

基于改进型鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型

胡瑾 闫柯 何东健 张海辉 辛萍萍 陶彦蓉

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 针对光温耦合条件下番茄光环境调控目标值难以快速、精确获取的问题,在光温嵌套光合速率试验结果基础上,为提高人工鱼群算法寻优速度,基于视野和步长动态调整思想,提出了改进型鱼群算法的光温耦合寻优方法,对不同温度下光饱和点进行快速精准寻优,建立了番茄光环境调控目标值模型,模型决定系数为0.9999。验证试验结果表明,不同温度下光饱和点的模型计算值与实测值高度线性相关,相关系数为0.988,最大相对误差在 $\pm 2\%$ 内,明显优于遗传算法构建模型的相对误差($\pm 6\%$)。快速、动态获取不同温度下光饱和点,对设施光环境精准调控效率具有重要意义。

关键词: 番茄; 改进型鱼群算法; 光环境调控; 目标值模型; 温度; 光饱和点

中图分类号: S126; X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)01-0260-06

Light Environment Regulation Target Model of Tomato Based on Improved Fish Swarm Algorithm

Hu Jin Yan Ke He Dongjian Zhang Haihui Xin Pingping Tao Yanrong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To struggle with the problems of hard to acquire the optimum light value for tomato planting rapidly and precisely, a model was developed to control the light staying around the optimum value in the environment. In order to evaluate the optimum light saturation points under different temperatures, a novel light and temperature coupling optimizing method based on improved fish swarm algorithm was proposed. This new method effectively improved the optimum speed of traditional fish swarm algorithm through adjusting the vision and step dynamically. In addition, the method could avoid trapping into local optimum, and get more accurate optimal solution than genetic algorithm. Based on the light saturation points by optimizing this method, the light environment regulation target model was established with nonlinear regression. For verifying the accuracy of the method, a set of light and temperature coupling photosynthetic rate test was performed. The results showed that the model determination coefficient can reach 0.9999, the squared error term was 1.543, and the root mean square error was 0.712. A comparison between simulation results and testing results was made, which showed the highly linear correlate relation with a value of 0.988 between them. In addition, the maximum relative error was less than $\pm 2\%$, which is obviously better than the results of genetic algorithm. At last, a positive conclusion was obtained that the proposed light and temperature coupling optimizing method in this study can acquire the optimum light saturation points rapidly and dynamically, and has great significance to the precise control of light environment in facility.

Key words: tomato; improved fish swarm algorithm; light environment regulation; target value model; temperature; light saturation point

收稿日期: 2015-05-12 修回日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31501224)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAH29B04)和陕西省科学技术研究发展项目(2013K02-03, 2014K08-02-03, 2014K02-08-02)

作者简介: 胡瑾(1980—),女,博士生,讲师,主要从事光电子技术、农业智能化调控技术研究, E-mail: hujin007@eyou.com

通信作者: 何东健(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理、图像处理研究, E-mail: hdj168@nwsuaf.edu.cn

引言

作物光照不足通常会出现弱光逆境、抑制茎的增粗生长、减少干物质积累、导致生长发育减缓等问题,严重影响作物产量和品质^[1-2]。相关研究证实,番茄作为喜光性作物,光照充足时番茄挂果数、总产量和单果质量可分别提高 48.91%、94.86% 和 30.86%^[3-4]。温度作为影响光合速率的另一主要因素,引起作物体内 Rubisco 活化酶的活性、气孔导度、叶绿素含量等变化^[5-6],在高低温条件下,甚至会出现温度胁迫效应,造成光合速率显著下降^[7-8]。即使在适宜范围内,由于温度与光照对光合速率的影响存在显著的交互作用,温度显著影响番茄光饱和点和最大光合速率^[9]。学者们研究了温度对光合速率的影响,建立了相关温度影响下番茄光合速率模型^[10-13],但基于光合速率模型进行不同温度条件下光合速率寻优,以及温度和光照关联条件下的光环境调控目标值模型尚待研究。因此,探寻温光耦合条件下光环境调控目标值已成为作物栽培领域亟待解决的问题。

基于遗传算法的光合优化调控模型可动态获取不同温度条件下光饱和点^[14],但由于遗传算法全局搜索能力强但局部寻优能力较差,致使该模型最大误差达 6%。近年来,改进的人工鱼群算法在避免基本人工鱼群算法运行速度慢的同时,具有全局寻优能力强、不易陷入局部极值点、精度普遍高于遗传算法等特点^[15-17],故得到了广泛关注,并被应用在海上导航、路由优化、水库优化调度、电站优化等多个领域,并取得良好效果^[18-21]。以上研究为建立基于改进型鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型提供了理论基础。

针对上述问题,本文设计基于改进型鱼群算法的光温耦合寻优方法,对比分析其与人工鱼群算法在寻优效率和结果上的差异,得到不同温度下的最大光合速率与光饱和点,从而提出并建立以最大光合速率为目标的番茄光环境调控目标值模型,对模型进行相关性和误差分析,以验证模型的准确性,为光环境的优化调控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验方法

为了与基于遗传算法的光合优化调控模型建模方法进行对比,本文采用与文献[14]相同的测试数据和试验方法。试验测试包括初试验和验证试验 2 个环节,试验于 2013 年 3—6 月在西北农林科技大学南校区玻璃温室内进行,供试番茄品种为“毛

刺 802”,选择长势均一的 5 叶 1 心番茄幼苗定植于盛有营养土的塑料盆内,营养土为加入草炭和复合肥的熟土,试验期内,施肥、浇水等管理均按照常规进行,不喷施任何农药和激素。

试验采用 LI-COR 公司生产的 Li-6400XT 型便携式光合仪,可在设定并调控叶室小环境的同时测定净光合速率。其中,温度梯度为 16、21、25、29、33、37℃,光子通量密度为 0、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,采用光温耦合嵌套试验方式得到不同梯度温度和光照对番茄幼苗的光合速率,进行粗大误差分析并滤除,其次对滤除粗大误差后的数据分别计算其均值,从而形成建模所需的温度、光照组合条件下对应的光合速率样本集。

1.2 模型建立方法

首先,利用处理后的数据建立光温耦合的非线性番茄光合速率模型,并以此作为目标函数;其次,基于光合速率模型采用改进型鱼群算法实现嵌套条件下的光温耦合寻优;最后,根据嵌套寻优结果建立光环境调控目标值模型,其流程图如图 1 所示。

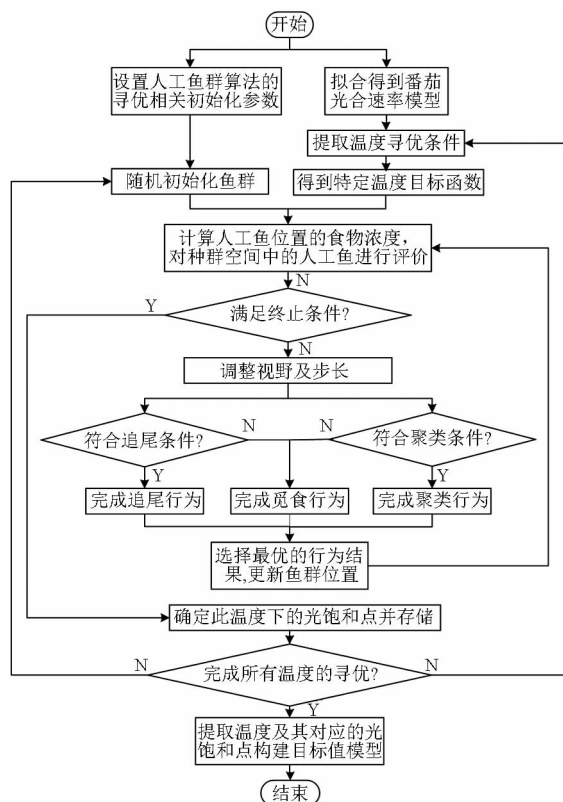


图 1 改进型鱼群算法流程图

Fig. 1 Flowchart of improved artificial fish swarm algorithm

1.2.1 番茄光合速率寻优目标值函数建立

图 1 中,采用多元非线性回归方法建立光温耦合的番茄光合速率模型,即

$$P_n = f(T, D) \quad (1)$$

式中 P_n ——光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

T ——温度, $^\circ\text{C}$

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

其中,在 $18 \sim 34^\circ\text{C}$ 范围内,确定寻优的特定温度,建立寻优条件数据样本集 $T = (T^1, T^2, \dots, T^m)$, $T^m = 18 + 2(m - 1)$, 单位: $^\circ\text{C}$, $m \in [1, 9]$ 。

在此基础上,根据寻优样本集完成对模型 $P_n = f(T, D)$ 温度的实例化,从而建立不同温度条件下的寻优目标值函数 $F^m = f(T^m, D)$ 。

1.2.2 基于改进型鱼群算法的寻优算法

本文在建立番茄光合速率模型的基础上,提出了基于改进型鱼群算法的光合速率寻优算法,完成特定温度下最优光合速率目标值寻优。由于一般人工鱼群算法在执行觅食行为、聚群行为、追尾行为和随机行为时均受到视野范围和步长的影响,视野范围越大,人工鱼群算法的全局搜索和收敛能力强,反之,人工鱼群算法的局部搜索能力强;步长越大,则收敛速度越快,但有时会出现振荡现象,反之,则收敛速度越慢,求解精度高^[15]。因此,本文通过视野和步长的动态调整对一般人工鱼群算法进行改进,以实现寻优速度和寻优精度的兼顾。

算法前期,采用大视野和大步长进行搜索,实现对整个求解域的粗略全局搜索,有效提高了全局搜索能力和收敛速度;中期,采用的视野和步长快速变小,以提高局部搜索能力,避免出现振荡现象影响收敛速度;后期,视野和步长降至最小,在最优解域附近开展精细搜索,以提高局部搜索能力和寻优结果精度。在特定温度下最优光合速率目标值寻优过程中,目标函数设定为人工鱼当前位置的食物浓度。首先随机生成初始鱼群,产生的初始鱼群个体的状态向量表示为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$, 其中 x_i 为欲寻优变量光子通量密度 D ; 并利用得到的特定温度下的寻优目标值函数 F^m , 作为该温度下寻优的食物浓度 Y , 从而利用 $Y^m = F^m$ 计算食物浓度完成评价, 当其鱼群评价不满足停止条件, 则改进型鱼群继续寻优操作。

(1)改进型鱼群算法的核心视野和步长的动态调整公式为

$$\begin{cases} v = av_{i-1} + v_{\min} \\ s_i = as_{i,i-1} + s_{\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中 v ——本次搜索人工鱼的视野

s_i ——本次搜索人工鱼移动的步长

v_{i-1} ——前次搜索人工鱼的视野

$s_{i,i-1}$ ——前次搜索人工鱼移动的步长

a ——调节系数

v_{\min} ——视野范围最小变化量

s_{\min} ——步长最小变化量

由式(2)可知,在初值确定的条件下,视野和步长由调节系数 a 决定,且与 a 呈线性关系。因此, a 变化趋势应与视野和步长保持一致,本文采用指数型函数构建调节系数,即

$$a = \exp(-30(t/T_{\max})^s) \quad (3)$$

式中 t ——当前迭代次数

T_{\max} ——最大迭代次数

s ——变化速率,取 $[0, 10]$ 范围内的整数

s 取值直接影响 a 的变化结果。不同变化速率条件下 a 的变化曲线如图 2 所示。

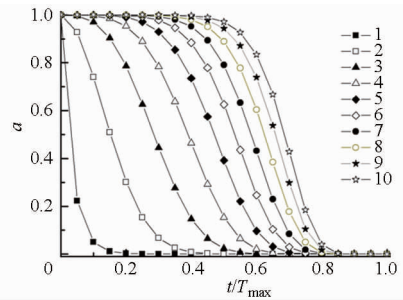


图 2 不同变化速率下调节系数变化曲线

Fig. 2 Curves of adjustment coefficient at different changing rates

由图 2 可知,随着变化速率 s 增大,前期全局搜索比重随之增大;中期比重呈先增大后减小的趋势,整体变化不大;后期采用最小视野和步长进行精细搜索的比重明显降低。由于作物光合速率模型呈现单峰形函数特征,具有较强的全局收敛能力,其寻优过程变化速率应选择较小值,以减少前期全局搜索比重,增大局部精细搜索比重,提高结果精度。

s 分别选取 1、2、3、4 进行试验验证,结果发现 $s = 1$ 时,其寻优结果最好,且避免了 s 为 2、3、4 时寻优过程出现的振荡现象,因此本文选择 s 为 1 作为变化速率。

(2)采用一般鱼群算法,根据种群空间中的每个人工鱼的食物浓度、拥挤度以及伙伴数量选择进行觅食、聚群和追尾操作,完成人工鱼的新位置获取,具体方法如下:

觅食行为:设一条人工鱼当前的状态为 x_i ,在其感知范围内随机选择一个状态 x_j ,即

$$x_j = x_i + (2r - 1)s_i \quad (4)$$

式中 r ——随机数

若该状态的食物浓度 $Y_j > Y_i$, Y_j 、 Y_i 分别表示随机人工鱼的食物浓度和当前人工鱼的食物浓度,则 x_{i++} 位置更新计算式为

$$x_{i++} = x_i + rs_i \frac{x_j - x_i}{\|x_j - x_i\|} \quad (5)$$

否则,再重复式(4)完成 x_j 位置更新,直到在迭代次数内满足 $Y_j > Y_i$,方完成位置更新。当迭代超过尝试次数,食物浓度仍不满足 $Y_j > Y_i$,则进行随机行为完成 x_{i+++} 位置更新,即

$$x_{i+++} = x_i + rs_t \quad (6)$$

聚群行为:是人工鱼朝伙伴中心移动的行为,若人工鱼群中心位置食物浓度 Y_c 、当前食物浓度的 Y_i 、当前视野内的伙伴数量 n_f 之间,满足 $Y_c/n_f > \delta Y_i$,其中 δ 为拥挤度,用来限制人工鱼群聚集的规模,执行聚群行为,计算式为

$$x_{i+++} = x_i + rs_t \frac{x_c - x_i}{\|x_c - x_i\|} \quad (7)$$

否则,执行觅食行为完成鱼群位置。

追尾行为:是人工鱼朝最优位置伙伴方向移动的行为。若人工鱼群当前最优位置食物浓度 Y_{gbest} 与当前食物浓度 Y_i 满足 $Y_{gbest}/n_f > \delta Y_i$ 时,执行追尾行为,计算式为

$$x_{i+++} = x_i + rs_t \frac{x_{gbest} - x_i}{\|x_{gbest} - x_i\|} \quad (8)$$

否则,人工鱼执行觅食行为。

(3)对比不同行为得到人工鱼的位置对应食物浓度,选取食物浓度高的人工鱼位置完成位置更新,并对生成的新鱼群进行优化过程迭代,直到完成特定温度下最大光合速率与光饱和点的寻优。然后重新提取一组温度下的寻优条件,重复上述过程,直至完成所有温度下的光合速率寻优。

1.2.3 光环境调控目标值模型

利用非线性回归的方法,基于寻优结果,以温度为自变量、光饱和点为因变量,构建番茄光环境调控目标值模型,实现任意温度光饱和点的动态获取。

2 结果与讨论

2.1 光合速率寻优结果分析

在对试验数据进行非线性回归建模的基础上,利用改进型鱼群方法与人工鱼群算法分别进行寻优,得到寻优结果如图 3 所示。

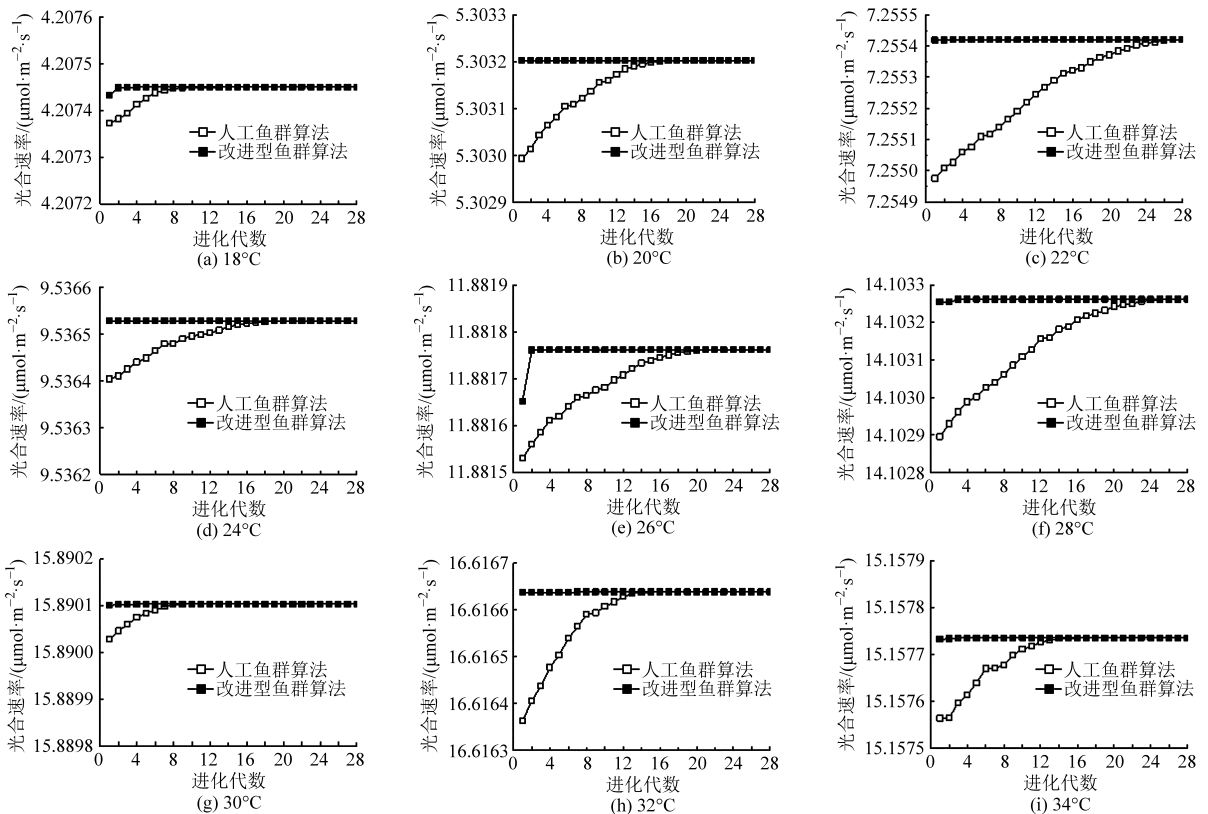


图 3 不同温度下光合速率的进化过程

Fig. 3 Evolution process of photosynthetic rate values under different temperatures

由图 3 可以看出,不同温度下,人工鱼群算法和改进型鱼群算法在进化初始阶段,其食物浓度较小,经过觅食、追尾和聚群等处理,位置不断进行更新,从而使得新鱼群中个体食物浓度不断提高,番茄本代最佳光合速率随进化代数增加而逐渐增大;而随

进化代数增加,当人工鱼群算法产生新的个体逼近最优解时,其个体食物浓度基本保持恒定,从而完成光合速率寻优。分析 2 种鱼群算法寻优结果发现,不同温度条件下 2 种算法最终得到的寻优结果一致。随着温度升高,光合速率也随之上升,在达到最

大值之后随着温度的继续升高光合速率持续下降,符合作物光合速率的基本规律^[9]。

从寻优效率来看,在进化过程中,改进型鱼群算法在不同温度下的进化速度均明显优于原有鱼群算法,与文献[14]使用遗传算法寻优速度相似,在8步之内可完成寻优过程,有效避免了人工鱼群算法运行速度慢的问题,表明本文设计的寻优方法合理,可用于该类多元非线性问题寻优。

2.2 光环境调控目标值模型结果分析

基于改进型鱼群算法得到不同温度梯度下最佳光合速率对应的光饱和点,即各温度下的光环境调控目标值寻优结果,如表1所示。从表1可以发现,光饱和点会随温度升高而升高,达到一定温度后光饱和点呈下降趋势,其与图3所示的最大光合速率随温度变化趋势一致,与张富存等^[8]在研究高温胁迫

对设施番茄光合作用特性影响时,所得不同温度下光饱和点和最大光合速率变化趋势的结论一致。进一步从作物生理分析可以发现:当温度在18~26℃之间时,随着温度的上升,叶片 Rubisco 酶的活性^[5]、气孔导度等明显上升,光合能力升高,因此其最大光合速率、光饱和点随温度迅速上升;26~32℃时,由于基本达到番茄最适生长温度区间,可能由于温度对 Rubisco 酶的活性、气孔导度等的影响开始明显减弱,最大光合速率和光饱和点随温度缓慢波动;当温度超过32℃,作物采用关闭气孔的方式降低蒸腾作用,从而减少水分散失,同时导致作物对CO₂吸收能力明显减弱^[22],造成可供光合作用物质代谢的CO₂总量下降,最大光和速率下降,反应中最大所需光子数下降、光饱和点迅速降低,综上表明上述光饱和点的寻优结果符合作物光合生理规律。

表1 不同温度下的光饱和点寻优结果

Tab.1 Light saturation point under different temperatures

温度/℃	18	20	22	24	26	28	30	32	34
光饱和点/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 053	1 110	1 166	1 203	1 212	1 213	1 212	1 210	1 186

基于上述结果,以温度 T 为自变量,光饱和点为因变量,用非线性回归方法建立调控目标值模型为

$$V_{\text{LSP}} = 1\,212e^{-\left(\frac{T-29.57}{30.65}\right)^2} + 31.11e^{-\left(\frac{T-23.41}{3.256}\right)^2} \quad (9)$$

其决定系数为0.9999,误差项平方和为1.543,均方根误差为0.712,表明模型具有良好拟合效果,可获取不同温度下以光饱和点为目标的调控目标值 $V_{\text{LSP}0}$ 。

2.3 模型验证结果分析

采用异校验方式,通过光饱和点实测值与模型拟合结果的对比分析,验证本模型的准确性及适应性。试验随机另外选取健壮幼苗21株作为供试样本,利用Li-6400XT型便携式光合速率仪,设定并调控叶室小环境,其中利用CO₂注入模块(6400-01)控制二氧化碳体积比恒定为300 $\mu\text{L}/\text{L}$,利用控温模块得到16~36℃范围内温度梯度为1℃时对应的光响应曲线。由于控温模块温度监测精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,因此在光响应曲线下的测试中采用重复检测的方式,待读取温度稳定在待测温度时得到21个温度下的光饱和点实测值。并利用模型计算对应温度下的光饱和点模拟值,对上述试验结果进行相关性分析,光饱和点实测值与模拟值之间关系如图4所示。拟合曲线相关系数为0.988,表明二者之间高度线性相关。

针对上述结果,计算不同温度下光饱和点实测值与模拟值相对误差 γ ,对试验结果进行误差分析, γ 的计算式为

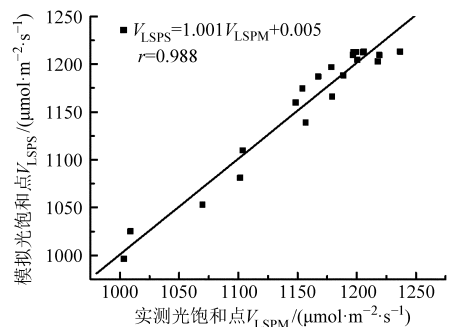


图4 光饱和点实测值与模拟值之间的相关性

Fig.4 Correlation analysis chart of light saturation point measured values and simulated value

$$\gamma = \frac{V_{\text{LSPS}} - V_{\text{LSPM}}}{V_{\text{LSPM}}} \times 100\% \quad (10)$$

结果表明不同温度下最大相对误差在 $\pm 2\%$ 内,明显优于文献[14]所建调控模型相对误差($\pm 6\%$),表明本文所建立的目标值模型可实现不同温度条件下光饱和点的高精度、动态获取。进一步将上述验证结果与基于遗传算法得到的验证结果进行对比,可以证明本模型相关性分析结果与误差分析结果均优于文献[14]所建调控模型。

3 结论

(1) 提出了基于改进型鱼群算法的光合速率寻优方法,通过视野和步长的动态调整,有效平衡了人工鱼群算法在全局收敛和局部收敛之间的差异,算法全局寻优能力强、速度快、精度高于遗传算法,可

实现不同温度下光饱和点的快速精确寻优。

(2) 用非线性回归方法建立的调控目标值模型,其决定系数为 0.999 9,具有良好拟合效果,可实现不同温度下以光饱和点为目标的调控目标值获取。

(3) 对 16 ~ 36℃ 范围内 21 个不同温度下光饱和点的模型计算值与实测值进行相关性分析与误差分析。结果表明,二者高度线性相关,其相关系数为 0.988,最大相对误差在 $\pm 2\%$ 内,明显优于遗传算法构建模型相对误差 ($\pm 6\%$)。

参 考 文 献

- 李益清. 弱光影响番茄光合特性的钙素调控机理研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2011.
- Yong Bum K. Effects of supplemental lighting on growth and yield of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in hydroponic culture under low levels of natural light in winter[J]. Korean Journal of Horticultural Science & Technology, 2011, 29(4):317 - 325.
- 李海达, 吉家曾, 郑桂建, 等. 不同 LED 补光光源对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(14):37 - 40,47.
- Li Haida, Ji Jiazeng, Zheng Guijian, et al. Effect of different LED light-supplement on the yield and quality of cherry tomato[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(14):37 - 40,47. (in Chinese)
- 吴锴, 张静, 郝称意. 温室番茄群体光合作用模拟模型的研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2013, 33(3):225 - 229.
- Wu Kai, Zhang Jing, Hao Chengyi. Simulation of the canopy photosynthesis model of greenhouse tomato[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Nature Science Edition, 2013, 33(3): 225 - 229. (in Chinese)
- Yamori W, Masumoto C, Fukayama H, et al. Rubisco activase is a key regulator of non-steady-state photosynthesis at any leaf temperature and, to a lesser extent, of steady-state photosynthesis at high temperature. [J]. Plant Journal, 2012, 71(6):871 - 880.
- Matsuda R, Ozawa N, Fujiwara K. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 170(3):150 - 158.
- 胡文海, 闫小红, 袁丽芳, 等. 光强在低温弱光胁迫后番茄叶片光合作用恢复中的作用[J]. 植物研究, 2011, 31(2):164 - 168.
- Hu Wenhai, Yan Xiaohong, Yuan Lifang, et al. The role of light intensity in the recovery of photosynthesis in the tomato leaves after chilling under low light[J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(2): 164 - 168. (in Chinese)
- 张富存, 张波, 王琴, 等. 高温胁迫对设施番茄光合作用特性的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28):211 - 216.
- Zhang Fucun, Zhang Bo, Wang Qin, et al. Effect of high temperature stress on photosynthesis characters of tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 211 - 216. (in Chinese)
- Hikosaka K, Ishikawa K, Borjigidai A, et al. Temperature acclimation of photosynthesis: mechanisms involved in the changes in temperature dependence of photosynthetic rate[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(2):291 - 302.
- 李天来, 颜阿丹, 罗新兰, 等. 日光温室番茄单叶净光合速率模型的温度修正[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):274 - 279.
- Li Tianlai, Yan Adan, Luo Xinlan, et al. Temperature modified model for single-leafnet photosynthetic rate of greenhouse tomato [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 274 - 279. (in Chinese)
- Li Pingping, Wang Jizhang, Chen Xin, et al. Studies on photosynthesis model of mini-cucumber leaf in greenhouse[M] // Cao W X, White J W, Wang E L. Crop Modeling and Decision Support, Springer & Tsinghua University Press, 2009:24 - 29.
- 王伟珍, 张漫, 蒋毅琼, 等. 基于 WSN 的温室番茄光合速率预测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2):192 - 197.
- Wang Weizhen, Zhang Man, Jiang Yiqiong, et al. Photosynthetic rate prediction of tomato plants based on wireless sensor network in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 192 - 197. (in Chinese)
- Zhang Jing, Wang Shuangxi. Simulation of the canopy photosynthesis model of greenhouse tomato[J]. Procedia Engineering, 2011, 16:632 - 639.
- 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)
- 王联国, 洪毅, 赵付青, 等. 一种改进的人工鱼群算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(19):192 - 194.
- Wang Lianguo, Hong Yi, Zhao Fuqing, et al. Improved artificial fish swarm algorithm [J]. Computer Engineering, 2008, 34(19):192 - 194. (in Chinese)
- Xiao Jiaomei, Zheng Xiaoming, Wang Xihuan, et al. A modified artificial fish-swarm algorithm [J]. World Congress on Intelligent Control & Automation, 2006:3456 - 3460.
- Neshat M, Sepidnam G, Sargolzaei M, et al. Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications[J]. Artificial Intelligence Review, 2014, 42(4):965 - 997.
- Gao Y, Guan L, Wang T, et al. Optimal artificial fish swarm algorithm for the field calibration on marine navigation[J]. Measurement, 2014, 50(4):297 - 304.
- Shan X, Jiang M, Li J, et al. The routing optimization based on improved artificial fish swarm algorithm[J]. World Congress on Intelligent Control & Automation, 2006:3658 - 3662.
- Peng Y. An improved artificial fish swarm algorithm for optimal operation of cascade reservoirs. [J]. Journal of Computers, 2011, 6(4):740 - 746.
- Guo W, Fang G, Huang X. An improved chaotic artificial fish swarm algorithm and its application in optimizing cascade hydropower stations[C] // Business Management & Electronic Information International Conference, 2011:217 - 220.
- 叶子飘, 于强. 植物气孔导度的机理模型[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4):772 - 782.
- Ye Zipiao, Yu Qiang. Mechanism model of stomatal conductance[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4):772 - 782. (in Chinese)