

智慧植保技术体系与应用现状综述

别宇辉¹ 陈鑫² 徐国威¹ 李云龙³ 张小利³ 曹金娟³
朝格敖其尔⁴ 莫仁⁴ 王耀君^{1*}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193;
3. 北京市植物保护站, 北京 100029; 4. 鄂尔多斯市农牧局, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要: 在全球气候变化加剧与粮食安全保障需求日益凸显的背景下, 农作物病虫害防控工作正面临多重挑战。智慧植保作为现代农业信息技术集成创新的重要方向, 通过深度融合人工智能、物联网、遥感监测等前沿技术, 构建感知-通信-决策-执行全链条智能化防控体系, 为提升农业灾害治理能力提供了关键技术支撑。该文系统梳理了智慧植保的技术架构: 在信息感知层面, 整合多源传感器网络与卫星遥感技术实现病虫害监测多维化; 在数据通信层面, 构建边缘计算与云计算协同的传输处理平台以保障信息时效性; 在决策执行层面, 依托智能算法驱动精准施药装备与植保机器人作业。并通过典型应用场景分析, 揭示了智慧植保装备在提升防治效率、减少农药用量及降低环境负荷等方面的显著效益。最后, 针对技术落地面临的成本约束、数据壁垒及标准缺失等现实瓶颈, 提出硬件轻量化-软件开源化-服务云端化的协同发展路径, 以期为推进农业绿色转型与可持续发展提供参考。

关键词: 智慧植保; 病虫害防控; 物联网; 人工智能

A review of smart plant protection technologies and their current applications

Bie Yuhui¹ Chen Xin² Xu Guowei¹ Li Yunlong³ Zhang Xiaoli³ Cao Jinjuan³
Chaoqiaoqier⁴ Mo Ren⁴ Wang Yaojun^{1*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. Beijing Plant Protection Station, Beijing 100029, China; 4. Bureau of Agriculture and Animal Husbandry of Ordos, Ordos 017200, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: Amid intensifying global climate change and rising concerns over food security, crop pest and disease control is confronted with multiple challenges. Smart plant protection, as a key frontier in the integrated innovation of modern agricultural information technologies, establishes an intelligent full-chain system covering perception, communication, decision-making, and execution through the deep integration of cutting-edge technologies such as artificial intelligence, Internet of Things, and remote sensing monitoring. This paper systematically reviews the technical architecture of smart plant protection: at the information perception layer, multi-source sensor networks are integrated with satellite remote sensing to achieve multi-dimensional monitoring of pests and diseases; at the data communication layer, an edge-cloud collaborative transmission and processing platform is constructed to ensure real-time information flow; at the decision-execution layer, intelligent algorithms are employed to power precision spraying equipment and plant protection robots. Typical application scenarios demon-

strate the significant benefits of smart plant protection technologies in improving control efficiency, reducing pesticide use, and minimizing environmental impacts. Finally, practical bottlenecks such as high cost, data silos, and a lack of unified standards are discussed, and a coordinated development strategy of hardware miniaturization, software open-sourcing, and cloud-based services is proposed to provide a theoretical reference for promoting agricultural green transformation and sustainable development.

Key words: smart plant protection; pest and disease control; Internet of Things; artificial intelligence

现代农业肩负着保障粮食安全、供给生物材料及维系生态系统平衡的多重使命。在全球气候变暖与人口持续增长的双重压力下,病虫害防控已成为制约农业可持续发展的核心瓶颈。据全国农作物病虫害测报网系统监测数据预测,2025年我国主要作物重大病虫害预计发生面积将达16 786.5万公顷次(刘杰等,2025)。这一严峻态势不仅直接冲击粮食安全体系,更通过农资过度投入、环境成本外溢等传导路径形成复合型系统性风险。

气候变化正深刻改变着病虫害的发生规律。全球气候变暖加剧了病原体的侵染风险,同时提升了昆虫的代谢速率和种群活动强度;夜间升温与无霜期延长为害虫越冬繁殖创造了有利条件(Wang et al., 2022)。在农村劳动力结构性短缺与消费者对绿色安全食品需求升级的双重驱动下,人工监测体系难以应对病虫害时空变异加剧的新态势(李安琦, 2020)。传统防控模式面临三重困境,即化学农药过度使用导致害虫抗药性增强、天敌种群衰减和生态链失衡(朱斌和梁沛, 2024);同时,跨境贸易增长带来的外来有害生物入侵风险持续攀升(褚丽彦, 2023)。在这种背景下,智慧植保技术体系应运而生,其以数据驱动为核心,通过物联网实现多源信息采集,依托大数据分析构建预测模型,运用人工智能优化决策系统,最终由无人机等智能装备执行精准作业(姜赛珂等, 2023)。该体系突破了传统路径依赖,形成监测-诊断-决策-执行的闭环管理:环境传感器网络与遥感监测实现病虫害动态捕捉,边缘计算与云计算协同提升数据处理时效,变量施药技术与自主导航装备保障精准防控。国家政策体系亦为智慧植保发展提供强力支撑,《全国智慧农业行动计划(2024—2028年)》鼓励有条件的地方整区域推进田间气象、作物长势、土壤墒情、病虫害等监测预警网络建设,形成覆盖全域的一体化监测体系(https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983057.htm)。

在资源约束趋紧、环境压力加剧的背景下,智慧植保为破解“虫口夺粮”与生态保护的矛盾提供了创

新方案。本文系统梳理了智慧植保的技术架构、应用场景与发展图谱,旨在为农业病虫害防控现代化转型提供理论参考,助力实现“保供给、保安全、保生态”的农业可持续发展目标。

1 智慧植保技术体系:感知、通信、决策、执行

智慧植保作为现代农业数字化转型的核心载体,通过构建感知-通信-决策-执行四位一体的闭环技术框架,实现了病虫害防控从单点作业向全链条协同的范式转变。传统植保作业存在人-机-药要素割裂、技术模块孤立运行的突出矛盾,导致防控效能呈现边际递减效应。智慧植保技术体系则以物联网平台为基座,整合卫星遥感、地面传感器网络构成空-天-地一体化监测网络,实现病虫害发生动态的多模态数据采集;通过5G+边缘计算架构构建数据传输高速通道,结合人工智能算法进行时空谱系分析,形成包含发生概率、扩散路径、危害等级的智能决策模型;最终驱动变量喷洒无人机、智能植保机器人等终端设备,完成数据采集-模型推演-装备响应的闭环控制(图1)。该体系突破了传统技术壁垒,形成监测网络全域覆盖、诊断决策智能迭代、执行装备自主协同的模块化集成优势,为现代农业灾害治理提供了系统化解方案。

1.1 多源环境监测与感知技术

信息感知是智慧植保体系的数据基石,通过构建空-天-地立体化监测网络实现对作物生长环境与病虫害发生动态的全要素感知,为精准防控决策提供实时、可靠的数据支撑。传统人工巡检存在效率瓶颈与数据断层,难以满足现代农业对时空连续性监测的需求。智慧植保通过传感器技术、物联网与遥感技术的深度融合,形成了覆盖微观田间环境到宏观区域生态的多尺度感知能力。

传感器技术实现田间微环境精准刻画。作为数据采集终端,农业传感器已形成多元化监测体系,涵盖气象要素(温湿度、光照、风速)、土壤参数(电导率、pH、养分含量)、作物生理指标(叶温、茎秆直径

变化)、水质指标(溶解氧含量、浊度)及病虫害特征参数(挥发性有机物、孢子浓度)等维度(Soussi et al., 2024)(表1)。基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的定位传感网络与遥感平台,可协同构建千米级空间分辨率的农业环境监测系统。设施农业领域已率先实现传感器直报系统与智

能调控装备的闭环联动,在温室环境中达成环境参数的毫秒级响应与自动化调控(熊晓菲等, 2024)。当前传感器技术正沿着多参数集成化、微型化、智能化和低成本化方向演进(刘羽飞等, 2023),为全域推广奠定技术基础。

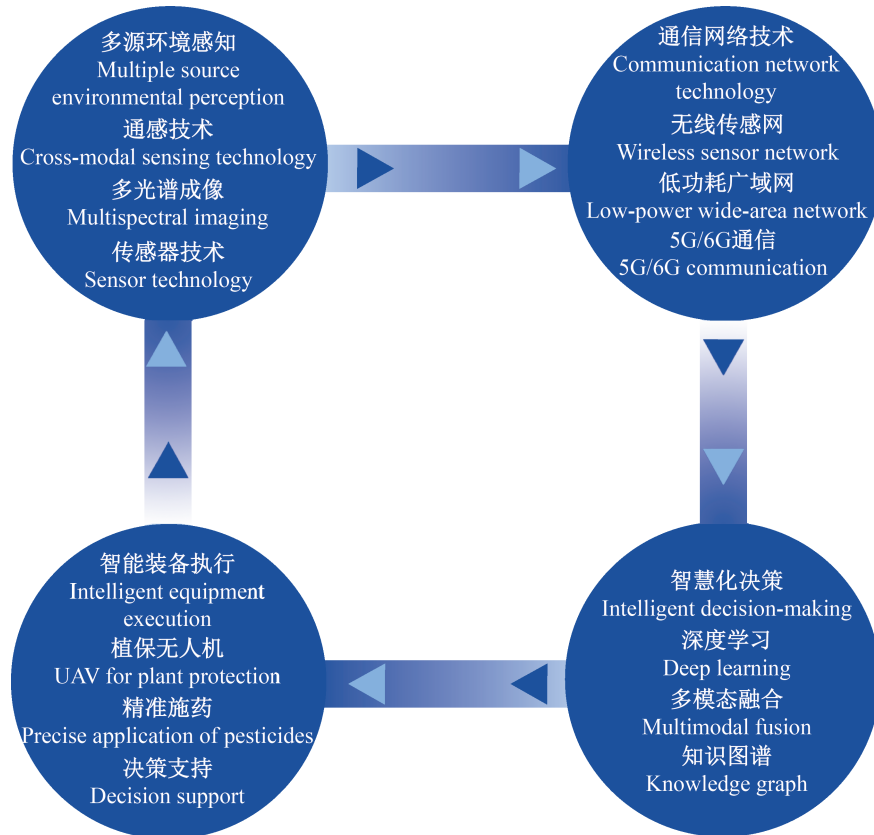


图1 智慧植保技术体系框架

Fig. 1 Technical framework of the smart plant protection system

在信息感知的基础上,利用物联网技术构建数据传输中枢。通过部署低功耗广域网络,物联网将海量传感节点、移动监测终端与云端平台互联,进而形成完整数据链。人工智能与物联网的融合赋予系统自学习能级,基于边缘计算的实时处理能力使病虫害监测响应时效显著提升。现代农业物联网系统通常由感知层、网络层和应用层组成,形成完整的数据采集、传输和处理体系(Boursianis et al., 2022)。物联网与人工智能融合产生了人工智能物联网技术,为智慧植保提供了更强大的技术支持。根据应用方式的不同,人工智能物联网可分为松耦合和紧耦合2种形式,分别适用于不同的应用场景(Muhammed et al., 2024)。在病虫害监测与预测方面,该技术已显示出巨大潜力,通过部署低功耗、低成本传感器节点实时传输环境数据,并利用机器学

习算法评估作物病虫害风险,实现实时预警与早期干预(Blanco-Carmona et al., 2023)。

遥感技术则拓展了宏观监测维度,能够大范围监测作物生长状况和病虫害发生情况。根据搭载平台的不同,遥感技术可分为近地遥感、航空遥感和卫星遥感3类,各具特点并适用于不同场景(Zhou et al., 2025)。不同遥感技术在病虫害监测中的性能对比图(图2)展示了近地遥感、无人机遥感和卫星遥感在空间分辨率、时间分辨率、覆盖范围、成本效益及技术成熟度等多个维度的综合表现。近地遥感具有高空间分辨率,适合早期作物生长状态与局部病虫害的精细监测;航空遥感平衡了分辨率和覆盖范围,适合中尺度区域监测;卫星遥感覆盖范围广,时间分辨率高,适用于病虫害发生趋势监测与农田长期变化分析。其中,无人机遥感作为连接近地遥感

与航空遥感的关键技术平台,因其具有低空飞行能力和高分辨率图像,在作物病虫害识别中扮演着越来越关键的角色(Zhao et al., 2023)。RGB成像、热成像、多光谱成像、高光谱成像和激光雷达等多种遥感系统的组合应用,能够从更多维度获取作物的物理、生理和病理信息。甄磊等(2022)利用无人机可见光图像通过神经网络分类法成功估算了甘肃鼯鼠 *Myospalax smithi* 对马铃薯 *Solanum tuberosum* 的为害量,其方法获得的样地害鼠为害裸地率与马铃薯

实际产量呈显著线性相关,拟合度达 0.558,为害鼠监测提供了新思路。耿芸等(2021)结合遥感与地理信息系统技术,采用多时相遥感卫星影像提取东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 生境空间分布信息,从整体景观尺度、像元尺度以及斑块尺度定量分析了东亚飞蝗生境的时空变异特征,证明基于多时相遥感影像能快速获取害虫生境的时空变异特征,有助于监测预警及科学防控。

表1 农业监测中常用传感器类型及其监测参数

Table 1 Common types of sensors and monitored parameters in agricultural monitoring

传感器类型 Sensor type	传感器名称 Sensor name	监测参数 Monitoring parameter	参考文献 Reference
土壤传感器 Soil sensor	STM32 土壤有机质传感器 STM32 soil organic sensor	土壤水分和土壤有机质 Soil moisture and soil organic matter	刘骏威等, 2025 Liu et al., 2025
	TDR 土壤水分传感器 TDR soil moisture sensor	土壤水分 Soil moisture	陈杏子等, 2024 Chen et al., 2024
	FDR 土壤水分传感器 FDR soil moisture sensor	土壤水分 Soil moisture	Chen et al., 2019
	LoRaWAN 土壤水分传感器 LoRaWAN soil moisture sensor	土壤水分 Soil moisture	Chavanne & Frangi, 2023
温度和湿度 传感器 Temperature and humidity sensor	rGO 湿度传感器 rGO humidity sensor	湿度 Humidity	Huang et al., 2023
	TENG 温湿度传感器 TENG temperature and humidity senso	温度和湿度 Temperature and humidity	Si et al., 2024
	PDMS-PVA 温湿度传感器 PDMS-PVA temperature and humidity senso	温度和湿度 Temperature and humidity	Song et al., 2025
	G-C 湿度传感器 G-C humidity sensor	湿度 Humidity	Beniwal et al., 2023
CO ₂ 传感器 CO ₂ sensor	NDIR CO ₂ 传感器 NDIR CO ₂ sensor	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	Wu et al., 2025
	p(D-co-M) CO ₂ 传感器 p(D-co-M) CO ₂ sensor	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	Shahrbabaki et al., 2023
	MOF/Pebax QCM CO ₂ 传感器 MOF/Pebax QCM CO ₂ sensor	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	Xu et al., 2025
光传感器 Light sensor	LDR 光传感器 LDR light sensor	光照强度 Light intensity	Hoque et al., 2020
	AS7341 光传感器 AS7341 light sensor	光照强度 Light intensity	Pereira & Gomes, 2025
	CdS LDR 传感器 CdS LDR sensor	光照强度 Light intensity	Cappelli et al., 2024
植物传感器 Plant sensor	多模态传感器 Multimodal sensor	挥发性有机化合物、叶片表面温湿度和环境湿度 Volatile organic compounds, leaf surface temperature/humidity, and environmental humidity	Lee et al., 2023
	柔性乙烯传感器 Flexible ethylene sensor	乙烯 Ethylene	Hossain et al., 2023
	EFPCF 柔性传感器 EFPCF flexible sensor	叶片表面温湿度 Leaf surface temperature and humidity	Qu et al., 2024
	土壤传感器 Soil sensor	STM32 土壤有机质传感器 STM32 soil organic sensor	土壤水分和土壤有机质 Soil moisture and soil organic matter

智慧植保信息感知系统的构建应遵循多源互补、多尺度协同的集成原则,依据监测对象的空间分布特征及防控目标需求,实现多技术体系的协同部

署与全要素监测。在实践应用中,大田作物监测宜构建天-空协同监测模式,利用卫星遥感开展区域性普查,同步部署无人机遥感实施重点区域精细观

测;设施农业场景需建立高密度传感网络实现环境参数实时感知,并辅以近地遥感技术捕捉空间异质性信息,形成多维数据融合架构;精准施药决策则需融合环境参数、病虫害动态及作物表型数据,构建多

源信息耦合的决策支持体系。随着新型传感器技术演进与多源数据融合算法突破,智慧植保的信息感知能力将持续迭代,为病虫害防控提供更完备的决策支撑。

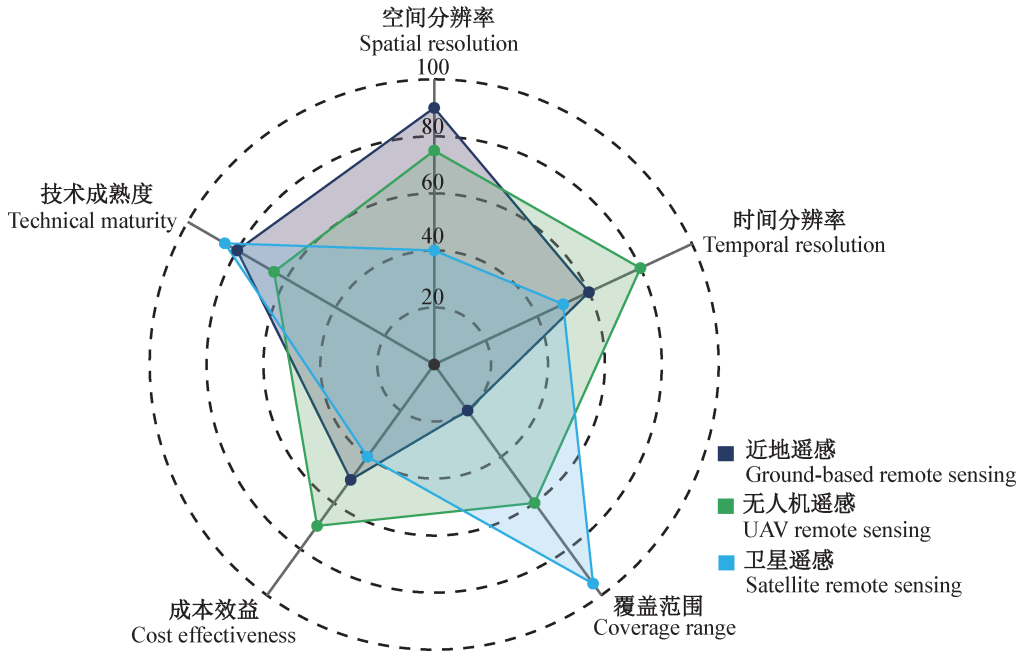


图2 不同遥感平台在病虫害监测中的性能对比

Fig. 2 Performance comparison of different remote sensing platforms for pest and disease monitoring

1.2 数据传输与处理的系统优化

数据传输与处理作为智慧植保体系的核心基础设施,直接决定系统响应时效与决策精度。传统植保信息处理模式高度依赖人工记录与经验判断,存在科学依据缺失与实时性不足的双重局限。智慧植保通过构建高效能数据通信网络与智能化数据处理架构,实现了农业信息的实时采集、高速传输与智能解析,从而释放数据驱动的决策支持能力。针对农田环境复杂性与数据多源异构特征,智慧植保采用分层计算架构:边缘计算层执行数据预处理与特征提取,完成无效数据清洗及关键参数凝练;本地汇聚层开展多源数据融合与轻量化模型推理,生成场景化决策预案;云端智能层实施深度知识挖掘与全局模型优化,持续迭代算法库与知识图谱。该三级架构通过梯度计算资源配置,在实时响应与深度分析之间形成动态平衡,为病虫害防控提供全流程智能化支撑。

在数据传输方面,农业物联网普遍采用无线传感器网络(Boursianis et al., 2022),通过将分布在农田各处的传感器节点以无线方式连接,实现环境、土壤、作物等信息的实时监测和传输。随着低功耗广

域网络技术的发展,远距离无线电(long range radio, LoRa)、窄带物联网(narrowband internet of things, NB-IoT)等新型通信技术凭借其低功耗、远距离传输的特点,在农业物联网领域得到了广泛应用(Blanco-Carmona et al., 2023)。为应对农田数据量的急剧增长,边缘计算与云计算相结合的数据传输架构,通过在数据源附近部署计算节点进行预处理和初步分析,显著减少了需要传输到云端的数据量,提高了系统的实时性和可靠性。

智慧植保采用“端-边-云”协同的三级数据处理架构,系统性解决了农业场景下多源异构数据的治理难题,即边缘计算层通过部署于田间的智能终端执行数据清洗与特征参数提取,构建数据质量的第一道防线;本地汇聚层通过多源数据融合引擎开展时空序列分析,基于轻量化人工智能模型生成场景化决策预案;云端智能层则依托高性能计算集群实施深度学习模型训练,通过联邦学习机制实现全局知识迭代与模型版本管理。该架构通过计算资源梯度配置,在保障实时响应能力的同时,构建了从数据采集到知识反哺的完整闭环,为病虫害防控提供持续优化的智能决策支撑。

人工智能技术,尤其是广泛应用于计算机视觉领域的深度学习技术,已成为智慧植保的技术基石。在植物病害智能诊断领域,深度学习技术体系主要由3种模型架构构成,分别是基于图像分类网络模型的病种识别框架、依托目标检测网络模型的病灶定位系统以及采用语义分割网络的病斑精

细化解析方案(表2)。这些网络通常基于卷积神经网络、生成对抗网络、变分自编码器和Transformer等深度学习架构构建而成,不同算法在特征提取能力、泛化能力与训练需求方面各有优势,在实际应用中应结合病虫害的监测场景灵活选用(Shoib et al., 2025)。

表2 病虫害识别模型和准确率

Table 2 Pest and disease identification models and their accuracy

算法类型 Algorithm type	模型名称 Model name	识别类别 Identify category	准确率 Accuracy/%	参考文献 Reference
分类网络 Classification network	LFMNet	玉米叶面Corn foliar pests and diseases	95.68	Liu et al., 2024
	Dise-Efficient	植物病虫害Plant pests and diseases	64.40	Guan et al., 2023
	CBAM-VGGNet16, NLCBAM-VGGNet16	小麦病虫害Wheat pests and diseases	96.60, 97.57	Yao et al., 2023
	AWdpCNER	小麦病虫害Wheat pests and diseases	94.76	Zhang DM et al., 2023
	SCHNet	柑橘害虫Citrus pests	94.48	Yu et al., 2024
	CA-ResNet-50-WAMSFF	苹果叶片病虫害Apple leaf pests and diseases	98.32	Zhang XH et al., 2023
	RLDMGWO	蝽科害虫和玉米病害虫 Pentatomidae pests and corn disease pests	95.83, 96.51	Lu et al., 2025
	FCOS-FL	荔枝叶片病虫害Lychee leaf pests and diseases	91.30	Xie et al., 2023
	HV-GNN	咖啡害虫Coffee pests	93.66	Maruthai et al., 2025
	EResNet-SVM	7种植物病害Seven plant diseases	99.30	Xiong et al., 2024
目标检测网络 Detection network	IMLL-DETR	荔枝叶片病虫害Lychee leaf pests and diseases	84.40	Li et al., 2025
	优化YOLOv8 Optimized YOLOv8	水稻和棉花病虫害 Rice and cotton pests and diseases	82.91	Wang et al., 2024
	GCCS-YOLOv5s	农业害虫Agricultural pests	90.50	Xiao et al., 2023
	TTPRNet	茶树虫害Tea tree insect infestation	92.80	Li et al., 2024
	SEDCN-YOLOv8	黄瓜病虫害Cucumber pests and diseases	75.10	Xie et al., 2025
Transformer 模型 Transformer model	PepperNet	辣椒病虫害Pepper pests and diseases	91.93	Liu & Wang, 2024
	SpemNet	棉花病虫害Cotton pests and diseases	99.03	Qiu et al., 2024
	RReNet	小麦叶片病虫害Wheat leaf pests and diseases	94.10	Zhang & Liu, 2025
	ResiAdvNet	马铃薯病虫害Potato pests and diseases	92.25	Tang et al., 2024

此外,多模态融合技术正快速发展,通过整合图像、气象、文本等不同感知通道的信息,可显著提升诊断结果的准确性与稳定性。根据李道亮等(2025)研究结果,多模态融合可分为输入级融合、特征级融合、决策级融合和混合级融合4种基本融合类型。在实际应用中,基于超图的双模态特征融合农作物病害识别算法BimodalFINet通过有效整合文本描述信息与图像视觉特征,构建了协同互补的特征表示,从而显著提升了模型的识别准确率(张净等, 2023)。类似地,多模态数据融合框架Rice-Fusion通过融合气象信息和水稻图像的视觉特征进行水稻病害诊断,准确率达95.31%,明显优于单一模态方法(Patil & Kumar, 2022)。

面向智慧植保的数智化转型,通信技术与算法体系的协同演进将驱动三大技术突破,一是在数据传输层面,5G/6G网络与边缘计算架构的深度融合,将构建起“端-边-云”协同的高速信息通道,实现从田间传感器到决策中枢的毫秒级响应,显著提升系统实时性;二是在算法优化层面,深度强化学习与自监督学习技术的突破,将破解复杂农业场景下的模型泛化难题,尤其在少样本病害识别与动态环境适配方面展现出应用潜力;三是在知识工程层面,农业知识图谱通过构建作物-病虫-环境三元关系网络,形成结构化知识表征体系,而基于规则引擎的专家系统则提供因果可溯的防控策略,二者的有机融合将构建起数据驱动+知识引导的双轮决策机制,为

农业生产者提供科学透明的智能决策支持。

1.3 智慧植保执行决策的精准实施

智慧植保执行技术作为智慧农业体系的关键实施环节,承担着将多维监测数据与诊断结论转化为精准防控行动的核心职能。传统植保作业模式高度依赖人工操作,普遍存在高强度人力依赖、响应滞后、药剂利用率低等结构性短板。智慧植保通过构建空-地协同的智能装备体系,以植保机器人集群、多旋翼无人机等新型载体为载体,集成变量施药技术、自主导航系统与数字孪生控制平台,实现了病虫害防控作业的精准化与智能化转型。其中,地面机器人搭载的多模态感知终端可实现厘米级定位施药,无人机平台通过多光谱导航实现复杂地形下的全域覆盖,共同构建起精准施药、动态防控的现代化作业体系。该技术体系不仅突破了传统作业模式的技术瓶颈,更通过人机协同决策机制的形成,构建起从监测预警到执行反馈的完整技术闭环,为现代农业病虫害防控提供了可复制的智能化解决方案。

植保无人机技术是当前发展最迅速的智慧植保执行装备之一。根据 Hafeez et al.(2023) 研究结果,农业无人机通常按结构形式分为固定翼、单旋翼和多旋翼类型,其中多旋翼因其机动性强、操作简便、适合小地块精细作业,成为应用最广泛的植保无人机类型。植保无人机作业效果受多种参数影响,包括飞行高度、速度和施药量等。李鹏飞等(2025)研究表明,通过参数优化,植保无人机在棉花田防治棉蚜 *Aphis gossypii* 时防治效果可达到 88.86%。针对不同地形条件,研究人员开发了多种路径规划算法,如基于改进人工鱼群算法的 T-AFSA(王浩然等,2025)和针对山地果园的三维作业路径规划方法(于少猛等,2025),均显著提高了无人机作业效率并降低了能耗。资乐等(2023)通过正交试验研究了不同类型飞防助剂与杀虫剂配伍方式对防治稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 效果的影响,发现杀虫剂和飞防助剂对防治效果均有极显著影响,而施药液量对防治效果无显著影响,选择适合的杀虫剂与飞防助剂配伍方式可使防治效果达 84.32%,这为植保无人机精准施药提供了重要参考。

植保机器人在设施农业和精细化作业中发挥着重要作用。在温室环境中,基于超宽带(ultra-wideband, UWB)测距值修正的融合定位方法能将机器人定位误差降低至 11.95 cm,为精准施药提供了坚实基础(毕松等,2023)。针对复杂地形,基于改进的蚁群优化-动态窗口算法(ant colony optimization-

dynamic window approach, ACO-DWA)的路径规划方法显著提升了机器人在果园等场景下的通行能力(牛晶等,2024)。专用植保机器人如自适应巡航除草机器人在水稻田的除草率达到 82.4% 的同时,仅造成 2.8% 的幼苗损伤,实现了从依赖化学农药的除草方式向基于自主导航与精密控制的机械除草的转变,降低了药物残留风险(Ju et al., 2024)。

精准施药技术是提高农药利用率、减少环境污染的关键。变量喷雾技术通过采集病虫害严重程度、作物冠层形貌等数据,实现按需喷雾,大幅提高了农药利用率(王果等,2023)。肖珂等(2022)基于冠层体积估算的果园自动变距精准施药系统能节省 30.25% 的药液,使农药附着率提高 18.66%。Han et al.(2024)研究发现脉宽调制驱动技术可通过调节电磁阀的通断频率控制喷嘴流量,实现了高精度变量施药,并能降低 92% 的能耗。在高效植保机械与精准施药技术进展方面,何雄奎(2022)综述了植保机械发展历程,总结了人背机器、机器背人、人机分离、喷雾机器人 4 个典型时代的特点,并提出新型植保装备与高效施药技术的研发应用推广功不可没。

智慧植保实施系统的技术架构应遵循精准-高效-安全三位一体的核心准则,其技术特性体现在 3 个方面:一是精准性维度,通过靶向施药技术实现病虫害的精准防控,最大限度地降低化学投入品使用量;二是高效性维度,依托智能装备实现大面积作业的快速响应,有效遏制病虫害的时空扩散;三是安全性维度,采用选择性施药策略减少对非靶标生物及生态环境的负面影响。在典型应用场景中,大田作物管理采用搭载变量喷雾系统的多旋翼无人机,构建区域化差异施药体系;设施农业领域已部署基于 UWB 定位或视觉导航的植保机器人集群,包括轨道式喷药机器人与履带式除草机器人等专业化装备;针对丘陵果园等复杂地形,初步形成空-地协同作业模式,实现病虫害信息采集与精准干预的闭环控制。

智能实施技术的演进将呈现自主化、精细化、绿色化的发展趋势。人工智能算法的突破将推动植保装备向完全自主决策模式的跃迁,实现从人工遥控到智能体自主作业的范式转变;微纳制造技术与精密驱动技术的融合,将使施药精度突破至亚厘米级尺度,支撑单株级乃至单叶级的超精细作业;现阶段,智能诱虫装置、自动化天敌释放系统及基于计算机视觉的虫害捕获设备已进入实地验证阶段,标志着生物防治与物理防治手段的智能化转型。随着监测网络与执行终端的深度耦合,上述绿色防控技术

将逐步实现动态调控与无人化作业的有机统一。

2 智慧植保的系统化应用实践

智慧植保技术体系已实现从科研创新到生产实践的转化应用,构建起覆盖病虫害全周期管理的技术解决方案。该体系在监测预警、智能决策与田间执行等关键环节形成价值闭环,突破了传统植保技术的单点式应用局限。其技术革新体现在2个维度:一是建立天-空-地一体化的多源数据感知网络,实现作物健康状态的实时监测与异常预警;二是构建基于大数据与人工智能模型的决策支持系统,形成监测-预警-防控-评估的动态优化闭环。

2.1 病虫害监测预警网络系统构建

病虫害监测预警是智慧植保体系中的关键组成部分,通过构建多元化的监测网络和智能化的预警

模型,为农业生产提供及时、准确的病虫害信息。传统监测方法主要依靠人工巡检和经验判断,难以覆盖大面积农田且预警滞后。智慧植保则通过物联网监测、遥感监测和综合管理系统的协同应用,建立全方位的病虫害监测预警网络。

多层次病虫害监测预警网络的构建应包含3个层次(图3):第1个层次是区域层面的宏观监测,通过卫星遥感和气象站网络掌握区域病虫害总体态势;第2个层次是乡镇层面的中观监测,通过无人机遥感和固定监测点网络掌握局部发生情况;第3个层次是田块层面的微观监测,通过传感器网络和智能诱捕器掌握具体发生动态。这种多层次监测体系通过宏观遥感与地面监测的协同互补,初步构建了由区域到田块的联动机制,显著提升了预警时效性与空间分辨率。

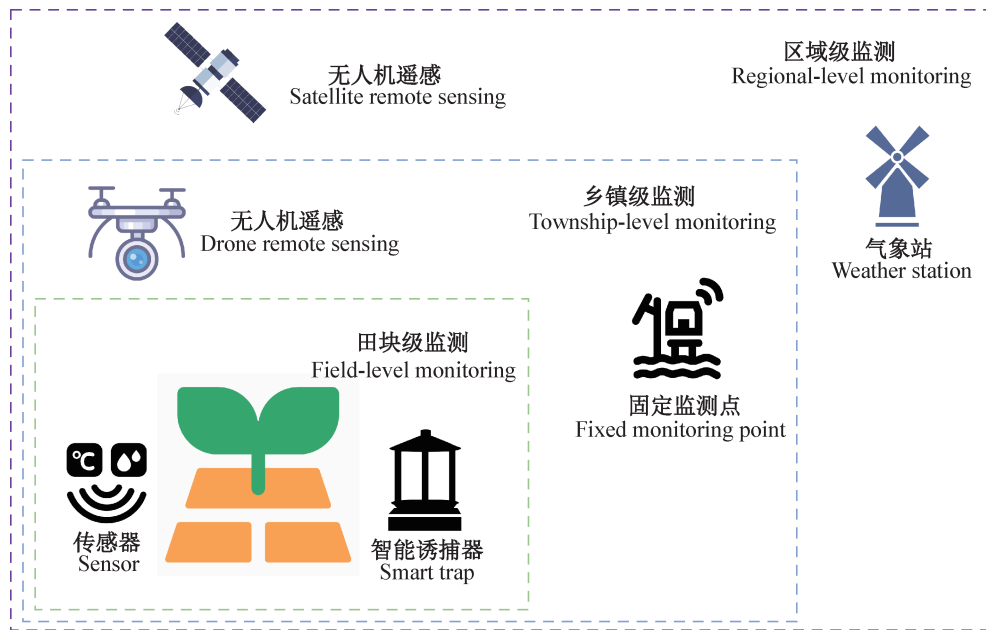


图3 智慧植保多层次监测预警网络架构

Fig. 3 Multi-level monitoring and early warning network architecture for smart plant protection

物联网监测技术通过在田间部署各类传感器和自动化设备,实时采集农田环境参数和病虫害信息。以江苏省为例,已建成以42个国家级区域测报站和220个省级植物疫情监测点为基础的监测网络,部署智能化监测设备491台(王莘等,2024)。这些设备与网络化数据报送系统结合,通过省级系统实现数据的实时上传,大幅提高了数据处理和可视化程度。研究人员还开发了集成光学电子传感器的智能三角型诱捕器,能够自动记录蛾类的低频翅膀拍动并通过无线通信实时发送数字检测信号,实现了自动化早期害虫监测(Welsh et al., 2022)。

遥感监测技术凭借其非接触、大范围、快速获取数据的优势,成为大面积农田和林地病虫害监测的重要手段。在森林病虫害监测领域,基于植被胁迫光谱弱信号增强的监测方法,通过选取敏感光谱指数并应用多种信号处理技术,构建了高精度的森林病虫害胁迫监测模型(李美琪等,2024)。在农作物病虫害监测方面,研究人员利用高光谱成像和机器学习方法,建立了黄瓜霜霉病和斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis* 虫害的高效识别模型,测试集总体分类精度达到96.23%(李杨等,2024)。无人机获取的多光谱遥感影像结合土壤调节植被指数和归一化植被

指数,成功实现了对棉田中多种害虫的高效识别(地力夏提·依马木等,2022)。

综合管理系统是将多种监测技术、预测模型和决策支持工具集成的信息化平台。综合管理系统集成了多源监测数据、预测模型和决策支持工具,构建了从宏观到微观、从预警到处置的全覆盖智能平台。该系统生成的监测预警信息,可通过专业网站、移动终端、微信公众号等多渠道发布,提升服务的可达性与实用性(王莘等,2024)。这些系统通过整合多源数据,构建了从宏观到微观、从早期预警到精准诊断的全方位监测体系,为农业生产提供了科学的决策支持。

未来,病虫害监测预警网络将朝着智能化、精准化和协同化方向发展。人工智能与大数据技术将增强对监测数据的理解能力,从简单现象识别逐步过渡到机制推断。多源数据融合将推动预警精度从区域级向田块级迈进。在技术成熟与服务体系建设的支持下,进一步探索农户参与的数据采集与反馈机制,有望补充专业监测体系,拓展监测网络的覆盖广度与灵活性。

2.2 病虫害精准防控决策的田间实施

精准防控作为智慧植保的重要目标,强调科学决策与高效执行,在提升防控效果的同时减少农药使用和环境污染。与以预防为主、综合防治的传统策略相比,智慧植保更注重防控策略的针对性和精准性,强调基于数据支持的按需防治。智慧植保强调按需施药、精准防控,通过植保无人机、精准施药系统等智能装备提高施药效率,同时结合植保机器人和环境调控设施等,实现全过程的病虫害科学管理。

精准防控决策支持系统应基于以下4个方面的要素:一是病虫害发生情况,包括种类、密度、分布和发展趋势;二是环境因素,包括温度、湿度、光照、风速和降雨等;三是作物状况,包括品种、生长阶段和抗性水平;四是防控资源,包括药剂储备、防控装备等物资资源,以及具备专业知识的技术人员和操作人员。系统通过综合分析这些要素,生成最优防控方案,包括防控时机、防控方法、药剂选择和施用参数等,指导农业生产者实施科学防控。

植保机器人在设施农业和精细化作业中表现出色。四轮独立驱动转向的设施植保机器人通过UWB和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)的组合导航控制系统,实现了高精度的自主导航,最大横向偏差平均值仅为0.094 m(冯昊栋等,

2025)。基于语义分割网络的作物行特征检测方法,通过像素级带状区域检测和作物行线特征拟合,使植保机器人能够稳定地沿作物行进行作业,横向偏差仅为0.092 m(李秀智等,2024)。在水稻田除草作业中,自适应巡航除草机器人通过改进YOLOv5模型实现高精度稻苗识别,除草率达到82.4%的同时仅造成2.8%的水稻幼苗损伤(Ju et al., 2024),有效减少了除草剂的使用。

精准施药技术显著提高了农药利用效率。基于冠层体积估算的果园自动变距精准施药系统通过红外测距传感器和喷施臂自适应调整,使农药附着率提高18.66%,节省30.25%的药液(肖珂等,2022)。基于物联网技术的变量速率树木喷洒系统能够根据摄像头检测到的树冠进行精准农药喷洒,显著提高了农药利用率(Koc et al., 2023)。基于可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)的电控精准喷洒系统通过闭环控制实现对流量和压力的精确调控,施药偏差量小于3%(陈恒峰等,2024),为大田作物的精准施药提供了可靠的技术装备。

植保无人机在大面积作物的快速施药方面优势明显。李鹏飞等(2025)通过优化多旋翼植保无人机作业参数,在棉花田对棉蚜的防效最高,达88.86%。于少猛等(2025)针对山地果园等复杂地形,优化了植保无人机三维作业路径规划中的航向角,降低了20.88%的能耗和16.31%的作业时间,同时实现了更均匀的冠层雾滴沉积。Biglia et al.(2022)比较了带状和广播喷洒模式,发现带状喷洒模式能显著提高药剂在作物冠层的沉积率(增加309%),并减少其地面损失率(减少54%),为果树作物的精准施药提供了优化方案。

未来,精准防控体系将呈现双轨协同的技术特征,实现宏观统筹与微观个性的有机统一。在区域性重大病虫害治理场景中,仍需强化统防统治的集约化防控模式,构建跨区域的协同防控网络;针对田块级差异化需求,则推动基于时空异质性的精准施策,通过变量控制技术实现防控资源的精准配置。这一转型过程将伴随两大技术突破,一是人工智能算法的持续迭代将推动决策模式从人机协同向自主智能的数智化跃迁,形成自适应防控策略生成能力;二是以生物防治、物理防治为核心的绿色防控技术体系,将通过多技术融合实现功能倍增,在智慧植保框架下构建起环境友好的技术矩阵。

2.3 智慧植保的多维效益评估

智慧植保技术的应用创造了显著的经济、生态

和社会价值。在继承传统植保综合防治理念的基础上,智慧植保借助智能监测、精准施药与信息化管理技术,实现了病虫害防控效率的提升,并进一步促进了经济、生态和社会效益的协同发展。通过系统化的价值评估,可以全面把握智慧植保在现代农业中的重要作用。

智慧植保效益的综合评估应从投入产出比、环境影响和社会贡献3个维度开展。在投入产出比方面,应考虑设备投资、运行成本和维护费用与增产增收、成本降低的比值;在环境影响方面,应评估农药使用量减少、环境污染降低和生物多样性保护的程度;在社会贡献方面,应量化劳动强度降低、健康风险减少和农业现代化推进的效果。通过这一框架,可以科学评估智慧植保技术在监测预警、精准施药和作业装备等不同环节的综合效益,为技术的选择、优化和推广提供决策依据。

在经济效益方面,智慧植保通过精准监测和防控,显著提高了防控效果和资源利用效率。Blanco-Carmona et al.(2023)研究表明,基于人工智能物联网的作物病虫害预警系统在杏园的应用中,大幅减少了农药使用量,提高了病虫害防控的精准性。李鹏飞等(2025)通过植保无人机施药来防控棉蚜,防效最高,达88.86%,显著降低了病虫害造成的产量损失。肖珂等(2022)研究表明精准施药技术的应用节省了30.25%的药液,直接降低了农药投入成本。

在生态效益方面,智慧植保通过减少农药用量、提高利用率和降低漂移损失,显著减轻了对环境的负面影响。带状喷洒模式相比广播喷洒模式能减少农药54%的地面损失,显著降低了农药对土壤的污染(Biglia et al., 2022)。自适应巡航除草机器人的应用,实现了从化学除草到机械除草的转变,大幅减少了除草剂的使用(Ju et al., 2024)。通过分析环境风况进而优化施药时机,能有效降低农药的漂移风险,减少对非靶标生物的影响(李仁凤和韩顺凯, 2025)。

在社会效益方面,智慧植保通过提高劳动生产率、改善作业环境和提升农产品品质,促进了农业生产的现代化转型。植保无人机已在大田作物植保中广泛应用,有效降低了劳动强度并提高了作业效率;植保机器人则在设施农业和精细作业场景中展现出良好的应用潜力,正逐步走向产业化。精准施药技术降低了农业生产者对农药的接触频率和暴露风险,保障了农业生产者的健康安全。农药的残留的减少提高了农产品品质,增强了消费者信心,促进了

农产品价值提升。

综合各方面效益评估结果,智慧植保技术不仅在经济层面提高了农业生产效率,降低了生产成本,而且在生态层面减少了环境污染,保护了生物多样性,在社会层面提升了农业生产者健康水平和农产品质量安全。这种多维效益的协同提升体现了智慧植保技术对农业可持续发展的重要贡献,也为其推广应用提供了强有力的支持。未来应建立更加系统、科学的效益评估体系,从整体上评估智慧植保各类关键技术经济性和适应性,为其系统集成、路径优化和分场景推广提供决策依据。

3 智慧植保的挑战与未来发展方向

智慧植保作为农业信息技术与生物防治工程交叉形成的新兴学科领域,其技术迭代与产业应用虽已呈现加速发展态势,但在核心技术突破与规模化推广层面仍面临多维挑战。系统解析制约智慧植保发展的技术瓶颈、应用堵点与机制障碍,并据此构建基础研究-技术攻关-场景验证-模式推广的协同创新路径,对形成具有自主知识产权的智慧植保技术体系、保障农业绿色发展具有战略价值。

3.1 当前面临的主要挑战

智慧植保技术在实际应用中面临技术、经济和社会多方面的挑战,需要系统性解决方案。

智慧植保技术标准化与数据互通是当前最突出的瓶颈之一。智慧植保涉及多类传感器、通信设备和执行装置,不同厂商设备间兼容性差,数据格式不统一,导致系统集成和数据共享困难。缺乏统一的技术标准和规范,使得技术应用碎片化,难以形成完整的智慧植保解决方案。特别是在多源异构数据融合方面,虽有多种融合方法,但缺乏适用于农业场景的标准化处理流程(李道亮等, 2025)。

系统稳定性和适应性不足是制约智慧植保技术推广应用的重要因素。农业生产环境复杂多变,温度、湿度、光照等条件变化剧烈,对设备的稳定性和环境适应性提出了更高要求。现有智慧植保设备在恶劣天气、复杂地形等条件下的适应性不足,影响监测数据的连续性和可靠性。特别是在山地丘陵地区,植保无人机和机器人的作业能力受到显著限制,尽管有针对性的路径规划算法,但适应性仍有待提高(牛晶等, 2024; 于少猛等, 2025)。

技术成本与效益平衡是智慧植保技术推广应用面临的现实挑战。高精度传感器、专业无人机和智能机器人等设备价格较高,初始投资大,运维成本

高,中小农户难以承担。据估算,一套完整的智慧植保解决方案投资可达数十万元,对于平均规模不足0.667 hm²的中小农户而言,单位面积投入过高,难以在短期内获得经济回报。虽然植保无人机作业效率高,精准施药装置能节省农药,但对于低值作物或小面积种植作物,投入产出比仍不理想。

专业人才缺乏制约了智慧植保技术的深入应用。智慧植保是一个多学科交叉的领域,需要同时具备农学知识和信息技术能力的复合型人才。目前,植保专业人员对信息技术了解不足,信息技术人员对农业生产规律认识有限,专业人才匮乏导致智慧植保技术难以发挥其最大效能。尤其在农村地区,专业人才更为稀缺,无法为智慧植保设备提供必要的技术支持和维护服务。

应用区域不平衡使智慧植保发展呈现两极化趋势。先进技术主要集中在经济发达地区和大型农业企业,小农户和边远地区应用水平较低。这种不平衡不仅体现在技术获取能力上,也体现在基础设施、技术服务和政策支持等方面。例如,虽然江苏省已建成完善的病虫害监测网络,但西部和边远地区的监测站点稀少,信息服务滞后(王莘等,2024)。

数据安全与隐私保护问题不容忽视。随着大量农业数据的采集和应用,数据所有权、使用权和价值分配问题日益凸显。农业生产者担心个人农田数据被商业机构获取并用于营销或其他目的,而缺乏有效的数据安全保障和隐私保护机制,影响了农业生产者对智慧植保技术的接受度和信任度。

3.2 未来发展的关键方向

面对上述挑战,智慧植保未来发展应重点关注以下5个方向:

一是技术创新与系统整合是智慧植保持续发展的核心驱动力。未来应加强智能传感器、通信技术、人工智能算法和执行装置的创新研发,提高技术成熟度和可靠性;同时注重技术间的系统整合,构建更加完善的智慧植保技术体系。具体而言,应重点开发低成本、高精度的病虫害传感器;优化边缘计算与云计算结合的数据处理架构,实现实时分析与深度挖掘并重;发展模块化、可扩展的智能植保装备,提高系统适应性和灵活性。

二是标准规范与平台建设是促进技术协同和数据共享的重要基础。应加快制定智慧植保技术标准体系,包括数据格式、通信协议、接口规范和评价指标等;建设统一的智慧植保数据平台,实现多源数据的集成管理和价值挖掘;推动设备间的互联互通,形

成开放兼容的技术生态。建立国家层面的智慧植保标准委员会,协调各方力量制定统一标准;开发开源的数据处理工具和算法库,降低技术应用门槛;探索区块链技术在农业数据安全与共享中的应用,保障数据所有者权益。

三是服务模式与商业创新是推动智慧植保从“能用”走向“好用”“常用”的关键途径,有助于打通技术推广的“最后一公里”。应发展多元化的智慧植保服务模式,满足不同规模和不同类型农户的需求;创新商业模式,降低技术应用成本,提高投入产出比。可探索智慧植保+托管服务模式,由专业服务组织提供标准化或定制化的病虫害管理服务,小农户可按服务频次、面积或作物类型灵活付费,同时可结合政府补贴机制,降低使用门槛;推广设备共享平台,通过集中采购和共享使用降低单户投入;发展区域协同管理模式,实现区域内病虫害的联防联控,提高防控效率;探索数据增值服务,通过农业数据分析提供决策支持,创造新的价值增长点。

四是人才培养与技术服务是保障智慧植保可持续发展的重要支撑。应加强复合型人才培养,提高基层技术人员和农业生产者的应用能力;健全技术服务体系,为智慧植保设备提供全生命周期支持。高校应开设智慧农业相关专业,培养既懂农业又懂信息技术的复合型人才;建立多层次的培训体系,针对不同对象开展有针对性的技术培训;发展农业社会化服务组织,为农业生产者提供专业的技术指导和设备维护;建立远程诊断与支持平台,利用网络技术解决基层技术问题。

五是政策支持与环境优化是智慧植保发展的重要保障。应完善支持政策,加大财政投入,优化发展环境,促进智慧植保健康发展。具体措施包括制订支持智慧植保研发和应用的专项政策,通过补贴、税收优惠等方式降低应用成本;加大公共服务平台建设投入,为中小农户提供基础技术支持;完善知识产权保护和数据安全法规,保障技术创新和数据应用的法律环境;推动产学研用协同创新,促进技术研发与实际需求的有效对接。

4 展望

展望未来,智慧植保将实现从技术应用到系统解决方案的转变,从分散的技术点到集成的解决方案,为农业生产提供全方位支持;从辅助决策到自主决策的跨越,人工智能算法将具备更强的推理能力和决策能力,实现真正意义上的智能防控;从单一防

控到综合管理的升级,整合病虫害防控、肥水管理、品质提升等关键环节,形成覆盖农业生产全过程的系统解决方案。随着技术的不断进步和应用深入,智慧植保将呈现以下发展趋势:

一是技术智能化水平全面提升。人工智能技术将在智慧植保的各个环节发挥着关键作用,深度学习、强化学习等先进算法将提高病虫害识别的准确性和速度;数字孪生技术将实现农田病虫害发生发展过程的虚拟模拟与预测;自主决策系统将赋予植保机器人和无人机更高的智能水平。

二是多源异构数据深度融合。卫星遥感、无人机遥感、地面传感器网络和人工调查数据将通过先进的数据融合算法实现无缝集成,构建全景式病虫害监测体系;多模态融合技术将充分利用图像、光谱、温度、湿度等多种数据信息,提高监测的全面性和准确性;区块链技术的应用将保障数据的安全性和可追溯性。

三是植保装备小型化与智能化。智能植保装备将向轻量化、小型化方向发展,提高在复杂田间环境中的机动性和作业精度;新一代便携式多参数传感器将支持小农户对田间病虫害、温湿度等关键指标进行快速精准监测,提高其病虫害管理能力;模块化设计的植保装备将提高系统的灵活性和适应性,降低维护和更新成本。

四是绿色植保技术广泛应用。生物防治、物理防治等环境友好型植保方法将与智能监测技术相结合,减少化学农药使用;精准变量施药技术将实现按需用药,降低农药使用量;农药漂移控制技术将减少非靶标污染;智能除草机器人等物理防除手段将与精准识别技术协同应用,逐步减少除草剂的使用,推动绿色防控方式的发展。

本文系统梳理了智慧植保技术体系与应用现状,以感知-通信-决策-执行的闭环技术框架,分析了信息感知技术的多维整合、数据传输与处理的系统优化以及智能实施技术的精准执行等关键环节,探讨了智慧植保在病虫害系统监测与预警、精准化防控措施实施等方面的应用实践和价值创造,并对智慧植保面临的挑战和未来发展方向进行了深入探讨。智慧植保作为现代农业的重要组成部分,通过整合多种先进技术,构建系统化的病虫害防控解决方案,将为粮食安全保障、生态环境保护和农业可持续发展做出重要贡献。未来的智慧植保将实现从传统保护到智能防控的转变,从单一手段到综合方案的升级,从经验决策到数据驱动的进阶,成为支撑农

业现代化建设的重要力量,为国家粮食安全和农业可持续发展保驾护航。

参 考 文 献 (References)

- Beniwal A, Ganguly P, Aliyana AK, Khandelwal G, Dahiya R. 2023. Screen-printed graphene-carbon ink based disposable humidity sensor with wireless communication. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 374: 132731
- Bi S, Zhang GX, Li ZJ, Hu FW. 2023. Positioning method of greenhouse plant protection robot based on distance measurement value correction. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 54(8): 347-358 (in Chinese) [毕松, 张国轩, 李志军, 胡福文. 2023. 基于测距值修正的温室植保机器人定位方法. *农业机械学报*, 54(8): 347-358]
- Biglia A, Grella M, Bloise N, Comba L, Mozzanini E, Sopegno A, Pittarello M, Dicembrini E, Alcatrão LE, Guglieri G, et al. 2022. UAV-spray application in vineyards: flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 845: 157292
- Blanco-Carmona P, Baeza-Moreno L, Hidalgo-Fort E, Martín-Clemente R, González-Carvajal R, Muñoz-Chavero F. 2023. AIoT in agriculture: safeguarding crops from pest and disease threats. *Sensors*, 23(24): 9733
- Boursianis AD, Papadopoulou MS, Diamantoulakis P, Liopa-Tsakalidi A, Barouchas P, Salahas G, Karagiannidis G, Wan SH, Goudos SK. 2022. Internet of Things (IoT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review. *Internet of Things*, 18: 100187
- Cappelli I, Parri L, Tani M, Vignoli V, Fort A. 2024. Pervasive monitoring in the context of precision agriculture: using low-cost LDR sensors for solar intensity measurement//2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Glasgow, United Kingdom: IEEE, pp. 1-6
- Chavanne X, Frangi JP. 2023. Smart networks of autonomous *in situ* soil sensors. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(11): 3343-3362
- Chen HF, Xu XB, Guo H, Gao GM. 2024. Design and test of precision spraying system of tractive drug dispenser. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 46(8): 201-205 (in Chinese) [陈恒峰, 许晓波, 郭辉, 高国民. 2024. 牵引式打药机精准喷洒系统的设计与试验. *农机化研究*, 46(8): 201-205]
- Chen LP, Zhangzhong LL, Zheng WG, Yu JX, Wang ZH, Wang L, Huang C. 2019. Data-driven calibration of soil moisture sensor considering impacts of temperature: a case study on FDR sensors. *Sensors*, 19(20): 4381
- Chen XZ, Hong M, Gao R, Jing YQ, Xiao J, Li H. 2024. Effect of fertilization on measurement accuracy of TDR soil moisture sensor. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 35(3): 217-224 (in Chinese) [陈杏子, 洪明, 高瑞, 景彦强, 肖键, 李杭. 2024. 施肥对 TDR 土壤水分传感器测量精度的影响研究. *水资源与水工程学报*, 35(3): 217-224]

- Chu LY. 2023. Discussion on plant quarantine in international trade. Chinese Bulletin of Botany, 58(2): 351 (in Chinese) [褚丽彦. 2023. 浅谈国际贸易中的植物检疫. 植物学报, 58(2): 351]
- Dilixiati Y, Zhou JP, Xu Y, Fan XP, Yalikun S. 2022. Cotton pest monitoring based on logistic algorithm and remote sensing image. Journal of South China Agricultural University, 43(2): 87–95 (in Chinese) [地力夏提·依马木, 周建平, 许燕, 樊湘鹏, 亚里坤·沙吾提. 2022. 基于 Logistic 算法与遥感影像的棉花虫害监测研究. 华南农业大学学报, 43(2): 87–95]
- Feng HD, Zheng H, Zhang Y, Xue XL, Tong JH, Yu GH. 2025. Design and navigation system experimentation of plant protection robots in ridge planting conditions. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 46(3): 71–78 (in Chinese) [冯昊栋, 郑航, 张毅, 薛向磊, 童俊华, 俞国红. 2025. 垄作模式设施植保机器人设计与导航系统试验. 中国农机化学报, 46(3): 71–78]
- Geng Y, Dong YY, Huang WJ, Zhao LL, Tu XB, Li HM. 2021. Dynamic remote sensing monitoring of oriental migratory locust habitats in Dagang Reservoir, Tianjin. Journal of Plant Protection, 48(1): 122–128 (in Chinese) [耿芸, 董莹莹, 黄文江, 赵龙龙, 涂雄兵, 李红梅. 2021. 天津市大港水库东亚飞蝗生境遥感动态监测. 植物保护学报, 48(1): 122–128]
- Guan HL, Fu C, Zhang GY, Li KF, Wang P, Zhu ZF. 2023. A lightweight model for efficient identification of plant diseases and pests based on deep learning. Frontiers in Plant Science, 14: 1227011
- Hafeez A, Husain MA, Singh SP, Chauhan A, Khan MT, Kumar N, Chauhan A, Soni SK. 2023. Implementation of drone technology for farm monitoring & pesticide spraying: a review. Information Processing in Agriculture, 10(2): 192–203
- Han L, Wang ZC, He XK. 2024. Development of an energy-saving PWM driving method for precision pesticide application using adjustable frequency and characterization of spray. Computers and Electronics in Agriculture, 217: 108634
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. Journal of Plant Protection, 49(1): 389–397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. 植物保护学报, 49(1): 389–397]
- Hoque MJ, Ahmed MR, Hannan S. 2020. Automated greenhouse monitoring and controlling system using sensors and solar power. European Journal of Engineering and Technology Research, 5(4): 510–515
- Hossain NI, Noushin T, Tabassum S. 2023. Tattoo-like flexible ethylene sensor for plant stress monitoring in real-time. IEEE Sensors Journal, 25(15): 27777–27790
- Huang YH, Zeng ZL, Liang T, Li J, Liao ZQ, Li JJ, Yang TT. 2023. An encapsulation strategy of graphene humidity sensor for enhanced anti-interference ability. Sensors and Actuators B: Chemical, 396: 134517
- Jiang SK, He XK, Liu YJ, Wang CL, Song JL, Zeng AJ. 2023. Development status and prospect of intelligent plant protection equipment and technology. Plant Health and Medicine, 2(4): 1–11 (in Chinese) [姜赛珂, 何雄奎, 刘亚佳, 王昌陵, 宋坚利, 曾爱军. 2023. 智慧植保装备与技术发展现状及展望. 植物医学, 2(4): 1–11]
- Ju JY, Chen GQ, Lv ZY, Zhao MY, Sun L, Wang ZT, Wang JF. 2024. Design and experiment of an adaptive cruise weeding robot for paddy fields based on improved YOLOv5. Computers and Electronics in Agriculture, 219: 108824
- Koc C, Duran H, Gerdan Koc D. 2023. Orchard sprayer design for precision pesticide application. Erwerbs-Obstbau, 65(5): 1819–1828
- Lee G, Hossain O, Jamalzadegan S, Liu YX, Wang HY, Saville AC, Shymanovich T, Paul R, Rotenberg D, Whitfield AE, et al. 2023. Abaxial leaf surface-mounted multimodal wearable sensor for continuous plant physiology monitoring. Science Advances, 9(15): eade2232
- Li AQ. 2020. Influence of plant protection on food security and countermeasures. Journal of Agricultural Catastrophology, 10(4): 153–154 (in Chinese) [李安琦. 2020. 论植物保护对粮食安全影响及对策建议. 农业灾害研究, 10(4): 153–154]
- Li DL, Zhao Y, Du ZZ. 2025. Advances in multi-modal fusion techniques and applications in agricultural field. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 56(1): 1–15 (in Chinese) [李道亮, 赵晔, 杜壮壮. 2025. 农业领域多模态融合技术方法与应用研究进展. 农业机械学报, 56(1): 1–15]
- Li MQ, Liu ML, Wang X, Liu XN, Wu L, Li JJ. 2024. Remote sensing recognition model of *Illicium verum* forest pests and diseases. Scientia Silvae Sinicae, 60(11): 128–138 (in Chinese) [李美琪, 刘美玲, 王璇, 刘湘南, 吴伶, 李军集. 2024. 八角林病虫害遥感识别模型. 林业科学, 60(11): 128–138]
- Li PF, Xue QY, Chen L, Feng HZ, Zheng YX, Wu G, Yu L. 2025. Effect of spray parameters on droplet deposition of UAV and *Aphis gossypii* Glover control efficiency. Journal of Agricultural Mechanization Research, 47(11): 199–205 (in Chinese) [李鹏飞, 薛钦元, 陈龙, 冯宏祖, 郑艺翔, 武刚, 王兰. 2025. 喷雾参数对无人机雾滴沉积及棉蚜防效的影响. 农机化研究, 47(11): 199–205]
- Li RF, Han SK. 2025. Spray droplet distribution of hexacopter agricultural UAV for plant protection under external wind conditions. Journal of Shenyang Agricultural University, 56(1): 108–116 (in Chinese) [李仁凤, 韩顺凯. 2025. 外界风速作用下六旋翼植保无人机施药雾滴分布研究. 沈阳农业大学学报, 56(1): 108–116]
- Li XZ, Fang HM, Zhu YL, Du BW, Dong HY. 2024. Visual servo control of plant protection robot based on semantic segmentation. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 55(5): 21–27, 39 (in Chinese) [李秀智, 方会敏, 朱玉奎, 杜博文, 董泓佑. 2024. 基于语义分割网络的植保机器人视觉伺服控制方法. 农业机械学报, 55(5): 21–27, 39]
- Li Y, Li CL, Wang X, Fan PF, Li YK, Zhai CY. 2024. Identification of cucumber disease and insect pest based on hyperspectral imaging. Spectroscopy and Spectral Analysis, 44(2): 301–309 (in Chinese) [李杨, 李翠玲, 王秀, 范鹏飞, 李余康, 翟长远. 2024. 高光谱成像的黄瓜病虫害识别和特征波长提取方法. 光谱学与光谱分析, 44(2): 301–309]

- Li YN, Chen T, Xia F, Feng HL, Ruan YP, Weng X, Weng XX. 2024. TTPRNet: a real-time and precise tea tree pest recognition model in complex tea garden environments. *Agriculture*, 14(10): 1710
- Li ZS, Shen Y, Tang JS, Zhao JQ, Chen QY, Zou HJ, Kuang YC. 2025. IMLL-DETR: an intelligent model for detecting multi-scale litchi leaf diseases and pests in complex agricultural environments. *Expert Systems with Applications*, 273: 126816
- Liu J, Bian Y, Zhang YY, Meng ZH, Huang C, Zeng J. 2025. Analysis of occurrence trends and causes of major crop diseases and pests in China in 2025. *China Plant Protection*, 45(2): 26–29, 44 (in Chinese) [刘杰, 卞悦, 张熠琦, 孟泽华, 黄冲, 曾娟. 2025. 2025年全国主要农作物重大病虫害发生趋势及其原因分析. *中国植保导刊*, 45(2): 26–29, 44]
- Liu J, Wang XW. 2024. A multimodal framework for pepper diseases and pests detection. *Scientific Reports*, 14(1): 28973
- Liu JT, He CY, Jiang YC, Wang MF, Ye ZQ, He MF. 2024. A high-precision identification method for maize leaf diseases and pests based on LFMNet under complex backgrounds. *Plants*, 13(13): 1827
- Liu JW, Ma ZH, Huang SG, Huang JS, Liu MH, Zhao JH. 2025. Study on the monitoring sensor for paddy soil organic matter based on STM32. *Journal of Jiangxi Agricultural University*, 47(3): 778–790 (in Chinese) [刘骏威, 马梓涵, 黄双根, 黄俊仕, 刘木华, 赵进辉. 2025. 基于STM32的稻田土壤有机质在线监测传感器的设计. *江西农业大学学报*, 47(3): 778–790]
- Liu YF, He Y, Liu F, Xu LJ, Feng XP, Tang Y, Wang ZX. 2023. Application and market of agricultural sensor technology in China: current status and future perspectives. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 49(3): 293–304 (in Chinese) [刘羽飞, 何勇, 刘飞, 许丽佳, 冯旭萍, 唐宇, 王正肖. 2023. 农业传感器技术在我国的应用和市场: 现状与未来展望. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 49(3): 293–304]
- Lu YC, Yu XB, Hu ZP, Wang XM. 2025. Convolutional neural network combined with reinforcement learning-based dual-mode grey wolf optimizer to identify crop diseases and pests. *Swarm and Evolutionary Computation*, 94: 101874
- Maruthai S, Selvanarayanan R, Thanarajan T, Rajendran S. 2025. Hybrid vision GNNs based early detection and protection against pest diseases in coffee plants. *Scientific Reports*, 15(1): 11778
- Muhammed D, Ahvar E, Ahvar S, Trocan M, Montpetit MJ, Ehsani R. 2024. Artificial intelligence of things (AIoT) for smart agriculture: a review of architectures, technologies and solutions. *Journal of Network and Computer Applications*, 228: 103905
- Niu J, Shen CY, Zhang LP, Li QJ, Liu SF. 2024. Research on obstacle avoidance path of wheeled plant protection robot based on improved ACO-DWA algorithm. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 38(5): 188–200 (in Chinese) [牛晶, 申传艳, 张利鹏, 李奇军, 刘世锋. 2024. 基于改进ACO-DWA算法的轮式植保机器人避障路径研究. *电子测量与仪器学报*, 38(5): 188–200]
- Patil RR, Kumar S. 2022. Rice-fusion: a multimodality data fusion framework for rice disease diagnosis. *IEEE Access*, 10: 5207–5222
- Pereira J, Gomes MG. 2025. Lighting strategies in vertical urban farming for enhancement of plant productivity and energy consumption. *Applied Energy*, 377: 124669
- Qiu KY, Zhang YJ, Ren ZK, Li M, Wang Q, Feng YQ, Chen F. 2024. SpemNet: a cotton disease and pest identification method based on efficient multi-scale attention and stacking patch embedding. *Insects*, 15(9): 667
- Qu CC, Sun WX, Hu DW, Yang C, Zhao TK, Wang XQ, He ZZ. 2024. Semi-embedded flexible multifunctional sensor for on-site continuous monitoring of plant microclimate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216: 108521
- Shahrbabaki Z, Farajikhah S, Ghasemian MB, Oveissi F, Rath RJ, Yun J, Dehghani F, Naficy S. 2023. A flexible and polymer-based chemiresistive CO₂ gas sensor at room temperature. *Advanced Materials Technologies*, 8(10): 2201510
- Shoab M, Sadeghi-Niaraki A, Ali F, Hussain I, Khalid S. 2025. Leveraging deep learning for plant disease and pest detection: a comprehensive review and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 16: 1538163
- Si JW, Yang J, Chen YQ, Hu NX, Yang YR, Wu YX, Huang QA, Han L. 2024. An integrated temperature and humidity dual-parameter triboelectric sensor. *Journal of Materials Chemistry C*, 12(30): 11640–11647
- Song MS, Jing XL, Yin ZY, Zhang H, Li JX, Huo TL. 2025. Dual-core photonic crystal fiber temperature and humidity sensor based on PDMS and PVA. *Plasmonics*, 20(5): 2391–2398
- Soussi A, Zero E, Sacile R, Trincherro D, Fossa M. 2024. Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*, 24(8): 2647
- Tang WT, Wen XH, Li M, Chen YQ, Hu ZL. 2024. ResiAdvNet: a named entity recognition model for potato diseases and pests based on progressive residual structures and adversarial training. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227: 109543
- Wang CZ, Wang XH, Jin ZN, Müller C, Pugh TAM, Chen AP, Wang T, Huang L, Zhang Y, Li LXZ, et al. 2022. Occurrence of crop pests and diseases has largely increased in China since 1970. *Nature Food*, 3(1): 57–65
- Wang G, Zhang X, Chen X, Liu DJ, Gong Y. 2023. Current research status and prospects of precision pesticide application technology and device. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(6): 68–73 (in Chinese) [王果, 张晓, 陈晓, 刘德江, 龚艳. 2023. 农药精准施用技术与装备研究现状及展望. *中国农机化学报*, 44(6): 68–73]
- Wang HR, Shi YK, Zhao YH, Zou N, Wu H, Yan YH. 2025. Path planning of plant protection UAV based on improved artificial fish swarm algorithm. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 47(8): 40–45 (in Chinese) [王浩然, 石永康, 赵玉花, 邹楠, 吴浩, 闫育华. 2025. 基于改进人工鱼群算法的植保无人机路径规划. *农机化研究*, 47(8): 40–45]
- Wang P, Zhang HB, Zhou C, Zhu XM, Tian ZH, Yang RM, Zhu F. 2024. Present situation and countermeasures of digital monitoring

- and early warning system for major crop diseases and insect pests in Jiangsu Province. *Modernizing Agriculture*, (3): 27–29 (in Chinese) [王莘, 张海波, 周晨, 朱先敏, 田子华, 杨荣明, 朱凤. 2024. 江苏省农作物重大病虫数字化监测预警系统建设现状及对策. *现代化农业*, (3): 27–29]
- Wang YC, Yi CC, Huang T, Liu J. 2024. Research on intelligent recognition for plant pests and diseases based on improved YOLOv8 model. *Applied Sciences*, 14(12): 5353
- Welsh TJ, Bental D, Kwon C, Mas F. 2022. Automated surveillance of lepidopteran pests with smart optoelectronic sensor traps. *Sustainability*, 14(15): 9577
- Wu JT, Shi M, Zhou N, Shi L, Shi YZ, Lei C, Mao HY. 2025. A non-dispersive infrared CO₂ sensor with a paraboloid chamber and a nanoforest-enhanced thermopile detector. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 14(4): 047005
- Xiao K, Hao Y, Gao GD. 2022. Design and experiment of automatic variable-distance precision spraying system in orchard. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 53(10): 137–145 (in Chinese) [肖珂, 郝毅, 高冠东. 2022. 果园自动变距精准施药系统设计与试验. *农业机械学报*, 53(10): 137–145]
- Xiao QX, Zheng WY, He YF, Chen ZJ, Meng FX, Wu LY. 2023. Research on the agricultural pest identification mechanism based on an intelligent algorithm. *Agriculture*, 13(10): 1878
- Xie JC, Xie XL, Xie W, Xie QX. 2025. An improved YOLOv8-based method for detecting pests and diseases on cucumber leaves in natural backgrounds. *Sensors*, 25(5): 1551
- Xie JX, Zhang XW, Liu ZQ, Liao F, Wang WX, Li J. 2023. Detection of litchi leaf diseases and insect pests based on improved FCOS. *Agronomy*, 13(5): 1314
- Xiong HT, Li J, Wang TW, Zhang F, Wang ZY. 2024. EResNet-SVM: an overfitting-relieved deep learning model for recognition of plant diseases and pests. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(10): 6018–6034
- Xiong XF, Wu WQ, Huo HY, Zhang X, Yu Y, An D, Zhang T, Wu JW. 2024. Research on sensor-based agricultural greenhouse data direct reporting system and intelligent control. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 26(7): 93–102 (in Chinese) [熊晓菲, 吴文茜, 霍洪彦, 张馨, 于艳, 安冬, 张同, 吴建伟. 2024. 基于传感器的农业温室数据直报系统与智能调控研究. *中国农业科技导报*, 26(7): 93–102]
- Xu XY, Zhou TT, Yang A, Jiang HT, Song Z, Wang XK, Bing Y, Zhao LQ, Zhang T. 2025. Mixed-matrix membrane-based piezoelectric CO₂ sensor with self-humidity compensation. *ACS Sensors*, 10(2): 1483–1492
- Yao JB, Liu JH, Zhang YN, Wang HS. 2023. Identification of winter wheat pests and diseases based on improved convolutional neural network. *Open Life Sciences*, 18(1): 20220632
- Yu SM, Yan M, Wang PF, Zhu JX, Yang X. 2025. 3D path planning of plant protection UAVs in hilly mountainous orchards. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 59(3): 635–642 (in Chinese) [于少猛, 闫铭, 王鹏飞, 朱建锡, 杨欣. 2025. 丘陵山地果园植保无人机三维路径规划. *浙江大学学报(工学版)*, 59(3): 635–642]
- Yu YN, Xiong CL, Yan JC, Mo YB, Dou SQ, Wu ZH, Yang RF. 2024. citrus pest identification model based on improved ShuffleNet. *Applied Sciences*, 14(11): 4437
- Zhang DM, Zheng G, Liu HB, Ma XM, Xi L. 2023. AWdpCNER: automated wdp Chinese named entity recognition from wheat diseases and pests text. *Agriculture*, 13(6): 1220
- Zhang J, Shao WW, Liu XM, Li HL, Gao Y, Zhang XC. 2023. Crop disease identification based on bimodal feature fusion and HGNN. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 51(15): 164–173 (in Chinese) [张净, 邵文文, 刘晓梅, 李贺亮, 高跃, 张轩诚. 2023. 基于超图的双模态特征融合的作物病害识别算法. *江苏农业科学*, 51(15): 164–173]
- Zhang XH, Li HL, Sun SH, Zhang WF, Shi FX, Zhang RH, Liu Q. 2023. Classification and identification of apple leaf diseases and insect pests based on improved ResNet-50 model. *Horticulturae*, 9(9): 1046
- Zhang YH, Liu DS. 2025. Rethinking feature representation and attention mechanisms in intelligent recognition of leaf pests and diseases in wheat. *Scientific Reports*, 15(1): 15624
- Zhao GY, Zhang YL, Lan YB, Deng JZ, Zhang QZ, Zhang ZC, Li ZY, Liu LH, Huang X, Ma JJ. 2023. Application progress of UAV-LARS in identification of crop diseases and pests. *Agronomy*, 13(9): 2232
- Zhen L, Guo YW, Qin M, Wang WH, Wang D. 2022. Assessment of potato damages caused by Gansu zokor *Eospalax cansus* using RGB images from unmanned aerial vehicle. *Journal of Plant Protection*, 49(6): 1697–1704 (in Chinese) [甄磊, 郭永旺, 秦萌, 王文慧, 王登. 2022. 基于无人机可见光图像估算甘肃鼯鼠对马铃薯的为害量. *植物保护学报*, 49(6): 1697–1704]
- Zhou YY, Ma YT, Ata-Ul-Karim ST, Wang S, Ciampitti I, Antoniuk V, Wu CC, Andersen MN, Cammarano D. 2025. Integrating multi-angle and multi-scale remote sensing for precision nitrogen management in agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 230: 109829
- Zhu B, Liang P. 2024. Occurrence and management of insecticides resistance. *Modern Agrochemicals*, 23(4): 1–6, 37 (in Chinese) [朱斌, 梁沛. 2024. 害虫对杀虫剂抗性的发生与治疗. *现代农药*, 23(4): 1–6, 37]
- Zi L, Zang Y, Huang JH, Bao RF, Zhou ZY. 2023. Influence of adjuvants and pesticides on the control efficacy against rice caseworm *Cnaphalocrocis medinalis* using crop protection unmanned aircraft system. *Journal of Plant Protection*, 50(2): 538–544 (in Chinese) [资乐, 臧禹, 黄俊浩, 包瑞峰, 周志艳. 2023. 植保无人机飞防助剂与杀虫剂配伍方式对其防治稻纵卷叶螟效果的影响. *植物保护学报*, 50(2): 538–544]

(责任编辑:李美娟)