

温室蓝莓光温协调优化模型与控制策略研究

徐立鸿 徐 赫 蔚瑞华
(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对目前温室光温调控目标值优化未综合考虑提升作物净光合速率和生产效益的问题,基于 NSGA-Ⅱ 多目标遗传算法进行光温协调优化模型研究。分别建立蓝莓光温耦合净光合速率模型与 Venlo 型温室夏季降温补光能耗模型,采用粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 进行参数辨识与验证分析,得到较为准确的目标函数模型;以蓝莓净光合速率最大、Venlo 型温室降温能耗最小为优化目标,采用 NSGA-Ⅱ 算法对光温协调优化模型进行模拟寻优,得到 Pareto 最优解集。为进一步验证优化效果,对最优解集采取不同选取策略,分别与优化前作对比。结果显示,在维持蓝莓光合速率基本不变的情况下可降耗约 21.3%;在优先考虑种植效益的前提下,可在降耗 8.6% 的同时平均增加光合速率约 28.9%。研究结果可为考虑作物光合提升与降耗综合目标的温室蓝莓光温协调优化模型与控制策略选取提供理论基础。

关键词: 温室; 蓝莓; 光合作用模型; 光温协调; 经济效益; 多目标优化

中图分类号: S625.5⁺1; S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)01-0360-10 **OSID:** 

Optimal Model of Blueberry Greenhouse Light and Temperature Coordination

XU Lihong XU He WEI Ruihua
(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Photosynthesis directly affects the quality and growth of blueberries, and the rate of crop photons is mainly influenced by temperature and photon yield density. At present, most greenhouse control did not consider the coordination of light temperature, and the actual energy consumption of greenhouses, not only resulting in meaningless waste of energy, but also creating a greenhouse small-climate environment which reduced the efficiency of blueberry photosynthesis. In order to solve the above problems, considering the photosynthemum and greenhouse cooling energy consumption during the spring and summer when blueberry was in flower fruit period, and the temperature and lighting control value of greenhouse were optimized by multi-target optimization algorithm. Firstly, the blueberry photosynthing rate model with temperature correction was established, which was based on the results of the temperature and photon pass density nesting test. Using a right-angled bi-curve correction model with temperature correction to model the blueberry photosynthetic rate. The model fitting results had a coefficient of determination (R^2) of 0.983 6, an average square root error of 0.570 1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and an average relative error of 3.86%, which can better reflect the relationship between blueberry photosynthing rate and temperature and light. Then a greenhouse energy consumption model was established, and the optimal solution of Pareto was solved by using NSGA-Ⅱ multi-objective optimization algorithm with greater net photosynthing rate and energy saving as the optimization goal. In order to further illustrate the optimization effect, different selection strategies were adopted for the optimization solution, which can reduce the energy consumption by about 21.3% while maintaining the photosynthetic rate of blueberries basically unchanged; under the premise of giving priority to planting benefits, the energy consumption can be reduced by 8.6% while the average increase of the photosynthetic rate by about 28.9%. The results can provide a theoretical basis for analyzing the physiological characteristics of crops and optimizing the greenhouse light temperature regulation setting. Greenhouse decision makers or control algorithms can use this method to set greenhouse temperature, light regulation settings. At the same time,

the research method can also be applied to the setting value optimization of other crops which missing yield models in greenhouse production.

Key words: greenhouse; blueberry; photosynthetic rate model; light and temperature coordination; economic benefit; multi-objective optimization

0 引言

南方种植的蓝莓花果期在 3—7 月^[1-2],期间需要适宜温度与足量光照。蓝莓作为喜光性作物,光合作用为其生长提供了最基础的碳水化合物,以提升果实品质与产量^[3]。因此,通过调控保持合适的光温环境对温室蓝莓生长十分必要。文献[4-6]表明温度和光子通量密度对蓝莓光合作用影响较大。然而传统温室普遍采用固定上下限的方法来补光,既没有考虑不同作物实际需求^[7],也没考虑光照和温度对作物光合作用的协同影响,容易导致能源浪费。

在补光控制方面,史小燕等^[8]针对光照光质、光照强度及光照时间对作物发育的影响,设计了自适应精确补光的光照调控系统。苏战战等^[9]设计了基于 RF-GSO 模型的温室番茄自适应调光系统。也有学者结合经济效益对补光控制进行优化。CLAUSEN 等^[10]研究了实时电价动态光照条件下番茄经济效益最优问题,在工程层面上实现了动态经济效益最优算法。XU 等^[11]结合作物产量模型对番茄补光调控进行多目标寻优,降低温室能耗。但现有的效益优化研究大多基于作物产量模型,却缺少对蓝莓产量模型的研究,无法直接对产量与能耗两个等量纲指标进行优化。

近年来,温室作物光合多因子优化调控领域也得到了广泛研究^[12-16]。虽在一定程度上考虑了环境因子耦合,却未综合考虑温度与光照的协同调控,以及温室降温与补光控制带来的效益问题。

关于蓝莓光合速率模型,国内外研究不多。徐德冰等^[17]使用 4 种生化模型对蓝莓光合速率进行拟合与辨识,得出直角双曲线修正模型能更好拟合蓝莓光合响应曲线的结论。吴思政等^[18]使用直角双曲线修正模型对 4 个蓝莓品种进行光合速率的比较。以上研究没有考虑温度对光合速率的影响,为了优化光温调控值,首先需建立带温度修正的蓝莓光合速率模型。其次,针对作物净光合速率与温室能耗具有不同的量纲,不能采用综合单目标进行优化问题,通过多目标寻优算法获取优化解。针对以上问题,本文以蓝莓光合速率和温室能耗作为目标函数,对光温调控值进行多目标寻优,以期对温室控制算法提供温度目标设定值和光照目标设定值的决

策依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 5—6 月在同济大学位于江苏省昆山市的 Venlo 型温室基地内进行,其地理位置为 121°11'E、31°33'N。试验温室跨度为 17 m,开间为 17.5 m,脊高为 7.2 m,檐高为 5.7 m,温室总体积为 1 918.875 m³。供试蓝莓品种为 3 年生的南高丛品种“安娜”。选择长势均一的 3 年苗植于盛有营养土的塑料盆内(高 31 cm,上口径 27.5 cm,底径 22 cm),每盆 1 株,共种植 50 株,按 50 cm×40 cm 行株距随机摆放。营养土以泥炭土为主,加入腐熟松针与酸性沙质土壤,pH 值为 5.2。试验期间,施肥、浇水等管理均按照常规进行,不喷施任何农药和激素。

试验温室内外分别安装昆仑海岸公司的气象传感器。传感器数据每 1 min 采集 1 次,数据由同济大学团队自主研发的物联网温室数据采集与控制系统自动读取并保存记录。

1.2 试验方法

采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 型便携式光合仪测定蓝莓叶片净光合速率。试验随机选取长势一致的蓝莓植株为测量对象,选择自上而下第 8 叶片作为功能叶,于 08:00—11:00 和 14:30—17:30 之间进行试验,温室内实际相对湿度为 45%~75%^[14]。

使用光合速率测定仪的不同子模块人工营造测试过程叶室小环境所需的二氧化碳浓度、温度、光子通量密度等。其中,利用二氧化碳注入模块(6400-01)控制二氧化碳浓度维持在室内常态值 400 μL/L;利用控温模块构造 16、20、22、24、26、28、30、32、35、38、41、44℃等 12 个温度梯度;利用 LED 光源模块(6400-02B)构造 2 100、1 900、1 700、1 500、1 300、1 200、1 100、1 000、900、800、700、600、500、400、300、200、100、50、30、0 μmol/(m²·s)共 20 个光子通量密度梯度,共进行 240 组试验。为减少试验数据偶然性,每组试验随机选取 4 株幼苗,每株幼苗测试 3 次,即形成 2 880 个试验样本数据。

2 蓝莓光合速率与温室能耗模型构建

2.1 蓝莓光温耦合光合速率模型

作物的净光合速率与多种环境因子相关。采用

直角双曲线修正模型^[17]对春夏季蓝莓净光合速率进行建模,其拟合方程式为

$$P_n(I) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \tag{1}$$

式中 P_n ——净光合速率
 I ——光子通量密度
 α ——植物光合作用对光响应曲线在 $I = 0$ 时的斜率,即初始量子效率
 R_d ——暗呼吸速率
 β ——修正系数 γ ——曲线弯曲度

为了充分考虑温度 T 对蓝莓净光合速率的影响,本文按照 Blackman 的限制因子律^[21],在直角双曲线修正模型的基础上进行温度修正。

由表 1 可知,在不同光子通量密度下,当温度为

16 ~ 26℃ 时,净光合速率随温度升高而增加;在 26 ~ 30℃ 时,净光合速率随温度升高缓缓增加,并达到最大;在 30 ~ 35℃ 时,净光合速率随温度升高缓缓下降;在 35℃ 之后,净光合速率随温度升高而快速降低。因此温度对净光合速率的修正在春夏季温度范围内可以表示为

$$f(T) = a \sin \left(\frac{\pi}{28} (T - 16) \right) + b \quad (16^{\circ}\text{C} \leq T \leq 44^{\circ}\text{C}) \tag{2}$$

式中 a 、 b ——系数
综上所述,建立光温耦合光合速率模型为

$$P_n(I, T) = \left(a \sin \left(\frac{\pi}{28} (T - 16) \right) + b \right) \left(\alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \right) \tag{3}$$

表 1 试验所得光合速率

Tab. 1 Test values of photosynthetic rate

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

温度/ ℃	光子通量密度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$									
	0	30	50	100	200	300	400	500	600	700
16	-0.98 ± 0.01	0.39 ± 0.07	1.12 ± 0.03	2.62 ± 0.01	3.91 ± 0.05	4.79 ± 0.03	5.29 ± 0.05	5.60 ± 0.08	5.79 ± 0.09	5.97 ± 0.06
20	-0.33 ± 0.00	0.71 ± 0.01	1.32 ± 0.12	2.84 ± 0.02	4.56 ± 0.04	5.99 ± 0.01	6.66 ± 0.11	7.18 ± 0.10	7.13 ± 0.00	8.29 ± 0.04
22	-0.36 ± 0.01	1.12 ± 0.03	1.97 ± 0.08	3.40 ± 0.05	5.47 ± 0.01	6.70 ± 0.07	7.27 ± 0.04	7.64 ± 0.03	7.94 ± 0.02	8.20 ± 0.07
24	-0.34 ± 0.01	1.15 ± 0.06	2.11 ± 0.02	4.80 ± 0.09	8.02 ± 0.04	9.90 ± 0.06	11.02 ± 0.09	11.70 ± 0.03	12.01 ± 0.07	12.55 ± 0.03
26	-0.73 ± 0.03	1.08 ± 0.02	2.14 ± 0.01	4.46 ± 0.06	8.04 ± 0.09	10.10 ± 0.01	10.76 ± 0.04	12.12 ± 0.01	12.74 ± 0.06	12.99 ± 0.11
28	-0.77 ± 0.00	1.04 ± 0.03	2.14 ± 0.05	4.43 ± 0.02	7.89 ± 0.02	10.15 ± 0.08	11.48 ± 0.03	12.37 ± 0.04	12.93 ± 0.07	13.38 ± 0.02
30	-0.99 ± 0.02	1.21 ± 0.01	1.92 ± 0.02	4.19 ± 0.04	7.67 ± 0.11	10.07 ± 0.05	11.60 ± 0.02	13.89 ± 0.06	13.16 ± 0.04	13.52 ± 0.08
32	-1.14 ± 0.05	0.64 ± 0.09	1.73 ± 0.10	3.94 ± 0.10	7.99 ± 0.01	9.76 ± 0.02	11.31 ± 0.08	12.30 ± 0.09	13.11 ± 0.09	13.61 ± 0.09
35	-0.20 ± 0.00	0.23 ± 0.11	1.42 ± 0.09	3.54 ± 0.08	7.08 ± 0.00	9.92 ± 0.03	10.97 ± 0.05	12.08 ± 0.05	12.81 ± 0.03	12.63 ± 0.05
38	-1.18 ± 0.01	0.69 ± 0.04	1.68 ± 0.03	3.47 ± 0.03	7.14 ± 0.05	9.42 ± 0.12	10.92 ± 0.00	11.68 ± 0.07	12.61 ± 0.05	13.05 ± 0.10
41	-1.57 ± 0.01	-0.41 ± 0.05	0.83 ± 0.05	2.09 ± 0.05	6.11 ± 0.02	8.07 ± 0.07	9.50 ± 0.07	10.49 ± 0.04	11.09 ± 0.06	11.32 ± 0.07
44	-1.67 ± 0.03	0.26 ± 0.06	1.20 ± 0.00	2.44 ± 0.07	4.81 ± 0.05	6.70 ± 0.04	7.96 ± 0.01	8.83 ± 0.08	9.93 ± 0.04	10.38 ± 0.11

温度/
℃

光子通量密度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$

	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 500	1 700	1 900	2 100
16	6.23 ± 0.02	6.62 ± 0.05	6.79 ± 0.06	6.85 ± 0.06	7.06 ± 0.03	6.97 ± 0.07	7.15 ± 0.08	7.21 ± 0.09	7.12 ± 0.04	7.22 ± 0.08
20	7.92 ± 0.10	8.11 ± 0.09	8.50 ± 0.01	8.69 ± 0.02	8.77 ± 0.11	9.28 ± 0.04	9.07 ± 0.11	9.37 ± 0.08	9.55 ± 0.03	9.78 ± 0.06
22	8.43 ± 0.06	8.61 ± 0.00	8.82 ± 0.10	8.94 ± 0.01	9.00 ± 0.05	9.18 ± 0.02	9.39 ± 0.09	9.65 ± 0.02	9.77 ± 0.01	10.10 ± 0.05
24	12.63 ± 0.05	12.79 ± 0.10	12.96 ± 0.08	12.94 ± 0.5	13.04 ± 0.10	12.96 ± 0.04	12.80 ± 0.09	12.85 ± 0.03	12.75 ± 0.05	12.59 ± 0.01
26	13.38 ± 0.03	13.64 ± 0.04	13.83 ± 0.06	14.04 ± 0.12	14.05 ± 0.09	14.21 ± 0.05	14.23 ± 0.06	14.54 ± 0.07	14.75 ± 0.03	14.16 ± 0.07
28	13.81 ± 0.01	13.97 ± 0.04	14.12 ± 0.00	14.32 ± 0.13	14.39 ± 0.05	14.57 ± 0.02	14.64 ± 0.08	14.63 ± 0.04	14.62 ± 0.07	14.59 ± 0.04
30	13.92 ± 0.08	14.15 ± 0.03	14.43 ± 0.09	14.56 ± 0.03	14.66 ± 0.06	14.75 ± 0.03	14.85 ± 0.05	14.90 ± 0.11	14.68 ± 0.06	14.27 ± 0.03
32	13.97 ± 0.06	14.13 ± 0.06	14.37 ± 0.05	14.51 ± 0.08	14.55 ± 0.01	14.40 ± 0.11	14.67 ± 0.01	14.62 ± 0.07	14.50 ± 0.02	14.47 ± 0.02
35	13.63 ± 0.02	13.87 ± 0.07	13.53 ± 0.04	14.05 ± 0.05	13.63 ± 0.15	13.77 ± 0.07	13.66 ± 0.02	13.40 ± 0.03	12.95 ± 0.13	11.94 ± 0.11
38	13.22 ± 0.04	12.54 ± 0.03	13.05 ± 0.05	12.52 ± 0.07	12.33 ± 0.04	11.37 ± 0.03	10.88 ± 0.03	9.87 ± 0.01	8.71 ± 0.11	7.24 ± 0.07
41	11.43 ± 0.06	10.55 ± 0.01	10.65 ± 0.10	10.43 ± 0.03	10.06 ± 0.06	9.27 ± 0.12	8.29 ± 0.07	6.89 ± 0.04	5.51 ± 0.05	4.19 ± 0.09
44	10.51 ± 0.10	10.82 ± 0.05	10.92 ± 0.03	9.79 ± 0.11	9.38 ± 0.07	8.35 ± 0.00	7.18 ± 0.05	5.41 ± 0.06	4.69 ± 0.09	3.85 ± 0.10

2.2 温室降温补光简化模型

温室内的温度变化受各种传热传质过程的影响^[22],对于 Venlo 型温室环境模型,许多学者对其进行了研究^[22-25]。在春夏季,温室不仅受室内自然通风、湿帘风机等调控方式的影响,还受到太阳辐

射、覆盖层热交换、作物蒸腾和土壤热交换等因素的影响,如图 1 所示^[26]。

由于试验温室的降温手段主要为自然通风和湿帘风机,因此降温能耗表示为

$$Q_{\text{cool}} = Q_{\text{pf}} + Q_{\text{vent}} \tag{4}$$

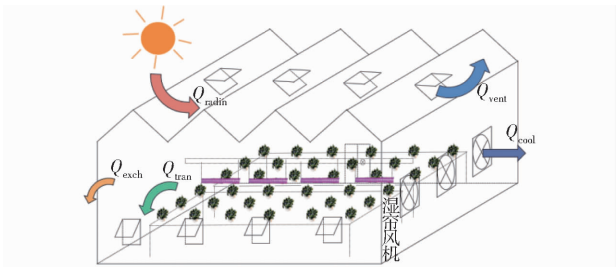


图 1 试验温室春夏季内外热交换

Fig. 1 Energy exchange between greenhouse and outside in summer

式中 Q_{cool} ——温室降温能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$
 Q_{pf} ——湿帘风机的降温能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$
 Q_{vent} ——自然通风引起的通风换热能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$
基于热量平衡原理,建立春夏季温室降温能耗模型^[27]为

$$Q_{pf} + Q_{vent} = -\rho_a V_g C_a \frac{dT_{in}}{dt} + Q_{radin} - Q_{exch} - Q_{tran} - Q_{soil} \quad (5)$$

式中 ρ_a ——空气密度, kg/m^3
 V_g ——温室体积, m^3
 C_a ——空气比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
 T_{in} ——温室室内的空气温度, $^{\circ}\text{C}$
 Q_{radin} ——进入温室的太阳辐射能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$
 Q_{exch} ——温室内空气通过覆盖材料与室外空气进行热交换的传导能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$
 Q_{tran} ——作物蒸腾吸热能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$
 Q_{soil} ——温室内空气与土壤之间的换热能量, $\text{kW} \cdot \text{h}$

由于室内作物蒸腾与太阳辐射有密切关系,一般随太阳辐射的增强而增强,为简化模型,合并太阳辐射项和作物蒸腾吸热项。

根据辐射热交换、热传导能量交换和传质传热能量交换等定理和试验温室的特点,温室能耗方程^[25,27]为

$$Q_{cool}(t) = -\rho_a V_g C_a \frac{T_{in}(t) - T_{in}(t - \Delta t)}{\Delta t} + A_g \varepsilon \tau Q_{rad}(t) - \varepsilon_{12} A_c \sigma [(T_{in}(t) + 273)^4 - T_{sky}^4(t)] X_l - A_c \zeta (T_{in}(t) - T_{out}(t)) - 1.86 A_g (T_{in}(t) - T_{soil}(t))^{4/3} \quad (6)$$

$$T_{sky} = 0.055 2 (T_{out} + 273)^{1.5} \quad (7)$$

其中 t ——时间序列
 Δt ——相连 t 时间序列的时间间隔
 A_g ——温室占地面积, m^2
 ε ——遮阳网透光率
 τ ——覆盖材料透光率
 $Q_{rad}(t)$ ——室外辐射通量密度, W/m^2

ε_{12} ——覆盖材料和空气之间的发射率
 A_c ——温室覆盖层的表面积, m^2
 σ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 T_{sky} ——天空有效温度, K
 X_l ——长波辐射修正系数
 T_{out} ——室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$
 ζ ——温室覆盖材料传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 T_{soil} ——室内土壤地表温度, $^{\circ}\text{C}$

此外,春夏季为蓝莓作物花果生长期,光照对蓝莓生长必不可少。补光能耗根据灯具光效 e 、灯光功率 ΔL 和补光时间可表示为

$$Q_{Light} = \int e \Delta L dt \quad (8)$$

综上所述,对于试验温室,春夏季补光降温总能耗模型可表示为

$$Q_{TL} = Q_{cool} + Q_{Light} \quad (9)$$

2.3 基于粒子群算法的能耗模型参数辨识

本文能耗模型参数辨识算法主要使用粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO),它源自于对鸟群捕食行为的研究,是一种进化计算技术,其基本思想是通过群体中个体之间的协作和信息共享来寻求最优解^[28]。在粒子群算法中,每个粒子都具有位置 x_i 和速度 v_i ,并可根据目标函数来计算当前所在位置的适应度。群体中每个粒子在寻优迭代过程中速度和位置更新公式为

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (P_i^k - x_i^k) + c_2 r_2 (g - x_i^k) \quad (10)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (11)$$

式中 v_i^k ——第 i 个粒子在第 k 次种群进化中的速度
 P_i^k ——第 i 个粒子在第 k 次进化后的局部最优解

g ——全局最优解
 x_i^k ——第 i 个粒子在第 k 次进化中的位置
 w ——惯性权重
 c_1, c_2 ——学习因子(加速度系数)
 r_1, r_2 ——0~1 之间的随机数

根据对简化温室能耗模型的构建,设置粒子群算法的适应度计算式为

$$f_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_i(t) - Q_{real,i}(t))^2} \quad (12)$$

式中 n ——时间序列最大值
 $Q_i(t)$ ——第 i 个粒子的第 t 个时间序列经过模型计算后的能耗
 $Q_{real,i}(t)$ ——第 i 个粒子第 t 个时间序列的真实能耗

算法主要流程为:
(1)初始化计算参数,并初始化粒子群的群体

规模 N 、每个粒子的速度 v_i 和位置 x_i 。

(2) 计算每个粒子的个体适应度 f_i^k 。

(3) 对每个粒子, 如果其适应度 f_i^k 和其个体极值 $P_{best,i}$ 比较后得到 $f_i^k < P_{best,i}$, 更新个体极值 $P_{best,i}$; 如果其适应度 f_i^k 和全局极值 g_{best} 比较后得 $f_i^k < g_{best}$, 更新全局极值 g_{best} 。

(4) 根据式 (10)、(11) 更新每个粒子速度 v_i^{k+1} 和位置 x_i^{k+1} 。

(5) 判断是否满足结束条件 (误差小于设定误差 ε_0 或达到最大迭代次数), 如果满足则输出参数辨识结果, 否则返回步骤 (2)。

3 光温协调多目标优化模型

温室内温度和光照强度均影响蓝莓净光合作用速率, 而净光合速率决定了作物生长速率。由于净光合速率 P_n 不代表产量和价值, 与环境调控能耗 Q_{TL} 为不同量纲, 无法综合成一个目标, 不能采用综合单目标进行优化问题。因此需采用多目标优化方法找到这两个目标的 Pareto 优化解。

3.1 调控目标函数与约束条件

两个目标优化问题的数学表达式为

$$\min f_1(\boldsymbol{X}) = Q_{TL} = Q_{cool} + Q_{Light} \tag{13}$$

$$\max f_2(\boldsymbol{X}) = P_n(T, I) \tag{14}$$

其中 $\boldsymbol{X} = (T_{aim}, I_{aim})$ (15)

式中 $\boldsymbol{X}$ ——优化变量

T_{aim} ——室内温度目标调控值, $^{\circ}\text{C}$

I_{aim} ——室内光照目标调控值, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

根据试验温室夏季实际室内温度和补光上限, 设置约束条件。综上, 考虑蓝莓光合作用的温室环境多目标调控值优化问题可具体描述为

$$\begin{cases} \min F(\boldsymbol{X}) = f_1(\boldsymbol{X}) - f_2(\boldsymbol{X}) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 16^{\circ}\text{C} \leq T_{aim} \leq T_{start} \\ I_{start} \leq I_{aim} \leq I_{end} \end{cases} \end{cases} \tag{16}$$

式中 $F(\boldsymbol{X})$ ——目标函数

T_{start} ——初始温度, $^{\circ}\text{C}$

I_{start} ——初始光照, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

I_{end} ——补光上限, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

3.2 多目标优化算法

选取温度调控目标值和光照调控目标值进行优化, 使温室整体能耗尽可能小, 蓝莓光合速率尽可能大, 此属于多目标优化。对于多目标优化问题, 存在一个最优解集, 为 Pareto 最优解。基于已建立的蓝莓作物光合速率模型和温室能耗模型, 使用 NSGA-II 算法进行全局搜索, 得到 Pareto 最优前沿解。

NSGA-II 算法是由 DEB 提出的一种多目标遗传算法。该算法所持有的精英保留策略和多样性维持机制可以确保其计算结果的收敛性与多样性^[19], 其流程如图 2 所示。

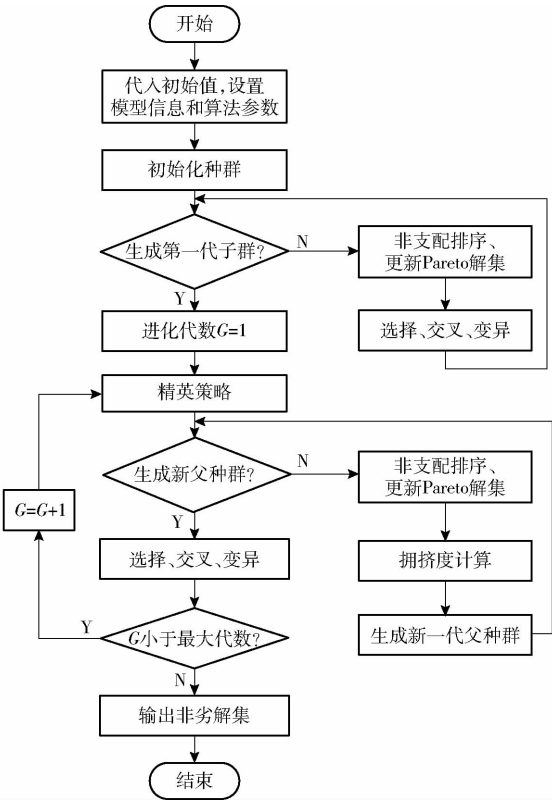


图 2 NSGA-II 算法流程图
Fig. 2 Steps of NSGA-II

4 结果与分析

4.1 蓝莓光合速率模型验证与分析

随机选择表 1 中 80% 的数据作为训练集, 20% 作为测试集。利用多元非线性回归对光响应参数进行拟合, 式中各参数的值为: $a = 0.1137$, $b = 0.1349$, $\alpha = 0.3104$, $\beta = 1.5654 \times 10^{-4}$, $\gamma = 0.0032$, $R_d = 1.0376 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

拟合完成后, 将实际值与预测值对比作为基准, 选用均方根误差 (Root mean square error, RMSE)、平均相对误差 (Mean relative error, MRE)、平均绝对误差 (Mean absolute error, MAE) 作为评价指标^[28]。模型拟合结果评价指标: MAE 为 $0.4985 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, MRE 为 3.86%, RMSE 为 $0.5701 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 决定系数为 0.9836。

拟合得到的三维曲面如图 3 所示, 测试集实测点与预测值之间的相关性如图 4 所示。

由图 3 可知, 在相同温度条件下, 蓝莓净光合速率随光子通量密度增大而增加, 在光饱和点处获得光合速率最大值; 随着光子通量密度进一步增加, 蓝莓净光合速率下降; 在相同光子通量密度的前提下,

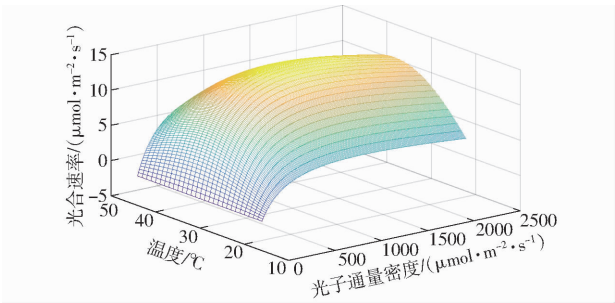


图 3 不同光子通量密度与温度作用下所得的光合速率

Fig. 3 Photosynthetic rate values under different photon flux densities and temperatures

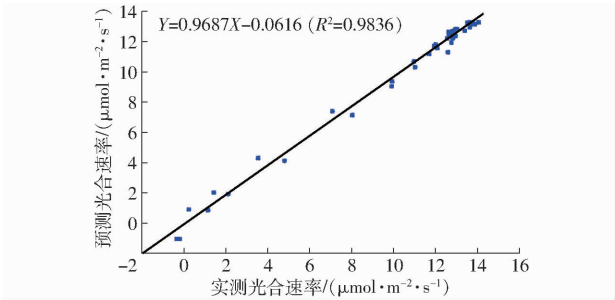


图 4 测试集光合速率实测值与预测值的相关性

Fig. 4 Correlation of measured photosynthetic rate and simulated values

蓝莓净光合速率随温度的变化也呈先上升后下降的趋势,此规律与前人研究结果^[8,17-18]相符,说明试验方案和模型结果的合理性。结合图 4 可知,模型拟合决定系数为 0.983 6,相关直线斜率为 0.968 7,纵坐标截距为 -0.061 6,表明两者实测值与预测值之间高度线性相关。本模型充分考虑了光照和温度两个因子之间的交互作用,可以作用于多目标光温调控优化。

4.2 温室能耗简化模型辨识与验证

选取试验温室 2020 年 5 月 18—21 日连续 4 d 的数据作为模型优化辨识的数据,并选取与辨识数据相连的 2020 年 5 月 22—24 日气象数据对降温能耗简化模型进行验证,设置粒子群算法迭代次数为 10 000,种群规模为 500。根据试验温室传感器实测温室内外环境参数和能耗对物理模型中的参数进行初步分析,划分了模型中的待辨识参数 X_l 、 ε 、 τ 和 ζ 。经过辨识可得均方根误差为 1.622 5 kW·h。结合辨识结果与文献[25-27]对确定参数的取值,模型中各参数如表 2 所示。

为进一步验证模型的准确性,选用 2020 年 5 月 25 日—6 月 3 日连续 10 d 的气象数据代入温室降温能耗简化模型,温室日降温能耗总量预测值和实际值比较如表 3 所示。由表 3 可以看到能耗的预测准确率不小于 81.03%,证明本文所建能耗模型在春夏季具有较高的准确性。

表 2 能耗模型参数

Tab. 2 Parameters of energy consumption model	
参数	数值
空气密度 $\rho_a/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.2
空气比热容 $C_a/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 008
覆盖材料和空气之间的发射率 ε_{12}	0.818
长波辐射修正系数 X_l	0.59
遮阳网透光率 ε	0.56
覆盖材料透光率 τ	0.79
温室覆盖材料传热系数 $\zeta/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	2.28

表 3 温室日降温能耗总量预测值和实际值对比

Tab. 3 Comparisons of actual and predicted daily cooling energy consumptions in greenhouse				
日期	日太阳辐射 总量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$)	室外日均 温度/ $^{\circ}\text{C}$	温室实际 日耗电总量/ ($\text{kW}\cdot\text{h}$)	相对误 差/%
05-25	1.127	27.98	35.510	5.83
05-26	1.808	24.65	24.713	4.61
05-27	2.694	26.24	47.160	7.38
05-28	1.956	24.71	27.849	11.86
05-29	0.827	22.98	8.118	18.97
05-30	1.640	26.34	37.428	5.79
05-31	0.495	24.08	5.397	12.35
06-01	1.296	30.26	19.185	9.25
06-02	0.880	26.69	10.151	1.92
06-03	1.158	28.90	13.186	15.24

4.3 多目标优化模型结果分析

经仿真试验发现,当种群规模取较大值时,得到的非支配解对应的温度调控值之间差值在 0.1℃以内,对实际控制没有意义。

选取初始种群规模 15,代入当前的室内平均温度和室内平均光子通量密度,经过 500 次遗传迭代进行全局寻优,获取当前温室的温光调控目标值。各参数初始值为: $X = (36.27^{\circ}\text{C}, 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$, $X_{\min} = (28^{\circ}\text{C}, 400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$, $X_{\max} = (36.27^{\circ}\text{C}, 2\,000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$,迭代次数为 500,种群规模为 15。

模型代入了 2020 年 5 月 18 日 15:55—16:00 的平均室内光子通量密度和平均室内温度,因为该时间段的室内环境特点为温度偏高,光子通量密度偏低,需要同时降温 and 补光,在春夏季具有一定代表性,适合用来验证优化算法的效果,求出接下来 1 h 的控制时段内温室最优温光调控值。当算法迭代完成后,即可获得相应的非支配解集。优化后的 Pareto 前沿如图 5 所示,整个 Pareto 前沿呈现下凸状,较为光滑,分布度良好,连续性强,这表明 NSGA-II 在样本空间内具有很强的逼近 Pareto 解的能力。因此,从区域中可以找到满意的平衡解。

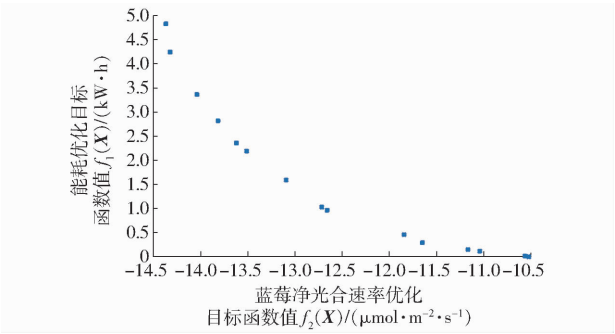


图 5 考虑蓝莓光合作用的温室多目标调控优化结果

Fig. 5 Optimal results of greenhouse multi-objective considering blueberry photosynthesis

目标函数 $F(X) = (f_1(X), -f_2(X))$, 相应优化变量 X 的非支配解, 以及净光合速率提升、能耗节省百分比如表 4 所示。

表 4 Pareto 最优解

Tab. 4 Pareto optimal solution

序 号	目标函数 $F(X)$ $(f_1(X), -f_2(X)) /$ $(\text{kW} \cdot \text{h},$ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	优化变量 X 的 非支配解 $(T_{\text{aim}}, I_{\text{aim}}) /$ $(^{\circ}\text{C}, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	性能提升 (降耗, 净光合速 率提升) / %
1	(0, -10.52)	(36.27, 432.79)	(100, -0.35)
2	(0.01, -10.56)	(36.27, 437.38)	(99.66, 0.03)
3	(0.12, -11.04)	(36.26, 495.83)	(95.86, 4.57)
4	(0.15, -11.17)	(36.27, 514.23)	(94.83, 5.80)
5	(0.29, -11.65)	(36.27, 595.26)	(90.00, 10.35)
6	(0.46, -11.85)	(36.04, 613.50)	(84.14, 12.24)
7	(0.96, -12.66)	(36.02, 889.70)	(66.90, 19.92)
8	(1.03, -12.72)	(35.91, 888.20)	(64.48, 20.48)
9	(1.59, -13.09)	(35.41, 1 043.15)	(45.17, 23.99)
10	(2.19, -13.51)	(33.72, 843.91)	(24.48, 27.97)
11	(2.36, -13.62)	(33.51, 868.47)	(18.62, 29.01)
12	(2.82, -13.82)	(32.66, 853.06)	(2.76, 30.90)
13	(3.36, -14.04)	(31.79, 884.00)	(-15.86, 32.99)
14	(4.24, -14.32)	(31.01, 1 122.11)	(-46.21, 35.64)
15	(4.83, -14.37)	(30.00, 1 128.62)	(-66.55, 36.11)

从表 4 可看出, 每个非支配解都在蓝莓净光合速率或温室降耗上有性能提升, 这表明本研究提出的优化模型具有可行性和有效性。在温室实际控制中, 决策者可输入当前实际气象数据与算法参数等, 参考每个非支配解的降耗与净光合速率提升情况, 并结合实际经营策略, 选择其中一个非支配解对应的目标温度调控值和目标光照调控值, 作为温室的调控依据。

4.4 不同调控策略优化仿真与分析

为进一步分析多目标优化模型的有效性, 本文结合两种常见调控策略对优化模型的非支配解进行选取, 并将所选的非支配解对应的调控效果, 与温室处在合理阈值调控下的实际能耗与蓝莓净

光合速率进行对比。采用 2020 年 5 月 18—24 日真实数据进行仿真, 室外气象为晴朗或多云, 室内相对湿度基本保持在 35%~75% 之间, 在夏季具有一定代表性。温室内的湿帘降温系统主要由 3 台负压风机与水帘墙组成, 全部开启时降温功率合计约 6.3 kW·h。结合各文献对蓝莓春夏季适宜温度区间进行总结, 设置温室实际调控中湿帘降温阈值调控策略为: 当室内温度大于 32℃ 或者室外温度大于 28℃ 时开启降温, 当室内温度小于 27℃ 时关闭。当室内光照小于 3 000 lx 时, 对蓝莓进行额外补光 200 μmol/(m²·s)。

由于该时期处于蓝莓花果期, 根据蓝莓生理习性, 选择每天 09:00—20:00 对蓝莓进行补光和降温调控。将调控时段先切分为时长为 1 h 的子时段, 计算子时段前 5 min 气象数据均值, 代入多目标优化算法进行寻优。最后根据决策倾向选取其中一个非支配解后的优化效果与实际阈值调控效果进行对比。具体优化应用步骤如图 6 所示。

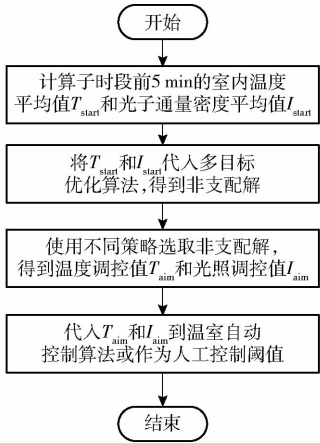


图 6 子时段多目标优化算法应用步骤

Fig. 6 Sub-period multi-objective optimization algorithm application steps

4.4.1 节能优先策略

该策略的目的在于以不降低现实调控下作物光合作用为前提, 节省经营开支。仿真时对每个子时段经过多目标优化后得到的非支配解, 选择与该子时段中实际蓝莓净光合速率平均值最贴近的解, 如图 7 所示。

获得各子时段已选择点对应的能耗, 以天为单位计算累积值, 与当天实际温室的能耗进行对比, 结果如图 8 所示。

对比结果表明, 与当前温室传统阈值调控手段相比, 使用多目标寻优策略可以在维持作物生长状态的前提下平均降低能耗约 21.3%。

4.4.2 效益优先策略

在实际温室控制中, 当原本的调控能耗在可

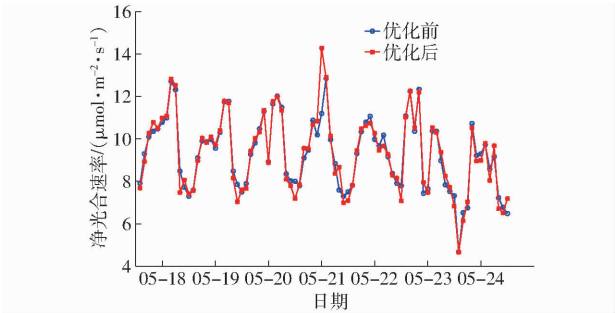


图 7 节能策略优化前后净光合速率对比
Fig. 7 Comparison of photosynthetic rate before and after optimization

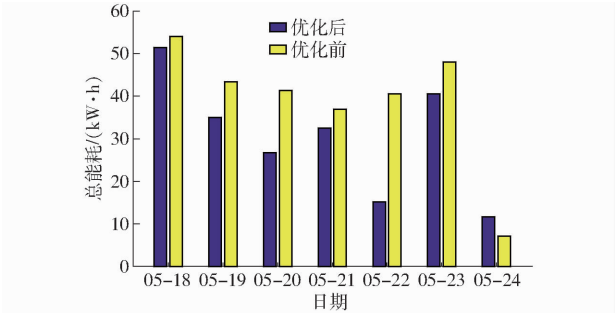


图 8 节能策略优化前后能耗对比
Fig. 8 Comparison of energy consumption before and after optimization

接受范围内时,即经营者认为优化前的控制成本无需节省,希望通过优化将同等能耗转换成更合理的室内温度和光照,提升作物的生长状态,以获取更高产量,优先效益。该策略目的是在保持与现实调控下近似能耗的前提下,提高作物的净光合速率。仿真时对多目标优化后得到的非支配解,选择与当天温室实际控制能耗近似的点,如图 9 所示。其相应的每个子时段的蓝莓净光合速率对比如图 10 所示。

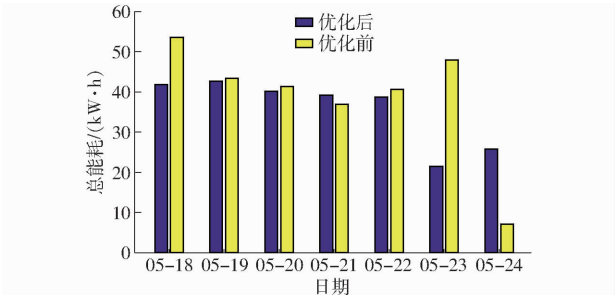


图 9 效益优先策略优化前后能耗对比
Fig. 9 Comparison of energy consumption before and after optimization

结果表明,通过多目标寻优策略,在降低温室能耗约 8.6% 的前提下平均提升蓝莓实际净光合速率

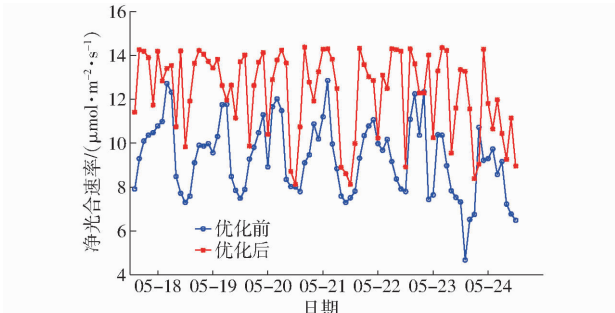


图 10 效益优先策略优化前后净光合速率对比
Fig. 10 Comparison of photosynthetic rate before and after optimization

约 28.9%,证明本文优化方法可以在不增加能耗的前提下为作物营造生长状态更好的小气候条件,以获取更高效益。

5 结论

(1)以温度和光子通量密度嵌套试验结果为基础,使用含温度修正的直角双曲线修正模型对南高丛品种“安娜”蓝莓春夏季花果期的净光合速率建模。模型拟合结果决定系数为 0.983 6,均方根误差为 0.570 1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,平均绝对误差为 0.498 5 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,平均相对误差为 3.86%,较好地反映蓝莓光合速率与温度和光照的关系。

(2)基于 Venlo 型温室能量平衡原理,建立了春夏季温室降温补光能耗的简化模型。通过粒子群算法辨识模型参数,均方根误差为 1.622 5 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。代入 10 d 的气象数据验证可得预测准确率不小于 81.03%,能较为准确地预测春夏季温室降温能耗。

(3)基于所建作物光合作用模型与温室能耗模型,以蓝莓净光合速率尽可能大、温室总能耗尽可能小为目标函数,使用多目标 NSGA-Ⅱ 算法对温室光合优化调控进行寻优,能够获取一组对目标函数性能有提升非支配解,证明了优化模型的可行性和有效性。

(4)使用两种非支配解选取策略对优化模型结果与试验温室真实阈值调控下的能耗与作物净光合速率进行进一步对比。节能优先策略可在不降低作物光合作用的前提下节约能耗约 21.3%;效益优先策略可在降耗约 8.6% 的前提下平均提升蓝莓实际净光合速率约 28.9%。该优化模型可为后续温室决策者设定光温调控目标策略奠定理论基础。

参 考 文 献

[1] 黄妍,杨静慧,黄哈达,等. 温室促成栽培中不同品种蓝莓花的形态特性比较[J]. 天津农学院学报,2019,26(2):18-21,26.

- HUANG Yan, YANG Jinghui, HUANG Handa, et al. Comparison of morphological characteristics of different varieties of blueberry flowers in greenhouse[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2019, 26(2): 18–21, 26. (in Chinese)
- [2] 王明洁, 孙晶, 段亚东, 等. 日光温室蓝莓物候期及生长、果实特性的调查[J]. 北方园艺, 2016(20): 52–54.
- [3] 方仲相, 胡君艳, 江波, 等. 蓝莓研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(4): 599–606.
- [4] 魏鑫, 魏永祥, 郭丹, 等. 不同打破休眠方式对‘密斯梯’越橘叶片光合特性及保护酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4517–4528.
- WEI Xin, WEI Yongxiang, GUO Dan, et al. Effects of different breaking dormancy ways on the photosynthetic characteristics and activities of protective enzymes of ‘misty’ blueberry leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(22): 4517–4528. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 朱玉, 高磊, 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)
- [7] 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.
- ZHU Zhou, TONG Xiangya, ZHENG Shuhe. Light regulation system for greenhouse based on light requirements of crops[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 192–196. (in Chinese)
- [8] 史小燕, 申宝营, 陈烨强. 育苗温室幼苗生长调节光照调控系统的设计[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(11): 204–206.
- [9] 苏战战, 李莉, 李文军, 等. 基于 RF–GSO 的温室番茄自适应调光系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 339–346.
- SU Zhanzhan, LI Li, LI Wenjun, et al. Design and experiment on adaptive dimming system for greenhouse tomato based on RF–GSO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Suppl.): 339–346. (in Chinese)
- [10] CLAUSEN A, MAERSK-MOELLER H M, SOERENSEN J C, et al. Integrating commercial greenhouses in the smart grid with demand response based control of supplemental lighting [C] // International Conference on Industrial Technology and Management Science, 2015.
- [11] XU Le, WEI Ruihua, XU 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.
- [12] 胡瑾, 荆昊男, 高攀, 等. 融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 329–336.
- HU Jin, JING Haonan, GAO Pan, et al. Intelligent regulation model of light environment for facility cucumbers with light quality demand[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 329–336. (in Chinese)
- [13] 王智永, 张海辉, 胡瑾, 等. 基于 SVM–ACO 算法的光环境优化调控模型[J]. 农机化研究, 2018, 40(10): 160–165.
- WANG Zhiyong, ZHANG Haihui, HU Jin, et al. Optimal control model of light environment based on SVM–ACO algorithm [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(10): 160–165. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 胡瑾, 隆星月, 邓一飞, 等. 基于水分利用率与光合速率的温室作物需水模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 362–370.
- HU Jin, LONG Xingyue, DENG Yifei, et al. Water demand model for greenhouse crops considering water use efficiency and photosynthetic rate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 362–370. (in Chinese)
- [16] 陈晓丽, 杨其长, 王利春, 等. 红蓝光交替照射下生菜能量利用与光合性能分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 344–350.
- CHEN Xiaoli, YANG Qichang, WANG Lichun, et al. Analysis of energy use efficiency and photosynthesis of lettuce under alternating red and blue irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 52(6): 344–350. (in Chinese)
- [17] 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)
- [18] 吴思政, 聂东伶, 梁文斌, 等. 4 个蓝莓品种光合特性的比较[J]. 经济林研究, 2015, 33(3): 1–7.
- WU Sizheng, NIE Dongling, LIANG Wenbin, et al. Comparison of photosynthetic characteristics of four blueberry cultivars [J]. Non-wood Forest Research, 2015, 33(3): 1–7. (in Chinese)
- [19] 胡旺, GARY G YEN, 张鑫. 基于 Pareto 熵的多目标粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2014, 25(5): 1025–1050.
- HU Wang, GARY G YEN, ZHANG Xin. Multiobjective particle swarm optimization based on Pareto entropy[J]. Journal of Software, 2014, 25(5): 1025–1050. (in Chinese)
- [20] 于强波. 辽南温室蓝莓周年栽培管理技术[J]. 北方园艺, 2018(17): 200–202.
- [21] 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)

[22] 杨昊谕. 日光温室热平衡解析[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
YANG Haoyu. Analysis on thermal equation of heliogreenhouse[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[23] VANTHOOR B H E. A model-based greenhouse design method[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2011.

[24] VAN O. Optimal control design for a solar greenhouse[D]. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 2007.

[25] SONG Yongtao, WEI Ruihua, XU Lihong. Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature[J]. Energies, 2018, 11(1): 65.

[26] 徐振峰. 温室温湿度建模与多目标相容切换控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
XU Zhenfeng. Research on modeling of temperature and humidity in greenhouse and multi-objective compatible switching control methods[D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)

[27] 陈教科, 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)

[28] SU Yuanping, XU Lihong. Towards discrete time model for greenhouse climate control[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2017, 10(2): 157 – 170.

[29] 王秀丽, 李淑慧, 陈皓勇, 等. 基于非支配遗传算法及协同进化算法的多目标多区域电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 11 – 15.
WANG Xiuli, LI Shuhui, CHEN Haoyong, et al. Multi-objective and multi-district transmission planning based on NSGA – II and cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 11 – 15. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 223 页)

[24] 杨永侠, 张函, 郭雅萍, 等. 基于地理探测器的山区作物生产潜力指数修正研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 267 – 274.  
YANG Yongxia, ZHANG Han, GUO Yaping, et al. Correction of crop production potential index in mountainous area based on geodetector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 267 – 274. (in Chinese)

[25] HUANG J, QU B, FANG G, et al. The drivers of the Asian longhorned beetle disaster show significant spatial heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106680.

[26] 路昌, 耿昊, 刘蕊, 等. 山东省耕地多功能耦合协调度时空格局分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 265 – 274.  
LU Chang, GENG Hao, LIU Rui, et al. Spatial-temporal pattern analysis of cultivated land multi-functional coupling coordination degree in Shandong Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 265 – 274. (in Chinese)

[27] 王法辉. 基于 GIS 的数量方法与应用[M]. 北京: 商务印书馆, 2009: 205 – 232.

[28] 李佳洺, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 148 – 160.  
LI Jiaming, LU Dadao, XU Chengdong, et al. The spatial differentiation and changes of the population on both sides of the Hu Huanyong line[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 148 – 160. (in Chinese)

[29] HUANG J X, WANG J F, BO Y C, et al. Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2014, 11(3): 3407 – 3423.

[30] 关喆. 哈尔滨市光肩星天牛发生危害调查研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010.

[31] STRAW N A, TILBURY C, FIELDING N J, et al. Timing and duration of the life cycle of Asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) in southern England[J]. Agricultural and Forest Entomology, 2015, 17(4): 400 – 411.

[32] KEENA M A, MOORE P M. Effects of temperature on *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) larvae and pupae[J]. Environmental Entomology, 2010, 39(4): 1323 – 1335.

[33] 刘辉芳. 河北省及北京市区柳树光肩星天牛和桑天牛的调查及防治策略[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(14): 6485 – 6487, 6624.  
LIU Huifang. Investigation and control strategy of *Achaeus sylvestris* and *Ceratophyllum sibiricum* in Hebei Province and Beijing Districts[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(14): 6485 – 6487, 6624. (in Chinese)

[34] CIAMPITTI M, CAVAGNA B. Public awareness: a useful tool for the early detection and a successful eradication of the longhorned beetles *Anoplophora chinensis* and *A. glabripennis*[J]. EPPO Bulletin, 2014, 44(2): 248 – 250.