

我国农作物病虫害智能监测预警技术新进展

封洪强^{1*}, 姚青², 胡程³, 黄文江⁴, 胡小平⁵,
刘杰⁶, 张云慧⁷, 张智⁸, 乔红波⁹, 刘伟⁷

(1. 河南省 0 号昆虫雷达野外科学观测研究站, 河南省农作物病虫害防治重点实验室, 农业农村部华北南部作物有害生物综合治理重点实验室, 河南省作物保护国际联合实验室, 河南省农业科学院植物保护研究所, 郑州 450002;
2. 浙江理工大学计算机科学与技术学院, 杭州 310018; 3. 北京理工大学信息与电子学院雷达技术研究所, 北京 100081; 4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 5. 旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 植保资源与病虫害治理教育部重点实验室, 农业农村部西北黄土高原作物有害生物综合治理重点实验室, 西北农林科技大学植物保护学院, 杨陵 712100; 6. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 7. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193; 8. 北京市植物保护站, 北京 100029;
9. 河南农业大学信息与管理科学学院, 郑州 450046)

摘要 近年来, 随着计算机、互联网、物联网、人工智能、传感器、遥感等技术的快速发展, 智能虫情测报灯、智能性诱捕器、昆虫雷达、无人机遥感、卫星遥感、智能识别 App 等现代智能农作物病虫监测装备及重大病虫害实时智能监测预警系统建设方面取得了比较明显的进步。本文综述了我国近 5 年在利用光谱遥感、昆虫雷达、图像识别等技术进行农作物病虫害监测预警研究和应用方面取得的重要进展, 分析了各类技术存在的不足与难点, 提出了未来发展的方向, 以期为充分利用空天地多源数据实现农作物病虫害精准预报提供指导。

关键词 农作物病虫害; 监测预警; 光谱; 卫星遥感; 无人机; 昆虫雷达; 智能虫情测报灯

中图分类号: S 431.9 文献标识码: A DOI: 10.16688/j.zwbh.2023404

Recent advances in intelligent techniques for monitoring and prediction of crop diseases and insect pests in China

FENG Hongqiang^{1*}, YAO Qing², HU Cheng³, HUANG Wenjiang⁴, HU Xiaoping⁵, LIU Jie⁶, ZHANG Yunhui⁷, ZHANG Zhi⁸, QIAO Hongbo⁹, LIU Wei⁷

(1. Entomological Radar Station Zero of Henan Province for Field Scientific Observation and Research, Henan Key Laboratory for Control of Crop Diseases and Insect Pests, Key Laboratory of Integrated Pest Management on Crops in Southern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, International Joint Research Laboratory for Crop Protection of Henan, Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Computer Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. Radar Research Lab, School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 5. State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas, Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management of Ministry of Education, Key Laboratory of Integrated Pest Management on the Loess Plateau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 6. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China; 7. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 8. Beijing Plant Protection Station, Beijing 100029, China; 9. College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China)

收稿日期: 2023-08-04 修訂日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(32072414); 国家重点研发计划(2022YFD1400403); 河南省重大科技专项(201300111500); 河南省农业科学院创新团队专项(2023TD13)

* 通信作者 E-mail:feng_hq@163.com

Abstract In recent years, with the rapid development of computer, internet, internet of things, artificial intelligence, sensor, remote sensing and other technologies, significant progress has been made in the construction of modern intelligent equipment for crop disease and insect pest monitoring, such as intelligent light-trap, intelligent pheromone trap, entomological radar, UAV remote sensing, satellite remote sensing, intelligent identification App, and real-time monitoring and early warning systems for major plant diseases and pests. In this paper, the important technical progresses and application cases in monitoring and forecast of crop pests and diseases with spectral remote sensing, entomological radar and image recognition in China in the past five years are reviewed, the shortcomings and challenges of various technologies are analyzed, and the direction of future development is proposed, in order to provide a guidance for the accurate forecast of crop pests and diseases by making full use of multi-source data from space, sky and earth surface.

Key words crop diseases and pests; monitoring and forecast; spectrum; satellite remote sensing; UAV; entomological radar; intelligent light-trap

我国农作物病虫害监测预警工作始于 20 世纪 50 年代。1955 年,农业部颁布了《农作物病虫害预测预报方案》,从 20 世纪 60 年代起,农业部组织专业人员整理印发全国主要病虫害基本测报资料汇编,供全国农技人员使用。1987 年—1990 年,农业部编制了 15 种重大病虫害测报调查规范,并于 1995 年在全国范围内实施,成为新中国成立以来首批植物病虫害测报调查规范国家标准^[1]。2009 年以来,在农业部的高度重视和大力支持下,我国农作物重大病虫害监测预警信息化建设快速发展,初步建成了国家农作物重大病虫害数字化监测预警系统平台^[2],并形成了电视、广播、手机、网络和报纸等多种媒体发布农作物病虫害测报结果的新模式^[3]。近年来,随着计算机、互联网、物联网、人工智能、遥感、地理信息系统、卫星定位系统、大气环流分析等技术的快速发展与在农作物病虫害监测预警中的广泛应用,智能虫情测报灯、智能性诱捕器、昆虫雷达、低空遥感、卫星遥感、智能识别 App 等现代智能病虫监测装备以及重大病虫害实时监测预警系统建设方面取得了比较明显进步,对病虫害监测和预测的时效性和准确度得以大幅度提高^[4—5]。本文综述了我国近 5 年在利用光谱遥感、昆虫雷达、图像识别等技术监测农作物病虫害方面取得的重要技术进展和应用案例,在对各类技术存在的不足和难点进行分析的基础上提出了未来发展的方向,以期为充分利用空天地多源数据实现农作物病虫害精准预报提供指导。

1 农作物病虫害智能监测预警技术现状

1.1 光谱遥感监测技术

农作物病虫害的光谱遥感监测技术是利用卫

星、无人机或其他平台上的传感器,根据不同波段范围内光学信号在辐射传输过程中与物体相互作用后发生的速率、强度等重要属性改变的原理,来探测农作物病虫害的技术^[6]。太阳光谱的能量分布特点决定了可见光和近红外波段的传感器数据信噪比较高。在该谱段,病虫害的各种特征和生理变化表现明显^[7—9]。此外,短波红外(SWIR)区域的一些波段对植物或土壤中的水分含量敏感,它们是传统可见光和近红外传感器的适当补充。荧光和热红外遥感系统能够跟踪植物的呼吸和光合过程,从而对农作物病虫害进行早期探测。然而荧光信号相对较弱,容易与自然光混淆,这限制了它们在大尺度区域研究中的应用;将它们与其他遥感系统(如高光谱系统)耦合可有效利用该系统^[10—11]。

确定高专一性的特征是光谱遥感监测技术的关键。在可见光和近红外光谱特征中,波谱反射率是最简单的形式,很多研究明确了主要农作物病虫害响应的敏感光谱区间^[12]。同时,反射光谱可以进行不同形式的变换,如连续统去除、分数阶微分和连续小波变换等,通过这些变换可以更加深入挖掘反射光谱蕴含的信息^[13]。此外,各种形式的植被指数也被广泛用于病虫害监测中^[14—16]。近 20 年来,目标地物的荧光和热特性也越来越广泛地被用于作物遥感监测^[17]。利用 400~600 nm 和 650~800 nm 荧光诱导波段的植被荧光特性,可以有效地对病虫害及生境因素进行监测^[18—19]。与上述特征不同,基于图像分析的颜色共生矩阵(color co-occurrence matrix, CCM)提取的纹理特征(均匀性、平均强度、方差、逆差、熵、对比度等)对于小尺度水平上的病虫害监测十分重要^[20]。此外,还可以基于遥感影像提取空间度量(景观特征),用于识别农作物病虫害的空

间分布模式^[21]。

不同类型的传感器可以获得不同类型的数据,适于搭载的平台、经费投入、数据获取途径、分析方法也各不相同,应根据不同的需求选用不同的传感器。采用较低成本的可见光成像遥感可以方便快捷地对农作物病虫害胁迫进行监测并取得不错的识别效果。多光谱成像遥感能获取更多的光谱信息,使监测结果更为准确有效^[7]。高光谱成像遥感具有连续光谱、更多波段和更大数据量等特点,能获得更好的农作物病虫害遥感监测效果^[22-23]。

卫星遥感监测技术是指利用搭载在人造地球卫星上的各类传感器对地监测数据进行农作物病虫害监测的一种技术。国内外学者针对农作物病虫害的卫星遥感监测问题,基于不同类型的算法,建立了农作物病虫害识别及发生严重度诊断模型,并应用在不同作物上。1)经典统计模型,具有形式简单、机制明确的优点,被广泛应用在一些农作物病虫害的监测研究中。如基于 3 波段夫琅和费暗线和反射率荧光指数 2 种方法提取冠层日光诱导叶绿素荧光(sun/solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)数据,结合对小麦条锈病敏感的光谱指数,利用偏最小二乘算法构建了冬小麦条锈病早期光谱探测模型^[24]。采用二元逻辑回归评估香蕉枯萎病染疫区和未染疫区之间植被指数关系的研究表明,同等条件下包含红边的植被指数更有助于识别病害^[25]。2)机器学习模型,利用机器学习方法提取多种特征,构建农作物病虫害遥感监测模型。基于 2 幅 Landsat-8 影像,提取作物在不同时期的生长参数和环境参数,使用合成少数过采样技术和反向传播神经网络在区域尺度上取得了较高准确度的小麦病虫害分布图^[26]。基于 MODIS 影像数据,应用空间一时间递归神经网络对陇南市的小麦条锈病进行监测预警,取得了较好的监测效果^[27]。

经过长期的不断探索以及卫星遥感技术的快速发展,我国利用卫星大面积监测农作物病虫害的能力取得重大突破,构建了农作物病虫害遥感监测与预测系统,定期生产和发布全球、全国、重点区域的多尺度主要农作物重大病虫害遥感监测和预测专题图与报告产品,基本实现了业务的持续运行^[28]。

随着无人机技术的快速发展,无人机具备了搭载可见光、多光谱和高光谱等多种传感器的能力,通过建立病虫害光谱特征和图像关系模型,并将其反

演到图像上,可为病虫害监测预警提供技术支撑。无人机能大范围、快速、实时获取高分辨率图像数据,弥补了卫星遥感重访周期长、覆盖角度小以及时空分辨率低的不足,在农作物病虫害监测方面有着良好的应用前景。

研究者利用无人机搭载传感器,对棉花蚜虫、叶螨和小麦白粉病、条锈病、全蚀病等病虫害进行了研究^[29-32]。采用连续 5 年在小麦白粉病盛发期从距地面不同高度处获取的无人机可见光图像,分析发现图像参数红值参数的对数(lgR)与病情指数或者产量在不同年度、不同高度间均存在较高的相关性,表明利用该图像数字参数监测白粉病和预测产量是可行的,但同时也发现 lgR 与病情指数或者产量之间的关系模型的稳定性在不同年度和高度间均存在一定差异^[32]。无人机遥感监测农作物病虫害的研究方法主要包括利用光谱角映射(spectral angle mapping, SAM)、K-邻近(K-nearest neighbor, KNN)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机系数混合回归模型(random coefficient regression models)、深度学习等。从研究结果上看,利用无人机识别病虫害的精度均可达 85% 以上,关键在于病虫害敏感光谱特征的选择和病虫情指标关系的建立。

1.2 昆虫雷达监测技术

昆虫雷达监测技术是利用电磁波探测空中自由飞行昆虫的一种技术,这种技术具有对昆虫无干扰、监测距离远、采样空间大、监测速度快、获得的信息丰富等特点^[33]。旋转极化设计的垂直昆虫雷达由于可以监测到中大型昆虫的体型参数、质量大小和振翅频率,对昆虫种类有更好的鉴别能力,自 20 世纪末以来正逐渐取代传统扫描昆虫雷达,成为昆虫雷达的主流机型^[4,33]。近年来随着数字技术的进步,昆虫雷达的性能得以大幅提升、制式更加丰富^[34-37]。目前,我国昆虫雷达 AD 采样频率达到了 120 MHz,采样精度达到了 16 位,相应的昆虫雷达的距离采样能力由原来的 50 m 提高至 1.25 m,昆虫雷达盲区由原来 200 m 左右降低至 80 m 左右,极大地改善了昆虫雷达对低空飞行昆虫的探测能力。近年来,为了进一步降低旋转极化垂直昆虫雷达盲区,我国将旋转极化垂直昆虫雷达与扫描雷达相结合,建成了双模式昆虫雷达,即利用一套收发、信号采集处理及终端系统实现两种雷达所有探测功能的

新型昆虫雷达^[37]。

2017 年 6 月 20 日—7 月 5 日河南省农业科学院将英国洛桑研究院昆虫雷达运至河南现代农业研究开发基地与我国昆虫雷达进行联合观测,结果表明我国昆虫雷达的性能更优秀。2019 年 9 月 21 日—23 日中国植物保护学会和河南省科学技术协会主办了第二届雷达空中生态学国际会议,来自中国、英国、荷兰、澳大利亚、美国、法国、德国、比利时、日本等 11 个国家的雷达空中生态学学者 100 余人参加了会议^[38]。此次会议向国际同行展示了我国昆虫雷达技术方面的优势,以色列海法大学 2020 年订购了我国生产的昆虫雷达,英国利兹大学 2022 年也采购了我国生产的昆虫雷达,实现了国产昆虫雷达出口零的突破^[39—40]。

随着现代雷达技术的发展,全相参、高分辨、全极化等新技术越来越多地被用于雷达探测。为了进一步提高昆虫雷达测量能力,我国研发了相参体制高分辨全极化昆虫雷达(图 1)。该雷达工作在 Ku 波段,兼具扫描模式和波束垂直对天观测模式^[41—42]。该雷达为相参体制,可测量目标的相位信息;采用调频步进频波形,实现约 0.2 m 的高距离分辨率^[43]。雷达采用全极化体制,双极化天线同时发射/接收 H 和 V 极化信号;发射机和接收机均有 H 和 V 两个极化通道。在发射信号时,H 和 V 极化信号同时发射,通过正交的相位编码隔离;在接收信号时,H 和 V 极化信号同时接收,其中 H 极化接收的



图 1 Ku 波段高分辨全极化昆虫雷达

Fig. 1 Ku-band high-resolution and fully polarimetric entomological radar

信号包括 HH 和 HV(两种信号的相位编码正交),V 极化接收的信号包括 VV 和 VH(两种信号的相位编码正交),通过相位解码可得到目标的极化散射矩阵。依托高分辨全极化昆虫雷达对目标幅度、相位、极化等信息的获取能力,一系列精度更高的体轴朝向^[44—45]、体重/体长^[46—47]、振翅频率^[48]等生物参数反演方法被提出。2018 年在云南对该雷达开展了外场观测试验,成功验证了雷达测量昆虫体轴朝向、振翅频率、速度和上升下降率等参数的能力^[49—51]。自 2019 年起,该型雷达先后在云南澜沧、江城、寻甸和山东东营、广东深圳等地进行部署,开展了长期自动化业务监测运行,在草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、黄脊竹蝗 *Ceracris kiangsu*、苹梢鹰夜蛾 *Hypocala subsatura* 等境外重大害虫迁飞监测中发挥了重要作用^[52]。

新一代昆虫雷达——高分辨多维协同雷达测量仪(图 2,图 3)的研制成功使昆虫雷达技术实现了新的突破。它主要由一台高分辨相控阵雷达和 3 台多频段全极化雷达组成。其中,高分辨相控阵雷达是一台 Ku 波段扫描雷达,其方位采用机械扫描、俯仰采用电扫描,负责搜索昆虫群并分离感兴趣的昆虫个体,将目标位置引导信息发送给 3 台多频段全极化雷达;3 台多频段全极化雷达可同时在 X、Ku 和 Ka 三个波段工作,距离分辨率 0.2 m,具备全极化测量和单脉冲跟踪能力,根据高分辨相控阵雷达提供的位置引导信息,协同搜索跟踪昆虫个体,实现精

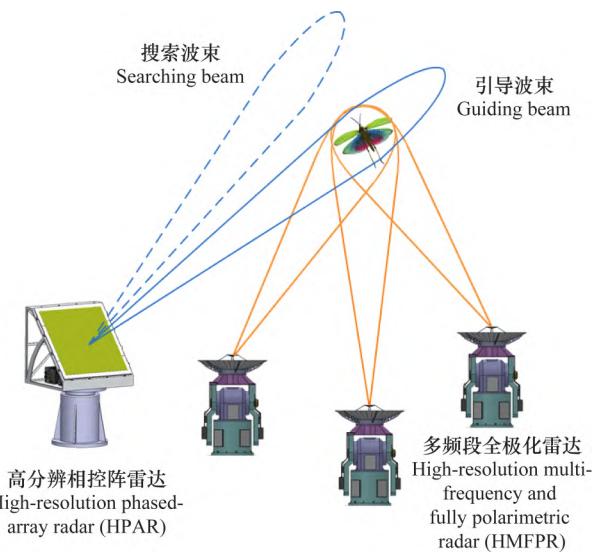


图 2 高分辨多维协同雷达测量仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high resolution multi-dimensional radar measurement system

细跟踪测量。同时,多频段全极化雷达也具备静止波束垂直对天监测、单部雷达跟踪测量等工作模式。基于额外的多频段、多基站协同测量,高分辨多维协

同雷达测量仪将进一步提高昆虫雷达生物学参数反演精度和三维朝向测量能力^[53-55]。目前,该仪器部署在山东东营黄河三角洲现代农业示范基地(图 3)。

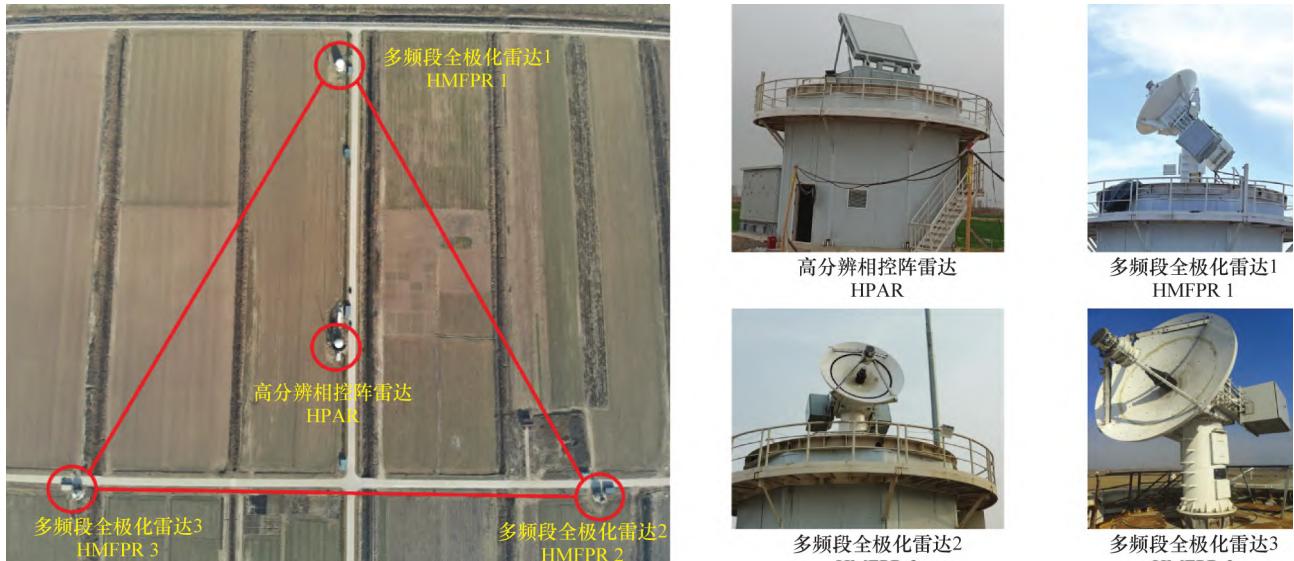


图 3 高分辨多维协同雷达测量仪实地部署图

Fig. 3 Field deployment photos of high resolution multi-dimensional radar measurement system

天气雷达也可以观测到昆虫迁飞,且具有网络覆盖广的优势。通过对同期高空探照灯诱虫量与多普勒天气雷达回波证实,多普勒天气雷达可以提取到昆虫的飞行方向、飞行速度等空中迁飞参数,在迁飞性害虫监测预警中具有重大的潜在应用价值^[56-57]。2018 年起,我国还利用高分辨多维协同雷达测量仪,开展了与天气雷达的长期联合观测试验,提出了基于我国天气雷达网的大尺度空中生物监测新方法^[58]:利用天气雷达多仰角、多特征数据,深度挖掘气象与生物回波轮廓和纹理特征差异,依靠 2008 年—2019 年间 200 余台天气雷达的历史观测数据构建训练与测试数据集,提出了基于多通道、多尺度空间特征的空中生物回波识别模型,该模型空中生物回波识别准确率高于 90%^[59-60];提出了基于高度分层模型与正则估计的生物回波反射率垂直廓线反演方法,实现了聚集成层迁飞生物垂直分布的准确估计,并采用联合观测试验中仪器获得的精确生物数量/密度作为参考真值,建立了天气雷达生物回波强度与生物数量/密度的映射关系^[61-63];提出了基于联合观测的低分辨天气雷达空中生物精确定量方法,利用高分辨昆虫雷达和探鸟雷达验证了天气雷达对于迁飞昆虫和鸟类的定量误差均小于 20%^[60]。

1.3 图像识别监测技术

图像识别监测技术是利用图像传感器采集农作物病虫害图像,通过图像识别算法进行病虫害的自动识别与诊断,从而达到病虫害智能监测的目的。目前该技术已被应用于虫情测报灯、性诱捕器、手机 App、AR 眼镜等。近几年,随着人工智能的发展,深度学习方法在图像识别任务中表现出色。许多研究者建立卷积神经网络模型对病虫害图像进行识别,获得了较好的结果。

传统(第 1 代)虫情测报灯,是由黑光灯、高压汞灯、双波系列灯等光源诱集配以氰化钾、敌敌畏等毒瓶杀死害虫并人工分类计数的简易型测报装置。20 世纪 80 年代到 2015 年前后市场上出现了第 2 代利用现代光、电、数控技术的虫情测报灯,实现了自动开关灯、虫体远红外杀死、接虫袋自动转换、虫体按天存放和整灯自动运行等功能^[64-65]。随着网络、图像识别和人工智能的发展,2016 年开始出现了第 3 代虫情测报灯,即智能虫情测报灯,它由灯光诱虫、远红外杀虫、虫体传输平台、虫体分散装置、自动清理装置、高清拍照设备、图像实时传输、靶标昆虫智能识别与计数、PC 和手机的客户端远程监控平台等模块组成,集成了自动化、互联网、图像处理和深度学习等多项前沿科技,可进行害虫信息实时采集、传

输、识别、分析和预警，并可实现远程实时监控、预警和管理。近年来，相关植保企业致力于智能虫情测报灯的改进，使其识别害虫的能力不断提高，有效缓解了我国基层植保人员不足的困境，减轻了植保人员工作量，提升了农作物害虫监测预警能力^[66–70]。

随着智能手机的普及，农作物病虫害拍照识别App得到了快速发展。一款基于图像大数据、卷积神经网络(CNN)模型，以TensorFlow为学习框架，搭载在移动终端的植物病虫害手机拍照识病虫App“植保家”，可识别39种作物上的212种重要病虫；自上线以来，“植保家”已有近10万用户，均可免费使用^[71]。搭载核心AI病虫害手机拍照识别的App和微信小程序“植小保”(原“慧植农当家”)目前可识别粮食作物(水稻、小麦、玉米)、蔬菜(白菜、番茄、黄瓜、茄子等)、果树(柑橘、桃、梨、葡萄、苹果等)、茶叶、烟草等52种作物675种病害(含生理性病害与药害)、639种害虫及危害状、39种杂草、15种天敌，平均识别准确率达94.57%^[72]。

可穿戴设备农作物病虫害AR智能测报仪^[73]，包括AR智能眼镜、AI识别模型和多终端监测预警平台。该设备以第一视角和语音控制采集病虫害图像和视频，对害虫和病斑进行智能识别诊断，解放双手，实现病虫害测报调查简单、高效、精准及数据可追溯，让“测报简单有效，测报不再辛苦”。目前该设备可以准确识别基于盘拍法的3种飞虱(白背飞虱*Sogatella furcifera*、褐飞虱*Nilaparvata lugens*和灰飞虱*Laodelphax striatellus*)的成虫种类、翅型和高龄若虫，以及稻飞虱低龄若虫共10个指标。除了稻飞虱田间测报调查，该设备还可应用于以“人工目测法”为主要测报调查手段的病虫害种类，如红蜘蛛、蚜虫、烟粉虱*Bemisia tabaci*、钻蛀性害虫为害状和各种病害病斑等。

1.4 害虫性诱自动监测技术

害虫性诱监测技术是利用人工合成含有害虫性信息素成分的性诱剂来诱集害虫，实现害虫监测的技术。由于性诱剂具有很强的灵敏性和专一性，环境友好，成本低，已被广泛应用于田间农业害虫的监测，特别是鳞翅目害虫^[4]。目前用于田间的性诱捕器，根据害虫捕获方式和计数方法的不同，可分为3类：1) 简易型性诱捕器，利用粘虫板/桶等+害虫人工鉴定法，价格便宜，但装置易损坏且无法重复利用，需要测报人员定期下田查看诱虫量，

费时费工、数据不能实时传输；2) 光电型智能性诱捕器，利用害虫捕获装置+光电计数器自动计数害虫法^[74]；由于其实现了自动计数获得了广泛应用。但由于人工合成的性诱剂无法保证高度的专一性，一种害虫不同地区性信息素成分比例可能存在差异，利用一种性诱剂在不同地区常引诱到多种相似的非目标害虫，或误入诱捕器的非目标害虫而导致光电计数器对目标害虫计数不准确^[75]；3) 基于机器视觉的智能性诱捕器，利用粘虫板+机器视觉系统采集性诱害虫图像+害虫图像自动识别计数法解决了性诱剂不专一导致计数不准的问题^[76–77]。基于深度学习和滑动窗的害虫自动检测方法被提出用于检测粘虫板图像上的苹果蠹蛾*Cydia pomonella*，获得了较好的害虫识别计数效果^[76]。利用工业相机搭建的机器视觉系统被用于定时采集粘虫板上的梨小食心虫*Grapholita molesta*飞蛾图像，并利用图像处理和机器学习方法实现了梨小食心虫的自动识别计数，平均准确率达到94%^[77]。

1.5 农作物病虫害监测预警技术体系构建与应用

1.5.1 草地贪夜蛾一体化监测预警技术体系的构建与应用

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)全球预警的跨洲迁飞性害虫—草地贪夜蛾自2018年底入侵我国以来，已在全国27个省份1700多个县发生，建立了周年繁殖区，并形成夏季发生区，成为我国又一个北迁南回、周年为害的重大害虫，对玉米等粮食作物生产构成重大威胁，两次位列农业农村部一类农作物病虫害名录首位^[78]。2020年—2023年中央一号文件均要求“抓好草地贪夜蛾等重大病虫害防控”，农业农村部2021年—2023年《“两增两减”虫口夺粮促丰收行动方案》中，草地贪夜蛾是重要的防控对象。

由于草地贪夜蛾境内外虫源的不确定性和东亚迁飞场的推动力增加了草地贪夜蛾的迁飞危害规律的复杂性，及时有效的监测预警是草地贪夜蛾防控成败的关键。针对草地贪夜蛾对黑光灯趋性较弱、性诱剂产品种类多专一性不强且缺乏田间标准化应用技术等监测预警难题，我国科技人员从草地贪夜蛾迁飞生物学和风场规律入手，分类突破其单项监测预警技术研发和集成应用的瓶颈。在昆虫雷达监

测技术示范上,收集了草地贪夜蛾体重、体长、体宽、振翅频率等生物学信息,利用预测模型,实现实时风场和迁飞轨迹的精准预测,并将以上功能接入“全国草地贪夜蛾发生防治信息平台”,雷达技术由多年的散点试验,跨入针对具体目标和区域的、有组织的实际应用。在高空测报灯监测技术上,利用草地贪夜蛾成虫趋光习性和嗜好光谱,研发了适用草地贪夜蛾监测的高空测报灯。在地面测报灯和性诱捕器监测技术上,利用机器视觉、人工智能和基于深度学习的图像识别技术,提高地面测报灯和性诱捕器

对草地贪夜蛾的识别精度和效率,实现其自动化、可视化的远程监测。在全国从南至北进行了地面测报灯和性诱捕器广泛试验,及时收集诱集效果信息,促使灯诱、性诱产品在半年内达到可用的效果。在上述草地贪夜蛾自动识别技术、昆虫雷达联网监测所需单项关键技术实现突破的基础上,集成创新了以昆虫雷达监测为核心、以灯诱和性诱为基础的全国草地贪夜蛾一体化智能监测预警技术(图 4),为全国草地贪夜蛾监测部署、实时预警提供了技术支撑^[78-79]。



图 4 草地贪夜蛾一体化监测预警技术体系核心监测设备

Fig. 4 The core monitoring equipments of the integrated monitoring and prediction system for the fall armyworm

1.5.2 沙漠蝗灾情遥感监测预警技术体系构建与应用

自 2018 年起,异常天气致使沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 在阿拉伯半岛南部沙漠边缘不断繁殖,并逐步蔓延席卷东非及西南亚多国,蝗灾危害程度达肯尼亚 70 年之最,是埃塞俄比亚和索马里 25 年之最。FAO 向全球发出预警,希望全球高度戒备蝗灾,采取多国联合防控措施防止沙漠蝗入侵国家出现粮食危机。由于沙漠蝗多发生于偏远地区,其繁殖区、迁飞动态和危害区域的监测技术一直是困扰各国、导致防治被动的瓶颈问题。当前,传统人工监测方法和基于气象站点的预测方法只能获取“点”上的虫害信息,不能满足“面”上对虫害的大尺度监测预警和实时防治防控的需求^[80-81]。遥感技术能够高效客观地实现大面积、时空连续的虫害发生发展状况监测预警,对于虫害的高效监测、快速预警及绿色、科学防控具有重要的实用价值^[82]。

沙漠蝗潜在繁殖区预警主要通过研究多生境因子对蝗虫发生的适宜性来确定,如应用 SMAP 卫星的表面温度、叶面积指数 LAI (leaf area index)

和根区土壤水分等生境因子来识别沙漠蝗的存在,进而确定其潜在繁殖区^[83]。基于气温、降水、土壤含沙量、土壤湿度以及植被绿度 5 类因子,运用 MaxEnt 模型实现了肯尼亚、苏丹和乌干达东北部的沙漠蝗繁殖区预测^[84]。在蝗卵孵化动态预警研究方面,部分学者利用遥感影像数据对土壤水分、温度等生境条件进行反演,分析虫卵孵化与土壤水热的关系,对蝗卵孵化动态进行预警^[85-86]。对于蝗虫发生风险及等级预警,主要通过蝗虫生境适宜度分析来实现。

我国学者结合蝗虫地面调查和区域普查数据、多源遥感数据及产品、地理空间辅助数据等数据基础,基于蝗虫生物生态学机理及蝗虫遥感监测预警机理,提取了生物气候、土壤条件和寄主植被等与蝗虫发生发展密切关联的生态环境要素;采用层次分析等方法提取了典型蝗虫监测预警遥感指标,通过蝗虫发育模型和数据挖掘方法分析了遥感指标的最优时序特征,通过移动窗算法和多尺度分割算法对遥感指标进行了景观结构空间化;最终构建了基于多元对地观测数据、结合气象差异、考虑时间滞后效

应的蝗虫监测预警指标体系^[87]。在此基础上建立了蝗虫遥感监测预警模型,构建了基于云平台技术的亚非沙漠蝗虫灾情遥感监测系统 <http://desert-locust.rscrop.com>,为用户提供亚非区域(也门、埃及、俄比亚、索马里、巴基斯坦、肯尼亚、印度、尼泊尔、阿富汗和伊朗)的沙漠蝗灾情遥感监测预警结果,包括迁飞路径预测数据、灾情监测数据、科学报告等内容。

1.5.3 主要粮食作物病害监测预警技术体系构建与应用

我国科技工作者重点围绕小麦条锈病、小麦赤霉病、小麦白粉病、玉米大斑病、水稻稻瘟病等作物病害开展监测预警应用基础及关键技术研究^[5,88—89],建立了病害早期分子检测技术体系,明确了病害监测的特征光谱,提出了病害宏观严重度和宏观病情指数的概念,构建了多种作物病害预测模型,研发出了作物病害预报器和孢子捕捉仪(图5),实现了在一台作物病害预报器中安装多个作物病害预测模型。小麦赤霉病智能化监测预警系统在陕西、江苏、安徽等19个省安装了近400套,

科学精准指导小麦赤霉病的防控工作。多年多点测试表明,我国小麦—玉米连作区小麦赤霉病BP神经网络预测模型的平均预测准确度可达80%以上^[90]。利用田间稻桩带菌率和关键气象因子数据,构建的基于人工神经网络算法(artificial neural networks, ANN)和支持向量机(support vector machine, SVM)的小麦—水稻轮作区小麦赤霉病发生流行程度预测模型,对江苏太仓小麦赤霉病发生流行程度的预测准确度均达到了100%^[91]。小麦条锈病智能化监测预警技术已在我国小麦条锈病流行区域的19个监测点进行了试验示范,并入选了2023年农业农村部十大农业重大引领性技术^[92]。玉米大斑病智能化监测预警系统,已在内蒙古、陕西、河南、山东等4个省(自治区)安装了近40台,开展试验示范工作。稻瘟病智能化监测预警系统已在黑龙江、安徽、江苏、浙江、四川、陕西等6个省安装了近30台,开始试验示范工作。基于分子定量检测技术、病菌孢子捕捉技术、无人机遥感技术的小麦白粉病监测预警技术体系,在全国10个省份试验示范。



图5 作物病害预报器和病菌孢子捕捉仪

Fig. 5 Predictor of crop disease and trapper of plant pathogen spore

2 农作物病虫害智能监测预警技术难点与发展方向

2.1 光谱遥感监测技术

作物的反射率是植株生理生化、结构形态的综合反映,这是遥感能够监测农作物病虫害的重要依据^[93]。无论是卫星遥感还是无人机遥感,农作物病虫害的光谱遥感监测技术的关键是高度专一且稳定的光谱特征。国内外学者利用多/高光谱非成像、成像数据通过光谱分析对胁迫机理展开一系列基础研究,筛选出小麦白粉病、条锈病、全蚀病、赤霉病,东方黏虫 *Mythimna separata*、大小斑病,水稻颖枯病、稻飞虱,番茄叶斑病和晚疫病等病虫害类型的光谱敏感波段^[94]。然而这些特征波段的专一性、稳定性仍是需要进一步攻克的难题。利用高光谱遥感技术在小麦灌浆期监测田间小麦冠层光谱反射率与白粉病病情指数的相关关系时发现,近红外波段与病情的相关性高于绿光波段^[95]。对不同小麦种植品种和不同种植密度下的田间小麦白粉病发生情况进行近地高光谱遥感监测,发现红边面积($\sum dr_{680\sim760\text{ nm}}$)与田间病情相关性最好,据此建立了基于 $\sum dr_{680\sim760\text{ nm}}$ 的病害监测模型和产量估计模型,但进一步对不同年份、不同品种和不同种植密度情况下的监测模型比较分析时发现,模型的斜率差异不显著,但截距大部分情况下差异显著^[96-97]。连续 4 年利用近地高光谱遥感对田间小麦白粉病的发生情况进行监测,发现在不同氮肥施用条件下 $\sum dr_{680\sim760\text{ nm}}$ 是用来监测小麦白粉病病情和估测产量最好的植被指数,但同样也发现基于 $\sum dr_{680\sim760\text{ nm}}$ 所建病害监测模型在年度间存在差异^[98]。因此,光谱遥感监测农作物病虫害模型的稳定性就成为重要科学问题,这直接关系到其在生产上的应用性。在今后研究中,分析和探究基于光谱参数的农作物病虫害田间发生程度模型的稳定性以及影响稳定性的因子,明确这些因子对模型稳定性的影响程度,由此建立稳定性好、适用范围广的主要农作物病虫害光谱监测模型,是该技术的难点和未来研究的重点。

2.2 昆虫雷达监测技术

利用雷达回波信号进行昆虫种类的自动识别一直是困扰昆虫雷达技术进一步发展应用的难题,采用了人工智能技术的高分辨全极化昆虫雷达和高分辨多维协同雷达测量仪的研制成功为突破这一难题

带来了新的希望。激光雷达把辐射源的频率提高到光频段,能够探测更微小的昆虫目标,且可以利用速率和光泽度等特征来区分昆虫种类,小型化的激光昆虫雷达可用于害虫的长期自动监测,监测效果与传统方法一致^[4,99]。然而,激光昆虫雷达的缺点是无法监测到昆虫移动的方向和速度,如果能将激光昆虫雷达与微波昆虫雷达相结合将会进一步提高对昆虫目标的识别能力。

近年来,我国尝试利用天气雷达网监测空中生物,取得了一些进展,但如何利用天气雷达准确区分昆虫、鸟或蝙蝠仍存在技术困难。国外对天气雷达的利用也仅局限于鸟类和蝙蝠对物候变化的响应、宏观生态规律研究,对昆虫监测的研究甚少^[100-103]。旋转极化垂直昆虫雷达造价低,自动化程度高,性能好且稳定,目前已成为国内植保科研单位的新装备,数量快速增加,实现数据实时共享、建成覆盖全国的昆虫雷达网是未来几年的努力方向。

2.3 图像识别监测技术

随着 ResNet、MobileNet、PPLCNet、FasterRCNN、YOLO、Transformer、SSD、RetinaNet 等深度学习网络模型的提出,农作物病虫害图像识别准确率大大提高,只要有足够量的准确标定的数据,就可以建立农作物病虫害自动识别的各类应用软件^[104]。目前,限制这项技术应用的瓶颈是大量准确标定的数据^[105]模型的轻量化以及搭载模型的芯片。目前尽管不同的研究者建立了自己的病虫害图像数据库,但许多图像未经专业人员正确标注,数据的标准化和共享共用尚未实现。害虫虫态多样性、虫体残缺、环境光照、虫体叠积等因素也增加了害虫识别和计数的难度。手机 App 不需要单独采购设备就可以实现农作物病虫害的拍照识别,一经出现便受到广大用户的喜爱,但由于其监测不具有连续性,而且受人为干扰与影响,不适合用于长期监测工作。固定式拍照识别或无人机载拍照识别设备虽然需要额外投资,但可以进行快速、长期稳定监测,有可能替代手机成为未来的图像识别监测技术的主要载体。目前限制智能虫情测报灯应用的不是图像识别技术,而是因其设计结构造成的虫体堆积粘连以及破损带来的识别困难,通过机械振动和循环传输或圆盘旋转从机械结构上部分解决了灯诱昆虫粘连堆叠的问题,但因红外杀死过程中由于昆虫挣扎造成的虫体破损仍难以避免。图像识别技术目前也被用

于性诱监测设备以克服性诱不专一的缺陷,基于机器视觉的智能性诱捕器可采用筒式粘虫带,自动根据图像中昆虫密度实现粘虫带自动更新,将测报人员从下田查虫、数虫和更换粘虫板的工作中解脱出来,实现了农业害虫性诱监测的智能化、实时性和数据可追溯性。国外一些企业开发了 Trapview, iSCOUT, SightTrap, Z-Trap, 和 DTN 智能诱捕器,然而,许多种植者对其成本和可扩展性并不满意^[106-107]。国内虽然也有企业在尝试开发性诱自动拍照识别设备,但性能稳定、经济有效的产品还有待进一步研发。

2.4 传感器技术

传感器技术、计算机技术和通信技术被称为信息技术的三大支柱。从物联网与智慧植保的角度来看,传感器技术是衡量行业智慧化、信息化程度的重要标志。传感器有物理量、化学量、生物量、温度传感器、湿度传感器、位移传感器、压力传感器、流量传感器等不同的类型,例如以昆虫信息素为核心的化学量传感器、以气象因子为核心的各种温湿度及光照强度等传感器等等。在植物保护领域应用比较成功的案例有安装在高塔或者桅杆上的光学传感器探测地物光谱信息^[108]、搭载在无人机上的多光谱相机实现了对田间小麦条锈病不同发生程度的监测^[109]、采用叶片表面湿润时间为核心的小麦赤霉病病穗率自动监测预警系统等^[5]。传感器是数据采集过程实现自动化的关键基础设备,是未来植物保护实现自动化和智能化的关键核心技术,特别是病原菌、害虫化学传感器、生物量传感器的研究仍然是一片空白,急需加强这个方向的多学科基础交叉研究。

2.5 多源数据融合处理技术

近年来随着智能虫情测报灯、智能性诱捕器、昆虫雷达、低空遥感、卫星遥感、智能识别 App 等现代智能病虫监测装备的不断发展和应用,农作物病虫害及其生境的多种来源监测数据(即多源数据)呈井喷式增长。然而,海量的多源数据只流于病虫害发生信息的可视化展示,未实现开放共享和深度挖掘,未在农作物病虫害预报中发挥应有作用,植保技术人员仍凭借多年经验对农作物病虫害发生趋势进行模糊预报。这是由于农作物病虫害发生与发展受自身生物学特性以及寄主、生境、耕作栽培措施等多种因素影响,因素之间互作机制极其复杂,加之重监测轻预报、重数据积累轻数据挖掘、研究者协同创新不

够等问题,导致目前没有可在生产上推广应用的基于多源数据的不同时空尺度的农作物病虫害预报模型。未来面临的关键难点与挑战主要为:1)多源数据的校准、规范和开放共享;2)生物和非生物因素对农作物病虫害的复杂影响机制的解析;3)多时空尺度农作物病虫害精准预报模型的建立与有效性验证^[110]。

建议各级政府、企业和科研院所加大资金投入,加强对农作物病虫害暴发成灾机理解析、智能化精准预报理论与技术探索等基础研究,加快农作物病虫害智能监测关键技术与装备研发;建立多部门合作协调机制,广泛验证现有智能监测技术与设备的准确性和稳定性,制定并实施一批农作物病虫害智能监测设备与技术的相关规范和标准,构建天空地一体化自动监测为主体、精细人工监测校样点相协同的农作物病虫害多源数据获取、传输、存储、分析及智能化精准预测平台。

参考文献

- [1] 刘万才, 姜玉英, 张跃进, 等. 我国农业有害生物监测预警 30 年发展成就[J]. 中国植保导刊, 2010, 30(9): 35—39.
- [2] 刘万才, 黄冲. 我国农作物病虫测报信息化建设进展与发展建议[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(3): 90—92.
- [3] 胡小平. 作物病害监测预警技术研究进展[C]//第十一届全国青年植保科技创新学术研讨会论文集. 南京:中国植物保护学会. 2016.
- [4] 封洪强, 姚青. 农业害虫自动识别与监测技术[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 127—133.
- [5] 胡小平, 户雪敏, 马丽杰, 等. 作物病害监测预警研究进展[J]. 植物保护学报, 2022, 49(1): 298—315.
- [6] ZHANG Jingcheng, HUANG Yanbo, PU Ruiliang, et al. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104943. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104943.
- [7] SU Jinya, LIU Cunjia, HU Xiaoping, et al. Spatio-temporal monitoring of wheat yellow rust using UAV multispectral imagery [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105035. DOI: 10.1016/j.compag.2019.105035.
- [8] ZHANG Hansu, HUANG Linsheng, HUANG Wenjiang, et al. Detection of wheat Fusarium head blight using UAV-based spectral and image feature fusion [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 1004427. DOI: 10.3389/fpls.2022.1004427.
- [9] ZHANG Jie, JING Xia, SONG Xiaoyu, et al. Hyperspectral estimation of wheat stripe rust using fractional order differential equations and Gaussian process methods [J/OL]. Computers

- and Electronics in Agriculture, 2023, 206: 107671. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107671.
- [10] ZHAO Feng, GUO Yiqing, VERHOEF W, et al. A method to reconstruct the solar-induced canopy fluorescence spectrum from hyperspectral measurements [J]. Remote Sensing, 2014, 6(10): 10171–10192.
- [11] HU Jiaochan, LIU Xinjie, LIU Liangyun, et al. Evaluating the performance of the SCOPE model in simulating canopy solar-induced chlorophyll fluorescence [J/OL]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 250. DOI: 10.3390/rs10020250.
- [12] SHI Yue, HUANG Wenjiang, LUO Juhua, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171–180.
- [13] SHI Yue, HUANG Wenjiang, GONZÁLEZ-MORENO P, et al. Wavelet-based rust spectral feature set (WRSFs): A novel spectral feature set based on continuous wavelet transformation for tracking progressive host-pathogen interaction of yellow rust on wheat [J/OL]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 525. DOI: 10.3390/rs10040525.
- [14] CHEN Dongmei, SHI Yeyin, HUANG Wenjiang, et al. Mapping wheat rust based on high spatial resolution satellite imagery [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 109–116.
- [15] REN Yu, HUANG Wenjiang, YE Huichun, et al. Quantitative identification of yellow rust in winter wheat with a new spectral index: Development and validation using simulated and experimental data [J/OL]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102384. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102384.
- [16] TIAN Long, WANG Ziyi, XUE Bowen, et al. A disease-specific spectral index tracks *Magnaporthe oryzae* infection in paddy rice from ground to space [J/OL]. Remote Sensing of Environment, 2023, 285: 113384. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113384.
- [17] 竞霞, 邹琴, 白宗, 等. 基于反射光谱和叶绿素荧光数据的作物病害遥感监测研究进展[J]. 作物学报, 2021, 47(11): 2067–2079.
- [18] JING Xia, ZOU Qin, YAN Jumei, et al. Remote sensing monitoring of winter wheat stripe rust based on mRMR-XGBoost algorithm [J/OL]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 756. DOI: 10.3390/rs14030756.
- [19] DU Kaiqi, JING Xia, ZENG Yelu, et al. An improved approach to monitoring wheat stripe rust with sun-induced chlorophyll fluorescence [J/OL]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 693. DOI: 10.3390/rs15030693.
- [20] GUO Anting, HUANG Wenjiang, YE Huichun, et al. Identification of wheat yellow rust using spectral and texture features of hyperspectral images [J/OL]. Remote Sensing, 2020, 12(9): 1419. DOI: 10.3390/rs12091419.
- [21] GENG Yun, ZHAO Longlong, HUANG Wenjiang, et al. A landscape-based habitat suitability model (LHS model) for oriental migratory locust area extraction at large scales: a case study along the middle and lower reaches of the Yellow River [J/OL]. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1058. DOI: 10.3390/rs14051058.
- [22] AIRES P, GAMBARRA-NETO F, COUTINHO W, et al. Near infrared hyperspectral images and pattern recognition techniques used to identify etiological agents of cotton anthracnose and ramulosis [J/OL]. Journal of Spectral Imaging, 2018, 7: a8. DOI: 10.1255/jsi.2018.a8.
- [23] SUSIĆ N, ŽIBRAT U, ŠIRCA S, et al. Discrimination between abiotic and biotic drought stress in tomatoes using hyperspectral imaging [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 273(10): 842–852.
- [24] 竞霞, 吕小艳, 张超, 等. 基于 SIF-PLS 模型的冬小麦条锈病早期光谱探测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 191–197.
- [25] YE Huichun, HUANG Wenjiang, HUANG Shanyu, et al. Recognition of banana Fusarium wilt based on UAV remote sensing [J/OL]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 938. DOI: 10.3390/rs12060938.
- [26] MA Huiqin, HUANG Wenjiang, JING Yuanshu, et al. Integrating growth and environmental parameters to discriminate powdery mildew and aphid of winter wheat using bi-temporal Landsat-8 imagery [J/OL]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 846. DOI: 10.3390/rs11070846.
- [27] XU Wei, WANG Qili, CHEN Runyu. Spatio-temporal prediction of crop disease severity for agricultural emergency management based on recurrent neural networks [J]. Geoinformatica, 2018, 22: 363–381.
- [28] DONG Yingting, XU Fang, LIU Linyi, et al. Automatic system for crop pest and disease dynamic monitoring and early forecasting [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 4410–4418.
- [29] 郭伟, 朱耀辉, 王慧芳, 等. 基于无人机高光谱影像的冬小麦全蚀病监测模型研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 162–169.
- [30] 郭伟, 李成伟, 王锦翔, 等. 基于无人机成像高光谱的棉叶螨为害等级估测模型构建[J]. 植物保护学报, 2021, 48(5): 1096–1103.
- [31] 郭伟, 乔红波, 赵恒谦, 等. 基于比值导数法的棉花蚜害无人机成像光谱监测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1543–1550.
- [32] LIU Wei, CAO Xueren, FAN Jieru, et al. Detecting wheat powdery mildew and predicting grain yield using unmanned aerial photography [J]. Plant Disease, 2018, 102(10): 1981–1988.
- [33] 封洪强. 雷达在昆虫学研究中的应用[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 1–13.
- [34] DRAKE V A, WANG Haikou. Ascent and descent rates of high-flying insect migrants determined with a non-coherent vertical beam entomological radar [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(3): 883–904.

- [35] DRAKE V A, HATTY S, SYMONS C, et al. Insect monitoring radar: maximizing performance and utility [J/OL]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 596. DOI: 10.3390/rs12040596.
- [36] DRAKE V A, HAO Z, WARRANT E. Heading variations resolve the heading-direction ambiguity in vertical-beam radar observations of insect migration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(10): 3873–3898.
- [37] 张鹿平, 张智, 季荣, 等. 昆虫雷达建制技术的发展方向 [J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(2): 153–159.
- [38] 中国植物保护学会. 第二届国际雷达空中生态学大会在郑州召开 [EB/OL]. (2019-09-30) [2023-08-04]. <http://www.ipmchina.net/a/xhdt/xuehuidongtai/2019/0930/1046.html>.
- [39] 芦晓春. 昆虫雷达技术发展研讨会在无锡召开——护航粮食安全 让虫情预警更精准更高效 [N]. 农民日报, 2020-12-22 (5).
- [40] 中国植物保护学会. 2020 年昆虫雷达技术发展研讨会在无锡举办 [EB/OL]. (2020-12-21) [2023-08-04]. <http://ipmchina.net/a/xhdt/xuehuidongtai/2020/1221/1151.html>.
- [41] 胡程, 李卫东, 王锐. 基于全极化的相参雷达迁飞昆虫观测 [J]. 信号处理, 2019, 35(6): 951–957.
- [42] 于腾, 王锐, 李沐阳, 等. 宽带全极化垂直昆虫雷达设计及校准关键技术研究 [J]. 信号处理, 2021, 37(2): 222–233.
- [43] WANG Rui, ZHANG Tianran, CUI Kai, et al. High-resolution and low blind range waveform for migratory insects' taking-off and landing behavior observation [J/OL]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3034. DOI: 10.3390/rs14133034.
- [44] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, et al. Accurate insect orientation extraction based on polarization scattering matrix estimation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(10): 1755–1759.
- [45] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, et al. Discrimination of parallel and perpendicular insects based on relative phase of scattering matrix eigenvalues [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(6): 3927–3940.
- [46] LI Weidong, HU Cheng, WANG Rui, et al. Comprehensive analysis of polarimetric radar cross-section parameters for insect body width and length estimation [J/OL]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64: 122302. DOI: 10.1007/s11432-020-3010-6.
- [47] HU Cheng, LI Weidong, WANG Rui, et al. Insect biological parameter estimation based on the invariant target parameters of the scattering matrix [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 6212–6225.
- [48] WANG Rui, HU Cheng, FU Xiaowei, et al. Micro-doppler measurement of insect wing-beat frequencies with W-band coherent radar [J/OL]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1396. DOI: 10.1038/s41598-017-01616-4.
- [49] HU Cheng, LI Wenqing, WANG Rui, et al. Insect flight speed estimation analysis based on a full-polarization radar [J/OL]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(10): 109306. DOI: 10.1007/s11432-018-9484-2.
- [50] 胡程, 张天然, 王锐. 基于 Radon 变换的昆虫上升下降率提取算法及实验验证 [J]. 信号处理, 2019, 35(6): 1072–1078.
- [51] 王锐, 李卫东, 胡程, 等. 全极化昆虫雷达生物参数反演方法与外场定量试验验证 [J]. 信号处理, 2021, 37(2): 199–208.
- [52] LIU Dazhong, ZHAO Shengyuan, YANG Xianming, et al. Radar monitoring unveils migration dynamics of the yellow-spined bamboo locust (Orthoptera: Arctypteridae) [J/OL]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 187: 106306. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106306.
- [53] WANG Rui, HU Cheng, LIU Changjiang, et al. Migratory insect multifrequency radar cross sections for morphological parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3450–3461.
- [54] LI Weidong, WANG Rui, ZHANG Fan, et al. Insect 3-D orientation estimation based on cooperative observation from two views of entomological radars [J/OL]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 4026705. DOI: 10.1109/LGRS.2022.3204205.
- [55] 蔡炯, 王锐, 胡程, 等. 基于新型扫描昆虫雷达的迁飞昆虫目标检测及密度反演 [J]. 信号处理, 2022, 38(7): 1333–1352.
- [56] 焦热光, 张智, 石广玉, 等. 北京多普勒天气雷达上的昆虫回波分析 [J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(2): 177–185.
- [57] 柳凡, 张智, 林培炯, 等. 2013 年北京一代粘虫迁飞峰期的多普勒天气雷达观测 [J]. 应用昆虫学报, 2023, 60(1): 233–244.
- [58] LONG Teng, HU Cheng, WANG Rui, et al. Entomological radar overview: System and signal processing [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(1): 20–32.
- [59] CUI Kai, HU Cheng, WANG Rui, et al. Deep-learning-based extraction of the animal migration patterns from weather radar images [J/OL]. *Science China Information Sciences*, 2020, 63(4): 140304. DOI: 10.1007/s11432-019-2800-0.
- [60] WANG Shuaihang, HU Cheng, CUI Kai, et al. Animal migration patterns extraction based on atrous-gated CNN deep learning model [J/OL]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 4998. DOI: 10.3390/rs13244998.
- [61] HU Cheng, CUI Kai, WANG Rui, et al. A retrieval method of vertical profiles of reflectivity for migratory animals using weather radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(2): 1030–1040.
- [62] WANG Rui, KOU Xiao, CUI Kai, et al. Insect-equivalent radar cross-section model based on field experimental results of body length and orientation extraction [J/OL]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 508. DOI: 10.3390/rs14030508.
- [63] CUI Kai, HU Cheng, WANG Rui, et al. Extracting vertical distribution of aerial migratory animals using weather radar [C/OL] // 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES), Nanjing, China, 2019. DOI: 10.23919/ACES48530.2019.9060648.

- [64] 杨荣明, 朱先敏, 朱凤. 我国农作物病虫害测报调查工具研发应用历程与发展建议[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(1): 51—55.
- [65] 刘万才, 陆明红, 黄冲, 等. 水稻重大病虫害跨境跨区域监测预警体系的构建与应用[J]. 植物保护, 2020, 46(1): 87—92.
- [66] JIAO Lin, DONG Shifeng, ZHANG Shengyu, et al. AF-RC-NN: An anchor-free convolutional neural network for multi-categories agricultural pest detection [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105522. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105522.
- [67] WANG Qijin, ZHANG Shengyu, DONG Shifeng, et al. Pest24: A large-scale very small object data set of agricultural pests for multi-target detection [J/OL]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105585. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105585.
- [68] 姚青, 吴叔珍, 蒋乃阳, 等. 基于改进 CornerNet 的水稻灯诱飞虱自动检测方法构建与验证[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 183—189.
- [69] LIU Liu, WANG Rujing, XIE Chengjun, et al. PestNet: An end-to-end deep learning approach for large-scale multi-class pest detection and classification [J]. IEEE Access, 2019, 7: 45301—45312.
- [70] YAO Qing, FENG Jin, TANG Jian, et al. Development of an automatic monitoring system for rice light-trap pests based on machine vision [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(10): 2500—2513.
- [71] 马文龙, 杨稀乾, 马玥, 等. “植保家”——手机拍照识病虫 App [C]//陈万权. 病虫防护与生物安全——中国植物保护学会2021年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021: 215.
- [72] 睿坤科技. AI 智慧种植服务平台—植小保 APP [OL]. [2023—08—04]. <https://www.cleverplanting.cn/#/ndj>.
- [73] 新华社. “5G+AR”数智技术赋能农业高质量发展 [OL]. (2023—08—09) [2023—08—28]. <https://h.xinhuaixmt.com/vh512/share/11631093?d=134b299&channel=weixin>.
- [74] 周爱萍. 害虫远程实时监测系统在草地贪夜蛾监测中的应用 [J]. 安徽农学通报, 2020, 26(S1): 88—89.
- [75] 罗金燕, 陈磊, 路风琴, 等. 性诱电子测报系统在斜纹夜蛾监测中的应用[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(10): 50—53.
- [76] DING Weiguang, TAYLOR G. Automatic moth detection from trap images for pest management [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 17—28.
- [77] 陈梅香, 郭继英, 许建平, 等. 梨小食心虫自动监测识别计数系统研制[J]. 环境昆虫学报, 2018, 40(5): 1164—1174.
- [78] ZHOU Yan, WU Qiulin, ZHANG Haowen, et al. Spread of invasive migratory pest *Spodoptera frugiperda* and management practices throughout China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(3): 637—645.
- [79] 周燕, 张浩文, 吴孔明. 农业害虫跨越渤海的迁飞规律与控制策略[J]. 应用昆虫学报, 2020, 57(2): 233—243.
- [80] LATCHININSKY A V, SIVANPILLAI R. Locust habitat monitoring and risk assessment using remote sensing and GIS technologies [M] // CIANCIO A, MUKERJI K. Integrated management of arthropod pests and insect borne diseases. Dordrecht: Springer: 2010: 163—188.
- [81] CRESSMAN K. Role of remote sensing in desert locust early warning [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 75—98.
- [82] 谢小燕, 邓雪华, 杜臻嘉. 沙漠蝗虫发生动态与防治进展[J]. 中国农业文摘·农业工程, 2020, 32(5): 66—67.
- [83] GÓMEZ D, SALVADOR P, SANZ J, et al. Desert locust detection using earth observation satellite data in Mauritania [J]. Journal of Arid Environments, 2019, 164: 29—37.
- [84] KIMATHI E, TONNANG H E Z, SUBRAMANIAN S, et al. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa [J/OL]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 11937. DOI: 10.1038/s41598-020-68895-2.
- [85] ESCORIHUELA M J, MERLIN O, STEFAN V, et al. SMOS based high resolution soil moisture estimates for desert locust preventive management [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018, 11: 140—150.
- [86] PIOU C, GAY P E, BENAHI A S, et al. Soil moisture from remote sensing to forecast desert locust presence [J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 56(4): 966—975.
- [87] 董莹莹, 赵龙龙, 黄文江. 亚非沙漠蝗灾情遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [88] 聂晓, 黄冲, 刘伟, 等. 小麦白粉病预测模型的有效性评价[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 38—41.
- [89] 袁冬贞, 崔章静, 杨桦, 等. 基于物联网的小麦赤霉病自动监测预警系统应用效果[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(1): 46—51.
- [90] 黄冲, 刘万才, 姜玉英, 等. 小麦赤霉病物联网实时监测预警技术试验评估[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(9): 28—32.
- [91] 邢瑜琪. 稻麦轮作区小麦赤霉病的监测与预警[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [92] 农业农村部. 农业农村部办公厅关于推介发布 2023 年农业主导品种主推技术的通知 [OL]. (2023—06—09) [2023—08—28]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202306/t20230609_6429776.htm.
- [93] 黄文江, 张竟成, 罗菊花, 等. 作物病虫害遥感监测与预测 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [94] 鲁军景, 孙雷刚, 黄文江. 作物病虫害遥感监测和预测预警研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(1): 21—32.
- [95] 乔红波, 周益林, 白由路, 等. 地面高光谱和低空遥感监测小麦白粉病初探[J]. 植物保护学报, 2006, 33(4): 341—344.
- [96] CAO Xueren, LUO Yong, ZHOU Yilin, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat cultivars using canopy hyperspectral reflectance [J]. Crop Protection, 2013, 45: 124—131.
- [97] CAO Xueren, LUO Yong, ZHOU Yilin, et al. Detection of powdery mildew in two winter wheat plant densities and prediction of grain yield using canopy hyperspectral reflectance [J/OL]. PLoS ONE, 2015, 10: e0121462. DOI: 10.1371/journal.pone.0121462.

- nal. pone. 0121462.
- [98] LIU Wei, SUN Chaofei, ZHAO Yanyan, et al. Monitoring of wheat powdery mildew under different nitrogen input levels using hyperspectral remote sensing [J/OL]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 3753. DOI:10.3390/rs13183753.
- [99] RYDHMER K, BICK E, STILL L, et al. Automating insect monitoring using unsupervised near-infrared sensors [J/OL]. *Scientific Reports*, 2022, 12:2603. DOI:10.1038/s41598-022-06439-6.
- [100] VAN DOREN B M, HORTON K G. A continental system for forecasting bird migration [J]. *Science*, 2018, 361 (6407): 1115–1118.
- [101] ROSENBERG K V, DOKTER A M, BLANCHER P J, et al. Decline of the North American avifauna [J]. *Science*, 2019, 366(6461): 120–124.
- [102] STEPANIAN P, WAINWRIGHT C. Ongoing changes in migration phenology and winter residency at Bracken Bat Cave [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 3266–3275.
- [103] STEPANIAN P M, ENTREKIN S A, WAINWRIGHT C E, et al. Declines in an abundant aquatic insect, the burrowing mayfly, across major North American waterways [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(6): 2987–2992.
- [104] 魏甫豫. 基于卷积神经网络下昆虫种类图像识别研究[D].
-
- (上接 228 页)
- [59] WEAVER N. Physiology of caste determination [J]. *Annual Review of Entomology*, 1966, 11(1): 79–102.
- [60] KUCHARSKI R, MALESZKA J, FORET S, et al. Nutritional control of reproductive status in honeybees via DNA methylation [J]. *Science*, 2008, 319(5871): 1827–1830.
- [61] WANG Miao, XIAO Yu, LI Yan, et al. RNA m⁶A modification functions in larval development and caste differentiation in honeybee (*Apis mellifera*) [J/OL]. *Cell Reports*, 2021, 34 (1): 108580. DOI: 10.1016/j.celrep.2020.108580.
- [62] XIA Jixing, GUO Zhaojiang, YANG Zezhong, et al. Whitefly hijacks a plant detoxification gene that neutralizes plant toxins [J]. *Cell*, 2021, 184(7): 1693–1705.
- [63] 张友军, 吴青君, 王少丽, 等. 我国蔬菜重要害虫研究现状与展望[J]. 植物保护, 2013, 39(5): 38–45.
- [64] 褚栋, 张友军. 近 10 年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展 [J]. 植物保护, 2018, 44 (5): 51–55.
- [65] YANG Xin, XIE Wen, WANG Shaoli, et al. Two cytochrome P450 genes are involved in imidacloprid resistance in field populations of the whitefly, *Bemisia tabaci*, in China [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2013, 107(3): 343–350.
- [66] YANG Xin, WEI Xuegao, YANG Jing, et al. Epitranscriptomic regulation of insecticide resistance [J/OL]. *Science Advances*, 2021, 7(19): eabe5903. DOI: 10.1126/sciadv.abe5903.
- 邯郸:河北工程大学,2022.
- [105] 邵泽中,姚青,唐健,等. 面向移动终端的农业害虫图像智能识别系统的研究与开发[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3257–3268.
- [106] PRETI M, FAVARO R, KNIGHT A L, et al. Remote monitoring of *Cydia pomonella* adults among an assemblage of nontargets in sex pheromone-kairomone-baited smart traps [J]. *Pest Management Science*, 2021, 77:4084–4090.
- [107] SUTO J. Codling moth monitoring with camera-equipped automated traps: a review [J/OL]. *Agriculture*, 2022, 12: 1721. DOI:10.3390/agriculture12101721.
- [108] RICHARDSON A D, KLOSTERMAN S, TOOMEY M. Near-surface sensor-derived phenology [M] // SCHWARTZ M D. Phenology: an integrative environmental science. Dordrecht: Springer, 2013: 413–430.
- [109] SU Jinya, YI Dewei, SU Baofeng, et al. Aerial visual perception in smart farming: field study of wheat stripe rust monitoring [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 2242–2249.
- [110] 封洪强,姚青,黄文江,等. 如何利用多源数据实现农作物病虫害精准预报? [M] // 中国科学技术协会. 2022 重大科学问题、工程技术难题和产业与技术问题. 北京:中国科学技术出版社, 2022.

(责任编辑: 杨明丽)

- [67] TIAN Shuping, WU Nan, ZHANG Lu, et al. RNA N⁶-methyladenosine modification suppresses replication of rice black streaked dwarf virus and is associated with virus persistence in its insect vector [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2021, 22(9): 1070–1081.
- [68] DOMINISSINI D, MOSHITCH-MOSHKOVITZ S, SCHWARTZ S, et al. Topology of the human and mouse m⁶A RNA methylomes revealed by m⁶A-seq [J]. *Nature*, 2012, 485 (7397): 201–206.
- [69] LEE J C, DREVES A J, CAVE A M, et al. Infestation of wild and ornamental noncrop fruits by *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2015, 108(2): 117–129.
- [70] XU Jun, DONG Qinglin, YU Ye, et al. Mass spider silk production through targeted gene replacement in *Bombyx mori* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(35): 8757–8762.
- [71] KLEIN A M, VAISSIERE B E, CANE J H, et al. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 274 (1608): 303–313.

(责任编辑: 田 喆)