专 论 与 综 述
Reviews

梨火疫病的分布、传播规律和防治的研究进展

郭 健[1], 刘朋飞[1], 朱云峰[2,3], 楼兵干[1*]

(1. 浙江大学生物技术研究所, 农业农村部作物病虫分子生物学重点实验室, 杭州 310058;
2. 阿克苏地区林业与草原局, 阿克苏 843099; 3. 浙江省林业局, 杭州 310019)

摘要 梨火疫病是由解淀粉欧文氏菌 *Erwinia amylovora* 引起的蔷薇科植物上的毁灭性病害。该病于 2016 年传入新疆,对我国苹果和梨产业的健康发展构成了严重威胁。梨火疫病发生历史久远,地理分布广泛,流行规律复杂,防控相对复杂和困难。本文综述了梨火疫病的发生历史、地理分布,病原菌的扩展定殖及传播规律,以及目前的防治方法,为梨火疫病的深入研究和综合防控提供参考。

关键词 梨火疫病; 解淀粉欧文氏菌; 发生历史; 扩展定殖; 防控措施

中图分类号: S 432 **文献标识码**: A **DOI**: 10.16688/j.zwbh.2023654

Research progress on the distribution, spread and control of fire blight

GUO Jian[1], LIU Pengfei[1], ZHU Yunfeng[2,3], LOU Binggan[1*]

(1. *Institute of Biotechnology, Zhejiang University, Key Laboratory of Molecular Biology of Crop Pathogens and Insects Pests, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310058, *China*; 2. *Forestry and Grassland Bureau of Akesu Prefecture, Akesu* 843099, *China*; 3. *Zhejiang Forestry Bureau, Hangzhou* 310019, *China*)

Abstract Fire blight, caused by *Erwinia amylovora*, is a devastating disease affecting plants of the family Rosaceae. Since its first detection in Xinjiang, China, in 2016, the disease has posed a serious threat to the sustainable development of the country's apple and pear industries. Fire blight has a long history, wide geographic distribution, and complex epidemiological characteristics, which make its prevention and control particularly challenging. This paper summarizes recent research progress on the historical occurrence, geographic distribution, and transmission mechanisms of fire blight, as well as the expansion and colonization behavior of *E. amylovora*. In addition, current advances in integrated management and control strategies are discussed. These insights provide a valuable reference for future research and for the development of effective, comprehensive prevention and control approaches for fire blight in China.

Key words fire blight; *Erwinia amylovora*; occurrence history; expansion and colonization; disease prevention and control approaches

梨火疫病是由解淀粉欧文氏菌 *Erwinia amylovora* 引起的蔷薇科仁果类植物的毁灭性病害,危害苹果、梨、山楂、榅桲等 40 余属的 220 种植物[1]。病原菌侵染花、叶片、嫩梢、幼果等部位,引起花腐、枯枝、果实腐烂,继而造成整株死亡[2]。该病害目前已传播至北美洲、欧洲、大洋洲、非洲、亚洲等地区的 60 多个国家[3],2016 年梨火疫病传入我国,目前新疆 9 个地州的 44 个县市、兵团 3 个市,甘肃张掖和武威的 8 个区县均有发生[4]。目前,新疆梨火疫病防控取得令人满意的效果,国内针对梨火疫病的研究也进入新阶段,但由于其危害重、缺乏优质抗性品种,还没有形成区域联动的系统性防控机制,病害外溢风险高,对我国梨和苹果产业形成严重威胁,是梨和苹果产区主要关注的问题。

本文就梨火疫病的发生历史与世界分布、梨火疫病菌在寄主上的扩展定殖规律,以及该病害的有效防控措施进行综述,旨在为国内梨火疫病的防控提供理论依据与应用参考。

收稿日期: 2023-12-20 **修订日期**: 2024-06-03
基金项目: 浙江省科技计划(2023C04012)
* 通信作者 E-mail:bglou@zju.edu.cn

1 梨火疫病的地理分布

1.1 梨火疫病在北美洲的发生与传播

国际上最早于1780年在美国纽约哈德逊河谷的苹果上发现梨火疫病。随着人类迁徙和种植区域的扩大,加之美国东中部地区没有天然屏障的阻挡,梨火疫病快速蔓延,到达气候湿润的南部和墨西哥湾沿岸的各州。1840年,梨火疫病蔓延到俄亥俄州、印第安纳州和伊利诺伊州[5],造成了严重的经济损失。高大的落基山脉的阻隔延缓了梨火疫病在美国西海岸地区的发生。直到1888年,加利福尼亚州和美国其他西部各州相继发现该病害[6]。由于阿拉斯加暖流经过形成的温带海洋性气候,使得该地区的降水丰富,非常不利于梨火疫病的防控,在俄勒冈州和华盛顿州造成巨大损失。19世纪进入工业革命后,随着交通运输工具的发展以及殖民地的扩张,加快了梨火疫病的传播速度[7]。到1915年,梨火疫病几乎传遍美国。在美国每年因梨火疫病造成的产量损失和防控成本超过1亿美元[8]。

1890年,首次在美国以外的加拿大安大略省尼亚加拉半岛上报道了梨火疫病[9]。至1924年,该病害已经传播到加拿大除安纳波利斯山谷地带以外所有的苹果和梨种植区。1966年,安纳波利斯山谷地区5、6月份遇到持续的强降雨并在超长时间内温度适宜,当地17个梨园发生了严重的梨火疫病[1]。1921年,梨火疫病传至墨西哥[10],在梨、苹果、楹梓、火棘上均有发生,造成了难以估计的经济损失[11]。

1.2 梨火疫病在环太平洋地区的传播

据日本文献记载,1903年在日本的苹果树上发现了梨火疫病的症状[12],随后在北海道地区流行,但日本政府一直不予认可[13]。1976年,Tanii等将病原菌鉴定为*E. amylovora*,1983年发现某些菌株仅对亚洲梨有致病力,并命名为*E. amylovora* pv. *pyri*[14],其生物学性状和*E. amylovora*非常相近[15]。

1995年,在韩国春川地区果园的亚洲梨上发现一种类似梨火疫病的病害[16],病原菌主要侵染亚洲梨和部分西洋梨品种,将其鉴定为亚洲梨火疫病菌*E. pyrifoliae*[17]。进一步研究表明*E. amylovora* pv. *pyri*在分子特征方面与*E. pyrifoliae*更相近[18],且日本的梨火疫病发生历史较韩国悠久,由此推测亚洲梨火疫病是由日本传入韩国。

2015年,在韩国安城的苹果园和天安市的海棠园中发生严重病害,经鉴定该病原菌为*E. amylovora*[19]。为防止该病害进一步扩散,韩国随即开展梨火疫病的防治与清除,降低该病害带来的经济损失。

1919年,在新西兰奥克兰地区的苹果、梨、楹梓和山楂上都发生了梨火疫病[20],后来被证实是使用了从美国进口的染病'Bartleet'梨接穗而引发大面积传播。至1936年,梨火疫病传遍整个新西兰[21]。澳大利亚作为新西兰邻近国家,早在1921年就已禁止从已发生梨火疫病的国家进口任何蔷薇科植物相关材料,包括种子和果实[22]。1997年在墨尔本皇家果园发生梨火疫病[23],政府下令迅速铲除烧毁果园中的所有植物。因此到目前为止,澳大利亚是国际上唯一一个曾经发生过梨火疫病,通过铲除烧毁没有再发生该病害的国家。

1.3 梨火疫病在欧亚与非洲大陆的传播

19世纪50年代开始,梨火疫病通过已经感染的植物材料从北美向欧洲西北部和非洲东北部两个方向传播。1958年,梨火疫病菌随着从美国进口的水果包装箱传入英国[24]。此后,该病害迅速流行,在英国范围内向北部、东部和西部传播。除了主要的寄主梨之外,还在苹果、山楂,以及蔷薇科花楸属的一些植物上发现了该病害[25]。之后在荷兰、波兰、丹麦、西德、法国和比利时的山楂树上相继发生梨火疫病。这一带正好位于候鸟迁飞的必经之路,梨火疫病主要通过候鸟传播[26-27]。

1964年,梨火疫病随美国'LeConte'梨的带病接穗传入埃及[28],这也是非洲地区的首次记录。由于气候条件不适宜,梨火疫病并未在埃及大范围暴发。直到1980年,梨树花期降雨增多,梨火疫病在埃及大暴发,逐渐传播至地中海沿岸的以色列、塞浦路斯、土耳其、希腊、黎巴嫩、约旦、伊朗、马其顿、保加利亚、罗马尼亚、匈牙利、南斯拉夫、阿尔巴尼亚、意大利、西班牙、叙利亚、摩洛哥等国家,并一路东进。到21世纪初,梨火疫病已蔓延到中国周边国家,包括俄罗斯(2003年)、吉尔吉斯斯坦(2008年)[29]、哈萨克斯坦(2010年)[30]。

2016年5月,在我国新疆伊犁哈萨克自治州首次发生梨火疫病[31],2017年在南疆库尔勒市香梨园暴发,2020年在甘肃省张掖市的梨园发生梨火疫病,2021年在武威市也发生该病害[32]。据统计数据显示,2016年新疆伊犁6 700 hm^2寄主林中,发病面积约2 500 hm^2[32]。

根据欧洲和地中海植物保护组织网站(https://gd.eppo.int/taxon/ERWIAM/distribution)和已有

报道[33],目前梨火疫病在国际上的发生与分布如表 1 所示。我国是世界上梨和苹果种植面积最大的国家,也是国际上最大的梨和苹果出口国,梨火疫病对我国梨和苹果产业形成严重威胁,因此必须采取有效的防控措施控制其在国内的发生,将该病害的传播风险和造成的经济损失降到最低。

表 1　梨火疫病在全球的分布

Table 1　Global distribution of fire blight

发生年份 Year of occurrence	国家(地区) Country (region)	发生年份 Year of occurrence	国家(地区) Country (region)
1780	美国	1990	保加利亚、约旦、意大利、波斯尼亚和黑塞哥维那
1840	加拿大	1992	罗马尼亚
1903	日本	1993	奥地利、哥伦比亚
1919	新西兰	1994	摩尔达维亚
1921	墨西哥	1995	乌克兰、西班牙、克罗地亚
1938	百慕大	1996	匈牙利、阿尔巴尼亚、黑山
1956	英国	1997	澳大利亚(短暂发生)
1964	埃及	2001	斯洛文尼亚
1966	荷兰、波兰	2003	俄罗斯、斯洛伐克
1968	危地马拉、丹麦	2005	立陶宛、叙利亚
1971	德国	2006	摩洛哥
1972	比利时、法国	2007	白俄罗斯、拉脱维亚、乌克兰
1982	卢森堡	2008	吉尔吉斯斯坦
1984	塞浦路斯	2010	哈萨克斯坦、葡萄牙
1985	土耳其、以色列、爱尔兰	2011	阿尔及利亚
1986	瑞典、挪威、希腊、马其顿	2012	突尼斯
1987	捷克	2015	韩国
1988	黎巴嫩	2016	中国、格鲁吉亚
1989	瑞士、伊朗、亚美尼亚、塞尔维亚		

2　梨火疫病菌的扩展定殖

梨火疫病菌可以通过寄主的自然孔口(蜜腺、气孔、皮孔等)和机械伤口侵染植物。其中,蜜腺是梨火疫病菌最主要的侵染途径。蔷薇科植物的柱头属于“湿柱头”类型,柱头的表皮细胞可以分泌氨基酸、糖类、脂类、激素、多肽和蛋白质等物质[34],因此梨火疫病菌易在柱头表面定殖,在雨水或露水的帮助下[35],迁移到底部的花托,通过蜜腺侵入花组织[36]。除了通过蜜腺进入植物内部,梨火疫病菌也可通过花瓣掉落后形成的孔口,侵入寄主组织[37]。

蜜蜂授粉极显著增加了梨火疫病传播的风险。由于蜜蜂身体上有许多短小绒毛,其表面湿度较高,有利于梨火疫病菌的携带。在传粉期,蜜蜂容易从受感染花朵上携带梨火疫病菌传播至健康的花朵,导致梨火疫病的大范围发生。已有研究表明,梨火疫病菌在蜜蜂身上的存活时间最长可达 13 d[38]。

除了蜜腺,梨火疫病菌也可以直接通过新梢的气孔、皮孔和叶片上的水孔等自然孔口进入植物组织定殖扩展。Zeng 等[37]利用 GUS 标记的梨火疫病菌进行研究,观察到病原菌可以通过叶片边缘的水孔侵入寄主。

梨火疫病菌还可以通过昆虫和农事操作等造成的伤口侵入寄主组织。半翅目昆虫(如蚜虫和梨木虱)以吸食树的汁液为生,研究发现这些昆虫刺吸产生的伤口给病原菌提供了侵入的机会[39-40];双翅目的蝇科以菌脓为食,从而导致自身带菌,传播至其他健康组织[41]。此外,果树修剪及暴风雨、冰雹等自然灾害产生的伤口也有利于病原菌的侵入,造成病害大面积发生。2008 年 6 月,加拿大阿尔伯塔省南部在发生冰雹后 10～14 d 暴发了梨火疫病,造成了严重的经济损失[42]。

目前对梨火疫病菌在寄主枝条内的扩展途径主要有两种观点。多数研究者认为梨火疫病菌主要在成熟的木质部导管进行定殖和扩展,另外一种观点认为主要定殖和扩展的部位在皮层薄壁组织的细胞间隙。本实验室研究发现(未发表数据),梨火疫病菌同时存在于这两个位置,其中皮层薄壁组织的细胞间隙是主要的定殖部位,木质部导管是主要的扩展路径。

梨火疫病菌侵入寄主后,可以在花、叶片、枝条等的薄壁组织的细胞间隙定殖。当细菌增殖[43]或胞外多糖吸收水分[44]时,由于存在水势差,细胞中的水和部分溶质渗漏到细胞间隙中,导致细胞间隙

内的压力不断增大[45]，推动梨火疫病菌在细胞间隙移动，造成植物组织变黑、萎蔫、菌脓渗出等症状。然而，病原菌在细胞间隙的移动速度较慢，快速扩展是通过维管组织进行，其中以木质部的导管为主，这可能是梨火疫病发病严重的一个重要原因[46-47]。研究发现，成熟的环纹和螺纹导管中梨火疫病菌较多，网纹和梯纹导管中的菌量较少[48]。梨火疫病菌可以在寄主的木质部导管中潜伏存活，而植物未表现梨火疫病症状，当寄主的生理条件发生改变，如春季发芽时，木质部汁液中某些氨基酸的浓度升高，以及环境温度升高，细菌便从木质部扩展到薄壁细胞间隙并快速繁殖，引起火疫病的症状[25]。

3 梨火疫病的防治

由于梨火疫病菌寄主范围十分广泛，定殖和扩展能力强，因此仅靠单一的防控措施难以达到理想效果。因梨火疫病菌的远距离传播主要通过带菌的苗木与接穗，所以在无病区必须严格执行植物检疫措施，防止病原菌的传入；在梨火疫病疫区，有效防控梨火疫病的策略是减少初侵染源，控制梨火疫病菌在寄主上的定殖，以及提高寄主对梨火疫病菌的抗性[31]，措施包括化学防治、生物防治、农业防治。其中，化学防治和科学修剪病枝是最主要和有效的措施。筛选推广抗病品种是一种最为经济有效的防治策略[49]，但是抗病基因与优良性状往往不连锁，目前推广的主栽梨、苹果品种多数是感病品种，尤其是库尔勒香梨更是高度感病。

3.1 植物检疫

植物检疫是通过法律、行政和技术手段，防止植物病、虫、杂草和其他有害生物的人为传播，保障农林业安全的措施，同时也是控制梨火疫病远距离扩散的最有效手段[3]。梨火疫病菌作为我国农业植物检疫性有害生物，目前在新疆和甘肃地区已有发生[4]，存在向黄土高原及内地苹果、梨产区进一步扩散的风险，因此必须加强植物检疫措施，阻止梨火疫病进一步传播。针对梨火疫病，主要的植物检疫措施有：1)严格检疫从国外进口的苹果、梨、海棠等植物的砧木、接穗，包括其包装、铺垫材料和运输工具，可以采用熏蒸、消毒等方法处理后，再行运输或放行；2)发现带有病菌的植物材料应立即销毁，禁止入境；3)在国内严格划分疫区与保护区，严禁从疫区引进寄主植物的种子、种苗、接穗等植物材料；4)有计划地建立无危险病害的种苗繁育基地，并实行产地检疫等。

3.2 化学防控

在梨火疫病疫区，化学防治是控制该病害的主要手段。梨火疫病菌一旦侵入寄主，会迅速在植物组织内进行定殖和扩展，杀菌剂的治疗效果便会降低，因此杀菌剂的使用时期非常关键[50]。花期是梨火疫病菌侵入的主要时期，也是梨火疫病防治的关键时期。本实验室研究发现(未发表)，初花期(5%花开)和落花期(85%花谢)喷施药剂对花朵的生长发育和坐果影响最小，防治效果也最好。其次台风、冰雹等极端自然天气造成的伤口易导致病原菌侵入，应及时采取化学药剂进行保护。

防控药剂的选择对梨火疫病防治至关重要。一直以来，铜制剂和抗生素类药剂在梨火疫病的防治中效果显著。但因铜离子会损伤叶绿体结构，影响花粉萌发和花粉管生长[51-52]。因此，铜制剂最好在植物休眠期或开花前使用。链霉素作为防治效果最好的抗生素类药剂，被广泛应用于梨火疫病的防治。在花期合理施用链霉素对梨火疫病的防控效果可达 90%以上[8]。因频繁、大量和持续使用链霉素，耐链霉素的梨火疫病菌菌株陆续被发现并报道[53]，研究发现，链霉素抗性菌株能在含有 100 mg/L 链霉素的选择性培养基上生长，有些菌株甚至能够耐受 5 000 mg/L 浓度的链霉素[54]。出于生物安全性考虑，许多欧洲国家已宣布禁用链霉素。我国于 2016 年 6 月停止批准农用链霉素产品再生产[55]。

为了延缓菌株耐药性的产生，一些国家和地区采取药剂交替施用或复配使用的策略，并不断推进新农药的开发。韩国在 2015 年暴发梨火疫病后，Lee 等[56]发现春雷霉素对梨火疫病的防控效果较为明显，防效与链霉素相当；刘朋飞等[57]研究发现，春雷霉素在库尔勒香梨上连续 3 年的平均防效低于农用硫酸链霉素，且不同生产厂家的药剂防效差异较大。目前尚未发现春雷霉素与链霉素存在交互抗性，使其作为梨火疫病防控的补充药剂有着较大的应用潜力[50]。以色列为应对链霉素抗性问题尝试使用噁喹酸(oxolinic acid)防治梨火疫病，发现喷施 200 mg/L 噁喹酸的田间防控效果与 100 mg/L 链霉素相当，但近年来，已有抗性菌株的报道[58]。另外，氟甲喹、三乙膦酸铝等其他新型化合物也逐渐进入国外市场。刘朋飞等[57]对国内 22 种细菌杀菌剂进行田间防效试验，筛选出 40%春雷·噻唑锌悬浮剂(SC)、20%春雷·噻菌铜 SC、10%丙硫唑 SC 以及 3%、5%和 12%中生菌素

水剂(AS)等药剂对梨火疫病的防效均在 70%以上,其中 40%春雷·噻唑锌 SC 1 000～2 000 倍液的防效和 72%农用链霉素可溶粉剂(SP)4 000 倍液相当甚至更好。目前常用的化学药剂如表 2 所示。

对于目前普遍出现的抗性菌株问题,可用以下策略获得一定程度的缓解:1)研制不同于传统杀菌剂作用位点的新型杀菌剂,降低产生抗性的概率;2)将现有有效杀菌剂进行复配。从 20 世纪 80 年代初期开始,复配药剂逐渐应用于田间,复配类型呈多样化,市场比重大大增加。目前已有一些对细菌性病害具有良好防治效果的复配药剂,如春雷·噻唑锌,春雷·喹啉铜等在室内有良好的抑菌效果[59],在田间同样表现出令人满意的防控效果[57];3)进行连续的抗药性定点监测,对田间合理使用杀菌剂进行指导等。

表 2　梨火疫病防控药剂

Table 2　Chemical agents used for the management of fire blight

药剂 Chemical	类别 Category	浓度(有效成分) Concentration of active ingredient	防效/% Control efficacy	参考文献 Reference
硫酸铝　Aluminum sulfate	铝制剂	—	51～65	[60-61]
硫酸铝钾　Potassium aluminum sulfate	铝制剂	800～2 000 mg/L	54～85	[61-62]
氯氧化铜　Copper oxychloride	铜制剂	1 000 mg/L	47～58	[60,63]
氢氧化铜　Copper hydroxide	铜制剂	280 mg/L	64～88	[64-65]
波多尔液　Bordeaux mixture	铜制剂	1 000 mg/L	36～79	[66]
三碱硫酸铜　Copper tribasic sulfate	铜制剂	340 mg/L	70～76	[67]
代森锰锌　Mancozeb	二硫代氨基甲酸酯类	5400 mg/L	65～78	[65]
链霉素　Streptomycin	抗生素	100～600 mg/L	60～97	[65,68]
土霉素　Oxytetracycline	抗生素	200 mg/L	40～88	[50,65]
春雷霉素　Kasugamycin	抗生素	100 mg/L	67～94	[50,65]
噁喹酸　Oxolinic acid	二代喹啉酮类	300 mg/L	74～92	[69]

3.3　农业防治

农业防控主要指为病害防治所采取的农业技术综合措施,以及调整和改善作物的生长环境或创造不利于病原菌生长发育或传播的条件。以下为防治梨火疫病的几种重要农业防控手段:冬季清园,及时清除病枯枝,修剪下的枝干、僵果、落叶等及时清理出果园,可有效降低梨火疫病菌基数,这也是全年综合防治工作的基础;生长期及时剪除发病的枝条、果实和花序。试验观察发现,在果园中,若剪除已经发病的部位(花、枝条、幼果等),后续再侵染的发生概率会大大降低[70]。本实验室在阿克苏苹果上研究发现,病枝修剪的深度与梨火疫病的发生程度有关,若修剪深度小于病原菌扩展深度会加剧梨火疫病传播,而修剪的深度超过病原菌扩展深度则显著降低了梨火疫病的发生率。因此,科学剪除发病组织应该作为一项持续进行的工作,前期剪除工作越及时和彻底,后期病枝剪除所需的劳动力越少且作业效率大幅提升。

此外,还应合理控制种植密度,保持果园良好的透光性;及时排水,避免果园湿度过高;合理施肥,改善土壤环境。研究发现,排水良好、钾含量较高、pH 为 5.5～6.5 的土壤环境中的果树更不容易发生病害[71]。

3.4　生物防治

对于梨火疫病轻度发生区和扩展前沿阻截区,利用有益微生物防治梨火疫病对生态环境友好,可作为化学农药的补充方案,延缓抗性菌株的产生。目前开发的生防菌剂如荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* A506、成团泛菌 *Pantoea agglomerans* C9-1 和 E325、枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* QST713 等被证明可以降低花朵被侵染的概率,但其效果受环境条件影响较大,存在防效不稳定的问题,且防效显著低于链霉素[68]。Kim 等用海藻酸盐微胶囊(alginate microcapsules, AMCs)包被 *P. agglomerans* E325 后使用,发现其防效显著提高[72]。另外,一些生防菌与链霉素混用后不仅防治效果稳定,还能减少链霉素的用量,有助于降低链霉素抗性菌株的选择压力[61,68]。

植物抗性诱导剂在广义上属于新型的生物制剂,本身并无杀菌活性,但它可激发植物的系统获得性抗性(system acquired resistance, SAR)。亚磷酸钾(potassium phosphite)作为一种植物生长调节剂可抑制植株徒长,使枝条粗壮,节间缩短,增强植物抗性,已被用来预防梨火疫病的感染[73]。在植物上喷施苯丙噻重氮(acibenzolar-S-methyl, ASM)也被证明可以减轻病害发生程度,但保护效果显著低

于链霉素[74]。喷施植物抗性诱导剂虽然能诱导作物获得 SAR，但并不能减少果园内梨火疫病菌的初始菌群数量[75]。因此，植物抗性诱导剂仅作为整个梨火疫病综合防控的补充措施。

3.5 培育抗病品种

培育抗病品种是解决梨火疫病最根本的手段，包括筛选抗病植株和培育转基因抗病植株两种方式。在国外，梨火疫病发生历史久，为有效降低该病害造成的经济损失，美国、新西兰、加拿大、波兰、德国和意大利等国家较早地开展了抗病育种计划，对许多古老栽培品种和优选品种进行了抗病性筛选[76]。目前，筛选出的苹果抗性品种有美国的‘Lorina’‘Liberty’‘MacFree’‘Enterprise’‘Prima’和‘Redfree’[49,77-78]；德国的‘Reanda’‘Remo’‘Rene’‘Resi’和‘Rewena’[79-80]；瑞士的‘Ladina’[81]；筛选出的梨抗性品种有德国的‘Alexandre Lucas’和‘Beurré Hardy’[82]；意大利的‘Aida’和‘Bohème’[83]。

除了选育抗病栽培品种，抗病砧木的筛选培育也是十分重要的。美国作为砧木选育开始较早的国家，筛选出较多抗梨火疫病的苹果砧木资源，‘Robusta 5’‘PI286613’‘Sissipuk’和 G 系列砧木[76]。哈萨克斯坦的 Kairova 等筛选出了苹果砧木资源‘62-396’[84]。

我国作为世界梨属和苹果属植物的重要起源中心，种质资源极其丰富。目前已经选育出近 400 个苹果（含砧木）新品种，如‘鲁丽’‘华硕’‘瑞阳’‘瑞雪’‘秦脆’和‘元富红’等[85]。原产于我国的梨属植物有 14 个种，主要有‘秋子梨’‘白梨’‘砂梨’‘新疆梨’‘杜梨’‘褐梨’和‘麻梨’等。其中‘秋子梨’‘白梨’‘砂梨’类的栽培品种最多，分布也最广泛[86]。我国梨火疫病发生时间短，研究起步晚，目前还没有选育出抗病的梨树和苹果品种及砧木。何临梓等研究发现‘秋子梨’对梨火疫病有一定抗病性[87]，但能否成为库尔勒香梨的砧木资源有待深入研究。陈励坤等研究发现，东方梨对梨火疫病的抗性更强，其中新疆梨品种‘棉梨’和‘也历克阿木特’表现出高抗性[88]。新疆野苹果 *Malus sieversii*，又称塞威氏苹果，具有耐寒、耐病、耐旱等优良性状，对火疫病具有一定的抗性[78]，新疆野苹果‘GD-9’对梨火疫病表现为高抗，有望成为抗梨火疫病的苹果砧木资源[89]。我们对阿克苏地区栽培的 9 个苹果品种对梨火疫病的抗性进行了研究，发现‘宫崎短枝富士’抗病性很好，‘王林’‘维纳斯黄金’则表现出高度感病性（未发表数据）。

随着基因组学、分子生物学的快速发展，分子育种在梨火疫病的抗病品种选育中的作用日益凸显[90]。Thapa 等在苹果中定位到 19 个梨火疫病的抗性数量性状位点（quantitative trait locus，QTL），并鉴别出位于抗性 QTL 区间内的抗性候选基因，可用于后续的分子育种研究[91]。目前，无论是筛选抗病植株，还是培育转基因抗病性植株，均存在培育年限较长等问题，Bühlmann-Schütz[92] 在温室条件下建立了一种新的培育方法——“快速通道（fast track）”，可以在不使用转基因技术的情况下，将田间条件下苹果 4～5 年的长世代周期缩短到大约 2 年，显著提高育种效率。

3.6 综合防控

由于梨火疫病传播速度快，发生范围广，危害程度重，单一的防控措施难以达到理想效果，因此，采取综合措施防控梨火疫病显得尤为重要。本课题组基于多年对梨火疫病防控技术的持续研究，提出了一套非常有效的关键防控措施，包括：1）梨火疫病疫区寄主植物花期严格禁止蜜蜂授粉；2）关键时期选对药剂进行化学防控，即初花期和落花期选择 40% 春雷·噻唑锌 SC 1 000 倍液、10%丙硫唑 SC 800 倍液、2%春雷霉素 AS 500 倍液、3%中生菌素可溶液剂（SL）400 倍液等杀菌剂中的一种进行防控；3）果树生长期需半个月进行一次果园巡查，发现病枝及时修剪，剪口须在病健交界处30 cm 以下的健康组织上，剪下的病枝条及时清理出果园，进行无害处理。该技术在新疆推广应用 20 万 hm^2 以上，防控效果良好。

4 展望

梨火疫病最初只在美国纽约州发生，目前全世界已有 60 多个国家和地区发生该病害，其远距离传播和扩散与人类活动密切相关。我国新疆和甘肃地区也已经发生该病害，存在向我国中东部地区传播扩散的风险，因此各省之间应加强检疫措施，防止病害进一步扩散，危害我国的水果产业。

病原菌在寄主组织内的扩展和定殖一直以来是梨火疫病研究的热点。许多研究表明，梨火疫病菌在皮层薄壁组织的细胞间隙和成熟木质部导管中定殖。但关于梨火疫病菌在寄主体内的扩展路径存在着一定的争议，部分研究认为主要扩展路径是木质部导管，而另有研究则认为是薄壁细胞的细胞间隙。

研究结果的不同可能受到接种方式、植物组织的生理条件、培养条件以及不同菌株的影响。但关于病原菌以何种机制、在何种条件下通过薄壁组织进入木质部导管目前尚不清楚。

当前,对该病害的有效防治策略仍是以化学防治为主,但梨火疫病菌对化学药剂(尤其是链霉素)的抗性问题一直困扰着许多国家的农业从业者。本课题组通过多年研究筛选出多种安全有效的梨火疫病防治药剂,有望进一步扩大应用范围,走向世界。抗病品种的筛选和培育是最有效和经济的长期防治手段,但传统选育方式周期较长、效率低。现阶段通过分子育种技术,利用重组技术及定位跟踪技术,可以直接对目标植物的表现型进行改变,极大地缩短了育种周期。生物防治是代替化学防治的一条重要途径,但目前市面上大多数生防菌治疗效果不佳,且使用时间存在一定局限性。因此,在抗病品种筛选和培育以及生物防治方面,仍需继续开展相关研究。

综上,对梨火疫病的防控应引起我们的高度重视,加强全国范围内的病害预测预报和相关技术培训。在发病区要控制病害发生程度,定期监测并适时喷药,力争将梨火疫病的危害损失降到最低;在未发生的地区,应采取严格的检疫措施,防患于未然,阻止和延缓梨火疫病在国内的扩散。

参考文献

[1] VAN DER ZWET T, KEIL H L. Fire blight, a bacterial disease of rosaceous plants [M]. Washington D C, USA: United States Department of Agriculture, 1979: 1 - 200.

[2] VAN DER ZWET T, BEER S V. Fire blight—its nature, prevention, and control: a practical guide to integrated disease management [M]// Agriculture information bulletin. Washington DC, USA: Department of Agriculture, 1999: 5 - 29.

[3] ZHAO Yuqiang, TIAN Yanli, WANG Limin, et al. Fire blight disease, a fast-approaching threat to apple and pear production in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(4): 815 - 820.

[4] 中华人民共和国农业农村部. 全国农业植物检疫性有害生物分布行政区名录(截至 2025 年 6 月 30 日) [EB/OL]. (2025 - 07 - 30). https://zzys.moa.gov.cn/gzdt/202507/t20250730_6476125.htm.

[5] BEECHER H W. The blight in the pear tree, its cause and a remedy for it [J]. Magazine of Horticulture, 1844, 10: 441 - 456.

[6] PIERCE N B. Pear blight in California [J]. Science, 1902, 16(396): 193 - 194.

[7] SWINGLE D B. Pear and apple blight in Montana [M]. Montana Agricultural College, Experiment Station, 1911: 14.

[8] NORELLI J L, JONES A L, ALDWINCKLE H S. Fire blight management in the twenty-first century-Using new technologies that enhance host resistance in apple [J]. Plant Disease, 2003, 87(7): 756 - 765.

[9] ANONYMOUS. Fruit growers association of Ontario [J]. Annual Report, 1890, 22: 75.

[10] RAMIREZ R. Plagas de la agricultura en el distrito federal [J]. La Revista Agricola, 1921, 9: 662 - 663.

[11] LOPEZ C, FUCIKOVSKY L. Distribution of fire blight in Mexico and the identification of the bacteria on pear and pyracantha [J]. Acta Horticulturae, 1990, 273: 33 - 36.

[12] 上田荣次郎. 苹果树腐烂病病原细菌[J]. 大日本农会报, 1903, 260: 1 - 3.

[13] BEER S V, KIM J, ZUMOFF C H, et al. Characterization of bacteria that cause bacterial shoot blight of pear in Japan [J]. Acta Horticulturae, 1996(411): 179 - 181.

[14] TANII A. Presentation made at 12th Shokubutsu Saikin-byo Danwakai [J]. Phytopathological Society of Japan, 1983: 18 - 23.

[15] GOTO M. Fundamentals of bacterial plant pathology [M]. San Diego: Academic Press, 2012: 342.

[16] RHIM S L, VÖLKSCH B, GARDAN L, et al. *Erwinia pyrifoliae*, an *Erwinia* species different from *Erwinia amylovora*, causes a necrotic disease of Asian pear trees [J]. Plant Pathology, 1999, 48(4): 514 - 520.

[17] KIM W S, GARDAN L, RHIM S L, et al. *Erwinia pyrifoliae* sp. nov., a novel pathogen that affects Asian pear trees (*Pyrus pyrifolia* Nakai) [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1999, 49(2): 899 - 905.

[18] MATSUURA T, SHINOHARA H, INOUE Y, et al. *Erwinia* isolates from the bacterial shoot blight of pear in Japan are closely related to *Erwinia pyrifoliae* based on phylogenetic analyses of *gyrB* and *rpoD* genes [J]. Journal of General Plant Pathology, 2007, 73(1): 53 - 58.

[19] MYUNG I, YUN M J, LEE Y H, et al. First report of fire blight caused by *Erwinia amylovora* on Chinese quince in South Korea [J]. Plant Disease, 2016, 100(12): 2521.

[20] COCKAYNE A H. Fire blight and its control: the hawthorn question [J]. New Zealand Journal of Agriculture, 1921, 23: 30 - 36.

[21] 赵友福. 梨火疫病的世界性传播现状及检疫对策[J]. 中国进出境动植检, 1995(4): 38 - 39.

[22] JOCK S, KIM W S, GEIDER K, et al. Isolation and characterization of *Erwinia amylovora* from Australian wood samples [J]. Acta Horticulturae, 1999(489): 61 - 64.

[23] RODONI B, KINSELLA M, GARDNER R, et al. Detection of *Erwinia amylovora*, the causal agent of fire blight, in the Royal Botanic Gardens, Melbourne, Australia [J]. Acta Horticulturae, 1999, 489: 169 - 170.

[24] CROSSE J E, BENNETT M, GARRETT C. Fire-blight of pear in England [J]. Nature, 1958, 182(4648): 1530.

[25] VANNESTE J L. Fire blight: the disease and its causative agent, *Erwinia amylovora* [M]// BONN W G, VAN DER ZWET T. Distribution and economic importance of fire blight. CABI Wallingford UK, 2000: 37-53, 73-83.

[26] SCHROTH M N, THOMSON S V, HILDEBRAND D C, et al. Epidemiology and control of fire blight [J]. Annual Review of Phytopathology, 1974, 12(1): 389-412.

[27] BAICU T, SEVERIN V, BRANISTE N, et al. First occurrence of fire blight in Romania [J]. EPPO Bulletin, 1994, 24(1): 129-134.

[28] EL-HELALY A F, ABO-EL-DAHAB M K, EL-GOORANI M A. The occurrence of the fire blight disease of pear in Egypt [J]. Phytopathologia Mediterranea, 1964, 3: 156-163.

[29] DRENOVA N V, ISINI M M, DZHAIMURZINA A A, et al. Bacterial fire blight in the Republic of Kazakhstan [J]. Plant Health Research and Practice, 2012, 1(3): 44-48.

[30] DOOLOTKELDIEVA T, BOBUSHOVA S, CARNAL S, et al. Genetic characterization of *Erwinia amylovora* isolates detected in the wild walnut-fruit forest of South Kyrgyzstan [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(S1): 109-120.

[31] SUN Weibo, GONG Peijie, ZHAO Yancun, et al. Current situation of fire blight in China [J]. Phytopathology, 2023, 113(12): 2143-2151.

[32] 刘凤权，明亮，赵延存，等. 中国梨火疫病发生与防控进展[J]. 落叶果树，2023，55(6)：1-7.

[33] VAN DER ZWET T. Present worldwide distribution of fire blight and closely related diseases [J]. Acta Horticulturae, 2006(704): 35-36.

[34] MANIRAJAN B A, RATERING S, RUSCH V, et al. Bacterial microbiota associated with flower pollen is influenced by pollination type, and shows a high degree of diversity and species-specificity [J]. Environmental Microbiology, 2016, 18(12): 5161-5174.

[35] SPINELLI F, CIAMPOLINI F, CRESTI M, et al. Influence of stigmatic morphology on flower colonization by *Erwinia amylovora* and *Pantoea agglomerans* [J]. European Journal of Plant Pathology, 2005, 113(4): 395-405.

[36] CUI Zhouqi, HUNTLEY R B, ZENG Quan, et al. Temporal and spatial dynamics in the apple flower microbiome in the presence of the phytopathogen *Erwinia amylovora* [J]. The ISME Journal, 2021, 15(1): 318-329.

[37] ZENG Quan, PUŁAWSKA J, SCHACHTERLE J. Early events in fire blight infection and pathogenesis of *Erwinia amylovora* [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(S1): 13-24.

[38] CHOI H J, KIM Y J, PARK D H. Extended longevity of *Erwinia amylovora* vectored by honeybees under *in vitro* conditions and its capacity for dissemination [J]. Plant Pathology, 2022, 71(3): 762-771.

[39] HILDEBRAND M, DICKLER E, GEIDER K. Occurrence of *Erwinia amylovora* on insects in a fire blight orchard [J]. Journal of Phytopathology, 2000, 148(4): 251-256.

[40] CIVOLANI S, MIRANDOLA D, BENETTI L, et al. Effects of acibenzolar-S-methyl on the probing behaviour and mortality of *Cacopsylla pyri* on pear plants [J/OL]. Insects, 2022, 13(6): 525. DOI: 10.3390/insects13060525.

[41] BOUCHER M T. The ecology of insect mediated transmission of the fire blight pathogen, *Erwinia amylovora*, by orchard dwelling dipterans [D]. New York: Cornell University, 2020.

[42] LANTHIER M. Summer outbreaks of fire blight in tree nurseries in South Alberta, Canada [J]. Acta Horticulturae, 2010(896): 293-300.

[43] EDEN-GREEN S J. Studies in fire blight disease of apples, pear and hawthorn (*Erwinia amylovora* (Burrill) Winslow et al.) [D]. London: University of London, 1972.

[44] SCHOUTEN H J. A possible role in pathogenesis for the swelling of extracellular slime of *Erwinia amylovora* at increasing water potential [J]. Netherlands Journal of Plant Pathology, 1989, 95(S1): 169-174.

[45] ZAMSKI E, SHTIENBERG D, BLACHINSKY D. The role of ooze exudation in the migration of *Erwinia amylovora* cells in pear trees infected by fire blight [J]. Israel Journal of Plant Sciences, 2006, 54(4): 301-307.

[46] BOGS J, GEIDER K. Migration and gene regulation of *Erwinia amylovora* in host plants assayed with the green fluorescent protein [J]. Acta Horticulturae, 1998(489): 365-370.

[47] KHARADI R R, SUNDIN G W. Dissecting the process of xylem colonization through biofilm formation in *Erwinia amylovora* [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(S1): 41-49.

[48] SUHAYDA C G, GOODMAN R N. Early proliferation and migration and subsequent xylem occlusion by *Erwinia amylovora* and the fate of its extracellular polysaccharide (EPS) in apple shoots [J]. Phytopathology, 1981, 71(7): 697-707.

[49] KOSTICK S A, NORELLI J L, EVANS K M. Novel metrics to classify fire blight resistance of 94 apple cultivars [J]. Plant Pathology, 2019, 68(5): 985-996.

[50] SLACK S M, WALTERS K J, OUTWATER C A, et al. Effect of kasugamycin, oxytetracycline, and streptomycin on in-orchard population dynamics of *Erwinia amylovora* on apple flower stigmas [J]. Plant Disease, 2021, 105(6): 1843-1850.

[51] ACHARYA S, SHARMA D K, JOSHI H C, et al. Effects of some heavy metals on *in vitro* pollen germination and pollen tube growth of *Jatropha curcas* [J]. Range Management and Agroforestry, 2011, 32(1): 52-55.

[52] LU Fei, HU Pingping, LIN Meilan, et al. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure responses of citrus leaves to copper toxicity induced by bordeaux mixture in greenhouse [J/OL]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(17): 9835. DOI: 10.3390/ijms23179835.

[53] JURGENS A G, BABADOOST M. Sensitivity of *Erwinia amylovora* in Illinois apple orchards to streptomycin, oxytetracycline, kasugamycin, and copper [J]. Plant Disease, 2013, 97(11): 1484-1490.

[54] LEE M H, HAM H, CHOI H W, et al. Isolation of streptomycin-resistant *Erwinia pyrifoliae* in Korea [J]. Plant Disease, 2023, 107(3): 616 - 619.

[55] 冯浩, 李富东, 刘笑, 等. 我国主要果树病害化学防治现状与建议[J]. 现代农药, 2023, 22(6): 7 - 12.

[56] LEE M S, LEE I, KIM S K, et al. *In vitro* screening of antibacterial agents for suppression of fire blight disease in Korea [J]. Research in Plant Disease, 2018, 24(1): 41 - 51.

[57] 刘朋飞, 覃伟铭, 张义智, 等. 22 个杀菌剂制剂对梨火疫病的田间防效试验[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(9): 2152 - 2159.

[58] HAM H, OH G, PARK D S, et al. Survey of oxolinic acid-resistant *Erwinia amylovora* in Korean apple and pear orchards, and the fitness impact of constructed mutants [J]. The Plant Pathology Journal, 2022, 38(5): 482 - 489.

[59] 刘朋飞, 王岩, 王泓力, 等. 6 种杀菌剂对梨火疫病菌的室内毒力测定和混配试验[J]. 植物保护, 2022, 48(6): 98 - 104.

[60] KUNZ S. Entwicklung von strategien zur feuerbrandbekämpfung in ökologischen obstbau [D]. Konstanz: University of Konstanz, 2009.

[61] KUNZ S, DONAT C. Field results for the efficacy of fire blight control agents in the last fifteen years in Germany [J]. Acta Horticulturae, 2014(1056): 101 - 106.

[62] BANTLEON G, SCHEER C, HARTUNG K, et al. Extensive efficacy tests of non-antibiotic fire blight control agents [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(1): 155 - 165.

[63] GUSBERTI M, KLEMM U, MEIER M S, et al. Fire blight control: the struggle goes on. A comparison of different fire blight control methods in Switzerland with respect to biosafety, efficacy and durability [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(9): 11422 - 11447.

[64] BRETH D I, REDDY M B, NORELLI J, et al. Successful fire blight control is in the details [J]. New York Fruit Quarterly, 2000, 8: 6 - 12.

[65] ADASKAVEG J E, FÖRSTER H, WADE M L. Effectiveness of kasugamycin against *Erwinia amylovora* and its potential use for managing fire blight of pear [J]. Plant Disease, 2011, 95(4): 448 - 454.

[66] BRISSET M, LUISETTI J, GAIGNARD J. Firestop: a chemical against bacterial diseases of fruit trees recently available in Europe [J]. Agronomie, 1991, 11(2): 93 - 99.

[67] DAFNY-YELIN M, MOY J C, MAIRESSE O, et al. Efficacy of fire blight management in pome fruit in northern Israel: copper agents and their effect on yield parameters [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(S1): 151 - 161.

[68] SUNDIN G W, WERNER N A, YODER K S, et al. Field evaluation of biological control of fire blight in the eastern United States [J]. Plant Disease, 2009, 93(4): 386 - 394.

[69] TSIANTOS J, PSALLIDAS P. The effect of inoculum concentration and time of application of various bactericides on the control of fire blight (*Erwinia amylovora*) under artificial inoculation [J]. Phytopathologia Mediterranea, 2002, 41(3): 246 - 251.

[70] DUPONT S T, MUNIR M, COX K, et al. Evaluation of pruning therapies in apple trees with fire blight [J]. Journal of Plant Pathology, 2023, 105(4): 1695 - 1709.

[71] SANTANDER R D, KHODADADI F, MEREDITH C L, et al. Fire blight resistance, irrigation and conducive wet weather improve *Erwinia amylovora* winter survival in cankers [J/OL]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1009364. DOI: 10.3389/fmicb.2022.1009364.

[72] KIM I, LEW B, ZHAO Youfu, et al. Biocontrol of fire blight via microcapsule-mediated delivery of the bacterial antagonist *Pantoea agglomerans* E325 to apple blossoms [J]. Biocontrol, 2022, 67(4): 433 - 442.

[73] ACIMOVIC S G, ZENG Quan, MCGHEE G C, et al. Control of fire blight (*Erwinia amylovora*) on apple trees with trunk-injected plant resistance inducers and antibiotics and assessment of induction of pathogenesis-related protein genes [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 16. DOI: 10.3389/fpls.2015.00016.

[74] MAROLLEAU B, GAUCHER M, HEINTZ C, et al. When a plant resistance inducer leaves the lab for the field: Integrating ASM into routine apple protection practices [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1938. DOI: 10.3389/fpls.2017.01938.

[75] MCGRATH M J, KOCZAN J M, KENNELLY M M, et al. Evidence that prohexadione-calcium induces structural resistance to fire blight infection [J]. Phytopathology, 2009, 99(5): 591 - 596.

[76] PEIL A, BUS V G, GEIDER K, et al. Improvement of fire blight resistance in apple and pear [J]. International Journal of Plant Breeding, 2009, 3(1): 1 - 27.

[77] MOHAN S K, FALLAHI E, BIJMAN V P. Evaluation of apple varieties for susceptibility to *Erwinia amylovora* by artificial inoculation under field conditions [J]. Acta Horticulturae, 2002(590): 373 - 375.

[78] HARSHMAN J M, EVANS K M, ALLEN H, et al. Fire blight resistance in wild accessions of *Malus sieversii* [J]. Plant Disease, 2017, 101(10): 1738 - 1745.

[79] RICHTER K, FISCHER C. Stability of fire blight resistance in apple [J]. Acta Horticulturae, 2002(590): 381 - 384.

[80] FISCHER C, RICHTER K. Fire blight resistant apple cultivars produced by conventional breeding [J]. Acta Horticulturae, 2004(663): 721 - 724.

[81] REININGER V, SCHÖNEBERG A, HOLLIGER E. Fire blight plant protection efficacy trial with resistant apple cultivar 'Ladina' [J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(S1): 143 - 149.

[82] EMERIEWEN O F, WÖEHNER T, FLACHOWSKY H, et al. *Malus* hosts-*Erwinia amylovora* interactions: strain pathogenicity and resistance mechanisms [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 551. DOI: 10.3389/fpls.2019.00551.

(下转 16 页)

识差、科学用药水平低，违规使用禁限用农药、超量超范围用药、忽视安全间隔期采摘上市等造成的。因此，建议政府部门应加强科学用药指导服务，通过发放技术挂图、明白纸，组织开展线上线下培训、田间课堂教学等形式，向生产者宣传普及科学安全用药、农药安全间隔期、芹菜病虫害绿色防控技术等相关知识，指导生产者在正确识别病虫害的基础上，正确选用在芹菜上登记的农药产品，并严格按照农药使用说明书用药，做到对症下药、适期用药、适量用药、交替轮换用药，提高农药使用效率。在选择用药品种时可优先选用安全间隔期相对较短，农药残留限量值较高的芹菜用已登记农药，尤其是临近上市期间要严格控制用药，降低农药残留超标风险。建立健全农药登记后监管机制，严查农药非法添加其他隐性成分等制售假劣农药行为，指导生产者选择正规渠道购买农药，避免使用假冒伪劣农药产品。加强农药市场监管，全面严查违法销售、使用禁限用农药问题。坚持检打联动，对监督抽查发现的不合格产品，要依法严厉查处，涉嫌犯罪的及时移交公安机关，公布典型案例，震慑违法违规行为，提高生产者质量安全意识。

参考文献

[1] 王娟娟，张曦，蒋靖怡. 关于豇豆、芹菜和韭菜质量安全的思考[J]. 中国蔬菜，2022(6)：7－10.

[2] 卓富彦，李萍，吴青君. 我国芹菜主要病虫害发生特点及全程绿色防控集成技术[J]. 中国蔬菜，2023(5)：117－119.

[3] 中华人民共和国国家卫生健康委员会，农业农村部国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量：GB 2763－2021 [S]. 北京：中国农业出版社，2021.

[4] 中华人民共和国国家卫生健康委员会，农业农村部国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中 2,4-滴丁酸钠盐等 112 种农药最大残留限量：GB 2763.1-2022 [S]. 北京：中国农业出版社，2023.

[5] 郝玉敏. 芹菜农药残留风险评估[J]. 食品安全质量检测学报，2021，12(13)：5215－5221.

[6] 李莉，于新海，张兴龙，等. 芹菜农药登记现状及其山东地区农药残留水平分析[J]. 农药科学与管理，2025，46(1)：21－25.

[7] 沈斯文，童金蓉，高猛峰，等. 上海市地产芹菜中农药残留慢性膳食暴露风险评估[J]. 农产品质量与安全，2024(1)：15－21.

[8] 中华人民共和国农业农村部. 绿色食品 农药使用准则：NY/T 393-2020 [S]. 北京：中国农业出版社，2020.

[9] 扈顺，高婧，王勇，等. 西芹根腐病病原菌的分离与鉴定[J]. 北方农业学报，2019，47(5)：65－69.

[10] 张敏，罗宁，陈爱昌，等. 甘肃省定西市芹菜根腐病发生及病原优势种类分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学版)，2022，37(6)：940－948.

[11] 王丹，刘存辉，石朝鹏，等. 轮作万寿菊对芹菜根结线虫病的防控效果[J]. 中国植保导刊，2020，40(12)：46－48.

[12] 王国荣，冯晓晓，吴慧明，等. 芹菜茎基腐病病原菌鉴定、消长动态调查与防治药剂筛选[J]. 浙江农业学报，2021，33(4)：661－669.

[13] 汤晗，吴园园，成亚菲，等. 浙江省芹菜中农药多残留水平及累积急性膳食摄入风险初评[J]. 农药学学报，2021，23(5)：947－955.

[14] 马新耀，郭俊锋，宋程飞，等. 我国小宗作物枸杞农药登记现状及建议[J]. 植物保护，2025，51(1)：37－40.

[15] 聂继云，匡立学，沈友明. 我国果品农药最大残留限量标准沿革与现状[J]. 中国果树，2019(3)：107－109.

[16] 王坦，陈珊珊，董茂锋，等. 中欧蔬菜农药登记和限量标准差异及技术壁垒措施解析—以西兰花为例[J]. 植物保护，2018，44(6)：78－84.

(责任编辑：杨明丽)

(上接 9 页)

[83] BERGAMASCHI M, RIVALTA L, SIRRI S, et al. Reactivity to fire blight of new promising pear selections [J]. Acta Horticulturae, 2006(704): 571－576.

[84] KAIROVA G, POZHARSKIY A, DAULET N, et al. Evaluation of fire blight resistance of eleven apple rootstocks grown in Kazakhstani fields [J/OL]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11530. DOI: 10.3390/app132011530.

[85] 中国苹果产业协会，中国农业大学农业规划设计院. 2021 年度中国苹果产业发展报告(总篇)精简版[J]. 中国果菜，2023，43(1)：1－8.

[86] 安萌萌，王敬民，朱伯峰，等. 山东省主要梨种质资源现状[J]. 农业科技通讯，2018(10)：174－176.

[87] 何临梓，张校立，叶春秀，等. 4 种梨砧木对梨火疫病的抗病性评价[J]. 西北农业学报，2023，32(3)：458－467.

[88] 陈励坤，徐叶挺，王永鹏，等. 新疆梨种质资源的火疫病抗性评价[J]. 中国果树，2022(8)：16－22.

[89] 李晓妹，韩丽丽，何亚南，等. 20 个苹果品种(类型)对梨火疫病菌的抗病性评价[J]. 植物检疫，2022，36(4)：6－12.

[90] KOSTICK S A, TEH S L, NORELLI J L, et al. Fire blight QTL analysis in a multi-family apple population identifies a reduced-susceptibility allele in 'Honeycrisp' [J/OL]. Horticultural Research, 2021, 8(1): 28. DOI: 10.1038/s41438-021-00466-6.

[91] THAPA R, SINGH J, GUTIERREZ B, et al. Genome-wide association mapping identifies novel loci underlying fire blight resistance in apple [J/OL]. Plant Genome, 2021, 14(2): e20087. DOI: 10.1002/tpg2.20087.

[92] BÜHLMANN-SCHÜTZ S, TSCHOPP D, LUSSI L, et al. Pyramiding fire blight resistances *Fb_E* and *FB_MR5* in *Malus* ×*domestica* using a "fast track" breeding approach [J]. Acta Horticulturae, 2021(1307): 21－26.

(责任编辑：杨明丽)