

基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统研究^{*}

季宇寒 李 婷 张 漫 沙 莎

(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)

摘要: CO₂ 是植物进行光合作用的重要原料,合理增施可提高作物的光合速率。为实现温室 CO₂ 气肥的精细管理,设计了基于无线传感器网络(WSN)的温室 CO₂ 气肥调控系统。该系统由监控节点、智能网关和远程管理软件组成,其中监控节点能够自动实时监测温室环境信息(CO₂ 浓度、光照强度、空气温湿度和土壤温湿度),并控制 CO₂ 增施气阀的开关;智能网关不仅能实现监控节点与远程管理软件之间的通信,还可在本地实现对温室环境信息的显示与存储,以及 CO₂ 增施调控等操作;远程管理软件除了具备基本的数据接收、存储和查询功能外,还可通过建立的光合速率预测模型对 CO₂ 气肥实现远程自动调控。本文以番茄为研究对象,采用开发的系统实时获取环境信息,使用 LI-6400XT 光合速率仪获取单叶净光合速率,建立了基于支持向量机(SVM)的番茄光合速率预测模型。为了提高预测模型的通用性,实验将苗后期番茄在 4 个 CO₂ 浓度梯度进行培育,其中 C1、C2、C3 分别进行 700、1 000、1 300 μmol/mol 浓度的 CO₂ 增施,CK 为对照组(CO₂ 浓度约为 450 μmol/mol)。数据分析采用 SVM 算法,以多种环境信息作为输入变量,以单叶净光合速率作为输出变量,得到光合速率预测模型。经过测试与验证,CO₂ 浓度调控系统能够稳定可靠地采集温室环境信息,适合应用在温室环境中;光合速率模型预测值和实测值相关系数为 0.981 5,均方根误差为 1.092 5 μmol/(m²·s),具有较好的预测效果,为温室番茄 CO₂ 定量增施调控提供了依据。

关键词: 温室 CO₂ 调控系统 无线传感器网络

中图分类号: S625.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0201-07

Design of CO₂ Fertilizer Optimizing Control System on WSN

Ji Yuhan Li Ting Zhang Man Sha Sha

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education,
China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Carbon dioxide (CO₂) is an important raw material of the plant photosynthesis. Increasing CO₂ fertilizer rationally can improve the net photosynthetic rate of plant leaf, and further improve crop yield and quality. To achieve precision management of CO₂ fertilizer in greenhouse, a greenhouse CO₂ fertilizer optimizing control system based on wireless sensor network (WSN) was designed and developed. The whole system includes four monitoring and controlling nodes, an intelligent gateway and a remote management software. The monitoring and controlling node, which connected to sensors and an electromagnet, can real time monitor greenhouse environmental parameters and control the switch of CO₂ source according to the demand of crop. The intelligent gateway can process and transmit the data and commands between nodes and remote management software. It can also storage and display environment parameters locally. Besides, user can control the CO₂ source by gateway. The remote management software, which embeds photosynthetic rate prediction model, can not only process and transmit the data, but also control CO₂ fertilizer remotely. To achieve precision management of CO₂ fertilizer supplement, it was necessary to build an accurate and reliable net photosynthetic rate prediction model. The paper

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-09
^{*} 国家自然科学基金资助项目(31271619)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110008130006)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015XD004)
作者简介: 季宇寒, 硕士生, 主要从事无线传感器网络应用研究, E-mail: jyh1009845844@163.com
通讯作者: 张漫, 副教授, 博士生导师, 主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

measured environment parameters by the system above mentioned, and obtained single-leaf net photosynthetic rate by LI-6400XT photosynthesis analyzer. Then a photosynthetic rate prediction model based on SVM was established. In order to improve the generality of prediction model, tomatoes in late seedling stage were cultivated in four different fertilizer levels ($(700 \pm 50) \mu\text{mol/mol}$ (C1), $(1\,000 \pm 50) \mu\text{mol/mol}$ (C2), $(1\,300 \pm 50) \mu\text{mol/mol}$ (C3), ambient about $450 \mu\text{mol/mol}$ (CK)). The photosynthetic rate prediction model was established by support vector machine (SVM). The environment parameters were used as input variables, and the photosynthetic rate was taken as output variable. The performances of designed system and prediction model were evaluated. The system can work stably and reliably, therefore it can be used to monitor environment information and control the CO_2 fertilizer in solar greenhouse. The prediction results of the model showed that R between predicted and measured data was 0.981 5 and RMSE was $1.092\,5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. According to the analysis, it was concluded that the prediction model can be good used as the basis of the quantitative regulation of CO_2 fertilization to tomato plants in greenhouse.

Key words: Greenhouse CO_2 controlling system Wireless sensor network

引言

为实现温室环境的准确控制,需要对温室环境进行实时监测。传统的有线传感器网络存在布线繁琐、维护困难等问题。无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)具有低功耗、低成本等优点^[1-3],为温室环境监测提供了一种部署方便、易于维护、成本低廉的新方案。Baviskar等^[4]设计了基于802.15.4协议的温室实时监控系統。Gomes等^[5]设计了温室环境监测系统,能够采集温室内多种环境信息,并能提供丰富的网络数据服务。毛鹏军等^[6]设计了基于CC2530的温室环境无线监测系统,能采集多种环境信息,并可在上位机软件中查询。蒋毅琼等^[7]设计了基于JN5139的温室 CO_2 气肥调控系统,能够同时采集温室作物的冠层与底层 CO_2 浓度,并能自动控制 CO_2 气肥的增施。胡瑾等^[8]设计了温室光环境调控系统,通过WSN网络采集光照与温度信息,并控制补光灯亮度。上述研究多集中在温室环境信息的采集,控制涉及较少;另一方面,网关多采用透传方式,不利于在温室本地对环境信息的查询与调控。

植物光合速率受光照强度、 CO_2 浓度、温湿度等多种因素影响。胡瑾等^[9]提出了基于遗传算法的番茄幼苗光合速率多元非线性模型,探究不同温度条件下的光饱和点。张海辉等^[10]在环境因子基础上融合叶绿素含量,建立黄瓜幼苗光合速率神经网络模型。李天来等^[11]建立了温室番茄单叶净光合速率的温度修正模型。 CO_2 是光合作用的重要原料,直接影响作物的暗反应速率和干物质的积累^[12-13]。温室 CO_2 调控具有重要意义,但目前方法多是定时固定浓度的简单控制,缺少基于光合速

率模型的智能控制。

针对以上问题,本文设计基于WSN的温室 CO_2 气肥优化调控系统,完成对温室环境信息的自动监测,并通过建立的光合速率模型实现 CO_2 浓度的控制。用户可通过智能网关在温室本地或通过远程管理软件查询温室环境信息并对 CO_2 气瓶进行控制。

1 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统设计

1.1 系统整体架构设计

温室 CO_2 气肥调控系统由监控节点、智能网关和远程管理软件3部分组成。系统的整体框架如图1所示,其中监控节点是系统的采集终端与执行机构,通过连接各种传感器采集温室内的环境信息,并能够控制电磁阀的开关。智能网关是监控节点与远程管理软件之间的桥梁,通过ZigBee网络汇聚监控节点采集的环境信息,还可向监控节点发送控制指令;通过GPRS网络将环境信息发送给远程服务器,并能够接收远程管理软件发送的指令。智能网关还能完成温室内的数据存储与显示、传感器与 CO_2 气阀控制。远程管理软件是系统的管理中心,能够完成环境信息存储与查询、曲线图绘制、 CO_2 自动调控等功能,特别是内嵌了光合速率预测模型,通过模型预测最适宜的 CO_2 浓度,实现温室 CO_2 气肥的智能调控。

1.2 WSN 系统设计

1.2.1 监控节点设计

监控节点是环境信息的采集终端,也是 CO_2 调控的执行机构。监控节点通过多种接口连接传感器,定时采集环境信息;通过I/O引脚控制继电器通断,控制 CO_2 气阀开关;通过ZigBee网

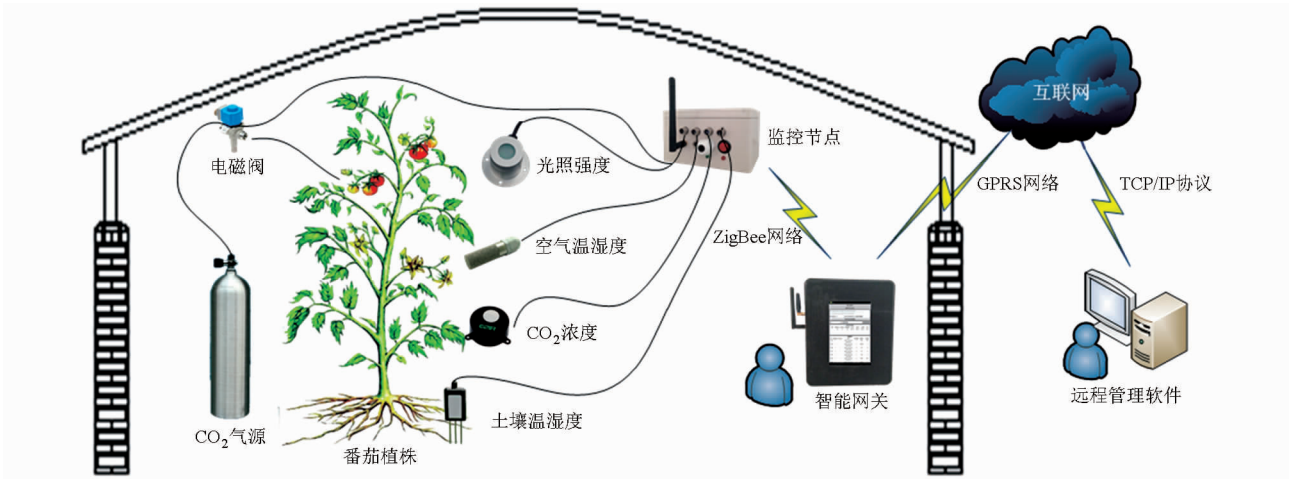


图 1 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统整体框架

Fig. 1 Overall framework of greenhouse CO₂ fertilizer optimizing control system on WSN

络,上传环境信息与接收控制指令。监控节点的硬件结构如图 2 所示,主要包括无线微控制模块、传感器模块、继电器模块和电源管理与程序下载模块。

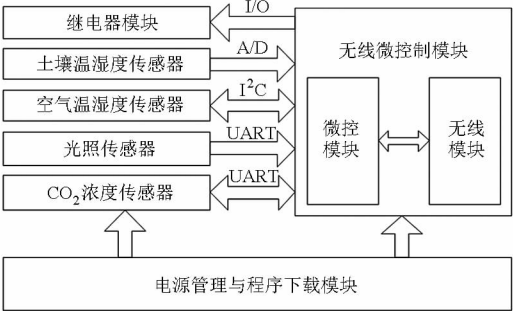


图 2 监控节点硬件结构框图

Fig. 2 Hardware structure of monitoring and controlling node

(1) 无线微控制模块

无线微控制模块主要完成控制与通信功能。其中,控制部分完成传感器数据的采集与继电器的控

制;通信部分完成 ZigBee 组网与无线数据收发。两部分之间也可通信以完成数据的无线发送与控制指令的执行。监控节点选用 JN5168-001-M06 高功率无线微控制器模块。

(2) 传感器与继电器模块

为了准确、可靠地测量温室环境信息,在综合了测量精度、功耗、稳定性等因素后,监控节点选用如表 1 所示的 4 种传感器。

为了安全有效控制 CO₂ 气阀的开关,选用单路光耦隔离继电器。该继电器 5 V 供电,3.3 V 通断控制,可负载 10A 250VAC 或 10A 30VDC,能够满足电磁阀控制需求。

(3) 电源管理与程序下载模块

监控节点的内部模块工作需要 5 V 与 3.3 V 供电,选用 LP2985AIM5-3.3 芯片进行电平转换。监控节点通过 mini USB 接口下载程序,选用 FT232RL 芯片完成程序烧写。

表 1 传感器主要参数

Tab. 1 Main parameters of sensors

传感器种类	测量范围	测量精度	工作电压	数据接口
CO ₂ 浓度传感器	0 ~ 5 000 μmol/mol	± 50 μmol/mol ± 3% 读数	3. 25 ~ 5. 5 V (典型 3. 3 V)	UART 串口 (TTL 电平)
光照传感器	0 ~ 179 000 lx	± 5% 读数	5 V	UART 串口 (TTL 电平)
空气温湿度传感器	温度: - 40 ~ 123. 8℃ 湿度: 0% ~ 100%	± 0. 4℃ ± 3. 0%	2. 4 ~ 5. 5 V (典型 3. 3 V 或 5 V)	类 I ² C 总线
土壤温湿度传感器	温度: - 30 ~ 70℃ 湿度: 0% ~ 100%	± 0. 6℃ ± 5%	5 ~ 24 V	两路 0 ~ 2 V 模拟电压

1. 2. 2 智能网关设计

智能网关是个域网 (WPAN) 与广域网 (WLAN) 之间的桥梁,完成 ZigBee 与 GPRS 网络之间的信息交互。同时,智能网关包含本地终端,能够完成存储与显示温室环境信息、调整传感器采集周期、标定传感器、控制 CO₂ 气阀通断等功能。智能网关的硬件

结构如图 3 所示。网关包括 ZigBee 通信模块、ARM 本地终端、GPRS 通信模块和电源管理与程序下载模块。

(1) ZigBee 通信模块

ZigBee 通信模块通过 ZigBee 网络与各监控节点通信,通过串口与 ARM 本地终端通信,完成

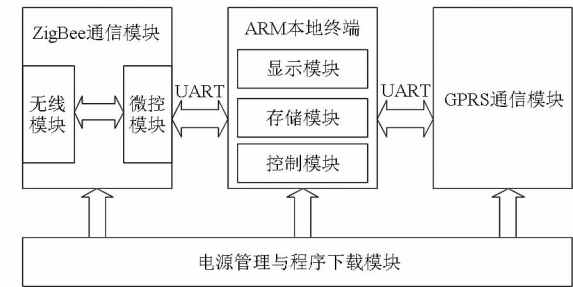


图3 智能网关硬件结构框图

Fig.3 Hardware structure of intelligent gateway

ZigBee 网络与串口之间的数据透传。ZigBee 通信模块是 WSN 网络的协调器,创建并管理整个 ZigBee 网络。ZigBee 通信模块在硬件上与监控节点基本一致,两者通过软件编程实现各自的功能。

(2)GPRS 通信模块

GPRS 通信模块通过 GPRS 网络与远程服务器通信,通过串口与 ARM 本地终端通信,完成 GPRS 网络与串口之间的数据透传。GPRS 通信模块选用 DF1005 GPRS DTU (Data transfer unit, 数据传输单元),通过 Socket 网络编程实现远程 GPRS 通信。

(3)ARM 本地终端

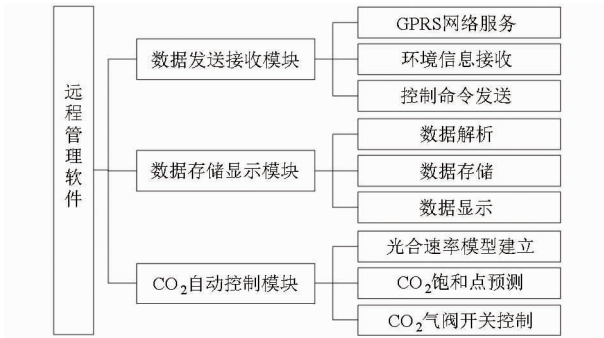
ARM 本地终端是智能网关的数据与控制核心,通过 2 个 RS232 串口分别与 ZigBee 通信模块、GPRS 通信模块通信,完成 WPAN 与 WLAN 之间的数据指令透传。同时,本地终端能够解析数据包与指令包,将环境信息与监控节点状态存储在数据库中,并在液晶屏上显示。用户能够查询环境数据和节点状态信息,并直接控制 CO₂ 气阀的通断。本地终端选用基于 Cortex-A9 内核的 iTOP-4412 开发板为硬件平台,以 Android 4.0.3 为系统开发软件。软件采用多线程编程、C 语言静态库、SQLite3 数据库等实现功能。

1.2.3 远程管理软件设计

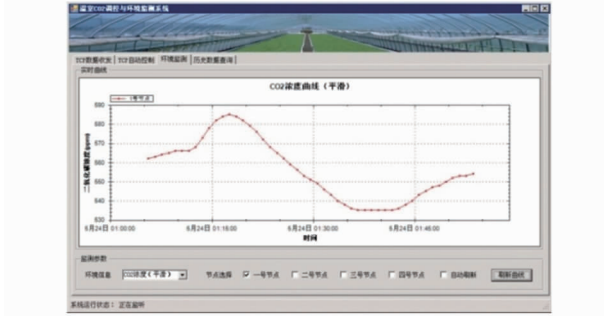
远程管理软件是系统的管理中心,实现数据存储与显示、曲线图绘制、监控节点远程控制和 CO₂ 浓度自动调控等功能。特别地,通过内嵌光合速率预测模型,实现 CO₂ 智能调控。远程管理软件的功能结构与界面如图 4 所示。功能结构包括数据发送接收模块、数据存储显示模块和 CO₂ 自动控制模块。

(1)数据发送接收模块

数据发送接收模块完成与智能网关中 GPRS 通信模块之间的数据收发,可以将智能网关发送的数据包显示在数据接收窗口中,并根据需要向智能网关发送指令。数据发送接收模块基于 Socket 网络编程,远程管理软件作为服务器端,GPRS 通信模块



(a)



(b)

图4 远程管理软件结构与界面

Fig.4 Structure and interface of remote management software

(a) 远程管理软件结构 (b) 远程管理软件界面

作为客户端,经过 3 次握手后,建立有效连接。

(2)数据存储显示模块

数据存储显示模块将数据发送接收模块接收到的数据包进行解析,存储到服务器的 SQL Server 数据库中。数据存储与显示主要通过远程管理软件登陆服务器本地数据库进行“增、删、改、查”等操作;动态数据曲线图通过 Zedgraph 绘图控件绘制。

(3)CO₂ 自动控制模块

通过建立光合速率预测模型,实现 CO₂ 的自动调控,当前的环境信息数据作为模型的输入,经过模型预测,将输出的 CO₂ 饱和点作为自动调控的目标浓度。

2 系统性能实验与结果分析

2.1 实验设计

2.1.1 实验环境搭建

实验时间为 2014 年 11—12 月,地点为中国农业大学东校区水利与土木工程学院的日光温室。番茄品种为“中杂 105”。实验设 4 个 CO₂ 浓度梯度处理组:C1 处理组((700 ± 50) μmol/mol),C2 处理组((1000 ± 50) μmol/mol),C3 处理组((1300 ± 50) μmol/mol),CK 处理组(温室内自然环境下,CO₂ 浓度约 450 μmol/mol)。每个处理组均置于 2.5 m × 0.6 m × 2.0 m 的培养槽内,并用塑料薄膜密封覆盖,防止 CO₂ 气肥外散,提高 CO₂ 利用率。番茄种植在培养槽内的基质里,基质提供足够的营养供番茄幼苗生长。

番茄于 2014 年 11 月 1 日定植于培养槽内,每槽 10 株。番茄幼苗出现 4~6 片真叶时,在水肥充足、温度适宜、光照较好的 9:00—12:00 增施 CO₂, 阴雨天无光照情况下不增施。

2.1.2 环境因子交互实验设计

影响番茄光合速率的环境因素有 CO₂ 浓度、光照强度、空气温湿度、栽培基质温湿度等,其中光与 CO₂ 是光合作用能量来源与主要原料,对番茄单叶净光合速率有很大影响^[14]。为建立温室番茄光合速率模型,在番茄苗后期进行 CO₂ 浓度与光照强度的交互实验。

实验选择 2014 年 11 月 13 日,分别对 4 个处理组的番茄植株进行环境信息与单叶净光合速率的测量。实验使用本文开发的温室 CO₂ 气肥优化调控系统采集温室内的环境信息,通过 WSN 与 GPRS 网络将温室内的环境信息直接存储到远程服务器的数据库中,以备后期数据处理。使用 LI-6400XT 便携式光合速率仪的红蓝光源叶室测量番茄的单叶净光合速率,测量对象为 4 个处理组的番茄植株,测量位置为叶片自上而下第 3 叶序上的顶叶,气体流速设置为 500 μmol/s,温室内实际湿度为 23.16%~46.07%。采用光合速率仪的环境控制模块控制叶室内部的环境参数。其中,利用 CO₂ 浓度注入系统设置 CO₂ 浓度梯度为 0、50、100、200、300、400、500、700、900、1 100、1 300、1 500、1 700 μmol/mol;利用 LED 光源模块设置光合有效辐射值(Photosynthetic active radiation, PAR)梯度为 0、20、50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 400、1 600 μmol/(m²·s)。在不同

的 CO₂ 浓度与光照强度组合下,测量植株的净光合速率。读取单叶净光合速率时,等待数值稳定在小数点后一位后再记录。

2.2 CO₂ 浓度优化调控系统性能分析

(1)通信距离测试

测试地点为中国农业大学校园内空旷地带,使用监控节点与智能网关互相发送数据,并逐渐增加两者间距离。通过测量,数据传输的有效视线距离约为 140 m,能够满足中小型日光温室的实际应用。

(2)通信可靠性测试

测试时间为 2014 年 9 月 3 日 00:00—09:59,测试地点为中国农业大学信电楼。测试使用监控节点、智能网关与远程管理软件,其中监控节点和智能网关之间距离 8.4 m。各传感器采集周期 60 s,经过 10 h 的连续测试,获得了系统的通信可靠性数据,结果如表 2 所示。可以看出,系统丢包率仅为 0.167%,能满足通信可靠性要求。

表 2 系统的丢包数和丢包率

Tab.2 Number and rate of packet loss on system					
发送端	接收端	发送包 数目/个	接收包 数目/个	丢包数 目/个	丢包 率/%
监控节点	智能网关	3 000	2 995	5	0.167
监控节点	远程管理软件	3 000	2 995	5	0.167

(3)数据可靠性测试

测试时间为 2014 年 9 月 7 日 10:00—12:00,实验地点为中国农业大学信电楼。将监控节点采集到的光照强度、CO₂ 浓度分别与标准仪器进行对照,验证系统的数据可靠性。传感器数据的一致性检测结果如图 5 所示。

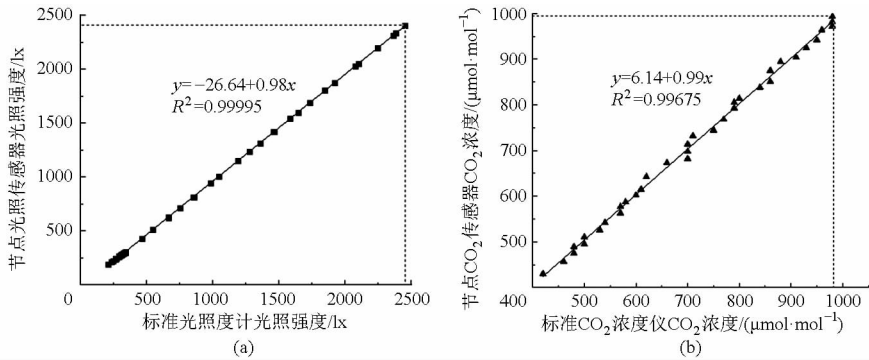


图 5 传感器的一致性检测结果

Fig.5 Results of sensor consistency

(a) 光照传感器 (b) CO₂ 传感器

2.3 光合速率预测模型评价

2.3.1 光合速率预测模型

支持向量机(Support vector machines, SVM)是基于统计学习理论^[15](Statistical learning theory, SLT)的机器学习方法。SVM 以 VC 维(Vapnik-

Chervonenkis dimension)理论与结构风险最小化为理论基础,在解决小样本、非线性和高维度问题上具有独特优势^[16],已成为继神经网络之后机器学习理论与技术研究的新热点^[17]。

本文使用 SVM 回归分析建立光合速率预测模

型,核函数选用径向基函数(Radial basis function, RBF)。通过环境因子交互实验,获得有效环境信息与单叶净光合速率共 126 组,从中随机选取 90 组作为训练集,其余 36 组作为测试集。训练集数据经过归一化后参与模型训练,训练时的惩罚系数(c)为 14.343 0,RBF 核函数半径(g)为 0.956 3,二者均由经验取得。获得光合预测模型后,使用测试集数据进行推广性检验,并预测 CO_2 饱和点。

对模型预测性能的评价指数主要包括相关系数 R 、平均相对误差 ARE、平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSE。

2.3.2 模型精度与预测结果

通过分析模型预测值与训练集实测值可得到光合模型在训练集上的准确性;通过分析模型预测值与测试集实测值可得到光合速率预测模型在测试集上的推广性。光合速率预测模型评估结果如表 3 所示。

表 3 光合速率预测模型评估结果

Tab.3 Evaluate of photosynthetic rateprediction model					
样本集	样本 数目/个	相关系数	平均相对 误差	平均绝对 误差/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	均方根 误差/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
训练集	90	0.988 3	0.209 4	0.549 0	0.620 7
测试集	36	0.981 5	0.330 6	0.891 0	1.092 5

结果表明,光合模型具有较大的相关系数与较小的均方根误差,满足预测要求。测试集上光合速率实测值与模型预测值相关性如图 6 所示。其中,虚线代表理论上最佳线性拟合直线 $Y=X$,实线代表实际拟合直线 $Y=0.92X+0.2$ 。两条曲线十分接近,相关系数 $R=0.98$,说明模型具有很好的预测效果。

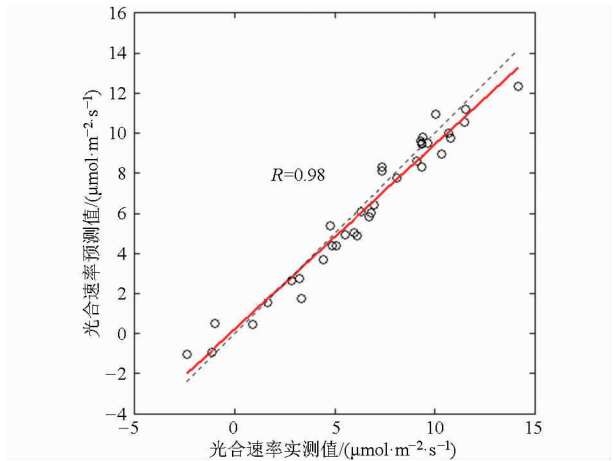


图 6 测试集的预测结果

Fig.6 Prediction result of prediction set

2.3.3 CO_2 -光合速率预测曲线

使用 LI-6400XT 得到不同 CO_2 浓度梯度下番茄光合速率的实测值,得到散点图;使用光合速率预测模型,可得到不同 CO_2 浓度梯度下光合速率的预测值,绘制出平滑曲线,对比结果如图 7 所示。模拟温室环境如下:辐射照度 $900\text{ W}/\text{m}^2$,空气温度 32.85°C ,空气湿度 28.6%,基质温度 21.3°C ,基质湿度 26%。

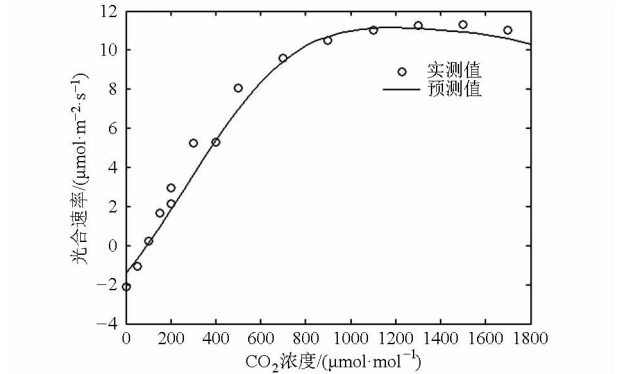


图 7 不同 CO_2 浓度下的光合速率预测结果

Fig.7 Prediction result of CO_2 curve

温室 CO_2 气肥调控系统获取曲线拐点对应的 CO_2 浓度(CO_2 饱和点)为 CO_2 调控的目标浓度,控制 CO_2 气阀开关,使温室内 CO_2 浓度保持在目标浓度附近,进而实现智能调控。 CO_2 曲线预测结果表明,光合速率模型能够很好地预测 CO_2 饱和点,为温室 CO_2 气肥调控提供可靠的控制依据。

综上所述,本文设计的温室 CO_2 气肥调控系统能够很好地完成温室内环境信息的监测和 CO_2 气肥的智能调控,为快速获取温室信息、合理增施 CO_2 气肥提供了完善的管理平台。同时,本文建立的光合速率预测模型为温室 CO_2 气肥的自动调控提供了理论依据与决策支持。

3 结论

(1) 设计了基于 WSN 的温室 CO_2 气肥优化调控系统,性能测试结果表明, CO_2 调控系统的通信距离为 140 m,长时间连续工作丢包率仅为 0.167%,采集到的数据具有良好的可靠性,能够满足温室内环境信息的自动监测功能。

(2) 以幼苗期番茄作为实验对象,建立了基于 SVM 的光合速率预测模型。经评估,光合速率预测模型的相关系数为 0.981 5,均方根误差为 $1.092\ 5\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,能较为准确地预测指定环境下的 CO_2 饱和点,进而完成温室 CO_2 气肥的按需增施,实现温室 CO_2 浓度的智能控制。

参 考 文 献

- 1 胡向东. 物联网研究与发展综述[J]. 数字通信, 2010(2): 17 – 21.
- 2 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215 – 227.
Qian Zhihong, Wang Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1): 215 – 227. (in Chinese)
- 3 王保云. 物联网技术研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(12): 1 – 7.
Wang Baoyun. Review on internet of things[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(12): 1 – 7. (in Chinese)
- 4 Baviskar J, Mulla A, Baviskar A, et al. Real time monitoring and control system for green house based on 802.15.4 wireless sensor network[C]//2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), IEEE, 2014: 98 – 103.
- 5 Gomes T, Brito J, Abreu H, et al. GreenMon: an efficient wireless sensor network monitoring solution for greenhouses[C]//2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015: 2192 – 2197.
- 6 毛鹏军, 姜水, 王俊, 等. 基于 ZigBee 技术的温室环境无线监测系统[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(1): 102 – 106, 115.
Mao Pengjun, Jiang Shui, Wang Jun, et al. Design of wireless monitoring system for greenhouse environment based on ZigBee[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(1): 102 – 106, 115. (in Chinese)
- 7 蒋毅琼, 张漫, 李婷, 等. 基于 WSN 的日光温室 CO₂ 浓度监控系统[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 166 – 171.
Jiang Yiqiong, Zhang Man, Li Ting, et al. Development of a CO₂ concentration monitoring and controlling system in solar greenhouse based on WSN[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(4): 166 – 171. (in Chinese)
- 8 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 regulation system of light environment in greenhouse based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 160 – 167. (in Chinese)
- 9 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)
- 10 张海辉, 陶彦蓉, 胡瑾. 融合叶绿素含量的黄瓜幼苗光合速率预测模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 259 – 263.
Zhang Haihui, Tao Yanrong, Hu Jin. Research on photosynthetic rate prediction model of cucumber seedlings fused chlorophyll content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 259 – 263. (in Chinese)
- 11 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-leaf net photosynthetic rate of greenhouse tomato[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 274 – 279. (in Chinese)
- 12 卢晓萍, 杨丙贤, 徐婵娟, 等. 3 种小檗科植物叶片 SPAD 值与叶绿素的相关性及通径分析[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2013, 39(3): 261 – 266.
Lu Xiaoping, Yang Bingxian, Xu Chanjuan, et al. Study on correlation and path analysis between SPAD values and chlorophyll concentrations in three species of berberidaceae leaves[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci, 2013, 39(3): 261 – 266. (in Chinese)
- 13 Nijs I, Behaeghe T, Impens I. Leaf nitrogen content as a predictor of photosynthetic capacity in ambient and global change conditions[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(2): 177 – 183.
- 14 张金恒, 王珂, 王人潮. 高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, 21(1): 74 – 80.
Zhang Jinheng, Wang Ke, Wang Renchao. Study on hyperspectral remote sensing in estimate vegetation leaf chlorophyll content[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2003, 21(1): 74 – 80. (in Chinese)
- 15 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 32 – 42.
Zhang Xuegong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 32 – 42. (in Chinese)
- 16 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(1): 2 – 10.
Ding Shifei, Qi Bingjuan, Tan Hongyan. An overview on theory and algorithm of support vector machines[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2 – 10 (in Chinese)
- 17 王国胜. 支持向量机的理论与算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.