DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.01.003

农作物重大病虫害预警与应急防控技术研究现状与趋势

李董[1], 汤启国[1], 王红波[1, 2], 邱威[1, 3, 4], 熊炜[1*]

(1. 农业农村部科技发展中心,北京市,100176; 2. 湖北省农业科学院粮食作物研究所,湖北武汉,430064;
3. 南京农业大学工学院,江苏南京,210031; 4. 江苏省智能化农业装备重点实验室,江苏南京,210031)

摘要:随着农业的发展,重大病虫害对农林业造成的经济损失和食品安全威胁日益严重。2024年中国主要粮食作物面临22种病虫害的挑战,预计影响面积达155 411 khm^{2}次,产量损失超1.5×10^{11} t。综述了农作物病虫害预警与应急防控技术的现状,其中病虫害预警技术包括物联网、遥感技术和计算机视觉识别技术;应急防控技术涵盖了化学通信机制的理解以开发新药剂和装备、物理消杀和智能防控产品的创新、生物防治资源的利用与产品创新、害虫致害性变异机制的研究以及植物抗性品种的可持续利用技术、害虫抗药性机制的研究与治理技术的开发,以及病虫害生态调控机理的研究与应用技术,旨在通过多学科交叉合作,实现对病虫害的有效控制,同时减少对环境的影响,促进农业的可持续发展。并探讨了病虫害预警与应急防控技术在农业领域的应用,分析了其在农业科技发展中的重要作用,并概括了各领域面临的挑战,例如无人机遥感监测技术精度不够,病虫害图像自动识别技术样本采集困难,化学防治未能实现精准施药,绿色制剂的生产工艺和市场化推广较为滞后以及病虫害预警系统的建设尚不完善等问题。未来,应加快物联网技术应用于病虫害预警,推动智慧农业与病虫害预警系统建设,研究无人机遥感监测技术、病虫害图像自动识别技术与化学防治技术生物防治技术。

关键词:病虫害预警;应急防控;物理防治;抗药性机制;生态调控策略;植物保护

中图分类号:S43 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2025)01-0025-16

李董, 汤启国, 王红波, 邱威, 熊炜. 农作物重大病虫害预警与应急防控技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2025, 6(1): 25—40

LI Dong, TANG Qiguo, WANG Hongbo, QIU Wei, XIONG Wei. Current status and trends of research on early warning and emergency control technology for major crop pests and diseases [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(1): 25—40

0 引言

随着农田保护工作的持续推进,农业生产力和发展水平不断提升,但重大病虫害问题却依旧突出。我国重大病虫害具有发生频率高、持续周期长的特点,直接对农林业造成巨大经济损失,同时也间接影响食品安全。

近年来,锈病、赤霉病、棉铃虫、水稻纹枯病等病虫害的重发风险较高,其危害和规模均较大。农业农村部于2024年3月印发了《2024年"虫口夺粮"保丰收行动方案》,旨在科学有效地防控农作物病虫害,提高作物单产水平,保障种植业稳产丰收。该方案指出,2024年,我国小麦、水稻、玉米和马铃薯等主要粮食作物,以及油料和蔬菜作物面临22种重大病虫害的严峻挑战,预计受影响面积将达到155 411 khm^{2}次,较2023年和2018至2022年的平均水平分别增长26.2%和18.4%。这些病虫害对超过70%的农作物种植区域构成威胁,可能导致的产量损失超过1.5×10^{11} t[1]。因此,建立和完善有效的重大病虫害预警与应急防控机制势在必行。农作物病虫害预警技术是指在病虫害发生之前,通过分析环境、作物等因素,预测病虫害发生的风险[2]。农作物病虫害防控主要包括物理防治、化学防治和生物防治等手段。随着物联网技术、遥感技术和计算机识别等技术的发展,农作物病虫害

收稿日期:2024-11-11 修回日期:2024-12-30
基金项目:农业农村部科技发展中心专业机构管理费(2069999);国家自然科学基金(32171905)
第一作者:李董,女,1992年生,北京人,硕士,农艺师;研究方向为农业科技管理。E-mail: lidongmoa@126.com
*通信作者:熊炜,男,1969年生,北京人,高级农艺师;研究方向为农业科技管理。E-mail: 1537233963@qq.com

预警技术以及防控手段的效率性、环保性和智能性显著提高。

本文通过阐述农作物重大病虫害预警与应急防控技术国内外研究现状,绘制病虫害预警以及应急防控的流程图,并分析重大病虫害预警与应急防控机制在农业中的应用,以及目前应用过程中存在的问题,进而为其未来发展方向提供进一步参考。

1 重大病虫害预警技术

现阶段,常规预警技术包括物联网技术、遥感技术和计算机视觉识别技术等。其中,物联网技术和遥感技术使用广泛,是重大病虫害预警领域的关键技术。

1.1 物联网技术

物联网起源于传媒领域,被视为信息科技产业的第三次革命。其关键技术如射频识别(RFID)、红外感应、全球定位系统(GPS)和激光扫描等,通过这些信息感知设备实现数据的收集与交换,为大数据和云计算提供了更广阔的数据存储与处理空间。随着5G技术的广泛部署,物联网的应用范围将进一步扩大,为产业发展带来新的动力。

近几年,物联网技术在我国受到高度重视,并逐渐成为我国农业技术领域的重要手段。国内科研机构、教育机构以及农业技术公司正在积极探索物联网技术在病虫害监测和预警领域的应用,如图1所示,并已在实时视频监测病虫害、自动检测害虫性诱以及气候模拟实时监测等方面取得了积极成果。随着物联网技术的持续发展和应用,预计我国在重大病虫害预警方面的水平将不断提升。



图1 重大病虫害预警互联网技术在农业的应用

Figure 1 Internet technology for early warning of major pests and diseases

1.1.1 视频远程实时监控

为了减轻害虫测报人员频繁实地考察的负担,农业保护系统和相关科技企业开发了病虫害实时监控设备和应用系统。这些技术采用高清红外摄像头远程传输图像,通过无线网络实现图像传输,使得病虫害能够被远程实时监控。农业保护人员可以通过移动设备或电脑客户端随时查看田间病虫害情况,并迅速制定相应的防治策略。

2006年,河南佳多科工贸股份有限公司开发了一种农林病虫害监测的远程实时监控系统。该系统整合了田间小气候信息采集、虫情测报灯、病虫调查统计器和光电数码显微成像技术,创建了多个可视化监测通道,以实现对作物生长状况、病虫害发展和环境因素的实时监控[4]。2012年,徐健宁等[5]深入探讨了视频远程监控系统的构造和功能,并介绍了该系统在东莞市的具体应用情况。2020年,范俊珺等[6]对视频远程实时监控系统进行了系统性的测试,结果表明数据的准确吻合度与实际接近,效果良好。

1.1.2 害虫性诱自动监测

害虫监测是一项既耗时又费力的劳动密集型工作。因此,实现害虫的自动识别和统计分析是植物保护领域面临的一项重要任务。随着物联网技术的进步,市场上出现了多种监测系统。这些系统主要通过在田间设置各类诱捕装置,利用信息素等性诱技术来捕获害虫。一旦害虫触发诱捕装置,传感器便会自动进行计数,并将数据通过服务器传输到监测人员的移动设备或电脑上,实现害虫的远程监测和数据的自动收集。

2017年,彭卫兵等[7]利用害虫性诱自动检测技术对斜纹夜蛾进行田间动态监测,结果表明该技术的捕虫效果优于自动虫情测报灯和普通性诱捕器。2019年,许秀琴等[8]通过使用害虫远程实时监测系统进行了田间试验,也证明了害虫性诱自动监测技术的捕虫效果优于普通性诱捕器,且数据监测的准确性、自动化程度较高。

1.1.3 气候模拟实时监测

自2008年起,全国农业技术推广服务中心与重庆市联合开发了马铃薯晚疫病的实时监测和预警系统。该系统融合了气象田间采集装置,依托物联网技术,实现了对田间病虫害情况的实时数据收集。通过构建病虫害气候模拟模型,该系统能够对病虫害进行预警监测。系统依托GIS地图分析病原特征,为病虫害的防控提供了科学依据。

1.1.4 病虫害视频诊断与会商

昆虫种类繁多,农民和植保人员在田间作业时,如果遇到一些无法识别的病虫害,可以通过视频诊断和会商来获取专家的帮助。目前,美国已经建立了全面

的国家植物诊断网络和远程视频会诊系统，而中国在病虫害的视频诊断和远程会诊方面还相对较弱，缺乏实质性的进展。因此，迫切需要加强农作物病虫害远程视频诊断技术的研究。

1.2　遥感技术

遥感技术发展于20世纪60年代，该技术将传感器搭载至无人机、气球等平台上，基于电磁波理论接收和处理远距离目标辐射和反射的电磁波信息。这项技术能够全面监控农作物的生长状况和发展趋势，通过对收集到的数据进行深入分析，以识别农作物可能遭受的病虫害类型。此外，借助全球定位系统（GPS）和地理信息系统（GIS），遥感技术可以实时、迅速地获取地面数据，并进行定位、空间分析、趋势预测和空间查询等操作[9]，从而推动病虫害监测和预报的发展，为大范围病虫害的动态监测奠定了基础。

害虫对作物内部结构和生长状态的破坏会干扰叶绿素的合成，改变植物的外观特征，并引起反射光谱的变化。技术人员利用遥感技术获取农作物图像，分析各区域作物的生长状态，并根据叶片的脱落或损坏程度判断病虫害的种类和危害程度，从而制定相应的预警和应急防控措施[8]。在遥感技术的长期发展过程中，无人机遥感技术、高光谱遥感技术和雷达遥感技术等取得显著进展，并获得了广泛应用，其技术分类如图2所示。



图2　重大病虫害预警遥感技术

Figure 2　Remote sensing technology for early warning of major pests and diseases

1.2.1　无人机遥感技术

无人机遥感技术是指利用无人机通过航拍而获得农林业资源影像，能够在短时间内获取丰富的空间遥感信息。无人机的飞行高度较低，获得的遥感影像分辨率优于传统的卫星遥感，精度可达厘米级。此外，处理系统能够在短时间内对采集的数字高程模型及数据进行快速处理。同时，全球定位系统（GPS）实时显示无人机的航拍情况，技术人员可结合相关信息对数据进行高效处理，将其转换为DEM、DOM等数据[11]。无人机遥感技术凭借其便捷性、机动性和活性等独特优势，获得了各领域学者的广泛关注，相关研究也日益丰富。

无人机于20世纪初在英国问世，并逐渐进入人们的视野。自20世纪30年代起，一些发达国家已开始利用无人机遥感技术来监测森林病虫害，以此评估森林资源的状况及病虫害的损害程度。相较于其他国家，我国在无人机遥感技术的应用上起步较晚。直至1958年，西北工业大学着手开展相关研究，并成功开发了我国首套无人机系统。进入20世纪末期，中国在无人机低空航测技术方面取得了一定进展。2003年，国内成功研发了UAVRS-Ⅱ型无人机遥感监测飞机及其配套系统，这标志着我国已具备独立开发无人机遥感系统的能力[12]。

目前，以美国、中国和西班牙为代表的国家在病虫害监测领域的研究成果占据了全球的一半以上。同时，加拿大、澳大利亚等国家在该领域也取得了一定的进展[13]。无人机遥感技术已经在全球众多国家和地区得到了广泛应用。

目前，无人机遥感监测作物病虫害的成像方式有5种，分别为无人机多光谱遥感影像、无人机高光谱遥感影像、无人可见光影像、红外热成像仪和激光雷达。无人机多光谱遥感影像技术涉及使用两个或更多波谱通道的传感器来同步捕捉地物图像，将目标物体的信息分解成不同光谱波段的图像，并从中提取光谱数据。

无人机高光谱遥感影像的成像原理与多光谱类似，监测对象主要集中在小麦、油菜、棉花、柑橘等作物。无人机搭载的可见光相机主要涵盖红色、蓝色和绿色3个光谱带，主要依赖于数字成像技术和RGB传感器。通过在不同的飞行高度和区域采集光谱信息，再结合影像的色彩和纹理特征，从而实现对病虫害的识别。

红外热成像遥感是指通过温度差异来监测病虫害，该技术因受气象环境的影响较大，导致其在病虫害监测领域的研究较少，国内外通常利用植株健康区与患病区的温度差异来进行监测分类。无人机搭载的激光雷达可提取作物的水平和垂直方向冠层信息，但受限于成本和算法，目前在病虫害监测领域应用较少，多数技术目前尚处于研究阶段。无人机遥感技术成像的方式研究成果如表1所示。

综上，包括美国、中国和西班牙在内的国家在无人机遥感监测技术方面采用了相似的光谱成像技术。尽管在某些情况下，在柑橘病虫害监测过程中，虽然存在

分类错误的情况[16],但总体监测结果与实际相符,达到 了预期的监测效果。

表 1 无人机遥感技术成像方式研究成果

Table 1 Research results of UAV remote sensing technology imaging method

作者	研究内容	成像方式
BACKOULOU 等[14]	不同的空间和时间维度利用多光谱技术成功识别了棉花枯萎病的病虫害胁迫区域	无人机多光谱遥感影像
赵晓阳等[15]	开发了一种对水稻病虫害发生动态进行有效监测的敏感性植被指数。	无人机多光谱遥感影像
兰玉彬等[16]	对健康和患黄龙病柑橘植株进行了建模和分类	无人机高光谱遥感影像
HUANG 等[17]	对小麦健康区和患叶斑病感染区进行了准确的区分	无人机高光谱遥感影像
刘伟等[18]	进行了可见光色彩特征参数与病情指数的相关性分析,综合光谱信息预测小麦白粉病发生	无人机可见光影像
王震等[19]	对水稻病虫害进行了分析验证	无人机可见光影像
SCHMITZ 等[20]	对健康甜菜和患线虫的甜菜进行了分类	红外热成像遥感
刘飞等[21]	提高了病虫害监测的准确性	红外热成像遥感
吴惠英等[22]	研发了农作物病虫害检测系统	激光雷达

1.2.2 高光谱遥感技术

高光谱遥感技术是指利用窄电磁波段,记录不同波长的光谱,并将其转化为数值形式,通过检测患病植株的光谱信号而掌握病虫害发展的危害程度。本质上,高光谱遥感技术融合了计算机技术和信息处理技术,是一种跨学科的综合技术。它不仅能够在特定领域实现目标的定性和定量监测,也是成像与光谱分析技术相结合的产物。

相较于传统的人工取样和调查的监测预报手段,高光谱遥感技术可以在较大的范围内,以较短探测周期和较低探测成本,探测更广区域,获得更丰富的监测资料。因此,作为遥感领域的新兴技术,高光谱遥感在近几十年来取得了显著进步,其应用广泛、成效显著。

1983 年,世界上第一台航空成像光谱仪在美国诞生;1999 年,美国地球观测计划 EOS 的中分辨率成像光谱仪 MODIS、2001 年欧洲卫星 PROBA 的紧凑型高分辨率成像光谱仪 CHRIS 以及 2022 年欧洲环境卫星 ENVISAT 的中分辨率成像频谱仪 MERIS 的相继升空,标志着航天高光谱时代的到来。

国内也紧随其后,20 世纪 80 年代,在国家科技攻关项目和 863 计划等政策的支持下,我国开展了高光谱成像技术的独立发展计划。80 年代中期,我国成功研发了紫外光谱仪和超声波测厚仪。随后又在此基础上研发了新型模块化航空成像光谱仪(MAIS)。当前,我国最先进的高光谱探测卫星“高分五号”在高光谱分辨率方面表现卓越,多项技术参数已达到国际先进水平。

近年来,高光谱遥感技术在病虫害监测领域的研究主要集中于小麦、水稻、玉米、棉花等作物上。以下以小麦和水稻为例,介绍此技术的研究现状。在小麦的病虫害监测中,小麦锈病和白粉病的研究较多。蒋金豹等[23]通过人工田间诱发不同等级条锈病,分析不同生长阶段且受不同程度病害影响的冬小麦冠层光谱和病情指数,经过平滑处理和一阶微分值计算,我们建立了一种区分健康小麦和受病害影响小麦的方法,为相关研究提供了技术基础。SINGH 等[24]采用了近红外光谱成像技术,开发了一种区分健康小麦与受病虫害影响小麦的方法。通过确定最优的研究波段,并结合直方图分析进行线性判别,该方法的识别准确度超过了 85%。CHANDRA 等[25]使用近红外高光谱成像技术监测虫害,在 900~1 700 nm 的波段范围内,通过近红外光谱成像技术对受米香虫和甲虫侵害的小麦进行了光谱图像采集。经过统计分析和聚类处理,研究显示健康小麦的识别准确度高达 96%,而虫害小麦的识别准确度也达到了 91%。在水稻的病虫害监测中,稻瘟病是主要病害之一。

在稻瘟病监测领域,高光谱遥感技术主要应用于稻苗瘟和叶瘟的监测[26-27]。郑志雄等[28]开发了一种基于高光谱成像技术的水稻叶瘟病病害程度分级新方法,试验结果表明,分级准确率达 96.4%,为稻叶瘟病田间病害程度提供了技术基础,并为抗病提供了新思路。刘占宇等[29]通过对浙江省和黑龙江省五种水稻病虫害的观测,运用多种技术手段,成功构建了病虫害胁迫指数,并深入探究了水稻病虫害的危害等级分类、色素含量、病害严重度指数和虫情指数等关键指标的估

算方法。

1.2.3　雷达遥感技术

雷达遥感技术主要通过发射电磁波监测虫害。当电磁波遇到大量害虫时，会产生大量回波信号，利用采集分析系统对图像和参数进行自动化处理和识别，从而获取昆虫的各种数据信息，并确定其种类和位置。脉冲雷达技术在农作物监测领域被细分为多种类型，包括扫描雷达、跟踪雷达、谐波雷达以及机载雷达等，以适应不同的监测需求，这些雷达可全面监测害虫的种类和行为，如迁徙和飞行等，从而提高虫害监测的准确性[31]。

国外对雷达技术的研究较早。1949年，美国证明了使用雷达监测设备可以监测昆虫的动态[32]。1954年，英国首次运用雷达监测到蝗群。随后，加拿大、澳大利亚等国也开始使用雷达监测技术[33]。目前，国外已对迁飞性鳞翅目昆虫、澳大利亚疫蝗和Helicoverpa punctigera虫源区迁飞活动进行了连续性监测[34]。我国在雷达遥感监测方面起步较晚。1984年，我国首次使用雷达技术对草地螟进行了监测，随后对粘虫（*Pseudalatia unipuncta*）、甜菜叶蛾（*Spodoptera exigua*）和棉铃虫（*Helicoverpa armigera*）等进行了研究，包括害虫的分布区和发生量等。2012年，杨秀好等[35]应用雷达遥感技术，通过构建二维和三维影像，获得了土栖白蚁的影像特征，综合误差率为1.93%。2015年，王松寒等[36]详细介绍了雷达遥感技术在水稻监测和识别中的应用情况。

1.3　计算机视觉识别

农作物病虫害识别的方法主要存在3种典型类别：人工识别、仪器鉴定[37]、基于模式识别和机器学习的先进识别方法[38]。其中依托计算机视觉的识别技术，凭借其在运行时速度更快、精度更高、稳定性更好的显著优势，已成功成为了智能农业领域最具广阔潜力的有害生物识别方法[38]。

基于计算机视觉识别的病虫害监测技术，充分结合了图像识别、统计机器学习、深度学习等[39]前沿人工智能技术，能精准地对农作物有害生物进行监测和分类。该技术具有精度高、实时性好、无损等显著优点，可为生物防治提供强大且可靠的技术保障[38]。目前该技术已逐步成为辅助农业安全预警的关键技术和相关领域的重点研究热点，对大力发展智慧农业和实现重大病虫害预警具有至关重要的意义。表2列举了常用的计算机视觉识别方法。

表2　计算机视觉识别的方法

Table 2　The method of computer vision recognition

方法		特点
机器学习	基于支持向量机的方法	小样本病虫害图像数据有良好泛化能力，但很难应对数据量较大的样本
	基于决策树的方法	便于理解和解释，但易产生过拟合问题
	基于反向传播神经网络的方法	能获得良好的检测准确率，但过度依赖人工设计特征提取器
	基于聚类的方法	原理简单，效率高，但很难识别多类别病虫害
	基于连通域分析的方法	原理简单，效率高，但多数只能用于分类计数
深度学习	两阶段方法（R-CNN、Fast-CNN、Faster-CNN等）	计算精度较高，计算成本较高
	单阶段方法（YOLO、SSD等）	运行速度快，可以实时监测，检测精度较低

国外在利用计算机视觉技术进行农作物监测与识别的研究起步较早，例如在1985年，已有研究者深入研究了谷物籽粒形态识别。

随着数字图像处理和模式识别技术的不断进步，计算机视觉在农作物病虫害监测与识别研究中得到了广泛应用。自1985年起，学者们就开始深入研究谷物籽粒形态识别。KEAGY、ZAYAS、CHRISTOPHER等[40-43]在基于计算机视觉的储量害虫智能识别领域取得了显著成果，实现了高识别率。

安冈善文等[44]针对受有害气体影响的农作物叶片进行了红外图像识别研究，结果表明红外图像能清晰揭示受污染区域，进而提出了一种基于此技术的农作物病虫害识别方法。WANG等[45]提出了一种结合注意力机制与残差网络的作物有害生物监测采样平衡区域建议网络（S-RPN），其平均召回率优于多盒检测器和retanet等方法。TASSIS等[46]结合实例和语义分割，将多个卷积神经网络集成应用于咖啡作物害虫自动监测中。

国内对计算机视觉识别技术的应用较晚，早期应用仅限于实验室阶段。随着计算机技术的发展，计算机视觉识别技术在智慧农业领域的应用越来越广泛。应义斌等[47]提出了使用红、蓝、绿色彩分量检测黄花梨

坏损区和非坏损区的突变可疑点,并通过试验证明了算法的准确性。柴阿丽等[48]通过计算机视觉、图像处理和模式识别技术,研究并开发了一种自动识别四种番茄叶部病虫害的方法,并建立了一套室内图像采集处理系统。孙云云等[49]采用卷积神经网络,针对小样本茶树病害图像识别问题,通过图像预处理和AlexNet模型的训练,实现了超过85%的准确识别率[50]。

2 重大病虫害应急防控技术

目前,在重大病虫害应急防控领域常用的有7种技术,主要包括:化学通信机制与新药剂研发、物理消杀与智能防控新产品、生物防治资源利用与产品创新、致害性变异机制与植物抗性品种可持续利用技术、害虫抗药性机制与治理技术、病虫害生态调控机理与应用技术、农产品农药残留与生物毒素风险评估和快速检测技术。以下将依次介绍这7种技术的研究与应用现状。

2.1 化学通信机制与新药剂、新装备研发

化学防治涉及应用化学农药、天然来源的农药或合成的天然模拟物来控制农业中的病虫害。我国在农药剂型、施用技术以及害虫抗药性等方面进行了大量研究。在水稻褐飞虱、棉铃虫、瓜—棉蚜、小菜蛾、桃蚜、烟粉虱、温室白粉虱、麦蚜等[51-61]害虫的抗药性机理、抗药性基因检测技术及管理策略研究方面,已经取得了明显的成效。

然而,就当下情况而言,目前我国的化学防治仍然以跟踪研究为主,在新型杀虫剂的研发、新药剂毒理机制研究、抗药性基因异源表达、功能鉴定及调控等方面与国外尚有较大差距。因此,我国仍需在化学防治领域加大投入,增加基础研究资金支持,并增设相关领域的重点实验室或研究中心,为化学防治提供更好的研究环境。

农药施用装备是化学防治的关键手段。不同的作业环境和作物种类需要配备相应的装备。如图3所示众多科研机构已针对大田、果园、温室等不同作业场景研发了多种喷雾装备。此外,表3也列举了一些喷雾装备的最新研究成果。



(a) 果园喷雾机 (b) 大田喷杆喷雾机 (c) 温室喷雾机

图3 喷雾机

Figure 3 Spray machine

表3 喷雾装备

Table 3 Spray equipment

环境	喷雾装备	特点	研发单位
果园	融合冠层健康与体积信息的梨树风送式智能施药装备[62]	实时探测病害和冠层体积进行变量施药	南京农业大学 2024
	低矮果园环流式循环风送喷雾机[63]	利用循环气流提高雾滴在果树冠层中的覆盖率	南京农业大学 2021
	丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机[64]	探测追踪靶标喷雾	中国农业大学 2023
	基于LiDAR的果园对靶变量喷药喷雾机[65]	根据果树冠层体积进行变量施药	西北农林科技大学 2022
大田	电涡流空气辅助喷雾机[66]	利用涡流改善水稻中下方雾滴沉积	南京农业大学 2022
	基于机器视觉和北斗定位的小麦变量喷雾机[67]	基于速度和植株密度进行变量施药	中国农业大学 2022
	大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统[68]	甘蓝作物行识别并对行喷雾	新疆农业大学 2022
温室	温室风幕式施药装置[69]	风幕出风口	南京农业大学 2023
	连栋温室分段变距喷雾机器人[70]	实现了无人化作业和提高作业精度	山东农业大学 2024

2.2 物理消杀与智能防控新产品

物理防治是指利用简单工具和各种物理因素,如光、热、电、温度、湿度、放射能和声波等防治病虫害。目前,我国在昆虫趋光机理研究[71]、昆虫辐射不育机理

研究等基础理论研究领域已取得显著突破。物理防治技术示意如图 4 所示，在灯光诱控技术、色板诱控技术、物理阻隔技术、温度控制技术、辐照不育技术等[72-77]研究和应用已经取得了全面的进展。

除了传统技术外，多种物理防控虫害的方法正在被探索和推广，例如真空或高压灭虫、高能灭虫、远红外辐射和微波辐射灭虫等技术。随着现代农业技术的持续进步，物理灭虫技术的应用前景日益广阔。物理防控领域正聚焦于为重大病虫害定制光谱配方，开发对天敌无害的灯光和色诱产品，研究病虫害的辐射不育技术，并开发农林草关键病虫害的遥感监测、图像智能采集、识别和传输技术，以及基于 5G 的智能化监测预警和防控设备。



图 4　物理防治技术示意图

Figure 4　Schematic diagram of physical control techniques

2.3　生物防治资源利用与产品创新

生物防治是指利用自然生物圈种农作物与病虫害存在的寄生、共生、捕食等关系，逐渐降低害虫活动范围，从而减少对农作物伤害的一种防治方式[78]。由于生物防治能够在不破坏种植环境并保持生态平衡的前提下解决病虫害的抗药性问题，并实现农作物的高质量生产，现已成为国际农业病虫害研究的热点。

当前，生物防控策略主要涵盖 3 大技术领域：微生物防控、寄生性生物防控以及捕食性天敌防控。在农业科研领域，人们也在致力于培育具有抗病虫害特性的作物品种，例如抗青枯病的马铃薯[79]、抗镰刀菌枯萎病的玉米[80]、抗花叶病的甘蔗[81]等，这些研究均取得了积极的成果[82]。

2.4　致害性变异机制与植物抗性品种可持续利用技术

研发植物抗性作物品种旨在控制病害虫侵害、保障粮食产量。然而在推广应用过程中，害虫的变异能够克服作物的抗性，使得它们对作物的破坏能力逐渐增强，导致抗虫品种的有效期限缩短。现阶段，致害性的适应机制研究分为 2 类：主动适应机制和被动适应机制[83]，防治机制如图 5 所示。

在主动适应机制方面，YE 等[84]研究发现，褐飞虱唾液中存在一种名为 NISEFI 的钙离子结合蛋白，这种蛋白能够引发水稻体内钙离子（Ca^{2+}）和过氧化氢（H_2O_2）水平的升高，触发水稻的主动防御反应，有效降低褐飞虱的生存率。在被动适应机制方面，郑瑜等[85]从褐飞虱的中肠转录组数据中筛选出了一批与消化和解毒功能相关的基因，其中 18 个关键的差异表达基因被成功克隆。

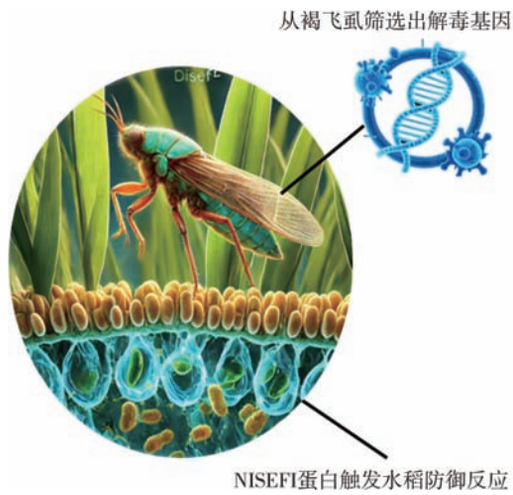


图 5　主动与被动防御机制

Figure 5　Active and passive defense mechanisms

在植物抗虫性机制方面，目前分为抗虫性、耐害性和抗生性 3 大类型，这种分类方式得到了国际学者的普遍认可[86]。在抗虫性方面，由于抗虫作物具有特殊株型、颜色等特点，如豆荚无毛的大豆品种抗食心虫，因此避免或减轻了虫害。在耐害性方面，当部分作物遭受相对范围密度内的虫害后，仍可避免大规模减产，如部分禾谷类作物遭受病虫害后不会显著影响其产量。在抗生性方面，当害虫食用抗生性作物后，其发育速度、存活率、繁殖率等均受不良影响，如水稻植株中的水杨酸和苯甲酸对二化螟幼虫有生长抑制作用[87]。

近年来，在国内外科学家的共同努力下，植物抗性品种研究逐渐深入，在转基因抗虫育种[88-89]、分子标记辅助育种[90-91]等方面进步明显，有效提高了作物的抗虫能力。但随着抗性品种培育工作的深入，害虫不定向持续变异、抗虫品种抗源单一、遗传多样性差等挑战依然严峻。

因此，必须加强对抗虫资源的搜集与开发，评估抗病虫主效基因和品种的时效性与空间有效性，并构建可持续利用抗性基因或品种的技术体系。

2.5　害虫抗药性机制与治理技术

随着杀虫剂的持续和广泛使用，害虫对这些化学品的敏感度下降，导致抗药性的形成。克服害虫抗药性已成为病虫害综合治理的重要挑战之一。近年来，

基因组测序和遗传操作技术的进步已经推动了昆虫抗药性研究的深入,研究已经深入到细胞和分子层面,这为管理害虫抗性提供了科学基础[92]。

当前,害虫对杀虫剂的抗性主要体现在3个关键方面:靶标不敏感性、代谢抗性以及穿透性降低[93]。靶标抗性通常指的是害虫体内的靶标分子发生突变或表达水平变化,导致其与杀虫剂的结合力下降,进而引起抗性。BLACKHALL等[94]研究发现,线虫的受体基因发生变异,或者离子通道配体结合域中的氨基酸序列发生缺失,可能会导致受体结构的变异,进而减少对阿维菌素的敏感度。代谢抗性是指昆虫体内解毒酶等酯酶的表达或活性增强,从而提高其对杀虫剂的分解能力。LU等[95]在对褐飞虱抗药性基因的研究中发现,羧酸酯酶在某些害虫的抗药性品系中表达量较高,通过RNA干扰(RNAi)技术抑制这些基因的表达后,能显著增加害虫对特定杀虫剂如CPF的敏感性。穿透抗性涉及昆虫体内渗透屏障的结构和成分变化,这些变化能够减少杀虫剂在昆虫体内的渗透和残留,从而降低杀虫剂的体内浓度,减轻解毒系统的压力。CHEN等[96]通过药物压力法筛选得到的果蝇ABM抗性品系中,观察到抗性品系的幼虫体壁厚度较敏感品系增加了1倍,同时几丁质层厚度也增加了2~3倍。

基因组学的显著进步使我们能够从分子和蛋白质层面,更加深入地揭示病虫害抗药性的分子机制,明确害虫抗药性的发展及其多重抗药性的形成机制。并利用基因手段或抑制剂精准调控上述3种抗性机制的关键步骤,可能会成为未来控制杀虫剂抗性的新策略。这将有助于从多基因间的相互作用去理解昆虫抗药性的进化,对新型抗药剂的研发和有效防控害虫具有重要指导意义。

2.6 病虫害生态调控机理与应用技术

农作物病虫害的生态调控是1种以整个生态系统或区域生态系统为基础的复杂系统工程。它依赖于生物链中各环节的相互制衡,综合运用生物防治、造林技术、抗性品种选育以及天敌动态监控等多种手段,目标是将害虫种群数量维持在安全阈值以下[97]。害虫防治的根本目的是将害虫种群的数量控制在生态系统的可持续范围之内。当害虫数量处于合理区间时,可提高作物和林木的忍耐能力和补偿能力,同时,保持一定数量的天敌有助于维护生物多样性和生态平衡。

现阶段,病虫害的生态调控主要分为3种措施:改善耕作环境、改善农田生物结构和加强田间防控管理[98],病虫害的生态调控措施如图6所示。在改善耕作环境方面,针对化学肥料使用过度、有机质营养流失等问题,可采用修复农田的措施,为农作物生长提供优质的生长环境。在改善农田生物结构方面,可通过以虫治虫、以菌治虫、以鸟治虫、人工诱捕等生物和物理防治的方法,以较低成本和无污染的方式控制害虫数量。在加强田间管控方面,可适当改变耕作制度和方法,如深翻土壤、合理轮作等,进而抑制病虫害生长发育、降低病虫害发生概率[99]。

随着农业可持续发展的深入,只有持续深化对农作物病虫害成因、行为模式及田间生态系统变化规律的研究,并结合作物种植结构的优化和种植制度的改进,采取具有针对性的措施,才能达到最优的生态调控效果。



图6 病虫害的生态调控措施

Figure 6 Ecological control measures for pests and diseases

3 预警与防控集成应用与推广

重大病虫害预警与应急防控的集成应用与推广是一项复杂且系统性的工程,涵盖了从早期监测到应急响应的一系列关键环节。如图7所示流程,包括监测与数据收集、数据分析与预警模型的建立、预警信息的分级与发布、制定防控方案、执行通过这些科学方法和步骤,可以提前识别潜在的病虫害风险应急措施并进行有效预测,从而在病虫害发生时迅速采取应急防控措施,减少对农业生产的损害,保证农业生产的连续性和稳定性。

在技术方面,该系统整合了物联网、云计算和大数据分析等前沿技术,构建了全国农林草病虫害及其适生环境的数据库,能够实现病虫害的实时精准监测和早期预警。经过分析,系统可以实现动态的病虫害监控制,确保及时发布预警信息。同时,安装识别监测技术和绿色预警技术的研发,推动了农业病虫害全程绿色防控体系的建立和广泛应用,这不仅有效地提高了化学药剂的使用,还促进了可持续农业的转型发展。

此外,植物检疫管理办法的强化实施,进一步强化了对虫害疫情的处置和处置能力,优化了检疫流程,提升了监督检查力度。同时,激发科研团队的创新动力,促进了科研成果的转化和应用,为病虫害提供了强有

力的技术支撑和防控。这一系列举措的实施，保障了多层次、多领域的防控体系，从而有效应对病虫害的挑战。

然而，农民的病虫害防疫意识日益增强。针对这一问题，可以通过加大技术推广和培训力度，增强农民的防疫知识和反应应急能力，能够更加及时、科学地应对病虫害的威胁，从而实现病虫害的防控有效，农业生产的稳定性与安全性。除了技术方面的支持，政策的推动同样至关重要。政府应制定科学的支持政策，并提供必要的经济激励，如技术严重、保险补偿等，促进重大病虫害预警与应急技术防控的广泛应用和普及。

通过这些综合性措施，重大病虫害预警与应急集成应用与推广项目将全面有效提升农业病虫害管理的现代化水平，显著增强农业系统的抗灾减灾能力，为农业生产提供更高效、更精准、更智能的防控手段，也为保障国家粮食安全、促进农业可持续发展做出积极贡献。

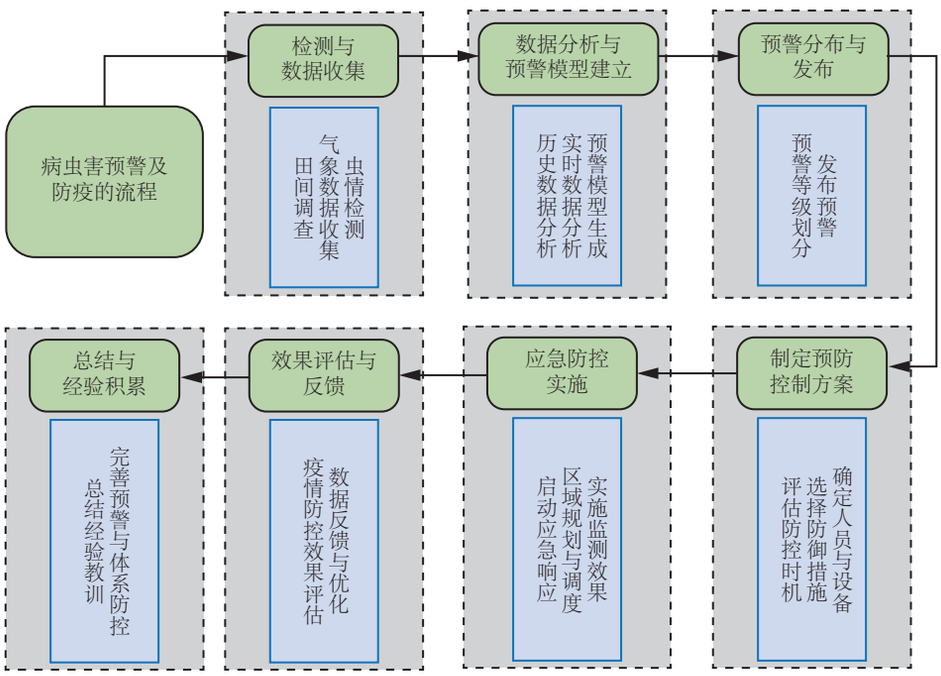


图 7　病虫害预警以及应急防控的流程图

Figure 7　Flowchart for pest and disease early warning and emergency control

4　总结与展望

随着农业部门各方面要求的不断提高，建立和完善重大病虫害预警与应急防控机制势在必行。研究从重大病虫害的研究背景入手，详细介绍了重大病虫害预警与应急防控机制的相关技术和国内外研究进展，并探讨了其在农业领域的应用，分析了其在农业科技发展中的重要作用，并概括了各领域面临的挑战、研究需求和发展方向。

1）物联网技术应用于病虫害预警。需要在基层植物保护和农业合作社中推广安装高清摄像头等物联网感应设备，特别是在基层和农业合作社。并提高病虫害监测和预警水平，弥补当前技术在基层应用中的不足，确保实时监控与预警。

2）无人机遥感监测技术。美国、中国和西班牙等国家已经采用了相似的光谱成像技术进行病虫害监测。我国技术存在分类错误的情况，虽然总体监测结果与实际相符，但仍受到气候和地理环境等因素的限制，影响了技术在农作物病虫害遥感预警中的广泛应用。未来要关注多遥感技术的数据采集与图像提取技术的提升。进一步解决遥感数据的降维、分类和分析问题。克服气候和地理环境的限制，提高遥感技术的稳定性和适应性。

3）病虫害图像自动识别技术，在农业领域具有重要意义。当前在病虫害图像自动识别技术的应用中，面临样本采集困难、分类精度不高等问题。实际应用中技术推广不足，识别精度和实用性尚未达到理想水平。未来需要持续加大对图像识别技术的研究投入；加强数据集建设和标准化，提高样本采集与图像识别的准确性；促进技术与农业生产的深度融合，使其在实际生产中发挥更大作用。

4）化学防治技术。当前化学防治技术仍主要依赖传统的农药施用方式，未能实现精准施药和环保化。未来需要加大对化学防治基础研究的投入，特别是对

新型农药的开发和精准施药技术的研究;增设相关领域的重点实验室或研究中心,为研究人员提供更好的科研环境和资源。

5)生物防治技术。生物防治技术仍面临天敌虫种选择、繁育技术等方面的挑战,且绿色制剂的生产工艺和市场化推广较为滞后。未来需要深化绿色、高效的生物制剂的研究,特别是在害虫天敌的培育和调控技术上取得突破;研究开发绿色剂型,使生物制剂成为主流的农作物病虫害防治手段。

6)智慧农业与病虫害预警系统建设。当前病虫害预警系统的建设尚不完善,缺乏有效的数据支持和系统整合能力。未来需要加强智慧农业的基础设施建设,推动信息化技术(如大数据、物联网、AI等)与农业生产的深度融合;推动病虫害预警体系的标准化建设,建立可操作的、可持续的智能防控平台。

在重大病虫害预警领域,除了加强物联网技术和无人机遥感技术的应用外,图像识别技术、生物防治技术和化学防治技术的研究也需要得到重视。当前面临的挑战主要体现在技术应用的推广、数据处理的精确度、实际生产中的适用性等方面。未来,需要多方面协同创新,并加强对基础研究的投入,以提升智慧农业和病虫害防控技术的整体水平。

参 考 文 献

[1] 刘杰,曾娟,黄冲,等. 2024年全国农作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊,2024,44(1):37-40.

[2] 李道亮,傅泽田,温继文,等. 农业病虫害远程诊断与预警技术[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

[3] 邢孔尧. 一种基于物联网的农作物病虫害监测装置[J]. 智慧农业导刊,2022,2(15):1-3.

[4] 黄冲,刘万才. 试论物联网技术在农作物重大病虫害监测预警中的应用前景[J]. 中国植保导刊,2015,35(10):55-60.

[5] 徐健宁,郑业鲁,罗卫强,等. 远程视频监控在农产品质量安全追溯系统中的应用研究[J]. 农业网络信息,2012,192(6):5-8.
XU Jianning, ZHENG Yelu, LUO Weiqiang, et al. Application of remote video monitoring in agricultural products quality traceability system [J]. Agriculture Network Information, 2012, 192(6): 5-8.

[6] 范俊珺,黄奎,陆玉,等. 物联网技术在农作物重大病虫害监测与预警领域的应用[J]. 云南农业科技,2020,314(4):47-49.

[7] 彭卫兵,高宗仙. 性诱害虫远程实时监测系统在蔬菜斜纹夜蛾监测中的应用效果研究[J]. 现代农业科技,2017,696(10):106-107,109.

[8] 许秀琴,刘媛,陆明红,等. 害虫远程实时监测系统在棉铃虫性诱监测上的应用初报[J]. 宁夏农林科技,2019,60(3):37-38.
XU Xiuqin, LIU Yuan, LU Minghong, et al. Application of pest remote real-time monitoring system for attractiveness of cotton bollworm [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2019, 60(3): 37-38.

[9] 崔亚琴. 遥感技术在森林病虫害监测研究中的应用[J]. 山西林业科技,2018,47(4):25-28.
CUI Yaqin. Application of remote sensing technology in monitoring of forest diseases and pests [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2018, 47(4): 25-28.

[10] 何芳. 遥感技术在农作物病虫害预警监测中的应用[J]. 南方农机,2022,53(4):50-52.

[11] 罗顶胜. 林业资源调查中无人机遥感技术的应用[J]. 南方农业,2021,15(12):134-135.

[12] 隆琅. 无人机遥感技术在森林病虫害监测的应用[J]. 广西农业机械化,2023,239(1):48-50.

[13] 宋勇,陈兵,王琼,等. 无人机遥感监测作物病虫害研究进展[J]. 棉花学报,2021,33(3):291-306.
SONG Yong, CHEN Bing, WANG Qiong, et al. Research advances of crop diseases and insect pests monitoring by unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. Cotton Science, 2021, 33(3): 291-306.

[14] BACKOULOU G F, ELLIOTT N C, GILES K, et al. Spatially discriminating Russian wheat aphid induced plant stress from other wheat stressing factors [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 123-129.

[15] 赵晓阳,张建,张东彦,等. 低空遥感平台下可见光与多光谱传感器在水稻纹枯病病害评估中的效果对比研究[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(4):1192-1198.
ZHAO Xiaoyang, ZHANG Jian, ZHANG Dongyan, et al. Comparison between the effects of visible light and multispectral sensor based on low-altitude remote sensing platform in the evaluation of rice sheath blight [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1192-1198.

[16] 兰玉彬,朱梓豪,邓小玲,等. 基于无人机高光谱遥感的柑橘黄龙病植株的监测与分类[J]. 农业工程学报,2019,35(3):92-100.
LAN Yubin, ZHU Zihao, DENG Xiaoling, et al. Monitoring and classification of citrus Huanglongbing based on UAV hyperspectral remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 92-100.

[17] HUANG H S, DENG J Z, LAN Y B, et al. Detection of Helminthosporium leaf blotch disease based on UAV imagery [J]. Applied Sciences, 2019, 9(3): 558.

[18] 刘伟. 小麦白粉病的遥感监测及空气中病菌孢子的时空动态研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2014.

LIU Wei. Monitoring of wheat powdery mildew by using remote sensing and spatiotemporal dynamics of airborne conidia of *blumeria graminis f.* sp. *tritici* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014.

[19] 王震，褚桂坤，张宏建，等．基于无人机可见光图像Haar-like特征的水稻病害白穗识别[J]．农业工程学报，2018，34(20)：73－82.
WANG Zhen, CHU Guikun, ZHANG Hongjian, et al. Identification of diseased empty rice panicles based on Haar-like feature of UAV optical image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 73－82.

[20] SCHMITZ A, KIEWNICK S, SCHLANG J, et al. Use of high resolution digital thermography to detect Heterodera schachtii infestation in sugar beets [J]. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, 2004, 69(3): 359－363.

[21] 刘飞，曹峰，孔汶汶，等．一种基于无人机多源图像融合的作物病害监测方法和系统[P]．中国专利：CN108346143A，2018－07－31

[22] 吴惠英，周彬，陆军，等．一种基于无人机的农作物病虫害监测系统和方法[P]．中国专利：CN104035412A，2014－09－10.

[23] 蒋金豹，陈云浩，黄文江．利用高光谱红边与黄边位置距离识别小麦条锈病[J]．光谱学与光谱分析，2010，30(6)：1614－1618.
JIANG Jinbao, CHEN Yunhao, HUANG Wenjiang. Using the distance between hyperspectral red edge position and yellow edge position to identify wheat yellow rust disease [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1614－1618.

[24] SINGH C B, JAYAS D S, PALIWAL J, et al. Detection of insect-damaged wheat kernels using near-infrared hyperspectral imaging [J]. Journal of Stored Products, 2009, 45(3): 151－162.

[25] CHANDRA B S, DIGVIR S J, JITENDRA P. Identification of insect-damaged wheat kernels using short-wave near-infrared hyperspectral and digital colour imaging [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 73(2): 115－130.

[26] 齐龙，马旭，梁柏，等．稻瘟病监测预测方法研究现状及流行风险评估体系构建初探[J]．中国农学通报，2011，27(33)：213－216.
QI Long, MA Xu, LIANG Bai, et al. Research on present status of rice blast monitoring and prediction methods and preliminary establishment of disease epidemic risk assessment system [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(33): 213－216.

[27] 冯雷，柴荣耀，孙光明，等．基于多光谱成像技术的水稻叶瘟检测分级方法研究[J]．光谱学与光谱分析，2009，29(10)：2730－2733.
FENG Lei, CHAI Rongyao, SUN Guangming, et al. Identification and classification of rice leaf blast based on multi-spectral imaging sensor [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(10): 2730－2733.

[28] 郑志雄，齐龙，马旭，等．基于高光谱成像技术的水稻叶瘟病病害程度分级方法[J]．农业工程学报，2013，29(19)：138－144.
ZHENG Zhixiong, QI Long, MA Xu, et al. Grading method of rice leaf blast using hyperspectral imaging technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(19): 138－144.

[29] 刘占宇．水稻主要病虫害胁迫遥感监测研究[D]．杭州：浙江大学，2008.
LIU Zhanyu. Monitoring the rice disease and insect stress with remote sensing [D]. Hangzhou: Zhejiang Univeisity, 2008.

[30] 李玮．农业病虫害监测中高光谱遥感技术应用研究进展[J]．现代农业科技，2019，748(14)：126－128.
LI Wei. Research progress on application of hyperspectral remote sensing technology in pest and disease monitoring [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 748(14): 126－128.

[31] 何芳．遥感技术在农作物病虫害预警监测中的应用[J]．南方农机，2022，53(4)：50－52.

[32] 翟保平．追踪天使——雷达昆虫学30年[J]．昆虫学报，1999(3)：315－326.
ZHAI Baoping. Tracking angels: 30 years of radar entomology [J]. Acta Entomologica Sinica, 1999(03): 315－326.

[33] 崔亚琴．遥感技术在森林病虫害监测研究中的应用[J]．山西林业科技，2018，47(4)：25－28.
CUI Yaqin. Application of remote sensing technology in monitoring of forest diseases and pests [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2018, 47(4): 25－28.

[34] DRAKE A. Automatically operating radars for monitoring insect pest migrations [J]. Entomologia Sinica, 2002, 9(4): 27－45.

[35] 杨秀好，骆有庆，GREGG Henderson，等．基于雷达遥感技术的土栖白蚁探测[J]．林业科学，2012，48(1)：115－120.
YANG Xiuhao, LUO Youqing, GREGG Henderson, et al. Subterranean termite detection with a ground penetrating radar technique [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(1): 115－120.

[36] 王松寒，何隆华．雷达遥感技术在水稻识别中的研究进展[J]．遥感信息，2015，30(2)：3－9.
WANG Songhan, HE Longhua. Advances of rice recognition by SAR [J]. Remote Sensing Information,

2015, 30(2): 3－9.

[37] TAMMY S, BOGGESS S, DENITA H, et al. Conventional gel electrophoresis and taqman probes enable rapid confirmation of thousand cankers disease from diagnostic samples [J]. Plant Disease, 2021, 10(105): 3171－3180.

[38] XIE C, WANG R, ZHANG J, et al. Multi-level learning features for automatic classification of field crop pests. Computers and Electronics in Agriculture [J]. 2018, 152: 233－241.

[39] FU X, GUO Q, SUN H. Statistical machine learning model for stochastic optimal planning of distribution networks considering a dynamic correlation and dimension reduction [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2904－2917.

[40] NGUGI L C, ABELWAHAB M, ABO-ZAHHAD M. Recent advances in image processing techniques for automated leaf pest and disease recognition－A review [J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(1): 23－60.

[41] KEAGY P M, SCHATZKI T F. Machine recognition of weevil damage in wheat radiographs [J]. Cereal Chemistry, 1993, 836: 108－119.

[42] ZAYAS I Y, FLINN P W. Detection of insects in bulk wheat samples with machine vision [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(3): 883－888.

[43] CHRISTOPHER R, ROY D, JOHN C. Imaging for the high-speed detection of pest insects and other contaminants in cereal grain in transit [C]// 2001 ASAE Annual International Meeting, Sacramento Convention Center, Sacramento, California, USA. 2001, 7.

[44] DARRELL T, GORDON G, HARVILLE M, et al. Integrated person tracking using stereo, color, and pattern detection [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 37(2), 175－185.

[45] WANG R, JIAO L, XIE C, et al. S-RPN: Sampling-balanced region proposal network for small crop pest detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 87.

[46] TASSIS, LUCAS M, TOZZI D S, et al. A deep learning approach combining instance and semantic segmentation to identify diseases and pests of coffee leaves from in-field images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186.

[47] 应义斌, 景寒松, 马俊福, 等. 机器视觉技术在黄花梨尺寸和果面缺陷检测中的应用[J]. 农业工程学报, 1999(1): 203－206.

[48] 柴阿丽, 李宝聚, 王倩, 等. 基于计算机视觉技术的番茄叶片叶绿素含量的检测[J]. 园艺学报, 2009, 36(1): 45－52.
CHAI Ali, LI Baoju, WANG Qian, et al. Detecting chlorophyll content of tomato leaves with technology of computer vision [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2009, 36(1): 45－52.

[49] 孙云云, 江朝晖, 董伟, 等. 基于卷积神经网络和小样本的茶树病害图像识别[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 48－55.
SUN Yunyun, JIANG Zhaohui, DONG Wei, et al. Image recognition of tea plant disease based on convolutional neural network and small samples [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(1): 48－55.

[50] 钟林忆, 刘海峰, 董力中, 等. 计算机视觉下的农作物病虫害图像识别研究[J]. 现代农业装备, 2021, 42(1): 51－55.
ZHONG Linyi, LIU Haifeng, DONG Lizhong, et al. Image recognition of crop diseases and insect pests based on computer vision [J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(1): 51－55.

[51] LIU Z, WILLIAMSON M S, LANSDELL S J, et al. A nicotinic acetyl-choline receptor mutation conferring target-site resistance to imidacloprid in Nila parvata lugens(brown planthopper) [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102: 8420－8425.

[52] LIU Z, HAN Z, WANG Y, et al. Selection for imidacloprid resistance in Nila parvata lugens: cross resistance patterms and possible mech-anisms [J]. Pest Management Science, 2003, 59: 770－775.

[53] 王娜. 河北邢台和江苏南京地区棉蚜对丁硫克百威和吡虫啉的抗性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
WANG Na. Carbosulfan and imidacloprid resistance of field population cotton aphid in Hebei Xingtai and Jiangsu Nanjing district [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.

[54] LIU X N, LIANG P, GAO X W, et al. Induction of the cyto-chrome P450 activity by plant allelochemicals in the cotton bollworm, Helicoverpa armigera (Hübner) [J]. Pesticide Bio-chemistry and Physiology, 2006, 84: 127－134.

[55] 李越, 朱鹤, 单莹, 等. 双酰肼类杀虫剂及对小菜蛾的防治研究进展[J]. 农药, 2023, 62(5): 313－318.
LI Yue, ZHU He, SHAN Ying, et al. Research progress of diacylhydrazine insecticides and their control of *Plutella xylostella* (L.) [J]. Agrochemicals, 2023, 62(5): 313－318.

[56] 李振宇, 叶乐夫, 甘杨广, 等. 木醋液对两种药剂防治桃蚜的增效作用[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 62(6): 71－79.

LI Zhenyu, YE Lefu, GAN Yangguang, et al. The synergistic effect of wood vinegar on two kinds of pesticides against myzus persicae [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(6): 71－79.

[57] 王文璐，梁鹏，宁杰，等．不同杀虫剂对3种设施蔬菜烟粉虱的田间防效评价[J]．中国蔬菜，2023(9)：105－109.
WANG Wenlu, LIANG Peng, NING Jie, et al. Field efficacy evaluation of different insecticides on bemisia tabaci in three greenhouse vegetables [J]. China Vegetables, 2023(9): 105－109.

[58] 茹宁辰，姜珊，纠敏，等．烟粉虱取食及其与TYLCCNV共侵染对烟草植株内H_2O_2的诱导响应[J]．安徽农学通报，2023，29(6)：119－124.
RU Ningchen, JIANG Shan, JIU Min, et al. H_2O_2 Responses in tobacco plants induced by whitefly *bemisia tabaci* and its co-infection with *tomato yellow leaf curl China virus* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(6): 119－124.

[59] 翁良宏，翟勤，刘苏．22%联苯·噻虫嗪悬乳剂对烟粉虱和温室白粉虱的防治效果研究[J]．现代农业科技，2022(14)：52－54，58.
WENG Lianghong, ZHAI Qin, LIU Su. Effect of 22% bifenthrin•thiamethoxam SE against bemisia tabaci and *trialeurodes vaporariorum* [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022(14): 52－54, 58.

[60] 程兆东．不同种衣剂对小麦蚜虫防效及小麦产量的影响[J]．乡村科技，2022，13(12)：64－66.

[61] CHEN M, HAN Z. Cloning and sequence analysis of 2 different acetylcholinesterase genes in Rhopalosi phum padi and Sitobion avenae [J]. Genome, 2006, 49 (3): 239－243.

[62] 丁为民，赵思琪，赵三琴，等．基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J]．农业机械学报，2016，47(6)：1－10，20.
DING Weimin, ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 1－10, 20.

[63] 邱威，孙浩，孙玉慧，等．低矮果园环流式循环风送喷雾机设计与试验[J]．农业工程学报，2021，37(6)：18－25.
QIU Wei, SUN Hao, SUN Yuhui, et al. Design and test of circulating air-assisted sprayer for dwarfed orchard [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 18－25.

[64] 李文伟，江世界，徐平凡，等．丘陵果园自走式小型靶标跟随喷雾机设计与试验[J]．农业机械学报，2023，54(9)：188－197.
LI Wenwei, JIANG Shijie, XU Pingfan, et al. Design and experiment of self-propelled small target following sprayer for hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 188－197.

[65] 窦汉杰，翟长远，王秀，等．基于LiDAR的果园对靶变量喷药控制系统设计与试验[J]．农业工程学报，2022，38(3)：11－21.
DOU Hanjie, ZHAI Changyuan, WANG Xiu, et al. Design and experiment of the orchard target variable spraying control system based on LiDAR [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(3): 11－21.

[66] WEI Q, HONGBIN G, YUBIN C, et al. An electrical vortex air-assisted spraying system for improving droplet deposition on rice [J]. Pest Management Science, 2022, 78(10): 4037－4047.

[67] 杨文超，何进，周靖凯，等．基于机器视觉和北斗定位的小麦变量喷雾系统研究[J]．农业机械学报，2022，53(7)：150－161.
YANG Wenchao, HE Jin, ZHOU Jingkai, et al. Design of wheat variable spray system based on machine vision and beidou positioning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 150－161.

[68] 韩长杰，郑康，赵学观，等．大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]．农业机械学报，2022，53(6)：89－101.
HAN Changjie, ZHENG Kang, ZHAO Xueguan, et al. Design and experiment of row identi6cation and row-oriented spray control system for field cabbage crops [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 89－101.

[69] 邱威，邬伊浩，周慧能，等．温室风幕式施药装置设计与试验[J]．南京农业大学学报，2023，46(2)：405－415.
QIU Wei, WU Yihao , ZHOU Huineng, et al. Design and test of greenhouse air curtain spraying device [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46 (2): 405－415.

[70] 李天华，董广胜，姚玉康，等．连栋温室分段变距喷雾机器人设计与试验[J]．农业机械学报，2024，55(2)：170－179.
LI Tianhua, DONG Guangsheng, YAO Yukang, et al. Design and experiment of segmented and variable distance spraying robot for multi-span greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 170－179.

[71] 高希武．我国害虫化学防治现状与发展策略[J]．植物保护，2010，36(4)：19－22.
GAO Xiwu. Current status and development strategy for chemical control in China [J]. Plant Protection, 2010, 36(4): 19－22.

[72] 陈晓霞，闫海燕，魏玮，等．光谱和光强度对龟纹瓢虫成虫

趋光行为的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2349－2355.
CHEN Xiaoxia, YAN Haiyan, WEI Wei, et al. Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of *Propylea japonica* (Thunberg) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2349－2355.

[73] 蒋月丽, 张建周, 袁水霞, 等. 黄色灯防治害虫的研究与应用进展[J]. 植物保护, 2018, 44(3): 6－10.
JIANG Yueli, ZHANG Jianzhou, YUAN Shuixia, et al. Progresses in the research and application of yellow light for pest control [J]. Plant Protection, 2018, 44(3): 6－10.

[74] 罗丰, 袁廷庆, 柯用春, 等. 不同颜色防虫网对豇豆生长特性、产量及蓟马发生量的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(09): 1584－1588.
LUO Feng, YUAN Tingqing, KE Yongchun, et al. Effects of different color insect-proof nets on occurrence of thrips and growth characteristics and yield of cowpea [J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(9): 1584－1588.

[75] 陈连珠, 张雪彬, 陶凯, 等. 彩色防虫网覆盖光质差异及其对豇豆生长和产量的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 45－50.
CHEN Lianzhu, ZHANG Xuebin, TAO Kai, et al. Difference of light quality under fly nets with different colours and its effects on the growth and yield of cowpea [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(2): 45－50.

[76] 史彩华. "日晒高温覆膜法"在韭蛆防治中的应用[J]. 中国蔬菜, 2017(7): 90.

[77] 李元英, 楼洪章, 张和琴. 玉米螟的多配性与辐射不育法的应用[J]. 中国农业科学, 1980(2): 79－82, 99－100.
LI Yuanying, LOU Hongzhang, ZHANG Heqin. Multipie mating of corn borer (ostrinina nubilalis hubner) and the application of radio-sterility method [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1980(2): 79－82, 99－100.

[78] 朱开成. 生物防治在农业病虫害防治中的应用现状及研究展望[J]. 种子科技, 2023, 41(12): 106－108.

[79] 陈卓, 王俊杰, 邹华芬, 等. 广东冬作区抗青枯病马铃薯新品种筛选[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 329－336.
CHEN Zhuo, WANG Junjie, ZOU Huafen, et al. Screening of new potato varieties resistant to bacterial wilt in winter cultivation area of Guangdong Province [J]. Chinese Potato Journal, 2020, 34(6): 329－336.

[80] 王海玄. 广西不同玉米品种对6种病原镰刀菌的抗性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
WANG Haixuan. Resistance of different maize varieties to six fusarium in Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.

[81] 李文凤, 王晓燕, 黄应昆, 等. 甘蔗新品种(系)对甘蔗花叶病的抗性评价[C]//中国植物保护学会. 植保科技创新与农业精准扶贫——中国植物保护学会2016年学术年会论文集. 中国农业科学技术出版社, 2016: 1.

[82] 张凯, 陈彦宾, 张昭, 等. 中国"十四五"重大病虫害防控综合技术研发实施展望[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 69－75.
ZHANG Kai, CHEN Yanbin, ZHANG Zhao, et al. Research and development of techniques for integrated control of major diseases and insect pests during the Fourteenth Five-Year Plan in China [J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(1): 69－75.

[83] 袁龙宇, 李燕芳, 肖汉祥, 等. 褐飞虱致害性变异机制研究进展[J]. 环境昆虫学报, 2022, 44(2): 297－304.
YUAN Longyu, LI Yanfang, XIAO Hanxiang, et al. Research progress on mechanism of virulence of the brown planthopper (Hemiptera: Delphacidae) [J]. Journal of Environmental Entomology, 2022, 44(2): 297－304.

[84] YE W, YU H, JIAN Y, et al. A salivary EF-hand calciumbinding protein of the brown planthopper Nilaparvata lugens functions as an effector for defense responses in rice [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40498.

[85] 郑瑜. 褐飞虱IR56种群致害性及中肠转录组的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
ZHENG Yu. Studies on the virulence and midgut transcriptome of *Nilaparvata lugens* (Stål) population reared on rice resistant variety IR56 [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[86] MAXWELL F G. 植物抗虫育种[M]. 北京: 农业出版社, 1985.

[87] 王学军, 陈满峰, 葛红, 等. 植物抗虫性及其遗传改良研究进展[J]. 现代农药, 2015, 14(3): 10－14.
WANG Xuejun, CHEN Manfeng, GE Hong, et al. Plant resistance to pest and research progress of genetic improvements [J]. Modern Agrochemicals, 2015, 14(3): 10－14.

[88] STEWART C N, ADANG M J, ALL J N, et al. Genetic Transformation, recovery, and characterization of fertile soybean transgenic for a synthetic bacillus thuringiensis cryIAc gene [J]. Plant Physiology, 1996, 112(1): 121－129.

[89] 郭东全, 杨向东, 包绍君, 等. 转CryIA和CpTI双价抗虫基因大豆的获得与稳定表达[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 2957－2962.
GUO Dongquan, YANG Xiangdong, BAO Shaojun, et al. Synchronous expression of CryIA and CpTI genes in soybean and analysis of their resistance to insect pests [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 2957－2962.

[90] WEI P, YAO Y, ZHU X, et al. Breeding of transgenic rice restorer line for multiple resistance against bacterial blight, striped stem borer and herbicide [J]. Euphytica, 2008, 163(2): 177－184.

[91] ZHU S, WALKER D R, BOERMA H R, et al. Effects of defoliating insect resistance qtls and a cry 1Ac transgene in soybean near-isogenic lines [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2008, 116(4): 455－463.

[92] 吴有刚，金京，杨胜祥，等. 昆虫抗药性产生机制[J]. 生物安全学报，2019，28(03)：159－169.
WU Yougang, JIN Jing, YANG Shengxiang, et al. Insect resistance development mechanism [J]. Journal of Biosafety, 2019, 28(3): 159－169.

[93] HEMINGWAY J, HAWKES N J, MCCARROLL L , et al. The molecular basis of insecticide resistance in mosquitoes [J]. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2004, 34(7): 653－665.

[94] BLACKHALL W J, PRICHARD R K, BEECH R N, et al. Selection at a gamma-aminobutyric acid receptor gene in Hae-monchus contortus resistant to avermectins/milbemycins [J]. Molecular and Biochemical Parasitology, 2003, 131(2): 137－145.

[95] LU K, WANG Y, CHEN X , ZHANG Z C, et al. Characterization and functional analysis of a carboxy-lesterase gene associated with chlorpyrifos resistance in Nilapa-rvata lugens [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2017, 203: 12－20.

[96] CHEN L P, WANG P, SUN Y J, et al. Direct inter-action of avermectin with epidermal growth factor receptor mediates the penetration resistance in Drosophila larvae [J]. Open Biology, 2016, 6(4): 150231.

[97] 付均惠，张倩. 浅析林业害虫防治的生态调控研究[J]. 生物灾害科学，2021，44(2)：119－122.
FU Junhui, ZHANG Qian. Analysis of ecological regulation of pest control in forestry [J]. Biological Disaster Science, 2021, 44(2): 119－122.

[98] 张菲菲. 农作物栽培病虫害生态调控[J]. 江西农业，2018(18)：27.

[99] 李亦白，曹光乔. 基于模拟退火算法的飞防队调度模型研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2022，3(2)：1－9.
LI Yibai, CAO Gunagqiao. Research on the scheduling model of flying defense team based on simulated annealing algorithm [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(2): 1－9.

Current status and trends of research on early warning and emergency control technology for major crop pests and diseases

LI Dong[1], TANG Qiguo[1], WANG Hongbo[1, 2], QIU Wei[1, 3, 4], XIONG Wei[1*]

(1. *Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing* 100176, *China*; 2. *Institute of Food Crops, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan* 430064, *China*; 3. *Nanjing Agricultural University College of Engineering, Nanjing* 210031, *China*; 4. *Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: With the advancement of agriculture, the economic losses and food safety threats caused by major plant diseases and pests to agriculture and forestry are becoming increasingly severe. In 2024, China's main food crops face challenges from 22 types of diseases and pests, with an expected affected area of 155 411 khm^2 and a yield loss exceeding 1.5×10^{11} t. This article provides an overview of the current status of crop disease and pest warning and emergency control technologies, where disease and pest warning technologies include the Internet of Things, remote sensing technology, and computer vision recognition technology; emergency control technologies cover the understanding of chemical communication mechanisms for the development of new pesticides and equipment, innovation in physical extermination and intelligent control products, utilization and product innovation of biological control resources, research on pest damage-type variation mechanisms and sustainable use of plant resistance varieties, research and development of pesticide resistance mechanisms and control technologies, as well as research and application technologies for the ecological regulation of diseases and pests. The aim is to achieve effective control of diseases and pests through interdisciplinary cooperation, while reducing environmental impact and promoting sustainable agricultural development. The article also discusses the application of disease and pest warning and

emergency control technologies in the agricultural field, analyzes their important role in the development of agricultural science and technology, and summarizes the challenges faced in each field, such as the insufficient accuracy of unmanned aerial vehicle remote sensing monitoring technology, difficulties in sample collection for disease and pest image automatic recognition technology, the failure of chemical control to achieve precise application, the lagging production processes and market promotion of green formulations, and the incomplete construction of disease and pest warning systems. In the future, the application of Internet of Things technology to disease and pest warning should be accelerated, the construction of smart agriculture and disease and pest warning systems should be promoted, and research should be conducted on unmanned aerial vehicle remote sensing monitoring technology, disease and pest image automatic recognition technology, chemical control technology, and biological control technology.

Keywords: pest and disease forewarning; emergency control; physical control; mechanisms of resistance; ecological control strategies; plant protection

Foundation items: Professional Institutions Management fees of the Technology Development Center of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs (2069999); National Natural Science Foundation of China (32171905)

First Author: LI Dong, E-mail: lidongmoa@126.com

* **Correspondence Author:** XIONG Wei, E-mail: 1537233963@qq.com