

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.005

引用格式: 张亚宁, 马正东, 陈莹, 等. 南疆沙区油莎豆根际耐盐促生菌株的筛选[J]. 草地学报, 2026, 34(4): 1181–1195
ZHANG Ya-ning, MA Zheng-dong, CHEN Ying, et al. Screening of Salt-Tolerant and Growth-Promoting Strains of *Cyperus esculentus* Rhizosphere in Sandy Areas of South Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4): 1181–1195

南疆沙区油莎豆根际耐盐促生菌株的筛选

张亚宁, 马正东, 陈莹, 佟鑫, 张盛洁, 贾舒安, 王旭哲*, 马春晖*
(石河子大学动物科技学院, 新疆石河子 832000)

摘要: 为从油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)根际土壤中筛选适应南疆极端环境的耐盐促生菌株, 丰富新疆盐碱沙土地菌株资源库, 本研究采用定向筛选培养基培养法、摇瓶培养法和16S rDNA鉴定法, 对耐盐促生菌进行筛选, 并测定其促生特性。最终通过油莎豆种子萌发和盆栽幼苗试验, 进一步验证其促生效果。本研究共获得10株耐盐促生菌, 分属于芽孢杆菌属(*Bacillus*)、弗里兰氏菌属(*Vreelandella*)、微小杆菌属(*Exiguobacterium*)和比斯鲍曼氏菌属(*Bisbaumannia*), 耐NaCl阈值范围为4%~8%。其中菌株Y-38(*Exiguobacterium acetylicum*)溶无机磷能力突出($0.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Y-35(*Exiguobacterium mexicanum*)产吲哚-3-乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)量最高($64.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Y-46(*Bisbaumannia pacifica*)耐受8% NaCl。种子萌发试验中, Y-38处理组发芽率达82.00%, 较对照显著提高26.89% ($P<0.05$); 盆栽试验中Y-38处理组的株高(39.17cm)、叶宽(5.22mm)、茎粗(5.52mm)等指标均显著高于Y-46和Y-35处理组 ($P<0.05$)。三株菌的促生效果通过综合排序为: Y-38>Y-46>Y-35, 最终确定了Y-38(乙酰微小杆菌, *Exiguobacterium acetylicum*)的高耐盐性与促生功能, 为盐碱土壤改良提供了菌种资源。

关键词: 油莎豆; 植物根际促生菌; 耐盐菌; 分离鉴定

中图分类号: S548

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)04-1181-15

Screening of Salt-Tolerant and Growth-Promoting Strains of *Cyperus esculentus* Rhizosphere in Sandy Areas of South Xinjiang

ZHANG Ya-ning, MA Zheng-dong, CHEN Ying, TONG Xin, ZHANG Sheng-jie, JIA Shu-an,
WANG Xu-zhe*, MA Chun-hui*

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

Abstract: To screen salt-tolerant and growth-promoting bacterial strains adapted to the extreme environment of Southern Xinjiang from the rhizosphere soil of *Cyperus esculentus* L. and enrich the strain resource bank for saline-alkali sandy soils in Xinjiang, this study employed the targeted screening medium culture method, shake flask culture method, and 16S rDNA identification method to isolate salt-tolerant and growth-promoting strains, determine their growth-promoting characteristics, and finally further verify the growth-promoting effects of these strains through *Cyperus esculentus* seed germination tests and potted seedling experiments. A total of 10 salt-tolerant and growth-promoting strains were obtained, which belonged to the genera *Bacillus*, *Vreelandella*, *Exiguobacterium*, and *Bisbaumannia*, with their salt tolerance thresholds ranging from 4% to 8% NaCl. Among these strains, strain Y-38 (*Exiguobacterium acetylicum*) exhibited prominent inorganic phosphorus-solubilizing ability ($0.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), strain Y-35 (*Exiguobacterium mexicanum*) showed the highest production of indole-3-acetic acid (IAA) ($64.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), and strain Y-46 (*Bisbaumannia pacifica*) could tolerate 8% NaCl. In the seed germination experiment, the germination rate of the Y-38 treatment group reached 82.00%, which was significantly 26.89% higher than the control group ($P<0.05$); in the potted

收稿日期: 2025-07-30; 修回日期: 2025-09-04

基金项目: 兵团科技计划项目(2024DB023); 石河子大学青年拔尖计划项目(BJZK202406); 国家自然科学基金项目(32260856); 国家牧草产业技术体系项目(CARS)资助

作者简介: 张亚宁(2004-), 男, 汉族, 河北邢台人, 本科生, 主要从事牧草生产与加工研究, E-mail: 2357678055@qq.com; * 通信作者
Author for correspondence, E-mail: 690953197@qq.com; chunhuima@126.com

experiment, growth indicators of the Y-38 treatment group, including plant height (39.17 cm), leaf width (5.22 mm), and stem diameter (5.52 mm), were all significantly higher than those of the Y-46 and Y-35 treatment groups ($P < 0.05$). The comprehensive ranking of the growth-promoting effects of the three strains was Y-38 > Y-46 > Y-35. Ultimately, the high salt tolerance and growth-promoting function of strain Y-38 (*Exiguobacterium acetylicum*) was confirmed, providing a bacterial strain resources for the improvement of saline-alkali soils.

Key words: *Cyperus esculentus* L.; Rhizosphere growth-promoting bacteria; Salt-tolerant bacteria; Isolation and identification

南疆作为我国重要的战略屏障和向西开放的关键门户,其生态安全与社会稳定是国家战略实施的基石^[1]。然而,该区域紧邻塔克拉玛干沙漠西缘,冬春风沙灾害频发,且沙质土壤普遍存在次生盐碱化问题,既威胁农业生产安全与居民生存环境,又制约当地农业可持续发展,阻碍生态效益提升。在此背景下,油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)作为一种抗逆性强、适应性广且兼具油料、粮食和饲草价值的生态经济作物^[2-4],已成为协调生产、生活与生态的重要资源。该作物的种植不仅能充分利用边际土地资源,为农户创造经济效益并保障油料供给,其地上茎叶还可作为饲草缓解草畜矛盾,推动团场循环经济发展;同时,该作物还可通过根系固沙减轻风沙灾害。然而,南疆沙区盐碱化沙质土壤会直接抑制油莎豆的产量与品质,这已成为当前亟待解决的关键问题。

针对沙漠化地区土壤改良的全球性需求,我国大力推进沙化土地修复工程,而微生物菌剂作为利用特定微生物活体改良土壤的重要形式,成为关键手段。自19世纪中期起,微生物菌剂便因改良盐碱土壤的潜力受到关注(如1896年德国“Nitragin”接种菌剂获美国专利,通过微生物互作降低土壤盐度^[5]),至20世纪50年代,其开始在我国盐碱地改良中逐步应用,并有效提升了作物产量^[6]。随着研究深入,学界对盐碱土壤中微生物互作与拮抗机制的认知不断加深,推动菌剂技术向复合功能型方向发展^[7]。

在这一技术演进中,植物根际促生菌(Plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR)作为微生物菌剂的重要分支,因其具备固氮、解磷、分泌生长激素、拮抗病原菌及耐盐碱等功能^[8-9],成为解决南疆盐碱化土壤问题的潜在关键。

PGPR可能通过代谢活动降低土壤盐碱度、改善油莎豆根际微环境,或通过固氮、解磷作用及激素分泌,促进油莎豆生长并同步提升其抗逆性与产量品质;同时,其上述作用可与油莎豆自身的固沙

功能相协同,进而形成“微生物改良-作物促生-生态防护”的良性循环。该循环能同步破解南疆沙区农业生产受限与风沙灾害频发的双重难题,最终为南疆沙区生态与经济协同发展提供核心技术支撑。

前人在植物根际促生菌(PGPR)应用于盐碱地改良方面已取得一定进展,例如丁绍武等^[6]分析了微生物菌肥在盐碱地改良中的应用潜力;Yang等^[10]则聚焦根际微生态,探讨了 *Klebsiella variicola* 对玉米幼苗根际土壤的生物学功能;景永元等^[2]对油莎豆在南疆的引种种植进行了初步探索。然而,针对南疆沙区特有的高盐、沙质、干旱环境,筛选具有高度环境适应性和多重促生功能的本地耐盐 PGPR 菌株的研究仍显不足。现有研究或侧重于单一促生特性(如溶磷或固氮),或所选菌株对南疆极端土壤条件的适应性缺乏系统评估,导致开发的菌剂在实际应用中效果不稳定。

因此,本研究聚焦于南疆沙区油莎豆根际,旨在筛选兼具高耐盐性及多重促生功能(溶磷、产 IAA 等)的土著菌株,以期开发出更适应本地环境、能有效提升油莎豆盐碱胁迫抗性和产量的高效微生物菌剂,为南疆沙区盐碱土壤生态修复和可持续农业发展提供新的解决方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 采样地情况及样本采集 土壤样本采集自新疆生产建设兵团第三师54团(38°60'N, 77°09'E, 海拔1231 m)。采用五点取样法,使用无菌铲采集油莎豆根茎周边0~0.5 cm处附着的土壤。在采集过程中,仔细去除土壤中的木屑和石块等杂质,并充分混合土壤样本后,将其存放于无菌自封袋中,随后在4℃条件下保存。样本被带回实验室后,使用60目筛网对样本进行过筛处理,去除较大的杂质颗粒,保证后续耐盐微生物筛选的准确性。

1.1.2 供试培养基 供试菌株的功能初筛分别采用LB培养基^[11]、Ashby无氮培养基^[12]、解有机磷培养基^[13]、解无机磷培养基^[14]、产硅酸盐培养基^[15]和产铁载体(CAS)培养基^[16],所有培养基均于121℃灭菌20 min。

1.1.3 主要化学试剂和仪器 钼锑抗显色液^[17]:量取100 mL钼锑贮备试剂于250 mL容量瓶中,再准确称取1.5 g抗坏血酸置于容量瓶中溶解,现配现用。

Salkowski 比色液^[18]:50.0 mL 35% HClO₄与1.0 mL 0.5 mol·L⁻¹ FeCl₃混匀,黑暗条件下保存备用。

实验所用化学试剂包括1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC),0.1 mol·L⁻¹ Tris-HCl,甲苯;所用仪器设备包括ME4001/02电子天平、SM-CJ-1F超净工作台、BSP-250生化培养箱、全温振荡培养箱、可见分光光度计。

1.2 根际促生菌的分离与纯化

准确称取10 g土壤样本,于无菌操作台中将其转移至盛有90 mL无菌水的250 mL锥形瓶内。将锥形瓶置于恒温摇床(150 r·min⁻¹,30℃)振荡30 min,随后静置20 min使液体分层。

通过十倍梯度稀释法构建稀释体系:无菌转移1 mL上清液至盛有9 mL无菌水的试管中,得到10⁻¹浓度稀释液,连续稀释获得10⁻²至10⁻⁶梯度悬浊液。选取10⁻²,10⁻³,10⁻⁴三个稀释度,每个浓度设置三个平行,分别取100 μL悬液均匀涂布于LB琼脂平板表面。封口膜密封培养皿后,将其置于28℃恒温培养箱中倒置培养48 h。

观察菌落动态发育特征,筛选具有显著形态差异的单菌落。对目标菌株采用四区划线法在新鲜LB琼脂平板上进行连续传代纯化(≥3次),直至光学显微镜(10×)下确认获得遗传均一性的纯培养物。

1.3 耐盐菌株的筛选与保存

将纯化菌株通过四区划线法接种于含5%(m/v) NaCl的LB筛选培养基(对照组为常规LB培养基),于恒温培养箱[(28±0.5)℃,相对湿度65%]静置培养24 h。

耐盐阳性菌株的判定标准为:实验组培养基中形成典型单菌落(直径≥0.5 mm)^[19]。通过三重独立实验筛选获得具有稳定耐盐表型的优势菌株。

菌株保存:将固体培养基上分离的单菌落挑取后重悬于10 μL无菌去离子水中,进行编号标记。随后将菌悬液接种至含5 mL LB液体培养基的10 mL离心管中,置于28℃,200 r·min⁻¹条件下振荡培养48 h。最后取灭菌30%甘油(v/v)与等体积菌液混合,保存于-80℃超低温冰箱长期保藏^[20]。

1.4 菌株促生能力测定

1.4.1 菌株溶磷能力 溶磷能力的评估采用溶磷圈法进行定性分析。将待测菌株分别点接于无机磷固体培养基(含磷酸钙盐)和有机磷固体培养基(含卵磷脂),采用四点接种法确保实验重复性^[21]。培养体系置于28℃恒温培养箱中倒置培养3~5 d,通过透明圈形成判断溶磷活性,对阳性菌株使用游标卡尺测量溶磷圈直径(D)和菌落直径(d),通过溶磷指数(Solubilization index, SI=D/d)表示菌株的解磷能力^[22],该比值越大,表明解磷能力越强。

磷标准曲线的制备方法如下:准确移取5 mg·L⁻¹磷标准工作液0~10 mL(梯度间隔为2 mL),分别置于50 mL容量瓶中,以超纯水补足至10 mL,形成系列浓度梯度。依次加入100 μL 2,4-二硝基苯酚指示剂,随后通过分步添加800 μL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃和400 μL 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄调节溶液pH至微黄色终点(必要时补加100 μL NaHCO₃)。定量加入5 mL钼锑抗显色剂后定容,最终体系磷浓度为0~1.0 mg·L⁻¹(浓度间隔0.2 mg·L⁻¹)。显色反应在≥15℃条件下进行30 min,于700 nm波长处测定蓝色络合物的吸光度。建立吸光度与磷浓度的一元线性回归模型,相关系数(R²)应达到0.999以上以验证线性关系。得到的标准曲线回归方程为 $y=0.5701x-0.0016$,相关系数为 $R^2=0.9997$ 。表明实验数据与拟合函数吻合度较高,数据可以使用。

菌种经液体种子培养基(TSB, Tryptic Soy Broth)活化48 h后,取500 μL菌悬液接种于蒙金娜无机磷液体培养基中。实验组与阴性对照组(未接种培养基)同步置于恒温振荡培养箱[(37±0.5)℃,180 r·min⁻¹]连续培养7 d。发酵液经10 000 r·min⁻¹离心8 min后,取上清液。采用钼锑抗比色法测定有效磷含量^[23]。

1.4.2 吲哚-3-乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)含量测定 用Salkowski比色法^[18]测定菌株分泌IAA的能力。反应后红色越深,菌株产IAA能力越强。

配制 IAA(吲哚-3-乙酸)梯度标准溶液:浓度梯度为 0, 5, 10, 20, 40, 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。取各浓度标准液 2.0 mL 加入石英比色管(光程 10 mm), 依次加入等体积 Salkowski 显色剂^[24], 混合摇匀, 避光静置 30 min。在波长 530 nm 处测定吸光值, 以 1:1(v/v)超纯水与显色剂混合液为空白对照, 使用分光光度计于 530 nm 波长处测定吸光度值, 仪器预热 30 min 后经三次基线校准。以 IAA 标准溶液质量浓度(x)为横坐标, $\text{OD}_{530\text{ nm}}$ 值(y)为纵坐标绘制 IAA 标准曲线, 得到标准曲线回归方程为 $y=0.016\ 14x+0.044\ 76$, 相关系数为 $R^2=0.994\ 55$, 表明实验数据与拟合函数吻合度较高, 数据可以使用。

将菌株接种于含 L-色氨酸的 LB 液体培养基中, 在恒温振荡培养箱 30°C , $160\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 培养 3 d, 做 3 次重复试验, 用无菌水调节菌悬液的 $\text{OD}_{600\text{ nm}}$ 值为 1.0。取菌株悬液于离心管中, 于高速离心机中 $4000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min。之后吸取 2 mL 的上清液置于试管中, 加入等量的 Salkowski 显色剂, 混合摇匀, 避光静置 30 min, 于波长 530 nm 处测定吸光度值, 以不接菌的上述培养基进行相同操作作为空白对照(CK), 根据 IAA 标准曲线计算菌株分泌 IAA 的含量。

1.4.3 菌株固氮能力 将纯化菌株制备为浓度约 $1\times 10^8\ \text{CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的菌悬液, 取 50 μL 均匀涂布于 Ashby 无氮固体培养基表面, 置于 28°C 恒温培养箱中倒置培养 3~4 d。对生长良好的菌落进行传代纯化:通过四区划线法转接至新鲜 Ashby 无氮培养基中, 连续传代培养 3 次(间隔周期为 5 d)。最终仍能形成典型单菌落且无杂菌污染的菌株, 可初步判定为具有自主固氮功能特性^[25]。

1.4.4 菌株硅酸盐分解能力 采用点样接种法将筛选菌株接种于硅酸盐分解固体培养基平板中央, 置于 30°C 恒温培养箱中培养 5 d。通过观察菌落周围是否形成透明晕环(水解圈)来判定分解能力。

1.4.5 菌株产铁载体能力 采用铬天青 S (Chrome azurol S, CAS) 检测平板法评估菌株铁载体合成能力。基于铁载体与 Fe^{3+} 的特异性螯合作用原理, 当菌株分泌的铁载体竞争性结合培养基中铁离子时, CAS-铁复合物发生解离, 导致菌落周围形成特征性橙红色晕圈^[26]。将处于对数生长期 ($\text{OD}_{600\text{ nm}}$ 值介于 0.8~1.0) 的菌悬液以 200 μL 接种于去铁培养基, 在 30°C 条件下以 $150\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速进行振荡培养 48 h。随后取 10 μL 培养液点接于 CAS

检测平板, 于 30°C 恒温培养箱中培养 3~5 d。每日监测菌落周边显色区域变化并精确测量晕圈直径, 通过显色圈 (Halo diameter, HD) 与菌落直径 (Colony diameter, CD) 比值 (H/C 值) 定量评价铁载体合成能力。

1.4.6 菌株生长曲线绘制 利用筛选出的有明显促生作用的菌株, 将保存的菌种接种到 LB 平板上三区划线, 30°C 过夜培养。挑取单菌落接种到 20 mL LB 液体培养基中, 28°C , $180\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养 24 h。按 1% 的接种量将培养液转接至装有 100 mL LB 液体培养基的 250 mL 三角瓶中 28°C , $180\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养, 每隔 2 h 在无菌条件下吸取 3 mL 菌液, 测定 $\text{OD}_{600\text{ nm}}$ 处吸光值。将所得数据进行整理, 以时间为横坐标, 吸光值为纵坐标绘制耐盐促生菌的生长曲线。

1.4.7 菌株耐盐曲线绘制 在 LB 液体培养基中添加 2%, 4%, 6%, 8%, 10% NaCl 装入瓶中, 调节 pH 至中性, 在 121°C 高温灭菌 20 min 后冷却, 按 1% 接种量吸取培养 48 h 的菌液于不同浓度 NaCl 培养基中 37°C , $150\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养 48 h, 测定 $\text{OD}_{600\text{ nm}}$ 处吸光度, 确定菌株对 NaCl 的耐受范围。

1.5 菌株鉴定

采用平板划线法将筛选获得的耐盐植物促生菌株接种于 LB 固体培养基, 置于 30°C 恒温培养箱培养 24~48 h。观察单菌落的形态学特征(包括形状、色泽、表面纹理等)。参考《常见细菌系统鉴定手册》^[27] 的方法进行革兰氏染色、蔗糖发酵、V-P 试验、柠檬酸盐利用试验、尿素酶反应、明胶液化试验、硝酸盐还原试验、淀粉水解试验和接触酶检测等表型特征分析, 依据《伯杰细菌鉴定手册》^[28] 的分类标准, 结合显微形态特征和生化特性, 确定菌株的科属。

将纯化菌株接种于 LB 液体培养基中, 于 30°C , $180\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养至对数生长期 ($\text{OD}_{600\text{ nm}}$ 值 = 0.8~1.0)^[29]。在 4°C , $8000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min 收集菌体, 按照 16S rDNA 基因序列分析的方法进行鉴定^[30] 利用 PCR 扩增 16S rDNA 基因序列, 引物为细菌 16S rDNA 基因通用引物 27F (5'-AGAGT TTGATCCTGGCTCAG-3') 和 1492R (5'-GGT TACCTTGTTACGACTT-3')。PCR 反应体系 (50 μL): 5 U $\cdot\mu\text{L}^{-1}$ Taq DNA 聚合酶 7.0 μL , 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 上下游引物各 1.5 μL , 1.0 μL 基因组 DNA 模板及 39.0 μL ddH₂O。扩增程序为: 95°C 预

变性 5 min; 95℃变性 30 s, 58℃退火 30 s, 72℃延伸 90 s, 共 35 个循环; 72℃终延伸 7 min。将 PCR 原液送往生物工程公司测序, 获得测序结果后在 NCBI 网站中进行 BLAST 序列比对, 基于 $\geq 99\%$ 相似度阈值确定菌株的种属信息。

1.6 种子萌发试验

以所筛选出的 10 株菌株菌悬浊液浸泡的种子为处理, 无菌水浸泡的种子为 CK, 每组处理设置 50 粒种子, 重复 3 次。依据国标 GB/T 2930.4-2001^[31] 开展萌发试验: 筛选颗粒饱满、大小均匀的油莎豆种子, 清水冲洗干净后, 以 0.5% (v/v) 次氯酸钠溶液表面灭菌 10 min, 无菌水淋洗 3 遍, 于 35℃条件下遮光浸种 24 h^[32], 将种子均匀平铺在盛有无菌滤纸的培养皿中。发芽周期设定为 10 d, 从第 3 d 开始每日定时观测并统计各个培养皿中发芽种子数。用第 5 d 的发芽种子数计算发芽势, 第 10 d 统计发芽率。计算公式如下:

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{前 5 d 内累计发芽的种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100$$

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{第 10 d 发芽的种子数} / \text{供试种子总数}) \times 100$$

1.7 油莎豆幼苗期盆栽试验

基于前期种子萌发试验, 筛选出 Y-35, Y-38 及 Y-46 菌株, 制备菌悬液, 各处理设置 3 次重复。油莎豆种子萌发后第 3 d, 选取生长状态均一的幼苗, 定植于基质统一的花盆 (直径 10 cm, 装土量 1 kg) 中, 单株栽培。采用灌根法接种菌悬液, 单次接种量为 50 mL, 每 5 d 处理一次。持续处理 30 d 后取样, 测定植株生长相关指标^[33]。

菌悬液制备: 将各供试菌株 (Y-35, Y-38, Y-46) 分别接种于 200 mL LB 液体培养基中, 于 28℃, 125 r·min⁻¹ 培养 48 h^[34]。随后, 在 4℃条件下 10 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 收集菌体, 去除上清液。收集的菌体沉淀用适量无菌水重悬, 调整菌悬液浓度至约 10⁷ CFU·mL⁻¹ (OD_{600 nm} 值为 0.8), 供后续接种试验使用^[35]。

1.8 数据处理

采用 Excel 2024 软件进行数据处理, 使用 Origin 2024 软件进行绘图, 使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 耐盐促生菌的功能性分析

利用 5% NaCl 的 LB 培养基从油莎豆根际土壤中筛选获得 10 株菌株, 并对其促生能力进行了定性和定量分析, 重点检测了解有机磷、解无机磷和产 IAA 三项指标。

解磷能力的定性结果表明, Y-35, Y-38, Y-46 具有解有机磷能力但组间差异不显著。Y-2, Y-9, Y-17, Y-22, Y-38, Y-46 具有解无机磷能力, 其中 Y-38 显著高于其他组 ($P < 0.05$)。

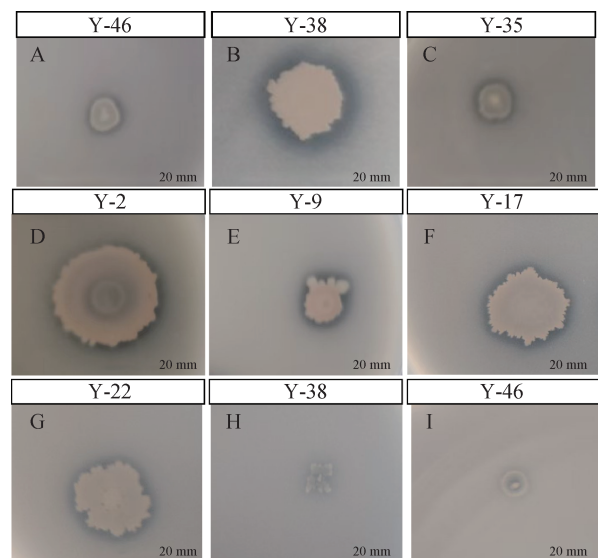


图1 菌株解有机磷和无机磷能力测定

Fig. 1 Determination of organic phosphorus-mineralizing and inorganic phosphorus-solubilizing abilities of strains

注: A-C 为解有机磷能力测定, D-I 为解无机磷能力测定

Note: A-C refers to determination of organic phosphorus dissolution ability, D-I refers to determination of inorganic phosphorus dissolution ability

不同菌株的促生能力存在显著差异 ($P < 0.05$)。在解有机磷能力方面, 仅 Y-35 (0.46 mg·L⁻¹), Y-38 (0.51 mg·L⁻¹) 和 Y-46 (0.42 mg·L⁻¹) 表现出活性 (图 1), 且三者间无显著差异; 解无机磷能力以 Y-38 (0.65 mg·L⁻¹) 最强, 显著高于其他菌株 ($P < 0.05$), 其次为 Y-46 (0.50 mg·L⁻¹) 和 Y-22 (0.49 mg·L⁻¹), 而 Y-30 和 Y-32 未检测到活性 (表 1)。

IAA 产量各菌株间差异显著 ($P < 0.05$), 分泌量的范围为 0.27~64.35 mg·L⁻¹, 有 8 株菌的 IAA 产量高于 10 mg·L⁻¹。Y-35 (64.35 mg·L⁻¹) 和 Y-46 (54.48 mg·L⁻¹) 产量最高, 显著优于其他菌株 ($P < 0.05$), Y-38 (10.28 mg·L⁻¹), Y-2 (16.21 mg·L⁻¹) 和

Y-40(13.42 mg·L⁻¹)产量居中,Y-9(0.27 mg·L⁻¹)产量最低。值得注意的是,Y-38同时具备解有机磷、解无

机磷和产 IAA 能力,显示出综合促生潜力,这些结果为后续植物促生菌的筛选和应用提供了重要数据支撑。

表 1 菌株促生能力定量分析

Table 1 Quantitative analysis of the promoting capacity of strains

菌株编号 Strain number	解有机磷含量 Content of mineralized organic phosphorus/ (mg·L ⁻¹)	解无机磷含量 Content of solubilized inorganic phosphorus/ (mg·L ⁻¹)	产 IAA 量 Content of produced IAA/ (mg·L ⁻¹)
Y-2	ND	0.40±0.01 ^e	16.21±0.20 ^c
Y-9	ND	0.44±0.02 ^{cd}	0.27±0.03 ⁱ
Y-17	ND	0.41±0.02 ^e	0.45±0.02 ^h
Y-22	ND	0.49±0.00 ^{bc}	10.69±0.03 ^f
Y-30	ND	ND	11.74±0.05 ^e
Y-32	ND	ND	11.86±0.04 ^e
Y-35	0.46±0.02 ^a	ND	64.35±0.06 ^a
Y-38	0.51±0.01 ^a	0.6503±0.01 ^a	10.28±0.02 ^g
Y-40	ND	ND	13.42±0.04 ^d
Y-46	0.42±0.01 ^a	0.50±0.05 ^b	54.48±0.03 ^b

注:ND为无效果。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note: ND means no effect. Different lowercase letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$), the same as below

对所筛选出的 10 株的促生特性进行了系统性定性评估,包括固氮能力、产铁载体能力及解硅酸盐能力(表 2)。结果表明,不同菌株的促生功能存在显著差异。Y-2, Y-9, Y-35, Y-38, Y-46 菌株均

不具备固氮、产铁载体和解硅酸盐能力; Y-17, Y-22, Y-32, Y-40 菌株具备固氮和解硅酸盐能力,但不具备产铁载体能力; Y-30 菌株具备解硅酸盐能力,不具备固氮和产铁载体能力。

表 2 油莎豆根际菌株促生特性

Table 2 Promoting characteristics of rhizosphere strains of *Cyperus esculentus* L.

菌株编号 Strain number	固氮能力 Nitrogen-fixing capacity	产铁载体能力 Siderophore-producing ability	解硅酸盐能力 Silicate-solubilizing ability
Y-2	—	—	—
Y-9	—	—	—
Y-17	+	—	+
Y-22	+	—	+
Y-30	—	—	+
Y-32	+	—	+
Y-35	—	—	—
Y-38	—	—	—
Y-40	+	—	+
Y-46	—	—	—

注:促生潜力以 D/d 比值判定:当 $D/d<0.5$ 时记为阴性(—),表示无显著促生作用;当 $D/d\geq 0.5$ 时记为阳性(+),表示具显著促生潜力

Note: The growth-promoting potential is determined by the D/d ratio: when $D/d<0.5$, it is recorded as negative (—), indicating no significant growth-promoting effect; when $D/d\geq 0.5$, it is recorded as positive (+), indicating significant growth-promoting potential

固氮能力方面,经过初步筛选,在 Ashby 无氮培养基上传代 3 次(图 2),仍能正常生长的菌株共 4 株(Y-17, Y-22, Y-32, Y-40),表明这 4 株菌具有固氮能力。

采用硅酸盐培养基对筛选出的 10 株菌株进行培养测定,筛选出菌落具有光滑透明油滴状的菌株。结果如图 3 所示, Y-17, Y-22, Y-30, Y-32, Y-40 菌株具有解硅酸盐特性。

产铁载体能力在所有供试菌株中均未检测到。

表明此类功能在油莎豆根际菌群中可能并非普遍特性。

10 株菌株在 LB 培养基中均呈现典型“S”型生长曲线,对数生长期集中于 6—18 h, 20—24 h 后达到平缓期(图 4),平缓期内(24—32 h)内所有菌株均未出现衰退期。平缓期内菌株 OD_{600 nm} 值排序为: Y-40>Y-30>Y-9>Y-32>Y-38>Y-35>Y-46>Y-17>Y-2>Y-22。且 OD_{600 nm} 值均在 2.0 以上,表明在 24—32 h 时间段内,菌株活性较强。

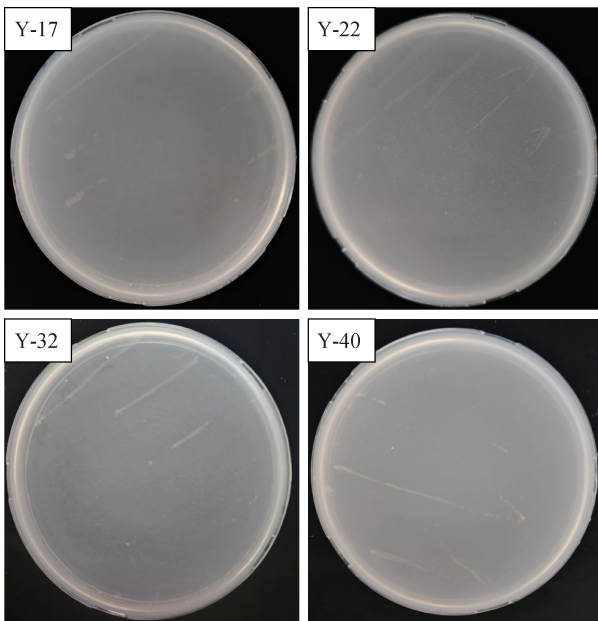


图2 菌株固氮能力测定

Fig. 2 Determination of nitrogen-fixing ability of strains

耐盐实验显示,所筛选出的10株菌株对NaCl具有较高的耐受能力。Y-17, Y-40, Y-46在

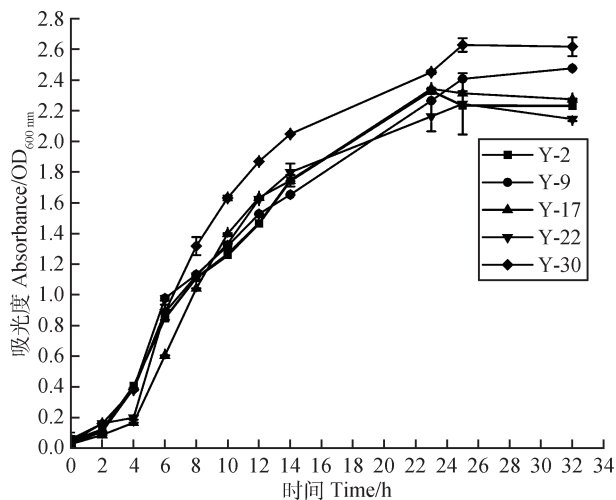


图4 菌株的生长曲线

Fig. 4 Growth curves of the strains

2.2 耐盐促生菌鉴定及生理生化分析

通过传统生理生化试验对10株菌株的表型特征进行分析(表3)。结果显示,淀粉水解能力仅Y-40呈阳性,其余菌株均为阴性;柠檬酸盐利用测试中,Y-22,Y-32和Y-40呈阳性,其他菌株为阴性;蔗糖发酵测试中,Y-38和Y-46呈阳性,其他为阴性;蛋白胨水反应仅在Y-38呈阳性;尿素酶活性测试中,Y-17和Y-35呈阳性;明胶液化能力在Y-22,Y-32和Y-40呈阳性;硝酸还原测试中,Y-17,Y-22,Y-30,Y-32,Y-35和Y-40呈阳性,而Y-2,Y-9,Y-

8%NaCl浓度下OD_{600 nm}值最大,Y-9,Y-35,Y-38在6%NaCl浓度下OD_{600 nm}值最大,如Y-2,Y-22和Y-30的耐盐阈值仅为4%,Y-32在2%~10%NaCl浓度范围内,OD_{600 nm}值一直下降,说明其耐盐性较差,受NaCl抑制程度最大(图5)。

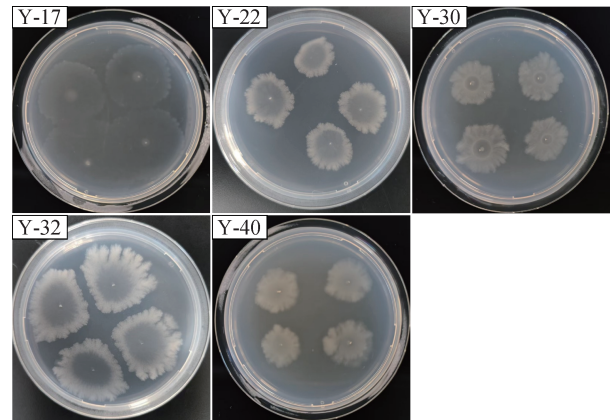
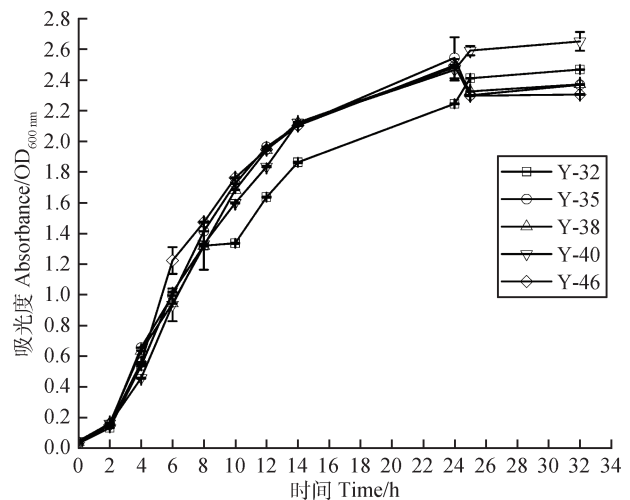


图3 菌株解硅酸盐能力测定

Fig. 3 Determination of silicate-solubilizing ability of strains



38和Y-46为阴性;甲基红测试中,Y-38和Y-46呈阳性;V-P测定在所有菌株中均呈阴性。

革兰氏染色结果显示(图6),除Y-17,Y-40为革兰氏阴性菌外,其余均为革兰氏阳性菌,符合芽孢杆菌属和微小杆菌属的典型特征。

对所筛选出的菌株进行16S rDNA鉴定通过分子同源序列对比(表4),并建立系统发育树(图7),发现10株菌株分别属于4个属,其中菌株Y-2(*Bacillus safensis*),Y-9(*Bacillus pumilus*),Y-22/Y-30/Y-32(*Bacillus subtilis*),Y-40(*Bacillus halotoler-*

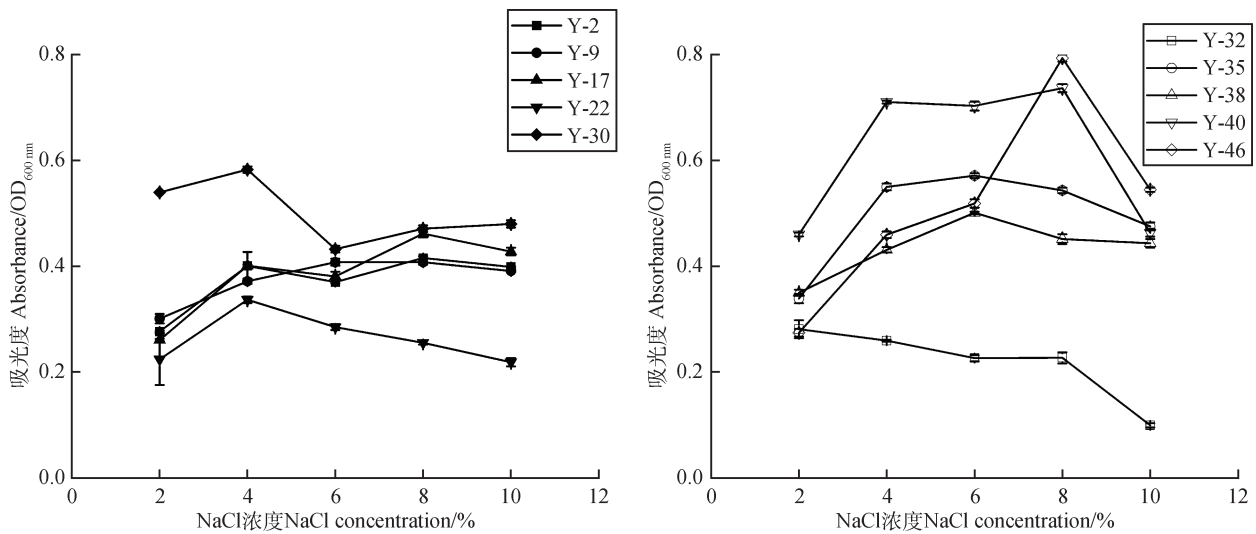


图 5 菌株的耐盐曲线

Fig. 5 Salt tolerance curves of the strains

表 3 菌株特征

Table 3 Strain characteristics

菌株特征 Strain characteristics	菌株编号 Strain number									
	Y-2	Y-9	Y-17	Y-22	Y-30	Y-32	Y-35	Y-38	Y-40	Y-46
淀粉水解 Starch hydrolysis	—	—	—	—	—	—	—	—	+	—
柠檬酸试验 Citrate utilization test	—	—	—	+	—	+	—	—	+	—
革兰氏染色 Gram staining	+	+	—	+	+	+	+	+	—	+
蔗糖发酵试验 Sucrose fermentation test	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+
蛋白胨水反应 Peptone water reaction	—	—	—	—	—	—	—	+	—	—
尿素酶试验 Urease test	—	—	+	—	—	—	+	—	—	—
明胶液化试验 Gelatin liquefaction test	—	—	—	+	—	+	—	—	+	—
硝酸还原试验 Nitrate reduction test	—	—	+	+	+	+	+	—	+	—
甲基红试验 Methyl red test	—	—	—	—	—	—	—	+	—	+
V-P 测定 Voges-proskauer test	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注: + 为阳性反应, — 为阴性反应

Note: + indicates a positive reaction, and — indicates a negative reaction

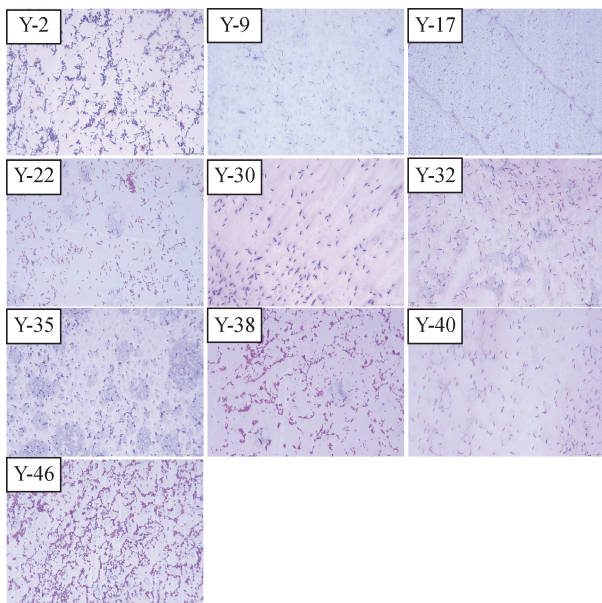


图 6 菌株革兰氏染色

Fig. 6 Gram staining of the strain

注: 图中比例尺为 200 μm Note: Scale bar is 200 μm

ans) 属于芽孢杆菌属, 占分离菌株总数的 60%; Y-17 (*Vreelandella titanicae*) 为弗里兰氏菌属代表菌株; Y-35 (*Exiguobacterium mexicanum*) 和 Y-38 (*Exiguobacterium acetylicum*) 属于微小杆菌属; Y-46 (*Bisbaumannia pacifica*) 为比斯鲍曼氏菌属。所有菌株的 16S rDNA 序列与 NCBI 数据库参比菌株的相似性均 $\geq 99\%$, 表明菌株分类学地位明确, 遗传稳定性较高。

2.3 耐盐促生菌的促生性能分析

种子萌发试验显示, 10 株耐盐促生菌株对油莎豆种子萌发具有不同程度的促进作用(图 8)。与对照组(CK)相比, 菌株处理组的第 10 d 发芽率及第 5 d 发芽势均有显著提升($P < 0.05$)。其中, Y-38 处理组发芽率最高(82.00%), 较 CK 提高 26.89%。Y-46 处理组发芽率为 80.00%, 发芽势达 64.00%, 均显著高于 CK。菌株 Y-35 的发芽率为 78.00%,

表 4 分离菌株的 16S rDNA 序列同源性分析

Table 4 Homology analysis of 16S rDNA sequences from isolated strains

菌株编号 Strain number	Blast 分析相似度最高的种属 Blast analysis highest similarity species	相似度 Similarity/%
Y-2	沙福芽孢杆菌 <i>Bacillus safensis</i> (NR041794.1)	100.00
Y-9	短小芽孢杆菌 <i>Bacillus pumilus</i> (NR117300.1)	99.79
Y-17	泰坦尼克号弗里兰氏菌 <i>Vreelandella titanicae</i> (NR027552.1)	99.71
Y-22	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> (NR027552.1)	99.93
Y-30	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> (NR027552.1)	99.93
Y-32	枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> (NR027552.1)	100.00
Y-35	墨西哥微小杆菌 <i>Exiguobacterium mexicanum</i> (NR109413.1)	99.44
Y-38	乙酰微小杆菌 <i>Exiguobacterium acetylicum</i> (NR043479.1)	99.72
Y-40	耐盐芽孢杆菌 <i>Bacillus halotolerans</i> (NR115931.1)	99.86
Y-46	太平洋比斯鲍曼菌 <i>Bisbaumannia pacifica</i> (NR114047.1)	99.51

而 Y-30 处理组的发芽势 (56.00%) 与发芽率 (72.67%) 亦优于 CK。

菌株间促生效应差异显著 ($P<0.05$)。Y-38 处理的发芽势显著高于 Y-46 处理 ($P<0.05$), 但发芽率差异不显著。Y-38, Y-35, Y-46 处理发芽率显著高于其他处理组, 且 Y-38 发芽率显著高于 Y-35。这表明 Y-38 菌株对油莎豆萌发具有显著的促进作用。

根据 2.1 和上述萌发试验的结果, 将 Y-35, Y-38, Y-46 三株菌制备成菌剂进行盆栽试验。结果如表 5 所示, 与未接菌对照 (CK) 相比, 菌剂处理对幼苗生长指标产生了显著影响 ($P<0.05$)。Y-38 处理表现最为突出, 其株高、叶宽、茎粗、地上鲜重和地下鲜重与 CK 组相比分别提升了 11.37%,

10.36%, 22.67%, 41.32%, 80.49%。

Y-35 处理仅显著增加了株高 (37.18 cm), 但其叶宽 (4.19 mm) 和茎粗 (3.54 mm) 反而低于 CK, 地上鲜重 (3.05 g) 和地下鲜重 (0.43 g) 与 CK 无显著差异; Y-46 处理对株高 (35.12 cm)、地上鲜重 (3.34 g) 和地下鲜重 (0.56 g) 无显著促生效果, 其叶宽 (4.60 mm) 和茎粗 (4.53 mm) 虽显著高于 Y-35 但与 CK 无显著差异。Y-35 和 Y-46 处理组在地下鲜重和地上鲜重上均差异不显著。

值得注意的是, Y-38 处理在株高、叶宽、茎粗、地上鲜重和地下鲜重方面均优于 Y-46 和 Y-35 处理且差异显著 ($P<0.05$)。这表明 Y-38 菌株对油莎豆幼苗的促生作用显著。

表 5 添加不同菌剂对油莎豆幼苗期生长指标的影响

Table 5 Effects of different microbial agents on growth indexes of soybean seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶宽 Leaf width/mm	茎粗 Stem diameter/mm	地上鲜重 Aboveground fresh weight/g	地下鲜重 Underground fresh weight/g
CK	35.17±1.25 ^c	4.73±0.08 ^b	4.50±0.34 ^b	2.88±0.27 ^b	0.41±0.06 ^b
Y-35	37.18±0.39 ^b	4.19±0.07 ^c	3.54±0.13 ^c	3.05±0.18 ^b	0.43±0.09 ^b
Y-38	39.17±1.55 ^a	5.22±0.06 ^a	5.52±0.22 ^a	4.07±0.19 ^a	0.74±0.13 ^a
Y-46	35.12±0.21 ^c	4.60±0.05 ^b	4.53±0.14 ^b	3.34±0.31 ^b	0.56±0.02 ^b

3 讨论

3.1 耐盐促生菌的促生特性

本研究筛选的 10 株耐盐促生菌在 5% NaCl 条件下均表现出生长活性, 其中 Y-17, Y-40, Y-46 在 8% NaCl 下仍维持较高 OD_{600 nm} 值, 显著优于多数报道的根际促生菌 (PGPR) 耐盐阈值 (通常 ≤ 6% NaCl)。如陈苏等^[36]从东乡野生稻根际分离的 6 株 PGPR 中, A5 和 A18 菌株耐盐性最强, 可在 1.20 mol·L⁻¹ (约 6.7%) NaCl 培养基上生长; Wu 等^[37]从东营盐碱地高粱根际土壤分离的芽孢杆菌 RA 可在 0~7% NaCl 浓度范围内生长; 卜凡等^[38]从小麦根际

土中筛选出的菌株 Ta Rb44 可以耐受高达 4% 的 NaCl。

菌株的促生功能呈现显著分化: 本研究成功从南疆油莎豆根际筛选出 10 株耐盐促生菌, 功能特性呈现多样性。在 IAA 分泌方面, Y-35 和 Y-46 的产量显著高于多数报道的 PGPR 菌株的产量, 如陶泽等^[35]从东北山樱根际土壤中筛选出的肠杆菌属 (*Enterobacter sp.*) D46 (IAA 产量为 53.10 mg·L⁻¹) 和代金霞等^[39]从宁夏银北盐碱区耐盐植物根际土壤中筛选出的 JJC12 枯草芽孢杆菌 (IAA 产量为 34.74 mg·L⁻¹)。Y-38 同时具备解有机磷、解无机磷和产 IAA 能力, 与张慧等^[40]的研究结果相一致。

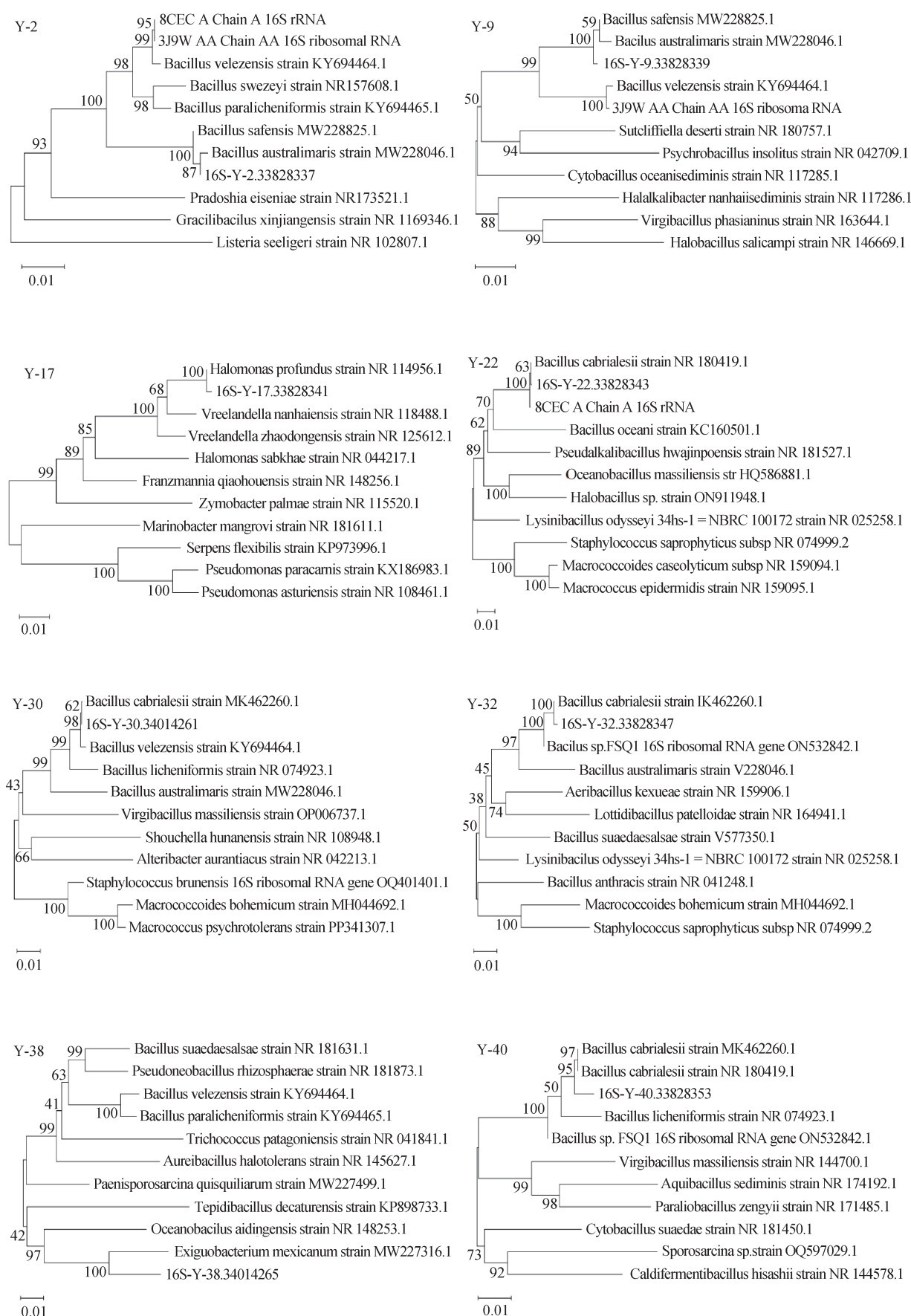


图 7 不同菌株基于 16S rDNA 的系统发育树

Fig. 7 Phylogenetic tree based on 16S rDNA of different strains

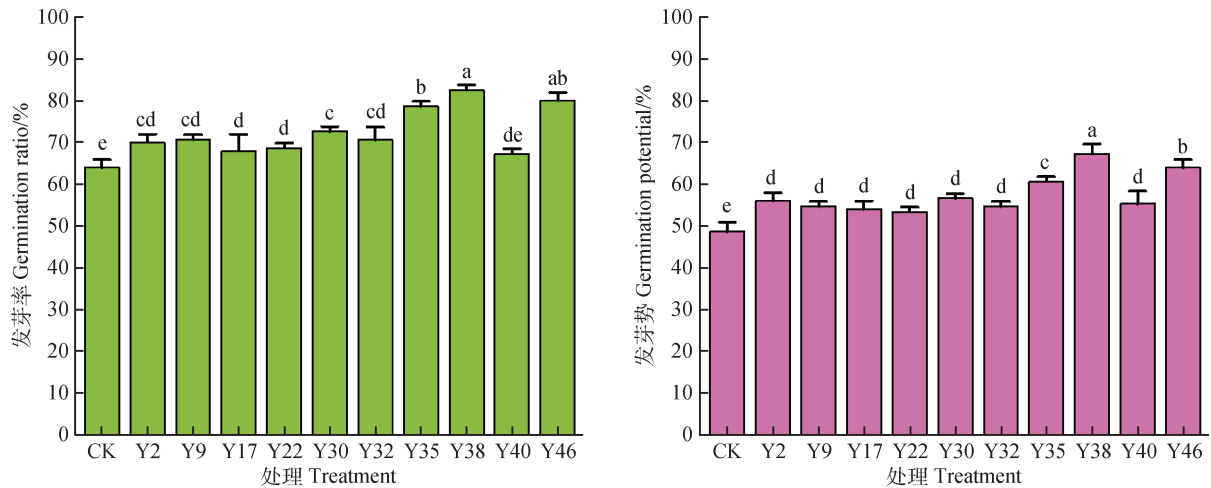


图8 不同处理下种子发芽率与发芽势

Fig. 8 Seed germination rate and germination potential under different treatments

此外,所有菌株均未表现出产铁载体能力,这可能与油莎豆根际微环境铁元素富集或菌株特异性有关。同时,菌株自身基因调控差异(如铁载体合成关键基因缺失)也可能是重要原因,这与刘奕嫒等^[41]研究铁的转运吸收与盐碱胁迫的关系的结果相一致。

耐盐性与促生功能的协同性在Y-38上表现突出,其解磷能力显著高于其他菌株($P < 0.05$),印证了耐盐菌株通过养分活化缓解盐胁迫的机制。然而,耐盐性最强的Y-46(8% NaCl)虽具备高产IAA能力,但解磷能力较弱,这表明菌株在适应高盐环境过程中,需优先分配能量用于渗透调节(如合成脯氨酸、甜菜碱),从而限制了代谢功能(如解磷相关酶合成)的表达,该结论与Yang等^[42]研究结果一致。

3.2 耐盐促生菌的鉴定

菌株鉴定显示芽孢杆菌属(*Bacillus*)占主导(60%),包括耐盐菌株Y-40(*B. halotolerans*)和高效解磷菌Y-38(*Exiguobacterium acetylicum*),印证了该属在根际促生菌中的核心地位。生理生化特性与分类地位高度相关:革兰氏阳性菌普遍具有柠檬酸盐利用能力,而唯一淀粉水解菌株Y-40与*B. halotolerans*的碳水化合物代谢特征吻合。

本研究发现耐盐性与代谢功能呈负相关:耐盐性最强的Y-46菌株无解磷与固氮能力,仅具备产IAA能力;而耐盐性中等的Y-38菌株兼具多种促生活性,这一结果支持如下观点:盐胁迫条件下,菌株的资源分配需在生存功能与共生功能间进行权衡—高盐环境下,菌株需将更多能量用于维持细胞渗透压平衡,进而导致其在促生相关代谢功能上的能

量投入减少;而中等耐盐菌株无需过度消耗能量以应对盐胁迫,因此可更高效地表达促生功能。

值得注意的是,具固氮能力的Y-17、Y-22、Y-32、Y-40均为芽孢杆菌属,但固氮效率与耐盐性无显著关联,与曹晶晶等^[43]报道的固氮菌耐盐性受限现象一致。推测可能是由于固氮酶对盐离子敏感,高盐环境下酶活性受抑,导致菌株即使具备固氮基因,也难以高效发挥固氮功能。此外,Y-40的淀粉水解独特性表明其碳源利用多样性可增强盐环境适应性,即通过降解土壤中淀粉类有机物获取更多碳源,为渗透调节物质合成提供能量,类似特性在刘文等^[44]研究中已被证实。

3.3 耐盐菌株的促生效果

植物根际促生菌(PGPR)对种子萌发和幼苗生长的调控作用,主要通过直接促生(分泌植物激素)和间接调控(优化根际微环境)实现。在种子萌发阶段,PGPR通过分泌吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA_3)等植物激素,刺激胚根细胞伸长和分裂,从而提高种子发芽率和发芽势^[45]。此外,PGPR还能通过溶磷、固氮等作用活化土壤养分,将土壤中难溶性磷、空气中的氮气转化为植物可吸收的有效养分,为种子萌发提供营养保障。在幼苗生长阶段,PGPR定殖于根际后,可通过竞争营养、分泌抗菌物质抑制病原菌繁殖,同时增加放线菌等有益微生物丰度,优化根际微生物群落结构,进而促进幼苗根系发育^[46]。

本研究通过盆栽试验发现,菌株促生效果与体外指标不完全一致:尽管Y-38并非IAA产量最高的菌株,但其处理组株高、地上鲜重及发芽率均显

著优于其他处理组,这一发现表明菌株的综合促生功能(解磷和IAA)比单一功能指标更能准确预测其在盐碱土中的实际促生效能。Y-35(高产IAA)的盆栽效果反而低于CK,分析原因可能是过量IAA抑制了主根伸长和侧根分化,导致幼苗生长受阻。这一现象与付严松等^[47]关于枯草芽孢杆菌AH18和地衣芽孢杆菌K11可分泌IAA,低浓度促进黄瓜根系生长,高浓度反而抑制主根伸长的研究结果相一致。

对比前人研究,Y-38的促生效果(株高提升11.40%)优于文怡等^[48]在研究盐渍土中报道的*Pseudomonas*菌株(株高提升5%~8%)和周晓倩等^[49]筛选的毛乌素沙地高效解磷假单胞菌R4(株高提升7.80%)。这一优势主要源于Y-38耐盐性与解磷能力的协同作用。Selvakumar等^[50]的研究发现,使用*Exiguobacterium acetylicum*菌株IP(MTCC 8707)处理小麦后根和地上部长度分别提高了16.54%和8.16%,表明该属菌株具有显著的促生潜力,也为本研究Y-38在油莎豆上的优异表现提供了支撑。窦鑫等^[51]对玉米添加贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*),使其株高、茎粗、地上物质干重均有所提升;王会会等^[52]通过对苦草接种根际促生菌(*Bacillus*),使其株高、根长、地上鲜重和根鲜重均有不同程度的提升。这些研究表明,同一菌属菌株的促生效果在不同作物上已得到广泛验证,进一步证明本研究筛选菌株的应用普适性。

值得注意的是,具固氮能力的菌株在萌发试验中未表现显著优势,表明固氮菌对种子萌发的影响较弱,推测原因可能是种子萌发阶段对氮素需求较低,菌株固氮功能难以充分发挥;同时,菌株的解磷、产IAA等其他功能可能对萌发指标产生干扰,掩盖了固氮作用的效果。因此,后期需参考李娜等^[53]关于营养生长期试验的研究方案,明确固氮菌株在油莎豆不同生育期的作用。

综上,耐盐促生菌的实际促生效果是其耐盐性、代谢功能多样性及宿主-微生物互作效率共同作用的结果。本研究筛选的Y-38兼具中等耐盐性、高效解磷能力及适宜IAA产量,其较为优异的综合性能可为盐渍化土壤微生物修复提供优选菌种资源,从而进一步丰富新疆盐碱沙土地的菌株资源库。

4 结论

本研究从南疆沙区油莎豆根际土壤中分离获

得10株耐盐植物根际促生菌(PGPR),根据解有机磷能力、解无机磷能力和产IAA能力,结合种子萌发率,定向筛选确定了3株表现优异的菌株,分别为Y-35(墨西哥微小杆菌)、Y-38(乙酰微小杆菌)、Y-46(太平洋比斯鲍曼菌),并进一步通过盆栽试验验证其促生能力。三株菌的促生效果通过综合排序为Y-38>Y-46>Y-35。最终确定了综合性能优异的Y-38菌株,该菌株具有良好的促生能力,可为油莎豆微生物肥料的开发利用提供理论支持。

参考文献

- [1] 施金里,徐丽萍,李晓航,等. 南疆县域生态-经济协调性评估及可持续发展分区[J]. 干旱区地理,2024,47(10):1794-1804
SHI J L, XU L P, LI X H, et al. Evaluation of ecological-economic harmony and sustainable development zoning in counties of southern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(10): 1794-1804
- [2] 景永元,谢元元,祁宏业,等. 在新疆南疆地区油莎豆引种种植初探[J]. 新疆畜牧业,2014(8):29-30
JING Y Y, XIE Y Y, QI H Y, et al. Preliminary study on introduction and planting of *Cyperus esculentus* in southern Xinjiang[J]. Xinjiang Xumuye, 2014(8): 29-30
- [3] 王瑞元,王晓松,相海. 一种多用途的新兴油料作物——油莎豆[J]. 中国油脂,2019,44(1):1-4
WANG R Y, WANG X S, XIANG H. A multi-purpose novel oil crop—*Cyperus* beans[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(1): 1-4
- [4] 杨向东,李子勇. 我国油莎豆产业发展现状、潜力及对策[J]. 中国油料作物学报,2022,44(4):712-717
YANG X D, LI Z Y. Tigernut industry in China: current status of development, potential and adaptive suggestions[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(4): 712-717
- [5] RAMAKRISHNAN B, MADDELA N R, VENKATESWARLU K, et al. Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view[J]. Environmental Science Advances, 2023, 2(4): 586-611
- [6] 丁绍武,张鹏. 盐碱地改良研究现状及微生物菌肥应用分析[J]. 现代农业科技,2019(7):175-176
DING S W, ZHANG P. Research status of saline-alkali land improvement and application analysis of microbial fertilizer[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019 (7): 175-176
- [7] VERA-GARGALLO B, HERNÁNDEZ M, DUMONT M G, et al. Thrive or survive: prokaryotic life in hypersaline soils[J]. Environmental Microbiome, 2023, 18(1): 17
- [8] 任智慧,于乔,高士孔,等. 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 Z H, YU Q, GAO S K, et al. Screening and promoting effects of plant growth-promoting bacteria from rhizosphere of *Campeiosachys nutans* Griseb[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1693-1701

- [9] 黄雨璇,多妹玮,马驰毓,等. 高寒沙化地优势植物根际促生菌筛选及初步鉴定[J]. 草地学报,2025,33(1):34-40
HUANG Y X, DUO S W, MA C Y, et al. Screening and preliminary identification of dominant plant growth-promoting rhizobacterial species in alpine desertification[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 34-40
- [10] YANG L J, YANG K J. Biological function of *Klebsiella variicola* and its effect on the rhizosphere soil of maize seedlings[J]. PeerJ, 2020, 8: e9894
- [11] 杨晓蕾,李建宏,姚拓,等. 5株植物根际促生菌功能特性及培养条件[J]. 草业科学,2022,39(1):30-38
YANG X L, LI J H, YAO T, et al. Functional characteristics and culture conditions of five plant growth-promoting rhizobacteria strains[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(1): 30-38
- [12] 崔月,张新军,王瑞红,等. 西藏雪灵芝根际固氮菌的分离与鉴定[J]. 高原农业,2023,7(6):638-643
CUI Y, ZHANG X J, WANG R H, et al. Isolation and identification of *Azotobacter* in the rhizosphere of *Arenaria brevipetala*[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2023, 7(6): 638-643
- [13] 陈丹阳,李汉全,张炳火,等. 两株解磷细菌的解磷活性及作用机制研究[J]. 中国生态农业学报,2017,25(3):410-418
CHEN D Y, LI H Q, ZHANG B H, et al. Phosphate solubilization activities and action mechanisms of two phosphate-solubilizing bacteria[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 410-418
- [14] 韩玉竹,赵建军,曾兵,等. 多花黑麦草根际解磷菌的分离及解磷能力测定[J]. 草地学报,2011,19(5):766-770
HAN Y Z, ZHAO J J, ZENG B, et al. Isolation and the phosphate solubilizing capacity of Italian ryegrass rhizosphere phosphate-solubilizing microorganism[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(5): 766-770
- [15] 赵君,饶惠玲,冯清玉,等. 一株南方红壤区杉木根际高效解钾菌的筛选、鉴定及其培养条件优化[J]. 林业科学研究,2022,35(1):172-181
ZHAO J, RAO H L, FENG Q Y, et al. Screening, identifying and optimizing the culture conditions of high-efficiency potassium-solubilizing bacteria in the rhizosphere of *Cunninghamia lanceolata* in red soil area of South China[J]. Forest Research, 2022, 35(1): 172-181
- [16] 李雪艳,张涛,杨红梅,等. 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 X Y, ZHANG T, YANG H M, et al. 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
- [17] 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,2024:23-27
YANG Z Y. Study on interspecific convergence evolution and intraspecific variation effect of saline-alkali-tolerant phosphate-solubilizing bacteria with high efficiency[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024: 23-27
- [18] SHOKRI D, EMTIAZI G. Indole-3-acetic acid (IAA) production in symbiotic and non-symbiotic nitrogen-fixing bacteria and its optimization by taguchi design[J]. Current Microbiology, 2010, 61(3): 217-225
- [19] 孙雪,董永华,王娜,等. 耐盐碱促生菌的筛选及性能[J]. 生物工程学报,2020,36(7):1356-1364
SUN X, DONG Y H, WANG N, et al. Screening and evaluation of saline-alkali-tolerant and growth-promoting bacteria[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, 36(7): 1356-1364
- [20] 姚林林. 大豆根际耐盐菌株筛选及其合成菌群抗逆促生特性的应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:12-13
YAO L L. Screening of salt-tolerant strains in soybean rhizosphere and application study on stress-resistant and growth-promoting characteristics of its synthetic flora[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024: 12-13
- [21] 任明霞,李静,艾加敏,等. 白刺花根瘤中分离细菌的物种多样性及其促生效应[J]. 微生物学报,2024,64(8):2940-2954
REN M X, LI J, AI J M, et al. Species diversity and plant growth-promoting effects of bacteria isolated from the root nodules of *Sophora davidii*[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2024, 64(8): 2940-2954
- [22] 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
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
- [23] 苏世锋,李世雄,赵文,等. 黑河源区退化草地恢复过程中土壤磷养分及其调控因子[J]. 草业科学,2022,39(8):1562-1570
SU S F, LI S X, ZHAO W, et al. Study on soil phosphorus nutrient and its regulatory factors during the restoration of degraded grassland in the source region of Heihe River[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1562-1570
- [24] 贾西贝,王琦琦,李杨,等. 一株产吡啶乙酸耐盐促生菌的分离、鉴定及发酵条件优化[J]. 中国酿造,2019,38(11):37-42
JIA X B, WANG Q Q, LI Y, et al. Isolation, identification and fermentation conditions optimization of a salt-tolerant, growth-promoting and indoleacetic acid-producing bacterium[J]. China Brewing, 2019, 38(11): 37-42
- [25] 张钧杰,刘爽,胡明珠,等. 荒漠植物根际土壤固氮微生物的筛选及其抗逆促生特性[J]. 生物技术通报,2025,41(6):317-326
ZHANG J J, LIU S, HU M Z, et al. Screening of nitrogen-fixing microorganisms in rhizosphere soil of desert plants and their stress-resistant and growth-promoting characteristics[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(6): 317-326
- [26] 刘丽辉,蒋慧敏,区宇程,等. 南方野生稻内生细菌的分离鉴定及促生作用[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(5):1051-1058
LIU L H, JIANG H M, OU Y C, et al. Identification and growth promotion of endophytic bacteria isolated from *Oryza meridionalis*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(5): 1051-1058

- [27] 东秀珠,蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京:科学出版社,2001:349-399
DONG X Z, CAI M Y. Handbook for Systematic Identification of common bacteria [M]. Beijing: Science Press, 2001: 349-399
- [28] BUCHANAN RE, GIBBONS NE. 伯杰细菌鉴定手册(第八版)[M]. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组译. 北京:科学出版社,1984:105-138
BUCHANAN R E, GIBBONS N E. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology (8th ed.) [M]. Translated by the Translation Group of Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1984:105-138
- [29] 周英萍,唐美珍,曹彦雪,等. 一株耐冷异养硝化菌的分离鉴定及脱氮特性[J]. 湖泊科学,2019,31(3):746-754
ZHOU Y P, TANG M Z, CAO Y X, et al. Isolation and denitrification characteristics of a psychrotrophic and heterotrophic nitrification bacterium [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 (3):746-754
- [30] HE A, NIU S, YANG D, et al. Two PGPR strains from the rhizosphere of *Haloxylon ammodendron* promoted growth and enhanced drought tolerance of ryegrass [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 161:74-85
- [31] 国家质量技术监督局. 牧草种子检验规程 发芽试验:GB/T 2930.4-2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001:11-14
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Rules for forage seed testing-germination test: GB/T 2930.4-2001 [S]. Beijing: China Standards Press, 2001:11-14
- [32] 李金珠,张学昆,徐劲松,等. H_2O_2 浸种促进油莎豆萌发的生理机制[J]. 草业科学,2023,40(4):965-975
LI J Z, ZHANG X K, XU J S, et al. Physiological mechanism by which H_2O_2 soaking treatments promote the germination of *Cyperus esculentus* [J]. Pratacultural Science, 2023, 40 (4): 965-975
- [33] 武玲玲,谢永丽,杨杰,等. 萎蔫芽孢杆菌 WL520 生物活性及干旱胁迫下促紫花苜蓿生长效应[J]. 草地学报,2024,32(1):322-330
WU L L, XIE Y L, YANG J, et al. Biological activity of *Bacillus* WL520 and its growth-promoting effect on alfalfa under drought stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1):322-330
- [34] 雷生妍,张英,苏贝贝,等. 植物根际促生菌(PGPR)对高寒区3种栽培饲草促生效果研究[J]. 草地学报,2025,33(7):2388-2399
LEI S Y, ZHANG Y, SU B B, et al. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on three cultivated forages in alpine area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7):2388-2399
- [35] 陶泽,佟兆庆,秦嗣军. 樱桃根际产吲哚乙酸促生菌的分离、鉴定及功能特性[J]. 微生物学报,2025,65(1):122-135
TAO Z, TONG Z Q, QIN S J. Isolation, identification, and functional characterization of plant growth-promoting rhizobacteria capable of producing indole acetic acid from cherry rhizosphere [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(1):122-135
- [36] 陈苏,简敏菲,张晓,等. 东乡野生稻根际促生菌分离筛选及其促生作用的研究[J]. 中国土壤与肥料,2022(10):222-230
CHEN S, JIAN M F, ZHANG X, et al. Isolation, screening, and growth-promoting characteristics of plant growth promoting rhizobacteria in the rhizosphere of Dongxiang wild rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(10):222-230
- [37] WU F H, CHEN Z T, XU X T, et al. Halotolerant *Bacillus* sp. strain RA coordinates myo-inositol metabolism to confer salt tolerance to tomato [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2024, 66(9):1871-1885
- [38] 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
BU F, HAN S N, ZHU R G, et al. Isolation, identification, and plant growth-promoting effect evaluation of a saline-alkali-tolerant rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* TaRb₄₄ [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(4):1498-1511
- [39] 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
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
- [40] 张慧,卢文才,王冬,等. 一株高产吲哚乙酸的 *Bacillus cereus* YT2-1C 的鉴定及促生作用[J]. 生物技术通报,2025,41(5): 300-309
ZHANG H, LU W C, WANG D, et al. Identification of *Bacillus cereus* YT2-1C with high indoleacetic acid yield and its growth-promoting effect [J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41 (5):300-309
- [41] 刘奕熾,于洋,方军. 盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究[J]. 土壤与作物,2018,7(2):201-211
LIU Y M, YU Y, FANG J. Saline-alkali stress and molecular mechanism of saline-alkali tolerance in plants [J]. Soils and Crops, 2018, 7(2):201-211
- [42] YANG X X, YUAN R W, YANG S Y, et al. A salt-tolerant growth-promoting phyllosphere microbial combination from mangrove plants and its mechanism for promoting salt tolerance in rice [J]. Microbiome, 2024, 12(1):270
- [43] 曹晶晶,熊惘梓,钞亚鹏,等. 极耐盐碱固氮菌的分离鉴定及固氮特性研究[J]. 微生物学报,2021,61(11):3483-3495
CAO J J, XIONG M Z, (CHAO/MIAO) Y P, et al. Isolation and identification of extremely salt-tolerant *Azotobacter* and its nitrogen-fixing characteristics [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(11):3483-3495
- [44] 刘文,杨渐,吴耿,等. 青藏高原北部湖泊沉积物中基于不同碳源可培养细菌多样性[J]. 盐湖研究,2016,24(2):92-101
LIU W, YANG J, WU G, et al. Diversity of cultivable bacteria based on different carbon sources in the sediments of lakes on northern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(2):92-101
- [45] 施静,陈瑞岭,李建宏,等. 党参植物根际促生菌(PGPR)的分离筛选和特性研究[J]. 安徽农学通报,2025,31(7):94-99

- SHI J, CHEN R L, LI J H, et al. Isolation, screening, and characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) of *Codonopsis pilosula* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2025, 31(7): 94-99
- [46] 李江, 靳艳玲, 赵海. 根际促生菌对植物生长的影响及其作用机制[J]. 黑龙江农业科学, 2023(10): 132-137
- LI J, JIN Y L, ZHAO H. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on plant growth and its mechanism [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(10): 132-137
- [47] 付严松, 李宇聪, 徐志辉, 等. 根际促生菌调控植物根系发育的信号与分子机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 42-48
- FU Y S, LI Y C, XU Z H, et al. Research progress on signals and molecular mechanisms of plant root development regulated by plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(9): 42-48
- [48] 文怡, 韦廷舟, 罗智健, 等. 两株耐盐假单胞菌对盐胁迫下油菜种子萌发的影响[J]. 植物学研究, 2023, 12(4): 192-199
- WEN Y, WEI T Z, LUO Z J, et al. Effects of two salt-tolerant *Pseudomonas* strains on seed germination of *Brassica napus* under salt stress [J]. Botanical Research, 2023, 12(4): 192-199
- [49] 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
- ZHOU X Q, FENG W, HE B, et al. Isolation and screening of soil phosphate-solubilizing bacteria and their phosphate solubilization mechanisms in the Mu Us Desert [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(11): 109-118
- [50] SELVAKUMAR G, KUNDU S, JOSHI P, et al. Growth promotion of wheat seedlings by *Exiguobacterium acetylicum* 1P (MTCC 8707) a cold tolerant bacterial strain from the Uttarakhand Himalayas [J]. Indian Journal of Microbiology, 2010, 50(1): 50-56
- [51] 窦鑫, 郭鹏博, 张伟, 等. 贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) PZ-3吸附载体的筛选及对玉米根际土壤微生物多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2024, 51(6): 2013-2029
- DOU X, GUO P B, ZHANG W, et al. The adsorption carrier of *Bacillus velezensis* PZ-3: screening and effects on microbial diversity in the rhizosphere soil of maize [J]. Microbiology China, 2024, 51(6): 2013-2029
- [52] 王会会, 李前正, 李亚华, 等. 根际促生菌对沉水植物的促生效应及其与沉积物氮磷赋存形态的关系[J]. 水生生物学报, 2021, 45(2): 299-307
- WANG H H, LI Q Z, LI Y H, et al. The effect of pgpr on submerged macrophyte and its relationship with the sediment nitrogen and phosphorus forms [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(2): 299-307
- [53] 李娜, 马祝铿, 黄瑞华, 等. 根瘤菌对广金钱草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 广西植物, 2021, 41(11): 1931-1938
- LI N, MA Z K, HUANG R H, et al. Soaking effects of rhizobia on seed germination and seedling growth of *Desmodium styracifolium* [J]. Guihaia, 2021, 41(11): 1931-1938

(责任编辑 闵芝智)