

融合叶位光合差异的设施黄瓜立体光环境优化调控模型

张海辉^{1,2} 张盼^{1,2} 胡瑾^{1,2} 来海斌^{1,2} 高攀^{1,3} 李斌^{1,2}

(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: 黄瓜整株光合积累不仅与温度、CO₂浓度、光照强度有关,而且与不同叶位的光合特性显著相关,实现不同叶位需光参数动态获取,是设施黄瓜立体光环境优化调控亟待解决的问题。本文提出了融合多智能算法的黄瓜立体光环境优化调控模型,设计了多因素嵌套实验获取多维样本数据,构建耦合叶位、温度、光照强度、CO₂浓度的回归型支持向量机光合速率预测模型;基于粒子群算法进行光饱和点寻优,获取不同环境条件下不同叶位的目标光照强度;采用回归型支持向量机算法,针对目标光照强度构建立体光环境优化调控模型。结果表明,本文所提方法可动态计算作物整株不同叶位不同环境因子作用下的目标光照强度,模型决定系数为 0.999 3,均方根误差为 2.349 μmol/(m²·s),进一步分析不同叶位叶绿素含量与光合特性关系,证明两者具有强关联性,研究对提高设施藤蔓类作物立体光环境调控效率具有重要意义。

关键词: 黄瓜; 光合作用; 不同叶位; 立体; 模型

中图分类号: S-3; S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0266-07

Optimization Regulation Model of Stereo Light Environment for Facility Cucumbers with Leaf Position Photosynthetic Differences

ZHANG Haihui^{1,2} ZHANG Pan^{1,2} HU Jin^{1,2} LAI Haibin^{1,2} GAO Pan^{1,3} LI Bin^{1,2}

(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 Perception and Intelligent Service, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The photosynthetic product accumulation of cucumber, which is related to temperature, carbon dioxide concentration and light intensity, shows high correlation with the photosynthetic characteristics of different leaf positions. The dynamic acquisition of light parameters in different leaf positions is a key problem to be solved in the optimization and regulation of stereo light environment of facility cucumber. A stereo light environment optimization control model was proposed based on multi-intelligent algorithm for cucumber, a multi-factor nesting experiment was designed to obtain multi-dimensional sample data, and a regression support vector machine photosynthetic rate prediction model, which coupled leaf position, temperature, light intensity and carbon dioxide concentration was constructed. Based on the particle swarm optimization algorithm, the light saturation point of different leaf positions was obtained under different environmental conditions. The regression support vector machine algorithm was used to construct the stereo light environment optimization control model for the target light intensity. The verification results showed that the proposed method can dynamically calculate the target light intensity with different environmental factors of different parts of the whole crop. The coefficient of determination was 0.999 3, and the root mean square error was 2.349 μmol/(m²·s). The relationship between leaf chlorophyll content and photosynthetic characteristics of different leaf position was further analyzed, and the strong correlation between the two was proved. The research result had important significance for improving the efficiency of stereo light environment regulation of facility vine crops.

Key words: cucumber; photosynthesis; different leaf positions; stereo; model

0 引言

黄瓜是我国主要设施作物之一,属喜光而耐阴性植物,其干物质积累的程度以及果实的优产优质主要决定于整株的光合作用^[1-3]。相关研究表明,作物整株光合作用不仅与外界温度、CO₂浓度、光照强度等环境因子显著相关,同时与不同叶位的光合能力密切联系^[4-7]。花果期黄瓜植株一般分为顶叶、中部叶位、下部叶位 3 部分,顶叶为初生叶,光合机构发育不健全,光系统中的叶绿素含量较少,光合能力较弱,中下部叶位多为功能叶,光合机构发育较完善,光系统中叶绿素含量较多,光合能力较强^[8-9]。传统补光多以功能叶位光合能力为基准采用冠层补光方式,由于叶片遮挡以及光照强度随距离增加而衰减,造成顶叶补光过多,中下部叶位受光不足,导致整株光合积累受限,不能充分利用不同叶位的光合能力以实现光能优化利用和最优光合积累^[10-11]。

近年来,众多学者针对不同叶位光合特性差异性进行了相关研究^[12-16]。研究表明不同叶位光合能力存在明显差异,但未能针对此差异性进行作物光环境调控模型构建。

目前,光环境优化调控模型以光合速率生理模型为基础,在预测算法及建模方法方面已开展研究^[17-18]。张海辉等^[19]研究了融合叶绿素含量的 BP 神经网络光合速率模型,通过加入生理因素提高模型精度。殷鉴等^[20]以春秋茬温室番茄为研究对象,采用无线传感器网络获取的环境因子数据为输入,功能叶位光合速率为输出,研究构建了光合速率预测模型。胡瑾等^[21]研究了番茄幼苗光合速率模型,采用遗传算法动态获取光饱和点,以此构建光合作用优化调控模型。叶子飘等^[22]研究了一种针对光响应和 CO₂响应的新模型,发现该模型可实现丹参的光和 CO₂响应数据高精度拟合,且可直接获取主要光合参数。以上研究通常以作物功能叶光合能力为标准构建模型,未考虑顶叶光合机构发育不全以及不同叶位光合特性差异。因此,研究融合叶位参数的作物立体光环境调控模型,已成为设施作物高效调控的关键。

本文将以构建融合叶位的多因子耦合黄瓜花果期整株光合速率预测模型为基础,设计基于粒子群寻优算法的光饱和点寻优方法,动态计算不同叶位目标光强,从而建立以最大光合速率为目标的黄瓜立体光环境优化调控模型,以期为设施作物整株光环境按需精准调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

田间试验于 2017 年 10—12 月在陕西省咸阳市泾阳县蔬菜产业综合服务区示范基地进行,供试黄瓜品种为“博耐 14-3”,育种时选取饱满籽粒进行浸泡、催芽、低温等常规处理,于 540 mm×280 mm×50 mm 的 50 孔营养钵进行育苗。育苗基质营养含量为有机质含量 50% 以上、腐殖酸含量 20% 以上、pH 值为 5.5~6.5。育苗期间进行统一灌溉、施肥及均匀光照处理。待黄瓜幼苗长至定植期,移植于基地东 2 号温室内,待黄瓜幼苗长至花果期时进行整株不同叶位净光合速率测量试验。试验期间,进行正常温室栽培管理,不施用农药及激素。

1.2 试验方法

试验主要设计不同叶位多环境因子嵌套试验,选取长势优良的黄瓜植株 60 株作为试验样本,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6800 型便携式光合仪测定样本净光合速率。为有效避免作物“午休现象”对试验样本数据可靠性的影响,于每天 09:00—11:30 和 14:30—17:00 进行试验。从植株顶叶向下依次选取第 1、3、5、7、9、11 叶位叶片作为试验样本。设施内温度、CO₂浓度、光照强度等环境因素日变化幅度大,经相关性分析可得(表 1),其对作物光合作用影响显著,因此本文选用以上环境参数开展试验研究和模型构建。采用光合仪自带子模块按需控制被测叶片周围的温度、CO₂浓度、光照强度等参数。其中,控温模块设定 18、20、24、28、32、36℃ 共 6 个温度梯度;CO₂注入模块设定 CO₂体积比为 300、600、900、1 200 μmol/mol 共 4 个浓度梯度;根据相关研究表明,黄瓜光饱和点约为 990 μmol/(m²·s)左右,综合考虑设施黄瓜光饱和点以及设施内部光照强度变化范围^[23-24],利用 LED 光源模块设定 0、

表 1 各环境因子与净光合速率的相关性

自变量	叶位	温度	CO ₂ 浓度	光照强度	湿度
相关系数	0.070 **	0.163 **	0.269 **	0.790 **	0.021
显著性检验值	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	0.358

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

20、50、100、200、300、500、700、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 共 14 个光照强度梯度;湿度模块设定叶室内部相对湿度为 50%。共进行 2 016 组试验,每组试验随机选取 3 株进行测量,形成容量为 6 048 组的试验样本数据集。

2 模型构建

本文分 3 步建立设施作物立体光环境优化调控模型。首先,基于不同叶位光合数据进行光合速率预测模型构建。其次,采用粒子群寻优算法对整株不同叶位于不同环境因子组合条件下的光饱和点进行寻优。最后,基于寻优所得光饱和点构建目标光强数据集,采用回归型支持向量机 (Regression support vector machine, SVR) 进行立体光环境优化调控模型构建。

2.1 融合叶位的多因子耦合光合速率预测模型构建

基于试验所得光合速率样本数据,综合考虑模型精度,选取合适建模方法是保证立体光环境精准调控的关键。由于 SVR 算法在模型训练过程中具有训练误差小、建模精度高、泛化能力强等特点^[25],本文采用 SVR 进行模型构建,建模流程如图 1 所示。

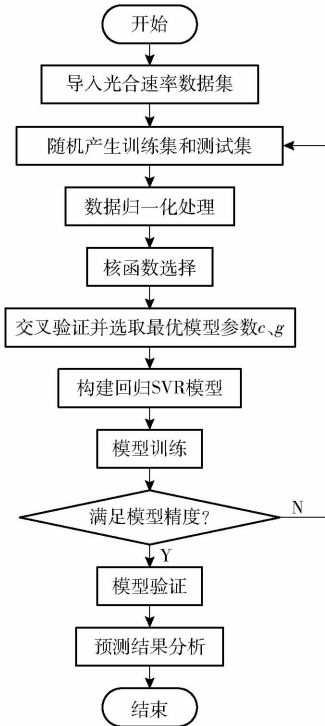


图 1 回归型支持向量机建模流程图
Fig. 1 Flow chart of regression support vector machine modeling

首先,随机选取训练集与测试集并进行归一化处理。试验共获取样本数据 2 016 组,随机选取 1 613 组样本数据(占总样本 80%)作为训练集,以

此进行后续模型构建。剩余 403 组样本数据(占总样本 20%)作为测试集,用于模型验证。由于不同样本数据之间量纲差异较大,直接进行训练可能导致网络收敛较难,故对训练集及测试集数据进行归一化操作,归一化区间为 $[-1,1]$,归一化公式为

$$y = 2(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) - 1 \tag{1}$$

式中 y ——归一化后的数据
 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ ——同一量纲数据序列最大值和最小值

由于径向基核函数具有计算过程参数变化而复杂度不变特性,本文选取其进行模型构建。核参数 c 主要影响核函数形态,影响因子 g 主要影响模型预测精度,经交叉验证方法进行多次经验计算获取最佳参数值 c 为 1.024, g 为 0.125。

最后,模型训练及构建。针对 1 613 组样本,采用径向基核函数,通过将低维空间的非线性不可分问题映射到高维空间,并在高维空间产生用于最优分类的超平面,进行线性回归决策分析。决策函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(x, x_i) + b \tag{2}$$

其中 $K(x, x_i) = \exp(-\sigma \|x_i - x\|^2) \tag{3}$

式中 σ ——宽度信息
 $f(x)$ ——决策输出 b ——偏置
 $K(x, x_i)$ ——核函数
 x ——输入信号
 x_i ——第 i 训练样本的输入
 $\bar{\alpha}_i^*$ 、 $\bar{\alpha}_i$ ——拉格朗日乘子
 l ——支持向量个数

2.2 基于粒子群算法的目标光照强度寻优

粒子群算法是通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的基于群体协作的随机搜索算法,其具有可调参数少、收敛速度快、可有效避免陷入局部最优值等优势^[26-28]。因此,考虑到模型复杂度以及期望精度,采用粒子群优化算法进行黄瓜整株不同叶位光饱和点数据集获取。该算法以净光合速率预测模型为适应度函数,获取不同叶位、温度、 CO_2 浓度条件下的目标光照强度数据集,流程图如图 2 所示。

(1) 粒子群初始化。由于寻优区间分别为步长为 1 的叶位的区间为 $[1,11]$,步长为 1 的温度区间 $[18,36]^\circ\text{C}$ 、步长为 50 的 CO_2 浓度区间 $[300,1\,200] \mu\text{mol}/\text{mol}$,目标光照强度区间为 $[0,1\,500] \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在解空间中,初始化粒子群的位置为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$,速度为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})$,粒子数为 20,保证初始种群在解空间均匀分布。

(2) 调用适应度函数。以光合速率预测模型为

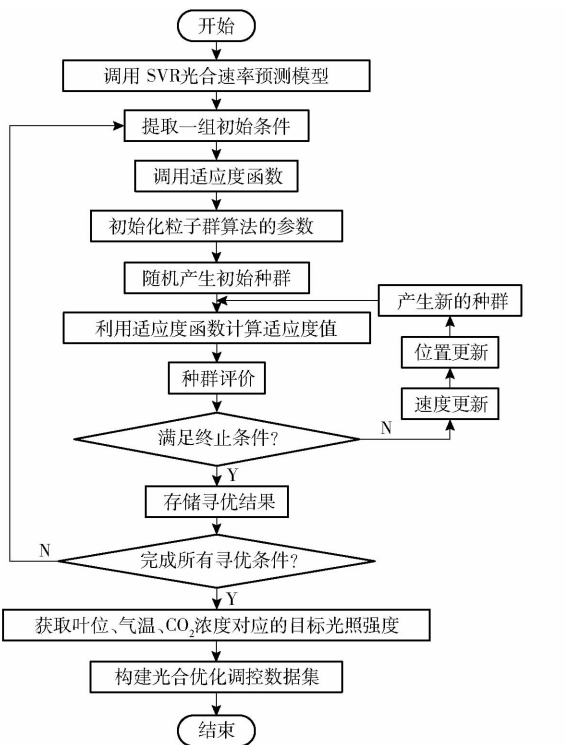


图 2 粒子群寻优算法流程图

Fig. 2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

适应度函数,采用个体和全局最优值相结合的方法进行粒子坐标更新。找到粒子在每一代中适应度最优值,将其对应坐标作为个体最优值。找到种群在每一代中适应度最优值,将其对应坐标作为全局最优值。

(3)速度及位置更新。粒子根据个体最优值和全局最优值实时更新自身速度,更新公式为

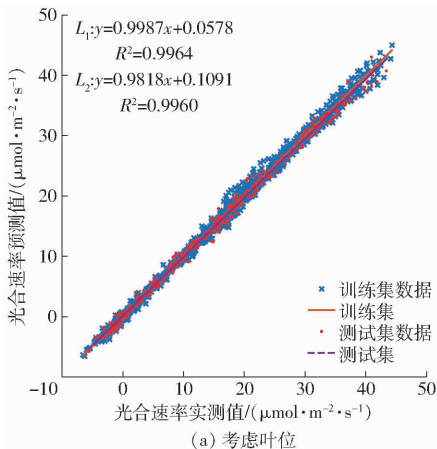
$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{gd}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D) \quad (4)$$

式中 v_{id} ——第 i 个粒子第 d 维的速度

ω ——惯性因子 d ——粒子维数

c_1, c_2 ——学习因子,通常取 $c_1 = c_2 = 2$

r_1, r_2 —— $[0, 1]$ 之间随机数



(a) 考虑叶位

x_{id} ——第 i 个粒子第 d 维的位置

p_{id} ——个体最优值

p_{gd} ——全局最优值

粒子根据更新后速度调整自己位置,更新公式为

$$x_{id} = x_{id} + \alpha v_{id} \quad (i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D) \quad (5)$$

式中 α ——约束因子

2.3 黄瓜立体光环境优化调控模型构建

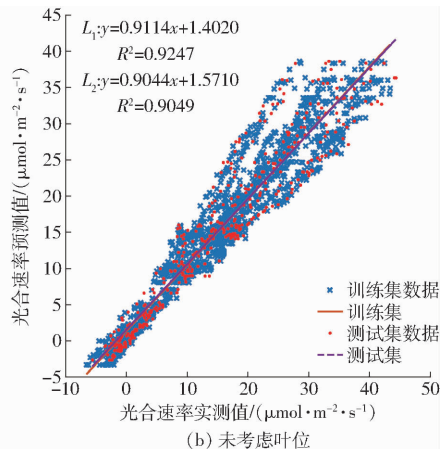
基于上述三维寻优方法,得到以叶位、温度、 CO_2 浓度为输入,光饱和点为输出的 3 971 组目标光强数据集。由于 SVR 算法具有建模精度高、模型可移植性好的特点,可满足后期嵌入式设备运行应用等需求,故仍然选取此方法进行黄瓜立体光环境优化调控模型构建。

随机选取总样本数据的 80% (即 3 177 组) 作为训练集,进行后续模型构建。选取总样本数据的 20% (即 794 组) 作为测试集,进行后续模型验证。对训练集及测试集数据进行归一化操作,然后选取径向基核函数参与模型训练,经交叉验证方法对不同组合条件下的 c, g 参数进行多次计算,确定最佳参数值 c 为 3.35, g 为 0.353 6,以此完成黄瓜整株光环境优化调控模型构建。

3 结果与分析

3.1 光合速率预测模型验证结果

为了验证叶位对预测模型精度影响,针对训练集采用相同建模方法,构建考虑/不考虑叶位因子的光合速率预测模型,并以异校验方式采用训练集和测试集进行两个模型对比验证,结果如图 3 所示。其中考虑叶位因子的训练集 (L_1) 及测试集 (L_2) 光合速率实测值及预测值相关性如图 3a 所示,结果表明其决定系数分别为 0.996 4、0.996 0;均方根误差分别为 0.704 9、0.745 9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;直线斜率分



(b) 未考虑叶位

图 3 不同叶位光合速率预测模型验证

Fig. 3 Verification of different leaf positions photosynthetic rate prediction models

别为 0.998 7、0.981 8；截距分别为 0.057 8、0.109 1。未考虑叶位因子的训练集 (L_1) 及测试集 (L_2) 光合速率实测值及预测值相关性如图 3b 所示,结果表明其决定系数分别为 0.924 7、0.904 9;均方根误差分别为 3.069 0、3.536 0 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;直线斜率分别为 0.911 4、0.904 4;截距分别为 1.402 0、1.571 0。可见,训练集及测试集拟合所得直线均基本重合,且

考虑叶位因子所构建的光合速率预测模型具有训练误差小、拟合度更好、线性度更高的特点。

3.2 立体光环境优化调控模型结果及验证

基于目标光强数据集构建了以叶位、温度、 CO_2 浓度为输入,光饱和点为输出的黄瓜立体光环境优化调控模型。其中,第 1、3、5、7、9、11 叶位不同环境因子组合条件下的光环境优化调控模型如图 4 所示。

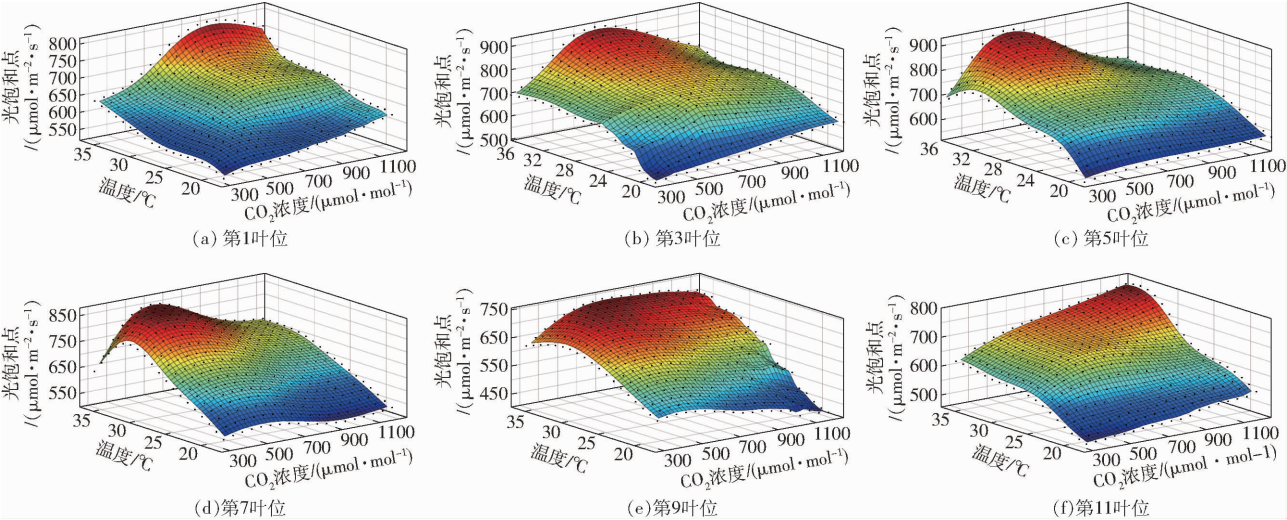


图 4 黄瓜整株不同叶位需光模型
Fig. 4 Light model of different leaf positions of cucumber

采用测试集对黄瓜立体光环境优化调控模型进行异校验,验证结果如图 5 所示。分析可得其决定系数为 0.999 3,均方根误差为 2.349 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,直线斜率为 0.998 5,截距为 1.006 0,光饱和点实测值与预测值相关性较高,可实现设施作物立体光环境的高效精准调控。

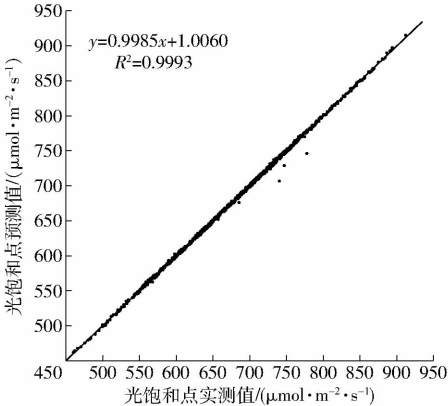


图 5 立体光环境优化调控模型验证

Fig. 5 Verification of stereoscopic light environment optimization control model

4 讨论

由图 4 可发现,不同叶位光合特性存在显著差异,而光合特性与植株本身发育及衰老程度导致不同叶位主要光合器官叶绿素含量差异性、叶片表面

气孔导度等因素密切联系。其中,叶绿素作为光合作用的主要参与元素,其一定程度上直接决定了光合能力^[29]。因此,本文补充测量试验期黄瓜不同叶位叶绿素含量,分析其变化规律与光合特性相互关系,以期探明作物立体补光的生理依据。在前述 60 株试验样本中选取长势基本一致、健康无病害的黄瓜植株 20 株,采用 SPAD-502 型叶绿素仪测量黄瓜整株 1、3、5、7、9、11 叶位叶片顶部、中部、底部 3 点的叶绿素含量,计算平均值作为该叶位叶绿素值,共获得数据 120 组。为避免外界自然光太强对数据产生影响,试验在阴天或者遮光条件下进行。测量所得植株不同叶位叶绿素如图 6 所示。

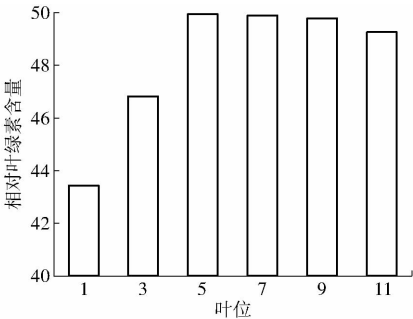


图 6 不同叶位叶绿素含量分布

Fig. 6 Distribution of chlorophyll contentat different leaf positions

由图 6 可知,不同叶位叶绿素含量存在明显差

异,由顶叶至老叶,叶绿素含量呈现先显著上升,再平缓,然后缓慢下降的趋势。叶绿素含量存在数值较高的局部平坦区,位于第 5、7 叶位区间。获取温度为 18、20、24、28、32、36℃,CO₂ 浓度为 600 μmol/mol 条件下不同叶位光合速率响应曲线如图 7 所示。

由图 7 分析发现,叶位 1、3、5 光合能力显著提升,叶位 5 与叶位 7 光合能力表现基本一致,且为整株光合最优叶位所在,叶位 9 与叶位 11 光合能力有

所下降,该结果与图 6 所示不同叶位叶绿素含量分布结果一致,证明不同叶位叶绿素含量与光合特性具有强关联性。同时,可发现叶位 9 与叶位 11 光合能力较图 6 所示叶绿素含量有更大程度降低,其与叶片衰老、光合机构机能降低等因素相关。因此,在满足冠层光合需求的同时,针对适宜叶位区间的精准补光可实现作物整株光合作用最优,为设施藤蔓作物立体补光提供了良好的理论依据。

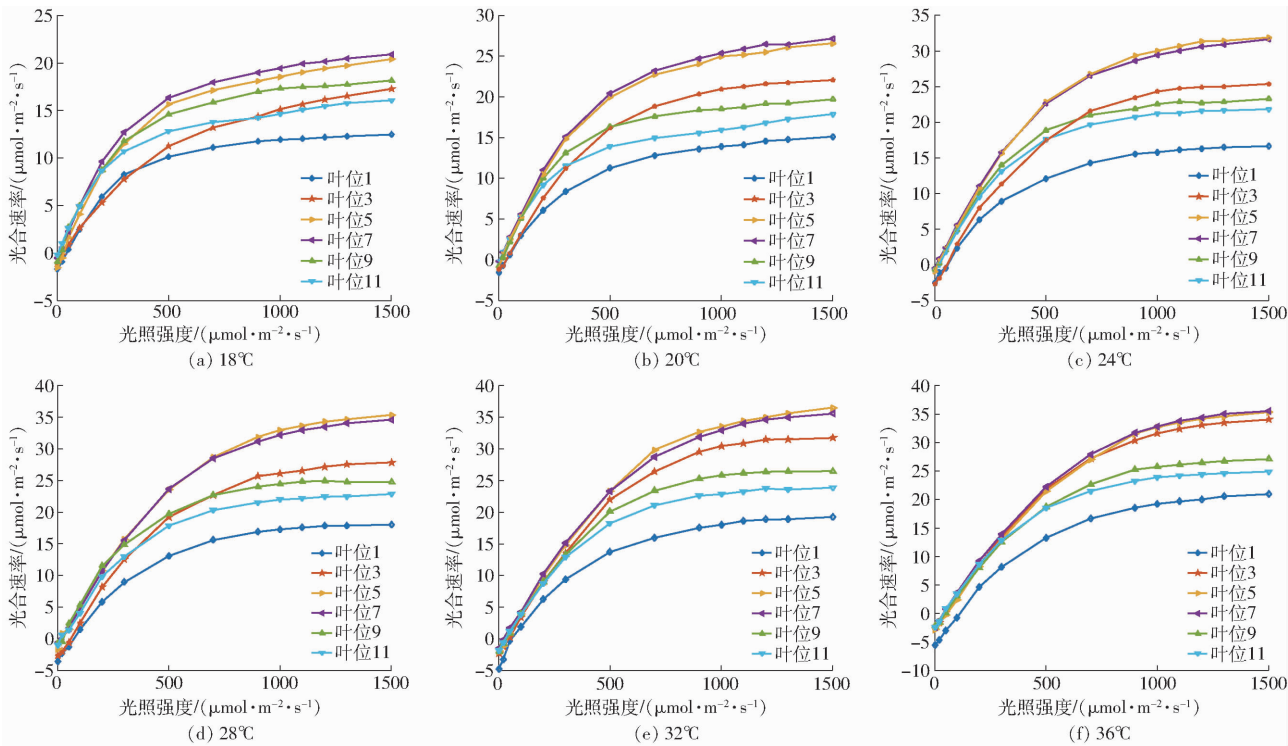


图 7 不同叶位光合速率响应曲线

Fig. 7 Photosynthetic rate response curves of different leaf positions

5 结论

(1)以叶位、温度、CO₂ 浓度、光照强度等多因子耦合所得净光合速率为基础,采用 SVR 算法构建所得光合速率预测模型决定系数为 0.996 0,能以较高精度拟合多因子与光合速率之间的关系。

(2)提出了基于粒子群寻优算法的目标光照强度寻优方法,可得不同叶位最大光合速率及最优目标光照强度,融合 SVR 算法构建以光饱和点

为目标值的黄瓜花果期立体光环境优化调控模型。验证结果表明,其决定系数为 0.999 3,拟合所得直线斜率为 0.998 5,纵坐标截距为 1.006 0,均方根误差为 2.349 μmol/(m²·s),可满足立体光环境按需调控的要求,为设施作物优产优质奠定了良好基础。

(3)基于叶绿素的验证试验表明,不同叶位叶绿素含量与光合特性具有强关联性,为设施藤蔓类作物立体光环境调控提供一定理论支撑。

参 考 文 献

[1] 艾希珍,张振贤,何启伟,等.日光温室黄瓜不同叶位叶片光合作用研究[J].中国农业科学,2002,35(12):1519-1524. AI Xizhen, ZHANG Zhenxian, HE Qiwei, et al. Study on photosynthesis of leaves at different positions of cucumber in solar greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002,35(12): 1519-1524. (in Chinese)

[2] 梁文娟,王美玲,艾希珍,等.黄瓜幼苗光合作用对亚适温弱光胁迫的适应性[J].农业工程学报,2008,24(8):240-244. LIANG Wenjuan, WANG Meiling, AI Xizhen, et al. Photosynthesis adaptation of cucumber seedlings to suboptimal temperature and low light intensity stress[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(8): 240-244. (in Chinese)

[3] 张振贤,艾希珍,赵世杰,等.黄瓜叶片光合作用的温度补偿点与光合启动时间[J].园艺学报,2003,30(2):157-162. ZHANG Zhenxian, AI Xizhen, ZHAO Shijie, et al. The temperature compensation point and the start time of photosynthesis of cucumber leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003,30(2): 157-162. (in Chinese)

- [4] AI X, ZHANG Z, WANG S, et al. Study on photosynthetic characteristics of different leaf-position leaves in ginger[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 1998,7(2):101–103.
- [5] LIU J P, YOU M H, ZENG X L, et al. Correlation analysis of photosynthetic rate and biomass of different leaf positions with seed yield of *Elymus sibiricus*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015,24(11):118–127.
- [6] KITAGAWA H, SHIMOTUBO K. Diurnal changes of photosynthetic rates in the different leaf positions on the stem under rice plant population[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1993, 62: 118–119.
- [7] 陈佰鸿,李新生,曹孜义,等. 葡萄试管苗不同叶位叶片光合与呼吸的特性[J]. 园艺学报,2004,34(5):637–640.
CHEN Baihong, LI Xinsheng, CAO Ziyi, et al. Studies on photosynthetic and respiratory characters of different leaf positions in grape plantlet in vitro[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2004,34(5):637–640. (in Chinese)
- [8] 王若青,林维申. 黄瓜结果期不同叶位功能叶与果实的源库关系[J]. 园艺学报,1991,18(3):239–244.
WANG Ruqing, LIN Weishen. The source and sink relationship between leaf of different developing stages in cucumber[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1991,18(3):239–244. (in Chinese)
- [9] 耿广涛,宋桂成,董文庆,等. 种植密度对不同叶位玉米叶片光合特性的影响[J]. 核农学报,2015,29(8):1589–1595.
GENG Guangtao, SONG Guicheng, DONG Wenqing, et al. Effect of different plant density on leaves photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) at different leaves position[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(8):1589–1595. (in Chinese)
- [10] 史祥宾,刘凤之,程存刚,等. 设施葡萄不同新梢间距处理对冠层光环境及果实品质的影响[J]. 园艺学报,2018,45(3):436–446.
SHI Xiangbin, LIU Fengzhi, CHENG Cungang, et al. Effects of different new shoots spacing on canopy light environment and fruit quality of grapevine under protected cultivation[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(3):436–446. (in Chinese)
- [11] 黄慧敏,董蓉,何丹妮,等. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(7):2129–2138.
HUANG Huimin, DONG Rong, HE Danni, et al. Effects of temporal and spatial variation of canopy structures and light conditions on population characteristics of *Fargesia decurvata*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(7):2129–2138. (in Chinese)
- [12] XIA R, SHI X. The effects of leaf age and different positions on canopies on photosynthetic rate of Huanghua pear[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1989(2):163–166.
- [13] MAO M, GUO D, LIANG Y. Effects of soil moisture on photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency of rape in different leaf positions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001,121:43–53.
- [14] 李伟,睦晓蕾,王绍辉,等. 黄瓜幼苗不同叶位叶片光合特性对弱光的响应[J]. 中国农业科学,2008,41(11):3698–3707.
LI Wei, SUI Xiaolei, WANG Shaohui, et al. Effects of low light on photosynthetic characteristics of different position leaves of cucumber seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008,41(11):3698–3707. (in Chinese)
- [15] 童淑媛,杜震宇,徐洪文,等. 不同株型玉米叶片净光合速率差异研究[J]. 东北农业大学学报,2011,42(4):42–47.
TONG Shuyuan, DU Zhenyu, XU Hongwen, et al. Study on differences of net photosynthetic rate of leaf in different corn types [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(4):42–47. (in Chinese)
- [16] 丁小涛,姜玉萍,王虹,等. LED 株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 上海农业学报,2016,32(6):48–51.
DING Xiaotao, JIANG Yuping, WANG Hong, et al. Effect of LED supplementary lighting among plants on tomato growth and fruit quality[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2016, 32(6):48–51. (in Chinese)
- [17] 武海巍,于海业,张蕾. 基于参数优化支持向量机的林下参净光合速率预测模型[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(5):1414–1418.
WU Haiwei, YU Haiye, ZHANG Lei. Prediction model of net photosynthetic rate of ginseng under forest based on optimized parameters support vector machine [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011,31(5):1414–1418. (in Chinese)
- [18] 潘少伟,梁鸿军,李良,等. 改进 PSO-BP 神经网络对储层参数的动态预测研究[J]. 计算机工程与应用,2014,50(10):52–56.
PAN Shaowei, LIANG Hongjun, LI Liang, et al. Dynamic prediction on reservoir parameter by improved PSO-BP neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(10):52–56. (in Chinese)
- [19] 张海辉,陶彦蓉,胡瑾. 融合叶绿素含量的黄瓜幼苗光合速率预测模型[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):259–263.
ZHANG Haihui, TAO Yanrong, HU Jin. Photosynthetic rate prediction model of cucumber seedlings fused chlorophyll content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8):259–263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150836&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.036. (in Chinese)
- [20] 殷鉴,刘新英,张漫,等. 春秋茬温室番茄光合速率预测模型通用性研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):327–333.
YIN Jian, LIU Xinying, ZHANG Man, et al. Photosynthetic rate prediction of tomato under greenhouse condition in spring and autumn growth period[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.):327–333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s050&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.050. (in Chinese)

- [11] ZEILER M D, FERGUS R. Visualizing and understanding convolutional networks[C] // European Conference on Computer Vision, 2014: 818 – 833.
- [12] 杨国国, 鲍一丹, 刘子毅. 基于图像显著性分析与卷积神经网络的茶园害虫定位与识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 156 – 162.
YANG Guoguo, BAO Yidan, LIU Ziyi. Localization and recognition of pests in tea plantation based on image saliency analysis and convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 156 – 162. (in Chinese)
- [13] 周云成, 许童羽, 郑伟, 等. 基于深度卷积神经网络的番茄主要器官分类识别方法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 219 – 226.
ZHOU Yuncheng, XU Tongyu, ZHENG Wei, et al. Classification and recognition approaches of tomato main organs based on DCNN[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 219 – 226. (in Chinese)
- [14] 高震宇, 王安, 刘勇, 等. 基于卷积神经网络的鲜茶叶智能分选系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 53 – 58.
GAO Zhenyu, WANG An, LIU Yong, et al. Intelligent fresh-tea-leaves sorting system research based on convolution neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 53 – 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170707&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.007. (in Chinese)
- [15] 孙俊, 谭文军, 毛罕平, 等. 基于改进卷积神经网络的多种植物叶片病害识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 209 – 215.
SUN Jun, TAN Wenjun, MAO Hanping, et al. Recognition of multiple plant leaf diseases based on improved convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 209 – 215. (in Chinese)
- [16] GB/T 5835—2009 干制红枣[S]. 2009.
- [17] REDMON J, FARHADI A. YOLOV3: an incremental improvement[R]. ArXiv Preprint ArXiv:1804.02767, 2018.
- [18] GIRSHICK R, DONAHU J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 580 – 587.
- [19] SUN X, WU P, HOI S C H. Face detection using deep learning: an improved faster RCNN approach[J]. Neurocomputing, 2018, 299: 42 – 50.
- [20] LIU J, WANG D, LU L, et al. Detection and diagnosis of colitis on computed tomography using deep convolutional neural networks[J]. Medical Physics, 2017, 44(9): 4630 – 4642.

~~~~~

(上接第 272 页)

- [21] 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)
- [22] 叶子飘, 高峻. 光响应和 CO<sub>2</sub> 响应新模型在丹参中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 129 – 134.  
YE Zipiao, GAO Jun. Application of anew model of light-response and CO<sub>2</sub> response of photosynthesis in *Salvia miltiorrhiza* [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2009, 37(1): 129 – 134. (in Chinese)
- [23] 韩建会, 徐淑贞, 张福曼. 日光温室不同季节生态环境对黄瓜光合作用的影响[J]. 华北农学报, 2003, 18(增刊): 124 – 126.  
HAN Jianhui, XU Shuzhen, ZHANG Fuman. Effect of the ecosystem environment in different season on cucumber photosynthesis in sunlight-glasshouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2003, 18(Supp.): 124 – 126. (in Chinese)
- [24] 庞金安, 马德华, 李淑菊. 黄瓜光合作用的研究[J]. 天津农业科学, 1997, 8(4): 10 – 17.  
PANG Jin'an, MA Dehua, LI Shuju. Study on photosynthesis of cucumber[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 1997, 8(4): 10 – 17. (in Chinese)
- [25] 张建华, 冀荣华, 袁雪, 等. 基于径向基支持向量机的棉花虫害识别[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 178 – 183.  
ZHANG Jianhua, JI Ronghua, YUAN Xue, et al. Recognition of pest damage for cotton leaf based on RBF—SVM algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 178 – 183. (in Chinese)
- [26] 王东风, 孟丽, 赵文杰. 基于自适应搜索中心的骨干粒子群算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(12): 2652 – 2667.  
WANG Dongfeng, MENG Li, ZHAO Wenjie. Improved bare bones particle swarm optimization with adaptive search center [J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(12): 2652 – 2667. (in Chinese)
- [27] 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 29 – 36.  
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 29 – 36. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150305&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150305&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005. (in Chinese)
- [28] PENG H, LI R, CAO L L, et al. Multiple swarms multi-objective particle swarm optimization based on decomposition[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(2): 3371 – 3375.
- [29] SAKOWSKA K, ALBERTI G, GENESIO L, et al. Leaf and canopy photosynthesis of a chlorophyll deficient soybean mutant [J]. Plant Cell & Environment, 2018, 41(6): 1427 – 1437.