doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.052

基于 RF－GSO 的温室番茄自适应调光系统设计与试验

苏战战[1]　李　莉[1]　李文军[1]　孟繁佳[2]　SIGRIMIS N A[3]

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083; 3. 雅典农业大学农业工程系, 雅典 11855)

摘要: 为满足温室番茄光环境的自适应调控,设计了基于 RF－GSO(随机森林-萤火虫)模型的温室番茄自适应调光系统,实现温室中温度、CO_2浓度、光照强度的实时采集,同时通过无线传感网络将信息传输到温室番茄自适应调光系统软件平台上,该平台可动态显示实时环境参数,并能实现补光灯远程调控。采用 RF－GSO 算法对温室内番茄理想光照强度进行动态计算,并将其与传感器实测光照强度间的差值作为调控参数,实现温室内番茄光环境的自适应调控。试验结果表明,系统检测的光照强度与温室调光目标值的决定系数 R^2 为 0.955,均方根误差为 2.168 μmol/(m^2·s),系统丢包率为 0.417%,说明基于 RF－GSO 的温室番茄自适应调光系统运行稳定、可靠。

关键词: 番茄; 温室; 自适应调光; 随机森林-萤火虫算法; 无线传感网络

中图分类号: S625.5+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)S0-0339-08

Design and Experiment on Adaptive Dimming System for Greenhouse Tomato Based on RF－GSO

SU Zhanzhan[1]　LI Li[1]　LI Wenjun[1]　MENG Fanjia[2]　SIGRIMIS N A[3]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Department of Agricultural Engineering*, *Athens Agricultural University*, *Athens* 11855, *Greece*)

Abstract: The suitable light environment could promote the photosynthetic rate of plants, increase the dry matter quality and then increase the fruit yield. In order to meet the adaptive regulation of greenhouse tomato light environment, a greenhouse tomato self-adaptive dimming system based on random forest－glowworm swarm optimization algorithm (RF－GSO) model was designed to realize the real-time collection of temperature, CO_2 concentration and light intensity in greenhouse. At the same time, the information was transmitted to the software platform of greenhouse tomato self-adaptive dimming system through wireless sensor network. The platform could dynamically display the real-time ring. The ambient parameters could also realize the remote control of supplementary light. The ideal illumination intensity oftomato in greenhouse was calculated dynamically by RF－GSO algorithm, and the difference between the ideal illumination intensity and the measured illumination intensity of the sensor was taken as the control parameter to realize the adaptive control of the light environment of tomato in greenhouse. The experimental results showed that the determination coefficient R^2 between the illumination intensity detected by the system and the target value of greenhouse dimming was 0.955, the root mean square error was 2.168 μmol/(m^2·s), and the system packet loss rate was 0.417%. It was showed that the adaptive dimming system of greenhouse tomato based on RF－GSO could achieve stable and reliable operation.

Key words: tomato; greenhouse; adaptive dimming; RF－GSO; wireless sensor network

0　引言

光是植物进行光合作用的主要能量来源。植物光合作用主要受温度、CO_2浓度和光照强度的影响,在光照强度过高或者不充分的条件下进行合理调光,能够提高植物的光合速率[1-3]。以提高番茄植

收稿日期: 2019－04－28　修回日期: 2019－05－28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YED0201003)和丽江市科技计划项目(LJGZZ－2018001)
作者简介: 苏战战(1994—),男,硕士生,主要从事温室环境控制研究,E-mail: 2326584792@qq.com
通信作者: 李莉(1978—),女,副教授,博士,主要从事精细农业系统集成研究,E-mail: lily@cau.edu.cn

株净光合速率为目标[4-6],研制开发符合我国农业生产实际需求的温室自适应调光系统具有重要意义。

近年来,关于温室调光系统方面的研究有很多[7]。文献[8]采用动态 LED 照明技术对向日葵补光进行了研究。文献[9]基于叶绿素荧光开发了一种 LED 光强的控制系统,但都存在光调控精度不高、系统稳定性差的问题。文献[10]设计了一种基于数控恒流技术的温室蓝莓种植光照调节器,通过 PID 控制实现光源输出亮度的恒定控制,但该补光方式存在动态调控机制不足的问题,容易造成温室作物补光不足和能源浪费。文献[11]设计了一种光环境智能检测和调控系统,根据环境温度和光照强度实时调节补光输出量,但并未考虑温室 CO_2 的影响,影响了温室光环境调控的精度。文献[12-13]设计了基于苗期番茄光合需求的光环境调控系统,虽然在调控策略上考虑了温室中温、光、气等多个环境因素,但缺乏上位机控制系统,无法实现对调光系统不同调光策略终端的同步监控。

针对上述问题,本文以番茄为对象,在考虑温室多环境因素的基础上,基于随机森林-萤火虫(RF-GSO)算法建立温室番茄自适应调光模型,采用模块化设计调光系统监控节点,Qt 设计系统软件平台,以无线通信方式进行数据传输,实现温室光环境参数的实时监测与调控。

1 自适应调光系统总体设计

1.1 系统总体设计

温室番茄自适应调光系统主要由 4 部分构成:监控节点、无线通信网络、智能网关和系统软件,总体结构如图 1 所示。其中,监控节点实现温室中温度、CO_2 浓度、光照强度的实时采集,同时将采集得到的环境信息通过网络传输到上位机软件平台,上位机软件平台除了具备接收节点数据、发送调光控制指令、数据库存储数据的功能,还可以通过建立模型实现光环境的自适应调控。上位机与网关之间通过 WiFi 的通信方式,网关和节点之间采用 ZigBee 通信,上位机发送指令给网关,网关通过 ZigBee 传输的方式发送给终端节点,执行相应的控制指令。

1.2 监控节点设计

1.2.1 监控节点电路设计

监控节点电路主要完成温室中温度、CO_2 浓度、光照强度环境信息的实时采集以及调光控制信号的接收和放大,它既是温室环境信息的采集终端,也是实现温室番茄自适应补光的执行机构。监控节点通过调光外围电路的多种接口连接传感器,实现对温室环境信息的实时采集与上传;通过 ZigBee 网络实现对调光系统监控节点温室环境信息的实时上传以及接收网关转发的控制指令。调光系统监控节点主要包括调光电路模块、传感器模块、控制信号放大模块、调光电源模块、补光灯、电源模块,监控节点结构如图 2 所示。

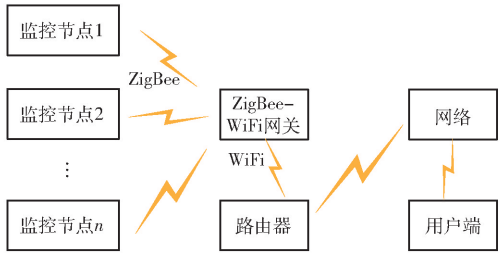


图 1 调光系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of dimming system

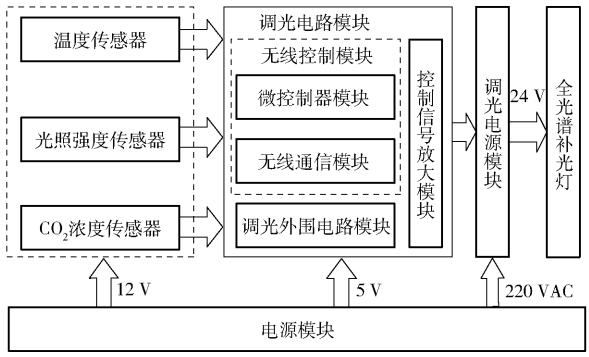


图 2 调光系统监控节点设计结构图

Fig. 2 Design of monitoring node for dimming system

(1)调光电路模块

调光电路模块,主要完成无线通信功能以及 PWM 控制信号的输出(PWM 控制信号是作为调光电源的输入信号,可以控制调光电源的输出电流)。如图 3 所示,该模块主要包括无线控制模块、控制信号放大模块以及调光外围电路模块。其中无线控制模块由微控制器模块和无线通信模块组成,主要以 CC2530DRF1605 作为核心器件,以满足调光系统低功耗的要求。控制信号放大模块主要是实现把调光外围电路输出信号从 0~3.3 V 放大至 0~10 V,放大后的控制信号作为调光电源的输入信号,控制调光电源电流的等比输出。调光外围电路模块是无线控制模块的外设接口电路。

(2)传感器模块

传感器模块,包括温度传感器、光照强度传感器、CO_2 浓度传感器,主要是完成对温室内温度、光照、CO_2 浓度信息的采集,为了保证调光系统监控节点对于温室内环境信息采集的稳定性和准确性,选用了如表 1 所示的 3 种传感器。

(3)调光电源与补光灯模块

调光电源与补光灯模块,主要实现对补光灯的

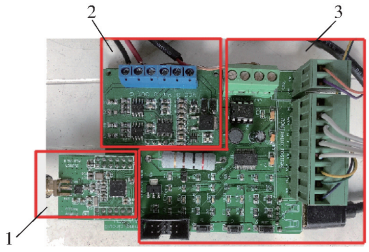


图 3　调光系统调光电路模块

Fig. 3　Dimming circuit module of dimming system

1. 无线控制模块　2. 控制信号放大模块　3. 调光外围电路模块

表 1　传感器主要参数

Tab. 1　Main parameters of sensors

传感器类型	测量范围	精度	工作电压/V
光照强度	0～1 212.4 μmol/(m^2·s)	±5%	3～5
温度	－40～123.8℃	±1℃	2.4～5.5
CO_2浓度	0～10 000 μmol/mol	1 μmol/mol	9～24

光强控制。通过接收调光电路模块输出的 PWM 控制信号，控制调光电源电流的输出，达到调节补光灯的目的。调光电源最大输出功率为 100 W，DC24V 恒压电流源（调光电源根据补光灯的型号进行选型，这里选用 DC24V 全光谱补光灯）

1.2.2　调光节点应用封装

将调光电路模块、调光电源放在容纳盒内部，容纳盒顶部打孔，并引出调光电路模块天线，利用伸缩杆固定容纳盒，容纳盒底部固定铝合金板，并将补光灯固定在铝合金板上（主要起到散热作用），如图 4 所示。



图 4　调光系统监控节点封装应用

Fig. 4　Application of monitoring node package in dimming system

1. 伸缩杆　2. 天线　3. 容纳盒　4. 铝合金板　5. 补光灯

1.3　上位机软件平台设计

系统软件基于 Qt 平台开发，它是综合性跨平台的 C＋＋应用开发框架，开发环境是一种高性能、高可靠的图形用户界面库[14－15]，通过该环境可编译显示软件效果，Qt 的良好封装机制使其模块化程度非常高，可重用性较高，开发效果好，图 5 为温室番茄自适应调光系统软件界面。

温室番茄调光系统软件是系统的管理中心，能够实现数据的存储与显示以及曲线图绘制，监控节点远程控制和番茄补光灯自动调控等功能。软件的功能结构主要包括数据接收发送模块、数据存储与显示模块、番茄补光灯调光控制模块。

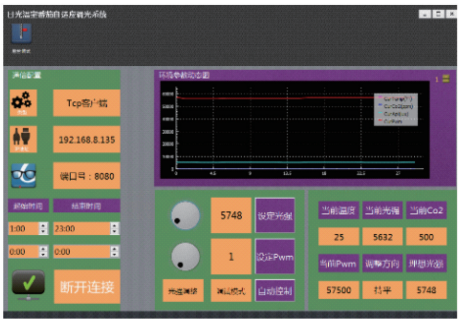


图 5　温室番茄自适应调光系统软件界面

Fig. 5　Software interface of adaptive dimming system for greenhouse tomato

（1）数据接收发送模块

数据接收发送模块主要完成与 ZigBee 网关中的 ESP8266 模块之间的数据收发，可以将网关发送的传感器数据信息显示在软件的数据接收窗口中，根据需要向 ZigBee 网关发送控制指令。番茄调光控制软件作为服务器端，ESP8266 设置为 AP 模式，作为客户端，通过输入 IP 地址，建立有效连接。

（2）数据存储与显示模块

数据存储与显示模块主要将 ZigBee 网关发送的数据包进行解析，并存储到服务器的数据库中，动态曲线图通过 Qt 的图形编辑器的绘图控件进行绘制。

（3）番茄补光灯调光控制模块

通过建立番茄自适应补光模型，将当前的日光温室环境信息作为自适应补光模型的输入，利用模型计算当前番茄的理想调光阈值，从而实现温室番茄光环境的自适应调控。

2　自适应调光模型建立过程

随机森林算法是一种新兴的机器学习算法，与支持向量机（SVM）、人工神经网络（ANN）相比，具有泛化误差可控、调节参数少、预测精度高等优点，能够有效避免过拟合问题[16－17]，人工萤火虫群优化（GSO）算法结构简单、寻优能力较强[18－19]，本次系统调控模型拟采用随机森林-萤火虫算法（Random forest－glowworm swarm optimization，RF－GSO）设计。以温度、CO_2浓度、光照强度信息数据作为温室番茄自适应调光模型的输入变量，通过 RF－GSO 算法对温室内番茄理想光照强度进行动态计算，将理想光照强度与实测值的差值作为调控参数，采用闭环控制实现温室内番茄光环境的自适应调控。

2.1 基于随机森林算法的净光合速率模型

采用随机森林算法建立番茄净光合速率模型

$$G(x,y,z)=\text{average}\sum_{k=1}^{1\,000}g_k(x,y,z) \tag{1}$$

式中 x——温度,℃

y——CO_2浓度,μmol/mol

z——光子通量密度,μmol/(m²·s)

$g_k(x,y,z)$——随机森林回归决策树

$G(x,y,z)$——番茄植株净光合速率,μmol/(m²·s)

同时利用测试集样本对随机森林算法得到的番茄净光合速率模型进行验证,如图 6 所示,R^2 = 0.983 1,预测精度较高。图中,u 为净光合速率预测值,v 为净光合速率实测值。

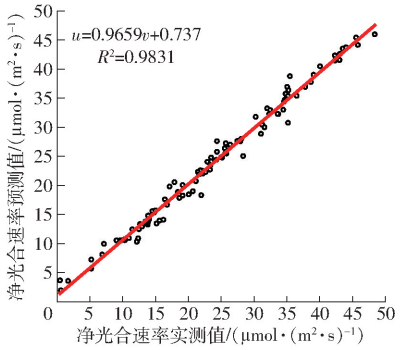


图 6 基于 RF 算法的模型预测样本精度关系

Fig. 6 Model prediction sample accuracy relationship diagram based on RF algorithm

2.2 基于萤火虫算法的光饱和点寻优

采用萤火虫算法对温室番茄理想光照强度进行寻优,如图 7 所示。

针对拟合得到的净光合速率模型 $G(x,y,z)$,提取温度、CO_2浓度交互下的光饱和点寻优条件,得到特定温度、CO_2浓度下的网络目标函数 $G(x,y_i,z_j)$,令

$$J_m=G(x,y_i,z_j) \tag{2}$$

式中 J_m——萤火虫寻优过程中的目标函数

使用 InitializeGSO 随机初始化萤火虫的位置,产生萤火虫的空间位置向量

$$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_i,\cdots,x_n) \tag{3}$$

式中 x_i——萤火虫算法欲寻优的光饱和点

$$l_i(t+1)=(1-\rho)l_i(t)+\gamma J(x_i(t+1)) \tag{4}$$

式中 $J(x_i(t+1))$——萤火虫 i 在 $t+1$ 时刻所在位置的目标函数

$l_i(t)$——萤火虫 i 在 t 时刻荧光素

ρ——荧光素挥发因子

γ——适应度提取比例

计算每只萤火虫个体的荧光素,萤火虫个体的荧光素与所在位置上的目标函数值有关,荧光素浓度越大,萤火虫亮度也越大,表示萤火虫个体所处位置越好,有较优目标函数值。

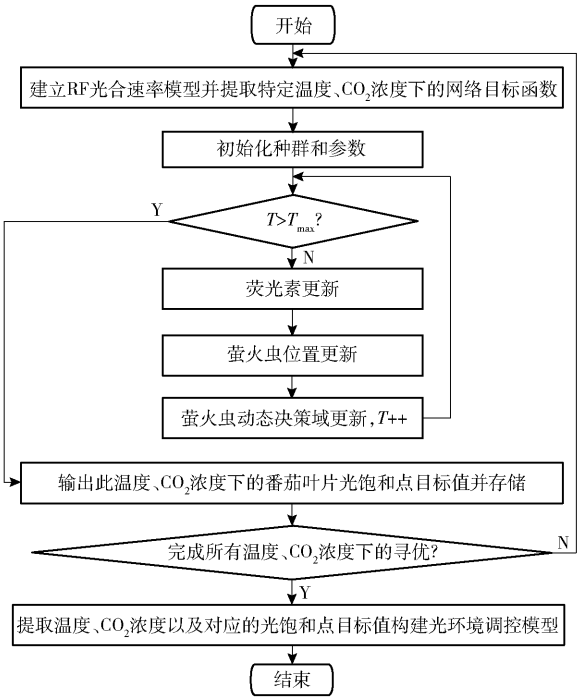


图 7 基于萤火虫算法的番茄光饱和点寻优过程

Fig. 7 Optimizing process of tomato light saturation point based on firefly algorithm

确定萤火虫移动方向,每次迭代,决策域中每只萤火虫都会继续寻找比自己大的荧光素个体构成新的邻域集合 $N(i)$,在邻域集合内通过轮盘赌算法选择一个合适的萤火虫,并向其移动,邻域集合内每一只萤火虫被选中的概率为

$$p_{ij}(t)=\frac{l_j(t)-l_i(t)}{\sum_{k\in N_i(t)}(l_k(t)-l_i(t))} \tag{5}$$

其中 $N_i(t)=\{j:d_{i,j}(t)<r_d^i;l_i(t)<l_j(t)\}$

式中 $d_{i,j}(t)$——在 t 次迭代萤火虫 i 与萤火虫 j 之间的空间距离

r_d^i——萤火虫 i 的动态决策域

确定萤火虫移动方向后,对萤火虫进行位置更新

$$x_i(t+1)=x_i(t)+s\frac{x_j(t)-x_i(t)}{\|x_j(t)-x_i(t)\|} \tag{6}$$

式中 s——萤火虫的固定移动步长

萤火虫位置更新后,萤火虫的动态决策域也相应地进行更新

$$r_d^i(t+1)=\min(r_s,\max(0,r_d^i(t),\beta(n_t-|N_i(t)|))) \tag{7}$$

式中 r_s——萤火虫的感知半径

β——萤火虫动态决策域的调节因子

n_t——萤火虫邻域集合阈值

重复上述过程，随着迭代次数的增加，所有的萤火虫个体都将会聚集在解空间中一定的位置处，即最优解位置，当达到最大迭代次数 N 时，输出最优值。

2.3　番茄光环境优化调控模型

完成所有温度、CO_2 浓度交互下的光饱和点寻优后，基于寻优结果，以温度和 CO_2 浓度作为自变量，番茄植株光饱点 $f(y,z)$ 作为因变量，利用非线性回归的方法构建温室番茄自适应调光模型，其函数关系式为

$$f(y,z)=990.149-0.1211y^3-0.0001z^2+6.9606y^2+0.0003z^2y+0.4151z-106.4715y-0.0044yz \quad (8)$$

调光模型的三维图如图 8 所示，随着温度和 CO_2 浓度的增加，番茄的理想光子通量密度持续增加，当温度超过 30℃ 时以及 CO_2 浓度超出 1 700 μmol/mol 时，出现光抑制现象。

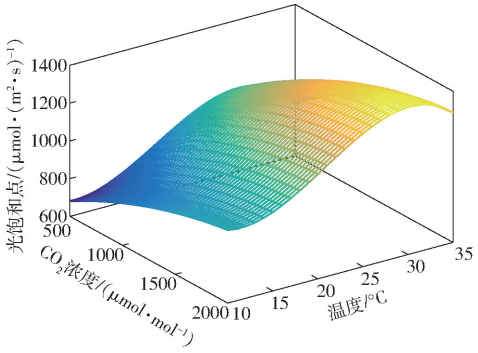


图 8　光环境优化调控模型

Fig. 8　Optimum regulation model of light environment

3　系统性能试验与结果分析

为了测试调光系统的性能，从系统通信可靠性，调光准确性出发，设计试验；以监控节点到网关之间、监控节点到上位机软件平台之间信号传输的丢包率为指标，来评价系统的通信可靠性；以温室番茄在补光周期内理想光照强度与调光系统实际监测光强值作对比，分析系统调光的准确性。同时试验增加固定阈值补光节点与 RF－GSO 动态阈值补光节点作对比，通过分析温室番茄净光合速率日变化曲线、光照强度日变化曲线、补光量日变化曲线来评价 RF－GSO 动态阈值补光的效果。

3.1　试验环境搭建

3.1.1　试验材料

试验在中国农业大学信息与电气工程学院楼顶日光温室（该日光温室后墙高度 2 m，跨度 4 m）内进行，本次试验对象为初果期番茄，供试番茄品种为杠六九，番茄采用种植槽（槽长 1 m，宽 30 cm，高 20 cm）进行定植，受限于温室面积，选择 24 株番茄作为研究对象，共 3 个种植槽，每个种植槽定植 8 株番茄。为了保持合适的株距，番茄在种植槽内采用交错式种植方式，番茄生长基质为番茄初果期专用基质，基质由草炭、砾石、珍珠岩、鸡粪按照 3∶1∶1∶1 构成。由于初果期番茄对于水肥的需求较大，试验期间，每隔 2 d，利用水肥一体机施一次水肥。

3.1.2　试验测量方法

如图 9 所示，试验对温室中 2 个种植槽 A、B 的番茄分别进行补光，并设置对照组种植槽 C，对照组番茄不补光。种植槽 A 中采用基于 RF－GSO 的动态阈值补光，对应节点 1；种植槽 B 中的番茄采用恒定阈值补光（根据番茄生长适宜环境下最优光饱和点确定[20]，设定固定补光阈值为 1 212 μmol/(m²·s)），对应节点 2。为了减少补光灯之间的相互影响，种植槽之间利用遮光布进行遮光处理。由于番茄生长所需的光周期为 14 h，通过调光系统软件设定节点 1 与节点 2 的系统补光时间为 06∶00—20∶00。对比试验于 2019 年 4 月 22 日开始。

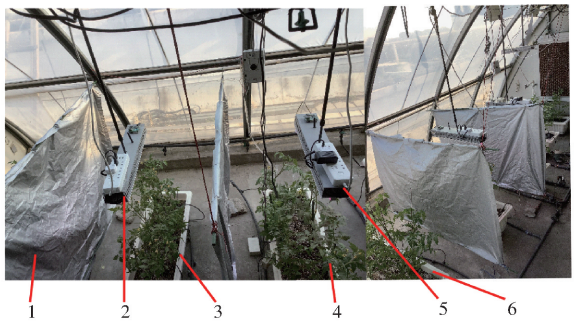


图 9　试验装置现场安装图

Fig. 9　Field installation diagram of test device

1. 遮光布　2. 节点 1　3. 种植槽 A　4. 种植槽 B　5. 节点 2　6. 种植槽 C

使用 LI－6400XT 型光合速率仪对番茄植株净光合速率进行测量，在测量过程中，待番茄净光合速率稳定后（变化幅度在 2 μmol/(m²·s) 以内），记录此环境下的净光合速率，每组测量在同一株番茄上数第 5 片展开功能叶片上重复 3 次并取平均值。使用调光系统监控节点监测番茄冠层光照强度、温室环境温度、CO_2 浓度，使用昆仑海岸光照传感器测量温室环境光照强度。

3.2　调光系统性能测试试验

3.2.1　通信可靠性

通信可靠性试验主要测试监控节点到网关，网关到上位机通信过程中的丢包率，测试地点同上，其中监控节点与智能网关之间距离 8 m，温度传感器、CO_2 浓度传感器、光照强度传感器设置采集周期为 5 s，测试时间为 10∶00—16∶00，经过连续 6 h 的测

试,结果如表 2 所示,可知丢包率仅为 0.417%。

表 2 通信可靠性测试结果

Tab. 2 Test results of communication reliability

发送端	接收端	发送包/个	接收包/个	丢包数/个	丢包率/%
监控节点	网关	4 320	4 302	18	0.417
网关	上位机	4 320	4 302	18	0.417

3.2.2 调光效果验证

测量温室番茄自适应调光系统在补光周期内(06:00—20:00)整点的温度、CO_2浓度、光照强度数据,其中光照强度指的是番茄植株冠层附近的光照强度。利用 LI-6400XT 型光合速率仪测量对应温度、CO_2浓度交互作用下初果期番茄植株的净光合速率以及光响应曲线,从而得到各个温度、CO_2浓度交互作用下番茄植株光饱和点的实测值,即番茄植株的理想光照强度,共 14 组数据。通过与温室番茄自适应调光系统的监测光照强度进行对比,分析温室番茄自适应调光系统监测光照强度与番茄光饱和点实测值的相关性,如图 10 所示,$R^2=0.955$,均方根误差为 2.168 μmol/(m²·s)。图中 h 为调光系统实际工作光照强度,k 为光饱和点实测值。

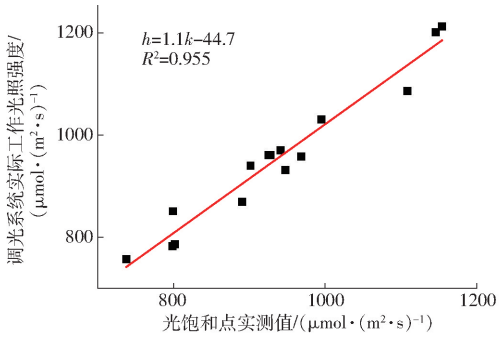


图 10 监测光照强度与光饱和点实测值相关性分析

Fig. 10 Analysis of correlation between monitored light intensity and measured light saturation point

3.2.3 固定阈值补光与动态阈值补光试验

(1)温室番茄净光合速率对比

在温室番茄自适应调光系统运行下,利用 LI-6400XT 型光合速率仪分别对种植槽 A 以及种植槽 B 内的番茄植株进行净光合速率测量,种植槽 A 与 B 内番茄的日净光合速率变化曲线如图 11c 所示,两种补光方式下的番茄净光合速率变化趋势一致,净光合速率均经历增加-下降-再增加-再下降的过程。结合图 11a、11b,发现 06:00—10:00,温度较低,07:00 前低于 15℃;10:00—14:00,温度较高,10:00 以后大于 35℃;由于节点 1 根据温室环境的温度和 CO_2浓度进行温室光环境的调控,而节点 2 按照最大光照强度进行补光,导致节点 2 下种植槽 A 中番茄植株出现了光抑制的现象,此时种植槽 A 中番茄的净光合速率大于种植槽 B 中番茄的净光合速率。06:00—10:00,随着温度的增加,温室番茄所需的理想光照强度逐渐增大,种植槽 B 中的番茄净光合速率略高于种植槽 A 中番茄植株的净光合速率;10:00—14:00,由于光抑制现象随着温室内 CO_2浓度降低而减弱,温度继续增加,种植槽 A 内番茄净光合速率高于种植槽 B 内的番茄,且种植槽 A 与 B 内番茄净光合速率差值逐渐增大;到了 15:00 以后,由于温度下降,CO_2浓度增加,光抑制现象减弱,种植槽 B 中番茄净光合速率逐渐趋近于种植槽 A 中番茄植株的净光合速率,且随着温度进一步下降,CO_2浓度进一步升高,番茄所需理想光照强度加大,种植槽 B 中番茄的净光合速率略高于种植槽 A 中番茄的净光合速率。

(2)节点光照强度对比

如图 12 所示,测量固定阈值、动态阈值模式下,温室番茄植株冠层附近的光照强度,该位置的光照强度等于环境光照强度加上补光量(补光灯在冠层附近所产生的光照强度)。06:00—20:00,采用动态阈值补光的节点 1 根据温室内当前的环境信息(温度、CO_2浓度),利用 RF-GSO 动态补光模型计算种植槽 A 中番茄所需的理想光照强度作为补光阈值,并利用其与节点 1 光照传感器输出值之间的差值进行补光;采用固定阈值补光的节点2会根据

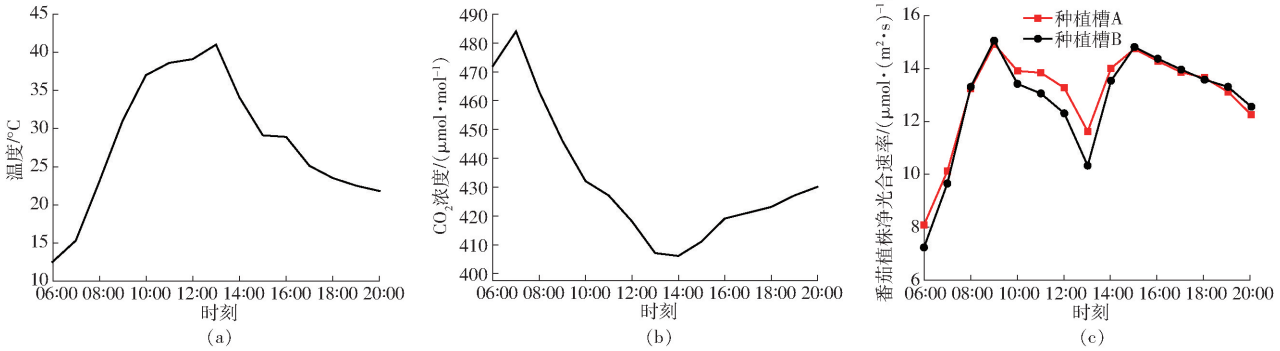


图 11 参数变化曲线

Fig. 11 Parametric variation curves

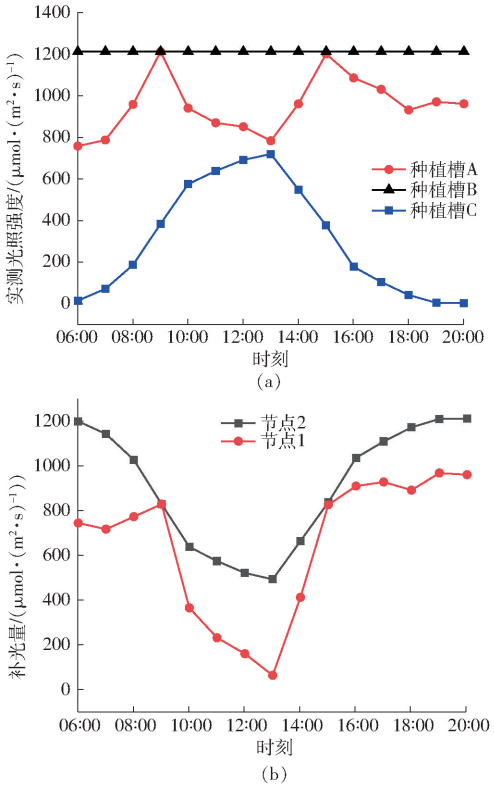


图 12　两种补光方式下光照强度与补光量日变化对比

Fig. 12　Comparison of diurnal variations of illumination intensity and illumination supplement under two different light supplement modes

固定阈值与节点 2 光照传感器输出值之间的差值调节补光灯光强，使种植槽 B 中番茄冠层光照强度达到设定值。固定阈值补光量与动态阈值补光量如图 12b 所示，可以看出节点 1 日补光量小于节点 2 日补光量。

4　结论

（1）以随机森林算法建立的番茄净光合速率预测模型作为寻优目标函数输入，采用萤火虫算法进行不同温度和 CO_2 浓度下的光饱和点寻优。基于萤火虫算法的寻优结果，以温度、CO_2 浓度为自变量，番茄植株光饱点为因变量，采用非线性拟合的方法建立了温室番茄的自适应调光模型。

（2）试验验证结果表明，温室番茄自适应调光系统监测光照强度值与番茄光饱和点实测值线性相关，决定系数 R^2 为 0.955，均方根误差为 2.168 μmol/(m²·s)，该温室番茄自适应调光系统能够满足温室番茄对于理想光环境的需求，可实现对温室番茄光环境的精确调控。

（3）设计的温室番茄自适应调光系统能够实现对温室内温度、CO_2 浓度、光照强度等环境信息的实时测量以及对温室光环境的自适应调控，且系统无线传输稳定，运行正常，经测试系统丢包率仅为 0.417%。

（4）将基于 RF－GSO 动态阈值补光与固定阈值补光进行对比分析，发现在提高温室番茄净光合速率上，动态阈值补光与固定阈值补光相差不大，由于光抑制现象，动态阈值补光总体上略好于固定阈值补光。在补光量上，动态阈值补光量明显小于固定阈值的补光量。

参　考　文　献

[1]　闫文凯. 日光温室人工补光对番茄光合作用及生长的影响[D]. 北京：中国农业科学院，2018.
YAN Wenkai. Effects of artificial light supplementation on photosynthesis and growth of tomato in solar greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)

[2]　路涛. 亚高温强光胁迫下番茄幼苗光抑制及光保护机制研究[D]. 沈阳：沈阳农业大学，2016.
LU Tao. Photoinhibition and photoprotection mechanism of tomato seedlings under sub-high temperature and high light stress [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[3]　何静雯，明萌，卢丹，等. 弱光胁迫对植物生理特性影响的研究进展[J]. 中国农学通报，2018，34(6)：123－130.
HE Jingwen, MING Meng, LU Dan, et al. Research progress on the effects of weak light stress on plant physiological characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(6): 123－130. (in Chinese)

[4]　胡瑾，闫柯，何东健，等. 基于改进型鱼群算法的番茄光环境调控目标值模型[J]. 农业机械学报，2016，47(1)：260－265.
HU Jin, YAN Ke, HE Dongjian, et al. A model of tomato light environment regulation target value based on improved fish swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 260－265. (in Chinese)

[5]　辛萍萍，张珍，王智永，等. 基于支持向量机-改进型鱼群算法的 CO_2 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. CO_2 optimization control model based on support vector machine-improved fish swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 249－256. (in Chinese)

[6]　刘新英，殷鉴，李寒，等. CO_2 与氮肥交互作用的番茄光合速率预测模型[J]. 农业机械学报，2017，48(增刊)：334－340.
LIU Xinying, YIN Jian, LI Han, et al. The prediction model of tomato photosynthesis rate by interaction of CO_2 and nitrogen fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 334－340. (in Chinese)

[7]　于海业，孔丽娟，刘爽，等. 植物生产的光环境因子调控应用综述[J]. 农机化研究，2018，40(8)：1－9.
YU Haiye, KONG Lijuan, LIU Shuang, et al. A review of the application of light environmental factors in plant production [J].

Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 1 - 9. (in Chinese)
[8] SCHWEND T, BECK M, PRUCKER D, et al. Test of a PAR sensor-based, dynamic regulation of LED lighting in greenhouse cultivation of helianthus annuus[J]. European Journal of Horticultural Science, 2016, 81(3):152 - 156.
[9] IERSEL M W V, WEAVER G, MARTIN M T, et al. A chlorophyll fluorescence-based biofeedback system to control photosynthetic lighting in controlled environment agriculture[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2016, 141(2):169 - 176.
[10] 唐宇,骆少明,黄伟锋,等. 基于数控恒流技术的蓝莓光照调节器设计[J]. 农机化研究,2018,40(8):52 - 57,69.
TANG Yu, LUO Shaoming, HUANG Weifeng, et al. Design of blueberry illumination regulator based on numerical control constant current technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 52 - 57,69. (in Chinese)
[11] 刘翔. 基于光温耦合的设施光环境检测与智能调控系统设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015.
LIU Xiang. Design of facility light environment detection and intelligent control system based on light-temperature coupling [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
[12] 胡瑾,樊宏攀,张海辉,等. 基于无线传感器网络的温室光环境调控系统设计[J]. 农业工程学报,2014,30(4):160 - 167.
HU Jin, FAN Hongpan, ZHANG Haihui, et al. Design of greenhouse light environment control system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 160 - 167. (in Chinese)
[13] 樊宏攀. 基于多因子耦合的光环境调控系统研究与设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
FAN Hongpan. Research and design of light environment control system based on multi-factor coupling [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
[14] 何小英. 基于物联网的家庭节能控制系统研究[D]. 荆州:长江大学,2018.
HE Xiaoying. Research on home energy-saving control system based on internet of things [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018. (in Chinese)
[15] MONTEIRO F R, GARCIA M A P, CORDEIRO L C, et al. Bounded model checking of C + + programs based on the Qt cross-platform framework[J]. Software Testing, Verification and Reliability, 2017, 27(3):1 - 16.
[16] 王升,付智勇,陈洪松,等. 基于随机森林算法的参考作物蒸发蒸腾量模拟计算[J]. 农业机械学报,2017,48(3):302 - 309.
WANG Sheng, FU Zhiyong, CHEN Hongsong, et al. Simulation calculation of reference crop evapotranspiration based on random forest algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 302 - 309. (in Chinese)
[17] YANG Renmin, ZHANG Ganlin, LIU Feng, et al. Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem[J]. Ecological Indicators, 2016, 60(1):870 - 878.
[18] 邹东尧,刘碧微,杨威. 基于飞行理论萤火虫算法的 TDOA 与 GROA 定位机制[J]. 计算机应用研究,2017,34(9):2768 - 2772.
ZOU Dongyao, LIU Biwei, YANG Wei. TDOA and GROA positioning mechanism based on flight theory firefly algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 34(9): 2768 - 2772. (in Chinese)
[19] MARINAKI M, MARINAKIS Y. A glowworm swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. Expert Systems with Applications, 2016, 46(10):145 - 163.
[20] 丁兆堂,卢育华,徐坤. 环境因子对番茄光合特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2003,34(3):356 - 360.
DING Zhaotang, LU Yuhua, XU Kun. Effects of environmental factors on photosynthetic characteristics of tomato[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2003, 34(3):356 - 360. (in Chinese)

(上接第 323 页)

[16] 程杉. 含分布式电源的配电网多目标优化问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
CHENG Shan. Study on multi-objective optimization of distribution network with distributed generation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
[17] 程梅. 基于改进粒子群和遗传算法的配电网重构研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2018.
CHENG Mei. Research on distribution network reconfiguration based on improved particle swarm and genetic algorithm[D]. Maanshan: Anhui University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
[18] BERGH F V D, ENGELBRECHT A P. A cooperative approach to particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):225 - 239.
[19] 赵永乐. 基于协同粒子群算法的卷积神经网络优化研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
ZHAO Yongle. Research on the convolutional neural networks optimization based on cooperative particle swarm algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
[20] 程文星. 基于改进粒子群算法的电力系统无功优化研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2018.
CHENG Wenxing. Research on reactive power optimization of power system based on improved particle swarm optimization [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2018. (in Chinese)