

目 录

前言

第一章 苜蓿生长发育与气象条件的关系	1
第一节 材料与方法.....	1
第二节 紫花苜蓿物候期与气象条件的研究.....	3
第三节 紫花苜蓿生长特性与气象条件关系的研究	13
第四节 紫花苜蓿光合作用日变化规律及其与气象因子的关系	29
第五节 紫花苜蓿草产量与气象因子的关系	40
第六节 紫花苜蓿地土壤水分与产草量的研究	50
参考文献	61
第二章 苜蓿抗逆性研究	65
第一节 不同苜蓿品种的抗旱性	65
第二节 不同苜蓿品种的耐热性和抗寒性	72
第三节 不同苜蓿品种耐盐性研究	79
第四节 不同苜蓿品种抗蚜性鉴定及抗性机理	84
参考文献.....	103
第三章 不同苜蓿品种光合特性研究	105
第一节 材料与方法.....	105
第二节 不同苜蓿品种分枝期光合特性研究.....	108
第三节 不同苜蓿品种现蕾期光合特性研究.....	117
第四节 不同苜蓿品种开花期光合特性研究.....	126
第五节 不同苜蓿品种不同茬次开花期光合日变化特征比较.....	134
参考文献.....	140
第四章 不同苜蓿品种根系形态及吸水规律研究	142
第一节 材料与方法.....	142
第二节 不同秋眠级数苜蓿品种根颈特性.....	143
第三节 不同秋眠级数苜蓿品种根系形态特性.....	148
第四节 不同秋眠级数苜蓿品种根系吸水规律.....	158
第五节 结论与讨论.....	162
参考文献.....	164
第五章 断根对紫花苜蓿生理生态效应的影响	166
第一节 断根对紫花苜蓿生长发育的影响.....	166
第二节 断根对紫花苜蓿光合作用的影响.....	184
第三节 断根对紫花苜蓿叶绿素荧光特性的影响.....	188

第四节	断根对紫花苜蓿叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性的影响·····	202
第五节	断根对紫花苜蓿叶片保护酶活性和丙二醛含量的影响·····	209
第六节	断根对紫花苜蓿叶片中渗透调节物质的影响·····	222
第七节	断根对紫花苜蓿冠层温度的影响·····	231
	参考文献·····	235
第六章	不同生长年限苜蓿生产性能及对土壤的环境效应·····	237
第一节	材料与方法·····	237
第二节	黄土高原地区不同生长年限苜蓿生物学性状分析·····	243
第三节	不同生长年限苜蓿光合作用日变化及其与环境因子的关系·····	257
第四节	黄土高原苜蓿不同叶位光合作用日变化规律研究·····	271
第五节	黄土高原不同生长年限苜蓿草地土壤水分消耗特征研究·····	275
第六节	黄土高原不同生长年限苜蓿对土壤水分环境的影响·····	284
第七节	黄土高原地区苜蓿生产力动态及水分利用效率研究·····	289
第八节	黄土高原不同生长年限苜蓿草地土壤理化性质研究·····	293
	参考文献·····	302
第七章	苜蓿草田轮作土壤环境效应研究·····	306
第一节	草田轮作试验设计和研究内容·····	306
第二节	宁南旱区苜蓿土壤干层水分时空动态规律·····	311
第三节	草粮轮作对苜蓿土壤干层水分恢复的可行性分析·····	318
第四节	宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究·····	323
第五节	不同草粮轮作方式土壤水分时空动态及水分恢复效应·····	331
第六节	不同草粮轮作方式土壤养分动态及氮素利用效率比较·····	348
第七节	宁南旱区最佳草粮轮作模式的确定·····	354
	参考文献·····	360

第一章 苜蓿生长发育与气象条件的关系

迄今为止,农作物产量与气候生态条件的关系已在许多作物上有过研究,如玉米、大麦、小麦、水稻、棉花、大豆、牧草等作物。有关苜蓿生长发育与气候生态条件关系的研究较少,大多停留在对苜蓿各生育期内气象要素的平均值、积累值、极值等的统计分析上。虽然能结合当地生产实践,定量地评述气候资源的有利与不利的情况,提出开发利用的一些意见,但这仅仅是一项基础性的研究工作,有些问题还难以回答,因此无法深刻揭示当地苜蓿生长与气候条件的关系,也难以提出符合当地发展的建设性意见。例如,①产量对气候条件的依存究竟有多大?在当前生产水平和技术条件下,哪些因素是影响产量的主导因素?②在苜蓿发育期的时间序列中,究竟哪一种气候因素起主导作用?哪一时期是关键时期?对产量有何显著的贡献?③苜蓿的生长发育与主要影响因素及关键时期的数值关系如何?④根据本地区的气候特征,苜蓿的气候生产力有多大?诸如此类的问题都有待于深入研究。

基于我国紫花苜蓿生产发展和研究中出现的问题,为推进苜蓿产业化发展,必须深入地研究苜蓿产量变异与气候条件的关系,定量估算气候要素的波动对产量的效应和贡献,从而获得苜蓿生长与农业气候环境信息的可靠数据,为我国紫花苜蓿品种高产栽培、育种和引种、合理布局及建立优质产业化生产基地提供科学依据;另外,亦可为国内苜蓿生长模型的研究和发展及苜蓿生产管理数字化奠定基础。因此,探明气候生态因素与苜蓿生长发育和产量的关系,进一步揭示苜蓿生长发育规律,具有十分重要的意义。

第一节 材料与方法

一、自然概况

试验地前茬为小麦,设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上,北纬 $34^{\circ}21'$,东经 $108^{\circ}10'$,海拔454.8m,该区属于暖温带半湿润季风气候区,年均日照时数2150h,年平均气温为 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$,极端最高气温为 $39\sim 40^{\circ}\text{C}$,极端最低气温为 $-21\sim -15^{\circ}\text{C}$,全年无霜期为221天,年均蒸发量为993mm,年平均降水量为621.6mm。年内降水分配不均,春季降水偏少、干旱,60%以上的降水集中在7月、8月、9月3个月,年际变化大,丰枯比为3.0,变异系数为0.25。土壤为黑垆土,土层深厚、通气良好,有机质为1.59%,全氮为0.055%,田间持水量为21.12%,地下水埋深约80m。

二、供试品种

参试苜蓿品种共7个,品种名称、秋眠级数和来源见表1-1。

表 1-1 苜蓿品种名称、休眠级数和来源

品种中文名	英文名称	休眠级数	品种来源
巨人 201	Ameristand 201	2	美国
路宝	Lobo	5	美国
牧歌 401	Amerigraze 401	4	美国
超级阿波罗	Apollo supreme	4	美国
超级 13R	13R supreme	8	美国
美国杂交熊	America-cross Xiong	4	中国宁夏
新疆大叶	Xinjiang big leaf	3	中国新疆

三、试验设计

参试品种为随机区组设计, 试验小区面积 $2.0\text{m} \times 9.0\text{m}$, 每小区 5 行, 行距 30cm, 每品种 5 个重复。供试品种均在 2001 年 5 月 4~6 日三天播种。播种量为 $15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拌沙后人工条播, 播深 2cm, 播前灌溉、整地耙平。分别于 2001 年 5 月 19 日出苗。整个生育期间不灌水、不施肥、不喷药, 田间人工适时除草。自建植第 2 年起每年在初花期刈割 3 次, 分别在 5 月中旬、7 月初和 9 月中旬。

四、测定项目和方法

(一) 生育期的观测

返青期、分枝期、现蕾期、初花期和盛花期的记载标准参考《苜蓿生产管理指南》(杨青川, 2001)。鉴别的标准是: 70% 的植株达到某一生育阶段为到达某一生育期; 10%~20% 植株到达为初期, 80% 植株到达为盛期。

(二) 株高动态测定

苜蓿普遍返青后, 株高约 15cm 时, 各品种随机选择有代表性的 10 株健康幼苗, 每隔 7 天定株测定, 株高用卷尺测量, 精确到 0.1cm。

(三) 生物量动态测定

从返青期开始, 株高约 15cm 时, 每隔 7 天取样测定各个品种地上部分的生物量。具体方法是: 每次每个品种取样 0.15m^2 (行长 50cm 的苜蓿), 齐地刈割, 重复 3 次, 分别称鲜重。用四分法取样, 之后将其茎 (包括繁殖器官)、叶等分别收集, 称鲜重后于 105°C 下杀青 15min, 80°C 烘干至恒重, 称量各部分干重。总生物量以茎干重和叶干重之和表示。根据茎、叶部分的生物量, 计算青干比 (F/D) 和茎叶比 (LSR)。其计算公式为

$$\text{青干比} = \text{样品鲜重(g)} / \text{样品干重(g)}$$

$$\text{茎叶比} = \text{烘干样中茎干重(g)} / \text{烘干样中叶干重(g)}$$

(四) 产草量的测定

在初花期(10%开花时)测定不同苜蓿品种的产草量。测产样方为 $1\text{m} \times 1\text{m}$ ，齐地刈割，重复3次，在田间分别称其鲜重。用四分法取样约100g鲜草，于烘箱内 105°C 下杀青15min， 80°C 烘干至恒重，称量烘干重。根据青干比计算干草产量，产量取平均值后折算成每公顷千克数 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

(五) 光合特性测定

2004年6月23日，正值第二茬苜蓿处于初花期时测定巨人201、牧歌401、路宝、新疆大叶的光合日变化特性。采用 Li-6400 便携式光合仪田间活体测定苜蓿叶片的光合生理生态指标，主要包括：叶片的光合速率 (P_n , $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r , $\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 (G_s , $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 等生理因子以及大气温度 (T_a , $^{\circ}\text{C}$)、田间 CO_2 浓度 (C_a , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、相对湿度 (RH, %)、光合有效辐射 (PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 等环境因子。气孔限制值 (L_s , %) 和叶片瞬时水分利用效率 (WUE, $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$) 由公式计算，即 $L_s = 1 - C_i/C_a$ (Berry and Downton, 1982); $\text{WUE} = P_n/T_r$ (Fischer and Turner, 1978)。叶面积的测定利用公式：叶面积 = 叶长 \times 叶宽 $\times 0.71$ (曹亦芬和曹致中, 1990)。测定时每品种随机选取生长良好的分枝，测定倒数第三片完全展开的健康完整叶片。测定从上午6:00到下午18:00，每隔2h测定1次，每次每品种测定均随机选取4个叶片重复测定。

(六) 土壤水分测定

2004年苜蓿返青前和每茬收获时每隔20cm测定、记录地下5m深土壤水分。测定2004年第一茬苜蓿不同生育期土壤水分状况。2005年返青和第一茬收获时每隔20cm测定5m深土壤水分。土壤水分的测定利用 CDR-503 型中子仪每隔20cm测定，地面以下0~20cm用土钻烘干法测定。

五、试验数据处理

采用 Excel 2000 进行数据的简单处理和图表绘制，DPS3.01 和 SPSS11.0 进行数据的方差分析、相关分析和多元统计分析，曲线模拟利用 Curve Expert 1.34 完成。

六、气象资料来源

气象资料由陕西杨凌西北农林科技大学灌溉站提供，该站与农作一站毗邻。气象指标包括逐日最高气温、逐日最低气温、逐日平均气温、逐日降雨量、逐日相对湿度和日照时数等。

第二节 紫花苜蓿物候期与气象条件的研究

物候期反映了一年中苜蓿生长发育的规律性变化。物候变化是苜蓿系统发育过程中

形成的遗传特性与外界环境条件共同作用的结果,尤其以气象条件影响较大,且气象条件中以温度的影响最大。物候期与一年中气候的季节性变化相吻合,正是这一特点使苜蓿物候期因年际间气象条件的波动而差异较大,也因地区间气象条件的差异而不同。

前人对苜蓿生产,特别是苜蓿抗寒性、耐热性、抗旱性、秋眠性和气候生态区划等进行了大量研究(刘建宁等,2003;苏加楷,2003;李崇巍等,2002)。但是国内有关苜蓿物候期与气象条件关系的研究很少,且多限于单一品种或定性分析。关于温度对作物发育影响的研究最早、最普通的是积温法,后来许多学者又提出了温度非线性模型(高亮之等,1989;彦习武,1988;沈国权,1980)。但是在这些模型中均未考虑品种因子,建立模型时,以一个品种分别模拟,利用模型参数的不同描述品种之间的差异,影响了模型的普适性。因此,为了较全面地揭示苜蓿物候期与气象条件的关系,为苜蓿育种、栽培及开展物候期预报提供依据,本节分别研究了7个不同秋眠级数苜蓿品种返青的气象条件以及各生育阶段和各茬次的热量指标,然后综合各品种特性总结出苜蓿物候期气象条件的规律,并做出定量分析。

一、紫花苜蓿返青的气象条件

(一) 年际间紫花苜蓿返青与气象条件的关系

苜蓿返青主要受水热条件的制约。多年生苜蓿经过秋冬几个月的黄枯期后,必须具备一定的热量和水分条件后才能返青。对于旱作农业,大气降水是苜蓿生长发育需水的唯一来源。苜蓿返青所需水分主要依靠上年度收获后的降水和返青前当年的降水。而有关苜蓿返青的温度指标有0℃、3℃、3.5℃和5℃的不同说法(颜亮东,1998;崔鲜一等,1996;杨文义,1995;张国胜和李希来,1992)。苜蓿返青时须通过最低温度临界值,当气温超过这一温度临界值后可诱发苜蓿返青。

不同年度苜蓿返青期及其温度指标见表1-2。

表 1-2 不同年度苜蓿返青与水热条件的关系

年份	返青期 (月-日)	≥0℃	≥5℃	≥0℃初日—返青			≥5℃初日—返青				上年度 降水量 /mm	返青前 当年降 水量 /mm
		初日 (月- 日)	初日 (月- 日)	天数	积温 /℃	日平均 温度/℃	天数	积温 /℃	有效积温 /℃	日平均 温度/℃		
2002	2-28	1-23	2-9	37.00	157.73	4.25	20.00	96.74	31.30	6.14		11.50
2003	3-2	1-29	2-17	33.00	139.20	4.16	14.00	103.40	33.40	7.38	437.00	13.38
2004	2-26	1-27	2-10	31.00	131.30	4.14	17.00	110.00	35.00	6.90	914.00	8.70
2005	3-12	2-20	3-4	21.00	109.20	4.90	9.00	48.40	23.40	6.86	551.50	25.20
平均	3-3	2-1	2-17	30.50	134.36	4.36	15.00	89.64	30.78	6.82	634.16	14.70

由表1-2分析4年以来苜蓿返青的气象条件可知,各年苜蓿返青期在2月底至3月初,且均在0℃和5℃初日之后。用0℃初日作为苜蓿返青期的指标,苜蓿返青推迟21~37天,相差16天,平均推迟30.5天,日平均温度大于4℃;用5℃初日作为苜蓿的返青期,苜蓿返青推迟9~20天,相差11天,平均推迟15天,日平均温度大于

6℃。可以看出苜蓿返青与日平均温度稳定通过 5℃ 的日期更接近。因此,在气候分析中,基本可以使用日平均温度稳定通过 5℃ 的初日作为苜蓿返青的温度指标。

从 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的初日分析,各年初日出现时间早晚不同,造成年际间返青的差异。基本上是初日出现的时间早,返青就早,反之,初日出现的时间晚,返青晚。从 0°C 初日到返青间隔平均约 30.5 天, 5°C 初日到返青间隔平均约 15 天。

从返青前的积温分析,返青前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温最多的 2002 年达 157.73℃,最少的 2005 年也达 109.20℃,而返青前 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温最多的 2004 年达 110℃,最少的 2005 年达 48.4℃,有效积温为 23.40~35.00℃。因此,当返青前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温达到 134.36℃, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温达 89.64℃或有效积温达 30.78℃时,苜蓿即可返青。

从上年度的降水量分析,2003 年降水量最多,达 914mm,表现为 2004 年返青最早;相反,2002 年和 2004 年降水较少,表现为返青日期较晚。降水多的年份,土壤水分得到一定程度的补充,由于苜蓿是深根系作物,可以有效地吸收地下深层的土壤水分,因此苜蓿返青与上年度降水量呈正相关。

从返青前当年的降水量分析,返青前降水量多的年份,返青日期较晚,但是返青速度快,即从 5°C 初日到返青所需时间短;返青前降水量少的年份,返青日期早,但是返青速度慢,即从 5°C 初日到返青所需时间相对较长。例如,2005 年返青前降水量高于其他年度 11.82~16.5mm,苜蓿返青期却晚于其他年度 10~15 天,且所需 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数也较其他年度分别少 10~16 天或 5~11 天。而 2004 年和 2002 年降水低于 2003 年,返青出现的时间相对较早,且所需 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数较多。因此,苜蓿返青期出现的早晚与返青前当年的降水量多少表现出负的相关性。究其原因主要是返青前当年的降水在一定程度上降低了气温,返青相对推迟,但是另外一方面也促进了水热配合,致使从 0°C 初日或 5°C 初日到苜蓿返青速度加快。

(二) 不同紫花苜蓿品种返青的热量指标

苜蓿所需的热量主要取决于大气及土壤的温度。不同苜蓿品种返青对热量条件的需求各有差异,且同一种苜蓿在不同的年份由于可塑性物质积累的差异及土壤水分的不同对热量条件的需求也不同。2002 年和 2004 年不同苜蓿品种的返青期及其返青前 10 天的平均温度如表 1-3 所示。

表 1-3 不同苜蓿品种返青及其温度指标

品种	返青期 (月-日)			返青前 10 天平均气温/℃		
	2002 年	2004 年	平均	2002 年	2004 年	平均
新疆大叶	3-5	3-1	3-3	5.42	7.68	6.55
巨人 201	3-5	3-1	3-3	5.42	7.69	6.56
路宝	2-25	2-26	2-25	6.98	6.95	6.97
牧歌 401	3-3	2-28	3-1	6.51	6.95	6.73
超级阿波罗	3-3	2-28	3-1	6.51	6.95	6.73

续表

品种	返青期 (月-日)			返青前 10 天平均气温/℃		
	2002 年	2004 年	平均	2002 年	2004 年	平均
美国杂交熊	2-28	2-25	2-26	6.73	6.68	6.71
超级 13R	2-21	2-18	2-19	6.02	5.58	5.80
平均	2-28	2-26	2-27	6.23	6.93	6.58

由表 1-3 可以看出,不同年份同一苜蓿品种的返青期相差不大,为 1~4 天,而同一年份不同苜蓿品种间返青期差异较大,返青最早和最晚的时间相差约 12 天,这主要取决于春季的升温过程和各品种返青时所需的热量。2002 年和 2004 年不同苜蓿品种返青早晚的顺序均表现为超级 13R 返青最早,其次是路宝、美国杂交熊、牧歌 401 和超级阿波罗,新疆大叶和巨人 201 返青最晚。各品种返青前 10 天平均气温均大于 5℃,表明不同苜蓿品种返青时所需的起始温度是相同的。由此也进一步说明以 5℃初日作为苜蓿的返青指标比 0℃更准确。

由表 1-3 还可以看出,2002 年和 2004 年不同品种返青前 10 天平均气温的变化存在一定的差异。2004 年返青前 10 天平均气温最低的是超级 13R,其次为美国杂交熊、路宝、牧歌 401 和超级阿波罗,新疆大叶和巨人 201 所需温度较高。而 2002 年返青前 10 天平均气温最低的是新疆大叶和巨人 201,其次为超级 13R、牧歌 401 和超级阿波罗、美国杂交熊、路宝。这种差异主要是返青前降雨导致气温降低程度及持续日数不同所致。综合两年的观测分析可知,非秋眠性品种超级 13R 返青所需温度较低 (5.80℃),而秋眠性品种巨人 201、新疆大叶和半秋眠性品种路宝、美国杂交熊、牧歌 401 及超级阿波罗返青相对所需温度较高 (均大于 6.5℃)。

为了进一步探索不同秋眠性苜蓿品种之间返青的规律,下面从积温角度进行分析。从表 1-4 中可以看出,不同年份间各品种返青前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温有所不同,但都存在一致的规律,即超级 13R 所需积温较低,其次为路宝、美国杂交熊、牧歌 401 和超级阿波罗,巨人 201 和新疆大叶所需积温较高。

表 1-4 不同苜蓿品种返青前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温

品种	返青前 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温/℃			返青前 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温/℃		
	2002 年	2004 年	平均	2002 年	2004 年	平均
新疆大叶	182.32	164.90	173.61	116.30	143.60	129.95
巨人 201	182.32	172.20	177.26	116.30	150.90	133.60
路宝	143.33	131.30	137.32	86.64	110.00	98.32
牧歌 401	172.82	148.60	160.71	109.75	127.30	118.53
超级阿波罗	172.82	148.60	160.71	109.75	127.30	118.53
美国杂交熊	157.73	122.60	140.17	96.74	101.50	99.12
超级 13R	113.94	75.70	94.82	57.35	59.20	58.28
平均	160.75	137.70	149.23	98.98	117.11	108.05

结合上述的分析可知,非秋眠性品种超级 13R 比半秋眠性品种路宝、美国杂交熊、牧歌 401 和超级阿波罗以及秋眠性品种巨人 201、新疆大叶对热量的要求低,返青早;而秋眠性苜蓿品种对热量的要求高,返青晚。

二、紫花苜蓿各生育阶段的气象条件

(一) 紫花苜蓿各生育阶段的热量指标

从各苜蓿品种的生育期观测结果来看(表 1-5),不同苜蓿品种返青期差异明显,返青以后的各生育阶段进程差异很快缩小。不同生育阶段,非秋眠性品种超级 13R 返青最早,秋眠性品种巨人 201 和新疆大叶返青最晚,前后相差 13 天;而在返青后各苜蓿品种到达某一生育阶段的进程早晚相差仅为 3~5 天,秋眠性品种新疆大叶和巨人 201 到达各个生育阶段的进程最晚,而非秋眠性品种(超级 13R)和半秋眠性品种(路宝、美国杂交熊,牧歌 401 和超级阿波罗)各个生育阶段进程很接近。综合以上分析可知,不同苜蓿品种的生育期和其秋眠性密切相关。非秋眠性苜蓿品种返青早,开花早,秋眠性苜蓿品种返青晚,开花晚。但这并不意味着非秋眠性品种完成整个生育期所经历天数少、积温低,而秋眠性品种完成整个生育期所经历天数多、积温高。

表 1-5 2004 年不同苜蓿品种的生育阶段

品种	生育阶段(月-日)				
	返青期	分枝期	现蕾期	开花期	结荚期
新疆大叶	3-1	3-30	4-26	5-10	5-24
巨人 201	3-1	3-31	4-26	5-10	5-23
路宝	2-26	3-28	4-23	5-7	5-20
牧歌 401	2-28	3-29	4-24	5-8	5-20
超级阿波罗	2-28	3-29	4-24	5-9	5-22
美国杂交熊	2-25	3-29	4-23	5-8	5-20
超级 13R	2-18	3-27	4-25	5-7	5-20

表 1-6 为 4 年生不同苜蓿品种各生育期的积温指标。

表 1-6 4 年生不同苜蓿品种各生育阶段 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温

品种	返青—分枝		分枝—现蕾		现蕾—开花		开花—结荚		返青—开花		返青—结荚	
	$\geq 5^{\circ}\text{C}$		$\geq 5^{\circ}\text{C}$		$\geq 5^{\circ}\text{C}$		$\geq 5^{\circ}\text{C}$		$\geq 5^{\circ}\text{C}$		$\geq 5^{\circ}\text{C}$	
	天数	积温	天数	积温	天数	积温	天数	积温	天数	积温	天数	积温
		$/^{\circ}\text{C}$		$/^{\circ}\text{C}$		$/^{\circ}\text{C}$		$/^{\circ}\text{C}$		$/^{\circ}\text{C}$		$/^{\circ}\text{C}$
新疆大叶	29.00	270.90	27.00	438.90	14.00	255.30	14.00	297.20	70.00	965.10	84.00	1262.30
巨人 201	30.00	281.60	26.00	428.20	14.00	255.30	13.00	276.80	70.00	965.10	83.00	1262.30
路宝	31.00	277.90	26.00	417.10	14.00	238.10	13.00	273.80	71.00	933.10	84.00	1206.90
牧歌 401	30.00	275.80	26.00	416.30	14.00	243.90	12.00	253.60	70.00	936.00	82.00	1189.60
超级阿波罗	30.00	275.80	26.00	416.30	15.00	265.70	13.00	277.80	71.00	957.80	84.00	1235.60
美国杂交熊	33.00	301.60	25.00	401.90	15.00	258.30	12.00	253.60	73.00	961.80	85.00	1215.40
超级 13R	38.00	320.70	29.00	458.10	12.00	209.90	13.00	273.80	79.00	988.70	92.00	1262.50

从表 1-6 中可以看出,非秋眠性品种超级 13R 从返青到结荚所需时间为 92 天,积温为 1262.50℃;从返青到开花所需时间为 79 天,积温为 988.70℃。而其他品种从返青到结荚所需时间为 82~85 天,积温为 1189.60~1262.30℃;从返青到开花所需时间为 70~73 天,积温为 933.10~965.10℃。这主要是返青到分枝阶段各品种所经历天数和积温差异较大所致。非秋眠性品种超级 13R 从返青到分枝所经历天数和积温大于其他品种,在以后的生育阶段各品种之间差异不是很大。

(二) 紫花苜蓿生育阶段长短与气象条件的关系

从返青期至结荚期,紫花苜蓿各生育阶段的长短与当地气候条件非常密切。利用多元回归统计方法求算出不同苜蓿品种各生育阶段天数与其相应时间内平均温度、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水和日照时数等气象因子的关系式,如下所述。

1. 返青到分枝阶段

返青至分枝天数 (Y) 与日平均温度 (T) 呈极显著负相关,说明温度升高对苜蓿分枝有明显的促进作用,温度高,该生育阶段缩短,分枝提前,反之,该生育期延长,分枝推迟。其关系式为

$$Y = -8.72T + 115.44 \quad n=7 \quad R=0.9355^{**} \quad R^2=0.8752$$

返青至分枝天数 (Y) 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 ($\sum T$) 呈极显著正相关,其关系式为

$$\sum T = 5.68Y + 107.02 \quad n=7 \quad R=0.9727^{**} \quad R^2=0.9461$$

根据有效积温理论, Y 的系数为返青至分枝阶段的下限温度,可近似取为 $T = (5.68 \pm 0.61)^{\circ}\text{C}$ 。即返青后 Y 天日平均气温高于 $(5.68 \pm 0.61)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温达 $(107.02 \pm 19.22)^{\circ}\text{C}$ 时,才普遍分枝。

苜蓿返青至分枝天数 (Y) 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 ($\sum T$)、累积降水量 ($\sum R$) 和累积日照时数 ($\sum S$) 呈极显著正相关,其回归和逐步回归关系式为

$$Y = 0.050 + 0.018\sum T + 0.222\sum R + 0.115\sum S$$

$$n=7 \quad R=0.9985^{**} \quad F=334.93^{**}$$

$$Y = 2.77 + 0.218\sum R + 0.133\sum S$$

$$n=7 \quad R=0.9982^{**} \quad F=575.36^{**}$$

2. 分枝到现蕾阶段

分枝至现蕾天数 (Y) 与日平均温度 (T) 呈不显著负相关,与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 ($\sum T$) 呈极显著正相关,其关系式为

$$\sum T = 13.95Y + 56.64 \quad n=7 \quad R=0.9613^{**} \quad R^2=0.9241$$

现蕾的气温下限为 $(13.95 \pm 1.78)^{\circ}\text{C}$ 。即当气温 $\geq (13.95 \pm 1.78)^{\circ}\text{C}$ 时,苜蓿才进行现蕾发育,当 Y 天后高于 $(13.95 \pm 1.78)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温累计达 $(56.64 \pm 47.29)^{\circ}\text{C}$ 时,普遍现蕾。

苜蓿分枝至现蕾天数 (Y) 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 ($\sum T$) 呈极显著正相关,与累积降水量

(ΣR) 和累积日照时数 (ΣS) 呈不显著正相关, 其回归和逐步回归关系式为

$$Y = 3.904 + 0.096 \Sigma T - 0.136 \Sigma R - 0.109 \Sigma S$$

$$n=7 \quad R=0.9811^{**} \quad F=25.75^{*}$$

$$Y = -1.741 + 0.066 \Sigma T$$

$$n=7 \quad R=0.9613^{**} \quad F=60.926^{**}$$

3. 现蕾到开花阶段

苜蓿现蕾到开花天数 (Y) 与日平均温度 (T) 呈不显著负相关, 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 (ΣT) 呈极显著正相关, 其关系式为

$$\Sigma T = 17.37 Y + 3.51 \quad n=7 \quad R=0.9329^{**} \quad R^2=0.8702$$

开花气温下限为 $(17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$ 。即当现蕾后 Y 天高于 $(17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温累计达 $(30.51 \pm 42.08)^{\circ}\text{C}$ 时, 普遍开花。

苜蓿现蕾到开花天数 (Y) 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 (ΣT) 呈极显著正相关, 与累积降水量 (ΣR) 和累积日照时数 (ΣS) 呈不显著正相关, 其回归和逐步回归关系式为

$$Y = -0.520 + 0.036 \Sigma T + 0.174 \Sigma R + 0.0275 \Sigma S$$

$$n=7 \quad R=0.9999^{**} \quad F=5609.91^{**}$$

$$Y = 0.178 + 0.049 \Sigma T + 0.102 \Sigma R$$

$$n=7 \quad R=0.9765^{**} \quad F=41.09^{**}$$

4. 开花到结荚阶段

开花到结荚天数 (Y) 与日平均温度 (T) 呈不显著负相关, 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 (ΣT) 呈极显著正相关, 其关系式为

$$\Sigma T = 21.83 Y - 8.3 \quad n=7 \quad R=0.9953^{**} \quad R^2=0.9907$$

结荚气温下限为 $(21.83 \pm 0.95)^{\circ}\text{C}$ 。

苜蓿开花到结荚天数 (Y) 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 (ΣT) 呈极显著正相关, 与累积降水量 (ΣR) 和累积日照时数 (ΣS) 呈不显著正相关, 其回归和逐步回归关系式为

$$Y = -1.312 + 0.0242 \Sigma T + 0.189 \Sigma R + 0.0758 \Sigma S$$

$$n=7 \quad R=0.9825^{**} \quad F=27.89^{**}$$

$$Y = 0.496 + 0.0453 \Sigma T$$

$$n=7 \quad R=0.9953^{**} \quad F=532.45^{**}$$

为了验证各生育阶段的界限温度指标, 根据上述各生育阶段天数与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的回归数学模型, 将不同苜蓿品种各生育阶段积温分别进行拟合, 其拟合结果完全符合观察值 (表 1-7)。

表 1-7 不同苜蓿品种各生育阶段天数与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温模型检验

生育阶段	误差	新疆大叶	巨人 201	路宝	牧歌 401	超级阿波罗	美国杂交熊	超级 13R
返青 分枝	观察值	270.90	281.60	277.90	275.80	275.80	301.60	320.70
	拟合值	271.72	277.40	283.08	277.40	277.40	294.44	322.84
	绝对误差	-0.8243	4.1963	-5.1832	-1.6037	-1.6037	7.1579	-2.1394
	相对误差	-0.0030	0.0149	-0.0187	-0.0058	-0.0058	0.0237	-0.0067
分枝 现蕾	观察值	438.90	428.20	417.10	416.30	416.30	401.90	458.10
	拟合值	433.23	419.28	419.28	419.28	419.28	405.33	461.13
	绝对误差	5.6706	8.9221	-2.1779	-2.9779	-2.9779	-3.4265	-3.0324
	相对误差	0.0129	0.0208	-0.0052	-0.0072	-0.0072	-0.0085	-0.0066
现蕾 开花	观察值	255.30	255.30	238.10	243.90	265.70	258.30	209.90
	拟合值	246.64	246.64	246.64	246.64	264.01	264.01	211.91
	绝对误差	8.6571	8.6571	-8.5429	-2.7429	1.6905	-5.7095	-2.0095
	相对误差	0.0339	0.0339	-0.0359	-0.0112	0.0064	-0.0221	-0.0096
开花 结荚	观察值	297.20	276.80	273.80	253.60	277.80	253.60	273.80
	拟合值	297.32	275.49	275.49	253.66	275.49	253.66	275.49
	绝对误差	-0.1200	1.3100	-1.6900	-0.0600	2.3100	-0.0600	-1.6900
	相对误差	-0.0004	0.0047	-0.0062	-0.0002	0.0083	-0.0002	-0.0062

三、紫花苜蓿刈草次数的热量指标

评价某一地区人工牧草产量的气候生产潜力,必须考虑牧草的刈草次数和产草量;而刈草次数和产草量与热量和水分条件密切相关。分析刈草次数的热量指标时,首先必须确定最佳刈草期。苜蓿干物质增重以盛花期最大;而干物质中蛋白质含量以初花期最高,开花过后干物质和蛋白质均明显下降。因此,确定开花初期为苜蓿的最佳刈草期,在开花盛期最好刈割完(刘玉华,2003)。

以 2004 年为例,各茬次均在开花期刈草测产。分析刈草次数热量指标时,统计返青(再生草为上一次刈草)至开花期的 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温和间隔天数。4 年生不同苜蓿品种刈草次数的热量指标见表 1-8。

表 1-8 4 年生不同苜蓿品种各茬次 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温

品种	—茬刈草								
	返青期 (月-日)	开花期 (月-日)	第一次 刈草期 (月-日)	返青—开花		开花—第一次刈草		返青—第一次刈草	
				天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃
新疆大叶	3-1	5-10	5-12	70.00	965.10	2.00	42.90	72.00	1008.00
巨人 201	3-1	5-10	5-12	70.00	965.10	2.00	42.90	72.00	1008.00
路宝	2-26	5-7	5-12	71.00	933.10	5.00	108.5	76.00	1041.60
牧歌 401	2-28	5-8	5-12	70.00	936.00	4.00	88.3	74.00	1024.30
超级阿波罗	2-28	5-9	5-12	71.00	957.80	3.00	66.50	74.00	1024.30
美国杂交熊	2-25	5-8	5-12	73.00	961.80	4.00	88.3	77.00	1050.10

续表

一茬刈草									
品种	返青期 (月-日)	开花期 (月-日)	第一次 刈草期 (月-日)	返青—开花		开花—第一次刈草		返青—第一次刈草	
				天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃
超级 13R	2-18	5-7	5-12	79.00	988.70	5.00	108.5	84.00	1097.20
平均	2-26	5-8	5-12	72.00	958.23	3.57	77.99	75.57	1036.21

二茬刈草									
品种	开花期 (月-日)	第二次 刈草期 (月-日)	第一次刈草—开花		开花—第二次刈草		第一次刈草—第二次刈草		
			天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	
新疆大叶	6-20	7-1	39.00	847.60	11.00	316.20	50.00	1163.80	
巨人 201	6-19	7-1	38.00	819.00	12.00	344.80	50.00	1163.80	
路宝	6-17	7-1	36.00	767.20	14.00	396.60	50.00	1163.80	
牧歌 401	6-19	7-1	38.00	819.00	12.00	344.80	50.00	1163.80	
超级阿波罗	6-19	7-1	38.00	819.00	12.00	344.80	50.00	1163.80	
美国杂交熊	6-18	7-1	37.00	792.80	13.00	371.00	50.00	1163.80	
超级 13R	6-16	7-1	35.00	743.40	15.00	420.40	50.00	1163.80	
平均	6-18	7-1	37.29	801.14	12.71	362.66	50.00	1163.80	

三茬刈草									
品种	开花期 (月-日)	第三次 刈草期 (月-日)	第二次刈草—开花		开花—第三次刈草		第二次刈草—第三次刈草		
			天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	
新疆大叶	8-15	8-31	45.00	1162.70	16.00	352.80	61.00	1515.50	
巨人 201	8-14	8-31	44.00	1142.20	17.00	373.30	61.00	1515.50	
路宝	8-10	8-31	40.00	1044.80	21.00	470.70	61.00	1515.50	
牧歌 401	8-14	8-31	44.00	1142.20	17.00	373.30	61.00	1515.50	
超级阿波罗	8-13	8-31	43.00	1120.30	18.00	395.20	61.00	1515.50	
美国杂交熊	8-13	8-31	43.00	1120.30	18.00	395.20	61.00	1515.50	
超级 13R	8-9	8-31	39.00	1019.20	22.00	496.30	61.00	1515.50	
平均	8-12	8-31	42.57	1107.39	18.43	408.11	61.00	1515.50	

四茬刈草									
品种	分枝期 (月-日)	第四次 刈草期 (月-日)	第三次刈草—分枝		分枝—第四次刈草		第四次刈草—第三次刈草		
			天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	天数	≥5℃积温/℃	
新疆大叶	10-19	10-20	49.00	842.40	1.00	13.00	50.00	855.40	
巨人 201	10-19	10-20	49.00	842.40	1.00	13.00	50.00	855.40	
路宝	10-18	10-20	48.00	829.30	2.00	26.10	50.00	855.40	
牧歌 401	10-18	10-20	48.00	829.30	2.00	26.10	50.00	855.40	
超级阿波罗	10-18	10-20	48.00	829.30	2.00	26.10	50.00	855.40	
美国杂交熊	10-18	10-20	48.00	829.30	2.00	26.10	50.00	855.40	
超级 13R	10-17	10-20	47.00	816.00	3.00	39.40	50.00	855.40	
平均	10-18	10-20	48.14	831.14	1.86	24.26	50.00	855.40	

由表 1-8 可知，秋眠级数不同的紫花苜蓿品种在陕西杨凌区一年刈割了四茬，第四茬苜蓿在分枝末期。从返青到第四茬刈草，≥5℃总积温为 4570.91℃左右，间隔日数

约 236.57 天。从返青到开花, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 总积温为 3697.9°C 左右, 间隔日数约 200 天。其中, 第一茬苜蓿从返青到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 958.23°C , 间隔日数约 72 天; 第二茬苜蓿从刈割到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 801.14°C , 间隔日数约 38 天; 第三茬苜蓿从刈割到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 1107.39°C , 间隔日数约为 43 天; 第四茬苜蓿从刈割到分枝需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 831.14°C , 间隔日数约 49 天。

不同茬次不同秋眠级数的苜蓿品种从返青(再生草为刈草)到开花所需天数和积温略有不同。头茬草中非秋眠性品种超级 13R 所需天数长, 积温略高; 半秋眠性品种路宝、超级阿波罗、牧歌 401 和美国杂交熊所需积温较低; 秋眠性品种新疆大叶和巨人 201 介于两者之间。再生草中非秋眠性品种超级 13R 所需天数最少, 积温最低, 其次为半秋眠性品种, 最后为秋眠性品种。

四、结论与讨论

(1) 苜蓿返青期在 2 月底至 3 月初, 返青的温度指标为 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日。 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日出现的时间早, 返青就早, 反之, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 初日出现的时间晚, 返青晚。从 5°C 初日到返青约需 15 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温达 89.64°C 或有效积温达 30.78°C 时, 苜蓿即可返青。苜蓿返青日期出现的早晚与上年度降水量呈正相关, 与返青前当年的降水量表现出负的相关性, 但是返青速率与返青前当年的降水量表现出正的相关性。

(2) 不同苜蓿品种返青期差异明显, 非秋眠性品种超级 13R 对热量的要求低, 返青早; 秋眠性苜蓿品种巨人 201 和新疆大叶对热量的要求高, 返青晚, 前后相差 13 天。返青后不同品种到达各生育期的差异较小, 早晚相差仅为 3~5 天, 秋眠性品种新疆大叶和巨人 201 到达各个生育阶段的进程相对较晚, 而非秋眠性品种超级 13R 和半秋眠性品种路宝、美国杂交熊, 牧歌 401 和超级阿波罗各个生育阶段进程很接近。Zaleski (1954) 报道, 和秋眠性品种相比, 非秋眠性品种开花早, 春季返青早, 夏季刈割再生迅速。刘建宁等 (2003) 在山西太原的试验认为, 半秋眠性和非秋眠性品种的出苗期、分枝期、初花期均比秋眠性品种早 2~4 天。而半秋眠性和非秋眠性品种的返青期比秋眠品种晚 5~6 天, 但这种差异在返青后的生长过程中很快就会消失。

(3) 不同苜蓿品种从返青到开花平均需 72 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 958.23°C ; 从返青到结荚需 84.86 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 1233.51°C 。其中, 从返青到分枝平均需要 31.57 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 286.33°C ; 从分枝到现蕾需 26.43 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 425.26°C ; 从现蕾到开花需 14 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 246.64°C ; 从开花到结荚需 12.86 天, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温为 272.37°C 。其中, 非秋眠性品种超级 13R 整个生育期间持续日数较长, 积温较高, 其他品种相差不大。

(4) 各阶段生育期长短与平均温度呈正相关, 与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温呈极显著正相关。根据有效积温理论得出各生育阶段的最低温度指标。分枝的气温下限为 $(5.68 \pm 0.61)^{\circ}\text{C}$, 从返青至分枝需要 $\geq (5.68 \pm 0.61)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $(107.02 \pm 19.22)^{\circ}\text{C}$; 现蕾的气温下限为 $(13.95 \pm 1.78)^{\circ}\text{C}$, 从分枝到现蕾需要 $\geq (13.95 \pm 1.78)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $(56.64 \pm 47.29)^{\circ}\text{C}$; 开花的气温下限为 $(17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$, 从现蕾到开花需要 $\geq (17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$ 的有效积温 $(30.51 \pm 42.08)^{\circ}\text{C}$ 。结荚的气温下限为 $(21.83 \pm 0.95)^{\circ}\text{C}$ 。

(5) 各阶段生育期长短与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降雨量和日照时数的线性回归方程均达到极显著水平,说明光、热、水是影响生育期长短的主要因素。对返青期到分枝期持续天数影响最大的是日照时数和降雨量;对分枝到现蕾持续天数影响最大的是 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温;对现蕾到开花持续天数影响最大的是 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温和降雨量;对开花到结荚持续天数影响最大的是 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温。

(6) 不同秋眠级数的紫花苜蓿一年刈割了三茬,均在开花期刈割,第四茬苜蓿在分枝末期。从返青到第四茬刈草, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 总积温为 4570.91°C 左右,间隔日数约236.57天。从返青到开花, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 总积温为 3697.9°C 左右,间隔日数约200天。其中,第一茬苜蓿从返青到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 958.23°C ,间隔日数约72天;第二茬苜蓿从刈割到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 801.14°C ,间隔日数约38天;第三茬苜蓿从刈割到开花需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 1107.39°C ,间隔日数约为43天;第四茬苜蓿从刈割到分枝需 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温平均为 831.14°C ,间隔日数约49天。通过分析可知,现蕾到开花阶段的下限温度为 $(17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$,即日平均温度达到 $(17.37 \pm 3.00)^{\circ}\text{C}$ 时,苜蓿才普遍现蕾。而10月上中旬的日平均温度为 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$,且呈现日益下降的趋势。因此,第四茬苜蓿没有现蕾开花主要是由于温度逐渐降低,现蕾和开花需要的最低温度不够,并且与发育阶段也有关系。

(7) 徐得源(1993)认为根据当地积温可以确定人工栽培牧草的刈割次数。当 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温达 4000°C 以上的地区栽培人工苜蓿,每年可以刈割4次; 3500°C 左右的地区每年可以收割3次; 2500°C 左右的地区每年可以收割2次,积温再低,只能收割1次。试验区2004年 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温达 5150°C , $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温达 4961°C ,从积温角度而言,在陕西杨陵区苜蓿可以在开花期刈割四茬,但前提是各茬次苜蓿开花后应尽量在短期内收获完成(最好控制在5天之内),间断期 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温小于 100°C ,使第四茬苜蓿有足够的温度条件完成其生长发育过程。另外,降水对刈草次数的影响主要表现在刈草期上,2004年降水主要分布在7月、8月、9月,即第三茬苜蓿生长收获期间,此时降水多、空气湿度大,导致该茬苜蓿开花较少,落花严重,影响开花期的准确判别。由于不能准确把握刈割时间,造成该茬苜蓿开花至刈割时间延长,从而影响第四茬苜蓿不能完成其发育过程。

第三节 紫花苜蓿生长特性与气象条件关系的研究

苜蓿的生长是在农田生态系统内苜蓿种群与周围环境因素相互作用的综合表现。环境因素包括立地土壤条件、栽培管理措施,以及光、温、水等气象因子,这些因素的共同作用最终集中体现在苜蓿植株的生长发育上。在其他条件一定的情况下,苜蓿生长发育与气象因子关系密切。为探究苜蓿的生长发育规律,一些学者或定性或定量研究苜蓿干物质积累规律,如特定品种株高、茎粗、叶片数、叶的长宽、叶面积及单株干重的增长过程(蒲金涌和姚晓红,2005;徐春明等,2003;多立安和罗新义,1996),但苜蓿在田间旱作条件下对株高生长和干物质积累过程及其与积温的关系未见报道。为此,本节应用Logistic方程分别对2004年7个苜蓿品种三茬的株高生长和生物量累积过程进

行模拟,以曲线变化及其特征值的对比分析来描述气象条件对苜蓿株高和生物量生长的综合影响,并对其应用进行简要讨论。

本研究对株高和生物量的动态测定是从 2004 年苜蓿普遍返青(再生草为刈草期)后株高约达 15cm 时开始,以后每隔 7 天测定一次,直至刈割。株高采用定株观测法,生物量用 0.15cm² 样方法测定。

一、生长模型的建立

在自然条件下,农作物株高生长和干物质积累是有限的。开始时,随着株高生长和干物质积累,其生长速率逐渐变大,当对有限的资源和其他生活条件竞争时,生长速率下降,最终趋向有限值(Yu et al., 2000; 沈亨理, 1996)。一般来说,农作物株高生长和干物质积累是“S”形曲线(多立安和罗新义, 1996)。具有上述特征的曲线有: Logistic 模型、Gompertz 模型、Richards 模型等,它们都属于参数模型,其优点在于估计参数即可取得模型中所有的特性。Richards 模型中因含有一个形状参数 m , 改变其参数值,就能形成不同的曲线形状,是一个适应性较广的模型。但由于必须确定 m 的取值,故应用上不如 Logistic 模型和 Gompertz 模型简便。Gompertz 模型与 Logistic 模型相比,在应用特点上则更适合那些“S”形曲线不对称、生长先快后慢的曲线拟合(朱元正等, 2003; 朱珉仁, 2002; 杨义群等, 1996)。所以,本节选择生物学意义明确的 Logistic 模型建立苜蓿株高生长或干物质积累的数学模型,其表达式为

$$y = \frac{k}{1 + e^{a+bt}} \quad (1-1)$$

式中, k 为一定曲线的生长上限,表征在该条件下曲线的最大生长潜力; t 为各茬草生长期间,苜蓿返青(再生草为刈草期后)至下一次测定株高或生物量期间的生长天数; a 、 b 是待定系数 ($a > 0$, $b < 0$), a 为表征植物个体竞争对群体增长起抑制(或阻滞)作用的参数; b 为内禀增长率。

Logistic 模型蕴藏着丰富的苜蓿生长的生物生态学特征信息,这些特征信息是通过模型的特定运算所求得特征参数来获得的。因此,利用这些数量化的特征信息参数能很好地认识苜蓿生长的规律。

对式(1-1)求一阶导数,可求得生长速率(v)。其计算式为

$$v = \frac{kbe^{a+bt}}{(1 + e^{a+bt})^2}$$

对式(1-1)求二阶导数,并令二阶导数为 0,可求得最大生长速率(v_{\max})及对应的时间和 y 值,即 (t_0, y) 。其计算式为

$$t_0 = a/b; y = k/2$$

$$v_{\max} = kb/4$$

当 $0 < t \leq a/b$ 时,生长曲线凹向上,当 $a/b < t < +\infty$ 时,生长曲线凸向上。

对式(1-1)求三阶导数,并令三阶导数为 0,可求得最快增长时段的起止时间(t_1, t_2)、快速生长期的持续天数($\Delta t = t_2 - t_1$)、最快增长时段的平均生长速率(\bar{v}_{\max})。

$$t_1 = [\ln(2 + \sqrt{3}) - a]/b$$

$$t_2 = [\ln(2 - \sqrt{3}) - a]/b$$

$$\bar{v}_{\max} = k/[\sqrt{3}(t_2 - t_1)]$$

当 $0 < t \leq t_1$ 时, 是苜蓿生长缓慢的迟滞期, 当 $t \geq t_2$ 时, 生长同样缓慢, 称为衰老期; 当 $t_1 < t < t_2$ 时, 生长几乎呈直线上升, 即对数期。 $\Delta t = t_2 - t_1$ 表示旺盛生长持续时间的长短。

二、株高与气候条件的关系

(一) 不同茬次苜蓿株高生长的 Logistic 模型

牧草长势好坏、产量高低, 其株高是主要标志。返青后, 苜蓿生长随时间呈“缓慢生长—积极生长—缓慢生长”趋势, 其高度生长进程呈“S”形增长。因此对 7 个苜蓿品种各茬高度可用 Logistic 方程拟合。

把 7 个 4 年生苜蓿品种生长季内各茬株高生长动态予以 Logistic 模型拟合, 则模型的拟合度都通过显著性检验 (表 1-9)。这就保证了通过对 Logistic 模型的进一步求算而获得的各茬苜蓿株高生长特征参数的有效性和可靠性。

由表 1-9 可知, 不同茬次中第一茬苜蓿的株高生长潜力最高, 为 97.29cm, 第二、第三茬苜蓿株高生长潜力较低, 分别为 87.49cm 和 63.38cm。第一茬苜蓿株高生长潜力要比第二、第三茬分别高 9.8cm 和 33.91cm。从品种看, 3 个茬次中均以美国杂交熊、超级 13R 较大, 牧歌 401 最小。各茬次苜蓿生长期间的平均气温第一茬为 13.81℃, 第二茬为 22.29℃, 第三茬为 25.93℃。因此, 苜蓿在温暖偏凉的气候条件下有利于株高的生长。相关分析表明, 第一茬各苜蓿品种株高与平均气温、平均最高气温和最低气温呈现极显著正相关 (相关系数在 0.99 以上), 第二茬各品种株高与平均最低气温呈现显著正相关, 与日均气温、日均最高气温的相关性不显著。第三茬各品种与日均最高温度呈现极显著负相关 (相关系数为 -0.97), 与平均温度呈显著负相关, 与最低温度无显著相关性。

(二) 不同茬次苜蓿株高生长速率比较分析

1. 不同茬次苜蓿株高生长速率的动态变化特征

生长速度 (v) 在一定程度上反映了苜蓿生长能力的强弱, 决定着苜蓿的生物产量和利用方式, 它的大小表示苜蓿进入旺长期的早晚。对 Logistic 方程求其一阶导数, 即为株高生长速率, 苜蓿株高生长速率曲线如图 1-1 所示。

由图 1-1 可以看出, 从返青到开花, 同一茬次不同苜蓿品种株高生长速率变化趋势相同, 生长速度在分枝末期至现蕾初期出现高峰, 前期和后期生长速度较慢。但是不同茬次株高生长速度极大值出现所需的时间不同: 第一茬草返青到开花 (花前期) 约 70 天, 极大值出现在 4 月 18 日, 正值分枝末期, 距返青期 47.72 天, v_{\max} 为 $1.77 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第二茬

表 1-9 不同茬次苜蓿高度生长的 Logistic 模型拟合参数

品种	第一茬					第二茬					第三茬				
	k/cm	a	b	R	k/cm	a	b	R	k/cm	a	b	R	k/cm	a	R
新疆大叶	97.1928	3.8995	-0.0842	0.9989**	93.2011	2.0342	-0.09	0.9999**	66.1281	2.2926	-0.1578	0.9994**			
巨人 201	78.2142	3.4093	-0.0776	0.9993**	89.4763	2.1248	-0.087	0.9999**	65.2122	2.2433	-0.1366	0.9997**			
路宝	100.7668	3.1876	-0.0627	0.9962**	86.4228	1.8801	-0.0816	0.9999**	61.4408	2.0895	-0.1386	0.9998**			
牧歌 401	87.967	3.3267	-0.0689	0.9989**	74.3334	2.2871	-0.1011	0.9986*	54.3145	2.1638	-0.15	0.9998**			
超级阿波罗	98.9329	3.2682	-0.0673	0.9997**	85.5647	2.1858	-0.0784	0.9999**	64.4443	2.0598	-0.1451	0.9993**			
美国杂交熊	116.4103	4.152	-0.085	0.9990**	94.2234	2.3695	-0.0866	0.9999**	66.4571	2.213	-0.1353	0.9997**			
超级 13R	101.5158	2.9349	-0.0621	0.9994**	89.2024	1.8119	-0.0893	0.9995**	65.6333	1.6037	-0.137	0.9995**			
平均	97.2857	3.4540	-0.0725		87.4892	2.0991	-0.0877		63.3758	2.0951	-0.1429	97.2857			

**表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

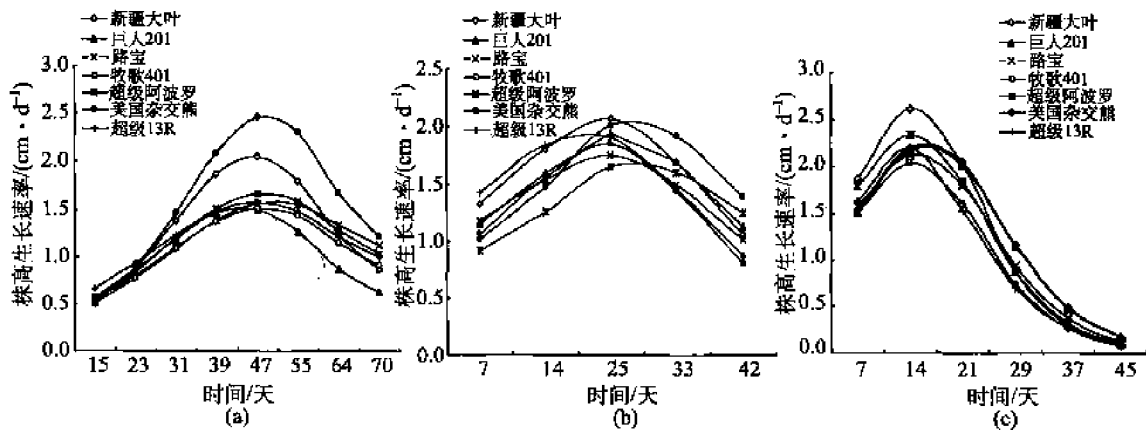


图 1-1 不同苜蓿品种株高生长速率曲线

(a) 第一茬; (b) 第二茬; (c) 第三茬

草花前期约 42 天, 极大值出现在再生后 24.03 天, 即 6 月 6 日, 正值分枝末期, v_{\max} 为 $1.91\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第三茬草花前期约 45 天, 极大值出现在再生后 14.67 天, 即 7 月 16 日, 正值分枝末到现蕾期, v_{\max} 为 $2.26\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。可见, 第二、第三茬草极大值出现距再生的时间比第一茬草早 23.69 天和 33.05 天, 生长速率是第一茬的 1.08 倍和 1.28 倍。这主要是由于第二、第三茬苜蓿生长正处在水热环境条件良好的夏季, 这样, 第二、第三茬苜蓿可利用良好的环境条件, 而在短期内迅速生长。下面结合一些速度特征参数再进一步分析。

2. 不同茬次苜蓿株高生长速率阶段特征比较

不同茬次苜蓿株高生长速度的特征参数见表 1-10。

由表 1-10 可知, 从第一茬到第三茬, 苜蓿株高生长都在分枝初期进入对数生长阶段, 但所需天数逐渐缩短。第一茬苜蓿在返青后 29.29 天左右, 即 3 月 31 日左右, 进入对数生长期。第二茬苜蓿在再生后 8.93 天左右, 即 5 月 22 日左右进入对数生长期。第三茬苜蓿在再生后 5.43 天左右, 即 7 月 6 日左右进入对数生长期。由此可见第一茬苜蓿株高生长的对数期要比第二、第三茬晚 20.36 天和 23.86 天。这是由于从第一茬到第三茬, 各茬次生长的温度逐渐升高, 前期株高生长速度较快引起的。第一、第二茬苜蓿株高生长对数期持续时间较长, 分别为 36.85 天和 30.19 天, 第三茬持续时间较短, 仅为 18.48 天。即第三茬苜蓿株高生长的对数期要比第一、第二茬短 18.37 天和 11.71 天, 而 v_{\max} 、 \bar{v}_{\max} 均表现为第三茬 > 第二茬 > 第一茬。这主要是由于第一茬苜蓿返青—开花阶段气温偏低, 在延长整个生育期的同时, 也延长了最大生长时段, 从而提高了温度的有效性, 而第二、第三茬苜蓿由于温度高, 植株生长快, 最大生长时段缩短, 影响苜蓿的生长。

表 1-10 不同茬次苜蓿株高生长速度特征参数

茬次	品种	最大生长速率		对数期			
		$t_0/\text{天}$	$v_{\max}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	$t_1/\text{天}$	$t_2/\text{天}$	$\Delta t/\text{天}$	$\bar{v}_{\max}/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
第一茬	新疆大叶	46.32	2.0457	30.68	61.96	31.29	1.79
	巨人 201	43.91	1.5181	26.95	60.87	33.92	1.33
	路宝	50.83	1.5798	29.83	71.83	42.00	1.39
	牧歌 401	48.31	1.5144	29.19	67.44	38.25	1.33
	超级阿波罗	48.54	1.6653	28.98	68.1	39.12	1.46
	美国杂交熊	48.87	2.4726	33.37	64.37	31.00	2.17
	超级 13R	47.23	1.5770	26.04	68.42	42.39	1.38
	平均	47.72	1.7675	29.29	66.14	36.85	1.55
第二茬	新疆大叶	22.592	2.0980	7.97	37.22	29.25	1.84
	巨人 201	24.412	1.9470	9.28	39.54	30.26	1.71
	路宝	23.046	1.7626	6.90	39.19	32.29	1.55
	牧歌 401	22.615	1.8793	9.59	35.64	26.04	1.65
	超级阿波罗	27.873	1.6775	11.08	44.67	33.59	1.47
	美国杂交熊	27.367	2.0395	12.16	42.58	30.42	1.79
	超级 13R	20.296	1.9908	5.54	35.05	29.51	1.75
	平均	24.03	1.9135	8.93	39.13	30.19	1.68
第三茬	新疆大叶	14.525	2.6094	6.18	22.87	16.69	2.29
	巨人 201	16.425	2.2267	6.78	26.07	19.28	1.95
	路宝	15.075	2.1291	5.57	24.58	19.00	1.87
	牧歌 401	14.425	2.0369	5.65	23.2	17.56	1.79
	超级阿波罗	14.195	2.3379	5.12	23.27	18.15	2.05
	美国杂交熊	16.358	2.2477	6.62	26.09	19.47	1.97
	超级 13R	11.709	2.2473	2.09	21.33	19.23	1.97
	平均	14.67	2.2621	5.43	23.92	18.48	1.98

从品种看,苜蓿株高生长达到最大生长速率所需时间(t_0)以美国杂交熊最长,超级 13R 最短。苜蓿株高生长进入对数期的时间(t_1)以美国杂交熊最长,超级 13R 较短。对数期持续时间(Δt)以路宝、超级阿波罗较长,新疆大叶较短。由此可见,非秋眠性品种超级 13R 株高生长潜力大,且株高生长进入对数期的时间较短,达到最大增长速率所需时间也较短。半秋眠性品种美国杂交熊株高生长潜力大,但株高生长进入对数期的时间较长,达到最大增长速率所需时间也较长。因此,在生产上可根据各品种对数期出现的早晚和持续时间,加强管理,强化生长旺盛的对数期,缩短进入对数期的时间,充分发挥不同苜蓿品种的生产潜能。

(三) 不同茬次苜蓿株高生长与气象因子的关系

1. 不同茬次苜蓿株高生长与气象条件的线性回归分析

气候生态因素中光、温、水等因素相互联系,共同影响着苜蓿的生长发育。牧草生

长的快慢除受环境条件影响之外,还与牧草具体所处的发育阶段有关。由于苜蓿的生长是一个逐渐累积的过程,因此本研究将7个苜蓿品种各茬次生长高度动态的平均值与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温(ΣT),气温稳定通过 5°C 初日起的累计日照时数(ΣS)和累积降水量(ΣR)进行线性回归分析,各方程相关系数均大于0.998,决定系数大于0.996,回归结果见表1-11。

表 1-11 苜蓿干物质累积量与气象要素线性回归参数值

变量	第一茬			第二茬			第三茬		
	回归 系数	标准 系数	各因子占总 作用比例/%	回归 系数	标准 系数	各因子占总 作用比例/%	回归 系数	标准 系数	各因子占总 作用比例/%
截距	-24.8242			14.0242			-23.0805		
$\Sigma T/^{\circ}\text{C}$	0.06735	0.7297	73.04	0.1877	2.5578	59.76	-0.0567	-1.0669	33.94
$\Sigma S/\text{mm}$	0.00771	0.00656	0.66	0.1199	0.0844	1.97	0.1388	0.3403	10.82
$\Sigma R/\text{h}$	0.07197	0.2628	26.31	-0.6767	-1.6376	38.26	0.6877	1.7366	55.24

分析3个自变量对株高影响的作用大小可知, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水、日照时数对第一茬苜蓿株高生长的作用大小分别为73.04%、0.66%、26.31%;对第二茬苜蓿的作用大小分别为59.76%、1.97%、38.26%;对第三茬苜蓿的作用大小分别为33.94%、10.82%、55.24%。由此可见苜蓿生长期间的积温值是株高生长较为稳定的重要农业气候指标。

2. 不同茬次苜蓿株高生长与积温的 Logistic 模型

为了能够方便地预计出 5°C 初日后(2月11日)苜蓿株高生长期间的积温值,将7个品种各茬次株高与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温进行 Logistic 曲线拟合,模型的拟合度都达到极显著水平,其方程系数及特征参数如表1-12所示。

表 1-12 苜蓿生长高度与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的 Logistic 方程系数及特征参数

茬次	品种	Logistic 方程系数				最大生长速率		对数期			
		k/cm	a	b	R	$k_0/^{\circ}\text{C}$	$v_{\max}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$k_1/^{\circ}\text{C}$	$k_2/^{\circ}\text{C}$	$k_2 - k_1$ $/^{\circ}\text{C}$	$v_{\max}/(\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
第一茬	新疆大叶	88.9850	3.8453	-0.0062	0.9969**	625.254	0.1368	411.11	839.39	428.28	0.12
	巨人 201	71.1938	3.4775	-0.0060	0.9968**	583.470	0.1061	362.50	804.44	441.93	0.09
	路宝	86.2735	3.1251	-0.0048	0.9925**	656.534	0.1027	379.86	933.21	553.34	0.09
	牧歌 401	77.5737	3.3124	-0.0052	0.9993**	634.554	0.1012	382.26	886.84	504.58	0.09
	超级阿波罗	86.8227	3.2456	-0.0051	0.9997**	635.151	0.1109	377.43	892.87	515.44	0.10
	美国杂交熊	106.3648	3.9977	-0.0060	0.9986**	666.275	0.1595	446.78	885.77	438.99	0.14
	超级 13R	88.1364	2.9519	-0.0049	0.9983**	606.136	0.1073	335.71	876.56	540.85	0.09
	平均	86.4786	3.4222	-0.0055		629.625	0.1178	385.09	874.15	489.06	0.10

续表

茬次	品种	Logistic 方程系数				最大生长速率		对数期			
		k/cm	a	b	R	$k_0/^\circ\text{C}$	$v_{\max}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$k_1/^\circ\text{C}$	$k_2/^\circ\text{C}$	$k_2 - k_1/^\circ\text{C}$	$\bar{v}_{\max}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
第一茬	新疆大叶	86.0412	2.0781	-0.0048	0.9997**	430.244	0.1039	157.58	702.91	545.32	0.09
	巨人 201	81.2830	2.1426	-0.0047	0.9997**	458.792	0.0949	176.79	740.80	564.01	0.08
	路宝	78.5760	1.9006	-0.0044	0.9997**	428.052	0.0872	131.44	724.66	593.22	0.08
	牧歌 401	69.5689	2.3398	-0.0053	0.9973*	438.994	0.0927	191.91	686.08	494.17	0.08
	超级阿波罗	74.4522	2.1471	-0.0043	0.9999**	505.200	0.0791	195.33	815.07	619.74	0.07
	美国杂交熊	83.6256	2.3486	-0.0046	0.9995**	509.451	0.0964	223.78	795.13	571.35	0.08
	超级 13R	83.3135	1.8810	-0.0048	0.9999**	389.447	0.1006	116.79	662.11	545.32	0.09
	平均	79.5515	2.1197	-0.0047		451.45	0.0935	170.52	732.39	561.88	0.081
第三茬	新疆大叶	65.8233	2.8963	-0.0065	0.9990**	443.533	0.1075	241.85	645.21	403.36	0.09
	巨人 201	64.9142	2.7119	-0.0055	0.9997**	489.520	0.0899	251.80	727.24	475.44	0.08
	路宝	61.1608	2.5854	-0.0057	0.9999**	456.790	0.0865	224.11	689.47	465.36	0.08
	牧歌 401	54.0780	2.7240	-0.0062	0.9999**	441.486	0.0834	228.04	654.93	426.89	0.07
	超级阿波罗	64.1387	2.6006	-0.0060	0.9987**	435.605	0.0957	215.01	656.20	441.19	0.08
	美国杂交熊	66.1512	2.6757	-0.0055	0.9994**	488.259	0.0906	247.94	728.58	480.64	0.08
	超级 13R	65.3788	2.1247	-0.0057	0.9997**	375.385	0.0925	142.71	608.06	465.36	0.08
	平均	63.0921	2.6169	-0.0059		447.225	0.0923	221.64	672.81	451.18	0.08

* 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$), 后同。

表中 k 为株高生长潜力, a 、 b 为待定系数, k_0 为极大生长率出现时的积温, k_1 为最大生长时段的初始积温, k_2 为最大生长时段的终止积温, $k_2 - k_1$ 为最快生长阶段的积温, v_{\max} 为极大生长速率, \bar{v}_{\max} 为最大生长时段的平均增长速率。

从表 1-12 中可以看出, 三茬苜蓿中, 第一茬苜蓿的株高增长潜力最大, 品种间三茬苜蓿均以美国杂交熊、新疆大叶和超级 13R 增长潜力最大, 具有良好的生长势头。因此, 在同样积温条件下, 这三个品种对温度反应敏感, 具有较强的生态适应性。

从生长特征参数来看, 第一茬的 v_{\max} 、 k_0 、 k_1 、 k_2 、 \bar{v}_{\max} 均比第二、第三茬高, 第一茬表现出良好的生长发育潜力。由 k_0 、 k_1 、 k_2 及 $\geq 5^\circ\text{C}$ 的积温关系还可以推算出在苜蓿生长发育过程中各主要阶段的积温以及相对应的时间。第一茬苜蓿生长速率极大值出现在 5°C 初日后积温达 629.63°C 时, 即 4 月 15 日前后, 正值分枝末期; 第二茬苜蓿在头茬苜蓿刈后积温达 451.45°C 时, 即 6 月 3 日前后, 正值分枝末期; 第三茬苜蓿在第二茬苜蓿刈后积温达 447.23°C 时, 即 7 月 14 日前后, 正值分枝末期。各茬次苜蓿对数期的起止积温及生育阶段为: 第一茬对数期的起止积温为 $385.09 \sim 874.15^\circ\text{C}$, 即 3 月 28 日到 4 月 28 日, 正值分枝初期到现蕾盛期, 此阶段积温为 489.06°C 。第二茬为 $170.52 \sim 732.39^\circ\text{C}$, 即 5 月 20 日到 6 月 16 日, 正值分枝初期到现蕾盛期, 此阶段积温为 561.88°C 。第三茬为 $221.64 \sim 672.81^\circ\text{C}$, 即 7 月 6 日到 7 月 24 日, 正值分枝初期到现蕾盛期, 此阶段积温为 451.17°C 。

三、苜蓿的干物质累积与气象条件的关系

苜蓿的干物质重 (W) 表示单位面积植株的净光合生产量, 是形成产量的基础, 测定干物质的积累过程可预示形成产量的能力, 了解苜蓿新陈代谢作用的强弱, 反馈气象因素的综合作用。在一定程度上, 干物质重反映了农田生态系统的功能, 是苜蓿群体与外界环境条件相互作用的结果。

(一) 苜蓿干物质累积的 Logistic 模型

苜蓿干物质生长曲线的共同特点是前期变化缓慢, 中期最快, 后期较平缓。干物质重随时间增长的曲线大致是一个“S”形, 对 2004 年 7 个苜蓿品种第一茬干物质积累动态进行 Logistic 模型拟合, 则模型的拟合度都通过显著性检验。Logistic 模型系数及其积累速率参数值见表 1-13。

表 1-13 苜蓿干物质生长的 Logistic 模型系数及其特征参数

品种	Logistic 方程系数				最大速率				对数期		
	W $/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R	t_0 /天	y $/(g \cdot m^{-2})$	CGR_{max} $/(g \cdot m^{-2} \cdot d)$	t_1 /天	t_2 /天	t_2-t_1 /天	$\overline{CGR}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$
新疆大叶	620.05	4.6541	-0.1178	0.9687*	39.52	310.03	18.25	28.34	50.71	22.37	16.01
巨人 201	820.24	4.1297	-0.1041	0.9479*	39.68	410.12	21.34	27.03	52.33	25.31	18.71
路宝	961.04	4.6088	-0.1037	0.9687*	44.46	480.52	24.91	31.75	57.16	25.41	21.83
牧歌 401	845.43	4.7739	-0.1137	0.9771**	41.98	422.72	24.04	30.40	53.56	23.16	21.07
超级阿波罗	793.43	4.1137	-0.1035	0.9876**	39.74	396.72	20.53	27.02	52.46	25.45	18.00
美国杂交熊	820.02	4.4184	-0.1077	0.9580*	41.02	410.01	22.08	28.79	53.25	24.45	19.36
超级 13R	716.63	3.7161	-0.0976	0.9687*	38.07	358.32	17.49	24.58	51.56	26.98	15.33
平均	796.69	4.3450	-0.1069		40.64	398.35	21.23	28.27	53.00	24.73	18.62

从表 1-13 中可以看出, 干物质重增长潜力 (W) 为 $796.69g \cdot m^{-2}$, 其中最大的是路宝为 $961.04g \cdot m^{-2}$, 其次为牧歌 401、巨人 201 和美国杂交熊, 均大于 $820.02g \cdot m^{-2}$, 干物质重增长潜力最小的是新疆大叶, 为 $620.05g \cdot m^{-2}$ 。

(二) 苜蓿干物质积累速率比较

1. 苜蓿干物质积累速率动态变化曲线

从图 1-2 中可以看出, 第一茬苜蓿从返青期到初花期, 不同苜蓿品种干物质积累速率具有相同的变化趋势, 即在返青后 40 天左右, 即分枝中期干物质增长率最快, 前期和后期较慢。从品种来看, 路宝、牧歌 401 和美国杂交熊干物质增长率较高, 新疆大叶和超级 13R 较小。下面结合一些速度特征参数再进一步分析。

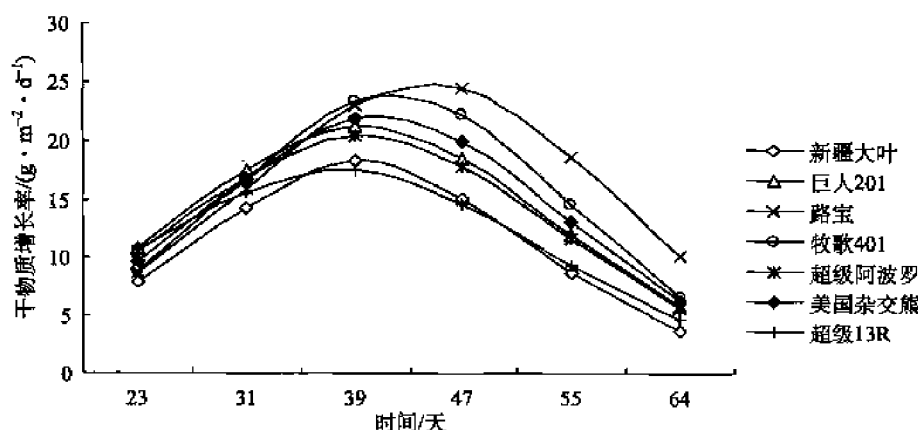


图 1-2 不同苜蓿品种干物质积累速率曲线

2. 不同苜蓿品种干物质积累阶段特征比较

不同苜蓿品种干物质积累速率特征参数见表 1-13。

由表 1-13 可知, 苜蓿普遍返青后需要 40.64 天左右, 大致在 4 月 10 日前后时, 干物质达到极大增长速率 (CGR_{max}) 为 $21.23 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 此时正值分枝中期, 干物质累积量约占第一茬总干物质重的 50%。迟滞期需要 28.27 天左右, 即 3 月 29 日前后, 正值苜蓿返青到分枝初期, 生长相对较慢, 干物质累积量约占第一茬总干物质重的 21.13%, 平均每天增加 $5.97 g \cdot m^{-2}$ 。该阶段温度较低 (平均温度约为 $9.76^{\circ}C$, 平均最低温度为 $4.89^{\circ}C$, 平均最高温度为 $15.59^{\circ}C$), 水热配合较差, 主要受热量和水分条件的影响。对数期持续时间为 24.73 天左右, 在 3 月 29 日前后到 4 月 23 日前后, 正值分枝初期到现蕾期。此期平均温度为 $15.84^{\circ}C$, 最高温度为 $23.15^{\circ}C$, 最低温度为 $9.05^{\circ}C$, 生长速率较快, 干物质累积量为 $460.47 g \cdot m^{-2}$, 约占第一茬总干物质重的 57.80%, 平均增长速率为 $18.62 g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。相关分析表明, 干物质累积量与同期最高温度和 $\geq 5^{\circ}C$ 的积温呈显著正相关 ($R=0.7722$ 和 $R=0.7652$), 与降水量、平均气温和最低温度呈极显著正相关 ($R=0.9068$ 、 $R=0.8762$ 和 $R=0.9632$)。对数期长短与 $\geq 5^{\circ}C$ 积温、日照时数达极显著正相关 ($R=0.8767$ 、 $R=0.9463$)。

非秋眠性品种超级 13R 迟滞期较短, 对数期较长, 但是平均增长速率和最大增长速率较小; 秋眠和半秋眠性品种迟滞期较长, 对数期较短, 但是平均增长速率和最大增长速率较大。

(三) 苜蓿茎、叶干物质重累积的 Logistic 模型及速率

苜蓿在现蕾形成以前光合产物全部用于建造茎、叶等营养器官。茎和叶的生物量积累也呈现缓慢增长—快速增长—缓慢增长的趋势, Logistic 模型系数及其速率参数值见表 1-14、表 1-15 和图 1-3。

表 1-14 苜蓿茎干物质增长的 Logistic 模型系数及其特征参数

品种	Logistic 方程系数				最大速率				对数期		
	$W/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R	$t_0/\text{天}$	$y/(g \cdot m^{-2})$	$CGR_{max}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$t_1/\text{天}$	$t_2/\text{天}$	$t_2-t_1/\text{天}$	$\overline{CGR}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$
新疆大叶	391.4600	5.4610	-0.1304	0.9859**	41.88	195.73	12.76	31.78	51.98	20.20	11.19
巨人 201	547.3300	4.8763	-0.1157	0.9583*	42.14	273.67	15.83	30.76	53.52	22.76	13.88
路宝	654.9400	5.1228	-0.1099	0.9810**	46.60	327.47	18.00	34.62	58.59	23.96	15.78
牧歌 401	610.6600	4.9193	-0.1065	0.9849**	46.19	305.33	16.26	33.83	58.56	24.73	14.26
超级阿波罗	586.3900	4.1765	-0.0940	0.9911**	44.42	293.20	13.78	30.41	58.43	28.01	12.08
美国杂交熊	573.2300	4.9419	-0.1114	0.9858**	44.38	286.62	15.96	32.55	56.20	23.65	13.99
超级 13R	526.4700	3.6476	-0.0820	0.9833**	44.47	263.24	10.80	28.42	60.53	32.11	9.47
平均	555.7829	4.7351	-0.1071		44.30	277.89	14.77	31.77	56.83	25.06	12.95

表 1-15 苜蓿叶片干物质增长的 Logistic 模型系数及其特征参数

品种	Logistic 方程系数				最大速率				对数期		
	$W/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R	$t_0/\text{天}$	$y/(g \cdot m^{-2})$	$CGR_{max}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$t_1/\text{天}$	$t_2/\text{天}$	$t_2-t_1/\text{天}$	$\overline{CGR}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$
新疆大叶	228.52	3.6172	-0.1034	0.9749**	34.98	114.26	5.91	22.24	47.71	25.47	5.18
巨人 201	268.63	3.2577	-0.0961	0.9754**	33.90	134.32	6.45	20.19	47.60	27.41	5.66
路宝	308.44	3.8366	-0.0963	0.9888**	39.81	154.22	7.43	26.15	53.48	27.33	6.51
牧歌 401	270.52	4.3613	-0.1202	0.9514*	36.29	135.26	8.13	25.33	47.25	21.92	7.13
超级阿波罗	245.99	3.8271	-0.1133	0.9555*	33.78	123.00	6.97	22.16	45.41	23.25	6.11
美国杂交熊	260.29	3.4796	-0.1005	0.9529*	34.62	130.15	6.54	21.51	47.72	26.20	5.74
超级 13R	241.92	3.8507	-0.1192	0.9628**	32.31	120.96	7.21	21.26	43.36	22.10	6.32
平均	260.62	3.7472	-0.1070		35.10	130.31	6.95	22.69	47.50	24.81	6.09

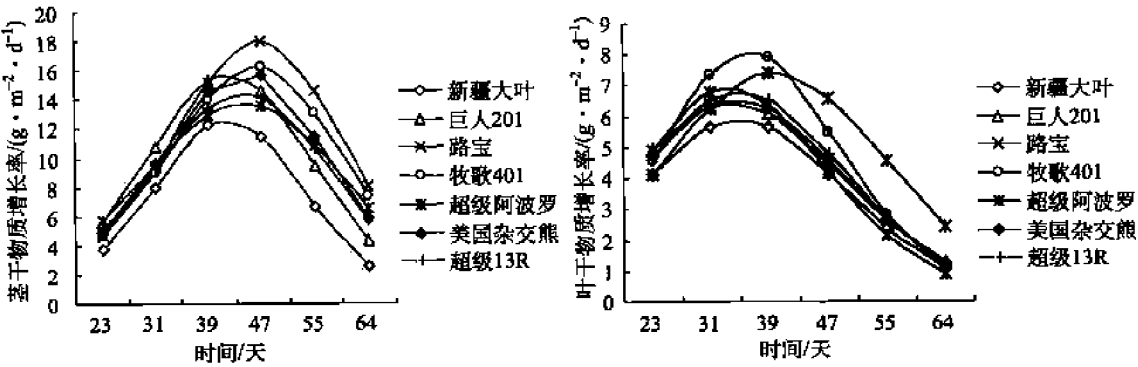


图 1-3 不同苜蓿品种茎和叶干物质积累速率曲线

由图 1-3 可知,从返青到初花,不同苜蓿品种茎的干物质增长率变化趋势相同,在返青后 45 天左右,即分枝盛期干物质增长率最大,前期和后期较慢。其中,路宝、牧歌 401、美国杂交熊和巨人 201 干物质增长率较大,新疆大叶最小;叶的干物质增长率在返青后 35 天左右,即分枝中期干物质增长速率最大,前期和后期较慢。其中,牧歌 401 和超级阿波罗的干物质生长率较大,新疆大叶最小。下面结合一些速度特征参数再进一步分析。

由表 1-14 可知,苜蓿返青后,茎干物质积累需要 44.30 天左右,即 4 月 14 日前后,正值分枝盛期时,达到其极大增长速率,为 $14.77\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。茎干物质积累的迟滞期为 31.77 天左右,即 3 月 31 日左右,正值返青至分枝阶段,平均温度为 9.9°C ,平均最高温度为 15.65°C ,平均最低温度为 5.07°C ,温度较低、水分条件较差,生长相对缓慢。对数期持续时间为 25.06 天左右,即 3 月 31 日到 4 月 26 日,处于分枝至现蕾盛期阶段,平均增长速率为 $12.95\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,此阶段茎的干物质重为 $324.53\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占第一茬茎总干物质重的 58.39%。相关分析表明,茎的干物质累积量与同期的平均温度和平均最低温度呈显著正相关(相关系数分别为 0.7792 和 0.7850)。

由表 1-15 可知,返青后,叶片干物质积累需要 35.10 天左右,即 4 月 5 日前后,正值分枝前期时,达到其极大增长速率,为 $6.95\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。叶片干物质积累的迟滞期为 22.69 天左右,即 3 月 23 日左右,正值返青至分枝晚期,平均温度为 9.57°C ,最高温度为 15.71°C ,最低温度为 4.42°C ,受温度和水分影响较大,生长缓慢。对数期持续时间为 24.81 天左右,即 3 月 23 日前后到 4 月 17 日前后,处于返青至分枝末期,平均温度为 13.61°C ,最高温度为 19.92°C ,最低温度为 7.89°C ,水热条件较好,生长较快,平均增长速率为 $6.09\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,此阶段的叶片的干物质重为 $151.09\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占第一茬叶总干物质重的 57.97%左右。相关分析表明,叶干物质累积量与同期 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温、日照时数、降水量、平均温度、平均最低温度呈显著正相关(相关系数均在 0.77 以上)。

茎和叶干物质生长动态相比较而言,叶片的生长潜力较小。叶片进入快速生长的对数期较早,对数期持续时间和茎相差不大,但是其最大增长速率和平均增长速率较小,干物质重增长较为缓慢。因此,在返青期,叶片进入快速生长期,干物质重大于茎秆;而分枝后,茎秆进入快速生长期,干物质重迅速超过叶片。

品种间,茎和叶的干物质重潜力较大的是路宝、牧歌 401,较小的为新疆大叶和超级 13R、巨人 201。茎、叶的迟滞期最短的是超级 13R,最长的是路宝和牧歌 401。茎的对数期以新疆大叶和巨人 201 较短,超级 13R 最长。叶的对数期以超级 13R 和牧歌 401 较短,路宝、巨人 201、美国杂交熊和新疆大叶较长。

(四) 苜蓿干物质积累与气象条件的关系

1. 苜蓿干物质累积量与气象条件的线性回归分析

苜蓿全株、茎和叶干物质累积量与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 ($\sum T$)、气温稳定通过 5°C 初日起的累计日照时数 ($\sum S$) 和累积降水量 ($\sum R$) 的线性回归方程相关系数均大于 0.9777,

决定系数大于 0.9550, 经检验为显著相关 (表 1-16)。这说明影响苜蓿干物质累积的主要气象因素已基本包括在内, 光、热、水对苜蓿干物质累积量均有不同程度的影响。分析 3 个自变量对干物质累积量影响的大小可知, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水和日照时数对全株干物质累积量的作用大小分别为 67.75%、19.02% 和 13.23%, 对茎干物质累积量的作用大小分别为 65.77%、12.78% 和 21.45%, 对叶干物质累积量的作用大小分别为 53.97%、31.62% 和 14.40%。由此可见, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温是影响苜蓿全株、茎和叶干物质累积量作用最大的因子。因此, 苜蓿生长期间的积温值是干物质积累较为稳定的重要农业气候指标。

表 1-16 苜蓿干物质累积量与气象要素线性回归参数值

变量	全株干物质			茎干物质			叶干物质		
	回归系数	标准系数	各因子占总作用的比例/%	回归系数	标准系数	各因子占总作用的比例/%	回归系数	标准系数	各因子占总作用的比例/%
截距	53.308 4			56.459 7			-3.150 7		
$\Sigma T/^{\circ}\text{C}$	1.810 3	1.773 8	67.75	1.411 02	1.990 2	65.77	0.399 27	1.235 1	53.97
$\Sigma S/\text{mm}$	-7.519 8	-0.498 0	19.02	-4.058 36	-0.386 9	12.78	-3.461 44	0.723 7	31.62
$\Sigma R/\text{h}$	-1.058 8	-0.346 5	13.23	-1.377 83	-0.649 1	21.45	0.319 02	0.329 6	14.40

2. 干物质累积量与积温的 Logistic 模型

7 个品种干物质累积与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 Logistic 曲线模型的方程系数及特征参数如表 1-17 和表 1-18。表 1-17 和表 1-18 中 W 为干物质重上限, a 、 b 为待定系数, CGR_{\max} 为极大增长率, k_0 为极大增长率出现时的积温, k_1 为最大增长时段的初始积温, k_2 为最大增长时段的终止积温, $\overline{\text{CGR}}$ 为最大增长时段的平均增长速率。

由表 1-17 可知, 干物质生产潜力为全株 > 茎 > 叶。品种间, 路宝、牧歌 401、美国杂交熊和巨人 201 全株、茎和叶干物质生产潜力均较大, 说明在同样的积温条件下这些品种具有良好的生长潜力。

由表 1-18 可知, CGR_{\max} 、 $\overline{\text{CGR}}$ 均表现出总干物质 > 茎 > 叶, 说明全株和茎的干物质增长显著, 叶片增长比较缓慢。干物质增长率极大值出现时的积温和生育阶段为总干物质在 5°C 初日后积温达 550.58°C 时, 即 4 月 10 日前后, 正值分枝期; 茎干物质在积温达 598.92°C 时, 即 4 月 12 日前后, 正值分枝期; 叶干物质在积温达 481.45°C 时, 即 4 月 5 日左右, 正值分枝前期。干物质累积进入对数期的起止积温为 $384.61 \sim 716.54^{\circ}\text{C}$, 即 3 月 28 日到 4 月 20 日, 正值分枝初期到现蕾期。茎干物质累积对数期的起止积温为 $424.48 \sim 773.36^{\circ}\text{C}$, 即 3 月 31 日到 4 月 22 日, 正值分枝初期到现蕾期。叶干物质累积对数期的起止积温为 $320.42 \sim 642.48^{\circ}\text{C}$, 即 3 月 20 日到 4 月 15 日, 正值返青到分枝末期。

表 1-17 苜蓿干物质累积与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的 Logistic 方程系数

品种	总干物质				茎干物质				叶干物质			
	W $/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R	W $/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R	W $/(g \cdot m^{-2})$	a	b	R
新疆大叶	596.3787	4.6483	-0.0086	0.9790**	376.1173	5.2622	-0.0092	0.9918**	221.2186	3.8266	-0.0080	0.9328*
巨人 201	785.2259	4.1400	-0.0076	0.9617*	525.8205	4.7050	-0.0081	0.9706**	259.4838	3.4774	-0.0075	0.9320*
跨宝	906.6536	4.4185	-0.0073	0.9801**	617.4305	4.7778	-0.0074	0.9894**	294.2979	3.8516	-0.0071	0.9457*
牧歌 401	792.5546	4.7777	-0.0084	0.9816**	558.0081	4.7029	-0.0075	0.9842**	262.4518	4.5718	-0.0092	0.9459*
超级阿波罗	739.5942	4.2787	-0.0081	0.9885**	527.3026	4.1478	-0.0071	0.9868**	238.5195	4.1635	-0.0090	0.9574*
美国杂交熊	783.3806	4.3607	-0.0078	0.9705*	540.0256	4.7188	-0.0078	0.9921**	254.8138	3.6069	-0.0075	0.9550*
超级 13R	664.7013	4.0075	-0.0079	0.9678*	462.6514	3.6650	-0.0064	0.9780**	235.5522	4.2986	-0.0097	0.9404*
平均	752.6413	4.3759	-0.0080		514.3366	4.5685	-0.0076		252.3339	3.9709	-0.0083	

表 1-18 苜蓿干物质累积与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的 Logistic 方程特征参数

干物质	品种	最大生长速率		对数期			$\overline{\text{CGR}}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
		$k_0/^{\circ}\text{C}$	$\text{CGR}_{\text{max}}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	$k_1/^{\circ}\text{C}$	$k_2/^{\circ}\text{C}$	$k_2 - k_1/^{\circ}\text{C}$	
总干物质	新疆大叶	539.8769	1.2837	386.92	692.83	305.91	1.1255
	巨人 201	541.8796	1.4998	369.50	714.26	344.75	1.3150
	路宝	609.4510	1.6433	427.80	791.10	363.30	1.4408
	牧歌 401	566.7438	1.6703	410.52	722.97	312.45	1.4645
	超级阿波罗	530.8573	1.4903	367.46	694.25	326.79	1.3067
	美国杂交熊	560.5013	1.5237	391.23	729.78	338.55	1.3359
	超级 13R	504.7166	1.3194	338.85	670.58	331.73	1.1569
	平均	550.5752	1.4901	384.61	716.54	331.93	1.3065
茎干物质	新疆大叶	574.4705	0.8613	430.70	718.24	287.55	0.7552
	巨人 201	580.1467	1.0661	417.76	742.53	324.77	0.9348
	路宝	643.9137	1.1453	466.43	821.40	354.98	1.0042
	牧歌 401	623.7308	1.0518	449.07	798.39	349.33	0.9223
	超级阿波罗	587.5113	0.9307	400.97	774.05	373.08	0.8160
	美国杂交熊	607.3102	1.0490	437.82	776.80	338.99	0.9198
	超级 13R	575.3469	0.7368	368.60	782.09	413.49	0.6460
	平均	598.9186	0.9773	424.48	773.36	348.88	0.8569
叶干物质	新疆大叶	478.9224	0.4419	314.10	643.75	329.65	0.3874
	巨人 201	464.2724	0.4859	288.44	640.10	351.66	0.4260
	路宝	543.2482	0.5216	357.50	729.00	371.50	0.4574
	牧歌 401	496.9359	0.6036	353.79	640.08	286.30	0.5293
	超级阿波罗	462.6122	0.5367	316.28	608.94	292.66	0.4705
	美国杂交熊	479.6463	0.4790	304.52	654.77	350.25	0.4200
	超级 13R	444.5253	0.5694	308.34	580.72	272.38	0.4993
	平均	481.4518	0.5197	320.42	642.48	322.06	0.4557

四、结论与讨论

Logistic 模型特征参数表明,不同茬次株高快速生长期的转折点所对应的返青后(再生后)的天数、生育阶段分别是:第一茬为 29.29~66.14 天,即 3 月 31 日到 5 月 5 日,正值分枝初期至现蕾末期;第二茬为 8.93~39.13 天,即 5 月 22 日到 6 月 22 日,正值分枝初期至初花期;第三茬为 5.43~23.92 天,即 7 月 6 日到 7 月 24 日,处于分枝初期至现蕾末期。株高极大生长速率第一茬为 $1.7675\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,第二茬为 $1.9135\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,第三茬为 $2.2621\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,分别出现在返青(再生)后 47.72 天、24.03 天和 14.67 天,即分枝末期。从特征变化分析来看,第一茬苜蓿株高生长潜力最大,但是由于生长在水热条件较差的早春,该茬苜蓿无法发挥其最快的生长潜力,因此第一茬苜蓿进入对数期生长的时间明显加长,从而对第二、第三茬苜蓿的生长潜力的发挥产生不良影响。因此,

在早春对第一茬苜蓿实施有效的管理,使第一茬苜蓿尽快进入对数生长期,这对第二、第三茬苜蓿的生长潜力的发挥具有积极的意义。从生长速率来看,第三茬苜蓿的生长速率明显高于第一、第二茬苜蓿的生长速率,这与第三茬苜蓿生长在高温多雨的环境条件有关。可见,管理好第三茬苜蓿,如加强苜蓿的营养管理、病虫害防治以及杂草防除等措施,更好地发挥第三茬苜蓿的生产效能,将对提高一年中苜蓿总生产力水平具有十分重要的意义。

各茬苜蓿株高与气象因子的相关分析表明,第一茬苜蓿株高与平均气温、平均最高气温和最低气温呈现极显著正相关(相关系数在 0.99 以上),第二茬苜蓿株高与平均最低气温呈现显著正相关,与日均气温、日均最高气温的相关性不显著。第三茬苜蓿株高与日均最高温度呈现极显著负相关(相关系数为-0.97),与平均温度呈显著负相关,与最低温度无显著相关性。

各茬苜蓿株高与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水和日照时数的线性回归方程均达到显著水平,这说明影响苜蓿株高生长的主要气象因素已基本包括在内,光、热、水对苜蓿株高生长均有不同程度的影响。其中, $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水、日照时数对第一茬苜蓿株高生长的作用大小分别为 73.04%、0.66%、26.31%;对第二茬苜蓿的作用大小分别为 59.76%、1.97%、38.26%;对第三茬苜蓿的作用大小分别为 33.94%、10.82%、55.24%。

统计检验结果表明,不同茬次苜蓿株高生长与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的 Logistic 模拟方程均达到显著水平,方程可靠,实用性强。株高快速生长期的转折点所对应的积温值范围分别是第一茬为 385.09~874.15 $^{\circ}\text{C}$,第二茬为 170.52~732.39 $^{\circ}\text{C}$,第三茬为 221.64~672.81 $^{\circ}\text{C}$ 。快速生长阶段所需积温分别为 489.06 $^{\circ}\text{C}$ 、561.88 $^{\circ}\text{C}$ 、451.18 $^{\circ}\text{C}$ 。最大瞬时增长率 v_{\max} 第一茬为 0.1178 $\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、第二茬为 0.0935 $\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、第三茬为 0.0923 $\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,分别出现在 5 $^{\circ}\text{C}$ 初日和再生后的 629.63 $^{\circ}\text{C}$ 、451.45 $^{\circ}\text{C}$ 、447.23 $^{\circ}\text{C}$ 之时。以积温为基础的两个转折点的确定,对于苜蓿的田间管理具有一定的指导意义。

苜蓿干物质随时间变化的 Logistic 模型特征参数表明,不同器官干物质积累快速增长期的转折点所对应的规定日期(3月1日)后的天数、生育阶段以及这一时段的总干重分别是总干物质为 28.27~53.00 天,即 3月29日到4月23日,正值分枝初期到现蕾期,干物质积累量为 460.47 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占总干重的 57.82%;茎干物质为 31.77~56.83 天,即 3月31日到4月26日,正值分枝初期到现蕾盛期,干物质重为 324.53 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占茎总干物质重的 58.39%;叶干物质为 22.69~47.50 天,即 3月23日到4月17日,处于返青至分枝末期,干物质重为 151.09 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,占叶总干物质重的 57.97%左右。极大增长速率总干物质为 21.23 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,茎干物质为 14.77 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,叶干物质为 6.95 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,分别出现在规定日期后的 40.64 天、44.30 天、35.10 天之时。

相关分析表明,第一茬苜蓿干物质积累量与同期最高温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温呈显著正相关($R=0.7722$ 和 $R=0.7652$),与降水量、平均气温和最低温度呈极显著正相关($R=0.9068$ 、 $R=0.8762$ 和 $R=0.9632$)。茎的干物质积累量与同期的平均温度和平均最低温度呈显著正相关(相关系数分别为 0.7792 和 0.7850)。叶干物质积累量与同期

$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 的积温、日照时数、降水量、平均温度、平均最低温度呈显著正相关（相关系数均在 0.77 以上）。

第一茬苜蓿干物质积累量与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水和日照时数的线性回归方程均达到显著水平，方程可信度高。其中， $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水和日照时数对全株干物质积累量的作用大小分别为 67.75%、19.02%、13.23%，对茎干物质积累量的作用大小分别为 65.77%、12.78%、21.45%，对叶干物质积累量的作用大小分别为 53.97%、31.62%、14.40%。由此可见， $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温是影响苜蓿全株、茎和叶干物质积累量作用最大的因子。因此，苜蓿生长期间的积温值是干物质积累较为稳定的重要农业气候指标。

苜蓿干物质积累与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的 Logistic 模型参数表明，干物质增长速率大小为总干物质>茎>叶，说明在同样积温条件下全株和茎的干物质增长显著，叶片增长比较缓慢。不同器官干物质快速增长期的转折点所对应的 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温值及生育阶段范围分别是总干物质为 384.61~716.54 $^{\circ}\text{C}$ ，即 3 月 28 日到 4 月 20 日，正值分枝初期—现蕾期；茎干物质为 424.48~773.36 $^{\circ}\text{C}$ ，即 3 月 31 日到 4 月 22 日，正值分枝初期—现蕾期；叶干物质为 320.42~642.48 $^{\circ}\text{C}$ ，即 3 月 20 日到 4 月 15 日，正值返青期—分枝末期。快速增长阶段所需积温总干物质为 331.93 $^{\circ}\text{C}$ ，茎干物质为 348.88 $^{\circ}\text{C}$ ，叶干物质为 322.06 $^{\circ}\text{C}$ 。总干物质极大增长速率为 $1.49\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，茎干物质为 $0.98\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，叶干物质为 $0.52\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ，分别出现在 5°C 初日后的 550.58 $^{\circ}\text{C}$ 、598.92 $^{\circ}\text{C}$ 、481.45 $^{\circ}\text{C}$ 之时。

综合分析，第一茬苜蓿株高生长速率的极大值出现时段和最快增长时段与总干物质增长率的极大值出现时间和最快增长时段基本同步，说明株高的生长和干物质的积累是同步协调进行的，在考虑刈草最佳时间时，苜蓿的株高是一个很好的衡量指标。另外，就第一茬苜蓿不同器官的干物质重积累而言，茎干物质重极大值出现时间和最快增长时段与总干物质重基本同步，而叶干物质重极大值出现时间和最快增长时段比总干物质和茎提前 9 天左右，说明茎的干物质积累在总干物质积累中占有很大的比例。这也从另一方面说明了在返青期叶片进入快速生长期，干物质重大于茎秆，茎叶比较小；而分枝后，茎秆进入快速生长期，干物质重迅速超过叶片，茎叶比较大。

第四节 紫花苜蓿光合作用日变化规律及其与气象因子的关系

光合作用是植物生产力构成的最主要因素，研究植物光合作用有助于采取适当的栽培措施提高植物的光合能力，从而提高产量。植物光合作用日变化是在一定天气条件下，各种生理生态因子综合效应的最终反应，其结果可作为分析产量限制因素的重要依据（杜占池等，1999）。围绕植物光合日变化研究较多的是自然条件下的净光合速率和叶片气孔导度的变化与环境因子、植株水分状况及产物积累等的关系。目前，研究已逐步深入到光合能力（自然或特定 CO_2 浓度水平和最适温度、湿度条件下的光饱和和光合速率）、羧化效率、量子产量、叶绿素荧光及某些生化指标在日进程中的变化规律（许大奎等，1990；Wise et al., 1991；Correia et al., 1990；Kuppers et al., 1986；Tenhunen et al., 1984）。

国内外有关紫花苜蓿光合作用的研究主要集中在 CO_2 加富的较短期试验和整株或单叶的呼吸作用上 (孙同兴等, 1999; 项斌等, 1996; Ziska and Bunce, 1994; Cure et al., 1986; Goudriaan and De Ruiter, 1983), 对紫花苜蓿光合作用日变化规律的研究缺乏系统性报道, 尤其是光合作用与水、温、光、 CO_2 等气象因子的研究尚未见报道。因此本节通过对旱作条件下生长第四年的 4 个紫花苜蓿品种叶片光合生理特性日变化规律的系统性研究与比较, 探索紫花苜蓿光合作用的规律及其光合效率午间降低的机制, 并对光合速率与光强、 CO_2 浓度、气温和空气湿度之间的关系做了研究, 分析其光合蒸腾特性日变化的原因, 对发挥紫花苜蓿光合生产力的潜势, 为紫花苜蓿品种的选育和高产栽培提供理论参考。

一、不同苜蓿品种光合作用的日变化

试验于 2004 年 6 月 23 日的晴朗天气进行, 此时苜蓿处于第二茬初花期。苜蓿生长的田间环境因子和不同苜蓿品种叶片的光合特征参数日变化均为同一天测定。

(一) 气象因子日变化规律

图 1-4 表明, 在 6:00~18:00 期间, 光合有效辐射 (PAR)、大气温度 (T_a)、相对湿度 (RH) 和田间 CO_2 浓度 (C_a) 的日变化均为“单峰”曲线。PAR 在 6:00~18:00 的变化范围为 $160.17 \sim 1681.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 6:00 左右最低为 $160.17 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 12:00 左右达到其高峰值 $1681.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后逐渐下降, 到 18:00 降为 $265.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; T_a 主要受到 PAR 的影响, 其变化范围为 $23.28 \sim 40.46^\circ\text{C}$, 6:00 左右最低为 23.28°C , 此后, 由于光辐射强度的迅速增加而上升较快, 到 14:00 左右达到最高温度 40.46°C , 其峰值比 PAR 滞后 2h, 之后随着光辐射强度的减弱而缓慢下降, 到 18:00 下降为 35.62°C 。其中 10:00~16:00, T_a 基本保持在 $39.35 \sim 40.46^\circ\text{C}$, 变化幅度很小。

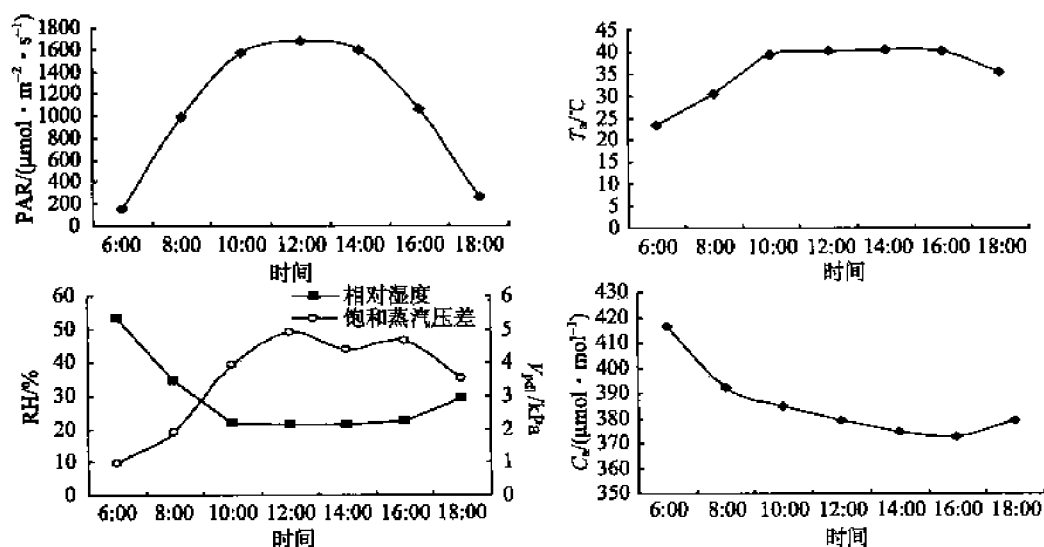


图 1-4 苜蓿生长的田间环境因子日变化

RH 与 PAR 和 T_a 的变化规律相反, 6:00 左右最高为 53.38%, 此后, 随着 T_a 的升高而迅速下降, 到 12:00 左右降到最低值 21.26%, 之后随着 T_a 的下降又有所回升。其中在 10:00~16:00, 基本保持为 21.32%~22.57%, 变化幅度很小。饱和蒸汽压差 (V_{sat}) 在 12:00 左右达到最大值 (4.92kPa), 16:00 左右又出现一个峰值 (4.65kPa), 日变化幅度为 0.97~4.92kPa。 V_{sat} 的变化规律与 PAR、 T_a 呈显著和极显著正相关 ($R_1=0.77$, $R_2=0.99$), V_{sat} 与 RH 呈极显著负相关 ($R=-0.98$); C_a 也呈现出有规律的日变化进程, 从早晨开始逐渐降低, 16:00 左右达到最低值, 而后略有回升, 变化范围为 372.78~416.74 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 日变化幅度不大。

(二) 光合速率和蒸腾速率日变化特征

图 1-5 表明, 供试 4 种苜蓿叶片光合速率 (P_n) 的日变化曲线均为典型的“双峰”曲线, 6:00 和 18:00 左右 P_n 最低, 12:00 左右有明显的光合“午休”现象, 只是不同品种 P_n 的高峰和低谷出现的时刻和高低有明显差异。新疆大叶、巨人 201 和牧歌 401 第一峰值出现在 10:00 左右, 分别为 23.17 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、32.7 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 32.53 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 第二峰值出现在 14:00 左右, 分别为 21.13 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、30.43 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 28.00 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而路宝的两个高峰分别出现在 8:00 左右和 14:00 左右, 峰值分别为 28.83 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 27.37 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。12:00 左右新疆大叶、巨人 201、牧歌 401 和路宝的 P_n 均处于低谷, 其值分别为 17.16 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、26.47 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、20.73 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 25.03 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可以看出, P_n 的第二个高峰值低于第一个高峰值, 且中午 P_n 下降的速率均大于下午 P_n 回升的速率, 即 P_n 中午降低快而恢复慢。其中牧歌 401 下降和回升的速率显著高于其他品种, 路宝最慢, 但是其“午休”现象比其他 3 个品种出现得早。比较发现, 3 个国外苜蓿品种的 P_n 在各个测定时间均高于国内品种新疆大叶。 P_n 的日平均值的顺序依次为巨人 201 (20.18 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 牧歌 401

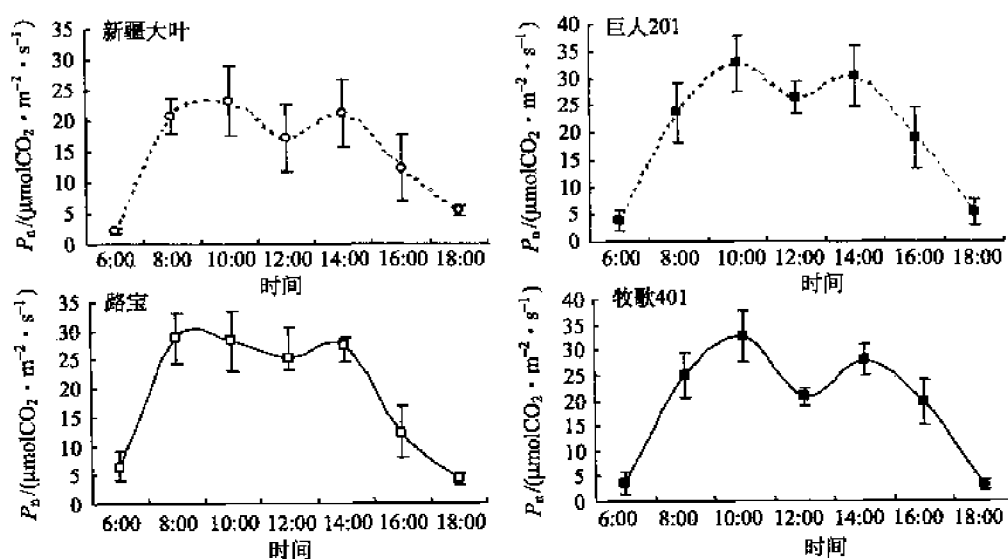


图 1-5 4 种苜蓿叶片光合速率日变化

($18.88\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 路宝 ($18.84\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 新疆大叶 ($14.55\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。经分析国外品种之间无显著性差异,但是与新疆大叶有极显著差异 ($P < 0.01$)。

蒸腾速率 (T_r) 的日变化进程与 P_n 基本一致,呈现“双峰”曲线 (图 1-6),新疆大叶、巨人 201、牧歌 401 和路宝在 10:00 左右出现第一个高峰,分别为 $15.6\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $25.2\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20.67\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $24.63\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,第二个高峰在 14:00 左右,新疆大叶、巨人 201、路宝峰值分别为 $16.53\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $25.53\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $23.63\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而牧歌 401 的第二个高峰出现在 16:00 左右 ($19.93\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),4 个品种在 12:00 左右都处于低谷 ($14.09\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $21.79\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $19.25\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $14.87\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。比较发现,巨人 201、牧歌 401 和路宝 3 个国外品种在各个测定时间的 T_r 都较新疆大叶高,特别是在 10:00 左右和 14:00 左右。 T_r 的日平均值依次为巨人 201 ($15.93\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 牧歌 401 ($14.78\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 路宝 ($13.88\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 新疆大叶 ($11.09\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。方差分析表明 3 个国外苜蓿品种之间无显著性差异,但是与新疆大叶有极显著差异 ($P < 0.01$)。

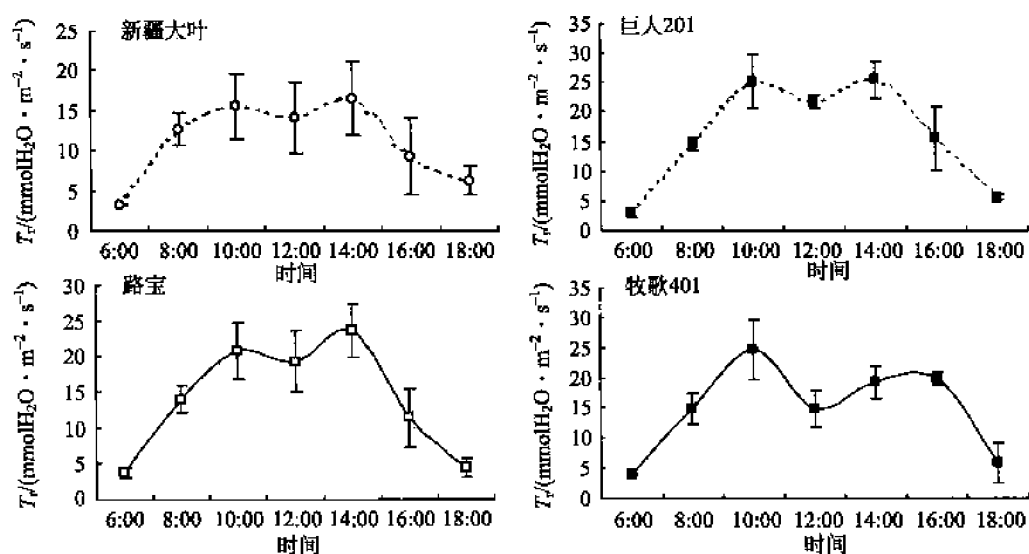


图 1-6 4 种苜蓿叶片蒸腾速率的日变化

(三) 水分利用效率的日变化

不同苜蓿品种的水分利用效率 (WUE) 日变化不同 (图 1-7)。新疆大叶、巨人 201、牧歌 401 呈“双峰”型,路宝呈“单峰”型。4 个品种在 8:00 左右的 WUE 均达到全天的最高值,分别为 $1.64\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.61\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.68\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $2.06\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。新疆大叶、巨人 201、牧歌 401 在 10:00~12:00 的 WUE 降到谷底,14:00 左右出现第二个高峰,但是峰值不明显,分别

为 $1.40 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.28 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.45 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。WUE 的日平均值依次为：路宝 ($1.36 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$) > 巨人 201 ($1.24 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$) > 新疆大叶 ($1.21 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$) > 牧歌 401 ($1.17 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$)，但是品种之间无显著性差异。

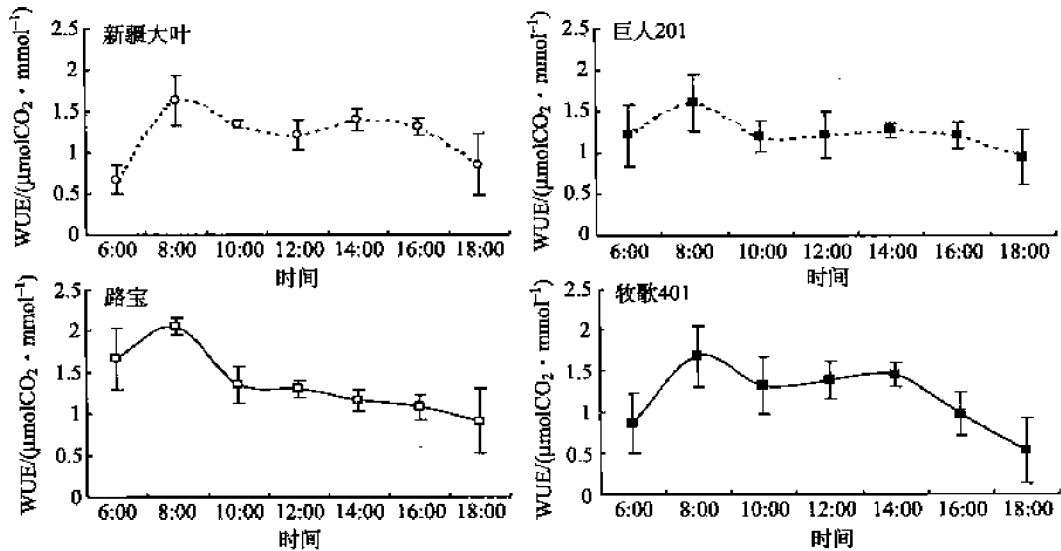


图 1-7 4 种苜蓿叶片水分利用效率日变化

(四) 气孔导度的日变化

不同苜蓿品种的气孔导度 (G_s) 日变化曲线均为“双峰”曲线 (图 1-8)，从早晨开始随着 PAR 和 T_a 的增加， G_s 逐渐增加，8:00 前，各苜蓿品种 G_s 非常接近，到 8:00 左右出现第一个峰值，8:00 以后，高温低湿的环境导致 G_s 迅速降低，新疆大叶下

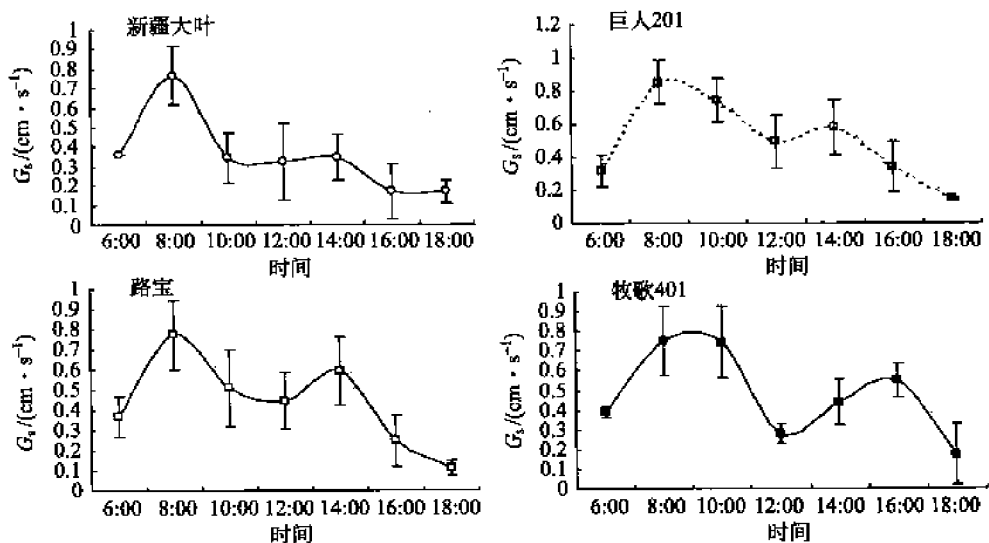


图 1-8 4 种苜蓿叶片气孔导度的日变化

降最快, 牧歌 401 变化最慢, 到 12:00 左右出现低谷, 14:00 左右出现第二个峰值, 牧歌 401 第二个峰值出现在 16:00 左右。比较发现, 巨人 201 的 G_s 在 8:00 和 14:00 左右的峰值最高, 新疆大叶最低。 G_s 的日平均值依次为巨人 201 > 牧歌 401 > 路宝 > 新疆大叶, 巨人 201 极显著高于新疆大叶 ($P < 0.01$), 其他品种之间无显著性差异。

(五) 光合速率与胞间 CO_2 浓度、气孔限制值的关系

图 1-9 表明, 4 个苜蓿品种叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 在 12:00 以前非常接近, 从早晨开始逐渐下降, 12:00 左右各品种 C_i 都处于低谷, 12:00 以后, 逐渐上升, 新疆大叶和路宝在 16:00 左右稍有下降, 出现第二个低谷。

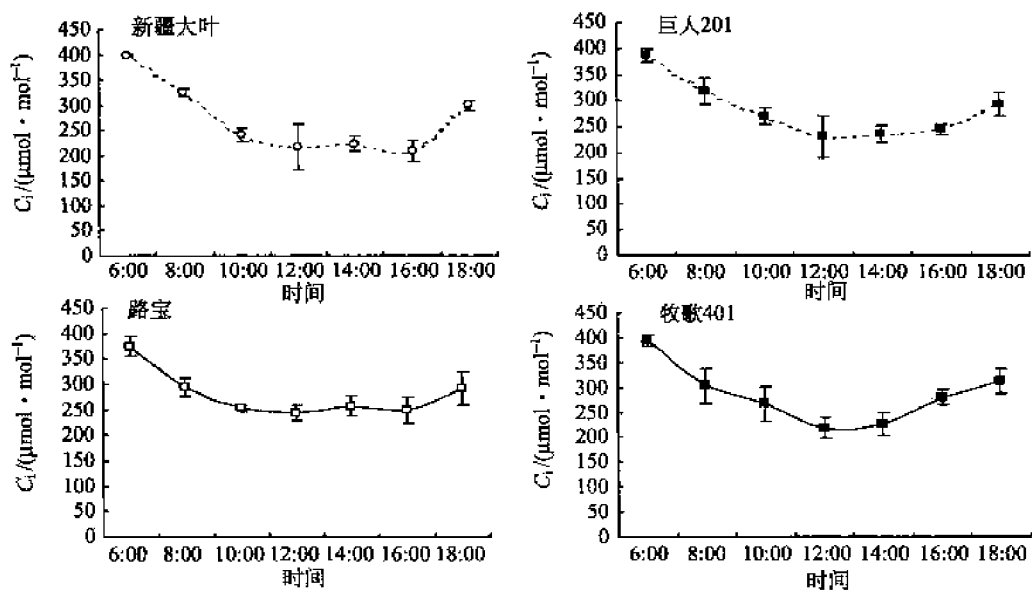


图 1-9 4 种苜蓿叶片胞间 CO_2 浓度日变化

气孔限制值 (L_s) 反映了植物叶片对大气 CO_2 相对利用效率的大小 (Ziska and Bunce, 1994)。经计算分析, 4 种苜蓿叶片 L_s 的日变化趋势并不同步 (图 1-10), 新疆大叶和路宝呈现出“双峰”趋势, 两个峰值分别出现在 12:00 左右和 16:00 左右; 巨人 201 和牧歌 401 表现出明显的“单峰”趋势, 在 12:00 左右出现最高峰。

4 种苜蓿 P_n 在 12:00 左右均有一“午休”低谷。光合“午休”是对炎热夏季的一种有益的生态适应和自我调节机制的表现。植物叶片 P_n 中午降低的植物自身因素不外乎两个: 气孔因素和非气孔因素。前者是由于中午田间光照、温度和湿度等环境因子的变化引起植物气孔的部分关闭, CO_2 进入叶片受阻而使光合下降, 而后者是由于叶肉细胞自身羧化酶活性的下降而引起 P_n 的降低 (杜占池, 1990)。根据 Farquhar 和 Sharkey (1982) 的观点, 只有当 P_n 和 C_i 变化方向相同, 两者同时减小, 且 L_s 增大时, 才可以认为 P_n 的下降主要是由 G_s 引起的, 否则 P_n 的下降要归因于叶肉细胞羧化能力的降低。4 个苜蓿品种在 10:00~12:00 P_n 降低、 C_i 下降、 L_s 增大, 因此可以推断出引起光合“午休”的主要原因是气孔因素。

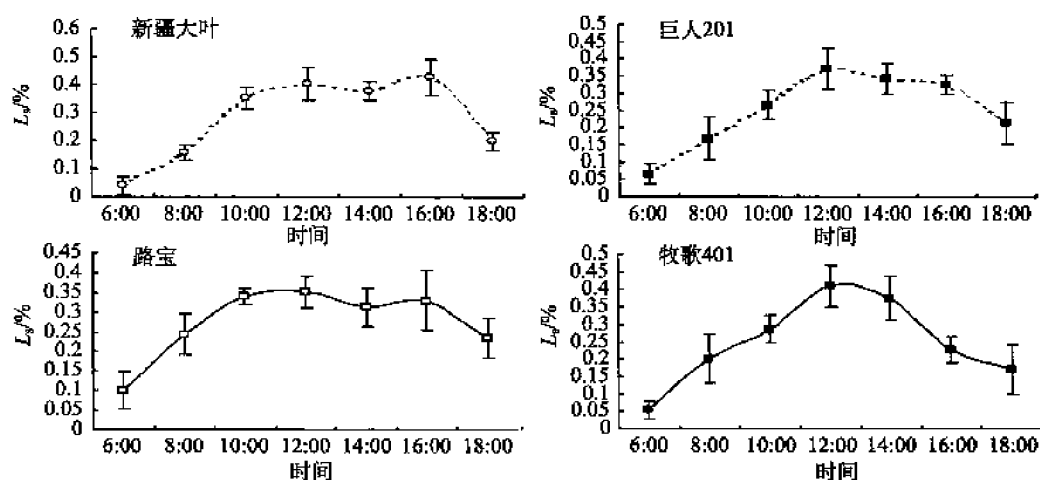


图 1-10 4 种苜蓿叶片气孔限制值日变化

(六) 光合特征参数的相关性分析

以 4 个苜蓿品种各个测定时刻光合特征参数平均值进行相关分析 (表 1-19)。

表 1-19 光合特征参数的相关性分析

相关系数	PAR	T_a	RH	C_a	G_s	C_i	P_n	T_r	WUE
PAR	1								
T_a	0.7647*	1							
RH	-0.7855*	-0.9857**	1						
C_a	-0.6462	-0.6677	0.6587	1					
G_s	0.4494	-0.0932	-0.0301	0.1473	1				
C_i	-0.8455**	-0.9785**	0.9761**	0.9130**	-0.0375	1			
P_n	0.9217**	0.5750	-0.6480	-0.4487	0.7535*	-0.6757	1		
T_r	0.9779**	0.7563*	-0.7822**	-0.5897	0.5279	-0.8122**	0.9597**	1	
WUE	0.4666	-0.0721	-0.0458	0.1006	0.9621**	-0.0948	0.7189	0.5057	1

* 相关性显著 ($P < 0.05$); ** 相关性极显著 ($P < 0.01$)。

由表 1-19 可知, T_a 与 PAR 呈显著正相关, RH 与 PAR、 T_a 呈显著或极显著负相关, C_a 与 PAR、RH、 T_a 无显著相关性。 C_i 与 PAR、 T_a 呈极显著负相关, 与 RH、 C_a 呈极显著正相关; P_n 与 PAR 和 G_s 呈极显著或显著正相关; T_r 与 P_n 、PAR 呈极显著正相关, 与 RH、 C_i 呈极显著负相关; WUE 与 G_s 呈极显著正相关; G_s 主要受 PAR 的影响。

二、光合速率和蒸腾速率与气象因子的关系

叶片的光合作用强弱取决于很多因素, 既有内部因素也有外部因素, 内部因素决定着对同化物的需要及同化物从光合器官中的运输, 但是这些内部因素和外部环境条件总是相互作用的, 有一些密切地依赖于外界条件。因此环境因子对光合作用影响的研究受

到了普遍关注。近年来,一些学者主要以经济作物和农作物等为试验材料研究了植物的光合作用与单个环境因子及其联合作用对光合作用的影响,并已明确了各环境因子对光合蒸腾速率的相对重要性,涉及的环境因子包括光强、温度、土壤含水量、土壤养分、CO₂ 浓度、大气污染物等。有关影响紫花苜蓿光合速率和蒸腾速率的水、温、光、CO₂ 等生态因子综合起来进行研究尚未见报道。本节主要分析 4 个紫花苜蓿品种各个测定时刻的平均光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 与 PAR、C_a、RH 和 T_a 等气象因子的关系,以期为进一步提高苜蓿光合生产力提供理论依据。

(一) 光合速率与气象因素的关系

P_n 与 PAR、C_a、RH 和 T_a 的回归分析结果见表 1-20,其线性回归方程为

$$P_n = 118.40 + 0.0189PAR + 0.057C_a - 1.437RH - 2.739T_a$$

经检验, $F(61.34) > F_{0.05}$, $R = 0.9959$, $R^2 = 0.9919$ 。可见此回归模型可信度达到 99.59%, 紫花苜蓿光合速率日变化的变异平方和有 99.19% 是由气象因子的日变化造成的。经 F 值检验, 变量与自变量的相关性达到显著水平, 说明它们与光合速率之间的回归关系真实可靠, 是影响光合速率的主要气象因子。

表 1-20 紫花苜蓿净光合速率与气象因素的线性回归结果

变量	回归系数	偏相关系数	标准误	t 值	$P_t > t $
截距	118.399 3		34.403 77	3.441 46	0.041 19
PAR	0.018 87	0.990 66	0.001 84	10.274 83	0.001 97
C _a	0.056 5	0.870 68	0.022 57	2.503 49	0.087 44
RH	-1.437 04	-0.945 72	0.349 19	-4.115 38	0.025 99
T _a	-2.738 76	-0.953 85	0.609 69	-4.492 09	0.020 59

紫花苜蓿光合速率与各气象因子间的简单相关系数只表示在其他气象因子都变化的情况下, 某一因子与光合速率关系的密切程度, 往往不能正确地说明因子间的真正关系, 但偏相关分析可准确地评价出任意两个因子之间的线性相关程度(袁志发和周静芋, 2000)。净光合速率与各气象因子的偏相关系数(表 1-20)表明, 紫花苜蓿净光合速率日变化与 PAR、RH、T_a 的相关关系分别达到了极显著和显著水平, 而上升到了重要位置。但是与 C_a 无显著的相关关系。

通径系数是变量标准化的偏回归系数, 是不带单位的相对数, 表示自变量与因变量之间的有方向的相关系数。根据相关系数的组成效应可将其剖分为各性状的直接效应(直接通径系数)和各性状通过其他性状的间接影响(间接通径系数)两部分, 这两部分的总和恰好等于其相关系数。因此, 通径系数分析能准确地反映出各自变量如何直接和间接地影响因变量(袁志发和周静芋, 2000)。各气象因素对光合速率的通径系数见表 1-21。

表 1-21 各气象因素对光合速率的通径系数

变量	直接作用 P_i	间接作用 ($r_{ij}P_j$)					决策系数 $R^2_{(i)}$
		Σ	PAR	C_a	RH	T_a	
PAR	1.109 38	-0.187 66		-0.144 59	1.284 14	-1.327 21	0.814
C_a	0.223 76	-0.634 83	-0.716 89		-1.076 82	1.158 88	-0.234
RH	-1.634 74	0.986 72	-0.871 45	0.147 39		1.710 78	-0.554
T_a	-1.735 45	2.310 51	0.848 42	-0.149 42	1.611 51		-5.008

表 1-21 表明,对紫花苜蓿光合速率日变化直接影响最大的气象因子是 T_a ,其次是 RH、PAR 和 C_a 。但 RH、PAR 和 C_a 的直接通径系数均不及各自通过 T_a 的间接通径系数,表明这三者对紫花苜蓿光合速率日变化的直接影响小于它们通过 T_a 的间接影响。由此可见 T_a 在光合速率日变化中所起的作用是很大的。虽然 PAR 与 P_a 具有极显著相关性,但是通径分析结果表明 PAR 的直接作用很小,它不是光合速率变化的主要原因,而是引起一天中气温和湿度等变化的主要因素。

决策系数是通径分析中的决策指标,用它可以把各自变量对因变量的综合作用进行排序,以确定主要决策变量和限制变量(袁志发和周静芋,2001)。根据决策系数: $R^2_{(i)} = 2 \cdot P_i \cdot r_{iy} - P_i^2$,计算出各气象因子对光合速率的决策系数(表 1-21),其排序为 $R^2(\text{PAR}) > R^2(C_a) > R^2(\text{RH}) > R^2(T_a)$, $R^2(C_a) < 0$, $R^2(\text{RH}) < 0$, $R^2(T_a) < 0$ 。故 PAR 是主要决策变量, T_a 、RH 和 C_a 为主要限制变量。

(二) 蒸腾速率与气象因素的关系

T_r 与 PAR、 C_a 、RH 和 T_a 的回归分析结果见表 1-22,其线性回归方程为

$$T_r = 8.781 + 0.012\text{PAR} + 0.044C_a - 0.301\text{RH} - 0.391T_a$$

经检验, $F(325.48) > F_{0.01}$, $R=0.9992$, $R^2=0.9984$ 。可见此回归模型可信度达到 99.92%,紫花苜蓿蒸腾速率日变化的变异平方和有 99.84%是由气象因子的日变化造成的。经 F 值检验,因变量与自变量的相关性达到极显著水平,说明这一模型具有较强的生物学意义。

从几个气象因子与蒸腾速率的偏相关系数来看(表 1-22),紫花苜蓿蒸腾速率日变化与 PAR 和 C_a 的相关关系分别达到了极显著正相关,与 RH、 T_a 无显著的相关关系。

由相关系数可知,相对于测定的其他气象因子,PAR 与紫花苜蓿 T_r 日变化的关系是最强的。通径系数分析结果(表 1-23)也表明,对于紫花苜蓿 T_r 日变化直接影响最大的气象因子是 PAR,其次是 RH、 T_a 和 C_a 。但是后者的直接通径系数均不及它们各自通过 PAR 的间接通径系数,表明它们对蒸腾速率日变化的直接影响小于它们通过 PAR 的间接影响。由此可见 PAR 在蒸腾速率日变化中所起的作用是很大的。

表 1-22 紫花苜蓿蒸腾速率与气象因素的线性回归结果

变量	回归系数	偏相关	标准误	t 值	$P_t > t $
截距	8.787 1		10.247 73	0.857 47	0.454 23
PAR	0.011 93	0.997 9	0.000 55	21.811 69	0.000 21
C_a	0.043 95	0.977 39	0.006 72	6.537 22	0.007 28
RH	-0.301 17	-0.898 55	0.104 01	-2.895 54	0.062 73
T_a	-0.390 69	-0.835 62	0.181 6	-2.151 31	0.120 56

各气象因子对蒸腾速率的决策系数（表 1-23）排序为 R^2 (PAR) $> R^2$ (RH) $> R^2$ (C_a) $> R^2$ (T_a)， R^2 (C_a) < 0 ， R^2 (T_a) < 0 。故 PAR 是主要决策变量，其次是 RH，主要限制变量是 T_a 。

表 1-23 各气象因素对蒸腾速率的通径系数

变量	直接作用 P_i	间接作用 ($r_{ij}P_j$)					决策系数 R_{iD}^2
		Σ	PAR	C_a	RH	T_a	
PAR	1.025 75	-0.047 77		-0.164 45	0.393 53	-0.276 85	0.954
C_a	0.254 49	-0.751 11	-0.662 84		-0.33	0.2417 3	-0.318
RH	-0.500 97	-0.281 26	-0.805 75	0.167 63		0.356 86	0.533
T_a	-0.362	1.108 37	0.784 46	-0.169 94	0.493 85		-0.671

三、结论与讨论

(1) 4 种紫花苜蓿的 P_n 日变化曲线呈典型的“双峰”型，第一峰值大于第二峰值。早晨光强和 T_a 低， P_n 也很低，随着 PAR 的增大、 T_a 的升高、气孔的开放，4 种苜蓿叶片 P_n 明显提高，巨人 201、牧歌 401 和新疆大叶在 10:00 左右达到第一个峰值，分别为 $23.17\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $32.7\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $32.53\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，此时叶面入射光强为 $1551.92\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ （对应的自然光强大约为 $1578.83\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， T_a 约为 39°C ，叶温约为 36°C 。Safaa 和 Glenn (1990) 报道苜蓿叶片达到最高光合速率时的温度为 34°C ，Brown 和 Radcliffe (1986) 认为苜蓿顶部叶片光合最适温度为 $25\sim 30^\circ\text{C}$ ，Murata 等 (1965) 报道 $5\sim 30^\circ\text{C}$ 是苜蓿幼苗光合作用的最适温度范围。本试验最高光合速率时的温度与前人报道有差异，这可能与测定时间较长或当时的光照、湿度等环境条件有关。另外由于没有在控温条件下研究温度对苜蓿叶片 P_n 的效应，因此有关紫花苜蓿的最适光合温度范围需要进一步研究。10:00~12:00，4 种苜蓿均处于光合“午休”阶段，此时 PAR 较大， T_a 为 $39\sim 40.36^\circ\text{C}$ ，叶温为 $36\sim 38.44^\circ\text{C}$ ，RH 为 $21.31\%\sim 21.81\%$ ， V_{pd} 达到最大，为 $3.95\sim 4.92\text{kPa}$ ， G_s 降低，限制了光合作用速率。但是在高温低湿胁迫下巨人 201、牧歌 401 和路宝的最小 P_n 依然维持在 $20\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上，表明这 3 个苜蓿品种具有很强的光合能力和对极端高温环境的适应能力。相比之下，新疆大叶

($17.16 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的这种适应能力相对较差。午后 14:00 左右, T_a 达到最大值 (40.46°C 左右), 强光、高温的条件提高了叶片光呼吸 (包括光下的暗呼吸), 这是 P_n 下午的峰值低于上午的峰值的一个重要原因。

(2) 有研究表明, 紫花苜蓿 T_r 日变化呈“双峰”型, 即在上午 9:00~11:00 和下午 15:00~17:00 各出现一个峰值, 尤以花期前较为常见 (陈一鹗和刘康, 1990)。本研究中 4 种苜蓿 T_r 日变化曲线均呈“双峰”型, 峰值出现在 10:00 左右和 14:00~16:00, 中午 12:00 左右出现“午休”低谷。 T_r 午间降低是由于午间高光辐射和高温, RH 明显降低, V_{pd} 增大, 植物叶面部分气孔关闭或缩小, 导致 G_s 变小, T_r 降低。这种现象是植物在进化过程中对自然条件的一种适应, 由此说明这四个品种对不良环境有一定抗性。而 4 个不同苜蓿品种间 T_r 的日变化差异是由其不同的生理特点、气孔构造特点及其自身生长节律决定的。

(3) WUE 是由植物的 P_n 和 T_r 两方面决定的, 即消耗单位重量的水植物所固定的 CO_2 量 (Fischer and Turner, 1978)。WUE 的大小可以反映植物对逆境适应能力的强弱 (刘金祥和麦嘉玲, 2004)。4 种苜蓿在测定当天的 WUE 平均值日变化与 G_s 的日变化趋势有极显著正相关关系 ($R=0.963$)。WUE 在早上 8:00 左右达到全天的高峰, 下午 14:00 左右出现的第二个峰值不明显, 10:00 左右出现低谷。而正午前后气孔全部或部分关闭使 P_n 下降的同时 T_r 也下降 (“午休”现象) 是植物适应中午高温高光强、免受损害的一种适应策略, 也是提高 WUE 的途径之一 (温达志等, 2001)。4 个苜蓿品种的 WUE 没有显著性差异, 其变化范围为 $1.17 \sim 1.36 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$, 与大多数 C_3 植物相比为低, 这与他人在目前 CO_2 浓度下测得的数据类似 (沈康等, 1990)。

(4) G_s 是指植物气孔传导 CO_2 和水的的功能, 它的变化首先影响水分的交换, 其次是 CO_2 的交换, 因此, G_s 的大小对 P_n 和 T_r 均有一定程度的制约, 进而影响水分利用率 (刘庚山等, 2004)。 G_s 下降、气孔关闭限制了气孔的蒸腾强度, 几乎所有的中生和旱生植物都可以通过关闭气孔来适应午间叶片过度蒸腾失水或低水势的土壤环境 (温达志等, 2000)。有关 G_s 变化规律的报道很多, 但都不尽相同, 王玉辉和周广胜 (2000) 认为早晨和傍晚 PAR 低导致羊草 G_s 在早晨和傍晚较低; 温达志等 (2000) 也发现墨西哥玉米、杂交狼尾草和皇草的 G_s 随光强和 T_a 的增加而增加, 正午前后保持一天中的最高值; 项斌等 (1996) 报道, 对紫花苜蓿 G_s 影响最大的环境因子是相对湿度, 从早晨气孔开始开放到 9:00 左右, 无论气孔的开放程度, 还是气孔的开放数量都达到最大。11:00~14:00, 气孔完全处于关闭状态, 下午 15:00 左右气孔重新开放, 但最大开度却比上午的小得多, 到 17:00 左右又处于关闭状态; 而黄振英等 (2002) 发现生长在毛乌素沙地的沙柳, 其 G_s 并没有随光强的增加而增加, 特别是在早晨和傍晚甚至出现了相反的关系, 此时土壤水分亏缺可能是限制 G_s 变化的最主要的环境因子。本研究中 4 种紫花苜蓿 G_s 日变化都以“双峰”形式出现, 8:00~9:00 和 14:00~15:00 各出现一个峰值, 第一个峰值大于第二个峰值, 而 12:00 左右处于低谷, 波动性很大, 这说明 G_s 对环境因子的变化是非常敏感的, 凡是影响植物光合作用和叶片水分状况的各种因素都有可能对 G_s 造成影响。

(5) 相关性分析表明, P_n 和 PAR 与 G_s 均呈显著正相关; T_r 与 P_n 、PAR 呈极显著正相关, 与 RH、 C_i 呈极显著负相关; WUE 与 G_s 呈极显著正相关; 而 G_s 主要受 PAR 的影响。

(6) 对影响苜蓿 P_n 和 T_r 的气象因子分析, 结果表明, 对光合速率日变化直接影响最大的因子是 T_a , RH、PAR 和 C_a 主要是通过 T_a 而间接影响光合速率日变化的; 对蒸腾速率日变化直接影响最大的因子是 PAR, RH、 T_a 和 C_a 主要是通过 PAR 而间接影响蒸腾速率日变化的。对光合蒸腾特性起主要决定作用的因子是 PAR, 主要限制因子是 T_a 。由此可见, 单纯强光不会引起光抑制和中午光合速率降低, “午休”可能主要是高温伴随大气湿度的降低以及 CO_2 浓度的供应不足所致。而蒸腾速率值大小取决于叶肉细胞间隙和大气之间的蒸汽压差额的大小, 而温度是决定这一差额的主要因子, 即使周围大气的相对湿度处于水汽饱和的状态下, 高温致使叶温升高, 使细胞间隙内蒸汽压增大仍能进行蒸腾作用。

第五节 紫花苜蓿草产量与气象因子的关系

苜蓿草产量在年际之间存在着一定的差异, 其原因是多方面的, 如品种、生长年限、施肥、密度、刈割以及气象因子等。气象因子常常是影响产量的较重要因子之一。因此, 对苜蓿的产量进行气候分析, 在生产上是有一定意义的。

一、不同年际、不同茬次、不同秋眠级数苜蓿品种的干草产量分析

2002~2005 年各茬次不同苜蓿品种产量和绝对生长率见表 1-24~表 1-27。从不同年度同一茬草产量分析, 第一茬草产量以 2002 年最高, 2005 年最低, 2003 年高于 2004 年但无显著差异。品种间以新疆大叶和超级 13R 产量最低, 其他品种之间无显著性差异 ($P>0.05$); 第二茬草产量 2002 年最高, 2004 年高于 2003 年但无显著差异 ($P>0.05$); 2004 年品种间无显著性差异 ($P>0.05$)。第三茬产量 2004 年最高, 2002 年最低; 品种间以美国杂交熊和巨人 201 最高, 新疆大叶最低, 其他品种之间无显著性差异 ($P>0.05$)。多重比较表明, 不同年份全年总产量 2002 年 $>$ 2004 年 $>$ 2003 年, 且均达显著水平 ($P<0.05$)。品种间总产量新疆大叶和超级 13R 最小, 其他品种较大, 依次为巨人 201 $>$ 美国杂交熊 $>$ 牧歌 401 $>$ 路宝 $>$ 超级阿波罗, 但是差异均不显著 ($P>0.05$)。

表 1-24 2002 年不同苜蓿品种各茬草产量和绝对生长率

品种	第一茬		第二茬		第三茬		总产量 /(kg·hm ⁻²)
	产量/(kg· hm ⁻²)	绝对生长率 /(kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	产量/(kg· hm ⁻²)	绝对生长率 /(kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	产量/(kg· hm ⁻²)	绝对生长率 /(kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	
新疆大叶	6 436.40bc	91.95	4 392.32b	112.62	1 624.68b	29.01	12 453.40bc
巨人 201	8 228.36ab	117.55	4 900.79ab	125.66	2 384.3a	42.58	15 513.45ab
路宝	7 159.81bc	102.28	5 022.02ab	128.77	1 883.32b	33.63	14 065.15abc

续表

品种	第一茬		第二茬		第三茬		总产量 (kg·hm ⁻²)
	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	
牧歌 401	9 511.54a	135.88	5 605.67a	143.74	1 870.49b	33.40	16 987.70a
超级阿波罗	7 883.43abc	112.62	5 168.4b	132.52	1 839.27b	32.84	14 891.10abc
美国杂交熊	7 442.12bc	106.32	5 999.06a	153.82	2 384.07a	42.57	15 825.25ab
超级 13R	6 327.80c	90.40	4 099.89b	105.13	1 679.89b	30.00	12 107.58c
平均值	7 569.92	108.14	5 026.88	128.89	1 952.29	34.86	14 549.09
比例/%	52.03		34.55		13.42		

注：各列相同字母表示在 5%水平上差异不显著。下同。

表 1-25 2003 年不同苜蓿品种各茬草产量和绝对生长率

品种	第一茬		第二茬		第三茬		总产量 (kg·hm ⁻²)
	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	产量/(kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	
新疆大叶	5 784.83a	79.24	2 402.36b	66.73	1 673.29b	21.45	9 860.48a
巨人 201	6 857.73a	93.94	3 464.14ab	96.23	2 599.18ab	33.32	12 921.06a
路宝	5 519.43a	75.61	2 493.15b	69.25	1 993.43ab	25.56	10 006.01a
牧歌 401	5 979.13a	81.91	2 092.55b	58.13	2 434.31ab	31.21	10 505.99a
超级阿波罗	5 471.53a	74.95	3 304.20ab	91.78	2 278.75ab	29.21	11 054.48a
美国杂交熊	6 790.73a	93.02	2 846.62b	79.07	2 849.76a	36.54	12 487.12a
超级 13R	5 127.53a	70.24	3 993.71a	110.94	1 698.46b	21.78	11 660.69a
平均值	5 932.99	81.27	2 942.39	81.73	2 218.17	28.44	11 213.69
比例/%	52.91		26.24		19.78		

从同一年各茬草产量分析，各年度第一茬草产量均显著高于其他茬次。第一茬产量占总产量的 42.82%~52.91%，第二茬为 26.24%~34.55%，第三茬为 13.42%~19.78%，第四茬为 11.21%。

从绝对生长率看，各年度第一、第二茬的绝对生长速率较大，第三或第四茬绝对生长率迅速减小，但是各茬草产量差异较大。第一茬和第二茬的绝对生长率 2002 年最大，达到 108.14~128.89kg·hm⁻²·d⁻¹，2003 年和 2004 年较稳定，2005 年最低，为 67.07kg·hm⁻²·d⁻¹。第三、第四茬绝对生长速率为 28.44~43.57kg·hm⁻²·d⁻¹。由此可见，不同年度各茬草产量差异并非完全由生育期长短造成，各茬草生长期间的气象因素是主要原因之一。

二、气候因子与苜蓿草产量的关联度分析

本节以 7 个苜蓿品种每年草产量的平均值为代表，分析 2002~2005 年，即生长 2~4 年的苜蓿草产量与气象因子的关系。

表 1-26 2004 年不同苜蓿品种各茬草产量和绝对生长率

品种	第一茬		第二茬		第三茬		第四茬	
	产量 (kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	产量 (kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	产量 (kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² · d ⁻¹)	产量 (kg·hm ⁻²)	绝对生长率 (kg·hm ⁻² · d ⁻¹)
新疆大叶	5 121.21a	74.22	3 148.81a	74.97	2 122.09a	37.23	976.76cd	20.35
巨人 201	5 984.16a	86.73	3 495.44a	83.22	2 844.59a	49.91	1 496.54abc	31.18
路宝	6 454.76a	93.55	3 515.58a	83.70	2 789.11a	49.11	1 976.91a	41.19
牧歌 401	5 684.84a	82.39	3 527.41a	83.99	2 277.61a	39.96	1 688.94ab	35.19
超级阿波罗	5 127.11a	74.31	3 247.47a	77.32	2 510.04a	44.04	1 405.53bc	29.28
美国杂交熊	5 781.95a	83.80	3 516.89a	83.74	2 637.73a	46.28	1 741.4ab	36.28
超级 13R	4 635.87a	67.19	3 801.52a	90.51	2 194.50a	38.50	870.65d	18.14
平均值	5 541.41a	80.31	3 464.73	82.49	2 483.67	43.57	1 450.96	30.23
比例/%	42.82		26.77		19.19		11.21	

表 1-27 2005 年不同苜蓿品种第一茬草产量和绝对生长率

品种	新疆大叶	巨人 201	路宝	牧歌 401	超级阿波罗	美国杂交熊	超级 13R	平均值
产量/(kg·hm ⁻²)	3377.94	5675.29	4813.48	4669.3	5444.53	5959.84	3394.08	4762.07
绝对生长率/(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	47.58	79.93	67.8	65.76	76.68	83.94	47.8	67.07

(一) 苜蓿草产量资料的处理

苜蓿为多年生植物。越冬的苜蓿在春季日平均温度升高到 5℃ 以上时, 开始返青, 在开花期刈割测产。秋季在气温降到 5℃ 以下时, 停止生长。因此, 根据气候资料分析, 苜蓿的生长期为 3~10 月, 计 7~8 个月。在此期间, 苜蓿可刈割 3 或 4 茬。在苜蓿开花期各茬次所测产量的总和, 即为全年产量。苜蓿的产量可以用下式表示

$$y = y_t + y_c \quad \text{或} \quad y_c = y - y_t$$

式中, y 为实际产量; y_t 为时间趋势产量; y_c 为气象因子对产量的贡献, 即气象产量。

由于苜蓿是多年生植物, 它的生长年限可达 10~20 年, 苜蓿的产量和质量随着生长年限的增加逐渐下降。一般情况下, 苜蓿的盛产期只有 6~7 年, 产量最高的时期是播种后的 2~4 年。该试验地实行旱作管理, 试验年限内管理水平基本一致。2001 年建制后 2~4 年内牧草产量基本保持稳定。故无需进行趋势处理, 可以直接使用实际产量相对于气象条件进行统计对比分析。

(二) 灰色关联度分析法

将各年气候因子和产量作为灰色系统, 以产草量为参考数列, 记为 $X_{0(k)}$, $k=1, 2, 3$ 。以 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温 ($^\circ\text{C}$)、降水量 (mm)、日照时数 (h)、平均温度 ($^\circ\text{C}$)、平均最高温度 ($^\circ\text{C}$)、平均最低温度 ($^\circ\text{C}$) 和平均相对湿度 (%) 作为参比数列, 分别记为 $X_{i(k)}$ ($i=1, 2, \dots, N$)。

数据均值化:

$$x_{ij} = x_{ij} / \bar{x}_i; y_{ij} = y_{ij} / \bar{y}_i, \quad i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, 8$$

求绝对差:

$$\Delta_{i(k)} = |X_{0(k)} - X_{i(k)}|$$

求关联系数 $\xi_{i(k)}$:

$$\xi_{i(k)} = [\Delta_{\min i(k)} + \rho \cdot \Delta_{\max i(k)}] / [\Delta_{i(k)} + \rho \cdot \Delta_{\max i(k)}]$$

式中, $\Delta_{\min i(k)}$ 称为二级最小差; $\Delta_{\max i(k)}$ 称为二级最大差; ρ 为分辨系数, 取值 $[0, 1]$, 一般取 $\rho=0.5$ 。

求关联度:

$$r_i = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^n \xi_{i(k)}$$

(三) 第一茬草产量与气象因子的关系

以 2002~2005 年第一茬苜蓿草产量为参考数列, 以 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温 ($^\circ\text{C}$)、降水量 (mm)、日照时数 (h)、平均温度 ($^\circ\text{C}$)、平均最高温度 ($^\circ\text{C}$)、平均最低温度 ($^\circ\text{C}$) 和平均相对湿度 (%) 作为参比数列, 进行关联度分析, 关联度矩阵见表 1-28。

表 1-28 2002~2005 年气候因子与第一茬苜蓿草产量的关联度

关联系数	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	关联度	位次
$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温	0.4488	0.7888	0.8516	0.4308	0.6300	3
降水量	0.4900	0.8259	0.9999	0.4372	0.6883	2
日照时数	0.3394	0.5273	0.3524	0.4988	0.4295	7
平均温度	0.4514	0.7503	0.7760	0.4426	0.6051	4
平均最高温度	0.4239	0.7968	0.7247	0.4477	0.5983	5
平均最低温度	0.3913	0.7854	0.8052	0.3866	0.5921	6
平均相对湿度	0.4892	0.9715	0.6301	0.6725	0.6908	1

从表 1-28 中可知, 第一茬苜蓿草产量与 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、日照时数、平均温度、平均最高温度、平均最低温度和平均相对湿度的关联度分别为 0.6300、0.6883、0.4295、0.6051、0.5983、0.5921 和 0.6908。其排序为: 平均相对湿度 $>$ 降水量 $>$ $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温 $>$ 平均温度 $>$ 平均最高温度 $>$ 平均最低温度 $>$ 日照时数。由于第一茬苜蓿生长季处于早春干旱季节, 因此降水量的多寡对第一茬草产量的影响很大, 而积温条件决定了第一茬草生长季, 对苜蓿草产量也具有较大影响。

(四) 气象因子对第一茬苜蓿草产量的时段效应

在自然条件下, 气象因素是逐日逐旬变化着的, 这种变化过程时刻影响着苜蓿的生长发育及产量形成。为明确气象因素分布与第一茬苜蓿草产量的关系, 各年苜蓿返青后以旬为单位进行顺序编号, 到第一茬刈草期约 7 旬。分别以各单位的平均温度、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、日照时数、平均相对湿度、平均最高温度、平均最低温度、相对湿度为参比数列, 以各年度第一茬苜蓿草产量为参考数列, 进一步分析 3 月至 5 月上旬气候因子与第一茬苜蓿草产量的关联度。

由表 1-29 可知, 3 月至 5 月上旬各旬平均相对湿度与产量的关联度依次为: $R_{3上} > R_{5上} > R_{3中} > R_{4上} > R_{4下} > R_{4中} > R_{3下}$ 。各旬 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温与产量的关联度依次为: $R_{3下} > R_{5上} > R_{3上} > R_{4上} > R_{4中} > R_{4下} > R_{3中}$ 。各旬降水量与产量的关联度依次为: $R_{5上} > R_{4中} > R_{4上} > R_{3中} > R_{3上} > R_{4下} > R_{3下}$ 。各旬日照时数与产量的关联度依次为: $R_{4中} > R_{3下} > R_{5上} > R_{4下} > R_{3中} > R_{4上} > R_{3上}$ 。各旬平均温度与产量的关联度依次为: $R_{3下} > R_{5上} > R_{3中} > R_{4上} > R_{4中} > R_{4下} > R_{3上}$ 。各旬平均最高温度与产量的关联度依次为: $R_{3中} > R_{3下} > R_{4中} > R_{5上} > R_{4下} > R_{4上} > R_{3上}$ 。各旬平均最低温度与产量的关联度依次为: $R_{5上} > R_{4上} > R_{4中} > R_{4下} > R_{3中} > R_{3下} > R_{3上}$ 。

表 1-29 逐旬气候因子与第一茬苜蓿草产量的关联度

旬序	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温		降水量		日照时数		平均温度		平均最高温度		平均最低温度		平均相对湿度	
	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
3 月上旬	0.7379	3	0.6950	5	0.5850	7	0.5701	7	0.5694	7	0.5855	7	0.6983	1
3 月中旬	0.6060	7	0.7020	4	0.6388	5	0.6850	3	0.7242	1	0.7613	5	0.6206	3
3 月下旬	0.7777	1	0.5801	7	0.7766	2	0.7471	1	0.6819	2	0.7267	6	0.5154	7
4 月上旬	0.7131	4	0.7357	3	0.5955	6	0.6761	4	0.6071	6	0.8187	2	0.6436	4

续表

旬序	≥5℃积温		降水量		日照时数		平均温度		平均最高温度		平均最低温度		平均相对湿度	
	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
4月中旬	0.7059	5	0.7510	2	0.8039	1	0.6658	5	0.6631	3	0.8030	3	0.5915	6
4月下旬	0.6826	6	0.6505	6	0.6637	4	0.6489	6	0.6342	5	0.7841	4	0.5998	5
5月上旬	0.7548	2	0.8022	1	0.6699	3	0.7308	2	0.6597	4	0.8237	1	0.6622	2

(五) 再生草产量与气象因子的关系

分别以 2002~2004 年第二、第三茬苜蓿草产量为参考数列,以再生草生长期间的 ≥5℃ 积温、降水量、日照时数、平均温度、平均最高温度、平均最低温度、平均相对湿度作为参比数列,进行关联度分析,关联度矩阵见表 1-30、表 1-31。

表 1-30 气候因子与第二茬草产量的关联度

关联系数	2002 年	2003 年	2004 年	关联度	位次
≥5℃ 积温	0.5630	0.6896	0.7952	0.6826	3
降水量	0.3579	0.5000	0.5798	0.4792	7
日照时数	0.3780	0.9368	0.3985	0.5711	6
平均温度	0.5599	0.5850	0.9937	0.7128	2
平均最高温度	0.5301	0.5777	0.9201	0.6760	4
平均最低温度	0.6661	0.6367	0.9999	0.7676	1
平均相对湿度	0.4956	0.7717	0.6051	0.6242	5

表 1-31 气候因子与第三茬草产量的关联度

关联系数	2002 年	2003 年	2004 年	关联度	位次
≥5℃ 积温	0.9613	0.8015	0.7374	0.8334	5
降水量	0.4674	0.3577	0.6297	0.4850	7
日照时数	0.9351	0.4932	0.4620	0.6301	6
平均温度	0.8027	0.9452	0.8931	0.8803	3
平均最高温度	0.7992	0.9440	0.8899	0.8777	4
平均最低温度	0.8534	0.9989	0.9060	0.9195	2
平均相对湿度	0.9845	1.0001	0.9223	0.9690	1

由表 1-30 可知,第二茬苜蓿草产量与其生长期间的气象因子关联度排序为:平均最低温度>平均温度>≥5℃ 积温>平均最高温度>平均相对湿度>日照时数>降水量。由表 1-31 可知,第三茬苜蓿草产量与其生长期间的气象因子关联度排序为:平均相对湿度>平均最低温度>平均温度>平均最高温度>≥5℃ 积温>日照时数>降水量。由此可见,影响苜蓿再生草的气候因子主要为热量指标,其次为日照时数,降水量对再生草产量的影响是最小的。一般而言,第二、第三茬草的生长处于高温季节,因而相对低温条件有利于苜蓿生长发育,其关联度分析也表明了这一点。

(六) 气象因子对再生草产量的时段效应

第二、第三茬草从上一茬草刈割后到本次刈割之间逐旬进行顺序编号, 第二茬草生长期约 4 旬, 第三茬约 6 旬。分别以第二、第三茬苜蓿草产量为参考数列, 以各单位 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、日照时数、平均温度、平均最高温度、平均最低温度、平均相对湿度为参比数列, 求得气象因子对第二、第三茬苜蓿草产量的关联度 (表 1-32, 表 1-33)。

表 1-32 逐旬气候因子与第二茬苜蓿草产量的关联度

旬序	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温		降水量		日照时数		平均温度		平均最高温度		平均最低温度		平均相对湿度	
	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
1	0.5925	2	0.4831	4	0.7280	2	0.5932	2	0.4991	3	0.5431	4	0.5867	3
2	0.6551	1	0.5614	3	0.9618	1	0.6549	1	0.6104	1	0.6577	2	0.5596	4
3	0.5553	3	0.6208	2	0.4707	4	0.5549	3	0.5439	2	0.6593	1	0.7056	1
4	0.5381	4	0.7168	1	0.5799	3	0.5378	4	0.4752	4	0.6125	3	0.6325	2

表 1-33 逐旬气候因子与第三茬苜蓿草产量的关联度

旬序	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温		降水量		日照时数		平均温度		平均最高温度		平均最低温度		平均相对湿度	
	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
1	0.5698	3	0.4637	6	0.7162	1	0.5699	3	0.7856	1	0.5951	3	0.6106	4
2	0.7378	2	0.8868	1	0.5435	6	0.7379	2	0.7466	2	0.5510	4	0.4532	6
3	0.5411	5	0.6820	4	0.6796	3	0.5412	5	0.6493	4	0.5014	5	0.5135	5
4	0.7749	1	0.8336	2	0.6264	5	0.7749	1	0.7349	3	0.8073	1	0.6340	2
5	0.5666	4	0.5392	5	0.6399	4	0.5666	4	0.5313	6	0.6135	2	0.6317	3
6	0.5193	6	0.6081	3	0.6939	2	0.5193	6	0.6462	5	0.4610	6	0.8122	1

由表 1-32 可知, 第二茬草生长期间各旬 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温对产量的关联度依次为: $R_2 > R_1 > R_3 > R_4$; 各旬降水量对产量的关联度依次为: $R_4 > R_3 > R_2 > R_1$; 各旬日照时数对产量的关联度依次为: $R_2 > R_1 > R_4 > R_3$; 各旬平均温度的关联度依次为: $R_2 > R_1 > R_3 > R_4$; 各旬平均最高温度对产量的关联度依次为: $R_2 > R_3 > R_1 > R_4$; 各旬平均最低温度对产量的关联度依次为: $R_3 > R_2 > R_4 > R_1$; 各旬平均相对湿度对产量的关联度依次为: $R_3 > R_4 > R_1 > R_2$ 。

由表 1-33 可知, 第三茬草生长期间各旬 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温对产量的关联度依次为: $R_4 > R_2 > R_1 > R_5 > R_3 > R_6$; 各旬降水量对产量的关联度依次为: $R_2 > R_4 > R_6 > R_3 > R_5 > R_1$; 各旬日照时数对产量的关联度依次为: $R_1 > R_6 > R_3 > R_5 > R_4 > R_2$; 各旬平均温度的关联度依次为: $R_4 > R_2 > R_1 > R_5 > R_3 > R_6$; 各旬平均最高温度对产量的关联度依次为: $R_1 > R_2 > R_4 > R_3 > R_6 > R_5$; 各旬平均最低温度对产量的关联度依次为: $R_4 > R_5 > R_1 > R_2 > R_3 > R_6$; 各旬平均相对湿度对产量的关联度依次为: $R_6 > R_4 > R_5 > R_1 > R_3 > R_2$ 。

(七) 气象因子与全年产草量的关系及其时段效应

以 2002~2004 年全年干草产量为参考数列, 以 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、日照时数、平均温度、平均最高温度、平均最低温度、平均相对湿度为参比数列, 进行灰色关联分析。关联矩阵见表 1-34。

表 1-34 2002~2004 年气候因子与苜蓿草全年总产量的关联度

关联系数	2002 年	2003 年	2004 年	关联度	位次
$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温	0.6723	0.8727	0.7563	0.7671	3
降水量	0.3948	0.4055	0.9548	0.5850	6
日照时数	0.4482	0.5913	0.3399	0.4598	7
平均温度	0.6516	0.7044	0.9129	0.7563	5
平均最高温度	0.7562	0.7674	1.0001	0.8413	1
平均最低温度	0.7733	0.7534	0.9855	0.8374	2
平均相对湿度	0.6619	0.7528	0.8599	0.7582	4

由表 1-34 可知, 对苜蓿全年干草产量影响较大的气候因子是平均最高温度、平均最低温度、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温, 其次是平均相对湿度、平均温度、降水量, 日照时数对苜蓿全年产量的影响最小。由于全年高温季节正处于苜蓿第二、第三茬草生长期间, 高温不利于第二、第三茬草产量, 从而影响苜蓿全年的产草量, 而相对低的温度有利于第二、第三茬草产量及全年产草量的提高, 这从其关联度分析也得到证实。

为了进一步分析苜蓿主要生长期 3~8 月的气象条件对苜蓿全年产草量的影响, 分别以 2002~2004 年苜蓿全年产草量为参考数列, 以 3~8 月逐月平均温度、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、降水量、日照时数、平均温度、平均最高温度、平均最低温度、平均相对湿度为参比数列, 进行关联分析。关联矩阵见表 1-35。

表 1-35 逐月气候因子与苜蓿草全年总产量的关联度

月份	$\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温		降水量		日照时数		平均温度		平均最高温度		平均最低温度		平均相对湿度	
	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次	关联度	位次
3	0.8182	1	0.4672	6	0.6892	3	0.7879	1	0.7141	2	0.5189	6	0.5487	4
4	0.5133	5	0.6657	2	0.6331	4	0.5173	5	0.4789	5	0.6087	5	0.5700	3
5	0.4876	6	0.6526	3	0.7358	1	0.4914	6	0.4656	6	0.6402	4	0.7819	1
6	0.5568	4	0.7221	1	0.7250	2	0.5611	4	0.5924	4	0.7952	1	0.6669	2
7	0.6485	3	0.5701	4	0.4915	6	0.6536	3	0.7033	3	0.7207	2	0.5390	6
8	0.7169	2	0.4872	5	0.5789	5	0.7225	2	0.7769	1	0.7013	3	0.5427	5

由表 1-35 可知, 全年苜蓿干草产量与各月 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温的关联度依次为: $R_3 > R_8 > R_7 > R_6 > R_4 > R_5$; 与各月平均温度的关联度依次为: $R_3 > R_8 > R_7 > R_6 > R_4 > R_5$; 与各月平均最高温度的关联度依次为: $R_8 > R_3 > R_7 > R_6 > R_4 > R_5$; 与各月平均最低温度的关联度依次为: $R_6 > R_7 > R_8 > R_5 > R_4 > R_3$; 与各月降水量的关联度依次为: $R_6 > R_4 >$

$R_5 > R_7 > R_8 > R_3$; 与各月日照时数的关联度依次为: $R_5 > R_6 > R_3 > R_4 > R_8 > R_7$; 与各月平均相对湿度的关联度依次为: $R_5 > R_6 > R_4 > R_3 > R_8 > R_7$ 。

三、结论与讨论

(1) 紫花苜蓿全年总产草量在种植后的第二年, 即 2002 年最高, 其次为 2004 年, 最低为 2003 年。各年度苜蓿第一茬产量占总产量的 42.82%~52.91%, 第二茬为 26.24%~34.55%, 第三茬为 13.42%~19.78%, 第四茬为 11.21%。第一茬草产量以 2002 年最高, 2005 年最低, 2003 年和 2004 年无显著差异; 第二茬草产量 2002 年最高, 2004 年和 2003 年无显著差异 ($P > 0.05$); 第三茬产量 2004 年最高, 2002 年最低。

(2) 各年度第一、第二茬的绝对生长速率较大, 第三、第四茬绝对生长率迅速减小, 但各茬草产量差异较大。这主要是由生育期长短和各茬草生长期间的气象因素变化造成的。表 1-36 表明, 随着第一茬草到第三茬草日平均气温的升高, 产量反而减少。第一茬草生长期温度较低, 土壤底墒好, 绝对生长率较高, 生长期较长, 产量高。如果第一茬温度为当地苜蓿生长的适宜温度, 则第二、第三茬温度已超过适宜温度, 且生长期较短, 不利于干物质的积累, 是导致产量下降的重要因子之一。第二和第三茬平均温度接近, 但绝对生长率相去甚远, 因此除了温度对苜蓿产量的影响外, 降水和日照也是影响产量的因素之一。日照时间长, 降水量居中的第一茬产量较高; 而日照时间短, 降水量偏多的第三、第四茬产量较低。尤其是 2003 年第三茬生长期遇到雨季, 日照时间最短, 生长期长, 倒伏落叶现象严重, 品质较低。 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温以第三茬最高, 这可能是该期雨季影响导致生长期延长。

表 1-36 2002~2005 年不同茬次生长期内的气象条件

茬次	年份	天数	$\geq 5^\circ\text{C}$ 积温/ $^\circ\text{C}$	降水/mm	日照/h	平均温度/ $^\circ\text{C}$
第一茬	2002	70	877.46	73.06	187.50	12.61
	2003	73	866.00	69.50	190.70	12.16
	2004	69	927.30	68.90	367.60	13.70
	2005	71	1099.80	86.10	389.80	15.52
第二茬	2002	39	994.85	103.00	106.10	25.51
	2003	36	891.20	26.80	110.40	24.76
	2004	42	936.30	37.10	180.10	22.29
第三茬	2002	57	1455.50	76.91	103.10	25.54
	2003	78	1802.60	526.10	58.00	23.11
	2004	56	1417.20	217.20	219.80	25.31
第四茬	2004	48	829.30	130.90	185.70	17.28

(3) 气象因子对第一茬草产量影响最大的为平均相对湿度, 其次是降水量和 $\geq 5^\circ\text{C}$ 积温, 日照时数的影响最小。其中, 平均相对湿度以 3 月上中旬对产量的影响最大, 说明大气干燥和土壤干旱是同步的; 降水量以 5 月上旬和 4 月中上旬影响最大。5 月上旬

是苜蓿开花比较集中的时期,降水对花序形成和刈割都有很大影响。4月中旬是苜蓿由营养生长向生殖生长转变的关键时期,降水量直接影响苜蓿植株的个体发育和生长中心的转移。4月上旬是苜蓿分枝形成的时期,降水促进苜蓿分枝生长,形成丰产株型结构; $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温尤其以3月下旬、5月上旬和3月上旬的热量资源不足,成为限制苜蓿产量的主要因素。3月下旬积温高加速苜蓿开始分枝生长,使生物量进入快速生长期,5月上旬积温影响苜蓿花絮的形成,3月上旬积温影响苜蓿的返青生长;日照时数的影响以4月中旬、3月下旬和5月上旬影响最大。4月中旬,苜蓿由营养生长进入生殖生长阶段需要适当光照的连续处理。3月下旬,苜蓿分枝形成前期,长日照有利于苜蓿的伸长和长粗,促进干物质积累。5月上旬有充足的光照,对花的形成十分重要,有利于高产,提高收获品质。

(4) 气象因子对第二茬草产量影响较大的是平均最低温度、平均温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温,其次是平均最高温度,降水量的影响最小。这说明第二茬草生长期间的平均最低温度和平均温度($16.09\sim 20.82^{\circ}\text{C}$ 和 $22.29\sim 25.51^{\circ}\text{C}$) 在适宜生长的温度范围内,促进苜蓿生长发育和干物质积累。据有关资料报道,紫花苜蓿积极生长期的温度范围为 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$,昼夜适宜温度为 $15\sim 25^{\circ}\text{C}/10\sim 20^{\circ}\text{C}$ (Brown and Radcliffe, 1986)。而 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温高低决定了第二茬草生长期的长短,直接影响苜蓿产量。因此,对第二茬产量影响最大的主要是温度指标。其中,最低温度和最高温度以第一茬草刈后的第3旬(现蕾到开花期)、第2旬(分枝期)对产量的影响最大,平均温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温以第1旬(萌发期)、第2旬(分枝期)对产量的影响最大。日照时数以第2旬、第1旬影响最大;降水量以第3旬、第4旬,即现蕾到开花期影响最大。

(5) 气象因子对第三茬草产量影响最大的为平均相对湿度、平均最低温度、平均温度,其次是平均最高温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、日照时数,降水量的影响最小。其中平均相对湿度以第二茬草刈后的第6旬、第4旬、第5旬影响最大。第4旬、第5旬、第6旬处于现蕾到开花期,平均相对湿度过大不利于花序形成;平均最低温度以第4旬、第5旬和第1旬影响最大,平均温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温均以第4旬、第2旬、第1旬的影响最大,由此可见,温度指标主要影响第4旬、第5旬和第2旬、第1旬,即现蕾到开花期和萌发到分枝期的温度指标对苜蓿产量的影响最大;日照时数以第1旬、第6旬、第3旬影响最大,即苜蓿的萌发期、开花期和分枝至现蕾期的日照长短对苜蓿的产量高低影响最大;降水量以第2旬、第4旬、第6旬影响最大,即分枝期、现蕾期和开花期的降水量影响最大。

(6) 气象因子对全年产草量影响以热量资源为优势因素,即平均最高温度、平均最低温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温,其次是平均相对湿度,日照时数的影响最小。其中,平均最高温度以8月、3月、7月和6月对全年产草量的影响较大;3月最高温度为 $13.49\sim 15.66^{\circ}\text{C}$,有利于苜蓿生长发育。6月、7月、8月3个月是高温季节($25.69\sim 32.37^{\circ}\text{C}$),高温促使苜蓿早衰,直接影响产量;平均最低温度以6月、7月和8月的影响最大,温度范围为 $18.74\sim 22.01^{\circ}\text{C}$,有利于苜蓿产量的形成;综合来看,7月、8月两个月温度较高,昼夜温差较小,苜蓿生长速率快,干物质积累较少,不利于产量的形成。 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温和平均温度以3月、8月、7月和6月对产量的影响最大。降水量以6月、4月、5月对产量的影响最大,降水有利于产量的增加;日照时数以5月、6月、3

月对产量的影响最大。

(7) 在气象因子与干草产量的分析中, 采用了多个温度指标, 如 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温、平均温度、平均最高温度、平均最低温度, 而这些温度指标具有密切的相关性, 为了防止温度指标过多导致多重共线性, 分析苜蓿生长期间任一时段各气象要素对苜蓿干草产量的影响程度, 找出相关程度大且影响时期又一致的因子用于定量分析。

(8) 根据以上结论, 在苜蓿生长季中, 早期应立足于促早栽培, 通过秸秆覆盖、松土、节水灌溉等措施弥补 3 月光热资源的不足和 4 月、5 月、6 月水分对产量的制约。晚期应立足于充分利用光、热、水资源, 防止早衰, 适时收获, 减少不利气候因素对苜蓿生长发育的影响, 争取苜蓿高产。针对每一茬草, 应根据气象因素对每一茬草产量的重要性及其时段效应采取相应的措施, 以达到高产为目标。

(9) 灰色关联度分析具有样本容量需求量少(最少 3 个数据), 数据不需要有规律性分布形式, 计算方法简便、工作量少, 定量分析结果与定性分析结果一致, 精准度高, 适用范围广等特点。范青慈和李希来(2003)、张静等(1996)、康志雄和邹达明(1993)等用此法研究了牧草和油茶产量与气候因子的关系, 得出了准确可靠的结果。本节虽然在分析样本的数量上有一定的局限性, 但对影响苜蓿产量的气候因素作定量化分析提出了用灰色关联理论进行关联分析的一种思路, 是对苜蓿生长的气候生态条件进行量化研究的一种尝试。

第六节 紫花苜蓿地土壤水分与产草量的研究

苜蓿是一种耗水力极强的豆科牧草, 平均耗水量为 800~900mm (耿华珠, 1995), 对种植区土壤水分平衡产生一定的影响。因此紫花苜蓿的产量形成与生育期土壤水分保证程度关系尤为密切。有关苜蓿与水分的关系问题国内外已有很多的相关报道, 大都从叶面蒸腾量及根系的吸水规律等生理特性上进行分析, 并且在不同地区研究了苜蓿对种植区水分平衡的影响(李桂荣, 2003; 韩仕峰, 1991; Jame et al., 1998; Bauder et al., 1987; Fairbourn, 1982)。旱作条件下, 牧草的生长主要依赖于自然降水, 而自然降水对牧草的水分供应又需要依赖土壤来加以调节。因此, 深入研究紫花苜蓿水分变化规律, 对于适时、适地种草, 充分利用有限水资源, 调节土壤水分状况以及提高苜蓿产草量具有重要意义。

本研究紫花苜蓿采用旱作种植模式, 试验地点为陕西杨凌西北农林科技大学农作一站, 水分测定采用北京核子仪公司生产的 CNC503B (DR) 智能中子水分仪和土钻采样烘干法结合进行。试验区地势平坦, 试验田内中子管理深 5m, 用中子仪法每隔 20cm 测定地下 20~500cm 土层的水分, 地表 20cm 内采用土钻采样、烘干法进行测定; 紫花苜蓿的地上生物量测定在初花期采用样方收割法。

一、苜蓿耗水规律

(一) 生育期耗水规律

苜蓿植株蒸腾和株间土壤蒸发的总耗水量是苜蓿种植区域水分平衡的主要支出部

分,而自然降水、灌溉等是土壤水分补充的重要形式。紫花苜蓿通过根系从土壤中吸收大量的水分,除满足其机体正常机能所需要和营养物质的运转输送之外,绝大部分消耗于叶面蒸腾作用和植株间的土壤蒸发。这些在紫花苜蓿整个生育周期或者某一发育期的植株蒸腾和株间土壤蒸发的实际蒸散量即苜蓿的耗水量,也称蒸散量。

紫花苜蓿耗水量采用土壤水分平衡方程计算。土壤水分平衡方程如下

$$ET = R + I + N - D - \lambda + \Delta W$$

式中, ET 为蒸散量(耗水量); R 为降水量; I 为灌溉量; N 为地下水上升进入该层的水分; D 为渗漏到下层的水分; λ 为地表径流; ΔW 为该时段开始与终止时的土壤水分差值。

由于本研究紫花苜蓿采用旱作种植模式,试验区地势平坦,土壤疏松,地表径流量趋近于 0。同时土层深厚,地下水埋深 80m,难以上移补给。在苜蓿种植地,多雨年份降水入渗深度不超过 2m(李玉山,2002),而本研究深度为 5m,无渗漏。故上式中的 I 、 N 、 D 、 λ 四部分均可忽略不计,则上式可以简化为

$$ET = R + \Delta W$$

根据简化后的土壤水分平衡方程,以 2004 年观测数据为例,计算试验区内 7 个苜蓿品种 5m 深土层不同生育期 and 不同茬次的耗水量,用以分析 4 年生苜蓿耗水的一般规律。

由表 1-37 可以看出,由于苜蓿品种不同,所处的生育阶段及气温、降水条件不同,耗水量不同。在旱作栽培条件下,苜蓿生长所需的水分主要来源于自然降水,耗水与降水之间存在差值,所缺水分由土壤储水量提供。例如,分枝到现蕾降水 12.8mm,耗水 34.36mm,所缺的 21.56mm 水分完全由土壤水分提供;降水充沛时,在满足苜蓿耗水后,多余的水分被储存到土壤中。返青到分枝降水 41.3mm,而此期间苜蓿耗水 30.77mm,多余的 10.53mm 水分被储存到土壤中。因此,土壤水分起到调节牧草耗水的作用。

表 1-37 2004 年第一茬不同苜蓿品种不同阶段的耗水量

生育阶段	返青—分枝 (3-10~4-10)		分枝—现蕾 (4-10~4-24)		现蕾—开花 (4-24~5-10)		返青—开花 (3-10~5-10)	
	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm·d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm·d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm·d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm·d ⁻¹)
新疆大叶	39.70	1.2805	31.67	2.2623	27.35	1.7091	98.72	1.6183
巨人 201	29.49	0.9511	34.14	2.4385	26.81	1.6756	90.44	1.4825
路宝	37.93	1.2236	32.21	2.3006	28.10	1.7560	98.24	1.6105
牧歌 401	31.48	1.0154	28.88	2.0632	31.31	1.9571	91.67	1.5029
超级阿波罗	21.98	0.7091	40.49	2.8924	35.28	2.2051	97.77	1.6026
美国杂交熊	26.66	0.8601	33.07	2.3619	32.92	2.0576	92.65	1.5189
超级 13R	28.12	0.9071	40.04	2.8598	26.92	1.6823	95.08	1.5586
平均值	30.77	0.9924	34.36	2.4541	29.81	1.8633	94.94	1.5563
比例/%	32.41		36.19		31.40		100	
天数	31		14		16		61	
降水量/mm	41.3		12.8		14.8		68.9	

注:表中日期表示方法为月-日,后同。

2004 年第一茬苜蓿从返青至开花期,耗水量平均为 94.94mm,耗水速率为 $1.5563\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中,从返青到分枝,尽管土壤中有冬春积雪融水等自然降水蓄积,但由于气温较低,植株生长缓慢,植株个体以及叶面积系数相对较小,不能充分覆盖地面,土壤水分消耗以株间土壤蒸发为主,31 天耗水量为 30.77mm,占该茬总耗水量的 32.40%,日均水分消耗量为 $0.9924\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;从分枝到现蕾,随着气温升高和春季降水的促进,紫花苜蓿进入旺盛生长期,植株茎叶的覆盖面增大,株间蒸发大大降低,叶面蒸腾显著增加,耗水量和耗水速度达到该茬苜蓿的最大值,14 天耗水量平均为 34.36mm,占该茬总耗水量的 36.19%,日均水分消耗量为 $2.4541\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;现蕾后紫花苜蓿由营养生长过渡到了生殖生长,茎叶生长迅速并达到了最大值,加之气温较高,紫花苜蓿生长旺盛,16 天内耗水平均 29.81mm,占该茬总耗水量的 31.40%,日均水分消耗量为 $1.8633\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。开花期进行第一次刈草后,再经一次萌发、分枝、现蕾、开花刈草等过程,各生育期耗水量重复前述趋势,由于气温较高,降水相对较多,各生育期进程明显比第一茬缩短,耗水量增大。

由表 1-38 可以看出,2004 年全生长期耗水量为 575.58mm,耗水速率为 $2.5811\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中第一茬苜蓿耗水量最低,61 天内耗水量为 94.93mm,占全生长期耗水的 16.49%,日均耗水速率为 $1.5563\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;第一茬苜蓿刈割之后,第二茬苜蓿萌发并完成其生育期,由于气温相对较高,苜蓿生长迅速,在短短的 44 天内即先后完成分枝、现蕾达到初花刈割时期,期间共耗水 103.50mm,占全生长期耗水的 17.98%,日均耗水量 $2.3523\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第一茬和第二茬紫花苜蓿生长期间降水量小于耗水量,因此土壤含水量日趋下降,进而影响第三茬苜蓿的萌发生长,同时第三茬苜蓿生长期间阴雨天较多,尽管雨热同期,第三茬紫花苜蓿从萌发到初花刈割的生长期长达 61 天,期间共耗水 232.44mm,日均 $3.8105\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,达到了年内生长耗水量的最大值;第四茬紫花苜蓿 57 天耗水 144.70mm,日均耗水速度 $2.5386\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第三茬、第四茬紫花苜蓿生长期处于雨季,降水量大于耗水量,土壤墒情得以恢复。

表 1-38 2004 年不同茬次苜蓿耗水量

茬次	第一茬 (3-10~5-10)		第二茬 (5-10~6-23)		第三茬 (6-23~8-23)		第四茬 (8-10~10-20)		生长期 (3-10~10-20)	
	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm· d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm· d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm· d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm· d ⁻¹)	耗水量 /mm	耗水速度 /(mm· d ⁻¹)
新疆大叶	98.71	1.6183	96.55	2.1942	222.56	3.6485	139.11	2.4406	556.93	2.4975
巨人 201	90.43	1.4825	113.38	2.5769	240.25	3.9386	138.47	2.4293	582.54	2.6123
路宝	98.24	1.6105	115.10	2.6159	224.71	3.6837	148.01	2.5967	586.05	2.6280
牧歌 401	91.68	1.5029	92.36	2.0992	237.68	3.8964	152.52	2.6757	574.24	2.5751
超级阿波罗	97.76	1.6026	99.66	2.2649	231.46	3.7945	149.94	2.6306	578.82	2.5956
美国杂交熊	92.65	1.5189	94.29	2.1431	234.14	3.8384	144.37	2.5327	565.45	2.5357
超级 13R	95.07	1.5586	113.17	2.5720	236.29	3.8736	140.51	2.4650	585.03	2.6235
平均值	94.93	1.5563	103.50	2.3523	232.44	3.8105	144.70	2.5386	575.58	2.5811
比例/%	16.49		17.98		40.38		25.14		100	
天数	61		44		61		57		223	
降水量/mm	68.9		39.5		217.2		168.6		494.2	

由表 1-38 还可以看出降水和温度与苜蓿耗水量和耗水速度的关系。2004 年全年总降水为 551.5mm, 苜蓿从返青到最后一次刈割全生长期内耗水量为 575.58mm, 就其全年(包括冬眠期)耗水量来说, 耗水量远大于自然降水量, 土壤水分处于严重负平衡状态, 其后果将引起深层土壤干燥化。再对比苜蓿各生育期内降水量与耗水量的适宜程度, 其相差很大, 有的亏缺, 有的盈余。基本上是耗水量随着降水量的增加而增加, 如第三、第四茬降水量较多, 耗水量也较高, 相反, 第一、第二茬降水量小, 其耗水量也较低。这主要是因为大气降水增加了土壤湿度, 加大了株间蒸发, 而且降水量使植株供水充分, 生长旺盛, 叶面蒸腾作用加强, 增大了耗水强度。因此, 对于关中地区旱作农业来说, 降水的多寡程度和季节性分配的多少直接影响着各生育期耗水量的大小。

从第一茬到第三茬, 随着温度的升高, 耗水量和耗水速率增大。第一茬苜蓿生长期间的气温低, 日平均温度为 14.78℃左右, 61 天内耗水总量和耗水速率最低; 而第二茬苜蓿生长期间日平均温度为 22.45℃左右, 其萌发和生长发育均比较快, 在短短的 44 天时间内即达到了初花刈割期, 其耗水总量和耗水速率增大; 第三茬苜蓿生长期间的平均温度为 25.72℃左右, 由于雨季的影响生育时间较长, 61 天内耗水量和耗水速率达到一年中的最大值。第四茬苜蓿生长期的日平均温度为 17.75℃左右, 气温下降抑制了苜蓿的生长速度, 影响其现蕾和开花, 耗水量和耗水速率迅速下降。这是因为温度升高, 大气相对湿度降低, 在一定程度内植株气孔充分开放而促进了叶面蒸腾。同时, 温度的升高加剧土壤水分的蒸发。

(二) 苜蓿的耗水系数

牧草地的株间蒸发随着植株叶面积的增加而减少, 植株的蒸腾则随着植株叶面积的增加而增加。植株蒸腾在牧草耗水量中占有很大的比例, 随着牧草叶面积的加大和产量的提高, 其耗水量也有所增加。为了分析苜蓿生产 1g 干物质所需的水分克数, 本节用耗水系数来表示这种关系, 单位为 $g \cdot g^{-1}$ 。其公式为

$$ET_0 = Y/W$$

式中, ET_0 代表苜蓿实际耗水系数; Y 为苜蓿干物质产量; W 为 5m 深土层实际耗水量。2004 年不同苜蓿品种不同茬次的耗水系数见表 1-39。

表 1-39 不同茬次苜蓿品种的耗水系数

茬次	第一茬	第二茬	第三茬	第四茬	全生长期
新疆大叶	192.76	306.61	1048.78	1424.21	489.87
巨人 201	151.12	324.37	844.60	925.26	421.50
路宝	152.19	327.39	802.78	748.70	397.42
牧歌 401	161.26	261.85	1043.55	903.02	435.73
超级阿波罗	190.67	306.87	922.14	1066.80	470.96
美国杂交熊	160.24	268.12	887.67	829.02	413.40
超级 13R	205.08	297.69	1076.72	1613.80	508.61
平均值	173.33	298.99	946.61	1072.97	448.21

由表 1-39 可知,全生长期内苜蓿的耗水系数平均为 448.21。其中,不同品种生长期耗水系数以超级 13R、新疆大叶和超级阿波罗最大,路宝最小。各品种耗水系数在不同茬次间表现一致,呈现由低到高的趋势。第一茬耗水系数最低,平均为 173.33;第三茬和第四茬较高,分别为 946.61、1072.97;第二茬居中,平均为 298.99。可见,产量高,耗水系数小,而产量低,耗水系数大。

二、苜蓿地土壤水分变化规律

土壤是植物生长的载体,同时也是植物水分、养分供给和缓冲的源泉和场所。对于旱作雨养农田来讲,紫花苜蓿等植物正是通过吸收土壤接纳的自然降水而获得其生长发育所必需的水分,因此,植物通过耗水降低土壤含水量和自然降水增加土壤含水量两者间的消长变化在土壤水分变化上得以体现。

(一) 不同苜蓿品种草地的土壤水分变化

2004 年不同苜蓿品种草地各茬次 5m 深土壤水分变化如图 1-11 所示。从图 1-11 中可知,在各生育阶段,超级 13R、美国杂交熊、超级阿波罗三条曲线在 2m 以下明显向

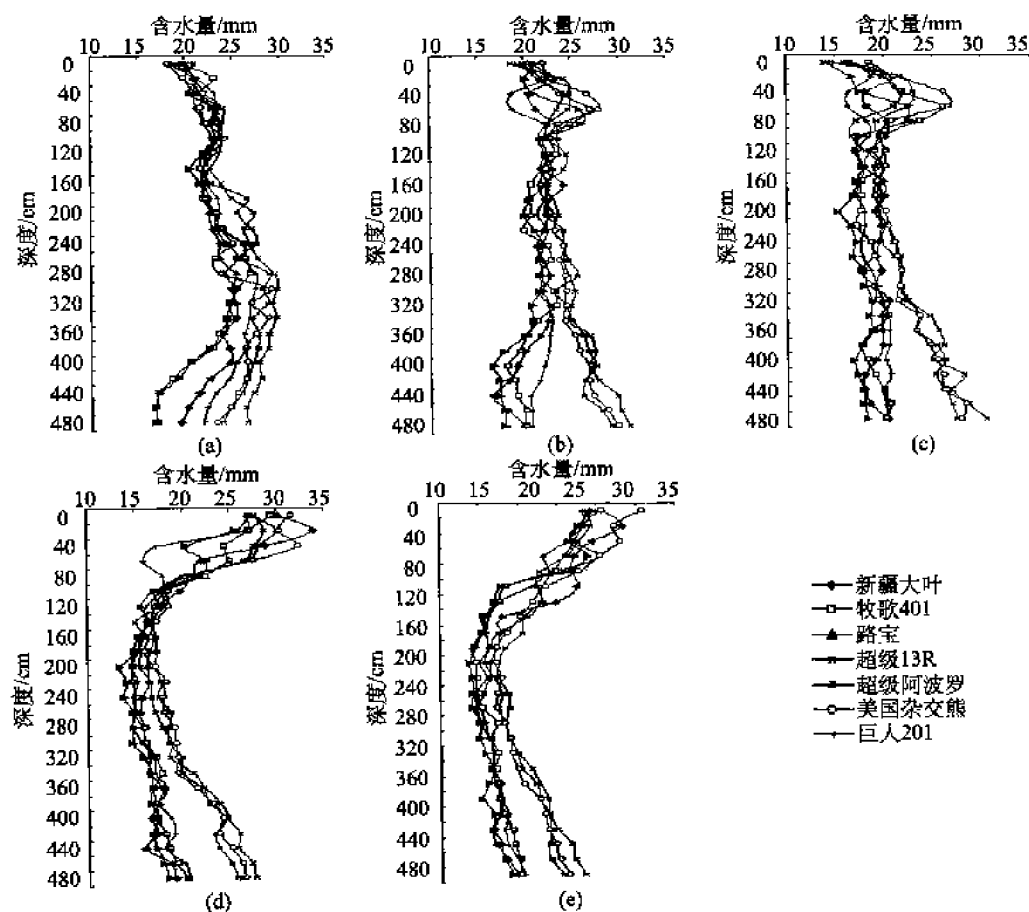


图 1-11 2004 年不同苜蓿品种草地各茬次的土壤水分变化

(a) 返青期; (b) 第一茬收获期; (c) 第二茬收获期; (d) 第三茬收获期; (e) 第四茬收获期

右偏移,而2m以内无明显偏移现象。由此可见,这3个品种5m深土壤含水量明显高于其他品种,尤其2m以下土壤含水量较高,这与其根系分布深度有关。同样,路宝、牧歌401、新疆大叶和巨人201的含水量曲线在2m以下明显向左偏移,尤以路宝、牧歌401偏移较为显著。因此这4个品种5m深土壤含水量明显低于其他品种,尤其2m以下土壤含水量较低。各茬次不同苜蓿品种草地5m深土壤含水量均表现为超级13R、超级阿波罗、美国杂交熊较高,其次为新疆大叶和巨人201,牧歌401、路宝最低。

(二) 不同生育阶段土壤水分的变化规律

各苜蓿品种草地在不同生育阶段土壤水分含量的平均值如图1-12所示。且随着生育阶段的推进,降水量和耗水量的相对差值(土壤水分亏缺)逐渐增大,土壤水分储量日趋降低,3月10日5m深土壤水分含量为593.597mm,4月10日(分枝期)为604.13mm,4月17日(分枝末期)为595.15mm,4月24日(现蕾期)为584.00mm,5月10日(初花期)为568.99mm。可见,3月10日~4月10日,由于降水较多(41.3mm),耗水较少(30.76mm),多余的10.54mm水分被储存到土壤中,土壤水分含量增大。在以后的各阶段,由于耗水多于降水,土壤水分一直处于亏缺状态,土壤含水量不断降低。

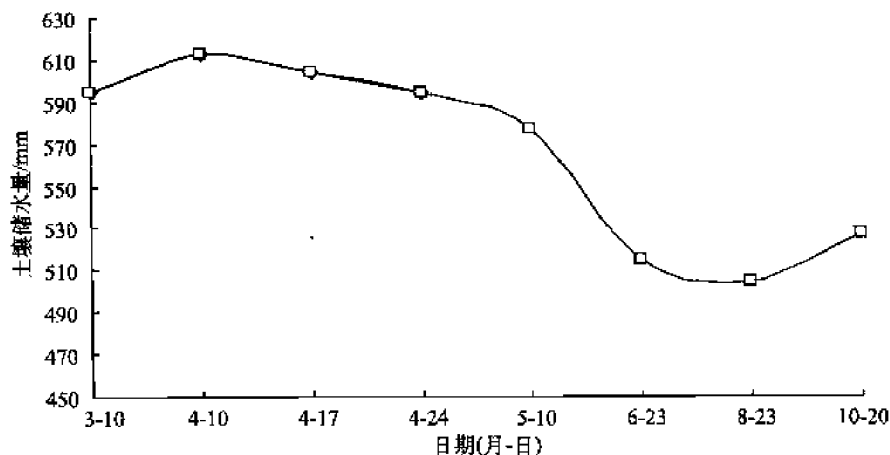


图 1-12 苜蓿不同生育阶段土壤储水量变化趋势

苜蓿地全年土壤储水量变化可以划分为3个阶段(图1-12)。

春季失墒期:3月10日苜蓿返青至6月23日第二茬苜蓿开花期,此期降水较少,只占全年降水的19.65%,5m深土层水分由593.60mm下降到504.99mm,日均失墒量为0.84mm。

夏季波动变化期:紫花苜蓿处于第三茬生长期(6月23日到8月23日),全年39.38%的降水集中于此时期,因此该茬紫花苜蓿地土壤水分的波动变化比较剧烈。7月正处在第二茬草刈后的再生期,苜蓿耗水量相对较少,降水较多,因而会出现明显的增墒效应。而8月下旬处于苜蓿开花期,耗水量最大使土壤水分出现低谷(失墒),但由于此期的强降水对土壤水分的补给作用,扭转了土壤水分储水量持续下降的趋势,土

壤储水量由于盈余而出现回升趋势。

秋季增墒期：从8月23日到10月20日，第四茬紫花苜蓿生长逐渐停止。此时温度逐渐降低，降水增多，占全年降水的30.57%，耗水量减小，土壤含水量逐渐增大。5m深土层水分由489.75mm上升到568.99mm，日均增墒量为0.42mm。

(三) 土壤水分的垂直变化规律

土壤储水量是土壤接纳自然降水等水分补给和蒸散水分支出等水分收支处于某种状态的土壤水分含量。为了反映旱作种植模式下4年生苜蓿地土壤水分垂直变化情况，本节采用在研究土壤水分垂直变化中常用的变异系数法来分析5m深土层水分的垂直变化(韩仕峰, 1992)。根据各茬次水分变化计算所得的变异系数, 可将土壤水分的垂直变化划分为4个不同的层次: 活跃层(0~60cm)、过渡层(60~140cm)、次活跃层(140~420cm)、稳定层(>420cm), 如图1-13所示(各苜蓿品种草地在不同生育阶段土壤水分含量的平均值)。

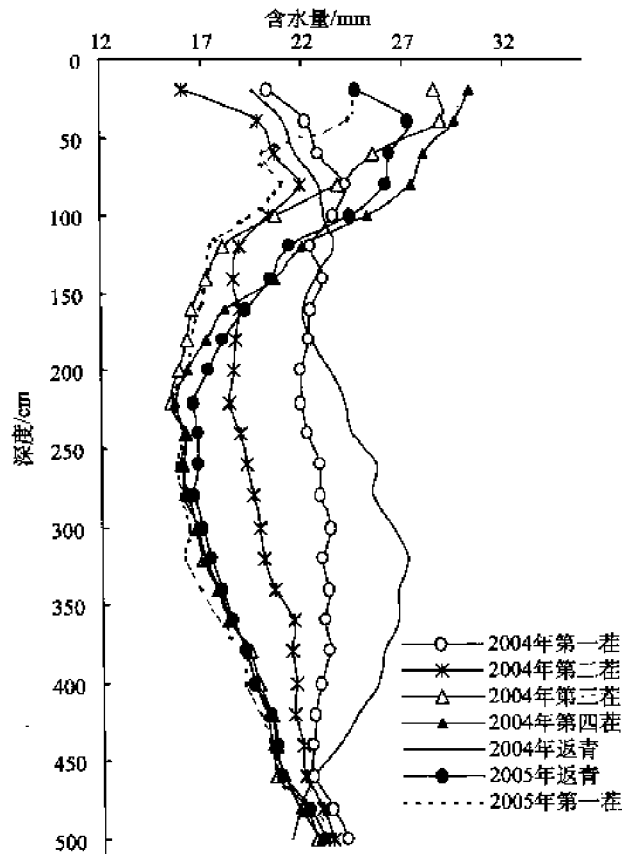


图1-13 苜蓿地5m深土层土壤含水量的垂直变化

0~60cm是活跃层, 土壤水分变异系数最大, 为12.75%~26.98%。该层受降水影响、苜蓿生长及人类活动等因素影响较大, 是苜蓿根系的集中分布层, 同时又是土壤水分交换的活动层, 自然降水通过表层向下渗透, 下层水分又通过毛细管作用向上补给

表层。因此，水分交换最为活跃，增墒与失墒变化剧烈，干湿变化明显。

60~140cm 是浅层与深层水分交替供应的过渡层，土壤相对比较紧实，侧根分布相对较少。当浅层水分亏缺时，深层水分通过毛细管作用补充给浅层；当浅层水分盈余时，又通过重力作用渗透蓄存到深层，因此，该层水分含量变化相对较小，土壤水分变异系数为 8.77%~12.35%。

140~420cm 属于次活跃层，土壤水分变异系数较大，为 11.55%~21.38%。春季该层将水分输送给上层，雨季将自然降水收墒储存到该层。由于苜蓿根系穿过较紧实的过渡层后，在该层产生较多的侧根。因此，该层成为苜蓿生长水分补给的又一重要层次。该土层储水量多寡对苜蓿生长发育及生产潜力的发挥起着重要作用。

420cm 以下是稳定层，土层水分含量变异系数很小，为 3.35%~8.50%，基本处于稳定状态，即水分相对稳定层。

整体上看，土壤水分含量在 200cm 以内变化较大，200cm 以下储水量下层高于上层，这与根系的分布有关。

就 2004 年全年四茬紫花苜蓿土层水分含量的变化而言，从返青到第三茬收获，整个土层的水分含量几乎平行向左移动，说明苜蓿对不同深度的土壤储水具有类似的利用能力。而第三茬和第四茬紫花苜蓿生长期降水量超过了耗水量并使土壤内有了较多的水分积蓄，通过重力作用下渗补充下层土壤水分储水量。其中，第三茬的降水使 0~120cm 的土壤水分得以补充，第四茬使得 0~160cm 土壤水分得以补充。但由于前期深层土壤水分的持续亏缺和地表接纳的自然降水下渗补充下部土层具有滞后性，深层土壤水分含量恢复需要一定的时间。

2004 年第四茬收获后至 2005 年返青期间，大于 5mm 的有效降水较少，仅为 36.4mm，一方面由于地表裸露，蒸发量较大，另一方面由于秋季盈余水分入渗到中下层土壤，以及冬季土壤水分由于热毛细管效应向上移动聚积，从而使表层土壤水分含量下降，140~280cm 土层含水量有所回升，下层水分含量变化很小。2005 年第一茬收获时，200cm 以上土层的含水量明显下降，而 280cm 以下土层含水量趋于稳定状态。由此可见，由于苜蓿强耗水造成的土壤持续水分亏缺，地面以下 280cm 土层水分含量很难有所恢复，常处于水分亏缺状态，且随着苜蓿生长年限的延长，该层以下有可能出现土壤干层。

三、苜蓿干草产量与土壤水分的关系

紫花苜蓿的生产力是在紫花苜蓿生物学特性、土壤、气候条件等基础上经能量转换和物质输送的结果。紫花苜蓿的产量指单位面积上的苜蓿通过光合作用而生产地上部分各种器官的生物量之和，它是衡量其生产性能和经济性能的重要指标。

（一）水分利用效率的分析

作物水分利用效率（WUE）是“作物-水分”关系研究中的一个重要的理论问题，作物水分利用效率为单位水分消耗所生产同化物的数量，是表征作物产量与水分消耗的定量关系指标，目前它已经被作为评价作物生长适宜程度的综合生理生态指标而广泛

应用。

由于不同茬次土壤储水量、耗水量及产量的差异,各茬次水分利用效率存在一定差异。表 1-40 是各茬次不同苜蓿品种水分利用效率统计表。

表 1-40 不同茬次苜蓿品种的水分利用率 (单位: $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)

茬次	第一茬	第二茬	第三茬	第四茬	全生长期
新疆大叶	51.88	32.61	9.53	7.02	20.41
巨人 201	66.17	30.83	11.84	10.81	23.72
路宝	65.71	30.54	12.46	13.36	25.16
牧歌 401	62.01	38.19	9.58	11.07	22.95
超级阿波罗	52.45	32.59	10.84	9.37	21.23
美国杂交熊	62.41	37.30	11.27	12.06	24.19
超级 13R	48.76	33.59	9.29	6.20	19.66
平均值	58.48	33.66	10.69	9.98	22.48

由表 1-40 可以看出,从不同品种看,超级 13R 和新疆大叶的水分利用效率较低,美国杂交熊和路宝的水分利用效率最高;各品种全生长期内水分利用效率平均为 $22.48\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从各茬次看,各品种的水分利用效率均表现为第一茬>第二茬>第三茬>第四茬。第一茬水分利用效率最大,平均为 $58.48\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次为第二茬,为 $33.66\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,第三、第四茬最小,分别平均为 $10.69\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9.98\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(二) 储水量与干草产量的关系

旱作雨养农牧业区的植物生长所需要的水分主要源于土壤接纳并蓄积的自然降水,因此,土壤水分状况将直接影响着紫花苜蓿等植物的发育和生物量形成。在土壤水分表征诸要素中,尤其以土壤储水量直接表征土壤水分供应能力并因其供应能力而左右生物的产量。

土壤储水量是指一定土层厚度的土壤含水量,以水层深度 (mm) 表示。计算公式为

$$H = \rho \cdot h \cdot w \times 10$$

式中, H 为土壤水分储水量 (mm); ρ 为土壤容重 (%); h 为土壤厚度 (cm); w 为土壤重量含水量 (%)。

为探索土壤储水量和紫花苜蓿产量 (地上生物量) 的相互关系,用土壤储水量和紫花苜蓿产量建立回归方程并分析它们的相关程度。结果表明,紫花苜蓿生物产量与土壤储水量之间有很强的相关性,相关系数高达 0.966,紫花苜蓿 5m 深土壤储水量和各茬产量拟合方程为 $y = 31.22814x - 14066.5959$, $R^2 = 0.933791$, $F = 28.2074^*$, $P = 0.0337$, 其中, y 为紫花苜蓿干草产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), x 为紫花苜蓿的土壤含水量 (mm)。

(三) 降水生产效率分析

在黄土高原旱作农牧业区,水是作物生长发育乃至生存的重要制约因素,而自然降水是该区域土壤水分的主要来源,由此可见紫花苜蓿生物产量与生育期降水量之间的关系密切。由于紫花苜蓿是收获茎叶的营养体生产,因此可以用降水生产效率表征紫花苜蓿的水分生产能力(韩仕峰,1992;Turner,2004),其计算公式为

$$y_r = y_p / r$$

式中, y_r 表示降水生产效率($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$); y_p 表示紫花苜蓿干草产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); r 表示对应生育阶段的降水量(mm)。

从全年降水生产效率看(表1-41),紫花苜蓿全年降水生产效率平均为 $26.19\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中,路宝最高,其次为巨人201、美国杂交熊和牧歌401,新疆大叶、超级13R和超级阿波罗最小。从各茬降水生产效率看,各品种降水生产效率表现规律一致,即第二茬和第一茬的降水生产效率最高,平均达 $87.71\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $80.43\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,第三茬和第四茬较低,平均为 $11.43\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.61\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这说明第二茬和第一茬对降水的利用程度较第三、第四茬高。各茬次降水生产效率的大小为:第二茬>第一茬>第三茬>第四茬。

表 1-41 紫花苜蓿的降水生产效率 (单位: $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$)

茬次	第一茬	第二茬	第三茬	第四茬	全生长期
新疆大叶	74.33	79.72	9.77	5.79	23.00
巨人 201	86.85	88.49	13.10	8.88	27.97
路宝	93.68	89.00	12.89	11.73	29.84
牧歌 401	82.51	89.30	10.49	10.02	26.67
超级阿波罗	74.41	82.21	11.56	8.34	24.87
美国杂交熊	83.92	89.04	12.14	10.33	27.68
超级 13R	67.28	96.24	10.10	5.16	23.28
平均值	80.43	87.71	11.44	8.61	26.19

四、结论与讨论

(1) 紫花苜蓿生长期内耗水量平均约 575.58mm 左右,日均耗水量为 $2.58\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。耗水总量与全年自然降水量基本相当,但各生育阶段降水量与耗水量的适宜程度相差很大,有的亏缺,有的盈余,基本上是耗水量随着降水量的增加而增加。第三茬耗水最多(232.44mm),日耗水量最高($3.81\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);其次是第四茬耗水量为 144.70mm,日耗水量为 $2.54\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;第二茬耗水量为 103.50mm,日耗水量为 $2.35\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;第一茬耗水量最低(94.93mm),日耗水量最低($1.56\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。其中,第一茬草不同生育阶段间,返青至分枝耗水较多(30.77mm),日耗水量较低($0.99\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$);分枝至现蕾耗水最多(34.36mm),日耗水量最大($2.45\text{mm} \cdot$

d^{-1}); 现蕾至初花耗水较多 (29.81mm), 日耗水量较大 ($1.86\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。以后几茬草各生育期耗水量重复前述趋势, 但生育期进程比第一茬缩短, 耗水量增大。由此可见, 苜蓿的需水过程为抛物线形, 需水峰值在分枝至现蕾阶段, 此阶段是需水的关键期。仇化民等 (1993) 认为牧草的耗水量随产量的增加而增加, 并且随着降水量的增加, 牧草的耗水量也增加。李玉山 (2002) 在长武的研究认为苜蓿生长期内 2m 和 10m 深土层耗水量分别为 461.7mm 、 519.4mm 。他认为由于苜蓿具有超常的吸水深度, 用 2m 深土层计算苜蓿耗水量会得到失真的结论。本研究以 5m 深土层计算苜蓿的耗水量也得到了较好的结论。

(2) 全生长期内紫花苜蓿的花前经济产量耗水系数平均为 448.21。其中第一茬耗水系数最低, 平均为 173.33; 第三茬和第四茬较高, 分别为 946.61、1072.97; 第二茬居中, 平均为 298.99。国内外学者关于紫花苜蓿耗水系数的报道数据为 180~2100, 上下限差别近 12 倍 (Fairbourn, 1982; Bauder et al., 1987)。孙洪仁等 (2005) 在前人的报道基础上研究认为, 在相对正常的田间栽培管理条件下, 建植当年紫花苜蓿花前生物产量耗水系数和花前经济产量耗水系数的范围分别为 800~1200 和 700~1050, 建植 2 年及以上者分别为 400~800 和 350~700; 紫花苜蓿全生育期生物产量耗水系数的范围为 700~1400。韩仕峰 (1991) 在宁夏南部山区对旱作条件下紫花苜蓿耗水规律的研究结果为, 半湿润偏旱区 (年降水量 500mm 左右, 干燥度 1.2~1.6)、半干旱区 (年降水量 450mm 左右, 干燥度 1.6~2.0) 和干旱区 (年降水量 400mm 以下, 干燥度 1.8~2.4) 生长第 3 年到第 4 年紫花苜蓿的生物产量耗水系数依次为 761、598 和 1145, 生长第 5~第 6 年高耗水量地块依次为 379、462 和 1329。仇化民等 (1993) 认为同一牧草在不同的气候年型条件下, 干旱年要比正常年的耗水量少, 但由于产量低, 耗水系数较小。

(3) 紫花苜蓿全年土壤储水量存在明显的季节变化, 可依次划分为春季失墒期 (返青至第二茬开花, 即 3~6 月)、夏季波动变化期 (第三茬生长期, 即 6 月 23 日至 8 月 23 日)、秋季增墒期 (第三茬收获至第四茬收获, 即 9 月至 10 月中旬)。土壤水分的高峰值对应降水的高峰值或耗水低值期, 反之亦然; 紫花苜蓿地 5m 深土层土壤水分的垂直变化根据变异系数的大小可划分为 4 个层次: 活跃层 (0~60cm)、过渡层 (60~140cm)、次活跃层 (140~420cm)、稳定层 (>420cm)。整体上看, 下层土壤水分含量高于上层。各茬次不同苜蓿品种草地 5m 深土壤含水量均表现为超级 13R、超级阿波罗、美国杂交熊较高, 其次为新疆大叶和巨人 201, 牧歌 401、路宝最低, 这种表现在 2m 以下土层尤为明显, 这与不同苜蓿品种根系分布深度密切相关。有研究表明, 土壤水分含量与苜蓿根系入土深度有一定的相关性 (白文明等, 2001)。从土壤表层到深层, 苜蓿根系体积和生物量逐次减少, 侧根分布主要在距地表 10~20cm 的主根区内 (郭正刚等, 2002), 根密度随深度的增加呈降低趋势, 根系对下层土壤的水分利用减少, 储水量较上层有所增加。而由于多种因素的限制, 随着苜蓿生长年限的延长, 通体土层呈现干燥化, 土层储水的供水调节能力急剧降低, 苜蓿生长逐渐转向依靠当年降水提供水源。有关苜蓿的垂直变化特征大多数研究只划分了 3 层, 即多变层、过渡层和稳定层, 各层次厚度不同 (杨小利, 2004; 杨启国等, 2003; 杜世平等, 1999)。所有这

些研究存在区域间的差异,且剖面深度均为2~3m,而本研究为5m,更能真实地反映苜蓿地土壤的垂直变化特征。

(4) 苜蓿全生长期内水分利用效率平均为 $22.48\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第一茬水分利用效率最高,平均为 $58.48\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次为第二、第三茬,分别为 $33.66\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $10.69\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,第四茬最低,平均为 $9.98\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。这也说明了苜蓿生长前期的天然降水无法满足苜蓿生长的需要而处于水分亏缺状态。李玉山(2002)利用12年的数据,分别以苜蓿地2m和10m深土层耗水量研究苜蓿鲜干草的水分利用效率,结果认为生长期内苜蓿鲜草的水分利用效率分别为 $79.95\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $70.95\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。苜蓿干草的水分利用效率分别为 $22.84\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $20.27\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(5) 紫花苜蓿生长期内降水生产效率平均为 $26.19\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第二茬和第一茬的降水生产效率最高,平均达 $87.71\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $80.43\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,第三茬和第四茬较低,平均为 $11.44\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.61\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第三、第四茬降水量较大,土壤水分出现盈余,但是水分的丰沛程度并没有提高紫花苜蓿的水分利用效率和降水生产力。因此,水分亏缺时,即第一、第二茬的土壤水分补给是提高紫花苜蓿产量的关键。

(6) 紫花苜蓿生物产量与土壤储水量之间呈显著正相关($R=0.966$)。朱湘宁等(2002)报道各生长期的苜蓿生长与土壤含水量呈显著的线性关系,且临近初花期的土壤含水量不同所带来的差异比初期要大。紫花苜蓿的产量是水、肥、气、热等诸要素共同作用的结果,尽管旱作条件下水分是紫花苜蓿生长发育的制约因素,但夏季高温对紫花苜蓿光合作用的抑制、对土壤水分亏缺的加剧以及早春和晚秋气温低下等都对紫花苜蓿的土壤水分消耗及有效利用产生一定影响。因此,紫花苜蓿的产量形成和土壤水分利用、调控的关系仍需深入研究。

(7) 有关土壤干层。李玉山(2001)把田间持水量的75%作为土壤干层的上限,出现在土壤2~3m以下。根据本研究的分析,2004年全年总降水为551.5mm,苜蓿从返青到最后一次刈割全生长期内耗水量为575.58mm,就其全年(包括冬眠期)耗水量来说,耗水量远大于自然降水量,土壤水分处于严重负平衡状态,其后果将引起深层土壤干燥化。由5m深土壤水分剖面图可推测4年生苜蓿地土壤干层的上限出现在280cm处,容积含水量为 $16.62\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,即重量含水量为11.96%。由于本研究的试验年限短,而土壤干层是一个长期变化的过程,所以有关土壤干层的出现深度和含水量指标还需进一步研究证实。

参 考 文 献

- 白文明,左强,黄元仿,等. 2001. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究. 植物生态学报, 25 (1): 35-41.
- 曹亦芬,曹致中. 1990. 苜蓿叶面积简易测定方法的研究. 草业科学, 7 (3): 60-62.
- 陈一鹏,刘康. 1990. 渭北旱塬紫花苜蓿的蒸腾强度与水量平衡研究. 水土保持通报, 6: 108-112.
- 仇化民,余优森,邓振镛,等. 1993. 黄土高原牧草耗水规律研究. 中国草地, 1: 33-39.
- 崔鲜一,彭玉梅,程渡. 1996. 科尔沁羊草-贝加尔针茅草原物候期和产草量与气象条件关系的研究. 草地学报, 4

- (4): 302-307.
- 杜世平, 王留芳, 龙明秀. 1999. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究. 草业科学, 16 (1): 12-17.
- 杜占池, 杨崇贵, 崔晓勇. 1999. 草原植物光合生理生态研究. 中国草地, 3: 20-27.
- 杜占池. 1990. 羊草和大针茅光合作用午间降低与生态因子关系的研究. 自然资源学报, 5 (2): 177-186.
- 多立安, 罗新义. 1996. 一年三次刈割苜蓿高度生长动态模型的研究. 天津师范大学学报: 自然科学版, 16 (1): 55-60.
- 范育慈, 李希来. 2003. 青海高寒草甸草地生产力与气候因素的灰色关联度分析. 草业科学, 20 (3): 8-12.
- 高亮之, 金之庆, 黄耀. 1989. 水稻钟模型——水稻发育动态的计算机模型. 中国农业气象, 10 (3): 3-10.
- 耿华珠. 1995. 中国苜蓿. 北京: 中国农业出版社.
- 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 2002. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究. 应用生态学报, 13 (8): 1007-1012.
- 韩仕峰. 1991. 宁南山区苜蓿草地土壤水分利用特征. 草业科学, 7 (5): 47-53.
- 韩仕峰. 1992. 黄土高原农田水量平衡——黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社.
- 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 2002. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. 西北植物学报, 22 (4): 817~823.
- 康志雄, 邹达明. 1993. 影响油茶产量气象因子的灰色关联分析. 经济林研究, 11 (1): 5-26.
- 李崇巍, 贾志宽, 林岭, 等. 2002. 几个苜蓿新品种抗旱性的初步研究. 干旱地区农业研究, 20 (4): 21-25.
- 李桂荣. 2003. 苜蓿需水量及水分利用效率的研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文.
- 李玉山. 2001. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 16 (5): 432-437.
- 李玉山. 2002. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 39 (3): 404-411.
- 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 2004. 不同覆盖对夏玉米叶片光合和水分利用效率日变化的影响. 水土保持学报, 18 (20): 152-155.
- 刘建宁, 胡跃高, 王运琦, 等. 2003. 紫花苜蓿休眠类型与生长特性及生产性能的研究. 第二届中国苜蓿发展大会论文集. 北京: 中国农业出版社: 66-68.
- 刘金祥, 麦嘉玲. 2004. CO_2 浓度增强对沿阶草光合特性的影响. 中国草地, 26 (3): 13-18.
- 刘玉华. 2003. 不同苜蓿品种品质特性分析和评价. 陕西: 西北农林科技大学硕士学位论文.
- 蒲金涌, 姚晓红. 2005. 紫花苜蓿及主要粮食作物各生育时段叶面积指数及光能利用率比较. 中国农业气象, 26 (1): 31-33.
- 沈国权. 1980. 影响作物发育速度的非线性温度模式. 气象, 6 (6): 9-11.
- 沈亨理. 1996. 农业生态学. 北京: 中国农业出版社: 34-35.
- 沈康, 吴贯明, 饶立华. 1990. 中国农业百科全书·生物学卷分册-植物生理生化. 北京: 农业出版社: 20.
- 苏加楷. 2003. 苜蓿的适应性、分布和区划. 第二届中国苜蓿发展大会论文集. 北京: 中国农业出版社: 13-15.
- 孙洪仁, 张英俊, 韩建国, 等. 2005. 紫花苜蓿的蒸腾系数和耗水系数. 中国草地, 27 (5): 65-70.
- 孙同兴, 张昕, 张长胜. 1999. CO_2 倍增对紫花苜蓿叶片形态结构的影响. 莱阳农学院学报, 16 (1): 1-5.
- 王玉辉, 周广胜. 2000. 松嫩平原盐碱化草地羊草叶片生理生态特性分析. 应用生态学报, 11 (3): 12-19.
- 温达志, 张德强, 周国逸. 2000. 四种禾本科牧草植物光合特性的初步研究. 热带亚热带植物学报, 增刊: 59-66.
- 温达志, 周国逸, 张德强, 等. 2001. 四种禾本科牧草植物蒸腾速率与水分利用效率的比较. 热带亚热带植物学报, 增刊: 67-76.
- 项斌, 林舜华, 高雷明. 1996. 紫花苜蓿对 CO_2 倍增的反应: 生态生理研究和模型拟合. 植物学报, 38 (1): 63-71.
- 徐春明, 贾志宽, 韩清芳, 等. 2003. 不同秋眠级数苜蓿品种生物量特性的研究. 草业学报, 12 (6): 70-73.
- 徐得源. 1993. 牧草生长发育和产量形成与气象条件的关系. 气象, 4: 8-11.
- 许大奎, 徐宝基, 沈允钢. 1990. C_3 植物光合效率的日变化. 植物生理学报, 1: 1-4.
- 颜亮东. 1998. 青海省环湖地区天然牧草返青与气象条件的关系及其预报. 中国农业气象, 19 (2): 42-45.
- 彦习武. 1988. 作物发育速度与温度关系的数学模式. 南京气象学院学报, 11 (1): 15-23.

- 杨启国, 张旭东, 杨兴国. 2003. 甘肃中部半干旱区紫花苜蓿耗水规律及土壤水分变化特征研究. 中国农业气象, 24(4): 37-39.
- 杨青川. 2001. 苜蓿生产与管理指南. 北京: 中国林业出版社.
- 杨文义. 1995. 典型草原牧草返青的气象条件研究. 草业科学, 12(6): 47-49.
- 杨小利. 2004. 陇东春播紫花苜蓿生长及水分规律研究. 干旱地区农业研究, 22(4): 128-130.
- 杨义群, 吴良欢, 张火法. 1996. Gompertz 曲线和 Logistic 增长曲线之比较. 生物数学学报, 11(3): 165-168.
- 袁志发, 周静芋. 2000. 试验设计与分析. 北京: 高等教育出版社.
- 袁志发, 周静芋. 2001. 决策系数——通径分析中的决策指标. 西北农林科技大学学报, 29(5): 129-133.
- 张国胜, 李希来. 1992. 青海省曲麻莱地区高寒草甸牧草生长与气象条件关系初探. 中国草地, 3: 48-51.
- 张静, 李希来, 马恩洲. 1995. 铁卜加地区牧草月产量与气象因子的灰色关联分析. 青海畜牧兽医杂志, 26(1): 43-46.
- 朱珉仁. 2002. Gompertz 模型和 Logistic 模型的拟合. 数学的实践与认识, 32(5): 705-709.
- 朱湘宁, 郭继勋, 梁存柱, 等. 2002. 华北平原地区灌溉对苜蓿产量及土壤水分的影响. 中国草地, 24(6): 32-37.
- 朱元正, 陈伟侯, 陈丰. 2003. Logistic 曲线与 Gompertz 曲线的比较研究. 数学的实践与认识, 33(10): 66-71.
- Bauder J W, Bauer A, Ramirez J M, et al. 1987. Alfalfa water use and production on dryland and irrigated sandy loam. Agron J, 70: 95-99.
- Berry J A, Downton W J S. 1982. Environmental regulation of photosynthesis. In: Govindjee. Photosynthesis: Development, Carbon Metabolism and Plant Productivity. Vol II. New York: Academic Press; 263~343.
- Brown P W, Tanner C B. 1983. Alfalfa stem and leaf growth during water stress. Agronomy Journal, 75: 779-805.
- Brown R H, Radcliffe D E. 1986. A comparison of apparent photosynthesis in sericea lespedeza and alfalfa. Crop Science, 26(6): 1208-1211.
- Correia M J, Chaves M M C, Pereira J S. 1990. Afternoon depression in grapevine leaves-evidence for a high light stress effect. Journal of Experimental Botany, 41(225): 417-426.
- Cure J D, Acock B. 1986. Crop responses to CO₂ doubling: a literature survey. Agriculture and Forest Meteorology, 38: 127-145.
- Fairbourn M L. 1982. Water use by forage species. Agron J, 74: 62-66.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. And Rev Plant Physiol, 33: 317-345.
- Fischer R A, Turner N C. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. Ann Rev Plant Physiol, 29: 227-317.
- Goudriaan J, De Ruiter H E. 1983. Plant growth in response to CO₂ enrichment at two levels of nitrogen and phosphorus supply. I. Dry matter, leaf area and development. Netherlands Journal of Agricultural Science, 31: 157-169.
- Jame L W. 1988. Daily and seasonal evapo-transpiration and yield of irrigated alfalfa in southern Idaho. Agronomy Journal, 80: 6622-6693.
- Kuppers M, Wheeler A M, Kuppers B I L, et al. 1986. Carbon dioxide fixation in eucalypts in field analysis of diurnal variations in photosynthetic capacity. Oecologia, 70: 273-282.
- Murata Y, Iyama J, Honma T. 1965. Influence of air temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern-type forage crops. Proc Crop Sci Soc (Japan), 34: 154-158.
- Safaa A H, Glenn W T. 1990. Effect of temperature regimes on photosynthesis respiration and growth in alfalfa. Proc Okla Acad Sci, 70: 1-4.
- Tenhunen J D, Lange O L, Gebel J, et al. 1984. Changes in photosynthetic capacity, carboxylation efficiency, and CO₂ compensation point associated with midday stomatal closure and midday depression of net CO₂ exchange of leaves of *Quercus Suber*. Planta, 162: 193-203.
- Turner N C. 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. Journals of Experimental Botany, 55: 2413-2425.

- Wise R R, Sparrow D H, Ortiz-Lopez, et al. 1991. Biochemical regulation during the midday decline of photosynthesis in field grown sunflower. *Plant Sci*, 74: 45-52.
- Yu Q, Liu J D, Luo Y. 2000. Applicability of some stomatal models to natural conditions. *Acta Botanica Sinica*, 42 (2): 203-206.
- Zaleski A. 1954. Identification and classification of Lucerne varieties and strains. *J Agric Sci*, 44: 199- 220.
- Ziska L H, Bunce J A. 1994. Direct and indirect inhibition of single leaf respiration by elevated CO₂ concentrations: Interaction with temperature. *Physiol Plant*, 90: 130-138.

第二章 苜蓿抗逆性研究

我国幅员辽阔、地形复杂、气候多变，各地都有特殊的环境。寒冷、高温、干旱、盐渍等各种不良环境，对牧草的生长有一定的影响。苜蓿品种的选择和布局，首先要考虑苜蓿品种的生态适应性，因此对苜蓿品种抗逆性（抗旱性、耐热性、抗寒性和耐盐性）研究至关重要。

第一节 不同苜蓿品种的抗旱性

我国是一个干旱半干旱地区面积较大的国家，旱区苜蓿产业化所面临的首要问题是抗旱苜蓿品种的选引。近年来国外苜蓿品种更新速度很快，在引种和培育中，需对多个苜蓿品种抗旱性进行鉴定。有关苜蓿抗旱性的研究很多（陶玲，1998；肖凤等，1992；周瑞莲等，1991），抗旱性指标也很多，有人曾用 21 种抗旱指标对苜蓿抗旱性进行鉴定（李造哲，1991）。研究表明，对抗旱性贡献较大的指标有：细胞膜相对透性、叶片保水力、游离脯氨酸、过氧化物酶活性、反复干旱幼苗成活率等。

本研究结合前人的研究工作选用公认且实用的苜蓿抗旱指标（黎裕，1993），对国内外 21 种品质优良的苜蓿品种抗旱性进行了研究，通过室内、室外试验的结合，对它们的抗旱性进行客观评价，从而为今后苜蓿品种的引进和推广奠定基础，同时也对多品种苜蓿抗旱性鉴定提供有效的依据。

一、材料与方法

（一）试验地概况和材料来源

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站，参试品种 21 个（表 2-1），15 个美国品种引自美国赛贝科种子子公司，其余 6 个品种为新疆、宁夏、甘肃、北京等地具有代表性的品种。所有品种在 2001 年 5 月 4 日播种，每个品种播种 5 个小区，小区面积 $5\text{m} \times 10\text{m}$ ，行距 30cm，播量为 $15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，拌沙后条播（播前灌溉，试验地前茬为小麦，土壤系垆土）。

表 2-1 不同苜蓿品种名录及来源

序号	苜蓿品种	材料来源	序号	苜蓿品种	材料来源	序号	苜蓿品种	材料来源
1	爱维兰	美国	8	巨人 201+Z	美国	15	爱林+Z	美国
2	改革者+Z	美国	9	牧野	美国	16	中苜 1 号	北京
3	爱菲尼特+Z	美国	10	卫士 302+Z	美国	17	保丰苜蓿	北京
4	射手	美国	11	全能+Z	美国	18	新疆大叶	新疆
5	路宝	美国	12	牧歌 401+Z	美国	19	中兰 1 号	兰州
6	爱博	美国	13	胜利者	美国	20	德国大叶熊	宁夏
7	超级 13R	美国	14	超级阿波罗	美国	21	美国杂交熊	宁夏

(二) 试验内容及方法

该试验分室内试验和室外试验两部分,室内试验测定苜蓿叶片细胞膜相对透性和离体叶片保水力,室外试验为稳态气孔计测定叶片气孔扩散阻力和蒸腾速度。

(1) 细胞膜相对透性测定。参照高俊凤(2000)的方法,关键步骤有:苜蓿分枝期取样;每次试验设两种处理,一份放入水中作对照,一份放入 -0.8MPa PEG 溶液中胁迫 6h,各品种每个处理重复三次;取同叶位叶片,用打孔器取样,加入无离子水 4ml;将试管放入真空干燥器内,抽气 15min,放在室内保持 30min;用 DDS-IIA 型电导仪测各试管溶液电导率后,置于沸水中煮 15min 取出,冷却后再测各试管外渗溶液的电导值。

(2) 叶片保水力的测定。参照高俊凤(2000)的方法,苜蓿分枝期取样;根吸水饱和 3h 后;取同一叶位的叶片称重,叶片置于室内,间隔 3h 称重一次,至 24h 后称重;称取干重。

(3) 稳态气孔计测定苜蓿叶片气孔扩散阻力和蒸腾速率。测试苜蓿品种经数日自然干旱;测试时间为每日上午 9:00~11:00,下午 3:00~5:00 测定;测定一定叶位的叶片,随机取样,设多次重复(>10 次);由于测试品种多,设一对照品种,以对照品种为标准进行相对值换算。

(三) 测定项目

(1) 细胞膜相对透性表示细胞受害程度,通常按下式计算:

$$\text{细胞膜相对透性}(\%) = L_1/L_2 \times 100$$

式中, L_1 为叶片杀死前外渗液的电导率; L_2 为叶片杀死后外渗液的电导率。

(2) 细胞膜伤害率,通常采用下式计算:

$$\text{伤害率}(\%) = \left(\frac{1 - T_1/T_2}{1 - C_1/C_2} \right) \times 100$$

式中, C_1 为对照叶片杀死前外渗液的电导率; C_2 为对照叶片杀死后外渗液的电导率; T_1 为处理叶片杀死前外渗液的电导率; T_2 为处理叶片杀死后外渗液的电导率。

(3) 叶片保水力的差异,可用脱水时间对叶片相对含水量作图,即可看出各叶片保水力的差异。或计算脱水 24h 后的相对含水量,以此表示叶片保水力的高低。

$$\text{相对含水量(RWC)} = \frac{W_t - W_d}{W_t - W_d} \times 100\%$$

式中, W_t 为组织鲜重; W_d 为组织干重; W_t 为组织被水充分饱和后的重量。

(4) 气孔阻力和蒸腾速率数据处理:测试原始数据经 Gruss 法对异常的试验数据进行剔除;根据对照品种数值换算为相对值。相对值 = $\frac{W_t}{W_d} \times 100\%$, 式中, W_t 为测试品种值, W_d 为对照品种值。以相对值大小进行排序比较。

(5) 以细胞膜伤害率、24h 叶片持水力、相对气孔阻力(因为蒸腾强度和气孔阻力为同一方法下测得的两组数据,所以只选择气孔阻力这一指标) 3 个指标进行聚类分析。程序采用 Ward 法,即离差平方和法。它是一种分类效果较好、应用最广泛的方法,使用软件为 SAS 8.0。

二、结果与分析

(一) PEG 模拟干旱胁迫对苜蓿叶片细胞膜相对透性的影响

在干旱胁迫影响下,常因伤害细胞膜结构而引起细胞膜透性增大,细胞内含物不同程度外渗,使外渗液电导率增大;膜相对透性变化愈大,表示受伤愈重,抗性愈弱。

表 2-2 说明在 -0.8MPa 的 PEG 胁迫下,不同苜蓿品种的细胞膜相对透性发生了改变。各品种叶片细胞膜受到伤害,各品种细胞膜相对透性均高于对照。但不同苜蓿品种间的细胞膜伤害率有显著的不同。其中超级阿波罗、美国杂交熊、牧歌 401+Z、爱林+Z 等品种的细胞膜伤害率均小于 20%,而中兰 1 号、爱博、中苜 1 号、射手等品种的细胞膜伤害率均大于 30%。

表 2-2 干旱胁迫下不同苜蓿品种细胞膜相对透性及气孔扩散阻力和蒸腾强度

苜蓿品种	细胞膜相对透性/%		伤害率/%	气孔阻力	蒸腾速率/(mmol $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	对照	处理			
超级阿波罗	35.81	44.22	13.1	1.075	1.127
美国杂交熊	29.17	41.2	16.98	1.001	0.999
牧歌 401+Z	33.78	45.81	18.16	1.150	0.973
爱林+Z	33.25	45.55	18.42	1.011	1.081
胜利者	35.68	49.05	20.79	0.838	1.238
改革者+Z	30.64	46.76	23.23	1.034	1.165
爱菲尼特+Z	32.6	49.08	24.44	1.071	0.944
巨人 201+Z	27.72	45.7	24.87	1.334	0.850
爱维兰	30.43	47.79	24.96	1.000	1.000
全能+Z	37.79	53.59	25.39	1.304	0.914
新疆大叶	32.78	50.41	26.23	1.157	0.964
德国大叶熊	31.39	50.28	27.53	0.799	1.224
保丰苜蓿	36.3	53.97	27.74	0.726	1.251
路宝	34.35	52.76	28.04	0.944	1.141
卫士 302+Z	34.63	53.89	29.47	1.157	0.938
牧野	36.25	55.43	30.08	1.245	0.934
超级 13R	30.38	52.87	32.29	0.675	1.592
中兰 1 号	31.43	53.96	32.86	0.531	1.655
爱博	33.48	55.49	33.09	0.720	1.492
中苜 1 号	31.78	55.11	34.2	0.707	1.448
射手	29.66	53.72	34.21	0.912	0.909

细胞膜伤害率的大小可以反映抗旱性的强弱,抗旱性与细胞膜伤害率呈负相关。从不同苜蓿品种的细胞膜伤害率可见国外苜蓿的抗旱性高于国内品种。根据细胞膜伤害率的不同将 21 个苜蓿品种抗旱性强弱划分为超级阿波罗>美国杂交熊>牧歌 401+Z>爱林+Z>胜利者>改革者+Z>爱菲尼特+Z>巨人 201+Z>爱维兰>全能+Z>新疆大叶>德国大叶熊>保丰苜蓿>路宝>卫士 302+Z>牧野>超级 13R>中兰 1 号>爱博>中苜 1 号>射手。

(二) 干旱条件下不同苜蓿品种气孔阻力和蒸腾强度的变化

气孔是 CO_2 进入与水分蒸腾的主要通道, 气孔的开闭大小对作物抗旱起重要作用。在干旱胁迫下, 气孔阻力越大的品种, 失水越慢, 越抗旱; 蒸腾作用是根系吸收的水分经过输导组织, 通过叶片气孔以水蒸气的形式逸散到大气中的生理过程。蒸腾强度是植物体内水分交换的重要指标, 与其抗旱性关系十分密切, 气孔阻力与蒸腾强度呈负相关, 一般来说, 蒸腾强度高的品种抗旱性较低。

对于多品种测定蒸腾强度和气孔阻力的主要问题是, 在不同日期内同一品种的蒸腾强度和气孔阻力差异很大。而多个品种又在一定时段内无法测定。对此每日测定时需参照同一品种作对照, 以相对值大小对各品种进行评价。

在自然干旱条件下, 不同苜蓿品种叶片气孔扩散阻力和蒸腾强度(相对值)不同, 见表 2-2。从表中可见不同苜蓿品种的扩散阻力和蒸腾强度呈负相关(两者相关系数为 -0.895 、 $P < 0.01$), 但超级阿波罗、改革者+Z、爱林+Z、射手等品种出现异常, 说明试验误差的存在。苜蓿蒸腾强度越大, 气孔阻力越小, 说明水分散失快、抗旱性差。根据不同苜蓿品种气孔阻力和蒸腾强度综合分析, 巨人 201+Z、全能+Z、牧野、新疆大叶、卫士 302+Z 等品种气孔阻力较大、蒸腾强度较小, 说明这些苜蓿品种较抗旱; 而德国大叶熊、保丰苜蓿、爱博、中苜 1 号、超级 13R、中兰 1 号等品种气孔阻力较小、蒸腾强度较大, 说明这些苜蓿品种抗旱性较差。

(三) 不同苜蓿品种离体叶片保水力的比较

不同苜蓿品种在不同时段离体叶片相对含水量不同(表 2-3)。相对含水量为不同时段叶片含水量占饱和水量的百分比。离体叶片在不同时段失水很快, 叶片保水力也在不断降低, 保水力越大说明叶片失水速率慢, 叶片保水力越强, 品种抗旱性越强。

表 2-3 不同苜蓿品种离体叶片保水力(相对含水量) (单位: %)

苜蓿品种	3h	6h	9h	24h
爱林+Z	82.18	67.46	57.45	22.03
牧歌 401+Z	86.31	71.91	57.68	21.35
胜利者	80.51	69.96	59.24	20.90
美国杂交熊	82.09	67.86	57.52	19.74
爱非尼特+Z	79.33	65.03	52.98	19.51
超级 阿波罗	82.71	67.52	56.84	19.39
巨人 201+Z	83.21	68.43	54.83	16.93
射手	79.16	63.18	50.44	16.82
卫士 302+Z	79.65	64.71	51.09	16.09
改革者+Z	78.06	63.14	50.73	15.60
牧野	81.23	64.32	49.61	15.33
爱维兰	80.19	66.34	53.79	13.84
全能+Z	81.20	64.35	48.66	13.44
路宝	81.09	65.28	51.57	13.11

续表

苜蓿品种	3h	6h	9h	24h
超级 13R	79.48	63.53	51.80	12.77
新疆大叶	79.33	62.03	47.22	12.50
中苜 1 号	83.49	67.80	54.02	12.31
爱博	79.32	63.62	50.53	11.99
德国大叶熊	82.48	66.10	50.72	8.18
中兰 1 号	74.77	54.60	39.45	6.89
保丰苜蓿	75.75	58.97	44.47	6.68
变异系数	3.22	5.76	9.11	30.20

表 2-3 中不同苜蓿品种的离体叶片随时间增加保水力不断降低,说明离体叶片在不同时段失水很快。但各苜蓿品种之间在不同时段的离体叶片保水力有所不同,通过对不同时段不同苜蓿品种之间离体叶片保水力的变异分析可知,在 3h、6h、9h、24h,各苜蓿品种的变异系数为 3.22%、5.76%、9.11%、30.20%,说明随时间增加各苜蓿品种离体叶片保水力差异越来越大,24h 离体叶片保水力可以较好地反映出各苜蓿品种持水力的差异。不同抗旱性苜蓿品种的持水力不同,持水力强的苜蓿品种抗旱性较强,因此 24h 离体叶片保水力可作为鉴定苜蓿抗旱性的合理指标。

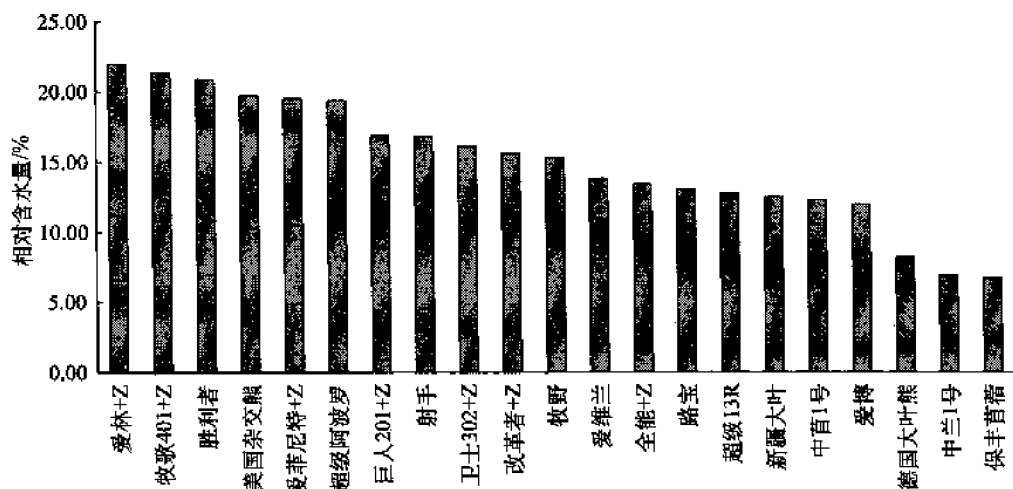


图 2-1 不同苜蓿品种 24h 离体叶片保水力

从 24h 叶片持水力大小(图 2-1)中,可看出各品种抗旱性强弱为爱林+Z>牧歌 401+Z>胜利者>美国杂交熊>爱菲尼特+Z>超级阿波罗>巨人 201+Z>射手>卫士 302+Z>改革者+Z>牧野>爱维兰>全能+Z>路宝>超级 13R>新疆大叶>中苜 1 号>爱博>德国大叶熊>中兰 1 号>保丰苜蓿。

根据 24h 离体叶片保水力,选出抗旱性不同的 6 种苜蓿品种进行分析。将爱林+Z、牧歌 401+Z 定为高抗旱品种,牧野、爱维兰定为中抗旱品种,中兰 1 号、保丰苜蓿定为低抗旱品种。图 2-2 为抗旱性强弱不同的 6 种苜蓿品种,不同时段离体叶片的保

水力。可以看出在 3h、6h、9h、24h 各时段，各品种间保水力有显著的不同，而高抗旱品种保水力始终大于中抗旱品种，中抗旱品种保水力始终大于低抗旱品种。

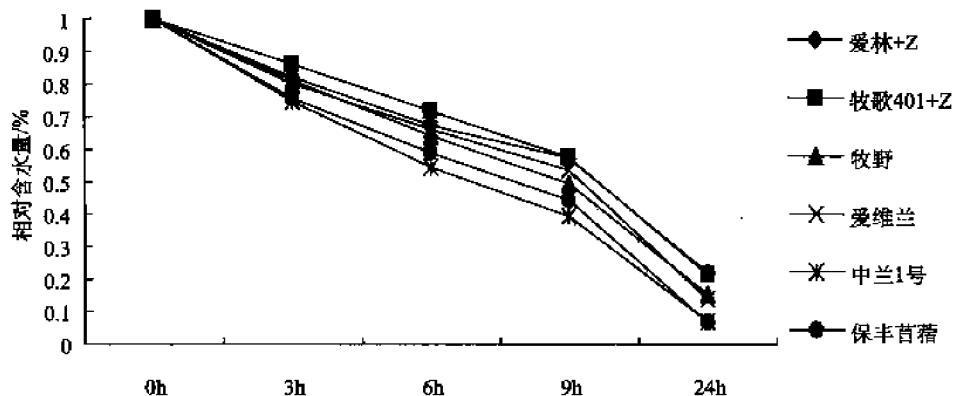


图 2-2 6 种抗旱性不同苜蓿离体叶片保水力

综合以上分析，对 21 个苜蓿品种抗旱性鉴定，使用不同的指标，判定结果不完全一致，说明还需进一步进行多指标综合分析。表 2-4 为 4 种抗旱指标间相关分析，结果表明：苜蓿细胞膜伤害率与 24h 离体叶片保水力之间呈极显著负相关，苜蓿细胞膜伤害率与相对扩散阻力呈显著负相关，但苜蓿细胞膜伤害率与相对蒸腾强度无相关性。因此细胞膜伤害率、24h 叶片保水力和相对扩散阻力等指标可作为 21 个苜蓿品种抗旱性鉴定的合理指标。而蒸腾强度和气孔阻力为同一方法下测得的两组数据，综合以上分析选择气孔阻力为抗旱指标更为合理。

表 2-4 不同苜蓿品种抗旱指标相关分析

相关系数	细胞膜伤害率	离体叶片保水力	相对扩散阻力	蒸腾强度
细胞膜伤害率	1			
<i>P</i>				
离体叶片保水力	-0.6706**	1		
<i>P</i>	0.0009			
相对扩散阻力	-0.4488*	0.5272*	1	
<i>P</i>	0.0413	0.0141		
蒸腾强度	0.4139	-0.5276*	-0.8953**	1
<i>P</i>	0.0621	0.014	<0.0001	

(四) 不同苜蓿品种抗旱性聚类分析

对于多品种苜蓿抗旱性鉴定，选用不同指标结果不完全一致。综合以上分析以细胞膜伤害率、24h 叶片保水力和相对气孔阻力 3 个指标对 21 个品种进行聚类分析。聚类分析选用系统聚类，程序选用 Ward 法即离差平方和法，它是一种分类效果较好、应用最广泛的方法。经 SAS 8.0 运行后结果如图 2-3 和表 2-5 所示。

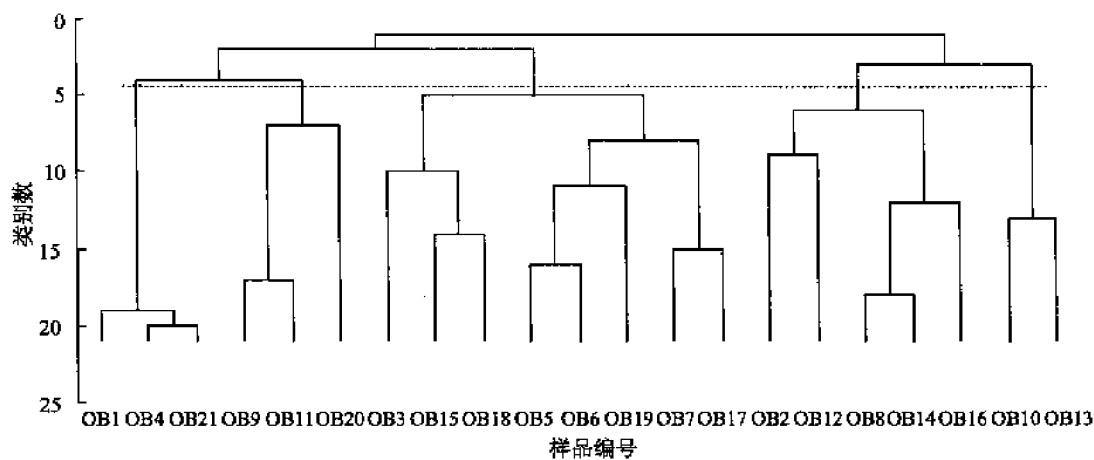


图 2-3 不同苜蓿品种抗旱性聚类分析图

表 2-5 不同苜蓿品种聚类分析结果（分三类）

CLUSTER=1		CLUSTER=2		CLUSTER=3	
序号	名称	序号	名称	序号	名称
5	爱林+Z	1	爱维兰+Z	6	爱博
12	牧歌 401+Z	2	改革者+Z	16	中苜 1 号
14	超级阿波罗	5	路宝	7	超级 13R
21	美国杂交熊	11	全能+Z	17	保丰苜蓿
13	胜利者	9	牧野	20	德国大叶熊
3	爱菲尼特+Z	10	卫士 302+Z	19	中兰 1 号
8	巨人 201+Z	18	新疆大叶		
		4	射手		

从聚类过程来看，SPRSQ 在 3 分类时发生数量突变，由 0.1998→0.0432，表明从 3 分类变为 2 分类时将损失大量信息，因此半偏 R^2 支持 3 分类，CCC 在 3 分类出现峰值 0.33 说明聚类判据的三次方支持 3 分类；伪 F 值 PSF 在 3 分类时出现峰值 23.6→27.5→22.2 也说明了 3 分类较好；伪 t^2 值在 4 分类时出现峰值 4.1→7.0→4.8，由于最佳分类在它上边一个，因而也支持 3 分类。因此 Ward 法支持将 21 个样本划分为 3 类。综合上述研究，根据聚类图和聚类结果可将 21 个苜蓿品种划分为高抗旱、中抗旱和低抗旱 3 类。高抗旱苜蓿品种为：爱林+Z、牧歌 401+Z、超级阿波罗、美国杂交熊、胜利者、爱菲尼特+Z、巨人 201+Z。中抗旱苜蓿品种为：爱维兰+Z、改革者+Z、路宝、全能+Z、牧野、卫士 302+Z、新疆大叶、射手。低抗旱苜蓿品种为：爱博、中苜 1 号、超级 13R、保丰苜蓿、德国大叶熊、中兰 1 号。

三、结论与讨论

关于苜蓿抗旱性的研究已有不少报道，抗旱性鉴定的指标、方法也很多。但对多个苜蓿品种的抗旱性鉴定报道较少。本研究参考前人的研究结果，选用细胞膜相对透性的

测定、离体叶片保水力的测定、扩散阻力和蒸腾强度的测定等简便且常用的方法,对 21 个苜蓿品种抗旱性进行了研究。

(1) PEG 模拟干旱胁迫对苜蓿叶片细胞膜相对透性的影响表明:在干旱胁迫下,不同苜蓿品种间的细胞膜伤害率有显著的不同,根据细胞膜伤害率的不同将 21 个苜蓿品种抗旱性强弱划分为超级阿波罗>美国杂交熊>牧歌 401+Z>爱林+Z>胜利者>改革者+Z>爱菲尼特+Z>巨人 201+Z>爱维兰>全能+Z>新疆大叶>德国大叶熊>保丰苜蓿>路宝>卫士 302+Z>牧野>超级 13R>中兰 1 号>爱博>中苜 1 号>射手。

(2) 不同苜蓿品种离体叶片保水力的变化研究表明:24h 离体叶片保水力为较合理的抗旱鉴定指标;依据 24h 离体叶片持水力得出各品种抗旱性强弱为爱林+Z>牧歌 401+Z>胜利者>美国杂交熊>爱菲尼特+Z>超级阿波罗>巨人 201+Z>射手>卫士 302+Z>改革者+Z>牧野>爱维兰>全能+Z>路宝>超级 13R>新疆大叶>中苜 1 号>爱博>德国大叶熊>中兰 1 号>保丰苜蓿。

(3) 自然干旱条件下不同苜蓿品种气孔阻力和蒸腾强度变化的研究表明:不同苜蓿品种叶片气孔扩散阻力和蒸腾强度(相对值)不同,综合分析巨人 201+Z、全能+Z、牧野、新疆大叶、卫士 302+Z 等品种气孔阻力较大、蒸腾强度较小,这些苜蓿品种较抗旱;而德国大叶熊、保丰苜蓿、爱博、中苜 1 号、超级 13R、中兰 1 号等品种气孔阻力较小、蒸腾强度较大,这些苜蓿品种抗旱性较差。

(4) 不同苜蓿品种抗旱指标相关分析表明:在本研究中,细胞膜伤害率、24h 离体叶片保水力和相对扩散阻力等指标可作为 21 个苜蓿品种抗旱性鉴定的合理指标。

(5) 对 21 个苜蓿品种抗旱性聚类分析表明:高抗旱苜蓿品种为爱林+Z、牧歌 401+Z、超级阿波罗、美国杂交熊、胜利者、爱菲尼特+Z、巨人 201+Z。中抗旱苜蓿品种为爱维兰+Z、改革者+Z、路宝、全能+Z、牧野、卫士 302+Z、新疆大叶、射手。低抗旱苜蓿品种为爱博、中苜 1 号、超级 13R、保丰苜蓿、德国大叶熊、中兰 1 号。

(6) 在本研究中对 21 个苜蓿品种进行抗旱鉴定,使用不同的指标得出结果不完全一致。因此对各指标的有效性进行判定,剔除不相关的指标,最后进行了多指标综合判定。本研究选用系统聚类方法能较好地对苜蓿品种进行抗旱性综合判定。

第二节 不同苜蓿品种的耐热性和抗寒性

苜蓿对高温的抵抗能力称为苜蓿的耐热性,对苜蓿品种的耐热性多以越夏率评价,然而高温对苜蓿的伤害大多是非致命的,非致命的伤害往往很难在田间发现也不容易识别,但其降低牧草活力造成牧草减产,因此有学者用生理生化方法对苜蓿耐热性进行研究。本研究依据前人的工作基础(肖凤等,1992;尚庄茂和王光耀,1996;陈立松和刘星辉,1997),采用电导法对 19 种苜蓿耐热性进行初步研究,为优质苜蓿品种的选引提供依据。

对苜蓿抗寒性的研究比较深入,我国北方旱区苜蓿越冬的安全性为人们首要关心的问题。苜蓿秋眠性是苜蓿的一种生长特性,这种特性与苜蓿的耐寒性和生产性能有直接

的关系。美国曾花费几十年的时间研究出了苜蓿种质资源 1~9 级秋眠性级别标准和相应的国家标准对照品种,目前国外已把苜蓿秋眠性作为苜蓿抗寒性鉴定的一个必测指标。秋眠水平是苜蓿引种、生态区划及选择最佳种植期的理论依据。国内对苜蓿秋眠性研究不多,依据秋眠性对苜蓿抗寒性进行评价,从而提出合理的引种区划方案,使之与国际标准接轨,这是苜蓿抗寒性的研究方向。本研究依据目前国内外公认的秋眠性鉴定法(周丽霞等,1999;卢欣石,1998;卢欣石和申玉龙,1992)对国内新的苜蓿品种秋眠性进行鉴定,根据秋眠性水平对不同苜蓿品种抗寒性进行研究,并对不同秋眠苜蓿品种生产性能进行初步研究。

一、材料与方法

(一) 试验内容与方法

试验材料同本章第一节,苜蓿耐热性测定参照肖凤等(1992)的方法。主要步骤如下。

- (1) 试验设高温 50℃与常温对照,两种处理,各种苜蓿品种每个处理设 3 次重复。
- (2) 苜蓿分枝期田间取样,品种要求大小、高度大体一致,连根拔出。
- (3) 将处理 1 的苜蓿插入大烧杯中,加水,苜蓿连同烧杯放入 50℃恒温箱,处理 50min(此处理苜蓿只受热胁迫,而不受干旱胁迫)。
- (4) 取同一叶位的叶片(中上部叶位),打孔器取样后,装入试管,加入去离子水 4ml。
- (5) 将试管放入真空干燥器内,抽气 15min,放在室内保持 30min。
- (6) 用 DDS-II A 型电导仪测量各种试管中叶片细胞膜相对透性后,置于沸水中煮 15min,取出冷却再测量其细胞外渗液电导值。

苜蓿秋眠性的测定,参照 Barns 等(1990)的方法(卢欣石和申玉龙,1992;Schwab et al., 1996):

- (1) 苜蓿播种后第三周,取部分代表性品种从田间随机取样 10 株。用游标卡尺和直尺,测各品种子叶节长(子叶节到第一片真叶节间的距离)和株高。
- (2) 苜蓿播种后第五周,从田间随机取样 15 株,测定每个品种的子叶节长,并根据对照苜蓿品种的子叶节长,确定苜蓿的秋眠等级。
- (3) 测定播种后第五周苜蓿的株高和鲜重,观察来年返青期及返青后株高。

(二) 测定项目

- (1) 不同处理时间:热胁迫 30min、50min、70min,测定并计算细胞膜相对透性及细胞膜伤害率。
- (2) 50℃高温胁迫 50min 不同苜蓿品种耐热性鉴定,细胞膜相对透性及细胞膜伤害率计算见前一节。
- (3) 苜蓿播种后第三周取代表性品种测子叶节长和株高;出苗第五周后测子叶节长、株高、单株重,来年进行返青期调查测株高。

(4) 对不同苜蓿品种子叶节长进行方差分析; 对秋眠指数、子叶节长、株高、单株重、返青期株高进行相关分析。

二、结果与分析

(一) 不同热处理时间对苜蓿品种细胞膜相对透性的影响

本试验探讨不同处理时间(30min、50min、70min)热胁迫下(在低温烘箱 50℃)不同苜蓿品种叶片细胞膜相对透性及细胞受伤害程度。本试验以超级 13R 为对照品种。从表 2-6 中可见在不同处理下, 随时间延长, 细胞膜伤害率增加; 超级 13R 细胞膜伤害率由 -0.7% 变为 29.49%; 其中热处理 30min, 对各品种细胞膜伤害率影响不大, 有 2 个品种细胞膜伤害率为负值。而热处理 70min 对各品种细胞膜伤害率过大, 3 个品种的细胞膜伤害率大于 65%, 且各品种之间差异不显著。热处理 50min, 对苜蓿叶片细胞伤害适度, 各品种间差异显著。耐热品种超级 13R 细胞膜伤害率为 8.05%, 不耐热品种为 36.71%, 一般品种美国杂交熊为 14.27%。由此可见热处理 50min 为较好的热处理时间, 可以对多个苜蓿品种耐热性进行鉴定。

表 2-6 不同热胁迫时间对苜蓿质膜透性的影响

热胁迫时间/min	品种	细胞膜相对透性/%		细胞膜伤害率/%
		对照	处理	
30	超级 13R	36.23	35.79	-0.70
	中苜 1 号	37.79	35.90	-3.05
	美国杂交熊	39.30	42.26	4.88
	中兰 1 号	37.73	42.02	6.89
50	超级 13R	27.72	33.55	8.05
	新疆大叶	32.41	45.03	18.66
	德国大叶熊	37.86	60.67	36.71
	美国杂交熊	29.17	39.28	14.27
70	超级 13R	30.38	50.92	29.49
	新疆大叶	32.78	77.95	67.20
	德国大叶熊	31.39	77.26	66.85
	中兰 1 号	31.43	76.17	65.25

(二) 热胁迫下不同苜蓿品种细胞膜相对透性(耐热性鉴定)

牧草叶片高温下受伤害后, 细胞膜受破坏, 细胞内含物外渗增多, 浸出液的电导率增高, 植物的耐热性降低, 反之, 耐热性提高。从表 2-7 中可以看出, 在 50min 热胁迫下, 不同苜蓿品种叶片细胞膜伤害率有显著的差异。德国大叶熊、巨人 201+Z、爱菲

尼特+Z、保丰苜蓿等品种叶片细胞膜伤害率均大于 20%，而卫士 302+Z、超级 13R、爱林+Z 等苜蓿品种叶片细胞膜伤害率均小于 10%；在此处理中，苜蓿叶片细胞膜受伤害越重说明品种耐热性越差。根据苜蓿叶片细胞膜伤害率，供试品种耐热性强弱排序为卫士 302+Z>超级 13R>爱林+Z>超级阿波罗>胜利者>牧歌 401+Z>爱博>路宝>改革者+Z>美国杂交熊>牧野>爱维兰>射手>新疆大叶>全能+Z>保丰苜蓿>爱菲尼特+Z>巨人 201+Z>德国大叶熊。

表 2-7 热胁迫下不同苜蓿品种细胞膜相对透性

苜蓿品种	细胞膜相对透性/%		细胞膜伤害率/%
	对照	处理	
德国大叶熊	37.86	60.67	36.71
巨人 201+Z	38.48	53.83	24.94
爱菲尼特+Z	29.92	44.29	20.51
保丰苜蓿	36.30	49.24	20.31
全能+Z	31.78	44.85	19.17
新疆大叶	32.41	45.03	18.66
射手	29.66	42.68	18.52
爱维兰	31.77	43.53	17.24
牧野	36.25	46.10	15.45
美国杂交熊	29.17	39.28	14.27
改革者+Z	33.14	42.51	14.00
路宝	25.35	34.71	12.53
爱博	31.19	39.74	12.43
牧歌 401+Z	35.78	43.67	12.28
胜利者	35.68	43.46	12.09
超级阿波罗	35.81	43.01	11.21
爱林+Z	30.81	36.93	8.85
超级 13R	27.72	33.55	8.05
卫士 302+Z	35.63	40.41	7.42

在苜蓿品种耐热性鉴定中，有时同一品种内各植株间耐热性能差异较大，中兰 1 号、中苜 1 号由于品种内差异变化较大，三次重复误差很大 (>5%)，结果未统计，而试验又没能及时补做，故缺省两品种耐热性鉴定。

(三) 不同苜蓿品种秋眠性测定及其生产性能分析

苜蓿出苗第五周，根据苜蓿子叶节长对不同苜蓿秋眠性进行鉴定（依据子叶节长长度排序，并根据对照品种秋眠指数，对未知品种进行秋眠指数鉴定），结果见表 2-8。带 * 的秋眠指数为鉴定出的国内 5 个品种的秋眠指数。中兰 1 号秋眠指数为 3 级，德国大叶熊秋眠指数为 6 级，中苜 1 号、保丰苜蓿、美国杂交熊、新疆大叶等苜蓿品种秋眠指数均为 4 级。

表 2-8 不同苜蓿品种秋眠特性和生产性能

苜蓿品种	秋眠指数	子叶节长/mm	差异检验 1%	株重/g	株高/cm	返青期	返青高/cm
巨人 201+Z	2	1.19	F	0.89	17.33	3月5日	13.60
爱维兰	2	1.21	F	0.89	23.32	3月7日	13.95
牧野	2	1.26	EF	0.93	17.99	3月5日	11.63
改革者+Z	3	1.54	EF	0.97	16.95	3月6日	13.75
全能+Z	3	1.55	DEF	0.96	17.37	3月3日	12.53
中兰1号	3*	1.60	DEF	1.47	19.53	3月1日	14.98
胜利者	3	1.61	DEF	0.97	18.55	2月26日	13.15
卫士 302+Z	4	1.67	CDE	1.06	16.63	3月7日	10.73
中苜1号	4*	1.76	BCDE	1.47	23.78	2月24日	17.70
牧歌 401+Z	4	1.78	BCD	1.02	18.23	3月3日	11.60
爱菲尼特+Z	4	1.78	BCD	1.62	22.87	3月5日	13.40
超级阿波罗	4	1.80	BCD	1.04	19.94	3月5日	12.20
保丰苜蓿	4*	1.80	BCD	1.28	22.52	2月26日	14.70
美国杂交熊	4*	1.83	BCD	1.23	21.03	2月28日	13.88
新疆大叶	4*	1.85	BCD	0.92	18.67	3月1日	11.48
爱林+Z	5	1.97	BCD	1.21	19.13	2月28日	13.63
射手	5	2.03	BCD	1.46	23.37	2月27日	15.10
路宝	6	2.04	BCD	1.30	22.20	2月25日	15.10
德国大叶熊	6*	2.07	BC	1.35	23.93	2月22日	22.95
爱博	7	2.27	AB	1.18	21.56	2月26日	14.68
超级 13R	8	2.73	A	0.89	33.24	2月21日	21.38

注：*表示差异显著 ($P<0.05$)；同列大写字母不同表示在 1%水平上差异显著。

从表 2-8 中可见不同秋眠指数的苜蓿品种子叶节长不同，各苜蓿品种子叶节长为 1.19~2.73mm。对 21 个苜蓿品种的子叶节长（每个品种 15 个重复）方差分析结果见表 2-9。

表 2-9 不同苜蓿品种子叶节长方差分析

差异源	SS	df	MS	F	$P_r>F$	F-crit
品种间	37.387 73	20	1.869 386	6.27	<0.0001	1.61
处理间	1.374 408	14	0.098 172	0.33	0.9899	
误差	83.521 64	280	0.298 291			
总计	122.283 8	314				

不同苜蓿品种间 $F=6.27$ 、 $P_r<0.01$ ，说明不同苜蓿品种间子叶节长有极显著差异，而同一品种各重复间（品种内） $F=0.33$ 、 $P_r=0.990>0.05$ ，差异不显著。对 21 个品种子叶节长均值排列及 LSR 检验，在 0.01 水平上，秋眠指数为 7、8 的品种之间差异不显著，秋眠指数为 2、3 的品种之间差异不显著，但它们之间有极显著差异。秋眠指数为 4、5、6 的品种之间差异不显著。根据卢欣石（1998）关于苜蓿秋眠性鉴定的研究，将秋眠指数为 2、3 的苜蓿品种划分为秋眠性苜蓿。秋眠指数为 4、5、6 的品种

划分为半秋眠苜蓿，秋眠指数为 7、8 的苜蓿品种为非秋眠品种。

对不同苜蓿品种秋眠性相关分析见表 2-10。不同苜蓿品种秋眠指数与子叶节长、株高、返青高度有极显著的相关性，相关系数分别为 0.97、0.67 和 0.60 ($P<0.01$)。而秋眠指数与单株重无相关性，相关系数为 0.25 ($P=0.27$)。可见子叶节长作为鉴定苜蓿秋眠指数的合理性。子叶节长与株高和来年返青株高有极显著的相关性，相关系数分别为 0.69 和 0.57 ($P<0.01$)。据推测这与苜蓿胚轴收缩生长有关。从表 2-10 中可见，非秋眠性苜蓿来年返青期较晚。巨人 201+Z、牧野返青期为 3 月 5 日，而非秋眠性苜蓿超级 13R 和德国大叶熊返青期分别为 2 月 21 日和 2 月 22 日。且返青高度随秋眠指数增加有增高的趋势。以上研究表明秋眠性苜蓿，返青晚、生长慢、相对耐寒。根据秋眠指数将不同苜蓿品种抗寒性划分为，秋眠品种（巨人 201+Z、爱维兰、牧野>改革者+Z、全能+Z、中兰 1 号、胜利者），抗寒性高于半秋眠品种（卫士 302+Z、中苜 1 号、牧歌 401+Z、爱菲尼特+Z、超级阿波罗、保丰苜蓿、美国杂交熊、新疆大叶>爱林+Z、射手>路宝、德国大叶熊），非秋眠品种，爱博、超级 13R 的抗寒性最弱。

表 2-10 不同苜蓿品种秋眠特性的相关分析表

	秋眠指数	子叶节长	单株重	株高	返青高
秋眠指数	1				
子叶节长	0.9723**	1			
P	<0.0001				
单株重	0.2514	0.2580	1		
P	0.2716	0.2588			
株高	0.6717**	0.6922**	0.2319	1	
P	0.0009	0.0005	0.3117		
返青高	0.6046**	0.5730**	0.3002	0.7766**	1
P	0.0037	0.0066	0.1861	<0.0001	

（四）苜蓿品种秋眠性鉴定时间的选择

子叶节长指子叶节至第一片真叶节的节间长度。关于子叶节长测定时间，周丽霞等（1999）提出在第一片真叶长出后（第三周左右）进行测定。本试验选择部分代表品种在出苗第三周进行子叶节长和株高的测定。

表 2-11 表明不同秋眠指数的苜蓿品种在第三周，子叶节长和株高随秋眠指数增加而增加。经相关分析，秋眠指数与子叶节长、株高有极显著的相关性 ($P<0.01$)。子叶节长与株高有显著的相关性 ($P=0.029$)。对各品种的子叶节长进行了方差分析，各品种之间 F 值为 6.27, $P<0.01$ ，说明品种间差异极显著。用 Duncan 新复极差法对各品种子叶节长进行了检验，用字母表示了其显著性检验结果（表 2-11）。从表中可以看出，在 0.05 水平上，秋眠指数为 7、8 的苜蓿品种之间差异不显著，但与其他品种差异显著，而其他品种之间差异不显著。在 0.01 水平上，秋眠指数为 7、8 品种之间差异不显著，秋眠指数为 4、5、6、7 品种之间差异不显著，秋眠指数为 2、3、4、5、6 品种

之间差异不显著,但秋眠指数为 7、8 品种和秋眠指数为 2、3 品种之间差异极显著。由此可见苜蓿秋眠性的鉴定在第三周和第五周的结果一致。在实际测量中发现第三周各品种子叶节和真叶节清晰可见,测量准确度较高。而第五周时许多苜蓿第一片真叶脱落,且子叶节和真叶节变粗为测量带来许多不便。建议今后苜蓿的秋眠性鉴定在出苗第三周进行为好。

表 2-11 部分苜蓿品种株高、子叶节长和 Duncan 新复极差法检验

苜蓿品种	秋眠指数	株高/cm	子叶节长/mm	差异显著性	
				0.05	0.01
爱维兰	2	5.82	1.23	b	C
改革者+Z	3	6.59	1.59	b	C
爱菲尼特+Z	4	6.95	1.60	b	CB
射手	5	8.03	1.73	b	CB
路宝	6	8.12	2.00	b	CB
爱博	7	8.45	3.19	a	AB
超级 13R	8	8.58	3.65	a	A

注:同列大、小写字母不同分别表示在 1%和 5%水平上差异显著。

三、结论与讨论

(1) 不同热胁迫时间对不同苜蓿品种细胞膜相对透性影响结果表明,热胁迫时间 50min 为较适宜的处理时间,以此可作为进行多品种苜蓿耐热性鉴定的胁迫时间。

(2) 热胁迫下不同苜蓿耐热性研究表明,在 50℃高温胁迫 50min 下,苜蓿叶片细胞膜伤害率越高,品种耐热性越差。其中爱林+Z、超级 13R、卫士 302+Z 等品种细胞膜伤害率低,说明这些品种耐热性强;德国大叶熊、巨人 201+Z、爱菲尼特+Z、保丰苜蓿等品种细胞膜伤害率高,品种耐热性弱。

(3) 电导法测苜蓿耐热性需做多次重复,否则可能会因为苜蓿单株间差异过大而造成试验失败。

(4) 不同苜蓿品种秋眠性鉴定表明,子叶节长为划分秋眠指数的合理指标。依据秋眠指数将苜蓿品种划分为秋眠品种、半秋眠品种和非秋眠品种。秋眠性苜蓿幼苗期生长慢、来年返青晚,返青生长缓慢,说明其具较强耐寒性。

(5) 依据秋眠指数对 21 种苜蓿耐寒性强弱划分为:秋眠品种(巨人 201+Z、爱维兰、牧野>改革者+Z、全能+Z、中兰 1 号、胜利者)抗寒性高于半秋眠品种(卫士 302+Z、中苜 1 号、牧歌 401+Z、爱菲尼特+Z、超级阿波罗、保丰苜蓿、美国杂交熊、新疆大叶>爱林+Z、射手>路宝、德国大叶熊)。非秋眠品种,爱博、超级 13R 抗寒性最弱。

(6) 对苜蓿秋眠性鉴定时期的研究表明,第三周和第五周测定的结果一致。但从操作角度上考虑,建议在出苗第三周测定较好。

(7) 苜蓿秋眠性研究在国内进展较慢,秋眠性与耐寒性的关系需做进一步深入研究,以利于同国际标准接轨。

第三节 不同苜蓿品种耐盐性研究

我国拥有大面积的盐碱地。苜蓿产业化面临的问题之一是如何合理开发、利用盐渍土地资源。选择耐盐碱的苜蓿品种进行土地改良，是一条切实可行之路。目前对苜蓿耐盐性的研究较多。在盐碱地中，苜蓿首先遇到的是在盐碱条件下种子萌发的问题。本研究对目前国内外 19 个优质苜蓿品种进行种子萌发期耐盐能力的比较试验，以便为筛选具有较高耐盐性的苜蓿品种提供科学依据，从而为盐碱地人工苜蓿草地的开发奠定基础。

一、试验材料及方法

试验材料同第一节（供试品种为除新疆大叶、德国大叶外 19 个苜蓿品种）。鉴于我国大部分盐碱地主要是典型的氯化物盐渍化土壤分布区，试验选用了 NaCl 溶液作为种子发芽的培养液，单盐毒害比复盐大，使用单盐 NaCl 溶液鉴定出的苜蓿品种更耐盐，参照前人的研究。设定 0、0.3%、0.7%、1.0% 4 种不同处理浓度。

试验方法依照国际种子检验规程，发芽床采用滤纸法。使用 100mm 口径的培养皿，皿内铺 2 张直径为 90mm 的滤纸，培养皿置于 20℃ 恒温培养箱内，每两天称重补充所失水分。正常发芽种子为有正常的幼根，并至少有 1 片子叶或 2 片子叶保留低于 2/3（不包括 2/3）。发芽势从第 4 天统计，苜蓿发芽率的日期规定在 7 天以上，所以增加检查记载次数。

第 6 天、第 8 天各统计发芽势一次，第 12 天统计发芽率，测定幼根长和苗高，每个重复测 5 株，计算各浓度下相对发芽率、相对发芽势、平均值及变异系数；以发芽势、发芽率、苗高、根长为指标对 19 个苜蓿品种进行聚类分析，聚类分析采用系统聚类法，使用软件为 SAS 8.0。

$$\text{种子发芽势} = \frac{\text{发芽初期(规定日期内)正常发芽粒数}}{\text{供检种子粒数}} \times 100\%$$

$$\text{种子发芽率} = \frac{\text{发芽终期(规定日期内)全部正常发芽粒数}}{\text{供检种子粒数}} \times 100\%$$

二、结果与分析

（一）不同浓度盐溶液对各品种种子发芽率的影响

从表 2-12 中可知，各苜蓿品种的发芽率均在一定盐溶液浓度范围内随盐浓度升高而降低。在 0.3%、0.7%、1.0% 3 个浓度中，19 个品种的相对平均发芽率依次为 53.68%、26.58%、24.19%。这说明浓度为 0.7%、1.0% 的 NaCl 溶液对苜蓿发芽有抑制作用。各处理浓度下相对发芽率均不高，这是因为依据国际种子检验标准，在规定发芽率统计天数内，许多种子虽然有正常幼根，但并未露出 1 片子叶或 2 片子叶。不能算作正常发芽种子，造成各处理发芽率不高。

表 2-12 不同浓度盐溶液对各品种发芽率的影响 (相对发芽率)

苜蓿品种	盐溶液浓度/%			
	0	0.3	0.7	1
射手	100	70.0	30.0	43.3
超级 13R	100	66.2	45.5	36.4
中苜 1 号	100	71.2	26.9	34.6
爱博	100	46.9	45.3	32.8
爱林+Z	100	60.6	31.0	32.4
爱非尼特+Z	100	47.0	24.2	30.3
牧野	100	43.8	28.8	27.4
卫士 302+Z	100	65.3	26.7	26.7
美国杂交熊	100	61.8	17.1	25.0
超级阿波罗	100	32.5	27.3	23.4
路宝	100	41.5	33.8	23.1
巨人 201+Z	100	52.2	25.4	22.4
胜利者	100	54.4	26.5	20.6
改革者+Z	100	41.5	29.2	18.5
保丰苜蓿	100	54.0	20.6	14.3
中兰 1 号	100	41.5	15.4	13.8
全能+Z	100	54.3	15.7	12.9
爱维兰+Z	100	63.8	19.0	12.1
牧歌 401+Z	100	51.4	16.7	9.7
平均		53.68	26.58	24.19
变异系数		20.46	32.40	38.46

对不同浓度 NaCl 胁迫下不同苜蓿品种发芽率变异系数分析可知, 在 0.3%、0.7%、1.0% 浓度下, 各品种变异系数分别为 20.46%、32.40%、38.46%, 说明在 0.7%、1.0% 浓度胁迫下各品种耐盐性差异增大。这两个浓度处理用做品种耐盐性鉴定更合理。在 0.7%、1.0% 浓度下相对发芽率高的品种种子耐盐性强, 综合分析射手、超级 13R、中苜 1 号、爱林+Z 等苜蓿品种, 在 0.7%、1.0% 浓度处理下相对发芽率均高于 30%, 说明这几个品种更耐盐。而全能+Z、牧歌 401+Z、中兰 1 号、爱维兰等品种, 在 0.7%、1.0% 浓度处理下, 相对发芽率均低于 20%, 表现较不耐盐。

(二) 不同浓度盐溶液对各品种幼根伸长量的影响

在不同盐溶液下, 各品种种子萌发期的幼根伸长与发芽率不完全相同, 随着浓度的升高, 幼根伸长并未完全降低, 见表 2-13。在 0、0.3%、0.7%、1.0% 4 种 NaCl 处理下, 各品种苜蓿平均根长分别为 3.57cm、4.12cm、2.80cm、2.15cm。在 0.3% 低盐浓度处理下, 19 个苜蓿品种中有 17 个品种幼根长高于对照, 苜蓿平均幼根长 4.12cm, 高于对照 0.55cm。可见低浓度 NaCl 溶液对苜蓿幼根生长有一定刺激作用, 此结果符合前人的研究, 低盐浓度对种子萌发有促进作用。而 0.7%、1.0% 浓度下, 苜蓿幼根根长小于对照, 说明高盐浓度抑制幼根伸长。

表 2-13 不同浓度盐溶液对各品种幼根生长量的影响

苜蓿品种	0%	0.3%	0.7%	1.0%
巨人 201+Z	4.10	4.05	2.76	2.47
牧野	3.56	4.23	3.36	2.18
全能+Z	3.68	4.76	2.97	2.75
卫士 302+Z	3.80	4.12	2.65	2.09
牧歌 401+Z	3.53	4.45	2.18	2.37
超级阿波罗	3.24	3.63	2.55	2.25
胜利者	2.85	3.53	2.73	2.08
爱林+Z	3.15	4.66	3.21	2.19
爱维兰+Z	3.94	4.33	2.69	1.73
改革者+Z	3.71	4.43	2.79	2.19
爱菲尼特+Z	3.20	3.93	2.36	2.06
射手	3.26	3.66	3.05	2.12
路宝	3.88	4.21	2.89	2.10
爱博	3.96	4.08	3.15	1.99
超级 13R	3.95	4.56	3.18	2.37
中苜 1 号	3.28	3.86	3.83	2.19
保丰苜蓿	3.34	3.95	2.34	1.88
中兰 1 号	3.36	4.34	2.51	1.87
美国杂交熊	4.04	3.49	2.06	1.90
平均	3.57	4.12	2.80	2.15
变异系数	10.62	9.58	16.19	11.04

不同 NaCl 浓度处理下各品种幼根伸长量变异分析可知, 在 4 种处理下, 各品种变异系数为 10.62%、9.58%、16.19%、11.04%。0.3% 浓度处理下的幼根伸长量变异最小, 从另一个侧面说明, 低盐促进苜蓿幼根生长, 品种之间差异减少。随盐溶液浓度增高, 苜蓿幼根生长受到抑制, 各品种间耐盐差异变大。0.7% 浓度处理下, 各品种苜蓿幼根长变异系数达 16.19%, 1% 浓度处理下变异系数减为 11.04%, 说明 1.0% 浓度处理对幼根抑制较大, 可见 0.7% 浓度处理下幼根长作为苜蓿品种种子耐盐鉴定的指标更为合理。0.7% 浓度处理下, 幼根长的品种更为耐盐, 牧野、爱林+Z、中苜 1 号、爱博、超级 13R 等品种幼根大于 3.10cm, 说明这些品种更耐盐。而牧歌 401+Z、保丰苜蓿、爱菲尼特+Z、美国杂交熊、中兰 1 号等品种幼根小于 2.6cm, 这些品种耐盐性较差, 幼根生长缓慢。

(三) 不同浓度盐溶液对各品种苗高的影响

由表 2-14 可知, 随着盐溶液浓度的升高, 各品种幼苗苗高(胚轴长)均呈下降趋势, 呈现负相关, 在 0、0.3%、0.7%、1.0% 各处理下, 幼苗平均高度为 3.37cm、3.04cm、2.16cm、1.83cm。其中 0.3% 浓度下苗高比对照仅下降 0.33cm, 说明低浓度盐分对苜蓿苗高抑制不大。在各处理下, 各品种苗高变异系数为 6.57%、10.52%、12.49%、11.65%, 其中 0.7% 浓度下各品种变异系数最大, 品种间耐盐性差异较大,

以此浓度下幼苗苗高作为鉴定苜蓿品种耐盐性的指标较为合理。在 0.7% 浓度处理下, 幼苗生长高的品种较为耐盐, 巨人 201+Z、牧野、路宝、中苜 1 号、超级 13R 苗高均大于 2.35cm, 表现较为耐盐, 而牧歌 401+Z、超级阿波罗、美国杂交熊、卫士 302+Z 等品种苗高低于 2.0cm, 生长慢, 耐盐性较差。

表 2-14 不同浓度盐溶液对苗高 (cm) 的影响

苜蓿品种	0%	0.3%	0.7%	1.0%
巨人 201+Z	3.37	2.99	2.58	2.31
牧野	3.33	2.93	2.47	1.80
全能+Z	3.68	2.88	2.00	2.02
卫士 302+Z	3.01	2.63	1.97	1.73
牧歌 401+Z	3.19	2.97	1.65	1.64
超级阿波罗	3.29	2.48	1.77	1.68
胜利者	3.41	2.72	1.95	1.56
爱林+Z	3.20	2.98	2.19	1.69
爱维兰+Z	3.51	2.89	2.32	1.67
改革者+Z	3.40	3.37	2.13	2.04
爱菲尼特+Z	3.25	3.30	2.27	1.96
射手	3.24	3.00	2.24	1.47
路宝	3.72	3.44	2.62	1.69
爱博	3.61	3.42	2.08	1.95
超级 13R	3.86	3.77	2.35	1.81
中苜 1 号	3.15	3.29	2.43	2.09
保丰苜蓿	3.45	2.78	2.10	2.07
中兰 1 号	3.15	2.87	2.10	1.87
美国杂交熊	3.26	2.97	1.79	1.72
平均	3.37	3.04	2.16	1.83
变异系数	6.57	10.52	12.49	11.65

(四) 不同浓度盐溶液对各品种发芽势 (相对发芽势) 的影响

种子发芽势指种子发芽试验初期 (规定日期) 正常发芽的种子占供试种子数的百分率, 它表明种子在发芽初期的发芽力。不同浓度下苜蓿第 4 天 (规定日期)、第 6 天、第 8 天种子的发芽势, 在 0.3% 浓度影响下, 苜蓿不同日期平均发芽势分别为 57.58%、42.78%、40.17%, 而 0.7% 浓度下发芽势分别为 18.85%、22.32%、17.23%; 1.0% 浓度下发芽势分别为 13.7%、14.41%、15.30%, 说明 0.3% 浓度下对苜蓿发芽势影响较小, 此浓度不宜作为苜蓿品种耐盐鉴定。

从苜蓿品种不同日期发芽势变异系数可知, 0.3% 浓度下变异系数较低, 而高浓度下变异系数较高。在第 4 天和第 6 天, 0.7%、1.0% 处理下, 苜蓿发芽势变异系数均大于 50%, 表明第 4 天和第 6 天苜蓿发芽势充分表现出苜蓿发芽初期种子的发芽力, 品种间耐盐性有显著差异, 因此, 测定第 4 天、第 6 天, 0.7%、1.0% 浓度处理下苜蓿品

种发芽势，可以较好地鉴定出苜蓿品种间耐盐力的大小。在 0.7%浓度处理下，苜蓿第 4 天、第 6 天的发芽势可见：牧野、爱林+Z、超级 13R、胜利者等品种耐盐性较强，巨人 201+Z、全能+Z、保丰苜蓿等品种耐盐性较差。在 1.0%浓度处理下，苜蓿第 4 天、第 6 天的发芽势可见：巨人 201+Z、爱林+Z、射手、爱博、中苜 1 号等品种耐盐性较强，全能+Z、保丰苜蓿、卫士 302+Z、路宝等品种耐盐性较差。

综上所述，使用不同指标来判定苜蓿各品种间耐盐性的强弱，结果并不完全一致，还需进一步进行多指标综合分析。

(五) 不同苜蓿品种耐盐性聚类分析

综合以上分析以 0.7%、1%浓度处理下，各苜蓿品种第 4 天、第 6 天的发芽势，第 12 天发芽率及 0.7%浓度处理幼根长、苗高等 8 项指标，对 19 个苜蓿品种进行聚类分析，结果见图 2-4 和表 2-15。可以看出，聚类结果可分为两个大类。每一类可再分为两小类，根据以上结果将不同苜蓿品种划分为高耐盐品种和低耐盐品种。进一步细分，在高耐盐类中爱林+Z、射手、牧野、超级 13R 4 个品种为一类，其耐盐性高于另一类（中苜 1 号、爱博和巨人 201+Z）；在低耐盐类中，爱维兰、保丰苜蓿、中兰 1 号、全能+Z、牧歌 401+Z 为一类，其耐盐性低于卫士 302+Z、超级阿波罗、胜利者、美国杂交熊、改革者+Z、路宝、爱菲尼特+Z 这一类。

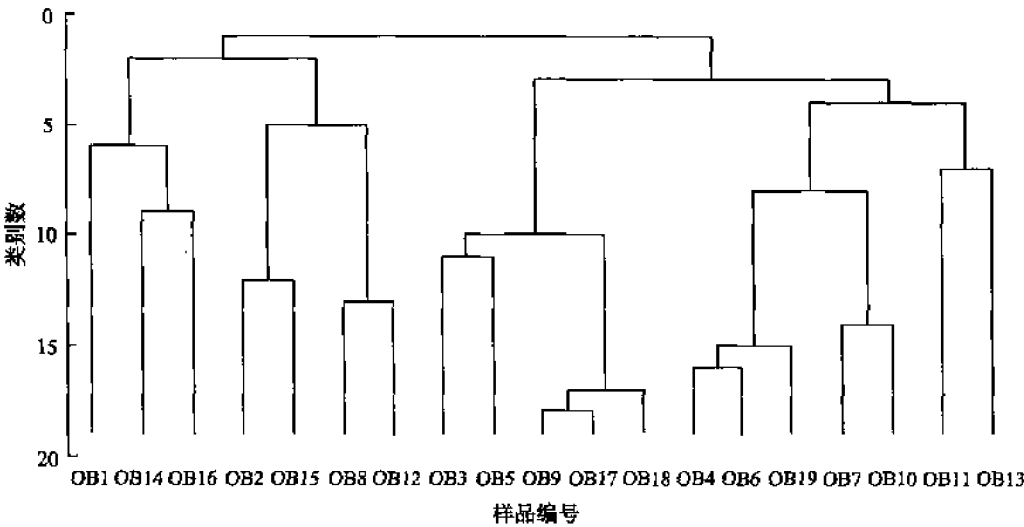


图 2-4 不同苜蓿品种耐盐性聚类分析图

表 2-15 不同苜蓿品种耐盐性聚类结果（分四类）

CLUSTER=1				CLUSTER=2			
CLUSTER=1		CLUSTER=2		CLUSTER=3		CLUSTER=4	
序号	名称	序号	名称	序号	名称	序号	名称
OB9	爱维兰	OB4	卫士 302+Z	OB8	爱林+Z	OB14	中苜 1 号
OB17	保丰苜蓿	OB6	超级阿波罗	OB12	射手	OB16	爱博

续表

CLUSTER=1				CLUSTER=2			
CLUSTER=1		CLUSTER=2		CLUSTER=3		CLUSTER=4	
序号	名称	序号	名称	序号	名称	序号	名称
OB18	中兰 1 号	OB19	美国杂交熊	OB2	牧野	OB1	巨人 201+Z
OB3	全能+Z	OB7	胜利者	OB15	超级 13R		
OB5	牧歌 401+Z	OB10	改革者+Z				
		OB11	爱菲尼特+Z				
		OB13	路宝				

三、结论与讨论

(1) 不同盐溶液浓度对各苜蓿品种种子发芽率的影响表明, 0.7%、1.0% 浓度 NaCl 处理下, 各苜蓿品种耐盐性差异显著。这两项指标可作为苜蓿耐盐性鉴定。

(2) 不同浓度盐溶液对各品种幼根、幼苗的影响可知, 0.3% 低浓度 NaCl 溶液, 对苜蓿幼根生长有一定刺激作用; 0.7% 浓度处理下, 各苜蓿品种的幼根长和幼苗变异系数最大, 品种间耐盐性出现较显著的差异, 可以作为苜蓿种子萌发耐盐鉴定的指标。

(3) 不同浓度溶液对不同品种发芽势的影响表明, 在第 4 天、第 6 天, 0.7%、1.0% 浓度处理下, 各苜蓿品种发芽初期种子发芽力有明显的不同, 各品种间种子耐盐性差异显著, 这四项指标作为苜蓿种子萌发耐盐性鉴定的指标较为合理。

(4) 选择不同耐盐鉴定指标, 对多个品种苜蓿耐盐性鉴定结果并不完全一致, 需进行多指标综合分析。

(5) 以发芽率、发芽势、幼根长、幼苗高等 8 项指标, 对 19 个苜蓿品种聚类分析。结果表明: 苜蓿种子耐盐能力强弱排序为: 爱林+Z、射手、牧野、超级 13R>中苜 1 号、爱博、巨人 201+Z>胜利者、改革者+Z、爱菲尼特+Z、路宝、超级阿波罗、卫士 302+Z、美国杂交熊>爱维兰、保丰苜蓿、中兰 1 号、全能+Z、牧歌 401+Z。

第四节 不同苜蓿品种抗蚜性鉴定及抗性机理

蚜虫是危害紫花苜蓿的主要有害生物类群, 属于同翅目蚜科 (Aphididae) 和斑蚜科。主要有 3 种: 苜蓿蚜、豆无网长管蚜 (*Acyrtosiphon pisum* Harris) 和苜蓿斑蚜 (*Therioaphis trifolii* Monell)。其多聚集在紫花苜蓿的嫩茎、叶、幼芽和花等各部位上, 以刺吸式口器吸取汁液, 导致被害植株叶片卷曲, 蕾和花变黄脱落, 并影响生长发育、开花结实和牧草产量, 严重时, 田间植株成片枯死。蚜虫因能大量排泄蜜露而常被人们称为油汗或腻虫。蜜露引起叶片发霉, 影响牧草的产量和质量。

我国主要依赖化学农药对蚜虫进行防治, 但由于其个体小、繁殖能力高、抗逆性强, 几乎对所有的化学杀虫剂都产生了强烈的抗药性, 以至于在生产中形成了“愈危害愈用药, 愈用药愈泛滥”的恶性循环局面。加之化学农药的长期使用, 使大量天敌被毒杀, 破坏了生态平衡。因此, 在蚜虫的综合治理中, 选育和种植抗蚜虫紫花苜蓿品种,

利用品种抗蚜性来抵御苜蓿蚜虫的危害,是从根本上解决蚜害问题的途径之一。这不仅对苜蓿产业开发和生态环境建设具有重要意义,而且减少了对化学防治的需求,降低了生产成本,更为重要的是减少了对空气、水和土壤污染的可能,减少了农药在草产品和畜产品中的残留,具有显著的经济效益、社会效益和生态效益。

了解紫花苜蓿品种对苜蓿蚜虫的抗性机制是选育抗蚜性紫花苜蓿品种所必需的基础研究。国外有关抗性机制的研究较多,但国内起步较晚。因此,本研究在借鉴国内外有关研究工作的基础上,主要从诱导型抗性方面研究陕西省主要栽培紫花苜蓿品种对蚜虫危害胁迫的抗性机制及生理响应,以阐明蚜虫危害胁迫对紫花苜蓿生长发育的伤害机理及紫花苜蓿对蚜虫危害胁迫的耐性机制,对进一步开发高抗性的紫花苜蓿新品种提供可以借鉴的理论依据。

一、材料与方法

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。试验选取对抗蚜性表现稳定的 6 个 6 年生紫花苜蓿品种(表 2-16),其中引进紫花苜蓿品种种子全部购自美国赛贝科种子子公司,国内品种种子来自其原产地。

表 2-16 试验苜蓿品种来源和特性

编号	紫花苜蓿品种	材料来源	休眠级数	抗性
1	中苜 1 号	北京	4	高感
2	新牧 1 号	新疆		高感
3	巨人 201+Z	美国	2	中抗
4	牧野	美国	2	中抗
5	德国大叶熊	宁夏	6	高抗
6	美国杂交熊	宁夏	4	高抗

参试品种田间随机排列,小区面积 18.0m^2 ($9.0\text{m} \times 2.0\text{m}$),每小区 5 行,行距 30cm,每品种重复 5 次。2001 年 5 月 4~6 日三天播种,人工开沟、条播,播深 2cm,播量 $15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。整个生育期全部旱作,不施肥、不喷洒农药,完全自然状态生长,仅进行田间适时人工除草。

试验供试虫源采自西北农林科技大学农作一站苜蓿植株上自然发生的蚜虫,经鉴定为苜蓿蚜。在人工气候箱内饲养繁殖,温度 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度 $65\% \pm 5\%$,光照 14L/10D,其后代供试验使用。

(一) 田间抗性鉴定

自 4 月中旬至 5 月下旬调查第一茬的蚜虫种群数量及随时间变化的动态,于苗期、分枝期、现蕾期、初花期、盛花期各调查一次。调查采取 5 点取样法,每点 20 株,统计蚜虫数量,绘制自然感蚜量动态曲线,计算感蚜指数(mean index of aphids susceptibility, IAS):

IAS=各品种单株平均蚜量/总鉴定品种的单株平均蚜量 (刘绍友等, 1993)。

其抗性标准划分为: 蚜量比值为 0~0.60、0.61~1.20、>1.21 时, 抗性程度分别为高抗、中抗、高感。

(二) 蚜虫短期危害下苜蓿丙二醛含量及防御性酶活性的测定

于 2006 年 5 月底第一茬刈割后分别对 6 种抗性不同的紫花苜蓿单株罩网 (30cm×30cm×60cm), 以防止蚜虫及其他害虫对其危害, 每品种 10 株。待第二茬苜蓿生长到初花期时, 选取长势一致的 6 或 7 株, 给罩网单株接 2~3 龄若虫, 每网 20 头。分别于接虫前, 接虫后 12h、24h、48h、120h、192h 取第 3 或第 4 个展开叶 (自上而下), 每品种取 7 或 8 片, 充分混合, 液氮保存, 以供测定。

丙二醛含量测定: 采用硫代巴比妥酸法。取待测叶片 0.3g, 加 5ml (10%) TCA, 研至均浆, 4℃ 4000g 离心 10min。吸取上清液 2ml 加 2ml TBA, 对照为 2ml 蒸馏水加 2ml TBA。沸水浴 20min。分别在 450nm、532nm、600nm 比色。含量表示为 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

超氧化物歧化酶活性测定: 采用氮蓝四唑 (NBT) 比色法 (李和生, 2000)。取待测叶片 0.3g, 加 8ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH7.8) PBS, 冰浴研磨, 4℃ 10 000g 离心 15min。反应体系: 1.5ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH7.8) PBS, 0.3ml ($130\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Met, 0.3ml ($750\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) NBT, 0.3ml ($100\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) EDTA- Na_2 , 0.3ml ($20\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 的核黄素, 蒸馏水 0.5ml, 测定管加酶液 0.1ml, 对照管加 0.1ml 的 PBS。对照管和测定管各取两支 (各管的透光尽量一致), 混合均匀后, 把一支对照管放在暗处, 其他 3 支置于 4000lx 日光灯下反应 8min, 560nm 比色。以抑制 NBT 光还原的 50% 作为一个酶活力单位 U, 酶活性表示为 $\text{U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

过氧化物酶活性测定: 采用愈创木酚法 (李和生, 2000)。取待测叶片 0.3g, 加 8ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH5.5) PBS, 冰浴研磨, 4℃ 10 000g 离心 10min, 取上清液定容于 25ml 容量瓶中。反应体系: 2.9ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH5.5) PBS, 1.0ml (2%) H_2O_2 , 1.0ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 愈创木酚和 0.1ml 酶液, 对照管加 0.1ml 灭活酶。470nm 比色, 每 20s 记录 1 次, 共记录 4min。以光密度对时间作图, 取最初反应直线部分。以每分钟内 OD_{470} 变化 1.0 为 1 个酶活性单位, 酶活性表示为 $\Delta\text{OD}_{470} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

过氧化氢酶活性测定: 采用紫外吸收法测定 (高俊凤, 2000)。酶液提取与 SOD 相同。反应体系: 0.1ml 酶液, 1.0ml (pH7.0) Tris-HCl, 1.7ml 蒸馏水 (对照加灭活酶)。逐管加入 0.2ml ($0.2\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) H_2O_2 , 并立即在 240nm 下测定光密度, 每隔 20s 记录一次, 共 4min。以光密度对时间作图, 取最初反应直线部分。以每分钟内 OD_{240} 变化 0.1 为 1 个酶活性单位, 酶活性表示为 $\Delta\text{OD}_{240} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

苯丙氨酸解氨酶活性测定: 参照高俊凤 (2000) 的方法。取待测叶片 0.3g, 加 pH 8.3 提取介质 (内含 $0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 8.8 硼酸缓冲液, 5.0mmol/L 巯基乙醇、 $1.0\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA- Na_2 , 5%甘油) 冰浴研磨, 4℃ 10 000g 离心 15min。反应体系: 0.5ml 酶液, 1ml ($0.02\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) L-苯丙氨酸, 2ml ($0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH8.8) 硼酸缓冲液和 1ml 蒸馏水。对照不加 L-苯丙氨酸, 多加 1ml 提取介质。将此反应液置 30℃ 恒温水浴中保温 60min, 加入 0.2ml ($6\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 盐酸终止反应, 290nm 比色。以每小时在

290nm 处吸光度变化 0.01 为一个酶活性单位, 酶活性表示为 $\Delta OD_{290} \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 。

多酚氧化酶活性测定: 参照朱广廉等 (1990) 的方法。酶液提取同 POD。反应体系: 3.9ml ($0.05 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ 、pH5.5) PBS, 1ml ($0.1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$) 儿茶酚, 0.5ml 酶液, 对照管加 0.1ml 灭活酶。37℃ 水浴 10min。在冰浴中加 2ml (20%) 三氯乙酸终止反应。525nm 比色。酶活性表示为 $\Delta OD_{525} \cdot g^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

以上测定每品种重复 5 次。

(三) 蚜虫短期危害胁迫对不同苜蓿品种光合特性的测定

于 2006 年 5 月底第一茬刈割后分别对 6 种抗性不同的紫花苜蓿单株罩网 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$), 以防止蚜虫及其他害虫对其危害, 每品种 10 株。待第二茬苜蓿生长到初花期时, 选取长势一致的 6 或 7 株, 给罩网单株接 2~3 龄若虫, 每网 20 头。分别于 2006 年 7 月 7 日 (胁迫前)、7 月 9 日 (胁迫 2 天、前期)、7 月 12 日 (胁迫 5 天、中期) 和 7 月 15 日 (胁迫 8 天、后期) 早晨 9:00~10:00 测定第 5 或第 6 个完全展开叶 (中间小叶) 的气体交换参数 (从上向下), 并采摘第 2 或第 3 个叶片, 用于测定叶绿素含量。

叶绿素含量测定: 参考高俊凤 (2000) 的方法并加以改进。取苜蓿叶片 0.1g, 剪碎, 置于 10ml 丙酮、无水乙醇和水的混合液中 ($4.5 : 4.5 : 1$, V/V/V) 遮光浸泡提取, 24h 后 (肉眼观察叶片完全发白) 把混合液定容至 25ml, 摇匀, 使用 UV-2550 型紫外分光光度计在 663nm 和 645nm 处测定提取液的 OD 值, 计算所测叶片中叶绿素的总量 Chl (Chla+Chlb)、Chla 和 Chlb 的含量, 并计算 Chla/Chlb 值。以上测定每品种重复 5 次。

气体交换参数测定: 利用 Li-6400 便携式光合系统测定仪 (Li-6400; Li-Cor Inc., NE, USA), 选用红蓝光源叶室测定苜蓿叶片气体交换参数。测定条件为 CO_2 浓度 (385 ± 5) $\mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 测定光强为 $1000 \mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 、胞间 CO_2 浓度 C_i 等气体交换参数由仪器自动给出, 气孔限制值 L_s 按照公式 $L_s = 1 - C_i/C_a$ (Berry and Downton, 1982) 计算。以上测定每个叶片重复 3 次, 每品种重复 5 次。

(四) 蚜虫短期危害胁迫对不同苜蓿品种叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数测定: 使用 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 配套荧光叶室, 于早晨 10:00~11:00 测定相同叶位 (从顶部向下第 5、第 6 片完全展开叶的中间小叶) 的叶绿素荧光。具体步骤如下: 暗适应 30min 的叶片, 照射检测光获取初始荧光 (F_o), 用饱和的红蓝光照射, 获取最大荧光 (F_m)。然后再把样品置于自然光下照射 30min, 得到稳态荧光 (F_s), 接着用饱和光照射, 得到光适应后的最大荧光 F'_m , 再施加远红光以测量光适应的初始荧光 (F'_o)。其他的叶绿素荧光参数: PS II 最大光能转换效率 (F_v/F_m)、PS II 潜在活性 (F_v/F_o)、PS II 反应中心实际光能转化效率 ($\Phi \text{PS II}$)、光合电子传递速率 (ETR)、光化学猝灭系数 (qP) 和非光化学猝灭系数 (NPQ), 由仪器自动给出。以上测定每个叶片重复 3 次, 每品种重复 5 次。

采用 Excel 2003 和 SAS V8 统计分析软件对数据进行作图和方差分析。

二、结果与分析

(一) 不同苜蓿品种田间抗蚜性鉴定

利用田间自然感蚜量调查所得数据, 绘出各品种感蚜量随时间发生的动态曲线 (图 2-5), 分析表明: 在 2006 年 4 月初至 6 月初紫花苜蓿第一茬, 田间自然发生的蚜虫数量随着时间的推移不断增加, 但不同品种发生量不同。到达盛花期时蚜虫发生量最大, 且各品种间差异极显著 ($F=62.96$, $P=0.0001<0.01$), 平均每株蚜虫发生量为: 中苜 1 号 15.34 头·株⁻¹、新牧 1 号 13.28 头·株⁻¹、巨人 201+Z 9.64 头·株⁻¹、牧野 11.2 头·株⁻¹、德国大叶熊 7.68 头·株⁻¹、美国杂交熊 8.32 头·株⁻¹。

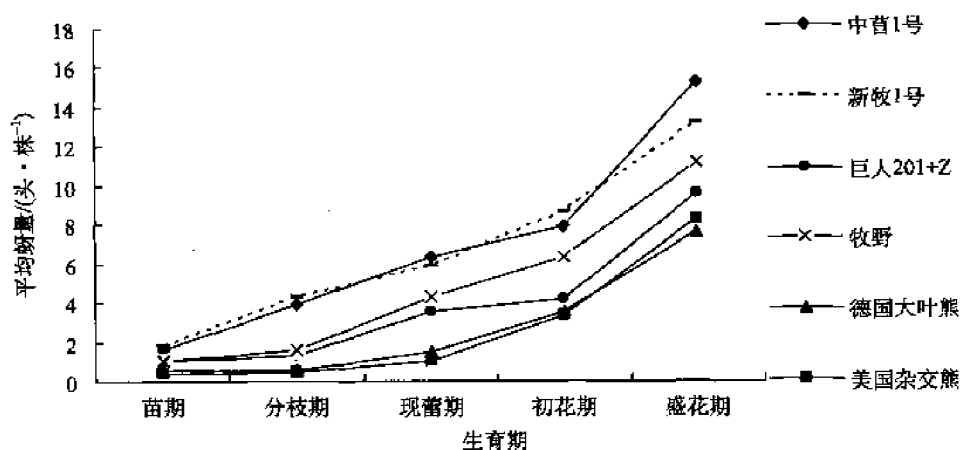


图 2-5 不同抗性品种上平均单株蚜量动态曲线图

对 6 种紫花苜蓿材料进行研究, 使用蚜量比值法计算 IAS (各品种单株平均蚜量/总鉴定品种的单株平均蚜量) (侯有明等, 1994; 刘绍友等, 1993), 并进行了抗蚜性鉴定。如表 2-17 所示, 得到高抗材料 2 份, 分别为德国大叶熊、美国杂交熊; 中抗材料 2 份, 分别为巨人 201+Z、牧野; 高感材料 2 份, 分别为中苜 1 号、新牧 1 号。

表 2-17 不同紫花苜蓿感蚜指数

抗性	高感		中抗		高抗	
分级	>1.21		0.61~1.20		0~0.60	
品种	中苜 1 号	新牧 1 号	巨人 201+Z	牧野	德国大叶熊	美国杂交熊
感蚜指数 IAS	1.50	1.45	0.84	1.04	0.59	0.58

(二) 蚜虫危害下对不同苜蓿品种体内丙二醛含量及防御性酶活性的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的产物之一, 其含量高低被用作膜伤害指标 (Bailly et al., 1996)。测定结果 (图 2-6) 表明: 蚜虫危害胁迫前高感品种的 MDA 含量高于中

抗品种和高抗品种, 经方差分析表明高感品种、中抗品种和高抗品种差异极显著 ($F=43.74$, $P=0.0001<0.01$)。蚜虫危害胁迫后, 各抗性品种的 MDA 含量均随危害胁迫的加剧有不同程度的上升。高感品种上升较快, 12h 出现高峰, 中抗品种也于 12h 达到较高水平, 而高抗品种上升较慢, 到 24h 才出现高峰。48h 后, 中抗品种和高抗品种的 MDA 含量趋于稳定, 而高感品种继续上升, 并于 192h 出现第二次高峰。在蚜虫危害胁迫的 192h 内, 高感品种的 MDA 含量始终高于中抗品种, 而高抗品种始终低于二者。

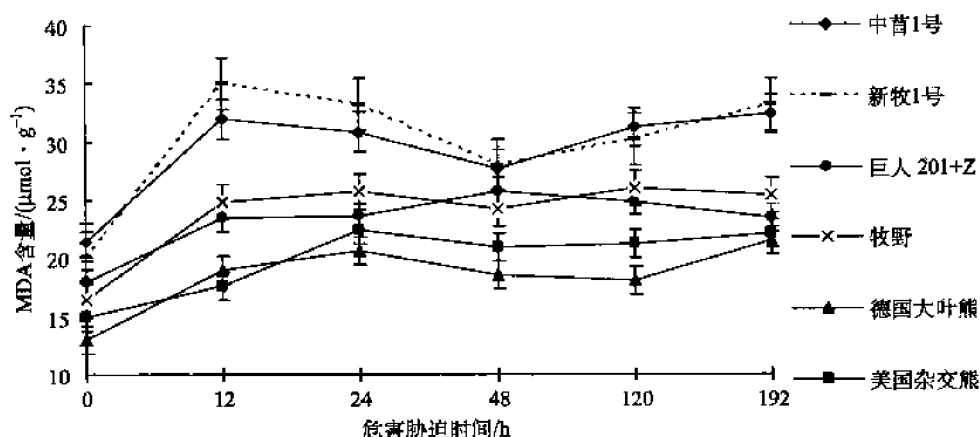


图 2-6 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 MDA 含量变化

紫花苜蓿不同抗性品种与蚜虫互作中 SOD 活性变化结果 (图 2-7) 表明: 蚜虫危害胁迫前, 高感品种、中抗品种和高抗品种的 SOD 活性均处于较低水平, 经方差分析表明高感品种、中抗品种和高抗品种差异极显著 ($F=45.47$, $P=0.0001<0.01$)。在蚜虫危害胁迫 12h 后, 高抗品种的 SOD 活性迅速上升并达到最大值, 而后迅速下降, 到 48h 又出现一个活性高峰, 但峰值远小于第一次, 随后 SOD 活性下降。中抗品种在蚜虫危害胁迫 12h 后也出现一活性高峰, 随后缓慢下降。高感品种在蚜虫危害胁迫的 192h 内仅在 24h 出现一次活性高峰, 不但晚于中抗品种和高抗品种, 而且峰值较低。在蚜虫危害胁迫的整个过程中, 高抗品种和中抗品种的 SOD 活性始终高于高感品种, 并且在 192h 高感品种、中抗品种和高抗品种的 SOD 活性均下降至危害胁迫前水平。

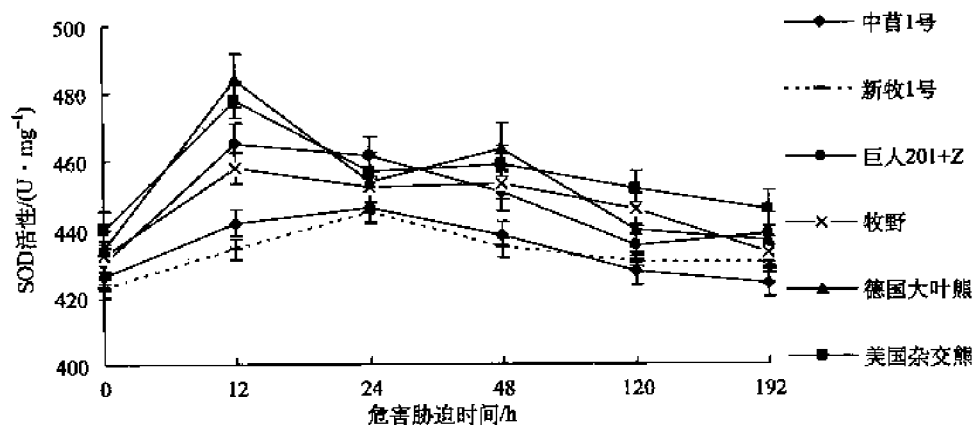


图 2-7 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 SOD 活性变化

紫花苜蓿不同抗性品种与蚜虫互作中 POD 活性变化结果 (图 2-8) 表明: 蚜虫危害胁迫前, 高感品种、中抗品种和高抗品种的 POD 活性均处于较低水平, 经方差分析表明: 高感品种、中抗品种和高抗品种差异极显著 ($F=141.95$, $P=0.0001<0.01$)。蚜虫危害胁迫后, 高感品种和高抗品种的 POD 活性均迅速上升, 并在 24h 达到最大值, 但高抗品种的 POD 活性峰值远大于高感品种。随后高感和高抗品种的 POD 活性均开始下降, 在 192h 下降到危害胁迫前水平。中抗品种在蚜虫危害胁迫后 POD 活性也迅速上升, 于 12h 出现活性高峰, 在 12~120h 均保持较高水平, 随后下降。在 192h, 高感品种、中抗品种和高抗品种的 POD 活性趋于相同, 但仍差异显著 ($F=9.24$, $P=0.0002<0.01$)。

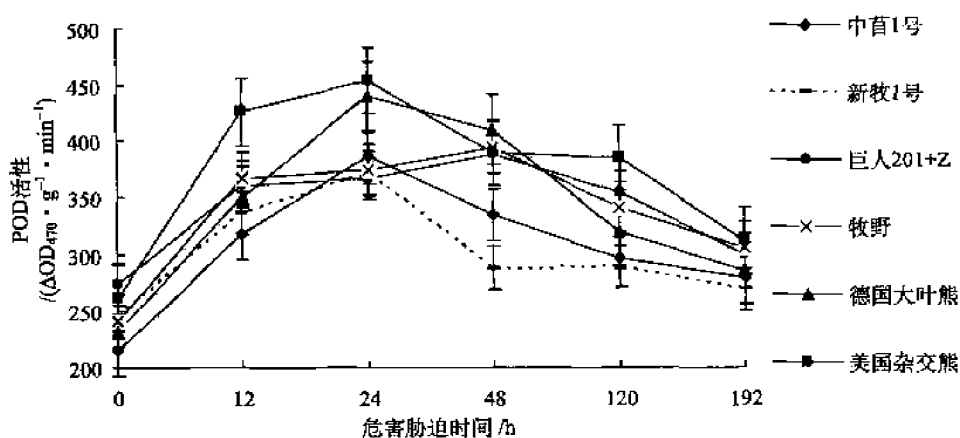


图 2-8 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 POD 活性变化

紫花苜蓿不同抗性品种与蚜虫互作中 CAT 活性变化结果 (图 2-9) 表明: 蚜虫危害胁迫前, 高感品种的 CAT 活性高于中抗品种和高抗品种, 经方差分析表明各抗性品种间差异极显著 ($F=55.03$, $P=0.0001<0.01$)。在蚜虫危害胁迫后, 高抗品种和高感品种的 CAT 活性均表现为波动性变化, 高抗品种为上升 (12h)、下降 (24h)、上升 (48h)、下降 (120h)、上升 (192h), 高感品种与之相反。而中抗品种在蚜虫危害胁迫

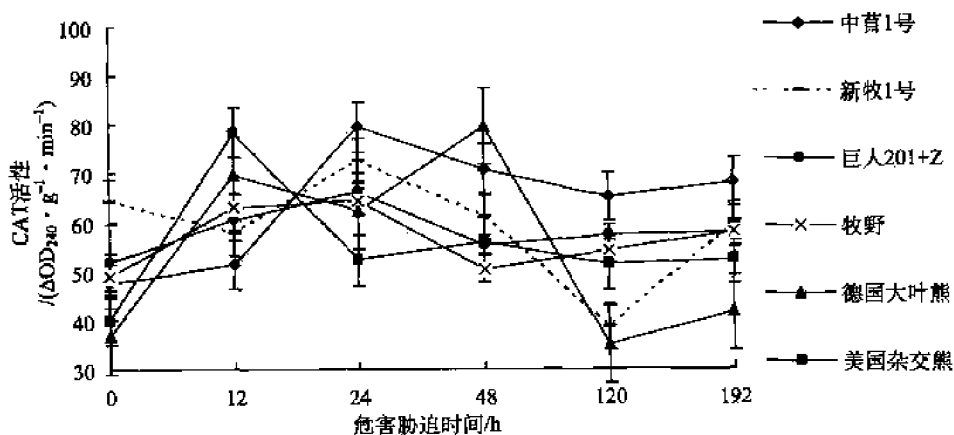


图 2-9 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 CAT 活性变化

后, CAT 活性迅速上升, 在 24h 出现活性高峰, 随后波动性变化, 并于 192h 时又出现活性高峰。

紫花苜蓿不同抗性品种与蚜虫互作中 PAL 活性变化结果 (图 2-10) 表明: 蚜虫危害胁迫前, 高感品种、中抗品种和高抗品种间的 PAL 活性均处于较低水平, 经方差分析表明差异极显著 ($F=14.35$, $P=0.0003<0.01$)。在蚜虫危害胁迫后, 各个抗性品种变化趋势基本一致。高抗品种 PAL 活性均出现双峰, 第一次高峰分别出现在 12h (美国杂交熊) 和 24h (德国大叶熊), 第二次高峰均出现在 120h, 并且峰值大小基本相同。中抗品种的 PAL 活性在 48h 前处于上升趋势, 并在 48h 达到最大值, 而后下降, 但降幅不大。高感品种的 PAL 活性在 24h 前处于下降趋势, 随后上升, 但是幅度不大, 最后趋于稳定。在蚜虫危害胁迫的 192h 内, 高抗品种的 PAL 活性始终高于高感品种, 而中抗品种的 PAL 活性居于二者之间。

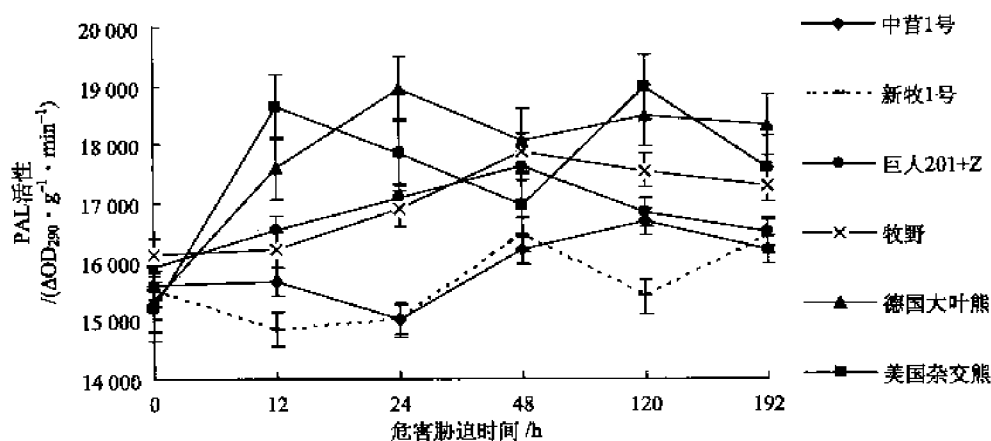


图 2-10 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 PAL 活性变化

紫花苜蓿不同抗性品种与蚜虫互作中 PPO 活性变化结果 (图 2-11) 表明: 蚜虫危害胁迫前, 高感品种、中抗品种和高抗品种的 PPO 活性经方差分析表明差异极显著 ($F=35.75$, $P=0.0001<0.01$)。在蚜虫危害胁迫后, 高感品种的 PPO 活性在 12h 迅

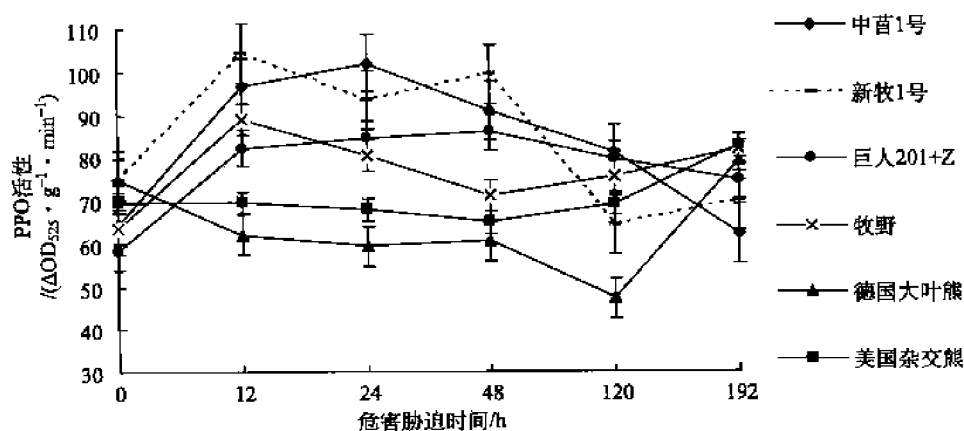


图 2-11 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 PPO 活性变化

速上升,其后在 12~48h PPO 活性保持稳定,而后开始下降,于 192h 下降至危害胁迫前水平。中抗品种的 PPO 活性在蚜虫危害胁迫前 12h 也迅速上升,随后巨人 201+Z 继续上升(12~48h),接着表现为下降(48~192h),而牧野的 PPO 活性变化与之相反,但两者变化幅度均不剧烈。高抗品种在蚜虫危害胁迫前 48h 均保持较稳定的酶活性,随后两者小幅下降(120h),而后上升,并于 192h 超过危害胁迫前的水平。

(三) 蚜虫短期危害胁迫对不同抗性苜蓿品种光合特性影响

叶绿素含量的降低从物质基础上对光合产物的形成产生不利影响。如表 2-18 所示,在蚜虫短期危害胁迫下,高抗品种、中抗品种和高感品种叶片的 Chl (Chla+Chlb) 含量均下降。危害胁迫前期高感品种中苜 1 号、新牧 1 号较胁迫前分别下降 5.04%、6.42%,中抗品种巨人 201+Z、牧野分别下降 3.23%、5.46%,高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊分别下降 2.44%、0.45%;危害胁迫中期较接种前高感品种分别下降 19.65%、23.85%,中抗品种分别下降 12.26%、13.54%,高抗品种分别下降 6.89%、2.26%;危害胁迫后期较接种前高感品种分别下降 22.67%、28.21%,中抗品种分别下降 18.49%、15.28%,高抗品种分别下降 12.44%、6.55%。Chla 和 Chlb 的含量,以及 Chla/Chlb 值的变化趋势与 Chl (Chla+Chlb) 基本相同。与此同时,在整个危害胁迫过程中高抗品种的 Chl (Chla+Chlb)、Chla、Chlb 以及 Chla/Chlb 始终高于中抗品种,而中抗品种始终高于高感品种。

表 2-18 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 Chl、Chla、Chlb 和 Chla/Chlb 的变化

	危害 胁迫时间/天	品种					
		中苜 1 号	新牧 1 号	巨人 201+Z	牧野	德国 大叶熊	美国 杂交熊
Chl/(mg·g ⁻¹)	0	3.97	4.36	4.65	4.58	4.50	4.43
	2	3.77	4.08	4.50	4.33	4.39	4.41
	5	3.19	3.32	4.08	3.96	4.19	4.33
	8	3.07	3.13	3.79	3.88	3.94	4.14
Chla/(mg·g ⁻¹)	0	2.68	2.94	3.15	3.10	3.02	2.97
	2	2.51	2.73	3.03	2.91	2.96	3.02
	5	2.12	2.20	2.75	2.67	2.87	2.99
	8	2.03	2.07	2.53	2.60	2.64	2.85
Chlb/(mg·g ⁻¹)	0	1.29	1.42	1.50	1.48	1.48	1.46
	2	1.26	1.35	1.47	1.42	1.43	1.39
	5	1.07	1.12	1.33	1.29	1.32	1.34
	8	1.04	1.06	1.26	1.282	1.30	1.29
Chla/Chlb	0	2.08	2.07	2.10	2.09	2.04	2.03
	2	1.99	2.02	2.06	2.05	2.07	2.17
	5	1.99	1.96	2.07	2.07	2.17	2.23
	8	1.96	1.95	2.01	2.03	2.03	2.21

如图 2-12 所示,在蚜虫危害胁迫的过程中,高抗品种、中抗品种和高感品种的净光合速率 P_n 均表现为持续下降的趋势,但不同抗性品种所表现出的降幅不同,差异显著 ($F=19.35$, $P=0.0005<0.01$)。高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊后期较蚜虫危害胁迫前分别下降 31.64%、38.17%,中抗品种巨人 201+Z、牧野后期较蚜虫危害胁迫前分别下降 58.01%、47.69%,而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号后期较蚜虫危害胁迫前分别下降 67.53%、74.32%。

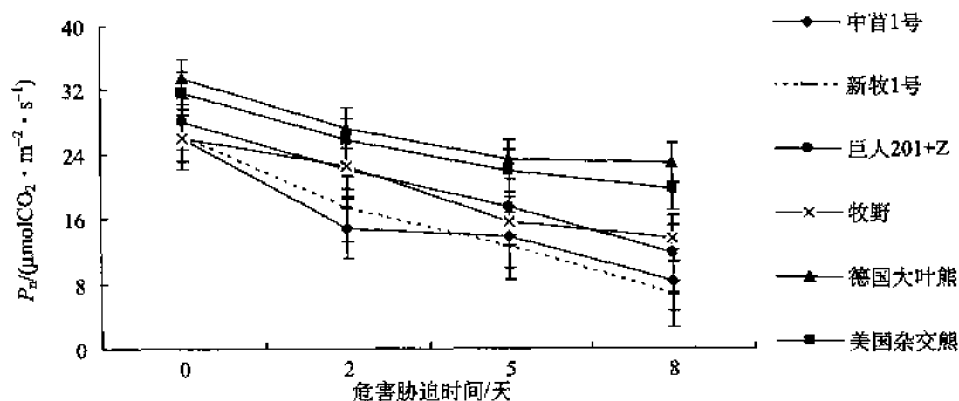


图 2-12 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种净光合速率 P_n 变化

如图 2-13 所示,在蚜虫危害胁迫的过程中高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊前期、中期表现为气孔导度 G_s 持续下降,中期较危害胁迫前降幅分别为 40.94%、30.72%,而后期略有上升,较危害胁迫前降幅分别为 16.96%、24.10%;中抗品种和高感品种在蚜虫危害胁迫的过程中, G_s 均表现为持续下降的趋势,但不同抗性品种所表现出的降幅不同,差异显著 ($F=19.35$, $P=0.0005<0.01$)。其中,中抗品种巨人 201+Z、牧野后期较危害胁迫前分别下降 73.33%、63.46%,高感品种中苜 1 号、新牧 1 号较胁迫前分别下降 82.78%、94.09%。

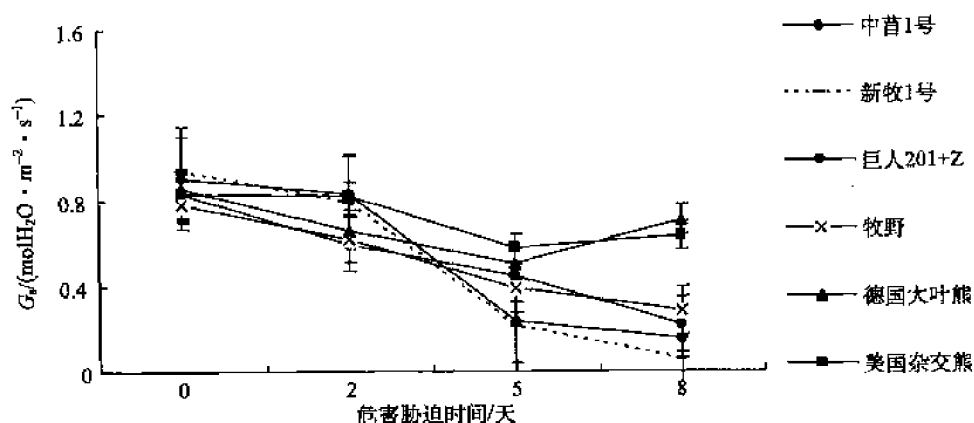


图 2-13 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种气孔导度 G_s 变化

如图 2-14 所示,蚜虫危害胁迫对紫花苜蓿叶片胞间 CO_2 浓度 C_i 有显著的影响,但对不同抗性品种影响不同。高抗品种和中抗品种在蚜虫危害胁迫的整个过程中均表现为

持续下降的变化趋势,高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊后期较危害胁迫前分别下降 15.06%、17.48%,中抗品种巨人 201+Z、牧野分别下降 22.32%、20.28%。高感品种中苜 1 号、新牧 1 号在蚜虫危害胁迫前期、中期表现为持续下降,随着危害胁迫的延长,后期表现为上升,后期降幅分别为危害胁迫前的 7.08%、8.64%。

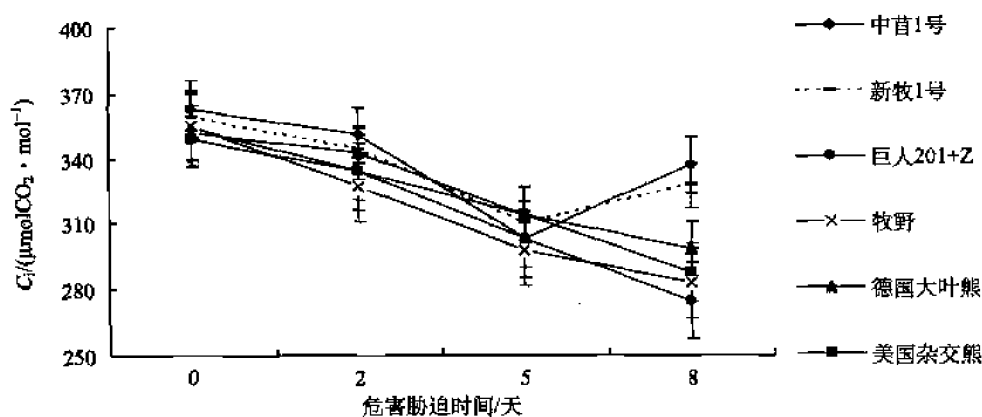


图 2-14 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种胞间 CO₂ 浓度 C_i 变化

由于胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 的变化,在蚜虫危害胁迫下 L_s 也表现出相应的变化趋势 (图 2-15)。高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊,中抗品种巨人 201+Z、牧野均持续上升,后期较危害胁迫前分别上升 73.82%、107.08%、122.27%、107.94。而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号前期、中期上升,升幅分别为 99.42%、94.32%,而后期下降至危害胁迫前的水平。

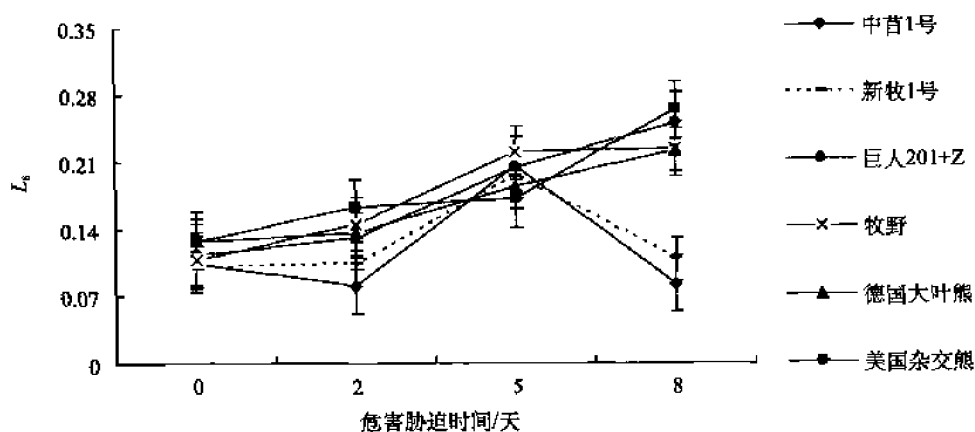


图 2-15 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种气孔限制值 L_s 变化

(四) 蚜虫短期危害胁迫对叶绿素荧光参数的影响

F_v/F_m 代表 PSⅡ 最大光能转换效率,是表明光化学反应状况的重要参数 (Briantais et al., 1986; Krause and Weis, 1984)。在蚜虫危害胁迫下 (图 2-16),高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊,中抗品种巨人 201+Z、牧野的 F_v/F_m 变化趋势一致,在危

害胁迫前期表现为下降,中期表现为上升,后期表现为下降,最后降幅分别为 1.82%、0.41%、7.18%、6.35%。而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号在蚜虫危害胁迫的整个过程中始终处于下降趋势,并且随危害胁迫时间的延长,下降幅度也随之增大,后期较危害胁迫前降幅分别为 25.72%、30.15%。

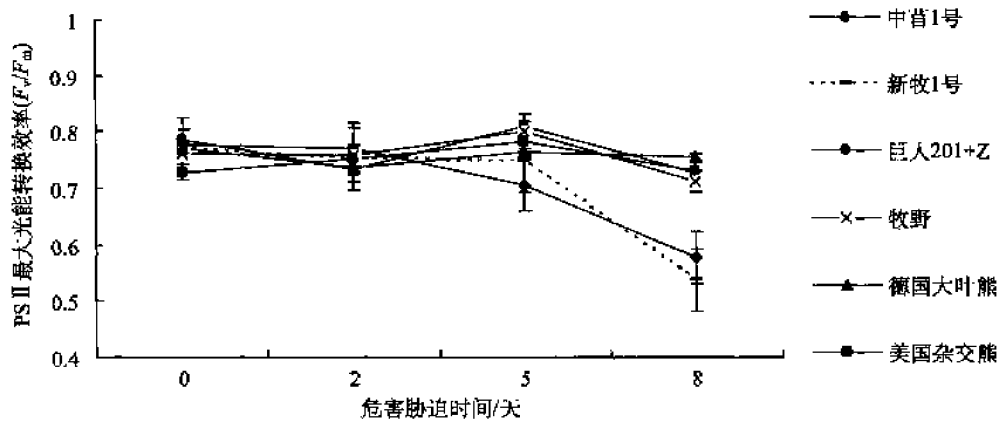


图 2-16 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 PSII 最大光能转换效率 (F_v/F_m) 变化

F_v/F_o 代表 PSII 潜在活性,是表明光化学反应状况的重要参数 (Briantais et al., 1986; Krause and Weis, 1984)。如图 2-17 所示,在蚜虫危害胁迫下,其变化趋势与 F_v/F_m 基本一致。高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊,中抗品种巨人 201+Z、牧野的 F_v/F_o 表现为波动性变化,均为下降、上升、下降,后期较危害胁迫前分别下降 5.75%、1.85%、26.40%、22.12%。而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号在蚜虫危害胁迫的整个过程中始终处于下降趋势,并且随胁迫时间的延长,下降幅度也随之增大,后期较危害胁迫前降幅分别为 60.93%、65.13%。

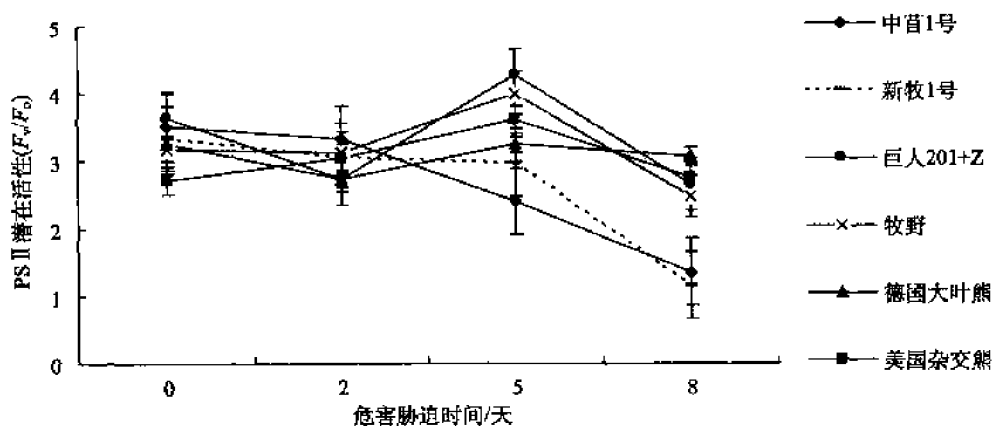


图 2-17 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 PSII 潜在活性 (F_v/F_o) 变化

$\Phi PSII$ 反映 PSII 反应中心在有部分关闭情况下的实际原初光能转化效率 (杨兴洪等, 2005), 与碳同化反应强度密切相关。如图 2-18 所示, 蚜虫危害胁迫后期除高抗品

种美国杂交熊 (0.20%)、中抗品种牧野 (7.79%) 较危害胁迫前略有上升外, 其他 4 个品种均有不同程度的下降, 但高抗品种德国大叶熊 (10.44%)、中抗品种巨人 201+Z (9.08%) 下降幅度较小, 而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号下降幅度较大, 分别为 13.11%、19.37%。

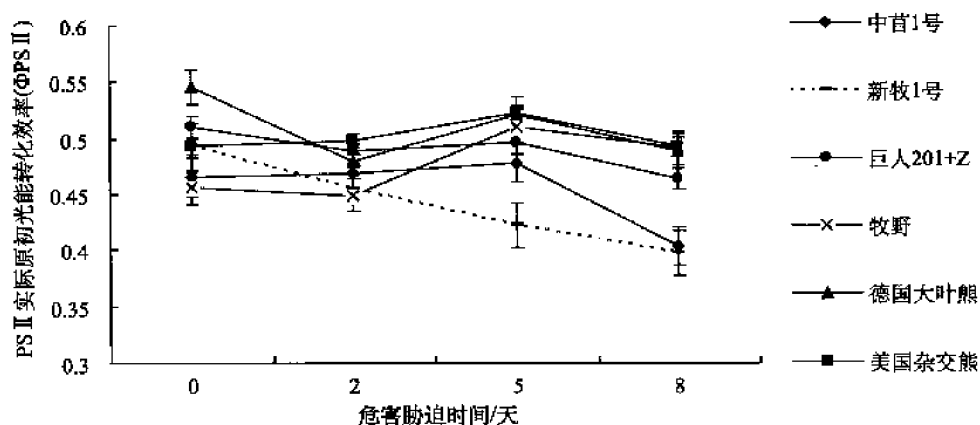


图 2-18 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种实际原初光能转化效率 (ΦPSII) 变化

ETR 表示光合电子传递速率 (张守仁, 1999)。如图 2-19 所示, 在蚜虫危害胁迫下其变化趋势与 ΦPSII 基本相同。除高抗品种美国杂交熊 (0.49%)、中抗品种牧野 (7.37%) 较危害胁迫前略有上升外, 其他 4 个品种均有不同程度的下降, 但高抗品种德国大叶熊 (12.06%)、中抗品种巨人 201+Z (8.64%) 下降幅度较小, 而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号下降幅度较大, 分别为 13.19%、19.53%。蚜虫短期危害胁迫后 ΦPSII 和 ETR 的变化反映出在生物危害逆境下, PSII 反应中心的实际原初光能转化效率与光合电子传递速率同时降低而影响光合速率。

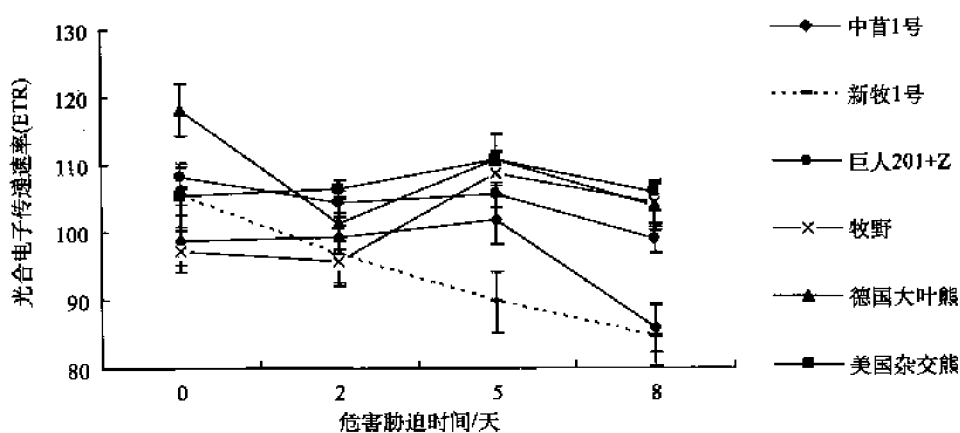


图 2-19 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种光合电子传递速率 (ETR) 变化

qP 表示光化学猝灭, 反映 PSII 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额, 又在一定程度上反映了 PSII 反应中心的开放程度 (张守仁, 1999; Van Kooten and

Snel, 1990)。如图 2-20 所示, 随着危害胁迫时间的延长, 高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊, 中抗品种巨人 201+Z、牧野表现为波动性变化: 下降、上升、下降的趋势, 后期较危害胁迫前分别下降 10.03%、5.27%、6.20%、0.79%。而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号始终处于下降趋势, 较危害胁迫前分别下降 8.62%、9.87%。

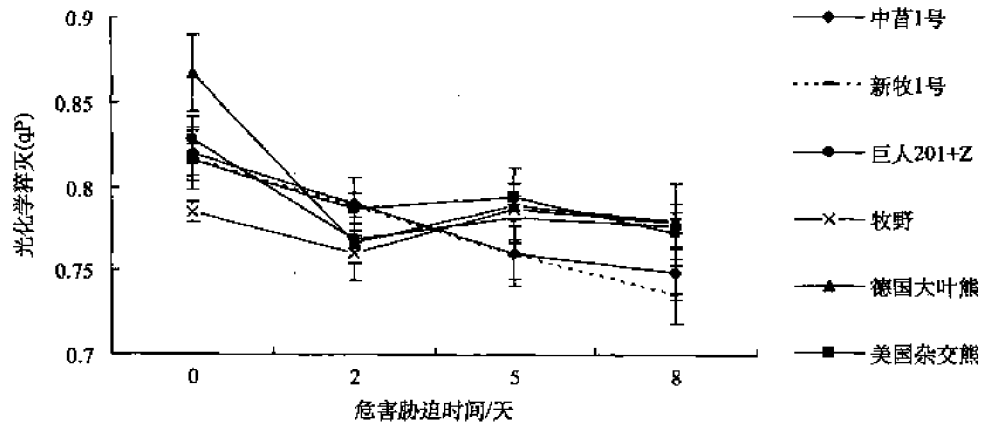


图 2-20 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种光化学猝灭 (qP) 变化

NPQ 表示非光化学猝灭, 反映的是 PSII 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的部分 (Bilger and Bjorkman, 1990)。如图 2-21 所示, 蚜虫危害胁迫前期高抗品种、中抗品种和高感品种均处于上升趋势, 中期下降, 后期抗性不同的品种表现出不同的变化方向: 较危害胁迫前, 高抗品种德国大叶熊下降 90.25%、美国杂交熊上升 16.46%, 中抗品种巨人 201+Z、牧野分别下降 47.24%、62.16%, 而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号大幅上升, 分别上升 146.48%、258.85%。

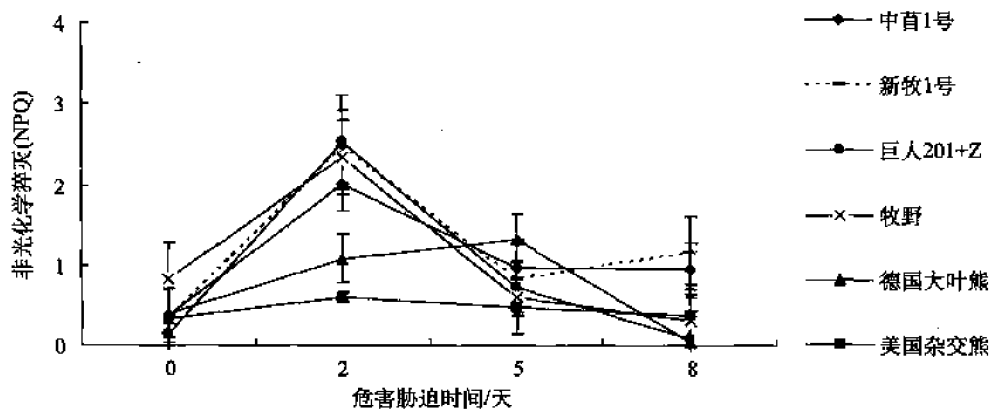


图 2-21 蚜虫危害胁迫后不同抗性品种非光化学猝灭 (NPQ) 变化

三、结论与讨论

(一) 田间抗性鉴定

在 2006 年 4 月初至 6 月初紫花苜蓿第一茬, 田间自然发生的蚜虫数量随着时间的

推移不断增加,但不同品种发生量不同。到达盛花期蚜虫发生量最大,且各品种间差异极显著($F=62.96$, $P=0.0001<0.01$)。使用蚜量比值法计算 IAS (各品种单株平均蚜量/总鉴定品种的单株平均蚜量),并进行了抗蚜性鉴定,得到了高抗材料两份,分别为德国大叶熊、美国杂交熊;中抗材料两份,分别为巨人 201+Z、牧野;高感材料两份,分别为中苜 1 号、新牧 1 号。

苜蓿蚜的种群数量随着紫花苜蓿的生长持续增加,但不同紫花苜蓿品种上苜蓿蚜的种群数量增长幅度不同。在高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊上,苜蓿蚜的种群数量一直保持在较低数量的状态下增长,最高单株蚜量出现在盛花期,分别为 $7.68 \text{ 头} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $8.32 \text{ 头} \cdot \text{株}^{-1}$ 。高感品种中苜 1 号、新牧 1 号尽管在苗期与其他紫花苜蓿没有显著差别,但随着时间的推移,单株蚜量迅速上升,在盛花期已分别达到 $15.34 \text{ 头} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $13.28 \text{ 头} \cdot \text{株}^{-1}$ 。这使紫花苜蓿植株矮小,叶片畸形、卷曲和叶色褪绿,对紫花苜蓿的正常生长发育产生严重影响。中抗品种巨人 201+Z、牧野,各生长阶段的蚜量均介于上述两类品种之间。综上所述,苜蓿蚜的种群数量与紫花苜蓿品种有着密切的关系。在高抗品种上,尽管有少量的蚜虫存在,但不足以构成对紫花苜蓿的危害,相反在感蚜植株上,单株蚜量随着棉花的生长急剧增加。

(二) 蚜虫危害对不同苜蓿品种体内丙二醛含量及防御性酶活性的影响

在蚜虫刺吸诱导的过程中,高感品种的 MDA 含量始终高于高抗品种,并且高感和高抗品种均保持上升的趋势;高感品种的 SOD、POD 和 PAL 活性始终低于高抗品种,其中高感和高抗品种的 SOD 和 POD 活性均表现先上升后下降的趋势,而 PAL 活性上升到高峰后均趋于稳定;CAT 活性在高感和高抗品种间表现为交替地上升下降;高抗品种的 PPO 活性前期低于高感品种,而后期高于高感品种。由此可见,在蚜虫危害胁迫下,高感和高抗品种间 MDA、SOD、POD、PAL 和 PPO 活性的变化与苜蓿的抗蚜性密切相关,均可作为苜蓿抗蚜性鉴定的生理指标,而 CAT 活性变化与苜蓿抗蚜性的关系有待进一步研究。

MDA 含量变化与抗蚜性的关系:MDA 是植物细胞膜脂过氧化的一个重要指标(Bailey et al., 1996),能与细胞内各种成分发生反应,从而引起各种酶和膜结构的严重损伤。研究表明(刘裕强等, 2005),当 MDA 含量大量增加时,表明体内细胞受到较严重的破坏。本试验研究发现,蚜虫危害胁迫后高感品种、中抗品种和高抗品种叶内的 MDA 含量都有所增加,说明细胞膜系统不同程度地受到了损坏。高感品种高峰出现早,且峰值较大,说明其细胞膜系统较中抗品种、高抗品种受到更为严重的损坏。

SOD、POD 和 CAT 活性变化与抗蚜性的关系:在生物体内,氧被视为电子传递的受体,得到电子时能生成超氧化物阴离子 O_2^- 及其衍生物 H_2O_2 、 $\cdot\text{OH}$ 、 O_2 等自由基(张福锁, 1993)。正常状态下,生物细胞代谢产生的活性氧并不对生物体造成严重危害。但在逆境条件下,可对其造成危害。而活性氧清除系统的 3 个主要酶(SOD、POD 和 CAT)能有效抑制活性氧自由基对机体的伤害。其中, SOD 催化超氧自由基产生歧化反应,生成毒性较小的 H_2O_2 和 O_2 (Bowler et al., 1992)。CAT 能进一步催化 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 。POD 能催化酚类物质氧化,它是木质素合成的关键酶之一,

同时在清除 H_2O_2 和 OH^- 自由基方面 also 具有重要的防御作用 (Bruce and West, 1989)。正是这 3 种酶的彼此协调、相互作用, 才使细胞内的自由基维持在正常水平, 从而减轻自由基对生物体造成的毒害, 提高生物体抗逆能力 (赵福庚等, 2004)。

试验证明植物受害虫危害胁迫后 SOD 和 POD 活性上升。本研究表明, 紫花苜蓿高感品种、中抗品种和高抗品种在蚜虫危害胁迫前期, SOD 和 POD 酶活性均呈上升趋势, 这可能是由于植物体内对逆境的一种代谢性调节作用。因为植物在遭受逆境胁迫时, 产生的氧自由基数量增多, 为了抵抗逆境对植物体造成的伤害, SOD 和 POD 酶活性增加, 以便清除氧自由基, 减少膜脂过氧化作用。与高感品种相比, 高抗品种的 SOD 和 POD 酶活性变化较早, 且峰值较高。这说明高抗品种可以对蚜虫的危害胁迫敏感地做出反应, 并且清除活性氧的能力较强。中抗品种 SOD 和 POD 酶活性介于二者之间。但随着蚜虫危害胁迫的持续, 活性氧的产生和抗氧化系统之间的平衡体系可能受到破坏, 从而损伤膜的结构并抑制酶的活性。因此在蚜虫危害胁迫的后期, 高感品种、中抗品种和高抗品种的 SOD 和 POD 活性均有所下降, 但 SOD 和 POD 活性表现为高抗品种 > 中抗品种 > 高感品种。这充分说明品种抗蚜性与 SOD 和 POD 活性的变化密切相关。

对于 CAT 的研究, 植物病理学方面研究较多, 但不同学者得出了不同的结论, 目前支持率最高的是作为水杨酸结合蛋白 (salicylic acid-binding protein, SABP) 的解释。病毒侵染后, 水杨酸含量增加, 结合到水杨酸结合蛋白 1 (SABP1 即 CAT) 上, 引起 CAT 构象的变化, 抑制 CAT 酶活性, 从而提高 H_2O_2 的含量, 而 H_2O_2 除能直接杀死病原物外, 还能激活病程相关蛋白基因的表达, 有利于植物的抗病反应; 反之, 由于植物本身存在抗逆性, 植物体内 H_2O_2 含量过高必然会再次诱导 CAT 的活性增加。本研究表明这种解释也适用于害虫与植物的互作机制。苜蓿中 CAT 活性的变化可能就是因为上述两种作用互相制约、CAT 活性处于动态消长过程的缘故。因此, CAT 活性变化与抗蚜性的关系有待进一步研究。

PAL 和 PPO 活性变化与抗蚜性的关系: 在植物抗性反应中, 苯丙烷类代谢是重要的代谢途径之一。PAL 是催化苯丙烷类代谢途径第一步反应的酶, 也是这一途径的关键酶和限速酶 (薛应龙等, 1983; 王敬文和薛应龙, 1982; Mauch-Mani and Slusarenko, 1996)。由于该途径的中间产物 (酚类物质) 以及终产物 (木质素、黄酮、异黄酮类等物质) 与植物抗虫性密切相关, 所以被认为是一种防御性酶 (吴晖等, 2005)。本试验研究表明: 蚜虫危害胁迫后, 高抗品种通过某种信号传递, 迅速启动 PAL 表达系统, 导致 PAL 迅速增高, 并分别在 12h (美国杂交熊) 和 24h (德国大叶熊) 到达第一次活性高峰, 产生大量木质素并沉积在细胞壁周围。由于细胞木质化增强, 蚜虫的刺吸行为受到限制。而次生代谢物的产生消耗了一部分 PAL 酶, 同时又激活和产生了一些 PAL 酶, 但这时消耗的 PAL 酶多于激活和产生的 PAL 酶, 所以 PAL 酶活性下降。随后由于 PAL 活性在植株体内失去平衡, 再一次诱导 PAL, 使其激活和产生, 在 120h 又产生一高峰。中抗品种对蚜虫刺吸作用反应较慢, 到 48h 才出现第一次活性高峰, 随后由于相同的作用机理, PAL 活性下降, 但与高抗品种不同, 并未出现第二次活性高

峰。而对于高感品种,由于蚜虫刺吸的破坏效应令 PAL 系统未能及时做出反应就已打破了其代谢平衡,因而危害胁迫前期 PAL 活性表现为缓慢下降的趋势,直到寄主受害严重时才略有升高,但是幅度不大,最后趋于稳定,并且在整个危害胁迫过程中 PAL 活性远低于高抗品种。由此可见, PAL 活性高峰出现的次数和时间与品种抗蚜性密切相关。

PPO 在植物抗性反应中也发挥着重要作用,其可催化木质素及其他酚类氧化产物的形成,构成保护性屏蔽,也可以通过形成醌类物质直接发挥抗性作用。它在植物与病菌的互作关系中研究较多,且活性与抗病性表现明显的相关性 (Avdiushko et al., 1993; Bashan et al., 1985)。而在植物与害虫的互作关系中研究较少。本研究表明:在蚜虫危害胁迫前期 PPO 活性与抗虫性呈负相关,后期呈正相关。这可能是由于蚜虫危害胁迫前期,高抗品种的 POD 和 PAL 的活性均迅速上升到较高水平,促进酚类化合物和木质素的合成和累积,足以抵抗蚜虫的危害胁迫,因此 PPO 没有被激发表达,处于较低水平。随着危害胁迫的持续,POD 和 PAL 的活性有所下降,不足以抵抗蚜虫的危害胁迫,因此 PPO 被激发表达,活性有所上升。高感品种则与之相反。中抗品种在蚜虫危害胁迫前期 (12h) POD 和 PAL 的活性不足以抵抗蚜虫的危害胁迫而导致 PPO 迅速上升,随后由于 POD 和 PAL 被部分激发表达,因而中抗品种的 PPO 一直保持相对稳定的酶活性。由此可见, PPO 的活性与抗蚜性密切相关。

(三) 蚜虫短期危害胁迫对不同苜蓿品种光合特性的影响

蚜虫危害胁迫使抗感品种叶绿素含量 $Chla+Chlb$ 、净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 均下降,但抗虫品种下降幅度较小;抗虫品种胞间 CO_2 浓度 C_i 持续下降,气孔限制值 L_s 持续上升,表明气孔限制是净光合速率 P_n 下降的主要原因,感虫品种胞间 CO_2 浓度 C_i 先降低后升高,气孔限制值 L_s 先升高后降低,表明胁迫前期气孔限制占主导地位,后期非气孔限制占主导地位。

叶绿素含量变化与抗蚜性的关系:光是光合作用的能源,是植物生长的必要因素。类囊体膜是叶绿体光能吸收、传递和转换的结构基础,而色素是类囊体膜的重要组成部分,是光能的受体。其中, $Chla$ 是反应中心复合体的重要组成部分,处于反应中心的特殊状态,是执行能量转化的光合色素, $Chlb$ 是光色素蛋白复合体的重要组成部分,主要作用在于捕获和传递光能 (潘瑞炽, 2004; Lichtenthaler, 1987), 而 $Chla/Chlb$ 值的变化,能反映叶片光合活性的强弱 (刘振亚和刘贞琦, 1993)。许多研究证实,环境因子的改变可以引起 Chl 和 $Chla/Chlb$ 的变化,进而引起光合功能的改变 (应小芳和刘鹏, 2005; Downton et al., 1985)。本试验表明,蚜虫危害胁迫后紫花苜蓿叶片 Chl 和 $Chla/Chlb$ 有所下降,其主要原因可能由于叶绿素合成受阻,或促进了叶绿素酶活性,使叶绿素分解;也可能是由于 $Chla$ 下降较快,而 $Chlb$ 下降较慢,产生了不合理的 $Chla/Chlb$ 值,使光能转化和能量提供受到抑制,从而不能维持光合作用的高效运转,并且导致叶片因吸收过量光能而产生一定光抑制,以及过量光能诱导的自由基产生,进而破坏叶绿体膜结构,加速叶绿素的分解和色素分子光氧化。这些方面都可能在一定程度上降低光合作用中对光能的吸收和传递。但 Chl 高抗品种较中抗品种、高感品种下降缓慢,并且在整个危害胁迫的过程中始终高于中抗品种、高感品种,表明高抗品种较中

抗品种、高感品种在危害胁迫的过程中所受到的伤害较小。

气体交换参数变化与抗蚜性的关系：植物的光合作用在逆境胁迫下会受到影响，使 P_n 下降。本研究中，在蚜虫危害胁迫下，各参试紫花苜蓿品种 P_n 随着危害胁迫时间的延长而呈下降趋势， G_s 表现与 P_n 基本相同，这可能是因为蚜虫的刺吸作用造成植物叶片保卫细胞膨压改变，导致 G_s 下降，从而影响到光合作用。但是不同抗性紫花苜蓿品种在蚜虫危害胁迫下 P_n 和 G_s 的变化表现出较大差异。对于高抗品种德国大叶熊、美国杂交熊 P_n 降幅最小， G_s 在危害胁迫后期还小幅上升；中抗品种巨人 201+Z、牧野，其 P_n 和 G_s 下降幅度较小，在危害胁迫后期仍能保持相对较高的光合速率；而高感品种中苜 1 号、新牧 1 号，其 P_n 和 G_s 下降幅度最大。

虽然 P_n 的下降趋势与 G_s 基本一致，但这不足以判断紫花苜蓿叶片光合速率的下降是由气孔限制所导致的（郭延平等，2003；许大全，1997）。根据 Farquhar 和 Sharkey (1982) 提出的气孔限制值分析观点，判定引起叶片光合速率降低主要因素的根据是胞间 CO_2 浓度 C_i 和气孔限制值 L_s 的变化方向， C_i 降低和 L_s 升高表明气孔因素是主要原因；而 C_i 增高和 L_s 降低则表明引起光合速率降低的主要原因是非气孔因素。本试验结果表明，在蚜虫危害胁迫前期和中期，不同抗性品种 C_i 与 P_n 和 G_s 的变化趋势相同，均持续下降，而 L_s 变化与之相反，均表现为持续上升，说明这个时期气孔因素在限制光合作用中起主导作用。随着危害胁迫的持续，后期不同抗性品种间 C_i 和 L_s 表现出相异的变化趋势，高抗品种和中抗品种 C_i 下降 L_s 上升，而高感品种 C_i 上升 L_s 下降，说明危害胁迫后期，对高抗品种和中抗品种来说，气孔因素仍在限制光合作用中起主导作用，而高感品种已经转变为非气孔限制因素占主导地位。这进而说明 P_n 、 G_s 、 C_i 和 L_s 的变化趋势及变化幅度反映了不同抗性品种间抗虫性的差异。

（四）蚜虫短期危害胁迫对不同苜蓿品种叶绿素荧光参数的影响

高感品种的 PSⅡ 最大光能转换效率 (F_v/F_m)、PSⅡ 潜在活性 (F_v/F_o)、PSⅡ 反应中心实际光能转化效率 ($\Phi PSⅡ$)、光合电子传递速率 (ETR)、光化学猝灭系数 (qP) 均随着危害胁迫的延长不断下降，而高抗和中抗品种在整个胁迫过程 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 $\Phi PSⅡ$ 、ETR、qP 降幅较小，其中牧野的 $\Phi PSⅡ$ 、ETR 还略有升高，两者的非光化学猝灭系数 NPQ 在前期和中期表现一致，先上升后下降，而后期高感品种上升、高抗和中抗品种下降。由此可见，在蚜虫危害胁迫下，抗感品种间叶绿素含量、光合特性和叶绿素荧光参数的变化趋势和变化幅度与苜蓿的抗蚜性强弱密切相关。

F_v/F_m 和 F_v/F_o 变化与抗蚜性的关系：正常情况下，植物叶片光合色素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光发射和热耗散 3 种途径来消耗 (Wise and Berry, 1987; Wise and Naylor, 1987)。而在胁迫条件下，这 3 种途径之间存在着此消彼长的关系，光合作用和热耗散的变化会引起荧光的相应变化。因此，可以通过对荧光的观测来探究植物在胁迫条件下光合作用和热耗散的情况 (杨兴洪等, 2005)。本实验研究表明，叶绿素荧光动力学参数的变化也反映出光能利用及环境胁迫的信息。蚜虫危害胁迫后不同抗性品种 F_v/F_m 和 F_v/F_o 总体上均表现为下降趋势，表明 PSⅡ 最大光能转换效率和 PSⅡ 潜在活性均降低，证实了蚜虫危害使 PSⅡ 活性中心受损，光合作用原初反应

受到抑制, 光合电子由 PSⅡ 反应中心向 Q_A 、 Q_B 及 PQ 库传递过程受到影响, 不利于激发能从天线色素蛋白复合体 LHC 向 PSⅡ 传递。这进一步干扰了 PSⅠ 和 PSⅡ 之间的能量分配及传递, 从而影响到寄主植物的光合磷酸化和碳同化。但抗感品种间也有差异, 危害胁迫中期高抗品种、中抗品种 F_v/F_m 和 F_v/F_o 有一小幅上涨阶段, 这可能由于抗虫品种通过内部调节所产生的适应性, 使 PSⅡ 反应中心受损较小, 而高感品种由于抗性较差, 危害胁迫后期下降更加明显。

$\Phi PSⅡ$ 和 ETR 变化与抗蚜性的关系: $\Phi PSⅡ$ 表示电子传递量子产率, 反映了 PSⅡ 反应中心部分关闭情况下的实际原初光能捕获率, 也是实际的 PSⅡ 反应中心进行光化学反应的效率 (杨兴洪等, 2005)。ETR 表示光和电子传递速率 (张守仁, 1999)。在蚜虫危害胁迫下, 不同抗性品种间 $\Phi PSⅡ$ 、ETR 表现不同, 高感品种总体处于下降趋势, 使为光和碳同化提供的 ATP 和 NADPH 的量减少, 同时也说明胁迫限制了 PSⅡ 反应中心的电子传递, 降低了电子传递量子产量, 严重限制了叶片光合作用的正常进行, 可以认为是 P_n 降低的内在原因之一, 并与 F_v/F_m 和 F_v/F_o 变化趋势一致。高抗品种、中抗品种表现稳定或有小幅上升, 因此它们能够通过光合电子传递途径, 将较多的光能用于 CO_2 同化, 阻止了过量的激发能在 PSⅡ 反应中心积累, 较高的 P_n 也反映了这一点。

qP 和 NPQ 变化与抗蚜性的关系: 光化学猝灭反映天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额, 要保持高的光化学猝灭就要使反应中心处于开放状态, 所以光化学猝灭在一定程度上反映了反应中心的开放程度。光化学猝灭系数 qP 越大, Q_A 还原态重新氧化形成 Q_A 的量越大, 即电子传递活性越大 (张守仁, 1999; 王可玢等, 1997; Van Kooten and Snel, 1990)。蚜虫危害胁迫后高感品种 qP 急剧下降, Q_A 更趋于还原态, 使 PSⅡ 反应中心开放部分比例下降, 而关闭部分比例上升, 这些关闭状态的 PSⅡ 反应中心不能进行稳定的电荷分离, 电子传递活性受到抑制, 进行光合作用的电子减少, 以热或其他形式耗散的光能增加, 从而使 P_n 降低。而高抗品种、中抗品种在危害胁迫中期有一小幅上升过程, 随后下降, 且在整个胁迫过程中降幅较小, 说明受蚜虫抑制作用较小, 表现为 P_n 较高。

非光化学猝灭反映 PSⅡ 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的光能部分。当 PSⅡ 反应中心天线色素吸收了过量的光能时, 如不能及时地耗散将对光合机构造成失活或破坏, 所以非光化学猝灭是一种自我保护机制, 对光合机构起一定的保护作用 (张守仁, 1999)。在蚜虫危害胁迫前期, 中抗品种、高感品种 NPQ 均大幅增大, 说明危害胁迫下光合机构的过剩激发能增多, 在光化学反应耗能减少的情况下, 天线系统的热耗散相应增加, 也表明蚜虫对紫花苜蓿已造成危害。而胁迫中期, 中抗品种、高感品种 NPQ 均大幅下降, 这可能是由于 PSⅡ 反应中心遭到破坏, 而使其吸收的光能总量急剧减少从而导致 NPQ 显著下降。胁迫后期, 高感品种的 NPQ 大于中抗品种, 表明高感品种在 qP 和 ETR 下降较多的情况下, 只能通过 NPQ 途径进行热耗散, 光合能力受到抑制。中抗品种可通过维持较高的光化学效率来进行耗散, 因此 NPQ 较小, 光合能力也较强。而高抗品种在蚜虫危害胁迫的整个过程中 NPQ 变化幅度较小, 表明蚜虫对其造成危害较小, 这从其较高的 P_n 也可以表现出来。

参考文献

- 陈立松, 刘星辉. 1997. 植物抗热性鉴定指标的种类. 干旱地区农业研究, 15 (4): 72-77.
- 高俊凤. 2000. 植物生理学实验技术. 西安: 世界图书出版公司.
- 郭延平, 周惠芬, 增光辉, 等. 2003. 高温胁迫对柑橘光合速率和光系统 II 活性的影响. 应用生态学报, 14 (6): 867-870.
- 黎裕. 1993. 作物抗旱鉴定方法与指标. 干旱地区农业研究, 11 (1): 91-99.
- 李和生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社: 164-169.
- 李造哲. 1991. 10 种苜蓿品种幼苗抗旱性的研究. 中国草地, 3: 1-3.
- 刘绍友, 侯有明, 李定旭. 1993. 小麦品种对麦长管蚜抗性机制的研究. 西北农业学报, 2 (3): 76-80.
- 刘裕强, 江玲, 孙立宏, 等. 2005. 褐飞虱刺吸诱导的水稻一些防御性酶活性的变化. 植物生理与分子生物学报, 31 (6): 643-650.
- 刘振亚, 刘贞琦. 1993. 作物光合作用的遗传及其在育种中的应用研究进展. 作物育种研究与进展 (第 1 集). 北京: 农业出版社: 168-183.
- 卢欣石, 申玉龙. 1992. 苜蓿秋眠性研究与利用. 国外畜牧学—草原与牧草, (4): 1-4.
- 卢欣石. 1998. 中国苜蓿审定品种秋眠性研究. 中国草地, (3): 1-5.
- 潘瑞炽. 2004. 植物生理学. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社: 66-67.
- 尚庄茂, 王光耀. 1996. 蔬菜抗热性的鉴定方法. 中国蔬菜, (5): 49-51.
- 陶玲. 1998. 甘肃省紫花苜蓿地方类型抗旱等级分类的研究. 草业科学, 15 (6): 7-10.
- 王敬文, 薛应龙. 1982. 植物苯丙氨酸解氨酶的研究-II, 苯丙氨酸解氨酶在抗马铃薯晚疫病中的作用. 植物生理与分子生物学报, 8 (1): 35-43.
- 王可盼, 许春辉, 赵福洪, 等. 1997. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内叶绿素 a 荧光参数的影响. 生物物理学报, 13 (2): 273-278.
- 吴晖, 陈顺立, 黄红青, 等. 2005. 锥栗抗栗瘦蜂性与苯丙氨酸解氨酶活性的关系. 福建林学院学报, 25 (4): 304-307.
- 肖凤, 闵继津, 杨世忠. 1992. 11 个优良草 (品) 种抗逆性的初步鉴定. 八一农学院学报, (5): 75-81.
- 许大全. 1997. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. 植物生理学通讯, 33 (4): 241-244.
- 薛应龙, 欧阳光察, 澳绍根. 1983. 植物苯丙氨酸解氨酶的研究-IV-水稻幼苗中 PAL 活性的动态变化. 植物生理与分子生物学报, 9 (3): 301-305.
- 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 2005. 遮荫和全光下生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征. 植物生态学报, 29 (1): 8-15.
- 应小芳, 刘鹏. 2005. 铝胁迫对大豆叶片光合特性的影响. 应用生态学报, 16 (1): 166-170.
- 张福锁. 1993. 环境胁迫与植物营养. 北京: 北京农业大学出版社: 71-98.
- 张守仁. 1999. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通讯, 16 (4): 444-448.
- 赵福庚, 何龙飞, 罗庆云. 2004. 植物逆境生理生态学. 北京: 化学工业出版社: 93-99.
- 周丽霞, 王朝凌, 杜天庆. 1999. 不同秋眠类型苜蓿生产性能的比较研究. 国外畜牧学-草原与牧草, (2): 16-18.
- 周瑞莲, 张承烈, 金巨和. 1991. 水分胁迫下紫花苜蓿叶片含水量、质膜透性、SOD、CAT 活性变化与抗旱性关系研究. 中国草地, (2): 20-24.
- 朱广廉, 钟梅文, 张爱琴. 1990. 植物生理学实验. 北京: 北京大学出版社: 37-40.
- Aydiushko S A, Ye X S, Kuc J. 1993. Detection of several enzymatic activities in leaf prints cucumber plant. *Physiol Mol Plant Pathol*, 42: 441-454.
- Bailly C, Benamar A, Corbineau F, et al. 1996. Changes in malondialdehyde content and in superoxide dismutase, catalase and glutathione reductase activities in sunflower seed as related to deterioration during accelerated aging. *Plant Physiol*, 97: 104-110.
- Bashan Y, Okon Y, Henis Y. 1985. Peroxidase, polyphenoloxidase and phenols in relations to resistance against

- Pseudomonas syringae* pv. *tomato* in tomato plants. Can J Bot, 65: 366-372.
- Berry J A, Downton W J S. 1982. Environmental regulation of photosynthesis. In: Govindjee, Photosynthesis: Development, Carbon Metabolism and Plant Productivity. Vol II. New York: Academic Press: 263-343.
- Bilger W, Björkman O. 1990. Role of the xanthophylls cycle, fluorescence and photosynthesis in *Hedera canariensis*. Photosynth Res, 25: 173-185.
- Bowler C, Montagu M V, Inze D. 1992. Superoxide dismutase and stress tolerance. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 43: 83-116.
- Briantais J M, Vernotte C, Krause G H, et al. 1986. Chlorophyll a fluorescence of higher plants. In: Govindjee, Ames J, Fork D C, et al. Light Emission by Plants and Bacteria. Orlando: Academic Press: 539-583.
- Bruce R J, West C A. 1989. Elicitation of lignin biosynthesis and isoperoxidase activity by pectic fragments in suspension cultures castor bean. Plant Physiol, 91: 889-897.
- Downton W J S, Grant W J, Robinson S P. 1985. Stomatal closure fully accounts for the inhibition of photosynthesis by abscisic acid. Plant Physiol, 77: 85-88.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. Annu Rev Plant Physiol, 33: 317-345.
- Krause G H, Weis E. 1984. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. Photosynthesis Res, 5: 139-157.
- Lichtenthaler H K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods Enzymol, 148: 351-383.
- Mauch-Mani B, Slusarenko A J. 1996. Production of salicylic acid precursors is a major function of phenylalanine ammonia-lyase in the resistance of *Arabidopsis* to *Peronospora parasitica*. Plant Cell, 8: 203-212.
- Schwab P M, Barnes D K, Sheaffer C C. 1996. The relationship between field winter injury and fall growth score for 251 alfalfa cultivars. Crop Sci, 36: 418-476.
- Van Kooten O, Snel J F H. 1990. The use of chlorophyll nomenclature in plant stress physiology. Photosynth Res, 25: 147-150.
- Wise R R, Berry J A. 1987. Quantum efficiency of PS II in relation to energy: Dependent quenching of chlorophyll fluorescence. Biochem Biophys Acta, A (894): 198-205.
- Wise R R, Naylor A W. 1987. Chilling-enhanced photooxidations: Evidence for the role of singlet oxygen and superoxide in the breakdown of pigments and endogenous antioxidants. Plant Physiol, B (83): 278-282.

第三章 不同苜蓿品种光合特性研究

近年来,我国有关苜蓿的研究大多集中在品种资源、引种试验、水分利用、干物质积累动态、品种区域试验、生态建设等方面,取得了可喜的进展。而在苜蓿光合特性及光抑制方面的研究涉足尚少,仅在环境因子变化对苜蓿光合的影响、苜蓿与其他作物的光合比较方面有少量报道,关于不同苜蓿品种光合特性的研究则很少见(耿华珠,1995;韩清芳和贾志宽,2004)。作物光合性能是产量的基础,因而在栽培生理研究中占有重要位置,许多国家都把光合作用的研究列为科学发展规划的主要项目之一。光合作用是苜蓿产量与品质形成的重要因素,研究不同品种苜蓿叶片的光合特性及其与主要环境因子的关系,分析比较不同品种光合特性的共性和特性,有助于了解苜蓿品种的生产潜能,明确品种对生态环境条件的要求及其生态适应性,寻求最佳的光合效率管理模式,可为苜蓿光合生理的研究提供有价值的基础数据,丰富苜蓿光合生理的研究内容,对科学栽培管理以及苜蓿高产高品质育种具有重要意义。

第一节 材料与方法

一、试验地自然概况

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。该站位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上,北纬 $34^{\circ}21'$,东经 $108^{\circ}10'$,海拔454.8m,年均日照时数2150h,年平均气温 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$,极端最高气温 $39\sim 40^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-21\sim -15^{\circ}\text{C}$,年平均降水量621.6mm,春季降水偏少、干旱,属暖温带半湿润季风气候区。土壤为黑垆土,土层深厚、通气良好,有机质 $15.9\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.055\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

二、试验材料及田间试验设计

试验所用的7个不同生态型苜蓿品种特性见表3-1,其中引进苜蓿品种种子全部购自美国赛贝科种子公司,国内品种种子来自产地。参试品种田间随机排列,小区面积 90m^2 ($9\text{m}\times 10\text{m}$),行距30cm。2001年5月4~6日三天播种,人工开沟、条播,播深2cm,播种量 $15\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。整个生育期全部旱作,不施肥、不喷洒农药,完全自然状态生长,仅进行田间适时人工除草。

表 3-1 试验苜蓿品种来源和名录

序号	紫花苜蓿品种	原产地	秋眠级数
I	巨人 201+Z	美国	2 级
II	中兰 1 号	兰州	3 级
III	爱菲尼特+Z	美国	4 级

续表

序号	紫花苜蓿品种	原产地	秋眠级数
IV	新疆大叶	新疆	4级
V	牧歌 401+Z	美国	4级
VI	路宝	美国	6级
VII	超级 13R	美国	8级

三、测试内容

不同生育期不同苜蓿品种光合特性：分别于分枝期、现蕾期、开花期 3 个生长期中晴朗无云天气选取不同品种栽培苜蓿的中等大小、叶色正常的 3~6 片叶子进行一次指标测定，包括光合日变化、叶绿素荧光参数、光-光合响应曲线、CO₂-光合响应曲线测定和光合生理生化指标（叶绿素含量、比叶重）。

不同茬次不同苜蓿品种光合特性：分别于第二茬及第三茬开花期晴朗无云天气选取不同品种栽培苜蓿的中等大小、叶色正常的 3~6 片叶子进行光合日变化测定。

四、研究项目及方法

（一）光合日进程

由于影响植物光合作用的主要环境因子——光照、温度、湿度和田间 CO₂ 浓度等在一天中呈现明显的变化，植物光合作用也呈现出各种日变化规律，这种变化因植物种类、生长状态和环境因子的不同而异。

采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合作用测定系统测定，在 2006 年 3~10 月苜蓿生长各生长期中，分别选择不同栽培苜蓿品种生长健康、长势一致、照光均一的同一叶位（从顶部向下第 1 片完全展开叶）苜蓿叶片的中间小叶测定其光合日进程，重复 3~6 次，8:00~18:00 每隔 1h 测 1 次。叶室内的光合有效辐射（PAR）、田间 CO₂ 浓度（C_a）、空气相对湿度（RH）、气温（T_a）由光合仪自动调控，净光合速率（P_n）、胞间 CO₂ 浓度（C_i）、气孔导度 G_s 等参数由光合仪同步探测记录。

（二）光-光合响应曲线及 CO₂-光合响应曲线测定

采用 Li-6400 便携式光合仪进行测定，然后对数据结果作出相应的光-光合响应曲线及 CO₂-光合响应曲线，并求得光补偿点（LCP）、光饱和点、暗呼吸速率（R_d）、表观量子效率（AQY）及 CO₂ 补偿点（CCP）、CO₂ 饱和点、光呼吸速率 R_p、羧化效率（CE）。

上午 9:30~11:00，采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 型便携式光合作用测定系统，开放式气路，设定温度为 25℃，CO₂ 浓度为 400 μmol · mol⁻¹，大气相对湿度为 50%~70%，应用 Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度（PAR，μmol · m⁻² · s⁻¹），分别在 PAR 为 2000 μmol · m⁻² · s⁻¹、1500 μmol · m⁻² · s⁻¹、1200 μmol ·

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下测定不同苜蓿品种功能叶片净光合速率 (P_n , $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 设定 PAR 为 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为测定光强, 采用 Li-6400-01 液化 CO_2 钢瓶提供不同的 CO_2 体积分数, 分别在 CO_2 浓度为 $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下测定叶片 P_n 。测定 P_n 前使用 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷光源诱导 10min, 在每个光强或 CO_2 浓度下平衡 60~200s 后测定 P_n , 当测量变异率小于 0.05 时由红外气体分析仪自动记录。测定时每个品种随机选两个典型植株, 取从顶部数第 1 片完全展开叶片, 以每片复叶的中部小叶作为测试叶, 结果取平均值。

应用指数方程及多项式方程拟合 PAR- P_n 曲线方程, 计算最大净光合速率 (P_{max}); 通过计算低辐射强度下 ($200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下) PAR 与 (P_n) 相关方程的方法求得光补偿点、表观量子效率、暗呼吸速率; 通过计算 CO_2 浓度与叶片 P_n 相关方程的方法求得 CO_2 补偿点、羧化效率及光呼吸速率等。

(三) 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光参数测定时间与净光合速率的测定一致。采用 Li-6400 便携式光合仪测定叶绿素荧光参数, 测定前用暗适应夹处理 30min 后测定, 每个品种 3 个重复, 取平均值。测定的基本参数为: 初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 。

用叶夹夹住苜蓿叶片, 暗适应处理 30min 后照射弱检测光 ($0.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 测得初始荧光 (F_0), 再照射饱和脉冲光 ($4000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 测得最大荧光 (F_m), 按公式 $F_v = F_m - F_0$ 计算出可变荧光 (F_v) 和 PSII 原初光化学效率 (F_v/F_m) 及 PSII 潜在活性 (F_v/F_0)。

(四) 光合生理生化指标测定

叶绿素含量: 叶绿体色素含量采用乙醇丙酮混合液浸提法提取, 用分光光度法测定, 按 Lichtenthaler 公式计算其含量。材料取与测定光合作用相同位置和相同发育阶段的叶片, 每个品种 3 个重复, 取平均值作为该品种的叶绿体色素值。具体操作方法: 早上 9:00~11:00 从各品种小区中随机选取生长健康、长势一致的植株, 剪取从顶部向下数第 1 片完全展开叶, 每个品种取约 0.1g, 3 个重复, 共约 0.3g。将新鲜叶样擦净、剪碎 (去中脉)、混匀, 用电子天平称取叶样鲜重, 每个样品称取 0.1g, 放入 25ml 容量瓶中。后在容量瓶中加入 10ml 丙酮-乙醇-水 (4.5:4.5:1) 混合液, 盖上瓶盖, 室温下置暗处浸提过夜, 其间摇动 3 或 4 次。叶组织完全变白时, 将混合液定容至 25ml, 过滤或离心后用移液管吸取叶绿素提取液, 置于 10ml 比色皿中, 以混合液作为空白对照。用 Unicam 5625 型 UV 分光光度计测定提取液在波长 663nm、652nm、646nm 和 470nm 处的光密度值, 按 Lichtenthaler 等对 Arnon 法的修正公式, 计算叶片 Chla、

Chlb 和类胡萝卜素含量 (李合生, 2000)。

$$\text{Chla 含量} = (12.21D_{663} - 2.81D_{646}) \cdot v / (1000W)$$

$$\text{Chlb 含量} = (20.13D_{646} - 5.03D_{663}) \cdot v / (1000W)$$

$$\text{叶绿素总含量} = (20.3D_{645} + 8.03D_{663}) \cdot v / (1000W)$$

$$\text{类胡萝卜素含量} = (1000D_{470} - 3.27C_{\text{chla}} - 104C_{\text{chlb}}) \cdot v / (1000W \times 229)$$

式中, v 为浸提液最终体积 (ml); W 为叶鲜重 (g); C_{chla} 为 Chla 浓度, C_{chlb} 为 Chlb 浓度。

比叶重: 剪取整株绿色叶片, 测定总叶面积, 然后烘干称重, 按下面公式计算: 比叶重 (SLW) = 叶片干重/面积。重复 3 次, 取平均值。

五、数据处理与分析

所有数据输入 Microsoft Excel 2003 做预处理, 然后利用 SPSS (statistical product and service solution) 12.0 和 SAS (statistical analysis system) 9.0 进行数据处理和分析。

第二节 不同苜蓿品种分枝期光合特性研究

试验于 2006 年 3 月 27 至 4 月 2 日 (晴天) 进行, 此时苜蓿处于第一茬分枝期。测量结果与分析如下。

一、分枝期光合日变化特征

(一) 分枝期田间环境因子日变化

光合有效辐射 (PAR) 日变化: 如图 3-1 所示, 光合有效辐射日变化呈单峰曲线, 高峰时期为 10:00~14:00, 14:00 以后 PAR 快速下降, 至 18:00 降至最低。光合有效辐射为 $150 \sim 1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

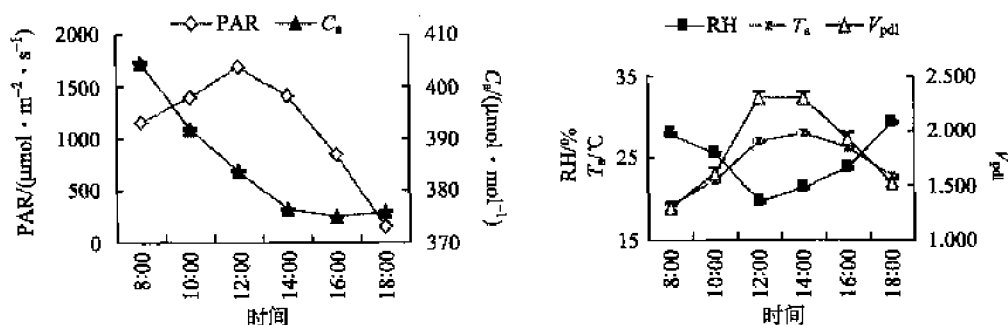


图 3-1 分枝期苜蓿生长的田间环境因子日变化

大气温度 (T_a) 日变化: 如图 3-1 所示, T_a 和 PAR 的日变化趋势相似呈单峰曲线, 日变化幅度较大, 日温差可达 9°C , 最高温度出现在 14:00, 滞后于 PAR。此后温

度有所降低, 至 18:00 降至 23℃, 为最高温度的 81.02%。

大气相对湿度 (RH) 日变化: 空气湿度日变化趋势见图 3-1, 与 PAR、 T_a 正好相反, 呈先下降后上升的趋势。上午的空气湿度较高, 达到 36%, 随后随着 T_a 的上升而下降, 14:00 降至最低值 32%, 此后开始回升, 至 18:00 达到最大值 47%。

CO₂ 浓度 (C_a) 日变化: 田间 CO₂ 浓度在一天中变化幅度不大 (图 3-1), 保持在 375~405 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 上午 8:00 浓度最高, 至 14:00 降至 376 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 此后一直维持在 375~376 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(二) 不同苜蓿品种叶片净光合速率 (P_n) 日变化特点

如图 3-2 所示, 7 个苜蓿品种叶片的净光合速率呈现 3 种不同的日变化趋势。中兰 1 号、路宝 P_n 日变化趋势呈“单峰”型, 从 10:00~14:00 随着 PAR 的增强和 T_a 的升高, P_n 呈上升趋势, 至中午 14:00 左右达到最高, 峰值分别为 27.750 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 28.033 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此后 P_n 开始下降, 且降低速率大于上午上升速率; 牧歌 401+Z 上午 10:00 左右已达到最高值, 峰值为 32.250 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此后 P_n 持续降低, 为“一降不起”型。其余品种 (爱菲尼特+Z、超级 13R、巨人 201+Z、新疆大叶) P_n 均呈“双峰”型变化趋势, 第 1 峰出现在 12:00 左右, 峰值分别为 29.100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、25.800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、23.033 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、22.025 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$); 中午 14:00 降至谷底, 谷值分别为 17.000 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、18.400 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、17.800 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、16.700 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中新疆大叶和爱菲尼特+Z 相对较低, 爱菲尼特下降幅度最大, 下降速率最大; 此后 P_n 开始回升, 至下午 16:00 达到第 2 峰, 其峰值分别为 17.950 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、22.975 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、19.56 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 23.999 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 除新疆大叶外, 其余 3 个品种第 2 峰值均低于第 1 峰值。

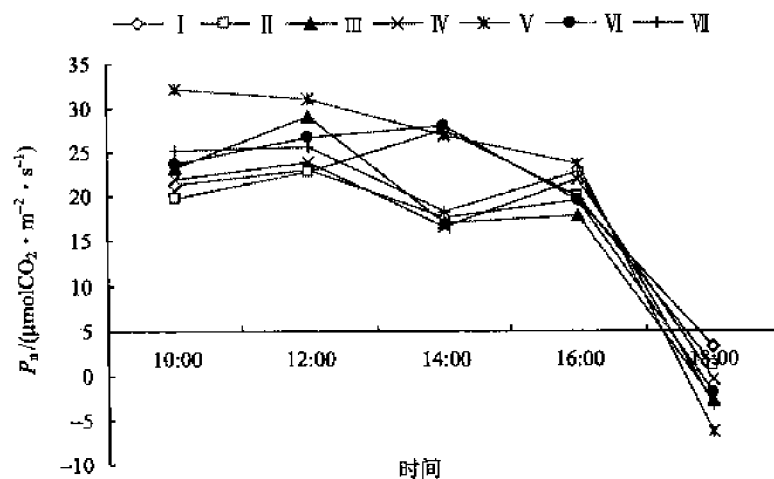


图 3-2 不同苜蓿品种分枝期叶片 P_n 日变化

I. 巨人 201+Z; II. 中兰 1 号; III. 爱菲尼特+Z; IV. 新疆大叶; V. 牧歌 401+Z; VI. 路宝; VII. 超级 13R

(三) 光合作用和主要生理生态因子的关系

植物的 P_n 不仅受到环境因子的调节影响,同时还受到内在生理因子的调节作用。

光合特性与环境生态因子的相关性分析:7个苜蓿品种的 P_n 与 PAR 都呈正相关关系,其中巨人 201+Z、中兰 1 号、新疆大叶、路宝相关性达到显著水平 ($P<0.05$);7个苜蓿品种的 P_n 与 T_a 、 V_{pd} 、 C_i 均呈不同程度的正相关,相关性均不显著;各品种 P_n 与 RH 均呈负相关,其中中兰 1 号相关性显著 ($P<0.05$);各品种 P_n 与 G_s 均呈正相关,其中中兰 1 号、牧歌 401+Z 相关性极显著 ($P<0.01$),超级 13R 相关性显著 ($P<0.05$);从相关系数的大小来看,对 P_n 影响最大的因子是 PAR、 G_s 和 RH (表 3-2)。

表 3-2 7 个苜蓿品种叶片分枝期光合速率与其影响因子的相关系数

品种	PAR	T_a	RH	V_{pd}	C_i	G_s
I	0.883*	0.442	-0.792	0.576	0.488	0.664
II	0.922*	0.781	-0.879*	0.855	0.253	0.975**
III	0.829	0.330	-0.813	0.455	0.717	0.809
IV	0.941*	0.516	-0.737	0.437	0.427	0.802
V	0.854	0.392	-0.803	0.584	0.472	0.994**
VI	0.938*	0.522	-0.821	0.711	0.320	0.670
VII	0.808	0.375	-0.822	0.506	0.488	0.885*

* 相关性显著 ($P<0.05$), ** 相关性极显著 ($P<0.01$)。I~VII 意义同图 3-2。

气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系:巨人 201+Z、爱菲尼特+Z、新疆大叶和超级 13R 的净光合速率在一天之中出现较剧烈的波动,出现“午休”。许大全(1997)认为,判断叶片光合速率降低的主要原因是气孔因素还是非气孔因素的两个可靠判据,是 C_i 和 L_s 的变化方向: C_i 降低和 L_s 升高表明气孔导度降低是主要原因;而 C_i 增高和 L_s 降低则表明主要原因是非气孔因素。本节对 4 个 P_n 均呈“双峰”型变化的苜蓿品种的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化进行了分析。由图 3-3 可见,巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 和超级 13R 变化趋势相似。12:00~14:00, L_s 降低,同时 C_i 增高,表明这三者光合作用的下降不是由气孔关闭引起的,而主要是非气孔限制导致的,即叶肉细胞光合活性降低的缘故 (Smirnoff and Colombe, 1988);而新疆大叶 L_s 稍有升高,同时 C_i 稍有降低,表明午间光合速率的降低主要缘于气孔因素,该品种气孔导度呈降低趋势也佐证这一点。16:00~18:00, 4 个苜蓿品种 L_s 均降低而 C_i 增高,表明此时叶肉细胞光合能力的下降是光合速率下降的主要原因。

对气孔限制值 (L_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与 P_n 进行相关分析发现,4 个不同苜蓿品种巨人 201+Z、爱菲尼特+Z、新疆大叶和超级 13R 的 L_s 与 P_n 呈不同水平的正相关,相关系数分别为 0.519 ($P=0.370$)、0.986 ($P=0.002<0.01$)、0.885 ($P=0.046<0.05$)、0.993 ($P<0.001$),2 个品种相关性极显著; C_i 与 P_n 均呈不同水平的

负相关, 相关系数分别为 -0.942 ($P=0.017<0.05$)、 -0.961 ($P=0.009<0.01$)、 -0.805 ($P=0.100$)、 -0.985 ($P=0.002<0.01$)。

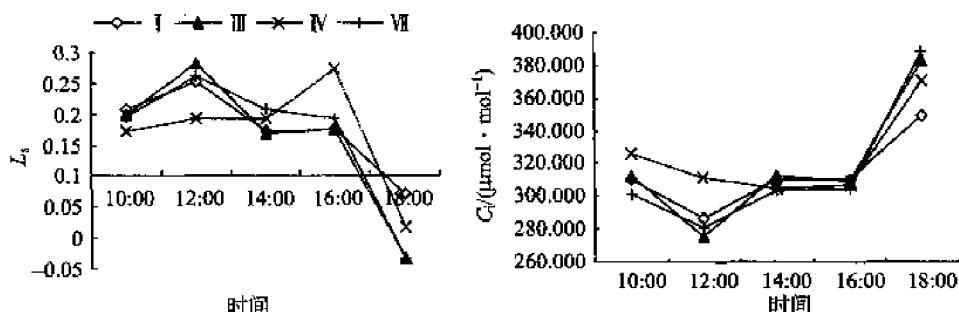


图 3-3 不同苜蓿品种叶片 L_s 和 C_i 日变化

I. 巨人 201+Z; III. 爱非尼特+Z; IV. 新疆大叶; VII. 超级 13R

叶绿体色素等生理指标对光合速率的影响: 如表 3-3 所示, 分枝期苜蓿叶片日均净光合速率与 Chla 含量、Chlb 含量、类胡萝卜素 (Car) 含量、Chla+Chlb、Chla/Chlb、比叶重 (SLW) 均呈正相关, 其中与 Chla 含量、比叶重相关性极显著 ($P<0.01$), 与类胡萝卜素含量、叶绿素总量相关性显著 ($P<0.05$)。

表 3-3 分枝期苜蓿叶片净光合速率与生理因子的相关系数

生理因子	Chla	Chlb	Car	Chla+Chlb	Chla/Chlb	SLW
相关系数	0.890**	0.257	0.777*	0.787*	0.324	0.891**

* 相关性显著 ($P<0.05$), ** 相关性极显著 ($P<0.01$)。

二、净光合速率对光强变化的响应

由配置红蓝光源设定不同光合有效辐射强度下测定的净光合速率 (图 3-4) 可见, 7 个苜蓿品种 P_n -PAR 曲线呈相似的变化趋势, 在一定的 PAR 范围内, P_n 随 PAR 的增加而增加, 当达到某一光强时, P_n 不再增加而呈饱和状态, 这时的光强为光饱和点 (LSP), 光饱和时的 P_n 为叶片的最大光合速率, 可以反映叶片的光合潜能; 当光强降低到一定水平时, 光合吸收的 CO_2 与呼吸放出的 CO_2 相等, 净光合速率等于零, 此时的光强为光补偿点 (LCP), 它是植物在低光强下保持净光合能力的一个指标。

不同苜蓿品种分枝期光合作用光响应曲线可用指数曲线来描述, Xu (2000)、Guo 等 (2005) 利用指数模型模拟了玉米光合速率随光强的变化, 并取得了满意的结果。本研究应用指数方程对分枝期不同苜蓿品种叶片的净光合速率和光合有效辐射的关系进行拟合为

$$P_n = P_{\max} \left(1 - e^{-\frac{PAR}{P_{\max}}} \right) - R_d \quad (3-1)$$

式中, PAR 为光合有效辐射; P_n 为不同 PAR 对应的叶片净光合速率, P_{\max} 为光饱和下叶片的最大净光合速率, R_d 为暗呼吸速率。式 (3-1) 可以较好地模拟光合速率随光强的变化, 各品种分枝期响应曲线拟合方程的决定系数 (R^2) 都在 0.997 以上, 拟合

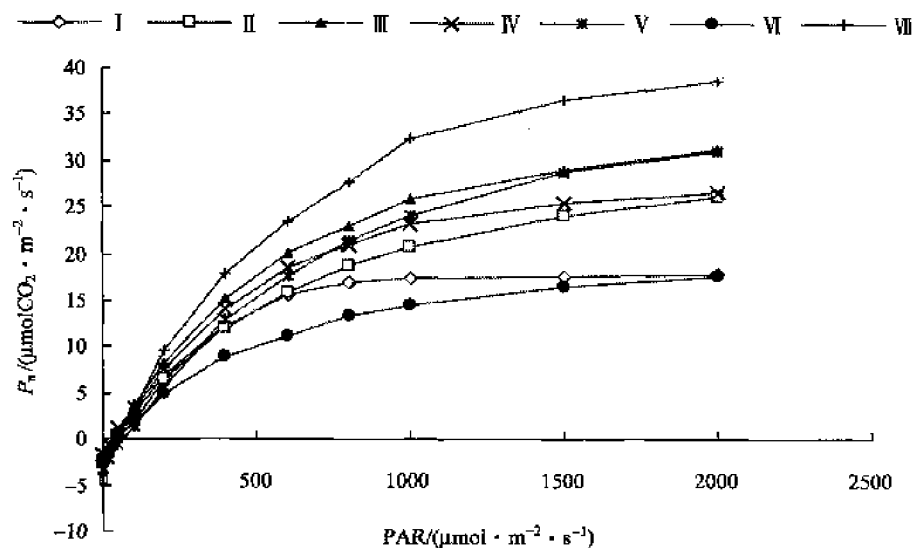


图 3-4 不同苜蓿品种分枝期叶片光合作用-光强响应曲线

图例标注同图 3-2

程度均达到极显著水平, 模拟结果能够反映实际情况。利用式 (3-1) 对测定数据进行拟合, 可以求出不同苜蓿品种叶片光合作用-光响应曲线的特征参数 (表 3-4)。表观量子效率 (AQY , $\text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$) 是用响应曲线中光合有效辐射在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的初始直线部分 (图 3-5) 的斜率表示 (Farquhar and Sharkey, 1982), 拟合方程为

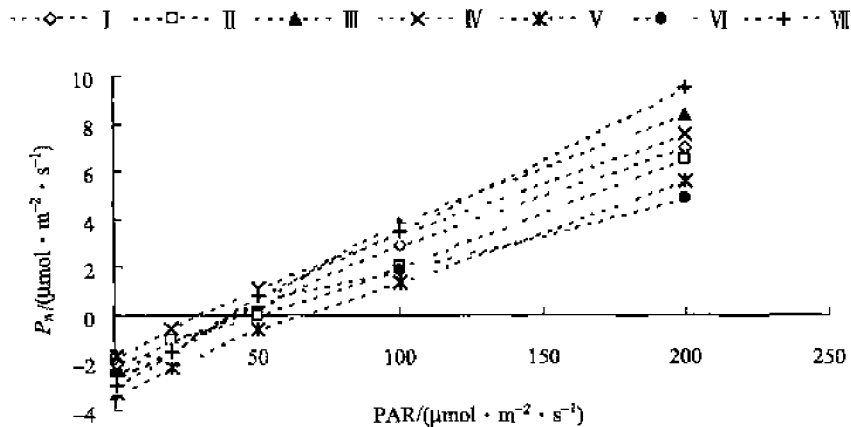
$$P_n = -R_d + AQY \cdot PAR \quad (3-2)$$

当 $P_n = 0$ 时, PAR 即为光合作用的光补偿点 (LCP , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 这里 R_d 为暗呼吸速率。方程拟合效果较好, R^2 均在 0.990 以上。将 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的线性方程 (式 3-2) 与指数模型计算出的 P_{\max} 值这条平行直线相交, 得出交点, 该交点在 x 轴上的数值即为近光饱和点 (Lk , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (刘宇锋等, 2005)。

表 3-4 不同苜蓿品种分枝期光响应特征参数

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
$P_{\max}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	20.640	29.077	34.034	28.827	36.261	19.503	43.281
$AQY/(\text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1})$	0.046bABC	0.044 bBC	0.056aAB	0.046bABC	0.044bC	0.036bC	0.062aA
$R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.953dDE	2.313cdBCD	2.405bcBC	1.467eE	3.083aA	2.015dCD	2.739abAB
$Lk/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	497dD	710bABC	655bcBCD	659bcBCD	892aA	598cdCD	742bAB
$LCP/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	43cC	52bB	43cC	32dD	70aA	56bB	44cC

注: 表中数据由拟合方程计算而来, 为两个重复的平均值。不同小写字母表示品种间差异显著, 大写字母表示差异极显著。I ~ VII 意义同图 3-2。

图 3-5 不同苜蓿品种分枝期叶片光合-低光强响应曲线 ($PAR < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

图例标注同图 3-2

(一) 表观量子效率

表观量子效率是叶片光能利用效率的一个重要指标,反映叶片对弱光的利用能力,也可以反映叶片的光合潜能。测定结果表明不同苜蓿品种的表观量子效率有一定差别(表 3-4),其大小顺序依次为超级 13R>爱菲尼特+Z>新疆大叶=巨人 201+Z>中兰 1 号=牧歌 401+Z>路宝。其中超级 13RAQY 极显著高于中兰 1 号、牧歌 401+Z 和路宝 ($P<0.01$);新疆大叶、巨人 201+Z、中兰 1 号、牧歌 401+Z 和路宝间无显著差异;路宝极显著低于爱菲尼特+Z 和超级 13R ($P<0.01$)。这说明超级 13R 和爱菲尼特+Z 叶片在分枝期对光能的利用效率最大,具有较强的弱光利用能力,而路宝等叶片光能利用效率较低,对弱光的利用能力小。

(二) 光补偿点和近光饱和点

不同苜蓿品种的光补偿点和近光饱和点均存在差异(表 3-4)。牧歌 401+Z Lk 最高,极显著高于其余品种;超级 13R、中兰 1 号、爱菲尼特+Z、新疆大叶 Lk 依次降低,四者间无显著差异;巨人 201+Z 最低,极显著低于牧歌 401+Z、超级 13R 和中兰 1 号。各品种间 LCP(除巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 和超级 13R 之间,中兰 1 号和路宝之间外)均存在极显著差异,其大小顺序为牧歌 401+Z>路宝>中兰 1 号>超级 13R>爱菲尼特+Z=巨人 201+Z>新疆大叶。综合分析表明,牧歌 401+Z 光能利用范围可塑性最大,其余品种光能利用范围大小依次是超级 13R、中兰 1 号、新疆大叶和爱菲尼特+Z,巨人 201+Z、路宝光能利用范围最窄。

(三) 光饱和下最大净光合速率和暗呼吸速率

光饱和时的净光合速率为叶片的最大光合速率,可以反映叶片的光合潜能。不同苜蓿品种光饱和下 P_{max} 差异具体见表 3-4,其中超级 13R P_{max} 最大,在分枝期具有较高的光合潜能,其余品种 P_{max} 大小依次是牧歌 401+Z、爱菲尼特+Z、中兰 1 号、新疆大

叶, 巨人 201+Z、路宝 P_{max} 最小, 具有最低的光合潜能。不同品种间 P_{max} 差异为 $1.137 \sim 23.778 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

光合产物的合成与运输都需要由呼吸来提供能量, 不同苜蓿品种暗呼吸速率存在较大差异 (表 3-4), 牧歌 401+Z 极显著高于其他品种 ($P < 0.01$); 超级 13R 次之, 极显著高于巨人 201+Z 和新疆大叶 ($P < 0.01$); 爱菲尼特+Z 显著高于路宝 ($P < 0.05$); 新疆大叶最小, 极显著低于其他品种。

三、叶绿素荧光日变化

(一) 不同苜蓿品种 F_v/F_m 日变化特点

可变荧光 (F_v) 与最大荧光 (F_m) 的比值 (F_v/F_m) 用于度量原初光能转换效率 (张守仁, 1999), 其日变化与光强的变化有关, 代表 PS II 光化学效率一天之中的变化。各品种 F_v/F_m 日变化值在一天中呈先下降后上升的倒抛物线形 (图 3-6), 超级 13R 在中午 13:30 下降到一天中的最低值, 此后逐渐回升, 至 15:30 已回复至初始水平的 95%, 其净光合速率 (P_n) 也相应增大 (图 3-2); 其余品种约在 15:30 下降至最低值, 然后缓慢上升, 至下午 17:30 左右恢复到初始水平的 93% 以上。其中中兰 1 号、路宝、牧歌 401+Z F_v/F_m 变化趋势相似, 下降较平缓, 下降幅度小, 表明这 3 个品种对强光的利用能力强, 光抑制较轻, 与此相对应所测得的 P_n 在 14:00~16:00 下降幅度小, 保持在相对较高的水平上 (图 3-2)。但牧歌 401+Z、路宝 F_v/F_m 均较中兰 1 号低, 表明中兰 1 号 PS II 光化学潜在效率较高。巨人 201+Z、新疆大叶、爱菲尼特+Z 下降趋势一致, 下降幅度相对较大, 出现较为明显的光抑制, 与此相对应所测得的 P_n 在 14:00~16:00 也相对较小 (图 3-2), 表明这 3 个品种对强光适应能力较差。在强光下, 不同苜蓿品种 PS II 功能均下调, F_v/F_m 下降, 光合速率也随之下降, 中午会出现明显的光抑制。其中对强光适应能力弱的品种, F_v/F_m 、光合速率下降幅度较大, 对强光利用能力较差 (李霞等, 2002)。

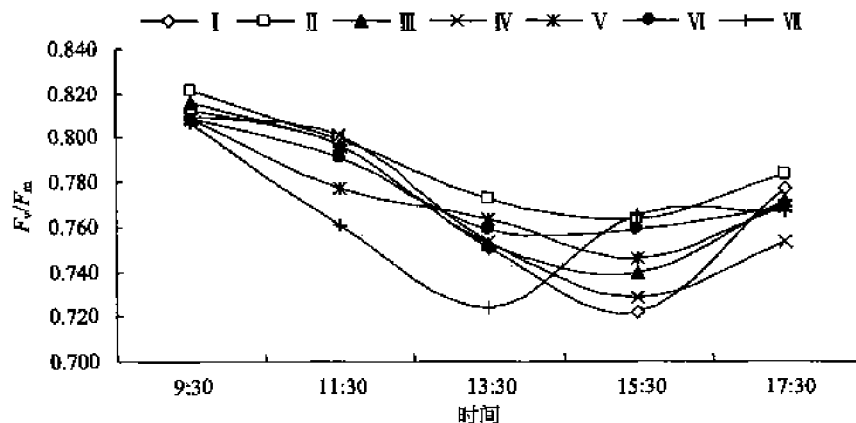


图 3-6 不同苜蓿品种分枝期叶片 F_v/F_m 日变化

图例标注同图 3-2

(二) 不同苜蓿品种 F_v/F_o 、 F_o 日变化特点

各苜蓿品种 F_v/F_o 的变化与 F_v/F_m 相似, 呈先缓慢下降后回升的趋势 (图 3-7)。超级 13R F_v/F_o 值较其他品种小, 且于 13:30 即降至最低值 2.671, 比其他品种早, 随后开始回升, 回升速率较其他品种快。其他品种 F_v/F_o 下降趋势较缓慢, 至下午 15:30 降至最低点, 随后开始回升, 最终可回复到初始值的 73%~81%。其中中兰 1 号、路宝、牧歌 401+Z 降低幅度较小, 并可回升到初始值的 78%~80%。

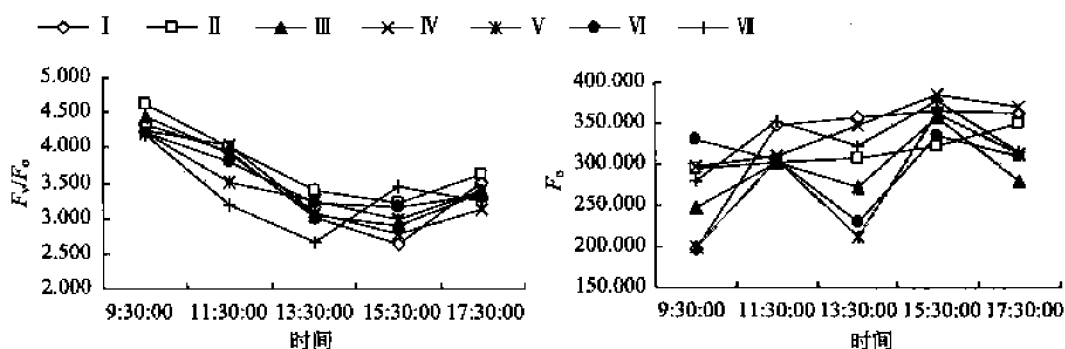


图 3-7 不同苜蓿品种分枝期叶片 F_v/F_o 和 F_o 日变化

图例标注同图 3-2

如图 3-7 所示, 11:30~13:30, 超级 13R F_v/F_m 下降到最低点的过程中, 其 F_o 也随之降低, 此后又开始回升。其余品种在 F_v/F_m 降低到最低点的 13:30~15:30 时间段 F_o 均呈上升趋势, 其中巨人 201+Z 和中兰 1 号上升幅度较小, 牧歌 401+Z、路宝、爱菲尼特+Z、新疆大叶 F_o 有较大的增加。

四、讨论与小结

(一) 叶片中叶绿素含量及组成比例与光合能力的关系

叶片中叶绿素含量是反映作物光合能力的一个重要指标。一般 Chla 有利于吸收长波光, Chlb 有利于吸收短波光。刘贞琦 (1985) 证明, 当 Chla/Chlb 值减少时, 能提高叶片光合活性。较高的 Chla+Chlb 含量水平、较低的 Chla/Chlb 类型的品种有较强的光能利用率。试验发现路宝、牧歌 401+Z 具最高的 Chla+Chlb 含量和 Car 含量, 中兰 1 号具最高的 Chlb 含量和最小的 Chla/Chlb 比值, 与其高光合速率相对应, 进一步相关分析发现, Chla+Chlb、Car 与日均 P_n 呈正相关, 但未达到显著水平。Suresh 等 (1997) 认为在饱和光强下, 一定范围内叶绿素含量的高低对 P_n 并无明显影响。

(二) 叶片荧光参数反映的光合特性

PSII 最大光化学效率 F_v/F_m (暗) 常用来表征植物是否处于胁迫状态, 通过对 F_v/F_m 日变化的测定可以检测到植物在所处的环境 (特别是光环境) 下是否发生光抑制和

发生光抑制的程度; F_v/F_o 值用于度量植物叶片 PSⅡ 潜在活性。二者是表示光化学反应状况的两个重要参数 (张守仁, 1999), F_v/F_m 和 F_v/F_o 值大, 说明 PSⅡ 反应中心的能量捕捉效率高。中兰 1 号、路宝、牧歌 401+Z F_v/F_m 值较大, 中午下降较平缓, 下降幅度较小, 且 F_v/F_o 值较高, 中午下降平缓, 且回升幅度大, 表明这 3 个品种对强光的利用能力强, 光抑制较轻, 有较高的 PSⅡ 潜在活性, 这可能是其净光合速率较其他品种高的内在原因。

作物叶片 F_v/F_m 和 P_n 除与品种有关外, 还受外界光强、温度等影响。各苜蓿品种在 15:30 (超级 13R 在 13:30) F_v/F_m 降到最低点, 此时光强为最大光强的 87% 以上, 比 9:30 时下降了 6%~12%, 说明各品种光合作用受到一定的光抑制, 用于光化学反应的激发能减少, 过剩的光能通过热或其他方式耗散, 导致苜蓿叶片光合速率的下降。此外, 在 F_v/F_m 下降到最低点的过程中, 超级 13R F_o 随之降低; 其余品种 F_o 均呈上升趋势, 其中巨人 201+Z 和中兰 1 号上升幅度较小, 牧歌 401+Z、路宝、爱菲尼特+Z、新疆大叶 F_o 有较大的增加。Xu 和 Wu (1996) 认为导致 F_o 改变的至少有非辐射能量耗散、PSⅡ 反应中心可逆失活和破坏 3 个因素, 所以 F_o 变化的方向取决于这些因素中起主要作用的因素。在光抑制机理研究中发现, 在没有其他环境胁迫的自然条件下, 植物的光抑制不是光合机构破坏、D1 蛋白净损失的结果, 而是一些保护性的能量耗散过程加强运转的反映 (Xu and Shen, 1997; Xu and Wu, 1996)。 F_o 升高往往被认为是光合机构遭到破坏的结果, 而这一指标的降低则可能是非光化学能量耗散的增加造成的 (Björkman and Demming, 1987)。本试验的结果表明, 在中午强光照射后, 超级 13R F_o 降低, 且随光强减弱后又恢复, 说明非辐射能量耗散在该品种光抑制发生过程中起主要作用; 牧歌 401+Z、路宝、爱菲尼特+Z、新疆大叶 F_o 有较大升高, 其 PSⅡ 反应中心可能发生可逆失活, 此后 F_o 的逐渐降低也印证了这一点。

(三) 小结

7 个苜蓿品种叶片在第一茬分枝期净光合速率呈现三种不同的日变化趋势。中兰 1 号、路宝 P_n 日变化趋势呈“单峰”型, 牧歌 401+Z P_n 日变化呈现“一降不起”的趋势, 爱菲尼特+Z、超级 13R、巨人 201+Z、新疆大叶 P_n 日变化均呈“双峰”型变化趋势, 除新疆大叶外, 其余 3 个品种第 2 峰值均低于第 1 峰值。爱菲尼特+Z、超级 13R、巨人 201+Z 午间光合作用的下降主要是非气孔限制导致的, 即叶肉细胞光合活性降低的缘故, 而新疆大叶午间光合速率的降低主要源于气孔因素。影响苜蓿分枝期净光合速率日变化的主要因子是光合有效辐射、气孔导度和大气相对湿度。分枝期苜蓿光合作用对光强单一生态因子水平变化的响应行为可用指数方程来描述; 超级 13R 和爱菲尼特+Z 表观量子效率显著高于其他品种, 对光能的利用效率最大, 具有较强的弱光利用能力, 不同品种间 AQY 为 0.036~0.062 $\text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$; 牧歌 401+Z 具最高的光饱和点, 极显著高于其余品种, 超级 13R、中兰 1 号次之; 新疆大叶、巨人 201+Z、爱菲尼特+Z、超级 13R 光补偿点相对较低, 对弱光的利用能力较强。综合分析发现, 牧歌 401+Z、超级 13R、中兰 1 号光能利用范围可塑性最大; 牧歌 401+Z 和超级 13R 暗呼吸速率显著高于其他品种, 可为植物生长提供较多的能量; 超级 13R P_{max} 最大, 在

分枝期具有较高的光合潜能,不同品种间 P_{\max} 差异为 $1.137 \sim 23.778 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中兰 1 号、路宝、牧歌 401+Z 光化学效率相对较高,对强光的利用能力强,光抑制较轻,有较高的 PSII 潜在活性,这可能是其净光合速率较其他品种高的内在原因。分枝期苜蓿叶片日均净光合速率与 Chla 含量、比叶重呈极显著正相关。

第三节 不同苜蓿品种现蕾期光合特性研究

测定于 2006 年 4 月 24 日至 5 月 2 日(晴天)进行,此时苜蓿处于第一茬现蕾期。结果分析如下所述。

一、不同苜蓿品种叶片现蕾期光合日变化特点

(一) 现蕾期苜蓿生长的田间环境因子日变化

光合有效辐射日变化:如图 3-8 所示,光合有效辐射日变化呈单峰曲线,高峰时期为 12:00~14:00,16:00 以后 PAR 快速下降,至 18:00 降至最低。光合有效辐射为 $350 \sim 1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

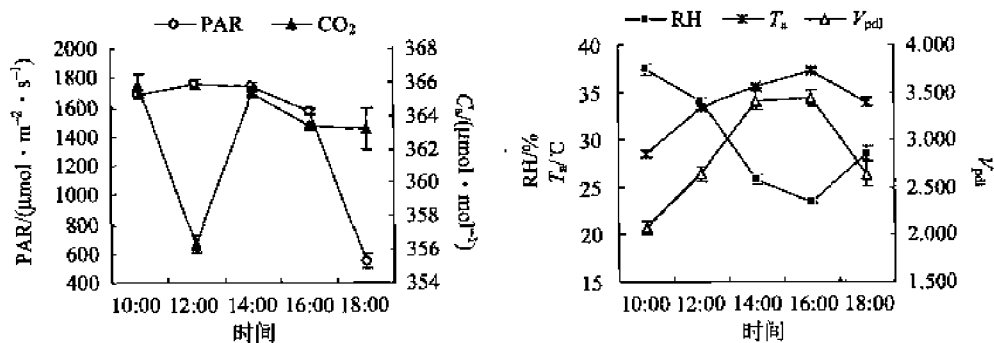


图 3-8 现蕾期苜蓿生长的田间环境因子日变化

大气温度日变化:如图 3-8 所示, T_a 和 PAR 的日变化趋势相似呈单峰曲线。日变化幅度较大,日温差可达 9°C ,最高温度出现在 16:00,迟于 PAR,此后温度有所降低,至 18:00 降至 34°C ,为最高温度的 90.90%。

大气相对湿度日变化:大气相对湿度日变化趋势如图 3-8 所示,与 PAR、 T_a 正好相反,呈先下降后上升的趋势。上午的空气相对湿度较高,达到 37%,随后随着 T_a 的上升而下降,16:00 降至最低值 23%,此后开始回升,至 18:00 回复到 29%。

CO₂ 浓度日变化:如图 3-8 所示,田间 CO₂ 浓度在一天中变化幅度不大,保持在 $358 \sim 366 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,上午 CO₂ 浓度最高,达到 $358 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,至 12:00 降至最低,此间变化幅度稍大。随后开始回升,至 14:00 回升至 $366 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,此后略有下降,但变化幅度不大。

(二) 净光合速率 (P_n) 日变化

供试品种现蕾期 P_n 日变化如图 3-9 所示。7 个苜蓿品种叶片的 P_n 均呈现“双峰”型变化趋势, 出现光合午休现象。第 1 峰出现在 12:00 左右, 各品种峰值差异不显著, 其中爱菲尼特+Z 峰值最高, 为 $39.275 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次为中兰 1 号和超级 13R, 峰值均为 $38.975 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其余品种依次为路宝、巨人 201+Z、新疆大叶和牧歌 401+Z; 中午 14:00 降至谷底, 谷值依次为巨人 201+Z ($27.975 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 超级 13R ($22.475 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 路宝 ($21.975 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 牧歌 401+Z ($21.925 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 新疆大叶 ($20.920 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 中兰 1 号 ($20.525 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 爱菲尼特+Z ($20.375 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 品种间差异不显著; 下降幅度最大的是爱菲尼特+Z, 下降了 48.12%, 降低幅度为 $18.900 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次是中兰 1 号, 下降了 47.34%, 下降最少的是巨人 201+Z, 仅为 19.03%, 下降幅度仅为 $6.575 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 此后 P_n 开始回升, 至下午 16:00 达到第 2 峰, 巨人 201+Z 峰值显著高于其他品种 ($P < 0.05$), 超级 13R 和路宝显著低于其他品种 ($P < 0.05$)。中兰 1 号回升最快, 达 63.70%, 回升幅度最大达到 $13.075 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次是新疆大叶和牧歌 401+Z, 分别回升了 53.68% 和 44.70%, 回升幅度分别为 $11.230 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.800 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 回升最小的是超级 13R, 仅为 2.00%, 回升幅度为 $0.450 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。除巨人 201+Z 外, 其余品种第 2 峰值均低于第 1 峰值, 其中峰值降低最多的是超级 13R, 降幅为 $13.025 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次为爱菲尼特+Z 和路宝, 降幅分别为 $11.400 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $9.858 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 牧歌 401+Z 和新疆大叶降低较少, 分别为 $1.625 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.675 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

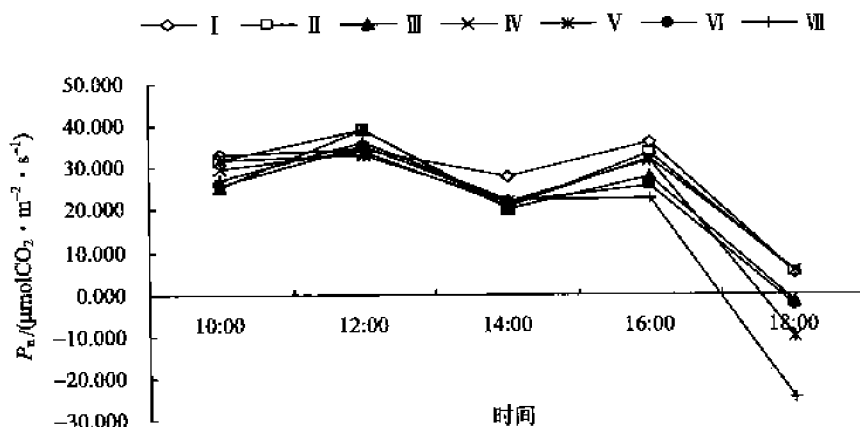


图 3-9 不同苜蓿品种现蕾期叶片 P_n 日变化

图例标注同图 3-2

(三) 光合作用和主要生理生态因子的关系

植物的 P_n 不仅受到环境因子的调节影响, 同时还受到内在生理因子的调节。

1. 光合特性与环境生态因子的相关性分析

表 3-5 表明, 7 个苜蓿品种的 P_n 与 PAR 都呈正相关关系, 除中兰 1 号外, 其余品种相关性达到显著至极显著水平; 牧歌 401+Z 和超级 13R 的 P_n 与 T_a 呈正相关, 其余品种呈微弱负相关, 相关性均不显著; 除超级 13R 外, 其余品种 P_n 与 RH 均呈正相关, 相关性不显著; 巨人 201+Z、牧歌 401+Z、路宝和超级 13R 4 个品种的 P_n 与 V_{pd} 呈正相关, 但相关性都不显著, 其余品种 P_n 与 V_{pd} 间均呈微弱负相关; 除巨人 201+Z 外, 其余品种 P_n 与 C_i 均呈负相关关系, 其中路宝相关性达到显著水平。从相关系数的大小来看, 对 P_n 影响最大的因子是 PAR。

表 3-5 7 个苜蓿品种叶片现蕾期光合速率与其影响因子的相关系数

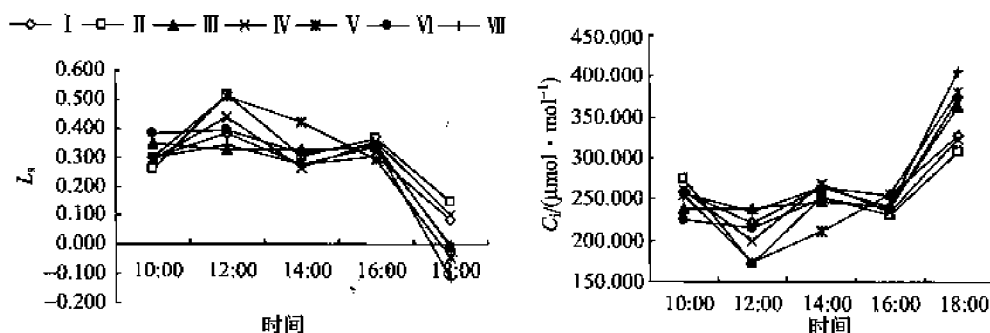
品种	PAR	T_a	RH	V_{pd}	C_i	G_s
I	0.936*	-0.124	0.133	0.086	0.329	0.171
II	0.828	-0.206	0.401	-0.313	-0.195	0.611
III	0.945*	-0.002	0.185	-0.064	-0.385	0.763
IV	0.908*	-0.154	0.370	-0.097	-0.117	0.771
V	0.920*	0.019	0.080	0.316	-0.525	-0.100
VI	0.916*	-0.014	0.363	0.151	-0.899*	-0.395
VII	0.963**	0.132	-0.018	0.319	-0.433	0.856

* 相关性显著 ($P < 0.05$), ** 相关性极显著 ($P < 0.01$)。I ~ VII 意义同图 3-2。

2. 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系

本节对 7 个 P_n 均呈“双峰”型变化的苜蓿品种的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化进行了分析 (图 3-10)。可知, 在 12:00~14:00, 各品种 P_n 均降低, 同时 L_s 降低而 C_i 增高, 表明此时光合作用的下降不是由气孔关闭引起的, 而主要是非气孔限制导致的, 即叶肉细胞光合活性降低的缘故 (许大全, 1995); 在 16:00~18:00, 7 个苜蓿品种 P_n 急剧降低, 与此同时, L_s 急剧降低且 C_i 增高, 表明此时叶肉细胞光合能力的下降是光合速率下降的主要原因。

对气孔限制值 (L_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与 P_n 进行相关分析 (表 3-6) 发现, 7 个不同苜蓿品种的 L_s 与 P_n 呈不同水平的正相关, 其中巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 和新疆大叶相关性显著, 路宝和超级 13R 相关性极显著; C_i 与 P_n 均呈不同水平的负相关, 其中巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 和新疆大叶相关性显著, 路宝和超级 13R 相关性极显著。

图 3-10 不同苜蓿品种现蕾期叶片 L_s 和 C_i 日变化

图例标注同图 3-2

表 3-6 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度与净光合速率之间的关系

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
C_i	-0.928*	-0.825	-0.916*	-0.939*	-0.864	-0.980**	-0.985**
L_s	0.951*	0.845	0.894*	0.958*	0.864	0.975**	0.981**

* 相关性显著 ($P < 0.05$), ** 相关性极显著 ($P < 0.01$)。I ~ VII 意义同图 3-2。

3. 叶绿体色素等生理指标对光合速率的影响

如表 3-7 所示, 现蕾期苜蓿叶片日均净光合速率与 Chla、Chlb、Chla+Chlb 均呈负相关, 与类胡萝卜素 (Car)、Chla/Chlb、比叶重 (SLW) 均呈正相关, 相关性均不显著, 其中类胡萝卜素对净光合速率影响较大。

表 3-7 现蕾期苜蓿叶片日均净光合速率与生理因子的相关系数

生理因子	Chla	Chlb	Car	Chla+Chlb	Chla/Chlb	SLW
相关系数	-0.454	-0.642	0.657	-0.573	0.187	0.113

二、光合作用对光和 CO_2 浓度的响应

(一) 光合作用-光响应曲线特征

由配置红蓝光源设定不同光合有效辐射强度下测定的净光合速率 (图 3-11, 图 3-12) 可知, 光强在 $0 \sim 600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 快速上升, 超过 $500 \sim 700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, P_n 升幅减弱, 但在 PAR 为 $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内均未达到完全饱和, 说明苜蓿品种潜在光合能力很大。

应用指数方程对不同苜蓿品种现蕾期叶片的净光合速率和光强的关系进行拟合, 并得出光合作用-光响应曲线特征参数, 方法同分枝期光响应曲线拟合。式 (3-1) 可以较好地模拟光合速率随光强的变化, 各品种现蕾期光响应曲线拟合方程的决定系数 (R^2) 都在 0.975 以上 (表 3-8), 拟合程度均达到极显著水平, 模拟结果能够反映实际

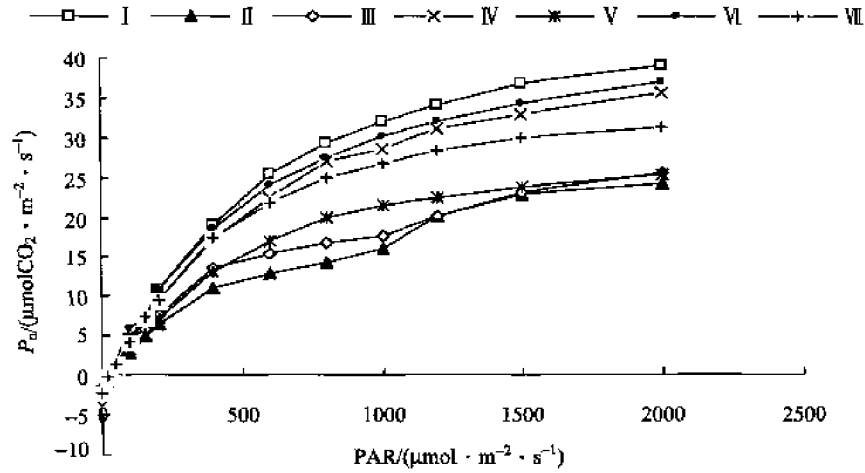


图 3-11 不同苜蓿品种现蕾期叶片光合作用-光强响应曲线

图例标注同图 3-2

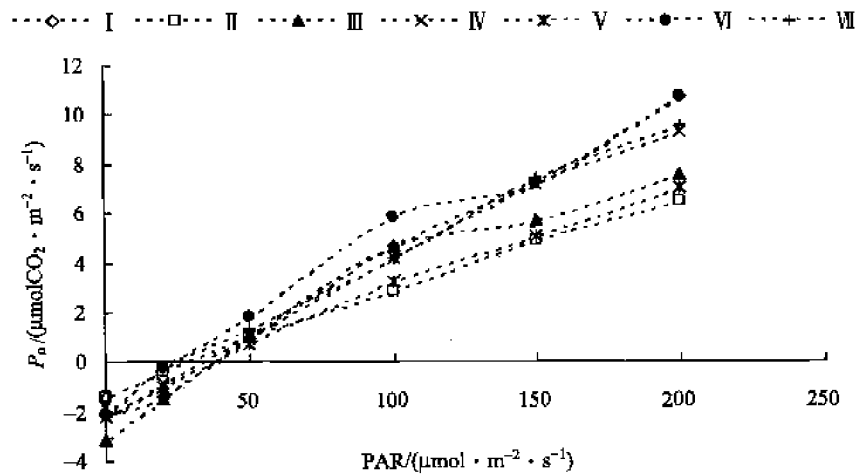


图 3-12 不同苜蓿品种现蕾期叶片光合作用-低光强响应曲线 ($PAR < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

图例标注同图 3-2

情况。对光强在 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的响应曲线进行直线回归分析, R^2 均在 0.951 以上 (表 3-8), 拟合效果较好, 得出拟合方程 [同式 (3-2)], 通过两个拟合方程, 可以求出不同苜蓿品种叶片光反应曲线的特征参数 (表 3-9)。

表 3-8 现蕾期光合响应曲线拟合方程决定系数

品种代号		I	II	III	IV	V	VI	VII
光响应曲线	指数方程 R^2	0.999	0.985	0.975	0.999	1	0.998	0.999
	直线方程 R^2	0.997	0.995	0.951	0.995	0.991	0.981	0.993
CO_2 响应曲线	指数方程 R^2	0.999	0.996	0.994	0.998	0.997	0.995	0.994
	直线方程 R^2	0.962	0.982	0.999	0.996	0.991	0.999	0.994

表 3-9 不同苜蓿品种现蕾期光合响应特征参数

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
光饱和最大净光合速率 (P_{\max}) /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	42.177	27.362	25.408	38.106	27.350	38.610	33.218
CO_2 饱和最大净光合速率 (P_{wax}) /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	48.206	44.829	49.300	45.114	50.767	52.065	50.281
AQY /($\text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$)	0.065aA	0.039dC	0.053bAB	0.059abA	0.046cBC	0.062abA	0.058abA
CE /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.130aA	0.119 abA	0.127aA	0.123abA	0.109bA	0.118abA	0.117abA
R_d /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.288aA	1.144fD	2.194abA	1.963bcAB	1.809cdB	1.475eCD	1.687deBC
R_p /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.390abA	6.555 abA	7.142aA	6.684abA	6.991abA	5.746bA	6.666abA
Lk /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	684abA	727aA	519eC	685abA	637dAB	648bcAB	602dB
LCP /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	35cB	29dC	41aA	34cB	39bA	24eD	29dC
CSP /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	421cB	431bcB	445bcB	420cB	531aA	491aA	485abAB
CCP /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	49dC	55cB	56bB	54cB	64aA	49dC	57bB

注：表中数据由拟合方程计算而来，为两个重复的平均值。不同小写字母表示品种间差异显著，不同大写字母表示差异极显著。I~VII意义同图 3-2。

1. 表观量子效率

不同苜蓿品种的表观量子效率有较大差异（表 3-9），其中中兰 1 号和牧歌 401+Z AQY 最低，显著低于其他品种，仅为 $0.039 \text{ CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ 和 $0.046 \text{ CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ ($P < 0.05$)；巨人 201+Z AQY 最高，可达 $0.065 \text{ CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ ，路宝、新疆大叶、超级 13R 次之；爱菲尼特+Z 再次之，显著低于巨人 201+Z。除中兰 1 号和牧歌 401+Z 外，其他品种均稍高于自然条件下一般植物的表观量子效率 ($0.03 \sim 0.06 \text{ CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$)（郭连旺和沈允钢，1996）。

2. 光补偿点和近光饱和点

不同苜蓿品种的光补偿点和近光饱和点均存在极显著差异 ($P < 0.01$)（表 3-9）。中兰 1 号、巨人 201+Z 和新疆大叶 Lk 最高，三者差异不显著，路宝、牧歌 401+Z 次之，爱菲尼特+Z 最低（仅为 $519 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ），与其他品种差异极显著；各品种

间 LCP 均存在极显著差异, 其顺序为爱菲尼特+Z>牧歌 401+Z>巨人 201+Z>新疆大叶>中兰 1 号=超级 13R>路宝。综合分析表明, 中兰 1 号、新疆大叶、巨人 201+Z、路宝光能利用范围可塑性较大, 牧歌 401+Z、超级 13R 次之, 爱菲尼特+Z 光能利用范围较窄。

3. 光饱和下最大净光合速率和暗呼吸速率

不同苜蓿品种光饱和下 P_{\max} 差异较明显, 巨人 201+Z 最高, 路宝和新疆大叶次之, 超级 13R 再次之, 中兰 1 号、牧歌 401+Z 和爱菲尼特+Z 最低, 不同品种间 P_{\max} 为 $25.408 \sim 42.177 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光合产物的合成与运输都需要由呼吸来提供能量, 不同苜蓿品种暗呼吸速率差异极显著 ($P < 0.01$) (表 3-9), 巨人 201+Z、爱菲尼特+Z R_d 显著高于除新疆大叶外其他品种, 新疆大叶、牧歌 401+Z 次之, 超级 13R 再次之, 路宝和中兰 1 号最小, 分别为巨人 201+Z 的 64.47% 和 50.00%。

(二) 光合作用- CO_2 响应曲线特征

随着 CO_2 浓度升高, 不同苜蓿品种净光合速率的变化也呈现一定趋势 (图 3-13)。 CO_2 响应曲线的方程拟合方法同光响应曲线, 且各品种曲线拟合方程决定系数均在 0.994 以上 (表 3-8), 拟合程度达极显著水平 (超级 13R 的 CO_2 响应方程拟合去除最后一个点, 拟合情况较好, $R^2 = 0.994$, 且不影响所求参数), 并在细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 为 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 内对叶片 P_n 和 C_i 进行直线回归, 其斜率为 RuBP 羧化效率 (CE, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (Hodgson and Raison, 1989), 拟合方程为

$$P_n = -R_p + \text{CE} \cdot C_i \quad (3-3)$$

当 $P_n = 0$ 时, C_i 即为光合作用的 CO_2 补偿点 (CCP, $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 这里 R_p 为光下呼吸速率。由于光下暗呼吸很小, 可以近似将光下叶片向无 CO_2 的空气中释放 CO_2 的速率看做光呼吸速率 (蔡时青和许大全, 2000)。将式 (3-3) 与指数模型计算出的 P_{\max} 值这条平行直线相交, 得出交点, 该交点在 x 轴上的数值即为 CO_2 饱和点 (CSP, $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

1. 羧化效率及光呼吸速率

羧化效率是在低 CO_2 浓度下, 净光合速率对 CO_2 浓度的变化率, 其值受羧化酶 Rubisco 活性及活化的量的限制, 值越大, 则 Rubisco 的羧化效率越高。巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 羧化效率较高, 显著高于牧歌 401+Z ($P < 0.05$), 与其他品种差异不显著。爱菲尼特+Z 光呼吸速率最高, 显著高于路宝 ($P < 0.05$), 与其他品种差异不显著。

CO_2 饱和点时的净光合速率最大, 即为光合能力, 它反映了 RuBP 再生速率的大小, 也反映了光合电子传递和光合磷酸化的活性。 CO_2 饱和下路宝 P_{\max} 最高, 达 $52.065 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 3-9), 其光合能力最大。

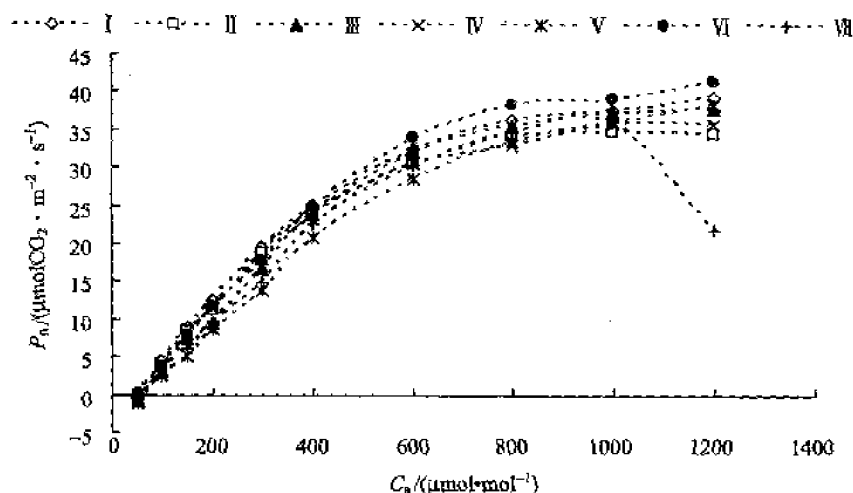


图 3-13 不同苜蓿品种现蕾期叶片光合- CO_2 响应曲线
图例标注同图 3-2

2. CO_2 补偿点与 CO_2 饱和点

不同苜蓿品种 CCP、CSP 差异极显著 ($P < 0.01$)。路宝、巨人 201+Z CCP 最低, 极显著低于其他品种; 牧歌 401+Z 最高, 极显著高于其他品种; 超级 13R、爱菲尼特+Z 次之, 显著高于除牧歌 401+Z 外的其他品种。牧歌 401+Z、路宝 CSP 较高, 显著高于其他品种, 超级 13R、爱菲尼特+Z 和中兰 1 号次之, 新疆大叶、巨人 201+Z CSP 显著低于其他品种 (表 3-9)。

三、讨论与小结

(一) 光饱和点与光补偿点

植物叶片的光饱和点与光补偿点反映了植物对光照条件的要求, 一般情况下光饱和点和光补偿点均较低的植物属于耐阴植物, 反之属于阳性植物。光补偿点较低、光饱和点较高的植物对光环境的适应性较强; 而光补偿点较高、光饱和点较低的植物对光照的适应性较弱。光饱和点的高低, 反映了光合机构暗反应过程对同化力最大需求量的多少。暗反应能力越强所需要的同化力越多, 光饱和点也相应越高 (蔡时青和许大全, 2000)。从分析结果看苜蓿的光补偿点较低, 且在 $0 \sim 2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光合有效辐射范围内, 净光合速率未达到最大净光合速率, 说明苜蓿对光的适应性较强, 另外也反映了苜蓿在强光下光合速率在更大程度上受 CO_2 供应的限制 (杨兴洪等, 2005)。

根据供试品种的光补偿点, 可以初步确定它们的耐阴性的大致顺序: 路宝 > 中兰 1 号 > 超级 13R > 新疆大叶 > 巨人 201+Z > 牧歌 401+Z > 爱菲尼特+Z。光补偿点高, 可部分说明叶肉细胞光合活性低。光补偿点低的植株其下部或株丛内部的叶片可利用较弱的光线进行光合作用, 保持生长, 提高整株植物的光合能力。

国外品种巨人 201+Z 和国内品种中兰 1 号、新疆大叶近光饱和点相对较高,而补偿点较低,光饱和点与光补偿点之间较宽的光能利用区间,在一定程度上解释了二者生产力高的原因,茎叶干物质累积量的大小顺序:中兰 1 号 ($0.895\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 巨人 201+Z ($0.583\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 新疆大叶 ($0.550\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 路宝 ($0.546\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 超级 13R ($0.516\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 爱菲尼特+Z ($0.469\text{kg} \cdot \text{m}^2$) > 牧歌 401+Z ($0.459\text{kg} \cdot \text{m}^2$)。培育广幅光强适应性苜蓿品种,对提高苜蓿产量具有积极意义。

(二) 光量子利用效率

表观量子效率是植物对 CO_2 同化的表观光量子效率,反映了植物光合作用的光能利用效率,尤其是对弱光的利用能力(蹇洪英和邹寿青,2003)。AQY 值高,说明其叶片光能转化效率高,暗呼吸速率则与叶片的生理活性有关。试验研究发现 AQY 与光饱和下 P_{\max} 存在显著正相关,相关系数为 0.882 ($P=0.020<0.05$)。从方差分析可知,不同苜蓿品种 AQY、 R_d 均有极显著差异。几个品种的表观量子效率,即单位光量子同化固定的 CO_2 分子数差异显著,说明不同苜蓿品种对弱光的利用存在较大差异,巨人 201+Z、路宝、新疆大叶 AQY 较高,对弱光利用能力较强。此外,巨人 201+Z R_d 为 $2.288\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其叶片生理活性也较高。

(三) RuBP 羧化效率、 CO_2 补偿点及 CO_2 饱和点

植物的光合速率受植物体内叶绿体的光合速率和 CO_2 供应的控制。叶绿体的光合速率分为受 Rubisco 活性限制的光合速率和由 RuBP 再生速率限制的光合速率控制。一般认为 CO_2 响应曲线中初始斜率与 RuBPCase (核酮糖 1,5-二磷酸羧化酶) 的活性呈正相关,巨人 201+Z CE 最高,达到 $0.130\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,具有较高的 RuBPCase 活性。Björkman 和 Demminb (1987) 提出光饱和净光合速率与 Rubisco 活性有很好的相关性。笔者对 CE 与 P_{\max} 进行相关分析也发现,二者存在一定正相关关系(相关系数为 0.397, $P=0.436>0.05$)。

郭连旺和沈允钢(1996)认为, C_3 植物的光呼吸可能是耗散过剩光能,保护光合机构免于强光破坏的一个途径;同时,光呼吸途径在消耗多余能量的同时,能释放被 PGA 结合的 P_i 元素,缓解由于 P_i 暂时亏缺而引起的对电子传递和光合磷酸化过程的限制。表 3-9 中爱菲尼特+Z、牧歌 401+Z R_p 较高,饱和 CO_2 时的 P_{\max} 也较高,表明 P_i 亏缺对电子传递和光合磷酸化过程的限制也相对较小。

当 CO_2 浓度从 $400\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到 $600\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,净光合速率可提高 $6.70\sim 8.90\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,为最大净光合速率的 $14.85\%\sim 17.10\%$, CO_2 饱和浓度下最大净光合速率较光饱和最大净光合速率高,这进一步证实了苜蓿强光下光合速率在更大程度上受 CO_2 供应的限制。其中,路宝增加幅度最大,且其 CCP 最低、CSP 较高,对 CO_2 利用幅度较广。

CO_2 补偿点低的作物常具有净光合速率高、产量高的特点,因此低 CO_2 补偿点也常被用作选育高产品种的指标(Medrano et al., 1995)。路宝、巨人 201+Z 具有较高的 Lk、AQY 及 CE,较低的 CCP,因此具有高光效和高 CO_2 利用率等光合特性,是具

有较高光能生产潜力的苜蓿品种。

(四) 小结

7 个苜蓿品种叶片在第一茬现蕾期净光合速率日变化均呈“双峰”型变化趋势,除巨人 201+Z 外第 2 峰值均低于第 1 峰值。7 个苜蓿品种午间光合作用的下降主要是非气孔限制导致的,即叶肉细胞光合活性降低的缘故。影响苜蓿现蕾期净光合速率日变化的主要因子是 PAR。现蕾期不同苜蓿品种光合作用对光强单一生态因子水平变化的响应行为均可用指数方程来描述;中兰 1 号和牧歌 401+Z AQY 显著低于其他品种,巨人 201+Z AQY 最高,对光能的利用效率最大,具有较强的弱光利用能力,不同品种间 AQY 为 $0.039 \sim 0.065 \text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$;中兰 1 号、巨人 201+Z 和新疆大叶具最高的 Lk,路宝、超级 13R、中兰 1 号、新疆大叶 LCP 相对较低,对弱光的利用能力较强。综合分析表明,中兰 1 号、新疆大叶、巨人 201+Z、路宝光能利用范围可塑性较大;巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 暗呼吸速率显著高于除新疆大叶外其他品种,叶片活性较高,可为植物生长提供较多的能量;巨人 201+Z P_{max} 最大,在现蕾期具有较高的光合潜能,不同品种间 P_{max} 差异为 $25.408 \sim 42.177 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。现蕾期不同苜蓿品种光合作用对 CO_2 浓度单一生态因子水平变化的响应行为均可用指数方程来描述;巨人 201+Z、爱菲尼特+Z 羧化效率较高,显著高于牧歌 401+Z,具有较高的 RuBP-Case 活性,不同苜蓿品种 CE 为 $0.109 \sim 0.130 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;路宝、巨人 201+Z CCP 最低,极显著低于其他品种,各品种 CCP 为 $49 \sim 64 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$;牧歌 401+Z、路宝 CSP 较高,显著高于其他品种,各品种 CSP 为 $420 \sim 531 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; CO_2 饱和下路宝 P_{max} 最高,达 $52.065 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其光合能力最大;爱菲尼特+Z、牧歌 401+Z R_p 较高,饱和 CO_2 时的 P_{max} 也较高, P_i 亏缺对电子传递和光合磷酸化过程的限制作用也相对较小。

第四节 不同苜蓿品种开花期光合特性研究

试验于 2006 年 5 月 22 日至 5 月 29 日(晴天)进行,此时苜蓿处于第一茬开花期。结果分析如下所述。

一、不同苜蓿品种开花期叶片光合日变化特点

(一) 开花期田间环境因子日变化

光合有效辐射 (PAR) 日变化:如图 3-14 所示,光合有效辐射日变化呈单峰曲线,高峰时期为 10:00~14:00,14:00 以后 PAR 快速下降,至 18:00 降至最低。光合有效辐射为 $50 \sim 1800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

大气温度 (T_a) 日变化:如图 3-14 所示, T_a 和 PAR 的日变化趋势相似,呈单峰曲线,日变化幅度较大,日温差可达 9°C ,最高温度出现在 14:00,比 PAR 推迟 2h。此后温度有所降低,至 18:00 降至 28°C ,为最高温度的 78.82%。

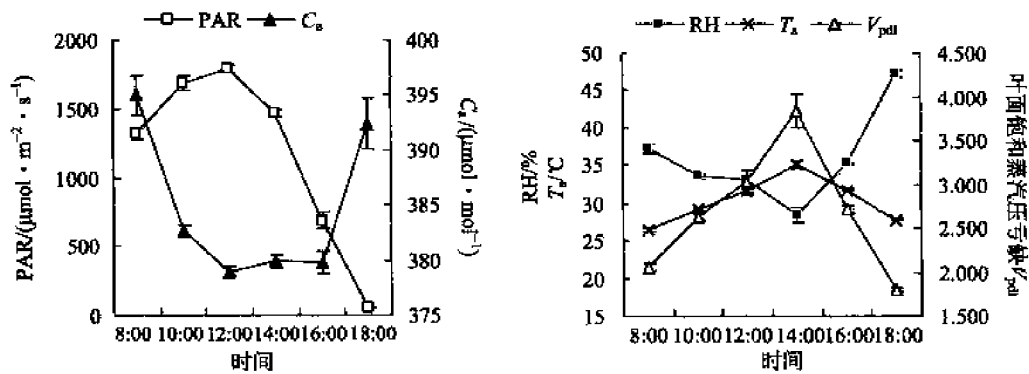


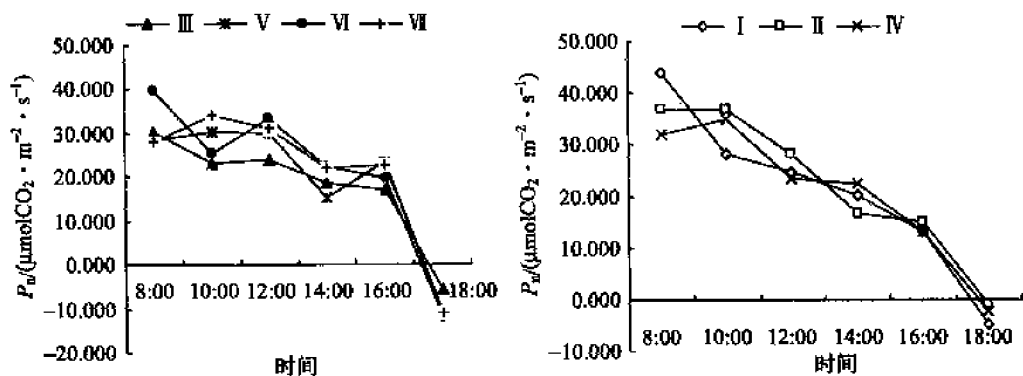
图 3-14 开花期苜蓿生长的田间环境因子日变化

大气相对湿度 (RH) 日变化: 空气相对湿度日变化趋势如图 3-14 所示, 与 PAR、 T_a 正好相反, 呈先下降后上升的趋势。上午的空气相对湿度较高, 达到 36%, 随后随着 T_a 的上升而下降, 14:00 降至最低值 32%, 此后开始回升, 至 18:00 达到最大值 47%。

CO_2 浓度 (C_a) 日变化: 如图 3-14 所示, 田间 CO_2 浓度在一天中变化幅度不大, 保持为 $377 \sim 395 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 上午 CO_2 浓度较高, 达到 $391 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 至 12:00 降至最低, 至 16:00 一直维持在 $379 \sim 380 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 随后开始回升, 至 18:00 达到最大。

(二) 净光合速率 (P_n) 日变化特点

如图 3-15 所示, 7 个苜蓿品种净光合速率日变化呈波动降低趋势, 其中牧歌 401+Z、超级 13R 中午 14:00 呈现午休现象, 14:00~16:00 P_n 有所回升, 而巨人 201+Z、中兰 1 号、新疆大叶、爱菲尼特+Z 和路宝 P_n 则没有回升现象。

图 3-15 不同苜蓿品种开花期叶片 P_n 日变化

图例标注同图 3-2

(三) 光合特性与其影响因子的相关性分析

1. 光合速率与环境因子的相关关系

7个苜蓿品种的 P_n 与 PAR 都呈正相关关系 (表 3-10), 除巨人 201+Z 和爱菲尼特+Z 外, 其余品种相关性达到显著至极显著水平; 7个品种 P_n 与 T_a 和 C_a 相关系数均较小, 相关性不显著; 7个品种 P_n 与 RH 均呈负相关, 其中牧歌 401+Z 和超级 13R 达到显著水平; 各品种 P_n 与 V_{pd} 呈正相关, 但相关性都不显著; 各品种 P_n 与 G_s 均呈正相关关系, 其中中兰 1 号、爱菲尼特+Z 和牧歌 401+Z 相关性达到显著水平, 其余品种二者间达到极显著水平。从相关系数的大小来看, 对 P_n 影响最大的因子是 G_s 和 PAR。

表 3-10 7个苜蓿品种叶片开花期光合速率与环境生态因子的相关系数

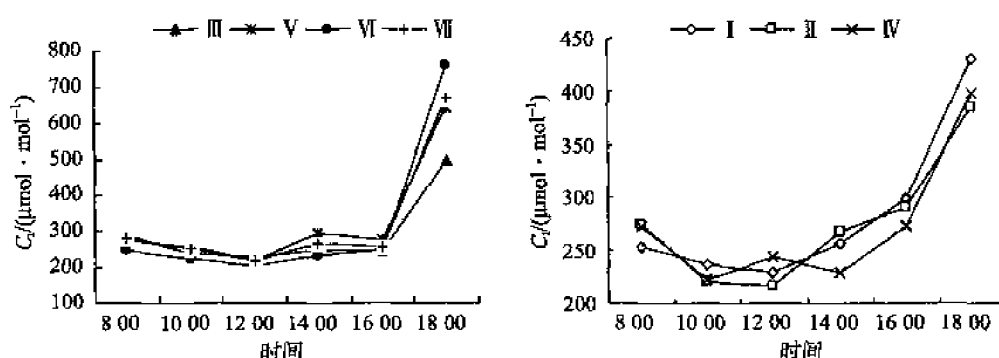
品种	PAR	T_a	RH	V_{pd}	C_a	G_s
I	0.798	-0.177	-0.468	0.073	0.309	0.931**
II	0.859*	-0.085	-0.425	0.105	0.342	0.833*
III	0.824	0.084	-0.711	0.319	-0.083	0.872*
IV	0.849*	0.032	-0.585	0.284	0.182	0.945**
V	0.836*	0.120	-0.818*	0.486	-0.767	0.884*
VI	0.818*	0.090	-0.767	0.396	-0.469	0.938**
VII	0.948**	0.184	-0.890*	0.491	-0.633	0.932**

* 表示差异显著; ** 表示差异极显著。I ~ VII 意义同图 3-2。

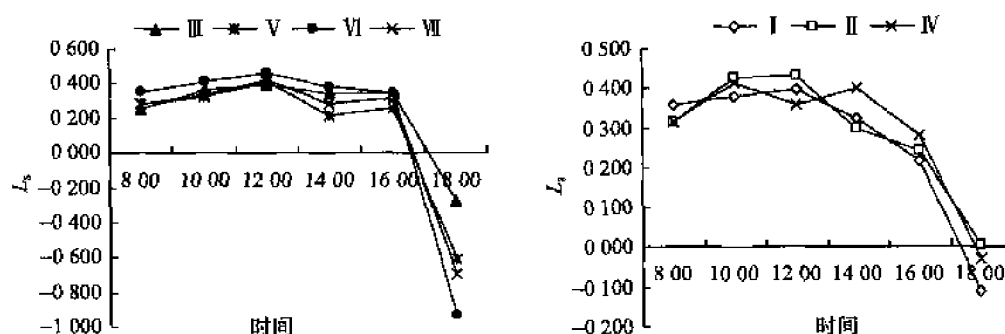
2. 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系

植物的 P_n 不仅受到环境因子的调节影响, 同时还受到内在生理因子的调节。对 7 个苜蓿品种的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化进行了分析。如图 3-15~图 3-17 所示, 在 12:00~14:00, 各品种 P_n 均降低, 其中新疆大叶 L_s 增高同时 C_i 降低, 表明午间净光合速率的降低主要缘于气孔因素; 而其余品种 L_s 均降低同时 C_i 增高, 表明此时光合作用的下降不是由气孔关闭引起的, 而主要是非气孔限制导致的, 即叶肉细胞光合活性降低的缘故; 在 14:00~16:00, 除牧歌 401+Z 和超级 13R P_n 有所增高, 其余品种 P_n 继续降低, 其中爱菲尼特+Z L_s 稍有增高同时 C_i 稍有降低, 表明此期间净光合速率的降低主要缘于气孔因素, 而其他 4 个品种 L_s 均降低同时 C_i 增高, 表明光合作用的下降主要缘于非气孔限制; 在 16:00~18:00, 7 个苜蓿品种 P_n 急剧降低, 与此同时, L_s 急剧降低且 C_i 增高, 表明此时叶肉细胞光合能力的下降是光合速率下降的主要原因。

对气孔限制值 (L_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与 P_n 进行相关分析 (表 3-11) 发现, 7 个不同苜蓿品种的 L_s 与 P_n 呈不同水平的正相关, C_i 与 P_n 均呈不同水平的负相关, 其中牧歌 401+Z 和超级 13R 相关性极显著, 其余品种相关性显著。

图 3-16 不同苜蓿品种开花期叶片 C_i 日变化

图例标注同图 3-2

图 3-17 不同苜蓿品种开花期叶片 L_a 日变化

图例标注同图 3-2

表 3-11 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度与净光合速率之间的关系

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
C_i	-0.833*	-0.837*	-0.859*	-0.846*	-0.965**	-0.909*	-0.967**
L_a	0.861*	0.878*	0.876*	0.878*	0.970**	0.914*	0.970**

* 相关性显著 ($P < 0.05$), ** 相关性极显著 ($P < 0.01$)。I ~ VII 意义同图 3-2。

3. 叶绿素等生理指标对光合速率的影响

开花期苜蓿叶片日均净光合速率与 Chla、Chlb、类胡萝卜素 (Car)、Chla+Chlb、比叶重 (SLW) 均呈负相关, 与 Chla/Chlb 呈正相关, 相关性均不显著, 其中比叶重、叶绿素 a/b 对净光合速率影响较大 (表 3-12)。

表 3-12 开花期苜蓿叶片日均净光合速率与生理因子的相关系数

生理因子	Chla	Chlb	Car	Chla+Chlb	Chla/Chlb	SLW
相关系数	-0.199	-0.281	-0.184	-0.227	0.495	-0.539

二、光合作用对光和 CO_2 浓度的响应

(一) 光合作用-光响应曲线特征

本研究应用指数方程和多项式方程对不同苜蓿品种开花期叶片的净光合速率和光合有效辐射的关系进行拟合,并得出光合作用-光响应曲线特征参数(图 3-18,图 3-19),巨人 201+Z、新疆大叶、牧歌 401+Z 和超级 13R 响应曲线拟合方法同分枝期光合作用-光响应曲线拟合。式 (3-1) 可以较好地模拟以上品种光合速率随光强的变化,各品种开花期光合作用-光响应曲线拟合方程的决定系数 (R^2) 都在 0.980 以上(表 3-13),拟合程度均达到极显著水平,模拟结果能够反映实际情况。中兰 1 号及爱菲尼特+Z 响应曲线拟合应用多项式 (3 次) 方程,决定系数在 0.973 以上,可以反映实际曲线情况。对各品种光强在 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的响应曲线进行直线回归分析, R^2 均在 0.903 以上(表 3-13),拟合效果较好,得出拟合方程 [同式 (3-2)],通过 2 个拟合方程,可以求出不同苜蓿品种叶片光合作用-光响应曲线的特征参数(表 3-14)。

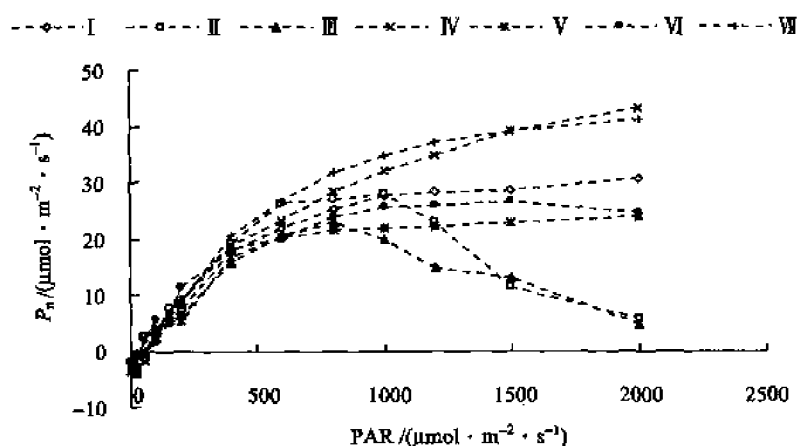


图 3-18 不同苜蓿品种开花期叶片光合作用-光强响应曲线
图例标注同图 3-2

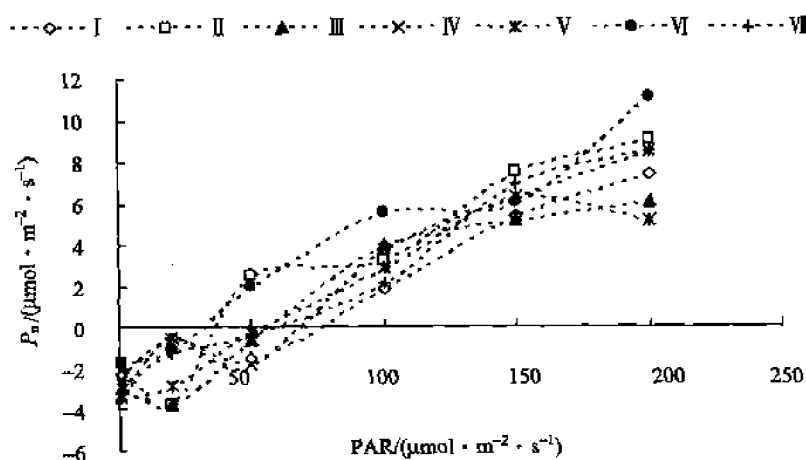
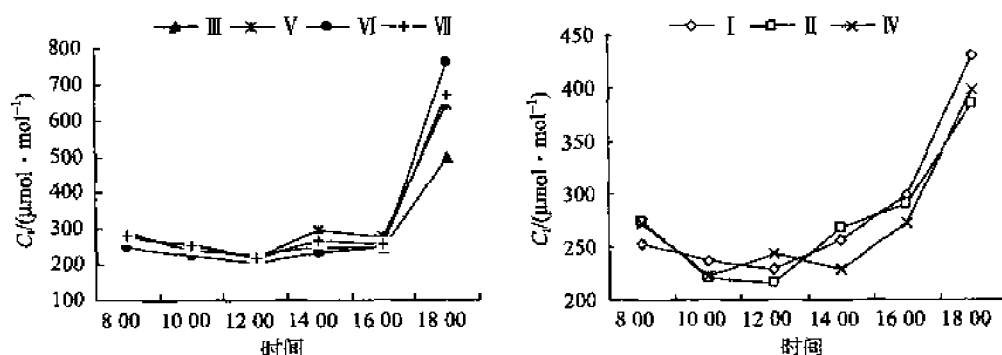
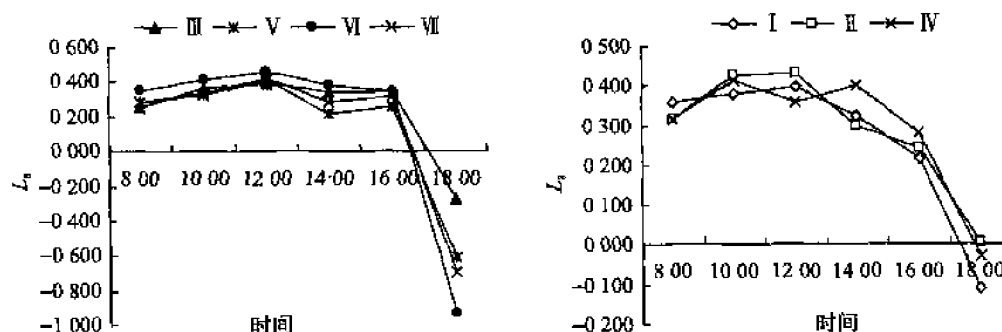


图 3-19 不同苜蓿品种开花期叶片光合作用-低光强响应曲线 ($\text{PAR} < 200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
图例标注同图 3-2

图 3-16 不同苜蓿品种开花期叶片 C_i 日变化

图例标注同图 3-2

图 3-17 不同苜蓿品种开花期叶片 L_s 日变化

图例标注同图 3-2

L_k $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	734aA	502bB	495bB	879aA	624bB	481bB	853aA
LCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	53bB	41cC	61aA	51bB	61aA	28dD	49bB
CSP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	531cBC	491cdC	418cdC	414dC	452cdC	715 bB	2313aA
CCP $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	84cC	94bB	69dD	82cC	85cBC	86cBC	160aA

注：表中数据由拟合方程计算而来，为两个重复的平均值。不同小写字母表示品种间差异显著，不同大写字母表示差异极显著。I~VII意义同图 3-2。

1. 表观量子效率

不同苜蓿品种开花期 AQY 有差异，其中巨人 201+Z AQY 最低，显著低于路宝，仅为 $0.049 \text{ CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ ($P < 0.05$)，对光能的利用效率最小，具较小的弱光利用能力；其余品种间均无显著差异。各品种 AQY 顺序为路宝 > 中兰 1 号 > 新疆大叶 > 超级 13R > 爱菲尼特+Z > 牧歌 401+Z > 巨人 201+Z。

2. 光补偿点和近光饱和点

不同苜蓿品种开花期光补偿点和近光饱和点均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。如表 3-14 所示, 超级 13R、新疆大叶和巨人 201+Z Lk 最高, 极显著高于其他品种, 三者间差异不显著; 其余品种间差异不显著, 大小顺序为牧歌 401+Z > 中兰 1 号 > 爱菲尼特+Z > 路宝。爱菲尼特+Z 和牧歌 401+Z LCP 最大, 极显著高于其他品种, 二者间差异不显著; 巨人 201+Z、新疆大叶和超级 13R 次之, 极显著高于中兰 1 号和路宝。综合分析表明, 新疆大叶、超级 13R 和巨人 201+Z 光能利用范围可塑性较大, 牧歌 401+Z 次之, 中兰 1 号、路宝、爱菲尼特+Z 光能利用范围较窄。

3. 光饱和和下最大净光合速率和暗呼吸速率

光饱和和下最大净光合速率可以反映叶片的光合潜能。不同苜蓿品种开花期光饱和下 P_{\max} 差异较明显, 新疆大叶和超级 13R P_{\max} 最大, 具有较高的光合潜能; 巨人 201+Z 次之, 牧歌 401+Z、路宝和中兰 1 号再次之; 爱菲尼特+Z 最小, 光合潜能最小; 不同品种间 P_{\max} 差异为 $0.040 \sim 25.835 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。光合产物的合成与运输都需要由呼吸来提供能量, 不同苜蓿品种暗呼吸速率差异有显著差异, 顺序依次是爱菲尼特+Z > 牧歌 401+Z > 新疆大叶 > 超级 13R > 巨人 201+Z > 中兰 1 号 > 路宝, 路宝极显著低于其他品种 (表 3-14)。

(二) 光合作用- CO_2 响应曲线特征

随着 CO_2 浓度升高, 不同苜蓿品种光合速率的变化也呈现一定趋势 (图 3-20)。光合作用- CO_2 响应曲线的变化趋势呈二次曲线关系。拟合的二次方程为

$$P_n = aC_a^2 + bC_a + c \quad (3-4)$$

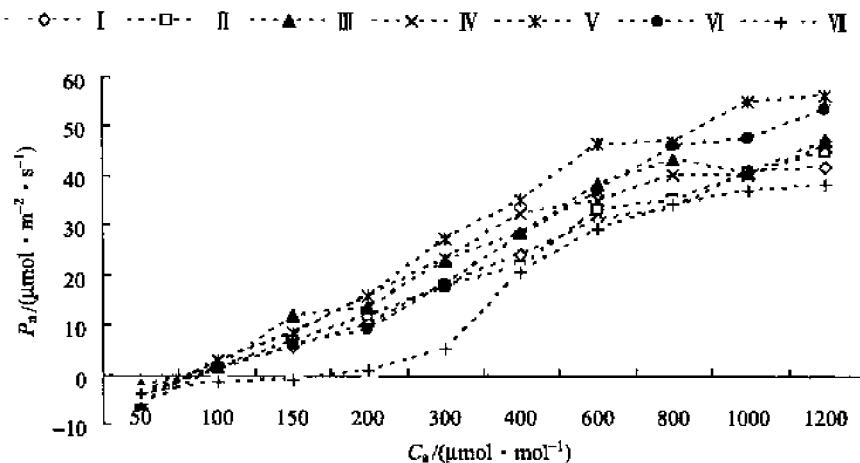
且各品种曲线拟合方程决定系数均在 0.956 以上, 拟合程度达极显著水平, 根据二项式特征, $P_n = (4ac - b^2)/(4a)$ 时, 得到最大值, 即为 CO_2 饱和浓度下最大净光合速率。在细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 为 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 内对叶片 P_n 和 C_i 进行直线回归, 其斜率为 RuBP 羧化效率 (CE, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (Hodgson and Raison, 1989), 其拟合方程为

$$P_n = -R_p + \text{CE} \cdot C_i \quad (3-5)$$

当 $P_n = 0$ 时, C_i 即为光合作用的 CO_2 补偿点 (CCP, $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 这里 R_p 为光下呼吸速率。由于光下暗呼吸很小, 可以近似将光下叶片向无 CO_2 的空气中释放 CO_2 的速率看做光呼吸速率 (蔡时青和许大全, 2000)。将式 (3-5) 与二项式模型计算出的 P_{\max} 值这条平行直线相交, 得出交点, 该交点在 x 轴上的数值即为 CO_2 饱和点。

1. 羧化效率及光呼吸速率

羧化效率是在低 CO_2 浓度下, 净光合速率对 CO_2 浓度的变化率, 其值受羧化酶 Rubisco 活性及活化的量的限制, 值越大, 则 Rubisco 的羧化效率越高。试验结果表明,

图 3-20 不同苜蓿品种开花期叶片光合作用- CO_2 响应曲线

图例标注同图 3-2

开花期苜蓿 CE 在品种间存在差异, 顺序依次为牧歌 401+Z>新疆大叶>中兰 1 号>爱菲尼特+Z>路宝>巨人 201+Z>超级 13R, 超级 13R CE 极显著低于其他品种, 对低浓度的利用率最低。

中兰 1 号、牧歌 401+Z 和新疆大叶开花期 R_p 相对较高, 显著高于超级 13R ($P<0.05$), 路宝、爱菲尼特+Z 和巨人 201+Z 次之, 超级 13R 最低。

CO_2 饱和点时的净光合速率最大, 即为光合能力, 它反映了 RuBP 再生速率的大小, 也反映了光合电子传递和光合磷酸化的活性。试验结果 (表 3-14) 可见, 7 个品种开花期 CO_2 饱和时 P_{max} 超级 13R>路宝>牧歌 401+Z>中兰 1 号>新疆大叶>爱菲尼特+Z>巨人 201+Z, 超级 13R、路宝等具有较高的光合能力, 巨人 201+Z 的光合能力最低。

2. CO_2 补偿点与 CO_2 饱和点

表 3-14 显示了, 7 个苜蓿品种开花期对 CO_2 的需求特性。超级 13R CCP 最高, 极显著高于其他品种 ($P<0.01$); 中兰 1 号次之, 显著高于其余品种 ($P<0.05$); 其余品种大小依次为路宝、牧歌 401+Z、巨人 201+Z、新疆大叶, 四者间无显著差异; 爱菲尼特+Z 最小, 极显著低于其他品种。不同苜蓿品种开花期 CSP 顺序为超级 13R>路宝>巨人 201+Z>中兰 1 号>牧歌 401+Z>爱菲尼特+Z>新疆大叶。结果表明, 不同苜蓿品种对 CO_2 的利用范围不同; 超级 13R 具有最宽的 CO_2 利用范围, 其次是路宝和巨人 201+Z, 其余依次是牧歌 401+Z、爱菲尼特+Z、中兰 1 号 and 新疆大叶。但一般情况下环境中 CO_2 浓度远远无法达到超级 13R 的 CSP。

三、讨论与小结

7 个苜蓿品种开花期净光合速率日变化呈波动降低趋势, 其中牧歌 401+Z、超级 13R 中午 14:00 呈现“午休”现象, 新疆大叶午间净光合速率的降低主要缘于气孔因

素；而其余品种此时光合作用的下降主要是非气孔限制导致的。影响苜蓿开花期净光合速率日变化的主要因子是气孔导度和光合有效辐射。开花期巨人 201+Z、新疆大叶、牧歌 401+Z 和超级 13R 4 个苜蓿品种光合作用对光强单一生态因子水平变化的响应行为可用指数方程来描述；中兰 1 号及爱菲尼特+Z 响应曲线可用多项式（3 次）方程拟合，效果较好。不同品种间 AQY 为 $0.049 \sim 0.062 \text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ ，AQY 顺序依次为路宝>中兰 1 号>新疆大叶>超级 13R>爱菲尼特+Z>牧歌 401+Z>巨人 201+Z，巨人 201+Z AQY 显著低于其他品种，在生长后期对弱光利用能力减弱；超级 13R、新疆大叶和巨人 201+Z Lk 最高，极显著高于其他品种，中兰 1 号和路宝光补偿点显著低于其他品种，不同品种光补偿点为 $28 \sim 61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，综合分析表明，新疆大叶、超级 13R 和巨人 201+Z 光能利用范围可塑性较大；爱菲尼特+Z、牧歌 401+Z、新疆大叶和超级 13R 暗呼吸速率显著高于其他品种，叶片活性较高，可为植物生长提供较多的能量；新疆大叶和超级 13R P_{\max} 最大，具有较高的光合潜能，不同品种间 P_{\max} 差异为 $2.232 \sim 25.835 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。开花期不同苜蓿品种光合作用对 CO_2 浓度单一生态因子水平变化的响应行为可用二次曲线方程来模拟；牧歌 401+Z、新疆大叶、中兰 1 号羧化效率较高，显著高于超级 13R，具有较高的 RuBPCase 活性，对低浓度 CO_2 利用率较高；不同苜蓿品种 CE 为 $0.039 \sim 0.193 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ；超级 13R 和中兰 1 号 CCP 极显著或显著高于其他品种，爱菲尼特+Z 最小，极显著低于其他品种，各品种 CCP 为 $69 \sim 160 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ；超级 13R、路宝 CSP 极显著高于其他品种，各品种 CSP 为 $414 \sim 2313 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ；超级 13R 具有最宽的 CO_2 利用范围，其次是路宝和巨人 201+Z， CO_2 饱和下超级 13R、路宝 P_{\max} 最高，分别达到 $60.000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $55.100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，具较高的光合能力；中兰 1 号、牧歌 401+Z 和新疆大叶开花期 R_p 相对较高，显著高于超级 13R ($P < 0.05$)。

第五节 不同苜蓿品种不同茬次开花期光合日变化特征比较

一、第二茬开花期光合日变化

（一）田间环境因子日变化

光合有效辐射 (PAR) 日变化：如图 3-21 所示，光合有效辐射日变化呈单峰曲线，高峰时期为 12:00~14:00，此后 PAR 快速下降，至 18:00 降至最低。光合有效辐射为 $220 \sim 1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

大气温度 (T_a) 日变化：如图 3-21 所示， T_a 和 PAR 的日变化趋势相似呈单峰曲线。日变化幅度较大，日温差可达 9°C ，上午 10:00 即达到 37°C ，为最高温度的 90.46%，此后一直维持在较高温度；最高温度出现在 12:00~14:00，此后温度有所降低，至 18:00 降至 37°C ，仍维持在最高温度的 90.46%。

大气相对湿度 (RH) 日变化：空气相对湿度日变化趋势如图 3-21 所示，与 PAR、 T_a 正好相反，呈先下降后上升的趋势。上午的空气相对湿度最高，达到 55%，随后随着 PAR 和 T_a 的上升而下降，14:00 降至最低值 32%，此后开始回升，至 18:00 回复到

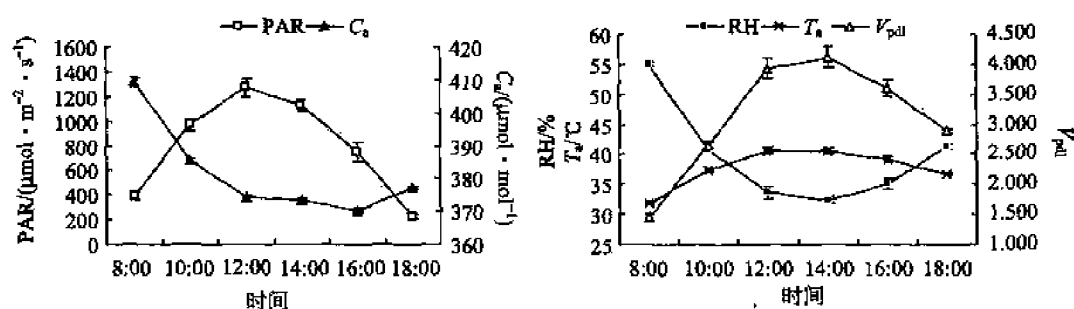


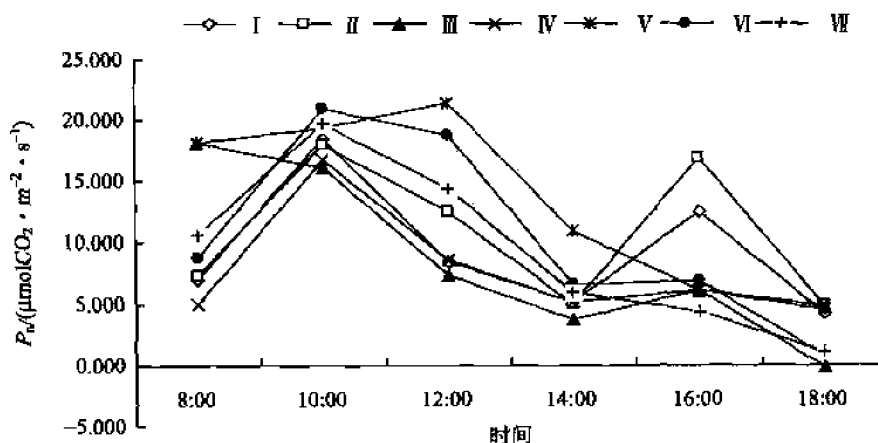
图 3-21 第二茬开花期苜蓿生长的田间环境因子日变化

41%。

田间 CO_2 浓度 (C_a) 日变化: 如图 3-21 所示, 田间 CO_2 浓度在一天中变化幅度不大, 保持在 $370 \sim 409 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 上午 8:00 CO_2 浓度最高, 随后开始降低, 至 16:00 降至最低, 随后开始回升, 至 18:00 回升至 $375 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(二) 不同苜蓿品种叶片净光合速率 (P_n) 日变化特点

如图 3-22 所示, 7 个苜蓿品种净光合速率呈现两种不同的日变化趋势, 其中牧歌 401+Z、超级 13R 日变化趋势呈“单峰”型, 上午 P_n 随着光合有效辐射的增强和温度的升高呈上升趋势, 峰值分别出现在 12:00 和 10:00, 其值分别为 $21.400 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $19.425 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 此后 P_n 开始下降。

图 3-22 第二茬开花期不同苜蓿品种叶片 P_n 日变化

图例标注同图 3-2

巨人 201+Z、中兰 1 号、爱菲尼特+Z、新疆大叶、路宝 5 个品种 P_n 日变化均呈“双峰”型变化趋势, 其中爱菲尼特+Z 8:00 P_n 即达到最大值 $18.125 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其他品种第 1 峰出现在 10:00 左右, 峰值依次为 $18.467 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $18.025 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $16.750 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20.925 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$); 5 个品种中午 14:00 降至谷底, 谷值依次为 $5.175 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、

5.042 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、3.714 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、5.232 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、6.608 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其中爱菲尼特+Z谷值最低，下降幅度最大，而路宝谷值相对较高；此后 P_n 开始回升，至下午 16:00 达到第 2 峰，其峰值分别为 12.433 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、16.813 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、6.107 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、6.115 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、6.945 $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，中兰 1 号和巨人 201+Z 回升幅度较大；5 个品种第 2 峰值均远低于第 1 峰值。

(三) 光合特性与其影响因子的相关性分析

植物的 P_n 同时受到内在生理因子和环境生态因子的调节影响。如表 3-15 所示，爱菲尼特+Z P_n 与 PAR、 T_a 、 V_{pd} 呈一定的负相关关系，与 RH 和 C_a 呈正相关，相关性均不显著， P_n 与 G_s 呈极显著正相关；除爱菲尼特+Z 外其他 6 个苜蓿品种的 P_n 与 PAR 和 G_s 都呈一定正相关关系，但相关性未达到显著水平， P_n 与 T_a 、 V_{pd} 、RH 和 C_a 都呈微弱的正相关或负相关，相关性均不显著。从相关系数的大小来看，对 P_n 影响较大的因子是 PAR 和 G_s 。

表 3-15 7 个苜蓿品种叶片开花期光合速率与环境生态因子的相关系数

品种	PAR	T_a	RH	V_{pd}	C_a	G_s
I	0.280	0.041	-0.054	-0.152	0.010	0.370
II	0.492	0.254	-0.249	0.134	-0.114	0.329
III	-0.054	-0.633	0.683	-0.720	0.787	0.953**
IV	0.284	0.135	-0.089	-0.228	0.036	0.573
V	0.527	-0.198	0.250	-0.272	0.421	0.788
VI	0.802	0.136	-0.118	0.130	0.051	0.497
VII	0.708	-0.027	0.062	-0.050	0.284	0.327

注：表中 I~VII 意义同图 3-2。** 表示差异极显著。

(四) 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系

对 7 个苜蓿品种的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 日变化进行了分析。如图 3-23 所示，在 10:00~12:00，除牧歌 401+Z 外，其他品种 P_n 均降低，其中，爱菲尼特+Z L_s 降低而 C_i 升高，表明此时光合作用的下降主要是非气孔限制导致的，即叶肉细胞光合活性降低的缘故（许大全，1995），而其他品种 L_s 增高同时 C_i 降低，表明此间净光合速率的降低主要缘于气孔因素；在 12:00~14:00，7 个苜蓿品种 P_n 均降低，其中新疆大叶 L_s 增高同时 C_i 降低，表明此间其净光合速率的降低主要缘于气孔因素，其他品种 P_n 降低的同时， L_s 降低而 C_i 增高，表明此时光合作用的下降不是由气孔关闭引起的，而主要是非气孔限制导致的，即叶肉细胞光合活性降低的缘故（许大全，1995）；在 14:00~16:00，牧歌 401+Z 和超级 13R P_n 继续降低，牧歌 401+Z 同时 L_s 降低而 C_i 升高，表明此时光合作用的下降是非气孔限制导致的，超级 13R 则正好相反，其 P_n 的降低缘于气孔限制；在 16:00~18:00，7 个苜蓿品种 P_n 均降低，与

此同时, L_s 降低且 C_i 增高, 表明此时叶肉细胞光合能力的下降是光合速率下降的主要原因。

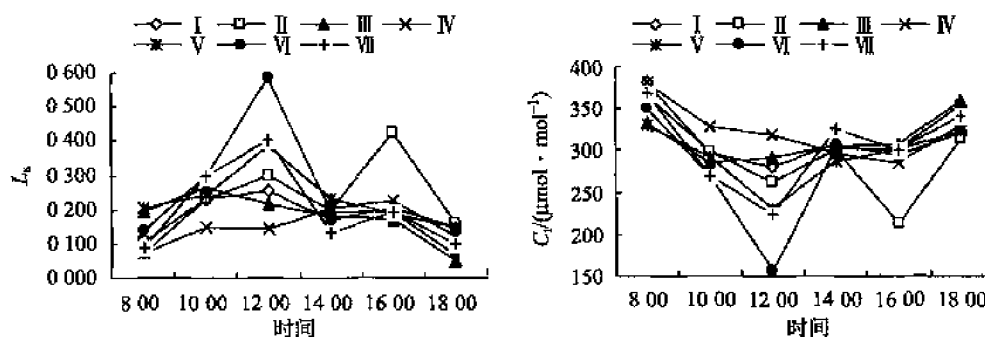


图 3-23 不同苜蓿品种第二茬开花期叶片 C_i 和 L_s 日变化

图例标注同图 3-2

对气孔限制值 (L_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与 P_n 进行相关分析 (表 3-16) 发现, 第二茬开花期 7 个不同苜蓿品种的 L_s 与 P_n 呈不同水平的正相关, C_i 与 P_n 均呈不同水平的负相关, 但相关性均不显著。

表 3-16 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度与净光合速率之间的关系

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
C_i	-0.364	-0.604	-0.352	-0.018	-0.501	-0.757	-0.576
L_s	0.522	0.702	0.734	0.024	0.747	0.804	0.692

注: 表中 I ~ VII 意义同图 3-2。

二、第三茬开花期光合日变化

(一) 田间环境因子日变化

光合有效辐射 (PAR) 日变化: 如图 3-24 所示, 光合有效辐射日变化呈单峰曲线, 高峰时期为 12:00~14:00, 14:00 以后 PAR 快速下降, 至 18:00 降至最低。光合有效辐射为 $80 \sim 1100 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

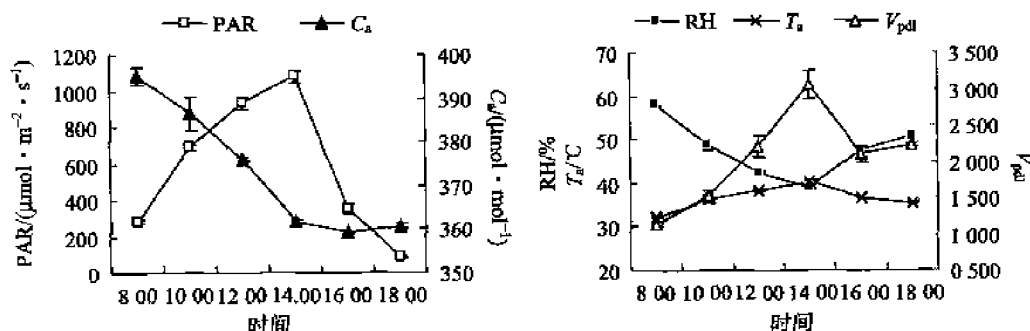


图 3-24 第三茬开花期苜蓿生长的田间环境因子日变化

大气温度 (T_a) 日变化: 如图 3-24 所示, T_a 和 PAR 的日变化趋势相似, 呈单峰曲线。日变化幅度较大, 日温差可达 9°C , 最高温度出现在 14:00, 此后温度降低幅度较小, 至 18:00 降至 36°C , 为最高温度的 87.84%。

大气相对湿度 (RH) 日变化: 日变化趋势如图 3-24 所示, 与 PAR、 T_a 正好相反, 呈先下降后上升的趋势。上午 RH 较高, 达到 58%, 随后随着 PAR 和 T_a 的上升而下降, 14:00 降至最低值 39%, 此后开始回升, 至 18:00 回复到 51%。

田间 CO_2 浓度 (C_a) 日变化: 如图 3-24 所示, 田间 CO_2 浓度在一天中变化幅度较大, 保持在 $359\sim 395\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 上午 8:00 CO_2 浓度最高, 至 16:00 降至最低, 此间变化幅度较大。16:00~18:00 回升至 $361\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 此后略有升高, 但升高幅度不大。

(二) 不同苜蓿品种叶片净光合速率 (P_n) 日变化特点

如图 3-25 所示, 7 个苜蓿品种叶片的净光合速率均呈现“单峰”型变化趋势。上午 P_n 随着光合有效辐射的增强和温度的升高呈上升趋势。爱菲尼特+Z 和牧歌 401+Z 峰值出现在 10:00, 其值分别为 $10.550\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $14.600\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 此后 P_n 开始下降; 超级 13R 峰值出现在 14:00, 其值较高, 达到 $16.167\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 其余品种峰值出现在 12:00, 其值分别为路宝 ($16.400\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 巨人 201+Z ($15.400\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 中兰 1 号 ($15.093\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) > 新疆大叶 ($14.900\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。牧歌 401+Z 16:00 值偏低, 可能受当时的环境条件影响。

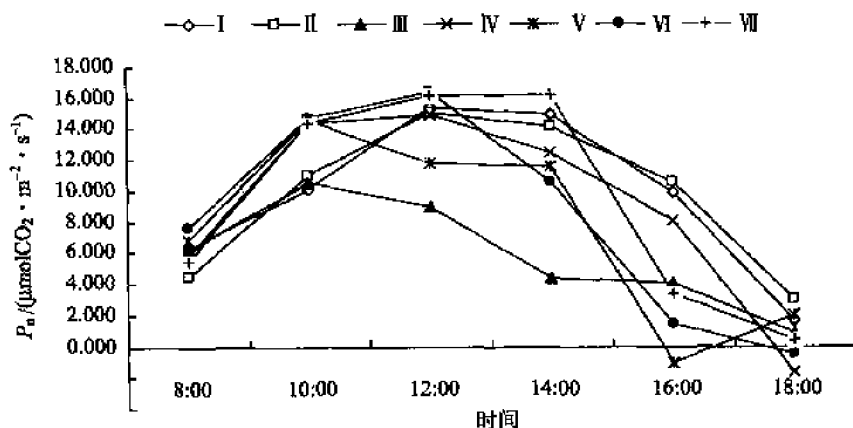


图 3-25 第三茬开花期不同苜蓿品种叶片 P_n 日变化

图例标注同图 3-2

(三) 光合特性与其影响因子的相关性分析

植物的 P_n 受到内在生理因子和环境因子的调节影响。如表 3-17 所示, 7 个苜蓿品种的 P_n 与 PAR 都呈正相关关系, 除爱菲尼特+Z、牧歌 401+Z 和路宝外, 其余品种相关性达到显著至极显著水平; P_n 与 T_a 和 G_s 呈不同程度的正相关, 除新疆大叶 P_n 与

G_s 相关性显著外,其他相关性均不显著;7个品种 P_n 与 RH 均呈不同水平负相关,但相关性不显著;巨人 201+Z、中兰 1 号、牧歌 401+Z 和超级 13R 4 个品种的 P_n 与 V_{pd} 呈正相关,但相关性都不显著,其余品种 P_n 与 V_{pd} 间均呈微弱负相关;除巨人 201+Z 和中兰 1 号外,其余品种 P_n 与 C_a 均呈正相关关系,相关性不显著。从相关系数的大小来看,对 P_n 影响最大的因子是 PAR。

表 3-17 7 个苜蓿品种叶片第三茬开花期光合速率与环境生态因子的相关系数

品种	PAR	T_a	RH	V_{pd}	C_a	G_s
I	0.934**	0.780	-0.643	0.135	-0.048	0.779
II	0.930**	0.725	-0.780	0.512	-0.207	0.436
III	0.595	0.060	-0.092	-0.285	0.676	0.739
IV	0.888*	0.465	-0.502	-0.143	0.236	0.866*
V	0.796	0.428	-0.528	0.228	0.615	0.563
VI	0.787	0.405	-0.481	-0.089	0.554	0.678
VII	0.968**	0.756	-0.803	0.216	0.287	0.560

* 表示差异显著; ** 表示差异极显著。I~VII 意义同图 3-2。

(四) 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系

对 7 个 P_n 均呈“单峰”型变化的苜蓿品种的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化进行了分析。如图 3-25、图 3-26 所示,在 10:00~12:00,只有爱菲尼特+Z、牧歌 401+Z P_n 有所降低,此时其 L_s 升高而 C_i 降低,表明此时光合作用的下降是由气孔关闭引起的;在 12:00~14:00,除超级 13R 外其他品种 P_n 均降低,同时 L_s 增高而 C_i 降低,表明此时光合作用的下降也是由气孔关闭引起的;在 14:00~18:00,7 个苜蓿品种 P_n 急剧降低,与此同时, L_s 急剧降低且 C_i 增高,表明此时叶肉细胞光合能力的下降是光合速率下降主要是叶肉细胞光合活性降低的缘故。牧歌 401+Z 在 16:00~18:00 变化趋势与其他品种相反,这可能是受当时的环境条件影响所致。

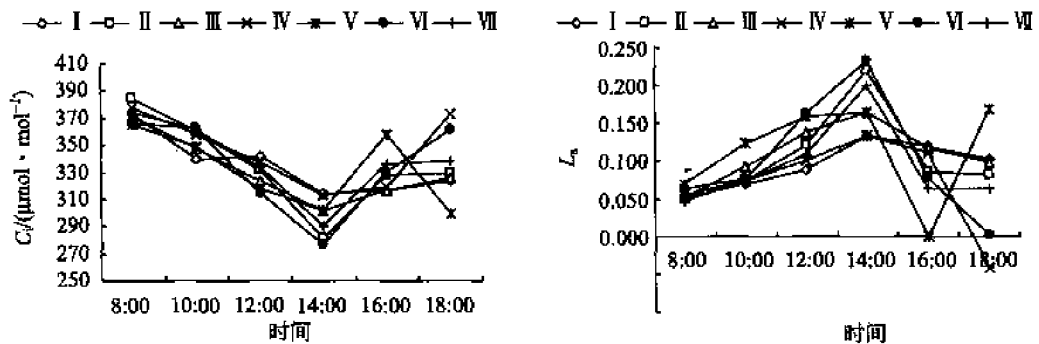


图 3-26 不同苜蓿品种第三茬开花期叶片 C_i 和 L_s 日变化

图例标注同图 3-2

对气孔限制值 (L_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与 P_n 进行相关分析 (表 3-18) 发现, 爱菲尼特+Z L_s 与 P_n 呈微弱负相关, C_i 与 P_n 呈正相关, 相关性均不显著; 其他苜蓿品种的 L_s 与 P_n 呈不同水平的正相关, C_i 与 P_n 均呈不同水平的负相关, 相关性均不显著。

表 3-18 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度与净光合速率之间的关系

品种代号	I	II	III	IV	V	VI	VII
C_i	-0.192	-0.529	0.368	-0.543	-0.154	-0.283	-0.358
L_s	0.313	0.653	-0.077	0.825	0.562	0.598	0.686

注: I~VII 意义同图 3-2。

三、讨论与小结

7 个苜蓿品种叶片在第二茬开花期净光合速率呈现两种不同的日变化趋势。巨人 201+Z、中兰 1 号、爱菲尼特+Z、新疆大叶、路宝 5 个品种 P_n 日变化均呈“双峰”型变化趋势, 5 个品种第 2 峰值均远低于第 1 峰值; 牧歌 401+Z、超级 13R 日变化趋势呈“单峰”型。

新疆大叶午间其净光合速率的降低主要缘于气孔因素, 巨人 201+Z、中兰 1 号、爱菲尼特+Z、路宝午间 P_n 下降主要是非气孔限制导致的。

影响第二茬开花期苜蓿净光合速率日变化的主要因子是光合有效辐射和气孔导度。

7 个苜蓿品种叶片第三茬开花期的净光合速率均呈现“单峰”型变化趋势, 爱菲尼特+Z 和牧歌 401+Z 峰值均出现在 10:00, 巨人 201+Z、中兰 1 号、新疆大叶和路宝等品种峰值出现在 12:00, 超级 13R 峰值出现在 14:00; 各苜蓿品种净光合速率在达到峰值后午间降低的降低主要缘于气孔因素。影响第三茬开花期苜蓿净光合速率日变化的主要因子是光合有效辐射。

对不同茬次苜蓿品种开花期日均净光合速率方差分析发现, 第一茬各苜蓿品种净光合速率均极显著高于第二茬和第三茬 ($P<0.01$), 牧歌 401+Z 第二茬净光合速率显著高于第三茬 ($P<0.05$), 其余品种第二茬与第三茬间净光合速率差异不显著。通过对不同茬次间净光合速率影响最大的光合有效辐射进行方差分析发现, 不同茬次间 PAR 差异极显著 ($P<0.01$)。相关分析发现, 各品种三茬间日均光合有效辐射与日均净光合速率呈正相关, 其中牧歌 401+Z 相关性显著 ($P<0.05$), 相关系数为 0.999。

参考文献

- 蔡时育, 许大全. 2000. 大豆叶片 CO_2 补偿点和光呼吸的关系. 植物生理学报, 26 (6): 545-550.
 耿华珠. 1995. 中国苜蓿. 北京: 中国农业出版社.
 郭连旺, 沈允钢. 1996. 高等植物光合机构避免强光破坏的保护机制. 植物生理学通讯, 32 (1): 1-8.
 郭连旺, 许大全, 沈允钢. 1994. 田间棉花叶片光合效率中午降低的原因. 植物生理学报, 20 (4): 360-366.
 韩清芳, 贾志宽. 2004. 紫花苜蓿种质资源评价与筛选. 杨凌: 西北农林科技大学出版社.
 蹇洪英, 邹寿育. 2003. 地毯草的光合特性研究. 广西植物, 23 (2): 181-184.
 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.

- 李霞, 刘友良, 焦德茂. 2002. 不同高产水稻品种叶片的荧光参数的日变化和光适应特性的关系. 作物学报, 28 (2): 145-153.
- 刘宇峰, 萧浪涛, 童建华, 等. 2005. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. 中国农学通报, 21 (8): 76-79.
- 刘贞琦. 1985. 不同株型水稻光合产量因子的研究. 贵州农业科学, 4 (2): 11-15.
- 许大全. 1995. 气孔的不均匀关闭与光合作用的非气孔限制. 植物生理学通讯, 31 (4): 246-252.
- 许大全. 1997. 光合作用气孔限制分析中的一些问题. 植物生理学通讯, 33 (4): 241-244.
- 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 2005. 遮荫和全光生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征. 植物生态学报, 29 (1): 8-15.
- 张守仁. 1999. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. 植物学通讯, 16 (4): 444-448.
- Björkman O, Demming B. 1987. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence at 77K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170: 489-504.
- Farquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann Rev Plant Physiol*, 33: 317-345.
- Guo J, Guo X Y, Wang J H, et al. 2005. Characteristic parameters of light responses of corn varieties with different plant shapes. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 25 (8): 1612-1617.
- Hodgson R A J, Raison J K. 1989. Inhibition of photosynthesis by chilling in moderate light: a comparison of plants sensitive and insensitive to chilling. *Planta*, 178: 545-552.
- Medrano H, Keys A J, Lawlor D W, et al. 1995. Improving plant production by selection for survival at low CO_2 concentrations. *J Exp Bot*, 46: 1389-1396.
- Smimoff N, Colombe S V. 1988. Drought influences the activity of enzymes of the chloroplast peroxide scavenging system. *Journal of Experimental Botany*, 38: 1097-1108.
- Suresh K, Rao K L N, Nair T V R. 1997. Genetic variability in photosynthetic rate and leaf characters. *Photosynthetica*, 33: 173-178.
- Xu D Q, Wu S. 1996. Three phases of dark-recovery course from photoinhibition resolved by the chlorophyll fluorescence analysis in soybean leaves under field conditions. *Photosynthetica*, 32: 417-423.
- Xu Da-Quan, Shen Yun-Gang. 1997. Diurnal variations in the photosynthetic efficiency in plants. *Acta Phytophysiol Sin*, 23: 410-416.
- Xu H L. 2000. Effects of a microbial inoculant and organic fertilizers on the growth, photosynthesis and yield of weat corn. *Nature Farming and Microbial Applications*. Food Products Press. NewYork; London. Oxford. 3 (1): 183-214.

第四章 不同苜蓿品种根系形态及吸水规律研究

根系是植物吸收、转化和储藏营养物质的重要器官，对地上部分的生长、形态建成发生作用，其生长情况直接影响地上部分的产量和植物的水土保持能力（Russell, 1997; Parao and Paningbatan, 1997）。同时根颈也是产生枝条的重要部位，直接影响苜蓿生产性能和可持续利用（Marquez-Ortiz et al., 1996），如再生性、耐寒性、抗旱性和抗病性等都与其密切相关。

土壤水分含量的高低是确定能否种植苜蓿及决定其产草量高低的重要条件。苜蓿为喜水性植物，需要水分较多，形成 1g 干物质需耗水 900~1570g。但是，苜蓿也最忌积水，过多的积水往往造成植株大批死亡。

该研究的目的在于通过分析比较国外引进的不同秋眠级数紫花苜蓿品种（试验第一年为 15 个品种，第二、第三年为 8 个品种）在自然条件下根系的生长特性，为进一步研究苜蓿根系的发生机理提供较为理想的试验材料和理论依据。同时，通过对土壤水分分布规律的分析，找出苜蓿根系吸水规律，为控制苜蓿灌溉提供参考，以促进旱区草业开发、畜牧业基地建设和生态农业的发展。

第一节 材料与方法

一、试验地概况

试验于陕西杨凌西北农林科技大学农作一站进行。该站位于秦岭北麓，渭河平原西部的头道塬上，北纬 34°21′，东经 108°10′，海拔 454.8m，年均日照时数 2150h，年平均气温 12~14℃，极端最低气温 -21~-15℃，年平均降水量 621.6mm，春季降水量偏少、干旱，雨量主要集中在 7 月、8 月、9 月 3 个月，属暖温带半湿润气候。土壤为黑垆土，土层深厚，通气良好，有机质 1.59%，全氮 0.055%。苜蓿试验地无灌溉条件，生育期间不施肥，只进行人工除草。苜蓿每年刈割三茬。

二、材料

试验第一年的苜蓿品种共 15 个，包括：秋眠级数（FD）为 2 的品种有 WL-252HQ、CW200、巨人 201，秋眠级数（FD）为 3 的品种有胖多、金皇后、苜蓿王、WL-232HQ，秋眠级数（FD）为 4 的品种有 WL-323UF、飞马、牧歌 401、顶点、爱菲尼特、WL-323、皇冠，秋眠级数（FD）为 6 的品种有维多利亚。

试验第二、第三年的苜蓿品种共 8 个，包括：秋眠级数（FD）为 2 的品种有 WL-252HQ、CW200、巨人 201，对应编号分别为 C3、C5、C8；秋眠级数（FD）为 3 的品种有胖多、金皇后，对应编号分别为 C2、C7；秋眠级数（FD）为 4 的品种有 WL-323UF、飞马，对应编号分别为 C1、C4；秋眠级数（FD）为 6 的品种有维多利亚，对

应编号为 C6。

三、试验方法与测定项目

(一) 试验方法

利用地上整体观察取样和根系分层分析相结合的方法。各品种田间采取完全随机设计的方法种植,于2004年4月13日人工条播,行距30cm,每品种种植两小区,每小区面积10.0m×2.6m,小区之间修筑隔离小埂,播种量为 $15\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验于2004年7月(第一年第一茬苜蓿)至2006年9月(苜蓿生长第三年第三茬)进行。其中,根系和土壤含水量的测定与苜蓿各茬刈割同期进行,其他数据在苜蓿生长期收集。随机在长势均等(地上部分直观)处取样,样方面积为 $0.5\text{m}\times 0.5\text{m}$,每个品种确定为5株。地上部分完成需测项目后;地下部分用壕沟法每10cm一层(前60cm)挖取根系至无根层,用水洗法处理后,置于烘箱内 $65^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ 烘24h,直至恒重,记录需测项目。土壤水分含量用打钻取土法测量。

(二) 测定项目

鲜草产量 在整块苜蓿地有1/3开花时,收割样方 $1\text{m}\times 1\text{m}$,即刻用电子天平称量其鲜重(kg),每个处理重复3次。

根颈形态 根颈入土深度(cm):从地表到根颈上端的垂直距离;根颈直径(cm);根颈分枝:从根颈直接长出的分枝;分枝直径(cm);二级根颈数。

根系形态 主根直径(cm):在0~10cm层,测定根颈下主根中间处粗度,其余各层测中间位置;主根深度(cm);侧根数:从主根长出的侧根,直径 $\geq 0.05\text{cm}$ 可计入;侧根直径(cm);侧根位置(cm):侧根在主根上发生的位置;生物量(g):每10cm层内的根系干重;侧根生物量(g):测每土层侧根干重(g)。

土壤含水量 分层(20cm一层)打钻取土后测量湿重和干重(置于烘箱内 $110^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 烘24h),每个处理重复3次。

第二节 不同秋眠级数苜蓿品种根颈特性

一、生长当年苜蓿根颈特性

当年生苜蓿第一茬根颈入土深度(表4-1)以秋眠级数为4的牧歌401最大,为4.25cm,极显著地高于除爱菲尼特(FD4)外的其余品种,而其他品种又均极显著地高于FD为3的金皇后,金皇后根颈入土深度为1.92cm,仅占牧歌401的45.2%。第一茬苜蓿根颈直径以FD为3的胖多最大,为0.57cm,极显著地高于除WL-323UF(FD4)、苜蓿王(FD3)以外的其他品种。其余品种均极显著地高于金皇后(FD3)、WL-252HQ(FD2)。苜蓿王(FD3)的根颈分枝数极显著地高于除爱菲尼特(FD4)外的其他品种,分枝直径以胖多(FD3)最大,为0.26cm;WL-252HQ(FD2)最小,为0.11cm。秋眠级数均为2的WL-252HQ、CW200、巨人2013个品种的根颈分枝数、

分枝直径、根颈入土深度之间差异不显著, 3 个品种的根颈直径之间差异虽达到极显著水平, 但与除金皇后外的其他参试品种相比, 根颈直径较小。秋眠级数均为 3 的胖多、金皇后、苜蓿王、WL-232HQ 4 个品种的根颈入土深度, 胖多、苜蓿王、WL-232HQ 三者之间无显著性差异, 但均极显著地高于金皇后。苜蓿王和胖多的根颈直径之间无显著性差异, 但二者极显著地高于 WL-232HQ 和金皇后。胖多、金皇后、苜蓿王、WL-232HQ 4 个品种的根颈分枝数差异显著。秋眠级数均为 4 的 WL-323UF、飞马、牧歌 401、顶点、爱菲尼特、WL-323、皇冠 7 个品种的根颈特性差异明显。其中, 根颈直径以 WL-323UF 最大, WL-323 最小; 根颈分枝数以爱菲尼特最多, WL-323 最少; 根颈入土深度以牧歌 401 最大, 顶点最小。秋眠级数为 6 的半休眠品种维多利亚的根颈特性各项指标在第一茬表现较差, 其根颈直径为 0.25cm, 极显著地低于除 FD 为 2 的 3 个品种和金皇后 (FD3) 外的其他品种; 而其根颈分枝数和根颈入土深度在参试品种中均是最小的。

表 4-1 不同苜蓿品种第一茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.51BA	10DC	0.25	3.11D	0
胖多	0.57A	12BC	0.26	3.65DC	0
WL-252HQ	0.15I	4F	0.11	2.97DE	0
飞马	0.47BC	10DC	0.26	2.87DEF	0
CW200	0.22H	6FE	0.15	3.03DE	0
维多利亚	0.25HG	5F	0.17	2.63EF	0
金皇后	0.15I	4F	0.12	1.92G	0
巨人 201	0.28G	6FE	0.17	2.58EF	0
顶点	0.41DE	10DC	0.23	2.52F	0
爱菲尼特	0.36FE	14BA	0.17	3.94BA	0
WL-323	0.34F	5F	0.25	2.59EF	0
皇冠	0.35F	7DFE	0.21	3.10D	0
苜蓿王	0.52BA	16A	0.25	3.57BC	0
WL-232HQ	0.34F	6FE	0.19	3.30DC	0
牧歌 401	0.42DC	9DCE	0.22	4.25A	0

注: 根颈分枝数和二级根颈数均为样品总数, 其他值为平均值。多重比较采用 Duncan 新复极差法; 不同大写字母表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$), 下同。

第二茬 (表 4-2) 根颈入土深度品种间差异显著 ($P = 0.0168 < 0.05$)。品种 WL-323 (FD4) 根颈入土深度最大为 5.46cm, WL-252HQ (FD2) 最小为 4.16cm。春播苜蓿生长当年根颈入土深度为 4.16~5.46cm, 不同品种间差异明显。维多利亚 (FD6) 和 WL-323 (FD4) 根茎入土深度无显著差异, 顶点 (FD4) 的根颈直径最小为 0.50cm, 但与胖多 (FD3)、CW200 (FD2)、WL-232HQ (FD3) 无显著差异。1 年生紫花苜蓿的根颈直径以维多利亚 (FD6) 最大, 为 0.89cm。根颈分枝数 WL-323 (FD4) 极显著地高于除 WL-252HQ (FD2) 外的其他品种。分枝直径以 WL-323UF (FD4) 和皇冠最大, 为 0.36cm; 巨人 201 (FD2) 最小, 为 0.20cm。秋眠级数均为 2

的 WL-252HQ、CW200、巨人 201 3 个品种的根颈分枝数、分枝直径、根颈入土深度差异显著。秋眠级数均为 3 的胖多、金皇后、苜蓿王、WL-232HQ 4 个品种的根颈分枝数和根颈入土深度之间无显著性差异。苜蓿王的根颈直径极显著地高于胖多、WL-232HQ 和金皇后。秋眠级数均为 4 的 WL-323UF、飞马、牧歌 401、顶点、爱菲尼特、WL-323、皇冠 7 个品种的根颈入土深度差异不显著，根颈直径以 WL-323 最大，顶点最小；根颈分枝数以 WL-323 最多，牧歌 401 最少。秋眠级数为 6 的半休眠品种维多利亚除根颈分枝数表现仍较差，仅有 7 个；而其根颈直径达到了 0.89cm，根颈入土深度较之第一茬也增加很多，达到了 4.73cm。两茬各品种均没有出现二级根颈。

表 4-2 不同苜蓿品种第二茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.77B	12CD	0.36	5.15BAC	0
胖多	0.56EDF	10EFD	0.23	5.00BDAC	0
WL-252HQ	0.57ED	16BA	0.21	4.16D	0
飞马	0.67C	12CD	0.30	4.61BDAC	0
CW200	0.50F	7F	0.33	5.06BDAC	0
维多利亚	0.89A	7F	0.51	4.73BDAC	0
金皇后	0.58ED	14BC	0.26	4.33BDC	0
巨人 201	0.67C	13BCD	0.20	5.34A	0
顶点	0.50F	8EF	0.24	5.23BA	0
爱菲尼特	0.58ED	12CD	0.24	5.42A	0
WL-323	0.84A	18A	0.24	5.46A	0
皇冠	0.82BA	13BCD	0.36	5.08BAC	0
苜蓿王	0.80BA	14BC	0.31	5.39A	0
WL-232HQ	0.54EF	11ECD	0.27	4.80BDAC	0
牧歌 401	0.61D	7F	0.35	4.28DC	0

注：同列不同大写字母差异极显著 ($P<0.01$)。

二、生长第二年苜蓿根颈特性

苜蓿生长第二年，第二茬根颈入土深度（表 4-3）以金皇后（FD3）最大，为 6.71cm，极显著地高于其他品种，而其他品种又均极显著地高于 WL-323UF（FD4），WL-323UF（FD4）根颈入土深度为 4.43cm，仅占金皇后（FD3）的 66%。根颈直径以维多利亚（FD6）最大，为 0.88cm，极显著地高于除胖多和飞马（FD3）以外的其他品种。金皇后（FD3）根颈分枝数极显著地高于除胖多（FD3）外的其他品种，分枝直径以维多利亚（FD6）最大，为 0.54cm；金皇后（FD3）最小，为 0.31cm。秋眠级数均为 2 的 WL-252HQ、CW200、巨人 201 3 个品种的根颈直径、根颈分枝数、分枝直径差异不显著，3 个品种的根颈入土深度之间差异达到极显著水平。秋眠级数均为 3 的胖多和金皇后两品种的根颈入土深度和根颈直径差异极显著性，根颈分枝数无显著性差

异。秋眠级数均为 4 的 WL-323UF 和飞马两品种的根颈特性差异显著。秋眠级数为 6 的半休眠品种维多利亚的根颈直径为 0.88cm, 是参试品种中最大的。

表 4-3 不同苜蓿品种第二年第二茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.65eE	14cCD	0.36	4.43gF	1
胖多	0.86abA	18bAB	0.39	4.90eDE	1
WL-252HQ	0.73cdCD	13cD	0.39	6.17bB	1
飞马	0.82bAB	17bBC	0.42	6.04bB	1
CW200	0.69deDE	13cD	0.42	4.72IE	0
维多利亚	0.88aA	13cD	0.54	5.12dCD	2
金皇后	0.74cCD	21aA	0.31	6.71aA	1
巨人 201	0.77cBC	17bBC	0.38	5.31cC	1

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$), 本章其余表同。

第三茬 (表 4-4), 品种 WL-252HQ (FD2) 根颈入土深度最大, 为 7.51cm, 极显著地高于其他品种; WL-323UF (FD4) 最小, 为 4.86cm, 是 WL-252HQ (FD2) 根颈入土深度的 64.7%。苜蓿生长第二年根颈入土深度为 4.86~7.51cm, 不同品种间差异明显。胖多 (FD3)、飞马 (FD4) 和金皇后 (FD3) 的根颈直径无显著差异。2 年生紫花苜蓿的根颈直径以金皇后 (FD3) 最大, 为 0.97cm。WL-323UF (FD4)、金皇后 (FD3) 根颈分枝数均为 22 个, 极显著地高于除胖多 (FD3) 外的其他品种, 分枝直径以维多利亚 (FD6) 最大, 为 0.54cm; WL-323UF (FD4)、金皇后 (FD3) 最小, 均为 0.35cm。由表 4-1~表 4-4 可看出, 休眠和半休眠苜蓿品种在生长当年无二级根颈产生, 至第二年的第二茬, 维多利亚 (FD6) 的二级根颈数最多, 为 2 个, 第三茬, 以维多利亚和胖多最多, 均为 3 个, 品种 CW200 (FD2) 出现二级根颈最晚, 在生长第二年的第三茬才出现二级根颈。

表 4-4 不同苜蓿品种第二年第三茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.86dC	22aA	0.35	4.86fF	2
胖多	0.93abAB	20abAB	0.43	6.63cC	3
WL-252HQ	0.88cdBC	15dC	0.47	7.51aA	2
飞马	0.93abAB	18bcBC	0.39	6.64cC	1
CW200	0.78eD	17cdBC	0.39	5.24eE	2
维多利亚	0.92bcAB	16cdC	0.54	5.80dD	3
金皇后	0.97aA	22aA	0.35	6.59cC	2
巨人 201	0.88cdBC	18bcBC	0.41	6.8bB	1

秋眠级数均为 2 的 WL-252HQ、CW200、巨人 201 3 个品种的根颈分枝数、分枝直径差异不显著, 3 个品种的根颈入土深度之间差异达到极显著水平。秋眠级数均为 3 的胖多和金皇后两品种的根颈特性之间无显著性差异。秋眠级数均为 4 的 WL-323UF 和飞马两品种的根颈特性差异显著。秋眠级数为 6 的半休眠品种维多利亚的根颈特性和其他品种差异明显。

三、生长第三年苜蓿根颈特性

苜蓿生长第三年, 第一茬根颈入土深度(表 4-5)以 CW200(FD2)最大, 为 6.69cm, 极显著地高于其余品种, 而其他品种又均极显著地高于维多利亚(FD6), 维多利亚(FD6)根颈入土深度为 4.59cm, 是金皇后(FD3)的 68.6%。第二茬(表 4-6)根颈入土深度品种间亦达到差异极显著水平。品种 WL-252HQ(FD2)根颈入土深度最大为 6.81cm, 极显著地高于除 WL-323UF 外的其他品种, CW200CFD2 最小, 为 5.44cm, 是 WL-252HQ(FD2)根颈入土深度的 79.9%。第三茬, 根颈入土深度(表 4-7)以 WL-252HQ(FD2)最大, 为 7.86cm, 极显著地高于其余品种, 而其他品种又均极显著地高于巨人 201(FD2), 巨人 201 根颈入土深度为 6.02cm。CW200(FD2)和维多利亚(FD6)在 1% 水平差异不显著。苜蓿生长第三年第三茬根颈入土深度为 6.63~7.86cm, 不同品种间差异明显。

表 4-5 不同苜蓿品种第三年第一茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.93aA	24aA	0.39	5.83cC	3
胖多	0.83bB	21bAB	0.41	4.74eE	3
WL-252HQ	0.73cdCD	15dC	0.37	4.93dD	2
飞马	0.73cdeCD	18cBC	0.40	5.79cC	1
CW200	0.68dFD	14dC	0.30	6.69aA	2
维多利亚	0.85bB	14dC	0.56	4.59fF	3
金皇后	0.78cBC	17cdC	0.46	4.96dD	3
巨人 201	0.93aA	16cdC	0.39	6.04bB	3

表 4-6 不同苜蓿品种第三年第二茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	0.90aA	28aA	0.40	6.75aA	4
胖多	0.83bBC	17bcB	0.44	5.98cC	4
WL-252HQ	0.78cC	15cBC	0.39	6.81aA	5
飞马	0.63eE	12dC	0.39	6.40bB	1
CW200	0.94aA	17bcB	0.32	5.44fF	4
维多利亚	0.84bB	18bcB	0.55	5.84dD	4
金皇后	0.69dD	19bB	0.42	6.35bB	5
巨人 201	0.70dD	17bcB	0.35	5.75eE	3

表 4-7 不同苜蓿品种第三年第三茬根颈特性

品种	根颈直径/cm	根颈分枝数/个	分枝直径/cm	入土深度/cm	二级根颈数/个
WL-323UF	1.33aA	34aA	0.36	7.56cC	6
胖多	1.37aA	28bB	0.40	7.48dD	6
WL-252HQ	1.02cC	18cdC	0.38	7.86aA	5
飞马	1.04cC	13eD	0.41	6.98eE	3
CW200	0.84dD	16deCD	0.32	6.63gF	5
维多利亚	1.15bB	19cdC	0.51	6.70fF	5
金皇后	1.13bB	29bB	0.44	7.73bB	6
巨人 201	0.86dD	20cC	0.37	6.02hG	4

第一茬, 巨人 201 (FD2) 和 WL-323UF (FD4) 的根颈直径最大, 均为 0.93cm, 极显著地高于其他品种。胖多 (FD3) 和维多利亚 (FD6) 之间无显著差异。第二茬, CW200 (FD2) 和 WL-323UF (FD4) 无显著差异, 但二者均极显著地高于其他品种。飞马 (FD4) 的根颈直径最小, 为 0.63cm, 极显著地低于其他参试品种。第三茬, 根颈直径以胖多 (FD3) 最大, 为 1.37cm, 与 WL-323UF (FD4) 之间无显著差异, 二者极显著地高于其他品种。其余品种均极显著地高于巨人 201 (FD2) 和 CW200 (FD2), 后两者之间无显著性差异。3 年生紫花苜蓿的根颈直径以胖多 (FD3) 最大, 为 1.37cm。

第一茬, WL-323UF (FD4) 根颈分枝数最多, 为 24 个, 极显著地高于除胖多外的其他品种。分枝直径以维多利亚 (FD6) 最大, 为 0.56cm; CW200 (FD2) 最小, 为 0.30cm。第二茬, 根颈分枝数 WL-323UF (FD4) 极显著地高于其他品种。分枝直径以维多利亚 (FD6) 最大, 为 0.55cm; CW200 (FD2) 最小, 为 0.32cm。第三茬, 根颈分枝数 WL-323UF (FD4) 极显著地高于其他品种。分枝直径以维多利亚 (FD6) 最大, 为 0.51cm; CW200 (FD2) 最小, 为 0.32cm。生长至第三年, 参试品种均出现二级根颈。

秋眠级数均为 2 的 WL-252HQ、CW200、巨人 201 3 个品种的根颈分枝数在生长第三年的三茬中差异不显著, 而它们的分枝直径和根颈入土深度差异达到极显著水平。秋眠级数均为 3 的胖多和金皇后两品种的根颈直径和根颈入土深度在生长第三年的三茬中差异达到极显著水平, 而二者的根颈分枝数之间无显著性差异。秋眠级数均为 4 的 WL-323UF 和飞马两品种的根颈直径、根颈分枝数和根颈入土深度等指标在生长第三年的三茬中的差异均达到了极显著水平。而秋眠级数为 6 的半休眠品种维多利亚的根颈特性在参试品种中的表现一般。

第三节 不同秋眠级数苜蓿品种根系形态特性

一、苜蓿生长第一年根系形态特性

(一) 根深及主根直径的垂直分布

侧根发生的总数与主根的粗度有密切关系, 主根越粗, 侧根发生的潜在机会越多。

如苜蓿王, 其在第一茬 0~10cm 的主根直径为 0.485cm、侧根为 11 个, 第二茬 0~10cm 的主根直径为 0.600cm、侧根为 21 个。主根直径的大小直接影响着根系体积的大小和根系生物量的多少, 而根系体积越大, 所接触的土壤面积越大, 地下空间占有量越大, 有利于植物大范围吸收土壤水分、养分。生长当年主根直径随土层深度的递增呈递减趋势。

由表 4-8 可以看出, 当年第一茬品种间最大根深差异明显。秋眠级数为 2 的 WL-252HQ 最小, 为 25.1cm; 飞马最大, 为 66.9cm, 而半休眠品种维多利亚 (FD6) 的最大根深仅为 29.2cm。第二茬 (表 4-9) 秋眠级数为 2 的巨人 201 最小, 为 91.3cm; 秋眠级数为 4 的 WL-323 最大, 为 162.3cm, 而维多利亚的根深已达到 133.4cm。两茬之间最大根深净增长速率最大的品种是 FD 为 2 的 WL-252HQ, 达 83.3%, 最小的是 FD 为 4 的 WL-232HQ 为 34.9%。自然条件下, 苜蓿生长当年最大根深可达 162.3cm。不同秋眠级数的苜蓿品种并没有表现出规律性。

表 4-8 不同苜蓿品种第一年第一茬根深及主根直径的垂直分布

品种	主根深度/cm	主根直径/cm			
		0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~40cm
WL-323UF	66.8	0.440	0.309	0.160	0.132
胖多	66.4	0.421	0.377	0.188	0.085
WL-252HQ	25.1	0.110	0.099	0.000	0.000
飞马	66.9	0.355	0.308	0.172	0.114
CW200	40.0	0.156	0.114	0.094	0.060
维多利亚	29.2	0.200	0.197	0.168	0.000
金皇后	26.6	0.105	0.078	0.044	0.000
巨人 201	43.4	0.229	0.251	0.153	0.106
顶点	63.7	0.307	0.289	0.175	0.116
爱菲尼特	35.0	0.278	0.207	0.288	0.080
WL-323	30.0	0.294	0.272	0.124	0.000
皇冠	63.5	0.299	0.201	0.143	0.091
苜蓿王	59.7	0.485	0.363	0.227	0.178
WL-232HQ	68.9	0.278	0.208	0.216	0.158
牧歌 401	48.5	0.330	0.234	0.117	0.086

表 4-9 不同苜蓿品种第一年第二茬根深及主根直径的垂直分布

品种	主根深度/cm	主根直径/cm			
		0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~40cm
WL-323UF	144.4	0.585	0.390	0.233	0.203
胖多	115.3	0.433	0.336	0.273	0.158
WL-252HQ	150.5	0.471	0.441	0.252	0.269
飞马	136.4	0.557	0.483	0.307	0.225
CW200	113.2	0.481	0.381	0.291	0.194

续表

品种	主根深度/cm	主根直径/cm			
		0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~40cm
维多利亚	133.4	0.672	0.374	0.319	0.187
金皇后	130.4	0.469	0.375	0.349	0.222
巨人 201	91.3	0.515	0.413	0.135	0.100
顶点	150.2	0.697	0.341	0.257	0.191
爱菲尼特	120.5	0.509	0.450	0.309	0.224
WL-323	162.3	0.685	0.509	0.276	0.172
皇冠	154.2	0.715	0.583	0.378	0.247
苜蓿王	158.2	0.600	0.489	0.353	0.248
WL-232HQ	105.8	0.447	0.357	0.264	0.178
牧歌 401	155.4	0.499	0.399	0.259	0.202

(二) 侧根的垂直分布

紫花苜蓿侧根发达,侧根数量的多少直接关系到根系吸收养分、水分能力以及抗旱性的强弱。研究的 15 个苜蓿品种间的侧根总数差异明显(表 4-10,表 4-11)。

表 4-10 不同紫花苜蓿品种第一年第一茬侧根数及位置的分布

品种	总数/个	侧根数/个				侧根位置/cm		
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	第一侧根 位置	最深侧根 位置	侧根平均 位置
顶点	14A	1	8	5	0	7.19	28.50	15.93
飞马	13A	2	8	3	0	7.48	21.60	15.27
苜蓿王	11A	1	5	5	0	6.37	23.18	13.18
胖多	8B	0	3	5	0	5.45	25.83	15.72
WL-323UF	7CB	2	4	1	0	8.30	21.74	15.47
WL-232HQ	5CBD	3	2	0	0	6.23	17.28	11.93
爱菲尼特	5CBD	1	3	1	0	8.14	24.83	19.04
牧歌 401	5CBD	1	4	0	0	9.64	18.52	13.12
WL-323	4CD	2	2	0	0	6.55	17.57	10.82
维多利亚	3ED	0	2	1	0	13.07	23.67	18.54
皇冠	3ED	1	2	0	0	9.70	16.54	13.05
金皇后	2ED	2	0	0	0	5.26	8.87	7.07
CW200	2ED	0	2	0	0	10.30	10.98	10.64
巨人 201	2ED	0	2	0	0	18.20	20.00	19.10
WL-252HQ	0E	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00

注:侧根数为样品总数。

表 4-11 不同紫花苜蓿品种第一年第二茬侧根数及位置的分布

品种	总数/个	侧根数/个				侧根位置/cm		
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	第一侧根 位置	最深侧根 位置	侧根平均 位置
苜蓿王	21A	2	7	7	5	9.00	39.93	20.66
皇冠	20BA	4	10	3	3	6.94	37.64	20.93
WL-323	17BC	0	13	2	2	10.90	38.44	24.89
L-323UF	14DC	0	13	0	1	10.61	34.22	18.84
牧歌 401	14DC	2	9	3	0	6.41	28.67	16.65
WL-252HQ	12DE	0	12	0	0	11.62	18.61	15.43
飞马	11DEF	0	4	6	1	16.19	34.95	25.08
金皇后	10DGEF	0	6	4	0	11.27	28.97	20.77
顶点	10DGEF	2	4	3	1	8.62	30.59	18.92
爱菲尼特	10DGEF	3	3	4	0	7.42	28.29	15.91
CW200	9HGEF	0	7	2	0	10.35	26.70	18.67
维多利亚	8HGF	3	3	2	0	7.34	28.9	16.08
巨人 201	7HGF	2	5	0	0	6.81	17.09	10.50
胖多	6HG	0	1	5	0	13.35	28.60	24.71
WL-232HQ	5H	2	3	0	0	8.33	17.00	12.13

通过比较可得出,生长当年各品种侧根总数差异明显。第一茬以顶点(FD4)最多,为14个,极显著高于除飞马(FD4)和苜蓿王(FD3)以外的其余品种,其中WL-252HQ(FD2)无侧根发生;第二茬以苜蓿王(FD3)最多,为21个,极显著高于除皇冠(FD4)外的其他品种。侧根总数越多,根系体积和表面积相对越大,根系吸收水分、养分和微量元素能力越大,抗逆性越强,品种适应环境的能力越强。秋眠级数均为2的WL-252HQ、CW200、巨人201 3个品种在生长当年两茬的侧根总数差异不显著;秋眠级数均为3的胖多、金皇后、苜蓿王和WL-232HQ 4个品种在生长当年两茬的侧根总数差异则达到极显著水平;秋眠级数均为4的7个品种侧根数在生长当年差异显著;半休眠品种维多利亚(FD6)的侧根数在生长当年表现较差。

侧根在主根上的发生部位,反映了品种利用土壤水分、养分和微量元素的立体分异性。试验表明,15个品种的侧根第一茬发生在土层0~30cm的主根段,其中主要集中在10~20cm,占总数的55.96%,30cm以下没有侧根发生;第二茬侧根发生在0~40cm的主根段,主要集中于10~30cm段,10~30cm土层的侧根数占总数的81.03%,40cm以下无侧根发生。

(三) 根系生物量垂直分布

紫花苜蓿属于直根系植物,根系由主根和侧根组成,根系生长与品种本身特性、外界环境等多种因素有关,根系生物量是所有因素共同作用的结果(郭正刚等,2002)。土壤不同深度的根系生物量,可反映品种在某一土层深度的生长能力,积累的生物量越多,说明在该层中利用土壤营养物质、水分的能力越强(白文明等,2001)。

供试的紫花苜蓿品种根系生物量差异明显。由表 4-12 可见, 生长当年第一茬各品种根系生物量随土层深度从上至下呈递减趋势。苜蓿王的根系生物总量为 9.89g, 极显著地高于其他品种; 胖多、顶点、WL-323UF 之间无显著差异, 但极显著高于其他品种 (苜蓿王除外)。其他参试品种均极显著高于 WL-252HQ、CW200 和金皇后 3 个品种。各品种在 0~20cm 层内的生物量均达 70% 以上, WL-252HQ 则在第一茬只生长于该层。秋眠级数均为 4 的苜蓿品种除金皇后外其他品种的根系生物量高于维多利亚 (FD6) 和秋眠级数均为 2 的 WL-252HQ、CW200 和巨人 201 3 个品种; 秋眠级数为 3 的苜蓿王的根系生物量在参试品种中最大。

表 4-12 不同苜蓿品种第一年第一茬根系生物量

品种	总重/g	根系干重/g (占总重的比例/%)						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
苜蓿王	9.89A	4.79 (48.5)	3.08 (31.1)	1.51 (15.2)	0.26 (2.6)	0.18 (1.8)	0.07 (0.7)	0.00 (0.0)
WL-323UF	8.38B	4.03 (48.1)	2.71 (32.2)	0.84 (9.9)	0.32 (3.7)	0.25 (2.9)	0.17 (2.0)	0.08 (0.9)
胖多	7.38B	3.51 (47.4)	2.30 (31.2)	1.05 (14.4)	0.26 (3.5)	0.14 (1.8)	0.09 (1.2)	0.03 (0.5)
顶点	7.78B	3.48 (44.7)	2.55 (32.7)	1.01 (13.0)	0.43 (5.5)	0.21 (2.7)	0.09 (1.1)	0.02 (0.2)
飞马	5.79C	2.99 (51.7)	2.06 (35.6)	0.49 (8.5)	0.14 (2.5)	0.07 (1.2)	0.03 (0.5)	0.00 (0.0)
爱菲尼特	5.30DC	2.76 (52.0)	1.99 (37.5)	0.53 (9.9)	0.03 (0.5)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
WL-232HQ	4.91DCE	3.10 (63.1)	1.14 (23.2)	0.29 (5.8)	0.18 (3.6)	0.13 (2.7)	0.04 (0.9)	0.03 (0.6)
牧歌 401	5.07DCE	2.52 (49.8)	1.86 (36.7)	0.52 (10.3)	0.14 (2.8)	0.03 (0.5)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
WL-323	4.26DFE	2.56 (60.0)	1.51 (35.4)	0.19 (4.6)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
皇冠	3.71GFE	1.92 (51.6)	1.16 (31.2)	0.36 (9.7)	0.14 (3.9)	0.08 (2.1)	0.05 (1.3)	0.01 (0.2)
巨人 201	3.17GF	1.35 (42.6)	1.23 (38.9)	0.36 (11.3)	0.21 (6.5)	0.02 (0.7)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
维多利亚	2.49G	1.33 (53.4)	0.74 (29.7)	0.42 (16.9)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
WL-252HQ	0.60H	0.38 (63.1)	0.22 (36.9)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
金皇后	0.44H	0.37 (82.7)	0.05 (12.1)	0.02 (5.2)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
CW200	1.11H	0.66 (59.5)	0.37 (33.4)	0.05 (4.7)	0.03 (2.3)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)

注: 生物量为样品总数。

第二茬各品种根系生物量的垂直分布可分为两种类型(表 4-13), 第一种是从表层到深层, 根系生物量逐渐减小; 第二种是 CW200、维多利亚、巨人 201、顶点 4 个品种出现生物量并不是随着土层的增加而减小的情况, 即维多利亚、顶点和 CW200 的生物量在 50~60cm 略高于 40~50cm 层, 巨人 201 的生物量在 0~10cm 略低于 10~20cm 层, 其原因是根系在下层出现弯曲生长或侧根较多而增大了该层生物量。皇冠根系生物总量为 63.33g, 极显著地高于其他品种, 而其他(巨人 201 除外)品种均极显著地高于 WL-232HQ 和胖多。WL-232HQ、胖多两品种无显著差异。根系生物总量最少的 WL-232HQ 仅 14.63g, 占皇冠根系生物量的 23.1%。秋眠级数为 2 的 WL-252HQ 和巨人 201 的根系生物量差异不显著, 二者显著地低于 CW200 (FD2), 三者的根系生物量在参试品种中表现一般; 维多利亚 (FD6) 的根系生物量 (37.94g) 较之于第一茬 (2.49g) 增加较大。第二茬 0~10cm 的生物量较于第一茬所占总数的百分比略有减少, 且参试品种根系生长均超过 60cm。

表 4-13 不同苜蓿品种第一年第二茬根系生物量

品种	总重/g	根系生物量/g (占总重的比例/%)						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
皇冠	63.33A	23.82 (37.6)	18.51 (29.2)	9.31 (14.7)	4.64 (7.3)	2.15 (3.4)	1.49 (2.4)	3.41 (5.4)
WL-323	42.89B	19.46 (45.4)	16.36 (38.1)	3.65 (8.5)	1.51 (3.5)	0.73 (1.7)	0.52 (1.2)	0.67 (1.6)
苜蓿王	42.06B	19.44 (46.2)	10.37 (24.6)	6.11 (14.5)	2.74 (6.5)	1.02 (2.4)	0.62 (1.5)	1.77 (4.2)
维多利亚	37.94CB	21.19 (55.9)	11.15 (29.4)	3.34 (8.8)	0.96 (2.5)	0.48 (1.3)	0.54 (1.4)	0.28 (0.7)
WL-323UF	32.91CD	15.57 (47.3)	10.67 (32.4)	1.92 (5.8)	1.12 (3.4)	0.87 (2.6)	0.53 (1.6)	2.23 (6.8)
飞马	31.36ED	14.41 (45.9)	8.79 (28.0)	4.35 (13.9)	1.07 (3.4)	0.74 (2.3)	0.54 (1.7)	1.48 (4.7)
顶点	30.79ED	21.01 (68.2)	3.83 (12.4)	2.71 (8.8)	1.14 (3.7)	0.50 (1.6)	0.57 (1.9)	1.03 (3.3)
爱菲尼特	25.52EDF	11.96 (46.9)	6.50 (25.5)	2.74 (10.7)	1.06 (4.1)	0.77 (3.0)	0.62 (2.4)	1.88 (7.4)
牧歌 401	26.19EGF	9.40 (35.9)	8.36 (31.9)	3.68 (14.0)	0.79 (3.0)	0.64 (2.4)	0.57 (2.2)	2.77 (10.6)
金皇后	22.52GF	11.15 (49.5)	6.67 (29.6)	2.62 (11.6)	0.78 (3.4)	0.49 (2.2)	0.32 (1.4)	0.49 (2.2)
CW200	22.18GF	8.25 (37.2)	8.25 (37.2)	2.54 (11.4)	1.48 (6.7)	0.34 (1.5)	0.39 (1.7)	0.94 (4.2)
WL-252HQ	20.78HG	8.49 (40.8)	4.66 (22.4)	1.94 (9.3)	1.10 (5.3)	0.82 (4.0)	0.75 (3.6)	3.02 (14.5)

续表

品种	总重/g	根系生物量/g (占总重的比例/%)						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
巨人 201	15.82HI	7.25 (45.8)	7.66 (48.4)	0.49 (3.1)	0.20 (1.3)	0.06 (0.4)	0.05 (0.3)	0.09 (0.6)
胖多	15.27HI	8.08 (52.9)	3.11 (20.4)	2.84 (18.6)	0.63 (4.1)	0.25 (1.6)	0.03 (0.2)	0.34 (2.2)
WL-232HQ	14.63I	7.34 (50.2)	3.85 (26.3)	1.71 (11.7)	0.85 (5.8)	0.29 (2.0)	0.25 (1.7)	0.34 (2.3)

二、生长第二年根系形态特性

(一) 主根入土深度、直径和生物量的垂直变化

由表 4-14 可以看出, 苜蓿生长第二年第二茬品种间最大根深差异明显。WL-323UF (FD4) 最大, 为 256cm; 金皇后 (FD3) 最小, 为 183cm。第三茬 (表 4-15) 最大根深以飞马 (FD4) 最大, 为 305cm, 巨人 201 (FD2) 最小, 为 240cm。自然条件下, 苜蓿生长第二年最大根深可达 305cm。

表 4-14 苜蓿生长第二年第二茬主根入土深度和直径的变化

品种	主根深度 /cm	主根直径/cm					
		0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~40cm	40~50cm	50~60cm
WL-323UF	256	0.54	0.41	0.34	0.24	0.21	0.18
胖多	216	0.70	0.57	0.41	0.25	0.21	0.19
WL-252HQ	215	0.62	0.57	0.41	0.26	0.23	0.20
飞马	267	0.66	0.55	0.39	0.29	0.25	0.22
CW200	252	0.61	0.46	0.35	0.28	0.23	0.23
维多利亚	245	0.77	0.68	0.45	0.30	0.27	0.26
金皇后	183	0.63	0.54	0.40	0.30	0.25	0.21
巨人 201	203	0.66	0.57	0.38	0.29	0.26	0.24

表 4-15 苜蓿生长第二年第三茬主根入土深度和直径的变化

品种	主根深度 /cm	主根直径/cm					
		0~10cm	10~20cm	20~30cm	30~40cm	40~50cm	50~60cm
WL-323UF	280	0.93	0.73	0.52	0.43	0.39	0.33
胖多	255	0.85	0.70	0.55	0.37	0.32	0.27
WL-252HQ	263	0.79	0.66	0.51	0.35	0.31	0.25
飞马	305	0.82	0.73	0.54	0.44	0.36	0.35
CW200	285	0.66	0.53	0.44	0.33	0.28	0.24
维多利亚	280	0.83	0.67	0.63	0.37	0.29	0.27
金皇后	225	0.83	0.66	0.42	0.29	0.26	0.25
巨人 201	240	0.79	0.64	0.50	0.37	0.32	0.27

主根直径均表现为在 0~10cm 土层最大,随着土层深度的加深,主根直径递减。其中,第二茬各土层均以维多利亚 (FD6) 的主根直径最大, WL-323UF (FD4) 最小,如在 0~10cm 土层,维多利亚 (FD6) 为 0.77cm,而 WL-323UF (FD4) 为 0.54cm;第三茬主根直径则以 WL-323UF 最大,如在 0~10cm 土层, WL-323UF (FD4) 为 0.93cm,而 CW200 (FD2) 为 0.66cm,但 CW200 (FD2) 在 40~50cm 层的主根直径为 0.28cm,小于 WL-323UF 在该层的 0.39cm。

各参试品种根系生物量差异明显。苜蓿生长第二年两茬各品种根系生物量随土层深度从上至下呈递减趋势。第二茬 (表 4-16),秋眠级数为 6 的维多利亚的根系生物总量为 88.26g,极显著地高于其他品种;金皇后 (FD3) 和 CW200 (FD2) 之间无显著差异, WL-252HQ (FD2) 和 WL-323UF (FD4) 亦无显著性差异。其他参试品种均极显著高于 WL-252HQ 和 WL-323UF 两个品种。各品种在 0~60cm 层内的生物量均达 87% 以上,其中, WL-252HQ 在 0~60cm 土层的根系生物量占总根系生物量的 94.1%。第三茬 (表 4-17),飞马的根系生物总量为 153.92g,极显著地高于其他品种;金皇后和 WL-323UF 之间无显著差异,但极显著高于其他品种。其他参试品种均极显著高于 CW200。随着根系的生长下移,各品种在 0~60cm 土层内的生物量占总地下根系生物量的比例有所下降,但比例最小的飞马仍高达 81.8%, WL-323UF 所占比例最大为 91.8%。秋眠级数为 3 和 4 的四个品种在第三茬的根系生物量表现较好。

表 4-16 苜蓿生长第二年第二茬根系生物量的变化

品种	总重/g	根系生物量/g						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
WL-323UF	49.63fF	19.15	9.90	6.05	3.67	2.78	1.65	6.43
胖多	69.81dD	29.77	14.36	10.68	4.29	2.27	2.06	6.38
WL-252HQ	47.68fF	19.24	12.25	8.03	3.26	1.18	0.91	2.81
飞马	73.95cC	27.86	15.45	11.62	3.68	3.30	2.22	9.82
CW200	60.99eE	25.34	12.47	5.11	4.90	3.38	2.07	7.72
维多利亚	88.26aA	38.19	22.72	11.60	4.63	3.12	2.46	5.54
金皇后	60.64eE	22.25	17.26	8.63	3.79	2.07	1.77	4.87
巨人 201	78.87bB	31.10	19.12	11.47	5.12	2.48	1.83	7.75

注:多重比较采用 Duncan 新复极差法。不同大小写字母分别表示差异达极显著 ($\alpha=0.01$) 和显著 ($\alpha=0.05$) 水平。下同。

表 4-17 苜蓿生长第二年第三茬主根生物量的变化

品种	总重/g	根系生物量/g						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
WL-323UF	144.10bB	65.74	27.35	18.66	9.62	6.42	4.48	11.83
胖多	119.90cC	51.38	21.59	17.59	6.39	5.00	4.50	13.45
WL-252HQ	85.06fF	29.14	20.76	11.37	5.97	4.14	2.52	11.16

续表

品种	总重/g	根系生物量/g						
		0~ 10cm	10~ 20cm	20~ 30cm	30~ 40cm	40~ 50cm	50~ 60cm	>60cm
飞马	153.92aA	52.01	32.62	16.90	10.68	7.46	6.28	27.97
CW200	77.81gG	29.84	13.64	9.64	5.57	4.09	2.85	12.18
维多利亚	94.67eE	31.58	20.23	16.10	8.49	4.87	4.05	9.35
金皇后	140.82bB	58.57	34.77	15.29	7.11	5.68	4.29	15.11
巨人 201	102.95dD	42.33	20.67	14.19	5.53	5.04	3.61	11.58

(二) 侧根的垂直分布

通过比较苜蓿生长第二年第二、第三茬侧根数的分布(表 4-18)可得出,生长当年各品种侧根总数差异明显。第二茬以胖多最多(FD3),为 28 个,极显著高于其余参试品种,其中 CW200(FD2)侧根数最少,仅为 11 个;第三茬以 WL-323UF(FD4)最多,为 31 个,极显著高于除胖多(FD3)、金皇后外的其他品种。秋眠级数为 3 和 4 的 4 个品种在生长第二年的侧根数要多于秋眠级数为 2 和 6 的 4 个品种。

表 4-18 不同苜蓿品种第二年第二、第三茬侧根数的分布

品种	总数/个	侧根数/个			品种	总数/个	侧根数/个		
		0~ 20cm	20~ 40cm	40~ 60cm			0~ 20cm	20~ 40cm	40~ 60cm
WL-323UF	21cBC	16	5	0	WL-323UF	31aA	21	10	0
30aAB	28aA	15	13	0	胖多	30aAB	16	14	0
WL-252HQ	20cdC	9	8	3	WL-252HQ	21cdD	11	9	1
飞马	15eD	10	5	0	飞马	22cdCD	15	6	1
CW200	11fE	6	4	1	CW200	18dD	7	7	4
维多利亚	18dCD	10	7	1	维多利亚	21cdD	4	17	0
金皇后	24bB	13	9	2	金皇后	28abABC	18	10	0
巨人 201	19cdC	13	6	0	巨人 201	24bcBCD	14	7	3

试验表明,8 个品种的侧根第二茬主要发生在 0~40cm 土层的主根段,占总数的 85%~100%,WL-323UF、胖多、飞马和巨人 201 4 个品种在 40cm 以下没有侧根发生;第二茬侧根也主要集中在 0~40cm 的主根段。

三、生长第三年根系形态特性

(一) 根系生物量的垂直分布

由表 4-19 可以看出,60cm 土层内根系生物量品种间差异明显。苜蓿生长至第三年,参试苜蓿品种 60cm 土层内生物量占到根系总生物量的 85.4%~92.6%。第一茬,60cm 土层内根系生物量以 WL-323UF 最大,为 157.4g,极显著地高于其他品种,其

60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例也最大,为 90.9%,飞马在 60cm 土层内根系生物量虽不是最小,但其 60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例最小,为 84.3%;第二茬,60cm 土层内根系生物量以 WL-323UF 最大,为 170.0g,极显著地高于其他品种,其 60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例也最大,为 91.9%,60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例最小的仍为飞马,为 83.9%;第三茬,60cm 土层内根系生物量以胖多最大,为 254.5g,极显著地高于其他品种,60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例最大的是 WL-323UF,为 92.6%,60cm 土层内根系生物量占根系总生物量的比例最小的是 CW200,为 85.4%。秋眠级数为 3 和 4 的 4 个品种(胖多、金皇后、WL-323UF 和飞马)在生长第三年第一茬、第二茬的侧根数要多于秋眠级数为 2 和 6 的 4 个品种(WL-252HQ、CW200、巨人 201 和维多利亚)。

表 4-19 第三年苜蓿不同茬次 60cm 土层内根系生物量分布

品种	2006 年第一茬	2006 年第二茬	2006 年第三茬
WL-323UF	157.4(90.9)aA	170.0(91.9)aA	222.8(92.6)bB
胖多	139.2(89.7)bB	155.2(90.0)bB	254.5(90.9)aA
WL-252HQ	65.4(88.8)gG	78.9(88.6)gG	98.9(89.9)fF
飞马	103.7(84.3)dD	108.4(83.9)dD	114.6(85.5)eE
CW200	86.8(84.9)eE	78.4(85.0)gG	96.0(85.4)gF
维多利亚	75.4(89.6)fF	99.7(89.1)eE	165.7(91.1)cC
金皇后	124.4(90.8)cC	118.4(90.9)cC	160.1(90.4)dD
巨人 201	87.6(89.8)eE	82.6(89.1)fF	86.3(89.8)hG

(二) 侧根的垂直分布

由表 4-20 可知,侧根数在参试品种间差异明显。第一茬,侧根数以 WL-323UF 最多,为 37 个,极显著地高于其他品种,侧根主要发生于 0~40cm 土层内;第二茬,侧根数以 WL-323UF 最多,为 43 个,极显著地高于其他品种,侧根仍主要发生于 0~40cm 土层内;第三茬,侧根数以 WL-323UF 和胖多最多,分别为 53 个和 57 个,极显

表 4-20 第三年不同品种侧根数量和分布位置

品种	2006 年第一茬/个				2006 年第二茬/个				2006 年第三茬/个			
	总数	0~	20~	40~	总数	0~	20~	40~	总数	0~	20~	40~
		20cm	40cm	60cm		20cm	40cm	60cm		20cm	40cm	60cm
WL-323UF	37aA	20	17		43aA	23	19	1	53bA	29	22	2
胖多	32bB	12	20		33bB	19	14		57aA	35	21	1
WL-252HQ	24cCD	10	11	3	24cC	21	1	2	29deC	7	21	1
飞马	25cC	14	11		25cC	11	9	5	28deC	9	15	4
CW200	20dD	10	10	2	24cC	10	14		26eC	13	12	1
维多利亚	23cdCD	10	11	2	26cC	13	12	1	31dC	12	15	4
金皇后	30bB	18	10	2	33bB	15	18		36cB	17	17	2
巨人 201	22cdCD	14	7	1	27cC	21	6		30dC	11	19	

著地高于其他品种,侧根仍主要发生于0~40cm土层内。第三年,侧根发生位置有随着苜蓿生长时间的延长而下移的趋势,但60cm以下无侧根发生。秋眠级数为2的WL-252HQ、CW200和巨人201在生长第三年的侧根数无极显著差异;秋眠级数为3的胖多和金皇后在生长第三年的前两茬的侧根数亦无显著性差异,第三茬差异极显著;第三茬胖多和金皇后的侧根数差异显著。

第四节 不同秋眠级数苜蓿品种根系吸水规律

一、苜蓿地土壤水分含量变化规律

田间土壤水分的研究对于水土资源的持续利用和农业生产的持久发展有重要的理论与实践意义(李保国等,2000)。土壤水分状况及其变化直接影响作物的生长、发育及产量。据研究,2m深的土层能储存全年的全部降水量(Cairns,1990)。因此,通过对苜蓿地2m和3m深土壤含水量的年际、茬次间和不同生长阶段的连续测定,以探索苜蓿地土壤水分变化规律。试验地苜蓿不同生育阶段降雨量见表4-21和表4-22。

表 4-21 苜蓿不同生育阶段降雨量

时段	2005 年	2006 年			
		总量	第一茬	第二茬	第三茬
降雨量/mm	416.9	380.8	88.4	52.8	239.6

表 4-22 2006 年第一茬不同生育期降雨量

时段	2006 年第一茬			
	总量	返青期	分枝期	开花期
降雨量/mm	88.4	9.2	14.8	64.4

(一) 苜蓿生长不同年限土壤含水量的变化特征

紫花苜蓿草地不同生长年限的土壤水分变化差异较大(图4-1)。在植株生长的第二年(2005年),全年生长期降雨量为416.9mm,3m土层土壤含水量的变幅为 $0.144 \sim 0.272 \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;在生长的第三年(2006年),全年生长期降雨量380.8mm,不同层次土壤含水量为 $0.113 \sim 0.214 \text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,0~3m土层由于根系分布密集,土壤水分消耗量大,其含水量比2005年低。而两年中,各品种土壤水分在1.2m以上变化明显,变幅为11.8%~27.2%。这说明苜蓿根系吸水对土壤含水量分布的影响主要集中于1.2m土层,即苜蓿生长三年根系吸水主要集中于该土层范围内。

在自然条件下,苜蓿地土壤含水量的年际分布总规律是:随着苜蓿生长年限的增加,各土层含水量明显呈递减趋势,两年土壤含水量均表现为在60~80cm处出现峰值,在1.2cm范围内呈现“谷—峰—谷”趋势。1.2m土层内土壤含水量变化明显,而2.0m以下苜蓿地土壤含水量递减速率相对减小(土壤含水量基本维持在 $0.120 \sim$

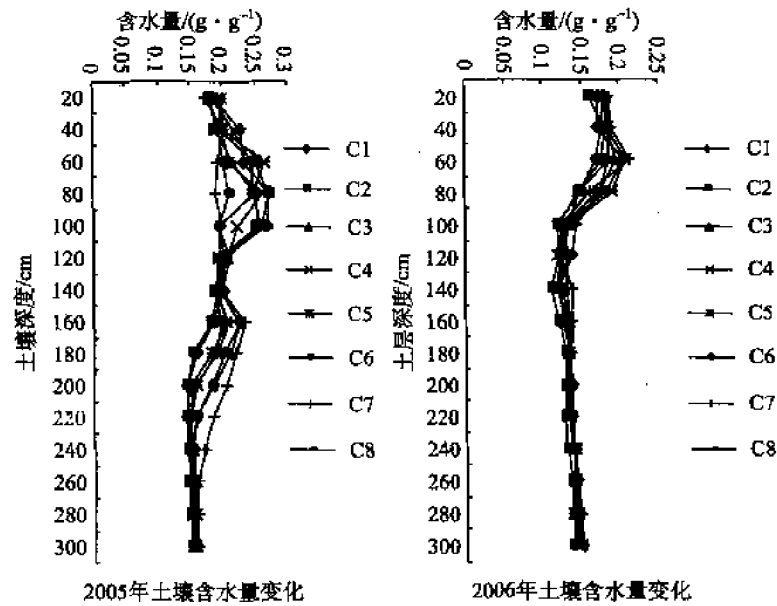


图 4-1 苜蓿生长第二、第三年土壤含水量分布图

0.150 g · g⁻¹ 范围内), 说明苜蓿生长 3 年内自然降水对苜蓿地深层土壤补偿作用不明显或短期内自然降水补偿量远低于苜蓿根系耗水量。

(二) 不同茬次苜蓿地土壤含水量的变化规律

结合苜蓿全生育期内降雨量 (表 4-21) 和 3.0m 土层内的土壤含水量变化 (图 4-2)

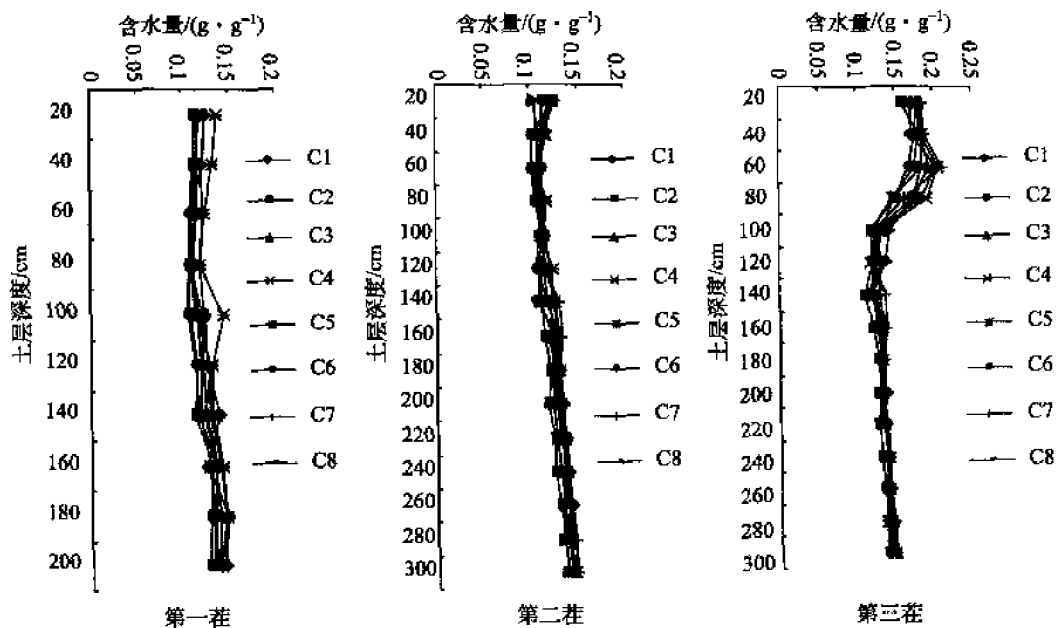


图 4-2 茬次间土壤含水量分布规律

分析可知：由于上年秋、冬季雨水的补给，土壤墒情较好，第一茬苜蓿进入返青期后的土壤含水量在 2.0m 土层内高达 $0.166 \sim 0.256 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，而水分含量变化剧烈的 1.2m 深土层土壤含水量仅为 $0.105 \sim 0.143 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。第二茬苜蓿各层土壤含水量变化不大，与第一茬相比，土壤水分略有减少，1.2m 土层土壤含水量为 $0.103 \sim 0.129 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。第三茬，土壤含水量在 1.2m 土层内上升明显，含水量为 $0.118 \sim 0.214 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，1.2m 以下与前两茬差异不大。土壤含水量的大小与同期降雨量的多少密切相关，第一茬的土壤含水量高于第二、第三茬，此期降雨量虽然不大（88.4mm），但高于第二茬的 52.8mm，第三茬的降雨量高达 239.6mm，对于土壤含水量的补给作用非常明显。

（三）不同生育阶段苜蓿地土壤含水量的变化特征

结合 2006 年第一茬不同生育期的降雨量（表 4-22）和 2.0m 土层内的土壤含水量变化（图 4-3）分析可知：返青到分枝经历 12 天，时间短，苜蓿刚开始生长，叶面积系数较小，加上气温刚刚开始回升，消耗水分不多。此期土壤含水量为 $0.181 \sim 0.280 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，因为降雨的补充比返青初土壤含水量稍有增大；分枝到初花历经 48 天，历时最长，耗水量最大。此期 2.0m 土层内的土壤含水量为 $0.540 \sim 0.143 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，与苜蓿返青到分枝期相比，土壤含水量下降幅度很大；开花期历经 20 天，耗水较多。

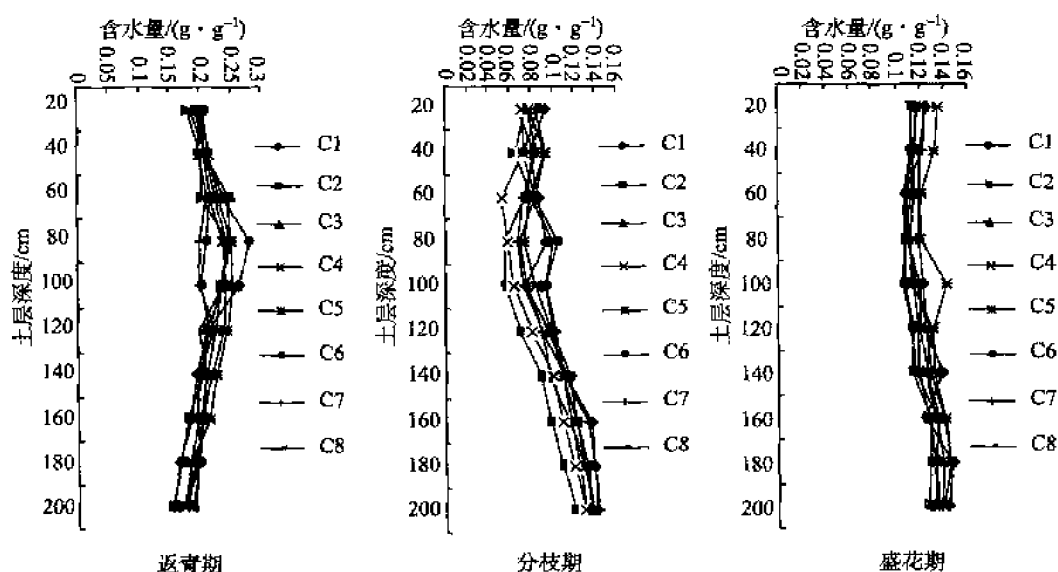


图 4-3 不同生长阶段土壤含水量的变化规律

（四）苜蓿根系特性与土壤水分消耗之间的关系

土壤含水量和苜蓿耗水量年际变化规律与苜蓿根系生物量的积累表现出一致性。由于参试苜蓿品种的休眠性，2005 年最后一茬至 2006 年第一茬根系生物量变化不大；而 2006 年第一、第二茬之间差异也不明显，说明第二茬苜蓿的生长主要是受水分的影响，该期降雨量少、气温高、蒸发强烈，导致土壤含水量低，苜蓿生长受到抑制；2006 年

第三茬表现较好,各品种 60cm 层根系生物量较第二茬增幅为 10%~55%。原因是土壤水分在此阶段由于得到降雨的充分补给而明显增加,苜蓿能充分吸收水分,苜蓿耗水量也相应明显增加。

连续 3 年对 4 个不同秋眠级数苜蓿品种的鲜草产量进行测定。由图 4-4 可以看出,春播苜蓿产量随生长年限持续增加,第一年产量最低,第二年最高,其中每年第一茬产量最高,第二茬最低,但在生长第一年,第二茬产量要高于第一茬。安洲等(2003)的研究结果认为,半秋眠和非秋眠紫花苜蓿年产草量呈现“双峰”型变化趋势,第一个高峰值在 5 月,非秋眠苜蓿的峰值持续到 6 月,4~6 月是两类苜蓿生长较快的时期,期间累计的产量占全年总产量的 53.46%~65.2%;第二个生长高峰值出现在 8 月,但明显小于第一个高峰值。本试验的结果也是这种情况。品种间表现出差异性,且这种差异性在不同刈割期无一致性。

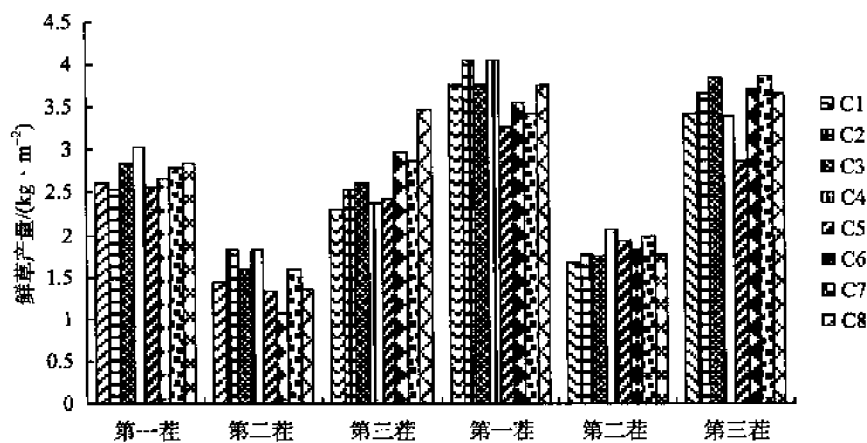


图 4-4 2005 年、2006 年两年各苜蓿品种鲜草量比较

苜蓿产草量与苜蓿根颈特性密切相关,表现为根颈直径越粗、分枝数越多、分枝直径越粗,则产草量越高,如金皇后,以其生长第二年的第三茬为例,根颈直径为 0.97cm、根颈分枝数为 22 个,其鲜草产量为 $2.89\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$,高于除巨人 201 外的其他品种。而半秋眠品种飞马和维多利亚的产量三年内整体表现不如秋眠品种金皇后和胖多,但维多利亚的增产潜力很大,飞马的产量表现较差与其根颈特性指标密切相关。在试验区,苜蓿生长三年内,出现秋眠级数高的品种产量稍低于秋眠级数低的情况,这种与传统认识上的不一致性,可能与参试品种对试验区的适应性有关。

苜蓿生长第三年比第二年耗水多,这与苜蓿即将进入高产年和当年降雨量相一致的结果(陈曦等,2005)不同,原因是第三年全生育期为 192 天,比第二年的 233 天短,且第三年第三茬于 9 月 17 日刈割,而试验区降雨集中于 8 月、9 月、10 月 3 个月。结合 2006 年苜蓿各茬耗水规律,第二茬的耗水量低于第一、第三茬,导致苜蓿生长差,产量低。产量总趋势是第一茬产量最高、第二茬产量最低,第三年产量比第二年高。与土壤含水量的年际间、茬次间变化规律表现出一致性。

第五节 结论与讨论

一、结论

不同秋眠级数苜蓿品种根系特性及吸水规律随苜蓿品种的不同而呈现差异性,但与苜蓿的秋眠级别的关系不是很密切。苜蓿品种的根颈特性差异明显。根颈入土深度随着苜蓿品种秋眠级数的增加而变浅。第一年,侧根主要发生于10~30cm层,40cm以下无侧根发生,不同品种最大根深均能达到100cm,最深可达162cm;苜蓿生长第二年,主根深度最深可达305cm,苜蓿根系主要分布在60cm土层内,侧根主要分布于0~40cm土层,60cm土层的根系生物量占总根系生物量的84%~94%,并且随着生长年限的延伸,该比例增加;苜蓿生长第三年,侧根仍主要发生于0~40cm层,且侧根位置随着生长时间的推移逐渐下移,60cm土层下无侧根发生,60cm土层内生物量占到根系总生物量的85.4%~92.6%。生长三年内,主要靠侧根在耕作层(60cm以上)至1.2m的土层内吸收土壤水分,侧根量决定了根系吸水量及强度。分枝到初花是耗水量最多的时期,其中初花到盛花是耗水速率最大的时期。土壤水分的高值期对应降水的高峰期或耗水低值期,反之亦然。

二、讨论

苜蓿的耐寒性与其根蘖性状特性究竟有无直接关系尚无定论(李向林和万里强,2004;梁慧敏,1995)。从本试验的结果看,根颈入土深度对苜蓿的秋眠性反应最为明显,秋眠级数越大,根颈入土深度越小,而根颈的其他指标并没有与其秋眠级数表现出一致性。这说明苜蓿的根颈入土深度可能对苜蓿的耐寒性影响很大。高振声等(1995)较系统地从不问生境条件下的生态适应性和边际效应对苜蓿根蘖苗发生的影响的角度对苜蓿根蘖性状进行了研究,认为在半干旱草原淡栗钙土地区及气候相对湿润的黏性湿土地区和潮土地区,根蘖型苜蓿均能表现出根蘖习性,在黏性黑土地区根蘖发生百分率较低,半干旱草原地区最适于根蘖型苜蓿生长和根蘖性状的发育。但没有对不同休眠性的苜蓿品种根蘖性状发生的差异性进行深入研究,本试验正是针对这一情况,在相同的生态环境条件下对不同秋眠级数苜蓿品种的根颈特性进行了研究,结果表现出差异性。这说明试验条件下的气候对苜蓿的休眠性要求不是十分严格,而品种间表现出的差异性是由品种的生物特性决定的。

苜蓿品种间根颈特性有明显差异(Marquez-Ortiz et al., 1999),本试验也证实了这一点。根颈是产生分枝的重要部位,同时也是吸收、运输、储存养分和水分的重要器官。参试苜蓿品种的根颈入土深度生长当年均能达到5cm左右,在根颈直径、分枝数、分枝直径和二级根颈分枝几方面,品种间表现出明显不同,从而造成的结果是:分枝或二级分枝较多者,根颈直径也较粗,同时主根直径越粗,根颈直径也越粗,从而根颈长出分枝的潜能也越大,如WL-323、苜蓿王、维多利亚、顶点、WL-323UF等。二级根颈是从根颈上长出的次级根颈,随苜蓿生长年限的增加而增加。二级根颈的产生也是根蘖型苜蓿根蘖性状的主要特征,二级根颈增加了苜蓿根系水平方向的延伸范围(董俊,

2001)。地上生物学产量实际上是根颈分枝和二级根颈分枝的生物量。随着生长时间的延长,各品种的分枝数、入土深度和二级根颈数均在增加。其中,根颈入土深度虽一直在增加,但其入土速率却在下降。分枝直径在生长当年增粗较快,但第二至第三年变化不是很大。已有报道,根颈直径在苜蓿生长第三年后有减小的趋势。分枝直径的大小、分枝数和二级根颈数及其分枝数的多少直接决定着地上产量的高低(吴新卫等,2007)。

在相同外界环境条件下,紫花苜蓿品种间侧根数、生物量、主根直径、最大根深均存在较大差异。在第一年试验所参试的15个品种中,皇冠、WL-323、苜蓿、飞马、顶点、WL-323UF、维多利亚具有较强的根系发育能力,表现为侧根较多、主根直径较粗、根系生物量大。土壤水分状况直接影响根系的生长与构形分布(扎西,1988;马其东和孟维国,1999)。侧根发生的部位受不同深度土壤含水量的影响。在灌溉条件下或降水比较充沛的地区(白文明等,2001),土壤耕作层的含水量有充分的保证,侧根主要集中在0~20cm土层,而在干旱少雨地区,侧根发生的主要部位则转移在含水量相对丰富的10~30cm土层。对生长当年的不同苜蓿品种第一、第二茬根系发育状况进行比较分析表明,第二茬的各项指标均显著高于第一茬。试验区,由于4~7月气温基本上处于回升期,但温度并不高(10~28℃),导致秋眠级数较高的品种,如维多利亚(FD6)在第一茬表现出的各项指标较差,第二茬由于气温适合,生长周期较长,表现较好。

试验区地表蒸发强烈,在0~10cm层根系发生受到水分胁迫,仅有少量侧根发生。根系生物量和主根直径的基本趋势是随土层深度的增加而呈递减态势。紫花苜蓿在自然条件下品种间侧根发生总数变化较大,这与在实验条件下取得的结果一致(郭正刚等,2002),即侧根的发生在品种间差异显著。这说明侧根发生的能力主要由品种的生物学特性决定。

土壤水分在干旱区农业用水中占有举足轻重的地位。苜蓿具有庞大的根系从土壤中吸收水分供其生长利用,其根系的生长状况与土壤水分分布、运移和消耗息息相关,因此,研究不同生长年限不同苜蓿品种在不同生长季节的根系特性以及土壤水分的动态变化,了解土壤水分状况,对于提高苜蓿草田的土壤水分利用效率、改善干旱地区的生态环境有着极为重要的意义(沈振荣,1992;康绍忠等,1998;刘昌明和王会肖,1999)。结合张春霞等(2004)、余优森(1984)的研究结果、土壤含水量的变化规律和试验区自然条件,可以得出试验区苜蓿根系吸水主要集中于耕作层(60cm以上)至1.2m的土层内,说明侧根是苜蓿吸收水分的主要部位,当60cm以下无侧根发生时,但仍有上层的残留侧根存在,根系吸水能力仍较强。至1.2m土层以下时,土壤水分主要被主根吸收或对上层土壤起补偿作用,但土壤含水量变化不明显。

在林草植被过度耗水的情况下,土壤含水量处于极度亏缺状态,甚至可达到或接近凋萎湿度,经过雨季上层土壤水分可以部分得到补偿,而得不到补偿的土层土壤含水量长期处于一种较稳定的低水平上,形成所谓的“土壤干层”(张兴昌和卢宗凡,1996)。多年生豆科人工草地生长期间2m以下土层因很难有水分入渗补充,出现生物耗水形成的干燥层,称为生物性干层(李玉山,2002)。张春霞等(2004)通过对黄土高原沟壑区不同种植年限苜蓿地土壤深层水分特征的分析表明,受降水影响,0~2m土层水分

变化较大, 2m 以下由于没有水分的补给, 出现了干燥化现象。苜蓿在生长前期主要利用上层土壤水分, 土壤水分恢复也是从上层开始, 下层的干层则难以恢复。苜蓿普遍具有“上保水, 下耗水”的特点(耿华珠等, 1995), 随着苜蓿生长年限的增加, 土壤含水量递减, 1.2m 以上土层含水量变化较大, 1.2m 以下土层含水量变化不大但呈递减趋势。由于降雨量小、蒸发强烈和苜蓿品种耗水多, 在第三年的苜蓿需水量最多的分枝期, 1.2m 以上土层会出现轻度干层甚至中度干层。随着降雨的适当补给, 干层容易恢复。

多年来, 有关苜蓿的遗传多样性、生物学特性、产草量动态、抗旱性、抗病性、耐盐性、育种、生理、活力、施肥等方面, 国内外专家学者做过大量研究(李世雄等, 2003; Julier et al., 2000)。对于地上生物量的评价仅限于产量相关及通径分析、品种特性比较及适应性评比, 分析了不同年份、不同环境各龄产量对总产量的作用及某些品种的农艺性状(乔海明, 1990; 孙启荣和桂荣, 2000; 罗新义等, 2001), 但尚未对中国主要苜蓿品种的品种特性进行深入系统的分析研究。苜蓿地上生物量除受生态因子(降水量、温度、日照、土壤类型等)的综合影响, 还受生育年龄、品种特性的影响(陈文等, 1992), 且限制紫花苜蓿生长的主要因素是品种(吴勤等, 1997)。因此, 开发利用我国紫花苜蓿品种的优良特性, 促进苜蓿产量的提高成为成功建植人工草地的关键所在。

本试验所得结果为不同秋眠级数春播苜蓿生长三年内的根系形态特性及其吸水规律, 三年以后的情况有待于进一步确认, 而关于苜蓿根的发生机理及其耗水机理等有待于深入探讨。

参 考 文 献

- 安渊, 胡雪华, 陈凡毅, 等. 2003. 半秋眠和非秋眠紫花苜蓿生长规律及再生性研究. 中国草地, 25 (5): 43-47.
- 白文明, 左强, 黄元仿, 等. 2001. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系生长及吸水规律的研究. 植物生态学报, 25 (1): 35-41.
- 陈文, 李琪, 张小虎. 1992. 影响庆阳黄土高原苜蓿生产的现存因素及其解决途径. 见: 任继周. 黄土高原农业系统国际学术会议论文集. 兰州: 甘肃科学技术出版社.
- 陈曦, 任树梅, 杨培岭, 等. 2005. 京郊地区苜蓿草地土壤水分状况与产草量的研究. 农业工程学报, 21: 218-220.
- 董俊. 2001. 西部地区苜蓿产业化发展的战略思考-续. 饲料广角, 11: 28-29.
- 高振声, 王培, 洪绶曾, 等. 1995. 苜蓿根瘤性状发生与生态适应性的研究. 草地学报, 3 (2): 126-134.
- 耿华珠, 吴永敷, 曹致中. 1995. 中国苜蓿. 北京: 中国农业出版社.
- 郭正刚, 张自和, 肖金玉, 等. 2002. 黄土高原丘陵沟壑区紫花苜蓿品种间根系发育能力的初步研究. 应用生态学报, 13 (8): 1007-1012.
- 康绍忠, 梁银丽, 蔡焕杰, 等. 1998. 旱区水-土-作物关系及其最优调控原理. 北京: 中国农业出版社.
- 李保国, 龚元石, 左强. 2000. 农田土壤水的动态模型及应用. 北京: 科学出版社.
- 李世雄, 王彦荣, 孙建华. 2003. 中国苜蓿品种种子产量性状的遗传多样性. 草业学报, 12 (1): 23-29.
- 李向林, 万里强. 2004. 苜蓿秋眠性及其与抗寒性和产量的关系. 草业学报, 13 (3): 57-61.
- 李玉山. 2002. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 39 (3): 404-411.
- 梁慧敏. 1995. 苜蓿根瘤特性与环境的关系. 国外畜牧学-草原与牧草, 2: 5-8.
- 刘昌明, 王会肖. 1999. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社.

- 罗新义, 李红, 王凤国. 2001. 苜蓿不同环境条件不同年份的产量相关及通径分析. 见: 中国农学会, 中国草原学会. 21 世纪草业科学展望——国际草业(草地)学术大会论文集. 北京: 中国农学通报期刊社: 351-354.
- 马其东, 孟维国. 1999. 不同苜蓿地方品种根系发育能力的评价和筛选. 草业学报, (1): 42-49.
- 乔海明. 1990. 苜蓿不同年份产量相关及通径分析. 中国草地, 3: 43-44.
- 沈振荣. 1992. 水资源科学实验与研究. 北京: 中国科学技术出版社.
- 孙启荣, 桂荣. 2000. 影响苜蓿产量和品质诸因素研究进展. 中国草地, 1: 57-63.
- 吴勤, 宋杰, 牛芳英. 1997. 紫花苜蓿草地地上生物量动态规律的研究. 中国草地, 6: 21-24.
- 吴新卫, 韩清芳, 贾志宽. 2007. 不同苜蓿品种根颈和根系形态学特性比较及根系发育能力初探. 西北农业学报, 16 (2): 80-86.
- 余优森. 1984. 人工牧草气候适应性分析. 农业气象, 6 (1): 32-36.
- 扎西. 1988. Observation on the root system of four legumes. 中国草业学报, 4 (4): 56-57.
- 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 2004. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究. 植物营养与肥料学报, 10 (6): 604-607.
- 张兴昌, 卢宗凡. 1996. 坡地土壤水分动态及耗水规律研究. 水土保持研究, 3 (2): 46-56.
- Cairns J J. 1990. Recovery and Restoration of Damaged Ecosystem. Charlottesville: Virginia University Press.
- Julier B, Huyghe C, Ecalle C. 2000. Within and among cultivar genetic variation in alfalfa: Forage quality, morphology, and yield. Crop Sci, 40 (2): 365-369.
- Marquez-Ortiz J J, Johnson L D, Basigalup D H, et al. 1996. Crown morphology relationships among alfalfa plant introduction and cultivars. Crop Sci, 36: 766-770.
- Marquez-Ortiz J J, Lamb F S, Johnson L D, et al. 1999. Heritability of crown trait in alfalfa. Crop Sci, 39: 38-43.
- Parao F T, Paningbatan E. 1997. Drought resistance of rice varieties in relation to their root growth. Philippine J Crop Sci, 1: 50-55.
- Russell R S. 1997. Plant Root Systems, Their Function and Interaction with the Soil. London: Mc Graw Hill.

第五章 断根对紫花苜蓿生理生态效应的影响

强大的根系是苜蓿生长发育所需水分、养分的供应者和地上生长的调节者。根系是苜蓿生命活动中具有重要生理作用的器官，在生长发育过程中，不仅起支持、固定、吸收作用，同时，还有合成及储藏作用，庞大的根系也可把从土壤中吸收的部分矿物质转化为有机物质，运至地上部，从而保证地上部正常的生长。苜蓿作为深根性牧草，抗旱、耐寒能力较强，可充分利用深层土壤水分，多年种植后易形成土壤干层。在阻断根系深层吸水完全依赖天然降雨的情况下，苜蓿生长将出现何种响应，目前国内外文献未见报道。由于苜蓿根系入土很深，取样和观测困难，导致根系研究主要停留在室内模拟试验或短期的研究上。本研究以断根处理作为水分胁迫的手段，研究苜蓿地上部分的反馈特征，从生理生态角度探讨多年生深根性植物的生活史适应机制，分析苜蓿断根对土壤水分胁迫供应的适应状况，这些问题的探索对深入了解苜蓿的抗旱生长机制有重要的科学意义，同时也为浅根型苜蓿种质资源的创建及栽培提供一定的理论依据。

第一节 断根对紫花苜蓿生长发育的影响

植物生长发育状况是对环境条件响应的最直接的体现，也是各种农艺措施效果的最终体现者。断根对植物的影响，因断根方法、植物种类、测定时期的不同而不同（王法宏等，2001；柳斌辉等，2008）。多数研究发现，断根对冬小麦的生长发育表现出先抑制和后促进的双重调节效应，是实现高产、稳产的重要措施（余松烈等，1965，1985；刘殿英，1983），断根后至拔节，单位面积地上部干物质平均增长量较少，拔节后特别是挑旗至成熟，断根处理的单位面积与单株地上部干物质累积量明显提高（李絮花，2002）；对冬小麦深耕断根可加快分蘖穗的穗分化速度，减小主茎穗与分蘖穗之间的穗分化差异，从而使小麦群体穗分化进程达到整齐一致（王瑞英等，2002）。而根系切除或损伤过晚（如小麦拔节以后）则造成减产；切除或损伤种子根，一般都要减产，而且切除或损伤越早，减产越严重（陈培元等，1980）。也有研究表明，断根使冬小麦株高、根系干物质质量、地上部干物质质量均降低（王振宇等，2007），断初生根对根系干物质质量的影响都大于断部分次生根（柳斌辉等，2008）；断根能否增产和植物品种有关，晋麦 47 在断根后产量均下降，而大根系小麦品种石 4185 断部分次生根后产量升高（柳斌辉等，2008），不同断根方法均加速了黍子后期的衰老进程（张永清和苗果园，2006）；经过断根处理的银杏树高生长高峰值有滞后现象（曹磊等，2005）。为此，本章对苜蓿断根后的生长发育情况进行了研究，以期明确由于断根而引起的吸水胁迫对苜蓿生长的影响以及随断根后时间的延长苜蓿的生长动态。

一、材料与方法

(一) 试验地概况

试验地设在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站。该地位于秦岭北麓、渭河平原西部的头道塬上, 北纬 $34^{\circ}21'$, 东经 $108^{\circ}10'$, 海拔 454.8m, 年均日照时数 2150h, 年平均气温 $12\sim 14^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 $39\sim 40^{\circ}\text{C}$, 极端最低气温 $-21\sim -15^{\circ}\text{C}$, 年平均降水量 621.6mm, 春季降水偏少、干旱, 雨量主要集中在 7 月、8 月、9 月 3 个月, 属暖温带半湿润季风气候区。土壤为黑垆土, 土层深厚、通气良好, 有机质 1.59%, 全氮 0.055%, 田间持水量为 21.12%, 地下水位深约 80m。

(二) 试验设计

试验用紫花苜蓿品种为阿尔冈金, 直根系品种, 于 2004 年 4 月种植。2007 年苜蓿返青后, 在试验地选择苜蓿生长均匀、一致处进行断根。断根方法为: 开挖斜坡坑道, 由浅入深, 道宽 1.5m, 坑最深处为 5.2m, 在坑道的两侧进行水平断根 (视为两次重复), 断根深度分别为 40cm、80cm、120cm、160cm、200cm、240cm、280cm、320cm、360cm、400cm、450cm、500cm, 各断根处理面积 $100\text{cm}\times 100\text{cm}$ 。断根结束后, 用多层塑料布覆盖坑内及两侧以防止土壤水分蒸发, 在坑的顶部用塑材进行弓形覆盖以防止降雨进入坑内。苜蓿整个生育期间不施肥、不灌溉, 对照为邻近未断根的苜蓿田。0~500cm 土壤含水量见表 5-1。

表 5-1 苜蓿地 0~500cm 土壤中含水量 (单位: %)

土层深度	0~40cm	40~80cm	80~120cm	120~160cm	160~200cm	200~240cm
含水量	16.54	17.51	18.46	18.10	12.83	12.73
土层深度	240~280cm	280~320cm	320~360cm	360~400cm	400~450cm	450~500cm
含水量	12.20	12.28	14.11	13.41	14.24	15.31

(三) 测定项目与方法

1. 株高

分别在苜蓿断根、刈割再生及返青后的 15 天 (株高约 15cm), 随机在各小区选择 10 株健康苗, 每隔 7 天定株测定株高。

2. 茎粗、节间数、叶片面积和叶片数

在初花期刈割后的苜蓿枝条中随机选取 20 枝, 测定茎粗、节间数和叶片数, 随机选 100 片叶, 测定叶面积。

3. 生育期

观察记载各个生育期。返青期、分枝期、现蕾期、初花期的记载标准参考《苜蓿生

产管理指南》(杨青川, 2003), 鉴别的标准是: 70%的植株达到某一生育阶段为到达某一生育期, 10%~20%植株开花为初花期。

4. 产量、鲜干比和茎叶比

在各茬初花期齐地刈割, 各个处理小区分别称鲜重, 根据含水量计算干重。分别得到各茬鲜重、干重和年总产量。用四分法取样, 之后将其茎(包括繁殖器官)、叶分别收集, 称鲜重后于 105℃ 下杀青 15min, 80℃ 烘干至恒重, 称量各部分干重。根据茎、叶部分的生物量, 计算鲜干比 (F/D) 和茎叶比 (LSR)。其计算公式为

$$\text{鲜干比} = \text{鲜重(g)} / \text{干重(g)}$$

$$\text{茎叶比} = \text{烘干样中茎干重(g)} / \text{烘干样中叶干重(g)}$$

(四) 数据处理

试验数据用 Excel 进行初步处理, 用 SPSS 12.0 软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿株高的影响

1. 断根后第一年株高

断根后第一年的第一茬(图 5-1)和不断根相比, 大于 320cm 的断根处理苜蓿株高略有增加, 其余处理均降低, 但只有 80cm、160cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 360cm 处断根的苜蓿植株最高 (56.0cm), 显著 ($P < 0.05$) 高于 280cm 以内断根的苜蓿, 80cm、160cm 处断根的处理株高最低 (41.6cm、44.3cm),

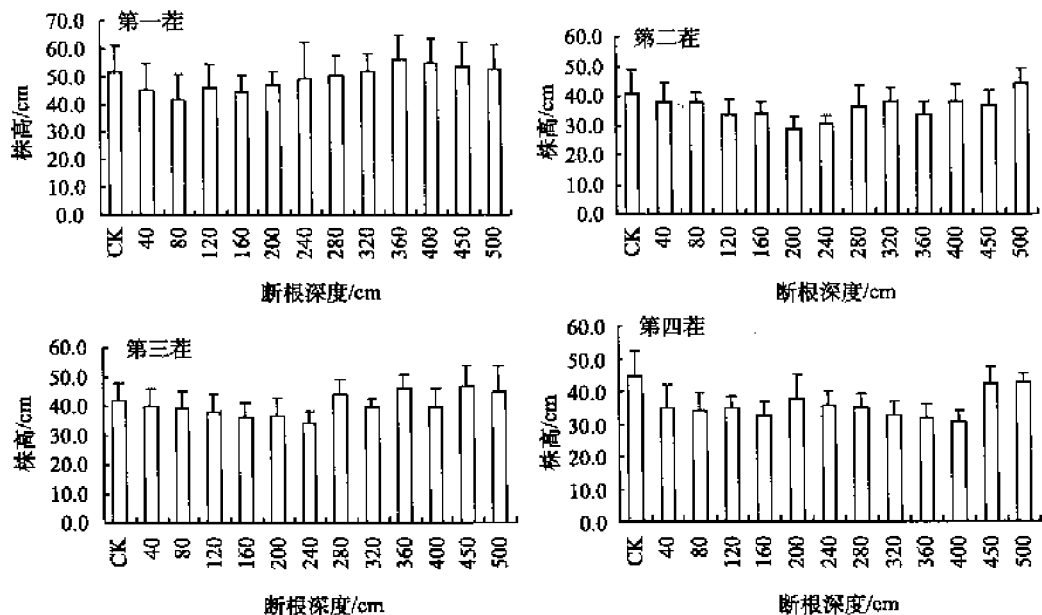


图 5-1 断根后第一年株高

显著 ($P<0.05$) 低于断根深度大于 280cm 的处理, 此外, 各处理间无显著差异。

断根后第一年的第二茬 (图 5-1), 除 500cm 处断根后苜蓿株高略有升高外, 其余各处理均降低, 而只有 200cm 和 240cm 处断根的处理显著降低 ($P<0.05$); 同时, 500cm 处断根的苜蓿株高最高 (44.2cm), 显著 ($P<0.05$) 高于其余各处理, 200cm 和 240cm 处断根的处理株高最低 (28.6cm 和 30.7cm), 显著 ($P<0.05$) 低于 80cm 以内及 280cm 以外的断根处理 (除 360cm)。

断根后第一年的第三茬 (图 5-1), 280cm、360cm、450cm、500cm 处断根苜蓿株高升高, 但差异均未达显著水平, 其余各处理均显著降低 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 280 cm) 苜蓿植株较高 (39~47cm), 450cm 处断根的苜蓿最高, 为 46.6cm, 显著 ($P<0.05$) 高于除 280cm、360cm 和 500cm 处断根外的其他各处理, 中间层断根的 (120~240cm) 植株较矮 (34~38cm)。

断根后第一年的第四茬 (图 5-1), 各处理苜蓿株高均降低, 且 400cm 以内的各处理均显著降低 ($P<0.05$); 在处理中, 450cm 和 500cm 处断根的苜蓿植株最高 (42.3cm 和 42.6cm), 极显著 ($P<0.01$) 高于其余各处理, 400cm 处断根的苜蓿最低 (30.7cm), 显著低于 240cm 处和大于 400cm 断根的各处理, 此外, 各处理间差异不显著。

2. 断根后第二年株高

断根后第二年的第一茬 (图 5-2), 和未断根相比, 320cm 处断根的苜蓿株高显著升高 ($P<0.05$), 其余各处理差异均未达显著水平; 大于 280cm 断根的苜蓿株高较高 (38~49cm), 除 320cm 处断根的处理外, 这些处理间无显著差异, 240cm 以内的处理株高较低 (30~35cm), 各处理间也均无显著差异, 而 120cm 和 240cm 处断根的苜蓿

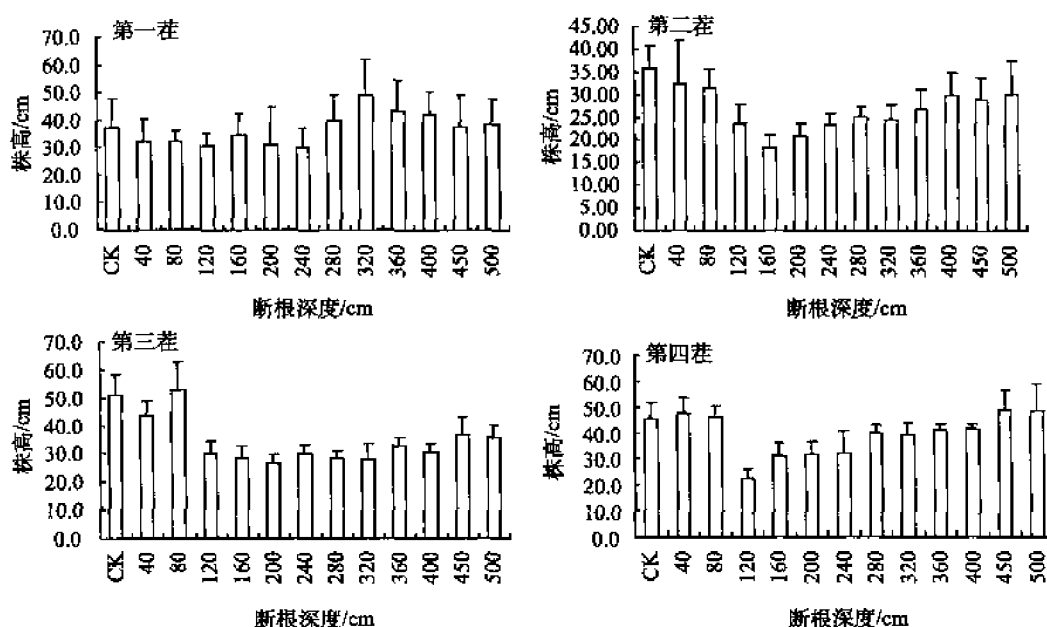


图 5-2 断根后第二年株高

植株显著 ($P < 0.05$) 低于断根深度大于 280cm 的苜蓿。

断根后第二年的第二茬 (图 5-2), 除 500cm 处断根的苜蓿株高略有升高外, 其余各处理均降低, 且中间层 (120~360cm) 处理显著降低 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) 苜蓿植株较高 (29~32cm), 且各处理间无显著差异, 中间层处理 (120~360cm) 较低, 且 160cm、200cm 和 240cm 处断根的苜蓿植株显著 ($P < 0.05$) 低于浅层和深层各处理。

断根后第二年的第三茬 (图 5-2), 80cm 处断根的苜蓿株高升高, 但差异未达显著水平, 其余各处理均显著降低 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 450 cm) 苜蓿植株较高 (36~53cm), 显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 (120~400cm) 断根的绝大多数处理, 中间层断根的各处理植株较低 (27~33cm), 200cm 和 240cm 处断根的处理最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于 360cm 处的断根的处理和浅层、深层各处理, 此外, 中间层各处理间无显著差异。

断根后第二年的第四茬 (图 5-2), 80cm 以内和大于 450cm 断根的苜蓿株高增加, 且除 80cm 处断根的处理外差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 其余处理均降低, 且 120~240cm 断根的处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 450 cm) 苜蓿植株最高 (46~49cm), 显著 ($P < 0.05$) 高于其余多数处理, 280~400cm 的断根处理居中 (39~41cm), 120~240cm 的断根处理最低 (22~32cm), 显著 ($P < 0.05$) 低于其余各处理。

总之, 在断根后两年里, 从第一茬到第四茬, 断根对苜蓿株高的影响呈多数处理不显著到多数显著的趋势, 且在各年的第一茬, 处理和对照及各处理间基本无显著差异。

(二) 断根对紫花苜蓿叶面积的影响

1. 断根后第一年叶面积

断根后第一年 (表 5-2), 与没有断根的苜蓿相比, 第一茬, 450cm 处断根的苜蓿叶面积略有增加, 而差异不显著, 其余各处理均减小, 且中间层 (120~280cm) 处理均显著减小 ($P < 0.05$); 在处理中, 80cm 以内的浅层断根处理和大于 320cm 的深层断根处理苜蓿叶面积较大 (0.761~0.931cm²), 中间层 (120~280cm) 处理叶面积较小 (0.602~0.693cm²), 且多数处理叶面积显著 ($P < 0.05$) 小于浅层和深层处理。第二茬, 各处理苜蓿叶面积均减小, 且只有 40cm 和 500cm 处断根的处理差异不显著; 在处理中, 120cm 以内的浅层断根处理和大于 280cm 的深层断根处理苜蓿叶面积较大 (0.693~0.768cm²), 中间层 (160~240cm) 处理叶面积较小 (0.602~0.665cm²), 500cm 处断根的苜蓿叶面积最大, 40cm 次之, 两处理叶面积显著 ($P < 0.05$) 高于中间层各处理, 240cm 处断根的苜蓿叶面积最小, 显著 ($P < 0.05$) 小于浅层和深层各处理。在第三茬中, 450cm 处断根的苜蓿叶面积显著增大 ($P < 0.05$), 其余各处理差异均未达显著水平; 在处理中, 160cm 和 240cm 处断根的苜蓿叶面积最小 (0.570cm² 和 0.597cm²), 显著小于 400cm 和 450cm 处断根的处理, 此外, 各处理间均无显著差异。第四茬各处理苜蓿叶面积均减小, 且 400cm 以内的各处理均显著减小 ($P < 0.05$); 在

处理中, 450cm 和 500cm 处断根的苜蓿叶面积最大 (1.442cm^2 和 1.433cm^2), 与其余各处理差异显著 ($P<0.05$), 120cm 处断根的苜蓿叶面积最小 (0.963cm^2), 显著小于浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 450\text{cm}$), 此外, 各处理间差异较小。

表 5-2 断根后第一年苜蓿叶面积

断根深度/cm	第一茬 /cm ²	差异显著性	第二茬 /cm ²	差异显著性	第三茬 /cm ²	差异显著性	第四茬 /cm ²	差异显著性
CK	0.855	abAB	0.860	aA	0.607	bcBC	1.499	aA
40	0.852	abAB	0.767	abAB	0.641	abcABC	1.182	bcBC
80	0.785	bcBC	0.732	bcB	0.606	bcBC	1.214	bBC
120	0.665	cdC	0.752	bcAB	0.630	bcABC	0.963	dC
160	0.644	cdC	0.649	cdBC	0.570	cC	0.994	cdC
200	0.715	cBC	0.665	cdBC	0.624	bcABC	1.230	bB
240	0.602	dC	0.602	dC	0.597	cBC	1.196	bcBC
280	0.693	cdBC	0.721	bcBC	0.624	bcABC	1.033	cdBC
320	0.828	bAB	0.759	bAB	0.615	bcAC	1.124	bcdBC
360	0.797	bcB	0.766	bAB	0.664	abcABC	1.145	bcBC
400	0.761	bcBC	0.748	bcAB	0.678	abAB	1.125	bcdBC
450	0.931	aA	0.693	bcdC	0.713	aA	1.442	aAB
500	0.843	abAB	0.768	abAB	0.635	abcABC	1.433	aAB

注: CK 代表对照, 同列大、小写字母不同分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著。

2. 断根后第二年叶面积

在断根后的第二年 (表 5-3), 在第一茬, 400cm 和 450cm 处断根处理叶面积增大, 其余处理均减小, 而差异只有 120~200cm 处的处理达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 240\text{cm}$) 苜蓿叶面积较大 ($0.808\sim 1.105\text{cm}^2$), 400cm 处断根处理叶面积最大, 与除 450cm 处断根外的各处理差异显著 ($P<0.05$), 此外, 深层和浅层的各处理间无显著差异, 中间层 (120~200cm) 处理叶面积较小 ($0.707\sim 0.728\text{cm}^2$), 三处理间无显著差异, 而显著 ($P<0.05$) 小于深层和浅层大多数处理。第二年的第二茬, 40cm 和 450cm 处断根的苜蓿叶面积增大, 而差异不显著, 其余各处理均降低, 且 80~240cm 除 160cm 外差异均达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 (40cm) 和深层处理 ($\geq 280\text{cm}$) 苜蓿叶面积较大 ($0.765\sim 0.984\text{cm}^2$), 除 280cm 和 400cm 处断根的处理外, 各处理叶面积显著大于中间层 (120~360cm) 绝大多数处理, 中间层处理叶面积较小 (多数为 $0.462\sim 0.743\text{cm}^2$)。在第三茬, 大于 320cm 的各断根处理差异不显著, 而 280cm 以内的各断根处理均极显著降低 ($P<0.01$); 在处理中, 深层处理 ($\geq 320\text{cm}$) 苜蓿叶面积较大 ($0.954\sim 1.050\text{cm}^2$), 极显著 ($P<0.01$) 大于 280cm 以内的各断根处理, 160cm 和 280cm 处断根的处理叶面积最小, 和 80cm 处断根的处理及各深层处理差异显著 ($P<0.05$), 此外, 各处理间无显著差异。第四茬, 160cm 处断根的苜蓿叶面积显著降低 ($P<0.05$), 其余各处理均无显著变化; 在处理中, 浅层 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层 ($\geq 240\text{cm}$) 各处理苜蓿叶面积较大

(1.117~1.460cm²), 500cm 和 240cm 处断根的处理最大, 显著 ($P<0.05$) 高于 40cm、400cm 处和 120~200cm 间断根的各处理, 中间层 (120~200cm) 处理叶面积较小 (0.896~1.020cm²), 160cm 处断根的处理叶面积最小, 显著小于深层和浅层各处理, 此外, 各处理间无显著差异。

表 5-3 断根后第二年苜蓿叶面积

断根深度/cm	第一茬 /cm ²	差异显著性	第二茬 /cm ²	差异显著性	第三茬 /cm ²	差异显著性	第四茬 /cm ²	差异显著性
CK	0.978	abAB	0.932	abAB	1.020	aA	1.300	abAB
40	0.853	bcABC	0.970	abAB	0.669	bcBC	1.117	bBC
80	0.894	bABC	0.462	dC	0.774	bB	1.314	abAB
120	0.721	cC	0.732	cBC	0.662	bcBC	1.020	bcBC
160	0.707	cC	0.837	bcB	0.567	cC	0.896	cC
200	0.728	cC	0.725	cBC	0.698	bcBC	0.976	bcBC
240	0.808	bcBC	0.743	cBC	0.672	bcBC	1.400	aAB
280	0.825	bcABC	0.835	bcBC	0.632	cBC	1.342	abAB
320	0.903	bABC	0.922	abAB	1.043	aA	1.287	abAB
360	0.899	bABC	0.896	abAB	1.035	aA	1.308	abAB
400	1.105	aA	0.765	bcBC	1.002	aA	1.168	bB
450	0.999	abAB	0.984	aA	1.050	aA	1.343	abAB
500	0.820	bcBC	0.871	bAB	0.954	aA	1.460	aA

(三) 断根对紫花苜蓿茎粗的影响

1. 断根后第一年茎粗

断根后第一年的第一茬 (图 5-3), 和对照相比, 除 500cm 处断根的处理外, 其余各处理苜蓿茎均变细, 且 120cm 和 200~320cm 断根的各处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在各处理中, 80cm 以内的浅层断根处理和大于 360cm 的深层断根处理苜蓿茎较粗 (2.9~3.4mm), 中间层 (120~320cm) 的处理茎较细 (大多为 2.4~2.8mm), 450cm 和 500cm 处断根的苜蓿茎显著 ($P<0.05$) 较除 160cm 处断根的处理外的中间层各处理粗, 280cm 处断根的苜蓿茎最细, 与除 240cm 处断根的处理外的各处理差异显著 ($P<0.05$), 此外, 各处理间差异不显著。第二茬, 除 40cm、360cm 和 450cm 外的各处理苜蓿茎变细, 但只有 160cm 和 240cm 处断根的处理苜蓿茎显著 ($P<0.05$) 变细; 在处理中, 450cm 处断根的苜蓿茎最粗, 显著 ($P<0.05$) 粗于 240cm、320cm、500cm 和 80~160cm 的各处理, 160cm 和 240cm 处断根的苜蓿茎最细, 和多数处理差异显著 ($P<0.05$)。第一年的第三茬, 80cm 和 320cm 处断根的苜蓿茎显著变粗 ($P<0.05$), 其余处理差异均未达显著水平; 在处理中, 断根处理深度不同, 茎粗存在一定差异, 但茎粗变化和断根深度没有明显的关系。在第四茬, 各断根处理使苜蓿茎粗无显著差异; 在处理中, 浅层 (≤ 160 cm) 和深层 (≥ 400 cm) 的处理茎较粗 (多数为 2.1~2.3mm), 中间层 (200~360cm) 茎较细, 为 2.0mm, 但只有 160cm 处断根的苜蓿茎

显著 ($P < 0.05$) 细于 320cm 处断根的处理。此外, 各处理间均无显著差异。

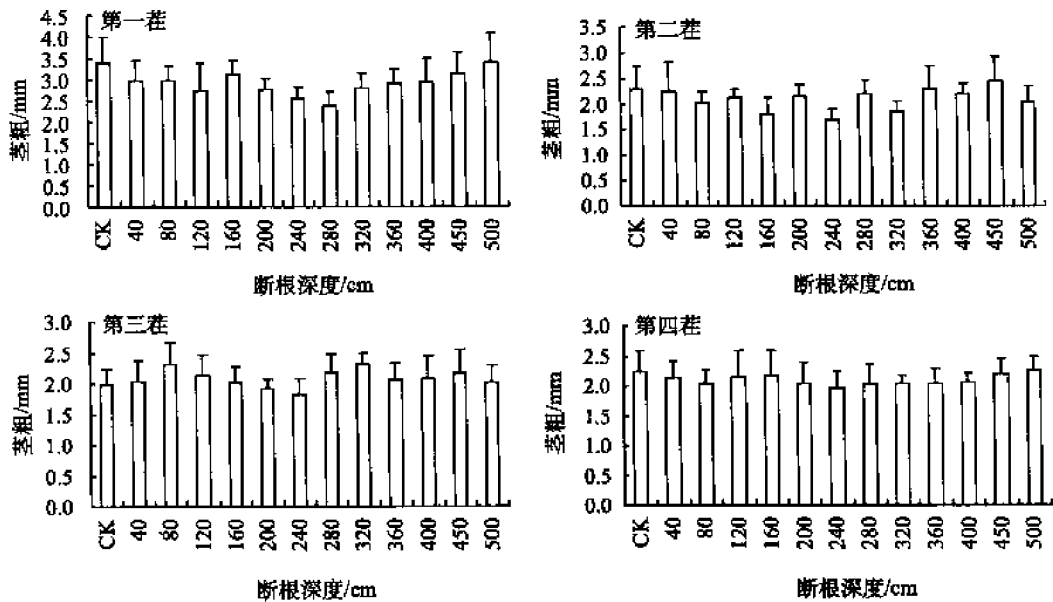


图 5-3 断根后第一年茎粗

2. 断根后第二年茎粗

断根后第二年的第一茬 (图 5-4), 和未断根相比, 各处理苜蓿茎显著变细 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 360 cm) 苜蓿茎较粗 (2.7~3.0mm), 500cm 处断根处理后的苜蓿茎最粗, 显著 ($P < 0.05$) 粗于除 120cm 外的中间层各处理, 中间层 (120~320cm) 的各处理茎较细 (2.4~2.6mm), 层内各处理间均无显著差异。第二茬, 和对照相比, 各断根处理苜蓿茎显著变细 ($P < 0.05$), 且除 80cm 处断根的处理外, 差异均达极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 苜蓿茎较粗 (2.4~2.5mm), 显著粗于其他各处理, 200cm 处断根处理的苜蓿茎最细, 与 120cm 以内和 240~320cm 的处理无显著差异, 大于 240cm 断根的各处理茎粗为 1.8~2.0mm, 相互无显著差异。在断根后第二年的第三茬, 80cm 处断根的苜蓿茎极显著变粗 ($P < 0.01$), 120cm 和 200cm 处断根的苜蓿茎极显著变细 ($P < 0.01$), 其余各处理差异均未达显著水平; 在处理中, 浅层断根处理 (≤ 80 cm) 苜蓿茎最粗 (2.0~2.6mm), 显著高于其余大部分处理, 深层处理 (≥ 360 cm) 苜蓿茎粗次之 (1.6~1.9mm), 层内各处理差异不显著, 而显著 ($P < 0.05$) 较中间层 (120~320cm) 的大部分处理粗, 中间层处理苜蓿茎最细 (1.5~1.7mm), 层内各处理均无显著差异, 而多数处理苜蓿茎显著 ($P < 0.05$) 较浅层和深层处理细。在第四茬中, 大于 360cm 的断根处理苜蓿茎变粗, 且 400cm 处断根的处理显著变粗 ($P < 0.05$), 其余各处理均变细, 且除 40cm 处断根的处理外, 各处理的茎均显著变细 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层 (40cm) 和深层 (≥ 360 cm) 的各处理苜蓿茎较粗 (2.0~2.3mm), 400cm 处断根的苜蓿茎最粗, 显著 ($P < 0.05$) 粗于 320cm 以内的各处理苜蓿的茎, 中间层

(80~320cm) 处理的首蓿茎较细 (1.6~1.9mm), 120cm 和 240cm 处断根的首蓿茎最细, 显著细于 80cm 以内和 280cm 以外断根的首蓿的茎。

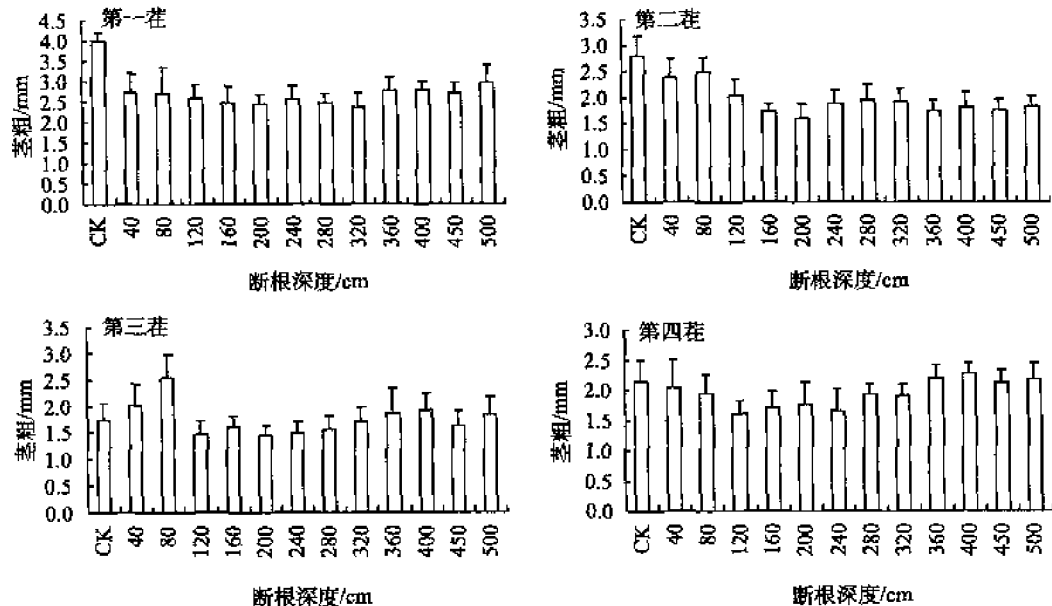


图 5-4 断根后第二年茎粗

(四) 断根对紫花苜蓿节间数的影响

1. 断根后第一年节间数

断根后第一年的第一茬 (图 5-5), 和没有断根的相比, 360cm、450cm 和 500cm 处断根的首蓿节间数增加, 且大于 450cm 处断根的首蓿节间数显著增加 ($P < 0.05$), 其余各处理均减少, 且除 240cm 和 400cm 外的各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 大于 360cm 断根的首蓿节间数较多, 显著 ($P < 0.05$) 多于其余大部分处理。第二茬, 各处理首蓿节间数均无显著变化; 在处理中, 240cm 处断根的首蓿节间数最多, 显著 ($P < 0.05$) 多于 80~160cm 以及 320cm、360cm 和 450cm 的各处理, 此外, 各处理间差异不显著。在第三茬, 40cm 处和大于 280cm 断根的首蓿节间数增加, 而只有 360cm 处断根的首蓿节间数显著增加 ($P < 0.05$), 其余处理均减少, 且 240cm 处断根的首蓿节间数显著减少 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层 (40cm) 处理和深层处理 (≥ 280 cm) 首蓿节间数较多 (11.3~12.8), 各处理间无显著差异, 而 360cm 处断根的首蓿节间数显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 (80~240cm) 各处理, 中间层处理首蓿节间数较少 (8.7~10.8), 240cm 处断根的首蓿节间数最低, 显著 ($P < 0.05$) 少于浅层和深层各处理。在断根后第一年的第四茬, 各处理首蓿节间数均减少, 且大于 80cm 的各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 40cm 和 120cm 处断根的首蓿节间数较多, 显著 ($P < 0.05$) 多于 160cm、240cm、360cm 和 400cm 处断根的首蓿节间数, 240cm 断根的首蓿节间数最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于大多数其余处理。

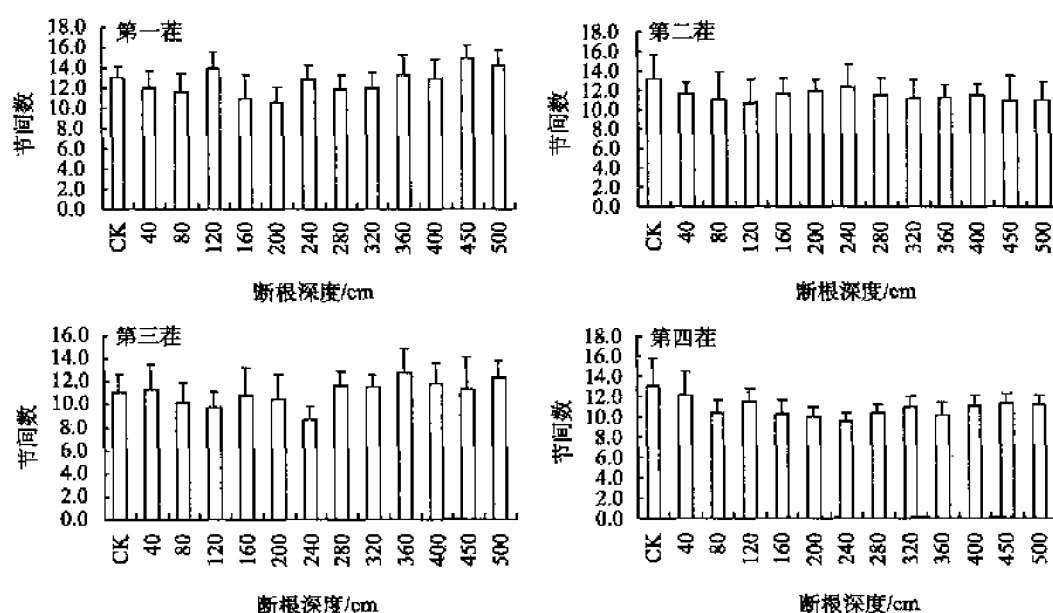


图 5-5 断根后第一年节间数

2. 断根后第二年节间数

断根后第二年的第一茬 (图 5-6), 和对照相比, 40cm 和大于 280cm 断根处理的各苜蓿节间数增加, 而只有 360cm 处断根的节间数达极显著水平 ($P < 0.01$); 在各断根处理中, 浅层处理 (40cm) 和深层处理 (≥ 240 cm) 苜蓿节间数较多 (10.8~13.3), 360cm 处断根的苜蓿节间数最多, 和各处理存在极显著 ($P < 0.01$) 差异, 其余深层和浅层的各处理间无显著差异, 中间层 (80~200cm) 的处理节间数较少 (9.9~10.8), 4 个处理间无显著差异, 而显著 ($P < 0.05$) 少于深层和浅层大多数处理节间数。在第二茬, 80cm 以内断根的苜蓿节间数增加, 而差异不显著, 其余各处理均减少, 且除 400cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) 苜蓿节间数较多 (9.3~13.6), 和绝大多数中间层 (120~360cm) 处理差异显著 ($P < 0.05$), 中间层处理节间数较少 (多数为 7.0~8.7)。在断根后第二年的第三茬 (图 5-6), 与对照相比, 各处理苜蓿节间数均减少, 且大于 120cm 的各断根处理差异均达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 80cm 以内断根的苜蓿节间数最多 (12.1~12.4), 极显著 ($P < 0.01$) 多于其他处理, 120cm 和 500cm 处断根的苜蓿次之 (9.7 和 9.8), 这些处理显著 ($P < 0.05$) 多于 200cm 和 280cm 处断根的苜蓿节间数, 此外, 各处理间无显著差异。在断根后第二年的第四茬 (图 5-6), 和对照相比, 各处理苜蓿节间数均无显著变化; 在处理中, 浅层 (≤ 120 cm) 和深层 (≥ 320 cm) 的各处理苜蓿节间数较多 (10.5~11.9), 80cm、320cm 和 400cm 处断根的苜蓿节间数最多, 显著 ($P < 0.05$) 多于中间层 (120~280cm) 处理, 中间层 (120~280cm) 处理苜蓿节间数较少 (10.0~10.5), 240cm 和 280cm 处断根的苜蓿节间最少, 显著少于 320cm、

400cm 处断根和 80cm 以内断根的苜蓿节间数, 此外, 各处理间无显著差异。

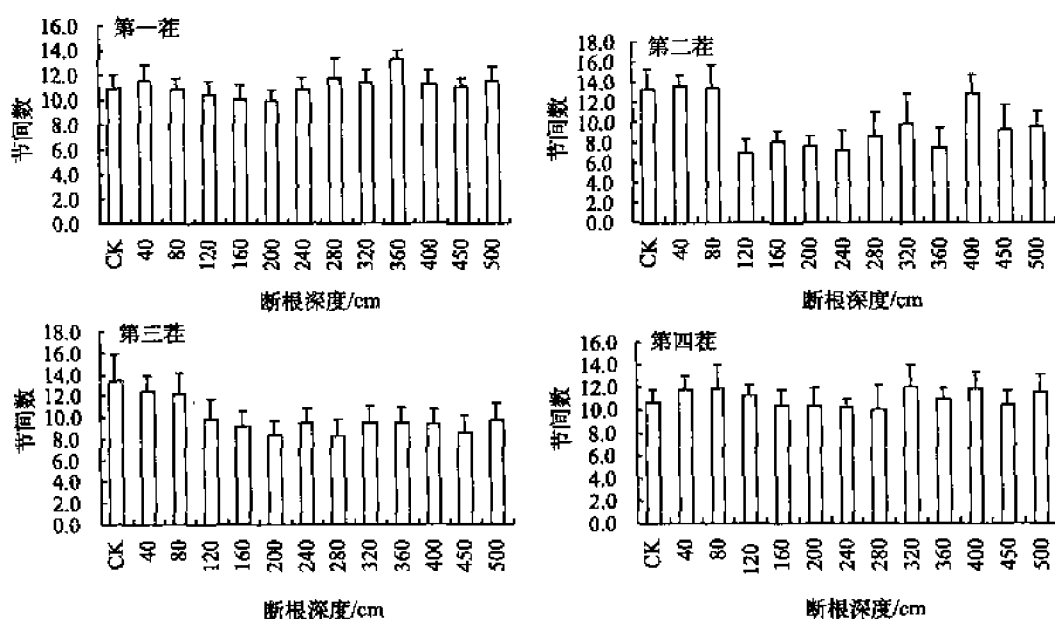


图 5-6 断根后第二年节间数

(五) 断根对紫花苜蓿茎叶比的影响

1. 断根后第一年茎叶比

断根后第一年的第一茬 (图 5-7), 和未断根相比, 120cm 处断根的苜蓿茎叶比显著增加 ($P < 0.05$), 其余处理无显著变化; 在处理中, 120cm 处断根的苜蓿茎叶比最大 (1.91), 显著 ($P < 0.05$) 大于 160~240cm 和大于 400cm 断根的各处理, 450cm 处断根的苜蓿茎叶比最小 (1.03), 显著 ($P < 0.05$) 小于 120cm、280cm 和 360cm 处断根的处理, 此外, 各处理间无显著差异。第二茬, 各处理苜蓿茎叶比均无显著变化; 在处理中, 280cm 处断根的苜蓿茎叶比最大, 显著 ($P < 0.05$) 大于 400cm 和 500cm 处断根的处理, 其余各处理间均无显著差异。第三茬, 120cm 处断根的处理苜蓿茎叶比显著增加 ($P < 0.05$), 160cm、320cm 和 400cm 处断根的处理苜蓿茎叶比显著降低 ($P < 0.05$); 在处理中, 120cm 处断根的苜蓿茎叶比最大, 显著 ($P < 0.05$) 大于除 200cm 外的各处理, 320cm 处断根的苜蓿茎叶比最小, 显著 ($P < 0.05$) 小于除 160cm 和 400cm 外的各处理, 此外, 各处理间均无显著差异。在断根后第一年的第四茬, 160cm 处断根的苜蓿茎叶比增加, 其余各处理均降低, 但差异均未达显著水平; 在处理中, 160cm 处断根的苜蓿茎叶比最大 (1.29), 与 80cm、280cm、400cm 处断根的苜蓿茎叶比差异显著 ($P < 0.05$), 此外, 各处理间差异不显著。

2. 断根后第二年茎叶比

断根后第二年的第一茬, 和对照相比, 各处理苜蓿茎叶比均增加 (图 5-8), 且

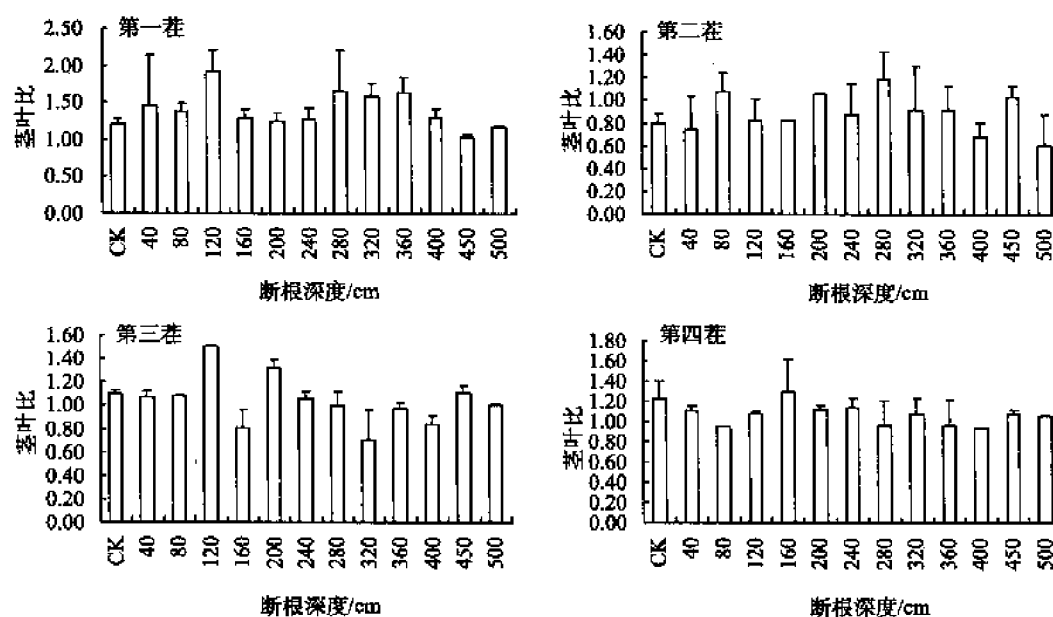


图 5-7 断根后第一年茎叶比

80~360cm 的大部分处理差异达显著水平 ($P < 0.05$)；在处理中，120cm、200cm 处断根的苜蓿茎叶比最大，与 40cm、320cm、400cm 处断根的处理差异显著 ($P < 0.05$)，其余各处理间无显著差异。在第二茬，各处理和对照及各处理间苜蓿茎叶比均无显著差异。第三茬，400cm 处断根的处理苜蓿茎叶比显著降低 ($P < 0.05$)，其余处理均无显著变化；在处理中，深层处理 (≥ 360 cm) 苜蓿茎叶比较小 (0.80~0.97)，显著 ($P < 0.05$) 小于 320cm 以内断根的大部分处理，320cm 以内断根的苜蓿茎叶比较大 (大多

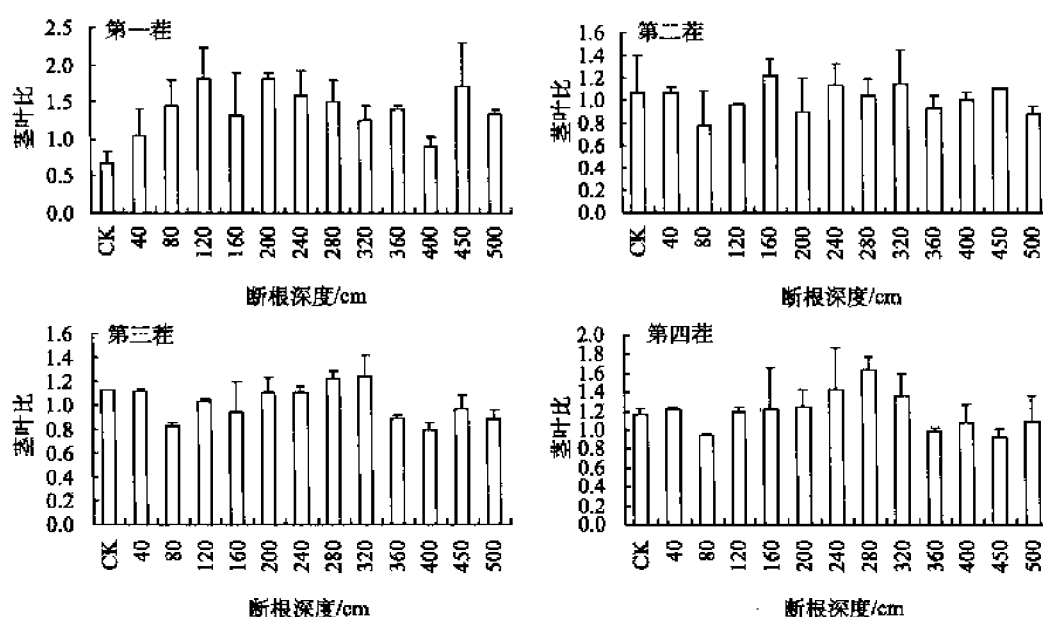


图 5-8 断根后第二年茎叶比

数为 1.04~1.24), 280cm 和 320cm 处断根的首蓿茎叶比最大, 显著 ($P<0.05$) 大于 80cm、160cm 和各深层处理。第四茬, 各处理苜蓿茎叶比均无显著变化; 在处理中, 深层 (≥ 360 cm) 处理苜蓿茎叶比较小 (0.92~1.09), 450cm 处断根的首蓿茎叶比最小, 显著 ($P<0.05$) 小于 240cm、280cm 处断根的处理, 320cm 以内的处理茎叶比较大 (绝大多数为 1.20~1.64), 240cm 和 280cm 处断根的首蓿茎叶比最大, 显著 ($P<0.05$) 大于 80cm 和各深层处理, 此外, 各处理间无显著差异。

(六) 断根对紫花苜蓿叶片数的影响

1. 断根后第一年叶片数

在断根后第一年的第一茬 (图 5-9), 和对照相比, 200cm 处断根的首蓿叶片显著减少 ($P<0.05$), 其余各处理均增加, 而只有 400cm 和 450cm 处断根的首蓿叶片显著增加 ($P<0.05$); 在处理中, 大于 400cm 的深层断根处理苜蓿叶片较多 (204~232 片·枝⁻¹), 400cm 和 450cm 处断根的首蓿叶片显著 ($P<0.05$) 多于其余各处理, 360cm 以内的断根处理叶片较少 (102~185 片·枝⁻¹), 200cm 处断根的首蓿叶片最少, 为 102 片·枝⁻¹, 极显著 ($P<0.01$) 低于各处理, 此外, 各处理间均无显著差异。第二茬, 120cm 处断根的首蓿叶片显著减少 ($P<0.05$), 而 400cm 处断根的首蓿叶片显著增加 ($P<0.05$), 其余处理无显著差异; 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) 苜蓿叶片数较多 (88~103 片·枝⁻¹), 400cm 处断根的首蓿叶片最多, 极显著多于 ($P<0.01$) 较中间层 (120~360cm) 处理, 中间层处理叶片较少 (73~81 片·枝⁻¹), 120cm 处断根的首蓿叶片最少, 为 73 片·枝⁻¹, 极显著 ($P<0.01$) 低于浅层和深层处理。在第三茬, 大于 400cm 断根的首蓿叶片增加, 其余处理均减少, 且中间层 (120~360cm) 处理除 320cm 外均显著减少; 在处理中, 深层处理 (≥ 400 cm)

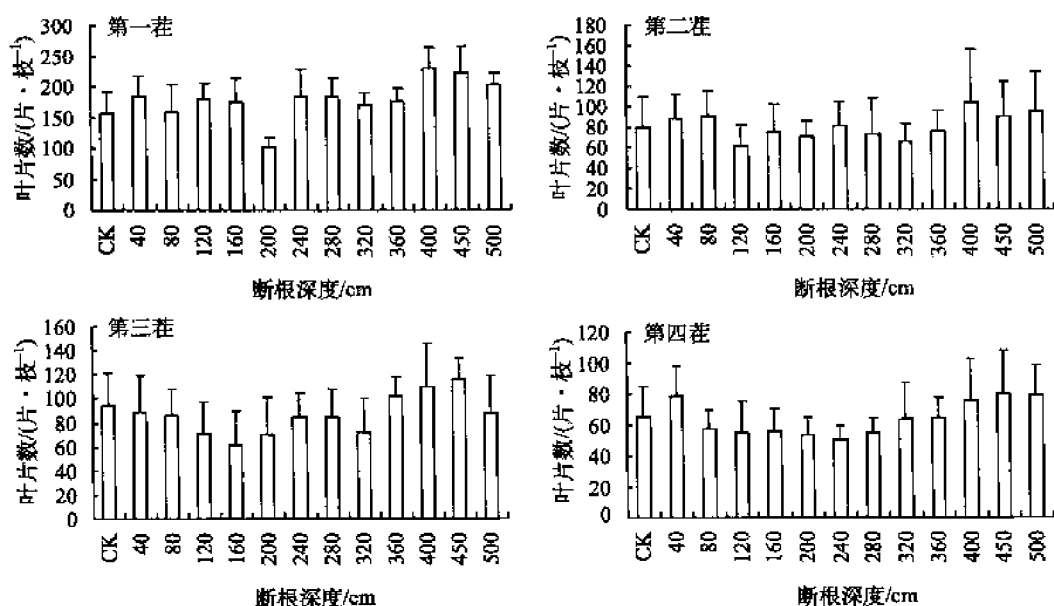


图 5-9 断根后第一年叶片数

叶片最多 (103~116 片·枝⁻¹), 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 次之 (86~89 片·枝⁻¹), 中间层 (120~360cm) 最少 (62~87 片·枝⁻¹), 深层处理叶片显著 ($P<0.05$) 多于中间层绝大多数处理多。第四茬, 浅层处理 ($\leq 40\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 苜蓿叶片均增加, 中间层 (80~360cm) 处理苜蓿叶片基本都减少, 而差异均未达显著水平; 在处理中, 浅层处理和深层处理叶片较多 (75~80 片·枝⁻¹), 中间层 (120~360cm) 较少 (50~65 片·枝⁻¹), 浅层和深层处理苜蓿叶片显著 ($P<0.05$) 较中间层处理多。

2. 断根后第二年叶片数

断根后, 在第二年的第一茬 (图 5-10), 与没有断根的苜蓿相比, 280~400cm 断根的苜蓿叶片增加, 且 360cm 和 400cm 处断根的苜蓿叶片显著增加 ($P<0.05$), 其余处理均减少, 且 200cm 和 240cm 处断根的苜蓿叶片显著减少 ($P<0.05$); 在处理中, 360cm 和 400cm 处断根的苜蓿叶片最多, 和除 320cm 处断根处理外的其余各处理差异均达显著水平 ($P<0.05$), 200cm 和 240cm 处断根的苜蓿叶片较少, 和绝大多数处理差异均达显著水平 ($P<0.05$), 浅层 ($\leq 160\text{cm}$) 和深层 ($\geq 450\text{cm}$) 各处理均无显著差异。在第二茬, 40cm 处断根的苜蓿叶片数未变, 其余各处理叶片均减少, 且除 80cm 外, 各断根处理叶片差异均达显著 ($P<0.05$) 和极显著水平 ($P<0.01$); 在各处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 苜蓿叶片最多 (130~155 片·枝⁻¹), 和其余各处理差异极显著 ($P<0.01$), 深层处理 ($\geq 450\text{cm}$) 苜蓿叶片较多 (61~77 片·枝⁻¹), 显著 ($P<0.05$) 多于中间层 (120~400cm) 的多数处理, 中间层叶片较少 (31~45 片·枝⁻¹), 且层内各处理间叶片数无显著差异。在第三茬, 80cm 以内断根的苜蓿叶片显著增加 ($P<0.05$), 其余各处理均减少, 而只有 450cm 处断根的苜蓿叶片显著减少 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 苜蓿叶片较多 (158~229 片·枝⁻¹), 显著

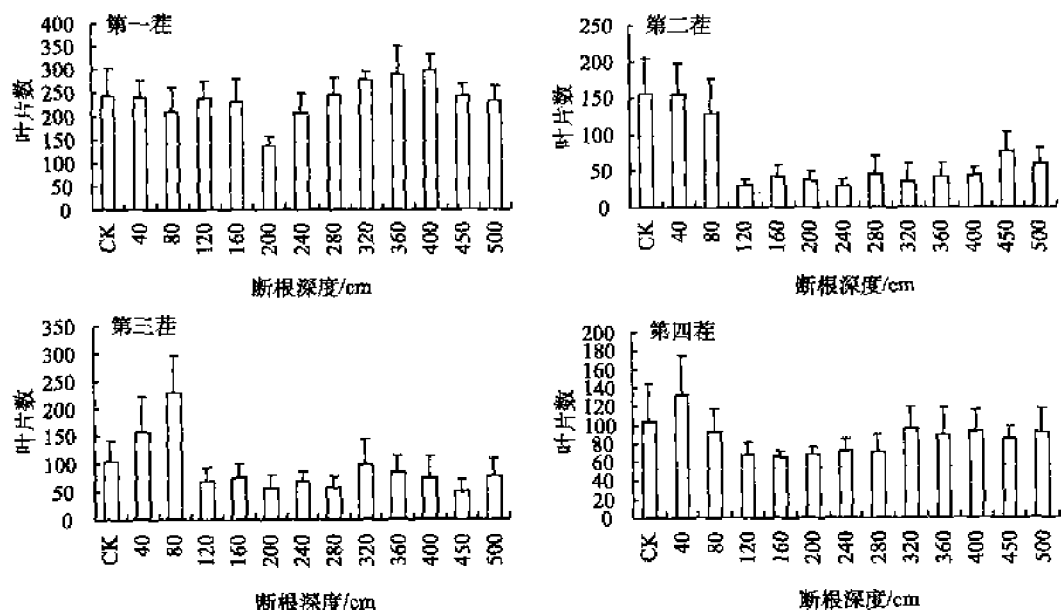


图 5-10 断根后第二年叶片数

($P < 0.05$) 高于 120cm 以外的各处理, 但大于 120cm 的各处理间叶片数均无显著差异。第四茬, 40cm 处断根的苜蓿叶片增加, 但差异不显著, 其余各处理均显著减少 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 320 cm) 苜蓿叶片较多 (85~133 片·枝⁻¹), 40cm 处断根的苜蓿叶片最多, 和其余各处理差异显著 ($P < 0.05$), 中间层 (120~280cm) 处理苜蓿叶片较少 (68~78 片·枝⁻¹), 160cm 处断根的苜蓿叶片最少, 与 40cm、320cm 处断根的处理差异显著 ($P < 0.05$), 此外, 各处理间均无显著差异。

(七) 断根对紫花苜蓿鲜干比的影响

在断根后第一、第二年, 与对照相比, 第二年第一茬变化较大, 同时, 各处理间差异也基本无显著差异 (表 5-4、表 5-5)。

表 5-4 断根后第一年苜蓿鲜干比

断根深度/cm	第一茬	差异显著性	第二茬	差异显著性	第三茬	差异显著性	第四茬	差异显著性
CK	3.6	a	3.2	abAB	3.7	ab	4.8	
40	3.3	ab	3.1	bAB	3.9	a	4.3	
80	2.9	b	3.5	aAB	3.7	a	4.8	
120	3.1	ab	3.0	bB	3.3	ab	4.2	
160	3.3	ab	3.4	aAB	3.4	ab	4.9	
200	3.4	ab	3.1	bAB	3.0	b	5.0	
240	3.0	b	3.4	abAB	3.4	ab	5.6	
280	3.4	ab	3.4	aAB	3.3	ab	5.4	
320	3.3	ab	3.3	abAB	3.4	ab	4.2	
360	3.2	ab	3.5	aA	3.8	a	5.0	
400	3.2	ab	3.3	abAB	3.5	ab	4.2	
450	3.3	ab	3.3	abAB	3.5	ab	4.1	
500	3.2	ab	3.2	abAB	3.3	ab	4.6	

注: 差异显著性一栏为空表示各处理间无显著差异, 本章下同。

表 5-5 断根后第二年苜蓿鲜干比

断根深度/cm	第一茬	差异显著性	第二茬	差异显著性	第三茬	差异显著性	第四茬	差异显著性
CK	3.8	aA	2.9		2.6	bc	4.5	ab
40	3.9	aA	3.2		2.7	bc	4.8	a
80	3.8	aA	3.0		2.7	abc	4.4	ab
120	2.9	bB	2.4		3.0	abc	3.9	bc
160	2.1	cB	2.4		2.5	c	3.8	bc
200	2.5	bcB	2.5		2.8	abc	3.4	c
240	2.5	bcB	2.4		3.0	abc	3.9	abc
280	2.3	bcB	2.3		3.1	abc	4.1	abc
320	2.7	bcB	2.8		2.9	abc	4.3	abc
360	2.3	bcB	2.7		3.2	abc	3.9	abc
400	2.5	bcB	2.3		3.0	abc	4.2	abc
450	2.6	bcB	2.6		3.3	a	3.8	bc
500	2.6	bcB	2.7		3.2	abc	4.6	ab

(八) 断根对紫花苜蓿产量的影响

1. 断根后第一年产量

断根后第一年的第一茬(图 5-11), 各处理苜蓿产量均降低, 且 450cm 以内断根的处理苜蓿产量均显著降低 ($P < 0.05$); 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 320\text{cm}$) 苜蓿产量较高 ($740 \sim 815\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 浅层和深层各处理内基本无显著差异, 中间层 ($120 \sim 280\text{cm}$) 处理苜蓿产量较低 ($540 \sim 720\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 显著 ($P < 0.05$) 低于浅层和深层绝大多数处理。第二茬各处理苜蓿产量均降低, 且除 40cm 和 450cm 处断根的处理外, 各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 40cm 处断根的苜蓿产量最高, 为 $656.9\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著 ($P < 0.05$) 高于除 450cm 外的各处理, 200cm 处断根的苜蓿产量最低, 为 $424.4\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著低于 40cm 处和大于 450cm 处断根的苜蓿产量, 其余各处理间均无显著差异。第三茬, 各处理产量均显著降低 ($P < 0.05$), 且多数处理差异达极显著水平 ($P < 0.01$); 200cm 和 240cm 处断根的苜蓿产量最低, 分别为 $205.0\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $206.7\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 显著 ($P < 0.05$) 低于 40cm 和 500cm 处断根的苜蓿产量, 此外, 各处理间产量均无显著差异。第四茬, 160cm 处断根的苜蓿产量显著降低 ($P < 0.05$), 其余处理均无显著差异; 浅层处理 ($\leq 120\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 产量较高 ($146.7 \sim 203.3\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 400cm 处断根的苜蓿产量最高 ($203.3\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 ($160 \sim 360\text{cm}$) 部分处理, 中间层处理产量较低 ($78.3 \sim 136.7\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 200cm 处断根的苜蓿产量最低 ($78.3\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 显著低于浅层和深层各处理, 此外, 各处理间差异不显著。

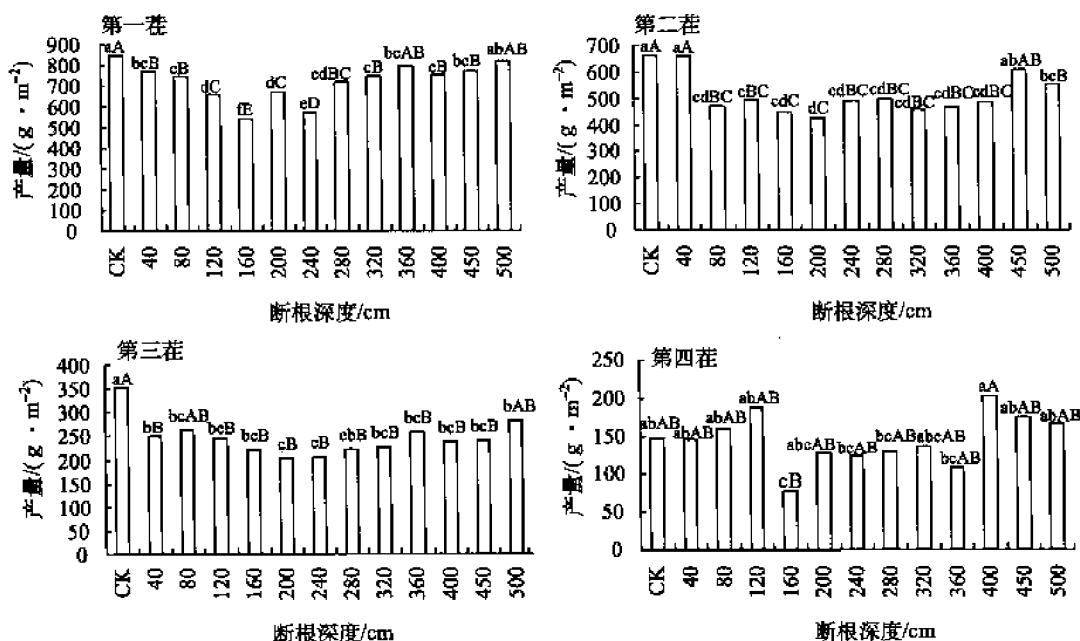


图 5-11 断根后第一年产量

2. 断根后第二年产量

断根后第二年的第一茬 (图 5-12), 各处理产量均极显著降低 ($P < 0.01$); 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 产量最高 ($405.0 \sim 420.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理, 深层 ($\geq 320\text{cm}$) 处理产量较高 ($280.0 \sim 305.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 中间层处理 ($120 \sim 280\text{cm}$) 产量最低 ($195.0 \sim 235.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 深层断根处理产量显著 ($P < 0.05$) 高于部分中间层处理, 但中间层和深层内各处理间无显著差异。第二茬, 各处理产量均显著降低 ($P < 0.05$); 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 产量最高 ($347.5 \sim 357.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 较高 ($167.5 \sim 175.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 中间层 ($120 \sim 360\text{cm}$) 处理产量最低 ($117.5 \sim 162.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 但中间层和深层内各断根处理间均无显著差异。第三茬, 各处理产量均降低, 且 $120 \sim 400\text{cm}$ 的各处理差异达显著水平 ($P < 0.05$); 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 产量较高 ($190.0 \sim 245.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 中间层处理 ($120 \sim 360\text{cm}$) 产量较低 ($120.0 \sim 195.0 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 200cm 处断根的苜蓿产量最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于 240cm 、浅层和深层各处理, 120cm 处断根的苜蓿产量次之, 显著 ($P < 0.05$) 低于 240cm 、浅层和大于 450cm 的各处理, 此外, 各处理间均无显著差异。第四茬, 各处理产量均降低, 且大于 120cm 的各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 绝大多数达极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 苜蓿产量较高 ($223.5 \sim 227.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 40cm 处断根的苜蓿产量极显著 ($P < 0.01$) 高于 120cm 以下断根的各处理, 中间层 ($120 \sim 320\text{cm}$) 处理产量较低 ($22.0 \sim 88.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 产量居中 ($106.0 \sim 172.5 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 中间层各处理产量显著 ($P < 0.05$) 低于浅层和深层各处理。

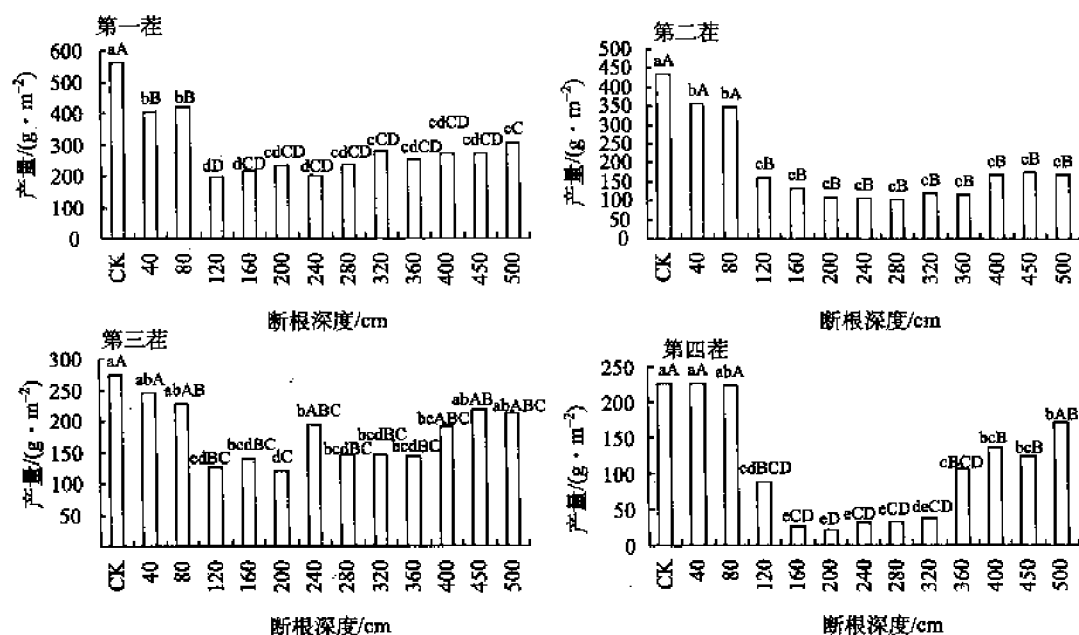


图 5-12 断根后第二年产量

从两年的产量可以看出(图 5-13, 图 5-14), 断根使苜蓿产量降低, 且浅层处理($\leq 80\text{cm}$)对产量的影响最小, 深层处理($\geq 360\text{cm}$)次之, 而中间层($120\sim 320\text{cm}$)处理对产量的影响最大。

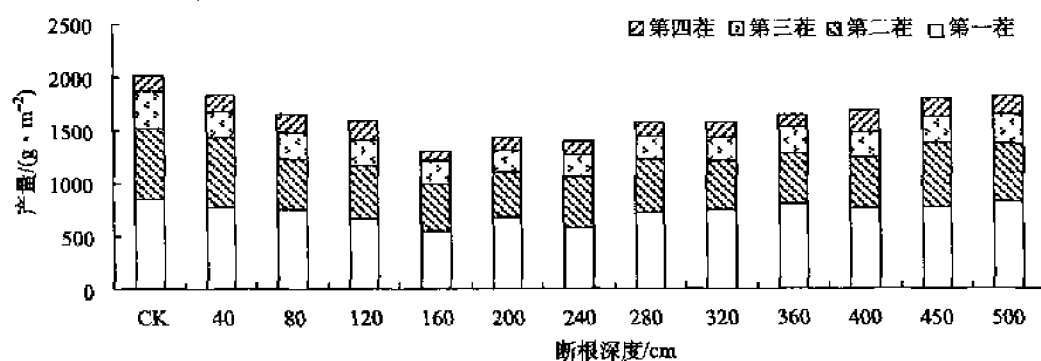


图 5-13 断根第一年产量

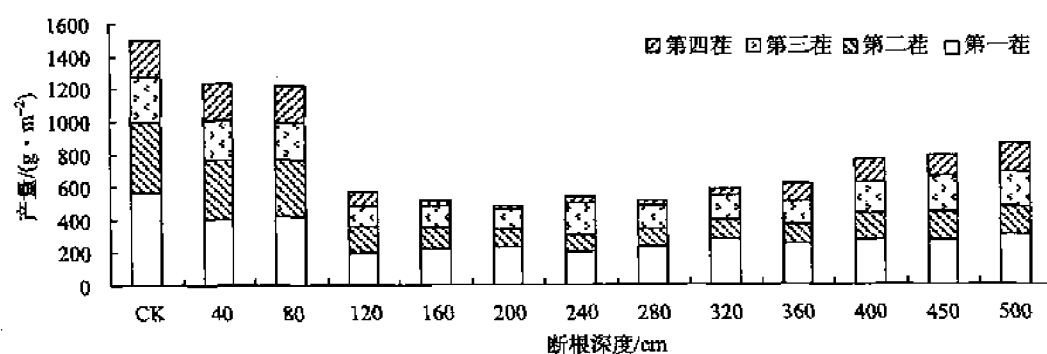


图 5-14 断根第二年产量

三、讨论与小结

断根使苜蓿产量和株高降低, 叶面积减小, 茎变细, 节间数减少, 茎叶比增加。在作物断根研究中, 得到了类似的结论。卢布(1999)研究表明断根使小麦单株和群体绿叶面积降低, 也有研究发现断根损伤了小麦根系, 直接削弱根系的吸收能力, 从而控制了茎叶的生长和分蘖的发生(余松烈等, 1965, 1985)。同时, 断根对单位面积小麦地上部干物质积累的影响是先抑制后促进(刘殿英, 1983; 马元客, 1995)。本试验研究表明, 浅层断根经过了生长受抑到和对照相近的过程, 尤其在断根后第二年, 浅层处理($\leq 80\text{cm}$)产量最高、深层处理($\geq 360\text{cm}$)次之、中间层($120\sim 320\text{cm}$)处理最低的趋势更为突出。这可能也是断根对苜蓿生长先抑制后促进的一种表现, 因为浅层断根后苜蓿根系和小麦等作物根系有相似的土壤分布, 但断根并没有使苜蓿产量增加, 这可能与断根后小麦和苜蓿的田间管理措施有关, 如小麦有灌溉保证其产量增加的水分需求, 发挥新生根的功能, 而本研究中的苜蓿在返青期断根后, 一直处于水分供应不足的状态, 尤其是经过了高温干旱的夏季, 次生根基本无生存的适宜条件。

断根也会使苜蓿叶片数减少,产量降低,节间数和茎叶比分别呈减少、增加的趋势,鲜干比无显著变化。此影响随断根深度、生育期和断根后恢复生长的时间而异。浅层处理($\leq 80\text{cm}$)和深层处理($\geq 360\text{cm}$)紫花苜蓿植株较高,叶面积较大,茎较粗,节间数较多,茎叶比较小,中间层($120\sim 320\text{cm}$)处理则相反,此规律在断根后第二年尤为明显;断根后第二年第二茬及以后各茬,浅层处理($\leq 80\text{cm}$)叶片数和对照无显著差异,而大于 120cm 的各处理叶片数显著减少;浅层处理($\leq 80\text{cm}$)产量最高,深层处理($\geq 360\text{cm}$)次之,中间层($120\sim 320\text{cm}$)处理最低。

第二节 断根对紫花苜蓿光合作用的影响

光合作用产物是植物有机物积累的源泉,而根系可通过吸收、合成等作用影响叶片的光合作用强度,调节气孔开度和叶片的受光姿态等,这些影响集中表现在调节植物的光合效能上,从而影响到作物的产量(黄发松,1998)。断根对植物光合作用的影响因植物种类、测定时期等的不同而异(杨洪强等,2002;郭翠花等,2007);同时,在吸水胁迫下,由于气孔关闭阻碍了 CO_2 的交换和对 CO_2 同化的非气孔性机制,引起苜蓿净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、光能转化积累率降低(韩瑞宏等,2007;Evans and Peadar,1984)和叶绿体超微结构破坏(韩瑞宏等,2007)。

为此,本研究在不同深层水平切断根系造成吸水胁迫后,对 P_n 、 T_r 、 G_s 、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用效率(WUE)等指标进行测定,可为明确不同深度根系及断根引起的吸水胁迫对苜蓿光合作用的影响提供一定的理论依据。

一、材料与方法

(一) 测定内容与方法

试验材料与处理同本章第一节,分别在断根后第一年、第二年第一茬苜蓿的现蕾期,用Li-6400便携式光合仪田间活体测定苜蓿叶片的光合生理生态指标: P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 等。叶片瞬时WUE由公式计算, $\text{WUE}=P_n/T_r$ 。

(二) 数据分析

试验数据用Excel进行初步处理,用SPSS 12.0软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿光合速率的影响

1. 断根后第一年光合速率

在断根后第一年第一茬的现蕾期(图5-15),与未断根苜蓿相比,各断根处理 P_n 均降低,且 $80\sim 360\text{cm}$ 断根的苜蓿叶片 P_n 均显著降低($P<0.05$);浅层处理($\leq 80\text{cm}$)

和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) P_n 较高 ($10.47 \sim 12.47 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 各处理间无显著差异, 而显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 ($120 \sim 320\text{cm}$) 多数处理, 中间层处理 P_n 较低 ($2.10 \sim 9.68 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 且层内处理间差异较大, 120cm 、 160cm 和 200cm 处断根的处理 P_n 极显著 ($P < 0.01$) 低于其他各处理。

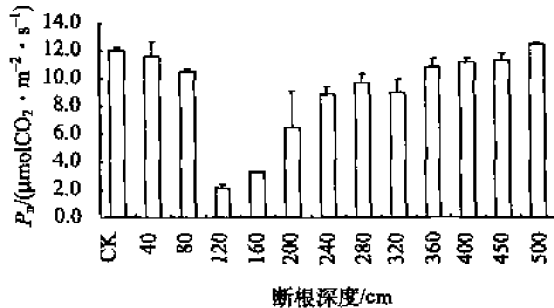


图 5-15 断根第一年光合速率

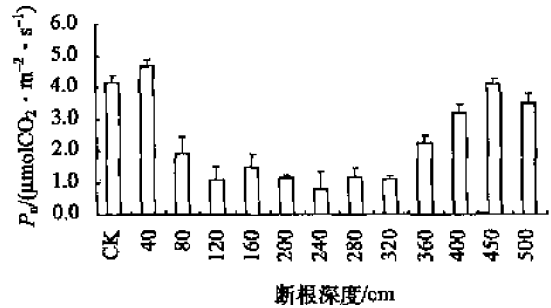


图 5-16 断根第二年光合速率

2. 断根后第二年光合速率

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-16), 与未断根苜蓿相比, 40cm 处断根的处理 P_n 略有升高, $\geq 80\text{cm}$ 的各断根处理 P_n 均降低, 且除 450cm 处断根外, 其余各处理 P_n 均显著降低 ($P < 0.05$); 浅层处理 (40cm) P_n 最高 ($4.67 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 与各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 且除 450cm 处断根的处理外的各处理差异达极显著水平 ($P < 0.01$), 深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) P_n 较高 ($2.23 \sim 4.10 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 ($80 \sim 320\text{cm}$) 各处理, 中间层处理 P_n 较低 ($0.77 \sim 1.93 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 且层内处理间基本无显著差异。

(二) 断根对紫花苜蓿气孔导度的影响

1. 断根后第一年气孔导度

在断根后第一年第一茬的现蕾期 (图 5-17), 和对照相比, 中间层处理 ($120 \sim 320\text{cm}$) G_s 降低, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) G_s 升高, 各层内处理间均无显著差异, 但只有 450cm 处断根 G_s 显著升高 ($P < 0.05$)。

2. 断根后第二年气孔导度

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-18), 各处理 G_s 均显著降低 ($P < 0.05$), 且 $\geq 120\text{cm}$ 处断根的各处理 G_s 均极显著降低 ($P < 0.01$); 在处理中, 浅层处理 (80cm) G_s 最高 ($0.28 \mu\text{molH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 和 $\geq 120\text{cm}$ 处断根的各处理差异均达极显著水平 ($P < 0.01$), 并且 $\geq 120\text{cm}$ 处断根的各处理间均无显著差异。

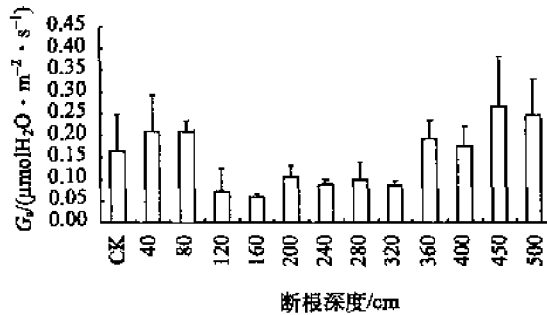


图 5-17 断根第一年气孔导度

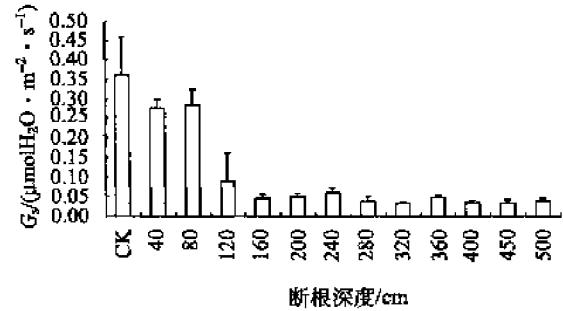
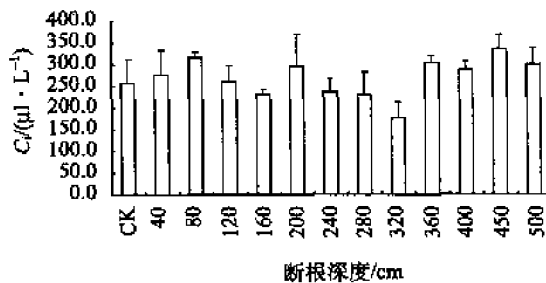
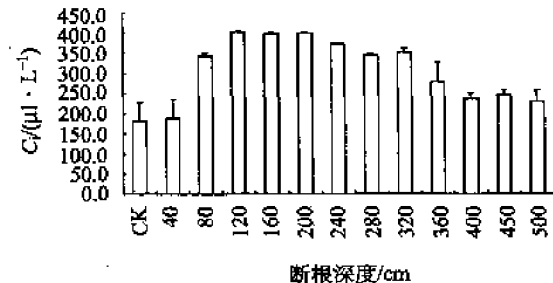


图 5-18 断根第二年气孔导度

(三) 断根对紫花苜蓿胞间 CO_2 浓度的影响

1. 断根后第一年胞间 CO_2 浓度

在断根后第一年第一茬的现蕾期 (图 5-19), 中间层处理 (160~320cm) C_i 基本都降低 (177.0~296.7 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$), 浅层处理 ($\leq 120\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) C_i 都升高 (260.7~335.0 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$), 但只有 320cm 和 450cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P < 0.05$); 450cm 处断根的 C_i 最高, 320cm 处断根的 C_i 最低, 两者差异极显著 ($P < 0.01$), 而其余各处理间均无显著差异。

图 5-19 断根第一年胞间 CO_2 浓度图 5-20 断根第二年胞间 CO_2 浓度

2. 断根后第二年胞间 CO_2 浓度

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-20), 和对照相比, 各处理 C_i 升高, 且除 40cm 处断根的处理外差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 多数达极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 浅层处理 (40cm) C_i 最低 (188.7 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$), 与其余各处理差异显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$), 深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) C_i 居中 (238.0~278.7 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$), 层内处理间差异较小, 而与其余各处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 中间层处理 (80~320cm) C_i 较高 (342.3~402.3 $\mu\text{l} \cdot \text{L}^{-1}$), 层内处理间差异较小。

(四) 断根对紫花苜蓿蒸腾速率的影响

1. 断根后第一年蒸腾速率

在断根后第一年第一茬的现蕾期 (图 5-21), 中间层处理 (120~280cm) 蒸腾速率 (T_r) 都降低 ($0.78 \sim 1.34 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 浅层处理 ($\leq 80 \text{ cm}$) 和深层处理 ($\geq 360 \text{ cm}$) T_r 基本都升高 ($1.41 \sim 2.11 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 500cm 处断根的处理 T_r 最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于 240cm、280cm 和 450cm 处断根的处理, 其余各处理间均无显著差异。

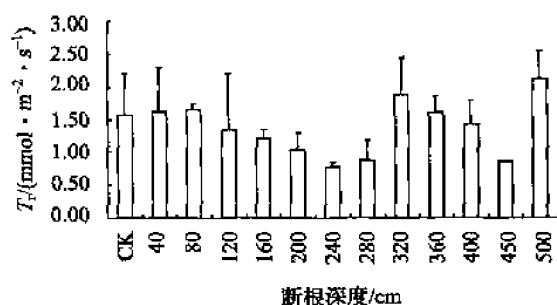


图 5-21 断根第一年蒸腾速率

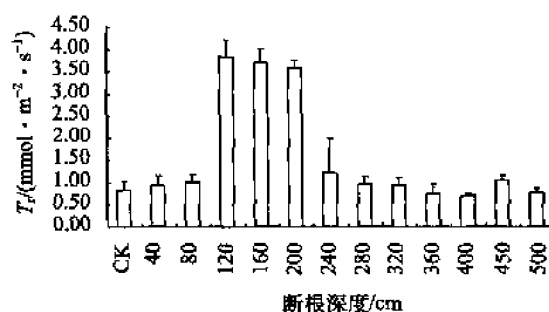


图 5-22 断根第二年蒸腾速率

2. 断根后第二年蒸腾速率

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-22), $\geq 360 \text{ cm}$ 的断根处理 T_r 基本都降低, 其余处理均升高, 且 120~240cm 的各处理差异达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 120cm 以内和 $\geq 280 \text{ cm}$ 的断根处理 T_r 较低 ($0.70 \sim 1.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 极显著 ($P < 0.01$) 低于 120~240cm 的各处理, 其余各处理间均无显著差异。

(五) 断根对紫花苜蓿水分利用效率的影响

1. 断根后第一年水分利用效率

在断根后第一年第一茬的现蕾期 (图 5-23), 120cm、160cm 处断根的处理 WUE 显著降低 ($P < 0.05$), 450cm 处断根的处理 WUE 显著升高 ($P < 0.05$); 在处理中, 450cm 处断根的处理 WUE 最高, 与其余处理差异显著 ($P < 0.05$), 120cm 处断根的处理 WUE 最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于除 160cm 和 320cm 外的各处理, 其余各处理间差异较小。

2. 断根后第二年水分利用效率

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-24), 40cm 处断根的首茬 WUE 最高 ($5.43 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 高于除 400cm 和 500cm 外的各处理, 深层处理 ($\geq 360 \text{ cm}$) WUE 较高 ($3.22 \sim 4.54 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 高

于 80~320cm 的各处理, 80cm 处断根的处理 WUE 显著 ($P<0.05$) 高于 120~240cm 的各处理, 其余中间层处理间均无显著差异。

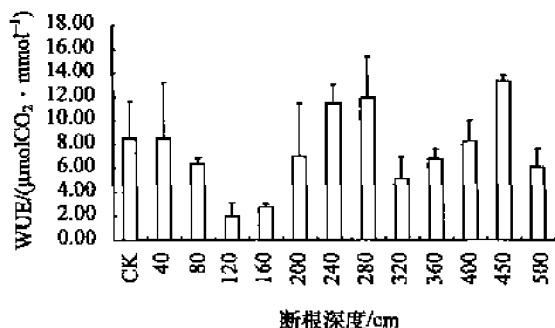


图 5-23 断根第一年水分利用效率

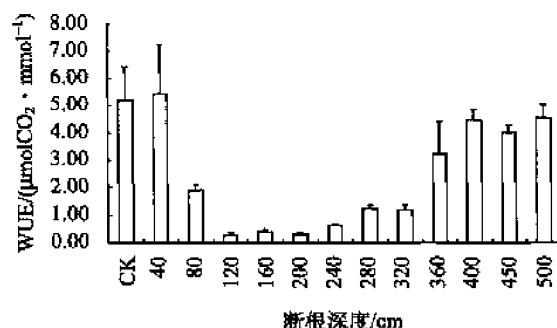


图 5-24 断根第二年水分利用效率

三、讨论与小结

断根对植物光合作用的影响因断根时期、断根的植物和测定时间而异。冬小麦适时断根使叶片叶绿素含量增加、降解速率延缓, 明显改善小麦生育后期旗叶的光合特性 (王法宏, 1998), 光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 均上升, 增加的幅度因品种而异 (柳斌辉等, 2008); 而在灌浆期断根使小麦旗叶叶绿素含量加速降低, 且断根越浅叶绿素含量越低 (郭翠华等, 2007); 对谷子在苗期伤根, T_r 、 G_s 无显著变化, 而其生育后期的 P_n 、WUE 提高, 谷子在拔节期伤根, 光合速率降低, WUE 的变化和田间水分含量有关; 苹果断根后第二天净光合速率不及对照的一半, 第 7 天接近对照, 第 14 天恢复至对照水平, 第 21 天开始高于对照, 之后逐渐升高 (第 28~第 42 天) (杨洪强等, 2002), 羧化效率与 P_n 变化趋势非常相近, T_r 和 G_s 均在断根后第 2 天大幅度下降, 之后逐渐回升, 但一直到处理后第 42 天也未达到对照水平, 而 WUE 在断根后第 2 天就明显高于对照, 以后进一步升高 (杨洪强等, 2002)。本研究结果也表明, 断根对苜蓿叶片光合作用参数的影响因断根深度、断根后恢复生长时间的不同而异。

断根后紫花苜蓿叶片 P_n 、 G_s 、WUE 降低, T_r 呈升高趋势, 而各处理胞间 CO_2 浓度 (C_i) 无显著变化, 但也因断根深度和测定时期不同而异。浅层 (≤ 80 cm) 和深层 (≥ 360 cm) 处理 P_n 、 G_s 、WUE 和 T_r 较高, 中间层 (120~320cm) 处理较低; 在断根后第一年, G_s 、 T_r 和 WUE 基本无显著变化, 80~360cm 的处理 P_n 均显著降低, 而在断根后第二年, 各处理 P_n 和 G_s 、80~320cm 的处理 WUE 基本都显著降低, 160~240cm 的各处理 T_r 极显著升高。

第三节 断根对紫花苜蓿叶绿素荧光特性的影响

光在植物生长中具有特殊作用, 除了作为一种能源控制光合作用, 它还以环境信号的形式通过光敏色素等作用途径调节植物生长、发育和形态建成, 使植物更好地适应外

界环境(周忆堂等, 2008)。叶绿素荧光技术广泛用于研究和探测各种逆境对植物光合生理的影响。在干旱胁迫下, 植物叶组织细胞叶绿体的片层结构受损, 希尔反应减弱, 光系统Ⅱ活力下降, 电子传递和光合磷酸化受抑制(王忠, 1999)。PSⅡ的光化学效率(F_v/F_m)和PSⅡ潜在光化学效率(F_v/F_o)是表明光化学反应状况的两个重要参数(温国胜等, 2006), F_v/F_m 被作为衡量PSⅡ完整性的指标(吴根良等, 2008), F_v/F_o 反映PSⅡ的潜在活性。非光化学猝灭(qN)值反映的是PSⅡ反应中心对天线色素吸收过量光能后的热耗散能力及光合机构的损伤程度, 荧光猝灭系数(qP)、qN和初始荧光(F_o)的变化幅度可作为植物抗旱性的指标。 Φ PSⅡ表征了PSⅡ非环式电子传递的光化学量子产量, 光化学是反映PSⅡ天线色素吸收的光能用于光化学反应的份额, PSⅡ的非循环电子传递速率(ETR)反映了实际光强条件下的表观电子传递效率(周忆堂等, 2008)。同时, 断根可引起植物荧光参数的变化, 此影响与植物种类和试验条件有关(马守臣等, 2006), 但关于断根对植物荧光特性影响的研究报道并不多。

因此, 利用叶绿素荧光分析技术研究断根对苜蓿荧光特性的影响, 可为断根引起的根系吸水胁迫对苜蓿光合内部结构的影响、荧光特性与光合作用及产量性状的关系提供一定的理论依据。

一、材料与方法

用PAM-2100荧光仪测定苜蓿叶片叶绿素荧光参数。利用Run1程序, 分别测定在断根后第一年、第二年各茬的 Φ PSⅡ和ETR, 在断根后夏季高温干旱时, 利用测定程序Run3, 测定PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)、初始荧光(F_o)、叶片获取光能能力的效应($1/F_o - 1/F_m$)、PSⅡ潜在光化学效率(F_v/F_o)和荧光参数光响应曲线。重复3次。

试验数据用Excel进行初步处理, 用SPSS 12.0软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿PSⅡ实际光化学效率的影响

1. 断根后第一年第一茬PSⅡ实际光化学效率

Φ PSⅡ表征了PSⅡ非环式电子传递的光化学量子产量。在断根后第一年第一茬的分枝期和现蕾期(表5-6), 各处理和对照 Φ PSⅡ均无显著差异; 在分枝期各处理间 Φ PSⅡ均无显著差异, 而在现蕾期, 80cm和240cm处断根的处理 Φ PSⅡ最高, 显著($P < 0.05$)高于120cm和160cm处断根的处理, 120cm断根的处理 Φ PSⅡ最低, 显著($P < 0.05$)低于大部分处理, 其余各处理间均无显著差异。在初花期, 中间层(120~280cm)除200cm处断根的处理外, Φ PSⅡ均显著降低($P < 0.05$), 其余处理 Φ PSⅡ无显著变化; 浅层处理(≤ 80 cm)和深层处理(≥ 320 cm) Φ PSⅡ较高(0.131~0.151), 中间层处理除200cm外 Φ PSⅡ较低(0.091~0.119), 120cm处断根的处理最低, 显著($P < 0.05$)低于200cm处断根的处理, 其余各处理均无显著差异。

表 5-6 断根后第一年第一茬 PSⅡ 实际光化学效率

断根深度/cm	分枝期	现蕾期	差异显著性	初花期	差异显著性
CK	0.732	0.320	abcAB	0.223	a
40	0.741	0.349	abAB	0.131	abc
80	0.735	0.421	aA	0.140	abc
120	0.731	0.203	cB	0.091	c
160	0.722	0.281	bcAB	0.112	bc
200	0.722	0.350	abAB	0.201	ab
240	0.736	0.421	aA	0.119	bc
280	0.739	0.302	abcAB	0.107	bc
320	0.736	0.348	abAB	0.140	abc
360	0.741	0.320	abcAB	0.136	abc
400	0.739	0.384	abA	0.144	abc
450	0.736	0.385	abA	0.151	abc
500	0.735	0.371	abA	0.147	abc

2. 断根后第一年第二茬 PSⅡ 实际光化学效率

在断根后第一年第二茬的现蕾期 (表 5-7), 与对照相比, 各处理 Φ PSⅡ 均降低, 且 160cm 和 200cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在各断根处理中, 160cm 和 200cm 处断根的处理 Φ PSⅡ 最低 (0.680 和 0.688), 显著 ($P < 0.05$) 低于 450cm 处断根的处理, 其余各处理间均无显著差异。

表 5-7 断根后第一年第二茬、第三茬和第四茬 PSⅡ 实际光化学效率

断根深度/cm	第一年第二茬	差异显著性	第一年第三茬	差异显著性	第一年第四茬
CK	0.741	a	0.384	abcAB	0.729
40	0.693	ab	0.363	bcAB	0.725
80	0.693	ab	0.432	abcAB	0.719
120	0.720	ab	0.400	abcAB	0.724
160	0.680	b	0.316	cB	0.714
200	0.688	b	0.333	bcB	0.739
240	0.711	ab	0.336	bcAB	0.723
280	0.719	ab	0.324	bcB	0.724
320	0.697	ab	0.394	abcAB	0.722
360	0.715	ab	0.447	abAB	0.730
400	0.717	ab	0.485	aA	0.713
450	0.737	a	0.423	abcAB	0.715
500	0.705	ab	0.494	aA	0.721

3. 断根后第一年第三茬 PSⅡ 实际光化学效率

在断根后第一年第三茬的现蕾期 (表 5-7), 与对照相比, 各处理差异均未达显著

水平；在断根处理中，400cm 和 500cm 处断根的处理 $\Phi\text{PS II}$ 最高（0.485 和 0.494），显著（ $P<0.05$ ）高于 40cm 和中间层（160~280cm）各处理，160cm 处断根的处理 $\Phi\text{PS II}$ 最低（0.316），显著（ $P<0.05$ ）低于 360cm、400cm 和 500cm 处断根的处理，其余各处理间均无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬 PS II 实际光化学效率

在断根后第一年第四茬的现蕾期（表 5-7），各处理与对照、各处理间 $\Phi\text{PS II}$ 均无显著差异。

5. 断根后第二年第一茬 PS II 实际光化学效率

在断根后第二年第一茬的现蕾期（表 5-8），160cm 处断根的处理 $\Phi\text{PS II}$ 显著降低（ $P<0.05$ ），其余处理均无显著变化；在断根处理中，浅层处理（ $\leq 80\text{cm}$ ）和深层处理（ $\geq 360\text{cm}$ ） $\Phi\text{PS II}$ 较高（0.345~0.530），中间层处理（120~320cm）较低（0.123~0.374），160cm 处断根的处理 $\Phi\text{PS II}$ 最低，显著（ $P<0.05$ ）低于 200cm 处断根的处理及浅层、深层各处理，40cm 和 360cm 处断根的处理 $\Phi\text{PS II}$ 最高，显著（ $P<0.05$ ）高于除 200cm 处断根的处理外的中间层各处理，此外，各处理间均无显著差异。

表 5-8 断根后第二年 PS II 实际光化学效率

断根深度/cm	第一茬	差异显著性	第二茬	差异显著性	第三茬	第四茬	差异显著性
CK	0.420	abAB	0.722	aA	0.737	0.309	abcAB
40	0.530	aAB	0.715	aAB	0.752	0.298	abcAB
80	0.356	abABC	0.717	aAB	0.698	0.331	abAB
120	0.184	bcBC	0.623	bcBC	0.677	0.225	bcB
160	0.123	cC	0.573	cC	0.726	0.200	cB
200	0.374	abABC	0.608	bcBC	0.672	0.264	bcAB
240	0.245	bcBC	0.635	bcABC	0.732	0.261	bcAB
280	0.258	bcABC	0.622	bcBC	0.735	0.294	abcAB
320	0.181	bcBC	0.643	bABC	0.729	0.307	abcAB
360	0.551	aA	0.633	bcABC	0.659	0.335	abAB
400	0.345	abABC	0.631	bcBC	0.705	0.259	bcAB
450	0.415	abAB	0.681	abAB	0.731	0.319	abAB
500	0.392	abAB	0.659	abABC	0.711	0.377	aA

6. 断根后第二年第二茬 PS II 实际光化学效率

在断根后第二年第二茬的现蕾期（表 5-8），各处理较对照 $\Phi\text{PS II}$ 均降低，且中间层（120~400cm）各处理差异均达显著水平（ $P<0.05$ ）；在断根处理中，浅层处理（ $\leq 80\text{cm}$ ） $\Phi\text{PS II}$ 最高（0.717），显著高于中间层各处理，深层处理（ $\geq 450\text{cm}$ ） $\Phi\text{PS II}$ 较高（0.681），中间层处理较低（0.573~0.643），160m 处断根的处理显著（ $P<0.05$ ）低于 320cm 处断根的处理、浅层和深层各处理，此外，各处理间均无显著差异。

7. 断根后第二年第三茬 PSⅡ 实际光化学效率

在断根后第二年第三茬的现蕾期（表 5-8），各处理与对照、各处理间 $\Phi\text{PSⅡ}$ 均无显著差异。

8. 断根后第二年第四茬 PSⅡ 实际光化学效率

在断根后第一年第四茬的现蕾期（表 5-8），各处理和对照 $\Phi\text{PSⅡ}$ 均无显著差异；在断根处理中，浅层处理（ $\leq 80\text{cm}$ ）和 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理 $\Phi\text{PSⅡ}$ 较高（0.259~0.377），中间层处理（120~240cm）较低（0.200~0.264），中间层各处理显著（ $P < 0.05$ ）低于 500cm 处断根的处理，其中，160cm 处断根的处理最低，显著（ $P < 0.05$ ）低于大部分浅层处理和 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理。

（二）断根对紫花苜蓿表观电子传递速率的影响

1. 断根后第一年第一茬表观电子传递速率

PSⅡ 的非循环电子传递速率（ETR）反映了实际光强条件下的表观电子传递效率。在断根后第一年第一茬（表 5-9），各处理 ETR 基本都降低，在分枝期和初花期，对照与各处理间差异均较小，而在现蕾期差异较大。在分枝期，浅层处理（ $\leq 160\text{cm}$ ）和深层处理（ $\geq 360\text{cm}$ ）ETR 普遍较高，中间层处理（200~320cm）较低，500cm 处断根的处理 ETR 最高，显著（ $P < 0.05$ ）高于 80cm 处断根的处理和中间层各处理，其余各处理间均无显著差异，在现蕾期，500cm 处断根的处理 ETR 最高，显著（ $P < 0.05$ ）高于部分处理，而在初花期，各处理均无显著差异。

表 5-9 断根后第一年第一茬表观电子传递速率

断根深度/cm	分枝期	差异显著性	现蕾期	差异显著性	初花期	差异显著性
CK	27.5	ab	77.8	a	80.5	a
40	24.2	abc	36.5	bc	49.5	ab
80	20.4	bc	24.0	bc	48.4	ab
120	26.9	abc	40.5	bc	38.0	b
160	23.2	abc	21.5	c	65.4	ab
200	22.5	bc	26.5	bc	53.7	ab
240	21.2	bc	24.2	bc	48.2	ab
280	23.0	bc	20.0	c	48.7	ab
320	19.2	c	21.8	c	45.6	ab
360	24.1	abc	17.5	c	60.1	ab
400	25.5	abc	31.2	bc	42.4	ab
450	27.2	abc	26.4	bc	65.2	ab
500	29.6	a	52.1	ab	60.0	ab

2. 断根后第一年第二茬表现电子传递速率

在断根后第一年第二茬的现蕾期（表 5-10），160cm 处断根的处理 ETR 显著降低（ $P<0.05$ ），其余处理均无显著差异； ≥ 400 cm 的各断根处理 ETR 较高（45.1~45.4），360cm 以内断根的处理 ETR 较低（44.3~44.9），160cm 处断根的处理 ETR 最低，显著（ $P<0.05$ ）低于 ≥ 360 cm 的各断根处理，450cm 处断根的处理 ETR 最高，显著（ $P<0.05$ ）高于 320cm 以内断根的多数处理，此外，各处理间均无显著差异。

表 5-10 断根后第一年第二茬至第四茬表现电子传递速率

断根深度/cm	第二茬	差异显著性	第三茬	差异显著性	第四茬	差异显著性
CK	45.1	abA	36.4	bcABC	47.6	abAB
40	44.6	bcAB	35.7	bcABC	48.7	abAB
80	44.7	bcAB	37.8	abcABC	54.2	aA
120	44.8	abcAB	36.6	bcABC	40.5	bcABC
160	44.3	cB	31.2	bcBC	28.3	cC
200	44.5	bcAB	30.6	bcBC	43.6	abABC
240	44.6	bcAB	29.1	cC	41.2	abcABC
280	44.8	abcAB	28.8	cC	37.5	bcBC
320	44.8	bcAB	36.3	bcABC	46.0	abAB
360	44.9	abAB	43.7	abAB	47.0	abAB
400	45.1	abA	47.0	abA	34.8	bcBC
450	45.4	aA	42.9	abABC	43.6	abABC
500	45.2	abA	48.2	aA	40.4	bcABC

3. 断根后第一年第三茬表现电子传递速率

在断根后第一年第三茬的现蕾期（表 5-10），各处理 ETR 均无显著变化；在处理中，浅层处理（ ≤ 120 cm）和深层处理（ ≥ 320 cm）ETR 较高（35.7~48.2），中间层处理 ETR 较低（28.8~31.2），500cm 处断根的处理 ETR 最高，显著（ $P<0.05$ ）高于 320cm 以内除 80cm 外的各处理，240cm 和 280cm 处断根的处理 ETR 最低，显著（ $P<0.05$ ）低于 >360 cm 的各断根处理，此外，各处理间均无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬表现电子传递速率

在断根后第一年第四茬的现蕾期（表 5-10），160cm 处断根的处理 ETR 显著降低（ $P<0.05$ ），其余处理均无显著变化；在处理中，80cm 处断根的处理 ETR 最高，显著（ $P<0.05$ ）高于部分处理，160cm 处断根的处理 ETR 最低，显著（ $P<0.05$ ）低于部分处理，此外，各处理间均无显著差异。

5. 断根后第二年第一茬表现电子传递速率

在断根后第二年第一茬的现蕾期（表 5-11），对照与各处理均无显著差异；在处理

中, 280cm 处断根的处理 ETR 最低, 40cm 处断根的处理 ETR 最高, 两处理差异显著 ($P < 0.05$), 其余各处理间均无显著差异。

表 5-11 断根后第二年表现电子传递速率

断根深度/cm	第一茬	差异显著性	第二茬	差异显著性	第三茬	差异显著性	第四茬	差异显著性
CK	32.4	ab	46.6	abABC	23.6	abAB	64.8	abcAB
40	63.1	a	45.6	bcBC	13.9	bBC	68.7	abcAB
80	28.9	ab	45.7	bcBC	14.9	bBC	77.7	abAB
120	41.3	ab	46.2	bcABC	11.2	bcBC	45.4	cB
160	35.3	ab	45.2	cC	1.8	cC	51.9	cB
200	57.5	ab	45.8	bcBC	2.0	cBC	64.4	abcAB
240	41.8	ab	47.0	abAB	8.3	bcBC	58.0	bAB
280	17.0	b	46.4	bABC	14.6	bBC	76.0	abAB
320	44.5	ab	46.7	abABC	16.4	bAB	65.4	abcAB
360	32.1	ab	46.4	bcABC	28.7	aAB	77.4	abAB
400	30.1	ab	47.1	abAB	32.6	aA	62.8	abcAB
450	38.7	ab	47.3	abAB	23.3	abAB	70.7	abcAB
500	29.5	ab	47.5	aA	22.6	abAB	80.2	aA

6. 断根后第二年第二茬表现电子传递速率

在断根后第二年第二茬的现蕾期 (表 5-11), 160cm 处断根的处理 ETR 显著 ($P < 0.05$) 降低, 其余各处理无显著变化; 在处理中, 200cm 以内的各处理 ETR 较低 (45.2~46.2), 160cm 处断根的处理 ETR 最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于除 360cm 外 ≥ 240 cm 的各处理, ≥ 240 cm 的断根处理 ETR 较高 (46.4~47.5), 500cm 处断根的处理 ETR 最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于 360cm 以内断根的绝大多数处理, 其余各处理间均无显著差异。

7. 断根后第二年第三茬表现电子传递速率

在断根后第二年第三茬的现蕾期 (表 5-11), 与对照相比, 160cm 和 200cm 处断根的处理 ETR 显著 ($P < 0.05$) 降低, 其余各处理无显著变化; 浅层处理 (≤ 80 cm) 和 ≥ 280 cm 的断根处理 ETR 较高 (13.9~32.6), 400cm 处断根的处理 ETR 最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于 320cm 以内断根的各处理, 160cm 和 200cm 处断根的处理 ETR 最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于各浅层和 ≥ 280 cm 的各断根处理。

8. 断根后第二年第四茬表现电子传递速率

在断根后第二年第四茬的现蕾期 (表 5-11), 各处理与对照 ETR 均无显著差异; 浅层处理 (≤ 80 cm) 和 ≥ 280 cm 的断根处理 ETR 较高 (62.8~80.2), 中间层处理 (120~240cm) 较低 (45.4~64.4), 除 200cm 外的各处理显著 ($P < 0.05$) 低于 500cm 处断根的处理, 500cm 处断根的处理 ETR 最高, 80cm 处断根的处理次之, 两处

理 ETR 显著 ($P < 0.05$) 高于 120cm 和 160cm 处断根的处理。

(三) 断根对 PSⅡ 最大光化学效率的影响

PSⅡ 最大光化学效率 (F_v/F_m) 表示暗适应下 PSⅡ 反应中心完全开放后的最大量子产量, 用于度量植物叶片 PSⅡ 原初光能转换效率, 表明 PSⅡ 利用光能的能力, 常作为植物受到环境胁迫时最直接的光合生理响应指标, 衡量 PSⅡ 完整性。非环境胁迫条件下叶片的荧光参数 PSⅡ 的光化学效率 (F_v/F_m) 极少变化, 不受物种和生长条件的影响, 而遭受光抑制的叶片这一参数变化明显 (吴根良等, 2008)。

在断根后第一、第二年 (表 5-12, 表 5-13), 与对照相比, 各处理 F_v/F_m 均降低, 且除 500cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在断根后第一年, 280cm 和 160cm 处断根的首梢 F_v/F_m 显著低于其余各处理, 但差异均未达极显著水平 ($P < 0.01$), 此外, 各处理间均无显著差异, 而断根后第二年, 中间层 (120~280cm) 处理 F_v/F_m 较低 (0.577~0.680), 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 320 cm) F_v/F_m 较高 (0.736~0.796), 显著 ($P < 0.05$) 高于中间层处理。

表 5-12 断根后第一年 F_v/F_m 、 F_o 、 $1/F_o - 1/F_m$ 和 F_v/F_o

断根深度/cm	F_v/F_m	差异显著性	F_o	差异显著性	$1/F_o - 1/F_m$	差异显著性	F_v/F_o	差异显著性
CK	0.816	aA	0.258	dB	3.114	bAB	3.715	bAB
40	0.788	bAB	0.273	cB	3.026	bAB	4.149	aA
80	0.790	bB	0.292	bAB	3.187	bA	3.423	bBC
120	0.774	bB	0.334	aA	2.389	eC	3.270	bBC
160	0.753	cB	0.323	aA	2.607	cBC	3.762	bAB
200	0.776	bB	0.319	abA	2.428	dC	3.265	cdBC
240	0.785	bB	0.291	bAB	2.371	eC	3.638	bcB
280	0.757	cB	0.291	bAB	2.552	dBC	3.107	dBC
320	0.768	bB	0.291	bAB	2.510	dBC	3.316	cBC
360	0.766	bB	0.281	bcB	2.326	eC	3.047	dC
400	0.779	bB	0.251	dB	2.587	cB	3.528	cBC
450	0.785	bAB	0.295	bAB	2.791	cB	4.430	aA
500	0.806	abAB	0.261	cdB	3.429	aA	3.460	bcBC

表 5-13 断根后第二年 F_v/F_m 、 F_o 、 $1/F_o - 1/F_m$ 和 F_v/F_o

断根深度/cm	F_v/F_m	差异显著性	F_o	差异显著性	$1/F_o - 1/F_m$	差异显著性	F_v/F_o	差异显著性
CK	0.802	aA	0.278	cBC	3.091	aA	3.462	cB
40	0.759	bcAB	0.253	cdC	2.983	aA	3.158	dB
80	0.779	bAB	0.235	dC	2.669	bB	3.534	cB
120	0.679	dC	0.324	aA	2.303	cC	1.803	gD
160	0.577	eD	0.335	aA	1.972	dC	1.362	hE
200	0.680	dC	0.296	bAB	1.785	eD	2.127	fD
240	0.643	dC	0.323	aA	2.016	dC	1.928	gD
280	0.659	dC	0.253	cdC	2.610	bB	2.119	fD

续表

断根深度/cm	F_v/F_m	差异显著性	F_o	差异显著性	$1/F_o - 1/F_m$	差异显著性	F_v/F_o	差异显著性
320	0.736	cB	0.319	abA	2.338	cBC	2.875	cC
360	0.742	cB	0.303	bAB	2.936	aA	2.883	cC
400	0.776	bAB	0.301	bAB	2.551	bB	4.040	aA
450	0.778	bAB	0.300	bAB	2.640	bB	3.517	cB
500	0.796	aA	0.256	cC	3.084	aA	3.895	bAB

(四) 断根对初始荧光的影响

初始荧光 (F_o) 增加可使植物叶片 PS II 反应中心出现不可逆的失活和破坏, 也可使植物叶片类囊体膜受到损伤, F_o 增加量越多, 类囊体膜受损程度就越严重, 它的变化程度可以用来鉴别植物抵抗或忍耐干旱的能力, 抗旱性越强的品种 F_o 增加幅度越小 (吴根良等, 2008)。

在断根后第一年 (表 5-12), 除 400cm 处断根的处理 F_o 降低外, 其余除 500cm 外 F_o 均显著升高 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和 ≥ 240 cm 的断根处理 F_o 较低 (0.251~0.295), 显著低于中间层处理 (120~200cm)。在断根后第二年 (表 5-13), 除 40cm、80cm、280cm 和 500cm 处断根的处理 F_o 降低外, 其余各处理 F_o 均显著 ($P < 0.05$) 升高; 且 120cm、160cm 和 240cm F_o 较高 (0.323~0.335), 基本都显著 ($P < 0.05$) 高于其余处理。

(五) 断根对叶片获取光能能力效应的影响

在断根后第一年 (表 5-12), 500cm 处断根的处理叶片获取光能能力的效应 ($1/F_o - 1/F_m$) 显著增加 ($P < 0.05$), 浅层处理 (≤ 80 cm) 叶片获取光能能力的效应无显著变化, 其余处理均显著降低 ($P < 0.05$); 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) 叶片获取光能能力的效应较高 (2.587~3.429), 中间层处理 (120~360cm) 较低 (2.326~2.607), 除 160cm 处断根的处理外, 均显著低于浅层和深层各处理。在断根后第二年 (表 5-13), 各处理叶片获取光能能力的效应均降低, 且除 40cm、360cm 和 500cm 处断根的处理外, 差异均达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 360 cm) 叶片获取光能能力的效应较高 (2.551~3.084), 中间层处理 (120~360cm) 较低 (为 1.785~2.338), 除 280cm 处断根的处理外各处理叶片获取光能能力的效应均显著低于浅层和深层各处理。

(六) 断根对 PS II 潜在光化学效率的影响

在断根后第一年 (表 5-12), 40cm、160cm 和 450cm 处断根的处理 PS II 潜在光化学效率 (F_v/F_o) 增加, 且 40cm 和 450cm 处断根的处理差异显著 ($P < 0.05$), 其余处理均降低, 且 200~400cm 断根的处理差异基本都达显著水平 ($P < 0.05$); < 160 cm 和 ≥ 450 cm 的断根处理 F_v/F_o 较高 (3.270~4.430), 200~400cm 断根的处理 F_v/F_o 较

低 (为 3.047~3.316), 多数处理 F_v/F_o 显著 ($P<0.05$) 低于 $<160\text{cm}$ 和 $\geq 450\text{cm}$ 的断根处理。断根后第二年, 80cm 处和 $\geq 400\text{cm}$ 的断根处理 F_v/F_o 增加, 且 400cm 和 500cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P<0.05$), 其余处理均显著降低 ($P<0.05$); 多数处理间存在显著差异 ($P<0.05$), 总体上, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) F_v/F_o 较高 (3.158~4.040), 320cm 和 360cm 处断根的处理 F_v/F_o 居中, 分别为 2.875 和 2.883, $120\sim 280\text{cm}$ 断根的处理 F_v/F_o 较低 (1.362~2.127)。

(七) 断根对叶绿素荧光光响应曲线的影响

1. 断根后 F_m'

从 $0\sim 280\text{s}$, F_m' 持续降低, $0\sim 40\text{s}$ 是其曲线突降的阶段。在各个测定时间点, 大部分处理和对照的增减关系和起始点时一致, 而较对照的增减幅度随时间的推移在逐渐减小, 在 280s 时, 各处理与对照、各处理间 F_m' 差异不大, 但 360cm 处断根的处理 F_m' 始终显著高于对照及各处理, 500cm 处断根的处理起始点和对照无显著差异, 而在 280s 时显著高于对照 ($P<0.05$) (图 5-25, 图 5-26)。同时, 断根改变了部分处理 F_m' 变化曲线, 在断根后第一年, 160cm 处断根的处理 F_m' 出现了从 $0\sim 80\text{s}$ 降低、 $80\sim 280\text{s}$ 逐渐回升的趋势, 而 400cm 处断根的处理 F_m' 曲线变化平缓, $0\sim 40\text{s}$ 的曲线突降的阶段不明显; 在断根后第二年, 240cm 处断根的处理 F_m' 出现了从 $0\sim 80\text{s}$ 降低、 $80\sim 280\text{s}$ 逐渐回升的趋势, 80cm 处断根的处理 F_m' 曲线变化平缓, $0\sim 40\text{s}$ 的曲线突降的阶段不明显。

在曲线起始点, 与对照相比, 断根后第一年, 120cm 以内断根的处理 F_m' 显著升高 ($P<0.05$), $240\sim 360\text{cm}$ 和 500cm 处断根的处理起始 F_m' 显著降低 ($P<0.05$); 在断根后第二年, 80cm 以内断根的处理起始 F_m' 显著降低 ($P<0.05$), 120cm 、 160cm 、 240cm 、 280cm 和 360cm 处断根的处理 F_m' 显著升高 ($P<0.05$)。

2. 断根后 qP

光化学荧光猝灭系数 (qP) 是反映 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学反应的份额, qP 越大, 表明 PS II 的电子传递活性越大, 下降幅度越小, 抗性越强 (周忆堂等, 2008)。

$0\sim 280\text{s}$, qP 在 20s 时骤降, 而后持续平稳升高, 在各个测定时间点, 大部分处理较对照的增减关系和起始点时一致, 而较对照的增加幅度随时间的推移在逐渐减小, 在 280s 时, 各处理与对照、各处理间 qP 差异不大, 而断根后第二年 120cm 处断根的处理始终显著 ($P<0.05$) 低于对照。在断根后第一年, 200cm 以内断根的处理在 $0\sim 20\text{s}$ 降低幅度较大, $20\sim 280\text{s}$ 时回升幅度较大, 而 280cm 、 320cm 和 360cm 处断根的处理 qP 从 $0\sim 280\text{s}$ 一直持续增加, 但增加幅度极小; 在断根后第二年, 120cm 、 160cm 和 240cm 处断根的处理 qP 持续升高, 升高幅度较大, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 在 $0\sim 20\text{s}$ 时降低幅度较小, 曲线变化平缓。

在曲线起始点, 与对照相比, 断根后第一年, 240cm 以内的断根处理起始 qP 显著

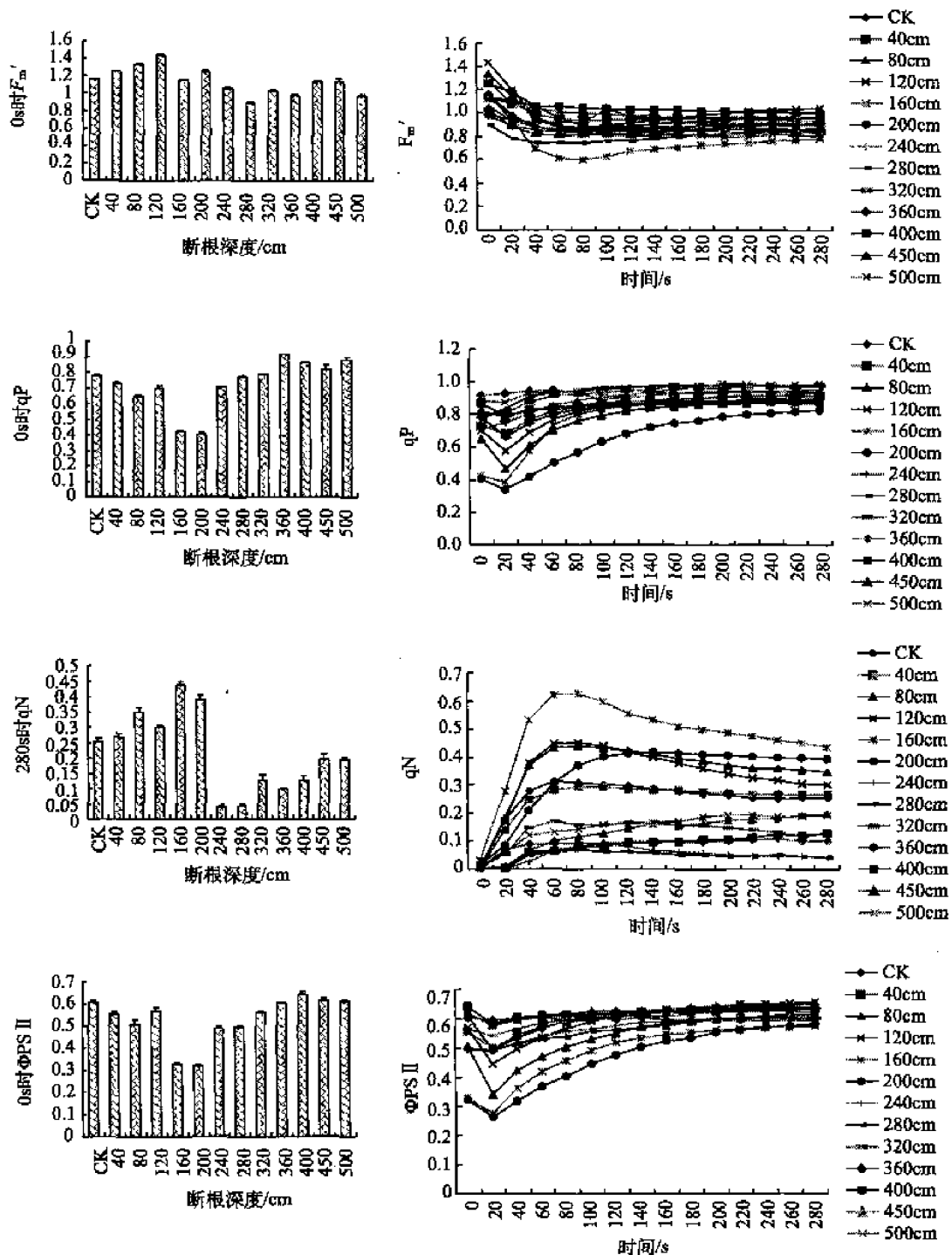


图 5-25 断根后第一年荧光参数光响应曲线

降低 ($P < 0.05$), $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理均升高, 且 $\geq 320\text{cm}$ 的断根各处理差异达显著水平 ($P < 0.05$); 在断根后第二年, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) qP

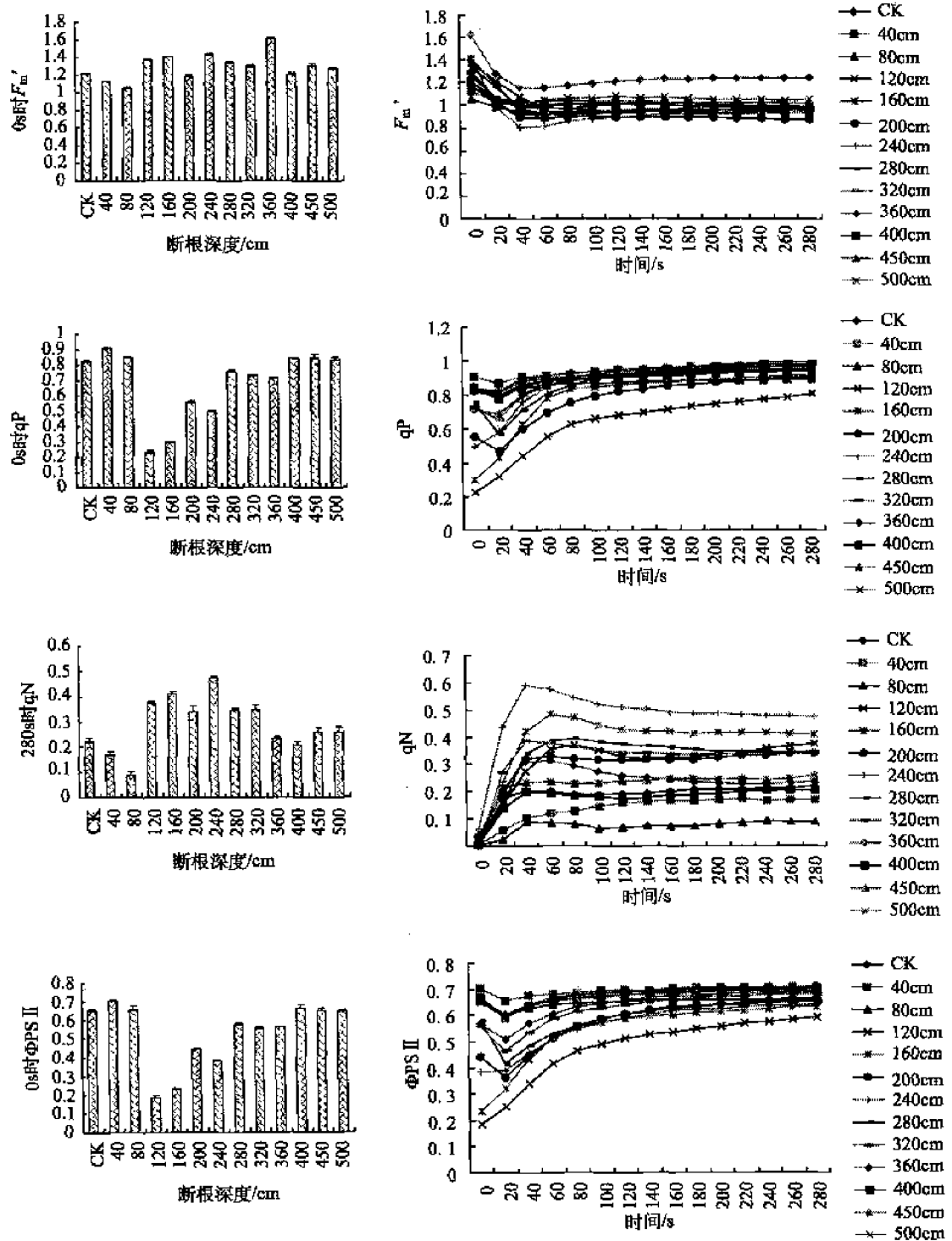


图 5-26 断根后第二年荧光参数光响应曲线

升高, 多数达显著水平 ($P < 0.05$), 中间层处理 (120~360cm) 均降低, 多数达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$)。

3. 断根后 qN

非光化学猝灭 (qN) 值大小反映的是 PS II 反应中心对天线色素吸收过量光能后的热耗散能力及光合机构的损伤程度, 是一种保护机制, 当植物处于胁迫时, qN 值增大, qN 上升幅度越大, 说明非辐射能量耗散的程度越大, 对光合系统破坏越小, 植物越抗旱 (周忆堂等, 2008)。

在 qN 曲线起始点各处理间、各处理与对照间 qN 均无显著差异, 0~60s, qN 大幅升高, 在 60s 时达最高值, 而后持续降低, 在 40~280s 的各个测定时间点, 大部分处理较对照的增减关系和 280s 时一致, 而较对照的增加幅度随时间而变。在断根后第一年, 200cm 以内断根的处理 qN 极显著 ($P<0.01$) 高于 ≥ 240 cm 的断根处理, 曲线变化幅度大, 而 ≥ 240 cm 的断根处理曲线变化平缓; 在断根后第二年, 中间层处理 (120~320cm) 曲线变化幅度大, 而浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 360 cm) 曲线变化平缓。

在 280s 时, 各处理 qN 差异较大。与对照相比, 在断根后第一年, 200cm 以内断根的处理 qN 增加, 且除 40cm 处断根的处理外, 差异均达显著 ($P<0.05$) 和极显著水平 ($P<0.01$), ≥ 240 cm 的断根处理 qN 均极显著降低 ($P<0.01$); 在断根后第二年, 浅层处理 (≤ 80 cm) qN 显著降低 ($P<0.05$), 深层处理 (≥ 360 cm) qN 无显著变化, 中间层处理 (120~320cm) 极显著升高 ($P<0.01$)。

4. 断根后 $\Phi PS II$

从 0~280s, $\Phi PS II$ 曲线在 20s 时出现骤降, 而后持续升高, 在各个测定时间点, 大部分处理较对照的增减关系和起始点时一致, 而较对照的增减幅度随时间的推移而逐渐减小, 在 280s 时, 各处理与对照、各处理间 $\Phi PS II$ 差异不大, 而在断根后第一年, 160cm 和 200cm 处断根的处理和在断根后第二年 120cm 处断根的处理始终显著低于对照 ($P<0.05$)。在断根后第一年, 80cm 处断根的处理在 20s 降低幅度最大, 而后的回升幅度也较大, 160cm 和 200cm 处断根的处理 $\Phi PS II$ 在起始点极显著 ($P<0.01$) 低于各处理, 而在 280s 与各处理差异不大, 即曲线在 20~280s 升高幅度大; 在断根后第二年, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) 在 0~20s 时降低幅度较小, 曲线变化平稳, 200~320cm 断根的处理曲线骤降明显, 回升幅度较大, 但 120cm 和 160cm 处断根的处理曲线持续增加, 无明显降低点。

在 $\Phi PS II$ 曲线起始点, 断根后第一年时, 深层处理 (≥ 360 cm) $\Phi PS II$ 无显著变化, 其余处理均极显著降低 ($P<0.01$), 在各断根处理中, 浅层处理 (≤ 120 cm) 和深层处理 (≥ 360 cm) $\Phi PS II$ 较高、中间层处理 (160~320cm) 较低; 而在断根后第二年, 深层处理 (≥ 400 cm) 和浅层处理 (80cm) $\Phi PS II$ 变化不显著, 40cm 处断根的处理显著增加 ($P<0.05$), 其余处理均显著降低 ($P<0.05$), 且浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 400 cm) $\Phi PS II$ 较高、中间层处理 (160~360cm) 较低。

三、讨论与小结

断根对荧光参数的影响因植物和水分供应状况而异,此作用与断根对光合作用、产量等的影响表现基本一致(马守臣等,2006)。研究表明,冬小麦在断根初期电子传递速率和有效光量子产量($\Phi\text{PS II}$)降低,而 PS II 光合电子传递活性增加,在孕穗期,随着更多的能量向地上部的运转,根系补偿作用使ETR、 $\Phi\text{PS II}$ 和qP增加,但在不同生育期, PS II 的光化学效率(F_v/F_o)和 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)无显著变化,因此,断根降低了小麦的竞争能力,使总体光合活性增强,促进了能量向地上部运转,与产量增加相一致(王振宇等,2007)。同时,水分供应水平影响断根植株的叶绿素荧光特性,冬小麦在返青期断根,在高水分条件下,断根提高了原初光能捕获效率($\Phi\text{PS II}$)、表观光合电子传递速率(ETR)、光化学猝灭(qP),促进了冬小麦光合作用的进行,但在低水分条件下这种促进作用不显著(马守臣等,2006)。本节研究表明,在高温干旱时,在断根后第一年,240cm以内的断根处理起始qP显著降低($P < 0.05$), $\geq 320\text{cm}$ 处断根的各处理显著升高($P < 0.05$),在断根后第二年,浅层和深层处理升高,中间层处理降低,因此,虽同在低水分条件下,断根的植物材料、断根的方法(深度)和测定时期不同,对qP值的影响不同。同时,在高、低水分条件下的冬小麦非光化学猝灭(qN)值均显著提高,但在高温干旱时,断根苜蓿qN值中间层处理(120~320cm)极显著升高,其余处理无显著变化,可能是因为断根后中间层处理比浅层和深层处理受到了较严重的水分胁迫,而非光化学能量耗散的提高有助于耗散过剩的激发能,以保护光合机构,从而缓解过剩光能对光合机构造成的伤害(马守臣等,2006)。

PS II 是光抑制的重要部位,许多胁迫因子,如干旱、热害和冷害等都可以使 PS II 光能利用效率(F_v/F_m)下降、 F_o 升高,从而使植物更易受到伤害(薛延丰和刘兆普,2008;李春霞和曹慧,2008;吴根良等,2008)。这和本节研究结果基本一致,断根后在高温干旱时,各个处理 F_v/F_m 、 $1/F_o - 1/F_m$ 、 F_v/F_o 降低, F_o 升高,表明断根使反应中心开放的比例下降,用于光合电子传递的能量减少(吴根良等,2008),且此作用在断根第二年更为明显,也说明断根后造成的水分胁迫在无人工灌水的条件下长时间持续,可能会使苜蓿叶片 PS II 反应中心出现了不可逆的失活和破坏,使苜蓿叶片类囊体膜受到损伤,苜蓿植株抗性降低(孙光闻等,2005;吴家森等,2008;康琅和汪良驹,2008),尤其是中间层断根的苜蓿。这也和水分胁迫可使小麦旗叶 F_m/F_o 和qP降低(薛延丰和刘兆普,2008)结论相吻合。

在接受光化之前,作用中心基本上处于关闭状态, F_m' 达到最大值,激发态在最大程度以荧光发射,随后由于电子传递的进行,作用中心部分打开,产生光化学猝灭(qP),并且猝灭程度逐渐上升,导致 F_m' 逐渐下降, $\Phi\text{PS II}$ 逐渐升高,在电子传递的同时,建立起跨类囊体膜的pH梯度导致了依赖 ΔpH 的非光化学猝灭(qN)的产生,因此qN逐渐升高(周忆堂等,2008)。与此同时,断根影响了苜蓿荧光参数光响应曲线,浅层处理($\leq 80\text{cm}$)和深层处理($\geq 400\text{cm}$) $\Phi\text{PS II}$ 曲线变化平稳,中间层(200~360cm)处理曲线骤变明显,变化幅度较大。

总之,在不同植物断根后荧光参数、光合作用和产量的变化基本一致。冬小麦、苹果等适时合理断根可使 PS II 向利于光合速率提高的趋势变化,最终表现为产量提高(柳斌辉等,2008;杨洪强等,2002),而本节中苜蓿断根后 F_v/F_m 、 $1/F_0 - 1/F_m$ 、 F_v/F_0 降低, F_0 升高, PS II 反应中心遭到了一定的破坏,光合作用受到抑制,从而导致了苜蓿产量降低。

在多数时期,断根对紫花苜蓿 PS II 非环式电子传递的光化学量子产量 ($\Phi PS II$)、表观电子传递效率 (ETR) 影响较小。而在高温干旱时,断根使 F_v/F_m 、 $1/F_0 - 1/F_m$ 、 F_v/F_0 降低, F_0 升高,呈断根对浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 影响较小、中间层处理 (120~320cm) 影响较大的趋势。同时,荧光参数曲线表现为 F_m' 逐渐下降, qP 、 $\Phi PS II$ 和 qN 逐渐升高;断根对曲线的影响,中间层 (120~320cm) 处理较浅层和深层处理大,第二年较第一年大,0~280s,浅层和深层处理曲线变化平稳,中间层处理曲线骤变明显,变化幅度较大。从第一年到第二年,浅层处理 F_m' 、 qN 由升高到降低, $\Phi PS II$ 由降低到无显著变化, qP 却由降低到升高,变化较大,深层处理 qN 由降低到无显著变化, qP 均升高, F_m' 和 $\Phi PS II$ 基本无显著变化,而中间层处理 F_m' 、 qN 、 $\Phi PS II$ 和 qP 变化在两年中均达显著水平。在断根后第二年, F_m' 、 qN 和 $\Phi PS II$ 基本都呈浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 降低、中间层 (120~320cm) 处理升高、深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 无显著变化的趋势,而 qP 表现出浅层 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层 ($\geq 400\text{cm}$) 处理升高、中间层处理 (120~360cm) 降低的趋势。

第四节 断根对紫花苜蓿叶片硝酸还原酶 和谷氨酰胺合成酶活性的影响

氮素的同化是植物的生长和发育中一个十分重要的生理过程。硝酸盐是高等植物生长所必需的营养成分,硝酸盐的同化是无机氮素转化为能被生物利用的有机氮素的主要途径(朱晓红,2004)。硝酸还原酶 (nitrate reductase, NR) 是氮素同化过程中的关键酶,催化硝态氮转化为亚硝态氮(曹翠玲等,2007),其活力水平与植株氮素吸收和转化密切相关(李絮花,2002)。同时,无机氮必须同化为谷氨酰胺和谷氨酸等有机氮才能被植物体所吸收和利用,谷氨酰胺合成酶 (glutamine synthetase, GS) 是高等植物氮代谢中十分重要的酶,它和谷氨酸合成酶联合作用,催化氨的同化,使其转变成谷氨酰胺和谷氨酸,作为在高等植物体内含氮有机物的生物合成中氮的供体(韩娜等,2004),而当植物受到胁迫时,GS 活性会受到抑制(刘永华等,2004)。因此,研究断根后苜蓿叶片中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性,可为了解断根和不同深度根系对苜蓿叶片氮代谢的影响提供一定的理论依据。

一、材料与方法

(一) 测定指标与方法

材料同本章第一节。在断根后第一年第一茬的分枝期、现蕾期和初花期及第一年第

三茬和第四茬的现蕾期,第二年第一茬、第三茬和第四茬的现蕾期,用冰盒采集叶片,带回实验室后,立即转入冰箱备用。

1. 硝酸还原酶活性

采用磺胺比色法测定(高俊凤,2006)。叶片去中脉,打成直径为1cm的圆片,取圆片200片分成四份称重后加入50ml三角瓶中,1个为空白,其余3个为测定酶活性的重复。空白瓶加1ml 30%三氯乙酸,再在每个瓶中加入 $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH7.5 磷酸缓冲液5ml,蒸馏水5ml,抽气后在30℃避光30min,之后在重复中分别加1ml 30%三氯乙酸,摇匀。取2.0ml反应液加磺胺试剂2ml、 α -萘胺试剂2ml,静置30min,520nm比色,读取吸光值。按下式计算酶活性:

$$\text{酶活性}(\mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}) = [(C_{\text{重复}} - C_{\text{空白}}) \times (V_t/V_s)] / (\text{FW} \times t)$$

式中, C 为由标准曲线求得值(μg); V_t 为提取液总体积(ml); V_s 为测定时加样量(ml);FW为样品鲜重(g); t 为反应时间(h)。

2. 谷氨酰胺合成酶活性

称取1.0g样品,加入3ml提取液(100ml $0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH8.0 Tris-HCl; 0.0612g Tris, 0.0498g $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.0617g DTT和13.692g蔗糖,用 $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl调pH),冰浴研磨,4℃12 000g离心20min。取上清液0.7ml于2支试管中,分别加入A(250ml $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH7.4 Tris-HCL缓冲液; 3.0590g Tris, 4.9795g $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.8628g 谷氨酸钠盐, 0.6057g 半胱氨酸, 0.1920g EDTA,用 $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl调pH)和B反应液各1.6ml(pH7.4, A液成分中加 $80\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸羟胺),再分别加0.7ml粗酶液和0.7ml ATP,37℃保温0.5h,加入显色剂1ml,摇匀并放置片刻后,于5000g离心10min,取上清液测定540nm吸光值, A液管为对照。用考马斯亮蓝法测定酶液中可溶性蛋白含量(高俊凤,2006)。根据下式计算GS活性。

$$\text{GS活性}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}) = A / (P \cdot V \cdot T)$$

式中, A 为540nm处吸光值; P 为粗酶液中可溶性蛋白质的质量浓度($\text{mg} \cdot \text{ml}^{-1}$); V 为反应体系中加的酶液体积(ml); T 为反应时间(h)。

(二) 数据处理

试验数据用SPSS 12.0软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿叶片硝酸还原酶活性的影响

1. 断根后第一年第一茬硝酸还原酶活性

在断根后第一年的第一茬分枝期(图5-27),500cm处断根对苜蓿叶片硝酸还原酶

(NR) 活性无显著影响, 其余各处理 NR 活性均极显著降低 ($P < 0.01$); 在处理中, 500cm 处断根的苜蓿叶片 NR 活性最高 ($1.298 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 320cm 断根处理次之, 两处理极显著高于其余各处理, 而 160cm 处断根的处理 NR 活性最低 ($0.119 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理, 此外, 大部分断根处理间无显著差异。在现蕾期 (图 5-27), 各处理苜蓿叶片中 NR 活性均达极显著降低 ($P < 0.01$); 深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 苜蓿叶片中 NR 活性较高 ($1.294 \sim 1.939 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 高于大部分处理, 500cm 处断根的处理 NR 活性最高, 极显著 ($P < 0.01$) 高于其他各处理, 120cm 以内断根的处理苜蓿叶片 NR 活性较低 ($0.580 \sim 0.893 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 3 个处理间无显著差异, 但显著 ($P < 0.05$) 低于大部分其他处理。在初花期 (图 5-27), 各处理苜蓿叶片中 NR 活性均降低, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 与深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 差异未达显著水平, 中间层 (120~360cm) 基本都显著降低 ($P < 0.05$); $\geq 400\text{cm}$ 的断根处理叶片 NR 活性较高 ($4.823 \sim 5.906 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 3 个处理 (400cm、450cm、500cm) 间无显著差异, 500cm 处断根的处理叶片 NR 活性最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其余各处理, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 居中, 与深层处理 (400cm、500cm) 无显著差异, 中间层 (120~360cm) 处理较低 ($1.477 \sim 4.440 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 与浅层、深层处理差异基本都达显著水平 ($P < 0.05$)。

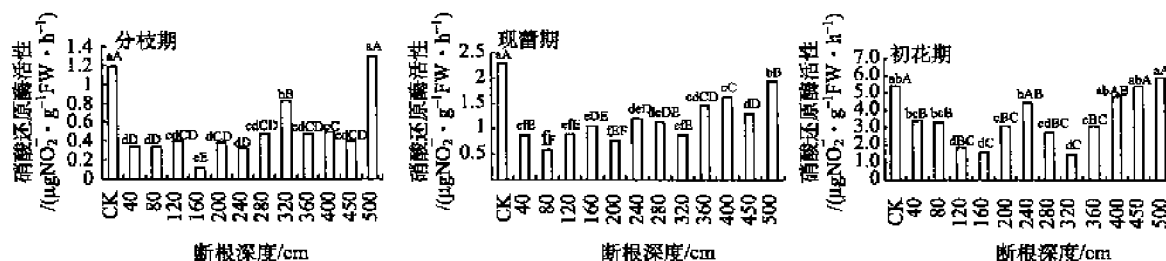


图 5-27 断根对第一年第一茬苜蓿叶片硝酸还原酶活性的影响

不同柱上小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同柱上大写字母不同表示差异极显著 ($P < 0.01$), 本章其余图同。

总之, 断根使苜蓿叶片 NR 活性降低, 随断根后恢复生长时间的延长, 叶片 NR 活性有所恢复, 同时, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 对 NR 活性的影响较小, 而浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) NR 活性恢复速度较快, 在初花期, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 基本恢复到了对照水平, 而中间层 (120~360cm) 基本都显著降低 ($P < 0.05$)。

2. 断根后第一年第三茬苜蓿硝酸还原酶活性

在断根后第一年的第三茬 (图 5-28), 0~160cm 各处理苜蓿叶片中 NR 活性均极显著降低 ($P < 0.01$); 在处理中, 450cm 和 500cm 处断根处理后苜蓿叶片中 NR 活性较高, 分别为 $1.636 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.903 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著 ($P < 0.05$) 高于大部分处理, 而 120~450cm 断根的各处理相互均无显著差异。

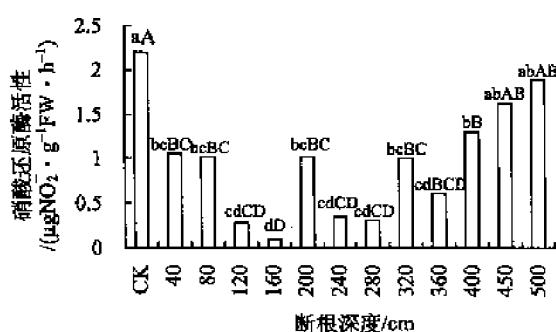


图 5-28 断根后第一年第三茬硝酸还原酶活性

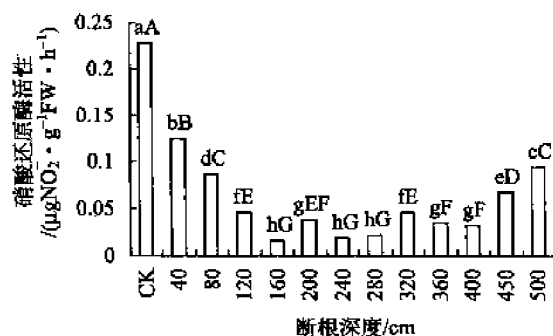


图 5-29 断根后第一年第四茬硝酸还原酶活性

3. 断根第一年第四茬硝酸还原酶活性

在断根后第一年的第四茬（图 5-29），各处理苜蓿叶片中 NR 活性均极显著降低（ $P < 0.01$ ）。同时，在绝大多数处理间苜蓿叶片中 NR 活性存在极显著差异（ $P < 0.01$ ）， $\leq 80\text{cm}$ 和 $\geq 450\text{cm}$ 的断根处理叶片中 NR 活性降低幅度较小（ $0.103 \sim 0.160 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ ），而中间层（ $120 \sim 400\text{cm}$ ）的各断根处理苜蓿叶片中的 NR 活性降低幅度较大（ $0.182 \sim 0.212 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ ）。

4. 断根后第二年第一茬硝酸还原酶活性

在断根后第二年第一茬的现蕾期（图 5-30），各处理苜蓿叶片中 NR 活性均降低，且除 40cm 和 400cm 处断根处理外，其余各处理差异均达显著（ $P < 0.05$ ）和极显著（ $P < 0.01$ ）水平；在处理中， $\leq 80\text{cm}$ 的浅层断根和 $\geq 400\text{cm}$ 的深层断根处理后苜蓿叶片中 NR 活性较高（ $10.287 \sim 14.830 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ ），显著（ $P < 0.05$ ）高于除 320cm 外的中间层（ $120 \sim 360\text{cm}$ ）各处理。

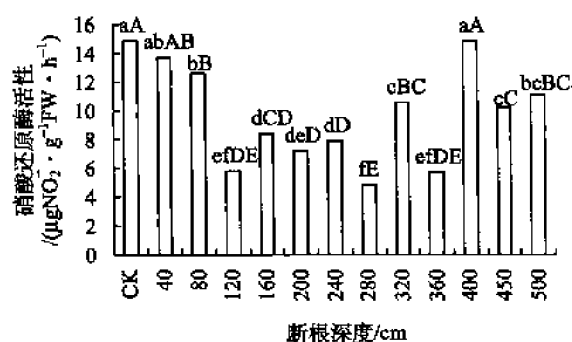


图 5-30 断根后第二年第一茬硝酸还原酶活性

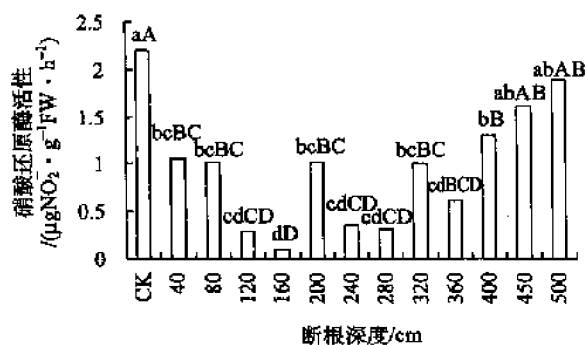


图 5-31 断根后第二年第三茬硝酸还原酶活性

5. 断根后第二年第三茬硝酸还原酶活性

在断根后第二年第三茬的现蕾期（图 5-31），各处理苜蓿叶片中 NR 活性均降低，且除 450cm 和 500cm 处断根的处理外，差异均达显著水平（ $P < 0.05$ ）；同时可以看

出, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 苜蓿叶片中 NR 活性较高 ($1.025 \sim 1.065 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) NR 活性次之 ($1.308 \sim 1.891 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 浅层、深层各处理内均无显著差异, 而深层处理显著高于部分中间层处理 ($120 \sim 360\text{cm}$), 中间层处理苜蓿叶片中 NR 活性较低 ($0.091 \sim 1.013 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 160cm 处断根的处理 NR 活性最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于浅层和深层各处理, 此外, 中间层、浅层各处理间均无显著差异。

6. 断根后第二年第四茬硝酸还原酶活性

在断根后第二年第四茬的现蕾期, 各断根处理苜蓿叶片中 NR 活性均显著降低 (图 5-32) ($P < 0.05$), 且除 40cm 处断根的处理外, 其余各处理均极显著降低 ($P < 0.01$); 同时, 各处理间差异较小, 80cm 以内的浅层断根和 $\geq 320\text{cm}$ 的深层断根处理后苜蓿叶片中 NR 活性较高 ($0.04 \sim 0.05 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 中间层 ($120 \sim 280\text{cm}$) 处理较低 (大多为 $0.02 \sim 0.03 \mu\text{gNO}_2^- \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 160cm 处断根的处理 NR 活性最低, 显著低于除 120cm 、 240cm 和 280cm 处断根的处理外的各处理。

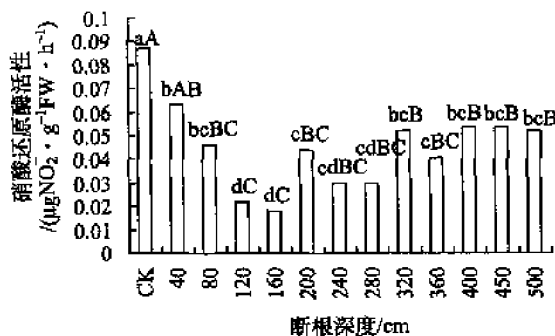


图 5-32 断根后第二年第四茬硝酸还原酶活性

(二) 断根对紫花苜蓿叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响

1. 断根后第一年第一茬谷氨酰胺合成酶活性

在断根后第一年第一茬的分枝期 (图 5-33), 500cm 处断根的苜蓿叶片中谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性显著升高 ($P < 0.05$), 80cm 以内和 320cm 处断根的苜蓿 GS 活性显著降低 ($P < 0.05$); 在处理中, 500cm 处断根的苜蓿叶片中 GS 活性最高 ($0.080\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理, 400cm 处断根的处理次之, 两处理显著 ($P < 0.05$) 高于除 200cm 和 240cm 外的各处理, 而 40cm 处断根的处理 GS 活性最低 ($0.031\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 低于多数处理, $120 \sim 280\text{cm}$ 断根的各处理 GS 活性居中 ($0.039 \sim 0.051\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 此间处理相互均无显著差异。在现蕾期 (图 5-33), 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) GS 活性显著升高 ($P < 0.05$), 其余各处理差异都不显著; 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) GS 活性较高 ($0.129 \sim 0.149\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 和绝大多数处理差异显著 ($P < 0.05$), 320cm 处断根的处理 GS 最低 ($0.097\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 低于 200cm 处和 120cm 以内断根的各处理, 此外, $\geq 120\text{cm}$ 的各断根处理间均无显著差异。在初花期 (图 5-33), 与对照相比, 360cm 和 450cm 处断根的苜蓿叶片中 GS 活性显著升高 ($P < 0.05$), 其余各处理均降低, 且除 500cm 外的各处理均显著降低 ($P < 0.05$); 在处理中, $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理 GS 活性较

高 ($0.085 \sim 0.247 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 360cm 和 450cm 处断根的苜蓿叶片中 GS 活性极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理, 240cm 以内断根的苜蓿叶片中 GS 活性较低 ($0.068 \sim 0.083 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 且这些处理间无显著差异。

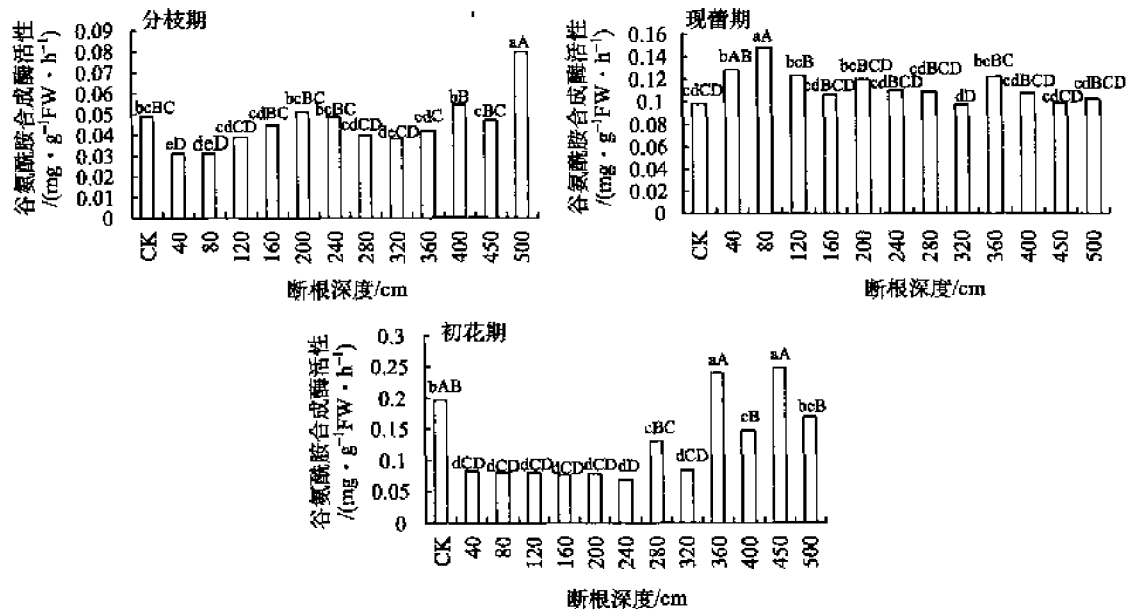


图 5-33 断根后第一年第一茬谷氨酰胺合成酶活性

2. 断根后第一年第三茬谷氨酰胺合成酶活性

从图 5-34 中可以看出, 在断根后第一年的第三茬, 各断根处理使苜蓿叶片中 GS 活性均显著降低 ($P < 0.05$), 且除 40cm 处断根的处理外, 差异均达极显著水平 ($P < 0.01$); 同时, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 320\text{cm}$) GS 活性较高 ($0.032 \sim 0.050 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 40cm 处断根的苜蓿叶片中 GS 活性最高, 为 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$, 500cm 处断根的处理次之 ($0.049 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 两处理间无显著差异, 而都显著 ($P < 0.05$) 高于 400cm 处和 120~280cm 断根的处理, 中间层 (120~280cm) 处理 GS 活性较低 ($0.017 \sim 0.032 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 200cm 处断根的处理 GS 活性最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于浅层、深层各处理和部分中间层处理, 此外, 80~450cm 断根的处理间均无显著差异。

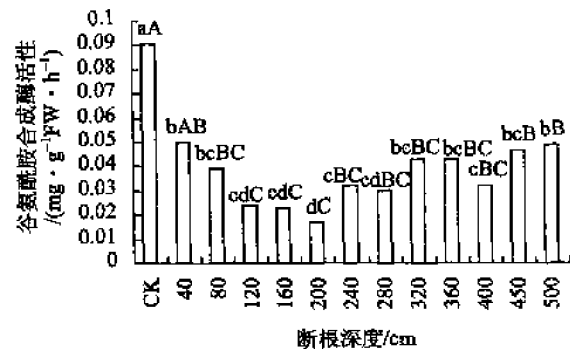


图 5-34 断根后第一年第三茬谷氨酰胺合成酶活性

3. 断根后第一年第四茬谷氨酰胺合成酶活性

在断根后第一年的第四茬(图 5-35), 只有 200cm 处断根的苜蓿 GS 活性显著降低 ($P<0.05$), 其余处理均无显著差异; 在处理中, 40cm 处断根的处理 GS 活性最高, 为 $0.156\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著 ($P<0.05$) 高于除 120cm、400cm 和 450cm 处断根的处理外的各处理, 200cm 处断根的处理 GS 活性最低, 为 $0.062\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著 ($P<0.05$) 低于大部分处理, 此外, 各处理间均无显著差异。

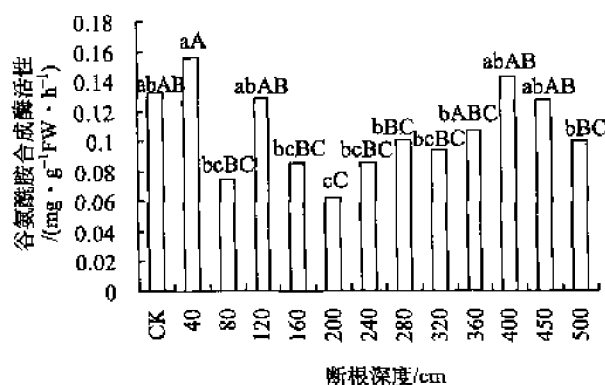


图 5-35 断根后第一年第四茬
谷氨酰胺合成酶活性

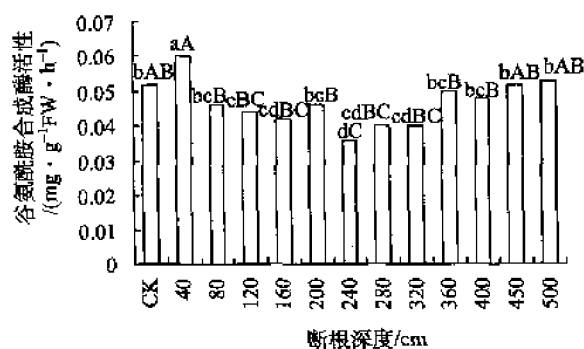


图 5-36 断根后第二年第一茬
谷氨酰胺合成酶活性

4. 断根后第二年第一茬谷氨酰胺合成酶活性

在断根后第二年第一茬的现蕾期(图 5-36), 40cm、450cm 和 500cm 处断根的苜蓿叶片中 GS 活性升高或未变, 其余处理 GS 活性均降低, 且 40cm 和 120~320cm 除 200cm 外的各处理差异均达显著 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) GS 活性较高 ($0.046\sim 0.060\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 40cm 处断根的处理 GS 活性最高, 显著 ($P<0.05$) 高于各处理, 其余浅层、深层各处理间均无显著差异, 中间层处理 (120~320cm) GS 活性较低 ($0.036\sim 0.044\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 240cm 处断根的处理 GS 活性最低, 显著 ($P<0.05$) 低于浅层、深层各处理和部分中间层处理, 此外, 80~400cm 的各处理间均无显著差异。

5. 断根后第二年第三茬谷氨酰胺合成酶活性

在断根后第二年第三茬的现蕾期(图 5-37), 各断根处理使苜蓿叶片中 GS 活性均极显著降低 ($P<0.01$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) GS 活性较高 ($0.056\sim 0.114\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 中间层处理 (120~320cm) GS 活性较低 ($0.031\sim 0.053\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 除浅层处理间、中间层部分处理间无显著差异外, 大部分处理间存在显著 ($P<0.05$) 或极显著差异 ($P<0.01$)。

6. 断根后第二年第四茬谷氨酰胺合成酶活性

在断根后第二年第四茬的现蕾期(图 5-38), 断根处理后苜蓿叶片中 GS 活性均极

显著降低 ($P < 0.01$); 且浅层处理 ($\leq 120\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 苜蓿叶片中 GS 活性较高 ($0.264 \sim 0.368 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 40cm 处断根的处理、深层处理相互间均无显著差异, 而显著 ($P < 0.05$) 高于其余处理, 80cm 与 120cm 处断根的处理 GS 活性无显著差异, 而与除 320cm 外的各处理差异显著 ($P < 0.05$), 中间层 (160~360cm) 处理 GS 活性较低 ($0.089 \sim 0.250 \text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 160cm 和 240cm 处断根的处理 GS 活性最低, 两处理间无显著差异, 而极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理, 其余中间层处理间无显著差异, 但中间层处理显著 ($P < 0.05$) 低于绝大多数的浅层、深层处理。

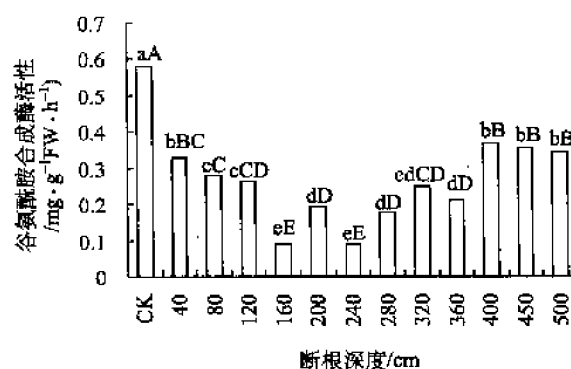
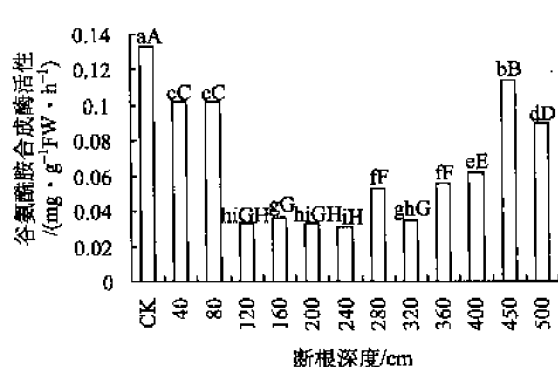


图 5-37 断根后第二年第三茬谷氨酰胺合成酶活性 图 5-38 断根后第二年第四茬谷氨酰胺合成酶活性

三、小结

断根使紫花苜蓿叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性降低, 总体上, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性较高、中间层 (120~360cm) 低。硝酸还原酶活性在各个测定时期基本都显著降低, 而谷氨酰胺合成酶活性在断根后第一年, 部分处理降低, 部分处理升高, 在断根后第二年, 各处理基本都显著降低。

第五节 断根对紫花苜蓿叶片保护酶活性和丙二醛含量的影响

超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 是植物体内清除活性氧和自由基的重要的保护酶, 丙二醛 (MDA) 是植物细胞发生膜脂过氧化作用的主要依据, 在植物处于逆境时, 通常体内的各种保护酶活性升高, 抑制丙二醛 (MDA) 的积累, 维持细胞的稳定和完整, 提高对逆境的适应性 (李会云和郭修武, 2008; 朱红霞等, 2008; Bowler et al., 1992)。因此, 保护酶活性的高低及 MDA 的含量在一定程度上反映了植物的耐逆境的能力。同时, 断根对植物活性氧清除能力的影响因植物种类等不同而异 (石岩等, 2000; 李向阳等, 2004)。为此, 本试验通过在大田条件下不同深度切断苜蓿根系的方法形成吸水胁迫, 研究断根后苜蓿叶片保护酶和丙二醛的含量变化, 以期探索苜蓿根系生长对地上部分生理相关性的影响提供一定的理论依据。

一、材料与方法

(一) 测定指标与方法

材料同本章第一节。断根后, 分别在第一年第一茬分枝期、现蕾期和初花期, 第一年第二茬、第三茬及第四茬的现蕾期, 第二年的第一茬、第三茬和第四茬的现蕾期, 于不同断根深度小区采集苜蓿叶片, 测定超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性和丙二醛 (MDA) 含量。

1. 酶液提取

称取 0.5g 去中脉的苜蓿叶片, 提取液为 $1/15\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 ($\text{pH}=7.8$), 倒入研钵内, 冰研磨成匀浆, $6000\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20min, 上清液为 SOD 酶液, 共 5ml。将酶液放入 4°C 冰箱中保存备用 (袁庆华等, 2002)。POD、CAT 酶液的提取方法同 SOD, 但 POD 提取液为 $0.01\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 ($\text{pH}=7.2$); CAT 酶液提取液为 $50\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 ($\text{pH}7.0$), $15\,000\text{g}$ 离心 15min (胡景江和孙群, 2006)。

2. SOD 活性测定

用 NBT 法。3ml 反应液中含有: $0.013\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲硫氨酸、 $6.3 \times 10^{-5}\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氮蓝四唑、 $1.3 \times 10^{-6}\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 核黄素、 $1 \times 10^{-4}\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸 (EDTA) 及 $\text{pH}=7.8$ 的 $0.05\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液, 加入稀释 30 倍的酶粗提液 1ml, 用 4000lx 荧光照射 15min, 并在 560nm 波长下测量吸光值。以每克鲜重含有的酶活单位 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$) 表示。3 次重复。

3. POD 活性测定

1ml 酶液加 3mL POD 反应混合液 (0.86ml 愈创木酚、0.59ml 30% H_2O_2 和 1.55ml $100\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{pH}6.0$ 磷酸缓冲液), 在 470nm 下比色, 每隔 1min 读取吸光值。以每分钟每克鲜重吸光值变化 100 所需的酶量为一个酶活单位 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$) 表示。3 次重复 (胡景江和孙群, 2006)。

4. CAT 活性测定

用紫外吸收法测定 (胡景江和孙群, 2006)。0.1ml 酶液 + 2.7ml CAT 反应液 [1.0ml $50\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris-HCl 缓冲液 ($\text{pH}7.0$)、0.2ml $100\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2O_2 和 1.7ml 蒸馏水] 为样品测定管, 在紫外分光光度计 240nm 比色, 每隔 30s 读取吸光值; 以 0.1ml 水浴灭活酶液 + 2.7ml CAT 反应液为对照管, 测定吸光值。以每克鲜重每分钟分解的过氧化氢 (H_2O_2) 的量为一个 CAT 酶活性单位 ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$) 表示。3 次重复。

5. 丙二醛含量测定

用硫代巴比妥酸比色法测定。新鲜叶片 0.6g 加 5% 三氯乙酸 (TCA) 提取液冰浴

研磨, 5%TAC总用量为10ml, 3000g离心15min, 取上清液2ml加5ml 0.5%硫代巴比妥酸(TBA), 沸水浴10min, 迅速冷却后3000g离心15min, 取上清液, 在600nm、532nm和450nm波长下比色读取吸光值, 0.5%TBA为空白调零。重复3次, 单位 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。

(二) 数据处理

试验数据用SPSS 12.0软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿叶片SOD活性的影响

1. 断根后第一年第一茬SOD活性

在断根后第一年第一茬的分枝期(图5-39), 深层断根处理(320~500cm)SOD活性增加幅度较大, 400cm处断根的处理SOD活性最高, 比对照增加 $60.7 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$, 与对照及其余各处理相比, 差异均达极显著($P < 0.01$)水平, 200cm处断根的处理最低, 极显著($P < 0.01$)低于对照和其余各处理(280cm处的除外), 对照与其他各处理间及各处理内均无显著差异。在现蕾期(图5-39), 除120cm处断根的首蓿叶片中SOD活性比对照略有增加外, 其余各处理均降低, 但160cm以内及400cm处断根的处理与对照差异未达显著差异水平, 其余各断根处理叶片中SOD活性均显著($P < 0.05$)低于对照; 同时, 200cm处断根的首蓿叶片中SOD最低, 极显著低于各处理。在初花期(图5-39), 各处理酶活性均比对照降低, 且除40cm、400cm处断根的首蓿叶

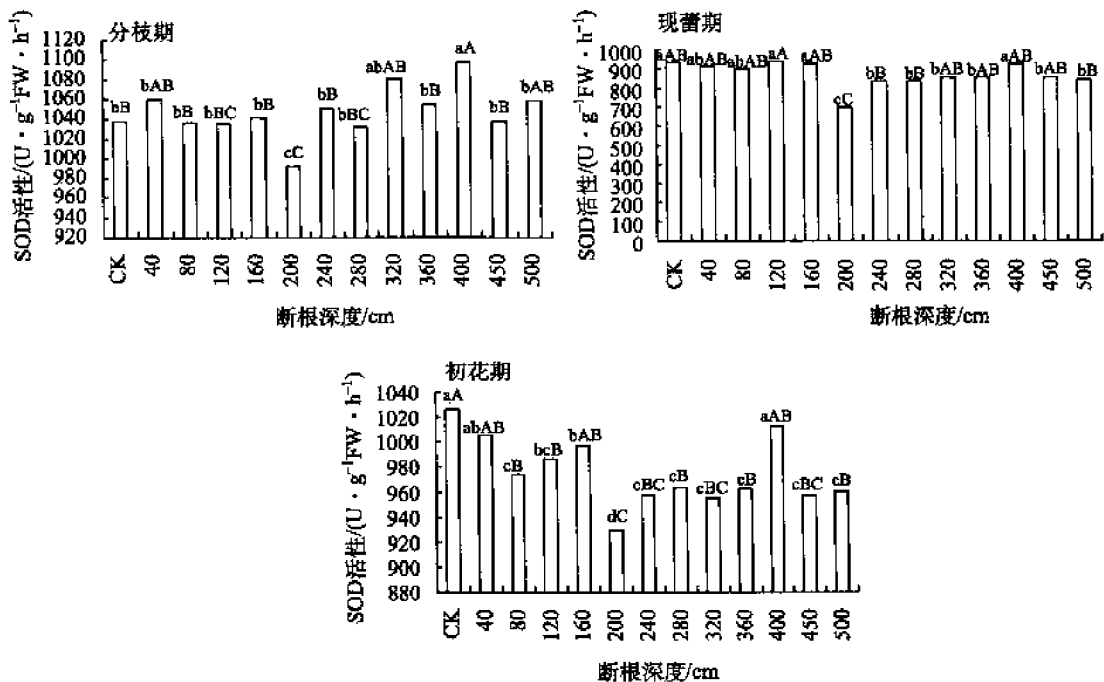


图 5-39 断根后第一年第一茬苜蓿叶片 SOD 活性

片中 SOD 活性差异未达显著水平外,其余处理均达显著水平 ($P<0.05$);在处理中,40cm、400cm 处断根的苜蓿叶片中 SOD 活性降低幅度最小,分别为 $14.2\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $21.7\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$,200cm 处断根的苜蓿 SOD 活性降低最大 ($97.9\text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{h}^{-1}$),3 个处理分别与其他各处理均存在显著差异 ($P<0.05$)。

同时,可以看出,断根对苜蓿叶片中 SOD 的影响与苜蓿的生育期有一定的关系,在分枝期苜蓿叶片中 SOD 的活性相对较高,现蕾期和初花期的相对较低,且初花期的最低。

2. 断根后第一年第二茬 SOD 活性

在断根后第一年第二茬的现蕾期(图 5-40),对照与大部分处理间 SOD 活性无显著差异,只有 240cm 处断根的处理显著降低 ($P<0.05$),120cm 和 400cm 处断根的处理显著升高 ($P<0.05$); $\leq 120\text{cm}$ 和 $\geq 360\text{cm}$ 的断根处理 SOD 活性较高,浅层处理(40cm、80cm)与深层处理($\geq 360\text{cm}$)间基本无显著差异,而中间层(160~320cm)处理 SOD 活性较低,且各中间层处理均显著低于 ($P<0.05$) 浅层和深层处理。

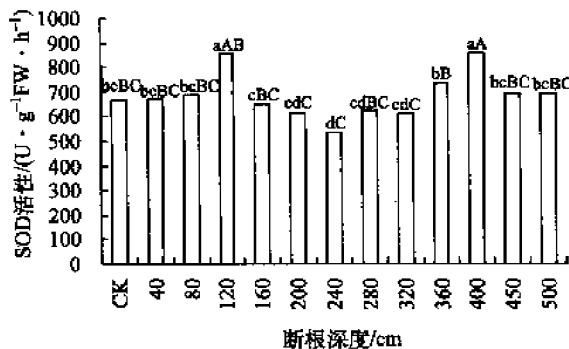


图 5-40 断根后第一年第二茬 SOD 活性

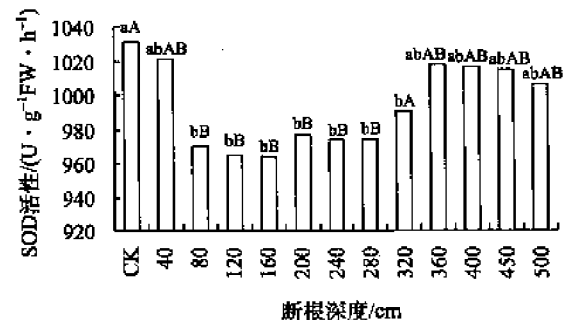


图 5-41 断根后第一年第三茬 SOD 活性

3. 断根后第一年第三茬 SOD 活性

在断根后第一年第三茬的现蕾期(图 5-41),SOD 活性与对照相比,各处理均降低,处理 80~320cm 差异达显著水平 ($P<0.05$),且大多数处理达极显著水平 ($P<0.01$)。

4. 断根后第一年第四茬 SOD 活性

在断根后第一年第四茬的现蕾期(图 5-42),与对照相比,400cm 处断根的处理 SOD 活性升高,其余各处理均降低,但差异只有 120cm、200cm、320cm 达显著水平 ($P<0.05$)。

5. 断根后第二年的 SOD 活性

在断根后第二年第一茬的现蕾期(图 5-43),各处理 SOD 活性均极显著降低 ($P<0.01$);同时,各处理间 SOD 活性差异较大,总体呈浅层处理($\leq 120\text{cm}$)和深层处理

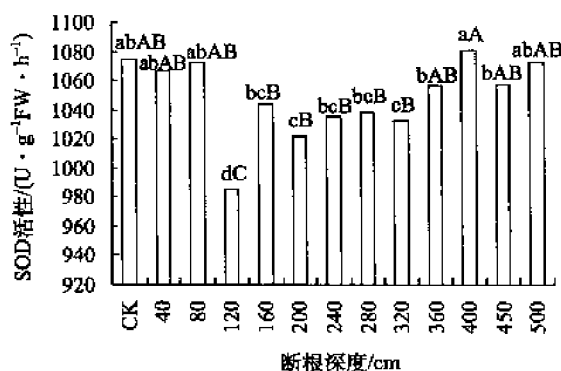


图 5-42 断根后第一年第四茬 SOD 活性

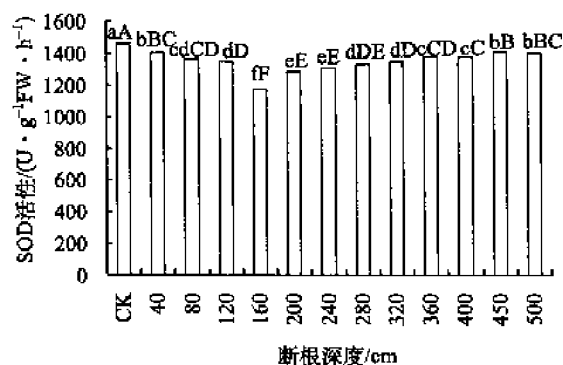


图 5-43 断根后第二年第一茬 SOD 活性

(≥ 360 cm) 苜蓿叶片中 SOD 活性较高 ($1354.5 \sim 1415.0 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$)、中间层处理 (160~320cm) 较低 ($1178.9 \sim 1349.9 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$) 的趋势, 40cm、450cm 和 500cm 处断根的苜蓿叶片中 SOD 活性最高 (约 $1410 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 相互无显著差异, 但均显著 ($P < 0.05$) 高于其他各处理, 160cm 处断根的处理最低 ($1178.9 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW} \cdot \text{h}^{-1}$), 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理。在第二年第三茬的现蕾期 (图 5-44), 各处理 SOD 活性均降低, 除 40cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$), 且除 500cm 处断根的处理外, 差异均达极显著水平 ($P < 0.01$); 同时, 120~400cm 断根的处理 SOD 活性较低, 相互均无显著差异, 但都显著低于其余各处理 ($P < 0.05$)。在第二年第四茬的现蕾期 (图 5-45), 各处理 SOD 活性均降低, 80~240cm 的处理差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 160cm 和 200cm 处断根的处理最低, 显著低于大部分处理 ($P < 0.05$), 其余各处理间基本无显著差异。

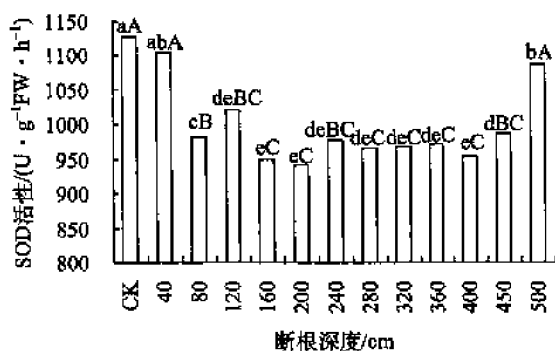


图 5-44 断根后第二年第三茬 SOD 活性

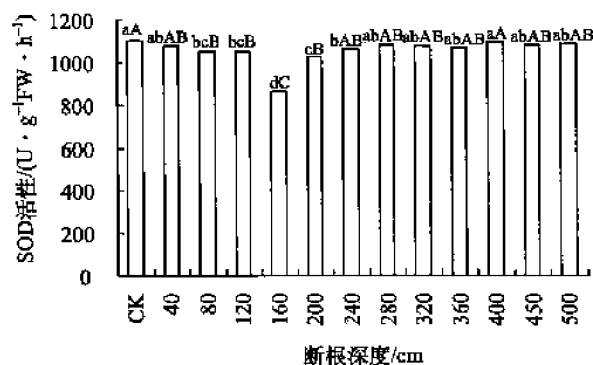


图 5-45 断根后第二年第四茬 SOD 活性

(二) 断根对紫花苜蓿叶片 POD 活性的影响

1. 断根后第一年第一茬 POD 活性

从图 5-46 中可以看出, 在断根后第一年第一茬的分枝期, 除 400cm 处断根后苜蓿

叶片中 POD 活性稍有增加外,其余的断根处理均使苜蓿叶片中的 POD 活性降低。在 200cm 以内断根的各处理,苜蓿叶片中 POD 的活性和对照差异均达显著水平 ($P < 0.05$),而断根深度大于 200cm 的处理中除 280cm 外,差异均未达显著水平。在现蕾期,不同深度断根后苜蓿叶片中的 POD 活性均降低,差异均达显著水平 ($P < 0.05$),且除 40cm、160cm 处断根的处理外,均达极显著水平 ($P < 0.01$);不同深度断根处理按叶片中 POD 酶活性大小可分为三类,第一类,断根深度在 160cm 以内,其断根各处理叶片中 POD 活性降低得最少 ($0.06 \sim 0.13 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$),第二类,断根深度为 200~360cm 的处理叶片中 POD 活性降低得最多 ($0.24 \sim 0.31 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$),第三类,断根深度在 $\geq 400\text{cm}$ 的断根处理,叶片中 POD 活性的降低居中 ($0.16 \sim 0.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$),每类内各处理间无显著差异,但三类间多数处理存在显著差异 ($P < 0.05$)。在初花期,各断根处理均使苜蓿叶片中的 POD 活性降低,且除 120cm、160cm、400cm 处断根的处理未达显著水平外,其余处理均达极显著 ($P < 0.01$) 水平;在处理中,120cm、160cm 处断根的苜蓿叶片中 POD 活性最高,200cm 处断根的处理最低,3 个处理和其余各处理均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

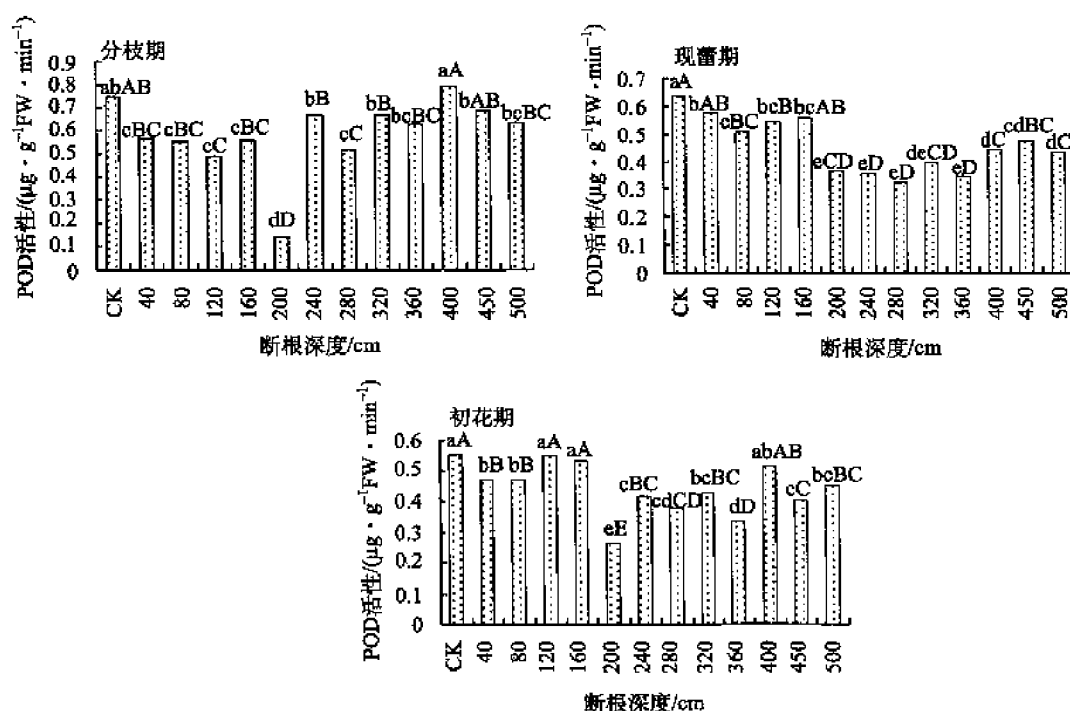


图 5-46 断根后第一年第一茬苜蓿叶片 POD 活性

在断根后第一年第一茬,断根对苜蓿叶片中 POD 活性的影响与生育期有关,现蕾期和初花期的 POD 活性较分枝期低,200cm 处断根的苜蓿叶片中 POD 活性在 3 个时期一直较低,400cm 处断根的处理一直较高。分枝期,断根深度在 200cm 以内的浅层断根,其叶片中 POD 活性降低得较多,在现蕾期和初花期降低得相对较少,而 $\geq 200\text{cm}$ 的断根处理却出现了相反的趋势。

2. 断根后第一年第二茬 POD 活性

在断根后第一年第二茬的现蕾期 (图 5-47), 400cm、450cm 和 500cm 处断根的处理 POD 活性升高, 但只有 400cm 处断根的处理差异显著 ($P<0.05$), 其余处理均降低, 且大部分处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 处理酶活性较高, 显著 ($P<0.05$) 高于各处理。

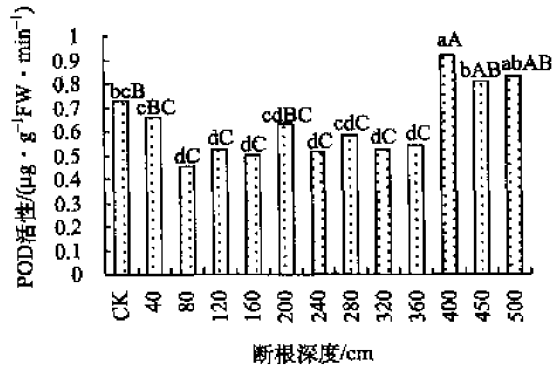


图 5-47 断根后第一年第二茬 POD 活性

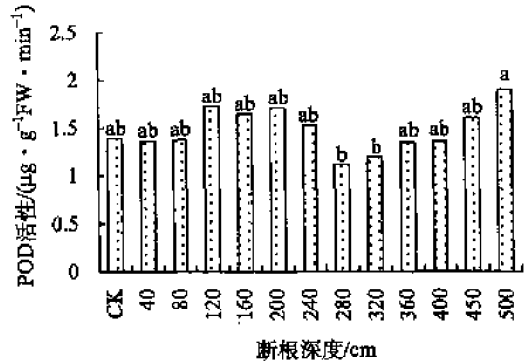


图 5-48 断根后第一年第三茬 POD 活性

3. 断根后第一年第三茬 POD 活性

在断根后第一年第三茬的现蕾期 (图 5-48), 对照与各个处理间叶片中 POD 活性差异不显著; 在处理中, 500cm 处断根的处理 POD 活性最高, 显著 ($P<0.05$) 高于 280cm 和 320cm 处断根的处理, 此外, 各处理间均无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬 POD 活性

在断根后第一年第四茬的现蕾期 (图 5-49), 与对照相比, 各处理苜蓿叶片中 POD 活性均降低, 但只有 320cm 和 400cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 40cm 处断根的处理 POD 活性最高, 显著高于 320cm 和 400cm 处断根的处理, 其余处理均无显著差异。

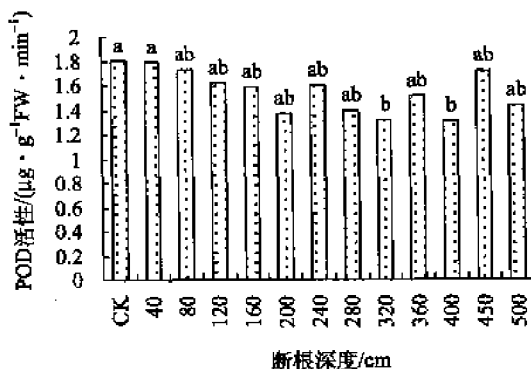


图 5-49 断根后第一年第四茬 POD 活性

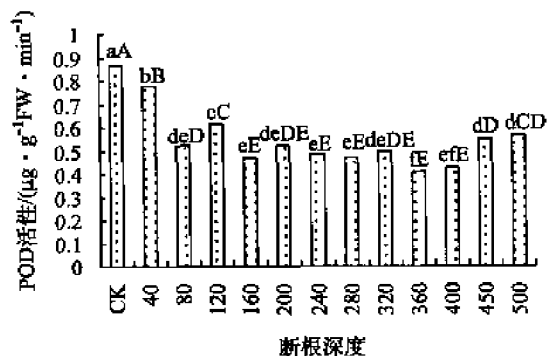


图 5-50 断根后第二年第一茬 POD 活性

5. 断根后第二年 POD 活性

在断根后第二年的第一茬的现蕾期 (图 5-50), 对照 POD 活性极显著高于各处理 ($P<0.01$); 在处理中, 120cm 以内断根的处理和深层处理 (≥ 450 cm) POD 活性较高 ($0.53\sim 0.78\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 基本都显著高于中间层 (160~400cm) 处理, 中间层处理 POD 活性较低 ($0.41\sim 0.52\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 其层内处理间差异较小。在第三茬的现蕾期 (图 5-51), 只有 400cm 处断根的处理 POD 活性显著升高 ($P<0.05$), 其余处理均无显著差异; 深层处理 (≥ 320 cm) 酶活性较高 ($1.40\sim 1.67\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 120cm 以内断根的处理次之 ($1.30\sim 1.41\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 中间层 (160~280cm) 处理较低 ($0.80\sim 1.20\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 400cm 处断根的处理 POD 活性最高, 显著 ($P<0.05$) 高于各中间层处理, 160cm 处断根的处理 POD 活性最低, 显著 ($P<0.05$) 低于深层和浅层处理, 此外, 各处理间无显著差异。在第四茬 (图 5-52), 只有 400cm 和 500cm 处断根的处理 POD 活性升高, 但差异不显著, 其余处理均降低, 120~320cm 的处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 深层处理 (≥ 360 cm) POD 活性较高 ($1.56\sim 1.86\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 浅层处理 (≤ 80 cm) 次之, 两层各处理间均无显著差异, 中间层 (120~320cm) 处理较低 ($0.80\sim 1.40\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{min}^{-1}$), 显著低于 80cm、400cm 和 500cm 处断根的处理 ($P<0.05$)。

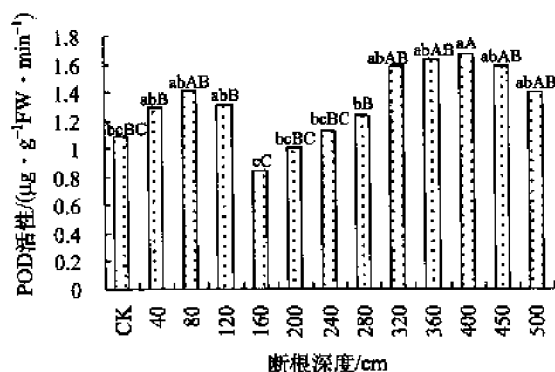


图 5-51 断根后第二年第三茬 POD 活性

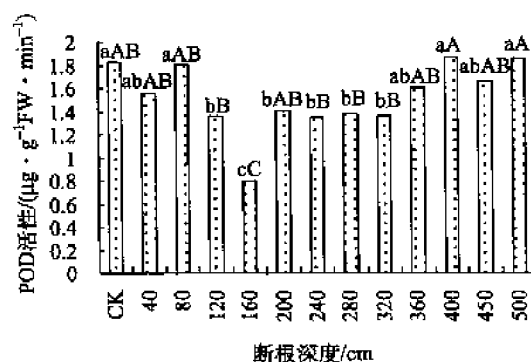


图 5-52 断根后第二年第四茬 POD 活性

在整个生长季中, POD 酶活性呈逐渐升高的趋势, 处理间差异由大变小, 出现了和处理深度相关的分层现象, 即深层处理和浅层处理酶活性较高, 中间层较低。

(三) 断根对紫花苜蓿叶片 CAT 活性的影响

1. 断根后第一年第一茬 CAT 活性

从图 5-53 中可以看出, 在断根后第一年第一茬的分枝期, 除断根深度超过 400cm 的苜蓿叶片中 CAT 活性降低外, 其余处理均使 CAT 活性升高, 其中, 80~280cm (除 160cm) 和 360cm 处断根后苜蓿叶片中 CAT 的活性与对照差异达显著水平 ($P<0.05$)。在现蕾期, 除 450cm 处断根使得苜蓿叶片中 CAT 活性升高外, 其余各个深度的断根处理

均使 CAT 活性降低,中间层断根处理(120cm、200~320cm、400cm)的各苜蓿叶片中 CAT 活性均显著降低 ($P<0.05$)。在初花期,450cm 断根的苜蓿叶片中 CAT 活性未变,而其余各个深度的断根处理均使 CAT 活性降低,但只有 280cm 处断根处理 CAT 活性差异达显著水平 ($P<0.05$);在处理中,450cm 断根的苜蓿叶片中 CAT 活性最高,280cm 最低,两者之间差异达显著水平 ($P<0.05$),其余各断根处理间均无显著差异。

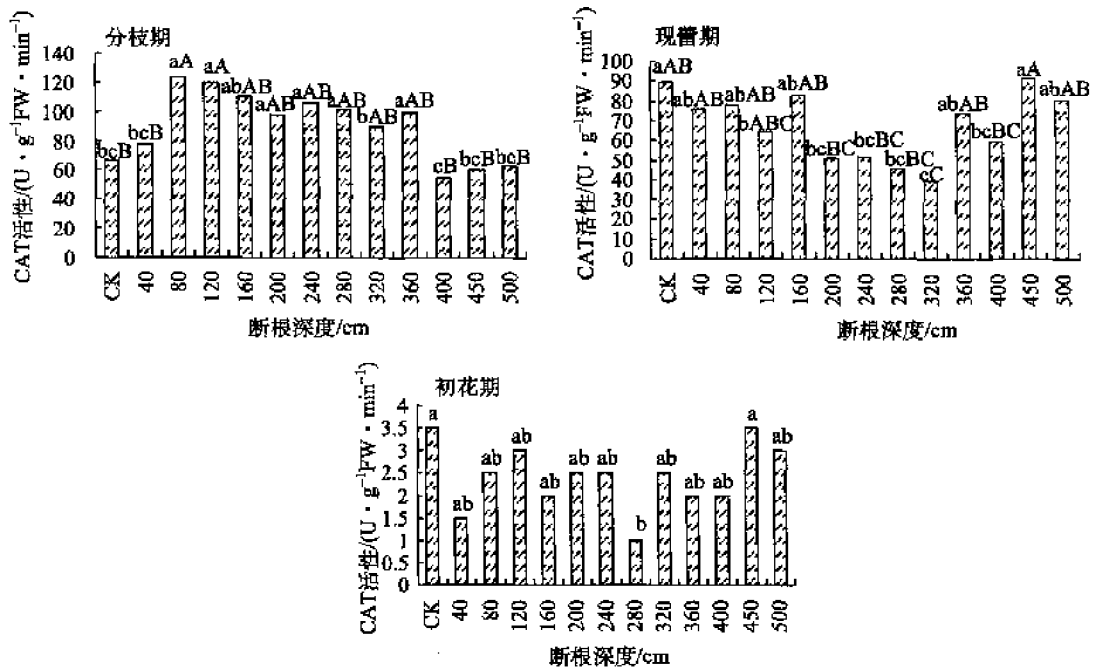


图 5-53 断根后第一年第一茬苜蓿叶片 CAT 活性

在断根后第一年第一茬,断根对不同生育期苜蓿叶片中 CAT 活性的影响不同,在分枝期,75%的断根处理使得苜蓿叶片中 CAT 活性升高,58%的处理显著升高 ($P<0.05$),在现蕾期,92%的处理降低,50%的处理显著降低 ($P<0.05$),在初花期,92%的处理降低,8%的处理达显著降低 ($P<0.05$)。这说明苜蓿叶片活性氧代谢能力随其伤根恢复性生长时间的长短而不断变化,断根对苜蓿叶片活性氧代谢能力的影响和断根深度密切相关。

2. 断根后第一年第二茬 CAT 活性

在断根后第一年第二茬的现蕾期(图 5-54),320cm 处断根的处理 CAT 活性显著升高 ($P<0.05$),120cm、160cm 和 280cm 处断根的处理显著 ($P<0.05$) 和极显著降低 ($P<0.01$);80~280cm 间的处理 CAT 活性较低,深层处理 (≥ 320 cm) 和浅层处理 (40cm) 较高。

3. 断根后第一年第三茬 CAT 活性

在断根后第一年第三茬的现蕾期(图 5-55),对照与各处理、各处理相互间 CAT 活性均无显著差异。

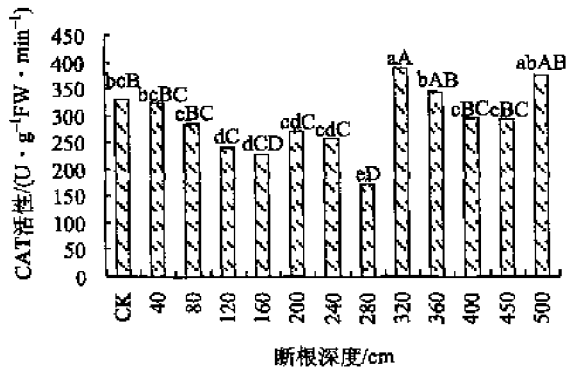


图 5-54 断根后第一年第二茬 CAT 活性

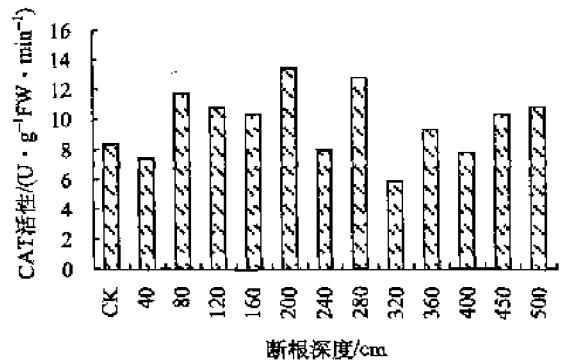


图 5-55 断根后第一年第三茬 CAT 活性

4. 断根后第一年第四茬 CAT 活性

在断根后第一年第四茬的现蕾期 (图 5-56), 各处理 CAT 活性均降低, 除 360cm 和 450cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 深层处理 (≥ 360 cm) CAT 活性较高 ($56.5 \sim 77.9 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 浅层处理 (≤ 80 cm) 次之, 深层和浅层各处理均无显著差异, 中间层处理 (120~320cm) 最低 ($32.4 \sim 58.9 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 层内各处理间基本无显著差异, 但显著低于 360cm、450cm 和 500cm 处断根的处理。

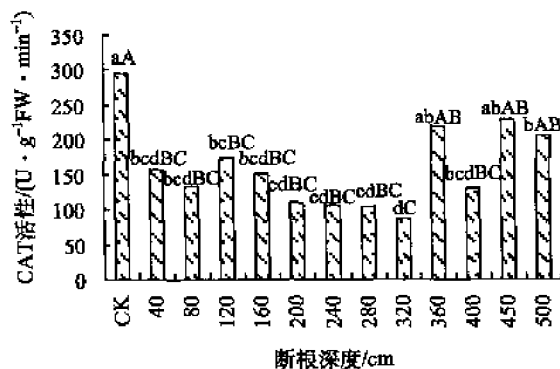


图 5-56 断根后第一年第四茬 CAT 活性

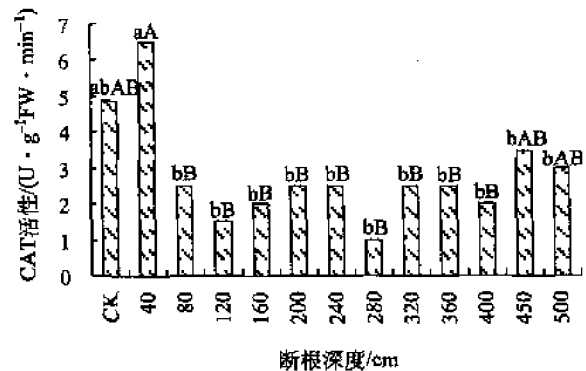


图 5-57 断根后第二年第一茬 CAT 活性

5. 断根后第二年 CAT 活性

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-57), 各处理与对照差异均未达显著水平; 在处理中, 40cm 处断根的处理 CAT 活性最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于各处理, 其余处理间均无显著差异。在第三茬 (图 5-58), ≥ 400 cm 的处理 CAT 活性升高, 450cm 处断根的处理与对照及其他各处理相比, 差异达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$), 360cm 以内断根的处理均降低, 且 120~160cm 及 280~320cm 断根的处理差异达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 深层处理 (≥ 400 cm) CAT 活性最高 ($7.9 \sim 10.2 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 显著 ($P < 0.05$) 高于各处理, 浅层处理 (≤ 80 cm) 次之, 两处理无显著差异, 中间层处理 (120~320cm) 最低 ($2.4 \sim 4.1 \text{ U} \cdot$

$\text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 层内各处理无显著差异, 而显著 ($P < 0.05$) 低于绝大部分浅层和深层处理。在第四茬的现蕾期 (图 5-59), 450cm 和 500cm 处断根的处理 CAT 活性升高, 其余处理均降低, 但只有 200cm 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) CAT 活性较高 ($71.7 \sim 77.9 \text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 浅层处理 (40cm、80cm) 居中, 中间层 (120~360cm) 最低 ($32.4 \sim 56.5 \text{U} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW} \cdot \text{min}^{-1}$), 其中, 200cm 处断根的处理 CAT 活性最低, 显著 ($P < 0.05$) 低于 450cm、500cm, 此外, 各处理无显著差异。

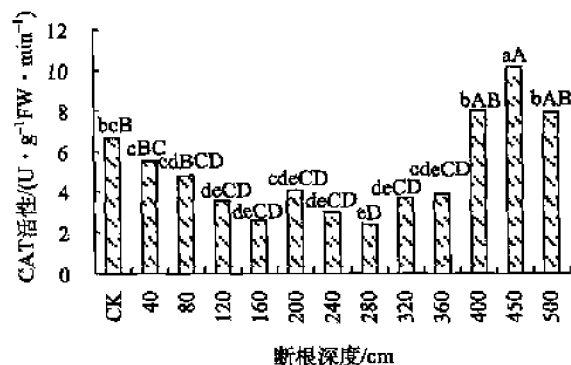


图 5-58 断根后第二年第三茬 CAT 活性

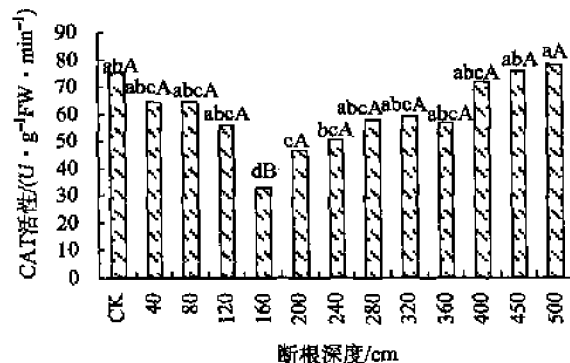


图 5-59 断根后第二年第四茬 CAT 活性

(四) 断根对紫花苜蓿叶片丙二醛含量的影响

1. 断根后第一年第一茬苜蓿叶片丙二醛含量

从图 5-60 中可以看出, 在断根后第一年第一茬的分枝期, 只有 360cm 和 500cm 处断根的处理苜蓿叶片丙二醛含量降低, 且 500cm 处断根的处理与对照差异显著 ($P <$

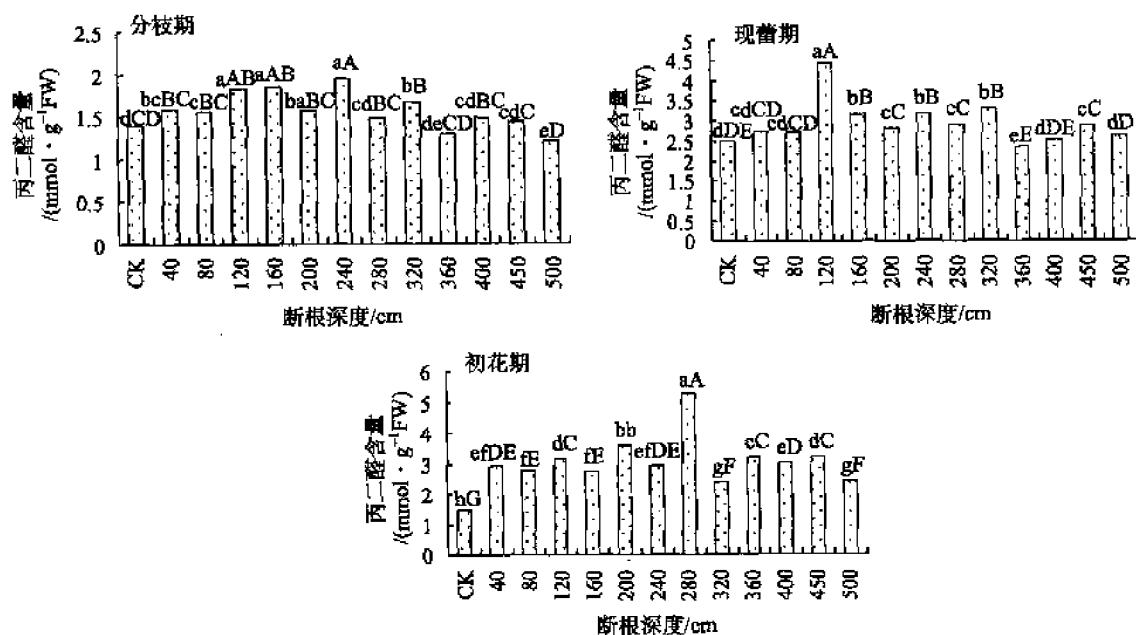


图 5-60 断根后第一年第一茬苜蓿叶片丙二醛含量

0.05), 其余处理均升高, 且除 280cm、400cm 和 450cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 240cm 处断根的处理丙二醛含量最高, 120cm 和 160cm 处断根的处理次之, 3 个处理间无显著差异, 但显著 ($P < 0.05$) 高于其余各处理, 总体上, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 360 cm) 丙二醛含量较低, 中间层 (120~320cm) 较高。在现蕾期, 除 360cm 断根处苜蓿叶片中丙二醛含量与对照相比显著 ($P < 0.05$) 降低外, 其余各个深度断根处理丙二醛含量均升高; 在处理中, 120cm 处断根的苜蓿叶片中丙二醛含量最高 ($4.438 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其他各处理。在开花期, 对照含量最低, 为 $1.488 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$, 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理; 在处理中, 绝大部分处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 280cm 处断根的处理丙二醛含量最高, 极显著 ($P < 0.01$) 高于各处理, 320cm 和 500cm 处断根的处理最低, 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理。

2. 断根后第一年第二茬苜蓿叶片丙二醛含量

在第一年第二茬的现蕾期 (图 5-61), 对照丙二醛含量最低, 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理; ≥ 280 cm 的断根苜蓿丙二醛含量较低 ($3.2 \sim 4.0 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 显著 ($P < 0.05$) 低于其余各处理 (除对照外), 120cm 以内断根的处理次之 ($3.9 \sim 4.1 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 而中间层 (160~240cm) 处理较高 ($4.5 \sim 4.9 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理。

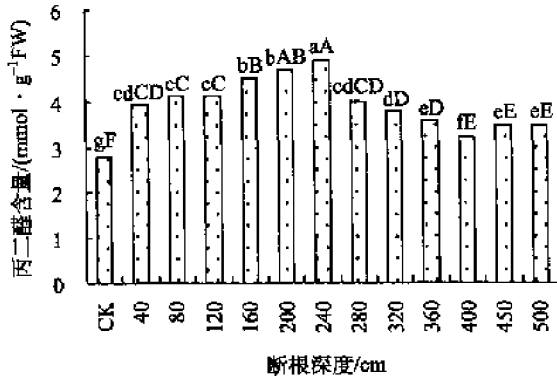


图 5-61 断根后第一年第二茬苜蓿叶片
丙二醛含量

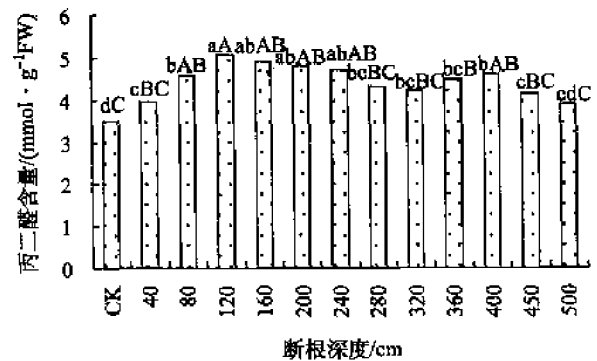


图 5-62 断根后第一年第三茬苜蓿叶片
丙二醛含量

3. 断根后第一年第三茬丙二醛含量

在断根后第一年第三茬的现蕾期 (图 5-62), 对照丙二醛含量显著 ($P < 0.05$) 低于各处理 (除 500cm 外); 在处理中, 浅层处理 (≤ 80 cm) 和深层处理 (≥ 450 cm) 丙二醛含量较低 ($3.9 \sim 4.6 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 40cm、450cm 和 500cm 处断根的处理间无显著差异, 而显著 ($P < 0.05$) 低于其余各处理, 中间层 (120~400cm) 较高 ($4.6 \sim 5.1 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 120cm 处断根的处理丙二醛含量最高, 显著 ($P < 0.05$) 高于其余处理, 此外, 中间层层内各处理间均无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬苜蓿叶片丙二醛含量

在断根后第一年第四茬的现蕾期（图 5-63），除 40cm 和 80cm 处断根的苜蓿叶片中丙二醛含量极显著（ $P<0.01$ ）低于对照外，其余各处理丙二醛含量均升高，且差异基本都达显著（ $P<0.05$ ）和极显著（ $P<0.01$ ）水平；在处理中，浅层处理（ ≤ 80 cm）和深层处理（ ≥ 450 cm）苜蓿叶片中丙二醛含量最低（ $\leq 3.6\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ），显著（ $P<0.05$ ）低于其余各处理，中间层（120~400cm）较高（4.8~6.2 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ），显著高于浅层和深层处理，其中，120~200cm 断根的处理丙二醛含量最高（ $\geq 5.6\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ），极显著（ $P<0.01$ ）高于其余各处理。

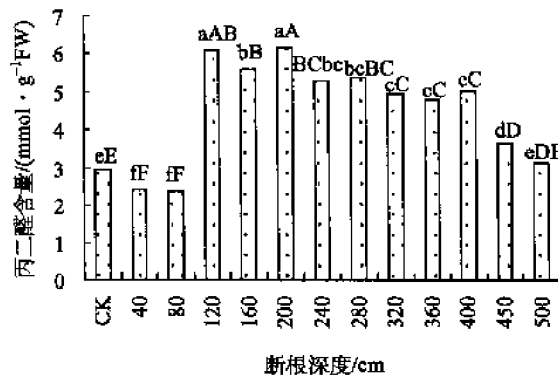


图 5-63 断根后第一年第四茬苜蓿叶片丙二醛含量

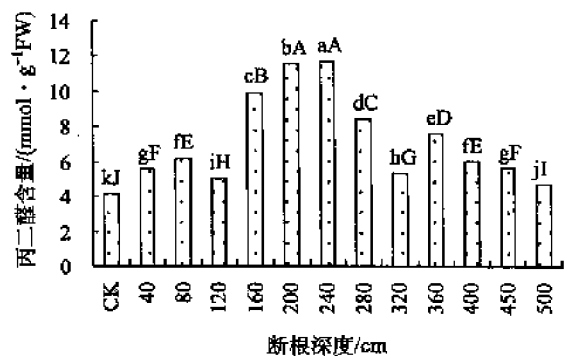


图 5-64 断根后第二年第一茬苜蓿叶片丙二醛含量

5. 断根后第二年苜蓿叶片丙二醛含量

在断根后第二年第一茬的现蕾期（图 5-64），对照苜蓿叶片中丙二醛含量最低，为 $4.169\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ，极显著（ $P<0.01$ ）低于各断根处理；此外，各处理间差异均达显著水平（ $P<0.05$ ）， ≤ 120 cm 和 ≥ 320 cm 的断根处理丙二醛含量较低（4.1~7.7 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ），而 160~280cm 的断根处理苜蓿叶片中丙二醛含量较高（8.5~11.8 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ）。在第三茬（图 5-65），对照丙二醛含量最低，极显著（ $P<0.01$ ）低于各处理；浅层处理（ ≤ 80 cm）和深层处理（ ≥ 400 cm）丙二醛含量都极显著（ $P<0.01$ ）低于中间层处理（120~360cm），浅层和深层处理内部处理无显著差异，而不同层间差异显著（ $P<0.05$ ），中间层处理丙二醛含量较高（5.4~6.3 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ），层内处理相互存在显著（ $P<0.05$ ）或极显著差异（ $P<0.01$ ）。在第四茬（图 5-66），只有 160cm 和 200cm 处断根的苜蓿叶片中丙二醛含量较对照显著升高（ $P<0.05$ ），其余处理差异均未达显著水平；同时，中间层（80~360cm）断根使苜蓿叶片中丙二醛含量升高（ $>2.8\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ）、深层（ ≥ 400 cm）和浅层（40cm）断根有使丙二醛含量降低的趋势（2.7~2.8 $\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ ）。

三、小结

断根使紫花苜蓿叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性降低，丙二醛含量升高，不同深度

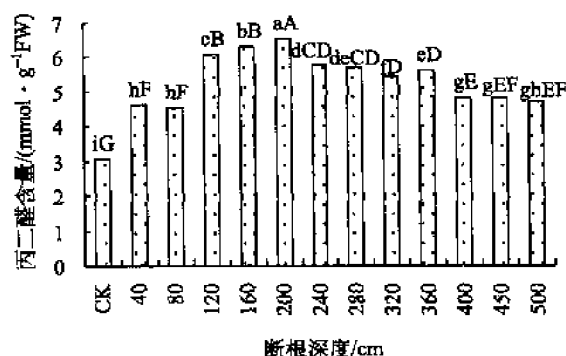


图 5-65 断根后第二年第三茬苜蓿叶片
丙二醛含量

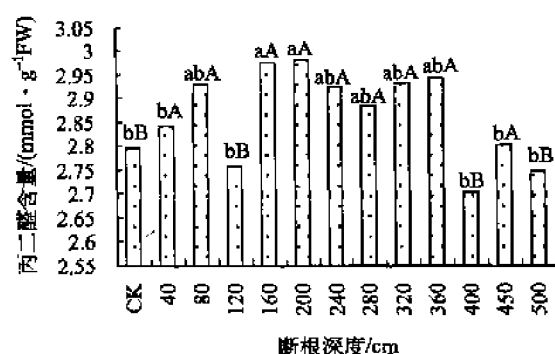


图 5-66 断根后第二年第四茬苜蓿叶片
丙二醛含量

断根处理对紫花苜蓿叶片保护酶活性和丙二醛含量的影响不同,且这种作用随断根后生长时间的延长而变化,但总体表现为深层($\geq 360\text{cm}$)和浅层($\leq 80\text{cm}$)断根保护酶活性高、丙二醛含量低,而中间层断根处理保护酶活性低、丙二醛含量高。

第六节 断根对紫花苜蓿叶片中渗透调节物质的影响

渗透调节是植物在逆境下降低渗透势、维持细胞膨压、抵御伤害的一种重要生理机制,可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质。在逆境下,植物体内会主动积累渗透调节物质,从而维持膨压,保持细胞持续生长,延迟叶片衰老,维持光合作用,减轻活性氧不平衡所产生的伤害。因此,可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的多少是植物抗逆性强弱的生理指标之一。因而,研究苜蓿断根后渗透调节物质的变化规律,可为断根对苜蓿抗性的影响提供一定的理论依据。

一、材料与方法

(一) 测定指标与方法

材料同本章第一节。在断根后第一年第一茬的分枝期、现蕾期和初花期,第一年第二茬、第三茬和第四茬的现蕾期,第二年第一茬和第四茬的现蕾期,用冰盒采集各处理小区的叶片,带回实验室后立即转入冰箱备用。

1. 脯氨酸

称取样品 0.5g,用 5ml 3%磺基水杨酸研磨成匀浆,移入具塞试管中,加盖沸水浴 15min,用 3%磺基水杨酸定容至 20ml,加盖,将试管浸入沸水浴中 15min,过滤,滤液待测。取滤液 0.5ml 加水 1.5ml、冰醋酸 2.0ml、酸性茚三酮 2.0ml,沸水浴 30min,冷却后加甲苯 5.0ml,暗中静置萃取 2~3h,取甲苯层在 520nm 测定吸光度(韩瑞宏等,2008)。按下式计算含量:

$$\text{脯氨酸含量(质量分数)} = [(CV_t)/(WV_s \times 10^6)] \times 100\%$$

式中, C 为从标准曲线查得的样品脯氨酸含量 (μg); V_t 为样品提取液总体积; W 为样品重量 (g); V_s 为测定时加样量 (ml); 10^6 为 g 换算成 μg 的换算系数。

2. 可溶性蛋白

采用考马斯亮蓝法 (吴雪霞等, 2008)。取 0.5g 样品加蒸馏水 5ml , 冰浴研磨, 提取液或适当稀释的提取液 0.1ml 加 0.9ml 蒸馏水及 5ml 考马斯亮蓝 G-250, 混匀, 放置 2min , 在 595nm 下比色, 读取吸光值, 并通过标准曲线回归方程计算蛋白质含量。计算式如下

$$\text{蛋白质含量}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}) = (CV_t)/(FWV_s \times 1000)$$

式中, C 为由标准曲线求得值 (μg); V_t 为样品提取液总体积 (ml); V_s 为测定时加样量 (ml); FW 为样品鲜重 (g); 1000 为将 μg 换算成 mg 的换算系数。

3. 可溶性糖

用蒽酮比色法。取干样 0.5000g 于 10ml 离心管中, 加 $5\sim 6\text{ml}$ 80% 乙醇溶液, 80°C 水浴 30min , 冷却, $3500g$ 离心 10min , 上清液转入 25ml 容量瓶中, 再加入 $5\sim 6\text{ml}$ 80% 乙醇, 如上法浸提 2 次, 上清液合并于 25ml 容量瓶中, 并定容至刻度。提取液稀释 $10\sim 50$ 倍后, 取 2ml 加 5.0ml 蒽酮-硫酸溶液, 水浴 10min , 冷却后, 在 620nm 下比色测吸光值。可溶性糖含量按下式计算:

$$\text{可溶性总糖含量} = [(CV_{tn})/(WV_s \times 1000)] \times 100\%$$

式中, C 为从标准曲线查得的样品葡萄糖含量 (μg); V_t 为样品提取液总体积; n 为稀释倍数; W 为样品干重 (g); V_s 为测定时加样量 (ml); 1000 为换算系数 ($1\text{mg} = 1000\mu\text{g}$)。

(二) 数据处理

试验数据用 SPSS 12.0 软件进行统计分析。

二、结果与分析

(一) 断根对紫花苜蓿叶片中脯氨酸含量的影响

1. 断根后第一年第一茬脯氨酸含量

从图 5-67 中可以看出, 在断根后第一年第一茬的分枝期, 40cm 、 120cm 、 160cm 和 320cm 处断根的苜蓿脯氨酸含量降低, 其余处理均升高, 各处理差异均达极显著水平 ($P < 0.01$); 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 脯氨酸含量较高 ($0.71\sim 0.86\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 显著高于大部分处理, 40cm 、 120cm 、 160cm 处断根的处理较低, 极显著 ($P < 0.01$) 低于除 320cm 外的各处理。在现蕾期, 各处理脯氨酸含量均升高, 且除 280cm 处断根的处理外, 差异均达显著 ($P < 0.05$) 和极显著水平 ($P < 0.01$); 在处理中, 120cm 以内断根的处理和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 脯氨酸含量较高 ($0.24\sim 38\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 显著高于中间

层处理 160cm、240cm、280cm 和 320cm。在初花期, 各处理脯氨酸含量均极显著 ($P<0.01$) 低于对照; 同时可以看出, 深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 脯氨酸含量较高 ($0.14\sim 0.15\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 显著 ($P<0.05$) 高于除 160cm 外的各处理, 120cm 以内断根的处理次之 ($0.09\sim 0.13\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 中间层 (200~360cm) 处理最低 (多为 $0.09\sim 0.10\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 各中间层处理间无显著差异, 但显著低于其他大部分处理。

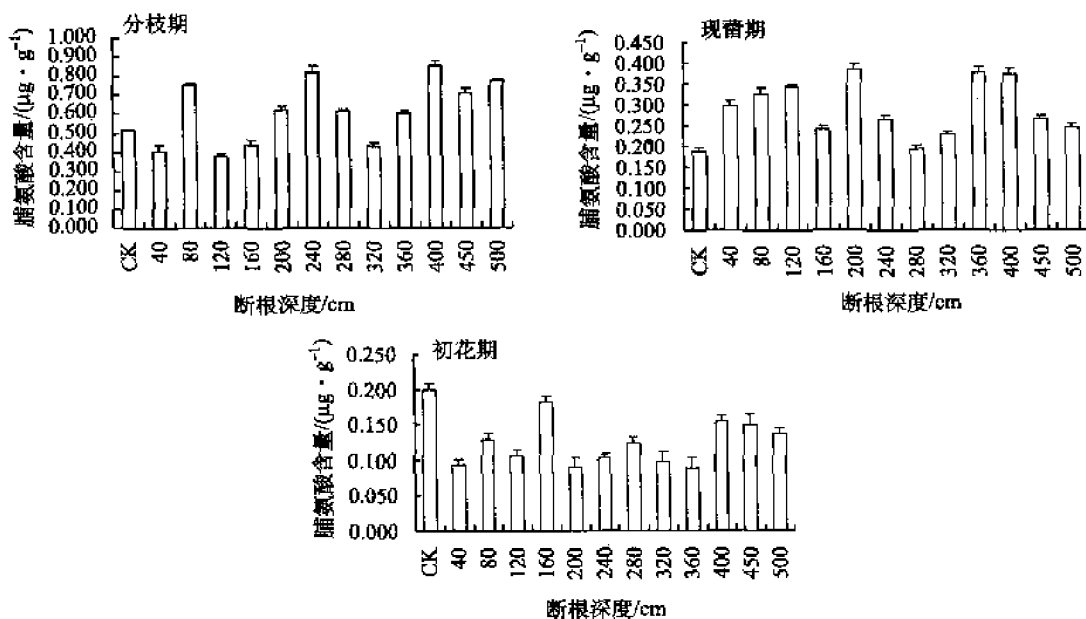


图 5-67 断根后第一年第一茬苜蓿叶片中脯氨酸含量

2. 断根后第一年第二茬脯氨酸含量

在断根后第一年第二茬的现蕾期 (图 5-68), 320cm 处断根的苜蓿脯氨酸含量降低, 其余处理均升高, 但只有 80cm、160cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 脯氨酸含量较高 ($0.66\sim 0.69\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 极显著 ($P<0.01$) 高于大部分处理, $\geq 120\text{cm}$ 的断根处理较低, 相互间基本无显著差异。

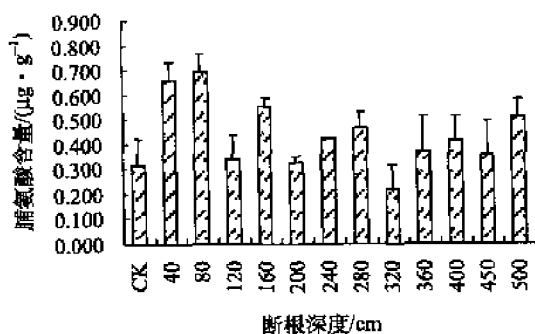


图 5-68 断根后第一年第二茬脯氨酸含量

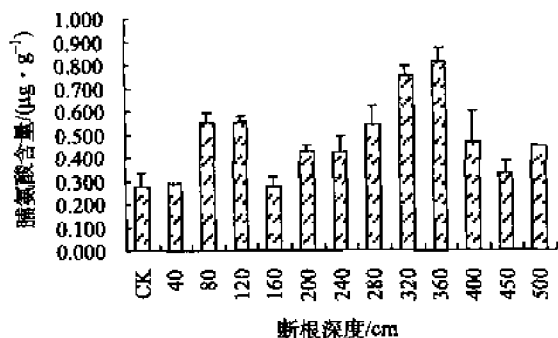


图 5-69 断根后第一年第三茬脯氨酸含量

3. 断根后第一年第三茬脯氨酸含量

在断根后第一年第三茬的现蕾期 (图 5-69), 160cm 处断根的处理脯氨酸含量未变, 其余处理均升高, 且除 40cm、450cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 40cm、160cm 和 450cm 处断根的处理脯氨酸含量较低 ($0.27 \sim 0.33 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 3 个处理间无显著差异, 而 40cm 和 160cm 处断根的处理显著 ($P < 0.05$) 低于其余处理, 320cm 和 360cm 处断根的处理脯氨酸含量较高 ($0.75 \sim 0.82 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 极显著高于各处理, 此外, 各处理间无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬脯氨酸含量

在断根后第一年第四茬的现蕾期 (图 5-70), 苜蓿叶片中脯氨酸含量部分处理升高, 部分处理降低; 在处理中, 280cm 脯氨酸含量最低 ($0.455 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 极显著 ($P < 0.01$) 低于 $\geq 200\text{cm}$ 处断根的绝大多数处理, 160cm 以内断根的处理脯氨酸含量较低 ($0.50 \sim 0.58 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 相互间无显著差异, 而显著低于其余多数处理, 500cm 处断根的处理最高 ($0.966 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 显著高于 360cm 以内断根的多数处理, 此外, 各处理间均无显著差异。

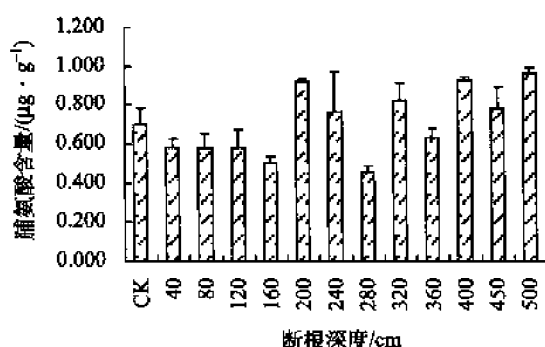


图 5-70 断根后第一年第四茬脯氨酸含量

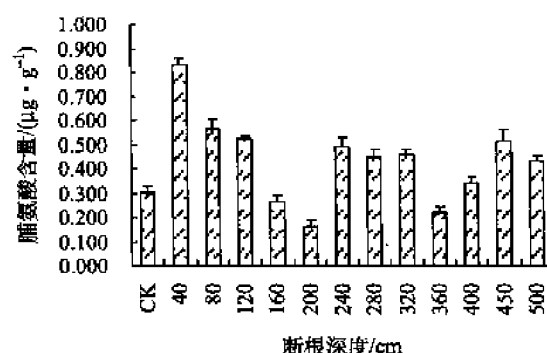


图 5-71 断根后第二年第一茬脯氨酸含量

5. 断根后第二年第一茬脯氨酸含量

在断根后第二年第一茬的现蕾期 (图 5-71), 160cm、200cm 和 360cm 处断根的处理脯氨酸含量显著 ($P < 0.05$) 降低, 其余处理均升高, 且除 400cm 外差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 浅层处理 ($\leq 120\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 450\text{cm}$) 脯氨酸含量较高 ($0.43 \sim 0.83 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 中间层 (160~400cm) 较低 ($0.16 \sim 0.49 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 其中, 240~320cm 的处理脯氨酸含量相对较高, 相互无显著差异, 但显著 ($P < 0.05$) 高于其余处理。

6. 断根后第二年第四茬脯氨酸含量

在断根后第二年第四茬 (图 5-72), 80~160cm、280~360cm 断根的处理脯氨酸含

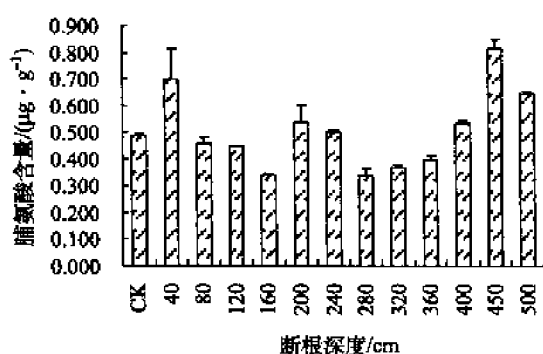


图 5-72 断根后第二年第四茬脯氨酸含量

量降低, 且 160cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P < 0.05$), 其余处理均升高, 且除 400cm 处断根的处理外, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 中间层 (120~360cm) 处理脯氨酸含量较低, 显著 ($P < 0.05$) 低于浅层处理 (40cm) 和深层处理 (≥ 450 cm), 450cm 处断根的处理脯氨酸含量最高, 极显著 ($P < 0.01$) 高于各处理, 40cm 和 500cm 处断根的处理次之, 与各处理均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

(二) 断根对紫花苜蓿叶片中可溶性蛋白含量的影响

1. 断根后第一年第一茬可溶性蛋白含量

从图 5-73 中可得, 在断根后第一年第一茬的分枝期, 40cm、160cm、280cm、320cm 叶片中可溶性蛋白含量降低, 且 40cm、160cm 和 280cm 处断根的处理差异达显著水平 ($P < 0.05$), 其余处理均升高, 且除 240cm 处断根的处理外差异均达显著水平 ($P < 0.05$); 在处理中, 深层处理 (≥ 360 cm) 和 80cm、120cm 处断根的处理可溶性蛋白含量较高 (36.8~47.5mg·g⁻¹FW), 极显著 ($P < 0.01$) 高于其余各处理, 中间层 (160~320cm) 处理较低 (27.1~36.1mg·g⁻¹FW), 160cm 处断根的处理最低 (27.1mg·g⁻¹FW), 极显著 ($P < 0.01$) 低于各处理。在现蕾期, 中间层 (160~360cm) 处理和 450cm 处断根的处理可溶性蛋白含量显著 ($P < 0.05$) 降低, 40cm 处

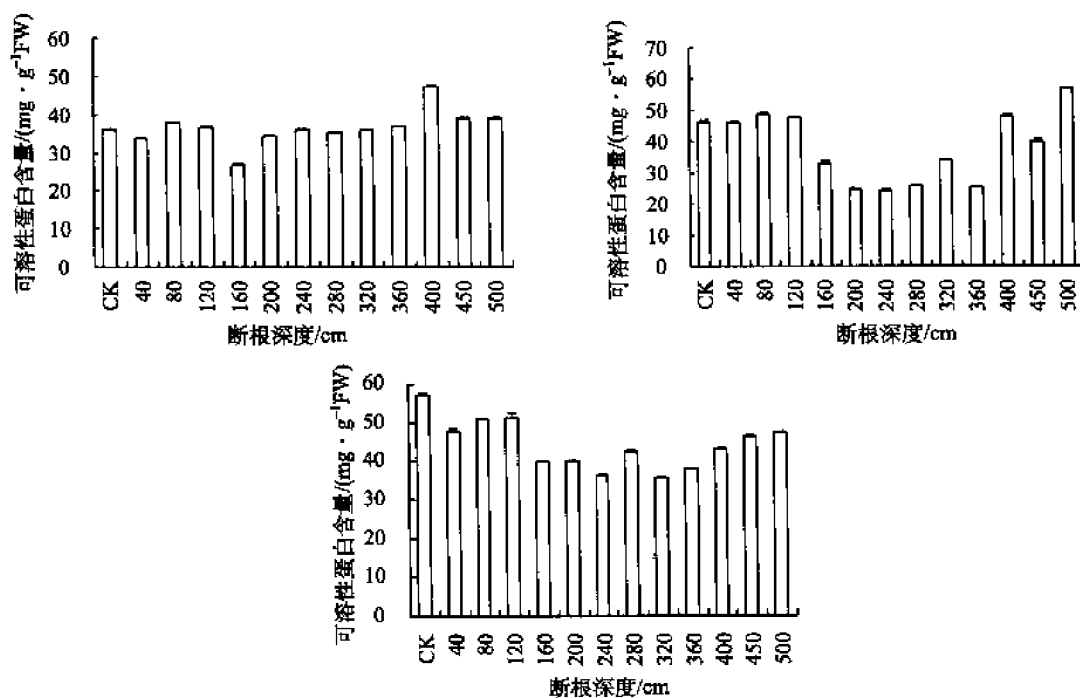


图 5-73 断根后第一年第一茬苜蓿叶片中可溶性蛋白含量

断根的处理没有显著变化,其余处理均显著 ($P<0.05$) 升高;在处理中,120cm 以内和 ≥ 400 cm 的断根处理可溶性蛋白含量较高 ($40.2\sim 57.0\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),极显著 ($P<0.01$) 高于中间层 (160~360cm) 处理。在初花期,各处理可溶性蛋白含量均极显著 ($P<0.01$) 低于对照;在处理中,120cm 以内断根的处理可溶性蛋白含量最高 ($47.8\sim 51.3\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),极显著 ($P<0.01$) 高于其余各处理, ≥ 400 cm 的处理次之 ($43.2\sim 47.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),与其他处理存在极显著差异 ($P<0.01$),中间层 (160~360cm) 处理最低 ($35.7\sim 39.9\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),极显著低于其他各处理。

2. 断根后第一年第二茬可溶性蛋白含量

在断根后第一年第二茬的现蕾期 (图 5-74),40cm、160cm 处断根的处理可溶性蛋白含量显著 ($P<0.05$) 降低,其余各处理均升高,且除 200cm 处断根的处理外差异均达显著水平 ($P<0.05$);在处理中, ≥ 360 cm 的断根处理可溶性蛋白含量较高 ($45.0\sim 47.6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),这些处理大部分相互无显著差异,但极显著高于其他处理。

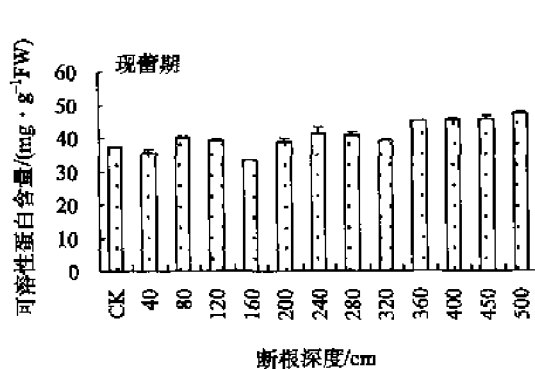


图 5-74 断根后第一年第二茬可溶性蛋白含量

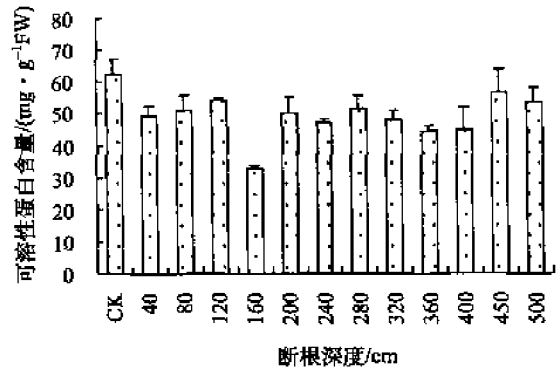


图 5-75 断根后第一年第三茬可溶性蛋白含量

3. 断根后第一年第三茬可溶性蛋白含量

在断根后第一年第三茬 (图 5-75),各处理可溶性蛋白含量均极显著 ($P<0.01$) 降低;在处理中,中间层处理 (160~400cm) 可溶性蛋白含量较低 ($33.0\sim 51.4\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),160cm 处断根的处理最低 ($33.0\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),极显著 ($P<0.01$) 低于各处理,360cm、400cm 处断根的处理与其余处理均存在显著差异 ($P<0.05$),此外,中间层各处理间差异均未达显著水平, ≥ 450 cm 和 ≤ 120 cm 的断根处理可溶性蛋白含量较高 ($49.1\sim 56.5\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),相互间无显著差异。

4. 断根后第一年第四茬可溶性蛋白含量

在断根后第一年第四茬 (图 5-76),只有 500cm 处断根的处理可溶性蛋白含量显著降低 ($P<0.05$),其余处理差异均未达显著水平;在处理中,500cm 处断根的处理可溶性蛋白含量最低 ($17.5\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),极显著 ($P<0.01$) 低于各处理,240cm 处断根的处理最高 ($25.4\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$),显著高于除 200cm、400cm 处断根的处理外的各处

理, 此外, 各处理间均无显著差异。

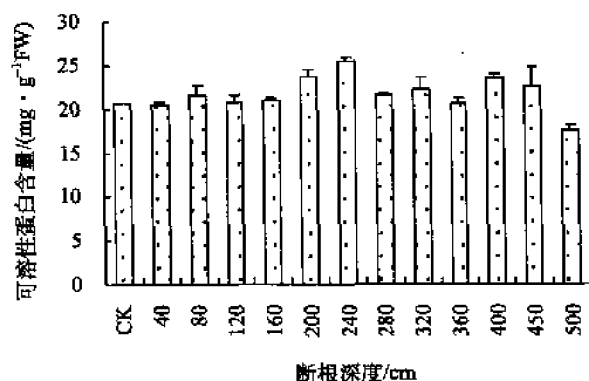


图 5-76 断根后第一年第四荏可溶性蛋白含量

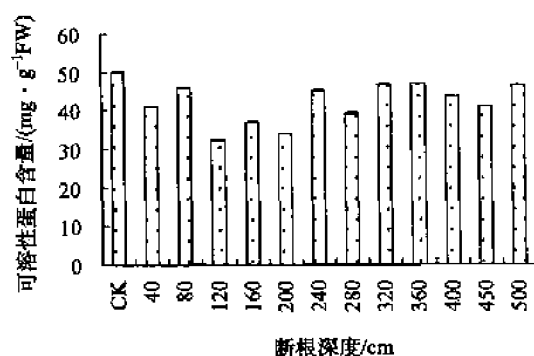


图 5-77 断根后第二年第一荏可溶性蛋白含量

5. 断根后第二年第一荏可溶性蛋白含量

在断根后第二年第一荏的现蕾期 (图 5-77), 各处理可溶性蛋白含量均极显著 ($P < 0.01$) 降低; 在处理中, 中间层 (120~280cm) 处理可溶性蛋白含量较低 (多为 32.2~39.2mg · g⁻¹FW), 浅层处理 (≤ 80 cm) 和 ≥ 320 cm 的断根处理较高 (40.9~46.9mg · g⁻¹FW), 显著 ($P < 0.05$) 高于中间层 (120~280cm) 除 240cm 外的各处理。

6. 断根后第二年第四荏可溶性蛋白含量

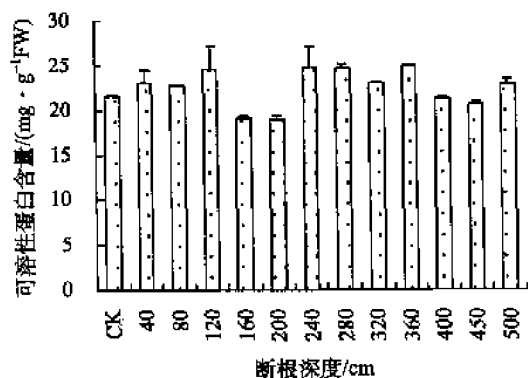


图 5-78 断根后第二年第四荏可溶性蛋白含量

在断根后第二年第四荏的现蕾期 (图 5-78), 160cm 和 200cm 处断根的处理可溶性蛋白含量显著降低 ($P < 0.05$), 360cm 处断根的处理显著升高 ($P < 0.05$), 其余处理差异均未达显著水平; 在处理中, 160cm 和 200cm 处断根的处理可溶性蛋白含量显著 ($P < 0.05$) 低于各处理, 360cm 处断根的处理最高 (25.0mg · g⁻¹FW), 显著 ($P < 0.05$) 高于部分处理, 此外, 各处理间无显著差异。

(三) 断根对紫花苜蓿叶片中可溶性糖含量的影响

1. 断根后第一年第一荏可溶性糖含量

从图 5-79 中可以看出, 在断根后第一年第一荏的分枝期, 40cm 处断根的苜蓿叶片中可溶性糖含量显著降低 ($P < 0.05$), 其余处理均升高, 且只有 120cm 处断根的处理差异未达显著水平; 在处理中, ≥ 280 cm 的断根处理可溶性糖含量较高 (54.2~61.2mg · g⁻¹), 240cm 以内断根的处理 (除 80cm 外) 较低 (39.7~55.0mg · g⁻¹)。在现蕾期,

280cm、320cm 处断根的处理可溶性糖含量显著升高 ($P<0.05$), 其余处理无显著差异; 在处理中, $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理 (除 400cm) 可溶性糖含量较高 ($66.5\sim 71.2\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 240cm 以内断根的处理 (除 120cm) 较低 ($51.0\sim 62.4\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。在初花期, 各处理可溶性糖含量均比对照降低, 且在 $80\sim 280\text{cm}$ 的处理差异均达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, 浅层处理 (40cm) 和深层处理 ($\geq 320\text{cm}$) 可溶性糖含量较高 ($44.7\sim 55.6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 相互间基本无显著差异, 但都显著 ($P<0.05$) 高于中间层 ($80\sim 280\text{cm}$) 处理。

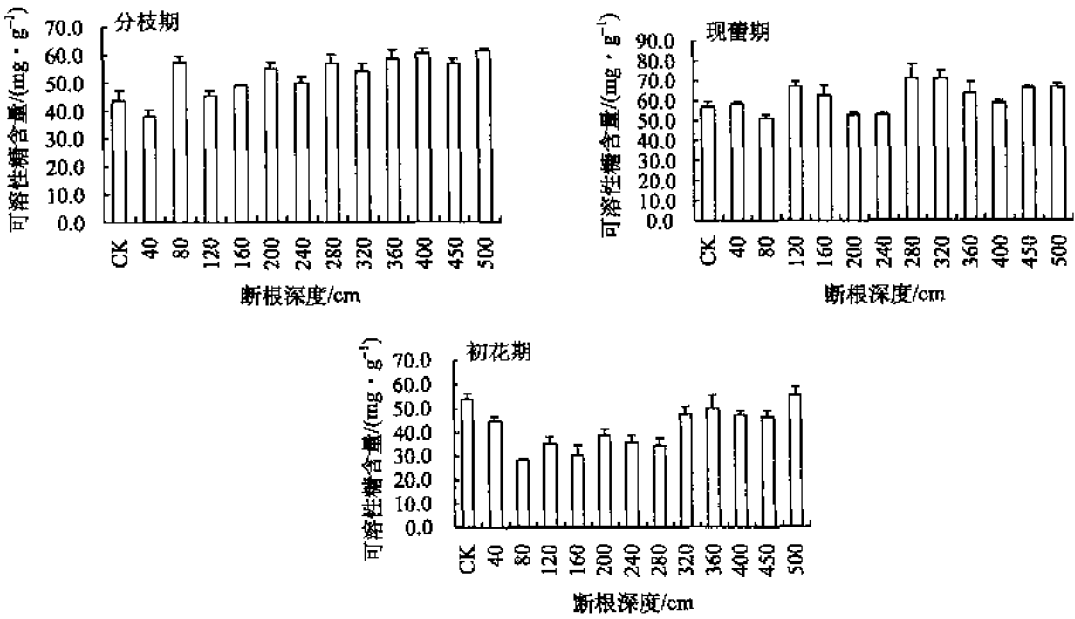


图 5-79 断根后第一年第一茬苜蓿叶片中可溶性糖含量

可见, 断根对可溶性糖含量的作用, 说明随生育期的推进, 苜蓿叶片对不良环境的适应能力随其伤根恢复性生长时间的长短而不断调整。

2. 断根后第一年第二茬可溶性糖含量

在断根后第一年第二茬的现蕾期 (图 5-80), 叶片中可溶性糖含量各处理均降低, 且 280cm 以内断根的各处理差异达显著水平 ($P<0.05$); 在处理中, $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理叶片中可溶性糖含量较高 ($26.1\sim 27.8\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 大部分处理相互无显著差异, 浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 次之 (约 $26.6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), 与 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理存在一定差异, 而与 200cm 以内断根的处理其余处理均无显著差异, 240cm 处断根的处理可溶性糖含量最低, 为 $26.6\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 显著 ($P<0.05$) 低于各处理。

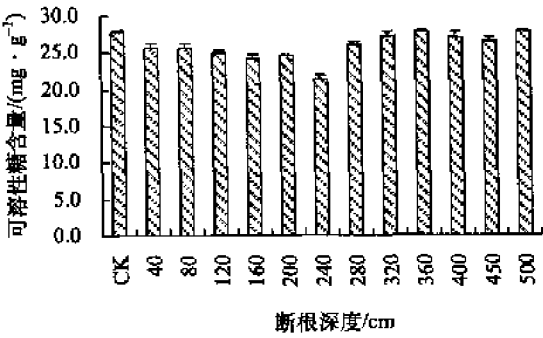


图 5-80 断根后第一年第二茬可溶性糖含量

3. 断根后第一年第三茬可溶性糖含量

在断根后第一年第三茬（图 5-81），与对照相比，叶片中可溶性糖含量各处理均降低，且除 500cm 处断根的处理外，差异均达极显著水平（ $P < 0.01$ ）；在处理中，中间层处理（120~240cm）叶片中可溶性糖含量较低（22.6~27.0 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），显著（ $P < 0.05$ ）低于除 40cm 处断根处理外的各处理，160cm 处断根的处理最低，极显著（ $P < 0.01$ ）低于各处理， $\leq 80\text{cm}$ 和 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理可溶性糖含量较高（27.0~31.9 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），500cm 处断根的处理最高，极显著（ $P < 0.01$ ）高于各处理。

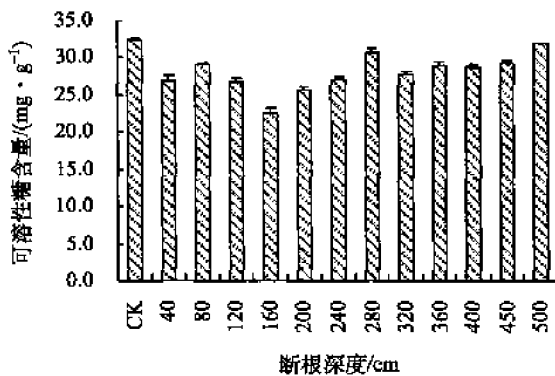


图 5-81 断根后第一年第三茬可溶性糖含量

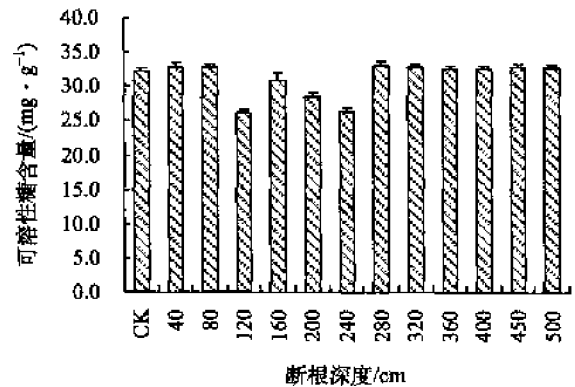


图 5-82 断根后第一年第四茬可溶性糖含量

4. 断根后第一年第四茬可溶性糖含量

在断根后第一年第四茬（图 5-82），120cm、200cm、240cm 处断根的处理叶片中可溶性糖含量显著（ $P < 0.05$ ）降低，其余处理均升高，但差异均未达显著水平；在处理中， $\leq 80\text{cm}$ 和 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理可溶性糖含量较高（32.5~33.1 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），相互间无显著差异，而极显著（ $P < 0.01$ ）高于中间层（120~240cm）各处理，中间层处理可溶性糖含量较低（26.1~30.8 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），相互间差异基本都达显著水平（ $P < 0.05$ ）。

5. 断根后第二年第一茬可溶性糖含量

在断根后第二年第一茬的现蕾期（图 5-83），各处理叶片中可溶性糖含量均降低，且除 400cm 处断根的处理外差异均达极显著水平（ $P < 0.01$ ）；在处理中，中间层（120~240cm）处理叶片中可溶性糖含量较低，显著（ $P < 0.05$ ）低于除 450cm 处断根的处理外的各处理，浅层处理（ $\leq 80\text{cm}$ ）和 $\geq 280\text{cm}$ 的断根处理可溶性糖含量较高（48.3~56.2 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ），400cm 处断根的处理最高，显著（ $P < 0.05$ ）高于各处理，500cm 处断根的处理次之，与除 80cm 和 280cm 处断根的处理外的各处理差异显著（ $P < 0.05$ ）。

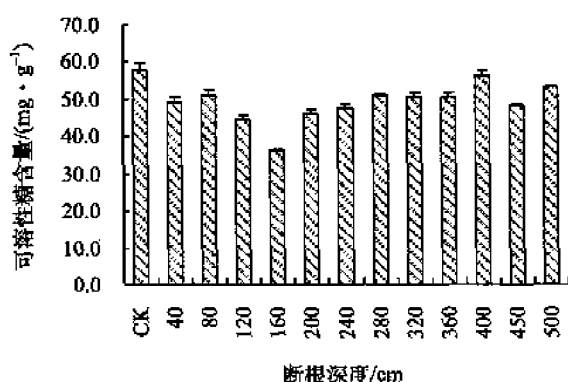


图 5-83 断根后第二年第一茬可溶性糖含量

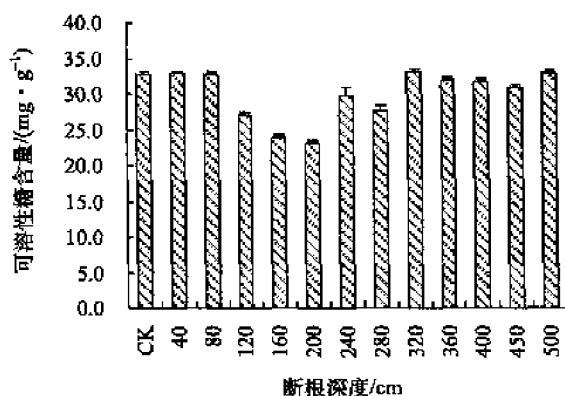


图 5-84 断根后第二年第四茬可溶性糖含量

6. 断根后第二年第四茬可溶性糖含量

在断根后第二年第四茬的现蕾期 (图 5-84), 与对照相比, 450cm 处和 120~280cm 断根的处理叶片中可溶性糖含量显著降低 ($P<0.05$), 其余处理均无显著变化; 在处理中, 中间层 (120~280cm) 处理可溶性糖含量较低 ($23.3\sim29.9\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 显著 ($P<0.05$) 低于浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 320\text{cm}$), 浅层处理和深层处理可溶性糖含量较高 ($31.1\sim33.1\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 处理间无显著差异。

三、小结

断根后, 紫花苜蓿叶片中可溶性蛋白和可溶性糖含量降低, 总体呈浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 360\text{cm}$) 较高、中间层 (120~320cm) 较低的趋势, 而对脯氨酸的影响规律性较差。断根后, 脯氨酸含量在多数时期, 部分处理升高, 部分处理降低; 少数时期出现各处理显著降低或升高的现象, 呈浅层处理 ($\leq 80\text{cm}$) 和深层处理 ($\geq 400\text{cm}$) 脯氨酸含量较高的趋势; 叶片中可溶性蛋白含量在断根初期 (第一年第一、第二茬的分枝期和现蕾期) 部分处理升高, 部分处理降低, 规律性较差, 在第一年第一茬初花期、第一年第三茬和第二年第一茬, 各处理均降低, 而在两年的第四茬, 各处理基本无显著变化; 叶片中可溶性糖含量仅在第一年第一茬分枝期和现蕾期, 部分处理降低, 部分处理升高, 而以后各处理可溶性糖含量均降低。

第七节 断根对紫花苜蓿冠层温度的影响

冠层温度是指在大气背景以及土壤、栽培技术完全相同的条件下, 在一个小尺度范围内, 植物不同时冠层温度的分异状况 (李向阳等, 2004)。冠层温度与农艺性状、抗旱性和植物体内部生理生化特性密切相关 (张嵩午, 1997; 张嵩午和王长发, 1999; 蒋骏等, 2003a, 2003b, 2002)。根据冠层温度特征, 可对小麦、苜蓿品种进行分类, 并发现冷型苜蓿的干草产量和品质指标 (除粗脂肪含量外) 均优于暖型苜蓿, 苜蓿不同发育期的冠层温度与其农艺性状指标间显著的偏相关关系主要集中在茎高、茎叶比、叶

面积和产量 4 个农艺性状指标上,开花期苜蓿冠层温度与反映抗旱性能强弱的离体叶片 24h 保水力之间存在显著的负相关关系(蒋骏等,2003b)。同时,冠层温度与水分胁迫密切相关,是监测作物水分胁迫程度的重要指标。

因此,本试验对苜蓿断根后冠层温度进行了研究,以期为揭开苜蓿生长发育状况与冠层温度间的关系及断根对苜蓿生长发育环境的影响提供一定的理论依据。

一、材料与方法

试验材料与处理同本章第一节。分别在断根后第一年分枝期和现蕾期、第二年第一茬现蕾期、第一、第二年第二茬的现蕾期下雨后第二天,第一、第二年第三茬现蕾期高温干旱时,第一、第二年第四茬现蕾期低温时,早晨 9:00~10:00 测定各处理叶面温度和冠层温度。冠层温度用国产 BAU-I 型红外测温仪(中国农业大学研制)。

二、结果与分析

(一) 断根后第一年第一茬的紫花苜蓿冠层温度

从表 5-14 中可以看出,在断根后第一年第一茬的分枝期和现蕾期,各处理与对照及各处理间冠层温度均无显著差异。

表 5-14 断根后第一、第二年第一茬的紫花苜蓿冠层温度

断根深度/cm	第一年分枝期 /℃	差异显著性	第一年现蕾期 /℃	差异显著性	第二年现蕾期 /℃	差异显著性
CK	13.7		26.1		25.3	dB
40	13.2		26.2		26.7	bAB
80	14.1		26.7		26.1	cdB
120	13.3		25.9		27.4	aA
160	13.5		26.6		27.2	abA
200	13.5		27.2		27.3	abA
240	12.7		27.2		27.6	aA
280	13.6		26.2		27.4	aA
320	14.2		26.3		27.4	aA
360	12.8		26.5		26.5	bcAB
400	13.1		26.4		26.4	cAB
450	12.8		26.0		26.4	cAB
500	12.5		26.5		26.4	cAB

(二) 断根后第二年第一茬的紫花苜蓿冠层温度

在断根后第二年第一茬的现蕾期,各处理与对照、各处理间冠层温度均无显著差异(表 5-14)。

(三) 断根紫花苜蓿雨后的冠层温度

在断根后第一、第二年第二茬雨后,各处理与对照、各处理间冠层温度均无显著差异(表 5-15)。

表 5-15 断根紫花苜蓿雨后的冠层温度

断根深度/cm	第一年第二茬/℃	第二年第二茬/℃
CK	24.7	19.1
40	24.3	19.3
80	24.7	19.4
120	25.0	19.6
160	25.3	19.8
200	24.8	19.1
240	25.2	18.8
280	24.8	18.7
320	24.4	18.6
360	24.8	18.6
400	24.1	18.7
450	24.8	19.0
500	24.3	18.8

(四) 高温干旱时断根紫花苜蓿的冠层温度

在断根后第一年第三茬高温干旱时,浅层断根($\leq 80\text{cm}$)和深层断根($\geq 320\text{cm}$)冠层温度无显著变化,中间层(120~280cm)断根后冠层温度显著升高($P<0.05$);在处理中,浅层和深层处理冠层温度较低(31.3~32.1℃),显著($P<0.05$)低于120cm、160cm和200cm处断根的处理,中间层处理冠层温度较高(32.7~33.5℃),显著($P<0.05$)高于多数浅层和深层处理。在断根后第二年第三茬高温干旱时,各处理冠层温度大部分显著升高($P<0.05$),且 $\geq 120\text{cm}$ 的断根处理差异达极显著水平($P<0.01$);在处理中,浅层处理($\leq 80\text{cm}$)冠层温度最低(31.3~31.6℃),显著($P<0.05$)低于其余多数处理,深层处理($\geq 320\text{cm}$)冠层温度较低(32.9~33.3℃),中间层(120~280cm)断根的处理冠层温度较高(34.2~35.0℃),显著($P<0.05$)高于浅层和深层各处理(表 5-16)。

表 5-16 高温干旱时断根紫花苜蓿的冠层温度

断根深度/cm	第一年/℃	差异显著性	第二年/℃	差异显著性/℃
CK	31.7	c	30.5	dC
40	31.3	c	31.3	dBC
80	32.1	bc	31.6	cdBC
120	33.1	a	34.2	aAB
160	33.5	a	34.5	aA

续表

断根深度/cm	第一年/℃	差异显著性	第二年/℃	差异显著性
200	33.0	a	35.0	aA
240	32.8	ab	34.6	aA
280	32.7	ab	34.3	aAB
320	32.0	bc	33.2	bB
360	32.1	bc	33.1	bB
400	31.9	c	32.9	bcB
450	31.8	c	33.3	bB
500	31.6	c	33.2	bB

(五) 秋季低温时断根紫花苜蓿的冠层温度

断根后第一年秋季,各处理与对照、各处理相互间冠层温度均无显著差异。而断根后第二年秋季,与对照相比,中间层(120~280cm)处理冠层温度显著升高($P<0.05$);在处理中,浅层处理(≤ 80 cm)和深层处理(≥ 320 cm)冠层温度较低(18.5~19.3℃),这些处理间均无显著差异,中间层处理冠层温度较高(19.3~20.4℃),160cm和240cm处断根的处理冠层温度最高,极显著($P<0.05$)高于浅层和深层各处理(表5-17)。

表 5-17 秋季低温时断根紫花苜蓿的冠层温度

断根深度/cm	第一年第四茬/℃	第二年第四茬/℃	差异显著性
CK	19.5	18.8	cB
40	19.1	19.0	bcB
80	19.5	19.0	bcB
120	19.1	19.3	bB
160	19.8	20.4	aA
200	19.2	20.1	abAB
240	19.5	20.3	aA
280	19.0	19.9	abAB
320	19.7	19.3	bcB
360	18.6	18.6	cB
400	19.2	18.5	cB
450	19.5	19.1	bcB
500	18.9	19.0	bcB

三、讨论与小结

植被盖度较小时,只能测定地表和作物冠层的平均温度,即植物表面温度;在植被盖度较大时,利用红外测温仪观测植被表面温度时,土壤背景对冠层温度观测的影响很小,测定值即为冠层温度(史长丽等,2006)。本试验在苜蓿盖度较大时用红外仪测定,其温度应为冠层温度,但由于断根使苜蓿生长发育受阻,尤其在断根后第二年,处理盖

度变小,其温度应为苜蓿表面温度。这也是断根后第二年冠层温度在处理间差异较大的原因。

本研究中断根后苜蓿产量降低、冠层温度升高的结果进一步支持了冠层温度与茎高、茎叶比、叶面积和产量等呈显著负相关的结论。

断根使紫花苜蓿冠层温度升高,总体呈浅层($\leq 80\text{cm}$)和深层($\geq 320\text{cm}$)处理低于中间层处理($120\sim 280\text{cm}$)的趋势。断根后,在第一年第一茬及第四茬、第一年和第二年第二茬的雨前,处理间冠层温度差异较小,而在第一年第三茬(高温干旱)和第二年第四茬时,中间层处理较对照显著升高,在第二年第三茬(高温干旱),各处理基本都显著升高,说明断根形成的水分胁迫对紫花苜蓿的影响在高温干旱时和胁迫长时间持续后表现得更为突出。

参考文献

- 曹翠玲,刘建朝,姚晨. 2007. 不同呼吸抑制剂对小麦幼苗根系硝酸还原酶活性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(8): 185-188.
- 曹磊,袁玉欣,井学辉,等. 2005. 断根处理对银杏树体生长、养分吸收及根系再生的影响. 河北农业大学学报, 28(2): 23-28.
- 陈培元,詹谷宇,谢伯泰. 1980. 冬小麦根系的研究. 陕西农业科学, 6: 1-6.
- 高俊凤. 2006. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社.
- 郭翠花,苗果园,高志强. 2007. 灌浆期断根对小麦产量及相关生理性状的影响. 麦类作物学报, 27(2): 331-33.
- 韩娜,葛荣朝,赵宝存,等. 2004. 植物谷氨酰胺合成酶研究进展. 河北师范大学学报(自然科学版), 28(4): 407-410.
- 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 2007. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应. 生态学报, 27(12): 5229-5237.
- 韩瑞宏,田华,高桂娟,等. 2008. 干旱胁迫下紫花苜蓿叶片水分代谢与两种渗透调节物质的变化. 华北农学报, 23(4): 140-144.
- 胡景江,孙群. 2006. 植物生理学研究技术. 杨凌: 西北农林科技大学出版社.
- 黄发松. 1998. 水稻根系生长生理与根系遗传育种研究. 见: 戴景瑞. 作物育种学术论文集. 北京: 中国农业出版社.
- 蒋骏,贾志宽,刘玉华,等. 2003a. 不同温度型苜蓿产量和品质的动态分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 23(5): 30-34.
- 蒋骏,贾志宽,徐春明,等. 2003b. 苜蓿冠层温度与农艺性状的相关分析. 干旱地区农业研究, 21(4): 20-22.
- 蒋骏,贾志宽,许秀娟. 2002. 苜蓿冠层温度的聚类分析. 干旱地区农业研究, 20(4): 17-21.
- 康琅,汪良驹. 2008. ALA对西瓜叶片叶绿素荧光光响应曲线的影响. 南京农业大学学报, 31(1): 31-36.
- 李春霞,曹慧. 2008. 干旱对苹果属植物叶绿素荧光参数的影响. 安徽农业科学, 36(31): 36-38.
- 李会云,郭修武. 2008. 盐胁迫对葡萄砧木叶片保护酶活性和丙二醛含量的影响. 果树学报, 25(2): 240-243.
- 李向阳,朱云集,郭天财. 2004. 不同小麦基因型灌浆期冠层和叶面温度与产量和品质关系的初步分析. 麦类作物学报, 24(2): 88-91.
- 李紫花. 2002. 冬小麦断根调控机理和断根与施肥的互作效应研究. 山东农业大学博士学位论文.
- 刘殿英. 1983. 小麦断根对其根系与产量性状的影响. 山东农学院学报, (2): 35-42.
- 刘永华,朱祝军,魏国强. 2004. 不同光强下氮素形态对番茄谷氨酰胺合成酶和光呼吸的影响. 植物生理学通讯, 40(6): 680-682.
- 柳斌辉,刘子会,张文英,等. 2008. 断根对不同根型小麦光合和生长的影响. 华北农学报, 23(增刊): 99-103.

- 卢布. 1999. 高产冬小麦穗数和穗重的调控成穗机制的探讨. 山东农业大学博士学位论文.
- 马守臣, 徐炳成, 李凤民, 等. 2006. 土壤水分对返青期断根冬小麦补偿效应的影响. 应用生态学报, 17 (10): 1849-1853.
- 马元客. 1995. 冬小麦分蘖和根系的研究. 农业学报, 10 (6): 486-493.
- 石岩, 位东斌, 于振文, 等. 2000. 深耘断根对旱地小麦花后根系衰老及产量的影响. 应用与环境生物学报, 6 (6): 516-519.
- 史长丽, 郭家选, 梅旭荣, 等. 2006. 夏玉米农田表面温度影响因素分析. 中国农业科学, 39 (1): 48-56.
- 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 2005. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响. 植物营养与肥料学报, 11 (5): 700-703.
- 王法宏, 王旭清, 曹宏鑫, 等. 2001. 冬前深耘断根对小麦根系活性的垂直分布及旗叶衰老的影响. 山东农业大学学报 (自然科学版), 32 (4): 503-507.
- 王法宏. 1998. 高产小麦生育后期根系活性的空间分布与衰老的关系及调控. 山东农业大学博士学位论文.
- 王瑞英, 崔广芳, 魏明, 等. 2002. 浇水与深耘断根对冬小麦穗分化进程的影响. 山东农业科学, 1: 23, 24.
- 王振宇, 吕金印, 李凤民, 等. 2007. 断根对冬小麦竞争能力与产量的影响. 植物生态学报, 31 (2): 300-304.
- 王忠. 1999. 植物生理学. 北京: 中国农业出版社: 60-64.
- 温国胜, 田海涛, 张明如, 等. 2006. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用. 应用生态学报, 17 (10): 1973-1977.
- 吴根良, 何勇, 王永传, 等. 2008. 不同光照强度下卡特兰和蝴蝶兰光合作用和叶绿素荧光参数日变化. 浙江林学院学报, 25 (6): 733-738.
- 吴家森, 宋福强, 陈荣, 等. 2008. 3种七叶树属植物叶片气体交换特征和叶绿素荧光特性比较. 植物研究, 28 (4): 438-441.
- 吴雪霞, 查丁石, 卞翔. 2008. 低温胁迫对茄子幼苗生长、抗氧化酶活性和渗透调节物质的影响. 江苏农业学报, 24 (4): 471-475.
- 薛延丰, 刘兆普. 2008. 不同浓度 NaCl 和 Na_2CO_3 处理对菊芋幼苗光合及叶绿素荧光的影响. 植物生态学报, 32 (1): 161-167.
- 杨洪强, 接玉玲, 张连忠, 等. 2002. 断根和剪枝对盆栽苹果叶片光合蒸腾及 WUE 的影响. 园艺学报, 29 (3): 197-202.
- 杨青川. 2003. 苜蓿生产与管理指南. 北京: 中国林业出版社.
- 余松烈, 亓新华, 金留福, 等. 1965. 冬小麦返青期中耕对植株的抑制和促进作用的研究. 作物学报, 4 (2): 127-134.
- 余松烈, 亓新华, 刘希运, 等. 1985. 冬小麦深耘断根增产作用的研究. 中国农业科学, (4): 30-35.
- 袁庆华, 桂枝, 张文淑. 2002. 苜蓿抗感褐斑病品种内超氧化物歧化酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性的比较. 草业学报, 11 (2): 100-104.
- 张嵩午, 王长发. 1999. 冷型小麦及其生物学特征. 作物学报, 25 (5): 608-615.
- 张嵩午. 1997. 小麦温型现象研究. 应用生态学报, 8 (4): 471-474.
- 张永清, 苗果园. 2006. 切断深层根对黍子根系及地上部营养生长的影响. 干旱地区农业研究, 24 (1): 134-137.
- 周忆堂, 马红群, 梁丽娟, 等. 2008. 不同光照条件下长春花的光合作用和叶绿素荧光动力学特征. 中国农业科学, 41 (11): 3589-3595.
- 朱红霞, 周晓冬, 葛才林, 等. 2008. 复合污染对水稻幼苗细胞膜透性及保护酶活性的影响. 生态环境, 17 (3): 999-1003.
- 朱晓红, 王朋, 梁文举, 等. 2004. 苜蓿化感作用的初步研究. 生态学杂志, 23 (3): 128-130.
- Bowler C, Montagu M V, Inze D. 1992. Superoxide dismutase and stress tolerance. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 43: 83-116.
- Evans D W, Peaden R N. 1984. Seasonal forage growth rate and solar energy conversion of irrigated Vernal alfalfa. Crop Science, 25 (5): 981-986.

第六章 不同生长年限苜蓿生产性能及对土壤的环境效应

在干旱、半干旱地区,土壤水分、养分的储量和分布受土壤质地、土地覆盖度、植被生长年限及气候条件的影响而不同(Gomez et al., 2000; Doming et al., 2001; Beate and Haberland, 2002; Connor, 2004)。黄土高原地区降水入渗深度一般为100~300cm,但土壤物理蒸发和植被蒸腾作用层深度可达800~1000cm,导致深层土壤经常处于水分亏缺状态,从而产生土壤土层,导致林草植被衰退,并呈逐年加深的趋势(杨文治和余存祖, 1992; 王国梁等, 2002; Shangguan and Zheng, 2006)。紫花苜蓿属多年生豆科牧草,具有强大的根系,由于其高产、优质、抗逆性强及蛋白质含量高等优点,一直被作为黄土高原地区人工草地建设的首选草种。但20世纪80年代末至90年代初,深层土壤水分出现的强烈亏缺,以及随之而产生的土壤养分缺乏问题,导致人工林草植被大面积衰退(梁一民等, 1990),并带来生态环境的恶化(李玉山, 2001a)。不同生长年限苜蓿对土壤水分、养分有何影响?草地水分、养分能否得到及时补偿和恢复?苜蓿适宜的种植年限是多少?这些重要的科学问题越来越受到人们的关注,成为黄土高原地区能否大面积发展人工草地的战略性决策问题。

针对人工草地土壤水分、养分严重亏缺的问题,国内外进行了大量的研究并取得了许多重要的进展,但在研究过程中存在一定的问题,主要表现在以下几个方面:一是选择的苜蓿生长年限比较单一,缺乏对同一地区不同生长年限苜蓿产量及耗水规律的系统研究;二是许多研究仅对0~500cm土层水分的变化规律进行了探讨,没有对500cm以下深层土壤水分的变化规律进行深入研究;三是对土壤干层的研究大都属于定性的论述,对土壤干层量化指标(干层范围、干化程度等)的研究相对较少;四是以前的研究大都局限于耕层土壤养分的消耗,而对土壤深层,特别是与根系分布深度相适应土层中土壤养分的消耗很少涉及,植物根系吸收的养分并不完全集中在耕层,还有相当一部分来自于土壤深层,研究耕层土壤养分的消耗难以全面表征土壤养分的分布特征;五是对同一地区不同生长年限紫花苜蓿光合作用的日变化规律缺乏系统性研究。针对以上问题进行深入、系统的研究,可为黄土高原地区草田轮作、苜蓿草田管理提供科学依据,对农业持续发展及生态环境恢复具有重要的理论与实践意义。

第一节 材料与方法

一、研究区自然概况

研究地点设在甘肃省农业科学院镇原试验站。该试验站位于陇东高原,地处北纬35°30',东经107°29',海拔1279m,属北方半湿润偏旱一熟区,为黄土高原沟壑区的典型区域。区域日照充足,年总辐射量 $5.54 \times 10^6 \sim 5.65 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,年日照时数2400~2600h,日照百分率55%,年平均气温8.3℃,最高温度37.2℃,最低温度

-20.8℃。≥0℃的积温 3435℃，≥10℃的积温 2722℃，无霜期 165 天，干燥度 1.17。多年平均降水量 540mm，降水量年内分布不均匀，降雨季节短而集中，54%以上的降水量集中在 7~9 月。年均蒸发量 1638.3mm，土壤凋萎湿度 7%。地下水埋深 60~100m，不参加生物水循环，旱塬水资源贫乏，无地表水来源，且塬高水低，是典型的旱作雨养农业区。本研究区土壤类型为发育良好的覆盖黑垆土，质地为中壤土。

自 1980 年以来，研究人员在该区域进行了大规模的植被恢复研究，紫花苜蓿作为黄土高原地区植被恢复的首选草种。目前该区域有 1~26 年不同生长年限的紫花苜蓿草地。试验地地势平坦，苜蓿草地均未施肥。

二、供试材料及试验点布设

(一) 供试材料

本试验供试品种为镇原紫花苜蓿，生长年限分别为 3 年、4 年、6 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年，各年限苜蓿种植于同一地点，相距不超过 500m。

(二) 试验点的布设

以位于甘肃省农业科学院的镇原试验站为研究基地，以不同生长年限紫花苜蓿草地为研究对象，以荒地（未开垦）、麦田为对照，共 10 个样地，荒地、麦田临近苜蓿草地。

试验各处理依次为①3 年：生长 3 年的苜蓿草地，2003 年 9 月下旬播种；②4 年：生长 4 年的苜蓿草地，2002 年 9 月下旬播种；③6 年：生长 6 年的苜蓿草地，2000 年 10 月播种；④8 年：生长 8 年的苜蓿草地，1998 年 7 月播种；⑤12 年：生长 12 年的苜蓿草地，1994 年 9 月下旬播种；⑥14 年：生长 14 年的苜蓿草地，1992 年 7 月播种；⑦18 年：生长 18 年的苜蓿草地，1988 年 7 月播种；⑧26 年：生长 26 年的苜蓿草地，1980 年 7 月播种；⑨荒地（CK1）：尚未开垦的荒地作为对照，与苜蓿草地相邻，为从未垦殖过的生荒地，杂草自然生长；⑩麦田（CK2）：为连作 4 年的冬麦田。每年 10 月初播种，翌年 7 月中下旬收获。冬小麦施 P_2O_5 35kg·hm⁻²，作为基肥；施 N 119.6kg·hm⁻²，一半为基肥，一半为追肥。每年施肥情况一致。苜蓿草地自播种至今，均未施肥，在丰雨年型，一年收获 3 茬，在欠雨年型，一年收获 2 茬。选择的生长年限苜蓿草地位于同一塬面，立地条件相同，其初始养分含量与目前的荒地（0 年）基本一致。本试验于 2006 年、2007 年连续两年进行。

三、研究项目与方法

(一) 植物学性状

在 2006 年、2007 年连续两年从苜蓿分枝期开始观测，每处理选取代表性的样点 3 个，每样点面积为 1m×1m，每点选取代表性植株 20 株，定株观测至初花期；第二茬从刈割后两周开始，每 7 天观测一次至初花期。观测项目为：样方内枝条总数、株高、

茎粗、侧枝数、侧枝长、叶重、茎重。分别用钢卷尺、游标卡尺、天平测量和称量。

(二) 生长特性

株高动态变化的测定：从分枝期开始，每种生长年限定株 60 株，按各生育期观测直至刈割为止。第二茬从刈割后 14 天开始至初花期。

分枝数动态变化：在不同生长年限苜蓿草地，每处理定 3 点，每样点面积 $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ ，从分枝期开始，每 7 天测定样方内分枝数，直至刈割为止。分枝数测定从根颈处数枝条。

茎叶比、干鲜比测定：结合生物量测定进行。具体方法是：试验期间，在不同茬次测定不同生长年限苜蓿的产量。每年刈割两次，收割后，带回实验室，茎、叶分开称鲜重，然后烘干称干重，测定茎叶比、干鲜比。

(三) 生长速度的测定

在不同生长年限苜蓿草地定点选取 20 株，重复 3 次，每 7 天测量一次株高（如遇下雨，则顺延），测定其绝对高度，相邻两次的绝对高度之差与间隔时间之比，即为苜蓿的生长速度。

(四) 再生速度的测定

每茬苜蓿刈割后一周测量再生株高，每 7 天测量一次直至刈割。再生速度用单位时间的株高变化来表示。

(五) 苜蓿产量测定

试验期间，在不同茬次测定不同生长年限苜蓿产量。每茬收割面积为 1m^2 ，留茬高度 3cm，收割后，立即称鲜草重。重复 3 次，取其平均值。采集部分草样，烘箱内烘干，称干草重，计算干物质率，计算地上生物量。

(六) 地下部测定

在不同生长年限苜蓿草地，分别选取 $200\text{cm} \times 100\text{cm}$ 代表性的样方，自上而下 10cm 一层，直至无根层，分别测量不同层次根系性状、主根数目、主根干重、主根体积、主根干重、第一侧根直径与位置、侧根数、侧根干重、侧根长、侧根体积。

根系体积和生物量的测定方法：把挖取的根系放在双层纱布内洗干净，在量筒中测定根系的体积。把样品带回实验室，放在 105°C 的烘箱中，烘 24h，称取根系干重，计为根系生物量。

侧根的测定方法：测定主根上的侧根数，距离主根 0.5cm 处的侧根直径 $\geq 0.1\text{cm}$ 时，可计入，小于 0.1cm 时，不计入。

(七) 光合特性测定

光合日变化：于 2006 年 5 月 16 日进行，此时苜蓿处于第一茬初花期。采用美国

Li-COR 公司生产的 Li-6400 便携式光合仪田间活体测定苜蓿叶片的光合生理生态指标。在不同生长年限苜蓿草地, 分别选择生长健康、长势一致、无病斑、照光均一的同一叶位(从顶部向下第 1 片完全展开叶)的中间小叶测定其光合日进程, 每次每年限测定均随机选取 5 片叶片重复测定, 8:00~19:00 每隔 1h 测 1 次。

主要测定指标: 叶片净光合速率 (P_n , $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r , $\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 (G_s , $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 等生理因子以及大气温度 (T_a , $^{\circ}\text{C}$)、田间 CO_2 浓度 (C_a , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、相对湿度 (RH, %)、光合有效辐射 (PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 等环境因子。气孔限制值 (L_s) 和叶片瞬时水分利用效率 (WUE) 由以下公式计算:

$$L_s = 1 - C_i/C_a$$

$$\text{WUE} = P_n/T_r$$

叶面积测定: 在 2006 年 5 月 18 日、7 月 28 日每茬苜蓿收获时, 在不同生长年限苜蓿草地, 分别选择生长健康、长势一致、无病斑、照光均一的同一叶位(从顶部向下第 1 片完全展开叶)的中间小叶测定, 每次每年限均选取 40 片叶片测定, 带回实验室用扫描仪测定。

叶绿素相对含量测定: 于 2006 年 4 月 24 日及第一茬、第二茬苜蓿收获前进行。采用 SPAD-502 型叶绿素仪测定苜蓿叶片的叶绿素相对含量。在不同生长年限苜蓿草地, 分别选择生长健康、长势一致、无病斑、照光均一的同一叶位(从顶部向下第 1 片完全展开叶)的中间小叶测定, 每次每年限测定均选取 10 片叶片, 重复 5 次。

(八) 土壤含水量的测定

土壤水分的测定于 2006 年、2007 年连续两年进行。2006 年 4 月在荒地、麦田及不同生长年限的苜蓿草地, 选取具代表性的样点 2 点, 土钻分层取土, 0~200cm 土层, 每 20cm 一个层次, 200~1000cm 土层, 每 50cm 一个层次, 采集 0~1000cm 土层土壤样品。

2006 年、2007 年在苜蓿不同茬次, 分别选取具代表性的样点 3 点, 土钻分层取土, 每 20cm 一个层次, 采集 0~200cm 土层土壤样品。所有土样用烘干法 (105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘 12~14h) 测定各层次土壤含水量。

(九) 土壤容重测定

采用环刀法测定。在荒地、麦田及不同生长年限的苜蓿草地, 分别选取具代表性的样点, 在每样点, 挖取长 200cm、宽 100cm、深 500cm 的土壤剖面, 在剖面自上而下环刀取土, 每 20cm 一个层次取样直至 200cm 土层, 在 500cm 土层深度再取一个样, 共 11 个样。每次取样, 在对应面同时取样作为重复, 供室内土壤水分物理性质分析。

(十) 土壤饱和含水量及田间持水量的测定

在测定土壤容重的同时测定土壤饱和含水量、田间持水量。

(十一) 土壤养分测定

2006年4月于苜蓿分枝初期采集土壤样品：在荒地、麦田及不同生长年限苜蓿草地，选取具代表性的样点2点，土钻分层取土，0~200cm土层，每20cm一个层次，200~1000cm土层，每50cm一个层次，采集0~1000cm土层土壤样品，同层土样混合均匀。所有土样自然风干，带回实验室，用四分法，取一半土样，磨细并通过0.149mm筛孔（用于测定有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、pH），另一半土样，磨细并通过1mm筛孔（用于测定碱解氮），储于纸袋中，用于土壤养分测定。

土壤样品室内分析指标分别为有机碳（SOC）、全氮（TN）、全磷（TP）、全钾（TK）、碱解氮（AN）、速效磷（AP）、速效钾（AK）、土壤pH。其中土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定（油浴温度为180℃，沸腾5min）；全氮采用半微量凯氏法测定；全磷采用NaOH熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定；全钾采用NaOH熔融-原子吸收法测定；碱解氮采用碱解-扩散法测定（用1.0mol·L⁻¹NaOH水解土壤，使潜在有效氮碱解转化为NH₃，溶解于H₃BO₃溶液，然后再用标准酸滴定）；速效磷采用0.5mol·L⁻¹NaHCO₃提取-钼锑抗显色-紫外分光光度法测定；速效钾采用NH₄Ac浸提-原子吸收法测定；pH采用水：土=1：1，电极电位法测定（鲍士旦，2002）。

四、试验数据处理

所有试验数据采用Excel进行统计处理，DPS 5.02和SAS 8.0进行方差分析及新复极差测验（范濂，1983；胡小平和王长发，2001）。

五、相关的计算公式

(一) 苜蓿水分利用效率的公式及其数学表达式

产量水平上的水分利用效率是单位耗水量的产量。苜蓿水分利用效率（WUE）定义为苜蓿干草产量Y（kg·hm⁻²）与农田耗水量ET（mm）的比值，即

$$WUE = Y/ET$$

根据农田水量平衡原理：

$$ET = W_{\text{播前}} - W_{\text{收获}} + I + P + G$$

则有

$$WUE = Y/ET$$

$$= Y/(W_{\text{播前}} - W_{\text{收获}} + I + P + G)$$

式中，W_{收获}为收获时土壤储水量（mm）；W_{播前}为播种前土壤储水量（mm）；I为生育期灌水量（mm）；P为生育期降水量（mm）；G为作物利用地下水量（mm）。

由于苜蓿生长期间不进行灌溉，因此I=0。试验地地下水埋深60~100m，因此取G=0。

(二) 土壤储水量测定

根据测定的容重值和土壤含水量，按下式计算土壤储水量：

$$W_1 = h \cdot a \cdot b \times 10/100$$

式中, W_1 为土壤储水量 (mm); h 为土层深度 (cm); a 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); b 为土壤含水量 (重量%)。

(三) 有效储水量测定

根据测定的容重值、土壤含水量及凋萎系数, 按下式计算土壤有效储水量:

$$W_2 = h \cdot a \cdot (b - c) \times 10/100$$

式中, W_2 为有效储水量 (mm); h 为土层深度 (cm); a 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); b 为土壤含水量 (重量%); c 为凋萎系数。

(四) 水分亏缺量测定

根据测定的容重值、土壤含水量和田间持水量, 按下式计算土壤水分亏缺量:

$$W_3 = h \cdot a \cdot (f - b) \times 10/100$$

式中, W_3 为水分亏缺量 (mm); h 为土层深度 (cm); a 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); b 为土壤含水量 (重量%); f 为田间持水量 (重量%)。

(五) 土壤孔隙度的计算公式

利用土壤容重可计算土壤孔隙度, 计算公式为

$$\text{土壤孔隙度}(\%) = (1 - \text{容重} / \text{比重}) \times 100$$

土壤总孔隙度一般以 50%~60% 为宜。土壤比重是指单位体积土粒的烘干重与同体积的水重之比。土壤比重主要取决于土壤矿物质, 通常取 $2.65 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 作为土壤比重的近似值。

(六) 土壤孔隙比的计算公式

土壤孔隙比的计算公式为

$$\text{土壤孔隙比} = \text{土壤孔隙度} / \text{土壤固相容积}$$

(七) 土壤潜在矿化氮量的计算公式

土壤碱解氮反映土壤的供氮水平, 为方便理解可以换算成单位面积土壤供氮指标。根据测定的碱解氮含量和容重值, 按下式计算土壤潜在矿化氮量 (谢忠凯等, 2006):

$$W_4 = han \times 10/100$$

式中, W_4 为潜在矿化氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); h 为土层深度 (cm); a 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); n 为碱解氮含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

六、气象资料来源

气象资料由农业部镇原黄土旱塬生态环境重点野外科学观测试验站提供。该试验站内设气象站, 提供的气象指标包括: 逐日降水量、逐日最高气温、逐日最低气温、逐日

平均气温、逐日相对湿度、日照时数等。

第二节 黄土高原地区不同生长年限苜蓿生物学性状分析

紫花苜蓿是一种优质豆科牧草，较高的生物产量是人们栽培的主要目标。苜蓿的植物学性状及苜蓿的经济性状是影响苜蓿生物产量形成和营养物质积累的主要因素（石界，2007）。鉴别不同生长年限苜蓿植物学性状与生物产量及各性状间的相互关系，明确各性状对生物产量的作用大小，同时通过对不同生长年限苜蓿经济性状综合分析，探讨不同生长年限苜蓿生物学性状的差异，可为干旱、半干旱地区紫花苜蓿高产栽培、苜蓿适宜的种植年限提供技术依据。

一、不同生长年限苜蓿植物学特性研究

（一）不同生长年限苜蓿地上部植物学性状研究

1. 不同生长年限苜蓿头茬草植物学性状比较

不同生长年限苜蓿头茬草植物学性状见表 6-1。可以看出，不同生长年限之间枝条总数存在极显著差异。3 年、4 年、6 年之间差异不显著，但它们极显著地高于 14 年、18 年、26 年。

表 6-1 不同生长年限苜蓿头茬草植物学性状比较（样方面积：0.6m×0.6m）

生长年限 /年	枝条总数 /个	株高 /cm	节间数 /(个·枝 ⁻¹)	节间长 /cm	茎粗 /mm	单株分枝数 /(个·株 ⁻¹)	单茎重 /g	单株叶重 /g
3	447.67AB	42.63	10.37	4.14	2.68	9.63	1.72	1.34
4	500.00A	52.42	9.78	5.37	2.62	9.13	1.51	1.28
6	517.67A	54.10	9.60	5.67	2.58	9.14	3.28	2.59
8	418.67ABC	45.67	10.07	4.54	2.61	9.93	2.87	2.67
12	429.33ABC	37.13	10.14	3.66	2.29	9.24	1.96	1.32
14	315.67CD	36.74	11.30	3.26	2.04	11.30	0.53	0.35
18	325.67CD	20.16	10.10	1.99	1.84	10.00	0.78	0.47
26	230.67D	26.43	10.60	2.49	2.06	10.40	0.66	0.50
平均值	398.17	39.41	10.25	3.89	2.34	9.85	1.66	1.32
标准差	99.00	11.87	0.53	1.30	0.33	0.74	1.02	0.91
变异系数	24.86	30.11	5.15	33.47	13.95	7.56	61.33	68.80

注：表中同列大写字母不同表示处理间在 0.01 水平上差异显著。本章后同。

不同生长年限间株高差异明显。6 年苜蓿最高，为 54.10cm，其次为 4 年，为 52.42cm，3 年、8 年苜蓿株高均超过 42cm，苜蓿生长超过 8 年，株高低于 40cm，最低的是 18 年、26 年苜蓿，仅为 20.16cm、26.43cm，分别比 6 年苜蓿低 33.94cm、27.67cm。节间数与节间长是相互影响的两个因素，节间长说明茎伸长速率快、生长势好；节间数多，相应长在茎上的复叶就多，不同处理中，3 年、4 年、6 年、8 年节间较

长, 大于 4.14cm, 而 18 年、26 年较短, 小于 2.50cm。不同生长年限间节间数相差不大, 都在 10 个·枝⁻¹左右。

分枝数表示苜蓿主茎上叶腋中叶芽形成侧枝, 侧枝上的腋芽长成新分枝的数量。单株分枝数反映个体分枝能力和生长健壮的程度, 分枝数量越多单株产量就越高。在本试验中, 生长低于 8 年, 密度大, 群体发育占优势, 个体分枝少; 生长超过 8 年, 群体长势较弱, 但个体充分发育; 苜蓿生长至 18 年以上, 田间杂草丛生, 苜蓿生长稀疏, 根颈粗大, 其上分枝多。

茎粗不仅表明个体发育的健壮程度, 也是其他性状的综合反映。3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿的直径较粗, 大于 2.5mm; 14 年、18 年、26 年苜蓿直径较细, 不到 2.1mm。单茎重是反映个体干物质累积量的指标, 在不同生长年限中, 6 年、8 年苜蓿最高, 超过 2.8g, 3 年、4 年、12 年较高, 为 1.51~1.96g, 14 年、18 年、26 年较低, 低于 0.8g。单株叶重最大的是 6 年、8 年苜蓿, 为 2.59g、2.67g, 其次较高的是 3 年、4 年、12 年苜蓿, 为 1.30g 左右, 14 年、18 年、26 年苜蓿的单株叶重较轻, 只有 0.32~0.5g。

在头茬草中, 不同生长年限间单株叶重差异最大, 变异系数达 68.80%, 单茎重位居第二, 节间长第三; 不同生长年限间节间数差异最小, 变异系数仅为 5.15%, 其次为单株分枝数, 变异系数为 7.56%。可以看出, 构成生物产量的重要因素(单株叶重、单茎重、节间长)在不同年限间差异较大, 从而造成同一紫花苜蓿品种生物产量在不同利用年限存在较大差异。

比较不同生长年限苜蓿头茬草植物学性状, 可以看出, 4 年、6 年苜蓿构成生物产量的植物学性状最好, 即苜蓿生长至 4~6 年, 丰产能力最强; 苜蓿生长超过 8 年, 草地开始衰败; 苜蓿生长至 18 年、26 年, 草地衰败严重, 构成生物产量的植物学性状最差。

2. 不同生长年限苜蓿再生草植物学性状分析

不同生长年限苜蓿再生草植物学性状见表 6-2。可以看出, 苜蓿生长年限不同, 单位面积内枝条总数存在极显著差异: 6 年极显著地高于除 4 年外的所有年限; 4 年、8 年、12 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于 14 年、18 年与 26 年苜蓿; 14 年、18 年极显著地高于 26 年苜蓿。

表 6-2 不同生长年限苜蓿再生草植物学性状比较

生长年限 /年	枝条总数 /个	株高 /cm	节间数 /(个·枝 ⁻¹)	节间长 /cm	茎粗 /mm	单株分枝数 /(个·株 ⁻¹)	单茎重 /g	单株叶重 /g
3	196.67CD	46.73	14.30	3.30	1.91	14.30	14.15	13.43
4	275.00AB	36.44	14.17	2.47	1.44	14.17	18.58	12.32
6	299.67A	52.56	15.12	3.51	1.81	15.12	20.8	12.9
8	246.67B	38.44	15.41	2.49	1.51	15.41	15.57	10.82

续表

生长年限 /年	枝条总数 /个	株高 /cm	节间数 /(个·枝 ⁻¹)	节间长 /cm	茎粗 /mm	单株分枝数 /(个·株 ⁻¹)	单茎重 /g	单株叶重 /g
12	235.50BC	29.47	15.70	2.23	1.57	15.70	15.83	9.65
14	153.33D	37.30	13.16	2.39	1.41	13.16	11.76	13.26
18	151.33D	20.94	11.37	1.84	1.17	11.37	13.34	17.84
26	105.33E	21.07	10.83	1.93	1.10	10.83	9.53	16.28
平均值	207.94	35.37	13.76	2.52	1.49	13.76	14.95	13.31
标准差	67.63	11.25	1.83	0.60	0.28	1.83	3.61	2.68
变异系数	32.52	31.82	13.30	23.73	18.80	13.30	24.17	20.10

注：枝条数指在 0.6m×0.6m 样方内的枝条总数；茎重、叶重分别指在 1m×1m 样方内的茎干重、叶片干重。

不同生长年限间株高差异明显。6 年最高，为 52.56cm，其次为 4 年、8 年、12 年苜蓿，14 年、18 年、26 年苜蓿株高较低，低于 40cm，比 6 年苜蓿低 14.12～31.62cm。再生草中，3 年、4 年、6 年、8 年、12 年苜蓿节间数较多，超过 14.17 个·枝⁻¹，14 年节间数较少，为 13.16 个·枝⁻¹，18 年、26 年节间数最少，少于 11.50 个·枝⁻¹。再生草中 6 年苜蓿的节间最长，其余年限差异不大，在 1.84～3.30cm 范围内。3 年、4 年、6 年、8 年、12 年苜蓿分枝数较多，超过 14.17 个·株⁻¹，分枝数最少的是 26 年苜蓿，只有 10.83 个·株⁻¹。茎秆粗细反映了个体发育状况，与茎重关系密切，二茬草中，3 年、4 年、6 年、8 年、12 年苜蓿直径较粗（大于 1.44mm）、茎秆较重（大于 14.15g），与株高协同生长的趋势明显。18 年苜蓿的单株叶重最大，为 17.84g，其次是 26 年苜蓿，为 16.28g，8 年、12 年较轻，低于 11g。

再生草中，样方内枝条总数差异最大，变异系数达 32.52%，其次是株高，为 31.82%，单茎重位居第三。

从两茬苜蓿的植物学性状来看，除再生草的节间数、分枝数大于第一茬外，第一茬苜蓿的所有植物学各性状指标都明显高于再生草。具体为：头茬草单位面积内枝条总数远高于再生草，比再生草多 91.48%，头茬草苜蓿株高的平均值比第二茬高 4.04cm，节间比再生草长 1.37cm，分枝数比再生草少 3.91 个·株⁻¹，茎粗较再生草粗 0.85mm。

通过对不同生长年限苜蓿头茬草、再生草植物学性状的综合分析，3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿构成生物产量的植物学性状突出，具有丰产的潜力。苜蓿生长超过 8 年，构成生物产量的植物学性状衰退，表现为节数少、节间短，植株矮小，单株分枝能力差，枝条数锐减。

3. 不同生长年限苜蓿植物学性状与生物产量的关系

苜蓿生物产量与主要植物学性状之间的相关关系列于表 6-3。从表中可以看出，苜蓿各植物学性状与产量之间均为正相关关系，且株高与产量的相关系数分别达极显著水平。节间长、茎粗与产量的相关系数分别达到 0.3706、0.3009。相关分析表明，在苜蓿生长过程中，通过合理的栽培管理，促进苜蓿生长发育，形成株型高、茎秆粗、节间

长的植株,这对提高牧草产量是有利的,但是,由于性状间存在负相关的关系,对某一性状的正向选择可能会造成对其他性状的负向选择,如对分枝数的正向选择,将造成节间缩短、茎粗变细。

表 6-3 紫花苜蓿植物学性状间的相关系数

项目	株高	节间数	节间长	分枝数	茎粗	单茎重	单株叶重
节间数	0.4927*						
节间长	0.7110**	-0.2599					
分枝数	0.3116	0.8385**	-0.3351				
茎粗	0.1913	0.0848	0.1417	-0.0243			
单茎重	0.5625**	0.2968	0.3699	0.2450	0.6570**		
单株叶重	0.4102	0.2765	0.2113	0.3720	0.1744	0.4093	
产量	0.5092**	0.2507	0.3706	0.0123	0.3009	0.1193	0.0811

* 表示 $\alpha=0.05$ 水平显著; ** 表示 $\alpha=0.01$ 水平显著。

由表 6-3 还可以看出,株高与节间长、株高与单茎重、株高与产量、节间数与分枝数、茎粗与单茎重达极显著正相关;节间长与节间数、节间长与分枝数、分枝数与茎粗呈负相关;从其他性状间相关系数来看,节间长、单茎重、节间数与株高协同变化趋势明显。这表明性状之间的相关关系是普遍存在的。

节间数和分枝数作为影响生物产量的重要因子,二者之间达到极显著正相关。分枝数反映了苜蓿生长的健壮程度,是综合性状的体现,只有生长健壮的植株才具有较强的分枝能力,具有较多的叶片并具有较高的产量。作为优质饲草,苜蓿有价值的部分为绿色营养体,株高和分枝数反映了苜蓿的生长状况和营养物质的累积量。为了获取较多的营养体生物量,在苜蓿栽培实践中,通过对与产量性状有显著相关而又易于田间识别的农艺性状进行选择,可以获得预期的目标。

(二) 不同生长年限苜蓿地下部植物学性状研究

根系是植物吸收、转化和储藏养分的器官,其生长发育状况直接影响地上生物量。苜蓿根系生长发育受土壤肥力、有机质含量、温度、水分、土壤物理状况及其他生态因子的影响,苜蓿生长年限对根系生长也产生深刻影响,不仅影响根系重量,而且也影响其在土体中的垂直分布 (Misra, 1956; Parao et al., 1976)。

1. 不同生长年限苜蓿根系生物量的垂直分布

不同生长年限苜蓿根系生物量的垂直分布见表 6-4。可以看出,根系生物量在不同生长年限间差异极显著。26 年极显著地高于其他生长年限;18 年与 12 年、14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 3 年、4 年,6 年与 8 年之间差异不显著,但极显著地高于 3 年、4 年,3 年、4 年之间差异不显著。

表 6-4 不同生长年限苜蓿根系生物量垂直分布

土层深度 /cm	生长年限/年								平均
	3	4	6	8	12	14	18	26	
全层	4.17D	5.16D	17.79C	16.31C	18.69BC	18.97BC	20.7B	47.49A	18.66
0~10	1.47	1.79	3.64	4.97	5.0	5.22	5.72	12.13	4.99
	(35.15)	(34.62)	(20.48)	(30.47)	(26.85)	(27.51)	(27.62)	(25.55)	(26.74)
10~20	1.10	0.87	2.01	2.21	2.77	2.97	2.74	7.98	2.83
	(26.36)	(16.83)	(11.30)	(13.57)	(14.82)	(15.66)	(13.22)	(16.97)	(15.17)
20~30	0.49	0.56	1.36	1.52	1.95	1.65	2.02	4.98	1.82
	(11.78)	(10.75)	(7.64)	(9.34)	(10.43)	(8.68)	(9.75)	(10.48)	(9.75)
30~40	0.33	0.35	1.07	1.04	1.78	1.29	1.55	5.15	1.57
	(7.85)	(6.79)	(5.99)	(6.35)	(9.53)	(6.79)	(7.49)	(10.85)	(8.41)
40~50	0.25	0.32	0.88	0.94	1.48	1.05	1.39	2.71	1.13
	(6.07)	(6.24)	(4.92)	(5.76)	(7.91)	(5.54)	(6.70)	(5.70)	(6.06)
50~60	0.20	0.27	0.79	0.77	1.21	0.94	1.08	1.81	0.88
	(4.77)	(5.28)	(4.41)	(4.70)	(6.52)	(4.96)	(5.23)	(3.82)	(4.72)
60~70	0.16	0.26	0.71	0.59	0.97	0.87	0.93	2.14	0.83
	(3.90)	(5.08)	(3.99)	(3.64)	(5.20)	(4.57)	(4.50)	(4.51)	(4.45)
70~80	0.18	0.23	0.69	0.49	0.85	0.78	0.78	2.01	0.75
	(4.21)	(4.47)	(3.90)	(3.03)	(4.57)	(4.12)	(3.77)	(4.24)	(4.02)
80~90	0	0.20	0.65	0.41	0.76	0.73	0.66	1.69	0.64
	(0)	(3.83)	(3.63)	(2.54)	(4.08)	(3.86)	(3.21)	(3.57)	(3.43)
90~100	0	0.16	0.63	0.40	0.68	0.63	0.63	1.75	0.61
	(0)	(3.09)	(3.56)	(2.46)	(3.66)	(3.34)	(3.04)	(3.68)	(3.27)
100cm 以下	0	0.15	5.36	2.96	1.21	4.67	3.20	5.13	2.84
	(0)	(2.96)	(30.15)	(18.17)	(4.46)	(24.62)	(15.47)	(10.81)	(15.52)

注：括号外的数字为根系生物量 (g)，括号内的数字为占总数的比例 (%)。多重比较采用 Duncan 新复极差法，不同大写字母分别表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)，下同。

从不同土层深度看，在 0~100cm 土层内，26 年苜蓿根系生物量在各层总是最高，3 年在各层总是最低。具体地：在 0~10cm 土层，根系生物量最高的是 26 年苜蓿，达到 12.13g，12 年、14 年、18 年超过 5.0g；根系生物量最低的是 3 年，只有 1.47g，较低的处理是 6 年 (3.64g)、8 年 (4.97g)，是 26 年苜蓿的 12.12%~40.97%。在 10~20cm 土层，根系生物量最高的是 26 年，为 7.98g，较低的是 3 年、4 年，只有 1g 左右，仅为 26 年苜蓿的 10.90%~13.78%；6 年、8 年、12 年、14 年、18 年根系生物量为 2.01~2.97g，为 26 年的 25.19%~37.22%。在 20~30cm 土层，根系生物量最高的是 26 年苜蓿，为 4.98g，其次是 18 年，为 2.02g；12 年、14 年根系生物量超过 1.65g；最低的是 3 年、4 年，低于 0.6g，6 年、8 年苜蓿根系生物量也较低，分别为 1.36g、1.52g。在 30~40cm 土层内，根系生物量最高的是 26 年苜蓿，为 5.15g；最低的是 3 年、4 年，分别仅为 0.33g、0.35g。在 50cm 土层以下，除 26 年苜蓿外，所有年限苜蓿各层根系生物量均小于 1.0g，3 年、4 年仅为 0.20g 左右，6 年、8 年、12 年、

14 年、18 年为 0.7~0.9g, 而 26 年苜蓿为 2.0g 左右。

不同生长年限苜蓿根系生物量在不同土层的垂直分布不同, 随根系向下延伸而逐渐递减。所有年限苜蓿的根系生物量以 0~10cm 最大, 占全层根系生物量的 26.74%, 随土层深度的增加, 根系生物量逐渐减少。10~20cm 土层根系生物量占全层根系生物量的 15.17%, 20~30cm 占 9.75%, 30~40cm 占 8.41%, 40~50cm 占 6.06%, 50~60cm 占 4.72%, 60~70cm 占 4.45%, 70~80cm 占 4.02%, 80~90cm 占 3.43%, 90~100cm 占 3.27%, 100cm 土层以下占到 15.52%。

从根系生物量的垂直分布看, 0~20cm 土层根系生物量占到全层根系生物量的 41.91%。这表明苜蓿根系主要集中在 0~20cm, 该土层根系发达, 有助于扩大浅层根系的吸收面积, 充分利用地表水分。从表中还可以看出, 随着苜蓿生长年限的延长, 100cm 土层以下根系生物量明显增加。这说明苜蓿生长年限越长, 根系下扎越深。在试验过程中测定的结果也表明, 苜蓿生长超过 8 年, 苜蓿根系下扎深, 并着生大量须根, 苜蓿主要通过须根吸收土壤深层的水分。

2. 不同生长年限苜蓿根系体积的垂直分布

根系体积在不同生长年限间差异极显著 (表 6-5)。26 年苜蓿的根系体积极显著地高于其他所有处理; 14 年极显著地高于除 26 年外的其他处理; 12 年、18 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于 3 年、4 年、6 年、8 年, 8 年极显著地高于 3 年、4 年、6 年苜蓿, 6 年极显著地高于 3 年、4 年, 3 年、4 年之间差异不显著。

表 6-5 不同生长年限苜蓿根系体积垂直分布

土层深度 /cm	生长年限/年								平均
	3	4	6	8	12	14	18	26	
全层	11.06F	13.09F	36.1E	38.83D	54.00C	58.4B	52.88C	141.63A	50.75
0~10	3.64 (32.91)	4.33 (33.08)	9.50 (26.32)	13.25 (34.12)	11.17 (20.68)	12.50 (21.40)	13.00 (24.58)	34.75 (24.54)	12.77
10~20	2.44 (22.06)	2.00 (15.27)	5.00 (13.85)	5.75 (14.81)	8.33 (15.43)	8.00 (13.70)	6.50 (12.29)	22.50 (15.89)	7.57
20~30	1.76 (15.91)	1.50 (11.45)	4.50 (12.47)	4.63 (11.91)	5.00 (9.26)	4.25 (7.28)	5.00 (9.46)	14.50 (10.24)	5.14
30~40	1.24 (11.21)	0.97 (7.38)	2.50 (6.93)	3.00 (7.73)	6.67 (12.35)	4.25 (7.28)	4.25 (8.04)	13.75 (9.71)	4.58
40~50	0.80 (7.23)	0.83 (6.36)	2.00 (5.54)	2.50 (6.44)	3.83 (7.10)	3.00 (5.14)	2.50 (4.73)	7.50 (5.30)	2.87
50~60	0.44 (3.98)	0.67 (5.09)	1.50 (4.16)	2.25 (5.79)	3.33 (6.17)	2.65 (4.54)	2.50 (4.73)	5.00 (3.53)	2.29
60~70	0.50 (4.52)	0.83 (6.36)	0.75 (2.08)	2.00 (5.15)	3.33 (6.17)	2.43 (4.15)	2.38 (4.49)	6.75 (4.77)	2.37
70~80	0.24 (2.17)	0.50 (3.82)	1.00 (2.77)	1.88 (4.83)	2.67 (4.94)	2.30 (3.94)	2.25 (4.25)	6.50 (4.59)	2.17

续表

土层深度 /cm	生长年限/年								平均
	3	4	6	8	12	14	18	26	
80~90	0 (0)	0.33 (2.54)	0.75 (2.08)	1.50 (3.86)	2.67 (4.94)	2.25 (3.85)	2.25 (4.25)	5.00 (3.53)	1.84
90~100	0 (0)	0.30 (2.29)	0.50 (1.39)	1.13 (2.90)	2.50 (4.63)	2.25 (3.85)	2.00 (3.78)	5.25 (3.71)	1.74
100cm	0	0.83	8.10	0.95	4.50	14.53	10.25	20.13	7.41
以下	(0)	(6.36)	(22.44)	(2.45)	(8.33)	(24.87)	(19.38)	(14.21)	

注：括号外的数字为根系体积 (cm^3)，括号内的数字为占总数的比例 (%)。

从不同土层深度看，根系体积与根系生物量的变化规律相同，即在 0~100cm 土层内，26 年根系体积在各层总是最高，3 年根系体积在各层总是最低。具体地：在 0~10cm 土层内，根系体积最大的是 26 年苜蓿，达到 34.75cm^3 ，其次较高的处理是 8 年、12 年、14 年、18 年，为 $11.17\sim 13.25\text{cm}^3$ ，是 26 年的 $32.14\%\sim 38.13\%$ ；根系体积最小的是 3 年，只有 3.64cm^3 ，是 26 年的 10.47% ；4 年、6 年的根系体积也较小，分别为 4.33cm^3 、 9.50cm^3 ，是 26 年根系体积的 12.46% 、 27.34% 。在 10~20cm 土层内，根系体积最大的是 26 年苜蓿，达到 22.50cm^3 ，6 年、8 年、12 年、14 年、18 年为 $5.0\sim 8.33\text{cm}^3$ ，比 26 年少 $14.17\sim 17.5\text{cm}^3$ ，3 年、4 年苜蓿根系体积较少，分别为 2.44cm^3 、 2.00cm^3 ，远低于 26 年苜蓿。在 20~30cm、30~40cm 土层内，根系体积的分布状况与 0~20cm 土层基本一致。

在 50cm 土层以下，不同生长年限苜蓿在不同土层变化不大，26 年苜蓿根系体积为 5.5cm^3 左右，6 年、8 年、12 年、14 年、18 年为 2.5cm^3 左右，3 年、4 年仅为 0.5cm^3 左右。

不同生长年限苜蓿根系体积在不同土层的垂直分布不同：随着土层深度的增加，根系体积逐渐减少。所有年限苜蓿根系体积以 0~10cm 最大，占全层根系生物量的 27.20% ，10~20cm 土层根系体积占全层的 15.41% ，20~30cm 占 11.0% ，30~40cm 占 8.83% ，40~50cm 占到 5.98% ，50~60cm 占 4.75% ，60~70cm 占 4.71% ，70~80cm 占 3.91% ，80~90cm 占 3.13% ，90~100cm 占 2.82% ，100cm 以下占到 12.26% 。

从根系体积的垂直分布看，苜蓿根系分布区域主要集中在 0~20cm，0~20cm 土层根系体积占到全层根系体积的 42.61% 。从不同生长年限看，26 年根系体积最大，8 年、12 年、14 年、18 年根系体积较大；根系体积较小的是 3 年、4 年苜蓿。

二、不同生长年限苜蓿生长特性研究

(一) 不同生长年限苜蓿生长速度比较

生长速度指单位时间内植株高度变化的快慢，它反映了牧草生长能力的强弱，决定着牧草的生物产量和利用年限。生长速度从一定角度反映牧草的耐牧、耐刈割性能以及

产草量和利用率。

不同生长年限苜蓿生长速度的差异见表 6-6。可以看出,不同生长年限苜蓿生长速度表现同样的规律。在第一茬草中,6 年苜蓿的生长速度最快 ($1.45\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),比平均值高 47.96%,其次是 3 年、4 年、8 年,超过 $1.02\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,生长最慢的是 18 年、26 年苜蓿,比 6 年低 145.76%~263.66%,12 年、14 年生长速度超过 $0.90\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。第二茬中,生长最快的是 6 年苜蓿,为 $0.72\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,3 年、4 年、8 年、12 年的生长速度也较快,超过 $0.50\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,生长最慢的是 18 年、26 年苜蓿,只有 $0.29\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,比 3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿低 $0.22\sim 0.44\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

表 6-6 不同生长年限苜蓿生长速度差异比较

生长年限 /年	第一茬		第二茬	
	生长天数 (4.25~5.15)	生长速度 /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	生长天数 (5.16~7.27)	生长速度 /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)
3	20	1.10	73	0.64
4	20	1.42	73	0.50
6	20	1.45	73	0.72
8	20	1.02	73	0.53
12	20	0.96	73	0.40
14	20	0.91	73	0.51
18	20	0.41	73	0.29
26	20	0.59	73	0.29
平均	20	0.98	73	0.48

从不同茬次看,第一茬苜蓿生长速度平均为 $0.98\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,明显高于第二茬 ($0.48\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$),第二茬比第一茬的生长速度慢 51.02%。从不同生长年限看,除 18 年苜蓿外,其余年限第二茬的生长速度比第一茬低 41%以上,这也正是第一茬苜蓿草产量的贡献率大于第二茬的原因所在。

从两茬苜蓿的生长速度看,3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿在整个阶段生长速度快,具有潜在的丰产优势,而生长至 18 年、26 年,苜蓿生长缓慢,衰败严重。

(二) 不同生长年限苜蓿株高动态变化分析

苜蓿返青以后,随着温度的升高、降水的增多以及发育阶段对生长环境的适应,生长速度逐渐加快。在一定气候条件下,苜蓿株高在整个生育期内的动态变化呈“缓慢生长—快速生长—缓慢生长”的 S 形曲线变化,即株高在返青期和分枝期前期缓慢增加,在分枝期后期和现蕾期,由于温度的进一步升高、降水量的增加以及苜蓿自身的遗传特性的影响,苜蓿在该阶段快速生长,在开花期苜蓿生殖生长旺盛,株高生长缓慢。苜蓿株高与生长发育时间的关系可以用 Logistic 曲线进行拟合,株高的规律性变化是由它的生物学特性决定的。

1. 生长方程的拟合和特征值估算

利用广泛应用于作物栽培生理生态研究的 Logistic 生长方程 $y=k_m/(1+e^{a+bx})$ 对

不同生长年限苜蓿在第二茬期间所测定的株高进行曲线拟合,并估算方程的特征值。 t 为本试验株高生长天数, y 为苜蓿某一时期的株高, a 、 b 、 k_m 是 3 个待定系数 ($a > 0$, $b < 0$), 它们均具有一定的生物学意义。 k_m 表示株高最大值; 当 $t_0 = -a/b$ 时, 有 $d^2y/d^2t = 0$, 此时苜蓿株高达到最大值, 即 $v_m = dy/dt = -bk_m/4$; t_0 表示株高生长最快的时刻, 此时的株高速率 (v_m) 又称为“速度特征值”。当 $t_1 = [\ln(2+1.732)-a]/b$, $t_2 = [\ln(2-1.732)-a]/b$ 时, 有 $d^3y/d^3t = 0$, 即在 t_1 时刻 d^2y/d^2t 达到最大值, 在 t_2 时刻 d^2y/d^2t 达到最小值。 t_1 和 t_2 将 Logistic 生长函数“S”形曲线分为 3 个阶段, 在 $0 \sim t_1$ 时间内, 株高呈缓慢上升的趋势, 即渐增期; 在 $t_1 \sim t_2$ 时间内株高生长速度加快, 几乎呈直线增加趋势, 即快增期; 在过了 t_2 时刻后, 株高生长速度又减缓下来, 使 y 最终趋向于 y_m , 即缓增期。 $\Delta t = t_2 - t_1$, 它被称为“时间特征值”, 表示了株高快速生长期的时间长短; 在 $t_1 \sim t_2$ 时间内, $GT = -bk_m/4 \times \Delta t$, GT 又被称为“生长特征值”, 它表示株高增长已达到最大增长量的 65.8% 以上。通过对 Logistic 曲线生长过程速度函数求导解析, 得到的 Logistic 曲线生长过程的 3 个关键期, 进而得到 Logistic 曲线生长方程的 3 个阶段——渐增期、快增期、缓增期。这样, 可以在预测的基础上较好地把握生长过程的 3 个阶段, 对生长过程进行科学解释, 为正确决策提供理论依据。数据处理采用 Excel 及唐启义和冯明光 (2002) 提供的 DPS 分析软件进行分析和作图。

2. 苜蓿株高生长的 Logistic 模型

把 8 种生长年限苜蓿第二茬期间株高生长动态用 Logistic 模型拟合, 模型的拟合度均通过显著性检验 (表 6-7), 保证了苜蓿株高生长特征参数的有效性和可靠性。再生草株高测定时间分别为 6 月 3 日、6 月 9 日、6 月 16 日、6 月 24 日、7 月 3 日、7 月 11 日、7 月 17 日、7 月 27 日。

表 6-7 不同生长年限苜蓿株高生长的 Logistic 模型及其特征值

生长年限 /年	GT/天	Δt /天	t_1 /天	t_0 /天	t_2 /天	V_m /(cm·d ⁻¹)	方程	R^2	P
3	61.769	38.848	25.103	44.527	63.951	1.590	$y=93.8067/(1+e^{3.0189-0.0678x})$	0.9572	0.0004
4	59.025	36.430	26.295	44.510	62.726	1.620	$y=89.6390/(1+e^{3.2181-0.0723x})$	0.9430	0.0008
6	63.071	31.207	29.337	44.941	60.545	2.021	$y=95.7835/(1+e^{3.7930-0.0844x})$	0.9986	0.0000
8	60.437	36.180	13.161	31.250	49.340	1.670	$y=91.7833/(1+e^{2.2750-0.0728x})$	0.9972	0.0000
12	57.645	50.555	33.187	58.464	83.742	1.140	$y=87.5431/(1+e^{3.0460-0.0521x})$	0.9665	0.0002
14	42.783	52.260	28.759	54.889	81.019	0.819	$y=64.9725/(1+e^{2.7664-0.05043x})$	0.9955	0.0000

续表

生长年限 /年	GT/天	Δt /天	t_1 /天	t_0 /天	t_2 /天	V_m /($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	方程	R^2	P
18	38.748	55.218	15.525	43.134	70.743	0.702	$y=58.8452 / (1+e^{2.0575-0.0477t})$	0.9955	0.0000
26	33.433	60.689	15.271	45.615	75.960	0.551	$y=50.7740 / (1+e^{1.9797-0.0434t})$	0.9965	0.0000
平均	52.114	45.173	23.330	45.916	68.503	1.264	$y=79.1434 / (1+e^{2.7693-0.0614t})$	0.9813	0.0002

注: GT 为生长特征值, Δt 为时间特征值, t_1 、 t_2 分别为进入、结束旺盛生长期的时间, t_0 为生长速率达最大的时间, V_m 为速度特征值, R^2 为方程的决定系数, P 为方程的显著水平。

从表中特征值可以看出, 生长年限为 3 年、4 年、6 年、12 年、14 年的苜蓿, 在 6 月 30 日左右进入株高旺盛生长期, 7 月底结束旺盛生长期, 最快生长期持续一个月左右; 苜蓿生长超过 14 年, 株高旺盛生长期提前至 6 月 18~19 日, 最快生长期持续时间延长。从不同生长年限看, 日生长速率最快的是 6 年苜蓿, 为 $2.02\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$, 3 年、4 年、8 年苜蓿株高生长速度也较快, 超过 $1.55\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$, 苜蓿生长超过 14 年 (含 14 年), 株高生长速度低于 $0.85\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(三) 不同生长年限苜蓿分枝数动态变化分析

分枝数、分枝速度与产量关系密切。对不同生长年限苜蓿在第二茬不同时期分枝数

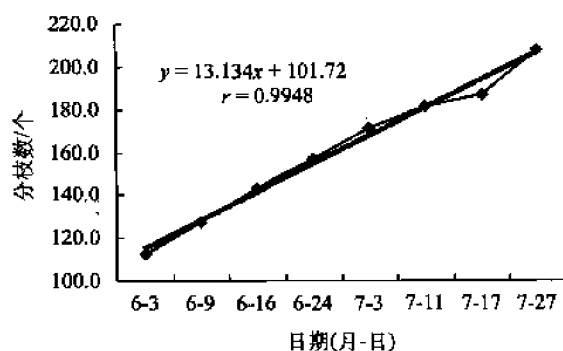


图 6-1 紫花苜蓿不同时期分枝数动态变化

变化取平均值, 作出变化趋势图, 如图 6-1 所示, 可以看出, 苜蓿分枝数与生育进程呈线性相关, 相关系数 $r=0.9948$, 达极显著正相关。

表 6-8 列出了不同生长年限苜蓿在不同测定时间分枝数的动态变化, 可以看出, 随着时间的推移, 所有生长年限苜蓿的分枝数逐渐增加。在各个测定时期, 4 年、6 年分枝数总是较多, 26 年分枝数总是最少。具体地: 6 月 3 日、6

月 9 日的测定结果表明, 4 年苜蓿的分枝数最多, 超过 170 个, 其次为 6 年、12 年, 分别为 155~172 个, 14 年、18 年、26 年分枝数较少, 低于 96 个。6 月 16 日、6 月 24 日的测定结果表明, 4 年的分枝数最多, 其次是 6 年, 18 年、26 年分枝数最少, 少于 85 个。7 月 3 日以后至第二茬收获前 (7 月 27 日), 分枝数最多的都是 6 年苜蓿, 其次是 4 年、8 年, 分枝数较少的是 26 年, 低于 80 个, 14 年、18 年苜蓿的分枝数也较少, 为 130 个左右。

表 6-8 不同生长年限苜蓿分枝数动态变化分析

生长 年限 /年	分枝数/个								分枝速度/(个·d ⁻¹)			
	6-3	6-9	6-16	6-24	7-3	7-11	7-17	7-27	分枝 期	现蕾 期	开花 期	分枝 开花
3	90.67	118.33	119.33	137.67	144.67	166.33	170.50	196.67CD	4.61	1.10	2.17	1.96
4	172.33	197.33	234.67	237.00	250.67	257.33	263.33	275.00AB	4.17	2.22	1.01	1.90
6	155.33	165.00	167.00	226.33	257.33	272.67	277.00	299.67A	1.61	3.85	1.76	2.67
8	105.33	119.33	164.67	169.67	186.67	195.67	210.67	246.67B	2.33	2.81	2.50	2.62
12	163.00	172.00	195.50	206.00	208.00	218.33	222.50	235.50BC	2.22	1.24	1.17	1.31
14	82.33	95.67	112.33	120.33	125.33	130.67	137.00	153.33D	1.50	1.50	1.15	1.34
18	74.67	82.67	83.67	84.33	125.33	135.00	138.67	151.33D	1.33	1.78	1.08	1.42
26	52.67	65.33	66.33	71.33	72.67	75.67	78.67	105.33E	2.28	0.31	1.36	0.98
平均值	112.04	126.96	142.94	156.58	171.33	181.46	187.29	207.94	2.51	1.85	1.53	1.78

注：样方面积为 0.6m×0.6m；表中日期表示方法为月-日，下同。

7 月 27 日的测定结果表明，不同生长年限苜蓿分枝数存在极显著差异：6 年与 4 年之间差异不显著，但极显著地高于其余所有年限；4 年与 8 年之间差异不显著，但极显著地高于除 6 年、12 年外的所有年限；14 年与 18 年之间差异不显著，但极显著地高于 26 年。

可以看出，分枝速度在生育期内的变化为“快速增长—较快增长—缓慢增长”，即随着苜蓿生育进程的推进，分枝速度逐渐减慢：在分枝期，分枝速度最快，达到 2.51 个·d⁻¹；在现蕾期，分枝速度达到 1.85 个·d⁻¹；而到了开花期，分枝数减少，每天只有 1.53 个。分枝数发生规律性的变化，与苜蓿的生育特性、外界的气候特点有关。苜蓿在分枝期以营养生长为主，进行分枝、生根、长叶；在现蕾期，营养生长与生殖生长并进，因此分枝速度比分枝期慢；而到了开花期，以生殖生长为主，光合产物和营养物质主要供应生殖器官的生长，输送到茎、叶的营养物质明显减少，因此分枝速度明显减慢。

(四) 不同生长年限苜蓿茎叶比、干鲜比分析

苜蓿茎叶比在不同利用年限及不同生育阶段均会发生变化。从图 6-2 中可以看出，不同生长年限苜蓿茎叶比存在差异。在第一茬，3 年、4 年、8 年茎叶比较高，超过 0.85，较低的是 12 年、14 年、18 年，低于 0.7。在第二茬草中，4 年、6 年、8 年、12 年较高，26 年苜蓿的茎叶比最低，只有 0.59，其次较低的是 18 年苜蓿，为 0.75。

苜蓿的干鲜比在不同生长年限间存在差异，表现出随着苜蓿生长年限的延长，干鲜比逐渐增大。在第一茬草中，18 年、26 年苜蓿的干鲜比分别为 0.27、0.29，而 3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿的干鲜比为 0.2 左右，分别比 18 年、26 年苜蓿低 18.52%~34.48%。在第二茬草中，干鲜比较大的是 14 年、18 年、26 年苜蓿，为 0.29~0.32，其余生长年限为 0.26 左右，分别比 14 年、18 年、26 年苜蓿低 3.45%~18.75%。

从图 6-2 中可以看出，不同生长年限苜蓿茎叶比在不同茬次之间存在较大的差异。所有生长年限苜蓿第一茬的茎叶比均小于 1，而第二茬苜蓿茎叶比除 14 年、18 年、26

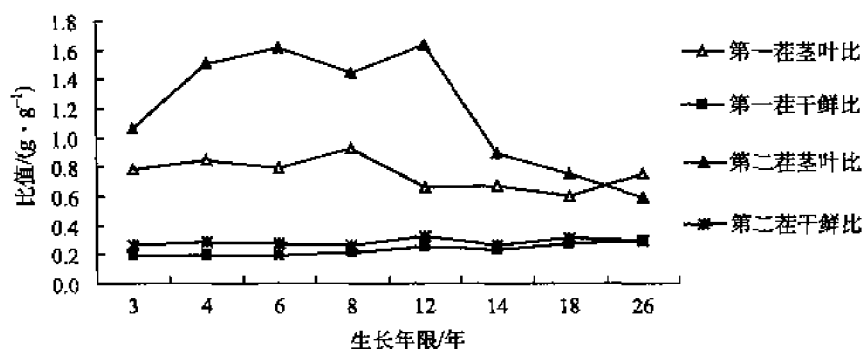


图 6-2 不同生长年限苜蓿茎叶比、干鲜比动态变化

年外,其余年限均大于 1.05,3 年、4 年、6 年、8 年、12 年超过 1.44,明显大于第一茬。从不同茬次的平均值看,再生草的茎叶比平均为 1.18,远高于第一茬草的 0.76,第二茬比第一茬高 35.59%。从苜蓿的生长年限看,14 年、18 年、26 年生苜蓿两茬的茎叶比相差不大,但 3 年、4 年、6 年、8 年、12 年苜蓿的茎叶比差别较大。

不同生长年限苜蓿干鲜比在不同茬次之间存在差异。总体看,所有生长年限苜蓿第二茬的干鲜比均大于第一茬。从不同茬次的平均值看,第一茬为 0.23,第二茬为 0.28,第二茬比第一茬高 21.74%。

三、不同生长年限苜蓿再生性能比较

不同生长年限苜蓿再生性能见表 6-9。从再生草的株高可以看出,苜蓿刈割两星期后,3 年、6 年、8 年苜蓿的株高最高,超过 4.5cm,18 年、26 年较低,低于 2.0cm,比 3 年、6 年、8 年苜蓿低 2.90~4.95cm。从再生草产量看,6 年苜蓿最高,干草产量达到 5083.02kg·hm⁻²,其次较高的是 3 年、4 年、8 年,超过 3170kg·hm⁻²,干草产量最低的是 26 年苜蓿,只有 769.62kg·hm⁻²,比 3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿低 2403.65~4313.40kg·hm⁻²,12 年、14 年、18 年苜蓿干草产量也较低,低于 1550kg·hm⁻²。从再生草占全年干草产量的比例看,年限之间差别不大。

表 6-9 不同生长年限苜蓿再生性能比较

生长 年限 /年	再生草株高/cm				再生速度/(cm·d ⁻¹)			再生草产量		
	6-3	6-9	7-3	7-27	分枝期	现蕾期	开花期	6-3~ 7-27	干草产量 /(kg·hm ⁻²)	占全年 总产/%
3	5.64	12.21	25.75	46.73	1.10	0.22	0.87	0.76	3210.76	43.11
4	2.79	6.03	25.05	36.44	0.54	0.61	0.47	0.62	4105.55	41.72
6	4.65	9.08	26.38	52.56	0.74	0.44	1.09	0.89	5083.02	44.20
8	6.48	10.02	22.63	38.44	0.59	0.35	0.66	0.59	3173.27	35.33
12	4.18	8.96	15.83	29.47	0.80	0.19	0.57	0.47	1532.06	30.33
14	3.58	6.54	20.53	37.30	0.49	0.42	0.70	0.62	1315.07	32.34
18	1.53	2.32	6.59	20.94	0.13	0.14	0.60	0.36	1468.86	44.63
26	1.75	2.52	6.15	21.07	0.13	0.13	0.62	0.36	769.62	31.08
平均	3.83	7.21	18.61	35.37	0.57	0.31	0.70	0.58	2582.28	37.84

从表 6-9 中可以看出,随着生育进程的推进,再生草生长速度表现出“快—慢—快”的规律性变化。在再生草最初生长的时期,再生速度平均为 $0.57\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,在 6 月 9 日至 7 月 3 日,再生速度为 $0.31\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,7 月 3 日~27 日,再生速度平均为 $0.70\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。再生草的生长速度表现出规律性的变化,这与苜蓿生长发育特性、外界降雨量及外界的温度状况有关。在苜蓿刈割后的 1 个月内,苜蓿处在分枝期,主要进行营养生长,因此生长速度相对较快,此后 1 个月内,苜蓿处在现蕾期,此阶段是营养生长与生殖生长并进阶段,既有根、茎、叶的生长,又有蕾、花的生长,期间降雨量仅 38.6mm,因此生长速度迅速减慢。而 7 月 3 日以后直至刈割,苜蓿处在开花期,以生殖生长为主,但由于此期温度高,降雨量多 (127.6mm),因此表现出较快的生长速度。

苜蓿生长年限不同,再生速度存在差异。分枝期,生长最快的是 3 年苜蓿,达到 $1.10\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,其次较快的是 4 年、6 年、8 年、12 年苜蓿,超过 $0.54\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,14 年为 $0.49\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$,生长最慢的是 18 年、26 年苜蓿,只有 $0.13\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在现蕾期,4 年、6 年苜蓿生长较快;14 年、18 年、26 年生长速度与分枝期差别不大,其余年限的生长速度均低于分枝期。在第二茬草的不同生育期中,开花期的生长速度最快,比较突出的是 14 年、18 年、26 年苜蓿,分别为 $0.70\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.60\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.62\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这可能与外界的降雨关系密切。苜蓿生长至 14 年以上,对土壤水分的累积消耗导致整个土体干化,在外界降雨量少少的情况下,苜蓿生长缓慢,当外界有较多的降雨时,苜蓿迅速生长,与 8 年苜蓿的生长速度相当,达到 $0.63\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右。

因此,从再生性能综合分析,3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿的再生性能强。

四、不同生长年限苜蓿总生物量特性研究

2006 年、2007 年全年鲜草、干草产量及干鲜比见表 6-10。结果表明,生长年限低于 6 年,随着生长年限的延长,产量呈上升趋势。生长年限超过 6 年,产量呈下降趋势。3 年苜蓿在 2006 年干草产量为 $7447.76\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2007 年干草产量达到 $9901.89\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量的增长率为 32.95%;4 年苜蓿在 2006 年干草产量为 $9839.95\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2007 年干草产量达到 $9952.21\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量的增长率为 1.14%。对于 6 年苜蓿来说,2007 年干草年产量比 2006 年下降了 3.34%;8 年、12 年、18 年、26 年苜蓿,2007 年比 2006 年干草产量分别下降了 32.57%、12.99%、43.55%、58.56%。

表 6-10 不同生长年限苜蓿总生物量比较

生长年限 /年	2006 年			2007 年		
	鲜草产量 /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比	鲜草产量 /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干草产量 /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	干鲜比
3	35 620.3	7 447.76	0.21	40 443.00	9 901.89	0.23
4	47 232.0	9 839.95	0.21	41 467.53	9 952.21	0.24
6	54 313.83	11 500.54	0.24	46 317.63	11 116.23	0.24
8	39 796.43	8 982.13	0.25	23 293.38	6 056.28	0.26
12	19 260.23	5 051.38	0.29	15 156.14	4 395.28	0.29

续表

生长年限 /年	2006 年			2007 年		
	鲜草产量 /(kg · hm ⁻²)	干草产量 /(kg · hm ⁻²)	干鲜比	鲜草产量 /(kg · hm ⁻²)	干草产量 /(kg · hm ⁻²)	干鲜比
14	17 127.13	4 066.64	0.25	19 073.56	5 149.86	0.27
18	12 200.61	3 291.01	0.30	5 992.52	1 857.68	0.31
26	9 037.485	2 476.04	0.29	3 420.60	1 026.18	0.30
平均	29 323.5	6 581.93	0.26	23 495.54	6 106.95	0.27

以上分析表明,在苜蓿生长的前6年,属于产量递增期,而当苜蓿生长超过6年,产量呈现逐年下降的趋势。进一步说明苜蓿高产期为6年,适宜种植年限不宜超过8年。

五、小结与讨论

苜蓿生物产量与植物学性状之间的相关关系表明,苜蓿各植物学性状与生物产量之间均为正相关关系,且株高与产量的相关系数达极显著水平。株高与节间长、株高与单茎重、株高与产量、节间数与分枝数、茎粗与单茎重均达极显著正相关。本试验中,由于苜蓿生长年限的影响,导致单株叶重、单茎重、节间长在不同年限间差异较大,这是造成同一紫花苜蓿品种在不同利用年限生物产量存在差异的主要原因。通过对不同生长年限苜蓿头茬草、再生草植物学性状的综合分析,3年、4年、6年、8年苜蓿构成生物产量的植物学性状突出,具有丰产的潜力。苜蓿生长超过8年,构成生物产量的植物学性状衰退,表现为节数少、节间短,植株矮小,单株分枝能力差,枝条数锐减,草地开始衰败;苜蓿生长至18年、26年,草地衰败严重,构成生物产量的植物学性状最差。

不同生长年限苜蓿根系生物量、根系体积存在极显著差异,26年苜蓿根系生物量、根系体积显著地高于其余所有年限,0~20cm土层是苜蓿根系分布的主要区域。苜蓿生长至12年以后,地上部尚保持有一定的生活力,这与强大的根系的促进作用有关。

从再生性能看,3年、4年、6年、8年苜蓿的再生性能强。不同生长年限苜蓿再生草的生长速度表现出“快—慢—快”的规律性变化。这与苜蓿的生长发育特性、外界降雨量及温度状况有关。在苜蓿刈割后的1个月内,苜蓿处在分枝期,主要进行营养生长,因此生长速度相对较快,此后1个月内,苜蓿处在现蕾期,此阶段是营养生长与生殖生长并进阶段,既有根、茎、叶的生长,又有蕾、花的生长,营养物质既要供应营养器官的生长,又要供应生殖器官的生长,在此期间降雨量仅为38.6mm,因此生长速度迅速减慢。而7月3日以后直至刈割,苜蓿处在开花期,以生殖生长为主,但由于此期温度高,降雨量多(127.6mm),因此表现出较快的生长速度。

苜蓿株高生长进程呈“S”形曲线增长。不同生长年限苜蓿株高旺盛生长期分别是:生长年限为3年、4年、6年、8年、12年、14年的苜蓿,在6月30日左右进入株高旺盛生长期,7月底结束旺盛生长期,最快生长期持续1个月左右;苜蓿生长超过14年,株高旺盛生长期提前至6月18~19日,最快生长期持续时间延长。从不同生长年限看,日生长速率最快的是6年苜蓿,为2.021cm · d⁻¹,3年、4年、8年苜蓿株高

生长速度也较快, 超过 $1.55\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$, 苜蓿生长超过 14 年 (含 14 年), 株高生长速度低于 $0.85\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2006 年、2007 年两年的产量结果表明, 在苜蓿生长的前 6 年, 属于产量递增期, 当苜蓿生长超过 6 年, 产量呈现逐年下降的趋势。这进一步说明苜蓿的高产期为 6 年, 适宜种植年限不宜超过 8 年。

第三节 不同生长年限苜蓿光合作用日变化 及其与环境因子的关系

光合作用为作物生长提供物质和能量, 是作物生长发育的基础和生产力的决定性因素, 同时又是一个对生态因子敏感的、复杂的生理过程 (姚素梅等, 2005), 研究植物的光合作用有助于采取适当的栽培措施提高植物的光合能力, 从而提高产量。近年来, 国内外对小麦、玉米、牧草等的光合作用进行了系统研究 (王群等, 2005; 隋娜等, 2005; 王建丽等, 2006; Wise et al., 1991), 对苜蓿的研究主要集中在种质资源的开发利用、优良品种的引进和培育等方面, 取得了许多进展。研究表明, 引进优良品种、改善栽培技术措施是提高苜蓿产草量、促进畜牧业发展的重要途径, 而提高单产的有效途径之一是增加光合产物的积累。因此, 研究苜蓿的光合特性对于提高苜蓿产草量、合理利用饲草有着重要意义。

本试验以黄土高原旱作条件下紫花苜蓿为研究对象, 通过研究生长年限分别为 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿叶片的光合生理特性, 分析紫花苜蓿净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、水分利用效率 (WUE)、气孔导度 (G_s) 及胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的日变化进程, 探索苜蓿光合作用的规律及其光合效率午间降低的机制, 以期从光合生理生态角度为紫花苜蓿高产栽培及适宜的利用年限提供理论依据与参考。

一、不同生长年限苜蓿光合性能比较

植物的光合性能可以通过净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率和胞间 CO_2 浓度等得到衡量。研究植物的光合特性, 有利于了解植物对光能的利用效率, 阐明植物光合的生态学特征。不同作物之间光合性能差异较大, 同一作物不同品种之间光合性能也存在显著差异。对于多年生作物, 不同年限之间光合性能是否存在差异还未见系统报道。因此研究不同生长年限苜蓿的光合特性, 并进一步分析比较它们之间的差异, 对苜蓿生物产量累积能力及水分利用效率的评价有非常重要的意义。

表 6-11 列出了不同生长年限苜蓿在初花期叶片的光合特性指标。可以看出, 苜蓿生长年限不同, 光合性能各指标存在极显著差异。从净光合速率看, 最大的是 6 年苜蓿, 最小的是 18 年苜蓿, 只有 $18.27\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比 6 年苜蓿低 $8.65\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同生长年限之间蒸腾速率存在极显著差异, 6 年极显著地高于除 12 年、14 年以外的所有年限, 4 年、8 年、26 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于 18 年。从水分利用效率看, 18 年苜蓿最高, 最低的是 6 年苜蓿。从气孔导度看, 6 年、8 年之间差

异不显著,但它们极显著地高于其余生长年限。胞间 CO_2 浓度在 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 18 年、26 年,18 年极显著地高于 26 年。叶绿素相对含量在不同生长年限之间差异极显著,4 年、6 年、8 年、12 年、14 年之间差异不显著,但它们极显著地高于 18 年、26 年苜蓿,18 年与 26 年之间差异不显著。

表 6-11 不同生长年限苜蓿光合性能比较

生长年限 /年	P_n $/(\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	T_r $/(\mu\text{molH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	WUE $/(\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1})$	G_n $/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	C_i $/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	Chl/%
4	21.82C	9.20B	2.53ABC	0.50B	281.86A	392A
6	26.92A	14.06A	1.95C	0.58A	285.89A	402A
8	22.02C	9.27B	2.52BC	0.58A	291.64A	345A
12	24.84AB	12.75A	2.20BC	0.49B	272.04A	361A
14	24.94AB	9.20B	2.87AB	0.47B	273.67A	351A
18	18.27D	5.33C	3.20A	0.23B	232.37B	237B
26	23.68BC	8.48B	2.56ABC	0.30B	168.79C	221B
平均值	23.21	9.76	2.55	0.45	258.04	330
标准差	2.89	2.87	0.41	0.13	43.85	72.09
变异系数/%	12.03	29.46	16.10	29.98	16.99	21.85

注:多重比较采用 Duncan 新复极差测验,不同大写字母为差异达极显著水平 ($P=0.01$)。

从不同生长年限苜蓿的变异系数看,生长年限对苜蓿光合特性的影响较大,变异系数都超过 12%。其中,生长年限对苜蓿初花期叶片的气孔导度和蒸腾速率影响最大,变异系数分别达到 29.98%和 29.46%,生长年限对叶绿素相对含量的影响也较大,变异系数达 21.85%。胞间 CO_2 浓度和水分利用率的变异系数为 16.99%和 16.10%;生长年限对净光合速率的影响较小,变异系数为 12.03%。可以看出,由于苜蓿生长年限的影响,苜蓿的光合特性在年限之间有较大的差异。

二、不同生长年限苜蓿光合作用的日变化

(一) 苜蓿生长的田间环境因子日变化规律

植物光合作用的日变化随着植物种类和环境条件的变化而有所不同。在自然条件下,环境因子对光合作用的影响不是单一、孤立的,而是相互联系、相互制约共同作用的结果。

通过对苜蓿生长的田间环境因子日变化规律的分析(图 6-3),结果表明,在 8:00~19:00,PAR、 T_a 、RH 和 C_a 的日变化均为“单峰”曲线。从早晨 8:00 开始测定时,PAR 为 $1116.59 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其后随着时间的推移,PAR 逐渐增加,至 12:00 左右达到其峰值 $1856.73 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,之后逐渐下降,至 19:00 降到最低值,为 $199.28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 T_a 变化范围为 $21.10 \sim 31.78^\circ\text{C}$,8:00 左右最低,为

21.10℃，此后，随着辐射强度的迅速增加而上升较快，到 14:00 左右达到最高温度 31.78℃，其峰值比 PAR 滞后 2h，之后随着辐射强度的减弱， T_a 缓慢下降，到 17:00 下降为 29.72℃，至 19:00 下降为 26.51℃，其中 13:00~16:00， T_a 保持在 30.85~31.78℃，变化幅度很小。

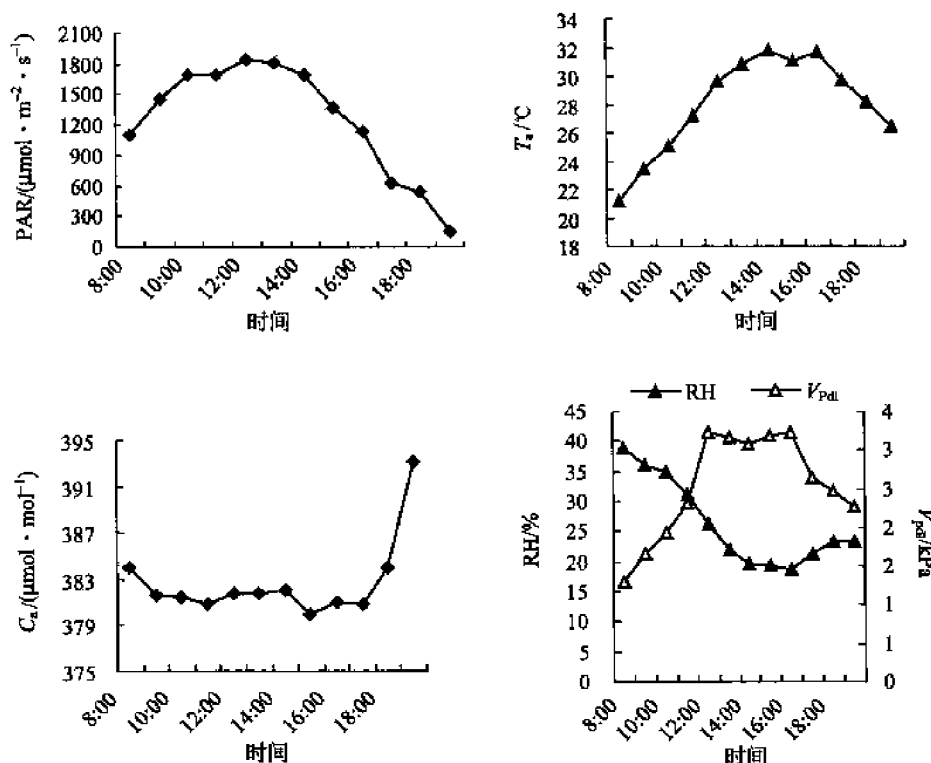


图 6-3 苜蓿生长的田间环境因子日变化

田间 CO_2 浓度 (C_a) 也呈现出规律性的日变化进程：从早晨 8:00 开始逐渐降低，15:00 左右达到最低值 ($379.90 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)，而后田间 CO_2 浓度逐渐回升，至 19:00 达到最大值，为 $393.22 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，变化范围为 $379.90 \sim 393.22 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，日变化幅度不大。RH 的变化规律与 PAR 和 T_a 相反。在 8:00 左右 RH 最高为 38.85%，此后，随着 T_a 的升高而迅速下降，到 16:00 左右降到最低值 18.79%，之后随着 T_a 的下降又有所回升，至 19:00，RH 上升到 23.46%。其中在 8:00~11:00，RH 基本保持在 35% 左右，在 14:00~16:00，RH 基本保持在 19% 左右，变化幅度较小。饱和蒸汽压差 (V_{pd}) 的变化规律与 RH 的变化趋势相反，即在 8:00 左右达到最小值 (1.31 kPa)，在 12:00 左右达到最大值 (3.23 kPa)，16:00 左右出现第二峰值 (3.23 kPa)，日变化幅度为 0.01~1.92 kPa。

(二) 不同生长年限苜蓿净光合速率日变化特征

供试苜蓿叶片净光合速率的日变化均呈典型的“双峰”曲线，上午 8:00~10:00 为 P_n 快速上升阶段，9:00~10:00 P_n 出现第一峰值，在 12:00 左右出现低谷，均有明

显的光合“午休”现象出现。 P_n 的第二峰值出现在 14:00 左右,此后呈快速下降趋势。苜蓿生长年限不同,叶片 P_n 出现高峰和低谷的时刻和高低有明显差异(图 6-4)。

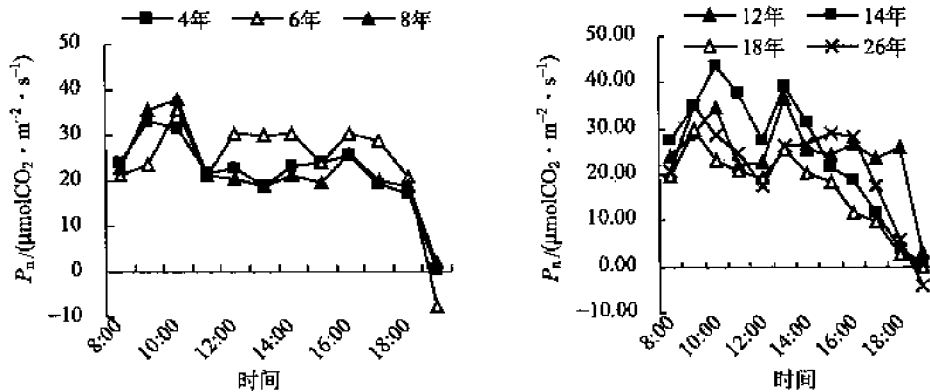


图 6-4 不同生长年限苜蓿叶片净光合速率日变化

4 年苜蓿 P_n 第一峰值出现在 9:00 左右,为 $33.02 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,第二峰值出现在 16:00 左右,为 $25.74 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 13:00 左右 P_n 处于低谷,为 $18.70 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6 年、8 年苜蓿第一高峰值都出现在 10:00,分别为 $35.50 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $37.92 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,低谷值都出现在 11:00,分别为 $21.28 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $21.0 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,但第二峰值出现的时刻有差异,6 年苜蓿第二高峰值在 14:00,而 8 年苜蓿出现在 16:00,峰值分别为 $30.42 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $25.94 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。苜蓿生长超过 8 年,叶片 P_n 出现高峰和低谷的时刻和高低与 3 年、4 年、6 年、8 年苜蓿有明显差异,12 年、14 年苜蓿第一峰值都出现在 10:00,分别为 $34.72 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $43.55 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;第二峰值都出现在 13:00,分别为 $36.38 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $39.53 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而 12 年苜蓿的最低值出现在 11:00,为 $22.07 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,14 年苜蓿出现在 12:00,为 $27.60 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。苜蓿生长至 18 年、26 年,第一峰值提前至 9:00,分别为 $29.78 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $35.00 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;第二峰值 18 年出现在 13:00,为 $25.56 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,26 年出现在 15:00,为 $29.12 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而低谷值都出现在 12:00,分别为 $19.22 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $17.45 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从以上分析可以看出, P_n 的第一峰值高于第二峰值,且 7 种生长年限的苜蓿中午 P_n 下降的速率均大于下午 P_n 回升的速率,即 P_n 中午降低快而恢复慢。随着苜蓿生长年限的延长, P_n 增加,苜蓿生长超过 18 年(含 18 年), P_n 迅速下降,但苜蓿生长至 26 年, P_n 高于 18 年苜蓿。

通过比较发现,6 年苜蓿的 P_n 高于其余所有生长年限,其次较高的是 4 年、12 年、14 年、8 年、26 年苜蓿。考虑到在 19:00,部分生长年限苜蓿的 P_n 出现负值,在计算 P_n 日平均值时去除该时刻的净光合速率,对 8:00~18:00 时段内的净光合速率进行平均,把不同生长年限苜蓿 P_n 的日平均值由大到小进行排序:6 年 ($26.92 \mu\text{molCO}_2 \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 12 年 ($26.78 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 14 年 ($24.94 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 8 年 ($23.83 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 4 年 ($23.76 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 26 年 ($23.68 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 18 年 ($18.27 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

不同生长年限苜蓿叶片净光合速率的方差分析结果表明, 年限之间存在极显著差异: 6 年、12 年与 14 年之间差异不显著, 但极显著地高于其余生长年限, 4 年、8 年、26 年之间差异不显著, 但极显著地高于 18 年。

(三) 不同生长年限苜蓿蒸腾速率日变化特征

T_r 的日变化进程与 P_n 基本一致, 呈现“双峰”曲线 (图 6-5), 但苜蓿生长年限不同, T_r 出现高峰和低谷的时刻和高低有明显差异。

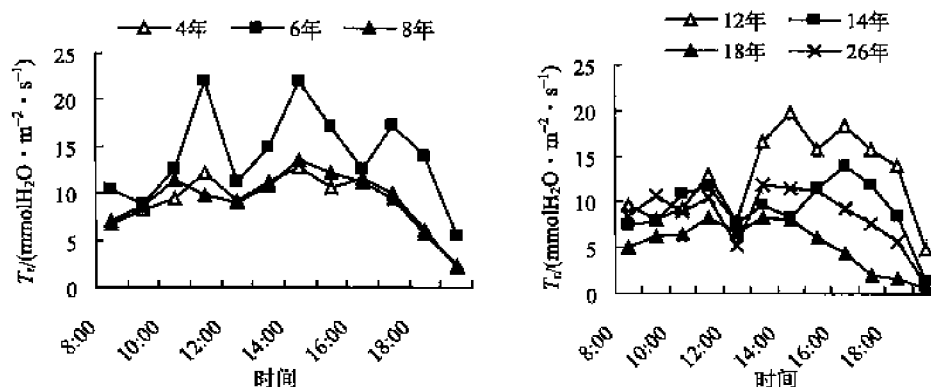


图 6-5 不同生长年限苜蓿蒸腾速率日变化

从图 6-5 中可以看出, 4 年、6 年苜蓿第一高峰值出现在 11:00 左右, 峰值分别为 $12.14 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $21.97 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 8 年苜蓿的第一高峰值出现在 10:00 左右, 为 $11.33 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 3 种年限的第二峰值都出现在 14:00 左右, 分别为 $12.70 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $22.07 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $13.58 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 低谷值都在 12:00 左右, 分别为 $9.28 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $11.23 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.15 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

苜蓿生长超过 12 年 (含 12 年), 除 26 年苜蓿外, T_r 第一高峰出现的时刻都为 11:00, 低谷出现的时刻都为 12:00 左右, 但第二峰值在不同年限之间存在差异, 12 年苜蓿在 14:00 出现, 为 $19.85 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 14 年在 16:00 出现, 为 $13.84 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 18 年和 26 年第二峰值都出现在 13:00, 分别为 $8.3 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $11.92 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从以上分析可以看出, 所有生长年限苜蓿 T_r 的第一峰值均低于第二峰值, 且在苜蓿出现第二峰值后, 蒸腾速率迅速下降。

不同生长年限苜蓿的蒸腾速率表现出中间高、两头低的规律, 即 6 年、8 年、12 年苜蓿的蒸腾速率高, 4 年、14 年、18 年、26 年低。与 14 年相比, 18 年、26 年苜蓿的蒸腾速率下降迅速, 苜蓿生长至 18 年, 蒸腾速率仅为 $5.33 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 但

苜蓿生长至 26 年, T_r 高于 18 年苜蓿。比较不同生长年限苜蓿 T_r 的日变化平均值, 由大到小的顺序依次为 6 年 ($14.06\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 12 年 ($12.75\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 8 年 ($9.27\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 4 年、14 年 ($9.20\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 26 年 ($8.48\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 18 年 ($5.33\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

方差分析结果表明, 不同年限之间 T_r 存在极显著差异: 6 年与 12 年之间差异不显著, 但极显著地高于其余生长年限, 4 年、8 年、14 年、26 年之间差异不显著, 但极显著地高于 18 年。

(四) 不同生长年限苜蓿水分利用效率 (WUE) 的日变化

从图 6-6 中可以看出, 不同生长年限苜蓿水分利用效率的日变化呈现规律性的变化: 在 9:00 左右达到全天的最大值, 此后随着时间的推移, WUE 逐渐下降, 在 17:00~18:00 左右又出现一个高峰值, 其后迅速下降。

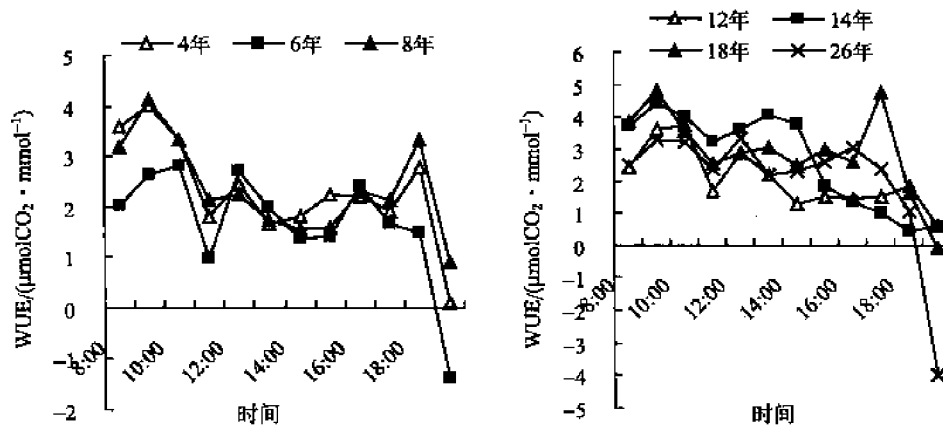


图 6-6 不同生长年限苜蓿水分利用效率日变化

所有生长年限苜蓿水分利用效率的日变化均呈“双峰”曲线。除 6 年苜蓿 WUE 在 10:00 达到全天的最大值 ($2.81\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$), 其余生长年限苜蓿均在 9:00 达到最大值, 4 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿的 WUE 分别为 $4.01\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $4.13\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $3.61\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $4.41\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $4.80\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $3.29\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。除 14 年苜蓿在 13:00 达到第二个高峰值 (为 $4.07\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$), 其余年限在 17:00~18:00 达到第二个高峰, 且峰值非常明显, 4 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿的 WUE 分别为 $2.80\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.50\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $3.33\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.88\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.85\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $4.75\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$, 26 年苜蓿的第二峰值出现在 16:00, 为 $3.05\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。所有年限苜蓿, 除 26 年苜蓿没有明显的低谷值, 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年、18 年苜蓿均有明显的低谷值, 4 年、6 年、12 年在 11:00 出现低谷值, 分别为 $1.79\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $0.97\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.70\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$, 8 年、14 年、18 年在 14:00~15:00 出现, 分别为 $1.55\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、

1. $89\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、2. $51\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。

(五) 不同生长年限苜蓿气孔导度 (G_s) 的日变化

不同生长年限苜蓿 G_s 的日变化曲线均为“双峰”曲线 (图 6-7)。所有生长年限苜蓿的 G_s 在早晨 8:00 左右达到全天的最大值, 其后随着温度的增加和湿度的下降, G_s 迅速降低。4 年、8 年、14 年在 16:00 左右, 6 年、12 年、18 年、26 年在 13:00~14:00 出现第二个峰值, 且第二峰值远小于第一峰值。4 年、6 年、8 年、12 年、14 年苜蓿 G_s 在 13:00~15:00 出现低谷, 18 年、26 年苜蓿在 12:00 左右出现低谷。

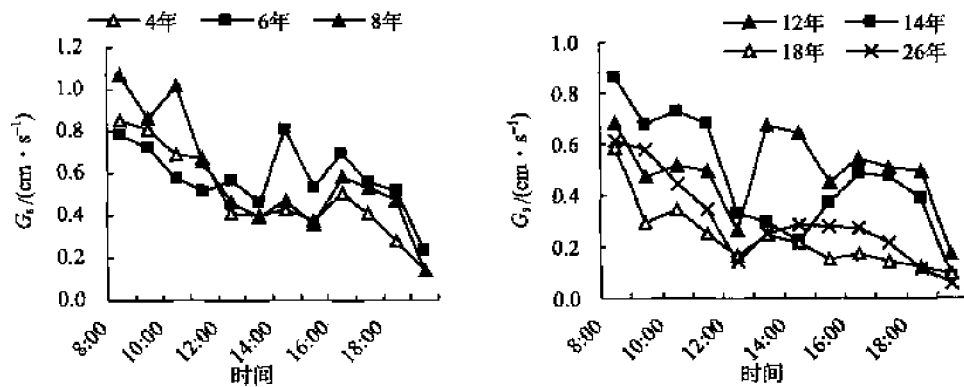


图 6-7 不同生长年限苜蓿叶片气孔导度的日变化

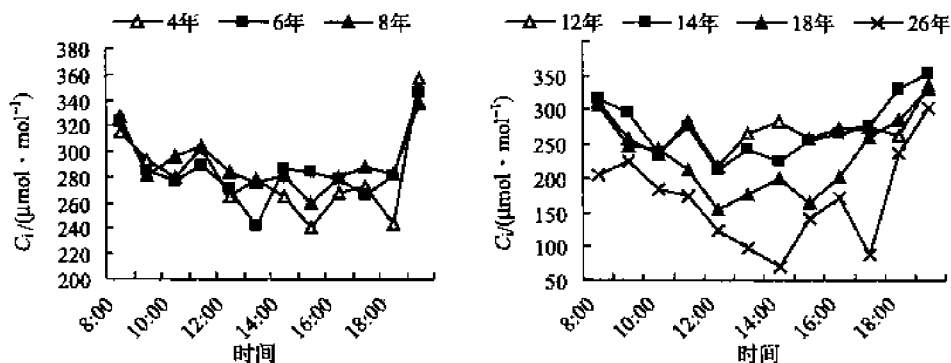
方差分析结果表明, 不同年限之间气孔导度存在极显著差异: 6 年与 8 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于其余生长年限, 4 年、12 年、14 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于 18 年、26 年, 18 年与 26 年之间差异不显著。8 年苜蓿叶片 G_s 在 8:00 的峰值最高, 达到 $1.07\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 18 年最低, 为 $0.59\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次是 26 年, 为 $0.62\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同生长年限苜蓿 G_s 的日平均值依次为 6 年 ($0.61\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 8 年 ($0.58\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 4 年 ($0.50\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 12 年 ($0.49\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 14 年 ($0.47\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 26 年 ($0.30\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 18 年 ($0.23\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(六) 不同生长年限苜蓿胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的日变化

图 6-8 表明, 不同生长年限苜蓿 C_i 的日变化呈现规律性的变化, 表现出随着时间的推移, C_i 逐渐下降, 在 12:00 左右达到全天的最低值 ($218.46\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 以后又逐渐上升, 在 19:00 左右达到全天的最高值 ($338.27\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

除 26 年苜蓿外, 其余生长年限苜蓿叶片 C_i 在早晨 8:00 左右非常接近, 为 $307.4 \sim 327.6\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 年限之间差异不大, 而 26 年苜蓿在早晨 8:00 左右 C_i 为 $204.2\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 远低于其他年限。在 9:00~18:00 的时间范围内, 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年苜蓿叶片 C_i 值接近, 为 $260\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右, 18 年苜蓿叶片 C_i 值低于 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年, 而高于 26 年苜蓿。

从不同生长年限苜蓿 C_i 日平均值的大小看, 苜蓿生长年限低于 8 年 (含 8 年), 表

图 6-8 不同生长年限苜蓿叶片胞间 CO_2 浓度的日变化

现出随着苜蓿生长年限的延长, C_i 逐渐升高, 苜蓿生长超过 8 年, C_i 逐渐降低。方差分析结果表明, 不同年限之间差异极显著: 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年之间差异不显著, 但它们极显著地高于 18 年、26 年, 18 年极显著地高于 26 年。

从以上分析可以看出, 8 年苜蓿保持有较高的胞间 CO_2 浓度, 以后随着苜蓿生长年限的延长, 胞间 CO_2 浓度迅速下降, 当苜蓿生长至 18 年, 胞间 CO_2 浓度已降低很多, 对苜蓿的光合作用将会产生不利的影响。

(七) 不同生长年限苜蓿气孔限制值 (L_s) 的日变化

L_s 反映了植物叶片对大气 CO_2 相对利用效率的大小。经计算分析, 不同生长年限苜蓿叶片 L_s 的日变化都呈现出“双峰”趋势, 但双峰出现的时间不同 (图 6-9)。4 年苜蓿两个高峰值分别出现在 12:00 和 15:00 左右; 6 年、8 年苜蓿两个高峰值分别出现在 9:00~10:00 和 13:00~15:00 范围内; 12 年、14 年苜蓿两个高峰值都分别出现在 10:00 和 12:00 左右; 18 年、26 年苜蓿的两个高峰值分别出现在 12:00~14:00 和 15:00~17:00。

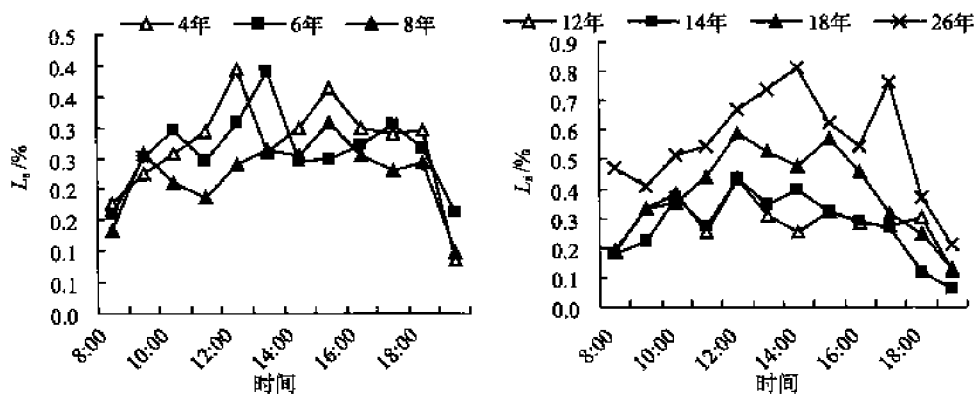


图 6-9 不同生长年限苜蓿叶片气孔限制值的日变化

从不同生长年限苜蓿叶片 L_s 的日平均值的大小看, 与 C_i 表现出相反的趋势, 即苜蓿生长年限低于 8 年 (含 8 年), L_s 表现出随着苜蓿生长年限的延长, L_s 逐渐降低, 苜蓿生长超过 8 年, L_s 逐渐升高。4 年、6 年、8 年苜蓿叶片 L_s 分别为 0.27%、0.26%、0.22%; 12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿叶片 L_s 分别为 0.29%、0.28%、0.386%、0.56%。

三、光合作用与主要生理生态因子的关系

光合作用的强弱取决于很多因素, 既有内部因素也有外部因素。内部因素决定着对同化物的需要及同化物从光合器官中的运输, 但是这些内部因素和外部环境条件总是相互作用、相互依赖的, 因此环境因子对光合作用影响的研究受到了普遍关注。在分析光合作用和主要生理生态因子的关系时, 所用数据为 7 种年限各指标的平均值。

(一) 净光合速率与空气温度的关系

温度不仅影响植物叶片的光合利用能力, 也影响其光能利用效率。在试验过程中, 上午 8:00~10:00, 空气温度从 21℃ 上升到 24℃, 是随着光合有效辐射的增强而逐渐升高的, 其变化幅度是在苜蓿光合作用适宜温度范围内。因此, 其净光合速率呈逐渐升高的变化趋势; 13:00~16:00, 空气温度一直维持在较高水平 (超过 30.5℃), 然后缓慢下降。相关分析结果表明, 净光合速率与空气温度之间呈极显著正相关 ($r=0.9508^{**}$, $P<0.01$)。以上分析说明一日中空气温度的日变化是影响净光合速率日变化的主要环境因子之一。

(二) 净光合速率与空气相对湿度的关系

相对湿度的日变化为早、晚较高, 中午较低。这种变化主要受空气温度变化的影响。分析表明, 大气相对湿度与净光合速率的相关性不显著。但大气相对湿度对净光合速率的影响在一日中不同时段表现出明显差异, 上午 8:00~10:00, 净光合速率与大气相对湿度之间呈极显著负相关 ($r=-0.9964^{**}$); 10:00~13:00, 净光合速率与大气相对湿度之间则呈正相关 ($r=0.4696$); 13:00~19:00, 净光合速率与大气相对湿度之间呈极显著负相关 ($r=-0.7146^{**}$)。以上分析说明一日中大气相对湿度的日变化是影响净光合速率日变化的主要环境因子之一。

(三) 净光合速率与胞间 CO_2 浓度的关系

相关分析表明, 胞间 CO_2 浓度与净光合速率之间存在极显著负相关关系 ($r=-0.8697^{**}$, $P<0.01$) (图 6-10)。一日中, 上午随净光合速率的升高, 固定较多的光合作用原料 CO_2 , 引起胞间 CO_2 浓度下降。下午随着田间光照、空气温度和空气相对湿度等环境因子的变化, 净光合速率降低, 固定 CO_2 的量减少, 从而引起胞间 CO_2 浓度上升。这说明一日中胞间 CO_2 浓度的日变化是影响净光合速率日变化的主要因子之一。

(四) 苜蓿叶片净光合速率、蒸腾速率与气孔导度的关系

气孔导度受环境因子的影响很大, 适宜的光强有利于气孔开张, 气孔阻力降低, 气

孔导度增大。从图 6-11 中可以看出, 一日中净光合速率与气孔导度之间呈正相关关系 ($r=0.6355^*$, $P<0.05$)。蒸腾速率在一天中随温度的升高而逐步上升, 下午随着温度的降低而逐渐降低, 蒸腾速率与气孔导度之间呈正相关关系 ($r=0.4975$)。

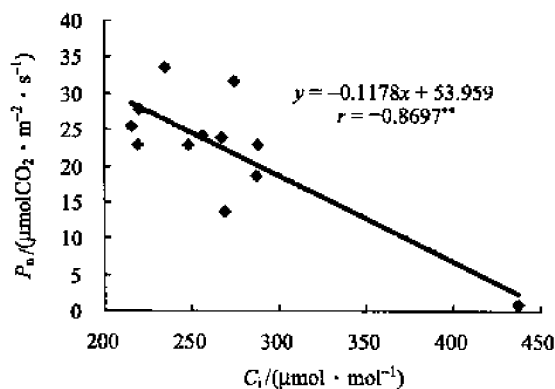


图 6-10 一日中净光合速率与胞间 CO_2 浓度的关系

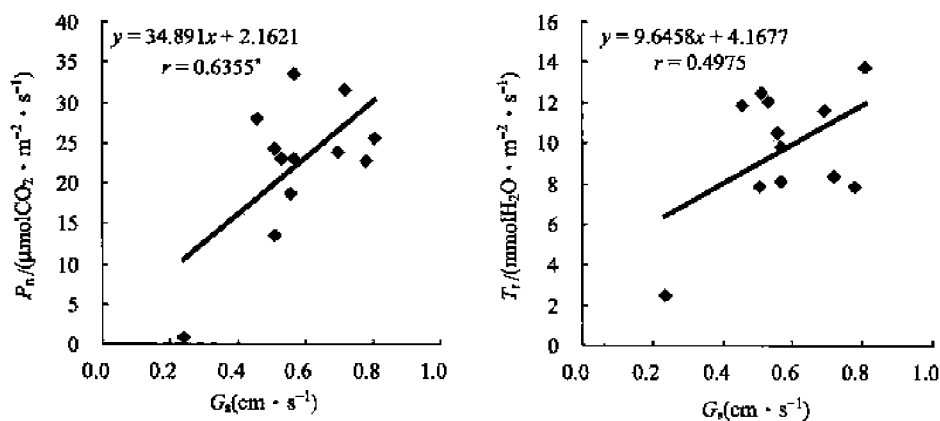


图 6-11 净光合速率、蒸腾速率与气孔导度的关系

(五) 净光合速率与蒸腾速率的关系

蒸腾速率在一天中随着温度的升高而逐步上升, 下午随着温度的降低, 蒸腾速率呈逐渐降低变化。相关分析表明 (图 6-11, 图 6-12), 苜蓿叶片净光合速率与蒸腾速率之间呈显著正相关关系 ($r=0.6613^*$, $P<0.05$)。

(六) 气孔限制值、胞间 CO_2 浓度的日变化及其与净光合速率之间的关系

不同生长年限苜蓿 P_n 在 11:00~12:00 均有一个光合“午休”低谷。叶片 P_n 中午降低的自身因素主要有两个: 气孔因素和非气孔因素。气孔因素是由于中午田间光照、空气温度和空气相对湿度等环境因子的变化引起植物气孔的部分关闭, CO_2 进入叶片受阻而使光合下降, 而非气孔因素是由于叶肉细胞自身羧化酶活性的下降而引起 P_n 的降低。根据 Farquhar 和 Sharkey (1982) 的观点, 只有当 P_n 和胞间 CO_2 浓度 C_i 变化

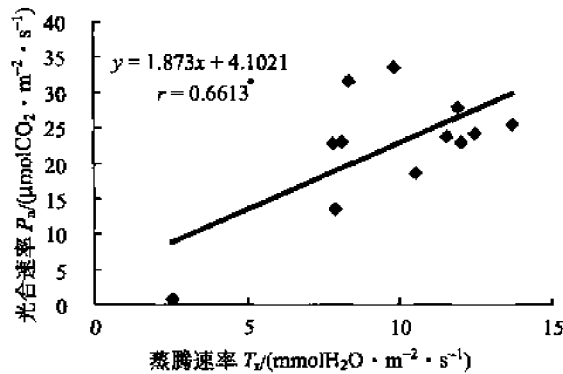


图 6-12 净光合速率与蒸腾速率的关系

方向相同,两者同时减小,且 L_s 增大时,才可以认为 P_n 的下降主要是由 G_s 引起的,否则 P_n 的下降要归因于叶肉细胞羧化能力的降低。

本研究对 7 种生长年限苜蓿的气孔限制值 (L_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 以及与净光合速率之间的关系进行了分析。可以看出,7 种生长年限苜蓿在 10:00~12:00 时段 P_n 的平均值分别为 $33.55 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $24.25 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $22.97 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表现出 P_n 在 10:00~12:00 期间降低, C_i 从 $250.72 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 下降到 $218.46 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, L_s 从 0.34% 增加到 0.44%,因此可以推断出引起光合“午休”的主要原因是气孔因素。

在 7 种生长年限中,4 年、6 年苜蓿光合速率的下降同时受气孔和非气孔因素限制,而 8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿光合速率的下降主要受非气孔因素限制。4 年苜蓿在 14:00~16:00 时段, P_n 与 C_i 并行下降,而 L_s 上升,说明 P_n 的下降主要受气孔因素限制;16:00~18:00 时段, P_n 的下降伴随着 C_i 上升, L_s 下降,说明 P_n 的下降主要受非气孔因素限制。6 年苜蓿在 14:00~17:00 时段, P_n 与 C_i 下降, L_s 上升,说明 P_n 的下降主要受气孔因素限制;17:00~18:00 时段, P_n 的下降伴随着 C_i 上升, L_s 下降,说明 P_n 的下降主要受非气孔因素限制。8 年苜蓿在 16:00~19:00 时段,12 年、14 年、18 年苜蓿在 13:00~19:00 时段,26 年苜蓿在 15:00~19:00 时段, P_n 下降, C_i 上升,而 L_s 下降,说明 P_n 的下降主要受非气孔因素限制。

四、光合速率和蒸腾速率与环境因子的相关分析

7 种生长年限紫花苜蓿各测定时刻的平均 P_n 和 T_r 同环境因子的相关分析表明 (表 6-12),紫花苜蓿 P_n 日变化与 PAR、 G_s 、Chl 呈极显著正相关 ($r = 0.8433^{**}$ 、 0.8223^{**} 、 0.8361^{**} , $P < 0.01$),与 T_r 呈显著正相关 ($r = 0.6613^*$, $P < 0.05$),与 C_a 呈极显著负相关 ($r = -0.8125^{**}$, $P < 0.01$),与其他环境因子相关性不显著。 T_r 与 Chl 呈极显著正相关 ($r = 0.7239^{**}$)、与 PAR 呈显著正相关 ($r = 0.6486^*$)、与 T_a 有较高的正相关 ($r = 0.5316$),与 C_a 呈极显著负相关 ($r = -0.8399^{**}$)。

表 6-12 紫花苜蓿光合速率与蒸腾速率和环境因素之间的相关系数

项目	P_n	PAR	T_r	T_a	RH	V_{pd}	G_s	C_a
PAR	0.8433**							
T_r	0.6613*	0.6486*						
T_a	-0.0614	0.1420	0.5316					
RH	-0.2857	0.2074	-0.2763	-0.9297**				
V_{pd}	-0.0450	0.2212	-0.1700	0.9727**	-0.8828**			
G_s	0.8223**	0.6383*	0.4360	-0.4176	0.6525*	-0.3948		
C_a	-0.8125**	-0.6765*	-0.8399**	-0.2916	0.9059	-0.2796	-0.6338*	
Chl	0.8361**	0.6187*	0.7239**	-0.4686	-0.1926	-0.9326**	0.9035**	0.5000

* 表示 0.05 水平显著; ** 表示 0.01 水平显著。

从其他因子间的相关关系看, PAR 除与 C_a 呈显著负相关 ($r=-0.6765^*$) 外, 与其他所有因子均为正相关关系, 且与 T_r 、 G_s 、Chl 呈显著正相关 ($r=0.6486^*$ 、 0.6383^* 、 0.6187^*); T_a 与 V_{pd} 呈极显著正相关 ($r=0.9727^{**}$), 与 RH 呈极显著负相关 ($r=-0.9297^{**}$), 与 G_s 、 C_a 呈负相关。RH 与 V_{pd} 呈极显著负相关 ($r=-0.8828^{**}$), 与 G_s 呈显著正相关 ($r=0.6525^*$)。 G_s 与 C_a 呈显著负相关 ($r=-0.6338^*$), 与 Chl 呈极显著正相关 ($r=0.9035^{**}$)。

从相关系数的大小来看, 对 P_n 影响最大的因子是 PAR, 其次是 Chl、 G_s 、 C_a 、 T_r 、RH、 T_a 与 V_{pd} 。对 T_r 影响最大的因子是 C_a , 其次是 Chl、PAR、 T_a 、 G_s 、RH 与 V_{pd} 。

五、不同生长年限苜蓿叶绿素相对含量比较

叶绿素是植物进行光合作用时吸收和传递光能的主要物质, 叶绿素含量和组成的变化反映了叶片光合生理活性的变化, 是反映作物衰老状况和光合能力的一个重要指标。

叶绿素含量降低预示叶片衰老的开始, 其含量下降得快则表明衰老进程快、衰老程度加深。从表 6-13 中可以看出, 随着生长年限的增加, 苜蓿叶片叶绿素相对含量逐渐

表 6-13 不同生长年限苜蓿叶绿素相对含量比较

生长年限 /年	分枝期		第一茬		第二茬	
	相对含量	$\alpha=0.01$	相对含量	$\alpha=0.01$	相对含量	$\alpha=0.01$
4	418	AB	392	A	234	AB
6	388	B	402	A	262	AB
8	467	A	345	A	259	AB
12	389	B	361	A	207	B
14	355	BC	351	A	224	AB
18	290	C	237	B	251	AB
26	305	C	221	B	280	A
平均	373		330		245	

减少,不同生长年限之间存在极显著差异。在苜蓿返青至分枝期,4年、6年、8年、12年极显著地高于18年、26年苜蓿。在第一茬苜蓿收获时,4年、6年、8年、12年、14年之间差异不显著,但极显著地高于18年、26年苜蓿。在第二茬苜蓿收获时,26年与4年、6年、8年、14年、18年之间差异不显著,但极显著地高于12年苜蓿。

从表中还可以看出,在苜蓿的生长周期中,叶绿素相对含量呈逐渐减少的趋势。在返青至分枝期,不同年限叶绿素相对含量的平均值为373,比第一茬(330)、第二茬(245)分别高43、128。

六、不同生长年限苜蓿叶面积及光合产物比较

从表6-14中可以看出,不同生长年限苜蓿叶面积存在极显著差异。在第一茬,4年苜蓿极显著地高于其他所有年限;6年、8年之间差异不显著,但极显著地高于其余年限。在第二茬,4年与6年、8年之间差异不显著,但极显著地高于12年、14年、18年、26年。从不同茬次看,所有年限苜蓿第一茬叶面积均大于第二茬。

表 6-14 不同生长年限苜蓿叶面积及光合产物比较

生长年限 /年	第一茬		第二茬	
	产量/(kg·hm ⁻²)	叶面积/cm ²	产量/(kg·hm ⁻²)	叶面积/cm ²
4	30 464.49A	2.07A	16 767.51B	1.15A
6	32 779.42A	1.80B	21 534.41A	1.12AB
8	26 529.1AB	1.73B	13 267.33C	1.08AB
12	14 167.38C	1.12D	5 092.847D	0.92BC
14	11 852.03DC	1.44C	5 275.10D	0.82DC
18	6 667D	0.78E	5 533.61D	0.68DE
26	6 204.014D	0.82E	2 833.475D	0.59E
平均	18 380.49	1.39	10 043.47	0.91

从不同生长年限看,生长年限为4年、6年、8年的苜蓿产量较高,分析其高产的原因,主要是叶面积大,对光能利用能力较高,单位时间内同化的光合产物多,其叶片在功能期光合速率较高,且衰老较慢,这为其积累较多的光合产物获得高产奠定了物质基础;而生长年限超过8年,苜蓿生长发生衰败,叶片较小,叶片在功能期光合速率相对较低,对光能利用能力相对较弱,单位时间内同化的光合产物少,导致苜蓿干草产量较低。因此,栽培管理中应尽可能维持苜蓿叶片旺盛的生理功能,使叶片的光合能力较长时间维持在较高水平上,并保持其较长的绿叶功能期,以利于光合产物的积累,形成较高的产量。

七、小结与讨论

光合作用是植物十分复杂的生理过程,叶片净光合速率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度、叶片成熟度等密切相关,又受光强、气温、大气相对湿度、土壤含水量等影响。相关分析结果表明,净光合速率与气孔导度呈极显著正相关($r=0.8223^{**}$, $P<0.01$),与田间 CO_2 浓度存在极显著负相关关系($r=-0.8125^{**}$, $P<0.01$),净光合速率、蒸腾速率与气孔导度之间呈显著正相关或正相关($r=0.6355^*$ 、 0.4975),表明空气温度、田间 CO_2 浓度是影响净光合速率的主要环境因子。

7 种生长年限紫花苜蓿的 P_n 日变化曲线均为典型的“双峰”曲线,第一峰值大于第二峰值。早晨光强和 T_a 低, P_n 也很低,随着 PAR 的增大、 T_a 的升高、气孔的开放,苜蓿叶片 P_n 明显提高,在 9:00~10:00 达到最大值。在 13:00~16:00,出现第二峰值,但由于强光、高温的条件提高了叶片的光呼吸强度,增加了呼吸消耗,这是 P_n 下午的峰值低于上午峰值的一个重要原因。

“午休”现象的出现,由生态因子、生理因子和生化因子等多方面控制,而且在不同的环境条件下,引起光合作用午间降低的原因也不同。“午休”现象的外部原因是大气相对湿度过低,内部因素主要是由于叶片持水力较小,失水较多,导致叶片与空气之间水蒸气亏缺增大所致。本研究中,在 11:00~12:00, T_a 在 25.63~31.21℃ 的范围内,此时随着温度的上升, RH 降低, V_{pd} 达到最大 (2.69~3.49kPa),限制了光合速率,因此出现“午休”现象。但即便是在高温低湿胁迫下,4 年、6 年、8 年、12 年、14 年苜蓿叶片的最小 P_n 依然维持在 $21\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,表明多年生苜蓿生长至 14 年,仍然具有较强的光合能力和对高温环境的适应能力。相比之下,18 年 ($19.22\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、26 年 ($17.45\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 苜蓿叶片的光合能力较差。

Safaa 和 Glenn (1990) 报道苜蓿叶片达到最高光合速率时的温度为 34℃, Brown 和 Radcliffe (1986) 认为苜蓿顶部叶片光合最适温度范围为 25~30℃, Murata 等 (1965) 报道 5~30℃ 是苜蓿幼苗光合作用的最适温度范围。本研究表明,在最高光合速率时, T_a 约为 24.88℃, 叶温 (T_l) 约为 23.97℃, 温度与前人的研究结论有异,这可能与苜蓿的生长年限较长有关,本研究中,苜蓿生长年限最长达到 26 年,而在前人的研究中苜蓿的年限仅为 2~4 年,因此出现差异。另外由于没有在控制条件下研究温度对苜蓿叶片 P_n 效应,因此有关紫花苜蓿的最适光合温度范围需要进一步研究。

与前人所做的研究相比,在本试验中,苜蓿光合速率低谷值的出现提前了 1h 左右,导致第二峰值的出现也提前了 1h 左右。这种提前可能有以下两方面的原因:第一与试验地点有关,本研究位于甘肃的陇东高原,而前人得出的结论是在地理位置更偏西的环境中得出的,两地之间有 1~1.5h 的时差。第二与苜蓿的生长年限有关,前人的研究多是针对一种生长年限的苜蓿,且苜蓿的生长年限多在 4 年以下。本试验研究的苜蓿年限为 4~26 年,生长年限跨度长,对苜蓿的光合特性产生深刻影响,导致光合速率的高峰及低谷值的出现产生差异。

许大全等(1998, 1990)研究表明, C_i 和 L_s 的变化方向是判断导致光合速率降低原因的主要依据: C_i 降低, L_s 升高, 表明光合速率的降低主要受气孔因素的限制, 而 C_i 增高和 L_s 降低则表明光合速率的降低主要受非气孔因素的限制。本研究中, 4 年、6 年苜蓿光合速率的下降同时受气孔和非气孔因素限制, 而 8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿光合速率的下降主要受非气孔因素限制。所有年限苜蓿在 19:00 左右, P_n 锐减, C_i 急剧上升, 而 L_s 下降, 说明 P_n 的下降主要受非气孔因素限制。叶片 G_s 与 P_n 的日变化趋势一致, 呈显著正相关关系 ($r=0.822^{**}$), 这与许大全提出的 P_n 对 G_s 具有反馈调节作用的想法一致, 即在有利于叶肉细胞的光合时 G_s 增大, 不利于光合时 G_s 减小。

G_s 是指植物气孔传导 CO_2 和水的能力, 它的变化首先影响水分的交换, 其次是 CO_2 的交换, 因此, G_s 的大小对 P_n 和 T_r 均有一定程度的制约, 进而影响水分利用率。 G_s 下降限制了气孔的蒸腾强度, 几乎所有的中生和旱生植物都可以通过关闭气孔来适应日间叶片过度蒸腾失水或低水势的土壤环境。有关 G_s 变化规律的报道很多, 但都不尽相同, 王玉辉和周广胜(2000)认为早晨和傍晚 PAR 低导致羊草 G_s 在早晨和傍晚较低; 项斌等(1996)报道对紫花苜蓿 G_s 影响最大的环境因子是相对湿度, 从早晨气孔开始开放到 9:00 左右, 气孔的开放程度和开放数量都达到最大。11:00~14:00, 气孔完全处于关闭状态, 15:00 左右气孔重新开放, 但最大开度却比上午小, 到 17:00 左右又处于关闭状态; 而黄振英等(2002)发现生长在毛乌素沙地的沙柳, 其 G_s 并没有随光强的增加而增加, 特别是在早晨和傍晚甚至出现了相反的关系, 此时土壤水分亏缺可能是限制 G_s 变化的最主要的环境因子。本研究中, 所有生长年限苜蓿 G_s 日变化均为“双峰”曲线, 在早晨 8:00 左右, 达到全天的最大值, 其后随着温度的增加和湿度的下降, G_s 迅速降低, 波动性很大, 这一结论与项斌等(1996)的研究结果一致, 说明 G_s 对环境因子的变化是非常敏感的, 凡是影响植物光合作用和叶片水分状况的各种因素都有可能对 G_s 造成影响。

在所有生长年限中, 6 年苜蓿的净光合速率最高, 表明苜蓿在利用的第 6 年生长健壮, 光合性能强, 具有丰产的潜力。而 26 年苜蓿的净光合速率高于 18 年苜蓿, 表明随着草地土壤水分的恢复, 地上部的生长发育开始有所恢复, 但恢复较慢。因此, 从苜蓿的净光合速率看, 苜蓿的最佳利用期为 6 年。

第四节 黄土高原苜蓿不同叶位光合作用日变化规律研究

研究苜蓿不同叶位的光合能力对于提高苜蓿产草量、合理利用饲草具有重要意义。但迄今为止, 国内外关于紫花苜蓿不同叶位光合特性的比较研究尚未见报道。基于此, 本研究通过研究黄土高原旱作条件下生长 14 年的紫花苜蓿不同叶位叶片的光合生理特性, 探索苜蓿不同叶位净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度等光合日变化特征, 分析不同层次苜蓿叶片的光合生理特性, 以期为紫花苜蓿高产栽培提供理论依据与参考。

本试验于 2006 年 5 月 18 日进行, 此时苜蓿处于第一茬初花期。在生长 14 年的苜

苜蓿地, 分别选择不同叶位生长健康、无病斑的苜蓿叶片测定其光合日进程。叶位的确定标准为: ①上部叶位, 从顶部向下第 1 片完全展开叶的中间叶片; ②中部叶位, 从上向下第四节位的中间叶片; ③下部叶位, 从上向下第六节位的中间叶片。每次每叶位测定均随机选取 5 个叶片重复测定, 8:00~19:00 每隔 1h 测定 1 次。主要测定指标及公式与第三节相同。

一、不同叶位净光合速率日变化特征

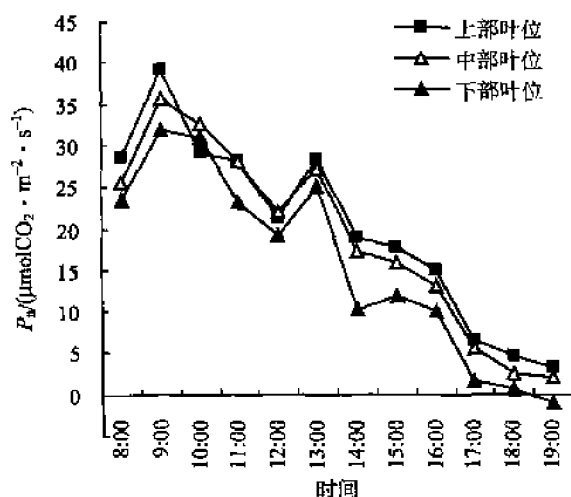


图 6-13 紫花苜蓿不同叶位净光合速率日变化

从图 6-13 中可以看出, 苜蓿不同叶位叶片 P_n 的日变化曲线一致, 均为典型的“双峰”曲线, P_n 第一峰值出现在 9:00, 第二峰值出现在 13:00, 在 12:00 左右出现低谷。苜蓿不同叶位 P_n 出现高峰和低谷的时刻一致, 但高峰值的大小不同。

苜蓿不同叶位 P_n 的第一峰值均出现在 9:00, 但峰值大小不同, 上部叶位最高, 为 $39.10 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次是中部叶位, 为 $35.57 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 下部叶位最低, 为 $31.97 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上、中、下叶位的第二峰值都出现在 13:00 左右, 分别为 $28.32 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $27.09 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $25.12 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同叶位的低谷都出现在 12:00 左右, 上部为 $21.37 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、中部为 $22.07 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、下部为 $19.13 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从以上分析可以看出, 不同叶位 P_n 的第一峰值均高于第二峰值。

对不同叶位 P_n 的日平均值进行方差分析, 结果表明不同叶位之间存在极显著差异: 上部叶位与中部叶位之间差异不显著, 但极显著地高于下部叶位, 中部叶位与下部叶位之间差异不显著。

二、不同叶位蒸腾速率日变化特征

不同叶位 T_r 的日变化进程与 P_n 一致, 呈现“双峰”曲线 (图 6-14)。可以看出, 紫花苜蓿不同叶位的蒸腾速率第一峰值均出现在 11:00, 但峰值大小不同, 中部叶位最高, 为 $16.83 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其次是下部叶位, 为 $16.70 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 上部叶位最低, 为 $15.33 \text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。上、中、下叶位的第二峰值都出现在

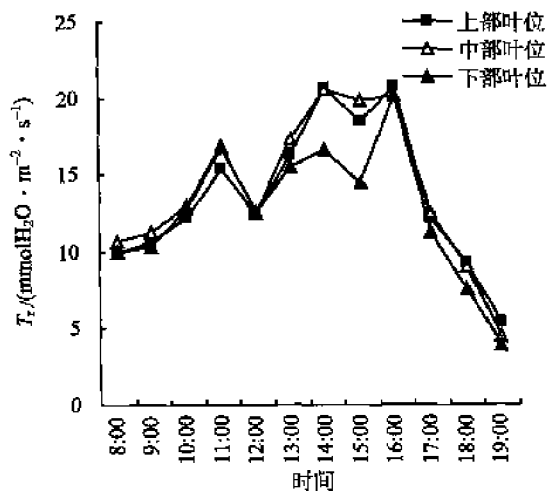


图 6-14 紫花苜蓿不同叶位蒸腾速率日变化

16:00 左右, 分别为 $20.70\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20.13\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $20.20\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低谷出现在 12:00, 不同叶位之间相差不大, 为 $12.50\text{mmolH}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。从以上分析可以看出, 不同叶位 T_r 的第一峰值均低于第二峰值, 且在苜蓿出现第二峰值后, 蒸腾速率迅速下降。方差分析结果表明, 不同叶位之间蒸腾速率差异不显著。

三、不同叶位水分利用效率日变化特征

不同叶位水分利用效率的日变化均呈典型的“双峰”曲线(图 6-15)。上、中、下叶位 WUE 在 9:00 达到全天的最大值, 分别为 $3.67\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $3.16\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $3.09\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。不同叶位在 13:00 左右出现第二峰值, 分别为 $1.72\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.56\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 、 $1.62\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}$ 。可以看出, 不同叶位 T_r 的第一峰值均高于第二峰值, 且在苜蓿出现第二峰值后, WUE 迅速下降。

对苜蓿不同叶位水分利用效率进行方差分析, 结果表明, 不同叶位之间存在极显著差异: 上部叶位极显著地高于下部叶位, 上部叶位与中部叶位之间、中部叶位与下部叶位之间差异不显著。

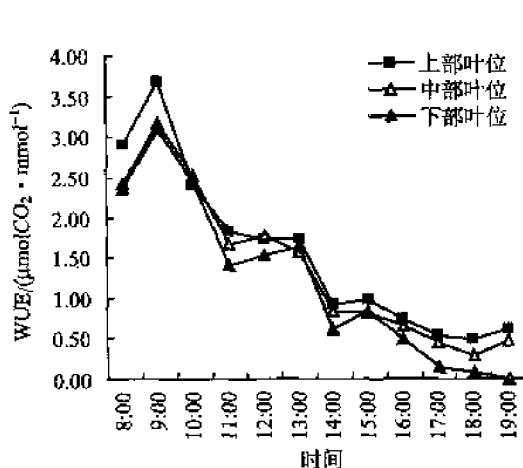


图 6-15 紫花苜蓿不同叶位水分利用效率日变化

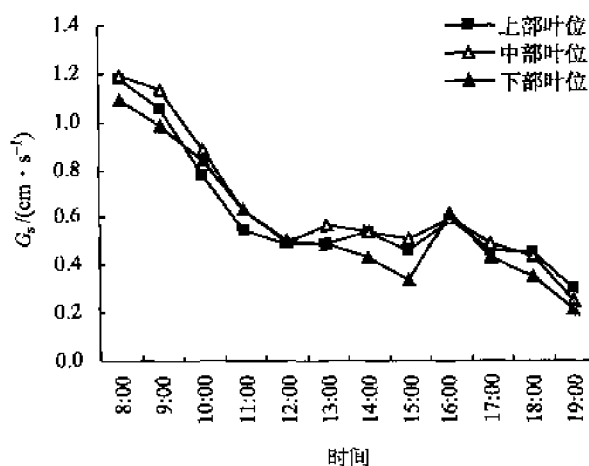


图 6-16 紫花苜蓿不同叶位气孔导度的变化

四、不同叶位气孔导度日变化特征

气孔导度受环境因子的影响很大, 适宜的光强有利于气孔开张, 气孔阻力降低, 气孔导度增大。紫花苜蓿不同叶位 G_s 的日变化曲线均为“双峰”曲线(图 6-16): G_s 在早晨 8:00 左右达到全天的最大值, 其后随着温度的增加和湿度的下降, G_s 迅速降低, 在 15:00 左右出现低谷, 在 16:00 出现第 2 个峰值。

方差分析结果表明, 不同叶位之间 G_s 差异不显著。从不同叶位 G_s 的日平均值看, 中部叶位 ($0.644\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 上部叶位 ($0.613\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) > 下部叶位 ($0.578\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

五、不同叶位胞间 CO_2 浓度 (C_i) 与气孔限制值 (L_s) 的日变化

图 6-17 表明, 紫花苜蓿不同叶位 C_i 的日变化在早晚较高、中午前后较低, 呈现规律性的变化, 表现出随着时间的推移, C_i 逐渐下降, 在 13:00 左右达到全天的最低值 ($278.22\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 以后又逐渐上升, 在 18:00 左右达到全天的最高值 ($348.33\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

不同叶位 C_i 在早晨 8:00 左右非常接近, 为 $310\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右, 不同叶位之间差异不大, 但下部叶位 C_i 最高, 分别比上部、中部叶位高 $9.0\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $3.34\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在 9:00~16:00 的时间范围内, 不同叶位 C_i 值都低于 $300\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 而在 17:00~19:00 的时间范围内, 不同叶位 C_i 值都高于 $320\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

从图 6-17 中可以看出, 下部叶位 C_i 在各时刻都最高, 其次是中部叶位, 最低的是上部叶位。方差分析结果表明, 不同叶位之间存在显著差异: 下部叶位显著地高于上部与中部叶位, 上部叶位与中部叶位之间差异不显著。

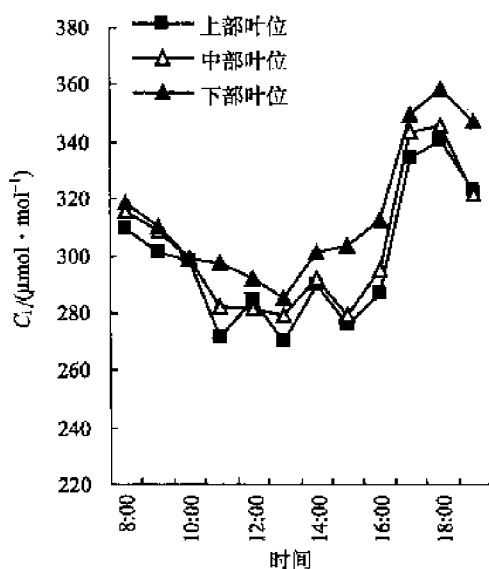


图 6-17 不同叶位胞间 CO_2 浓度日变化

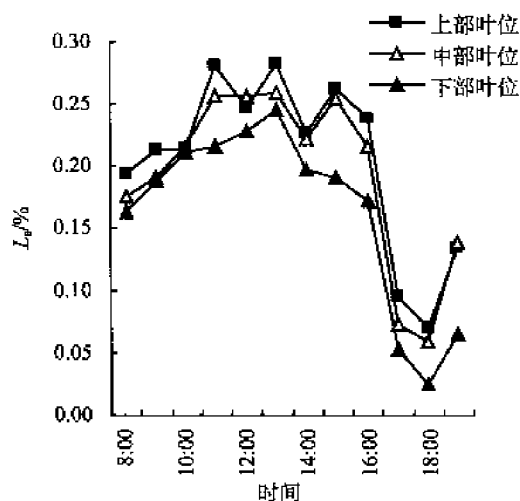


图 6-18 不同叶位气孔限制值日变化

不同叶位 L_s 的日变化趋势并不同步, 上部和中部叶位 L_s 呈现出“双峰”趋势, 两个峰值分别出现在 13:00 和 15:00, 低谷值出现在 14:00; 下部叶位 L_s 呈现出明显的“单峰”趋势, 在 13:00 左右出现最高峰, 为 0.24% (图 6-18)。

从不同叶位 L_s 的日平均值看, 与 C_i 表现出相反的趋势, 即上部叶位 (0.20%) > 中部叶位 (0.19%) > 下部叶位 (0.16%)。

六、小结与讨论

不同叶位之间 P_n 存在极显著差异, 表明苜蓿叶片的光合速率具有分层的特点: 上层强光区为高光合速率层, 下层弱光区为低光合速率维持层, 中层为中光区, 光合速率

介于上层与下层之间。

上部叶位的叶片受光条件最好,能够接受到较多的太阳辐射,同时空气流通能力强,因此 P_n 高;照射到上部叶片的光线,其中一部分通过透射和折射被中部叶片所截获,因此中部叶位的叶片也有较好的光照条件,但比上部叶位差;而处于植株下层的下部叶位,由于受到上部和中部叶片的遮阴,只能截获到很少的漏射光和透射光,同时由于空气流通少, CO_2 的交流更新慢,因此 P_n 最低。这是同一植株不同叶位之间 P_n 存在显著差异的主要原因。

本研究中不同叶位 T_r 日变化曲线均呈“双峰”型, T_r 的第一峰值均低于第二峰值,且在苜蓿出现第二峰值后,蒸腾速率迅速下降。不同叶位的低谷均出现在 12:00。蒸腾速率在不同品种之间存在显著差异,但同一作物品种的不同叶位之间蒸腾速率的差异不显著。

不同叶位 WUE 的日变化均呈“双峰”型变化趋势,在 9:00 和 13:00 各出现 1 个峰值,在 11:00 出现低谷值。不同叶位之间 WUE 存在极显著差异:上部叶位极显著地高于下部叶位,上部叶位与中部叶位之间、中部叶位与下部叶位之间差异不显著。

本研究中,不同叶位 G_s 日变化均为“双峰”曲线,在早晨 8:00 左右,达到全天的最大值,其后随着温度的增加和湿度的下降, G_s 迅速降低,波动性很大。

光合能力的强弱在相当程度上取决于物种的遗传特性(兰小中等,2005),但是适宜的外部生态条件会促使其固有的光合潜能发挥(陈洪松等,2003)。在不同叶位中,日均净光合速率最高的是上部叶位,达到 $20.04\mu mol CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,日均 WUE 最高的也是上部叶位,为 $1.54\mu mol CO_2 \cdot mmol^{-1}$ 。这是因为苜蓿的上部叶位所处的自然条件好,通风透光条件好,具有较强的光合能力和较长的光合功能期。因此,通过采取合理的栽培技术改善群体结构、优化空间配置及其功能,充分提高苜蓿群体的光合作用,以最大限度地发挥紫花苜蓿的光合生产潜力。在选择苜蓿品种上,应优先选择株型良好、叶姿直立的苜蓿品种,以提高下层叶片的截光率,并进一步发挥中上层叶片的生理功能即提高单叶的光合效率,可能是不断提高苜蓿产量的有效途径。

第五节 黄土高原不同生长年限苜蓿草地土壤 水分消耗特征研究

黄土高原地区是中国东部沿海平原和西部内陆高原的过渡地带,农业生产的主要限制因素是干旱缺水,全区年均降水 300~600mm,年内分配极不均衡(潘成忠等,2006)。自 20 世纪 90 年代以来,该区大面积种植的苜蓿草地因土壤水分的过耗而衰败。研究苜蓿草地土壤水分消耗规律对黄土高原地区农业持续发展及生态环境恢复有重要的理论意义。

一、不同生长年限苜蓿草地土壤水分动态变化规律

图 6-19 为不同生长年限苜蓿草地 0~1000cm 土层水分的变化规律,可以看出,不

同生长年限苜蓿草地土壤水分呈现规律性的变化：随土层深度的增加，土壤含水量增加，在 80~100cm 土层，达到全层的最大值，土壤含水量为 12.00%~17.15%；100cm 土层以下土壤含水量开始下降，含水量为 10.03%~13.94%；300cm 土层以下，土壤含水量缓慢增加，除 3 年苜蓿增加幅度较大外，其余生长年限变化趋势平缓，4 年、6 年、8 年苜蓿草地变动于 13.66%~14.76%，12 年、14 年变动于 11.76%~11.87%，18 年、26 年苜蓿草地为 10.50% 左右。不同生长年限苜蓿草地土壤含水量在 800cm 土层出现了一个水分低谷值（比上下层低 0.2~3 个百分点），800cm 土层以下土壤水分缓慢增加。

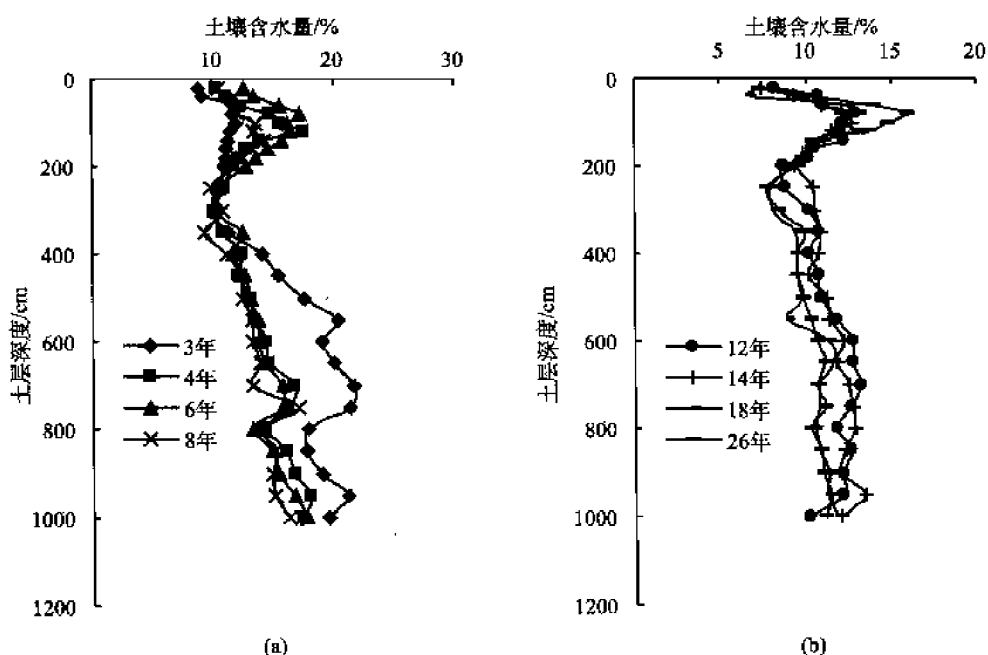


图 6-19 苜蓿草地土壤水分垂直变化特征

从 0~200cm 土层看，6 年苜蓿草地的含水量最高，为 14.82%，其次是 4 年、8 年，分别为 13.22%、12.5%，26 年为 11.63%，3 年、12 年、14 年、18 年苜蓿草地土壤含水量较低，分别为 10.93%、10.90%、10.46%、10.39%，比 26 年低 0.70~1.24 个百分点。由于蒸散的强烈影响，所有年限苜蓿草地在 0~20cm 土层含水量最低，6 年为 12.66%，4 年、8 年分别为 10.32%、10.51%，3 年为 8.84%，12 年、14 年分别为 8.2%、7.42%，土壤含水量最低的是 18 年和 26 年，低于 7.50%。在 20~100cm 土层，土壤含水量增加，6 年苜蓿草地最高，为 15.6%，其次是 26 年、4 年，分别为 13.63%、13.47%，12 年、14 年、18 年土壤含水量较低，低于 12%。在 100~200cm 土层，土壤含水量比 20~100cm 土层有所下降，土壤含水量最高的是 6 年苜蓿草地，为 14.64%，4 年、8 年为 13.60%、13.09%，12 年、14 年、18 年、26 年土壤含水量较低，只有 10.41%~10.91%。

在 200~500cm 土层，土壤含水量最高的是 3 年，达到 12.87%，其次是 4 年、6

年、8年,为11.13%~11.91%,12年、14年为10.05%、10.48%,18年与26年最低,低于9.25%。在500~1000cm土层,随苜蓿生长年限的延长,土壤含水量下降,但高于200~500cm土层,土壤含水量较高的是4年、6年苜蓿草地,超过15.10%,8年为14.60%,12年、14年分别为12.20%、12.31%,土壤含水量最低的是18年、26年苜蓿草地,分别为10.90%、10.83%。

根据0~1000cm土层水分含量变化情况,把8种生长年限苜蓿草地分为3组,3年、4年、6年苜蓿草地为第一组,土壤含水量为14.84%、14.22%、13.85%,土壤水分条件最好,土壤供水力强;8年苜蓿草地为第二组,土壤含水量为12.98%;12年、14年、18年、26年苜蓿草地为第三组,土壤含水量分别为11.25%、11.22%、10.27%、10.76%,土壤水分条件最差。

以上分析表明,在200~1000cm土壤深层,随苜蓿生长年限的延长,苜蓿对下层土壤水分利用程度加剧,土壤水分含量降低;从不同土壤层次看,随着土层的加深,土壤含水量缓慢增加。根据不同生长年限苜蓿草地土壤水分变化情况,0~1000cm土层可分为4个水分变化范围:①0~40cm为土壤水分剧变层。该层受降水、温度等外部水热条件的影响强烈,干湿变化剧烈,对表层土壤含水量影响最大,土壤含水量变动于6.97%~13.05%;②40~100cm为活跃层。该层土壤水分变化较上层减弱,主要受蒸发、降水及苜蓿耗水的影响,土壤含水量变动于11.93%~16.32%;③100~300cm为次活跃层。该层主要受苜蓿耗水的影响,土壤水分变化明显减弱,土壤含水量变动于9.76%~13.41%;④300~1000cm为相对稳定层。该层主要受苜蓿耗水的影响,水分变化相对稳定,土壤含水量变动于11.19%~14.81%。

二、不同生长年限苜蓿草地储水量变化规律

(一) 苜蓿草地土壤储水量垂直变化规律分析

苜蓿生长年限不同,根系在土体中分布的数量与深度具有很大差异,对土壤不同层次水分的利用不同,导致土壤的蒸发和植被的蒸腾量不同,从而使土壤储水量存在很大差异。比较不同生长年限苜蓿草地在0~1000cm土层的储水量(表6-15),可以看出,不同年限间差异达到极显著水平。3年苜蓿草地土壤储水量为2232.0mm,极显著地高于其他生长年限;4年、6年之间差异不显著,但极显著地高于除3年外的其他所有年限;8年极显著地高于12年、14年、18年、26年;12年、14年极显著地高于18年、26年苜蓿草地,18年、26年之间差异不显著。

表 6-15 不同生长年限苜蓿草地土壤储水量的垂直分布

土层深度 /cm	生长年限/年							
	3	4	6	8	12	14	18	26
0~1000	2232.0A	1878.8B	1945.6B	1784.3C	1542.1D	1555D	1350.1E	1372.3E
0~100	151.3	172.1	221.1	170.4	148.4	142.7	136	165.3
	(6.8)	(9.2)	(11.4)	(9.5)	(9.6)	(9.2)	(10.1)	(12.0)

续表

土层深度 /cm	生长年限/年							
	3	4	6	8	12	14	18	26
100~200	141.5	186	196.1	175.5	142.1	141	133.2	146.1
	(6.3)	(9.9)	(10.1)	(9.8)	(9.2)	(9.1)	(9.9)	(10.6)
200~300	136.6	147.9	138.3	138.6	123	145.5	104.8	105.7
	(6.1)	(7.9)	(7.1)	(7.8)	(8.0)	(9.4)	(7.8)	(7.7)
300~400	166.4	162.3	160.6	138.1	136.4	150.6	122.3	126.3
	(7.5)	(8.6)	(8.3)	(7.7)	(8.8)	(9.7)	(9.1)	(9.2)
400~500	226.2	171	176	166.5	145.7	146.3	127.3	125.8
	(10.1)	(9.1)	(9.0)	(9.3)	(9.4)	(9.4)	(9.4)	(9.2)
500~600	280.6	183.5	192.1	180.2	170.2	157.8	134.9	135.4
	(12.6)	(9.8)	(9.9)	(10.1)	(11.0)	(10.1)	(10.0)	(9.9)
600~700	296.9	208.3	208.5	185.2	179.6	163.6	149.3	141.1
	(13.3)	(11.0)	(10.7)	(10.4)	(11.6)	(10.5)	(11.1)	(10.3)
700~800	279.4	200.9	202	212.1	169.7	171.9	141.7	138.9
	(12.5)	(10.7)	(10.4)	(11.9)	(11.0)	(11.1)	(10.5)	(10.1)
800~900	262.4	216.1	211.5	204.3	171.8	164	147.5	141.5
	(11.8)	(11.5)	(10.9)	(11.4)	(11.1)	(10.5)	(10.9)	(10.3)
900~1000	290.7	232.8	239.5	213.4	155.2	171.5	153	146.1
	(13.0)	(12.4)	(12.3)	(12.0)	(10.1)	(11.0)	(11.3)	(10.6)
0~200	292.8	358.2	417.2	345.9	290.5	283.6	269.3	311.5
	(13.1)	(19.1)	(21.4)	(19.4)	(18.8)	(18.2)	(19.9)	(22.7)
200~1000	1939.2	1520.6	1528.5	1438.3	1251.6	1271.4	1080.8	1060.8
	(86.9)	(80.9)	(78.6)	(80.6)	(81.2)	(81.8)	(80.1)	(77.3)

注：括号外的数字为土壤储水总量 (mm)，括号内的数字为占总量的比例。

在旱作雨养农业区，降水是造成作物农田土壤储水利用程度及土壤水分补充的主要原因，但降雨入渗深度也仅补充至 200cm 土层。从表 6-15 中可以看出，在 0~200cm 土层，3 年、12 年、14 年、18 年苜蓿草地储水量低于 300mm，而 4 年、6 年、8 年、26 年超过 300mm，其中，6 年最高，为 417.2mm，4 年、8 年、26 年分别为 358.2mm、345.9mm、311.5mm。

由于 0~200cm 土层处在水分消耗、补充的不断交替过程中，是干湿交替层，不能反映长时段土壤水分的变化趋势，而 200cm 以下土壤水分难以得到降水入渗补充，因此通过比较不同生长年限苜蓿 200cm 以下土壤深层的储水量状况，能够反映不同生长年限苜蓿对土壤水分的影响。

在 200~1000cm 土壤深层，3 年苜蓿草地土壤储水量最高，达到 1939.2mm，4 年、6 年较高，超过 1520mm，8 年苜蓿草地为 1438.3mm，12 年、14 年分别为 1251.6mm、1271.4mm；18 年与 26 年最低 (1080.8mm、1060.8mm)，比 3 年苜蓿草地低 858.3~878.3mm，比 4 年、6 年低 439.9~467.6mm，表现出随苜蓿生长年限的延长储水量下

降的趋势。

从不同土层储水量占全层的比例看,不同生长年限存在差异。在0~200cm土壤上层,26年苜蓿草地土壤储水量占全层的比例最高,达到22.7%,其次是6年,为21.4%,最低的是3年,只有13.1%,4年、8年、12年、14年、18年所占比例为18%~20%。从200~1000cm土壤深层看,3年苜蓿草地所占比例最高,达到86.9%,最低的是26年苜蓿草地,为77.3%,6年为78.6%,其余年限均为80%左右。

不同生长年限苜蓿草地土壤储水量在不同土层的垂直分布不同。所有年限从400cm开始,随着土层深度的增加,土壤储水量所占比例逐渐增加,表明苜蓿对土壤深层水分利用强度随土层深度增加而减小,苜蓿生长利用的土壤水分主要来自受降雨影响最大的0~200cm土层。从苜蓿的生长年限看,随苜蓿生长年限的延长,土壤储水量迅速下降。这说明生长年限越长,根系分布越深,对深层水分的消耗越强烈,致使深层土壤经常处于水分亏缺状态,这与苜蓿生长期间的需水有密切关系。苜蓿前期生长旺盛,水分利用较多,但由于较大的覆盖度减少了强烈的蒸发,致使上层仍保持较高的含水量与储水量,随种植年限增加,生长趋于稳定,而生长到26年时苜蓿已进入衰败阶段,对上层土壤的耗水减少,储水量较大,而深层土壤由于生长前期累积耗水量大,土壤干燥化程度加剧,使苜蓿生长逐渐转向依靠当年降水提供水源。

(二) 不同茬次土壤储水量变化规律分析

图6-20为不同生长年限苜蓿在不同茬次土壤储水量的变化。可以看出,不同茬次、不同土层深度土壤储水量存在差异。在0~100cm土层,所有生长年限第二茬储水量大于第一茬,均比第一茬高2.09%~33.29%。在100~200cm土层,除14年苜蓿草地外,所有生长年限第一茬储水量大于第二茬,均比第二茬高0.7%~18.85%。从土壤全层看,4年、8年、26年第一茬高于第二茬,其余年限储水量第一茬小于第二茬。

从同一茬次的不同土层深度看,无论是第一茬还是第二茬,所有生长年限苜蓿0~100cm土层储水量均高于100~200cm土层储水量。

试验点属于北方半湿润偏旱一熟区,作物生长期间,不进行灌溉,同时地下水埋藏深(60~100m),是典型的旱作雨养农业区,因此降雨是苜蓿需水的唯一来源。在苜蓿生长期间,全生育期降雨量为422.4mm。在第一茬苜蓿生长期间,降雨量仅为21.2mm,经历了较严重的旱情,但由于在2005年9~11月降雨量达到186.6mm,该部分降雨被很好地储蓄在土壤中,因此第一茬苜蓿生长期间降雨量累计至207.8mm,维持了土壤中的水量,保证了苜蓿生长的需要。在第二茬苜蓿生长期间,降雨量为166.2mm,降雨较集中,在7月20~24日降雨量为57.2mm,因此第二茬苜蓿0~100cm土壤含水量较高。

三、苜蓿草地深层土壤干层形成过程

黄土高原地区降水少蒸发大,地下水埋藏深,在林草植被强烈耗水情况下,深层土壤处于水分亏缺状态,有时甚至达到或接近凋萎湿度,这种水分亏缺经过雨季之后得不

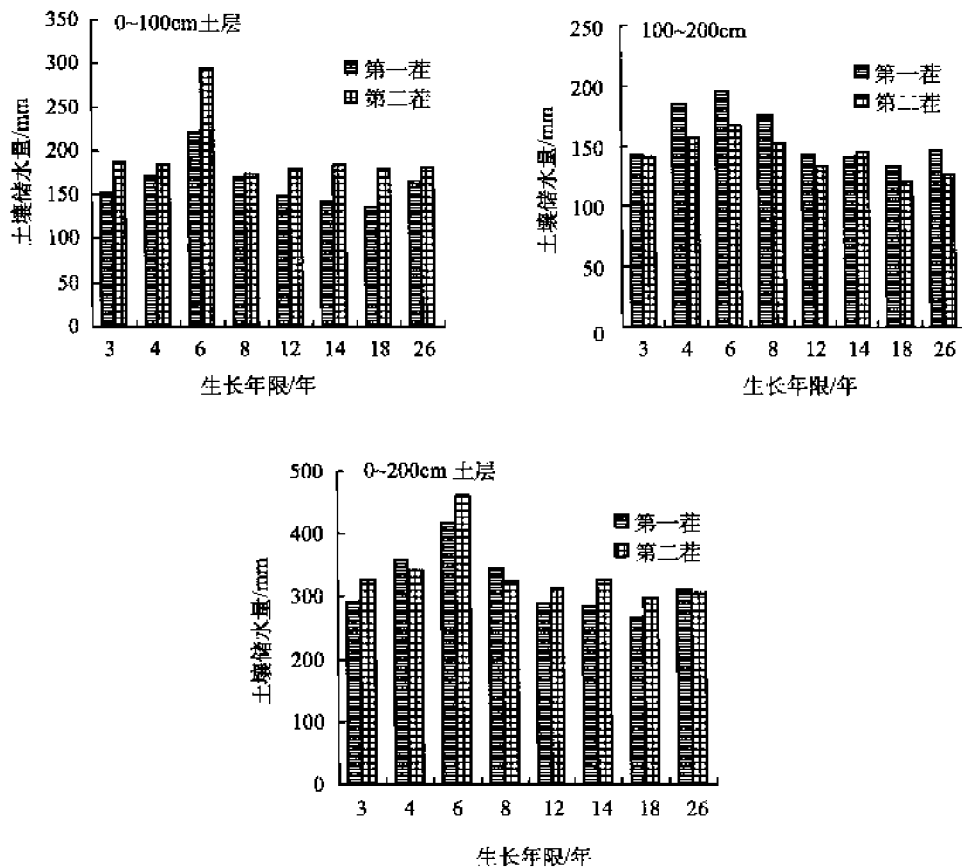


图 6-20 不同茬次土壤储水量变化规律

到补偿, 导致土壤湿度长期处于一种较稳定的低水平状况, 最终形成土壤干层。多年生苜蓿由于耗水量大, 土壤水分得不到补充, 土壤干化被进一步激发和强化, 苜蓿的生长年限越长, 干化程度越严重。

本研究根据试验区土壤凋萎湿度、田间持水量、植物生长状况及水分亏缺程度, 将土壤干层划分为 3 个等级: 轻度干层, 土壤含水量为 9%~11%; 中度干层, 土壤含水量为 7%~9%; 重度干层, 土壤含水量低于 7%。表 6-16 列出了不同生长年限苜蓿草地 80~700cm 土层含水量的动态变化。可以看出, 不同生长年限苜蓿草地土壤干层的厚度及干化程度不同。本试验苜蓿草地土壤凋萎系数为 7%, 按照实测土壤水分含量, 所有生长年限苜蓿草地各层次的土壤含水量均大于 7%, 没有出现重度干层。但是均出现轻度干层: 3 年在 200~300cm 土层, 土壤含水量为 10.2%~10.6%; 4 年在 250~350cm 土层, 土壤含水量为 10.23%~10.86%; 6 年在 200~300cm 土层, 土壤含水量为 10.23%~10.48%; 8 年在 200~350cm 土层, 土壤含水量为 9.41%~10.85%; 12 年在 140~500cm 土层, 土壤含水量为 8.71%~10.89%; 14 年在 140~450cm 土层, 土壤含水量为 9.40%~10.91%; 18 年在 120~550cm 土层, 土壤含水量为 7.96%~10.38%; 26 年在 120~600cm 土层, 土壤含水量为 7.78%~10.87%, 出现轻度干层。从土壤干化的严重程度看, 生长年限低于 8 年 (含 8 年), 各土层含水量均高于 9%,

没有出现中度干层；生长年限超过 8 年，苜蓿草地出现中度干层；12 年在 180~250cm 土层，土壤含水量为 8.71%~8.79%，18 年、26 年在 250~300cm 土层，土壤含水量为 7.78%~8.48%，出现中度干层。

表 6-16 不同生长年限苜蓿草地土壤干层状况比较 (单位: %)

土层深度 /cm	生长年限/年								麦田	荒地
	3	4	6	8	12	14	18	26		
80~100	11.89	15.6	16.2	13.6	12.2	12.7	12.0	14.9	14.48	10.54
100~120	11.40	17.50	16.35	13.44	12.08	11.6	12.98	13.74	15.07	11.24
120~140	11.23	13.98	15.81	14.22	12.31	11.1	10.12	10.87	14.84	12.11
140~160	11.09	12.77	14.57	13.32	10.49	10.2	10.38	10.45	15.29	12.87
160~180	11.19	12.08	13.62	12.53	10.23	9.8	9.57	9.84	15.16	13.00
180~200	11.01	11.66	12.84	11.95	8.71	9.4	9.19	9.63	14.69	12.60
200~250	10.6	11.05	10.48	9.83	8.79	10.4	7.96	7.78	14.02	12.24
250~300	10.2	10.23	10.23	10.85	10.15	10.5	8.15	8.48	13.29	12.89
300~350	11.3	10.86	12.46	9.41	10.78	10.9	9.32	9.91	16.36	11.86
350~400	14.1	12.50	11.59	11.19	10.22	10.7	9.49	9.53	16.77	12.68
400~450	15.5	12.17	12.67	12.23	10.79	10.1	9.50	9.51	16.86	12.78
450~500	17.5	13.14	13.10	12.41	10.89	11.3	9.82	9.85	18.31	12.48
500~550	20.4	13.45	13.69	13.24	11.81	11.3	8.91	10.24	18.52	13.24
550~600	18.9	14.43	13.85	13.20	12.71	12.2	11.32	10.61	18.49	14.13
600~650	20.0	14.59	14.19	13.85	12.73	11.8	11.61	11.10	19.15	13.93
650~700	21.6	16.76	15.71	13.32	13.15	12.5	10.78	10.63	19.18	14.38

2006 年试验区全年降雨量仅 422.4mm，属于欠水年型。苜蓿草地土壤水分循环处于亏缺状态。在 200~400cm 土层，土壤水分亏缺严重，形成中度干层，主要是由于天然降雨的入渗深度和地下水位的上升难以接合，形成了深厚的土壤干层。以上结果表明，苜蓿生长进入中老龄期（8 年以上），草地的土壤水分平衡状况常常受不同年份降雨量的影响，尤其是在干旱年土壤水分亏缺极为严重，单靠有限的天然降雨来补充土壤水分的不足，满足不了植物生长的需要；在黄土高原地区，苜蓿生长的关键是水分，草地水分的平衡状况与年降雨量和季节的分配特点有一定关系。在干旱年，苜蓿生长不仅得不到补偿反而大量消耗土壤深层的储水，使土层内的含水量下降，尤其是在半干旱地区，土壤干化这一严重的土壤退化形式已成为人工植被建设的严重隐患。

四、苜蓿草地土壤水分恢复

紫花苜蓿生长超过一定年限，种群发生衰败，土壤含水量有一定恢复，但受土壤水分过耗和较少降水量的影响，恢复速度很慢，所需年限较长。生长 18 年、26 年的苜蓿已进入衰败期，生物量锐减，对土壤水分利用强度虽然逐步减少，但也只能使土壤上层

的水分逐步得到恢复,而深层土壤水分仍然难以恢复。本试验中,在0~200cm土层,6年苜蓿草地的含水量最高,为14.82%,其次是4年、8年,分别为13.22%、12.50%,26年苜蓿草地为11.63%,3年、12年、14年、18年土壤含水量较低,分别为10.93%、10.90%、10.46%、10.39%,土壤含水量从18年的10.39%,到26年的11.63%,8年期间土壤含水量增加了11.93%,年均恢复1.49%。照此速度,若恢复至8年苜蓿草地0~200cm土层含水量(12.5%),需14年时间,而要恢复至6年苜蓿草地0~200cm土层含水量(14.82%),则需要26年时间。因此水分的恢复过程非常缓慢,所需年限较长。在200~1000cm土层,3年苜蓿草地土壤含水量达到17.29%,4年、6年、8年苜蓿草地及荒地土壤含水量分别为14.25%、13.85%、13.25%、13.57%,12年、14年为11.47%、11.69%,而18年、26年只有10.20%、10.21%,表现出随着苜蓿生长年限的延长,对下层土壤水分利用程度加剧,下层土壤通体呈现干化。

从0~100cm土层看,12年、14年、18年、26年苜蓿草地土壤含水量分别为11.03%、10.50%、10.32%、12.36%,土壤含水量从18年的10.32%到26年的12.36%,8年期间增加了19.77%,而在100~200cm土层,18年、26年苜蓿草地土壤含水量分别为10.45%、10.91%,8年期间增加了4.4%,可以看出土壤含水量的恢复是自上而下的,主要恢复层为60~100cm土层。在土壤深层(200~1000cm)18年、26年苜蓿草地土壤含水量分别为10.20%、10.21%,则说明苜蓿草地深层土壤水分很难得到恢复。

五、小结与讨论

在0~1000cm土层,不同生长年限苜蓿草地土壤储水量随生长年限的延长而下降,4年、6年、8年苜蓿草地土壤储水量较高,超过1784mm,12年、14年为1550mm左右,18年、26年土壤储水量最低,只有1350.1mm、1372.3mm,比4年、6年低27%~32%。在0~200cm土壤上层,26年苜蓿草地土壤储水量高于12年、14年、18年,而在200~1000cm土壤深层,26年苜蓿草地土壤储水量只有1060.8mm,低于所有生长年限,进一步说明土壤水分的恢复是从土壤上层开始的,而深层土壤由于生长前期累积耗水量大,深层土壤干化程度加剧。生长18年、26年的苜蓿已进入衰败期,生物量锐减,对土壤水分利用强度虽然逐步减少,但也只能使土壤上层的水分得到恢复,而深层土壤水分仍然难以恢复。本试验中,在0~200cm土层,土壤含水量从18年的10.39%,到26年的11.63%,8年期间土壤含水量增加了11.93%,年均恢复1.49%。照此速度,若恢复至8年苜蓿草地0~200cm土层含水量(12.5%),需13年时间,而要恢复至6年苜蓿草地0~200cm土层含水量(14.82%),则需要28年时间。因此土壤水分的恢复过程非常缓慢,所需年限较长。

许多学者对黄土高原地区土壤干层进行了研究(李玉山,2002;樊军等,2004a,2004b;程积民等,2005a,2005b),认为在黄土高原地区,多年连续种植苜蓿导致土壤干化,最终形成土壤干层。本研究根据试验区土壤凋萎湿度及苜蓿草地土壤水分情况,认为土壤含水量低于11%,即视为形成干层,其下限为凋萎湿度(7%),并把土

壤干层划分为 3 个等级：轻度干层（9%~11%）、中度干层（7%~9%）、重度干层（<7%）。这与程积民等（2005a, 2005b）提出的黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤的干层范围（6%~10%）接近。

张春霞等（2004）研究了黄土高原苜蓿草地土壤水分状况，认为 5 年、10 年、15 年苜蓿草地土壤干层分别出现在 220cm、240cm、260cm 土层。刘沛松等（2005）对宁南山区苜蓿草地土壤水分消耗规律的研究结果表明，随着苜蓿生长年限的延长，土壤干层逐渐上移，并且干层厚度呈现减小趋势。但本试验的研究结果表明，随着苜蓿生长年限的延长，土壤干层厚度向下延伸，干化程度加剧，这与程积民等（2005a, 2005b）、黄明斌等（2003）及杜世平等（1999）的研究结果一致。本研究中，苜蓿草地土壤干层出现的区域为 160~600cm 土层。4 年、6 年苜蓿草地由于生长年限较短，对土壤水分消耗相对少，在 250~300cm、300~350cm 土层分别出现轻度干层（土壤含水量为 10.23%~10.86%）；生长年限为 8 年的苜蓿草地在 250cm 土层，接近中度干层（土壤含水量为 9.83%）；生长年限超过 8 年，苜蓿草地出现中度干层：12 年在 200~250cm 土层，18 年、26 年在 250~300cm 土层，土壤含水量均低于 9%，出现中度干层。苜蓿生长年限短，对土壤水分消耗相对少，在土壤上层出现轻度干层，生长年限越长，根系分布越深，对深层水分的消耗越强烈，同时由于苜蓿生长前期累积耗水量大，深层土壤干化程度加剧、干层范围向下延伸，12 年苜蓿草地干层范围达到 500cm 土层，18 年、26 年苜蓿草地干层已延至 600cm 以下。

土壤水分的垂直变化主要取决于降雨和蒸散过程的相互作用，地形和土地利用方式也是重要的影响因素（邱扬等，2001；王军等，2001）。根据不同生长年限苜蓿草地土层含水量的大小以及根系对水分的吸收利用情况，可将苜蓿草地 0~1000cm 土层土壤水分的垂直变化过程分为 4 个层次：①0~40cm 为土壤水分剧变层。该层土壤含水量变化剧烈的原因是：土壤水分主要受控于气候条件，特别是受降水和蒸发的影响而出现明显波动。具体地说，一是由于该层是雨水到达土壤时最早承接雨水的部位，因而它的土壤含水量变化特征与大气降水最为拟合，二是该层又是土壤系统与大气系统的交界处，故该层是土壤系统对气候最敏感的部位，所以，这一层土壤干湿变化剧烈，对表层土壤含水量影响最大。②40~100cm 为活跃层，该层土壤水分变化较上层减弱，主要受蒸发、降水及苜蓿耗水的影响，土壤含水量变动为 11%~16%，这一层在外界强烈蒸腾期和缺水期可向上层土壤供水，丰水年雨季可起储水作用，对苜蓿根系吸收有一定的调节作用，因此，该层土壤水分较为活跃。③100~300cm 为次活跃层，该层受蒸发、降水的影响较小，主要受苜蓿耗水的影响，土壤水分变化幅度明显减弱，土壤含水量变动为 9.76%~13.41%。④300~1000cm 为相对稳定层。土壤含水量在土壤深层表现为土层越深，其含水量变化越小，受苜蓿耗水的影响少，水分变化相对稳定，土壤含水量变动于 11.19%~14.81%。

土壤水分的变化是气候波动和植被时空动态变化的直接反映（Rodrigue, 2000），其动态变化趋势与降雨（主要是大于 10mm 的有效降雨）的变化趋势基本一致。在天然降雨条件下，由于降雨入渗、再分布和土壤蒸发向深层传递的滞后性，各层土壤水分变化幅度具有一定差异，浅层土壤水分变化幅度明显大于较深层，其受降雨和蒸散的影响

响也相应较大。黄土高原地区土壤水分的补偿和恢复主要在雨季,暴雨和微雨对土壤水分的补给作用较小,只有降雨强度适中、历时长、雨量大的降雨过程才能有较多的降雨入渗补给土壤水分,土壤水分的恢复程度和深度又因各年降雨的丰欠与有效降雨的多寡而存在明显差异(杨文治和邵明安,2000)。在特定的气候条件下,如何维持林草植被总耗水量与有效降雨量之间的平衡,确定土壤水分的植被承载力,是揭示土壤干层形成机理、减缓深层土壤干化危害的关键。有关这方面的研究还有待于进一步深入。

根据苜蓿草地土壤干层发生的时间及深度,本研究认为,在黄土高原地区,紫花苜蓿适宜的生长年限不宜超过8年,生长高峰期为第4年至第6年。李裕元和邵明安(2005)的研究表明,紫花苜蓿草地经过6~10年的时间即可以演替到以长芒草为优势种群的天然次生草原植被。因此在苜蓿生长6年后,应实施粮草轮作,以恢复土壤水分,持续提高土地生产力水平。

第六节 黄土高原不同生长年限苜蓿对土壤水分环境的影响

根据气候、水文和土壤等自然条件来实行退耕还林(草),恢复自然植被可以产生显著的气候和环境效应(符淙斌和袁慧玲,2001),而这种气候和环境效应又反过来影响土壤水分的变化(Huser et al., 1999; Chen et al., 2006)。在黄土高原,降水通常是土壤水分的唯一来源,从未垦殖过的荒地、农田及不同生长年限的苜蓿草地对土壤水分的利用以及土壤干化特征等方面存在着较大差异(胡梦君等,2003)。如何判定人工植树种草对土壤水分生态环境、土壤干化程度的影响,分析土壤干层对土壤水分循环、林草植被建设的影响等,都是目前亟须解决的问题(杨文治和田均良,2004)。如何维持不同土地利用类型(林、草、农田等)总耗水量与总有效降水量之间的平衡,更有待于系统而深入的研究(刘文兆,2000)。为此,本试验以荒地、麦田及8种(3年、4年、6年、8年、12年、14年、18年、26年)生长年限的紫花苜蓿草地为研究对象,系统研究0~1000cm土层的土壤水分变化规律,分析不同种植年限土壤水分循环的差异,对于进行生态植被建设具有十分重要的参考价值和指导意义,可为黄土高原生态环境的改善和可持续发展提供科学依据。

一、不同生长年限苜蓿草地水分亏缺分析

从表6-17中可以看出,不同生长年限0~1000cm剖面平均含水量存在极显著差异,麦田极显著地高于处理;4年、6年之间差异不显著,但它们极显著地高于除3年外的其他所有年限;8年与荒地之间差异不显著,但它们极显著地高于12年、14年、18年与26年。按照水分含量可以把不同土地利用方式分为3组,麦田、3年、4年、6年苜蓿草地为第一组,8年、荒地为第二组,12年、14年、18年、26年苜蓿草地为第三组。第一组剖面平均含水量极显著地高于第二、第三组。这是因为3年、4年、6年苜蓿生长年限短,对上层土壤水分利用多,但对200cm以下深层水分利用较少,因此全层土壤含水量的平均值高,4年、6年苜蓿草地的有效储水量都在1000mm以上,远远大于该区年均降雨量,土壤供水力强,而小麦是一年生作物,根系下扎浅,对深层土壤

的水分利用少, 1000cm 土层有效储水量高达 1513.39mm; 第二组土壤含水量较低, 但 1000cm 土层有效储水量略高于该区年均降雨量; 第三组土层含水量最低, 只有 10.20%, 有效储水量低于该区年均降雨量, 相应的水分亏缺达 2058.64~2143.14mm, 相当于该区 3~4 年的有效降雨量。

表 6-17 不同生长年限苜蓿草地水分亏缺分析

生长年限 /年	土层深度 /cm	平均含水量 /%	土壤储水量 /cm	有效储水量 /cm	水分亏缺量 /cm	亏缺比例 /%
3	0~200	10.93	292.83	118.31	326.09	111.36
	200~1000	17.29	1939.13	486.17	286.09	14.75
	0~1000	14.84B	2231.96	604.48	612.18	27.43
4	0~200	13.22	358.18	181.74	310.09	86.57
	200~1000	14.25	1520.64	824.44	1231.51	80.99
	0~1000	13.85C	1878.83	1006.18	1541.60	82.05
6	0~200	14.82	417.17	234.02	201.21	48.23
	200~1000	13.85	1528.46	812.60	1210.70	79.21
	0~1000	14.22BC	1945.63	1046.62	1411.91	72.57
8	0~200	12.54	345.96	166.49	298.02	86.14
	200~1000	13.25	1438.32	733.27	1343.69	93.42
	0~1000	12.98D	1784.28	899.75	1641.71	92.01
12	0~200	10.90	290.49	117.29	329.29	113.36
	200~1000	11.47	1251.60	544.30	1472.13	117.62
	0~1000	11.25E	1542.09	661.58	1801.42	116.82
14	0~200	10.46	283.64	106.83	373.39	131.64
	200~1000	11.69	1271.40	563.77	1466.21	115.32
	0~1000	11.22E	1555.04	670.60	1839.60	118.30
18	0~200	10.39	269.27	99.53	407.22	151.23
	200~1000	10.20	1080.79	392.73	1735.92	160.62
	0~1000	10.27EF	1350.06	492.25	2143.14	158.74
26	0~200	11.63	311.48	137.02	351.45	112.83
	200~1000	10.21	1060.82	385.25	1707.19	160.93
	0~1000	10.76F	1372.31	522.27	2058.64	150.01
麦田	0~200	13.85	372.20	197.23	300.35	80.70
	200~1000	17.95	2063.29	1316.16	615.42	29.83
	0~1000	16.37A	2435.49	1513.39	915.77	37.60
荒地	0~200	10.61	284.17	109.70	378.77	133.29
	200~1000	13.57	1410.39	734.82	1357.62	96.26
	0~1000	12.43D	1694.56	844.52	1736.39	102.47

从 0~200cm 土层看, 26 年苜蓿草地 0~200cm 土层平均含水量比全层含水量的平均值高近 1 个百分点, 比 12 年、14 年、18 年高 0.73~1.25 个百分点。18 年 0~200cm 土层平均含水量比全层含水量也略有提高。从有效储水量上看, 苜蓿种植 26 年以后, 0~200cm 土层水分恢复已超过 12 年苜蓿, 达到 130mm 左右。这进一步说明苜蓿生长到一定年限, 土壤水分从上层开始恢复。

在 200~1000cm 土层, 平均含水量最高的是麦田与 3 年苜蓿草地, 接近 18%, 其次是 4 年和 6 年, 在 14.0% 左右, 荒地 13.57%, 8 年苜蓿草地 13.25%, 12 年、14 年、18 年、26 年低于 12%。从有效储水量看, 麦田土壤水分条件最好, 达到 1513.39mm, 其次是 4 年、6 年苜蓿草地, 有效储水量达 824.44mm、812.6mm, 土壤水分条件最差的是 18 年、26 年苜蓿草地, 有效储水量不到 400mm, 水分亏缺高达 1700mm 以上。这说明随着种植年限的延长, 苜蓿草地通体干化。

不同生长年限 0~1000cm 土层都存在不同程度的水分亏缺, 具体为: 18 年苜蓿草地水分亏缺最高, 为 2143.14mm, 亏缺比例高达 158.74%; 其次为 26 年, 水分亏缺量达 2058.64mm, 亏缺比例为 150.01%; 3 年和麦田的水分亏缺较少, 少于 1000mm, 亏缺比例小于 40%; 荒地水分亏缺介于 8 年与 12 年之间, 亏缺量为 1736.39mm, 水分亏缺比例在 102.47%。

从不同土层深度看, 随深度的增加, 土壤水分亏缺量逐渐增加: 0~200cm 土层水分亏缺占全层的 14.25%~21.81%; 200~500cm 土层占全层的 32.03%~38.10%; 500~1000cm 土层占全层的 45.72%~49.27%。

以上分析表明, 苜蓿生长年限不同, 对土壤水分的利用程度不同。土壤内的有效水以生长年限超过 8 年的苜蓿草地剩余最少, 其次是荒地, 生长年限低于 8 年的苜蓿草地有效水剩余较多, 麦田土壤内的有效水剩余最多。因此, 在所分析的立地条件下, 对土壤水分的消耗依次为生长年限超过 8 年的苜蓿草地 > 荒地 > 生长年限低于 8 年的苜蓿草地 > 麦田。

二、不同生长年限苜蓿草地土壤含水量距平变化

利用土壤含水量距平可确定土壤低水分含量区域, 并可预测不同生长年限土壤干层存在的区域。图 6-21 绘出了不同生长年限苜蓿草地含水量的距平变化曲线。可以看出, 所有处理在 0~40cm 土层都出现负距平。麦田在 0~350cm、3 年苜蓿在 0~400cm 土层距平值都为负值, 而荒地在 0~140cm 出现负距平。其余年限苜蓿在 160~600cm 土层之间出现低水分含量区域, 但随生长年限的不同而有差异。4 年、6 年苜蓿草地在 160~600cm 土层出现负距平, 200~400cm 土层负距平值最高, 为 1.38%~3.99%; 8 年苜蓿草地在 180~500cm 土层出现负距平, 在 200~400cm 土层负距平值最高, 为 1.03%~3.57%; 12 年、14 年在 160~500cm 土层出现负距平, 在 160~400cm 土层负距平值最高, 为 1.02%~2.54%; 18 年苜蓿草地在 180~550cm 土层出现负距平, 在 200~350cm 负距平值最高, 为 1.10%~2.3%; 26 年苜蓿草地在 160~600cm 土层出现负距平, 在 200~450cm 土层负距平值最高, 为 1.13%~2.98%。本研究, 不同生长年限苜蓿草地 0~1000cm 土层含水量的平均值不同, 4 年、6 年、8 年、12 年、14

年、18年、26年苜蓿草地平均含水量分别为13.85%、14.22%、12.98%、11.25%、11.22%、10.27%、10.76%，6年苜蓿草地平均值比18年、26年高3~4个百分点，虽然4年、6年、18年、26年苜蓿草地在180~550cm土层均出现负距平值，但4年、6年苜蓿草地180~550cm土层土壤含水量（11.91%、12.30%）远大于18年、26年（9.10%、9.42%）。因此负距平反映了不同生长年限苜蓿草地土壤低水分含量区域，并不表示土壤干层的区域，但随着苜蓿生长年限的延长，土壤干层必然出现在负距平区域内。

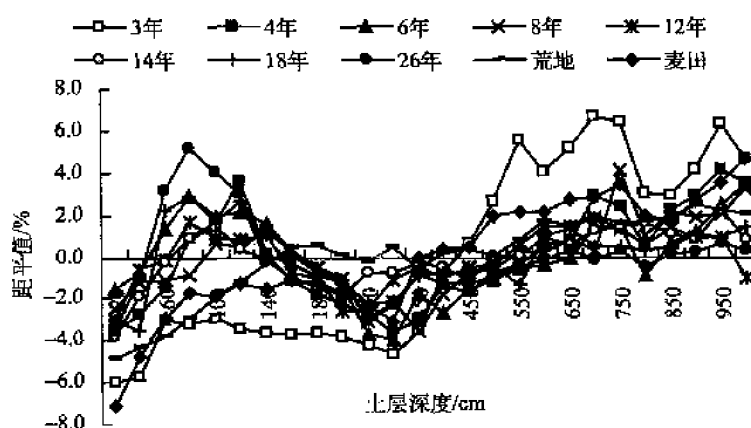


图 6-21 不同生长年限苜蓿草地土壤含水量距平变化

所有处理在0~40cm土层都出现负距平，主要原因是0~40cm土壤水分变化剧烈，受外界气候的强烈影响。土壤水分的测定时间是2006年4月21日，自2006年1~3月降水总量是21.2mm，4月未下雨，因此表层土壤水分极度缺乏，导致所有处理0~40cm土层都出现负距平。

三、土壤水分生态环境效应分析

土壤干层是位于降雨入渗补给深度以下，因植物蒸散导致土壤水分负平衡而形成的长期存在的干燥化土层，它涉及黄土高原地区生态环境建设中的重大科学问题（李玉山，2001b）。草地以及林地的土壤干层是由于根系的直接吸收所造成的，而农田的干层则是由于根层与下层的土壤水势的梯度差异所引起的水分逐年上移而形成的，与水分收支的负平衡直接相关。随着黄土高原林草植被建设的进行，对土壤干化的研究也在不断走向深入。土壤干层的形成，恶化了土壤水分生态环境，不仅影响牧草生长、生存和天然更新，而且对后续草种的选择和造林种草的实施也形成潜在威胁。

一年生小麦对土壤水分利用时间短，利用层次浅，0~1000cm土层含水量达16.37%，比其他土地利用方式高2.15~4.10个百分点，对土壤水分生态环境不会产生深刻影响。荒地由于杂草对降水入渗的阻碍及对土壤水分的消耗，200cm土层以上水分条件较差，土壤含水量只有10.61%，与18年苜蓿草地相当而低于其他土地利用方式，

分别低 0.3~4.12 个百分点,但 200~1000cm 土壤深层含水量达 13.51%,比麦田 (17.74%)、3 年 (17.14%)、4 年 (14.04%)、6 年 (13.59%) 低 0.08~4.23 个百分点,比 8 年 (13.05%)、12 年 (11.56%)、18 年 (10.10%)、26 年 (10.15%) 苜蓿草地高 0.46~3.41 个百分点,土壤上层的水分亏缺可以通过降水得到补充,其对土壤水分生态环境也不会产生深刻影响。生长年限不同的苜蓿草地,全年蒸发蒸腾量超过降水量,出现不同程度的土壤干层。生长年限为 3 年、4 年、6 年的苜蓿草地,在 200~300cm 土层、300~350cm 土层及 250~300cm 土层出现轻度干层,干层的厚度浅,程度轻,因此对土壤水分生态环境不会产生深刻影响。根据本试验的测定结果,苜蓿生长年限越长,干层范围越大,干化程度越重,生长超过 8 年的苜蓿草地,出现中度干层,干层范围已延至 600cm 以下。在干湿季明显的季风条件下,上层 (0~200cm) 土壤处于水分消耗补充的不断交替过程中,而下层 (200~1000cm) 土层受降水的影响小,地下水也难以补充,所以土壤干层一旦形成,很难得到恢复,200cm 以下形成的土壤干层将长期存在。

由于黄土土层深厚,土壤干化的直接后果是形成土壤干层,对降水垂直补给地下水过程发生阻止作用。因此,黄土高原地区苜蓿草地土壤深层干化使植物生长的土壤水分环境恶化,削弱土壤水库对年际干旱的调节能力,并带来一系列其他环境问题,如小气候环境趋于旱化、土地退化、植被生长衰退等,不仅对土壤水分生态环境产生深刻影响,而且会对该区整体水文状况产生不良影响。

四、小结与讨论

土壤水分的储量和分布,受植物用水特征的强烈影响而产生分异。小麦对土壤水分利用时间短,利用层次浅,主要吸收上层土壤水分,对下层土壤水分吸收少;由于麦田在播前进行了犁地、整地等农艺技术措施,降水充分入渗,因此在 0~200cm 土层,土壤储水量低于 6 年苜蓿草地而高于荒地与其他生长年限,在 200~1000cm 土层,土壤储水量远高于荒地与苜蓿草地。荒地未开垦土地,地面紧实,降水入渗难,地面裸露蒸发量大,加之地面杂草消耗土壤水分,导致 0~200cm 上层土壤水分含量较低;在 200~1000cm 土层,可能因杂草长期生长造成土壤深层水分的消耗,因此土壤储水量低于麦田及 4 年、6 年、8 年,而高于 12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿草地。不同生长年限苜蓿草地对土壤水分的消耗存在差异,对土壤水分的利用深度除与其根系分布的深度有关外,还与其生长的年限有关。素有“牧草之王”的紫花苜蓿具有庞大的根系,在 2003~2006 年所进行的试验中,苜蓿生长超过 3 年,根系分布深度超过 4m (万素梅等, 2004),由于多年生长连续耗水,其对土壤水分的利用深度延伸到 5m,苜蓿生长超过 8 年,水分利用的深度可达到 9~9.2m 以下 (陈一鄂和刘康, 1990; 韩仕峰, 1990)。生长年限越长,根系分布越深,对深层水分的消耗越强烈,致使深层土壤经常处于水分亏缺状态。生长到 26 年时苜蓿已进入衰败阶段,对上层土壤的耗水减少,储水量较大,而深层土壤由于生长前期累积耗水量大,深层土壤干化程度加剧。

苜蓿生长超过一定年限,根系活力下降,生物量减小,进入衰败期,对土壤水分利用强度减小,土壤含水量有一定恢复,但受土壤水分过耗和较少降水量的影响,恢复速度较慢,只能使土壤上层的水分逐步得到恢复,而深层土壤水分难以恢复。本研究中,26年苜蓿草地0~200cm土层土壤含水量低于4年、6年、8年,高于12年、14年、18年;在200~1000cm土层,4年、6年、8年土壤含水量超过13.3%,12年为11.56%,而18年、26年只有10.10%,表现出随着苜蓿生长年限的延长,对下层土壤水分利用程度加剧,下层土壤通体呈现干化,苜蓿生长年限超过6年,土壤水分状况比荒地差。

由于植物生理特性以及生长周期的不同,麦田、荒地和苜蓿草地对土壤水分的消耗依次为麦田<4年<6年<荒地<8年<12年<26年<18年。麦田通体没有出现干层;荒地和苜蓿草地均出现土壤干层,荒地及生长年限低于8年(含8年)的苜蓿草地,出现轻度干层,生长年限超过8年,出现中度干层。麦田、荒地,4年、6年、8年苜蓿草地,对土壤水分生态环境不会产生大的影响;12年、18年、26年苜蓿草地,对土壤水分生态环境产生深刻的负面影响。

李玉山(2002)研究了黄土高原地区旱作麦田产量及土壤水分消耗,结果表明麦田土壤干化趋势明显,出现土壤干层。但本试验的研究结果表明,麦田通体没有出现干层,这与刘刚等(2004)的研究结果一致。李玉山(2002)把田间持水量的75%作为土壤干层的上限,在他的研究中,麦田土壤含水量达到14.74%,即视为出现干层,这与本研究对土壤干层的界定范围不一致。

对土壤水分的研究,一般需要较长时间序列的观测资料。但本节主要分析0~1000cm土壤各层次土壤水分,是一种以空间代替时间的分析方法。此外,不同土地利用方式处于同一塬面,降雨条件相同,而且主要分析土壤剖面200cm以下土壤水分的消耗规律。200cm以下土壤水分年内变化较小,属于相对稳定层(杜世平等,1999),在苜蓿生长期间水分难以得到补偿,所以,用一次水分观测资料分析不同土地利用方式土壤水分的消耗是可行的。

第七节 黄土高原地区苜蓿生产力动态及水分利用效率研究

本研究选取同一地点生长年限分别为3年、4年、6年、8年、12年、14年、18年、26年的紫花苜蓿草地,通过研究不同生长年限苜蓿生产力动态变化及其对深层土壤水分的消耗,为黄土高原地区农业持续发展与生态环境恢复提供科学依据。

一、不同生长年限苜蓿生产力动态

不同生长年限苜蓿产量存在极显著差异(表6-18)。从两茬苜蓿的总产来看,6年苜蓿极显著地高于除4年外的所有年限;4年与8年之间,8年与3年之间差异不显著,但它们极显著地高于12年、18年、26年苜蓿产量。

表 6-18 不同生长年限紫花苜蓿鲜草产量及产量动态指数比较

生长年限 /年	第一茬		第二茬		总产 /(kg·hm ⁻²)	鲜草 Y _i	干草 Y _i
	产量 /(kg·hm ⁻²)	占全年总产 /%	产量 /(kg·hm ⁻²)	占全年总产 /%			
3	21 852.94B	61.35	13 767.36C	38.65	35 620.3C	0.75	0.76
4	30 464.49A	64.50	16 767.51B	35.50	47 231.99AB	1.00	1.00
6	32 779.42A	60.35	21 534.41A	39.65	54 313.83A	1.15	1.17
8	26 529.1AB	66.66	13 267.33C	33.34	39 796.43BC	0.84	0.91
12	14 167.38C	73.56	5 092.847D	26.44	19 260.22D	0.41	0.51
14	11 852.03DC	69.20	5 275.10D	30.80	17 127.13DE	0.40	0.40
18	6 667D	54.64	5 533.61D	45.36	12 200.61DE	0.33	0.42
26	6 204.014D	68.65	2 833.475D	31.35	9 037.489E	0.19	0.25
平均	18 814.55	64.86	10 508.95	35.13	29 323.5		

注：多重比较采用 Duncan 新复极差法，不同大写字母表示差异达极显著水平 ($\alpha=0.01$)。

不同生长年限苜蓿生产力在不同茬次变化趋势一致：在苜蓿生长前期，随着苜蓿生长年限的延长，苜蓿产量增加，在苜蓿生长的第 6 年，产量达到最高，苜蓿生长超过 6 年，产量开始逐年下降。从表 6-18 中可以看出，不同生长年限苜蓿第一茬产量差异极显著，6 年、4 年之间差异不显著，但它们极显著地高于除 8 年外的其他年限，8 年、3 年之间差异不显著，但它们极显著地高于其他生长年限，12 年极显著地高于 18 年、26 年，18 年、26 年之间差异不显著。不同生长年限苜蓿第二茬产量差异也达到极显著水平，6 年极显著地高于其他所有年限，3 年、8 年之间差异不显著，但它们极显著地高于 12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿。

从不同茬次看，不同生长年限苜蓿第一茬鲜草产量平均为 18 814.55kg·hm⁻²，占全年的 64.86%，对年产草量贡献率最大。第二茬鲜草产量为 10 508.95kg·hm⁻²，占全年的 35.13%，对年产草量贡献率低于第一茬苜蓿。因此，在苜蓿的栽培管理中，第一茬苜蓿的田间管理尤为重要。第二茬苜蓿对总产量的贡献较低，但是并不能因此而忽视第二茬苜蓿的管理，因为苜蓿是多年生牧草，第二茬的生长状况直接影响苜蓿的越冬性能和根系的健壮程度，对来年第一茬苜蓿生长有直接的影响，再生草对于获得苜蓿全年高产、稳产具有重要作用。

二、苜蓿鲜草产量波动性及其与生长年限的关系

苜蓿的生长年限可分为生物性生长年限和经济性生长年限。前者是指生物学寿命生长年限，后者是指具有经济效益的生长年限，即退化或衰败发生前的生长年限。本节主要研究经济性生长年限。为避免因各环境因素对产量发生波动性影响，而难于判断苜蓿生长衰退发生时期，特采用产量动态指数 Y_i 来描述产量随生长年限的变化。产量动态指数 Y_i 为各生长年限苜蓿的实际产量与同一年份高产期苜蓿产量之比值，不受降水量的影响，可以避免环境因素对产量产生波动性影响。本研究采用产量动态指数 Y_i 来描述产量随生长年限的变化，能够较准确地判断生长衰退发生的时期（李玉山，2001a）。图 6-22 反映了 3 年、4 年、6 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿鲜草和干草的

Y_i 值变化。图 6-22 中, $Y_{\text{鲜草}}$ 表示不同生长年限鲜草产量动态指数; $Y_{\text{干草}}$ 表示不同生长年限干草产量动态指数。可以看出, 苜蓿鲜草和干草的产量动态指数变化趋势完全一致: 随着生长年限的延长, Y_i 值逐渐增加, 在苜蓿生长的第 6 年, Y_i 值大于 1.0, 苜蓿生长超过 6 年, Y_i 值开始下降, 小于 1.0, 生长出现衰退, 当苜蓿生长 18 年以后, Y_i 值低于 0.42。从实测的苜蓿鲜草产量也可以看出, 18 年、26 年苜蓿鲜草产量仅为 $12\ 200.61\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9037.49\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明苜蓿生长严重衰败。

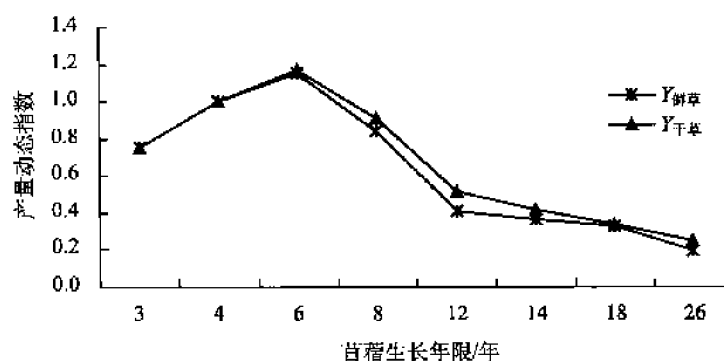


图 6-22 苜蓿产量动态指数随生长年限的变化

李玉山 (2002) 的研究结果表明, 苜蓿产量波动性主要取决于产量波动区域 (F_r) 与平均产量 (Y_a) 的差值, 当波动区域大于平均产量时, 表明产量波动剧烈, 波动区域小于平均产量时, 则表明产量相对稳定。本试验中, 在苜蓿生长的前 6 年, 平均鲜草产量为 $45\ 722.04\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产量波动区域为 $18\ 693.53\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 波动系数 (F_r/Y_a) 为 0.41, $F_r < Y_a$, 产量表现相对稳定。苜蓿生长 6 年以后, 产量出现了很大波动。8 年、12 年、14 年、18 年、26 年苜蓿平均鲜草产量为 $20\ 151.08\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产量最高的 8 年苜蓿, 为 $39\ 796.43\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产量最低的是 26 年, 只有 $9037.49\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 后二者之差即波动区域达到 $30\ 758.95\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 波动系数为 1.53, $F_r > Y_a$, 说明苜蓿生长中后期产量波动剧烈。

三、不同生长年限苜蓿水分利用效率比较

在半干旱和半湿润地区, 苜蓿产草量主要取决于土壤水分条件。不同生长年限苜蓿干草产量、总耗水量及水分利用效率存在差异 (表 6-19)。可以看出, 苜蓿生长年限不同, 干草产量波动较大, 产量变化区域为 $2476.04 \sim 11\ 500.54\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但其总耗水量之间差异较小, 在 200mm 左右。从耗水系数来看, 18 年、26 年最大, 达到 0.060、0.065, 其次是 12 年、14 年, 4 年、6 年、8 年耗水系数最小, 低于 0.020。从水分利用效率来看, 4 年、8 年苜蓿水分利用效率最高, 超过 $60\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其次是 6 年, 为 $54.73\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 3 年为 $36.78\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 12 年为 $26.67\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 水分利用效率较低的是 14 年、18 年、26 年苜蓿, 低于 $19.50\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比 4 年、6 年、8 年低 37.99~50.59 个百分点。

表 6-19 不同生长年限苜蓿水分利用效率比较

生长年限 /年	产量 /(kg·hm ⁻²)	播时储水 /mm	收时储水 /mm	生育期降水 /mm	总耗水量 /mm	耗水系数 /(mm·kg ⁻¹ ·hm ⁻²)	水分利用效率 /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
3	7 447.76C	292.83	329.14	166.2	202.51	0.027	36.78
4	9 839.95B	358.18	341.33	166.2	149.35	0.015	65.89
6	11 500.54A	417.17	461.10	166.2	210.13	0.018	54.73
8	8 982.13B	345.96	326.36	166.2	146.6	0.016	61.27
12	5 051.38D	290.49	313.71	166.2	189.42	0.037	26.67
14	4 066.64DE	283.64	327.94	166.2	210.5	0.052	19.32
18	3 291.01EF	269.27	299.65	166.2	196.58	0.060	16.74
26	2 476.04F	311.49	307.13	166.2	161.84	0.065	15.30

从以上分析可以看出,苜蓿生长年限不同,对水分的利用效率不同,苜蓿生长低于8年(含8年),能够较充分地利用有限的降水,而苜蓿生长超过8年,生长发生衰败,生物量锐减,地面裸露,土壤水分蒸发损失,苜蓿生长超过18年,生长严重衰败,水分利用效率低于 $17\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$,不能把降雨有效地转化为作物的产量。

四、苜蓿产草量与土壤水分的关系

在半干旱地区,苜蓿产草量主要取决于水分条件,产草量与前一年雨季降水和当年生育期降水量的关系密切。本研究中,6年苜蓿产草量最高,此后随着生长年限的延长,苜蓿草地开始衰败。通过对不同生长年限苜蓿产草量与土壤水分之间的关系进行分析(图6-23),结果表明,苜蓿产草量与土壤水分之间呈极显著正相关关系($y=0.0005x+9.4027$, $r=0.8695^{**}$),表明水分条件直接影响苜蓿的生长和产量,是影响苜蓿产量的主要因子,改善土壤水分条件有利于苜蓿生产效率的发挥。

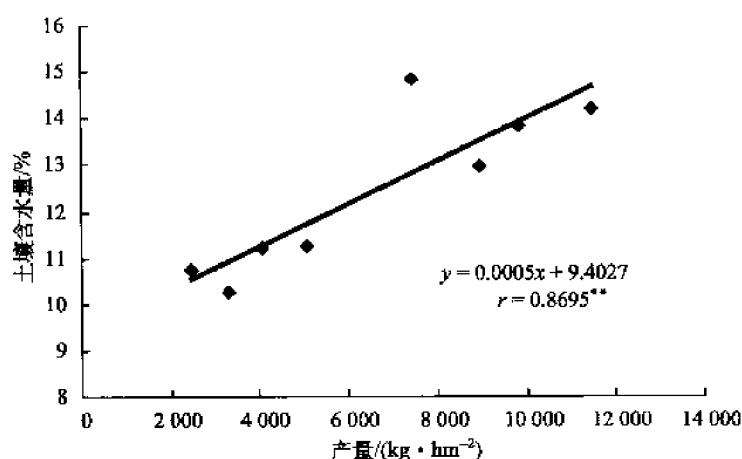


图 6-23 苜蓿产草量与土壤水分的关系

五、小结与讨论

不同生长年限苜蓿产量的方差分析结果表明,第6年为苜蓿的高产期。苜蓿生长至12年,全年鲜草产量只有 $19\,260.2\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与6年苜蓿产量相比,减少了 $35\,053.6\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,苜蓿生长26年后,产量低于 $10\,000\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

产量动态指数可以避免环境因素对产量产生波动性影响,能够较准确地判断生长衰退发生的时期。从产量动态指数可以看出,紫花苜蓿生长超过一定年限,种群发生衰败。苜蓿生长超过6年,产量开始下降,超过8年,生长发生衰退,当苜蓿生长至18年,生长严重衰败。从产量波动区域(F_t)与平均产量(Y_a)的差值可以看出,在苜蓿生长的前期(1~6年),产量表现相对稳定;苜蓿生长的中后期(生长超过6年),产量波动剧烈。

不同生长年限苜蓿水分利用效率存在差异。随着苜蓿生长年限的延长,水分利用效率降低。4年、6年、8年苜蓿水分利用效率较高,超过 $50\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,苜蓿生长至12年、14年,水分利用效率为 $20\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,苜蓿生长超过18年,水分利用效率只有 $15\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右。

程积民等(2005b)研究了黄土丘陵区退耕地紫花苜蓿生长状况,认为紫花苜蓿生长的高峰期为第4~第5年,在生长的第6年苜蓿草地开始衰败。而本试验的研究结果表明,紫花苜蓿生长的高峰期为第6年,在生长的第8年苜蓿草地开始衰败。这与程积民的结论有出入,其原因可能是程积民研究的黄土高原半干旱区,年降水量为445mm,且苜蓿种植在坡地,由于坡地土壤水分、养分状况不同于塬面,因此退耕地苜蓿的生长高峰及生长衰退发生的时期相对较早。本试验研究黄土高原半湿润区紫花苜蓿的生长,研究区域地势平坦,年降水量为540mm,并且运用产量动态指数作为判断苜蓿发生衰退的依据,避免了环境因素对产量产生波动性影响,能够较准确地判断苜蓿生长衰退发生的时期,因而具有一定的科学性。

苜蓿植株总干物质生产中仅有一部分是作为牧草来收获的,根系占相当一部分,苜蓿生长年限越长,根系所占比例越大。根系的生长发育及生物量直接影响苜蓿生产力。研究表明,苜蓿根系约占总生物量的38%,而留茬的接近10%,因此苜蓿的产草量应按苜蓿总干物质生产力的52%来计算。在本试验中,仅考虑了苜蓿地上部分的生产力,而没有考虑苜蓿地下部分的生产力。这是本研究存在的不足之处,也是今后有待于进一步改进和完善之处。

本研究中,苜蓿干草产量与土壤水分呈极显著正相关($r=0.8695^{**}$),此结论与Saeed和El-Nodi(1997)的研究结果一致。研究表明土壤水分条件是影响苜蓿产量的主要因子,改善土壤水分条件有利于苜蓿生产效率的发挥。根据苜蓿生产力动态和土壤水分状况,本研究认为,在黄土高原地区紫花苜蓿生长的高峰期为第6年;适宜的生长年限不宜超过8年。

第八节 黄土高原不同生长年限苜蓿草地土壤理化性质研究

土壤物理性质不仅决定土壤中水、气、热和生物状况,而且影响土壤中营养元素的

有效性和供应能力 (Boix et al., 2001; Arshad et al., 1996), 了解土壤的物理性质有助于运用水分调控措施, 调节土壤的水、肥、气、热等肥力因素, 为作物的生长发育创造良好的土壤环境。

氮、磷、钾营养元素是植物生长必需的大量元素, 养分缺乏影响植物的产量和品质。目前国内外对土壤养分及其影响因素的相关研究较多 (李世清等, 2004; Joanne et al., 2007)。土壤养分的含量、形态和分布受多种因素的影响, 长期种植作物条件下, 土壤中养分的形态和分布发生了很大变化。连续种植苜蓿会显著消耗土壤养分 (樊军等, 2004a, 2004b); 苜蓿连续种植 5 年后, 土壤氮素含量最低, 此后随生长年限延长, 氮素含量有所提高 (张春霞等, 2005); 由于土壤结构以及植物根系分布状况, 不同土层养分含量存在显著差异, 其季节性变化过程也明显不同 (王改兰等, 2005); 土壤有机碳的变化直接影响氮素的形态和有效性 (郝文芳等, 2005); 土壤全氮与有机质呈正相关, 碱解氮与全氮呈极显著正相关 ($r=0.944^{**}$), 增加土壤的有机质含量, 即能增加其全氮量, 进而增加碱解氮含量, 提高土壤供氮水平 (刘世全等, 2004)。

苜蓿种植多年后, 深层土壤水分出现的强烈亏缺以及随之而产生的土壤养分缺乏问题, 导致黄土高原地区苜蓿草地大面积衰退 (李玉山, 2001b)。草地养分能否得到及时补偿和恢复, 这一重要的科学问题越来越受到人们的关注, 并成为黄土高原地区能否大面积发展人工草地的战略性决策问题。本研究采集生长年限分别为 3 年、4 年、6 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年的苜蓿草地及同一地区连作 4 年的麦田、荒地等土壤样品, 研究了 0~1000cm 土层的土壤养分变化规律, 并分层采集 0~500cm 各土层土样, 分析黄土坡面土壤物理性质随种植年限的动态变化规律, 以期能系统反映不同生长年限苜蓿对深层土壤养分的消耗规律及土壤物理性质的动态变化规律, 为黄土高原地区苜蓿草地合理施肥、草田轮作及土壤-作物系统的养管理提供科学依据。

一、不同生长年限苜蓿草地土壤物理性质研究

(一) 不同生长年限苜蓿草地土壤容重垂直变化特征研究

不同生长年限苜蓿草地 0~200cm 各层次土壤容重呈现规律性的变化 (图 6-24): 在 20~40cm 土层土壤容重达到全层的最大值, 为 $1.33\sim 1.61\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 40cm 土层以下土壤容重开始下降, 至 100cm 土层以下, 土壤容重比较稳定, 变化幅度较小, 为 $1.32\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。

从 0~20cm 土壤表层看, 6 年苜蓿草地的容重值最高, 为 $1.40\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 4 年最低, 为 $1.30\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 3 年、8 年、12 年、14 年、18 年、26 年之间相差不大, 为 $1.36\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右。在 20~40cm 土层, 土壤容重增加, 达到全层的最大值, 除 4 年外, 所有年限均超过 $1.42\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其中 6 年苜蓿草地最大, 为 $1.61\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其他生长年限为 $1.42\sim 1.50\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

在 40~60cm 土层, 土壤容重开始下降。土壤容重最大的是 6 年苜蓿草地, 为 $1.50\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其次是 3 年、8 年、12 年, 为 $1.39\sim 1.47\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 苜蓿生长年限超过 14 年, 土壤容重低于 3 年、6 年、8 年、12 年。60~80cm 土层土壤容重的变化规律与

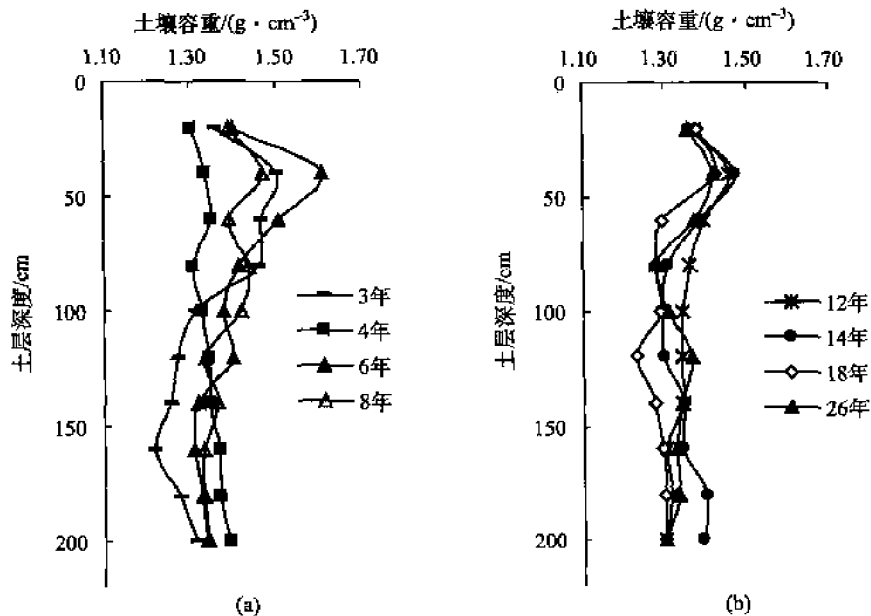


图 6-24 苜蓿草地土壤容重垂直变化特征

40~60cm 土层相同, 但 18 年、26 年苜蓿草地土壤容重最小, 仅 $1.28\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

80cm 土层以下, 土壤容重缓慢下降, 至 100cm 土层, 土壤容重变化幅度较小, 达到稳定。在 100cm 土层以下, 3 年苜蓿草地土壤容重最低, 为 $1.27\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 其次是 18 年, 为 $1.279\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 12 年、26 年土壤容重也较小, 分别为 $1.32\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $1.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

从不同土层的垂直分布看, 0~20cm 土层的土壤容重为 $1.37\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 低于 20~40cm ($1.46\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、40~60cm ($1.39\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 与 60~80cm 土层相当 ($1.36\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 100cm 土层以下, 土壤容重较小且稳定在 $1.32\sim 1.33\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在调查过程中发现, 在 500cm 土壤深层, 土壤容重表现为随土层深度的加深, 土壤容重降低, 3 年、6 年土壤容重为 $1.40\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右, 8 年、12 年、14 年土壤容重为 $1.36\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右, 而 18 年、26 年土壤容重低于 $1.35\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(二) 苜蓿草地土壤物理性质综合分析

表 6-20 列出了不同处理土壤物理性状指标。结果表明, 荒地、麦田、苜蓿草地之间土壤物理性质存在差异。在 0~200cm 土层, 荒地、麦田土壤容重小于 6 年、8 年、12 年、14 年, 与 3 年、4 年、26 年苜蓿草地相差不大, 为 $1.34\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右。在 500cm 土层, 麦田容重最高, 比荒地及所有生长年限苜蓿草地高 0.5%~10.5%; 荒地 与 18 年土壤容重相近, 高于 4 年、26 年苜蓿草地, 低于 3 年、6 年、8 年、12 年、14 年。

表 6-20 不同生长年限苜蓿草地土壤物理性质动态变化过程分析

生长年限 /年	土层深度 /cm	容重 /(g·cm ⁻³)	饱和含水量 /%	田间持水量 /%	孔隙度 /%	固相容积 /%	孔隙比
3	0~200cm	1.343	34.307	30.954	49.339	50.661	0.974
	500cm	1.428	32.811	30.964	46.117	53.883	0.856
4	0~200cm	1.347	35.212	32.568	49.162	50.838	0.967
	500cm	1.316	36.803	34.763	50.343	49.657	1.014
6	0~200cm	1.403	30.862	29.468	47.059	52.941	0.889
	500cm	1.395	34.231	32.990	47.343	52.657	0.899
8	0~200cm	1.381	33.554	31.163	47.904	52.096	0.920
	500cm	1.363	36.765	34.690	48.566	51.434	0.944
12	0~200cm	1.353	33.708	31.031	48.928	51.072	0.958
	500cm	1.388	33.680	33.101	47.624	52.376	0.909
14	0~200cm	1.360	35.035	32.289	48.677	51.323	0.948
	500cm	1.347	36.025	33.773	49.173	50.827	0.967
18	0~200cm	1.306	37.057	34.635	50.721	49.279	1.029
	500cm	1.334	37.392	35.492	49.679	50.321	0.987
26	0~200cm	1.340	35.814	33.242	49.435	50.565	0.978
	500cm	1.299	37.511	35.258	50.983	49.017	1.040
荒地	0~200cm	1.342	33.261	30.583	49.358	50.642	0.975
	500cm	1.330	35.872	34.763	49.811	50.189	0.992
麦田	0~200cm	1.345	32.473	30.867	49.253	50.747	0.971
	500cm	1.435	35.762	32.350	45.851	54.149	0.847
0~200cm	平均值	1.352	34.13	31.68	48.984	51.016	0.961
	标准差	0.026	1.677	1.425	0.975	0.975	0.037
	变异系数	1.911	4.913	4.498	1.991	1.911	3.879
500cm	平均值	1.363	35.69	33.81	48.549	51.451	0.946
	标准差	0.047	1.524	1.376	1.761	1.761	0.066
	变异系数	3.423	4.270	4.068	3.627	3.423	6.989

从固相容积看,在 0~200cm 土层,18 年苜蓿草地最小,为 49.28%,3 年、4 年、26 年苜蓿草地为 50%左右,6 年、8 年分别为 52%左右,12 年、14 年为 51%左右。

从不同土地利用方式的变异系数看,在 0~200cm 土层,土地利用方式对土壤物理性质的影响较小,而在 500cm 深层土壤,土地利用方式对土壤物理性质影响较大。在 0~200cm 土层,土地利用方式对土壤容重、固相容积影响最小,变异系数仅 1.911%,对饱和含水量、田间持水量的影响较大,变异系数达 4.913%、4.498%。在 500cm 土层,土地利用方式对土壤容重、固相容积的影响最小,变异系数均为 3.423%。但变异系数大于 0~200cm 土层,500cm 土层饱和含水量、田间持水量的变异系数与 0~

200cm 土层相当, 为 4.25% 左右。

二、黄土高原地区不同生长年限苜蓿草地土壤化学性质研究

(一) 土壤化学特性相关分析

土壤基本化学特性间的相关分析列于表 6-21。从表中可以看出, SOC 与 TN、AN 均为极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.9844、0.9262。TN 与 AN 呈极显著正相关, 相关系数为 0.9679。以上相关分析表明, 土壤有机碳含量的提高, 必然导致全氮、碱解氮的提高, 这为苜蓿草田管理, 合理施肥提供了理论依据。

表 6-21 土壤化学特性相关分析

项目	pH	SOC	TN	TP	AN	AP
SOC	-0.5346					
TN	-0.1615	0.9844**				
TP	-0.1923	0.101	0.1660			
AN	-0.5332	0.9262**	0.9679**	0.2059		
AP	-0.5513	-0.4541	-0.4796	0.0282	-0.5146	
AK	-0.5156	0.5599	0.5427	-0.0114	0.4427	0.2771

* 显著相关; ** 极显著相关。

表 6-21 表明, 土壤基本化学特性间, pH 与 SOC、TN、AN 之间均为负相关关系。从其他性状间相关关系来看, TN、AN 与 SOC 的协同变化趋势明显。性状间的相关关系是普遍存在的。这就表明: 在苜蓿草田管理中, 通过采取相应的农艺措施, 正向选择与 SOC 相关的因素, 可以有效提高草地肥力水平。

(二) 不同生长年限苜蓿草地土壤有机质垂直变化规律

土壤有机质对维持土壤养分平衡和提高有效态养分起着非常重要的作用。图 6-25 为不同处理 0~1000cm 土层有机质含量变化规律, 可以看出, 麦田、荒地 与 苜蓿草地 对土壤有机质的利用存在差异, 但变化规律大致相同, 即随土层深度的增加, 有机质含量迅速下降, 在 0~200cm 土层, 有机质含量变化较大, 而在 700cm 土层以下, 变化趋势平缓, 比较稳定。

在 0~1000cm 土壤剖面, 除 6 年外, 所有年限苜蓿草地土壤有机质含量均低于荒地, 比荒地低 0.461~1.838g·kg⁻¹; 与麦田相比, 除 18 年苜蓿外, 所有年限苜蓿草地土壤有机质含量均高于麦田, 比麦田高 0.496~1.231g·kg⁻¹。

从不同土层深度看, 在 0~200cm 土层, 苜蓿生长低于 14 年 (含 14 年), 土壤有机质超过 8.0g·kg⁻¹; 苜蓿生长超过 14 年, 土壤有机质低于 8.0g·kg⁻¹, 但 26 年苜蓿草地有机质含量高于 18 年。与荒地相比, 所有年限均高于荒地: 4 年、6 年、8 年、12 年、14 年比荒地高 11.06%~36.52%, 26 年比荒地高 10.06%, 而 18 年与荒地有机质含量相当。与麦田相比, 除 18 年外, 所有生长年限苜蓿草地有机质含量均高于麦田, 比麦田高 8.20%~34.19%。

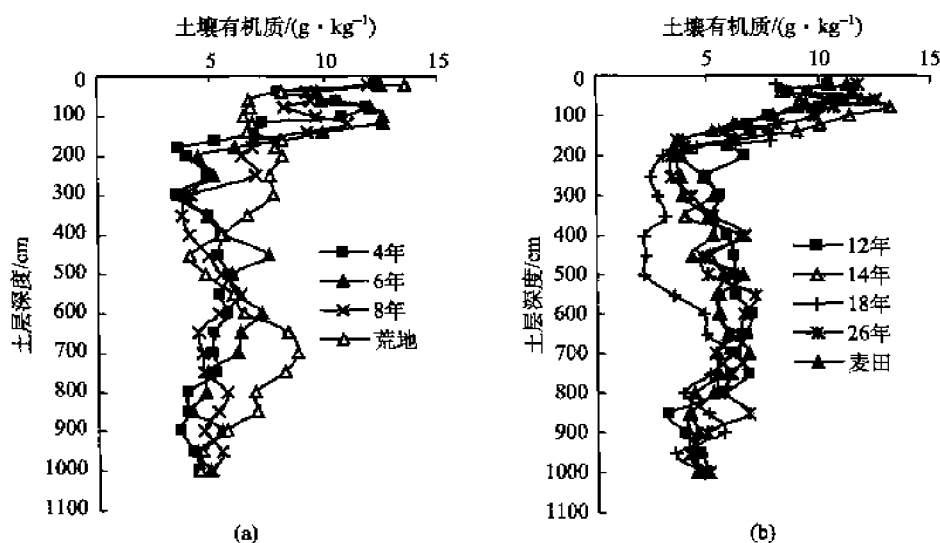


图 6-25 不同生长年限苜蓿草地土壤有机质垂直变化

在土壤深层 (200~1000cm), 有机质含量比 0~200cm 土层低 $0.76 \sim 4.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所有年限均低于荒地, 分别比荒地低 $13.16\% \sim 39.84\%$ 。与麦田相比, 4 年、18 年土壤有机质含量低于麦田, 其余年限均高于麦田, 分别高 $0.8\% \sim 11.4\%$ 。

从以上分析可以看出, 荒地、麦田及不同生长年限苜蓿草地土壤有机质存在差异。主要原因是由于麦田属于农业生态系统, 在生产过程中进行了培肥地力, 而小麦根系的活动范围主要集中在 100cm 土层范围内, 因此导致该层有机质含量高于荒地。在 200~1000cm 土层, 小麦根系很难达到该层, 土壤基本未被扰动过, 而对于多年生的苜蓿来说, 根系深达 7~8m, 由于根系的扰动、穿插与挤压, 以及根系死亡以后形成的有机物质, 导致苜蓿草地深层土壤有机质含量远高于麦田。对于荒地而言, 多年以来着生大量杂草, 其中也包含多年生杂草, 100cm 土层以下受到根系活动的影响, 因此在土壤深层有机质含量也高于麦田。

不同生长年限苜蓿草地对土壤有机质的消耗存在差异, 且随着土层的加深, 有机质含量逐渐降低, 苜蓿生长至 26 年, 生长衰败, 地上生物量少, 对养分的吸收少, 同时根系庞大, 由枯枝落叶和根系归还到农田的有机质多, 有机质得到恢复, 因此 26 年苜蓿草地有机质含量高于 18 年。

(三) 不同生长年限苜蓿草地土壤全氮垂直变化规律

图 6-26 为不同处理 0~1000cm 土层氮素总量变化规律, 可以看出, 土壤全氮含量呈现规律性的变化。随土层深度的增加, 全氮含量下降, 在 200~300cm 土层, 达到全层的最低值, 仅为 $0.233 \sim 0.295 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 350cm 土层以下, 全氮含量变化趋势平缓, 基本稳定在 $0.334 \sim 0.360 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从 0~200cm 土层看, 所有年限苜蓿草地土壤全氮含量均超过荒地与麦田, 比荒地高 $8.54\% \sim 45.09\%$ 、比麦田高 $1.07\% \sim 35.1\%$, 且麦田全氮含量高于荒地。在不同生

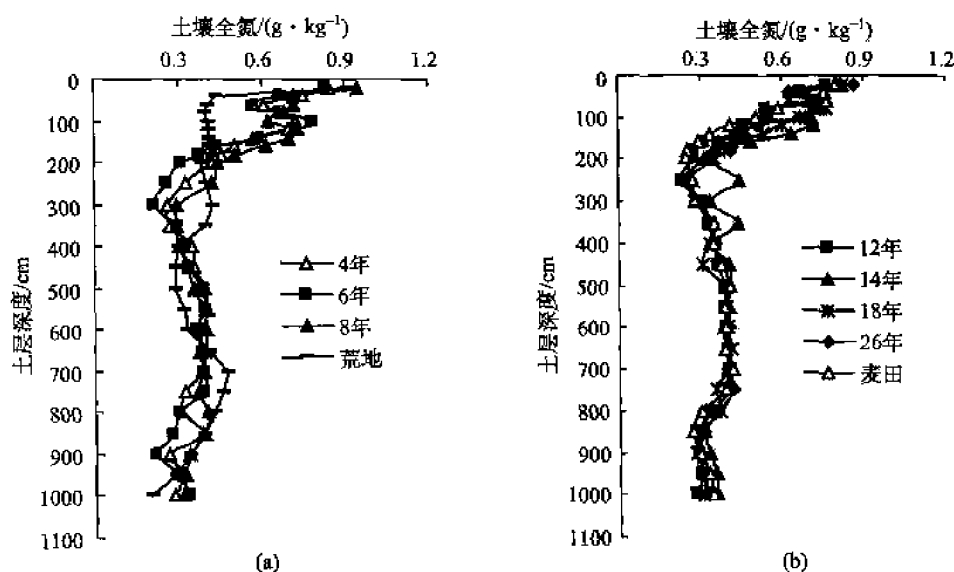


图 6-26 不同生长年限苜蓿草地土壤全氮垂直变化

长年限之间, 8 年全氮含量最高, 为 $0.667 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次是 4 年、14 年、6 年、18 年、26 年, 分别为 $0.571 \sim 0.626 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 12 年全氮含量最低, 为 $0.499 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别比 4 年、6 年、8 年、14 年、18 年、26 年低 $0.071 \sim 0.168 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在土壤深层 (200~1000cm), 荒地、麦田及所有生长年限苜蓿草地全氮含量差异不大, 均为 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。

以上分析表明, 不同生长年限苜蓿草地对土壤全氮的消耗存在差异, 且随着土层的加深, 全氮含量逐渐降低。从 0~1000cm 土壤全层看, 苜蓿草地土壤全氮含量均高于荒地及麦田, 比荒地高 $0.90\% \sim 19.92\%$, 比麦田高 $0.43\% \sim 18.34\%$ 。

(四) 不同生长年限苜蓿草地土壤潜在矿化氮量

土壤碱解氮含量是土壤的有效氮指标, 代表土壤供氮强度。为方便理解用土壤潜在矿化氮量进行比较。表 6-22 列出了不同生长年限苜蓿草地在一定土层深度的潜在矿化氮量, 可以看出, 在 0~1000cm 土壤剖面, 所有年限苜蓿草地土壤潜在矿化氮量均高于荒地及麦田, 比荒地高 $9.29\% \sim 95.33\%$, 比麦田高 $0.66\% \sim 79.91\%$; 荒地潜在矿化氮量比麦田高 7.89% 。

表 6-22 土壤潜在矿化氮量

(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理	4 年	6 年	8 年	12 年	14 年	18 年	26 年	荒地	麦田
0~200cm	718.52	797.31	819.41	582.88	660.66	441.45	610.86	309.73	397.09
较荒地的增加率/%	131.99	157.42	164.56	88.19	113.30	42.53	97.23	0.00	28.21
较麦田的增加率/%	80.95	100.79	106.35	46.79	66.38	11.17	53.83	-22.00	0.00
200~600cm	814.98	591.52	852.13	584.99	569.86	417.31	450.79	492.35	453.50
较荒地的增加率/%	65.53	20.14	73.08	18.82	15.74	-15.24	-8.44	0.00	-7.89

续表

处理	4 年	6 年	8 年	12 年	14 年	18 年	26 年	荒地	麦田
较麦田的增加率/%	79.71	30.43	87.90	28.99	25.66	-7.98	-0.60	8.57	0.00
600~1000cm	694.13	540.02	496.57	545.06	438.77	376.29	676.88	484.99	447.81
较荒地的增加率/%	43.12	11.35	2.39	12.39	-9.53	-22.41	39.57	0.00	-7.67
较麦田的增加率/%	55.00	20.59	10.89	21.72	-2.02	-15.97	51.15	8.30	0.00
200~1000cm	1498.85	1129.45	1343.15	1111.01	1004.64	794.04	1141.34	962.10	892.51
较荒地的增加率/%	55.79	17.39	39.61	15.48	4.42	-17.47	18.63	0.00	-7.23
较麦田的增加率/%	67.94	26.55	50.49	24.48	12.56	-11.03	27.88	7.80	0.00
0~1000cm	2534.73	2402.10	2608.99	1975.55	2043.60	1459.74	2052.68	1335.70	1450.18
较荒地的增加率/%	89.77	79.84	95.33	47.90	53.00	9.29	53.68	0.00	8.57
较麦田的增加率/%	74.79	65.64	79.91	36.23	40.92	0.66	41.55	-7.89	0.00

从不同土层深度看,在 0~200cm 土层,苜蓿生长低于 8 年(含 8 年),潜在矿化氮量超过 $710\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;苜蓿生长超过 8 年,潜在矿化氮量低于 $600\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但苜蓿生长至 26 年,潜在矿化氮量增加,超过 $610.86\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;荒地、麦田的潜在矿化氮量远低于苜蓿草地,荒地比苜蓿草地低 $42.53\% \sim 164.56\%$,比麦田低 28.21% 。200~600cm 土壤深层,4 年、6 年、8 年、12 年、14 年潜在矿化氮量较高,超过 $569\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比荒地高 $15.74\% \sim 73.08\%$,比麦田高 $25.66\% \sim 87.90\%$;18 年、26 年较低,比荒地低 $8.44\% \sim 15.24\%$,比麦田低 $0.60\% \sim 7.98\%$ 。在 600~1000cm 土层,4 年、6 年、8 年、12 年、26 年潜在矿化氮量高于荒地与麦田,比荒地增加 $2.39\% \sim 43.12\%$,比麦田增加 $10.89\% \sim 55.00\%$,14 年、18 年分别比荒地、麦田低 $9.53\% \sim 22.41\%$ 、 $2.02\% \sim 15.97\%$ 。

在 200~1000cm 土壤深层,潜在矿化氮量最高的是 4 年,比荒地、麦田分别高 55.79% 、 67.94% ,6 年、8 年和 26 年也较高,超过 $1129\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别比荒地、麦田高 $17.39\% \sim 39.61\%$ 、 $26.55\% \sim 50.49\%$;12 年、14 年潜在矿化氮量为 $1000\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,高于荒地与麦田;土壤潜在矿化氮量最低的是 18 年苜蓿草地,仅 $794.04\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,比荒地低 17.47% ,比麦田低 11.03% 。

三、小结与讨论

(一) 土壤物理性质

土壤容重作为一个表征土壤结构状况的指标,在一定程度上反映了土壤的疏松状况,是一个非常重要的物理指标。土壤容重在不同土层深度呈现规律性的变化:随土层深度的增加,土壤容重逐渐增加,在 20~40cm 土层,达到全层的最大值,至 100cm 土层以下,土壤容重降低且变化幅度较小。主要原因可能是在土壤上层,由于人为的影响对土壤踩踏、压实;而在土壤下层,受人为因素的影响小,同时又有根系的生物松土,因此下层土壤容重低于上层。

苜蓿连续种植 18 年后,土壤容重逐渐变小。可能有以下几方面的原因:在苜蓿生

长过程中,随种植年限的延长,根系分布层次变深,当苜蓿生长到一定年限,根系大量发生,通过根系的穿插、挤压生长,使土壤疏松多孔隙;在苜蓿生长过程中,根系死亡留下的根孔,以及枯枝落叶增加了土壤的有机质,也使土壤疏松而多孔隙;苜蓿生长年限越长,根系下扎越深,对深层土壤的疏松作用越明显,孔隙度越大,使土壤的紧实度变小。

为深入了解土壤物理性状之间的相互影响,研究对主要指标进行了相关分析,结果表明,土壤容重与有机质含量呈极显著负相关($r=-0.8556^{**}$),说明土壤容重的差异一部分由于有机质差异所致。土壤容重与土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量呈极显著负相关,相关系数分别为 $r=-0.9999^{**}$ 、 -0.9217^{**} 、 -0.8649^{**} 。此结论与 Mar 等(2001)、贾树海等(1996)的研究结果一致。这说明土壤孔隙度与土壤持水性能直接取决于土壤容重,间接受土壤有机质的影响。

(二) 土壤有机碳

土壤有机碳对维持土壤养分平衡和提高有效态养分起着非常重要的作用。多数情况下,轮作系统中种植苜蓿不会增加土壤有机碳(Cornpton and Boone, 2002)。Hass 和 Evans(1957)报道,在半湿润区,长期种植苜蓿不会增加土壤有机碳。但 Gupta 和 Reuszer(1967)得出了相反的结论,认为苜蓿种植 7 年以后土壤有机碳增加 25%。本研究中,不同生长年限苜蓿草地土壤有机碳差异极显著,苜蓿草地土壤有机碳比荒地增加 5.6%~18%,此结论与 Gupta 和 Reuszer(1967)的结论一致。

本试验中,有机碳与全氮、全氮与碱解氮之间均呈极显著正相关,表明土壤有机质含量的提高必然导致全氮、碱解氮的提高,这为苜蓿草田管理、合理施肥提供了理论依据。

(三) 土壤全氮

土壤全氮含量与分布受作物根系吸收特征的强烈影响而产生分异。荒地地面裸露,只有较少的杂草,虽然对土壤中养分的吸收少,但每年直接和间接归还到土壤中的有机质来源少,因此土壤全氮含量最低。小麦对土壤养分利用时间短,利用层次浅,主要吸收上层土壤养分,对下层土壤养分吸收少;小麦属于富碳耗氮类作物,对土壤中氮素消耗较多,即使施用化肥,土壤全氮含量仍较低。苜蓿利用共生固氮,固定大气中游离的氮气,增加土壤中的氮源。已有的研究表明,苜蓿每年固定的 N_2 为 $70\sim400\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (Kelner et al., 1996)。因此苜蓿草地土壤全氮含量高于荒地与麦田。但不同生长年限苜蓿草地对土壤氮素的消耗存在差异,苜蓿种植年限少于 6 年(含 6 年),地上部生长旺盛,生物量高,通过枯枝落叶及根系残茬归还到土壤中较多的有机碳源,同时根系分布层次相对较浅,对深层土壤氮素消耗少,因此 0~1000cm 土层全氮含量较高;随种植年限的延长,根系分布层次变深,对深层土壤养分吸收较多,因此土壤全氮含量逐渐降低;苜蓿生长至 18 年以后,生长衰败,根系活力下降,对土壤养分的吸收量减少,同时由于部分根系死亡,从而增加了归还土壤的有机氮量,土壤中也保持较高的全氮含量,因此 18 年、26 年全氮含量高于 12 年。

(四) 土壤潜在矿化氮量

所有生长年限苜蓿草地潜在矿化氮量高于荒地,说明种植苜蓿对土壤矿化氮的增加效应。在600~1000cm土层,26年潜在矿化氮量高于6年、8年、10年、12年、18年与荒地,说明苜蓿主要依靠深层根系吸收土壤中的水分和养分,促进矿化氮的转化。

苜蓿生长超过一定年限,根系活力下降,生物量减少,进入衰败期,对土壤氮素利用强度减少,土壤氮素有一定恢复,但受土壤氮素累计消耗的影响,恢复速度较慢,只能使土壤上层的氮素逐步得到恢复,而深层土壤氮素难以恢复。本研究中,在0~200cm土层,26年全氮、碱解氮含量低于4年、6年,高于12年;在200~1000cm土层,土壤全氮、碱解氮含量在不同生长年限之间差异不大,但深层土壤全氮、碱解氮含量下降。笔者认为,随着生长年限的延长,苜蓿对氮素的利用已由表层逐渐转向对中下层土壤中氮素的吸收利用。

(五) 苜蓿适宜的生长年限

苜蓿生长超过一定年限,根系活力下降,进入衰败期,对土壤养分利用强度减少,土壤养分有一定恢复,但受土壤养分累计消耗的影响,恢复速度较慢,只能使土壤上层的养分逐步得到恢复,而深层养分难以恢复。

从土壤养分综合考虑,苜蓿适宜的生长年限为6年,6年以后苜蓿草地养分含量下降。由于施肥能够延长紫花苜蓿草地的使用年限(魏臻武等,2007),因此在苜蓿生长6年以后,应对苜蓿草地进行合理施肥,在有灌溉条件的地区,在灌溉前,条施或撒施化肥,在没有灌溉条件的地区,在雨季来临前条施化肥,以提高肥料的利用效率。

参 考 文 献

- 鲍士旦. 2002. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 陈洪松, 郝明德, 宋孝玉. 2003. 黄土高原沟壑区农田土壤水分动态变化. 水土保持研究, 10 (1): 92-94.
- 陈一鄂, 刘康. 1990. 渭北旱塬紫花苜蓿的蒸腾强度与水量平衡研究. 水土保持通报, 10 (6): 108-112.
- 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 2005a. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. 林业科学, 41 (2): 37-41.
- 程积民, 万惠娥, 王静. 2005b. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 16 (3): 435-438.
- 杜世平, 王留芳, 龙明秀. 1999. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究. 草业科学, 16 (1): 12-17.
- 樊军, 郝明德, 邵明安. 2004a. 黄土高原沟壑区草地土壤深层干燥化与氮素消耗. 自然资源学报, 19 (2): 202-206.
- 樊军, 郝明德, 邵明安. 2004b. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报, 20 (1): 61-64.
- 范谦. 1983. 农业试验统计方法. 郑州: 河南科学技术出版社: 89-135.
- 符淙斌, 袁慧玲. 2001. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. 科学通报, 46 (8): 691-695.
- 韩仕峰. 1990. 宁南山区苜蓿草地土壤水分利用特征. 草业科学, 7 (5): 47-53.
- 郝文芳, 单长卷, 梁宗锁, 等. 2005. 陕北黄土丘陵沟壑区人工刺槐林土壤养分背景和生产力关系研究. 中国农学通报, 21 (9): 129-135.
- 胡梦君, 刘文兆, 赵姚阳. 2003. 黄土高原农、林、草地水量平衡异同比较分析. 干旱地区农业研究, 21 (4): 15-20.
- 胡小平, 王长发. 2001. SAS基础及统计实例教程. 西安: 西安地图出版社.

- 黄明斌, 杨新民, 李玉山. 2003. 黄土高原生物利用型土壤干层的水文生态效应研究. 中国生态农业学报, 11 (3): 113-116.
- 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 2002. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. 西北植物学报, 22 (4): 817-823.
- 贾树海, 崔学明, 李绍良. 1996. 草原生态系统研究. 北京: 科学出版社.
- 兰小中, 廖志华, 王景升. 2005. 西藏高原濒危植物西藏巨柏光合作用日进程. 生态学报, 25 (12): 3172-3175.
- 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 2004. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响. 中国农业科学, 37 (6): 859-864.
- 李玉山. 2001a. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. 土壤学报, 38 (3): 353-356.
- 李玉山. 2001b. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 16 (5): 432-437.
- 李玉山. 2002. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, 39 (3): 403-411.
- 李裕元, 邵明安. 2005. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究. 应用生态学报, 16 (12): 2321-2327.
- 梁一民, 李代琼, 从心海. 1990. 沙打旺草地草量动态及水分利用研究. 水土保持学报, 4 (3): 71-78.
- 刘刚, 王志强, 王晓岚. 2004. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析. 水土保持研究, 11 (1): 126-129.
- 刘沛松, 李军, 贾志宽, 等. 2005. 宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究. 中国农学通报, 21 (9): 270-274.
- 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 等. 2004. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析. 水土保持学报, 18 (6): 54-67.
- 刘文兆. 2000. 小流域水分行为、生态效应及其优化调控研究方面的若干问题. 地球科学进展, 15 (5): 541-544.
- 潘成忠, 上官周平, 刘国彬. 2006. 黄土丘陵沟壑区退耕草地土壤质量演变. 生态学报, 26 (3): 690-696.
- 邱扬, 傅伯杰, 陈利顶. 2001. 黄土高原地区土壤含水量的空间异质性研究. 应用生态学报, 12 (5): 715-720.
- 石界. 2007. 半干旱区紫花苜蓿地上干物质质量增长动态. 干旱气象, 25 (2): 77-81.
- 隋娜, 李萌, 田纪春, 等. 2005. 超高产小麦品种(系)生育后期光合特性的研究. 作物学报, 31 (6): 808-814.
- 唐启义, 冯明光. 2002. 实用统计分析及其DPS数据处理系统. 北京: 科学出版社.
- 万素梅, 胡守林, 王龙昌, 等. 2004. 不同紫花苜蓿品种根系发育能力的研究. 西北植物学报, 24 (11): 2048-2052.
- 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 2001. 黄土高原丘陵区土地利用与土壤水分的时空关系研究. 自然资源学报, 16 (6): 521-524.
- 王群, 李潮海, 栾丽敏, 等. 2005. 不同质地土壤夏玉米生育后期光合特性比较研究. 作物学报, 31 (5): 628-633.
- 王改兰, 段建南, 李旭霖, 等. 2005. 黄土丘陵区土壤-作物系统氮素特征与管理. 植物营养与肥料学报, 11 (5): 578-583.
- 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 2002. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应. 自然资源学报, 17 (3): 339-344.
- 王建丽, 张永亮, 朱占林, 等. 2006. 杂花苜蓿叶片光合生理生态特性. 草地学报, 14 (2): 138-141.
- 王玉辉, 周广胜. 2000. 松嫩平原盐碱化草地羊草叶片生理生态特性分析. 应用生态学报, 11 (3): 12-19.
- 魏臻武, 符昕, 曹致中, 等. 2007. 苜蓿生长特性和产草量关系的研究. 草业学报, 16 (4): 1-8.
- 项斌, 林舜华, 高雷明. 1996. 紫花苜蓿对 CO_2 倍增的反应: 生态生理研究和模型拟合. 植物学报, 38 (1): 63-71.
- 谢忠凯, 杨振玲, 孙波. 2006. 长白山区新林地人参栽培土壤供氮能力研究及管理. 人参研究, 18 (2): 11-13.
- 许大全, 沈允钢. 1998. 光合作用的限制因子. 北京: 科学出版社.
- 许大全, 徐宝基, 沈允钢. 1990. C_3 植物光合效率的日变化. 植物生理与分子生物学学报, 16 (1): 1-6.
- 杨文治, 邵明安. 2000. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社.
- 杨文治, 田均良. 2004. 黄土高原土壤干燥化问题探源. 土壤学报, 41 (1): 1-6.

- 杨文治, 余存祖. 1992. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社.
- 姚素梅, 康跃虎, 刘海军, 等. 2005. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦光合作用的日变化研究. 农业工程学报, 21 (11): 16-19.
- 张春霞, 郝明德, 李丽霞. 2005. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤碳、氮、磷组分的变化. 草地学报, 13 (1): 66-70.
- 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 2004. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究. 植物营养与肥料学报, 10 (6): 604-607.
- Arshad M A, Lowery B, Grossman B. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 123-141.
- Beate K, Haberland U. 2002. Impact of land use changes on water dynamics-a case study in temperate meso and macroscale river basins. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 619-629.
- Boix F C, Calvo C A, Imeson A C, et al. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 44: 47-67.
- Brown R H, Radcliffe D E. 1986. A comparison of apparent photosynthesis in sericea lespedeza and alfalfa. *Crop Science*, 26 (6): 1208-1211.
- Chen L D, Huang Z L, Gong J, et al. 2006. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau China. *Catena*, 8: 1-9.
- Compton J E, Boone R D. 2002. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 933-943.
- Connor D J. 2004. Designing cropping systems for efficient use of limited water in southern Australia. *European Journal of Agronomy*, 21: 419-431.
- Doming F, Villagarcía L, Boer M M, et al. 2001. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modeling and hill slope runoff measurements. *Journal of Hydrology*, 243: 17-30.
- Ferquhar G D, Sharkey T D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann Rev of plant Physiol*, 33 (1): 317-345.
- Gomez P A, Martinez M M, Albaladejo J, et al. 2000. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *Journal of Hydrology*, 253: 211-226.
- Gupta U C, Reuszer H W. 1967. Effect of plant species on the amino acid content and nitrification of soil organic matter. *Soil Sci*, 104: 395-412.
- Hass H J, Evans C E. 1957. Nitrogen and carbon changes in Great Plains soils as influenced by cropping and soil treatments. *Technical Bulletin*, 1: 164.
- Huser T, Mika J, Lczy D, et al. 1999. Climate change and soil moisture: A case study. *Phys Chem Earth*, 24 (10): 905-912.
- Joanne B, Chen C R, Xu Z H, et al. 2007. Gross nitrogen transformations in adjacent native and plantation forests of subtropical. *Australia Soil Biology & Bio-chemistry*, 39: 426-433.
- Kelner D J, Vessey J K, Entz M H. 1996. The nitrogen dynamics of 1-, 2- and 3-year stands of alfalfa in a cropping system. *Agric Ecosyst Environ*, 64: 1-10.
- Mar B V, Nilda M A, Norman P. 2001. Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern Caldenal area of Argentina. *Soil Sci*, 16 (7): 441-452.
- Misra D K. 1956. Relation of root development to drought resistance of plants. *Indian Agron*, 1: 41-46.
- Murata Y, Iyama J, Honma T. 1965. Influence of air temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern-type forage crops. *Proc Crop Sci Soc (Japan)*, 34: 154-158.
- Parao F T, Paningbatan E Jr, Yoshida S. 1976. Drought resistance of rice varieties in relation to their root growth. *Philippine Crop Sci*, 1: 50-55.
- Rodrigue I. 2000. Ecology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resource Res*,

36 (1):1-9.

Saeed I A M, EI-Nadi A H. 1997. Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa. *Irr. Sci*, 17: 63-68.

Safaa Al-Hamdani, Glenn W T. 1990. Effect of temperature regimes on photosynthesis, respiration, and growth in alfalfa. *Proc OklaAcad Sci*, 70: 1-4.

Shangguan Z P, Zheng S X. 2006. Ecological properties of soil water and effects on forest vegetation in the Loess Plateau. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 13 (4): 307-314.

Wise R R, Sparrow D H, Ortiz-Lopez, et al. 1991. Biochemical regulation during the midday decline of photosynthesis in field grown sunflower. *Plant Sci*, 74: 45-52.

第七章 苜蓿草田轮作土壤环境效应研究

草粮轮作能够充分利用豆科牧草的生物固氮，是一种以用地和养地相结合的农田生物培肥措施，在国内外已有悠久的历史。据《吕氏春秋》记载，公元前 129 年紫花苜蓿被引进中国后，就有了苜蓿与其他粮食作物进行轮作的种植方式（王无怠，1989）。在今天，它又成为现代持续性农业系统中的一个重要组成部分。在水土流失严重、干旱频繁、土壤瘠薄的我国黄土高原半干旱地区，倡导大量种草、实施草田轮作的呼声一直很高（山仑等，1992；李凤民等，2003），认为这是提高粮食生产、增加畜牧业比例和保持水土的纽带和必经步骤。

将豆科牧草——苜蓿引入作物轮作系统的草粮轮作措施，能够改良土壤，培肥地力，增加土壤有机质和氮素，用地与养地相结合，合理的草粮轮作能大量减少化肥的施用量，改善土壤物理性状，增加土壤水稳性团粒结构，降低土壤容重，增加土壤孔隙度，提高土壤持水量；保持水土，防风固沙，减少地表径流，防止水土流失。苜蓿—作物轮作还可改善农田生态环境，苜蓿通过生物脱盐和大量吸水可降低地下水位，改良盐渍化土壤。

第一节 草田轮作试验设计和研究内容

一、试验区概况

（一）自然概况

试验地点设在宁夏海原县贾塘乡的西北农林科技大学和固原市农业科学研究所宁南干旱半干旱试验区。海原县总面积 5489.0km²，是宁夏面积最大的三县之一，也是固原市面积最大的县，回族及少数民族人口占该县的 70%，人多地少，人口密度 66.3 人·km⁻²。丘陵山地占全县土地面积的 80%以上。位于宁夏回族自治区西部，所辖于固原市。地处六盘山北麓，北纬 36°06′40″~37°04′32″，东经 105°09′45″~106°10′00″。年降雨量 350mm，70%以上降水集中在 7 月、8 月、9 月，正好在牧草生长的生育期，有利于牧草生长发育。年蒸发量 2100~2300mm，为平均降雨量的 5~6 倍，干燥度 2.17。平均气温 5~7℃，年平均无霜期 146 天，≥10℃的年均活动积温 2381℃，日照时数达 2706h，适合大农业发展，更适合牧草生长；海拔 1600~1800m，为温凉半干旱偏旱地区。

（二）试验区降水特征分析

试验区年降水情况如图 7-1 所示，2002~2005 年及多年平均降水量分别为 257.7mm、343.9mm、243.7mm、171.3mm 和 350.0mm。

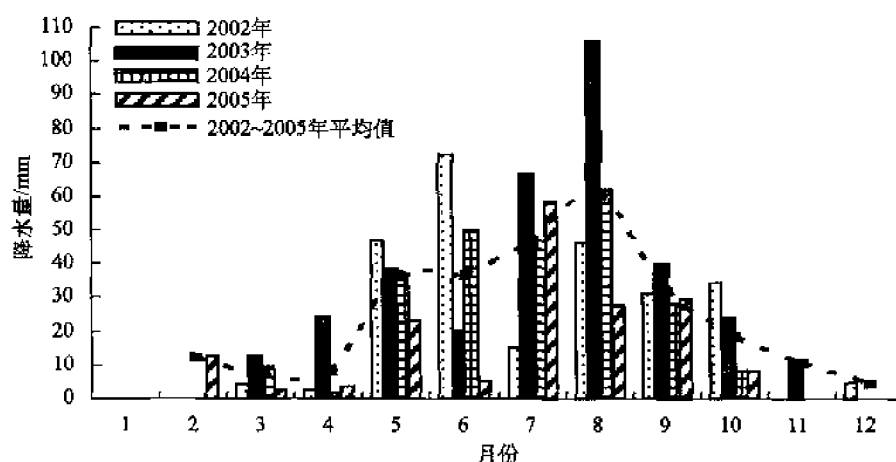


图 7-1 试验区 2002~2005 年逐月降水量分布

年降水量相对变化率 P ：

$$P = \left[\frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \right] \times 100\%$$

式中， R 为降水量； \bar{R} 为年平均降水量。取 $P \geq 25\%$ 为丰水年， $P \leq -25\%$ 为干旱年（黄高宝等，2006）。由此可知，2002 年、2004 年为欠水年，2003 年为丰水年，2005 年为干旱年。

各年降水量呈倒“V”字形分布（图 7-1），且年内雨季降水分布与作物生育期的吻合度差异对作物生长造成很大影响。试验区降水主要分布在 5~9 月，占全年总降水量的 83.83%，冬春季降水比例很小。强降水期出现的早晚极大地影响不同种类作物的产量高低，作物生育关键期干旱缺水是作物减产的主要原因。2003~2005 年轮作春小麦生育期降水量分别为 117.3mm、106.9mm 和 44.9mm，马铃薯和谷子各年生育期降水量分别为 272.6mm、225.8mm 和 148.3mm。尤其 2005 年春小麦处在抽穗灌浆期的 6 月，降雨仅为 5.2mm，各轮作作物全面减产。但这些不影响对 2002~2005 年形成的各个轮作方式间作物水分利用和产量效应之间的对比分析。

二、试验设计

（一）试验设计 I

本试验于 2003~2005 年进行。2002 年选取地势平坦的 10 年生紫花苜蓿草地进行草粮轮作试验，总面积 2490m²。当年苜蓿鲜草产量为 3500kg·hm⁻²。2003 年 3 月 29 日进行翻耕，作为轮作区。另有面积为 90m² 的苜蓿不翻耕保持继续生长，作为对照区。

轮作区设 3 次重复，各重复区面积均为 830m²。翻耕后的轮作区 0~200cm 土壤容重 1.224g·cm⁻³，0~60cm 土层平均有机质含量 14.83g·kg⁻¹、全氮 1.037g·kg⁻¹、碱解氮 55.0707mg·kg⁻¹、全磷 0.660g·kg⁻¹、速效磷 5.167mg·kg⁻¹、速效钾 263.20mg·kg⁻¹，pH 为 8.16。

2003~2005 年在轮作区连续轮作 3 年作物，轮作作物为春小麦（W）、马铃薯（P）

和谷子 (M)。轮作完成后设置了 27 种不同草粮轮作模式。每年春小麦播期为 3 月 21~29 日, 收获期为 7 月 12~17 日, 马铃薯和谷子的播期为 4 月 21~28 日, 收获期为 10 月 5~12 日。春小麦品种为红芒, 马铃薯品种为雪花白, 谷子品种为大同 14 号。各年的轮作作物施肥水平均相同, 播种前均匀撒施, 统一翻耕入土作底肥 (对照区苜蓿不施肥)。第 1 年施 N $86.55\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $106.65\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第 2 年施 N $45.74\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $114.07\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 第 3 年施 N $62.58\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $107.58\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料为尿素 (46%N) 和磷酸二铵 (44% P_2O_5 , 16%N)。

试验完成后共形成 27 种草粮轮作方式, 如下。

第一年的 3 种轮作方式:

苜蓿 (10 年生) → 春小麦 (W, 下简写为麦), 苜蓿 (10 年生) → 马铃薯 (P, 下简写为薯), 苜蓿 (10 年生) → 谷子 (M, 下简写为谷)。

第二年的 9 种轮作方式:

苜蓿 → 麦 → 麦 (WW), 苜蓿 → 麦 → 薯 (WP), 苜蓿 → 麦 → 谷 (WM);

苜蓿 → 薯 → 麦 (PW), 苜蓿 → 薯 → 薯 (PP), 苜蓿 → 薯 → 谷 (PM);

苜蓿 → 谷 → 麦 (MW), 苜蓿 → 谷 → 薯 (MP), 苜蓿 → 谷 → 谷 (MM)。

第三年的 27 种轮作方式为:

苜蓿 → 麦 → 麦 → 麦 (WWW), 苜蓿 → 麦 → 麦 → 薯 (WWP), 苜蓿 → 麦 → 麦 → 谷 (WWM);

苜蓿 → 麦 → 薯 → 麦 (WPW), 苜蓿 → 麦 → 薯 → 薯 (WPP), 苜蓿 → 麦 → 薯 → 谷 (WPM);

苜蓿 → 麦 → 谷 → 麦 (WMW), 苜蓿 → 麦 → 谷 → 薯 (WMP), 苜蓿 → 麦 → 谷 → 谷 (WMM);

苜蓿 → 薯 → 麦 → 麦 (PWW), 苜蓿 → 薯 → 麦 → 薯 (PWP), 苜蓿 → 薯 → 麦 → 谷 (PWM);

苜蓿 → 薯 → 薯 → 麦 (PPW), 苜蓿 → 薯 → 薯 → 薯 (PPP), 苜蓿 → 薯 → 薯 → 谷 (PPM);

苜蓿 → 薯 → 谷 → 麦 (PMW), 苜蓿 → 薯 → 谷 → 薯 (PMP), 苜蓿 → 薯 → 谷 → 谷 (PMM);

苜蓿 → 谷 → 麦 → 麦 (MWW), 苜蓿 → 谷 → 麦 → 薯 (MWP), 苜蓿 → 谷 → 麦 → 谷 (MWM);

苜蓿 → 谷 → 薯 → 麦 (MPW), 苜蓿 → 谷 → 薯 → 薯 (MPP), 苜蓿 → 谷 → 薯 → 谷 (MPM);

苜蓿 → 谷 → 谷 → 麦 (MMW), 苜蓿 → 谷 → 谷 → 薯 (MMP), 苜蓿 → 谷 → 谷 → 谷 (MMM)。

(二) 试验设计 II

试验区人工种植的各年生紫花苜蓿及轮作地面积均在 666.7m^2 以上, 地块邻近, 地势平坦。土壤类型均为黄绵土, 质地轻壤。2004 年 7 月 24~26 日对试验区 4 年生、

7年生、12年生苜蓿地以及10年生苜蓿翻耕后分别轮作了4年、10年和18年粮食作物的农田0~700cm深层土壤水分进行了测定,轮作4年、10年和18年的当季作物或茬口依次为豌豆、糜子和胡麻,轮作期间的作物为马铃薯、春小麦、谷子、糜子、扁豆和胡麻等。2005年8月19~20日又测定了3年生、6年生、10年生苜蓿地和撂荒地0~1000cm的深层土壤水分,同时测定几类不同作物在不同生产力下的农田0~600cm土壤水分。2004年7月24日和2005年8月19日测定前的年内降水量基本相当,分别为128.0mm和124.8mm。土壤含水率测定各重复2次,取平均值,间距20cm·层⁻¹,用重量含水率(%)表示。

苜蓿地土壤剖面水分均在各年刈割第一茬时测定,以常年撂荒地剖面水分为对照。采用常规土钻取样测定土壤湿度,用重量含水率(%)表示,取样间距20cm·层⁻¹。不同生长年限苜蓿地水分测定各重复两次,求平均值。经测定,试验区田间持水量为19.16%。苜蓿地萎蔫湿度3.50%,作物大田萎蔫湿度6.10%。

(三) 试验设计Ⅲ

本试验于2002~2004年进行。2002年10月11日和2004年8月22日分别同期测定了2年生、3年生、6年生和6年生、10年生苜蓿地0~200cm土壤水分动态趋势;2003~2004年每年3月下旬选取3年生、6年生、10年生、18年生和22年生苜蓿样地,面积均在666.7m²以上,测定其0~100cm土层容重、孔隙度及饱和持水量,研究苜蓿地土壤物理性状随生长年限的变化趋势;各年4月28日分别耕翻6年生、10年生(2003年)和22年生(2004年)苜蓿地,面积均为270m²,进行轮作谷子(*Panicum miliaceum*)试验,轮作前后测定0~200cm或0~300cm土壤水分和0~60cm上层各养分含量,研究不同生长年限苜蓿耕层养分动态,以及轮作后的土壤水分恢复和谷子产量效应;在宁南旱农试验区固原杨郎乡陶庄试验点测定了1~12年生苜蓿的产草量(鲜重)和0~500cm土壤湿度(重量含水率)平均值,据此建立函数曲线方程,分析苜蓿取得最大经济效益时的生长年限和水分利用动态趋势;最后将苜蓿地土壤理化性状、苜蓿产草量动态、土壤水分变化,以及轮作谷子产量效应等指标相结合,确定实施草粮轮作时苜蓿耕翻的最佳生长年限。

2003~2004年6年生、10年生和22年生苜蓿轮作谷子品种均为大同14号,在播种期一次性施肥。6年生和10年生轮作谷子施肥水平一致,每公顷施纯N和纯P₂O₅分别为90kg和112.5kg,22年生苜蓿轮作谷子每公顷施纯N和纯P₂O₅分别为45kg和112.5kg。轮作前对6年生、10年生和22年生苜蓿每个样地0~60cm土层随机取样9或10穴,充分混匀装入布袋,带回室内测定养分及pH。收获期测定谷子产量。2003年在6年生和10年生苜蓿后轮作谷子的生育期降水量均为272.6mm,2004年的22年生苜蓿轮作谷子生育期降水量为225.8mm。

三、数据测定和分析方法

(一) 产量测定

各小区作物在收获期全区收获,并折算成公顷产量。马铃薯产量以5:1折粮计。

(二) 土壤水分测定

土壤水分测定采用田间土钻取样,室内烘箱烘干。每年主要在轮作作物生育关键期测定各小区土壤水分,春小麦在播期、拔节期、抽穗灌浆期和收获期,马铃薯在播期、现蕾开花期、薯块膨大期和收获期,谷子在播期、拔节期、抽穗开花期和收获期。同时测定对照苜蓿地水分。测定深度为0~200cm或0~300cm,除0~10cm和10~20cm层外,20cm以下土层测定间隔均为20cm。每小区重复3次,取平均值。

土层湿度用重量含水率(%)表示,储水量用毫米(mm)表示。试验区降水量(mm)实地测得。土壤储水量通过如下公式计算:

$$W=B \cdot H \cdot b \times 10/100$$

式中, W 为土壤储水量(mm); B 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层厚度(cm); b 为重量含水率(%)。

(三) 降雨量测定

降雨量为在试验区设置的降雨量器测得。

(四) 土壤物理性状测定

容重、孔隙度和饱和持水率采用环刀法。

(五) 养分和 pH 的测定

每年各作物播期和收获期对各轮作小区对角线5点取样,取样深度分别为0~20cm、20~40cm、40~60cm土层,按照相同层次混匀自然风干。拿回室内分别过1mm和0.25mm筛,测定养分含量。

有机质为重铬酸钾外加热氧化法,全氮为凯氏定氮法,全磷为酸溶-钼锑抗比色法,碱解氮为碱解扩散法,速效磷用钼锑抗比色法(Olsen法);pH用奥立龙MODEL868酸度计测定。

(六) 土壤酶活性的测定

试验只测定了轮作第三年作物收获期的0~60cm土层混合土样酶活性。脲酶采用奈氏比色法,磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,过氧化氢酶采用容量法,蔗糖酶采用二硝基水杨酸比色法,其活性单位分别以 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot 24\text{h} \cdot 37^\circ\text{C})$ 、 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot 24\text{h} \cdot 37^\circ\text{C})$ 、 ml/g 和 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot 24\text{h} \cdot 37^\circ\text{C})$ 表示。酶活性测定参照关松荫(1986)《土壤酶及其研究法》一书。

(七) 数据分析

采用Excel 2003整理、作图和dps7.05软件进行单因素方差分析(ANOVA)。各指标均值为算术平均值。

四、研究内容

在现有试验条件和前人研究的基础上,结合已有的研究资料,期望通过试验研究出适合宁南地区农牧业发展的最优化草粮轮作模式,拟从土壤水分和养分角度对草田轮作进行以下方面的研究。

(1) 不同生长年限的苜蓿 0~700cm 和 0~1000cm 深层土壤水分动态分布规律,以及草粮轮作对土壤水分恢复的可行性。

(2) 根据苜蓿草地土壤水分消耗动态和产草量动态,建立方程求导,确定达到最佳的经济效益和生态效益的苜蓿生长年限。

(3) 苜蓿耕翻后,3 年轮作期间不同草粮轮作方式的 0~200cm 和 0~300cm 土壤水分时空动态。

(4) 不同轮作方式下轮作作物 0~60cm 土壤养分动态变化。

(5) 轮作结束后,不同轮作方式茬口土壤养分和酶活性的差异性。

(6) 三种轮作作物的优化选择及其在轮作中的次序排列研究。

(7) 比较 27 种不同草粮轮作方式的作物总产量、水分恢复效应、水分利用效率、降水生产效率以及氮素利用效率。

(8) 分析确定同时具备生态效益、经济效益和社会效益的最佳草粮轮作模式。

第二节 宁南旱区苜蓿土壤干层水分时空动态规律

苜蓿形成的土壤干层问题已经引起人们足够的重视(郭忠升和邵明安,2003;李玉山,2002),但是对苜蓿土壤大厚度深层次(700~1000cm)的水文动态进行连续年份的测定和研究甚少。本节结合苜蓿深层土壤水分的分布和动态变化,对苜蓿地 0~1000cm 水分剖面分布进行了层次划分,以撂荒地对照,重点研究苜蓿草地深层水分利用和土壤干层水分动态,为宁南山区农业结构调整和土壤有限水资源的持续利用提供理论依据。

一、苜蓿地土壤剖面水分分布特征

根据两年各生长年限苜蓿土壤深层水分实测结果(图 7-2,图 7-3),对其剖面水分分布特征进行分析。

随着苜蓿生长年限的增加,土壤干燥化程度加剧。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿 0~700cm 土层平均含水率分别为 5.30%、5.22%和 5.01%,其中 0~200cm 分别为 6.77%、7.08%和 7.89%,200~700cm 分别为 4.63%、4.18%和 4.15%;2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~800cm 平均含水率分别为 6.26%、5.60%和 5.27%,其中 0~200cm 分别为 6.92%、8.42%和 8.02%,200~800cm 分别为 6.41%、4.57%和 4.15%。可见,0~200cm 土层均保持较高的湿度,随着苜蓿生长年限增加,200~800cm 土层范围干燥化加剧。

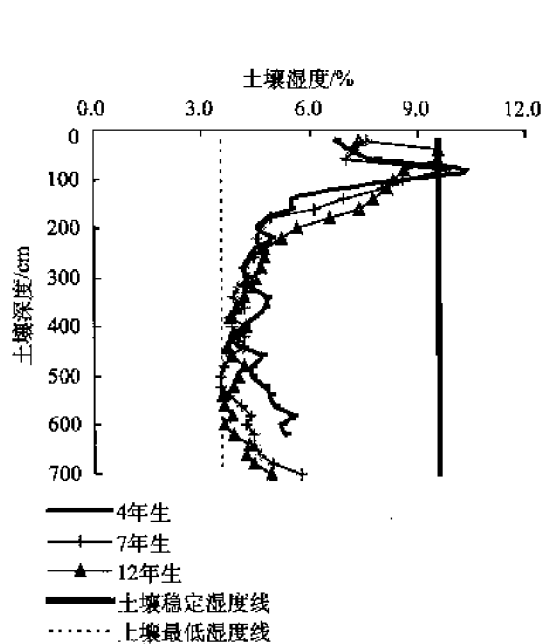


图 7-2 不同生长年限苜蓿 0~700cm 土壤剖面水分分布

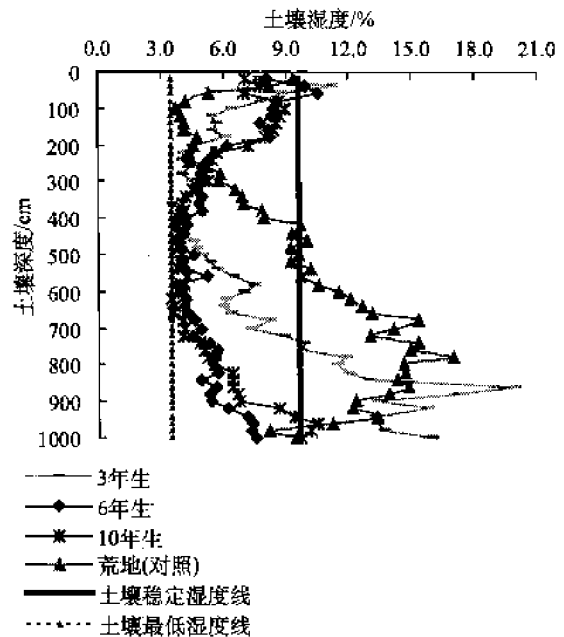


图 7-3 不同生长年限苜蓿 0~1000cm 土壤剖面水分分布

各苜蓿地水分在土壤垂直剖面上有着基本相似的分布特征，且随生长年限增加呈有规律变化。各年生苜蓿地 0~100cm 表土层由于受降水的直接作用，总体上保持较高的湿度。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿 0~100cm 土层平均含水率分别为 8.11%、8.04% 和 8.69%，2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿 0~100cm 土层平均含水率分别为 8.40%、9.10% 和 7.86%。100~300cm 土层水分随着苜蓿生长年限的增加，有增加趋势。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.92%、5.26% 和 5.92%，2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.83%、6.43% 和 6.77%。而 300~800cm 范围内土壤湿度随生长年限增加呈干燥化趋势。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地 300~700cm 土层平均含水率分别为 4.83%、4.13% 和 4.00%，2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 300~800cm 土层含水率分别为 6.41%、4.57% 和 4.15%。800~1000cm 土层水分开始下降，但到一定年限后有明显反弹，2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 14.73%、6.25% 和 8.09%，6~10 年期间含水率上升了 1.84%。

从各年生苜蓿地土壤剖面湿度最低点可看出根系深度位置及其随生长年限的动态变化。图 7-2、图 7-3 中显示，2004 年的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿根系深度分别约在 420cm、500cm 和 540cm 左右，2005 年的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿根系深度分别在 360cm、580cm 和 620cm 左右。两年测定结果均表明，3~12 年生苜蓿根系大致分布在 360~620cm 深度范围，在 3 年生以后，苜蓿根系已达 300cm 以下，对 300cm 以下土层水分消耗强烈，且随生长年限增加，不断下扎延深，反映了根系的向水性。

以常年撂荒地土壤剖面同土层水分为对照，可看出各生长年限苜蓿根系的吸水深

度。如图 7-2、图 7-3 所示, 2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿根系耗水深度均超过 700cm, 2005 年 3 年生苜蓿耗水深度为 840cm, 6 年生超过 1000cm, 10 年生为 960cm。以 2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地为例, 0~300cm 土层湿度均高于撂荒地, 其中 0~100cm 土层湿度高低依次为 6 年生 (9.10%) > 3 年生 (8.40%) > 10 年生 (7.86%) > 撂荒地 (6.18%), 100~300cm 土层湿度依次为 10 年生 (6.77%) > 6 年生 (6.43%) > 3 年生 (4.83%) > 撂荒地 (4.72%), 这可能与地面覆盖度大小和根系耗水深度变化有关; 300~800cm 土壤湿度均低于撂荒地, 依次为撂荒地 (11.05%) > 3 年生苜蓿地 (6.37%) > 6 年生苜蓿地 (4.55%) > 10 年生苜蓿地 (4.15%), 显示出苜蓿根系对土壤水分的剧烈消耗; 800~1000cm 土层湿度依次为 3 年生苜蓿地 (15.05%) > 撂荒地 (12.50%) > 10 年生苜蓿地 (8.15%) > 6 年生苜蓿地 (6.29%), 说明 3 年生苜蓿根系耗水深度还未达该层。可见, 各年生苜蓿地 300cm 以上土层湿度基本上高于对照撂荒地同层湿度, 300cm 以下土层湿度远低于撂荒地。

二、苜蓿土壤剖面水分时空动态规律

由连续两年对不同生长年限苜蓿土壤水分的实测结果显示, 随着生长年限增加, 苜蓿地土壤剖面水分变化遵循一定规律。各年生苜蓿 0~100cm 土层经雨季降水补充, 同时又受到强烈蒸发, 土层湿度保持在 7.86%~9.10%。苜蓿生长的第 3~第 12 年, 随着生长年限增加, 对 100~300cm 层水分消耗逐渐减少。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.92%、5.26%和 5.92%, 2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.83%、6.43%和 6.77%。对 300cm 以下深层土壤水分消耗量增加。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地 300~700cm 土层平均含水率分别为 4.83%、4.13%和 4.00%, 2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 300~800cm 土层含水率分别为 6.41%、4.57%和 4.15%。与上述苜蓿根系随生长年限变化的深度大小一致。由于 3 年生苜蓿地和撂荒地 800~1000cm 土层湿度分别为 14.73%和 12.61%, 而 6 年生苜蓿地此层湿度仅 6.25%, 说明 3 年生苜蓿还未消耗利用到该土层水分, 而 6 年生时苜蓿耗水深度已远远超过 1000cm。结合田间长势认为, 约 6 年生苜蓿进入生长旺盛期, 土壤水分蒸腾强烈, 耗水深度最大, 土壤水分严重消耗。在生长的第 7~第 12 年, 由于苜蓿生长衰败, 形成的生物量和对水分的耗用量逐渐减少, 在天然降水补充作用下, 土壤上层水分有增加趋势。800~1000cm 土层在 6 年生后得到土壤深层储水的调节作用, 湿度有增加现象, 由 6 年生的 6.25%上升到 10 年生的 8.09%。这可能由于苜蓿蒸腾拉力作用, 在土壤垂直深度方向形成水势梯度差, 1000cm 以下未被利用的土壤储水克服重力势向上移动补偿, 引起了 800~1000cm 土层湿度的增加。

三、苜蓿地干层特征及土壤剖面水文层次的划分

(一) 苜蓿土壤干层

土壤干层是位于降雨入渗补给深度以下, 因林草植被过度消耗深层储水导致土壤水

分负平衡而形成的长期存在的干燥化土层,是黄土高原地区半干旱和半湿润环境条件下出现的一种特殊的水文现象(杨文治等,1998)。大多研究者认为土壤干层湿度范围应以土壤稳定湿度为上限,稳定萎蔫系数为下限(王力等,2000;杨文治,2001)。土壤稳定湿度是指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下,通常旱地土壤能够长期维持的土壤湿度,其值为田间持水量的50%~75%(杨文治和邵明安,2000;李玉山,2001a)。杨文治和邵明安(2000)认为,土壤稳定湿度可根据无雨或少雨的干旱季节测得的土壤湿度系列加以判断,其值为表现出稳定趋势的深层土壤湿度,此时悬浮水在蒸发过程中失去了连续性并停止向蒸发面运移。而图7-3中常年撂荒地土壤剖面440~560cm土层水分分布就具有此特征,尽管裸露土壤的水分在源源不断地被蒸发,向地面运移而散失,但是该层含水率稳定在9.17%~9.99%,平均为9.58%,以此为拐点,其下层湿度呈直线增加趋势。因此本试验区土壤稳定湿度为9.58%,

由于2004~2005年实测苜蓿土壤稳定凋萎湿度为3.50%,土壤干层湿度应在3.50%~9.58%含水率范围。由图7-2、图7-3所示,苜蓿土壤干层范围为3.50%(最低含水率线)到9.58%(土壤稳定湿度线)之间的部分。2004年测定的4年生、7年生和12年生苜蓿干层在土壤中的分布深度均可超过700cm,2005年测定的3年生、10年生苜蓿的干层分布深度分别达720cm和940cm,6年生苜蓿干层深度可超过1000cm。随生长年限的延长,苜蓿土壤0~800cm干层湿度一直减小,厚度先增加后减小。

(二) 土壤剖面水文层次的划分

综合两年苜蓿土壤剖面的水分分布特征及其随生长年限的动态变化,可将苜蓿草地0~1000cm剖面划分为4个层次:降水蒸发易变层(0~100cm)、降水继续扩散层(100~300cm)、根系耗水干燥层(300~800cm)和深层储水调节层(800cm以下)。以上各层次均可划入干层范围,不同层次的水分动态如图7-4和图7-5所示。

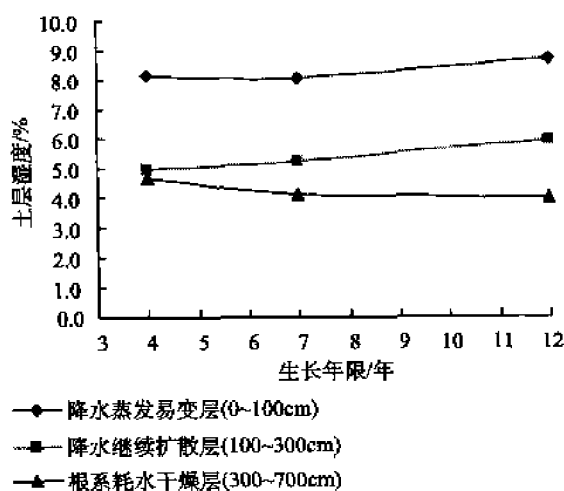


图7-4 4年生、7年生和12年生苜蓿地不同土层水分动态分布

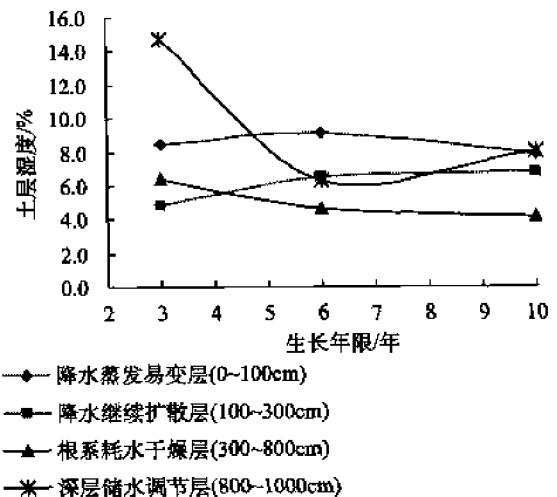


图7-5 3年生、6年生和10年生苜蓿地不同土层水分动态分布

降水蒸发易变层 (0~100cm): 各年生苜蓿地 0~100cm 土层水分在生长季内变化较大, 随降水和蒸发出现明显的干湿波动, 相对保持较高的湿度, 两年测定的含水率为 7.86%~9.10%。同时易受外界气候因素的直接影响, 湿度高低与苜蓿生长年限不相关。2004 年和 2005 年测定前该土层受到较相等的降水和同样气候环境下的蒸发影响, 所以测定时的土壤湿度变化不大, 保持在 8.00% 左右。各年生苜蓿地 0~100cm 土层平均含水率都高于对照的常年撂荒地 (6.18%), 地面有苜蓿植被覆盖可有效抑制水分蒸发, 与有关结论 (沈禹颖等, 2004) 一致。

降水继续扩散层 (100~300cm): 各年生苜蓿地 100~300cm 土层含水率均随苜蓿生长年限的增加而增加。其中 100~200cm 在苜蓿 3~4 年生后湿度高于大田凋萎湿度 5.90%, 2004 年的 4 年生、7 年生、12 年生苜蓿该层湿度分别为 5.44%、6.12%、7.10%, 2005 年的 3 年生、6 年生、10 年生苜蓿该层湿度分别为 5.44%、7.73%、8.18%; 而 200~300cm 土层湿度虽有增加现象但仍都低于大田凋萎湿度 5.90% (朱显谟, 1989)。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿 200~300cm 土层平均含水率分别为 4.39%、4.40% 和 4.74%; 2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地该土层平均含水率分别为 4.21%、5.13% 和 5.36%。只有在丰水年的雨季遇较大而持续的降水后才有可能恢复到稳定湿度以上, 使干层得到消除。然而在宁南山区这种降水概率极为罕见。对照撂荒地 100~200cm 和 200~300cm 土层平均含水率分别为 4.30% 和 5.14%。可见, 各年生苜蓿地 100~200cm 土层湿度均高于对照的常年撂荒地同层湿度, 进一步说明地面植被的抑制蒸发作用; 各年生苜蓿地 200~300cm 土层湿度除 10 年生苜蓿地外, 均低于对照撂荒地, 说明苜蓿对此层土壤水分的消耗量大于降水入渗的补充量。总体而言, 随着苜蓿生长年限增加, 降水继续扩散层 (100~300cm) 湿度有上升趋势。可能随着苜蓿生长年限增加, 形成生物量减小, 对土壤耗水量减少, 0~100cm 土层未能完全利用的水分或非生长季的少许降水继续下渗到 120~300cm 土层, 引起湿度稍有上升。

根系耗水干燥层 (300~800cm): 土壤剖面含水率最低点为苜蓿生长的强耗水深度, 反映苜蓿根系的位置。各年生苜蓿的强耗水深度均在 300~800cm 范围内, 且逐年加深。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿强耗水深度分别在 420cm、500cm 和 540cm, 各深度对应的最低含水率分别为 3.77%、3.50% 和 3.57%; 2005 年测定的 3 年生、6 年生、10 年生苜蓿强耗水深度分别在 360cm、460cm、620cm 处, 对应的最低含水率分别为 3.56%、3.82%、3.52%, 最低湿度都趋向于 3.50%。随生长年限的增加, 苜蓿对该层土壤水分的消耗由浅层向深层延伸, 呈干燥化趋势。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地 300~700cm 土层平均含水率分别为 4.83%、4.13% 和 4.00%, 2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 300~800cm 土层含水率分别为 6.41%、4.57% 和 4.15%, 苜蓿对该层土壤水分的消耗强度也表现为先强后弱。根系耗水干燥层 (300~800cm) 由于降水无法入渗, 只存在苜蓿的蒸腾耗水作用, 随苜蓿生长年限的增加, 干燥化程度不断加剧。所以, 该层土壤一旦形成干层, 将成为永久性干层。

深层储水调节层 (800~1000cm): 苜蓿生长到一定年限, 800~1000cm 深层土壤湿度有反弹现象。苜蓿在 3~6 年生期间 800~1000cm 深层土壤湿度由 14.73% 下降到

6.25%，10年生时增加到8.09%，基本回升到降水蒸发易变层（0~100cm）含水率水平，其中900~1000cm土层湿度为9.65%，已经恢复到土壤稳定湿度9.58%以上。这说明深层储水调节层形成的干层在苜蓿生长发生衰退后，通过土壤深层储水的补充，可上升到稳定湿度之上，达到对干层的缓解与消除。然而，在重力作用下，这种土壤毛管上升水向上运移补充的高度是有限的。

从苜蓿土壤剖面水分的垂直分布看，降水蒸发易变层（0~100cm）湿度最高，2004年和2005年测定的各年生苜蓿该层平均含水率分别为8.28%和8.45%；深层储水调节层（800~1000cm）较高，2005年平均含水率为7.17%；降水继续扩散层（100~300cm）次之，平均含水率分别为5.37%和6.01%；根系耗水干燥层（300~800cm）最低，2005年各年生苜蓿该层平均含水率为5.04%。其中300~700cm土层平均含水率2004年和2005年分别为4.25%和4.59%。

四、小结

随着苜蓿生长年限的增加，土壤总体上干燥化程度加剧。2004年测定的4年生、7年生和12年生苜蓿0~700cm土壤平均含水率分别为5.30%、5.22%和5.01%，2005年测定的3年生、6年生和10年生苜蓿地0~800cm土壤平均含水率分别为6.26%、5.60%和5.27%。

不同土层湿度变化趋势不同。3年生以后，苜蓿根系已达300cm以下，随生长年限增加，对300~800cm土层范围水分消耗强烈，4~12年生苜蓿地300~800cm土层湿度均在5%以下；而对300cm以上土层水分消耗减缓，其中0~100cm土层湿度受降水、蒸发和苜蓿田间覆盖度的影响较大，保持相对较高湿度，100~300cm土层湿度随生长年限延长，湿度均有所增加。

根据多年生苜蓿土壤水分分布特征和动态变化，将其剖面划分为4个层次：降水蒸发易变层（0~100cm）、降水继续扩散层（100~300cm）、根系耗水干燥层（300~800cm）和深层储水调节层（800~1000cm以下）。

苜蓿在6年前，根系耗水深度和干层厚度逐年迅速增加，土壤干燥化加剧；6年生苜蓿进入生长旺盛期，土壤水分蒸腾强烈，耗水深度和干层厚度均最大，超过1000cm，0~1000cm平均含水率仅5.73%；7~12年生，苜蓿生长衰退，耗水深度和干层厚度有所减小，但300cm以下干燥化仍在加剧，300~700cm干层含水率仅维持在4%左右的水平，800~1000cm土层受深层储水的补充，湿度有回升现象。在降水补充作用下，300cm以上土层湿度随生长年限增加而增加。

五、讨论

（一）苜蓿地垂直剖面水文的层次划分问题

韩仕峰（1990）将黄土区0~800cm土壤水分分布特征划分为速变层（0~20cm）、活跃层（20~100cm）、次活动层（100~200cm）和相对稳定层（200cm以下）4个层次。杜世平等（1999）将宁南紫花苜蓿地0~300m土层土壤水分垂直分布划分为3个层次：活跃

层(0~70cm)、次活跃层(70~150cm)、相对稳定层(150~300cm)。本试验在以上研究的基础上,根据两年测定的6种不同生长年限苜蓿地土壤剖面水分分布特征和动态规律,将其分为4个层次:降水蒸发易变层(0~100cm)、降水继续扩散层(100~300cm)、根系耗水干燥层(300~800cm)和深层储水调节层(800~1000cm)。

苜蓿吸水湿度超过1000cm,降水入渗深度在100cm左右,与有关研究(李玉山,2002)的结论基本一致。由于同时又受到强烈的蒸发损失,所以把0~100cm层称为“降水蒸发易变层”。100~300cm土层水分随生长年限增加而稍有增加,可能由于在苜蓿非生长季或7~9月雨季未被苜蓿完全利用的降水下渗所致。而且,在苜蓿3年生以后,根系吸水层主要集中在300cm以下,对300cm以上水分利用量相对减少,当苜蓿进入衰退期,形成生物量减小,耗水量减少,加上降水的补充作用,使得100~300cm土层湿度增加,所以称为“降水继续扩散层”。3~12年生苜蓿根系基本分布在300cm以下,苜蓿耗水深度与根系分布关系密切(韩仕峰,1990),随生长年限增加根系下扎深度加深,导致300~800cm土层干燥化加剧,所以把该层称为“根系耗水干燥层”。6~10年生800~1000cm土层水分有回升现象,所以把该层称为“深层储水调节层”(800~1000cm)。这两层水分变化特点均与程积民等(2004)在宁南苜蓿地的深层水分测定结果一致。

(二) 苜蓿土壤剖面水分时空动态变化

不同层次土壤干层深度水分的增加,主要还是要通过合理利用有限的降水资源来完成。降水是宁南半干旱偏旱区主要的水源。有研究表明黄土高原每年降水补给土壤的深度主要在1.5m土层以上,在特别湿润年份,降水入渗补给深度达3.0m(袁建平和蒋定生,2001;王恒俊,1991;孙长忠和黄宝龙,1999),杨文治和余存祖(1992)认为在旱作农区作物耗水在土层上部形成的暂时性低湿层,一般通过当年降水可得到补偿、恢复。

苜蓿地通过降水下渗和扩散的最大临界深度为300cm。根据试验区实地测定结果,随苜蓿年限增加,300cm以上土层湿度有增加趋势。这可能是由于随着苜蓿生长年限的延长,根系主要耗水区向300cm以下深层延伸,对300cm以上浅土层耗水强度相对减少所致,与0~100cm土层未能完全利用的水分或非生长季短期休闲的少量降水继续扩散到100~300cm土层有关。有研究认为(孙鸿良,2003),黄土高原4年生苜蓿生长期降水补充深度仅90cm,即使翻耕后休闲4个月降水入渗深度也只有150cm。而对300cm以下土壤水分消耗加剧,该层土壤干燥化严重,难以有效恢复,和王志强等(2003)在宁南的研究结论一致。所以,苜蓿地300cm以下土壤一旦形成干层,依靠降水难以恢复。800~1000cm土层水分在苜蓿6~10年生有恢复趋势,甚至可将含水率增加到降水蒸发易变层(0~100cm)的湿度水平(7.86%)之上,这与程积民等(2005)在宁南的研究结果一致。由于降水入渗深度为100cm左右,继续渗漏的临界深度为300cm,不可能越过深厚的300~800cm干层而使800~1000cm层水分得到有效恢复(樊军等,2004),并且黄土高原地下水埋深达60~100m(李玉山,2001a,2001b),也排除了地下水的影响。因此,只能是1000cm以下未曾利用到的深层“土壤水库”储水向上补充的结果。可以认为,由于土体中水分的运动遵循经典热力学的普遍规律,由高势能方向向低势能方向不停地运动,土

壤没有利用到的深层储水以毛管水的形式沿干层造成的水势梯度差（杨文治等，1998），顺着苜蓿根系的蒸腾拉力，克服重力向上层低水势区缓慢运移补充。但由于受重力的抵消作用，向上补充的高度是有限的。从更深层次的整个土壤系统角度来看，这实质上是土壤水分的一个有限调节，不能算作真正意义上的干层水分恢复途径，降水垂直入渗是苜蓿干层水分得到恢复的主要来源（李玉山，2001a，2001b）。

第三节 草粮轮作对苜蓿土壤干层水分恢复的可行性分析

多年生苜蓿在土壤中形成深厚的干层将严重影响后茬作物对水分的需求和产量的提高。近年来，苜蓿土壤干层问题引起了人们足够的重视，并对此提出了多种解决途径：通过灌溉补水、降低土壤蒸发耗散量、控制植物群落密度和生长年限，以及采用与禾本科牧草浅混播等方式，减缓和防止干土层的进一步发展（陈洪松等，2005），而对苜蓿草地干土层有限水分持续利用并具有生物恢复作用的草粮轮作措施研究报道较少。发展禾本科和豆科牧草相结合及科学合理的轮作制度，使生态用水与蓄水相结合，全面保护和有效利用有限的水资源，是半干旱区人工草地建设与发展应该深入探讨的问题（程积民等，2004）。本节在研究苜蓿草地土壤干层的形成和消长动态规律的基础上，探讨草粮轮作对于土层水分的生态用水及恢复效果，为农地资源的合理、持续利用提供科学依据。

一、紫花苜蓿土壤干层特征

本试验把土壤剖面含水率低于土壤稳定湿度 9.58% 且在雨季不能得到恢复的土层范围称为土壤干层。大多数研究者认为土壤干层湿度上限应低于土壤稳定湿度（李玉山，1983，2001a）。土壤稳定湿度是指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下，通常旱地土壤能够长期维持的土壤湿度，其值为田间持水量的 50%~75%（杨文治，2001）。由于该试验区田间持水量为 19.16%，轻壤土的土壤稳定湿度相当于田间持水量的 49%~54%（杨文治，1985），按 50% 计算，土壤稳定湿度约为 9.58%。

根据上述土壤干层划分标准，2004~2005 年测定的不同生长年限苜蓿土壤干层分布在低于含水率 9.58% 的土壤稳定湿度线左侧部分。2004 年 7 月测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿土壤干层均深达 700cm 以下，2005 年 8 月测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿土壤干层深度下限分别为 720cm、1000cm 以下和 940cm。由此可见，各年生苜蓿地 0~700cm 土层范围基本上均属于土壤干层，6 年生苜蓿土壤干层最深，可达 1000cm 以下。随着苜蓿生长年限的增加，干土层厚度先增加后减小。

二、苜蓿土壤干层水分恢复标准

对照的作物农田也同样存在着土壤干层。经测定，试验区低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地 0~600cm 土壤湿度分别为 10.11%、9.37%、9.07%、9.13% 和 8.76%，平均为 9.29%。0~600cm 土层剖面最低含水率分别为 6.10%、6.23%、6.36%、6.83% 和 6.36%，基本趋近于 6.10%，所

以农田的土壤干层分布在 6.10%~9.58% 的含水率线。不同种类作物、不同生产力下农田的 0~600cm 土壤水分分布如图 7-6 所示。

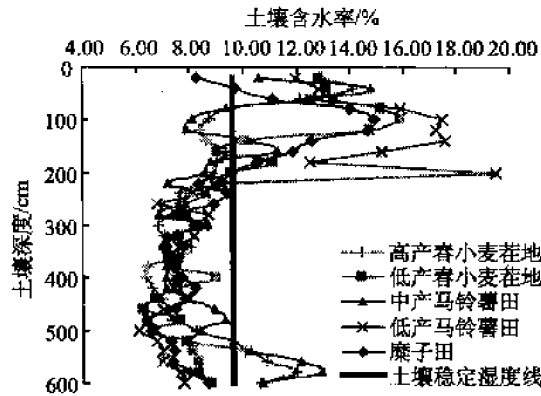


图 7-6 不同作物农田 0~600cm 土壤水分分布

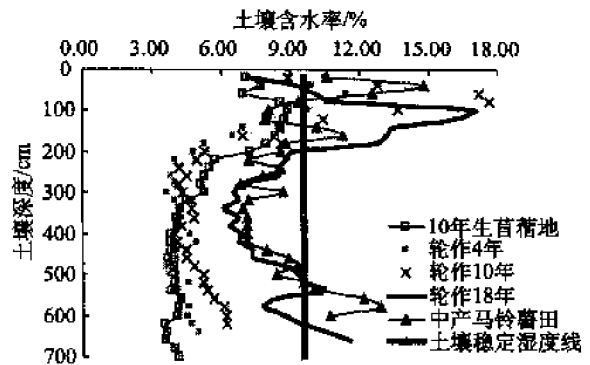


图 7-7 10 年生苜蓿轮作不同年份作物后土壤水分动态分布

各类农作物耗水深度主要在 0~200cm (李玉山, 1983), 且耗水强度远低于苜蓿, 能够积蓄降水, 因而农田 200cm 以上土层基本上不存在干层。图 7-6 中低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地 0~200cm 土壤湿度依次由高到低分别为 15.27%、12.50%、11.72%、10.21% 和 10.18%，平均 11.98%，均高于土壤稳定湿度 9.58%。且同一种类作物产量越高，0~200cm 土层湿度越低。

各类农田土壤干层均分布在 200cm 以下，除中产马铃薯田和高产春小麦收获地干层深度下限分别在 500cm 和 520cm 深度外，其他农田干层深度均超过 600cm。而且作物种类不同，田间干层厚度不同。低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地土壤干层范围分别在 220cm 以下（含 220cm，下同）、160cm 以下、200cm 以下、180~500cm 和 80~520cm。同一作物产量越低，200~600cm 土层湿度也越低。低产马铃薯田、低产春小麦收获地、糜子田、中产马铃薯田和高产春小麦收获地各类农田 200~600cm 土壤平均湿度分别为 7.53%、7.81%、7.74%、8.59% 和 8.05%。

与农田相比，具有极强蒸腾耗水能力的苜蓿降低了土壤湿度，扩大了土壤干层的深度与厚度。由图 7-6、图 7-7 和图 7-8 比较可知，在农田种植苜蓿后，土壤水分被强烈消耗，土壤干层的湿度范围由原先的 6.10%~9.58% 扩大到 3.50%~9.58%，相应地扩大了土壤干层的深度与厚度。各类农田 0~600cm 土层平均湿度为 8.76%~10.11%，而 2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~600cm 平

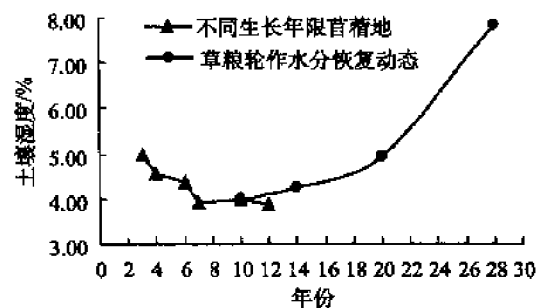


图 7-8 苜蓿地 300~600cm 土壤干层水分变化趋势和草粮轮作恢复效应

均湿度分别为 5.28%、5.04% 和 5.36%，2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~600cm 平均湿度分别为 5.50%、5.82% 和 5.57%。因此，农田土壤湿度可作为草粮轮作对苜蓿干层水分的恢复指标。

三、草粮轮作对土壤干层恢复效果

草粮轮作能够缓解苜蓿干层干燥化加剧的状态，并能有效恢复苜蓿干层水分。图 7-7 为 10 年生苜蓿地及其轮作 4 年、10 年和 18 年后的 0~700cm 农田土壤剖面水分分布。10 年生苜蓿地 0~600cm 土壤湿度为 5.57%，其中 0~200cm 土层湿度为 8.02%，200~600cm 土层湿度为 4.35%。轮作 4 年、10 年和 18 年粮食作物后的 0~600cm 土壤湿度分别为 5.58%、6.88% 和 9.19%，其中 0~200cm 土层湿度分别为 8.39%、11.01% 和 11.90%，200~600cm 土层湿度分别为 4.17%、4.81% 和 7.84%。这说明草粮轮作使土壤水分自上而下得到恢复，作物轮作年份越长，土壤水分恢复效果越好。

轮作 18 年时，0~600cm 土壤湿度均高于糜子田（9.07%）、中产马铃薯田（9.13%）和高产冬小麦茬地同土层湿度（8.76%），接近于低产冬小麦茬地同层湿度（9.37%），低于低产马铃薯田同层湿度（10.11%）。其中 0~200cm 土层湿度高于同土层的糜子田（11.72%）、中产马铃薯田（10.21%）和高产冬小麦茬地湿度（10.18%）；200~600cm 土层湿度均高于低产马铃薯田（7.53%）、糜子田（7.74%）和低产冬小麦茬地同层湿度（7.81%），低于中产马铃薯田（8.59%）和高产冬小麦茬地同土层湿度（8.05%），且剖面内各土壤测点湿度均高于农田最低含水率 6.10%，说明经过草粮轮作 18 年后，苜蓿生长期间形成干燥化土层的湿度已基本恢复到农田水平。

草粮轮作使苜蓿地干层范围和厚度减小。图 7-6、图 7-7 和图 7-8 显示，2004 年的 12 年生苜蓿地干层深度和厚度均远大于 700cm，2005 年的 10 年生苜蓿地干层深度和厚度均深达 940cm，而轮作 18 年时土壤干层范围已减小到 200~520cm，厚度仅 320cm，甚至小于对照的中产马铃薯农田。对照的中产马铃薯农田干层范围为 180~520cm，厚度 340cm，说明干层明显得到消除。

四、苜蓿土壤干层水分变化趋势及草粮轮作恢复速度

为便于比较分析，本试验统一用 300~600cm 土层湿度动态变化来表示苜蓿土壤干层水分随生长年限的变化趋势以及草粮轮作对苜蓿干层水分的恢复效果。由于 0~300cm 表层土壤含水量受降水蒸发等气象条件影响较大，这种变化并不能反映土壤含水量长期的动态变化规律。而 300cm 以下土层不直接受降水随机性变化的影响，可反映苜蓿生长过程中对干层水分的消耗规律，且降水对土壤水分的恢复是由上而下进行的，所以 300~600cm 土层水分一旦能恢复到正常农田水平，就意味着 0~300cm 也已基本恢复。图 7-8 反映了 2004~2005 年测定的苜蓿地 300~600cm 干层水分随生长年限的动态变化及 10 年生苜蓿经草粮轮作 4 年、10 年和 18 年后（图 7-8 中对应的 14 年、20 年和 28 年）的农田水分恢复动态。

随着苜蓿生长年限的增加，300~600cm 土壤干层湿度逐年下降，土壤整体干燥化程度加剧。由图 7-8 可看出，苜蓿 3~7 年生，300~600cm 土层湿度急剧下降，由

4.97%减小到 3.90%，年均降低 0.24%；7 年生以后，该层湿度维持在含水率为 4.00%的极干燥化状态，7 年生、10 年生和 12 年生苜蓿该层含水率分别为 3.90%、4.01%和 3.89%，均低于当地苜蓿凋萎湿度 4.5%（李军等，2007）。可见，7 年生之后，苜蓿的生长仅依靠 300cm 以上土层的当年降水。到 12 年生时苜蓿土壤水分已极为匮乏，田间地上部分生长严重衰退，产草量极低。有关研究（韩仕峰，1990）认为，宁南山区苜蓿 10 年生以后，多数趋于生理衰败，加之深层水分的枯竭，生物产量极低。

10 年生苜蓿经过草粮轮作 4 年、10 年和 18 年，300~600cm 干层湿度由 4.01%分别增加到 4.25%、4.94%和 7.84%，年均恢复速度分别为 0.06%、0.07%和 0.16%，说明干层一旦形成，水分不易恢复，随着轮作年份增加，恢复速度逐渐加快。轮作 18 年时，该土层湿度已高于低产马铃薯田（7.28%）、糜子田（7.50%）和低产冬小麦茬地（7.67%）同土层湿度，仅次于中产马铃薯田（8.85%）和高产冬小麦茬地（8.22%）同土层湿度。因此，10 年生苜蓿经过草粮轮作的生物修复作用，大约需要 18 年可使土壤干层水分恢复到农田状态。

五、讨论

（一）苜蓿地土壤深层水分的自然恢复现象

随着苜蓿生长年限的增加，土壤干燥化程度加剧。这与有关研究结论一致。李玉山（2002）通过在陕西长武的长期定位试验观测，苜蓿地整个剖面各层次土壤湿度以类似的速率逐年降低。韩仕峰（1990）对宁夏固原岷岷的 1~12 年生苜蓿地土壤水分实测结果表明，随着苜蓿生长年限的增加，0~5m 土壤湿度由 1 年生的 8.9%下降到 12 年生的 6.1%。

然而，苜蓿生长到一定年限发生衰退后，深层土壤水分有恢复现象。这与程积民等（2005）在宁南旱区固原头营梁的试验结果基本一致。程积民试验认为随着紫花苜蓿种群的衰败，土壤含水量有一定恢复。苜蓿 6 年生时 600~800cm 土壤水分有所恢复，7~12 年生时 400~800cm 土壤水分有所恢复，但幅度均不大。在半干旱地区，10 年生苜蓿退化草地土壤水分的自然恢复过程一般需 5 年。随着草地的退化，其 0~800cm 的土壤水分可自然恢复到种植紫花苜蓿之前的水平。研究认为土壤水分的恢复是受地下水影响的结果。而根据本试验测定，苜蓿在 6~10 年生仅在 800~1000cm 土层水分有较大恢复，该层土壤湿度由 6 年生的 6.25%恢复到 10 年生的 8.09%，干层深度由 6 年生的 1000cm 以下可减小到 10 年生的 920cm。苜蓿在 6 年生后发生退化，12 年生时干层深度仍在 700cm 以下，0~800cm 土壤水分并未得到自然恢复。苜蓿生长期间 300~800cm 土层干燥化加剧，300cm 以下干层将长期存在，而且降水入渗深度最大仅为 300cm。所以，尽管种植苜蓿后土壤渗透性好，但降水不可能透过 300~800cm 的深厚干层而使 800cm 以下深层水分得到补充，这一点与樊军等（2004）的结论一致，况且黄土高原地下水埋深达 60~100m（李玉山，2001b），埋藏较深，也排除了地下水的影响，可以认为是“土壤水库”的深层储水向上补充的结果。杨文治等（1998）研究认为，土体中水分运动同样遵循经典热力学的普遍规律，由高势能方向向低势能方向不停

地运动。本研究认为,深层土壤储水被苜蓿消耗后储水量有限,且受重力作用,向上补充调节的深度是有限的,不可能使0~800cm土壤水分得到全部恢复。从更深层次的整个土壤系统角度看,这实质上是土壤水分的内部调节过程,不是真正意义上的苜蓿干层水分恢复途径。降水入渗才是使苜蓿土壤干层水分恢复的唯一来源(李玉山,2001b)。

(二) 草粮轮作措施对苜蓿地干土层水分恢复效应

在同等降水条件下,不同植物对土壤水分的消耗强度不同。苜蓿地0~200cm土层均为干层,而农田0~200cm土层湿度均高于田间稳定湿度。杨文治(2001)认为,在旱作农区作物耗水在土层上部形成的暂时性低湿层,一般通过当年降水可得到补偿、恢复,与本试验结论一致。但在高产作物参与种植下,农田降水渗深以下土壤水分消耗较多,该土层湿度稳定在较低的水平,易形成土壤干层,这也是农田作物产量低而不稳、易产生波动的主要原因(李玉山,2002)。

在宁南山区,苜蓿草地和农田由于土壤物理蒸发和植物蒸腾作用,均存在土壤干层。紫花苜蓿与大田作物的凋萎系数分别为4.5%(李军等,2007)和5.9%(朱显谟,1989),土壤稳定湿度为9.58%,各年生苜蓿土壤剖面最低含水率达到凋萎湿度以下,趋近于3.50%,不同类型农田的土壤剖面最低含水率趋近于6.10%。在农田种植苜蓿后,土壤干层湿度范围由原先的6.10%~9.58%扩大到3.50%~9.58%,土壤干层厚度和深度也相应加厚加深。山仑等(1992)和刘忠民等(1993)在宁南试验认为,随着苜蓿种植年限的加长,主要吸水层下移,土壤上层水分可逐渐得到恢复,苜蓿耕翻后可轮作一年生浅根系的草谷子作物,王志强等(2003)也认为,紫花苜蓿翻耕后种植1年生农作物水分还可得到一定的恢复。本试验区各年生苜蓿地0~100cm土层由于直接受降水补充保持了较高湿度,干湿变化与苜蓿生长年限变化不相关,可进行草粮轮作。而王俊等(2004)试验发现生长超过10年的苜蓿草地0~200cm土壤水分持续下降,即使轮作谷子也不能使水分恢复。

本试验中草粮轮作可使测定深度内0~600cm土壤水分恢复到农田水平,且轮作年份越长,土壤各个层次水分恢复效果越好。10年生苜蓿轮作4年、10年和18年后的农田0~600cm土层湿度分别为5.58%、6.88%和9.19%,其中200cm以上土层水分得到了较大恢复,轮作4年、10年和18年后的农田0~200cm土层湿度分别为8.39%、11.01%和11.90%,轮作10年以后均超过土壤稳定湿度9.58%,经过18年轮作后,土壤水分基本恢复到农田水平。王俊等(2004)在甘肃省榆中县的试验也证明合理轮作对解决苜蓿种植导致的土壤水分亏缺问题具有重要作用。苜蓿地的水分恢复同时与试验区的气象条件、土壤特性和降水格局有关。

六、小结

随着苜蓿生长年限的增加,干土层深度与厚度先增加后减小。3年生苜蓿干土层深度为720cm,6年生时最深可达1000cm以下,10年生时为920cm。3~12年生苜蓿地0~700cm土层基本上均属于土壤干层范围。

随苜蓿生长年限增加,0~800cm土层湿度不断降低,一定年限后800~1000cm土

层湿度有明显恢复现象。2004 年测定的 4 年生、7 年生和 12 年生苜蓿地 0~700cm 土层平均含水率分别为 5.30%、5.22%和 5.01%；2005 年测定的 3 年生、6 年生和 10 年生苜蓿地 0~800cm 土层湿度分别为 6.26%、5.60%和 5.27%；800~1000cm 土层湿度分别为 14.73%、6.25%和 8.09%。

300cm 为苜蓿地降水下渗的最大临界深度。在苜蓿生长期间，300cm 以下的土壤干层一旦形成，将长期存在，7~12 年生苜蓿 300~700cm 土层湿度仅维持在 4.0%左右。

草粮轮作可使苜蓿生长形成的干土层水分得到有效恢复。农田种植苜蓿后，土壤干燥化加剧，土壤剖面最低含水率临界线由 6.10%下降到 3.50%，干层厚度增加；10 年生苜蓿地轮作 18 年粮食作物后，土壤湿度基本恢复到农田水平，干层厚度也接近农田，且轮作年份越长，降水下渗深度越大，土壤各层次水分恢复效果越好。

第四节 宁南旱区草粮轮作系统中紫花苜蓿适宜利用年限研究

草粮轮作能够以苜蓿生产带动畜牧业和粮食的产业化，促进农业增长方式的转变，优化产业结构（赵凤岐等，2007），是农牧业可持续发展的主要实现形式。如果苜蓿地倒茬时间太早，不能取得较高的经济效益，倒茬时间太晚，深厚的土壤干层水分又很难尽快恢复。在草粮轮作系统中，为了取得较高的苜蓿产草量和粮食产量，又能使苜蓿地土壤水分通过作物轮作后尽快恢复，从而保证整个系统经济效益和生态效益的协调、统一和持续发展，关键在于确定合理的苜蓿翻耕轮作年限。本节在研究多种苜蓿地土壤理化性状动态变化的基础上，通过不同生长年限苜蓿的草粮轮作试验，比较其土壤水分恢复效果及轮作作物的产量效应，并结合苜蓿产草量动态和土壤水分利用状况，从整个草粮轮作周期的系统角度，将生态效益、经济效益和社会效益相结合，研究确定草粮轮作系统中苜蓿耕翻轮作的最适宜年限，为农地资源的合理、高效、持续利用提供科学依据。

一、苜蓿生长期间土壤环境的改善

（一）苜蓿生长对土壤理化性状的影响

3 年生、6 年生、10 年生、18 年生、22 年生苜蓿地有关理化性状测定结果如表 7-1 所示。

苜蓿在 3~22 年生，随着年限增加，土壤容重和 pH 减小，土壤孔隙度和饱和持水率增加。容重年均减小 $0.011\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，土壤孔隙度年均增加 0.42%，饱和持水量年均增加 0.74%。3 年生苜蓿土壤容重与 10 年生之后的容重差异显著（ $P < 0.05$ ），与 18 年生后的差异达极显著（ $P < 0.01$ ）；10~22 年生苜蓿土壤孔隙度与 3 年生的差异显著（ $P < 0.05$ ），18~22 年生与 3 年生的差异达极显著（ $P < 0.01$ ）；18~22 年生苜蓿土壤饱和持水率与 3~10 年生的差异显著（ $P < 0.05$ ），与 3 年生差异极显著（ $P < 0.01$ ）。

表 7-1 不同生长年限苜蓿地土壤理化性质

项目	3 年生	6 年生	10 年生	18 年生	22 年生
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$1.355 \pm 0.052 \text{Aa}$	$1.268 \pm 0.090 \text{ABab}$	$1.224 \pm 0.073 \text{ABbc}$	$1.175 \pm 0.095 \text{Bbc}$	$1.142 \pm 0.073 \text{Bc}$
土壤孔隙度/%	$48.87 \pm 1.96 \text{Bc}$	$52.17 \pm 3.41 \text{ABbc}$	$53.65 \pm 2.76 \text{ABab}$	$55.65 \pm 3.57 \text{Aab}$	$56.90 \pm 2.77 \text{Aa}$
饱和持水率/%	$37.36 \pm 1.79 \text{Bb}$	$41.88 \pm 5.43 \text{ABb}$	$42.12 \pm 5.70 \text{ABb}$	$49.75 \pm 7.59 \text{Aa}$	$51.53 \pm 6.34 \text{Aa}$
pH	—	$8.25 \pm 0.06 \text{Aa}$	$8.17 \pm 0.05 \text{Ab}$	—	$8.16 \pm 0.03 \text{Ab}$
有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	$14.50 \pm 0.51 \text{Ab}$	$14.86 \pm 0.91 \text{Ab}$	—	$16.10 \pm 0.57 \text{Aa}$
碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	$49.00 \pm 2.46 \text{Bb}$	$55.07 \pm 1.37 \text{Bb}$	—	$60.02 \pm 2.88 \text{Aa}$
速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	$6.11 \pm 1.38 \text{Aa}$	$5.17 \pm 1.00 \text{ABb}$	—	$4.50 \pm 1.75 \text{Bb}$

注：土壤容重、孔隙度和饱和持水率均为 0~100cm 土壤测定值；pH、有机质、碱解氮和速效磷含量均为 0~60cm 土层平均值。同一行大小写字母分别表示差异达极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 水平。

土壤理化性状得到改善，土壤盐碱化程度缓解。苜蓿在 6~22 年生，0~60cm 土层有机质含量增加了 $1.60 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，碱解氮含量增加了 $11.02 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，速效磷由 6 年生的 $6.1 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减小到 22 年生的 $4.5 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，pH 下降了 0.09。22 年生苜蓿土壤有机质和碱解氮与 6 年生、10 年生的差异显著 ($P < 0.05$)，6 年生苜蓿土壤 pH 和速效磷含量与 10 年生、22 年生的差异显著 ($P < 0.05$)，尤其是 6 年生与 22 年生的速效磷含量差异达极显著水平 ($P < 0.01$)，因而苜蓿翻耕轮作作物时要配施适量磷肥。

(二) 不同生长年限苜蓿地 0~200cm 土壤水分动态趋势

由于宁南旱区苜蓿旺长期一般在 5~6 年，衰退期在 10 年以后 (韩仕峰, 1990)，所以本试验重点研究了 6 年生和 10 年生苜蓿土壤水分分布特征 (图 7-9, 图 7-10)。

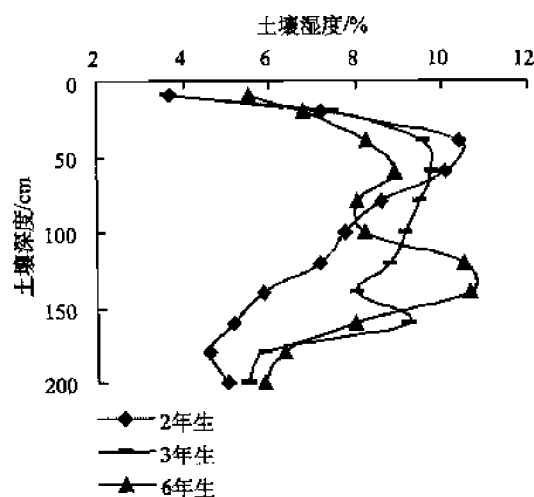


图 7-9 2 年生、3 年生、6 年生苜蓿地 0~200cm 土壤水分分布 (2002 年)

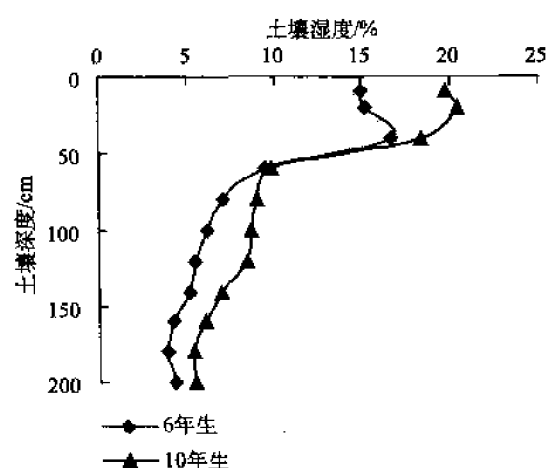


图 7-10 6 年生、10 年生苜蓿地 0~200cm 土壤水分分布 (2004 年)

随苜蓿生长年限延长, 0~200cm 土壤储水量增加, 100~200cm 增幅较大。2002 年同期测定的 2 年生、3 年生和 6 年生苜蓿地 0~200m 土层平均含水率分别为 6.86%、7.83%和 7.91%, 其中 0~100cm 土层湿度分别为 7.95%、8.16%和 7.61%, 100~200cm 土层湿度分别为 5.54%、7.45%和 8.26%。2004 年同期测定的 6 年生和 10 年生苜蓿地 0~200cm 土壤平均湿度分别为 8.41%和 9.74%, 其中 0~100cm 湿度分别为 11.57%和 12.46%, 100~200cm 湿度分别为 4.61%和 6.47%。可见 0~100cm 湿度受外界气候条件影响较大, 测定时间不同波动较大, 100~200cm 较能准确反映土壤湿度随苜蓿年限增加而增加的变化趋势。图 7-9 和图 7-10 表明, 苜蓿在 2~6 年生和 6~10 年生 0~200cm 土壤平均含水率分别增加了 1.05%和 1.33%, 水分恢复量分别约为 14.69mm 和 25.16mm, 可能是苜蓿根系不断下扎深层吸水, 而减少了对上层水分的消耗。尤其旺长期以后 0~200cm 水分恢复较多, 一年生农作物主要利用该土层水分(冷石林等, 1996), 这为草粮轮作的可行性奠定了基础。

二、不同生长年限苜蓿轮作后土壤水分恢复效果及产量效应

(一) 草粮轮作下的土壤水分恢复

轮作谷子后, 6 年生、10 年生苜蓿 0~200cm 和 22 年生苜蓿 0~300cm 土壤水分变化如图 7-11~图 7-14 所示。

2003 年 6 年生、10 年生苜蓿经过草粮轮作后土壤水分均得到不同程度的恢复。6 年生苜蓿轮作谷子后, 0~200cm 土壤水分由 209.54mm 增加到 338.45mm, 恢复量为 128.91mm; 10 年生苜蓿地轮作谷子后, 0~200cm 土壤水分由播期的 217.38mm 增加到收获期的 313.7mm, 恢复量为 96.32mm。而 6 年生苜蓿生长到 10 年生的 4 年期间, 0~200cm 土壤水分仅增加了 25.16mm。可见, 草粮轮作处理下该层土壤水分恢复速度远高于苜蓿持续生长的自然恢复速度。由图 7-13 显示, 2004 年的 22 年生苜蓿地轮作谷

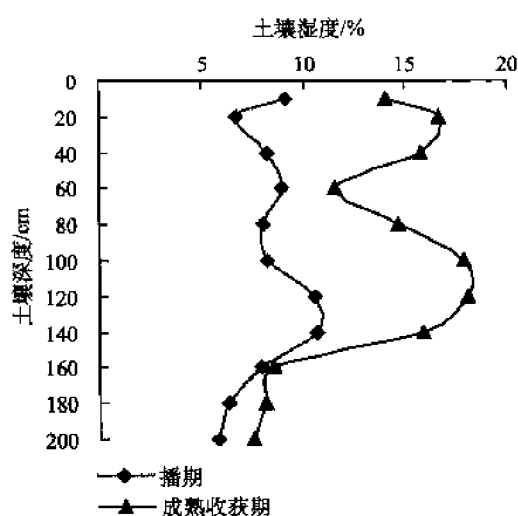


图 7-11 6 年生苜蓿轮作谷子后
0~200cm 土壤水分恢复

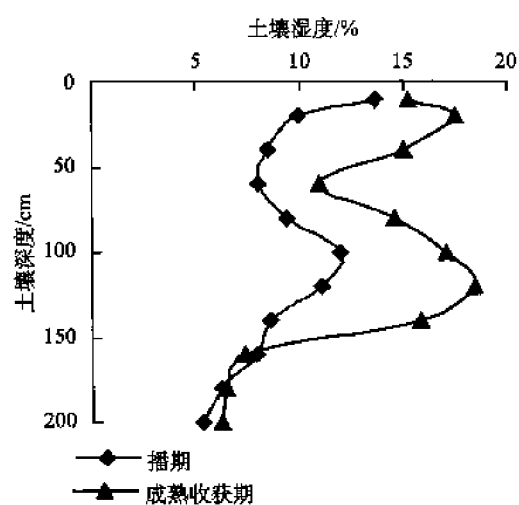


图 7-12 10 年生苜蓿轮作谷子后
0~200cm 土壤水分恢复

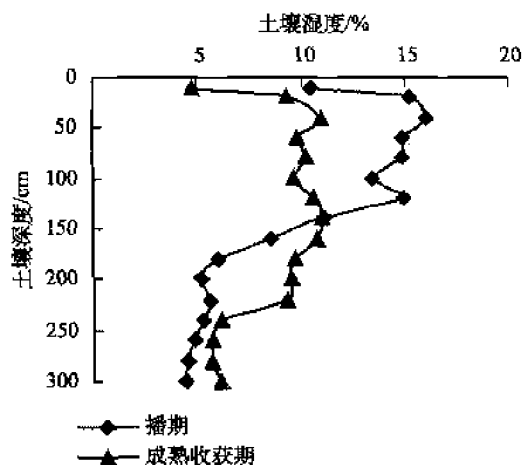


图 7-13 22 年生苜蓿轮作谷子后
0~300cm 土壤水分变化

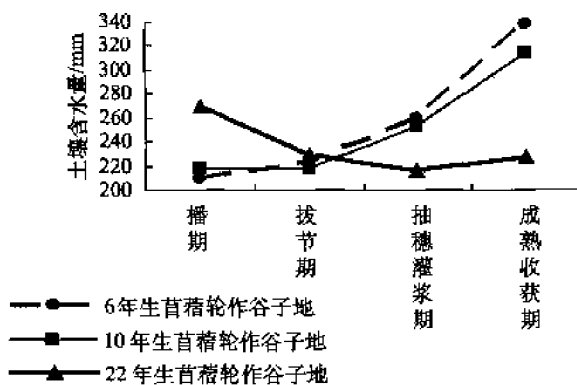


图 7-14 不同生长年限苜蓿轮作谷子各生育期
0~200cm 土壤水分动态

子后土壤水分没有恢复反而降低, 0~200cm 土壤水分由播种前的 269.63mm 减少到谷子收获时的 227.08mm, 减少量为 42.55mm, 0~300cm 减少量为 23.94mm, 与 6 年生、10 年生轮作谷子地水分恢复量差异显著。所以, 对苜蓿实行草粮轮作的年份越早, 土壤水分恢复效果越好。

草粮轮作促进 200cm 以下土层水分得到恢复。22 年生苜蓿经过草粮轮作后, 谷子收获期 140cm 以下土壤水分与播种期相比有较明显的增加趋势, 其中 200~300cm 土壤水分增加了 18.61mm (图 7-13); 由图 7-11、图 7-12 显示, 6 年生和 10 年生苜蓿轮作谷子后 200cm 均表现出恢复趋势。有研究认为, 苜蓿持续生长导致 200cm 以下形成的干层将长期存在 (於凤安, 1996), 而经过草粮轮作后, 土壤水分向深层入渗, 200cm 以下土壤水分得到不同程度的恢复。

(二) 轮作谷子地水分-产量效应

从各年生苜蓿轮作谷子的生育期 0~200cm 土壤水分动态变化来看 (图 7-14), 6 年生和 10 年生苜蓿轮作谷子后, 0~200cm 土壤水分均呈较大恢复趋势, 恢复量分别为 63.06mm 和 55.22mm, 6 年生苜蓿轮作谷子地水分恢复量稍大于 10 年生轮作地, 而 22 年生苜蓿轮作谷子后 0~200cm 土壤水分下降了 42.55mm。这说明苜蓿生长年份过长, 轮作作物后保水能力差, 不利于农地水分平衡。

表 7-2 显示, 6 年生苜蓿轮作谷子的经济产量和水分利用效率 (WUE) 均最高, 分别为 $1725.95\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12.0116\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与 10 年生和 22 年生苜蓿轮作谷子之间的差异性显著 ($P < 0.05$), 6 年生苜蓿轮作谷子的经济产量分别比 10 年生和 22 年生苜蓿轮作的谷子高 $240.15\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $165.20\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, WUE 分别比 10 年生和 22 年生苜蓿轮作谷子高 $3.5891\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.1955\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$; 22 年生苜蓿轮作谷子生育期耗水量最多, 为 268.35mm, 与 6 年生和 10 年生苜蓿轮作谷子之间差异显著 ($P < 0.05$), 6 年生苜蓿轮作谷子生育期耗水量最少, 为 143.69mm, 比 10 年生和 22 年生苜蓿轮作谷子分别少 32.51mm 和 124.66mm。

表 7-2 不同生长年限苜蓿轮作前后 0~200cm 土壤水分变化和谷子产量效应

草粮轮作 方式	播种期土壤 储水量/mm	收获期土壤 储水量/mm	生育期降 水量/mm	生育期耗 水量/mm	生育期水分 增减量/mm	经济产量 (kg·hm ⁻²)	WUE (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
6 年生苜蓿→ 谷子	209.54± 6.75b	338.45± 16.04a	272.6	143.69± 9.29 b	128.91± 9.29 a	1725.95a	12.0116± 0.7783a
10 年生苜蓿→ 谷子	217.38± 12.47 b	313.78± 6.53 a	272.6	176.20± 19.01 b	96.40± 19.00 a	1485.80b	8.4325± 0.9150 b
22 年生苜蓿→ 谷子	269.63± 13.22 a	227.08± 7.52 b	225.8	268.35± 5.70 a	-42.55± 5.70b	1560.75b	5.8161± 0.1236 b

注：同一列不同字母表示差异性在 5%水平上显著。

由此可见，实施草粮轮作的苜蓿生长年限越短，土壤水分恢复效果越明显，经济产量和 WUE 越高。反之，苜蓿生长年限越长，轮作作物的 WUE 较低，不利于土壤水分的恢复，同时，苜蓿生长衰退后产草量很低，0~200cm 土壤水分恢复缓慢，浪费农业资源。

三、草粮轮作中苜蓿耕翻轮作年限的确定

(一) 宁南山区 1~12 年生紫花苜蓿产草量动态特征

在宁南旱农试验区固原杨郎乡陶庄试验点测定的 1~12 年生苜蓿的产草量和 0~500cm 土壤湿度动态变化特征如图 7-15 所示。

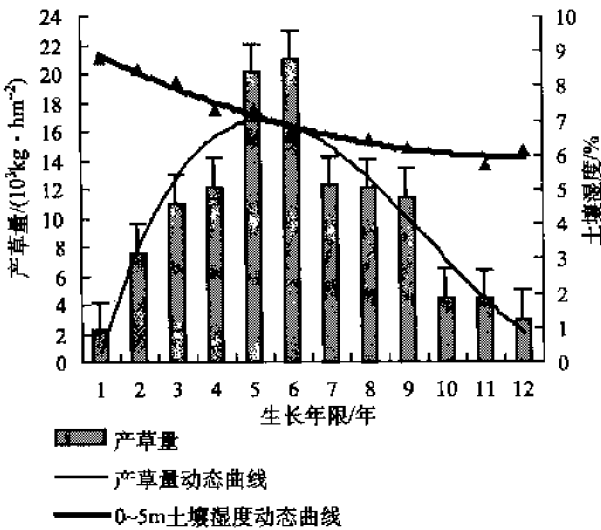


图 7-15 1~12 年生苜蓿产草量及 0~5m 土壤水分动态

1~12 年生苜蓿产草量基本呈正态分布。1~4 年生苜蓿产草量逐渐增加，5~6 年生苜蓿产草量最高，7 年生之后产草量逐渐下降，10 年生后草地严重衰退，12 年生时产草量仅 3000kg·hm⁻²。1~12 年生苜蓿产草量随生长年限动态变化关系可拟合为三

次曲线方程:

$$Y = 0.0524X^3 - 1.4965X^2 + 11.34X - 9.0868 \quad R^2 = 0.8387$$

式中, Y 为苜蓿产草量; X 为生长年限。

根据苜蓿 1~12 年的产草量可作出总产量 (TPP)、平均产量 (APP) 和边际产量 (MPP) 随生长年限变化的动态趋势图, 如图 7-16 和图 7-17 所示。

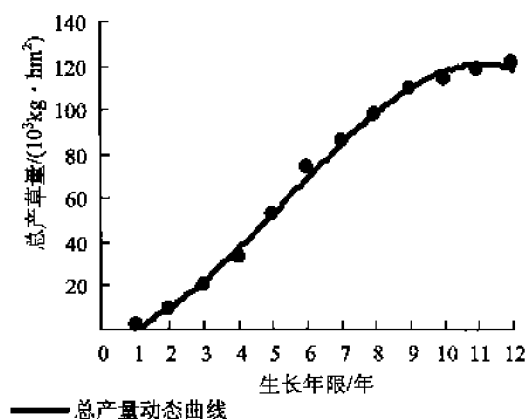


图 7-16 苜蓿总产量动态

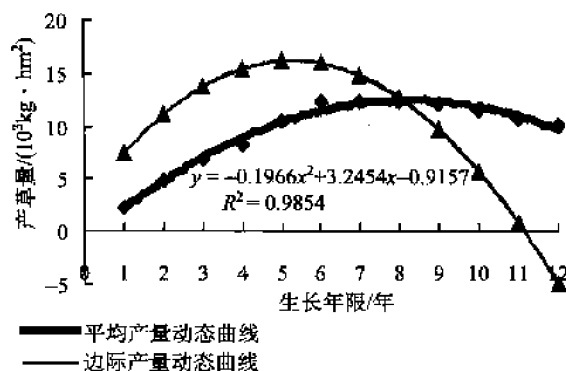


图 7-17 1~12 年生苜蓿平均产量及边际产量动态

TPP、APP 和 MPP 随生长年限变化的拟合曲线方程如下:

$$\text{TPP}; Y = -0.1575X^3 + 2.5047X^2 + 2.9272X - 4.6791 \quad R^2 = 0.9967$$

$$\text{APP}; Y = -0.1966X^2 + 3.2454X - 0.9157 \quad R^2 = 0.9854$$

$$\text{MPP}; Y = -0.4725X^2 + 5.0094X + 2.9272 \quad R^2 = 1$$

式中, Y 表示产草量 (10^3 kg/hm^2), X 为苜蓿生长年限。

根据导数的几何意义, 大约在第 4.0 年为总产量上升的拐点, 第 11.2 年时总产草量最高, 此时总产草量等于 $121\,024 \text{ kg/hm}^2$; 最高平均产草量出现在第 8.3 年, 为 $12\,477.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 最高边际产量在第 5.3 年, 为 $16\,204.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 即第 5 年至第 6 年为苜蓿的旺盛生长阶段, 经济效益最高。

第 8.3 年时边际产量等于平均产量, 即图 7-17 中两曲线的交叉点, 之后二者逐年下降, 边际产量在 11.2 年时为 0。此后边际产量转为负值, 总产量下降, 为不合理生产阶段 (侯军岐, 1993), 因而, 单独从苜蓿产草量角度考虑, 取得最大经济效益的生长年限应小于 11 年生。

(二) 苜蓿地 0~5m 土壤水分动态特征

由图 7-15 显示, 1~3 年生该土层平均含水率为 8.3%~8.5%, 从 5~6 年生开始维持在低湿度水平, 7~12 年生土壤水分严重亏缺, 接近该区农田土壤凋萎湿度 5.9% (朱显谟, 1989), 11 年生仅 5.7%, 低于农田凋萎湿度, 说明苜蓿土壤水分逐年减少, 5~6 年生以后苜蓿生长仅依靠当年降水, 当年降水又难以及时下渗补充其需求 (李玉

山, 2002)。苜蓿各年生土壤水分动态变化可拟合为二次曲线方程:

$$Y = 0.024X^2 - 0.5796X + 9.4304 \quad R^2 = 0.9746$$

式中, Y 为各年生苜蓿 0~500cm 土壤平均含水率; X 为苜蓿生长年限。

由曲线求导得出, 6.0 年生为水分急剧下降的拐点, 12.1 年生为水分最低点。随着苜蓿生长年限的延长, 土壤 0~200cm 土层湿度有增加趋势, 因而推断 200cm 以下土壤水分干燥化程度逐年加剧, 与有关结论一致 (刘忠民等, 1993)。

由于水分是旱区农业生产的首要限制因素 (冷石林等, 1996), 也是确定苜蓿耕翻轮作年限的关键。结合以上分析结果, 为了使整个草粮轮作系统取得最佳经济效益和生态效益, 既要求苜蓿取得较高的总产草量, 又要求土壤水分不至于消耗太多, 能保证土壤中留下较足量的水分来满足轮作作物的正常生长需求, 从而达到苜蓿和粮食作物双丰收, 保持农地土壤水分平衡, 维持农业生产的可持续发展, 苜蓿实行轮作的最佳生长年限应为 5~6 年生。

四、小结

(1) 随着苜蓿生长年限的延长, 土壤理化性状得到改善。0~60cm 土壤有机质增加, pH 降低, 土壤氮素增加, 0~100cm 土壤容重减小, 孔隙度增大, 持水能力增强, 0~200cm 土壤湿度增加, 为轮作浅根系作物生长创造了良好的土壤环境。而 0~60cm 土壤磷素含量减少, 轮作作物时要配施足量磷肥。

(2) 苜蓿轮作的年份越早, 土壤水分恢复效果越好。6 年生和 10 年生苜蓿地轮作谷子后, 0~200cm 土壤水分恢复量分别为 128.9mm 和 96.32mm, 22 年生苜蓿轮作后水分反而降低了 42.55mm, 说明苜蓿生长年限越长, 草粮轮作后越不利于水分的恢复。

(3) 从草粮轮作系统的总产量和土壤水分的持续利用方面综合分析, 6 年生是苜蓿总产草量的最高峰期, 又是 0~500cm 土壤水分下降的转折期, 轮作谷子产量和 WUE 最高; 6 年生、10 年生和 22 年生苜蓿地轮作谷子产量分别为 $1725.95\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1485.80\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1560.75\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, WUE 分别为 $12.0116\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.4325\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5.8161\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。第 5~第 6 年苜蓿的经济效益最高, 第 8 年后平均产草量减小, 边际产草量在 5 年生之后开始下降, 11 年后为 0。因此, 为保持较高的生态效益和经济效益, 使有限水分资源达到可持续利用, 苜蓿 5~6 年生是实行草粮轮作的最佳年限, 最迟不能超过 11 年生。

五、讨论

(一) 苜蓿地实行草粮轮作的土壤环境效应

以苜蓿为前茬的草粮轮作是一种历史悠久的耕作制度。国内外大量研究表明, 将以苜蓿为代表的豆科牧草引入作物轮作系统, 可以改善土壤物理环境, 增加土壤肥力, 提高后茬作物的产量和品质 (党延辉, 1998; 王庆锁等, 1999)。人工草地利用几年之后, 深层储水大量消耗, 注定要衰退。在我国黄土高原半干旱地区, 近年来也有不少学者呼

吁积极推行草田轮作制度,并认为草田轮作是进行生态恢复重建,实现农业可持续发展的关键步骤(孙鸿良,2003)。

随着苜蓿生长年限增加,苜蓿地土壤理化性状得到改善,土壤碱解氮含量提高。与有关研究结论一致,苜蓿根瘤菌和大量的须根可以增加土壤的腐殖质和有机质(Yang and Kay, 2001),改善土壤团粒结构(Anthony and Graeme., 2000)。苜蓿翻耕后的农田作物水分利用效率显著高于常规农田中的作物(王晓凌等,2007),与苜蓿连作相比,苜蓿-作物草田轮作对提高后作作物土壤氮素的有效性具有积极作用,且不同轮作方式对土壤氮素变化有显著影响(王俊等,2006)。苜蓿根系具有很强的根瘤固氮作用(鲁鸿佩和孙爱华,2003),是一种良好的轮作倒茬和种地养地的豆科植物,适合轮作粮食作物,提高粮食产量并改善品质(山仑等,1992)。苜蓿草地轮作农田的土壤肥力一般是下降的(邹亚丽等,2005),所以轮作时要适当配施氮磷肥。本试验中土壤速效磷含量随苜蓿生长年限增加而降低,导致10年生和22年生苜蓿轮作谷子的WUE显著低于6年生苜蓿,这可能是水肥不协调造成的。而有研究表明,苜蓿可为后作作物提供速效磷,与小麦连作系统相比,苜蓿-小麦轮作可以显著提高土壤速效磷含量(Li et al., 2002),这需要进行进一步试验验证。

苜蓿地上层土壤保持了较高湿度,并随苜蓿种植年限增加,水分逐渐得到恢复,为苜蓿地耕翻后轮作抗旱性较强的谷类作物提供了可能(刘忠民等,1993)。草粮轮作可以促使土壤水分下渗,从而使苜蓿地干土层水分逐渐恢复到农田状态。李军等(2007)认为草粮轮作可使苜蓿干层水分完全恢复到大田水平。王俊等(2004)试验也证明合理轮作对解决苜蓿种植导致的土壤水分亏缺问题具有重要作用。

总之,草粮轮作能够对苜蓿草地有限降水、苜蓿根瘤所固氮素和大量有机质等水肥资源做到合理、有效、持续利用,促进区域农牧业经济的持续稳定协调发展,保持土壤水分生态平衡,从而取得经济效益、生态效益和社会效益的共同提高。

(二) 草粮轮作中苜蓿地耕翻年限问题

在草粮轮作系统中,苜蓿利用年限受到苜蓿产草量、土壤水分、轮作作物产量及WUE等因素决定,其中水分是首要因素(冷石林等,1996)。韩仕峰(1990)根据黄土高原不同气候类型区的降水条件,认为应重视提高土壤水分对苜蓿生长的主导作用,分别提出不同降水类型区的苜蓿倒茬时间,干旱区以6~7年为宜,半干旱地区为8~9年,半湿润地区可延长到9~10年。也有研究认为,为了保持高原沟壑区苜蓿地持续产草量,在苜蓿生长到3~5年(王庆锁等,1999)就应耕挖,然后通过种植3~5年粮食作物来恢复土壤水分。苜蓿全年产草量同时受第1次刈割期的影响(魏臻武等,2007),从而影响到土壤储水量的高低和草粮轮作的苜蓿翻耕年限。

本研究认为,单就苜蓿产草量角度考虑,其生长年限应在11年左右,而在草粮轮作系统内,既要保证苜蓿和轮作作物得到较高的产量,又要求土壤水分达到足量、持续、稳定利用,苜蓿生长年限应相对缩短为5~6年。山仑等(1992)也认为,在宁南旱区实行草粮轮作的苜蓿的种植年限以5~6年为宜,张春霞等(2004)也认为应在苜蓿土壤干层未形成较大厚度之前进行轮作,均与本试验结论一致。在倒茬季节上,杜世

平等(1999)认为应在草粮轮作头一年雨季前对苜蓿地进行耕翻蓄水,翌年轮作作物,而本试验认为超长生长年限的苜蓿(如22年生)不宜提前耕翻而后轮作。

第五节 不同草粮轮作方式土壤水分时空动态及水分恢复效应

在中国黄土高原地区,水分是植被生长、作物产量和生态恢复的首要限制因子(山仑和陈国良,1993),土壤储水对增加和维持作物产量有着十分重要的作用(杨文治和邵明安,2000)。但苜蓿对水分需求量大,在干旱环境中较深的根系大量消耗土壤深层水分,土壤干燥化加剧(刘沛松等,2008),而且形成深厚的土壤干层在长时期内难以恢复,影响土壤水分的循环利用(李玉山,2001b)。同时,苜蓿产量下降,草地严重退化,限制了农牧业的持续发展。有研究认为(王俊等,2004)草粮轮作可以有效恢复苜蓿干土层水分,然而,到目前为止,将退化苜蓿草地翻耕轮作后,对不同轮作模式农田的土壤水分恢复效应的比较研究还未曾报道。

在中国宁南旱区将10年生苜蓿地耕翻后,进行了连续3年的定位轮作试验,研究不同轮作方式下土壤水分的动态变化特征,并对多种轮作方式的产量、水分利用效率等方面进行比较,为同类地区农牧业的可持续发展及合理选择草粮轮作模式提供理论依据。

一、草粮轮作农地与对照苜蓿草地、撂荒地土壤水分状况比较

3年轮作完成后共形成27种草粮轮作方式。下面仅以WPW轮作模式0~200cm土壤水分与对照苜蓿草地、撂荒地作以下比较,如图7-18所示。

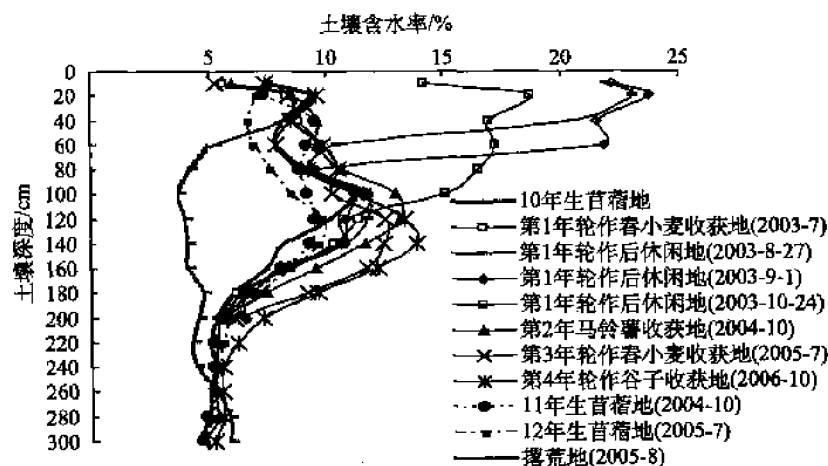


图 7-18 WPW 轮作模式农田与对照苜蓿草地、撂荒地 0~200cm 土壤水分比较

随着轮作年限的延长,草粮轮作地土壤水分得到明显恢复,高于对照未翻耕苜蓿地和常年撂荒地。如图7-18所示,2004年雨季结束后10月测定的11年生苜蓿草地和2005年7月雨季前测定的12年生苜蓿草地120~200cm土层湿度分别为7.88%和8.19%,120~300cm土层湿度分别为6.46%和6.68%,随时间变化均表现出缓慢恢复趋势;2003~2005年各年同期测定的轮作第一年春小麦地、第二年马铃薯地、

第三年春小麦地以及第四年谷子收获农田 120~200cm 土层湿度分别为 8.36%、9.51%、10.42%和 11.29%，可见，草粮轮作农田水分恢复效果明显高于持续生长的苜蓿地。

2005 年 8 月 19 日对地面无植被生长且常年休闲的对照撂荒地水分测定结果显示，即使在 8 月雨季，仅在 0~40cm 土层水分得到雨水入渗补充，60~240cm 各土层湿度远低于苜蓿生长草地和轮作地，240cm 以下土层湿度随深度增加而逐渐增加。60~300cm 土层含水率均在凋萎湿度 6.10% 以下，属于干土层范围，其中 120~200cm 和 120~300cm 土层湿度分别仅为 4.30% 和 4.72%。常年撂荒地土壤剖面各土层水分最低，苜蓿地次之，草粮轮作地最高。

草粮轮作期间的降水补充是土壤水分恢复的主要来源，尤其在春小麦收获后较长的休闲期正逢 7~9 月雨季，降水下渗恢复深度更为明显。苜蓿翻耕后（2003 年 3 月 20 日）第一年轮作春小麦收获后，从 7 月 17 日春小麦收获到 8 月 27 日，降水可下渗到 60cm 土层，9 月 1 日达到 80cm，10 月 24 日雨季结束后已下渗到 140cm 土层；2004 年马铃薯播期（3 月 22 日）已达到 160cm，收获期（7 月 14 日）为 180cm；2005 年播期（3 月 17 日）和收获期（7 月 12 日）已增加到 200cm 土层，甚至更深。所以，草粮轮作是退化苜蓿草地干土层水分得到恢复的有效途径。

二、不同草粮轮作模式对土壤不同深度层次水分的影响

（一）第三年为春小麦的草粮轮作方式对苜蓿地不同土层水分影响

2003 年 3 月将 10 年生苜蓿翻耕后，2003~2005 年轮作期间第三年为春小麦轮作系列 0~200cm 土壤剖面不同深度层次水分动态如图 7-18~图 7-27 所示。第三年为马铃薯的不同草粮轮作方式对 0~200cm 土壤剖面不同深度层次水分的影响如图 7-28~图 7-36 所示。第三年为谷子的不同草粮轮作方式对 0~200cm 土壤剖面不同深度层次水分的影响如图 7-37~图 7-43 所示。为便于描述，按照第三年轮作作物种类将其划分为 3 个轮作系统，即春小麦轮作系统、马铃薯轮作系统和谷子轮作系统。

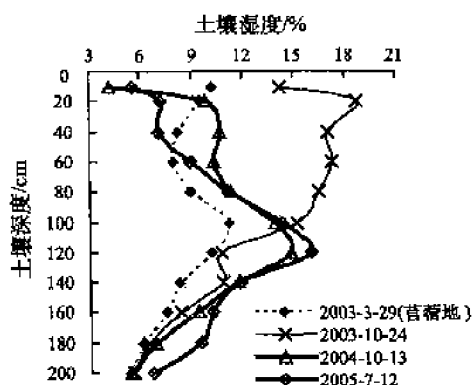


图 7-19 WWW 轮作方式

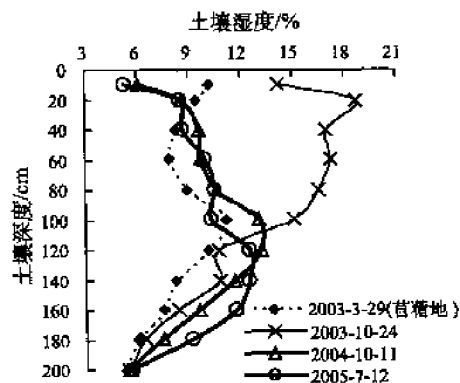


图 7-20 WPW 轮作方式

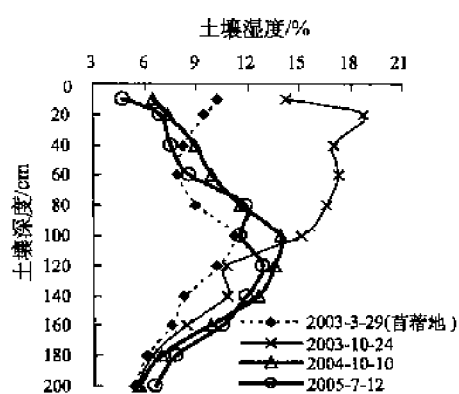


图 7-21 WMW 轮作方式

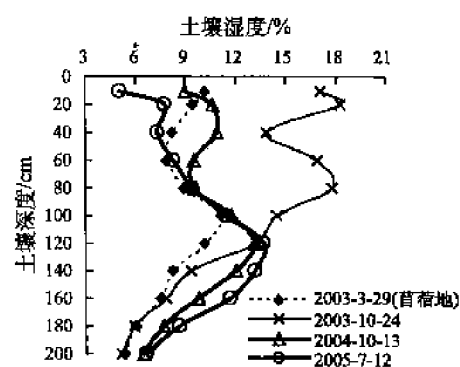


图 7-22 PWW 轮作方式

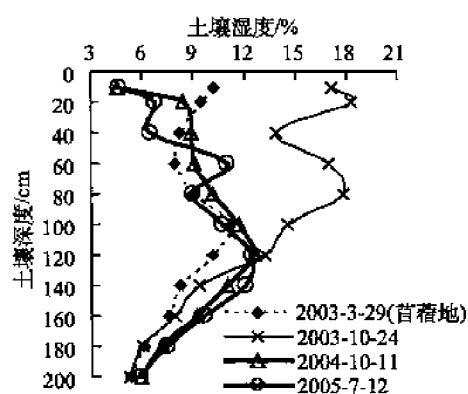


图 7-23 PPW 轮作模式

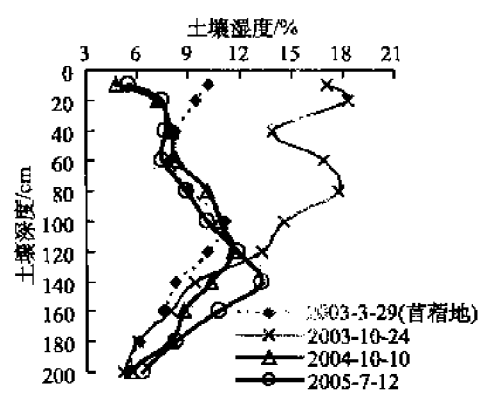


图 7-24 PMW 轮作模式

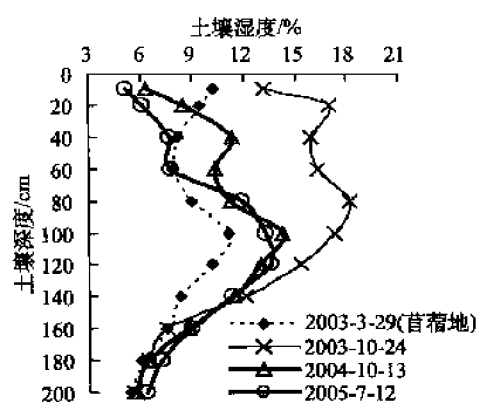


图 7-25 MWW 轮作模式

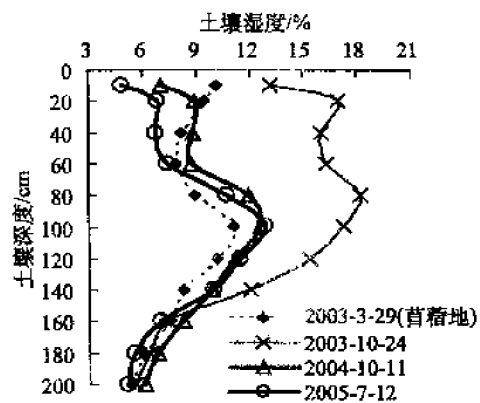


图 7-26 MPW 轮作模式

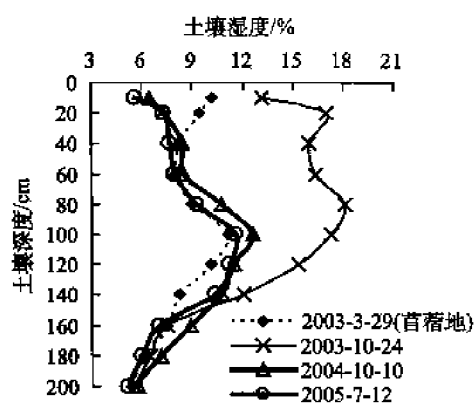


图 7-27 MMW 轮作模式

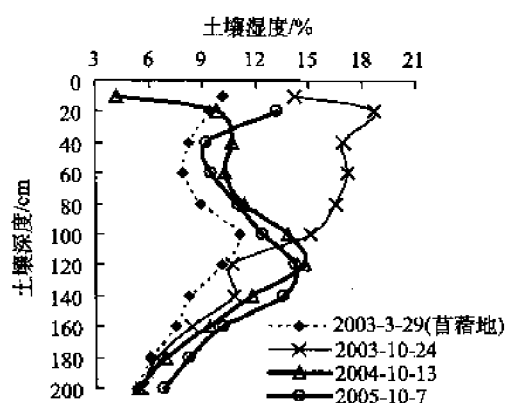


图 7-28 WWP 轮作模式

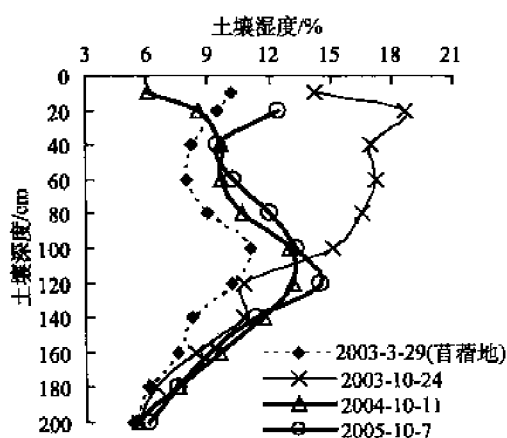


图 7-29 WPP 轮作模式

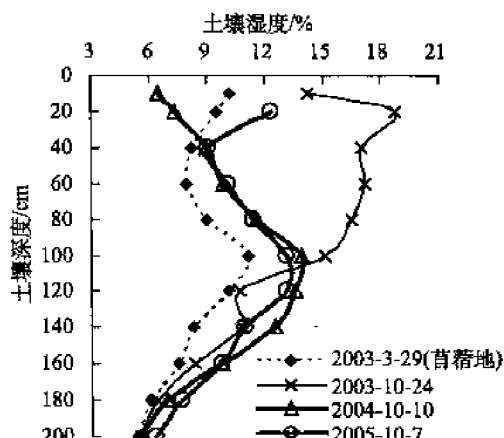


图 7-30 WMP 轮作模式

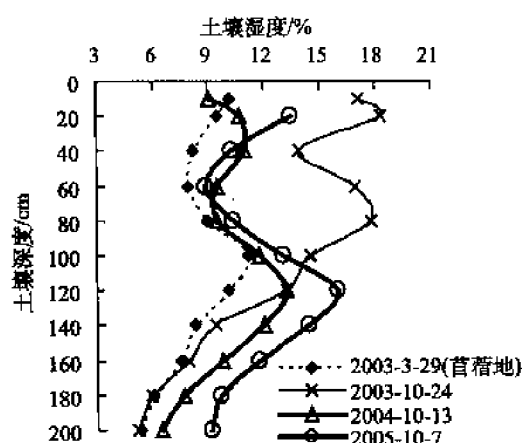


图 7-31 PWP 轮作模式

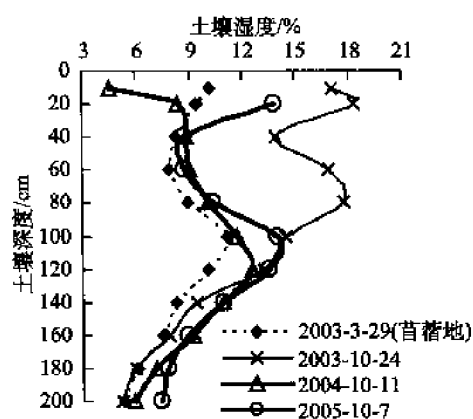


图 7-32 PPP 轮作模式

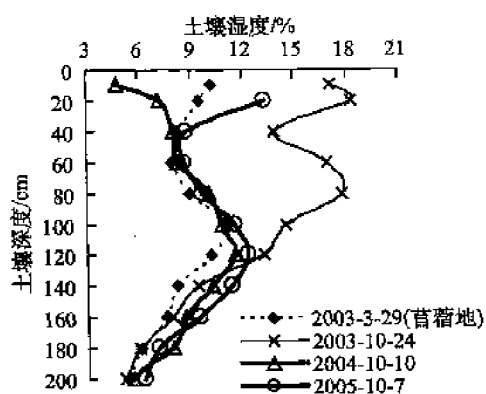


图 7-33 PMP 轮作模式

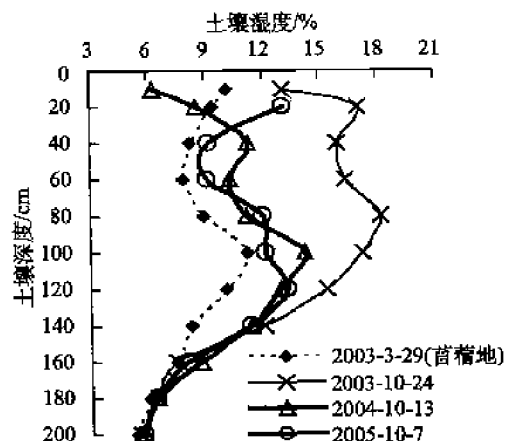


图 7-34 MWP 轮作模式

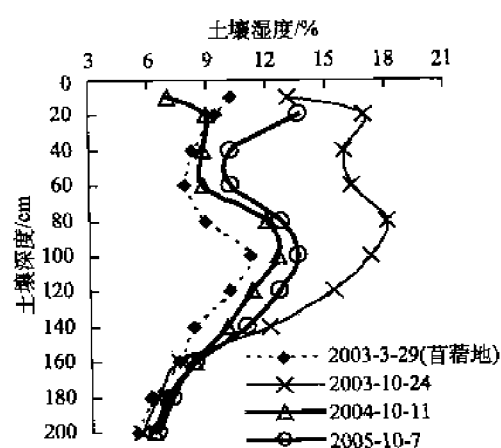


图 7-35 MPP 轮作模式

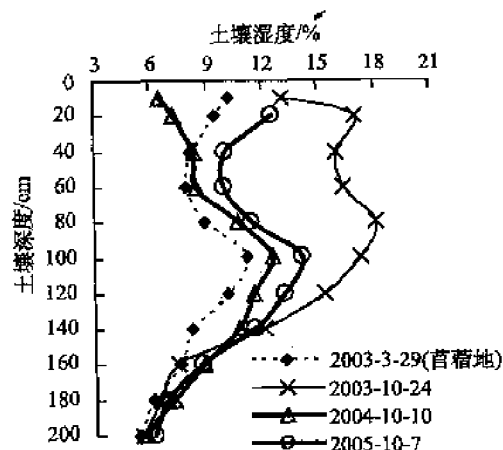


图 7-36 MMP 轮作模式

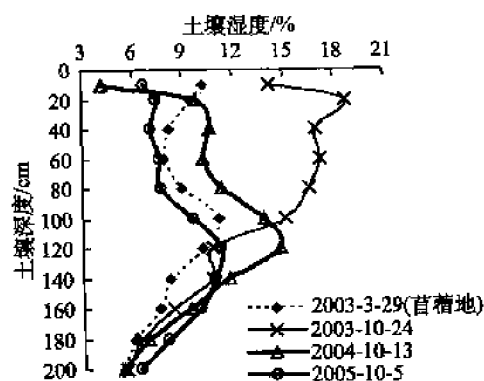


图 7-37 WWM 轮作模式

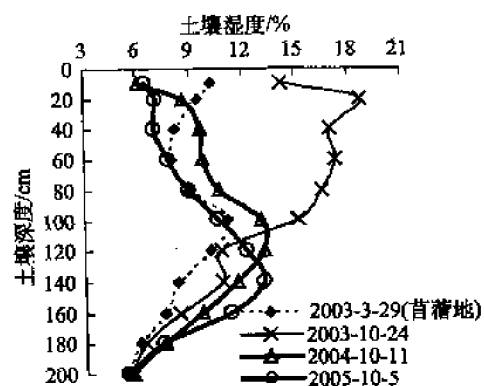


图 7-38 WPM 轮作模式

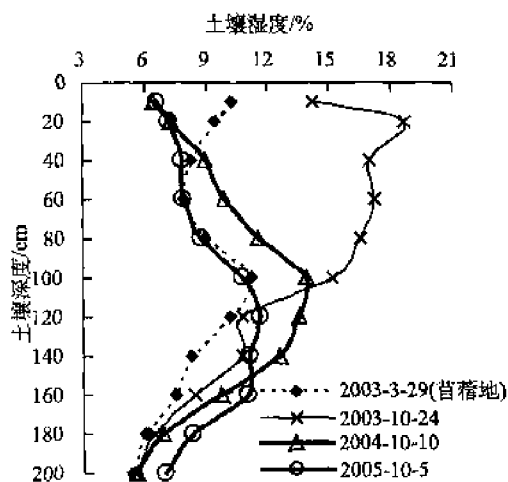


图 7-39 WMM 轮作模式

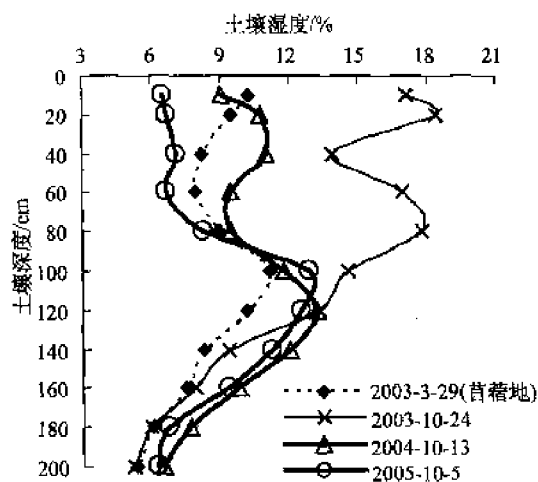


图 7-40 PWM 轮作模式

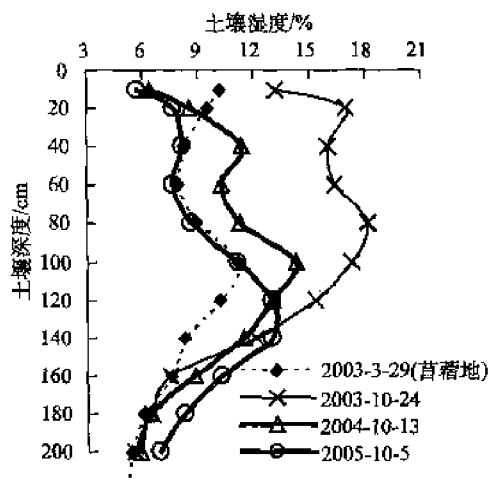


图 7-41 MWM 轮作模式

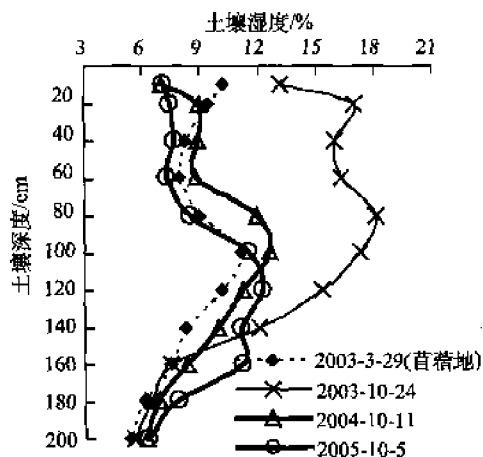


图 7-42 MPM 轮作模式

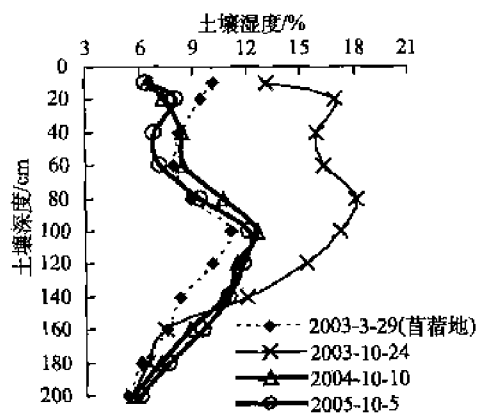


图 7-43 MMM 轮作模式

从各轮作系统不同轮作模式的 2003~2005 年 0~200cm 土壤剖面水分分布动态特征看 (图 7-18~图 7-43), 0~40cm 深度受降水和地面蒸发的影响较明显, 在降水量较大的雨季或严重干旱年份可影响到 60cm, 在较大降水的年份 (2003 年) 作物收获后降水可入渗到 100cm; 60~120cm 土壤水分主要被轮作作物利用。所以, 各年份中 120cm 以上的土层水分主要受降水补充、地面蒸发和作物蒸腾利用的影响, 波动较大, 主要由降水量大小和不同种

类作物的耗水特性决定。

不同轮作模式的 120~200cm 土层水分变化幅度较小,随着轮作年限的增加,基本上表现出不断恢复趋势。春小麦轮作系统各个轮作模式在 2003 年 3 月苜蓿翻耕时、2003 年 10 月、2004 年 10 月和 2005 年 7 月轮作作物收获后同期测定不同模式土壤水分。结果表明,轮作前,苜蓿地 120~200cm 土层平均含水率为 7.45%,2003~2005 年轮作期间,WWW 春小麦连作模式下各年该土层平均含水率分别为 8.36%、9.62% 和 10.82%,WPW 模式下各年依次轮作的春小麦、马铃薯和春小麦地该土层含水率分别为 8.36%、9.51% 和 10.33%,WMW 模式各年轮作土壤含水率依次为 8.36%、9.67% 和 9.89%,PWW 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、9.83% 和 10.76%,PPW 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、9.15% 和 9.47%,PMW 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、8.81% 和 10.08%,均呈不断恢复趋势。MWW 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、9.05% 和 9.48%,MPW 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、8.47% 和 7.84%,MMW 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、8.77% 和 7.96%,均由于第一年轮作谷子引起第二年该层土壤水分下降,其中第三年轮作春小麦的 MWW 模式因前茬为春小麦,水分有所回升,而 MPW、MMW 模式由于第二年种植高产高耗水作物马铃薯和谷子,导致第三年的春小麦土壤水分继续下降,且 2005 年气候严重干旱,从而引起不同茬口上的春小麦死苗严重,地面裸露,土壤水分大量蒸发损失,接近于撂荒地水分状况。

(二) 第三年为马铃薯的草粮轮作方式对苜蓿地不同深度层次水分影响

轮作期间马铃薯轮作系列 0~200cm 土壤剖面不同深度层次水分动态如图 7-28~图 7-36 所示。马铃薯轮作系列中各个轮作模式在 2003 年 3 月苜蓿翻耕时、2003 年 10 月、2004 年 10 月和 2005 年 10 月轮作作物收获后同期测定不同模式土壤水分,结果表明,轮作前,苜蓿地 120~200cm 土层平均含水率为 7.45%,2003~2005 年轮作期间,WWP 轮作模式下各年该土层平均含水率分别为 8.36%、9.62% 和 10.63%,WPP 模式下各年依次轮作地该土层含水率分别为 8.36%、9.51% 和 9.70%,WMP 模式各年轮作土壤含水率依次为 8.36%、9.67% 和 9.56%,PWP 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、9.83% 和 12.20%,PPP 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、9.15% 和 9.72%,PMP 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、8.81% 和 9.29%,MWP 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、9.05% 和 8.99%,MPP 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、8.47% 和 9.09%,MMP 模式各年该层土壤含水率依次为 9.36%、8.77% 和 9.31%,前两年由于谷子连作,土壤含水率下降,尽管第三年大旱,轮作的马铃薯地该层水分却增加。尽管降水量连年持续下降,WWP、WPP、WMP、PWP、PPP、PMP 轮作方式轮作期间使退化苜蓿地的水分得到连年恢复,其中 PWP 方式恢复程度最大,由翻耕前的 7.45% 上升到 12.20%,含水率净增加量为 4.75%。MWP、MPP 和 MMP 方式由于第一年轮作谷子后使该层水分得到大幅度恢复,相对地,以后有所下降,但轮作后总体上均使 120~200cm 土层水分得到不同程度的恢复。

(三) 第三年为谷子的草粮轮作方式对苜蓿地不同深度层次水分影响

轮作期间谷子轮作系列 0~200cm 土壤剖面不同深度层次水分动态如图 7-37~图 7-43 所示。谷子轮作系列中各轮作模式在 2003~2005 年轮作期间, 分别于 2003 年 3 月苜蓿翻耕时、2003 年 10 月、2004 年 10 月和 2005 年 10 月轮作作物收获后同时测定各轮作方式的 120~200cm 土壤水分分别为, WWM 模式下各年该土层平均含水率分别为 8.36%、9.62%和 9.31%, WPM 模式下各年该土层含水率分别为 8.36%、9.51%和 9.88%, WMM 模式各年轮作土壤含水率依次为 8.36%、9.67%和 9.80%, PWM 模式各年土壤含水率依次为 8.33%、9.83%和 9.21%, MWM 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、9.05%和 10.25%, MPM 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、8.47%和 9.74%, MMM 模式各年土壤含水率依次为 9.36%、8.77%和 9.20%。其中 WWM、WPM、WMM、PMM 方式下该层土壤水分均呈不断恢复趋势, 其他轮作方式轮作后有升有降, 相对苜蓿翻耕前, 水分均有增加。尽管 2005 年旱情严重, MWM 模式由于第二年春小麦休闲地的雨季蓄水, 轮作第三年谷子地含水率却最高, 比耕翻前增加了 2.80%。

三、不同草粮轮作模式 0~200cm 土壤含水量的时间动态

由于农作物主要利用 0~200cm 土层水分 (冷石林等, 1996), 因而本试验将轮作期间 0~200cm 土壤水分动态分为 0~120cm 和 120~200cm 两个深度层次来重点描述。2003~2005 年不同轮作模式和对照苜蓿地土壤各层次水分变化如图 7-44~图 7-52 所示。

随轮作年限增加, 27 种草粮轮作方式土壤各土层水分变化有着共同的趋势特征。0~120cm 与 0~200cm 土层水分变化趋势基本相似, 而 0~120cm 土壤水分不论降水量大小, 一直显示出不断恢复趋势。在年降水量持续递减的情况下, 轮作地 0~120cm、120~200cm 和 0~200cm 土层水分呈现不同变化趋势。在 2003~2005 年轮作期间, 各

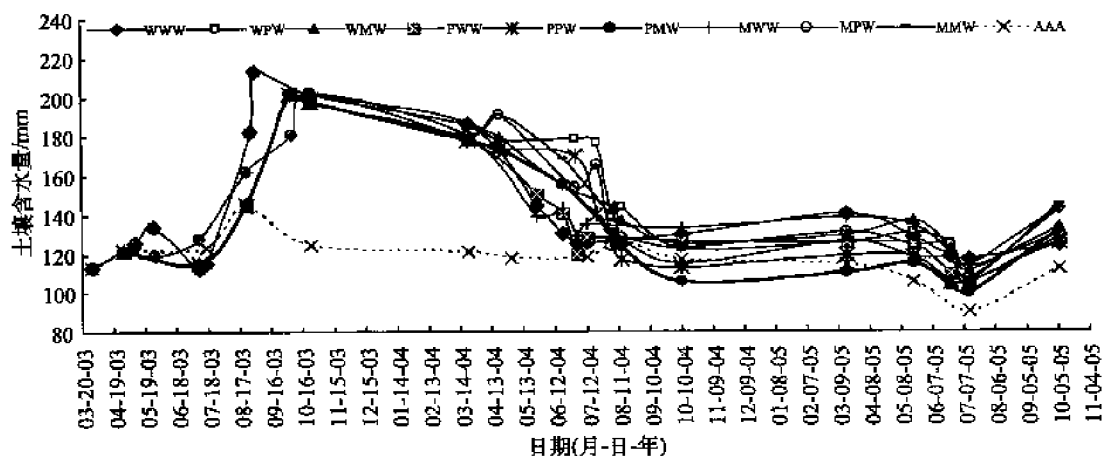


图 7-44 春小麦轮作系列 0~120cm 土层含水量动态

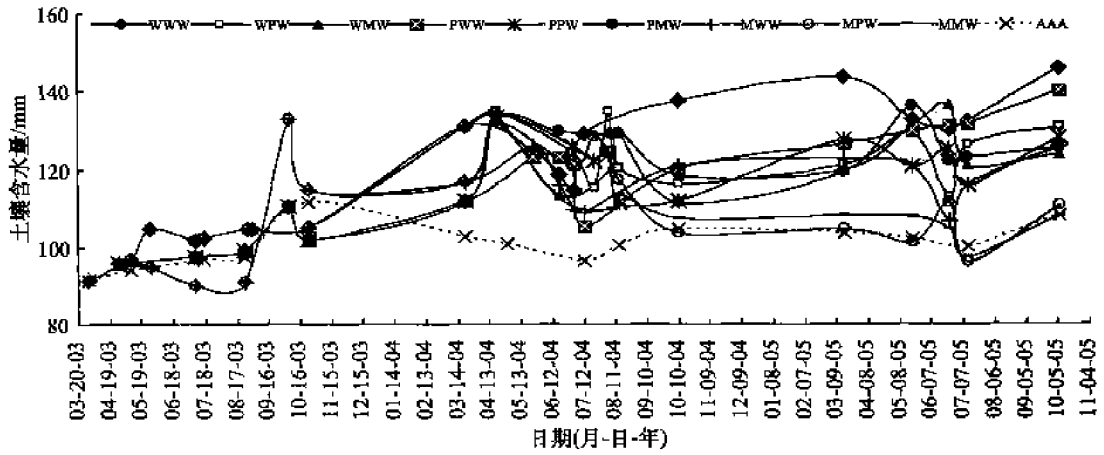


图 7-45 春小麦轮作系列 120~200cm 土层含水量动态

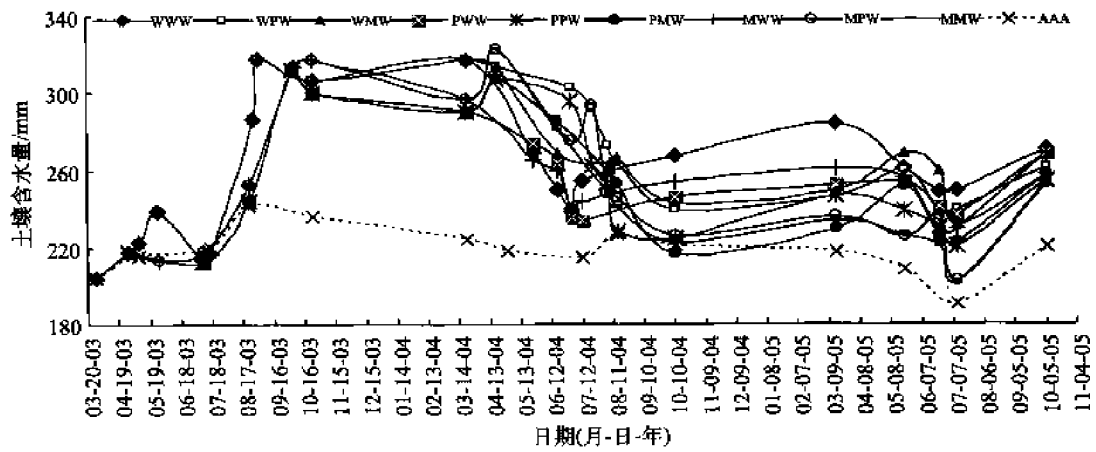


图 7-46 春小麦轮作系列 0~200cm 土层含水量动态

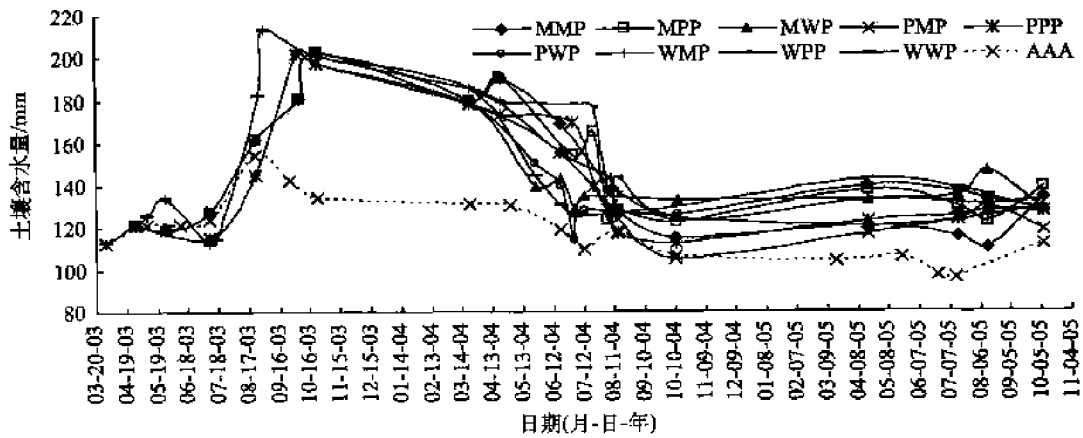


图 7-47 马铃薯轮作系列 0~120cm 土层含水量动态

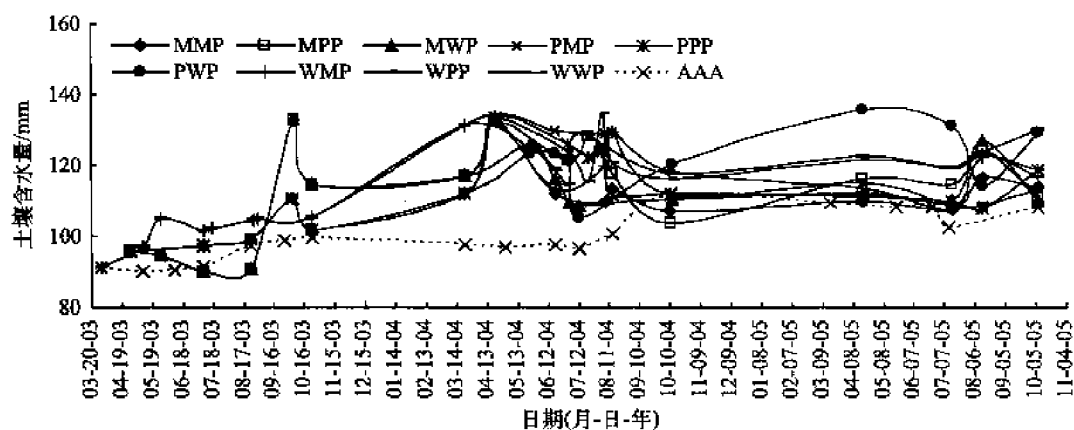


图 7-48 马铃薯轮作系列 120~200cm 土层含水量动态

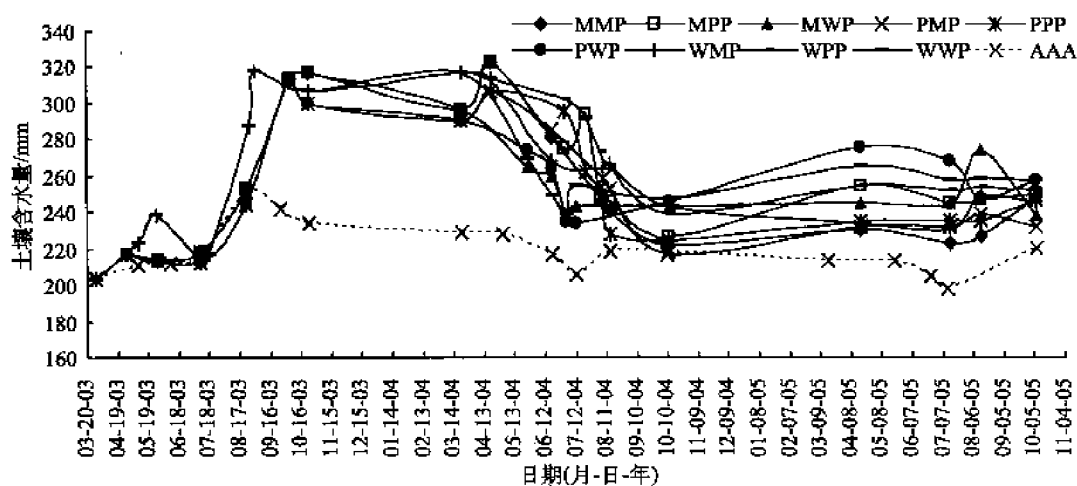


图 7-49 马铃薯轮作系列不同轮作模式 0~200cm 土层含水量动态

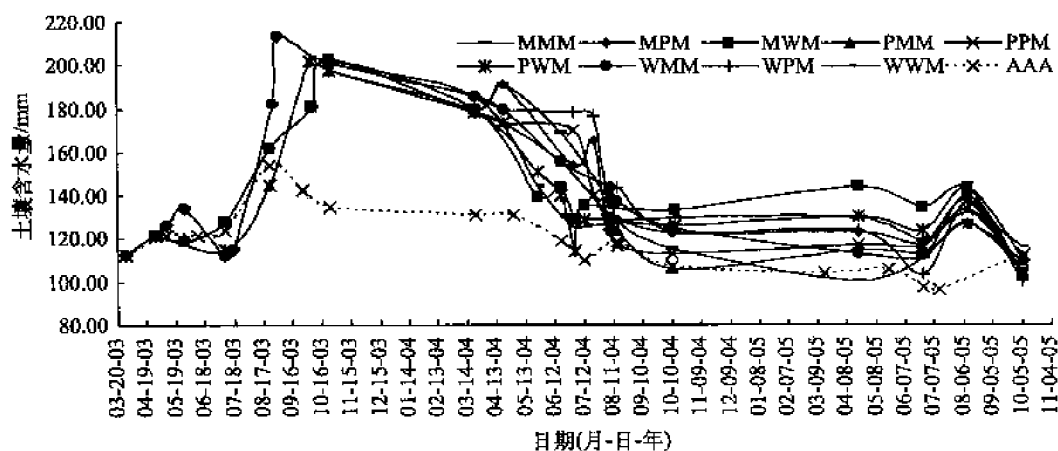


图 7-50 谷子轮作系列不同轮作模式 0~120cm 土层含水量动态

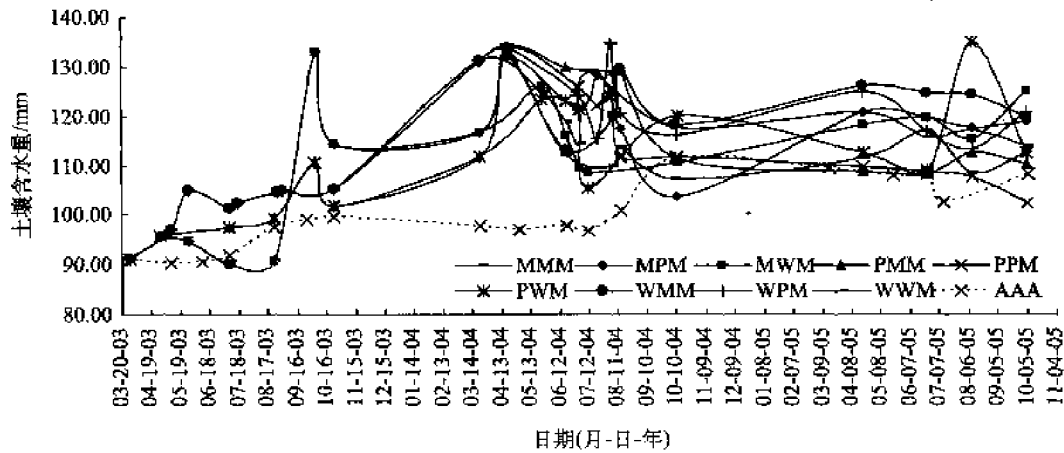


图 7-51 谷子轮作系列中不同轮作模式 120~200cm 土层含水量动态

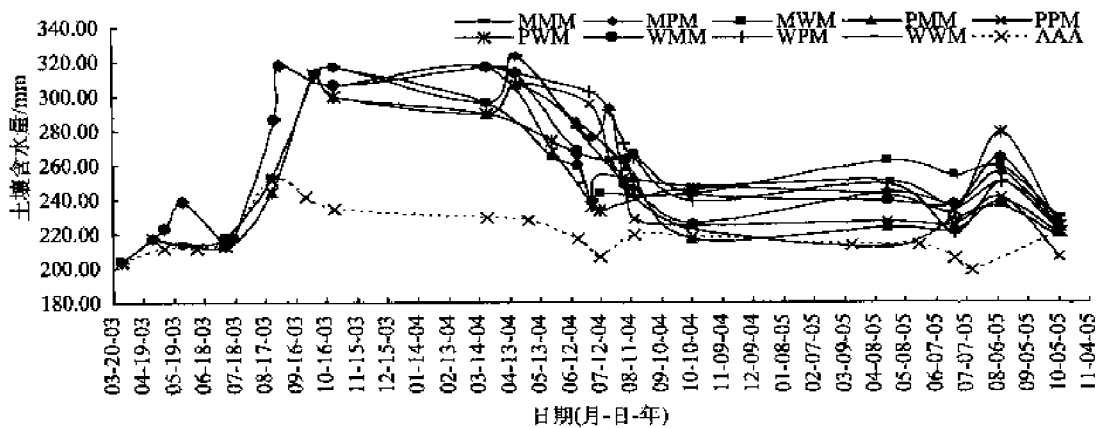


图 7-52 谷子轮作系列中不同轮作模式 0~200cm 土层含水量动态

年降水量分别为 343.9mm、243.7mm、171.3mm，逐年递减且降幅较大。轮作第一年（2003 年）降水量较大，各轮作模式农田 0~120cm 土层水分迅速增加，当年 10 月雨季结束后直到第二年（2004 年）3 月、4 月播种期均保持较高水平，有利于出苗和苗期生长，而在第三年（2005 年）轮作期间降水很少，土壤水分一直维持在较低水平。从总的趋势看，轮作第一年 10 月以后该土层含水率逐年降低，而且波动较大。所以，0~120cm 土层含水量易受短期内随机降水的影响，且变率较大。120~200cm 土层水分受地面蒸发和短期随机降水影响较小，通过作物利用后的剩余水量不断下渗，基本上表现出稳步上升态势。

作物生育期消耗的土壤水分主要靠每年的 7~9 月雨季降水来补充。在 2003 年 7~9 月雨季期间，各轮作地 0~120cm 和 0~200cm 土壤水分都表现出迅速增加趋势，作物收获后休闲期间直到 2004 年 3 月播种前，由于雨季降水入渗的滞后效应（李玉山，2002），土壤一直保持较高的水分，到下一年轮作作物生育期又被消耗而下降，在 2004

年和 2005 年雨季再次得到较大的补偿量,可保持到翌年 3 月、4 月作物播期,如此循环,保证了轮作农地土壤水分平衡和持续恢复。对照苜蓿地土壤水分最高出现在各年 8 月,在当年又被很快消耗,土壤水分恢复量很小。

四、不同轮作模式土壤水分、产量和水分利用效率动态变化及比较

(一) 不同草粮轮作方式各年份作物收获地土壤水分比较

在 2003~2005 年轮作期间,由于春小麦与马铃薯、谷子不在同期收获,所以本试验于各作物全部收获后的 10 月雨季结束时测定收获地 0~200cm 土壤水分,比较不同轮作模式对土壤水分影响的差异性。

不同轮作模式对 0~200cm 土层水分影响差异性达显著或极显著水平。表 7-3 显示,第一年(2003 年)轮作前茬同为苜蓿,作物全部收获后 10 月 24 日测定的土壤水分结果表明,第一年轮作谷子地 0~200cm 土壤含水量最高,与春小麦地和马铃薯地差异达极显著水平($P<0.01$),但 0~120cm 无明显差异,春小麦、马铃薯和谷子地平均含水率分别为 203.29mm、197.90mm 和 202.50mm,而 120~200cm 深度平均含水率分别为 102.38mm、101.96mm 和 114.62mm,轮作谷子地水分显著高于马铃薯和春小麦轮作地($P<0.05$),说明苜蓿耕翻后第一年轮作谷子时土壤水分恢复效果较好。

表 7-3 不同降水年份下轮作作物对土壤水分影响的差异性比较

轮作 方式	播期 水分/mm	轮作第一年作物 (2003-10)		轮作第二年作物 (2004-10)		轮作第三年作物 (2005-10)		总恢 复量 /mm
		轮作地 0~200cm 土壤含水量/mm	比上一年 增减/mm	轮作地 0~200cm 土壤含水量/mm	比上一年 增减/mm	轮作地 0~200cm 土壤含水量/mm	比上一年 增减 /mm	
WWW	203.89	306.67Bb	102.78	267.80Aa	-38.87	270.77Aa	2.97	66.88
WPW	203.89	306.67Bb	102.78	239.44BCDEbd	-67.23	261.90ABCabc	22.46	58.01
WMW	203.89	306.67Bb	102.78	243.47BCDbc	-63.20	257.60ABCDabc	14.13	53.71
PWW	217.38	299.86Bb	82.48	246.46ABCh	-53.40	268.80ABab	22.34	51.42
PPW	217.38	299.86Bb	82.48	224.79CDFde	-75.07	254.58ABCDbc	29.79	37.20
PMW	217.38	299.86Bb	82.48	217.24De	-82.62	257.40ABCDabc	40.16	40.02
MWW	217.38	317.11Aa	99.73	253.92ABab	-63.19	268.93ABab	15.01	51.55
MPW	217.38	317.11Aa	99.73	226.51CDEcde	-90.60	253.15ABCDEcd	26.64	35.77
MMW	217.38	317.11Aa	99.73	222.62CDEde	-94.49	253.80ABCDbc	31.18	36.42
MMP	217.38	317.11Aa	99.73	222.62CDEde	-94.49	248.49BCDEFcd	25.87	31.11
MPP	217.38	317.11Aa	99.73	226.51CDEcde	-90.60	250.77ABCDEcd	24.26	33.39
MWP	217.38	317.11Aa	99.73	253.92ABab	-63.19	238.08DEFGdef	-15.84	20.70
PMP	217.38	299.86Bb	82.48	217.24De	-82.62	232.88EFGefg	15.64	15.50
PPP	217.38	299.86Bb	82.48	224.79CDEde	-75.07	246.83CDEFode	22.04	29.45
PWP	217.38	299.86Bb	82.48	246.46ABCb	-53.40	258.27ABCDabc	11.81	40.89
WMP	203.89	306.67Bb	102.78	243.47BCDbc	-63.20	246.44CDEFode	2.97	42.55
WPP	203.89	306.67Bb	102.78	239.44BCDEbd	-67.23	251.93ABCDEcd	12.49	48.04
WWP	203.89	306.67Bb	102.78	267.80Aa	-38.87	257.70ABCDabc	-10.10	53.81

续表

轮作 方式	播期 水分/mm	轮作第一年作物 (2003-10)		轮作第二年作物 (2004-10)		轮作第三年作物 (2005-10)		总恢 复量 /mm
		轮作地	比上一年	轮作地	比上一年	轮作地 0~200cm	比上一年	
		0~200cm 土壤含水量/mm	增减/mm	0~200cm 土壤含水量/mm	增减/mm	土壤含水量 /mm	年增减 /mm	
MMM	217.38	317.11Aa	99.73	222.62CDEde	-94.49	217.67GHgh	-4.95	0.29
MPM	217.38	317.11Aa	99.73	226.51CDEode	-90.60	222.68GHg	-3.83	5.30
MWM	217.38	317.11Aa	99.73	253.92ABab	-63.19	228.84FGfg	-25.08	11.46
PMM	217.38	299.86Bb	82.48	217.24De	-82.62	219.74GHgh	2.50	2.36
PPM	217.38	299.86Bb	82.48	224.79CDEde	-75.07	206.77GHgh	-18.02	-10.61
PWM	217.38	299.86Bb	82.48	246.46ABCb	-53.40	224.20GHfg	-22.26	6.82
WMM	203.89	306.67Bb	102.78	243.47BCDBc	-63.20	223.05GHfg	-20.42	19.16
WPM	203.89	306.67Bb	102.78	239.44BCDEbd	-67.23	221.18GHgh	-18.26	17.29
WWM	203.89	306.67Bb	102.78	267.80Aa	-38.87	229.89FGfg	-37.91	26.00

注：同一列中大、小写字母分别表示不同轮作模式土壤水分、产量和 WUE 在 1% 和 5% 水平上差异的显著性。下同。

2004 年 10 月 11 日同期测定结果显示, 各轮作方式土壤含水量次序依次为 WW>MW>PW>WM>WP>MP>PP>MM>PM, WW 方式的春小麦连作地水分最高, 与除 MW 以外的其他轮作地差异显著 ($P<0.05$), PM 轮作地最低, 与除 MM 以外的其他方式农地水分差异性显著 ($P<0.05$)。第二年轮作春小麦地水分较高, 这是由于春小麦生长需水相对较少和收获后雨季降水入渗的结果; 轮作马铃薯地次之, 由于马铃薯能够高效利用当年降水, 且根系较浅, 对深层水分消耗较少; 谷子地水分含量最低, 由于谷子根系较深, 且需水量较大的缘故。但是春小麦后的谷子地含水量却较高, 仅次于第二年春小麦地, 这是第一年春小麦收获后雨季蓄水的结果。

第三年的土壤水分也反映了轮作完成后最终的水分恢复状况。不同的轮作方式对土壤水分的利用程度不同, 轮作完成后 27 种草粮轮作方式的土壤水分比较情况将在本章第七节分析。

当年降水量大小直接影响土壤水分的恢复。2003~2005 年降水量分别为 343.9mm、243.7mm 和 171.3mm, 由表中数据显示, 第一年降水量最大, 土壤水分恢复幅度较大, 最大净恢复量为 102.78mm; 第二年土壤水分基本上都下降, 可能与第一年较大的恢复程度有关, 第一年储存了较多的水分促进了第二年轮作作物产量的提高; 尽管第三年大旱, 各轮作方式的土壤水分仍然比第二年有所恢复。

土壤水分的高低基本上反映为当年作物对水分的利用程度, 春小麦对水分利用少, 当年土壤含水量就高, 反之, 谷子对水分消耗多, 当年土壤含水量就低。所以, 当年种植的作物对土壤水分的影响是主要的, 前茬作物的影响次之。从各轮作方式总的恢复量来看, 连作春小麦地含水量最高, 马铃薯次之, 谷子地最低。

(二) 不同草粮轮作方式各年份作物产量、水分利用效率 (WUE) 比较

由表 7-4 可看出, 第一年轮作的马铃薯产量 (5:1 折粮后) 最高, 谷子产量次之,

春小麦产量最低, 分别为 $2658.0\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1485.8\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $364.1\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 相互之间差异性达极显著水平 ($P < 0.01$)。第一年轮作的马铃薯、谷子和春小麦的 WUE 分别为 $14.9856\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $8.4324\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $3.4976\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 相互之间差异性极显著 ($P < 0.01$)。各年份马铃薯的水分利用效率仍然显著或极显著高于谷子和春小麦。

表 7-4 不同降水年份下轮作物产量差异性比较

轮作 方式	第 1 年轮作物		第 2 年轮作物		第 3 年轮作物	
	产量	WUE	产量	WUE	产量	WUE
WWW	364.1Cc	3.4976Cc	649.4Ef	3.8294De	342.2Ij	4.2709HIh
WPW	364.1Cc	3.4976Cc	2766.0Aa	9.2283Aa	203.8LMjk	3.9123IJKh
WMW	364.1Cc	3.4976Cc	1511.6Dde	5.0459Ccd	150.1Mk	2.4077LIj
PWW	2658.0Aa	14.986Aa	393.2Ef	2.4086Ef	248.1LMjk	4.0829HIh
PPW	2658.0Aa	14.986Aa	2366.7Bb	7.6851Bb	189.8LMjk	2.6850KLi
PMW	2658.0Aa	14.986Aa	1889.6Cc	5.9890Cc	143.9Mk	2.7789JKLi
MWW	1485.8Bb	8.4325Bb	468.5Ef	2.9283DEf	291.1LMij	3.7919IJKh
MPW	1485.8Bb	8.4325Bb	2533.3ABab	7.8547Bb	129.1Mk	1.6610Lj
MMW	1485.8Bb	8.4325Bb	1779.0CDcd	5.4502Ccd	117.5Mk	1.5260Lj
MMP	1485.8Bb	8.4325Bb	1779.0CDcd	5.4502Ccd	1320.0EFc	10.1026BCDcd
MPP	1485.8Bb	8.4325Bb	2533.3ABab	7.8547Bb	1518.0CDb	10.0000BCDcd
MWP	1485.8Bb	8.4325Bb	468.5Ef	2.9283DEf	1782.0Aa	11.4605Aab
PMP	2658.0Aa	14.986Aa	1889.6Cc	5.9890Cc	1366.2DEc	9.2417Dd
PPP	2658.0Aa	14.986Aa	2366.7Bb	7.6851Bb	1531.2CDb	11.2127ABab
PWP	2658.0Aa	14.986Aa	393.2Ef	2.4086Ef	1755.6ABa	10.5708ABCbc
WMP	364.1Cc	3.4976Cc	1511.6Dde	5.1119Ccd	1293.6EFGc	9.5104CDd
WPP	364.1Cc	3.4976Cc	2766.0Aa	9.2283Aa	1603.8BCb	10.6029ABCbc
WWP	364.1Cc	3.4976Cc	649.4Ef	3.8297De	1854.6Aa	11.8649Aa
MMM	1485.8Bb	8.4325Bb	1779.0CDcd	5.4502Ccd	628.5Kh	4.0178HIJh
MPM	1485.8Bb	8.4325Bb	2533.3ABab	7.8547Bb	972.1IJfg	5.6580FGg
MWM	1485.8Bb	8.4325Bb	468.5Ef	2.9283DEf	1134.1GHIde	6.2320FGfg
PMM	2658.0Aa	14.986Aa	1889.6Cc	5.9890Cc	676.9Kh	4.3098HIh
PPM	2658.0Aa	14.986Aa	2366.7Bb	7.6851Bb	1006.5HIJef	5.9666FGg
PWM	2658.0Aa	14.986Aa	393.2Ef	2.4086Ef	1153.9FGHd	6.8988EFef
WMM	364.1Cc	3.4976Cc	1511.6Dde	5.1119Ccd	875.7Jg	5.3189GHg
WPM	364.1Cc	3.4976Cc	2766.0Aa	9.2283Aa	1041.7HIJdef	5.9120FGg
WWM	364.1Cc	3.4976Cc	649.4Ef	3.8297De	1282.8EFGc	7.5686Ee

注: 同一列中大、小写字母分别表示不同轮作方式当年作物产量、WUE 分别在 1% 和 5% 水平上差异显著性。马铃薯产量以 5:1 折粮计。

第二年轮作中,无论在春小麦茬、马铃薯茬或谷子茬上轮作的马铃薯、谷子和春小麦产量之间差异性依然达极显著水平 ($P<0.01$),仍然为马铃薯产量最高,谷子产量次之,春小麦产量最低。无论在第一年何种作物的茬口后,第二年轮作的马铃薯的 WUE 都极显著高于谷子、春小麦的 WUE。这说明 2003~2005 年不同降水年型下,马铃薯都表现出极高的产量,谷子次之,春小麦最低。所以,在 3 种轮作作物中,马铃薯是最适合在宁南地区光热条件下生长的作物。第三年轮作作物的产量和 WUE 大小次序依然是马铃薯最大,谷子次之,春小麦最小。由表 7-4 所示,27 种轮作模式第三年作物的产量高低依次为 WWP>MWP>PWP>WPP>PPP>MPP>PMP>MMP>WMP>WWM>PWM>MWM>WPM>PPM>MPM>WMM>PMM>MMM>WWW>MWW>PWW>WPW>PPW>WMW>PMW>MPW>MMW,以第二年春小麦为前茬的第三年马铃薯产量最高,为 $1755.6\sim 1854.6\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 WWP、MWP 方式下的马铃薯与除 PWP 方式以外的其他所有轮作方式下第三年马铃薯产量之间差异性达极显著 ($P<0.01$);以第二年谷子为前茬的第三年春小麦产量最低,为 $117.5\sim 150.1\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中 MMW、PMW、WMW 与除 PPW、WPW、PWW、MWW 以外的其他所有轮作方式下的第三年作物产量之间差异性达极显著水平 ($P<0.01$)。

27 种轮作模式第三年作物的水分利用效率依次为 WWP>MWP>PPP>PWP>WPP>MMP>MPP>WMP>PMP>WWM>PWM>MWM>PPM>WPM>MPM>WMM>PMM>WWW>PWW>MMM>WPW>MWW>PMW>PPW>WMW>MPW>MMW,其中 WWP 方式下的第三年马铃薯水分利用效率最高,为 $11.8748\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,与除 MWP、PPP 之外的其他轮作方式下第三年作物产量之间差异性显著 ($P<0.05$);MMW、MPW 最低,分别仅为 $1.5567\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $1.6565\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,与除 WMW 以外的其他轮作方式下的第三年作物 WUE 之间差异性显著 ($P<0.05$)。

由于前作茬口顺序的不同,在第三年为同种类作物的不同轮作模式下,第三年作物产量和 WUE 相互之间差异性也达到显著或极显著水平。以第三年为春小麦的轮作系列为例,由表 7-4 显示,各个轮作模式下的第三年的作物产量由高到低依次为 WWW>MWW>PWW>WPW>PPW>WMW>PMW>MPW>MMW,其中 WWW 模式的第三年春小麦产量最高,为 $342.2\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与除 MWW 之外的其他模式之间差异显著 ($P<0.05$),与除 MWW 和 PWW 之外的其他模式之间差异达极显著 ($P<0.01$),这可能与前两年春小麦收获后休闲期雨季较大的降水能够较多地渗入到 120cm 以下深层土壤有关。MMW 模式中的春小麦产量最低,为 $117.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与除 WMW、PMW、MPW 之外的其他模式第三年春小麦产量之间差异显著 ($P<0.05$)。从轮作模式的作物顺序看,前作作物中春小麦比例较大的模式其第三年春小麦的产量较高,如 WWW、MWW 和 PWW 模式;前两年谷子及马铃薯比例较大的轮作模式下,第三年春小麦产量较低,如 MMW、MPW 和 PMW,这也与前作作物对土壤肥力的消耗强度有关。

(三) 轮作期间作物的产量及水分利用效率的动态变化

作物的产量受当年降水的影响很大。2003~2005 年轮作期间,降水量逐年减小,

同种作物的产量随之下降(表 7-4)。如 WPW、WMW、PWW、MWW 轮作方式中的春小麦产量变化; PPW、PMP、PPP、PWP、WPP、PPM 方式中的马铃薯产量动态; WMM、PMM、MWM、MPM 方式中的谷子产量变化,其中有第一、第二年谷子连作的方式例外,如 MMM、MMP、MMW,可能由于苜蓿茬后轮作第一年的谷子为土壤集纳了较多的水分引起第二年谷子产量的提高。

然而,不论何种轮作方式下的春小麦,其水分利用效率呈增加趋势,如 WWW 方式。当前茬为谷子时,后作春小麦的 WUE 反而下降,如 WMW、WPW、PWW、MWW、WWP、WWM 中的春小麦;由马铃薯所参加的轮作使半干旱区作物生产资源具有较高的利用率,苜蓿茬后轮作第一年的马铃薯的 WUE 最高,谷子的 WUE 逐年下降。所以,春小麦不能以谷子为前茬作物,马铃薯应在苜蓿翻耕后轮作。

五、小结

(1) 经过在 10 年生退化苜蓿草地进行了连续 3 年的 27 种作物轮作模式的试验表明,轮作作物种类和组合方式不同,对土壤水分消耗的强度及深度不同,导致土壤含水量出现较大差异。轮作期间第一年轮作作物对土壤水分恢复起主要作用。轮作第一年以种植马铃薯为宜。

(2) 在 3 年不同降水年型中,马铃薯都表现出较大的产量和水分利用效率,适宜宁南山区的气候条件,是草粮轮作的首选作物;春小麦收获后休闲期有利于雨季降水在土壤的下渗,保持了农地水分的平衡,所以当土壤水分过耗时以种植春小麦为宜,可利用其收获后休闲期来集纳雨季降水,以促进农田水分平衡。

六、讨论

(一) 草粮轮作对苜蓿土壤水分含量和水分利用效率的影响

李玉山(2001b, 2002)和 Xu 等(2006)认为,在中国黄土高原半干旱地区,紫花苜蓿应该调节和保持草地适度生产力,以维持土壤水分平衡,调节和保持草地生产力的主要措施包括降低密度、缩短生长年限和草本植物间混作。Bullied 和 Entz(1999)以及程积民等(2005)认为紫花苜蓿进入衰退期后土壤水分可自然恢复,但是这样会造成对农地和降水资源的极大浪费。山仑和陈国良(1993)认为苜蓿应生长到 4 年后就进入草粮轮作系统,以恢复土壤水分。

草粮轮作对苜蓿草地的恢复效应主要表现在 120~200cm 深度。在不同降水年型下,0~120cm 土层含水量受外界气候影响波动很大,也与当地较强的风力和日光辐射有关,这样导致 0~100cm 土壤水分蒸散强烈,该层水分常处于与大气剧烈交换状态。而 120~200cm 土层水分随着轮作年限的增加一直保持上升趋势,很少受年降水量大小的影响,这与黄高宝等(2006)研究结论一致。对照中的 10 年生苜蓿随着生长年限的延长,120~200cm 土层水分逐年稍有上升,但没有草粮轮作效果明显,所以可用 120~200cm 土层含水量变化反映草粮轮作的恢复效应。因此,对 120~200cm 土层及以下深度水分的储存和对当年降水的充分利用成为作物增产的主要途径。

降水对土壤水分的影响是主要的。草粮轮作地和对照苜蓿地 0~200cm 土壤水分随年降水量减少而逐年下降,但 120~200cm 土壤含水量均表现出恢复趋势,表明老化苜蓿草地土壤水分有自然恢复现象(刘忠民等,1993),但对照苜蓿地 0~100cm 和 120~200cm 土层含水量均低于各草粮轮作农田(王俊等,2004)。经测定,退化苜蓿产草量随年降水量的不断递减而递减,2003~2005 年的苜蓿鲜草产量依次约为 $4000\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $3600\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2900\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,基本依赖于前一年和当年降水,与有关研究结论一致(李玉山,2002)。所以,产草量也是影响苜蓿草地水分的重要因素。

通常认为,同种耕作方式下,轮作种植的土壤水分含量与水分利用效率均明显高于连作(马月存等,2007)。张立峰等(2001)试验结果显示,不同作物与同一作物不同茬口的水分利用效率(WUE)差异显著,倒茬对作物生长季水分利用效率的影响可达 11.44%~46.66%,作物的生长期需水与降水供应的时序吻合状况也对作物水分利用效率的影响较大。所以本试验中马铃薯生育期与降水季节同步,水分利用效率较高。

(二) 轮作作物产量

大多研究表明,苜蓿耕翻后轮作的粮食作物具有较高的经济产量(Bagayoko et al., 1996),主要是苜蓿根瘤固氮作用使粮食作物农田的土壤氮含量和有效性均显著增加(Baldock et al., 1981)。在半干旱地区,作物增产主要依赖于生育期间的有效降水和播种前的土壤蓄水(严昌荣等,2002)。本试验中,10 年生苜蓿导致土壤水分严重缺乏,对轮作作物的增产作用没有得到发挥,导致作物生育关键期的水分亏缺,造成严重减产,与有关结论一致(冷石林等,1996)。轮作作物中,马铃薯和谷子生育期在 4 月下旬到 10 月初,生育关键期正好处于 7~9 月雨季,所以更适应当地气候条件,产量较高,与有关结论一致(王晓凌等,2007)。

马铃薯生育期与当地雨、热同步,产量最高,是最适合当地种植的作物;春小麦生育期在 3 月底到 7 月中旬,而雨季常在 7~9 月,收获后雨季才来临,生育期和雨季降水极不吻合,降水不能被充分利用,产量较低。因而,作物生育期与降水同步协调是作物增产的关键,提高轮作模式整体作物产量的有效途径是最大限度地增加雨季土壤降水入渗深度和入渗量,促进苜蓿土壤干层水分恢复。

(三) 轮作作物次序

在宁南半干旱地区,水分不足导致作物对养分难以有效而充分地利用、苜蓿根瘤固氮难以发挥肥力优势。探寻既有明显土壤水分恢复效应又有较高作物产量的轮作模式是本试验研究的目的所在。

由于不同作物轮作处理也对土壤水分影响很大,因此不同的作物轮作顺序对土壤水分恢复及产量的提高非常重要。田秀萍等(2000)认为作物实行轮作制时,要注意选择茬口位点,茬口位点不同,作物产量也不同。Fischer 等(2002)认为,前茬较低的土壤水分和当季作物较大的水分需求量是影响后作作物水分供应和产量提高的主要因素。土壤水分恢复受不同种类作物轮作的影响差异较大。Gregory 等(2005)认为作物轮作的多样化可减小地表径流,Gouranga 等(2004)试验证明轮作有利于有效缓解干旱状

况,因而合理的草粮轮作次序可以提高土壤含水量,促进养分有效利用。刘忠民等(1993)的试验认为,苜蓿翻耕后第一年轮作谷子有利于干土层水分的恢复,与本试验结果相同,这也是宁南当地农户的传统做法。可能由于降水可沿着谷子茎秆直接导入根部土壤,减少了水分滞留地面的时间,降低了无效蒸发和地面径流损失,而且根系较深,深层土质疏松,水分下渗深度较大。而王俊等(2004)在半干旱区的试验研究结果认为,从土壤水分恢复角度分析,苜蓿种植后不宜种植谷子,以轮作马铃薯为宜,从肥力角度看,第二年以种植春小麦为宜。

第六节 不同草粮轮作方式土壤养分动态及氮素利用效率比较

苜蓿生长期间,能够为土壤提供大量的氮素和有机质(Gudni and Craig, 2003),改善土壤结构(Malhia and Lemke, 2007),减少碳、氮、磷淋失。所以,苜蓿草地翻耕后是粮食作物上好的前茬。但是不同作物轮作方式对苜蓿草地土壤氮、磷素的吸收利用效率不同,表现出不同的土壤理化性状,从而形成差异较大的茬口特性。茬口特性是前茬作物通过对土壤理化性质的作用(王立祥, 2001),影响到后作作物的产量水平(张保烈, 1984)。在作物栽培上运用作物与土壤、土壤与作物之间的关系,合理安排前作与后作的轮换顺序,使之获得增产并取养地之效,具有重要意义。如能利用不同种类作物的茬口特性合理轮作,可改善土壤中的水、肥、气、热等状况,既能维持土壤能力,又能防止病虫害的危害,从而促进增产。本节重点研究了3年轮作期间土壤养分动态变化和27种草粮轮作方式对氮素的利用状况,以期为更好地布置第四年轮作做准备。

一、土壤养分动态

图7-53~图7-58分别是不同草粮轮作方式土壤各个养分在2003~2005年3年期间的动态变化。图中横坐标1, 2, 3, 4分别代表轮作前苜蓿翻耕时和第1~3年轮作作物收获期土壤的养分含量。

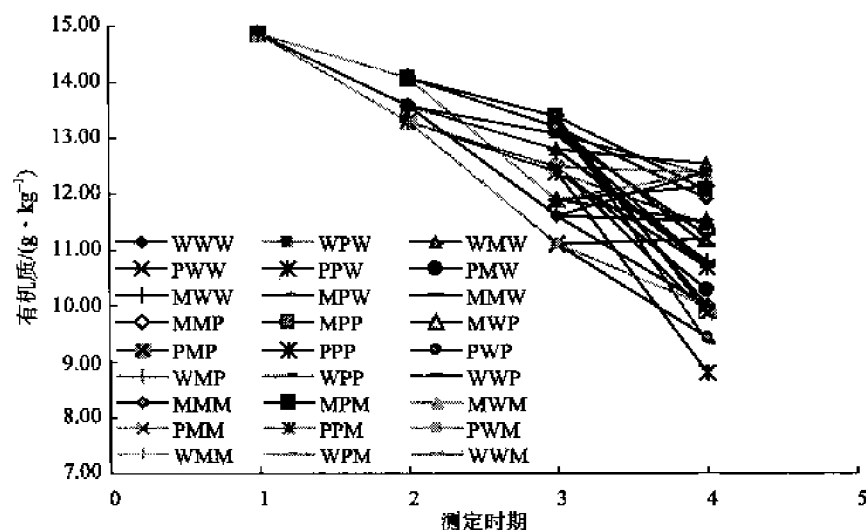


图 7-53 有机质动态变化

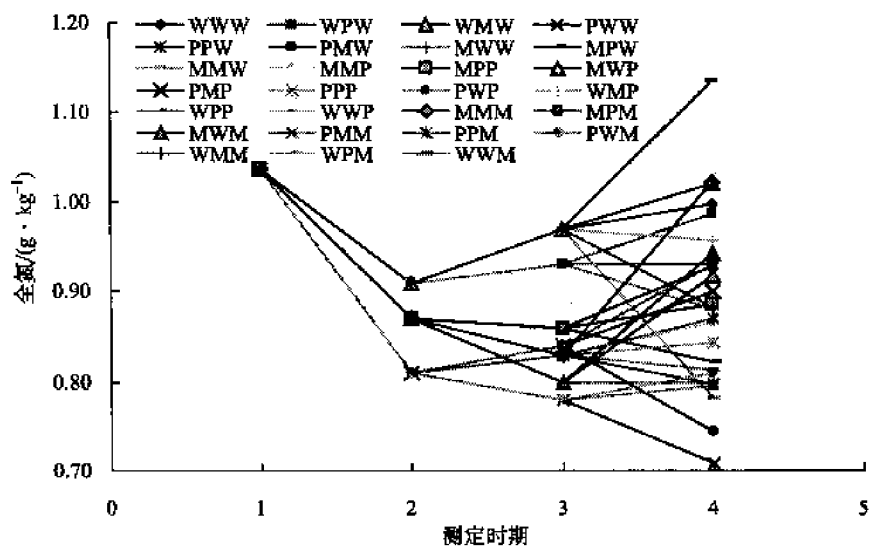


图 7-54 全氮动态变化

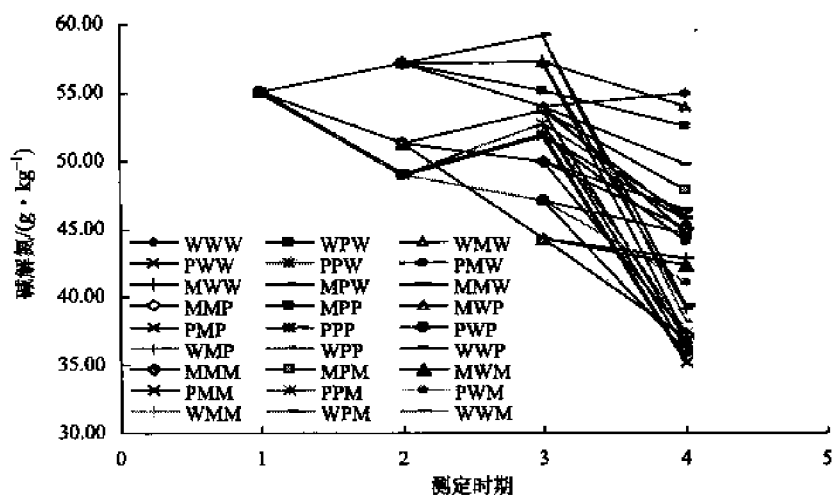


图 7-55 碱解氮动态变化

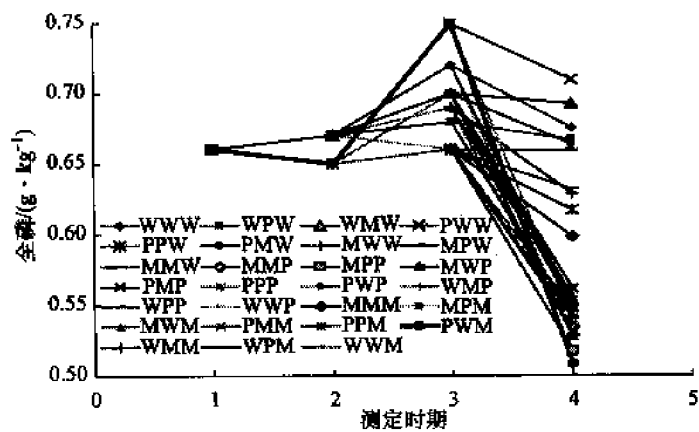


图 7-56 全磷动态变化

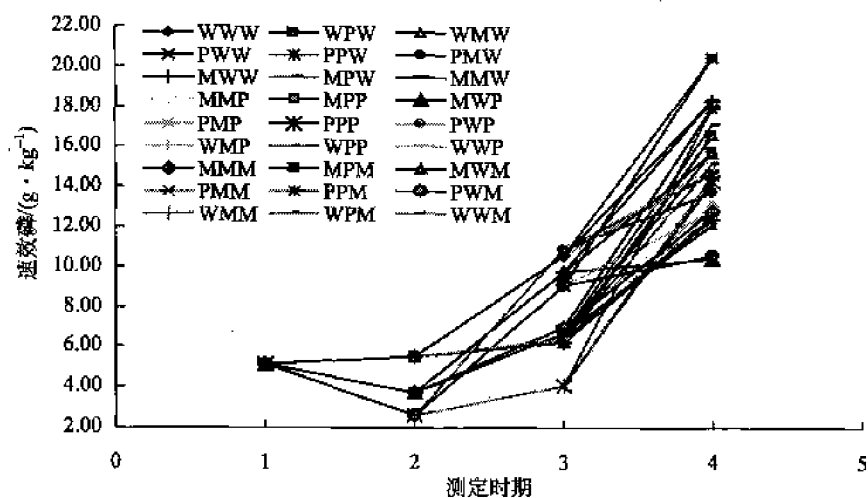


图 7-57 速效磷动态变化

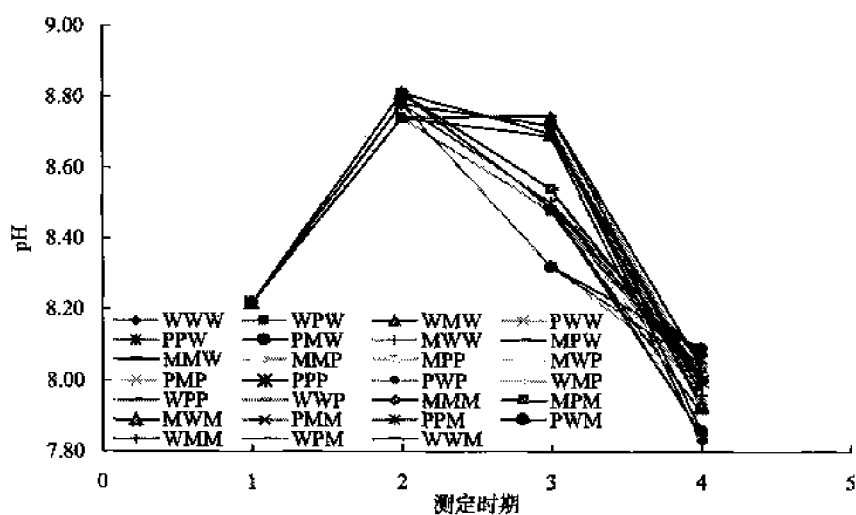


图 7-58 土壤 pH 动态变化

(一) 有机质动态

苜蓿地耕翻轮作后, 土壤有机质含量不断下降。图 7-55 显示, 第一、第三年轮作的马铃薯下降幅度最大, 春小麦次之, 谷子最小。第二年轮作作物中, 春小麦的土壤有机质下降最多, 不论前茬为春小麦、马铃薯或谷子。这可能与轮作作物的种类和当年产量有关, 产量越高, 有机质下降幅度越大。轮作方式 PPP 产量最高, 有机质下降幅度最大, 由轮作前的 $16.86\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $8.82\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所以高产作物连作导致有机质含量下降最快。

(二) 全氮

全氮受作物产量和土壤水分的影响变化明显。第一年轮作的马铃薯产量(5:1折粮后)最高,谷子产量次之,春小麦产量最低,分别为 $2658.0\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $1485.8\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $364.1\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,第一年轮作作物收获后,马铃薯、谷子和春小麦的0~60cm土层全氮含量大小依次为 $0.910\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.870\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.810\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。第二年作物收获后,春小麦茬口上的各个作物田全氮均增加,这与第一年春小麦产量较低并遗留较多的氮素有关;谷子茬口后的作物农地全氮均减小,由于第一年谷子产量较高并消耗了较多的养分;马铃薯茬口后除春小麦收获地全氮减小外,其他农地全氮均增加。WWM方式第三年的谷子全氮最高,PWW的全氮最低,这与当年的干旱状况和作物种类有关。这还与前茬遗留的水分含量高低有关,如前作为春小麦时,能够利用休闲期积蓄雨季降水,促进了后作作物对养分的利用,全氮含量下降幅度较大,如PWW、WWP、PWM等轮作方式,所以要注意水肥协调,增产增效。

(三) 碱解氮

碱解氮含量变化更能体现作物的产量高低。由于第一年春小麦产量最低,不能充分利用苜蓿地氮素和所施氮肥,故第二年继续施肥后碱解氮含量持续增加,直到第三年被轮作作物充分利用后才大幅度下降;第一年马铃薯后轮作的第二年马铃薯和谷子全氮增加,第三年又减少,春小麦及其第三年所有的作物田全氮均下降,MWM轮作三年中下降趋势最为明显。

(四) 全磷

除第一年为马铃薯的轮作方式全磷稍有减少外,其他轮作作物均增加,第二年轮作中,谷子茬后的马铃薯全磷下降,其余所有轮作作物地的全磷均增加。这说明马铃薯对磷素需求量大。由于三年所施磷肥量基本相同,说明施磷肥过量或者前两年有效磷含量低,作物难以利用。而到第三年时,所有作物田全磷都下降,轮作促使有效磷含量增加,尽管降水不足,但作物消耗磷素较多。所以,轮作可提高磷的有效性。

(五) 速效磷

除轮作第一年马铃薯和谷子收获地速效磷下降而春小麦地速效磷稍有上升外,其他轮作年份所有的轮作作物田速效磷含量均增加,这可能与每年播期施磷肥过量有关,还主要与轮作年份的降水量有极大关系。第一年降水较多,速效磷能被充分利用。而在第二、第三年轮作期间,降水量持续大幅减少,磷素吸收受到阻碍,特别在2005年大旱之年,作物不能充分利用,加上施肥后,土壤速效磷含量大幅上升,极度过剩。这说明土壤水分影响作物对磷素的吸收,同时进一步说明轮作增加了磷素的有效性。

(六) pH

第一年轮作后,0~60cm土层的pH大幅上升,盐碱化加剧,但是在第二年以后得

到逐渐缓解,尤其在第三年下降幅度最大,可由第一年收获期的 8.74~8.81 下降到第三年收获期的 7.83~8.09。这说明草粮轮作可降低土壤的盐碱化程度。

二、不同轮作方式的作物氮素利用效率

氮素是植物生长所需的大量元素之一,通常植物生长过程中吸收的氮要高于其他矿物质元素,因而氮常成为限制植物生长的主要元素。氮素一方面是植物在土壤中需求量最大的元素,另一方面又是最易通过淋溶或挥发从土壤中损失的元素,因此氮素一直就是土壤养分研究的重点。氮素养分利用效率是指在单位面积 (hm^2) 的农田上每单位 (kg) 氮素可生产的作物产量 (kg),通常用 $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 表示。通过氮素养分利用效率可以表示单位氮素产生的经济效益值。

由表 7-5 可看出,不同轮作方式的作物搭配组合中,马铃薯和谷子轮作比例较大的方式,其氮素利用效率较高,其中 PMM 最高,为 $39.140 \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$,与其余所有的轮作方式之间差异性极显著 ($P < 0.01$)。春小麦参与比例较大的轮作方式氮素利用效率较低,如 WWW、MWW、PWW、WWM 和 WWP 轮作方式为 $8.192 \sim 10.193 \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围,与其余轮作方式的氮素利用效率之间差异性极显著 ($P < 0.01$)。

表 7-5 27 种不同草粮轮作方式的作物总产量及 N 素利用效率比较

轮作方式	第 1 年轮作播期/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	第 3 年轮作收获期/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	3 年总施氮量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	总耗氮量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	轮作作物总产量/ $(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$	氮素利用效率 (NUE) / $(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$
WWW	1.037	0.898	0.026	0.166	1355.6No	8.192Jk
WPW	1.037	0.888	0.026	0.176	3333.9Jjk	18.998FGf
WMW	1.037	0.921	0.026	0.143	2025.8Mn	14.178Ihi
PWW	1.037	0.710	0.026	0.354	3299.2Jjk	9.320Jjk
PPW	1.037	0.798	0.026	0.266	5214.5CDd	19.612Ff
PMW	1.037	0.745	0.026	0.319	4691.5EFf	14.726Ihi
MWW	1.037	0.799	0.026	0.265	2245.3Mn	8.483Jjk
MPW	1.037	0.823	0.026	0.240	4148.2Ggh	17.257GHg
MMW	1.037	0.814	0.026	0.249	3382.3Uj	13.574Li
MMP	1.037	0.866	0.026	0.198	4584.8Ff	23.217Ee
MPP	1.037	0.886	0.026	0.178	5537.1Cc	31.146Cc
MWP	1.037	0.918	0.026	0.145	3736.3Hli	25.735Dd
PMP	1.037	0.900	0.026	0.164	5913.8Bb	36.152Bb
PPP	1.037	0.843	0.026	0.221	6555.9Aa	29.708Cc
PWP	1.037	0.810	0.026	0.254	4806.8EFef	18.963FGf
WMP	1.037	0.957	0.026	0.107	3169.3JKjk	29.736Cc
WPP	1.037	0.930	0.026	0.133	4733.9EFef	35.492Bb
WWP	1.037	0.782	0.026	0.281	2868.1Kl.lm	10.193Jj
MMM	1.037	0.932	0.026	0.132	3893.3GHhi	29.611Cc
MPM	1.037	0.928	0.026	0.136	4991.2DEde	36.814Bb
MWM	1.037	0.942	0.026	0.121	3088.4JKl.kj	25.444Dd

续表

轮作 方式	第1年轮作播 期/(g·kg ⁻¹)	第3年轮作收获 期/(g·kg ⁻¹)	3年总施氮 量/(g·kg ⁻¹)	总耗氮 量/(g·kg ⁻¹)	轮作作物 总产量 /(kg·hm ⁻²)	氮素利用 效率 (NUE) /(kg·kg ⁻¹ ·hm ⁻²)
PMM	1.037	0.930	0.026	0.134	5224.5CDd	39.140Aa
PPM	1.037	0.871	0.026	0.193	6031.2Bb	31.302Cc
PWM	1.037	0.795	0.026	0.268	4205.1Gg	15.674HIgh
WMM	1.037	0.882	0.026	0.181	2751.5Im	15.178HIhi
WPM	1.037	0.882	0.026	0.182	4171.8Gg	22.924Ee
WWM	1.037	0.836	0.026	0.228	2296.2Mn	10.094Jj

注：同列中不同的大小写字母分别表示在1%和5%水平上差异显著。

作物总产量在 5000kg·hm⁻² 的轮作方式分别为 PMM、PMP、PPM、MPP、PPP 和 PPW，PMM、PMP、PPM、MPP、PPP 的氮素利用效率也较高，为 29.708～39.140 kg·kg·hm⁻²。通过上述有机质动态变化可知，PPP 轮作方式在第三年收获期已经下降到最低点，不利于第四年的作物轮作，所以只能在其他方式中选择最具经济效益的轮作方式付诸实际生产中。然而，要在宁南旱区选择最优化的轮作模式加以推广，还需要与苜蓿土壤干层水分恢复效应、轮作总产量、水分利用效率和降水利用效率等多个指标相结合。

三、小结

苜蓿地耕翻轮作后，土壤有机质含量不断下降，尤其高产作物连作导致有机质含量下降最快。氮素受作物产量和土壤水分的影响变化明显。轮作可提高磷的有效性。马铃薯对磷素需求量大。土壤水分影响作物对磷素的吸收。草粮轮作可减少土壤的盐碱化程度。高产作物比例较大的轮作方式总产量和氮素利用效率均较高，如 PMM、PMP、PPM、MPP、PPP 轮作方式。

四、讨论

(一) 苜蓿草地轮作后土壤养分变化

苜蓿草地轮作后土壤养分一般是逐年下降的。有研究认为，由于耕作过程增加了对土壤的干扰，苜蓿草地轮作为农田后土壤全氮和有机质会迅速下降，土壤退化过程加速 (Yang and Kay, 2001)。王俊等 (2005) 通过多年生苜蓿草地轮作两年农田的试验结果表明，与苜蓿连作相比，土壤耕层全氮、有机质下降，土壤全磷无显著变化，轮作提高了土壤氮、磷养分有效性及其活化率，不同轮作方式对土壤养分变化有显著影响，因此有必要选择合适的轮作方式来维持土壤肥力平衡。这些都与本试验研究结论一致。有研究表明 (杨改河, 1993; 袁宝财等, 2001)，苜蓿茬口的养分效应可以维持三、四年以上。

本试验中 10 年生苜蓿草地氮素含量并不高。测定结果表明，6 年生和 10 年生苜蓿草地 0～60cm 土层速效氮含量分别为 49.00mg·kg⁻¹ 和 55.07mg·kg⁻¹，差异不明显；

速效磷含量分别为 $6.11\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.17\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.01$), 所以有研究认为, 苜蓿生长过程中根瘤固氮可能主要用于自身生长所需, 仅有少量枯枝落叶和根系的腐烂及微生物分泌物等提供少量氮源。苜蓿生长过程中需要大量消耗土壤水分和养分, 尤其是对土壤磷素消耗量较大。而且刈草使生物量从田间生态系统不断带出, 导致土壤中速效氮、速效磷不断减少。因而, 老苜蓿地翻耕种植禾本科作物时, 施氮补磷是后作作物增产的关键 (刘孟雨等, 1998)。

(二) 苜蓿茬后轮作作物的产量状况

由本章第五节轮作期间作物各年产量结果显示, 苜蓿草地轮作第一年作物增产效果明显, 以后逐年下降。刘成龙等 (2007) 认为, 随着苜蓿茬后轮作玉米种植年限的增加, 苜蓿固定的氮素、残根有机质减少, 家畜粪便的肥力减小, 从而使地力减弱。另外, 病虫害开始增加, 使玉米增产幅度减小。

降水对氮素的增产效果有明显影响。2003~2005 年降水下降幅度较大, 同类作物产量也随之逐年减小。樊廷录等 (2004) 研究表明, 苜蓿茬后轮作的同类作物氮素利用效率的逐年降低也可能与轮作期间的降水量逐年下降有关。

第七节 宁南旱区最佳草粮轮作模式的确定

有研究认为草粮轮作可以有效恢复苜蓿干土层水分 (王俊等, 2004)。然而, 到目前为止, 将退化苜蓿草地翻耕后进行轮作, 从土壤水分恢复和轮作作物产量效应等综合指标方面对多种轮作模式优化的研究还未见报道。在中国宁南旱区将 10 年生苜蓿地耕翻后, 进行了连续 3 年的定位轮作试验, 研究不同草粮轮作模式土壤水分恢复效应和轮作作物的产量效应, 从生态效益和经济效益两方面对其进行优化比较, 为同类地区农牧业的可持续发展及合理选择草粮轮作模式提供理论依据。

一、不同草粮轮作模式对苜蓿土壤水分的恢复效应

2005 年 10 月雨季结束时, 即轮作第三年各小区作物全部收获后, 对各轮作模式作物收获地 0~200cm 土壤水分统一进行了测定, 发现各轮作模式的土壤水分都有不同程度的恢复, 结果见表 7-6。

表 7-6 不同草粮轮作模式 0~2m 土层水分恢复及作物产量效应

轮作模式	轮作结束土壤水分/mm	生育期降水总量/mm	生育期耗水总量/mm	作物总产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	WUE ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	降水生产效率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)
WWW	270.77Aa	269.1	353.8	1355.6No	3.8318Mm	1.7863Mm
WPW	261.90ABCabc	388.0	455.9	3333.9Jjk	7.3125GHf	4.3930Iji
WMW	257.60ABCDabc	388.0	462.1	2025.8Mn	4.3836LMl	2.6693Li
PWW	268.80ABab	424.4	401.4	3299.2Jjk	8.2196DEcd	4.3474Ji

续表

轮作模式	轮作结束土壤水分/mm	生育期降水总量/mm	生育期耗水总量/mm	作物总产量 (kg·hm ⁻²)	WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	降水生产效率 (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
PPW	254.58ABCDbc	543.3	556.0	5214.5CDd	9.3786Bb	6.8711DEd
PMW	257.40ABCDabc	543.3	544.7	4691.5EFf	8.6136CDe	6.1820Fef
MWW	268.93ABab	424.4	413.0	2245.3Mn	5.4373IJKij	2.9587Ll
MPW	253.15ABCDEcd	543.3	576.4	4148.2Ggh	7.1962GHf	5.4661GHg
MMW	253.80ABCDbc	543.3	579.6	3382.3Uj	5.8357IJhi	4.4567Iji
MMP	248.49BCDEFcd	646.7	633.3	4584.8Ff	7.2398GHf	6.0414Fi
MPP	250.77ABCDEcd	646.7	650.5	5537.1Ce	8.5117Dcd	7.2962CDe
MWP	238.08DEFGdef	527.8	491.7	3736.3Hh	7.5989EFGef	4.9233Hih
PMP	232.88EFGefg	646.7	640.7	5913.8Bb	9.2301BCb	7.7926BCb
PPP	246.83CDEFcde	646.7	621.9	6555.9Aa	10.5419Aa	8.6387Aa
PWP	258.27ABCDabc	527.8	506.7	4806.8EFef	9.4864Bb	6.3338EFef
WMP	246.44CDEFcde	491.4	535.8	3169.3JKjk	5.9147Ihi	4.1762JKij
WPP	251.93ABCDEcd	491.4	555.1	4733.9EFef	8.5282Dcd	6.2379Fef
WWP	257.70ABCDabc	372.5	430.0	2868.1KLlm	6.6702Hg	3.7792Kjk
MMM	217.67GHgh	646.7	659.0	3893.3GHhi	5.9075Ihi	5.1301GHb
MPM	222.68GHg	646.7	668.5	4991.2DEde	7.4668FGf	6.5769EFde
MWM	228.84FGfg	527.8	518.2	3088.4JKLkj	5.9601Ih	4.0695JKij
PMM	219.74GHgh	646.7	649.9	5224.5CDd	8.0384DEFde	6.8843DEd
PPM	206.77GHgh	646.7	654.0	6031.2Bb	9.2217BCb	7.9473Bb
PWM	224.20GHfg	527.8	507.9	4205.1Gg	8.2797Dcd	5.5410GHgh
WMM	223.05GHfg	491.4	564.4	2751.5Lm	4.8747KLk	3.6256Kk
WPM	221.18GHgh	491.4	580.0	4171.8Gg	7.1924GHf	5.4972Gg
WWM	229.89FGfg	372.5	443.2	2296.2Mn	5.1814JKjk	3.0257Li

注：同列中不同的大小写字母分别表示在 1% 和 5% 水平上差异显著。马铃薯产量以 5:1 折粮计。

经过方差分析显示, WWW 轮作模式土壤水分含量最高, 为 270.77mm, 与除 MWW、PWW、WPW、PWP、WWP、WMW 和 PMW 之外的其他模式之间差异显著 ($P < 0.05$), 与除 MWW、PWW、WPW、PWP、WWP、WMW、PMW、PPW、MMW、MPW、WPP 和 MPP 之外的其他模式之间差异达极显著 ($P < 0.01$) 水平, 这与春小麦收获后较长休闲期内适逢雨季较大的降水有关。PPM 模式的土壤含水量最低, 仅 206.77mm, 与除 MMM、PMM、苜蓿连作和 WPM 之外的其他模式之间差异极显著 ($P < 0.05$), 与除 MMM、PMM、苜蓿连作、WPM、MPM、WMM 和 PWM 之外的其他模式之间差异达极显著水平 ($P < 0.01$), 这可能与第一、第二年轮作了产量较高、耗水量较大的马铃薯后, 继续在 2005 年干旱年份中种植了抗旱性较强的谷子有关, 从而导致土壤水分被持续消耗利用, 不能及时得到补偿和恢复。因此, 轮作模式中作物对水分的消耗有叠加效应, 为使土壤水分达到协调平衡持续利用, 高产作物不能连年种植。

尽管年降水量不断下降, 继续生长的对照小区苜蓿土壤水分也得到恢复, 轮作前苜

苜蓿开垦地 0~200cm 土壤含水量为 203.89mm, 三年后 0~200cm 土壤含水量为 220.60mm, 自然恢复了 16.71mm, 表明苜蓿草地土壤上层水分有自然恢复的趋势, 这可能与苜蓿生产力持续下降有关。

对照苜蓿土壤水分与 PMP、WWM、MWM、PWM、WMM、MPM、WPM、PMM、MMM 和 PPM 模式之间差异不显著, 表明第三年降水量极少的情况下种植谷子对水分消耗强烈, 谷子有较强的耐旱性。以上这些轮作模式对苜蓿干土层水分恢复效果不明显。

二、不同草粮轮作模式的作物产量效应

(一) 作物总产量

不同草粮轮作模式的作物总产量差异较大。如表 7-6 所示, 产量较高的轮作模式依次为 PPP>PPM>PMP>MPP>PMM>PPW>MPM>PWP>WPP, 为 4733.9~6555.9kg·hm⁻², 均与除 PMW 和 MMP 之外的模式作物总产量间差异极显著 ($P<0.01$), 其中 PPP 模式产量最高, 为 6555.9kg·hm⁻², 与其余所有模式差异极显著 ($P<0.01$); 产量较低的轮作模式依次为 WWW<WMW<MWW<WWM, 为 1355.6~2296.2kg·hm⁻², 均与其余模式差异极显著 ($P<0.01$), 其中 WWW 模式产量最低, 仅为 1355.6kg·hm⁻², 与其他所有模式差异达极显著水平 ($P<0.01$)。可见, 马铃薯种植年份比例较大的轮作模式总产量较大, 谷子次之, 春小麦最低。

(二) 水分利用效率

不同草粮轮作模式的作物水分利用效率 (WUE) 差异也很大。WUE 较大的轮作模式依次为 PPP>PWP>PPW>PMP>PPM, 范围为 9.2218~10.5419kg·hm⁻²·mm⁻¹, 其中 PPP 最大, 为 10.5419kg·hm⁻²·mm⁻¹, 与其余所有模式之间差异达极显著水平 ($P<0.01$), PWP、PPW、PMP 和 PPM 与除 PPP 之外的轮作模式 WUE 之间差异显著 ($P<0.05$), 说明马铃薯轮作比例较大的模式 WUE 也较大。WUE 较低的模式依次为 WWW<WMW<WMM<WWM<MWW<MMW<MMM<WMP<MWM, 范围为 3.8317~5.9601kg·hm⁻²·mm⁻¹, 其中 WWW 最小, 与其余模式差异显著 ($P<0.05$), 与除 WMW 之外的所有模式之间差异极显著 ($P<0.01$)。这说明禾谷类作物 (尤其春小麦) 比例较大的轮作模式水分利用效率较低。

(三) 降水生产效率

轮作期间, 2003~2005 年降水总量均为 758.9mm, 因而不同轮作模式降水生产效率之间差异性与总产量一致。降水生产效率较大的轮作模式依次为 PPP>PPM>PMP>MPP>PMM>PPW>MPM>PWP>WPP, 为 6.2379~8.6387kg·hm⁻²·mm⁻¹, 与除 PMW 和 MMP 之外的其余模式间差异极显著 ($P<0.01$), 其中 PPP 的降水生产效率最大, 为 8.6387kg·hm⁻²·mm⁻¹, 与其余所有模式差异极显著 ($P<0.01$); 降水生产效率较低的轮作模式依次为 WWW<WMW<MWW<WWM, 为 1.7863~

$3.0257\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 均与其余模式差异极显著 ($P < 0.01$), 其中 WWW 模式最低, 仅为 $1.7863\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 与其他所有模式差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。可见, 马铃薯比例大的轮作模式降水生产效率较高, 轮作模式均为禾谷类作物的降水生产效率较低。

从以上指标比较结果可知, 马铃薯应是适合当地草粮轮作的首选作物, 在各轮作模式中不同年份均具有较高的产量、WUE 和降水生产效率; 谷子次之; 春小麦最低。

三、最佳草粮轮作模式的确定

各草粮轮作模式中作物组合不同, 对土壤水分利用强度和深度不同, 导致轮作完成后各轮作模式的土壤含水量、作物总产量、水分利用效率和降水利用效率间差异显著, 甚至达极显著水平。由于 2002~2005 年轮作期间降水、施肥及气候条件相同, 不影响对各个轮作模式的作物水分利用、产量之间的比较, 轮作完成后, 土壤水分恢复效应和轮作作物总产量均较高的模式即为最优化的草粮轮作模式。

表 7-6 中, 轮作完成后 WWW 模式土壤含水量最高, 为 270.77mm, 是由于各年小麦收后休闲期恰遇 7~9 月雨季降水补偿而达到较好的恢复效果, 这部分水分没有被作物充分利用, 以致轮作总产量、WUE 和降水生产效率均最低, 即该模式对有限降水资源利用不充分; PPP 模式的轮作作物总产量、WUE、降水生产效率均最高, 但轮作完成后土壤水分恢复效应较差, 不利于翌年作物生长, 尤其马铃薯连作易出现退化现象, 病虫害增加, 薯块减小。因而 WWW、PPP 模式各有缺点, 不能作为最佳模式在实际生产中推广应用。

因此, 为保障草粮轮作的生态效益和经济效益同步稳定提高, 最佳的轮作模式必须同时满足以下 5 个方面要求: ① 0~200cm 土壤含水量应显著高于轮作前的苜蓿地, 各土层水分相当于或高于当年大田时才能达到轮作恢复目的; ② 具有较高的轮作作物总产量; ③ 具有较高的水分利用效率 (WUE); ④ 具有较高总降水生产效率; ⑤ 具有较高的氮素养分利用效率。只有同时满足以上条件时才是最优化的草粮轮作模式。

通过综合比较以上指标, PPW、PWP 和 PMW 为较好的草粮轮作模式, 其中 PPW 为最佳模式。轮作完成后, 它们的土壤水分、轮作作物总产量、WUE、降水生产效率均在 27 种轮作模式中较高, 与大多数模式间差异达显著或极显著水平。PPW 轮作模式的 0~200cm 土壤水分、轮作作物总产量、WUE、降水生产效率和土壤的氮素利用效率分别为 254.58mm 、 $5214.5\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9.3786\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $6.8711\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $19.612\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。PWP 模式以上各指标分别为 258.27mm 、 $4806.8\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $9.4864\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $6.3338\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $18.963\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。生产中需要有谷子的轮作模式为 PMW, 其以上各指标依次为 257.40mm 、 $4691.5\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $8.6136\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $6.1820\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $15.674\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。它们的土壤水分恢复效果之间无差异, 在总产量和降水生产效率方面, PPW 与 PWP、PMW 模式间差异极显著 ($P < 0.01$), 在水分利用效率方面, PPW、PWP 与 PMW 模式差异极显著 ($P < 0.01$), 在氮素利用效率方面, PPW 与 PWP 间无差异性, 但它们与 PMW 之间差异性极显著 ($P < 0.01$)。相比较而言,

PPW 是最优化的轮作模式,它不仅能够较充分高效地利用有限的降水资源,获得高产,而且对土壤水分恢复效应明显,同时具有较高的生态效益和经济效益,可作为宁南当地较适宜的草粮轮作模式加以推广。

四、小结

在宁南旱区对退化苜蓿地的草粮轮作中,马铃薯产量较高,能够充分高效利用当年有限的降水资源,是较适宜的轮作作物。春小麦收获后的休闲期,土壤能够积蓄较多的雨季降水,水分及时得到补偿。在轮作模式中将马铃薯和春小麦相互搭配可取得较高产量,同时使农地土壤水分得到平衡和恢复。试验中 PPW 模式的土壤水分恢复量、作物总产量、WUE 和降水生产效率均较高,与其余模式间差异显著或极显著。PPW 轮作模式的 0~200cm 土壤水分、轮作作物总产量、WUE、降水生产效率和氮素利用效率分别为 254.58mm (其中 120~200cm 土层水分与轮作前苜蓿地相比,净恢复量为 24.73mm)、5214.5kg·hm⁻²、9.3786kg·hm⁻²·mm⁻¹、6.8711kg·hm⁻²·mm⁻¹和 19.612kg·kg⁻¹·hm⁻²,PPW 与其他草粮轮作方式相比,是最优化的轮作模式,能够同时获得较高的生态效益和经济效益。

由第三章得出结论:紫花苜蓿最佳生长年限为 5 年生。结合轮作作物对土壤水分恢复、作物总产量、水分利用效率、降水生产效率和氮素利用效率多方面指标综合分析,合理的草粮轮作模式应为“5 年生苜蓿—马铃薯—马铃薯—春小麦”,该模式可在宁南旱区加以推广应用。

五、讨论

(一) 草粮轮作对苜蓿土壤干层水分恢复

草粮轮作势在必行。在中国黄土高原地区,水分是作物产量形成、植被生长和生态恢复的首要限制因子(山仑和陈国良,1993)。据本试验测定,2002~2005 年试验区年降水量分别为 257.7mm、343.9mm、243.7mm、171.3mm,对照的 10~13 年生退化苜蓿鲜草产量分别约为 3500kg·hm⁻²、4000kg·hm⁻²、3600kg·hm⁻²、2900kg·hm⁻²,产草量变化仅依赖于当年降水量大小维持在很低状况,经济效益低下;轮作前苜蓿 0~200cm 土壤含水量 203.89mm,轮作后测定的对照苜蓿地该层土壤含水量为 220.60mm,自然恢复量 16.71mm,说明苜蓿土壤上层水分有自然恢复现象,与有关结论一致(刘忠民等,1993),然而产量效益和土壤水分均远低于轮作地。程积民等(2005)与 Bullied 和 Entz (1999)认为紫花苜蓿进入衰退期后土壤水分可自然得到恢复,但在宁南地区单靠自然恢复耗时太长,会造成农地资源和降水的极大浪费,水分恢复程度可能与当地降水格局有关。

李玉山(2002)认为,在中国黄土高原半干旱地区,为维持土壤水分平衡,紫花苜蓿应该调节和保持草地适度生产力,主要措施包括降低密度、缩短生长年限和草本植物间混作。但是在苜蓿生长中后期,鲜草产量随前一年和当年降水量的丰缺形成上下波动,土壤水分和产量仍然较低,均不能从根本上解决苜蓿地土壤干燥化问题。

面对老化苜蓿地水分难以恢复及产量低下的问题,山仑和陈国良(1993)提出苜蓿生长到4年后就应进入草粮轮作系统,以保持土壤水分平衡。已有研究证明,草粮轮作可促进苜蓿土壤干层水分恢复(王俊等,2004)。Gouranga等(2004)认为作物轮作的多样化有利于有效地缓解干旱状况。Gregory等(2005)试验证明轮作可减小地表径流和氮流失。本试验中绝大多数轮作模式比继续保持生长的苜蓿地水分恢复效果显著,甚至达极显著水平,同时取得了较高的经济效益。轮作作物种类和组合方式不同,对土壤水分消耗的强度及深度不同,导致土壤含水量出现较大差异。轮作模式中作物对水分的消耗有叠加效应,前作作物耗水特性影响后作作物土壤水分恢复程度。马铃薯虽然适合当地气候条件,产量较高,但耗水强烈,连作不利于水分恢复,且易发生马铃薯退化现象,所以不宜采用PPP连作模式。由于马铃薯和谷子对土壤水分消耗量较大,不能连作或相互搭配轮作,如PPM、MMM、MMP、MPM等模式。春小麦尽管产量较低,但能够在收获后休闲期使雨季降水及时积蓄于土壤,补偿作物生长消耗了的水分。因此,从水分恢复角度考虑,高产作物与春小麦搭配轮作,才能平衡和恢复土壤水分,如PWP和PPW模式。

(二) 轮作作物产量响应

大多研究表明,在半干旱区,苜蓿耕翻后轮作的粮食作物具有较高的经济产量(Bationo et al., 1998; Bagayoko et al., 1996; Stoop and Van Stavern, 1981; Nicou, 1978),主要由于苜蓿根瘤固氮作用使粮食作物田的土壤氮含量和有效性均显著增加(Pierce and Rice, 1988)。豆科牧草后轮作的谷类作物总干物质产量也较高(Bagayoko et al., 2000),草粮轮作的谷类作物干物质产量比连作增加490%~550%(Alvey et al., 2001)。

在中国黄土高原地区,土壤储水对增加和维持作物产量有着十分重要的作用(山仑和陈国良,1993)。旱地作物耗水主要来源于生育期间的有效降水和播种前的土壤蓄水(严昌荣等,2002)。作物生育关键期的水分亏缺容易造成严重减产(冷石林等,1996)。Fischer等(2002)也认为,前茬较低的土壤水分和当季较大的需水量影响后作作物水分需求和产量提高。

在宁南半干旱地区,水分不足导致作物对养分难以有效而充分地利用,苜蓿根瘤固氮难以发挥肥力优势。本轮作试验中,上年和当年降水量大小对作物产量及土壤水分的恢复影响很大。2003年作物产量普遍较高,降水343.9mm,也为2004年播期出苗奠定了较好的水分基础,所以尽管2004年降水量减小到243.7mm,但不影响作物生育期维持正常生长的供水,该年各轮作作物仍具有较高的产量。然而,2005年为历来罕见的干旱年份,降水仅171.3mm,既无2004年较多土壤蓄水遗留,也无当年足量降水及时补偿,苗期土壤水分供给不足,导致轮作作物全面减产。

轮作模式中作物生长期和雨季降水不同步是总产量低的主要原因。WWW轮作模式就是由于每年的春小麦生育期与雨季降水期不吻合,造成土壤水分不足,轮作总产量最低。本试验区的春小麦生育期在3月底到7月中旬,而雨季常在7~9月,生育期和雨季降水极不同步,产量相对很低。而马铃薯和谷子生育期在4月下旬到10月初,生

育关键期正好处于7~9月雨季,所以适应当地气候条件,产量高于春小麦,与有关结论一致(王俊等,2004)。

(三) 最佳草粮轮作模式的评价与优化

作物产量是反映经济效益的重要指标。WUE是反映作物生产力的可靠指示器,水分利用效率是研究作物产量、蒸腾耗水和地表蒸发之间相互消长关系的具体表现。但WUE可以随时空变化,受作物种类、土壤条件、农业措施(包括施肥和大气因素)影响较大(Mueller et al., 2005),本试验每年轮作的作物种类、品种、施肥水平以及降水量均一致,减小了影响因素对WUE的影响。也有人用降水利用效率对轮作模式进行评价(黄高宝等,2006)。刘忠民(1992)认为,以提高水资源利用效率为核心的旱作农业,必须更多地依靠提高生长季降水的利用率,而不是土壤储水。

本节综合以上评价指标,并结合土壤水分恢复效应,从几个指标对各个轮作模式的生态效益和经济效益进行了综合比较分析,全面地对草粮轮作模式进行优化评价。

王晓凌等(2007)用土壤干层相对恢复程度来表示苜蓿土壤干层水分恢复情况,效果较好。相对恢复程度用苜蓿翻耕后农田每年4月或10月土壤含水量与同期常规农田土壤含水量的比值表示,此值不受降雨量的影响。由于本试验工作量大,不能在常规农田重复以上轮作试验,无法与常规农田比较得出苜蓿土壤干层的相对恢复程度。

有研究表明,苜蓿翻耕后第一年轮作抗旱性较强的谷子有利于干土层水分的恢复(刘忠民等,1993),这也是宁南当地农户的传统做法。但王俊等(2004)和王晓凌等(2007)试验认为,从土壤水分恢复角度分析,苜蓿种植后不宜种植谷子,以轮作马铃薯为宜;而从肥力角度看,第二年以种植春小麦为宜(王俊等,2004),均与本试验的PWP轮作模式结论完全一致。

综合以上指标,本试验结果认为,PPW、PWP和PMW是宁南旱区草(苜蓿)-粮轮作系统中较好的轮作模式,与其他模式间差异显著。其中PPW为最佳模式,水分恢复效应、轮作作物总产量、WUE和降水生产效率等综合指标均较高,具有最佳的生态效益和经济效益。

参考文献

- 陈洪松,邵明安,王克林. 2005. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. 生态学报, 25 (10): 2491-2498.
- 程积民,万惠娥,王静,等. 2004. 黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复. 生态学报, 24 (12): 2979-2983.
- 程积民,万惠娥,王静. 2005. 黄土丘陵区苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 16 (3): 435-438.
- 党廷辉. 1998. 黄土旱塬区轮作培肥试验研究. 水土保持学报, 4 (3): 44-47.
- 杜世平,王留芳,龙明秀. 1999. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究. 草业科学, 18 (1): 12-15.
- 樊军,郝明德,邵明安. 2004. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报, 20 (1): 61-65.
- 樊廷录,周广业,王勇,等. 2004. 甘肃省黄土高原旱地冬小麦-玉米轮作制长期定位施肥的增产效果. 植物营养与肥料学报, 10 (2): 127-131.
- 关松荫. 1986. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社.
- 郭忠升,邵明安. 2003. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, (8): 1640-1647.
- 韩仕峰. 1990. 宁南山区苜蓿草地土壤水分利用特征. 草业科学, 7 (5): 47-52.

- 侯军岐. 1993. 农业技术经济学. 西安: 陕西科学技术出版社: 97-99.
- 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 2006. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应. 生态学报, (4): 1176-1185.
- 冷石林, 韩仕峰, 王立祥. 1996. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京: 中国农业科学技术出版社: 166-172.
- 李凤民, 徐进章, 孙国钧. 2003. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. 生态学报, 23 (9): 1901-1909.
- 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 2007. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应. 生态学报, 27 (1): 75-89.
- 李玉山. 1983. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 3 (2): 91-101.
- 李玉山. 2001a. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. 土壤学报, 38 (3): 353-356.
- 李玉山. 2001b. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 16 (5): 427-432.
- 李玉山. 2002. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. 土壤学报, (5): 404-411.
- 刘成龙, 王静, 郭亚男. 2007. 草田轮作粮食增产效果分析. 内蒙古农业科技, (6): 58.
- 刘孟雨, 但野利秋, 刘会灵. 1998. 苜蓿改良的盐碱土壤对小麦的效应研究— 对小麦生长及产量的影响. 生态农业研究, 6 (2): 58-60.
- 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 2008. 宁南山区紫花苜蓿土壤干层水分动态及草粮轮作恢复效应. 生态学报, 28 (1): 183-191.
- 刘忠民, 山仑, 邓西平. 1993. 宁南山区草田轮作研究 (不同耕作制度下的农田水分平衡). 水土保持学报, 7 (4): 67-71.
- 刘忠民. 1992. 宁南黄土丘陵区不同轮作方式农田水分平衡研究. 水土保持通报, 12 (6): 21-25.
- 鲁鸿佩, 孙爱华. 2003. 草田轮作对粮食作物的增产效应. 草业科学, 20 (4): 10-13.
- 马月存, 秦红灵, 高旺盛, 等. 2007. 农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征. 生态学报, (6): 2523-2530.
- 山仑, 陈国良. 1993. 黄土高原旱地农业的理论与实践. 北京: 科学出版社: 256-280.
- 山仑, 刘忠民, 辛业全, 等. 1992. 宁南山区草田轮作研究 I 不同轮作方式的生产力及效益. 水土保持学报, 6 (4): 60-68.
- 沈禹颖, 南志标, 高崇岳, 等. 2004. 黄土高原苜蓿-冬小麦轮作系统土壤水分时空动态及产量响应. 生态学报, 24 (3): 640-647.
- 孙长忠, 黄宝龙. 1999. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究. 生态学报, 19 (5): 615-621.
- 孙鸿良. 2003. 西北地区农牧业发展方向的探讨. 草业学报, 12 (4): 1-6.
- 田秀萍, 邱泳宁, 肖桂才, 等. 2000. 茬口对农作物产量影响的研究. 黑龙江八一农垦大学学报, 12 (1): 19-23.
- 王恒俊. 1999. 黄土高原地区土壤资源及其合理利用. 北京: 中国科学技术出版社: 205-241.
- 王俊, 李凤民, 贾宇, 等. 2005. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化. 应用生态学报, 16 (3): 439-444.
- 王俊, 刘文兆, 李凤民. 2004. 半干旱区不同作物与苜蓿轮作对土壤水分恢复与肥力消耗的影响. 土壤学报, 44 (1): 179-183.
- 王俊, 刘文兆, 李凤民, 等. 2006. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮素变化. 草业学报, 15 (5): 32-37.
- 王力, 邵明安, 侯庆春. 2000. 土壤干层量化指标初探. 水土保持学报, 14 (4): 87-90.
- 王立祥. 2001. 耕作学. 重庆: 重庆出版社.
- 王庆锁, 张玉发, 苏加楷, 等. 1999. 苜蓿-作物轮作研究. 生态农业研究, 7 (3): 35-38.
- 王无怠. 1989. 草田轮作的新进展. 草业科学, 6 (4): 20-24.
- 王晓凌, 陈明灿, 李凤民, 等. 2007. 黄土高原土壤干层水分恢复与作物产量响应. 水土保持研究, 14 (3): 1-4.
- 王志强, 刘宝元, 路炳军. 2003. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究. 生态学报, (9): 1944-1950.
- 魏臻武, 符昕, 曹致中, 等. 2007. 苜蓿生长特性和产草量关系的研究. 草业学报, 16 (4): 1-8.