

李绍建, 李雪梦, 杨瑾, 等. 根际生防菌田间应用对丹参生长及药用品质的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1): 194–203.

LI S J, LI X M, YANG J, et al. Effects of field application of rhizospheric biocontrol bacteria on growth and medicinal quality of *Salvia miltiorrhiza*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 194–203.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.22

根际生防菌田间应用对丹参生长及药用品质的影响

李绍建¹, 李雪梦¹, 杨瑾¹, 郭治辰¹, 高素霞¹, 秦艳红¹, 文艺¹,
鲁书豪¹, 赵莹², 杨健³, 万修福³, 王飞¹

(1. 河南省农业科学院 植物保护研究所/农业农村部华北南部作物有害生物综合治理重点实验室/河南省农用微生物创新中心, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学 植物保护学院, 河南 郑州 450046; 3. 中国中医科学院中药资源中心, 北京 100700)

摘要:为探究根际生防菌对丹参促生、防病及品质的影响, 使用从丹参根际土壤中分离的 *Paenibacillus polymyxa* Pp146、*Bacillus velezensis* Bv1-4、*Pseudomonas jessenii* Pj01-9、*Streptomyces syringium* SY6-10、*B. haynesii* CYM6-3、*S. toxytricini* 136 等 6 株生防菌株、灌溉水(CK) 分别对丹参进行灌根处理, 系统评价其对丹参根生长指标、根腐病防治及根内 23 种化学成分(包括 5 种丹参酮类和 18 种丹酚酸类)的影响。结果表明, 6 株生防菌田间灌根处理对丹参根长、根直径及根条数无显著促生作用; 除菌株 Pp146 外, 其余 5 株生防菌处理较 CK 丹参的根鲜质量均显著提高。在病害防控方面, 6 株生防菌对丹参根腐病的防治效果达 34.31%~65.59%, 其中, 菌株 Bv1-4、CYM6-3 显著降低了根腐病的发病率, 菌株 Pp146、Bv1-4、Pj01-9、SY6-10、CYM6-3 显著降低了病情指数。化学成分测定结果表明, 菌株 Bv1-4 显著提高了丹参酮类(丹参酮 I、丹参酮 II_A、丹参新酮)和丹酚酸类(原儿茶醛)的含量; 菌株 136 显著促进了丹酚酸 B 的积累; 菌株 Pj01-9 显著增加了咖啡酸、丹酚酸 C 的含量; 菌株 SY6-10 显著提升了丹参素的含量。综上, 6 株生防菌对丹参田间根腐病防控、产量提升及化学成分积累均具有较好效果, 其中, 菌株 Bv1-4 表现出最优的综合效果。

关键词:丹参; 根际生防菌; 生长指标; 化学成分; 根腐病发病率; 微生物菌剂

中图分类号: S567.5+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2026)01-0194-10

Effects of Field Application of Rhizospheric Biocontrol Bacteria on Growth and Medicinal Quality of *Salvia miltiorrhiza*

LI Shaojian¹, LI Xuemeng¹, YANG Jin¹, GUO Zhichen¹, GAO Suxia¹, QIN Yanhong¹,
WEN Yi¹, LU Shuhao¹, ZHAO Ying², YANG Jian³, WAN Xiufu³, WANG Fei¹

(1. Institute of Plant Protection, Henan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Integrated Crop Pests Management on Crops in Southern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Agricultural Microbiology Innovation Center of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Plant Protection, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 3. National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China)

Abstract: To explore the effects of rhizospheric biocontrol bacteria on growth promotion, disease prevention, and quality of *Salvia miltiorrhiza*, in this study, six biocontrol bacteria (*Paenibacillus polymyxa* Pp146, *Bacillus velezensis* Bv1-4, *Pseudomonas jessenii* Pj01-9, *Streptomyces syringium* SY6-10, *B. haynesii* CYM6-3, and *S. toxytricini* 136) isolated from the rhizosphere soil of *S. miltiorrhiza* and water(CK) were utilized for root irrigation treatments, respectively. The effects of these

收稿日期: 2025-05-30

基金项目: 国家中药材产业技术体系(CARS-21); 河南省中药材产业技术体系(HARS-22-11-Z1); 河南省农业科学院新兴学科(2024XK06); 河南省农业科学院自主创新项目(2025ZC51); 河南省科技攻关计划(252102111102)

作者简介: 李绍建, 副研究员, 博士, 主要从事药用植物保护研究, E-mail: lishaojianli@126.com, 李绍建、李雪梦为同等贡献作者

通信作者: 万修福, 助理研究员, 硕士, 主要从事中药材生态种植研究, E-mail: xiufuwan@163.com

王飞, 副研究员, 硕士, 主要从事药用植物保护研究, E-mail: yunfeiren@163.com

biocontrol bacteria on root growth parameters, root rot disease control, and the contents of 23 chemical components(including 5 tanshinones and 18 phenolic acids) in the roots of *S. miltiorrhiza* were systematically evaluated. The results demonstrated that the field root irrigation treatment with six biocontrol bacteria had no significant growth-promoting effect on the root length, root diameter, and the root branch number. The analysis of the fresh root weight of the plots revealed that except for isolate Pp146, the fresh root weight of the plots treated with the other five biocontrol bacteria was significantly higher than that of CK treatment. In terms of disease control, the six biocontrol bacteria exhibited a control efficacy of root rot ranging from 34.31% to 65.59% against root rot disease. Specifically, the incidence rate of root rot was significantly reduced by *B. velezensis* Bv1-4 and *B. haynesii* CYM6-3, while the disease index was significantly decreased by *P. polymyxa* Pp146, *B. velezensis* Bv1-4, *P. jessenii* Pj01-9, *S. syringium* SY6-10, and *B. haynesii* CYM6-3. The results of the chemical component determination indicated that *B. velezensis* Bv1-4 significantly promoted the contents of tanshinones(tanshinone I, tanshinone II_A, and miltirrhizone) and phenolic acids(protocatechualdehyde); *S. toxytricini* 136 significantly enhanced the accumulation of salvianolic acid B; *P. jessenii* Pj01-9 significantly increased the contents of caffeic acid and salvianolic acid C; and *S. syringium* SY6-10 significantly enhanced the content of danshensu. In conclusion, the six biocontrol bacteria strains had demonstrated significant effects on the prevention and control of root rot disease, yield improvement, and chemical component accumulation in *Salvia miltiorrhiza* under field conditions, with *B. velezensis* Bv1-4 demonstrating the most comprehensive effects.

Keywords: *Salvia miltiorrhiza*; rhizospheric biocontrol bacteria; growth parameter; chemical component; incidence of root rot; microbial agent

近年来,随着我国中医药事业的蓬勃发展,中药材需求量持续增长,作为中医药产业链源头的中药材种植业也迎来了快速发展^[1]。然而,在种植规模不断扩大的同时,过度施用化肥农药、盲目追求产量等问题日益凸显,对中药材产地的生态环境和药材品质造成了严重威胁^[2]。在此背景下,对植物有益微生物为核心的微生物菌剂进行开发,其绿色、可持续等优势已成为当前中药农业发展的重点方向^[2-3]。

丹参(*Salvia miltiorrhiza* Bge.)为唇形科鼠尾草属的重要药用植物,其干燥根及根茎具有活血祛瘀、凉血消痈、清心除烦等功效^[4],被广泛应用于多种中药方剂中^[5-7]。丹参的化学成分主要包括脂溶性的丹参酮类和水溶性的丹酚酸类,其中,丹参酮 I、丹参酮 II_A、隐丹参酮和丹酚酸 B 是丹参的主要有效成分,也是《中国药典(2020 版)》规定的丹参质检的指标性成分^[4]。近年来,随着我国丹参大面积集约化种植,连作障碍、病虫害等问题日益严重^[8],尤其是在丹参整个生长期均可发生、田间发病普遍的根腐病,严重影响丹参的产量和品质,已成为制约丹参生产的主要病害^[9-10],急需开发有效的防治药剂。研究表明,从药用植物根内或根际土壤中分离的有益微生物(如根瘤菌属 *Rhizobium*、芽孢杆菌属 *Bacillus*、假单胞菌属 *Pseudomonas*、克雷伯氏菌属 *Klebsiella* 等)具有固氮、溶磷、产生植物激素等多种功能^[11-13],可通过调节植物激素水平或增强植物营养吸收促进植物生长^[14-15]。此外,这

些有益微生物还能促进药用植物次生代谢产物的合成与积累^[16-19]。利用有益微生物资源开发药用植物专用的微生物菌剂,对中药产业发展、药用品质提升具有重要意义。

目前,针对丹参的有益微生物研究主要聚焦于促生、次生代谢调控与产物积累,且多局限于室内,而大田应用中兼具促生和防病功能的有益微生物对丹参化学成分的影响尚未见报道。基于此,本研究以田间种植丹参为研究对象,选取从丹参根际分离并经室内验证兼具促生与防病效果的 6 株生防菌进行田间灌根试验,系统评价其对丹参生长、根腐病防控及化学成分的影响,以期对丹参生产中绿色高效微生物菌剂的开发与应用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 植物 供试材料为河南省农业科学院植物保护研究所选育的郑丹 1 号丹参,经河南省农业科学院植物保护研究所秦艳红研究员鉴定为唇形科植物丹参(*S. miltiorrhiza* Bge.)。

1.1.2 生防菌株 供试生防菌株多黏类芽孢杆菌 *Paenibacillus polymyxa* Pp146、贝莱斯芽孢杆菌 *Bacillus velezensis* Bv1-4 和杰氏假单胞菌 *Pseudomonas jessenii* Pj01-9,来源于河南省农业科学院植物保护研究所中药材病虫害研究室菌源库。生防菌株 *Streptomyces syringium* SY6-10、海内氏芽孢

杆菌 *B. haynesii* CYM6-3 和毒三素链霉菌 *S. toxytricini* 136, 来源于河南农业大学植物保护学院生物防治研究室菌源库。

1.1.3 培养基 LB 固体培养基: 胰蛋白胨 10 g, 酵母提取物 5 g, 氯化钠 10 g, 琼脂 18 g, 蒸馏水 1 000 mL。LB 液体培养基: 以不加琼脂的 LB 培养基为 LB 液体培养基。高氏一号固体培养基(用于链霉菌培养): 可溶性淀粉 20 g, 硝酸钾 1 g, 磷酸氢二钾 0.5 g, 七水硫酸镁 0.5 g, 氯化钠 0.5 g, 七水硫酸亚铁 0.091 5 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL。高氏一号液体培养基(用于链霉菌培养): 以不加琼脂的高氏一号固体培养基为高氏一号液体培养基。

1.1.4 仪器与试剂 ACQUITY UPLC I-Class/Xevo TQ-S micro IVD 系统购自美国 Waters 公司。对照品: 丹参酮 I (批号 20090901)、丹参酮 II_A (批号 22012016)、隐丹参酮 (批号 20090909)、二氢丹参酮 I (批号 20090910)、丹参新酮 (批号 21100627)、富马酸 (批号 23112302)、琥珀酸 (批号 23100943)、苹果酸 (批号 21032511)、原儿茶醛 (批号 21032401)、D-酒石酸 (批号 20060516)、咖啡酸 (批号 20060809)、柠檬酸 (批号 20082009)、阿魏酸 (批号 20061150)、丹参素 (批号 21031005)、紫草酸 (批号 21101928)、迷迭香酸 (批号 20081109)、异迷迭香酸苷 (批号 22061681)、丹酚酸 A (批号 21010801)、丹酚酸 B (批号 21010802)、丹酚酸 C (批号 21010803)、丹酚酸 D (批号 20062243)、丹酚酸 E (批号 22012351)、丹酚酸 Y (批号 22012351) 均购自北京倍特仁康生物医药科技有限公司。色谱纯甲醇、乙腈及液相色谱-质谱联用仪 (Liquid Chromatograph Mass Spectrometer, LC-MS)、分析用甲酸均购自美国 Fisher Scientific 公司; 实验用水为屈臣氏蒸馏水; 0.22 μm PTFE 滤膜购自天津津腾实验设备有限公司。

1.2 试验设计

在河南省许昌市禹州市广顺种植专业合作社丹参种植田, 设置 7 个处理, 分别为 6 株生防菌发酵稀释液 (发酵液浓度为 2.0×10^9 cfu/mL, 田间施用稀释 100 倍) 和灌溉水处理 (CK); 试验采用单因素完全随机区组设计, 每个处理 4 次重复, 每个小区 18 m² (长 7.5 m, 3 垄, 一垄双行, 垄间距 80 cm, 行距 20 cm, 株距 20 cm)。于 7 月丹参苗期采用灌根方式处理一次, 每株 100 mL, 30 d 后用同样方法

和用量再处理一次, 共处理 2 次, 其他管理按当地常规栽培措施进行。

1.3 生防菌田间应用对丹参的促生防病试验

1.3.1 生防菌发酵液制备 分别将菌株活化至 LB 固体培养基和高氏一号固体培养基 (链霉菌), 置于 28 ℃ 恒温培养箱中培养 48 h, 然后使用灭菌牙签分别挑取菌株单菌落转入装有对应液体培养基的锥形瓶内, 放入 28 ℃、180 r/min 摇床, 培养 72 h 后将各菌株发酵液浓度调至 2.0×10^9 cfu/mL, 即得各菌株发酵液。

1.3.2 田间调查 于丹参收获期, 每小区收集所有丹参根样品测定小区根鲜质量; 每小区随机选取 20 株丹参根样品, 测定丹参根长、根直径、根条数, 调查根腐病发病率及发病级数; 另每处理随机选取 9 株根样品编号后阴干, 干燥后的单株根样品进行化学成分含量测定。田间调查参照孙泽瑞^[20]的丹参根腐病病害分级方法, 分级标准如下。

0 级. 植株主根生长正常, 茎基部无病害; 1 级. 表皮表现出轻微病症, 但病症未侵染内部组织; 3 级. 表皮呈现明显病症, 维管束呈褐色; 5 级. 维管束呈深褐色, 导管木质化, 根部开始腐烂, 腐烂部分占总根的 30% 以下, 生长受阻; 7 级. 根部腐烂部分占总根的 30% 以上或全株因病萎蔫; 9 级. 植株地上部分全部干枯死亡, 并且根系全部腐烂。

1.3.3 利用各处理小区丹参根腐病病级, 计算病情指数。 利用处理组及对照组病情指数, 计算防治效果。

$$\text{发病率} = \frac{\text{发病株数}}{\text{调查总株数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum (\text{病级数} \times \text{该病级株数})}{(\text{最高病级数} \times \text{调查总株数})} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{防治效果} = \frac{(\text{对照组病情指数} - \text{处理组病情指数})}{\text{对照组病情指数}} \times 100\% \quad (3)$$

1.4 丹参的化学成分含量测定

1.4.1 待检样品溶液制备 干燥后的单株根样品利用打粉机粉碎, 粉碎后样品过 0.25 mm 筛, 装入封口袋并编号备用; 待检样品溶液的制备参照《中国药典 (2020 版)》^[4]对丹参丹酚酸类及丹参酮类的提取方法, 实验条件参照王巧等^[21]的方法。称取待检样品时, 封口袋内样品需充分混匀, 精密称取样品干燥粉末 15 mg, 置于 2 mL 离心管内, 每个样品称取 2 管; 每管样品中分别加入 80% 甲醇 (酚酸类提取试剂) 或纯甲醇 (丹参酮类提取试剂) 1.5 mL,

称定质量,超声提取(功率 300 W,频率 40 kHz) 40 min;冷却后称定质量,分别用对应提取试剂补足失质量。以 12 000 r/min 离心 5 min,上清液过 0.22 μm 微孔滤膜后即得待检样品溶液。

1.4.2 对照品溶液制备及样品成分的测定 精密称取丹酚酸 B 对照品 1.83 mg,加甲醇配制质量浓度为 1 mg/mL 的单一对照品溶液,4 $^{\circ}\text{C}$ 下冷藏保存,供超高效液相色谱(UPLC)分析用;另分别精密称取其他成分对照品适量,加甲醇配制质量浓度为 1 mg/mL 的单一对照品备用液,然后根据响应值量取各对照品备用液适量,加甲醇配制质量浓度为 20 $\mu\text{g/mL}$ 不等的混合对照品溶液,4 $^{\circ}\text{C}$ 下冷藏保存,供超高效液相色谱—三重四极杆质谱联用技术(UPLC-QQQ-MS)分析用。

1.4.3 色谱条件 Waters XBridge BEH C_{18} 色谱柱(3.0 mm $\times$ 100 mm,2.5 μm),柱温为 40 $^{\circ}\text{C}$,进样量

为 1 μL ,流速为 0.3 mL/min;流动相 A 为 0.1% 甲酸乙腈;流动相 B 为 0.1% 甲酸水溶液;丹酚酸 B 等度洗脱程序:0 min,A(25%);3 min,A(25%);检测波长为 287 nm。酚酸类梯度洗脱程序:0 min,A(5%);3.5 min,A(30%);6.0 min,A(60%);6.5 min,A(90%);7.5 min,A(90%);8 min,A(5%);10 min,A(5%);丹参酮类洗脱程序:0 min,A(65%);3.5 min,A(75%);4.5 min,A(65%);7.0 min,A(65%)。

1.4.4 质谱条件 采用电喷雾离子源(ESI),丹参酮类成分采用正离子扫描,酚酸类成分采用负离子扫描;气帘气流速为 30 L/min,喷雾电压为 5 500 V(正离子)和-4 500 V(负离子);雾化气流速为 50 L/min,加热辅助气流速为 50 L/min;采集方式为多反应监测(MRM)模式,离子源温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,脱溶剂温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 。其他质谱条件见表 1。

表 1 22 种成分的 MRM 质谱条件

Tab.1 Mass spectrometry conditions for 22 components in MRM mode

成分 Component	保留时间/min Retention time	定量离子对/(m/z) Quantitative ion pair	定性离子对/(m/z) Qualitative ion pair	碰撞能量/eV Collision energy
富马酸 Fumaric acid	2.13	114.7/70.6	114.7/26.6	6,12
琥珀酸 Succinic acid	2.27	116.8/72.6	116.8/98.6	10,7
苹果酸 Malic acid	1.60	132.7/114.6	132.7/70.6	7,13
原儿茶醛 Protocatechuic	3.84	136.8/107.8	136.8/91.6	21,26
酒石酸-D Tartaric acid	1.51	148.8/86.7	148.8/72.6	10,14
咖啡酸 Caffeic acid	4.01	178.8/134.8	178.8/90.7	15,17
柠檬酸 Citric acid	1.95	190.8/110.7	190.8/86.6	7,14
阿魏酸 Ferulic acid	4.98	192.8/134.0	192.8/177.8	17,13
丹参素 Danshensu	2.90	196.8/134.8	196.8/178.8	17,11
迷迭香酸 Rosmarnic acid	5.28	359.0/160.8	359.0/196.8	11,28
丹酚酸 D Salvianolic acid D	4.85	417.0/174.8	417.0/196.8	28,19
丹酚酸 C Salvianolic C	6.11	491.0/293.0	491.0/196.8	25,21
丹酚酸 A Salvianolic A	5.67	493.0/295.0	493.0/184.7	15,24
紫草酸 Lithospermic acid	5.22	493.0/294.9	493.0/184.8	11,28
异迷迭香酸甘 Salviaflaside	4.62	521.0/160.8	521.0/358.9	34,12
丹酚酸 E Salvianolic acid E	5.01	717.1/320.9	717.1/519.0	36,19
丹酚酸 Y Salvianolic Y	5.52	717.2/321.0	717.2/519.0	36,20
丹参酮 1 Tanshinone I	4.32	277.0/177.8	277.0/249.0	36,17
二氢丹参酮 1 Dihydrotanshinone	3.31	279.0/261.0	279.0/233.0	16,21
丹参新酮 Milerione	6.80	283.0/223.0	283.0/239.9	23,24
丹参酮 2A Tanshinone 2A	6.02	295.0/276.9	295.0/249.0	20,22
隐丹参酮 Cryptotanshinone	4.42	296.9/251.0	296.9/282.0	23,26

1.5 数据分析

采用 WPS Office 2024 软件进行数据处理,采

用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析,采用 Origin 2024 软件进行绘图。

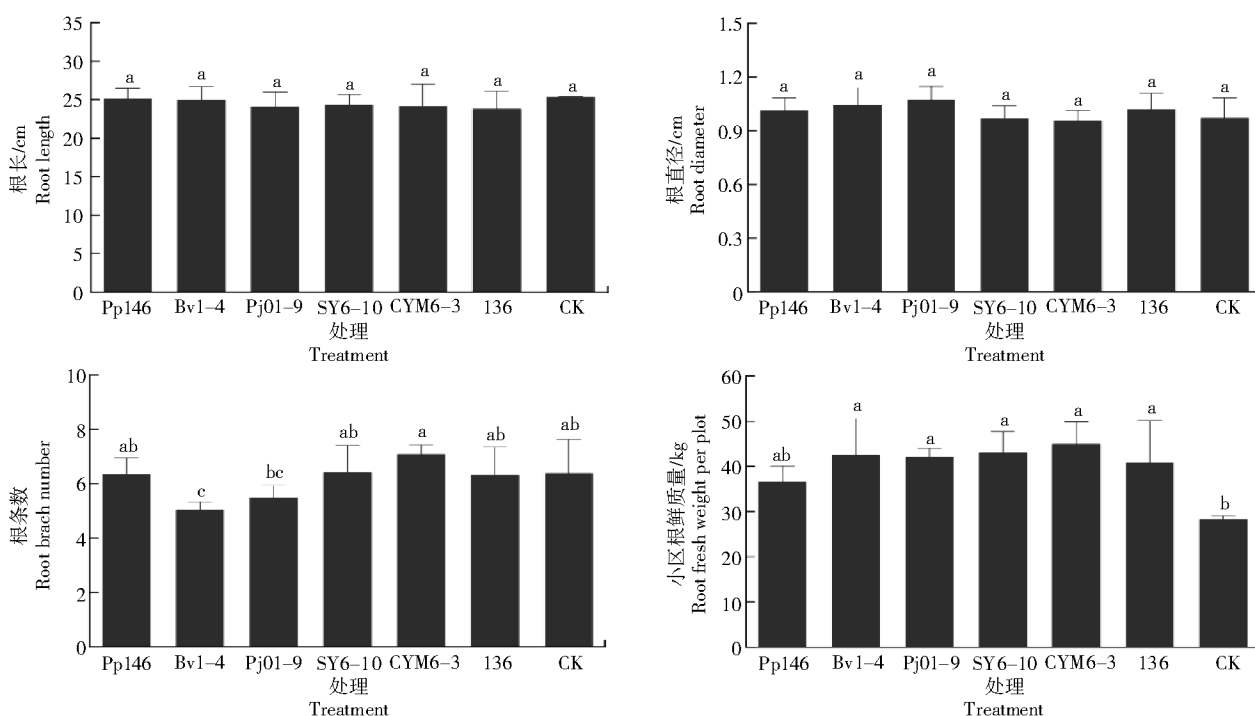
2 结果与分析

2.1 不同生防菌处理对丹参的促生效果

于丹参收获期对不同处理丹参地下部根的表型性状调查结果显示(图1),CK的丹参平均根长为25.33 cm,6株生防菌处理后的丹参平均根长均小于CK,但未达显著水平;除菌株CYM6-3外,其他5株生防菌处理后的丹参平均根直径均大于CK(0.97 cm),但各处理间同样未达显著水平;各

处理组丹参的平均根条数为5~7条,其中,菌株Bv1-4处理丹参的平均根条数为5条,与菌株Pj01-9处理差异不显著,但显著少于其他生防菌和CK($P<0.05$)。

不同生防菌处理组的小区根鲜质量测定结果显示(图1),CK的小区根鲜质量为28.25 kg,除菌株Pp146外,其他5株生防菌处理的小区根鲜质量均显著大于CK($P<0.05$),均表现出良好的增产效果。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

The different lowercase letters indicated significant differences among the treatments($P<0.05$). The same as below

图1 生防菌处理对丹参根的促生及增产效果

Fig.1 Growth promoting and yield increasing effects of biocontrol bacteria treatments on the roots of *S. miltiorrhiza*

2.2 不同生防菌处理对丹参根腐病的防治效果

不同生防菌处理对丹参根腐病的防治效果如

图2所示。

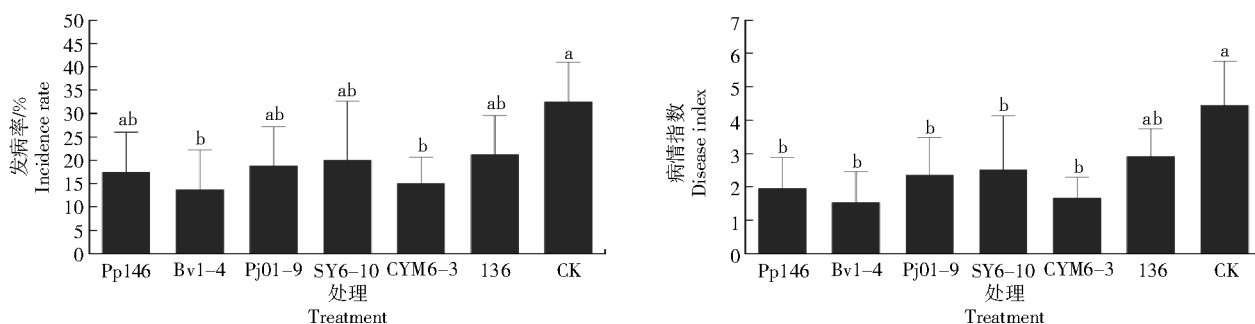


图2 生防菌处理对丹参根腐病的防治效果

Fig.2 Control efficiency of biocontrol bacteria treatments on *S. miltiorrhiza* root rot

丹参收获期对不同生防菌处理组的根腐病发病率及病害严重度的调查结果表明(图2),CK丹参根腐病的发病率为32.50%,6株生防菌处理均可降低根腐病的发病率,其中,菌株Bv1-4、CYM6-3处理的丹参根腐病平均发病率分别为13.75%和15.00%,均显著低于CK($P<0.05$);除菌株136外,其他5株生防菌处理较CK均显著降

低了丹参根腐病病情指数($P<0.05$)。

利用病情指数计算根腐病的防治效果结果显示(表2),6株生防菌处理对丹参根腐病的防治效果为34.31%~65.59%,其中,菌株Bv1-4和CYM6-3处理对丹参根腐病防治效果分别为65.59%和62.46%,均达60%以上,表现出对丹参根腐病较好的防治效果。

表2 生防菌处理下丹参根腐病的防治效果

Tab.2 The control efficiency of biocontrol bacteria treatments on *S. miltiorrhiza* root rot

指标 Index	Pp146	Bv1-4	Pj01-9	SY6-10	CYM6-3	136
防治效果 Control efficiency	56.20±10.84a	65.59±10.68a	46.82±12.90a	43.69±18.77a	62.46±7.22a	34.31±9.39a

注:相同小写字母表示各处理间差异不显著($P>0.05$)。

Note: The same lowercase letters indicated that there were no significant differences among the treatments($P>0.05$).

2.3 不同生防菌处理对丹参指标性成分含量的影响

不同生防菌处理丹参指标性成分含量测定的结果显示(图3),菌株Bv1-4处理较CK可显著提高丹参内丹参酮I、丹参酮II_A的含量($P<0.05$),而其他5株生防菌对丹参内丹参酮I、丹参酮II_A含量的影响不显著。按照《中国药典(2020版)》对丹参干燥品指标性成分的含量要求,丹参酮I、丹参酮II_A、隐丹参酮的总含量不得少于0.25%,丹酚

酸B的含量不得少于3.0%。本试验中不同生防菌及CK的丹参成分含量均可满足药典的要求,CK丹参酮I、丹参酮II_A、隐丹参酮的总含量为1.02%,菌株Bv1-4处理丹参的这3个成分总含量达到1.27%。另外,6株生防菌处理均可一定程度上提高丹酚酸B的含量,菌株136处理与CK间差异显著($P<0.05$),其他5株处理与CK间均未达显著水平。

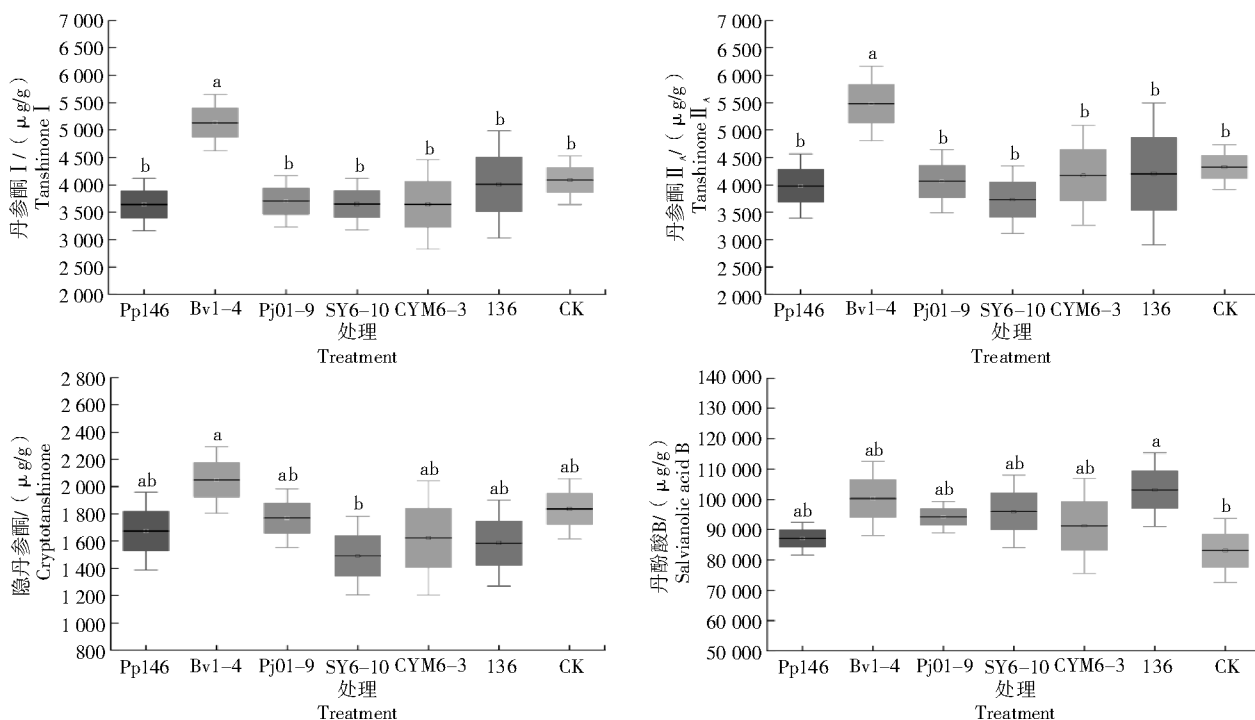


图3 生防菌处理对丹参指标性成分的影响

Fig.3 Effects of biocontrol bacteria treatments on index components of *S. miltiorrhiza*

2.4 不同生防菌处理对丹参其他成分含量的影响

除《中国药典(2020版)》规定的丹参指标性成分外,不同生防菌处理还可对丹参其他成分含量产生影响。如表3所示,相较于CK,菌株Bv1-4处理可以显著提高丹参新酮、原儿茶醛的含量($P<$

0.05),菌株Pj01-9处理可显著提高咖啡酸、丹酚酸C的含量($P<0.05$),菌株SY6-10处理可显著提升丹参素的含量($P<0.05$);而菌株Bv1-4、CYM6-3、136处理却显著降低了丹酚酸A的含量($P<0.05$)。

表3 生防菌处理下丹参中其他成分的含量

Tab.3 Contents of other components in *S. miltiorrhiza* treated by biocontrol bacteria $\mu\text{g/g}$

成分 Component	Pp146	Bv1-4	Pj01-9	SY6-10	CYM6-3	136	CK
丹参酮类 Tanshinones							
二氢丹参酮 I Dihydrotanshinone I	988.03± 108.65a	1 242.33± 123.74a	1 187.50± 103.44a	971.50± 91.38a	908.67± 73.16a	1 032.76± 129.32a	1 241.47± 115.06a
丹参新酮 Miltrione	113.18± 17.99b	214.34± 27.36a	112.47± 14.46b	97.07± 19.63b	102.75± 30.94b	96.00± 15.33b	126.00± 13.98b
丹酚酸类 Salvianolic acids							
富马酸 Fumaric acid	28.10±3.85a	16.88±1.30b	22.80±3.84ab	22.87±2.61ab	13.28±1.18b	14.95±1.96b	20.06±2.59ab
琥珀酸 Succinic acid	507.56± 42.00a	561.48± 31.54a	615.77± 65.43a	651.41± 79.99a	536.97± 26.81a	559.50± 70.05a	554.03± 48.13a
苹果酸 Malic acid	4 774.76 ±214.05a	4 660.53 ±231.90a	5 039.88 ±246.24a	5 019.13 ±257.66a	5 020.99 ±120.72a	4 948.61 ±101.64a	4 543.21 ±336.31a
原儿茶醛 Protocatechuic aldehyde	14.55±1.06ab	19.39±1.07a	17.27±1.93ab	16.69±1.68ab	14.34±1.31ab	13.25±0.64b	13.48±1.30b
D-酒石酸 D-Tartaric acid	107.13± 14.18b	188.62± 24.22a	170.20± 21.17ab	186.06± 26.39a	191.39± 11.40a	168.38± 11.56ab	125.89± 10.86ab
咖啡酸 Caffeic acid	75.75±4.66abc	78.39±4.90ab	92.05±8.41a	74.04±6.02abc	71.40±6.24abc	54.44±10.05 c	67.99±7.66bc
柠檬酸 Citric acid	1 664.72± 135.43ab	1 613.12± 149.38b	1 896.99± 123.88ab	2 187.38± 206.73a	1 635.10± 156.44ab	1 882.26± 179.45ab	1 683.87± 150.48ab
阿魏酸 Ferulic acid	4.81±0.31a	4.62±0.26ab	4.30±0.42ab	3.66±0.19ab	3.42±0.70b	4.08±0.52ab	4.29±0.39ab
丹参素 Tanshinol	962.32± 22.34b	1 090.77± 49.30ab	1 155.56± 19.09ab	1 221.06± 110.50a	1 008.55± 27.48ab	1 061.19± 90.62ab	949.39± 60.92b
紫草酸 Lithospermic acid	4 503.66± 175.76ab	4 641.52± 219.93ab	5 038.52± 103.83a	4 975.40± 433.78ab	4 040.17± 250.64b	4 468.04± 163.17ab	4 496.42± 286.36ab
迷迭香酸 Rosmarinic acid	6 632.88± 109.46a	6 624.61± 326.92a	7 403.79± 245.37a	6 864.72± 554.96a	7 010.53± 383.51a	7 653.68± 302.22a	6 707.52± 373.51a
异迷迭香酸苷 Salviaflaside	97.94±13.98a	79.98±5.21a	86.42±15.40a	90.16±8.63a	91.56±15.11a	92.70±16.15a	82.39±7.07a
丹酚酸 A Salvianolic acid A	48.88±4.89ab	32.62±3.18bc	48.51±3.64ab	35.16±3.98abc	22.20±3.73c	28.97±8.69c	49.89±6.32a
丹酚酸 C Salvianolic acid C	4.09±0.42ab	4.10±0.35ab	4.66±0.45a	3.65±0.38abc	2.71±0.34 c	2.64±0.43 c	3.07±0.23bc
丹酚酸 D Salvianolic acid D	33.03±3.45a	30.81±3.50a	35.37±3.52a	39.76±7.87a	22.80±2.97a	26.09±2.45a	35.19±5.29a
丹酚酸 E Salvianolic acid E	250.47± 12.77ab	242.74± 16.84ab	267.56± 12.90ab	284.67± 43.21a	193.30± 9.39b	226.96± 15.20ab	253.34± 22.25ab
丹酚酸 Y Salvianolic acid Y	1 181.49± 64.06ab	1 141.77± 61.54ab	1 281.26± 62.33a	1 239.22± 127.20ab	942.98± 40.43b	1 105.18± 48.48ab	1 183.17± 96.04ab

注:不同小写字母表示各处理间在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences at the 0.05 level among the treatments.

2.5 不同生防菌处理对丹参总丹参酮和总酚酸含量的影响

不同生防菌处理对丹参总丹参酮和总酚酸含

量的影响如图4所示,菌株Bv1-4处理较其他5株生防菌和CK显著提升了总丹参酮含量($P<0.05$),其余5株生防菌处理均低于CK的总丹参酮

含量。此外,6株生防菌处理与CK的总酚酸含量

间均无显著差异。

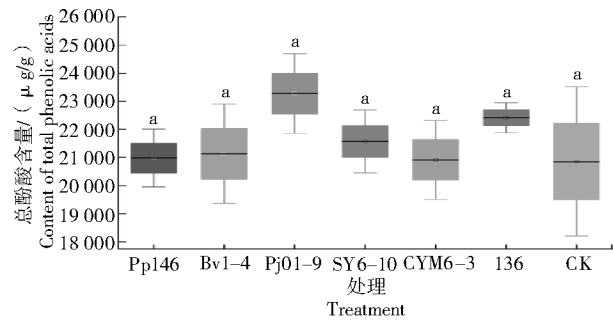
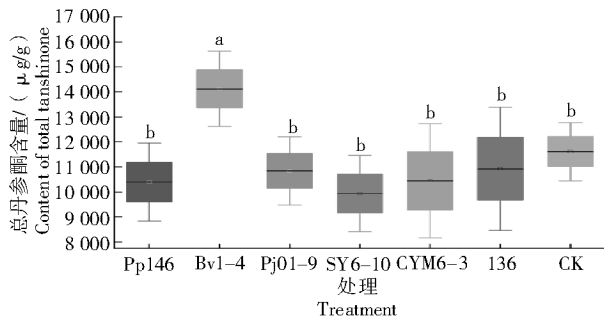


图4 生防菌处理对丹参总丹参酮和总酚酸含量的影响

Fig.4 Effects of biocontrol bacteria treatments on content of total tanshinone and total phenolic acids of *S. miltiorrhiza*

3 结论与讨论

植物与微生物的共生关系是自然界中普遍存在的现象。研究表明,植物在其根际、叶际、种子表面及体内定殖着丰富的微生物群落^[22-24]。这些微生物与植物经过长期进化形成了互利共生关系,在植物生长发育、养分吸收以及应对干旱、盐分、重金属等非生物胁迫和病虫害等生物胁迫过程中发挥着重要作用^[25-28]。近年来,关于有益微生物对植物生长促进及病害防控的研究取得了显著进展。KUMAR等^[29]从姜黄根状茎内分离获得9株具有固氮、溶磷和产IAA能力的生防菌株,其中荧光假单胞菌 *P. fluorescens* 对姜黄叶片数、茎高及根状茎鲜质量等表现出显著促生效果;陈逢玲等^[30]从关防风根际土壤中筛选出2株贝莱斯芽孢杆菌 *B. velezensis*,其对关防风立枯病的盆栽防效均超过60%;马召等^[8]通过盆栽试验证实,3株丹参根内细菌可促进丹参幼苗的主根长度、直径、地上与地下部生物量。然而,现有研究多局限于室内或温室条件下的效果评价,当这些有益微生物应用于田间时,往往面临防效不稳定、作用效果受限等问题^[31-32]。

本研究在前期已验证6株生防菌室内促生防病效果的基础上^[13,33],进一步开展了田间应用研究,结果表明,6株生防菌田间处理对丹参根长、根直径的影响均未达显著水平;除菌株Bv1-4处理的丹参根条数显著少于CK外,其余处理与CK无显著差异。这一结果与室内盆栽试验中观察到的显著促生效果^[8,34]存在差异。另外,除菌株Pp146外,其余5株生防菌处理的小区根鲜质量均显著高于CK,结合其降低根腐病发病率和病情指数的试验结果,推测本研究中生防菌处理对丹参的增产效果主要由于其防病作用保证了各处理小区健康植株

的数量。已有研究表明,土壤类型、水分含量、碳氮含量、酸碱度、温湿度等能够影响土壤中根际微生物的丰度和多样性^[35-38],从而直接或间接影响根际生防菌对植物生长的促进作用,因此,经室内验证的根际生防菌在进行大田效果评价时,还需充分考虑田间复杂的环境因素对根际生防菌功能的直接或间接影响。此外,部分根际生防菌还可直接合成或诱导植物产生吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)、赤霉素(Gibberellic, GA)、细胞分裂素(Cytokinin, CTK)等多种激素类物质来促进植物生长^[34,39],本研究中6株生防菌是否可直接产生或诱导丹参产生上述激素类物质还需进一步研究。

对于药用植物而言,根际、根内有益微生物除具有促生和增强抗逆能力外,还可影响其次生代谢产物的合成与积累,从而提升药材品质^[40-41]。然而,不同有益微生物对丹参活性成分的影响存在显著差异。研究表明,丹参根际土曲霉 *Aspergillus terreus* 和极细枝孢霉 *Cladosporium tenuissimum* 等真菌可促进丹参中丹参酮Ⅱ_A和隐丹参酮的合成与积累^[18];丹参根际分离的泛菌属 *Pantoea* 和假单胞菌属 *Pseudomonas* 则能显著提高丹参中丹酚酸B、迷迭香酸的含量^[19];而内生真菌深绿木霉 *Trichoderma atroviride*^[17]以及青霉菌属 *Penicillium meloforme*等^[42]在促进丹参酮类物质积累的同时,对酚酸类物质表现出抑制作用。本研究发现,生防菌处理可显著影响丹参指标性成分的含量,菌株Bv1-4处理可显著提高丹参酮类(丹参酮Ⅰ、丹参酮Ⅱ_A)和丹参新酮的含量,也可一定程度提升丹酚酸B的含量,同时未对其他丹酚酸类物质产生显著抑制,这与明乾良等^[17]和LI等^[42]的研究结果存在差异;菌株136处理则显著提高了丹酚酸B的含量,而对丹参酮类成分表现出轻微抑制。此外,生防菌

处理也可显著影响丹参其他成分的含量,菌株 Pj01-9 处理可以显著提高咖啡酸和丹酚酸 C 的含量,菌株 SY6-10 处理可以显著提高丹参素的含量,这些差异可能源于不同生防菌对丹参次生代谢途径的调控机制存在多样性。丹参的优形优质受到其品种基因型、产区生态地理因子及农艺措施等多种因素综合作用的影响^[43]。生防菌处理对丹参特定化学成分含量的提升在不同品种上、不同产区间是否具有稳定效果,还有待于进一步研究。

本研究为生防菌田间应用效果评价提供了重要依据,筛选的促生、防病、提升丹参化学成分积累的优良菌株,为开发定向获得成分含量稳定、优形优质表型明显的丹参专用微生物菌剂提供了优质菌种资源,研究结果对实现丹参绿色、高产、优质种植具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 王红阳,康传志,张文晋,等. 中药生态农业发展的土地利用策略[J]. 中国中药杂志,2020,45(9):1990-1995.
WANG H Y, KANG C Z, ZHANG W J, et al. Land use strategy of ecological agriculture of Chinese materia Medica in future development[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(9): 1990-1995.
- [2] 王红阳,康传志,王月枫,等. 药用植物微生物组的研究现状及展望[J]. 中国中药杂志,2022,47(20):5397-5405.
WANG H Y, KANG C Z, WANG Y F, et al. Medicinal plant microbiome: advances and prospects[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(20): 5397-5405.
- [3] 张瑞福,沈其荣. 微生物肥料新型功能作用机理与根际定殖增强策略[J]. 微生物学杂志,2024,44(1):1-11.
ZHANG R F, SHEN Q R. Mechanisms of the microbial fertilizer's novel functions and the strategies to enhance its root colonization[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(1): 1-11.
- [4] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 第一部.[M]. 北京: 中国医药科技出版社,2020:77-78.
National Pharmacopoeia Board. The Pharmacopoeia of the People's Republic of China. Part One.[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 77-78.
- [5] LI X X, DU F F, JIA W W, et al. Simultaneous determination of eight Danshen polyphenols in rat plasma and its application to a comparative pharmacokinetic study of DanHong injection and Danshen injection[J]. Journal of Separation Science, 2017, 40(7):1470-1481.
- [6] ZHANG M Y, GUO F F, LI X Y, et al. Yi-Xin-Shu capsule ameliorates cardiac hypertrophy by regulating RB/HDAC1/GATA4 signaling pathway based on proteomic and mass spectrometry image analysis[J]. Phytomedicine, 2022, 103: 154185.
- [7] LUO J, SONG W J, YANG G Y, et al. Compound Danshen (*Salvia miltiorrhiza*) dripping pill for coronary heart disease: an overview of systematic reviews[J]. The American Journal of Chinese Medicine, 2015, 43(1):25-43.
- [8] 马召,李晓帆,孙莉琼,等. 三株丹参根内生细菌对宿主生长及药用品质的影响[J]. 草业学报,2025,34(4):175-188.
MA Z, LI X F, SUN L Q, et al. Effects of three endophytic bacteria in the roots of *Salvia miltiorrhiza* on host growth and medicinal quality[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 175-188.
- [9] 王铁霖,关巍,孙楷,等. 丹参常见病害的病原、发病规律及综合防治[J]. 中国中药杂志,2018,43(11):2402-2406.
WANG T L, GUAN W, SUN K, et al. Progress in researches on pathogens, epidemiology and integrated control of diseases on *Salvia miltiorrhiza* in China[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(11): 2402-2406.
- [10] 杨瑾,文艺,高素霞,等. 河南产区丹参根腐病原鉴定[J]. 河南农业科学,2021,50(10):92-98.
YANG J, WEN Y, GAO S X, et al. Identification of pathogens causing *Salvia miltiorrhiza* root rot disease in Henan Province[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(10): 92-98.
- [11] 杜文静,刘锦霞,李晶,等. 甘肃地区道地药材根际固氮微生物分离鉴定[J]. 土壤与作物,2017,6(1):67-72.
DU W J, LIU J X, LI J, et al. Isolation and identification of nitrogen-fixing microorganisms from herbal rhizosphere soil in Gansu province[J]. Soils and Crops, 2017, 6(1): 67-72.
- [12] 冯维维,武美贤,司雨婷,等. 中华补血草内生与根际具 ACC 脱氢酶活性细菌的筛选及其生物多样性[J]. 微生物学报,2016,56(4):719-728.
FENG W W, WU M X, SI Y T, et al. Screening and biodiversity of endophytic and rhizosphere bacteria containing ACC deaminase from halophyte *Limonium sinense* (Girard) Kuntze[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2016, 56(4): 719-728.
- [13] 王飞,杨瑾,李绍建,等. 丹参根腐病菌拮抗菌株贝莱斯芽孢杆菌 Bv1-4 的筛选及盆栽防效[J]. 中国生物防治学报,2023,39(6):1398-1407.
WANG F, YANG J, LI S J, et al. Screening of antagonistic isolate *Bacillus velezensis* Bv1-4 and its control effect against root rot disease on *Salvia miltiorrhiza*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2023, 39(6): 1398-1407.
- [14] 余斐,苏艳,李吉跃,等. 植物根际促生菌促生机理研究[J]. 林业与环境科学,2017,33(2):107-112.
YU F, SU Y, LI J Y, et al. Plant growth-promoting rhizobacteria promoting mechanism research[J]. Forestry and Environmental Science, 2017, 33(2): 107-112.
- [15] 曾美娟,钟永嘉,刁勇. 药用植物根际促生菌促生机理研究进展[J]. 生物技术通报,2017,33(11):13-18.
ZENG M J, ZHONG Y J, DIAO Y. Promoting mechanism of plant growth-promoting rhizobacteria in medicinal plants[J]. Biotechnology Bulletin, 2017, 33(11): 13-18.
- [16] 宋欢,刘洁,宋萍,等. 内生真菌和内生细菌接种对雷公藤生长和次生代谢产物积累的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2020,28(4):347-355.
SONG H, LIU J, SONG P, et al. Effects of inoculation with endophytic fungi and endophytic bacteria on growth and accumulation of secondary metabolites in *Tripterygium wilfordii*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2020, 28(4): 347-355.
- [17] 明乾良. 内生真菌对丹参毛状根生长和次生代谢的影响及其分子机制[D]. 上海:第二军医大学,2014.
MING Q L. Effects of endophytic fungus on the growth and secondary metabolism of *Salvia miltiorrhiza* hairy roots and its molecular mechanism[D]. Shanghai: Second Military Medi-

- cal University, 2014.
- [18] 陈海敏. 丹参伴生微生物组及其优势种调控丹参酮合成的机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
CHEN H M. Deciphering *Salvia miltiorrhiza* associated microbiome and regulating mechanism of tanshinone biosynthesis by their dominant species[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [19] YOU H, YANG S J, ZHANG L, et al. Promotion of phenolic compounds production in *Salvia miltiorrhiza* hairy roots by six strains of rhizosphere bacteria[J]. Engineering in Life Sciences, 2017, 18(3):160-168.
- [20] 孙泽瑞. 丹参根腐病生物防治药剂筛选[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
SUN Z R. Screening of biocontrol agents *salvia* root rot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [21] 王巧, 于永杰, 付海燕, 等. 基于多指标含量测定结合化学计量学的不同产地丹参品质差异分析[J]. 分析测试学报, 2023, 42(4):389-401.
WANG Q, YU Y J, FU H Y, et al. Quality difference analysis of *salviae miltiorrhizae Radix* et rhizoma from different origins based on multi-index content determination combined with chemometrics[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2023, 42(4):389-401.
- [22] TRIVEDI P, LEACH J E, TRINGE S G, et al. Plant - microbiome interactions: from community assembly to plant health [J]. Nature Reviews Microbiology, 2020, 18(11):607-621.
- [23] GONG T Y, XIN X F. Phyllosphere microbiota: Community dynamics and its interaction with plant hosts[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2021, 63(2):297-304.
- [24] WALSH C M, BECKER-UNCAPHER I, CARLSON M, et al. Variable influences of soil and seed-associated bacterial communities on the assembly of seedling microbiomes[J]. The ISME Journal, 2021, 15(9):2748-2762.
- [25] SÁNCHEZ-CANIZARES C, JORRÍN B, POOLE P S, et al. Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome[J]. Current Opinion in Microbiology, 2017, 38:188-196.
- [26] WAGG C, SCHLAEPPI K, BANERJEE S, et al. Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning[J]. Nature Communications, 2019, 10:4841.
- [27] COMPANT S, SAMAD A, FAIST H, et al. A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application[J]. Journal of Advanced Research, 2019, 19:29-37.
- [28] 刘浩浩, 李黎, 刘巍, 等. 植物微生物群落构建及其病害防治应用进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(14):7-14.
LIU H H, LI L, LIU W, et al. Research progress on plant microbiome construction and its application in plant disease control[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(14):7-14.
- [29] KUMAR A, VANDANA, SINGH M, et al. Isolation of plant growth promoting rhizobacteria and their impact on growth and curcumin content in *Curcuma longa* L.[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2016, 8:1-7.
- [30] 陈逢玲, 于航, 常丽娜, 等. 关防风立枯病原菌根际拮抗菌筛选与鉴定[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(3):681-688.
CHEN F L, YU H, CHANG L N, et al. Screening and identification of the antagonistic bacteria against *Saposhnikovia divaricata* seedling damping-off[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(3):681-688.
- [31] XU X M, JEFFRIES P, PAUTASSO M, et al. Combined use of biocontrol agents to manage plant diseases in theory and practice[J]. Phytopathology, 2011, 101(9):1024-1031.
- [32] MAZZOLA M, FREILICH S. Prospects for biological soil-borne disease control: application of indigenous versus synthetic microbiomes[J]. Phytopathology, 2017, 107(3):256-263.
- [33] 王飞, 李雪梦, 杨瑾, 等. 3株丹参根际促生细菌的筛选、鉴定及作用评价[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12):81-89.
WANG F, LI X M, YANG J, et al. Screening, identification and effect evaluation of three plant growth-promoting rhizobacteria from *Salvia miltiorrhiza*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(12):81-89.
- [34] 郑玲玲, 陈美兰, 康利平, 等. 根内根抱囊霉 *Rhizophagus intraradices* 对丹参生长作用的研究[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(2):349-355.
ZHENG L L, CHEN M L, KANG L P, et al. Effect of *Rhizophagus intraradices* on growth of *Salvia miltiorrhiza*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(2):349-355.
- [35] FRANCIOLI D, SCHULZ E, LENTENDU G, et al. Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7:1446.
- [36] RUAN Y, KUZYAKOV Y, LIU X Y, et al. Elevated temperature and CO₂ strongly affect the growth strategies of soil bacteria[J]. Nature Communications, 2023, 14:391.
- [37] ZHANG H, LIU W J, KANG X M, et al. Changes in soil microbial community response to precipitation events in a semi-arid steppe of the Xilin River Basin, China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1):97-110.
- [38] BACH E M, BAER S G, MEYER C K, et al. Soil texture affects soil microbial and structural recovery during grassland restoration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12):2182-2191.
- [39] CASSÁN F, VANDERLEYDEN J, SPAEPEN S. Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, 33(2):440-459.
- [40] HUANG W J, LONG C L, LAM E. Roles of plant-associated microbiota in traditional herbal medicine[J]. Trends in Plant Science, 2018, 23(7):559-562.
- [41] WU W, CHEN W H, LIU S Y, et al. Beneficial relationships between endophytic bacteria and medicinal plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12:646146.
- [42] LI X Y, LIN Y L, QIN Y, et al. Beneficial endophytic fungi improve the yield and quality of *Salvia miltiorrhiza* by performing different ecological functions[J]. PeerJ, 2024, 12:e16959.
- [43] 袁媛, 郑汉, 黄璐琦. 再论道地药材“优形、优质、优效”特征成因及研究模式[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(15):3977-3985.
YUAN Y, ZHENG H, HUANG L Q. Review of contributing factors and research model of "excellent shape, high quality, and superior effect" of Dao-di herbs[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(15):3977-3985.