

连栋温室采光性能评价指标

程勤阳¹, 丁小明¹, 曲梅²

(1. 农业部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100083)

摘 要: 温室的采光性能决定着进入温室的能量和作物用于光合作用的光合有效辐射大小。但采光性能的优劣在中国缺少明确的评价指标。该文综合分析了已有研究成果, 提出了太阳总辐射透过率、光合有效辐射及其在温室内分布的均匀性等 3 个技术参数作为温室采光性能的评价指标。

关键词: 连栋温室, 光合有效辐射, 光合作用, 采光性能, 评价指标, 光照均匀度, 辐射透过率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.031

中图分类号: S625.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0169-04

程勤阳, 丁小明, 曲梅. 连栋温室采光性能评价指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 169—172.

Cheng Qinyang, Ding Xiaoming, Qu Mei. Evaluation index of lighting performance in multi-span greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 169—172. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

温室是现代农业装备的重要组成部分, 能够避免恶劣天气的影响, 为作物创造适宜的光照、温度、湿度等生长环境。太阳辐射透过温室透光覆盖材料, 经过温室结构件以及通风、电气、灌溉等配套设施进入温室内, 并到达作物生长区域。影响进入温室内作物生长区域的太阳辐射的因素很多, 其中有: 温室结构型式, 如屋面角度及形状、跨度、山墙高度、结构长宽比、朝向等; 温室覆盖系统材料的特性, 如透光特性、安装方式、老化程度、受污染程度等; 温室配套设施种类, 如内外遮阳系统、室内照明和灌溉系统等; 温室建设地点的影响, 如地理纬度、气候特征、大气透明度, 太阳高度角等。这些因素及其相互影响, 不同程度的影响着温室的采光性能。虽然中国现代温室工程已经发展了近 30 年, 但至今中国还没有建立明确的指标体系来评价温室的采光性能。本文拟在综合分析已有研究成果的基础上对温室采光性能的评价指标进行探讨。

1 评价指标的确定

温室内作物用于光合作用的光合有效辐射 (简称 PAR) 和温室内温度升高的热量主要来自于温室外的太阳辐射。温室采光性能评价指标应全面衡量进入温室内的能量、用于植物光合作用的光合有效辐射以及温室内光照分布的均匀性。

1.1 太阳总辐射透过率

太阳辐射是地球能量的主要来源, 其中大气层外太阳辐射中 99.99% 能量集中在 0.20~100 μm 之间, 其中

0.28~0.40 μm 波段的能量占 8.02%, 0.40~0.78 μm 波段的能量占 46.43%, 0.78~100 μm 波段的能量占 45.54%^[1]。太阳辐射经过大气层时, 大气层中的氧、臭氧、水蒸气和二氧化碳等气体分子对太阳辐射进行了选择性吸收。其中, 臭氧主要吸收波长小于 0.3 μm 的紫外辐射, 水蒸气主要吸收波长 1 μm 左右的红外辐射, 二氧化碳主要吸收更长波长的红外辐射。到达地面的太阳辐射 97% 以上集中在 0.28~2.8 μm 的波段内^[2]。

透过温室的太阳辐射为温室提供了能量, 将太阳辐射能转化为热能贮存在温室内, 提高了温室内环境的温度, 给作物提供适宜的温度和湿度环境。温室内的气候变化很大程度上取决于太阳辐射的进入量。不同覆盖材料的温室对太阳辐射的透过性能不同。比如, 玻璃对可见光部分及近红外和 2500 nm 以内的红外线透光率高。聚碳酸酯中空板基本不透过紫外线, 在可见光范围内的透光率较玻璃约低 10%, 在 2~5 μm 红外线波段的辐射透过率仅为玻璃的 40% 左右^[3]。而聚氯乙烯 (PVC) 膜和聚乙烯 (PE) 膜对可见光的透射率较高, 均在 90% 左右, 比聚碳酸酯中空板高出 10% 左右, 比玻璃高出 2% 左右。除了覆盖材料的类型外, 温室对太阳辐射的透过率与温室建设地点的纬度、温室方位、温室类型和温室结构, 温室内设备的布置, 透光覆盖材料的老化程度、结露情况与污染程度等诸多因素有关, 透过率是综合性的平均状态下的指标。无论是太阳直接辐射, 还是散射辐射, 最终进入温室内, 构成了温室内微气候的重要影响因素, 所以, 温室太阳总辐射的透过率水平至关重要。

研究人员计算温室对太阳辐射的透过率都是以室内和室外太阳总辐射值相比得出来的, 但有关太阳辐射的度量有不同的考虑。建筑上都是以光照度作为度量指标^[4]。宋卫堂等^[5]对温室内外光照度进行测量后以室内 9 个测点的平均照度和室外一点的照度相比计算温室的透光率。与此类似, 刘杰等^[6]采用照度计对连栋塑料温室的室内外太阳辐射照度进行测量后计算温室的透光率,

收稿日期: 2008-12-01 修订日期: 2009-04-06

基金项目: 农业部行业标准制定 “温室采光性能测试方法”

作者简介: 程勤阳 (1971—), 男, 湖北人, 高级工程师, 主要从事农业建筑技术研究。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院, 100125, Email: qinyangch@sina.com

周萍等人^[7]利用照度计测量不同天气条件下温室内外太阳辐射照度计算平均透光率,宋明军^[8]对双连栋节能日光温室沿长度方向不同部位的平均透过率进行了计算,测量的参数也是照度。与上述不同的是裴孝伯等人^[9]对上海引进的 Venlo 型玻璃温室室内外的光合有效辐射量子通量密度进行测量后以室内值和室外值相比计算了温室平均透光率。王鹏^[10]、William^[11]也以光合有效辐射量子通量密度的测量为基础计算温室的平均透光率。张辉^[12]提出的温室透光率测定方法与前面所述的不同,以能量测量法为基础通过测量室内外太阳辐射,再计算平均透光率。3种测定方法各有优缺点,照度测量法测试仪器和方法应用较多,以人所感觉到的可见光为测试对象,适合于建筑物的采光性能评价;光合有效辐射量子通量密度测量法关注于直接影响植物光合作用部分光照的透过情况,但却忽略了占太阳辐射总能量 50% 以上的红外和紫外部分的能量;能量测量法则综合考虑了经透射进入温室的能量,包括了太阳辐射的绝大多数能量波段。因此,以太阳总辐射透过率作为温室透光率的评价指标更加科学。按式(1)计算。

$$\tau = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{Si}}{E_{So}} \quad (1)$$

式中: τ ——温室太阳总辐射透过率; E_{Si} ——室内第 i 测点太阳总辐射照度, W/m^2 ; E_{So} ——室外太阳总辐射照度, W/m^2 ; n ——室内测点数量。

1.2 光合有效辐射

植物的 5 种光化学反应,光合作用、色素的合成、光周期现象、趋光性和光形态诱变,都集中在波长 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围内。通常将 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 范围内的太阳辐射称为光合有效辐射^[1]。光合有效辐射能被作物叶绿体利用并进行光合作用,将无机物转变为有机物,把太阳能转变为化学能,储存在形成的有机物中。直接影响着作物的生长、发育、产量以及产品质量。可见,温室内光合有效辐射的大小应是温室采光性能优劣的一个重要考核指标。

按照光化学定律,光化学反应速度决定于被吸收的光量子数量^[13],光合作用可被吸收的光量子主要是光合有效辐射谱段范围内的光量子。单位能量的光量子数与波长有关,波长越长,量子数越多,可见相同的能量的辐射在不同的谱段其光量子数是不同的。

对 PAR 的度量有两种方法,一种是能量方法,测定光合有效辐射照度;另一种是量子方法,测定光合有效量子通量密度。这两种计量方法各有优劣。能量方法的优点在于它和气象台日射观测所用单位一致,便于和能量平衡的研究以及光合产量的能量进行比较。但是,温室内的园艺作物进行光合作用时,光是以量子的形态参与反应,不同波长的量子,所含能量不同,所以测定 PAR 的能量并不能反映 PAR 的光量子数,它所代表的辐射的光合效价也不准确。所以,量子方法应是更合理的 PAR 计量系统^[14]。

光合有效辐射的测量,前期由于缺少必要的检测设

备,在气象学中缺少必要的常规观测数据,所以长期以来研究者一直希望建立太阳辐射照度与光合有效辐射的关系,希望通过测量太阳辐射照度就可以得到光合有效辐射。王谦等人^[15]建立了太阳辐射照度与光合有效辐射之间的线性关系式,结果表明,利用太阳辐射照度计算光合有效辐射值相对于实际测量的值相对误差,晴天为 7%,阴天为 2%。马金玉等人^[16]利用河北固城 2005~2007 年的太阳辐射和光合有效辐射量子通量密度的实测数据进行分析,建立了光合有效辐射和太阳总辐射之间的关系,认为呈近似钟型,有 60% 的比值分布在 $0.35 \sim 0.45$ 之间,受太阳高度角、云量等多种因素的影响。K.C.Ting 等人^[17]建立了直射光合有效辐射、散射光合有效辐射和太阳总辐射之间的经验公式,用于预测露地或温室内光合有效辐射和太阳总辐射的关系。以上学者研究的目的是想通过太阳辐射照度就可以得到太阳光合有效辐射。由于温室内的太阳辐射不仅受地理位置、气候条件等外在因素的影响,而且还受温室的朝向、结构型式、设备配备及布置方式,温室覆盖材料等诸多因素的影响,因此揭示温室内太阳辐射不同度量单位之间的内在关系并不现实。从测试手段的发展来看,目前的总辐射计、照度计和光量子通量密度计等均成熟可靠,可直接测量出太阳辐射通量密度、光照度和光合有效辐射量子通量密度。因此,光合有效辐射量子通量密度不存在测量上的困难,已没有必要通过测量太阳辐射通量密度或光照度来推算光合有效辐射量子通量密度。

1.3 光照分布均匀度

光合有效辐射量子通量密度实际反映了温室内光合有效辐射大小,其在温室内的分布是否均匀一致也应是评价温室采光性能的重要指标。除太阳高度角、天气等自然因素以外,光照分布的均匀性还受到温室的方位、屋面角度、覆盖材料散射特性的影响。中、高纬度地区东西向温室屋脊天沟等主要水平结构在温室内将造成阴影弱光带,透光率最大和最小的差值可超过 40%。南北向温室光透射率分布是床面中央高,东西侧墙附近低 10%;南面山墙处透过率较高,山墙阴影顶部以北逐渐降低 15%~30%^[13]。因此,温室内太阳光照的分布明显不同于室外,光照分布较均匀的温室内,作物群体漏光损失少,作物光能利用率高;光照分布不均匀的温室光能利用率低,作物生长不一,影响产品质量。

衡量温室内光照分布的均匀性可用光照分布均匀度指标。照明行业对于光照分布均匀度的计算有两种方法,一是以最小照度和平均照度相比,另一种是以最小照度和最大照度相比^[18]。这两种方法都以极值为基础,计算结果容易受到极端值的影响,尤其是最小照度和最大照度相比的算法,容易夸大数据的离散程度。王鹏等人^[10]采用的均匀度是以平均绝对差为基础进行计算的,测量参数为光合有效量子通量密度,按式(2)、式(3)和式(4)计算。

$$\lambda = 1 - \frac{\overline{\Delta E_{PAR}}}{E_{PAR}} \quad (2)$$

其中,

$$\overline{E_{PAR}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{PARi} \quad (3)$$

$$\overline{\Delta E_{PAR}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_{PARi} - \overline{E_{PAR}}| \quad (4)$$

式中: λ ——温室内光照分布均匀度; $\overline{\Delta E_{PAR}}$ ——光合有效光量子通量密度与平均值的绝对偏差的平均值; $\overline{E_{PAR}}$ ——温室内光合有效光量子通量密度平均值, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; E_{PARi} ——温室内第 i 测点光合有效光量子通量密度, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

该方法将所有观测值综合考虑, 减少了照明行业中个别观测值对整个观测数列离散程度的影响, 更加科学合理, 但不便于解析运算。利用统计学计算方法中的变异系数^[19]来计算均匀度则可以有效克服极端观测值的不利影响, 又能避免绝对值运算的麻烦。按式 (5) 和式 (6) 计算。

$$\lambda = 1 - \frac{s}{\overline{E_{PAR}}} \quad (5)$$

$$\text{其中, } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{PARi} - \overline{E_{PAR}})^2}{n-1}} \quad (6)$$

式中: s ——温室内光合有效光量子通量密度的标准差, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2 实测评价分析

为检验上述 3 个指标的测试可行性, 选择位于北京昌平区一连栋双层充气塑料薄膜温室和位于海淀区中国农业大学的一 Venlo 型玻璃温室为测试对象。塑料温室于 1998 年建成, 没有充气, 膜上灰尘较多, 室内无作物; 温室开间 4 m, 跨度 8 m, 侧墙长度 80 m, 山墙长度 48 m。玻璃温室于 2007 年 8 月建成并投入使用, 经过 1 a 的使用, 在温室天沟附近有较多的污物; 温室有室外和室内遮阳系统, 室内有小白菜、韭菜等矮小作物; 温室开间 4 m, 跨度 9.6 m, 侧墙长度 57.6 m, 山墙长度 32 m。分别于 2008 年 2 月 28 日测试了塑料薄膜温室和 2008 年 9 月 27 日测试了玻璃温室, 室内外遮阳系统处于打开状态, 两天皆为晴天, 但有一定云量。室内测试点均匀分布 9 个点, 见图 1 和图 2, 测试传感器高度为距离地面以上 1.5 m。室外测试 1 个点, 在温室附近没有遮挡的位置, 传感器高度为 1.5 m。太阳辐射采用总辐射计测量, 光谱范围为 0.3~2.8 μm 。光合有效辐射使用光量子仪测量, 光谱范围为 0.4~0.7 μm 。测试时刻为整点时间, 即每个整点时刻各个测点读取数据 2 次, 且所有测点的测量在 10 min 内完成。

温室内采光性能测试结果见表 1。

由表 1 可知, 在 10:00 到 14:00 之间, 温室的太阳辐射透过率和光照分布均匀度的变化差异不显著。可见, 在这个时间段内测量都能客观的反映温室的透光性能和温室内光照的分布的均匀度。而室内光合有效辐射

量子通量密度随着室外太阳辐射的变化而变化, 则说明该测量应考虑测试时间对测试结果的影响。测试结果表明, 该温室由于覆盖材料的污染和老化, 采光性能已严重下降。室内光照分布均匀度, 玻璃温室明显好于塑料薄膜温室。测试结果表明, 两个温室应做温室覆盖的清洗或更换, 以及根据均匀度情况合理安排室内作物布局。

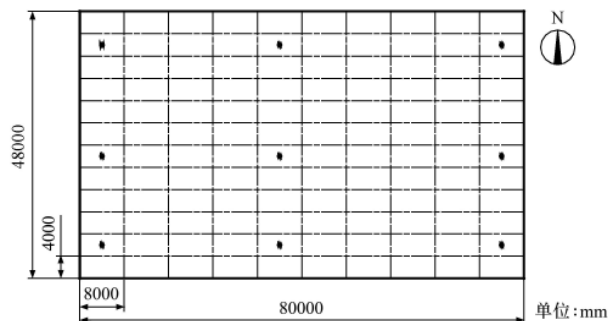


图 1 塑料膜温室内测点布置示意图

Fig.1 Distribution layout of measuring points in film greenhouse

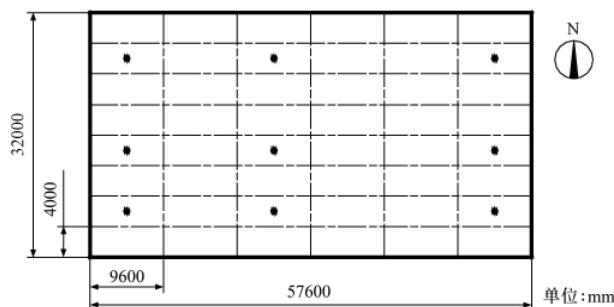


图 2 玻璃温室内测点布置示意图

Fig.2 Distribution layout of measuring points in glass greenhouse

表 1 温室采光性能检测结果

Table 1 Results of evaluating lighting performance in greenhouse

温室	参数	测试时间				
		10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
薄膜温室	A	479	617	723	628	552
	B	25%	23%	23%	24%	24%
	C	158	192	228	202	179
	D	68%	73%	72%	77%	77%
玻璃温室	A	296	402	588	474	438
	B	41%	42%	39%	39%	44%
	C	264	373	489	404	410
	D	84%	88%	81%	73%	78%

注: A——温室外太阳总辐射, W/m^2 ; B——温室太阳辐射透过率平均值; C——温室内光合有效辐射量子通量密度平均值, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D——温室内光照分布均匀度。

3 结 论

温室内太阳总辐射透过率、光合有效辐射及其在温室内的分布均匀性可作为评价温室采光性能的 3 个指标, 从“温室效应”、“光合作用”和“作物生长均匀性”等方面评价温室的采光性能, 可指导温室设计者、制造商、使用者掌握和比较不同温室的采光性能优劣, 改善采光性能, 合理布局温室内作物生产。

[参 考 文 献]

- [1] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] 王健强. 太阳能发电技术与应用: 第一讲太阳辐射与太阳能资源[J]. 电力电子, 2008, (6): 54—58, 34.
Wang Jianqiang. Photovoltaic power generation technology and applications solar radiation and solar resource[J]. Power Electronics, 2008, (6): 54—58, 34. (in Chinese with English abstract)
- [3] 周长吉, 丁小明, 杜孝明. 温室用聚碳酸酯中空板辐射透过特性初步研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 192—196.
Zhou Changji, Ding Xiaoming, Du Xiaoming. Light transmissivity of polycarbonate multi-wall sheet used as greenhouse glazing material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 192—196. (in Chinese with English abstract)
- [4] 全国人类工效学标准化技术委员会. GB 5699—2008, 采光测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 宋卫堂, 张树阁, 黄之栋, 等. 三连栋不对称屋面玻璃温室设计与光照性能分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 106—109.
Song Weitang, Zhang Shuge, Huang Zhidong, et al. Structure design and illumination performance of 3-span asymmetrical roofing glass greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 106—109. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘杰, 李保明, 黄仕伟, 等. NJ—6 型连栋塑料温室冬季光温环境的试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2001, (6): 59—62.
Liu Jie, Li Baoming, Huang Shiwei, et al. Study on light and thermal environment of NJ-6 type multi-span greenhouse in winter[J]. Journal of China Agricultural University, 2001, (6): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周萍, 陈杰, 戴丹丽, 等. 不同天气条件下连栋温室室内光照分布规律研究[J]. 农机化研究, 2007, (6): 123—125.
Zhou Ping, Chen Jie, Dai Danli. Study on the regularity of sunlight in the layout of mutli-greenhouse in different weather[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, (6): 123—125. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宋明军, 郭晓东. 双连栋节能日光温室的设计建造及其温光性能观测[J]. 河南农业科学, 2005, (9): 79—82.
Song Mingjun, Guo Xiaodong. Design construction and warmlight performance observation of double-connected energy saving sunlight greenhouses[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2005, (9): 79—82. (in Chinese with English abstract)
- [9] 裴孝伯, 李世诚, 蔡润, 等. 现代温室光环境特征的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 246—249.
Pei Xiaobo, Li Shicheng, Cai Run. Characteristics of light environment in modern greenhouse[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2005, 32(2): 246—249. (in Chinese with English abstract)
- [10] 王鹏, 李卫欣, 孙永涛, 等. 连栋塑料温室光温环境特征分析[J]. 北方园艺, 2005, (1): 18—19.
- [11] William J Roberts. Glazing materials, structural design, and other factors affecting light transmission in greenhouses [EB/OL]. <http://aesop.rutgers.edu/~horteng/Workshop>.
- [12] 张辉. 谈谈普通型塑料温室透光率的测定方法[J]. 现代农业装备, 2008, (5): 55—56.
- [13] 杨邦杰. 中国现代科学全书农业工程——农业生物环境与能源工程[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 59—62.
- [14] 周允华, 项月琴, 栾禄凯. 光合有效量子通量密度的气候学计算[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 447—455.
- [15] 王谦, 陈景玲, 孙治强, 等. Li-cor 仪器太阳辐射测量单位定量变换的应用研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 140—144.
Wang Qian, Chen Jingling, Sun Zhiqiang, et al. Application of quantum unit conversion in solar radiation measurement using Li-cor instruments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 140—144. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马金玉, 刘晶淼, 李世奎, 等. 基于试验观测的光合有效辐射特征分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 673—682.
Ma Jinyu, Liu Jingmiao, Li Shikui, et al. Study on the features of the Photosynthetic Active Radiation(PAR) with experimentations and measurements[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 673—682. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ting K C, Giacomelli G A. Availability of solar photosynthetically active radiation[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 130(5): 1453—1457.
- [18] GB 5697—1985, 人类工效学照明术语[S].
- [19] 贾怀勤. 应用统计[M]. 北京: 对外经济贸易大学出版社, 1998: 121—122.

Evaluation index of lighting performance in multi-span greenhouse

Cheng Qinyang¹, Ding Xiaoming¹, Qu Mei²

(1. Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Lighting performance in greenhouse is crucial for heat gain and Photosynthetically Active Radiation (PAR) density for crop photosynthesis in greenhouse. At present, China lacks a series of the harmonious and standardized indices to evaluate lighting performance in greenhouse. On the basis of analyzing current research achievements, total solar radiation transmittance, PAR, uniformity of illuminance were suggested to determine lighting performance in multi-span greenhouse.

Key words: multi-span greenhouses, photosynthetically active radiation, photosynthesis, lighting performance, evaluation index, illuminance uniformity, solar radiation transmittance