

贝莱斯芽孢杆菌研究综述

聂文星¹, 李梦梅², 陈雨^{2,3}, 赵小燕², 吴奕清²

(1. 贵州省生物研究所 贵阳 550009; 2. 遵义医科大学医学与科技学院 贵州遵义 563000;
3. 贵阳信息科技学院 贵阳 550025)

摘要: 目前, 芽孢杆菌作为生物防治菌的应用极为广泛, 为了更加系统地了解贝莱斯芽孢杆菌应用现状与作用机制, 笔者通过查阅近年来已发表的贝莱斯芽孢杆菌相关文献, 对贝莱斯芽孢杆菌在瓜菜中的应用现状进行介绍, 并对作用过程中发挥抗病害、促生长和生物防治的机制进行了概述和总结, 期望在今后为贝莱斯芽孢杆菌更好地应用于农业领域提供参考依据。

关键词: 贝莱斯芽孢杆菌; 生物防治; 农业应用

中图分类号: S476

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)10-001-08

Review on the research of *Bacillus velezensis*

NIE Wenxing¹, LI Mengmei², CHEN Yu^{2,3}, ZHAO Xiaoyan², WU Yiqing²

(1. Guizhou Institute of Biology, Guiyang 550009, Guizhou, China; 2. Medicine & Technology College of Zunyi Medical University, Zunyi 563000, Guizhou, China; 3. Guiyang Institute of Information Science and Technology, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Currently, the application of *Bacillus velezensis* as biocontrol agents is extremely widespread. To gain a more systematic understanding of the current application status and mechanisms of action of *Bacillus velezensis*, this paper reviews recently published literature on this bacterium. It introduces the current application of *Bacillus velezensis* in cucurbits and vegetables, and summarizes the mechanisms underlying its roles in disease suppression, growth promotion, and biological control during its action. The aim is to provide a reference for the more effective utilization of *Bacillus velezensis* in the agricultural field in the future.

Key words: *Bacillus velezensis*; Biological control; Agricultural application

贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)最初于1999年在西班牙马拉加省的贝莱斯河中被发现并分离出来,直到2005年被首次报道和命名^[1],可从海洋或土壤沉积物、土壤、植株根际、植物组织、动物肠道中分离得到。经研究发现,贝莱斯芽孢杆菌具有广谱抑菌活性及促生能力,可降低植物病害的发生率^[2]。作为一种抗病促生微生物,贝莱斯芽孢杆菌制成的微生物菌剂具有高效环保的特点,在微生物研究中逐渐吸引到相关领域研究者的注意力,研究人员通过优化菌株 YH-18 的培养基组分和培养条件,提高发酵液中的有效活菌数,以期增加发酵液中的芽孢数,延长贮存时间,降低发酵成本,为

贝莱斯芽孢杆菌的工业化扩大生产和推广应用提供理论依据和技术参考^[3]。

贝莱斯芽孢杆菌可生成多种次级代谢产物,并且展现出广谱的抑菌活性以及促进生长的效果。该菌株被认定为生防芽孢杆菌中的典型代表,同时也成为微生物农药研发的核心菌种,在作物病害的生物防治中得到了广泛应用^[4-5]。近年来,由生防菌制备的生物农药作为有效且环保的化学农药替代品,越来越多地应用于农业的可持续发展当中。贝莱斯芽孢杆菌通过代谢产物在植物病害防治、畜禽肠道菌群调节、水产病原抑制及工业酶生产中发挥重要作用,在“绿色农药”发展趋势下,贝莱斯芽孢

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-05-15

基金项目: 贵州省农业微生物全省重点实验室(黔科合平台 ZSYS(2025)029); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑(2024)一般 171); 遵义医科大学医学与科技学院 2025 年大学生创新创业训练项目(202513653778)

作者简介: 聂文星,男,研究实习员,主要从事微生物发酵、生物合成、生物制造、生物化学与分子生物学、酿酒、食品相关研究。E-mail: 904967360@qq.com

共同第一作者: 李梦梅,女,在读本科生,主要研究方向为微生物发酵。E-mail: 2175826426@qq.com

通信作者: 陈雨,女,讲师,主要从事微生物发酵及分子生物学相关研究。E-mail: 1459962842@qq.com

杆菌作为微生态制剂具有抗逆性强、无耐药性风险及环境友好等优势,未来有望为农业可持续发展、食品安全及生态保护提供解决方案^[6]。贝莱斯芽孢杆菌产生的次级代谢产物是抑制病原真菌和细菌的天然物质,这些代谢产物能产生植物激素促进植物生长,并生成众多次级代谢产物,以竞争性地抑制植物病原菌^[7]。在相关研究中,科研人员从植物叶片中分离出一种具有生物防治潜力的菌株,初步试验结果表明,该菌株对多种植物病原真菌和细菌具有显著的抑制作用^[8]。

1 贝莱斯芽孢杆菌在农业领域的应用现状

随着现代农业的快速发展,农产品产量大幅提升,但同时也带来了一系列质量安全问题,生产中滥用抗生素和超标使用添加剂,使兽药在畜禽产品中的残留已严重影响到动物性食品的质量和卫生安全。农药残留作为农产品质量安全的重要方面,其对人体健康和环境的影响不容忽视^[9-10]。随着绿色发展理念的提出,人们开始积极探寻安全且环保的化学农药替代品,在此背景下,贝莱斯芽孢杆菌作为一种对农作物病虫害具有显著防治效果的生物菌剂,受到了大量的关注与研究。农药及化肥的大量施用,不仅造成了土壤污染、土地肥力下降、阻碍农作物正常生长发育及导致害虫产生耐药性,而且还会导致害虫天敌等非目标生物被误杀,造成生态破坏等问题,甚至在人体中富集,引起人体慢性中毒,甚至可能导致人体神经系统及肝脏功能受损,诱发皮肤癌等疾病^[11-12]。在贝莱斯芽孢杆菌研究过程中发现,它一方面能显著抑制病原菌的生长,有促进植物生长、驱动有益菌聚集、缓解土地连作障碍、丰富细菌群落多样性等优点^[13-14];另一方面,贝莱斯芽孢杆菌具有对环境友好、在自然界中分布广泛、对非目标生物安全等特点,很大程度上减轻了化学药剂对环境造成的危害^[15]。

作为一种新兴的植物益生菌,贝莱斯芽孢杆菌在农业领域的应用已取得显著进展,主要体现在病害防控、促生增产及土壤改良等方面。其广谱抗菌活性源于丰富的次级代谢产物(如脂肽类、聚酮类化合物)和高效的分泌系统,能够抑制多种病原真菌和细菌。沙月霞等^[16]研究发现,在田间试验中,菌株 E69 对稻瘟病菌表现出显著的防治效果,其对叶瘟的抑制率高达 85.97%,对穗颈瘟的抑制率亦达到

69.67%;此外,该菌株对包括番茄灰霉病菌、西瓜枯萎病菌在内的 11 种病原菌均显示出强烈的拮抗作用。李生樟等^[17]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 504 对大多数黄单胞菌属的细菌具有较好的拮抗作用,对水稻白叶枯病菌的拮抗效果最显著,能有效缓解水稻细菌性病害,其抑菌活性在 pH 为 5.5~8.9 范围内稳定,适用于多种土壤环境。

在促生方面,贝莱斯芽孢杆菌通过定殖植物组织直接促进瓜菜生长,提高植物吸收和利用养分的效率。此外,贝莱斯芽孢杆菌还能促进植物体内激素的合成,如细胞分裂素、生长素等,这些激素对植物的生长发育具有关键性的调节功能,吴玉洪等^[18]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 BMF03 的发酵液以及菌糠发酵产物对黄瓜的幼苗生长有显著的促进效果;因此,贝莱斯芽孢杆菌不仅能够提高瓜菜的产量与品质,还能进一步减少瓜菜中的农药残留量,降低生产费用,达成农产品的环保高效产出。代诗佳等^[19]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 FH-1 通过调控水稻根际土壤微生物群落结构,显著促进了水稻苗期的生长;在接种后第 20 天,水稻株高和干质量分别比空白对照高 6.02% 和 12.52%;菌株 FH-1 通过富集特定功能菌群和调节氮素循环相关功能,显著提高了水稻的生长速度。李坤等^[20]研究发现,与无菌水浸种处理相比,用贝莱斯芽孢杆菌 TC-52 菌悬液浸种处理的水稻胚根的生长量可提高 19%,主根长度增长了 25%,在侧根数增加了 29%,对水稻立枯病的防治效果在 75% 以上。

贝莱斯芽孢杆菌作为一种具有显著产酶能力的微生物,能够有效促进有机质的分解,并且在养分循环方面发挥着重要的作用。张岳峰^[21]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 YH-18 和 YH-20 与有机肥结合施用后,阳光玫瑰葡萄叶片叶绿素含量提高 10.12%,果实可溶性固形物含量提高 20.08%,显著改善品质。陈龙等^[22]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 157 优化后产内切纤维素酶达 $5.14 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$,在 pH 5.0~10.0 和 40~50 °C 下保持较高的酶活性,有助于降解秸秆等农业废弃物,为瓜菜种植提供可持续的有机肥源。此外,穆文强等^[23]对育苗基质优化研究发现,育苗基质中添加贝莱斯芽孢杆菌和 γ -聚谷氨酸的两步混合法优化了菌剂的分布均匀性,从而提高了育苗基质的持水性和孔隙度,这种结合有机肥和功能性基质的方法可以进一步提高贝莱斯芽孢杆菌在农业中的应用效率。

2 贝莱斯芽孢杆菌对瓜菜的抗病害和促生长作用

芽孢杆菌属微生物作为一类有益菌,在植物遭受细菌、病毒、真菌及线虫等多种病原体侵袭时表现出优异的防治作用。此类微生物通过激发植物的系统性抗性以及通过竞争性地抑制病原体等机制,有效保护植物免受病原体侵害,进而促进植物的健康生长。此外,芽孢杆菌在促进植物生长、防治植物病害方面具有显著效果,其形成的芽孢具备强大的抗逆性,能在多样的环境条件下存活并定殖,这为生物防治菌剂的生产、运输和贮存提供了便利^[24]。

2.1 贝莱斯芽孢杆菌对瓜菜的抗病害作用

2.1.1 对细菌性病害的抗病作用 植物遭受的细菌性感染主要涵盖了斑点病、软腐病、青枯病等多种类型,这些病害对农作物的健康生长构成了严重威胁。斑点病通常表现为叶片上出现褐色或黑色的斑点,影响植物的光合作用;软腐病则会导致植物组织软化腐烂,严重时整个植株会迅速崩溃;而青枯病则使得植物的茎部和叶片出现萎蔫和枯黄,最终导致植物死亡。这些病害不仅影响作物的产量和品质,还可能对整个农业生态系统造成破坏。

(1)辣椒细菌性斑点病,亦称作细菌性疮痂病,是在辣椒和番茄上发生的一种世界性病害,主要危害叶片、茎蔓和果实^[25]。王辉等^[26]通过优化发酵条件,获得对辣椒细菌性斑点病有较好抑制效果的菌液,菌液最高防治效果可达70.17%。

(2)软腐病是魔芋种植过程中危害最严重的病害之一,目前无有效防控药剂,软腐病频发会导致魔芋减产20%~30%,甚至绝收^[27]。崔双等^[28]发现,贝莱斯芽孢杆菌对魔芋软腐致病菌的生防机制主要为:当魔芋遭受病菌侵染时,贝莱斯芽孢杆菌能产生拮抗物质,抑制其生长,7株贝莱斯芽孢杆菌处理过的魔芋植株软腐病发病率及病情指数均明显降低。孙旺旺等^[29]的研究显示,贝莱斯芽孢杆菌BPC6对生菜的软腐病和菌核病也具有良好的生物防治作用。

(3)青枯病是由青枯雷尔氏菌引发的细菌性病害,是一种重要的植物土传病害;青枯病通过植物根系损伤处进入植物体内,与寄主争夺养分,最终导致寄主枯萎死亡^[30-31]。王博文等^[32]研究发现,硝酸铵钙与贝莱斯芽孢杆菌GT11的联合施用能减少土壤中青枯菌的数量,改变烟草根际土壤细菌群落的

多样性和群落结构,达到防治烟草青枯病的效果。王晓楠等^[33]对贝莱斯芽孢杆菌ZN-S10进行试验发现,贝莱斯芽孢杆菌ZN-S10对5种植物常见病菌有不同程度的抑制作用;使用其灌根后,在番茄受到青枯菌侵扰时,能够激活番茄的诱导抗性,增强体内防御酶的活性,抑制病原菌的繁殖。

2.1.2 对病毒病害的防病作用 葫芦科植物包括118属825种,广泛分布于热带和亚热带地区,其中作为栽培作物的有西瓜、甜瓜、黄瓜、南瓜、丝瓜、冬瓜、瓠子、葫芦、西葫芦、苦瓜、菜瓜等^[34-35]。危害葫芦科作物的病毒多达46种,但发生普遍、危害严重的重要病毒主要有5种,分别是小西葫芦黄花叶病毒、西瓜花叶病毒、黄瓜花叶病毒、番木瓜环斑病毒、南瓜花叶病毒^[36]。Ahmed等^[37]的研究发现,贝莱斯芽孢杆菌PEA1-CF对黄瓜花叶病毒侵染具有多层次的抑制作用,PEA1-CF的灭活活性表现最为突出,抑制率高达97.56%;其治疗活性和保护活性分别达到72.88%和55.88%的抑制效果,此发现对利用贝莱斯芽孢杆菌控制黄瓜花叶病毒侵染具有重大意义。

2.1.3 对真菌性病害的防病作用 苦瓜白粉病是由单囊壳属(*Sphaerotheca*)的瓜类白粉病菌引起的植物病害,该病害可影响苦瓜的整个生长周期,尤其在结瓜期及成熟期更为常见,且在生长中后期达到发病高峰,苦瓜白粉病对苦瓜的产量和品质产生了严重的影响。目前,对于白粉病的防治,仍以抗性品种的选育和使用农用化学杀菌剂为主,为此,人们开始探索生防菌如贝莱斯芽孢杆菌等对苦瓜白粉病的防治作用。项佳胤等^[38]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌N46通过抑制叶面白粉病孢子萌发和诱导苦瓜叶片产生依赖于茉莉酸途径的抗病性起到对白粉病的防治效果,通过盆栽苦瓜测定并确认了贝莱斯芽孢杆菌N46对苦瓜白粉病的良好防治效果。另外,炭疽病危害核桃、辣椒、水稻、枸杞等许多作物,对经济效益造成一定影响。以辣椒炭疽病为例,高绍凯等^[39]从健康辣椒果实中分离筛选出1株内生防菌株贝莱斯芽孢杆菌C3,C3对辣椒炭疽病菌有较好的拮抗效果,表现出相近于400 mg·L⁻¹吡唑醚菌酯药剂的防效,通过根部裂纹、伤口,以及叶部表面伤口等部位进入宿主植物,在宿主植物体内成功定殖,有利于内生菌发挥生防功效,长期对宿主产生积极影响。

番茄灰霉病由灰葡萄孢菌引发,是一种全球性的真菌性病害,常发生在番茄生长期和贮运过程

中,该病菌主要危害番茄叶片、果实等。张琦等^[40]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 SM2 可引起番茄灰霉病菌丝发生畸变并破坏菌丝完整性,揭示了 SM2 防治灰霉病的显微拮抗机制;另外,贝莱斯芽孢杆菌 SM2 诱导了番茄叶片高表达超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等保护酶和增加脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物,从而增强了番茄叶片对灰霉病的抵御能力,揭示了 SM2 防治灰霉病的诱导系统抗性机制。以上两种途径对利用生防菌剂治疗番茄灰霉病提供了理论支撑。

2.1.4 对线虫的抗病作用 植物寄生线虫中的根结线虫是极为关键的一类,寄主范围广泛,受害作物有 3000 多种^[41]。番茄是根结线虫的易感作物,罗利艳等^[42]利用番茄探究了贝莱斯芽孢杆菌 TMQ-KSL-1 发酵液对番茄根结线虫的生防作用,发现贝莱斯芽孢杆菌 TMQ-KSL-1 通过抑制线虫卵孵化,形成健康的植物根部土壤环境,在有效防治番茄根结线虫病害的同时促进根系生长。该菌发酵液和发酵上清液对线虫卵的孵化抑制率和线虫二龄幼虫校正死亡率均在 90%以上,由此可以看出,其对防控番茄根结线虫病害的巨大潜力以及广阔的市场前景。此外,贝莱斯芽孢杆菌对松材线虫也具有抑杀性,具备一定的松材线虫病防治价值^[43]。

2.2 贝莱斯芽孢杆菌对瓜菜的促生长作用

2.2.1 有效提高叶绿素含量 贝莱斯芽孢杆菌对于植物的促生长作用体现在多个方面,其作用机制涉及激活光合系统功能、改善荧光特性及增强植物抗逆性等,贝莱斯芽孢杆菌在多类作物中被证实能有效提升叶绿素含量,提高植物对阳光的吸收效率,以促进其生长发育。例如,在陈甦等^[44]的研究中,通过芽孢杆菌发酵液对西瓜幼苗叶绿素含量的影响进行探讨,观察到使用 $200\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的贝莱斯芽孢杆菌 sj1616 发酵液处理的西瓜幼苗叶片,其叶绿素 SPAD 值达到 59.53,这在一定程度上表明了西瓜幼苗的光合作用效率得到了提高。对番茄的研究进一步验证了其促生效果,贝莱斯芽孢杆菌处理的番茄叶绿素含量显著高于解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌,并与化学药剂中生菌素的效果相当,同时还能提升超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶活性,增强植株抗病性。李英等^[45]探索不同芽孢杆菌添加至餐厨堆肥配制的基质中对黄瓜育苗效果的影响,研究表明,枯草芽孢杆菌和贝莱斯芽孢杆菌处理的幼苗叶绿素含量、叶面积、地上部鲜质量和地上部干质量这 4 项指标表现最佳,而且贝

莱斯芽孢杆菌处理的平均隶属度最大,说明贝莱斯芽孢杆菌对黄瓜幼苗的促生效果最佳。

2.2.2 特点突出,具有开发和应用潜力 从生物分类角度来说,贝莱斯芽孢杆菌隶属于芽孢杆菌属,是一类需氧或可适应厌氧环境的革兰氏阳性菌,能够形成芽孢。这些细菌生长速度快,对营养的需求简单,具有强大的抗逆境能力,能产生多种代谢产物,并且具有广泛的抑菌特性,对环境友好。它们能产生抗真菌肽(AFP),芽孢杆菌的 AFP 主要由脂肽和多肽组成,特别是脂肽类物质,这是一类低分子的多肽,展现出高效的广谱抑菌活性。这些脂肽不仅对真菌、细菌、病毒和支原体有抑制作用,还具有低毒性、易降解和热稳定性等优点,具有很大的研究潜力^[46-47]。因此,将贝莱斯芽孢杆菌作为切入点去深入研究芽孢杆菌属类对生物技术发展也是一种新的思路。

贝莱斯芽孢杆菌在促进植物生长方面发挥着重要作用,通过包括酶促分解、营养转化、激素合成以及抗逆性调控等多种机制,全方位地促进了植物的生长发育。这些发现不仅揭示了贝莱斯芽孢杆菌在农业领域应用中的巨大潜力,而且为其作为微生物肥料或生物防治制剂的进一步开发提供了坚实的科学基础^[20]。

3 贝莱斯芽孢杆菌生物防治机制

芽孢杆菌对植物病害的作用机制复杂多样,可利用一种或多种机制组合来预防或减轻病菌对植物的损伤,直接或间接与病原体相互作用、抑制病原物生长、争夺养分和空间^[48-49],贝莱斯芽孢杆菌的作用机制主要包括竞争作用、溶菌作用、拮抗作用、诱导抗病性等。

3.1 竞争作用

在贝莱斯芽孢杆菌的生物防治机制中,竞争作用作为其抑制植物病原菌的关键机制之一,主要体现在贝莱斯芽孢杆菌能够在植物组织及土壤中定殖,从而排斥、阻碍并干扰植物病原体在植物上的生物胁迫。该作用主要通过营养竞争和空间位置竞争两个方面得以实现。

在营养竞争方面,刘雪娇等^[50]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌通过分泌多种代谢产物直接与病原菌争夺关键资源,菌株 3A3-15 分泌 IAA 的能力为 $5.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,是潜在的促生长内生菌株。铁载体使芽孢杆菌在植物细胞间的竞争和入侵宿主植物的过程中胜出。王馨芳等^[51]研究,贝莱斯芽孢杆菌

BQ 的代谢产物能增加尖孢镰孢菌 DS 的菌体细胞膜通透性并加剧核酸内容物释放,并引起细胞破裂至死亡。此外,贝莱斯芽孢杆菌还能分泌蛋白酶、纤维素酶、淀粉酶等水解酶,加速环境中高分子物质的分解,进一步削弱病原菌的营养获取能力。

在空间位置竞争上,贝莱斯芽孢杆菌通过生物膜形成和根系定殖占据生态位,形成物理屏障。Lagzian 等^[52]研究了贝莱斯芽孢杆菌株 Q12、US1 和 UR1 的生物膜形成、根系定殖能力及耐盐性,结果表明,贝莱斯芽孢杆菌 Q12 在菌膜上形成了强大的生物膜,在番茄根尖周围形成缠绕的线圈,同时 Q12 菌株可以在 10% 盐中生长,US1 菌株生长量微小,但 UR1 在该盐浓度下不生长。张倩等^[53]研究发现,贝莱斯芽孢杆菌 KT 菌悬液可以有效抑制匍枝根霉 LC-7 的生长和孢子萌发,显著降低甜樱桃软腐病的发生率,防治效果呈浓度依赖性,且对果实品质无不良影响。

3.2 溶菌作用

溶菌作用是指拮抗微生物吸附在病原真菌的菌丝上,并随着菌丝生长而生长,产生溶菌物质消解菌丝体,使菌丝发生断裂、解体或细胞质消解;或者是次生代谢产物对病原菌孢子的细胞壁产生溶解作用,致使细胞壁产生穿孔、畸形等现象^[54]。张德锋等^[55]通过三代 Nanopore 测序平台对贝莱斯芽孢杆菌 LF01 进行全基因组测序分析,发现其基因组中携带了 *bacillaene*、杆菌霉素 D、溶杆菌素、*difficidin*、泛革素和表面活性素等 9 个拮抗物质基因簇,约占基因组全长的 8.83%;可以产生一系列脂肽类次级代谢产物,分泌多种水解酶,如纤维素酶、 β -葡聚糖酶、蛋白酶和几丁质酶,特异性降解病原菌细胞壁的关键成分。徐婷等^[56]发现,贝莱斯芽孢杆菌 YB15 能在葡聚糖酶鉴定培养基中形成明显透明水解圈,并通过病原菌的对照试验,表明该酶在芽孢杆菌 YB15 的抑菌中有重要作用。

3.3 拮抗作用

拮抗作用指的是微生物通过释放特定的次级代谢产物直接消灭病原体或抑制其繁殖,或者通过营造一个对病原体不利的环境来间接抑制其生长^[57]。贝莱斯芽孢杆菌对多种病原菌具有很强的拮抗活性,这主要得益于其分泌的细胞壁降解酶、脂肽类抗生素以及聚酮类抗生素等物质。郭佳^[58]将贝莱斯芽孢杆菌 GS-7 菌株发酵滤液稀释 10 倍,发现其对灰霉菌菌丝生长的抑制率为 71.76%,在 36 h 之前影响孢子的形态,36 h 之后完全抑制孢子萌

发。沙月霞等^[16]发现,贝莱斯芽孢杆菌 E69 发酵液几乎完全抑制稻瘟病菌孢子萌发和附着孢的形成,对孢子萌发和附着孢形成的抑菌率在 84% 以上。从黑胡椒根际中分离的贝莱斯芽孢杆菌 RB.DS29 产生的抗菌物质具有蛋白酶、几丁质酶和 β -葡聚糖酶活性,能够破坏疫霉等真菌的细胞壁,对某些真菌有良好的拮抗作用^[59]。

3.4 诱导抗病性

诱导植物抗性是通过非致病菌株、弱毒菌株、蛋白质或糖蛋白、胞外多糖和脂多糖等因子激活植物体内苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶、几丁质酶和多酚氧化酶等防御酶,进而促使植物产生系统诱导抗性,增强植物的抗病能力,抵御病原菌的入侵^[4,60]。贝莱斯芽孢杆菌通过分泌植物激素和挥发性化合物,能够诱导植物产生抗性,提高植物抗病力。邹强等^[61]报道贝莱斯芽孢杆菌 TP-1 通过诱导葡萄苯丙氨酸解氨酶、多酚氧化酶、过氧化物酶活性来增强葡萄对灰霉病的抗性。孙平等^[62]分析贝莱斯芽孢杆菌 L-1 的全基因组发现,其携带合成表面活性素、丰原素等脂肽类物质的基因簇,同时分泌乙偶姻和 2,3-丁二醇诱导植物产生抗病相关酶。

4 贝莱斯芽孢杆菌应用于农业领域的前景

贝莱斯芽孢杆菌作为一种高效、广谱、环境友好的生物防治菌种,在农业可持续发展的进程中显示出巨大的应用潜力。随着全球范围内对化学农药减量替代需求的日益增长,其商业化应用正逐步从实验室研究阶段向实际农业生产过渡。

4.1 高效生物防治,替代化学农药

贝莱斯芽孢杆菌通过分泌抗菌物质(脂肽类表面活性素、互生素、芬戈霉素等)直接抑制病原菌,并通过竞争生态位和诱导植物系统抗性间接增强植物抗菌能力。对真菌、细菌、病毒及线虫均表现出拮抗作用,例如抑制桃树褐腐病、马铃薯黑胫病等^[63-64]。全球化学农药减量需求迫切,2024 年我国共登记了 8 个新农药品种,其中微生物农药和生物化学农药分别占 50% 和 12.5%,显示生物农药在稳步发展,体现了我国农药制造和研发水平在逐步提高,贝莱斯芽孢杆菌作为低毒、无残留的生物制剂,市场空间巨大^[65]。

4.2 促进植物生长,合成生物绿色制剂

贝莱斯芽孢杆菌通过固氮、解磷、产铁载体等

机制改善植物营养吸收功能,同时合成吲哚乙酸(IAA)、ACC脱氢酶等物质促进根系发育,提高作物对干旱、盐碱及重金属胁迫的耐受性^[19]。陈佳伟等^[66]的研究表明,贝莱斯芽孢杆菌 YCH92 能够改善棉田土壤环境,增加棉花产量,稀释 100 倍菌液组的籽棉产量较未施加菌液组增加了 25.0%。

4.3 加强采后保鲜,延长作物贮藏期

保鲜剂在果蔬采后防腐保鲜方面效果佳,但其存在微生物抗药性和毒副作用,开发高效、安全的新型保鲜剂是生产实践中的迫切需要。生物保鲜旨在利用生物特性及环境互作关系和拮抗作用,从本质上抑制致病菌繁殖并增强果实耐贮性,是未来发展的主流趋势。贝莱斯芽孢杆菌在采后处理中表现突出,菌株 BG-2 处理厚皮甜瓜后,可延缓果实硬度下降,维持可溶性固形物和维生素 C 含量,并通过提高 POD、PPO 等酶活性抑制腐烂。低温(4℃)条件下与菌剂联用可进一步延长保鲜效果,为新疆甜瓜等特色瓜果的贮藏提供有力的技术支持^[67]。

5 总 结

贝莱斯芽孢杆菌在减少化学农药使用、提高农作物产量以及环境保护方面具有重要意义,在农业可持续发展中展现出较大的应用潜力。与化学制剂的农药相比,贝莱斯芽孢杆菌无污染、安全性高等特点从多方面减轻了环境压力,符合农业绿色发展的要求。在植物抗病害方面,贝莱斯芽孢杆菌通过竞争营养与生态位、分泌溶菌物质、拮抗病原菌及诱导植物系统抗性等多途径实现生物防治,增强了植物对真菌、细菌及病毒等多种病原菌的抵御能力,有效降低病害发生率与严重程度,提高农产品质量,保障了作物安全;在促生长作用方面,贝莱斯芽孢杆菌通过提高叶绿素含量、促进光合作用、分泌植物激素(如生长素)及改善根际微环境,进而改善土壤养分与根系微环境,促进植物根系发育与植株生长,提高作物产量与生物量。

贝莱斯芽孢杆菌作为一种具有多种功能的生物防治细菌,凭借其广谱抑菌活性、促生能力及环境友好性,在农业可持续发展中展现出较大的应用潜力。尽管贝莱斯芽孢杆菌在农业领域表现优异,但研究多集中于水稻等大规模农作物,对瓜菜等农作物的研究还不够深入,仍需进一步研究其与瓜菜作物的特异性互作机制、规模化生产工艺及田间稳定性。未来,结合基因编辑技术优化菌株功能、开

发复合菌剂与智能施肥技术,将推动贝莱斯芽孢杆菌在绿色农业中的广泛应用,为实现减药增效、生态安全提供重要支撑。

6 展 望

随着对贝莱斯芽孢杆菌研究的不断深入,其在各个领域的应用前景愈发广阔。科学家们已经揭示了贝莱斯芽孢杆菌在生物技术、医药、农业等多个领域的巨大潜力。在解析贝莱斯芽孢杆菌次级代谢产物的合成途径方面,科学家们已经取得了显著进展。通过先进的分析技术,如质谱和核磁共振,研究人员能够详细描绘出这些复杂化合物的结构,并理解它们的生物合成机制。这些次级代谢产物不仅具有抗菌、抗病毒等生物活性,还为新药开发提供了宝贵的资源。在农业领域,贝莱斯芽孢杆菌因卓越的生物防治效果和植物促生长能力而备受瞩目。它能够有效抑制多种植物病原菌的生长,减少作物病害的发生。此外,贝莱斯芽孢杆菌还能促进植物根系的发育,提高植物对营养的吸收能力,从而促进作物生长和产量提高。未来,通过科学技术对贝莱斯芽孢杆菌进行改良和优化,有望进一步提升其防治病虫害的能力,同时增强其促进植物生长的效果。这将有助于减少化学农药的使用,促进农业朝向绿色、可持续的方向发展。

参考文献

- [1] RUIZ-GARCIA C, BEJAR V, MARTINEZ-CHECA F, et al. *Bacillus velezensis* sp. Nov., a surfactant-producing bacterium isolated from the river Vélez in Málaga, southern Spain[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, 55(1): 191-195.
- [2] 王玉鹏,何静,陈伟,等. 贝莱斯芽孢杆菌 G18 的抑菌及促生作用研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 64-75.
- [3] 石慧敏,叶建仁,王焱,等. 响应面优化贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)菌株 YH-18 产芽孢培养基和培养条件[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(1): 209-218.
- [4] 张德锋,高艳侠,王亚军,等. 贝莱斯芽孢杆菌的分类、拮抗功能及其应用研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3634-3649.
- [5] 许沛冬,易剑锋,陈迪,等. 贝莱斯芽孢杆菌生防次级代谢产物研究进展[J]. 生物技术通报, 2024, 40(3): 75-88.
- [6] 曹艳子,顾艳丽,高丽,等. 贝莱斯芽孢杆菌的研究现状与应用展望[J]. 中国微生态学杂志, 2024, 36(3): 351-356.
- [7] 陈龙,吴兴利,闫晓刚,等. 贝莱斯芽孢杆菌的分类、次级代谢产物及应用[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(1): 1-8.
- [8] 许沛冬. 贝莱斯芽孢杆菌 HAB-2 菌株抑菌次级代谢产物基因簇及调控基因 *yabN* 的研究[D]. 海口:海南大学, 2022.

- [9] 党启峰,王宗升,楚电峰.动物食品药物残留与防治对策[J].中国动物检疫,2011,28(7):24-27.
- [10] 孙立强.农产品质量安全控制及农药残留检测技术研究[C]//冶金工业教育资源开发中心.2024 精益数字化创新大会平行专场会议——冶金工业专场会议论文集(上册).2024:220-222.
- [11] 何丽莲,李元.农田土壤农药污染的综合治理[J].云南农业大学学报,2003,18(4):430-434.
- [12] 陈苏敏,胡启山,郭鹏程,等.农药污染及其危害的有效防控[J].现代农业科技,2008(4):94-95.
- [13] 王萌,乔赫梁,姚云平,等.贝莱斯芽孢杆菌 QL-2 对连作花生土壤肥力和微生物群落的影响[J].中国土壤与肥料,2024(6):168-177.
- [14] 孙正祥,曹帅,王蓝琴,等.贝莱斯芽孢杆菌 D61-A 对水稻根际土壤细菌群落结构的影响[J].长江大学学报(自然科学版),2023,20(2):113-120.
- [15] 徐淑琴,贺曦,龚紫凤,等.贝莱斯芽孢杆菌的生物学特性及其农业应用现状[J].饲料研究,2022,45(9):143-147.
- [16] 沙月霞,隋书婷,曾庆超,等.贝莱斯芽孢杆菌 E69 预防稻瘟病等多种真菌病害的潜力[J].中国农业科学,2019,52(11):1908-1917.
- [17] 李生樟,陈颖,杨瑞环,等.一株拮抗黄单胞菌的贝莱斯芽孢杆菌的分离和鉴定[J].微生物学报,2019,59(10):1969-1983.
- [18] 吴玉洪,冷超凡,陈莹莹,等.贝莱斯芽孢杆菌 BMF03 对黄瓜幼苗促生长作用及其生物学功能研究[J].东北农业科学,2023,48(3):106-111.
- [19] 代诗佳,王敬敬,魏莱,等.贝莱斯芽孢杆菌 FH-1 通过调控特定时空的土壤微生物组促进水稻苗生长[J].微生物学通报,2024,51(7):2381-2410.
- [20] 李坤,洪秀杰,王欣悦,等.贝莱斯芽孢杆菌 TC-52 的分离鉴定及其对水稻幼苗生长和立枯病的影响[J].江苏农业科学,2024,52(10):129-137.
- [21] 张岳峰.2 株贝莱斯芽孢杆菌在上海葡萄上的应用[J].安徽农业科学,2024,52(18):144-146.
- [22] 陈龙,吴兴利,李立佳,等.一株高产内切纤维素酶贝莱斯芽孢杆菌的产酶条件优化及酶学性质分析[J].中国畜牧兽医,2019,46(5):1353-1361.
- [23] 穆文强,尚庆茂,武瑞赞,等.含复合贝莱斯芽孢杆菌和 γ -聚谷氨酸的功能性育苗基质混配工艺优化[J].中国农业大学学报,2023,28(6):183-193.
- [24] 曹灏,陈智磊,李雪松,等.贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 悬浮剂配方优化及对草莓炭疽病的防治效果[J].农药学报,2024,26(5):911-921.
- [25] 陈新,刘清波,赵廷昌.辣椒细菌性疮痂病原菌分类、检测及综合防治研究进展[J].植物保护,2011,37(1):11-18.
- [26] 王辉,刘丽,于舒怡,等.贝莱斯芽孢杆菌 SF18-3 的鉴定及对辣椒细菌性斑斑病的防效评价[J].沈阳农业大学学报,2024,55(4):417-425.
- [27] 周洁,赵清华,张杰,等.魔芋软腐病病原菌与健株根系分泌物比较分析[J].中国瓜菜,2024,37(11):145-152.
- [28] 崔双,陈昌龙,冯佳豪,等.魔芋软腐病病原菌 *Pectobacterium aroidearum* 的特征及贝莱斯芽孢杆菌的生防效果[J].中国蔬菜,2021(3):83-93.
- [29] 孙旺旺,闫丽,陈昌龙,等.生菜软腐和菌核病拮抗菌贝莱斯芽孢杆菌 BPC6 鉴定与防效[J].中国生物防治学报,2020,36(2):231-240.
- [30] 刘帅康,黎昕,丰慧,等.青枯病生物防治研究进展[J].植物医学,2023,2(4):39-46.
- [31] XIAN L, YU G, WEI Y L, et al. A bacterial effector protein hijacks plant metabolism to support pathogen nutrition[J]. Cell Host and Microbe, 2020, 28(4):548-557.
- [32] 王博文,王金星,邱成尧,等.贝莱斯芽孢杆菌联合含钙土壤调理剂对烟草青枯病的防治[J].生物技术进展,2024,14(5):839-847.
- [33] 王晓楠,冯晓晓,施斌,等.内生细菌 ZN-S10 的鉴定及其对番茄青枯病菌的抑菌作用[J].浙江农业学报,2023,35(11):2636-2644.
- [34] 刘美,刘莉铭,吴会杰,等.VIGS 技术的研究进展及其在葫芦科作物中的应用[J].果树学报,2018,35(11):1422-1429.
- [35] 郑棚峻,张宇,张松柏,等.葫芦科作物重要种传病毒研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(3):5-9.
- [36] 彭斌,顾青,古勤生,等.5 种病毒侵染葫芦科作物的症状观察[J].中国西瓜甜瓜,2004(6):18-20.
- [37] AHMED A, BEHIRY S I, AI-ASKAR A A. *Bacillus velezensis* PEA1 inhibits *Fusarium oxysporum* growth and induces systemic resistance to cucumber mosaic virus[J]. Agronomy, 2020, 10(9):1312.
- [38] 项佳胤,商桑,田丽波.贝莱斯芽孢杆菌 N46 对苦瓜白粉病的防治机理研究[J].热带作物学报,2024,45(6):1292-1302.
- [39] 高绍凯,邓金奇,李晨曦,等.辣椒炭疽病拮抗内生菌的分离鉴定及防效试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2024,50(4):60-64.
- [40] 张琦,刘应敏,杨东燕,等.贝莱斯芽孢杆菌 SM2 对番茄灰霉病的生防效果[J].中国瓜菜,2024,37(2):66-73.
- [41] LI J, ZOU C G, XU J P, et al. Molecular mechanisms of nematode-nematophagous microbe interactions: Basis for biological control of plant-parasitic nematodes[J]. Annual Review of Phytopathology, 2015, 53:67-95.
- [42] 罗利艳,江志阳,孙翠焕,等.贝莱斯芽孢杆菌 TMQ-KSL-1 分离鉴定及其发酵液对番茄根结线虫的生防作用[J].微生物学杂志,2024,44(2):62-70.
- [43] 张文博,李昱龙,周蕾,等.植物根际益生菌代表菌株贝莱斯芽孢杆菌 FZB42 对松材线虫的抑杀性[J].微生物学报,2021,61(5):1287-1298.
- [44] 陈甦,段海明,李帅,等.3 株芽孢杆菌及其混合发酵液对西瓜幼苗生长的影响[J].中国瓜菜,2024,37(2):46-51.
- [45] 李英,王文婷,陈润泽,等.餐厨堆肥配制基质中添加不同芽孢杆菌对黄瓜育苗效果的影响[J].山东农业科学,2024,56(2):70-76.
- [46] 刘军,江宇琪,刘康,等.贝莱斯芽孢杆菌产抑菌物质培养基发酵优化[J].现代食品科技,2024,40(6):114-123.
- [47] 杨然迪,杨怡妍,曹灏,等.贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 产脂肽类物质抑菌活性及发酵条件优化[J].农药学报,2024,26(3):504-516.

- [48] BONATERRA A, BADOSA E, DARANAS N, et al. Bacteria as biological control agents of plant diseases[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(9): 1759.
- [49] LEGEIN M, SMETS W, VANDENHEUVEL D, et al. Modes of action of microbial biocontrol in the phyllosphere[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1619.
- [50] 刘雪娇, 李红亚, 李术娜, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 3A3-15 生防和促生机制[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(3): 302-310.
- [51] 王馨芳, 张婉霞, 史美玲, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 BQ 对党参根腐病原菌抑制效应初探[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(2): 167-173.
- [52] LAGZIAN A, RISEH R S, SARIKHAN S, et al. Differences among *Bacillus velezensis* strains from biofilm formation to competition in niche determination on plant roots[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(4): 951-960.
- [53] 张倩, 陈雨诗, 许春艳, 等. 贝莱斯芽孢杆菌防治甜樱桃采后软腐病的效果和机理[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 229-239.
- [54] 李晶, 杨谦. 生防枯草芽孢杆菌的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(1): 106-111.
- [55] 张德锋, 高艳侠, 可小丽, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 LF01 基因组序列分析及其代谢产物的生防作用[J]. *水产学报*, 2022, 46(2): 196-206.
- [56] 徐婷, 朱天辉, 李姝江, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 *Bacillus velezensis* YB15 β -葡聚糖酶的抑菌作用与基因克隆[J]. *中国生物防治学报*, 2014, 30(2): 276-281.
- [57] 王超, 郭坚华, 席运官, 等. 拮抗细菌在植物病害生物防治中应用的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(18): 1-6.
- [58] 郭佳. 贝莱斯芽孢杆菌 GS-7 发酵条件优化及对黄瓜灰霉病防治效果的研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [59] TRINH T H T, WANG S L, NGUYEN V B, et al. A potent anti-fungal rhizobacteria *Bacillus velezensis* RB. DS29 isolated from black pepper (*Piper nigrum* L.) [J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2019, 45(11): 5309-5323.
- [60] ZHU F, CAO M Y, ZHANG Q P, et al. Join the green team: Inducers of plant immunity in the plant disease sustainable control toolbox[J]. *Journal of Advanced Research*, 2024, 57: 15-42.
- [61] 邹强, 牛新湘, 刘萍, 等. 拮抗葡萄灰霉病贝莱斯芽孢杆菌的生长特征及对相关防御酶活性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(15): 126-133.
- [62] 孙平平, 崔建潮, 贾晓辉, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 L-1 对梨灰霉和青霉病菌的抑制作用评价及全基因组分析[J]. *微生物学报*, 2018, 58(9): 1637-1646.
- [63] 周慧娟, 叶正文, 吕贝贝, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 *Bacillus velezensis* D44 及其在作为生物保鲜剂中的应用: CN118291321A[P]. 2024-07-05.
- [64] 赵远征, 张超, 王东, 等. 贝莱斯芽孢杆菌及其在农业生产中的应用: CN118995538A[P]. 2025-01-28.
- [65] 白小宁, 李友顺, 农向群, 等. 2023 年我国登记的新农药特点[J]. *农药*, 2024, 63(1): 1-4.
- [66] 陈佳伟, 林艳, 张明星, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 YCH92 对棉花根际土壤微生物群落及棉花产量的影响[J]. *作物学报*, 2025, 51(10): 2821-2835.
- [67] 佐长庚, 王静怡, 牛新湘, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 BG-2 对厚皮甜瓜贮藏品质及防御酶活性的影响[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(10): 4171-4185.