

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2023.04.001

智慧植保装备与技术发展现状及展望

姜赛珂, 何雄奎, 刘亚佳,
王昌陵, 宋坚利, 曾爱军

中国农业大学 理学院, 北京, 100193

摘 要: 智慧植保装备和技术的发展极大促进了农业生产无人化和智能化。本文旨在综述智慧植保装备与技术的最新进展, 进一步分析其在农业生产中的应用和潜在影响。通过对相关文献和研究成果的综合分析, 本文首先对不同智慧植保装备与技术进行了相应分类与描述, 然后探讨了智慧植保装备与技术病虫害监测与预警、精准施药、施肥与灌溉管理等方面的应用与发展。最后, 本文讨论了智慧植保装备与技术面临的挑战和未来发展方向。

关 键 词: 智慧植保; 农业生产; 装备技术;

无人化

中图分类号: S49

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2023)04-0001-11

Development Status and Prospect of Intelligent Plant Protection Equipment and Technology

JIANG Saike, HE Xiongkui, LIU Yajia,
WANG Changling, SONG Jianli, ZENG Aijun

College of Science, China Agricultural University, Haidian District, Beijing 100193, China

Abstract: The development of intelligent plant protection equipment and technology has greatly promoted the unmanned and intelligent agricultural production. This paper aims to review the latest progress of intelligent plant protection equipment and technology, and further analyze its application and potential impact in agricultural production. Based on the comprehensive analysis of relevant literatures and research results, this paper first classified and described different smart plant protection equipments and technologies, and then discussed the application and de-

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-28); 中国农业大学 2115 人才培养发展支持计划项目; 三亚中国农业大学研究引导资金项目(SYND-2021-06)。

作者简介: 姜赛珂, 博士研究生, 主要从事智能植保技术及装备方面的研究。

通信作者: 何雄奎, 教授, 博士生导师。

velopment of smart plant protection equipment and technologies in pest monitoring and early warning, precision application of chemicals, fertilization and irrigation management. Finally, this paper discusses the challenges and future development direction of intelligent plant protection equipment and technology.

Key words: intelligent plant protection; agricultural production; equipment technology; unmanned

据国家统计局数据显示,至2022年底,我国全年粮食种植面积11 833万 hm^2 。其中,稻谷种植面积2 945万 hm^2 ,小麦种植面积2 352万 hm^2 ,玉米种植面积4 307万 hm^2 ,大豆种植面积1 024万 hm^2 ,棉花种植面积300万 hm^2 ,糖料种植面积147万 hm^2 。果园种植面积共计0.122 7亿 hm^2 。然而,随着人口的不断增长和粮食需求的不断上升,我国农业生产正面临着日益严峻的挑战。同时,传统的植保方式已经无法满足高效、可持续的农业发展需求^[1]。为了满足粮食安全和可持续发展的要求,农业领域迫切需要创新的解决方案。在这个背景下,智慧农业的出现为农业生产提供了新的机遇和解决方案。

智慧农业是一种基于信息和知识的农业生产方式,其核心要素包括互联网、物联网、大数据、云计算和人工智能等现代信息技术^[2-3]。通过这些技术与农业相结合,实现农业生产过程中的信息感知、定量决策、智能控制、精准投入和个性化服务等功能。智慧农业标志着农业信息化发展的高级阶段,从最初的数字化转变为网络化,再到智能化的发展过程。智慧植保装备与技术是指应用先进的信息技术和自动化技术来改进农业植保过程的一种技术手段(图1),结合传感器技术、遥感技术、无人机技术、人工智能等多种技术^[4-5],实现了农业生产的精细化管理和智能化决策支持,为农业生产提供了更准确、高效和环保的解决方案,提高了农作物保护的效率和农作物产量、减少了农药化肥使用和生产成本、降低了环境污染,并提高了农业生产的可持续性。

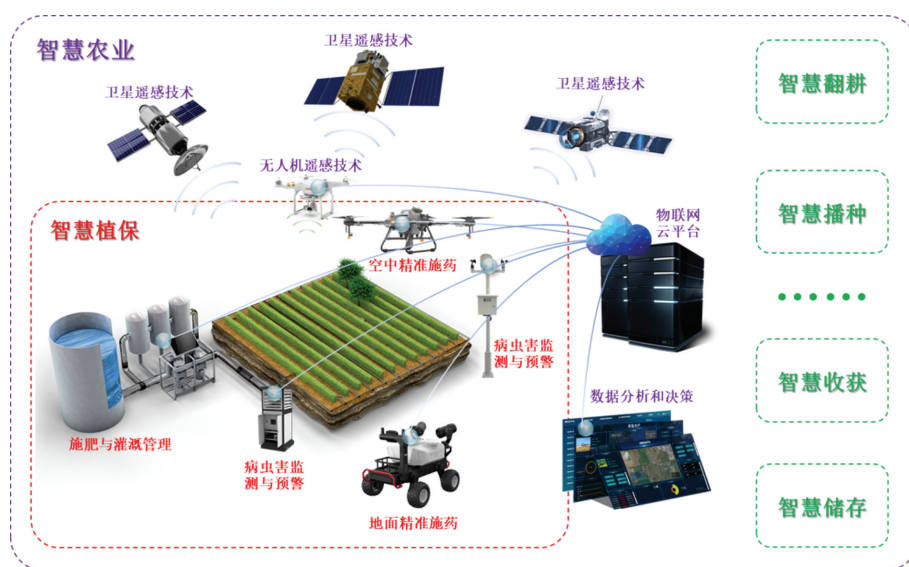


图1 智慧植保系统

本文旨在综述智慧植保装备与技术的最新进展,探讨其在农业生产中的应用和潜在影响。通过对相关文献和研究成果的综合分析,探讨智慧植保技术的分类和特点,以及其在农业生产

中的具体应用领域,并进一步分析智慧植保技术面临的挑战和限制,展望未来的发展方向.

1 智慧植保装备与技术的分类和特点

1.1 智慧植保技术

智慧植保技术作为农业领域中一项日益重要的技术,通过应用先进的信息技术和自动化技术,为农业植保过程带来了革命性的变革.智慧植保技术的核心在于数据的采集、分析和应用.通过传感器技术、遥感技术和计算机视觉与图像处理技术等(表 1),可以实时获取农田的环境参数、作物生长状态和病虫害情况等关键信息.这些数据通过数据分析和决策支持系统的处理,为农户和农业专业人员提供了科学的植保决策依据,包括施药方案、灌溉管理和病虫害防控等.

表 1 智慧植保技术应用方式及特点

技术类型	应用方式	特点
传感器技术 ^[6-8]	在温室、农田和果园中安装传感器,实时测量土壤的湿度、温度、养分含量等参数,以及植物的生长状况和健康状况	提供农田的实时信息,帮助农户和管理者了解农田的状态,并根据实际需求进行精细化管理和决策支持
遥感技术 ^[9-12]	利用卫星影像或无人机获取农田和果园数据.通过对数据进行分析 and 处理,实现作物监测、病虫害预警、土地利用分析等	可以快速获取作物的全貌,识别异常情况并及时采取措施,提高农作物的产量和质量
计算机视觉与图像处理技术 ^[13-17]	通过相机获取植物表型信息,进一步对植物图像进行分析和识别,可以用于检测病虫害、识别杂草、判断植物生长状态等	可以获取作物数据,进一步为植保作业提供精确性、高效性和智能化的决策支持
自动驾驶技术 ^[18-22]	基于全球定位系统、激光雷达、视觉相机等多元传感设备,通过定位、导航、避障算法,实现智能农机精确定位、智能导航	提高了农业作业的效率 and 准确性,减少了人为操作的误差,同时降低了劳动成本
数据分析和决策支持技术 ^[23-24]	整合和分析传感器和遥感数据等多源数据,建立模型和算法,对农田生长环境、作物生长状态和农业管理进行全面评估和预测	为农户和管理者提供科学的种植方案、施肥方案和灾害预警,提高农业生产的效益和可持续性

智慧植保技术的集成为农业生产带来了许多特点和优势,使得智慧植保实现了更加精细化施肥和喷药,并根据农田的实际需求和植物生长状态,精确调节营养元素和农药的投入,提高了农作物的生长质量和产量.智慧植保利用传感器和遥感技术实现了农田的实时监测和预警,能够及时发现和应对病虫害等灾害,降低农作物的损失.除此之外,智慧植保技术还优化了农业生产管理,通过数据分析和决策支持系统提供科学的种植方案和管理建议,帮助农户制订了决策,并提高了农业生产的效益和可持续性.

1.2 智慧植保装备

智慧植保装备是农业领域中应用智能化和自动化技术的关键工具,用于实施智慧植保技术,提高农业生产的效率和可持续性.这些装备结合了传感器、控制系统、无人机等先进技术,为农田监测、施药、施肥和灌溉等环节提供了智能化解决方案.常见的智慧植保装备及特点如表 2 所示.

智慧植保装备的应用提高了农业生产效率和工作安全性,优化了资源利用,提供了精准决策支持,降低了农药使用量.然而,智慧植保装备也存在包括技术复杂性、高成本、数据隐私与安全风险以及适应性问题.尽管存在挑战,但随着技术的发展和普及,智慧植保装备有望为农业带来更多的好处,并推动农业向着可持续和现代化的方向发展.

表2 常见的智慧植保装备及特点

植保装备	应用方式	特点
传感器装备 ^[25-26]	智慧植保系统的核心组成部分,通过感知和采集农田的环境数据,如土壤湿度、温度、气象条件等	具有高精度、实时性和可靠性的特点,能够提供准确的农田信息,为农民和决策者提供农业管理的基础数据
控制系统装备 ^[27-29]	通过对传感器数据的分析和决策,实现对植保操作的自动化和精确控制,包括自动喷雾控制系统、智能灌溉控制系统、施肥控制系统等	具有自动化、精准化和可调节性的特点,可以根据实际情况自动调整喷雾量、施肥量、灌溉量等参数,最大限度提高农作物生长质量和产量
无人机装备 ^[30-35]	搭载遥感相机和传感器的无人机能够进行农田的航测和监测,获取高分辨率的图像和数据	具有高效性、灵活性和广覆盖性的特点,可以快速获取农田信息,包括作物生长状态、病虫害分布等,为农民提供精准的植保决策支持
智能农机装备 ^[36-40]	结合了自动化技术和机械设备,如智能化喷雾器、变量施肥机、自动驾驶农机等	具有高效、自动化和精准化的特点,能够减少人工操作和作业时间,提高农业生产效率和作业质量

2 智慧植保装备与技术在农业生产中的应用

当前,智慧植保装备与技术已经在许多农业生产环节得到了广泛应用,为农民和农业管理者提供了强大的工具和支持.通过实时监测、智能喷药、精确施肥、自动化作业和数据分析等手段,智慧植保装备与技术显著提高了农作物产量和质量,降低农药和化肥的使用,优化资源利用和保护环境.

2.1 病虫害监测与预警

病虫害监测与预警是智慧植保装备与技术在农业生产中的重要应用之一.通过传感器、无人机和图像识别等技术,智慧植保装备能够实时监测和识别农田中的病虫害情况,并提供预警信息,帮助农民及时采取相应的防治措施.如图所示2,植物病虫害检测与预警主要包含4个步骤:数据采集、数据分析、预警系统和决策支持.

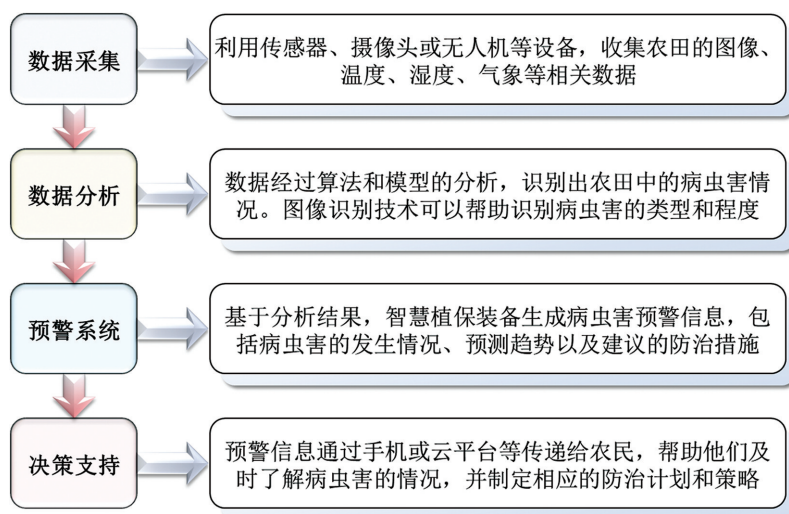


图2 病虫害监测与预警流程图

随着科学技术的发展,无人机、物联网、深度学习等技术及平台在植物病虫害监测与预警中发挥到越来越重要的作用,尤其在作物病害监测领域,基于感知、决策、执行的无人机技术也已成为智慧农业的关键核心技术^[41]。同时,基于人工神经网络的病虫害分析预测^[42],基于支持向量机(SVM)的病虫害分析预测^[43],基于3S技术(遥感技术、全球定位系统和地理信息系统3种技术的结合)的病虫害预测^[44],基于物联网技术的病虫害预测应用^[45]和基于图像处理的病虫害诊断^[46-47]等极大促进了病虫害预测的发展。

病虫害监测与预警的优势在于提供了实时的病虫害信息,使农民能够迅速采取措施,减少农作物受损的风险。同时,智慧植保装备还可以帮助农民优化防治措施,减少农药的使用量,降低对环境的影响。然而,病虫害监测与预警也存在一些挑战。准确识别和预测病虫害需要可靠的算法和模型,对设备的精度和稳定性要求较高。此外,病虫害的多样性和变异性也给预警系统带来一定的挑战。

2.2 精准施药

精准施药是智慧植保装备与技术在农业生产中的关键应用之一。植保机械作为施药的工具与手段,一百多年以来,药械发展经历了人背机器、机器背人、人机分离、智能喷雾完全无人4个典型时代^[48]。当前,通过利用传感器、地理定位系统(GPS)和智能控制系统等,智慧植保装备可以实现对植物进行精准的农药施用^[49-50],减少农药的使用量,提高施药效果,同时降低对环境和人员的潜在风险。如图3所示为不同作业环境下的智能植保施药装备。



图3 农业植保施药装备

大田智能施药装备是应用于大田农作物施药操作的智能化喷洒设备,主要针对小麦、大豆及甜菜等主粮作物或经济作物,可有针对性地喷施杀虫剂、杀菌剂、除草剂及植物生长调节剂等^[51-52]。基于先进的定位、识别、决策技术和自动化控制系统,可以实现高效、精确的喷洒作业,进一步提高农作物保护和病虫害防治的效果。在大田航空植保作业方面,大疆、极飞、极目等公司开发出多款适合大田植保作业的多旋翼无人机,极大降低了大田施药的复杂性。

果园智能施药装备主要包含4种:果园自动对靶喷雾机、果园风送变量喷雾机、果园自动仿形变量喷雾机和果园植保无人机。其中,果园自动对靶技术主要依赖于红外传感器技术、激光测距传感器技术、超声波传感技术等,但这些技术在靶标识别环节受外界复杂环境影响严重;风送变量喷雾是果园最常见的施药方式,风向、风速和风量是风送喷雾风力的3要素,准确的方向、恰当的风速和适当的风量是果园风送喷雾重中之重^[53-55],同时,风量需求“置换原则”和风速需求“末速度原则”为风送喷雾机的研制提供相应的参数估算^[56];果园自动仿形变量喷雾机基于激光雷达、视觉相机、红外传感器等设备,能够根据果树的形状和结构变化,实现喷雾量的自动调节,以提高喷洒的效果和效率。2013年,中国农业大学联合无锡市中波机械制造有限公司成功研制出一款基于激光雷达的果园自动仿形变量喷雾机^[57](图4),为果园精准喷

雾机提供了新设计、新思路、新结构；果园植保无人机针对冠层厚实的果树很难实现良好的作业效果，为解决此问题，中国农业大学无人机系统研究院和大疆创新科技有限公司研发出了枝向对靶技术^[58]，该技术通过调节前后机臂喷洒仰角，可让雾滴沿着树枝斜角穿透冠层，确保药液从上到下均匀附着。除此之外，大疆最新的 T50 植保无人机可实现最大 50°坡度的果树航测，能够自动识别果树棵数与障碍物，并依据果树分布走势，生成精准三维航线。



图4 中国农业大学研制的果园自动仿形变量喷雾机

设施智能施药装备受温室空间影响，主要有悬挂式和地面移动式两种。根据支撑施药装备轨道数目的不同，可将其分为双轨式施药机和单轨式施药机。当前，基于微电脑控制器、PLC、单片机等，温室悬挂式施药机已可以实现温室智能化作业要求。温室地面移动式施药机研究方面，主要依靠激光雷达、红外传感器、磁带、热水管道等实现其自主导航作业^[59]。

2.3 施肥与灌溉管理

智慧植保装备在施肥与灌溉管理中的应用革新了传统的农田管理方式，如图5所示^[60]，通过集成传感器技术、数据分析和自动化控制系统，提供了精确、高效的施肥与灌溉管理解决方案。传感器监测土壤湿度、营养物质含量和其他关键参数，将实时数据传输至中央控制系统进行分析^[61]。基于这些数据，智慧植保装备可以为农民提供准确的作物需求信息和决策支持，以制订最佳的施肥和灌溉策略。自动化施肥系统根据作物需求和土壤分析结果，精确施加适量肥料，提高肥料利用效率，减少环境污染风险。智能灌溉系统根据土壤湿度、气象条件和作物需求^[62-63]，实现精确的灌溉控制，避免水分浪费和作物生长不均匀。此外，遥感技术可用于监测和评估农田状况，为农民提供更全面的土地和作物信息。

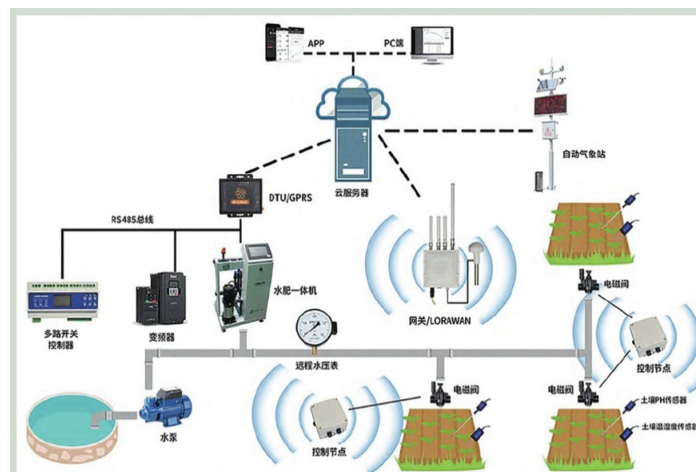


图5 物联网智能灌溉系统

传统的农业生产中,水和肥料往往是分开使用的,导致了许多问题.一方面,传统的灌溉方式往往会造成大量的水分浪费,因为水分不能被有效地保持在根区,而是流失到土壤深层或者渗漏到地下水.另一方面,传统的施肥方式存在浪费和环境污染的问题,肥料往往无法充分被植物吸收利用,一部分被淋溶流失到地下水或者排入水体,导致水体富营养化和生态环境问题.近年来,水肥一体化技术逐渐应用起来,其核心思想是在灌溉和施肥过程中充分考虑植物的需水和施肥需求,将水和肥料的供应与农作物的生长阶段和需求相匹配,实现精确供水和精确施肥^[64-67].这需要运用现代科学技术和措施,包括智能灌溉系统、土壤水分监测技术、肥料控释技术、氮肥利用率调控等手段.水肥一体装备通过科学技术和手段,将水资源和肥料资源合理利用,实现农作物的高效用水和高效施肥,并且,物联网与 5G 技术的发展应用极大地提升其工作效率及控制精度,如图 6 所示为西北农林科技大学研发的水肥一体机远程控制系统^[68].



图 6 水肥一体机远程控制系统框图

智慧植保装备在施肥与灌溉管理中的应用,不仅能够使农民实现精准施肥和灌溉管理,减少资源浪费,提高农作物的产量和品质.同时,精确的施肥和灌溉管理也有助于减少环境污染和保护土壤、水体的健康.

3 结论与展望

综上所述,智慧植保装备与技术在农业生产中扮演着越来越重要的角色.通过集成传感器技术、遥感技术、自动驾驶技术和数据分析等手段,智慧植保能够提高农作物产量、优化农业生产管理、减少农药使用 and 环境影响.然而,智慧植保仍面临着挑战,包括高成本、可行性、数据隐私和安全性等问题.解决这些问题需要政府、科研机构、企业和农民共同努力,加强技术研发与创新,推动政策支持和培训机制建设,实现智慧植保技术的可持续发展和广泛应用.此外,为了推动智慧植保的发展,需要加强跨学科的研究合作、标准化和规范化,并注重普及和培训.展望未来,智慧植保装备与技术将在农业生产中发挥更大的作用,实现农业的可持续发展和精细化管理.

虽然智慧植保装备与技术在农业领域呈现出广阔的前景^[69-70],但在农业生产中仍面临一些挑战和限制,包括技术成熟度和可靠性、数据隐私和安全、技术推广和普及、法律和政策支持、农业生态和可持续性,以及数字鸿沟和信息不对称等。

3.1 技术成熟度和可靠性

智慧植保装备与技术的集成,涉及多个领域的集成,包括传感器技术、遥感技术、自动化技术、数据分析等。这些技术的发展还存在一些挑战,例如传感器的准确性和稳定性、遥感数据的获取和解析、自动化设备的可靠性等。因此,确保智慧植保技术的稳定性和可靠性,仍然需要技术研发和实践的不断积累。

3.2 数据隐私和安全

智慧植保装备与技术的需要收集大量的农田数据,包括土壤数据、作物生长数据、农户信息等,这些数据的安全性和隐私保护成为一个重要问题。确保数据的安全存储和传输,防止数据被非法获取或滥用,是智慧植保技术发展中需要解决的一个重要问题。

3.3 技术推广和普及

尽管智慧植保技术在农业生产中具有潜力,但技术的推广和普及仍然面临一些限制,其中包括技术成本较高、农民对新技术接受度不高、技术操作和维护的复杂性等。要推动智慧植保技术的广泛应用,需要加强技术培训和他支持,降低技术成本,提高农民的技术素养和接受度。

3.4 法律和政策支持

智慧植保装备与技术的发展需要建立相应的法律法规和政策支持。这包括数据隐私保护的法律法规、智慧植保设备的认证和标准、对智慧植保技术的政策扶持和激励等。政府部门和相关机构需要积极参与,制定政策和措施,为智慧植保技术的发展提供支持和引导。

3.5 农业生态和可持续性

在推动智慧植保技术的发展时,需要注重农业生态和可持续性的保护。例如,合理使用农药和化肥,避免对环境和生态系统造成负面影响;保护土壤质量和生物多样性,避免过度耗竭和破坏。智慧植保技术在解决农业生产问题的同时,需要与生态保护和可持续农业的目标相协调,避免出现新的环境问题。

3.6 数字鸿沟和信息不对称

智慧植保装备与技术的广泛应用需要农民具备相关的数字技术能力和信息获取途径。然而,农村地区普遍存在数字鸿沟问题,缺乏稳定的互联网连接和数字技术培训机会。因此,在推广智慧植保技术时,需要解决信息不对称和数字鸿沟问题,确保技术的普及和受益面更广泛。

参考文献:

- [1] 何雄奎. 中国植保机械与施药技术研究进展 [J]. 农药学报, 2019, 21(S1): 921-930.
- [2] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究 [J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
- [3] 陈桂芬, 李静, 陈航, 等. 大数据时代人工智能技术在农业领域的研究进展 [J]. 中国农业文摘-农业工程, 2019, 31(1): 12-16.
- [4] 韩冷, 何雄奎, 王昌陵, 等. 智慧果园构建关键技术装备及展望 [J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 1-11.
- [5] 万雪芬, 郑涛, 崔剑, 等. 中小型规模智慧农业物联网终端节点设计 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 306-314.
- [6] 时国龙, 沈心怡, 辜丽川, 等. 面向智慧农业的无芯片射频跨域感知研究进展 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 10-23.
- [7] 王潇, 张美娜, ZHOU J F, 等. LiDAR 传感器及技术在农业场景的应用进展综述 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11): 155-164.
- [8] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1-7.

- [9] ABD EL-GHANY N M, ABD EL-AZIZ S E, MAREI S S. A Review: Application of Remote Sensing as a Promising Strategy for Insect Pests and Diseases Management [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(27): 33503-33515.
- [10] 赵龙才, 李粉玲, 常庆瑞. 农作物遥感识别与单产估算研究综述 [J]. *农业机械学报*, 2023, 54(2): 1-19.
- [11] YUAN W A, CHOI D, BOLKAS D. GNSS-IMU-Assisted Colored ICP for UAV-LiDAR Point Cloud Registration of Peach Trees [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 197: 106966.
- [12] 杜蒙蒙, Ali Roshanianfard, 刘颖超. 可见光波段无人机遥感图像的小麦茎蘖密度定量反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(12): 3828-3836.
- [13] 夏烨, 雷晓晖, 祁雁楠, 等. 基于改进 Ghost-YOLOv5s-BiFPN 算法检测梨树花序 [J]. *智慧农业(中英文)*, 2022, 4(3): 108-119.
- [14] ROY A M, BHADURI J. Real-Time Growth Stage Detection Model for High Degree of Occultation Using DenseNet-Fused YOLOv4 [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 193: 106694.
- [15] LIU S Q, JIN Y S, RUAN Z W, et al. Real-Time Detection of Seedling Maize Weeds in Sustainable Agriculture [J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 15088.
- [16] HONG Q Q, JIANG L, ZHANG Z H, et al. A Lightweight Model for Wheat Ear Fusarium Head Blight Detection Based on RGB Images [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3481.
- [17] 吴叶兰, 陈怡宇, 廉小亲, 等. 高光谱成像的柑橘病虫害叶片识别方法 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(12): 3837-3843.
- [18] JIANG S K, WANG S L, YI Z Y, et al. Autonomous Navigation System of Greenhouse Mobile Robot Based on 3D Lidar and 2D Lidar SLAM [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 815218.
- [19] LIU L M, LIU Y J, HE X K, et al. Precision Variable-Rate Spraying Robot by Using Single 3D LIDAR in Orchards [J]. *Agronomy*, 2022, 12(10): 2509.
- [20] 刘伟洪, 何雄奎, 刘亚佳, 等. 果园行间 3D LiDAR 导航方法 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 165-174.
- [21] 刘路, 潘艳娟, 陈志健, 等. 高遮挡环境下玉米植保机器人作物行间导航研究 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 11-17.
- [22] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 1-18.
- [23] 许建宏. 农业大数据与云计算的应用研究 [J]. *中国果树*, 2023(7): 157.
- [24] 许多, 鲁旺平, 许瑞清, 等. 基于农业时空多模态知识图谱的水稻精准施肥决策方法 [J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(3): 281-292.
- [25] 刘羽飞, 何勇, 刘飞, 等. 农业传感器技术在我国的应用和市场: 现状与未来展望 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2023, 49(3): 293-304.
- [26] THAKUR D, KUMAR Y, KUMAR A, et al. Applicability of Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture: a Review [J]. *Wireless Personal Communications*, 2019, 107(1): 471-512.
- [27] 孙京伟. 电子技术在现代装备机械中的运用 [J]. *电子技术与软件工程*, 2021(12): 78-79.
- [28] LIU R Q, WANG Y S, LI D D, et al. A Simple, Low-Cost and Efficient γ -CD/MWCNTs/CP-Based Electrochemical Sensor for the Rapid and Sensitive Detection of Methyl Parathion [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14(10): 9785-9795.
- [29] QIN L L, HE Y W, ZHAO X Y, et al. Preparation, Characterization, and in Vitro Sustained Release Profile of Resveratrol-Loaded Silica Aerogel [J]. *Molecules*, 2020, 25(12): 2752.
- [30] 王梦迪, 何莉, 刘潜, 等. 基于小麦冠层无人机高光谱影像的农田土壤含水率估算 [J]. *农业工程学报*, 2023, 39(6): 120-129.
- [31] KIM J, KIM S, JU C, et al. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: a Review of Perspective of Platform, Control, and Applications [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 105100-105115.

- [32] RAHMAN M F F, FAN S R, ZHANG Y, et al. A Comparative Study on Application of Unmanned Aerial Vehicle Systems in Agriculture [J]. *Agriculture*, 2021, 11(1): 22.
- [33] MESSINA G, MODICA G. Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1491.
- [34] 周志艳, 明锐, 臧禹, 等. 中国农业航空发展现状及对策建议 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 1-13.
- [35] 杜蒙蒙, 刘颖超, 姬江涛, 等. 基于无人机与激光测距技术的农田地形测绘 [J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 60-67.
- [36] 翟长远, 杨硕, 王秀, 等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 1-20.
- [37] XIE BB, JIN Y C, FAHEEM M, et al. Research Progress of Autonomous Navigation Technology for Multi-Agricultural Scenes [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 211: 107963.
- [38] REHMAN A, SABA T, KASHIF M, et al. A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture [J]. *Agronomy*, 2022, 12(1): 127.
- [39] SU Y, WANG X P. Innovation of Agricultural Economic Management in the Process of Constructing Smart Agriculture by Big Data [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2021, 31: 100579.
- [40] 韩佳伟, 朱文颖, 张博, 等. 装备与信息协同促进现代智慧农业发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 55-63.
- [41] 黄冲, 刘万才, 姜玉英, 等. 农作物重大病虫害数字化监测预警系统研究 [J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(5): 196-199, 205.
- [42] KLEM K, SPITZER T. Prediction Model for Cabbage Stem weevil *Ceutorhynchus pallidactylus* Mrsh. Occurrence on Winter Rape Based on an Artificial Neural Network [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2017, 19(3): 302-308.
- [43] 蒋龙泉, 鲁帅, 冯瑞, 等. 基于多特征融合和 SVM 分类器的植物病虫害检测方法 [J]. *计算机应用与软件*, 2014, 31(12): 186-190.
- [44] 汪浩然, 闫秀婧. 基于“3S”技术林业有害生物预警预报系统设计与实现 [J]. *矿山测量*, 2016, 44(5): 28-31.
- [45] 王献锋, 张传雷, 张善文, 等. 基于自适应判别深度置信网络的棉花病虫害预测 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 157-164.
- [46] 高新浩, 刘斌. 基于机器视觉的鲜食玉米品质检测分类器设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 298-303.
- [47] 李素, 郭兆春, 王聪, 等. 信息技术在农作物病虫害监测预警中的应用综述 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(22): 1-6.
- [48] 何雄奎. 高效植保机械与精准施药技术进展 [J]. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 389-397.
- [49] 何雄奎. 中国精准施药技术和装备研究现状及发展建议 [J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(1): 133-146.
- [50] WANG S L, LI X E, ZENG A J, et al. Effects of Adjuvants on Spraying Characteristics and Control Efficacy in Unmanned Aerial Application [J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): 138.
- [51] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势 [J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20): 30-40.
- [52] QIAO B Y, HE X K, LIU Y J, et al. Maize Characteristics Estimation and Classification by Spectral Data under Two Soil Phosphorus Levels [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 493.
- [53] 翟长远, 赵春江, Ning Wang, 等. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 1-15.
- [54] HUANG Z, WANG C L, LI Y F, et al. Field Evaluation of Spray Drift and Nontargeted Soybean Injury from Unmanned Aerial Spraying System Herbicide Application under Acceptable Operation Conditions [J]. *Pest Management Science*, 2023, 79(3): 1140-1153.
- [55] LI T A, QI P, WANG Z C, et al. Evaluation of the Effects of Airflow Distribution Patterns on Deposit Coverage and Spray Penetration in Multi-Unit Air-Assisted Sprayer [J]. *Agronomy*, 2022, 12(4): 944.
- [56] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算 [J]. *植物保护*, 2008, 34(6): 124-127.
- [57] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2017,

- 33(1): 70-76.
- [58] QI P, HE X K, LIU Y J, et al. Design and Test of Target-Oriented Profile Modeling of Unmanned Aerial Vehicle Spraying [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2022, 15(3): 85-91.
- [59] 姜赛珂, 张美娜, 李雪, 等. 设施内自主移动装备导航控制技术研究进展 [J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(3): 159-169.
- [60] 曹征. 物联网技术在农业灌溉系统中的应用 [J]. *中国果树*, 2022(8): 125.
- [61] RAIMONDI G, MAUCIERI C, TOFFANIN A, et al. Smart Fertilizers: What should we Mean and where should we Go? [J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2021, 16(2): 12-19.
- [62] 鲁旭涛, 张丽娜, 刘昊, 等. 智慧农业水田作物网络化精准灌溉系统设计 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 71-81.
- [63] LAVANYA G, RANI C, GANESHKUMAR P. An Automated Low Cost IoTBased Fertilizer Intimation System for Smart Agriculture [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2020, 28: 100300.
- [64] 周良富, 金永奎, 薛新宇. 电磁阀开关模式下文丘里施肥器吸肥特性研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 277-284.
- [65] NONGBET A, MISHRA A K, MOHANTA Y K, et al. Nanofertilizers: a Smart and Sustainable Attribute to Modern Agriculture [J]. *Plants*, 2022, 11(19): 2587.
- [66] 戴秀, 王坚强, 任妮, 等. 智能水肥一体化管控平台的设计与实现 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(18): 177-181.
- [67] 鲁娟利, 姜建国, 李鹏伟. 基于 Web 数据挖掘的水肥一体机功能参数实现 [J]. *农机化研究*, 2022, 44(5): 204-207.
- [68] 朱德兰, 阮汉铨, 吴普特, 等. 水肥一体机肥液电导率远程模糊 PID 控制策略 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 186-191.
- [69] 王海光. 智慧植保及其发展建议 [J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(10): 1-21.
- [70] YANG X, SHU L, CHEN J N, et al. A Survey on Smart Agriculture: Development Modes, Technologies, and Security and Privacy Challenges [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 8(2): 273-302.

责任编辑 王新娟