

# 水稻根际高效解磷细菌SP1的筛选及其促生作用研究

杜春梅\*, 李玉婷, 韩学东, 霍孝平, 董锡文

佳木斯大学生物与农业学院, 黑龙江 佳木斯

收稿日期: 2026年1月3日; 录用日期: 2026年2月3日; 发布日期: 2026年2月12日

## 摘 要

以北方寒地种植的水稻、玉米和大豆根际土壤为试材, 采用含 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的NBRIP培养基筛选解无机磷细菌, 并通过形态观察、生理生化特征分析及分子生物学方法对其进行鉴定。利用钼蓝比色法测定菌株的解磷能力, 结合盆栽试验探究菌株对水稻的促生长作用及根际土壤改良效果, 旨在为寒冷地区生物磷肥的开发提供优良菌种。结果显示, 菌株SP1被鉴定为泛菌属革兰氏阴性短杆菌, 在NBRIP培养液中可溶性磷含量最高达900.31 mg/L; 盆栽试验结果显示, 接种菌株SP1后, 水稻生长显著促进、产量明显提高, 同时根际提高水稻根际土壤的有效磷含量, 降低土壤的pH值。研究表明, 泛菌SP1是一株兼具高效解磷能力与促生长特性的细菌, 可应用于生物磷肥开发及土壤改良。

## 关键词

水稻, 溶无机磷细菌, 泛菌, 有效磷, 促生作用

# Screening of Highly Efficient Phosphate-Solubilizing Bacterial Strain SP1 from Rice Rhizosphere and Its Potential for Plant Growth Promotion

Chunmei Du\*, Yuting Li, Xuedong Han, Xiaoping Huo, Xiwen Dong

College of Biology and Agriculture, Jiamusi University, Jiamusi Heilongjiang

Received: January 3, 2026; accepted: February 3, 2026; published: February 12, 2026

\*第一作者。

文章引用: 杜春梅, 李玉婷, 韩学东, 霍孝平, 董锡文. 水稻根际高效解磷细菌 SP1 的筛选及其促生作用研究[J]. 农业科学, 2026, 16(2): 255-265. DOI: 10.12677/hjas.2026.162034

## Abstract

The rhizosphere soils of rice, maize and soybeans from the cold regions in northern China were used as experimental materials. To provide excellent strains suitable for the development of bio-phosphate fertilizer in cold region, the inorganic phosphate-solubilizing bacterium was screened by NBRIP medium containing  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , and then was identified based on morphology, physiology and biochemistry, and molecular biological methods. Its phosphate-solubilizing activity was determined by molybdenum blue colorimetry method, as well as the effects of bacterium inoculation on rice growth-promoting and rhizosphere soil improvement were investigated by the pot experiments. The results showed that the strain SP1 was identified as a member of *Pantoea* sp., rod-shaped Gram-negative bacterium. The soluble phosphorus content of strain SP1 in the NBRIP broth reached 900.31 mg/L. The growth and yield of rice were significantly promoted by inoculation of strain SP1 in pot experiments. Meanwhile, the pH value of rice rhizosphere soil was reduced. Research results indicate that the *Pantoea* SP1 strain is a growth-promoting and efficient phosphorus-solubilizing bacterium, which could be applied for the development of biological phosphorus fertilizer and soil improvement.

## Keywords

Rice, Inorganic Phosphate-Solubilizing Bacteria, *Pantoea*, Available Phosphorus, Plant Growth Promotion

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

磷是植物生长所必需的主要大量元素之一，参与光合作用、呼吸作用、细胞分裂、养分运输、生物固氮及信号转导等重要代谢过程[1]。然而，土壤中 95%以上无机磷以磷酸钙、磷铁矿等难溶性形态存在，无法被作物直接吸收利用[2]。

高效溶解土壤难溶性无机磷对农业生产与生态环境具有重要意义。一方面可显著提升土壤有效磷含量，缓解作物磷素胁迫，促进植株营养生长与生殖生长，增强植株抗病性；另一方面可减少化学磷肥的盲目投入，降低磷肥流失造成的水体富营养化、土壤磷素累积污染等问题，兼具培肥土壤与降低面源污染的双重生态意义，是农田绿色生产与土壤肥力可持续调控的关键途径[3] [4]。

根际土壤中的解磷微生物(包括细菌、放线菌和真菌)是土壤生态系统磷循环的重要驱动因子，可将不可利用的磷转化为可利用形态，提升根际土壤有效磷含量，供植物吸收利用[5]。其中，解磷细菌(PSB)被公认为比土壤中的非解磷微生物具有更高效的磷酸盐溶解能力[6]。PSB 通过产生葡萄糖酸盐等多种有机酸，降低周围土壤 pH 值，驱动磷酸盐增溶，促进根际磷素溶解；同时还能产生吲哚乙酸，刺激根系生长，增加根毛与侧根数量[7]。

据报道，土壤中存在大量的解磷细菌，包括 *Bacillus*、*Erwinia* sp.、*Pseudomonas*、*Burkholderia*、*Flavobacterium* sp.、*Micrococcus* sp.、*Corynebacterium* 和 *Xanthomonas* sp.等[8] [9]。泛菌属菌株由于突出的环境多样性和适应性，以及多种生物合成及降解能力，近年来引起各国学者的关注，国内外关于泛菌属细菌的解磷研究有了越来越多的报道[10]。从突尼斯南部绿洲枣椰树(*Phoenix dactylifera* L.)根际土壤中

分离得到 *Pantoea agglomerans* 对  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  的体外增溶活性高达 980 mg/L, 有效地提高了半干旱土壤中有效磷的含量[11]。从韩国密阳大豆植物根际土壤中分离的 *Pantoea agglomerans* R-42 对  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  的体外增溶活性高达 1312 mg/L, 并且具有抗盐和抗酸碱能力[12]。从黄河三角洲盐地碱蓬根际土壤分离的 *Pantoea vagans* RPB03, 在密闭、解磷菌较高盐、高温和碱性条件下解磷量达到 300 mg/L 以上, 土壤有效磷含量从 0.029 mg/kg 提升至 0.043 mg/kg [13]。从河北省迁安市油松根际分离的泛菌 D2 培养液有效磷含量提高为 392.13 mg/L [14]。

黑龙江省是水稻、玉米和大豆三大作物的主产区, 种植面积广阔, 对土壤中有效磷的需求量较大。由于该省独特的地域与气候条件, 现有多株筛选自南方高温高湿生境的生防菌, 在低温环境下存在繁殖速度慢、活性衰减快、与土著微生物竞争能力弱等问题。目前, 适配寒地黑土环境及作物品种的本土高效生防菌株较为稀缺, 因此从三大作物生境中筛选出适合当地的新型促生长解磷菌具有重要实践价值。本研究拟从寒地水稻、玉米和大豆的根际土壤中筛选高效解磷细菌, 探究该类细菌对土壤磷转化及植株促生能力的影响, 以期对寒地解磷微生物肥料的研发提供适用于寒冷地区的优良菌株资源。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

#### 2.1.1. 土样和水稻种子

土样采自黑龙江省种植的生长状态良好的玉米、大豆和水稻根际土壤。采样时, 先去除植物根际表层土壤, 再用无菌铲采集 5~15 cm 深的根际土壤, 每个样点采集 3 份土样, 装入有编号的自封袋后带回实验室。水稻种子三江 6 号购于黑龙江省宝山农场。

#### 2.1.2. 供试菌株

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*) GIM1.160 购于广东微生物菌种保藏中心。

#### 2.1.3. 培养基

NBRIP 培养基[15], 牛肉膏蛋白胨培养基, 高氏 I 号培养基, 马丁氏培养基, 固体培养基中加入 2% 的琼脂粉,  $7 \times 10^4$  Pa 灭菌 30 min。

#### 2.1.4. 主要试剂

(1) 细菌 DNA 快速抽提试剂盒、SpanPrep 柱式 PCR 产物纯化试剂盒、Taq DNA 聚合酶(5 U/ $\mu$ L)、dNTP(each 10 mmol/L)及引物均来自生工生物工程(上海)股份有限公司。硫酸、钼酸铵、钼锑抗、酒石酸锑钾和抗坏血酸等均为分析纯。

(2) 钼蓝比色液: 按 3 mol/L 硫酸溶液:去离子水:5%抗坏血酸溶液:2.5%钼酸铵溶液 = 1:2:1:1 (v/v)混匀, 即为钼蓝比色液, 现用现配。

(3) 钼锑抗显色剂: 量取 163 mL 浓硫酸(密度 1.84 g/mL), 缓缓加入到 400 mL 蒸馏水中, 不断搅拌, 冷却。另称取 10 g 钼锑抗溶于约 60℃的 300 mL 蒸馏水中, 冷却。然后将浓硫酸溶液缓缓倒入钼酸铵溶液中, 同时搅拌, 再加入 0.5%酒石酸锑钾溶液 100 mL, 冷却后, 加蒸馏水稀释到 1000 mL, 摇匀, 贮于棕色试剂瓶中, 即钼锑抗贮存液。在钼锑抗贮存液加入 1.5%(m/v)的抗坏血酸, 混匀, 即钼锑抗显色剂现用现配。

(4) Salkowski 显色液: 称取 13.5 g  $\text{FeCl}_3$  溶于 100 mL 水中, 得到 0.5 mol/L  $\text{FeCl}_3$  溶液, 吸取 0.5 mol/L  $\text{FeCl}_3$  溶液 1 mL 于 50 mL 蒸馏水中, 再加入浓硫酸 30 mL, 冷却后定容至 100 mL。

(5) CAS 蓝色检测液: 取 6 mL 浓度为 10 mM 的 HDTMA 溶液加入 100 mL 容量瓶中, 用蒸馏水进行适度稀释; 另将 1.5 mL 浓度为 1 mmol/L 的  $\text{FeCl}_3$  溶液与 7.5 mL 浓度为 2 mmol/L 的 CAS 溶液均匀混合

后,沿玻璃棒缓慢加入上述容量瓶中。随后,称取 4.307 g 无水双二甲胺(无水哌嗪)溶解于 30 mL 蒸馏水中,沿杯壁缓慢加入 6.25 mL 浓度为 12 mmol/L 的浓盐酸,将此混合溶液转移至上述容量瓶内,最后用蒸馏水定容至 100 mL,即得到 CAS 检测液。

### 2.1.5. 仪器

生物显微镜(SB-20077,北京泰克仪器有限公司),PCR 仪(Tgradient, Biometra 公司),电泳仪(DYY-6C,北京六一厂),全温摇床振荡器(ZHWY-2102,上海智城分析仪器制造有限公司),高速离心机(HC-2517,安徽中科中佳科学仪器有限公司),可见分光光度计(22PC05299,上海棱光技术有限公司),数显酸度计(PHS-2C,杭州雷磁分析仪器公司),数显电导率仪(DDS11A,上海雷磁公司)。

## 2.2. 方法

### 2.2.1. 土壤理化指标测定

土壤 pH 值和电导率(EC)的测定。取风干的土样,过筛(1 mm)。按土:水 = 1:2.5 (w/v)混合,用 pH 计测定土壤 pH 值。按土:水 = 1:5 (w/v)混合,用电导率仪测定土壤的电导率。

土壤绝对含水量的测定。采用干燥法测定土壤的绝对含水量。土壤含水量 = (原土重 - 烘干土重)/烘干土重 × 100%。

土壤有效磷测定。将 5 g 过筛(0.85 mm)的风干土样和一勺无磷活性炭置于 250 mL 的三角瓶中,加入 100 mL 0.5 mol/L 碳酸氢钠,25℃恒温震荡 30 min,过滤,收集 5 mL 滤液于试管中,用钼锑抗比色法测有效磷的含量。

土壤微生物数量的测定。参照杜等方法进行土壤细菌、放线菌和真菌数量的测定[16]。

### 2.2.2. 解磷菌的筛选

用 NBRIP 培养基对解磷菌进行分离纯化。取 10 g 新鲜的土样,置于含 90 mL 无菌水和玻璃珠的三角瓶中,充分振荡,制成土壤稀释液。将 100  $\mu$ L 土壤稀释液涂布在 NBRIP 培养基上,30℃恒温培养 7 d。挑取有明显解磷圈的菌落,划线法转接至 NBRIP 培养基上进行反复纯化,纯化的单菌落转接于牛肉膏蛋白胨培养基斜面上,4℃低温保存备用。

### 2.2.3. 解磷菌解磷能力测定

通过解磷圈的大小定性评价菌株的解磷能力。将纯化的菌株接种于 50 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养进行扩大培养中,37℃、140 r/min 摇床培养 12 h 后,调整菌浓度至  $OD_{600} = 0.5$  ( $10^8$  CFU/mL),取 20  $\mu$ L 菌悬液滴加至 NBRIP 培养基的中央,30℃培养 7 d,用游标卡尺测量菌落直径(C)和解磷圈直径(H),计算增溶指数(SI) = 解磷圈直径(H)/菌落直径(C)。

通过测定 NBRIP 液体培养基(含有 5 g/L  $Ca_3(PO_4)_2$ )中可溶性磷含量来定量评价菌株的解磷能力。将 100 倍稀释的过夜培养物接种到 100 mL NBRIP 培养液中,30℃、140 r/min 摇床培养 8 d,每隔 24 h 定时取样,12,000 r/min 离心 5 min 得到上清液,用钼蓝比色法测定可溶性磷含量,同时用酸度计测定上清液的 pH 值。以不接菌的 NBRIP 液体培养基为空白对照。

### 2.2.4. 解磷菌 IAA 分泌量的测定

将种子液按 1%的接种量分别转接至含 L-色氨酸的 LB 液体培养基中,于 30℃、140 r/min 条件下振荡培养 72 h。取 100  $\mu$ L 菌悬液与 100  $\mu$ L Salkowski 显色液混匀,避光反应 30 min 后,使用分光光度计在 530 nm 波长下比色。以 100  $\mu$ L 去离子水与 100  $\mu$ L Salkowski 显色液的混合液作为参比液调零,测定并记录待测液的吸光值,代入 IAA 标准曲线公式计算菌株的 IAA 分泌量。

### 2.2.5. 解磷菌铁载体活性的测定

将菌株种子液按 1% 的接种量分别转接至 KMB 液体培养基和富铁 KMB 液体培养基中, 于 28℃、140 r/min 条件下振荡培养 72 h。取 5 mL 菌悬液以 4000 r/min 离心 15 min, 保留上清液; 按体积比 V(培养基上清液):V(CAS 检测液)=1:1 颠倒混匀, 反应 10 min 后, 以去离子水为对照, 使用分光光度计在 630 nm 波长下测定反应液的吸光值。铁载体表达量计算公式:  $Su = (Ar - A)/Ar \times 100\%$ 。式中, Su-铁载体表达量; Ar-富铁 KMB 培养基上清液的 OD 值; A-KMB 液体培养基上清液的 OD 值。

### 2.2.6. 菌株 SP1 的鉴定

#### (1) 形态及生理生化鉴定

将菌株 SP1 划线接种在牛肉膏蛋白胨培养基上, 30℃ 培养 24 h, 观察菌落的形状、颜色、边缘及透明度等。挑取菌落边缘的菌体, 进行革兰氏染色, 以大肠杆菌(*Escherichia coli*)为参照, 使用油镜观察细菌的形态。参照朱等人的方法对菌株主要的生理生化特性进行测定[17]。

#### (2) 菌株 16S rDNA 基因序列分析

用“细菌 DNA 快速抽提试剂盒”提取菌株 SP1 的全基因组 DNA (gDNA)。以 gDNA 为模板, 16S rDNA 的通用引物(27F: 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3'; 1492R: 5'-TACGGTTACCTTGTACGACTT-3')进行 PCR 扩增。PCR 反应体系: ddH<sub>2</sub>O 14.9 μL, 10 × PCR Buffer 2 μL, Mg<sup>2+</sup> (25 mmol/L) 1.2 μL, dNTP (each 10 mmol/L) 0.4 μL, 27F (10 μmol/L) 0.5 μL, 1492R (10 μmol/L) 0.5 μL, gDNA 0.1 μL, Taq DNA 聚合酶(5 U/μL) 0.4 μL。PCR 反应条件: 94℃ 预变性 5 min; 94℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 1 min, 30 个循环; 72℃ 终延伸 5 min。PCR 产物用 SpanPrep 柱式 PCR 产物纯化试剂盒纯化, 送生工生物工程(上海)股份有限公司进行双向测序。在 NCBI 数据库对测得的 16S rDNA 序列进行 Blast 比对分析, MEGA 6.0 软件进行系统发育树的构建。

### 2.2.7. 菌株 SP1 的溶血试验

将菌株 SP1 活化后, 挑取单菌落接种于哥伦比亚血琼脂培养基上培养 48 h, 通过观察平板上是否出现溶血环判断菌株的安全性, 并以金黄色葡萄球菌作为阳性对照菌株。

### 2.2.8. 菌株 SP1 盆栽试验

将未灭菌的土壤充分混合, 过 2 mm 筛, 每个花盆里装满 400 g 土壤。选取生长状态良好且长势相同的三江 6 号水稻幼苗, 每盆移栽 4 株, 深度 2.0 cm。水稻在 2 种不同的处理下种植: (1) 对照组: 试验土壤 + 未接种 SP1 的培养液; (2) 处理组: 试验土壤 + 接种 SP1 的培养液。每个处理 3 次重复, 将盆栽置于露天阳台上, 每间隔一个月, 施加等量相应培养液, 共计 5 次, 不施用任何肥料。待水稻成熟后分别测定水稻植株地上株高、地下根长、分蘖数、每穗饱满的籽粒数和千粒重。同时, 测定水稻根际土壤的理化指标和细菌、放线菌和真菌 3 大微生物类群的数量。

### 2.2.9. 统计学分析

每个试验进行 3 次, 数据以平均值 ± 标准差表示。用 SPSS 17.0 软件进行方差分析(ANOVA),  $P < 0.05$  有统计学意义。用 GraphPad Prism 8.3.0 进行作图。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 解磷菌的筛选

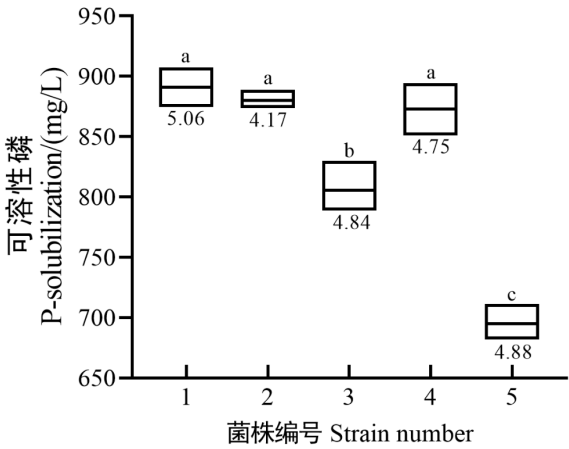
利用 NBRIP 培养基从东北寒地种植的玉米、大豆和水稻根际土壤中初筛获得 5 株有明显溶磷圈的细菌(见表 1)。5 株细菌均为革兰阴性细菌, 理化性质各不相同。利用 NBRIP 液体培养基对 5 株细菌进行解



磷能力测定(见图 1)。5 种细菌培养到第 4 天, 培养上清液中可溶性磷的含量最高, 在 700~900 mg/L 之间不等。发酵液的 pH 值较初始 pH 值(7.0)有明显下降( $P < 0.05$ )。其中, 1 号菌株培养上清液中可溶性磷含量为  $890.88 \pm 16.51$  mg/L, 高于其它菌株, 故以 1 号菌株为重点研究菌株, 将其命名为 SP1。

**Table 1.** The source of strains and solubilization index  
**表 1.** 菌株的来源及增溶指数

菌株编号	植物根际	地理位置	菌落直径	溶磷圈直径	溶磷指数
1	水稻	E 130°49'29.99" N 46°55'18.15"	$10.2 \pm 0.1$	$16.1 \pm 0.2$	$1.58 \pm 0.02c$
2	水稻	E 130°16'23.36" N 46°51'36.87"	$10.2 \pm 0.3$	$12.3 \pm 0.2$	$1.21 \pm 0.02d$
3	大豆	E 130°49'51.79" N 46°55'19.24"	$9.6 \pm 0.4$	$15.4 \pm 0.3$	$1.60 \pm 0.12c$
4	大豆	E 130°49'27.07" N 46°53'54.99"	$8.4 \pm 0.2$	$14.9 \pm 0.5$	$1.77 \pm 0.05b$
5	玉米	E 130°49'31.04" N 46°55'17.28"	$8.2 \pm 0.2$	$15.6 \pm 0.4$	$1.95 \pm 0.01a$



**Figure 1.** P-solubilization content in broth of five bacterial strains cultured for four days  
**图 1.** 5 株细菌培养 4 d 培养液中可溶性磷的含量

### 3.2. 菌株 SP1 的鉴定

#### 3.2.1. 菌株形态及生理生化鉴定

菌株 SP1 在牛肉膏蛋白胨培养基上菌落呈规则的圆形, 表面光滑, 菌体黄色, 革兰氏染色为阴性短杆菌(见图 2), 能运动。生理生化测定结果见表 2。

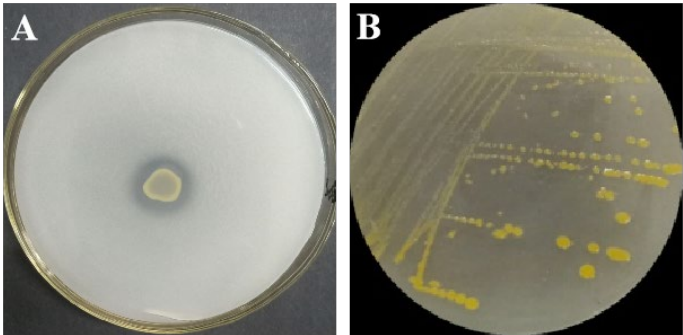
#### 3.2.2. 菌株 SP1 的分子生物学鉴定

PCR 扩增菌株 SP1 的 16S rDNA 并测序, 将测得的基因序列提交至 Genbank, 基因序列号为 ON564597.1。在 NCBI 数据库进行 BLAST 比对, 根据序列的相似性进行系统发育树的构建(见图 3)。菌株 SP1 与 *Pantoea eucalypti* FBS135 (MK910226.2) 的 16s rDNA 基因序列的相似性高达 99.79%, 说明二者具有高度的同源性。结合其形态和生理生化特性, 初步鉴定菌株 SP1 为泛菌属细菌。

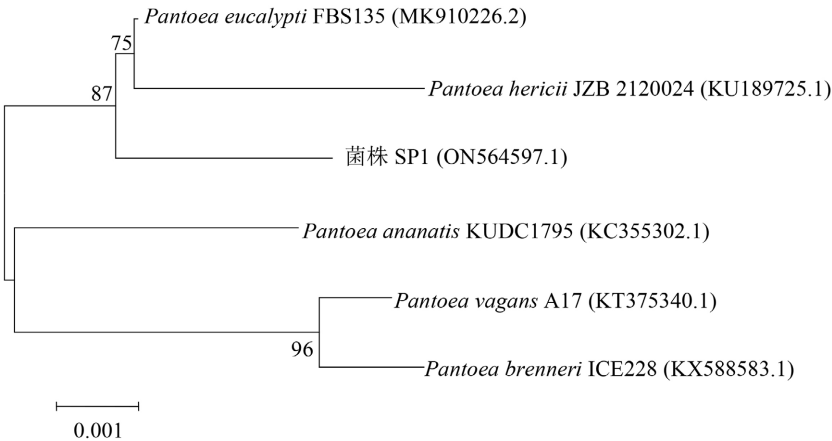
**Table 2.** Physiological and biochemical identification of strain SP1  
**表 2.** 菌株 SP1 的生理生化鉴定

试验项目	试验结果	试验项目	试验结果
葡萄糖产酸/产气	+/-	明胶液化试验	+
甘露糖产酸/产气	+/-	淀粉水解试验	-
麦芽糖产酸/产气	+/-	油脂分解试验	-
蔗糖产酸/产气	+/-	精氨酸双水解试验 t	-
乳糖产酸/产气	-/-	鸟氨酸脱羧酶试验	-
吡哌试验	+	丙二酸盐试验	+
甲基红试验	+	接触酶试验	+
柠檬酸盐利用试验	+	氧化酶试验	-
乙酰甲基甲醇试验	-	形态	杆状
硝酸盐还原试验	+	革兰氏染色	-
硫化氢试验	-	运动性	+

注：+ 代表阳性(生长或反应)；- 代表阴性(不生长或不反应)。



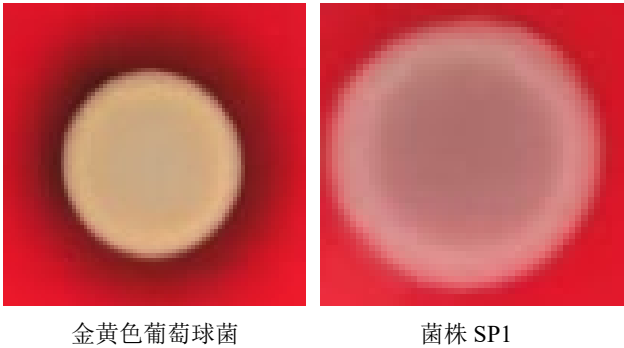
**Figure 2.** Halo zone of strain SP1 on NBRIP medium (A) and the colony morphology of strain SP1 on beef extract-peptone medium (B)  
**图 2.** 菌株 SP1 在 NBRIP 培养基(A)上的溶磷圈和牛肉膏蛋白胨培养基上(B)的菌落形态



**Figure 3.** Phylogenetic tree of rice rhizosphere strain SP1  
**图 3.** 水稻根际菌株 SP1 的系统发育树

### 3.3. 菌株 SP1 的溶血试验

在哥伦比亚血琼脂培养基上的溶血检测显示, 对照菌株金黄色葡萄球菌菌落周围形成清晰透明的溶血环, 菌株 SP1 未出现溶血环, 说明菌株 SP1 不具有溶血能力, 安全性较好(见图 4)。

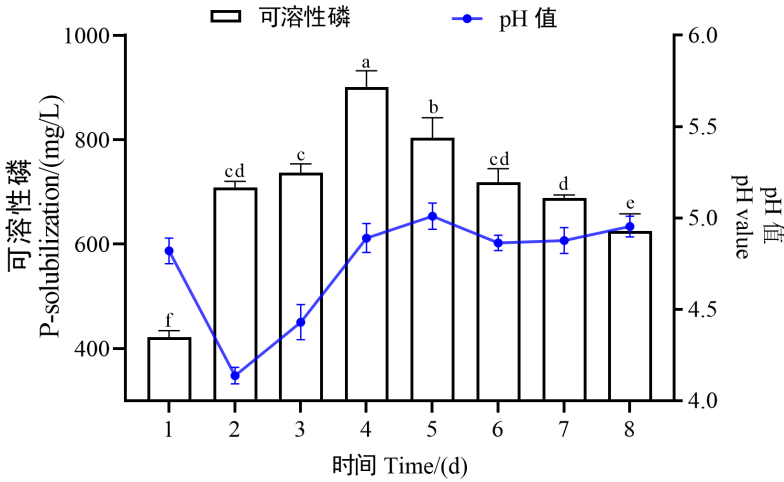


**Figure 4.** The hemolytic phenomenon of the strain SP1 on Columbia blood agar medium

**图 4.** 菌株 SP1 在哥伦比亚血琼脂培养基上的溶血现象

### 3.4. 菌株 SP1 解磷能力的测定

在 NBRIP 液体培养基中对菌株 SP1 进行 8 d 培养, 菌株 SP1 培养上清液中可溶性磷含量随培养时间呈先升后降的趋势(见图 5)。培养 2~3 天, 上清液中可溶性磷含量显著增加( $P < 0.05$ ); 培养到第 4 天, 上清液中可溶性磷含量最高, 达  $900.31 \pm 25.97 \text{ mg/L}$ ; 继续培养, 上清液中可溶性磷含量显著下降( $P < 0.05$ ), 但可溶性磷含量  $625.16 \pm 26.84 \text{ mg/L}$  以上。与初始 pH 值 7.0 相比, 培养液中 pH 值呈先下降后上升趋势。培养第 2 天, pH 值降到最低, 为  $4.12 \pm 0.04$  ( $P < 0.05$ ), 下降了 2.88; 培养到第 5 天, pH 值逐步升高; 继续培养, pH 值处于动态平衡。



**Figure 5.** P-solubilization content and pH value in broth of strain SP1

**图 5.** 菌株 SP1 培养液中可溶性磷含量及 pH 值

### 3.5. 菌株 SP1 IAA 分泌量和铁载体活性的测定

菌株 SP1 IAA 分泌量  $12.80 \pm 1.38 \text{ mg/L}$ ; 铁载体活性的 Su 值在  $50.61 \pm 1.54\%$ 。



3.6. 菌株 SP1 对水稻生长的影响

从水稻根际分离的菌株 SP1，回接到土壤中，对三江 6 号水稻生长的影响(见表 3)。接种菌株 SP1 的处理组培养的水稻植株地上株高、地下根长、每株水稻的分蘖数和每穗饱满的籽粒数分别为  $63.00 \pm 2.19$  cm、 $13.57 \pm 0.82$  cm、 $4.60 \pm 0.89$  和  $56.00 \pm 1.63$  粒，均显著高于未接种菌株 SP1 的对照组( $P < 0.05$ )。处理组地上株高比对照组( $69.97 \pm 2.71$  cm)增高了 11%，地下根长比对照组( $9.20 \pm 1.59$  cm)增长了 47.5%，每株水稻的分蘖数比对照组( $3.20 \pm 0.84$ )增加了 43.8%，每穗饱满的籽粒数比对照组( $42.67 \pm 1.25$ )增多了 31.2%。处理组植株的饱满籽粒的千粒重较对照组略有提高，但差异不显著。以上结果说明，施用菌株 SP1 可以促进水稻植株的生长，提高水稻的产量。

Table 3. Effects of strain SP1 on rice growth  
表 3. 菌株 SP1 对水稻生长的影响

处理	地上株高/cm	地下根长/cm	分蘖数/(个/株)	饱满籽粒数/(个/穗)	千粒重/g
未接种 SP1	$63.00 \pm 2.19b$	$9.20 \pm 1.59b$	$3.20 \pm 0.84b$	$42.67 \pm 1.25b$	$23.63 \pm 1.59a$
接种 SP1	$69.97 \pm 2.71a$	$13.57 \pm 0.82a$	$4.60 \pm 0.89a$	$56.00 \pm 1.63a$	$24.23 \pm 1.85a$

3.7. 菌株 SP1 对土壤的理化性质和微生物数量的影响

通过测定水稻根际土壤的理化指标和 3 大微生物类群的数量，探讨菌株 SP1 对水稻根际土壤的影响(见表 4)。与未接种菌株 SP1 的对照组相比，接种菌株 SP1 的处理组土壤的 pH 值和电导率显著下降( $P < 0.05$ )，处理组有效磷含量显著升高( $P < 0.05$ )，处理组和对照组的含水量无显著差异；接种菌株 SP1 的处理组土壤中细菌数量显著增加( $P < 0.05$ )，放线菌和真菌的数量无显著差异，致使 B/F 比值显著增加( $P < 0.05$ )。以上结果说明，施用菌株 SP1 可以提高水稻根际土壤的有效磷含量，降低土壤的 pH 值；同时，菌株 SP1 能在此土壤环境中大量的繁殖。

Table 4. Effects of strain SP1 on rhizosphere soil of rice  
表 4. *Pantoea* sp.菌株对水稻根际土壤的影响

处理	含水量/%	pH 值	电导率/ ( $\mu$ S/cm)	有效磷/ (mg/kg)	细菌/( $\times 10^7$ CFU/g)	放线菌/( $\times 10^6$ CFU/g)	真菌/( $\times 10^5$ CFU/g)	B/F
未接种 SP1	$19.50 \pm 0.86a$	$8.10 \pm 0.11a$	$420.33 \pm 8.18a$	$58.38 \pm 0.76b$	$1.08 \pm 0.03b$	$1.21 \pm 0.08a$	$2.76 \pm 0.17a$	$39.24 \pm 3.53b$
接种 SP1	$21.43 \pm 1.13a$	$7.45 \pm 0.03b$	$335.00 \pm 18.71b$	$68.03 \pm 1.32a$	$2.61 \pm 0.15a$	$1.08 \pm 0.06a$	$2.19 \pm 0.23a$	$106.28 \pm 14.76a$

4. 讨论与结论

黑龙江是水稻、玉米和大豆的主产区，2025 年粮食总播种面积将稳定在 1466.67 万  $\text{hm}^2$  以上。如此广阔的作物种植面积，对磷元素的供给量提出了巨大需求。尽管土壤中无机与有机形态的磷含量较为丰富，但它们常以难溶性螯合物的形式存在：例如水稻生长的稻田土壤长期处于还原状态，磷素易被铁、铝离子固定，形成难溶性的磷酸铁或磷酸铝；玉米等禾本科植物生长的旱地土壤中，磷素多以钙结合态(碱性土壤)或铁铝结合态(酸性土壤)存在；大豆等豆科直根系作物虽能深入土壤深层，并与根瘤菌形成共生固氮体系，但磷素是限制其固氮效率的关键因子。因此，从作物生长环境中筛选解磷菌，对于提升作

物对磷的利用率、减少化肥投入具有至关重要的意义[18]。

本研究先后从3种作物的根际土壤中分离获得解磷菌50株。在相同的试验条件下,泛菌属、伯克霍尔德菌属和克雷伯菌属等革兰氏阴性细菌表现出较高的解磷活性。本研究分离鉴定的泛菌属菌株SP1在含有 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的NBRIP培养基上展现出了明显的溶磷圈,可溶解 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的能力高于700 mg/L。泛菌属是肠杆菌科能够产生黄色色素的一群革兰氏阴性细菌,属内的许多菌株显示出惊人的环境多样性和适应性,并具有多种生物合成和生物降解能力,可以在农业、环境和临床中有潜在的应用价值[10]。*Pantoea* sp. EA106是一种天然的水稻根际分离菌,通过高铁载体活性促进水稻生长,防止有毒砷在植物组织中积累[19]。在印尼巴厘岛花生根际分离的*P. agglomerans*的细菌悬液处理水稻种子,显著提高水稻植株生长和产量[20]。国内许多学者针对水稻内生泛菌多样性进行了研究,如李南南等研究表明泛菌属是水稻的灌浆期和成熟期的优势菌种之一[21];严婷婷等认为泛菌属是种子内生细菌的常见菌种[22]。关于泛菌对植物的促生长研究方面主要集中在内生的成团泛菌方面。刘佳等认为,接种内生成团泛菌HAUM1提高宿主水稻的生物量、叶绿素及磷含量方面[23]。成团泛菌YS19很强的固氮活性和促生作用,通过分泌生长素影响自然培养的水稻植株中光合产物由茎、叶向穗的转移[24]。本试验分离得到的泛菌SP1,除具备高效溶解无机磷的能力外,还能分泌吲哚乙酸(IAA)并具有产铁载体活性,这预示着该菌株具有促进植物生长的潜能。试验以低溶性磷的碱性土壤为材料进行盆栽试验。接种菌株SP1处理后,提高土壤的有效磷含量、降低了碱性土壤的pH值,提高了土壤细菌的种群数量。同时,接种菌株SP1水稻生长参数显著高于未接种菌株SP1的对照组。这些结果表明,泛菌属细菌SP1有能力溶解碱性土壤中的无机磷酸化合物,降低了土壤的pH值。与此同时,接种SP1的处理组增加了水稻植株地上地下部分的生物量。尽管在饱满籽粒千粒重上没有显著差异,但其增加每株水稻的分蘖数和每穗饱满的籽粒数,其间接的增加了水稻的产量,证实了*Pantoea eucalypti*对水稻生长的促生作用。

本研究从北方寒地种植的水稻根际土壤中分离的解磷菌株SP1为泛菌属细菌。该菌株适合北方地理和土壤环境条件,具有较强的解磷能力,能改善土壤的性质,促进水稻的生长发育。因此,菌株SP1有望开发成适合当地条件的、可靠的、有效的新的接种剂,可以减少化肥和农药的施用,促进农业的可持续发展。

## 基金项目

黑龙江省省属高等学校基本科研业务费项目(2020-KYYWF-0234)。

## 参考文献

- [1] Alaylar, B., Güllüce, M., Karadayi, M. and Isaoglu, M. (2019) Rapid Detection of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Agricultural Areas in Erzurum. *Current Microbiology*, **76**, 804-809. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01688-7>
- [2] Zhang, J., Wang, P., Fang, L., Zhang, Q., Yan, C. and Chen, J. (2017) Isolation and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Mushroom Residues and Their Effect on Tomato Plant Growth Promotion. *Polish Journal of Microbiology*, **66**, 57-65. <https://doi.org/10.5604/17331331.1234994>
- [3] Lobo, C.B., Juárez Tomás, M.S., Viruel, E., Ferrero, M.A. and Lucca, M.E. (2019) Development of Low-Cost Formulations of Plant Growth-Promoting Bacteria to Be Used as Inoculants in Beneficial Agricultural Technologies. *Microbiological Research*, **219**, 12-25. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.10.012>
- [4] Lei, Y., Kuai, Y., Guo, M., Zhang, H., Yuan, Y. and Hong, H. (2025) Phosphate-Solubilizing Microorganisms for Soil Health and Ecosystem Sustainability: A Forty-Year Scientometric Analysis (1984-2024). *Frontiers in Microbiology*, **16**, Article ID: 1546852. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1546852>
- [5] Hegyi, A., Nguyen, T.B.K. and Posta, K. (2021) Metagenomic Analysis of Bacterial Communities in Agricultural Soils from Vietnam with Special Attention to Phosphate Solubilizing Bacteria. *Microorganisms*, **9**, 1796-1812. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091796>
- [6] Richardson, A.E., Barea, J.M., McNeill, A.M., et al. (2009) Plant Growth-Promoting Microorganisms in Sustainable

- Agri-Cultural Production. *Annals of Applied Biology*, **154**, 307-330.
- [7] Nacoan, S., Jogloy, S., Riddech, N., Mongkolthanaruk, W., Kuyper, T.W. and Boonlue, S. (2020) Interaction between Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth Promotion and Tuber Inulin Content of *Helianthus Tuberosus* L. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 4916. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61846-x>
  - [8] Kumar, S., Diksha, Sindhu, S.S. and Kumar, R. (2022) Biofertilizers: An Ecofriendly Technology for Nutrient Recycling and Environmental Sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, **3**, Article 100094. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100094>
  - [9] Oteino, N., Lally, R.D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K.J., *et al.* (2015) Plant Growth Promotion Induced by Phosphate Solubilizing Endophytic *Pseudomonas* Isolates. *Frontiers in Microbiology*, **6**, 745-753. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00745>
  - [10] Walterson, A.M. and Stavrinides, J. (2015) *Pantoea*: Insights into a Highly Versatile and Diverse Genus within the Enterobacteriaceae. *FEMS Microbiology Reviews*, **39**, 968-984. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv027>
  - [11] Saadoul, I., Mosbah, A., Ferjani, R., Stathopoulou, P., Galiatsatos, I., Asimakis, E., *et al.* (2021) The Impact of the Inoculation of Phosphate-Solubilizing Bacteria *Pantoea* Agglomerans on Phosphorus Availability and Bacterial Community Dynamics of a Semi-Arid Soil. *Microorganisms*, **9**, 1661-1679. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081661>
  - [12] Son, H., Park, G., Cha, M. and Heo, M. (2006) Solubilization of Insoluble Inorganic Phosphates by a Novel Salt- and Ph-Tolerant *Pantoea* Agglomerans R-42 Isolated from Soybean Rhizosphere. *Bioresource Technology*, **97**, 204-210. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.021>
  - [13] 刘萍, 夏江宝. 滨海盐碱地根际解磷细菌磷素转化特征[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4531-4540.
  - [14] 王俊娟, 阎爱华, 王薇, 等. 铁尾矿区油松根际溶磷泛菌 D2 的筛选鉴定及溶磷特性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3705-3711.
  - [15] Mehta, S. and Nautiyal, C.S. (2001) An Efficient Method for Qualitative Screening of Phosphate-Solubilizing Bacteria. *Current Microbiology*, **43**, 51-56. <https://doi.org/10.1007/s002840010259>
  - [16] 杜春梅, 董锡文, 吴玉德, 等. 长期旱改水对黑土微生物类群及酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2018(4): 127-132.
  - [17] 朱德旋, 杜春梅, 董锡文, 等. 一株寒地高效解无机磷细菌的分离鉴定及拮抗作用[J]. 微生物学报, 2020, 60(8): 1672-1682.
  - [18] Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H. and Gobi, T.A. (2013) Phosphate Solubilizing Microbes: Sustainable Approach for Managing Phosphorus Deficiency in Agricultural Soils. *SpringerPlus*, **2**, 587-600. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
  - [19] Lakshmanan, V., Shantharaj, D., Li, G., Seyfferth, A.L., Janine Sherrier, D. and Bais, H.P. (2015) A Natural Rice Rhizospheric Bacterium Abates Arsenic Accumulation in Rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*, **242**, 1037-1050. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2340-2>
  - [20] Khalimi, K., Suprapta, D.N. and Nitta, Y. (2012) Effect of *Pantoea agglomerans* on Growth Promotion and Yield of Rice. *Agricultural Science Research Journal*, **2**, 240-249.
  - [21] 李南南. 水稻种子内生细菌群落多样性研究及一株新菌种的鉴定[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2017.
  - [22] 严婷婷, 赵艳, 王超霞, 等. 水稻种子内生细菌 16S rDNA 基因高通量测序 PCR 引物筛选和菌群结构分析[J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(2): 316-326.
  - [23] 刘佳, 林会, 赵斌. 内生菌团泛菌 HAUM1 对宿主水稻的定殖及促生作用[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(23): 4820-4824.
  - [24] 李倩倩, 熊小路, 牟昱飞, 等. 水稻内生菌团泛菌 YS19 共质体形成差异表达蛋白 MalE 及其兼职功能[J]. 生物化学与生物物理进展, 2012, 39(3): 273-281.