

单慧勇, 李晨阳, 张程皓, 等. 有限二氧化碳资源条件下的温室光气耦合优化调控模型[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 471-479.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.025

有限二氧化碳资源条件下的温室光气耦合优化调控模型

单慧勇, 李晨阳, 张程皓, 赵 辉, 卫 勇, 郭旭存

(天津农学院工程技术学院, 天津 300384)

摘要: 针对当前温室环境调控成本较高的问题, 为了在满足作物生长需求的条件下降低调控成本, 拟研究 1 种在有限二氧化碳(CO_2)资源条件下的温室光气耦合优化调控模型。首先, 以温度、 CO_2 浓度、光照度作为输入, 以净光合速率作为输出, 构建基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)的光合速率预测模型; 然后, 基于提出的光合速率预测模型, 构建在有限 CO_2 资源条件下温室 CO_2 优化调控模型数据库, 可根据用户输入的 CO_2 资源总量, 自动寻优获取最佳补气时间与单位补气量; 最后, 提出以光照度增长相对价值为评价指标的经济性相对最优的补光策略, 在确定的补气时间段内进行补光, 最终实现了有限 CO_2 资源条件下的温室光气耦合优化调控, 进一步提高了设施温室环境因子调控的精准度与智能化水平。

关键词: 光合速率预测; 光气耦合; 调控模型; 最小二乘支持向量机(LS-SVM)

中图分类号: S24; S11⁺9

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2021)02-0471-09

Optimal control model of greenhouse light gas coupling under limited CO_2 resources

SHAN Hui-yong, LI Chen-yang, ZHANG Cheng-hao, ZHAO Hui, WEI Yong, GUO Xu-cun

(College of Engineering and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384)

Abstract: Due to the high cost of environmental regulation in greenhouse, an optimal control model of greenhouse light gas coupling under limited carbon dioxide(CO_2) resources is proposed to reduce the cost of regulation and control under the condition of meeting the needs of crop growth. Firstly, the photosynthetic rate prediction model based on least squares support vector machine(LS-SVM) was constructed with temperature, CO_2 concentration and illumination as input and net photosynthetic rate as output. Secondly, based on the proposed photosynthetic rate prediction model, the database of greenhouse carbon dioxide optimal regulation model under limited carbon dioxide resources was constructed. The optimal replenishment time and unit replenishment amount could be obtained automatically according to the total amount of carbon dioxide resources input by users. Then, a relatively optimal light replenishment strategy with the relative value of light growth as the evaluation index was proposed, and light supplement was carried out in a

certain period of time. Finally, the optimal control of greenhouse light gas coupling under limited carbon dioxide resources is realized, which further improves the accuracy and intelligence level of greenhouse environmental regulation.

Key words: photosynthetic rate prediction; coupling regulation of light and CO_2 ; control model; least squares support vector machine(LS-SVM)

收稿日期: 2020-06-27

基金项目: 天津市企业优秀科技特派员项目(19JCTPJC56700); 天津市科技重大专项与工程计划项目(19YFZCSN00360); 天津市滨海新区社会发展领域科技项目(BHXQKJXM-SF-2018-27); 天津市农业科技成果转化与推广项目(201703080)

作者简介: 单慧勇(1977-), 男, 山西临汾人, 硕士, 副教授, 研究方向为农业自动化系统。(E-mail) tjshyyr@sina.com

在植物的光合作用过程中,温度、光照、二氧化碳等均是影响光合速率的主要因素,对于反季节的温室栽培而言,光照、CO₂ 浓度是限制植物生长的主要环境因子^[1-2]。因此,以提高作物光合速率为目的建立植物的光气耦合优化调控模型,是设施温室智能调控系统的重要组成部分。

光气耦合优化调控模型的基础是光合速率预测模型,传统的预测模型存在拟合精度低等问题,近年来,研究者以光合作用的主要影响因子为变量进行光合速率预测模型研究^[3-5],构建了不同的光合速率模型,极大改善了预测模型的适应性和准确度。在温室 CO₂ 和光照调控方面,以饱和点为调控指标的调控模型得到了广泛研究应用^[6-8]。基于饱和点的调控虽然可以达到最大光合速率,但会造成调控效益下降。目前,在考虑环境参数调控效益的前提下,胡瑾等^[9-11]提出了基于离散曲率算法的光照度、CO₂ 优化调控模型,可以在有效降低调控成本的前提下提升作物的光合速率。但是在实际生产实践中,CO₂ 补充量并不能按照上述理论调控模型进行持续优化调控,因此探讨在有限 CO₂ 资源条件下的温室光气耦合优化调控方案显得极为重要。

本研究首先构建基于最小二乘支持向量机(LS-SVM)的光合速率预测模型,然后基于预测模型构建有限 CO₂ 资源条件下温室 CO₂ 的优化调控模型数据库,用户在进行 CO₂ 调控时,仅需输入总补气量便可自动获取对应的最优补气时间与单位补气量。然后结合本研究提出的经济性相对最优的补光策略,在上述确定的补气时间段内进行光照调控,最终实现有限 CO₂ 资源条件下的温室光气耦合优化调控。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本试验于 2019 年 12 月在天津农学院西校区实训基地温室内进行,以黄瓜品种津优 35 为试验材料,采用常规栽培方法进行管理。环境因子变量包括温度、光照度及 CO₂ 浓度,其中温度设 7 个梯度(15 ℃、18 ℃、21 ℃、25 ℃、28 ℃、33 ℃、36 ℃),光照度设 7 个梯度[200 μmol/(m²·s)、500 μmol/(m²·s)、800 μmol/(m²·s)、1 100 μmol/(m²·s)、1 400 μmol/(m²·s)、1 700 μmol/(m²·s)、2 000 μmol/(m²·s)],CO₂ 浓度设

7 个梯度(300 μmol/mol、600 μmol/mol、900 μmol/mol、1 200 μmol/mol、1 500 μmol/mol、1 800 μmol/mol、2 100 μmol/mol)。本试验剔除低温(15 ℃、18 ℃)条件下对应的最高光照度[2 000 μmol/(m²·s)]及高温(33 ℃、36 ℃)条件下对应的最低光照度[300 μmol/(m²·s)]后,采用各环境因子间嵌套方式进行设计。

1.2 净光合速率的测定

选取生长状况差异较小、健壮的黄瓜植株进行试验,测量设备为 CI-340 便携式光合作用仪,可按需要控制测量叶室的小环境,以设置不同试验条件;为了避免植物“午休现象”对数据采集的影响,选择 9:00–11:00、14:30–16:00 时间段进行试验^[12-13]。本研究用单叶片瞬时试验,为了得到足够稳定的净光合速率,选择连续 2 d 以上的相同天气进行测量,测量前对夹入叶室的叶片进行充分的光诱导。最终形成以温度(℃)、CO₂ 浓度(μmol/mol)、光照度[μmol/(m²·s)]为输入,净光合速率(P_n) [μmol/(m²·s)]为输出的 315 组试验样本集。

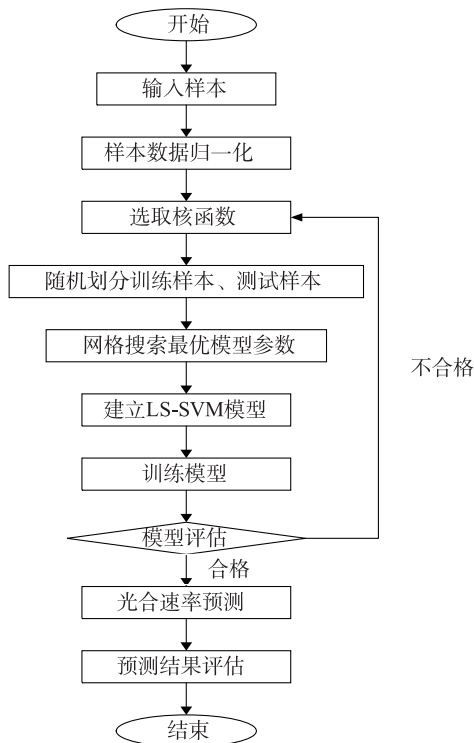
2 基于 LS-SVM 的光合速率预测模型

2.1 LS-SVM 回归模型建模过程

影响黄瓜光合速率的主要影响因素有温度、光照度及 CO₂ 浓度,光合速率模型的构建过程,就是寻求温度(x_1)、光照度(x_2)、CO₂ 浓度(x_3)与输出光合速率(y_i)之间的函数关系。相关公式为 $y_i=f(x_i)$ ($i=1,2,3$)。

本研究采用 LS-SVM 算法构建光合速率预测模型,其算法理论参考文献[14],具体流程见图 1。

基于本试验得到的数据,利用 MATLAB R2018b 进行编程,对前期 315 组数据进行随机排序,取前 252 组数据作为预测模型的输入,占总数据量的 80%,用其余 63 组数据对预测模型进行检验。由于各输入参数、输出参数的数量级不同,因此采用 MATLAB 平台自带的归一化函数 mapminmax,模型归一化区间为[0.2,0.9];选取径向基函数作为核函数进行建模^[15];gam 是控制错分样本惩罚程度的可调参数,sig2 是径向基核函数的参数,通过网格搜索获取最优建模参数 gam、sig2^[16],其确定的 gam=263.549,sig2=0.204 042 5。确定模型各参数后,调用 LS-SVM 工具箱的 trainlssvm 函数进行光合速率预测模型的构建。



LS-SVM:最小二乘支持向量机。

图1 光合速率预测模型建立流程

Fig.1 Establishment process of photosynthetic rate prediction model

2.2 LS-SVM 回归模型的评估

在 MATLAB 的 LS-SVM 工具箱中调用 `simlssvm` 函数进行模型验证,将预测结果与实际样本进行反归一化处理,结果表明,其平均绝对误差为 $0.5209 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,决定系数 (R^2) = 0.967 4,均方误差为 $0.6325 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。预测数据与实际数据之间的误差见图 2,可以看出,基于 LS-SVM 建立的光合速率预测模型误差较小,最大误差也低于 $4.5000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,可以较好地预测作物的光合速率。

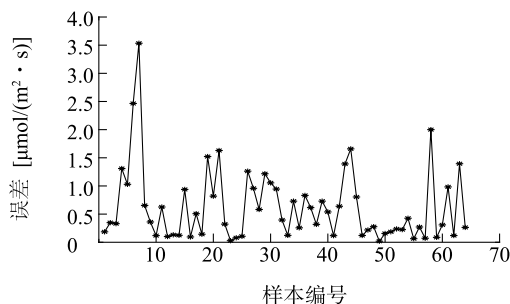


图2 预测模型预测值的误差

Fig.2 Error of prediction results

3 温室补气优化决策模型的构建

3.1 有限 CO₂ 资源条件下温室补气优化决策模型

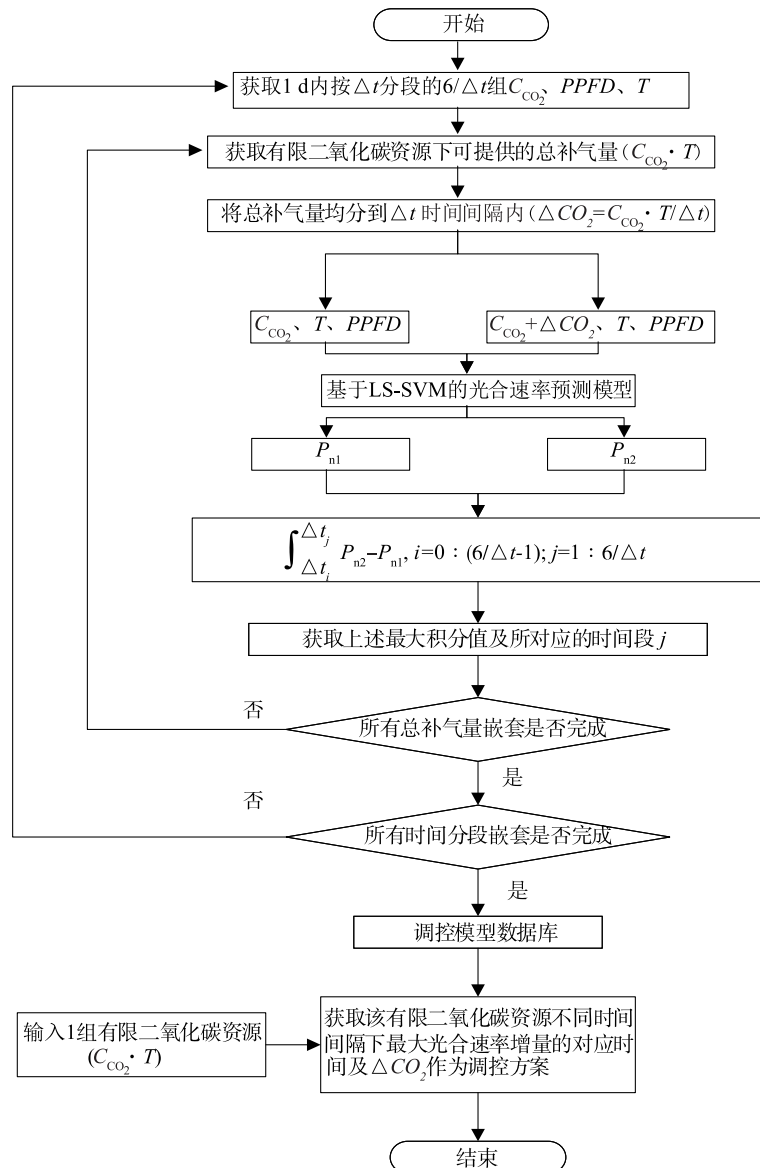
基于上文构建的光合速率预测模型,本研究提出了在 1 d 内有限 CO₂ 资源条件下对温室 CO₂ 浓度进行优化调控的思路,即寻找当天温室最适补气时间与对应的补气量,以补气后的光合速率增量作为评价指标,在有限的 CO₂ 资源条件下建立 CO₂ 优化调控模型数据库。

以天津农学院西校区温室作为研究基地,其 1 d 内温室温度被升起的时间段为 9:00–16:00,因此选择 9:30–15:30 进行寻优补气,即将该 6 h 以 Δt 为步长进行分割, Δt 设置为 30 min、60 min、90 min、120 min、180 min,从而分别将 9:30–15:30 分割为 12 个、6 个、4 个、3 个、2 个时间段;设给定有限 CO₂ 资源为 $C_{\text{CO}_2} \cdot T$ (CO₂ 浓度 × 时间),将 CO₂ 的浓度区间设为 600~3 000 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,固定步长为 50 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, T 设为 30 min,将有限光照资源均分到各 Δt 时间内,即得到该时间段的补气量 ($\Delta \text{CO}_2 = C_{\text{CO}_2} \cdot T / \Delta t$)。分别获取上述时间段内的环境因子参数 [T 、 C_{CO_2} 、光子通量密度 ($PPFD$)] 与补气后的环境因子参数 (T 、 $C_{\text{CO}_2} + \Delta \text{CO}_2$ 、 $PPFD$),将其分别作为光合速率预测模型的输入参数,得到未补气的光合速率 (P_{m1})、补气后的光合速率 (P_{m2}),计算其在对应时间段的光合速率增量,寻优得到最大增量及对应的调控时段,将其汇总为调控模型数据库。继而寻找在给定有限 CO₂ 资源条件下不同时间间隔对应的 5 组数据,获取最大光合速率增量及对应时间段作为该有限 CO₂ 资源条件下的调控方案。为了清晰地描述本研究内容,绘制有限 CO₂ 资源条件下的补气决策优化方案流程 (图 3)。

在对设施进行补气时,操作人员远程在控制面板给定补气总量 (图 4),并基于上述模型数据库,自动获取补气时间段与单位补气量,从而形成结合温度、光照度等参数的最优补气策略。

3.2 模型数据分析

为了构建上述模型的调控数据库,通过日光温室远程智能监控系统获取天津农学院西校区实训基地温室内 2020 年 3 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日的环境参数,用 MATLAB 软件进行调控数据库的建立。本研究以 2020 年 3 月 5 日的数据为例进行分析,用该时间的调控数据库共构建出 245 组



C_{CO_2} : CO_2 浓度 ($\mu mol/mol$); $PPFD$: 光子通量密度; T : 时间 (min); Δt : 时间步长 (min); ΔCO_2 : CO_2 补气量; LS-SVM: 最小二乘支持向量机;
 P_{n1} : 未补气的的光合速率, P_{n2} : 补气后的光合速率; i : 以 1 为间隔, 从 0 开始到 $6/\Delta t-1$ 的数组; j : 以 1 为间隔, 从 1 开始到 $6/\Delta t$ 的数组。

图 3 有限 CO_2 资源条件下补气决策优化方案流程

Fig.3 Optimization process of gas replenishment decision under limited CO_2 resources

数据, 由于不能一一列举, 因而给出 $1\ 000\ mol/mol \times 30\ min$ 、 $1\ 500\ mol/mol \times 30\ min$ 、 $2\ 000\ mol/mol \times 30\ min$ 3 组有限补气资源总量下的以 Δt 分段的共 15 组数据。

由表 1 可以看出, 补气时间总体分布在 9:30–12:30。对图 5、表 1 进行综合分析可知, 2020 年 3 月 5 日上午、下午的光照度基本呈对称分布, 可见光照度对补气时间的影响较小; 温度从

9:00 时最低的 $15\ ^\circ C$ 一路攀升至 13:00 的 $38\ ^\circ C$, 之后开始缓慢下降, 至 16:00 时为 $32\ ^\circ C$, 可见表 1 中的补气时间与温度有着密切联系; 当温度高于 $35\ ^\circ C$ 时, 在高温胁迫下黄瓜的光合速率下降, 与文献[17]、[18]的研究结论一致。由此可见, 在午后补充 CO_2 并未能得到较高的光合收益, 这也从侧面证明了本研究提出的有限 CO_2 资源补充时间段的正确性。

自动控制面板

CO₂(μmol/mol)

时间(min)

补气总量: 2 000 × 30

执行 清除

补气时间段: 10 : 30-11 : 30

单位时间补气量: 1 000 μmol/(mol·min)

自定义补气面板

补气时间段:

单位补气时间段:

主控面板

开始

结束

实时环境显示面板

温度: 24 °C

二氧化碳浓度: 797 μmol/mol

光照度: 897 μmol/(m²·s)

图 4 远程用户控制面板
Fig.4 Control panel of remote users

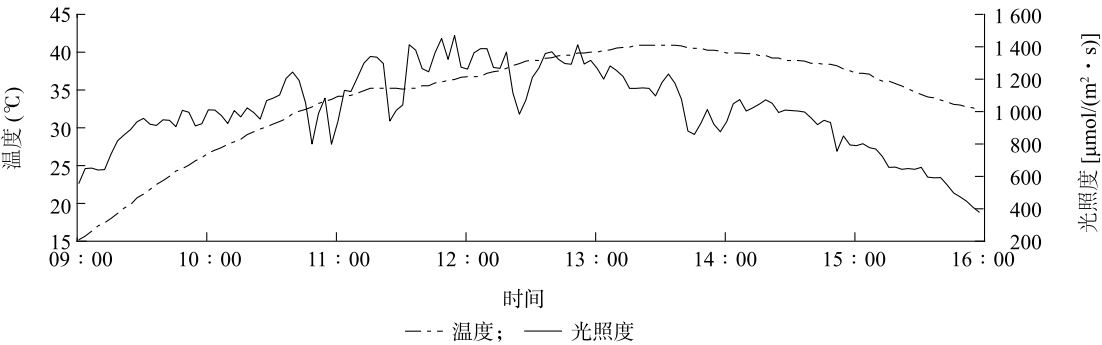


图 5 2020 年 3 月 5 日 9 : 00-16 : 00 温度与光照度的变化
Fig.5 Changes of temperature and illumination during 9 : 00-16 : 00 on March 5, 2020

表 1 有限 CO₂ 资源条件下的补气调控方案
Table 1 Regulation and control schemes for air supply under limited CO₂ resources

最优补气时间段	补气时长 (min)	光合速率增量 [μmol/(m ² ·s)]	补气量 [μmol/(mol·min)]	可用补气资源总量 (μmol/mol)
11 : 00-11 : 30	30	515.389 7	1 000.000 0	1 000×30
10 : 30-11 : 30	60	585.929 4	500.000 0	
11 : 00-12 : 30	90	595.809 8	333.333 3	
09 : 30-11 : 30	120	601.784 3	250.000 0	
09 : 30-12 : 30	180	607.244 0	166.666 7	
11 : 00-11 : 30	30	601.632 8	1 500.000 0	1 500×30
10 : 30-11 : 30	60	820.474 3	750.000 0	
11 : 00-12 : 30	90	864.864 4	500.000 0	
09 : 30-11 : 30	120	876.938 1	375.000 0	
09 : 30-12 : 30	180	897.799 3	250.000 0	
11 : 00-11 : 30	30	564.908 2	2 000.000 0	2 000×30
10 : 30-11 : 30	60	998.924 4	1 000.000 0	
11 : 00-12 : 30	90	1 106.486 0	666.666 7	
09 : 30-11 : 30	120	1 129.242 0	500.000 0	
09 : 30-12 : 30	180	1 176.918 0	333.333 3	

4 经济相对最优的光照调控模型的构建

4.1 经济相对最优的光照调控目标值获取方案

在获取了补气时间段与单位补气量后,需要对温室光照度进行补充。本研究提出了依据光照度增长相对价值曲线曲率最大值进行寻优的光照度调控目标值获取方案,并绘制了经济相对最优的光照调控目标值获取流程(图 6)。其中光照度增长相对价值 $= P_n / PPFD$ 。

为了精确地描述程序中的寻优条件及寻优目标函数等关键参数,结合流程图对上述寻优方案的具体操作步骤进行描述。

4.1.1 获取不同环境因子嵌套条件下的光合速率

在试验梯度范围内,以每个环境因素的不同步长增加的形式,循环获取嵌套环境因子的所有梯度条件。在本研究中,设置温度区间为 12~33 ℃,固定步长为 1 ℃;设置 CO₂ 浓度区间为 300~1 500 μmol/mol,固定步长为 50 μmol/mol;设置光照度为 100~1 700 μmol/(m²·s),固定步长为 5 μmol/(m²·s)。通过调用已建立的 LS-SVM 光合速率预测模型,获取上述环境因子嵌套条件下对应的光合速率。

4.1.2 采用曲线平滑的差分曲率计算寻优 在获取不同寻优方案下最优光照度的过程中,需要进行温度实例化和 CO₂ 浓度实例化,以光照度增长相对价值作为评价指标,寻优时确定温度与 CO₂ 浓度,光照度依次递增,绘制评价指标曲线。基于曲线平滑的差分曲率进行计算^[19],所需处理的曲线为 $C = \{P_1, P_2, \dots, P_i\}$,其中 $P_i = (x_i, y_i)$ 表示边界像素点。应用高斯函数将曲线作平滑处理,处理后的曲线为 $C_k = \{P_1^k, P_2^k, \dots, P_i^k\}$, $P_i^k = (x_i^k, y_i^k)$,继而用差分法计算构成曲线各点的离散曲率:

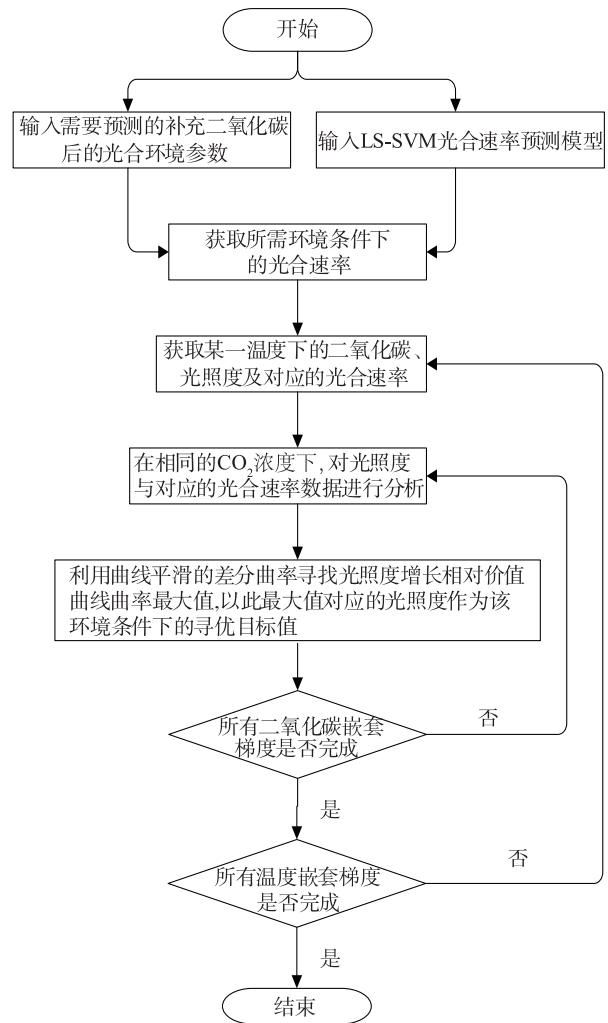
$$k_i^k = \frac{\Delta x_i^k \Delta^2 y_i^k - \Delta^2 x_i^k \Delta y_i^k}{[(\Delta x_i^k)^2 + (\Delta y_i^k)^2]^{1.5}}$$

其中:

$$\Delta x_i^k = \frac{x_{i+1}^k - x_{i-1}^k}{2}, \quad \Delta y_i^k = \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{2}$$

$$\Delta^2 x_i^k = \frac{\Delta x_{i+1}^k - \Delta x_{i-1}^k}{2}, \quad \Delta^2 y_i^k = \frac{\Delta y_{i+1}^k - \Delta y_{i-1}^k}{2}$$

式中, x_i^k 为平滑处理后拟合曲线坐标点的横坐



LS-SVM:最小二乘支持向量机。

图 6 经济相对最优的光照调控目标值获取流程

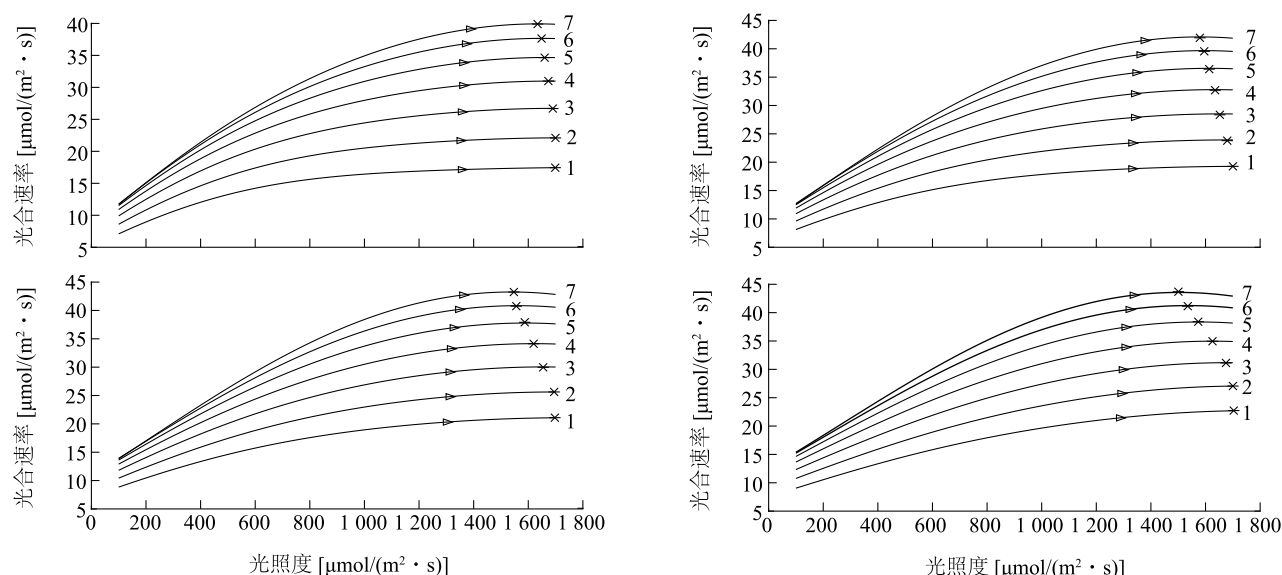
Fig.6 Flow chart of obtaining target value of light regulation with relatively optimal economy

标, y_i^k 为平滑处理后拟合曲线坐标点的纵坐标。

按照上述方法对评价指标曲线各点求曲率并找出最大值点,最大值对应的光照度即为寻优光照度,记录并保存寻优光照度,获取所有评价指标曲线曲率最大点对应的光照度时结束。

4.2 光照度调控数据分析

在建模过程中,每种方案均获取了 550 组不同条件下光照度的调控点,由于无法完全罗列,故下文仅展示温度为 24~33 ℃(以 3 ℃为步长)、CO₂ 浓度为 300~1 500 μmol/mol(以 200 μmol/mol为步长)条件下不同寻优方案的光照度。不同方案的寻优结果见图 7,对比结果见表 2。



1:CO₂ 浓度为 300 μmol/mol;2: CO₂ 浓度为 500 μmol/mol;3:CO₂ 浓度为 700 μmol/mol;4:CO₂ 浓度为 900 μmol/mol;5: CO₂ 浓度为 1 100 μmol/mol;6:CO₂ 浓度为 1 300 μmol/mol;7:CO₂ 浓度为 1 500 μmol/mol。三角形为本研究确定的补光点,星形为传统光饱和点确定的补光点。

图 7 不同方案的寻优结果

Fig.7 Optimization results of different schemes

从表 2 可以看出,本研究提出的光照调控方案可以使光照度大幅降低,同时使光合速率仅出现小幅度下降,相比于传统光饱和点调控,光照度需求量平均下降 18.27%,而光合速率仅平均降低 2.43%,说明采用经济相对最优的光照调控策略,可以使设施补光在投入较少的情况下获得相对较高的效益。

4.3 基于 BP 神经网络经济性相对最优的光照调控模型的构建

基于上述寻优方法,得到了以温度、CO₂ 为输入,以光照度调控目标值为输出的 550 组目标数据集,采用 BP 神经网络分别进行光照度优化模型构建。随机选取其中 440 组数据作为预测模型的输入,占总数据量的 80%,用其余 110 组数据对预测模型进行检验。在训练时,数据归一化处理函数采用 MATLAB 自带函数 mapminmax。模型设计采用 3 层神经网络,结合经验公式 $m = \sqrt{n+l} + \alpha$ 确定单隐层节点数^[20],式中, m 为单隐层节点数, n 为输入层节点数(在本研究中为 2), l 为输出层节点数(在本研究中为 1), α 为常数,其值为 1~10。经过反复训练和调试,最终将单隐层的神经元数量设置为 7,网络训练的目标误差设为 0.000 1,训练步数设为 1 000 步,在此基础上,网络隐含层的传递函数为 tansig,输出

层传递函数为 logsig。

基于 BP 神经网络构建的优化模型的验证结果表明,决定系数 (R^2) = 0.988 8,均方误差为 3.203 6 μmol/(m²·s),平均绝对误差为 3.362 1 μmol/(m²·s)。由图 8 可知,基于 BP 神经网络建立的光照度优化模型误差较小,其最大误差也保持在 30 μmol/(m²·s) 以内,符合预测精度要求。

5 结论

本研究提出了 1 种有限 CO₂ 资源条件下的温室光气耦合优化调控模型。基于提出的采用 LS-SVM 算法的光合速率预测模型构建了有限 CO₂ 资源条件下温室 CO₂ 优化调控模型数据库,可根据用户输入的 CO₂ 资源总量,自动寻优获取最佳补气时间与单位补气量,能够在 CO₂ 资源一定的条件下大幅度地提高光合收益。继而结合经济性相对最优的补光策略,在上述确定的补气时间段内进行光照调控,经评估计算,该补光方案能够使设施温室补光在投入较少的情况下获得相对较高的效益。由于设施温室作物光合速率还与温度、湿度等环境参数有关,本课题组今后将在现有研究基础上,结合其他环境参数调控的多维环境因子耦合调控模型进行研究,进一步提高智慧农业设施温室内环境因子调控的精准度与智能化。

表 2 不同光照调控方案数据对比

Table 2 Data comparison of different light regulation schemes

温度 (℃)	CO ₂ 浓度 (μmol/mol)	传统光饱和点调控方案		本研究的光照调控方案		本研究较传统方法的降幅(%)	
		光照度 [μmol/(m ² ·s)]	光合速率 [μmol/(m ² ·s)]	光照度 [μmol/(m ² ·s)]	光合速率 [μmol/(m ² ·s)]	光照度	光合速率
24	300	1 700	17.475 19	1 350	17.133 65	20.59	1.95
24	500	1 700	22.142 65	1 355	21.715 33	20.29	1.93
24	700	1 685	26.725 81	1 355	26.184 20	19.58	2.03
24	900	1 665	30.956 94	1 360	30.305 80	18.32	2.10
24	1 100	1 655	34.627 82	1 365	33.878 54	17.52	2.16
24	1 300	1 645	37.618 91	1 370	36.800 83	16.72	2.17
24	1 500	1 630	39.897 93	1 390	39.150 54	14.72	1.87
27	300	1 700	19.296 89	1 320	18.825 56	22.35	2.44
27	500	1 680	23.938 76	1 320	23.363 72	21.43	2.40
27	700	1 650	28.508 88	1 335	27.884 46	19.09	2.19
27	900	1 625	32.767 00	1 335	32.051 19	17.85	2.18
27	1 100	1 605	36.521 52	1 350	35.810 84	15.89	1.95
27	1 300	1 590	39.645 09	1 360	38.946 59	14.47	1.76
27	1 500	1 575	42.072 24	1 380	41.478 71	12.38	1.41
30	300	1 700	21.110 90	1 300	20.317 56	23.53	3.76
30	500	1 690	25.606 63	1 305	24.759 23	22.78	3.31
30	700	1 650	29.999 49	1 315	29.159 08	20.30	2.80
30	900	1 610	34.101 93	1 320	33.274 30	18.01	2.43
30	1 100	1 580	37.753 14	1 330	36.990 34	15.82	2.02
30	1 300	1 555	40.831 46	1 340	40.150 43	13.83	1.67
30	1 500	1 535	43.250 96	1 360	42.721 08	11.40	1.23
33	300	1 700	22.746 95	1 280	21.430 26	24.71	5.79
33	500	1 700	27.009 68	1 285	25.697 05	24.41	4.86
33	700	1 670	31.102 88	1 290	29.886 58	22.75	3.91
33	900	1 615	34.914 77	1 300	33.872 57	19.50	2.98
33	1 100	1 570	38.332 76	1 310	37.479 75	16.56	2.23
33	1 300	1 530	41.253 39	1 320	40.579 13	13.73	1.63
33	1 500	1 500	43.579 37	1 335	43.087 94	11.00	1.13

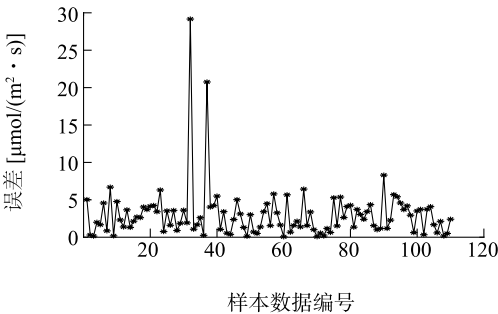


图 8 光照调控模型的预测结果误差
Fig.8 Prediction error of light regulation model

参考文献:

[1] 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.

[2] YIN-JIAN Z, YI-TING Z, HOU-CHENG L, 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.

[3] 张 盼. 非均匀光合特性约束下的黄瓜立体需光模型构建方法研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.

[4] 张海辉,张 珍,张斯威,等. 黄瓜初花期光合速率主要影响因素分析与模型构建[J].农业机械学报,2017,48(6):242-248.

- [5] 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.
- [6] 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].农业机械学报,2016,47(1):260-265.
- [7] 辛萍萍,张 珍,王智永,等. 基于支持向量机-改进型鱼群算法的 CO₂ 优化调控模型[J].农业机械学报,2017,48(6):249-256.
- [8] 朱 舟,童向亚,郑书河. 基于作物光照需求的温室光调控系统[J].农机化研究,2016,38(2):192-196.
- [9] 胡 瑾,田紫薇,汪健康,等. 基于离散曲率的温室 CO₂ 优化调控模型研究[J].农业机械学报,2019,50(9):337-346.
- [10] 白京华. 基于光合速率预测模型的黄瓜幼期 CO₂-光照协同调控目标参数获取方法[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [11] 辛萍萍. 效益优先的温室环境多因子协同调控模型与方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [12] 李萍萍,李冬生,王纪章,等. 温室黄瓜叶片光合速率的类卡方模型[J].农业工程学报,2009,25(1):171-175.
- [13] 史为民,陈青云,乔晓军. 日光温室黄瓜叶片光合速率模型及其参数确定的初步研究[J].农业工程学报,2005,21(5):113-118.
- [14] 陈 涛,吕 松,任廷林,等. 基于最小二乘支持向量机的周用电量预测方法[J].华电技术,2020,42(1):35-40.
- [15] 孙双林,杨 倩. 基于最小二乘支持向量机的船舶集中空调系统能耗预测[J].舰船科学技术,2020,42(2):184-186.
- [16] 陶开鑫,俞成丙,侯颀骛,等. 基于最小二乘支持向量机的棉针织物活性染料湿蒸染色预测模型[J].纺织学报,2019,40(7):169-173.
- [17] 孙胜楠,王 强,孙晨晨,等. 黄瓜幼苗光合作用对高温胁迫的响应与适应[J].应用生态学报,2017,28(5):1603-1610.
- [18] 丁小涛. 温室黄瓜高温耐受性及其响应机制研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [19] 郭娟娟,钟宝江. U 弦长曲率:一种离散曲率计算方法[J].模式识别与人工智能,2014,27(8):683-691.
- [20] 陶彦蓉. 基于 BP 神经网络的黄瓜光合速率预测模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2016.

(责任编辑:徐 艳)