



徐钰姣,汪志远,吴金梅,等.芽胞杆菌在植物病害生物防治中的作用机制与应用研究进展[J].南京农业大学学报,2026,49(5):1123-1132.
Xu Y J, Wang Z Y, Wu J M, et al. Research progress on the mechanisms and applications of *Bacillus* in the biological control of plant diseases[J].
Journal of Nanjing Agricultural University, 2026, 49(5): 1123-1132.

特约综述

芽胞杆菌在植物病害生物防治中的作用机制与应用研究进展

徐钰姣,汪志远,吴金梅,高学文,伍辉军*,顾沁*

(南京农业大学植物保护学院,江苏 南京 211800)

摘要:芽胞杆菌及其近缘产芽胞细菌具有芽胞抗逆性强、代谢产物丰富、易于发酵和制剂加工等特点,部分菌株还具有较强的植物相关生态位定殖能力,是植物病害生物防治领域重要的微生物资源。本文综述芽胞杆菌主要生防类群、活性物质、作用机制及应用进展,重点介绍枯草芽胞杆菌种复合群、蜡样芽胞杆菌广义群以及具有重要农业应用价值的近缘产芽胞细菌,论述脂肽、聚酮类及聚酮-非核糖体肽杂合化合物、小分子抗生素、胞外酶、嗜铁素和挥发性有机物等主要活性物质合成与作用机制。芽胞杆菌可通过定殖与营养竞争、直接拮抗、诱导植物系统抗性、促进植物生长及调节植物相关微生物群落等途径抑制病害发生。其制剂已广泛用于种子处理、土壤处理、叶面喷施和采后病害防控。目前仍存在实验室筛选结果与田间防效不一致、近缘类群分类鉴定困难及部分菌株存在安全风险等问题。今后应加强菌株的准确鉴定、分类与安全评价,深入解析芽胞杆菌植物相关生态位中的定殖与功能表达机制,推进制剂优化和复合生防体系构建,以提高芽胞杆菌生防产品的田间稳定性和应用水平。

关键词:芽胞杆菌;植物病害;生物防治;活性代谢物;定殖;诱导系统抗性

中图分类号:S476.1

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2026)05-1123-10

Research progress on the mechanisms and applications of *Bacillus* in the biological control of plant diseases

XU Yujiao, WANG Zhiyuan, WU Jinmei, GAO Xuwen, WU Huijun*, GU Qin*

(College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China)

Abstract: *Bacillus* spp. and closely related spore-forming bacteria are important microbial resources for the biological control of plant diseases because of their highly stress-resistant endospores, diverse metabolites, and suitability for fermentation and formulation. Some strains also exhibit strong colonization capacity in plant-associated niches. This review summarizes the principal *Bacillus* taxa used in biological control, their bioactive compounds, mechanisms of action, and advances in practical applications, with particular emphasis on the *Bacillus subtilis* species complex, the *Bacillus cereus* sensu lato group, and closely related spore-forming bacteria of agricultural importance. Major bioactive compounds, including lipopeptides, polyketides and polyketide-nonribosomal peptide hybrids, small-molecule antibiotics, extracellular enzymes, siderophores, and volatile organic compounds, are also summarized. *Bacillus* spp. can suppress plant diseases through colonization and nutrient competition, direct antagonism, induction of systemic resistance, promotion of plant growth, and modulation of plant-associated microbial communities. Their formulations have been widely applied in seed treatment, soil treatment, foliar spraying, and postharvest disease management. However, several challenges remain, including inconsistencies between laboratory screening results and field efficacy, difficulties in the taxonomic identification of closely related taxa, and potential safety risks associated with certain strains. Future research should strengthen accurate strain identification, taxonomic classification, and safety assessment, further elucidate the mechanisms underlying colonization and functional expression in plant-associated niches, and promote formulation optimization and the development of combined biocontrol systems to improve the field stability and practical application of *Bacillus*-based biocontrol products.

Keywords: *Bacillus*; plant disease; biological control; bioactive metabolites; colonization; induced systemic resistance

收稿日期:2026-07-09

基金项目:教育部学科突破先导项目(JYB2025XDXM703)

作者简介:徐钰姣,南京农业大学钟山青年研究员,主要从事植物微生物互作与病害绿色防控机制研究,E-mail:xuyujiao@njau.edu.cn。*通信作者:顾沁,教授,博导,主要研究方向为植物病害生物防控技术,E-mail:guqin@njau.edu.cn;伍辉军,教授,博导,研究方向为植物病害生物防治,E-mail:hjwu@njau.edu.cn。

植物病害绿色防控是减少化学农药依赖的重要途径之一。与传统化学防治方式相比,微生物生防具有环境友好性高、作用机制多样以及生态相容性较好等特点,因此近年来受到广泛关注。其中,芽胞杆菌及其近缘产芽胞细菌能够形成耐逆内生芽胞,便于工业化发酵、制剂加工、保存和运输^[1-2]。不同菌株在生态适应性方面存在差异,但总体上可在根际、叶际、种子表面、穗部以及采后果蔬表面等植物相关生态位中定殖,并持续释放抗菌代谢物,影响寄主免疫和微生物群落结构^[1,3]。这些特征使芽胞杆菌成为商业化程度较高、应用场景较为广泛的一类生防微生物资源^[2]。本文以植物病害生物防治为主线,在已有材料基础上,结合分类学、天然产物化学、植物-微生物互作及生防制剂应用等研究进展,围绕芽胞杆菌的主要类群、活性代谢物及其生防机制等方面进行系统综述。

本文采用结构化叙述性综述方法,以 Web of Science Core Collection、Scopus、PubMed 和中国知网为主要数据库,并以 Google Scholar 及纳入文献的参考文献链补充检索,检索时段为建库至 2026 年 9 月 1 日。检索词围绕研究主题组合设置,包括“*Bacillus*”“*Bacillus subtilis* species complex”“*Bacillus velezensis*”“*Bacillus licheniformis*”“*Bacillus pumilus*”“*Bacillus thuringiensis*”“*Paenibacillus*”及“taxonomy/phylogenomics”“Cry/Vip”“lipopeptide/bacillomycin”“difficidin/bacillaene/mersacidin”“induced systemic resistance”“microbiome”“field efficacy/formulation/commercial product/registration”等英文词和相应中文词。在文献筛选中,分类学、代表性菌株及作用机制部分以近 5 年研究为主,同时酌情纳入能够提供基因组分类、突变体分析、化学鉴定或植物试验直接证据的早期关键研究。应用与产品部分重点选取近 5 年发表的田间试验和多地点研究,并参考现行官方登记资料及产品标签。仅涉及动物、食品发酵或环境修复的研究,以及菌株信息或资料来源无法核实的文献,不纳入本文分析。

1 芽胞杆菌的主要类群

1.1 分类学认识与生防相关类群

传统广义芽胞杆菌属包含多个系统发育距离较远的谱系。基因组分类研究已将其中若干谱系调整为新属,但植物病害生防文献中仍常沿用历史名称。为兼顾分类准确性与文献连续性,本文将芽胞杆菌属中的枯草芽胞杆菌种复合群和蜡样芽胞杆菌广义群作为两类重点对象,并将类芽胞杆菌、短芽胞杆菌等近缘产芽胞细菌作补充讨论^[4-5]。近缘种仅凭 16S rRNA 序列往往难以准确区分,因此,菌株鉴定应综合采用全基因组平均核苷酸一致性(ANI)、数字 DNA-DNA 杂交(dDDH)及核心基因组系统发育分析等方法。

1.2 枯草芽胞杆菌种复合群

枯草芽胞杆菌种复合群是植物病害生防研究和产品开发的核心理类群。基于核心基因组系统发育分析,枯草芽胞杆菌种复合群可概括为枯草芽胞杆菌、解淀粉芽胞杆菌、地衣芽胞杆菌和短小芽胞杆菌 4 个主要分支^[5]。其中,解淀粉芽胞杆菌、贝莱斯芽胞杆菌和暹罗芽胞杆菌亲缘关系密切,可作为“解淀粉芽胞杆菌操作分类群”加以讨论^[5-6]。该复合群的代表菌株常携带非核糖体肽合成酶、聚酮合酶、嗜铁素和挥发物相关基因簇,并通过定殖、直接拮抗和寄主免疫调节共同发挥作用^[1,7-9]。

1.3 蜡样芽胞杆菌广义群

蜡样芽胞杆菌、苏云金芽胞杆菌和炭疽芽胞杆菌同属蜡样芽胞杆菌广义群,亲缘关系近,部分毒力或杀虫决定因子位于可移动遗传元件上^[10-11]。苏云金芽胞杆菌以产生晶体蛋白(Cry)和营养期杀虫蛋白(Vip)等杀虫蛋白而著称^[12]。除杀虫活性外,少数菌株还表现出抑制植物病原菌的潜力。例如,CHGP12 能够产生多种抗菌代谢物,并在植物试验中降低鹰嘴豆枯萎病的严重程度^[13]。鉴于苏云金芽胞杆菌隶属于蜡样芽胞杆菌广义群,将其作为植物病害生防候选菌株时,应在菌株水平系统评价肠毒素、呕吐毒素(cereulide)等毒力因子及其相关基因、抗菌药物耐药性和表型安全性。

1.4 类芽胞杆菌和短芽胞杆菌等近缘产芽胞细菌

除芽胞杆菌属核心生防类群外,类芽胞杆菌属(*Paenibacillus*)和短芽胞杆菌属(*Brevibacillus*)中的部分菌株也具有农业价值。例如,多黏类芽胞杆菌 TP3 产生的杀镰孢菌素(fusaricidin)类化合物参与对灰葡萄孢的拮抗,并在草莓植物试验中降低灰霉病发生^[14];侧孢短芽胞杆菌 F5 的芽胞制剂或培养上清液对南方根结线虫表现出生物防治潜力^[15]。这些近缘产芽胞细菌与芽胞杆菌各物种的名称和功能不能相互替代;开发时应提供菌株保藏编号、全基因组鉴定、安全性评价和田间表现。

2 芽胞杆菌产生的主要活性物质

2.1 非核糖体合成脂肽类物质

脂肽是芽胞杆菌最具代表性的生防代谢物,主要包括表面活性素、泛革素和伊枯草菌素等家族^[16-18]。它们由非核糖体肽合成酶合成,常以多个同系物共存。表面活性素更多参与运动、生物膜形成和免疫激发等生理活动,泛革素与伊枯草菌素类则主要通过与细胞膜脂质相互作用,改变真菌或卵菌细胞膜的结构与通透性,进而抑制菌丝生长;三类物质可协同,但其贡献取决于菌株、产量、靶标和环境条件^[8,16-17]。因此,脂肽生物合成基因簇及其体外产物的检出并不能直接证明其生防功能,仍需通过突变体、原位代谢定量及植物试验加以验证。近年来的植物试验显示,脂肽不仅直接作用于病原菌,还会影响寄主防御和植物相关微生物群落。例如:贝莱斯芽胞杆菌 FZB42 的泛革素和杆菌霉素 D(bacillomycin D)参与水稻纹枯病抑制及根际群落重塑^[19];贝莱斯芽胞杆菌 Y6 产生的伊枯草菌素和泛革素参与水稻纹枯病防控,并在田间处理中表现出增产效应^[20]。这类结果比单纯平板抑菌更接近实际生态过程,但仍需多地点、多年份试验验证。

2.2 聚酮类及聚酮-非核糖体肽杂化化合物

解淀粉芽胞杆菌/贝莱斯芽胞杆菌相关菌株还可产生大环内酯素(macrolactin)、达菲菌素(difficidin)和芽胞杆菌烯(bacillaene)等聚酮或聚酮-非核糖体肽杂化化合物^[17,21-23]。这些物质对植物病原细菌或真菌的作用谱并不相同,并常与脂肽和胞外酶共同发挥作用。体外活性不能直接代表田间有效剂量,较可靠的功能判定应结合基因簇缺失、互补和侵染部位的代谢检测。

2.3 小分子抗生素与核糖体合成抗菌肽

除上述非核糖体产物外,芽胞杆菌还能产生枯草菌素(subtilin)、枯草菌糖肽(sublancin)、美杀菌素(mersacidin)等核糖体合成并经翻译后修饰的抗菌肽,以及溶杆菌素等结构较小的抗生素^[17,22]。它们可通过破坏细胞膜、抑制细胞壁或蛋白质合成发挥作用,但作用谱、稳定性和产量差异较大。

2.4 胞外酶、嗜铁素、挥发性有机物和免疫激发子

胞外水解酶、嗜铁素和挥发性有机物共同补充芽胞杆菌的抗菌体系。几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶和蛋白酶等可破坏病原菌相关结构;嗜铁素通过竞争 Fe^{3+} 限制病原菌;乙偶姻、2,3-丁二醇等挥发物则可参与远距离抑菌、促生或诱导抗性^[3,17]。这些物质通常在复杂代谢背景中共同出现,其实际贡献受营养、空间距离和环境条件制约。

芽胞杆菌还可通过脂肽、挥发物和细胞表面组分触发植物早期防御信号,并调节水杨酸、茉莉酸和乙烯相关通路^[1,3]。代谢物缺失突变体、寄主免疫指标和微生物组分析提示,同一代谢物可能同时作用于病原菌、寄主和周围微生物^[19,24]。表 1 依据枯草芽胞杆菌种复合群的主要系统发育分支、蜡样芽胞杆菌广义群及近缘产芽胞属选取代表性菌株,重点展示其产生的活性物质类型。

表 1 代表性生防菌株及其报道的活性物质

Table 1 Representative biocontrol strains and their reported bioactive compounds

菌株 Strain	所属类群 Group	报道的活性物质 Reported compounds	参考文献 Reference
<i>B. velezensis</i> FZB42	枯草芽胞杆菌种复合群	表面活性素、泛革素、杆菌霉素 D(bacillomycin D)、达菲菌素、大环内酯素、芽胞杆菌烯、溶杆菌素	[19,21,25-27]
<i>B. velezensis</i> DMW1	枯草芽胞杆菌种复合群	伊枯草菌素及多类抗菌代谢物	[23-24]
<i>B. velezensis</i> Y6	枯草芽胞杆菌种复合群	伊枯草菌素、泛革素	[20]
<i>B. methylotrophicus</i> DR-08 (现多归入 <i>B. velezensis</i>)	枯草芽胞杆菌种复合群	氧化达菲菌素、达菲菌素	[28]
<i>B. amyloliquefaciens</i> SQR9	枯草芽胞杆菌种复合群	杆菌霉素 D	[29]
<i>B. subtilis</i> RB14	枯草芽胞杆菌种复合群	伊枯草菌素 A、表面活性素	[30]
<i>B. licheniformis</i> N1	枯草芽胞杆菌种复合群	伊枯草菌素、表面活性素	[31]
<i>B. pumilus</i> W-7	枯草芽胞杆菌种复合群	表面活性素、泛革素 B	[32]
<i>B. thuringiensis</i> CHGP12	蜡样芽胞杆菌广义群	伊枯草菌素、泛革素、表面活性素、芽胞杆菌烯、芽胞杆菌素、植物唑菌素和溶杆菌素	[13]
<i>P. polymyxa</i> NX20	近缘产芽胞细菌	杀镰孢菌素(fusaricidin)	[33]

3 芽胞杆菌防治植物病害的作用机制

3.1 定殖与竞争作用

芽胞杆菌的生防效果并非由单一抗生素或某一生理过程决定,而与定殖、竞争、拮抗和寄主响应等多

个过程有关^[1,3]。其中,菌体能否到达并稳定占据根际、叶际、穗部、花器、伤口或采后果实表面等部位,是持续发挥生防作用的重要基础^[1,3]。

芽胞在适宜的水分、温度和营养条件下萌发后,可通过趋化和鞭毛运动接近植物组织,并借助表面附着和生物膜形成建立稳定种群。枯草芽胞杆菌生物膜主要由胞外多糖、TasA 纤维蛋白和疏水蛋白等组分构成,可提高菌体对干旱、紫外线、营养变化及微生物竞争的耐受能力^[34]。植物细胞壁多糖还可诱导枯草芽胞杆菌形成根相关生物膜^[35],表明植物来源信号能够影响芽胞杆菌的定殖过程。

定殖形成后,芽胞杆菌可优先占据根表、叶面、伤口和幼嫩组织等病原菌易侵染的部位,减少病原菌与寄主组织接触的机会。同时,芽胞杆菌能够利用根系分泌物和叶面渗出物中的糖类、有机酸和氨基酸等营养物质,与病原菌形成资源竞争。部分菌株还可分泌嗜铁素螯合 Fe^{3+} ,限制病原菌对铁的获取。由于铁与病原菌生长及毒力表达密切相关,铁竞争也是芽胞杆菌限制病原菌增殖和致病的重要方式之一^[3,27]。

3.2 拮抗菌作用

直接拮抗是芽胞杆菌抑制病原菌的主要方式。伊枯草菌素和泛革素家族常表现出较强的抗真菌、抗卵菌活性;表面活性素除具有一定膜活性外,还参与菌体运动、生物膜形成和植物免疫激发,部分脂肽在特定体系中也可抑制植物病原细菌^[16-18,36-38]。达菲菌素、大环内酯素和芽胞杆菌烯等聚酮或杂合化合物常表现较强的抗细菌活性^[17,21,25-26],溶杆菌素可通过抑制细胞壁前体合成发挥作用^[22]。

胞外水解酶也是芽胞杆菌拮抗病原菌的重要组成部分。几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶、蛋白酶、纤维素酶和脂肪酶等可作用于病原菌细胞壁或相关结构组分,影响菌丝生长、孢子萌发和侵染过程。胞外酶与脂肽、聚酮类物质及溶杆菌素等抗菌代谢物共同作用,可进一步增强对病原菌的抑制效果^[3,16-17,37]。

3.3 诱导植物系统抗性

除直接抑制病原菌外,芽胞杆菌还可诱导系统抗性(ISR)。植物识别鞭毛蛋白、脂肽和挥发性有机物等微生物来源信号后,可引发 Ca^{2+} 内流、活性氧爆发和 MAPK 级联反应,并通过茉莉酸/乙烯与水杨酸信号通路之间的交互调控形成防御预激^[38-40]。不同芽胞杆菌菌株在不同寄主和病原体系中所依赖的防御通路并不完全相同。因此,ISR 的判定应综合考虑微生物与病原菌的空间分离试验、菌株定殖对照、寄主防御信号响应及最终的病害抑制效果,避免仅依据单一防御酶活性或标记基因表达的变化得出结论。近年来的研究表明,芽胞杆菌介导的 ISR 具有明显的菌株、寄主和病原体系依赖性。贝莱斯芽胞杆菌 WB 处理西瓜后提高 PAL、POD、SOD、 β -1,3-葡聚糖酶活性并促进木质素、胍胍质及水杨酸/茉莉酸相关响应,对枯萎病的保护与转录组变化相一致^[41]。在拟南芥-灰霉菌体系中,贝莱斯芽胞杆菌 83 可通过乙偶姻及水杨酸、茉莉酸相关信号通路诱导抗性,植物突变体试验进一步验证了相关信号通路在该过程中的作用^[42]。与上述研究不同,在番茄-南方根结线虫体系中,分根试验和激素信号相关突变体分析均未能证明贝莱斯芽胞杆菌 YS-AT-DS1 的防治作用依赖典型 ISR,也未显示茉莉酸或水杨酸信号通路是其发挥防效的必要条件^[43]。这表明,该菌株在这一体系中的病害抑制作用可能主要源于直接作用或其他机制。因此,当研究仅观察到防御酶活性或少数标记基因表达升高时,只能认为其可能与诱导抗性有关,尚不足以证明典型 ISR 的发生。

3.4 促生作用与寄主抗病能力提升

芽胞杆菌的促生作用可在一定程度上缓解病害造成的生长损失。部分菌株能够产生吲哚乙酸等植物激素类物质,或具有 ACC 脱氨酶活性,从而影响植物根系发育和胁迫响应^[44-45]。IAA 是芽胞杆菌中研究较多的促生代谢物。张瑞福团队以贝莱斯芽胞杆菌 SQR9 为材料研究后发现,菌株 IAA 产量与其促生能力有关,IAA 合成发生变化后,植物促生效果也随之改变^[46]。进一步研究表明,SQR9 可通过多条色氨酸依赖途径合成 IAA,其中 PatB、YclC 和 DhaS 参与吲哚-3-丙酮酸途径^[47]。微生物来源 IAA 可改变根系构型,促进侧根和根毛发育,从而扩大根系与土壤的接触范围。在贝莱斯芽胞杆菌 FZB42 与拟南芥互作体系中,植物免疫和活性氧信号可反过来影响细菌 IAA 分泌及根部定殖^[48]。

除产生植物激素类物质外,部分芽胞杆菌还具有溶磷、解钾或固氮能力,并可通过分泌有机酸等方式提高养分有效性。根系发育和养分吸收改善后,植株通常具有较好的生长状态和胁迫耐受能力,从而减轻病原菌侵染造成的生长抑制和产量损失。因此,芽胞杆菌的促生作用虽不直接抑制病原菌,但可通过改善植物生长状态、增强植物对病原菌侵染的耐受能力,从而减轻病害造成的损失。

3.5 微生态调控作用

微生物组研究表明,接种芽胞杆菌产生的影响并不限于菌株本身。FZB42及其脂肽缺失突变体在水稻体系中引起不同的根际群落和寄主抗性响应^[19];田间施用贝莱斯芽胞杆菌制剂还可改变大豆不同生育期的根际群落、降低部分时期的镰刀菌相对丰度并提高产量^[49]。这些结果表明,芽胞杆菌可能通过调节植物微生物群落参与病害防控,但群落变化与病害减轻之间的因果关系仍需通过进一步的功能试验和不同环境条件下的重复验证加以确认。

总体来看,芽胞杆菌防治植物病害涉及定殖竞争、直接拮抗、诱导抗性、促进植物生长和微生态调控等多种作用。稳定定殖使菌株能够在目标部位持续发挥作用,抗菌代谢物和胞外酶直接限制病原菌,诱导抗性调动植物自身防御,促生作用则有助于减轻病害造成的生长损失。与此同时,芽胞杆菌还可影响植物相关微生物群落。不同机制相互联系,其贡献大小随菌株、寄主和环境条件而变化。因此,生防芽胞杆菌的评价不宜仅依据平板拮抗效果,还应结合定殖、活性代谢物、诱抗和促生性状以及环境适应性等进行综合分析。机制间也并非简单相加,而是存在促进和制约。例如:表面活性素既促进运动和生物膜,又可激发植物免疫;稳定定殖提高脂肽和胞外酶在侵染位点的局部暴露,而铁竞争和微生态重塑又会改变次级代谢表达。相反,过强的抗菌活性可能抑制其他有益微生物,持续激活植物免疫也可能消耗过多资源并影响植物生长。因此,机制贡献应在相同菌株背景下通过单基因/多基因缺失、时间序列定殖与代谢定量以及因子试验区分,并检验协同效应是否超出独立效应之和。

与其他生防微生物相比,芽胞杆菌的突出优势是形成耐逆芽胞、便于规模发酵和制剂化,并可兼具抗生、诱抗与促生作用^[2-3]。假单胞菌的根际竞争和次级代谢能力较强,但通常不形成耐逆芽胞,储运和环境耐受策略与芽胞杆菌不同^[50]。木霉菌可通过重寄生、细胞壁降解酶和次级代谢物抑制病原真菌,其优势靶标及发酵、孢子质量控制要求与细菌制剂不同^[51]。链霉菌拥有丰富的天然产物和根际定殖潜力,但培养和产品生产周期通常更长^[52]。因此,生防菌的选择应综合考虑防治对象、施用部位、货架期和生产条件;对于复配菌剂,应通过单菌剂对照及相互作用分析,明确其是否能够提高病害防治效果以及不同菌株间是否存在协同作用^[1-3]。

4 芽胞杆菌在植物病害生物防治中的应用

4.1 种子处理、土壤处理和根际病害防控

种子处理是芽胞杆菌制剂较常见的施用方式,可采用拌种、浸种或种子包衣等方法。附着于种子表面的芽胞可随种子萌发逐渐恢复生长,并在幼根周围定殖。种子处理常用于防治腐霉、立枯丝核菌和镰刀菌等引起的猝倒病、立枯病、根腐病和枯萎病,同时对幼苗生长和抗逆也有一定促进作用^[51]。种子萌发初期根际范围较小、营养物质较丰富,有利于芽胞杆菌较早建立种群。

土壤处理主要包括灌根、滴灌、沟施、穴施,以及与有机肥、栽培基质或土壤调理剂混合施用,常用于枯萎病、青枯病、根腐病、猝倒病及部分连作障碍相关病害的防控。进入根区后,芽胞杆菌可通过定殖竞争、抗菌物质分泌和根际微生物群落调节等途径限制病原菌。对于青枯病等细菌性土传病害,达菲菌素、氧代达菲菌素及部分挥发性代谢物可直接抑制茄科雷尔氏菌(*Ralstonia solanacearum*),根际群落的变化也可能进一步限制病原菌积累^[28]。

芽胞杆菌在土壤和植物表面的表现容易受剂量、施用时期、土壤性质、气象条件及原有微生物群落影响。一项针对2000—2021年相关研究的Meta分析(Meta-analysis)表明,芽胞杆菌总体上能够减轻植物病害,其中新筛选菌株的防治效果通常优于商品制剂,且发病前施用的效果优于发病后施用^[9]。因此,评价体系除平板拮抗外,还应包括定殖、剂量反应、适宜施用窗口和多地点田间稳定性。

近5年的田间研究显示,不同菌株和施用尺度的防病表现存在明显差异。枯草芽胞杆菌PTS-394可湿性粉剂按100倍稀释用于辣椒根腐病时,田间防效为74.43%^[53];贝莱斯芽胞杆菌SDTB038发酵液(10^8 CFU·mL⁻¹)防治番茄冠腐根腐病的防效为42.98%,低于苯醚甲环唑的63.63%^[54]。贝莱斯芽胞杆菌Y6处理使马铃薯疮痂病病情严重度由13.20%降至4.00%,发病率由41.70%降至6.70%,1个试验点的商品薯产量提高23.40%^[55]。Serenade(QST 713)防治马铃薯早疫病时,温室条件下抑制病害幅度为50%~95%,人工田间喷施仅为20%~25%,机械化大田喷施几乎无效,反映出覆盖度、环境和施用尺度可显著削弱温室效果^[56]。上述结果说明,剂量、对照类型、试验地点和施用设备均应纳入田间证据评价。

4.2 叶面喷施、穗部病害和采后病害防控

叶面喷施常用于白粉病、灰霉病、叶斑病、稻瘟病及部分细菌性叶部病害的防治。芽胞杆菌到达叶面后,可在叶表或伤口附近存活和定殖,并通过产生脂肽、胞外酶等物质限制病原菌萌发和扩展,同时也可诱导植物防御反应。稻瘟病、番茄灰霉病和蔬菜白粉病等防控过程中,脂肽和诱导系统抗性常共同参与防效形成^[36,57-58]。由于叶面长期受到紫外线、干湿交替和降雨冲刷影响,制剂附着性、耐紫外线能力以及施用时期都会直接影响田间效果。

穗部和花器病害的防控更依赖适宜的施用时期和定殖窗口。以梨火疫病为例,花器是解淀粉欧文氏菌(*Erwinia amylovora*)的重要侵染部位,解淀粉芽胞杆菌/贝莱斯芽胞杆菌相关菌株产生的达菲菌素和溶杆菌素可抑制病原菌,并降低病害发生^[25]。FZB42 产生的达菲菌素和溶杆菌素对水稻黄单胞菌也具有较强活性,可影响病原菌细胞结构及部分毒力相关基因表达,并在水稻上表现出防病作用^[26]。

采后病害也是芽胞杆菌较有应用前景的领域。采收后果蔬表面和伤口处营养物质丰富,容易受到青霉、灰霉和链格孢等病原菌侵染。采用浸果、喷雾或涂布等方式施用芽胞杆菌,可利用其伤口定殖、营养竞争和抗菌代谢物抑制采后腐烂。与部分化学保鲜剂相比,芽胞杆菌制剂残留风险较低,还可与低温贮藏、气调保鲜和可食性涂膜等技术配合使用。

4.3 活体制剂、代谢产物制剂与复合生防模式

目前,芽胞杆菌的产业化应用仍以活体制剂为主,常见剂型包括可湿性粉剂、水分散粒剂、悬浮剂、颗粒剂和种子包衣剂。芽胞耐贮藏、便于发酵和制剂加工,施用后还可在适宜生态位萌发,并持续产生多种活性物质。活体制剂成本相对较低,但其田间效果容易受到温度、水分、土壤和植物生育期等因素影响,不同环境下的防效可能存在差异。

截至 2026 年 9 月 1 日,本文在农业农村部农药检定所“农药登记数据查询”平台以“芽胞杆菌”为有效成分关键词进行模糊检索,并排除已过有效期的产品,共检得 207 条有效登记记录^[59]。国内外代表性产品及其登记信息见表 2,涵盖国内不同剂型和用途的登记产品,以及以 QST 713、FZB24、MBI 600 和 QST 2808 等菌株为有效成分、具有公开登记标签的国外产品^[59-63]。

表 2 代表性芽胞杆菌产品及登记信息

Table 2 Representative *Bacillus* products and registration information

代表性产品(登记证号) Representative products (registration certificate No.)	菌株 Strain	登记持有人 Registrant	剂型 Formulation	应用范围 Application scope	来源 Source
枯草芽胞杆菌 (PD20212723)	有效成分标作 <i>B. subtilis</i>	江苏省扬州绿源生物 化工有限公司	悬浮剂 100 亿 CFU·mL ⁻¹	辣椒疫病,喷雾	农药检定所 数据库 ^[59]
枯草芽胞杆菌 (PD20161450)	有效成分标作 <i>B. subtilis</i>	山东秀邦生物 科技有限公司	可湿性粉剂 1 000 亿芽胞·g ⁻¹	柑橘溃疡病、棉花黄萎病,喷雾	农药检定所 数据库 ^[59]
枯草芽胞杆菌 (PD20262305)	有效成分标作 <i>B. subtilis</i>	山西泓洋化工 有限公司	颗粒剂 100 亿芽胞·g ⁻¹	烟草黑胫病,穴施	农药检定所 数据库 ^[59]
枯草芽胞杆菌 (PD20210294)	有效成分标作 <i>B. subtilis</i>	江苏省溧阳中南 化工有限公司	水分散粒剂 1 000 亿 CFU·g ⁻¹	水稻稻瘟病、番茄灰霉病、草莓和黄瓜白 粉病,喷雾	农药检定所 数据库 ^[59]
Serenade ASO (EPA Reg. No. 264-1152)	<i>B. subtilis</i> QST 713	Bayer CropScience LP	水悬浮型, 最低 1×10 ⁹ CFU·g ⁻¹	田间、温室、苗圃等,具体防治对象和施 用方法以 EPA 批准的产品标签为准	美国 EPA 产品标签 (2025 年版) ^[60]
TAEGRO (EPA Reg. No. 70127-5)	<i>B. subtilis</i> var. <i>amyloliquefaciens</i> FZB24	Novozymes Biologicals, Inc.	水分散性粉剂, 最低 1×10 ¹⁰ CFU·g ⁻¹	土传和叶部病害抑制,喷施、灌根、种子 处理和灌溉施用	美国 EPA 产品标签 (2024 年版) ^[61]
Serifel (EPA Reg. No. 71840-18)	<i>B. amyloliquefaciens</i> MBI 600	BASF Corporation	可湿性粉剂, 最低 5.5×10 ¹⁰ CFU·g ⁻¹	多种作物真菌和细菌性病害,具体适用 作物、防治对象及施用方法以 EPA 批准 的产品标签为准	美国 EPA 产品标签 (2019 年版) ^[62]
SONATA ASO (EPA Reg. No. 264-1153)	<i>B. pumilus</i> QST 2808	Bayer CropScience LP	水悬浮型, 最低 1×10 ⁹ CFU·g ⁻¹	农业和商业用途的叶面或种子处理,具 体防治对象以 EPA 批准的产品标签为准	美国 EPA 产品标签 (2020 年版) ^[63]

直接利用芽胞杆菌代谢产物可降低活菌扩散风险,但发酵上清液和脂肽粗提物组成复杂,易受培养条件和下游工艺影响,且单一活性物质含量较低、分离纯化成本较高。因此,代谢物制剂的开发应加强活性成分定量和批次一致性控制,并开展毒理学、环境行为及生态安全评价,同时兼顾生产成本、持效性和多组分协同作用。目前,此类制剂更适用于采后处理、设施栽培及不宜施用活菌的场景。

为提高田间防效的稳定性,可采用载体包埋、缓释递送以及与相容性农业投入品配合施用等方式,改

善芽胞杆菌的存活、释放和定殖效果。Kan等^[64]的研究将贝莱斯芽胞杆菌 ZF481 包埋于壳聚糖/卡拉胶微球,在温室和田间试验中提高了对大白菜根肿病的防效,说明制剂结构本身会影响菌体存活、释放和田间表现。复合菌剂和合成菌群则不宜简单增加菌株数量,应依据生态位与功能互补设计,并设置单剂等剂量对照,验证相容性及真实增益。

5 总结与展望

芽胞杆菌能够形成抗逆性较强的芽胞,并可产生脂肽、聚酮类化合物、小分子抗生素、胞外酶、嗜铁素和挥发性有机物等多种活性物质,是植物病害生物防治中研究和应用较为广泛的一类有益细菌。其生防作用不仅来自对病原菌的直接抑制,还与植物表面和根际定殖、营养与生态位竞争、诱导植物抗性、促进植物生长以及影响植物相关微生物群落等过程有关。不同机制之间相互协同,共同构成芽胞杆菌防治多种植物病害的作用基础。

尽管芽胞杆菌生防资源丰富,实验室筛选结果与田间防效不一致的问题仍较常见。传统的平板对峙或抑菌圈试验主要反映菌株在特定培养条件下的拮抗能力,难以充分评价其在植物和田间环境中的表现。今后的菌株筛选应更加重视根际趋化、植物表面附着、生物膜形成、环境适应性和持续定殖能力,并结合活性代谢物、促生和诱抗性状进行综合评价。如何建立与田间防效密切相关的评价指标,仍是高效生防菌株筛选需要解决的问题。

菌株分类和安全性也是芽胞杆菌开发利用中需要关注的环节。解淀粉芽胞杆菌、贝莱斯芽胞杆菌和暹罗芽胞杆菌等近缘种基因组相似度较高,仅依靠 16S rRNA 序列或常规生理生化特征容易出现鉴定偏差^[5,65]。结合全基因组平均核苷酸一致性(ANI)、数字 DNA-DNA 杂交(dDDH)和核心基因组系统发育分析,有助于提高菌株分类鉴定的准确性。对于蜡样芽胞杆菌群及其他具有潜在安全风险的菌株,还应关注毒力因子、毒素产生能力和抗性基因等特征,并结合基因组和表型试验开展安全评价。

另一个值得深入研究的问题是芽胞杆菌在植物相关生态位中的定殖及功能表达。病原菌侵染、植物根系分泌物和环境胁迫均可能改变芽胞杆菌的趋化、运动、生物膜形成和次级代谢。已有研究表明,植物来源信号能够影响芽胞杆菌定殖行为,但不同作物和病害体系中的关键化学信号及其感知机制仍不清楚。结合比较基因组、转录组和代谢组等技术,解析芽胞杆菌对寄主和病原菌信号的响应,有望进一步明确其活性物质和定殖性状对实际防效的贡献,并为菌株改良和施用时期优化提供依据。

制剂与递送技术是提高芽胞杆菌田间存活能力和防效稳定性的重要环节。研究表明,海藻酸盐/明胶纳米复合包埋具有保护芽胞和控制释放的潜力^[66];壳聚糖/卡拉胶微球在温室及田间试验中也可提高贝莱斯芽胞杆菌对大白菜根肿病的防治效果^[64]。然而,较高的包埋率或理想的体外释放特征并不必然转化为稳定的田间防效。纳米及微胶囊制剂的环境行为、非靶标效应、释放稳定性、生产成本和监管属性仍需系统评价。今后的研究应规范报告制剂活菌数、货架期、释放动力学和施用剂量,并通过多地点田间试验评价其防效稳定性。

CRISPR-Cas 技术可用于消除菌株的不利性状、调控生物膜形成和次级代谢相关基因簇,以及构建不含抗生素抗性标记的菌株。近期建立的贝莱斯芽胞杆菌基因编辑平台可提高多种环脂肽的产量及菌株的体外拮抗活性^[67]。但代谢物产量增加并不必然带来田间的防效提升,基因稳定性、代谢负担、非靶标生态效应、水平基因转移风险及转基因微生物监管等问题仍需在环境释放前系统评估。现阶段,基因编辑可优先用于作用机制验证和优良菌株筛选,并结合封闭发酵与制剂优化推动成果转化。

从研究设计和证据评价的角度看,现有研究在试验尺度、方法规范和结果报告等方面仍存在不足。目前,体外抑菌、盆栽及小区试验所占比例较高,而随机化设计、样本量确定依据和跨地点重复等信息常报告不足。不同研究在菌株命名、剂量单位、施用时期和防效指标等方面也缺乏统一标准,阴性对照、商业对照以及原位定殖和代谢物定量分析仍不充分。此外,发表偏倚和较短的观察周期可能导致防效稳定性被高估。后续研究应预先设定主要评价指标,完整报告菌株保藏编号和基因组信息,开展多地点、多年份的随机区组试验,并综合评价病害防效、作物产量、持效期、生产成本、非靶标效应及其与常规防控措施的兼容性。只有将可重复的机制证据与规模化生产、合规登记和生产条件下的成本效益相结合,才能促进芽胞杆菌生防技术的稳定应用和产业化。

参考文献 References:

- [1] Zhang N, Wang Z Q, Shao J H, et al. Biocontrol mechanisms of *Bacillus*: improving the efficiency of green agriculture [J]. Microbial Biotechnology, 2023, 16(12): 2250–2263.
- [2] Khan A R, Mustafa A, Hyder S, et al. *Bacillus* spp. as bioagents: uses and application for sustainable agriculture [J]. Biology, 2022, 11(12): 1763.
- [3] Karačić V, Miljaković D, Marinković J, et al. *Bacillus* species: excellent biocontrol agents against tomato diseases [J]. Microorganisms, 2024, 12(3): 457.
- [4] Gupta R S, Patel S, Saini N, et al. Robust demarcation of 17 distinct *Bacillus* species clades, proposed as novel Bacillaceae genera, by phylogenomics and comparative genomic analyses: description of *Robertmurraya kyonggiensis* sp. nov. and proposal for an emended genus *Bacillus* limiting it only to the members of the subtilis and *Cereus* clades of species [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020, 70(11): 5753–5798.
- [5] Fan B, Blom J, Klenk H P, et al. *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, and *Bacillus siamensis* form an “operational group *B. amyloliquefaciens*” within the *B. subtilis* species complex [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 22.
- [6] Ngalimat M S, Yahaya R S R, Baharudin M M A, et al. A review on the biotechnological applications of the operational group *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. Microorganisms, 2021, 9(3): 614.
- [7] Dobrzyński J, Jakubowska Z, Kulkova I, et al. Biocontrol of fungal phytopathogens by *Bacillus pumilus* [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1194606.
- [8] Zhong X F, Jin Y Y, Ren H, et al. Research progress of *Bacillus velezensis* in plant disease resistance and growth promotion [J]. Frontiers in Industrial Microbiology, 2024, 2: 1442980.
- [9] Serrão C P, Ortega J C G, Rodrigues P C, et al. *Bacillus* species as tools for biocontrol of plant diseases: a meta-analysis of twenty-two years of research, 2000–2021 [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 40(4): 110.
- [10] Palma L, Muñoz D, Berry C, et al. *Bacillus thuringiensis* toxins: an overview of their biocidal activity [J]. Toxins, 2014, 6(12): 3296–3325.
- [11] Ehling-Schulz M, Lereclus D, Koehler T M. The *Bacillus cereus* group: *Bacillus* species with pathogenic potential [J]. Microbiology Spectrum, 2019, 7(3): 7.3.6.
- [12] Pacheco S, Gómez I, Peláez-Aguilar A E, et al. Structural changes upon membrane insertion of the insecticidal pore-forming toxins produced by *Bacillus thuringiensis* [J]. Frontiers in Insect Science, 2023, 3: 1188891.
- [13] Fatima R, Mahmood T, Moosa A, et al. *Bacillus thuringiensis* CHGP12 uses a multifaceted approach for the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* and to enhance the biomass of chickpea plants [J]. Pest Management Science, 2023, 79(1): 336–348.
- [14] Tsai S H, Chen Y T, Yang Y L, et al. The potential biocontrol agent *Paenibacillus polymyxa* TP3 produces fusaricidin-type compounds involved in the antagonism against gray mold pathogen *Botrytis cinerea* [J]. Phytopathology, 2022, 112(4): 775–783.
- [15] Hamze R, Rui L. *Brevibacillus laterosporus* as a natural biological control agent of soil-dwelling nematodes [J]. Agronomy, 2022, 12(11): 2686.
- [16] Ongena M, Jacques P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol [J]. Trends in Microbiology, 2008, 16(3): 115–125.
- [17] Tran C, Cock I E, Chen X J, et al. Antimicrobial *Bacillus*: metabolites and their mode of action [J]. Antibiotics, 2022, 11(1): 88.
- [18] Théatre A, Hoste A C R, Rigolet A, et al. *Bacillus* sp. a remarkable source of bioactive lipopeptides [M] // Biosurfactants for the biobased economy. Cham: Springer International Publishing, 2021: 123–179.
- [19] Ali Q, Khan A R, Wang Y J, et al. Antimicrobial metabolites of *Bacillus velezensis* FZB42 reshape rice rhizosphere microbial community composition and induce host resistance against *Rhizoctonia solani* [J]. Current Plant Biology, 2025, 41: 100440.
- [20] Tao H, Li X Y, Huo H Z, et al. *Bacillus velezensis* Y6, a potential and efficient biocontrol agent in control of rice sheath blight caused by *Rhizoctonia solani* [J]. Microorganisms, 2024, 12(8): 1694.
- [21] Chen X H, Vater J, Piel J, et al. Structural and functional characterization of three polyketide synthase gene clusters in *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 [J]. Journal of Bacteriology, 2006, 188(11): 4024–4036.
- [22] Islam T, Rabbee M F, Choi J, et al. Biosynthesis, molecular regulation, and application of bacilysin produced by *Bacillus* species [J]. Metabolites, 2022, 12(5): 397.
- [23] Yu C J, Chen H, Zhu L L, et al. Profiling of antimicrobial metabolites synthesized by the endophytic and genetically amenable biocontrol strain *Bacillus velezensis* DMW1 [J]. Microbiology Spectrum, 2023, 11(2): e00038–e00023.
- [24] Zhao Q, Ali Q, Yuan W W, et al. Role of iturin from *Bacillus velezensis* DMW1 in suppressing growth and pathogenicity of *Plectosphaerella cucumerina* in tomato by reshaping the rhizosphere microbial communities [J]. Microbiological Research, 2025, 296: 128150.
- [25] Chen X H, Scholz R, Borris M, et al. Difficidin and bacilysin produced by plant-associated *Bacillus amyloliquefaciens* are efficient in controlling fire blight disease [J]. Journal of Biotechnology, 2009, 140(1/2): 38–44.
- [26] Wu L M, Wu H J, Chen L N, et al. Difficidin and bacilysin from *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 have antibacterial activity against *Xanthomonas oryzae* rice pathogens [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 12975.
- [27] Chowdhury S P, Hartmann A, Gao X W, et al. Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42: a review [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 780.
- [28] Im S M, Yu N H, Joen H W, et al. Biological control of tomato bacterial wilt by oxydifficidin and difficidin-producing *Bacillus methylotrophicus* DR-08 [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2020, 163: 130–137.

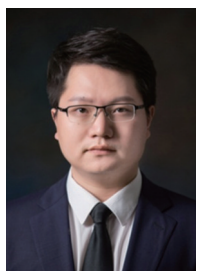
- [29] Xu Z H, Shao J H, Li B, et al. Contribution of bacillomycin D in *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 to antifungal activity and biofilm formation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(3): 808–815.
- [30] Asaka O, Shoda M. Biocontrol of *Rhizoctonia solani* damping-off of tomato with *Bacillus subtilis* RB14[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(11): 4081–4085.
- [31] Kong H G, Kim J C, Choi G J, et al. Production of surfactin and iturin by *Bacillus licheniformis* N1 responsible for plant disease control activity[J]. The Plant Pathology Journal, 2010, 26(2): 170–177.
- [32] Wang Y Y, Zhang C Y, Liang J, et al. Surfactin and fengycin B extracted from *Bacillus pumilus* W-7 provide protection against potato late blight via distinct and synergistic mechanisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104(17): 7467–7481.
- [33] Yu C J, Yang X H, Liang X L, et al. Fusaricidin produced by the rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* NX20 is involved in the biocontrol of postharvest plant-pathogenic oomycete *Phytophthora capsici*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112545.
- [34] Vlamakis H, Chai Y R, Beauregard P, et al. Sticking together; building a biofilm the *Bacillus subtilis* way[J]. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11(3): 157–168.
- [35] Beauregard P B, Chai Y R, Vlamakis H, et al. *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2013, 110(17): E1621–E1630.
- [36] Raaijmakers J M, de Bruijn I, Nybroe O, et al. Natural functions of lipopeptides from *Bacillus* and *Pseudomonas*: more than surfactants and antibiotics[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2010, 34(6): 1037–1062.
- [37] Dimkić I, Janakiev T, Petrović M, et al. Plant-associated *Bacillus* and *Pseudomonas* antimicrobial activities in plant disease suppression via biological control mechanisms; a review[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2022, 117: 101754.
- [38] Ongena M, Jourdan E, Adam A, et al. Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants[J]. Environmental Microbiology, 2007, 9(4): 1084–1090.
- [39] Ryu C M, Farag M A, Hu C H, et al. Bacterial volatiles induce systemic resistance in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology, 2004, 134(3): 1017–1026.
- [40] Pieterse C M J, Zamioudis C, Berendsen R L, et al. Induced systemic resistance by beneficial microbes[J]. Annual Review of Phytopathology, 2014, 52: 347–375.
- [41] Chen Z N, Wang Z G, Xu W H. *Bacillus velezensis* WB induces systemic resistance in watermelon against *Fusarium* wilt[J]. Pest Management Science, 2024, 80(3): 1423–1434.
- [42] Martínez-Terrazas E, Aragón W, Ocampo C F, et al. *Bacillus velezensis* 83 protects *Arabidopsis thaliana* against *Botrytis cinerea* by triggering JA-, and SA-dependent induced systemic resistance[J]. Pest Management Science, 2026, 82(3): 2532–2540.
- [43] Hu Y F, You J, Wang Y, et al. Biocontrol efficacy of *Bacillus velezensis* strain YS-AT-DS1 against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in tomato plants[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 1035748.
- [44] Tsotetsi T, Nephali L, Malebe M, et al. *Bacillus* for plant growth promotion and stress resilience: what have we learned? [J]. Plants, 2022, 11(19): 2482.
- [45] de Andrade L A, Santos C H B, Frezarin E T, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agricultural production[J]. Microorganisms, 2023, 11(4): 1088.
- [46] Shao J H, Xu Z H, Zhang N, et al. Contribution of indole-3-acetic acid in the plant growth promotion by the rhizospheric strain *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(3): 321–330.
- [47] Shao J H, Li S Q, Zhang N, et al. Analysis and cloning of the synthetic pathway of the phytohormone indole-3-acetic acid in the plant-beneficial *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9[J]. Microbial Cell Factories, 2015, 14: 130.
- [48] Tzipilevich E, Russ D, Dangel J L, et al. Plant immune system activation is necessary for efficient root colonization by auxin-secreting beneficial bacteria[J]. Cell Host & Microbe, 2021, 29(10): 1507–1520.
- [49] Lv D X, Zhang L, Guo Y H, et al. Effect of *Bacillus velezensis* on the structure of the rhizosphere microbial community and yield of soybean[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25: 1052.
- [50] Guzmán-Guzmán P, Santoyo G. Action mechanisms, biodiversity, and omics approaches in biocontrol and plant growth-promoting *Pseudomonas*: an updated review[J]. Biocontrol Science and Technology, 2022, 32(5): 527–550.
- [51] Mukherjee P K, Mendoza-Mendoza A, Zeilinger S, et al. Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases[J]. Fungal Biology Reviews, 2022, 39: 15–33.
- [52] Khan S, Srivastava S, Karnwal A, et al. *Streptomyces* as a promising biological control agents for plant pathogens[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1285543.
- [53] Qiao J Q, Zhang R S, Liu Y F, et al. Evaluation of the biocontrol efficiency of *Bacillus subtilis* wettable powder on pepper root rot caused by *Fusarium solani*[J]. Pathogens, 2023, 12(2): 225.
- [54] Chen Q Q, Qiu Y, Yuan Y Z, et al. Biocontrol activity and action mechanism of *Bacillus velezensis* strain SDTB038 against *Fusarium* crown and root rot of tomato[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 994716.
- [55] Tao H, Wang S S, Li X Y, et al. Biological control of potato common scab and growth promotion of potato by *Bacillus velezensis* Y6[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1295107.
- [56] Stridh L J, Mostafanezhad H, Andersen C B, et al. Reduced efficacy of biocontrol agents and plant resistance inducers against potato early blight

- from greenhouse to field[J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2022, 129(4): 923–938.
- [57] Salazar B, Ortiz A, Keswani C, et al. *Bacillus* spp. as bio-factories for antifungal secondary metabolites: innovation beyond whole organism formulations[J]. *Microbial Ecology*, 2023, 86(1): 2044.
- [58] Lam V B, Meyer T, Arias A A, et al. *Bacillus* cyclic lipopeptides iturin and fengycin control rice blast caused by *Pyricularia oryzae* in potting and acid sulfate soils by direct antagonism and induced systemic resistance[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(7): 1441.
- [59] 农业农村部农药检定所. 农药登记数据[EB/OL]. [2026-09-01]. <http://www.icama.org.cn/kgls/dataCenter?hash=reg-info>. Institute for the Control of Agrochemicals, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Pesticide registration data[EB/OL]. [2026-09-01]. <http://www.icama.org.cn/kgls/dataCenter?hash=reg-info> (in Chinese).
- [60] Environmental Protection Agency. Pesticide product label: SERENADE ASO, EPA Reg. No. 264–1152[EB/OL]. (2025-02-12) [2026-09-01]. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/000264-01152-20250212.pdf.
- [61] Environmental Protection Agency. Pesticide product label: TAEGRO, EPA Reg. No. 70127–5[EB/OL]. (2024-09-16) [2026-09-01]. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/070127-00005-20240916.pdf.
- [62] Environmental Protection Agency. Pesticide product label: Serifel, EPA Reg. No. 71840–18[EB/OL]. (2019-02-11) [2026-09-01]. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/071840-00018-20190211.pdf.
- [63] Environmental Protection Agency. Pesticide product label: SONATA ASO, EPA Reg. No. 264–1153[EB/OL]. (2020-02-03) [2026-09-01]. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/ppls/000264-01153-20200203.pdf.
- [64] Kang H J, Fan T F, Shi Y X, et al. Encapsulation of *Bacillus velezensis* and its biocontrol efficiency against *Plasmodiophora brassicae* in Chinese cabbage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 337: 113473.
- [65] Dunlap C A, Kim S J, Kwon S W, et al. *Bacillus velezensis* is not a later heterotypic synonym of *Bacillus amyloliquefaciens*; *Bacillus methylotrophicus*, *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *plantarum* and ‘*Bacillus oryzicola*’ are later heterotypic synonyms of *Bacillus velezensis* based on phylogenomics[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2016, 66(3): 1212–1217.
- [66] Pour M M, Saberi-Riseh R, Esmailzadeh-Salestani K, et al. Evaluation of *Bacillus velezensis* for biological control of *Rhizoctonia solani* in bean by alginate/gelatin encapsulation supplemented with nanoparticles[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2021, 31(10): 1373–1382.
- [67] Li L, Luo K C, Zhang S Y, et al. A three-plasmid-containing CRISPR-Cas9 platform to engineer *Bacillus velezensis* 916 as an efficient biocontrol agent[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2025, 91(10): e01389–e01325.

责任编辑: 刘怡辰 严曙玮



徐钰姣, 南京农业大学钟山青年研究员, 主要从事小麦重大病害绿色防控及植物-病原菌-微生物组互作机制研究, 重点关注有益微生物调控植物健康与病害发生的作用机制及其绿色防控应用。以第一作者在 *Cell Host & Microbe* 等期刊发表研究论文, 相关研究揭示了植物微生物组调控寄主微环境、抑制病原菌侵染的新机制。获得国家发明专利授权 1 项。2026 年入选江苏省卓越博士后计划 A 档, 并获国家资助博士后研究人员计划(C 档)资助。



顾沁, 南京农业大学植物保护学院教授、博导, 国家级青年人才。主要从事植物病害生物防控研究, 在植物-微生物互作机制、重大病害绿色防控等方面具有扎实的研究基础和丰富的实践经验。先后承担国家自然科学基金面上项目、教育部学科突破先导、国家重点研发计划等项目。相关研究成果以第一或通信作者身份在 *Cell Host & Microbe*、*Nature Communications*、*Nucleic Acids Research* 等国际学术期刊发表 SCI 论文 60 余篇。



伍辉军, 南京农业大学植物保护学院教授、博导, 江苏省科技副总。长期专注于生防细菌活性物质的合成调控机制研究, 并深入探索其在防治植物病害及促进植物生长中的作用机制, 致力于相关产品的开发与应用。近 5 年主持国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、江苏省自然科学基金等科研项目 10 余项, 获得中国产学研合作创新成果奖二等奖, 在 *Nucleic Acids Research*、*NPJ Biofilms and Microbiomes*、*Postharvest Biology and Technology* 和 *Molecular Plant Pathology* 等国内外期刊发表论文 40 余篇, 获授权发明专利 20 件, 研发微生物菌剂产品 4 个, 参与制定农业行业标准 1 项, 参编《农业植物病理学》等教材。