

中图分类号: S532; S435.32 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)05-0460-08
DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.05.009

马铃薯环腐病发生、检测及防治进展

邵 鹏^{1*}, 丁 宁², 王庆军¹, 韩 腾¹, 秦 竞¹, 王跃华¹

(1. 枣庄市农业农机技术推广中心, 山东 枣庄 277800; 2. 枣庄市农业科学研究院, 山东 枣庄 277800)

摘 要: 马铃薯是重要的粮食和蔬菜作物, 在农业生产中占有重要地位。马铃薯环腐病是一种细菌性病害, 以带病种薯为主要传播途径, 严重影响马铃薯的产量、品质及后代种薯质量, 具有易传播、早期症状不明显、危害严重、防治困难等特点, 已经成为马铃薯生产中的主要病害。文章对马铃薯环腐病的危害、成因和发病特点进行了总结, 归纳了病菌的检测方法、防治措施以及相关的国内外研究进展, 并提出相应建议和研究展望, 以期推动马铃薯环腐病的防治。

关键词: 马铃薯; 症状; 环腐病; 检测; 防治措施

Progress in Occurrence, Detection and Control of Potato Ring Rot

SHAO Peng^{1*}, DING Ning², WANG Qingjun¹, HAN Teng¹, QIN Jing¹, WANG Yuehua¹

(1. Zaozhuang Agricultural and Machinery Technology Promotion Center, Zaozhuang, Shandong 277800, China;

2. Zaozhuang Agricultural Science Research Institute, Zaozhuang, Shandong 277800, China)

Abstract: Potato is a food and vegetable crop, and plays an important role in agricultural production. Potato ring rot is a disease caused by bacterial, which mainly spreads through diseased seed tubers and seriously affects the yield and quality of potato, and quality of offspring as seed potatoes. It is easy to spread, with no obvious early symptoms but serious and uncontrollable harm, which has become a major disease affecting potato production. The harms, reasons and characteristics of potato ring rot were summarized. The detection methods, control measures and related research progress at home and abroad about potato ring rot were discussed, and the corresponding suggestions and research prospects were put forward to promote the prevention and control of potato ring rot.

Key Words: potato; symptom; ring rot; detection; control measure

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)原产于南美洲的安第斯山脉, 宜粮宜菜, 在全世界160个国家种植和生产, 居水稻、小麦、玉米之后, 被称为“第四大粮食作物”, 具有生育期短、产量高、适应力强、营养全面的特点^[1,2]。中国是全球第一大马铃薯生产

国, 2021年中国马铃薯种植面积达463.25万hm², 总产量1790.7万t(数据来源于农业农村部), 是中国重要的粮食作物之一^[3]。

马铃薯环腐病(Potato ring rot)又称马铃薯轮腐病, 是一种细菌性维管束病害, 由环腐棒状杆菌侵

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 枣庄市科技发展计划项目(2021NS18)。

作者简介: 邵鹏(1985-), 男, 硕士, 高级农艺师, 主要从事农业技术推广工作。

*通信作者(Corresponding author): 邵鹏, E-mail: shaopeng1182@163.com。

染引起,在马铃薯主要生产区均有发生^[4],是当前马铃薯种植过程中的主要病害。在中国,马铃薯环腐病于20世纪50年代最先于黑龙江省发现,随着马铃薯种植范围的扩大,到20世纪70年代以后逐渐传播到全国其他地区,严重影响马铃薯产量和品质,减产幅度可达30%以上,同时块茎质量较差,商品性下降^[5],降低种植收益。20世纪70~80年代被列为国内植物检疫对象,环腐病害早已被列为重要的进出口检疫内容,国际上要求马铃薯种薯带病允许率为“0”^[6]。因此,马铃薯环腐病的综合防治和早期检测已经成为马铃薯种植中的重要内容。

枣庄市是山东省马铃薯主产区,属于马铃薯二季作产区^[7,8],2021年全市马铃薯种植面积达4.14万hm²,产量234.15万t(数字来源为2021年统计),马铃薯产业已经成为枣庄市农业发展的一张名片,在发展农村经济、增加农民收入方面发挥了重大作用。因此,马铃薯环腐病的防治对于枣庄市乃至全省全国马铃薯产业的健康发展具有重要意义。

1 马铃薯环腐病发病机理和发病条件

马铃薯环腐病由密执安棒状杆菌引起,密执安棒状杆菌是好气棒状杆菌,革兰氏阳性,主要存在于植物的木质部维管中,大小0.8~1.2 μm × 0.4~0.6 μm,显微镜下呈短杆状,无鞭毛、无菌丝、无孢子,单生或双生,无荚膜和芽孢,无游动能力,在培养基上菌落呈白色,且透明有光泽,侵染植物引起萎蔫、茎溃烂、维管变色等症状^[9]。该菌可分为6个亚种,其中密执安棒状杆菌环腐亚种(*Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*, Cms)会侵染马铃薯,并引起马铃薯环腐病^[10]。

在马铃薯幼苗萌发及植株生长期,均可被密执安棒状杆菌侵染,影响马铃薯生长,导致减产和经济损失^[11]。该病原菌可直接通过伤口侵染马铃薯的幼苗组织,使植株感染环腐病,从而影响植株生长,表现出枯萎、矮小等症状,甚至死亡^[12]。在马铃薯生长过程中,种薯中携带的环腐病菌随养分和水分从地下部向地上部的茎、叶、芽内流动,病菌在生命活动中可以产生酸性毒素导致体细胞变性,特别是使薄壁细胞受到破坏,水分渗失。同时,病

菌在维管束中的运输和生长导致植物水分和养分供应受阻,影响作物生长。在马铃薯块茎形成期,病菌通过茎部向地下部的块茎中转移,重病薯在地里腐烂,轻病薯经贮藏又成为第2年的侵染来源。

马铃薯环腐病的发生与土壤温度和pH有关,大田地温在19~23℃时利于该病的发生和传播,低于16℃时病害发展减缓,而超过31℃病原菌生长会受到抑制,病菌致死温度为50℃时10 min以上,适宜传播pH为7.0~8.4^[13]。

2 马铃薯环腐病发病症状

马铃薯环腐病病原体同时存在于植物内部和土壤中,典型症状为地上部病株萎蔫,地下部块茎维管束呈环形腐烂。

2.1 地上部症状

田间调查发现该病害在苗期无明显症状,典型症状出现在马铃薯开花期后,表现为分枝少、叶片小且黄化,叶片和叶脉间失绿,叶片边缘向上卷曲并呈焦枯状。植株被感染后,从下部叶开始发病,逐步向上发展至全株,最后黄化枯死。病株枯死后茎秆为绿色,叶片黄化但是不脱落,维管组织呈现为黄褐色,用手挤压茎秆时,有时会溢出乳白色黏稠状菌液^[14]。

2.2 地下块茎症状

轻度感病时,地下块茎外部无明显症状,感染严重时,块茎表皮颜色变暗,芽眼发黑并枯死,表面有时会出现裂纹。将染病块茎切开后,可以看到明显的环状,环状呈乳白色或黄褐色,用手挤压块茎有时会溢出乳白色菌液,严重感染的块茎可以看到黑色环状空洞,表皮与内部薯心发生分离^[15]。

3 马铃薯环腐病检测方法

传统的病原菌检测方法主要包括病原学检测(革兰氏染色法、形态结构观察法、指示植物接种鉴定法)和免疫学检测(乳胶凝集试验、酶联免疫吸附测定法、荧光免疫检测法)等^[16]。其中,病原学检测耗时长、敏感性低,投入成本高,且对经典分类学要求极高,不适合用于病害的快速检测^[17];免疫学检测容易出现假阳性和假阴性结果^[18]。欧洲和

地中海植物保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)委员会提出使用至少两种基于不同生物学特性的诊断测试对马铃薯环腐病菌进行准确检测^[19], 虽然能够实现精确识别, 但是操作复杂、成本高。因此快速、准确、高效的马铃薯环腐病检测方法成为主要的研究方向。当前, 马铃薯环腐病快速检测的主要研究方向为光谱技术和分子检测技术。

3.1 光谱技术

目前, 国内主要利用近红外光谱和高光谱成像技术检测识别马铃薯环腐病。

3.1.1 近红外光谱分析技术

美国材料检测协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)将介于可见光谱和中红外光谱之间的780~2 526 nm的区域定义为近红外光谱区。近红外光谱(Near Infrared, NIR)分析技术是指利用近红外光谱对物体进行定性和定量分析的一种技术^[20], 具有绿色、环保、无损的特点, 其发展和运用在无损检测分析技术领域具有跨时代的意义^[21]。孙建英等^[22]利用光谱技术对马铃薯环腐病进行无损检测, 试验通过透射光谱系统采集了正常马铃薯与感染环腐病马铃薯的可见/近红外透射光谱, 对比分析发现感染环腐病的马铃薯样本光谱透射率在整个波段都低于正常样本的透射率, 并对敏感波段初步建立了马铃薯环腐病的识别模型。张小燕等^[23]利用近红外光谱技术结合簇类独立软模式法(Soft independent modeling of class analogy, SIMCA), 探测马铃薯块茎内部品质的变化, 将环腐病马铃薯与健康马铃薯进行区分, 效果良好, 具有实用性。

3.1.2 高光谱成像技术

高光谱成像技术将光谱技术和二维成像技术进行融合, 可以在获取被测物的空间图像信息的同时, 得到被测物的光谱信息^[24]。利用高光谱成像技术可以实现同时检测农产品的物理结构、化学成分以及外在特征, 在农产品无损检测中具有极强的可操作性和广阔的应用前景^[25]。郭红艳等^[26]选取波长900~1 700 nm, 采用高光谱成像技术对马铃薯环腐病进行了无损检测, 试验结果表明高光谱

无损检测马铃薯环腐病具有可行性。

3.2 分子检测技术

近年来, 随着分子生物学的发展, 基于DNA的分子检测方法已开始植物病原诊断上使用, 主要有普通PCR技术、巢式PCR技术、环介导等温扩增技术(Loop-mediated isothermal amplification, LAMP)、多重PCR技术及实时荧光定量PCR技术等, 针对性强, 准确率较高。

3.2.1 PCR技术

DNA条形码技术是指利用生物体DNA中一段或几段标准DNA序列进行快速鉴定的新兴技术, 能够实现对物种快速准确的识别, 一般步骤可分为提取物种DNA、PCR扩增与测序目标基因以及序列的分析与鉴定^[27]。Hebert等^[28]提出将DNA条形码技术用于物种鉴定。魏琪等^[29]将检测检疫性细菌病害的DNA条形码技术应用在马铃薯4种细菌性病害中, 结果显示DNA条形码技术可较好检测马铃薯环腐病和疮痂病。胡林双等^[30]特异性扩增马铃薯环腐病菌16S rDNA基因序列片段1 046 bp, PCR反应具有较高的重复性、可靠性。普通PCR虽然检测速度快、成本低, 但灵敏度较低, 只能定性检测, 仅对显症马铃薯块茎具有较好的鉴定效果^[31]。

3.2.2 巢式PCR技术

常规PCR只使用一对特异性引物进行扩增, 但巢式PCR利用内外两对引物进行2轮扩增反应, 降低了扩增多个靶位点的可能性, 适合微量靶序列的检测, 具有非常高的灵敏度和扩增特异性, 对马铃薯土传病害的早期诊断具有重要意义^[32]。Lee等^[33]根据马铃薯环腐病菌上的插入原件IS1121设计的巢式PCR引物, 能在无症状的马铃薯植株或块茎中超灵敏检测到极低浓度的密执安棒状杆菌。但是巢式PCR在进行第2次扩增时, 有较大几率引起交叉感染, 其灵敏度往往低于实时荧光定量PCR^[34], 目前较少用于马铃薯环腐病菌的检测。

3.2.3 环介导等温扩增技术

环介导等温扩增技术具有快速、简便、特异性强的特点, 能够在等温条件下短时间内实现DNA的大量扩增。汪万春等^[35]选择马铃薯环腐病菌基因组DNA特有的保守区域设计一套LAMP引

物, 通过优化反应条件, 建立了马铃薯环腐病菌 LAMP 检测体系。Sagcan 和 Kara^[36]采用了比色法和横向侧流试验条法对阳性样品进行检测, 通过简单的 DNA 分离方法和反应混合物的冻干, 不需要任何成像设备, 实现了对马铃薯环腐病原菌的 LAMP 检测方法的优化。相较于普通 PCR 技术, LAMP 技术大大缩短了反应时间, 降低了对仪器的依赖, 同时检测的灵敏度、特异性都有不同程度的提高, 更适合田间大规模的样品检测^[37]。

3.2.4 多重 PCR 技术

在自然界中马铃薯环腐病、黑胫病、晚疫病等病害对植株通常是复合侵染的, 因此可以利用双重 PCR 技术实现两种及多种病菌的同时检测。韩广涛等^[38]将马铃薯环腐病菌基因序列(纤维素酶 A)特异性引物 CMS1/CMS2 与马铃薯黑胫病菌特异性引物 ECA1f/ECA2r 进行组合, 成功优化并建立了针对马铃薯环腐病菌和黑胫病菌检测的双重 PCR 技术体系, 实现了对马铃薯环腐病菌和黑胫病菌的同时、快速、高效检测。刘秀丽等^[39]通过克隆马铃薯环腐病菌和晚疫病病菌转录间隔区(ITS)序列, 选取差异位点, 分别设计了两对引物 P.IN1/P.IN2 和 C.IN1/C.IN2 进行扩增, 构建了双重 PCR 反应体系, 实现了同时对马铃薯晚疫病病菌和环腐病菌的快速可靠检测。

3.2.5 实时荧光定量 PCR 技术

实时荧光定量 PCR 技术(Real-time fluorescent quantitative PCR, qPCR)是在 PCR 扩增体系中加入荧光物质, 通过荧光信号对 PCR 进程和生成的 PCR 产物进行监测分析。qPCR 实时检测的技术与传统方法相比, 优势在于不仅可对目标物进行定性判别, 还可分析目标物的含量^[40]。魏琪等^[41]根据环腐病菌 16S rRNA 保守序列设计特异性引物及探针, 建立了马铃薯环腐病菌 qPCR 检测体系, 可实现对马铃薯环腐病菌进行微量检测。

4 防治措施

4.1 选育抗性品种

目前, 国内并未育成对马铃薯环腐病免疫的品种^[42], 但有许多品种表现出了一定的抗性, 例如‘东农 303’‘克新 1 号’‘荷兰 7 号’‘固红 1 号’。各地

根据当地的自然条件和种植习惯培育了一批抗性品种, 吴焕章等^[43]选育的马铃薯鲜食品种‘郑商薯 10 号’适合河南省二季作区和一季作区早熟栽培, 对环腐病表现出了一定的抗性。陈焕丽等^[44]以‘中薯 3 号’为母本、‘呼薯 4 号’为父本, 通过有性杂交选育而成的早熟马铃薯新品种‘商马铃薯 2 号’, 适合中原二季作区纯作或间作套种栽培, 田间表现抗环腐病。

4.2 加强种薯管理

马铃薯环腐病菌在土壤中不能存活, 其主要传染源是带病的种薯, 种薯的跨区域运输导致了病原体的跨区域传播^[45]。从根源上防治马铃薯免受环腐病菌的侵染, 要加强对马铃薯种薯培育各个环节的管理, 建立一定面积无病留种田, 严格在无病田区进行原种和原原种的培育。引种时应全面掌握种薯病害的发生情况, 不引种疫区种薯, 选择无病种薯^[46]。要重视种薯生产和调运环节的检疫工作, 严格执行检疫要求和标准, 确保生产与调运的种薯安全无病菌。建立优良脱毒品种的选育基地, 强化管理体系建设, 生产脱毒种薯^[47]。

带菌的种薯在用刀切块时, 细菌会随切刀传播到健康种薯上, 造成病菌的感染。因此, 要尽可能采用小整薯播种, 可以减轻该病害的传播和感染, 连续实施 3 年发病率减轻 50%~80%, 出苗率提高 70%~95%, 产量提高 20%~30%^[48]。如确需使用刀具切块, 可以使用 75%酒精对刀具消毒, 同时做好种薯的消毒工作。

收获后, 种薯要摊放在通风避光场所 15~20 d, 温度控制在 1~3℃, 相对湿度控制在 90%左右, 经常通风透气, 并及时清除病薯及病薯周围块茎^[49]。贮藏结束后, 要对块茎进行严格筛选, 去除品相差的块茎, 并及时对贮藏场所彻底消毒。

4.3 加强田间管理

选择脱毒种薯起垄栽植, 可采用单垄单行(垄宽 62~70 cm)或者单垄双行(垄宽 80~90 cm, 垄内行距 30 cm), 垄高 25 cm, 株距 20~25 cm, 定植 4 000~5 000 株/667m², 播种深度 13~15 cm。施商品有机肥(有机质≥30%, N+P₂O₅+K₂O≥4%)250~400 kg/667m²或者充分腐熟的堆肥 1 000~1 500 kg/667m², 搭配高

钾复合肥($N:P_2O_5:K_2O = 15:10:20$)100~120 kg/667m², 作为基肥条施或者穴施, 在生长中后期结合病虫害防治根外追施中微量元素肥料。在做好晾种、晒种和浸种工作的基础上, 播种后要及时在地表喷洒药剂, 防止病菌侵入。在马铃薯生长期要做好环腐病、黑胫病、晚疫病、早疫病、蚜虫、地老虎、蛴螬、金针虫等病虫害防治工作, 及时中耕除草, 加强水肥管理, 适时收获, 提高马铃薯产量。同时, 马铃薯连作易造成病菌的累积和传播, 可以与小麦、玉米、大豆等作物进行合理轮作。

4.4 药物防治

使用化学药品是快速有效的防治方法, 目前通过研究和田间试验, 多种药剂可用于马铃薯环腐病的防治。

4.4.1 土壤消毒

土壤消毒能够有效的防治土传病害, 播前可用熟石灰进行全田消毒, 用量为50~60 kg/667m²。

4.4.2 药剂拌种

合理使用药剂对种薯进行拌种浸种, 可以有效减轻病虫害的发生, 是防治马铃薯环腐病的重要手段^[50,51]。可用甲基托布津、叶枯唑(或春雷霉素)、滑石粉或者农用链霉素、甲基托布津和滑石粉混合进行拌种, 也可用40%福尔马林200倍液或者36%甲基托布津悬浮剂800倍液浸种。陈能柱^[52]进行了4种不同药剂对马铃薯环腐病的田间防效试验, 结果表明10%次氯酸钠和高锰酸钾、硫酸铜对马铃薯种薯进行浸种, 均可有效控制马铃薯环腐病的发生。

4.4.3 药剂喷施

发病初期用72%农用链霉素400倍液全田喷雾, 或用合霉素可湿性粉剂、硫酸铜溶液对植株喷雾, 发病期每隔1周喷1次, 根据病情情况调整剂量和频次, 也可使用高锰酸钾、碘和含酚化合物、漂白剂、硫酸铜等药物控制马铃薯环腐病。胡亚峰等^[53]采用赤·吡乙·芸苔可湿性粉剂45 g/hm² + 22.4%氟唑菌苯胺悬浮剂450 mL/hm² + 4%春雷霉素水剂600 g/hm²处理防治马铃薯环腐病效果较好, 其产量也最高。

4.5 生物防治

目前, 马铃薯环腐病的主要防治手段是施用化学农药, 但是化学农药的大量使用会污染环境, 尤其是土壤、水体和大气^[54]。植物源杀菌剂是从植物中提取的活性成分和按活性结构合成的化合物及衍生物, 具有绿色环保无污染的特点, 应用前景广阔^[55]。高以宸等^[56]试验探索红蓼挥发油植物源杀菌剂在马铃薯环腐病防治中的效果, 结果表明, 红蓼挥发油植物源杀菌剂的使用可有效提升马铃薯环腐病菌的抗性, 降低植株发病率, 促进马铃薯生长。Jin等^[57]研究了19个海带分级分离物对马铃薯环腐病菌(Cms)的抑菌活性, 结果表明海带提取物对Cms有抑菌潜力, 其中主要成分烷烃、酯、酸和醇的三级分离物(Fr.3)的抗菌活性最高。Alla等^[58]研究表明, 商品制剂($(NaCa)_8(AlSiO_4)_6(SO_4, Cl, S)_2$ (青金石)和单碘乙酸钠(线粒体抑制农药类似物)能够通过降低Cms生物膜形成, 从而对马铃薯环腐病起到抑制作用。纳米复合生物制剂也开始应用于马铃薯环腐病的防治, Perfilova等^[59]将从药用大担子菌灵芝、猪苓、硫酸菌、香菇、平菇等真菌中提取的生物聚合物添加到细菌悬浮液中后发现, 真菌提取物对马铃薯环腐病菌细胞膜的生长具有抑制作用。研究表明, 以阿拉伯半乳糖(Se/Arabogalactan)和淀粉(Se/Starch)为基质的硒纳米复合材料可以提高马铃薯的免疫力, 促进马铃薯的生产且无残留, 可作为防治马铃薯环腐病的潜在药剂^[60]。

5 展望

粮食安全是保障社会稳定和人民安居乐业的基础, 马铃薯作为粮菜兼用作物, 具有产量高、适应性强、营养丰富等特点。马铃薯种植在保障中国粮食安全方面具有巨大潜力^[61], 在中国和印度, 约有13亿人以新鲜马铃薯为主食, 每人每年消费约50 kg^[62]。中国幅员辽阔, 自然条件和地理环境得天独厚, 除了平原地区之外, 许多高海拔或高纬度地区也具备良好的种薯生产条件^[63], 因此发展马铃薯产业成为解决粮食安全问题的的重要手段。2015年, 农业部正式提出大力发展马铃薯种

植, 实施马铃薯主粮化战略, 马铃薯产业具有广阔的发展前景。

环腐病是马铃薯种植中主要的细菌性病害, 对于马铃薯生长危害极大, 目前尚未有彻底根除的手段, 枣庄市春季前期温度低, 后期升温快, 要在品种选择上优选早熟品种, 在种植中以预防为主。一是加强抗性品种的选育。选育早熟、优质、高产、综合抗性好的马铃薯新品种十分必要, 通过传统选育或者基因等方法筛选或培育出抗马铃薯环腐病的品种, 减少化学药剂的使用, 促进马铃薯绿色生产。二是强化检疫措施。马铃薯种薯的跨区域运输是病原菌传播的主要途径, 因此要加大对马铃薯种薯培育、运输、种植等过程的检疫, 制定完善环腐病菌检疫的标准和方法, 做到有规可循、有法可依, 切断病菌的传播途径。三是加大对检测手段的研究力度。马铃薯环腐病菌感染植株早期症状不明显, 很难通过地上部分直接判断, 给病害的早期检测和防治带来困难^[64]。因此, 成本低、易操作、灵敏度高、能够实现多重检测是马铃薯环腐病菌快速检测的基本要求。光谱技术和分子检测技术由于其本身的特点, 将成为马铃薯环腐病检测的主要研究方向。四是发展低毒高效化学防治和生物防治。在马铃薯环腐病的防治中, 目前以化学药剂的使用为主, 但是化学药剂的大量使用, 会对生态环境、土壤健康及农产品质量安全造成危害, 这与农业绿色可持续发展的目标相悖, 高效、无污染的植物源抑菌剂和生物提取剂必将成为病虫害防治的主要研究方向。在当前现状下, 生物防治技术还不成熟, 尚不能大面积推广使用, 短时期内, 马铃薯环腐病防治的主要手段依然是使用化学药剂。因此, 研制和使用低毒高效药物是当务之急, 同时, 要将化学防治与生物防治相结合, 提高防治效果。五是推广马铃薯种植新技术。在生产中, 加大对马铃薯种植技术的试验示范, 总结提炼马铃薯种植新技术, 加大对水肥一体化技术、测土配方施肥技术、有机肥替代化肥等先进水肥技术的推广应用力度, 促进马铃薯的生长, 提高其抗病性。发展规模化种植, 完善生产、贮

存、筛选等环节的技术规程, 培养有技术、有知识的新农民, 严格标准化生产, 减少病菌的传播。

[参 考 文 献]

- [1] Naumann M, Koch M, Thiel H, *et al.* The importance of nutrient management for potato production part II: Plant nutrition and tuber quality [J]. *Potato Research*, 2020, 63: 121–137.
- [2] 李子涵, 杨晓晶. 世界及中国马铃薯产业发展分析 [J]. *中国食物与营养*, 2016, 22(5): 5–9.
- [3] 徐建飞, 金黎平. 马铃薯遗传育种研究现状与展望 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 990–1015.
- [4] 孙秀梅. 马铃薯环腐病的发生及其防治 [J]. *农业科技通讯*, 2001(1): 26.
- [5] 崔凤英. 马铃薯环腐病发生与防治 [J]. *农村科技*, 2015(6): 43–44.
- [6] De Boer S H, Slack S A. Current status and prospects for detecting and controlling bacterial ring rot of potatoes in North America [J]. *Plant Disease*, 1984, 68(10): 841–844.
- [7] 杨玉田, 王跃华, 魏涛, 等. 关于枣庄市马铃薯产业发展的思考 [J]. *农业科技通讯*, 2017(5): 38–40.
- [8] 席兴文, 张慎凤, 魏永侠. 滕州马铃薯的生产现状、存在问题和建议 [J]. *中国农业文摘*, 2021(5): 65–67.
- [9] Eichenlaub R, Gartemann K H. The *Clavibacter michiganensis* subspecies: molecular investigation of gram-positive bacterial plant pathogens [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2011, 49 (1): 445–464.
- [10] 张兆良, 韩孟浩, 迟胜起, 等. 马铃薯环腐病病原的分离与鉴定 [C]//金黎平, 吕文河. 马铃薯产业与种业创新. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2022: 382–385.
- [11] Yang C Y, Han K S, Jung J K, *et al.* Control of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) by mating disruption with sex pheromone in pear orchards [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2003, 6(1): 97–104.
- [12] Howard R J, Harding M W, Daniels G C, *et al.* Efficacy of agricultural disinfectants on biofilms of the bacterial ring rot pathogen, *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2015, 37(3): 273–284.
- [13] 李秀杰. 马铃薯环腐病防治技术分析 [J]. *河南科技*, 2015(21):

- 217.
- [14] 曹贞菊, 陈明俊, 罗小波, 等. 马铃薯细菌性病害及防治研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2021, 35(3): 272–280.
- [15] Osdaghi E, van der Wolf J M, Abachi H, *et al.* Bacterial ring rot of potato caused by *Clavibacter sepedonicus*: a successful example of defeating the enemy under international regulations [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2022, 23(7): 911–932.
- [16] Mancini V, Murolo S, Romanazzi G. Diagnostic methods for detecting fungal pathogens on vegetable seeds [J]. *Plant Pathology*, 2016, 65: 691–703.
- [17] Goud J C, Termorshuizen A J. Quality of methods to quantify microsclerotia of *Verticillium dahliae* in soil [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2003, 109: 523–534.
- [18] 李婷, 杨坤. 等温扩增技术在寄生虫及其他病原体检测中的应用 [J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2018, 30(2): 232–236.
- [19] Perminow J, Akselsen I, Borowski E, *et al.* Potato ring rot in Norway: occurrence and control [J]. *Potato Research*, 2012, 55(3–4): 241–247.
- [20] Blanco M, Villarroya I. NIR spectroscopy: a rapid-response analytical tool [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2002, 21(4): 240–250.
- [21] 吴凤丽. 马铃薯环腐病与晚疫病的发生症状及防治措施 [J]. 现代农业科技, 2012(23): 147, 150.
- [22] 孙建英, 郁志宏, 席那顺朝克图. 基于光谱技术的马铃薯环腐病无损检测 [J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2019, 40(4): 52–57.
- [23] 张小燕, 杨炳南, 曹有福. 近红外光谱的马铃薯环腐病SIMCA模式识别 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(8): 2379–2385.
- [24] 马本学, 应义斌, 饶秀勤, 等. 高光谱成像在水果内部品质无损检测中的研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1611–1615.
- [25] 吴静珠, 吴胜男, 刘翠玲, 等. 近红外和高光谱技术用于小麦籽粒蛋白含量预测探索 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(2): 60–62.
- [26] 郭红艳, 刘贵珊, 吴龙国, 等. 基于高光谱成像的马铃薯环腐病无损检测 [J]. 食品科学, 2016, 37(12): 203–207.
- [27] 胡洁, 田茜, 高文娜, 等. 密执安棒形杆菌的DNA条形码基因筛选与评价 [J]. 植物检疫, 2016, 30(2): 28–33.
- [28] Hebert P D N, Ratnasingham S, Waard J R. Barcoding animal life: cytochrome oxidase subunit 1 divergences among closely related species [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2003, 270(s1): 96–99.
- [29] 魏琪, 闵凡祥, 张抒, 等. 采用DNA条形码技术检测马铃薯4种细菌病害 [J]. 中国马铃薯, 2016, 30(2): 105–111.
- [30] 胡林双, 何云霞, 郭梅, 等. 应用PCR技术快速检测马铃薯环腐病菌 [J]. 中国马铃薯, 2006, 20(4): 197–199.
- [31] 李磊, 赵昱榕, 谢学文, 等. 马铃薯土传病原菌快速检测方法的比较分析及其应用 [J]. 中国蔬菜, 2020(10): 27–34.
- [32] 彭丹丹, 张源明, 舒灿伟, 等. 植物病原真菌分子检测技术的研究进展 [J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(5): 2015–2022.
- [33] Lee I M, Bartoszyk I M, Gundersen D E, *et al.* Nested PCR for ultrasensitive detection of the potato ring rot bacterium *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(7): 2625–2630.
- [34] Morgan J K, Zhou L J, Li W B, *et al.* Improved real-time PCR detection of '*Candidatus Liberibacter asiaticus*' from citrus and psyllid hosts by targeting the intragenic tandem-repeats of its prophage genes [J]. *Molecular and Cellular Probes*, 2012, 26(2): 90–98.
- [35] 汪万春, 袁钧, 郑春生, 等. 马铃薯环腐病菌LAMP检测方法的建立 [J]. 植物检疫, 2014, 24(1): 29–32.
- [36] Sagcan H, Kara N T. Detection of potato ring rot pathogen *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* by loop-mediated isothermal amplification (LAMP) assay [J]. *Scientific Reports*, 2019, 31(1): 20393.
- [37] 肖翠, 廖晶晶, 何利刚, 等. 柑橘黄龙病快速诊断与检测技术研究进展 [J]. 农业科技通讯, 2017(12): 341–344.
- [38] 韩广涛, 杨志辉, 朱杰华, 等. 双重PCR技术检测马铃薯环腐病菌和黑胫病菌方法的建立 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4199–4206.
- [39] 刘秀丽, 庞博, 张金文, 等. 双重PCR检测马铃薯晚疫病和环腐病方法的建立 [J]. 植物保护, 2015, 42(2): 114–119.
- [40] 梁子英, 刘芳. 实时荧光定量PCR技术及其应用研究进展 [J]. 现代农业科技, 2020(6): 8–10, 15.
- [41] 魏琪, 胡林双, 董学志, 等. 马铃薯环腐病菌Real-time Taqman-PCR检测体系的建立 [J]. 中国马铃薯, 2010, 24(5): 301–305.
- [42] 杜贝贝. 红蓼活性化合物槲皮素结构优化初探及对马铃薯环腐病菌的抑菌作用研究 [D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [43] 吴焕章, 陈焕丽, 张晓静, 等. 马铃薯新品种‘郑商薯10号’的

- 选育[J]. 中国瓜菜, 2018, 31(8): 29–32.
- [44] 陈焕丽, 李志敏, 邵蕾, 等. 优质多抗马铃薯新品种‘商马铃薯2号’的选育[J]. 中国瓜菜, 2017, 30(7): 17–19.
- [45] Donoso A, Valenzuela S. In-field molecular diagnosis of plant pathogens: recent trends and future perspectives[J]. Plant Pathology, 2018, 67(7): 1–11.
- [46] 于达. 马铃薯良种繁育的防毒防病技术探究[J]. 河南科技, 2013(10): 199.
- [47] 张勇. 马铃薯栽培与病虫害防治技术分析[J]. 种子科技, 2022, 40(6): 41–43.
- [48] 郑红梅. 马铃薯环腐病的防治措施[J]. 现代畜牧科技, 2020(4): 46–47.
- [49] 王晓东. 马铃薯环腐病的发生及防治[J]. 现代农业科技, 2023(2): 45.
- [50] 覃金鼓, 蒙懿, 王天顺, 等. 不同药剂处理种薯对马铃薯病害防治及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2022(12): 57–59.
- [51] 付梅, 林蜀云, 饶永峰, 等. 不同药剂拌种在马铃薯生产上的应用效果研究[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(2): 60–62.
- [52] 陈能柱. 几种药剂浸种对马铃薯环腐病的防效[J]. 农业科技与信息, 2016(11): 96, 98.
- [53] 胡亚峰, 陈小花, 李继明, 等. 安定区马铃薯不同药剂拌种试验[J]. 农业科技通讯, 2022(5): 177–181.
- [54] 李亮, 张占英, 孙慧英, 等. 农药危害与绿色植保技术探讨[J]. 湖北植保, 2018(4): 63–64.
- [55] 郭宇俊, 韩俊艳, 李志强, 等. 植物源农药的研究与应用[J]. 黑龙江农业科学, 2019(4): 131–133.
- [56] 高以宸, 蔡瑾, 王梦亮, 等. 红蓼挥发油杀菌剂对马铃薯环腐病的防治效果[J]. 山西农业科学, 2019, 47(12): 2185–2188, 2194.
- [57] Jin C, Feng J, Xie S, *et al.* *Laminaria japonica* extract, an inhibitor of *Clavibacter michiganense* subsp. *sepedonicum* [J]. PLoS One, 2014, 9(4): e94329.
- [58] Alla I P, Antonina G P, Baira B B, *et al.* Pesticides impact on *Clavibacter michiganensis* ssp. *sepedonicus* biofilm formation [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2018, 53(7): 464–468.
- [59] Perfilova A I, Tsivileva O M, Drevko Y B, *et al.* Effect of selenium-containing biocomposites from medicinal mushrooms on the potato ring rot causative agent [J]. Doklady Biological Sciences, 2018, 479(1): 67–69.
- [60] Perfilova A I, Nozhkina O A, Graskova I A, *et al.* Selenium nanocomposites having polysaccharid matrices stimulate growth of potato plants *in vitro* infected with ring rot pathogen [J]. Doklady Biological Sciences, 2019, 489(1): 184–188.
- [61] FAOSTAT. Food and agriculture data 2019 [EB/OL]. [2023–09–30]. <https://www.fao.org/faostat/en/data/QCinfo>.
- [62] Devaux A, Goffart J P, Petsakos A, *et al.* Global food security, contributions from sustainable potato agri-food systems [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2020.
- [63] 朱兰兰. 气流膨化马铃薯脆片的研制及其安全性评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [64] 唐利华, 郭堂勋, 李其利, 等. 柑橘黄龙病田间诊断与检测技术研究进展[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(8): 81–87.