

◆ 专论:杀菌剂(特约稿)◆

中国桃重要病害的化学防治现状及关键技术

曾哲政^{1,2},罗朝喜^{1,2*}

(1. 华中农业大学 果蔬园艺作物种质创新与利用全国重点实验室,武汉 430070;2. 华中农业大学植物科技学院 湖北省作物病害监测及安全控制重点实验室,武汉 430070)

摘要:概述了我国主要的桃病害,介绍了在桃病害防治中使用的药剂及其应用技术。针对当前桃病害化学防治中出现的抗药性问题,系统总结和分析了相关研究成果,以期为桃病害监测和绿色防控提供参考,实现对桃病害更加高效、安全的防控。

关键词:桃树;病害;化学防治;抗药性

中图分类号:S 436.621.1 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.02.004

Chemical control status and key techniques of major peach diseases

ZENG Zhezheng^{1,2}, LUO Chaoxi^{1,2*}

(1. National Key Laboratory for Germplasm Innovation & Utilization of Horticultural Crops, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Lab of Crop Disease Monitoring & Safety Control in Hubei, College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The major diseases on peach in China, and the use of fungicides and their application scenarios for peach disease control were reviewed in this paper. The prevailing challenges associated with fungicide resistance and current research findings were summarized. The aim was to provide a reference for the monitoring of peach diseases and development of green control technologies, achieving the more efficient and safe management of peach diseases.

Key words: peach tree; disease; chemical control; resistance

桃(*Prunus persica* (L.) Batsch)属于蔷薇科落叶果树或灌木,全球各地均有种植^[1]。作为桃树的起源地,中国在全球桃生产中处于领先地位,年产量高达1 681.71万吨,占2022年全球桃产量的44.93%。随后依次是意大利(115.15万吨)、土耳其(100.82万吨)、希腊(89.45万吨)、西班牙(87.07万吨)、美国(66.65万吨)、伊朗(57.73万吨)、智利(31.29万吨)、埃及(27.26万吨)^[2]。桃果实可直接食用,也能加工成罐头、蜜饯和果汁等产品,同时其多彩的花朵也具有很高的观赏价值。桃树易遭受多种病害的侵染,严重降低桃果实的产量和品质,是桃产业中最突出的挑战之一。我国最重要的桃病害包括由*Monilinia* spp.引起的褐腐病、*Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*

(Xap)引起的细菌性穿孔病、*Botryosphaeria* spp.引起的流胶病、*Venturia carpophila*引起的疮痂病,以及*Phomopsis amygdali*引起的枝枯病等^[3]。这些病害不仅能显著降低果实的产量和品质,严重时甚至会缩短树木寿命。长期以来,化学防治在桃病害防控中占主导地位,有力保障了我国桃产业的持续发展。然而,农药残留、环境污染及病原菌抗药性等问题也随之产生。随着消费者对食品安全和环境保护意识的提高,科学合理地使用化学药剂,推进果树病害的绿色防控,已成为桃产业健康发展的关键。

1 桃重要病害

桃在生长发育过程中,易受到多种病害的侵扰。

收稿日期:2024-03-04

基金项目:国家桃产业技术体系(CARS-30);国家自然科学基金(31371896)

作者简介:曾哲政(1997—),男,武汉人,博士研究生,主要从事桃褐腐病菌抗药性机制研究。E-mail:402137943@qq.com

通信作者:罗朝喜(1973—),男,昆明人,博士,教授,主要从事植物病原真菌抗药性及真菌病害防控研究。E-mail:cxluo@mail.hzau.edu.cn

其中,*Monilinia spp.*引起的褐腐病是对我国桃果产量及品质影响最为严重的病害。导致我国桃褐腐病的病原物包括*M. fructicola*、*M. yunnanensis*和*M. mucronata*,其中*M. fructicola*为优势种^[4]。此外,*M. laxa*、*M. fructigena*和*M. polystroma*在国外也被报道能够引起桃褐腐病^[5]。*Monilinia spp.*不仅导致果实腐烂,还能引起花腐和枝枯。受感染的花蕾通常变褐枯萎,随后病菌在枝条上形成溃疡。果实上,侵染初期,褐腐病菌在果皮表面形成褐色圆形斑点;在适宜的环境条件下,病斑在短时间内迅速扩展,覆盖整个果实表面,导致果肉迅速软化并溃烂。随着病害的发展,病斑表面逐渐生长出一层灰褐色的绒状霉层。收获后,褐腐病菌也可在果实中潜伏侵染,侵染比例高,为30%~50%^[6],一旦条件适宜,病菌能迅速导致果实腐烂,这是影响商品桃品质和储存性的主要因素之一。

Xanthomonas arboricola pv. *pruni* (Xap)引发的细菌性穿孔病,是一种对桃树叶片、果实和枝条均有显著影响的重要病害。叶片上,病斑初为灰色水渍点,后扩大呈深褐色,边缘黄化,最终中心坏死形成穿孔,严重时可导致叶片脱落,从而削弱树势^[7]。果实上,病斑早期症状类似叶片,后期中心凹陷,潮湿时渗出黄色菌脓,形成火山口状裂纹,影响果实外观和品质^[8]。枝干上,病害表现为深褐色、椭圆形的溃疡斑,通常由越冬病菌在春季适宜条件下引发^[8]。2017—2018年,受长江流域梅雨季节影响,湖北省主要桃产区桃细菌性穿孔病大暴发,许多桃木被迫砍伐搁置,造成巨大的经济损失^[9]。

除了上述主要病害,桃树还可能受到其他一些病害的影响,如流胶病、疮痂病、枝枯病、炭疽病和白粉病等。流胶病由*Botryosphaeria spp.*引起,通常在树干和主要分枝上形成小的隆起水泡,严重时可能导致树脂渗出并滴落到地面,影响桃树的整体健康^[3]。疮痂病由*Venturia carpophila*引起,主要侵害桃树果实。初期,果实表面出现小而不规则的柔软棕色斑点,表面粗糙。随着病情发展,这些斑点可能合并,导致果皮严重开裂,显著降低果实的商品价值^[10-12]。枝枯病由*Phomopsis amygdali*引起,在桃树上的主要表现为枝条上的收缩性溃疡斑,这些溃疡斑可导致枝条枯死,严重时甚至威胁到整棵树的存活^[13-14]。炭疽病由*Colletotrichum spp.*引起。这种病菌通常在桃树上形成坚硬、凹陷的病斑,主要影响果实,降低了果实的商品价值,进而导致巨大的经济损失^[15-16]。白粉病由*Podosphaera pannosa*引起,主要

影响桃树的果实表皮,但也可能发生在叶片和嫩枝上。病害表现为受感染表面覆盖白色粉状物,随着时间的推移,这些覆盖物逐渐变成棕色,影响果实的外观和商品价值^[17]。

桃病害的发生不仅增加了果园的管理难度和成本,还可能影响桃树的整体健康和果实的市场竞争力。目前,化学防治是减轻病害影响、保障桃树健康和提高产量的重要手段。

2 桃病害化学防治技术

2.1 休眠晚期

在美国东南部和西班牙,休眠晚期常用铜制剂防治细菌性病害、枝枯病(西班牙)以及缩叶病。在我国,桃产业尚未规模化,遍布全国的众多中小型果园使规范用药存在一定挑战。我国桃生产中常用石硫合剂进行清园消毒。

2.2 花期和落花期

美国的农业生产中,为了减少花腐、穿孔以及疮痂病对花和幼果的影响,从盛花期开始,每10~14 d会喷洒1次对蜜蜂无害的化学药剂。而在我国,为保护生态环境以及重要的授粉昆虫,在开花期不推荐使用化学药剂。

2.3 幼果期至硬核期

在桃果实的初期生长阶段,从幼果期到硬核期,可以施用保护性杀菌剂,如克菌丹、百菌清以及有机铜制剂。这些杀菌剂有助于有效防治桃常见病害,包括褐腐病、疮痂病、枝枯病、炭疽病、白粉病以及细菌性穿孔病(铜制剂)。此外,若果实出现白粉病引起的锈斑,可以通过施用硫磺加以治疗。

2.4 果实膨大期

在果实成熟前关键时期,果皮裂纹或脱落可能导致病害风险增加。为预防潜在的病害,推荐定期施用保护性杀菌剂(例如克菌丹、百菌清、代森锰锌等)。其中,克菌丹不仅能够在果皮表面形成一道保护层,还能有效防止炭疽病菌的积累。在病害风险较低的情况下,可采用硫磺作为替代杀菌剂。与多作用位点的保护性杀菌剂相比,苯并咪唑类(多菌灵等)、三唑类(丙环唑等)、甲氧基丙烯酸酯类(嘧菌酯等),以及琥珀酸脱氢酶抑制剂类(啶酰菌胺等)单一作用位点杀菌剂高效且对环境友好,但更易引发抗药性。

因此,为长期有效管控抗药性,建议在此阶段避免使用高抗性风险的单一作用位点杀菌剂,尤其是苯并咪唑类杀菌剂。

2.5 采收前

为了有效防治褐腐病,建议在果实着色阶段优先采用单一作用位点杀菌剂,并推荐混用具有不同作用机制的杀菌剂,如苯甲·嘧菌酯(三唑类杀菌剂苯醚甲环唑+甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂嘧菌酯)、唑醚·戊唑醇(甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂吡唑醚菌酯十三唑类杀菌剂戊唑醇)、唑醚·啶酰菌(甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂吡唑醚菌酯+琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌剂啶酰菌胺)、唑醚·甲硫灵(甲氧基丙烯酸酯类杀菌剂吡唑醚菌酯+苯并咪唑类杀菌剂甲基硫菌灵)等,以增强防治效果和降低抗药性产生的风险。与克菌丹相比,这些高抗性风险的杀菌剂在控制采收前后的果实褐腐病方面效果更好。

3 对杀菌剂的抗性

抗药性是化学防治过程中的一大重要问题,面对杀菌剂抗药性的挑战,采取有效的抗性管控策略至关重要,此举可有效延长高抗性风险杀菌剂的使用寿命。抗性管控应首先侧重于非化学的栽培措施,如冬季清园、选择抗病品种、适当修剪、合理疏果等,以降低病原体种群。其次,在果实对病害抵抗力较强的时期,应用多作用位点杀菌剂(如克菌丹)进行全园喷施,以化学方式进一步减少病原体数量。使用高抗性风险的单一作用位点杀菌剂时,必须采取谨慎且策略性的应用方法。登记用于桃病害防控的单一作用位点杀菌剂包括苯并咪唑类杀菌剂(MBCs)、三唑类甾醇脱甲基化酶抑制剂(DMIs)、甲氧基丙烯酸酯类呼吸抑制剂(QoIs)以及琥珀酸脱氢酶抑制剂(SDHIs),都应被纳入到管控计划中,以便有效监测和控制杀菌剂抗性的产生。

3.1 对MBC类杀菌剂的抗性

自20世纪60年代末引入以来,MBC类杀菌剂在防治由*Monilinia* spp.引起的桃褐腐病方面效果显著。然而,20世纪70年代,美国部分地区的*M. fructicola*和*M. laxa*对MBCs产生抗性^[18-23]。之后,新西兰^[24]、韩国^[25]、巴西^[26]、西班牙^[27]和塞尔维亚^[28]等国家相继报道对MBCs存在抗性的*M. fructicola*菌株。西班牙和希腊的桃果园也出现了对MBCs产生抗性的*M. laxa*菌株^[29-30]。我国北京、山东和云南等地部分菌株*M. fructicola*也表现出对MBCs的抗性^[31-32]。抗性分子机理研究表明, β -微管蛋白(TUB2)的不同氨基酸突变导致了MBCs的不同水平抗性。在*M. laxa*抗性菌株中,第198位氨基酸(E198A)和第240位氨基酸(L240F)的突变分别对应高抗性和低抗性^[25,32]。而在

*M. fructicola*抗性菌株中,第6位组氨酸变为酪氨酸(H6Y)和198位谷氨酸变为丙氨酸(E198A)分别造成菌株对MBCs产生低抗性和高抗性^[21]。最近的研究表明,在我国,*M. fructicola*对MBCs抗性主要由E198A突变导致,我国多菌灵抗性菌株发生频率为2.86%,其中,山东省有8.33%的菌株具有抗药性,在被调查省份中抗药性比例最高^[33]。最近福建也发现基于H6Y突变的低抗菌株^[34]。

MBC类杀菌剂也常用于防治*Colletotrichum* spp.引起的桃炭疽病以及*Venturia carpophila*引起的桃疮痂病。在美国,*C. siamense*由于TUB2蛋白的E198A突变而表现出对MBCs抗性^[35]。而在我国,*C. acutatum*复合种对MBC类杀菌剂存在天然抗性^[36]。对于疮痂病菌*V. carpophila*,我国14个省份检测到其MBCs抗性菌株,抗性主要是由TUB2蛋白中的E198K和E198G突变引起^[37]。

3.2 对DCF类杀菌剂的抗性

20世纪70年代末,二甲酰亚胺类杀菌剂(DCFs)开始用于防治桃病害,我国于20世纪90年代开始使用此类杀菌剂^[38]。经过数十年的使用,美国^[39]、新西兰^[40]、澳大利亚^[41]以及西班牙^[42]相继报道了*M. fructicola*对DCF类杀菌剂的抗药性,但在我国,褐腐病菌对DCF类杀菌剂的抗药性未见报道^[30]。然而在我国引起桃树炭疽病的*C. nymphaeae*、*C. fructicola*和*C. siamense*均对DCF类杀菌剂表现出高抗性^[36,43]。尽管抗性菌株层出不穷,但此类药剂的抗性机制目前仍不清晰。

3.3 对DMI类杀菌剂的抗性

自20世纪70年代初期,三唑类甾醇脱甲基化酶抑制剂(DMIs)作为一种新型杀菌剂,被引入农业生产领域,并迅速成为防治多种真菌病害的重要工具。然而,随着此类杀菌剂在农业生产中的广泛应用,特别是在美国乔治亚州^[44]以及其他东部州地区,经过逾20年的使用后,桃褐腐病菌*M. fructicola*对DMI类杀菌剂的抗性问题相继报道^[45]。DMI类杀菌剂抗性问题不仅局限于美国,巴西^[26]和西班牙^[42]也发现了*M. fructicola*对DMI类杀菌剂的抗性。深入的分子生物学研究揭示了*M. fructicola*中14 α -去甲基酶(*MfCYP5D*)基因的过量表达与DMI抗性存在直接联系^[46];而在巴西分离株中发现的*MfCYP5I*基因编码第461位氨基酸(G461S)的突变也与抗性紧密相关^[47]。此外,*MfCYP5I*基因的过表达与美国东南部*M. fructicola*菌株中的“Mona”元件存在显著关联^[46],然而在密歇根州和纽约州的菌株中,这种关联并未被

观察到^[48-49]。我国尚未检测到对DMI类杀菌剂存在抗性的*M. fructicola*菌株。

对桃炭疽病菌*Colletotrichum* spp.的研究中发现,我国不同种的桃炭疽病菌对DMI类杀菌剂的敏感性出现显著差异。例如,*C. nymphaeae*仅对粉唑醇和腈苯唑表现出抗性,而*C. truncatum*则对包括戊唑醇、叶菌唑、粉唑醇和腈苯唑在内的多种DMI类杀菌剂表现出抗性。与此相对,部分*C. foriniae*菌株仅表现出对DMI类杀菌剂敏感性的轻微降低^[50]。

3.4 对QoI类杀菌剂的抗性

甲氧基丙烯酸酯类呼吸抑制剂(QoIs)在多个国家的多种作物上广泛应用,以控制多种病原体^[51]。我国部分桃褐腐病菌*M. fructicola*对QoI类杀菌剂的敏感性有所降低^[52],但尚不能将其定性为产生抗性。在桃褐腐病菌*M. fructicola*中,QoIs的靶标*Cyt b*基因编码第143位氨基酸的序列后紧接1个大小为1 166 bp的内含子,阻止了G143A突变的发生^[52]。然而,在桃炭疽病菌*Colletotrichum* spp.中,*Cyt b*基因的G143A突变已成为一种普遍现象。在我国和美国分别发现*C. fructicola*和*C. siamense*对QoI类杀菌剂抗性菌株,其抗性均由*Cyt b*基因中的G143A突变所致^[43,53]。

3.5 对SDHI类杀菌剂的抗性

自2003年起,琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌剂(SDHIs)在美国上市,用于防治桃树病害。然而,不久后在南卡罗来纳州的一个果园观察到部分桃褐腐病菌*M. fructicola*对这类杀菌剂产生抗性,但其抗性机制尚不明确^[54]。在我国的桃炭疽病菌中,*C. nymphaeae*对啶酰菌胺存在天然抗性^[36]。

3.6 抗药性监测

监测病原菌对合理应用杀菌剂及有效防控病害具有至关重要的意义。传统上,通常用不同浓度的杀菌剂处理病原菌的菌株,并通过菌丝生长抑制试验来确定其EC₅₀(即抑制菌丝生长50%所需的浓度)或MIC(即完全抑制菌丝生长的最低浓度),根据EC₅₀以及MIC来判断该菌株是否对所用杀菌剂具有抗药性^[55]。为了提高检测效率,研究人员开发出一种利用阿尔玛蓝或刃天青作为呼吸指示剂,以评估*M. fructicola*对DMI类杀菌剂抗性的方法^[56]。随着对杀菌剂抗性分子机制认识不断深入,一系列简单且高效的检测方法被相继开发出来。这些检测方法不仅能够进行高通量检测,而且适用于在病原体群体中以较低频率监测对杀菌剂的抗性。例如,基于PCR和测序的技术已被用于检测*M. fructicola*^[21,57]以及*M. laxa*对MBC类杀菌剂的抗性^[22];PCR-RFLP技术也

被用于检测*M. laxa*对MBC类杀菌剂的抗性^[22],以及*M. fructicola*对DMI类杀菌剂的抗性^[45]。近些年,环介导等温扩增(LAMP)技术因其操作流程简便且对设备仪器要求不高而受到广泛关注。该技术仅需使用Bst DNA聚合酶和1组4个特异性引物,在恒温条件下,便能特异地扩增目标DNA序列^[58]。为了更直观地观察扩增产物,可以通过添加荧光染料如SYBR,从而实现产物的可视化^[59]。基于此,一种针对桃褐腐病菌*M. fructicola*中DMI抗性菌株的LAMP检测方法被开发出来,为桃病害的防控以及杀菌剂抗性管控提供了新的技术支持^[60]。与LAMP技术相似,重组酶聚合酶扩增(RPA)也是一种在恒定温度下进行的简化扩增方法,只需2个引物就能完成对目标DNA序列的扩增^[61]。将RPA技术与CRISPR/Cas12a系统相结合,通过RPA扩增特定的DNA序列,并利用Cas蛋白与crRNA复合体的特异性识别,结合荧光报告探针,实现对扩增产物的可视化^[62]。基于此,一种针对桃疮痂病菌*V. carpophila*中MBC抗性菌株的快速检测法被成功开发,为桃病害的抗性治理提供了新的工具^[63]。

3.7 抗药性治理

在美国东南部,由于桃产业较为集中,能够通过严格的抗性管控措施来控制抗性问题。具体措施包括在花期使用不同作用机理的单一作用位点杀菌剂,在果实生长初期仅使用多作用位点杀菌剂,在采收前混配或轮换使用不同作用机理的杀菌剂。相同作用机理的单一作用位点杀菌剂在一个生长季仅使用1次^[64]。为了有效管控杀菌剂抗性,需严格执行清园措施,以降低病原物的基数。西班牙抗药性管控策略也是避免在同一作物生长周期内重复使用具有相同作用机理的杀菌剂,交替使用或混配使用具有不同作用机理的杀菌剂^[65]。我国由于桃生产主要依赖于遍布全国的众多中小型果园,这为实施统一的抗性管控措施带来挑战。

持续对果农进行培训,确保最新的病害和抗性管控知识能够有效地应用于农业实际生产中,这点至关重要。果农在田间的实践经验对研究人员而言亦是宝贵的信息来源,因此,科学的病害与抗药性管控计划需要研究人员与果农紧密合作。定期举办的培训在促进信息交流、推动综合病虫害管控策略的执行、明确尚未产生抗药性的杀菌剂种类、优化应用策略、加强抗药性管控以及提高病害诊断的准确性等方面都发挥着关键作用。

西班牙为了鼓励果农减少农药使用并降低病

原菌抗药性产生的风险,已建立了一个综合性的病害管控系统。该系统包括提供专业的咨询服务、有效的病害监测工具以及相关政策,促使本国桃产业可持续发展以及更加环保^[66]。我国已推出一款名为“慧植农当家”的智能手机应用软件,该应用软件依托专家技术支持,协助种植户识别病虫害并提供田间管控策略、用药建议等基本信息。

4 展望

在桃病害防控策略中,化学防治将继续发挥着重要作用,但其面临的抗药性问题亟需关注。褐腐病在我国发生尤为严重,而在美国东南部,该病害未被列为最严重的病害,这得益于当地严格的病害和抗药性管控措施。在过去的15年中,除了有机管理的果园,该地区未报道过褐腐病的大规模暴发。然而,病原菌的适应性使得现有的防治措施可能面临挑战。随着生态文明建设的推进,对环境保护的重视正在促使市场减少使用对环境、非靶标生物有害的杀菌剂,特别是一些多作用位点杀菌剂。这种趋势可能会导致对那些具有较高抗性风险的单一作用位点杀菌剂的依赖性增强,进而可能削弱现有的抗药性管控策略的有效性。为了应对这一挑战,必须在确保病害控制的同时,采取更加审慎的杀菌剂使用策略,以维护农业生态系统的健康和可持续性。鉴于开发具有新作用机理的单一作用位点杀菌剂投入高、周期长,延长已登记杀菌剂的有效使用期限具有重要意义。尽管目前缺乏对常规杀菌剂的抗药性监测,但基于LAMP、RPA等的新技术为快速、低成本的检测提供了新途径,这些检测可以在实验室之外的环境中进行。

在桃生产中,细菌性病害的控制仍然是一个挑战,尤其是在缺乏有效杀菌剂的情况下。育种工作者正在努力增强桃树对细菌穿孔病的抗性,这已成为新品种选育的重要方向。未来的研究可能会集中于生物膜在细菌性穿孔病防治中的作用,以及开发出既能防控病害又不损伤有益微生物的特定杀菌剂。桃树表面不仅存在病原体,还有众多有益微生物,这些微生物与病原体在同一生态位上共存。因此,广谱农药如铜制剂不是最佳选择,未来的研究需要关注更加精细的农药开发策略,以实现对病害的有效控制,同时保护和利用桃树周围的微生物群落。

参考文献

- [1] ZHENG Y, CRAWFORD G W, CHEN X. Archaeological evidence for peach (*Prunus persica*) cultivation and domestication in China [J]. PLoS One, 2014, 9: e106595.
- [2] Food and Agricultural Organization of the United Nations. Crops and livestock products[DB/OL]. [2024-02-28]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.
- [3] LUO C X, SCHNABEL G, HU M J, et al. Global distribution and management of peach diseases[J]. Phytopathol Research, 2022, 4: 30.
- [4] 罗朝喜. 果树褐腐病的研究现状及其展望[J]. 植物病理学报, 2017, 47(2): 145-153.
- [5] BATRA L. World species of *Monilinia* (fungi): their ecology, bio-systematics and control[J]. Mycologia Memoir, 1991, 16: 1-24.
- [6] LUO Y, MICHAILIDES T J. Threshold conditions that lead latent infection to prune fruit rot caused by *Monilinia fructicola* [J]. Phytopathology, 2003, 93: 102-111.
- [7] MORALES G, LLORENTE I, MONTESINOS E, et al. Basis for a predictive model of *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* growth and infections in host plants[J]. Acta Horticulturae, 2016, 1149: 1-8.
- [8] 王程安. 桃穿孔病病原菌的分离与鉴定[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [9] 罗梅. 桃细菌性穿孔病病原鉴定、分子检测及其防治研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [10] SCHNABEL G, LAYNE D R. Comparison of reduced-application and sulfur-based fungicide programs on scab intensity, fruit quality, and cost of disease control on peach[J]. Plant Disease, 2004, 88(2): 162-166.
- [11] GONZÁLEZ-DOMÍNGUEZ E, ARMENGOL J, ROSSI V. Biology and epidemiology of *Venturia* species affecting fruit crops: a review[J]. Frontier in Plant Science, 2017, 8: 1496.
- [12] ZHOU Y, ZHANG L, FAN F, et al. Genome sequence of *Venturia carpophila*, the causal agent of peach scab[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2021, 34: 852-856.
- [13] FROELICH M H, SCHNABEL G. Investigation of fungi causing twig blight diseases on peach trees in South Carolina[J]. Plant Disease, 2019, 103(4): 705-710.
- [14] YANG L N, WANG L Y, CAO J, et al. Molecular and biological characterization of two new species causing peach shoot blight in China[J]. Plant Disease, 2022, 106(1): 182-189.
- [15] BERNSTEIN B, ZEHR E I, DEAN R A, et al. Characteristics of *Colletotrichum* from peach, apple, pecan, and other hosts[J]. Plant Disease, 1995, 79: 478-482.
- [16] TAN Q, SCHNABEL G, CHAISIRI C, et al. *Colletotrichum* species associated with peaches in China[J]. J Fungi, 2022, 8: 313.
- [17] GROVE G G. Powdery mildew[M]. St. Paul: APS Press, 1995:

- 12-14.
- [18] SONODA R M, OGAWA J M, MANJI B T, et al. Factors affecting control of blossom blight in a peach orchard with low level benomyl-resistant *Monilinia fructicola*[J]. Plant Disease, 1983, 67: 681-684.
- [19] MICHAILIDES T J, OGAWA J M, OPGENORTH D C. Shift of *Monilinia* spp. and distribution of isolates sensitive and resistant to benomyl in California prune and apricot orchards[J]. Plant Disease, 1987, 71: 893-896.
- [20] ZEHR E I, TOLER J E, LUSCZ L A. Spread and persistence of benomyl-resistant *Monilinia fructicola* in South Carolina peach orchards[J]. Plant Disease, 1991, 75: 590 - 593.
- [21] MA Z H, YOSHIMURA M A, MICHAILIDES T J. Identification and characterization of benzimidazole resistance in *Monilinia fructicola* from stone fruit orchards in California[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69: 7145-7152.
- [22] MA Z H, YOSHIMURA M A, HOLTZ B A, et al. Characterization and PCR-based detection of benzimidazole-resistant isolates of *Monilinia laxa* in California[J]. Pest Management Science, 2005, 61: 449-457.
- [23] MA Z H, MICHAILIDES T J. Advances in understanding molecular mechanisms of fungicide resistance and molecular detection of resistant genotypes in phytopathogenic fungi[J]. Crop Protection, 2005, 24: 853-863.
- [24] SANOAMUANG N, GAUNT R E. Persistence and fitness of carbendazim- and dicarboximide-resistant isolates of *Monilinia fructicola* (Wint) Honey in flowers, shoots and fruit of stone fruit [J]. Plant Pathology, 1995, 44: 448-457.
- [25] LIM T H, CHANG T H, CHA B. Biological characteristics of benzimidazole-resistant and -sensitive isolates of *Monilinia fructicola* from peach fruits in Korea[J]. Journal of Plant Pathology, 1999, 15: 340-344.
- [26] MAY-DE MIO L L, LUO Y, MICHAILIDES T J. Sensitivity of *Monilinia fructicola* from Brazil to tebuconazole, azoxystrobin, and thiophanate-methyl and implications for disease management [J]. Plant Disease, 2011, 95(7): 821-827.
- [27] EGUN B, MELGAROJO P, DE CAL A. Sensitivity of *Monilinia fructicola* from Spanish peach orchards to thiophanate-methyl, iprodione, and cyproconazole: fitness analysis and competitiveness [J]. European Journal of Plant Pathology, 2015, 141: 789-801.
- [28] HRUSTIC J, MIHAJLOVIC M, GRAHOVAC M, et al. Fungicide sensitivity, growth rate, aggressiveness and frost hardiness of *Monilinia fructicola* and *Monilinia laxa* isolates[J]. European Journal of Plant Pathology, 2018, 151: 389-400.
- [29] EGUN B, MELGAROJO P, DE C A. The effect of fungicide resistance on the structure of *Monilinia laxa* populations in Spanish peach and nectarine orchards[J]. European Journal of Plant Pathology, 2016, 145: 815-827.
- [30] MALANDRAKIS A A, MARKOGLOU A N, ZIOGAS B N. PCR-RFLP detection of the E198A mutation conferring resistance to benzimidazoles in field isolates of *Monilinia laxa* from Greece [J]. Crop Protection, 2012, 39: 11-17.
- [31] 樊锦艳,房雅丽,国立耘.美澳型核果褐腐病菌对甲基硫菌灵和啶酰菌胺的敏感性[J].植物保护学报,2009,36: 251-256.
- [32] CHEN S N, SHANG Y, WANG Y, et al. Sensitivity of *Monilinia fructicola* from peach farms in China to four fungicides and characterization of isolates resistant to carbendazim and azoxystrobin[J]. Plant Disease, 2014, 98(11): 1555-1560.
- [33] IQBAL S. 桃褐腐病菌杀菌剂抗性监测及MBC类杀菌剂抗性菌株表征[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- [34] KE D F, MENG H, LEI W T, et al. Prevalence of H6Y mutation in β -tubulin causing thiophanate-methyl resistant in *Monilinia fructicola* from Fujian, China[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2022, 188: 105262.
- [35] HU M J, GRABKE A, DOWLING M E, et al. Resistance in *Colletotrichum siamense* from peach and blueberry to thiophanate-methyl and azoxystrobin[J]. Plant Disease, 2015, 99(6): 806-814.
- [36] USMAN H M, TAN Q, FAN F, et al. Sensitivity of *Colletotrichum nymphaeae* to six fungicides and characterization of fudixonil-resistant isolates in China[J]. Plant Disease, 2022, 106(1): 165-173.
- [37] ZHOU Y, FAN F, CHAISIRI C, et al. Sensitivity of *Venturia carpophila* from China to five fungicides and characterization of carbendazim-resistant isolates[J]. Plant Disease, 2021, 105(12): 3990-3997.
- [38] 袁章虎,张小风,韩秀英.灰霉菌抗药性研究进展[J].河北农业大学学报,1996,19: 107-111.
- [39] RITCHIE D F. Effect of dichloran, iprodione, procymidone and vinclozolin on the mycelial growth, sporulation, and isolation of resistant strains of *Monilinia fructicola*[J]. Plant Disease, 1982, 66: 484-486.
- [40] ELMER P A G, GAUNT R E. A survey of fungicide insensitivity in *Monilinia fructicola*[C]. Proceedings of the New Zealand Weed and Pest Control Conference, 1986, 39: 166-169.
- [41] WHERRETT A, SIVASTITHAMPARAM K, KUMAR S. Detection of possible systemic fungicide resistance in Western Australian *Monilinia* populations[J]. Phytopathology, 2001, 91: S95.
- [42] EGUN B, MELGAROJO P, DE CAL A. Sensitivity of *Monilinia fructicola* from Spanish peach orchards to thiophanate-methyl, iprodione, and cyproconazole: fitness analysis and competitiveness [J]. European Journal of Plant Pathology, 2015, 141: 789-801.
- [43] USMAN H M, TAN Q, KARIM M M, et al. Sensitivity of *Colletotrichum fructicola* and *Colletotrichum siamense* of peach in China to multiple classes of fungicides and characterization of pyraclostrobin-resistant isolates[J]. Plant Disease, 2021, 105(11): 3459-3465.

- [44] SCHNABEL G, BRYSON P K, BRIDGES W C, et al. Reduced sensitivity in *Monilinia fructicola* to propiconazole in Georgia and implications for disease management[J]. Plant Disease, 2004, 88(9): 1000-1004.
- [45] LUO C X, COX K D, AMIRI A, et al. Occurrence and detection of the DMI resistance-associated genetic element 'Mona' in *Monilinia fructicola*[J]. Plant Disease, 2008, 92(7): 1099-1103.
- [46] LUO C X, SCHNABEL G. The cytochrome P450 lanosterol 14 α -demethylase gene is a demethylation inhibitor fungicide resistance determinant in *Monilinia fructicola* field isolates from Georgia[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74: 359-366.
- [47] LICHTEMBERG P S F, LUO Y, MORALES R G, et al. The point mutation G461S in the MfCYP51 gene is associated with tebuconazole resistance in *Monilinia fructicola* populations in Brazil[J]. Phytopathology, 2017, 107: 1507-1514.
- [48] VILLANI S M, COX K D. Characterizing fenbuconazole and propiconazole sensitivity and prevalence of 'Mona' in isolates of *Monilinia fructicola* from New York[J]. Plant Disease, 2011, 95(7): 828-834.
- [49] LESNIAK K E, PENG J, PROFER T J, et al. Survey and genetic analysis of demethylation inhibitor fungicide resistance in *Monilinia fructicola* from Michigan orchards[J]. Plant Disease, 2021, 105(4): 958-966.
- [50] CHEN S N, LUO C X, HU M J, et al. Sensitivity of *Colletotrichum* species, including *C. foriniae* and *C. nymphaeae*, from peach to demethylation inhibitor fungicides[J]. Plant Disease, 2016, 100(12): 2434-2441.
- [51] YPEMA H L, GOLD R E. Kresoxim-methyl: modification of a naturally occurring compound to produce a new fungicide[J]. Plant Disease, 1999, 83(1): 4-19.
- [52] LUO C X, HU M J, JIN X, et al. An intron in the cytochrome b gene of *Monilinia fructicola* mitigates the risk of resistance development to QoI fungicides[J]. Pest Management Science, 2010, 66: 1308-1315.
- [53] HU M J, GRABKE A, DOWLING M E, et al. Resistance in *Colletotrichum siamense* from peach and blueberry to thiophanate-methyl and azoxystrobin[J]. Plant Disease, 2015, 99(6): 806-814.
- [54] CHEN F P, LIU X L, CHEN S N, et al. Characterization of *Monilinia fructicola* strains resistant to both propiconazole and boscalid[J]. Plant Disease, 2013, 97(5): 645-651.
- [55] RUSSELL P E. Sensitivity baselines in fungicide resistance research and management. FRAC monograph 3[M]. Brussels: Crop Life International, 2003: 56.
- [56] COX K D, QUELLO K, DEFORD R J, et al. A rapid method to quantify fungicide sensitivity in the brown rot pathogen *Monilinia fructicola*[J]. Plant Disease, 2009, 93(4): 328-331.
- [57] 罗梅, 阴伟晓, 罗朝喜. 桃褐腐病菌对多菌灵抗性的AS-PCR检测技术[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 136-143.
- [58] NOTOMI T, OKAYAMA H, MASUBUCHI H, et al. Loop-mediated isothermal amplification of DNA[J]. Nucleic Acids Research, 2000, 28: e63.
- [59] PAN Z C, XU J, PRIOR P, et al. Development of a specific molecular tool for the detection of epidemiologically active mulberry causing-disease strains of *Ralstonia solanacearum* phylotype I (historically race 5-biovar 5) in China[J]. European Journal of Plant Pathology, 2013, 137: 377-391.
- [60] CHEN S N, SCHNABEL G, YUAN H Z, et al. LAMP detection of the genetic element 'Mona' associated with DMI resistance in *Monilinia fructicola*[J]. Pest Management Science, 2019, 75: 779-786.
- [61] PIEPENBURG O, WILLIAMS C H, STEMPLE D L, et al. DNA detection using recombination proteins[J]. PLoS Biology, 2006, 4: e204.
- [62] CHEN J S, MA E B, HARRINGTON L B, et al. CRISPR-Cas12a target binding unleashes indiscriminate single-stranded DNase activity[J]. Science, 2018, 360: 436-439.
- [63] HU J J, LIU D, CAI M Z, et al. One-Pot assay for rapid detection of benzimidazole resistance in *Venturia carpophila* by combining RPA and CRISPR/Cas12a[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71: 1381-1390.
- [64] SCHNABEL G, BRANNON P M. Biology, epidemiology, and management of diseases of peach driving the spray program in the southeastern United States[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 295: 110818.
- [65] MINISTERIO D A, PESCA Y A. Guia de gestion integrada de plagas. Frutales de hueso: albaricoque, melocoton, nectarina, paraguayo, ciruelo y cerezo[M]. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca Alimentacion, 2015: 189.
- [66] MATYJASZCZYK E. Products containing microorganisms as a tool in integrated pest management and the rules of their market placement in the European Union[J]. Pest Management Science, 2015, 71: 1201-1206.

(编辑:顾林玲)

欢迎订阅《现代农药》(双月刊) 定价:120元/年

编辑部电话:025-86581148 QQ:966491600 联系人:靳红华