

温室透光覆盖材料透光特性的测试

丁小明, 周长吉[※]

(农业部规划设计研究院, 北京 100125)

摘 要:透光特性是温室透光覆盖材料的一个重要指标,其数值的表达却因测试方法的不同而有所差异。该文介绍了透光覆盖材料太阳辐射透过率的测试及计算方法,选用聚乙烯塑料膜(PE)、浮法玻璃、聚碳酸酯双层中空板(PC)三种典型的覆盖材料进行了测试,计算了国际照明委员会(CIE)规定的标准 C、标准 A 和标准 D65 三种光源下,在可见光与 PAR 波段范围内,基于 4 种权重系数下的覆盖材料透光率和光合有效辐射(PAR)透过率。结果表明,PE 薄膜几乎不受影响,浮法玻璃相差 2%左右,聚碳酸酯双层中空板差异达 2%~3.7%。

关键词: 温室覆盖材料; 透光率; 可见光; PAR; 测试方法

中图分类号: S625: TO320.72⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0210-04

丁小明, 周长吉. 温室透光覆盖材料透光特性的测试[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 210—213.

Ding Xiaoming, Zhou Changji. Test and measurement of solar visible radiation transmittance of greenhouse glazing[J].

Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 210–213.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

温室覆盖材料的透光特性是衡量覆盖材料性能的一个重要指标。中国温室使用的覆盖材料主要有塑料膜、浮法玻璃和聚碳酸酯中空板。在中国这些产品都有相应的国家和行业标准，透光率是衡量产品是否符合标准的一个关键指标，其中，GB 4455^[1]规定透光性棚膜透光率不低于 85%，GB/T 20202^[2]规定不低于 87%。对于浮法玻璃，GB11614^[3]根据厚度，规定了不同厚度的透光率，其中 4 mm 厚不低于 87%，5 mm 厚不低于 86%。聚碳酸酯中空板，NY/T 1362^[4]规定了 8 mm 和 10 mm 厚度的双层中空板的透光率，分别不应低于 78% 和 76%。JG/T 116-1999^[5]分别规定了双层和三层聚碳酸酯中空板的透光率，最低限值分别为 75% 和 70%。

除产品标准, 中国的温室园艺工作者也制定了一系列的温室建设标准, 其中温室覆盖材料的透光性同样为一个重要的设计参数。在标准 JB/T 10286^[6]规定了日光温室中单层塑料和无滴长寿塑料薄膜透光率应达到 90% 以上。此外, 对于波浪板、双层中空板和三层中空板等, 规定透光率应在 80% 以上, 玻璃透光率应达到 90% 以上。NYJ/T 05^[7]则规定日光温室建设中的覆盖材料透光率不应低于 85%。JB/T 10288^[8]规定了连栋温室中薄膜透光率应达到 90% 以上, 双层中空板和三层中空板, 透光率分别应达 82% 和 74% 以上, 而浮法玻璃透光率应达 90% 以

上。NYJ/T 06^[9]则规定连栋温室建设中覆盖材料透光率不宜低于 80%。

从以上论述看,建设标准对透光率的要求大于产品标准中对于材料的合格规定值。这一方面说明了温室设计者从园艺生产角度为了满足温室内作物生长需要而追求温室良好的透光率,另一方面也反映了材料标准中对于产品质量和检测方法进行了更新,使得建设标准在透光率指标的规定上与生产实际产生了差异。例如,虽然都是聚碳酸酯中空板标准,JG/T 116 与 NY/T 1362 对于透光率的测试却采用了不同的方法,方法的变化带来了同一材料透光率数值的差异。JG/T 116 给出的透光率计算方法与薄膜标准、玻璃标准一样,都是基于人眼视觉的材料的透光率,没有将作物对光的反应的差异描绘出来。而 NY/T1362 对透光率的测试却不考虑人眼视觉的影响,但也没有考虑作物对不同光谱的敏感差异。

国际上早已在材料的描述中将作物有重要功能的 PAR 测试作了规定。例如, 标准 ASAE EP460^[10]给出了不同材料的 PAR 透过率, 同时强调温室覆盖材料应给出在不同波段上的透过率, 并且标准中明确指出材料在不同波段上的透过率的差异会影响作物的生长和发育。而 ANSI/ASAE EP406.4^[11]认为在温室通风量需求设计中应考虑的是覆盖材料的太阳总辐射透过率, 并建议该值的选取应从 PAR 辐射透过率估算或者取其经验值。NGMA^[12]覆盖材料标准建议为了比较作物的潜在生长能力, 覆盖材料生产企业应给出太阳辐射透过率, 还应给出 PAR 透过率。

中国目前很多文献和产品样本都将温室覆盖材料在可见光区域内的辐射透过率统一用透光率描述,而不考虑其具体的检测和计算方法。严格说来,辐射透过率仅仅反映了材料本身对辐射的透过程度,与作物和人眼的响应程度无关,而材料的透光率则是基于人眼视觉对太阳可见光(380~780 nm)响应下的辐射透过率,是一个经加权计算后的辐射透过率。此外,PAR 透过率则是基

收稿日期: 2007-08-10 修订日期: 2007-12-12

基金项目：国家“十一五”科技支撑计划重点项目“现代高效设施农业工程技术研究与示范”(2006BAD28B07)；863 计划：基于环境模拟的日光温室结构优化与数字化设计（2006AA10Z260）

作者简介: 丁小明 (1976—), 男, 山东新泰人, 工程师, 主要从事设施农业技术标准和设施装备研究开发工作。北京市朝阳区麦子店街 41 号 农业部规划设计研究院, 100125。Email: dingxmcn@china.com.cn

※通讯作者: 周长吉 (1964—), 男, 甘肃武威人, 研究员, 博士, 主要从事温室工程技术的研究、开发、设计和标准化工作。北京市朝阳区麦子店街41号 农业部规划设计研究院, 100125。Email: zhoucj@facciae.com

于植物响应下的太阳 400~700 nm 波长范围的辐射透过率,与作物对光的响应程度有关。所以透光率和 PAR 透过率无论是波段范围还是计算方法都不相同,对于作物生长而非人居住的温室,覆盖材料用透光率描述并不准确。目前温室覆盖材料透光特性基本用透光率来描述,把采取不同测试设备、不同计算方法获得的太阳辐射透过率统称为透光率,不区别测试方法,没有测试的光谱范围,必然导致透光覆盖材料透光性能的错误比较。

基于上述现状,本文在分析比较目前太阳辐射透过率测试及计算方法的基础上,选用 3 典型的温室透光覆盖材料:塑料薄膜、浮法玻璃、聚碳酸酯中空板进行测试,计算了标准 C、标准 A 和标准 D65 3 种光源下,在可见光与 PAR 波段范围,基于不同权重系数下的辐射透过率,分析了因测试和计算方法带来的覆盖材料透光率和 PAR 透过率数值的差异,可为温室工程设计和相关材料性能研究提供参考。

1 材料辐射透过率测试方法

国内外关于材料太阳辐射透过率的测试标准较多。中国温室透光覆盖材料的测试主要采用 GB/T 2410^[13]和 GB/T 2680^[14]。国际上,ASTM D 1003^[15]介绍了两种测量塑料材料的透光率的方法,一种是积分球式雾度计法,另一种为带有积分球的分光光度计法。两种方法要求设备必须具备国际照明委员会(CIE)要求的标准 C 或标准 A 光源,GB/T 2410 采用了 ASTM D 1003 中的积分球式雾度计测试方法,根据中国的实际情况降低了对试样的状态调节和仪器精度要求,选择标准 C 光源。同样在塑料材料的测试中,国际标准 ISO 13468-1^[16]和 ISO 13468-2^[17],则推荐用带有积分球的分光光度计法测量材料的辐射透过率,推荐用标准 D65 光源,数据处理同 ASTM D 1003 采用基于人眼视觉的辐射透过率计算方法。ISO 9005^[18]是关于玻璃测试的,此标准采用选定波长范围涵盖整个太阳光谱范围的带有积分球的分光光度计测量材料在不同波段内的辐射透过率,并根据光谱的权重计算材料的辐射透过率,GB/T 2680 采用了该标准。在美国,材料辐射透过率的测试大多采用 ASTM E903^[19],该测试方法同样采用带有积分球的分光光度计,可以根据加权方法计算辐射透过率。

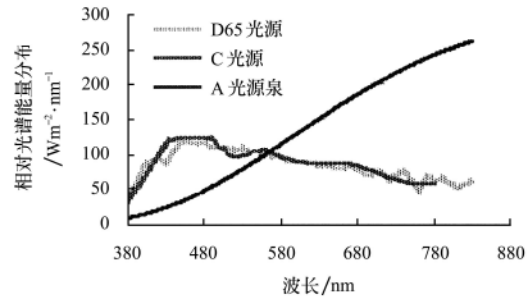
带有积分球的分光光度计法是根据分光光度计的分光原理,具有同等能量的某一波长上的光谱经过被测试材料全部进入积分球,积分球内的检测器响应后获得透过后的该波长上的辐射能量,辐射能量的前后比值就是该种材料在该波长上的辐射透过率。材料在某一波段内的辐射透过率根据 CIE 标准光源在对应波长上的光谱能量分布,按公式(1)通过在各波长上的加权积分后获得。

$$\tau = \frac{\sum S(\lambda) \times \tau(\lambda) \times D(\lambda)}{\sum S(\lambda) \times D(\lambda)} \times 100\% \quad (1)$$

式中 τ ——光谱辐射透过率; $S(\lambda)$ ——CIE 标准光源在对应波长上的光谱能量分布, $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$; $\tau(\lambda)$ ——相应

波长上的辐射透过率, %; $D(\lambda)$ ——相应波长上的光谱辐射权重系数,即光谱响应敏感系数; λ ——波长, nm。

目前,标准 A、标准 C 和标准 D65 三种光源为比较常用的用于模拟太阳光谱的光源,其光谱能量分布见图 1。从图 1 知,标准 C 光源和标准 D65 光源相近,而标准 A 光源差异很大。



注:数据来自文献[20]的表13-3

图1 CIE标准光源的相对光谱能量分布
Fig.1 Relative spectrum energy distribution of CIE standard light sources

公式(1)属于加权计算,不是所有波长的光都采用相同的处理,而是根据权重系数的差异而有所不同,目前主要有4种权重系数。对于权重系数的使用,常用的就是基于人眼的视觉响应。大多数建筑都是为人服务,所以用此响应系数值计算材料的透光特性是有意义的。但温室是服务于作物的,作物对光的敏感和人差异很大。McCree^[21]通过对22种包括谷物、蔬菜在内的作物对太阳光谱波段350~750 nm的响应值测试研究发现,作物对太阳光谱响应的敏感程度并不均一,而是呈现出两个峰值,分别在620 nm和440 nm处,而在400 nm以下和670 nm以上敏感程度急剧下降。Nijssen^[22]研究了400~700 nm范围内的光合有效辐射,认为光合有效辐射的光谱能量密度相对于太阳辐射能量密度在对应波长上随着波长的增大而线性增大,在700 nm波长上,达到最大值,如公式(2)。我们称之为线性敏感系数。

$$E_{PAR}(\lambda) = E(\lambda) \times \lambda / 700 \quad (2)$$

式中 $E_{PAR}(\lambda)$ ——相应波长上的光合有效辐射能量, $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$; $E(\lambda)$ ——相应波长上的太阳辐射能量, $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$; λ ——波长, nm。

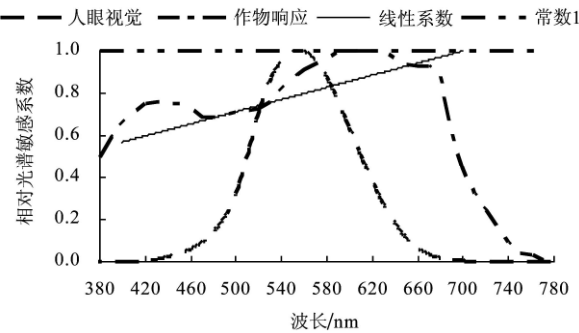
Harry Stijger^[23]研究则认为,所有可见光波长上的辐射对作物的光合作用都是同等重要的,例如透过覆盖材料进入温室内的蓝光中没有参与光合作用的部分实际上对于改善作物的品质具有重要作用。对于园艺作物生产,一个平衡的可见光谱有利于作物的全面生长。我们将这时的权重系数取恒定常数1。

根据上述4种权重系数作图2。

2 试验材料与方法

为研究光源类别、光谱范围、权重系数对覆盖材料的辐射透过特性,本文选用了3种温室最基本的覆盖材料:塑料薄膜、聚碳酸酯中空板和浮法玻璃进行了测试。材料分别为0.12 mm厚的聚乙烯吹塑薄膜、4 mm厚浮法玻

璃和8 mm厚双层聚碳酸酯中空板（上下壁厚为0.5 mm，肋筋厚度为0.4 mm且间距为10 mm，在两肋筋间部位测试^[24]），均为新的出厂产品。试样尺寸为50 mm×50 mm，每组试验取3试样，分别计算算术平均值作为其测试结果。除玻璃外，所有试样均在温度23℃±2℃，相对湿度50%±5%的环境下状态调节不少于4 h。辐射透过率测试均在上述状态调节环境下进行，测试仪器为Perkin-Elmer公司生产的带有积分球的分光光度计，型号为Lambda 35，设定的测试光谱范围为380~780 nm，每隔5 nm记录一组数据，辐射透过率根据不同的权重系数和不同的标准光源按公式（1）分别计算。



注：数据分别来自文献[20]的表13-1、[21]、[22]、[23]

图2 人眼和作物对可见光响应敏感系数

Fig.2 Relative sensitivity coefficients of the human eyes and plants response to visible radiation

3 试验结果与分析

测试和计算结果分别见图3和表1。图3为3种材料在带有积分球的分光光度计下测试所得的不经加权计算的辐射透过率随波长变化的关系图，辐射透过率即公式（1）中的 $\tau(\lambda)$ 。辐射透过率经公式（1）计算后得到不同光谱

范围、不同标准光源、不同权重系数下的覆盖材料辐射透过率值，见表1。计算结果值的差异用标准偏差衡量。由表1可知，材料对光源、光谱范围和权重系数的敏感程度并不一样。由图3可知，薄膜在整个可见光谱内各波长上的辐射透过率是均匀的，所以薄膜几乎不受这些因素的影响，结果无明显差异。而聚碳酸酯中空板在400 nm以下辐射透过率急剧下降，基于人眼视觉响应下的透光率与其他3种权重系数下的计算值最大相差3.5%。玻璃在400 nm以下和580 nm以上出现缓慢下降，看似不明显的辐射透过率的下降反映在计算结果上，幅度虽不如聚碳酸酯中空板，但也相差2%。总体看，基于人眼视觉的透光率数值与采用其他3种权重系数的辐射透过率计算结果差异明显，而且结果明显偏大（表1）。

此外，光谱范围在基于人眼视觉响应下的计算结果没有显著差别。对光谱范围敏感计算结果差异最大的为聚碳酸酯中空板，400~700 nm波段范围内的计算值要高于380~780 nm的计算值1%~2%。

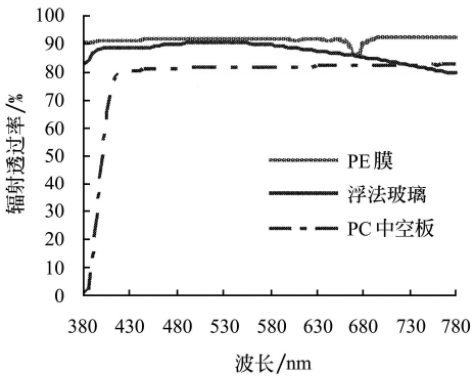


图3 材料在可见光范围内的辐射透过率
Fig.3 Visible radiation transmittance of glazing

表1 标准光源下材料在各波段范围内的辐射透过率
Table 1 Radiation transmittance of glazing tested under different standard light sources

		标准光源下材料在各波段范围内的辐射透过率 / %						
材料	权重	D65 光源		C 光源		A 光源		标准偏差
		380~780 nm	400~700 nm	380~780 nm	400~700 nm	380~780 nm	400~700 nm	
PE 薄膜 (0.12 mm)	人眼视觉	91.95*	91.95*	91.95*	91.95*	91.90	91.89	0.03
	常数 1	91.71	91.58	91.70	91.57	91.84	91.36	0.16
	作物响应	91.56	91.55	91.56	91.54	91.40	91.31	0.11
	线性系数	/	91.54	/	91.53	/	91.30 [#]	0.14
	标准偏差	0.20	0.20	0.20	0.20	0.27	0.28	/
聚碳酸酯 双层中空板	人眼视觉	80.83	80.83	80.83	80.83	80.91	80.91	0.04
	常数 1	77.39 [#]	79.37	78.20	79.67	81.06*	80.98	1.47
	作物响应	77.78	79.64	78.48	79.89	80.75	81.03	1.27
	线性系数	/	79.83	/	80.06	/	81.14	0.70
	标准偏差	1.88	0.64	1.44	0.50	0.16	0.10	/
浮法玻璃	人眼视觉	89.86*	89.86	89.84	89.84	89.56	89.57	0.15
	常数 1	87.82	88.94	87.87	88.90	85.90	88.22	1.11
	作物响应	88.69	88.92	88.68	88.88	87.73 [#]	88.13	0.47
	线性系数	/	88.79	/	88.74	/	87.84	0.53
	标准偏差	1.02	0.49	0.99	0.51	1.83	0.77	/

注：*表示每种材料测试结果最大值；#表示每种材料测试结果最小值。

对于光源类别, 标准D65光源和标准C光源计算结果具有较好的一致性, 而标准A光源差异较大, 如聚碳酸酯中空板相差可高达3.7%。

可见, 薄膜由于在每个波长上均匀的辐射透过性, 计算方法的差异并不影响其最终计算值。而聚碳酸酯中空板和浮法玻璃由于在整个光谱范围内辐射透过性并不均匀, 计算方法对计算结果影响最高可达3.7%。特别是聚碳酸酯中空板, 为了降低老化影响, 必须在表面作防紫外线处理, 所以在400 nm以下几乎不透过任何太阳辐射。而浮法玻璃, 由于含有三氧化二铁等物质导致在红光以及近红外波段内太阳辐射透过率逐渐下降。无论是防紫外线, 还是减少红光和近红外线, 计算方法都不同程度地影响到聚碳酸酯中空板和浮法玻璃的辐射透过率。所以, 聚碳酸酯中空板和浮法玻璃的透光特性数据给出测试和计算方法是必要的。

4 结论和讨论

温室透光覆盖材料的重要特性之一在于其透光性。但其透光特性的表达因测试和计算方法的不同而差异明显。本文以聚乙烯塑料薄膜(PE)、浮法玻璃、聚碳酸酯双层中空板(PC)三种典型的覆盖材料为对象, 在同一设备、相同测试环境下, 利用不同的计算方法计算了温室覆盖材料在可见光与PAR波段范围内, 在不同的标准光源下, 基于4种权重系数下的辐射透过率。结果表明, PE薄膜几乎不受影响, 浮法玻璃相差2%左右, 聚碳酸酯双层中空板差异达2%~3.7%。

可见, 温室覆盖材料检测仪器所用光源、光谱范围以及权重系数的选择影响着覆盖材料透过特性的测试结果。这说明, 只有明确材料透光性的测试和计算方法才能有效比较不同厂家以及国内外企业所生产温室覆盖材料的质量。所以, 温室覆盖材料生产企业应分别给出透光率和PAR辐射透过率值, 这有利于温室企业对覆盖材料的正确判断, 也有助于温室园艺工作者根据种植作物需求科学设计和合理安排生产。

参考文献

- [1] GB 4455-2006, 农业用聚乙烯吹塑棚膜[S].
- [2] GB/T 20202-2006, 农业用乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA)吹塑棚膜[S].
- [3] GB 11614-1999, 浮法玻璃[S].
- [4] NY/T 1362-2007, 温室用聚碳酸酯中空板[S].
- [5] JG/T 116-1999, 聚碳酸酯(PC)中空板[S].
- [6] JB/T 10286-2001, 日光温室结构[S].
- [7] NYJ/T 05-2005, 日光温室建设标准[S].
- [8] JB/T 10288-2001, 连栋温室结构[S].
- [9] NYJ/T 06-2005, 连栋温室建设标准[S].
- [10] ASAE EP460 FEB04, Commercial Greenhouse Design and Layout[S].
- [11] ANSI/ASAE EP406.4 JAN03, Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses[S].
- [12] NGMA Glazing Standard -1986[S].
- [13] GB/T 2410-1980, 透明塑料透光率和雾度试验方法[S].
- [14] GB/T 2680-1994, 建筑玻璃可见光透过率、太阳光直接透过率、太阳能总透过率、紫外线透过率及有关窗玻璃参数的测定[S].
- [15] ASTM D 1003, Standard test method for haze and luminous transmittance of transparent plastics [S].
- [16] ISO13468-1:1996, Plastics -- Determination of the total luminous transmittance of transparent materials—Part 1: Single-beam instrument[S].
- [17] ISO13468-2:1999 Plastics-Determination of the total luminous transmittance of transparent materials—Part 2: Double-beam instrument[S].
- [18] ISO 9050-2003, Glass in building-determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors[S].
- [19] ASTM E 903-96, Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating Spheres (Withdrawn 2005)[S].
- [20] 徐叙瑛, 苏勉曾. 发光学与发光材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [21] McCree K J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants[J]. Agricultural Meteorology, 1972, (9): 191—216.
- [22] Nijsskens J, Deltour J, Coutisse S, et al. Radiation transfer through covering materials solar and thermal screens of greenhouses[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1985, 35: 229—242.
- [23] Harry Stijger. All colours in light are equal for photosynthesis[J]. Flower Tech, 2004, 7(2): 9—11.
- [24] 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.

Test and measurement of solar visible radiation transmittance of greenhouse glazing

Ding Xiaoming, Zhou Changji*

(Institute of Facility Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China)

Abstract: Solar visible transmittance is crucial for greenhouse glazing. Different test methods for solar visible transmittance of glazing induce different results. The present paper described test and calculating methods for solar transmittance of glazing. Three typical glazing materials, namely, polyethylene(PE) film, float glass and double polycarbonate(PC) sheet, were measured and calculated under different International Commission on Illumination(CIE) standard sources(A, C and D65), within the visible and photosynthetic active radiation(PAR) spectra, using four response coefficients to solar radiation. Results show that PE film is not affected and float glass differs 2%, the difference of double polycarbonate sheets is up to 2%~3.7%.

Key words: greenhouse glazing; light transmittance; visible radiation; PAR; test method