

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2026.01.002

益生菌防控柑橘溃疡病的研究进展

麻子君¹, 肖庆驹², 金鑫¹, 吴雅倩¹,
文诚志¹, 厉闾¹

1. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715;

2. 赣南科学院 赣州市柑桔科学研究所, 江西 赣州 341003

摘要: 柑橘溃疡病是由柑橘黄单胞菌柑橘亚种(*Xanthomonas citri* subsp. *citri*)引起的重要检疫性细菌病害, 严重制约全球柑橘产业的发展。当前防控措施仍以化学防治为主, 但长期使用易引发环境污染、食品安全和抗药性等问题。相比之下, 微生物防治因其绿色、安全和可持续等优势受到广泛关注。益生菌可通过产生抑菌活性物质、营养竞争及诱导植物系统抗性等多种机制抑制病原菌, 在柑橘溃疡病防控中展现出良好应用潜力。通过系统分析气候条件、品种抗性、生育期特征及柑橘微生物群落变化等影响柑橘溃疡病发生的关键因素, 重点综述芽孢杆菌、假单胞菌、真菌及噬菌体等生防微生物通过拮抗作用、干扰群体感应和破坏生物膜等多机制协同防控溃疡病的研究进展, 并总结其田间应用效果。研究表明, 部分生防微生物及其代谢产物在田间条件下防效已接近或优于传统铜制剂, 但其防效稳定性、作用机制解析深度及产业化应用仍存在一定限制, 未来需加强基于微生态调控和多策略集成的绿色防控研究。

关键词: 柑橘溃疡病; 黄单胞菌; 生防微生物;

益生菌; 作用机制

中图分类号: S432.4

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2097-1354(2026)01-0017-13

Research Progress on Probiotics for the Control of Citrus Canker Disease

MA Zijun¹, XIAO Qingju², JIN Xin¹,
WU Yaqian¹, WEN Chengzhi¹, LI Tian¹

收稿日期: 2025-03-07

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFD1400200)。

作者简介: 麻子君, 硕士研究生, 主要从事柑橘溃疡病的生物防治研究。

通信作者: 厉闾, 博士, 副教授。

1. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Ganzhou Citrus Science Research Institute, Gannan Academy of Sciences, Ganzhou Jiangxi 341003, China

Abstract: Citrus canker, caused by *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, is an important quarantine bacterial disease that severely limits the development of the global citrus industry. Current control relies mainly on chemical agents, which can cause environmental pollution, food safety issues, and pathogen resistance with long-term use. In contrast, microbial control, being green, safe, and sustainable, displays attracted attention widely. Probiotics can inhibit pathogens through producing antimicrobial compounds, nutrient competition, and inducing plant systemic resistance, showing promising potential in citrus canker management. This review systematically analyzes the key factors affecting citrus canker occurrence, including climate conditions, varietal resistance, growth stages, and citrus microbiome dynamics. We also focus on the research progress of biocontrol microorganisms, such as *Bacillus*, *Pseudomonas*, fungi, and bacteriophages, which suppress disease through antagonism, quorum sensing interference, and biofilm disruption. Field studies show that some biocontrol microbes and their metabolites achieve efficacy comparable to or even exceeding traditional copper-based agents. However, there are still certain limitations in terms of control effect stability, depth of action mechanism analysis, and industrial application. In the future, research on green prevention and control based on microecological regulation and multi-strategy integration needs to be strengthened.

Key words: Citrus canker disease; microecology; biocontrol microorganism; probiotics; mechanism of action

我国是世界重要的柑橘种植地区之一,拥有丰富的柑橘种质资源。柑橘溃疡病是由柑橘黄单胞菌柑橘亚种(*Xanthomonas citri* pv. *citri*, Xcc)引起的一种细菌性检疫病害,在中国、美国、澳大利亚和巴基斯坦等柑橘主产区均有报道,并造成严重的经济损失^[1-5]。目前,柑橘溃疡病的主要防控措施包括检验检疫、选育和推广抗病品种、加强田间管理以及施用含铜化学药剂,其中含铜制剂被认为是防治柑橘溃疡病最为有效的化学手段^[6-8]。然而,化学药剂的长期使用不仅存在环境污染和安全隐患,也不符合当前农业绿色防控的发展方向。近年来,生物防治被认为是替代化学防治的最具潜力的方法之一,越来越多的益生菌被研究并应用于植物病害防控^[9]。用于防治柑橘溃疡病的有益微生物来源广泛,包括柑橘自身、土壤及其他植物等,其作用机制多样(如拮抗作用、营养竞争以及诱导植物防御反应等^[7, 10])。深入解析益生菌的作用机制,有助于优化生物防治策略,并为阐明生防微生物、病原菌与寄主植物之间的互作关系提供理论支持,从而改进其应用方式和施用效果,维护柑橘产业的健康与可持续发展。本文围绕影响柑橘溃疡病发生的因素、生防微生物的种类及其作用机制,以及柑橘溃疡病生物防治面临的问题与挑战进行综述,旨在总结该领域的研究进展与发展趋势,为后续深入研究提供参考。

1 柑橘溃疡病发生的影响因素

植物病害的发生是一个复杂的过程,涉及病原体、寄主植物、环境条件及人类活动等多种因素的相互作用。柑橘溃疡病的发生与流行不仅直接影响果实产量和品质,还对柑橘产业造成巨大经济损失。其发生与流行程度主要取决于病原菌的种群密度、柑橘品种的抗病性、气候环境条件以及生态系统状态等因素。

1.1 环境因子

柑橘溃疡病菌(*Xanthomonas citri* pv. *citri*)是柑橘溃疡病发生的必要条件,病原菌主要通

过雨水飞溅和风力进行短距离传播, 而人为活动则是其远距离传播和区域扩散的重要因素^[11]。柑橘溃疡病的病残体是病原菌的重要来源。研究表明, 柑橘溃疡病菌的最适生长温度为 20~30 °C, 在 5~40 °C 均可存活和生长^[12]。Hameed 等^[13]的研究发现, 温度 27~37 °C、相对湿度 55%、降雨量 4.7~7.1 mm 以及风速 8 km/h 等条件有利于柑橘溃疡病的发生。此外, 柑橘叶部害虫取食造成的伤口可显著促进病原菌侵染, 加剧病害发生。7~9 月有效控制柑橘潜叶蛾的发生, 可显著降低柑橘溃疡病的危害程度^[7, 14-19]。

1.2 柑橘品种及生育期

不同柑橘品种对柑橘溃疡病的抗性存在显著差异。香橙、金橘等品种抗性相对较强, 而脐橙、柠檬和血橙等品种则较为易感^[1, 20-21]。研究表明, 幼龄柑橘树由于抽梢频繁、叶片组织幼嫩, 更易受到柑橘黄单胞菌的侵染^[1, 6, 22]; 人工接种试验也表明, 柑橘溃疡病可贯穿果实整个发育周期, 其中幼果期对病原菌最为敏感^[23]。

1.3 柑橘微生物的变化

植物微生物组的稳定性对维持植物健康具有重要意义。植物微生物群落在激活植物免疫系统、抑制病原菌侵染、促进养分吸收以及提高植物生长和产量等方面发挥着关键作用^[24-26]。稳定的微生物群落具有较强的抗干扰能力, 有助于植物抵御病害侵染^[27-28]。研究表明, 通过微生物网络分析可筛选出在植物生长、抗病和耐逆过程中发挥关键作用的核心微生物^[29]。目前的研究发现, 柑橘根际微生物群落中假单胞菌属(*Pseudomonas*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)和伯克霍尔德菌属(*Burkholderia*)等是重要的核心成员, 在不同条件下可抑制柑橘病害的发生^[25, 30]。Huang 等^[31]在研究柑橘溃疡病叶际微生物群落时发现, 内生微生物中肠杆菌属(*Enterobacter*)、假单胞菌属和泛菌属(*Pantoea*)与病原菌之间的竞争作用显著增强。在叶表微生物群落中, 寡养单胞菌属(*Stenotrophomonas*)、假单胞菌属和鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)的丰度与黄单胞菌属(*Xanthomonas*)呈正相关, 可能在病害发生中发挥协同或伴生作用, 而不动杆菌属(*Acinetobacter*)则与黄单胞菌属呈负相关^[32]。此外, 多项研究表明, 不同来源的生防微生物在防治柑橘溃疡病方面具有良好潜力, 例如, 来自柑橘叶片的铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa* LV)和解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens* QC-Y), 以及来自土壤的假单胞菌(*Pseudomonas* sp. SJ01)和链霉菌(*Streptomyces* sp. A16)等^[33-35]。

上述因素既是柑橘溃疡病发生的重要驱动因素, 也是制定防控策略时必须重点考虑的因素, 直接影响防治效果。植物病害防控的本质在于通过改变病害发生条件, 打破病原菌、寄主植物和环境之间的“病害三角”关系, 从而实现有效防控。因此, 柑橘溃疡病发生因素同样会制约生防微生物的防治效果。

2 柑橘溃疡病生防微生物的种类

在减少化学药剂使用、推动绿色防控的背景下, 开发和应用高效、安全的生物防治策略已成为植物病害管理的重要发展方向。以细菌和真菌为代表的新型微生物制剂, 在植物病害的可持续治理中发挥着越来越重要的作用^[36-37]。目前的大量研究表明, 细菌、真菌及噬菌体等多种微生物均可对柑橘溃疡病产生显著的防控效果。已有报道的柑橘溃疡病生防微生物种类及其相关信息汇总见表 1。

表1 柑橘溃疡病生防微生物汇总表

种类	菌属	名称	作用机制	来源	引用文献		
生防细菌	芽孢杆菌	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> LE109	—	柑橘	[38]		
		<i>Bacillus subtilis</i> LE24	—	柑橘			
		<i>Bacillus tequilensis</i> PO80	—	柑橘			
		<i>Bacillus pumilus</i> TLB7-7	—	土壤			
		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> QC-Y	—	叶片	[33]		
		<i>Bacillus thuringiensis</i> TbL-22	破坏 Xcc 生物膜	其他植物	[39]		
		<i>Bacillus thuringiensis</i> TbL-26	—	其他植物			
		<i>Bacillus velezensis</i> SWUA08	产生抑菌活性物质	叶片	[40]		
		<i>Bacillus subtilis</i> CQBS03	分泌抑菌蛋白	叶片	[41]		
		<i>Bacillus subtilis</i> GN222	—	柑橘	[42-43]		
		<i>Bacillus subtilis</i> GN233	—	柑橘			
		<i>Bacillus subtilis</i> J1	—	土壤	[44]		
		<i>Bacillus subtilis</i> KC	—	土壤			
		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> T1	—	土壤			
		<i>Bacillus pumilus</i> T2	—	土壤			
		<i>Bacillus subtilis</i> Bv10	—	叶片	[45]		
		<i>Bacillus subtilis</i> 101	产生抑菌活性物质	—	[46]		
		<i>Bacillus subtilis</i> 54-6	—	—			
		<i>Bacillus subtilis</i> Q34	—	叶片	[47]		
		<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> F9	抑制 Xcc 产生胞外酶, 破坏细胞壁; 产生脂肽类抗菌物质	—	[48]		
		<i>Bacillus velezensis</i> Bv-21	—	叶片	[49-50]		
		<i>Bacillus velezensis</i> EB-39	诱导 Xcc 细胞膜溶解	叶片			
		<i>Bacillus</i> sp. SJ13	破坏群体感应信号传导	叶片	[51]		
		<i>Bacillus wiedmannii</i> EB-35	—	叶片	[49]		
		<i>Bacillus toyonensis</i> EB-44	—	叶片			
		假单胞菌	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	破坏 Xcc 生物膜	叶片	[52]
				<i>Pseudomonas protegens</i> CS1	产生活性氧(ROS), 抑制 Xcc 生长	叶片	[53]
				<i>Pseudomonas</i> sp. LN	—	叶片	[54]
				<i>Pseudomonas aeruginosa</i> LV	破坏 Xcc 细胞结构	柑橘	[34]
				<i>Pseudomonas aeruginosa</i> SWUC02	产生抑菌活性物质	叶片	[40]
<i>Pseudomonas entomophila</i> JS2	分泌抗生素 diketopiperazine 抑制 Xcc 生长			土壤	[55]		
<i>Pseudomonas</i> sp. CLH2	—			土壤	[56]		
<i>Pseudomonas geniculata</i> 95	诱导激活植物的免疫系统			土壤	[57]		
<i>Pseudomonas fluorescent</i> KSA1	—			叶片	[58]		
<i>Pseudomonas fuorescent</i> 19	—			—	[59]		
<i>Pseudomonas putida</i> 1	—			—			
<i>Pseudomonas</i> sp. SJ01	破坏群体感应信号传导			叶片	[51]		
<i>Pseudomonas</i> sp. SJ02	破坏群体感应信号传导			叶片			
<i>Streptomyces</i> sp. 22-4	—			土壤	[60]		
链霉菌属	<i>Actinomycetales bacterium</i> CYZ2-6			<i>Actinomycetales bacterium</i> CYZ2-6	破坏 Xcc 细胞结构, 破坏细胞膜	—	[61]
		<i>Streptomyces rochei</i> GAS1-9	—	—			
		<i>Streptomyces griseochromogenes</i> YCD1-7-1	—	—			
		<i>Streptomyces</i> sp. MKLFXJ-I	—	土壤	[62]		
		<i>Streptomyces</i> sp. A16	—	土壤	[35]		
		<i>Streptomyces</i> sp. CLT3	—	土壤	[56]		
		<i>Streptomyces</i> sp. GLL-9	产生放线菌素 X2	叶片	[63]		
		<i>Streptomyces</i> sp. Caat 1-54	产生抑菌活性物质	—	[64]		
		<i>Cronobacter</i> sp. DGH1	产生抗菌活性多肽	土壤	[65]		
		其他细菌	<i>Enterobacter</i> sp. DGH3	<i>Enterobacter</i> sp. DGH3	产生抗菌活性多肽	叶片	
<i>Kosakonia cowanii</i> GN223	—			柑橘	[42]		
<i>Gluconobacter</i> sp. Kx15	—			叶片	[66]		
<i>Lactobacillus</i> sp. Kx48	—			叶片			
<i>Acinetobacter baumannii</i> Bt8	—			土壤	[67]		

续表

种类	菌属	名称	作用机制	来源	引用文献
生防真菌		<i>Burkholderia</i> sp. CLT3	—	土壤	[56]
		<i>Burkholderia cepacia</i> Bc51	—	叶片	[68]
		<i>Sphingomonas folli</i> sp. nov	—	叶片	[69]
		<i>Burkholderia territorii</i> A63	诱导激活植物的免疫系统	土壤	[70]
		<i>Burkholderia metallica</i> A53	诱导激活植物的免疫系统	土壤	
		<i>Staphylococcus pasteurii</i> B1	产生抑菌活性物质	叶片	[71]
		<i>Staphylococcus warneri</i> C8	产生抑菌活性物质	叶片	
		<i>Acinetobacter lactucae</i> QL-1	破坏群体感应信号传导	土壤	[72]
		<i>Pseudogymnoascus</i>	—	其他(南极洲海洋沉积物)	[73]
		<i>Penicillium</i> sp. CRM 1540	产生抑菌活性物质青霉素酸	—	[74]
		<i>arbuscular mycorrhizal fungi</i>	—	—	[75]
	噬菌体		<i>Aspergillus terreus</i> SCSIO 41202	破坏 Xcc 生物膜的形成和诱导活性氧的积累	—
		<i>Pseudogymnoascus</i> sp. LAMAI 2784	产生活性物质双脱氯大地丁, 抑制 Xcc 活性。	其他(南极土壤)	[76]
		Xanthomonas virus (phage) XacN1	宿主特异性, 裂解宿主菌	—	[77]
		<i>Filamentous phage</i> XacF1	改变宿主细菌的生理变化, 导致 Xcc 致病力下降	土壤	[78]
		<i>Bacteriophages</i> Cp1	裂解 Xcc	土壤	[79]
		<i>Bacteriophages</i> Cp2	裂解 Xcc	土壤	
	<i>Xanthomonas virus</i> Xac-P9	裂解杀灭宿主细菌	其他	[80]	

2.1 生防细菌

研究表明, 芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)和链霉菌属(*Streptomyces*)等多种细菌类群中的特定菌株, 对植物真菌性和细菌性病原具有显著抑制活性^[81]。其中, 芽孢杆菌属、假单胞菌属和链霉菌属是目前研究较多、在柑橘溃疡病防治中应用潜力最大的生防微生物菌属^[10]。

2.1.1 芽孢杆菌

芽孢杆菌分布广泛, 生理特性稳定, 能够形成耐逆性的内生孢子以适应不良环境条件, 是柑橘溃疡病生物防治中最具应用潜力的菌属之一。Rabbee 等^[49-50]从不同柑橘品种的内生微生物中筛选获得 21 株芽孢杆菌, 其中 *Bacillus velezensis* EB-39 对病原菌表现出最强的拮抗活性, 其田间应用可使柑橘溃疡病发病率降低 38%。此外, 来源于其他植物的枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis* LE24)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens* LE109)和苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis* TbL-22)等, 其发酵液中均含有抑菌活性物质。其中, 苏云金芽孢杆菌 TbL-22 处理后可使叶片发病率降低 64.05%^[38-39]。此外, 多项研究表明, *Bacillus subtilis* CQBS03、GN222 和 J1 等菌株对柑橘溃疡病均具有显著的防治效果^[41-42, 44, 46]。

2.1.2 假单胞菌

假单胞菌属在植物体内和土壤环境中普遍存在, 具有生长繁殖快、代谢类型丰富、可产生多种生物活性物质等特点, 在植物病害生物防治中具有重要作用。Michavila 等^[53]从柠檬叶片中分离筛选得到的 *Pseudomonas protegens* CS1, 不仅能够显著抑制病原菌生长, 还可在叶片表面和组织内稳定定殖。Villamizar 等^[55]研究发现, *Pseudomonas entomophila* JS2 对柑橘溃疡病菌具有显著拮抗活性。Yang 等^[82]报道, 来源于水稻土壤的 *Pseudomonas mosselii* 923 对柑橘黄单胞菌表现出明显的抑制作用, 显示出良好的应用前景。

2.1.3 其他生防细菌

除芽孢杆菌属和假单胞菌属外,伯克霍尔德菌属(*Burkholderia*)和链霉菌属(*Streptomyces*)等细菌也被证实可有效防治柑橘溃疡病。Riera等^[57]和谭小艳等^[68]研究发现,来源于柑橘叶片的*Burkholderia territorii* A63、*Burkholderia metallica* A53和*Burkholderia cepacia*在平板对峙试验中均能显著抑制病原菌生长。链霉菌能够产生多种具有生物活性的次生代谢产物,在体外条件下可有效抑制多种植物病原菌,并在多种作物病害防控中表现出良好效果。董玉兰等^[56]研究表明,链霉菌CLT3对柑橘溃疡病菌的抑制率较高,其田间防效可达83.85%。此外,从土壤中分离得到的*Streptomyces* sp. A16、*Streptomyces* sp. GLL-9、*Actinomycetales bacterium* CYZ2-6和*Streptomyces griseochromogenes* YCD1-7-1等菌株,对柑橘溃疡病菌亦表现出良好的拮抗活性^[35, 61, 63]。

2.2 生防真菌

真菌在自然生态系统中分布广泛,种类丰富,但用于柑橘溃疡病防治的研究相对较少。生防真菌主要通过产生具有抑菌活性的次生代谢物来抑制病原菌生长。颜桢灵等^[83]对来源于健康柑橘植株的72株内生真菌发酵产物进行筛选,发现其中29株真菌的乙酸乙酯提取物对病原菌具有显著抑制作用。Lin等^[84]研究表明,脐橙内生真菌*Diaporthe* sp. HT-79的粗发酵产物对柑橘溃疡病菌具有明显的抑制效果。Nugroho等^[71]发现,来源于南极土壤和海洋沉积物的真菌,如*Paraconiothyrium*、*Cadophora*、*Toxicocladosporium*、*Penicillium*和*Pseudogymnoascus*等,对柑橘溃疡病菌亦表现出较强抑制能力。尽管生防真菌资源丰富,但目前可实际应用于柑橘溃疡病防治的种类仍然有限,其潜力尚有待进一步挖掘。

2.3 生防噬菌体

噬菌体是一类能够特异性感染并裂解细菌的病毒,具有体积小、宿主特异性强等特点。生防噬菌体可通过裂解病原菌或降低其致病力来实现病害防控。Ali等^[78]研究发现,来源于土壤的丝状噬菌体XacF1可通过与柑橘黄单胞菌基因组发生重组,改变宿主菌的生理特性,从而显著降低其致病力。研究还表明,噬菌体*Bacteriophages* Cp1和*Bacteriophages* Cp2可识别病原菌不同的表面受体并对其进行裂解,进而降低柑橘溃疡病的发生程度^[79]。从污水中分离得到的噬菌体Xac-P9具有较好的稳定性,在处理30 min后对宿主菌的裂解率可达90%,处理150 min后可实现完全杀灭,显示出良好的应用潜力^[80]。尽管现有噬菌体对柑橘黄单胞菌具有较好的抑制效果,但其在柑橘溃疡病防控中的实际应用仍较少,相关资源和技术体系仍有待进一步完善。

3 柑橘溃疡病生防微生物的作用机制

柑橘溃疡病生防微生物的作用机制主要可归纳为以下3类:通过产生抑菌活性物质直接抑制或杀灭病原菌;诱导植物系统抗性,提高寄主整体抗病能力;干扰病原菌群体感应系统或影响其基因组结构,从而削弱致病力。

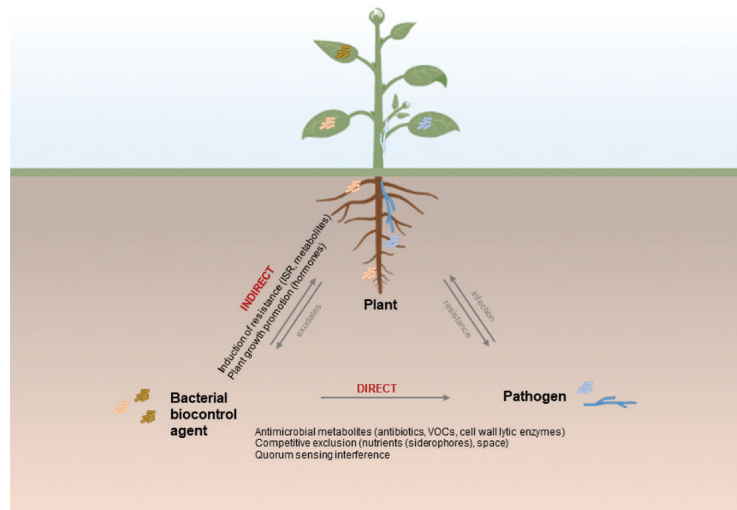


图 1 生防微生物防治柑橘溃疡病的主要作用机理^[81]

3.1 生防微生物产生抑菌活性物质

生防微生物可通过分泌多种抗菌化合物直接作用于病原菌, 抑制其生长或破坏其细胞结构。Rabbee 等^[49]利用扫描电镜观察发现, *Bacillus velezensis* EB-39 的乙酸乙酯提取物处理后, 病原菌细胞膜出现明显破损或溶解, 病原菌数量显著减少。Wang 等^[48]研究表明, *Bacillus amyloliquefaciens* F9 分泌的脂肽类物质(如 Fengycin、Surfactin 和 Iturin)能够抑制病原菌胞外酶的产生, 并诱导细胞壁裂解, 从而减轻病害发生。研究还发现, *Pseudomonas mosselii* 923 通过产生 pseudoiodinine 有效抑制病原菌生长。*Pseudomonas aeruginosa* LV 产生的次生代谢物同样表现出较强的抗菌活性^[34]。此外, Michavila 等^[53]报道, *Pseudomonas protegens* CS1 发酵产物中含有绿脓杆菌螯铁蛋白对映体, 可诱导活性氧积累并造成氧化胁迫, 从而抑制病原菌生长。Vieira 等^[73]发现, *Penicillium* sp. CRM 1540 产生的青霉素在 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 条件下对病原菌的体外抑制率可达 90%。深海真菌 *Aspergillus terreus* SCSIO 41202 产生的代谢物对 Xcc 亦具有显著拮抗作用^[75]。

3.2 生防微生物诱导激活植物免疫

生防微生物可通过诱导植物免疫反应, 提高寄主对病原菌的防御能力。赖家豪等^[42]研究发现, *Bacillus* sp. GN222、*Kosakonia cowanii* GN223 和 *Bacillus subtilis* GN232 可显著提高脐橙防御相关酶活性, 从而增强其对柑橘溃疡病的抗性。Riera 等^[57]发现, 在病原菌侵染的叶片中 *Pseudomonas geniculata* 95 诱导激活了水杨酸信号途径标记基因水杨酸羧甲基转移酶 I 和 SAM-SACM 的表达, 激活植物免疫系统并显著缓解病害症状。Xie 等^[74]研究表明, 接种丛枝菌根真菌可通过促进防御信号分子积累和病原防御基因表达, 提高柑橘对 Xcc 侵染的抗性。

3.3 其他作用

部分生防菌还可通过干扰病原菌的群体感应系统, 或通过竞争营养和生态位降低病原菌的定殖能力。Caicedo 等^[85]发现, *Bacillus* sp. SJ13、*Pseudomonas* sp. SJ02 和 *Pseudomonas* sp. SJ01 均可有效减轻柑橘溃疡病症状。其中, *Pseudomonas* sp. SJ02 可通过降解病原菌扩散性信号分子, 阻断其群体感应过程, 抑制生物膜形成。Ye 等^[72]报道的新型信号分子降解菌 *Acinetobacter lactuca* QL-1, 可通过群体淬灭效应显著降低病原菌致病力。研究结果表明, 破坏柑

橘黄单胞菌的群体感应并抑制其生物膜形成是有效防治柑橘溃疡病的重要策略。Ali 等^[78]研究发现,来自土壤的丝状噬菌体 XacF1 通过将其自身基因组与柑橘黄单胞菌基因组重组,显著降低了柑橘黄单胞菌的生理活性和毒力,导致其丧失致病性。

4 讨论与展望

目前,柑橘溃疡病的防控仍是以铜制剂为主的化学防治措施为主。本文系统综述了影响柑橘溃疡病发生的主要因素,总结了生防微生物防治柑橘溃疡病的研究进展及其作用机制。柑橘溃疡病的有效防控需要将预测预报、检验检疫、田间管理和病害防治等措施进行综合应用。加强田间管理、有效控制柑橘潜叶蛾发生,可显著降低溃疡病暴发风险。已有研究表明,在夏末秋梢期,柑橘潜叶蛾取食造成的大量伤口是诱发溃疡病流行的重要因素^[53-60]。同时,多项研究显示,部分生防微生物的防效可优于传统化学药剂。例如,*Diaporthe* sp. HT-79 产生的亚油酸在 7.8 mg/L 条件下可破坏病原菌细胞结构^[84];噬菌体 Xac-P9 在与病原菌共培养 150 min 后可实现完全裂解^[80]; *Streptomyces* sp. GLL-9 产生的放线菌素 X2 在田间防效上优于铜制剂^[63]。尽管如此,生防微生物在实际推广应用中仍面临诸多挑战。

4.1 柑橘溃疡病微生物防治存在的问题

尽管关于柑橘溃疡病生防微生物的研究不断增加,但目前市场上可供应的微生物制剂种类仍然有限,尚难以成为主流防控手段。其主要原因包括:生防微生物资源尚未充分挖掘;部分生防菌作用机制尚不完全明确,限制了其定向优化和高效利用;微生物制剂防效易受环境条件影响,田间效果稳定性不足;以及微生物制剂在规模化生产、储存和运输过程中仍存在技术瓶颈。这些问题在一定程度上制约了生防微生物在柑橘溃疡病防控中的推广应用。

4.2 柑橘溃疡病微生物防治的未来发展趋势

柑橘溃疡病的微生物防治是一个涉及多因素、多层级的复杂过程。未来研究应重点关注以下几个方向:深入解析柑橘黄单胞菌侵染、定殖及致病的分子机制,为生物防治提供更多潜在靶点;创新生防微生物资源挖掘策略,通过多生态位采样,结合 16S 测序和基因组学技术,高效筛选具有应用潜力的益生菌资源;系统阐明生防菌的作用机制和环境适应性,重点关注其在田间条件下的定殖能力和防效稳定性;根据不同果园生态条件,探索生防微生物的最佳施用方式、剂量和时期,将其科学融入现有果园管理体系中,以提升整体防控效果。

总体而言,有益微生物在柑橘溃疡病防控中具有广阔应用前景。未来,其应用模式有望从单一抑制病原菌向调控植株整体健康和微生态平衡转变,通过优化柑橘微生物群落结构、增强植株长势,从而实现柑橘溃疡病的长期、稳定和绿色防控,为柑橘产业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] ALI S, HAMEED A, MUHAE-UD-DIN G, et al. Citrus Canker: A Persistent Threat to the Worldwide Citrus Industry—An Analysis[J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): 1112.
- [2] RICHARD D, TRIBOT N, BOYER C, et al. First Report of Copper-Resistant *Xanthomonas citri* pv. *citri* Pathotype a Causing Asiatic Citrus Canker in Réunion, France[J]. *Plant Disease*, 2017, 101(3): 503.
- [3] BANSAL K, MIDHA S, KUMAR S, et al. Ecological and Evolutionary Insights into *Xanthomonas citri* Pathovar Diversity[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2017, 83(9): e02993-16.

- [4] DAS A K. Citrus Canker—a Review[J]. Journal of Applied Horticulture, 2003, 5(1): 52-60.
- [5] 姚廷山, 周彦, 周常勇. 柑橘溃疡病菌分化及防治研究进展[J]. 园艺学报, 2015, 42(9): 1699-1706.
- [6] GOTTWALD T R, GRAHAM J H, SCHUBERT T S. Citrus Canker: The Pathogen and Its Impact[J]. Plant Health Progress, 2002, 3(1): 15.
- [7] SHAHBAZ E, ALI M, SHAFIQ M, et al. Citrus Canker Pathogen, Its Mechanism of Infection, Eradication, and Impacts[J]. Plants, 2023, 12(1): 123.
- [8] GOTTWALD T R, HUGHES G, GRAHAM J H, et al. The Citrus Canker Epidemic in Florida: The Scientific Basis of Regulatory Eradication Policy for an Invasive Species[J]. Phytopathology, 2001, 91(1): 30-34.
- [9] PALMIERI D, IANIRI G, DEL GROSSO C, et al. Advances and Perspectives in the Use of Biocontrol Agents Against Fungal Plant Diseases[J]. Horticulturae, 2022, 8(7): 577.
- [10] 段娇, 刘阳, 冯广达, 等. 柑橘溃疡病及其微生物防治研究进展[J]. 微生物学报, 2023, 63(5): 1944-1958.
- [11] BOCK C H, GRAHAM J H, GOTTWALD T R, et al. Wind Speed Effects on the Quantity of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* Dispersed Downwind from Canopies of Grapefruit Trees Infected with Citrus Canker[J]. Plant Disease, 2010, 94(6): 725-736.
- [12] GRAHAM J H, GOTTWALD T R, CUBERO J, et al. *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*: Factors Affecting Successful Eradication of Citrus Canker[J]. Molecular Plant Pathology, 2004, 5(1): 1-15.
- [13] HAMEED A, RAJPUT N A, BINYAMIN R, et al. Epidemiological Markers for Citrus Canker Caused by *Xanthomonas citri* pv. *citri*[J]. International Journal of Phytopathology, 2023, 12(3): 295-302.
- [14] BELASQUE J J, PARRA-PEDRAZZOLI A L, RODRIGUES NETO J, et al. Adult Citrus Leafminers (Phyllocnistis Citrella) Are Not Efficient Vectors for *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*[J]. Plant Disease, 2005, 89(6): 590-594.
- [15] JESUS W C J, BELASQUE J J, AMORIM L, et al. Injuries Caused by Citrus Leafminer (Phyllocnistis Citrella) Exacerbate Citrus Canker (*Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*) Infection[J]. Fitopatologia Brasileira, 2006, 31(3): 277-283.
- [16] CHRISTIANO R S C, DALLA PRIA M, JESUS W C J, et al. Effect of Citrus Leaf-Miner Damage, Mechanical Damage and Inoculum Concentration on Severity of Symptoms of Asiatic Citrus Canker in Tahiti Lime[J]. Crop Protection, 2007, 26(2): 59-65.
- [17] STELINSKI L L, LAPOINTE S L, MEYER W L. Season-Long Mating Disruption of Citrus Leafminer, *Phyllocnistis citrella* Stainton, with an Emulsified Wax Formulation of Pheromone[J]. Journal of Applied Entomology, 2010, 134(6): 512-520.
- [18] NAQVI S A H, WANG Jie, MALIK M T, et al. Citrus Canker—Distribution, Taxonomy, Epidemiology, Disease Cycle, Pathogen Biology, Detection, and Management: A Critical Review and Future Research Agenda[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1075.
- [19] MARTINI X, DIEPENBROCK L M. 2023—2024 Florida Citrus Production Guide: Plant Bugs, Chewing Insect Pests, Caribbean Fruit Fly, and Thrips: CPG ch. 26, CG005/ENY-605, rev. 5/2023[EB/OL]. [2026-01-08]. <https://journals.flvc.org/edis/article/view/133505>.
- [20] FU H Y, ZHAO M M, XU J, et al. Citron C-05 Inhibits both the Penetration and Colonization of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* to Achieve Resistance to Citrus Canker Disease[J]. Horticulture Research, 2020, 7: 58.
- [21] 李小孟. 柑橘及其近缘属植物的分子进化与栽培柑橘的起源研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [22] MIRZAEI-NAJAFGHOLI H, AEINI M, TARIGHI S, et al. Comparing Bacterial Properties in Relation to the Virulence Factors of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* Strains and Evaluating Resistance of Subtribe Citrinae Cultivars to the Most Virulent Strain[J]. Journal of Plant Pathology, 2021, 103(2): 449-460.
- [23] LIU L, LIU X, LIU L Y, et al. Clarification of the Infection Pattern of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* on Cit-

- rus Fruit by Artificial Inoculation[J]. *Plant Methods*, 2024, 20(1): 65.
- [24] CASTRILLO G, TURCK F, LEVEUGLE M, et al. Speeding Cis-Trans Regulation Discovery by Phylogenomic Analyses Coupled with Screenings of an Arrayed Library of Arabidopsis Transcription Factors[J]. *PLoS One*, 2011, 6(6): e21524.
- [25] ZHANG Y Z, XU J, WANG E T, et al. Mechanisms Underlying the Rhizosphere-to-Rhizoplane Enrichment of *Cellvibrio* Unveiled by Genome-Centric Metagenomics and Metatranscriptomics[J]. *Microorganisms*, 2020, 8(4): 583.
- [26] COMPANT S, CASSAN F, KOSTIĆ T, et al. Harnessing the Plant Microbiome for Sustainable Crop Production[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2025, 23(1): 9-23.
- [27] CHAUDHRY V, BAINDARA P, PAL V K, et al. *Methylobacterium indicum* sp. Nov., a Facultative Methylotrophic Bacterium Isolated from Rice Seed[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2016, 39(1): 25-32.
- [28] MORELLA N M, KOSKELLA B. The Value of a Comparative Approach to Understand the Complex Interplay between Microbiota and Host Immunity[J]. *Frontiers in Immunology*, 2017, 8: 1114.
- [29] 程可心, 杜尧, 李凯航, 等. 玉米与叶际微生物组的互作遗传机制[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(2): 215-228.
- [30] XU J, ZHANG Y Z, ZHANG P F, et al. The Structure and Function of the Global Citrus Rhizosphere Microbiome[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4894.
- [31] HUANG F, LING J f, ZHU C Y, et al. Canker Disease Intensifies Cross-Kingdom Microbial Interactions in the Endophytic Microbiota of Citrus Phyllosphere[J]. *Phytobiomes Journal*, 2023, 365-374.
- [32] 高爽. 柑橘叶表细菌种群结构与溃疡病的关联研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [33] QIAN J L, ZHANG T, TANG S, et al. Biocontrol of Citrus Canker with Endophyte *Bacillus amyloliquefaciens* QC-Y[J]. *Plant Protection Science*, 2020, 57(1): 1-13.
- [34] DE OLIVEIRA A G, SPAGO F R, SIMIONATO A S, et al. Bioactive Organocopper Compound from *Pseudomonas aeruginosa* Inhibits the Growth of *Xanthomonas citri* subsp. *citri*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 113.
- [35] 姚廷山, 周常勇, 胡军华, 等. 柑橘溃疡病土壤拮抗放线菌的分离及菌株 A16 初步鉴定[J]. *果树学报*, 2014, 31(4): 684-688.
- [36] LEGEIN M, SMETS W, VANDENHEUVEL D, et al. Modes of Action of Microbial Biocontrol in the Phyllosphere[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1619.
- [37] KALIA V C, PATEL S K S, KANG Y C, et al. Quorum Sensing Inhibitors as Antipathogens: Biotechnological Applications[J]. *Biotechnology Advances*, 2019, 37(1): 68-90.
- [38] DAUNGFU O, YOUPENSUK S, LUMYONG S. Endophytic Bacteria Isolated from Citrus Plants for Biological Control of Citrus Canker in Lime Plants[J]. *Tropical Life Sciences Research*, 2019, 30(1): 73-88.
- [39] ISLAM M N, ALI M S, CHOI S J, et al. Biocontrol of Citrus Canker Disease Caused by *Xanthomonas citri* subsp. *citri* Using an Endophytic *Bacillus thuringiensis*[J]. *The Plant Pathology Journal*, 2019, 35(5): 486-497.
- [40] SUDYOUNG N, TOKUYAMA S, KRAJANGSANG S, et al. Bacterial Antagonists and Their Cell-Free Cultures Efficiently Suppress Canker Disease in Citrus Lime[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2020, 127(2): 173-181.
- [41] 陈力, 王中康, 黄冠军, 等. 柑橘溃疡病生防菌株 CQBS03 的鉴定及其培养特性研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2537-2545.
- [42] 赖家豪, 宋水林, 刘冰. 三株柑橘溃疡病生防内生细菌对脐橙感染溃疡病后几种防御酶活性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(11): 1994-2000.
- [43] LAI J H, KUANG W G, LIU B, et al. Identification of Endophytic Bacterial Strain GN223 and Its Effectiveness

- Against Citrus Canker Disease in Navel Orange under Field Conditions[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2022, 32(1): 14-29.
- [44] 吴明琼. 柑橘溃疡病菌拮抗细菌筛选和药剂防治试验[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [45] 谭小艳, 黄思良, 晏卫红, 等. 柑橘溃疡病菌的拮抗细菌 Bv10 的研究[J]. *广西农业生物科学*, 2006, 25(3): 229-234.
- [46] 岑铭松, 顾渊, 马海杰, 等. 壳聚糖和 2 株芽孢杆菌对柑橘溃疡病菌的杀菌效果评价[J]. *植物检疫*, 2017, 31(5): 15-20.
- [47] 易龙, 董国菊, 马冠华. 拮抗柑橘溃疡病内生细菌的筛选及鉴定[C]//中国植物病理学会. 中国植物病理学会 2012 年学术年会论文集. 赣南师范学院江西省脐橙工程技术研究中心; 西南大学植物保护学院, 2012: 380.
- [48] WANG X, LIANG L Q, SHAO H, et al. Isolation of the Novel Strain *Bacillus amyloliquefaciens* F9 and Identification of Lipopeptide Extract Components Responsible for Activity Against *Xanthomonas citri* subsp. *citri* [J]. *Plants*, 2022, 11(3): 457.
- [49] RABBEE M F, ISLAM N, BAEK K H. Biocontrol of Citrus Bacterial Canker Caused by *Xanthomonas citri* subsp. *citri* by *Bacillus velezensis* [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022, 29(4): 2363-2371.
- [50] RABBEE M F, ALI M S, BAEK K H. Endophyte *Bacillus velezensis* Isolated from *citrus* spp. Controls Streptomycin-Resistant *Xanthomonas citri* subsp. *citri* that Causes Citrus Bacterial Canker [J]. *Agronomy*, 2019, 9(8): 470.
- [51] CAICEDO J C, VILLAMIZAR S, FERRO M I T, et al. Bacteria from the Citrus Phylloplane Can Disrupt Cell-Cell Signalling in *Xanthomonas citri* and Reduce Citrus Canker Disease Severity [J]. *Plant Pathology*, 2016, 65(5): 782-791.
- [52] SPAGO F R, ISHII MAURO C S, OLIVEIRA A G, et al. *Pseudomonas aeruginosa* Produces Secondary Metabolites that Have Biological Activity Against Plant Pathogenic *Xanthomonas* Species [J]. *Crop Protection*, 2014, 62: 46-54.
- [53] MICHAVILA G, ADLER C, DE GREGORIO P R, et al. *Pseudomonas protegens* CS1 from the Lemon Phyllosphere as a Candidate for Citrus Canker Biocontrol Agent [J]. *Plant Biology*, 2017, 19(4): 608-617.
- [54] MURATE L S, OLIVEIRA A G D, HIGASHI A Y, et al. Activity of Secondary Bacterial Metabolites in the Control of Citrus Canker [J]. *Agricultural Sciences*, 2015, 6(3): 295-303.
- [55] VILLAMIZAR S, FERRO J A, CAICEDO J C, et al. Bactericidal Effect of Entomopathogenic Bacterium *Pseudomonas entomophila* Against *Xanthomonas citri* Reduces Citrus Canker Disease Severity [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1431.
- [56] 董玉兰, 唐前君, 易图永, 等. 柑橘溃疡病土壤拮抗菌的筛选、鉴定及防效测定 [J]. *湖南农业科学*, 2012(9): 77-80.
- [57] RIERA N, WANG H, LI Y, et al. Induced Systemic Resistance Against Citrus Canker Disease by Rhizobacteria [J]. *Phytopathology*, 2018, 108(9): 1038-1045.
- [58] AL-SALEH M. Evaluation of Saudi Fluorescent *Pseudomonads* Isolates as a Biocontrol Agent Against Citrus Canker Disease Caused by *Xanthomonas citri* subsp. *citri* A [J]. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, G Microbiology*, 2014, 6(2): 1-7.
- [59] KHODAKARAM G, HEYDARI A, BALESTRA G M. Evaluation of *Pseudomonads* Bacterial Isolates in Biological Control of Citrus Bacterial Canker Disease [J]. *International Journal of Agricultural Research*, 2008, 3(4): 268-272.
- [60] WATTANA-AMORN P, CHAROENWONGSA W, WILLIAMS C, et al. Antibacterial Activity of Cyclo(L-Pro-L-Tyr) and Cyclo(D-Pro-L-Tyr) from *Streptomyces* Sp. Strain 22-4 Against Phytopathogenic Bacteria [J]. *Natural Product Research*, 2016, 30(17): 1980-1983.

- [61] 马冠华, 杨镜祯, 易龙, 等. 柑橘溃疡病拮抗放线菌筛选及其抑菌机理研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10547-10549, 10589.
- [62] 高嫚妮, 潘志成, 高波, 等. 银杏林土壤放线菌分离鉴定及对植物病原菌的拮抗作用研究[J]. 农业与技术, 2019, 39(24): 6-10.
- [63] GAO L L, KUMARAVEL K, XIONG Q, et al. Actinomycins Produced by Endophyte *Streptomyces* Sp. GLL-9 from Navel Orange Plant Exhibit High Antimicrobial Effect Against *Xanthomonas citri* susp. *citri* and *Penicillium Italicum*[J]. Pest Management Science, 2023, 79(11): 4679-4693.
- [64] RODRIGUES J P, PETI A P F, FIGUEIRÓ F S, et al. Bioguided Isolation, Characterization and Media Optimization for Production of Lysolipins by Actinomycete as Antimicrobial Compound Against *Xanthomonas citri* subsp. *citri*[J]. Molecular Biology Reports, 2018, 45(6): 2455-2467.
- [65] GHOLAMI D, GOODARZI T, AMINZADEH S, et al. Bacterial Secretome Analysis in Hunt for Novel Bacteriocins with Ability to Control *Xanthomonas citri* subsp. *citri* [J]. Iranian Journal of Biotechnology, 2015, 13(3):10-19.
- [66] 张洪波, 巢进, 王跃强, 等. 柑橘溃疡病拮抗菌的分离筛选及其田间防效[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2007(5): 605-607.
- [67] 谭小艳, 黄思良, 任建国, 等. 柑桔溃疡病生防细菌 Bt8 的研究[J]. 微生物学报, 2006, 46(2): 292-296.
- [68] 谭小艳, 黄思良, 任建国, 等. 柑桔溃疡病内生拮抗细菌 Bc51 的研究[J]. 植物病理学报, 2007, 37(1): 9-17.
- [69] FENG G D, LI J L, PAN M K, et al. *Sphingomonas folii* sp. Nov., *Sphingomonas citri* sp. Nov. and *Sphingomonas citricola* sp. Nov., Isolated from Citrus Phyllosphere[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2022, 72(8): 331-339.
- [70] RIERA N, HANDIQUE U, ZHANG Y Z, et al. Characterization of Antimicrobial-Producing Beneficial Bacteria Isolated from Huanglongbing Escape Citrus Trees[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 2415.
- [71] NUGROHO Y A, SUHARJONO S, WIDYANINGSIH S. Biological Control of Citrus Canker Pathogen *Xanthomonas citri* subsp. *citri* Using Rangpur Lime Endophytic Bacteria[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2022, 32(1): 63.
- [72] YE T, ZHOU T, FAN X H, et al. *Acinetobacter lactucae* Strain QL-1, a Novel Quorum Quenching Candidate Against Bacterial Pathogen *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2867.
- [73] VIEIRA G, KHALIL Z G, CAPON R J, et al. Isolation and Agricultural Potential of Penicillic Acid Against Citrus Canker[J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(4): 3081-3088.
- [74] XIE M M, ZHANG Y C, LIU L P, et al. Mycorrhiza Regulates Signal Substance Levels and Pathogen Defense Gene Expression to Resist Citrus Canker[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2019, 47(4): 1161-1167.
- [75] ZHANG J, GAO L L, LIN H T, et al. Discovery of Antibacterial Compounds Against *Xanthomonas citri* subsp. *citri* from a Marine Fungus *Aspergillus terreus* SCSIO 41202 and the Mode of Action[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(22): 12596-12606.
- [76] FERRAREZI J H, MARIN V R, VIEIRA G, et al. Bisdechlorogeodin from Antarctic *Pseudogymnoascus* sp. LAMAI 2784 for Citrus Canker Control[J]. Journal of Applied Microbiology, 2024, 135(4): 1xae093.
- [77] YOSHIKAWA G, ASKORA A, BLANC-MATHIEU R, et al. *Xanthomonas citri* Jumbo Phage XacN1 Exhibits a Wide Host Range and High Complement of tRNA Genes[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 4486.
- [78] ALI AHMAD A, ASKORA A, KAWASAKI T, et al. The Filamentous Phage XacF1 Causes Loss of Virulence in *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*, the Causative Agent of Citrus Canker Disease[J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: 321.

- [79] ALI AHMAD A, OGAWA M, KAWASAKI T, et al. Characterization of *Bacteriophages* Cp1 and Cp2, the Strain-Typing Agents for *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(1): 77-85.
- [80] 肖道, 丁良, 丛郁, 等. 柑橘溃疡病菌噬菌体的分离鉴定[J]. *园艺学报*, 2021, 48(12): 2349-2359.
- [81] BONATERRA A, BADOSA E, DARANAS N, et al. Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases [J]. *Microorganisms*, 2022, 10(9): 1759.
- [82] YANG R H, SHI Q, HUANG T T, et al. The Natural Pyrazolotriazine Pseudiodinine from *Pseudomonas mosselii* 923 Inhibits Plant Bacterial and Fungal Pathogens[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 734.
- [83] 颜桢灵, 陈洁萍, 农小霞, 等. 柑橘内生真菌的分离鉴定及其发酵产物对柑橘溃疡病菌的抑制活性[J]. *广西植物*, 2021, 41(7): 1196-1208.
- [84] LIN H T, LIANG Y, KALIAPERUMAL K, et al. Linoleic Acid from the Endophytic Fungus *Diaporthe* sp. HT-79 Inhibits the Growth of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* by Destructing the Cell Membrane and Producing Reactive Oxygen Species (ROS)[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2023, 192: 105423.
- [85] CAICEDO J C, VILLAMIZAR S, FERRO M I T, et al. Bacteria from the Citrus Phylloplane Can Disrupt Cell-Cell Signalling in *Xanthomonas citri* and Reduce Citrus Canker Disease Severity[J]. *Plant Pathology*, 2016, 65(5): 782-791.

责任编辑 苏荣艳