

• 综 述 •

植物根际促生菌对药用植物生长影响的研究进展

焦松林 综述, 欧阳湖, 刘浪, 祝钰洋, 周东海[△]审校

(贵州省疾病预防控制中心, 贵州 贵阳 550004)

[摘要] 植物根际促生菌(PGPR)是一类定殖于植物根际的有益细菌,其能通过多重促生效应改善药用植物的生长发育,以降低生产中化肥和农药长期施用引发的负面影响。该文从 PGPR 对药用植物的生长发育和抗逆能力影响方面进行了综述,旨在为药用植物的可持续性和高质量生产提供理论指导。

[关键词] 植物根际促生菌; 药用植物; 抗逆性; 综述

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2024.02.029 **中图法分类号:**R282.2

文章编号:1009-5519(2024)02-0316-05 **文献标识码:**A

**Research progress on the effects of Plant growth-promoting rhizobacteria
on the growth of medicinal plants**

JIAO Songlin, OU-YANG Hu, LIU Lang, ZHU Zhengyang, ZHOU Donghai[△]

(Guizhou Center for Disease Control and Prevention, Guiyang, Guizhou 550004, China)

[Abstract] Plant growth-promoting rhizobacteria(PGPR) are a class of beneficial bacteria that colonize the plant rhizosphere. They can improve the growth and development of medicinal plants through multiple growth promoting effects, thereby reducing the negative effects caused by long-term use of fertilizers and pesticides in production. The article reviews the effects of PGPR on the growth, development, and stress resistance of medicinal plants, aiming to provide theoretical guidance for the sustainability and high-quality production of medicinal plants.

[Key words] Plant growth-promoting rhizobacteria; Medicinal plants; Stress resistance; Review

药用植物是我国重要的中药资源,截至目前,我国记载的药用植物资源已有 1.3 万余种^[1]。但近年来随着野生药用植物资源的过度开采,为缓解市场供需矛盾,人工种植逐渐演变成药用植物生产的主流方式^[2]。调查显示,我国 2020 年中药材种植总面积约有 8 339.46 万亩,300 余种常用中药材实现人工种植^[3]。然而,目前的人工种植往往依赖化肥和农药的投入,这势必会影响到药材的质量和用药安全,同时也会威胁到土壤资源和生态环境。因此,有必要去探寻一种可持续性的、高质量的药用植物生产方式。

植物根际促生菌(PGPR)是一类定殖于植物根际的有益细菌,自 1978 年被首次报道以来,目前已有 20 余种属 PGPR 从植物根际分离,包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、固氮菌属(*Azotobacter*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)和伯克霍尔德里氏菌属(*Burkholderia*)等^[4-5]。据报道,PGPR 能通过多重促生效应改善药用植物的生长发育,以降低生产中化肥和农药长期施用引发的负面影响^[4]。鉴于此,本文从 PGPR 对药用植物的生长发育和抗逆能力影响方面进行了综述。

1 PGPR 对药用植物的生长发育影响

1.1 促生效应 药用植物的生长状况与其产量密切相关。PGPR 可通过固氮、溶磷、解钾、产铁载体等方式分解土壤中被固定的养分,供药用植物根系吸收利用,从而促进根系生长。如施用枯草芽孢杆菌、滋养节杆菌、根瘤菌和中华根瘤菌复合 PGPR 菌剂能提高土壤中氮、磷、钾养分含量,促进黄芪生长^[6]。圆褐固氮菌和恶臭假单胞菌能通过增强鸭嘴花根际土壤固氮酶和酸性磷酸酶活性以维持氮、磷供应,提高鸭嘴花根系生物量和干物质含量^[7]。罗勒混合接种苜蓿中华根瘤菌 Rm1021、枯草芽孢杆菌 BS119m、根瘤菌 USDA4438 和荧光假单胞菌 WCS417r 能增强地上部磷、铁、铜矿质养分累积^[8]。PGPR 也能通过调控植物激素水平或分泌某些代谢产物刺激药用植物生长。姚阳阳等^[9]研究发现,复合施用枯草芽孢杆菌 5C1、解淀粉芽孢杆菌 5C5 和贝莱斯芽孢杆菌 5C7 可提高当归内源茉莉酸、生长素、赤霉素和细胞分裂素水平,植株株高、主根长、单株鲜重等生物量显著增加。SANTORO 等^[10]研究发现,荧光假单胞菌分泌的挥发性有机化合物能促进辣薄荷根系生长和单萜类产物合

成。另外,PGPR 还能通过诱导药用植物自身系统抗性改善生长。SAHANDI 等^[11]研究发现,恶臭假单胞菌和成团泛菌能提高辣薄荷叶片过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶和多酚氧化酶活性来增强植株抗性,避免外界因子对植株生长侵害。HAM 等^[12]研究发现,假节杆菌 NIBR-BAC000502770 能提高水杨梅植株抗菌活性和抗性产物(总酚、类黄酮)含量。RIAHI 等^[13]研究发现,施用嗜根性假单胞菌 S211、盐单胞菌 G11 和伊平屋桥大洋芽孢杆菌 E9 均能增强香叶天竺葵叶片总酚和类黄酮含量。此外,某些 PGPR 也能通过改变根际微生物群落种类和丰度,促进药用植物生长。李娟等^[14]研究发现,假节杆菌生物肥料 HZ-24 对黄芪根系的促生增产机理是通过改变黄芪根际微生物的菌落结构,使根际土壤细菌、放线菌数量增加及真菌数量减少。WEI 等^[15]分析了施用贝莱斯芽孢杆菌 D2WM 和 ZJ-11 的金线莲根际微生物群落多样性,结果发现,贝莱斯芽孢杆菌 D2WM 和 ZJ-11 能通过增强金线莲根际固氮菌、担子菌门和子囊菌门等有益微生物的丰度,提高土壤中矿质养分供应,同时降低黄色杆菌、青霉菌和卡氏枝孢瓶霉等病原体丰度,促使金线莲植株生长和品质改善。

种子萌发是获取高产量药用植物的关键第 1 步。研究证实,PGPR 对药用植物的种子萌发具有促进作用。KANG 等^[16]研究发现,伯克霍尔德里氏菌 KCTC11096 能显著提高莴苣种子的萌发和生长能力。FATEMEH 等^[17]研究发现,圆褐固氮菌 12、荧光假单胞菌 169、枯草芽孢杆菌 FzB24 和生脂固氮螺菌 OF 对山楂种子发芽率、发芽速度和平均发芽时间均有显著促进作用。李茜等^[18]研究发现,与对照组比较,接种含 ACC 脱氨酶的假单胞菌 F195 的金铁锁种子发芽率、发芽势、发芽指数、日平均发芽率和活力指数分别显著提高了 32%、49%、223%、32% 和 358%。

1.2 药效活性成分累积 药效活性成分是药用植物发挥药理作用的关键因素,也是评价其质量优劣的首要指标。同一种属药用植物的根际 PGPR 能通过改善药用植物的生长,间接促进其药效活性成分的合成。CHAMKHI 等^[19]研究发现,藏红花根际水生拉恩菌 S11A1、S11P1 和争论产碱菌 S12S4 能显著促进藏红花植株生长,加速藏红花柱头中藏红花素、藏红花酸、苦藏花素和藏红花醛含量累积。JAGTAP 等^[20]研究发现,姜黄根际嗜线虫沙雷氏菌 RGK 和变形假单胞菌 RGK 能通过促进姜黄根茎生长增强根茎中姜黄素、4-羟基-2-甲基苯乙酮、2,4-二叔丁基酚、*a*R-姜黄酮和 (*Z*)- γ -亚特兰大酮等化合物累积。PRAKASH 等^[21]研究发现,相比未接种处理,接种根际沙福芽孢杆菌 NAIMCC-B-02323 STJP 的甜叶菊

类黄酮、碳水化合物和甜菊糖苷含量分别显著提高 86.99%、103.84% 和 120.62%。

不同种属药用植物间的根际 PGPR 也能促进药效活性成分合成。黄靖等^[22]研究发现,施用番茄根际解淀粉芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌能促进金线莲皂苷和类黄酮(槲皮素、山柰酚、异鼠李素)含量累积。杨雪等^[23]研究发现,白刺根际解淀粉芽孢杆菌 DGL1 能诱导燕麦植株 CSLH 和 *glgC* 基因表达,加速燕麦多糖合成。

2 PGPR 对药用植物的抗逆能力研究

2.1 干旱 药用植物在干旱环境会引发渗透失衡,并诱导胞内活性氧含量累积,严重阻碍药用植物生长。PGPR 能通过调节渗透、激活植物激素通路、增强光合作用、提升抗氧化酶活性和抗性产物含量等机制,减轻干旱对药用植物生长的影响。CHIAPPERO 等^[24]研究发现,在干旱环境施用荧光假单胞菌 WCS417r 和解淀粉芽孢杆菌 GB03 能提高辣薄荷幼苗 POD、超氧化物歧化酶(SOD)活性和总酚含量,降低丙二醛(MDA)水平,有效减轻干旱对幼苗的负面效应。ASGHARI 等^[25]研究发现,唇萼薄荷幼苗在干旱胁迫下施用圆褐固氮菌和巴西固氮螺菌,能提高植株 DPPH 自由基清除活性和酚类、类黄酮及含氧单萜含量,降低 MDA 水平。ASLANI 等^[26]研究发现,药用鼠尾草在干旱胁迫下接种印度梨形孢和荧光假单胞菌,能提高叶片叶绿素相对含量,促进叶片单萜类化合物合成。YUE 等^[27]研究发现,施用解淀粉芽孢杆菌 FZB42 能通过促进甘草根系脯氨酸和蔗糖累积,改善渗透平衡,并激活内源茉莉酸通路,减轻甘草产量和药理代谢损失。

PGPR 还能提高药用植物应对低温胁迫的抗逆性。KUMAR 等^[28]研究发现,胡黄连在低温胁迫下接种沙雷氏菌 PKL:12 能诱导与冷胁迫基因编码蛋白(冷休克蛋白、分子伴侣蛋白和伴侣蛋白)、生长素和铁载体生物合成基因编码蛋白及磷酸盐溶解基因编码蛋白的表达。

2.2 重金属 重金属污染是影响药用植物药材品质和绿色出口的重要限制因素。PGPR 可通过根系生长,减少氧化应激,缓解重金属胁迫,提高药用植物重金属耐受性。赵晶晶等^[29]研究发现,外源施用 PGPR 复合菌肥能降低滇重楼根茎砷、铜、铅和镉重金属元素累积,提高根茎药用价值。SONI 等^[30]研究发现,对葫芦巴接种微杆菌-SURC140 能有效减轻铬(VI)胁迫,且植株株高、根长和根干重分别比未接种处理组提高了 86%、92% 和 74%。WEI 等^[31]研究发现,单独施用解淀粉芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌和牛放线菌均能显著抑制丹参根系对镉的吸收,提高根系总丹参酮含量。KANG 等^[32]研究发现,在重金属铝的处理下,

接种根瘤菌 DCY116T 能提高人参幼苗脯氨酸、酚类和糖类含量,并诱导 PgCAT、PgAPX 和 PgP5CS 活性氧清除基因表达增强,从而提高植物的抗逆性。

2.3 连作障碍 连作障碍会导致土壤微生物生态结构失调,诱发植物化感作用现象发生,致使药用植物生长发育受阻,病虫害发生加剧,药材产量和品质降低。研究表明,PGPR 能有效改善连作根际土壤的理化性质和微生物环境失衡。吴红森等^[33]研究发现,施用假单胞菌属、芽孢杆菌属微生物菌肥能增强太子参根际土壤中有益假单胞菌属丰度,减少致病尖孢镰刀菌丰度,缓解太子参的连作障碍,增加重茬太子参多糖、环肽 B 和总氨基酸含量。位小丫等^[34]研究发现,施用枯草芽孢杆菌、伯克霍尔德氏菌能提高连作太子参根际土壤 pH 值和速效氮含量,并促使重茬根际土壤微生物群落结构和功能多样性朝正茬根围微生物生态方向演变,缩小重茬与正茬根际土壤中病原真菌与有益真菌丰度比例差异,提高重茬太子参产量。冀玉良等^[35]研究发现,施用枯草芽孢杆菌 PS-8 能显著提高连作桔梗根际土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶活性,减少尖孢镰刀菌数量。

2.4 盐分 PGPR 能有效缓解土壤盐分对药用植物诱发的渗透胁迫和离子失衡,提升药用植物耐盐性。XIONG 等^[36]研究发现,施用弯曲芽孢杆菌 KLBMP4941 能促进补血草植株叶绿素累积,提高 POD、CAT、SOD 活性及脯氨酸和类黄酮含量,并调节 Na⁺/K⁺ 稳态增强植株应对盐胁迫的耐受性。HAN 等^[37]对盐胁迫下党参施用解淀粉芽孢杆菌 GB03 时发现,解淀粉芽孢杆菌 GB03 能提高党参光合作用,降低叶片渗透电位和抑制膜脂过氧化反应的发生。

2.5 生物防治 药用植物在生长发育过程中时常遭受来自病原菌的侵害,PGPR 作为一类生防菌,能通过诱导系统抗性、拮抗作用、营养和生态位点竞争等途径抑制病原菌生长。如芽孢杆菌 R57 能防治腐皮镰刀菌和锐顶镰刀菌对黄芪根的感染^[38]。多粘类芽孢杆菌 CF05 能通过增强铁皮石斛植株抗性抑制细菌性叶斑病原细菌(萎蔫短小杆菌)生长^[39]。解淀粉芽孢杆菌 FZB42 能有效抑制当归根腐病的发生,降低根际镰刀菌、赤霉菌、柱孢属真菌和的相对丰度^[40]。有研究发现,解淀粉芽孢杆菌 HK34 和多粘类芽孢杆菌 GBR-1 能分别拮抗恶疫霉菌和锈腐病菌对人参的感染^[41-42]。李海云等^[43]研究发现,红三叶根际副假单胞菌能通过分泌嗜铁素增强对铁养分竞争,继而抑制立枯丝核菌生长。

3 小结与展望

PGPR 作为一类根际有益细菌,对药用植物的生长发育兼备促生和抵御外环境因子侵袭两重有益效

应,能较大幅度化解化肥与农药过量施用引发的负面影响。然而,PGPR 应用于药用植物的实际生产还存在一定局限,具体表现在:(1)PGPR 环境适应性差,菌株定植能力弱。PGPR 在实际生产中的定植效果易受到土壤环境、药用植物根际分泌产物及病原微生物拮抗竞争等多重环境因子影响,致使其促生效应的发挥不稳定。(2)PGPR 菌肥时效性短,多数菌剂仅对某一段时期内的药用植物生长具有显著促进作用。(3)PGPR 菌肥生产要求多,且针对不同的药用植物还需制备专业菌肥。因此,如何研制具有高适应性、高定植和高效率的 PGPR 菌肥有望成为今后实现药用植物可持续性和高质量发展的重要方向。

参考文献

- [1] 程蒙,杨光,黄璐琦.《中国中药资源发展报告(2019)》综述--中药资源发展七十年历程与展望[J].中国食品药品监管,2021(3):16-27.
- [2] CAO P, WANG G, WEI X, et al. How to improve CHMs quality: Enlighten from CHMs ecological cultivation[J]. Chinese Herbal Medicines, 2021, 13(3): 301-312.
- [3] 王慧,张小波,汪娟,等. 2020 年全国中药材种植面积统计分析[J].中国食品药品监管,2022(1): 4-9.
- [4] GOUDA S, KERRY R G, DAS G, et al. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture[J]. Microbiol Res, 2018, 206: 131-140.
- [5] 周倩怡,李屹,韩睿,等. 根际促生菌缓解园艺作物连作障碍的研究进展[J].生态学杂志,2022, 41(9): 1845-1852.
- [6] 杨振宇,王宝慧,宋诗娟,等. 固氮菌剂对黄芪生长、土壤养分及酶活性的影响[J].山西农业科学,2022, 50(6): 861-868.
- [7] SINGH B, SAHU P M, ALORIA M, et al. Azotobacter chroococcum and Pseudomonas putida enhance pyrroloquinazoline alkaloids accumulation in Adhatoda vasica hairy roots by biotization[J]. J Biotechnol, 2022, 353: 51-60.
- [8] KHALEDIYAN N, WEISANY W, SCHENK P M. Arbuscular mycorrhizae and rhizobacteria improve growth, nutritional status and essential oil production in Ocimum basilicum and Satureja hortensis [J]. Ind Crop Prod, 2021, 160: 113163-113171.
- [9] 姚阳阳,杨涛,王引权,等. 两类根际复配促生菌剂对当归生长、生理特征及药效成分的影响[J].

中国实验方剂学杂志, 2022, 28(8): 131-138.

- [10] SANTORO M V, ZYGADLO J, GIORDANO W, et al. Volatile organic compounds from rhizobacteria increase biosynthesis of essential oils and growth parameters in peppermint (*Mentha piperita*) [J]. *Plant Physiol Bioch*, 2011, 49(10): 1177-1182.
- [11] SAHANDI M S, MEHRAFARIN A, BADI H N, et al. Improving growth, phytochemical, and antioxidant characteristics of peppermint by phosphate-solubilizing bacteria along with reducing phosphorus fertilizer use [J]. *Ind Crop Prod*, 2019, 141: 111777-111786.
- [12] HAM S H, YOON A R, OH H E, et al. Plant growth-promoting microorganism *Pseudarthrobacter* sp. NIBRBAC000502770 enhances the growth and flavonoid content of *Geum aleppicum* [J]. *Microorganisms*, 2022, 10(6): 1241-1250.
- [13] RIAHI L, CHERIF H, MILADI S, et al. Use of plant growth promoting bacteria as an efficient biotechnological tool to enhance the biomass and secondary metabolites production of the industrial crop *Pelargonium graveolens* L' Hér. under semi-controlled conditions [J]. *Ind Crop Prod*, 2020, 154: 112721-112720.
- [14] 李娟, 王文丽, 赵旭. 生物肥料 HZ-24 对黄芪生长及土壤微生物数量和酶活性的影响 [J]. *土壤与作物*, 2022, 11(2): 200-208.
- [15] WEI M, ZHANG M, HUANG G, et al. Coculture with two *Bacillus velezensis* strains enhances the growth of *Anoectochilus* plants via promoting nutrient assimilation and regulating rhizosphere microbial community [J]. *Ind Crop Prod*, 2020, 154: 112697-112706.
- [16] KANG S M, KHAN A L, HUSSAIN J, et al. Rhizonin A from *Burkholderia* sp. KCTC11096 and its growth promoting role in lettuce seed germination [J]. *Molecules*, 2012, 17(7): 7980-7988.
- [17] FATEMEH A, MASOUD T, PEJMAN A, et al. Effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) and stratification on germination traits of *Crataegus pseudoheterophylla* Pojark. Seeds [J]. *Sci Hortic-Amsterdam*, 2014, 172: 61-67.
- [18] 李茜, 贾颜, 李新艺, 等. 含 ACC 脱氨酶的植物促生菌对金铁锁种子萌发的影响 [J]. *河南农业科学*, 2022, 51(5): 45-52.
- [19] CHAMKHI I, SBABOU L, AURAG J. Improved growth and quality of saffron (*Crocus sativus* L.) in the field conditions through inoculation with selected native plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) [J]. *Ind Crop Prod*, 2023, 197: 116606-116614.
- [20] JAGTAP R R, MALI G V, WAGHMARE S R, et al. Impact of plant growth promoting rhizobacteria *Serratia nematodiphila* RGK and *Pseudomonas plecoglossicida* RGK on secondary metabolites of turmeric rhizome [J]. *Biocatal Agr Biotech*, 2023(47): 102622-102636.
- [21] PRAKASH J, EGAMBERDIEVA D, ARORA N K. A novel *Bacillus safensis*-based formulation along with mycorrhiza inoculation for controlling *Alternaria alternata* and simultaneously improving growth, nutrient uptake, and steviol glycosides in *Stevia rebaudiana* under field conditions [J]. *Plants*, 2022, 11(14): 1857-1873.
- [22] 黄靖, 陈婵. 接种促生菌对金线莲生物活性成分及土壤细菌群落的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(23): 184-191.
- [23] 杨雪, 王添, 谢永丽, 等. 解淀粉芽孢杆菌 DGL1 促燕麦生长分子机制及代谢通路探究 [J]. *草地学报*, 2022, 30(11): 2899-2909.
- [24] CHIAPPERO J, DEL R C L, ALDERETE L G S, et al. Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content [J]. *Ind Crop Prod*, 2019, 139: 111553-111561.
- [25] ASGHARI B, KHADEMIAN R, SEDAGHATI B. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) confer drought resistance and stimulate biosynthesis of secondary metabolites in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) under water shortage condition [J]. *Sci Hortic-Amsterdam*, 2020, 263: 109132-109141.
- [26] ASLANI Z, HASSANI A, MANDOULAKANI B A, et al. Effect of drought stress and inoculation treatments on nutrient uptake, essential oil and expression of genes related to monoterpenes in sage (*Salvia officinalis*) [J]. *Sci Hortic*

- Amsterdam, 2023, 309:111610-111622.
- [27] YUE L, UWAREMWE C, TIAN Y, et al. *Bacillus amyloliquefaciens* rescues glycyrrhizic acid loss under drought stress in *Glycyrrhiza uralensis* by activating the jasmonic acid pathway[J]. *Front Microbiol*, 2022, 12:4211-4223.
- [28] KUMAR R, BORKER S S, THAKUR A, et al. Physiological and genomic evidence supports the role of *Serratia quinivorans* PKL: 12 as a biopriming agent for the biohardening of micro-propagated *Picrorhiza kurroa* plantlets in cold regions [J]. *Genomics*, 2021, 113 (3): 1448-1457.
- [29] 赵晶晶, 李卓蔚, 许凌峰, 等. 根际促生菌剂对滇重楼生理特性及无机元素的影响[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2022, 28(2):166-174.
- [30] SONI S K, KUMAR G, BAJPAI A, et al. Hexavalent chromium-reducing plant growth-promoting rhizobacteria are utilized to bio-fortify trivalent chromium in fenugreek by promoting plant development and decreasing the toxicity of hexavalent chromium in the soil[J]. *J Trace Elem Med Bio*, 2023, 76:127116-127125.
- [31] WEI X, CAO P, WANG G, et al. Microbial inoculant and garbage enzyme reduced cadmium (Cd) uptake in *Salvia miltiorrhiza*(Bge.) under Cd stress[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2020, 192: 110311-110321.
- [32] KANG J P, HUO Y, YANG D U, et al. Influence of the plant growth promoting *Rhizobium panacihumi* on aluminum resistance in *Panax ginseng*[J]. *J Ginseng Res*, 2021, 45 (3): 442-449.
- [33] 吴红森, 张晟恺, 焦艳阳, 等. 微生物菌肥对太子参连作障碍和药理作用的改良效应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(8):1315-1326.
- [34] 位小丫, 林煜, 陈婷, 等. 田间条件下植物促生细菌缓解太子参连作障碍的效果评价[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2):399-408.
- [35] 冀玉良, 赵志新, 高宝云. 桔草芽孢杆菌 PS-8 对桔梗连作障碍土壤的修复及其促生作用[J]. *商洛学院学报*, 2022, 36(6):15-25.
- [36] 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]. *Ecotox Environ Safe*, 2020, 194:110374-110383.
- [37] HAN Q Q, WU Y N, GAO H J, et al. Improved salt tolerance of medicinal plant *Codonopsis pilosula* by *Bacillus amyloliquefaciens* GB03[J]. *Acta Physiol Plant*, 2017, 39:1-7.
- [38] 祖未希, 赵晓霞, 高芬. 芽孢杆菌 R57 对黄芪的防病提质作用及其鉴定[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(21):129-135.
- [39] 徐桑尔, 卢鹏, 金莉萍, 等. 多粘类芽孢杆菌防治铁皮石斛细菌性叶斑病及促生效果[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(12):2033-2034.
- [40] LIU Y, TIAN Y, YUE L, et al. Effectively controlling *Fusarium* root rot disease of *Angelica sinensis* and enhancing soil fertility with a novel attapulgit-coated biocontrol agent[J]. *Appl Soil Ecol*, 2021, 168:104121-104135.
- [41] LEE B D, DUTTA S, RYU H, et al. Induction of systemic resistance in *Panax ginseng* against *Phytophthora cactorum* by native *Bacillus amyloliquefaciens* HK34 [J]. *J Ginseng Res*, 2015, 39(3):213-220.
- [42] KIM Y S, KOTNALA B, KIM Y H, et al. Biological characteristics of *Paenibacillus polymyxa* GBR-1 involved in root rot of stored Korean ginseng[J]. *J Ginseng Res*, 2016, 40 (4): 453-461.
- [43] 李海云, 姚拓, 张榕, 等. 红三叶根际促生菌中具生防效果菌株筛选、鉴定及特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(3):743-750.

(收稿日期:2023-06-25 修回日期:2023-08-24)