

农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望

廖娟^{1,2} 陶婉琰^{1,2} 臧英^{1,2} 曾弘毅³ 汪沛^{1,4} 罗锡文^{1,4}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;
3. 暨南大学信息科学技术学院, 广州 510632; 4. 广东省农业人工智能重点实验室, 广州 510642)

摘要: 病虫害是影响农作物健康生长、产量和质量的制约因素之一,加强农作物病虫害的监测,对农作物病虫害进行精准防控,对保障粮食安全,提高农产品产量和质量具有重要意义。随着信息技术的发展,农作物病虫害监测由传统的人工监测逐渐向自动化、信息化和智能化方向发展。农作物病虫害监测平台、监测传感器技术以及相关的数据分析和处理技术是研究农作物病虫害遥感监测的关键技术,这些关键技术的发展水平,决定了农作物病虫害遥感监测技术的发展水平。本文从监测平台、监测传感器技术和相关数据分析与处理技术3方面对农作物病虫害监测技术研究进展进行综述。在监测平台方面,归纳总结了地面监测平台、航空监测平台和卫星监测平台的国内外研究现状,并分析了上述平台优缺点;在监测传感器技术方面,综述了雷达传感器、图像传感器、热成像传感器和光谱传感器等在作物病虫害领域的研究进展;在相关数据分析与处理技术方面,阐述了经典统计算法、计算机图像处理算法、机器学习算法和深度学习算法在农作物病虫害监测领域的研究成果。最后提出了监测平台、监测传感器技术和相关数据分析与处理技术的未来发展趋势,以期为进一步促进我国农作物病虫害监测平台及相关技术的发展提供参考。

关键词: 作物; 病虫害; 监测平台; 遥感技术; 信息技术

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0001-19

OSID:



Research Progress and Prospect of Key Technologies in Crop Disease and Insect Pest Monitoring

LIAO Juan^{1,2} TAO Wanyan^{1,2} ZANG Ying^{1,2} ZENG Hongyi³ WANG Pei^{1,4} LUO Xiwen^{1,4}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment,
Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence (GDKL-AAI), Guangzhou 510642, China)

Abstract: Diseases and insect pest are the most restricting factors affecting the crop health, the improvement of the crop yield and quality. It is of great significant to strengthen the development of crop disease and insect pest monitoring. Therefore, to undertake the precise prevent and control on the crop disease and insect pest is key for ensuring the food safety, and improve the yield and quality of crop. The traditional disease and insect pest monitoring mainly relies on the manual field investigation, with low efficiency and quality, which can no longer meet the needs of efficient, intelligent and professional modern agriculture. With the development of information technology, the monitoring of crop diseases and insect pest has gradually developed from the traditional manual monitoring to remote sensing monitoring. Crop monitoring platform, monitoring sensor technology, data analysis and processing technology are key technologies for the development of remote sensing monitoring of crop diseases and insect pest. The development of the above technologies determined the development of remote sensing monitoring technology of crop disease and insect pest. The research progress of monitoring platform, monitoring

收稿日期: 2023-06-29 修回日期: 2023-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、兵团财政科技计划项目(2023AB014)、国家自然科学基金项目(31901401)、广东省科技计划项目(2021B1212040009)和广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515011528、2020A1515110225)

作者简介: 廖娟(1987—),女,助理研究员,博士,主要从事精准农业关键技术研究,E-mail: liaojuan0529@scau.edu.cn

通信作者: 罗锡文(1945—),男,教授,中国工程院院士,主要从事农业工程技术研究,E-mail: xwluo@scau.edu.cn

sensor technology, data analysis and processing technology for crop disease and insect pests were summarized. In terms of monitoring platform, the research status of ground machinery platform, aircraft platform, and satellite platform was summarized. In the monitoring sensor technology, the research progress of radar sensor, image sensor, thermal imaging sensor and spectral sensor for crop diseases and pests monitoring was summarized. In data analysis and processing technology, the research achievements of classical statistical algorithms, computer image processing algorithms, machine learning algorithms and deep learning algorithms in crop diseases and insect pests monitoring were expounded. Furthermore, recommendations were proposed for further promoting the development of crop diseases and insect pests monitoring, including building multi-scale integrated application monitoring platform, promoting the development of multi-scale data fusion sensor, and continuous optimizing multidisciplinary theory and algorithm structure research.

Key words: crop; disease and insect pest; monitoring platform; information technology

0 引言

中国是一个人口众多的国家^[1],保障粮食安全关系到我国国计民生和社会稳定^[2]。病虫害是农作物主要灾害之一,具有种类多、影响范围广、危害严重、爆发率高等特点,严重威胁粮食安全^[3]。近年来,全球气候变化的不断加剧导致作物病虫害分布范围及危害程度均呈现出不断加大的趋势。据统计,2019年,全球因病虫害造成的小麦、水稻、玉米等作物产量损失分别达到21.5%、30.0%和22.6%^[3]。全球因病虫害造成的粮食产量损失约占全球粮食总量的14%,其中,因虫害造成的粮食产量损失约占全球粮食总产量的10%^[4]。病虫害在农作物生长发育的不同时期均有发生,而且在农作物生长不同阶段发生的病虫害不同,因此,应在农作物不同生长阶段对病虫害进行严密监测,积极做好防治,以免发生重大损失^[5]。

病虫害精准防控是根据农作物病虫害的实际发生情况进行变量喷施和精准管理,是减少病虫害造成的损失、提高作物产量和农产品质量、减少农药污染和浪费、保障农产品安全、保护生态环境和增加农民收入的有效措施,病虫害精准监测是实施病虫害精准防治的前提和基础。目前,我国农作物病虫害防治主要以人工对病虫害是否发生以及危害程度的判断结果作为依据,进行农药喷施。人工监测方式耗时费力、时效性差、主观性强^[6],易造成病虫害漏防成灾和防控效率低等问题。且这种病虫害防治方式一般忽视不同区域受病虫害危害程度的差异,采取均匀喷洒的方式,造成资源浪费、农药残留、农产品药害以及环境污染。

现代农业的发展以及对精准施药的要求,对病虫害监测提出了新的要求。作物病虫害主要作用于作物的新陈代谢系统,使得作物内部系统生理机能和结构遭受损伤,外部表现为枯萎、斑点、霉粉等明

显的特征,内部表现为生物理化特征的变化,如叶绿素、胡萝卜素等色素浓度或含量,以及营养成分下降,而这些变化都会导致农作物光谱特性的变化。因此,可通过机器视觉、高光谱技术、遥感技术对农作物的生物理化性质以及光谱特性进行监测,是目前农作物病虫害监测的研究热点。

为了克服人工监测的缺点,雷达技术、图像技术和遥感技术等信息技术逐渐应用于作物病虫害的监测,并取得了一定进展。其中农作物病虫害监测平台、监测传感器以及相关的数据分析与处理技术是实现农作物病虫害遥感监测的关键技术。

本文拟阐述农作物病虫害监测平台、监测传感器以及相关的数据分析与处理技术的发展现状,总结目前存在的问题,并分析未来的发展趋势,以期作为作物病虫害遥感监测的发展提供参考。

1 农作物病虫害监测平台研究进展

农作物受到病虫害侵害后,其生理生化信息会发生变化,进而影响农作物的产量。病虫害监测是通过分析农作物生理生化信息变化来判断病虫害的发生与否及危害程度。遥感监测是将传感器搭载在各类监测平台对农作物病虫害实施全面监测的技术,为传统的作物调查方法提供了一种重要的补充手段,提高了大范围病虫害监测的能力。遥感监测平台大致可分为实验室遥感监测、近地遥感监测、航空遥感监测和卫星遥感监测,这些监测平台在作物病虫害监测中发挥着不同作用^[7]。

1.1 实验室监测平台

实验室监测平台是通过自动化传送设备和集成化传感器完成受病虫害侵染后作物的相关动态生长发育表型数据的获取。实验室监测技术可以对环境因素进行精准调控,严格控制作物的生长条件,如土壤的水分和养分等;可以精确模拟、有针对性研究复杂条件下的作物生长。其优势是分辨率和可控性高、重复性强且不受外界干扰,为后续的病虫害分析

提供高质量的多维图像和实验数据。

在实验室病虫害监测研究中,通常需要采集作物染病样本,离体后进行纯化培养。国外较早开展农作物病虫害检测与识别。ZHANG 等^[8]采用高光谱成像监测平台对水稻叶片进行了高光谱图像采集,提取全叶和非病叶的平均光谱反射率数据,并对以上数据进行重建,采用转换后的数据对受稻瘟病感染的水稻严重程度进行识别,结果显示基于支持向量机的模型在水稻拔节期、孕穗期和抽穗期 3 个时期的分类准确率分别为 83.33%、97.06% 和 83.87%。FENG 等^[9]利用实验室监测平台分别通过可见-近红外光谱(HSI)、中红外光谱(MIR)和激光诱导击穿光谱(LIBS)3 种方法对水稻白叶枯病、稻瘟病和纹枯病进行研究,采用这 3 种光谱特征融合的数据对水稻病害进行分类,结果表明特征融合和决策融合能提高模型的识别性能。CONRAD 等^[10]采用实验室监测平台收集了接种番茄枯萎病菌的水稻叶片的近红外光谱,采用支持向量机和随机森林两种机器学习算法建立了基于监督分类的疾病预测模型,结果显示基于支持向量机的模型准确率高,达到 86.1%。

国内对农作物病虫害的智能识别研究起步晚,早期专家现场诊断是主要的判别手段,这种方法存在效率低、主观性强等问题,随着我国现代农业的发展,人工识别病虫害的方法逐渐被取代。近年来,我国越来越多的学者开展了农作物病虫害监测相关研究工作。冯雷等^[11]采用具有绿、红和近红外三波段的多光谱成像技术的实时多光谱图像检测平台对苗期稻瘟病进行检测,提取了水稻叶面及冠层图像信息检测,试验结果表明对无枯叶状态下染病水稻检测的准确率最高,达到 98%。柴阿丽等^[12]研发了一套室内图像采集处理监测系统,提取了 4 种番茄叶部病害病斑区域特征参数并构建了判别模型,结果显示该系统对番茄叶部病害的识别准确率达到 94% 以上。田明璐等^[13]基于实验室监测平台的水稻叶片高光谱影像数据,通过对受稻纵卷叶螟虫害叶片和健康叶片在光谱反射率和植被指数上的差异进行统计分析,建立了一个基于 RVI 的决策树分类模型。袁建清^[14]采用实验室监测平台对 4 种不同胁迫水平下的水稻叶片的光谱特征进行分析,采用 4 种特征提取方法建立了叶片尺度稻瘟病的判别模型,为冠层尺度和区域尺度稻瘟病识别提供了基础。

计算机视觉技术作为一种智能手段是当前实验室监测研究的热点。ZAYAS 等^[15]在害虫检测方面采用模式识别和图像处理领域的多光谱分析理论,旨在提高害虫的检测准确率,试验结果表明该法有

较高的识别率。YANG 等^[16]探索了一种水稻(*Oryza sativa*)分蘖分析和产量性状的断层扫描和数字测量方法。MURAKAMI 等^[17]提出了一种自动计数蓟马的方法,该方法对黄瓜叶下表面的数字彩色图像进行识别。通过采集受蓟马虫害的黄瓜叶片图像,利用灰度共生矩阵等多种方法对这些图像进行辨别和分类。试验结果显示,分类精确率达 98% 以上。中国农业大学昆虫生态技术创新(IPMist)实验室在病虫害监测预警方面进行了多项研究,该实验室曾利用自主开发的软件对农作物上的白粉虱进行自动计数,精确率达到 90% 以上^[18]。王克如^[19]基于图像处理技术和神经网络技术等,实现了远程对作物进行病害图像识别与诊断。沈佐锐等^[20]采用普通相机获取温室白粉虱寄生叶片的图像,对图像分割后的二值图像结合数学形态学算法处理,利用区域标记进行白粉虱个体的自动计数,累积准确率达 91% 以上。刘占宇等^[21]采用 ASD 光谱仪采集了水稻二化螟和稻瘟病引起的白穗和健康稻穗的室内光谱,并选择红边面积、红边斜率、绿峰面积和绿峰振幅 4 个高光谱变量输入学习向量量化(LVQ)神经网络模型进行建模,测试结果显示对白穗和正常稻穗的分类精度高达 100%。谷牧宇^[22]在室内采集了水稻冠层光谱反射率叶绿素 SPAD 值、卷叶率,从实验结果来看,SPAD 值与卷叶率间存在极显著的相关性,水稻叶片叶绿素 SPAD 值有望用于稻纵卷叶螟危害的监测。

实验室监测平台主要是利用室内光谱仪等实现对可见光、近红外光谱等病虫害数据的获取,借助偏最小二乘法等数据处理方法对作物病原体潜伏感染及其严重程度进行判定。室内监测与田间监测相比,可以排除环境因素的干扰和重复采集数据等优势,适合小区域尺度的病虫害监测。但是在实际应用中,室内平台无法对田间病虫害实际发生情况进行评估,不适应田间农作物病虫害监测的需求。

1.2 田间监测平台

实验室中的农作物病虫害信息具有一定的局限性,无法代替田间试验研究。相对于实验室环境的可控性,实际大田中存在多种不确定因素,还可能出现多种胁迫同时共存的现象,导致监测难度增加。面向田间环境的监测平台可以研究作物在自然条件下的性状,环境开阔,气象条件真实,有利于作物病虫害监测研究。田间的作物监测平台按空间尺度可分为地面监测平台、航空监测平台和卫星监测平台。

1.2.1 地面监测平台

地面监测是基于手持仪器、塔基平台等平台搭

载光谱仪获取作物光谱反射率的一种遥感监测方式,利用非成像光谱仪测量作物受病虫害胁迫后的冠层及叶片的光谱反射率或者利用成像光谱获取作物光谱图像。地面监测平台的作物病虫害信息通常由地物光谱仪获取,PFRS 地物光谱仪是第一个研发出来作为农作物病虫害监测使用的便携式光谱仪。随着高光谱技术的发展,相继研制出 PIDS 地物光谱仪和 ASD 地物光谱仪用于作物长势和病虫害监测研究^[23]。

近年来,国内外学者通过地物光谱仪获取的光谱数据,分析了反射光谱特征与病虫害参数之间的关系,筛选出病虫害危害后的敏感波段,从而实现对病虫害的监测与分类识别(表 1)。地物光谱仪具有小尺度掌握作物病虫害相关信息等特点,能够在一定尺度空间内提高作物病虫害管理水平。YUAN 等^[32]结合地面高光谱和多光谱影像等监测陕西地区受白粉病胁迫的小麦,对提取的红光波段、绿光波段、归一化植被指数、三角植被指数和大气阻抗植被指数等光谱特征参数进行分析,发现能够较准确地识别出病害小麦,准确度达 78%。乔红波等^[33]利用 ASD 手持式高光谱仪对冬小麦条锈病、白粉病和麦蚜危害下的田间光谱反射率进行了测量,并采用了逐步判别、线性判别和分层聚类等方法筛选受胁迫的敏感波段,对作物病虫害具有较好的识别效果。杨菲菲等^[34]利用 ASD 非成像光谱仪和推扫式成像光谱仪进行冬小麦涝渍害监测研究,结果表明冬小麦涝渍害监测最佳波长范围为 640 ~ 680 nm。黄林生等^[35]利用非成像光谱仪进行小麦赤霉病的监测研究和模型构建,结果表明 MSR 结合 GASVM 的总体分类精度为 75%。谷牧宇^[22]采用高光谱遥感测定了小区水稻不同时期的冠层光谱,分析了反射率与卷叶率间的关系,试验结果表明:扬花期建立的卷叶率监测模型诊断正确率最高,孕穗期次之。梁勇等^[36]为了解决水稻稻纵卷叶螟和二化螟成虫图像识别自动化程度低的问题,自主研发了基于 YOLO v5 算法的水稻虫害识别模型和水稻虫害拍摄监测装置,该装置可以自动获取受这两种虫害影响的水稻图像,稻纵卷叶螟和二化螟识别的精确度分别达到 91.67% 和 93.39%,结果表明该监测装置可以用于水稻田间病虫害监测。高桓凯等^[37]设计了一款基于计算机视觉技术的南疆小麦病虫害监测系统,该系统通过数码相机采集小麦图像,经过预处理、特征提取、特征分析以及小麦病虫害类型诊断等步骤,最后通过用户端将诊断结果告知用户,实现了病虫害可视化监测。试验结果表明,该系统对黑穗病和根腐病等虫害监测准确率均达到 85% 以上。

表 1 不同作物不同病虫害光谱响应阶段			
Tab.1 Spectral response stages of different pests and diseases of different crops			
作物	病虫害类型	敏感波段/nm	文献序号
小麦	条锈病	446 ~ 725, 1 380 ~ 1 600	[24]
	白粉病	490, 510, 516, 540, 780, 1 300	[25]
	黄花叶病	560 ~ 720, 800 ~ 900	[26]
水稻	褐飞虱	401 ~ 661, 674 ~ 960, 410 ~ 510, 511 ~ 581, 565 ~ 680, 692 ~ 795	[27]
	叶瘟病	552 ~ 558, 672 ~ 682, 719 ~ 726, 756 ~ 768, 990 ~ 998	[28]
	白叶枯病	700 ~ 800	[29]
玉米	粘虫	660 ~ 880	[30]
番茄	叶斑病	628 ~ 643, 689 ~ 692	[31]

与卫星和航空监测的不可控性相比,地面监测有效避免了大气中各种因素的干扰,具有灵活方便、受外界因素影响较小及监测精度高等特点。作物叶片水平的光谱特征不受土壤和形态等因素影响,适用于开展农作物病害内部特征的深入研究。

1.2.2 航空监测平台

航空遥感监测是指利用航空飞行器作为运载工具在空中对地面作物进行病虫害监测。近年来,轻小型无人机遥感技术的快速发展为实现高精度量化的作物病虫害监测提供了契机。低空遥感系统的重要组成部分主要为轻小型的无人机遥感系统,具有时空分辨率高、成本低、灵活机动、操作简单等优势。因此,基于无人机遥感技术的作物病虫害监测方法能够为病虫害的防控治理提供有效的科学技术指导^[38-39],是病虫害高精度定量化监测的有效手段,也是未来精准农业发展的重要方向。

当前基于轻小型无人机遥感系统的作物病虫害监测研究主要集中在作物病害相关指数的提取、不同病害分类及时空监测等方面^[40]。随着航空技术的快速发展,无人机搭载的传感器体积越来越小、重量越来越轻、数据传输和处理越来越成熟,采用轻小型无人机遥感系统对作物病虫害进行监测取得了重要进展。HUANG 等^[41]基于机载 PHI 高光谱影像数据对小麦条锈病严重程度进行了反演及其发生区域制图。LI 等^[42]基于高光谱航空影像实现了柑橘黄龙病的遥感监测。兰玉彬等^[43]利用无人机低空监测,研究了一种快速高效的柑橘黄龙病病虫害识别方法,该方法利用无人机获取柑橘果园的高光谱影像,通过对黄龙病林冠感兴趣区域的光谱数据进行提取和分析,建立了柑黄龙病的判别模型,以实现对病情的监测和识别。郭伟等^[44]采用无人机搭载数码相机获取棉花冠层叶片数据,对受棉叶螨虫害影响的棉花冠层叶片进行了叶绿素遥感估测,结果表

明棉花冠层叶片叶绿素遥感监测模型可以估计棉叶螨虫危害情况。贺园园^[45]以棉花叶螨为病虫害识别对象,通过无人机遥感技术对健康叶片和叶螨病害进行监测识别,并建立了遥感影像识别模型,试验结果表明在叶螨发生的高峰期进行识别能够直接对健康棉田和叶螨区域进行划分。丁玥等^[46]基于无人机平台搭载高光谱成像仪获取受细菌条斑病胁迫的水稻光谱数据,采用相关性分析算法和敏感度分析法对光谱数据特征波段进行了选取,建立了基于特征波段和全波段对水稻细菌条斑病受害情况的支持向量机分级模型。结果表明,受细菌条斑病胁迫的水稻光谱红光区与近红外区之间存在高度相关性。罗菊花等^[47]基于多时相高光谱航空影像,通过提取敏感特征构建病情指数对小麦条锈病进行了监测研究,并对其发病严重程度及发病区域进行了评价,研究结果表明提取的敏感波段可用于指导作物病害监测波段选择。王小龙等^[48]采用无人机搭载的多光谱影像设备获取了棉花田地的影像数据,实现了棉花蜘蛛螨害的识别和分析。崔美娜等^[49]为了实时感知螨害情况,利用 UAV 多光谱图像数据对棉花螨害进行了调查,采用特征选择获取有效建模特征,建立了基于 UAV 多时相影像数据的螨害 Logistic 模型,并在此基础上建立了螨害时空变化监测模型。

与传统田间定位监测相比,无人机遥感监测技术的优势在于信息采集速度快、范围广等,基于无人机遥感的作物病虫害监测是目前农作物病虫害监测的先进技术,能够有效解决传统病虫害监测过程中的不足,是未来大面积病虫害监测的重要手段之一。但是采用无人机遥感监测方式时,由于不同种类的无人机平台在应用层面的数据参数存在一定差异,作为分析作物病虫害胁迫方法,一方面应重点关注空间分辨率、监测精度、飞行高度和续航时间等诸多与无人机相关的数据信息。另一方面,应研发飞行持久、稳定性高和可操作性强的无人机平台。

1.2.3 卫星监测平台

卫星遥感监测是以人造卫星为传感器载体平台,远程接收目标物体反射或辐射的电磁波,探测光谱特征信息,同时获取地面作物的图像和光谱数据的一种技术^[50]。与传统的监测方法相比,具有测量效率高、覆盖区域广等特点^[51],也是农作物病虫害监测的重要发展方向之一。

国外研究卫星遥感技术较早,美国和欧盟等国家已将卫星遥感逐渐应用于农场管理,如美国的 Landsat 系列卫星、欧洲航天局的哨兵系列(Sentinel series)、高光谱卫星 Hyperion 等。MIRIK 等^[52]利用

Landsat 5 TM 图像记录了定点小麦条纹花叶病的检测和量化,用于小麦作物管理。YUAN 等^[53]基于 Worldview 2 和 Landsat 8 卫星图像对麦田白粉病和蚜虫的发生进行了监测,提出了一种基于两类遥感数据监测作物病虫害生境的方法。CHAO 等^[54]从哨兵二号卫星遥感影像中提取小麦条锈病的特征参数,采用支持向量机(SVM)建立了监测模型。YUAN 等^[55]和 HAN 等^[56]利用高分辨率的 SPOT-6 卫星遥感影像提取的归一化植被指数(NDVI)、三角植被指数(Triangular vegetation index, TVI)、大气阻力植被指数(Atmospherically resistance vegetation index, ARVI)等多个病害敏感指数以及蓝、绿、红、近红外 4 个原始波段的组合,结合适当的分类方法,成功绘制了区域尺度的小麦白粉病危害。CHEN 等^[57]利用 Landsat 5 TM 卫星进行棉花黄萎病监测研究,结果表明黄萎病严重度与波段 1、3 呈极显著正相关,与波段 4 呈极显著负相关,与波段 2、5、7 相关性较弱。RAZA 等^[58]利用 PlanetScope 卫星进行大豆猝死综合症监测研究,结果表明随机森林算法可将健康和患病大豆植株进行分类,精度达 75% 以上。FRANKE 等^[59]利用 Quickbird 高分辨率遥感影像进行小麦白粉病和条锈病监测研究,采用混合调谐匹配滤波(MTMF)和 NDVI 对不同染病程度的区域进行划分,识别精度达 88.6%。

国内在病虫害卫星遥感研究方面的发展起步较晚,但近年来取得了快速发展。中国发射了一系列高分辨率卫星,如高分系列、资源系列、环境系列等,这些卫星具有较高的空间分辨率和多谱段观测能力,能够提供对地观测数据。同时,欧洲太空局发射的哨兵系列卫星也为病虫害监测提供了重要数据支持^[60]。高分一号卫星(GF-1)于 2013 年在我国成功发射,它以高时空分辨率、多光谱和覆盖范围广等优势,为及时准确地监测作物的生长状况创造了非常有利的条件。高分五号卫星是我国最先进的高光谱探测卫星,具有高光谱分辨率、高精度、高灵敏度观测能力,多项指标达到了国际先进水平。高光谱遥感技术在不断地向高空间分辨率方向发展的同时,光谱分辨率也在不断提高。王霄煜等^[61]基于高分一号卫星遥感影像与地面样方数据采集的光谱相结合进行分析,获得了新疆卡玛斯县及周边的棉花种植面积,采用阈值分析、监督分类和非监督分类 3 种方法进行数据对比分析,结果表明非监督分类方法相比其他两种精度更高。胡根生等^[62]和马慧琴等^[63]利用 Landsat-8 卫星影像数据提取的多种遥感特征结合粒子群优化的最小二乘支持向量机和 AdaBoost 等不同分类方法成功监测了区域尺度小麦

白粉病。黄林生等^[64]利用 Sentinel-2 卫星影像提取常规的病害敏感植被指数和红边波段指数,并结合 BP 神经网络方法对小麦条锈病进行了监测研究。

卫星遥感监测病虫害研究主要以国外卫星为主,国产卫星病虫害监测研究较少。现阶段,高光谱卫星遥感影像监测主要用于监测作物病虫害的危害程度,属于事后处理,这种方法无法提前预防病虫害的发生。因此,有必要加大预测作物病虫害的高光谱卫星遥感技术的研究,通过对病虫害进行预测,减少作物病虫害和造成的相关损失,为有关部门防治病虫害提供参考。

综上所述,实验室监测平台、地面监测平台、航

空监测平台以及卫星监测平台各自有优势,也有不足(表 2),它们在不同场景的农作物病虫害监测中发挥了重要的作用。地面监测平台的优点是采样精度高、受环境和载荷限制相对较小,但数据获取覆盖范围小、采样效率低,因此,基于地面高光谱技术的作物病虫害监测识别研究主要应用于室内或小范围田间区域。航空或卫星图像遥感技术主要应用于大田区域、国家或更大尺度的病虫害识别中,由于田间的复杂地形和植被环境,航空或卫星图像遥感采样精度相对较低,很难实现不同病虫害的识别。未来应充分利用现有技术及资源,发展“星-机-地”联合应用平台,实现大尺度病虫害信息的高效和精准获取,以满足大田病虫害高精度监测识别的需求。

表 2 各类作物病虫害监测平台优缺点分析

Tab. 2 Analysis of advantages and disadvantages of various crop diseases and insect pest monitoring platforms						
监测平台类型		优点		缺点		
实验室平台		分辨率高、可控性好、重复性强、不受外界干扰、适合小区域监测等		监测面积小、无法满足多环境因素、效率较低、成本较高等		
田间地面平台		可进行连续作业、测量精度高、可信度高、获取数据方便等		覆盖面积小、效率低下、耗费大量人力物力、智能程度低等		
航空平台		载荷能力高、可进行较大面积监测、可搭载多种传感器等		易受恶劣天气等环境因素干扰、电池续航能力弱、空间分辨率较低、运营成本高等		
卫星平台		可连续观测、监测范围广、数据采集速度快、监测视点高、影像信息丰富、可进行大面积监测等		卫星遥感影像存在混合相元、成本高、精度相对较低等		

2 作物病虫害监测传感器研究进展

常见的作物病虫害信息获取方法有声信号检测

法、图像识别法和光谱检测法等,不同传感器的优势和不足各异,在不同场景的病虫害监测中,发挥着重要作用(表 3)。

表 3 不同传感器优缺点及相关研究成果

Tab. 3 Advantages and disadvantages of different sensors and related research results						
传感器	波段/nm	电磁波类型	优点	缺点	应用场景	文献序号
雷达传感器	106 ~ 1 010	脉冲电磁波	采集信息速度快、精度高、可获取作物水平及其垂直结构的冠层信息,主要用于害虫迁移的检测等	成本极高,不能长期不间断观测,作用范围较小等	作物点云信息采集等	[65-67]
图像传感器	390 ~ 770	红、绿、蓝光	体积小、数据量小、使用方便、成本低、数据结构简单且直观等	易受光照等环境因素影响,波段少、分辨率低等	产量预估、作物分类等	[68-70]
热成像传感器	750 ~ 2 500	红外光	可将红外辐射图像转化为可视的热量图、不受电磁干扰、可以全天候监测等	图像分辨率低、信噪比低、受外界环境因素干扰大、获取信息较单一等	作物表层温度、水分胁迫监测等	[71-82]
多光谱传感器	390 ~ 3 000	可见光、红边、近红外光	波段多、信息量大、成本低等	无法提供连续的高光谱分辨率频谱信息、图像质量差、波段易饱和等	作物表型反演、病虫害监测、水分胁迫监测等	[83-87]
高光谱传感器	10 ~ 5 000	可见光、近红外光、中红外光	光谱信息丰富、分辨率高、准确度高、可提供完整且连续的光谱曲线等	操作困难、数据过于复杂、价格昂贵等	叶面积指数、叶绿素含量检测等	[88-97]

2.1 雷达传感器

雷达是一种基于目标的电磁波传播和回波信号

反射进行远程监测的工具,雷达监测是通过雷达传感器接收害虫反射的雷达信号进行虫害信息获取的

方法。雷达信号通常为高频无线电信号,当害虫反射足够多的雷达信号时,接收机可以接收并获得害虫信息。与光学成像遥感不同,激光雷达是一种利用激光脉冲与目标物相互作用来获取相关信息的技术。其主要优势是可以获取高精度三维数据,在作物垂直结构探测上开辟了可能性,弥补了光学遥感在提取冠层结构信息方面的不足。BRIECHLE 等^[65]通过将 3D 深度神经网络 Point Net++ 和激光雷达数据与多光谱影像融合,对多种树种(松树、桦树、桤木)和带有树冠的枯立木进行分类,结果表明是可行的。雷达也适合于观测作物虫害种群的远距离迁移等。YU 等^[66]将无人机搭载的高光谱成像数据和激光雷达数据的融合进行害虫的检测,并通过类似的方法评估了松梢甲虫造成的损失。因为昆虫体内含水率较高,对雷达信号有良好的反射特性。常用的虫害探测雷达发射的波长为厘米波,对大规模昆虫种群的探测距离可达几十千米。目前已研制出可以实现对小昆虫进行远距离迁飞观测的毫米波昆虫雷达。杨秀丽等^[67]基于我国首台毫米波扫描昆虫雷达,采集了稻飞虱、稻纵卷叶螟等害虫的虫量和飞行高度数据,分析了虫群的迁飞规律和轨迹。

雷达监测技术不仅可以用于提取作物水平和垂直结构的冠层信息,也可用于检测害虫迁移,预防突发性害虫的爆发。但是雷达观测法也存在局限性,首先是雷达观测法不适用于隐蔽害虫的检测,且由于迁飞性虫害需要长期不间断进行观测,观测成本极高;其次是雷达系统的价格十分昂贵,而且算法模型存在局限性。因此,雷达监测技术有待进一步改进,目前在农作物病虫害监测方面的应用仍处于试验阶段。

2.2 图像传感器

图像识别法是利用图像传感器采集病虫害图像从而获取病虫害信息的方法,经过分析和处理病虫害图像,可以有效地区分病虫害的类型和数量。该方法极大地提高了识别精度和效率,同时降低了劳动强度。

近年来,国内外学者对田间作物病虫害图像识别进行了较多研究,并且取得了较好的研究成果。杨英茹等^[68]针对复杂环境下番茄叶部图像识别困难的问题,采集了温室番茄白粉病、早疫病和斑潜蝇 3 种常见的病虫害图像,提出了一种基于颜色纹理特征的复杂环境番茄叶部图像病害识别方法(CCL-SVM),试验结果表明该方法识别精度高于深度学习 VGG16 和 Alexnet 方法,CCL-SVM 方法在识别精度上更优,并且每个小区域图像的平均测试时间更短,具有减小复杂背景影响、计算量小以及系统

要求低的优点。马超等^[69]以田间开放环境下采集的水稻病害图像为研究对象,提出了一种基于方向梯度直方图(HOG)特征和支持向量机(SVM)的水稻病害检测方法。该方法利用 HOG 特征提取病虫害图像的特征向量,并将特征向量输入到 SVM 分类器进行训练,从而实现对整个图像中病斑的自动检测。结果表明,该方法对多种病斑的综合识别率可以达到 94% 以上,具有在不同拍摄环境下适用性强、处理过程简便等优点。王雪等^[70]以黄瓜霜霉病为研究对象,采用高清数码相机直接获取黄瓜病害样本的数字图像,采用灰度化处理、二值化处理和边缘检测法处理等方法提取了病害特征参数,利用 K 值近邻法对样本进行分类识别,结果表明识别率达到 95%。

目前,图像识别方法在作物病虫害监测中得到了广泛的应用,但仍难以应用于大面积种植的大田作物,主要是田间环境较为复杂,图像传感器容易受光照条件、土壤覆盖和天气等因素影响,而且噪声和干扰也会降低检测的效率和准确性。此外,作物虫害的遮蔽性和迁移性使得检测更加困难。

2.3 热成像传感器

热成像技术利用热成像传感器拍摄热红外图像,监测病虫害早期危害引起作物表面的温度差异,实现监测目的。热成像技术具有以下优点:不受电磁干扰,可以远距离定位目标;不受光线影响,全天候监测;具有很高的灵敏度和较强的预警性。因此热成像技术可作为作物病原体早期监测和作物病虫害量化的工具^[71],提供作物生理上不可见的信息。

热成像技术在侵染性病害监测方面的应用包括番茄花叶病、苹果结痂病、小麦叶锈病及甜菜褐斑病等^[72-75]。热成像技术对苹果疮痂的早期检测结果表明,在发病前 1~3 d,病原菌在表皮下生长会引起叶片温度局部下降,叶片明显患病面积百分比与热像仪观察到的最大温差有一定的关系^[50]。OERKE 等^[74]采用数字红外热成像技术对接种苹果黑星病菌后的苹果叶片病情的严重程度进行检测和定量分析,并研究了其对苹果叶片蒸腾作用的影响。BELIN 等^[76]对比荧光技术和热成像技术对苹果疮痂病的检测结果表明,热成像技术在检测和量化叶片表面苹果痂方面比荧光成像技术具有极大的优势。SCHMITZ 等^[77]利用航空遥感热成像技术通过温度差异识别健康甜菜和受线虫危害的甜菜。STOLL 等^[78]在室内采用热像仪对不同水分条件下接种霜霉病的葡萄叶片进行监测,在接种 4 d 后就可以观察到热响应特征,而且不同水分状况下的叶片之间温度存在明显差异。WANG 等^[79]以感染尖

孢镰刀菌的黄瓜叶片为研究对象,采用热红外相机监测其应激反应。研究发现,在感病初期,叶片的蒸腾速率下降导致叶片温度上升,随着细胞的失水死亡,叶片温度略有下降。在感病后期,叶片的水平衡被破坏,组织死亡并脱水,最终导致温度上升。研究认为红外热成像技术可用于无损监测黄瓜镰刀菌枯萎病,并取得了良好的效果。朱文静等^[80]采用红外热成像传感器对整株小麦样本进行图像采集,研究真菌对健康植株、潜伏期植株和显症植株的温度变化规律。结果表明,基于红外热成像边缘检测算法的小麦叶锈病分级方法是可行的。李小龙等^[81]利用热红外成像技术观测到小麦染病叶片和健康叶片之间 1.22℃ 的温度差异。朱圣盼^[82]利用可见光采集系统、红外热图像采集系统和多光谱图像采集系统对植物早期病害进行初步监测。在使用红外热像仪观察植物叶片时,还结合其他试验方法研究了叶片的内部变化,如电镜试验、超微病变分析和叶绿素含量检测等。热图像清晰地显示了病变部位与健康部位的温度差异。

热成像遥感技术是一种基于温度差异进行病虫害信息分析的方法。研究表明,热成像技术具有检测速度快、测温精度高等优势。热成像技术在作物病害检测方面有广泛的应用前景。但复杂的外界环境为热成像技术精确监测作物带来了巨大的挑战,从而导致热成像技术在作物病虫害监测方面的研究较少。

2.4 光谱传感器

光谱技术是一项基于分析狭窄的连续光谱波段的反射,以找到对疾病最敏感的波段的技术^[51]。由于病虫害会造成作物叶片的营养成分等生理情况发生变化,进而导致患病作物与健康作物在光谱反射特性上存在较大差异。光谱技术通过获取田间作物可见光、近红外和短波红外等波段的光谱信息,从而实现对作物病虫害的监测,如图 1 所示。光谱技术分为光谱非成像技术和高光谱成像技术,高光谱成像技术可同时获取作物的图像和光谱信息,具有波段信息丰富、数据量较大等特点^[83]。

光谱检测适合大面积检测,具有快速、无损和无接触等检测特点,光谱传感器已被广泛应用于作物病虫害的监测。ASHOURLLOO 等^[84]通过光谱混合分析与 Fisher 方法,找到了对叶锈病胁迫敏感的 605、695、455 nm 3 个高光谱有效监测波长。BAURIEGEL 等^[85]在实验室条件下获取小麦赤霉病的高光谱数据,研究得出 500 ~ 533 nm、560 ~ 675 nm、682 ~ 733 nm 和 927 ~ 931 nm 波长范围为区分健康与患病的小麦叶耳组织的最佳波段。MA 等^[86]应用

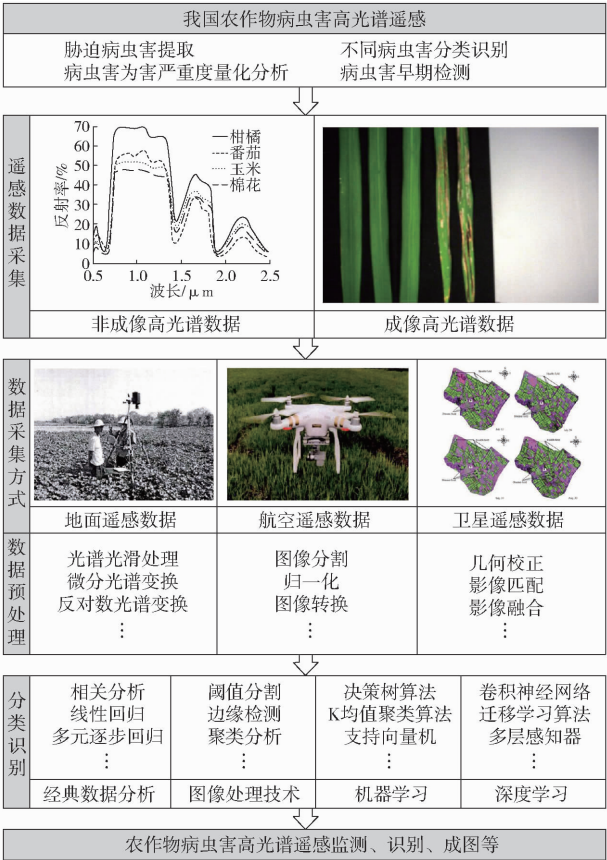


图 1 基于高光谱的作物病虫害处理流程图
Fig. 1 Crop pest treatment process based on hyperspectral spectrum

连续小波分析对由镰刀菌引起的赤霉病侵染的麦穗进行可见-红外波段的高光谱识别,最终确定471、696、841、963、1 069、2 272 nm 共 6 个小波特征,并利用 Fisher 线性判别分析建立了基于这 6 个小波特征的赤霉病的识别模型。FENG 等^[87]利用人工接种田地、盆栽和病害苗圃试验采集高光谱数据,得到白粉病冠层光谱最敏感的比值指数形式的波长范围为 570 ~ 590 nm 和 536 ~ 566 nm,对归一化差值指数的最佳波长波段为 568 ~ 592 nm 和 528 ~ 570 nm。PRABHAKAR 等^[88]利用高光谱辐射计测定了选定作物的叶绿素和相对含水量,并对棉田的叶蝉危害进行了检测,结果显示健康植株和叶蝉侵染植株的反射率在近红外(NIR)和可见光区(VIS)有显著差异,叶绿素 A 含量明显低于叶绿素 B 含量。竞霞等^[89]基于野外定位调查数据及高空间分辨率遥感影像,采用变量投影重要性(VIP)准则和偏最小二乘回归(PLS)方法,建立了棉花黄萎病病情严重度的定量估测模型。该模型利用野外调查数据和高空间分辨率的遥感影像,能够有效估测棉花黄萎病的严重程度。地力夏提·依马木等^[90]采用多光谱遥感影像和 Logistic 算法,实现了对棉田虫害的田间监测。试验结果表明,准确率达到 90.5%。乔红波

等^[91]采用手持式高光谱仪分析了不同时期地面平台光谱反射率与病情指数,结果表明近红外波段的相关性高于绿光波段。袁琳^[92]提出了一种基于成像高光谱技术区分小麦病虫害叶片的方法,以小麦条锈病、白粉病以及蚜虫病 3 种病虫害为例,根据光谱特征、图像几何和纹理特征识别和区分病虫害。黄双萍等^[93]利用高光谱成像技术对水稻穗瘟病害等级程度进行分级,分类识别精度达到 94.72%。雷雨等^[94]利用高光谱成像技术提出了一种小麦条锈病病害等级程度分级方法,分级准确率为 98.15%。刘爽等^[95]结合高光谱图像和机器学习提出了一种对大量小麦赤霉病籽粒样本进行快速可视化识别的方法,该方法识别准确率达到 90% 以上。

综上所述,国内外科研工作者对基于光谱遥感技术在作物病虫害监测方面的应用进行了大量研究,奠定了光谱遥感技术在农作物病虫害监测中的重要地位,农作物病虫害监测正在向无损伤、高空间分辨率和高时间分辨率的作物病虫害监测方向发展。光谱遥感技术根据光谱仪所处高度可分为近地遥感技术、机载遥感技术和卫星遥感技术。由于探测高度不同,获取的数据形式及特点也存在很大的差异。近地遥感技术获取的数据主要为非成像模式,精度高,能准确反映作物信息但检测范围小;卫星遥感技术属于成像光谱,监测范围大但精度低;机载遥感光谱也属于成像光谱,机动强度、估测精度和监测范围介于上述两者之间。不同尺度遥感技术存在各自优势,基于多尺度遥感技术作物监测的研究相对缺乏,为了提高监测精度、稳定性和实用性,应结合作物特点进行数据融合,集合各技术优势,最终实现“星-空-地”一体化同步实时监测。

3 农作物病虫害数据分析与处理方法研究进展

为了实现作物病虫害精准监测,需要选择适当的算法结构,构建所选光谱特征和病虫害类别以及危害程度之间的关系模型。目前,在作物病虫害遥感监测预测中使用比较多的是经典统计模式、计算机图像处理方法、机器学习法和深度学习算法等(表 4)。

3.1 经典数据统计分析法

经典的统计分析法主要包括回归模型、主成分分析、聚类分析和判别分析等方法^[112-115]。由于其具有形式简单、机制明确等优点,目前被广泛应用于农作物病虫害的监测研究中。JONES 等^[116]通过分析从偏最小二乘(PLS)回归,分析相关系数谱,并通过逐步多重线性回归(SMLR)程序来确定有效波长。这些分析方法揭示了几个重要的区域波长,并

表 4 不同数据处理方法在作物病虫害方面的应用
Tab.4 Application of different data treatment methods to crop diseases and insect pests

数据处理方法	算法	作物	病虫害种类	文献序号
经典统计	相关分析、方差分析	小麦	白粉病	[96]
	线性回归、非线性回归	小麦	条锈病	[97]
	逻辑回归分析	小麦	白粉病	[98]
	偏最小二乘法	小麦	条锈病	[99]
	偏最小二乘回归、多元逐步回归	番茄	叶斑病	[100]
	边缘检测法	水稻	叶瘟病	[101]
	数学形态法	小麦	条锈病	[102]
	聚类分析法	水稻	褐飞虱	[63]
图像处理	BP 神经网络	水稻	褐斑病	[103]
	模糊 C 均值聚类算法	棉花	炭蛆病	[104]
	最大类间方差法和边缘检测法	黄瓜	病虫害	[105]
	主成分分析	番茄	枯萎病	[106]
	人工神经网络	黄瓜	花叶病毒	[107]
	线性判别分析和支持向量机 Fisher	小麦	白粉病	[108]
机器学习	AdaBoost			
	偏最小二乘判别分析	大豆	枯萎病	[109]
	随机森林	水稻	细菌性条斑病	[110]
	迁移学习	番茄	病虫害	[111]

产生了基于吸收光谱的疾病严重程度的预测模型。采用最优模型预测验证数据集的疾病严重程度,均方根差(RMSD)为 4.9%,决定系数 R^2 为 0.82。刘鹏等^[117]在其研究中对不同生育期的小麦冠层条锈病进行了高光谱数据分析,并采用 t 检验和相关性分析等统计方法筛选特征波段。建立了一套病害诊断特征波段筛选方法,分别得到了适合条锈病早期检测的 4 个波长为 576、705、712、1 416 nm 和中期检测的 5 个波长为 558、632、375、696、712 nm。陈云浩等^[118]获取了不同生育时期染病冬小麦冠层光谱和病情指数,在 350 ~ 1 350 nm 范围内利用主成分分析法提取前 5 个主成分,以及在蓝边(490 ~ 530 nm)、黄边(550 ~ 582 nm)和红边(630 ~ 673 nm)内的一阶微分光谱的前 3 个主成分,借助以上特征波段构建了用于检测冬小麦条锈病的病情反演模型。袁琳等^[119]利用 ASD 光谱仪测量了小麦叶片条锈病和白粉病两种高光谱数据,通过相关分析法和独立 T 检验,筛选出两种病害敏感度差异明显的光谱特征波段,并构建了病害判别模型和病情严重度反演模型。孙瑞林^[120]选取小麦 25 种植被指数与 DI 进行一元线性、逐步回归和 BPNN 建模,筛选出不同生育期最优的小麦叶锈病监测模型。楚万林等^[121]在研究棉

花冠层叶片时,发现基于棉花叶片一阶导数光谱建立的多元逐步回归模型可以有效估算棉花叶片的叶绿素含量。黄亚雄^[122]和李岚涛等^[123]分别采用基于 NDVI 的回归模型和 FDR-PLS 模型对油菜产量进行了预测研究,模型决定系数分别达到 0.75 和 0.91。

3.2 计算机图像处理法

随着科学技术的快速发展,图像处理技术被广泛应用于作物病虫害的识别和诊断^[124]。作物受到致病菌感染后,会发生一系列代谢变化,导致作物叶子的颜色、形状、纹理和光谱等外部特征发生变化^[125]。不同病害由于不同的致病病原体导致的病斑特征也不相同,因此,可以通过作物叶片的图像信息来判断作物是否感染病害^[126]。

基于传统图像处理技术对病虫害进行识别与诊断的研究主要包括图像预处理、图像特征提取、图像特征降维和病虫害模式识别模型构建 4 部分。HEIDARIAN 等^[127]利用光谱带组合的方法研究小麦植株在红、绿、蓝光谱通道之间的变化确定小麦病叶面积,实现了健康植株与发病植株的区分。朱文静等^[80]基于红外热成像边缘检测算法对小麦叶锈病进行分级。胡智元等^[128]和陈柄权等^[129]提出了一种改进门限型中值滤波算法,该算法能够有效地去除噪声并且保留图像细节。在图像特征提取方面,边缘检测是计算机视觉中重要的研究方法,也是解析作物图像的关键技术。边缘检测不仅是数字图像处理的重要方法,也是解析作物图像的关键技术。陈浩等^[130]将蚁群算法引入到玉米干旱的热成像图处理中,并提出将边缘检测用于红外热像分析中。特征挑选的目的是为了挑选对病虫害识别更有利的特征,主成分分析作为常用的线性降维方法被广泛应用,朱景福等^[131]提出一种在 RGB 彩色空间用流形学习算法进行玉米叶片病虫害彩色图像识别的方法。王莹等^[132]针对多光谱图像数据维数高导致图像色彩再现过程中数据处理复杂度高的问题,提出了一种多光谱图像非线性降维方法。对植物病虫害进行特征挑选之后,一般采用支持向量机、人工神经网络等完成对病虫害的分类。叶聪等^[133]提出了基于图像灰度频率与人工神经网络的病虫害防治方法。黄巧义等^[134]探讨了一种基于支持向量机和最大类间方差法相结合的水稻冠层图像分割算法,以解决田间多变光照强度对水稻冠层图像分割带来的难题。

传统图像处理在植物病虫害之间迁移能力差,且病斑分割和病虫害识别性能不理想。卷积神经网络的出现有效提升了植物病虫害之间的迁移能力且

其端到端的病虫害特征提取能力为植物叶片病虫害实时、准确的诊断提供了技术支持。曾伟辉等^[135]为了解决稻田自然环境下拍摄到的害虫图像质量较低的问题,提出了一种基于 SCResNeSt (Self-calibrated convolutions and ResNeSt block for ResNet50) 的低分辨率水稻害虫识别网络,通过将低分辨率图像进行剪裁处理,构建并训练 ESRCAN 网络以生成与原始图像相当的超分辨率 (Super-resolution, SR) 图像,进一步提高了水稻害虫识别的准确率。于通^[136]利用卷积神经网络和计算机视觉技术,实现了对大豆、玉米和人参 3 种作物共 12 种叶部病害进行图像识别,并对现有的卷积神经网络模型进行改进,显著提高了模型识别率。邱靖等^[137]在深度学习 Keras 框架下,采用水稻 3 种病害经归一化处理的数据,对深度卷积神经网络进行训练,建立了 3 种水稻病害识别模型。许景辉等^[138]为实现复杂田间背景下的玉米病虫害图像识别,提出了一种基于迁移学习的卷积神经网络玉米病虫害图像识别模型。杜忠康等^[139]将深度特征融合算法与卷积神经网络相结合,在较好保留相关信息的前提下去除特征图像的冗余特征,实现了番茄叶片的快速检测。万颖等^[140]针对基于图像分割与卷积神经网络的水稻病虫害识别方法对光照和背景比较敏感等问题,提出了一种基于物联网和深度卷积神经网络的水稻病虫害识别方法。

目前,计算机图像处理技术应用十分广泛,在农业生产过程中,应用图像处理技术可以对农作物的病虫害问题进行实时监测。与人工监测相比,图像处理技术可以准确快速地获取病虫害信息,使诊断更加精准有效。未来将图像处理技术与计算机技术结合使农业作物病虫害监测向自动化、智能化的方向发展,必然能够提升农业生产的效益。

3.3 机器学习方法

近年来,机器学习方法逐渐在遥感监测作物病虫害胁迫领域得到应用^[141]。机器学习方法主要分为经典机器学习方法和深度学习方法。经典学习机器方法主要有支持向量机、决策树和 K 近邻算法等,所需训练样本数据较小,设备性能要求较低、模型更容易理解。ZHOU 等^[142]通过分析无人机获取的冠层高度 (CH) 和植被覆盖度 (VFC) 等冠层结构,以及 Sentinel-2A/B 数据计算的基于卫星的光谱特征,采用机器学习模型 (包括偏最小二乘回归 (PLSR)、支持向量回归 (SVR)、随机森林回归 (RFR) 和极值学习回归 (ELR)), 评估无人机数据替代人工采样数据和预测田间病情指数 (DI) 的潜力。结果表明,SVR 方法的性能略优于其他方法,

均方根误差 (RMSE) 为 1.89%。此外,与单一类型特征 (RMSEs 为 2.86%, RMSEVIs 为 1.93%) 相比,冠层结构 (CS) 和植被指数 (VIs) 的组合提高了预测精度。MA 等^[143]为了在区域尺度上区分小麦白粉病和蚜虫,采用基于原始训练数据集的 BPNN 和支持向量机 (SVM) 方法对作物生长和环境参数初试结果进行比较和测试,结果表明,该方法结合不同作物时期的生长和环境参数,双时生长指数模型和基于环境因子的 SMOTE - BPNN 模型、BPNN 模型、SVM 模型的总体准确率均在 80% 以上,SMOTE 与 BP 神经网络相结合,可有效提高小个体病虫害的识别精度。

深度学习是机器学习领域中的一个新兴分支,通过构建深层神经网络模型来实现自动化的特征学习和模式识别。深度学习的主要特点是具有多层网络结构,可以学习数据的抽象层次表示,从而提取出更高级、更抽象的特征。在一些复杂的场景中,深度学习方法在监测作物病虫害方面表现出强大的能力。BRAHIMI 等^[144]采用 AlexNet 和 GoogleNet 训练 14 828 幅感染疾病的番茄叶片图像,通过可视化的方法了解叶片的症状定位病害区域,实现了对包含 9 种病害的番茄叶片图像的分类。DANG 等^[145]利用高光谱及无人机遥感技术进行棉花根腐病的监测研究,结果表明在非监督分类下二者均能准确地识别出感病区域。RODRIGUEZ 等^[146]利用无人机遥感技术进行马铃薯晚疫病的监测研究,采用 5 种分类方法对病区进行分类,结果表明线性支持向量机和随机森林算法分类效果最佳。崔丽洁^[147]提出了一种迁移学习的方法以改善水稻病斑图像集样本数量不足的问题,该算法是基于预训练的 DDC 深度迁移学习,将水稻图像集迁移到大型数据集上预先训练好的卷积神经网络模型中进行再次训练。针对不同的训练样本差异较大的问题,提出用 DDC 算法进行优化,将最终得到的训练结果与直接在训练集上训练的结果进行比较,验证了所提出算法的有效性,证明了该算法具有更强的表征能力。唐翠翠等^[148]采集了小麦白粉病、条锈病、蚜虫和全蚀病等多种病虫害的数据信息,采用模式识别和机器学习算法对多种病害种类进行了区分、估算和预测研究。其团队还自主研制了国内首个全国尺度的作物病虫害遥感监测预警系统,定期在线发布病虫害遥感专题图和灾情评估报告。孙俊等^[149]提出了一种基于卷积神经网络的识别模型,该模型结合了批归一化和全局池化的技术,能够有效识别 14 种不同植物的 26 类病害,该模型受叶片空间位置变化的影响较小,具备较高的识别精度和鲁棒性。张初^[150]对极限学习机

(Extreme learning machine, ELM)、RBF 神经网络、随机森林、支持向量机、K-近邻 (KNN) 等判别算法进行了比较分析,以识别油菜叶片病害部位的健康区和病区。

综上所述,深度学习相较于传统机器学习具有很多优势,包括自动化程度高、运算速度快以及对特征的自主学习能力。通过深度学习,可以将任务与特征进行联合建模,提取更加准确的信息。

相较于传统机器学习的自动化程度低和运算速度慢等特点,深度学习能够自动进行任务建模,自动化程度高,提取信息精准,在许多领域取得了重大突破。但是,深度学习也有一定的限制。首先,深度学习算法通常需要大量的训练数据才能达到较好的性能。此外,深度学习对计算机的性能要求较高,特别是处理大规模数据和复杂模型时,可能需要使用高性能的硬件设备。此外,深度学习模型的设计和调优也需要一定的专业知识和经验。因此,对深度学习还需要进行深入研究。

4 结论与展望

4.1 结论

目前,我国正处于由传统农业向现代农业发展的阶段。现代农业要求农业生产过程实现精准化,精准施药是精准农业的重要内容之一,农作物病虫害精准监测是实施精准施药的前提和基础。我国采用自主研发的遥感卫星、无人机和信息技术,农作物病虫害的精准监测研究与应用取得了显著进步,为现代农业的发展提供了重要支持。但是,与发达国家的农业现代化水平相比,我国仍处于落后阶段。目前,采用可见光成像技术、雷达、热成像和光谱技术监测作物病虫害胁迫的相关研究已取得较大进展,但离实际应用还有一定的距离。在监测平台和传感器的研发和应用方面还存在不足,在监测病虫害数据获取、处理和应用方面仍有很大的发展空间。

4.2 展望

结合目前我国农作物病虫害监测研究现状,应从以下方面加大力度开展研究,进一步促进我国农作物病虫害监测的发展:

(1) 监测平台

现有的病虫害监测平台大多采用单一监测平台,且仅针对少数作物的少数病虫害监测或单一作物的单一病虫害监测,而大田农作物往往是多种病虫害同时发生,因此,在作物病虫害监测中,往往需要同时提供多种病虫害的多尺度信息,以便于更准确更全面的进行分析。随着作物病虫害监测研究的不断深入,如何利用现有技术资源,将多尺度的平

台数据融合,以构建“星-机-地”综合应用监测平台,获取多尺度、多类型病虫害特征的海量信息数据,建立高质量的病虫害信息数据技术体系,是农作物病虫害监测的发展趋势。

(2) 传感器

“同物异谱”和“同谱异物”现象是作物病虫害监测中获取有效信息的难点,利用高精度传感器或多传感器遥感数据相融合的方法可有效减少“同物异谱”和“同谱异物”现象对水稻病虫害监测精度的影响,从而提高水稻病虫害监测精度。但国外进口高精度传感器成本较高,难以推广应用。由于不同传感器适用于不同特定的环境,多种传感器获取的数据信息通常在大范围的应用中适用性较差,与单个传感器提取出的统一且单一的数据相比,使用多传感器获取的数据量大,数据处理难度也大。因此,在保证监测要求和精度的情况下,一方面,应开发适应于病虫害监测的低成本、高精度传感器,进行不同维度、不同尺度的数据融合,在提高监测精度和适用

性的同时降低成本。另一方面,将同一时间不同传感器采集的数据进行管理和系统分析,以获取监测数据与病虫害之间的关联信息是研究的重点和难点。

(3) 数据分析与处理

对于复杂背景下的病虫害监测数据,不同种类的病虫害通常提取的特征不一样。传统机器学习方法依赖选择的分类特征来提高识别和分类精度,特异性高,而深度学习算法具有较高的计算量和复杂度。改进算法,减少复杂背景在学习和计算中产生的时间成本和经济成本,在提高精度的同时提高运算效率是未来研究的重点方向之一。特别是充分利用当前发展迅速的非线性科学、人工智能的分支学科的理论与方法,如支持向量机、遗传算法、人工神经网络、人工免疫系统和蚁群算法等,以满足数据高效、精准处理的需求,采用不同学科领域的最新理论、方法、技术与成果,充分利用多学科理论交叉与技术方法集成,辅助解决病虫害监测信息处理中存在的问题。

参 考 文 献

- [1] 刁宁宁. 大田农作物病虫害遥感监测[J]. 农业工程技术, 2021, 41(30): 37-38.
- [2] 梅多平. 乡村振兴背景下的粮食安全与农户增收策略[J]. 甘肃农业, 2022(4): 9-11.
- [3] 周建民, 周其显, 刘燕德. 红外热成像技术在农业生产中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(2): 1-4, 51.
ZHOU Jianmin, ZHOU Qixian, LIU Yande. Application of infrared thermography techniques in agricultural production[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(2): 1-4, 51. (in Chinese)
- [4] DEUTSCH C A, TEWKSBUY J J, TIGCHELAAR M, et al. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate[J]. Science, 2018, 361(6405): 916-919.
- [5] 袁红丽. 卫星遥感技术在河南省作物监测上的经济问题研究[J]. 农业灾害研究, 2016, 6(8): 52-58, 61.
YUAN Hongli. Study on economic issues of satellite remote sensing technology applying in crop monitoring in Henan Province [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2016, 6(8): 52-58, 61. (in Chinese)
- [6] 翟肇裕, 曹益飞, 徐焕良, 等. 农作物病虫害识别关键技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 1-18.
ZHAI Zhaoyu, CAO Yifei, XU Huanliang, et al. Review of key techniques for crop disease and pest detection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 1-18. (in Chinese)
- [7] 王萍. 遥感技术在农业生产过程中的应用浅析[J]. 农业与技术, 2022, 42(2): 43-45.
- [8] ZHANG G, XU T, TIAN Y, et al. Assessment of rice leaf blast severity using hyperspectral imaging during late vegetative growth[J]. Australasian Plant Pathology, 2020, 49(5): 571-578.
- [9] FENG L, WU B, ZHU S, et al. Investigation on data fusion of multisource spectral data for rice leaf diseases identification using machine learning methods[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1-15.
- [10] CONRAD A O, LI W, LEE D, et al. Machine learning-based presymptomatic detection of rice sheath blight using spectral profiles[J]. Plant Phenomics, 2020, 2020: 1-10.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 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 Horticulture Sinica, 2009, 36(1): 45-52. (in Chinese)
- [13] 田明璐, 班松涛, 袁涛, 等. 基于高光谱成像技术的水稻叶片稻纵卷叶螟虫害信息提取[J]. 上海农业学报, 2022, 38(1): 90-94.
TIAN Minglu, BAN Songtao, YUAN Tao, et al. Information extraction of rice leaf roller based on hyperspectral imaging technology[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2022, 38(1): 90-94. (in Chinese)
- [14] 袁建清. 基于多尺度遥感的寒地水稻稻瘟病信息提取与识别研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
YAN Jianqing. Information extraction and identification of rice blast in cold region based on multi-scale remote sensing data

- [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [15] ZAYAS I Y, FLINN P W. Detection of insects in bulks wheat samples with machine vision[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 6(3): 883–888.
- [16] YANG W, GUO Z, HUANG C, et al. Combining high-throughput phenotyping and genome-wide association studies to reveal natural genetic variation in rice[J]. Nat. Commun., 2014, 5: 5087.
- [17] MURAKAMI S, HOMMA K, KOKE T. Detection of small pests on vegetable leaves using GLCM[C] // ASAE Annual International Meeting, Tampa, FL, 2005.
- [18] 吕昭智, 沈佐锐, 程登发, 等. 现代信息技术在害虫种群密度监测中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 112–115.
LÜ Zhaozhi, SHEN Zuorui, CHENG Dengfa, et al. Application of information technologies in monitoring the population density of pests[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 112–115. (in Chinese)
- [19] 王克如. 基于图像识别的作物病虫害诊断研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
WANG Keru. Diagnosis of crop disease, insect pest and weed based on image recognition[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005. (in Chinese)
- [20] 沈佐锐, 于新文. 温室白粉虱自动计数技术研究初报[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 94–99.
SHEN Zuorui, YU Xinwen. Preliminary research on automated counting technology for *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 94–99. (in Chinese)
- [21] 刘占宇, 孙华生, 黄敬峰. 基于学习矢量量化神经网络的水稻白穗和正常穗的高光谱识别[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(6): 664–668.
LIU Zhanyu, SUN Huasheng, HUANG Jingfeng. Classification of empty and healthy panicles in rice plants by hyperspectral reflectance based on learning vector quantization (LVQ) neural network[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2007, 21(6): 664–668. (in Chinese)
- [22] 谷牧宇. 水稻反射光谱和叶绿素 SPAD 值与稻纵卷叶螟危害程度的关系[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
GU Muyu. The relationship of rice reflectance and chlorophyll SPAD values with damage degree of the rice leaf folder[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [23] 赵洪莹, 舒清态, 王柯人, 等. 高光谱遥感技术在森林病虫害监测中的应用[J]. 绿色科技, 2020(19): 145–148.
ZHAO Hongying, SHU Qingtai, WANG Keren, et al. Application of hyperspectral remote sensing technology in forest disease and insect pest monitoring[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(19): 145–148. (in Chinese)
- [24] 黄木易, 黄文江, 刘良云, 等. 冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 176–180.
HUANG Muyi, HUANG Wenjiang, LIU Liangyun, et al. Spectral reflectance feature of winter wheat single leaf infected with stripe rust and severity level inversion[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 176–180. (in Chinese)
- [25] GRAEFF S, LINK J, CLAUPEIN W. Identification of powdery mildew (*Erysiphe graminis* sp. tritici) and take-all disease (*Gaeumannomyces graminis* sp. tritici) in wheat (*Triticum aestivum* L.) by means of leaf reflectance measurements[J]. Central European Journal of Biology, 2006, 1(2): 275–288.
- [26] 李鹏, 崔正勇, 高国强, 等. 小麦黄花叶病研究进展[J]. 山东农业科学, 2017, 49(8): 168–172.
LI Peng, CUI Zhengyong, GAO Guoqiang, et al. Research progress of wheat yellow mosaic[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(8): 168–172. (in Chinese)
- [27] 黄建荣. 稻纵卷叶螟和褐飞虱为害水稻的光谱监测[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
HUANG Jianrong. Detection of *Cnaphalocrocis medinalis* Giiene and *Nilaparvata lugens* (Stal) damage in rice using spectral data[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [28] 程术希, 邵咏妮, 吴迪, 等. 稻叶瘟染病程度的可见-近红外光谱检测方法[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(3): 307–311.
CHENG Shuxi, SHAO Yongni, WU Di, et al. Determination of rice leaf blast disease level based on visible-near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2011, 37(3): 307–311. (in Chinese)
- [29] 陈铭涛, 范俊伟, 彭继煌, 等. 白叶枯病胁迫下水稻冠层高光谱研究[J]. 现代农业科技, 2014(6): 142–144, 148.
CHEN Mingtao, FAN Junwei, PENG Jihuang, et al. Research on canopy hyperspectral reflectance of bacterial leaf blight in rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014(6): 142–144, 148. (in Chinese)
- [30] 臧红婷. 玉米粘虫时空动态遥感监测与评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
ZANG Hongting. Monitoring and evaluation the spatial and temporal dynamic changes of corn armyworm based on remote sensing data[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [31] 尹小君, 宁川, 张永才. 加工番茄早疫病高光谱遥感识别研究[J]. 遥感信息, 2015, 30(2): 94–98.
YIN Xiaojun, NING Chuan, ZHANG Yongcai. Hyperspectral remote sensing identification of processing tomato early blight based on GA and SVM[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(2): 94–98. (in Chinese)
- [32] YUAN L, PU R, ZHANG J, et al. Using high spatial resolution satellite imagery for mapping powdery mildew at a regional scale[J]. Precision Agriculture, 2016, 17(3): 332–348.
- [33] 乔红波, 夏斌, 马新明, 等. 冬小麦病虫害的高光谱识别方法研究[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 770–774.
QIAO Hongbo, XIA Bin, MA Xinming, et al. Identification of damage by diseases and insect pests in winter wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(4): 770–774. (in Chinese)
- [34] 杨菲菲, 刘升平, 诸叶平, 等. 基于高光谱遥感的冬小麦涝渍胁迫识别及程度判别分析[J]. 智慧农业(中英文),

- 2021, 3(2): 35–44.
- YANG Feifei, LIU Shengping, ZHU Yeping, et al. Identification and level discrimination of waterlogging stress in winter wheat using hyperspectral remote sensing[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(2): 35–44. (in Chinese)
- [35] 黄林生, 张寒苏, 阮超, 等. 基于近地高光谱数据和遗传算法优化的支持向量机麦穗尺度赤霉病识别[J]. 农业工程技术, 2020(2): 182–188.
- HUANG Linsheng, ZHANG Hansu, RUAN Chao, et al. Detection of scab in wheat ears using in situ hyperspectral data and support vector machine optimized by genetic algorithm[J]. Agricultural Engineering Technology, 2020(2): 182–188. (in Chinese)
- [36] 梁勇, 邱荣洲, 李志鹏, 等. 基于YOLO v5和多源数据集的水稻主要害虫识别方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 250–258.
- LIANG Yong, QIU Rongzhou, LI Zhipeng, et al. Identification method of major rice pests based on YOLO v5 and multi-source datasets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 250–258. (in Chinese)
- [37] 高桓凯, 花元涛, 张凌飞, 等. 基于机器视觉技术的南疆小麦病虫害监测系统[J]. 塔里木大学学报, 2019, 31(4): 73–78.
- GAO Huankai, HUA Yuantao, ZHANG Lingfei, et al. Monitoring system of wheat diseases and insect pests in South Xinjiang based on machine vision technology[J]. Journal of Tarim University, 2019, 31(4): 73–78. (in Chinese)
- [38] 宋雪莲, 张文, 王普昶, 等. 遥感技术在智慧农业中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7): 1–5.
- SONG Xuelian, ZHANG Wen, WANG Puchang, et al. Research on application of remote sensing technology in wisdom agriculture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 1–5. (in Chinese)
- [39] 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.
- [40] 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. (in Chinese)
- [41] HUANG W, LAMB D, NIU Z, et al. Identification of yellow rust in wheat using in-situspectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(4–5): 187–197.
- [42] LI X, LEE W, LI M, et al. Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 83: 32–46.
- [43] 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 CSAE, 2019, 35(3): 92–100. (in Chinese)
- [44] 郭伟, 高春风, 乔红波, 等. 基于无人机数码影像的棉叶螨严重度监测[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 143–150.
- GUO Wei, GAO Chunfeng, QIAO Hongbo, et al. Severity monitoring of cotton spider mite based on UAV digital image[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 143–150. (in Chinese)
- [45] 贺园园. 基于无人机遥感的大面积农作物叶片病虫害识别研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(1): 216–220.
- HE Yuanyuan. Identification of crop leaf diseases and insect pests based on UAV remote sensing[J]. Automation & Instrumentation, 2023(1): 216–220. (in Chinese)
- [46] 丁玥, 张运, 王爱芳, 等. 基于无人机高光谱的水稻细菌条斑病监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 44–47.
- DING Yue, ZHANG Yun, WANG Aifang, et al. Monitoring of bacterial streak disease in rice based on UAV hyperspectral method[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(5): 44–47. (in Chinese)
- [47] 罗菊花, 黄文江, 顾晓鹤, 等. 基于 PHI 影像敏感波段组合的冬小麦条锈病遥感监测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 184–187.
- LUO Juhua, HUANG Wenjiang, GU Xiaohe, et al. Monitoring stripe rust of winter wheat using PHI based on sensitive bands[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 184–187. (in Chinese)
- [48] 王小龙, 邓继忠, 黄华盛, 等. 基于高光谱数据的棉田虫害鉴别研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 97–103.
- WANG Xiaolong, DENG Jizhong, HUANG Huasheng, et al. Identification of pests in cotton field based on hyperspectral data[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 97–103. (in Chinese)
- [49] 崔美娜, 戴建国, 王守会, 等. 基于无人机多光谱影像的棉叶螨识别方法[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(8): 1457–1466.
- CUI Meina, DAI Jianguo, WANG Shouhui, et al. Research on identification method of mite infection cotton based on UAV multi-spectral image[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(8): 1457–1466. (in Chinese)
- [50] 高永刚, 刘丹, 张福娟, 等. 卫星遥感在森林病虫害监测上的研究进展[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 113–117.
- GAO Yonggang, LIU Dan, ZHANG Fujuan, et al. The application development of satellite remote sensing technology in the assessment of forest damage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(2): 113–117. (in Chinese)
- [51] EL-GHANY A, NESREEN M, EL-AZIZ A, et al. A review: application of remote sensing as a promising strategy for insect pests and diseases management[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(27): 33503–33515.
- [52] MIRIK M, ANSLEY R J, PRICE J A, et al. Remote monitoring of wheat streak mosaic progression using sub-pixel classification of Landsat 5 TM imagery for site specific disease management in winter wheat[J]. Advances in Remote Sensing, 2013, 2(1): 16–28.

- [53] YUAN L, BAO Z, ZHANG H, et al. Habitat monitoring to evaluate crop disease and pest distributions based on multi-source satellite remote sensing imagery[J]. *Optik*, 2017, 145: 66 – 73.
- [54] CHAO R, DONG Y, HUANG W, et al. Prediction of wheat stripe rust occurrence with time series Sentinel – 2 images[J]. *Agriculture*, 2021, 11(11): 1 – 19.
- [55] YUAN L, ZHANG J, SHI Y, et al. Damage mapping of powdery mildew in winter wheat with high-resolution satellite image[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 3611 – 3623.
- [56] HAN J, WEI C, CHEN Y, et al. Mapping above-ground biomass of winter oilseed rape using high spatial resolution satellite data at parcel scale under waterlogging conditions[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 5 – 18.
- [57] CHEN B, WANG K, LI S, et al. Estimating severity level of cotton infected verticillium wilt based on spectral indices of TM image[J]. *Sensor Letters*, 2011, 9(3): 1157 – 1163.
- [58] RAZA M M, HARDING C, LIEBMAN M, et al. Exploring the potential of high-resolution satellite imagery for the detection of soybean sudden death syndrome[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1213.
- [59] FRANKE J, MENZ G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. *Precision Agriculture*, 2007, 8(3): 161 – 172.
- [60] 马慧琴. 基于多源多时相遥感分析的小麦主要病害动态监测[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
MA Huiqin. Dynamic monitoring of major wheat diseases based on multi-source and multi-temporal remote sensing analysis [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [61] 王霄煜, 雷钧. 基于高分一号卫星数据的新疆棉花种植面积信息提取研究[J]. *新疆农业科技*, 2021(1): 23 – 26.
- [62] 胡根生, 吴问天, 黄文江, 等. 粒子群优化的最小二乘支持向量机在小麦白粉病监测中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(2): 299 – 304.
HU Gensheng, WU Wentian, HUANG Wenjiang, et al. Application of PSO – LSSVM in wheat powdery mildew monitoring [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(2): 299 – 304. (in Chinese)
- [63] 马慧琴, 黄文江, 景元书, 等. 基于 AdaBoost 模型和 mRMR 算法的小麦白粉病遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 162 – 169.
MA Huiqin, HUANG Wenjiang, JING Yuanshu, et al. Remote sensing monitoring of wheat powdery mildew based on AdaBoost model combining mRMR algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(5): 162 – 169. (in Chinese)
- [64] 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)
- [65] BRIECHLE S, KRZYTEK P, VOSSELMAN G. Classification of tree species and standing dead trees by fusing UAV-based LiDAR data and multispectral imagery in the 3D deep neural network PointNet + + [J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, 2: 203 – 210.
- [66] YU R, LUO Y, ZHOU Q, et al. A machine learning algorithm to detect pine wilt disease using UAV-based hyperspectral imagery and LiDAR data at the tree level[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 101: 102363.
- [67] 杨秀丽, 陈林, 程登发, 等. 毫米波扫描昆虫雷达空中昆虫监测的初步应用[J]. *植物保护*, 2008(2): 31 – 36.
YANG Xiuli, CHEN Lin, CHENG Dengfa, et al. Primary application of millimetric scanning radar to tracking high-flying insects in southern China[J]. *Plant Protection*, 2008(2): 31 – 36. (in Chinese)
- [68] 杨英茹, 吴华瑞, 张燕, 等. 基于复杂环境的番茄叶部图像病虫害识别[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(9): 177 – 186.
YANG Yingru, WU Huarui, ZHANG Yan, et al. Tomato disease recognition using leaf image based on complex environment [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(9): 177 – 186. (in Chinese)
- [69] 马超, 袁涛, 姚鑫锋, 等. 基于 HOG + SVM 的田间水稻病害图像识别方法研究[J]. *上海农业学报*, 2019, 35(5): 131 – 136.
MA Chao, YUAN Tao, YAO Xinfeng, et al. Study on image recognition method of rice disease in field based on HOG + SVM[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, 35(5): 131 – 136. (in Chinese)
- [70] 王雪, 马卓, 王欣, 等. 基于颜色和形状特征的黄瓜霜霉病自动识别研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(6): 1071 – 1075.
WANG Xue, MA Zhuo, WANG Xin, et al. Automatic recognition of cucumber downy mildew based on color and shape feature [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2013, 40(6): 1071 – 1075. (in Chinese)
- [71] ZHANG J, HUANG Y, YUAN L, et al. Using satellite multispectral imagery for damage mapping of armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in maize at a regional scale[J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(2): 335 – 348.
- [72] CHAERLE L, HAGENBEEK D, DE BRUYNE E, et al. Thermal and chlorophyll-fluorescence imaging distinguish plant-pathogen interactions at an early stage[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, 45(7): 887 – 896.
- [73] 徐小龙. 基于红外热成像技术的植物病害早期检测的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
XU Xiaolong. Application of infrared thermal imaging in the detection of plants disease at an early stage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [74] OERKE E C, FRÖHLING P, STEINER U. Thermographic assessment of scab disease on apple leaves[J]. *Precision Agriculture*, 2011, 12(5): 699 – 715.

- [75] LENTHE J H, OERKE E C, DEHNE H W. Digital infrared thermography for monitoring canopy health of wheat[J]. Precision Agriculture, 2007, 8(1): 15–26.
- [76] BELIN É, ROUSSEAU D, BOUREAU T, et al. Thermography versus chlorophyll fluorescence imaging for detection and quantification of apple scab[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 90: 159–163.
- [77] SCHMITZ A, KIEWNICK S, SCHLANG J, et al. Use of high resolution digital thermography to detect *Heterodera schachtii* infestation in sugar beets[J]. Commun. Agric. Appl. Biol., 2004, 69(3): 359–363.
- [78] STOLL M, SCHULTZ H R, BERKELMANN-LOEHNERTZ B. Exploring the sensitivity of thermal imaging for *Plasmopara viticola* pathogen detection in grapevines under different water status[J]. Functional Plant Biology, 2008, 35(4): 281–288.
- [79] WANG M, LING N, DONG X, et al. Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2012, 61: 153–161.
- [80] 朱文静, 陈华, 李林, 等. 基于红外热成像边缘检测算法的小麦叶锈病分级研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 36–41, 48.
- ZHU Wenjing, CHEN Hua, LI Lin, et al. Grading of wheat leaf rust based on edge detection of infrared thermal imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 36–41, 48. (in Chinese)
- [81] 李小龙, 王库, 马占鸿, 等. 基于热红外成像技术的小麦病害早期检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 183–189.
- LI Xiaolong, WANG Ku, MA Zhanhong, et al. Early detection of wheat disease based on thermal infrared imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 183–189. (in Chinese)
- [82] 朱圣盼. 基于计算机视觉技术的植物病害检测方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- ZHU Shengpan. Research on plant disease detection methods based on computer vision technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [83] 任清. 作物不同胁迫与衰老的遥感监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- REN Yu. Research on the remote sensing monitoring methods of different stresses and senescence of crops[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [84] ASHOURLOO D, MOBASHERI M R, HUETE A. Evaluating the effect of different wheat rust disease symptoms on vegetation indices using hyperspectral measurements[J]. Remote Sensing, 2014, 6(6): 5107–5123.
- [85] BAURIEGEL E, GIEBEL A, GEYER M, et al. Early detection of *Fusarium* infection in wheat using hyper-spectral imaging[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 75(2): 304–312.
- [86] MA H, HUANG W, JING Y, et al. Identification of *Fusarium* head blight in winter wheat ears using continuous wavelet analysis[J]. Sensors, 2019, 20(1): 20.
- [87] FENG W, SHEN W, HE L, et al. Improved remote sensing detection of wheat powdery mildew using dual-green vegetation indices[J]. Precision Agriculture, 2016, 17(5): 608–627.
- [88] PRABHAKAR M, PRASAD Y G, THIRUPATHI M, et al. Use of ground based hyperspectral remote sensing for detection of stress in cotton caused by leafhopper (Hemiptera: Cicadellidae) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 189–198.
- [89] 竞霞, 黄文江, 琚存勇, 等. 基于 PLS 算法的棉花黄萎病高空间分辨率遥感监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 229–235.
- JING Xia, HUANG Wenjiang, JU Cunyong, et al. Remote sensing monitoring severity level of cotton verticillium wilt based on partial least squares regressive analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 229–235. (in Chinese)
- [90] 地力夏提·依马木, 周建平, 许燕, 等. 基于 Logistic 算法与遥感影像的棉花虫害监测研究[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(2): 87–95.
- DILIXIATI·Yimamu, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Cotton pest monitoring based on Logistic algorithm and remote sensing image[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(2): 87–95. (in Chinese)
- [91] 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.
- QIAO Hongbo, ZHOU Yilin, BAI Youlu, et al. The primary research of detecting wheat powdery mildew using in-field and low altitude remote sensing[J]. Journal of Plant Protection, 2006, 33(4): 341–344. (in Chinese)
- [92] 袁琳. 小麦病虫害多尺度遥感识别和病害区分方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- YUAN Lin. Identification and differentiation of wheat diseases and insects with multi-source and multi-scale remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [93] 黄双萍, 齐龙, 马旭, 等. 基于高光谱成像的水稻穗瘟程度分级方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 212–219.
- HUANG Shuangping, QI Long, MA Xu, et al. Grading method of rice panicle blast severity based on hyperspectral image[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 212–219. (in Chinese)
- [94] 雷雨, 韩德俊, 曾庆东, 等. 基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 226–232.
- LEI Yu, HAN Dejun, ZENG Qingdong, et al. Grading method of disease severity of wheat stripe rust based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 226–232. (in Chinese)
- [95] 刘爽, 谭鑫, 刘成玉, 等. 高光谱数据处理算法的小麦赤霉病籽粒识别[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(11): 3540–3546.

- LIU Shuang, TAN Xin, LIU Chengyu, et al. Recognition of fusarium head blight wheat grain based on hyperspectral data processing algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(11): 3540–3546. (in Chinese)
- [96] LIU Z Y, WU H F, HUANG J F. Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 99–106.
- [97] YANG C M, CHENG C H, CHEN R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper[J]. Crop Science, 2007, 47(1): 329–335.
- [98] YAO Q, GUAN Z, ZHOU Y, et al. Application of support vector machine for detecting rice diseases using shape and color texture features[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering Computing, Hongkong, 2009: 79–83.
- [99] 张凝, 杨贵军, 赵春江, 等. 作物病虫害高光谱遥感进展与展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 403–422.
- ZHANG Ning, YANG Guijun, ZHAO Chunjiang, et al. Progress and prospects of hyperspectral remote sensing technology for crop diseases and pests[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 403–422. (in Chinese)
- [100] SUMAN T, DHURUVAKUMAR T. Classification of paddy leaf diseases using shape and color features[J]. International Journal of Electrical and Electronics Engineers, 2015, 7(1): 239–250.
- [101] 刘婷婷, 王婷, 胡林. 基于卷积神经网络的水稻纹枯病图像识别[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(1): 90–94.
- LIU Tingting, WANG Ting, HU Lin. *Rhizocotonia solani* recognition algorithm based on convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 39(1): 90–94. (in Chinese)
- [102] 李小龙, 马占鸿, 孙振宇, 等. 基于图像处理的小麦条锈病菌夏孢子模拟捕捉的自动计数[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 199–206, 302.
- LI Xiaolong, MA Zhanhong, SUN Zhenyu, et al. Automatic counting for trapped urediospores of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici based on image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 199–206, 302. (in Chinese)
- [103] 刘占宇, 祝增荣, 赵敏, 等. 基于主成分分析和人工神经网络的稻穗健康状态的高光谱识别[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(3): 607–616.
- LIU Zhanyu, ZHU Zengrong, ZHAO Min, et al. Hyperspectral discrimination of different health conditions rice panicles based on principal component analysis and artificial neural network[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(3): 607–616. (in Chinese)
- [104] 李健丽, 董莹莹, 师越, 等. 基于随机森林模型的小麦白粉病遥感监测方法[J]. 植物保护学报, 2018, 45(2): 395–396.
- [105] XIA J A, WANG Y Y, XIN C H, et al. Performance analysis of clustering method based on crop pest spectrum[J]. Engineering in Agriculture, 2018, 11(2): 395–396.
- [106] 郑琼洁. 基于图像处理的番茄常见病害检测研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.
- ZHENG Qiongjie. Research on common tomato disease detection based on image processing [D]: Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [107] 刘立波, 赵春江, 吴华瑞, 等. 数学形态学在作物病害图像预处理中的应用研究[J]. 农机化研究, 2013, 35(8): 180–183.
- LIU Libo, ZHAO Chunjiang, WU Huarui, et al. Application research of mathematical morphology in crop disease image preprocessing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(8): 180–183. (in Chinese)
- [108] 李培富, 李冬. 宁夏水稻抗稻瘟病性的聚类分析[J]. 宁夏农林科技, 2007(2): 40–41, 68.
- [109] 谭峰, 马晓丹. 基于神经网络的植物图像分割算法的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2009, 21(1): 63–65.
- TAN Feng, MA Xiaodan. Study on the segmentation algorithm of plant image based on BP neural network[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009, 21(1): 63–65. (in Chinese)
- [110] 袁培森, 曹益飞, 马千里, 等. 基于 Random Forest 的水稻细菌性条斑病识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 139–145, 208.
- YUAN Peisen, CAO Yifei, MA Qianli, et al. Identification method of rice bacterial leaf streak based on Random Forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 139–145, 208. (in Chinese)
- [111] 余小东, 杨孟辑, 张海清, 等. 基于迁移学习的农作物病虫害检测方法研究与应用[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 252–258.
- YU Xiaodong, YANG Mengji, ZHANG Haiqing, et al. Research and application of crop disease detection method based on transfer learning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 252–258. (in Chinese)
- [112] 张竞成. 多源遥感数据小麦病害信息提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHANG Jingcheng. Methods for information extraction of wheat disease based on multi-source remote sensing data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [113] 罗菊花. 基于多源数据的小麦蚜虫遥感监测预测研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- LUO Juhua. Research on remote sensing monitoring and prediction of wheat aphids based on multi-source data [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2012. (in Chinese)
- [114] 王利民, 刘佳, 邵杰, 等. 基于高光谱的春玉米大斑病害遥感监测指数选择[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 170–177.
- WANG Limin, LIU Jia, SHAO Jie, et al. Remote sensing index selection of leaf blight disease in spring maize based on hyperspectral data[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 170–177. (in Chinese)
- [115] 张雪雪, 王斌, 田洋洋, 等. 作物病虫害预测机理与方法研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 110–120.

- ZHANG Xuexue, WANG Bin, TIAN Yangyang, et al. Research progress on forecasting mechanism and methodology for crop disease and insect pest[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(5): 110 – 120. (in Chinese)
- [116] JONES C D, JONES J B, LEE W S. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 329 – 335.
- [117] 刘鹏, 张竞成, 杨娉婷, 等. 多生育期小麦条锈病光谱波段优选及监测研究[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(6): 833 – 841.
- LIU Peng, ZHANG Jingcheng, YANG Pingting, et al. Analysis on monitoring of wheat stripe rust at multiple stages and optimization of bands for disease detection[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2017, 33(6): 833 – 841. (in Chinese)
- [118] 陈云浩, 蒋金豹, 黄文江, 等. 主成分分析法与植被指数经验方法估测冬小麦条锈病严重度的对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2161 – 2165.
- CHEN Yunhao, JIANG Jinbao, HUANG Wenjiang, et al. Comparison of principal component analysis with vi-empirical approach for estimating severity of yellow rust of winter wheat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2161 – 2165. (in Chinese)
- [119] 袁琳, 张竞成, 赵晋林, 等. 基于叶片光谱分析的小麦白粉病和条锈病区分及病情反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1608 – 1614.
- YUAN Lin, ZHANG Jingcheng, ZHAO Jinlin, et al. Differentiation of yellow rust and powdery mildew in winter wheat and retrieving of disease severity based on leaf level spectral analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1608 – 1614. (in Chinese)
- [120] 孙瑞琳. 基于近地高光谱与无人机图像的小麦叶锈病遥感监测研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- SUN Ruilin. Research on remote sensing monitoring of wheat leaf rust based on ground hyperspectral and UAV images[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [121] 楚万林, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 棉花冠层叶片叶绿素含量与高光谱参数的相关性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 65 – 73.
- CHU Wanlin, QI Yanbing, CHANG Qingrui, et al. Relationship between chlorophyll content and hyperspectral parameters in canopy leaves of cotton[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 65 – 73. (in Chinese)
- [122] 黄亚雄. 基于光谱技术的油菜估产研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- HUANG Yaxiong. Study on rapeseed yield estimation based on spectral technique[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [123] 李岚涛, 任涛, 汪善勤, 等. 基于角果期高光谱的冬油菜产量预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 221 – 229.
- LI Lantao, REN Tao, WANG Shanqin, et al. Prediction models of winter oilseed rape yield based on hyperspectral data at pod-filling stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 221 – 229. (in Chinese)
- [124] 李艳雪, 吕芳. 向日葵叶部病害图像分割方法[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(5): 148 – 151.
- LI Yanxue, LÜ Fang. Image segmentation method of sunflower leaf disease image[J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(5): 148 – 151. (in Chinese)
- [125] 李旺, 唐少先. 基于图像处理的农作物病害识别研究现状[J]. 湖南农机, 2012, 39(1): 176 – 178.
- LI Wang, TANG Shaoxian. Review of crop diseases recognition based on image processing[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2012, 39(1): 176 – 178. (in Chinese)
- [126] 赵聪慧, 张淑娟. 基于计算机视觉和光谱技术的农作物病害无损检测方法的研究进展[C]//第二届国际计算机及计算技术在农业中的应用研讨会暨“第二届中国农村信息化发展论坛”论文集, 2008: 14 – 20.
- [127] HEIDARIAN DEHKORDI R, EL JARROUDI M, KOUADIO L, et al. Monitoring wheat leaf rust and stripe rust in winter wheat using high-resolution UAV-based red-green-blue imagery[J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3696.
- [128] 胡智元, 刘祚时, 程素平. 改进门限中值滤波算法在水果图像噪声中应用研究[J]. 机械设计与制造, 2019(7): 177 – 179, 183.
- HU Zhiyuan, LIU Zuoshi, CHENG Suping. The improved threshold median filtering algorithm applied in fruit image noise[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(7): 177 – 179, 183. (in Chinese)
- [129] 陈炳权, 崔金鸽, 徐庆, 等. 基于小波变换和改进中值滤波的医学图像耦合去噪算法[J]. 中南大学学报, 2019, 26(1): 120 – 131.
- CHEN Bingquan, CUI Jingge, XU Qing, et al. Coupling denoising algorithm based on discrete wavelet transform and modified median filter for medical image[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1): 120 – 131. (in Chinese)
- [130] 陈浩, 康晓慧, 张梅, 等. 稻瘟病菌空中孢子量与气象因子的关系[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(8): 1869 – 1871.
- CHEN Hao, KANG Xiaohui, ZHANG Mei, et al. Relationship between spatial spore amount of *pyricularia oryzae* cavara and meteorological factors[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009, 48(8): 1869 – 1871. (in Chinese)
- [131] 朱景福, 李雪. 玉米叶片病害彩色图像识别的降维和聚类方法[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 350 – 354.
- [132] 王莹, 王忠民, 王义峰, 等. 面向色彩再现的多光谱图像非线性降维方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1171 – 1178.

- WANG Ying, WANG Zhongmin, WANG Yifeng, et al. Nonlinear dimensionality reduction of multi-spectral images for color reproduction[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1171–1178. (in Chinese)
- [133] 叶聪, 沈金龙. 基于图像灰度频率与人工神经网络的病虫害防治[J]. 电子器件, 2018, 41(1): 250–255.
YE Cong, SHEN Jinlong. Image grey frequency and artificial neural network based pest control approach[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2018, 41(1): 250–255. (in Chinese)
- [134] 黄巧义, 张木, 李苹, 等. 支持向量机和最大类间方差法结合的水稻冠层图像分割方法[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(4): 52–60.
HUANG Qiaoyi, ZHANG Mu, LI Ping, et al. Rice canopy image segmentation using support vector machine and Otsu's method[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(4): 52–60. (in Chinese)
- [135] 曾伟辉, 张文凤, 陈鹏, 等. 基于 SCResNeSt 的低分辨率水稻害虫图像识别方法[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 277–285.
ZENG Weihui, ZHANG Wenfeng, CHEN Peng, et al. Low-resolution rice pest image recognition based on SCResNeSt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 277–285. (in Chinese)
- [136] 于通. 基于图像和光谱信息的典型叶片病害识别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
YU Tong. Research on recognition of typical leaf diseases based on images and spectral information[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [137] 邱靖, 刘继荣, 曹志勇, 等. 基于卷积神经网络的水稻病害图像识别研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2019, 34(5): 884–888.
QIU Jing, LIU Jirong, CAO Zhiyong, et al. Rice disease image recognition research based on convolutional neural network [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(5): 884–888. (in Chinese)
- [138] 许景辉, 邵明烨, 王一琛, 等. 基于迁移学习的卷积神经网络玉米病害图像识别[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 230–236, 253.
XU Jinghui, SHAO Mingye, WANG Yichen, et al. Recognition of corn leaf spot and rust based on transfer learning with convolutional neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 230–236, 253. (in Chinese)
- [139] 杜忠康, 房胜, 李哲, 等. 基于卷积神经网络深度特征融合的番茄叶片病害检测[J]. 中国科技论文, 2021, 16(7): 701–707.
DU Zhongkang, FANG Sheng, LI Zhe, et al. Tomato leaf disease detection based on deep feature fusion of convolutional neural network[J]. China Sciencpaper, 2021, 16(7): 701–707. (in Chinese)
- [140] 万颖, 杨红云, 王映龙, 等. 基于图像分割与卷积神经网络的水稻病害识别[J]. 西北农业学报, 2022, 31(2): 246–256.
WAN Ying, YANG Hongyun, WANG Yinglong, et al. Recognition of rice disease based on image segmentation and cnvolutional neural networks[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(2): 246–256. (in Chinese)
- [141] 周济. 从数据到信息——基于人工智能的表型组分析方法在植物研究中的应用[C]//2018 中国遗传学会第十次全国会员代表大会暨学术讨论会论文摘要汇编, 2018: 38.
- [142] ZHOU X, YANG L, WANG W, et al. UAV data as an alternative to field sampling to monitor vineyards using machine learning based on UAV/Sentinel-2 data fusion[J]. Remote Sensing, 2021, 13(3): 457.
- [143] MA H, HUANG W, JING Y, et al. Integrating growth and environmental parameters to discriminate powdery mildew and aphid of winter wheat using bi-temporal Landsat-8 imagery[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 846.
- [144] BRAHIMI M, BOUKHALFA K, MOUSSAOUI A. Deep learning for tomato diseases: classification and symptoms visualization[J]. Applied Artificial Intelligence, 2017, 31(4): 299–315.
- [145] DANG L M, LEE O N, PARK H, et al. Fusarium wilt of radish detection using RGB and near-infrared images from unmanned aerial vehicles[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2863.
- [146] RODRIGUEZ J, LIZARAZO I, PRIETO F, et al. Assessment of potato late blight from UAV-based multispectral imagery [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184: 106061.
- [147] 崔丽洁. 机器学习在水稻病斑图像识别中的方法研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
CUI Lijie. Research on machine learning in rice patch image recognition[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2019. (in Chinese)
- [148] 唐翠翠, 黄文江, 罗菊花, 等. 基于相关向量机的冬小麦蚜虫遥感预测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 201–207.
TANG Cuicui, HUANG Wenjiang, LUO Juhua, et al. Forecasting wheat aphid with remote sensing based on relevance vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 201–207. (in Chinese)
- [149] 孙俊, 谭文军, 毛罕平, 等. 基于改进卷积神经网络的多种植物叶片病害识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 209–215.
SUN Jun, TAN Wenjun, MAO Hanping, et al. Recognition of multiple plant leaf diseases based on improved convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 209–215. (in Chinese)
- [150] 张初. 基于光谱与光谱成像技术的油菜病害检测机理与方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
ZHANG Chu. Detection mechanism and methodology of *Brassica napus* disease using spectroscopy and spectral imaging technologies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)