

# 基于无线传感网的设施环境二氧化碳精准调控系统

张海辉 邵志成 张佐经 吴婷婷 王传哲 辛萍萍

(西北农林科技大学机械与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 设计了一套基于无线传感网的设施环境二氧化碳精准调控系统,包括主控节点、监测节点及补施节点,通过 ZigBee 协议实现节点间信息交互。监测节点实时获取设施内多点二氧化碳浓度、温度、光照数据;主控节点根据作物各阶段最适生长环境,结合温度与光照阈值,动态计算二氧化碳浓度目标值与实时值之间的差值作为调控参数,采用反馈控制实现二氧化碳动态调控;为改善以往设施二氧化碳补施不均的普遍现象,设施中气体扩散管道采取双 M 型布置方式,设计开孔大小不同的二氧化碳扩散孔,由补施节点配合对流装置控制各小区域的二氧化碳排放量,达到均匀和定量补施的目的。实地布置和试验表明基于无线传感网的设施环境二氧化碳调控系统可实现稳定可靠运行,以设施番茄为研究对象,在面积 36.66 m<sup>2</sup> 日光温室内补施目标值与实时值的相对误差小于 3.5%,在面积 27.74 m<sup>2</sup> 玻璃温室内验证监测节点间二氧化碳浓度变异系数小于 2.93%,证明本系统可实现二氧化碳精准及均匀补充。

**关键词:** 设施环境; 二氧化碳; 无线传感网; 精准补施; 均匀补施

中图分类号: TP391; S625.5<sup>+</sup>1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0325-07

## Regulation System of CO<sub>2</sub> in Facilities Based on Wireless Sensor Network

ZHANG Haihui SHAO Zhicheng ZHANG Zuojing WU Tingting WANG Chuanzhe XIN Pingping  
(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Carbon dioxide is the necessary material for plant photosynthesis, and building favorable carbon dioxide environment in facilities is essential for crop growth. The design of an environment carbon dioxide precision control system based on wireless sensor network (WSN) was introduced, which was composed of master node, monitoring node and fertilizing node. Information interaction among nodes were achieved with ZigBee protocol, which was a general protocol for wireless sensor network. Monitoring node was used to monitor real-time carbon dioxide concentration, temperature and light intensity in facilities environment. With a feedback control, master nodes achieved dynamic adjustment of carbon dioxide based on different growing seasons for various plants in facilities and combining optimum thresholds of temperature and lights. To improve the disadvantage of uneven carbon dioxide implementation, double M type conductive pipe was deployed in facilities. Meanwhile, different hole sizes on the pipe were designed for acquiring the same instantaneous flow. In collaboration with convection device, fertilizing node controlled the carbon dioxide emissions through gas tank passing and breaking, and guaranteed the uniformity of carbon dioxide implementation. The results show that the relative error between the target and the real-time value is less than 3.5% in solar greenhouse with area of 36.66 m<sup>2</sup>. The designed experiment result shows that the variation coefficient of carbon dioxide concentration among monitoring nodes is less than 2.93% in glasshouse with area of 27.74 m<sup>2</sup>, which proves that the system can realize precise and uniform fertilizing of carbon dioxide.

**Key words:** environment of facilities; carbon dioxide; wireless sensor network; precise fertilizing; uniform fertilizing

## 引言

二氧化碳是植物进行光合作用的必要物

质<sup>[1-2]</sup>,精准定量补施是保证植物高效利用降低高浓度二氧化碳对于植物光合富营养化影响的关键<sup>[3]</sup>。燃烧秸秆补施温室二氧化碳“气肥”虽能满

足植物进行光合作用的需求,但其费事费工,环境污染,不安全问题突出<sup>[4-5]</sup>;设施自动化或半自动化定量施肥,可以提高二氧化碳精准补施的工作效率,但无法满足植物进行最优光合作用所需二氧化碳的浓度,造成利用率低和资源浪费<sup>[6-7]</sup>。

国内外已经在设施环境二氧化碳监测与调控方面开展了相关技术及系统应用研究,取得了很多成果<sup>[8-11]</sup>。在环境信息监测方面,李少华等<sup>[12]</sup>开发的基于单片机控制的温室二氧化碳调控系统设计,能满足二氧化碳无线智能化补施要求,但存在单点监测与布线困难等问题;温竹等<sup>[13]</sup>开发的基于JN5148的温室二氧化碳浓度检测系统,实现了无线室内二氧化碳浓度值的实时监测,但未进行二氧化碳浓度的调控;张海辉等<sup>[14]</sup>研制的基于WSN的温室环境监测系统能够对设施二氧化碳浓度信息实现自动汇聚和无线传输。在设施环境二氧化碳精准调控方面,张漫等<sup>[15]</sup>研发的基于WSN的温室二氧化碳气肥优化调控系统研究,实现温室二氧化碳气肥的精准管理,但未对监测与控制实现无线分离;王东等<sup>[16]</sup>设计了温室大棚二氧化碳浓度精准调控系统,完成了基于现场监测结果的二氧化碳浓度的精准控制,试验结果表明系统具有监测精度高、可靠性高等特点,但未开启二氧化碳气体均匀性补施研究。在设施二氧化碳均匀性补施方面,刘妍华等<sup>[17]</sup>运用Fluent软件模拟仿真了增施二氧化碳气肥对温室流场影响的数值模拟及验证,但未结合具体作物进行

二氧化碳气肥调控。王双喜等<sup>[18]</sup>运用气体射流理论,分析研究温室内补施二氧化碳浓度分布的均匀性,结果表明二氧化碳的变异系数保持小于3.1%,但补施过程未考虑植物所处温度与光照条件下对光合作用的影响,且未考虑管道各个导气孔流量之间的差异,造成二氧化碳补施相对不均。

本文以日光温室试验基地进行二氧化碳调控效果为研究对象,依据温室空间的拓扑结构,构建ZigBee无线自组网,通过监测节点,主控节点及补施节点的无线互联,根据温室二氧化碳浓度、温度及光照动态调控二氧化碳浓度。监测节点探测设施环境二氧化碳浓度、温度、光照强度;主控节点依据番茄所处生长阶段所需的最优二氧化碳浓度进行动态调控,基于流量反馈调控机制下发控制命令;补施节点设计基于流量监测的气体联控模块,以改善气肥智能化补施水平,实现精准与按需施肥。

## 1 系统总体设计

系统由主控节点、监测节点及补施节点3部分组成,总体架构如图1所示。采用低功耗芯片CC2530F256作为中心处理单元,组网方式采用星型拓扑结构。其中,主控节点担任WSN中协调器的功能,负责建立网络与添加网络节点。监测节点作为网络结构中的路由器,负责加入协调器建立的网络与转发数据功能。补施节点也作为网络结构中的路由器。

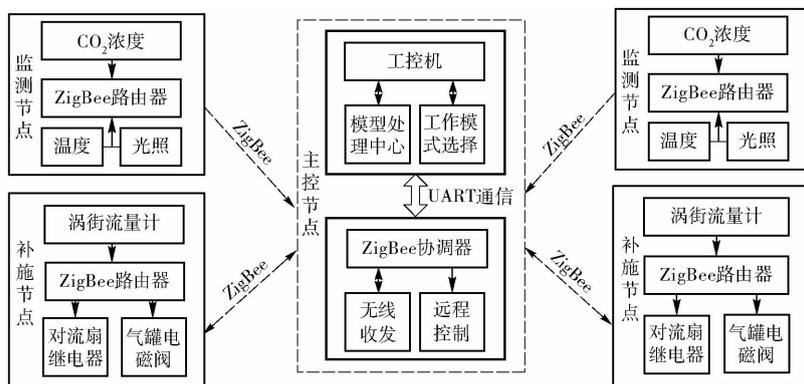


图1 系统硬件总体结构图

Fig.1 Structure drawing of system hardware

系统中,监测节点负责设施环境信息的采集,该节点获取设施环境温度、光照强度及二氧化碳浓度数据,通过调用射频发送函数,无线传输环境参量至主控节点。

补施节点主要完成终端命令的执行与调控信息的反馈,该路由节点获取终端命令解析得控制指令,决定启闭气罐电磁阀与对流装置,同时涡街流量计监测流量值,反馈至主控节点维护系统稳定运行。

主控节点主要负责设施环境信息的交互与模型的处理。该节点通过具有人机交互的工控机进行模型处理,结合涡街流量计的的反馈信息,进而下发控制信号至补施节点。

## 2 系统硬件设计

系统采用CC2530F256处理器进行监测、补施及主控3类节点的硬件设计,利用射频收发电路实

现设备间的信息交互。

### 2.1 监测节点设计

监测节点硬件电路主要完成环境信息采集与无线上传功能,结构框图如图 2 所示。硬件电路主要包括电源模块、温度采集模块、二氧化碳浓度监测模块及光照测量模块。

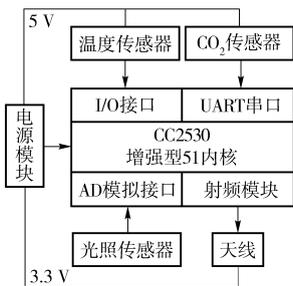


图 2 监测节点电路图

Fig. 2 Diagram of monitoring node circuit

监测节点支持 5 V 与 3.3 V 供电;使用 DS18B20 温度传感器监测设施环境温度参数,二氧化碳传感器使用英国 GSS 公司产的 COZIR 传感器,COZIR 支持串口通信功能,通过与单片机的 TXD 和 RXD 端口获得浓度信息,光照测量模块使用美国 DAVIS 公司产的 6450 Pro 光辐射传感器,模块支持 A/D 采样,与单片机的模数端口连接。

### 2.2 补施节点设计

补施节点包括电源模块、驱动模块、气罐电磁阀、对流装置及涡街流量计,结构框图如图 3 所示。补施节点接收主控节点无线下达的控制信号,架设在控制终端的涡街流量计,上传监测的二氧化碳释放量为主控节点的控制提供反馈信息,判断启闭气罐电磁阀与对流装置,从而实现二氧化碳精准定量补施。

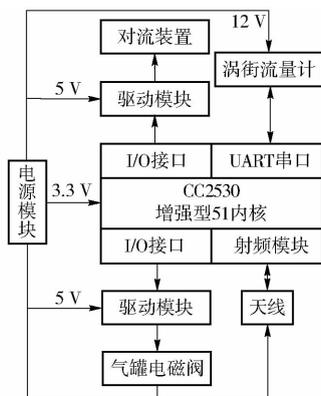


图 3 补施节点电路图

Fig. 3 Diagram of fertilizing node circuit

电源模块为节点各个模块提供电能,驱动模块实现终端命令至末端执行的转换过程,气罐电磁阀控制二氧化碳的出气,决定整个补施空间内的二氧化碳浓度含量,对流装置加速气体均匀扩散至整个

流体空间。涡街流量计为补施提供反馈信息,决定二氧化碳气罐释放量。

### 2.3 主控节点设计

主控节点硬件电路主要包括电源模块,无线模块,串口通信模块及工控机开发组件。中心处理节点为无线交互与模型处理提供硬件平台。结构框图如图 4 所示,其中,无线模块为信息交互提供硬件平台,串口通信模块负责单片机与工控机之间的信息交互,工控机开发组件担任模型处理与状态指示职责。

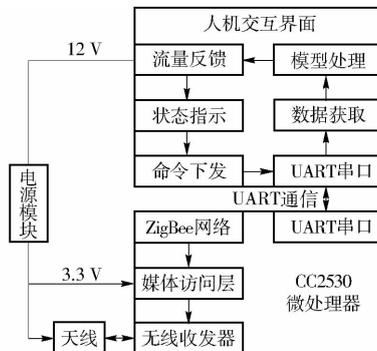


图 4 主控节点电路图

Fig. 4 Diagram of master node circuit

## 3 系统软件设计

系统软件开发包括监测节点、补施节点及主控节点 3 部分,全部采用标准 C 语言进行编程,对于系统移植与应用扩展具有极大的便利性。

### 3.1 监测节点软件开发

监测节点软件设计主要功能包括加入协调器创建的网络,环境参量的采集与无线信息的发送。监测节点程序中设定与协调器相同频段的局域网号,通过查找同频段的协调器,申请加入网络,同时协调器随机分配一个网络地址给监测节点。组网成功后,初始化系统参数,完成设施环境温度、光照及二氧化碳浓度采集,调用射频发送函数,实现环境参量的无线上传,最终完成协调器接收设施环境信息,程序流程如图 5 所示。

### 3.2 补施节点软件开发

补施节点软件设计包括加入协调器建立的网络,流量信息的上传及无线接收控制信息,程序流程如图 6 所示。加入协调器所组网络,原理同监测节点相同。初始化系统参数,根据 RS485 串口通信协议采集二氧化碳释放量,上传至主控节点提供反馈信息,射频接收函数获取主控节点发送的终端命令,并进行解析提取,确定启闭气罐电磁阀与对流扇,考虑长时间导气孔开启状态下,气体液化吸热会导致罐体结冰,故通过特定空占比的方波控制信号补施

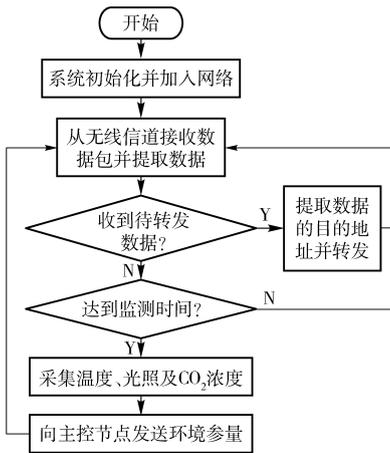


图 5 监测节点软件流程图

Fig. 5 Flow chart of monitoring node software

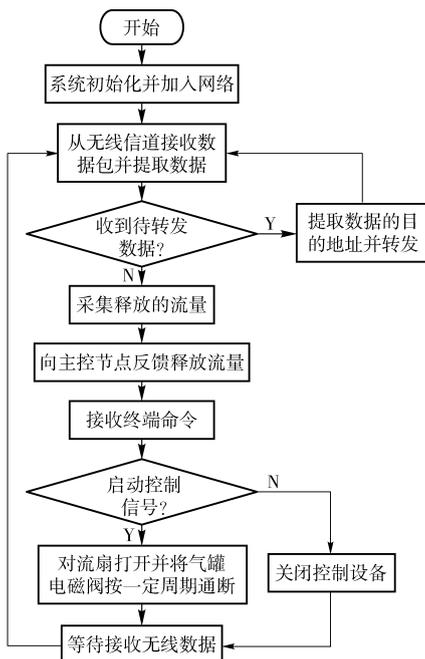


图 6 补施节点软件流程图

Fig. 6 Flow chart of fertilizing node software

二氧化碳,实现不间断连续调控二氧化碳气体。

### 3.3 主控节点软件开发

主控节点包括基于 ZigBee 主控平台与基于 Linux 工控机平台的软件开发,主控平台通过搭建 ZigBee 无线自组网,实现数据按照系统设定方向无线传播。工控机平台通过模型处理下发控制信号。

#### 3.3.1 工控机平台软件设计

工控机作为整个系统的大脑中枢,处理主控平台上传的无线信息。工控机通电后,初始化系统时间、工控机界面等系统操作,工控机平台通过 RS232 串口通信协议获取设施环境内温度、光照、二氧化碳浓度及气体释放流量,根据植物在特定生长期所需的最优二氧化碳浓度,以及植物所需温度与光照环境条件下,结合流量计的反馈信息,下发终端控制命令。系统界面如图 7 所示。



图 7 工控机开发平台界面

Fig. 7 Interface of development platform

调控系统补施方式设有最优模式,该模式针对设施环境作物单一的情况,通过番茄在特定生长期所需的二氧化碳浓度的差异性,与植物所处设施环境中二氧化碳浓度进行横向对比,结合设施环境所处温度与光照限定条件下,配合流量反馈信息,判断设备工作模式。

#### 3.3.2 主控平台软件设计

主控平台软件设计主要包括创建无线传感网络,数据的汇集与下发及串口数据通信。创建无线网络主要完成构建特定频率的网络及允许同频段的网络节点加入;数据的汇集与下发主要实现信息按照程序设定方向实现定向流动;串口数据通信主要实现主控平台与工控机平台之间的有线互联,软件流程如图 8 所示。

主控平台上电以后,协调器选择空闲信道,以特定频率组建网络,调用射频接收函数获取监测节点环境参量与补施节点反馈信息,再调用串口写函数,向工控机发送环境参数与二氧化碳排放量,同时,主控节点调用串口读函数,等待获得工控机串口发送来的终端命令,命令以广播的方式无线下发。

## 4 调控原理分析

相关研究表明<sup>[19-22]</sup>,不同生长期番茄所需二氧化碳最优浓度具有差异性,苗期约为 700  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,果期约为 1 300  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,且发现在不适宜的温度与光照环境下补施二氧化碳,不仅造成资源浪费,且植株在高浓度二氧化碳环境下,所处低温或高温以及无光或强光下,都会极大的抑制光合作用。通过查询相关文献可知,番茄的最适光照与温度分别为 250 ~ 380  $\text{W}/\text{m}^2$  与 18 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$ ,其中最佳温度在 26 ~ 30 $^{\circ}\text{C}$  之间。

系统以最优浓度与实时浓度的差值为调控参数。气罐所需排放二氧化碳总流量为

$$Q_{total} = \frac{(C_n - C)V_{offset}}{tC_{out}} \quad (1)$$

式中  $Q_{total}$ ——气罐二氧化碳总流量  
 $C_n$ ——目标二氧化碳浓度

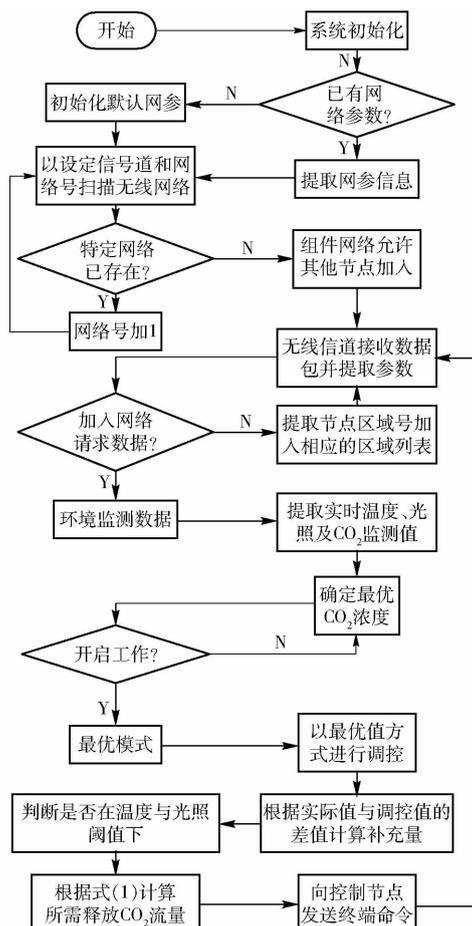


图 8 主控节点软件流程图

Fig. 8 Flow chart of master node software

$C$ ——实时二氧化碳浓度

$V_{offset}$ ——系统补施空间

$C_{out}$ ——气罐出气孔处二氧化碳浓度

$t$ ——补施时间

考虑到调控过程二氧化碳的无规则扩散,通过搭建如图 9 所示的双 M 型气体导输管道,设计各出气孔瞬时流量相同,实现均匀性补施。气罐总流量与各出气孔瞬时流量定量关系式为

$$Q_{total} = nQ \quad (2)$$

式中  $Q$ ——各个出气孔的瞬时流量

$n$ ——导输管道开孔个数

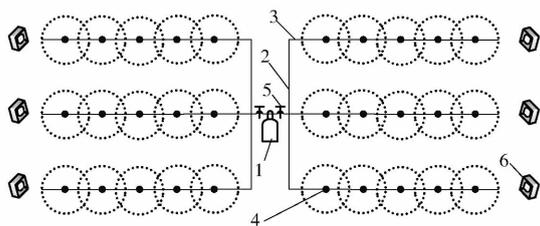


图 9 二氧化碳气体管道部署图

Fig. 9 Layout of carbon dioxide gas pipe line

1. 二氧化碳气罐
2. 主管道
3. 支路管道
4. 导气喷孔
5. 电磁阀
6. 对流扇

为实现各出气孔的瞬时流量相同,系统设计不

同的开孔大小。根据流体力学知识,气罐距导气孔较近处,流量较大,距导气孔较远处,流量较小,且对称位置流量相同。根据伯努利原理,保持各个喷气孔流量相同,从而可得喷孔面积与喷空深度之间的定量关系式为

$$Q = \pi R^2 \sqrt{\frac{2(C - \rho gh - p)}{\rho}} \quad (3)$$

其中  $R = \sqrt{\frac{Q}{\pi} \sqrt{\frac{\rho}{2(C - \rho gh - p)}}}$  (4)

式中  $R$ ——喷孔半径  $C$ ——伯努利常数

$\rho$ ——流体密度  $g$ ——重力加速度

$h$ ——喷孔距气罐出气孔的相对高度

$p$ ——喷口处的压力

## 5 试验验证

### 5.1 设备部署

2016 年 1 月,调控系统部署于陕西省阎良区武屯镇西北农林科技大学阎良蔬菜试验示范站 2 号棚。整个温室外形呈圆弧柱状结构,温室配有卷帘机,上通风与下通风等气体对流设备,在补施过程中,考虑气体无规则扩散,通过搭建塑料隔膜,进行二氧化碳智能调控对比试验区的效果验证。试验部署于整个温室(50 m × 7.8 m)中间(4.8 m × 7.8 m)区域。

主控节点担任开启自动化设备的任务,通常放置于试验场所外侧,防止人为干扰影响调控效果;二氧化碳监测设备放置于温室正中间位置,该点反映整个区域内二氧化碳的平均浓度;补施节点放置于试验区域外部,气体通过导气管道引流进入试验区域。考虑植株高度,叶片进行光合作用场所及二氧化碳比空气相对分子质量大等因素,本系统部署二氧化碳导气管道距地面垂直高度为 2 m,保证导气管道位于植株上侧空间。根据均匀性扩散试验确定管道之间的水平间隔为  $L_0 = 0.6$  m,气罐出气孔之间的水平距离  $L_1 = 0.6$  m,二氧化碳浓度变异系数降低至允许误差以内。

### 5.2 调控参数确定

根据设施植物所处具体环境的限定,结合植物最适调控范围,确定最优二氧化碳调控阈值,温室番茄处于苗期,最优二氧化碳浓度设为  $1\ 300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。图 10 所示为温室光照与温度的变化曲线。设施环境内的光照大体经历先上升后下降的过程,在中午时分达最大值。设施环境内的温度总体变化不大,作物生长环境处于日光温室,温度既受外界环境的影响,又受温室自身保温作用的影响。结合植物所处的光合环境,设定补施二氧化碳最优调控环境,

设计温度阈值在 12 ~ 15℃ 之间,光照阈值在 15 ~ 100 W/m<sup>2</sup> 之间进行气肥调控效果验证。

在冬季,大约在 10:00—16:00 打开卷帘机与上通风设备,下通风设备一般不工作,且考虑温室二氧化碳补施最长不宜超过 4 h,因此设备工作的最适补施时间设置在 10:00—14:00 区间段内。

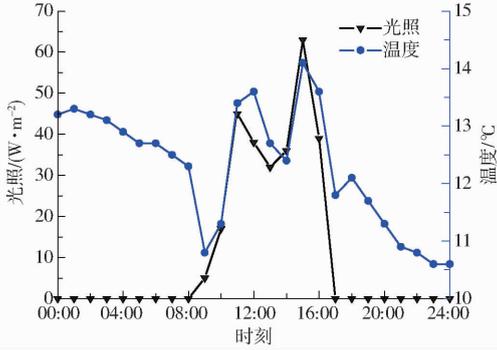


图 10 温度与光照变化曲线

Fig. 10 Variation curves of temperature and light intensity

### 5.3 调控效果验证

二氧化碳调控效果通过搭建设施环境智能补施设备实现作物补施气肥的目的。从 2016 年 1 月 27 日起开始进行二氧化碳调控试验,测试设施环境内二氧化碳最优浓度与实时浓度以及系统最终调控结果值。验证试验前在试验区域与对比区域增设塑料薄膜进行空间隔档,同时在试验起始前打开上下通风装置,使空间内二氧化碳保持相对一致后进行密闭处理。

经过 60 d 二氧化碳浓度监测与调控效果验证,证明系统可稳定运行。其中,2016 年 3 月 9 日温室二氧化碳浓度变化曲线如图 11 所示。

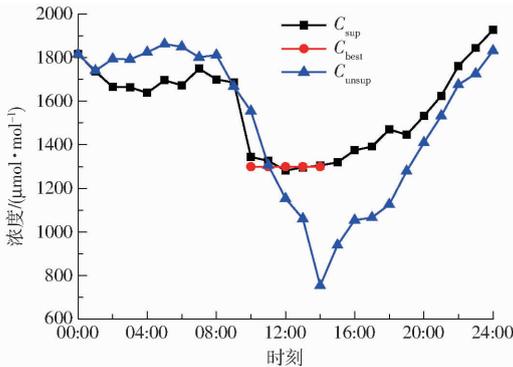


图 11 二氧化碳变化曲线

Fig. 11 Variation curves of carbon dioxide

由图 10 与图 11 可得,在未补施的二氧化碳调控设施环境内,温度与光照未成为制约光合作用的限制性因素,但二氧化碳浓度在光合时段的急剧下降 ( $C_{\text{unSUP}}$ ),造成二氧化碳成为制约光合作用的关键性因素。

在设施补施环境中,温度与光照处于相对适宜

条件下,通过精准补施设备弥补设施环境缺乏的二氧化碳,极大的提高光合作用效率,试验表明补施过程中最优目标值 ( $C_{\text{best}}$ ) 与实际值 ( $C_{\text{sup}}$ ) 的相对误差小于 3.5%,证明该系统可实现精准与高效补施。

### 5.4 补施均匀性验证

二氧化碳扩散均匀性验证试验在西北农林科技大学南校玻璃温室 (7.3 m × 3.8 m) 进行,呈长方体结构,内种植番茄,试验空间密闭性较好,外界因素对试验影响较小,试验场所适合验证气体扩散均匀性效果。试验材料包括:二氧化碳调控装备一套、气罐一个、导气管道一套和对流装置 6 个。按照图 9 所示拓扑结构布置二氧化碳导气管道,分别在试验场地中间 (middle)、前端 (front) 及后端 (behind) 3 个点布置同一水平面上的二氧化碳均匀性扩散结构。3 个监测设备放置高度距地面 0.4 m 高度,试验起始前待 3 个监测节点二氧化碳浓度保持相对稳定后开始试验,试验效果如图 12 所示。

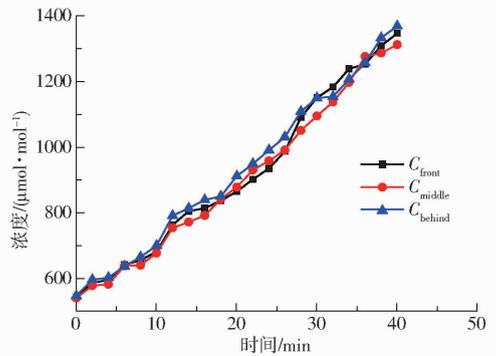


图 12 气体扩散示意图

Fig. 12 Diagram of gas diffusion

按照图 12 离散点拟合 3 条离散曲线,各个相关系数分别为 0.983、0.990、0.992,拟合曲线为

$$\begin{cases} y_{\text{front}} = 20.56x_{\text{front}} + 502.1 \\ y_{\text{middle}} = 20.07x_{\text{middle}} + 499.9 \\ y_{\text{behind}} = 20.51x_{\text{behind}} + 518.4 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $y_{\text{front}}$ 、 $y_{\text{middle}}$ 、 $y_{\text{behind}}$  ——前端、中间、后端的二氧化碳浓度

$x_{\text{front}}$ 、 $x_{\text{middle}}$ 、 $x_{\text{behind}}$  ——前端、中间、后端的二氧化碳浓度上升所需时间

各监测节点的二氧化碳补施速率均与所处时间无关,3 个监测节点间的二氧化碳浓度的变异系数小于 2.93%,保证二氧化碳浓度补偿保持相对匀速上升趋势,植物逐渐适应相对高浓度二氧化碳光合环境。

## 6 结论

(1) 设计的二氧化碳调控系统,达到了设施环境参量的无线监测与远程调控设施二氧化碳浓度的

功能,且整个系统无线传输稳定,运行正常。

(2)以设施番茄为应用对象,在面积 $36.66\text{ m}^2$ 日光温室内,在10:00—14:00调控时间段内,保持补施目标值与实时值的相对误差小于3.5%,证明该系统具有良好的调控精度。

(3)在补施系统中设计双M型扩散管道,保证调控空间内二氧化碳浓度保持相对一致,在面积 $27.74\text{ m}^2$ 玻璃温室内,保持变异系数低于2.93%,证明该系统可实现均匀、定量补施。

(4)针对温度与光照变化平缓的情况下,根据设定番茄不同生长期所需的二氧化碳浓度差异进行优化补偿,并以此进行二氧化碳调控。但当处于温

度与光照变化比较剧烈的情况下,仅根据特定生长期的阈值不能达到理想的调控效果,后续将进一步集成融合多因子的优化调控模型,根据实时环境温度与光照强度确定作物所需最优二氧化碳浓度,以此实现智能化调控。

(5)假设作物的生理代谢对设施空间二氧化碳浓度的变化比较缓慢,仅根据某时刻固定浓度值判别系统调控参数存在不足,后续将考虑作物的光合作用与呼吸作用导致设施空间二氧化碳浓度变化,造成系统控制相对滞后的问题,通过分析特定环境下的作物呼吸与释放二氧化碳量,实时精准定量确定二氧化碳浓度调控参数,从而实现精细化调控。

### 参 考 文 献

- 潘璐,崔世茂,宋阳,等.长期加富 $\text{CO}_2$ 条件下温室黄瓜光合作用对高温的应答机理[J].北方园艺,2015(16):1-6.  
PAN Lu, CUI Shimao, SONG Yang, et al. High temperature response mechanism of photosynthesis of grafting cucumber in greenhouse under long-term elevated  $\text{CO}_2$  [J]. Northern Horticulture, 2015(16):1-6. (in Chinese)
- SILVA C S, SEIDER W D, LIOR N, et al. Exergy efficiency of plant photosynthesis[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 130: 151-171.
- 张志明.  $\text{CO}_2$ 施肥对番茄果实品质的影响[D].杭州:浙江大学,2012.  
ZHANG Zhiming. Effect of carbon dioxide enrichment on tomato fruit quality [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- 杨秋莲,徐全辉.秸秆生物反应堆对温室气温和二氧化碳浓度的影响[J].安徽农业科学,2011,39(10):5971-5972.  
YANG Qiulian, XU Quanhui. Effect of straw bioreactor landfill on temperature and  $\text{CO}_2$  concentration in greenhouse [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(10):5971-5972. (in Chinese)
- 郭华,韩大鹏.秸秆还田新方法——燃烧生成 $\text{CO}_2$ 增施技术[J].农业技术与装备,2012(16):82.
- 赵鹏,单慧勇,戚自雄,等.温室二氧化碳气肥补施控制系统设计[J].农业装备与车辆工程,2014,52(10):7-9.  
ZHAO Peng, SHAN Huiyong, QI Zixiong, et al. Design of greenhouse  $\text{CO}_2$  regulation system [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2014, 52(10):7-9. (in Chinese)
- 杨敬伟,杨景发,杨雅彬,等.设施农业专用二氧化碳监控系统的设计[J].农机化研究,2014,36(6):127-130,137.  
YANG Jingwei, YANG Jingfa, YANG Yabin, et al. A design of dedicated carbon dioxide monitor system in facility agriculture [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6):127-130,137. (in Chinese)
- JOSE Boaventura Cunha. Real-time adaptive control for greenhouse heating, cooling and  $\text{CO}_2$  enrichment [C] // Computers in Agriculture and Natural Resources-Proceedings of the 4th World Congress, 2006:116-121.
- JIANG Yiqiong, SHA Sha, ZHANG Man, et al. Development of a wireless sensor network for  $\text{CO}_2$  concentration precision control in Greenhouse [C] // 2014 ASABE Annual International Meeting, 2014:2361-2367.
- 张荣标,项美晶,李萍萍,等.基于信息融合的温室 $\text{CO}_2$ 调控量决策方法[J].农业机械学报,2009,40(6):175-178.  
ZHANG Rongbiao, XIANG Meijing, LI Pingping, et al. Decision-making on greenhouse  $\text{CO}_2$  control quantity based on information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):175-178. (in Chinese)
- 纪建伟,赵海龙,李征明,等.基于STM32的温室 $\text{CO}_2$ 浓度自动调控系统设计[J].浙江农业学报,2015,27(5):860-864.  
JI Jianwei, ZHAO Hailong, LI Zhengming, et al. Design on automatic control system of  $\text{CO}_2$  concentration in greenhouse based on STM32 [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(5):860-864. (in Chinese)
- 李少华,谢守勇,陈翀,等.基于单片机控制的温室二氧化碳调控系统设计[J].农机化研究,2013,35(6):178-181.  
LI Shaohua, XIE Shouyong, CHEN Chong, et al. Design of carbon dioxide control system based on MCU for greenhouse [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6):178-181. (in Chinese)
- 温竹,李士军,张文军,等.基于JN5148的温室 $\text{CO}_2$ 浓度监测系统[J].中国农机化学报,2014,35(2):259-262,270.  
WEN Zhu, LI Shijun, ZHANG Wenjun, et al.  $\text{CO}_2$  concentration monitoring system of greenhouses based on JN5148 [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2):259-262,270. (in Chinese)
- 岳青,张海辉,卢博友.基于WSN的温室环境监测节点设计[J].安徽农业科学,2010,38(30):17219-17221,17254.  
YUE Qing, ZHANG Haihui, LU Boyou. Design of monitoring nodes of greenhouse environment based on WSN [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(30):17219-17221,17254. (in Chinese)
- 蒋毅琼,张漫,李婷,等.基于WSN的日光温室 $\text{CO}_2$ 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  $\text{CO}_2$  concentration monitoring and controlling system in solar greenhouse based on WSN [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(4):166-171. (in Chinese)

- process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9):145-151. (in Chinese)
- 13 RIADHMUMMED Hussain, AHMAD Siti Anom Binti, MARHABANMOHDHAMIRUCE, et al. Infrared heating in food drying: an overview [J]. Drying Technology, 2015, 33(3):322-335.
- 14 DAS I, DAS S K, BAL S. Drying performance of a batch type vibration aided infrared dryer[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1):129-133.
- 15 LIKITRATTANAPORN Charun, NOOMHORM Athapol. Effects of simultaneous parboiling and drying by infrared radiation heating on parboiled rice quality [J]. Drying Technology, 2011, 29(9):1066-1075.
- 16 WANG J. A single-layer model for far-infrared radiation drying of onion slices [J]. Drying Technology, 2002, 20(10):1941-1953.
- 17 张丽丽,王相友,魏忠彩,等. 红外辐射干燥胡萝卜切片结构特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7):246-251. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160734&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160734&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.034.
- ZHANG Lili, WANG Xiangyou, WEI Zhongcai, et al. Structural properties research of infrared radiation drying for carrot slices[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):246-251. (in Chinese)
- 18 刘云宏,朱文学,刘建学. 地黄真空红外辐射干燥质热传递分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10):135-140.
- LIU Yunhong, ZHU Wenxue, LIU Jianxue. Mass and heat transfer analysis of vacuum infrared radiation drying on rehmanniae [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):135-140. (in Chinese)
- 19 谢小雷,张春晖,贾伟,等. 连续式中红外-热风组合干燥设备的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):282-289.
- XIE Xiaolei, ZHANG Chunhui, JIA Wei, et al. Development and test of continuous combined mid-infrared with hot air drying equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):282-289. (in Chinese)
- 20 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):128-132.
- LIN Xi'na, WANG Xiangyou. Modeling and evaluation of infrared radiation drying for apple slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6):128-132. (in Chinese)
- 21 李超新,张学军,朱自成. 基于神经网络红枣红外辐射干燥预测模型建立[J]. 农机化研究, 2015(5):220-223.
- LI Chaoxin, ZHANG Xuejun, ZHU Zicheng. Predicted model of red jujube infrared radiation drying based on artificial neural network [J]. Journal of Agriculture of Mechanization Research, 2015(5):220-223. (in Chinese)
- 22 DHIB R. Infrared drying: from process modeling to advanced process control [J]. Drying Technology, 2007, 25(1):97-105.
- 23 AFZAL T M, ABE T. Some fundamental attributes of far infrared radiation drying of potato [J]. Drying Technology, 1999, 17(1-2):138-155.
- 24 LAMPINEN M J, OJALA K T, KOSKI E. Modeling and measurements of infrared dryers for coated paper [J]. Drying Technology, 1991, 9(4):973-1017.
- 25 吴振,李红,罗杨,等. 银耳红外辐射干燥特性研究及动力学模型构建[J]. 天然产物研究与开发, 2014(4):471-474, 503.
- WU Zhen, LI Hong, LUO Yang, et al. Drying characteristics of *Tremella fuciformis* under infrared ray and its kinetics model [J]. Natural Product Research and Development, 2014(4):471-474, 503. (in Chinese)
- 26 李国勇. 神经模糊控制理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.

(上接第 331 页)

- 16 王东,张海辉,冯建合,等. 温室大棚 CO<sub>2</sub> 浓度精准调控系统的设计与实现[J]. 农机化研究, 2012, 34(3):114-118.
- WANG Dong, ZHANG Haihui, FENG Jianhe, et al. Design and realization of carbon dioxide precision control system for greenhouse[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(3):114-118. (in Chinese)
- 17 刘妍华,曾志雄,郭嘉明,等. 增施 CO<sub>2</sub> 气肥对温室流场影响的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12):194-199.
- LIU Yanhua, ZENG Zhixiong, GUO Jiaming, et al. Numerical simulation and experimental verification of effect of CO<sub>2</sub> enrichment on flow field of greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12):194-199. (in Chinese)
- 18 王双喜,高昌珍,杨存栋,等. 温室 CO<sub>2</sub> 气体浓度环境自动调控系统的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3):84-86.
- WANG Shuangxi, GAO Changzhen, YANG Cundong, et al. Auto-controlling system of CO<sub>2</sub> concentration in modernized greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3):84-86. (in Chinese)
- 19 熊珺,曲英华,范冰琳,等. 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下番茄苗期及果期的光合特性[J]. 北方园艺, 2015(9):6-9.
- XIONG Jun, QU Yinghua, FAN Binglin, et al. Effect of different CO<sub>2</sub> on tomato photosynthesis in seedling and fruiting stage[J]. Northern Horticulture, 2015(9):6-9. (in Chinese)
- 20 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)
- 21 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)
- 22 赵冠艳,朱世东,李东林,等. CO<sub>2</sub> 富加处理甜瓜幼苗光合特性的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊 2):103-105.
- ZHAO Guanyan, ZHU Shidong, LI Donglin, et al. Photosynthetic characteristics of CO<sub>2</sub> enrichment in melon seedlings [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(Sup. 2):103-105. (in Chinese)