



邹玮,岳延滨,赵泽英,等.辣椒病害智能化识别与防治研究进展[J].黑龙江农业科学,2025(10):96-104.

# 辣椒病害智能化识别与防治研究进展

邹 玮,岳延滨,赵泽英,李莉婕,韩 威

(贵州省农业科技信息研究所,贵州 贵阳 550006)

**摘要:**辣椒病害的发生严重影响了辣椒品质和产业链的经济效益。人工智能、计算机技术的发展,为辣椒病害智能化识别和防治提供了技术前提。为促进辣椒病害的实时智能检测和科学防治,基于前人研究成果介绍了辣椒主要病害的分类、流行规律和症状表现,根据辣椒受害感染后表型变化和生理生化特征,比较分析了传统人工和智能化方法对辣椒病害进行识别和防治的优缺点。着重介绍了基于生化分析、可见光图像、光谱分析方法识别辣椒病害,以及智能化识别诊断、精准施药技术等辣椒病害防治方面的研究。展望了可穿戴式传感器、气象数据对辣椒病害的识别预测。并对智能化识别和防治方法在辣椒病害研究中存在的问题和研究方向进行了讨论和展望。

**关键词:**辣椒病害;识别检测;精准防治;生化分析;可见光图像;光谱分析

辣椒不仅是重要的蔬菜作物,也是调味品和工业原料,富含维生素 C、维生素 A、辣椒素等活性成分,具有重要的营养价值和药用价值<sup>[1]</sup>。近年来,辣椒年种植面积稳定在 146.67 万 hm<sup>2</sup> 以上,是中国种植面积最大的蔬菜,总产量达 6 400 多万 t,农业产值 2 500 亿元,辣椒产业在农业经济中占据重要地位,种植面积和产量均居世界前列<sup>[2-4]</sup>。然而,辣椒在生长过程中常常受到各种病害的侵袭,严重威胁其产量和品质。

在大田种植期间,辣椒病害智能化识别和防治是全产业链中的重要环节,高质高效的生产对于辣椒产业可持续发展、提高椒农收入以及推动乡村振兴都具有重要影响。目前辣椒病害识别和防治主要依靠人工,因此容易出现农药使用不当、防治不及时等问题,辣椒病害的症状可以通过果实、叶片和茎秆在形态、色素、水分等方面的变化来判断,病害会使色素含量等发生变化,随着病害感染程度的加重,辣椒会出现脱水症状<sup>[5]</sup>。这些症状的发生会引起特定传感器的响应,有研究用传感器采集数据对病害进行识别,例如色素含量等生理生化指标变化,可以通过近地遥感或无人机遥感的光谱技术进行早期监测,进而能适时精准进行防治。

本文系统阐述了辣椒主要病害的分类、流行规律和症状表现,梳理了辣椒病害识别和防治措施的研究进展,详细分析了基于生化分析、可见光

图像、光谱分析方法在辣椒病害识别方面的应用,以及预警系统、精准施药设备和环境调控技术等辣椒病害防治方面的研究,展望了可穿戴式传感器、气象数据对辣椒病害的识别预测。探讨了多模态数据融合、技术集成创新、模型优化等在辣椒病害识别和防治中的应用前景,旨在为辣椒病害的实时智能检测和科学防治提供理论依据和技术参考,以期对其他作物病害的识别和防治研究提供一定借鉴。

## 1 辣椒主要病害分类

辣椒病害基于病原体类型、症状特点及发病条件可以划分为真菌病害、细菌病害以及病毒病害。真菌病害主要有炭疽病、疫病和白粉病等,病原体具有明显的菌丝、孢子等结构。细菌病害主要有青枯病、疮痂病等,病原体为单细胞微生物,无明显菌丝结构,病害症状通常表现为斑点、萎蔫、腐烂等<sup>[6]</sup>。病毒病害的病原体为病毒,缺乏独立生存能力,其传播必须依赖蚜虫、蓟马等介体昆虫,受感染植株常呈现花叶、矮化或坏死等症状<sup>[7]</sup>。侵染辣椒的病毒病有 40 多种,在我国辣椒产区主要以黄瓜花叶病毒和烟草花叶病毒最为常见,发病的辣椒植株一般由 2 种或多种病毒复合侵染,辣椒病毒病的症状可能会因病毒种类和辣椒品种的不同而有所差异<sup>[8]</sup>,主要病害类型及情况如表 1 所示。由于辣椒不同类别病害的发生规律存在差异,对辣椒主要病害进行分类,可以有效

收稿日期:2025-07-29

基金项目:贵州省农科院青年基金项目(黔农科一般基金[2024]25号);贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般173)。

第一作者:邹玮(1997—),女,硕士,研究实习员,从事图像处理、植物表型等相关研究。E-mail:171465192@qq.com。

通信作者:岳延滨(1984—),男,硕士,副研究员,从事作物生长模拟和表型分析研究。E-mail:58644230@qq.com。

构建病害预测预警模型,智能识别系统只有准确地将病害归入正确类别,才能调用或推荐对症、高效、合规的防治方案,确保智能系统输出的防治决策具有科学性。

表 1 辣椒主要病害情况及说明

病害分类	典型病害名称	病原体	病菌发育适宜环境条件	病害表型症状	病害图片
真菌病害	炭疽病	辣椒刺盘孢和果腐刺盘孢	12~33 ℃,相对湿度 95%左右、喜偏酸性环境	主要侵染果实,受害果实表面形成近椭圆形凹陷病斑,初期有环纹状排列的红色小粒点,后转为黑色。叶片染病,产生近圆形褐色病斑,表面有轮纹状排列黑色小粒点;茎和果梗染病,出现不规则形凹陷褐斑 <sup>[9]</sup>	
	疫病	辣椒疫霉菌	10~37 ℃,空气相对湿度达 90%以上	通常从茎基部开始发病,呈暗绿色水渍状软腐病斑;叶片发病,出现近圆形暗绿色病斑,导致叶片黄绿色软腐。果实发病,病斑呈暗绿色水渍状不规则病斑,果肉软腐 <sup>[10]</sup>	
	白粉病	内丝白粉菌属、鞭粗内丝白粉菌、辣椒拟粉孢霉	20 ℃左右,相对湿度 45%~75%时发病快、超过 95%时发病受到抑制	主要危害叶片,早期叶面出现不规则黄绿斑,霉层不明显。病斑持续扩展,低湿环境促使叶背面生成密集白色粉状霉层,后期白粉遍及全叶,造成植株萎蔫与落叶 <sup>[11]</sup>	
	灰霉病	灰葡萄孢菌	20~23 ℃,相对湿度 90%以上,在冬春低温高湿环境下发病严重	幼苗症状为子叶黄化与幼茎缢缩易折,最终枯死。成株染病,叶片表现腐烂或干枯,高湿时伴有灰色霉层,茎部为水浸状渐转为灰白或褐色,潮湿时产生霉状物(似枯萎病)。花果受害后呈水浸状病变,常密布灰色霉层 <sup>[12]</sup>	
细菌病害	青枯病	革兰氏阴性细菌	25~30 ℃,连续降雨转晴后土壤高湿,温度陡然升高,发病严重	植株自上而下萎蔫,叶片染病后褪绿黄化至褐枯。茎部病斑呈褐色水浸条状,根茎维管束褐变,挤压会渗出乳白菌液。病果初期仅内部产生褐变,后期呈水浸状易脱落 <sup>[13]</sup>	
	软腐病	胡萝卜软腐欧氏菌	25~30 ℃,病菌在相对湿度 85%以上时发病严重	主要侵染果实。初期果皮出现暗绿色水浸状,短期内全果腐烂发臭。叶茎染病,叶片形成褪色小斑→不规则淡黄色圆斑;茎部出现中央变灰、边缘黑色病斑,腐烂后发臭 <sup>[14]</sup>	
	疮痂病	野油菜黄单胞辣椒斑点致病型菌	20~30 ℃,连续相对湿度 90%以上有利于病原菌侵入	染病后,叶片出现黄绿水渍状小斑→暗绿痂斑→叶脉畸形皱缩;茎部出现水渍状条斑→木栓化隆起痂斑;果实隆起黑点→转墨绿色痂斑→高湿有菌脓渗出 <sup>[15]</sup>	
病毒病害	斑萎病毒病、花叶病毒病等	黄瓜花叶病毒、烟草花叶病毒、马铃薯 Y 病毒等	15~35 ℃,相对湿度 80%以下适宜发病,低于 60%时,呈加重趋势	花叶型:明脉→褪绿→稳定斑斑;黄化型:植株上黄下绿;畸形型:叶皱缩→植株矮化+丛生;病果:病斑深浅相间→果实畸变;坏死型:幼嫩组织褐枯→叶脉坏死→枝茎呈条纹坏死斑、维管束变褐 <sup>[16-17]</sup>	

从表1中可以看出,辣椒灰霉病主要在冬春低温高湿环境下发生,其余大部分病害在高温高湿环境下容易爆发。不同病害对辣椒不同部位的侵害程度不同,病害发生初期,炭疽病、软腐病等主要侵害辣椒果实,疫病主要从辣椒茎基部开始发病,白粉病、疮痂病等主要对叶部造成损害,疫病、青枯病以及多种病害侵染后期会对整个植株产生影响,造成整个植株枯萎死亡。辣椒病害流行受温湿度、品种抗性、土壤环境等调控,以辣椒炭疽病为例,病原分生孢子可附着种子表面,或以潜伏菌丝存于种内,造成播种后苗期侵染,同时,菌丝体及分生孢子盘可随病残体在土壤中越冬,构成次季初侵染源<sup>[18]</sup>。

## 2 辣椒主要病害识别方法

### 2.1 传统人工识别

传统辣椒病害的检测主要依靠农民或有关专家,在田间通过观察叶片、茎秆、果实的外观症状,结合病害的典型特征、外部环境条件等判断病害类型。相关书籍手册中对典型病害特征描述只针对单一病害,而在实际种植过程中,同一植株甚至同一叶片和果实上可能同时感染多种病害,造成病斑部位特征不明显,从而导致病害诊断出现错误,且早期病害的发生很难被及时发现,病害诊断容易出现延误,使得病原体很快向周围扩散,侵染邻近植株,导致大面积地块感染。因此依靠个人主观经验判断辣椒病害的方式,不仅容易引发检测水平不均衡、响应不及时、诊断准确率较低等问题,还可能导致部分椒农因对辣椒病害种类认知不足而出现农药使用不当的现象,从而延误病害防治的最佳时机,最终导致病害大规模爆发,加剧经济损失。

### 2.2 基于生化分析方法识别

在病原体对辣椒的侵染过程中,辣椒会受激释放特定的化学物质,如挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)或次生代谢物<sup>[19]</sup>。基于化学分析的病害检测通常采用固相微萃取(Solid-phase Microextraction, SPME)、乙醇提取等方法提取植物体内相关化学成分,并使用气相色谱-质谱法(Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)、高效液相色谱法(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)等对提取的化学成分进行检测和分析,识别病害的特征性化学成分<sup>[20]</sup>。通过微生物学分析能够确定辣椒病害的病原菌类型,这种检测方法需要从

病害组织中分离病原菌,通过实验室培养、实时荧光定量PCR方法、基因测序等确定病原体的种类和遗传特征以及荧光标记或探针技术等标记辅助诊断<sup>[21-22]</sup>。

结合生物学和化学病害检测方法能够准确识别病原类型,并且分析病害胁迫对辣椒生理指标的影响,从而为探究抗病生理机制和制定病害防控措施提供理论基础。侯思皓等<sup>[23]</sup>通过形态学观察和ITS序列分析鉴定辣椒果实炭疽病病原菌类型。沈会芳等<sup>[24]</sup>在PDA培养基上对辣椒组织叶斑病病原菌进行分离培养,利用基因组DNA测序确定病菌类型,并对比不同剂量配比药剂对病原菌的抑制作用。目前基于生化分析检测病害类型的方法只能在实验室中进行,可以通过特征性化学成分识别,在病害症状出现前检测到异常。但该方法的样本处理过程较为复杂,要依赖实验室专业设备与操作人员技术,样本处理复杂、成本高且实时性不足。

### 2.3 基于可见光图像识别

基于图像的辣椒病害识别技术主要通过计算机视觉和深度学习算法实现,近年来,卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)等深度学习模型常用于图像分类和目标检测识别任务中,能够有效提取辣椒病害的特征信息,构建病害分类检测模型,实现不同病害的自动识别。YOLO是一种实时目标检测算法,其模型按照大小可以分为Large(L)、Medium(M)、Small(S)和Nano(N)4个版本<sup>[25-26]</sup>。Nano版本模型最小,适合部署在移动端设备或嵌入式系统,但精度最低,通过改进YOLO模型可以有效平衡识别精度和效率问题,后期通过优化算法还可以实现复杂背景下目标检测识别。李芳等<sup>[27]</sup>提出了改进YOLOv8n模型的辣椒病害检测方法,与原YOLOv8n模型相比对辣椒炭疽病、脐腐病等4种病害数据平均识别准确率提高了2.6%。Bezabh等<sup>[28]</sup>利用图像特征提取和设计的多分类器实现了辣椒5种病害的识别。Liu等<sup>[29]</sup>提出了PepperNet模型,将存在遮挡且背景复杂的辣椒病虫害图像多模态特征进行分解,并采用细粒度方法学习,实现了复杂场景下辣椒病虫害检测,后期可将模型部署在无人机上用作辣椒大面积病虫害实时监测。

综合多个相关研究发现,图像识别方法对单一病害识别效果较好,当同时出现多种病害且病害间特征差异不明显时,模型泛化能力较差,此外,图像识别方法对辣椒早期病害监测的难度大,

早期病害侵染时,辣椒外形在肉眼范围内几乎没有变化,只有在出现病斑时,模型才能从图片中提取特征进行判断。基于可见光图像的病害识别需要大量数据集进行建模,目前常用的作物病害图像数据库有 Plant Village、AI Challenger 2018 图

片分类比赛数据库等,数据库详情如表 2 所示。在构建自己的辣椒病害数据库时要确保数据多样性和平衡性等问题,同时,为了便于用户使用,病害识别模型训练好后可以部署到边缘端设备<sup>[30]</sup>。

表 2 常用作物病害图像数据库

数据库名称	作物类型	描述	访问方式
Plant Village	有 50000 多张叶片图像,涵盖苹果、辣椒、番茄等 14 种作物,38 类病害	数据经过专家标注,标准化环境拍摄,并提供了增强样本,适用于分类模型训练	通过 GitHub、飞桨 AI Studio 官网搜索,输入代码读取
AI Challenger 扩展集	具有 50000 多张标注图片,覆盖苹果、辣椒、玉米等 10 种作物,共 27 类病害	按“物种-病害-严重程度”三级划分,共 61 个细粒度类别,可用于病害分类、严重程度评估、轻量化模型部署	通过飞桨 AI Studio 官网搜索获取
2022 年科大讯飞辣椒病虫害图像识别挑战赛数据库	覆盖 11 类辣椒病虫害,共 7556 张	田间实地拍摄,包含复杂背景、多变光照及不同清晰度的图像,部分病害形态相似	在讯飞开放平台,搜索“2022 辣椒病虫害图像识别挑战赛”获取
中兴大学数据库	水稻叶芽线虫高光谱影像 + XML 标注、茶树病害图像、气象站影像数据资料等	例如:水稻线虫病害波长范围 900~1700 nm,主要用于潜育期病害研究	未公开,需签署学术授权协议或进行学术授权申请

## 2.4 基于光谱技术识别

目前荧光光谱、多光谱、近红外光谱、高光谱等光谱技术常用于病害检测研究。其中荧光光谱波长取决于荧光物质的种类和激发源的特性,主要用于点测量,使用时受环境因素影响较大<sup>[31]</sup>。多光谱设备成本较低且数据处理相对简单,适合实时检测,但波段数量有限,光谱分辨率不高,对复杂病害的分类能力有限。近红外光谱是利用作物对近红外光的吸收和反射特性,间接反映作物的生理状态和病害程度,但近红外光谱分辨率较低。高光谱能够提供丰富的病害光谱特征,从而实现病害的分类与识别,但设备价格昂贵,采集的数据量大,存储和处理需要高性能计算资源<sup>[32]</sup>。在辣椒病害识别检测过程中,高光谱可于病原侵染后 24 h 内发现辣椒病害,显著早于显症期,可进行早期病害机制解析,但需稳定光照,无人机载光谱易受风干扰,而多光谱技术适用于辣椒病害显症期监测,目前在大田常规巡检与显症监测研究中较为常见。

当前基于光谱技术的辣椒病害识别检测研究已取得阶段性进展,但在实际应用、多病害同步识别等方面仍需深入探索。基于荧光光谱的病害检测研究主要集中于不同的激发光源分析、光谱差异分析、特征荧光分析等<sup>[33-34]</sup>。辣椒在感染病害

后,内部色素、酶活等会发生变化,因此对不同近红外波段的吸收会存在差异,通过检测特定波段的变化可以确定病害类型<sup>[35]</sup>。沈梦姣等<sup>[36]</sup>通过高光谱成像技术实现了辣椒早疫病潜育期的识别,可识别时间为接种病毒后 24 h,准确率达 93% 以上。Duan 等<sup>[37]</sup>利用多光谱成像结合纹理信息建立了辣椒疫病早期检测 CNN 模型,能够在接种后 48 h 实现检测,准确率为 91.3%。上述光谱技术对辣椒病害的实验室级检测研究已趋成熟,但面向田间复杂场景的实时监测系统仍需技术优化和验证。Shao 等<sup>[38]</sup>为开发便携式高光谱成像系统进行田间辣椒根腐病潜伏期检测,因此通过神经网络等方式提取与根腐病相关的波长建模,以寻找最优模型。此外还有研究将辣椒主要病虫害光谱识别模型内置于无人机中央处理系统,可以实时处理辣椒植株冠层病虫害光谱数据,并生成预警信息<sup>[39]</sup>。随着无人机技术的发展,可以在无人机上搭载近红外、高光谱等传感器进行大范围农田监测,通过快速获取高分辨率图像和光谱数据,及时发现病害类型和分布情况<sup>[40-42]</sup>。

## 2.5 基于多源信息融合的辅助监测与预警技术

### 2.5.1 基于柔性可穿戴式传感器辅助监测

为防止辣椒病害大规模爆发,在辣椒长期高效、无损监测研究过程中,可以借鉴柔性可穿戴式传感器

在其他作物上的应用研究。植物可穿戴式传感器可以持续无损地获取作物生理、生化和营养水平等重要生命信息,具有模块化、低成本、动态监测和低侵入性等特点。Lee等<sup>[43]</sup>将VOC传感器、温湿度传感器等集成在一个平台,在叶片远轴端贴附多模态可穿戴式传感器,并开发机器学习模型分析多通道传感器数据,在活体番茄上接种病毒4d后可对番茄斑点枯萎病毒进行定量检测。赵一聪<sup>[44]</sup>构建了一种自适应叶片生长的叶面传感器,可以用来获取温度、湿度和光强等环境信息以及由叶片生长引起的应变信号,传感器采用黏性硅胶基底材料,能够紧密贴附于叶面,跟随叶面进行各种形变,并搭建了无线通信电路传输植物生长和环境数据,传输距离可达200m,太阳能模块搭载低功耗采集电路可实现持续供电。目前植物可穿戴感知技术研究正在从体表到体内从单参数到多参数转变,要大面积推广应用还需要克服传感器贴附植物表面或植入植物体内时的微创低损、远距离无线传输、持续供能和多模态传感器融合感知等问题。

2.5.2 基于气象数据分析预警 辣椒病害的监测不仅可以依赖实时辣椒健康状态和病害检测,还能结合气象数据,预测未来病害的发生风险。由表1可知,病害的发生与温、湿度密切相关,持续降雨或灌溉不当会导致田间积水,增加病害发生的风险,同时风速、风向的观测可以间接预测病害传播的趋势,如面积和方向等,光照强弱及日照持续时间与辣椒生长发育情况相关,适宜的光照强度和um时间有利于增强辣椒植株的抗病能力。姚熠等<sup>[45]</sup>通过绥阳县3个乡镇在2016—2018年的辣椒病害观测数据,结合气象分析,找出了病毒病初发期气象指标。同时,有研究整合了当地历史气象数据和病害发生数据,通过统计学方法分析气象数据与病害发生的相关性,从而确定可能导致病害发生的相关参数临界值,并结合机器学习建立辣椒病害预测模型<sup>[46]</sup>。后期可以将模型部署到云端或边缘服务器上,通过气象站或传感器实时采集气象数据,预测辣椒病害的发生。

对于辣椒病害识别,传统人工方法仅适用于小规模家庭菜园种植,不适用于大面积精准监测;生化分析方法适用于当病害症状不典型或多种病害症状相似时的病原菌精准鉴定,但通常是破坏性取样,检测周期长,不能原位实时监测,难以大面积应用;可见光图像识别方法适用于症状明显的病害识别,可在温室或田间进行固定监测,也可

利用无人机、地面移动平台搭载相机进行普查;光谱技术适用于在肉眼或可见光相机无法察觉症状前识别病害,可手持、车载或无人机搭载进行大面积扫描快速获取田间病害感染情况;基于柔性可穿戴式传感器辅助监测方法可以针对某些病害发生过程中产生的特异挥发性有机物或渗出物进行早期预警,并且可以提供辣椒生长过程中连续的生理数据流,但对传感器性能要求高,目前主要用于特定生理参数监测,对广谱病害识别能力有限;气象数据分析预警方法适用于病害长期趋势分析和规划,能在气象条件达到病害流行阈值前发出预警,指导喷施保护性杀菌剂,该方法预测的是“风险”,而非实际发生的“病害”,因此无法完全确定具体田块内是否已有病原菌存在或辣椒植株是否已感病。

### 3 辣椒病害防治

#### 3.1 传统辣椒病害防治措施

在辣椒种植过程中,传统病害防治主要以预防为主,同时兼顾化学防治和生物防治。辣椒苗移栽时需要合理安排种植密度,辣椒生长过程中要及时进行田间管理,以减少病害的发生和大面积传播<sup>[47]</sup>。化学防治需要根据病害严重程度合理喷施对应浓度和剂量的药液,但具体农业生产上的实际防治情况是,只要出现病害或者辣椒生长发育到易感病的生育期时,农户就开始大量喷施农药。生物防治可以通过释放天敌等方式,控制作为病害传播载体的蚜虫等害虫,从而降低害虫的种群密度<sup>[48]</sup>。传统辣椒病害防治方法通常依赖自然手段,成本较低,容易被农民掌握和应用,但传统方法见效较慢,需要大量人工进行操作,费时费力,对突发性病害或抗药性病害的控制能力较弱,防治效果很大程度上依赖于种植者的经验,且喷施农药过程中还会对人体健康造成影响,科学性和精准性不足,这些方法在大规模种植中效率较低,难以快速覆盖大面积农田。

#### 3.2 辣椒病害智能化防治

辣椒病害的智能化防治是辣椒产业健康发展的重要保证,通过结合物联网、大数据分析等技术,实现对辣椒病害的实时监测、早期预警和精准防治<sup>[49]</sup>。目前智能防治技术主要包括智能感知与预警、精准决策与执行、综合调控预防策略等,其中精准决策与执行技术通过前期对辣椒病害的分布和严重程度进行识别诊断,并将结果反馈给施药控制系统,从而实现施药区域、药液量和施药

时间的精准控制,综合调控通过对温度、湿度等进行精准控制,同时自动灌溉和施肥系统根据环境条件、植株不同生育期需求情况精准调控水肥。精准施药设备、无人机的使用代替传统人工可以减少人力投入,智能监测设备结合预警模型可以在早期发现病情,降低病害发生风险。

**3.2.1 智能感知与预警** 智能感知与预警系统分为病害感知层、数据传输层和应用层,病害感知层通过在田间安装可见光、近红外等传感器和环境数据采集设备(如气象站)实时动态采集数据,数据传输层是将传感器采集的视频或图片数据通过无线(Wi-Fi、蓝牙等)方式上传至云端或边缘端数据库,应用层通过集成的检测模型对数据库视频和图片进行处理,实现田间病害类型识别和定位,检测结果将反馈给用户或作为喷药等病害防治设备的控制信号<sup>[50]</sup>。唐新苗<sup>[51]</sup>提出了物联网设备在设施大棚中的部署标准,涵盖了环境监测传感器布局、数据融合协议及病虫害防控等执行模块。通过集成物联网传感器网络、辣椒病虫害识别模块、自动药物配比模块与生长补偿系统等,可实现病害智能感知与预警,减少人工干预 30% 以上<sup>[52]</sup>。智能感知与预警系统的设计和开发为辣椒病害提供实时监测、数据分析和精准预警功能,为后期施药策略提供决策支持。

**3.2.2 精准决策与执行** 精准施药技术借助全球定位系统(GPS)、遥感等手段,精准定位和识别土壤、作物病害情况,为后期喷药设备提供精准施药决策依据,可以减少药剂使用和作物对药液产生抗性,降低环境污染<sup>[53]</sup>。该技术可以分为施药决策生成和决策实施两大部分,决策生成通过地理信息技术获取地块位置数据,结合相机、近红外等传感器获取作物病害类型和程度生成施药处方图;决策实施通过将处方图实时解释转化为施药作业机具控制系统的相关参数,可以调节施药浓度、喷药压力等,实现变量喷药控制<sup>[54]</sup>。目前基于无人机的精准施药方式可以通过搭载可见光、光谱等传感器采集田间作物位置、长势和病害等信息,生成处方图,植保无人机根据处方图数据对相关地块喷施对应药液<sup>[55-56]</sup>。基于地面精准施药已有团队研发了机器人巡检喷药设备,张俊雄等<sup>[57]</sup>根据黄瓜病害等级程度通过机械臂上喷嘴电磁阀控制,实现了单体植株和单个叶片内病害区域的对靶变量喷雾。另有一种基于机器视觉方法检测葡萄白粉病发病区域对靶喷施的机器人,可以最小化点喷面积<sup>[58-59]</sup>。西南大学研究提出

了一种辣椒喷药机器人及其控制方法,机器人集成了行走底盘、双摄像头(路径导航+病斑识别)、旋转云台及摆动喷管,适用于山地小规模种植场景<sup>[60]</sup>。喷药机器人后期在辣椒种植使用过程中可以增加播种、移栽、剪枝、采摘等功能,实现作物耕、种、管、收全流程监管和作业,增加机器使用率。

**3.2.3 环境调控与综合预防** 土壤湿度、肥力以及环境温度、湿度等对辣椒正常生长和病害传播具有重要影响,适宜的环境条件能够确保辣椒健康生长、减少病害传播。精准灌溉在辣椒种植过程中能保持土壤湿度适宜,减少病原菌滋生,还能避免过量灌溉导致的根部病害,或者因过度干旱削弱辣椒植株抗病能力,合理施肥可以增强辣椒植株的抗病能力。目前,智能灌溉、排水系统通过部署传感器实时监测土壤湿度、植株蒸腾量,同时结合天气预报和作物生长阶段的需求等多元信息,自动生成科学合理的灌溉和排水策略,控制灌溉设备和排水系统工作<sup>[55,61]</sup>。房启超等<sup>[62]</sup>提到在西北二十九团辣椒智能化种植过程中,分别在植株顶部、中部和地面附近安装温度传感器,在辣椒种植大棚顶部安装光照强度检测设备,数据传输到中央控制系统,当超过阈值时,系统会自动调整大棚顶窗、侧窗以及遮阳帘开闭。智能环境调控技术通过精准管理和优化生长环境,未来将能够有效预防和控制辣椒病害,提升其产量和品质。

## 4 结论与展望

目前在辣椒病害识别研究方面,基于深度学习的图像识别模型能够有效区分辣椒的病毒病、疫病、炭疽病等常见病害,识别准确率已达到较高水平。基于光谱分析可以检测辣椒染病后特定生理指标变化,从而提取特征波段对病害进行诊断,基于生化分析方法可以在室内实现辣椒不同病害的精准识别,同时还有学者提出了多模态植物可穿戴传感设备,可实现在体植株病害实时检测。在病害智能化防治研究方面,通过安装监测设备和智能防治系统能够实现辣椒病害的实时预警与防治,辣椒喷药机器人的应用可降低人工等成本投入,环境调控技术可预防辣椒病害发生。然而,当前研究仍存在一些不足,如单一智能化识别模型在复杂田间环境下的鲁棒性有待进一步提升(如复杂光照下识别准确率下降多少,没有具体数据),且智能化防治系统和设备的推广与应用仍面临成本和技术门槛较高的问题,目前国产与进口

遥感、光学传感器的价格差异显著,例如高光谱成像设备,德国 CUBERT X20P-LIR 报价 145 万元,集成高光谱、激光雷达、热红外等模块,适用于无人机精准遥感,国产设备如 HY-9010-L 无人机载高光谱系统整机价低于 80 万元,具备 1 920 个空间通道和 1 TB 存储,性能接近进口中端产品,价格仅为进口的 30%~50%。因此,未来研究需要在模型优化、技术集成创新、系统和设备自主研发以及推广应用等方面进一步努力。

#### 4.1 智能化识别技术的突破与展望

当前辣椒病害检测设备精度和稳定性难以保证、传感器和核心部件依靠进口,核心算法“黑盒子化”。因此,国产化集成多个、多源传感器实现辣椒病害信息的实时采集,已成为当前病害等表型获取的趋势。此外还存在多源异构传感器高通量时空采集不同步、多维数据采集端融合和解析难等问题,传统可见光、遥感影像解译技术,往往侧重于针对单一模态单一任务建模,缺乏对多模态数据、时间序列数据、地理先验知识的综合建模和利用,限制了其在海量数据和多种任务中的泛化能力。后期研究可以将遥感影像、地理信息数据以及常规气象观测数据结合,构建一体化时空模型,首先需要进行硬件设备部署,实现高空平台、近地平台和地下层数据采集,其次利用时空匹配等算法将数据进行融合,并提取病害特征构建诊断模型,最后将模型部署到边缘服务器端进行应用,通过多模态数据融合、多任务学习以及构建基准数据集等方式,可以充分利用多模态数据的互补性。

#### 4.2 智能化防治技术的突破与发展

辣椒智能化防治过程中,可以用数据驱动决策,通过构建“空天地”智慧网络,整合卫星遥感、无人机航拍与地面传感器,实现辣椒全生长周期动态管理。精准变量施药技术在实际应用时要解决喷雾漂移、对靶定位精度、施药延时等问题,化学农药施用决策过程要解决农田信息获取存在偏差的问题。同时要建立用于处方图与施药量解译的病害发生程度量化判别标准,决策执行方面要解决变量控制延时、工作参数不稳定等问题。

#### 参考文献:

[1] 常伟,万瑶.基于高质量发展视角的新疆兵团辣椒产业提质升级研究[J].北方园艺,2024(23):125-130.  
 [2] 吴永红,周书栋,李雪峰,等.2019年辣椒科学研究进展[J].辣椒杂志,2020,18(2):1-7,13.  
 [3] 彭月,吴永红,王俊莹,等.2021年辣椒科学若干领域重要研究进展[J].辣椒杂志,2022,20(1):1-11.

[4] 邹学校,马艳青,戴雄泽,等.辣椒在中国的传播与产业发展[J].园艺学报,2020,47(9):1715-1726.  
 [5] ANJNA, SOOD M, SINGH P K. Hybrid system for detection and classification of plant disease using qualitative texture features analysis[J]. Procedia Computer Science, 2020, 167: 1056-1065.  
 [6] 彭月,马艳青,高风云,等.我国辣椒生产相关标准体系现状分析与展望[J].中国蔬菜,2024(3):7-18.  
 [7] GHOSH S, KANAKALA S, LEBEDEV G, et al. Transmission of a new polerovirus infecting pepper by the whitefly Bemisia tabaci[J]. Journal of Virology, 2019, 93(15): e00488-19.  
 [8] 邹学校.辣椒育种栽培新技术[M].长沙:湖南科学技术出版社,2021.  
 [9] TIEN N T T, THANH L T H, THI N T K, et al. First report of colletotrichum species causing chili (*Capsicum annuum* L.) anthracnose in Hue, Vietnam [J]. Australasian Plant Pathology, 2025, 54(3): 413-424.  
 [10] SHI F Y, WANG X X, WEI M J, et al. Transcriptome analysis provides new insights into the resistance of pepper to phytophthora capsici infection[J]. BMC Genomics, 2025, 26(1): 311.  
 [11] HUSSEIN M A M, ABDEL-AAL A M K, RAWA M J, et al. Enhancing chili pepper (*Capsicum annuum* L.) resistance and yield against powdery mildew (*Leveillula taurica*) with beneficial bacteria[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2023, 33(1): 114.  
 [12] YANG L F, LIU X L, LU H Y, et al. Cinnamaldehyde inhibits postharvest gray mold on pepper fruits via inhibiting fungal growth and triggering fruit defense[J]. Foods, 2023, 12(18): 3458.  
 [13] SOOD T, SOOD S, SOOD V K, et al. Assessment and validation of resistance to bacterial wilt (*Ralstonia solanacearum*) through field and molecular studies in bell pepper[J]. Journal of Plant Pathology, 2023, 105(3): 849-857.  
 [14] LI X F, LI G, YI L H, et al. Soft rot of postharvest pepper: bacterial pathogen, pathogenicity and its biological control using *Lactobacillus farciminis* LJLAB1 [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(1): 443-455.  
 [15] SUBEDI A, MINSAVAGE G V, JONES J B, et al. Exploring diversity of bacterial spot associated Xanthomonas population of pepper in southwest Florida [J]. Plant Disease, 2023, 107(10): 2978-2985.  
 [16] LIN W H, ZHANG S G, ZHANG H, et al. The transcriptional analysis of pepper shed light on a proviral role of light-harvesting chlorophyll a/b binding protein 13 during infection of pepper mild mottle virus[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1533151.  
 [17] LUO C, LUO Y, LUO H, et al. High-throughput sequencing identification and multiplex RT-PCR detection of pepper viruses[J]. Physiological and Molecular Plant

- Pathology, 2025, 136: 102555.
- [18] 刘彦均. 辣椒抗病候选基因 *RIA-5* 的功能验证及其在泡椒抗病遗传改良中的应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024.
- [19] 王丽. 多组学联合解析不同基因型辣椒响应铜胁迫的机制研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2024.
- [20] 朱燕, 姚香澳, 官智勇. 稻谷中真菌毒素的暴露污染、检测技术及防控研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(15): 264-274.
- [21] BHAKAT A, SEN S, BANERJEE S, et al. Plant growth promotion and lipopeptide-mediated biological control of chilli pathogen *Colletotrichum siamense* by endophytic *Bacillus* sp. [J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2023, 125: 102026.
- [22] HANNUM S, ACEH R M, ELIMASNI. Begomovirus detection on diseased chili plant (*Capsicum annum* L.) in Tanah Karo North Sumatera with PCR techniques[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 305012057-012057.
- [23] 侯思皓, 巩雪峰, 许艺, 等. 辣椒炭疽病菌鉴定及炭疽菌胁迫下的生理变化[J]. 西南农业学报, 2024, 37(10): 2185-2193.
- [24] 沈会芳, 杨祁云, 张景欣, 等. 辣椒叶斑病原鉴定及其对杀菌剂的敏感性[J]. 植物保护, 2025, 51(2): 245-251, 296.
- [25] MATHEW M P, MAHESH T Y. Leaf-based disease detection in bell pepper plant using YOLO v5[J]. Signal, Image and Video Processing, 2022, 16(3): 841-847.
- [26] DUAN Y L, HAN W Y, GUO P, et al. YOLOv8-GDCI: research on the *Phytophthora* blight detection method of different parts of chili based on improved YOLOv8 model [J]. Agronomy, 2024, 14(11): 2734.
- [27] 李芳, 危疆树, 王玉超, 等. 基于改进 YOLOv8n 模型的辣椒病害检测方法[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 323-334.
- [28] BEZABH Y A, SALAU A O, ABUHAYI B M, et al. CPD-CCNN: classification of pepper disease using a concatenation of convolutional neural network models[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 15581.
- [29] LIU J, WANG X W. A multimodal framework for pepper diseases and pests detection[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 28973.
- [30] 邹玮, 岳延滨, 冯恩英, 等. 基于 MobileNet V2 的辣椒果实炭疽病识别及其应用[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(9): 125-132.
- [31] 林晓东. 基于荧光光谱的茶藻斑病病害程度判别方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [32] 白大昱. 基于高光谱/可见光的甜瓜白粉病早期识别与严重程度分级研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [33] 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.
- [34] 王迎旭. 基于叶绿素荧光技术的温室黄瓜植株营养参数检测与病害分类研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [35] 张德荣, 方慧, 何勇. 可见/近红外光谱图像在作物病害检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(6): 1748.
- [36] 沈梦姣, 鲍浩, 张艳. 基于光谱-纹理特征的辣椒早疫病潜育期高光谱图像检测识别[J]. 生物化学与生物物理进展, 2025, 52(1): 233-243.
- [37] DUAN Z J, LI H Q, LI C G, et al. A CNN model for early detection of pepper *Phytophthora* blight using multispectral imaging, integrating spectral and textural information[J]. Plant Methods, 2024, 20(1): 115.
- [38] SHAO Y Y, JI S H, XUAN G T, et al. Detection and analysis of chili pepper root rot by hyperspectral imaging technology[J]. Agronomy, 2024, 14(1): 226.
- [39] 贵州省农业科技信息研究所(贵州省农业科技信息中心). 一种基于机载光谱的辣椒主要病虫害智能识别系统: 202210647562. X[P]. 2022-09-06.
- [40] 曹英丽, 张弘泽, 郭福旭, 等. 基于无人机遥感的农作物病害监测研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 616-628.
- [41] ANAM I, ARAFAT N, HAFIZ M S, et al. A systematic review of UAV and AI integration for targeted disease detection, weed management, and pest control in precision agriculture [J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 9: 100647.
- [42] 颜子一, 沈奕扬, 唐伟, 等. 基于无人机高光谱的稻田杂草识别和空间分布研究[J]. 激光生物学报, 2024, 33(4): 335-346.
- [43] LEE G, HOSSAIN O, JAMALZADEGAN S, et al. Abaxial leaf surface-mounted multimodal wearable sensor for continuous plant physiology monitoring [J]. Science Advances, 2023, 9(15): eade2232.
- [44] 赵一聪. 用于植物监测的柔性可穿戴传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- [45] 姚熠, 张开华, 蹇孝敏, 等. 气象因子对绥阳县辣椒病毒病的影响[J]. 现代农业科技, 2019(21): 112-113, 115.
- [46] 贵州春芯科技有限公司, 云南春芯科技有限公司, 贵州省蚕业研究所(贵州省辣椒研究所). 辣椒病害预测方法、装置、电子设备及存储介质: 202111070300. 3[P]. 2021-11-05.
- [47] 赵永建. 威宁县辣椒地膜栽培技术要点[J]. 广东蚕业, 2025, 59(3): 20-22.
- [48] 杨鑫, 黄燕云. 系统分析设施辣椒种植技术及病虫害综合防治关键技术环节[J]. 种子世界, 2025(5): 36-38.
- [49] SOMASHEKAR K S, MOINUDDIN, BELAGALLA N, et al. Revolutionizing agriculture; innovative techniques, applications, and future prospects in precision farming[J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2024, 30(8): 405-419.
- [50] 李昊. 基于深度学习的柑橘病害智能在线监测系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [51] 唐新苗. 以物联网为基础的智慧温室大棚蔬菜种植技术[J]. 现代农机, 2025(2): 87-89.
- [52] 湖南省阳雀湖农业开发有限公司. 用于辣椒种植的病虫害防护系统及方法: 202310031657. 3[P]. 2023-05-05.
- [53] 李强. 农业精准施药技术对农作物产量与品质的影响[J]. 新农人, 2024(16): 81-83.
- [54] 魏鹏, 闫晓静, 徐军, 等. 植物保护施药技术创新与装备智能化的研究现状与展望[J]. 现代农药, 2023, 22(5): 1-8, 27.

- [55] 于丰华,许童羽,郭忠辉,等. 水稻智慧无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文),2024,6(6): 1-22.
- [56] PARTEL V, COSTA L, AMPATZIDIS Y. Smart tree crop sprayer utilizing sensor fusion and artificial intelligence[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,191:106556.
- [57] 张俊雄,曹峥勇,耿长兴,等. 温室精准对靶喷雾机器人研制[J]. 农业工程学报,2009,25(S2):70-73.
- [58] OBERTI R, MARCHI M, TIRELLI P, et al. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot[J]. Biosystems Engineering, 2016,146: 203-215.
- [59] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7): 1-22, 55.
- [60] 西南大学. 一种辣椒喷药机器人及其控制方法:201910411588.2[P]. 2023-10-20.
- [61] 吴云,李博,李晶晶. 设施蔬菜栽培管理物联网关键技术研究及应用[J]. 种子科技,2025,43(2): 84-86, 152.
- [62] 房启超,谭治中. 辣椒智能化种植技术及病虫害防治[J]. 农业工程技术,2025,45(5): 26-27.

## Research Progress on Intelligent Identification and Control of Pepper Diseases

ZOU Wei, YUE Yanbin, ZHAO Zeying, LI Lijie, HAN Wei

(Guizhou Agricultural Science and Technology Information Institute, Guiyang 550006, China)

**Abstract:** The occurrence of pepper diseases has severely impacted the quality of peppers and the economic benefits of the industrial chain. With the development of artificial intelligence and computer technology, which provide a technical premise for intelligent identification and control of pepper diseases. In order to promote real-time intelligent detection and scientific prevention and control of chili diseases, based on previous research, this paper introduced the classification, epidemic law and symptom of main diseases of pepper, according to the phenotypic changes and physiological and biochemical characteristics after pepper disease infection. The advantages and disadvantages of traditional artificial and intelligent methods for disease identification and control were compared. Focusing on research advancements in pepper disease identification using biochemical analysis, visible light imaging, and spectral analysis methods, as well as intelligent diagnostic systems and precision pesticide application technologies. The identification and prediction of pepper diseases by wearable sensors and meteorological data are prospected. The existing challenges and future directions in intelligent disease detection and control were also discussed.

**Keywords:** pepper disease; identification and detection; precise prevention and control; biochemical analysis; visible light imaging; spectral analysis

(上接第 95 页)

## Research Progress in Protoplast Fusion Breeding Technology of *Auricularia*

YUE Xin, HAN Chuang, ZHANG Xiaojia, ZHAO Yanshu, MA Yinpeng, JIANG Yuxin, DAI Xiaodong

(Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences / National Collection of Edible Fungi, Harbin 150010, China)

**Abstract:** As an important means in the research of *Auricularia* breeding, protoplast fusion technology can effectively break through the barriers of cell walls and the limitations of spore germination rate, overcome the obstacle of cross-incompatibility, significantly expand the resources of *Auricularia* breeding materials, shorten the time for breeding new strains, and provide a solid foundation for variety innovation. To efficiently select and breed high-quality *Auricularia* strains, this paper reviews the preparation and regeneration of *Auricularia* protoplasts, protoplast fusion breeding, and the identification of fusants. It summarizes the application of protoplast fusion breeding technology in strain development and prospects its future development.

**Keywords:** *Auricularia*; protoplast fusion breeding; fusant identification