

doi:10.3788/gzxb20134212.1501

太阳光特定波段光强快速检测方法研究

张海辉^a, 梁岩^a, 胡瑾^a, 刘正道^a, 周庆珍^a, 樊宏攀^b

(西北农林科技大学 a. 机械与电子工程学院; b. 信息工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 太阳光中各光质对植物光合和生理调节效果不同, 分波段光强检测是设施农业高效补光的基础. 针对现有特定波段光强检测仪器存在价格高及不易扩展等缺点, 提出一种新型定波段光照快速检测方法. 以红、蓝光为例, 通过实验测量计算不同太阳高度角下特定波段光强占太阳光的百分比, 并采用 Matlab 运用最小二乘法进行函数拟合, 融合太阳高度角计算公式, 建立了特定波段光强在太阳光所占百分比与日期、时间、经度及纬度四个参量之间的多参量耦合模型, 通过实时检测太阳光光强快速计算了特定波段光强值. 实验证明本方法测量误差小于 4.5%, 可满足补光系统分波段光强检测需求.

关键词: 光谱分析; 光谱学; 多参量耦合模型; 太阳光; 太阳高度角; 定波段; 最小二乘法; Matlab

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)12-1501-6

Study on Rapid Detection Method of Sunlight Specific Waveband Intensity

ZHANG Hai-hui^a, LIANG Yan^a, HU Jin^a, LIU Zheng-dao^a, ZHOU Qing-zhen^a, FAN Hong-pan^b

(a. College of Mechanical and Electronic Engineering; b. College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Different sunlight spectra make different regulation on the photosynthesis and physiology of plants. The detection of different bands light intensity is the foundation of the highly efficient supplementary lighting. Because the existing specific band intensity detection instruments have the disadvantages of high cost and easy to expand, a new method of rapid detection of specific waveband intensity was presented. Taking red and blue as an example, the percentage of specific waveband accounting for sunlight was obtained. By using Matlab, the least squares method was adopted for fitting function, combining with the calculation formula of sun elevation angle, and a multi-parameter coupling model between the percentage of specific waveband accounting for sunlight and the date, time, latitude and longitude was established. The specific waveband intensity was rapidly calculated by real-time detecting the intensity of sunlight. Experimental results showed that measurement error of the method is less than 4.5%, which can satisfy the need of light intensity detection of the sub-band of light filling system.

Key words: Spectrum analysis; Spectroscopy; Multi-parameter coupling model; Sun; Sun elevation angle; Specific waveband; Least squares method; Matlab

0 引言

设施种植受玻璃、薄膜覆盖及温室结构的影响, 其太阳辐射透过率随季节及时间的变化而变化, 透过率在 14%~80% 之间^[1-2], 光照不足已成了阻碍

设施种植发展的重要因素^[3], 所以太阳光谱光源是高效补光技术的研究热点. 但太阳光是多种光质组成的混合光, 而不同光质在植物光合作用中起到不同的调控作用, 造成不同植物各个生长阶段所需光质比例也有所差异, 其中对绿色植物光合来说以红、

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(No. 2013K0203)和西安市科技计划项目(No. NC1214(2))资助

第一作者: 张海辉(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为精细农业、服务计算和农业光电子学. Email: zhanghh@nwsuaf.edu.cn

收稿日期: 2013-07-22; 录用日期: 2013-10-10

蓝光影响最大,其光质和光照量直接影响作物的产量及品质^[4-5].因此,能否实现定量定光质补光已成为设施种植的一种瓶颈.

近年来随着 LED 技术的发展使设施定量补光成为可能,但定量补光的前提是对当前光照强度进行定波段测量和控制,由于太阳作为一种多光谱混合光源,对其光强的监测应采用分波段监测.现有针对太阳光监测的设备大多采用全波段或宽波段监测不能满足实际需要,而少数分波段光强检测仪器如红、蓝光光强检测仪,存在价格高、难维护、扩展性差等问题,造成定波段光强监测技术难以得到广泛应用,严重限制设施定量精准补光技术的发展.

针对以上问题,本文在不考虑天气状况的影响前提下,利用太阳光中各个波段的光所占的比例基本只受太阳高度角的影响这一原理^[6-7],建立了太阳光中不同波段的光强占太阳光总光强的百分比与测量时的时间、经度、纬度及日期的对应函数关系模型,从而提出了一种快速的太阳光分波段光强检测方法.基于该方法可通过测量太阳光的总光强计算不同波段的光强值,具有较好的通用性和可移植性.

1 研究方法

1.1 实验机理

辐射到地面上的太阳光,经过大气层的折射、反射等作用,光谱的组成也随之发生了变化^[6-7],而在不考虑天气的影响下,太阳光中各个波段的光所占的比例受太阳高度角的影响最大.通过查阅资料得到如表 1 所示的对应关系^[6-7].由表 1 可知,已有的数据为离散的数据点,不能得到连续的太阳高度角下对应的各波段光所占的比例,不能被实际技术所应用.并且数据点较少,不适于进行公式拟合.

表 1 各种太阳高度下太阳辐射中所含光谱的比例
Table 1 The proportion of spectra account for solar radiation under various sun elevation angle (%)

Sun elevation angle	Red	Yellow	Green	Blue
90°	28	29	22	13
60°	29	30	22	12
30°	30	31	23	11
10°	36	33	20	7
5°	47	34	14	4
1°	84	13	3	0

通过上述分析,本研究选择对作物生长影响最大的红、蓝光波段为研究对象,通过实验测量、数据拟合、模型建立、模型验证等步骤,得到不同波段光强占太阳光的比例与测量的时间、日期、及测量点的经度、纬度之间的对应关系,最终提出一种新型的定波段光照检测方法,本方法可扩展应用到红、蓝光以

外的任意太阳波段光强快速检测.

其中太阳高度角是太阳光线和观测点地平线间的夹角,用 h 表示,表达式为^[7-9]

$$\sin(h) = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (1)$$

式中: φ 是纬度、 δ 是赤纬(太阳倾角或日偏角)、 ω 是时角. δ 变化于 $\pm 23.5^\circ$ 之间.在要求不严格时可以认为赤纬计算公式为^[10]

$$\delta_{(\text{某日})} = \epsilon \sin\lambda \quad (2)$$

式中, ϵ 为黄赤交角等于 23.5° . λ 为黄径,春分日 $\lambda = 0$. $\lambda_{(\text{某日})} = 0.986n$, n 为某日距离春分的间隔日数. ω 为时角.时角的计量以正午时为 0° .午后为正值,午前为负值.以角度表示,一个真太阳日相当于时角 15° .因此, $\omega = (T-12) \times 15^\circ$, $T = h + \frac{m - (120 - \text{当地经度}) \times 4}{60}$ 为真太阳时与北京时间为

真太阳时与北京时间的换算关系,其中, h 为北京时间的小时数, m 为分钟数.当 T 所得值为负数时,则加上 24 小时.

1.2 实验方案

研究数据通过在陕西省杨凌农业示范区进行实验采集获取,在实际天气条件下,选取没有遮挡物的空旷的室外测量点,采用校准的 LI-1800 便携式分光光谱辐射仪分别测量同一太阳高度角下波长范围 $390 \sim 1\,050 \text{ nm}$ 太阳光谱强度及波长范围分别为 $620 \sim 770 \text{ nm}$ 和 $440 \sim 495 \text{ nm}$ 的红、蓝光光强值,测定波段为 $300 \sim 1\,100 \text{ nm}$,扫描波长间隔为 2 nm ^[11].在光强测定中采用的测量机理为光面积积分方法,在光强分布图中对上述波段进行积分得到太阳光及红、蓝光的光强值.测量期间保证探头水平放置,充分感应光照.由于太阳高度角不适用于直接测量,因此先通过计算将太阳高度角换算为相应的对应时间,本文采用北京时间进行测量.由于本实验是在 2012 年 6、7 月份选取晴朗的天气,连续 30 天进行数据采集,因此通过计算 6、7 月份杨凌地区可达到的最大太阳高度角,最终确定测量方式为分别测量从 70° 到 5° 每隔 5° 及 1° 的太阳高度角下对应的太阳光及红、蓝光的光强,经过计算得到不同太阳高度角下红、蓝光光强占太阳光光强的百分比.

1.3 采样数据处理

通过测量共得到了 30 组数据,在建立模型前对数据进行了粗大误差的剔除.超出规定条件下预期的误差称为粗大误差,含粗大误差的值称为异常值,为了保证测量数据的准确性,必须将异常值剔除.因为本实验对每一个参量测量 30 次,因此采用 δ 准则进行粗大误差的剔除. δ 准则的原理是认为误差超过 3δ 者概率很小,为不可能事件.即如果计量所得

值 x_i 的残差 $v_i = x_i - \bar{x}$ (\bar{x} 为测量平均值) 满足式(3).

$$|v_i| > 3\delta \quad (3)$$

则认为 x_i 含粗大误差而剔除, 其中 δ 表示标准偏差, 计算公式为^[12]

$$\delta \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum v_i^2} \quad (4)$$

此规则可重复运用直到所保留数据中不含有粗大误差为止.

表 2 不同太阳高度角下红、蓝光占太阳光的百分比

Table 2 The percentage of red and blue account for sunlight respectively under different sun elevation angle (%)

Sun elevation angle	1°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°
Red	83.1	47.6	36.5	35.2	34.1	32.2	31.9	31.1	30.3	30.2	29.8	29.1	28.3	26.4	25.6
Blue	0	4.2	7.1	7.9	8.5	9.8	11.0	11.4	11.6	11.8	11.9	12.1	12.2	12.8	13.5

2 建立模型

模型建立中, 首先通过以上连续三十天的测量, 得到不同太阳高度角下特定波段占太阳光的比例, 通过 Matlab 拟合出比例与太阳高度角的对应函数关系, 代入太阳高度角计算公式, 最终得到特定波段光强占太阳光的百分比与时间、经度、纬度及测量日期之间的对应关系. 模型建立过程如图 1.

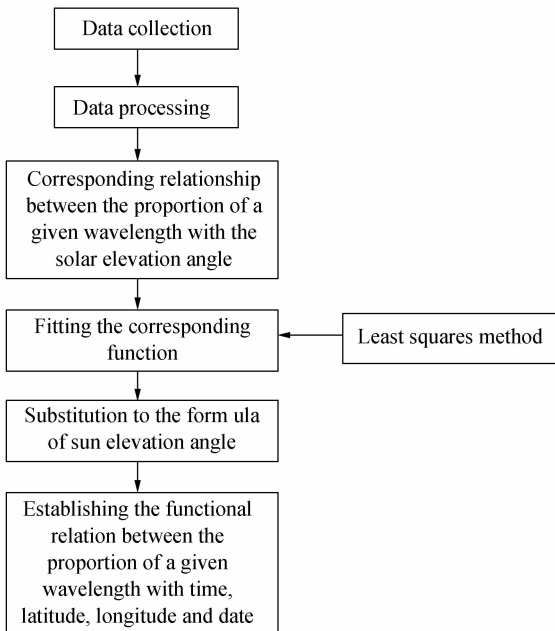


图 1 模型建立流程

Fig. 1 The modeling process

2.1 最小二乘法函数拟合

本研究采用线性最小二乘法实现上述模型中的函数拟合. 基本思路如下^[13-16]: 设太阳高度角为自变量 x , 红光占太阳光的百分比为因变量 $f(x)$, 则

$$f(x) = a_1 r_1(x) + a_2 r_2(x) + \cdots + a_m r_m(x) \quad (6)$$

式中 $r_k(x)$ 是事先选定的一组函数, a_k 是待定系数 ($k=1, 2, \dots, m, m < n$).

将 30 天测得的三十组数据剔除粗大误差后取平均值, 得到的最终结果如表(2)所示, 并计算三十组数据的方差值. 方差的计算公式如式(5)所示. 通过计算, 得到上述测量中同个太阳高度角下的方差值不大于 0.35.

$$S^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \cdots + (x_n - \bar{x})^2] \quad (5)$$

拟合准则是使 n 个点 $(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n$, 与 $y=f(x_i)$ 距离 δ_i 的平方和最小. 这一准则即为最小二乘准则. 根据最小二乘准则, 令

$$J(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 \quad (7)$$

为求 a_1, a_2, \dots, a_m 使 J 达到最小, 只需要利用极值的必要条件 $\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 (k=1, \dots, m)$ 得到关于 a_1, \dots, a_m 的线性方程组为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n r_1(x_i) [\sum_{k=1}^m a_k r_k(x_i) - y_i] = 0 \\ \sum_{i=1}^n r_m(x_i) [\sum_{k=1}^m a_k r_k(x_i) - y_i] = 0 \end{cases} \quad (8)$$

记为

$$\begin{bmatrix} r_1(x_1) & \cdots & r_m(x_1) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_1(x_n) & \cdots & r_m(x_n) \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (9)$$

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_m)^T, y = (y_1, \dots, y_n)^T$$

方程组(8)可表示为

$$R^T R A = R^T y \quad (10)$$

方程(10)称为法方程组, 当 $\{r_1(x), \dots, r_m(x)\}$ 线性无关时, R 列满秩, $R^T R$ 可逆, 于是方程组(10)有唯一解, 即

$$A = (R^T R)^{-1} R^T y \quad (11)$$

可以看出, 只要 $f(x)$ 关于待定系数 $a_1 \cdots a_m$ 线性, 在最小二乘准则式(7)下得到的方程组(8)关于 $a_1, a_2 \cdots a_m$ 也一定是线性的. 对数据 (x_i, y_i) 用线性最小二乘法作拟合时, 首要的也是关键的一步是恰当地选取经验公式 $r_1(x), r_2(x), \dots, r_m(x)$. 根据实验中获得的数据画出红、蓝光占太阳光的比例与太阳高度角对应关系的散点图.

根据散点图确定红光拟合函数采用多项式形式或幂函数 $y = ax^b + c$ 形式, 蓝光采用多项式形式或对数函数 $y = a \log_b(x) + c$ 形式^[16].

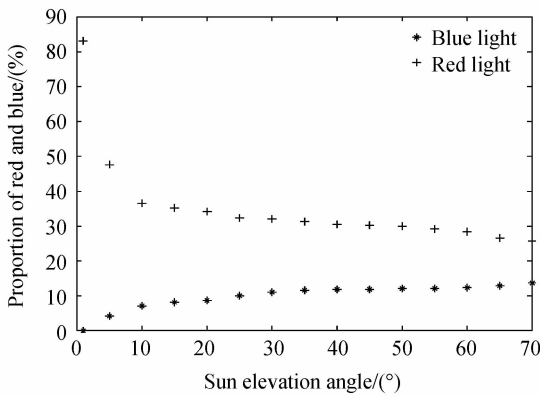


图2 红、蓝光占太阳光的比例与太阳高度角对应关系
Fig. 2 The corresponding relationship between the percentage of red and blue account for sunlight with the sun elevation angle

2.2 用 Matlab 实现曲线拟合

Matlab 是款功能强大的系统分析和仿真软件, 本文选用它作为实现曲线拟合的软件工具, 用 Matlab 语言编程实现最小二乘法的思路如下^[17-20]:

1) 输入参量 x, y 的测量值, 其中 y 为红光占太阳光的百分比, x 为对应的太阳高度角的值, 且以数组形式输入.

2) 用 Matlab 中的 plot 函数做出 x 与 y 的散点图, 对比典型曲线图, 选取合适的经验公式.

3) 采用 Matlab 拟合工具箱 curve fitting tool 进行上述函数拟合, 求出拟合函数 $f(x)$.

4) 编写 MATLAB 程序估计其误差, 并作出拟合曲线和数据的图形. 运行后屏幕显示数据 (x_i, y_i) 与拟合函数 $f(x)$ 的最大误差 E_w , 平均误差 E_1 和均方根误差 E_2 ^[21-22] 及其数据点 (x_i, y_i) 和拟合曲线 $y=f(x)$ 的图形.

通过以上方式, 分别得到采用两种不同的方式拟合出的函数.

2.2.1 蓝光拟合结果

多项式形式拟合函数为

$$f(x) = -6.5556 \times 10^{-9} x^6 + 1.5384 \times 10^{-6} x^5 - 0.00013912 x^4 + 0.0061333 x^3 - 0.1399 x^2 + 1.7562 x - 1.6403 \quad (12)$$

通过误差计算得到最大误差 $E_w = 0.3483$, 平均误差 $E_1 = 0.1426$, 均方根误差 $E_2 = 0.1805$.

对数形式拟合函数为

$$f(x) = 3.1699 \ln(x) - 0.3653 \quad (13)$$

其中最大误差 $E_w = 0.9118$, 平均误差 $E_1 = 0.4221$, 均方根误差 $E_2 = 0.5037$.

通过比较两种拟合方式准确度差异不大, 考虑到后续加入太阳高度角计算公式进行公式合成的复杂性及实际应用中的可行性, 仍采用对数函数进行函数拟合, 最终确定蓝光占太阳光的百分比与太阳

高度角的对应关系为

$$f(x) = 3.1699 \ln(x) - 0.3653.$$

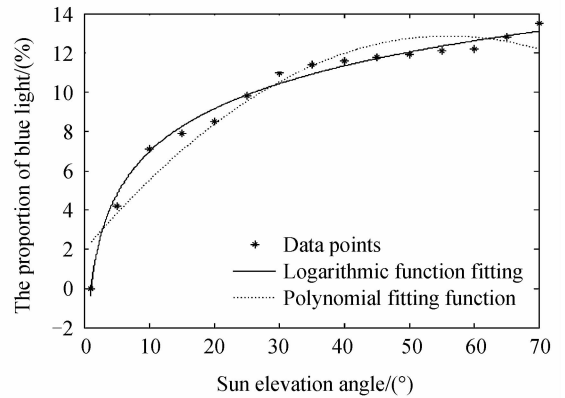


图3 蓝光拟合结果
Fig. 3 The result of the blue's fitting

2.2.2 红光拟合结果

多项式形式拟合结果为

$$f(x) = 5.051 \times 10^{-8} x^6 - 1.1988 \times 10^{-5} x^5 + 0.001113 x^4 - 0.05118 x^3 + 1.211 x^2 - 13.941 x + 95 \quad (14)$$

式中, 最大误差 $E_w = 2.242$, 平均误差 $E_1 = 0.8791$, 均方根误差 $E_2 = 1.0614$.

幂函数形式拟合结果为

$$f(x) = 61.09 x^{-0.559} + 22 \quad (15)$$

式中, 最大误差为 $E_w = 2.364$, 平均误差 $E_1 = 0.8219$, 均方根误差 $E_2 = 1.059$.

通过比较两种拟合方式, 最终确定红光占太阳光的百分比与太阳高度角的对应关系为

$$f(x) = 61.09 x^{-0.559} + 22$$

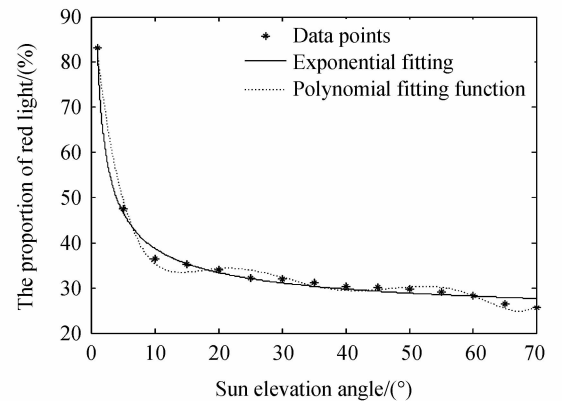


图4 红光拟合结果
Fig. 4 The result of the red's fitting

2.3 公式整合

通过上述拟合方式, 最终得到了红、蓝光占太阳光的百分比与太阳高度角的对应函数关系, 太阳高度角的计算公式为

$$\sin(h) = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (16)$$

代入, 最终得到时间与红、蓝光占太阳光百分比的对

应关系如式(17)、(18)所示。

红光

$$y=61.09\{\arcsin[\sin\varphi\sin[\varepsilon\sin(0.986n)]]+\cos\varphi\cos[\varepsilon\sin(0.986n)]\cos[(T-12)\times 15^\circ]\}^{-0.559}+22 \quad (17)$$

蓝光

$$y=3.1699\ln\{\arcsin[\sin\varphi\sin[\varepsilon\sin(0.986n)]]+\cos\varphi\cos[\varepsilon\sin(0.986n)]\cos[(T-12)\times 15^\circ]\}-0.3653 \quad (18)$$

3 实验验证与讨论

为了验证本文提出的方法建立模型的准确性,进行了实验验证.运用该模型计算了杨凌地区 2012 年 11 月 11 日北京时间 9:00-17:00 的红、蓝光光强占太阳光的百分比,如图 5、6 中实线所示.同时采用 LI-1800 便携式分光光谱辐射仪每一个小时测量一次红、蓝光及太阳光光强,计算出红、蓝光所占的比例,如图 5、6 中散点图所示.经过误差分析,最大误差不超过 3.5%.本文选取了陕西省渭南市等多个测量点进行了验证,误差均在 4.5%以内.

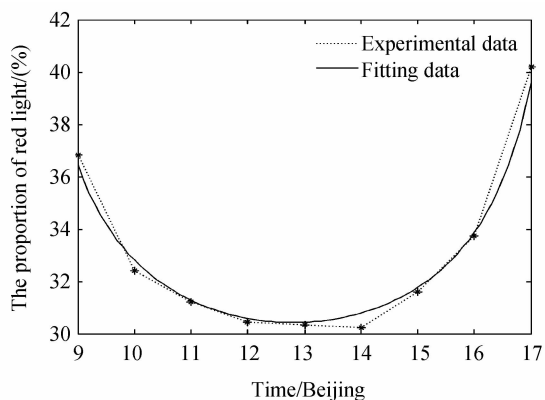


图 5 红光模型的验证

Fig. 5 The red model verified

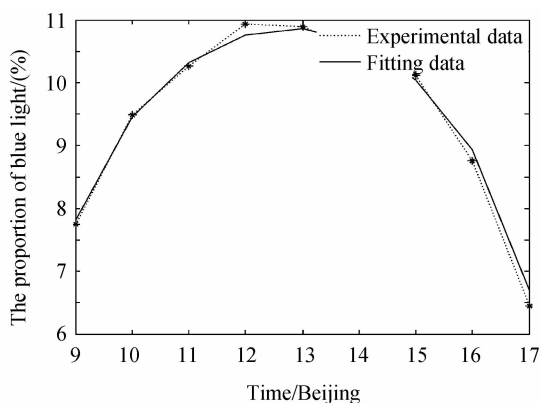


图 6 蓝光模型的验证

Fig. 6 The blue model verified

本文是针对红蓝光进行建模,提出了一种定波段光强快速检测的方法,本方法可扩展应用到不同

波段;目前本方法是在晴天条件下建立的模型,未考虑不同天气带来的影响,相关实验表明,阴天及雨天会使太阳光谱中的长波部分得到加强,导致同一太阳高度角下红光所占的比例增加,蓝光比例减小^[23-24],但经过对文献中的实验结果进行分析,天气造成的偏移量相对值较小.本文以晴天测得的数据建模时造成的误差较小,因此,在光环境快速测控等工程应用中具有广泛应用前景.若需要进行不同波段的精确测量,可在不同天气条件下测量,通过加入天气因素对模型进行修正,从而提高模型准确度.

4 结论

本文通过实验测量及数据拟合的方式,得到了红、蓝光占太阳光总光强的百分比与测量时的时间、经度、纬度及日期的对应函数关系,提出了一种新的太阳光定波段光强快速检测方法.经过验证,虽然拟合中会产生拟合误差,但在应用模型进行实地验证时,模型的实际误差均在 4.5%以内,这是因为拟合最大误差产生在太阳高度角大小于 5°的时候,而实际应用中太阳高度角基本在 5°以上,因此本文提出的方法建立的模型准确度较高,具有可行性.

参考文献

- [1] LU Wen-long, XIN Li-yuan, SONG Zhi-wen, et al. Analysis on the current problems and countemasure of protected plant industry in tianjin[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(23): 473-477.
陆文龙, 信丽媛, 宋治文, 等. 天津设施种植业现状、问题与发展建议[J]. *中国农学通报*, 2009, **25**(23): 473-477.
- [2] GAO Qing-lu, LIANG Yun-juan, DUAN Ai-wang. Light characteristics and its changing laws in solar[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, **19**(3): 200-203.
郜庆炉, 梁云娟, 段爱旺. 日光温室内光照特点及其变化规律研究[J]. *农业工程学报*, 2003, **19**(3): 200-203.
- [3] ZHANG Yong-hong, GE Hui-yan. Analysis and countermeasure to limited factors of sunshine in protected agriculture in weinan city[J]. *Shaanxi Meteorology*, 2006, (1): 32-33.
张永红, 葛徽衍. 渭南市设施农业光照限制因子分析和对策[J]. *陕西气象*, 2006, (1): 32-33.
- [4] ZHANG Hai-hui, YANG Qing, HU Jin et al. Self-adaptive and precise supplementary lighting system for plant with controllable LED intensity [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, **27**(9): 153-155.
张海辉, 杨青, 胡瑾, 等. 可控 LED 亮度的植物自适应精准补光系统 [J]. *农业工程学报*, 2011, **27**(9): 153-155.
- [5] ZHOU Chan, YANG Yun-fei, WANG Kun. Effect of red and blue spectrum on photosynthesis physiological characteristics of two ecotypes of leymus chinensis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(7): 1441-1444.
- [6] 甄文超, 王秀英. 气象学与农业气象学基础[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 19-30.
- [7] 贺庆棠, 陆佩玲. 气象学[M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2010: 39-42.
- [8] WANG Guo-an, MI Hong-tao, DENG Tian-hong, et al. Calculation of the change range of the sun high angle and the

- azimuth of sunrise and sunset in one year[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2007, **30**(S): 161-164.
 王国安, 米鸿涛, 邓天宏, 等. 太阳高度角和日出日落时刻太阳方位角一年变化范围的计算[J]. *气象与环境科学*, 2007, **30**(增刊): 161-164.
- [9] LIU Wei-feng, XIE Yong-jie, CHEN Ruo-wang, *et al.* Observation of relationship between zenith luminance and sun high angle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(7): 49-52.
 刘伟峰, 谢永杰, 陈若望, 等. 天顶亮度与太阳高度角关系的观测[J]. *光电工程*, 2012, **39**(7): 49-52.
- [10] YU He-jun. Study on the formula of the solar declination and time difference in meteorology [J]. *Meteorological Hydrological and Marine Instruments*, 2006, **9**(3): 50-53.
 于贺军. 气象用太阳赤纬和时差计算方法研究[J]. *气象水文海洋仪器*, 2006, **9**(3): 50-53.
- [11] WANG Shao-hui, KONG Yun, CHENG Ji-hong, *et al.* Effects of supplied light on photosynthetic characteristics and translocation of ^{14}C -assimilates of cucumber growing under solar greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, **24**(9): 203-208.
 王绍辉, 孔云, 程继鸿, 等. 补充单色光对日光温室黄瓜光合特性及光合产物分配的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(9): 203-208.
- [12] ZHAI Bao-feng. Researches on the technology of grain moisture measurement based on data merging [D]. Shen Yang: Shenyang University of Technology, 2002.
 翟宝峰. 基于数据融合的粮食水分检测技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002.
- [13] ZHU Feng, MIAO Run-cai, SU Bing, *et al.* Measurement of surface tension and capillary wave velocity at different temperature by laser diffraction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2927-2930.
 朱峰, 苗润才, 苏兵, 等. 激光衍射法测量表面张力和毛细波波速与温度的关系[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2927-2930.
- [14] HAN Qing-yao, XIAO Qiang, YUE Ying. Study of space discrete point's piecewise linear fitting on least square method [J]. *Industrial Instrumentation & Automation*, 2012, (4): 107-109.
 韩庆瑶, 肖强, 乐英. 空间离散点最小二乘法分段直线拟合的研究[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2012, (4): 107-109.
- [15] SHIMIZU T, KYOCHI S, IKEHARA M. A design of dual-tree complex wavelet transform based on least squares method[C]. Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop, 2009.
- [16] WANG Ke, MAO Zhi-ji. Actualizing least-squares curve-fitting based on matlab[J]. *Journal of Beijing Broadcasting Institute(Science and Technology)*, 2005, **12**(2): 52-55.
 王可, 毛志伋. 基于 Matlab 实现最小二乘曲线拟合[J]. *北京广播学院学报(自然科学版)*, 2005, **12**(2): 52-55.
- [17] SHI Xian-liang, WU Cheng-fu. RIs parameter identification and emulate based on matlab/simulink[J]. *Microprocessors*, 2005, (6): 44-46.
 石贤良, 吴成富. 基于 Matlab 的最小二乘法参量辨识与仿真[J]. *微处理机*, 2005, (6): 44-46.
- [18] TANG Jia-de. Nonlinear curve fitting based on MATLAB [J]. *Computer and Modernization*, 2008, (6): 15-19.
 唐家德. 基于 MATLAB 的非线性曲线拟合[J]. *计算机与现代化*, 2008, (6): 15-19.
- [19] YU Zhi-wei, CHENG Sheng-guo. Contrast analysis of data processing method based on the MATLAB in compaction test [C]. International Conference on Civil Engineering, Architecture and Building Materials (CEABM 2012). 2012, 1.
- [20] YANG Yun-sheng. Curve fitting based on matlab and the application on test data [J]. *Computer and Information Technology*, 2009, **17**(2): 34-36.
 杨云升. Matlab 曲线拟合及其在试验数据处理中的应用[J]. *电脑与信息技术*, 2009, **17**(2): 34-36.
- [21] HOGWEIJ G M D, HORDOSY G, LOPES CARDOZ O N J. Heat transport analysis with error calculation [J]. *Computer Physics Communications*, 1990, **59**(2): 245-258.
- [22] WANG Shu-sen, YANG Yan, DUAN Qi-chang. Quantitative methods based on relaxation oscillator and least squares[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(4): 101-103.
 王树森, 杨艳, 段其昌. 基于张弛振荡器和最小二乘法的量化方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(4): 101-103.
- [23] YANG Xi-feng, LIU Tao, ZHAO You-bo, *et al.* Measurement and analyses of sunlight and skylight spectra [J]. *Actascientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2004, **37**(4): 70-72.
 杨希峰, 刘涛, 赵友博, 等. 太阳光和天空光的光谱测量分析[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2004, **37**(4): 70-72.
- [24] WANG Ya-ji. Measurement and application of solar radiation spectra [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011.
 王亚吉. 太阳辐射光谱的测量与应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.