

一株番红花根际促生菌SR383的鉴定及其对宿主生长的促进作用

苏清亲, 李寒柏, 应不凡, 徐竞超, 谢星光, 韩婷

Isolation of Rhizobacteria from *Crocus Sativus* L. Rhizosphere and Their Effects on Host-Growth Promotion

SU Qingqin, LI Hanbai, YING Bufan, XU Jingchao, XIE Xingguang, HAN Ting

在线阅读 View online: <http://yxsj.smmu.edu.cn/cn/article/doi/10.12206/j.issn.2097-2024.202505023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

胡椒的化学成分及其生物活性研究

Research on the chemical compositions and their biological activities of *Piper nigrum* L.

药学实践与服务. 2025, 43(7): 313-319 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202308065](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202308065)

ORM1促肝细胞增殖的作用及其机制探索

Exploration of the role and mechanism of ORM1 in promoting hepatocyte proliferation

药学实践与服务. 2025, 43(5): 222-227 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202410014](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202410014)

中药青蒿抗氧化活性的谱效关系研究

Study on spectrum-effect relationship based on antioxidant activity of *Artemisiae Annuae* Herba

药学实践与服务. 2024, 42(5): 203-210, 216 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202211012](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202211012)

正极性驻极体联合5-氟尿嘧啶对瘢痕成纤维细胞生长抑制的协同作用

Synergistic effect of positive electret combined with 5-fluorouracil on growth inhibition of scar fibroblasts

药学实践与服务. 2024, 42(6): 244-247 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202310027](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202310027)

鬼针草降压作用研究及展望

Progress and prospect of the antihypertensive effect from *Bidens pilosa* L.

药学实践与服务. 2025, 43(9): 427-430 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202408021](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202408021)

载葡萄糖氧化酶纳米凝胶的构建及对胶质瘤细胞Warburg效应的抑制

Construction of glucose oxidase loaded nanogels and its inhibition effect on the Warburg effect in glioma cells

药学实践与服务. 2026, 44(3): 132-136, 166 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202511030](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202511030)



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

· 论著 ·

一株番红花根际促生菌 SR383 的鉴定及其对宿主生长的促进作用

苏清亲, 李寒柏, 应不凡, 徐竟超, 谢星光, 韩 婷 (海军军医大学药理学系, 上海 200433)

[摘要] **目的** 本研究旨在探索根际微生物在促进番红花生长中的应用潜力, 以及它们在提高土壤质量和减少环境压力方面的作用。 **方法** 从番红花根际土壤中鉴定了一株根际促生细菌 SR383, 并研究其促生长特性。通过田间试验, 评估接种 SR383 对番红花球茎生长的影响, 并分析了其对根际土壤微生物数量、微生物生物量以及土壤酶活性的影响。 **结果** 菌株 SR383 能有效产生植物激素, 并在固氮、溶磷、解钾等方面显示出潜力。田间应用 SR383 后, 番红花球茎的鲜重和叶长均有所增加, 土壤中的微生物总量及酶活性也得到提升。 **结论** SR383 作为一种潜在的植物生长促进剂, 能显著促进番红花生长, 并改善土壤质量, 为其作为化肥替代品在番红花生产中的应用提供了科学依据。

[关键词] 根际促生菌; 番红花; 促生长作用; 抗氧化酶活性; 根际微环境

[文章编号] 2097-2024(2026)00-0001-06

[DOI] 10.12206/j.issn.2097-2024.202505023

Isolation of Rhizobacteria from *Crocus Sativus* L. Rhizosphere and Their Effects on Host-Growth Promotion

SU Qingqin, LI Hanbai, YING Bufan, XU Jingchao, XIE Xingguang, HAN Ting (School of Pharmacy, Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

[Abstract] **Objective** To explore the potential application of rhizosphere microbes in promoting the growth of saffron crocus and their roles in improving soil quality and reducing environmental stress. **Methods** Rhizosphere bacteria were identified from the rhizosphere soil of *Crocus Sativus* L. and their growth-promoting characteristics were studied. Field trials were conducted to assess the impact of inoculating rhizosphere bacteria on the growth of *C. Sativus* corms, and their effects on the number of rhizosphere soil microbes, microbial biomass, and soil enzyme activity were analyzed. **Results** The strain SR383 effectively produced plant hormones and demonstrated potential in nitrogen fixation, phosphorus solubilization, and potassium release. The field application of SR383 led to increasement of fresh weight and leaf length of *C. Sativus*, as well as enhanced levels of microbial populations and enzyme activity in the soil. **Conclusion** As a potential plant growth promoter, SR383 can significantly stimulate the growth of saffron crocus and ameliorate soil quality, providing a scientific basis for its application as an alternative to chemical fertilizers in saffron crocus production.

[Key words] Rhizobacteria; *Crocus sativus* L.; Growth promoting; Plant antioxidant enzyme activities; Rhizosphere environment

番红花 (*Crocus sativus* L.) 因其柱头的药用与商业价值被称为“红色金子”, 其药理活性涉及抗肿瘤、神经保护等多重机制^[1]。然而, 其无性繁殖导致的病毒积累、化肥依赖性生产引发的土壤退化^[2], 以及高昂的种植成本制约了产业发展。根际微生物通过固氮、激素合成及养分活化等途径促进植物生长, 其中植物根际促生菌 (plant growth promotion rhizosphere microorganisms, PGPR) 已在多种作物中展现出替代化肥的潜力, 但关于其在番红花中的

应用尚未系统研究。

本研究基于 PGPR 作用机制, 通过 16S rRNA 鉴定番红花根际促生菌, 系统评估其产吲哚-3-乙酸 (3-Indoleacetic acid, IAA)、溶解磷钾、合成铁载体等促生功能。结合田间试验, 解析菌株接种对球茎生物量、抗氧化酶系统及土壤微生物的影响, 为开发绿色种植技术提供理论支撑。研究结果可为解决番红花连作障碍、降低化肥依赖提供新策略, 助力产业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株来源于前期从番红花根际分离, 与拟南芥共培养筛选得到的根际促生菌 SR383, 田间实

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目 (82174091); 海军军医大学药理学系雏鹰学院培养计划 (2024CY005)

[作者简介] 苏清亲, 本科生, Email: 3265584534@qq.com

[通信作者] 韩 婷, 博士, 教授, 研究方向: 中药活性物质及品质调控, Email: hanting@smmu.edu.cn

验使用的番红花购自上海市崇明区番红花基地。

葡萄糖、1-氨基环丙烷-1-羧酸脱氢酶(1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)活性测定培养基(上海源叶生物科技有限公司);琼脂(北京康倍斯科技有限公司);蛋白胨(杭州莱钡特生物科技有限公司);氯化钠(天津市永大化学试剂有限公司);酵母浸膏(杭州百思生物技术有限公司);高氯酸、次氯酸钠(Greagent);氯化铁、氯化钡、苯酚钠(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);无机磷培养基、硅酸盐培养基、阿须贝氏培养基、铬天青培养基(青岛海博生物技术有限公司);总超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性检测试剂盒、酸性磷酸酶(Acid phosphatase, ACP)活性检测试剂盒、碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, ALP)活性检测试剂盒(杭州碧云天生物技术股份有限公司);丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量检测试剂盒(北京索莱宝科技有限公司);过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性检测试剂盒、过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性检测试剂盒、3,5-二硝基水杨酸(北京博奥森生物技术有限公司);氢氧化钠、氯化钡、盐酸、甲苯、过氧化氢、高锰酸钾(国药集团化学试剂有限公司);色氨酸、三苯基四氮唑(Adamas)。

溶菌肉汤(Lysogeny broth, LB)培养基:胰蛋白胨 10.0 g, 酵母浸膏 5.0 g, 氯化钠 10.0 g, 琼脂 15.0 g。液体培养基配制不加入琼脂。上述培养基溶于 1 L 纯水中,在 121℃ 下高压灭菌 15 min。固体培养基分装至 90 mm 培养皿中,冷却后备用。马铃薯葡萄糖琼脂(Potato dextrose agar, PDA)培养基:去皮马铃薯 200 g, 葡萄糖 20 g, 琼脂 15 g, 纯水 1 L, 自然 pH。配置方法同上。Salkowski 试剂: 35% HClO₄ 50 ml, 0.5 mol/L FeCl₃ 1 ml。

万分之一电子天平(上海天美天平仪器有限公司);电子天平(上海佑科仪器仪表有限公司);立式压力蒸汽灭菌锅(上海博迅实业有限公司);细菌培养箱(上海龙跃仪器设备有限公司);立式恒温摇床(上海牟测仪器科技有限公司);酶标仪(Thermo Fisher Scientific);台式高速冷冻离心机(Eppendorf);去离子纯水机(上海和泰仪器有限公司);pH 计(梅特勒-托利多国际贸易)。

2 方法

2.1 根际细菌促生长特性的评价

菌株 SR383 的促生特性测定如下: IAA 合成采用色氨酸-LB 液体培养法,离心取上清加 Salkowski

试剂显色,540 nm 比色定量^[3];赤霉素(gibberellin, GA)检测通过浓硫酸显色反应结合 412 nm 吸光度测定。溶磷、溶钾能力分别通过无机磷/硅酸盐培养基透明圈法观测^[4],固氮能力依据阿须贝氏培养基生长情况评估^[5]。ACC 活性测试参照关永贺等方法^[6],通过 OD₆₀₀ 值比较菌株在 ACC 为唯一氮源时的生长差异。

2.2 分子特性研究

采用细菌基因组 DNA 提取试剂盒[天根生化科技(北京)有限公司]提取细菌 DNA^[7]。采用 16S rDNA 的通用引物 27F(5'-AGA GTT TGA TCC TGG CTC AG-3')和 149R(5'-TAC GGC ATC CTT GTT ACG ACT T-3')进行特异性扩增^[8]。PCR 反应体系为 50 μl,包括 2 μl 模板 DNA、上下游引物各 2 μl、25 μl 2×Taq Mix 和 21 μl 去离子水。PCR 反应条件:95℃ 5 min,94℃ 40 s,52℃ 50 s,72℃ 1 min,35 个循环,72℃ 10 min。PCR 产物经 1% 琼脂糖凝胶(150 V,20 min),检测合格后送往生工生物工程(上海)股份有限公司进行序列测定。所得序列数据应用 NCBI BLAST 工具进行同源性分析,并使用 MEGA 11 软件和邻接法进行系统发育分析。

2.3 田间试验设计

实验在上海市海军军医大学实验农场(31°3' N, 121°5' E)开展,年均温 14~21℃,年均降水量 1 275 mm,无霜期 230~250 天。试验地自 2019 年休耕,土壤初始 pH 5.23,有机质 20.16 g/kg,碱解氮 208.65 mg/kg,有效磷 23.57 mg/kg,有效钾 868.36 mg/kg。设置 SR383 接种组(50 个消毒球茎浸菌 12 h,菌液浓度为 1×10⁸ CFU/ml)与无菌水对照组。2021 年 11 月定植于 15 个地块(1 m×1.5 m,行距 0.2 m,株距 0.1 m,深度 0.08 m),常规管理越冬。2022 年 3 月采集根际土及植株样品:根际土过 2 mm 筛后 4℃ 保存;植株分器官测定鲜重和长度,部分组织-80℃ 冻存用于生理分析。子球茎于 3~4 月形成,同步记录生长参数。

2.4 球茎抗氧化酶活性测定

除去番红花球茎膜质包被并洗净,称取约 0.1 g 新鲜番红花球茎组织,加入 1 ml 磷酸缓冲液进行冰浴匀浆;8 000 r/min,4℃ 离心 10 min,取上清,置于冰上待测。按照试剂盒说明书进行 MDA 含量和 SOD、POD、CAT 活性的测定^[9]。

2.5 番红花根际土壤 TBC 和 TFC 的平板计数

土壤细菌数量(Total bacterial count, TBC)和真菌数量(Total fungal count, TFC)采用稀释涂布平板

法。称取相当于 5.0 g 干重土的新鲜土壤,加入含有 45 ml 无菌水和玻璃珠的三角瓶内,30℃,4 150 r/min 震荡 30 min。取土壤悬液 10 倍梯度稀释至 10⁻⁶,吸取 100 μl 涂布相应的平板。置 30℃ 培养箱中培养,观察计数。结果以每克干土所含菌数量(CFU/g)表示。细菌培养采用 LB 培养基培养,真菌培养采用 PDA 培养基培养。

2.6 番红花根际土壤 MBC 和 MBN 的测定

土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定^[10]。具体流程:取 25.0 g 土样经氯仿熏蒸 24 h(25℃),抽气去除残留氯仿。熏蒸组与未熏蒸组分别加入 10 mg 新鲜土壤,调节含水量至田间持水量 55%,于 25℃ 黑暗培养 10 d。培养后,NaOH 吸收液经盐酸滴定法测定 CO₂ 释放量,计算 MBC;土样经 100 ml 0.5 mol/L KCl 浸提,滤液通过靛酚蓝比色法(NH₄⁺)和代氏合金还原蒸馏法(NO₃⁻)测定氮含量,结合熏蒸与未熏蒸组差值计算 MBN。空白对照同步处理以校正背

景值。

2.7 番红花根际土壤酶活性的测定

土壤脲酶(SUE)活性采用靛酚蓝比色法活性测定^[11]。土壤蔗糖酶(Soil sucrase, SSC)活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[12]。土壤脱氢酶(Soil dehydrogenase, SDHA)活性采用氯化三苯基四氮唑比色法测定^[13]。土壤过氧化氢酶(Soil catalase, SCAT)活性测定采用高锰酸钾滴定法^[14]。土壤酸性磷酸酶(Soil acid phosphatase, SACP)^[15]和土壤碱性磷酸酶(Soil alkaline phosphatase, SALP)^[16]按照试剂盒说明书上的步骤进行。

3 结果

3.1 根际细菌 SR383 的促生长潜力

如表 1 所示,菌株 SR383 具有产生 IAA 和 GA 的能力,IAA 的产率为 6.18 μg/mg,GA 的产率为 2.01 μg/mg。菌株 SR383 同时表现出固氮、溶磷、解钾和分解 ACC 的能力,但并未表现出产生铁载体的能力。

表 1 细菌 SR383 的促生长潜力

菌株	溶磷	解钾	固氮	产铁载体	ACC脱氢酶	吲哚乙酸IAA(mg/L)	赤霉素GA(mg/L)
SR383	+	+	+	-	+	6.18±0.37	2.01±0.53

注:“+”表示阳性,“-”表示阴性。

3.2 菌株 SR383 的分子生物学鉴定

基于 16S rDNA 序列的 BLAST 比对显示,SR383 与嗜麦芽窄食单胞菌 *Stenotrophomonas maltophilia* McS10(KY078806)相似度达 99.7%,系

统发育树显示 *Stenotrophomonas maltophilia* McS10 (KY078806)形成支持率 93%的进化枝。因此,将菌株 SR383 鉴定为嗜麦芽窄食单胞菌 (*Stenotrophomonas maltophili*)(图 1)。

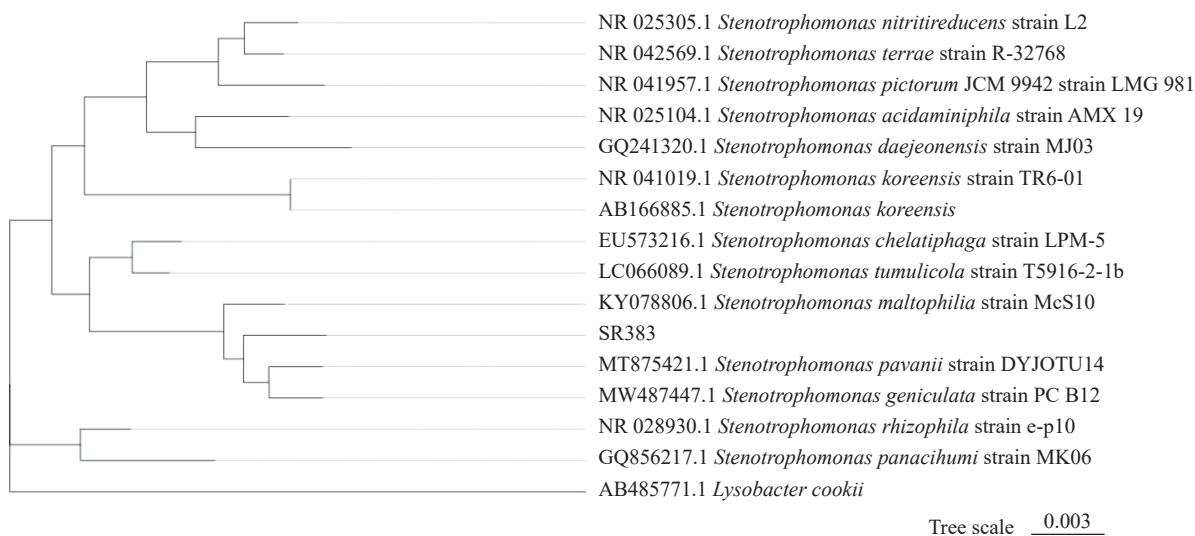


图 1 基于 16S rRNA 序列构建的系统发育树

3.3 田间条件下菌株 SR383 对番红花球茎生长的影响

与未接种处理相比(图 2A B),接种根际细菌

SR383 促进了番红花球茎鲜重的增加,鲜重相对增幅为 40.53%。另外,接种 SR383 分离株的叶片长度有增加,叶长相对增幅为 70.57%。番红花的抗

氧化活性和MDA含量如图2 C-F所示,根际细菌SR383的MDA含量显著降低,降幅达到21.00%。但菌株的CAT活性显著提高,增幅为104.85%。

值得注意的是,SR383处理时CAT活性最高。分离株SR383的POD活性提高了34.15%。此外,SR383分离株的SOD活性升高幅度在66.40%。

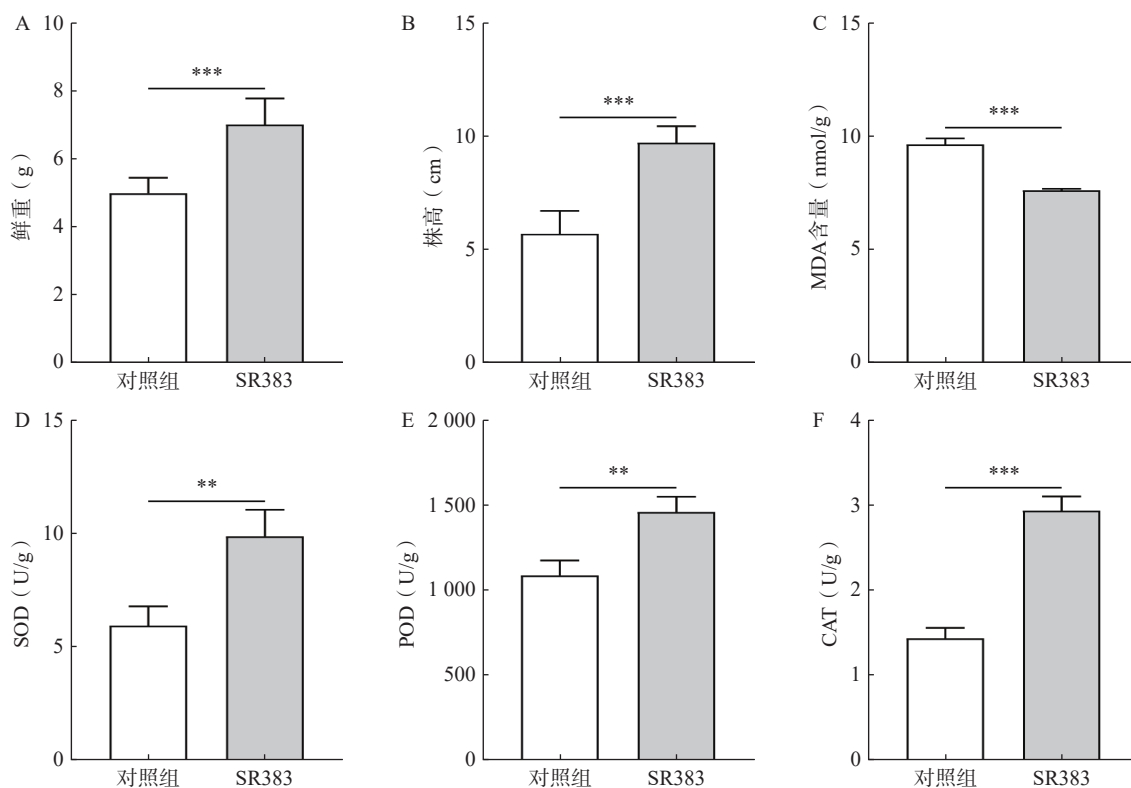


图2 田间条件下不同菌株对番红花各指标的影响

A. 对番红花球茎鲜重的影响; B. 对番红花叶长的影响; C. 对番红花球茎MDA含量的影响; D. 对番红花球茎CAT活性的影响; E. 对番红花球茎POD活性的影响; F. 对番红花球茎SOD活性的影响注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, 与对照组比较。

3.4 SR383对番红花根际微生物数量和微生物生物量的影响

如图3所示,SR383接种的番红花根际土壤的TBC显著升高,增幅为846.07%,然而TFC却显著降低了84.64%。SR383接种的番红花根际土壤的MBC同样也有着明显的升高,增幅为11.54%。SR383接种的土壤的MBN亦有增加,增幅为178.42%。

3.5 根际土壤酶活性

如图4所示,菌株SR383显著影响了土壤酶活性。其中,其对土壤碳、氮循环相关酶的提升作用最为突出:SR383处理的SSC和SUE活性较对照组分别提高了55.62%和55.72%,表明其能有效促进土壤碳源和氮素的转化。在反映微生物活性和氧化应激的指标上,SR383对SDHA活性的提升有限(6.98%),但使SCAT活性大幅提高了115.41%,显示出其对缓解土壤过氧化胁迫的潜在作用。此外,SR383对土壤磷酸酶也有一定促进效果,使SACP和SALP活性分别提高10.72%和12.48%,

有助于土壤有机磷的矿化。

4 讨论

PGPR是与植物协同进化的共生微生物,通过拮抗或协同作用调节土壤微环境,其促生机制包括直接作用(如养分活化、激素合成)和间接作用(如抗逆诱导、病害抑制)^[17]。番红花作为三倍体不育植物,依赖球茎无性繁殖,其生长发育与土壤环境密切相关^[18]。前人研究从番红花根际分离了多种PGPR(如产IAA、铁载体及溶磷菌株),并验证了其田间促生效果,但关于PGPR改善土壤条件的作用机制尚未深入解析^[19-21]。

PGPR通过分泌IAA、GA等植物激素及ACC脱氨酶调控植物生长,同时通过固氮、溶磷、产铁载体等提高养分有效性^[22-23]。Ambardar等分离的6株菌中,6株产IAA,3株产铁载体,2株溶磷;Kour等鉴定的17株菌均具IAA和铁载体合成能力;Magotra等获得的13株菌中,8株产IAA,12株产铁载体,6株溶磷^[19-21]。本研究发现SR383菌株

具有独特促生特性,表明植物与 PGPR 互作受生物因素(如微生物群落、发育阶段)和非生物因素(如

土壤组成、气候)共同调控。

田间试验显示,SR383 显著增加番红花球茎鲜重及叶片长度,与文献报道的 PGPR 提升生物量趋势一致^[24]。环境胁迫诱导植物活性氧(ROS)积累,造成膜脂过氧化(MDA 含量升高),而 PGPR 可通过上调抗氧化酶(POD、CAT、SOD)活性缓解氧化损伤。例如,*Serratia odorifera* 增强干旱胁迫下抗氧化酶活性^[25],*Pantoea agglomerans* 和 *Pseudomonas fragi* 提升盐胁迫下的 CAT 和 POD 活性^[26]。本研究中,SR383 处理降低 MDA 含量并激活抗氧化酶系统,证实 PGPR 通过调节氧化平衡增强植物抗逆性。

PGPR 定殖效率受土著微生物竞争抑制^[27],但其仍可通过调控土壤微生物群落与酶活性改善土壤功能。本研究发现,SR383 接种显著提高土壤细菌总数、微生物生物量碳/氮及酶活性水平。微生物生物量碳增加可能促进碳矿化,而土壤酶(如脲酶、磷酸酶)活性增强直接反映土壤肥力提升^[14,28],SR383 可能通过“植物-微生物-土壤”协同机制实现促生效应。

综上,本研究揭示了 SR383 菌株通过多重促生途径(激素调控、养分活化、抗逆诱导)及土壤改良

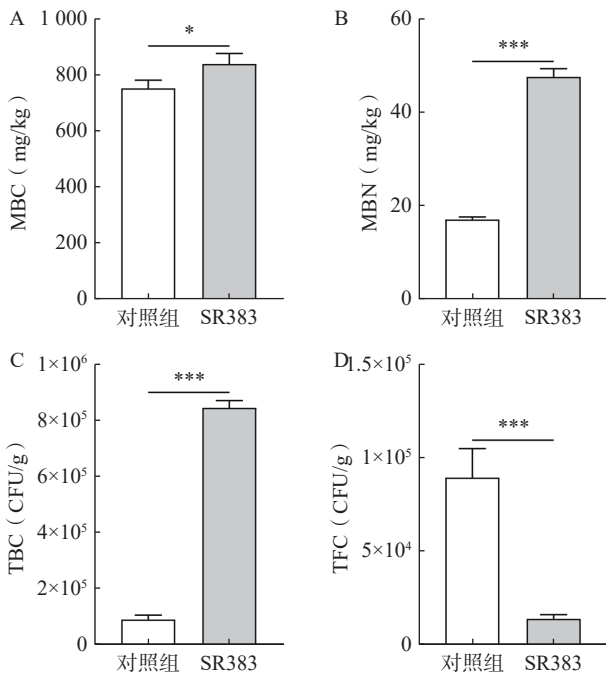


图3 根际细菌对根际土壤 MBC、MBN、TBC 和 TFC 的影响
A. 对根际土壤 MBC 的影响; B. 对根际土壤 MBN 的影响; C. 对根际土壤 TBC 的影响; D. 对根际土壤 TFC 的影响注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, 与对照组比较。

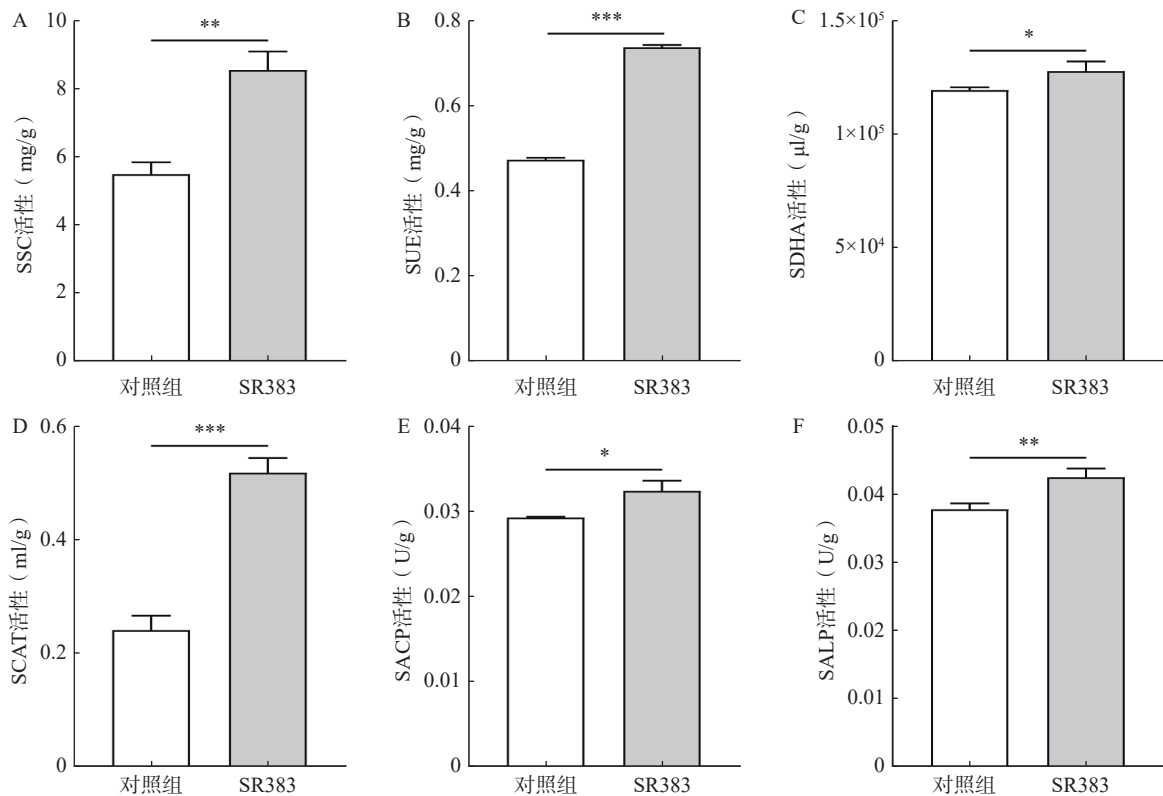


图4 根际细菌对 SSC、SUE、SDHA、SCAT、SACP 和 SALP 根际土壤活性的影响。

A. 对 SSC 根际土壤活性的影响; B. 对 SUE 根际土壤活性的影响; C. 对 SDHA 根际土壤活性的影响; D. 对 SCAT 根际土壤活性的影响; E. 对 SACP 根际土壤活性的影响; F. 对 SALP 根际土壤活性的影响注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$, 与对照组比较。

功能促进番红花生长,为其作为生物肥料替代化学投入品提供理论依据。

【参考文献】

- [1] 江雪,刘梦璠,刘华,等. 西红花的资源分布及抗肿瘤研究进展[J]. *世界科学技术-中医药现代化*, 2021, 23(9): 3251-3263.
- [2] 徐有祥,朱真令,王昱妃,等. 化肥有机替代对鲜食玉米产量品质及土壤肥力的影响[J]. *浙江农业科学*, 2024, 65(6): 1329-1332.
- [3] 韩晓伟,张小波,严玉平,等. 16S rRNA 基因高通量测序法分析黄河太岁细菌的多样性[J]. *微生物学通报*, 2018, 45(4): 866-874.
- [4] 吕正阳,许钰滢,吴凤娟,等. 一株菌草根际细菌的鉴定及其生物学特性研究[J]. *青海农林科技*, 2022(1): 1-5,37.
- [5] 曹晶晶,熊惘梓,钞亚鹏,等. 极耐盐碱固氮菌的分离鉴定及固氮特性研究[J]. *微生物学报*, 2021, 61(11): 3483-3495.
- [6] 关永贺,杨君,包永明,等. 高效液相色谱法检测大豆 1-氨基环丙烷-1-羧酸合酶活性的研究[J]. *分析化学*, 2007, 35(3): 355-359.
- [7] 刘彦超,张贞明,金梦军,等. 紫花苜蓿内生细菌的拮抗作用及优良拮抗菌株的鉴定和生物功能[J]. *草业科学*, 2021, 38(10): 1998-2007.
- [8] WEISBURG W G, BARNES S M, PELLETIER D A, et al. 16S ribosomal DNA amplification for phylogenetic study[J]. *J Bacteriol*, 1991, 173(2): 697-703.
- [9] AHMAD MIR M, JOHN R, ALYEMENI M N, et al. Jasmonic acid ameliorates alkaline stress by improving growth performance, ascorbate glutathione cycle and glyoxylase system in maize seedlings[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 2831.
- [10] WU J, JOERGENSEN R G, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure[J]. *Soil Biol Biochem*, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [11] LIU S, WANG Z Y, NIU J F, et al. Changes in physicochemical properties, enzymatic activities, and the microbial community of soil significantly influence the continuous cropping of *Panax quinquefolius* L.(American ginseng)[J]. *Plant and Soil*, 2021, 463(1-2): 427-446.
- [12] 曹俐,王阳,杨蕴力,等. 转 BpGLK 裂叶桦生长变异、根际土壤酶活性及微生物群落组成[J]. *林业科学*, 2022, 58(12): 21-31.
- [13] 马云,周彬彬,张杰. 聚乙烯和荧蒽联合暴露对土壤酶活性的影响[J]. *浙江工业大学学报*, 2024, 52(5): 579-585.
- [14] 赵雨萌,缪佩佩,王旭东,等. 解淀粉芽孢杆菌 TR2 对草莓土壤酶活性的影响与防病促生作用[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(2): 495-501.
- [15] 李莹飞,耿玉清,周红娟,等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 98-104.
- [16] 李莹飞,耿玉清,万杰. 基于不同基质测定土壤碱性磷酸酶活性的比较[J]. *土壤通报*, 2015, 46(5): 1133-1137.
- [17] 张典利,孟臻,亓文哲,等. 植物根际促生菌的研究与应用现状[J]. *世界农药*, 2018, 40(6): 37-43,50.
- [18] DHAR A K, SAPRU R, REKHA K. Studies on saffron in Kashmir-I: Variation in natural population and its cytological behaviour[J]. *Journal of Crop Improvement*, 1988(15): 48-52.
- [19] AMBARDAR S, VAKHLU J. Plant growth promoting bacteria from *Crocus sativus* rhizosphere[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2013, 29(12): 2271-2279.
- [20] KOUR R, AMBARDAR S, VAKHLU J. Plant growth promoting bacteria associated with corm of *Crocus sativus* during three growth stages[J]. *Lett Appl Microbiol*, 2018, 67(5): 458-464.
- [21] MAGOTRA S, BHAGAT N, AMBARDAR S, et al. Field evaluation of *PGP bacillus* sp. strain D5 native to *Crocus sativus*, in traditional and non traditional areas, and mining of PGP genes from its genome[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 5454.
- [22] 文霞,李艺妆,李世平,等. 我国草地植物根际促生菌种类及其作用研究进展[J]. *草学*, 2024(3): 1-7.
- [23] 崔薇薇. 植物根际促生菌的研究进展[J]. *辽宁农业科学*, 2010(2): 35-39.
- [24] DOUGLAS M H, SMALLFIELD B M, WALLACE A R, et al. Saffron(*Crocus sativus* L.): The effect of mother corm size on progeny multiplication, flower and stigma production[J]. *Sci Hort*, 2014, 166: 50-58.
- [25] GUL F, KHAN I U, RUTHERFORD S, et al. Plant growth promoting rhizobacteria and biochar production from *Parthenium hysterophorus* enhance seed germination and productivity in barley under drought stress[J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1175097.
- [26] GUPTA S, PANDEY S, KOTRA V, et al. Assessing the role of ACC deaminase-producing bacteria in alleviating salinity stress and enhancing zinc uptake in plants by altering the root architecture of French bean(*Phaseolus vulgaris*)plants[J]. *Planta*, 2023, 258(1): 3.
- [27] FINKEL O M, CASTRILLO G, HERRERA PAREDES S, et al. Understanding and exploiting plant beneficial microbes[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2017, 38: 155-163.
- [28] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 277-280.

[收稿日期] 2025-05-09 [修回日期] 2026-03-26
[本文编辑] 费永和