

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.039

基于离散曲率的温室 CO₂ 优化调控模型研究

胡瑾^{1,2} 田紫薇¹ 汪健康¹ 卢有琦¹ 辛萍萍^{1,3} 张海辉^{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: 提出了基于离散曲率算法的温室 CO₂ 优化调控模型, 通过设计嵌套试验采集温室不同温度、光照强度、CO₂ 浓度组合下的番茄光合速率, 利用支持向量机回归算法 (Support vector regression algorithm, SVR) 构建光合速率预测模型; 以预测模型网络为目标函数, 采用 L 弦长曲率算法实现 CO₂ 响应曲线离散曲率的计算, 利用爬山法获得不同温度、光照强度组合条件的 CO₂ 响应曲线曲率最大点, 以此作为效益最优的调控目标值, 进而基于 SVR 构建 CO₂ 优化调控模型。结果表明, 调控模型的决定系数为 0.99、均方根误差为 4.42 μmol/mol、平均绝对误差为 3.17 μmol/mol, 拟合效果良好。与 CO₂ 饱和点目标值的调控效果对比发现, 理论上 CO₂ 供需量平均下降 61.81%, 光合速率平均减少 15.58%; 验证试验中, 相较饱和点调控下光合速率平均下降 15.14%, CO₂ 供需量下降 57.61%, 相较自然条件下光合速率升高 26.70%。说明此温室 CO₂ 优化调控模型具有高效节能特点, 为设施作物 CO₂ 高效精准调控和节本增效提供了理论基础。

关键词: 温室; CO₂ 优化调控; 支持向量机回归; 离散曲率; 爬山法; 光合速率

中图分类号: S126; S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0337-10

Carbon Dioxide Optimal Control Model Based on Discrete Curvature

HU Jin^{1,2} TIAN Ziwei¹ WANG Jiankang¹ LU Youqi¹ XIN Pingping^{1,3} ZHANG Haihui^{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: CO₂ is one of the main resources for plant photosynthesis. The slope of CO₂ response curve represents the effect of CO₂ concentration on photosynthetic rate. The first curvature maximum point represents the characteristic point where the effect of CO₂ concentration on photosynthetic rate becomes weak. Therefore, the acquisition of this point is the key to realize the optimal benefit control of CO₂. A CO₂ optimal control model based on discrete curvature algorithm was proposed. Firstly, a photosynthetic rate experiment was designed. The subject of the experiment was tomato. The experimental conditions were the different combinations of temperature, photonic flux density and CO₂ concentration. In the experiment, temperature, photon flux density and CO₂ concentration gradients were set as 6, 10 and 20, respectively. Totally 1200 sets of CO₂ response data were obtained by LI-6800 portable photosynthetic rate instrument. And 80% data were used to construct photosynthetic rate prediction model based on the support vector regression, and the rest of the data were used for model verification. Then, the CO₂ response curves under the nested conditions were obtained by using the established photosynthetic rate prediction model. Next, the discrete curvature value of every response curve was calculated by the L-chord discrete curvature algorithm. Using hill-climbing method, the maximum curvature value of every response curve was obtained. The CO₂ concentrations corresponding to the maximum curvature values were taken as the control target values. Finally, the CO₂ optimal control model was constructed based on the support vector regression. The results showed that the decision coefficient of the control model was

收稿日期: 2019-06-02 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671587、31501224)、陕西省重点研发计划项目(2018TSCXL-NY-05-02)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

0.99, the mean square error was $4.42 \mu\text{mol/mol}$, and the average absolute error was $3.17 \mu\text{mol/mol}$. Compared with the CO_2 saturation point, the CO_2 demand was decreased by 61.81%, but the photosynthetic rate was decreased by 15.58%. In the verification experiment, compared with the saturation point regulation, the average photosynthetic rate was decreased by 15.14% by using the proposed regulation method, the supply of CO_2 was decreased by 57.61%. Compared with the natural method without any regulation, the photosynthetic rate was increased by 26.70% with the regulation proposed method. This indicated that the CO_2 optimization control model was of high efficiency and energy saving. This control model could provide theoretical basis for efficient and precise regulation of CO_2 for facility crops.

Key words: greenhouse; CO_2 optimal control; support vector regression; discrete curvature; hill-climbing method; photosynthetic rate

0 引言

CO_2 是绿色植物光合作用的主要原料之一,对作物生长发育和物质积累至关重要^[1]。但由于温室相对密闭,一天中随着温室光照强度和温度条件的变化,作物对 CO_2 的需求也会发生改变,导致 CO_2 供需不匹配^[2-4]。适宜的 CO_2 浓度将有效促进作物生长,不足或过高时将对作物产生有害影响^[5-9]。在 CO_2 浓度较低或者中等阶段,光合速率随着 CO_2 浓度增加而快速增大, CO_2 是影响该阶段光合速率的主要因素,当 CO_2 超过一定浓度达到限制点后,光合速率增长幅度逐渐变小^[10],若仍大量增加 CO_2 ,对植物光合速率提升效果不明显且耗费大量资源。因此,探寻适宜作物生长的 CO_2 浓度,建立融合调控效益的 CO_2 优化调控模型,已成为设施农业中 CO_2 环境高效调控亟待解决的问题。

近年来, CO_2 环境调控方法已成为研究热点。文献[11]研究了生理生化 CO_2 响应模型,从生理角度分析了 CO_2 响应的影响因素。文献[12]研究了日光温室草莓光合特性及其对 CO_2 浓度升高的响应,并从生理角度分析原因,为 CO_2 调控奠定生理基础。文献[13]研究发现, CO_2 浓度在 $(800 \pm 25) \sim (1\ 000 \pm 25) \mu\text{mol/mol}$ 范围内时,番茄结果期叶片光合速率调控效果很好,为我国北方地区温室番茄结果期的生产实践提供了理论参考依据。文献[14]对开花期番茄增施 $1\ 000 \sim 1\ 300 \mu\text{mol/mol}$ 的 CO_2 ,可较大提高番茄单叶净光合速率。以上研究在固定范围内进行 CO_2 调控,该区域也就是 CO_2 对光合速率影响由强变弱的变化区,而光照强度和温度等其他因素也会对 CO_2 限制点产生动态影响,因此该类方法虽然一定程度提升了光合效率,但难以真正实现高效精准调控。文献[15-16]建立了番茄不同生长期的光合速率预测模型,实现了不同含水率下以 CO_2 饱和点为目标值的精准预测,为温室 CO_2 气肥自动调控提供了理论依据和决策支持。文献[17]

建立了温度、光强与作物生长阶段的 CO_2 饱和点之间的对应关系,以 CO_2 饱和浓度为目标值进行动态最优调控。文献[18]提出了融合支持向量机-改进型鱼群算法的 CO_2 优化调控模型,在不同温度、光照强度组合条件下动态预测 CO_2 饱和点,为 CO_2 精准调控提供定量依据。上述方法均以 CO_2 饱和点进行调控,而其位于 CO_2 浓度较高阶段时,随着 CO_2 浓度的增加, CO_2 响应曲线增加趋势变缓直至下降,因此以 CO_2 饱和点进行调控,虽然可以达到最大光合速率,但造成资源浪费与调控效益下降。根据以上分析,如果采用 CO_2 响应曲线中光合速率由快速增加变为缓慢上升的特征点作为目标点,可实现在保证作物光合需求的条件下最大程度提升 CO_2 调控效率。曲率作为一种常用的曲线评价指标被用于曲线特征点的提取^[19],并初步在农业数据分析中得到应用,如文献[20]应用最大曲率点实现了夏玉米物候期的生长状态转换时间的获取。因此探寻 CO_2 响应曲线曲率最大点成为提升 CO_2 调控效益的关键。

针对上述问题,在考虑光合速率与调控效益的前提下,本文以初花期温室番茄为试验材料,研究构建基于支持向量机回归算法(SVR)的光合速率预测模型,并对不同温光条件下的 CO_2 响应曲线进行离散曲率计算与最大值寻优,从而获取曲率最大值点对应的 CO_2 浓度,以此构建基于离散曲率的 CO_2 优化调控模型,为温室 CO_2 的精准高效调控和节本增效提供定量依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2018年9—10月在西北农林科技大学泾阳蔬菜试验示范站温室内进行。试验地位于北纬 $34^{\circ}26'$ 、东经 $108^{\circ}7'$,属于暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候,年均日照时数 $2\ 163.8 \text{ h}$,年均辐射总量 479.9 kJ/m^2 ,年均积温 $4\ 811^{\circ}\text{C}$,年均气温

12.9℃^[21]。以番茄品种“金棚 8B”为试材,在培养皿中将已经浸胀的种子进行催芽,待要萌发时进行低温处理,在 72 孔穴盘内采用营养钵育苗。育苗基质为农业育苗专用基质,其营养含量为有机质质量分数 50% 以上,基质孔隙度约 60%,pH 值 6~7。幼苗培育期间,保持水肥充足,待番茄幼苗叶片为 5 片左右,选择长势均匀的番茄幼苗进行移植。待番茄第 1 朵花苞开放,选择茎的横径 0.8~1.2 cm、株高 25 cm 左右的健康植株进行光合速率测试。试验期间,施肥、浇水等田间管理均正常进行,不喷施任何农药和激素。

1.2 试验方法

试验选取茁壮的番茄 180 株作为样本,采用美国 LI-COR 公司的 LI-6800 型便携式光合仪测定温度、光照强度和 CO₂ 耦合下的 CO₂ 响应曲线,同时为避开光合“午休现象”对试验数据的影响,选择在 09:00—11:30 和 14:30—17:30 进行试验数据采集。选择自顶叶往下的第 5 片功能叶片作为试验样本。在试验过程中采用光合仪选配的多个子模块按需控制叶室环境参数。其中,利用控温模块设定 16、20、24、28、32、36℃ 等 6 个温度梯度,利用 LED (Light emitting diode) 光源模块获得 0、200、400、600、800、1 000、1 300、1 600、1 900、2 200 μmol/(m²·s) 等 10 个光子通量密度梯度,共形成 60 组嵌套试验条件。由于光合仪 CO₂ 注入系统中 CO₂ 混合浓度可控范围是 0~2 500 μmol/mol,故每组试验利用 CO₂ 注入模块设定 20 个 CO₂ 浓度测试点,分别为 0、50、100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000、1 100、1 200、1 300、1 500、1 700、1 900、2 100、2 300 μmol/mol,共获取 1 200 个测量数据。在同一植株功能叶片上每个测量环境条件进行 3 次重复,剔除错误数据后取平均,共获取 1 200 个有效试验数据。

2 模型构建

本文分 3 步构建 CO₂ 优化调控模型。首先基于光合试验数据建立光合速率预测模型;其次,基于光合速率预测模型获取不同光照强度和温度下的 CO₂ 浓度和光合速率关系曲线,并基于 *L* 弦长离散曲率法对曲线进行曲率计算;最后,对曲线的离散曲率进行最大值寻优,获取 CO₂ 效益优化调控目标值,以此构建 CO₂ 优化调控模型。

2.1 多因子耦合的光合速率预测模型

将试验所得的数据集随机分为训练集和测试集,即选取 960 组数据作为训练集(占总数据集的 80%),剩下 240 组数据作为测试集(占总数据集的

20%)。针对样本数据特点以及高精度要求,选取 SVR 算法^[22]进行光合速率预测模型的构建。基于试验所得到的数据,以温度、光照强度、CO₂ 浓度作为输入样本,以光合速率作为输出样本,采用 SVR 算法构建光合速率预测模型,进行光合速率的拟合预测,其具体流程如图 1 所示。

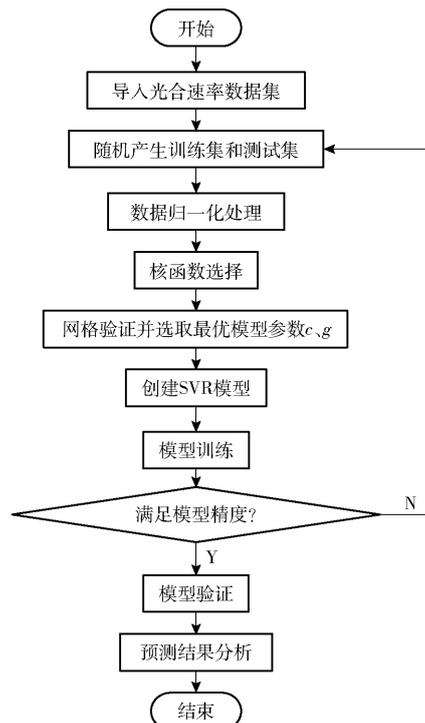


图 1 支持向量机回归建模流程图

Fig. 1 Flow chart of support vector regression modeling

为避免大数据淹没小数据现象,以及便于神经网络预测与曲率计算,首先,将数据集进行归一化操作。其次,确定 SVR 关键参数。由于径向基核函数计算的复杂度不随参数变化而变化,故选取其作为核函数;惩罚因子 *c* 为对误差的宽容度,*c* 过大,容易导致模型过拟合,*c* 过小,容易导致模型欠拟合;影响因子 *g* 隐含地决定了数据映射到新的特征空间后的分布。经网格验证方法进行多次经验计算获取最佳参数值惩罚因子 *c* 为 3.00,影响因子 *g* 为 3.41。最后,训练及构建模型。针对 960 组训练集,采用径向基核函数,通过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。

2.2 基于 *L* 弦长曲率法的 CO₂ 响应曲线曲率最大点获取

2.2.1 *L* 弦长曲率法的原理

在 CO₂ 响应曲线中,首个曲率最大点代表着 CO₂ 浓度对净光合速率影响程度由强到弱的特征点位,是构建 CO₂ 优化调控模型的关键。根据有限个数据点拟合的 CO₂ 响应曲线无法采用连续曲线曲

率法,而离散曲率法不需要具体的公式便可计算曲率,文献[23]提出的一种离散曲率计算方法—— L 弦长曲率,在局部区域计算曲率,不受整条曲线的全局影响,且与曲线的真实曲率之间存在密切联系。

L 弦长曲率法依赖输入的参数 L ,根据拓扑距离获取目标点处前后距离为 L 的点来确定它的支持领域,并应用线性插值提高曲率计算精度。曲线上某点 p_i 的 L 弦长曲率的计算主要分为两个步骤:① p_i 点的支持领域获取,如图2所示。②将支持领域前后端点之间的欧氏距离与参数 $2L$ 作比值,然后应用和该比值平方与数字1的差值相关的一个根号值作为离散曲率。

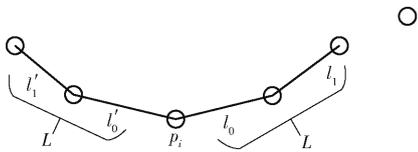


图2 p_i 点的支持领域

Fig. 2 Supporting area of p_i

2.2.2 L 弦长曲率计算和最大值寻优

CO_2 响应曲线离散曲率最大点的获取方法主要包括两方面内容,首先在不同光温嵌套条件获取 CO_2 响应曲线,其次进行 L 弦长曲率计算和最大值寻优。

(1) 获取不同光温嵌套条件下的 CO_2 响应数字曲线

通过调用已建立的SVR光合速率预测模型网络,获取不同温度和光照强度嵌套条件下 CO_2 浓度与光合速率的关系曲线。每组 CO_2 响应曲线曲率的获取均建立在特定温度、光照强度基础上。温度以 1°C 为步长,建立曲率获取温度条件数据样本集 $T^i = (T^1, T^2, \dots, T^{21})$,其中 $T^i = 16 + (i - 1)$, $i \in [1, 21]$ 区间的整数。光照强度以 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 为步长,建立曲率获取光照强度条件数据样本 $P^j = (P^1, P^2, \dots, P^{41})$,其中 $P^j = 200 + 50(j - 1)$, $j \in [1, 41]$ 区间的整数。在 $16 \sim 36^\circ\text{C}$ 和 $200 \sim 2200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 范围内,完成预测模型对温度、光照强度的实例化,从而建立不同光温条件下的 CO_2 响应曲线。

(2) 采用 L 弦长曲率计算和寻优

由于光合速率与 CO_2 浓度不在同一个量级内,将各数字响应曲线归一化之后再计算各响应曲线的 L 弦长曲率。首先根据输入参数 L ,从当前点分别向前后遍历寻找与当前点拓扑距离均为 L 的前后端点,从而确定支持领域,并利用线性插值提高计算精度,从而得到领域前端点 p_i^b 和领域后端点 p_i^f ,最后得到调整后的支持领域 $[p_i^b, p_i^f]$ 。然后,在此支持领

域内,当前点的 L 弦长曲率计算式为

$$c_i = s_i \sqrt{1 - \left(\frac{D_i}{2L}\right)^2} \quad (1)$$

其中

$$s_i = \text{sign}((x_i - x_i^b)(y_i^f - y_i^b) - (x_i^f - x_i^b)(y_i - y_i^b)) \quad (2)$$

式中 D_i —— p_i^b 、 p_i^f 两点间欧氏距离

s_i ——离散曲率符号

(x_i^b, y_i^b) —— p_i^b 的坐标

(x_i^f, y_i^f) —— p_i^f 的坐标

s_i 为正表示曲线在当前点呈凸性,反之呈凹性;为避免实验数据微小波动导致响应曲线的凹凸性发生改变从而无法准确获取离散曲率最大值,因此本文在计算离散曲率时将符号统一取为正号。

按照以上步骤对响应曲线各点求 L 弦长曲率,并应用爬山法^[24]寻优得到曲率最大值。记录和保存其对应的 CO_2 浓度,直到获取所有响应曲线曲率最大点对应的 CO_2 浓度。

2.3 CO_2 优化调控模型构建

基于上述寻优方法,得到了温度、光照强度为输入, CO_2 响应曲线离散曲率最大点对应的 CO_2 浓度为输出的861组目标 CO_2 浓度数据集,采用SVR算法进行 CO_2 优化调控模型构建。随机选取训练集与测试集并进行归一化处理。针对861组目标 CO_2 浓度数据集,随机选取689组样本数据(约占总样本的80%)作为训练集,172组(约占总样本的20%)作为测试集,用于模型验证。选择径向基核函数参与模型训练,确定最佳参数 c 为1.00, g 为4.91,以此完成 CO_2 优化调控模型的构建。

3 结果分析

3.1 光合速率预测模型验证结果

为了验证SVR构建预测模型的拟合效果,同时采用BP(Back propagation)神经网络和非线性回归多项式构建拟合预测模型,三者的模型评价对比如表1所示。由表1可见,SVR构建预测模型的决定系数最高,为0.98;均方根误差与平均绝对误差均最小,分别为 $1.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $1.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

表1 3种建模方法的预测模型评价指标对比

Tab. 1 Comparison of prediction model indicators for three modeling methods

算法	决定系数	均方根误差/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均绝对误差/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
BP神经网络	0.96	2.85	2.18
SVR	0.98	1.79	1.21
多项式拟合	0.91	4.08	3.06

证明 SVR 算法对于本文多维样本数据拟合具有优势,采用 SVR 算法构建预测模型是可行的。

为进一步验证 SVR 预测模型的预测效果,将 SVR 预测模型与 CO₂ 经典响应模型进行对比。目前被普遍应用于植物生理生态等方面研究的 CO₂ 经典响应模型有直角双曲线模型、Michealis - Menten 模型和直角双曲线修正模型等^[25]。因此选取以上 3 种 CO₂ 经典响应模型对 60 组嵌套条件下的试验数据进行拟合,并将这 3 种模型的评价指标绘制成盒图,如图 3 所示。

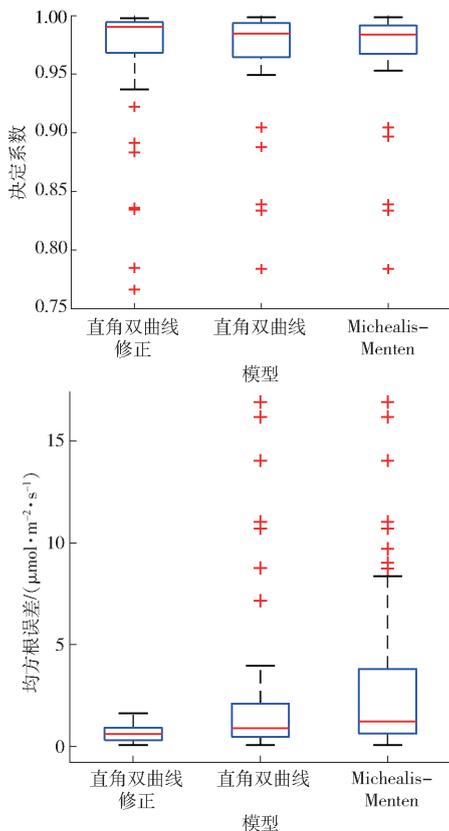


图3 3种 CO₂ 经典响应模型评价指标对比

Fig. 3 Comparison of evaluation indexes of three typical models

由图3可发现,直角双曲线修正模型决定系数所处范围的上下界均高于其他两种模型,均方根误差所处范围上下界均小于其他两种模型,说明3种典型模型中,直角双曲线修正模型对本文试验数据的拟合效果最好。因此,进一步采用直角双曲线修正模型与本文 SVR 预测模型进行对比,以此验证 SVR 预测模型的拟合效果。通过对比可以发现,直角双曲线修正模型的决定系数范围为 0.97 ~ 0.99,均方根误差范围为 0.7 ~ 1.81 μmol/(m²·s); SVR 预测模型的决定系数为 0.98,均方根误差为 1.79 μmol/(m²·s),均位于直角双曲线修正模型相应评价指标的范围之内。这说明,SVR 预测模型的拟合效果与直角双曲修正模型的拟合效果很接近。

但是直角双曲线修正模型无法预测实测点之外的数据,而 SVR 预测模型可在保证与直角双曲线修正模型相近精度的情况下实现对非试验条件样本的预测,可解决试验样本不足的问题。

采用异校验方式应用验证集对光合预测模型的泛化能力进行验证,得到光合速率实测值和预测值相关性如图4所示。图中直线 L₁ 为测试集数据实际值和预测值的拟合直线,其斜率为 0.95,截距为 0.47,说明预测值与实测值相关性较高。

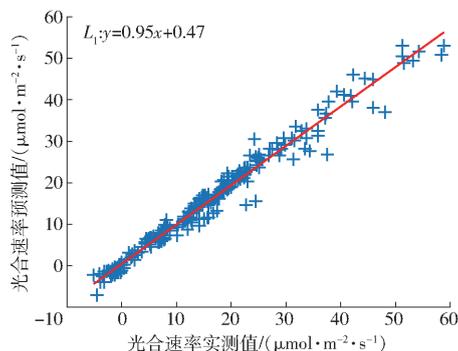


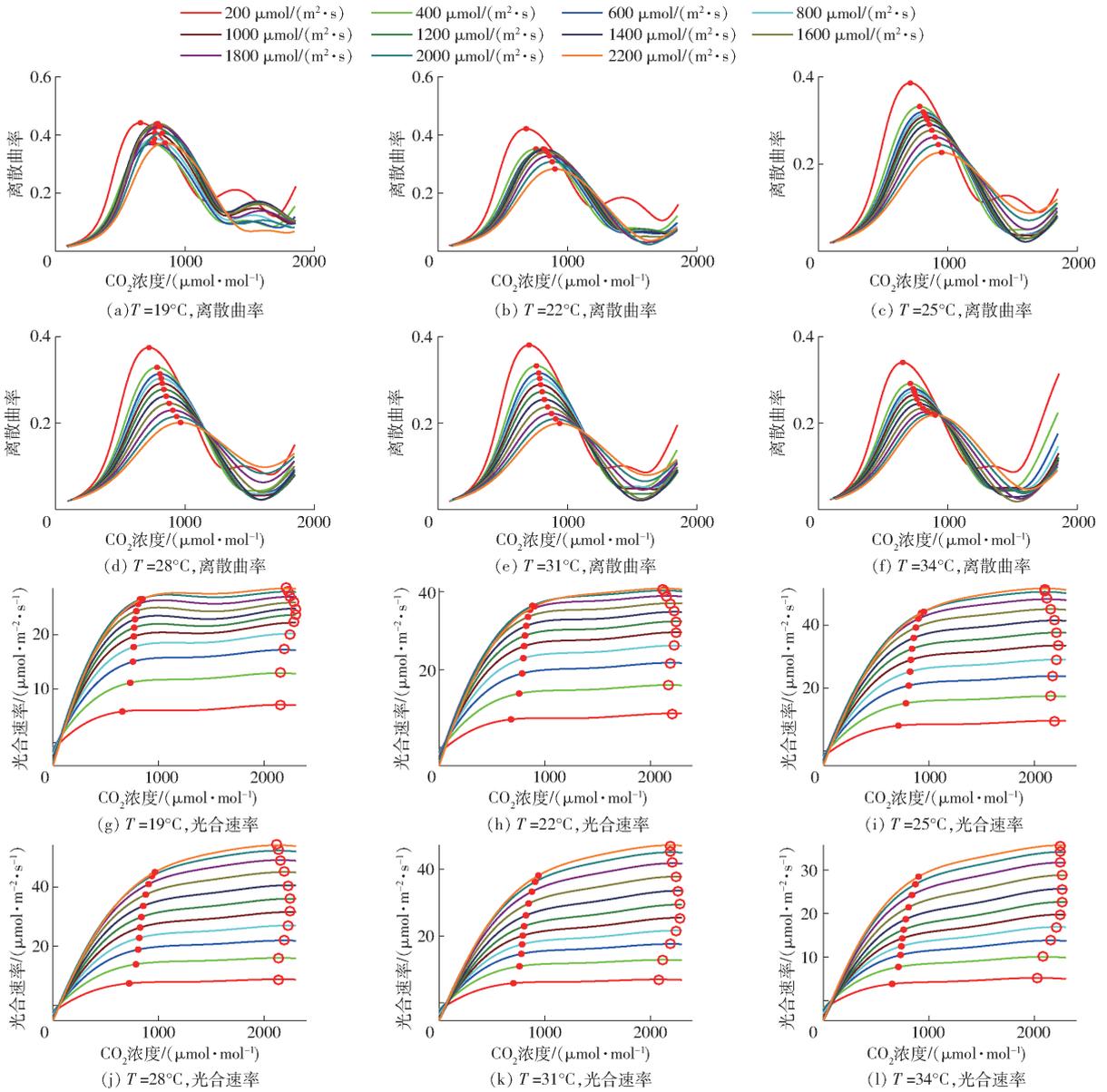
图4 SVR 光合速率预测模型验证

Fig. 4 SVR predictive model verification

3.2 离散曲率最大值点获取

在建模过程中累计获得 861 组不同条件下的曲率最大点,由于无法完全罗列,下文仅展示温度从 19℃ 到 34℃ 区间内以 3℃ 为步长,光照强度从 200 μmol/(m²·s) 到 2 000 μmol/(m²·s) 区间内以 200 μmol/(m²·s) 为步长条件下的 CO₂ 响应曲线曲率及曲率最大值点的获取结果,如图5所示。同时,为了对比曲率最大点与 CO₂ 饱和点的效果,本文采取与文献[18]中相同的方法获取 CO₂ 饱和点,最后得到 CO₂ 响应曲线中曲率最大点和 CO₂ 饱和点的对比关系图,其中曲率最大点为点状标记,CO₂ 饱和点为圆圈状标记。

由图5可发现,定义离散曲率图中首个曲率最大值点代表 CO₂ 浓度对光合速率影响程度从强到弱的特征点位,刚好对应于光合速率图中相应曲线的增长速率转折点,这说明 L 弦长曲率法可以提供准确的 CO₂ 调控目标点。由光合速率图可以发现,在特征点位之前,光合速率随着 CO₂ 浓度增加而快速上升;越过该点后,大量补充 CO₂ 直到 CO₂ 饱和点,只能促进光合速率少量提高,造成 CO₂ 补充效益降低。进一步分析发现,所有特征点位对应的 CO₂ 浓度均在 600 ~ 1 000 μmol/mol 范围内;所有的 CO₂ 饱和点变化不大,且都在曲线末端区域,即 2 000 ~ 2 300 μmol/mol 范围以内。以上分析结果与文献[19]构建的 CO₂ 优化调控模型预测 CO₂ 饱和点位于 1 800 ~ 2 400 μmol/mol 区间基本一致。

图5 CO₂ 响应曲线特征点获取与效果对比Fig. 5 Acquisition of characteristic points of CO₂ response curves and comparison of effect

进一步分析光合速率图中不同环境下曲率特征点和 CO₂ 饱和点的变化,可以发现同一光照强度下,CO₂ 曲率特征点和 CO₂ 饱和点随着温度的增加呈现先增后减的趋势;同一温度下,随着光照强度的增加,CO₂ 曲率特征点对应的 CO₂ 浓度一直升高;而 CO₂ 饱和点浓度呈现先升后降的趋势。在较低或中等光照强度条件下,CO₂ 饱和点浓度随着光照强度的增加而增加,当光强增加到 1 000 μmol/(m²·s) 至 1 400 μmol/(m²·s) 范围内时,CO₂ 饱和点浓度开始下降,与文献[18]中 CO₂ 饱和点浓度随着光照强度的增加呈现先升后降趋势的现象一致。以上分析说明了不同温度和光强下 CO₂ 曲率特征点和饱和点均存在差异。

3.3 CO₂ 优化调控模型结果及验证

为了验证基于 SVR 算法构建的番茄 CO₂ 优化

调控模型的拟合效果,本文同时采用 BP 神经网络和非线性回归多项式拟合两种方法构建调控模型,模型评价对比如表 2 所示。

表 2 3 种建模方法的调控模型评价指标对比
Tab. 2 Comparison of control model indicators for three modeling methods

算法	决定系数	均方根误差/ (μmol·mol ⁻¹)	平均绝对误差/ (μmol·mol ⁻¹)
SVR	0.99	4.42	3.17
BP 神经网络	0.98	4.64	3.42
多项式拟合	0.97	8.70	4.90

由表 2 可见,SVR 模型的决定系数最高,为 0.99;均方根误差和平均绝对误差最低,分别为 4.42 μmol/mol 和 3.17 μmol/mol,SVR 算法构建的 CO₂ 调控目标值模型具有更高的精准度和拟合效

果,具体模型如图 6 所示。由图 6 可发现,当温度和光照强度较低时,CO₂ 调控目标值较低;在温度一定时,CO₂ 调控目标值随着光照强度的增加而升高;当光照强度一定时,随着温度的增加,CO₂ 调控目标值呈现先升后降的趋势,与作物生长需求一致。

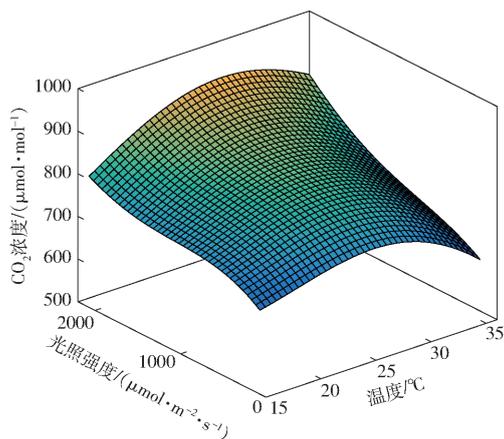


图 6 CO₂ 优化调控模型

Fig. 6 CO₂ optimal regulation model

为了进一步证明调控模型精准性,本文采用相同试验样品测量了 60 组不同光温条件下的 CO₂ 响应曲线,并利用 CO₂ 响应直角双曲线修正模型^[11]进行响应曲线拟合,最后通过连续曲率法实现了不同响应曲线曲率最大值获取,以此作为调控目标的实测值。同时,将 CO₂ 优化调控模型获取的调控目标值作为预测值,进行调控模型验证,相关性如图 7 所示。分析可知,图中直线 L₂ 为实际值和预测值的拟合直线,斜率为 0.98,截距为 19。可见,本文构建的 CO₂ 优化调控模型能准确预测 CO₂ 效益优化点,为 CO₂ 的精准高效调控提供了定量依据。

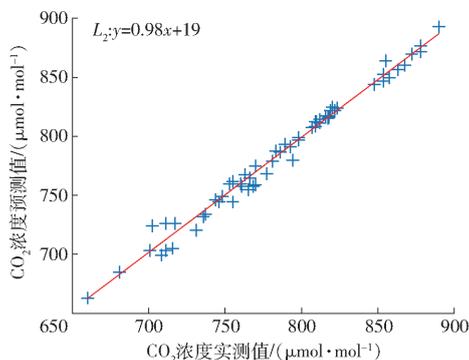


图 7 CO₂ 优化调控模型验证

Fig. 7 Regulatory model verification of CO₂

3.4 调控效果对比

3.4.1 理论调控效果分析

为了进一步验证 CO₂ 优化调控模型的调控效果,与获取 CO₂ 饱和点作为调控目标值的传统方

法^[18]进行效果比较。在温度试验区间内以 6°C 的温度梯度为例,对比结果如表 3 所示。从表 3 中可以发现,所有光温耦合条件下,CO₂ 供需量的大幅度下降均只造成光合速率的少量降低。本文获取离散曲率最大点对应的 CO₂ 浓度作为目标值,相比于 CO₂ 饱和点目标值的方法,CO₂ 供需量平均下降 61.81%,光合速率平均仅减少 15.58%。说明采用该方法构建不同温度、不同光照强度条件下的 CO₂ 优化调控模型具有高效节能特点,可为设施作物 CO₂ 环境优化调控提供理论基础。

3.4.2 实际调控效果分析

为了验证本模型的实际调控效果,在西北农林科技大学泾阳蔬菜试验示范站的温室内开展调控模型验证试验,试验采用自行研制的 CO₂ 闭环调控系统构建验证系统,系统工作流程如图 8 所示。传感器实时监测温室内的 CO₂ 浓度、光照强度和温度等环境信息,并传递给决策节点。决策节点基于实时环境信息,利用树莓派中内嵌的 CO₂ 优化调控模型计算 CO₂ 调控目标值。然后,根据实时 CO₂ 浓度和调控目标值,判断是否需要调控。若当前浓度高于目标值,则不进行调控,继续进行调控目标值的计算与比较;若当前浓度低于目标值,则进行动态 CO₂ 差值计算,发出 CO₂ 调控信号,打开调控设备中 CO₂ 发生器的电磁阀,释放对应体积的 CO₂,然后关闭电磁阀,等待 10 min 使 CO₂ 分布均匀,然后再返回到决策节点。

试验分别在同一温室的 3 块大小相同的区域内进行,利用塑料膜实现 3 块区域之间的空间隔离,对比曲率组、饱和组、自然组 3 组的调控效果。试验中运行 CO₂ 曲率最大点模型和 CO₂ 饱和点模型,采用曲率最大点和饱和点作为目标值分别对限制点区和饱和点区进行调控,自然对照区为自然条件不进行 CO₂ 补充。试验于 07:00 开始,采用 LI-6800 型便携式光合速率测试仪对不同试验区的番茄进行光合速率测量,不同试验区域光合速率变化趋势基本一致,其中得到 6 月 3 日的番茄光合速率时变化趋势如图 9 所示,当天温室内温度和光照强度的变化趋势如图 10 所示。由图 9 可发现,曲率组光合速率整体比饱和组低 15.14%,补充 CO₂ 供需量降低 57.61%;曲率组光合速率整体比自然组高 26.70%。说明以曲率最大点为调控目标值的 CO₂ 调控模型可以在提高光合速率的情况下大幅度减小 CO₂ 供需量,对融合效益的 CO₂ 精准调控具有实际指导意义。由图 10 可以发现,温度和光照强度随着时间的推移有着明显的变化,本文提出的 CO₂ 优化调控模型可以基于实时环境对 CO₂ 调控目标值进

表3 曲率特征点与CO₂饱和点对比

Tab.3 Comparison of characteristic value and conventional value in two methods

温度/ ℃	光照强度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	利用离散曲率获取的目标点		CO ₂ 饱和点		新方法相比传统方法降低率/%	
		CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	光合速率/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	CO ₂ 浓度	光合速率
22	200	655	5.79	2151	7.03	69.55	17.74
	400	730	11.10	2146	12.89	65.98	13.91
	600	756	15.00	2189	17.19	65.46	12.73
	800	763	17.71	2239	20.17	65.92	12.19
	1000	765	19.67	2277	22.20	66.40	11.40
	1200	768	21.29	2297	23.65	66.57	9.98
	1400	776	22.84	2298	24.83	66.23	8.02
	1600	788	24.34	2281	25.93	65.45	6.13
	1800	805	25.67	2253	27.00	64.27	4.95
	2000	824	26.51	2222	27.94	62.92	5.11
2200	845	26.59	2202	28.53	61.63	6.80	
28	200	721	7.43	2139	8.82	66.29	15.75
	400	784	13.87	2144	16.01	63.43	13.36
	600	806	18.84	2189	21.92	63.18	14.04
	800	816	22.79	2228	26.95	63.38	15.43
	1000	824	26.30	2246	31.54	63.31	16.63
	1200	836	29.83	2241	36.04	62.70	17.22
	1400	854	33.59	2219	40.57	61.51	17.21
	1600	877	37.43	2186	45.03	59.88	16.90
	1800	905	40.98	2154	49.10	57.99	16.55
	2000	935	43.68	2131	52.28	56.12	16.45
2200	965	45.01	2126	54.10	54.61	16.80	
34	200	651	3.81	2024	5.23	67.84	27.13
	400	710	7.71	2084	10.05	65.93	23.23
	600	731	10.47	2158	13.81	66.13	24.22
	800	739	12.48	2217	16.92	66.67	26.24
	1000	747	14.29	2253	19.78	66.84	27.77
	1200	760	16.29	2269	22.67	66.51	28.14
	1400	780	18.69	2269	25.70	65.62	27.29
	1600	807	21.43	2260	28.80	64.29	25.58
	1800	839	24.25	2250	31.72	62.71	23.54
	2000	872	26.75	2245	34.13	61.16	21.64
2200	902	28.48	2252	35.70	59.95	20.22	

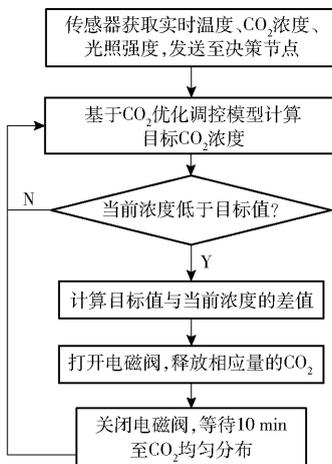
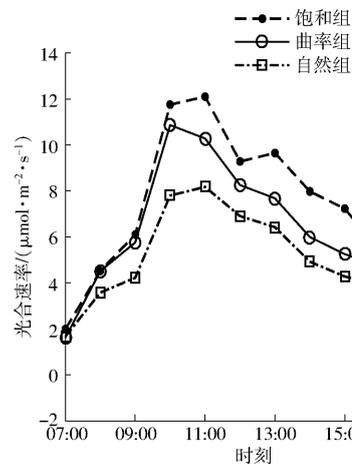
图8 CO₂调控流程图Fig.8 Flow chart of CO₂ control

图9 3组光合速率的变化趋势

Fig.9 Comparison of variation trend of photosynthetic rate

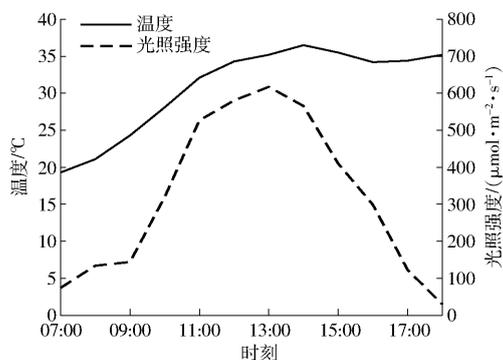


图10 温度和光照强度的变化趋势

Fig. 10 Variation trends of temperature and light intensity

行动态、高效的获取。

4 结论

(1)结合番茄植株CO₂响应特点建立了一种番茄初花期CO₂优化调控模型。以温度、光照强度、CO₂浓度等多因子耦合嵌套所得净光合速率试验结果为基础,采用SVR算法构建所得光合速率预测模

型,决定系数为0.98,较非线性回归多项式拟合和BP神经网络构建的预测模型,能以更高精度拟合多因子输入情况下的光合速率。

(2)提出基于L弦长曲率理论的CO₂响应曲线离散曲率计算方法,可获取CO₂响应曲线曲率最大点,求得CO₂效益优化调控目标值,从而满足CO₂按需调控且节能高效的要求,为设施作物优产优质,增大效益奠定了良好的基础。

(3)基于SVR算法构建以CO₂效益优先值为调控目标值的调控模型,决定系数为0.99,均方根误差为4.42 μmol/mol,平均绝对误差为3.17 μmol/mol,拟合效果好。与CO₂饱和点调控方式对比,光合速率平均减少15.58%,但CO₂供需量平均下降61.81%。验证试验中光合速率较饱和点调控时仅下降15.14%,但CO₂供需量平均下降57.61%;相较自然条件下光合速率升高26.70%。因此,本文提出模型能够兼顾作物需求和效益,可为实现设施作物动态、高效CO₂调控提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Z, LIU L, ZHANG M, et al. Effect of carbon dioxide enrichment on health-promoting compounds and organoleptic properties of tomato fruits grown in greenhouse[J]. Food Chemistry, 2014, 153:157-163.
- [2] LI Y, DING Y, LI D, et al. Automatic carbon dioxide enrichment strategies in the greenhouse: a review[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171:101-119.
- [3] 王红玉,曲英华,周士力,等. CO₂增施与养分交互作用对日光温室番茄生长的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):182-188.
WANG Hongyu, QU Yinghua, ZHOU Shili, et al. Interactive effect of CO₂ enrichment and nutrient on growth of tomato in solar greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(Supp.):182-188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s129&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.029. (in Chinese)
- [4] PAN Lu, LI Zhixin, CUI Shimao, et al. Effect of high temperature and elevated CO₂ coupling on photosynthesis and leaf senescence of cucumber in greenhouse[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(3):168-173.
- [5] THONGBAI P, KOZAI T, OHYAMA K. CO₂ and air circulation effects on photosynthesis and transpiration of tomato seedlings[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126(3):338-344.
- [6] AH R C, SU J S, SUN W C, et al. CO₂ enrichment with higher light level improves flowering quality of phalaenopsis queen beer 'Mantefon'[J]. Scientia Horticulturae, 2019,247:356-361.
- [7] KEUTGEN N, CHEN Kai, LENZ F. Responses of strawberry leaf photosynthesis, chlorophyll fluorescence and macronutrient contents to elevated CO₂[J]. Journal of Plant Physiology, 1997, 150(4):395-400.
- [8] LI Pinghua, BOHNERT H J, GRENE R. All about FACE—plants in a high CO₂ world[J]. Trends in Plant Science, 2007, 12(3):87-89.
- [9] BECKER C, KLÄRING H P. CO₂ enrichment can produce high red leaf lettuce yield while increasing most flavonoid glycoside and some caffeic acid derivative concentrations[J]. Food Chemistry, 2016, 199:736-745.
- [10] 于国华,张国树,战淑敏,等. CO₂浓度对黄瓜叶片光合速率、RubisCO活性及呼吸速率的影响[J]. 华北农学报,1997,12(4):101-106.
YU Guohua, ZHANG Guoshu, ZHAN Shumin, et al. Effect of CO₂ concentrations on photosynthetic rate, RubisCO activity and respiratory rate of the cucumber leaves[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1997, 12(4):101-106. (in Chinese)
- [11] 叶子飘. 光合作用对光和CO₂响应模型的研究进展[J]. 植物生态学报,2010,34(6):727-740.
YE Zipiao. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO₂[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(6):727-740. (in Chinese)
- [12] 苏培玺,杜明武,张立新,等. 日光温室草莓光合特性及对CO₂浓度升高的响应[J]. 园艺学报,2002,29(5):423-426.

- SU Peixi, DU Mingwu, ZHANG Lixin, et al. Changes of photosynthetic characteristics and response to rising CO₂ concentration in strawberry in solar greenhouse[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, 29(5): 423 - 426. (in Chinese)
- [13] 张振花, 孙胜, 刘洋, 等. 增施 CO₂ 对温室番茄结果期叶片光合特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1398 - 1402.
ZHANG Zhenhua, SUN Sheng, LIU Yang, et al. Effects of CO₂ enrichment on photosynthetic characteristics of greenhouse tomato during fruiting stage[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1398 - 1402. (in Chinese)
- [14] 张漫, 李婷, 季宇寒, 等. 基于 BP 神经网络算法的温室番茄 CO₂ 增施策略优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 239 - 245.
ZHANG Man, LI Ting, JI Yuhan, et al. Optimization of CO₂ enrichment strategy based on BPNN for tomato plants in greenhouse[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 239 - 245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150833&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.033. (in Chinese)
- [15] 李婷, 季宇寒, 张漫, 等. CO₂ 与土壤水分交互作用的番茄光合速率预测模型[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(增刊): 208 - 214.
LI Ting, JI Yuhan, ZHANG Man, et al. Tomato photosynthetic rate prediction models under interaction of CO₂ enrichments and soil moistures[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(Supp.): 208 - 214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S034&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.034. (in Chinese)
- [16] 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?flag=1&file_no=2017s050&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.050. (in Chinese)
- [17] 周庆珍. 基于光温耦合的温室二氧化碳调控系统设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHOU Qingzhen. The design of greenhouse carbon dioxide regulation system based on light-temperature coupling[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- [18] 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/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 249 - 256.
XIN Pingping, ZHANG Zhen, WANG Zhiyong, et al. Carbon dioxide optimal control model based on support vector-improved fish swarm algorithm[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(6): 249 - 256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170632&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.032. (in Chinese)
- [19] 张栋海, 黄丽娜, 费立凡, 等. 一种基于曲率法的曲线特征点选取方法[J]. *测绘科学*, 2013, 38(3): 151 - 153.
ZHANG Donghai, HUANG Li'na, FEI Lifan, et al. An algorithm of extracting feature points in curve based on the curvature[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(3): 151 - 153. (in Chinese)
- [20] 李颖, 陈怀亮, 李耀辉, 等. 一种利用 MODIS 数据的夏玉米物候期监测方法[J]. *应用气象学报*, 2018, 29(1): 111 - 119.
LI Ying, CHEN Huailiang, LI Yaohui, et al. A method for summer maize phenology monitoring by MODIS data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, 29(1): 111 - 119. (in Chinese)
- [21] 王鹏勃, 李建明, 丁娟娟, 等. 水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(2): 314 - 323.
WANG Pengbo, LI Jianming, DING Juanjuan, et al. Effect of water and fertilizer coupling on quality, yield and water use efficiency of tomato cultivated by organic substrate in bag[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(2): 314 - 323. (in Chinese)
- [22] BRERETON R G, LLOYD G R. Support vector machines for classification and regression[J]. *ANALYST*, 2010, 135(2): 230 - 267.
- [23] 钟宝江, 廖文和. 基于精化曲线累加弦长的角点检测技术[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(7): 939 - 943.
ZHONG Baojiang, LIAO Wenhe. Corner detection based on accumulative chord length of refined digital curves[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(7): 939 - 943. (in Chinese)
- [24] TSAMARDINOS I. The max-min hill-climbing Bayesian network structure learning algorithm[J]. *Machine Learning*, 2006, 65(1): 31 - 78.
- [25] 丁林凯, 阚飞, 李玲, 等. 陇中半干旱区玉米对光和 CO₂ 浓度的响应模型[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(8): 86 - 91.
DING Linkai, KAN Fei, LI Ling, et al. Photosynthetic responses models of maize to light intensity and CO₂ concentration in semi-arid area of central Gansu[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(8): 86 - 91. (in Chinese)