

引用格式:郭思雨,李青慧,任青措,等.柴达木盆地盐生植物根际解磷菌的分离、鉴定及盐胁迫下的促生特性[J].福建农林大学学报(自然科学版),2025,54(5):647-657.

GUO S Y, LI Q H, REN Q C, et al. Isolation and identification of phosphate-solubilizing bacteria from halophytic rhizosphere in Qaidam Basin and their growth-promoting ability under salt stress[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2025,54(5):647-657.

# 柴达木盆地盐生植物根际解磷菌的分离、鉴定及盐胁迫下的促生特性

郭思雨,李青慧,任青措,沈才睿,冶贵生,马玉花

(青海大学农牧学院,青海 西宁 810016)

**摘要:**【目的】从柴达木盆地盐碱地盐生植物根际土壤中分离耐盐促生微生物,分析其促生特性,为筛选适用于盐碱环境的高效解磷促生菌提供优质菌种。【方法】利用含  $100\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 的 LB 固体培养基筛选生长良好的菌株,经平板划线法纯化。通过形态学观察、生理生化测定及 16S rDNA 序列比对进行鉴定,并测定其解有机磷和无机磷能力;采用菌液浸种法,将油菜种子在盐胁迫条件下培养,评估菌株对种子发芽率及植株生长的影响。【结果】共获得 6 株耐盐解磷菌:1 株肇东氏弗里兰德菌(*Vreelandella zhaodongensis*) P1,1 株耐盐刘志恒菌(*Zhihengliuella halotolerans*) P2,2 株表皮葡萄球菌(*Staphylococcus epidermidis*) P3、P5,2 株腐生葡萄球菌(*Staphylococcus saprophyticus*) P4、P6。培养 5 d 后,6 株菌溶解有机磷的直径为 6.70~14.81 mm,溶解无机磷的直径为 5.95~11.96 mm,解有机磷量  $2.81\sim 3.61\ \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,解无机磷量为  $4.05\sim 12.04\ \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,其中 P3 表现最佳,显著高于其他菌株。促生试验表明,6 株菌均能提高油菜发芽率,其中 P3 处理组在无胁迫和盐胁迫条件下发芽率分别为 90.67% 和 74.67%,较对照 CK1(无菌水浸泡 20 h 后喷淋无菌水)和 CK2(无菌水浸泡 20 h 后喷淋含  $100\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl 的无菌水)分别提高 29.34% 和 30.00%。在植株生长方面,P3 和 P5 表现突出:P3 处理组鲜质量达 28.48 g,较 CK 提高 120.85%;P5 处理组在株高(104.21 mm,增加 42.42%)和根长(64.89 mm,增加 80.67%)方面效果最佳。【结论】柴达木盆地分离获得的 6 株耐盐解磷菌均具显著促生作用,可在盐胁迫下提高油菜发芽率并促进植株生长,显示出改良旱区盐渍化土壤的应用潜力,其中 P3 和 P5 效果最为优异。

**关键词:**柴达木盆地;盐渍化;菌种鉴定;解磷菌;促生能力

**中图分类号:**S714.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-5470(2025)05-0647-11

**DOI:**10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202408002



开放科学(资源服务)  
标识码(OSID)

## Isolation and identification of phosphate-solubilizing bacteria from halophytic rhizosphere in Qaidam Basin and their growth-promoting ability under salt stress

GUO Siyu, LI Qinghui, REN Qingcuo, SHEN Cairui, YE Guisheng, MA Yuhua

(College of Agriculture and Animal Science, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:**【Objective】Microorganisms with salt-tolerant and growth-promoting capacity were isolated from the rhizospheric soils of halophytic plants grown in the saline-alkali land of Qaidam Basin, and assessed on growth-promoting characteristics, to provide efficient phosphate-solubilizing and growth-promoting bacteria accommodating to saline-alkali environments.【Method】Salt-tolerant bacteria were screened with LB solid medium containing  $100\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl, purified by streak plate method, and then identified via morphological observation, physiological and biochemical tests and 16S rDNA sequence alignment. The phosphate-solubilizing ability of these strains were assessed, and their effect on seed germination and plant growth under salt stress were verified with *Brassica napus* seeds inoculated with the bacterial reagents.【Result】Six phosphate-solubilizing strains with excellent salt tolerance and growth-pro-

收稿日期:2024-08-02 修回日期:2024-09-09

基金项目:青海省科技计划项目(2024-ZJ-941);青海省“高端创新人才千人计划”项目(2022)。

通信作者:马玉花(1978—),女,教授,博士。研究方向:森林培育理论与技术、植物资源开发利用。Email:qhxnmyh@163.com。

moting ability were screened, including 1 *Vreelandella zhaodongensis* strain (P1), 1 *Zhihengliuella halotolerans* strain (P2), 2 *Staphylococcus epidermidis* strains (P3 and P5), and 2 *Staphylococcus saprophyticus* strains (P4 and P6). After 5 d cultivation with the 6 strains, the zone diameters of dissolved organic phosphorus and inorganic phosphorus reached 6.70–14.81 mm and 5.95–11.96 mm, respectively, and the contents of solubilized organic phosphorus and inorganic phosphorus yielded at 2.81–3.61  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  and 4.05–12.04  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ , respectively, among which strain P3 significantly outperformed the other strains. Germination promotion experiment showed that the phosphate-solubilizing bacteria can enhance the germination rate of *B.napus*. After 5 d cultivation under non-stress and salt stress conditions, strain P3 demonstrated the best promotive effect on *B.napus* germination, with germination rates of 90.67% and 74.67%, respectively, up by 29.34% and 30.00% compared to the CK1 (sterile water soaked for 20 h and sprayed with sterile water) and CK2 (sterile water containing 100  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl after 20 h soaked in sterile water). At the same time, these phosphate-solubilizing strains significantly enhanced the growth and development of *B.napus* plants, particularly notable effects from P3 and P5. The plants treated with strain P3 had the greatest fresh weight at 28.48 g, a significant increase of 120.85% compared to CK; strain P5 exhibited the most pronounced effect on plant height (104.21 mm) and root length (64.89 mm), up by 42.42% and 80.67%. 【Conclusion】The 6 phosphate-solubilizing strains obtained from Qaidam Basin exhibited excellent salt tolerance and growth-promoting characteristics; they enhanced the germination and growth of *B.napus* under salt stress conditions, indicating high potential for the abatement of soil salinization in arid regions, particularly strains P3 and P5 with the most prominent effects.

**Key words:** Qaidam Basin; salinization; species identification; phosphate-solubilizing bacteria; growth-promoting ability

土壤盐碱化是指自然因素或人为活动影响,导致土壤质量下降或退化的过程。盐碱土存在多种缺陷,常引起农作物生长不良。目前,全球约有 $9.12 \times 10^9 \text{ hm}^2$ 土地受盐渍化影响<sup>[1]</sup>,且该趋势仍在加剧。因此,盐碱化已成为全球关注的重大土壤环境问题之一。柴达木盆地位于青海省西北部,地处阿尔金山脉以南、昆仑山脉以北,东北有祁连山脉,地理坐标为 $90^{\circ}07'E-99^{\circ}20'E, 35^{\circ}13'N-39^{\circ}18'N$ ,平均海拔约 3 000 m,是我国海拔最高的内陆盆地<sup>[2]</sup>。盐碱胁迫不仅严重影响植物的生长发育和农作物产量<sup>[3]</sup>,还会对植物的代谢过程产生不利影响<sup>[4-5]</sup>。盐碱地作为独特的自然生态系统,具有特殊的土壤微生物群落<sup>[6]</sup>。根际细菌是根际微生态系统的重要组成部分,主要分布于植物根际土壤或根系周围,能在竞争性微生物存在的条件下于根系各生态位中繁殖和定殖<sup>[7]</sup>。这些细菌可通过调节自身生理代谢应对干旱、低温、病原菌侵染等生物与非生物胁迫<sup>[8]</sup>,并通过溶解磷酸盐、固氮等机制与植物建立互利共生关系,从而提高植物养分吸收和逆境抵抗力,在改良盐碱土壤方面具有重要潜力。已有研究表明,解磷菌在促进植物生长发育方面作用显著<sup>[9-11]</sup>。例如,曹熙等<sup>[12]</sup>从盐碱化农作物中分离到一株高效解磷菌,能有效提升土壤肥力。杜艺等<sup>[13]</sup>从荒漠植物根际筛选出 10 株解磷菌株,可显著促进柠条幼苗生长,其中 IP6 菌株处理后柠条鲜质量提高 30.68%。车欣宇等<sup>[14]</sup>从 3 株解磷菌中发现,黑曲霉 JP01 解磷能力突出,能增加玉米幼苗株高、茎粗、地下部干质

量,并提升植株全磷含量。李秀彤等<sup>[15]</sup>从茅台酒厂种植地土壤中筛选出 2 株解磷菌,这些菌株在酒糟中生长能力强,为其在酒糟制备生物有机肥以及溶解土壤中难溶性磷酸钙方面的应用提供参考<sup>[16]</sup>。近年来研究进一步证实,来源于植物根际的解磷菌株可在提高种子发芽率、促进幼苗生长、增加产量和改善土壤特性等方面发挥重要作用<sup>[17]</sup>。

本研究以柴达木盆地盐生植物根际土壤为材料,分离获得耐盐且具有解磷功能的促生菌株,分析其促生特性与系统发育地位,并在盐胁迫条件下开展种子发芽及植株生长试验,评估其对植物生长的影响,旨在为利用微生物修复和改良干旱地区盐碱化土壤提供潜在的优良菌种资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验方法

1.1.1 土样采集 于 2023 年 7 月 15 日,在青海省海西蒙古族藏族自治州格尔木市( $94^{\circ}57'42''E, 36^{\circ}31'2''N$ ,海拔 2 736.03 m)采用“S”形采样法采集生长于盐碱地的耐盐碱植物。以植株地面主茎为中心,半径 20 cm 范围内清除表层盐碱结晶和上层覆土后,整体挖取植物地下部分,并取距地面 5~20 cm 的根际土壤。共采集黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、芦苇(*Phragmites australis* Cav.)、怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)根际土壤样品 30 份,经标准检验筛过筛后混合,制成混合土样。处理后的土样置于 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱保存,以备后续促生菌筛选研究使用。供试土壤为黏质土,其理化性质如下:电导率(EC,水土体

积比5:1)为7.70 mS·cm<sup>-1</sup>;pH值(水土体积比2.5:1.0)为8.84;土壤养分质量分数分别为全氮0.554 g·kg<sup>-1</sup>、全钾17.925 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮11.68 mg·kg<sup>-1</sup>、全磷0.536 g·kg<sup>-1</sup>、速效钾859.87 mg·kg<sup>-1</sup>、有机质5.128 g·kg<sup>-1</sup>、有机磷2.576 mg·kg<sup>-1</sup>。

1.1.2 菌株的分离和筛选 在无菌条件下,称取10 g土样加入适量生理盐水中,于30℃、170 r·min<sup>-1</sup>的摇床上振荡培养30 min。将菌悬液进行10倍系列梯度稀释后,取适量稀释液涂布于含100 g·L<sup>-1</sup> NaCl的LB固体培养基上,每个稀释度设3次平行重复。

1.1.3 菌株的纯化 在含100 g·L<sup>-1</sup> NaCl的LB固体培养基平板上,挑选具有透明圈或浑浊圈且菌落形态凸起较高的单菌落进行分离。采用平板划线法,将其接种于普通肉汤固体培养基上进行纯化培养。

1.1.4 菌株的形态鉴定 采用革兰氏染色法观察菌株形态。取洁净载玻片,于中央滴加1滴蒸馏水,用接种环从划线平板上挑取单一菌落,轻轻涂抹成直径约1 cm的涂片。按照革兰氏染色试剂盒说明进行操作:结晶紫初染1 min后水洗;滴加碘液媒染1 min后水洗;用无水乙醇脱色30 s后水洗;以番红复染1 min后水洗。自然晾干后,在光学显微镜油镜下观察菌体形态、菌落特征及分布情况,并记录革兰氏染色反应结果。

1.1.5 菌株的生理生化鉴定 参考文献[18]的方法对分离菌株的生理生化特征进行测定,参照生化管说明书判定结果并记录。

1.1.6 菌株的分子鉴定 采用引物27F(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3')和1492R(5'-GGT-TACCTTGTACGACTT-3')扩增菌株的16S rDNA基因,预期产物长度约为1 500 bp。扩增产物经测序后,将所得序列通过BLAST分析检索,与已报道的16S rDNA序列进行同源性比对。根据比对结果,利用MEGA 11.0软件构建系统发育树,以确定菌株的物种归属及其亲缘关系。

1.1.7 菌株解磷能力的测定 定性测定:采用打孔法分别在卵黄固体培养基和无机磷培养基上,用无菌打孔器打3个孔,每孔加入30 μL菌液,于30℃倒置培养5 d。在培养第3天和第5天,分别测量菌落周围浑浊圈或透明圈的直径。培养基参照文献[19]的配方配制。定量测定:绘制磷标准工作曲线,参照

钼锑抗比色法<sup>[20]</sup>测定培养液中可溶性磷含量。

1.1.8 种子发芽能力的测定 将菌株悬液调节至 $D_{600\text{ nm}}=1$ 后,稀释100倍作为供试菌剂备用。供试油菜品种为‘青蔬919’(青海互丰农业科技集团有限公司)。先将种子用无菌水充分浸泡,并挑选大小一致、饱满的种粒。按以下步骤进行表面消毒:用KMnO<sub>4</sub>(4 g·L<sup>-1</sup>)浸泡8 min,无菌水冲洗5次;再用HgCl<sub>2</sub>(1 g·L<sup>-1</sup>)浸泡45 s,随后用无菌水冲洗3次。处理后的种子于菌液中浸泡20 h,随后置于铺有湿润无菌滤纸的培养皿内,每日喷淋含100 g·L<sup>-1</sup> NaCl的无菌水以形成盐胁迫条件。设置两组对照:CK1为无菌水浸泡20 h后喷淋无菌水;CK2为无菌水浸泡20 h后喷淋含100 g·L<sup>-1</sup> NaCl的无菌水。每个培养皿放置50粒种子,在28℃条件下培养5 d,并分别于培养第3天和第5天测定发芽率。

1.1.9 植物生长能力的测定 选取长势一致的油菜幼苗20株,转接至1/2 MS固体培养基中,置于人工气候箱内培养。培养条件为:温度25℃,每天光照时间16 h,黑暗时间8 h。连续培养7 d后,观察并记录植株的生长状态,同时测定其鲜质量、根长和株高等生长指标。

## 1.2 数据处理

运用Excel 2016软件进行数据处理及作图,用SPSS 25.0软件对数据进行单因素方差分析,其中, $P<0.05$ 代表存在显著差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 解磷菌菌株形态学鉴定

经纯化培养,在含100 g·L<sup>-1</sup> NaCl的LB固体培养基上共获得28株菌株。其中,6株表现出较强的有机磷和无机磷溶解能力,分别命名为P1、P2、P3、P4、P5和P6。P1:菌落淡黄色,圆形,直径1~3 mm,边缘光滑,中部稍凸起,不透明,革兰氏染色阴性,菌体呈杆状;P2:菌落淡黄色,圆形,直径0.5~2.0 mm,边缘光滑,平坦,不透明,革兰氏染色呈阴性,菌体呈杆状;P3:菌落淡黄色,圆形,直径0.5~2.0 mm,边缘光滑,平坦,不透明,革兰氏染色呈阴性,菌体呈球状;P4:菌落淡黄色,圆形,直径2~4 mm,边缘光滑,中部凸起,不透明,革兰氏染色呈阳性,菌体呈球状;P5:菌落淡黄色,圆形,直径2~4 mm,边缘光滑,中部凸起,不透明,菌落表面具黏性,革兰氏染色呈

阴性,菌体呈球状;P6:菌落淡黄色,圆形,直径 0.5~2.0 mm,边缘光滑,平坦,不透明,革兰氏染色呈阳性,菌体呈球状。图 1 展示了各菌株的菌落形态,图 2 为其革兰氏染色显微镜观察结果。

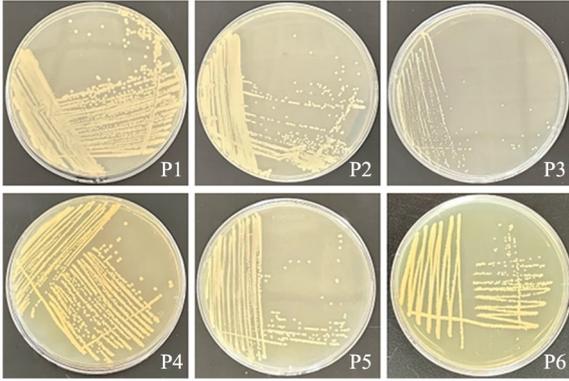


图 1 解磷菌菌株的菌落形态

Fig.1 Colony morphology of phosphate-solubilizing strains

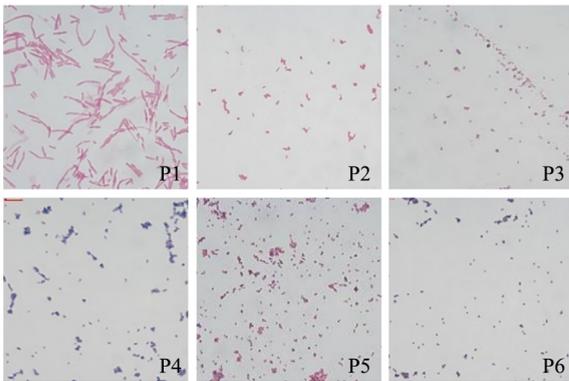


图 2 解磷菌菌株的革兰氏染色(100×)

Fig.2 Gram staining of phosphate-solubilizing strains (100×)

## 2.2 解磷菌菌株生理生化鉴定

对 6 株菌株进行生理生化特性测定(表 1)。测定结果表明,L-精氨酸双水解酶与赖氨酸试验:P1、P2 呈阳性,P3、P4、P5、P6 呈阴性。葡萄糖试验:P5、P6 呈阳性,P1、P2、P3、P4 呈阴性。L-阿拉伯糖试验:仅 P1 呈阳性,其余呈阴性。木糖试验:仅 P6 呈阳性,其余呈阴性。尿素酶试验:除 P2 呈阴性外,其余菌株均呈阳性。改良 V-P 试验:P3、P5 呈阳性,P1、P2、P4、P6 呈阴性。30 g·L<sup>-1</sup>过氧化氢、淀粉水解、硫化氢、苯丙氨酸试验:6 株菌株均呈阴性。70 g·L<sup>-1</sup>氯化钠试验:6 株菌株均呈阳性。葡萄糖代谢类型:均为发酵型细菌。

## 2.3 解磷菌菌株分子生物学鉴定

对提取的 6 株菌株 16S rDNA 进行 PCR 扩增,获得的条带大小约为 1 500 bp,与预期片段一致。测

序结果显示,P1、P2、P3、P4、P5、P6 的序列长度分别为 1 454、1 450、1 477、1 482、1 480、1 482 bp。将 6 株菌株序列提交至 BLAST 进行同源性比对,并上传至 NCBI GenBank 数据库,获得登录号分别为:P1 (PQ285360)、P2 (PQ285367)、P3 (PQ285375)、P4 (PQ285380)、P5 (PQ285379)、P6 (PQ285388)。基于同源性比对结果,利用 MEGA 11.0 软件构建系统发育树(图 3)。结果表明:P1 与参考菌株肇东氏弗里兰德菌(*Vreelandella zhaodongensis*) MK418354.1、MK070081.1 同源性均为 99.71%,且聚为同一分支;结合生理生化特征,将 P1 鉴定为肇东氏弗里兰德菌。P2 与参考菌株耐盐刘志恒菌(*Zhihengliuella halotolerans*) KX389574.1、PP758181.1 同源性分别为 99.79%、99.86%,且聚为同一分支;结合生理生化特征,将 P2 鉴定为耐盐刘志恒菌。P3、P5 与参考菌株表皮葡萄球菌(*Staphylococcus epidermidis*) KY818945.1、MZ749719.1、OK393658.1 共同聚为一支;结合生理生化特征,将 P3、P5 鉴定为表皮葡萄球菌。P4、P6 与参考菌株腐生葡萄球菌(*Staphylococcus saprophyticus*) KT260360.1、MW228159.1、MN173448.1 共同聚为一支;结合生理生化特征,将 P4、P6 鉴定为腐生葡萄球菌。

## 2.4 解磷菌菌株解磷能力测定

2.4.1 定性分析 在卵黄琼脂培养基上培养 3 d 后,6 株菌株形成的浑浊圈直径为 4.27~13.20 mm,大小顺序为 P3>P2>P5>P4>P1>P6(表 2)。其中,P3 的浑浊圈直径最大,显著高于除 P2 外的其余菌株。培养 5 d 后,浑浊圈直径增至 6.70~14.81 mm,P3 依旧最大(14.71 mm),显著高于除 P2 外的其余菌株。在无机磷培养基上培养 3 d 后,各菌株形成的透明圈直径为 5.63~9.06 mm,依次为 P5>P4>P3>P6>P1>P2;P5 最大,较 P2 高 61%,差异显著。培养第 5 天时,透明圈直径增加至 5.95~11.96 mm,P5 最大(11.96 mm),P4 次之(11.12 mm)。

2.4.2 定量分析 由表 3 可知,在有机磷培养基中,6 株解磷菌的解有机磷量为 2.81~3.61 μg·mL<sup>-1</sup>,其中 P1 的解有机磷能力最高,其次为 P3。在无机磷培养基中,6 株菌的解无机磷量为 4.05~12.04 μg·mL<sup>-1</sup>,P3 的解无机磷能力显著高于其他菌株,P6 次之。

表1 6株解磷菌菌株生理生化鉴定结果<sup>1)</sup>

Table 1 Physiological and biochemical identification of 6 phosphate-solubilizing strains

生理生化试验 Physiological and biochemical test	鉴定结果 Identification result					
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
L-精氨酸双水解酶 L-arginine dihydrolase	+	+	-	-	-	-
赖氨酸 Lysine	+	+	-	-	-	-
3%过氧化氢 3% hydrogen peroxide	-	-	-	-	-	-
葡萄糖 Glucose	-	-	-	-	+	+
L-阿拉伯糖 L-arabinose	+	-	-	-	-	-
木糖 Xylose	-	-	-	-	-	+
淀粉水解 Starch hydrolysis	-	-	-	-	-	-
7%氯化钠 7% Sodium chloride	+	+	+	+	+	+
硫化氢 Hydrogen sulfide	-	-	-	-	-	-
尿素酶 Urease	+	-	+	+	+	+
苯丙氨酸 Phenylalanine	-	-	-	-	-	-
改良 V-P Modified Voges-Proskauer	-	-	+	-	+	-
葡萄糖 OF Glucose OF	发酵 Fermentative	发酵 Fermentative	发酵 Fermentative	发酵 Fermentative	发酵 Fermentative	发酵 Fermentative

<sup>1)</sup> “+”表示阳性,“-”表示阴性。

"+" indicates positive, and "-" indicates negative.

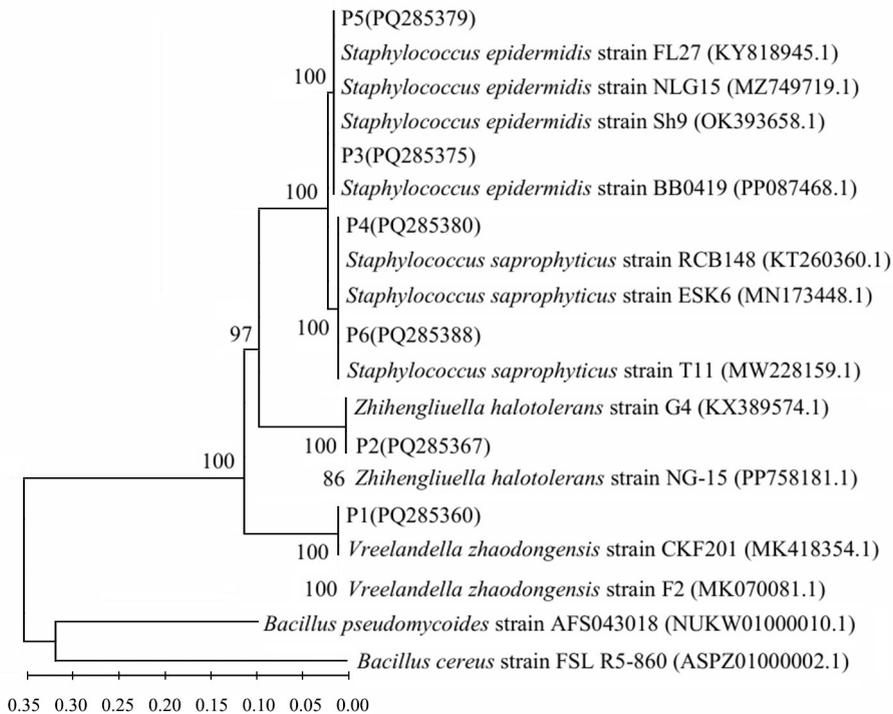


图3 解磷菌菌株的系统发育树

Fig.3 Phylogenetic tree of phosphate-solubilizing strains

2.5 解磷菌菌株在盐胁迫下对油菜种子发芽率的影响

6株解磷菌处理均显著提高了油菜种子的发芽率(图4)。喷施 100 g · L<sup>-1</sup> NaCl 产生盐胁迫后,油菜发芽率明显下降。培养 3 d 时,对照组 CK1 的发芽率为 52.00%,解磷菌处理组为 53.00% ~ 66.00%,

较 CK1 提高 1.00% ~ 14.00%; CK2 的发芽率为 39.30%,处理组为 42.00% ~ 61.33%,较 CK2 提高 2.70% ~ 22.03%。培养 5 d 时,CK1 的发芽率为 65.33%,处理组为 70.67% ~ 90.67%,较 CK1 提高 5.34% ~ 29.34%;CK2 的发芽率为 44.67%,处理组为 47.33% ~ 74.67%,较 CK2 提高 2.66% ~ 30.00%。

表 2 解磷菌解磷能力的定性测定结果<sup>1)</sup>

Table 2 Qualitative determination of phosphate solubilization capacity of phosphate-solubilizing strains

菌株 Strain	浑浊圈直径/mm Diameter of turbid zone		透明圈直径/mm Diameter of transparent zone	
	卵黄琼脂培养基 3 d Cultivation in egg yolk agar medium for 3 d	卵黄琼脂培养基 5 d Cultivation in egg yolk agar medium for 5 d	无机磷固体培养基 3 d Cultivation in inorganic phosphate solid medium for 3 d	无机磷固体培养基 5 d Cultivation in inorganic phosphate solid medium for 5 d
P1	8.23±0.52cd	8.67±0.48bc	7.00±1.10ab	8.02±0.76bc
P2	12.71±4.48c	14.71±3.94a	5.63±0.89b	5.95±1.29c
P3	13.20±1.54c	14.81±3.47a	8.50±0.88a	9.71±1.06ab
P4	8.57±1.06cd	11.17±1.64ab	8.88±0.68a	11.12±0.56a
P5	9.30±0.81cd	10.83±1.42abc	9.06±1.45a	11.96±1.12a
P6	4.27±0.55d	6.70±0.27c	7.90±2.31ab	8.17±2.12bc

<sup>1)</sup> 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at a significance level of 0.05.

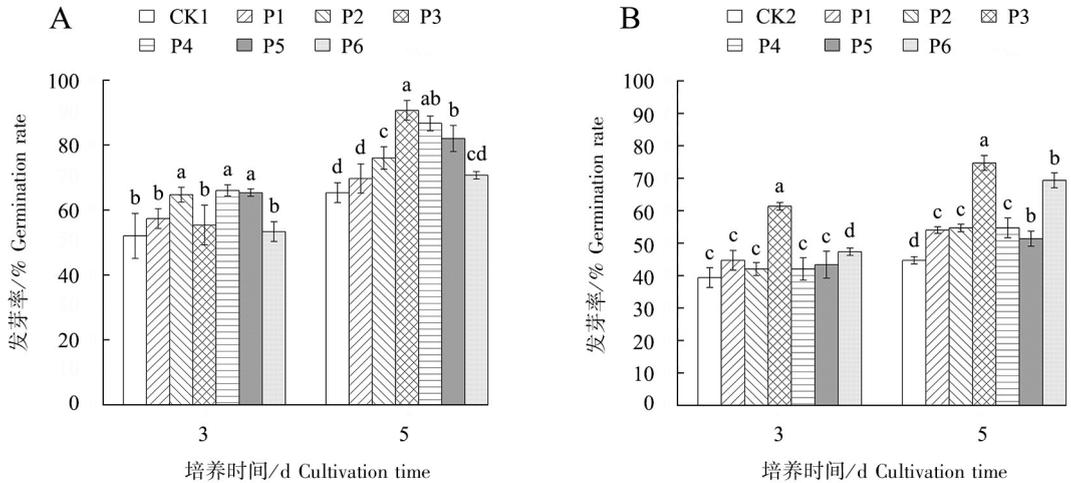
表 3 解磷菌解磷能力的定量测定结果<sup>1)</sup>

Table 3 Quantitative determination of phosphate solubilization capacity of phosphate-solubilizing strains

菌株 Strain	解磷量/( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) Content of phosphate solubilized	
	有机磷培养基 Organic phosphate medium	无机磷培养基 Inorganic phosphate medium
P1	3.61±0.86a	4.61±0.51d
P2	3.18±0.30ac	4.05±0.41d
P3	3.53±0.21a	12.04±0.13a
P4	3.51±0.25a	6.88±0.30c
P5	2.81±0.25b	7.09±0.53c
P6	2.85±0.20b	7.90±0.58b

<sup>1)</sup> 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at a significance level of 0.05.



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ); A. 不胁迫; B. 盐胁迫。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ); A. Control; B. Salt stress.

图 4 解磷菌菌株在盐胁迫下对油菜发芽率的影响

Fig.4 Effect of phosphate-solubilizing strains on *B.napus* germination rate under salt stress

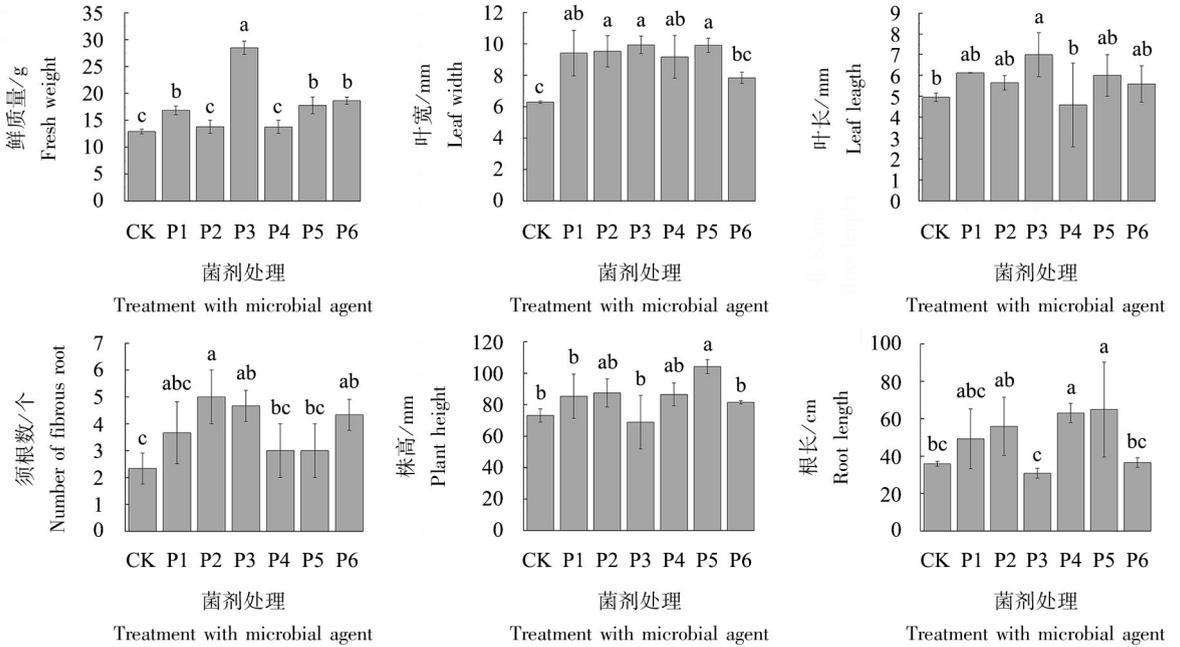
不同解磷菌处理均提高了油菜种子在 CK1 条件下的发芽率,并在盐胁迫条件下(CK2)表现出不同程度的抗盐促进作用。培养 5 d 后,无论是在无盐胁迫还是盐胁迫条件下,P3 处理的促进效果均最为显著,其发芽率分别达到 90.67% 和 74.67%,分别较 CK1 和 CK2 提高了 29.34% 和 30.00%。

## 2.6 解磷菌菌株在盐胁迫下对油菜幼苗生长发育的影响

图 5 显示,施用解磷菌菌剂显著促进了油菜的生长发育,其鲜质量、株高、根长、须根数、叶长和叶宽均较对照组显著提高。在鲜质量方面,菌剂处理的增幅范围为 6.67% ~ 120.85%。其中,P3 处理效果

最为显著,较对照提高 120.85%,P6 次之,提高 44.57%。在株高与根长方面,P5 处理效果最佳,株高为 104.21 mm(较 CK 提高 42.42%),根长为 64.89 mm(提高 80.67%);菌株处理总体株高增幅为 11.41%~80.67%,根长增幅为 1.81%~42.42%,其中 P3 对株高和根长无显著促进作用。在须根数方面,菌剂处理整体增幅为 28.76%~114.60%,其中 P2 效果最佳(增加 114.60%),P3 次之(增加 100.43%)。

在叶长与叶宽方面,增幅范围分别为 12.95%~41.26%和 24.68%~58.17%。P3 处理效果最为显著,叶长 6.98 mm(提高 41.26%),叶宽 9.93 mm(提高 58.17%);P4 对叶长促进作用不显著。综上,施用解磷菌菌剂可显著促进油菜生长,其中 P3 对鲜质量、叶长和叶宽的促进效果最优,P5 对株高和根长促进效果最优,P2 在须根数增加方面效果最显著。



不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

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

图5 不同解磷菌菌液处理对油菜生长发育的影响

Fig.5 Effect of different phosphate-solubilizing strains on the growth and development of *B.napus*

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

土壤盐碱化是目前植物生长面临的严峻威胁之一,植被破坏、过度施用化肥等问题加快了土壤的盐碱化。目前,盐碱地治理的主要策略包括物理改良、化学改良和生物改良。其中,生物改良是指通过施用微生物菌剂、引种或栽培耐盐碱植物等措施改善盐碱地土壤环境<sup>[20]</sup>。根际微生物研究的核心目标在于揭示其群落组成、多样性、动态变化及功能活性<sup>[21]</sup>。已有研究表明,根际微生物的引入或调控可显著改变土壤结构与根际分泌物组成,从而在定性与定量层面重塑根际微生物群落结构<sup>[22-23]</sup>,并减少化肥及农药的外源投入。根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria,PGPR)通过特有的磷酸盐溶解、固氮等代谢活动<sup>[24]</sup>,能够直接促进植物的新陈代

谢,增强其对水分和矿物质养分的吸收能力,促进根系发育和相关酶活性。同时,PGPR 还可通过刺激有益微生物或抑制病原微生物的方式,间接提升植物健康水平,并在盐碱胁迫条件下降低不利环境因素的影响。磷是植物生长发育所必需的常量营养元素之一。尽管土壤中磷的总储量丰富,但大部分以难溶性磷酸盐的形式存在,无法被植物直接利用。解磷菌能够将难溶性磷酸盐转化为可溶性磷,从而显著提升植物的磷利用效率。因此,解磷菌被认为是研制磷酸盐生物肥料、提高作物产量和土壤肥力的理想微生物资源之一<sup>[25]</sup>。

本研究从柴达木盆地盐生植物根际土壤中分离获得 28 株耐受  $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$  的菌株,其中 6 株表现出显著的解磷能力。这表明盐生植物根际土壤中蕴藏着丰富的耐盐促生菌资源,与已有研究的相关

结论<sup>[26-27]</sup>一致。经系统鉴定,P1 为肇东氏弗里兰德菌,P2 为耐盐刘志恒菌,P3 与 P5 为表皮葡萄球菌,P4 与 P6 为腐生葡萄球菌。已有研究表明,肇东氏弗里兰德菌、耐盐刘志恒菌及表皮葡萄球菌在盐碱条件下能够保持较好的生长能力,但关于其解磷能力的报道相对有限,腐生葡萄球菌的研究多集中于其病原性方面,鲜有涉及其解磷功能<sup>[28]</sup>。在本研究中,P3 与 P5 在植物促生方面表现最为突出,进一步验证了葡萄球菌在提升植物抗逆性和促进生长发育方面的潜在应用价值;而 P2(耐盐刘志恒菌)的促生能力相对较弱。定性分析结果显示,6 株解磷菌在卵黄琼脂和无机磷培养基上培养 5 d,其解磷效果存在显著差异。浑浊圈直径范围为 6.70~14.81 mm,透明圈直径范围为 5.95~11.96 mm。其中,P3 解有机磷能力最强(浑浊圈直径 14.81 mm),P5 解无机磷能力最强(透明圈直径 11.96 mm)。这一结果与先前研究<sup>[29-30]</sup>一致,证明同种解磷菌在解磷活性方面存在明显的菌株间差异,这可能与其基因组差异及代谢途径的不同有关,反映出盐生植物根际解磷菌群体在功能上的高度多样性。张晶晶等<sup>[31]</sup>从核桃根际土壤中分离到 14 株解磷菌,其解有机磷浑浊圈直径为 3.91~11.83 mm,解无机磷透明圈直径为 2.15~6.17 mm。本研究中 P3 与 P5 的圈径(14.81 mm 与 11.96 mm)均高于前述结果,可能是由于本研究菌株来源于盐碱地,盐碱环境中高浓度钠、钙离子更易与磷结合形成难溶性化合物,从而为解磷菌提供了更多的底物资源。此外,本研究中 6 株解磷菌的解无机磷量为 4.05~12.04  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,较高佩等<sup>[32]</sup>采用相同测定方法得到的 5.29~8.49  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$  偏高,这进一步表明盐碱地来源解磷菌菌株在解无机磷能力上具有较大的潜力。

种子萌发阶段是植物整个生长周期的关键时期,其顺利与否直接决定了后续的生长发育潜力。盐分过度累积会抑制种子吸水,导致激素代谢紊乱、酶活性下降,进而影响呼吸作用,阻碍种子萌发<sup>[33]</sup>。本研究发现,在盐胁迫条件下,P3 处理对油菜种子发芽的促进作用最为显著,发芽率较 CK2 提高了 30%,这一结果与郭彦钊等<sup>[34]</sup>关于耐盐促生菌处理能够缓解盐胁迫并促进种子萌发的研究结论一致。在植物生长促进方面,本研究结果显示,施用解磷菌剂不仅能够提高种子发芽率,还可显著促进油菜

幼苗的生长发育,包括鲜质量、株高、根长、须根数及叶片性状的显著改善。该结果进一步验证了解磷菌在提升植物生长和抗逆性方面的重要作用,并为农业生产中利用解磷菌提高作物产量和品质提供了可靠的科学依据。

总体来看,本研究不仅加深了对解磷菌功能多样性及其促生机理的理解,还展示了其在推动农业可持续发展中的巨大潜力。研究成果对于减少化肥依赖、提升作物产量、改善盐渍化土壤质量具有重要意义,同时为干旱盐碱地区的微生物改良提供了优质的菌种资源。

### 3.2 结论

本研究从柴达木盆地耐盐植物根际土壤中筛选获得 6 株具有显著解磷能力的耐盐菌株(P1、P2、P3、P4、P5、P6)。(1)6 株菌株均具有较高的有机磷和无机磷溶解能力,表现出良好的耐盐性。(2)施用解磷菌菌剂均能促进油菜种子萌发,提高发芽率,并显著促进幼苗的生长发育。其中,P3 处理对油菜鲜质量、叶长和叶宽的促进效果最为显著;P5 处理在株高和根长的促进作用方面最为突出。(3)生理生化和 16S rDNA 序列鉴定结果表明:P1 为肇东氏弗里兰德菌,P2 为耐盐刘志恒菌,P3 和 P5 为表皮葡萄球菌,P4 和 P6 为腐生葡萄球菌。

### 参考文献(References)

- [1] 单永晖,马斌,周志宇,等.我国草地植物根际研究展望[J].甘肃科技,2007,23(11):234-239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2007.11.098.  
SHAN Y H, MA B, ZHOU Z Y, et al. Prospect of grassland plant rhizosphere research in China[J]. Gansu Science and Technology, 2007,23(11):234-239. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0952.2007.11.098.
- [2] 张殿发,王世杰.吉林西部土地盐碱化的生态地质环境研究[J].土壤通报,2002,33(2):90-93. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2002.02.003.  
ZHANG D F, WANG S J. Study on the eco-geo-environment of land salinization in west Jilin Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002,33(2):90-93. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2002.02.003.
- [3] 冒海霞.土地盐碱化及其治理措施[J].农业科技与信息,2018(6):56-57. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2018.06.023.  
MAO H X. Land salinization and its control measures[J].

- Agricultural Science-Technology and Information, 2018 (6):56-57. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2018.06.023.
- [4] 张嘉琪,任志远.1977—2010年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J].资源科学,2014,36(10):2103-2112.  
ZHANG J Q, REN Z Y. Analysis on surface spatiotemporal variation tendency of potential evapotranspiration in Qaidam basin[J]. Resources Science, 2014,36(10):2103-2112.
- [5] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008,59:651-681. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.
- [6] QADIR M, OSTER J D, SCHUBERT S, et al. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils[J]. Advances in Agronomy, 2007,96:197-247. DOI: 10.1016/S0065-2113(07)96006-X.
- [7] MULETA D, ASSEFA F, GRANHALL U. *In vitro* antagonism of rhizobacteria isolated from *Coffea arabica* L. against emerging fungal coffee pathogens[J]. Engineering in Life Sciences, 2007,7(6):577-586. DOI: 10.1002/elsc.200700004.
- [8] FARINA R, BENEDUZI A, AMBROSINI A, et al. Diversity of plant growth-promoting rhizobacteria communities associated with the stages of canola growth[J]. Applied Soil Ecology, 2012,55:44-52. DOI: 10.1016/j.apsoil.2011.12.011.
- [9] 李青青,张芮,高彦婷,等.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. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.240190.  
LI Q Q, ZHANG R, GAO Y T, et al. Phosphorus solubilization effect of saline-tolerant phosphorus-solubilizing bacteria and its effect on soybean germination[J]. Microbiology China, 2024,51(11):4574-4589. DOI: 10.13344/j.microbiol.china.240190.
- [10] 张晗昱,李丹丹,郑瑾,等.青藏高原多年冻土区解磷菌筛选及抗逆能力评价[J].微生物学报,2024,64(6):1876-1890. DOI: 10.13343/j.cnki.wsb.20230677.  
ZHANG H Y, LI D D, ZHENG J, et al. Screening of phosphorus-solubilizing strains with stress tolerance in the permafrost region of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024,64(6):1876-1890. DOI: 10.13343/j.cnki.wsb.20230677.
- [11] 谢宇星,郭祁,毕欢博,等.火龙果根际高效解磷菌的筛选[J].中南农业科技,2024,45(4):27-30. DOI: 10.3969/j.issn.1007-273X.2024.04.007.  
XIE Y X, GUO Q, BI H B, et al. Screening of phosphate-solubilizing bacteria in the rhizosphere of pitaya [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2024,45(4):27-30. DOI: 10.3969/j.issn.1007-273X.2024.04.007.
- [12] 曹熙,王恩彪,赵欢,等.高效解磷菌的筛选及其对玉米促生作用的研究[J].工业微生物,2024,54(2):7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6678.2024.02.003.  
CAO X, WANG E B, ZHAO H, et al. Research on the screening of efficient phosphate-solubilizing bacteria and its promoting effect on maize growth[J]. Industrial Microbiology, 2024,54(2):7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6678.2024.02.003.
- [13] 杜艺,周波,袁娜娜,等.荒漠植物根际解磷细菌的筛选及抑菌和促生特性研究[J].农业科学研究,2024,45(1):20-25. DOI: 10.13907/j.cnki.nykxyj.2024.01.012.  
DU Y, ZHOU B, YUAN N N, et al. Screening of phosphate-solubilizing bacteria in rhizosphere of desert plants and their antibacterial and growth-promoting effects[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2024,45(1):20-25. DOI: 10.13907/j.cnki.nykxyj.2024.01.012.
- [14] 车欣宇,彭启超,张志鹏,等.一株根际解磷菌的筛选鉴定及促生作用研究[J].中国土壤与肥料,2024(1):218-225. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.23002.  
CHE X Y, PENG Q C, ZHANG Z P, et al. Screening and identification of a rhizosphere phosphate-solubilizing bacteria and its growth-promoting effect[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(1):218-225. DOI: 10.11838/sfsc.1673-6257.23002.
- [15] 李秀彤,张迪,赵福培,等.两株高效解磷菌的筛选及解磷性能分析[J].微生物学杂志,2024,44(3):60-69. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7021.2024.03.007.  
LI X T, ZHANG D, ZHAO F P, et al. Screening and analysis of two strains of high efficiency phosphor-soluble bacteria[J]. Journal of Microbiology, 2024,44(3):60-69. DOI: 10.3969/j.issn.1005-7021.2024.03.007.
- [16] 王继莲,王冬玲,周茜,等.盐碱地旱生芦苇根际解磷菌株筛选及促生特性[J].江苏农业学报,2024,40(1):64-74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.01.007.  
WANG J L, WANG D L, ZHOU Q, et al. Screening and growth-promoting characteristics of phosphorus-solubilizing strains from the rhizosphere of *Phragmites australis* in saline-alkali soil[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2024,40(1):64-74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.01.007.

- [17] 许立阳,王亚男,曾希柏,等.微生物菌肥对瘠薄稻田土壤养分及水稻生长的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(10):2350-2362. DOI: 10.11654/jaes.2024-0043.
- XU L Y, WANG Y N, ZENG X B, et al. Microbial fertilizer effects on soil nutrients and rice growth in barren paddy fields [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(10): 2350-2362. DOI: 10.11654/jaes.2024-0043.
- [18] 东秀珠,蔡妙英.常见细菌系统鉴定手册[M].北京:科学出版社,2001.
- DONG X Z, CAI M Y. Manual of systematic identification of common bacteria [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [19] 高佩,王彬贤,郭思雨,等.青海野生中国沙棘根际解钾菌的分离、鉴定及其促生能力比较[J].福建农林大学学报(自然科学版),2024,53(3):401-409. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202307028.
- GAO P, WANG B X, GUO S Y, et al. Isolation, identification and comparison on growth-promoting ability of potassium-solubilizing bacteria in the rhizosphere of wild *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in Qinghai [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 53(3): 401-409. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).202307028.
- [20] 吴小花.解磷细菌的分离筛选及其对盆栽樟树苗生长的影响分析[D].南昌:江西农业大学,2022. DOI: 10.27177/d.cnki.gjxnu.2022.000366.
- WU X H. Isolation and screening of phosphate-solubilizing bacteria and its effect on growth of potted camphor seedlings [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022. DOI: 10.27177/d.cnki.gjxnu.2022.000366.
- [21] 高倩,卢楠.盐碱地综合治理开发研究现状及展望[J].南方农机,2021,52(16):153-155. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2021.16.051.
- GAO Q, LU N. Current status and prospect of research on comprehensive management and development of saline-alkali land [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(16): 153-155. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3872.2021.16.051.
- [22] JAVID A P, NOWSHEEN S, ELSAYED F A. Core microbiome: improving crop quality and productivity [M]. New York: Wiley, 2022: 118-138. DOI: 10.1002/9781119830795.
- [23] PERSYN A, MÉNDEZ S G, DE MEYER S, et al. Digging into the lettuce cold-specific root microbiome in search of chilling stress tolerance-conferring plant-growth-promoting bacteria [J]. Phytobiomes Journal, 2024, 8(1): 46-58. DOI: 10.1094/pbiomes-07-22-0044-mf.
- [24] ABDELKEFI N, LOUATI I, MECHICHI H Z, et al. Enhanced salt stress tolerance in tomato plants following inoculation with newly isolated plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328: 112921. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.112921.
- [25] KRISHNA SAMAL D P, SUKLA L B. Assessment of potent phosphate-solubilizing bacteria isolated from rice fields in Odisha and unraveling their growth-promoting efficacies [J]. Geomicrobiology Journal, 2024, 41(2): 135-148. DOI: 10.1080/01490451.2023.2293735.
- [26] DE FREITAS J R, BANERJEE M R, GERMIDA J J. Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.) [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(4): 358-364. DOI: 10.1007/s003740050258.
- [27] 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. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.05.009.
- DAI J X, TIAN P Y, SHEN C, et al. Screening of rhizosphere bacteria from salt tolerant plants and their growth promoting effects [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(5): 968-975. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.05.009.
- [28] 王倩,蓝蔚青,侯旻,等.银杏叶提取液对腐生葡萄球菌的作用机理[J].食品与生物技术学报,2018,37(9):971-976. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1689.2018.09.011.
- WANG Q, LAN W Q, HOU M, et al. Antimicrobial mechanism of *Ginkgo biloba* leaf extracts (GBLE) against saprophytic *Staphylococcus* [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(9): 971-976. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1689.2018.09.011.
- [29] 叶维雁,吴海波,刘惠民,等.2株番木瓜根际促生菌的解磷解钾作用[J].江苏农业科学,2017,45(6):247-251. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.064.
- YE W Y, WU H B, LIU H M, et al. Phosphate and potassium solubilization of two strains of *Papaya rhizosphere* growth-promoting bacteria [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 247-251. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.064.
- [30] 何雪香,李玫,廖宝文.红树林固氮菌和解磷菌的分离及对秋茄苗的促生效果[J].华南农业大学学报,2025,33(1):64-68. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.

2012.01.013.

HE X X, LI M, LIAO B W. Isolation of nitrogen-fixing bacteria and phosphate-solubilizing bacteria from the rhizosphere of mangrove plants and their enhancement to the growth of *Kandelia candel* seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 33 ( 1 ): 64 - 68. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2012.01.013.

- [31] 张晶晶,李建贵,郭艺鹏,等.新疆核桃根际土壤中解磷菌的分离筛选及鉴定[J].经济林研究,2015,33(2):57-62. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.02.010.

ZHANG J J, LI J G, GUO Y P, et al. Screening and identification of phosphate-solubilizing bacteria in rhizosphere soil of Xinjiang walnut[J]. Nonwood Forest Research, 2015, 33 ( 2 ): 57 - 62. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2015.02.010.

- [32] 高佩,王彬贤,马亚琼,等.青海野生中国沙棘根际解磷菌的分离、鉴定及其对薤菜的促生作用[J].江苏农业科学,2024,52(11):247-253. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2024.11.032.

GAO P, WANG B X, MA Y Q, et al. Isolation and identification of phosphate-solubilizing bacteria from rhizo-

sphere of wild *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rouxi in Qinghai Province and its effect on growth of water spinach [ J ]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52 ( 11 ): 247 - 253. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2024.11.032.

- [33] HABIB S H, KAUSAR H, SAUD H M. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance salinity stress tolerance in okra through ROS-scavenging enzymes [ J ]. BioMed Research International, 2016, 2016 ( 1 ): 6284547. DOI: 10.1155/2016/6284547.

- [34] 郭彦钊,杜春辉,于烽,等.旱区盐生植物根际促生菌的分离鉴定及其干旱、盐胁迫下促生特性[J].微生物学报,2023,63(2):610-622. DOI: 10.13343/j.cnki.wsx.20220379.

GUO Y Z, DU C H, YU F, et al. Isolation and identification of growth-promoting bacteria in halophyte rhizosphere in arid region and their growth-promoting characteristics under drought and salt stresses [ J ]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63 ( 2 ): 610 - 622. DOI: 10.13343/j.cnki.wsx.20220379.

(责任编辑:吴显达)