

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)04-0339-08

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.04.007

## 两株植物促生细菌的分离鉴定及对马铃薯的促生效果评价

孙平平<sup>1</sup>, 吴若晨<sup>1</sup>, 吕秀华<sup>2</sup>, 贾伟<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 李正男<sup>1\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古民族幼儿师范高等专科学校, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 根际促生菌的应用是农业“减肥、减药”的有效措施。为筛选更多根际促生菌资源, 以陕西省韩城市铁矿厂土样为试验材料, 采用逐级稀释法、促生筛选培养基和马铃薯盆栽试验筛选有促生效果的菌株, 获得了两株植物根际促生菌, 并研究其促生效果及对pH和盐的耐受性。从铁矿厂分离筛选到2株具有良好促生作用的菌株HC6-7和HC6-11, 均具有络合铁和产IAA能力, 其中菌株HC6-7可产生11.59 mg/L的IAA, 菌株HC6-11具有固氮和解磷能力; 2株菌最适生长pH为7~9, 均可在浓度为5% NaCl及以下培养基中生长。马铃薯盆栽结果显示, 经菌液处理后, 处理组生物量均高于对照组; 形态学和分子生物学方法鉴定菌株HC6-7为内生芽孢杆菌(*Priestia endophytica*), HC6-11为阿塔卡马假单胞菌(*Pseudomonas atacamensis*)。内生芽孢杆菌(*P. endophytica* HC6-7)和阿塔卡马假单胞菌(*P. atacamensis* HC6-11)对马铃薯具有促生能力, 该结果将为植物促生菌肥研制提供微生物资源。

**关键词:** 马铃薯; 促生菌; 内生芽孢杆菌; 阿塔卡马假单胞菌

## Isolation and Identification of Two Plant Growth-promoting Bacteria and Evaluation of Their Growth-promoting Effects on Potatoes

SUN Pingping<sup>1</sup>, WU Ruochen<sup>1</sup>, LYU Xiuhua<sup>2</sup>, JIA Wei<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, LI Zhengnan<sup>1\*</sup>

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Inner Mongolia Minzu Preschool Education College, Erdos, Inner Mongolia 017000, China)

**Abstract:** The application of plant growth-promoting bacteria is an effective method for reducing the need for pesticides and fertilizers. To isolate additional resources of plant growth-promoting bacteria, soil samples were collected from the Hancheng Iron Ore site in Shaanxi Province for this research. The serial dilution method, *in vitro* cultivation on growth-promoting screening medium, and *in vivo* screening on potato plants were employed to select the growth-promoting strains. Two strains were identified, and their tolerance to pH and salt concentration was studied. The two strains, HC6-7 and HC6-11, exhibiting significant growth-promoting effects, were isolated from the iron mine. Both strains demonstrated the ability to produce siderophores and indole-3-acetic acid (IAA), with HC6-7 producing IAA at a concentration of 11.59 mg/L. Additionally, strain HC6-11 exhibited capabilities for nitrogen fixation and phosphorus solubilization. The optimal pH for both strains ranged from 7 to 9, and both strains were able to grow in media containing 5% or less NaCl. Pot experiments with potato plants revealed that the biomass of potatoes treated with the bacterial solution was greater than that of the control group. The strain HC6-7 was identified as *Priestia endophytica*, while HC6-11

收稿日期: 2024-05-01

基金项目: 鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20240042); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0112); 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZY21458)。

作者简介: 孙平平(1985-), 女, 博士, 副教授, 主要从事园艺作物病原菌及病害防控研究。

\*通信作者(Corresponding author): 李正男, 教授, 主要从事园艺病害及寄主互作研究, E-mail: lizhngnan@imau.edu.cn。

was identified as *Pseudomonas atacamensis* through morphological and molecular biology methods. In conclusion, *P. endophytica* HC6-7 and *P. atacamensis* HC6-11 have the potential to promote potato growth, and these findings would provide valuable microbial resources for the development of plant growth-promoting bacterial fertilizer.

**Key Words:** potato; growth-promoting bacterium; *Priestia endophytica*; *Pseudomonas atacamensis*

肥料是作物生产的物质基础, 对农民收入和农产品增产有重要作用, 但化肥的过量施用会造成土壤板结化、水体污染等严重问题。中国虽为化肥用量最高的国家, 但由于化肥利用率偏低<sup>[1]</sup>, 高产田面积仅占总耕地面积的30%<sup>[2]</sup>。提高土壤养分利用率, 减少化肥施用成为中国农业可持续发展的重中之重。

根际作为植物与土壤、微生物之间相互接触与作用的重要界面<sup>[3]</sup>, 对土壤养分的有效吸收利用有直接影响, 且与植物抗逆性、根系病害防治有密切的关系。如今, 根际已成为生物地球化学循环的热点区域。根际促生菌(Plant growth promoting rhizobacteria, PGPRs), 是一种自然存在于土壤中, 并在植物根际定殖的微生物, 可将土壤中难以被植物直接吸收的养分通过自身代谢过程降解为可被利用的养分, 提高土壤中各种元素的利用率。PGPRs不仅可以改善土壤理化性质, 还可促进植物生长, 增加作物产量, 增强植物抗逆性, 提高产品质量。生物菌肥的使用可有效缓解土壤板结, 减轻水体污染, 且具有低成本, 作用持久的特点<sup>[4]</sup>。因此, 植物根际促生菌的筛选和应用成为人们研究的热点<sup>[5,6]</sup>。

植物根际促生菌具有绿色环保, 污染少的优点。本研究从陕西省韩城市铁矿厂植物根际土壤中分离菌株, 筛选具有产嗜铁素、解磷、固氮和产生生长素能力的菌株, 采用盆栽试验验证菌株促生效果, 为植物根际促生菌在农业生产中的应用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 土壤样品采集

从陕西省韩城市铁矿场(N 35.48°, E 110.44°)采集土壤样品。采集样品时去除地表5 cm土层,

用土壤采样器取25 cm以内土壤样品, 混合均匀后置于牛皮纸袋中密封、编号, 带回实验室, 置于4 °C环境中保存备用。

#### 1.1.2 主要培养基和试剂

Luria-Bertani(LB)培养基、Chrome azurol S Assay Medium(CAS)培养基、Ashby培养基、蒙金娜无机磷培养基、蒙金娜有机磷培养基、Alkowsky显色液等试剂均购自青岛海博生物技术有限公司。

#### 1.1.3 主要仪器设备

电热恒温培养箱(HPX-9162MBE, 上海博讯实业有限公司); 实体解剖镜(LEICA EZ4W, 德国莱卡仪器有限公司); 超净工作台(SW-CJ-1FD, 苏州安泰公司); 显微镜(LEICA ICC50W, 德国莱卡仪器有限公司); 电泳仪(BG-Power 600K450W, 北京百晶生物技术有限公司); PCR仪(624BR47696, 美国伯乐Bio-Rad公司), 扫描电镜(SU8100扫描电子显微镜, 日本日立公司)。

## 1.2 菌株分离

利用逐级稀释法分离采集土壤样品中的细菌。称取土样10 g, 溶于90 mL无菌水中, 加入无菌玻璃珠, 150 r/min摇床上振荡30 min, 制成土壤悬浮液, 用梯度稀释法稀释至 $10^{-1}$ ~ $10^{-4}$ 倍, 分别取100  $\mu$ L稀释液涂于LB固体培养基上, 28 °C培养2 d, 记录菌株生长情况, 然后挑取单个菌落在LB固体培养基上进行纯化和培养。

### 1.3 分离菌株离体促生能力筛选

#### 1.3.1 促生培养基测定

在LB培养基上将活化的菌株用无菌棉签分别点接在CAS固体平板培养基(络合铁)、孟金娜无机磷培养基(解无机磷能力)、有机磷培养基(解有机磷能力)和Ashby培养基(固氮能力)上, 每个菌株3个重复, 28 °C培养5 d。具有络合铁、溶磷、固氮能力的菌株会在菌落周围形成橙黄色(CAS培养基)或透明圈, 透明圈越大, 颜色变化越大, 说

明菌株络合铁、解磷和固氮的能力越强。观察并记录菌落直径(d)和透明圈直径(D), 利用D/d计算菌株的络合铁、解磷和固氮能力。

### 1.3.2 产IAA能力测定

将筛选出来的菌株接种在含500 mg/L色氨酸的LB液体培养基中, 每个菌株重复3次, 在180 r/min摇床中28 ℃培养2 d, 测定OD<sub>600</sub>值。取10 mL样液于50 mL离心管中, 10 000 r/min离心10 min。取上清液1 mL, 加入4 mL的Alkowskii比色液, 室温暗置20 min后, 测定OD<sub>530</sub>值, 在标准曲线上查出相应吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)的含量。

## 1.4 筛选菌株对马铃薯促生作用的评价

2022年3月将基质与沙土按照体积比1:1混合, 灭菌分装后置于15 cm × 20 cm塑料花盆中, 选择形态完好的‘V7’马铃薯种薯种植于盆中, 放置于内蒙古自治区农牧业科学院蔬菜花卉研究所温室大棚中, 定期浇水。待马铃薯种子破土发芽后(约1周), 每盆加入100 mL(OD<sub>600</sub>=1.0)菌株发酵液, 灌至马铃薯根部, 对照组灌溉等量LB发酵液, 每个处理6盆, 重复3次。30 d后测量马铃薯株高、茎粗, 将收获植株冲洗干净后自然晾干, 称量鲜重和根长, 将植株置于105 ℃烘箱杀青30 min, 再于60 ℃烘干至恒重, 称量植株干重。

## 1.5 菌株鉴定

### 1.5.1 形态特征鉴定

将菌株接种于LB固体培养基上, 28 ℃下黑暗培养2 d, 观察菌株菌落形态。挑取少量菌体利用扫描电镜观察菌体形态, 观察3~5个视野, 测量菌体大小。

### 1.5.2 分子生物学方法鉴定

将菌株接种于LB液体培养基, 置于180 r/min摇床上28 ℃振荡培养24 h, 取1 mL菌液10 000 r/min离心1 min, 用Ezup柱式细菌基因组DNA抽提试剂盒提取细菌总DNA。采用细菌通用引物27F/1492R(5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'/5'-GGTACCTTGTTACGACTT-3'), 对其16S rDNA序列进行PCR扩增, 反应体系如下: 2×M5 Hipper 超光速 Mix 10 μL, ddH<sub>2</sub>O 7 μL, DNA模板1 μL, 上下游引物各1 μL; 反应条件: 94 ℃ 5 min; 94 ℃ 45 s,

55 ℃ 45 s, 72 ℃ 90 s, 30个循环; 72 ℃ 10 min。反应结束后用1%琼脂糖凝胶电泳检测, 胶回收后将PCR产物送交生工生物工程(上海)股份有限公司测序。使用Vector NTI Advance 11软件将测序结果进行校正和拼接, 用BLASTn软件对拼接的序列进行同源序列检索, 根据比对结果找到近似种; 利用GGDC网站(<http://ggdc.dsmz.de>)下载相应模式菌株, 利用MEGA11软件的比邻法构建系统发育进化树。

对用16S rDNA初步确定为假单胞菌的菌株, 采用假单胞菌的特定引物PsEG30F(5'-ATYGAAATCGCCAARCG-3')和PsEG790R(5'-CGGTTGATKTCCTTGA-3')扩增其*rpoD*基因片段, PCR程序与16S rDNA相同, 退火温度为55 ℃, 延伸40 s<sup>[7]</sup>, 反应结束后对扩增序列进行检测和测序, 利用GGDC网站下载假单胞菌的模式菌株, 利用MEGA11软件的比邻法构建系统发育进化树。

## 1.6 促生菌株在不同pH和盐浓度的生长能力

用1 mol/L HCl和NaOH分别调整培养基pH为1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11和12, 取2 mL供试菌株种子液接种到含200 mL不同pH培养基的三角瓶中, 在180 r/min摇床上28 ℃培养48 h, 测定OD<sub>600</sub>值, 以确定不同pH对菌株生长的影响。

配制含NaCl浓度为0、0.1%、0.5%、1%、2%、5%、10%、12%和15%的LB液体培养基, 取2 mL供试菌株种子液接种到含200 mL不同NaCl浓度培养基的三角瓶中, 在180 r/min摇床上28 ℃培养48 h, 测定OD<sub>600</sub>值, 确定不同盐浓度对菌株生长的影响。

## 1.7 数据分析方法

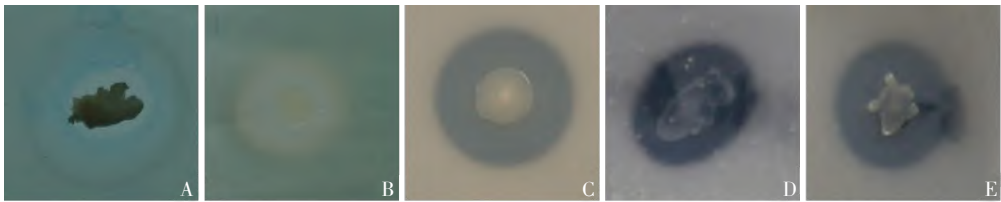
使用Excel 2016软件进行数据整理和作图, 使用SPSS 25.0软件进行数据单因素方差分析, 用Duncan's法进行数据多重比较( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株分离及其促生效果测定

用逐级稀释法从土壤样品中分离到124株细菌, 利用CAS培养基筛出2株可高效产生嗜铁素的

菌株 HC6-7、HC6-11, 其 D/d 比值分别为 2.62 和 2.26。利用蒙金娜解磷(有机磷和无机磷)、Ashby 培养基, 以及培养基中加入一定量的 L-色氨酸对 2 个菌株的解磷、固氮和产 IAA 能力进行测定, 结果显示, 两株菌均具有络合铁和产 IAA 活性, 其中 HC6-7 产 IAA 量为 11.59 mg/L, HC6-11 产 IAA 量为 3.24 mg/L; 此外, HC6-11 还有解磷和固氮活性(图 1, 表 1)。



A、B. 络合铁, C. 有机磷, D. 无机磷, E. 固氮。A 为 HC6-7, B~E 为 HC6-11。  
A and B. Siderophores, C. Organic phosphorus, D. Inorganic phosphorus, E. Nitrogen. A is strain HC6-7, B~E are strain HC6-11.

图 1 菌株 HC6-7 和 HC6-11 的促生效果测定  
Figure 1 Determination of growth promoting effect of strains HC6-7 and HC6-11

表 1 菌株 HC6-7 与 HC6-11 的促生效果  
Table 1 Growth promoting effect of HC6-7 and HC6-11

| 项目<br>Item                          | HC6-7                                |                                                 |                                                                        | HC6-11                               |                                                 |                                                                        |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                                     | 菌落直径 d<br>(mm)<br>Colony<br>diameter | 透明圈直径 D<br>(mm)<br>Transparent<br>ring diameter | 透明圈直径/菌落<br>直径(D/d)<br>Transparent ring<br>diameter/Colony<br>diameter | 菌落直径 d<br>(mm)<br>Colony<br>diameter | 透明圈直径 D<br>(mm)<br>Transparent<br>ring diameter | 透明圈直径/菌落<br>直径(D/d)<br>Transparent ring<br>diameter/Colony<br>diameter |
| 络合铁 Siderophores production         | 3.55±0.45                            | 9.32±1.17                                       | 2.62                                                                   | 3.34±1.58                            | 7.54±0.81                                       | 2.26                                                                   |
| 无机磷 Inorganic phosphorus solubility |                                      | —                                               |                                                                        | 4.05±1.03                            | 12.25±0.93                                      | 3.02                                                                   |
| 有机磷 Organic phosphorus solubility   |                                      | —                                               |                                                                        | 16.90±9.75                           | 23.10±7.92                                      | 1.37                                                                   |
| 固氮 Nitrogen fixation                |                                      | —                                               |                                                                        | 6.04±1.38                            | 9.36±0.99                                       | 1.55                                                                   |

注: “—” 表示无透明圈, 数值均表示平均值±标准差。  
Note: “—” indicates that no transparent ring is observed; all the numbers are means ± standard deviation.

2.2 对马铃薯植株的促生效果

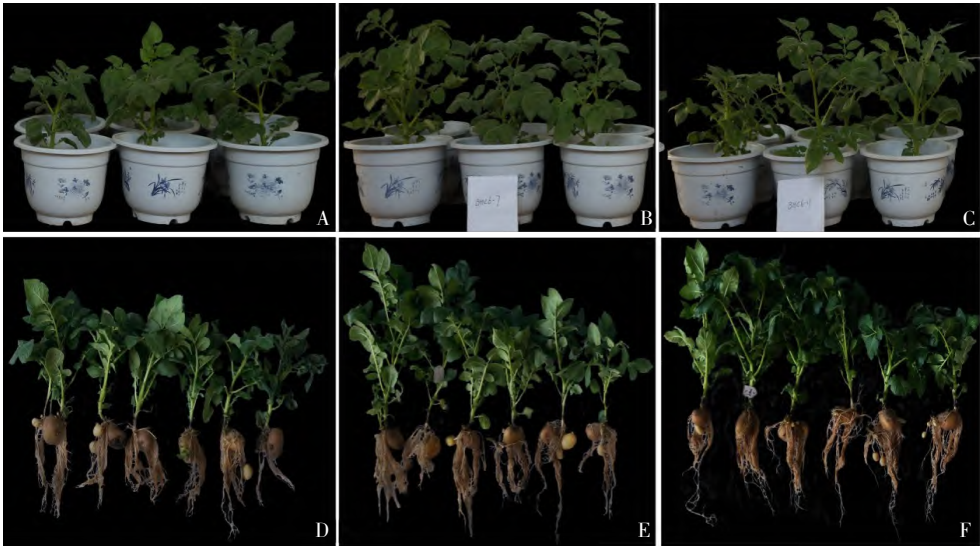
菌株 HC6-7 和 HC6-11 对马铃薯盆栽促生效果的测定结果显示, 菌株 HC6-7 和 HC6-11 均可促进马铃薯株高、茎粗、鲜重和干重(图 2, 表 2)的增加。经 HC6-7 和 HC6-11 菌液处理后马铃薯植株株高和根长高于对照(图 2), HC6-7 处理的平均株高为 14.83 cm, 根长为 21.48 cm, 相比对照分别增加了 16.77%和 12.82%; HC6-11 处理的马铃薯平均株高为 16.00 cm, 根长为 22.03 cm, 相比对照分别增加了 25.98%和 12.82%。此外, 经 HC6-7 和 HC6-11 菌液处理后马铃薯植株平均茎粗增加 22%, 鲜重分别增加 57.54%和 54.38%, 植株干重分别增加 16.61%

和 54.69%(表 2), 表明菌株 HC6-7 和 HC6-11 可显著促进马铃薯生长。

2.3 菌株鉴定

2.3.1 形态学鉴定

将纯化后的 2 株促生菌株分别接种于 LB 固体培养基上, 菌株 HC6-7 菌落白色、不透明, 表面凸起, 光滑无褶皱、黏稠, 菌落呈圆形, 边缘不整齐(图 3A1~A2), 菌体短杆状, 大小为 1.307~2.775 μm × 0.600~0.775 μm(图 3A3)。菌株 HC6-11 菌落黄色、半透明, 表面光滑(图 3B1~B2), 菌体杆状或弯曲, 大小为 0.963~6.727 μm × 0.375~0.592 μm(图 3B3)。



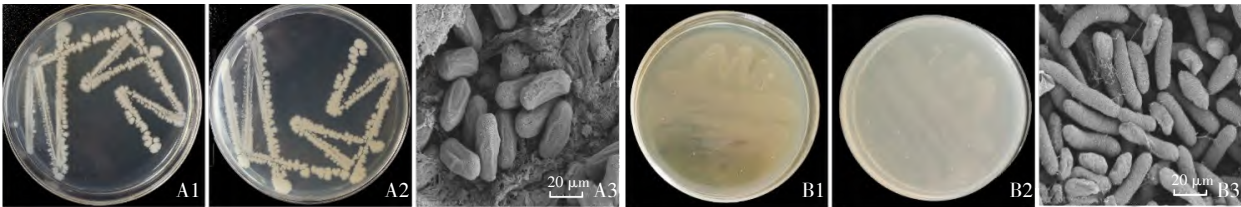
A、D. 对照, B、E. 接种 HC6-7 处理, C、F. 接种 HC6-11 处理。  
A and D. Control, B and E. Treated with HC6-7, C and F. Treated with HC6-11.

图2 菌株 HC6-7 和 HC6-11 对马铃薯的促生盆栽试验  
Figure 2 Potted experiment of growth promotion of potato by strains HC6-7 and HC6-11

表2 菌株 HC6-7 和 HC6-11 对马铃薯植株的促生效果  
Table 2 Growth promotion effects of HC6-7 and HC6-11 on potato

| 处理<br>Treatment | 株高(cm)<br>Plant height | 茎粗(mm)<br>Stem diameter | 根长(cm)<br>Root length | 每株干重(g)<br>Dry weight per plant | 每株鲜重(g)<br>Fresh weight per plant |
|-----------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| CK              | 12.70±2.48b            | 6.72±0.78b              | 19.04±4.93b           | 5.37±3.27b                      | 20.59±5.93b                       |
| HC6-7           | 14.83±3.26ab           | 8.20±1.82ab             | 21.48±3.50a           | 8.46±9.68a                      | 24.01±11.53a                      |
| HC6-11          | 16.00±4.35a            | 8.33±1.01a              | 22.03±3.97a           | 8.29±5.40a                      | 31.85±6.08a                       |

注：同一列中不同字母表示在  $P<0.05$  水平上差异显著。  
Note: Different letters in the same column indicate significant differences at  $P<0.05$ .



A1~A3 依次为菌株 HC6-7 的菌落正面、反面和菌体扫描电镜图, B1~B3 依次为菌株 HC6-11 的菌落正面、反面及菌体扫描电镜图, 其中 A3 和 B3 的示例线表示 1  $\mu\text{m}$ 。  
A1-A3 are the front, back and scanning electron microscope images of strain HC6-7; B1-B3 are the front, back and scanning electron microscope images of strain HC6-11. Bars in A3 and B3 represent 1  $\mu\text{m}$ .

图3 菌株 HC6-7 与 HC6-11 形态特征  
Figure 3 Morphological characteristics of strains HC6-7 and HC6-11

### 2.3.2 菌株的分子生物学方法鉴定

利用模式菌株基于16S rDNA基因序列构建HC6-7和HC6-11的系统发育进化树(图4)。菌株HC6-7与内生芽孢杆菌(*Priestia endophytica* 2D, NCBI: AF295302)聚在一枝; 菌株HC6-11与韩国假单胞菌*Pseudomonas koreensis* Ps 9-14 (AF468452)、阿塔卡马假单胞菌(*P. atacamensis* M7D1, SSBS01000008)聚在一枝。采用假单胞菌特异引物对HC6-11的*rpoD*基因进行扩增并构建系统发育进化树, 结果显示HC6-11与菌株阿塔卡马假单胞菌(*P. atacamensis* M7D1, SSBS01000008)聚到一枝, 形态结合分子

序列测定结果显示菌株HC6-7为内生芽孢杆菌, 菌株HC6-11为阿塔卡马假单胞菌。

### 2.4 不同酸碱度和含盐量对活性菌株生长影响分析

通过测定HC6-7和HC6-11在不同pH和不同NaCl浓度培养基中的生长状况, 评价其耐酸碱和盐的能力。结果显示, 菌株HC6-7和HC6-11在pH 6~10的培养基中均可正常生长, 最适pH为7~9, pH<5或>11时生长缓慢。菌株HC6-7、HC6-11在含5%NaCl及以下浓度的培养基中可正常生长, 而在10%及以上NaCl中无法正常生长(图5)。

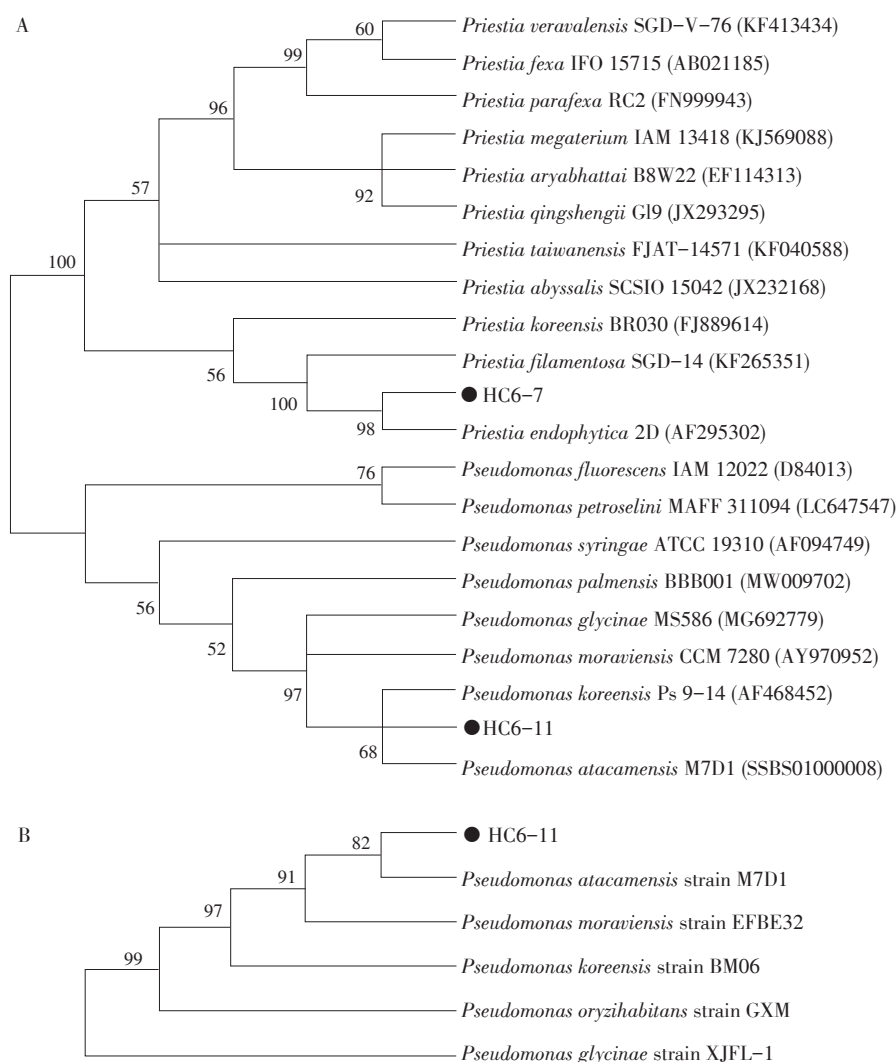


图4 基于16S rDNA序列(A)和*rpoD*基因序列(B)构建系统发育进化树菌株鉴定结果

Figure 4 Phylogenetic trees based on 16S rDNA (A) and *rpoD* gene sequences (B) for the identification of isolated strains

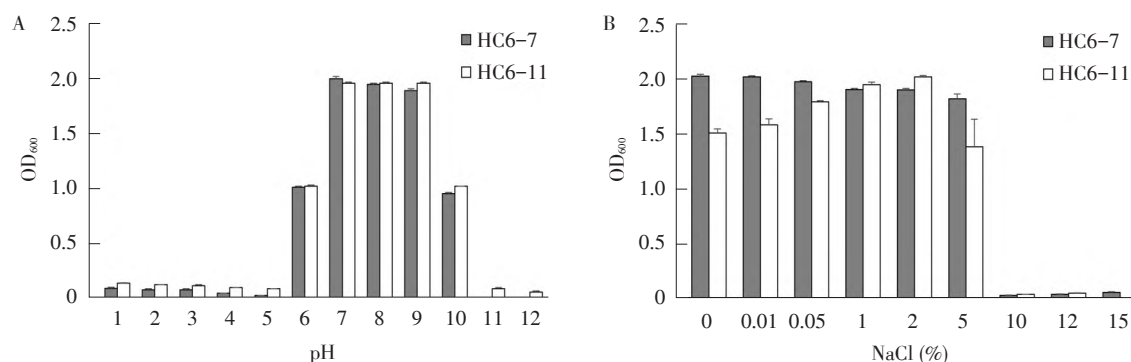


图5 不同pH(A)和NaCl浓度下(B)菌株HC6-7和HC6-11的生长情况

Figure 5 Growth of strains HC6-7 and HC6-11 at different pH (A) and NaCl concentrations (B)

### 3 讨论

根际促生菌可以将土壤中的一些难溶性物质转化为可溶性物质,从而提高植物对这些物质的吸收利用。目前已有多个促生菌的报道,例如宋小双等<sup>[8]</sup>、漫静等<sup>[9]</sup>、韩丽珍等<sup>[10]</sup>分别从辽宁省樟子松、羊草、茶树等植物根际土壤分离筛选出具有促生效果的菌株。本研究通过促生培养基筛选结合盆栽试验,从铁矿厂筛选出对马铃薯具有显著促生活性的菌株HC6-7和HC6-11,两菌株均具有高效络合铁能力和产IAA能力,此外菌株HC6-11具有解磷和固氮能力,形态特性结合分子序列鉴定其分别为内生芽孢杆菌(*P. endophytica*)和阿塔卡马假单胞菌(*P. atacamensis*)。两菌株可在pH 6~10和含5%NaCl及以下培养基中生长,具有一定的应用潜力。

*P. endophytica* 为 *Bacillus endophyticus* 的同物异名<sup>[11]</sup>,目前已报道多株内生芽孢杆菌对作物具有促生效果,例如 *B. endophyticus* J13 可通过分泌植物胞外多糖,影响脱落酸合成和信号转导,从而提高拟南芥的耐旱性<sup>[12]</sup>; *B. endophyticus* IGPEB 33 与丛枝菌根真菌混合使用可显著促进生姜生长,提高其土壤养分利用率<sup>[13]</sup>。阿塔卡马假单胞菌最早分离自智利的阿塔卡马沙漠开花植物的根际,该类菌株可通过产生高分子聚合物提高石油的回收率被广泛研究<sup>[14,15]</sup>,此外阿塔卡马假单胞菌可减少重金属污染<sup>[16]</sup>,Arora等<sup>[17]</sup>报道菌株 *P. atacamensis* KSS-6 与有机肥混合施用可提高水稻产量和盐碱土壤中的养分

利用率。本研究中,内生芽孢杆菌(*P. endophytica* HC6-7)和阿塔卡马假单胞菌(*P. atacamensis* HC6-11)可显著促进马铃薯生长,该结果为内生芽孢杆菌和阿塔卡马假单胞菌的应用提供基础。

### [参考文献]

- [1] 梁玲玲,周霞,李志强,等.不同减肥技术对马铃薯养分高效利用的影响[J].中国马铃薯,2020,34(3):150-157.
- [2] 束维正.中微量元素肥料在农业生产上的应用[J].安徽农学通报,2013,19(24):63-64.
- [3] 邵秋雨,董醇波,韩燕峰,等.植物根际微生物组的研究进展[J].植物营养与肥料学报,2021,27(1):144-152.
- [4] 王哲,屠春宝,马琨,等.生物菌肥对土壤及农作物的影响研究进展[J].浙江农业科学,2024,65(10):2523-2528.
- [5] Prashar P, Kapoor N, Sachdeva S. Rhizosphere: its structure, bacterial diversity and significance [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2014, 13: 63-77.
- [6] Beneduzi A, Ambrosini A, Passaglia L M. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents [J]. Genetics and Molecular Biology, 2012, 35: 1044-1051.
- [7] Mulet M, Bennasar A, Lalucat J, et al. An rpoD-based PCR procedure for the identification of *Pseudomonas* species and for their detection in environmental samples [J]. Molecular and Cellular Probes, 2009, 23(3): 140-147.
- [8] 宋小双,遇文婧,周琦,等.樟子松根际土壤解磷细菌的筛选、鉴定及解磷能力[J].中国农学通报,2020,36(32):76-81.

- [9] 漫静, 唐波, 邓波, 等. 羊草根际促生菌的分离筛选及促生作用研究 [J]. 草业学报, 2021, 30(1): 59.
- [10] 韩丽珍, 邓兆辉, 朱春艳, 等. 茶树根际促生菌的筛选与促生特性的研究 [J]. 山地农业生物学报, 2016, 35(1): 51–56.
- [11] Gupta RS, Patel S, Saini N, *et al.* Robust demarcation of 17 distinct *Bacillus* species clades, proposed as novel *Bacillaceae* genera, by phylogenomics and comparative genomic analyses: description of *Robertmurraya kyonggiensis* sp. nov. and proposal for an emended genus *Bacillus* limiting it only to the members of the *Subtilis* and *Cereus* clades of species [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020, 70: 5753–5798.
- [12] Sharma R, Behera A K, Nenmeli Sampathkumar RG, *et al.* The drought-mitigating rhizobacterium, *Bacillus endophyticus* J13, modulates soil moisture content under drying conditions, precluding the necessity of drought-mediated signaling in *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 43: 3813–3825.
- [13] Jabborova D, Davranov K, Jabbarov Z, *et al.* Dual inoculation of plant growth-promoting *Bacillus endophyticus* and *Funneliformis mosseae* improves plant growth and soil properties in ginger [J]. ACS Omega, 2022, 7(39): 34779–34788.
- [14] Abbaspour A, Jafari A, arahomi D S, *et al.* Production and characterization of a polysaccharide/polyamide blend from *Pseudomonas atacamensis* M7D1 strain for enhanced oil recovery application [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124421.
- [15] Poblete-Morales M, Carvajal D, Almasia R, *et al.* *Pseudomonas atacamensis* sp. nov., isolated from the rhizosphere of desert bloom plant in the region of Atacama, Chile [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2020, 113: 1201–1211.
- [16] Mazari H E, Meliani A, Berkati S, *et al.* Washing of heavy metal-contaminated soils using pyoverdine extracted from plant growth-promoting bacteria *Pseudomonas lactis* and *P. atacamensis* [J]. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 2024, 19 (1): 169–178.
- [17] Arora N K, Mishra J, Singh P, *et al.* Salt-tolerant plant growth-promoting *Pseudomonas atacamensis* KSS-6 in combination with organic manure enhances rice yield, improves nutrient content and soil properties under salinity stress [J]. Journal of Basic Microbiology, 2024, 64(6): 2300767.