

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.038

融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型

胡瑾^{1,2} 荆昊男¹ 高攀^{1,2} 李远方¹ 张仲雄^{1,3} 张海辉^{1,3}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3. 陕西省农业信息感知与智能服务重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 设施光环境是影响作物生长发育的重要因素之一,其包括设施光强和光质。不同温度下,两者与光合速率存在显著的互作关系,建立融合作物光质需求的设施光环境智能调控模型,是设施农业环境调控急需解决的问题之一。本文以黄瓜为试验材料,设计了温度、光照强度、光质比嵌套的植株净光合速率测试试验,获取了多因子耦合的试验样本,并利用支持向量机建立了融合黄瓜光质需求的光合速率预测模型。其次,提出了基于粒子群算法的光照强度和光质比寻优算法,获取了不同温度条件下最适合植物生长的光照强度和光质比。最后,基于寻优结果,利用偏最小二乘回归法构建红蓝光目标值调控模型。验证结果表明,光合速率预测模型训练集数据和测试集数据的拟合度分别为0.9971和0.9969,均方根误差分别为0.3630、0.4367 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。红、蓝光目标值调控模型均方根误差分别为15.0878、10.1383 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,可满足调控模型精度要求。其调控效果相比于传统固定光质比调控模型有明显提升,为有效地进行设施光环境调控提供了重要依据。

关键词: 黄瓜; 光质比; 净光合速率; 回归型支持向量机; 粒子群算法

中图分类号: S126; S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0329-08

Intelligent Regulation Model of Light Environment for Facility Cucumbers with Light Quality Demand

HU Jin^{1,2} JING Haonan¹ GAO Pan^{1,2} LI Yuanfang¹ ZHANG Zhongxiong^{1,3} ZHANG Haihui^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Shaanxi Key Laboratory of Agricultural Information Awareness and Intelligent Services, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The facility light environment, including facility light intensity and light quality, is an important factor affecting the growth and development of crops. There is a significant interaction between the light intensity, light quality and photosynthetic rate at different temperatures. It is one of the most urgent problems for facility agriculture to establish an intelligent regulation model of light environment for facility cucumbers with light quality demand, and effectively improve the light environment of crops. A multi-factor nesting experiment was designed to obtain multi-dimensional sample data, and a support vector regression algorithm photosynthetic rate prediction model was constructed, which coupled temperature, light intensity, and light quality. Then, based on the particle swarm optimization algorithm, the optimal light intensities and light qualities under specific temperature conditions were obtained quickly. Finally, based on the optimization results, the intelligent regulation models of red and blue light were constructed by partial least squares regression method. As a result, the fitting degrees of training set and test set of the photosynthetic rate prediction model were 0.9971 and 0.9969, respectively, and the root mean square errors of training set and test set were 0.3630 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and 0.4367 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The root mean square errors of the intelligent regulation models of red and blue light were 15.0878 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and 10.1383 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively. Compared with the traditional fixed light quality models, the regulation effect of the model was significantly improved, which indicated that

收稿日期: 2019-06-10 修回日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671587)、陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-02)、西安市科技计划项目(201806117YF05NC13(4))和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017124)

作者简介: 胡瑾(1980—),女,副教授,主要从事设施光环境调控和智能信息处理研究,E-mail: hujin007@nwsuaf.edu.cn

these models provided an important basis for the effective regulation of the light environment of facilities.

Key words: cucumbers; light quality; net photosynthesis rate; support vector regression algorithm; particle swarm optimization algorithm

0 引言

黄瓜是一种重要的设施农业作物,光环境是影响黄瓜生长发育的重要因素,其不仅与光照强度有关^[1-6],也与光质比(红光占总光强的比例)密切相关。研究证明,合理调节光质比能显著提升作物品质^[7-8]。KHATTAK等^[9]研究表明金鱼草植物高度、节间长度和叶面积受光质影响较大。MIAO等^[10]证明蓝光比红光更有利于促进黄瓜叶片光合电子传递。王君等^[11]证明采用不同红蓝配比光处理的生菜其光能利用效率存在明显差异。刘彤等^[12]研究发现在不同条件下,植物光合作用所需的红蓝光强度比例也存在不同。但是目前大多数光环境调控的模型和系统研究只涉及到固定的光质比调控^[13-15],近期也出现了考虑环境对光质影响的研究,其一定程度上提高了调控效果^[16],但由于设置的试验条件不足,以及算法限制等问题,并没有进一步进行光质动态连续调控模型和方法的研究,造成现有设施光环境调控模型通常只考虑了固定光质比下的光强精准调控,尚未引入环境动态变化下的融合光质比和光强的协同调控方法,影响光环境调控效果。所以,建立融合作物光质需求的设施光环境智能调控模型,是设施农业环境调控急需解决的问题之一。

本文拟构建融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型。首先基于试验数据,利用回归型支持向量机(Support vector regression algorithm, SVR)算法建立融合黄瓜光质需求的光合速率预测模型,然后利用粒子群算法寻找特定温度下最大光合速率点对应的光照强度和光质比,最后基于寻找的数据建立光合速率调控目标值模型。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2019年4月在西北农林科技大学北校区农业物联网重点实验室进行,供试的黄瓜品种为“金胚98-1F1”,试验期间,对试验材料在培养箱进行正常的培育,不喷洒任何农药和激素。本试验主要设计了不同光质比、光强和温度耦合的嵌套试验,选取长势优良的黄瓜植株60株,采用LI-6800型便携式光合速率测试仪测定样本净光合速率。为了避免因天气状况不同和植株“午休”对试验结果造

成影响,选择较为晴朗的天气,于08:30—11:30,14:30—17:30期间进行试验。利用光合速率测试仪自带的多个子模块设置不同的环境条件进行试验,其中,CO₂浓度控制在400 μmol/mol,控温模块设定18、21、24、27、30、33℃共6个温度梯度,LED光质比设定为0.1、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.9共7个梯度,LED光源设定为0、30、75、150、300、500、650、800、1 000、1 200、1 400、1 600、1 800 μmol/(m²·s)共13个光照强度梯度,获取以温度、光质比、光照强度为输入,黄瓜净光合速率为输出的546组样本数据。

1.2 融合光质需求的光合速率预测模型建立

智能算法可有效提升模型的预测效率^[17-19],相关研究发现BP神经网络和随机森林算法的运算效率和预测精度一般不及支持向量机算法^[20],因此本文采用回归型支持向量机进行模型构建。该模型以温度、光质比、光照强度为输入,黄瓜净光合速率为输出,选用高斯核函数进行数据与特征空间之间的映射,最后在特征空间构建最优回归平面,完成模型建立,其流程图如图1所示。

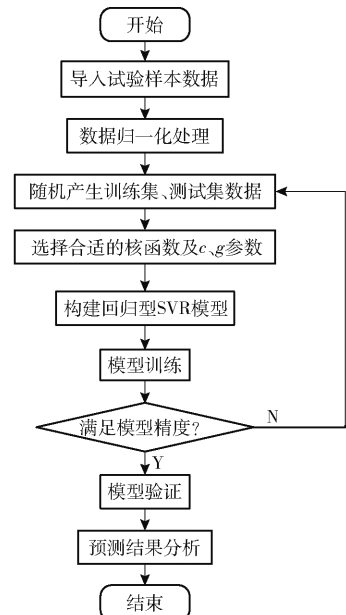


图1 基于回归型支持向量机的光合速率预测模型建立流程图

Fig. 1 Flowchart of photosynthetic rate prediction model based on SVR

(1)由于不同样本数据之间的差距比较大,量纲也有所不同,故先对全体样本数据进行归一化处理,将数据统一到同一个区间 $[0,1]$ 之内,所用的归一化计算式为

$$y' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中 y' ——归一化之后的数据

x_{\min} ——同一量纲数据中的最小值

x_{\max} ——同一量纲数据中的最大值

(2)从归一化后的 546 组数据中,随机选取 437 组数据(占样本总数据的 80%)作为训练集数据构建 SVR 模型,其余的 109 组数据(占样本总数据的 20%)作为测试集数据以验证模型的泛化能力。

(3)本研究样本数据之间存在明显的非线性关系。对于非线性支持向量机问题来说,首先需选取合适的核函数,将数据映射到特征空间,然后在特征空间里利用线性支持向量机方法寻找最优回归平面。本文采用高斯核函数进行数据的映射变换,并采用网格迭代寻优方法进行惩罚因子 c 和核函数参数 g 优化。其中, c 控制对超出误差样本的惩罚程度, g 决定了数据映射到新的特征空间后的分布,与函数的宽度参数有关。本文经过迭代寻优得到最优的 c 为 17, g 为 5。其中高斯核函数的表达式为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\delta^2}\right) \quad (2)$$

式中 δ ——函数宽度参数,控制函数的径向作用范围

\mathbf{x} ——训练集函数的自变量

\mathbf{x}_i ——核函数中心

映射之后在特征空间内利用拉格朗日函数求解回归平面,所得最优回归平面为

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha_i) K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b \quad (3)$$

$$\text{其中 } b = y_i + \delta - \sum_{i=1}^m (\hat{\alpha}_i - \alpha) \mathbf{x}_i^T \mathbf{x} \quad (4)$$

式中 $\hat{\alpha}_i, \alpha_i$ ——引入的松弛变量

(4)以测试集实测净光合速率为实测值,模型计算值为预测值,进行光合速率模型泛化能力和相关性比较。

1.3 基于粒子群算法的最优光照强度、光质比获取

为了寻找特定温度条件下的光饱和点和最佳光质比,本文采用粒子群算法进行寻优。粒子群算法是一种基于迭代的优化算法,具有操作方法简单,寻优速度快的特点^[21]。该算法基于群体中个体位置信息和食物位置信息连续发送的机制,利用信息共享完成个体移动方向和移动速度调整,从而实现群体不断地从杂乱无序的运动变为有序的活动,完成从随机解出发寻找最优解的过程。基于上述思想,本文采用光合速率预测模型实例化的方法建立不同温度下的寻优适应度函数,利用粒子群算法获取不同温度下净光合速率最大点,以及对应的光照强度和光质比,其流程图如图 2 所示,寻优具体过程包括

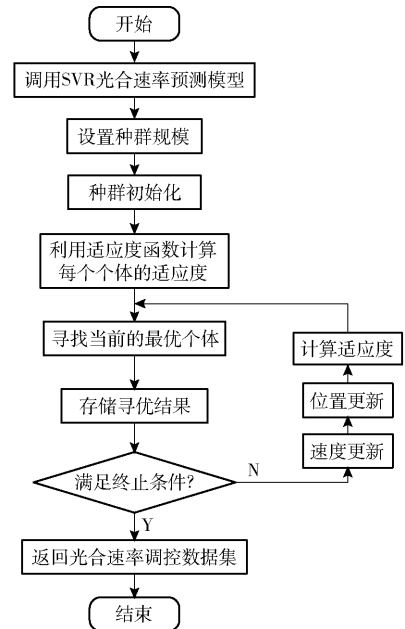


图 2 粒子群算法寻优流程图

Fig. 2 Flowchart of particle swarm optimization algorithm

以下步骤:

(1)进行特定温度下的光合速率预测模型实例化,并以此构建寻优目标值函数。

(2)确定模型参数,其中种群规模(即算法所需粒子的数量)为 60,算法最大迭代次数为 300,粒子的位置范围为 $[0, 1]$,速度范围为 $[-0.005, 0.005]$,粒子的个体学习因子为 0.5,社会学习因子为 1.5,惯性权重为 0.5。

(3)初始化每个粒子的位置和速度,并以每一点对应的光合速率预测值作为适应度函数进行计算。

(4)通过比较每个粒子的适应度寻找初始化后群体中的最优位置及其适应度值,在此基础上进行迭代寻优,使每个个体都向最优解的方向运动,直到寻找到最优解。

(5)当满足寻优结束条件,即运行次数达到该算法设置的最大迭代次数后自动停止,并记录和保存所寻找到的最优解结果。

1.4 光合速率调控目标值模型建立

粒子群寻优算法寻找了特定温度下光合速率最优点对应的光质比和光照强度,基于此寻优结果,利用偏最小二乘回归法构建黄瓜的光合速率调控目标值模型,主要包括以下步骤:

(1)基于粒子群算法寻找到的特定温度下最大光合速率对应的光质比和光照强度,分别计算对应的红、蓝光的光照强度,计算式为

$$P_r = PL \quad (5)$$

$$P_b = P(1 - L) \quad (6)$$

式中 P_r ——最优点红光光照强度

P_b ——最优点蓝光光照强度

L ——最优光质比

P ——最优总光照强度

以温度为输入,对应的红光和蓝光的光强为输出,采用最高阶次为三次的偏最小二乘回归法,进行模型拟合,得到的调控模型表达式为

$$y = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (7)$$

式中 a, b, c, d ——调控曲线系数

t ——环境温度

y ——红光或蓝光需求量

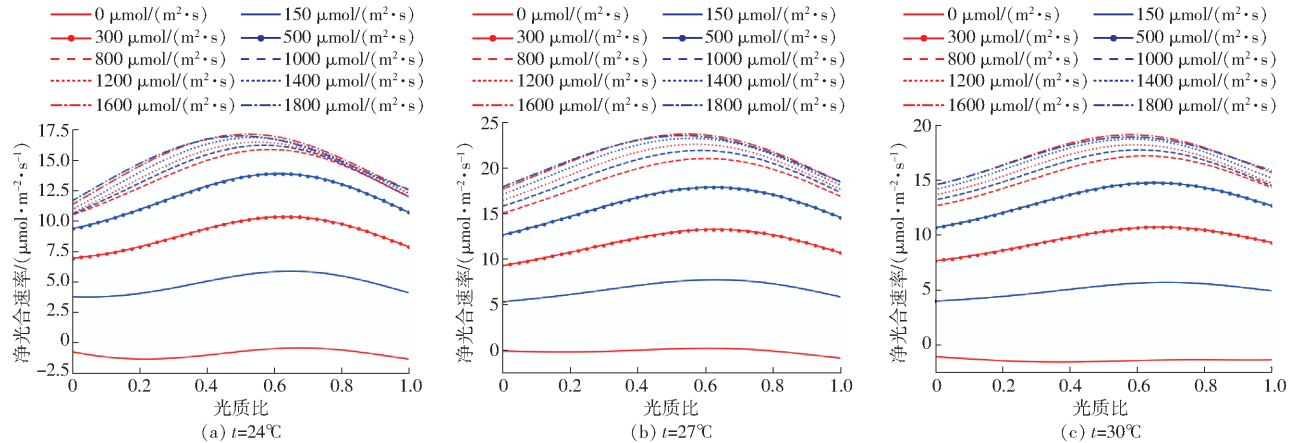


图3 不同温度下黄瓜净光合速率与光照强度、光质比的关系

Fig. 3 Relationships between net photosynthetic rate, light intensity and light quality of cucumbers

质比不一致,整体来说,随着光质比的增加,光合速率呈先增后减的趋势。因此,建立光质比动态调控可以在一定程度上优化调控效果。

2.2 光合速率预测模型验证

为了验证 SVR 光合速率预测模型的性能,同时选取 BP 神经网络算法、随机森林算法(Random forest, RF)建模进行对比,3种模型的评价指标对比如表1所示。

表1 3种模型的拟合度和均方根误差对比

Tab. 1 Comparisons of fitness and root mean square errors of three models

预测模型 类型	拟合度		均方根误差/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	训练集	测试集	训练集	测试集
SVR	0.997 1	0.996 9	0.363 0	0.436 7
BP	0.851 3	0.866 8	2.574 2	2.300 2
RF	0.997 0	0.982 8	0.238 7	0.871 2

由表1可知,利用 SVR 算法建立的模型训练集数据和测试集数据的拟合度分别为 0.997 1 与 0.996 9,均高于 BP 神经网络算法和 RF 算法建立的模型;进一步对比均方根误差可知,随机森林算法在模型建立过程中出现过拟合,虽然训练集的均方根误差最小,但测试集的均方根误差较大。综合考虑,选用 SVR 算法能更好地反映数据之间的关系。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

分析了温度、光照强度、光质比与净光合速率的关系,得到部分试验曲线如图3所示。由图3可知,在相同温度下,随着光照强度的增大,黄瓜净光合速率总体趋势增大,当光照强度较低时,黄瓜的净光合速率随光照强度增长而快速上升,到达一定值后增长速度变缓,甚至会出现下降。而且光质比对黄瓜净光合速率也有显著影响,在不同温度下其最佳光

为了观察 SVR 预测模型的泛化能力,选用测试集的 109 组样本数据对模型的泛化能力进行验证。实测值和计算值的相关性如图4所示。结果表明,测试集拟合度为 0.996 9,实测值和计算值两组数据之间具有较高的相关性。

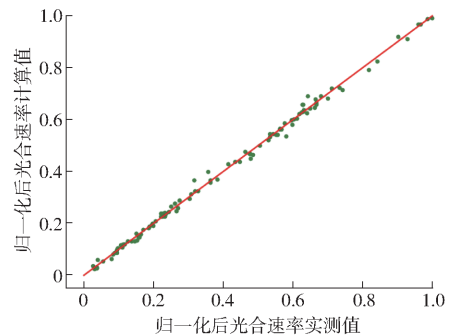


图4 光合速率预测模型相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis of photosynthetic rate prediction model

2.3 粒子群寻优结果

利用粒子群算法完成了特定温度下净光合速率最大点的寻优,其中 18、21、24、27、30、33°C 条件下的寻优迭代过程如图5所示。由图5可知,粒子群算法寻优过程中无振荡,很快便可以收敛到最优点,证明该方法对于此类样本寻优适合。得到最优点数据如表2所示。

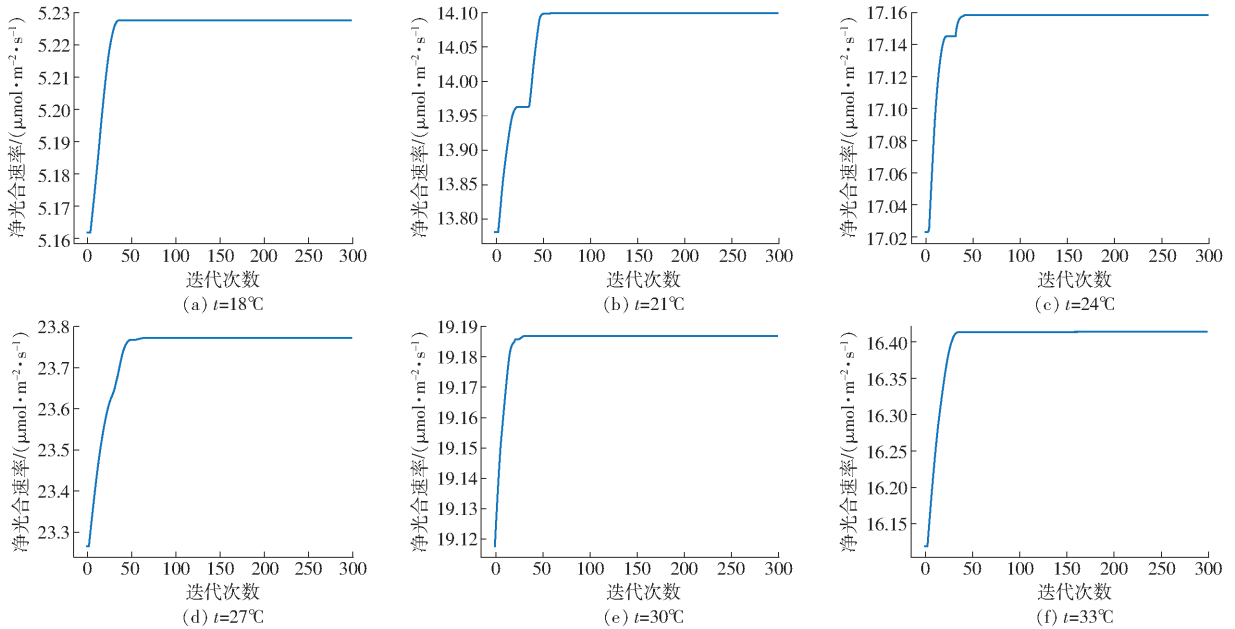


图5 粒子群算法寻优迭代过程

Fig. 5 Processes of particle swarm optimization

表2 光强与光质比寻优结果

Tab. 2 Values of optimal points for light intensity and light quality

温度/ °C	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	最佳光 质比	光饱和点/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
18	5.227 6	0.353 9	1 526.640 5
21	14.098 3	0.490 5	1 598.633 7
24	17.158 1	0.512 1	1 652.057 0
27	23.772 2	0.534 5	1 660.337 2
30	19.186 8	0.564 3	1 650.247 3
33	16.413 6	0.518 0	1 567.566 6

由表2可知,在不同温度条件下,最大光合速率、光饱和点以及最佳光质比都有所不同。随着温度的升高,3种变量的变化趋势都是先增后减,其中最大光合速率、光饱和点大约在27°C附近达到最大值,而最佳光质比在30°C附近达到最大值。进一步分析发现,温度在21~33°C范围时,最佳光质比约为0.5,但低温会使最佳光质比较大程度地偏离0.5,18°C时寻找到的最佳光质比只有0.3539,说明在较低的温度下蓝光可能更有利于提升作物光合能力。

2.4 调控模型验证

基于光饱和点和最佳光质比寻优结果,利用式(5)、(6)分别计算特定温度下红、蓝光的需求量,然后利用偏最小二乘回归法进行拟合,得到红、蓝光的调控曲线如图6所示,得到的拟合曲线方程分别为

$$y = -0.138\ 321\ 296t^3 + 6.996\ 413\ 49t^2 - 60.851\ 210\ 7t + 176.653\ 100 \quad (8)$$

$$y = 0.071\ 543\ 518\ 5t^3 - 3.925\ 050\ 00t^2 + 41.036\ 025\ 0t + 1\ 101.351\ 70 \quad (9)$$

红、蓝光调控模型均方根误差分别为14.6351、10.1920 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

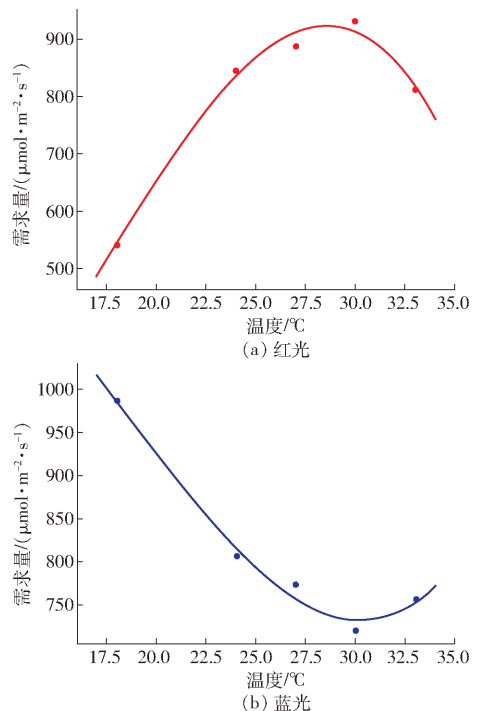


图6 调控曲线

Fig. 6 Intelligent regulation model curves

由图6可知,在红、蓝光的调控模型中,红光需求量随温度的升高而先增后减,大约在28°C附近达到最大值;而蓝光需求量随温度的升高而先减后增,大约在30°C附近达到最小值。这是因为植物光合作用的主要能量来源于红光,在28°C附近,黄瓜的

光合作用最强,此时所需的红光光照强度也最多。而刺激植物气孔张开是蓝光的一个重要功能,在低温和高温条件下作物会通过关闭气孔来调节光合作用,所以随着温度的升高,所需的蓝光光照强度先减小后增大,且在30℃附近,蓝光光照强度达到最小,此种变化趋势可能还与酶的活性等生理参数密切相关^[22]。

为了进一步验证所得调控模型的准确性,本文进行了计算值与实测值相关性分析。通过对实际测量的9个温度下光响应曲面光合速率最大值寻优得到光饱和点和最佳光质比,并利用式(5)、(6)得到对应温度下红、蓝光实测值,同时利用式(8)、(9)获取对应温度下红、蓝光预测值,从而进行实测值与计算值的相关性分析,结果如图7所示。

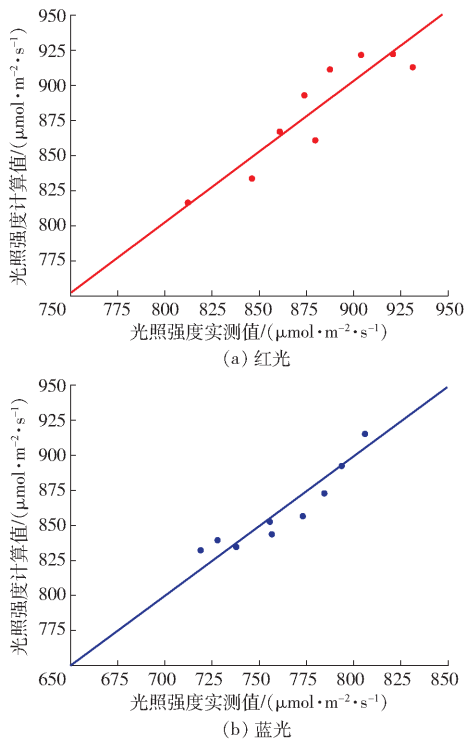


图7 调控模型泛化能力

Fig. 7 Fitness of intelligent regulation models

由图7可知,通过相关性拟合得到的拟合度分别为0.8345和0.8535,红光调控模型相关直线的斜率为1.0013,截距为1.6122;蓝光调控模型相关直线的斜率为0.9857,截距为9.5260,红、蓝光调控模型的均方根误差分别为15.0878、10.1383 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,说明该调控模型计算值与实测值之间有较高的相关性,可满足实际红、蓝光高效调控需求。

2.5 模型调控效果分析

温度、光照强度、光质比都是影响黄瓜光合速率的重要因素,三者对黄瓜的光合作用存在明显的互作作用。为了验证耦合条件下,光质比对光合速率

的影响,对比不同文献中常见的光质比与本模型得到的最佳光质比在相应光饱和点下的净光合速率,结果如表3所示。

表3 不同光质比对应的净光合速率

Tab. 3 Net photosynthetic rates at different light qualities

温度/ ℃	光质比 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$				
	1/2 ^[22]	2/3 ^[23]	3/4 ^[23]	4/5 ^[12]	动态解
18	4.9967	4.6420	4.5496	4.5052	5.2276
21	14.0914	12.3542	11.3425	10.9527	14.0983
24	17.1515	16.1629	14.9837	14.1801	17.1581
27	23.7140	22.9172	21.5963	20.6060	23.7722
30	19.0248	18.7712	17.8938	17.2145	19.1868
33	16.3975	15.3314	13.9596	13.0142	16.4136

由表3可知,在利用粒子群寻优找到的最佳光质比下,黄瓜的净光合速率高于其他几种常见的光质配比。在这几种常用的光质比条件中,光质比为0.5时对应的净光合速率最高,当光质比超过0.5时,净光合速率随光质比的增大而减小。且由表2可知,不同温度条件下,适合黄瓜生长的最佳光质比不同,最佳光质比随温度的升高而先增大后减小。所以相比于0.5这一最优固定光质比,利用粒子群算法动态寻优得到的光质比在相同总光强条件下,其调控效果更优。

3 讨论

为了进一步分析不同光质比造成净光合速率变化的原因,对比了不同温度下光质比对气孔导度的影响,如图8所示。由图8可知,光照强度、光质比和温度对气孔导度有显著影响,相同光质比条件下,气孔导度随温度变化趋势与光合速率变化趋势保持一致,大约在27℃附近达到最大值。从图8可知,在较低温度(24℃)及较高温度(33℃)时,光质比的变化对气孔导度有显著影响,增加蓝光光强可以显著地影响气孔导度变化。27~30℃附近,在最适光质比范围内,增加蓝光光强对气孔导度的影响很小,可能是由于在此温度范围内,光质比不再是影响其变化的主导因素,此时光合速率的下降可能与酶的活性等生理参数更相关。同时,在相同温度和光照条件下,气孔导度随光质比的增加而先增后减^[24],且在光质比约为0.5处达到最大值,该变化趋势与净光合速率的变化趋势一致。从而表明最佳光质比的动态变化很有可能是蓝光的气孔导度效应引起的。

同时,光质比还会通过影响色素活性等生理参数进而影响其光合作用。相关研究发现红蓝光通过光敏色素和隐花色素共同调节光合作用。储钟稀

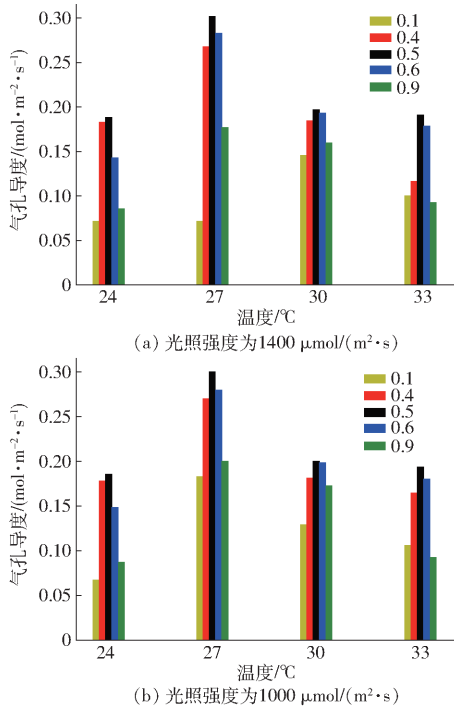


图8 不同温度下光质比对气孔导度的影响

Fig. 8 Effect of light quality on stomatal conductance at different temperatures

等^[25]研究了光质对黄瓜叶片光合作用特性的影响,发现红光处理的叶片具有较高的光系统 II (PS II) 活性和较低的光系统 I (PS I) 活性,蓝光处理的叶片具有较低的 PS II 活性和较高的 PS I 活性。而 PS I 和 PS II 是光合作用重要的两个过程,所以红蓝光比例过高或过低均会对植物的光合作用造成不

利影响。王晓艳等^[22]研究了不同比例的红蓝光对弱光下黄瓜叶绿体超微结构和相关光合特性的影响。结果显示,光质比为 0.5 处理组的比叶质量、净光合速率、气孔导度和光合性能指数均最高,分析得到光质比为 0.5 最有利于黄瓜幼苗叶绿体的发育和高光合速率的实现。其结果与表 2 中黄瓜的净光合速率随光质比的增大而先增后减,且在光质比约为 0.5 时达到最大值一致。

4 结论

(1) 以温度、光质比、光照强度为输入,黄瓜净光合速率为输出,建立基于回归型支持向量机算法的融合黄瓜光质需求设施光环境智能调控模型。验证结果表明,该模型的拟合度为 0.996 9,其均方根误差为 $0.436 7 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,明显优于 BP 算法和随机森林算法构建的模型,为设施光环境调控提供了重要依据。

(2) 基于粒子群算法实现了不同温度下最佳光质比和光饱和点获取,其结果表明不同温度下最适合黄瓜生长的光质比存在差异,最佳光质比随温度的升高呈现先增后减的趋势,大约在 30°C 附近达到最大值。

(3) 建立了红、蓝光目标值调控模型,其均方根误差分别为 $15.087 8$ 、 $10.138 3 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其调控效果明显优于传统固定的光质比,可用于指导实际应用中的光环境调控。

参 考 文 献

- [1] ZHENG Yinjian, ZHANG Yiting, LIU Houcheng, et al. Supplemental blue light increases growth and quality of greenhouse pak choi depending on cultivar and supplemental light intensity[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10):2245-2256.
- [2] SUI Xiaolei, MAO Shengli, WANG Lihao, et al. Effect of low light on the characteristics of photosynthesis and chlorophyll a fluorescence during leaf development of sweet pepper[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(10):1633-1643.
- [3] YAO Xuyang, LIU Xiaoying, XU Zhigang, et al. Effects of light intensity on leaf microstructure and growth of rape seedlings cultivated under a combination of red and blue LEDs[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(1):97-105.
- [4] MA Ping, BAI Tuanhui, WANG Xiaoqian, et al. Effects of light intensity on photosynthesis and photoprotective mechanisms in apple under progressive drought[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(9):1755-1766.
- [5] LI Hongwei, WANG Gui, ZHENG Qi, et al. Genetic analysis of biomass and photosynthetic parameters in wheat grown in different light intensities[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2014, 56(6):594-604.
- [6] LI Jinling, ZHAO Zhi, LIU Hongchang, et al. Influence of light intensity and water content of medium on total dendrobine of *Dendrobium nobile* Lindl[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2017,10(11):1095-1100.
- [7] 童哲, 赵玉锦, 王台, 等. 植物的光受体和光控发育研究[J]. 植物学报, 2000, 42(2):111-115. TONG Zhe, ZHAO Yujin, WANG Tai, et al. Photoreceptors and light-regulated development in plants[J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(2):111-115. (in Chinese)
- [8] 刘晓英,徐志刚,焦学磊,等. 可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(1):208-212. LIU Xiaoying, XU Zhigang, JIAO Xuelei, et al. Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1):208-212. (in Chinese)
- [9] KHATTAK A M, PEARSON S. Light quality and temperature effects on antirrhinum growth and development. [J]. Journal of Zhejiang University-Science B, 2005, 6B(2):119-124.
- [10] MIAO Yanxiu, WANG Xiaozhuo, GAO Lihong, et al. Blue light is more essential than red light for maintaining the activities of photosystem II and I and photosynthetic electron transport capacity in cucumber leaves [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(1):87-100.

- [11] 王君, 全宇欣, 杨其长. LED光源红蓝光配比对生菜光合作用及能量利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14):242-248.
WANG Jun, TONG Yuxin, YANG Qichang. Effect of LED light with different ratios of red to blue light on photosynthesis and energy use efficiency for lettuce[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 242-248. (in Chinese)
- [12] 刘彤, 刘雯, 马建设. 可调红蓝光光子比例的LED植物光源配光设计方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):154-159.
LIU Tong, LIU Wen, MA Jianshe. Distribution design method for LED plant light source with tunable ratio of red/blue photons[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1):154-159. (in Chinese)
- [13] 胡瑾, 樊宏攀, 张海辉, 等. 基于无线传感器网络的温室光环境调控系统设计[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4):160-167.
HU Jin, FAN Hongpan, ZHANG Haihui, et al. Design of regulation system of light environment in greenhouse based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 160-167. (in Chinese)
- [14] 胡瑾, 何东健, 任静, 等. 基于遗传算法的番茄幼苗光合作用优化调控模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17):220-227.
HU Jin, HE Dongjian, REN Jing, et al. Optimal regulation model of tomato seedlings' photosynthesis based on genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 220-227. (in Chinese)
- [15] 胡瑾, 闫柯, 何东健, 等. 基于改进型鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 260-265.
HU Jin, YAN Ke, HE Dongjian, et al. Light environment regulation target model of tomato based on improved fish swarm algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):260-265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160135&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.035. (in Chinese)
- [16] YANG Zhenchao, HE Wei, MOU Suntao, et al. Plant growth and development of pepper seedlings under different photoperiods and photon flux ratios of red and blue LEDs[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 173-180.
- [17] 王丽爱, 周旭东, 朱新开, 等. 基于HJ-CCD数据和随机森林算法的小麦叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):149-154.
WANG Liai, ZHOU Xudong, ZHU Xinkai, et al. Inverting wheat leaf area index based on HJ-CCD remote sensing data and random forest algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 149-154. (in Chinese)
- [18] 师翊, 耿楠, 胡少军, 等. 基于随机森林回归算法的苹果树冠层光照分布模型[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 214-222.
SHI Yi, GENG Nan, HU Shaojun, et al. Illumination distribution model of apple tree canopy based on random forest regression algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):214-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190525&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.025. (in Chinese)
- [19] 瞿英, 王冕, 董文旭, 等. 基于BP神经网络的农田大气氨浓度预测[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(4): 519-528.
QU Ying, WANG Mian, DONG Wenxu, et al. Prediction of atmospheric ammonia concentration in farmlands using BP neural network[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(4): 519-528. (in Chinese)
- [20] 张盼, 张海辉, 胡瑾, 等. 基于不同叶位的茄子花期光合速率预测模型研究[J]. 上海农业学报, 2019, 35(1):97-101.
ZHANG Pan, ZHANG Haihui, HU Jin, et al. Model for predicting flowering-stage eggplant photosynthetic rate based on different leaf positions[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2019, 35(1):97-101. (in Chinese)
- [21] 刘伟, 王建平, 刘长虹, 等. 基于粒子群寻优的支持向量机番茄红素含量预测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 143-147.
LIU Wei, WANG Jianping, LIU Changhong, et al. Lycopene content prediction based on support vector machine with particle swarm optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):143-147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120427&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.027. (in Chinese)
- [22] 王晓艳, 张晓楠, 成后德, 等. 红蓝光比例对弱光下黄瓜幼苗光合功能的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(6): 1410-1416.
WANG Xiaoyan, ZHANG Xiaonan, CHENG Houde, et al. Photosynthesis of cucumis sativus under weak light in response to different proportions of red to blue light[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(6): 1410-1416. (in Chinese)
- [23] 陈祥伟, 刘世琦, 冯磊, 等. 不同LED光源对乌塌菜光合特性及品质的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(增刊1):243-248.
CHEN Xiangwei, LIU Shiqi, FENG Lei, et al. Effects of light qualities on photosynthetic response and nutritional quality of savoy[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(Supp.1):243-248. (in Chinese)
- [24] 周婵, 杨允菲, 王堃. 红蓝复合光谱对两个生态型羊草光合生理特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(7): 1441-1444.
ZHOU Chan, YANG Yunfei, 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. (in Chinese)
- [25] 储钟稀, 童哲, 冯丽洁, 等. 不同光质对黄瓜叶片光合特性的影响[J]. 植物学报, 1999, 41(8):867-870.
CHU Zhongxi, TONG Zhe, FENG Lijie, et al. Effect of different light quality on photosynthetic characteristics of cucumber leaves[J]. Acta Botanica Sinica, 1999, 41(8):867-870. (in Chinese)