

设施蔬菜臭氧植保机设计与试验

王志彬^{1,2} 乔晓军^{1,2} 刘智^{1,2} 王莹¹ 李玉凤¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 根据设施蔬菜病虫害绿色防控需求,设计了一款多功能植保机,并配套设计了信息管理系统。该机主要包括臭氧发生、电路控制、高速风机、诱虫灯、环境数据采集等功能模块,各模块由 STM32F103 微处理器进行控制。采用高压放电法制取臭氧,通过配备的风机及气流导向板将臭氧扩散至整个设施空间,实现病菌、害虫卵、幼虫的消杀;利用诱虫灯将害虫成虫吸引至设备底部,通过风机产生的吸力将其吸入设备内并杀灭。基于物联网体系架构设计的信息管理系统可实现多功能植保机的远程控制和植保数据的智能管理。应用多功能植保机进行了温室黄瓜白粉病和烟粉虱的防治试验,结果表明,使用该设备后,在黄瓜全生长期可将黄瓜白粉病的病情指数控制在 5.9,对黄瓜烟粉虱的防治效果可达 89.5%。

关键词: 设施农业; 植保机; 病虫害; 臭氧; 物联网; 远程控制

中图分类号: S436.3; TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0293-08

OSID:



Design and Experiment of Multi-functional Plant Protection Machine for Controlling Vegetable Diseases and Insect Pests in Greenhouses

WANG Zhibin^{1,2} QIAO Xiaojun^{1,2} LIU Zhi^{1,2} WANG Ying¹ LI Yufeng¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Diseases and insect pests can seriously affect the yield and quality of greenhouse vegetables. Spraying chemical pesticides is currently the most effective method to control diseases and insect pests. However, the extensive use of chemical pesticides, on the one hand, leads to pathogenic bacteria and pests becoming resistant to chemical pesticides, which eventually makes prevention and control more difficult and, on the other hand, causes serious environmental pollution and leaves pesticide residues that are a threat to people's health. Developing green control technology for diseases and insect pests is an important way to reduce the amounts of chemical pesticides used. A new type of ozone sterilizer device, named multi-functional plant protection machine, and an information management system was designed. The device included mainly ozone generation, circuit control, high-speed fan, trap lamp, environmental data acquisition, and other modules. All the modules were controlled by a STM32F103 microprocessor. The machine used a high-voltage discharge method to produce ozone that could be rapidly and evenly diffused into the whole facility space through the high-speed and large-volume fan and special air duct. At the required concentration, the ozone could oxidize and decompose eggs and larvae of insects, bacteria, and fungi, and inhibit virus reproduction. The device had yellow and blue lights to attract adult insects, which were then sucked into the machine by the fan and killed. The information management system had IoT-based architecture and included a mobile app. This web-based information management system interacted mainly with the data center to realize intelligent management of plant protection data. The device could be controlled remotely using the mobile APP for real-time adjustment of the fan's wind speed, adjustment of ozone release, collection of environmental data, and opening of the trap lamp and other functions. The multi-functional plant protection machine was tested for its ability to control cucumber powdery mildew and *Bemisia tabaci* in several greenhouse facilities. The test results showed

收稿日期: 2021-01-21 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1101100、2020YFD1000300)和北京市农林科学院创新能力建设专项(KJXC20211003)

作者简介: 王志彬(1983—),男,高级工程师,博士,主要从事作物病虫害绿色防控技术研究,E-mail: wangzb@nrcita.org.cn

通信作者: 乔晓军(1965—),男,研究员,博士,主要从事绿色防控智能装备研究,E-mail: qiaoxj@nrcita.org.cn

that after using the equipment during the whole growth period of the cucumber, the disease index of cucumber powdery mildew was controlled at 5.9, and the control effect on *Bemisia tabaci* reached 89.5%. The multi-functional plant protection machine effectively controlled cucumber powdery mildew and *Bemisia tabaci* in the greenhouses. The research result provided a reference for green control of diseases and insect pests in facilities that grow vegetables.

Key words: facility agriculture; plant protection machine; diseases and pest insects; ozone; Internet of Things (IoT); remote control

0 引言

随着设施蔬菜产业的发展,蔬菜受病虫害的影响日趋严重^[1-2]。目前,对设施蔬菜病虫害的防治主要依赖于化学农药。各种化学农药的大量使用,一方面使病虫产生抗药性,导致防治更加困难,另一方面造成严重的环境污染和农药残留,直接影响蔬菜的品质。因此,研究设施蔬菜病虫害绿色防控技术、减少化学农药施用量,对确保蔬菜产量和质量具有十分重要的社会意义和经济价值^[3]。

臭氧(O₃)具有很强的氧化性,不仅能够快速、高效、广谱杀菌,而且安全无毒,作为一种光谱性杀菌剂,臭氧具有很好的杀菌效果^[4-11]。近年来,利用臭氧气体防治作物病虫害的研究受到国内外学者的广泛关注,取得了初步成效^[12-15]。文献[16-17]试验表明,使用臭氧气体熏蒸土壤能够有效杀灭线虫。张娜等^[18]研究表明,不同浓度的臭氧熏蒸处理均可以显著抑制树莓的微生物繁殖($P < 0.05$)。张治家等^[19]利用 160 mg/m³的臭氧气体处理 30 min 后,番茄和黄瓜种子表面微生物的抑制率达到最大值,分别为 97.4% 和 99.5%。高文瑞等^[20]研究发现,增施臭氧能显著降低大棚内番茄和辣椒的田间病害发生率,同时能促进产量的提高。范鑫等^[21]对臭氧技术及臭氧植保机械在农业领域的应用现状进行了梳理,指出臭氧植保机械成本高、臭氧浓度不易控制等因素制约了臭氧技术在农业领域的大规模应用。

针对现有臭氧植保机械便携性差、系统落后、价格昂贵且功能单一等问题,本文结合设施蔬菜病虫害防治特点,设计一款设施蔬菜多功能植保机,并配套研发信息管理系统,以期为设施蔬菜病虫害的绿色防控提供新的设备与技术。

1 总体功能结构

设施蔬菜多功能植保机的设计主要包括多功能植保机硬件的设计和与其配套的信息管理系统的设计。设备总体功能结构如图 1 所示。

在实际应用中,多功能植保机主要悬挂安装在

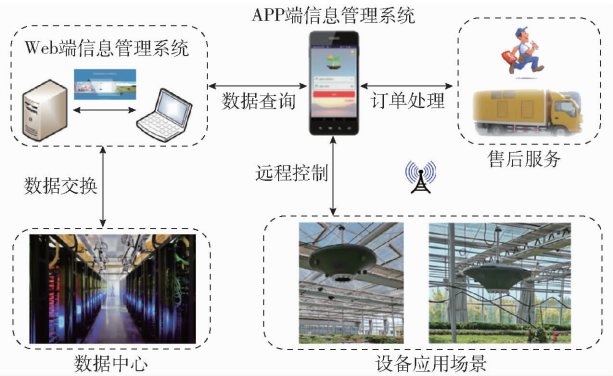


图 1 设备功能结构示意图

Fig. 1 Functional framework of multi-functional plant protection machine

设施温室的顶部,通过无线传输网络实现与信息管理系统通信。信息管理系统包括 Web 端信息管理系统和 APP 端信息管理系统。Web 端信息管理系统主要负责与数据中心的信息交互,实现植保数据的智能管理;APP 端信息管理系统主要负责设备的远程控制、售后服务、数据查询等,实现硬件设备的智能管理。

2 硬件设计

多功能植保机具有杀菌、除虫、辅助加热、环境数据采集等功能,主要由臭氧发生器、风机、诱虫灯、气流导向板、传感器、控制装置等组成。设备宽度为 800 mm,高度为 318 mm,额定电压为 220 V,额定功率为 290 W。设备结构如图 2 所示。

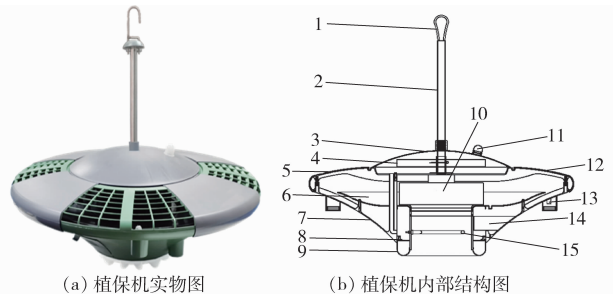


图 2 多功能植保机

Fig. 2 Multi-functional plant protection machine

1. 吊钩 2. 挂杆 3. 保护盖 4. 控制装置 5. 上舱体 6. 气流导向板 7. 下舱体 8. LED 环形灯 9. 灯罩 10. 风机 11. 光照强度传感器 12. 风向调节板 13. 温湿度传感器 14. 臭氧发生器 15. 加热管

2.1 工作原理

多功能植保机属于高压放电式臭氧发生器,利用一定频率的高压电流制造高压电晕电场,使电场内或电场周围的氧分子发生电化学反应制造臭氧,通过配备的风机及气流导向板将其扩散至设施整个空间。

在病害防治方面,当臭氧达到一定浓度时,会氧化分解细菌和真菌的细胞壁,使其代谢和繁殖遭到破坏,达到杀灭病菌的目的^[21]。在虫害防治方面,根据害虫发育不同时期的特点,分别采用物理和化学方法除虫:在害虫的卵和幼虫时期,当臭氧达到一定浓度时,其强氧化性会氧化害虫的细胞膜,导致细胞死亡,从而有效杀灭害虫的卵和幼虫;在害虫的成虫时期,利用害虫的趋光性,设备底部的黄、蓝色诱虫灯吸引害虫飞近后,高速旋转的风机产生的吸力会把害虫吸入设备内杀灭。

2.2 结构与功能

设备配有臭氧发生、电路控制、高速风机、诱虫灯、环境数据采集等功能模块。

2.2.1 臭氧发生模块

臭氧发生模块是该设备的核心组件,包括臭氧电源、臭氧电极、高压包等。臭氧电源负责输出高压直流电。臭氧电极基于沿面放电原理在高频电压作用下电离氧气产生臭氧。控制装置在臭氧释放方面采用了更为周全的设计,采用持续断续性臭氧释放,同时控制风机连续送风,增加臭氧与空气混合程度。研发的臭氧发生器外形尺寸为 610 mm × 460 mm × 320 mm,并联安装 2 个高压放电管,臭氧产量 10 g/h,出风口处臭氧质量浓度 4.3 ~ 10.7 mg/m³。

2.2.2 电路控制模块

电路控制模块由传感器接口、ARM 微处理器、执行设备接口和通信模块组成。控制系统通过传感器接口把设施环境参数,例如温度、湿度、光照强度以及 CO₂ 浓度等转换为电压或电流信号传送给 ARM 微处理器进行处理,根据处理结果控制相应的执行设备。控制电路板以及电路原理如图 3、4 所示。

ARM 微处理器是整个电路控制系统的核心,先将传感器送来的模拟信号进行 A/D 转换,然后把转换得到的数字信号写入缓存。同时,将采集到的环境参数值和预设值进行比较,检验是否在预设范围内。若超出预设范围,则控制执行设备工作。执行机构通过 ARM 微处理器的控制,实现对设施内臭氧浓度的动态调节。ARM 微处理器采用意法半导体公司生产的 STM32 系列 32 位高性能微处理器 STM32F103VCT6,该微处理器工作频率为 72 MHz,内置高达 256 KB 的 Flash 存储器和 48 KB 的静态随

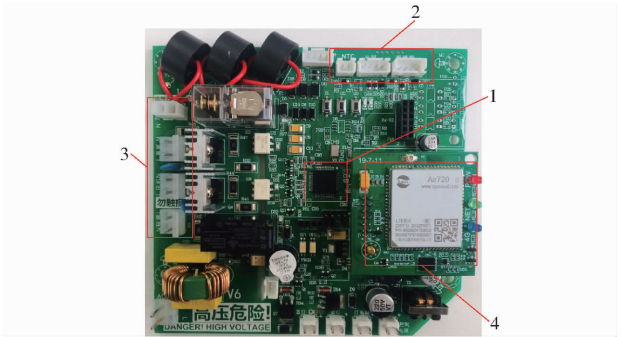


图 3 多功能植保机控制电路板

Fig. 3 Control circuit board in multi-functional plant protection machine

1. ARM 微处理器 2. 传感器接口 3. 执行设备接口 4. 无线通信模块

机存储器,具有丰富的增强 I/O 端口。

STM32F103VCT6 微处理器可通过 I²C 标准协议与 BH1750FVI 型光照强度传感器、SHT30 型温湿度传感器等模块进行通信,实时监测设施内的温湿度、光照强度等数据,并通过无线通信模块将监测到的数据自动上传至服务平台。此外,该电路还预留多个传感器接口,可扩展监测 CO₂ 浓度(MG811 电化学式 CO₂ 传感器)、氨气浓度(MQ-135 金属半导体式氨气传感器)等温室环境数据。

无线通信模块可根据数据传输距离配备 GPRS、WiFi、蓝牙等通信模块,实现数据的实时传输。在数据长距离传输时,STM32F103VCT6 微处理器可通过串口与 Air720 模块连接,将数据通过 Air720 模块发送到云服务器端,实现嵌入式网关和云服务器之间的通信,其中 Air720 模块能够向下兼容现存的 GSM/GPRS 网络,以确保在缺乏 3G 和 4G 网络的偏远地区也能工作。在数据短距离传输时,STM32F103VCT6 微处理器可通过串口与 ESP8266 模块连接组建 WiFi 通信网络,将数据通过 ESP8266 模块发送至绑定的无线路由器上,实现数据的传输;STM32F103VCT6 微处理器还可通过串口与 ATK-BLE01 蓝牙模块连接,实现数据的近距离实时传输。

执行设备主要包括臭氧发生模块、高速风机模块、辅助加热模块、诱虫灯等。上位机通过无线通信模块与 STM32F103VCT6 微处理器相联,工作人员可通过上位机实现对整个设备的控制。此外,根据作物设施生长环境的不同,工作人员可通过上位机对设备环境参数进行预设,以满足不同作物不同生长期内杀菌除虫时对臭氧浓度的要求。

2.2.3 高速风机模块

多功能植保机配备中,风机最大静压 550 Pa、最大风量 1 350 m³/h;植保机外侧的风向调节板可根据温室空间类型调节方向风量,其结构示意图如

感知层以多功能植保机为硬件平台,集成光照强度传感器、温湿度传感器、CO₂ 浓度传感器等,实时采集与监测温室内的环境数据。网络层主要采用 GPRS、WiFi、蓝牙等无线通信技术,MQTT 网络协议以及 QoS 等技术,实现温室环境数据的传输与同步、上位机控制指令的识别与转发等操作。应用层主要分为服务支撑层和应用 UI 接口。在该系统中,服务支撑层以各类应用服务器为基础,主要负责对采集的数据进行解析、转换、汇集、分析,以及用户应用的适配和事件触发等。其中,数据库采用 Java + tomcat + MySQL 软件架构模式,植保信息采用二维结构数据表和关联数据表进行数据存储,采用 JDBC 连接池、MyBatis 中间件等技术实现对数据的高效查询。上位机通过 Socket 与服务器建立长连接,实现指令的转发。应用 UI 接口包括应用管理系统的 Web 管理端和 APP 客户端。Web 管理端采用 B/S(Brower/Server)工作模式,管理人员通过 Web 管理端可以实现植保机用户信息和设备应用信息的管理,具体包括:用户的个人信息、设备匹配信息、设备使用信息等,设备的注册信息、运行信息、维修记录、报警记录以及温室环境数据等。设备报警信息通过短信形式实时发送到用户的手机,以使用户对温室内设备运行状态进行远程监测。APP 客户端具有植保机用户注册、设备绑定、设备维修、工作模式设定、数据实时查询与可视化显示等功能。用户通过该 APP 软件可以远程控制设备风机风速的调整、臭氧浓度的调节、诱虫灯的开启等,也可实时查询温室内温度、湿度、光照强度、天气状况、设备运行状态等信息。系统工作流程如图 8 所示。

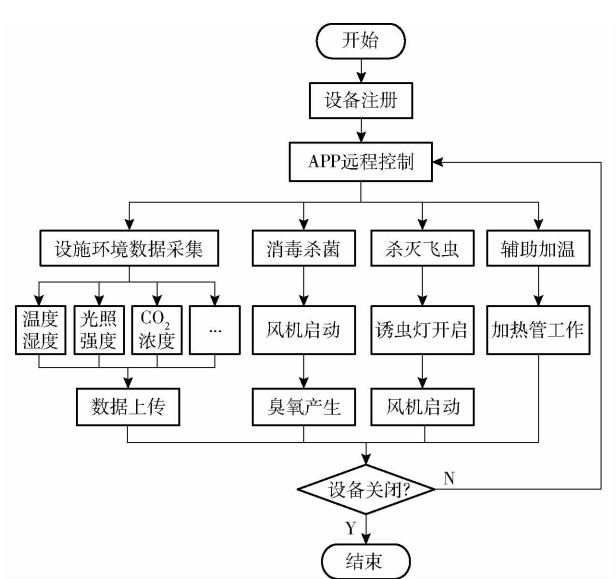


图 8 系统工作流程图

Fig. 8 Flow chart of information management system

4 试验

为验证多功能植保机对设施蔬菜病虫害的防治效果,在全国不同省市进行了多组不同作物的病虫害防治试验。本文以与山东省植物保护总站合作开展的温室黄瓜病虫害防治试验为例,介绍多功能植保机在温室中的应用效果。

4.1 试验设计

以黄瓜白粉病、烟粉虱为试验对象,在山东省济南市长清区恒源农业生态园开展了温室蔬菜病虫害防治试验。试验中,随机选择 3 个温室(每个温室面积为 667 m²)作为对照组,每个温室同时定植全雌油量王品种黄瓜。3 个对照组具体设置如下:对照组 1,空白对照(CK),即对温室内黄瓜不作任何病虫害防治处理;对照组 2,对温室内黄瓜采用多功能植保机防治病虫害处理;对照组 3,对温室内黄瓜采用化学农药防治病虫害处理(喷洒 25% 嘧菌酯 1 500 倍液防治黄瓜白粉病;喷洒 12% 乙基多杀菌素 2 000 倍液防治黄瓜烟粉虱)。3 个对照组其它水肥、前茬作物、日常管理措施等均相同。

试验从黄瓜定植后一周开始,分别在苗期、初果期、盛果期内各取样一次,共 3 次。

4.2 试验方法

黄瓜白粉病调查时,在每个小区采用对角线五点调查法,分别在黄瓜苗期、初果期和盛果期内每个调查点取样 12 株,共计 60 株,每株调查全部叶片,记录调查总叶片数、发病叶片数以及每个叶片的病情级别。黄瓜白粉病病情分级标准为:0 级,无症状;1 级,病斑面积占整个叶片面积的 5% 以下;3 级,病斑面积占整个叶片面积的 5% ~ 25%;5 级,病斑面积占整个叶片面积的 26% ~ 50%;7 级,病斑面积占整个叶片面积的 51% ~ 75%;9 级,病斑面积占整个叶片面积的 75% 以上。发病率和病情指数计算公式为

$$I = \frac{D}{N} \times 100\%$$
 (1)

$$D_i = \frac{\sum (sn)}{NS} \times 100$$
 (2)

式中 I——发病率,%
D——发病叶数
N——调查总叶数
D_i——病情指数
s——各病情级别代表数值
n——各病情级别病叶数
S——最高病情级别代表数值

黄瓜烟粉虱调查时,在每个小区采用对角线五

点调查法,分别在黄瓜苗期、初果期和盛果期内每个调查点取样 6 株,共计 30 株,每株调查全部叶片,记录每株烟粉虱成虫的数量。计算公式为

$$P = \frac{M - T}{M} \times 100\%$$
 (3)

式中 P ——防治效果,%
 M ——空白对照区烟粉虱成虫数
 T ——处理区烟粉虱成虫数

4.3 结果与分析

在 3 个对照温室内,不同方法防治黄瓜白粉病效果如表 1 所示。

表 1 不同方法防治黄瓜白粉病效果

Tab.1 Effects of different methods used to control cucumber powdery mildew			
生长期	处理	病情指数	发病率/%
苗期	CK	(3.1±2.3) ^a	(18.3±7.0) ^a
	对照组 2	(3.7±2.4) ^a	(20.0±9.5) ^a
	对照组 3	(2.8±1.5) ^a	(15.0±7.0) ^a
初果期	CK	(26.1±4.2) ^a	(81.7±7.0) ^a
	对照组 2	(7.0±2.1) ^b	(26.7±7.0) ^b
	对照组 3	(4.8±0.8) ^b	(33.3±13.2) ^b
盛果期	CK	(56.1±6.0) ^a	(95.0±4.5) ^a
	对照组 2	(6.9±2.0) ^c	(38.3±9.5) ^c
	对照组 3	(14.6±1.8) ^b	(58.3±10.2) ^b
全生长期	CK	(28.5±22.8) ^a	(65.0±35.1) ^a
	对照组 2	(5.9±2.5) ^b	(28.3±11.3) ^b
	对照组 3	(7.4±5.5) ^b	(35.6±20.8) ^b

注:全生长期包括苗期、初果期和盛果期。数值后面的不同字母表示在相同生长期内同列数据经 Tukey's HSD 检验后差异显著 ($P<0.05$)。下同。

表 1 表明:在黄瓜苗期,对照组 2、对照组 3 与 CK 相比,白粉病病情指数和发病率差异不显著;在黄瓜初果期和盛果期,对照组 2、对照组 3 与 CK 相比,使用多功能植保机、喷洒 25% 嘧菌酯 1 500 倍液均对白粉病的防治具有明显的效果;在黄瓜全生长期,对照组 2 与对照组 3 相比,使用多功能植保机比喷洒 25% 嘧菌酯 1 500 倍液对白粉病的防治效果更好,白粉病的病情指数降低了 1.5。多功能植保机在防治白粉病时,可以根据需要随时产生臭氧气体,氧化分解单丝白粉菌 *Sphaerotheca fuliginra* (Schlecht) Poll., 使其代谢和繁殖遭到破坏,从而达到杀灭病菌的目的。施用化学农药防治白粉病时,需要根据白粉病的病情人工喷洒化学农药,防治效果取决于农药使用的剂量、喷洒周期、农药品种等因素。因此,利用多功能植保机防治黄瓜白粉病比施用化学农药防治更及时,防治效果更好。

在 3 个对照温室内,不同方法防治黄瓜烟粉虱效果如表 2 所示。

表 2 不同方法防治黄瓜烟粉虱效果

Tab.2 Effects of different methods used to control Bemisia tabaci on cucumber			
生长期	处理	防治效果/%	平均虫口数/头
苗期	CK		0.8 ^a
	对照组 2	50.0	0.4 ^a
	对照组 3	25.0	0.6 ^a
初果期	CK		38.6 ^a
	对照组 2	80.3	7.6 ^b
	对照组 3	96.9	1.2 ^c
盛果期	CK		144.0 ^a
	对照组 2	92.2	11.2 ^b
	对照组 3	98.3	2.4 ^c
全生长期	CK		61.1 ^a
	对照组 2	89.5	6.4 ^b
	对照组 3	97.7	1.4 ^c

表 2 表明:对照组 2、对照组 3 与 CK 相比,在黄瓜初果期和盛果期,使用多功能植保机和 12% 乙基多杀菌素 2 000 倍液均能有效防治烟粉虱,而且均显著高于 CK;在黄瓜全生长期,对照组 2 与对照组 3 相比,使用多功能植保机比喷洒 12% 乙基多杀菌素 2 000 倍液对烟粉虱的防治效果降低了 8.2 个百分点,防治效果不如施用化学农药。多功能植保机防治烟粉虱主要利用成虫的趋光性,吸引其至设备底部,然后利用风机产生的风力将其吸入设备内杀灭。因此,该方法只能杀灭部分烟粉虱成虫,防治效果不如施用化学农药明显。

多功能植保机对温室内黄瓜白粉病和烟粉虱均具有较好的防治效果,与施用化学农药的防治方法相比,具有如下优点:①防治过程未施用化学农药,避免了化学农药施用产生的农药残留、环境污染、病虫抗药性等问题。②多功能植保机可根据防治需要随时工作,而化学农药的施用需要考虑农药使用剂量、喷洒周期、农药品种等因素,例如防治白粉病和烟粉虱分别施用了不同的化学农药以及剂量。③多功能植保机可以在设施内长期重复使用(设备使用寿命为 10 a 以上),可有效降低农药购买、人工施药等生产投入成本。

4.4 设备应用

目前,多功能植保机已在北京市房山区国家现代农业产业园、北京兴农鼎力种植专业合作社、北京老宋瓜王科技发展有限公司、赤峰市立志农庄设施农业示范园等多个省市自治区的农业单位推广应用,覆盖黄瓜、番茄、豇豆、芹菜、西瓜等多种作物,取得了初步成效,例如,在辽宁省朝阳市公营子镇的温室泰国无筋豆病虫害防治试验中,使用多功能植保机能将灰霉病的发病率控制在 9.2%;在山西省太

原市小店区的温室皇后芹菜病虫害防治试验中,使用多功能植保机能将叶斑病、灰霉病的病株率控制在 3.0% 以下,蚜虫和美洲斑潜蝇的虫株率控制在 2.8% 以下;在内蒙古赤峰市宁城县的温室银月亮番茄病虫害防治试验中,使用多功能植保机能将番茄晚疫病的发病率控制在 4.4%,白粉虱的发病率控制在 7.2%。设备实际应用场景如图 9 所示。



图 9 设备实际应用场景

Fig.9 Practical application scenarios in greenhouses

利用多功能植保机信息管理系统可以实现设备的远程控制和植保数据的智能管理,满足了设备大规模应用的管理需求。系统运行结果如图 10 所示。

5 结论

(1)根据设施蔬菜病虫害绿色防控需求,设计



图 10 系统运行结果

Fig.10 Operation results generated by information management system

了一款设施蔬菜多功能植保机,该机主要包括臭氧发生、电路控制、高速风机、诱虫灯、环境数据采集等功能模块。

(2)配套设计了多功能植保机信息管理系统,该系统可实现多功能植保机的远程控制和植保数据的智能管理。

(3)温室黄瓜病虫害防治试验表明,使用多功能植保机对温室黄瓜白粉病和烟粉虱均有较好的防治效果。该多功能植保机在对温室黄瓜白粉病和烟粉虱的防治过程中未施用化学农药,从而避免了化学农药施用产生的农药残留、环境污染、病虫抗药性等问题。

参 考 文 献

[1] 王翔宇,温皓杰,李鑫星,等. 农业主要病害检测与预警技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 266 – 277. WANG Xiangyu, WEN Haojie, LI Xinxing, et al. Research progress analysis of mainly agricultural diseases detection and early warning technologies[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 266 – 277. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160937&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.037. (in Chinese)

[2] CARVAJAL-YEPES M, CARDWELL K, NELSON A, et al. A global surveillance system for crop diseases[J]. Science, 2019, 364(6447): 1237 – 1239.

[3] 张礼生,刘文德,李方方,等. 农作物有害生物防控: 成就与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(12): 1664 – 1678. ZHANG Lisheng, LIU Wende, LI Fangfang, et al. Crop pest control in China: advances and perspectives[J]. Scientia Sinica Vitae, 2019, 49(12): 1664 – 1678. (in Chinese)

[4] PANDISELVAM R, SUBHASHINI S, BANUU PRIYA E P, et al. Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety[J]. Ozone: Science and Engineering, 2019, 41(1): 17 – 34.

[5] VLASSI E, VLACHOS P, KORAROS M. Effect of ozonation on table grapes preservation in cold storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2031 – 2038.

[6] 陈存坤,张慧杰,纪海鹏,等. 臭氧精准处理提高采后草莓抗氧化酶活性和酚类物质含量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 274 – 280. CHEN Cunkun, ZHANG Huijie, JI Haipeng, et al. Ozone treatment improving antioxidant enzyme activity and phenolic content of postharvest strawberry[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 274 – 280. (in Chinese)

[7] TZORTZAKIS N, CHRYSARGYRIS A. Postharvest ozone application for the preservation of fruits and vegetables[J]. Food Reviews International, 2017, 33(3): 270 – 315.

[8] FUJIWARA K, FUJII T, PARK J S. Comparison of foliar spray efficacy of electrolytically ozonated water and acidic electrolized

- oxidizing water for controlling powdery mildew infection on cucumber leaves[J]. Ozone: Science and Engineering, 2009, 31(1): 10–14.
- [9] 乔晓东, 贾海遥, 王晨健, 等. 有机基质臭氧消毒设备设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 138–145. QIAO Xiaodong, JIA Haiyao, WANG Chenjian, et al. Design and experiment of ozone sterilizer device for organic matrix[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 138–145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200716&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.016. (in Chinese)
- [10] 王海鸥, 胡志超, 吴峰, 等. 超声波臭氧组合果蔬清洗机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 165–169, 175. WANG Haiou, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and experiment on ultrasonic-ozone washer for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 165–169, 175. (in Chinese)
- [11] LEMZC D, JEMBREK D, BAŽOK R, et al. Ozone effectiveness on wheat weevil suppression: preliminary research[J]. Insects, 2019, 10(10): 357.
- [12] 袁也, 顾红蕊, 张潇丹, 等. 臭氧对三七自毒皂苷的降解和根腐病菌的抑制效应研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(1): 124–131. YUAN Ye, GU Hongrui, ZHANG Xiaodan, et al. Effect of ozone on the degradation of *Panax notoginseng* autotoxic saponins and the inhibition of root rot pathogens[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(1): 124–131. (in Chinese)
- [13] 胡静荣, 史彩华, 徐宝云, 等. 臭氧水对韭蛆的防治效果及对韭菜生长的影响[J]. 昆虫学报, 2018, 61(12): 1404–1413. HU Jingrong, SHI Caihua, XU Baoyun, et al. Control efficacy of ozone water against *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae) larvae and its influence on the growth of Chinese chives[J]. Acta Entomologica Sinica, 2018, 61(12): 1404–1413. (in Chinese)
- [14] VIOLEAU F, HADJEB K, ALBET J, et al. Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics[J]. Ozone: Science and Engineering, 2008, 30(6): 418–422.
- [15] 宋卫堂, 王成, 侯文龙. 紫外线-臭氧组合式营养液消毒机的设计及灭菌性能试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 360–365. SONG Weitang, WANG Cheng, HOU Wenlong. Development and test of nutrient solution disinfection machine by combining UV with ozone[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 360–365. (in Chinese)
- [16] MITSUGI F, ABIRU T, IKEGAMI T, et al. Treatment of nematode in soil using surface barrier discharge ozone generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(12): 3076–3081.
- [17] MSAYLEB N, IBRAHIM S. Treatment of nematodes with ozone gas: a sustainable alternative to nematicides[J]. Physics Procedia, 2011, 21: 187–192.
- [18] 张娜, 李昆仑, 王文生, 等. 应用臭氧浓度精准控制熏蒸装置提高树莓贮藏品质[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 295–301. ZHANG Na, LI Kunlun, WANG Wensheng, et al. Application of ozone concentration precise control fumigation device improving quality of raspberries during cold storage[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 295–301. (in Chinese)
- [19] 张治家, 刘红艳, 翟海翔, 等. 臭氧处理对番茄和黄瓜种子萌发的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 98–102, 111. ZHANG Zhijia, LIU Hongyan, ZHAI Haixiang, et al. Effect of ozone treatment on germination of tomato and cucumber seeds[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(9): 98–102, 111. (in Chinese)
- [20] 高文瑞, 李德翠, 徐刚, 等. 臭氧灭菌对大棚内番茄和辣椒田间病害发生率、产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(12): 2769–2774. GAO Wenrui, LI Decui, XU Gang, et al. Effects of ozone sterilization on field disease incidence, yield and quality of tomato and pepper in greenhouse[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(12): 2769–2774. (in Chinese)
- [21] 范鑫, 尚德林, 兰玉彬, 等. 臭氧技术及臭氧植保机械在农业中的应用[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(5): 71–77. FAN Xin, SHANG Delin, LAN Yubin, et al. Application of ozone technology and ozone plant protection devices in agriculture[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(5): 71–77. (in Chinese)
- [22] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1–20. LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for Internet of Things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1–20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180101&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)