



刘悦,王立达,兰英,等.植物根际芽胞杆菌促生防病的作用机制及其应用[J].黑龙江农业科学,2021(4):125-129,130.

植物根际芽胞杆菌促生防病的作用机制及其应用

刘悦,王立达,兰英,李青超,赵秀梅,杨莹,周传余

(黑龙江省农业科学院 齐齐哈尔分院,黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要:为促进环境友好型、高效安全的有益芽胞杆菌制剂的开发与应用,本文总结并系统阐述了芽胞杆菌在寄主植物上的定殖以及对寄主植物增效防病的作用机理,进一步综述了植物根际芽胞杆菌在促进农林作物生长以及防治植物病害中的应用现状,并对未来植物根际芽胞杆菌需重点关注的科学问题及其开发应用进行了展望。

关键词:根际芽胞杆菌;促生;防病;定殖;作用机制

近年来,化学肥料在对农林作物产量的提升方面已被广泛应用,但化学肥料的不合理使用不仅不能达到良好的预期效果,而且还会对生态环境产生不良影响^[1]。另外,在保证农林作物的高效生产过程中,长期无节制的使用化学肥料与化学农药,会导致土壤中的氮磷等营养物质平衡的丧失,进而对植物生长产生巨大危害。化学药剂的过度施用已严重影响我国农林业的可持续发展^[2],因此对环境相容性好、高效绿色的有益制剂的研究迫在眉睫。

植物促生根细菌(Plant growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)是指栖居于植物根组织内部、表面以及根际土壤中的一类有益细菌,它能够促进植物生长、防治植物病害^[3]。PGPR的种类繁多,其中芽胞杆菌因其耐受性强、促生防病效果明显而被广泛应用于农业生产与绿化造林中。蜡样芽胞杆菌(*Bacillus cereus*)^[4]、枯草芽胞杆菌(*B. subtilis*)^[5]、苏云金芽胞杆菌(*B. thuringiensis*)^[6]等都是在农业中具有重要意义的芽胞杆菌分离株。瓦雷兹芽胞杆菌(*B. velezensis*) FZB42 也因其能够有效地定殖于植物根部,且具有抵抗多种植物病原体和促进植物生长的活性,已被商品化生产和应用^[7]。本文综述了植物根际芽胞杆菌促进植物生长、防治植物病害的应用现状,以及芽胞杆菌与植物互作的潜在机制,并对未来根际芽胞杆菌的研究方向与开发利用提出展望。

1 芽胞杆菌概述

芽胞杆菌(*Bacillus*)是一类能够形成内生孢子的革兰氏阳性细菌,具有增殖代谢速度快、体积大、耐受性及生命力强等生物学特性。芽胞杆菌的细胞壁较厚,菌体呈杆状,菌体内含 DNA、RNA 及合成蛋白质等物质,其产生的芽胞是具有多层结构的休眠体,具有对外界逆境及其他理化因素很强的抵抗能力^[8]。芽胞萌发要经历几个分化阶段,并受芽胞年龄、RNA 状态等因素的影响^[9]。刘悦等^[10]在检测蜡样芽胞杆菌 SQL0164 的芽胞形成时发现,菌株 SQL0164 产芽胞的数量和状态随培养时间发生变化。

芽胞杆菌可产生丰富的代谢活性物质,有些芽胞杆菌在生产食品加工业中,被认为是产酶和多糖的理想细胞工厂。Peng 等^[11]通过进一步优化合成途径和竞争途径的动态调节,利用工程改造的枯草芽胞杆菌菌株实现了甘露聚糖的高效生产。另外,芽胞杆菌具有较强的有机质分解能力, Wani 等^[12]研究表明,在不同浓度的铬存在下,芽胞杆菌 PSB10 可以显著改善鹰嘴豆作物的生长。同时,芽胞杆菌占据着明显的空间优势,分布广泛且易于从土壤等环境中分离,在工业与农业生产等方面都是广泛应用的微生物资源。

2 芽胞杆菌促生防病的作用机制

2.1 芽胞杆菌的定殖

芽胞杆菌在寄主植物上的定殖能力是发挥其促生与生防作用的重要前提,芽胞杆菌具有对植物根周围微环境较强的适应能力,它可通过与其它微生物的相互竞争,从而更有效地定殖于植物根部^[13-14]。Fan 等^[15]研究表明,瓦雷兹芽胞杆菌 FZB42 能通过有效定殖于玉米、番茄等植物根部来促进其生长。另外菌株 FZB42 能通过产生抗

收稿日期:2020-11-30

基金项目:黑龙江省农业科学院“农业科技创新跨越工程”专项课题(HNK2019CX10-18);齐齐哈尔市科技局农业攻关项目(NYGG-201715)。

第一作者:刘悦(1995—),女,硕士,研究实习员,从事植物保护研究。E-mail:2563522180@qq.com。

菌物质来有效抑制植物根际中存在的致病菌,但菌株 FZB42 定殖相关基因发生突变时,其抑菌能力也将丧失^[16]。同时,影响细菌定殖的因素有很多,其中包括细菌本身对植物根系分泌物的趋化性、细菌生物膜的形成能力与运动能力等因素。

2.1.1 芽胞杆菌的趋化性 在自然界中,芽胞杆菌面临着不断变化的环境条件,这需要细菌快速和持续的适应,以确保最佳的生长和增殖。细菌的趋化性是指细菌向高浓度的引诱剂积累或远离驱避分子,使生物体达到营养浓度较高的生态位,同时避免毒素^[17-18]。植物根系分泌物对芽胞杆菌起着趋化剂的作用。Allard 等^[19]研究表明,拟南芥的根系分泌物在体外可吸引枯草芽胞杆菌(*Bacillus subtilis*),*Bacillus subtilis* 的趋化性受体在其有效定殖植物根部以及与植物互作中发挥重要作用。有研究从番茄根系分泌物中分离的苹果酸可明显诱导解淀粉芽胞杆菌 T-5 的趋化反应,通过趋化作用介导的定向运动来促进菌株 T-5 在植物根部的有效定殖^[20]。另有研究表明,蜡样芽胞杆菌 *Bacillus cereus* YL6 对甘蓝根系分泌物表现出强烈的正趋化反应,向土壤中添加根分泌的有机酸可促进 YL6 在甘蓝根中的定殖^[21]。此外,细菌完整的趋化机制是其在植物根部早期定殖的必要因素。Liu 等^[22]研究表明,瓦雷兹芽胞杆菌 SQR9 的趋化性化学感受器,参与了菌株定殖植物根部种群的早期建立,菌株 SQR9 可诱导黄瓜根分泌 d-半乳糖,与此同时 d-半乳糖作为一种信号分子亦可诱导菌株 SQR9 更有效地定殖。综上研究表明,芽胞杆菌对植物分泌物的趋化作用是植物-微生物相互作用所必需的。

2.1.2 芽胞杆菌的运动性 芽胞杆菌的运动能力对其在植物根部的早期定殖至关重要,细菌可在植物根系分泌物的趋化作用下运动,细菌的运动性可分为泳动(swimming)、爬行(swarmming)和蹭行(TWITCHING)等运动方式^[23]。Zhao 等^[24]研究表明,*Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 的运动性相关基因是其在植物根部定殖过程中的关键基因。另外,芽胞杆菌菌株能通过运动找到合适的生态位点来更有效地定殖于寄主植物。有研究发现,蜡样芽胞杆菌 YL6 在大白菜中的定殖是一个动态过程,它从根表面移动到根组织,然后移动到茎和叶,并产生生长素来更有效地促进植物生长^[21]。综上研究表明,芽胞杆菌的运动性是影响其在寄主植物上定殖效率的关键因素之一。

2.1.3 芽胞杆菌生物膜的形成 芽胞杆菌可通过与植物的趋化作用运动至植物根系,在植物根部早期定殖,而芽胞杆菌在植物根部形成生物膜是长期定殖的必要条件。细菌的生物膜是指被细菌胞外大分子包裹的有组织的细菌聚集体,细菌生物膜的形成对其自身有良好的保护作用,并使其能够在寄主植物根部有效的定殖^[25]。Beauregard 等^[26]研究发现,*Bacillus subtilis* 中许多参与菌株生物膜形成的基因也参与了其在拟南芥根部的有效定殖。另有研究表明,短小芽胞杆菌(*Bacillus pumilus*)FAB10 菌株可通过形成生物膜来有效的定殖于小麦根部,并有助于缓解小麦中的盐分胁迫^[27]。另外,芽胞杆菌生物膜的形成对于防治植物病害也至关重要。Chen 等^[28]从自然环境中分离得到了可抗番茄青枯病的枯草芽胞杆菌菌株,研究表明该菌株的生物膜形成能力与其发挥对植物的保护功能密切相关。综上研究表明,芽胞杆菌生物膜的形成对于植物根表面的细菌定殖以及发挥其促生防病功能至关重要。

2.2 芽胞杆菌与植物的互作

芽胞杆菌通过对植物根系分泌物的趋化性运动至植物根部,在植物根部聚集后形成生物膜并长期定殖于植物,芽胞杆菌对植物促生防病的作用机制主要包括以下 4 个方面:其一,产生植物生长调节物质,促进植物发育。如刘鲁峰等^[29]从甘蔗根系分离得到的枯草芽胞杆菌 B9 能够产生吲哚-3-乙酸(IAA),并对玉米的种子和幼苗均有促进作用;其二,生物固氮、解磷、产生嗜铁素等物质,促进寄主植物对营养物质的吸收。Mahmood 等^[30]从黄瓜中分离得到的内生芽胞杆菌可通过生成铁载体、增溶磷酸盐来显著地促进寄主植物生长;其三,产生抑菌化合物抑制植物病原菌的生长、诱导植物产生对病原菌的抗性,提高寄主植物的健康水平。有研究发现,瓦雷兹芽胞杆菌 FKM10 可通过分泌葡糖苷酶来破坏镰刀菌的细胞壁,从而有效抑制病原菌的生长^[31];其四,诱导寄主产生对生物与非生物胁迫的抗性。如 Stavropoulou 等^[32]通过接种促进植物生长的枯草芽胞杆菌来增强番茄对盐分的耐受性。综上所述,芽胞杆菌在寄主植物有效定殖后,可通过以上几个方面来发挥其增效防病功能,然而每个方面具体的作用机制还有待于更深入的研究。

3 芽胞杆菌在促进农林作物生长中的应用

芽胞杆菌可通过产生植物营养物质来维持土

壤肥力,从而提高作物产量。Franco-Sierra 等^[33]从香蕉植物根际分离的枯草芽胞杆菌 EA-CB0575 可产生表面活性素和丰原素,增溶磷酸盐、固定氮,并产生吡啶和铁载体化合物,EA-CB0575 菌株使番茄植物的总干重(TDW)增加了 34.60%。Ker 等^[34]研究发现,多粘类芽胞杆菌可对柳枝根发挥生物固氮作用,并通过产生生长素来刺激柳枝的生长。

另外,芽胞杆菌可通过产生挥发性有机化合物(VOC)来触发植物的诱导性系统耐受(IST),增强植物在逆境胁迫中的耐受力。Saoussen 等^[35]研究发现促进植物生长的根际细菌 *B. velezensis* GJ11 可产生 2,3-丁二醇和乙酰丁香酮等挥发性化合物,这些化合物可使植物的气孔关闭,从而触发植物对外界逆境的防御反应。另有研究发现亚麻植物可通过接种芽胞杆菌 *Bacillus* sp. Strain1(B2)来增强植物在逆境中的耐受性,并且经细菌接种的植物在其相对含水量、植物高度、水溶性碳水化合物和脯氨酸含量以及抗氧化酶活性方面均表现出增强^[36]。此外,盐胁迫是对植物生长产生不良影响的环境胁迫之一,高盐会造成植物的生长迟缓,影响作物产量。有研究表明,芽胞杆菌有助于植物通过产生吡啶乙酸、乙烯等化合物来抵御盐胁迫,这些耐盐芽胞杆菌可作为植物的有效防御剂,并且芽胞杆菌可通过调节植物的生理和分子响应,在不损害环境的情况下促进植物生长并减轻盐胁迫的影响,极大地有助于解决植物由于高盐引起的产量问题^[37]。有研究发现产生 ACC 脱氨酶的根际芽胞杆菌属,可通过调节乙烯代谢途径来减轻盐分胁迫并促进玉米的生长^[38]。另有研究表明,坚强芽胞杆菌(*Bacillus firmus*) SW5 在缓解高盐度对大豆生长的不利影响中起着至关重要的作用^[39]。综上所述研究表明,芽胞杆菌菌株的开发已被广泛应用于农业生产中,并取得了良好的经济与生态效益。

4 芽胞杆菌在防治植物病害中的应用

芽胞杆菌具有可产生内生孢子的高抗性结构,使其能够在恶劣的环境条件下生存,并通过分泌脂肽、抗生素、酶等物质来抑制植物病原体的生长,已被广泛应用于防控病原性真菌引起的植物病害反应^[40-41]。枯草芽胞杆菌 SL-44 不仅能激活辣椒幼苗抗青枯病的系统抗性,而且还能产生表面活性素、伊枯草菌素和丰原素等抗菌肽,抑制甚至破坏立枯丝核病菌菌丝的生长^[42]。此外,镰刀病原菌(*Fusarium* sp.)是最具破坏力的土壤传播

疾病之一,芽胞杆菌也被广泛应用于防治镰刀病原菌引起的农作物枯萎病。Chowdhury 等^[43]研究发现,番茄土壤中的 *Bacillus* sp. LBF-01 菌株可通过增强植株根和叶中防御相关酶的活性,从而防治镰刀菌引起的番茄枯萎病。另有研究从甲基营养芽胞杆菌 DR-08 中分离出的 Difficidin 和 Oxidifficidin 等抑菌活性物质,对番茄枯萎病也具有良好的生物防治效果^[44]。同时,枯草芽胞杆菌 V26 具有控制镰刀病原菌引起的马铃薯枯萎病和块茎干腐病的生物学潜力^[45]。此外,芽胞杆菌在农业害虫防治等方面也被广泛应用。叶虹等^[46]研究发现,枯草芽胞杆菌与苏云金芽胞杆菌等生防菌的协同作用,对于农业鳞翅目虫害的防治效果显著。另有研究发现苏云金芽胞杆菌 Cry2Ab2 是玉米棉铃虫(*Helicoverpa zea*)的可持续防御微生物制剂^[47]。综上所述表明,芽胞杆菌菌株可作为农作物的生物肥料和生物防治菌剂,绿色可持续地防治植物病虫害。

5 总结与展望

综上,植物根际芽胞杆菌具有有效的促进植物生长以及防治植物病害的活性,已被广泛地应用于农业生产和绿色防控中,为进一步推动农业绿色、高效、可持续发展提供科学依据。本文综述了植物根际芽胞杆菌在促进农林作物生长以及防治植物病害中的应用现状,总结并阐述了芽胞杆菌可能通过植物根系分泌物的趋化作用运动至植物根部,在与植物根部短期接触后,芽胞杆菌从运动细胞分化为生物膜产生细胞并长期定殖于寄主植物。与此同时,芽胞杆菌可产生植物激素、抑菌化合物等物质,增强寄主植物耐受性,从而实现了对寄主植物的促生防病功效。以上的研究结果和理论知识,将为植物促生芽胞杆菌的研究与开发应用提供科学依据。

芽胞杆菌的许多特征与植物紧密相关,今后在进行植物根际芽胞杆菌促生防病的研究方面,需重点关注以下 3 点。其一,深入挖掘芽胞杆菌在植物根际的定殖机制。芽胞杆菌在寄主植物上的定殖能力是发挥其促生与生防作用的重要前提,故应特别关注芽胞杆菌与植物根定殖的相关生物学性状与分子机制的研究。另外,芽胞杆菌在植物体内定殖并相互作用时,植物可通过活性氧的爆发来应对外界胁迫,那么芽胞杆菌是如何激活不同的细胞防御机制对氧化胁迫作出反应,并影响菌株定殖能力等方面,也需进一步深入研究^[48]。其二,基于芽胞杆菌对植物促生防病机理

的相关研究结果,可进一步深入菌群间互动所产生的增效机制研究。Niu 等^[49]通过探索细菌种间相互作用,从玉米根部简化组装了独特的微生物群落,该模型群落可显著抑制植物病原真菌,并对寄主植物的生长和健康至关重要。其三,芽胞杆菌对农作物防病增效的机制研究较为广泛,然而关于芽胞杆菌对林木促生防病的相关研究尚不明确,且鲜有开展相关研究的报道^[50],故对于芽胞杆菌推动林业可持续发展的相关研究与应用也是未来需重点关注的课题。

参考文献:

- [1] Taie H A A, Salama Z A E, Radwan S. Potential activity of basil plants as a source of antioxidants and anticancer agents as affected by organic and bio-organic fertilization[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2010, 38(1): 119-127.
- [2] 詹其厚,陈杰. 基于长期定位试验的变性土养分持续供给能力和作物响应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 124-132.
- [3] Andres Y L, Monserrate L, Buella L, et al. Antarctic *Pseudomonas* spp. promote wheat germination and growth at low temperatures[J]. Polar Biology, 2018, 41(11): 2343-2354.
- [4] Yang W, Zheng L, Liu H X, et al. Evaluation of the effectiveness of a consortium of three plant-growth promoting rhizobacteria for biocontrol of cotton *Verticillium wilt*[J]. Biocontrol and Technology, 2014, 24(5): 489-502.
- [5] Shanmugam V, Kanoujia N. Biological management of vascular wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* by plant growth-promoting rhizobacterial mixture[J]. Biological Control, 2011, 57(2): 85-93.
- [6] Gassmann A J, Shrestha R B, Kropf A L, et al. Field-evolved resistance by western corn rootworm to Cry34/35Ab1 and other *Bacillus thuringiensis* traits in transgenic maize[J]. Pest Management Science, 2020, 76(1): 268-276.
- [7] Luo C P, Chen Y X, Liu X H, et al. Engineered biosynthesis of cyclic lipopeptide locillomycins in surrogate host *Bacillus velezensis* FZB42 and derivative strains enhance antibacterial activity[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(11): 4467-4481.
- [8] Prashar P, Kapoor N, Sachdeva S. Rhizosphere: Its structure, bacterial diversity and significance[J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2014, 13(1): 63-77.
- [9] Segev E, Smith Y, Ben-Yehuda S. RNAdynamics in aging bacterial spores[J]. Cell, 2012, 148(1-2): 0-149.
- [10] 刘悦,詹亚光,牛犇. 水曲柳促生蜡芽芽孢杆菌 SQL0164 的分离鉴定及其根表定殖分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(10): 61-69.
- [11] Peng J, Yang X, Hua L, et al. Biosynthesis of low-molecular-weight mannan using metabolically engineered *Bacillus subtilis* 168 [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 251: 115-117.
- [12] Wani P A, Khan M S. Bacillus species enhance growth parameters of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in chromium stressed soils[J]. Food & Chemical Toxicology An International Journal, 2010, 48(11): 3262-3267.
- [13] Yuan J, Zhang N, Huang Q, et al. Organic acids from root exudates of banana help root colonization of PGPR strain *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 13438.
- [14] Liu Y, Chen L, Wu G, et al. Identification of root secreted compounds involved in the communication between soil-borne pathogen-cucumber-*Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2016, 30(1): 53.
- [15] Fan B, Chen X H, Budiharjo A, et al. Efficient colonization of plant roots by the plant growth promoting bacterium *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42, engineered to express green fluorescent protein [J]. Journal of Biotechnology, 2011, 151: 303-311.
- [16] Koumoutsis A, Chen X H, Vater J, et al. DegU and YczE positively regulate the synthesis of bacillomycin D by *Bacillus amyloliquefaciens* strain FZB42[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2007, 73(21): 6953.
- [17] Xiong Y W, Li X W, Wang T T, et al. Root exudates-driven rhizosphere recruitment of the plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus flexus* KLBMP 4941 and its growth-promoting effect on the coastal halophyte *Limonium sinense* under salt stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 194: 110374.
- [18] Walukiewicz H E, Ordal G W, Rao C V. *In vitro* assay for measuring receptor-kinase activity in the *Bacillus subtilis* chemotaxis pathway[M]// Bacterial Chemosensing. Methods in Molecular Biology, 2018, 1729: 95-105.
- [19] Allard-Massicotte R, Tessier L, Lécuyer F, et al. *Bacillus subtilis* early colonization of *Arabidopsis thaliana* roots involves multiple chemotaxis receptors [J]. mBio, 2016, 7(6): e01664-16.
- [20] Tan S, Yang C, Mei X, et al. The effect of organic acids from tomato root exudates on rhizosphere colonization of *Bacillus amyloliquefaciens* T-5[J]. Applied Soil Ecology, 2013, 64: 15-22.
- [21] Wang X, Xie H, Ku Y, et al. Chemotaxis of *Bacillus cereus* YL6 and its colonization of Chinese cabbage seedlings[J]. Plant and Soil, 2020, 447(1-2): 413-430.
- [22] Liu Y, Feng H, Fu R, et al. Induced root-secreted D-galactose functions as a chemoattractant and enhances the biofilm formation of *Bacillus velezensis* SQR9 in an MepA-dependent manner[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104(17): 785-797.
- [23] Tchoufag J, Ghosh P, Nan B, et al. Mechanisms for bacterial gliding motility on soft substrates[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(50): 1-8.
- [24] Zhao X, Wang R, Shang Q, et al. The new flagella-associated collagen-like proteins ClpB and ClpC of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 are involved in bacterial motility[J]. Micro-

- biological Research, 2016, 184: 25-31.
- [25] Ricci E, Schwinghamer T, Fan D, et al. Growth promotion of greenhouse tomatoes with *Pseudomonas* sp. and *Bacillus* sp. biofilms and planktonic cells[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 138: 61-68.
- [26] Beauregard P B, Chai Y, Vlamakis H, et al. *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(17): 1621-1630.
- [27] Firoz Ahmad A, Iqbal A, John P. Growth stimulation and alleviation of salinity stress to wheat by the biofilm forming *Bacillus pumilus* strain FAB10[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 143: 45-54.
- [28] Chen Y, Yan F, Chai Y, et al. Biocontrol of tomato wilt disease by *Bacillus subtilis* isolates from natural environments depends on conserved genes mediating biofilm formation[J]. Environmental Microbiology, 2013, 15(3): 848-864.
- [29] 刘鲁峰, 狄义宁, 何丽莲, 等. 内生枯草芽孢杆菌 B9 促生长效果及产吲哚乙酸 (IAA) 能力研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(2): 49-56, 97.
- [30] Mahmood A, Kataoka R. Metabolite profiling reveals a complex response of plants to application of plant growth-promoting endophytic bacteria [J]. Microbiological Research, 2020, 234: 126421.
- [31] Wang C, Zhao D, Qi G, et al. Effects of *Bacillus velezensis* FKM10 for promoting the growth of *Malus hupehensis* Rehd. and inhibiting *Fusarium verticillioides* [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 10: 2889.
- [32] Stavropoulou A. About the action of metabolites of plant growth-promoting rhizobacteria *Bacillus subtilis* on plant salt tolerance (I) [J]. Archiv Fr Pflanzenschutz, 2011, 44(19): 1867-1882.
- [33] Franco-Sierra N D, Posada L F, Santa-Maria G, et al. *Bacillus subtilis* EA-CB0575 genome reveals clues for plant growth promotion and potential for sustainable agriculture[J]. Functional & Integrative Genomics, 2020, 20(4): 575-589.
- [34] Ker K, Seguin P, Driscoll B T, et al. Switchgrass establishment and seeding year production can be improved by inoculation with rhizosphere endophytes[J]. Biomass & Bioenergy, 2012, 47(DEC.): 295-301.
- [35] Saoussen B K, Boutheina M T, Slim T. Biological potential of *Bacillus subtilis* V26 for the control of *Fusarium wilt* and tuber dry rot on potato caused by *Fusarium* species and the promotion of plant growth[J]. Biological Control, 2020, 152: 10444.
- [36] Sanaz R K, Abdolrazagh D S, Mohammad R. Stress tolerance in flax plants inoculated with *Bacillus* and *Azotobacter* species under deficit irrigation[J]. Physiologia Plantarum, 2020, 170(2): 269-279.
- [37] Rameesha A, Sumaira R, Kashif A, et al. Halotolerant PG-PR: A hope for cultivation of saline soils[J]. Journal of King Saud University-Science, 2019, 31(4): 1195-1201.
- [38] Misra S, Chauhan P S. ACC deaminase-producing rhizosphere competent *Bacillus* spp. mitigate salt stress and promote *Zea mays* growth by modulating ethylene metabolism[J]. 3 Biotech, 2020, 10(2): 4736-4743.
- [39] El-Esawi M A, Alaraidh I A, Alsahli A A, et al. *Bacillus firmus* (SW5) augments salt tolerance in soybean (*Glycine max* L.) by modulating root system architecture, antioxidant defense systems and stress-responsive genes expression [J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2018, 132: 375-384.
- [40] Meschke H, Schrempf H. *Streptomyces lividans* inhibits the proliferation of the fungus *Verticillium dahliae* on seeds and roots of *Arabidopsis thaliana* [J]. Microbial Biotechnology, 2010, 3(4): 428-443.
- [41] Shafi J, Tian H, Ji M. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: A review[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2017, 31(3): 446-459.
- [42] Wu Z, Huang Y, Li Y, et al. Biocontrol of *Rhizoctonia solani* via induction of the defense mechanism and antimicrobial compounds produced by *Bacillus subtilis* SL-44 on pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2676.
- [43] Chowdhury S K, Majumdar S, Mandal V. Biocontrol potential and growth promotion capability of *Bacillus* sp. LBF-1 for management of wilt disease of *Solanum lycopersicum* caused by *Fusarium* sp. [J]. Russian Agricultural Sciences, 2020, 46(2): 139-147.
- [44] 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.
- [45] Khedher S B, Kilani-Feki O, Dammak M, et al. Efficacy of *Bacillus subtilis* V26 as a biological control agent against *Rhizoctonia solani* on potato [J]. Comptes Rendus Biologies, 2015, 338(12): 784-792.
- [46] 叶虹, 来银坤, 鲁建刚, 等. 一种用于防治鳞翅目虫害的生防菌剂及其制备工艺. 中国, CN108477222A [P]. 2018-09-04.
- [47] Yang F, Head G P, Price P A, et al. Inheritance of *Bacillus thuringiensis* Cry2Ab2 protein resistance in *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Pest Management Science, 2020, 76(11): 3676-3684.
- [48] Imlay J A. Cellular defenses against superoxide and hydrogen peroxide[J]. Annual Review of Biochemistry, 2008, 77(1): 755-776.
- [49] Niu B, Paulson J N, Zheng X, et al. Simplified and representative bacterial community of maize roots[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(12): E2450.
- [50] Rameesha A, Sumaira R, Kashif A, et al. Halotolerant PG-PR: A hope for cultivation of saline soils[J]. Journal of King Saud University-Science, 2019, 31(4): 1195-1201.



王蕾,张巍,张明月,等. 橐吾属植物研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2021(4):130-135.

橐吾属植物研究进展

王蕾¹, 张巍², 张明月¹, 董然¹, 韩东洋¹, 林强¹

(1. 吉林农业大学园艺学院, 吉林 长春 130118; 2. 安图县园林管理中心, 吉林 延边 133600)

摘要: 橐吾属植物资源分布广, 化学活性物质多样, 药理作用明显, 营养和食疗价值较高。为促进橐吾属植物的开发利用, 本文针对近几年橐吾属植物的资源分布、形态学、遗传与鉴定、繁殖生物学、化学活性物质、药理作用及营养与食用价值方面的研究进展进行综述。

关键词: 橐吾属; 化学活性成分; 药理作用; 营养价值; 研究与利用

橐吾属(*Ligularia*)植物为菊科(Compositae)千里光族多年生草本, 东北地区多数种类集食用、药用、观赏等功能于一体。橐吾属植物一般花期较长, 花多为黄色, 常作为园林湿地或林缘花境绿化以及花海中多功能植物材料^[1], 其中蹄叶橐吾(*L. fischeri*)、狭苞橐吾(*L. intermedia*)的根、茎可入药, 常作为藏药、川药等民间草药使用, 分别称为山紫菀和光紫菀。该属植物富含倍半萜类、黄酮类、生物碱类等化学成分, 药理上在抗炎抑菌、抗癌、抗肿瘤、保护胃黏膜等方面发挥着重要功效^[2], 同时营养成分十分丰富, 在保健品和医药领域有着广阔的开发利用价值。本文全面综述了近几年国内外相关的研究进展, 以期对橐吾属植物的开发利用提供帮助。

1 分类与资源分布

橐吾属自 1861 年建立一直持有两种意见, 部分学者认为其形态与千里光属有很大区别, 应将其立为一个独立的属, 也有部分学者坚持将本属作为千里光族的一部分或千里光族下的一个属, 1938 年, 外国学者首次进行分类并记述了 89 种中国产橐吾属植物, 依据花序类型分为伞房组和总状花序组, 为橐吾属植物分类奠定了基础^[3]。刘尚武^[4]根据橐吾属植物形态特征进行分类, 包括伞房组、线苞组、花葶组、橐吾组、合苞组及蓝灰组共 6 个组, 其中伞房组和橐吾组下各有 3 个系, 后将其种类系统分为 6 个组, 11 个系, 共计 129 个种。

现橐吾属全世界报道约有 150 种, 欧洲仅有西伯利亚橐吾(*L. sibirica*)和灰绿橐吾(*L. glauca*)2 种, 主要分布在喀尔巴阡山和阿尔卑斯山, 其余种类全部产于亚洲, 日本有 8 种, 喜马拉雅及克什米尔地区 11 种, 中亚-帕米尔-伊朗 16 种, 西伯利亚 7 种及远东地区有 9 种, 中国橐吾属植物

收稿日期: 2020-12-04

基金项目: 吉林省科技厅科技支撑计划项目(20180201079NY)。

第一作者: 王蕾(1996—), 女, 在读硕士, 从事长白山野生植物种质资源及观赏园艺研究。E-mail: 1198565201@qq.com。

通信作者: 董然(1966—), 女, 博士, 教授, 博导, 从事长白山野生植物引种驯化研究。E-mail: 1836630983@qq.com。

Mechanism and Application of Plant Rhizosphere *Bacillus* in Promoting Growth and Preventing Diseases

LIU Yue, WANG Li-da, LAN Ying, LI Qing-chao, ZHAO Xiu-mei, YANG Ying, ZHOU Chuan-yu
(Qiqihar Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, China)

Abstract: In order to promote the development and application of environmentally friendly, efficient and safe beneficial *Bacillus* preparation. This paper summarized and systematically described, the colonization of *Bacillus* in host plants and the mechanism of synergism and disease prevention of host plants, further reviewed the application of *Bacillus* rhizosphere in promoting the growth of agricultural and forestry crops and controlling plant diseases, and prospected the scientific issues and application of *Bacillus* rhizosphere in the future.

Keywords: *Bacillus* rhizosphere; promoting growth; preventing diseases; colonization; mechanism of action