doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.011

面向农户需求的作物病害智能管控技术研究现状与推广策略

张　标[1]　张一丁[2]　张领先[3]

(1.阜阳师范大学经济学院,阜阳 236041;2.中国农业大学工学院,北京 100083;
3.中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要:作物病害智能管控技术为破解传统病害诊断与防治效率低的困境提供了新路径,但推广面临农户需求多样、技术体系复杂、应用场景分散等现实挑战。以病三角原理为理论基础,阐明作物病害智能管控工作原理,构建了涵盖感知层、认知层、预测层、决策层和执行层的作物病害智能管控技术体系。在此基础上,系统分析了多模态数据采集与融合技术、作物病害表征机理解析技术、作物病害关联挖掘与预测技术、多目标决策与处方推荐技术、作物病害智能管控终端装备的研究现状。基于创新扩散理论和技术接受模型,深入分析农户对作物病害智能管控技术的需求特征以及典型应用场景。最后,设计了面向农户需求的 4 阶段作物病害智能管控模式,构建了以农户需求为核心的多主体协同推广策略方案,提出跨区协同、技术优化、示范推广、能力提升、终端适配、制度保障等推广措施。研究结果可为作物病害智能管控技术从研发到推广应用提供科学依据与实践指导。

关键词:作物病害;智能管控;推广策略;农户需求

中图分类号:F323;TP391　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)18-0117-16　　**OSID**:

Research Status and Promotion Strategies of Crop Disease Intelligent Control Technology Targeting Farmers' Needs

Zhang Biao[1]　Zhang Yiding[2]　Zhang Lingxian[3]

(1. *School of Economics*, *Fuyang Normal University*, *Fuyang* 236041, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Crop disease intelligent control technology offers an approach to overcome the inefficiencies of traditional disease diagnosis and management. However, its promotion still faces practical challenges, including diverse farmer need, complex technological systems, and fragmented application scenarios. Grounded in the disease triangle principle, the working mechanism of crop disease intelligent control was elucidated and a five-layer technological framework encompassing perception, cognition, prediction, decision-making, and execution was constructed. Based on this framework, the research status of core technologies was systematically analyzed, including multi-modal data acquisition and fusion, disease characterization mechanism analysis, association mining and prediction, multi-objective decision-making and prescription recommendation, and intelligent control terminal equipment. Drawing on innovation diffusion theory and the technology acceptance model, farmers' demand characteristics for intelligent control technology and their typical application scenarios were further explored. Subsequently, a four-stage intelligent control model oriented to farmer needs was designed, a multi-stakeholder collaborative promotion strategy system centered on farmer demands was constructed, and specific promotion measures were proposed, including cross-regional collaboration, technology optimization, demonstration and extension, capacity building, terminal adaptation, and institutional support. This research can provide

收稿日期:2026-05-22　修回日期:2026-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(62376272)、安徽省自然科学基金项目(2208085QD101)和安徽省优秀青年教师培育重点项目(YQZD2024025)

作者简介:张标(1988—),男,副教授,博士,主要从事农业经济与信息化研究,E-mail:zb@fynu.edu.cn

通信作者:张领先(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事农业信息化研究,E-mail:zhanglx@cau.edu.cn

scientific basis and practical guidance for the transition of crop disease intelligent control technology from research to application.

Key words: crop diseases; intelligent management; promotion strategies; farmers' needs

0 引言

作物病害对粮食安全构成重大威胁[1-2]。据统计,我国常见农作物病害 775 种,呈分布范围广、成灾频率高、突发性强的显著规律[3]。依赖于植保专家或农技人员经验的传统病害诊断及防治策略存在耗时费力、效率低等问题[4-5]。随着智慧农业的快速发展,通过作物病害智能管控,实现作物病害高效精准诊断、预警与防控,成为减少病害损失、保障粮食安全的现实需求与研究热点[6-8]。

当前,随着机器学习(ML)、深度学习(DL)、可解释人工智能(XAI)和联邦学习(FL)等模型的发展与应用[9],显著提升了农作物病害图像识别准确率[10],且在作物病害智能诊断和预测方面取得了丰硕成果[11-14]。针对植物电子病历资料中结构化和非结构化等多类型数据混合特征,丁俊琦等[15]研发了一种基于数据融合与注意力机制优化的作物病害诊断模型,能够实现作物病害的有效诊断。针对大田水稻病害图像背景复杂、干扰信息多、推理速度慢等问题,刘晓君等[16]通过优化卷积层、重构 Transformer、集成高效通道注意力模块,提出一种基于改进 MobileViT 模型的水稻病害识别方法。针对复杂环境适应问题,苏涵等[17]提出了一种基于多域特征金字塔增量反馈宽度学习网络的作物病害识别方法,实现作物叶片病害的高效识别。随着大型自走式植保机械、航空植保机械等植保装备的广泛应用,我国植保防治的病害预测预报、应急防治保障、防控标准化等能力显著提高[18]。然而,在"大国小农"国情背景下,农户农业生产具有地理分散、规模较小、知识有限等特征,导致实际生产中面临病害防治技术缺失、实际效果差、粮食风险高等现实挑战[19]。农户作为我国农业技术最终采纳和应用的主力军,因此根据广大农户对作物病害防治技术的需求特征,实现供需适配平衡,是充分发挥作物病害智能管控技术的创新成果与功能的前提条件[20]。为此,有必要探讨面向农户需求的作物病害智能管控技术研究现状及推广策略,以期为推动作物病害精准防控和高效防治提供科学依据与路径。

1 作物病害智能管控技术研究现状

1.1 技术体系

作物病害智能管控是以病三角原理为理论基础[21],以人工智能、大数据、物联网、云计算等新一代信息技术为支撑,通过数据驱动和知识增强,从"点-面-时空"多尺度角度,重构病原物、寄主作物及环境三者的数字化交互关系,实现作物病害智能管控的高效、精准、主动。图 1 为作物病害智能管控工作原理。

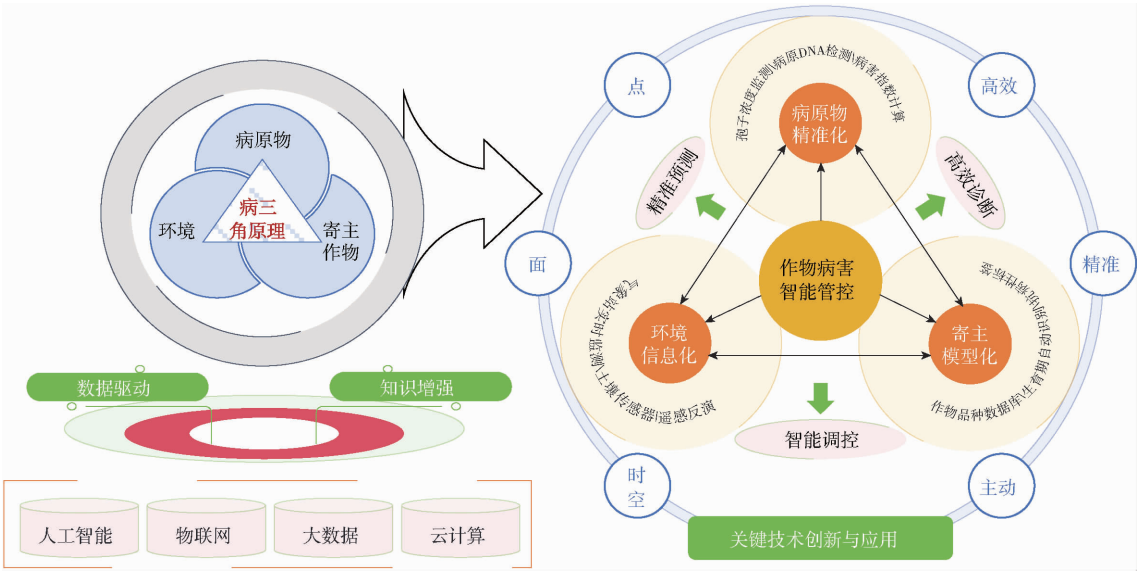


图 1 作物病害智能管控工作原理

Fig. 1 Principles of intelligent control technology for crop diseases

病三角原理阐明病原物、寄主作物和环境三者的共同作用导致病害发生和扩散机理[22-23]。将植物病理学理论与人工智能技术深度融合,通过病原物精准化、环境信息化和病害寄主模型

化，实现作物病害高效诊断、精准预测和智能调控，解决作物病害致病机理不清、侵染过程复杂、特征相似识别难、防控措施滞后等问题。作物病害智能管控不仅仅是技术创新应用，更是重塑未来农业模式，实现从经验判断到科学决策、从被动防治到主动预防、从个体实施到区域协同的智能模式转变。

按照作物病害防治流程与技术功能层级，可将作物病害智能管控技术体系划分为感知层、认知层、预测层、决策层和执行层 5 大核心技术类型，体系的技术类型、关键技术、关键算法、核心特征及应用场景如图 2 所示。

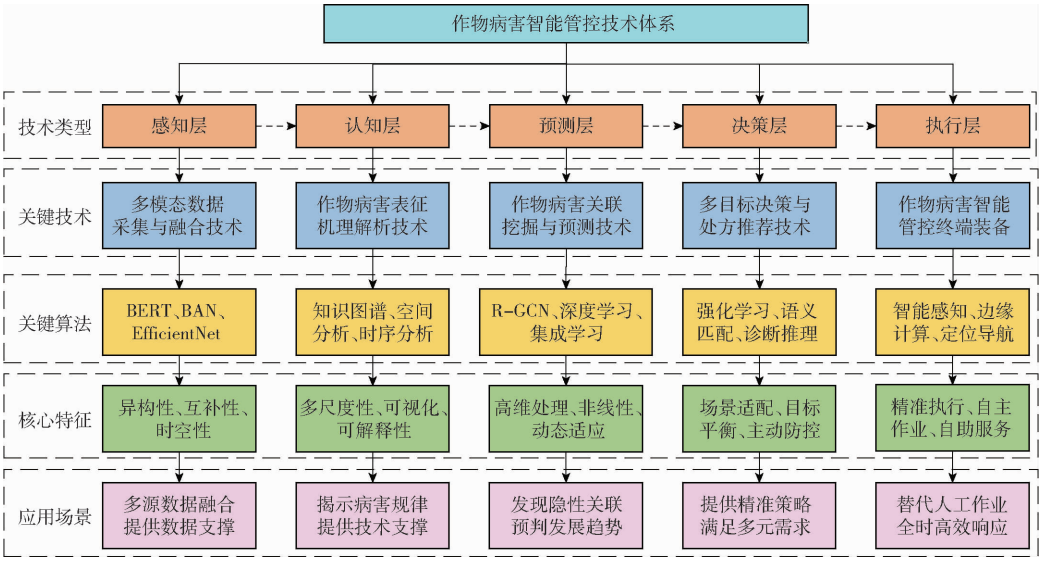


图 2　作物病害智能管控技术体系

Fig. 2　System of crop disease intelligent control technology

1.2　多模态数据采集与融合技术

根据病三角原理，作物病害发生与寄主病原物、作物特征以及周围环境等密切相关，不仅需要采集多种数据信息，而且这些信息还以结构化数据、文本数据、图像数据和时空数据等多模态类型同时呈现[24]。由于作物病害信息来源多样且零散，形成具有结构化、半结构化和非结构化等多个模态的数据资源[25]，呈明显的异构性、互补性和时空关联性等特征。

针对多模态数据采集，胡婷等[26]利用智能手机、专业相机和无人机等设备对不同地区、作物种类及生长阶段采集图像，提出一种基于层次标注和自适应预处理的多源农业病害图像数据集构建方法。高荣华等[27]通过借助少量图像数据，同时结合环境与专家知识资源，融合结构化作物生长环境数据与非结构化图像等多模态数据，采用多结构数据集成学习方法进行病害识别，解决作物病害数据多结构、多形态、多参数等难题。视频图像被广泛应用于作物生长监测，但复杂场景下作物病害图像分割与病害特征提取至关重要[28-29]。针对自然环境存在光照、作物间生长遮挡等问题，双目立体视觉技术通过采集不同视角的图像重建作物病害区域[30]。Sun 等[31]提出一种基于双目相机和深度学习技术的自然环境植物病害检测方法，解决了在宽视场下检测叶片病害时背景干扰问题。

针对多模态数据融合问题，文献[32-34]提出了基于 BERT、卷积神经网络等深度神经网络模型的多模态融合方法。Li 等[35]提出了一种整合图像和文本的多模态对比学习方法解决小样本识别问题。张善文等[36]提出一种基于多尺度融合卷积神经网络的病害叶片分割方法，解决病害叶片图像分割精度低和泛化能力弱等问题。向玉云等[37]提出基于自适应 BayesShrink 和频-空特征融合的作物病害识别方法，解决真实环境下采集病害图像中存在的大量噪声和复杂背景干扰问题。Zhou 等[38]利用图像和文本 2 种模态数据之间的相关性和互补性特征，构建了基于“图像-文本”多模态协同表示和知识辅助(ITK-Net)的病害识别模型。吴华瑞等[39]提出了一种基于文本、音频和图像等多模态数据融合的大模型架构 Agri-QA Net，采用基于 Transformer 的融合层整合文本、音频和图像等特征。综上所述，作物病害多模态数据采集与融合技术已为整合作物病害电子病历数据、问诊文本数据、图像数据、环境气象数据、作物生长数据等提供支撑。

总体来看，多模态数据采集与融合技术已取得显著进展，为作物病害智能诊断提供了可靠的数据。但是，在现实田间场景下，作物病害智能管控需要融合更多类型的高光谱图像、卫星遥感、动态视频、专

业知识等多源异构数据,依然面临时间序列对齐难、差异化特征易忽略、语义转换鸿沟大等关键技术问题,尤其是多源异构数据的标准化与跨场景泛化能力有待提升。

1.3 作物病害表征机理解析技术

由于作物病害防治场景多样化,导致作物病害侵染过程和识别技术存在巨大差异。机器视觉和深度学习技术已应用于病害识别[40],能准确判断病害的种类和严重程度[41]。以大田大面积区域为对象,遥感监测技术,尤其基于低空无人机搭载高光谱、多光谱与可见光(RGB)传感器的协同技术,为作物病害机理表征提供了先进技术手段[42-44]。以设施环境或小范围作物为对象,利用物联网监测、大数据分析和图像处理等技术,可探究环境信息对作物病害的影响机理及其表征变化[45]。王东方等[46]提出了一种农作物病害分类模型 TL-SE-ResNeXt-101,为复杂农业生产环境下对不同作物种类不同病害的识别分类提供方法支撑。朱文静等[47]利用大疆 M600 Pro 型无人机搭载 RedEdge-MX 型多光谱相机获取小麦冠层多光谱影像,采用大津法、阈值分割法和支持向量机等方法,对小麦赤霉病遥感图像进行精细化语义分割,降低了田块边缘阴影背景和染病麦穗之间的误判率。Kumar 等[48]利用离散小波变换对叶片颜色、形状和纹理等病变属性进行重要特征提取。

面对田间作物病害高质量标注数据稀缺、相似症状区分困难等问题,小样本学习(FSL)提供了技术解决方法。杨森等[49]在小样本学习图像分支中引入视觉 Transformer 替代传统卷积神经网络编码器,并引入模型无关的元学习(MAML)优化算法,提出了一种新型多模态小样本学习模型(MMFSL),实现数据量少场景下病害精准识别。针对图像训练样本不足问题,王春山等[4]构建了一种基于图像与文本双模态联合表征学习的作物病害识别模型,融合不同模态之间的共性和特性,更好地解决开放环境病害识别问题。数据增强技术和数据合成技术可有效扩充样本规模、提升模型泛化能力[50]。Chen 等[51]利用基于生成对抗网络(GAN)的数据合成技术,生成逼真的病害样本,缓解了深度学习在葡萄叶病害识别中罕见病害与新发病害样本不足问题。

在开放复杂环境下精准识别作物病害特征是作物病害机理精准表征的关键[52-53]。李淑菲等[54]提出一种基于可见光谱和改进 YOLO v5 目标检测网络的黄瓜病害识别模型,解决自然环境中黄瓜病害准确实时检测问题。韩宗桓等[55]基于黄瓜霜霉病菌原位染色显微图像,构建 DS-YOLO v8s 实例分割网络,实现病菌各类侵染结构高精度分割,并对病菌各类侵染结构的形态特征进行定量表征。罗洋等[56]提出主干信息共享与多感受野特征自适应融合的作物叶片等级和病害识别算法,解决了作物叶片等级和病害识别准确率低、成本高等问题。针对目前基于深度学习的识别方法严重依赖于大规模的标注数据和不同作物场景局限,Shuai 等[57]提出了一种基于多模态自动提示优化的作物病害分类方法(AgriMAPO),通过自动提示工程增强(LLMs)的判别能力,从而实现高精度、小样本病害识别。Giridharan 等[58]开发了一种基于图像的鲁棒方法,可在不同环境和成像条件下自动对玉米、水稻和小麦叶片病害进行分类。

总体来看,利用小样本学习、多模态联合表征、生成式数据增强等方法,作物病害表征机理解析技术已从单一模态和场景转向多模态融合和跨场景泛化发展。但是,面对更加复杂的田间环境,提高作物病害表征的精度与鲁棒性,仍是未来研究的重点。

1.4 作物病害关联挖掘与预测技术

作物病害发生呈现点、面、时空多尺度并存的特征,且病害发病原因复杂多变,各种因子之间相互关联影响[59],因此作物病害关联挖掘和智能识别技术要具备高维处理能力、非线性建模和动态适应等性能。当前,利用深度学习方法挖掘病害与关键影响因素间的复杂关联关系,预测病害的区域演变与时空演化趋势是研究热点和实际需求[60-61]。基于深度学习的识别方法通过向网络中嵌入多尺度特征提取或注意力模块以挖掘丰富的病害特征或定位病斑,进而提升复杂背景下作物病害识别精度[37,62]。Gao 等[63]通过改进注意力机制和残差神经网络(ResNet),提出一种基于双分支、高效通道注意力(DECA)的作物病害识别模型。Xu 等[64]将数据挖掘技术应用于遥感数据的动态空间面板,研发了一种基于集成学习技术和时空循环神经网络(STRNN)的作物病害时空演化预测模型,为作物病害提前预测提供技术支撑。黄林生等[65]以陕西省宁强县小麦条锈病为研究对象,提出了 Sentinel-2 影像和 BP 神经网络结合的小麦条锈病监测方法,为区域尺度上开展作物病害监测提供方法。Selvaraj 等[66]通过航空图像和机器学习方法检测香蕉植物及其主要病害。Mishra 等[67]提出一种使用极限学习机(ELM)对作物叶片图像病害检测的可解释叶片病害检测器(I-LDD)框架。

病害早期检测对作物保护至关重要[68-69]。吕高强等[70]利用傅里叶变换红外光声光谱技术(Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy,

FTIR－PAS)逐层扫描获得各位点原始光谱,解决水稻在稻瘟病潜育期的表观正常性导致早期诊断难的问题。高荣华等[71]提出了一种基于多维光谱序列(MDSS)和加权随机森林(WRF)的番茄灰霉病早期诊断与鉴别方法,在肉眼明显可见叶面病斑前对作物病害实现诊断。路阳等[72]提出一种基于高光谱图像结合一维卷积神经网络的玉米大斑病早期识别方法,实现了玉米大斑病的早期识别。沈梦姣等[73]提出了一种基于光谱-纹理特征的辣椒早疫病潜育期高光谱图像检测识别方法,利用光谱特征或纹理特征实现作物病害潜育期病状的检测识别。此外,庞浩等[74]通过提取作物病斑区域颜色特征的一阶矩到三阶矩,构建作物潜育期病状可见光图像三通道识别模型,为作物病害早期监测和科学防控提供了技术路径。Kaur 等[75]基于随机森林、逻辑回归、KNN、决策树和 XGBoost 等机器学习模型,创建了 1 个原型系统进行作物病害早期预警。

当前,作物病害关联挖掘与预测技术正从单一数据源、浅层模型向多源融合、深度时空建模方向演进,早期诊断能力显著增强。然而,多个作物病害协同预测、跨区域可迁移性以及模型可解释性仍有待深入探索。

1.5　多目标决策与处方推荐技术

多目标决策与处方推荐技术通过智能决策为农户提供精准的病害管控策略,实现从单点、静态决策到支持向多目标、多尺度及主动防控智能化决策[76]。在区域性目标决策与处方推荐方面,通过融合无人机高光谱、卫星遥感以及微观调查等多源数据,利用机器学习和深度学习模型开展作物病害区域性监测与评估,实现多尺度的时空预测[77-79]。

针对人工开具处方效率低问题,基于诊断推理推荐、语义检索推荐、多模态融合推荐、强化学习决策等推荐方法[80],为作物病害处方推荐提供技术支撑。针对苹果叶部病害程度识别准确率低问题,刘斌等[81]构建了一种基于快照集成方法的苹果叶部病害程度识别模型。张家瑜等[82]提出了一种基于选择性注意力机制的木薯叶病害神经网络检测改进算法 MAISNet,显著提升了神经网络模型在复杂非结构环境下木薯叶病害检测准确率。此外,吴桓宇等[83]将知识图谱应用于作物病害处方推荐。李悦等[84]将农作物病虫害领域本体与通用的科技文献本体以及传统的知识组织体系进行深度融合,构建面向多源数据深度融合的农作物病虫害本体。利用检索增强生成(RAG)将病虫害知识、防治经验和研究文献整合到智能诊断中,实现外部知识库检索与大语言模型生成能力相结合,提供最新、最准确的专业推理和诊断[85]。

大语言模型快速发展为病害智能诊断与处方推荐提供了新思路,尤其是基于智能体的病害诊断具有多步推理、动态规划和自我反思能力,具有更强的适应性和准确性[86-87]。Yang 等[88]提出一种集成 CNN、VLM 和 LLM 的生成式人工智能驱动框架,核心模块包括基于 CycleGAN 的数据增强和风格转换模块、基于 CNN 的疾病检测模块、基于 VLM 的视觉语义描述模块和基于 LLM 控制策略生成模块,为作物病害诊断和控制策略的生成提供智能解决方案。

面向作物病害防治的多样化、可拓展、多模态复杂应用场景,需综合考虑防治效果、经济成本、环境影响等多重目标,而多目标决策与处方推荐技术研究已取得显著成效。但是,利用大语言模型在真实复杂场景中平衡多目标冲突、提升模型泛化能力及降低计算成本,是未来研究重点。

1.6　作物病害智能管控终端

作物病害智能管控终端集成智能感知、边缘计算、精准执行功能的硬件设备,是实现作物病害智能管控技术最终落地应用“最后一公里”硬件支撑与物理载体。按照功能可将作物病害智能管控终端分为数据采集、智能决策和智能执行 3 大类装置,分别实现病害信息获取、智能分析决策和精准防控作业。

数据采集装置用于多源病害信息采集,主要有环境信息传感器、孢子捕捉仪、监控视频、多光谱/高光谱成像仪、热红外成像仪、便携式病害诊断仪等。王奥霖等[89]根据截获病菌孢子的空气动力学原理将采样装置划分为重力沉降式、主动吸气式、撞击式和其他类型,主要差异表现在捕捉效率、捕捉周期、样品处理难易、适用的靶标病菌孢子尺寸和监测频率等方面。杨宁等[90]提出一种基于气载微流控芯片的作物病害孢子流式动态检测方法,解决了微流控芯片孢子检测复用率低问题。

智能决策装置主要是利用边缘计算节点执行计算,但大型深度神经网络模型对高计算要求不适合资源受限的农业应用,迫切需要用于作物病害检测的轻量级模型设计[91]。张净等[92]提出一种基于改进 YOLO v8n 的轻量化番茄叶片病害检测方法,为番茄叶片病害检测模型在嵌入式设备端上部署和应用提供参考。蔡鑫等[93]提出一种病灶感知的渐进式压缩框架(L－EAFP),解决高性能苹果叶部病害诊断模型难以在边缘设备高效部署的问题,为高性能农业 AI 模型在边缘端的部署提供了有效方案。

智能执行装置根据决策结果执行精准防控作业,实现从处方推荐到实际作业。典型的作物病害

智能管控执行装置包括精准施药机、植保无人机[94-95]、智能虚拟诊疗亭、智能虚拟诊疗机器人等。精准施药机利用变量喷施技术、处方图解析、GPS 定位导航等，根据病害严重度及分布图，实现不同区域按需变量精准施药[96-98]。植保无人机利用自主飞行、RTK 高精度定位、变量喷施、作业监管等技术，实现高效作业、适应复杂地形、可接入处方推荐系统等目标[99]，成为目前大田作物常用的智能精准施药设备[100]。翟长远等[101]设计了基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统，实现农药精准变量喷施，作业地块、作业时间、作业面积、农药种类与配比、喷施药量、喷雾压力、实时流量和作业速度等信息的在线监测、实时显示和溯源管理。温室智能施药机器人具有施药精准、风雾变量、自主行走、作业高效等优势，关键技术主要有自走式底盘设计、精准施药技术、智能导航技术和作物病虫害精准识别与决策技术等[41]。此外，智能虚拟诊疗亭和机器人凭借语音交互、触摸屏、知识图谱问答、热敏打印等优势，提供 24 h 自助问诊服务，解决偏远地区农技人员不足问题。

当前作物病害智能防治终端研究已实现从传统人工操作向自动化作业转变，边缘计算效率显著提升，精准执行装置不断成熟。然而，目前病害智能防控装备价格较高，通用装备和个性化装备适配性不足，尤其是复杂农田环境中智能装备稳定性有待提升。随着人工智能技术快速发展，人工智能大模型将整合文本、图像与传感等多源数据，通过多智能体协同无人机集群、植保精准施药机器人等作业，实现精准施药智能决策与植保全流程自主化[102]。

2 作物病害智能管控技术特征及应用场景

2.1 需求特征

农户对作物病害智能管控技术的需求动机是采纳应用的前提条件[103]。提高综合效益是农户采纳作物病害智能管控技术的经济需求，也是农户需求的核心驱动力。当作物病害发生时，准确诊断和及时防控成为农户的核心需求。当然，基于知识能力、资源禀赋考虑，农户也会有技术产生操作简便性和成本低的实际需求，成为技术推广扩散的关键因素。Zhang 等[104]通过对 351 个农户追踪调查研究发现，利用植保无人机服务为农户提供了有效的作物病虫害管理，但需要解决持续存在的制度和技术障碍。可见，农户采纳作物病害智能管控的需求具有清晰目标、核心动机、完善条件、期望效益和障碍因素等多样化的复合特征。农户对作物病害智能管控的需求与采纳机制如图 3 所示。

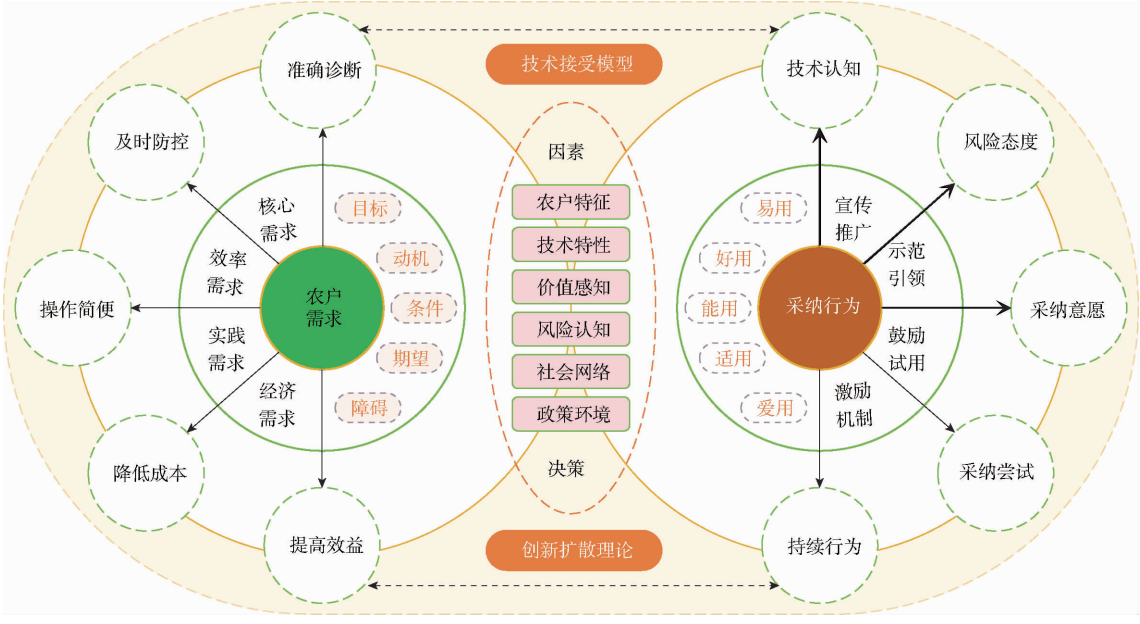


图 3 农户对作物病害智能管控的需求与采纳机制

Fig. 3 Demand and adoption mechanism of crop disease intelligent control among farmers

基于农户需求特征，作物智能管控技术要具备易用、好用、能用、适用等复合属性，推动实现农户爱用，解决农户所关心的“能不能用、好不好用、有没有用、适不适合、能不能长久用”等实际问题。然而，农户采纳作物智能管控技术是一个心理认知变化与动态决策行为选择的多阶段动态过程，且受到农户特征、技术特征、价值感知、风险认知、社会网络、政策环境等因素的综合影响[105-107]。根据创新扩散理论和技术接受模型，可将农户采纳过程划分为技术认知、风险态度、采纳意愿、采纳尝试、持续行为 5 个阶段。在技术扩散不同阶段，可采用宣传推广、示范引领、鼓励试用、激励机制等差异化阶梯型

策略促进农户采纳应用。

2.2　典型应用场景

面向农户对作物病害精准诊断与处方推荐的需求，作物病害智能管控技术及其系统为农户提供交互应答功能，实现自动诊断病害种类并推荐个性化防治处方，缓解基层农技服务人员不足的问题。张领先等[19]构建了面向不同应用场景的作物病害处方推荐方案。Saeed 等[108]开发了基于 Matlab 的图形用户界面(GUI)，使农民能够在 3 s 内对马铃薯叶片图像进行分类，帮助农民进行疾病识别和管理。Buchaillot 等[109]开发了一种基于 web(图 4)和 Android(图 5)的 Doctor Nabat 作物病害诊断与决策系统，支持法语、阿拉伯语和英语，并在中东和北非进行实践推广应用，结果表明，诊断作物病害准确率为 94%。宁晋县河北大曹庄农场国家试验站与中国农科院植物保护研究所联合研发的小麦赤霉病自动化监测仪，基于实时传输数据信息，通过 AI 大模型结合当地病原菌类型、小麦品种抗性等因素进行决策分析，对小麦赤霉病发生的预测准确率达 94%[110]。在现实应用中，植保无人机是目前推广应用较为成熟的作物病害智能防治终端装备。2024 年我国植保无人机保有量达 2.51×10^5 架，年防治作业面积达 1.78×10^8 hm^2次，呈快速增长趋势[102]。



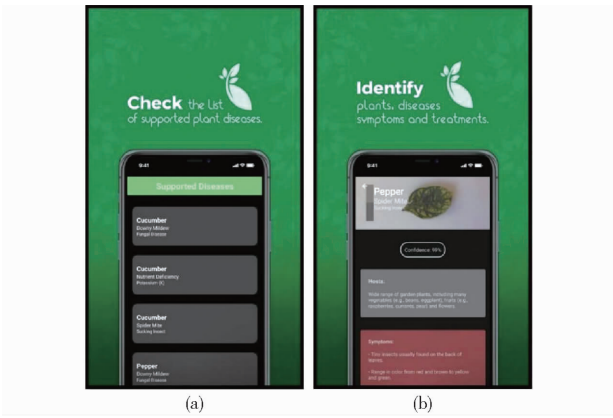
图 4　Doctor Nabat 网页版界面

Fig. 4　Image of final Doctor Nabat web

3　作物病害智能管控技术推广策略

3.1　管控模式设计

传统农技服务模式中存在供需错位、激励不足和服务公平性等核心难题，从而导致农业技术推广与实际应用效果较差。数字化农技服务模式不仅具有很强的公共服务普惠效应，还重构了农业技术创新扩散的空间模式[111]。面向小农户需求的作物病害智能管控技术，在进行推广应用时需要妥善处理农民技术需求与农业技术创新的关系，坚持“需求决定供给”的体验传播与“供给创造需求 ”的组织



(a)　(b)

图 5　Doctor Nabat Android 界面

Fig. 5　Images of Doctor Nabat Android

传播配合使用[112]。研究表明，通过政府购买服务有助于加速公益性农业技术的应用扩散，且因地制宜选择政府购买技术服务模式，能够显著提高政策执行效率和技术到位率[113]。此外，研究发现，通过构建“纵向联通”与“横向联动”的智能农机协同推广网络，形成“政策—研发—推广—应用—反馈”推广闭环，能够成功打通农业新技术推广应用“最后一公里”问题[114]。

根据作物病害智能管控技术特征和适配场景，按照病害信息采集、信息处理、信息展现、信息应用的信息数据流逻辑，设计基于作物病害需求输入、智能决策、服务输出和效果反馈 4 阶段面向农户需求的作物病害智能管控模式(图 6)。信息输入支持视频、图像、语音和文本信息等多模态数据输入，为农户应用提供多样化的适配应用场景。智能决策是作物病害智能管控的核心大脑，通过多模态数据融合、病害表征解析、病害关联挖掘和多目标决策等技术，为作物病害智能管控提供技术支撑。服务输出通过视频讲解、图像展示、语音播报与文字呈现等方式直接面向农户提供交互场景，为农户提供病害诊断结果、推荐防治处方、指导用药措施及展示预期效果。农户通过采纳推荐处方、防治装备或专家指导后开展实践应用，针对技术不足及需改进提升的地方进行使用效果反馈，为技术优化和升级提供数据支撑。

3.2　推广策略

根据技术采纳规律和技术推广扩散规律，以农户采纳应用需求为核心，构建由政府主导、专家指导、新型农业经营主体带动的作物病害智能管控技术推广策略体系(图 7)。

政府部门牵头搭建作物病害智能管控平台和组建跨区域协同管控体系，并为农户采纳作物病害智能管控技术提供技术培训、宣传介绍、政策支持等激励措施。新型农业经营主体通过组织观摩和效果展示等措施，带动作物病害智能管控技术应用。农户

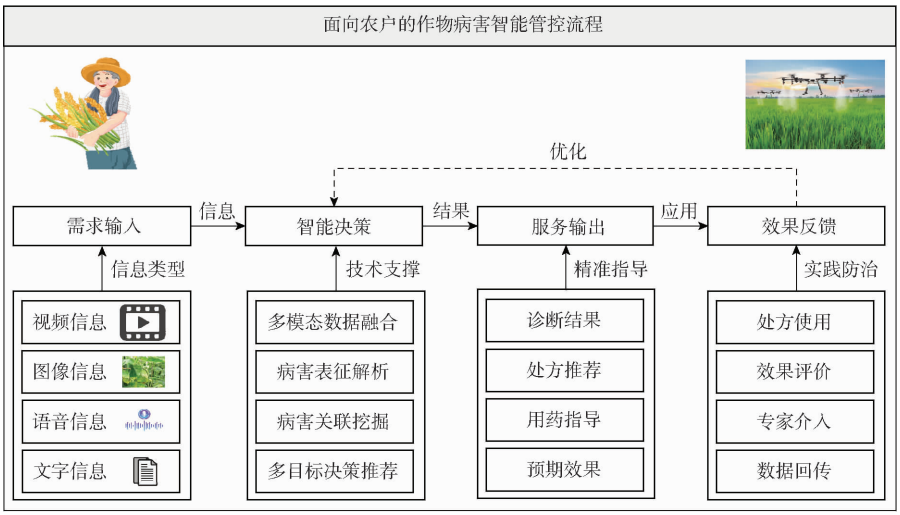


图 6 作物病害智能管控模式设计

Fig. 6 Design of mode for crop disease intelligent control targeting farmers' needs

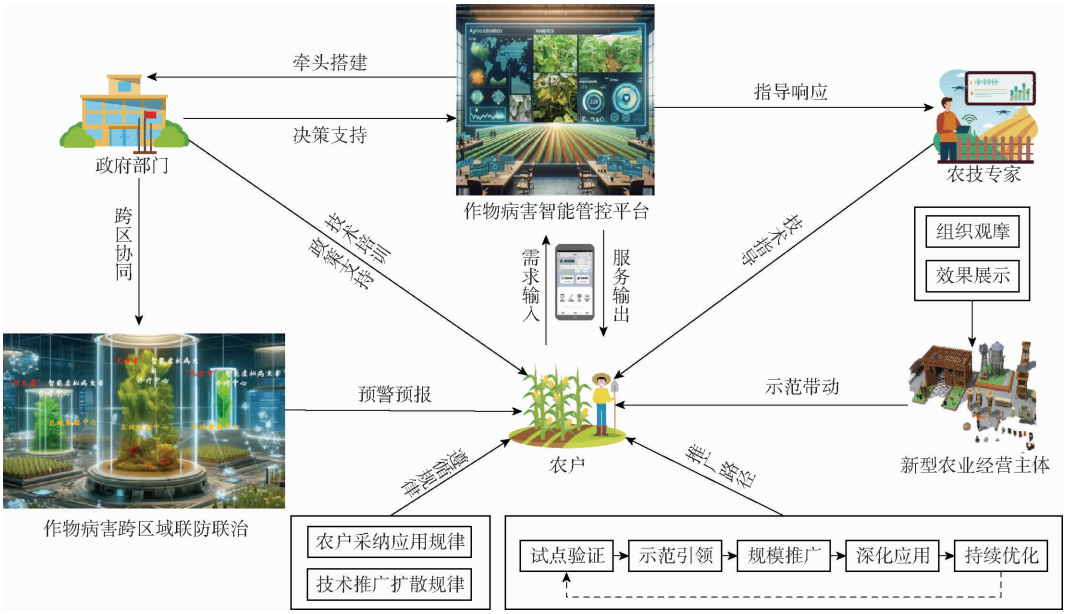


图 7 作物病害智能管控技术推广策略体系

Fig. 7 Promotion strategy plan of crop disease intelligent control technology

基于智能终端与作物病害智能管控平台对接交互，满足生产实际中作物病害诊断与处方推荐的需求。当然，如果平台给出的诊断结果或推荐处方不能满足农户实际需求，平台会通知该区域内农技专家到现场进行核查与指导。

易红梅等[115]研究发现，有 5% 大规模农户购买了植保无人机，其中有 16% 大规模种植户为自家农机安装北斗导航，但小农户均没有购买植保无人机和安装北斗导航等智能设备，主要是通过构建无人机植保社会化服务实现数字化转型。为此，面向农户实际需求和应用能力，构建“试点验证—示范引领—规模推广—深化应用—持续优化”的作物病害智能管控技术推广实施方案：①开展小范围试点验证技术可行性和实用性，将最新技术推向实际场景。②通过合作社、种植大户等示范户优先应用，利用“邻里效应”加速技术扩散和带动周边农户试用。③以县域为单位，由政府主导在全域内大规模推广。④政府提供政策补贴、技术培训及配套支持措施，强化农户持续应用意愿。⑤在推广全程中，根据实践效果反馈，持续对模型和数据库进行迭代升级。

3.3 推广措施

3.3.1 智能管控协同体系

面向多区域农户作物病害防治的共同需求，由政府部门牵头组建作物病害智能管控跨区域协同技术体系，加强跨区域协同管理与合作，打破区域间农业病害防治的信息壁垒。政府主导建立农业基础数据采集与应用体系，整合分散的土壤、气象、病虫害等数据，推动多源数据融合，优化区域智能决策支持系统，精准预测区域作物病害发生时空规律。将农技推广中心纳入“最后一公里”实施者，切实解决农

户的实际需求；积极引导和鼓励社会企业参与，为智能管控提供技术和资金支撑，实现作物病害智能管控公益性与经营性管理运营相结合。

3.3.2　适用性与稳定性

根据作物病害多源异构数据，加大研发针对跨作物的多病害综合智能诊断与预测模型，结合农户使用反馈和专家知识经验，打造准确率高的 AI 农技专家和 AI 智能客服，提高作物病害智能管控的科学性和精准性。鼓励高校、企业、科研机构、农技中心等联合攻关作物病害智能管控核心技术难题，推动不同作物品种、不同区域、不同病害的多场景适配技术转化与推广，尤其是提升复杂环境下技术稳定性。针对农户需求特征，亟需研发简易适用的轻量化、低功耗边缘计算与作物病害智能诊断设备，推进终端设备界面简化和操作优化，降低农户群体使用门槛和适配复杂场景的智能终端成本。

3.3.3　应用与示范

选取成熟度高、应用效果好的作物病害智能管控技术，在病害易发典型区域进行试点推广应用，在实际应用中不断完善病害模型与终端装备。在推广示范区域，建议采用“以点带面”阶段式推广模式，针对技术应用意愿强、具有规模生产能力的专业合作社和种植大户，先行开展试点应用。通过示范户的示范辐射带动作用，逐步将技术推广至示范区域的普通农户，促进区域性作物智能管控技术推广应用。最后，利用技术空间溢出效应向地理周边辐射，达到大面积推广应用的效果。

3.3.4　适配终端

农户作为作物病害智能管控技术使用者，受知识能力、资源禀赋等因素制约，应优先推广便携式病害诊断仪、智能虚拟诊疗亭、手机 app 等，同时还要降低设备投入和使用成本、简化设备操作流程以及实现多人共享使用等，以提高农户采纳率。当然，面向农户推广作物病害智能管控技术时，还需对新型农业经营主体、农技推广人员或植物医生、政府管理部门等不同主体提供配套服务（图 8）。

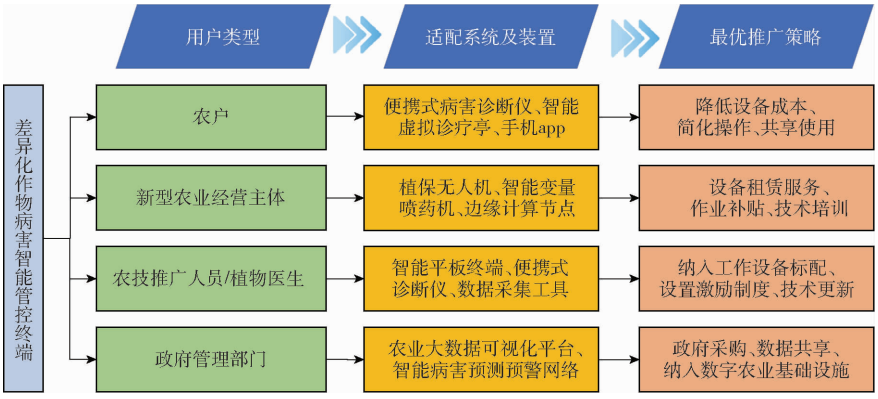


图 8　面向不同用户的作物病害智能管控技术推广措施

Fig. 8　Promotion measures of crop disease intelligent control technology for different users

新型农业经营主体作为小农户和现代农业有机衔接的桥梁，在新技术推广扩散中起到示范带动农户使用的重要作用，针对植保无人机、智能变量喷药机、边缘计算节点等作物病害智能管控终端，优先采取设备租赁服务、作业补贴机制和新技术培训等措施，提高试用和推广新技术新产品的积极性和应用效果。针对农技推广人员或植物医生，优先将智能平板、便携式诊断仪、数据采集工具等作物病害智能管控终端纳入工作设备标配，并设置技术推广激励制度和技术更新学习计划。对政府管理部门，优先通过政府采购、数据共享等方式，将农业大数据可视化平台、智能病害预测预警网络等作物病害智能管控体系纳入数字农业基础设施建设内容。

3.3.5　综合应用能力

作物病害智能管控技术作为农业新质生产力的典型技术，符合农业新技术的推广应用规律。相对于传统农业技术，作物病害智能管控技术对农户的知识能力具有较高要求。因此，在面向农户推广过程，需要针对农户开展专题培训、现场观摩、演示实践等技术培训，提高他们对技术的深入了解、操作使用以及人机协同能力，最大限度地发挥新质生产力的效果。同时，借助抖音、快手等短视频宣传渠道，为农户直观展示或直播演示，使他们更容易理解和接受新技术。此外，强化农业社会化服务组织功能，为农户提供数字服务、精准信息、智能植保等，满足农户使用作物病害智能防控技术的实际需求。

4　总结与展望

作物病害智能管控技术为解决传统病害诊断与防治效率低的问题提供技术路径。基于病三角原理，提供了作物病害智能管控的工作原理，构建了涵

盖感知层、认知层、预测层、决策层和执行层的作物病害智能管控技术体系，并梳理了多模态数据采集与融合技术、作物病害表征机理解析技术、作物病害关联挖掘与预测技术、多目标决策与处方推荐技术、作物病害智能管控终端的研究现状。整体来看，现有作物病害智能管控技术研究取得了大量创新性成果，但这些研究成果多是基于理想状态的试验数据，仅有少量研究在有限范围内开展了实地试验。面向农户差异化需求和复杂现实应用场景，作物病害智能管控技术大规模推广应用还存在多源异构数据融合效率低、模型可解释性弱、跨区域泛化能力有限、多病害协同预测能力薄弱、技术适用性和实用性不足等问题。在“大国小农”背景下，面向分散小农户对作物病害精准智能防控的需求，需加快实施跨区协同防治、提升技术性能、加强示范带动、研发终端适配等推广策略与措施。为此，在未来作物病害智能管控技术研究中，需重点围绕大语言模型与知识图谱深度融合的处方推荐、多病害协同智能管控策略、轻量化边缘计算模型优化、跨区域跨作物泛化能力提升、终端设备轻量化改进等进行深入研究。

参 考 文 献

[1] Wang X W, Liu J. Enhancing plant disease detection through multi-modal integration of visual and textual data[J]. Plant Methods, 2026, 22(1): 30.

[2] Guo M, Guerra-Manzanares A. Cropper: an explainable lightweight attention-guided ensemble for robust plant disease diagnosis in data-scarce conditions[J]. Applied Soft Computing, 2026, 196: 115020.

[3] 王桂荣，王源超，杨光富，等. 农业病虫害绿色防控基础的前沿科学问题[J]. 中国科学基金, 2020, 34(4): 374 - 380.
Wang Guirong, Wang Yuanchao, Yang Guangfu, et al. Frontiers in scientific issues of controlling agricultural pests and diseases by environmental-friendly methods[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(4): 374 - 380. (in Chinese)

[4] 王春山，赵春江，吴华瑞，等. 采用双模态联合表征学习方法识别作物病害[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 180 - 188.
Wang Chunshan, Zhao Chunjiang, Wu Huarui, et al. Recognizing crop diseases using bimodal joint representation learning[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(11): 180 - 188. (in Chinese)

[5] Tan F, Yan T Y, Duan L, et al. Early detection of cotton verticillium wilt using hyperspectral and chlorophyll fluorescence imaging fusion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 246: 111610.

[6] Singh A, Jones S, Ganapathysubramanian B, et al. Challenges and opportunities in machine-augmented plant stress phenotyping [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(1): 53 - 69.

[7] Yang M, Seklouli A, Ren L, et al. A new mobile diagnosis system for estimation of crop disease severity using deep transfer learning[J]. Crop Protection, 2024, 184: 14.

[8] Thai H, Le K. Mobileh-transformer: enabling real-time leaf disease detection using hybrid deep learning approach for smart agriculture[J]. Crop Protection, 2025, 189: 107002.

[9] Shawon S, Niha F, Sinan O, et al. Integrating federated learning and explainable ai for plant disease detection: a systematic review of recent advances in precision agriculture[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2026, 19(1):138.

[10] 封洪强，姚青，胡程，等. 我国农作物病虫害智能监测预警技术新进展[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 229 - 242.
Feng Hongqiang, Yao Qing, Hu Cheng, et al. Recent advances in intelligent techniques for monitoring and prediction of crop diseases and insect pests in China[J]. Plant Protection, 2023, 49(5): 229 - 242. (in Chinese)

[11] Chug A, Bhatia A, Singh A, et al. A novel framework for image-based plant disease detection using hybrid deep learning approach[J]. Soft Computing, 2023, 27(18): 13613 - 13638.

[12] Ashraf M, Abrar M, Qadeer N, et al. A convolutional neural network model for wheat crop disease prediction[J]. Cmc-Computers Materials & Continua, 2023, 75(2): 3867 - 3882.

[13] Gao W W, Zong C L, Wang M Y, et al. Intelligent identification of rice leaf disease based on YOLO V5 - EFFICIENT[J]. Crop Protection, 2024, 183: 106758.

[14] Song L, Zhao J L, Li Y H, et al. Early detection of wheat powdery mildew: a multi-source in situ remote sensing approach enabled by stacked ensemble learning[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2026, 16(1): 124 - 138.

[15] 丁俊琦，李博，乔岩，等. 基于植物电子病历多类型数据融合的作物病害诊断方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 196 - 204.
Ding Junqi, Li Bo, Qiao Yan, et al. Crop disease diagnosis method based on fusion of multiple types of data from plant EMRs [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 196 - 204. (in Chinese)

[16] 刘晓君，吴茜，孙传亮，等. 基于改进 MobileViT 模型的水稻病害识别算法与系统研发[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(1): 28 - 39.
Liu Xiaojun, Wu Qian, Sun Chuanliang, et al. Rice disease identification method based on improved MobileViT model and system development[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(1): 28 - 39. (in Chinese)

[17] 苏涵,戴曲顺,李忠艳. 基于多域特征融合增量反馈宽度学习的作物病害图像识别[J]. 农业工程学报, 2026, 42(3): 241 – 252.
Su Han, Dai Qushun, Li Zhongyan. Crop disease image recognition based on multi-domain feature fusion and incremental feedback broad learning[J]. Transactions of the CSAE, 2026, 42(3): 241 – 252. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 张领先,丁俊琦,陈菲菲,等. 基于电子病历多模态数据的作物病害多元场景处方推荐方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 25 – 36.
Zhang Lingxian, Ding Junqi, Chen Feifei, et al. Multi-scenario prescription recommendations for crop diseases based on multi-modal data of electronic medical records[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 25 – 36. (in Chinese)

[20] 张标,张领先,王洁琼. 我国农业技术推广扩散作用机理及改进策略[J]. 科技管理研究, 2017, 37(22): 42 – 51.
Zhang Biao, Zhang Lingxian, Wang Jieqiong. Diffusion mechanism and improvement strategy of agricultural technology extension in China[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(22): 42 – 51. (in Chinese)

[21] 王波,丁俊琦,吴奇峰,等. 基于多源异构数据和知识图谱的作物病害关联分析[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 546 – 559.
Wang Bo, Ding Junqi, Wu Qifeng, et al. Multi-scenario prescription recommendations for crop diseases based on multi-modal data of electronic medical records[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 546 – 559. (in Chinese)

[22] Chappelka A H, Grulke N E. Disruption of the 'disease triangle' by chemical and physical environmental change[J]. Plant Biology, 2016, 18: 5 – 12.

[23] Pokhrel A. Role of individual components of disease triangle in disease development: a review[J]. Journal of Plant Pathology & Microbiology, 2021, 12(9): 1 – 7.

[24] Jagadeesan P, Vedaraj M. A depthwise squeeze-based residual recurrent autoencoder for accurate plant leaf disease prediction using multimodal data[J]. Journal of Crop Health, 2026, 78(1): 37.

[25] Li X P, Yang S, Li S Q. From identification to prevention: a kiwi disease diagnosis system integrating vision and large language models[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 244: 111484.

[26] 胡婷,孙晓海,宋海龙,等. 基于层次标注和自适应预处理的多源农业病害图像数据集构建[J]. 吉林大学学报(理学版), 2025, 63(3): 815 – 821.
Hu Ting, Sun Xiaohai, Song Hailong, et al. Construction of multisource agricultural disease image dataset based on hierarchical annotation and adaptive preprocessing[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2025, 63(3): 815 – 821. (in Chinese)

[27] 高荣华,李奇峰,孙想,等. 多结构参数集成学习的设施黄瓜病害智能诊断[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 158 – 165.
Gao Ronghua, Li Qifeng, Sun Xiang, et al. Intelligent diagnosis of greenhouse cucumber diseases based on multi-structure parameter ensemble learning[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 158 – 165. (in Chinese)

[28] Abdalla A, Cen H Y, Wan L, et al. Fine-tuning convolutional neural network with transfer learning for semantic segmentation of ground-level oilseed rape images in a field with high weed pressure[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 11.

[29] Dolatabadian A, Neik T X, Danilevicz M, et al. Image-based crop disease detection using machine learning[J]. Plant Pathology, 2025, 74(1): 18 – 38.

[30] 杨学军,钟金彪,林开颜,等. 双目立体视觉技术及其在智慧农业中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 27 – 39.
Yang Xuejun, Zhong Jinbiao, Lin Kaiyan, et al. Research progress on binocular stereo vision technology and its applications in smart agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 27 – 39. (in Chinese)

[31] Sun H, Xue J L, Song Y, et al. Detection of fruit tree diseases in natural environments: a novel approach based on stereo camera and deep learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 137(PartA):109148.

[32] Chen J D, Chen J X, Zhang D F, et al. Using deep transfer learning for image-based plant disease identification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 11.

[33] Subakti A, Murfi H, Hariadi N. The performance of bert as data representation of text clustering[J]. Journal of Big Data, 2022, 9(1): 21.

[34] Anitha J, Saranya N. Cassava leaf disease identification and detection using deep learning approach[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2022, 17(2): 7.

[35] Li H N, Chen B Y, Chen J J, et al. Itimca: image-text information and cross-attention for multi-modal cassava leaf disease classification based on a novel multi-modal dataset in natural environments[J]. Crop Protection, 2025, 189: 106981.

[36] 张善文,王振,王祖良. 多尺度融合卷积神经网络的黄瓜病害叶片图像分割方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16):

149 – 157.
Zhang Shanwen, Wang Zhen, Wang Zuliang. Method for image segmentation of cucumber disease leaves based on multi-scale fusion convolutional neural networks[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(16): 149 – 157. (in Chinese)
[37] 向玉云,陈思远,高爽,等. 基于自适应 BayesShrink 和频-空特征融合的作物病害识别方法[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 204 – 215.
Xiang Yuyun, Chen Siyuan, Gao Shuang, et al. Disease identification method based on adaptive BayesShrink and frequency-spatial feature fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(6): 204 – 215. (in Chinese)
[38] Zhou Ji, Li Jiuxi, Wang Chunshan, et al. Crop disease identification and interpretation method based on multimodal deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 189: 106408.
[39] 吴华瑞,赵春江,李静晨. 基于多模态融合大模型架构 Agri – QA Net 的作物知识问答系统[J]. 智慧农业(中英文), 2025, 7(1): 1 – 10.
Wu Huarui, Zhao Chunjiang, Li Jingchen. Agri – QA Net: multimodal fusion large language model architecture for crop knowledge question-answering system[J]. Smart Agriculture, 2025, 7(1): 1 – 10. (in Chinese)
[40] Sajitha P, Andrushia A D, Anand N, et al. A review on machine learning and deep learning image-based plant disease classification for industrial farming systems[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2024, 38: 18.
[41] 余忠义,王洪宇,赵磊,等. 温室智能施药机器人关键技术研究进展[J]. 农药学学报, 2025, 27(6): 973 – 988.
Yu Zhongyi, Wang Hongyu, Zhao Lei, et al. Research progress on key technologies of greenhouse intelligent pesticide application robot[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2025, 27(6): 973 – 988. (in Chinese)
[42] 刘子扬,冯帅,赵冬雪,等. 无人机高光谱遥感的水稻叶瘟病的光谱特征提取与检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(5): 1457 – 1463.
Liu Ziyang, Feng Shuai, Zhao Dongxue, et al. Research on spectral feature extraction and detection method of rice leaf blast by UAV hyperspectral remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(5): 1457 – 1463. (in Chinese)
[43] 刘涛,韩伊曼,杨奉源,等. 基于无人机遥感影像土壤背景剔除的玉米叶部病害等级识别模型[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 408 – 417.
Liu Tao, Han Yiman, Yang Fengyuan, et al. Classification of maize leaf disease level information from UAV remote sensing images with soil background removal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 408 – 417. (in Chinese)
[44] Bao W X, Huang C P, Hu G S, et al. Detection of fusarium head blight in wheat using UAV remote sensing based on parallel channel space attention[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108630.
[45] Osroosh Y, Khot L R, Peters R T. Economical thermal-RGB imaging system for monitoring agricultural crops[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 34 – 43.
[46] 王东方,汪军. 基于迁移学习和残差网络的农作物病害分类[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 199 – 207.
Wang Dongfang, Wang Jun. Crop disease classification with transfer learning and residual networks[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(4): 199 – 207. (in Chinese)
[47] 朱文静,戴世元,冯展康,等. 基于垄间背景剔除优化小麦赤霉病遥感监测精度[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 219 – 229.
Zhu Wenjing, Dai Shiyuan, Feng Zhankang, et al. Optimizing wheat scab in remote sensing monitoring accuracy usinginterridge background elimination[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 219 – 229. (in Chinese)
[48] Kumar K K, Kannan E. Detection of rice plant disease using AdaBoostSVM classifier[J]. Agronomy Journal, 2022, 114(4): 2213 – 2229.
[49] 杨森,冯全,阎文博,等. 多模态引导视觉 Transformer 的小样本农作物病害识别[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 195 – 203.
Yang Sen, Feng Quan, Yan Wenbo, et al. Recognizing few-shot crop diseases using multimodal-guided visual Transformer [J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(6): 195 – 203. (in Chinese)
[50] 吴建军,赵惠圆,祝玉华. 葡萄叶片病害智能检测技术研究进展[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(4): 842 – 854.
Wu Jianjun, Zhao Huiyuan, Zhu Yuhua. Research progress on intelligent detection technology for grape leaf diseases[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2026, 42(4): 842 – 854. (in Chinese)
[51] Chen Y P, Wu Q F. Grape leaf disease identification with sparse data via generative adversarial networks and convolutional neural networks[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(1): 235 – 253.
[52] 王海光. 植物病害图像识别及其发展前景[J]. 植物病理学报, 2025, 55(4): 964 – 977.
Wang Haiguang. Plant disease image recognition and its prospects[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2025, 55(4): 964 – 977. (in Chinese)
[53] Ametefe D S, Sarnin S S, Ali D M, et al. Enhancing leaf disease detection accuracy through synergistic integration of deep transfer learning and multimodal techniques[J]. Information Processing in Agriculture, 2025, 12(3): 279 – 299.
[54] 李淑菲,李凯雨,乔岩,等. 基于可见光光谱和改进 YOLO v5 的自然场景下黄瓜病害检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(8): 2596 – 2600.
Li Shufei, Li Kaiyu, Qiao Yan, et al. Cucumber disease detection method based on visible light spectrum and improved YOLO

v5 in natural scenes[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(8): 2596 – 2600. (in Chinese)

[55] 韩宗桓,张一丁,姜晓雪,等. 基于实例分割的黄瓜霜霉病菌侵染结构定量表征[J]. 农业机械学报, 2026, 57(10): 198 – 207.
Han Zonghuan, Zhang Yiding, Jiang Xiaoxue, et al. Instance segmentation-based quantitative characterization of infection structures of cucumber downy mildew pathogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(10): 198 – 207. (in Chinese)

[56] 罗洋,何自芬,张印辉,等. 主干信息共享与多感受野特征自适应融合的作物叶片等级和病害识别方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 377 – 387.
Luo Yang, He Zifen, Zhang Yinhui, et al. Crop leaf grade and disease recognition method based on backbone information sharing and multi-receptive field feature adaptive fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 377 – 387. (in Chinese)

[57] Shuai L Y, Zhu L C, Yang Y, et al. Agrimapo: a multimodal automatic prompt optimization approach for crop disease classification using large language models[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2026, 16(2): 911 – 925.

[58] Giridharan S, Kumar M, Susee S. Real-time crop leaf disease detection and classification using a hybrid morlet wavelet interactive attention neural network optimized by the red-billed blue magpie algorithm[J]. Agronomy Journal, 2026, 118(2): 15.

[59] Xu C, Zhao L, Wen H J, et al. Intelligent management of crop diseases and pests in multiscale and multimodal complex scenarios: technologies, applications, and prospects[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 244:111443.

[60] Bouacida I, Farou B, Djakhdjakha L, et al. Innovative deep learning approach for cross-crop plant disease detection : a generalized method for identifying unhealthy leaves[J]. Information Processing in Agriculture, 2025, 12(1): 54 – 67.

[61] Soni K, Gangwar R. A survey: to identify plant leaf diseases by feature extraction methods and classification techniques[J]. Planta, 2025, 262(4): 16.

[62] Li G Q, Jiao L, Chen P, et al. Spatial convolutional self-attention-based transformer module for strawberry disease identification under complex background[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 10.

[63] Gao R H, Wang R, Feng L, et al. Dual-branch, efficient, channel attention-based crop disease identification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190:106410.

[64] Xu W, Wang Q L, Chen R Y. Spatio-temporal prediction of crop disease severity for agricultural emergency management based on recurrent neural networks[J]. Geoinformatica, 2018, 22(2): 363 – 381.

[65] 黄林生,江静,黄文江,等. Sentinel – 2 影像和 BP 神经网络结合的小麦条锈病监测方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 178 – 185.
Huang Linsheng, Jiang Jing, Huang Wenjiang, et al. Wheat yellow rust monitoring method based on Sentinel – 2 image and BPNN model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 178 – 185. (in Chinese)

[66] Selvaraj M, Vergara A, Montenegro F, et al. Detection of banana plants and their major diseases through aerial images and machine learning methods: a case study in DR Congo and Republic of Benin[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 169: 110 – 124.

[67] Mishra R, Kavita, Rajpal A, et al. I-ldd: an interpretable leaf disease detector[J]. Soft Computing, 2024, 28(3): 2517 – 2533.

[68] Yu H Y, Li X K, Yu Y, et al. A dual-branch multimodal model for early detection of rice sheath blight: fusing spectral and physiological signatures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 110031.

[69] Shahid M F, Khanzada T J S, Aslam M A, et al. An ensemble deep learning models approach using image analysis for cotton crop classification in ai-enabled smart agriculture[J]. Plant Methods, 2024, 20(1):104.

[70] 吕高强,伊丽姆努尔·吾斯曼,单迪迪,等. 基于 FTIR – PAS 的水稻稻瘟病光谱特征及潜育期诊断技术[J]. 农业工程学报, 2025, 41(24): 163 – 172.
Lü Gaoqiang, Yilimunuer Wusiman, Shan Didi, et al. Spectral characteristics and incubation period diagnosis technology of rice blast disease based on FTIR – PAS[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(24): 163 – 172. (in Chinese)

[71] 高荣华,冯璐,张月,等. 基于多维随机森林的番茄灰霉病高光谱图像早期检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(10): 3226 – 3234.
Gao Ronghua, Feng Lu, Zhang Yue, et al. Early detection of tomato gray mold disease with multi-dimensional random forest based on hyperspectral image[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(10): 3226 – 3234. (in Chinese)

[72] 路阳,顾福谦,谷英楠,等. 高光谱图像结合一维卷积神经网络的玉米大斑病早期识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(8): 2302 – 2310.
Lu Yang, Gu Fuqian, Gu Yingnan, et al. Early detection of northern corn leaf blight using hyperspectral images combined with one-dimensional convolutional neural networks[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2025, 45(8): 2302 – 2310. (in Chinese)

[73] 沈梦姣,鲍浩,张艳. 基于光谱–纹理特征的辣椒早疫病潜育期高光谱图像检测识别[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(1): 233 – 243.
Shen Mengjiao, Bao Hao, Zhang Yan. Research on hyperspectral image detection and recognition of pepper early blight

incubation period based on spectral and texture features[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2025, 52(1): 233 - 243. (in Chinese)

[74] 庞浩,张艳. 作物潜育期病状可见光图像三通道识别模型[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(10): 2650 - 2662.
Pang Hao, Zhang Yan. Three-channel recognition model based on visible light images for crop disease incubation stage[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2025, 52(10): 2650 - 2662. (in Chinese)

[75] Kaur A, Randhawa G, Farooque A, et al. Potato crop disease prediction in prince edward island using machine learning : a decision support approach for farmers[J]. Ecological Informatics, 2026, 94: 22.

[76] 张领先,韩梦瑶,丁俊琦,等. 作物病害智能诊断与处方推荐技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 1 - 18.
Zhang Lingxian, Han Mengyao, Ding Junqi, et al. Research progress in intelligent diagnosis and prescription recommendation of crop diseases[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 1 - 18. (in Chinese)

[77] Omia E, Bae H, Park E, et al. Remote sensing in field crop monitoring : a comprehensive review of sensor systems , data analyses and recent advances[J]. Remote Sensing, 2023, 15(2): 46.

[78] Shokouhifar M, Khoshvaght S, Mirjalili S, et al. Real-time metaheuristic-driven machine learning model for UAV-assisted wireless rechargeable sensor networks in smart agriculture[J]. Applied Soft Computing, 2026, 199: 115309.

[79] 黄文江,张竞成,黄林生,等. 植被病虫害遥感监测预警研究进展与展望[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 2065 - 2082.
Huang Wenjiang, Zhang Jingcheng, Huang Linsheng, et al. Progress of vegetation pest and disease monitoring and forecasting [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(6): 2065 - 2082. (in Chinese)

[80] 张领先,赵聃桐,丁俊琦,等. 基于 CDSSM 的作物病害处方推荐方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 308 - 317.
Zhang Lingxian, Zhao Dantong, Ding Junqi, et al. Recommendation method of crop disease prescription based on CDSSM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 308 - 317. (in Chinese)

[81] 刘斌,徐皓玮,李承泽,等. 基于快照集成卷积神经网络的苹果叶部病害程度识别[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 286 - 294.
Liu Bin, Xu Haowei, Li Chengze, et al. Apple leaf disease identification method based on snapshot ensemble CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 286 - 294. (in Chinese)

[82] 张家瑜,朱锐,邱威,等. 基于选择性注意力神经网络的木薯叶病害检测算法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 254 - 262.
Zhang Jiayu, Zhu Rui, Qiu Wei, et al. Cassava leaf disease detection algorithm based on selective attention neural network [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 254 - 262. (in Chinese)

[83] 吴桓宇,陈明,郭钦鸿. 基于大语言模型与知识图谱的水稻病虫害专家系统[J]. 农业工程学报, 2025, 41(22): 244 - 255.
Wu Huanyu, Chen Ming, Guo Qinhong. Rice pest and disease expert system based on large language model and knowledge graph[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(22): 244 - 255. (in Chinese)

[84] 李悦,孙坦,鲜国建,等. 面向多源数据深度融合的农作物病虫害本体构建研究[J]. 数字图书馆论坛, 2021(2): 2 - 10.
Li Yue, Sun Tan, Xian Guojian, et al. Research on ontology construction of crop diseases and pests for deep fusion of multi-source data[J]. Digital Library Forum, 2021(2): 2 - 10. (in Chinese)

[85] 杨俊,杨婉霞,杨森,等. 自适应混合检索增强大模型的农作物病虫害智能问答方法[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(1): 52 - 61.
Yang Jun, Yang Wanxia, Yang Sen, et al. Intelligent Q&A method for crop diseases and pests using LLM augmented by adaptive hybrid retrieval[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(1): 52 - 61. (in Chinese)

[86] 王惟实,张慧源,朱诗嫣,等. 大语言模型在植物病虫害智能诊断中应用的研究进展[J]. 植物保护学报, 2026, 53(1): 67 - 79.
Wang Weishi, Zhang Huiyuan, Zhu Shiyan, et al. Research advances in the application of large language models for intelligent diagnosis of plant diseases and insect pests[J]. Journal of Plant Protection, 2026, 53(1): 67 - 79. (in Chinese)

[87] Chen D, Huang Y B. Integrating reinforcement learning and large language models for crop production process management optimization and control through a new knowledge-based deep learning paradigm[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110028.

[88] Yang S, Guo J X, Yu J T. A generative AI-driven framework integrating CNN - VLM - LLM for intelligent crop disease diagnosis and control strategy generation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 244: 111475.

[89] 王奥霖,范洁茹,徐飞,等. 植物病原菌孢子捕捉和监测:助力植物病害管理[J]. 植物保护, 2025, 51(1): 1 - 19.
Wang Aolin, Fan Jieru, Xu Fei, et al. Catching and monitoring airborne inoculum of plant pathogens:improving plant disease management[J]. Plant Protection, 2025, 51(1): 1 - 19. (in Chinese)

[90] 杨宁,张素亮,王亚飞,等. 基于气载微流控芯片的作物病害孢子流式动态检测方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 318 - 325.
Yang Ning, Zhang Suliang, Wang Yafei, et al. Crop disease spore flow dynamic detection method based on airborne microfluidic chip[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 318 - 325. (in Chinese)

[91] Zhu X Y, Mao T T, Chen J G, et al. Attention-based and context-aware knowledge distillation for enhancing crop disease

detection[J]. Applied Soft Computing, 2026, 195: 115017.

[92] 张净,华玟,刘晓梅,等. 基于改进 YOLO v8n 的轻量化番茄叶片病害检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 538 - 549.
Zhang Jin, Hua Wen, Liu Xiaomei, et al. Lightweight tomato leaf disease detection method based on improved YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 538 - 549. (in Chinese)

[93] 蔡鑫,聂荟珊,杜甜甜,等. 面向边缘部署的苹果叶部病害轻量化诊断方法[J]. 农业机械学报, 2026, 57(8): 235 - 245.
Cai Xin, Nie Huishan, Du Tiantian, et al. Lightweight diagnostic method for apple leaf diseases oriented to edge deployment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(8): 235 - 245. (in Chinese)

[94] 韩涛,鲍美萍,黄友锐,等. 基于改进沙猫群优化算法的植保无人机路径规划研究[J]. 农业机械学报, 2026, 57(7): 362 - 372.
Han Tao, Bao Meiping, Huang Yourui, et al. Path planning for plant protection UAVs based on improved sand cat swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(7): 362 - 372. (in Chinese)

[95] 赵德楠,兰玉彬. 植保无人机静电喷雾技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 15 - 28.
Zhao Denan, Lan Yubin. Review and prospects of electrostatic spraying technology for plant protection UAVs[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(12): 15 - 28. (in Chinese)

[96] 郝建军,艾庆贺,袁大超,等. 电动自走式玉米-花生带状复合种植模式施药机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(9): 216 - 225.
Hao Jianjun, Ai Qinghe, Yuan Dachao, et al. Design and experiment of electric self-propelled maize-peanut strip compound planting pesticide applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(9): 216 - 225. (in Chinese)

[97] 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.
Lan Yubin, Yan Yu, Wang Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20): 30 - 40. (in Chinese)

[98] 余忠义,何雄奎,苏立阳,等. 果园风送对靶变量施药关键技术及装备研究进展[J]. 农药学学报, 2025, 27(5): 799 - 812.
Yu Zhongyi, He Xiongkui, Su Liyang, et al. Research progress on key technologies and equipment for air-assisted to target variable pesticide application in domestic orchards[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2025, 27(5): 799 - 812. (in Chinese)

[99] Zhang H, Qi L J, Wu Y L, et al. Numerical simulation of airflow field from a six-rotor plant protection drone using lattice boltzmann method[J]. Biosystems Engineering, 2020, 197: 336 - 351.

[100] Yan Y W, Song F, Sun J Y. The application of UAV technology in maize crop protection strategies: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110679.

[101] 翟长远,张焱龙,邹伟,等. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 160 - 169.
Zhai Changyuan, Zhang Yanlong, Zhou Wei, et al. Design and test of precision variable-rate spray monitoring and control system based on pesticide spraying traceability[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 160 - 169. (in Chinese)

[102] 袁会珠,李香帅,魏鹏,等. 我国农药使用技术发展与智慧植保技术体系展望[J]. 植物保护, 2025, 51(5): 208 - 220.
Yuan Huizhu, Li Xiangshuai, Wei Peng, et al. Development of pesticide application technologies in China and prospects for intelligent plant protection system[J]. Plant Protection, 2025, 51(5): 208 - 220. (in Chinese)

[103] Han G, Wang J J, Arbuckle J G, et al. Understanding the adoption of precision agriculture technologies by farmers in China: insights from the unified theory of acceptance and use of technology[J]. Agricultural Systems, 2026, 231: 104549.

[104] Zhang H Y, Song Y J, Wang Y, et al. Refining pesticide use to reduce yield loss: how drone plant protection transforms smallholder pest management[J]. Food Policy, 2026, 139: 103035.

[105] 朱月季,张颖,胡晨. 作物病害危机下农户新品种采纳行为研究:从个体决策到扩散机制[J]. 农业技术经济, 2019(12): 80 - 95.
Zhu Yueji, Zhang Ying, Hu Chen. Study on farmers' behavior of adopting new varieties under the crisis of crop disease: from individual choice to diffusion mechanism[J]. Agricultural Technology Economics, 2019(12): 80 - 95. (in Chinese)

[106] Li W J, Clark B, Taylor J, et al. A hybrid modelling approach to understanding adoption of precision agriculture technologies in chinese cropping systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 12.

[107] Silveira F D, Landaverde R, Barbedo J G A. Drivers of the agriculture 4.0 technologies in the agri-food system: a systematic literature review and directions for future research[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 243:111351.

[108] Saeed S, Rehman H, Hussain M, et al. Performance investigation of ml algorithms for potato blight classification: the role of hyperparameter tuning[J]. Journal of Crop Health, 2026, 78(2): 19.

[109] Buchaillot M, Fernandez-Gallego J, Mahmoudi H, et al. Framework for deep learning diagnosis of plant disorders in horticultural crops: from data collection tools to user-friendly web and mobile apps[J]. Ecological Informatics, 2024, 84: 102900.

[110] 闫德见. 小麦防病害 AI 来助力[EB/OL]. (2025 - 05 - 19)[2026 - 05 - 15]. https://www.moa.gov.cn/xw/qg/202505/t20250516_6474032.htm.

[111] 朱萌,龚为纲. 数字技术赋能农业社会化服务的技术逻辑与实践困境:基于农技推广大数据的分析[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2024, 24(6): 83 - 95.
Zhu Meng, Gong Weigang. Technical logic and practical challenges of digital technology empowering agricultural socialization services: an analysis based on big data of agricultural extension platform[J]. Journal of Northwest A&F University (Social Science Edition), 2024, 24(6): 83 - 95. (in Chinese)

[112] 邵腾伟,吕秀梅. 基于转变农业发展方式的基层农业技术推广路径选择[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(4): 942 - 948.
Shao Tengwei, Lü Xiumei. Research on the choices to agricultural technology extension ways based on the changing of agricultural development means[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(4): 942 - 948. (in Chinese)

[113] 姚科艳,陈利根,刘珍珍. 政府购买服务模式如何影响农业技术推广效果:基于农作物秸秆还田技术的实证分析[J]. 农业技术经济, 2023(11): 98 - 109.
Yao Keyan, Chen Ligen, Liu Zhenzhen. How does government purchase model affect the effect of agricultural technology promotion: an empirical analysis based on mechanized straw returning technology for crops[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2023(11): 98 - 109. (in Chinese)

[114] 马红坤,陈雪,毛世平. 如何打通农业新技术推广应用的“最后一公里”:以日本推广智能农机“遥控割草机”为例[J]. 中国软科学, 2025(5): 67 - 78.
Ma Hongkun, Chen Xue, Mao Shiping. How to bridge the “last mile” of promoting and applying new agricultural technologies: a case study of Japan's remote-controlled mower[J]. China Soft Science, 2025(5): 67 - 78. (in Chinese)

[115] 易红梅,何煦,智华勇,等. 涉农数智技术采纳现状与现实挑战:基于两套具有代表性农户调查的研究[J]. 智慧农业(中英文), 2026, 8(3): 51 - 66.
Yi Hongmei, He Xu, Zhi Huayong, et al. Adoption and challenges of digital and intelligent technologies in agriculture: evidence from two representative household survey[J]. Smart Agriculture, 2026, 8(3): 51 - 66. (in Chinese)

(上接第 69 页)

[20] Dong G, Xie W, Huang X, et al. Review of small object detection algorithms based on deep learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(11): 16 - 27.

[21] Yang G, Wang J, Nie Z, et al. A lightweight YOLO v8 tomato detection algorithm combining feature enhancement and attention [J]. Agronomy, 2023, 13(7): 18 - 24.

[22] 雷帮军,余翱,余快. 基于 YOLO v8s 改进的小目标检测算法[J]. 无线电工程, 2024, 54(4): 857 - 870.
Lei Bangjun, Yu Ao, Yu Kuai. Small object detection algorithm based on improved YOLO v8s[J]. Radio Engineering, 2024, 54(4): 857 - 870. (in Chinese)

[23] 王泽宇,徐慧英,朱信忠,等. 基于 YOLO v8 改进的密集行人检测算法:MER - YOLO[J]. 计算机工程与科学, 2024, 46(6): 1050 - 1062.
Wang Zeyu, Xu Huiying, Zhu Xinzhong, et al. An improved dense pedestrian detection algorithm based on YOLO v8: MER - YOLO[J]. Computer Engineering & Science, 2024, 46(6): 1050 - 1062. (in Chinese)

[24] 周兴华,陈西江,羊海东,等. 动态卷积 YOLO v5 的视频火焰检测算法[J]. 测绘科学, 2023, 48(4): 106 - 118.
Zhou Xinghua, Chen Xijiang, Yang Haidong, et al. Video flame detection algorithm based on dynamic convolution YOLO v5 [J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(4): 106 - 118. (in Chinese)

[25] Shi Q, Li C, Guo B, et al. Manipulator-based autonomous inspections at road checkpoints: application of faster YOLO for detecting large objects[J]. Defence Technology, 2022, 18(6): 937 - 951.

[26] 刘清河, 崔光尚, 姜翔瀚,等. 改进 YOLO v8 的复杂交通场景目标检测算法[C]// 第三十一届中国汽车工程学会年会论文集, 2024: 89 - 95.
Liu Qinghe, Cui Guangshang, Jiang Xianghan, et al. Improved YOLO v8 target detection algorithm for complex traffic scenes [C]// Proceedings of the 31st SAECCE2024, 2024: 89 - 95. (in Chinese)

[27] 白凯,张玉杰,苏邓文,等. 基于改进 YOLO v8n 的花生叶片病害检测方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 518 - 526, 564.
Bai Kai, Zhang Yujie, Su Dengwen, et al. Peanut leaf disease detection method based on improved YOLO v8n [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6): 518 - 526, 564. (in Chinese)