

基于高斯曲率最大化的蓝莓温室光照与CO₂综合调控策略

徐立鸿 刘辉辉 蔚瑞华

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对目前温室光照、CO₂ 调控效益不高等问题,提出了一种基于高斯曲率最大化的蓝莓温室光照和 CO₂ 综合调控策略。首先通过采集不同温度、光照强度、CO₂ 浓度嵌套下的蓝莓净光合速率,建立不同温度下包含光照强度、CO₂ 浓度的蓝莓净光合速率机理模型;接着根据不同温度下蓝莓光合速率机理模型的高斯曲率函数构造适应度函数,并采用粒子群算法进行最大值寻优,计算高斯曲率最大值所对应的光照强度和 CO₂ 浓度,获得不同温度下光照强度、CO₂ 浓度高斯曲率最大点;最后基于多项式拟合,建立不同温度下光照、CO₂ 综合调控策略。通过与最大净光合速率饱和点的调控对比发现,平均光照强度下降 60.73%,CO₂ 浓度下降 25.00%,而平均净光合速率仅下降 14.29%。与实际蓝莓净光合速率对比发现,采用本文提出的光照、CO₂ 综合调控策略,蓝莓净光合速率较实际值平均提高 1.87 倍以上。说明本文提出的光照、CO₂ 综合调控策略具有综合效益高等特点,可为温室光照、CO₂ 调控提供理论支撑。

关键词: 温室; 蓝莓; 光合速率模型; 高斯曲率; 粒子群算法; 光照与 CO₂ 综合调控

中图分类号: S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)07-0354-09

OSID:



Integrated Control Strategy of Light and CO₂ in Blueberry Greenhouse Based on Maximizing Gaussian Curvature

XU Lihong LIU Huihui WEI Ruihua

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Photosynthesis directly affects the quality and yield of blueberries, and the photosynthetic rate of crops is mainly affected by temperature, light and CO₂. At present, the control of light and CO₂ is mainly based on the saturation point of photosynthesis rate, and the control and control efficiency is low. Aiming at the current problems of greenhouse light and CO₂ control efficiency, a comprehensive control strategy of blueberry greenhouse light and CO₂ based on the maximization of Gaussian curvature was proposed. Firstly, by collecting the blueberry net photosynthetic rate under different temperatures, light, and CO₂ nesting, a blueberry net photosynthetic rate mechanism model was established, including light intensity and CO₂ concentration at different temperatures; then according to the Gaussian curvature function of the blueberry photosynthetic rate mechanism model at different temperatures, the fitness function was constructed, and the particle swarm algorithm was used to optimize the maximum value, the light intensity and CO₂ concentration corresponding to the maximum Gaussian curvature were calculated, and the maximum point of light and CO₂ Gaussian curvature at different temperatures were obtained; finally, based on polynomial fitting, different comprehensive control strategy of light and CO₂ was established at different temperatures. By comparing with the control of the saturation point of the maximum net photosynthetic rate, it was found that the average light intensity was decreased by 60.73%, the CO₂ concentration was decreased by 25.00%, and the average net photosynthetic rate was only decreased by 14.29%. Compared with the actual blueberry net photosynthetic rate, it was found that using the proposed comprehensive control strategy of light and CO₂, the blueberry net photosynthetic rate was increased by more than 1.87 times on average compared with the actual value. It showed that the proposed comprehensive regulation strategy of illumination and CO₂ had the characteristics of high comprehensive benefit, and it can provide theoretical support for the regulation of illumination and CO₂ in greenhouse.

Key words: greenhouse; blueberry; photosynthetic rate model; Gaussian curvature; particle swarm algorithm; integrat control of light and CO₂

0 引言

蓝莓光合作用直接影响产量和品质。影响光合作用最主要的因素有：温度、光照强度和 CO₂ 浓度^[1]，研究表明随着温度上升蓝莓净光合率先增大后减小^[2]，高温胁迫会降低酶的活性^[3]，进而降低蓝莓光合作用。补光和增施 CO₂ 则能够在一定程度上降低叶片气孔限制，提高作物净光合速率^[4]。

目前 CO₂ 调控^[5-9] 和补光控制^[10-13] 方面的研究多以单因子进行，较少考虑对光照、CO₂ 进行联合调控。针对光照、CO₂ 联合调控，白京华^[14] 利用支持向量回归建立光合速率模型，并采用离散曲率获取不同温度下光照、CO₂ 调控目标区域，为光照、CO₂ 的联合调控提供了依据。辛萍萍^[15] 在适宜温度内研究了基于效益优先的光照、CO₂ 协同调控目标值的获取方法，降低调控成本的情况下有效提升了作物的光合速率。单慧勇等^[16] 提出了在 CO₂ 资源受限下的光照、CO₂ 耦合调控。光照、CO₂ 调控方面的研究大多以黑盒模型的方法建立作物净光合速率模型，模型缺乏机理性和普适性。在研究光照、CO₂ 单因子调控中，采用离散曲率方法计算光响应曲线和 CO₂ 响应曲线曲率最大点的方法，极有可能由于数据的波动而改变光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的凹凸性，影响曲率正负，甚至可能发生曲率爆炸，无法得出正常的曲率最大值。采用机理模型进行建模一方面可以增强模型机理性和普适性，另一方面也可以避免数据的波动影响曲率的计算。

针对以上问题，本文通过采集不同温度、光照强度、CO₂ 浓度嵌套下的蓝莓净光合速率数据，在不同温度下以直角双曲修正模型为光响应模型，建立带 CO₂ 修正的蓝莓净光合速率机理模型。根据不同温度下蓝莓净光合速率模型的高斯曲率函数构造适应度函数，采用粒子群算法对蓝莓净光合速率模型的高斯曲率函数进行最大值寻优，并计算对应的光照强度和 CO₂ 浓度。以此构建基于高斯曲率最大化的蓝莓温室光照、CO₂ 综合调控策略，为蓝莓温室光照、CO₂ 的高效节能调控提供依据。并采用本团队提出的温室环境多因子协调控制算法^[17] 对温湿度进行调控，使其满足蓝莓生长的温湿度要求，在此基础上研究光照和 CO₂ 的综合调控策略。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2021 年 3—5 月在昆山市永宏温室有限公

司 Venlo 型温室内进行，试验温室坐标为 (31°33'N, 121°11'E)。选择 3 年生的南高丛蓝莓“绿宝石”作为试验品种。供试蓝莓种植于塑料盆内，选择泥炭土为主要原料的营养土作为栽培基质，土壤 pH 值约为 5.2。试验期间按照常规的管理对蓝莓进行浇水、施肥、防虫等操作，不使用任何农药和激素。

1.2 试验方法

试验随机选择长势良好的蓝莓植株作为样本，采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 型便携式光合速率仪测定蓝莓叶片净光合速率。测量时间段为 08:00—18:00，测量期间温室内相对湿度范围为 45%~75%。使用便携式光合速率仪的不同子模块按照试验需要人工营造叶室环境。其中，利用控温模块构造 16、20、24、28、32、36、40、44℃ 等 8 个温度梯度；利用 LED 光源模块 (6400-02B) 构造 2 400、2 100、1 800、1 500、1 200、900、700、500、300、100、50、0 μmol/(m²·s) 等 12 个光量子通量密度梯度；利用 CO₂ 注入模块 (6400-01) 设定 14 个 CO₂ 测试点：400、300、100、50、0、400、400、500、700、1 000、1 300、1 600、1 900、2 200 μmol/mol。由于 CO₂ 测试点从 0 μmol/mol 变为 500 μmol/mol 时植物所需的诱导时间较长，故增设 2 个 400 μmol/mol 的 CO₂ 测试点，以上 2 个 CO₂ 测试点不作实际建模数据使用，因此共 1 152 组试验。其中对同一株蓝莓叶片重复测量 3 次，剔除异常数据后求均值，共获得 1 152 个有效数据。

2 光合速率机理模型

基于实际采集数据建立不同温度下光照、CO₂ 耦合的蓝莓净光合速率机理模型，为构建基于高斯曲率最大化的蓝莓温室光照、CO₂ 综合调控策略提供模型基础。

2.1 常见的光合速率机理模型

直角双曲线模型、非直角双曲线模型^[18] 和负指数模型均可以用来描述光响应模型和 CO₂ 响应模型，但上述模型均不能有效反映光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的饱和点^[19]，叶子飘等^[20-21] 在此基础上提出的直角双曲线修正模型则能较好地反映光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的饱和点。常见的光响应模型和 CO₂ 响应模型如表 1、2 所示。

表 1、2 中 α_l 为弱光条件下光响应曲线斜率或初始量子效率；P_{lmax} 为强光作用下的最大净光合速率；I 为光量子通量密度；θ_l (0 < θ_l < 1) 为光响应曲线的凸度；β_l 为修正系数；γ_l 为光响应曲线弯曲程度；α_c 为 CO₂ 响应曲线初始斜率；P_{cmax} 为高 CO₂ 浓度下最大净光合速率；C 为 CO₂ 浓度；θ_c (0 < θ_c < 1)

表 1 常见的光响应模型
Tab.1 Light response models

公式	模型	优缺点
$P = \frac{\alpha_I I P_{I_{\max}}}{\alpha_I I + P_{I_{\max}}}$	直角双曲线模型	不能直接估算饱和点光照强度
$P = \frac{\alpha_I I + P_{I_{\max}} - \sqrt{(\alpha_I I + P_{I_{\max}})^2 - 4\theta_I \alpha_I I P_{I_{\max}}}}{2\theta_I}$	非直角双曲线模型	效果比直角双曲线模型好;不存在极值,不能估算饱和点光照强度
$P = P_{I_{\max}} (1 - e^{-\alpha_I I / P_{I_{\max}}})$	负指数模型	通过原点并且不存在拐点,光照强度较高时存在一条渐近线
$P = \alpha_I \frac{1 - \beta_I I}{1 + \gamma_I I} I$	直角双曲线修正模型 (叶子飘模型)	存在极值点,可以估算饱和点光照强度和最大净光合速率 ^[22]

表 2 常见的 CO₂ 响应模型
Tab.2 CO₂ response models

公式	模型	优缺点
$P = \frac{\alpha_C C P_{C_{\max}}}{\alpha_C C + P_{C_{\max}}}$	直角双曲线模型	不能直接估算 CO ₂ 饱和点
$P = \frac{\alpha_C C + P_{C_{\max}} - \sqrt{(\alpha_C C + P_{C_{\max}})^2 - 4\theta_C \alpha_C C P_{C_{\max}}}}{2\theta_C}$	非直角双曲线模型	效果比直角双曲线模型好;不存在极值,不能估算 CO ₂ 饱和点
$P = P_{C_{\max}} (1 - e^{-\alpha_C C / P_{C_{\max}}})$	负指数模型	通过原点并且不存在拐点,CO ₂ 浓度较高时存在一条渐近线
$P = \alpha_C \frac{1 - \beta_C C}{1 + \gamma_C C} C$	直角双曲线修正模型 (叶子飘模型)	存在极值点,可以估算饱和点 CO ₂ 浓度和最大净光合速率

为CO₂ 响应曲线的凸度; β_c 为修正系数; γ_c 为 CO₂ 响应曲线弯曲程度; P 为光合作用速率。

2.2 不同温度下光合速率机理模型

直角双曲线修正模型存在极值点,可以较好地估算饱和点光照强度、CO₂ 浓度以及最大净光合速率,因此本文选择直角双曲线修正模型作为光响应模型对蓝莓净光合速率进行建模,并在该模型基础上加入 CO₂ 影响因子。基于直角双曲线修正模型的蓝莓净光合速率光响应模型表达式为

$$P_n = F(I) = \alpha_I \frac{1 - \beta_I I}{1 + \gamma_I I} I - r_d \tag{1}$$

式中 P_n ——蓝莓净光合速率
 r_d ——蓝莓呼吸速率

Blackman 限制因子律^[23]表明:其他环境因子对作物光合作用的影响可以在光响应模型的基础上乘以环境因子的修正函数。本文仅考虑 CO₂ 浓度和光量子通量密度对蓝莓净光合速率的影响,结合

Blackman 限制因子律,采取 CO₂ 响应函数模型进行修正。本文 CO₂ 响应模型选择直角双曲线修正模型。综上所述,建立包含 CO₂ 浓度和光量子通量密度的蓝莓净光合速率模型

$$P_n = F(C, I) = \left(\alpha_C \frac{1 - \beta_C C}{1 + \gamma_C C} C \right) \left(\alpha_I \frac{1 - \beta_I I}{1 + \gamma_I I} I \right) - r_d \tag{2}$$

在不同温度 T (16、20、24、28、32、36、40、44℃) 下对蓝莓净光合速率模型 P_n 进行拟合。每组温度 T 下有 144 组样本,随机选取 115 组样本数组数据作为训练集(约占总样本数 80%),剩下 29 组样本作为测试集(约占总样本数 20%),采用拟牛顿法(BFGS) + 通用全局优化法进行参数拟合,BFGS 具有良好的自校正能力和超线性收敛性等特点,能有效避免通用全局优化算法计算复杂且难以收敛问题,拟合过程在 1stOpt 软件中进行。拟合得到的结果如表 3 所示。

表 3 不同温度下蓝莓净光合速率模型参数

Tab.3 Parameters of blueberry photosynthetic rate model at different temperatures							
温度 $T/^\circ\text{C}$	α_C	β_C	γ_C	α_I	β_I	γ_I	r_d
16	3.15×10^{-3}	1.72×10^{-4}	1.00×10^{-3}	0.048 1	4.96×10^{-5}	5.44×10^{-3}	0.96
20	6.10×10^{-3}	1.95×10^{-4}	7.33×10^{-4}	0.027 5	6.19×10^{-5}	3.98×10^{-3}	1.62
24	4.79×10^{-3}	2.13×10^{-4}	5.75×10^{-4}	0.038 0	6.34×10^{-5}	3.59×10^{-3}	1.97
28	3.79×10^{-3}	2.18×10^{-4}	5.34×10^{-4}	0.049 7	6.39×10^{-5}	3.49×10^{-3}	2.10
32	3.08×10^{-3}	2.16×10^{-4}	5.42×10^{-4}	0.061 4	6.40×10^{-5}	3.58×10^{-3}	2.12
36	4.90×10^{-3}	2.14×10^{-4}	5.80×10^{-4}	0.038 0	6.32×10^{-5}	3.73×10^{-3}	2.09
40	5.36×10^{-3}	2.08×10^{-4}	7.11×10^{-4}	0.033 9	6.16×10^{-5}	4.27×10^{-3}	2.03
44	3.53×10^{-3}	2.11×10^{-4}	1.00×10^{-3}	0.053 4	6.62×10^{-5}	5.87×10^{-3}	1.94

本文所建的不同温度下蓝莓净光合速率模型的评价指标如表 4 所示。

表 4 不同温度下蓝莓净光合速率模型评价指标
Tab.4 Evaluation index of blueberry photosynthetic rate model at different temperatures

温度/ ℃	MAE/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	MRE/ %	RMSE/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	R ²
16	0.451 0	0.513 1	0.543 4	0.980 8
20	0.372 5	0.540 7	0.487 8	0.993 6
24	0.405 2	0.176 0	0.494 3	0.995 9
28	0.446 3	0.270 7	0.624 6	0.994 8
32	0.551 9	0.577 9	0.716 6	0.992 6
36	0.514 9	0.505 8	0.605 7	0.992 8
40	0.283 2	0.085 9	0.379 1	0.994 5
44	0.293 6	0.099 5	0.400 2	0.987 7

由表 4 可知,平均绝对误差 (MAE) 在 0.283 2 ~ 0.551 9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间,平均相对误差 (MRE) 在 0.085 9% ~ 0.577 9% 之间,均方根误差 (RMSE) 在 0.379 1 ~ 0.716 6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间, R²最低 0.980 8。

不同温度下拟合得到的蓝莓净光合速率模型如图 1 所示。从图 1 可知,不同温度下的蓝莓净光合速率模型,在 CO₂ 浓度一定时,蓝莓净光合速率随着光子通量密度的增大而增大,当超过光饱和点时随着光子通量密度的增强蓝莓净光合速率呈现抑制现象;在光子通量密度一定时,蓝莓净光合速率随着 CO₂ 浓度的增大而增大,当超过 CO₂ 浓度饱和点时随着 CO₂ 浓度的继续增强,蓝莓净光合速率呈现抑制现象。

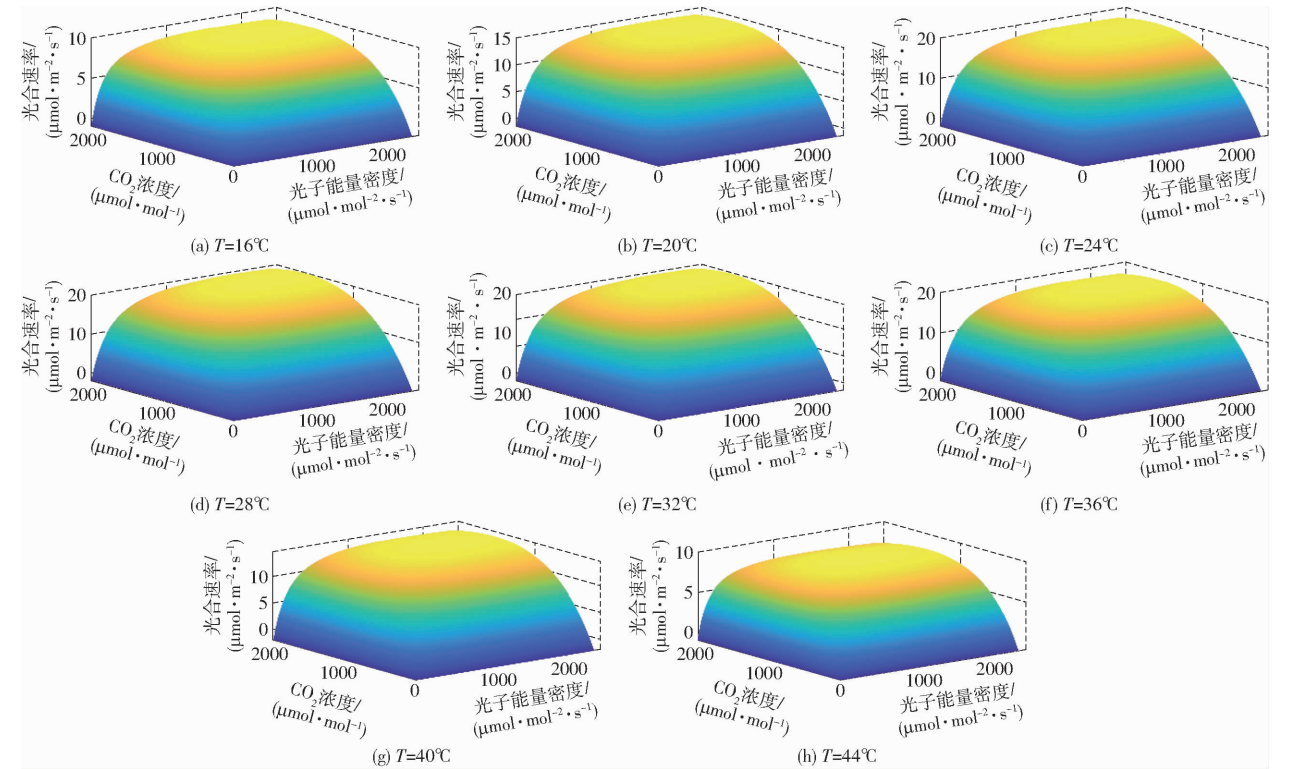


图 1 不同温度下的蓝莓净光合速率模型

Fig. 1 Blueberry photosynthetic rate model at different temperatures

3 基于高斯曲率最大化的光照与 CO₂ 综合调控策略

3.1 蓝莓净光合速率模型的高斯曲率函数

在二维平面内,曲率为单位弧段切线转过角度的极限,表征了曲线上某点的弯曲程度。在 CO₂ 响应曲线中,常以曲线曲率最大点对应的 CO₂ 浓度来作为 CO₂ 浓度对作物净光合速率影响程度由强到弱的特征点^[24]。以该特征点作为 CO₂ 调控目标点可以在满足作物光合作用需求的情况下最大程度地提升 CO₂ 调控效率。

将曲率的概念推广到三维,对于空间上一点,在任意方向上可以得到一个曲率。空间曲面上任意一点的曲率是描述三维模型形状的重要属性,它反映了点所在曲面的凹凸程度,具有旋转不变性和平移不变性^[25]。过这一点,拥有无穷多个相互垂直的正交曲率,存在一组正交曲率使得这组正交曲率分别取极大极小值,则称这组正交曲率为主曲率。高斯曲率为主曲率的乘积。

蓝莓净光合速率与 CO₂ 浓度、光照强度不在同一量级内,需要将其进行归一化后再计算各响应曲面的高斯曲率。这里采用归一化函数进行归一化。

归一化后的区间为 $[0,1]$,归一化函数为

$$y = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \tag{3}$$

式中 y ——归一化后数据

x ——待归一化数据

$x_{\max}、x_{\min}$ ——待归一化数据的最大、最小值

不同温度下蓝莓净光合速率模型的高斯曲率函数 k_c 计算式为

$$k_c = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \tag{4}$$

其中

$$L = \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial C^2}}{\left[1 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial I}\right)^2\right]^{0.5}} \tag{5}$$

$$M = \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial C \partial I}}{\left[1 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial I}\right)^2\right]^{0.5}} \tag{6}$$

$$N = \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial I^2}}{\left[1 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial I}\right)^2\right]^{0.5}} \tag{7}$$

$$E = 1 + \left(\frac{\partial F}{\partial C}\right)^2 \tag{8}$$

$$F = \frac{\partial F}{\partial C} \frac{\partial F}{\partial I} \tag{9}$$

$$G = 1 + \left(\frac{\partial F}{\partial I}\right)^2 \tag{10}$$

3.2 基于粒子群算法的高斯曲率最大值寻优

粒子群算法是一种模拟鸟类觅食的随机搜索算法,其算法原理是对单个粒子在搜索空间内搜索最优解,并将其标记为当前个体的极值;将所有个体极值进行共享,找到最优的个体极值作为群体最优解^[26];所有粒子根据当前的个体极值和群体极值进行更新。所有粒子具有2个属性:速度和位置,其中速度表征快慢,位置表征方向。粒子速度和位置更新公式为

$$v_{id}(t+1) = \omega v_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id}(t) - x_{id}(t)) + c_2 r_2 (p_{gd}(t) - x_{gd}(t)) \tag{11}$$

$$x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \tag{12}$$

$(i = 1, 2, \cdots, N; d = 1, 2, \cdots, D)$

式中 N ——粒子群个数

D ——空间维度

ω ——惯性权重因子

c_1 ——个体学习因子

c_2 ——群体学习因子

$r_1、r_2$ ——介于 $(0,1)$ 之间的随机数

p_{id} ——第 i 个粒子在 d 维的最优位置

p_{gd} ——整个粒子在 d 维的最优位置

v_{id} ——第 i 个粒子在 d 维的速度

x_{id} ——第 i 个粒子在 d 维的位置

惯性权重因子 ω 影响粒子搜索范围和精度: ω 越大全局搜索能力越强,局部搜索能力越弱,容易导致收敛精度较低, ω 越小局部搜索能力越强,全局搜索能力越弱,容易陷入局部最优。传统的 ω 优化采用线性递减的方式虽然可以加快收敛速度,但是收敛前期容易忽略最优值而导致全局搜索能力的降低^[27]。本文采用先增后减的方式进行优化,前期 ω 增大过程可以有效避免陷入局部最优,后期 ω 减小过程可以加快收敛速度,具体方式为

$$\omega = \begin{cases} \omega_0 + \frac{k_i}{k_{\max}}(\omega_{\max} - \omega_{\min}) & \left(\omega \leq \omega_{\max}, 0 \leq k_i \leq \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2}\right) \\ \omega_{\max} & \left(\omega > \omega_{\max}, 0 \leq k_i \leq \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2}\right) \\ \omega_0 - \left(\frac{k_i}{k_{\max}} - \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2k_{\max}}\right)(\omega_{\max} - \omega_{\min}) & \left(\frac{k_{\max} - k_{\min}}{2} < k_i \leq k_{\max}\right) \end{cases} \tag{13}$$

$(0.5 \leq \omega_{\min} < \omega_{\max} \leq 1)$

式中 ω_0 ——惯性权重初值,取 0.75

k_i ——当前迭代的次数

$k_{\min}$ ——最小迭代次数

$k_{\max}$ ——最大迭代次数

$\omega_{\min}$ ——惯性权重最小值

$\omega_{\max}$ ——惯性权重最大值

采用变化的学习因子避免粒子陷入局部最优,个体学习因子和群体学习因子的变化量为

$$c_1 = c_{r1} + \frac{k_i}{k_{\max}}(c_{\max1} - c_{r1}) \tag{14}$$

$$c_2 = c_{r2} + \frac{k_i}{k_{\max}}(c_{\max2} - c_{r2}) \tag{15}$$

式中 $c_{r1}、c_{r2}$ ——个体学习因子和群体因子初始值
 $c_{\max1}、c_{\max2}$ ——个体学习因子和群体因子的最大值

根据不同温度下蓝莓净光合速率模型的高斯曲率函数 k_c 构造适应度函数

$$f(C, I) = -k_c \tag{16}$$

粒子群算法流程如图 2 所示。

计算得到不同温度下蓝莓净光合速率模型高斯曲率最大值及其对应的光照强度和 CO_2 浓度点,计算结果如表 5 所示。

3.3 不同温度下光照、 CO_2 综合调控策略建立

根据表 5 中的数据,采用多项式拟合建立不同

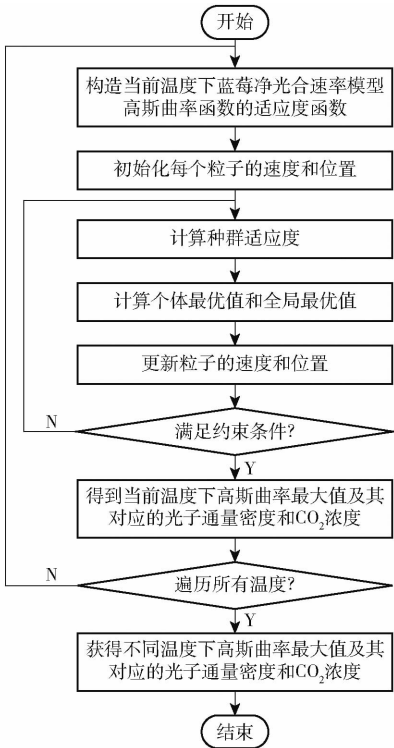


图 2 粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow diagram of PSO

表 5 不同温度下高斯曲率最大点及其对应的光照强度和 CO₂ 浓度

Tab. 5 Maximum point of Gaussian curvature and its corresponding light intensity and CO ₂ concentration at different temperatures				
温度/ ℃	高斯 曲率	光子通量密度/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	CO ₂ 浓度/ (μmol·mol ⁻¹)	光合速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
16	4. 624 4	580	1 014	7. 58
20	4. 176 8	693	1 170	12. 80
24	4. 087 9	729	1 244	16. 66
28	4. 189 5	763	1 281	18. 37
32	4. 186 8	743	1 269	17. 88
36	4. 280 6	721	1 252	16. 34
40	4. 697 3	692	1 175	12. 68
44	6. 546 8	585	1 026	7. 54

表 6 高斯曲率最大化调控与光合速率饱和点对比

Tab. 6 Comparison of maximum control of Gaussian curvature and saturation point of photosynthetic rate										
温度/ ℃	高斯 曲率	高斯曲率最大点			光合速率饱和点			降低率/%		
		光子通量密度/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	CO ₂ 浓度/ (μmol·mol ⁻¹)	光合速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光子通量密度/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	CO ₂ 浓度/ (μmol·mol ⁻¹)	光合速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	光子通量 密度	CO ₂ 浓度	光合 速率
16	4. 624 4	580	1 014	7. 58	1 750	1 608	9. 30	66. 84	36. 91	18. 51
20	4. 176 8	693	1 170	12. 80	1 778	1 612	15. 06	61. 05	27. 40	15. 02
24	4. 087 9	729	1 244	16. 66	1 835	1 605	19. 37	60. 29	22. 46	13. 98
28	4. 189 5	763	1 281	18. 37	1 850	1 604	21. 05	58. 75	20. 11	12. 75
32	4. 186 8	743	1 269	17. 88	1 828	1 609	20. 61	59. 33	21. 15	13. 25
36	4. 280 6	721	1 252	16. 34	1 808	1 596	18. 91	60. 14	21. 58	13. 59
40	4. 697 3	692	1 175	12. 68	1 729	1 548	14. 69	60. 00	24. 08	13. 63
44	6. 546 8	585	1 026	7. 54	1 443	1 392	8. 73	59. 46	26. 26	13. 58

温度下光照、CO₂ 综合调控策略,拟合结果为

$$I = -2.3172 \times 10^{-3} T^4 + 0.2840 T^3 - 13.4476 T^2 + 289.2565 T - 1616.8848$$

(16℃ ≤ T ≤ 44℃) (17)

$$C = -2.7515 \times 10^{-3} T^4 + 0.3320 T^3 - 15.8054 T^2 + 349.0236 T - 1703.8074$$

(16℃ ≤ T ≤ 44℃) (18)

光照强度与温度的多项式拟合中 R² 为 0.988 8, CO₂ 浓度与温度的多项式拟合中 R² 为 0.998 7,拟合效果如图 3 所示。

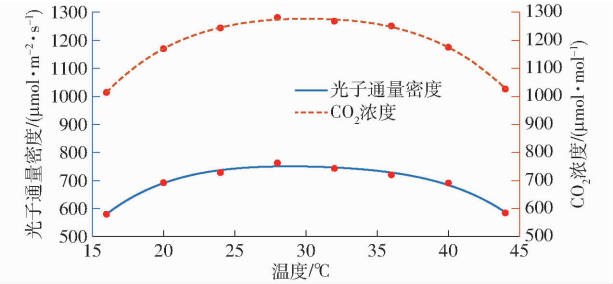


图 3 光照强度、CO₂ 浓度综合调控策略拟合曲线

Fig. 3 Integrated control strategy of light and CO₂

4 结果与讨论

4.1 理论调控效果对比

为验证不同温度下光照与 CO₂ 综合调控策略的效果,本文与不同温度下蓝莓光合速率饱和点进行对比,对比结果如表 6 所示。基于高斯曲率最大化的调控相比于光合速率饱和点调控,平均光照强度下降 60.73%,CO₂ 浓度下降 25.00%,而平均净光合速率仅下降 14.29%。充分说明,本文采用的方法在牺牲少量光合速率的情况下,大幅减少了光照和 CO₂ 的调控阈值,有效地节约了光照和 CO₂ 的施放成本。该方法对于温室作物光照、CO₂ 的调控具有高效节能的特征。

4.2 实际调控效果分析

为了验证本文提出的光照、CO₂ 综合调控策略的实际效果,选择 2021 年 5 月 28 日(室外最低气温 20℃,最高气温 30℃,阴天)、5 月 29 日(室外最低气温 21℃,最高气温 30℃,多云)2 天进行手动调控。调控时间为 08:00—18:00,调控时间段内室内相对湿度为 45%~70%。试验以小时为单位进行调控,整点时刻,取前 15 min 室内温度、光照强度、CO₂ 浓度均值作为当前时刻环境初始值。利用光照、CO₂ 综合调控策略获取整点时刻不同温度下的光照、CO₂ 调控目标值。采用 Li-6400XT 型便携式光合仪的控温模块、光源模块和 CO₂ 注入模块设定对应的温度、光照强度和 CO₂ 浓度测定蓝莓叶片的光合速率:当室内光照强度、CO₂ 浓度低于调控目标值时,以调控目标值作为设定值;否则以当前环境光照强度、CO₂ 浓度作为设定值。与光合速率饱和点进行对比,调控效果对比图如图 4 所示。从图 4g、4h 可以看出,采用本文建立的光照、CO₂ 综合策略可以有效增大蓝莓净光合速率。相比于饱和点调控,平均光照强度分别降低 59.44%(5 月 28 日)、59.61%(5 月 29 日),平均 CO₂ 浓度分别降低 20.14%(5 月 28 日)、20.36%(5 月 29 日),而平均光合速率仅降低 12.76%(5 月 28 日)、11.85%(5 月 29 日)。相比于自然环境下的光合速率,本文提出的调控策略平均光合速率提高了 2.43 倍(5 月 28 日)、1.87 倍(5 月 29 日)。

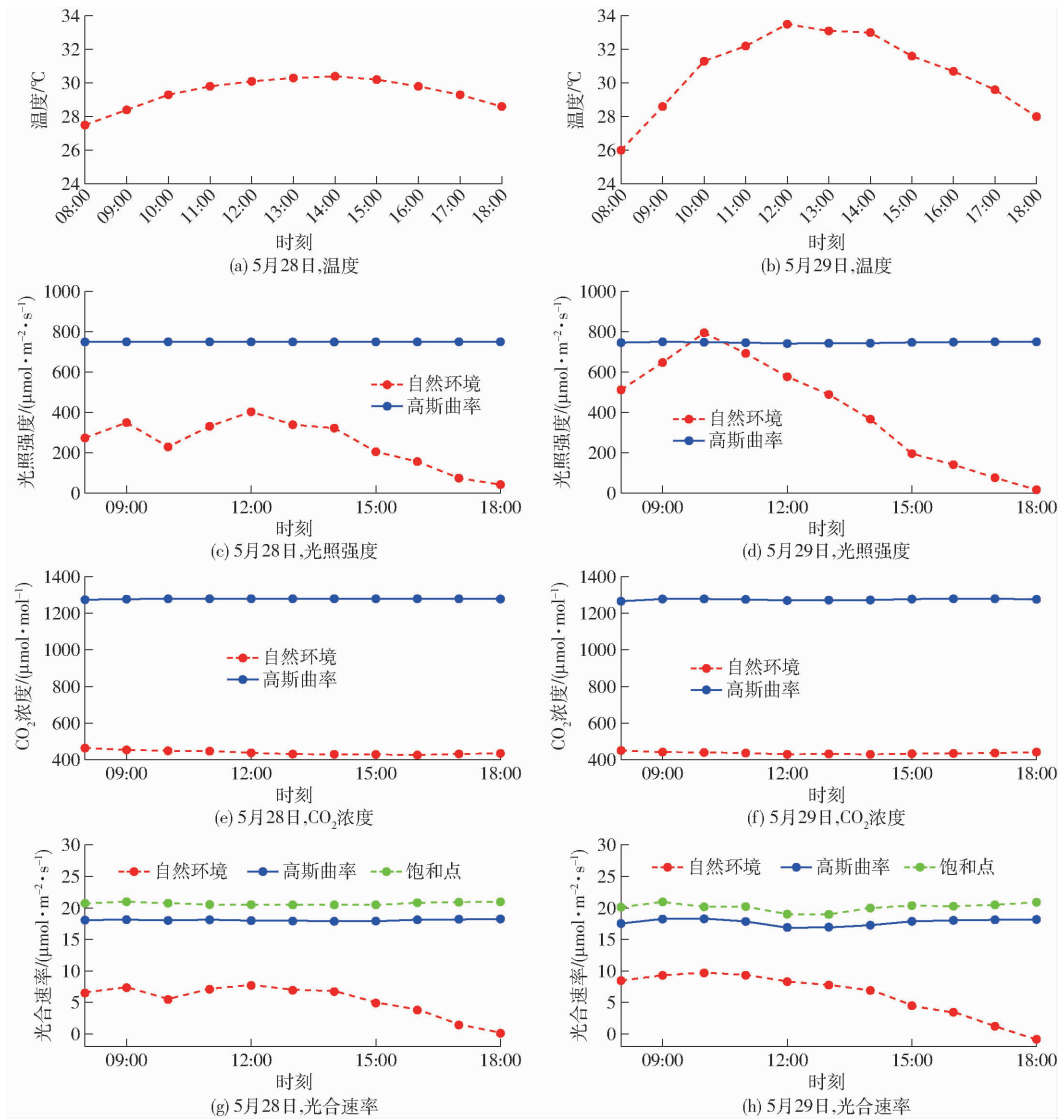


图 4 调控效果对比
Fig. 4 Control effect comparisons

5 结论

(1)以直角双曲线修正模型为基础,建立了不同温度下包含光照、CO₂ 的蓝莓净光合速率模型,不

同温度下模型评价指标中平均绝对误差在 0.283 2~0.551 9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间,平均相对误差在 0.085 9%~0.577 9% 之间,均方根误差 (RMSE) 在 0.379 1~0.716 6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间, R^2 达到

同温度下模型评价指标中平均绝对误差在 0.283 2~0.551 9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间,平均相对误差在 0.085 9%~0.577 9% 之间,均方根误差 (RMSE) 在 0.379 1~0.716 6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间, R^2 达到

0.980 8 以上,模型精度较高,能较好地反映蓝莓净光合速率与光照强度、CO₂ 浓度的变化关系。

(2)提出以高斯曲率最大时的光照强度、CO₂ 浓度为调控目标值,采用粒子群算法进行高斯曲率最大值寻优,获得不同温度下的光照、CO₂ 调控值。利用多项式拟合建立不同温度下蓝莓光照、CO₂ 综合调控策略,并且光照、CO₂ 综合调控策略精度较高,拟合结果中光照调控策略的 R^2 为 0.988 8,CO₂ 调控策略的 R^2 为 0.998 7。

(3)在不同温度下将基于高斯曲率最大化的光照、CO₂ 综合调控策略与蓝莓光合速率饱和点调

控策略进行对比发现,采用本文提出的调控策略相比于光合速率饱和点调控策略,平均光照强度下降 60.73%,CO₂ 浓度下降 25.00%,而平均净光合速率仅下降 14.29%。说明本文提出的方法在牺牲少量光合速率的情况下,可以大幅减少光照、CO₂ 的调控阈值,从而可以有效地节约光照、CO₂ 的施放成本。通过与自然环境下的光合速率对比发现,采用本文提出的光照、CO₂ 综合调控策略能大幅提升作物光合速率。充分说明,采用基于高斯曲率最大化的光照、CO₂ 综合调控策略兼具高效节能的特征。

参 考 文 献

[1] 彭舒,杨岑,邵显会,等. 外界因子对蓝莓生理特性影响的研究进展[J]. 安徽农业科学,2021,49(5):21-25.
PENG Shu, YANG Qin, SHAO Xianhui, et al. Research progress of effects of external factor on physiological characteristics of blueberry[J]. Anhui Agric. Sci., 2021, 49(5): 21-25. (in Chinese)

[2] 朱玉,黄磊,党承华,等. 高温对蓝莓叶片气孔特征和气体交换参数的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(1):218-225.
ZHU Yu, HUANG Lei, DANG Chenghua, et al. Effects of high temperature on leaf stomatal traits and gas exchange parameters of blueberry[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 218-225. (in Chinese)

[3] 吴思政,梁文斌,聂东伶,等. 高温胁迫对不同蓝莓品种光合作用的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(11):1-8.
WU Sizheng, LIANG Wenbin, NIE Dongling, et al. Effects of high temperature stress on photosynthesis of different blueberry varieties[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 1-8. (in Chinese)

[4] 李宁,王龙昌,郭文忠,等. 不同二氧化碳浓度与栽培方式对番茄生长的影响[J]. 北方园艺,2014(1):6-11.
LI Ning, WANG Longchang, GUO Wenzhong, et al. Effects of different carbon dioxide concentration and cultivation methods on growth of tomato[J]. Northern Horticulture, 2014(1): 6-11. (in Chinese)

[5] 张振花,袁宏霞,刘洋,等. 温室番茄对增施不同浓度 CO₂ 的光合响应[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(4):1010-1018.
ZHANG Zhenhua, YUAN Hongxia, LIU Yang, et al. Photosynthetic responses of tomato to different concentrations of CO₂ enrichment in greenhouse[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 1010-1018. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 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]. 农业机械学报,2015,46(8):239-245.
ZHANG Man, LI Ting, JI Yuhang, et al. Optimization of CO₂ enrichment strategy based on BPNN for tomato plants in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 239-245. (in Chinese)

[8] 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.
XIN Pingping, ZHANG Zhen, WANG Zhiyong, et al. Carbon dioxide optimal control model based on support vector-improved fish swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 249-256. (in Chinese)

[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.
HU Jin, TIAN Ziwei, WANG Jiankang, et al. Carbon dioxide optimal control model based on discrete curvature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 337-346. (in Chinese)

[10] XV Le, WEI Ruihua, XV Lihong. Optimal greenhouse lighting scheduling using canopy light distribution model: a simulation study on tomatoes[J]. Lighting Research and Technology, 2018, 52(2): 233-246.

[11] 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)

[12] 单慧勇,李晨阳,张程皓,等. 效益优先的温室光照优化调控模型研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(2):66-73.
SHANG Huiyong, LI Chenyang, ZHANG Chenghao, et al. Optimal control model of greenhouse light gas coupling under limited CO₂ resources[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(2): 66-73. (in Chinese)

[13] 徐立鸿,徐赫,蔚瑞华. 温室蓝莓光温协调优化模型与控制策略研究[J]. 农业机械学报,2022,53(1):360-369.
XU Lihong, XU He, WEI Ruihua. Optimal model of blueberry greenhouse light and temperature coordination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 360-369. (in Chinese)

[14] 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.

BAI Jinghua. Target parameter acquisition method of co-regulation of CO_2 - light in cucumber juvenile based on photosynthetic rate prediction model[D]. Yangling:Northwest A&F University,2019. (in Chinese)

- [15] 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.

XIN Pingping. Multi-factor coordination control model and method of greenhouse environment for benefit-priority [D]. Yangling:Northwest A&F University.2019. (in Chinese)

- [16] 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.

SHAN Huiyong, LI Chenyang, ZHANG Chenghao, et al. Optimal control model of greenhouse light gas coupling under limited CO_2 resources[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci., 2021,37(2):471-479. (in Chinese)

- [17] 徐立鸿,蔚瑞华,苏远平,等. 一种温室环境多因子协调节能优化控制方法:201710261551.7[P]. 2017-08-15.

- [18] JOHNSON I R, THORNELY J H M, FRANTZ J M, et al. A model of canopy photosynthesis incorporating protein distribution through the canopy and its acclimation to light, temperature and CO_2 [J]. Annals of Botany,2010,106(5):735-749.

- [19] 徐德冰,王明月,祖蕾,等. 适合蓝莓的光合响应曲线拟合模型研究[J]. 中国农机化学报,2017,38(10):33-37.

XU Debing, WANG Mingyue, ZU Lei, et al. Study on photosynthetic response curves fitting model for blueberry[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(10):33-37. (in Chinese)

- [20] 叶子飘,于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报,2008,32(6):1356-1361.

YE Zipiao, YU Qiang. Comparison of new and several classical models of photo synthesis in response to irradiance[J]. Journal of Plant Ecology(Chinese Version), 2008,32(6):1356-1361. (in Chinese)

- [21] 叶子飘,于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型的比较[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(6):771-775.

YE Zipiao, YU Qiang. Comparison of a new model of light response of photosynthesis with traditional models[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007,38(6):771-775. (in Chinese)

- [22] 叶子飘,李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版),2010,31(3):38-44.

YE Zipiao, LI Jinsheng. Comparative investigation light response of photosynthesis on non-rectangular hyperbola model and modified model of rectangular hyperbola[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2010, 31(3):38-44. (in Chinese)

- [23] 侯加林. 温室番茄生长发育模拟模型的研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.

HOU Jialin. Study on model to greenhouse tomato growth and development[D]. Beijing:China Agricultural University,2005. (in Chinese)

- [24] 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)

- [25] 马骊溟,徐毅,李泽湘. 基于高斯曲率极值点的散乱点云数据特征点提取[J]. 系统仿真学报,2008,20(9):2341-2344.

MA Liming, XU Yi, LI Zexiang. Extracting feature points for scattered points based on Gauss curvature extreme point[J]. Journal of System Simulation, 2008,20(9):2341-2344. (in Chinese)

- [26] 陈教料,陈教选,杨将新,等. 基于自加速遗传粒子群算法的半封闭式温室能耗预测[J]. 农业工程学报,2015,31(24):186-193.

CHEN Jiaoliao, CHEN Jiaoxuan, YANG Jiangxin, et al. Prediction on energy consumption of semi-closed greenhouses based on self-accelerating PSO-GA[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(24):186-193. (in Chinese)

- [27] 刘红军,魏宇祥. 基于人工鱼群和粒子群优化混合算法的侧铣刀轴轨迹规划[J]. 中国机械工程,2018,29(23):2815-2820.

LIU Hongjun, WEI Yuxiang. Side milling cutter axis trajectory planning based on the hybrid algorithm of artificial fish swarm and particle swarm optimization[J]. China Mechanical Engineering,2018,29(23):2815-2820. (in Chinese)