

乌兰布和沙漠四翅滨藜根际、内生细菌的促生作用及其复合菌群的构建

高艳东¹, 崔大力², 王志林¹, 侯可心¹, 刘扬¹, 李俊达¹, 王宗人¹,
赵雨洁¹, 刘爽¹, 刘惠荣^{1*}

1 内蒙古农业大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特

2 内蒙古沙漠本草农业科技有限公司, 内蒙古 巴彦淖尔

高艳东, 崔大力, 王志林, 侯可心, 刘扬, 李俊达, 王宗人, 赵雨洁, 刘爽, 刘惠荣. 乌兰布和沙漠四翅滨藜根际、内生细菌的促生作用及其复合菌群的构建[J]. 微生物学报, 2026, 66(4): 1890-1906.

GAO Yandong, CUI Dali, WANG Zhilin, HOU Kexin, LIU Yang, LI Junda, WANG Zongren, ZHAO Yujie, LIU Shuang, LIU Huirong. Evaluation of plant growth-promoting effects of rhizosphere and endophytic bacteria of *Atriplex canescens* in the Ulan Buh Desert and construction of strain combinations[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2026, 66(4): 1890-1906.

摘要: 四翅滨藜是荒漠抗逆先锋树种, 也是肉苁蓉主要寄主, 在内蒙古乌兰布和沙漠地区广泛种植。根际及内生微生物在植物生长发育和抗逆境过程中发挥重要作用。然而, 关于内蒙古乌兰布和沙漠地区四翅滨藜根际与内生微生物的促生功能研究尚较为匮乏。【目的】筛选内蒙古乌兰布和沙漠地区四翅滨藜根际及内生细菌中的促生菌株, 为该地区四翅滨藜的可持续繁育提供微生物菌种资源。【方法】从内蒙古磴口县乌兰布和沙漠采集四翅滨藜根际土和植株样品, 分离纯化四翅滨藜根际和内生细菌, 探究这些细菌与课题组前期得到的黄芪促生细菌对四翅滨藜幼苗的促生效果, 对具有显著促生效果的菌株进行分子生物学鉴定和促生功能分析, 然后对这些菌进行复配组合构建人工复合菌群, 并检测复合菌群对四翅滨藜的促生效果。【结果】共分离得到 60 株四翅滨藜根际细菌和 14 株内生细菌, 其中 2 株内生细菌具有显著促生作用, 检测的黄芪促生菌中有 3 株菌对四翅滨藜具有显著促生作用。5 株促生细菌分属于 3 个属和 4 个种, 包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和不动杆菌属(*Acinetobacter*)。这些促生菌株均具有不同水平的固氮、解无机磷、解有机磷、解钾长石、解硅酸铝钾、产吲哚-3-乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)和产生物膜的能力, 大多数菌株具有产铁载体的能力。人工复合菌群中多个组合均具有促进效果, 组合 2 (IH-2、IH-9、TYA27)、3 (IH-2、IH-9、PAS13-2)和 4 (IH-2、TYA39、TYA27)综合促

资助项目: 巴彦淖尔市科技计划(K202311); 内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS03042); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(BR251306)

This work was supported by the Science and Technology Plan of Bayannur City (K202311), the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2024LHMS03042), and the Inner Mongolia Autonomous Region Direct University Basic Research Grant (BR251306).

*Corresponding author. E-mail: lh217@126.com

Received: 2025-09-15; Accepted: 2025-11-19; Published online: 2025-11-28

生效果最好, 毕节假单胞菌(*Pseudomonas bjiensis*) IH-2 为核心菌株。【结论】乌兰布和沙漠地区四翅滨藜的促生菌主要包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*), 毕节假单胞菌(*P. bjiensis*)在促生复合菌群中起核心作用。

关键词: 四翅滨藜; 根际促生细菌; 内生促生细菌; 促生作用; 人工复合菌群

Evaluation of plant growth-promoting effects of rhizosphere and endophytic bacteria of *Atriplex canescens* in the Ulan Buh Desert and construction of strain combinations

GAO Yandong¹, CUI Dali², WANG Zhilin¹, HOU Kexin¹, LIU Yang¹, LI Junda¹, WANG Zongren¹, ZHAO Yujie¹, LIU Shuang¹, LIU Huirong^{1*}

1 College of Life Sciences, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, China

2 Inner Mongolia Desert Herbal Agriculture Technology Co., Ltd., Bayannur, Inner Mongolia, China

Abstract: As a pioneer species in desert areas and the main host of *Cistanche deserticola*, *Atriplex canescens* is widely planted in the Ulan Buh Desert in Inner Mongolia. Rhizosphere and endophytic microorganisms play a significant role in the growth and stress resistance of plants. However, few studies have been conducted on the growth-promoting functions of rhizosphere and endophytic bacteria on *A. canescens* in the Ulan Buh Desert. **[Objective]** We screened plant growth-promoting strains from the rhizosphere and endophytic bacteria of *A. canescens*, aiming to provide microbial resources for the sustainable breeding of *A. canescens* in this region. **[Methods]** Rhizosphere soil and plant samples of *A. canescens* were collected from the Ulan Buh Desert in Dengkou County, Inner Mongolia. Rhizosphere and endophytic bacteria were isolated and purified. The plant growth-promoting effects of these bacteria and the plant growth-promoting bacteria of *Astragalus* previously obtained by our research group on *A. canescens* seedlings were investigated. Molecular biological identification and functional analysis were conducted on the strains with significant plant growth-promoting effects. Then, these strains were combined and the growth-promoting effects of the strain combinations on *A. canescens* were evaluated. **[Results]** A total of 60 rhizosphere bacterial strains and 14 endophytic bacterial strains of *A. canescens* were isolated. Two endophytic bacterial strains significantly promoted the growth of *A. canescens* seedlings. Among the *Astragalus* growth-promoting bacteria tested, three strains had significant growth-promoting effects on *A. canescens* seedlings. The five plant growth-promoting strains were identified as four species belonging to three genera: *Pseudomonas*, *Bacillus*, and *Acinetobacter*. These strains had different levels of nitrogen fixation, inorganic and organic phosphorus solubilization, potassium feldspar and potassium aluminum silicate solubilization, and indole-3-acetic acid (IAA) and biofilm production. Most of the strains had the ability to produce

siderophores. Multiple strain combinations promoted the growth of *A. canescens*. Combinations 2 (IH-2, IH-9, and TYA27), 3 (IH-2, IH-9, and PAS13-2) and 4 (IH-2, TYA39, and TYA27) demonstrated the best comprehensive plant growth-promoting effects, with *Pseudomonas bijieensis* IH-2 as the core strain. **[Conclusion]** The growth-promoting bacteria of *A. canescens* in the Ulan Buh Desert mainly include *Pseudomonas* and *Bacillus*. *P. bijieensis* plays a core role in the plant growth-promoting bacterial combinations.

Keywords: *Atriplex canescens*; plant growth-promoting rhizobacteria; plant growth-promoting endophytic bacteria; plant growth-promoting effect; strain combinations

四翅滨藜 (*Atriplex canescens*) 为藜科滨藜属多年生半常绿灌木^[1]。它是美国科罗拉多州立大学等单位经过 25 年努力选育出的一个改良品种, 具有抗干旱、耐盐碱的优良种性^[2], 被广泛用于牧场改良、水土保持和盐碱地改造等, 是半干旱地区的典型植物, 适应的土壤条件和气候范围很广。内蒙古乌兰布和沙漠年均降水量较低, 沙化面积占磴口县绝大部分, 沙漠地表极易扬起风沙, 植被丰富度较低, 主要为沙生草本植物和灌木。1989 年, 中国林业科学研究院首次引进四翅滨藜, 并在内蒙古地区进行引种试验, 其耐干旱、耐贫瘠等效果优于其他灌木滨藜品种^[3], 丰富了我国北方干旱、半干旱地区的物种资源。同时, 四翅滨藜还可作为名贵药材肉苁蓉的重要寄主, 极大地提高了肉苁蓉的产量和品质^[4]。

植物根际促生菌 (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) 是天然微生物, 因其具有较强的植物根部定殖能力, 且能抑制植物病原菌、促进植物生长和增强植物抗逆性的作用而备受关注。植物内生菌具有定殖于植物根部或其他部位的能力, 它在促进植物发育的同时不会诱发任何不良后果, 与宿主植物形成互利共生关系, 因此植物内生微生物可能比土壤微生物对植物产生更直接和积极的影响, 在农业、园艺以及各种作物中的应用潜力巨大^[5-6]。微生物肥料因其高效环保, 符合可持续农业发展的要求,

被认为是替代化肥最具潜力的绿色肥料之一^[7-8]。植物根际及内生微生物是微生物肥料的重要菌种来源, 优良菌株的筛选及功能研究是开发高效微生物肥料的基础。

四翅滨藜虽已在内蒙古地区引进多年, 但尚未受到重视^[9-10], 其研发、开发利用程度较低, 根际及内生微生物在四翅滨藜生长发育、抗逆境等方面的作用尚不明确。本研究从内蒙古磴口县乌兰布和沙漠四翅滨藜种植区采集样品, 分离四翅滨藜根际及内生细菌, 研究分离菌株对四翅滨藜的促生作用, 在此基础上构建复合菌群并分析其促生功能, 以期开发四翅滨藜专用微生物菌剂奠定基础, 这对促进四翅滨藜广泛种植具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 四翅滨藜样品采集及四翅滨藜种子

四翅滨藜根及根际土于 2023 年 11 月采集自内蒙古巴彦淖尔市磴口县王爷地苁蓉生物有限公司乌兰布和沙漠种植基地 (40° 34' 54" N, 106° 53' 53" E), 植株生长年限为 1 年, 采用抖落法采集根际土壤样品, 用无菌毛刷收集, 采集深度为地下 10–15 cm。四翅滨藜种子由内蒙古王爷地苁蓉生物有限公司惠赠。

1.2 主要试剂及仪器

琼脂、葡萄糖、 KH_2PO_4 、 NaCl 、 CaCO_3 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 FeCl_3 、 H_3BO_3 、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、钼酸

铵、酵母提取物、丙酮酸钠等分析纯化学药品, 国药集团化学试剂有限公司; Phosphate buffer saline (PBS), 安徽白鲨生物科技有限公司; 细菌基因组 DNA 快速抽提试剂盒, 生工生物工程(上海)股份有限公司。

生化培养箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 高温高压灭菌锅, Hirayama Manufacturing Corporation; $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱, 长虹美菱股份有限公司; 超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; 离心机, 日立工机有限公司; 酶标仪, 伯腾仪器有限公司。

1.3 培养基

参照文献[11], 使用 1/2 R2A 培养基对四翅滨藜根际细菌和内生细菌进行分离和纯化, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存。

参照文献[12], 使用 Ashby、PVK 无机磷、蒙金娜有机磷、硅酸盐、M1997 和 CAS 固体培养基检测菌株的固氮、解无机磷、解有机磷、解钾长石、解硅酸铝钾和产铁载体能力; 使用 TSB 培养基检测菌株的产吲哚乙酸(indole-3-acetic acid, IAA)和生物膜能力。

1.4 四翅滨藜根际细菌的筛选

采用土壤梯度稀释法, 将土壤稀释液涂布在 1/2 R2A 培养基上, $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养 1 d, 挑取单菌落, 通过涂布划线法纯化菌株, 再转接至 1/2 R2A 液体培养基中 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 培养 1 d, 吸取 600 μL 于含有 1 mL 33% 无菌甘油的离心管中, 混匀后置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中保存。

1.5 四翅滨藜内生细菌的筛选

采取常规组织分离法^[13]对四翅滨藜植株根部进行内生细菌的分离。用自来水冲洗根部去除泥土, 剪切成 3 cm 片段, 无菌水漂洗 3 次, 再将其浸入 0.2% Sillwet-77 溶液, 超声处理 (120 W, 40 kHz) 10 min, 重复 3 次后, 用无菌

水浸泡 30 s, 转入 0.01 mol/L PBS 缓冲液, 超声清洗 3 遍以完成表面消毒。表面消毒后的四翅滨藜根在超净台内操作: 使用无菌器械切取根段, 三点接种至 1/2 R2A 培养基, 置于 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 细菌培养箱恒温培养, 每日观察并纯化, 直至无污染菌落。

1.6 四翅滨藜根际及内生细菌的促生效果检测

1.6.1 细菌菌悬液的制备

将菌株接种至 200 mL 1/2 R2A 液体培养基, $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、160 r/min 培养 24 h, 10 000 r/min 离心 5 min 收集菌体, 用 0.12 mmol/L 无菌 PBS 缓冲液 (pH 7.2) 洗涤 3 次, 每次 10 000 r/min 离心 3 min。最后用 PBS 重悬菌体, 调节 OD_{600} 至 0.80 ± 0.05 , 备用。

1.6.2 根际及内生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响

取 40 粒/管表面消毒的四翅滨藜种子, 置于 10 mL 无菌离心管中, 加入制备好的菌悬液, 浸泡 12 h, 同时设置无菌 PBS 缓冲液作为对照。将浸泡后的种子均匀播种于育苗盘, 每组设 4 个重复, 置于光照培养架 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光暗比 16 h:8 h), 定期浇灌无菌水。培养 30 d 后, 测量根长、株高、茎粗、根粗、鲜重、干重、侧根数及叶片数等生长参数。

1.7 黄芪根际促生细菌对四翅滨藜的促生效果检测

1.7.1 细菌菌悬液的制备

方法同 1.6.1 节细菌菌悬液的制备。

1.7.2 黄芪根际促生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响

方法同 1.6.2 节根际及内生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响。

1.8 高效促生菌的鉴定

挑取单一菌落, 转接至 1/2 R2A 培养基,

28 °C恒温培养 24–48 h, 观察菌落生长状态。使用细菌基因组 DNA 快速抽提试剂盒提取细菌基因组 DNA, 并以 27F (5'-CCGGATCCAGAGTTTGATCATGGCTCAGCA-3') 和 1492R (5'-CGGGATCCTACGGCTACCTTGTACGACTT-3') 通用引物扩增菌株的 16S rRNA 基因片段, 扩增反应体系与 PCR 反应条件参照文献[14]。琼脂糖凝胶电泳检测后, 送到生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。将测序获得的有效 16S rRNA 基因序列通过 BLAST 序列比对挑选相似度最高的序列, 使用软件 MEGA 7.0, 采用最大似然法构建系统发育树, 1 000 次自展值验证。

1.9 高效促生菌的促生功能分析

1.9.1 固氮能力的测定

将筛选得到的高效促生菌配制成菌悬液, 使 OD_{600} 在 0.80 ± 0.05 之间, 吸取 1 μ L 接种于 Ashby 固体培养基上。每个试验重复 3 次, 观察不同菌株在培养基上的生长情况, 培养 5 d 后, 用游标卡尺测量各菌体透明圈直径, 按平均值从大到小排序, 根据 0–5 打分系统, 无此项能力为 0 分, 有此项能力的, 按照 1–5 档打分, 前 20% 为 5 分, 依次排列, 后面的分别为 4 分、3 分、2 分、1 分(最后的 20%)^[15]。

1.9.2 溶磷能力的测定

将筛选得到的高效促生菌配制成菌悬液, 使 OD_{600} 在 0.80 ± 0.05 之间, 吸取 1 μ L 接种于 PVK 无机磷和蒙金娜有机磷固体培养基上。测定方法同 1.9.1 节。

1.9.3 解钾长石能力的测定

将筛选得到的高效促生菌配制成菌悬液, 使 OD_{600} 在 0.80 ± 0.05 之间, 吸取 1 μ L 接种于硅酸盐固体培养基上。测定方法如 1.9.1 节。

1.9.4 解硅酸铝钾能力的测定

将筛选得到的高效促生菌配制成菌悬液, 使 OD_{600} 在 0.80 ± 0.05 之间, 吸取 1 μ L 接种于 M1997 固体培养基上。测定方法同 1.9.1 节。

1.9.5 产铁载体能力的测定

将四翅滨藜促生菌株菌悬液点接在 CAS 蓝色固体检测平板上, 28 °C 培养箱中培养 5 d。菌落周围出现橙色透明圈证明该菌株能产铁载体, 根据有无透明圈以及透明圈大小, 初步判断该菌是否有产铁载体的能力及强弱。测定方法同 1.9.1 节。

1.9.6 产 IAA 能力的测定

将筛选出的四翅滨藜促生菌株分别转接到 TSB 培养基上(96 孔板), 28 °C 恒温培养 5 d。配制 5 mL 35% 高氯酸加 0.1 mL 的 0.5 mol/L 的三氯化铁比色液, 每孔加入 100 μ L 的比色液, 暗培养 30 min, 液体颜色变红则意味着能够产生 IAA, 无红色代表无此能力。

1.9.7 产生物膜能力的测定

将挑选出的四翅滨藜促生菌转接到 TSB 培养基上(96 孔板), 于 28 °C 培养箱培养 5 d。小心将菌液倒掉, 用 PBS 缓冲液涮洗 3–4 次, 倒置 45 min 控干水分, 加入 200 μ L 0.5% 的结晶紫染液, 30 min 后用无菌水涮洗 3–5 次, 加入 95% 的乙醇观察, 根据颜色判定是否有生物膜能力, 变蓝色表示能够产生物膜, 无颜色则不能产生物膜。

1.10 高效促生菌的复配及其促生效果检测

将具有显著促生能力的促生菌株分别以 5 株菌 1 个组合、4 株菌 1 个组合、3 株菌 1 个组合进行复配, 共 16 种复配方式(表 1)。

促生效果的检测方法同 1.6.2 节根际及内生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响, 30 d 后, 测量四翅滨藜幼苗根长、株高和干重。

1.11 数据统计分析

柱状图制作及数据分析使用 GraphPad Prism 9.5。采用 Kolmogorov-Smirnov 法检验数据正态性, 符合正态分布的数据, 通过方差齐性检验进行单因素方差分析, 采用 Dunnett 法进行数据多重比较, 进行显著性分析。样本量合

表1 菌株复配情况

Table 1 The combination situation of the strains

Combination	The combination situation of the strains	Combination	The combination situation of the strains
1	IH-2, IH-9, TYA39	9	IH-9, TYA27, PAS13-2
2	IH-2, IH-9, TYA27	10	TYA39, TYA27, PAS13-2
3	IH-2, IH-9, PAS13-2	11	IH-2, IH-9, TYA39, TYA27
4	IH-2, TYA39, TYA27	12	IH-2, IH-9, TYA39, PAS13-2
5	IH-2, TYA39, PAS13-2	13	IH-2, IH-9, TYA27, PAS13-2
6	IH-2, TYA27, PAS13-2	14	IH-2, TYA39, TYA27, PAS13-2
7	IH-9, TYA39, TYA27	15	IH-9, TYA39, TYA27, PAS13-2
8	IH-9, TYA39, PAS13-2	16	IH-2, IH-9, TYA39, TYA27, PAS13-2

理性通过检验效能验证^[11], 满足统计学要求。

2 结果与分析

2.1 四翅滨藜根际及内生细菌的分离

采用 1/2 R2A 培养基从四翅滨藜根际土中分离得到 60 株根际细菌, 菌落多呈乳白色、表面

光滑; 从四翅滨藜根内分离得到 14 株内生细菌, 部分菌落呈淡黄色、多数呈白色或乳白色、表面光滑(图 1)。本研究共分离得到 74 株细菌。

2.2 四翅滨藜根际及内生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响

在四翅滨藜根际细菌中有 49 株菌对四翅滨

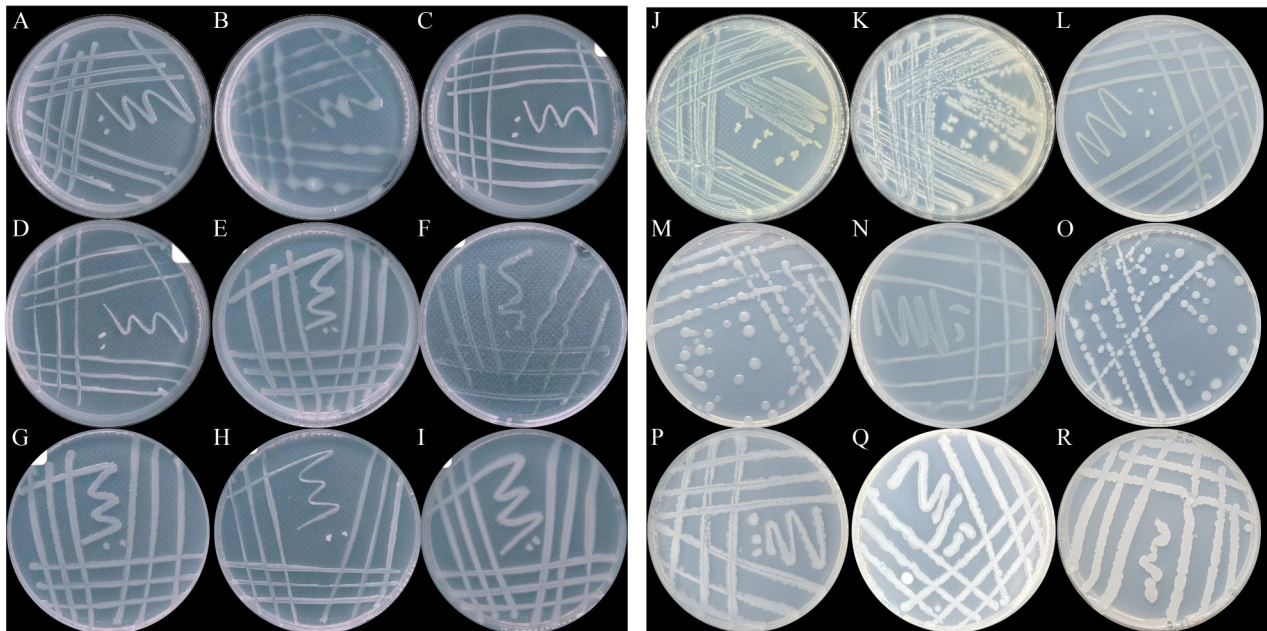


图1 部分四翅滨藜根际与内生细菌的培养性状

Figure 1 Cultivation characteristics of some rhizosphere and endophytic bacteria of *Atriplex canescens*. A–I: The strains AHL-4, PHL-8-2, HL-4, HL-1, PHL-8-1, AHL-3, AHL-5, AHL-3-2 and PHL-2 of rhizosphere bacteria of *Atriplex canescens*, respectively; J–R: The strains IH-2, IH-9, IH-3-4, IH-5-2, IH-5-3, IH-7-1-1, IH-8, IH-4 and IH-7-1-2 of endophytic bacteria of *Atriplex canescens*, respectively.

藜幼苗根长有促进作用(图 2、图 3A), 提高了 1.25%–70.68%; 有 19 株菌对四翅滨藜幼苗株高有促进作用(图 3B), 提高了 3.68%–27.14%; 有 3 株菌对四翅滨藜幼苗根粗有促进作用(图 3C), 提高了 4.28%–4.93%; 有 10 株菌对四翅滨藜幼苗茎粗有促进作用(图 3D), 提高了 3.09%–40.72%; 有 1 株菌对四翅滨藜幼苗鲜重有促进作用(图 3E), 提高了 3.90%; 有 30 株菌对四翅滨藜幼苗干重有促进作用(图 3F), 提高了 0.74%–110.46%; 有 6 株菌对四翅滨藜幼苗侧根数有促进作用(图 3G), 提高了 20.00%–54.12%; 有 3 株菌对四翅滨藜幼苗叶片数有促进作用(图 3H), 提高了 6.25%–12.50%。

在四翅滨藜内生细菌中有 14 株菌对四翅滨藜幼苗根长有促进作用(图 2、图 3A), 提高了 27.03%–211.49%, 其中 IH-9、IH-2 具有显著促进作用, 提高了 129.05%–211.49%; 有 4 株菌对四翅滨藜幼苗根粗有促进作用(图 3C), 提高了 1.64%–5.26%; 有 14 株菌对四翅滨藜幼苗茎粗有促进作用(图 3D), 提高了 5.15%–43.81%, 其中 IH-9 具有显著促进作用, 提高了 43.81%; 有 3 株菌对四翅滨藜幼苗鲜重有促进作用(图 3E), 提高了 0.72%–7.80%; 有 4 株菌对四翅滨藜幼苗

干重有促进作用(图 3F), 提高了 3.61%–23.69%; 有 13 株菌对四翅滨藜幼苗侧根数有促进作用(图 3G), 提高了 2.35%–107.06%, 其中 IH-9 具有显著促进作用, 提高了 107.06%; 有 6 株菌对四翅滨藜幼苗叶片数有促进作用(图 3H), 提高了 6.25%–37.50%。

2.3 黄芪根际促生细菌对四翅滨藜幼苗生长的影响

课题组前期从黄芪根际土中筛选到 12 株对黄芪有显著促生作用的细菌^[4], 本研究同时检测了这些黄芪促生菌对四翅滨藜幼苗生长的影响(图 4、图 5), 共有 3 株细菌对四翅滨藜幼苗生长具有显著促生作用。

在黄芪根际促生细菌中有 7 株菌对四翅滨藜幼苗根长有促进作用(图 5A), 提高了 3.04%–225.41%, 其中 TYA39 等 3 株菌具有显著促进作用, 提高了 171.62%–225.41%; 有 3 株菌对四翅滨藜幼苗根粗有促进作用(图 5C), 提高了 2.30%–14.14%; 有 10 株菌对四翅滨藜幼苗茎粗有促进作用(图 5D), 提高了 2.58%–36.08%; 有 2 株菌对四翅滨藜幼苗鲜重有促进作用(图 5E), 提高了 16.33%–34.91%; 有 4 株菌对四翅滨藜幼苗干重有促进作用(图 5F),

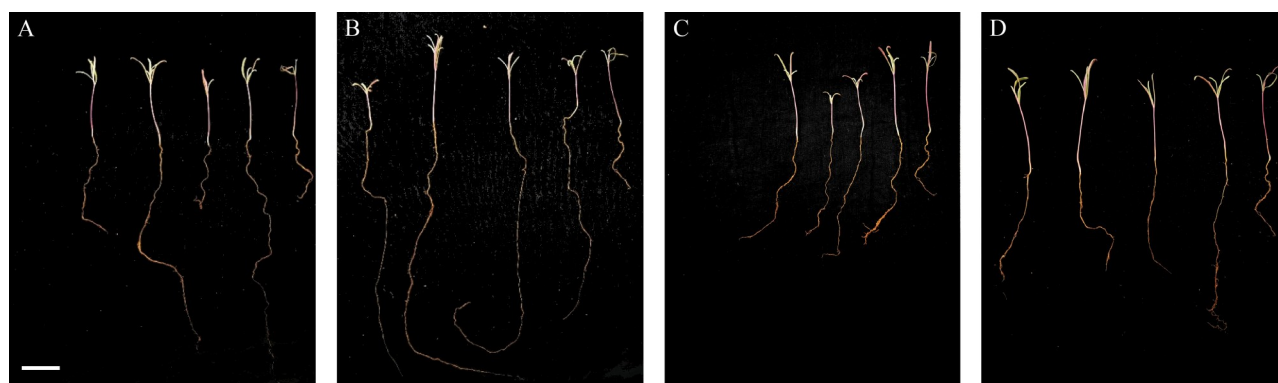
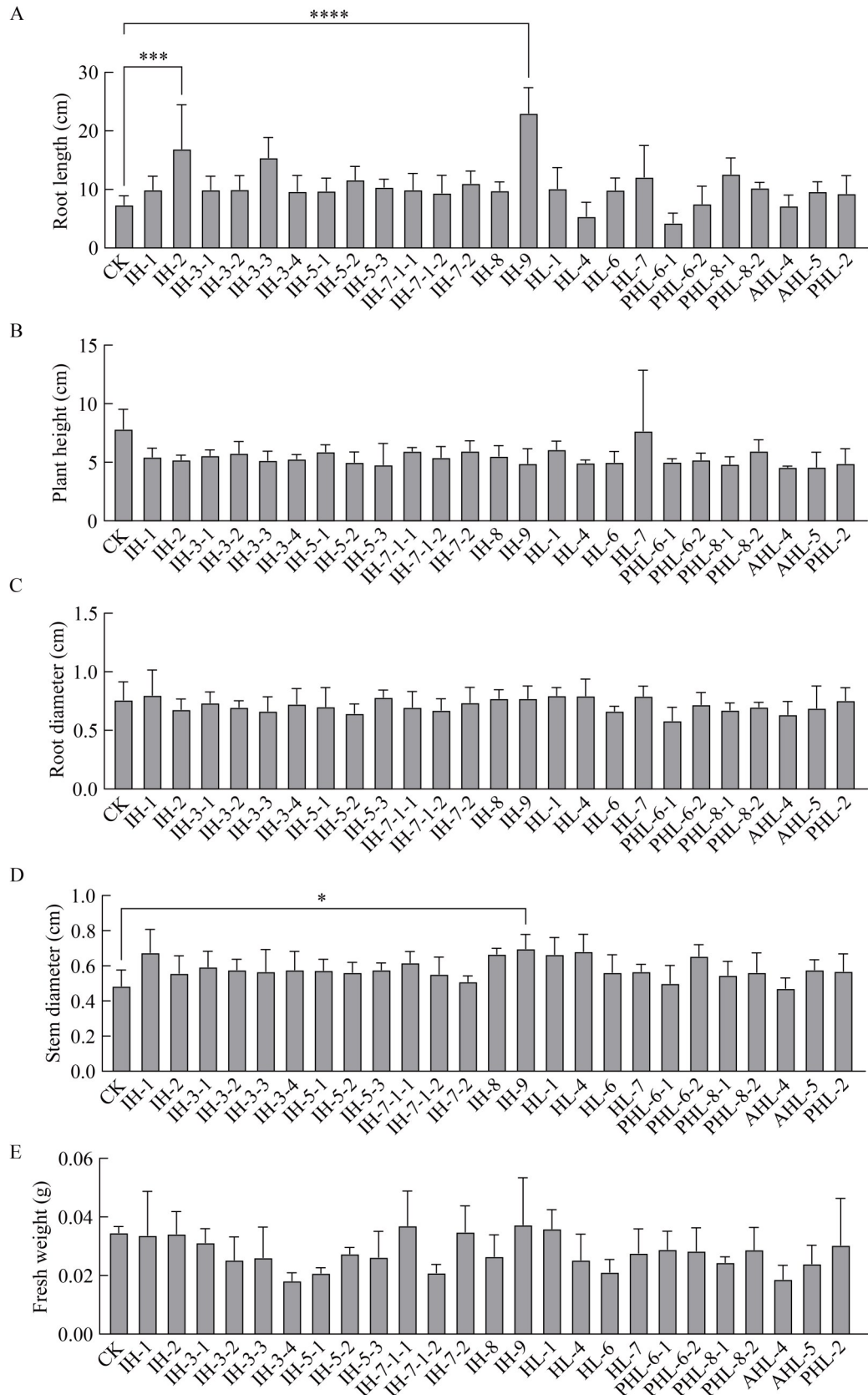


图2 部分四翅滨藜根际及内生细菌菌株对四翅滨藜幼苗的促生效果

Figure 2 The growth promotion effect of some strains of rhizosphere and endophytic bacteria of *Atriplex canescens* on the *Atriplex canescens* seedlings. A, B, C and D are the treatment groups treated with the microbial inoculum IH-2, IH-9, PHL-2 and HL-1, respectively. The plant on the far right in each figure is the CK control group. The length of the scale bar in the lower left corner is 2.5 cm.



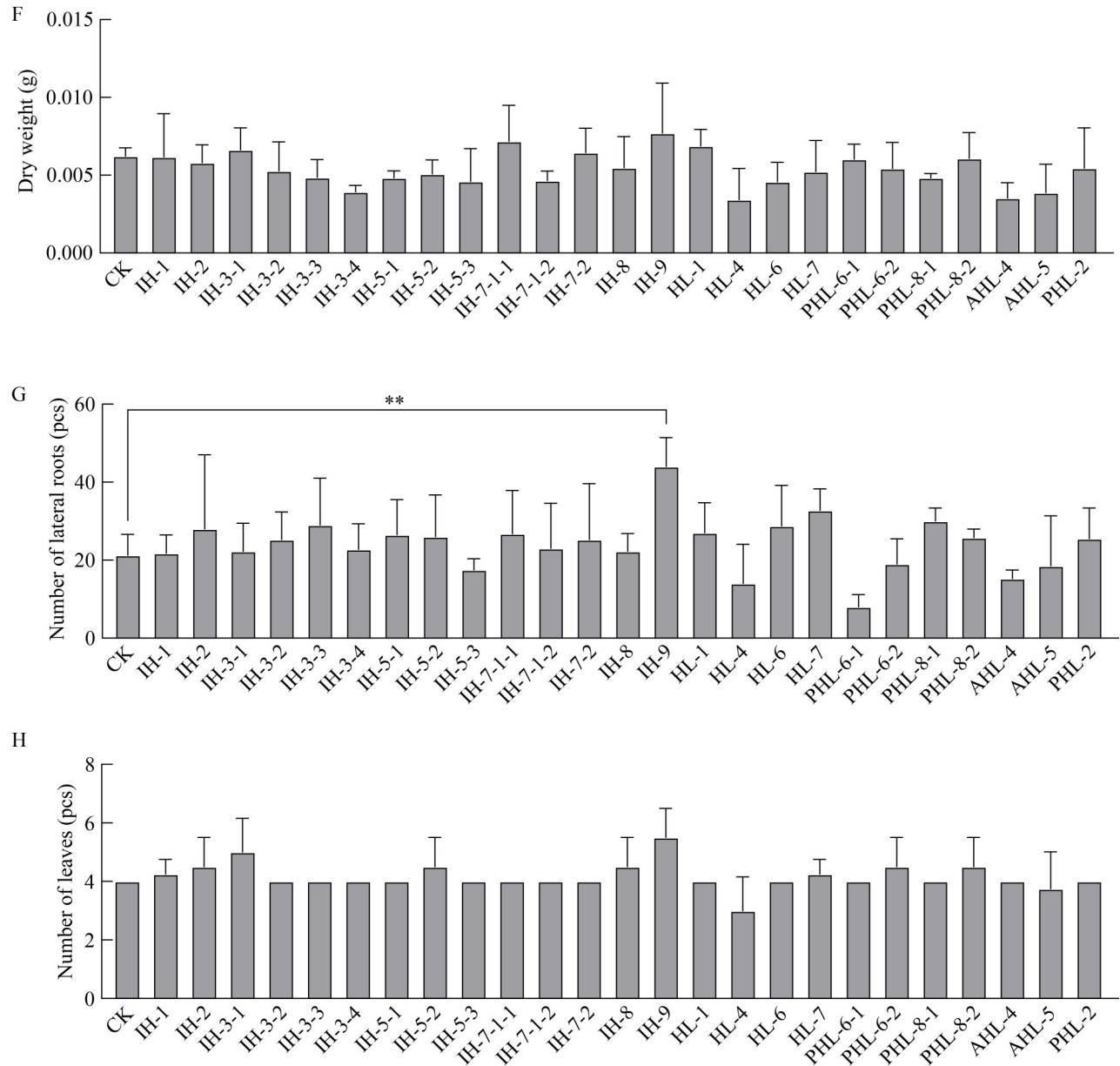


图3 部分四翅滨藜根际及内生细菌菌株对四翅滨藜幼苗生长的影响

Figure 3 Effect of some strains of rhizosphere and endophytic bacteria of *Atriplex canescens* on the growth of the *Atriplex canescens* seedlings. A, B, C, D, E, F, G and H are the root length, plant height, root diameter, stem diameter, fresh weight, dry weight, number of lateral roots and number of leaves of *Atriplex canescens* seedlings, respectively. CK is the control group, and the others are the treatment groups treated with the corresponding microbial inoculums. The strains whose numbers start with “I” are endophytic bacteria IH-1, IH-2, IH-3-1, IH-3-2, IH-3-3, IH-3-4, IH-5-1, IH-5-2, IH-5-3, IH-7-1-1, IH-7-1-2, IH-7-2, IH-8, IH-9, while those without “I” are rhizosphere bacteria HL-1, HL-4, HL-6, HL-7, PHL-6-1, PHL-6-2, PHL-8-1, PHL-8-2, AHL-4, AHL-5, PHL-2. *, **, ***, or **** indicates a significant difference from the control treatment at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, or $P < 0.0001$ level, respectively.

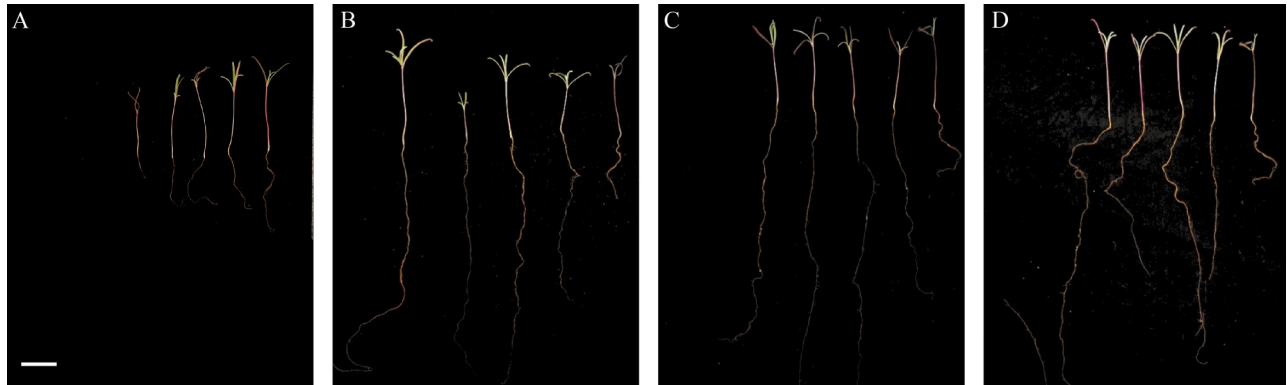


图4 部分黄芪根际促生细菌菌株对四翅滨藜幼苗的促生效果

Figure 4 The growth promotion effect of some strains of growth-promoting rhizosphere bacteria of *Astragalus membranaceus* on the *Atriplex canescens* seedlings. A, B, C and D are the treatment groups treated with the microbial inoculum NAS12-1, TYA39, TYA27 and PAS13-2, respectively. The plant on the far right in each figure is the CK control group. The length of the scale bar in the lower left corner is 2.5 cm.

提高了 6.83%–44.18%；有 6 株菌对四翅滨藜幼苗侧根数有促进作用(图 5G)，提高了 10.59%–161.18%，其中 TYA39 具有显著促进作用，提高了 161.18%；有 8 株菌对四翅滨藜幼苗叶片数有促进作用(图 5H)，提高了 6.25%–37.50%。

2.4 四翅滨藜高效促生菌的鉴定

对筛选得到的四翅滨藜高效促生菌进行分子生物学鉴定，并构建系统发育树(图 6)。本研究分离鉴定的 5 株对四翅滨藜具有显著促生作用的细菌分布于 3 个属、4 个种。菌株 TYA39 和 IH-2 的菌落呈淡绿色、小菌落、球形；菌株 TYA27 的菌落呈乳白色、小菌落、多呈椭圆形；菌株 IH-9 的菌落呈白色、小菌落、呈不规则形状；菌株 PAS13-2 的菌落呈白色、小菌落、呈不规则形状。结合菌株的系统发育树结果及形态学特征，确定菌株 TYA39 和菌株 IH-2 属于假单胞菌属(*Pseudomonas*)，菌株 IH-9 和 PAS13-2 属于芽孢杆菌属(*Bacillus*)，菌株 TYA27 属于不动杆菌属(*Acinetobacter*)。

2.5 四翅滨藜高效促生菌促生功能的初步探究

对有显著促生作用的 5 株菌株进行促生功

能探究，分别检测其固氮、解无机磷、解有机磷、解钾长石、解硅酸铝钾、产 IAA、产铁载体和产生物膜的能力(表 2)。在四翅滨藜促生菌中所有菌株均具备固氮、解无机磷、解有机磷、解钾长石、解硅酸铝钾、产 IAA 和产生物膜的能力。在产铁载体方面，IH-2、IH-9 和 TYA39 具有较高水平。

2.6 四翅滨藜高效促生菌的复配及其促生效果检测

根据促生菌株的分子生物学鉴定与促生功能检测结果，分别以 5 株菌为一个组合、4 株菌为一个组合和 3 株菌为一个组合进行复配，共 16 种复配方式。

通过盆栽试验检测复配菌剂对四翅滨藜幼苗根长、株高和干重指标的影响(图 7)。有 11 个组合对根长有促进作用(图 8A)，使根长提高了 1.58%–30.65%；有 6 个组合对株高有促进作用(图 8B)，使株高提高了 4.19%–18.36%；有 4 个组合对干重有促进作用(图 8C)，使干重提高了 9.20%–63.52%。复配菌剂中组合 2、3 和 4 在根长、株高和干重指标上较对照组及其他组合有较大提升幅度，综合促生效果最好，这 3 个组

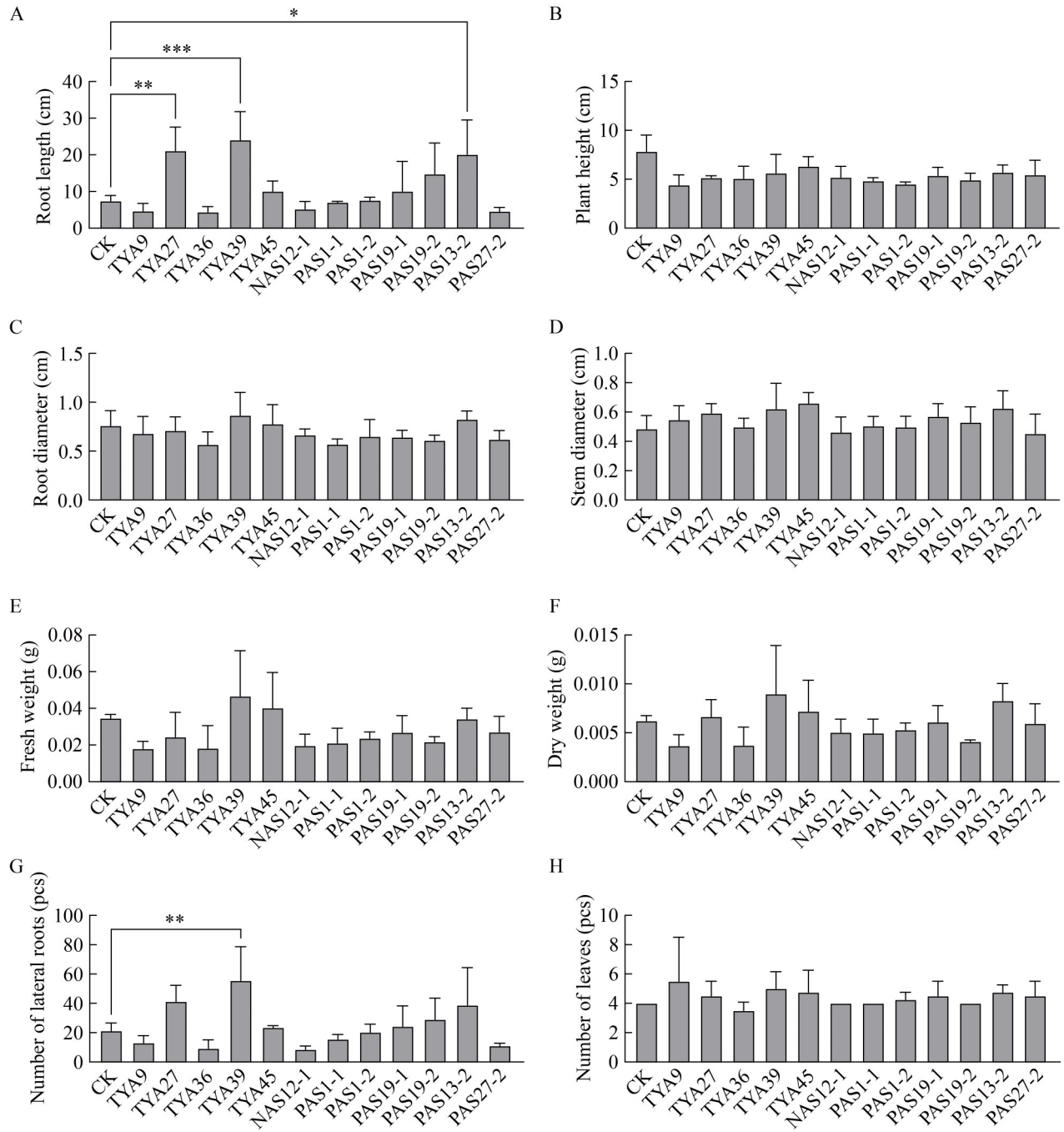


图5 黄芪根际促生细菌菌株对四翅滨藜幼苗生长的影响

Figure 5 Effect of some strains of growth-promoting rhizosphere bacteria of *Astragalus membranaceus* on the growth of the *Atriplex canescens* seedlings. A, B, C, D, E, F, G and H are the root length, plant height, root diameter, stem diameter, fresh weight, dry weight, number of lateral roots and number of leaves of *Atriplex canescens* seedlings, respectively. CK is the control group, and the others are the treatment groups treated with the corresponding microbial inoculum, *, **, or *** indicates a significant difference from the control treatment at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, or $P < 0.001$ level, respectively.

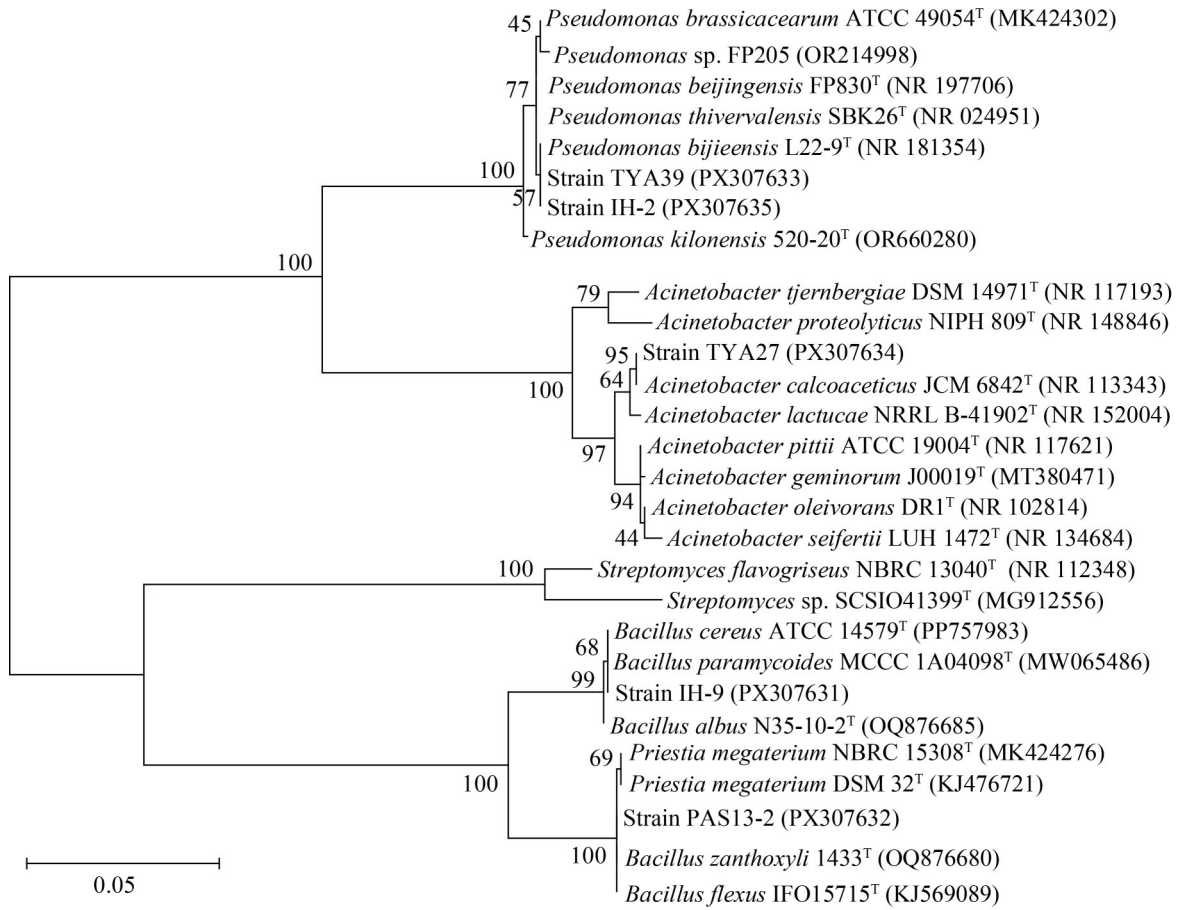


图6 基于16S rRNA基因序列的促生菌株系统发育树

Figure 6 Phylogenetic tree of the growth-promoting strains based on 16S rRNA gene sequences. The numbers in parentheses: The sequence accession number. The bolded letters: The numbers of the growth-promoting strains isolated in this study. The numbers in each branch points: The percentages supported by bootstrap. The bar: The nucleotide sequence divergence.

表2 四翅滨藜促生菌株的促生功能分析

Table 2 Analysis of the growth promoting functions of *Atriplex canescens* growth promoting strains

Strain number	Nitrogen fixation	Inorganic phosphorus solubilization	Organic phosphorus solubilization	Potassium feldspar solubilization	Potassium aluminosilicate solubilization	Siderophores production	IAA production	Biofilm production
IH-2	2	3	3	2	4	4	+	+
IH-9	4	1	5	4	3	3	+	+
TYA39	3	2	2	3	2	5	+	+
TYA27	1	4	1	1	1	0	+	+
PAS13-2	5	5	4	5	5	0	+	+

The numbers 1 to 5 indicate the level of the corresponding function, with 0 representing the lack of that capability. + indicates that it can grow on this medium or has the ability to do so.

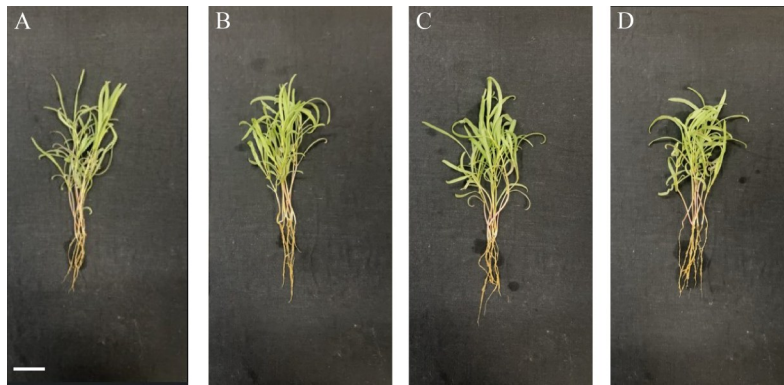


图7 部分菌株复配组合对四翅滨藜幼苗生长的促进效果

Figure 7 Effect of some compound combinations of the growth-promoting bacteria on the *Atriplex canescens* seedlings. A is the control group, and B, C and D are the treatment groups of strain combination 2, 3 and 4, respectively. The length of the scale bar in the lower left corner is 2.5 cm.

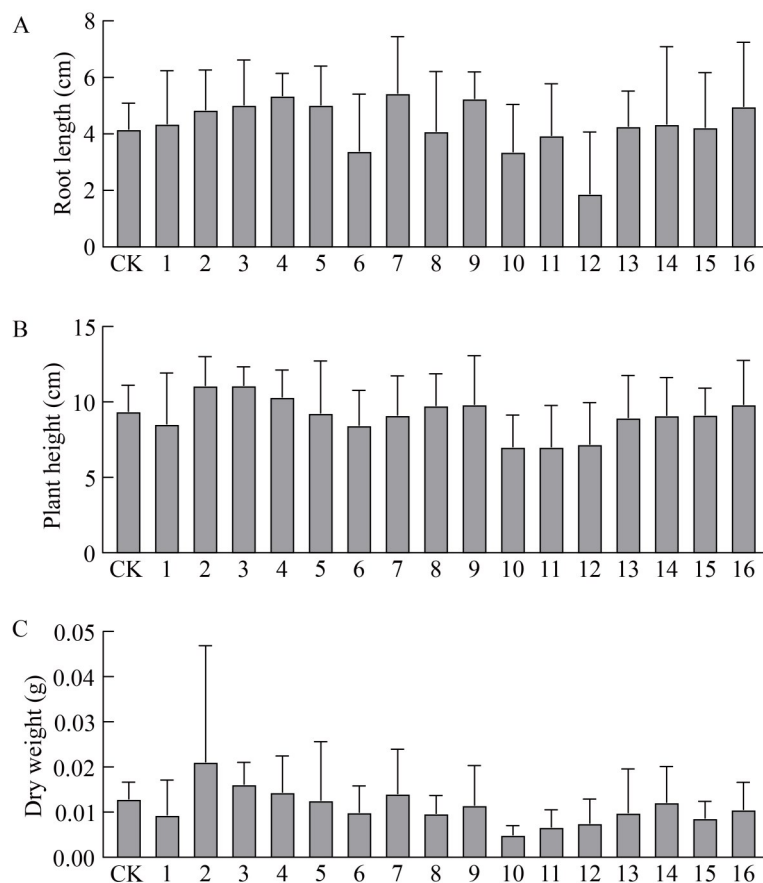


图8 复配菌剂对四翅滨藜幼苗生长指标的影响

Figure 8 Effect of the compound combinations on the growth of *Atriplex canescens* seedlings. A, B, and C are root length, plant height, and dry weight of *Atriplex canescens* seedlings, respectively. CK is the control group, and the others are the treatment groups treated with the corresponding compound combinations.

合共有的菌株为 *P. bijieensis* IH-2, 初步认定其为核心菌株。

3 讨论

本研究以内蒙古磴口县乌兰布和沙漠的四翅滨藜为研究对象, 对其根际及内生细菌进行分离, 共获得 74 株细菌, 其中四翅滨藜根际细菌 60 株、内生细菌 14 株。通过将本研究分离得到的菌株与前期实验室已有的黄芪根际促生细菌一同对四翅滨藜进行盆栽试验, 筛选出 5 株对四翅滨藜具有显著促进作用的细菌, 其中四翅滨藜内生细菌 2 株, 黄芪根际促生细菌 3 株。对这 5 株具有显著促进作用的细菌进行分子生物学鉴定, 结果显示它们分属于 3 属 4 种, 包括 *Pseudomonas*、*Bacillus* 和 *Acinetobacter*。其中, 菌株 *B. paramycoides* IH-9 和 *P. bijieensis* TYA39 对多个指标具有显著促进作用。

在已有的四翅滨藜相关微生物研究中更多关注的是根际土壤的微生物群落变化, 尚未见针对四翅滨藜本身促生作用的研究。在本研究得到的 3 个四翅滨藜促生菌属中, *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 在促生方面的研究较为广泛。Taman 等^[16]研究表明, 具有解磷和产 IAA 等能力的 *Pseudomonas* sp. TM8 在盆栽试验中促进了番茄的生长。本研究中的 *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 与上述菌株类似, 具备固氮、解磷、产 IAA 等促生功能, 可能通过改善土壤营养和影响植物激素稳态, 进而促进植物的生长发育^[17-19]。Ahmed 等^[20]研究发现, 内生细菌菌株 *P. oryzihabitans* GDW1 使番茄植株根长提高了 38%, 该菌株主要通过调节宿主转录组和根际细菌组来实现其促进作用。本研究中菌株 *A. calcoaceticus* TYA27、*P. polymyxa* IH-9 和 *P. polymyxa* TYA39 使四翅滨藜根长分别提高了 185.54%、211.49% 和 225.41%, 起到了与文献报道菌株类似的作用, 这些菌株可能也通过调节四翅滨藜某些关键基因表达及其根际微生物群落结构而发挥作用。He 等^[21-23]发现, 来自梭梭根际的

Pseudomonas sp. M30-35 可以通过增强抗氧化酶活性和调节脱落酸(abscisic acid, ABA)信号增强黑麦草的耐旱性, 进而促进拟南芥生长; Ma 等^[24]研究表明, *B. velezensis* HR6-1 可以增强番茄的耐盐性, 促进番茄生长; Wang 等^[25]通过宏基因组分析发现 *B. cereus* OTU8977 通过增强苯丙醛生物合成和碳水化合物代谢过程来促进核桃的生长。本研究中的 *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 也可能通过增强植物抗逆性和调节植物代谢过程来促进四翅滨藜生长。然而, 这些菌株的确切作用机制究竟如何还需今后进一步深入研究。此外, *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 还具有抗病防害能力, Alhaj Hamoud 等^[26]研究发现 *P. fluorescens* 可以通过抗氧化调节增强水稻生长并减轻镉毒性; Sánchez 等^[27]研究发现 *P. halotolerans* 可以促进番茄生长, 并且能够减少植物病原体毒力因子, 减轻对水果和植物的损害; Kumar 等^[28]研究发现苏丹草种子内生细菌 *B. amyloliquefaciens* 可以保护幼苗免受 *R. solani* 的侵害。本研究中分离到的 *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 是否在增强四翅滨藜抗病防害方面也有一定作用, 也需要进一步研究。人们对 *Acinetobacter* 的促生研究相对较少, 杨金新等^[29]研究发现具有解钾等多项促生功能的水稻内生菌 *A. soli* JKDY-3 显著促进水稻幼苗根系生长, 并能有效定殖在植物体内。本研究结果类似, 该属的菌株可以促进四翅滨藜生长, 也具有解钾、固氮等功能, 可能通过类似的机制发挥作用, 但其是否也可以定殖于四翅滨藜体内尚需检测。除了促生能力, 该菌属还具有抗逆能力, Ali 等^[30]研究发现 *A. oleivorans* IRS14 可以通过调节生理生化因素减轻小麦的寒冷胁迫, 而本研究在此方面还有待深入研究。

单一微生物菌剂的促生效果通常有限, 而复合微生物菌剂的应用则更有助于改善植物生长^[31-32]。Wu 等^[33]研究发现, 复合木霉菌剂 (CAT) 可促进黄连的生长、改善土壤条件、降低根腐病发病率和严重程度, 显示出 CAT 作为生

物肥料替代合成肥料的潜力。Wang 等^[34]研究表明, *B. velezensis* FH-1 与缺陷短波单胞菌 (*Brevundimonas diminuta*) NYM3 共接种能有效促进水稻的生长, 与单独接种和对照(CK)相比, 共接种菌剂通过富集相关物种增强微生物硝化功能, 增加了土壤全氮和微生物网络复杂度, 特异性地促进水稻生长。刘梓豪^[35]研究发现, 防控玉米种栖镰孢菌的复合菌群形成了以核心拮抗菌芽孢杆菌 *Bac* 抑制种栖病原菌生长与侵染为主, 其余非拮抗菌促进核心拮抗菌生长, 同时促进其抗病和促生能力的菌株间合作模式, 同时植物可以通过调节根系分泌物组分, 调节菌群中核心拮抗菌的促生与抗病能力, 进而实现菌群的抗病与促生功能切换, 最终揭示了一种“核心菌株主效, 非核心菌株互作增效”的菌群合作新模式。相比单株菌剂而言, 复合菌剂的优势源于其模拟自然微生物群落的协同增效机制, 在一定条件下可突破单株菌剂的局限性, 实现“1+1>2”的生态效应, 如共接种 *Azospirillum brasilense* 和 *Bradyrhizobium* sp. 与单独接种 *Bradyrhizobium* sp. 相比具有更佳效果^[36]。本研究通过对 5 株四翅滨藜促生细菌进行复配, 得到 16 个组合。结果显示, 有多个组合对幼苗有促进作用, 其中组合 2、3 和 4 复配效果最好, 这 3 个组合的共有菌株为 *P. bijiensis* IH-2, 且该菌株在各项促生功能上均具有较高水平, 因此初步认定菌株 *P. bijiensis* IH-2 为这 3 个组合的核心菌株, 其可能也是通过“核心菌株主效, 非核心菌株互作增效”方式主导作用, 但其确切机制还需后续试验验证, 可通过去除该菌株后观察复合菌群的功能是否有明显变化来进行判断。本研究中报道的这 3 个复合菌群尽管对四翅滨藜生长有较好的促进作用, 但其作用并未达到显著水平, 这可能是由于本研究使用的四翅滨藜种子发芽率较低、质量不均匀导致的。今后需要在解决种子品质的基础上扩大实验规模继续验证。本研究结果为室内初步试验, 后续将继续筛选、扩大盆栽

试验规模, 并计划在乌兰布和沙漠种植基地进行大田试验, 监测在室外自然情况下菌剂对四翅滨藜是否也具有显著促生作用, 以及菌剂对土壤速效磷/氮等营养元素含量、微生物群落演替的影响, 尝试揭示菌剂的作用机制, 为开发四翅滨藜专用复合微生物菌剂奠定基础。此外, 本研究发现黄芪根际促生菌对四翅滨藜也具有促生作用, 初步说明不同植物的促生菌或许可以相互共享, 这为微生物菌剂的研发提供了一个新思路。关于不同植物促生菌的共享机制, 一方面, 可能是不同植物菌群通过代谢互补形成稳定共生联盟, 或是植物释放特定化学物质(糖类、有机酸、酚类等)吸引/激活异源促生菌^[37], 但其他植物的促生菌是否对四翅滨藜也有促生作用需要进一步扩大范围验证, 反之亦然。另一方面, 也可能是由于 *Pseudomonas* 和 *Bacillus* 的菌株环境适应性强, 是自然界各类植物最常见的促生菌, 对大部分植物都具有一定的促生作用。尽管这些属的菌株是从不同的植物根际或体内分离的, 但其对其他植物同样可以通过调控植物生长相关基因表达来调节植物激素信号通路(生长素、赤霉素、细胞分裂素)和胁迫反应而起到类似的促生作用^[20-23]。

4 结论

本研究揭示出乌兰布和沙漠地区四翅滨藜的促生菌主要包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*), 菌株 *P. bijiensis* IH-2 在促生复合菌群中起核心作用。

作者贡献声明

高艳东: 文章的撰写及数据处理及整合; 崔大力: 参与实地调研和样品采集; 王志林: 参与部分数据分析处理; 候可心: 样品采集及实验处理等; 刘扬: 部分文章的修改和实验指导; 李俊达: 参与部分数据处理、图片制作等; 王宗人: 样品采集及室内验证等; 赵雨洁: 参与部分数据分析和室内验证; 刘爽: 样品采集及数据分析软件提供; 刘惠荣: 实验的

总体设计及文章稿件修改。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在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。

参考文献

- [1] 孔东升. 四翅滨藜形态特征及生理生态适应性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(1): 210-216.
Kong DS. Morphological characteristics and eco-physiological adaptability of *Atriplex canescens*: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(1): 210-216 (in Chinese).
- [2] 胡焕琼, 李利, 于军, 梁海连, 吕瑞恒. 四翅滨藜和多枝怪柳对土壤干旱的响应差异[J]. 干旱区研究, 2023, 40(12): 2007-2015.
Hu HQ, Li L, Yu J, Liang HL, Lyu RH. Differences in the response to soil drought in *Atriplex canescens* and *Tamarix ramosissima*[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(12): 2007-2015 (in Chinese).
- [3] 牛勇, 高国韵, 牛风英, 张英连. 四翅滨藜嫩枝扦插试验[J]. 内蒙古林业, 2013(5): 18-19.
- [4] 魏惠梅. 四翅滨藜接种肉苁蓉的高产技术研究[J]. 新农人, 2024(31): 81-83.
- [5] 张亚, 任子君, 张婵, 苏玉静, 任旭妍, 张涛, 孙凯乐, 孙治强. 根际促生菌与氨基酸肥联合追施对温室番茄产量及品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(2): 209-215.
Zhang Y, Ren ZJ, Zhang C, Su YJ, Ren XY, Zhang T, Sun KL, Sun ZQ. Effect of joint fertilizer application of rhizosphere bacteria and amino acid on yield and quality of greenhouse tomatoes[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(2): 209-215 (in Chinese).
- [6] Lucy M, Reed E, Glick BR. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 2004, 86(1): 1-25.
- [7] 孔亚丽, 秦华, 朱春权, 田文昊, 朱晓芳, 虞轶俊, 张均华. 土壤微生物影响土壤健康的作用机制研究进展[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 331-347.
Kong YL, Qin H, Zhu CQ, Tian WH, Zhu XF, Yu YJ, Zhang JH. Research progress on the mechanism by which soil microorganisms affect soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 331-347 (in Chinese).
- [8] 李俊, 姜昕, 马鸣超, 关大伟, 曹凤明, 李力. 我国微生物肥料产业需求与技术创新[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2): 1-5.
Li J, Jiang X, Ma MC, Guan DW, Cao FM, Li L. Development demand and technical innovation for bio-fertilizer industry in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2): 1-5 (in Chinese).
- [9] Ma DK, He ZB, Bai XL, Wang W, Zhao P, Lin PF, Zhou H. *Atriplex canescens*, a valuable plant in soil rehabilitation and forage production. a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 804: 150287.
- [10] 吴岚, 姚云峰, 李钢铁, 屈兴红, 赵中华. 从美国引进的七种灌木的出苗及幼苗期观测[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 20-24.
Wu L, Yao YF, Li GT, Qu XH, Zhao ZH. The primary study on seeding character of seven shrubs introduced from America[J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry, 2004, 25(1): 20-24 (in Chinese).
- [11] 高艳东, 候可心, 李俊达, 刘扬, 陶羽, 王志林, 刘惠荣. 梭梭根际、内生细菌的促生作用及其复合菌群的构建[J/OL]. 微生物学通报, 2025: 1-18. (2025-08-26). <https://link.cnki.net/doi/10.13344/j.microbiol.china.250666>.
Gao YD, Hou KX, Li JD, Liu Y, Tao Y, Wang ZL, Liu HR. Evaluation of plant growth-promoting effects of rhizosphere and endophytic bacteria of *Haloxylon ammodendron* and construction of strain combinations[J/OL]. Microbiology China, 2025: 1-18. (2025-08-26). <https://link.cnki.net/doi/10.13344/j.microbiol.china.250666> (in Chinese).
- [12] 许芳芳. 促进盐碱胁迫下小麦生长根际细菌与合成群落的构建及机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
Xu FF. Promoting wheat growth under saline-alkaline rhizosphere bacterial and construction of synthetic communities stress and their mechanisms[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023 (in Chinese).
- [13] 周默, 白庆荣. 内蒙古莫旗黄芪根腐病原的分离与鉴定[J]. 东北农业科学, 2021, 46(2): 52-55, 61.
Zhou M, Bai QR. Isolation and identification of root rot pathogen of *Astragalus membranaceus* in Moqi, Inner Mongolia[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(2): 52-55, 61 (in Chinese).
- [14] 李俊达. 黄芪根系微生物的促生作用及微生物制剂对黄芪生长的大田效果[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
Li JD. Growth-promoting effects of root microorganisms of *Astragalus membranaceus* and field effects of microbial preparations on *Astragalus* growth[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024 (in Chinese).
- [15] 曹诗娅, 梅亭, 郭扬, 刘瑞波, 王明玖, 何欣月, 肖婷婷, 唐芳. 不同苜蓿根系分离菌株及合成菌群对苜蓿种子萌发的影响[J/OL]. 微生物学报, 2025: 1-18. (2025-10-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13343/j.cnki.wsx.20250581>.
Cao SY, Mei T, Guo Y, Liu RB, Wang MJ, He XY, Xiao TT, Tang F. Effects of different bacterial strains isolated from alfalfa roots and synthetic microbial communities on alfalfa seed germination[J/OL]. Acta Microbiologica Sinica, 2025: 1-18. (2025-10-09). <https://link.cnki.net/doi/10.13343/j.cnki.wsx.20250581> (in Chinese).
- [16] Taman, Kaur J, Walia SS. Co-inoculation of indigenous *Pseudomonas* sp. and *Priestia* sp. to improve the soil health, plant growth, yield and fruit quality parameters of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Current Microbiology, 2025, 82(5): 210.
- [17] Etesami H, Glick BR. Halotolerant plant growth-promoting bacteria: prospects for alleviating salinity stress in plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 178: 104124.
- [18] Tsukanova KA, Chebotar VK, Meyer JJM, Bibikova TN.

- Effect of plant growth-promoting rhizobacteria on plant hormone homeostasis[J]. *South African Journal of Botany*, 2017, 113: 91-102.
- [19] Ben Massoud M, Sakouhi L, Karmous I, Zhu Y, El Ferjani E, Sheehan D, Chaoui A. Protective role of exogenous phytohormones on redox status in pea seedlings under copper stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 221: 51-61.
- [20] Ahmed W, Wang Y, Ji WX, Liu SS, Zhou S, Pan JD, Li ZG, Wang FS, Wang XR. Unraveling the mechanism of the endophytic bacterial strain *Pseudomonas oryzae* GDW1 in enhancing tomato plant growth through modulation of the host transcriptome and bacteriome[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(5): 1922.
- [21] He AL, Zhao LY, Ren W, Li HR, Paré PW, Zhao Q, Zhang JL. A volatile producing *Bacillus subtilis* strain from the rhizosphere of *Haloxylon ammodendron* promotes plant root development[J]. *Plant and Soil*, 2023, 486(1): 661-680.
- [22] He AL, Niu SQ, Zhao Q, Li YS, Gou JY, Gao HJ, Suo SZ, Zhang JL. Induced salt tolerance of perennial ryegrass by a novel bacterium strain from the rhizosphere of a desert shrub *Haloxylon ammodendron*[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(2): 469.
- [23] He AL, Niu SQ, Yang D, Ren W, Zhao LY, Sun YY, Meng LS, Zhao Q, Paré PW, Zhang JL. 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.
- [24] Ma XJ, Ouyang ZP, Luo HB, Shang WK, Ma HH, Zhu MM, Dong H, Guo ZX, Dong XX, Piao FZ, Shen SS, Li XZ, Wang Y, Zhang T. *Bacillus velezensis* HR6-1 enhances salt tolerance in tomato by increasing endogenous cytokinin content and improving ROS scavenging[J]. *Microbiological Research*, 2025, 296: 128143.
- [25] Wang CX, Song WC, Li CY, Cao YR, Li XC, Zhao J, Yang F, Yu HY, Liang Q, Yang KQ, Liu JN, Fang HC. Metagenomic analysis reveals *Bacillus cereus* OTU8977 as a potential probiotic in promoting walnut growth[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 839.
- [26] Alhaj Hamoud Y, Shaghaleh H, Saleem MH, Alshahami MO, Alqurashi M, Alhelaify SS, Alharthy OM, Fayad E, Rastogi A. Eco-friendly role of *Serratia marcescens* and *Pseudomonas fluorescens* in enhancing rice growth and mitigating cadmium toxicity via uptake modulation and antioxidant regulation[J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 718.
- [27] Sánchez P, Castillo I, Martínez-Checa F, Sampedro I, Llamas I. *Pseudomonas halotolerans* sp. nov., a halotolerant biocontrol agent with plant-growth properties[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1605131.
- [28] Kumar K, Kumar D, Pal G, Verma SK. Seed inhabiting bacterial endophyte *Bacillus amyloliquefaciens* (SS7) defends sorghum Sudan grass seedlings from a phytopathogen *Rhizoctonia solani*[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2025, 41(7): 246.
- [29] 杨金新, 王璐, 覃天涵, 段莹泽, 韦靖, 李佳慧, 朱英芝, 李战彪. 水稻内生菌 *Acinetobacter soli* JKDY-3 分离鉴定及其促生作用[J]. *南方农业学报*, 2025, 56(5): 1486-1497.
- Yang JX, Wang L, Qin TH, Duan YZ, Wei J, Li JH, Zhu YZ, Li ZB. Isolation and identification of an endophytic *Acinetobacter soli* JKDY-3 from rice and its plant growth-promoting effects[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2025, 56(5): 1486-1497 (in Chinese).
- [30] Ali A, Dindhorja K, Kumar R. *Acinetobacter oleivorans* IRS14 alleviates cold stress in wheat by regulating physiological and biochemical factors[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2023, 134(8): 1xad176.
- [31] Moretti LG, Crusciol CAC, Bossolani JW, Momesso L, Garcia A, Kuramae EE, Hungria M. Bacterial consortium and microbial metabolites increase grain quality and soybean yield[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(4): 1923-1934.
- [32] Tanwar A, Aggarwal A, Panwar V. Arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma viride* mediated *Fusarium* wilt control in tomato[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2013, 23(5): 485-498.
- [33] Wu LX, Wang Y, Lyu H, Chen XD. Effects of a compound *Trichoderma* agent on *Coptis chinensis* growth, nutrients, enzyme activity, and microbial community of rhizosphere soil[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e15652.
- [34] Wang JJ, Zhao SQ, Xu S, Zhao W, Zhang XX, Lei Y, Zhai HH, Huang ZY. Co-inoculation of antagonistic *Bacillus velezensis* FH-1 and *Brevundimonas diminuta* NYM3 promotes rice growth by regulating the structure and nitrification function of rhizosphere microbiome[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1101773.
- [35] 刘梓豪. 防控玉米种栖镰孢菌的根际菌群构建与菌群内部互作机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021.
- Liu ZH. The construction and internal interaction mechanism of a synthetic rhizosphere microbiota in inhibiting the seed-borne *Fusarium* of maize[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [36] Barbosa JZ, Hungria M, da Silva Sena, João Victor, Poggere G, dos Reis AR, Corrêa RS. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103913.
- [37] 李凤, 刘会涛, 田莎, 刘应高. 复配芽孢杆菌对撑绿杂交竹枯萎病的生物防治效果研究[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(12): 76-84.
- Li F, Liu HT, Tian S, Liu YG. Biological control effect of compounded *Bacillus* on wilt disease of *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(12): 76-84 (in Chinese).