



农业部农业设施结构工程重点实验室

KEY LABORATORY OF FARM BUILDING IN STRUCTURE AND CONSTRUCTION



## 光伏温室采光设计理论的初探

汇报人：魏晓明 博士 高级工程师

AUG. 15, 2014

农业部规划设计研究院 设施农业研究所

CHINESE ACADEMY OF AGRICULTURE ENGINEERING

# REPORT OUTLINE

第一部分 背景及现状

第二部分 设计理论初探

第三部分 案例研究分析

第四部分 我们的工作

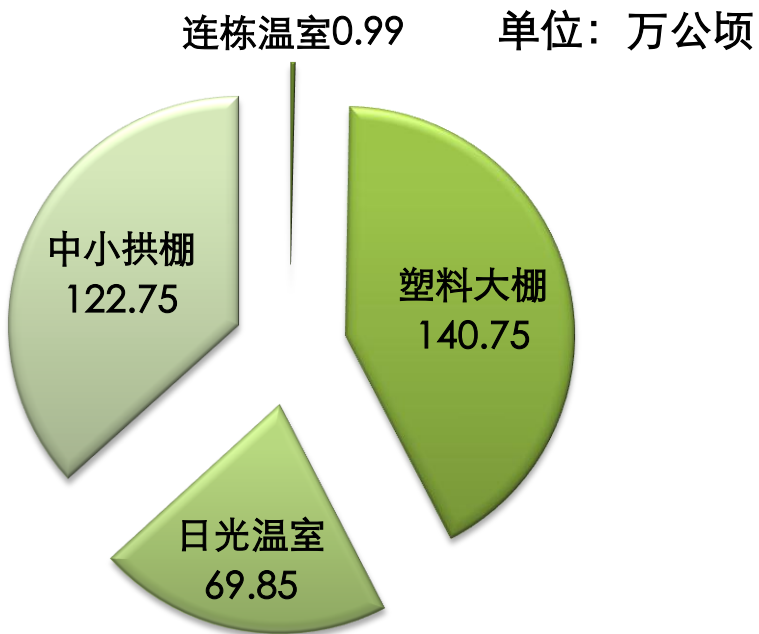
## 第一部分 背景及现状



# 1. 背景及意义

近年来，我国温室园艺产业发展迅速。截止2008年底，我国温室设施规模已突破334万公顷，位居世界首位。

直接产值超4000亿元



为园艺产品的均衡稳定供给、农民的持续增收、农业现代化水平的持续提升，  
**做出了巨大贡献。**

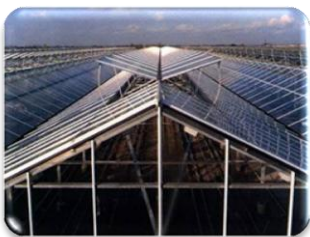


## 1. 背景及意义

随着温室设施的大型化、装配化、自动化、精准化的发展，为给作物提供适宜稳定的温、光、湿等环境条件，温室内配套的装备也越来越多，诸如：



**人工补光**



**通风装备**



**降温装备**



**加温装备**



**CO<sub>2</sub>施肥**

**温室园艺是一个高投入、高产出的产业，亦是一个高耗能的行业！**

## 1. 背景及意义

据联合国统计，全世界每年农业生产能耗量的35% 用于温室加温。

### 荷兰

每 $\text{m}^2$ 温室年消耗 $43\text{m}^3$ 天然气用于加温和补光，荷兰温室的天然气消耗量占全国的12%。

### 日本

200g的西红柿需要消耗石油85ml；1根黄瓜消耗石油60ml。

### 中国

北方地区每亩连栋温室年采暖耗煤100-120t；南方地区每亩夏季降温20000kWh。



**能耗，制约了温室产业的可持续性！**

## 1. 背景及意义

由于同样需要利用太阳能：



光伏发电



温室生产



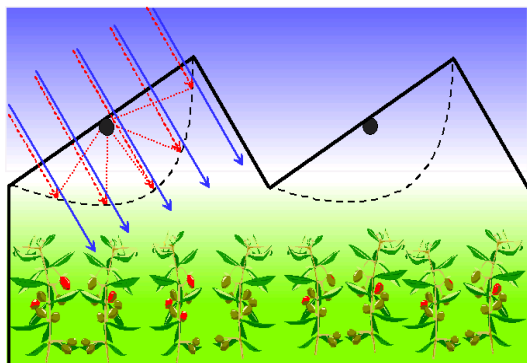
光伏温室系统

光伏组件所产电能供温室使用或直接并网，减少生产能耗、摆脱温室建设选址的能源供给限制和光伏电站建设的土地制约，这一研究在**温室**和**光伏**行业引起了越来越多的关注。

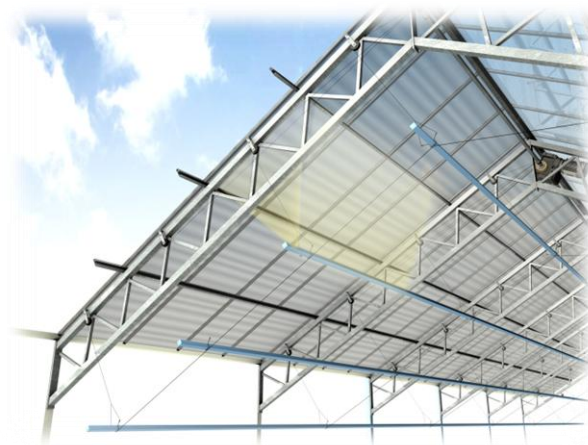
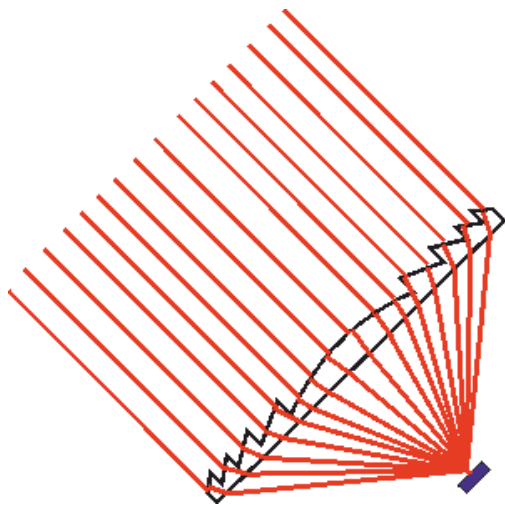
## 2. 国内外发展现状及存在的问题

荷 兰

第一阶段



第二阶段





## 2. 国内外发展现状及存在的问题

日本



美国



西班牙



法国



## 2. 国内外发展现状及存在的问题

国内



江西

山东

宁夏



江苏

.....



## 2. 国内外发展现状及存在的问题



光伏温室产业  
“方兴未艾”



缺乏理论研究，光环境  
能否满足作物需求  
“有待商榷”



亟待

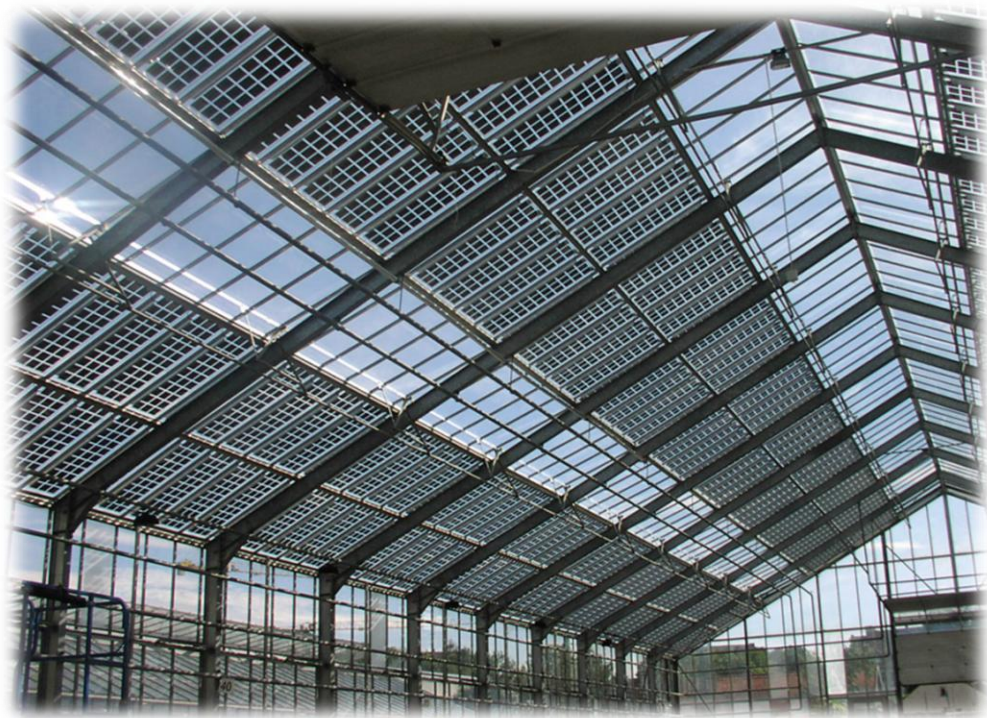
结合作物采光生长模型，初步建立适宜于光伏温室的采光设计理论

为光伏温室的优化设计和我国设施园艺装备的优化升级



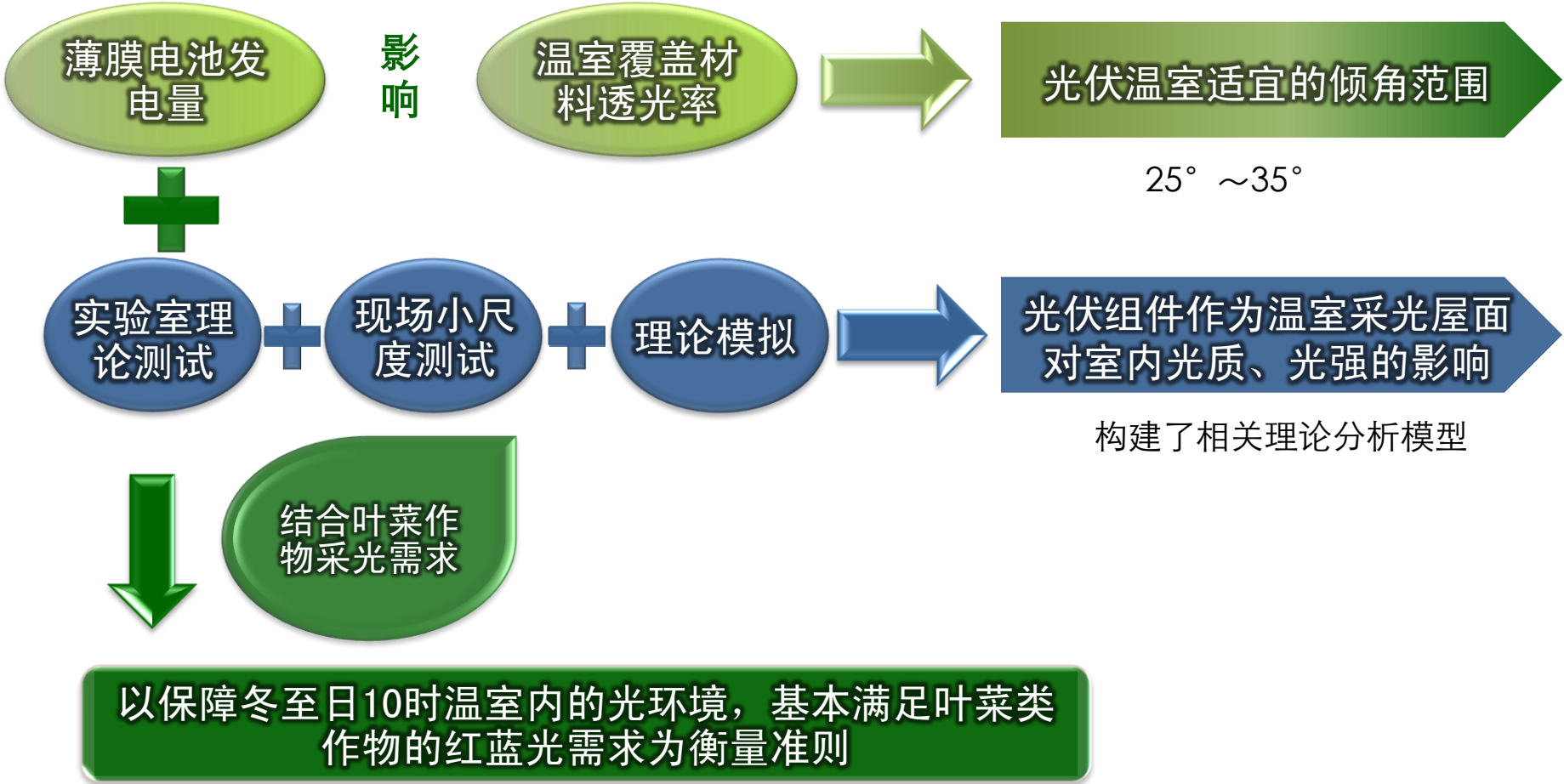
提供理论支撑。

## 第二部分 设计理论初探





通过比较屋面倾角



初步形成光伏温室的采光设计理论！

## 1. 光伏温室适宜屋面倾角的筛选

### 筛选原则



光伏发电

并行

不悖



温室生产

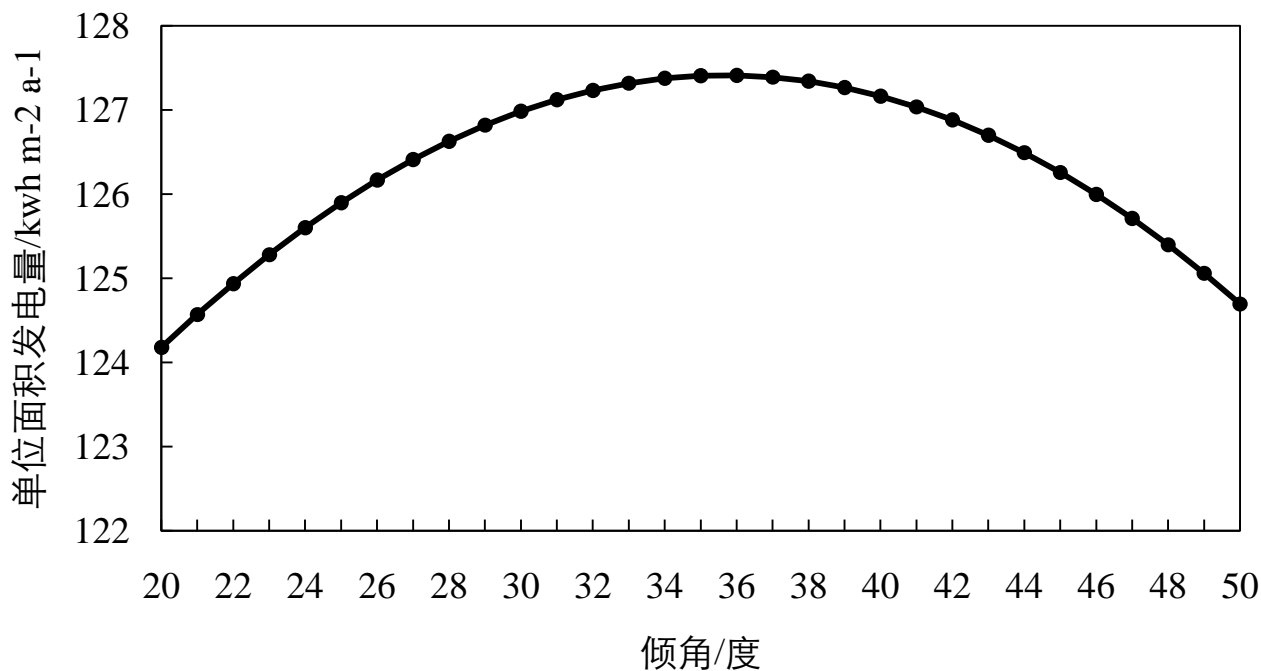
为目标

综合考虑屋面倾角对光伏电板发电效率和对温室覆盖材料透光率的影响

得出相对最优化的结果。

# 1. 光伏温室适宜屋面倾角的筛选

**倾角对发电的影响：**以北京为例，依据气象数据和薄膜电池性能参数，利用 RETScreen (V4.0) 软件，计算倾角在20° ~50° 范围之间组件单位面积的年发电量

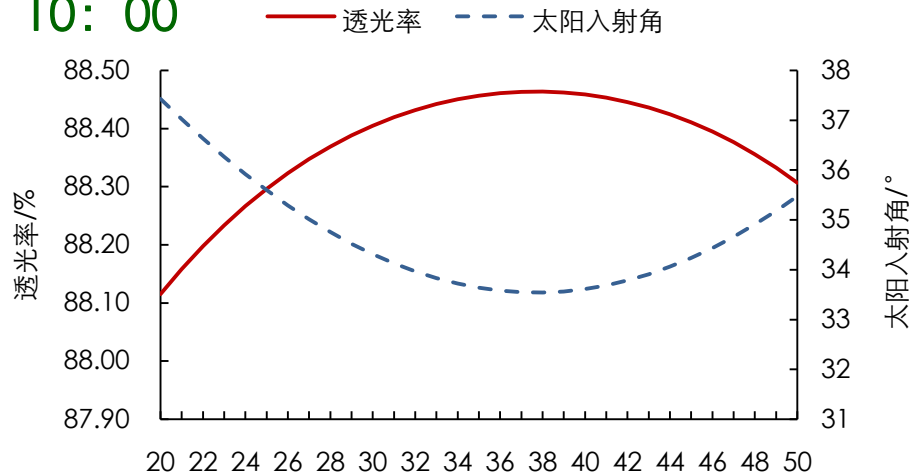


总体呈**先增加后降低**的趋势（倾角**35°** 最大），基本上下变化在**3%**之内，因此综合考虑安装要求，温室屋面光伏组件倾角可在**25° ~35°** 之间变化。

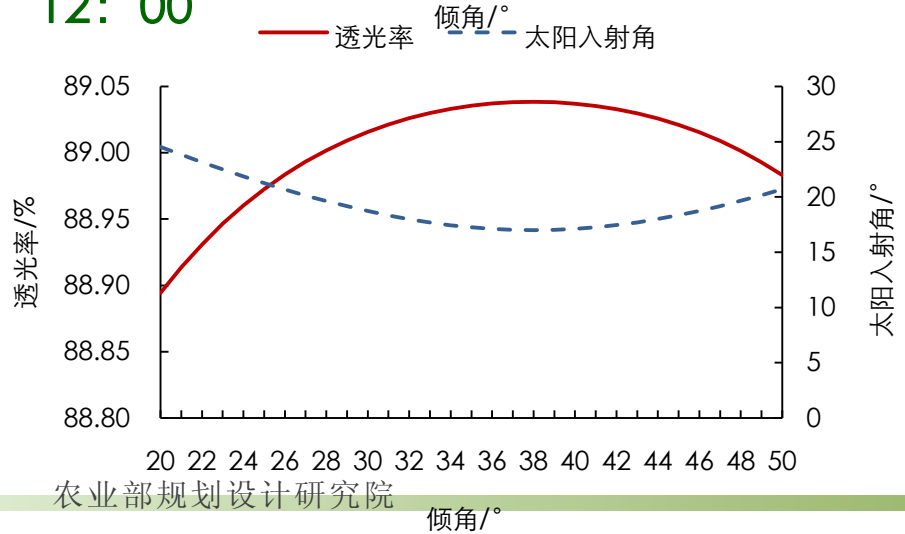
# 1. 光伏温室适宜屋面倾角的筛选

**倾角对透光率的影响：**以4mm浮法玻璃为例，计算北京地区冬至日不同屋面倾角对太阳入射角及玻璃透光率的影响

10: 00



12: 00



- ✓针对某一时刻，随着倾角变化，透光率总体呈**先增加后降低**的趋势（倾角**35°**最大）；
- ✓温室适宜的屋面倾角范围可在**25° ~ 35°**之间浮动，与电池板适宜安装倾角相比对，**两者相符**！



## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

光伏组件对室内光环境的影响，主要体现在3个方面：



对室内光照强度的影响



对室内光质变化的影响



对室内地面光环境均匀度的影响

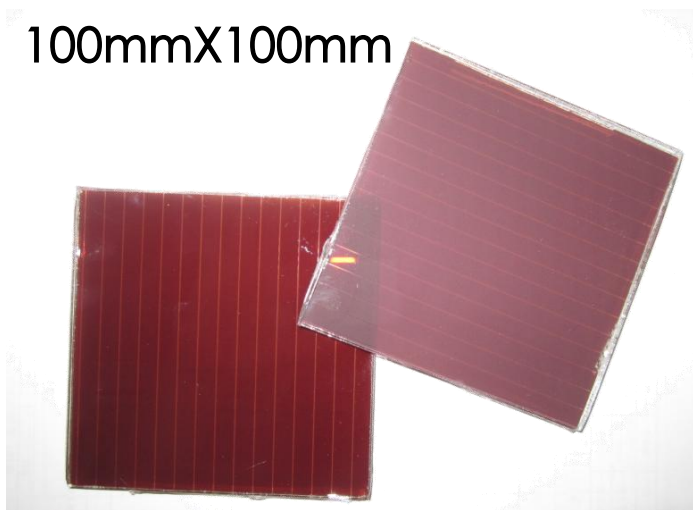


## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

### 1) 光伏组件自身透过率的测试

选取国内生产厂家提供的样品进行测试

100mmX100mm



测试仪器为Perkin-Elmer公司

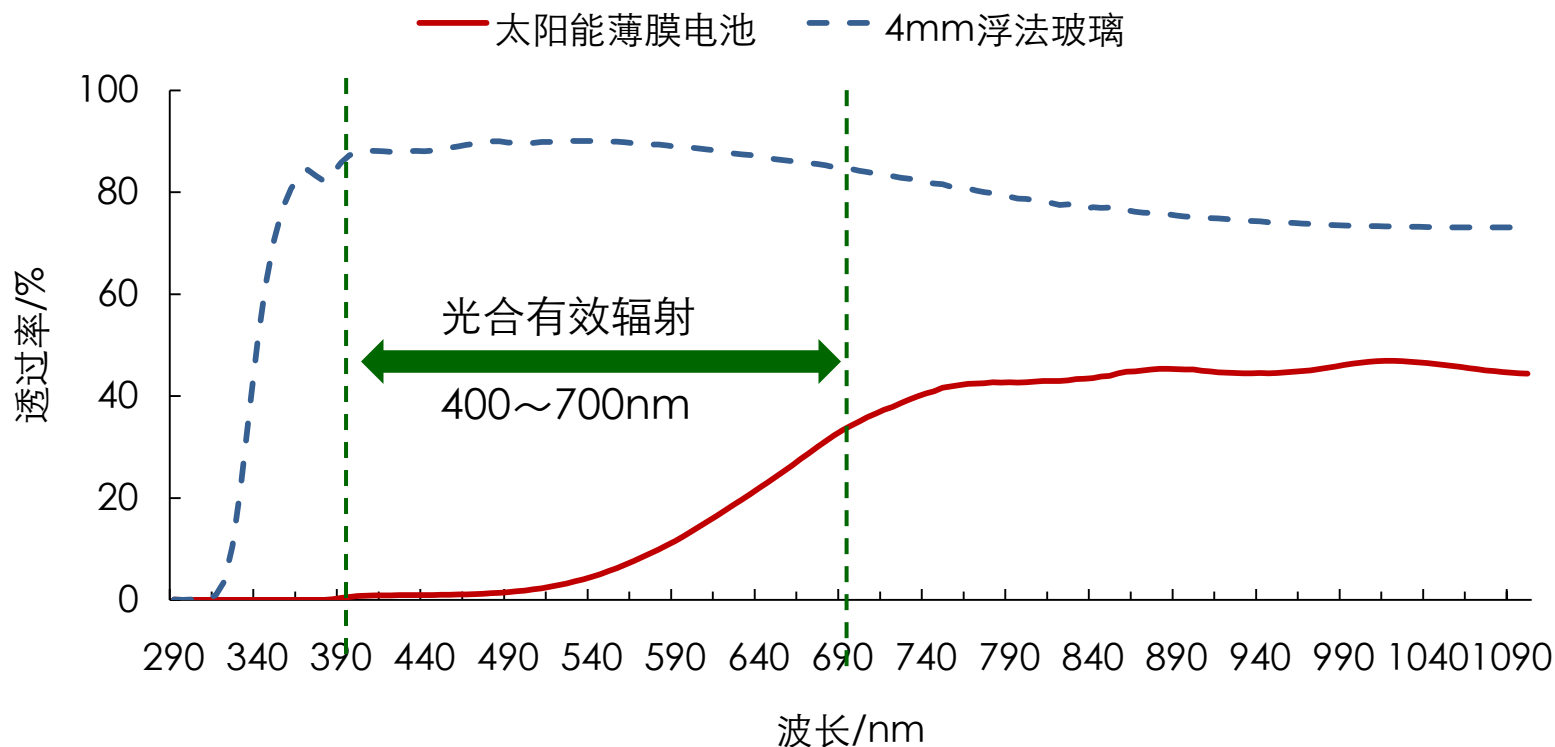
Lamnda 950分光光度计



测试光谱为290~1100 nm范围内，光伏组件的理论透过率。

## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

### 1) 光伏组件自身透过率的测试



- ✓ 500nm以下的光辐射基本不透过(蓝紫光全被阻隔在薄膜电池外);
- ✓ 在红光区域(620-750nm), 透光率约32.1%;
- ✓ 在整个波段范围(290-1100nm), 透光率约25%。

## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

### 2) 室内光强模拟计算

阴影区地面接收到的瞬时辐射强度：

$$I_{total-s} = I_{b\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{total-pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_n \cdot r_{total-n}$$

式中：

$I_{total-s}$  一光伏温室地面阴影区总辐射强度；

$r_{pv}$  一屋面光伏组件面积与地面阴影面积比；

$r_{total-pv}$  一屋面光伏组件总面积与地面总面积比；

$r_{total-n}$  一屋面透光覆盖材料总面积与地面总面积比；

$\lambda_n$  一屋面透光覆盖材料透光率。



## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

### 2) 室内光强模拟计算

非阴影区地面接收到的瞬时辐射强度：

$$I_{total-n} = I_{b\theta} \cdot \lambda_n \cdot r_n + I_{d\theta} \cdot \lambda_n \cdot r_{total-n} + I_{d\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{total-pv}$$

式中：

$I_{total-n}$  — 光伏温室地面非阴影区总辐射强度；

$r_n$  — 屋面透光覆盖材料面积与地面非阴影区面积比；

因此，只需已知区域的地理纬度、日序数、屋面倾角角度、光伏组件面积和屋面面积，就可求出室内地面的任意时刻的辐射强度。

## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

### 3) 光照均匀性评价

**光照分布均匀性**是评价温室性能的重要指标。针对光伏温室内，如光伏组件布置合理，光照分布较均匀，作物品质、产量稳定；反之则会造成作物生长不一。

衡量光伏温室内光照分布的均匀性可用光照分布均匀度指标 $C_v$

其中

$$C_v = 1 - \frac{s}{\bar{I}}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}}$$

式中：

$C_v$  一光伏温室内光强分布均匀度；

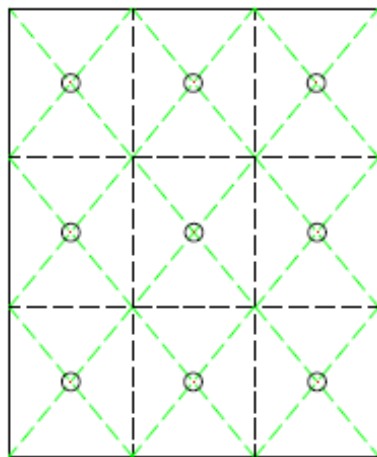
$s$  一光伏温室内光强的标准差；

$\bar{I}$  一光伏温室内光照强度的平均值；

$I_i$  一光伏温室内第*i*块的光照强度。

## 2. 光伏组件布置方案对室内光环境影响

针对光伏温室，可选取不同布置方案的标准单元，将其对应的地面均分成9个方格，取方格的光照均值作为该块的强度如下图所示，运用公式计算光照均匀度。



光伏组件在温室屋面的不同布置方式，可根据本研究所得的模拟公式，利用评估其光照均匀度值，来优化判定最佳的布置方案。

### 3. 基于作物需求的光伏温室采光设计理论

叶菜类作物对光强及光质的需求：

**光强**：叶菜类作物（生菜）的光补偿点约 $15-20 \text{ w/m}^2$ ，  
光饱和点约 $250 \text{ w/m}^2$ 。

**光质**：适宜的红蓝光需求分别

**红光**（ $660\text{nm} \pm 20\text{nm}$ ）约 $34.2 \text{ w/m}^2$ （PAR）；

**蓝光**（ $450\text{nm} \pm 20\text{nm}$ ）约 $4.3 \text{ w/m}^2$ （PAR）；。

光伏温室光环境设计需从**光强**、**光质**两方面来分析，尤其是要考虑**满足作物对蓝光的需求**。





### 3. 基于作物需求的光伏温室采光设计理论

采光设计方法：

以保障冬至日10时温室内的光环境基本满足叶菜类作物的红蓝光需求为衡量准则，确定温室屋面中光伏组件的安装比例；结合室内光环境均匀度，判定光伏组件的布置方式，从而基本确定光伏温室的设计参数。

满足蓝光：

$$I_{b\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{pv} \cdot \rho_{blue-pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{total-pv} \cdot \rho_{blue-pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_n \cdot r_{total-n} \cdot \rho_{blue-n} = I_{blue}$$

式中：

$I_{blue}$  一叶菜类作物对蓝光的需求；

$\rho_{blue-pv}$  一透过光伏组件的辐射中，蓝光所占的比例；

$\rho_{blue-n}$  一透过玻璃的辐射中，蓝光所占的比例；

$r_{total-pv}$  一屋面光伏组件总面积与地面总面积比；

$r_{total-n}$  一屋面透光覆盖材料总面积与地面总面积比。

### 3. 基于作物需求的光伏温室采光设计理论

满足红光：

$$I_{b\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{pv} \cdot \rho_{red-pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_{pv} \cdot r_{total-pv} \cdot \rho_{red-pv} + I_{d\theta} \cdot \lambda_n \cdot r_{total-n} \cdot \rho_{red-n} = I_{red}$$

式中：

$I_{red}$  一叶菜类作物对红光的需求；

$\rho_{red-pv}$  一透过光伏组件的辐射中，红光所占的比例；

$\rho_{red-n}$  一透过玻璃的辐射中，红光所占的比例；

根据公式，已知**地理纬度**以及叶菜类作物对**红蓝光**的生长需求，即可确定出光伏温室的**光伏组件安装面积**，进而根据**光照均匀度**计算，确定光伏组件在屋面的**装布置方案**。

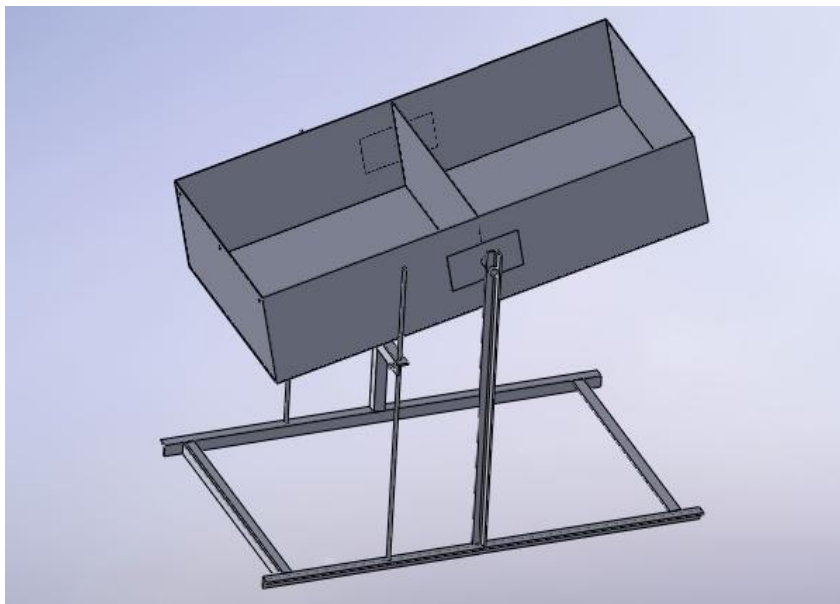


## 第三部分 案例研究分析



## 1. 红蓝光透过率测试

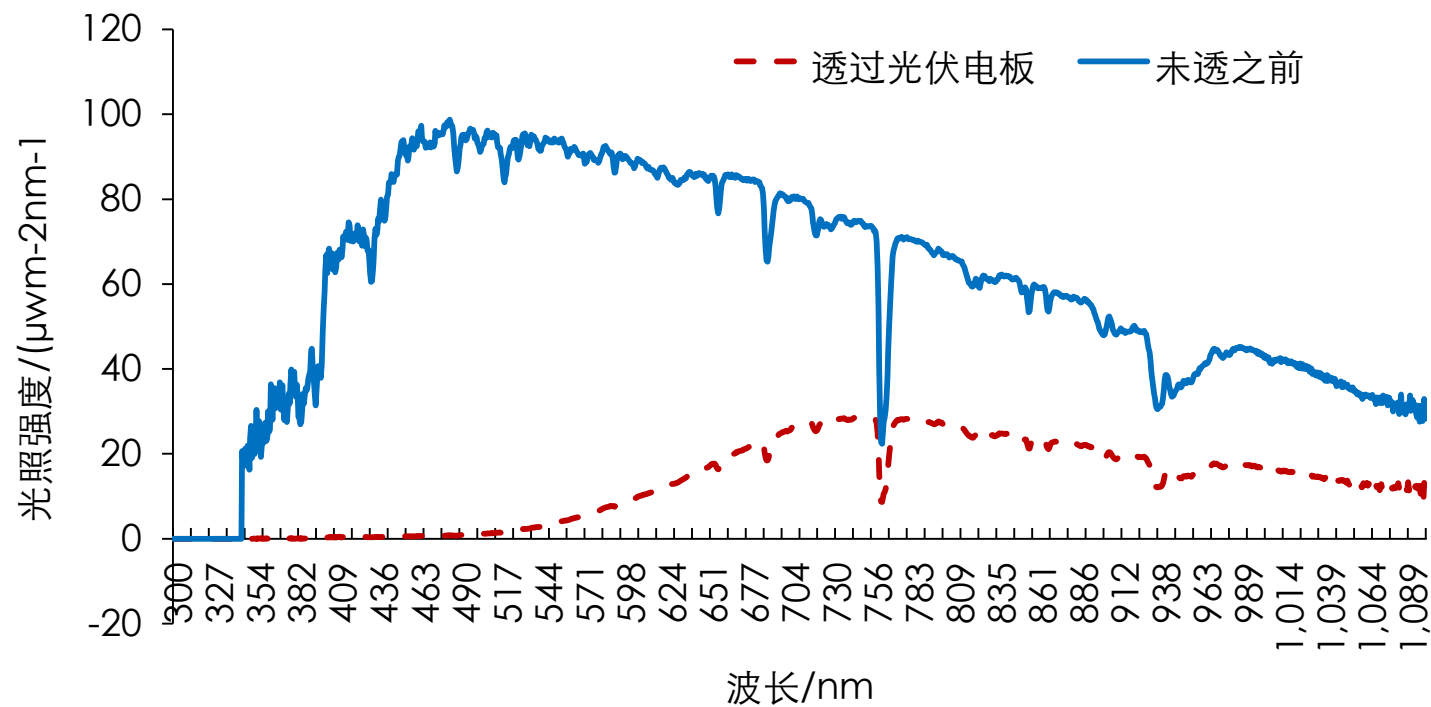
自行开发的测试装置：



测试冬至日，倾角为 $30^{\circ}$  范围内，光伏组件的透过率。

# 1. 红蓝光透过率测试

测试光伏组件在倾角为30° 时，对从300-1100nm的太阳光的透过率。



对图进行积分可以看出，倾角为30° 时，光伏组件对于300-1100nm辐射的透过率为22%。透过光伏组件前后，红（620-700nm）、蓝（455-492nm）光占总辐射的比例分别为13.72%、6.78%（透过前）；14.28%、0.25%（透过后）。



以北京地区（北纬 $39.9^{\circ}$ ）的8m跨、80m长日光温室为例：

前屋面角为 $30^{\circ}$ 、脊高4.1m、前屋面水平投影6.8m、后屋面水平投影1.2m、后墙高3.1m。其采光屋面面积约 $635\text{m}^2$ 。

光伏组件安装倾角：

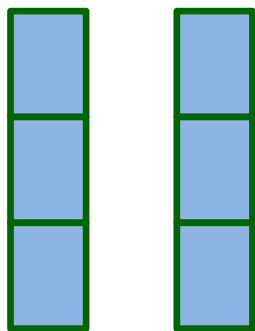
结合光伏温室的屋面倾角范围，可将光伏温室中光伏组件的安装倾角定为 $30^{\circ}$ 。

光伏组件安装面积：

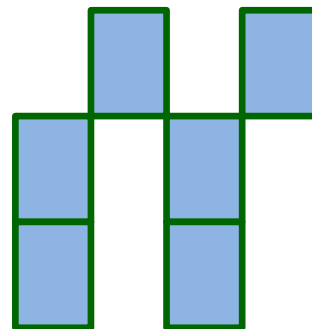
结合光伏温室设计理论，计算得出：当光伏组件面积占采光面面积的25%时，室内阴影区接收到的蓝光为 $4.3\text{w}/\text{m}^2$ 、红光为 $26.7\text{ w}/\text{m}^2$ 、总辐射为 $183\text{ w}/\text{m}^2$ 。基本满足作物生长需要。此时光伏组件面积约 $159\text{ m}^2$ ，单块薄膜电池板尺寸 $1.1\times 1.3\text{m}$ ，所以可安装111块。

### 光伏组件布置方案：

方案一（间隔布置）：



方案二（棋盘布置）：



光照均匀度：

方案一为67.8%；方案二为75.8%。光照均匀度越大，说明均匀性越好，故方案二要均匀度要好于方案一，从而更有利于温室作物的生产。

针对北京地区8m跨、80m长日光温室，

适宜铺设111块光伏组件、安装倾角为 $30^{\circ}$ ，布置方案采用棋盘式布置。

以案例中所得的光伏温室为分析对象，进行投入产出的经济性分析：

**建设性投入**（合计23.9万元）：

日光温室投资： $640\text{m}^2 \times 0.02 = 12.8$ 万元

光伏组件投资： $111 \times 100\text{wp} \times 0.001 = 11.1$ 万元

**年均运营性投入**（合计0.25万元）：

生产成本：0.25万元

**年均产出**（合计2.505万元）：

叶菜：1.5万元

发电：2.01万kwh，1.005万元

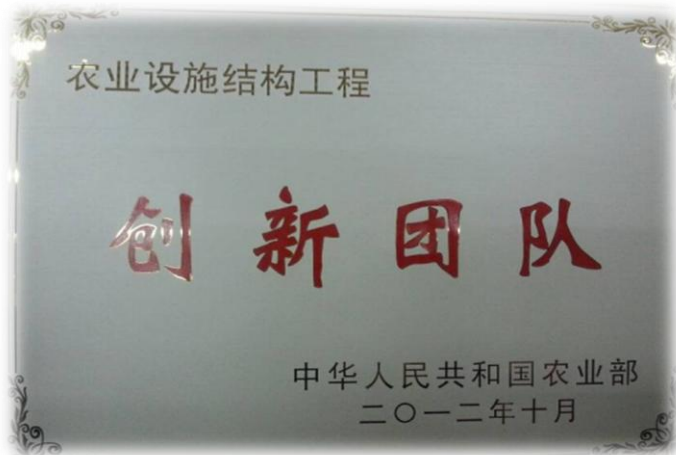
光伏温室不仅能够保障叶菜的正常生产，而且还可发电**2.01万kwh**，具有较好的经济效益，值得进行推广。

## 第四部分 我们的工作



## 1. 简介

农业部规划设计研究院设施农业研究所是国内最早从事设施农业领域的科技创新、技术推广、工程咨询、政府服务的科研单位，是农业部农业设施结构工程重点实验室的依托单位。承担国家级科研任务10余项，编制设施农业国家及行业标准29项，完成设施农业工程咨询和设计项目200余项。



中国农机化协会设施农业分会

2. 在光伏温室方面的工作

➤ “十二五” 国家科技支撑项目 “设施节能与绿色能源利用装备研制与产业化示范”  
(光伏温室)

➤ 完成了国内首个光伏温室（1.5公顷）的倒塌技术鉴定

➤ 承担国标：农业温室结构荷载规范



附录 A 温室结构专用材料和设备的自重

附表A 温室结构专用材料和设备的自重

项次	名称	自重	备注
1	透光覆盖材料 (N/m²)	普通平板玻璃	100 4mm 厚, 不含窗框
		普通平板玻璃	130 5mm 厚, 不含窗框
		非晶硅电池组件	170 6.8mm 厚, 不含窗框
		非晶硅电池组件	210 8.6mm 厚, 不含窗框
		非晶硅电池组件	280 11.6mm 厚, 不含窗框
		晶硅电池组件	120 40mm 厚, 不含窗框
		晶硅电池组件	170 7.7mm 厚, 不含窗框
		塑料薄膜	10 聚乙烯膜
		塑料薄膜	14 聚氯乙烯膜
		塑料薄膜	10 EVA 膜
		塑料薄膜	14 PET 膜
		双层中空 PC 板	13 6mm 厚, 不含固定框
		双层中空 PC 板	15 8mm 厚
		双层中空 PC 板	17 10mm 厚





**真诚感谢！**

不吝予以指正批评