# 塔里木西缘沙枣根际促生菌的筛选鉴定及促生效果研究

董宇韬[1,2]，何 苗[2]，聂羽伶[1,2]，罗青红[2*]，包慧芳[4]，吴梓菲[3,4]，王兴雯[3,4]，黄选胜[4]

（1. 新疆农业大学 林学与风景园林学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆林业科学院 造林治沙研究所，新疆 乌鲁木齐 830063；
3. 新疆农业大学 农学院，新疆 乌鲁木齐 830052；4. 新疆农业科学院 微生物应用研究所，新疆 乌鲁木齐 830091）

**摘 要** 利用植物根际促生菌（plant growth-promoting rhizobacteria，PGPR）促进植物生长发育是一种绿色可持续农业发展的新型策略。为挖掘具有开发潜力的 PGPR 资源并验证其促生效果，从新疆塔里木西缘岳普湖县沙枣（*Elaeagnus angustifolia*）根际土壤样品中进行微生物菌种分离，并测定其解磷、固氮、产氨等促生能力，筛选并鉴定促生菌株，测定菌株水解酶活性及生长特性。通过回接试验，测定植株生长生理指标，验证其促生效果。结果显示，从沙枣根际土壤中分离得到 66 株细菌，其中 10 株具备三种及以上促生特性，泛菌属（*Pantoea*）菌株 SZ1 具备 6 种促生特性及 4 种水解酶活性。回接菌株 SZ1 至沙枣种子和幼苗后，其发芽势、发芽率、根长、株高、叶片数、茎粗和鲜重较清水对照（CK1）分别提高了 76.47%、64.00%、53.61%、50.98%、32.47%、51.49% 和 51.27%；较空白 NB 培养基溶液对照（CK2）分别提高了 70.45%、65.32%、49.21%、48.98%、30.52%、42.99% 和 51.94%。此外，叶绿素含量和叶片含氮量较 CK1 分别提高了 26.35% 和 40.54%，较 CK2 分别提高了 23.84% 和 35.58%；叶片抗氧化酶活性（SOD、CAT 和 POD）较 CK1 分别提升了 21.46%、29.18% 和 33.74%，较 CK2 分别提升了 19.90%、17.82% 和 31.81%。本研究筛选获得 10 株具有多种促生功能的根际细菌，其中泛菌属菌株 SZ1 促生效果显著，为促进植物生长所需的微生物菌剂和微生物肥料的开发提供重要的菌种资源。

**关键词** 沙枣（*Elaeagnus angustifolia*）；根际促生菌（PGPR）；促生作用；水解酶活性；叶绿素含量；叶片含氮量；抗氧化酶活性

**中图分类号** Q939.96 **文献标识码** A **文章编号** 1005－7021(2026)03－0050－14

doi：10.3969/j.issn.1005－7021.2026.03.005

# The Screening, Identification, and Growth-Promoting Effect of Rhizosphere Bacteria in *Elaeagnus angustifolia* from the Western Edge of the Tarim Basin

DONG Yu-tao[1,2], HE Miao[2], NIE Yu-ling[1,2], LUO Qing-hong[2*], BAO Hui-fang[4],
WU Zi-fei[3,4], WANG Xing-wen[3,4], HUANG Xuan-sheng[4]

(1. *College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052;
2. *Institute of Afforestation and Desertification, Xinjiang Academy of Forest Sciences, Urumqi* 830063;
3. *College of Agriculture, Xinjiang Agriculture University, Urumqi* 830052;
4. *Institute of Microbial Application Research, Xinjiang Academy of Agriculture Sciences, Urumqi* 830091)

**Abstract** The use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) to enhance plant growth and development is a novel, green, and sustainable agricultural strategy. In this study, microbial strains were isolated from rhizosphere soil samples of *Elaeagnus angustifolia* from the western edge of the Tarim Basin, and evaluated their phosphate-solubilizing, nitrogen-fixing, ammonia-producing, and other growth-promoting abilities. Through the re-inoculation experi-

基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目（2022D01D46）

作者简介：董宇韬 男，硕士研究生。研究方向为有益微生物挖掘及应用。E-mail：2543614693@qq.com

* 通讯作者。女，研究员，博士，硕士生导师。研究方向为植物生理生态。E-mail：506695844@qq.com

收稿日期：2025-08-01

ment, the growth and physiological indexes of plants were determined to verify their growth-promoting effects. The results showed that 66 bacterial strains were isolated from the rhizosphere soil of *Elaeagnus angustifolia*, among which 10 strains exhibited three or more plant growth-promoting traits. The *Pantoea* strain SZ1 possessed six growth-promoting characteristics and showed the activity of four types of hydrolases. After re-inoculation of strain SZ1 into the seeds and seedlings of *Elaeagnus angustifolia*, the germination potential, germination rate, root length, seedling height, number of leaves, stem diameter, and fresh weight increased by 76.47%, 64.00%, 53.61%, 50.98%, 32.47%, 51.49%, and 51.27%, respectively, compared with the sterile water control (CK1), and by 70.45%, 65.32%, 49.21%, 48.98%, 30.52%, 42.99%, and 51.94%, respectively, compared with the blank NB medium control (CK2). In addition, chlorophyll and leaf nitrogen contents increased by 26.35% and 40.54% over CK1, and by 23.84% and 35.58% over CK2. The activities of antioxidant enzymes (SOD, CAT and POD) in the leaves were also enhanced by 21.46%, 29.18%, and 33.74% compared with CK1, and by 19.90%, 17.82%, and 31.81% compared with CK2. In this study, 10 strains of rhizosphere bacteria with multiple growth-promoting functions were screened, among which the *Pantoea* strain SZ1 had a significant growth-promoting effect, providing important strain resources for the development of microbial agents/fertilizers required for promoting plant growth.

**Keywords** *Elaeagnus angustifolia*; plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR); growth-promoting effect; hydrolytic enzyme activity; chlorophyll content; leaf nitrogen content; antioxidant enzyme activity

沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)为胡颓子科(Elaeagnaceae)胡颓子属(*Elaeagnus*)的一种多年生落叶小乔木或灌木,主要分布在我国西北干旱和半干旱地区,广泛应用于荒漠化治理、生态植被恢复、防护林建设等领域[1]。近年来,传统的高消耗农业模式以及化肥和农药的过度使用,导致土壤退化加剧,进而影响植物的生长和健康[2]。随着生物技术的迅速发展,传统化学肥料也逐渐被更加环保高效的生物改良技术取代。微生物肥料因其环境友好性和高效性,契合可持续农业发展的需求,已成为替代传统化肥的理想选择[3-4]。优良菌株的筛选是开发高效微生物肥料的基础,植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria,PGPR)因其丰富且优良的促生特性,成为微生物肥料开发中的核心菌种资源[5]。PGPR 是一类通过多种机制促进植物生长的微生物群体,其在促进植物生长发育方面具有重要潜力。现有研究表明,这类根际微生物通常具备溶解难溶性磷酸盐、固氮以及分泌植物激素等多种特性,可通过改善植物营养供应、调节激素平衡和提高抗病能力,进一步促进植物生长[6-7]。李建宏[8]研究表明,优良植物根际促生菌蕈状芽孢杆菌(*Bacillus mycoides*) Gnyt1 具备溶磷、固氮、分泌植物激素等多种功能,能够有效改善植物生长环境,促进其生长。筛选与应用高效根际促生菌株,有助于提升植物的生长潜力和生理功能。目前关于沙枣的研究多集中于栽培管理技术[9]、果实品质及营养价值[10]等方面,虽已有关于其根瘤菌等共生细菌的相关研究[11],但针对沙枣根际促生菌的筛选与鉴定鲜有报道。本研究从新疆塔里木西缘岳普湖县不同年份的沙枣根际土壤中筛选出具有良好促生特性的菌株,并对其生物学特性进行检测与分析,通过盆栽实验测定植株生长生理指标,评估其对植株生长的影响,以期为高效生物肥料的开发提供优质的菌种资源,并为优质菌种资源的开发应用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 土样采集 根际土壤样品采自新疆塔里木西缘岳普湖县(39°50′ N,76°32′ E,海拔 1 233.42 m)的 5 年生、10 年生、20 年生和 40 年生沙枣林。将样品装入无菌采样袋后置于移动冰箱中,带回实验室于 4 ℃条件下冷藏保存备用。

1.1.2 培养基 阿须贝氏培养基、有机磷固体培养基、无机磷固体培养基、CAS 检测培养基、MKB 液体培养基、PCA 培养基、NA 培养基、NB 培养基、金氏 B 培养基、LB 培养基均购自青岛海博生物技术有限公司。蛋白胨水液体培养基:蛋白胨 10.0 g,NaCl 10.0 g,蒸馏水 1 L;纤维素酶检测培养基:羧甲基纤维素钠 10.0 g,$(NH_4)_2SO_4$ 4.0 g,$KH_2PO_4$ 2.0 g,$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g,$MnSO_4$ 0.5 g,

琼脂 20.0 g,蒸馏水 1 L;蛋白酶检测培养基:蛋白胨 10.0 g,牛肉膏 5.0 g,NaCl 5.0 g,琼脂 20.0 g,脱脂奶粉 15.0 g,蒸馏水 1 L;淀粉酶检测培养基:可溶性淀粉 2.0 g,NaCl 5.0 g,牛肉膏 5.0 g,蛋白胨 10.0 g,琼脂 20.0 g,蒸馏水 1 L;葡聚糖酶检测培养基:$KH_2PO_4$ 6.8 g,$K_2HPO_4$ 18.0 g,酵母膏 5.0 g,β-1,3-葡聚糖 4.0 g,苯胺蓝 0.1 g,琼脂 20.0 g,蒸馏水 1 L;几丁质酶检测培养基:$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.2 g,$KH_2PO_4$ 6.0 g,$K_2HPO_4$ 4.0 g,$(NH_4)_2SO_4$ 2.0 g,$Na_3C_6H_5O_7$ 1.0 g,胶体几丁质 5.0 g,琼脂 20.0 g,蒸馏水 1 L。以上培养基均按参考文献[12]配制。

1.1.3 主要试剂与仪器设备 细菌基因组 DNA 提取试剂盒(北京索莱宝科技有限公司);10 × CAS 检测液、Nessler 试剂、Salkowskis 比色液、革兰染色试剂盒、香柏油(山东海博生物科技有限公司);植物叶绿素试剂盒、叶片含氮量试剂盒、过氧化物酶(POD)试剂盒、过氧化氢酶(CAT)试剂盒和超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒(苏州格锐思生物科技有限公司)。高压蒸汽灭菌锅(BOXUN,上海博迅实业);恒温培养箱(BI-250A,上海一恒科学仪器有限公司);紫外可见分光光度计(SPECORD 210PLUS,德国耶拿分析仪器有限公司);PCR 扩增仪(Biometra TAdvanced,德国耶拿分析仪器有限公司);电泳仪(DYY-6C,北京六一生物科技有限公司);恒温摇床(ZWYC-2932,上海智诚分析仪器有限公司)。

**1.2 方法**

1.2.1 菌株的筛选及分离纯化 取 10 g 沙枣根际土样,加入 90 mL 无菌水,180 r/min 振荡 1 h。将土壤悬液梯度稀释至 $10^{-3}$、$10^{-4}$、$10^{-5}$ 倍,取 100 μL 分别涂布于 NA 培养基[13-14],于恒温培养箱中(湿度 70%,温度 28 ℃)倒置培养 1 ~ 3 d,根据菌落的形态特征挑选不同形态的单菌落进行纯化,分别采用平板、斜面及甘油管对菌株进行保存。

1.2.2 菌株促生特性检测 ①固氮特性测定:挑取纯化后的菌株单菌落接种 LB 液体培养基,37 ℃、180 r/min 培养 24 h,取 5 μL 菌液接种于阿须贝氏培养基,37 ℃恒温培养 3 d,观察菌株的生长状况[15-16]。每株菌接种 3 次并传代 3 次作为重复,若菌株生长正常,证明其具备固氮特性。②产氨特性测定:将纯化后的菌株单菌落接种于含 10 mL 蛋白胨水液体培养基的试管中,37 ℃、180 r/min培养 48 h 后,加入 0.5 mL Nessler 试剂,若产生黄褐色沉淀,则表明其具备产氨能力[17],每株菌接种 3 次作为重复。③解磷特性测定:将纯化后的菌株接种至有机磷和无机磷固体培养基,37 ℃恒温倒置培养 5 d,若菌落周围形成透明圈,则判断该菌株具备解磷能力[15],测量溶磷透明圈直径(D)和菌落直径(d),通过二者比值(D/d)判断其解磷能力强弱,每株菌接种 3 次作为重复。④产铁载体特性测定:a. 定性测定。将纯化后的菌株接种至 CAS 检测培养基,37 ℃恒温倒置培养 3 ~ 5 d,若菌落周围出现橙黄色晕圈,表明该菌株具备产铁载体特性[15],每株菌接种 3 次作为重复。b. 定量测定。将培养 24 h 的菌株培养液按 1%(体积分数,下同)接种量转接至 100 mL MKB 液体培养基中,37 ℃、180 r/min 培养 72 h 后,10 000 r/min离心 10 min,取上清液与 CAS 检测液等体积混合,静置 1 h 后,使用紫外可见分光光度计于 630 nm 处测定样品吸光度值(*As*),空白培养基于 630 nm 处测定吸光度值为对照(*Ar*)[18-19]。铁载体活性(Su)按照以下计算公式计算。$Su(\%) = ((Ar - As)/Ar) \times 100$,其中 Su 表示铁载体活性的百分比[15]。⑤分泌吲哚乙酸(IAA)特性测定:a. 定性测定。将菌株培养液 $OD_{600}$ 值调至 1.0 后,按 1% 的接种量接种于含有 L-色氨酸(100 mg/L)的 LB 液体培养基中,37 ℃、180 r/min 培养 2 d[20],取菌悬液 10 000 r/min 离心 10 min,弃上清液,将 5 mL 菌悬液与等体积 Salkowski 比色液混合。以未接种菌株的 LB 液体培养基加入等量比色液作为对照[21],室内避光显色 30 min,观察溶液颜色变化,若呈红色,则表明该菌株分泌 IAA。每株菌接种 3 次作为生物学重复。b. 定量测定。采用比色法在 530 nm 波长处测定样品吸光度,并根据标准曲线计算各菌株分泌的 IAA 浓度[22],每株菌接种 3 次作为生物学重复。c. 标准曲线绘制。以 IAA 母液配制 10、20、30、40、50、60、70、80、90 和 100 mg/L 的标准 IAA 梯度溶液,取 1 mL 标准溶液与等量的 Salkowski 试剂混合,室温避光放置 30 min 后测定 $OD_{530}$ 值[23]。

1.2.3 菌株水解酶活性及生化反应测定 ①水解酶活性测定:纤维素水解酶检测是将菌株单菌落接种至纤维素检测培养基平板中央,37 ℃倒置

培养 72 h,加入 1 mg/mL 刚果红染液染色 1 h,再加入 1 mol/L 的 NaCl 溶液脱色 30 min 后,观察是否形成透明圈[24-25]。淀粉水解酶检测是将菌株单菌落接种至淀粉酶检测培养基平板中央,37 ℃倒置培养 72 h,加入碘液,显色后弃去碘液,观察是否形成透明圈[19]。蛋白酶、葡聚糖酶和几丁质酶检测方法相似,将菌株单菌落接种至蛋白酶、葡聚糖酶和几丁质酶检测培养基平板中央,37 ℃倒置培养 72 h,观察培养基表面是否有光圈产生[26]。上述五种水解酶活性检测均设置 3 次重复实验。②生化反应测定:柠檬酸盐利用、MR、$H_2S$ 和 V-P 等生化反应试验参照王中华等[20]的方法进行,均重复检测 3 次。

1.2.4 菌株生长特性测定 采用平板点接法将分离得到的 10 株根际细菌接种至 PCA 培养基,于 28、37、55 和 65 ℃恒温培养 24 h。将菌株接种至不同 NaCl 浓度(0%、2.5%、5.0%、10.0%)(质量分数)的 PCA 培养基中,37 ℃恒温培养 24 h,进行 NaCl 耐受性测试;同时,将菌株接种至 pH 为 5、6、7、8 的 PCA 培养基[27-28],37 ℃恒温培养 24 h,观察菌落生长情况。以上三种生长特性测定均设置 3 次重复。

1.2.5 菌株鉴定 ①形态学鉴定:采用划线法将纯化后的单菌落接种至 NA 培养基,37 ℃恒温培养 48 h,观察菌落形态特征,对菌株进行革兰染色及显微形态观察[29]。②分子生物学鉴定:采用 16S rRNA 基因通用引物 27 F 和 1492 R 对菌株的 16S rDNA 序列进行 PCR 扩增,扩增产物委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序,测序结果与 NCBI 数据库中已知序列进行比对分析,申请基因登录号后采用 MEGA 11.0 完成系统发育树的绘制[24]。

1.2.6 促生菌对植株生长的影响 ①种子发芽试验:挑选成熟饱满的沙枣种子,置于 0.1%(质量分数)的高锰酸钾溶液中浸泡 15 min,无菌水漂洗 3 次,并将种子按每组 60 粒分装于烧杯中,共 3 组。将振荡后的促生菌培养液稀释 5 倍至 500 mL(约为 $10^8$ CFU/mL)后加入烧杯作为处理组。另设两组对照:一组加入等量无菌水(CK1),另一组加入等量稀释 5 倍后的空白 NB 培养基溶液(CK2),分别用于处理相应种子。浸泡 4 h 后将种子均匀铺于覆纱布的发芽盒中,每盒 20 粒,设置 3 次重复。保持生长条件一致,在第 3 天测定发芽势,第 7 天测定发芽率。②盆栽促生试验:采用游标卡尺测量种子发芽长度,选取长度基本一致(±0.1 cm)的沙枣种子移栽至装有育苗土($V$ 基质:$V$ 土:$V$ 蛭石 =7:2:1)的育苗钵中。待幼苗出齐后,每个育苗钵中保留 1 株沙枣苗,选取长势相对一致的幼苗进行试验。将促生菌培养液稀释 5 倍至 500 mL(约为 $10^8$ CFU/mL)喷施;对照组 CK1 和 CK2 分别喷施等量的清水和稀释 5 倍后的空白 NB 培养基溶液。处理及对照组均设置 3 次重复,每次重复含 9 株独立植株,共计 27 株,置于人工气候室中培养(28 ℃光照 12 h,20 ℃黑暗 12 h)50 d 后,测定各组植株的株高、茎粗、根长和鲜重等相关生长指标[16]。

1.2.7 促生菌对植株生理指标的影响 ①植株叶绿素含量及叶片含氮量测定:将稀释 5 倍至 500 mL的促生菌培养液(约为 $10^8$ CFU/mL)喷施植株 50 d 后,进行植株生理指标测定。选取各处理组的沙枣植株,挑选大小均匀且健康的叶片,1.5% 次氯酸钠消毒 2 min,无菌水漂洗 3 次,自然晾干备用。植株叶绿素含量和叶片含氮量的测定分别采用植物叶绿素试剂盒和叶片含氮量试剂盒通过比色法测定[30]。②植株叶片抗氧化酶活性测定:试验时间、叶片挑选及处理方法同 1.2.7①。植株叶片处理后,采用过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)活性试剂盒严格按照说明书进行三种酶活性测定,检测方法为比色法[31]。

1.2.8 数据处理与分析 实验数据采用 Office 2016 Excel 进行整理,采用 SPSS 24.0 进行单因素方差(One-way ANOVA)分析,使用 Origin 2024 进行可视化图、表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株分离纯化结果

将沙枣根际土壤制备成的悬液进行 $10^{-3}$、$10^{-4}$和 $10^{-5}$浓度梯度稀释,涂布于 NA 培养基培养 3 d,共分离得到 66 株细菌(图 1),分别命名为 SZ1 ~ SZ66。

### 2.2 菌株促生性能检测

2.2.1 固氮及产氨能力分析 经固氮和产氨能力检测,共筛选出 22 株具备相关功能的菌株,其

中包括菌株 SZ1、SZ6 和 SZ21 等，部分检测结果如图 2 所示。菌株具备固氮和产氨能力，可通过转化氮源形式提高氮素的可利用性，从而为植物提供养分，促进其生长发育。

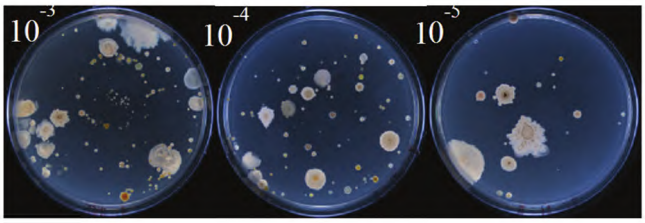



**图 1　沙枣根际细菌的分离**

Fig. 1　Isolation of rhizobacteria from *Elaeagnus angustifolia*

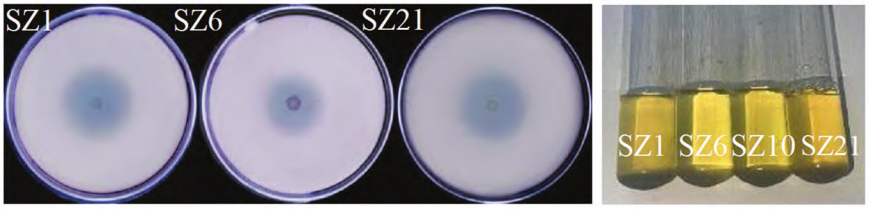



**图 2　沙枣根际细菌固氮与产氨能力检测**

Fig. 2　Traits of nitrogen-fixing and ammonia-producting of *Elaeagnus angustifolia* rhizobacteria

2.2.2　*溶磷能力分析*　对分离获得的 66 株细菌进行溶磷能力测定，结果显示，2 株细菌（菌株 SZ1 和 SZ21）具备无机磷溶解能力，3 株细菌（菌株 SZ1、SZ21 和 SZ30）具备有机磷溶解能力。菌株 SZ1 的有机磷溶磷圈直径为 3.24 cm，菌株 SZ21 为 3.16 cm，菌株 SZ30 为 2.67 cm。菌株 SZ1 的有机磷溶磷圈直径（D/d 比值）大于菌株 SZ30，与菌株 SZ21 无显著差异。菌株 SZ1 的无机磷溶磷圈直径（3.76 cm）大于菌株 SZ21（2.95 cm）。其中菌株 SZ1 和 SZ21 同时具备有机磷和无机磷溶解能力（图 3），能够增强磷的可溶解性，从而提高植物对磷的吸收效率，促进其生长发育。

2.2.3　*产铁载体能力分析*　37 株细菌能够在 CAS 检测培养基上生长，说明具备产铁载体能力，部分菌株定性检测结果如图 4 所示。菌株 SZ1、SZ10 和 SZ30 产铁载体活性较强，分别达到 52.02%、48.42% 和 37.01%；多数菌株产铁载体活性处于中等水平（20% ~30%），如菌株 SZ6、SZ13 和 SZ17 等。其中菌株 SZ1 产铁载体活性最强，显著高于其他菌株，表现出较强的产铁载体能力（表 1）。




**图 3　沙枣根际细菌溶磷能力测定**

Fig. 3　Phosphorus solubilizing capacity of *Elaeagnus angustifolia* rhizobacteria




**图 4　沙枣根际细菌产铁载体能力定性检测**

Fig. 4　Qualitative analysis of iron siderophore producing capacity of *Elaeagnus angustifolia* rhizobacteria

2.2.4 吲哚乙酸(IAA)分泌能力分析 IAA 分泌能力定性检测结果显示,在 66 株根际细菌中,有 11 株具备分泌 IAA 的能力。部分菌株的培养液显色结果如图 5 所示,其中菌株 SZ1 呈深红色,颜色明显深于其他菌株,表明菌株 SZ1 的 IAA 分泌能力最强。定量检测结果显示(表 1),菌株 SZ1 的 IAA 产量为 29.10 mg/L,显著高于其他菌株($P < 0.05$)。菌株 SZ21 和 SZ5 分别为 21.91 mg/L和 17.72 mg/L。

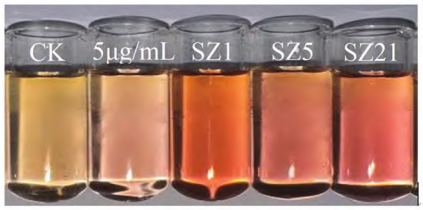



**图 5 沙枣根际细菌分泌 IAA 能力定性检测**

Fig. 5 Qualitative analysis of indole-3-acetic acid (IAA) secretion ability of *Elaeagnus angustifolia* rhizobacteria

**表 1 沙枣根际细菌产铁载体及 IAA 分泌特性定量检测结果**

Table 1 Quantitative detection results of siderophore and IAA secretion characteristics rhizobacter of *Elaeagnus angustifolla*

| 菌株 | 产铁载体活性/% | IAA/(mg·L$^{-1}$) | 菌株 | 产铁载体活性/% | IAA/(mg·L$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| SZ1 | 52.02 ±0.33a | 29.10 ±0.33a | SZ34 | 33.14 ±0.45f | – |
| SZ2 | 18.78 ±1.53s | – | SZ35 | 10.65 ±0.52x | – |
| SZ3 | – | – | SZ36 | 11.12 ±0.33x | 1.15 ±0.15h |
| SZ4 | 27.05 ±0.16kl | – | SZ37 | – | – |
| SZ5 | 28.71 ±0.57hi | 17.72 ±0.08c | SZ38 | 20.95 ±0.68r | – |
| SZ6 | 24.45 ±0.62op | – | SZ39 | 12.03 ±0.61w | – |
| SZ7 | – | – | SZ40 | – | 2.13 ±0.43g |
| SZ8 | 25.68 ±0.44mn | – | SZ41 | – | – |
| SZ9 | – | – | SZ42 | – | – |
| SZ10 | 48.42 ±0.43b | – | SZ43 | – | – |
| SZ11 | – | – | SZ44 | 26.23 ±0.85lm | – |
| SZ12 | 23.77 ±0.17p | – | SZ45 | 13.55 ±0.75v | – |
| SZ13 | 23.98 ±0.23p | – | SZ46 | 12.84 ±0.42w | 3.25 ±0.53f |
| SZ14 | 22.95 ±1.65q | – | SZ47 | 13.98 ±1.02v | – |
| SZ15 | – | – | SZ48 | 16.44 ±0.50u | – |
| SZ16 | 20.46 ±0.59r | – | SZ49 | – | – |
| SZ17 | 24.34 ±0.19p | – | SZ50 | 35.42 ±0.40e | 0.62 ±0.43i |
| SZ18 | – | – | SZ51 | – | – |
| SZ19 | – | – | SZ52 | 24.57 ±0.84op | – |
| SZ20 | – | – | SZ53 | 25.26 ±0.91no | – |
| SZ21 | 27.32 ±0.43jk | 21.91 ±0.14b | SZ54 | – | – |
| SZ22 | 29.83 ±1.02h | 6.80 ±0.22d | SZ55 | – | 3.10 ±0.03f |
| SZ23 | – | – | SZ56 | – | – |
| SZ24 | – | – | SZ57 | 18.05 ±0.57t | – |
| SZ25 | 31.97 ±0.75g | – | SZ58 | – | – |
| SZ26 | – | – | SZ59 | 17.58 ±0.43t | 4.33 ±0.10e |
| SZ27 | 16.90 ±1.65u | – | SZ60 | – | – |
| SZ28 | 29.34 ±0.76h | – | SZ61 | – | – |
| SZ29 | – | – | SZ62 | – | – |
| SZ30 | 36.95 ±1.65d | 1.22 ±0.13h | SZ63 | 24.01 ±0.37p | – |
| SZ31 | 27.99 ±0.76ij | – | SZ64 | – | – |
| SZ32 | – | – | SZ65 | – | – |
| SZ33 | 37.01 ±1.24c | – | SZ66 | 32.62 ±1.15fg | – |

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);“–”表示阴性

## 2.3 菌株水解酶活性及生化特性分析

通过对分离得到的 66 株细菌进行上述促生特性分析,共有 10 株促生细菌具备三种及以上的促生特性。选择这 10 株促生细菌进行水解酶活性和生化反应检测。水解酶活性测试结果表明,10 株促生细菌在几丁质酶测试中均呈阴性,7 株促生细菌在淀粉水解酶、蛋白酶和纤维素酶测试中均呈阳性;菌株 SZ1、SZ10、SZ30、SZ50 及 SZ66 在葡聚糖酶测试中呈阳性。生化反应测试结果显示,10 株促生细菌 V-P 试验均呈阴性,6 株促生细菌柠檬酸盐利用试验呈阳性;菌株 SZ1、SZ6、SZ21 和 SZ30 在 MR 和 $H_2S$ 试验中均呈阳性(图 6)。

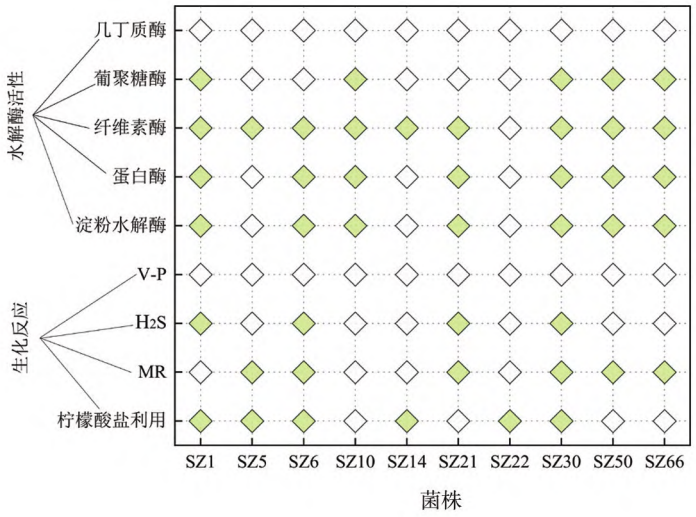



**图 6　沙枣根际促生菌生化反应及水解酶活性特征**

Fig. 6　Biochemical reactions and hydrolytic enzyme activity characteristics of PGPR isolated from the rhizobacteria of *Elaeagnus angustifolia*

绿色表示阳性;白色表示阴性

Green indicates positive; White indicates negative

## 2.4　菌株生长特性分析

从温度、盐度及 pH 三个方面对 10 株根际促生菌的生长特性进行分析。结果表明,菌株可在 NaCl 浓度为 0% ~5%(质量分数)的培养基中正常生长,10% 浓度下生长受到明显抑制,菌株 SZ1 和 SZ14 死亡(图 7A)。温度测试结果显示,大部分菌株在 28 ~37 ℃范围内生长良好,55 ℃时菌株生长受到抑制,部分菌株死亡,65 ℃时停止生长(图 7B)。pH 测试结果显示,菌株可耐受 pH 3 ~9 的环境,其中在 pH 9 条件下生长明显受限,说明菌株适合在中性或酸性环境中生长(图 7C)。

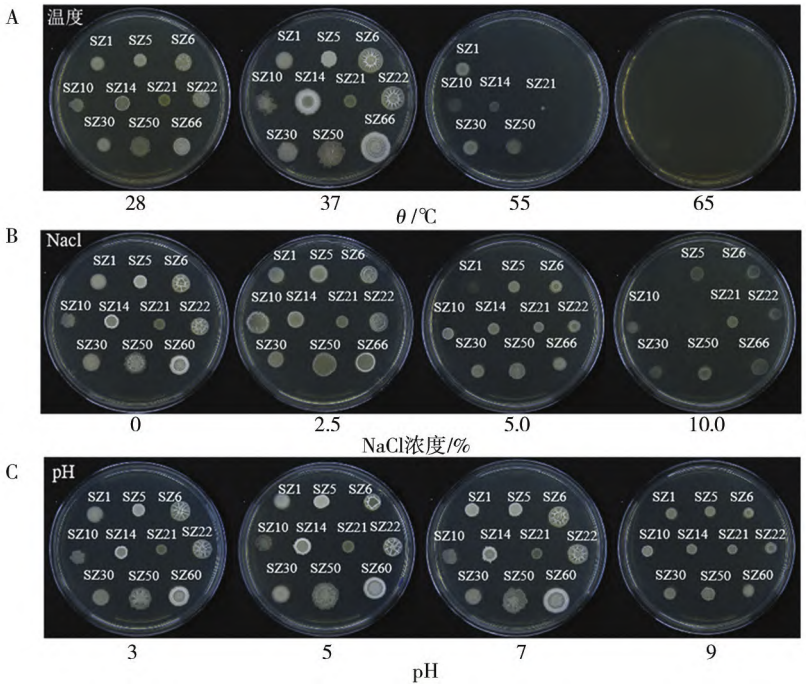



**图 7　沙枣根际促生菌生长特性检测**

Fig. 7　Growth characteristics of PGPR isolated from the rhizobacteria of *Elaeagnus angustifolia*

### 2.5 菌株鉴定结果

2.5.1 形态学鉴定 10 株根际促生菌的形态学鉴定结果以及革兰染色结果见表 2、图 8。革兰染色结果表明,菌株 SZ1 和 SZ21 为革兰阴性菌,其余 8 株均为革兰阳性菌。

2.5.2 分子生物学鉴定 根据 16S rRNA 序列比对结果,初步确定 10 株根际促生菌的分类地位(图 9)。菌株 SZ1 和 SZ21 属于泛菌属(*Pantoea*),其余 8 株(SZ5、SZ6、SZ10、SZ14、SZ22、SZ30、SZ50 和 SZ66)属于芽孢杆菌属(*Bacillus*)。

### 2.6 根际促生菌对植株生长指标的影响

2.6.1 促生菌对种子发芽的影响 不同根际促生菌处理对沙枣种子的发芽率和发芽势产生显著影响。菌株 SZ1 处理组表现最佳,发芽势和发芽率分别为 37.50% 和 51.25%,显著高于对照组(CK1、CK2)($P<0.05$),菌株 SZ21 和 SZ22 两组位列第二和第三位(47.50%、45.00%)。其中菌株 SZ1 处理组的种子发芽势及发芽率相较 CK1 组提升 76.47% 和 64.00%,较 CK2 组提升 70.45% 和 65.32%(图 10)。

2.6.2 根际促生菌对盆栽幼苗生长的影响 如表 3 和图 11 所示,菌株 SZ1 在促进根系生长方面表现最佳,显著优于其他菌株处理($P<0.05$)。在株高方面,菌株 SZ1、SZ21 和 SZ50 均具有较强的促生作用,其中菌株 SZ1 效果最佳(12.38 cm)。菌株 SZ1 和 SZ21 处理显著提高幼苗叶片数,优于其他处理组,菌株 SZ5 和 SZ6 两组处理与对照组(CK1、CK2)均无显著差异($P>0.05$)。茎粗和鲜重方面,菌株 SZ1 与 SZ22 显著优于其他处理($P<0.05$)。综上所述,菌株 SZ1 与 SZ21 两组处理在促进沙枣生长指标方面综合表现突出,菌株 SZ5 和 SZ30 效果相对较弱。

**表 2 沙枣根际促生菌形态学鉴定**

Table 2 Morphological identification results of PGPR isolated from the rhizobacteria of *Elaeagnus angustifolia*

| 菌株 | 菌落形态 | 菌体形态 | 革兰染色 |
|---|---|---|---|
| SZ1 | 浅黄色,表面光滑,不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阴性 |
| SZ5 | 乳白色,表面粗糙,中心隆起,边缘不整齐,不透明,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ6 | 白色,表面光滑、不透明,边缘整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ10 | 白色,表面褶皱、不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ14 | 灰白色,表面干燥、不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ21 | 黄色,表面光滑、湿润,边缘整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阴性 |
| SZ22 | 白色,表面光滑、中心略显隆起、不透明,边缘不规则,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ30 | 白色,表面干燥且粗糙,不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ50 | 白色,表面褶皱、有纹理,不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |
| SZ66 | 白色,表面平滑、中间空洞、不透明,边缘不整齐,形状为圆形 | 杆状 | 阳性 |

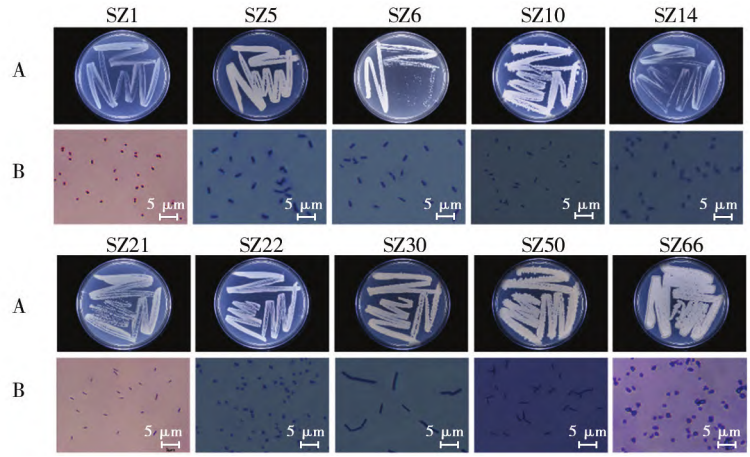



**图 8 沙枣根际促生菌菌落形态(A)和菌体形态(B)**

Fig. 8 Colony(A) and cellular morphology(B) of PGPR isolated from the rhizobacteria of *Elaeagnus angustifolia*

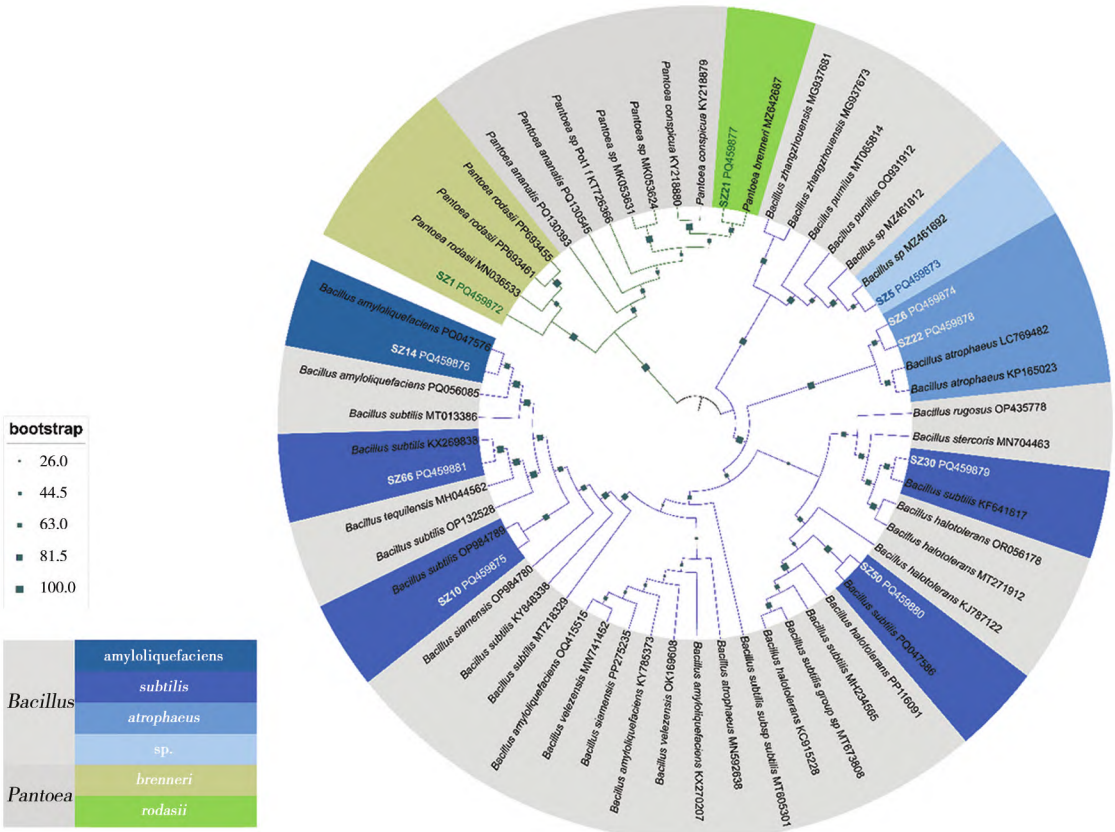



**图 9　基于 16S rRNA 基因序列的 10 株沙枣根际促生菌系统发育分析**

Fig. 9　Phylogenetic analysis of ten plant growth-promoting bacterial strain from the *Elaeagnus angustifolia* rhizosphere based on 16S rRNA gene sequences

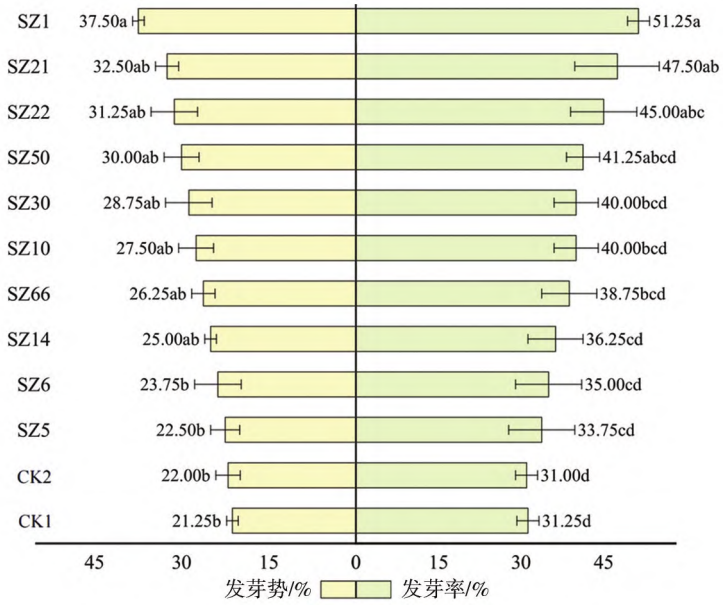



**图 10　不同菌株处理对沙枣种子发芽促生效果比较**

Fig. 10　Growth-promoting effects of different bacterial strain treatments on the germination of *Elaeagnus angustifolia* seeds

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$)

**表 3　不同菌株处理对沙枣苗促生效果**

Table 3　Growth-promoting effects of different bacterial strain treatments on *Elaeagnus angustifolia* seedlings

| 菌株 | 根长/cm | 株高/cm | 叶片数/片 | 茎粗/mm | 鲜重/g |
|---|---|---|---|---|---|
| CK1 | 9.83 ±0.83g | 8.20 ±0.96e | 10.04 ±0.84h | 1.01 ±0.17f | 0.73 ±0.12f |
| CK2 | 10.12 ±0.41g | 8.31 ±1.14e | 10.19 ±0.67gh | 1.07 ±0.18ef | 0.77 ±0.14fg |
| SZ1 | 15.10 ±1.24a | 12.38 ±1.01a | 13.30 ±0.94a | 1.53 ±0.16a | 1.17 ±0.12a |
| SZ5 | 10.29 ±1.03fg | 8.41 ±0.71e | 10.22 ±0.74gh | 1.13 ±0.13de | 0.78 ±0.17fg |
| SZ6 | 12.33 ±1.40e | 9.71 ±0.73c | 10.33 ±0.86fgh | 1.22 ±0.10c | 0.87 ±0.06de |
| SZ10 | 12.25 ±1.21e | 10.08 ±0.81c | 11.48 ±0.74c | 1.10 ±0.08de | 0.90 ±0.08d |
| SZ14 | 12.01 ±1.85e | 9.74 ±1.62c | 10.59 ±0.95efg | 1.36 ±0.07b | 0.87 ±0.10de |
| SZ21 | 13.83 ±1.50bc | 11.41 ±1.30b | 13.07 ±0.90a | 1.51 ±0.09a | 1.13 ±0.10a |
| SZ22 | 13.14 ±1.81cd | 10.11 ±1.76c | 11.04 ±0.74cde | 1.46 ±0.08a | 0.91 ±0.14d |
| SZ30 | 10.99 ±1.24f | 9.10 ±0.93d | 10.78 ±0.63def | 1.08 ±0.20ef | 0.81 ±0.13ef |
| SZ50 | 14.26 ±1.64b | 11.84 ±1.05ab | 12.48 ±1.20b | 1.34 ±0.10b | 1.06 ±0.07b |
| SZ66 | 12.49 ±1.22de | 10.35 ±0.74c | 11.22 ±0.68cd | 1.16 ±0.17cd | 1.00 ±0.15c |

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),图 12、13 同

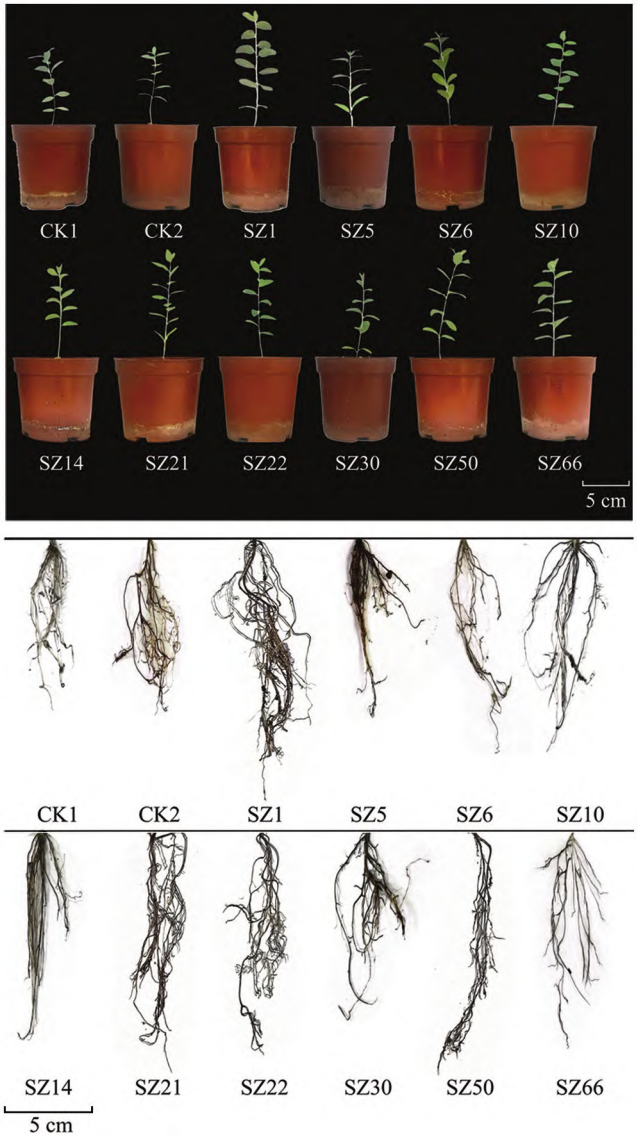



**图 11　不同菌株处理对沙枣表型的影响**

Fig. 11　Effects of different strain treatments on the phenotype of *Elaeagnus angustifolia*

### 2.7 根际促生菌对植株生理指标的影响

叶绿素含量和叶片含氮量是衡量植物光合作用效率的重要指标。如图 12A、12B 所示，菌株 SZ1、SZ6、SZ21、SZ50 和 SZ66 处理组的叶绿素含量和叶片含氮量均显著高于对照组（CK1、CK2），而菌株 SZ5 处理组与 CK1 和 CK2 均无显著差异（$P>0.05$）。其中，菌株 SZ1 处理组的叶绿素含量及叶片含氮量达到最高，较 CK1 分别提高 26.35% 和 41.43%，较 CK2 分别提高 23.84% 和 35.62%。结果表明，菌株 SZ1 处理显著促进沙枣幼苗叶绿素积累和氮素吸收，增强了光合作用效率，为植株生长提供了良好的营养支持。

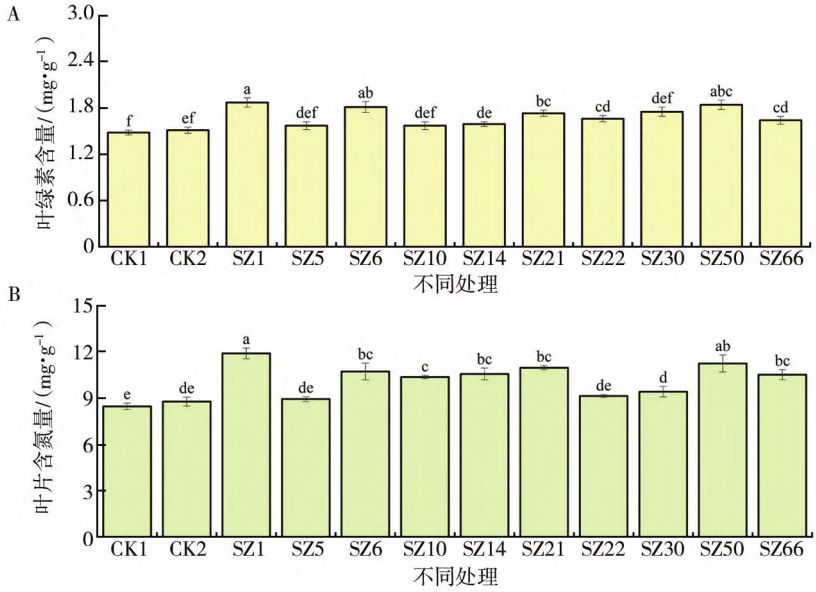
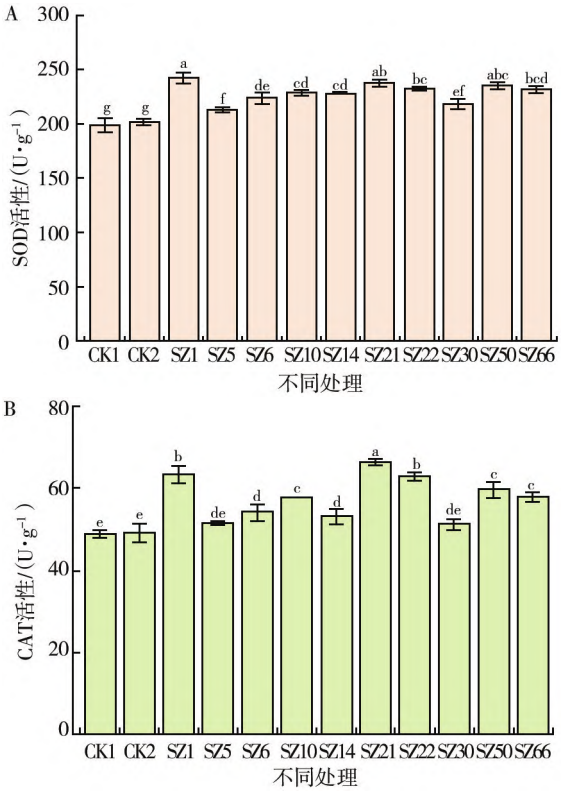



**图 12 不同菌株处理对沙枣叶绿素含量（A）及叶片含氮量（B）的影响**

Fig. 12 Effects of different strain treatments on chlorophyll content (A) and leaf nitrogen content (B) in *Elaeagnus angustifolia*

抗氧化酶（POD、CAT、SOD）活性是衡量植物抗氧化能力及其维持细胞功能的重要参数。在 SOD 活性方面，10 组处理的 SOD 活性均显著高于两组对照（$P<0.05$），其中菌株 SZ1 处理组最强，达到 241.47 U/g，相较于 CK1 和 CK2 分别提高 23.66% 和 19.78%（图 13A）。在 CAT 活性方面，10 组处理中，8 组处理（SZ1、SZ6、SZ10、SZ14、SZ21、SZ22、SZ50 和 SZ66）的 CAT 活性显著高于 CK1 和 CK2，且两组对照组间差异不显著。其中，菌株 SZ21 表现最佳，CAT 活性高达 66.28 U/g，相较于两组对照分别提高 35.32% 和 31.33%，而菌株 SZ5 和 SZ30 两组与 CK1 和 CK2 均无显著差异，表明其对植株抗氧化酶机制调节作用较弱（图 13B）。在 POD 活性方面，共有 5 组处理（SZ1、SZ21、SZ22、SZ50 和 SZ66）POD 活性均显著高于两组对照（$P<0.05$）。其中，菌株 SZ1 组表现最佳，POD 活性高达 248.49 U/g，较 CK1 和 CK2 分别提高 33.75% 和 31.81%；菌株 SZ21 和 SZ50 次之，且两组间无显著差异（图 13C）。



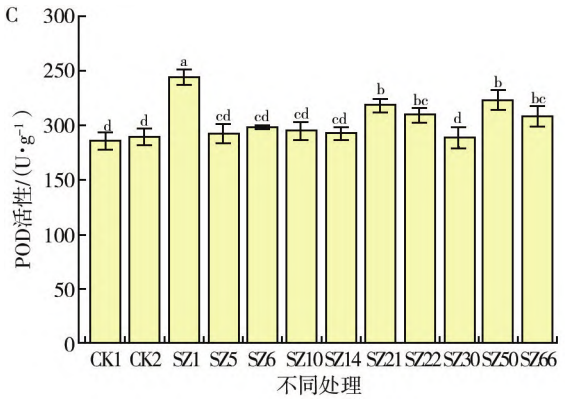



**图 13　不同菌株处理对沙枣叶片抗氧化酶活性的影响**

Fig. 13　Effects of different strain treatments on antioxidant enzyme activity in *Elaeagnus angustifolia* leaves

## 3　讨　论

沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)是一种适应盐碱和干旱环境的防护树种,广泛应用于防风固沙、生态修复和土地保护等领域[32],具有重要的生态和经济价值。为提高植株存活率,增强防护效果并实现更高的经济效益,种植者通常依赖化学肥料和农药。然而,大量的化学肥料和农药的投入会对植株的生长发育及其生物成分产生不良影响。相比之下,有益根际微生物具备环境友好和无破坏性的特点,作为替代策略,不仅能够降低成本,且在常规和逆境条件下能有效促进植株生长[33-34]。尽管有益根际微生物在其他植物中的应用已得到广泛研究,但关于沙枣根际微生物的研究鲜有报道。考虑其生长环境的特殊性及丰富的防护效能,沙枣根际可能蕴含着独特的微生物群落。因此,本研究针对沙枣根际微生物开展相关研究。

植物根际促生菌(PGPR)因其具备固氮、产氨、解磷、产铁载体和分泌生长激素等多种有益生物学特性[35-36],逐渐成为现代植物微生物学及其应用研究的重点。已有研究表明,促生菌通过上述特性能够促进植物生长[37]。土壤溶磷微生物不仅通过溶磷作用提高植物对磷的吸收能力,还通过分泌代谢产物进一步促进植物生长发育[38]。与李岚岚等[39]通过橡胶树根部分离得到的菌株 17-7 相比,本研究中的菌株 SZ1 和 SZ21 具备溶解有机磷的能力,且推测其可能具备降解农药残留的潜力,从而有助于土壤健康和农田生态环境的改善。代金霞等[40]的研究表明,菌株 KDZ3 和 KDZ4 具备解磷、分泌 IAA 和产铁载体三种促生特性,其 IAA 分泌量分别为 12.5 mg/L 和 13.2 mg/L,均低于本研究中的菌株 SZ1 和 SZ21。此外,菌株 SZ1 和 SZ21 具备六种促生特性,表现出更强的促生潜力。

菌株 SZ1 和 SZ21 隶属于泛菌属(*Pantoea*);菌株 SZ5、SZ6、SZ10、SZ14、SZ22、SZ30、SZ50 和 SZ66 隶属于芽孢杆菌属(*Bacillus*)。这两个菌属中的众多物种已被证实具有促生作用。泛菌属菌株与作物之间的关联体现在其通过分泌植物激素及水解酶活性,促进植物生长并抑制病原微生物的活性[41]。从人参的根际土壤中分离得到菌株 *Pantoea agglomerans* TY15 具备固氮、解钾、产铁载体和 IAA 四种促生特性,通过回接显著提升人参鲜重[42]。已有研究表明,泛菌属菌株具有较强的产铁载体和溶解无机磷能力,平均溶磷量在 500 mg/L 以上[43]。芽孢杆菌属菌株具有多种促进植物生长的作用机制。从黄芪根际土壤中筛选得到的菌株 *Bacillus* sp. J1 和 *Bacillus* sp. G4 具备固氮功能,并经田间试验验证,两菌株混合接种能够显著提高植株生物量及主要药用成分的积累[44]。此外,研究表明阿耶波陀芽孢杆菌(*Bacillus aryabhattai*)具有溶解磷酸盐及产生铁载体的能力,能够耐受氧化和亚硝化胁迫,并通过分泌植物激素促进大豆的生长[45]。

叶绿素作为光合作用中的核心成分,直接参与光能的吸收与同化产物的积累[46],在调控植物生长发育的过程中发挥关键作用。其含量受遗传特性及光照、温度、营养等外界因素的共同调控,也可反映植物的生长状态与抗逆能力。本研究通过盆栽实验评估菌株的促生效应,发现接种菌株 SZ1 及 SZ21 处理的幼苗生长指标、叶绿素含量和叶片含氮量均显著高于对照,该结果与已有泛菌属细菌在调控植物叶绿素合成方面的研究结论相吻合[47]。

在不同环境条件下,植物体内易积累大量活性氧(ROS),如超氧阴离子($O_2^-$)、羟基自由基(·OH)和过氧化氢($H_2O_2$)等,过量的 ROS 可引发膜脂过氧化和细胞损伤,进而导致代谢紊乱与生理功能失调[48]。为维持细胞氧化还原稳态,植

物依赖 SOD、POD 和 CAT 等抗氧化酶系统清除体内 ROS[49]。SOD 通过催化超氧自由基歧化为 $O_2$ 和 $H_2O_2$，减轻氧化伤害；POD 则在清除 ROS 的同时，促进木质素和软木脂合成，增强植物抗病性。本研究结果表明，根际促生菌可诱导宿主植物抗氧化酶活性，提升其抗氧化防御水平。接种菌株 SZ1 和 SZ21 显著增强了沙枣叶片中 SOD、POD 和 CAT 的活性，与高长敏等[50]的研究结果一致。

促生菌通过分泌水解酶分解土壤中的有机质，释放植物可利用的营养元素，促进植株生长。研究发现[51-52]纤维素酶和葡聚糖酶能够降解植物细胞壁中的纤维素及多糖，增强植物与根际微生物的之间的互作，有助于种子萌发及幼苗早期生长。本研究筛选得到的 10 株促生菌中，有 7 株菌株均具备淀粉水解酶、蛋白酶和纤维素酶活性，展现出较强的促生潜力。

本研究从新疆塔里木西缘岳普湖县沙枣根际土壤中分离筛选得到促生菌 SZ1，并通过盆栽实验验证了其显著的促生效果。未来研究将通过田间试验进一步验证菌株 SZ1 对沙枣及其他植物的促生效果，探索其与根际微生物的相互作用，优化应用策略，促进植物的生长发育。此外，还将重点研究菌株 SZ1 促进植物生长的作用机制及其对非生物胁迫的适应机制，并通过田间试验评估其实际应用效果，为高效生物肥料的开发提供优质菌种资源。

## 参考文献：


[1] 刘珩寒，蒋腾，罗青红，等. 新疆大果沙枣果实褐斑病菌主要生物学特性及室内药剂筛选[J]. 河北农业科学，2024，28(3)：62-68.

[2] 孔亚丽，秦华，朱春权，等. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报，2024，61(2)：331-347.

[3] 王景超，于晓菲，商姗姗. 我国微生物肥料研究现状及其在作物上的应用进展[J]. 农业与技术，2022，42(1)：34-37.

[4] Randy O，Eduardo V，José L. Plant growth promotion by *Bacillus megaterium* involves cytokinin signaling[J]. Plant Signaling & Behavior，2008，3(4)：263-265.

[5] AninditaR. Plant growth regulating phytohormones：The potent targets to alleviate abiotic stress in crop plants：A research update and the way forward[J]. Journal of Agricultural Science，2024，16(3)：10-10.

[6] 谭红晓，崔康佳，王娜娜，等. 天津市特色农产品沙窝萝卜根际细菌多样性及促生菌研究[J]. 微生物学杂志，2024，44(2)：42-52.

[7] Sara L，Karsten N，Hanna B，et al. Screening and optimization of indole-3-acetic acid production and phosphate solubilization by rhizobacterial strains isolated from *Acacia cyanophylla* root nodules and their effects on its plant growth[J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology，2020，18(1)：71.

[8] 李建宏. 优良植物根际促生菌 *Bacillus mycoides* Gnyt1 特性研究及全基因组测序分析[D]. 兰州：甘肃农业大学，2017.

[9] 李晓龙，任晓远，杜海波，等. 吉林西部沙枣栽培管理技术及应用推广[J]. 果树资源学报，2025，6(2)：76-79.

[10] 盛玮，刘巧玲，刘丽燕. 基于因子分析的 6 个大果沙枣新品种果实性状综合评价[J]. 果树学报，2024，41(9)：1800-1810.

[11] 宋福强，牛丽纯，常伟，等. 盐碱地引种沙枣根瘤内生菌及根际土壤 AM 真菌的多样性[J]. 中国农学通报，2016，32(7)：6-13.

[12] 孙雪. 耐盐碱微生物的分离筛选及其对盐碱地改良效果的研究[D]. 上海：上海大学，2020.

[13] 苏沛珠，林渝清，刘洋洋，等. 一株来源于健康人初乳中的嗜黏蛋白阿克曼氏菌的分离及鉴定[J]. 微生物学通报，2024，44(5)：80-89.

[14] 邵嘉朱，吕雯，廖鑫琳，等. 大豆根际促生菌的分离、鉴定及其耐盐促生作用[J]. 中国农业科学，2024，57(21)：4248-4263.

[15] 王晶，李波，黎柳萍，等. 广西亚热带植物根际促生菌的筛选、鉴定及促生作用研究[J]. 南京农业大学学报，2024，47(3)：468-476.

[16] 高佩，马亚琼，何永超，等. 中国沙棘根际固氮菌的分离、鉴定及促生能力比较[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2024，53(4)：522-531.

[17] 于素梅. 植物促生细菌 *Bacillus*. sp YM-1 对土壤 Pb 钝化及油菜促生作用的研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2018.

[18] Bastien C，Basile G，Julien C，et al. Endophytic PGPR from tomato roots：Isolation，*In vitro* characterization and *in vivo* evaluation of treated tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Microorganisms，2022，10(4)：765-765.

[19] 何亚芳，包慧芳，王宁，等. 甜瓜镰刀菌果腐病菌拮抗菌筛选及其拮抗性研究[J]. 园艺学报，2023，50(10)：2257-2270.

[20] 王中华，张辉红，常泸尹，等. 酸快生芽孢杆菌‘HS3’培养条件的优化及其在玉米花生间作体系中的促生效果[J]. 植物营养与肥料学报，2023，29(1)：142-157.

[21] 周波，代金霞. 柠条根际产铁载体促生菌的分离鉴定及其促生特性[J]. 北方园艺，2017(21)：122-129.

[22] 鲁晏宏，郝金辉，罗明，等. 梨火疫病拮抗菌筛选及温室防效测定[J]. 微生物学通报，2021，48(10)：3690-3699.

[23] 朱星铖. 烟草靶斑病生防菌筛选鉴定及室内防效评价[D]. 贵阳：贵州大学，2024.

[24] 王思盼，陈柏安，黄永健，等. 长茎葡萄蕨藻益藻细菌筛选及性能评价[J]. 广东海洋大学学报，2023，43(4)：84-92.

[25] 王春玲，黄钰婷，刘星，等. 一株贝莱斯芽胞杆菌鉴定、全基因组学分析及其抗病促生特性[J]. 微生物学报，2025，65

(2):745-757.
[26] Immanuel G, Dhanusha R, Prema P, et al. Effect of different growth parameters on endoglucanase enzyme activity by bacteria isolated from coir retting effluents of estuarine environment[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2006,3(1):25.
[27] Vessey JK, Chemining'wa GN. The genetic diversity of *Rhizobium leguminosarum* bv. viciae in cultivated soils of the eastern Canadian prairie[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(1):153-163.
[28] 杜雪倩,张捷,张思雨,等. 枸杞根际促生菌筛选及其促生效应[J/OL]. 南方农业学报, hhtps://link. cnki. net/urlid/45. 1381. S. 20241231. 0855. 002.
[29] 陈臣,田同辉,刘政,等. 可减弱豆腥味酵母菌的筛选及其在豆渣饮料中的应用[J]. 食品研究与开发,2022,43(17):175-183.
[30] 王炫栋. 杨梅根际分离 PGPR 放线菌的防病促生功能评估及抑菌机理研究[D]. 金华:浙江师范大学,2023.
[31] 顾美英,葛春辉,朱静,等. 促生菌及其组合对新疆干旱区小麦生长和生理特性的影响[J]. 新疆农业科学,2024,61(12):2890-2901.
[32] 张英凡,楚光明,刘长青,等. 新疆焉耆垦区防护林主要树种适宜性评价研究[J]. 西北林学院学报,2024,39(4):189-199.
[33] 李玉柱,谭智勇,刘艺,等. 微生物菌剂对土壤养分及微生物群落结构影响的研究进展[J]. 中南农业科技,2024(3):222-226.
[34] 李年顺,曹雅雄,郭孟娇,等. 不同植物乳酸杆菌对苜蓿和全株玉米青贮的影响[J]. 饲料工业,2025,46(22):102-108.
[35] 罗菲,汪涯,曾庆桂,等. 东乡野生稻根际可培养细菌多样性及其植物促生活性分析[J]. 生物多样性,2011,19(4):476-484.
[36] 陈亚方,陈佳敏,李俊霖,等. 巨大芽孢杆菌对全株藜麦青贮发酵品质的影响[J]. 饲料工业,2025,46(14):139-146.
[37] Hasna SH, Hossain K, Mohd HS. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance salinity stress tolerance in okra through ROS-scavenging enzymes[J]. BioMed Research International, 2016,62(8):45-47.
[38] Jabborova D, Davranov K, Jabbarov Z, et al. Impact of growth-promoting endophytic bacteria on ginger plant growth[J]. Indian Journal of Microbiology,2024,65(2):1-10.
[39] 李岚岚,戴利铭,施玉萍,等. 生防链霉菌 17-7 生理生化功能研究[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):169-175.
[40] 代金霞,田平雅,沈聪,等. 耐盐植物根际促生菌筛选及促生效应研究[J]. 生态环境学报,2021,30(5):968-975.
[41] 袁加升,贺赛雅,张晋豪,等. 一株水稻内生菠萝泛菌的分离及防病促生效果评价[J]. 植物病理学报,2024,54(4):808-818.
[42] 尹琢. 具拮抗促生能力人参内生菌的筛选及其对人参不定根的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
[43] 万金琳,穆红梅,谢雨淳,等. 南极低温植物促生菌筛选及促生功能评价[J]. 微生物学通报,2025,52(6):2652-2665.
[44] Hongrittipun P, Youpensuk S, Rerkasem B. Screening of nitrogen fixing endophytic bacteria in *Oryza sativa* L. [J]. Journal of Agricultural Science,2014,6(6):66.
[45] Yujia S, Dan W, Hua FZ, et al. Insights into the biocontrol and plant growth promotion functions of *Bacillus altitudinis* strain KRS010 against *Verticillium dahliae*[J]. BMC Biology,2024, 22(1):116.
[46] Wlodarczyk LM, Snellenburg JJ, Dekker JP, et al. Development of fluorescence quenching in *Chlamydomonas reinhardtii* upon prolonged illumination at 77 K. [J]. Photosynthesis Research, 2018,137(3):503-513.
[47] 黄家梦,陆晓民,肖兵,等. *Pantoea* sp. SH3 对番茄缺铁反应的影响[J]. 安徽科技学院学报,2022,36(6):41-48.
[48] 孔亚丽,朱春权,曹小闯,等. 土壤微生物介导植物抗盐性机理的研究进展[J]. 中国农业科学,2021,54(10):2073-2083.
[49] 高媛,曹飞,李辉,等. 河岸带内生烟曲霉的香豆素类抗氧化产物提高拟南芥抗涝害能力研究[J]. 微生物学杂志,2019, 39(6):56-64.
[50] 高长敏,马光恕,廉华,等. 木霉菌对黄瓜幼苗生长和膜脂过氧化指标的影响及对枯萎病的防治效果[J]. 中国生物防治学报,2018,34(5):762-770.
[51] Ahmad TA, Murali M, Omar AF, et al. Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants[J]. Frontiers in Microbiology,2023,14: 1214845.
[52] Yeong AH, Mo YK, Woo HC. Biological control activity of plant growth promoting rhizobacteria *Burkholderia contaminans* AY001 against tomato *Fusarium* wilt and bacterial speck diseases[J]. Biology,2022,11(4):619.