

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)02-0158-09

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.02.009

综 述

马铃薯晚疫病综合防治措施

王艳平¹, 谢婉莹¹, 陈佳¹, 余佳丽¹, 罗亮¹, 李希静¹,
张娜¹, 冯媛媛¹, 刘松青¹, 李佩华², 詹家绥^{3*}

(1. 成都师范学院化学与生命科学学院/特色园艺生物资源开发与利用四川省高校重点实验室, 四川 成都 611130;

2. 西昌学院农业科学学院, 四川 西昌 615013; 3. 瑞典农业大学森林真菌学和植物病理学系, 瑞典 乌普萨拉 75007)

摘要: 由致病疫霉引起的马铃薯晚疫病是马铃薯生产的毁灭性病害, 主要侵染马铃薯的块茎和茎叶。多年来, 中国多个地区都遭受了严重的晚疫病, 极大影响了中国马铃薯产量和品质。为此, 寻求行之有效的晚疫病防治措施至关重要。目前, 马铃薯晚疫病的防治措施主要有化学防治、生物防治和农业防控, 但是各项防控措施均存在一定的局限性。对这些防控措施的优缺点及最近发展进行综述分析认为, 化学防治成效快, 但成本高、污染环境, 不科学施用容易导致药剂失效; 生物防治具有成本低、绿色无污染、应用范围广泛等优点, 但其有效性也会随外界气候和生态环境变化及病原菌的演化而改变; 农业防控措施尤其是抗性品种的选育和使用, 仍然是控制马铃薯晚疫病最经济、有效、环保的手段, 但其对晚疫病的防控效果也会随病原菌的不断演化而丧失。建议在进化(达尔文)植物病理学的框架下, 根据致病疫霉的致病性和马铃薯抗病性的互作特点, 综合使用各种有效的方法, 以实现马铃薯晚疫病防控的社会、经济和生态效应最大化。

关键词: 马铃薯生产; 植物病害; 杀菌剂; 防治效果; 进化

Integrated Control Measures of Potato Late Blight

WANG Yanping¹, XIE Wanying¹, CHEN Jia¹, YU Jiali¹, LUO Liang¹, LI Xijing¹,
ZHANG Na¹, FENG Yuanyuan¹, LIU Songqing¹, LI Peihua², ZHAN Jiasui^{3*}

(1. College of Chemistry and Life Sciences, Chengdu Normal University/Sichuan Provincial Key Laboratory for Development and Utilization of Characteristic Horticultural Biological Resources, Chengdu, Sichuan 611130, China;

2. College of Agricultural Sciences, Xichang University, Xichang, Sichuan 615013, China;

3. Department of Forest Mycology and Plant Pathology, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 75007, Sweden)

Abstract: Potato late blight caused by *Phytophthora infestans* is a devastating disease, mainly infecting potato tubers, stems and leaves. Over the years, many regions in China have suffered severe late blight disease, which has been one of the main obstacles reducing potato yield and quality. Hence, it's critical to seek effective measures to prevent and control potato late blight. At present, the prevention and control measures applied to potato late blight

收稿日期: 2023-04-18

基金项目: “十四五”四川省薯类育种攻关(2021YFYZ0019); 国家现代农业产业技术体系四川薯类创新团队(川财教[2019]59号); 成都师范学院高层次人才引进项目(YJRC2021-08); 国家级创新训练项目(202214389062); 省级创新训练项目(S202214389114)。

作者简介: 王艳平(1992-), 女, 博士, 讲师, 主要从事马铃薯晚疫病防控和环境适应性研究。

*通信作者(Corresponding author): 詹家绥, 博士, 教授, 主要从事病原菌防控和群体遗传学研究, E-mail: jiasui.zhan@slu.se。

mainly include chemical control, biological control and agricultural prevention and control, but each of these measures has its own limitations. The advantages, disadvantages and recent developments for prevention and control of late blight were summarized. Chemical control is effective, but it is expensive, pollutes environments, and is prone to failure if improperly administrated. Biological control is low cost, environmentally friendly, and has the potential of wide application, but its effect varies depending on climatic conditions, ecological environments and pathogen populations. Agricultural control measures, especially the breeding and application of resistant varieties, are still the most economical, effective and environmentally friendly means to control potato late blight, but their effectiveness could also lose with the continuous evolution of the pathogen. To maximize the socioeconomic and ecological benefits of late blight management, these chemical, biological and agricultural measures should be integrated within an evolutionary (Darwinian) plant pathology framework according to the interactive features between *P. infestans* pathogenicity and potato resistance.

Key Words: potato production; plant disease; fungicide; control efficacy; evolution

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)在全球广泛栽培,是仅次于水稻、小麦和玉米的第四大粮食作物,在全球粮食生产中占据关键地位,是目前重要的非谷类粮食作物之一^[1-3]。2019年中国马铃薯总种植面积约为578.27万hm²,占全球总种植面积的31.89%;总产量约为943.62万t,占全球总产量的25.09%,均居世界第一(<https://www.fao.org/home/en>)。马铃薯营养物质丰富,经济价值较高,在中国栽培范围较为广泛。在马铃薯栽培生产中,易遭受晚疫病、早疫病、黑胫病、环腐病、疮痂病等多种病害,严重限制着马铃薯产业的健康发展^[4,5]。FAO的年度报告(<https://www.fao.org/home/en>)中曾明确指出,由于马铃薯晚疫病造成的经济损失超过了小麦锈病和稻瘟病,而且由于其防控困难,对农业产生的影响也更加广泛^[6]。因此,研究马铃薯晚疫病防控已经成为马铃薯产业的当务之急。

由属藻物界(Chromista),卵菌门(Oomycota)卵菌纲(Oomycetes)霜霉目(Peronosporales)腐霉科(Pythiaceae)疫霉属(*Phytophthora*)的致病疫霉(*Phytophthora infestans*)引起的马铃薯晚疫病严重影响马铃薯产量和质量^[7-9]。马铃薯晚疫病菌最早发现于墨西哥中部地区^[10-12],主要是包含A1、A2和自育型三种交配型的异宗配合生物体,且A2交配型所占比例每年有不断提高的趋势^[13]。马铃薯在遭受致病疫霉侵染初期,薯皮表面出现不规则

凹陷病斑或产生褐色条状病斑,病害边缘交界清晰,初期开始侵染的部位比其他部位更为严重。染病块茎病部易受其他病菌侵染而腐烂,并伴随难闻的气味,病斑迅速扩大蔓延至全部叶片表面,渐变褐色,直至全株腐败变黑^[10,14-16]。在潮湿、多雨、寒冷和透气性差的条件下,致病疫霉感染马铃薯的速度更为迅速,侵染范围更广^[17-19]。晚疫病在田间发病时常在植株下部的衰老叶片首见症状,病叶顶端或边缘的水渍状褪绿斑点会逐渐向外扩展,形成圆状深绿色斑点。病叶斑点的周围呈现光晕,为淡绿色。而在栽培环境较为潮湿时,感病叶片的背面会出现白色绒毛^[20]。其发生范围广泛,流行速度快,危害性极强,造成马铃薯大幅度减产,品质下降,贮藏过程中出现“烂窖”情况等,再加上近年来种植品种单一化和抗药性菌株的出现,马铃薯晚疫病的防治已是马铃薯生产中的重难点问题^[21-23]。

致病疫霉具有极强的侵染力,田间块茎一旦被侵染,且在病发时未对马铃薯进行农药控制,则马铃薯田可在几天内变成一片“焦黑”。当马铃薯种薯上带有病菌,且环境条件适宜时,便开始大量繁殖,逐渐传染到周围的薯芽上,沿茎从地面向上生长,不到7d时间就可以完成一次侵染,同一生长季里再侵染可多次发生^[24]。同时,病斑会和外面较潮湿空气接触,繁殖产生晚疫病菌芽孢,影响马铃薯植株下部叶片的生长,并经空气

环流传染到周围马铃薯植株上^[25-27]。在病害较为流行的气候条件下, 植株会提前枯死, 导致20%~40%甚至100%的经济损失^[28]。虽然使用农药和其他防控手段可以降低晚疫病病害造成的损失, 但流行年份所造成的人力和经济损失依然相当严重。因此, 研究晚疫病有效防治, 对促进马铃薯产业的蓬勃发展, 为中国粮食安全提供保障具有重要意义。目前, 中国晚疫病防治措施主要包括化学防治、生物防治和选育抗病品种等农业防控措施。

1 化学防治

化学防治效率最高且研究相对广泛, 研究方向主要聚焦安全高效、无抗药性、新型绿色无污染及可持续性。在生产中杀菌剂作为主要的化学防治产品被广泛使用, 供生产选用的马铃薯晚疫病防治药剂相对较多, 根据作用方式不同主要分为保护性和治疗性两类^[29]。保护性杀菌剂多为多位点杀菌剂, 作用机理是在病原菌侵染寄主植物前抑制菌丝生长或孢子活性, 或致其死亡, 从而保护植物免受病原菌侵染。虽然保护性杀菌剂作用位点多, 但仅在寄主植物表面发挥作用, 当病原菌侵入植物体内后则无法发挥防治作用, 导致防治效果相对较差^[30]。治疗性杀菌剂多为单位点杀菌剂, 有保护和治疗双重功能, 能够通过渗透进入寄主植物或能被寄主植物内吸传导至植物体内, 进而抑制或彻底消灭已侵入到植物体内的病原物。但由于作用靶标相对单一, 导致病原菌易产生抗药性, 从而降低防治效果。因此, 在使用化学杀菌剂防治晚疫病时, 要注意根据发病期选择相应作用机制的抗菌剂, 在发病前使用保护性杀菌剂, 发病后则应选用治疗性杀菌剂或保护性和治疗性杀菌剂的复配制剂, 以期降低抗药性产生的概率。此外, 根据药剂组成不同, 马铃薯晚疫病防治药剂亦可分为单剂和混剂, 单剂的有效成分主要为百菌清、吡唑醚菌酯、代森锌、精甲霜灵、烯酰吗啉、双炔酰菌胺、肟菌酯、苦参碱、香芹酚、氢氧化铜、代森锰锌、噁菌酯、噁唑菌酮、氟啶胺、氰霜唑、噁唑菌酮等。混剂主要是氟菌·霜霉威、烯酰·噁霉酮、烯酰·代森联、

烯酰·唑啉菌、丙森·缬霉威、甲霜·锰锌等^[31-33]。

当前, 在晚疫病的防治过程中常用保护性和治疗性杀菌剂复配, 如69%烯酰吗啉锰锌可湿性粉剂、72%克露可湿性粉剂、47%春雷氧氯铜可湿性粉剂、58%甲霜灵锰锌可湿性粉剂复配杀菌剂, 兼具保护和内吸的双重作用^[34,35]。烯酰吗啉锰锌可湿性粉剂是烯酰吗啉与代森锰锌复配的杀菌剂, 烯酰吗啉是一种治疗性成分, 通过抑制纤维素合成途径影响病原菌细胞壁形成, 对卵菌的各个生长发育阶段均有抑制作用, 在孢子形成前用药可较好的抑制孢子产生、防止病害蔓延; 代森锰锌为广谱保护性成分, 一方面可破坏辅酶A, 直接影响需有辅酶A参与的脂肪酸的 β 氧化、丙酮酸脱氢酶系和 α -酮戊二酸脱氢酶系的活性, 另一方面可抑制以铜、铁为辅基的酶活性。因此混剂兼有保护和治疗双重防病作用, 且延缓了病菌对内吸治疗成分的抗药性产生。相关研究表明, 在田间发病中心出现时, 用69%烯酰吗啉锰锌可湿性粉剂800倍液、72%克露可湿性粉剂600倍液、47%春雷氧氯铜可湿性粉剂800倍液和58%甲霜灵锰锌可湿性粉剂400倍液喷雾消毒后, 其病株的减少率分别高达92.3%、94.3%、91.9%和94.5%^[36,37]。

近年来, 马铃薯晚疫病的防治药剂不断增多, 但鲜有高效治疗晚疫病的药剂。由于马铃薯种植户对晚疫病预防的重视程度不够, 发病前很少采用药剂防治或药剂使用不当, 导致马铃薯晚疫病的频繁发生^[38]。此外, 化学防治效果还会受到农药药效随地理气候环境(如温度)和马铃薯晚疫病菌遗传变异的影响^[39,40], 长期选用单一防治药剂, 还会导致马铃薯晚疫病菌抗药性增加、防效降低。因此, 为了进一步提高马铃薯晚疫病病害的化学防治水平, 必须科学合理制定药剂防治措施。同时, 要根据马铃薯的实际种植地区的气候和病原菌群体结构相关状况, 有针对性的制定化学防治措施以达到有效防治晚疫病的目的^[25]。

2 生物防治

长期大量使用化学药剂会导致药物残留, 对

生态环境有破坏作用, 进而危害生态平衡, 且药剂使用方法和用量不佳, 将会造成损失。与化学防治相比, 生物防治因具有成本低、绿色无污染、应用范围广泛等优点而备受关注, 被誉为目前预防病害有前景的途径之一, 其主要使用有益微生物抑制致病疫霉。目前, 马铃薯晚疫病生物防治主要有两种途径: 一种是生防菌, 利用有益细菌自身在新陈代谢过程分泌的代谢物质抑制致病疫霉菌丝生长; 第二种是植物源杀菌剂, 通过在植物体内提取对病原物产生抑制作用的有效成分^[10]。但类似于化学防控, 生物防治制剂的有效性也会随外界气候和生态环境而变化, 病原菌的不断演化也会对生物防控制剂产生抗药性, 必须加以科学应用以提高使用效果、延长使用寿命^[41]。

2.1 生防菌

生防菌在其体内的代谢途径中会产生一系列的代谢产物, 其对病原菌的生长有一定影响, 可阻止病原菌增殖、抑制菌丝生长、阻碍无性繁殖过程中游动孢子的释放以及孢子囊和休止孢子的萌发, 进而对致病菌产生拮抗作用。

目前, 已有相关研究表明, 生防菌在防治马铃薯晚疫病上具有较为显著的作用。如芽孢杆菌早在二十多年前就被发现并逐渐被广泛使用, 其不仅能够分泌活性物质抵抗病菌, 还能使病原菌产生溶菌作用, 进一步激发植物的诱导抗病性, 提高植物抗病能力。其中, 枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)应用最为广泛。Daayf等^[42]研究发现, 从分离出的15种枯草芽孢杆菌菌株中筛选出了三类抑菌效果较为显著的菌株, 分别是B-1、B-3和J-1。研究指出, 这三类枯草芽孢杆菌菌株对致病疫霉的抑菌率均在75%以上, B-1高达81%, 证明枯草芽孢杆菌对致病疫霉生长具有明显的抑制作用。当前, B-3、B-903、B-II、BL-03、ZH-2等枯草芽孢杆菌菌株具有显著抑菌效果, 在中国被广泛应用。吴艳清等^[43]在致病疫霉拮抗芽孢杆菌的相关研究中, 发现芽孢杆菌产生的脂肽类物质可明显抑制病原菌生长, 脂肽粗提物的抑菌率可达90%以上。目前国内已开发出一批生防作用效果较

好的芽孢杆菌菌株, 如C-1、B10-26、LX-11。

此外, 假单胞菌(*Pseudomonas adaceae*)、嗜线虫杆菌(*Xenorhabdus* sp.)、木霉菌(*Trichoderma* sp.)等在防治马铃薯晚疫病中有良好作用^[44,45]。假单胞菌是广泛分布于自然界的一种典型的根际促生革兰氏阴性细菌, 可产生多类在抑制病原菌活性方面能力较强的抗生素, 在致病疫霉菌丝生长过程中通过拮抗和竞争作用, 抑制病原菌生长, 有效预防病害发生^[46,47]。目前已经发现能直接定殖在病原菌丝上的假单胞菌, 可与寄主植株共生, 直接作用于菌丝, 使病原菌致病力减弱。嗜线虫杆菌是存在于昆虫病原线虫体内的革兰氏阴性共生细菌, 新陈代谢过程中产生的活性物质会在多种病原细菌、酵母菌和病原真菌体内产生广谱抗菌性, 存在较强的抑制效果, 且对马铃薯晚疫病致病疫霉菌同样具有特异拮抗性^[48]。木霉菌是一种重要的生防真菌, 其可诱导植物产生抗性, T115D发酵滤液能够减缓致病疫霉在田间块茎上的侵染速度, HNA14的代谢物对致病疫霉孢子囊萌发抑制效果较好^[45]。

由于生防菌类试剂对病害的防控作用通常发挥较缓慢, 特别是病菌群体侵染数量较大, 发病较为流行的田间, 生防菌对病原菌还未开始发挥抑菌作用时, 病菌早已先侵染寄主, 引起大范围病害, 这时即使增加施用生防菌的剂量, 防效也不会太高。所以在田间最好是采用先施用化学药剂, 降低田间群体的病菌数量后, 再施用生防菌试剂的措施。综上, 在实际生产中生防菌应用要发挥最好防效, 需在适宜时间与其他防治措施综合使用。

2.2 植物源杀菌剂

近年来随着环保意识的增强, 植物源杀菌剂在植物病害防治方面应用广泛。植物源杀菌剂是植物体内本身具有抗菌活性的物质如香豆素类、生物碱类、酚类、氨基酸类等次生代谢物质, 经人工提取而制成的杀菌剂^[49,50]。这些次生代谢物通过打破细胞的稳恒状态, 阻碍病原菌细胞膜的渗透作用和蛋白质合成, 使病原菌不能维持正常的生命活动, 从而达到抑制菌体生长繁殖的作

用。植物源杀菌剂的活性成分为植物体内天然物质, 具有较低的生物学毒性、残留量小、环境污染低等优势。

目前已经有多项试验证明, 植物源杀菌剂对抑制马铃薯晚疫病病菌具有明显作用。Thuerig等^[51]用含量约为1 $\mu\text{g/mL}$ 的厚朴萃取物(香豆素类)处理马铃薯晚疫病病菌, 结果显示厚朴萃取物对晚疫病病菌抑制率达到97%。王树桐等^[52]发现知母提取物(生物碱类)浓度达到10 mg/mL 时对马铃薯晚疫病病菌孢子的直接萌发有抑制作用, 抑制效果达72.89%。王云龙等^[53]发现苦参醇萃取物(生物碱类)对马铃薯晚疫病病菌的孢子生长有较强的抑制效果。陈亚兰和张健^[54]研究表明, 丁子香酚(酚类物质)对晚疫病致病疫霉的平均防治效果较为明显, 其对芒果炭疽病、香蕉枯萎病同样表现出较好的抑制作用, 且防治成本明显降低。曹静等^[55]研究指出, 当浓度稀释为200倍的菊花、五倍子提取物, 对马铃薯晚疫病病菌丝的生长具有显著性抑制效应, 与甲霜灵3 000倍液的疗效比较抑制效果超过100%^[12]。外源性褪黑激素(氨基酸类)可改变马铃薯晚疫病病菌的亚显微结构, 提高马铃薯晚疫病病菌对于外界不良环境的敏感性, 降低其生活力, 从而减弱马铃薯晚疫病病菌的侵染能力。此外, 同时使用植物源杀菌剂和外源性褪黑素可减少植物源杀菌剂的使用剂量并增强植物源杀菌剂对马铃薯晚疫病的防治效果^[56]。

3 农业防控措施

农业防控措施是通过选育抗病品种、改进栽培种植技术、加强田间技术管理, 创造出适宜马铃薯生长发育和有益生物繁殖, 尽量减少使病原菌繁殖旺盛的环境^[57]。该方法安全无污染, 无药物残留, 能实现可持续发展。

3.1 选育抗病品种

在众多的防治方法中, 栽培和选育抗病品种不仅是马铃薯晚疫病防控最为经济、高效的方法, 也是国内外防治马铃薯晚疫病研究中成功率较高的方法。马铃薯晚疫病早期的抗病品种选育是由寄主中的主效R基因控制的垂直抗性品

种, 又称小种专化抗性品种, 但该垂直抗性维持时间短, 在生产中难以长久使用, 新培育抗性品种田间大面积种植几年后, 抗性往往会丧失且很难再重复利用^[58-61]。

目前, 选育马铃薯晚疫病抗病品种主要通过筛选田间抗性品种, 其由微效多基因控制, 具有一定的抑制晚疫病小种感染能力。虽然抗性比垂直抗性弱, 但使用寿命相对较长。马铃薯垂直抗性的有效性可通过不同的田间栽培模式加以改变。相关研究表明, 通过混作提高马铃薯群体遗传多样性, 不但能降低晚疫病的田间流行, 还能延缓病原菌的演化速度, 从而达到延长抗病品种的使用寿命^[62]。此外, 有研究表明, 不同抗性品种的交叉使用(种内轮作)可达到田间病害防控和延长抗性品种使用寿命的效果^[63], 但相关研究在马铃薯晚疫病防控上还鲜有报道。

中国如今已从水平抗性方面着手, 筛选出数百个综合性状优良的抗性品种, 可大规模减少晚疫病对马铃薯生产的威胁, 并充分应用到马铃薯晚疫病防控中。目前种植品种有‘农天1号’‘天薯10号’‘陇薯3号’‘陇薯7号’‘陇薯12号’‘青薯6号’‘青薯9号’‘丽薯6号’等高抗品种, ‘庄薯3号’‘云薯202号’‘云薯303号’‘云薯505号’‘农天2号’‘天薯11号’‘陇薯6号’等中抗性品种^[64,65]。另外‘克新12号’‘克新13号’‘乌盟610’‘高原4号’等, 较早期的抗病品种的种植也比较广泛。

3.2 种薯处理

在马铃薯收获、入窖、出窖、催芽及播前切薯时, 必须把带有病原菌的种薯筛选出来并彻底剔除。保持地窖干净整洁, 保留下的健康种薯及时从地窖中取出, 并放置在阳光直晒的地方2~3 d晾干。尽量避免放置在水泥地板上, 以免损坏健康种薯。晾干后须再次进行筛选, 选择种薯表皮光滑无蛀眼、芽眼大小均匀、没有病害侵染、品种特有性状强的块茎播种。

在播前切薯时, 必须对切块用具进行彻底消毒, 避免病原菌通过切块用具快速传染, 导致田间栽培时病原菌的大面积侵染, 从而影响马铃薯产量和质量^[66]。切块完成后, 每300 kg种薯块均

匀喷洒72%霜脲锰锌可湿性粉剂100 g加水6 kg后的混合试剂, 喷洒后的种薯块闷种18 h再进行播种^[67]; 也可用苯并咪唑可湿性粉剂1 000倍液浸种后再进行播种, 可有效降低播种后马铃薯晚疫病致病疫霉传播的风险, 为种薯健康生长奠定坚实的基础。

3.3 因地制宜、适时播种

根据马铃薯的品种类型、地理位置、气候因素、耕作制度等因素选择适宜的播种期。尽量减少田间积水, 选择土质疏松、通水透气、排水良好的地块种植马铃薯, 为马铃薯植株创造良好的生长环境。尽量确保在晚疫病高发前收获马铃薯, 减少病害传染的风险。在马铃薯的生长发育周期中, 以开花期的感病速度最快, 应尽量避免植株在雨季开花^[68]。生产中通常根据各个马铃薯的品种特性确定适宜栽种时期, 但对于遭受马铃薯晚疫病危害的地区, 可以根据实际生产情况早播或晚播, 如春种马铃薯适时早播避免马铃薯出苗后遭遇晚霜, 气温高时秋种马铃薯适时晚播保证马铃薯避开高温期。在生产中还要避免与茄科类(烟草、辣椒等)、十字花科类作物(萝卜、大白菜等)连作或套种, 防止病原菌累积和土传病害发生^[69]。

3.4 做好田间栽培技术管理

马铃薯的田间栽培技术管理应注意以下几点: (1)选用地势较高、土壤松散、排灌系统较好的地块, 施用适量的基肥, 并及时播种。(2)可采取高垄双行栽培, 尽量避免积水。在增加密度系数的同时, 通过提高通透性来降低田间湿度, 有效阻碍病原菌以雨水或灌溉水的方式侵染马铃薯块茎, 起到抗病增产的目的^[70]。(3)根据马铃薯不同品种间生长习性的差异, 科学选择密植方式, 合理轮作倒茬, 降低患病率。(4)生产中科学合理施肥, 不能只注重施N肥, 应适当增施P、K肥和微量元素肥料, 加强马铃薯植株抗病性^[71]。(5)做好中耕培土、清沟排水相关工作, 如发现田间有患病植株, 必须立即带出。在远离田间的区域及时焚烧, 对患病植株周围进行深度消杀处理, 防止病菌的传播。(6)患病率较高时期, 应在收获前

杀秧(机械、化学)、晾田, 避免健康的马铃薯块茎与已被侵染的马铃薯植株直接接触, 以降低马铃薯块茎患病率。(7)注意监测气象情况, 强化对马铃薯晚疫病的监控预测预警^[72]。在马铃薯生长发育关键期, 可以采取每周检查一次汇报一次的监控制度, 严谨观察实时记录此病害的发病流行趋势与发病的病情状况。(8)严格加强并落实种植户的引导与宣传。在马铃薯栽培种植期, 充分利用媒体等方式加强对马铃薯晚疫病防治的宣传, 借助专业技术人员现场科普及村委会、居委会举办的讲座等方式, 加强种植户对马铃薯晚疫病的防控措施和相关知识的理解与应用, 更好地促进种植户对该病害防控进行一系列的实施, 最终达到马铃薯晚疫病防治率显著提升的目的。

4 总 结

马铃薯晚疫病的有效防治是马铃薯生产中不可避免的难题, 生产上主要通过使用化学药剂以及种植抗病品种的方式减轻病害的发生。但是由于马铃薯晚疫病的病原菌具有易变异性和快速进化的特点, 抗病品种在大面积种植后容易在短时间内就丧失了原有的抗性, 造成人力、物力及抗性资源的损失。因此, 开发生物和化学防控结合的环境友好的新型农药混剂和新型生物源杀菌剂, 是未来防治马铃薯晚疫病的新方向。

晚疫病的防治是一个系统性工程, 单纯依靠任何一种防治措施都很难取得良好的防治效果。因此, 防治晚疫病要根据进化生物学和疾病流行学的理论综合运用各种防治措施, 相互结合、动态应用^[73]。依据品种的生长期、抗病特性、晚疫病病原的地区生理小种特点、当地气候条件、引进品种用途等, 来确定防治措施。晚疫病病菌侵染传播速率很快, 如果发现中心病株, 不进行及时预防, 错失感染初期的良好预防阶段, 两周内就能使整块田发生病害。加之在生产实践中种植户缺乏晚疫病防治意识, 大多数种植户在发现病害之后才开始采取补救措施, 到那时往往为时已晚, 从而导致病原的肆意蔓延。此外, 需要注意施药药效、施用方法和施用时期, 以及综合运用

各种防控措施的落实, 是病害防控的关键。在预防工作过程中要明确掌握“防为主, 控为辅”的整体综合防控工作宗旨, 才能取得“预防却不见病”的最佳效果^[74,75]。

防控马铃薯晚疫病还必须根据不同地区的生产实际状况, 综合考虑田间品种的可实践性等实际问题, 在符合农业可持续发展和农产品生态安全的前提下, 因地制宜地做好对马铃薯晚疫病的有效预防。近年, 随着中国经济社会的快速发展, 人们对粮食、环境安全等方面的重视越来越强, 因此晚疫病防控措施在未来将朝着可持续、低成本、环境友好的方向发展。

[参 考 文 献]

- [1] Jansky S H, Jin L P, Xie K Y, *et al.* Potato production and breeding in China [J]. *Potato Research*, 2009, 52(1): 57–65.
- [2] Weeks D P. Gene editing in polyploid crops: wheat, camelina, canola, potato, cotton, peanut, sugar cane, and citrus [J]. *Progress in Molecular Biology and Translational Science*, 2017, 149: 65–80.
- [3] Runno-Paurson E, Ronis A, Hansen M, *et al.* Lithuanian populations of *Phytophthora infestans* revealed a high phenotypic diversity [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2015, 122(2): 57–65.
- [4] Mosquera T, Alvarez M F, Jiménez-Gómez J M, *et al.* Targeted and untargeted approaches unravel novel candidate genes and diagnostic SNPs for quantitative resistance of the potato (*Solanum tuberosum* L.) to *Phytophthora infestans* causing the late blight disease [J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): e156254.
- [5] Runno-Paurson E, Hannukkala A O, Kotkas K, *et al.* Impact of phytosanitary quality of seed potato and temporal epidemic progress on the phenotypic diversity of *Phytophthora infestans* populations [J]. *American Journal of Potato Research*, 2013, 90(3): 245–254.
- [6] Fry W E, Birch P R J, Judelson H S, *et al.* Five reasons to consider *Phytophthora infestans* a reemerging pathogen [J]. *Phytopathology*, 2015, 105(7): 966–981.
- [7] Latijnhouwers M, de Wit P J G M, Govers F. Oomycetes and fungi: similar weaponry to attack plants [J]. *Trends in Microbiology*, 2003, 11(10): 462–469.
- [8] Hawkes J G. The potato: evolution, biodiversity and genetic resources [M]. London: Belhaven Press, 1990.
- [9] Haas B J, Kamoun S, Zody M C, *et al.* Genome sequence and analysis of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* [J]. *Nature*, 2009, 461(7262): 393–398.
- [10] 张小燕, 马玉林, 孙全花. 马铃薯晚疫病综合防治技术研究 [J]. *甘肃科技纵横*, 2021, 50(7): 17–20.
- [11] 李洁, 闫硕, 张芳, 等. 近年来中国马铃薯晚疫病的时空演变特征及防控情况分析 [J]. *植物保护学报*, 2021, 48(4): 703–711.
- [12] Grünwald N J, Flier W G. The biology of *Phytophthora infestans* at its center of origin [J]. *Annual Review Phytopathology*, 2005, 43: 171–190.
- [13] Hohl H R, Iselin K. Strains of *Phytophthora infestans* from Switzerland with A2 mating type behaviour [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1984, 83(3): 529–530.
- [14] 刘冠求, 崔亮, 万博, 等. 马铃薯晚疫病的流行规律与防控措施 [J]. *园艺与种苗*, 2021, 41(4): 89–90.
- [15] 孙晓梅. 浅谈马铃薯栽培与病害防治 [J]. *农民致富之友*, 2017, 61(21): 37.
- [16] Raffaele S, Farrer R A, Cano L M, *et al.* Genome evolution following host jumps in the Irish potato famine pathogen lineage [J]. *Science*, 2010, 330(6010): 1540–1543.
- [17] Yang L, Zhu W, Wu E, *et al.* Trade-offs and evolution of thermal adaptation in the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* [J]. *Molecular Ecology*, 2016, 25(16): 4047–4058.
- [18] Qin C, He M, Chen F, *et al.* Comparative analyses of fungicide sensitivity and SSR marker variations indicate a low risk of developing azoxystrobin resistance in *Phytophthora infestans* [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 20483.
- [19] Wu E, Yang L, Zhu W, *et al.* Diverse mechanisms shape the evolution of virulence factors in the potato late blight pathogen *Phytophthora infestans* sampled from China [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 26182.
- [20] Haverkort A J, Struik P C, Visser R G F, *et al.* Applied biotechnology to combat late blight in potato caused by

- Phytophthora infestans* [J]. Potato Research, 2009, 52(3): 249–264.
- [21] 张国芝, 万宣伍, 封传红, 等. 四川省马铃薯病虫害发生特点与原因分析 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41(10): 38–42.
- [22] 周阳, 赵中华, 杨普云, 等. 近年马铃薯晚疫病发生特点与防控对策 [J]. 中国植保导刊, 2014, 34(6): 63–66.
- [23] Samen F M A, Secor G A, Gudmestad N C. Variability in virulence among asexual progenies of *Phytophthora infestans* [J]. Phytopathology, 2003, 93(3): 293–304.
- [24] Khavkin E E. Potato late blight as a model of pathogen–host plant coevolution [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2015, 62(3): 408–419.
- [25] 卢志刚. 马铃薯晚疫病流行特点及防治措施 [J]. 农业工程技术, 2019, 39(26): 43.
- [26] Runno-Paurson E, Fry W E, Myers K L, et al. Characterisation of *Phytophthora infestans* isolates collected from potato in Estonia during 2002–2003 [J]. European Journal of Plant Pathology, 2009, 124(4): 565–575.
- [27] Gautam H R, Bhardwaj M L, Kumar R. Climate change and its impact on plant diseases [J]. Current Science, 2013, 105(12): 1685–1691.
- [28] Filippov A, Kuznetsova M, Rogozhin A, et al. Development and testing of a weather-based model to determine potential yield losses caused by potato late blight and optimize fungicide application [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(4): 462–468.
- [29] 赵振杰. 马铃薯晚疫病化学防治时机研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [30] 娄树宝. 马铃薯晚疫病菌抗药性研究现状 [J]. 黑龙江农业科学, 2010, 33(7): 165–168.
- [31] 张欣杰, 宋文睿, 陈汉, 等. 马铃薯晚疫病化学防控现状与展望 [J]. 中国植保导刊, 2021, 41(6): 33–39.
- [32] 莫庆忠, 吕树鸣, 岳永贵, 等. 不同药剂组合对马铃薯晚疫病的防治效果 [J]. 耕作与栽培, 2022, 42(3): 50–52.
- [33] 韩小女, 展康, 蔡永占, 等. 不同药剂组合对马铃薯晚疫病的防治效果 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34(1): 46–52.
- [34] 朱小琼, 车兴璧, 国立耘, 等. 六省市致病疫霉交配型及其对几种杀菌剂的敏感性 [J]. 植物保护, 2004, 42(4): 20–23.
- [35] 王梦飞, 杨富, 马涛. 不同杀菌剂防治马铃薯晚疫病田间药效试验 [J]. 中国马铃薯, 2011, 25(1): 47–49.
- [36] 刘燕茹. 马铃薯晚疫病防治效果试验 [J]. 现代农村科技, 2022, 57(10): 71–72.
- [37] 郝丽萍, 巩亮军, 沈慧梅. 几种常用杀菌剂对马铃薯晚疫病防治效果比较研究 [J]. 农药科学与管理, 2016, 37(7): 41–44.
- [38] 陈万利. 黑龙江省马铃薯晚疫病的发生与防治对策 [C]//陈伊里, 屈冬玉. 马铃薯产业与科技扶贫. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [39] Lurwanu Y, Wang Y, Wu E, et al. Increasing temperature elevates the variation and spatial differentiation of pesticide tolerance in a plant pathogen [J]. Evolutionary Applications, 2021, 14(5): 1274–1285.
- [40] Yang L N, Nkurikiyimfura O, Pan Z C, et al. Plant diversity ameliorates the evolutionary development of fungicide resistance in an agricultural ecosystem [J]. Journal of Applied Ecology, 2021, 58(11): 2566–2578.
- [41] Cao K, Forrer H R. Current status and prosperity on biological control of potato late blight (*Phytophthora infestans*) [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2001, 52(7): 1361–1365.
- [42] Daayf F, Adam L, Fernando W G D. Comparative screening of bacteria for biological control of potato late blight (strain US–8), using *in vitro*, detached-leaves, and whole-plant testing systems [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2003, 25(3): 276–284.
- [43] 吴艳清, 蒋继志, 梁廷银. 致病疫霉拮抗芽孢杆菌的筛选及脂肽类物质分离的研究 [J]. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8111–8112, 8135.
- [44] 梁允刚, 孟晶, 谭兰玉, 等. 马铃薯晚疫病生防菌的分离鉴定与防治效果 [J]. 北方农业学报, 2017, 45(4): 54–57.
- [45] 韩龙. 马铃薯晚疫病生防菌剂的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [46] Bengtsson T, Holefors A, Liljeroth E, et al. Biosurfactants have the potential to induce defence against *Phytophthora infestans* in potato [J]. Potato Research, 2015, 58(1): 83–90.
- [47] Caulier S, Gillis A, Colau G, et al. Versatile antagonistic activities of soil-borne *Bacillus* spp. and *Pseudomonas* spp. against *Phytophthora infestans* and other potato pathogens [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 143.
- [48] Yang X, Zhang Z, Yang H, et al. Inhibition of metabolites from *Xenorhabdus nematophilus* against *Phytophthora infestans* [J].

- Journal of Agricultural University of Hebei, 2001, 24(2): 65–68.
- [49] 田甲佳, 刘良燕. 马铃薯主要真菌病害及防治方法研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2021, 35(5): 444–455.
- [50] 黄新异, 武东波, 蒙静, 等. 植物提取物防治马铃薯晚疫病研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2016, 30(6): 367–371.
- [51] Thuerig B, Ramseyer J, Hamburge M, *et al.* Efficacy of a *Magnolia officinalis* bark extract against grapevine downy mildew and apple scab under controlled and field conditions [J]. Crop Protection, 2018, 114: 97–105.
- [52] 王树桐, 曹克强, 胡同乐, 等. 知母提取物对马铃薯晚疫病菌的抑制作用及防病效果 [J]. 植物病理学报, 2006, 52(3): 267–272.
- [53] 王云龙, 闵凡祥, 高云飞, 等. 10种药剂处理对马铃薯晚疫病的防治效果分析 [J]. 中国马铃薯, 2014, 28(2): 94–99.
- [54] 陈亚兰, 张健. 不同杀菌剂对马铃薯晚疫病的防治效果 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31(6): 359–363.
- [55] 曹静, 赵志军, 马艳芝. 地肤子等9种中草药提取物对马铃薯晚疫病菌的影响 [J]. 江苏农业科学, 2009, 37(5): 149–150.
- [56] 李长印, 胡承孝, 倪刚, 等. 马铃薯晚疫病防治措施研究进展 [J]. 中国农学通报, 2020, 36(21): 155–159.
- [57] 仲彩萍, 漆文选, 孙新荣. 马铃薯晚疫病田间症状及危害特点与防治 [J]. 陕西农业科学, 2015, 61(11): 79–80.
- [58] Fry W. *Phytophthora infestans*: the plant (and *R* gene) destroyer [J]. Molecular Plant Pathology, 2008, 9(3): 385–402.
- [59] Goodwin S B, Cohen B A, Fry W E. Panglobal distribution of a single clonal lineage of the Irish potato famine fungus [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1994, 91(24): 11591–11595.
- [60] Benson D M. *Phytophthora* diseases worldwide [J]. Crop Protection, 1997, 16(4): 385–402.
- [61] Goodwin S B. Widespread distribution and probable origin of resistance to metalaxyl in clonal genotypes of *Phytophthora infestans* in the United States and Western Canada [J]. Phytopathology, 1996, 86(7): 793.
- [62] Yang L N, Pan Z C, Zhu W, *et al.* Enhanced agricultural sustainability through within-species diversification [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(1): 46–52.
- [63] Zhan J, Thrall P H, Papaix J, *et al.* Playing on a pathogen's weakness: using evolution to guide sustainable plant disease control strategies [J]. Annual Review of Phytopathology, 2015, 53(1): 19–43.
- [64] 王鹏, 李芳弟, 郭天顺, 等. 马铃薯育成品种晚疫病抗性及其产量的鉴定与评价 [J]. 中国马铃薯, 2018, 32(4): 199–204.
- [65] 马师祥. 马铃薯晚疫病综合防治 [J]. 云南农业, 2021, 36(9): 80.
- [66] 于台泽, 贾良良, 牛丽娟, 等. 马铃薯轮作的生态和经济效益—案例分析 [J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 337–349.
- [67] 杨梅. 马铃薯晚疫病的发生原因及综合防治措施 [J]. 农技服务, 2017, 34(15): 56.
- [68] 王霞. 马铃薯播种环节关键技术 [J]. 河南农业, 2018, 29(19): 56.
- [69] 丁凯鑫, 王立春, 单莹, 等. 马铃薯连作障碍及其防控的研究进展 [J]. 中国马铃薯, 2022, 36(1): 71–77.
- [70] 谢琴, 刘忠婧. 马铃薯田间管理技术要点 [J]. 农家参谋, 2021, 39(24): 44–45.
- [71] 任利芳. 马铃薯田间管理技术要点 [J]. 河北农机, 2020, 46(11): 32–34.
- [72] 谢成君, 刘普明, 王颖, 等. 马铃薯晚疫病预警系统在西吉县的应用 [J]. 中国马铃薯, 2014, 28(2): 106–110.
- [73] Zhan J, Thrall P H, Burdon J J. Achieving sustainable plant disease management through evolutionary principles [J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(9): 570–575.
- [74] 刘云美, 柴体真, 张国京. 马铃薯晚疫病的发生与防治 [J]. 云南农业, 2021, 39(8): 55–56.
- [75] 毛元江. 浅析马铃薯晚疫病的发生与防治 [J]. 农家参谋, 2019(6): 94.