

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202601022

杜春梅, 赵悦, 唐千里, 等, 2026. 微生物防治猕猴桃细菌性溃疡病的研究进展 [J]. 广西植物, 46(4): 651–670.  
DU C M, ZHAO Y, TANG Q L, et al., 2026. Research advances on microbial control of kiwifruit bacterial canker [J].  
Guihaia, 46(4): 651–670.



## 微生物防治猕猴桃细菌性溃疡病的研究进展

杜春梅<sup>1,2</sup>, 赵悦<sup>1</sup>, 唐千里<sup>1</sup>, 柳静雯<sup>1</sup>, 王嘉良<sup>1</sup>, 刘德江<sup>1,2\*</sup>

( 1. 佳木斯大学 生物与农业学院, 黑龙江 佳木斯 154000; 2. 中-乌农林技术开发  
与应用国际合作联合实验室, 黑龙江 佳木斯 154000 )

**摘要:** 由丁香假单胞菌猕猴桃致病变种引发的猕猴桃细菌性溃疡病是一种毁灭性病害。相较于化学防治手段,利用微生物进行病害防治具有环境相容性高、可持续性強和不易使病原菌产生抗药性等显著优势。通过文献梳理,该文系统概述了猕猴桃细菌性溃疡病的病害特点、致病菌与传播途径、微生物生防菌的主要类群、核心生防机制,以及微生物在该病生物防治中的实际应用情况,旨在为猕猴桃细菌性溃疡病的可持续生物防控提供理论支撑与实践指导。结果表明:(1)生防微生物种类丰富。对猕猴桃细菌性溃疡病具有防控效果的微生物主要包括细菌、放线菌、真菌和噬菌体四大类。其中,细菌中的芽孢杆菌属与假单胞菌属以及放线菌中的链霉菌属应用最为广泛,防效显著。(2)生防机制有直接作用和间接作用两条路径。直接作用包括分泌抗菌肽、抗生素等抑菌物质以溶解病原菌细胞壁,通过营养竞争、空间占位以阻断病原菌的侵染位点,以及借助寄生作用直接破坏病原菌的菌体结构;间接作用核心在于诱导寄主植物产生系统抗性,从而增强其对猕猴桃细菌性溃疡病的抵御能力。多数高效生防菌株兼具这两种作用机制,其防效优于单一作用机制的菌株。(3)同一研究中,复合微生物菌剂的防治效果与稳定性通常优于单一微生物。不同菌株间协同作用,不仅能拓宽抗菌谱,还能提升菌株在植株体表的定殖率与抗逆性。综上,该文明确指出了当前猕猴桃细菌性溃疡病生物防控领域存在的核心问题,并提出了具有针对性的建议。

**关键词:** 猕猴桃, 细菌性溃疡病, 微生物, 生物防控, 进展

**中图分类号:** Q945.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2026)04-0651-20

## Research advances on microbial control of kiwifruit bacterial canker

DU Chunmei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yue<sup>1</sup>, TANG Qianli<sup>1</sup>, LIU Jingwen<sup>1</sup>,  
WANG Jialiang<sup>1</sup>, LIU Dejiang<sup>1,2\*</sup>

( 1. College of Biology and Agriculture, Jiamusi University, Jiamusi 154000, Heilongjiang, China; 2. China-Ukraine Agriculture &  
Forestry Technology Development and Application International Cooperation Joint Lab, Jiamusi 154000, Heilongjiang, China )

收稿日期: 2026-03-06 接受日期: 2026-04-12

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2024C062)。

第一作者: 杜春梅(1978—), 博士, 讲师, 主要从事微生物资源开发与应用研究, (E-mail) duchunmei@jmsu.edu.cn。

\*通信作者: 刘德江, 硕士, 正高级实验师, 研究方向为寒地稀有植物种质资源发掘与利用, (E-mail) liudejiang2004@163.com。

**Abstract:** Kiwifruit bacterial canker (KBC), caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, is a devastating disease. Compared with chemical control methods, microbial-based disease control offers significant advantages, including exceptional environmental compatibility, robust sustainability, and a reduced likelihood of developing pathogen resistance. Through literature review, this article systematically summarizes the disease characteristics, pathogenic bacterium, and transmission routes, as well as the main microorganism species used in biological control, core biocontrol mechanisms, and practical applications of microorganisms in the biocontrol of KBC. The aim of this study is to provide theoretical support and practical guidance for the sustainable biocontrol of KBC. The results are as follows: (1) Biocontrol microorganisms are highly diverse. The microorganisms with control effects on KBC mainly included four categories: bacteria, actinomycetes, fungi, and bacteriophages. Among these, *Bacillus* and *Pseudomonas* (bacteria) and *Streptomyces* (actinomycetes) are the most widely used and exhibit significant efficacy. (2) The biocontrol mechanisms involve both direct and indirect pathways. Direct mechanisms include the secretion of antimicrobial peptides, antibiotics and other antimicrobial substances to dissolve pathogenic bacterial cell walls, blocking infection sites through nutritional competition and spatial occupation, as well as direct disruption of pathogen structure via parasitism; indirect mechanisms primarily involve the induction of systemic resistance in host plants to enhance resistance to KBC. Most highly effective biocontrol strains employ both mechanisms, demonstrating superior efficacy compared with strains relying on a single mechanism. (3) In the same study, the control efficacy and stability of composite microbial agents are generally superior to those of single microorganisms. The synergistic effects among different strains not only broaden the antimicrobial spectrum but also enhance the colonization rate and stress tolerance of the strains on plant surfaces. In summary, this article clearly identifies the core issues in the current field of KBC biocontrol and puts forward targeted recommendations.

**Key words:** kiwifruit, bacterial canker, microorganisms, biocontrol, advances

猕猴桃 (*Actinidia* Lindl.) 富含多种维生素和矿物质, 被誉为“水果之王” (Han et al., 2023)。其因营养丰富且兼具保健功能与药用价值, 深受消费者喜爱 (Deng et al., 2023)。中国是世界上主要的猕猴桃生产国与销售国, 其种植面积与产量均居世界首位。根据中国园艺学会猕猴桃分会统计, 截至 2024 年 8 月, 中国猕猴桃种植总面积达 29.2 万  $\text{hm}^2$ , 其中结果面积约 19.9 万  $\text{hm}^2$ , 占总种植面积的 68%; 从全国产量来看, 2023 年累计产量为 382.6 万 t (李大卫等, 2024)。自 2013 年以来, 随着国家一系列惠农政策的相继实施, 我国猕猴桃产业逐步迈向规模化、标准化发展阶段, 并实现了快速成长。目前, 中国贫困地区的猕猴桃栽培面积占全国总栽培面积的 46.4%, 猕猴桃种植业已成为助力国家精准扶贫、推进乡村振兴与促进生态文明建设的重要产业之一 (李大卫等, 2024)。然而, 由丁香假单胞菌猕猴桃致病变种 (*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, Psa) 引起的猕猴桃细菌性溃疡病 (kiwifruit bacterial canker, KBC) 是一种在全球各猕猴桃种植区均有发生的毁灭性病害 (Vanneste, 2012)。该病具有爆发性

强、传播速度快、难以预防和控制等特点, 对猕猴桃产量和品质有重大影响 (Zhao et al., 2023)。

目前, 生产上对 KBC 的防治以预防为主, 包括使用春雷霉素、四霉素和中生菌素等农用抗生素 (Wang et al., 2021; 李晨等, 2024)。但是, 这些药剂的长期使用不仅会导致抗药性菌株的出现和抗生素的残留等问题, 而且也不利于猕猴桃产业的绿色健康发展 (Massart et al., 2015)。利用天然存在的微生物及其代谢产物防治植物病害, 不仅具有环境相容性高、可持续性强、不易使病原菌产生抗药性等优点, 部分微生物及其代谢产物还兼具促进植物生长和改善土壤生态环境的功能, 近年来逐渐成为病害防治领域的研究热点 (El-Saadony et al., 2022)。

综合现有研究进展来看, 利用微生物防治 KBC 的研究整体处于实验室或温室验证向田间应用的过渡阶段, 部分有益微生物已在田间推广应用并取得了一定成效 (Santos et al., 2024)。然而, 研究与应用具有明显的地域性特征, 虽在实验室中展现出优异的防治效果, 但田间应用稳定性欠佳, 因此尚未实现大规模产业化替代化学防治。

基于此,本文围绕 KBC 生防微生物的资源类型、作用机制及防控效果开展了系统性研究,针对当前领域存在的问题进行了分析并提出针对性建议,旨在为研发安全、绿色、环保的生物防治制剂提供优质种质资源,明确不同生防菌的作用机制与适用场景,为 KBC 的绿色生物防控提供理论支撑与实践指导,助力猕猴桃产业实现可持续健康发展。

## 1 猕猴桃以及猕猴桃细菌性溃疡病

### 1.1 猕猴桃

猕猴桃属于猕猴桃科多年生大型落叶藤本植物,其果肉鲜嫩多汁、口感适口,富含维生素 C、多种不饱和脂肪酸、矿质元素等营养成分,以及萜烯类、黄酮类、酚类、香豆素类、三萜类等有效成分,具有抗炎、抗过敏、抗癌、抗溃疡等药理特性,因此兼具营养价值与药用价值(冯勇,2021)。自 20 世纪 70 年代起,猕猴桃开始在全球范围内广泛种植,现已成为一种重要的经济作物。目前,中国、意大利和新西兰是猕猴桃的主要生产国(李大卫等,2024)。

### 1.2 猕猴桃细菌性溃疡病

KBC 是猕猴桃生产中危害最为严重的毁灭性病害。1984 年,日本首次从美味猕猴桃(*Actinidia deliciosa*)中分离出 KBC 的病原体 Psa。此后,该病原体陆续在意大利、葡萄牙、新西兰、韩国、中国等国家被发现。该病害由变形菌门(*Proteobacteria*)假单胞菌属(*Pseudomonas*)丁香假单胞菌猕猴桃致病变种(Psa)引起(Vanneste, 2017)。Psa 是一种革兰氏阴性需氧杆菌,具有极性鞭毛,对温度的适应性广泛,可在 4~20 °C 的环境中生长(Donati et al., 2014)。Psa 在 10~20 °C 的温度范围内侵袭性更强,其最适生长温度为(15 ± 3) °C(Pereira et al., 2021)。

KBC 通常在冬末春初与秋季发病,主要危害猕猴桃果树的叶片、枝干以及果实(钟彩虹等, 2020;秦虎强等,2020)。KBC 典型症状如下:(1)芽变为棕色,叶子上出现不规则棕色斑点,病斑呈暗褐色,叶片随之发黄;(2)受感染的树枝会渗出乳白色或红色的细菌黏液;(3)花朵不能正常开放,花梗、花蕾和花瓣均会褐变(Renzi et al., 2012;刘露,2023)。KBC 的危害部位广泛,影响周期长、流行频率高、防控难度大,严重制约猕猴桃产业的高质量和高效率发展。

Psa 主要的传播途径如下:(1)花粉传播。受感

染的雄花能够在自然条件下将 Psa 传播给健康植株(Lopes et al., 2020),而随意使用未经检测或质量不合格的带菌花粉进行人工授粉,同样会造成 Psa 的传播。(2)昆虫传播。蜜蜂是 Psa 的传播媒介之一,它们会采集受 Psa 感染的花粉,再将这些带菌花粉从花朵传播到不同的猕猴桃植株上(Donati et al., 2018)。(3)人工操作及操作设备传播。感病果园与健康果园之间人员频繁往来,在果园内进行农事操作时未做好消毒或隔离措施,易导致溃疡病传播(钟彩虹等,2020)。(4)受感染猕猴桃苗木售卖传播。种植户在已知或未知感染的情况下,对种苗进行大量繁育并售卖,加大了带菌植株在种植地的广泛传播(Pereira et al., 2021)。

## 2 生防微生物的类群

当前,已经从环境中分离得到的针对 KBC 的生防微生物主要涵盖细菌、放线菌、真菌和噬菌体等类群。

### 2.1 生防细菌

细菌凭借种类丰富、繁殖速率快、代谢途径复杂多样、代谢产物种类繁多且对致病菌作用方式多样以及生活周期短等优势,在自然生物防治进程与人为生物防治实践中占据关键地位(Ali et al., 2022)。据报道,对 Psa 具有拮抗作用的细菌主要包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、赖氨酸芽孢杆菌属(*Lysinibacillus*)、泛菌属(*Pantoea*)、类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*)、乳酸菌属(*Lactobacillus*)等,这些均是具有生物防治潜力的类群(Daranas et al., 2019;Yan et al., 2023;黄丽丽等,2023;Fu et al., 2024;Shao et al., 2024)。其中,芽孢杆菌属和假单胞菌属是防治 KBC 最为广泛的细菌类群。在芽孢杆菌属中,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)、蜡样芽孢杆菌(*B. cereus*)和巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*)等生防菌,对 Psa 具有显著的抑制作用和良好的防治效果(李娟,2010;邵宝林等,2015;朱海云等,2021;Wang B C et al., 2023)。在假单胞菌属中,嗜根假单胞菌(*Pseudomonas rhizophila*)、食苯假单胞菌(*P. benzenivorans*)对 Psa 具有较好的预防效果(杨若兰,2022;黄静等,2025;Tian et al., 2025b)。此

外,乳酸菌中的植物乳杆菌也被视作极具潜力的一类细菌(Daranas et al., 2019)。

## 2.2 生防放线菌

生防放线菌是一类可产生丰富活性次生代谢产物的微生物,其代谢产物具有高效杀菌作用。目前已有报道显示,对 Psa 具有拮抗作用的放线菌类群包括链霉菌属(*Streptomyces*)、糖霉菌属(*Glycomyces*)、原小单胞菌属(*Promicromonospora*)、拟诺卡氏菌属(*Nocardioopsis*)等(Kim et al., 2019; 关鹏等, 2024)。其中,链霉菌属是在 KBC 防治方面应用最广泛、资源最丰富的类群(朱海云等, 2016; 田雪莲等, 2017; 刘巍等, 2023)。

## 2.3 生防真菌

国内外针对不同植物生防真菌的研究已较为丰富,但聚焦于猕猴桃的相关研究却相对匮乏,特别是针对 KBC 的研究更是寥寥无几(Guzmán-Guzmán et al., 2023)。对 Psa 有抑菌活性的生防真菌大多是内生菌,已见报道的包括木霉属(*Trichoderma*)、黑孢霉属(*Nigrospora* sp.)、三线镰孢菌(*Fusarium tricinctum*)、链格孢菌(*Alternaria alternata* var. *alternata*)和孢子副空球菌(*Paraphaospheria sporulosa*)等(Yan et al., 2013; Hill et al., 2015; Chen et al., 2022; Ma et al., 2023; 李晨, 2025)。

## 2.4 生防噬菌体

噬菌体是一类专门侵染特定细菌的病毒,它们对特定细菌种类或菌株有着极强的靶向性,能够附着于目标细菌表面,将自身 DNA 注入细菌体内,随后在宿主体内完成自我复制,最终致使细菌细胞裂解死亡。基于噬菌体的特异性与环境安全性,其可作为生物防治剂用于防治 KBC。目前,从 Psa 生存环境中分离获得的噬菌体主要包括肌尾病毒科(Myoviridae)、长尾病毒科(Siphoviridae)、短尾病毒科(Podoviridae)和囊状病毒科(Cystoviridae)。其中,各科的代表性菌株包括 PHB09(肌尾病毒科)、PKb2b(长尾病毒科)、PHB10b(长尾病毒科)、PPPL-1(短尾病毒科)、PKb5a 和 PHR10a(囊状病毒科)等(Liu et al., 2021; Song et al., 2021; Bai et al., 2022; Hu et al., 2025)。

## 3 生防微生物的生防机制

生防微生物的生防机制包括抗菌作用、竞争作用、免疫诱抗作用和促进植物生长等方面(Hill

et al., 2015)。生防菌可通过单一或多种机制与病原菌发生直接或间接的相互作用,从而有效抑制或减轻植物病害(图 1)。

### 3.1 抗菌作用

某些微生物能够产生脂肽、细菌素、抗生素、生物表面活性剂、细胞壁降解酶或微生物挥发性化合物等特定代谢产物,或合成和分泌生物碱类、萜类、酚类等具有抗菌活性的物质,通过直接抑制致病菌的生长、繁殖或代谢活性来发挥抗菌作用。分离自健康的猕猴桃根际的多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa* YLC1)对 KBC 有防效的生物活性成分为多粘菌素 B1(Wang H et al., 2023)。从黄瓜叶片中分离得到的内生菌薰衣草链霉菌(*Streptomyces lavendulae* gCLA4),其发酵滤液中的链丝菌素 F 成分,可与 Psa 的 FtsZ 靶点结合并发挥作用,从而抑制 Psa 的细胞分裂(刘巍等, 2023; Wang et al., 2024)。皱纹假单胞菌(*Pseudomonas corrugata* XL17)产生 2,4-二乙酰基福林糖醇和脂肽,对 KBC 具有防治作用(Ali et al., 2022)。分离自野生中药牛蒡茎部的子囊链霉菌变种(*Streptomyces sporovirgulis* var. *arctium* TGNBSA5),其发酵滤液对 Psa 具有抑菌活性,主要活性成分为苯甲醇(黄以超, 2012)。从猕猴桃内生真菌 *Bipolaris* sp. 分离得到的萜类化合物 4(bipolarisorokin M)和化合物 5(bipolarisorokin N)对 Psa 有抗菌活性,最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)分别为  $32 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $64 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ (Yu et al., 2022)。

### 3.2 竞争作用

通常情况下,生防菌可通过分泌抗生素或抗菌代谢物干扰病原菌的毒力,同时占据病原菌在植物上的侵染位点,并在感染部位定殖存活。借助更高效的营养吸收系统,生防菌能与病原菌争夺水分、氨基酸、碳水化合物、维生素、无机盐及铁元素等营养物质和生存空间,进而抑制病原菌的生长繁殖(Abd El-Mageed et al., 2020)。黄杆菌(*Flavobacterium* F55)能快速利用‘海沃德’根分泌物促进自身生长,从而增强抗 Psa 的能力(Zheng et al., 2024)。

### 3.3 免疫诱抗作用

生防菌的部分种类可通过诱导植物内源抗性信号通路,增强宿主防御机制并引发系统性抗性,触发多种生化与分子层面的防御反应,从而间接

提升植物对病原菌的抵御能力。接种贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* WL-23)可诱导猕猴桃植株产生系统性抗性,植株体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶和苯丙氨酸解氨酶的活性显著上升,同时水杨酸含量也呈上升趋势(Wang B C et al., 2023)。在田间试验中,从猕猴桃枝条分离的贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis* JIN4),对猕猴桃表现出有效的定殖效果,可提高猕猴桃叶片中过氧化氢含量和过氧化氢酶活性,进而增强猕猴桃植株对 Psa 的抵抗力(Zhao et al., 2024)。猕猴桃根际来源的嗜根假单胞菌(*Pseudomonas rhizophila* Z98)会促使猕猴桃中防御相关基因 *AcBSL1*、*AcJAR4*、*AcEIN3*、*AcERF2* 和 *AcTGA9* 的表达增强,从而激活植物的免疫反应(Tian et al., 2025b)。植物内生真菌链格孢菌(*Alternaria alternata* var. *alternata*)的发酵浸膏可诱导猕猴桃产生免疫应答反应,包括活性氧迸发与胍胍质沉积,并能提升植株体内过氧化氢酶和过氧化物酶的活性(李晨,2025)。

### 3.4 促进植物生长

某些微生物,尤其是植物根际促生菌,能够在寄主植物体内定殖,并通过直接和间接的机制促进植物生长(El-Saadony et al., 2022)。直接促生机制包括产生吲哚乙酸、乙烯、茉莉酸、赤霉素和细胞分裂素等植物激素,溶解磷酸盐,固定氮素,以及通过产铁载体促进铁的吸收等。间接效应则包括抗生素的产生、营养竞争、寄生作用、病原体毒素抑制以及诱导抗性等(Elnahal et al., 2022)。接种贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* WL-23)不仅增加了猕猴桃体内吲哚乙酸、赤霉素 3 和细胞分裂素的含量,还提高了芽孢杆菌属(*Bacillus*)、慢生根瘤菌属(*Bradyrhizobium*)、罗丹杆菌属(*Rhodanobacter*)及木霉属(*Trichoderma*)等有益微生物的相对丰度,从而促进幼苗的生长(Wang B C et al., 2023)。在实验室条件下,贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* JIN4)菌株表现出固氮和解磷能力,同时具备促进植物生长的特性(Zhao et al., 2024)。皱纹假单胞菌(*Pseudomonas corrugata* XL17)产生的吲哚乙酸和 ACC 脱氨酶,可能参与植物的促生长过程(Ali et al., 2022)。*Streptomyces* sp. W3SF9 和 *Streptomyces racemochromogenes* W1SF4 在纤维素分解、几丁质分解、蛋白分解和铁载体生成方面表现出色,具备促进植物生长的能力(Kim et al., 2019)。

## 4 微生物生防菌在 KBC 防治中的应用

随着中国及部分欧美国家先后禁止将链霉素用于 KBC 的防治,采用生防菌剂等绿色防控手段已成为预防该病害的首要选择。

### 4.1 单一微生物在 KBC 防治中的应用

在 KBC 的生物防治研究与应用中,单一微生物的利用较为广泛,其中以芽孢杆菌属细菌和链霉菌属放线菌为主(表 1,表 2)。

4.1.1 单一生防细菌 在盆栽和大田试验中,应用效果较为理想的是从猕猴桃生境中分离的芽孢杆菌属细菌和假单胞菌属细菌。盛存波等(2006)从猕猴桃根际土壤分离到的芽孢杆菌(*Bacillus* B56-3)菌株,通过田间试验采用喷雾和病斑刮除涂抹相结合方式,使用稀释 100 倍的发酵滤液对 KBC 的治疗效果和病斑治愈率分别达 86.5%和 91.4%。Zhao 等(2024)从猕猴桃枝条分离得到的贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* JIN4)菌株,田间试验结果表明该菌对猕猴桃的定殖效果显著,不仅能提高植物的抗氧化酶活性,还可诱导猕猴桃植株产生抗性,对 KBC 防治效果为 60.22%。邵宝林等(2015)从猕猴桃根际土壤中分离得到的蜡样芽孢杆菌(*B. cereus* B2),通过盆栽试验,采用 B2 发酵原液、50 倍、100 倍和 500 倍发酵稀释液对染病的猕猴桃枝条进行喷雾处理,30 d 后的防治效果分别为 90.45%、86.52%、80.90%和 67.98%;在田间试验中,不同稀释倍数的 B2 发酵液对 Psa 的防治效果分别为 85.10%、78.65%、75.30%和 62.11%。李娟(2010)从猕猴桃根际土壤中分离得到的枯草芽孢杆菌(*B. subtilis* ZM12)和巨大芽孢杆菌(*B. megaterium* SF6),在盆栽试验中对 Psa 的预防效果分别为 87.3%和 80.4%。黄静等(2025)从猕猴桃根际土壤中分离得到的食苯假单胞菌(*Pseudomonas benzenivorans* CXG2-5)菌株,在离体枝条和叶片上对 KBC 的预防效果分别为 65.0%和 92.4%,该菌株的微胶囊菌剂在田间的防治效果为 60.89%,略低于 20%春雷霉素,高于枯草芽孢杆菌可湿性粉剂。Wang H 等(2023)从猕猴桃根际土壤分离得到多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa* YLC1),田间试验结果显示,3 倍稀释的 YLC1 发酵液对溃疡病菌具有较好的抑菌效果,抑

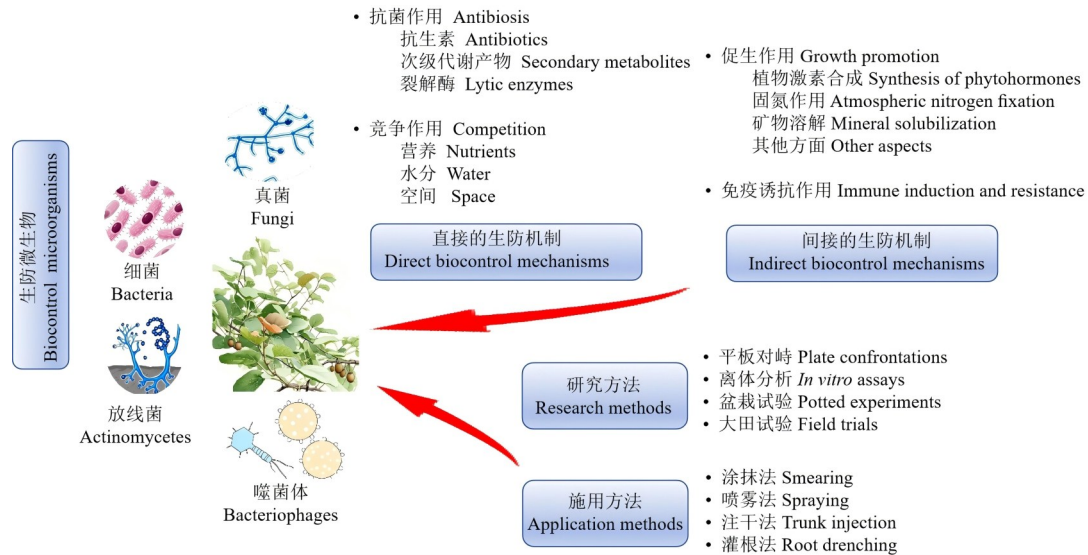


图 1 KBC 生防微生物的类群、生防机制、研究方法及施用方法

Fig. 1 Biocontrol microorganism species, biocontrol mechanisms, research methods, and application methods of KBC

菌防效达 85.4%。

除猕猴桃生境细菌外,自然环境中其他细菌对 Psa 也展现出良好的防治效果。朱海云等(2021)从野生银杏叶中分离得到蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* MA23),盆栽试验结果显示内生菌 MA23 发酵上清液对 KBC 的防治效果达 93.6%;Wicaksono 等(2018)从新西兰的一种药用灌木松红梅(*Leptospermum scoparium*)中分离的内生细菌假单胞菌(*Pseudomonas* sp. T1R21、T4MS32AP 和 T4MS33)可通过伤口接种进入美味猕猴桃体内,抑制 Psa 的定殖,进而减轻病害的致病程度。

**4.1.2 单一生防放线菌** 链霉菌属放线菌及其代谢产物在控制 KBC 中展现出巨大的潜力(表 2)。朱海云等(2016)从健康猕猴桃植株中分离得到肉桂链霉菌(*Streptomyces cinnamomensis* M109),在采用喷雾法时田间防效为 72.1%,在采用注干法时田间防效为 84.6%;张文娟(2020)从猕猴桃植株的枝条和叶片组织中分离得到内生放线菌 WN34,并采用喷雾与涂抹两种方法开展田间试验,结果显示该菌株发酵液粗提活性物在施药 28 d 后,对 KBC 的防治效果分别为 66.0% 和 78.2%;田雪莲等(2017)从猕猴桃根际土壤中分离得到抗生素链霉菌(*S. antibioticus* NA-TXL-1),经预防法和治疗法的盆栽试验验证,该菌株发酵原液对 Psa 的预防效果和治疗效果分别为 73.06% 和 55.62%。

申哲等(2008)从黄瓜叶片中分离得到薰衣草链霉菌(*S. lavendulae* gCLA4),经室内离体枝条及田间树干喷施试验,该菌株发酵液对 KBC 的防治效果分别为 83.43% 和 71.07%;刘巍等(2023)证实了 gCLA4 发酵滤液对 Psa 具有拮抗活性,田间防治效果为 64.90%;王芳等(2017)从渤海湾海边土壤分离获得的链霉菌属 *Streptomyces* sp. SY-L12,其培养 24 h 的发酵液原液对病原菌的生长抑制率达 94.0%,培养 8~9 d 的发酵产物对 KBC 的盆栽防效为 85.4%,优于  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  对照药剂;关鹏等(2024)从新疆巴里坤盐湖和达坂城盐湖分离获得的糖霉菌属 *Glycomyces* ZBW8-1、原小单孢菌属 *Promicromonospora* E14-3 和拟诺卡氏菌属 *Nocardiosis* ZB5-6 菌株对 Psa 的抑菌圈直径分别为 27.5、23.6、26.2 mm。从极端环境中分离出的抗 Psa 菌株,不仅丰富了生防菌株的多样性,还展现出优异的抑菌能力,有望成为防治 KBC 的优良菌剂。

**4.1.3 单一生防真菌** 目前,单一生防真菌在 KBC 防治中的应用实例较为有限,所分离的菌株主要来源于植物内生真菌。Yan 等(2013)从猕猴桃植株叶片和枝条中分离的内生真菌黑孢霉属 *Nigrospora* sp. J2 对 Psa 具有稳定的拮抗活性,抑菌圈直径为 14 mm。从海棠树树皮组织中分离的链格孢菌(*Alternaria alternata* var. *alternata*),其

表 1 单一生防细菌在 KBC 防治中的应用

Table 1 Application of single biocontrol bacterium strains for the prevention and control of KBC

生防细菌 Biocontrol bacterium	来源 Source	研究方法 Research method	防控效果 Control effect	参考文献 Reference
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i> B56-3	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	田间试验 Field trials	稀释 100 倍的 B56-3 发酵滤液的治疗效果和病斑治愈率分别可达 86.5% 和 91.4% The cure effect and curability can get to 86.5% and 91.4% of 100-fold diluted B56-3 fermentation filtrate, respectively	盛存波等, 2006
贝莱斯芽孢杆菌 <i>Bacillus velezensis</i> WL-23	猕猴桃的叶、枝条和根际土壤 Kiwifruit leaves, branches and rhizosphere soil	离体分析 <i>In vitro</i> assays  盆栽试验 Potted experiments	叶子的右侧出现了少量的病斑, 总体防控效果为 72.22% A small number of spots appear on the right side of the leaf, and the overall control effect is 72.22% 促进幼苗生长和根系发育 It promotes seedling growth and root system development	Wang B C et al., 2023
贝莱斯芽孢杆菌 <i>B. velezensis</i> JIN4	猕猴桃枝条 Kiwifruit branches	田间试验 Field trials	防治效果为 60.22% The control efficiency is 60.22%	Zhao et al., 2024
蜡样芽孢杆菌 <i>B. cereus</i> B2	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	盆栽试验 Potted experiments  田间试验 Field trials	未稀释发酵液、稀释 50 倍、稀释 100 倍、稀释 500 倍后 30 d 的防治效果分别为 90.45%、86.52%、80.90%、67.98% The control effects are 90.45%, 86.52%, 80.90%, and 67.98% with the undiluted fermentation broth, 50-fold, 100-fold, and 500-fold dilutions after 30 days, respectively 在相同稀释倍数下, 发酵液的防治效果分别为 85.10%、78.65%、75.30% 和 62.11% The control effects are 85.10%, 78.65%, 75.30%, and 62.11% respectively with the fermentation broth at the same dilution folds	邵宝林等, 2015
枯草芽孢杆菌, 巨大芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i> ZM12, <i>B. megaterium</i> SF6	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	盆栽试验 Potted experiments	预防效果分别为 87.3% 和 80.4% The control effects are 87.3% and 80.4%, respectively	李娟, 2010
蜡样芽孢杆菌 <i>B. cereus</i> MA23	野生银杏叶 Wild <i>Ginkgo biloba</i> leaves	盆栽试验 Potted experiments	防治效果为 93.6% The control efficacy is 93.6%	朱海云等, 2021
沙福芽孢杆菌 <i>B. safensis</i> ZK-1	健康猕猴桃果实 Healthy kiwifruit fruits	平板对峙 Plate confrontations	对 Psa 表现出较高的抑菌活性, 抑菌面积为 1.58 cm <sup>2</sup> It exhibits high antibacterial activity against Psa, with an inhibitory area of 1.58 cm <sup>2</sup>	王博真, 2022
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i> spp.	猕猴桃栽培土壤和健康猕猴桃组织 Kiwifruit cultivation soil and healthy kiwifruit tissues	平板对峙 Plate confrontations	抑菌圈直径为 20.8~23.7 mm The diameter of the inhibition zone is 20.8-23.7 mm	杜贞娜等, 2021
食苯假单胞菌 <i>Pseudomonas benzenivorans</i> CXG2-5	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	平板对峙 Plate confrontations  离体分析 <i>In vitro</i> assays  田间试验 Field trials	抑菌圈直径达 22 mm, 抑制率为 72.7% The diameter of the inhibition zone is 22 mm, the inhibition rate is 72.7% 对枝条和叶片病害的防治效果分别达到 65.0% 和 92.4% The preventive effects on branches and leaves reach 65.0% and 92.4%, respectively 微胶囊菌剂的防效为 60.89% The control effect on microcapsules of this strain is 60.89%	黄静等, 2025
嗜根假单胞菌 <i>P. rhizophila</i> Z98	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	离体分析 <i>In vitro</i> assays	病害发生率降低了 98.89%, 并且限制了 Psa 在木质部叶脉中的扩散传播 The potent preventive effect achieves a 98.89% reduction, and its ability limits Psa's vascular spread	Tian et al., 2025b

续表 1

生防细菌 Biocontrol bacterium	来源 Source	研究方法 Research method	防控效果 Control effect	参考文献 Reference
食苯假单胞菌, 池生戴尔福特菌 <i>P. benzenivorans</i> CXG2-5, <i>Delftia lacustris</i> ZWP15	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	离体分析 <i>In vitro</i> assays	离体枝条有伤接种,ZWP15 和 CXG2-5 对 Psa 的预防效果分别为 70.17%和74.22%, 治疗效果分别为 21.93%和 48.89%;当真 真空渗透叶盘无伤接种时,ZWP15 和 CXG2- 5 对 Psa 的预防效果分别为 93.51%和 91.85%, 治疗效果分别为 21.15% 和 31.90% The preventive effects of ZWP15 and CXG2-5 on Psa are 70.17% and 74.22% and the treatment effects are 21.93% and 48.89%, respectively; when using the <i>in vitro</i> branch wound method, the preventive effects of ZWP15 and CXG2-5 on Psa are 93.51% and 91.85%, and the treatment effects are 21.15% and 31.90%, respectively, through vacuum permeation leaf discs of kiwifruit without wound inoculation	杨若兰, 2022
假单胞菌, 假单胞菌, 假单胞菌 <i>Pseudomonas</i> sp. T1R21, <i>Pseudomonas</i> sp. T4MS32AP, <i>Pseudomonas</i> sp. T4MS33	新西兰药用灌木 (松红梅) New Zealand medicinal shrub ( <i>Leptospermum</i> <i>scoparium</i> )	田间试验 Field trials	3 种内生细菌可通过伤口接种进入美味猕猴桃,抑制 Psa 的定殖并减轻病害的致病程度 Three endophytic bacteria are able to invade <i>Actinidia deliciosa</i> via wound inoculation, inhibit Psa colonization and alleviate disease severity	Wicaksono et al., 2018
皱纹假单胞菌 <i>Pseudomonas</i> <i>corrugata</i> XL17	油菜冠瘿 Rape crown gall	离体分析 <i>In vitro</i> assays	XL17 及其无细胞培养滤液抑制了 Psa 的生 长,阻止了由 Psa 侵染引发的叶片坏死 XL17 and its cell-free culture filtrate inhibit the growth of Psa and prevent leaf necrosis caused by Psa infection	Ali et al., 2022
假单胞菌, 假单胞菌, 寡养单胞菌, 溶杆菌属 <i>Pseudomonas</i> sp. R10, <i>Pseudomonas</i> sp. RS54, <i>Stenotrophomonas</i> sp. R31, <i>Lysobacter</i> sp. R34	猕猴桃枝、根和根 际土壤 Kiwifruit branches, roots and rhizosphere soil	离体分析 <i>In vitro</i> assays	与 Cu(OH) <sub>2</sub> 和其他菌株相比,R10 的治疗 效果更好,平均病变长度为 5.9 mm,治疗效 果为 75% R10 exhibits superior therapeutic efficacy compared with Cu(OH) <sub>2</sub> and the other strains, with average lesion length of 5.9 mm and treatment efficacy of 75%	Fu et al., 2024
假单胞菌, 赖氨酸芽孢杆菌属 <i>Pseudomonas</i> sp. 62, <i>Lysinibacillus</i> sp. 189	猕猴桃样品 Kiwifruit samples	离体分析 <i>In vitro</i> assays	内生细菌 62 和 189 对 Psa 的抑制效果最 好,具有最强的拮抗活性 Endophytic bacteria 62 and 189 demonstrate the best control efficacy against Psa, possessing the strongest antagonistic activity	郭睿文, 2016
多粘类芽孢杆菌 <i>Paenibacillus</i> <i>polymyxa</i> YLC1	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	田间试验 Field trials	防治效果达 85.4% The control effect reaches 85.4%	Wang H et al., 2023
类芽孢杆菌 <i>Paenibacillus</i> sp. 3	猕猴桃的枝条、叶、 根和根际土壤 Kiwifruit branches, leaves, roots and rhizosphere soil	离体分析 <i>In vitro</i> assays	防效为 60.47% The control effect is 60.47%	章丽丹, 2021
内生泛菌 <i>Pantoea endophytica</i> KBA19	猕猴桃的枝条 Kiwifruit branches	离体分析 <i>In vitro</i> assays	KBA19 通过细胞间接触杀伤有效保护猕猴 桃枝免受 Psa 感染 KBA19 effectively protects kiwifruit branches from Psa infection via cell-to-cell contact- dependent killing	Shao et al., 2024
弗氏甲基杆菌 <i>Methylobacterium frigidiaeris</i> NO.357	印度洋海泥 Indian Ocean sea mud	平板对峙 Plate confrontations	抑菌圈直径达(21.30 ± 0.83) mm The diameter of the inhibition zone is (21.30 ± 0.83) mm	石悦炜等, 2023
植物乳杆菌, 植物乳杆菌 <i>Lactobacillus</i> <i>plantarum</i> TC92, <i>L. plantarum</i> PM411	微生物菌种保藏 中心 Microbial culture collection center	盆栽试验 Potted experiments  半田间/田间试验 Semi-field and field assays	温室条件下,TC92 和 PM411 的防治效果分 别为 84.5%~96.3%和 70.0%~75.4% The control efficacies range from 84.50% to 96.3% for TC92, and from 70.0% to 75.4% for PM411 under greenhouse conditions PM411 可使该病发病率减半,防治效果为 54.2% PM411 is able to halve the disease incidence, and its control efficacy is 54.2%	Daranas et al., 2019

表 2 单一生防放线菌在 KBC 防治中的应用

Table 2 Application of single biocontrol actinomycete strains for the prevention and control of KBC

生防放线菌 Biocontrol actinomycete	来源 Source	研究方法 Research method	防控效果 Control effect	参考文献 Reference
链霉菌属, 穗产色链霉菌 <i>Streptomyces</i> W3SF9, <i>Streptomyces racemochromogenes</i> W1SF4	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	平板对峙 Plate confrontations  盆栽试验 Potted experiments	抑菌圈直径分别为 3.53 cm 和 3.92 cm The diameters of the inhibition zones are 3.53 cm and 3.92 cm, respectively W1SF4 和 W3SF9 在猕猴桃根际和层际具有较强的抑菌活性和良好的定殖能力 W1SF4 and W3SF9 exhibit strong antibacterial activity and excellent colonization ability in the rhizosphere or phyllosphere of kiwifruit	Kim et al., 2019
肉桂链霉菌 <i>S. cinnamonensis</i> M109	健康猕猴桃植株 Healthy kiwifruit plants	抑菌分析 Antimicrobial assays  田间试验 Field trials	MIC 值为 0.91 mg · mL <sup>-1</sup> The MIC value is 0.91 mg · mL <sup>-1</sup>  喷雾法防效为 72.1%, 注干法防效为 84.6% The control efficiency is 72.1% using the spraying method and 84.6% using the trunk injection method	朱海云等, 2016
内生放线菌 Endophytic actinomycetes WN34	猕猴桃的枝条 和叶 Kiwifruit branches and leaves	田间试验 Field trials	28 d 后, 喷雾法防效为 66.0%, 涂抹法防效为 78.2% The control efficiency is 66.0% using the spraying method and 78.2% using the smearing method after 28 days	张文娟, 2020
抗生素链霉菌 <i>S. antibioticus</i> NA-TXL-1	猕猴桃根际土壤 Kiwifruit rhizosphere soil	盆栽试验 Potted experiments	发酵液防治 Psa 的效果分别为 73.06% 和 55.62% The effects of the fermentation broth in preventing and controlling Psa are 73.06% and 55.62%, respectively	田雪莲等, 2017
薰衣草链霉菌 <i>S. lavendulae</i> gCLA4	黄瓜叶 Cucumber leaves	离体分析 <i>In vitro</i> assays  盆栽试验 Potted experiments	对离体枝条和树干的防治效果分别为 83.43% 和 71.07% The control efficacies are 83.43% (on <i>in vitro</i> branches) and 71.07% (in kiwi orchards), respectively 其活性成分为链丝菌素 F, 28 d 后相对防治效率可达 64.90% Its active ingredient is streptomycin F, the relative control efficiency can reach 64.90% after 28 days	刘巍等, 2023; 申哲等, 2008
链霉菌属 <i>Streptomyces</i> sp. SY-L12	渤海湾海边土壤 Coastal soil from the Bohai Bay	平板对峙 Plate confrontations 盆栽试验 Potted experiments	对 Psa 的抑制率为 94.0% The inhibitory rate against Psa is 94.0% 其发酵液的防效为 85.4% The control efficacy of its fermentation broth is 85.4%	王芳等, 2017
子囊链霉菌变种 <i>S. sporovirgulis</i> var. <i>arctium</i> TGNBSA5	野生中药牛蒡的 茎部 Wild Chinese medicinal plants <i>Arctium lappa</i> stem	平板对峙 Plate confrontations	抑菌圈直径为 (17±2) mm, 生物活性化合物为苯甲醇 The diameter of the inhibition zone is (17±2) mm, the bioactive compound is benzyl alcohol	黄以超, 2012
糖霉菌属, 原小单孢菌属, 拟诺卡氏菌属 <i>Glycomyces</i> ZBW8-1, <i>Promicromonospora</i> E14-3, <i>Nocardioopsis</i> ZB5-6	新疆巴里坤盐湖 和达坂城盐湖 Barkol and Dabancheng salt lakes in Xinjiang	平板对峙 Plate confrontations	抑菌圈直径分别为 27.5、23.6、26.2 mm The diameters of inhibition zones are 27.5, 23.6, 26.2 mm, respectively	关鹏等, 2024

发酵浸膏对猕猴桃离体叶片和枝条的防治效果分别为 85.36% 和 48.06% (李晨, 2025)。Ma 等 (2023) 从猕猴桃植株中分离的三线镰孢菌 (*Fusarium tricinctum*) 对 Psa 体外抑制率为 59.5%, 从该菌分离的咪唑生物碱, 可通过破坏细菌细胞

壁结构发挥抗菌活性, 其 MIC 为 25~50 μg · mL<sup>-1</sup>。从猕猴桃内生真菌孢子副空球菌 (*Paraphaospheria sporulosa*) 中获得的异苯并呋喃酮和异香豆素, 具有抗 Psa 活性, MIC 在 25~100 μg · mL<sup>-1</sup> 之间 (Chen et al., 2022)。猕猴桃内生真

菌 *Bipolaris* sp. 含有萜类(包括倍半萜类、酯萜类和类似物)和克山酮类,对 Psa 具有抗菌活性(Yu et al., 2021, 2022)。

众所周知,内生真菌是生物活性物质的重要来源(Yan et al., 2013)。尽管目前针对 Psa 生防真菌的研究主要集中在平板抑菌试验以及体外离体枝条或叶片基础研究层面,但随着对真菌代谢产物挖掘工作的不断推进,其代谢产物作为潜在抗 Psa 药物的价值逐渐凸显,越来越多的真菌有望成为防治 KBC 的有效生物防治菌株。

4.1.4 生防噬菌体 噬菌体是一类能特异性感染目标细菌的病毒,凭借其宿主范围的高度特异性,近年来被视作细菌性病原体的潜在生物防治剂。目前,Psa 噬菌体已成功从全球不同生态位中分离得到,在 KBC 的生物防控领域初步展现出应用成效。Park 等(2018)和 Song 等(2021)研究的短尾病毒科 PPPL-1 噬菌体对 KBC 的多数菌株具有显著抑制作用,其对 KBC 的防控效果与链霉素和土霉素相当,并且能够成功杀死对链霉素具有抗药性的 Psa 细菌分离株,该病毒在 40 °C、pH 3~11 以及 365 nm 紫外光照射下均能保持稳定。Frampton 等(2014)从新西兰果园中分离鉴定的噬菌体  $\phi$ Psa316 对 KBC 具有较强的防控能力,并且抗噬菌体细菌的出现概率为  $1.20 \times 10^{-3}$ 。商业化的噬菌体  $\phi 6$  能感染 Psa CRA-FRU 12.54 和 Psa CRA-FRU 14.10 菌株,当感染复数(multiplicity of infection, MOI)为 1 或 100 时,均可有效灭活上述致病菌株(Pinheiro et al., 2019, 2020)。Liu 等(2021)从中国猕猴桃果园土壤中分离出一株新型噬菌体 PHB09,该噬菌体潜伏期短、裂解量大且在较宽的 pH 值和温度范围内具有良好的稳定性。PHB09 能裂解多种 III 型 Psa 菌株(包括 BJ530、BJ9 和 BST)及 II 型 Psa 菌株,是一种具有特异性灭活作用的生物防治剂。Yu 等(2016)从韩国猕猴桃果园土壤中分离得到的肌病毒科噬菌体 KHU $\phi$ 44,对 14 株 Psa 均有较好的抑制作用。噬菌体的体外裂解活性可维持至 80 h,在 50 °C、pH 11 和 UV-B 光条件下保持稳定。上述这些噬菌体绝大多数分离自 Psa 侵染猕猴桃的生境,不仅对 Psa 具有特异性,还能耐受多种环境因素,在 KBC 的防治中具有潜在应用前景。

上述微生物均对 Psa 具有显著的抑制效果,其中部分菌株在田间试验中表现出优异的生防成

效,其高效生防能力与以下几个因素密切相关。

(1)生防菌的来源。筛选自猕猴桃生态圈(包括根际土壤、枝叶等部位)的绝大多数生防菌,其生防效果显著优于非生境来源的菌株。这可能是因为这类生防菌与猕猴桃植株长期共进化,从而具备了更强的宿主适配性、定殖能力以及生态位竞争力。猕猴桃抗性品种‘皖金’根际富集的假单胞菌、溶杆菌能高效定殖(Zheng et al., 2024);猕猴桃枝条分离的内生泛菌(*Pantoea endophytica* KBA19)可通过 T6SS 直接接触并精准杀灭 Psa(Shao et al., 2024);分离自‘海沃德’根际土壤的黄杆菌(*Flavobacterium* F55)可高效利用根系特有代谢物促进自身快速增殖,进而增强对 Psa 的抑菌能力(Zheng et al., 2024);分离自抗性品种‘万金’根际的假单胞菌(*Stenotrophomonas* sp.),能够主动招募并协同猕猴桃核心有益菌群,形成功能互补的生防菌群,进而显著提升整体防治效果(Fu et al., 2024)。分离自湖南省的贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* JIN4)菌株对当地气候和土壤环境的适应能力更强,有助于占领猕猴桃根间或体内的生态位,从而增强对 KBC 的抑制作用(Zhao et al., 2024)。链霉菌属 *Streptomyces* W3SF9 和穗产色链霉菌(*S. racemochromogenes* W1SF4)在猕猴桃幼苗的根和叶上均表现出较强的定殖能力(Kim et al., 2019)。

(2)猕猴桃品种。生防菌在抗病品种上防治效果更稳更高,在高感品种上效果波动大、易被突破。美味猕猴桃‘海沃德’为抗病品种,中华猕猴桃‘红阳’为高感品种,*Flavobacterium* F55 在‘海沃德’上防效达 88.2%,在‘红阳’上仅为 45.7%。抗病品种根际天然富集如黄杆菌、芽孢杆菌等更多生防菌(Zheng et al., 2024)。「皖金」为抗病品种,「东红」为感病品种,从「皖金」根际或根内分离的溶杆菌属 *Lysobacter* sp. R34 和假单胞菌(*Pseudomonas* sp. R10)在本抗性品种上的定殖率与防治效果均显著高于感病品种「东红」(Zheng et al., 2024)。

(3)生防菌施用方法。目前,针对猕猴桃病灶部位,主要采用喷雾法、注干法、涂抹法以及灌根法等方式进行处理(图 1)。同一种生防菌,不同处理方式对 Psa 生防效果存在显著性差异,每种方法都有各自的优势。张文娟(2020)通过田间试验对比了喷雾法与涂抹法两种施药方式,结果显示

涂抹法的防效(78.2%)显著优于喷雾法(66.0%)。涂抹法可以使菌剂直接接触病灶,局部浓度高,定殖快,既能快速抑制病情的发展,又可有效避免外界气候条件的干扰。朱海云等(2016)通过田间试验对比了喷雾法和注干法两种施药方式,结果显示注干法的防效(84.6%)优于喷雾法(72.1%)。嗜根假单胞菌(*Pseudomonas rhizophila*)注干法防效达98.89%(Tian et al., 2025b)。注干法使生防菌可以直达维管束、阻断Psa在木质部传导,持效期长。采用喷雾法时,蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* B2)发酵原液的防效超90%(邵宝林等, 2015)。采用灌根方式施用*B. amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* D747菌株,能有效降低Psa在中华猕猴桃上诱发的叶斑病严重程度(Biondi et al., 2022)。灌根施用*Flavobacterium* F55,可抑制‘红阳’猕猴桃地上部分Psa的繁殖(Zheng et al., 2024)。灌根法能使菌株在猕猴桃根际定殖,进而诱导植株产生系统抗性,实现跨生态位对地上部分的保护。

(4)KBC的发病程度。KBC的田间发病情况是影响生防菌应用效果的关键因子。当病情指数低、病原菌基数小、树体健康度高时,生防菌能借助生态位竞争、拮抗作用及诱导宿主抗病性等机制,实现对病害的高效防控;而当病情严重、病灶深入木质部、树体免疫系统受损时,生防菌则难以定殖并发挥作用。在猕猴桃开花初期施用*Flavobacterium* F55菌株,其对KBC的防治效果可达84.4%,显著优于化学药剂春雷霉素69.0%的防效(Zheng et al., 2024)。离体枝条有伤接种池生戴尔福特菌(*Delftia lacustris* ZWP15)和食苯假单胞菌(*Pseudomonas benzenivorans* CXG2-5)对Psa的预防效果分别为70.17%和74.22%,治疗效果分别为21.93%和48.89%(杨若兰, 2022)。从实例中可以看出,生防菌的防效与KBC的发病程度呈显著负相关。

#### 4.2 复配微生物生防菌在KBC防治中的应用

大多数生物防治研究主要围绕单一菌株的分离、筛选与应用展开,但在大田生产实践中,单一成分的生防菌剂常面临防效不稳定、抑菌谱较窄等问题(Massart et al., 2015)。多株生防菌经科学复配后,可通过多种生防机制协同作用,更高效地实现病害防控,同时还能促进植物产量与品质的提升,降低成本、提高效益。

4.2.1 生防微生物的复配方式 为了开发防效高、稳定性好的复合菌剂,深入研究生防菌的作用机制至关重要。复配前,首先考量菌株间的互作关系,筛选相容性良好且能产生协同增效作用的菌株开展复配;其次应结合菌株的生物学特性、生长速度及作用机制,依据最终应用目标进行科学配制,从而获得高效的复配组合。

生防菌的复配方式可分为复配主体和施用方式两类。复配主体根据菌群的组成成分可划分为五类,即细菌生防菌群、放线菌生防菌群、真菌生防菌群、混合生防菌群(如细菌和放线菌的复配、细菌和真菌的复配或者放线菌和真菌复配等)以及噬菌体鸡尾酒(王卫雄等, 2020)。根据菌群数量,可将菌株进行两两复配,也可进行多株菌复配。其施用方式主要分为两种:一种是各菌株单独发酵后再混合施用,另一种是将菌株混合发酵后直接施用(付博等, 2020)(表3)。

#### 4.2.2 复配微生物生防菌在KBC防治中的应用

4.2.2.1 细菌生防菌群 属内菌株复配与属间菌株复配是微生物协同防治植物病害的两种重要策略,二者在亲缘关系、生理特性以及生防效果上各具优势。在实际的生防应用研究中,由同属或不同属的两种或多种细菌构建的细菌生防菌群,在KBC的防治领域应用较为广泛。

##### (1) 属内两株细菌复配

李娟(2010)对芽孢杆菌属内的枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis* ZM12)和巨大芽孢杆菌(*B. megaterium* SF6)两种细菌,采用等体积的接种方式进行发酵培养后施用。盆栽试验结果表明,该混合发酵液对KBC的防治效果高达92.4%,优于ZM12(87.3%)与SF6(80.4%)的单菌处理效果;田间试验结果表明,复合拮抗菌剂原液、50倍和100倍稀释发酵液对KBC的防治效果分别为89.8%、85.6%和83.7%。由于属内菌株生理代谢特征与生态位较为相似,菌株间不易产生拮抗;不同芽孢杆菌可在产酶、解磷、固氮、促生、抗病、抗逆等方面形成功能互补与效果叠加,进而增强环境耐受能力与定殖能力,使复配体系稳定性更高,最终对KBC的抑制效果更为显著。

##### (2) 属间两株细菌复配

黄丽丽等(2025)对不同属的池生戴尔福特菌(*Delftia lacustris* ZWP15)和解蛋白芽孢杆菌(*Bacillus proteolyticus* Hhb.019)两种细菌分别进行

表 3 复配微生物在 KBC 防治中的应用

Table 3 Application of mixed microorganisms for the prevention and control of KBC

复配主体 Compounding subject	复配方式 Compounding method	防控效果 Control effect	参考文献 Reference
枯草芽孢杆菌+巨大芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> ZM12 + <i>B. megaterium</i> SF6	1% ZM12 菌悬液和 1% SF6 菌悬液共培养发酵后直接施用 Direct application after co-culture fermentation culture of a 1% ZM12 bacterial suspension and a 1% SF6 bacterial suspension	在盆栽试验中,混合发酵液对 KBC 的控制效果达到 92.4%;在田间试验中,混合拮抗菌发酵液,50 倍稀释液和 100 倍稀释液对 KBC 的防治效果分别为 89.8%、85.6%和 83.7% In potted experiments, the control effect of the mixed fermentation broth on KBC reaches 92.4%; in field trials, the control effects of the mixed antagonistic bacteria fermentation broth, 50-fold and 100-fold diluted broth on KBC are 89.8%, 85.6%, and 83.7%, respectively	李娟, 2010
池生戴尔福特菌+解蛋白芽孢杆菌 <i>Delftia lacustris</i> ZWP15 + <i>Bacillus proteolyticus</i> Hhb.019	分别发酵后以 1:1 的体积比混合施用 Mixed application at a 1:1 volume ratio after separate fermentation	混合发酵液对离体枝条病斑的预防效果达 88.97%,比单一菌株高;在田间试验中,10 倍稀释混合发酵液对 KBC 的防治效果为 73.89% The preventive effect of the mixed fermentation broth on detached-branch lesions is 88.97% higher than that of the single bacterial strain; in field trials, the control effect of the 10-fold diluted mixed fermentation broth on KBC is 73.89%	黄丽丽等, 2025
池生戴尔福特菌+解蛋白芽孢杆菌 <i>Delftia lacustris</i> ZWP15 + <i>Bacillus proteolyticus</i> Z38	分别发酵后以 1:1 的体积比混合施用 Mixed application at a 1:1 volume ratio after separate fermentation	通过叶盘真空渗透接种和离体枝条有伤接种,混合菌悬液对 KBC 的防治效果分别为 81.72%和 88.97%,对猕猴桃无致病性;在田间试验中,10 倍稀释的混合发酵液注干防治效果分别为 73.89%和 81.78% The efficacies of the mixed bacterial suspension against KBC are 81.72% and 88.97% through vacuum infiltration inoculation of leaf discs and wound inoculation of isolated branches, respectively, and they are non-pathogenic to kiwifruit; in field trials, the efficacy of the 10-fold diluted mixed fermentation broth against KBC are 73.89% and 81.78% for the main stem, respectively	刘露, 2023
产酶溶杆菌+沙福芽孢杆菌 <i>Lysobacter enzymogenes</i> OH11 + <i>Bacillus safensis</i> ZK-1	2 株细菌细胞按 1:1 体积比混合发酵培养后直接施用 Direct application after mixed fermentation culture of two strains of bacterial cells at a 1:1 volume ratio	OH11W 或 ZK-1 与 Psa 在琼脂平板上的共培养,能有效杀死 Psa M228 和 C48;猕猴桃枝条和果实的生物防治试验表明,复合菌与 Psa C48 共培养可显著降低 KBC 症状的发生 Co-culture of OH11W or ZK-1 with Psa on agar plates results in the killing of Psa M228 and C48; the biocontrol experiments on kiwi branches and fruits show that the co-culture of the compound bacteria and Psa C48 significantly reduce the occurrence of symptoms of KBC	Lin et al., 2023
假单胞菌属+寡养单胞菌属 <i>Pseudomonas</i> sp. R10 + <i>Stenotrophomonas</i> sp. R31	将 OD <sub>600</sub> 为 1.0 的 R10 和 R31 细胞悬浮液按 1:1 体积比混合后施用 Mixed application after the cell suspensions of R10 and R31 with an OD <sub>600</sub> of 1.0 are mixed at a 1:1 volume ratio	在离体枝上的体外实验表明,混合生物防治剂对 KBC 的治疗效果分别提高了 30.7%(与 R10 相比)和 61.3%(与 R31 相比) In vitro assays on detached branches show that the mixed biocontrol agent enhances the therapeutic effect against KBC by 30.7%(vs R10) and 61.3%(vs R31), respectively	Fu et al., 2024
红树动球菌+蒙氏肠球菌+嗜根寡养单胞菌 <i>Kineococcus mangrovi</i> ZC-3 + <i>Enterococcus mundtii</i> ZC-5 + <i>Stenotrophomonas rhizophila</i> ZC-6	3 种菌发酵液等量混合后施用 Mixed application after mixing the fermentation broths of three strains in equal volumes	构建的生防菌群抑菌率达 100%;在植物体内试验中,生物防治菌群的防治效果最好,防治效果为 56.00% The inhibition rate of the constructed biocontrol bacterial community reaches 100%; in the in-vivo plant experiment, the biocontrol bacterial community demonstrates the best preventive effect, with a control efficiency of 56.00%	尹志诚等, 2024

续表 3

复配主体 Compounding subject	复配方式 Compounding method	防控效果 Control effect	参考文献 Reference
内生泛菌+ 沙福芽孢杆菌+ 枯草芽孢杆菌 <i>Pantoea endophytical</i> ZK4 + <i>Bacillus safensis</i> ZK1 + <i>B. subtilis</i> ZK3	ZK4 与芽孢杆菌按 3 : 1 体积比混合施用 Mixed application after mixing ZK4 with <i>Bacillus</i> at a volume ratio of 3 : 1	复配菌剂能同时实现“短距离”接触杀菌和“长 距离”分泌扩散性抑菌物质,抑制猕猴桃溃疡 病菌 The compound bacterial agent can simultaneously achieve short-distance cell-to-cell contact- dependent killing and long-distance secretion of diffusive antibacterial substances to inhibit KBC	吴倩桦, 2023
解淀粉芽孢杆菌+ 长枝木霉 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> + <i>Trichoderma longibrachiatum</i>	将 1 mL 芽孢杆菌细胞与 1 mL 木霉孢子悬浮液共培 养发酵后直接施用 Direct application after co- culture fermentation of 1 mL of <i>Bacillus</i> cells and 1 mL of <i>Trichoderma</i> spore suspension	分别用稀释 200 倍和 100 倍的混合发酵液进行 全株喷施和灌根处理,混合发酵液第一年防治 效果为 36.99%,第二年防治效果为 69.52% Through whole-plant spraying and root drenching with 200-fold and 100-fold diluted mixed fermentation broth, respectively, the control effects of the mixed broth are 36.99% in the first year and 69.52% in the second year	马群飞, 2021
解淀粉芽孢杆菌+ 拟康氏木霉+ 黑根霉 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> + <i>Trichoderma pseudokoningii</i> + <i>Rhizopus nigricans</i>	新型混合发酵处理 Novel mixed fermentation treatment	混合发酵液不仅能直接抑制病原菌,还能通过 改善土壤微生态提高植物抗病性;在田间试验 中,该复方降低了 50% 以上的发病率 The mixed fermentation broth not only directly inhibits pathogenic bacteria but also enhances plant disease resistance by improving soil microecology; in field trials, this compound formulation reduces the incidence of diseases by over 50%	Cong, 2019
噬菌体 Bacteriophage PKb2b + PHB10b + PKb5a + PHR10a	4 种噬菌体按 1 : 1 : 1 : 1 体积比均匀混合形成鸡尾 酒后混合应用 Mixed application after cocktail mixed four bacteriophages evenly at a volume ratio of 1 : 1 : 1 : 1	在田间试验中,噬菌体鸡尾酒可以显著降低 KBC 的发病率;噬菌体鸡尾酒对 Psa BJ530 的 失活率为 73.3%,噬菌体颗粒浓度显著升高 In field trials, bacteriophage cocktail can significantly reduce the incidence of KBC; the inactivation rate of the bacteriophage cocktail to Psa BJ530 is 73.3%, and the concentration of bacteriophage particles increases significantly	Bai et al., 2022; Hu et al., 2025
噬菌体 Bacteriophage CHF1 + CHF7 + CHF19 + CHF21	噬菌体鸡尾酒 Bacteriophage cocktail	在猕猴桃离体叶片试验中,噬菌体混合物在施 用后 3 h 内可有效降低 Psa 负载量,并使损伤指 数降低超 50%;该混合物对非目标微生物无显 著影响 In <i>in vitro</i> assays with kiwifruit leaf samples, the mixture of bacteriophages reduces the Psa bacterial load within three hours post-application and is able to reduce the damage index by over 50% of cases; the mixture has no significant effect on non- target microorganisms	Flores et al., 2020

单独发酵,将二者发酵液按 1 : 1 体积比组合后制得的菌剂,对离体枝条病斑的预防效果达 88.97%,该效果优于单一菌种的防效;此外,经 10 倍稀释复配生防菌剂的发酵液对 KBC 的田间防效为 73.89%。刘露(2023)对不同属的两种细菌池生戴尔福特菌(*Delftia lacustris* ZWP15)和解蛋白芽孢杆菌(*Bacillus proteolyticus* Z38)分别进行单独发酵,将二者发酵液按 1 : 1 体积比混合后施用。通过室内叶盘真空渗透接种和离体枝条有伤接种试验验证其对 KBC 的预防效果分别为 81.72% 和 88.97% 且对猕猴桃无致病作用。田间试验结果表明,稀释 10 倍的混合发酵液对该病的整体防治效果为 73.89%,对主干的防治效果则为 81.78%。

Lin 等(2023)将 *Lysobacter enzymogenes* OH11 和 *Bacillus safensis* ZK-1 的细胞以 1 : 1 的体积比在混合菌落的琼脂板上共培养,能有效杀死 Psa M228 和 Psa C48;猕猴桃枝条和果实生防试验显示复配菌与 Psa C48 共培养显著减少了细菌性溃疡病症状的发生。Fu 等(2024)将光密度 600 nm (optical density at 600 nm, OD<sub>600</sub>) 为 1.00 的 *Pseudomonas* sp. R10 和 *Stenotrophomonas* sp. R31 的细胞悬液按 1 : 1 体积比混合后,离体枝条抑菌试验结果表明,混合生防菌剂对 KBC 的防治效果,相较于 R10 和 R13 单剂处理分别提高了 30.7% 和 61.3%。尹志诚等(2024)对不同属的红树动球菌(*Kineococcus mangrovi* ZC-3)、蒙氏肠球菌(*Enterococcus mundtii*

ZC-5) 和嗜根寡养单胞菌 (*Stenotrophomonas rhizophila* ZC-6) 3种细菌分别进行单独发酵,将发酵菌液等体积混合后施用。离体共培养结果表明,该复配菌对 KBC 的抑制率达 100%;活体试验结果显示,由这 3 株菌联合构建的生防菌群防治效果最佳,为 56.00%,经其处理的猕猴桃植株不仅叶片病斑数量少、面积小,而且植株长势与健康状况未受影响。吴倩桦(2023)将发酵后的内生泛菌(*Pantoea endophytical* ZK4)分别与沙福芽孢杆菌(*Bacillus safensis* ZK1)和枯草芽孢杆菌(*B. subtilis* ZK3)按照 3:1 体积比混合,所制备的复配菌剂可同时通过“短距离”接触杀菌和“长距离”分泌扩散性抑菌物质两种方式,抑制 KBC 病原菌。

4.2.2.2 混合生防菌群 细菌和真菌组合形成的混合菌群在 KBC 的生物防治中也有少量的相关报道。马群飞(2021)将 1 mL 解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)细菌悬液和 1 mL 长枝木霉(*Trichoderma longibrachiatum*)真菌孢子悬液发酵共培养后,采用 200 倍和 100 倍稀释的混合发酵液进行整株喷施和灌根联合处理。结果显示,第一年和第二年的防治效果分别为 36.99% 和 69.52%。Cong(2019)将解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)、拟康氏木霉(*Rhizopus nigricans*)和真菌黑根霉(*Trichoderma pseudokoningii*)进行复配,所得混合菌剂不仅直接抑制病原菌,还通过改善土壤微生态增强植株抗病性;田间试验结果显示,该复配菌剂使 KBC 的病害发生率降低了 50.00%以上。

4.2.2.3 噬菌体鸡尾酒 以噬菌体混合制成的“鸡尾酒”制剂,在 KBC 的生物防治中同样取得了一定成效。Bai 等(2022)和 Hu 等(2025)从猕猴桃生长环境中分离得到长尾病毒科成员 PKb2b、PHB10b 以及囊状病毒科成员 PKb5a、PHR10a,体外试验显示,这 4 株噬菌体混合物对 Psa BJ530 的失活率为 73.3% 且噬菌体颗粒浓度随之显著升高;体内试验表明,该噬菌体混合物可有效抑制 Psa 的增长。此外,这 4 株噬菌体在溃疡病发病期的自然温度、pH 值及 UV-B 条件下,其活性总体保持稳定。Flores 等(2020)从猕猴桃果园的土壤样品中筛选出 4 株噬菌体 CHF1、CHF7、CHF19 和 CHF21,其混合制剂在使用 3 h 内可显著降低 Psa 菌量,使病害损伤指数降低超 50%,且对非靶标微生物无显著影响。将噬菌体置于与猕猴桃生产相

关的条件下,所有噬菌体均保持了良好的活性。从上述实例可见,在同一研究中,复配菌株的防治效果显著优于单一菌株,其复配理论指导基础如下:(1)生防机制差异显著,功能互补性更强。复配后能通过多靶点、多机制协同作用防控病害。(2)生态位互补,定殖范围更广。不同属微生物在植株根表、叶表及体内的定殖部位与偏好存在差异,能够全方位占据生态位,减少内部竞争,提高整体定殖稳定性。(3)环境适应范围更广,田间稳定性更高。不同属菌株对温度、湿度、土壤及 pH 值的耐受范围差异较大,复配后整体抗逆性得以提升,在复杂田间环境中防效更稳定。(4)复配菌株可互相促进生长、互相保护,进而形成稳定的功能微生物群落。复配的优势并非一定优于最强单株,而是通过生态位互补、机制协同、环境适应性,提升生防效果的稳定性和持久性(王卫雄等,2020)。

## 5 总结与展望

### 5.1 总结

本文围绕 KBC 的微生物生防展开综述,系统梳理了生防菌的种类、作用机制以及其在该病生物防治中的应用现状。与传统化学防治相比,采用微生物生防策略不仅环境友好,而且还能有效延缓病原菌抗药性的产生与发展,提升果实品质,契合猕猴桃产业绿色可持续发展的需求。众多生防微生物的发掘与深入研究,不仅为 KBC 生防菌剂的研发提供了安全高效的菌株资源及配套应用技术,而且还为猕猴桃产业的健康可持续发展提供了坚实支撑。基于对现有研究结果和理论知识的理解与分析,今后 KBC 的微生物防治研究与应用需重点关注以下几点。

5.1.1 加快筛选高效防控 Psa 的生防菌资源 综合数据可见,兼具优良田间防效与强环境适应性的 Psa 生防菌资源仍相对匮乏。真正应用于田间试验且防效在 85% 以上的生防菌株仅有少数,例如芽孢杆菌(*Bacillus* B56-3)、蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus* B2)、多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa* YLC1)和肉桂链霉菌(*Streptomyces cinnamomensis* M109)(盛存波等,2006;邵宝林等,2015;朱海云等,2016;Wang H et al., 2023)。贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis* JIN4)和食苯假单

胞菌(*Pseudomonas benzenivorans* CXG2-5)等菌株虽已在田间推广应用,但对 Psa 的防控效果仅维持在 60%左右(Zhao et al., 2024; 黄静等, 2025)。尽管国内外已针对 Psa 生防菌开展了大量筛选工作,但其研究方法大多局限于平板抑菌、枝条或叶片的离体分析以及盆栽试验等层面。虽然部分菌株在离体分析与盆栽试验中表现出理想防治效果,但尚未真正应用于田间试验。综上所述,猕猴桃自身微生态(根际、内生、叶际)是筛选高效且适配性强的 Psa 生防菌的理想来源。同时,借助植物与微生物的互作机制,可从猕猴桃生境中快速分离出高效的生防微生物(李青等, 2026)。

**5.1.2 加强 Psa 生防菌防控的广域性研究** 多数菌株仅在特定品种、特定环境有效,广域应用潜力未被充分挖掘。多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa* YLC1)不仅对 Psa 具有高效生防作用,还对多种植物病原细菌展现出广谱抑制活性,但其生防效果目前仅在‘红阳’猕猴桃上得到验证(Wang H et al., 2023)。*Flavobacterium* F55 已在陕西省内 3 个不同试验区完成防效验证,然而该菌株的防控研究目前仅局限于‘红阳’猕猴桃(Zheng et al., 2024)。食苯假单胞菌(*Pseudomonas benzenivorans* CXG2-5)对 Psa 具有良好的防治效果,不过其应用测试目前仅覆盖湖南部分产区(黄静等, 2025)。多数已分离的生防菌均缺乏对其广域应用潜力的系统评价,难以满足不同生态区猕猴桃产业的绿色防控需求。建议首先在猕猴桃主产区挖掘本土多功能优势菌株,其对本地环境、Psa 种群的适配性更强,更易实现大面积应用。其次,靶向筛选对多种 Psa 菌株均有强拮抗的生防菌。最后,加大某种生防菌剂的研发,实行跨区域田间适应性验证。

**5.1.3 开展生物防控机制的系统性研究** 生防菌、病原菌与宿主植物间的互作是一个涵盖分子信号传导、代谢调控与微生态平衡的复杂网络系统,并且这一互作过程受微环境的影响极为显著,实验室模拟条件难以精准复刻田间复杂的微环境,制约着人们对其深层机制的探究。近期,西北农林科技大学果树病害综合防治研究团队阐明了维管组织介导的 Psa 系统性传导是溃疡病呈现“一病多症”及“发病快、死树急”的内在机制,为 Psa 的精准防控找到了关键的突破口(Tian et al., 2025a)。猕猴桃根际来源的嗜根假单胞菌

(*Pseudomonas rhizophila* Z98)能抑制 Psa 在木质部叶脉中的扩散传播,生防效果达 98.89%(Tian et al., 2025b)。李青等(2026)发现了“溃疡病菌入侵-猕猴桃有益菌定向富集”的动态互作网络,为植物-微生物联合抗病理论体系的发展提供理论依据。研究者可依托微生物-植物互作机制,深度解析生防菌的防治机理,通过人为构建特定微生物菌群,有效提升其适配性与定殖能力,进而增强植物的抗病能力。

**5.1.4 加快可推广应用微生物菌剂研制进程** 尽管部分生防菌在小范围田间试验中对 KBC 展现出显著的防治效果,但其菌剂研发与产业化进程仍较为缓慢。菌剂研发受到菌株稳定性、环境适应性、作用机制、生产及制剂技术、登记流程与成本控制等多重因素的制约,因此应该优先研发能直接应用于田间的简易剂型,简化繁琐的施用流程。首先,可湿性粉剂成本低廉、易于储存,适用于叶面喷雾且适配无人机施药;悬浮剂分散性佳、附着力强,适合枝干涂抹与灌根作业;颗粒剂缓释性能优异,适用于根际施用,可与有机肥、生物炭混合使用,适配“水肥菌一体化”技术。其次,筛选玉米粉、豆粕、麸皮等农业废弃物作为发酵原料,优化发酵工艺参数,提高菌株增殖效率,缩短发酵时间,降低发酵成本,实现“低成本、高产”的目标。最后,联合当地农业技术推广中心、猕猴桃产业协会以及龙头企业,开展菌剂示范推广工作,建设核心示范园,让种植户直观看到防控效果。目前, Wang 等(2022)基于植物病原菌富集原理构建的生防菌靶向分离技术体系,成功分离出能有效抑制溃疡病菌的沙福芽孢杆菌(*Bacillus safensis*),并依托该菌株研发出低毒高效的“中生防药剂”,且已在湖北省多地开展田间防效验证,这使得该药剂有望在实际生产中推广应用。

## 5.2 展望

**5.2.1 合成生物学改造生防菌** 借助 CRISPR-Cas9 等高效基因编辑技术,定向优化 KBC 生防菌的核心功能模块。(1)通过过表达冷休克蛋白基因(Csp 家族)及渗透调节相关基因,显著增强菌株在极端环境中的存活能力与定殖效率。(2)通过强启动子改造、沉默冗余代谢基因等手段,定向重构抗菌代谢物合成途径,或异源表达 Psa 特异性裂解基因,显著提升其抑菌活性与靶向性。(3)导入植物维管束亲和基因并优化鞭毛基因,增强菌株

在猕猴桃木质部的趋化运动能力;强化生物膜合成基因簇,促使工程菌在伤口、导管口稳定占位,进而阻断 Psa 的入侵通道。(4)构建“Psa 感应-智能杀伤-自身调控”一体化回路,让 KBC 工程菌株可精准识别 Psa 并按需启动抑菌功能,减少对果园土著微生物群的干扰;同时结合营养缺陷型底盘改造,提升工程菌株的环境安全性,为其田间规模化应用筑牢基础。

5.2.2 基于微生物组的病害预警与精准防控 基于微生物组学技术,解析猕猴桃溃疡病健康植株与发病植株根际、叶际及枝干维管内生菌群结构差异,筛选病害特异性微生物标记物,进而构建潜伏侵染阶段的早期微生态预警模型;同时通过定向修复核心抗病有益菌群、组装合成功能菌群、优化栽培管理以调控果园微生态,构建从早期风险预警到菌群精准重塑的一体化绿色防控体系。

5.2.3 生防菌与智慧农业的融合应用 借助在线监测设备,对果园环境、Psa 菌量及 KBC 生防菌的定殖动态进行实时监测,通过完善大数据分析模型,进一步推动智能装备与 KBC 生防菌施用的深度适配;研发适用于猕猴桃枝干维管系统的精准注射设备、无人机变量施药系统等智能装备,以实现 KBC 生防菌的定向递送与定量施用,有效提升其施用效率与防治效果;同时结合“水肥菌一体化”智慧灌溉技术,促进 KBC 生防菌应用与栽培管理的协同融合。

## 参考文献:

- ABD EL-MAGEED T A, RADY M M, TAHA R S, et al., 2020. Effects of integrated use of residual sulfur-enhanced biochar with effective microorganisms on soil properties, plant growth and short-term productivity of *Capsicum annuum* under salt stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 261: 108930.
- ALI M A, LUO J Y, AHMED T, et al., 2022. *Pseudomonas bijieensis* strain XL17 within the *P. corrugata* subgroup producing 2, 4-diacetylphloroglucinol and lipopeptides controls bacterial canker and gray mold pathogens of kiwifruit [J]. *Microorganisms*, 10(2): 425.
- BAI J, LIU Y X, LIU M J, et al., 2022. Application of phage therapy against red-fleshed kiwifruit canker [J]. *Biological Control*, 169: 104893.
- BIONDI E, SCHIAVI D, PEREZ FUENTEALBA S, et al., 2022. *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* strain D747 to control the kiwifruit bacterial canker disease [J]. *Acta Horticulturae*, 1332: 95-102.
- CHEN Q, YU J J, HE J, et al., 2022. Isobenzofuranones and isocoumarins from kiwi endophytic fungus *Paraphaeosphaeria sporulosa* and their antibacterial activity against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Phytochemistry*, 195: 113050.
- CONG Y Z, 2019. Novel mixed fermentation of bio-control microorganisms treatment agent for suppressing kiwifruit bacterial canker disease associated with soil microflora alterations [J]. *Journal of Plant Physiology & Pathology*, 7: 27.
- DARANAS N, ROSELLÓ G, CABREFIGA J, et al., 2019. Biological control of bacterial plant diseases with *Lactobacillus plantarum* strains selected for their broad-spectrum activity [J]. *Annals of Applied Biology*, 174(1): 92-105.
- DENG S Y, CHANG W, QUE Y W, et al., 2023. Survival of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in detached kiwifruit leaves at different environmental conditions [J]. *PeerJ*, 11: e15031.
- DONATI I, BURIANI G, CELLINI A, et al., 2014. New insights on the bacterial canker of kiwifruit (*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*) [J]. *Journal of Berry Research*, 4(2): 53-67.
- DONATI I, CELLINI A, BURIANI G, et al., 2018. Pathways of flower infection and pollen-mediated dispersion of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, the causal agent of kiwifruit bacterial canker [J]. *Horticulture Research*, 5: 56.
- DU Z N, YAN Z Y, HOU Z Y, et al., 2021. Isolation and identification of pathogen causing canker and screening of biocontrol bacteria in kiwifruit [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 34(4): 755-761. [杜贞娜, 晏子英, 侯忠余, 等, 2021. 猕猴桃溃疡病病原菌的鉴定及生防菌的筛选 [J]. *西南农业学报*, 34(4): 755-761.]
- ELNAHAL A S M, EL-SAADONY M T, SAAD A M, et al., 2022. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: a review [J]. *Plant Pathology*, 162(4): 759-792.
- EL-SAADONY M T, SAAD A M, SOLIMAN S M, et al., 2022. Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: mechanisms, challenges and future perspectives [J]. *Frontiers in Plant Science*, 13: 923880.
- FENG Y, 2021. Comprehensive evaluation of quality indexes of different kiwifruit varieties based on principal component and cluster analysis [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 49(22): 180-185. [冯勇, 2021. 基于主成分和聚类分析的不同品种猕猴桃品质指标综合评价 [J]. *江苏农业科学*, 49(22): 180-185.]

- FLORES O, RETAMALES J, NÚÑEZ M, et al., 2020. Characterization of bacteriophages against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* with potential use as natural antimicrobials in kiwifruit plants [J]. *Microorganisms*, 8(7): 974.
- FRAMPTON R A, TAYLOR C, HOLGUÍN MORENO A V, et al., 2014. Identification of bacteriophages for biocontrol of the kiwifruit canker phytopathogen *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 80(7): 2216–2228.
- FU B, WANG J Z, ZHANG F, et al., 2020. Optimization of culture conditions of biocontrol bacteria for controlling pepper blight and compounding of inoculants [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 766(2): 84–86. [付博, 王家哲, 张锋, 等, 2020. 防治辣椒疫病的生防菌培养条件优化与菌剂复配 [J]. *现代农业科技*, 766(2): 84–86.]
- FU M, CHEN Y H, LIU Y X, et al., 2024. Genotype-associated core bacteria enhance host resistance against kiwifruit bacterial canker [J]. *Horticulture Research*, 11: uhae236.
- GUAN P, HE Z Y, DAI X J, et al., 2024. Screening and identification of actinomycetes for biocontrol of kiwifruit bacterial canker [J]. *Biotic Resources*, 46(3): 276–282. [关鹏, 贺志有, 代小娟, 等, 2024. 猕猴桃细菌性溃疡病生防放线菌的筛选与鉴定 [J]. *生物资源*, 46(3): 276–282.]
- GUO R W, 2016. Community diversity of endophyte of kiwifruit and screening of antagonistic strains [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1–75. [郭睿文, 2016. 猕猴桃内生菌多样性及溃疡病拮抗菌筛选 [D]. 成都: 成都理工大学: 1–75.]
- GUZMÁN-GUZMÁN P, KUMAR A, DE LOS SANTOS-VILLALOBOS S, et al., 2023. *Trichoderma* species: our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review [J]. *Plants (Basel)*, 12: 432.
- HAN X, ZHANG Y L, ZHANG Q, et al., 2023. Two haplotype-resolved, gap-free genome assemblies for *Actinidia latifolia* and *Actinidia chinensis* shed light on the regulatory mechanisms of vitamin C and sucrose metabolism in kiwifruit [J]. *Molecular Plant*, 16(2): 452–470.
- HILL R, STARK C, CUMMINGS N, et al., 2015. Use of beneficial microorganisms and elicitors for control of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in kiwifruit (*Actinidia* spp.) [J]. *Acta Horticulturae*, 1095: 137–144.
- HU R, XU X H, JIA Y J, et al., 2025. Phage cocktail alleviates bacterial canker of kiwifruit by modulating bacterial community structure in field trial [J]. *Microorganisms*, 13(1): 104.
- HUANG J, YANG R L, LIU X Y, et al., 2025. Screening and identification of a biocontrol strain CXG2-5 against kiwifruit bacterial canker and preparation of microcapsules [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 41(10): 3734–3746. [黄静, 杨若兰, 刘馨颖, 等, 2025. 猕猴桃细菌性溃疡病生防菌 CXG2-5 的筛选鉴定及微胶囊菌剂制备 [J]. *生物工程学报*, 41(10): 3734–3746.]
- HUANG L L, LIU L, LIU W, et al., 2025. A compound biocontrol inoculant for controlling kiwifruit bacterial canker: CN202310604073.0 [P]. 2025–12–09. [黄丽丽, 刘露, 刘巍, 等, 2025. 一种防治猕猴桃细菌性溃疡病的复配生防菌剂: CN202310604073.0 [P]. 2025–12–09.]
- HUANG L L, ZHENG W, LIU W, et al., 2023. A bacterium of the genus *Flavobacterium* and its application in agriculture: CN116286558 A [P]. 2023–06–23. [黄丽丽, 郑伟, 刘巍, 等, 2023. 一种黄杆菌及其在农业上的应用: CN116286558 A [P]. 2023–06–23.]
- HUANG Y C, 2012. Identification of an antagonistic actinomycete TGNBSA5 against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* and study on its bioactive components [D]. Yangling: Northwest A & F University: 1–60. [黄以超, 2012. 猕猴桃溃疡病菌生防放线菌 TGNBSA5 的鉴定及其活性组分的初步研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学: 1–60.]
- KIM M J, CHAE D H, CHO G, et al., 2019. Characterization of antibacterial strains against kiwifruit bacterial canker pathogen [J]. *Journal of Plant Pathology*, 35(5): 473–485.
- LI C, 2025. Development of a plant immune inducer and research on integrated control techniques for kiwi fruit canker in Funiu mountain area [D]. Yangling: Northwest A & F University: 1–75. [李晨, 2025. 一种植物免疫诱抗剂的研制及伏牛山区猕猴桃溃疡病综合防控技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学: 1–75.]
- LI C, WANG T L, MAO Y R, et al., 2024. Demonstration effect of key prevention and control technologies of “two before and two after” for kiwifruit canker [J]. *China Fruits* (7): 111–112. [李晨, 王天乐, 毛怡茹, 等, 2024. 猕猴桃溃疡病“两前两后”关键防控技术示范效果 [J]. *中国果树* (7): 111–112.]
- LI D W, HUANG W J, ZHONG C H, 2024. Current status of China’s kiwifruit industry and development recommendations for the “15th Five-Year Plan” [J]. *Journal of Fruit Science*, 41(11): 2149–2159. [李大卫, 黄文俊, 钟彩虹, 2024. 中国猕猴桃产业现状及“十五五”发展建议 [J]. *果树学报*, 41(11): 2149–2159.]
- LI J, 2010. Biological control technologies and field applications for common diseases of kiwifruit in Shaanxi [D]. Xi’an: Northwest University: 1–84. [李娟, 2010. 陕西猕猴桃常见病害生物防治技术及田间应用 [D]. 西安: 西北大学: 1–84.]

- LI Q, LIU H H, XIAO H L, et al., 2026. Analysis of rhizosphere soil microbial community structure and diversity under different incidence levels of kiwifruit canker [J/OL]. *Plant Protection*: 1–13 [2026–04–10]. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2025239>. [李青, 刘浩浩, 肖海林, 等, 2026. 猕猴桃溃疡病不同发病程度下根际土壤微生物群落结构和多样性分析 [J/OL]. *植物保护*: 1–13 [2026–04–10]. <https://doi.org/10.16688/j.zwbh.2025239>.]
- LIN L, LI L, TAO M, et al., 2023. Assembly of an active microbial consortium by engineering compatible combinations containing foreign and native biocontrol bacteria of kiwifruit [J]. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 21: 3672–3679.
- LIU L, 2023. Screening and optimization of fermentation process of compound antagonistic strain against kiwifruit bacterial canker [D]. Yangling: Northwest A & F University: 1–74. [刘露, 2023. 猕猴桃细菌性溃疡病复配拮抗菌的筛选及发酵工艺优化 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学: 1–74.]
- LIU W, WANG H, YANG R L, et al., 2023. Effect of *Streptomyces lavendulae* gCLA4 on control of kiwifruit bacterial canker and identification of its antibacterial substances [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 32(8): 1289–1296. [刘巍, 王华, 杨若兰, 等, 2023. 淡紫灰链霉菌 gCLA4 对猕猴桃溃疡病预防效果及抑菌活性成分分离鉴定 [J]. *西北农业学报*, 32(8): 1289–1296.]
- LIU Y X, LIU M J, HU R, et al., 2021. Isolation of the novel phage PHB09 and its potential use against the plant pathogen *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Viruses*, 13(11): 2275.
- LOPES M M, BARTOLOMEU M, GOMES A T P C, et al., 2020. Antimicrobial photodynamic therapy in the control of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* transmission by kiwifruit pollen [J]. *Microorganisms*, 8(7): 1022.
- MA J T, DONG X Y, LI Z H, et al., 2023. Antibacterial metabolites from kiwi endophytic fungus *Fusarium tricinctum*, a potential biocontrol strain for kiwi canker disease [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(20): 7679–7688.
- MA Q F, 2021. Studies on the mixed culture fermentation of *Trichoderma longibrachiatum* and *Bacillus amyloliquefaciens* to control plant diseases [D]. Qingdao: Shandong University: 1–193. [马群飞, 2021. 混合发酵长枝木霉和解淀粉芽孢杆菌防治植物病害的研究 [D]. 青岛: 山东大学: 1–193.]
- MASSART S, PERAZZOLLI M, HÖFTE M, et al., 2015. Impact of the omic technologies for understanding the modes of action of biological control agents against plant pathogens [J]. *Biological Control*, 60(6): 725–746.
- PARK J, LIM J A, YU J G, et al., 2018. Genomic features and lytic activity of the bacteriophage PPPL-1 effective against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, a cause of bacterial canker in kiwifruit [J]. *Microbial Biotechnology*, 28(9): 1542–1546.
- PEREIRA C, COSTA P, PINHEIRO L, et al., 2021. Kiwifruit bacterial canker: an integrative view focused on biocontrol strategies [J]. *Planta*, 253(2): 49–68.
- PINHEIRO L A M, PEREIRA C, BARREAL M E, et al., 2020. Use of phage  $\phi 6$  to inactivate *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in kiwifruit plants: in vitro and ex vivo experiments [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 104(3): 1319–1330.
- PINHEIRO L A M, PEREIRA C, FRAZÃO C, et al., 2019. Efficiency of phage  $\phi 6$  for biocontrol of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*: an in vitro preliminary study [J]. *Microorganisms*, 7(9): 286.
- QIN H Q, LIU W, ZHAO Y J, et al., 2020. Demonstration and evaluation of key techniques for control of kiwifruit bacterial canker [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 66(5): 20–25. [秦虎强, 刘巍, 赵英杰, 等, 2020. 猕猴桃细菌性溃疡病防控关键技术示范及效果评价 [J]. *陕西农业科学*, 66(5): 20–25.]
- RENZI M, COPINI P, TADDEI A R, et al., 2012. Bacterial canker on kiwifruit in Italy: anatomical changes in the wood and in the primary infection sites [J]. *Phytopathology*, 102(9): 827–840.
- SANTOS M G, NUNES DA SILVA M, VASCONCELOS M W, et al., 2024. Scientific and technological advances in the development of sustainable disease management tools: a case study on kiwifruit bacterial canker [J]. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1306420.
- SHAO B L, WANG C H, LIU L X, et al., 2015. Identification and application of biocontrol *Bacillus* B2 against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 31(26): 103–108. [邵宝林, 王成华, 刘露希, 等, 2015. 猕猴桃溃疡病生防芽孢杆菌 B2 的鉴定及应用 [J]. *中国农学通报*, 31(26): 103–108.]
- SHAO X L, WU Q H, LI L, et al., 2024. Adapting the inoculation methods of kiwifruit canker disease to identify efficient biocontrol bacteria from branch microbiome [J]. *Molecular Plant Pathology*, 25(1): e13399.
- SHEN Z, HUANG L L, TU X, et al., 2008. Control effect of kiwifruit bacterial canker by active metabolites from plant endophytic actinomycetes [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 24(4): 329–334. [申哲, 黄丽丽, 涂璇, 等, 2008. 植物内生放线菌活性物质防治猕猴桃溃疡病 [J]. *中国生物防治*, 24(4): 329–334.]

- SHENG C B, AN D R, LU Y W, et al., 2006. Study on control effect of kiwifruit bacterial canker by bio-control strain B56-3 [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 15(3): 75-78. [盛存波, 安德荣, 鲁燕汶, 等, 2006. 生防菌株 B56-3 防治猕猴桃溃疡病的初步研究 [J]. *西北农业学报*, 15(3): 75-78.]
- SHI Y W, HOU J Q, XU L K, et al., 2023. Screening and identification of marine bacteria antagonistic to the pathogen causing kiwifruit bacterial canker [J]. *Light Industry Science and Technology*, 39(3): 33-35. [石悦炜, 侯景棋, 徐麓凯, 等, 2023. 拮抗猕猴桃溃疡病致病菌的海洋细菌的筛选与鉴定 [J]. *轻工科技*, 39(3): 33-35.]
- SONG Y R, VU N T, PARK J, et al., 2021. Phage PPPL-1, a new biological agent to control bacterial canker caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* in kiwifruit [J]. *Antibiotics (Basel)*, 10(5): 554.
- TIAN R Z, TIAN Y J, DANG Q Q, et al., 2025a. Vascular network-mediated systemic spread of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causes the bacterial canker of kiwifruit [J]. *Horticultural Plant Journal*, 11(6): 2093-2108.
- TIAN R Z, TIAN Y J, MI Q Q, et al., 2025b. Histochemical analysis reveals the biocontrol activity of a rhizospheric bacterium *Pseudomonas rhizophila* Z98 against kiwifruit bacterial canker [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 208: 106251.
- TIAN X L, YIN X H, LONG Y H, et al., 2017. Screening, identification and optimization of fermentation conditions for antagonistic actinomycetes against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Food Science*, 38(16): 79-85. [田雪莲, 尹显慧, 龙友华, 等, 2017. 猕猴桃溃疡病菌拮抗菌筛选、鉴定及发酵条件优化 [J]. *食品科学*, 38(16): 79-85.]
- VANNESTE J L, 2012. *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa): a threat to the New Zealand and global kiwifruit industry [J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 40(4): 265-267.
- VANNESTE J L, 2017. The scientific, economic, and social impacts of the New Zealand outbreak of bacterial canker of kiwifruit (*Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*) [J]. *Annual Review of Phytopathology*, 55: 377-399.
- WANG B C, GUO Y S, CHEN X T, et al., 2023. Assessment of the biocontrol potential of *Bacillus velezensis* WL-23 against kiwifruit canker caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14): 11541.
- WANG B Z, 2022. Pathogen-enrichment dependent screening of host-derived biocontrol bacteria for controlling kiwifruit bacterial canker disease and its application with *Lysobacter enzymogenes* in developing a complex biocontrol community [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1-63. [王博真, 2022. 基于病原菌富集的猕猴桃溃疡病生防细菌的高效发掘及其与产酶溶杆菌复配菌剂的初步研发 [D]. 南京: 南京农业大学: 1-63.]
- WANG B Z, LI L, LIN Y H, et al., 2022. Targeted isolation of biocontrol agents from plants through phytopathogen co-culture and pathogen enrichment [J]. *Phytopathology Research*, 4: 19.
- WANG F, LI D, ZHANG X W, et al., 2017. Control efficacy of *Streptomyces* sp. SY-L12 on *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, causal agent of kiwifruit bacterial canker [J]. *Northern Horticulture*(7): 139-142. [王芳, 李丹, 张信旺, 等, 2017. 一株链霉菌对猕猴桃溃疡病的防效 [J]. *北方园艺*(7): 139-142.]
- WANG H, MI Q Q, MAO Y R, et al., 2024. Streptothricin-F inhibition of FtsZ function: a promising approach for controlling *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(5): 2624-2633.
- WANG H, WANG N N, TAN Y X, et al., 2023. *Paenibacillus polymyxa* YLC1: a promising antagonistic strain for biocontrol of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, causing kiwifruit bacterial canker [J]. *Pest Management Science*, 79(11): 4357-4366.
- WANG Q P, ZHANG C, LONG Y H, et al., 2021. Bioactivity and control efficacy of the novel antibiotic tetramycin against various kiwifruit diseases [J]. *Antibiotics*, 10(3): 289.
- WANG W X, SHEN B, JIA H B, et al., 2020. Application of rhizospheric biocontrol consortia and the potential mechanisms of their enhancing efficacy on disease-suppressive effect [J]. *Biotechnology Bulletin*, 36(9): 31-41. [王卫雄, 沈博, 贾洪柏, 等, 2020. 根际生防菌群的应用及其防病增效的潜在机制 [J]. *生物技术通报*, 36(9): 31-41.]
- WICAKSONO W A, JONES E E, CASONATO S, et al., 2018. Biological control of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* (Psa), the causal agent of bacterial canker of kiwifruit, using endophytic bacteria recovered from a medicinal plant [J]. *Biological Control*, 116: 103-112.
- WU Q H, 2023. Development of targeted biocontrol bacterial agents against kiwifruit bacterial canker and study on its antibacterial mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1-92. [吴倩桦, 2023. 猕猴桃溃疡病靶向性生防菌剂的研发及其杀菌机制研究 [D]. 南京: 南京农业大学: 1-92.]
- YAN J Y, CUI Y L, DING J, et al., 2013. Isolation and identification of the causal pathogens for kiwifruit bacterial canker and the isolation of the antagonistic endophytic fungi from kiwifruit in Sichuan, China [J]. *Journal of Agricultural Science*, 5(7): 262-268.
- YAN Z, FU M, MIR S H, et al., 2023. Diversity and

- characterization of antagonistic bacteria against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* isolated from kiwifruit rhizosphere [J]. FEMS Microbiology Letters, 370: fnad078.
- YANG R L, 2022. Screening of biocontrol microbe and agent preparation on kiwifruit bacterial canker [D]. Yangling: Northwest A & F University: 1-83. [杨若兰, 2022. 猕猴桃细菌性溃疡病生防菌筛选及其菌剂制备 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学: 1-83.]
- YIN Z C, GU J Y, LI N Y, et al., 2024. Construction and control effect of biocontrol flora of kiwifruit bacterial canker [J]. Scientia Silvae Sinicae, 60 (12): 101-110. [尹志诚, 顾佳颖, 李南羿, 等, 2024. 猕猴桃溃疡病生防菌群的构建及其生防效应 [J]. 林业科学, 60 (12): 101-110.]
- YU J G, LIM J A, SONG Y R, et al., 2016. Isolation and characterization of bacteriophages against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* causing bacterial canker disease in kiwifruit [J]. Microbial Biotechnology, 26(2): 385-393.
- YU J J, JIN Y X, HUANG S S, et al., 2021. Sesquiterpenoids and xanthenes from the kiwifruit-associated fungus *Bipolaris* sp. and their anti-pathogenic microorganism activity [J]. Journal of Fungi, 8(1): 9.
- YU J J, WEI W K, ZHANG Y, et al., 2022. Terpenoids from kiwi endophytic fungus *Bipolaris* sp. and their antibacterial activity against *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. Frontiers in Chemistry, 10: 990734.
- ZHANG L D, 2021. Isolation and identification of the causal pathogens for summer canker on kiwifruit and screening of biocontrol strains [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University: 1-58. [章丽丹, 2021. 猕猴桃夏季溃疡病病原菌的分离鉴定及生防菌株的筛选 [D]. 南京: 南京农业大学: 1-58.]
- ZHANG W J, 2020. Screening of antagonistic strain of kiwifruit bacterial canker and field test of pesticide effectiveness [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 66(5): 36-38, 43. [张文娟, 2020. 猕猴桃溃疡病拮抗菌株筛选及田间药效试验 [J]. 陕西农业科学, 66(5): 36-38, 43.]
- ZHAO C, LIU W, ZHANG Y L, et al., 2023. Two transcription factors, AcREM14 and AcC3H1, enhance the resistance of kiwifruit *Actinidia chinensis* var. *chinensis* to *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. Horticulture Research, 11: uhad242.
- ZHAO X, ZHAI Y, WEI L, et al., 2024. Isolation and identification of a novel *Bacillus velezensis* strain JIN4 and its potential for biocontrol of kiwifruit bacterial canker caused by *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* [J]. Frontiers in Plant Science, 15: 1513438.
- ZHENG W, WANG N, QIAN G L, et al., 2024. Cross-niche protection of kiwi plant against above-ground canker disease by beneficial rhizosphere *Flavobacterium* [J]. Communications Biology, 7: 1458.
- ZHONG C H, LI L, PAN H, et al., 2020. Occurrence rule and comprehensive control of kiwifruit bacterial canker disease [J]. China Fruits (1): 9-13, 18. [钟彩虹, 李黎, 潘慧, 等, 2020. 猕猴桃细菌性溃疡病的发生规律及综合防治技术 [J]. 中国果树 (1): 9-13, 18.]
- ZHU H Y, MA Y, KE Y, et al., 2016. Screening, identification and controlling effects of biocontrol strain against Chinese gooseberry or kiwi fruit bacterial canker [J]. Journal of Microbiology, 36(5): 90-96. [朱海云, 马瑜, 柯杨, 等, 2016. 猕猴桃细菌性溃疡病生防菌的筛选、鉴定及其防效初探 [J]. 微生物学杂志, 36(5): 90-96.]
- ZHU H Y, MA Y, KE Y, et al., 2021. Screening and identification of an antagonist against the pathogen of kiwifruit canker and its antifungal activity to the phytopathogenic fungus [J]. Biotechnology Bulletin, 37(6): 66-72. [朱海云, 马瑜, 柯杨, 等, 2021. 猕猴桃溃疡病菌拮抗菌的筛选、鉴定及其对植物病原真菌的抗性 [J]. 生物技术通报, 37(6): 66-72.]

(责任编辑 邓斯丽)