

研究报告

羊草根际耐盐促生菌的筛选鉴定及促生效果

张旭东, 陈永成, 刘朝荣, 胡天宇, 陈莹, 苏力合, 白云飞, 刘慧, 马春晖*

石河子大学 动物科技学院, 新疆 石河子 832000

张旭东, 陈永成, 刘朝荣, 胡天宇, 陈莹, 苏力合, 白云飞, 刘慧, 马春晖. 羊草根际耐盐促生菌的筛选鉴定及促生效果[J]. 微生物学通报, 2026, 53(1): 328-344.

ZHANG Xudong, CHEN Yongcheng, LIU Chaorong, HU Tianyu, CHEN Ying, SU Lihe, BAI Yunfei, LIU Hui, MA Chunhui. Screening, identification, and growth-promoting effect evaluation of salt-tolerant rhizosphere bacteria of *Leymus chinensis*[J]. Microbiology China, 2026, 53(1): 328-344.

摘要:【背景】发掘根际耐盐微生物对于盐碱地改良利用和缓解植物盐胁迫具有重要意义。【目的】筛选种植在盐碱地的羊草(*Leymus chinensis*)根际促生菌,分析其生长特性及促生效果,并探究其对羊草种子萌发的影响,为根际促生菌的开发应用提供科学依据。【方法】从羊草根际土壤中分离出菌株,用不同盐浓度和不同pH值的LB培养基测定菌株耐盐能力及pH适应性,用Salkowski比色法测定其产吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)能力,用钼锑抗比色法和CAS培养基测定菌株的解磷和产铁载体能力。结合形态、生理生化及16S rRNA基因测序,筛选出优势促生菌株。通过种子萌发试验来验证其促生效果,开展菌株与羊草幼苗互作的盐胁迫盆栽试验,测定不同处理下羊草幼苗的生长及生理指标。【结果】筛选得到3株高效多功能促生菌株:盐角木罗塞略莫拉氏菌(*Rosellomorea arthrocnemi*) Z7、海水罗塞略莫拉氏菌(*Rosellomorea aquimaris*) Z25、大洋沉积物泡状芽孢杆菌(*Cytobacillus oceanisediminis*) Z49;3株菌均可在盐浓度为0%~9%、pH值在8.85~10.00的LB培养基上存活,其产IAA能力分别为10.10、7.74、17.44 mg/L,解无机磷能力分别为107.80、128.52、95.95 mg/L,其中菌株Z25还具有产铁载体能力。羊草种子萌发试验可知,相较于对照组,3株菌使种子发芽率分别提高5.45%、16.36%、13.64%。对根长的提升率分别为17.86%、31.79%、27.14%。盆栽试验表明接菌可降低羊草幼苗丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量,提高抗氧化酶含量。【结论】菌株Z7、Z25、Z49是兼具产IAA、溶磷、耐盐碱的多功能促生菌,可为开发生物制剂提供优良菌株资源,提高盐碱地的利用率。

关键词: 盐碱; 根际促生菌; 羊草; 吲哚乙酸; 解磷

资助项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS); 高产优质牧草羊草品种筛选及高效生产关键技术集成与示范项目(2023AB069)

This work was supported by the National Modern Agricultural Industry Technology System Project (CARS) and the Screening of High-yield and High-quality Forage *Leymus chinensis* Varieties and Integration and Demonstration of Key Technologies for Efficient Production (2023AB069).

*Corresponding author. E-mail: chunhuima@126.com

Received: 2025-05-18; Accepted: 2025-07-28; Published online: 2025-08-13

Screening, identification, and growth-promoting effect evaluation of salt-tolerant rhizosphere bacteria of *Leymus chinensis*

ZHANG Xudong, CHEN Yongcheng, LIU Chaorong, HU Tianyu, CHEN Ying, SU Lihe, BAI Yunfei, LIU Hui, MA Chunhui*

College of Animal Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China

Abstract: [Background] Exploring salt-tolerant rhizosphere microorganisms is of great significance for improving and utilizing saline-alkali land and for alleviating plant salt stress. [Objective] To screen plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) of *Leymus chinensis* planted in saline-alkali soils, analyze their growth characteristics and plant growth-promoting effects, and explore their effects on seed germination of *L. chinensis*, thus providing a scientific basis for the development and application of PGPR. [Methods] The strains were isolated from the rhizosphere soil of *L. chinensis*. The salt tolerance and pH adaptability of the strains were tested in LB media with different salt concentrations and pH values. The ability to produce indole-3-acetic acid (IAA) was determined by the Salkowski colorimetric method. The molybdenum-antimony colorimetric method and CAS medium were used to assess the abilities of the strains to solubilize phosphorus and produce siderophores, respectively. The strains were identified based on morphological, physiological, biochemical, and 16S rRNA gene sequencing, and the dominant strains with plant growth-promoting effects were screened. Seed germination tests were conducted to verify the plant growth-promoting effects of the strains. Pot experiments on the interactions between strains and *L. chinensis* seedlings under salt stress were carried out to determine growth and physiological indicators of the seedlings under different treatments. [Results] Three efficient multifunctional strains with plant growth-promoting effects were screened out: *Rosellomorea arthrocnemi* Z7, *Rosellomorea aquimaris* Z25, and *Cytobacillus oceanisediminis* Z49. They could survive in LB media with salt concentrations of 0%–9% and pH 8.85–10. Z7, Z25, and Z49 showed the IAA production capacity of 10.10, 7.74, and 17.44 mg/L and the inorganic phosphorus-solubilizing capacity of 107.80, 128.52, and 95.95 mg/L, respectively. Among them, strain Z25 produced siderophores. Compared with the control group, Z7, Z25, and Z49 increased the seed germination rate by 5.45%, 16.36%, and 13.64% and the root length by 17.86%, 31.79%, and 27.14% respectively. Inoculation of the three strains reduced the MDA content and increased the content of antioxidant enzymes of *L. chinensis* seedlings in Pot experiments. [Conclusion] Strains Z7, Z25, and Z49 are multifunctional bacteria that produce IAA, solubilize phosphorus, and tolerate saline-alkali. They can serve as excellent strain resources for the development of bioinoculants and improve the utilization rate of saline-alkali soil.

Keywords: saline-alkali; plant growth-promoting rhizobacteria; *Leymus chinensis*; indole-3-acetic acid (IAA); phosphorus solubilization

土壤盐渍化是影响农业生产的重要环境因素之一^[1], 全球约 10%的灌溉农田和雨养农田因盐渍化减产, 部分区域产量下降达 35%。我国是土壤盐渍化较为严重的国家之一, 盐渍土总面积为 3.69×10^7 hm², 占全国可利用土地面积的 5.01%^[2]。土壤盐渍化主要影响土壤生物特性及理化性质, 其引起的渗透胁迫和高 pH 胁迫等对植物细胞膜结构产生破坏, 从而抑制植物生长, 降低作物产量^[3-5]。盐碱地的改良主要通过化学、灌溉、淋洗等方法对盐碱地进行改良^[6-8]。这些方法存在成本昂贵, 易受环境因素的影响, 容易对土壤造成二次污染等问题。生物改良的方法因其可以提升土壤肥力, 提高土壤微生物群落多样性, 减少化肥使用所造成的污染, 提高边际土地利用效率, 而越来越受到关注。目前生物改良方法主要通过利用微生物、耐盐植物等资源对盐碱地进行恢复。

植物根际促生细菌(plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)是对植物生长有益的根际微生物, 具有促进作物养分吸收、招募有益微生物、分泌生长调节物质、抑制病原微生物、并能缓解外界环境对植物胁迫的一类微生物^[9-10]。其可以作为一种环境友好、有效、可持续的生物肥料, 在增加作物产量、提高植物抗逆性等方面具有重要的应用价值, 利用 PGPR 作为生物肥料和植物保护剂已成为现代农业的研究热点。已有研究表明, 从不同植物的根际土中所筛选出来的 PGPR, 可以通过增强植物渗透调节能力、改善光合效率及激活抗氧化防御系统等多种机制, 来缓解盐胁迫对植物生长的影响, 提高植物在盐碱胁迫下的生物量积累^[11-14]。由此可见, 根际促生菌对植物在逆境条件下的适应能力及生长发育具有重要的作用。然而, 当前研究也存在一些局限, 多数研究集中于主要农作物(如大豆^[15]、小麦^[16]、水稻^[17]), 对具有重要生态和经济价值的耐盐饲草作物 PGPR 资源挖掘相对不足。

羊草(*Leymus chinensis*)为禾本科赖草属草

本植物, 是欧亚大陆东部典型草原和草甸草原的主要建群种及优势种^[18]。其适应性强、可以在 pH 8.5-11.5 的盐碱地上存活, 是非盐生植物中耐盐碱较好的植物, 有“碱草”之美称, 此外, 羊草还具有产量高、适口性好、返青早、枯黄晚等特点, 可长时间为家畜提供青饲料^[19-20]。中国草食畜牧业集约化发展加大了对优质饲料需求, 通过盐碱地的改良与饲草种植的深度结合, 大力推广“以种适地”, 积极发展盐碱地种草。优先种植羊草等耐盐碱先锋作物, 以推动盐碱地种草面积明显增加, 通过这种耐盐植物与根际促生菌相互配合的方式, 可以更好地利用盐碱地。

基于此, 本研究从盐碱地种植的羊草根际土壤中筛选具有促生效果的菌株, 进行一系列生理生化、分子生物学鉴定和促生机理的研究。然后进行种子萌发与盆栽试验验证, 以期对盐碱地的利用及生物制剂的开发提供优良菌株资源。

1 材料与amp;方法

1.1 样品

供试羊草种子由中国农业科学院草原研究所提供。试验地位于新疆维吾尔自治区石河子市 147 团 18 连(44°37'17.026"N, 86°0'57.672"E), 选取长势旺盛的羊草, 在植株周围沿根系生长方向挖出植物根系, 轻轻抖动根部, 去除附带的非根际土, 将整个植株带根装入无菌袋并低温保存, 带回实验室备用。

1.2 培养基、主要试剂和仪器

LB 培养基用于筛选菌株, 额外添加 NaCl 溶液来筛选耐盐菌株。无机磷固体培养基和有机磷固体培养基定性测定菌株解磷能力, 无机磷液体培养基和有机磷液体培养基定量测定菌株解磷能力。LB 固体培养基、LB 液体培养基、无机磷细菌培养基、有机磷细菌培养基和 CAS 培养基, 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司; 解磷菌无机磷液体培养基和解磷菌有机磷液体培养基, 上海钰博生物科技有限公司。Salkowski 比色液配制按照相凯文等^[21]的方法

配制; Salkowski 试剂, 福州飞净生物科技有限公司; L-色氨酸, 广州浩玛生物科技有限公司。双功能气浴恒温振荡器, 常州金坛良友仪器有限公司; 高压灭菌锅, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; PCR 仪, SensoQuest 有限责任公司。

1.3 菌株筛选及保存

称取 10 g 根际土加入 90 mL 无菌水, 28 °C、120 r/min 振荡培养 4 h 得 10^{-1} 土壤悬液。经系列稀释(取 1 mL 悬液加入 9 mL 无菌水)制备 10^{-2} – 10^{-8} 梯度悬液。吸取各梯度悬液涂布于含 5% NaCl、pH 8.0 (NaOH 调节)的耐盐碱 LB 培养基, 30 °C 倒置培养 2 d。挑取形态差异明显的单菌落, 在 LB 平板上连续划线纯化 5 次。纯化菌株编号后, 按菌悬液:甘油=1:1 制成甘油管, -80 °C 保存备用^[22]。

1.4 菌株耐盐碱能力测定

将筛选的菌株接种在 NaCl 含量为 1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%、9% 而 pH 不变的 LB 固体培养基中, 并在 30 °C 培养箱中倒置培养 1 d^[23]。

以各菌株均能生长的最大盐浓度为基础, 调整培养基 pH 值分别至 8.0、8.5、9.0、9.5、10.0、11.0、12.0, 30 °C 培养箱倒置培养 1 d^[23]。

1.5 羊草根际细菌功能测定

1.5.1 产铁载体能力测定

将菌株点接种于 CAS 培养基中, 28 °C 倒置培养 5 d, 观察菌株周围是否出现橙色铁载体晕圈, 有橙色晕圈为产铁载体菌株^[24]。

1.5.2 分泌吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)能力测定

将菌株接种到含有 L-色氨酸的 LB 液体培养基中 30 °C、120 r/min 培养 3 d。10 000×g 离心 10 min。取上清液与等量的 Salkowski 比色液混匀, 避光放置 30 min, 以未接菌的培养基为对照组。颜色变为红色即为具有分泌 IAA 能力的菌株, 并测定 OD_{530} ^[25], 根据 IAA 标准曲线计算 IAA 浓度。

1.5.3 解磷能力定性测定

将初步筛选出的菌株点接种于有机磷固体培养基与无机磷固体培养基, 28 °C 倒置培养 5 d, 观察菌株周围是否有透明圈, 用游标卡尺测量透明圈直径(D)与菌株直径(d), 根据可溶性指数(D/d)值的大小对菌株的解磷能力进行判断。

1.5.4 解磷能力定量测定

综合选取各能力优良的菌株进行解磷能力的定量测定, 将 OD_{600} 为 0.9 的解磷菌按 1% 接种量接种到有机磷液体培养基和无机磷液体培养基中, 30 °C、120 r/min 培养 7 d 后取样, 采用钼锑抗比色法测定磷含量^[26]。

1.6 菌株的鉴定

1.6.1 菌株 16S rRNA 基因序列鉴定

将获得的菌株在 LB 液体培养基上培养 3 d 后使用细菌基因组 DNA 快速抽提试剂盒提取基因组 DNA, 用细菌通用引物 27F (5'-AGAG TTTGATCCTGGCTCAG-3')和 1492R (5'-GGTT ACCTTGTTACGACTT-3')进行 PCR 扩增, 具体反应体系及条件依据文献[24]进行, 扩增产物送至北京睿博兴科生物技术有限公司进行测序。将所得的 16S rRNA 基因序列在 BLAST 在线服务器 (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) 进行同源性比对分析。使用 MEGA 11 软件构建系统发育树(自展检验值为 1 000), 对菌株进行分类鉴定。

1.6.2 菌株生理生化鉴定

依据杜连祥等^[27]的方法对菌株进行生理生化鉴定。

1.7 羊草种子萌发试验

选取大小一致、籽粒饱满的羊草种子, 用 75% 酒精清洗 1 min, 无菌水清洗 4–5 次后再用 5% 的 NaClO 溶液处理 2 min, 无菌水清洗多次^[18]。将种子在 OD_{600} 为 0.5 的菌悬液中浸泡 2 h 作为处理组, 设置无菌水浸泡作为对照组, 在培养皿上铺两层无菌滤纸, 每皿 50 粒种子, 每组设置 4 个重复。7 d 后统计发芽势, 20 d 后统计发芽率、根长、苗长等。

1.8 菌株对养草幼苗生长和耐盐性的影响

将营养土与蛭石 3:1 混匀后灭菌装入塑料花盆(10 cm×14 cm), 每个花盆 0.4 kg, 然后播种 10 粒上述处理后的羊草种子, 待幼苗长出后, 随机留取 5 株长势均一的幼苗, 然后向羊草幼苗近根的土壤中分别施加 10 mL 菌液(Z7、Z25、Z49), CK 组加等量的 LB 液体, 每个处理 5 盆。接种菌液 1 d 后分别采用 100 mmol/L 和 200 mmol/L 的 NaCl 溶液对羊草幼苗进行胁迫处理, 每盆加 80 mL NaCl 溶液, 间隔 48 h 施加 1 次盐溶液, 共施加 3 次盐溶液, 使土壤总盐度最终为 3.07 g/kg 和 6.72 g/kg^[28-29], CK 浇灌等量无菌去离子水。处理后进行为期 2 周的正常管理, 然后取样。测定生长及生理指标, 其中丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定, 过氧化物酶(peroxidase, POD)酶活采用愈创木酚法测定, 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)酶活采用 NBT 还原法测定, 过氧化氢酶(catalase, CAT)酶活采用高锰酸钾滴定法测定^[30]。

1.9 数据处理

实验所得数据采用 Excel 2019 处理, 使用 SPSS 27.0 软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 耐盐菌株的筛选结果

通过连续 5 次分离纯化获得 40 株形态差异明显且能在含 5% NaCl 的 LB 培养基上生长的菌株。NaCl 浓度为 1%、2%、3%、4%、5%、6%且 pH 不变时, 所有菌株生长状况良好, 当 NaCl 浓度超过 6%时, 多数菌株的生长出现明显的抑制现象, 有些菌株停止生长甚至出现死亡现象, 有 20 株菌均可在 9% NaCl 且 pH 不变的 LB 培养基上生长。此外, 有 17 株菌可在 5% NaCl 且 pH 值为 8.85–10.00 的条件下存活, 根据实验结果共筛选出 15 株耐盐碱能力较强的菌株, 供后续促生特性试验。

2.2 菌株产铁载体能力分析

通过菌株在 CAS 培养基中是否产生橙色铁载体晕圈, 共筛选出 2 株具有产铁载体能力的菌株。其中菌株 Z80 可溶性指数(D/d)大于 2 (表 1), 其可能具有较强的产铁载体能力。

2.3 菌株分泌 IAA 能力的分析

对筛选出的耐盐碱能力较强的菌株进行分泌 IAA 能力的定性测定, 共有 12 株菌具有分泌 IAA 的能力。其中菌株 Z49 颜色最深, 其余菌株颜色略浅。

对菌株分泌 IAA 能力进行定量测定, 结果测得 IAA 浓度范围为 1.32–17.44 mg/L (表 2), 其中菌株 Z49 分泌量最多, 为 17.44 mg/L。

表 1 菌株产铁载体的能力

Table 1 The ability of strains to produce siderophores

| Item | Strain Z25 | Strain Z80 |
|--|-------------|-------------|
| 透明圈直径 Transparent zone diameter (D , mm) | 32.83±0.78a | 32.83±0.78a |
| 菌落直径 Colony diameter (d , mm) | 18.82±0.16a | 2.43±0.22b |
| 可溶性指数 Soluble index (D/d) | 1.75±0.05b | 2.70±0.15a |

不同小写字母表示不同菌各指标差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicated that there were significant differences in each index of different bacteria ($P<0.05$). The same below.

表 2 菌株产吲哚乙酸浓度

Table 2 Indole-3-acetic acid (IAA) concentration produced by strains

| 菌株编号 Strain code | 吲哚乙酸 Indole-3-acetic acid (mg/L) |
|---------------------|-------------------------------------|
| Z1 | 3.51±0.04h |
| Z5 | 3.08±0.03i |
| Z7 | 10.10±0.08b |
| Z21 | 5.44±0.21f |
| Z25 | 7.74±0.13e |
| Z31 | 1.32±0.01k |
| Z33 | 7.92±0.06d |
| Z49 | 17.44±0.18a |
| Z57 | 4.79±0.19g |
| Z63 | 3.52±0.03h |
| Z77 | 2.67±0.01j |
| Z80 | 9.08±0.02c |

2.4 菌株解磷能力定性测定结果

通过溶磷圈法对解磷菌进行定性筛选, 筛选出 12 株具有解无机磷能力的菌株, 培养 5 d 后其 D/d 在 1.05–1.85, 均具有较好的解无机磷能力(表 3)。

筛选出 4 株具有解有机磷能力的菌, 其 D/d 在 1.30–2.60 (表 4), 其解有机磷能力都较好。

2.5 菌株解磷能力定量测定结果

综合依据菌株耐盐碱能力及各项促生功能的测定, 菌株 Z7、Z25、Z49 均同时具有耐盐碱能力、分泌 IAA、解磷作用, 其中菌株 Z25

还具有产铁载体能力, 3 株菌均通过溶血性安全试验。因此选取这 3 株菌进行后续试验。

对所选的 3 株菌的解磷能力进行定量测定, 其解无机磷的含量分别为 107.80、128.52、95.95 mg/L, 均具有较强的解无机磷能力(图 1), 此外, 通过测量菌株发酵液的 pH 值, 发现添加菌株的发酵液 pH 值较空白组发酵液均有下降。

三株菌有机磷含量与空白组有机磷含量相比增加不多, 仅增加 3.85–10.66 mg/L (表 5), 其中增加最多的是菌株 Z49, 达 10.66 mg/L, 这与 D/d 的趋势一致。

2.6 菌株鉴定结果

2.6.1 菌株生理生化及 16S rRNA 基因测序结果

对所筛选出的 3 株菌进行生理生化鉴定(表 6)。并使用 MEGA 11 软件计算序列同源性并构建系统发育树(图 2)。菌株 Z7 与盐角木罗塞略莫拉氏菌(*Rosellomorea arthrocnemi*)相似性最

表 3 菌株解无机磷能力

Table 3 Inorganic phosphate solubilizing ability of strains

| 菌株编号 Strain code | 透明圈直径 Transparent diameter (D, mm) | 菌落直径 Colony diameter (d, mm) | 可溶性指数 Soluble index (D/d) |
|---------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Z1 | 6.85±0.031b | 4.54±0.051b | 1.51±0.010c |
| Z7 | 6.30±0.070cd | 4.69±0.031b | 1.34±0.007ef |
| Z25 | 5.60±0.045f | 3.44±0.045d | 1.63±0.008b |
| Z33 | 5.94±0.061e | 3.21±0.031e | 1.85±0.001a |
| Z45 | 3.57±0.092h | 2.71±0.036f | 1.32±0.019f |
| Z49 | 6.46±0.053c | 5.13±0.070a | 1.26±0.007g |
| Z52 | 7.09±0.070a | 5.16±0.090a | 1.38±0.011de |
| Z57 | 4.88±0.070g | 3.53±0.091d | 1.38±0.016d |
| Z63 | 6.17±0.143d | 3.84±0.122c | 1.61±0.022b |
| Z66 | 6.18±0.045d | 4.56±0.074b | 1.35±0.013def |
| Z73 | 4.79±0.051g | 4.56±0.095b | 1.05±0.010h |
| Z77 | 5.72±0.110f | 3.76±0.087c | 1.52±0.064c |

表 4 菌株解有机磷能力

Table 4 Inorganic phosphate solubilizing ability of strains

| 菌株编号 Strain code | 透明圈直径 Transparent diameter (D, mm) | 菌落直径 Colony diameter (d, mm) | 可溶性指数 Soluble index (D/d) |
|---------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Z5 | 8.65±0.06b | 5.70±0.15b | 1.52±0.01d |
| Z7 | 11.01±0.18a | 8.45±0.11a | 1.30±0.01e |
| Z25 | 7.63±0.15c | 4.55±0.11c | 1.68±0.02c |
| Z49 | 5.49±0.18d | 2.11±0.07d | 2.60±0.02a |
| Z63 | 3.13±0.11e | 1.65±0.06e | 1.90±0.03b |

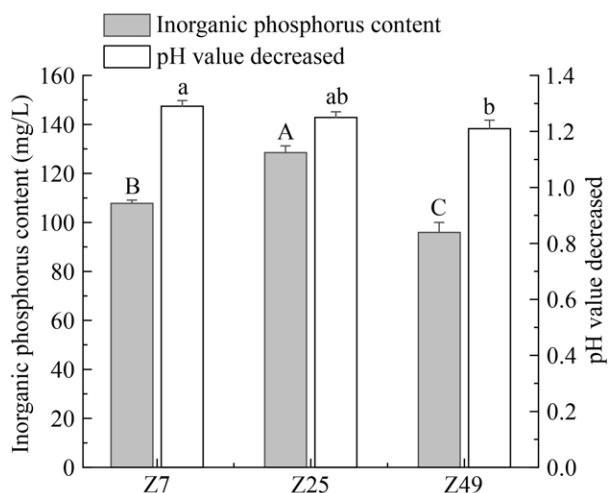


图 1 无机磷浓度与 pH 值降低量 不同大写字母表示 3 株菌无机磷含量差异显著($P<0.05$), 不同小写字母表示 pH 值降低差异显著($P<0.05$)。

Figure 1 Inorganic phosphorus concentration and pH reduction. Different uppercase letters indicate that the inorganic phosphorus content of the three strains is significantly different ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate that the pH value is significantly different ($P<0.05$).

表 5 菌株解有机磷浓度

Table 5 Organic phosphorus concentration

| 菌株编号 | 有机磷浓度 |
|--------|---|
| Strain | Organic phosphorus concentration (mg/L) |
| Z7 | 3.85±1.36b |
| Z25 | 5.62±1.35b |
| Z49 | 10.66±0.89a |

高, 达 99.161%, 结合形态学特征和生理生化特性, 鉴定菌株 Z7 为 *Rossellomorea arthrocnemi*。同上, 菌株 Z25 鉴定为海水罗塞略莫拉氏菌 (*Rossellomorea aquimaris*), 菌株 Z49 鉴定为大洋沉积物泡状芽孢杆菌 (*Cytobacillus oceanisediminis*)。

2.6.2 羊草根际促生菌对种子萌发的影响

由图 3 可知, 相较于 CK, 接种菌株 Z25 和 Z49 后, 羊草种子发芽势(图 3A)、发芽率(图 3B)、发芽指数(图 3C)均显著提高($P<0.05$), 其中发芽势分别提高 18.48%和 16.93%, 发芽率分别提高 16.36%和 13.64%, 发芽指数分别提高 36.92%和 34.46%, 菌株 Z7 与 CK 组相比差异不显著。菌株 Z7、Z25、Z49 种子活力指数均显著高于 CK ($P<0.05$) (图 3D); 相较于菌株 Z7,

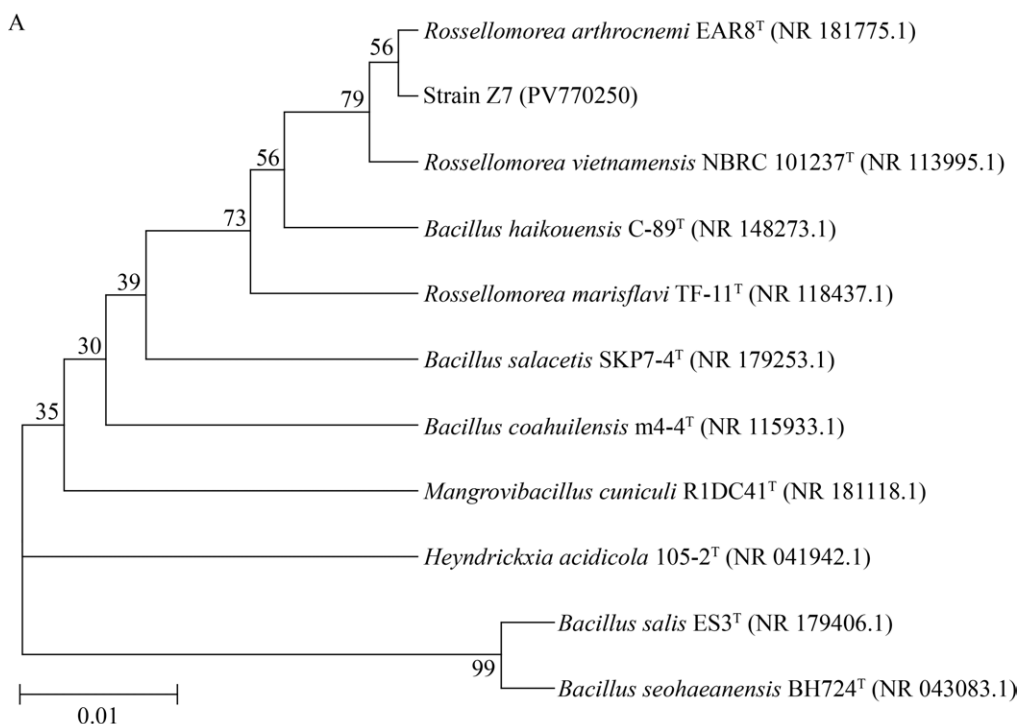
表 6 所选菌株生理生化试验

Table 6 Physiological and biochemical tests of selected strains

| Item | Strain | | |
|-------------------------------|--------|-----|-----|
| | Z7 | Z25 | Z49 |
| 淀粉水解 Starch hydrolysis | + | - | + |
| 柠檬酸盐利用 Citrate utilization | - | - | + |
| 蔗糖发酵 Sucrose fermentation | + | - | - |
| 蛋白胨水解 Peptone hydrolysis | - | - | - |
| 尿素酶 Urease | - | - | + |
| 接触酶试验 Contact enzyme test | + | + | + |
| 明胶液化 Gelatin liquefaction | + | - | - |
| 硝酸盐还原 Nitrate reduction | + | + | + |
| 甲基红试验 Methyl red test | - | + | + |
| V-P 试验 V-P test | + | + | + |

+和-分别表示阳性反应和阴性反应。

+ and - indicate positive reaction and negative reaction, respectively.



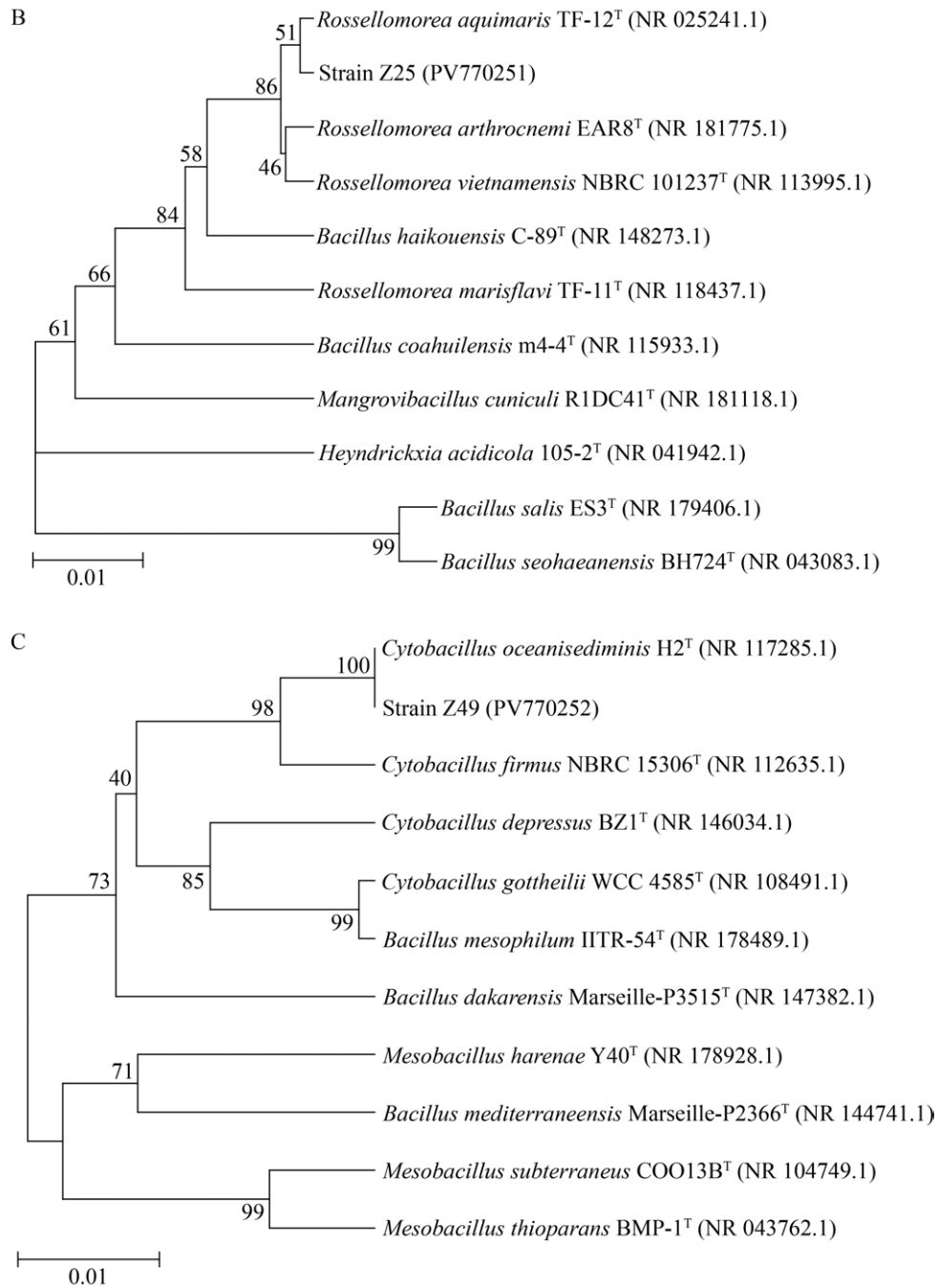


图 2 所选菌株基于 16S rRNA 基因序列构建的系统发育树 A: 菌株 Z7; B: 菌株 Z25; C: 菌株 Z49。括号内序列为菌株的 GenBank 登录号; 分支节点数字表示 bootstrap 值(1 000 次重复); 标尺代表进化距离。

Figure 2 Phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequence of the selected strains. A: Strain Z7; B: Strain Z25; C: Strain Z49. The sequence in parentheses is the GenBank accession number of the strain; The branch node number represents the bootstrap value (1 000 repetitions); The scale represents the evolutionary distance.

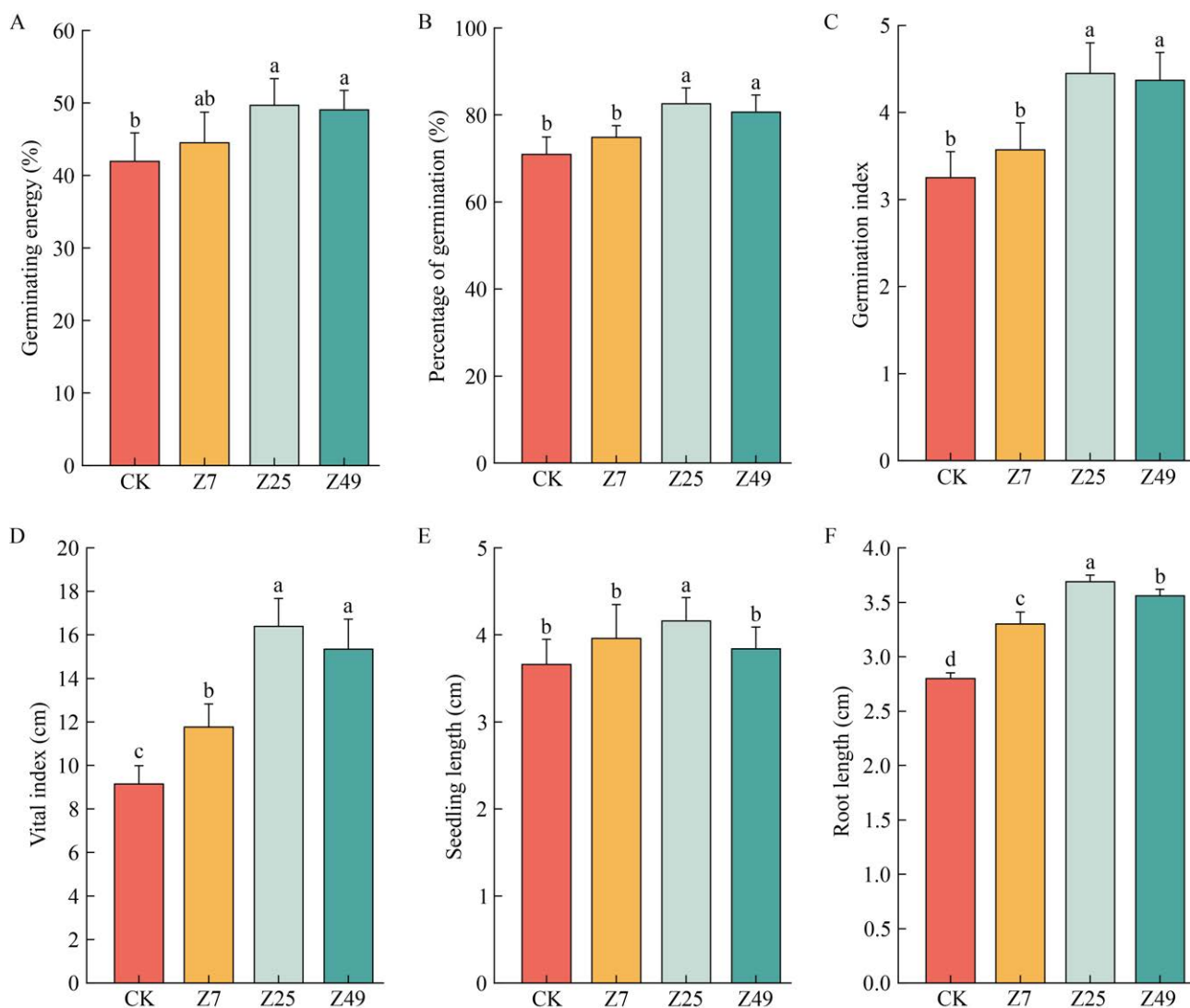


图3 菌株对羊草种子萌发的影响 A: 发芽势; B: 发芽率; C: 发芽指数; D: 活力指数; E: 苗长; F: 根长。不同大写字母表示不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Figure 3 The effect of strains on seed germination of *Leymus chinensis*. A: Germination potential; B: Germination rate; C: Germination index; D: Vigor index; E: Seedling length; F: Root length. Different lowercase letters on the column indicated that the difference between different treatments reached a significant level ($P<0.05$).

菌株 Z25 和菌株 Z49 活力指数分别显著提高 39.38%和 30.52%。菌株 Z25 苗长显著高于其他 3 组($P<0.05$) (图 3E)。相较于 CK 组, 3 株菌对根长具有显著的影响, 对根长的提升率分别为 17.86%、31.79%、27.14% ($P<0.05$) (图 3F)。

2.6.3 盐胁迫下菌株接种对羊草幼苗生长和生理特性的影响

盐胁迫下接种耐盐促生菌的羊草幼苗生

长情况具有明显差异(图 4), 结果显示, 羊草幼苗地上鲜重、干重与地下鲜重、干重随着 NaCl 胁迫程度的增加呈先上升后下降趋势。在盐胁迫的条件下, 接菌处理的幼苗鲜重和干重均高于 CK 组($P<0.05$) (图 5)。其中菌株 Z25 在 100 mmol/L 的盐胁迫下其地上鲜重和地下鲜重分别提高 25.43%和 44.84%; 200 mmol/L 盐胁迫下分别提高 18.90%和 17.80%。



图4 不同盐胁迫处理后的羊草植株照片
Figure 4 Photos of *Leymus chinensis* plants after different salt stress treatments.

随着盐浓度的升高,CK组羊草幼苗CAT活性(图6A)、SOD活性(图6B)、POD活性(图6C)、MDA含量(图6D)显著升高。在盐胁迫处理下,接菌处理羊草幼苗的CAT、POD和

SOD活性均显著高于CK组,MDA含量显著降低。在200 mmol/L的盐胁迫下CAT、POD和SOD酶活性最高。

3 讨论

PGPR作为一类环境友好型细菌,其在改善植物生长和缓解非生物胁迫方面发挥着重要作用^[31]。本研究从盐碱地羊草根际分离出3株具有促生功能且耐盐碱的菌株,通过生理生化特性与分子生物学鉴定,菌株Z7、Z25为*Rossellomorea*,菌株Z49为*Cytobacillus*,均可在盐浓度为9%的LB培养基上生长。已有研究证明从盐碱地种植的不同植物根际土壤中筛选分离出的*Rossellomorea* EAR8^T、S-3均可在盐浓度高达25%的培养基中生长,从豆荚土壤中筛选出来的菌株*C. oceanisediminis* NBR14V对2 mol/L的盐浓度表现出耐受性^[32-34]。综上所述,本研究所筛3株菌在盐碱耐受方面具有一定优势。

PGPR通过生物固氮、溶磷、解钾等方式促进植株对土壤中氮、磷等矿物元素的吸收^[35],还能通过分泌植物激素如IAA来促进植株生长。IAA在植物中通过促进细胞的伸长和分裂来影响植物的生长,同时参与植物对外界环境的响应,包括逆境条件下的应激反应和植物的适应性调节^[36]。周益帆等^[37]从青菜根际土壤中筛选出的25株菌株产IAA能力为0.93–30.05 μg/mL,李福艳等^[38]从根际土壤中筛选出14株分泌IAA的菌株,其中菌株YC3172和YC5064分泌IAA能力最强,产量分别达79.75 mg/L和67.55 mg/L。任智慧等^[39]筛选出14株菌株,均可分泌IAA,分泌量在6.69–10.40 μg/mL。本研究共筛选出15株菌株,其中能分泌IAA的有12株,占总数的80%,分泌量在1.32–17.44 mg/L,其中菌株Z49分泌量最高,产量为17.44 mg/L。相较于前人研究,本研究筛选的3株菌表现出不错的分泌IAA能力,在根际促生方面具有非常大的开发潜力。

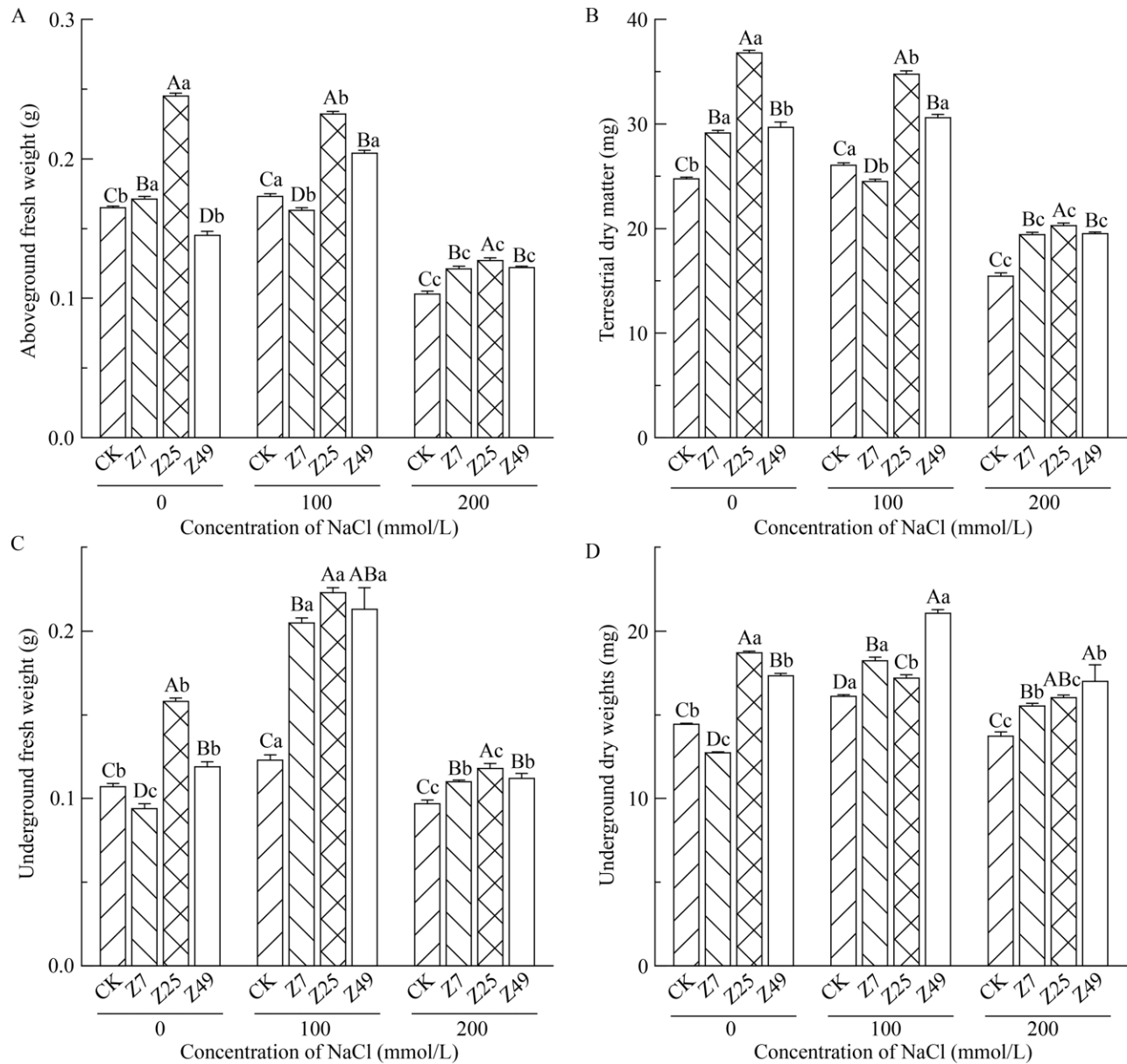


图5 盐胁迫下接种菌株对羊草幼苗生长的影响 A: 地上部鲜重; B: 地上部干重; C: 地下部鲜重; D: 地下部干重。不同大写字母表示同一盐浓度下不同处理之间差异达到显著水平($P<0.05$); 不同小写字母表示同一处理下不同盐浓度之间差异达到显著水平($P<0.05$)。

Figure 5 Effects of inoculated strains on the growth of *Leymus chinensis* seedlings under salt stress. A: Aboveground fresh weight; B: Terrestrial dry weight; C: Underground fresh weight; D: Underground dry weight. Different uppercase letters indicate that the difference between different treatments under the same salt concentration reaches a significant level ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate that the differences among different salt concentrations under the same treatment reach a significant level ($P<0.05$).

土壤中的铁元素在中性或碱性条件下形成稳定的不溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, 使植物难以吸收和利用^[40]。铁载体与 Fe^{3+} 特异性螯合形成螯合物,

从而提高植物根际有效铁的含量^[41], 本研究所筛选出具有产铁载体能力的菌株为 *Rossellomorea*。磷在土壤中主要以不溶性无机或有机化合物的

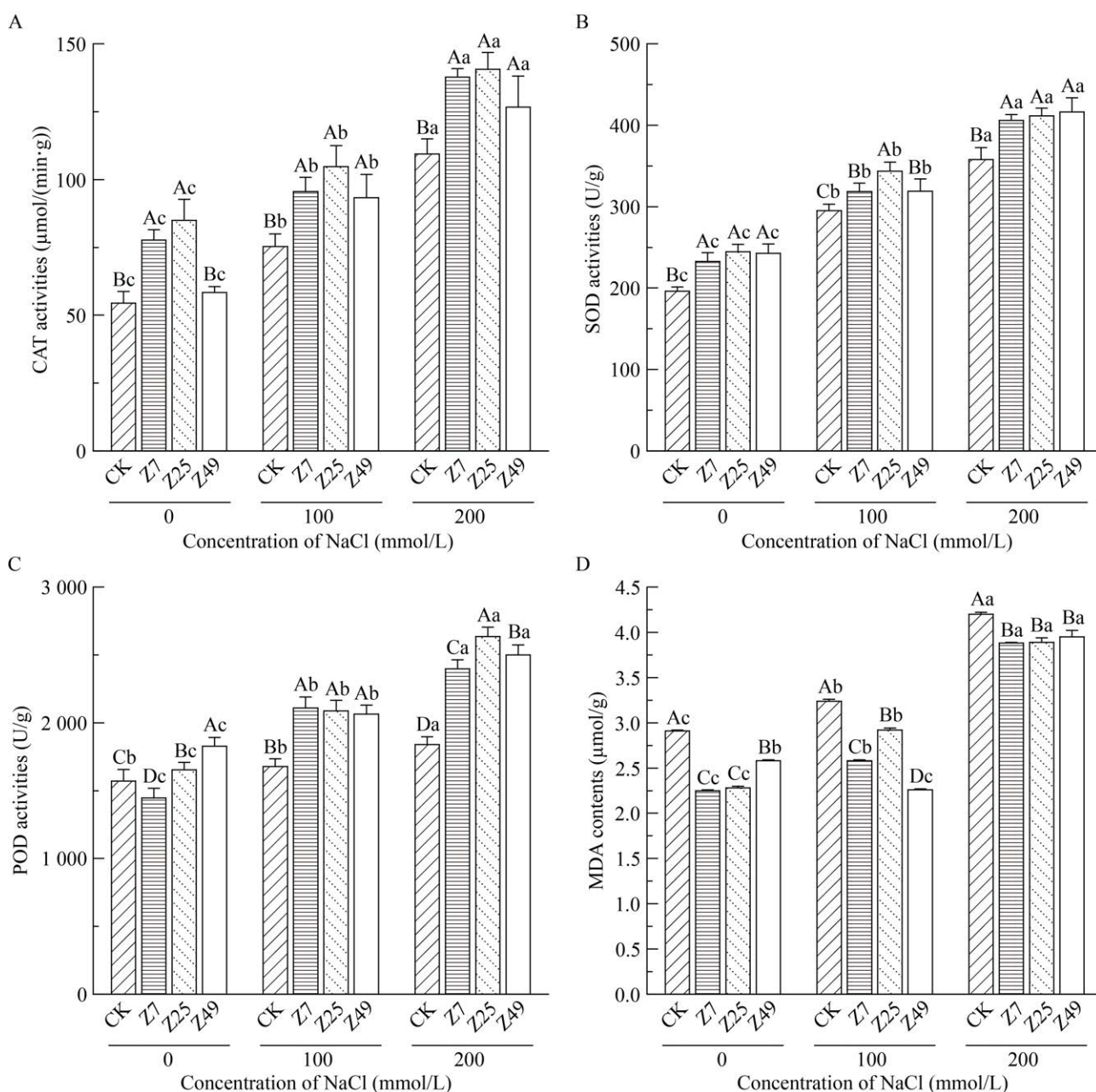


图 6 盐胁迫下接种菌株对羊草幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 A: 过氧化氢酶活性; B: 超氧化物歧化酶活性; C: 过氧化物酶活性; D: 丙二醛含量。不同大写字母表示同一盐浓度不同处理之间差异达到显著水平($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一处理不同盐浓度之间差异达到显著水平($P < 0.05$)。

Figure 6 Effects of inoculation with strains on antioxidant enzyme activity and malondialdehyde content of *Leymus chinensis* seedlings under salt stress. A: Catalase activity; B: Superoxide dismutase activity; C: Peroxidase activity; D: Malondialdehyde content. Different uppercase letters indicated that the difference between different treatments under the same salt concentration reached a significant level ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that the difference among different salt concentrations under the same treatment reach a significant level ($P < 0.05$).

形式存在^[42]。土壤中 95%以上的磷为难溶性固态磷,并且供植物直接吸收利用的有效磷含量较少,只有 0.1%的总磷以可溶形式存在,可供植物吸收^[43]。而解磷微生物可以通过分泌有机酸溶解无机磷,还可以通过分泌碱性和酸性磷酸酶分解有机磷。目前发现的解磷微生物种类繁多,但主要以细菌为主,如芽孢杆菌属(*Bacillus*)、肠杆菌属(*Enterobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、土壤杆菌属(*Agrobacterium*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)等^[44],均具有不同程度的解磷能力。黄欣等^[45]在盐碱区盐蒿根际土壤中筛选出假单胞菌属,具有良好的解磷效果(71.32 mg/L),并对油菜种子的发芽和生长有显著影响。侯莹莹等^[46]在成熟期玉米植株根际土壤筛选出阿氏肠杆菌(*Enterobacter asburiae*),解磷量 158.52 mg/L,对玉米种子发芽有显著影响。本研究从羊草根际土壤中所筛选出的 3 株菌解磷量分别为 107.80、128.52、95.95 mg/L,相较于前人研究处于较高水平。本研究测定菌株解有机磷有明显透明圈但测定液体解磷量很少,差异出现的原因可能是菌落分泌的解磷酶与有机磷的接触以及解磷条件有关^[47]。

大量的研究表明,根际促生菌对种子萌发具有积极影响^[48-49],本研究筛选的 3 株菌均提高了羊草种子的发芽指标,特别是接种后种子活力指数分别提高 28.52%、79.13%、67.76%。有研究表明,相较于模式菌株,从原生环境土壤中所筛选的菌株,具有适应性强、生物多样性高、遗传稳定性好等优点,可能对植物的促生效果更好,并能够更好地适应土壤中的微生物群落形成共生菌落,从而提高土壤定殖率^[50]。菌株产生的 IAA 通过诱导细胞伸长或响应细胞分裂直接促进根的生长^[45]。三株菌均显著促进了羊草幼苗的根长,提升率分别为 17.86%、31.79%、27.14%,而增强的根系可以改善土壤的孔隙度和结构,间接缓解土壤结构障碍的问题^[51]。

盐度会对植物的生长和生理产生不利影

响,导致植物活性氧过量产生,进一步导致细胞膜损伤及蛋白质变性,使植物生物量和产量均显著降低^[12]。本实验发现,添加 100 mmol/L 的盐溶液后,CK 地上、地下的干重和鲜重均高于不加盐胁迫的 CK,可能是由于幼苗在低盐度下可能有一定适应能力,从而使得生物量增加,随着盐浓度逐渐增加,胁迫伤害逐渐增加,导致生物量减少^[52],无论在正常情况还是盐胁迫的影响下,接菌处理均提高了羊草幼苗的鲜重和干重。这与燕麦在盐胁迫下接种克雷伯氏菌(*Klebsiella* sp.)的结果^[53]一致。本研究结果表明在盐胁迫下,接种 3 株菌均能显著提高羊草幼苗叶中 CAT、SOD 和 POD 活性,显著降低 MDA 含量,能有效缓解盐胁迫对羊草幼苗造成的氧化损伤。在玉米^[52]、生菜^[54]等接种 PGPR 均出现类似的结果。综上,接种菌株可对盐胁迫下羊草幼苗胞内活性氧的清除起到积极作用,有助于植物在盐胁迫环境中更好地生长。

4 结论

本研究从盐碱地羊草根际土壤中筛选出 15 株具有较强盐碱耐性的菌株,其中 3 株(Z7、Z25、Z49)具有良好的产 IAA 和解磷能力,pH 耐受范围为 8.85-10.00,对 NaCl 耐受程度达 9%。浸种处理对羊草种子的发芽指数具有促进作用,菌株 Z25 综合效果最优。盐胁迫下接种菌液处理可有效缓解盐胁迫对羊草幼苗所造成的氧化损伤。

作者贡献声明

张旭东:实验操作,撰写文章;陈永成:监督指导;刘朝荣:数据收集;胡天宇:软件程序;陈莹:数据分析;苏力合:稿件润色修改;白云飞:实验操作;刘慧:提供材料;马春晖:获取基金,提供资源。

作者利益冲突公开声明

作者声明绝无任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

REFERENCES

- [1] 姜焕焕, 祁佩时, 王通, 迟晓元, 陈明娜. 花生根际多功能固氮菌的分离及其耐盐碱特性研究[J]. 生物技术通报, 2019, 35(3): 24-30.
JIANG HH, QI PS, WANG T, CHI XY, CHEN MN. Screening of multi-function nitrogen-fixing bacteria in peanut rhizosphere and their tolerances to saline[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(3): 24-30 (in Chinese).
- [2] 赵作章, 陈劲松, 彭尔瑞, 李荣亮, 吴大真. 土壤盐渍化及治理研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2023(6): 202-208.
ZHAO ZZ, CHEN JS, PENG ER, LI RL, WU DZ. Research progress on soil salinization and management[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(6): 202-208 (in Chinese).
- [3] 王艳霞, 解志红, 张蕾, 常大勇. 田菁根际促生菌的筛选及其促生耐盐效果[J]. 微生物学报, 2020, 60(5): 1023-1035.
WANG YX, XIE ZH, ZHANG L, CHANG DY. Screening of plant growth promoting and salt tolerant rhizobacteria in *Sesbania cannabina*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(5): 1023-1035 (in Chinese).
- [4] 陈燕鸿, 蔺红苹, 徐苏琪, 邱雨春, 李双羽, 李嘉怡, 卢冬梅. 植物根际促生菌的筛选及其耐盐促生效果[J]. 微生物学报, 2025, 65(1): 150-168.
CHEN YH, LIN HP, XU SQ, QIU YC, LI SY, LI JY, LU DM. Screening of plant growth-promoting rhizobacterium with salt tolerance from rhizosphere[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(1): 150-168 (in Chinese).
- [5] FANG SM, HOU X, LIANG XL. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 667458.
- [6] 李双君, 胡桂清, 张文太, 孟景怡. 改良剂施用对硫酸盐型棉田产量及土壤盐渍化参数的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(4): 102-110.
LI SJ, HU GQ, ZHANG WT, MENG JY. Effects of acid-base balance conditioner application on cotton yield and soil salinization parameters in sulfate saline fields[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(4): 102-110 (in Chinese).
- [7] 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 李晓光, 刘小京. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1016-1024.
GUO K, JU ZQ, FENG XH, LI XG, LIU XJ. Advances and expectations of researches on saline soil reclamation by freezing saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1016-1024 (in Chinese).
- [8] 阿依古丽·达嘎尔别克, 艾比布拉·伊马木, 大森圭佑, 哈丽代·热合木江. 不同洗盐法对盐碱化土壤改良效果研究[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(3): 477-482.
Ayiguli·Dagaerbieke, Aibibula·Yimamu, Omori·Keisuke, Halidai·Rehemjiang. Effects of different salt leaching methods on improving saline-alkali soil[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(3): 477-482 (in Chinese).
- [9] 马雪晴, 冀傲冉, 郑娇莉, 曹春霞, 龚艳, 黄大野, 王蓓蓓. 植物根际促生菌促生机制及其应用研究进展[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(2): 13-23.
MA XQ, JI AR, ZHENG JL, CAO CX, GONG Y, HUANG DY, WANG BB. Research progress on growth-promoting mechanism and application of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(2): 13-23 (in Chinese).
- [10] 江美彦, 周杨, 刘仁浪, 姚菲, 杨云舒, 侯凯, 冯冬菊, 吴卫. 白芷根际促生菌的筛选及其促生效果研究[J]. 生物技术通报, 2022, 38(8): 167-178.
JIANG MY, ZHOU Y, LIU RL, YAO F, YANG YS, HOU K, FENG DJ, WU W. Screening and plant growth promoting of grow-promoting bacteria in rhizosphere bacteria of *Angelica dahurica* var. *formosana*[J]. Biotechnology Bulletin, 2022, 38(8): 167-178 (in Chinese).
- [11] SHABAAN M, ASGHAR HN, AHMAD ZAHIR Z, SARDAR MF, PARVEEN R, FAIZA, ALI Q. Halotolerant rhizobacterial consortium confers salt tolerance to maize under naturally salt-affected soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2022, 86(5): 1264-1279.
- [12] GAO YR, ZOU H, WANG BS, YUAN F. Progress and applications of plant growth-promoting bacteria in salt tolerance of crops[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(13): 7036.
- [13] YIN ZQ, WANG X, HU YJ, ZHANG JK, LI H, CUI YR, ZHAO DY, DONG XS, ZHANG XH, LIU K, DU BH, DING YQ, WANG CQ. *Metabacillus dongyingensis* sp. nov. is represented by the plant growth-promoting bacterium BY2G20 isolated from saline-alkaline soil and enhances the growth of *Zea mays* L. under salt stress[J]. mSystems, 2022, 7(2): e0142621.
- [14] 吕正阳, 邵登科, 张春源, 赖泽成, 李望豪, 周瑞鹏, 刘梓烨, 王荣波, 林占燧, 鲁国东, 叶文雨. 一株耐盐碱细菌的筛选鉴定及其对植物的促生作用[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(1): 41-47.
LÜ ZY, SHAO DK, ZHANG CY, LAI ZC, LI WH, ZHOU RP, LIU ZY, WANG RB, LIN ZX, LU GD, YE WY. Isolation and identification of a saline-alkali resistant bacterium and its growth-promoting function on plant[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2023, 52(1): 41-47 (in Chinese).
- [15] LU L, LIU N, FAN ZH, LIU MH, ZHANG XX, TIAN J, YU YJ, LIN HH, HUANG Y, KONG ZS. A novel PGPR strain, *Streptomyces lasalocidi* JCM 3373^T, alleviates salt stress and shapes root architecture in soybean by secreting indole-3-carboxaldehyde[J]. Plant, Cell & Environment, 2024, 47(6): 1941-1956.
- [16] HUANG Z, WANG C, FENG Q, LIOU RM, LIN Y-F, QIAO JH, LU YX, CHANG Y. The mechanisms of sodium chloride stress mitigation by salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria in wheat[J]. Agronomy, 2022, 12(3): 543.
- [17] KHUMAIRAH FH, SETIAWATI MR, FITRIATIN BN,

- SIMARMATA T, ALFARAJ S, ANSARI MJ, EL ENSHASY HA, SAYYED RZ, NAJAFI S. Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria isolated from saline soil improve nitrogen fixation and alleviate salt stress in rice plants[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 905210.
- [18] 梁潇, 侯向阳, 王艳荣, 任卫波, 赵青山, 王照兰, 李怡, 武自念. 羊草种质资源耐盐碱性综合评价[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(3): 1-9.
LIANG X, HOU XY, WANG YR, REN WB, ZHAO QS, WANG ZL, LI Y, WU ZN. Comprehensive evaluation on saline-alkali tolerance of *Leymus chinensis* germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(3): 1-9 (in Chinese).
- [19] 张佳伟, 贾玉山, 王志军, 格根图, 包健, 王宇, 刘逸超, 岳晓明. 羊草和蒙古韭的不同混合比例对其青贮品质的影响[J]. *饲料研究*, 2022, 45(19): 93-96.
ZHANG JW, JIA YS, WANG ZJ, GE GT, BAO J, WANG Y, LIU YC, YUE XM. Effect of mix proportion on silage quality of *Leymus chinensis* and *Allium mongolicum*[J]. *Feed Research*, 2022, 45(19): 93-96 (in Chinese).
- [20] 罗俊杰, 肖燕子, 侯美玲, 徐丽君, 胡梦洁, 卢娜, 张小林, 张佳旭, 安鑫. 不同添加剂对苜蓿与羊草混合青贮品质及维生素含量的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(3): 992-1000.
LUO JJ, XIAO YZ, HOU ML, XU LJ, HU MJ, LU N, ZHANG XL, ZHANG JX, AN X. Effects of different additives on quality and vitamin content of mixed silage of alfalfa and *Leymus chinensis*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(3): 992-1000 (in Chinese).
- [21] 相凯文, 李丹丹, 郭自春, 任宗玲, 田慎重, 高磊, 彭新华, 蔡燕飞. 一株高产吲哚乙酸促生菌的筛选鉴定、条件优化、应用效果及其代谢途径[J]. *微生物学通报*, 2025, 52(6): 2599-2612.
XIANG KW, LI DD, GUO ZC, REN ZL, TIAN SZ, GAO L, PENG XH, CAI YF. A high indole-3-acetic acid-producing bacterial strain with plant growth-promoting effect: screening, identification, culture condition optimization, application, and genome-wide analysis[J]. *Microbiology China*, 2025, 52(6): 2599-2612 (in Chinese).
- [22] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
XU GH, ZHENG HY. *Manual of Soil Microbial Analysis Methods*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986 (in Chinese).
- [23] 张哲超. 耐盐碱根际促生菌与丛枝菌根真菌联合提高牧草盐碱耐受性的微生物机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
ZHANG ZC. Microbial mechanism of combined inoculation with haloalkaliphilic rhizosphere growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi to improve saline-alkaline tolerance of herbage[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022 (in Chinese).
- [24] 黄臣, 韩玲娟, 梁银萍, 杨凯元, 蒋霖, 孙小涵, 范乐, 赵祥, 高鹏. 达乌里胡枝子四株耐盐碱根际促生菌的鉴定及其促生作用[J]. *草地学报*, 2023, 31(4): 1036-1047.
HUANG C, HAN LJ, LIANG YP, YANG KY, JIANG L, SUN XH, FAN L, ZHAO X, GAO P. Identification and plant growth promotion analysis of four salt-alkali tolerant rhizosphere-promoting bacteria isolated from *Lespedeza daurica*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 1036-1047 (in Chinese).
- [25] GLICKMANN E, DESSAUX Y. A critical examination of the specificity of the Salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(2): 793-796.
- [26] 杨志远. 耐盐碱解磷菌高效解磷的种间趋同进化及种内变异效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
YANG ZY. The convergent evolutionary and intraspecific variation of efficient phosphorus solubilization in saline-alkali tolerant phosphorus-solubilizing bacteria[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024 (in Chinese).
- [27] 杜连祥, 路福平. 微生物学实验技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005.
DU LX, LU FP. *Microbiological Experimental Techniques*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2005 (in Chinese).
- [28] AMINI HAJIABADI A, MOSLEH ARANI A, ETESAMI H. Salt-tolerant genotypes and halotolerant rhizobacteria: a potential synergistic alliance to endure high salinity conditions in wheat[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 202: 105033.
- [29] HAJIABADI AA, ARANI AM, GHASEMI S, RAD MH, ETESAMI H, MANSHADI SS, DOLATI A. Mining the rhizosphere of halophytic rangeland plants for halotolerant bacteria to improve growth and yield of salinity-stressed wheat[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 163: 139-153.
- [30] 李招琴, 王超, 胡琬新, 张玲玲, 韦廷舟, 侯苏洋, 黄莉, 杨若豆, 李林钦, 徐静, 江世杰. 两株盐矿区植物根际耐盐菌对油菜促生作用研究[J/OL]. *中国农业科技导报*, 2025: 1-9. (2025-03-24). <https://link.cnki.net/doi/10.13304/j.nykjdb.2024.0630>.
LI ZQ, WANG C, HU WX, ZHANG LL, WEI TZ, HOU SY, HUANG L, YANG RD, LI LQ, XU J, JIANG SJ. Research on growth-promoting effect of two salt-tolerant plant rhizobacteria from salt mine on *Brassica napus* L.[J/OL]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025: 1-9. (2025-03-24). <https://link.cnki.net/doi/10.13304/j.nykjdb.2024.0630> (in Chinese).
- [31] 高守舆, 刘文静, 李钰莹, 向清源, 许佳俊, 舒蕾淇, 李肇中. 苗期白羊草对盐胁迫的生理生化响应及其耐盐阈值的界定[J]. *草业学报*, 2025, 34(3): 164-174.
GAO SY, LIU WJ, LI YY, XIANG QY, XU JJ, SHU LQ, LI ZZ. Physiological and biochemical responses of *Bothriochloa ischaemum* seedlings to salt stress at seedling stage and definition of salt tolerance threshold[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(3): 164-174 (in Chinese).
- [32] NAVARRO-TORRE S, CARRO L, IGUAL JM, del CARMEN MONTERO-CALASANZ M. *Rosellomorea arthrocnemi* sp. nov., a novel plant growth-promoting bacterium used in heavy metal polluted soils as a phytoremediation tool[J]. *International Journal of*

- Systematic and Evolutionary Microbiology, 2021, 71(10): 005015.
- [33] LI M, LI WJ, WANG CX, JI L, HAN K, GONG JH, DONG SY, WANG HL, ZHU XM, DU BH, LIU K, JIANG JQ, WANG CQ. Growth-promoting effects of self-selected microbial community on wheat seedlings in saline-alkali soil environments[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2024, 12: 1464195.
- [34] UMRAO V, YADAV S, SEMWAL P, MISRA S, MISHRA SK, CHAUHAN PS, SHIRKE PA. Endophytic bacilli from *Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub. induces plant growth and drought tolerance[J]. International Microbiology, 2024, 27(5): 1541-1556.
- [35] 邵嘉朱, 吕雯, 廖鑫琳, 袁歆瑜, 宋振, 蒋冬花. 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.
- SHAO JZ, LÜ W, LIAO XL, YUAN XY, SONG Z, JIANG DH. Isolation and identification of soybean rhizosphere growth-promoting bacteria and their salt tolerance and growth-promoting effects[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(21): 4248-4263 (in Chinese).
- [36] 肖峰, 刘才鑫, 祖艳群, 王磊, 李祖然, 王吉秀. 叶面喷施吡啶乙酸对小花南芥和玉米间作富集铅的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(1): 230-239.
- XIAO F, LIU CX, ZU YQ, WANG L, LI ZR, WANG JX. Effects of foliar spraying of IAA on Pb enrichment during interplanting of *Arabidopsis thaliana* L. var. parviflora Franch and *Zea mays* L.[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(1): 230-239 (in Chinese).
- [37] 周益帆, 王金斌, 何川, 岳童, 白寅霜, 李庆伟, 唐雪明, 杨焱, 蒋玮, 黄艳娜. 一株产吡啶乙酸的 *Bacillus velezensis* JB0319 的筛选、鉴定及其促生作用[J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 173-183.
- ZHOU YF, WANG JB, HE C, YUE T, BAI YS, LI QW, TANG XM, YANG Y, JIANG W, HUANG YN. Screening, identification and growth promotion of a strain of *Bacillus velezensis* JB0319 producing indoleacetic acid[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 173-183 (in Chinese).
- [38] 李福艳, 刘晓玉, 颜静婷, 蔡燕飞. 三株产吡啶乙酸根际促生芽孢杆菌的筛选鉴定及其促生作用[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(5): 873-884.
- LI FY, LIU XY, YAN JT, CAI YF. Isolation and identification of three indole-3-acetic acid producing plant-growth-promoting rhizosphere *Bacillus* sp. and their growth-promoting effects[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(5): 873-884 (in Chinese).
- [39] 任智慧, 于乔, 高士孔, 王家驹, 牛德鹏, 刘美丽, 呼天明, 付娟娟. 垂穗披碱草根际促生菌的分离鉴定及促生作用研究[J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1693-1701.
- REN ZH, YU Q, GAO SK, WANG JJ, NIU DP, LIU ML, HU TM, FU JJ. Screening and promoting effects of plant growth-promoting bacteria from rhizosphere of *Campepistachys nutans* Griseb[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1693-1701 (in Chinese).
- [40] 李雪艳, 张涛, 杨红梅, 楚敏, 高雁, 曾军, 霍向东, 张涛, 林青, 欧提库尔, 李玉国, 娄恺, 史应武. 棉花黄萎病拮抗细菌产铁载体测定及其对抑菌活性的影响[J]. 微生物学通报, 2019, 46(5): 1074-1080.
- LI XY, ZHANG T, YANG HM, CHU M, GAO Y, ZENG J, HUO XD, ZHANG T, LIN Q, OU T, LI YG, LOU K, SHI YW. Determination of the siderophore produced by antagonistic cotton *Verticillium* wilt bacteria and its effect on antibacterial activity[J]. Microbiology China, 2019, 46(5): 1074-1080 (in Chinese).
- [41] 张婷, 万雨欣, 徐伟慧, 王志刚, 陈文晶, 胡云龙. 一株玉米根际促生菌 *Leclercia adecarboxylata* LN01 促生效果研究及其基因组分析[J]. 生物技术通报, 2025, 41(1): 263-275.
- ZHANG T, WAN YX, XU WH, WANG ZG, CHEN WJ, HU YL. Growth-promoting effects of a rhizosphere growth-promoting bacterium *Leclercia adecarboxylata* LN01 in maize plants and its whole-genome analysis[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(1): 263-275 (in Chinese).
- [42] 李青青, 张芮, 高彦婷, 张红娟, 刘柯含. 耐盐碱解磷菌的溶磷效果及其对黄豆萌发的影响[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4574-4589.
- LI QQ, ZHANG R, GAO YT, ZHANG HJ, LIU KH. Phosphorus solubilization effect of saline-tolerant phosphorus-solubilizing bacteria and its effect on soybean germination[J]. Microbiology China, 2024, 51(11): 4574-4589 (in Chinese).
- [43] SAADOULI I, MOSBAH A, FERJANI R, STATHOPOULOU P, GALIATSATOS I, ASIMAKIS E, MARASCO R, DAFFONCHIO D, TSIAMIS G, OUZARI HI. The impact of the inoculation of phosphate-solubilizing bacteria *Pantoea agglomerans* on phosphorus availability and bacterial community dynamics of a semi-arid soil[J]. Microorganisms, 2021, 9(8): 1661.
- [44] 池景良, 郝敏, 王志学, 李杨. 解磷微生物研究及应用进展[J]. 微生物学杂志, 2021, 41(1): 1-7.
- CHI JL, HAO M, WANG ZX, LI Y. Advances in research and application of phosphorus-solubilizing microorganism[J]. Journal of Microbiology, 2021, 41(1): 1-7 (in Chinese).
- [45] 黄欣, 陈燕, 谷青青, 徐秋霞, 吴玲, 王莹, 郭聪, 曹凡, 李玉娟. 盐蒿根际产 ACC 脱氨酶菌株的筛选及其促生效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2024(12): 223-229.
- HUANG X, CHEN Y, GU QQ, XU QX, WU L, WANG Y, GUO C, CAO F, LI YJ. Screening of ACC-deaminase strains from the rhizosphere of *Artemisia halodendron* and study on their growth-promoting effect[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(12): 223-229 (in Chinese).
- [46] 侯莹莹, 胡小梅. 3 株玉米根际解磷菌筛选鉴定及促生作用研究[J]. 东北农业大学学报, 2024, 55(5): 46-55.
- HOU YY, HU XM. Screening and identification of three strains of phosphate-solubilizing bacteria from maize rhizosphere and their roles in plant growth promoting effect[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2024, 55(5): 46-55 (in Chinese).
- [47] 胡子全, 赵海泉. 一株有机解磷菌的筛选及其最佳生

- 长条件的研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 66-70.
- HU ZQ, ZHAO HQ. Screening of one organophosphate-degradation bacterium and its optimum growth condition[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(17): 66-70 (in Chinese).
- [48] 杜雪倩, 张捷, 张思雨, 吕丽芸, 任怡卓, 王国琴, 郑蕊, 岳思君. 枸杞根际促生菌筛选及其促生效应[J/OL]. 南方农业学报, 2024: 1-14. (2024-12-31). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1381.S.20241231.0855.002.html>.
- DU XQ, ZHANG J, ZHANG SY, LYU LY, REN YZ, WANG GQ, ZHENG R, YUE SJ. Screening of rhizosphere growth-promoting bacteria of *Lycium barbarum* and their growth-promoting effects[J/OL]. Journal of Southern Agriculture, 2024: 1-14. (2024-12-31). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1381.S.20241231.0855.002.html> (in Chinese).
- [49] 巨亚雯, 陈亚丽, 徐蓬, 付佑胜, 牛邦彦, 张兴旭. 盐胁迫下根际促生菌对醉马草种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 419-426.
- JU YW, CHEN YL, XU P, FU YS, NIU BY, ZHANG XX. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on *Achnatherum inebrians* seed germination during salt stress[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(2): 419-426 (in Chinese).
- [50] LI ZF, ZHU ZY, QIAN K, TANG BP, HAN BC, ZHONG ZH, FU T, ZHOU P, STUKENBROCK EH, MARTIN FM, YUAN ZL. Intraspecific diploidization of a halophyte root fungus drives heterosis[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 5872.
- [51] PHILIPPOT L, CHENU C, KAPPLER A, RILLIG MC, FIERERER N. The interplay between microbial communities and soil properties[J]. Nature Reviews Microbiology, 2023, 22(4): 226-239.
- [52] ATICI Ö, AYDIN İ, KARAKUS S, TIRYAKI D. Inoculating maize (*Zea mays* L.) seeds with halotolerant rhizobacteria from wild halophytes improves physiological and biochemical responses of seedlings to salt stress[J]. Biologia Futura, 2025, 76(1): 101-116.
- [53] SAPRE S, GONTIA-MISHRA I, TIWARI S. *Klebsiella* sp. confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (*Avena sativa*)[J]. Microbiological Research, 2018, 206: 25-32.
- [54] BAI YS, ZHOU YF, YUE T, HUANG YN, HE C, JIANG W, LIU H, ZENG HJ, WANG JB. Plant growth-promoting rhizobacteria *Bacillus velezensis* JB0319 promotes lettuce growth under salt stress by modulating plant physiology and changing the rhizosphere bacterial community[J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 213: 105451.