

古 鸣,李明源,李云霞,等. 盐碱植物根际溶磷菌的筛选及对玉米生长的影响[J]. 江苏农业学报,2026,42(5):963-972.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.010

盐碱植物根际溶磷菌的筛选及对玉米生长的影响

古 鸣, 李明源, 李云霞, 王继莲

(喀什大学生命与地理科学学院/新疆帕米尔高原生物资源与生态重点实验室,新疆 喀什 844000)

摘要: 为进一步挖掘耐盐促生菌种资源,研制适用于盐碱环境的植物促生菌剂,本研究利用选择性培养基,从新疆维吾尔自治区喀什地区盐碱草地植物根际土壤中分离筛选溶磷菌,通过 *16S rRNA* 基因测序鉴定菌株分类地位,并采用半固体试管苗和盐碱土盆栽试验评估其对植物的促生效应。结果共筛选出 19 株溶磷菌菌株,溶磷量介于 7.67~43.08 $\mu\text{g}/\text{mL}$,菌株 c3-9、f1-8、b1-8、c3-1 溶磷量位列前 4 位,且具有一定耐盐碱胁迫能力。19 株溶磷菌菌株隶属于 6 个菌属,包括肠杆菌属(*Enterobacter*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、金色单胞菌属(*Chryseomonas*)、勒克氏菌属(*Leclercia*)。接种假单胞菌属 f1-8 菌株、不动杆菌属 b1-8 菌株、霍氏肠杆菌属 c3-1 菌株和勒克氏菌属 c3-9 菌株对非盐碱胁迫下玉米试管苗生长有不同程度的促进作用。盐碱土壤盆栽试验结果显示,与对照相比,f1-8 菌株显著提升了玉米株高和地上部鲜重($P<0.05$),c3-9 菌株对玉米根干重有显著促进作用($P<0.05$),f1-8 菌株、c3-1 菌株对玉米总根体积的影响达显著水平($P<0.05$),f1-8 菌株、b1-8 菌株、c3-9 菌株对玉米总根长的影响达显著水平($P<0.05$)。此外,盆栽土壤理化性质检测结果显示,接种溶磷菌后土壤速效磷含量增加了 16.03%~66.79%。对玉米生长指标和土壤速效磷含量的主成分分析结果表明,c3-9 处理的综合效果最佳。该研究结果扩充了盐碱地溶磷菌种资源库,为开发盐碱地改良微生物肥料提供了理论基础。

关键词: 盐碱地; 溶磷菌; 促进生长; 玉米

中图分类号: S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)05-0963-10

Screening of phosphorus-solubilizing bacteria in the rhizosphere of saline-alkali plants and their effects on maize growth

GU Ming, LI Mingyuan, LI Yunxia, WANG Jilian

(1.The College of Life and Geographic Sciences, Kashi University/Key Laboratory of Biological Resources and Ecology of Pamirs Plateau in Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi 844000, China)

Abstract: To further explore salt-tolerant and growth-promoting microbial resources and develop plant growth-promoting bacterial inoculants suitable for saline-alkali environments, this study employed selective media to isolate and screen phosphate-solubilizing bacteria from the rhizosphere soil of plants growing in saline-alkali grasslands in Kashi, Xinjiang. The taxonomic status of the strains was identified through *16S rRNA* gene sequencing, and their growth-promoting

收稿日期:2025-05-22

基金项目:喀什地区科技计划项目(KS2024001);国家自然科学基金项目(32160408)

作者简介:古 鸣(1999-),女,山东日照人,硕士研究生,主要从事资源微生物筛选及植物促生研究。(E-mail)17863325627@163.com

通讯作者:王继莲,(E-mail)wjilian0710@sina.com

effects on plants were evaluated using semi-solid tube plantlets and pot experiments with saline-alkali soil. A total of 19 phosphate-solubilizing bacterial strains were screened, with the amounts of solubilized phosphorus ranging from 7.67 $\mu\text{g}/\text{mL}$ to 43.08 $\mu\text{g}/\text{mL}$. The strains c3-9, f1-8, b1-8 and c3-1 ranked among the top four in terms of phosphate-solubilizing amounts and exhibited a

certain tolerance to saline-alkali stress. The 19 phosphate-solubilizing bacterial strains belonged to six genera, including *Enterobacter*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Chryseomonas*, and *Leclercia*. Inoculation with *Pseudomonas* strain f1-8, *Acinetobacter* strain b1-8, *Enterobacter hormaechei* strain c3-1, and *Leclercia* strain c3-9 all promoted the growth of maize plantlets under non-saline-alkali stress to varying degrees. Pot experiments with saline-alkali soil showed that, compared with the control, strain f1-8 significantly increased maize plant height and above-ground fresh weight ($P < 0.05$); strain c3-9 significantly promoted maize root dry weight ($P < 0.05$); strains f1-8 and c3-1 significantly affected total root volume ($P < 0.05$); and strains f1-8, b1-8, and c3-9 significantly influenced total root length ($P < 0.05$). Additionally, the physicochemical property analysis of the potting soil indicated that the available phosphorus content increased by 16.03% to 66.79% after inoculation with phosphate-solubilizing bacterial strains. The principal component analysis (PCA) results for maize growth indices and soil available phosphorus content indicated that the c3-9 treatment exhibited the best overall effect. These findings expand the germplasm resource library of phosphate-solubilizing bacteria for saline-alkali soils and provide a theoretical basis for the development of microbial fertilizers for saline-alkali soil improvement.

Key words: saline-alkali soil; phosphate-solubilizing bacteria; growth promotion; maize

土壤速效磷是植物生长发育不可或缺的磷素形态(磷为植物必需的矿质元素)^[1],但其在土壤中的生物有效性常受限于复杂的化学固定机制。全球范围内约70%的农业土壤存在磷素有效性不足的问题,这些土壤约95%的总磷以难溶性无机磷(如磷酸钙、磷酸铁、磷酸铝)或有机磷(如植酸、磷脂)形式存在,难以被植物根系直接吸收。这一现象在盐碱化土壤中尤为严峻,高pH值会进一步促进磷与钙、镁等阳离子的结合,显著抑制其生物有效性^[2-3]。虽然施用磷肥可以在一定程度上补充磷素,但磷肥的当季利用率普遍较低,不仅造成资源浪费,还会通过磷素迁移诱导水生藻类异常增殖,进而驱动水体富营养化^[4]。在此背景下,溶磷细菌(PSB)因其独特的溶磷功能备受关注。这类微生物通过分泌低相对分子量有机酸(如柠檬酸、葡萄糖酸)以及质子泵介导的根际pH调控和磷酸酶介导的有机磷矿化等协同机制,将闭蓄态磷转化成植物根系可直接吸收的 $H_2PO_4^-$ 或 HPO_4^{2-} 离子形态,使土壤速效磷含量提升,植物对磷素的利用率也提高,为农业可持续发展提供了高效、低成本的解决方案^[5-7]。

盐碱土是全球土地退化的主要类型之一,其面积约占陆地总面积的10%。随着气候变化加剧及不合理灌溉等人类活动的影响,盐碱土面积正持续扩张。盐碱胁迫会严重破坏土壤生态系统:高浓度盐分可引发植物渗透胁迫与离子毒害,高pH值则会破坏土壤团粒结构,进而抑制土壤微生物多样性及酶活性^[8]。在此环境下,土壤中磷的固定化效应尤为突出,显著降低了植物对磷的吸收效率。而耐盐碱溶磷菌能够耐受极端盐碱环境并释放有效磷,

促进植物生长。如李青青等^[9]发现巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)菌株BNCC190686和雷氏普罗威登斯菌(*Providencia rettgeri*)菌株BNCC186224在盐胁迫环境下可显著促进黄豆种子萌发;Yadav等^[10]则证实耐盐解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)菌株PH30可提高豌豆、小麦和绿豆种子的发芽率和关键生长指标,并增加了土壤有效磷的含量^[10]。然而,现有解磷菌种资源多分离自普通土壤环境,如农田、森林土壤等,其在盐碱胁迫下易出现代谢抑制甚至失活,导致实际应用效果受限。由于不同溶磷菌在代谢途径^[11]、溶磷效率^[12]及环境适应性方面存在显著差异^[13],表明菌株性能高度依赖于其遗传背景与环境互作机制。因此,针对盐碱环境定向筛选兼具高效溶磷能力与耐盐碱性的功能菌株,是突破盐碱化土壤磷素生物有效性瓶颈的关键策略。

盐碱植物作为长期适应极端环境的特殊类群,其根际微生物通过分泌有机酸溶解土壤难溶性磷钾、产生铁载体螯合重金属离子、合成吡啶乙酸等植物激素调控生长,还可通过诱导系统抗性增强宿主对盐碱、干旱等多重胁迫的耐受能力,在植物-土壤互作中扮演关键角色^[14]。新疆是中国盐碱地分布最广泛的地区之一,其盐碱地规模占全国盐碱地总量的1/3,而南疆地区因干旱少雨、蒸发强烈及不合理灌溉等因素,盐碱化程度更甚^[15]。本研究拟从南疆耐盐碱植物根际土壤中分离筛选溶磷菌株,并基于盐碱土壤盆栽试验解析其介导的植物促生效应,旨在为盐碱地微生物菌剂开发提供兼具生态适应性与功能稳定性的菌种资源。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤样品

研究区位于新疆维吾尔自治区南疆喀什地区莎车县盐碱草地(76°28'10"E,38°49'78"N),因降水量少,蒸发量大及不合理灌溉等因素,导致该地盐碱化严重,且昼夜温差大,日照时间长。区域内植被以盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、旱生芦苇(*Phragmites australis*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等耐盐碱植物为主。2023年6月,本研究采用混合取样法取样,挖出完整的植物根系,轻轻抖落表面浮土后将根际封装至自封袋中。盆栽试验用土采集自喀什郊区原生盐碱地,挖取距土壤表面10~30 cm 土层的土壤。土壤 pH 值为 8.13,全盐含量为 1.97 g/kg,碱解氮、速效钾和有效磷含量分别为 24.15 mg/kg、127.63 mg/kg、10.12 mg/kg,全磷含量 2.18 g/kg,有机质含量为 15.44 g/kg。

1.2 培养基

本研究所用培养基包括 NBRIP 培养基,用于分离溶磷菌株^[16];LB 培养基,用于菌株纯化及活化^[17];无磷霍格兰营养液(Hoagland nutrient solution without phosphorus)半固体培养,另添加难溶性磷酸钙[Ca₃(PO₄)₂],用于玉米试管苗试验^[18]。

1.3 溶磷菌菌株筛选

称取 10.0 g 根际土样,转移至装有 90 mL 无菌水的锥形瓶中,28 °C,180 r/min 振荡 30 min。将土壤悬浮液按一定稀释度稀释后,取 100 μL 涂布于 NBRIP 培养基上,28 °C 培养 3~5 d,然后挑取有明显溶磷圈的菌株在 LB 培养基上反复划线纯化后,用甘油法保藏,存放于-80 °C 冰箱中。

1.4 溶磷能力测定

采用钼锑抗比色法,以不同磷浓度为横坐标,OD₇₀₀ 值为纵坐标绘制磷标准曲线^[16]。溶磷菌菌株于 LB 平板上活化后,挑取单菌落接种于含 30 mL LB 液体培养基的锥形瓶中,25 °C,180 r/min 振荡培养 24 h 制备种子液(溶磷菌含量为 1 mL 1×10⁶ CFU),按 2% 接种量接种至 50 mL NBRIP 液体培养基中。各处理均设置 3 个重复,以未接菌的培养基为空白对照,28 °C,180 r/min 培养 7 d。培养液 10 000 r/min 离心 15 min 后取上清液,用之前绘制好的标准曲线测定可溶性磷含量。根据公式:可溶

性磷含量(μg/mL)= $\rho \times V \times T_s / V_0$ 计算菌株可溶性磷含量。其中 ρ 为从磷标准曲线中查得的磷质量浓度,单位为 μg/mL;V 为显色时定容体积,单位为 mL;T_s 为分取倍数;V₀ 为参与测定的发酵液原始体积,单位为 mL。

1.5 溶磷菌菌株鉴定

用无菌牙签挑取单菌落于 50 μL 裂解液(TaKaRa)中,90 °C 金属浴 15 min 后作为模板。PCR 体系(50 μL):PCR 预混液(Mastermix)25 μL,引物 27F(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3')和 1492R(5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3')各 2 μL,模板 2 μL,ddH₂O 补足至 50 μL。对菌株 16S rRNA 进行基因序列扩增,经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测后,由通用生物(安徽)股份有限公司完成测序,将返回序列经 EzBioCloud 数据库比对,以高同源性的序列为参考对比,利用 MEGA 11.0 软件的邻接法(NJ)构建系统发育树。

1.6 溶磷菌菌株耐盐碱能力测定

参照卜凡等^[19]和周妍等^[2]的方法对溶磷能力较强的 4 株菌株进行耐盐碱能力测定:分别以含有 1% NaCl、3% NaCl、5% NaCl、7% NaCl、9% NaCl 和 12% NaCl 的 LB 液体培养基检测菌株的耐盐能力;分别配置 pH 值为 8、9、10、11、12 的 LB 液体培养基测试菌株的耐碱能力。挑单菌落接种至 LB 液体培养基,28 °C,200 r/min 培养 24 h 制备种子液。将种子液以 1% 接种量转接至不同盐碱梯度的 LB 液体培养基中,28 °C,200 r/min 培养 48 h,测定 OD₆₀₀ 值,以不添加菌液的相应 NaCl 浓度和 pH 值培养基为对照,每个处理 3 个重复。

1.7 植物促生试验

以南疆主推玉米品种新玉 104 为供试植物,分别进行无盐碱胁迫的半固体试管苗试验及盐碱土壤盆栽试验。供试菌株为溶磷能力较强的 4 株菌株。

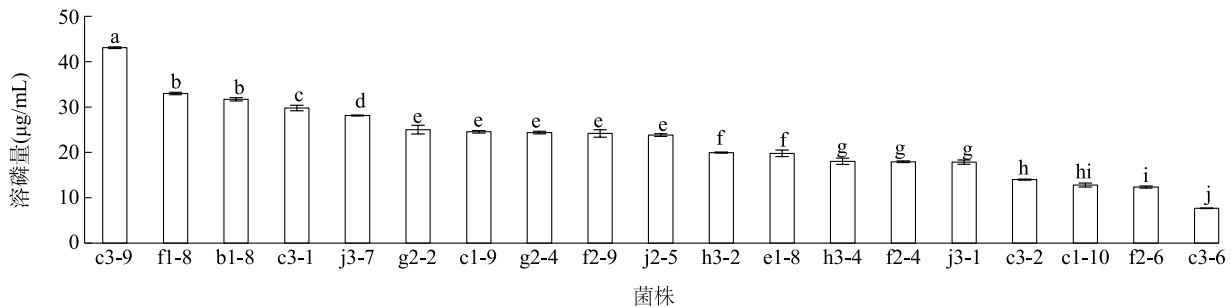
1.7.1 试管苗试验 筛选籽粒饱满的玉米种子经 75% 乙醇 30 s 完成表面消毒,无菌水冲洗 3~4 次,再用 2% NaClO 溶液浸泡 5 min,间歇性搅拌后洗涤 3~4 次。将无菌滤纸铺置于无菌培养皿中润湿,种子均匀分布,每日补充无菌水维持一定湿度,置于 37 °C 培养箱中萌发至出芽。将苗高约 5 cm 幼苗移入含有半固体培养基的玻璃试管中,每管 3 株,24 h 后进行接菌处理^[18]。将溶磷菌菌株在 LB 培养基中振荡扩大培养(25 °C,180 r/min,24 h),菌液 OD₆₀₀ 统一调整为 0.8(活菌数 1 mL 1×10⁸ CFU)。在幼苗根

部接种 5 mL 菌液,对照组接种对应的 LB 液体培养基,每 5 d 接菌 1 次,每组 4 个重复。将试管苗置于 25 °C 培养室中(光照 16 h/黑暗 8 h)统一管理 30 d 后取样,测定相应地上和地下部分生物量。用根系扫描仪对幼苗根系进行扫描分析。

1.7.2 盆栽试验 玉米种子灭菌处理同方法 1.7.1,待种子发芽后挑选芽长一致的幼苗移入装有 500 g 已干热灭菌处理的盐碱土壤花盆中(盆高 14.0 cm,上底直径 15.6 cm,下底直径 12.2 cm),每盆 3 株幼苗,每组 4 个重复。于幼苗 2 叶期实施接菌处理,接菌方法同试管苗试验。30 d 后取样并测定相应生物量指标。用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量^[20]。

1.8 数据分析

应用 Excel 2010 对试验数据进行整理,通过



图柱上不同小写字母表示菌株间溶磷能力差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

图 1 19 株菌株溶磷能力

Fig.1 Phosphate-solubilizing capacity of 19 strains

2.2 耐盐碱植物根际土壤溶磷菌菌株鉴定结果

基于 EzBioCloud 数据库比对,本研究对溶磷菌菌株的 16S rRNA 基因序列进行系统发育分析,结果显示 19 株菌株分属于 6 个属(图 2),包括肠杆菌属 (*Enterobacter*) 6 株,不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 和假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 各 5 株,芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、金色单胞菌属 (*Chryseomonas*) 和勒克氏菌属 (*Leclercia*) 各 1 株。溶磷能力较强的 4 株菌株 c3-9、f1-8、b1-8、c3-1 分别隶属于勒克氏菌属、假单胞菌属、不动杆菌属、霍氏肠杆菌属 (*Enterobacter hormaechei*),以这 4 株菌株为研究对象,进行后续耐盐碱能力测定及植物促生试验。

2.3 溶磷菌菌株耐盐碱能力

将 4 株溶磷菌菌株分别接种于不同含盐量和 pH 值的 LB 液体培养基中,结果(表 1)显示,含盐量为 1% 和 3% 时 4 株菌株均能正常生长,含盐量高于 3% 时,菌株 f1-8 和 b1-8 生长受到明显抑制,而 c3-1

和 c3-9 在含盐量 7% 时仍能正常生长,说明菌株 c3-1 和 c3-9 的耐盐能力更强。耐碱试验结果显示,

2 结果与分析

2.1 溶磷菌菌株筛选及溶磷能力

本研究从盐爪爪、盐节木、旱生芦苇等耐盐碱植物根际土壤中共分离到 95 株菌株,其中具有溶磷能力的菌株有 19 株,分别为 c3-9、f1-8、b1-8、c3-1、j3-7、g2-2、c1-9、g2-4、f2-9、j2-5、h3-2、e1-8、h3-4、f2-4、j3-1、c3-2、c1-10、f2-6、c3-6(图 1)。从图 1 可知,不同菌株溶磷量差异较大,溶磷量介于 7.67 ~ 43.08 $\mu\text{g}/\text{mL}$,其中,c3-9 溶磷量最高(43.08 $\mu\text{g}/\text{mL}$),其他溶磷能力较高的菌株有 f1-8、b1-8、c3-1,溶磷量分别是 32.99 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、31.71 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 、29.78 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。

pH 为 8 ~ 10 时 4 株菌株均能正常生长,pH 为 11、12 时,菌落基本不生长。综上,4 株菌株均具有一定耐盐碱胁迫的能力。

2.4 溶磷菌菌株对玉米试管苗生长的影响

将溶磷菌菌株接种至玉米试管幼苗,结果(表 2、图 3)显示,不同菌株对玉米地上部分有不同程度的促进作用,茎粗、株高、地上部鲜重、地上部干重分别提高了 45.13% ~ 70.45%、25.07% ~ 37.80%、92.25% ~ 134.69%、82.35% ~ 164.71%,与对照相比差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。从根系看,接种后玉米根鲜重、根干重、根表面积、分叉数分别提高了 41.10% ~ 92.23%、54.55% ~ 72.73%、40.73% ~ 53.85%、62.84% ~ 104.03%,与对照相比差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。综上,4 株菌株均对玉米生长有积极影响,但不同菌株对玉米形态建成和生物量具有指标选择性。

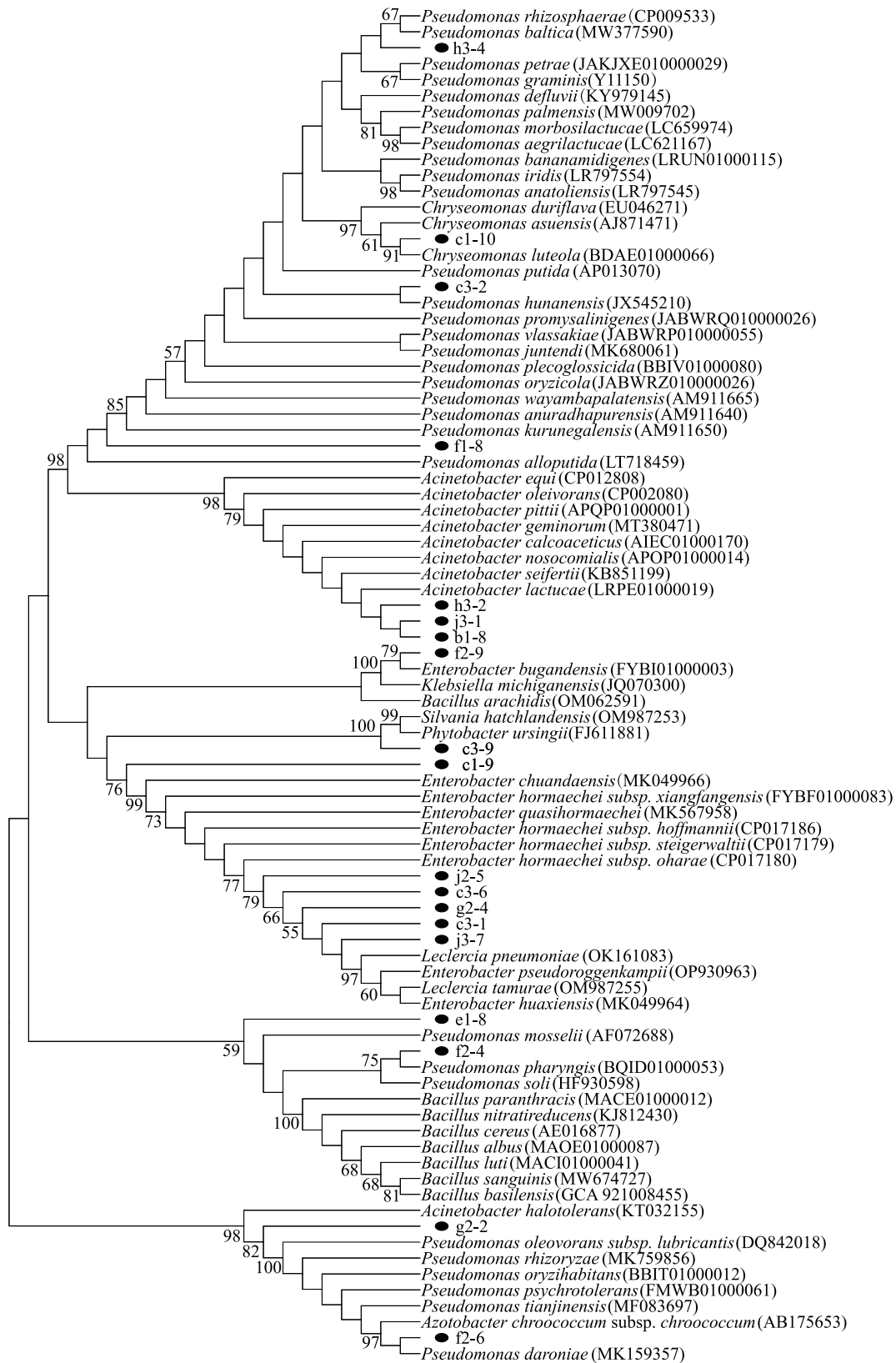


图2 基于16S rRNA基因的溶磷菌菌株系统发育树

Fig.2 Phylogenetic tree of phosphate-solubilizing bacterial strains based on the 16S rRNA gene

表 1 溶磷菌菌株的耐盐性和耐碱性

Table 1 Salt tolerance and alkali tolerance of the phosphate-solubilizing bacterial strains

菌株	NaCl 含量 (%)						pH 值				
	1	3	5	7	9	12	8	9	10	11	12
f1-8	++	++	+	+	+	+	++	+++	++	-	-
c3-1	+++	+++	++	++	+	+	++	+++	++	-	-
b1-8	++	++	+	+	-	-	++	++	++	-	-
c3-9	+++	+++	++	++	+	-	++	++	++	-	-

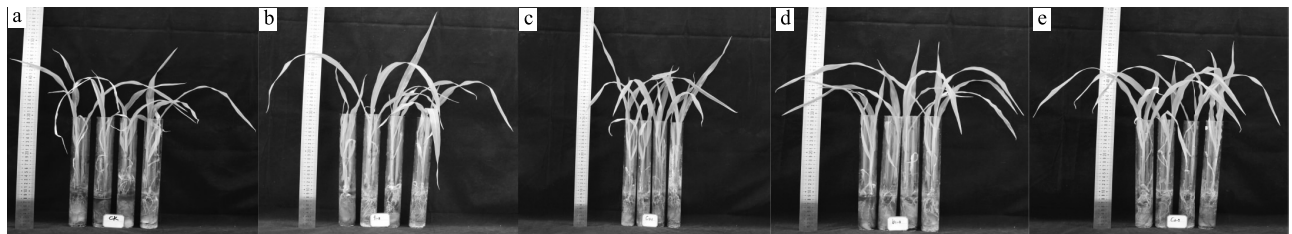
+++; $OD_{600} \geq 1.0$, 菌株生长旺盛; ++; $0.5 \leq OD_{600} < 1.0$, 菌株生长良好; +; $0 \leq OD_{600} < 0.5$, 菌株生长受到抑制; -; 菌株基本不生长。

表 2 溶磷菌菌株对玉米试管苗生长的影响

Table 2 Effects of phosphate-solubilizing bacterial strains on the growth of maize test-tube seedlings

处理	茎粗 (mm)	株高 (cm)	地上部鲜重 (g)	地上部干重 (g)	根鲜重 (g)	根干重 (g)	根表面积 (cm ²)	根系分叉数
对照	3.08±0.08c	43.47±3.04b	2.71±0.10c	0.34±0.03c	3.09±0.25d	0.33±0.06b	255.27±16.99b	1 595.00±236.02b
f1-8	4.58±0.07ab	59.90±1.02a	6.36±0.27a	0.90±0.05a	4.36±0.19c	0.51±0.03a	392.74±19.33a	3 254.33±306.14a
c3-1	4.64±0.36ab	55.70±2.60a	5.21±0.26b	0.69±0.04b	4.98±0.27bc	0.54±0.03a	359.24±6.77a	2 597.33±31.26a
b1-8	4.47±0.18b	54.37±2.73a	5.87±0.52ab	0.83±0.06a	5.33±0.35ab	0.53±0.06a	375.89±5.27a	2 919.33±140.17a
c3-9	5.25±0.33a	57.03±0.19a	5.49±0.30ab	0.62±0.05b	5.94±0.34a	0.57±0.03a	379.72±23.14a	3 136.00±273.89a

表中数据为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。



a 为 LB 培养基 (对照), b、c、d、e 分别为菌株 f1-8、菌株 c3-1、菌株 b1-8、菌株 c3-9 接种处理的玉米试管苗。

图 3 溶磷菌菌株对玉米试管苗的促生作用

Fig.3 Growth-promoting effects of phosphate-solubilizing bacterial strains on maize test-tube seedlings

2.5 溶磷菌菌株对盐碱土壤盆栽玉米生长的影响

将溶磷菌菌株进行盐碱土壤盆栽接种试验,结果 (表 3、图 4) 显示, f1-8 菌株接种处理较对照显著提升了玉米株高和地上部鲜重 ($P < 0.05$), 增幅分别达 25.87% 和 36.02%。根系构型分析结果表明, 与对照相比, 不同菌株对玉米根鲜重影响不显著 ($P > 0.05$),

c3-9 菌株对玉米根干重影响显著 ($P < 0.05$), f1-8 菌株、c3-1 菌株对玉米总根体积的影响达显著水平 ($P < 0.05$), f1-8 菌株、b1-8 菌株、c3-9 菌株对玉米总根长的影响达显著水平 ($P < 0.05$)。综上, 玉米接种拉克氏菌属 c3-9 菌株、假单胞菌属 f1-8 菌株的促生效果更好, 具有进一步开发应用的潜力。

表 3 溶磷菌菌株对盆栽玉米的促进生长作用

Table 3 Growth-promoting effects of phosphate-solubilizing bacterial strains on potted maize

处理	株高 (cm)	地上部鲜重 (g)	根鲜重 (g)	根干重 (g)	总根体积 (cm ³)	总根长 (cm)
对照	46.20±0.76b	2.61±0.06b	1.51±0.17ab	0.08±0.006bc	4.65±0.27c	16.15±0.28b
f1-8	58.15±4.65a	3.55±0.31a	1.55±0.07ab	0.10±0.007ab	9.79±0.24a	30.92±2.25a
c3-1	52.40±3.13ab	2.95±0.25ab	1.63±0.28ab	0.10±0.012ab	6.80±0.43b	23.05±1.48ab
b1-8	50.67±2.77ab	2.89±0.34ab	1.23±0.17b	0.06±0.007b	4.57±0.12c	24.50±3.12a
c3-9	53.50±1.32ab	3.29±0.10ab	1.90±0.04a	0.11±0.006a	5.02±0.08c	28.03±3.93a

表中数据为平均值±标准差。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

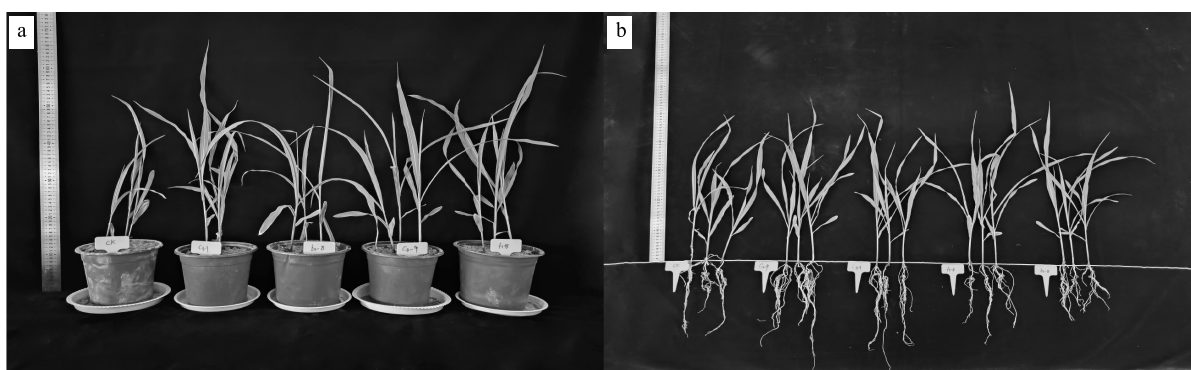


图 a、图 b 从左到右分别为 LB 培养基(对照)、c3-1 菌株、b1-8 菌株、c3-9 菌株、f1-8 菌株接种处理的玉米苗。

图 4 溶磷菌菌株对盆栽玉米生长的影响

Fig.4 Effects of phosphate-solubilizing bacterial strains on the growth of potted maize

2.6 溶磷菌菌株对土壤速效磷含量的影响

土壤速效养分作为植物代谢的核心营养源,其含量高低体现了植物汲取养分的实际状况。为进一步验证溶磷菌菌株对土壤磷素的影响,本试验分别对各溶磷菌菌株处理后的根际土壤速效磷含量进行测定,结果如表 4 所示,接种菌株后的土壤速效磷含量与对照相比差异均达显著水平($P < 0.05$),增幅为 16.03%~66.79%,其中接种 c3-9 菌株土壤速效磷含量与对照相比增加幅度最大,说明溶磷菌菌株能有效活化土壤中的难溶性磷,有效提升根际土壤速效磷的供应水平。

表 4 接种溶磷菌菌株对土壤速效磷含量的影响

Table 4 Effects of inoculation with phosphate-solubilizing bacterial strains on soil available phosphorus content

处理	土壤速效磷含量 (mg/kg)
对照	10.48±0.09d
f1-8	15.55±0.01b
c3-1	15.35±0.14b
b1-8	12.16±0.03c
c3-9	17.48±0.05a

表中数据为平均值±标准差。数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.7 接种溶磷菌菌株后玉米生长指标及土壤速效磷含量的主成分分析

4 株溶磷菌菌株接种后玉米生长指标及土壤速效磷含量彼此间存在差异,且各指标间具有一定相关性,故采用主成分分析法对株高、地上部鲜重、根鲜重、根干重、总根体积、总根长、速效磷含量 7 个单项指标进一步分类简化。将 7 个单项指标转化为 2 个主成分(表 5),根据特征值大于 1 进一步提取,得到 2 个主成

分,其方差贡献率分别为 70.699%和 21.149%,累计贡献率为 91.848%(表 6)。评价的 7 个指标转化为 2 个不相关的综合指标,达到对原始信息降维的目的。主成分载荷矩阵表征原始变量与主成分间的协方差结构,第 1 主成分代表了玉米生长状况及土壤速效磷含量总信息的 70.699%,主要反映植株地上部分及土壤速效磷含量情况,而第 2 主成分代表了玉米生长状况及土壤速效磷含量总信息的 21.149%,主要反映了植株根系构型。以 2 个主成分的方差贡献率为权重,构建溶磷菌菌株的综合评价得分模型: $D_n = 70.699F_1 + 21.149F_2$ 。根据上述综合评价得分模型,计算各菌株对玉米的促生作用及土壤速效磷含量提高的综合评价分值,分值越高,说明其促生作用越明显,结果如表 7 所示,各处理对玉米生长及土壤速效磷含量的综合评价排序依次为:c3-9>f1-8>c3-1>b1-8>对照,表明 4 株溶磷菌菌株均可促进玉米生长和提高土壤速效磷含量,以 c3-9 菌株综合作用最佳。

表 5 接种不同溶磷菌菌株后玉米生长指标和土壤速效磷含量的主成分载荷

Table 5 Principal component loadings of maize growth indicators and soil available phosphorus content after inoculation with different phosphate-solubilizing bacterial strains

指标	第 1 主成分	第 2 主成分
株高	0.935	-0.351
地上部鲜重	0.953	-0.233
根鲜重	0.609	0.787
根干重	0.804	0.543
总根体积	0.723	-0.448
总根长	0.887	-0.334
速效磷含量	0.917	0.278

表 6 主成分的特征值、贡献率及累计贡献率

Table 6 Eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution rates of principal components

统计项	第 1 主成分	第 2 主成分
特征值	4.949	1.480
贡献率 (%)	70.699	21.149
累计贡献率 (%)	70.699	91.848

表 7 接种不同溶磷菌菌株后玉米生长及土壤速效磷含量的综合评价结果

Table 7 Comprehensive evaluation results of maize growth and soil available phosphorus content after inoculation with different phosphate-solubilizing bacterial strains

处理	F1	F2	F	排序
对照	-2.700	0.610	-1.940	5
f1-8	2.490	-1.270	1.630	2
c3-1	0.300	0.500	0.350	3
b1-8	-1.790	-1.290	-1.670	4
c3-9	1.700	1.440	1.640	1

F1: 第 1 主成分的得分; F2: 第 2 主成分的得分; F: 综合得分。

3 讨论

解磷微生物是驱动土壤磷素生物地球化学循环的重要类群^[21-22], 目前已发现有 20 多个属细菌具有溶磷能力, 以肠杆菌属 (*Enterobacter*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、根瘤菌属 (*Rhizobium*) 和埃希氏菌属 (*Escherichia*) 细菌为主^[23-24]。如本课题组前期分离自新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州盐碱地旱生芦苇根际土壤的溶磷菌包括肠杆菌属、假单胞菌属、不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 等 7 个属的细菌^[16]; 黄臣等^[25]从达乌里胡枝子根际土壤中分离出 4 株中度盐碱耐受溶磷菌菌株, 隶属于肠杆菌属和葡萄球菌属。本研究从耐盐碱植物根际土壤中分离的溶磷菌同样以肠杆菌属为优势菌属, 进一步证实肠杆菌是盐碱环境中的潜在功能菌群。在盐碱胁迫响应中, 肠杆菌可通过调控胞内相容性溶质 (如甜菜碱、海藻糖) 的合成与积累维持渗透平衡, 并利用 Na^+/H^+ 逆向转运蛋白 (*NhaA*) 排出过量 Na^+ , 从而保障细胞代谢活性^[26]。此外, 部分肠杆菌属细菌还兼具植物促生特性, 如合成吡啶乙酸、铁载体及 1-氨基环丙烷-1-羧酸 (ACC) 脱氨酶, 能够在溶磷的同时缓解盐碱胁迫对植物生

长的抑制作用^[27]。

本研究筛选出的 19 株溶磷菌菌株溶磷量呈现显著差异, 其中菌株 c3-9、f1-8、b1-8、c3-1 溶磷能力表现尤为突出, 分属于勒克氏菌属、假单胞菌属、不动杆菌属、霍氏肠杆菌属。研究表明, 假单胞菌属和肠杆菌属细菌常通过分泌有机酸 (如柠檬酸、琥珀酸) 降低周围微环境 pH 值, 螯合金属离子以解离难溶性磷酸盐^[28-29], 而不动杆菌属细菌则倾向于依赖磷酸酶或植酸酶的水解作用^[30]。值得注意的是, 4 株溶磷菌菌株均表现出一定耐盐碱胁迫能力, 表明其溶磷功能与逆境适应机制存在协同性。通过维持细胞渗透压稳定和膜结构完整性, 菌株能够在盐碱条件下持续分泌溶磷相关代谢产物。相比之下, 溶磷量较低的菌株可能因渗透调节能力较弱或代谢通路差异, 在盐碱环境中溶磷效能受限^[31]。这种差异为后续定向筛选高效功能菌株提供了依据, 即优先关注兼具高溶磷量与强耐盐碱特性的优势类群, 其在盐碱土壤中更易定殖并发挥磷素活化作用。

盐碱土壤盆栽试验结果表明, f1-8 菌株、c3-9 菌株在盐碱环境下促进玉米植株生长的效果较优, 无论是地上部分还是地下部分均呈现积极响应, 与非盐碱胁迫下试管苗试验结果形成功能验证, 这可能与 f1-8 菌株、c3-9 菌株较高的溶磷量及稳定的根际定殖能力相关。土壤理化性质检测结果显示, 接种溶磷菌菌株后速效磷含量增加 16.03%~66.79%, 直接证明了菌株通过溶磷作用提升了土壤磷素有效性, 为植物吸收利用提供了物质基础。根系发育的改善尤为关键, 发达的根系不仅能够扩大植物对水分和养分的吸收面积, 还可以通过增强根际微生态互作, 进一步强化溶磷菌的促生效应^[32]。但本研究中不同菌株对玉米不同生长指标的促进作用存在差异, 如 f1-8 对株高和地上部鲜重的促进作用表现突出 ($P<0.05$), 而 c3-9 对根干重、总根长的促进作用显著 ($P<0.05$), 这种功能分化可能与菌株的溶磷物质类型 (如有机酸种类、酶活性) 及与宿主植物的互作特异性相关。主成分分析进一步揭示, c3-9 对玉米生长和土壤磷素活化的综合表现优势突出, 表明其在盐碱土壤改良中具有更高的应用潜力。

菌株的根际定殖能力、环境适应性及其与土著微生物的互作效应, 同样会影响其溶磷性能和促进生长的效果。本研究中菌株 b1-8 对玉米根系生物量未表现出促进作用 (根鲜重、根干重、总根体积与

对照无显著差异),提示菌株-作物-环境三者间的适配性是功能表达的关键前提,单一的高溶磷能力并不能完全保障促生效果,需综合考量菌株与宿主植物的协同兼容性。尽管实验室与盆栽条件下菌株的促生作用已得到初步验证,但其在开放农田系统中的生态行为,如长期定殖能力、群落演替影响等仍亟待解析。未来研究需聚焦于建立基于环境响应因子(如盐度、pH、有机质含量)的菌剂配伍策略,通过优化菌株组合提升耐盐碱微生物肥料的精准适配性。这不仅有助于突破盐碱地磷素限制瓶颈,提升耕地生产力,还将为化肥减量化战略提供微生物解决方案,对实现农业绿色可持续发展具有双重实践价值。

4 结 论

本研究从新疆维吾尔自治区喀什地区耐盐碱植物根际土壤中筛选出 19 株溶磷菌菌株,溶磷量介于 7.67~43.08 $\mu\text{g}/\text{mL}$,其中 f1-8、b1-8、c3-1、c3-9 菌株的溶磷能力位居前 4 位。19 株菌株隶属于 6 个菌属,以肠杆菌属占优势。接种菌株 f1-8、b1-8、c3-1、c3-9 对在正常生长环境下玉米试管苗生长有积极作用。盐碱土壤盆栽试验结果显示,与对照相比,f1-8 菌株对玉米地上部生物量(株高和地上部鲜重)影响显著($P < 0.05$);c3-9 菌株对玉米根干重有显著促进作用($P < 0.05$),f1-8 菌株、c3-1 菌株对玉米总根体积的影响达显著水平($P < 0.05$),f1-8 菌株、b1-8 菌株、c3-9 菌株对玉米总根长的影响达显著水平($P < 0.05$)。对各溶磷菌菌株处理后的根际土壤速效磷含量测定结果显示,4 株菌株均显著提升了土壤有效磷含量($P < 0.05$)。主成分分析结果表明,c3-9 菌株处理的盐碱土壤玉米生物量和土壤速效磷含量的综合作用最好,可为盐碱地微生物菌肥开发提供优质菌种资源。

参考文献:

- [1] 银婷婷,王敬敬,柳 影,等. 高效解磷菌的筛选及其促生机制的初步研究[J]. 生物技术通报,2015,31(12):234-242.
- [2] 周 妍,王丽娜,张美珍,等. 耐盐碱解磷菌的筛选鉴定及对绿豆的促生作用[J]. 西北农业学报,2022,31(4):488-497.
- [3] 张 巍,冯玉杰. 松嫩平原盐碱土壤理化性质与生态恢复[J]. 土壤学报,2009,46(1):169-172.
- [4] HAMEEDA B, HARINI G, RUPELA O P, et al. Growth promotion of maize by phosphate-solubilizing bacteria isolated from composts and macrofauna [J]. Microbiological Research, 2008, 163(2):234-242.
- [5] MUHAMMAD K, MUHAMMAD I Q, BILAL A M, et al. Endophyte-mediated stress tolerance in plants: a sustainable strategy to enhance resilience and assist crop improvement [J]. Cells, 2022, 11(20):3292.
- [6] 张美珍,王丽娜,刘 权,等. 耐盐碱溶磷菌的筛选鉴定及其在大豆生长中的功能验证[J]. 河南农业科学,2022,51(5):34-44.
- [7] 马 莹,曹梦圆,石孝均,等. 植物促生菌的功能及在可持续农业中的应用[J]. 土壤学报,2023,60(6):1555-1568.
- [8] 冯凯月,赵鑫淼,李子妍,等. 植物响应盐碱胁迫的分子机制研究进展[J]. 生物技术通报,2024,40(10):122-138.
- [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.
- [10] YADAV A, CHAUHAN R, YADAV K. Halotolerant phosphate solubilizing bacteria as growth promoter for mung bean, pea and wheat crops [J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2022,35(21):239-247.
- [11] DING Y Q, YI Z L, FANG Y, et al. Multi-omics reveal the efficient phosphate-solubilizing mechanism of bacteria on rocky soil [J]. Frontiers in Microbiology, 2021,12:761972.
- [12] WEI Y Q, ZHAO Y, FAN Y Y, et al. Impact of phosphate-solubilizing bacteria inoculation methods on phosphorus transformation and long-term utilization in composting [J]. Bioresource Technology, 2017,241:134-141.
- [13] 潘忠飞,熊 欢,尹 倩,等. 油茶根际溶磷细菌对不同红壤质地磷组分及磷素转化的影响[J]. 微生物学报,2025,65(5):2014-2033.
- [14] 张旭萍,刘 强,王 锦,等. 盐碱胁迫下盐生植物与根际土壤微生物交互作用机制研究进展[J]. 土壤通报,2024,55(4):1191-1200.
- [15] 樊永红,史长鑫,王 杰,等. 新疆盐穗木根际耐盐碱菌株生物学特性的初步研究[J]. 中国土壤与肥料,2020(5):258-261.
- [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.
- [17] 李 静,李明源,张 甜,等. 盐生植物解磷菌的筛选及促生效应研究[J]. 核农学报,2023,37(7):1470-1479.
- [18] 张银翠,姚 拓,赵桂琴,等. 耐盐促生菌筛选鉴定及对盐胁迫燕麦生长的影响[J]. 草地学报,2021,29(12):2645-2652.
- [19] 卜 凡,韩思宁,朱仁贵,等. 一株耐盐碱多黏类芽孢杆菌 TaRb44 的分离鉴定和耐盐促生作用评价[J]. 微生物学报,2025,65(4):1498-1511.
- [20] 申佳丽,曹树槟,焦甜甜,等. 7 株根际促生菌对设施小黄瓜生长发育及土壤根际环境的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(4):51-60,68.
- [21] 周晓倩,冯 薇,贺 斌,等. 毛乌素沙地土壤解磷菌的分离筛选及其解磷机制[J]. 农业工程学报,2024,40(11):109-118.
- [22] 温绍福,江润海,朱城强,等. 铅污染土壤中解磷菌对玉米根际土壤性质和微生物群落结构的影响[J]. 生物技术通报,2024,40(9):225-237.

- [23] TIMOFEEVA A, GALYAMOVA M, SEDYKH S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture[J]. *Plants*, 2022, 11(16):2119.
- [24] 庄馥璐,柴小粉,高蓓蓓,等. 苹果根际解磷菌的分离筛选及解磷能力[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(7):69-79.
- [25] 黄 臣,韩玲娟,梁银萍,等. 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.
- [26] QUICK M, DWIVEDI M, PADAN E. Insight into the direct interaction of Na⁺ with NhaA and mechanistic implications[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):7045.
- [27] KIM K, JANG Y J, LEE S M, et al. Alleviation of salt stress by *Enterobacter* sp. EJ01 in tomato and *Arabidopsis* is accompanied by up-regulation of conserved salinity responsive factors in plants[J]. *Molecules and Cells*, 2014, 37(2):109-117.
- [28] BAKKI M, BANANE B, MARHANE O, et al. Phosphate solubilizing *Pseudomonas* and *Bacillus* combined with rock phosphates promoting tomato growth and reducing bacterial canker disease[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15:1289466.
- [29] 曹耿悦,郑庭裕,于梦雅,等. 外生菌根真菌及其助手细菌联合解磷的研究进展[J]. *微生物学报*, 2025, 65(2):515-523.
- [30] 马 凯,王效昌,谢嘉慧,等. 沉积物解磷菌的研究进展:分布、解磷能力及功能基因[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(2):280-290.
- [31] 程士谦. 盐碱地解磷微生物分布特征及其调控研究[D]. 银川:宁夏大学,2024.
- [32] 王莉晶,高晓蓉,孙嘉怡,等. 土壤解磷微生物作用机理及解磷菌肥对作物生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(14):5948-5950,5958.

(责任编辑:黄克玲)