



综述 • Review

枯草芽孢杆菌的应用研究进展

黄飞奕 李小龙

(贺州学院 食品与生物工程学院 广西 贺州 542899)

摘要 枯草芽孢杆菌作为一种重要的功能性菌种，能够产生多种抗菌素、酶及促进动植物生长的活性物质。枯草芽孢杆菌具有对人无毒无害、对动植物和环境友好等多种优点，被广泛应用于现代农业生产中。该文综述了近年来枯草芽孢杆菌在植物生长、土壤改良和防治病原菌等方面的应用现状，阐明了枯草芽孢杆菌未来在农业领域的应用前景和研究热点。

关键词 枯草芽孢杆菌；植物生长；土壤改良

文章编号 019-2025-0484

Research Progress on the Application of *Bacillus Subtilis*

Huang Feiyi, Li Xiaolong

(School of Food and Biological Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, China)

Abstract As an important functional strain, *Bacillus subtilis* can produce various antibiotics, enzymes, and active substances that promote the growth of animals and plants. *B. subtilis* has multiple advantages, including being non-toxic to humans, harmless to animals and plants, and environmentally friendly, making it widely used in modern agricultural production. This article reviews the current applications of *B. subtilis* in plant growth, soil improvement, and disease control in recent years, and elucidates the future prospects and research hotspots of *B. subtilis* in the agricultural field.

Keywords *Bacillus subtilis*; Plant growth; Soil improvement

1 引言

枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 属于芽孢杆菌科、芽孢杆菌属，是一种广泛存在于土

壤、植物根际和水体中的革兰氏阳性细菌。它能在有氧或兼性厌氧环境中生长繁殖，没有荚膜，周身覆盖着鞭毛，因此具备运动能力，属

收稿日期：2023-08-23 录用日期：2023-09-06

通讯作者：李小龙，单位：州学院 食品与生物工程学院 广西 贺州

基金项目：贺州学院校级课程（编号：HZUBS02108，2023JSQD01）

引用格式：黄飞奕, 李小龙. 枯草芽孢杆菌的应用研究进展[J]. 现代精准农业快报, 2023, 1(1): 6-10.

于单细胞原核生物^[1]。该细菌能够形成芽孢,并且对多种抗生素无耐药性,对动物也无毒性^[2]。作为芽孢杆菌属中的一员,它以卓越的环境适应性和多样的生理功能而著称。作为纯天然的益生菌,枯草芽孢杆菌对环境友好且无害,已在农业、工业、医药卫生、水产养殖等多个领域得到广泛应用^[3]。作为一种广泛存在于土壤中的有益微生物,枯草芽孢杆菌能够产生多种植物生长激素,如吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA)和细胞分裂素等。这些激素对植物的生长发育具有重要的调节作用。枯草芽孢杆菌在土壤中可以起到溶磷、固氮等作用,能改善土壤微环境^[4]。此外,枯草芽孢杆菌具有极强的稳定性和抗逆性,可以耐受高温、酸碱和盐分。它广泛分布于土壤、植物体表、根茎、体内,具有较强的抗菌活性,能够与病原菌竞争,有效阻碍病原菌在植物上的定殖和侵染,从而达到抵抗病原菌的效果^[5]。

2 枯草芽孢杆菌在植物生长中的作用

枯草芽孢杆菌在植物生长激素的合成方面展现出显著的潜力。蔡学清等^[6]的研究表明,在辣椒种子上接种枯草芽孢杆菌BS-2菌株后,辣椒幼苗的鲜重和干重显著增加。这一现象归功于BS-2菌株能够有效促进辣椒等宿主植物体内生长激素如生长素、赤霉素等的合成,同时抑制植物体内脱落酸等物质的含量,从而促进作物生长。陈雨欣等^[7]通过施用枯草芽孢杆菌对兰州百合的生长发育及鳞茎代谢进行研究,发现枯草芽孢杆菌在一定程度上能够促进兰州百合的生长发育,提高株高、茎粗和叶片数量,显著影响兰州百合鳞茎中的代谢途径。王进等^[8]的试验也证实了枯草芽孢杆菌菌株WJ47对辣椒种植的积极影响,结果显示该菌株能显著增加辣椒根颈部到顶部间距、茎粗、

挂果数和产量。此外,一些枯草芽孢杆菌在水中繁殖时,能够有效分解水中的无机铵态氮或硝态氮^[9],并将土壤或水中难溶性无机磷或其他有机磷全部溶解,转化为可溶性,从而提高土壤中可溶性磷含量,为植物生长发育提供更多的安全可用养分。通过这些机制,枯草芽孢杆菌不仅提高了作物的产量,还改善了作物的品质,为实现农业的可持续发展提供了新的思路。刘东旭^[10]通过基质栽培研究了枯草芽孢杆菌对黄瓜生长及品质提升的相关机理,结果表明,在不同浓度营养液中添加枯草芽孢杆菌后,黄瓜幼苗的株高、叶绿素含量和干物质积累均有所提升,从而促进了黄瓜幼苗的生长。李婧等^[11]的研究发现,枯草芽孢杆菌能促进玉米植株地上部分和地下部分对N、P、K的吸收。与对照组相比,地上部分N、P、K含量最大增加15.1%、25.1%、32.9%,地下部分最大增加30.6%、38.4%、22.1%。

3 发酵进展

穆常青^[12]在 $^{\circ}\text{C}$ 、190 r/min摇瓶条件下培养枯草芽孢杆菌B-332,发现其对稻瘟病菌的抑菌作用达到最高。张慧等^[13]研究发现,37 $^{\circ}\text{C}$ 的发酵初始温度有助于枯草芽孢杆菌抗菌物质的积累,此温度下产量最大。彭化贤等^[14]在20L发酵罐中,通过调整搅拌转速至180 r/min,40 h后获得枯草芽孢杆菌Xi-55发酵液,细菌量为 $5.06 \times 10^{10} \text{cfu/mL}$,显示其对稻曲病的预防效率为63.22%。黄福佳等^[15]指出,发酵培养基中添加适量磷酸盐可以增强蛋白质的生物活性。MEENA等^[16]使用响应面法优化枯草芽孢杆菌KLP2015的生产工艺参数,使得其脂肽产量提高了1.8倍,对霉菌具有抑制作用。

4 枯草芽孢杆菌在土壤改良中的作用

枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 作为一种广泛存在于土壤中的益生菌, 在土壤改良方面, 枯草芽孢杆菌通过其固氮作用和促进有机质分解, 改善了土壤结构, 提高了土壤肥力。因此, 枯草芽孢杆菌在农业可持续发展中的角色不容忽视, 它不仅有助于减少化学农药的使用, 降低环境污染, 还能提高作物的产量和质量, 为生态农业和有机农业的发展提供了新的思路和方法。黄浩杰^[17]选取了 3 种微生物菌种研究其对镉的吸附作用, 结果表明枯草芽孢杆菌在高镉浓度下吸附效果最好。李琪等^[18]研究了枯草芽孢杆菌对早熟禾和紫花苜蓿修复镉污染土壤的强化作用, 结果表明接种枯草芽孢杆菌对早熟禾和紫花苜蓿修复镉污染土壤均表现出显著的强化作用。刘悦畅^[19]采用盆栽试验研究了沼泽红假单胞菌和枯草芽孢杆菌两种菌对土壤中镉形态转变的影响, 结果表明两种菌单独或联合使用均能使农田土壤中的有效态镉含量明显降低。宋璐等^[20]向镉胁迫下连翘植物添加枯草芽孢杆菌菌液, 探索枯草芽孢杆菌对连翘生长生理指标的影响, 结果表明枯草芽孢杆菌菌液能显著缓解镉对连翘生长的胁迫, 添加 15 mg/kg 菌液处理下连翘幼苗的株高、茎叶鲜重、根鲜重、叶片中叶绿素 A 含量和叶绿素总含量分别较对照提高了 112.59%、96.50%、95.68%、210.53% 和 162.30%。郝希超^[21]研究土培条件下添加枯草芽孢杆菌等 5 种菌种对黑麦草等在铈胁迫下的影响, 结果表明单年生黑麦草与胶质芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌联合对高浓度铈污染土壤具有较好的修复效果。李宝庆等^[22]研究表明枯草芽孢杆菌能够增加草莓根际土壤中有益菌相对丰度, 减少致病菌相对丰度, 优化土壤真菌群落结构, 有效防治草莓根腐病促进草莓健康生长。陈雨欣等

^[23]通过施用枯草芽孢杆菌对兰州百合的生长发育及鳞茎代谢进行研究, 发现枯草芽孢杆菌在一定程度上能够促进兰州百合的生长发育, 提高株高、茎粗和叶片数量, 显著影响兰州百合鳞茎中的代谢途径。

5 植物病害防治

枯草芽孢杆菌的杀菌机理与传统杀菌剂不同, 其菌体本身对病原菌并没有杀伤作用, 而是通过分泌的有益物质诱导植物自身的生理、生化防卫反应来阻止外来病原菌的侵染, 达到防治病害的目的^[24], 其防治植物病原菌的机制主要依赖于其产生的多种抗菌活性物质。这些物质包括抗生素、细菌素、酶类以及挥发性有机化合物等, 它们能够有效抑制或杀死多种植物病原菌。He 等^[25]研究发现, 枯草芽孢杆菌菌株 BJ-1 通过抑制致病疫霉孢子萌发和附着孢子形成, 使稻瘟病菌菌丝和孢子生长异常, 或者引起致病菌丝解体, 抑制稻瘟病发生, 促进植株生长。牛焕杰等^[26]通过盐酸沉淀法和甲醇浸提从枯草芽孢杆菌发酵液中提取粗提物, 经过分离纯化获得抗菌蛋白 EP-1, 研究发现, 这种抗菌蛋白可有效抑制苹果树腐烂病菌的生长并破坏其细胞结构。此外, 枯草芽孢杆菌还能够促进植物生长, 通过产生植物生长激素如吲哚乙酸 (IAA) 和赤霉素 (GA), 改善植物对营养的吸收, 从而提高作物的抗逆性和产量。枯草芽孢杆菌 CY1 (*Bacillus subtilis* CY1) 能够通过分泌胞外酶等促进植物根系生长的物质提高植物利用养分的能力对番茄植株生长具有促进作用, 同时可以通过提高植物体内防御酶活性增强植物对病原入侵的抵抗能力兼具生物防治及促生效果^[27]。游佳^[28]研究表明施用枯草芽孢杆菌 J-15 次生代谢产物 (SMs) 可以使棉花致病的病原菌及其他几类病原真菌的相对丰

度下降的同时,对土壤细菌群落却并无显著影响。说明了 SMs 在棉花黄萎病的生物防治中可作为生物农药的潜力。祖雪等^[29]筛选的枯草芽孢杆菌 K-268 对稻瘟病菌菌丝生长抑制率达 86.30%±0.70%,同时对供试的水稻纹枯病菌、玉米大斑病菌及柑橘沙皮病菌等植物病原菌均有抑制作用。郑小亮等^[30]的研究发现,枯草芽孢杆菌分泌的抗菌蛋白能够降低小麦赤霉病的发病率。喷洒枯草芽孢杆菌还可以控制水稻纹枯病发生^[31],对苹果树腐烂病菌菌丝生长也具有明显的抑制和破坏作用^[32]。在生态农业中,枯草芽孢杆菌的使用有助于减少化学农药的依赖,促进农业的可持续发展。

6 展望

枯草芽孢杆菌作为一种极具潜力的微生物资源,在农业领域的应用研究正逐渐受到关注。得益于其在生物农药和植物生长促进方面的独特优势,枯草芽孢杆菌有望成为推动市场增长的关键因素之一。通过应用枯草芽孢杆菌,作物产量得以提升,同时减少了对化学农药的依赖,这不仅增强了作物的产量和品质,还对环境的可持续性产生了正面效应。未来的研究将更加聚焦于枯草芽孢杆菌的基因工程改良,旨在提升其在各种环境条件下的稳定性和效能。随着相关法规的完善以及公众对生物农药接受度的不断提升,枯草芽孢杆菌在农业中的应用前景将变得更加广阔。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

参考文献

- [1] 李怡洁,杨佐忠. 枯草芽孢杆菌主要作用机制与应用研究进展[J]. 四川林业科技, 2019, 40(4): 126-130.
- [2] 白延琴,辛小玲,来有志,等. 枯草芽孢杆菌的分离筛选[J]. 畜牧兽医杂志, 2013, 32(2): 24-31.
- [3] 王晓云. 高产蛋白酶枯草芽孢杆菌的筛选与诱变选育研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015 :1-5.
- [4] 宫安东,孔宪巍,翟新可,等. 枯草芽孢杆菌 WY8-7 的溶磷、抑菌及促生长作用[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 697-705.
- [5] 范海燕. 枯草芽孢杆菌 9407 生防机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [6] 蔡学清,何红,胡方平. 内生菌 BS-2 对辣椒苗的促生作用及对内源激素的影响[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(4): 49-52.
- [7] 陈雨欣,马祥臣,王健铭,等. 枯草芽孢杆菌对兰州百合生长发育及鳞茎代谢的影响[J]. 植物研究, 2023, 44(6): 926-935.
- [8] 王进,高鹏,黄天悦,等. 产聚谷氨酸菌株的筛选及其发酵物对辣椒生长及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2018, 47(11): 56-60.
- [9] 解玉萌,田相利,赵坤,等. 两株海水氮降解菌的分离鉴定及其无机氮去除特性初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(S1): 33-44.
- [10] 刘东旭. 枯草芽孢杆菌与营养液处理促进黄瓜生长及品质提升的生理机制[D]. 太原: 山西农业大学, 2021.
- [11] 李婧,揣峻峰,王磊,等. 枯草芽孢杆菌发酵上清液对玉米植株生长和养分吸收的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(10): 138-140, 166.
- [12] 穆常青. 枯草芽孢杆菌 B-332 菌株及其抗菌物质对稻瘟病的生防作用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2006.
- [13] 张慧,白丹虹,陈济琛,等. 枯草芽孢杆菌 CS16 发酵条件及其抑菌活性物质研究[J]. 福建农业学报, 2015, 30(4): 386-393.
- [14] 彭化贤,席亚东,刘波微,等. 枯草芽孢杆菌 Xi-55 液体发酵条件的优化及防治稻曲病试验[J]. 西南农业学报, 2008, 21(5): 1298-1302.

- [15] 黄福佳, 姜宁, 张爱忠, 等. 枯草芽孢杆菌工程菌发酵技术的研究进展 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017(3): 63-67.
- [16] KILANI-FEKI O, BEN KHEDHER S, DAMMAK M, et al. Improvement of antifungal metabolites production by *Bacillus subtilis* V26 for biocontrol of tomato post-harvest disease [J]. Biological Control, 2016, 95: 73-82.
- [17] 黄浩杰. 三种微生物菌种对镉的吸附作用及机理研究 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [18] 李琪, 邢颖娜, 杜逢慧, 等. 枯草芽孢杆菌对早熟禾和紫花苜蓿修复镉污染土壤的强化作用 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 7385-7390.
- [19] 刘悦畅. 沼泽红假单胞菌和枯草芽孢杆菌联合修复农田土壤镉污染的研究 [D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [20] 宋璐, 张花, 李保珍, 等. 枯草芽孢杆菌对镉胁迫下连翘生长生理的影响 [J]. 森林与环境学报, 2022, 42(6): 6617-622.
- [21] 郝希超. 铀污染土壤牧草 - 微生物联合修复工艺研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [22] 李宝庆, 石亚冰, 凌凡舒, 等. 枯草芽孢杆菌对土壤真菌群落结构及草莓根腐病的调控作用 [J]. 山东农业科学, 2023, 56(6): 81-87.
- [23] 陈雨欣, 马祥臣, 王健铭, 等. 枯草芽孢杆菌对兰州百合生长发育及鳞茎代谢的影响 [J]. 植物研究, 2023, 44(6): 926-935.
- [24] 王翠梅, 李剑. 枯草芽孢杆菌在有机蔬菜种植中的应用 [J]. 上海农业科技, 2017(4): 142, 144.
- [25] HE Y, ZHU M, HUANG J, et al. Biocontrol potential of a *Bacillus subtilis* strain BJ-l against the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* [J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2019, 41(1): 47-59.
- [26] 牛焕杰, 李辉, 王娜娜, 等. 苹果树腐烂病菌拮抗枯草芽孢杆菌 E1R-j 抗菌蛋白的分离纯化 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2016, 44(9): 135-142.
- [27] 蔡学清, 何红, 胡方平. 内生菌 BS-2 对辣椒苗的促生作用及对内源激素的影响 [J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(4): 49-52.
- [28] 游佳, 赵灏冉, 赵晶晶, 等. 枯草芽孢杆菌 J-15 次生代谢产物对棉田土壤细菌群落的影响 [J]. 生态毒理学报, 2023, 18(4): 338-348.
- [29] 祖雪, 周瑚, 朱华璋, 等. 枯草芽孢杆菌 K-268 的分离鉴定及对水稻稻瘟病的防病效果 [J]. 生物技术通报, 2022, 38(6): 52-62.
- [30] 郑小亮, 董超, 牛瑞艳, 等. 枯草芽孢杆菌 Z1-2 抗菌蛋白特性及对小麦赤霉病菌的抑制作用 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2018(2): 206-211.
- [31] 张俊华, 李新斌, 余小清, 等. 生物农药“枯草芽孢杆菌”防治水稻纹枯病试验 [J]. 湖北植保, 2019(3): 14-15.
- [32] 金京京, 齐永志, 甄文超, 等. 枯草芽孢杆菌 B1514 可湿性粉剂对小麦纹枯病的防效及对土壤微生物区系和小麦产量的影响 [J]. 农药学报, 2016, 18(5): 596-604.