

# 水稻根际解磷菌的筛选鉴定与促生功能研究

史 凡

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年1月23日; 录用日期: 2025年3月1日; 发布日期: 2025年3月11日

## 摘要

目的: 磷是作物生长发育不可或缺的关键营养元素。在土壤中, 大多数磷素都以难溶性磷酸盐状态存在, 难以被植物直接吸收利用。土壤中含有大量的解磷菌, 筛选高效的解磷菌可促进磷转化, 改善土壤质量, 促进植物生长。方法: 利用梯度稀释法对微生物进行分离, 并对其进行纯化与鉴定。评价菌株的生长特性、解磷能力。结果: 从水稻根际土中共筛选到三株高效解磷菌, 分别是神户肠杆菌(*Enterobacter kobei*) C3、恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*) P6和铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*) P12。相比商业常用高效解磷菌荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*) PF, 铜绿假单胞菌P12具有更强的解无机磷(磷酸钙)的能力, 而神户肠杆菌C3解有机磷(植酸钙(Ca-Phyt))能力更强。最后, 四株解磷菌组合成的混合菌群能够更好地促进水稻生长并提高水稻对磷的吸收。结论: 为微生物菌剂的研制和应用提供了理论基础。

## 关键词

解磷菌, 筛选鉴定, 解磷能力, 促生

# Screening, Identification of Phosphate-Solubilizing Bacteria in Rice Rhizosphere and Their Plant Growth-Promoting Functions

Fan Shi

College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Mar. 1<sup>st</sup>, 2025; published: Mar. 11<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

**Objective:** Phosphorus is a crucial nutrient element for crop growth and development. In soil, the

**文章引用:** 史凡. 水稻根际解磷菌的筛选鉴定与促生功能研究[J]. 生物过程, 2025, 15(1): 29-38.  
DOI: [10.12677/bp.2025.151005](https://doi.org/10.12677/bp.2025.151005)

majority of phosphorus exists in the form of insoluble phosphates, making it inaccessible for direct absorption and utilization by plants. The soil harbors a vast number of phosphate-solubilizing bacteria. Screening highly efficient phosphate-solubilizing bacteria can promote the transformation of phosphorus, improve soil quality, and facilitate plant growth. Methods: Separate microorganisms using the gradient dilution method, and purify and identify them. Evaluate the growth characteristics and phosphate-solubilizing ability of the strains. Results: A total of three highly efficient phosphate-solubilizing bacteria were screened from the rhizosphere soil of rice, namely *Enterobacter kobei* C3, *Pseudomonas putida* P6, and *Pseudomonas aeruginosa* P12. Compared with *Pseudomonas fluorescens* PF, a commonly used commercial high-efficiency phosphate-solubilizing bacterium, P12 has a stronger ability to solubilize inorganic phosphorus (calcium phosphate), while C3 exhibits a stronger ability to solubilize organic phosphorus (calcium phytate (Ca-Phyt)). Finally, the mixed flora composed of the four phosphate-solubilizing bacteria can promote the growth of rice and enhance the phosphorus absorption of rice. Conclusion: This provides a theoretical basis for the development and application of microbial inoculants.

## Keywords

Phosphate-Solubilizing Bacteria, Screening and Identification, Phosphate-Solubilizing Ability, Plant Growth Promotion

Copyright © 2025 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

磷对于作物的生长发育进程而言，属于不可或缺的关键营养要素。在农业生产过程中，磷元素参与植物的生长、发育、细胞分裂、光合作用等多种过程，并存在于各种酶中，参与其活性和功能的调节过程[1]。在土壤中，磷素主要呈现出两种形式，即无机磷与有机磷[2]。就无机磷而言，仅有一小部分呈可溶性磷酸盐形态，也就是( $H_2PO_4^-$  /  $HPO_4^{2-}$ )，能够直接被植物吸收利用。而大部分无机磷极易与  $Ca^{2+}$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  这类金属阳离子发生络合反应，进而化合生成磷酸铁( $FePO_4$ )、磷酸铝( $AlPO_4$ )以及磷酸钙( $Ca_3(PO_4)_2$ )等磷酸盐物质，被牢牢固定在土壤之中，难以被植物直接摄取利用。在土壤所含的有机磷成分里，植酸占据了较大比重，植物根系无法直接从中获取磷元素[3]。通常需要被水解酶——植酸酶催化水解成正磷酸盐，才可被植物吸收利用[4]。为保障作物高产，大量磷肥被施加到田间，但其不仅容易被固定为难溶无机磷与有机磷，导致磷肥利用率低，且易流失造成水体富营养化等环境污染[5]。

土壤中的解磷微生物能将难溶磷转化为可被植物直接吸收利用的磷。解磷菌(phosphate-solubilizing bacteria, PSB)主要是通过酸解和酶解来发挥作用的[6][7]。对于不溶性的无机磷，PSB 通过分泌低分子量有机酸转化为可溶性磷，也可以通过释放  $H^+$ ，从而降低土壤的 pH 值[8]。对于不溶性的有机磷，PSB 通过分泌酶催化有机磷矿化，在这些酶当中，磷酸酶与植酸酶较为常见。张朝楠等在盐碱土中筛选到了一株耐盐解磷菌(CZ-B1)——解淀粉芽孢杆菌，这种菌株的筛选与驯化，可以为在盐碱土壤中生长的植物生长提供 P 元素[9]。俞海阳等在土壤中筛选到了一株假单胞菌——JP233，JP233 通过溶解有机酸 2-葡萄糖酸释放有效磷，将 JP233 接种在玉米植物土壤中，显著增加了玉米地上部和全株的生物量[10]。白凯宏等筛选到的假单胞菌属 NK2 具有溶解不溶性磷  $Ca_3(PO_4)_2$  的能力，通过释放有机酸来溶解磷酸盐，例如：草酸、乙酸、葡萄糖酸和柠檬酸，并能提高番茄的生长[11]。

本研究从水稻土中经分离、纯化最终成功筛选出三株解磷能力超群的菌株，分别命名为：C3、P6、

P12, 经鉴定发现三种菌株分别为神户肠杆菌(*Enterobacter kobei*)、恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)。并和商业常用高效解磷菌荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)PF作对比。研究旨在为微生物菌肥的开发提供有力支撑。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 土壤的取样

土壤样品采自杭州大兴水稻田, 待水稻收割完毕后, 采用“棋盘式布点法”取样, 先小心拨开水稻秸秆周边的杂草, 然后用小铲子轻轻去除表层 1~2 cm 的浮土杂质。再用土钻垂直插入土壤, 采集 10~15 cm 深度的土壤样本, 每个采样点采集约 200 g 土壤, 将各个采样点的土壤样品充分搅拌, 形成混合样本。将样品装在灭菌袋后运回实验室, 挑拣出混在其中的残根、碎石等, 之后过 2 mm 规格的筛网。最后把土壤样品置于-80°C 的冰箱中保存, 以供后续研究利用。

### 2.2. 供试培养基

LB 培养基、NBRIP 培养基、植酸钙培养基。

### 2.3. 解磷菌的分离、筛选

运用梯度稀释法分离解磷菌。称取 2.5 g 土壤样本, 置入盛有 50 ml 无菌蒸馏水的三角瓶, 于 28°C、180 r/min 的摇床持续震荡 30 min, 振荡结束后提取上清液, 并依照  $10^{-1}$  至  $10^{-10}$  的梯度逐步进行稀释。吸取 50  $\mu$ l 处于不同浓度的上清液, 均匀地涂布于 NBRIP 固体培养基表面, 28°C 恒温培养 3 d。挑取出周边带有溶磷圈的菌落, 于 LB 平板反复划线纯化。挑取单克隆, 接种至 LB 液体培养基内, 再次置于 28°C 的摇床中, 持续培养 8 h 后利用甘油保存菌种, 以供后续使用。

### 2.4. 菌株 16S rDNA 序列分析及比对

选用细菌 16S rDNA 通用引物 27F: (5'-AGAGTTGATCCTGGCTCAG-3'), 1492R: (5'-GGTACCTT-GTTACGACTT-3')建立 PCR 扩增体系进行扩增。将 PCR 产物纯化, 测定菌株的基因序列信息, 而后借助 NCBI 数据库所配备的工具 BLAST, 将菌株的基因序列与 GenBank 数据库中的序列进行比较, 选取同源性性较高的模式菌株序列, 以 Neighbor Joining 法分别构建 C3、P6、P12 的系统发育树。

### 2.5. 解磷菌抗性测定

将四株目标菌株各自接种至 LB 液体培养基内, 28°C、220 r/min 培养 8 h 后取出, 利用无菌水洗去菌株表面附着的培养基成分, 调 OD<sub>600</sub> = 0.2。按照 0.2% 的比例分别接种在 LB 液体培养基中, 并设置一定的胁迫。其中, 盐浓度分别为: 1%、3%、5%、7%、9%。pH 分别为: 4、6、8、9、10。温度分别为: 28°C、15°C。以空 LB 液体培养基为对照。每隔 2 h 吸取 0.2 ml 菌液至酶标板, 随后用酶标仪测量菌液 OD<sub>600</sub> 的值, 并绘制生长曲线。每个处理设置 4 个重复。

### 2.6. 低温下菌株可溶磷含量的测定

先将四株菌株分别接种于 LB 液体培养基, 28°C、220 r/min 培养 8 h 取出, 用无菌水洗去培养基, 调 OD<sub>600</sub> = 0.6, 按 2% 比例分别接种在 NBRIP 和植酸钙培养基中, 并设置一定的胁迫。其中, 温度分别为: 28°C、15°C。盐浓度梯度分别为: 1%、5%、9%。pH 梯度设置为: 6、9。以不同温度、盐浓度、不同 pH、不加菌的 NBRIP 和植酸钙培养基分别为空白对照。培养 4 d 后, 用钼锑抗比色法测定菌株的解磷能力。每组处理设置四个重复。

## 2.7. 菌株促生能力的测定

以野生型粳稻石狩白毛(SSBM)为材料, 把培养了 7 天的 SSBM 幼苗移至土壤中, 四种菌株等比例混合, 按照 1:1000 的比例加混合菌群, 以不加菌的土培 SSBM 为对照。两周后再次加入混合菌群, 室外培养 30 天后, 测量生理指标和全磷含量。每组处理做 7 个重复。

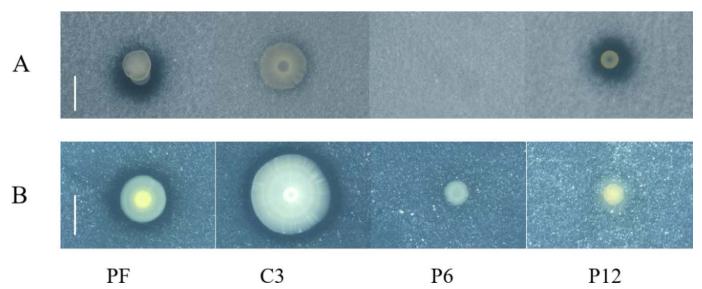
## 2.8. 数据分析

采用 Excel 软件进行数据处理, 用 PPT、GraphPad Prism 9 软件进行统计分析和作图, 显著性水平  $P < 0.05$ 。运用 MEGA 软件构建系统发育树。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 菌株筛选分离

采用磷酸钙(NBRIP)平板培养基筛选后获得三株解磷菌, 分别是神户肠杆菌 C3、恶臭假单胞菌 P6、铜绿假单胞菌 P12。菌株经过纯化以后, 在 NBRIP、Ca-Phyt 平板培养基上培养, 有明显透明圈出现。如图 1 所示。从左往右依次是: 荧光假单胞菌 PF、神户肠杆菌 C3、恶臭假单胞菌 P6、铜绿假单胞菌 P12。



(A): 无机磷 NBRIP 固体培养基; (B): 有机磷植酸钙固体培养基;  
图注: 标尺是 1 cm。

**Figure 1.** Phosphorus dissolution circle of four strains on different media  
**图 1.** 四种菌株在不同培养基上的溶磷圈

### 3.2. 菌株分子生物学鉴定

利用通用引物 27F 和 1492R 对三种解磷菌的基因组进行 16S 序列扩增, 经过 BLAST 比对, 如图 2 所示, 结果显示: C3 与神户肠杆菌(*Enterobacter kobei*)的相似度较高。P6 与恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的相似性比较高, P12 与铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)完全一致。

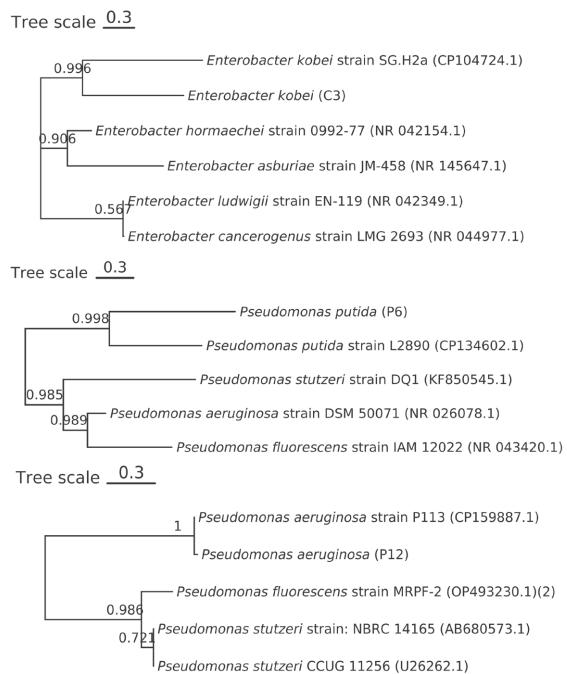
## 3.3. 生长曲线的测定

### 3.3.1. 低温胁迫下生长曲线测定

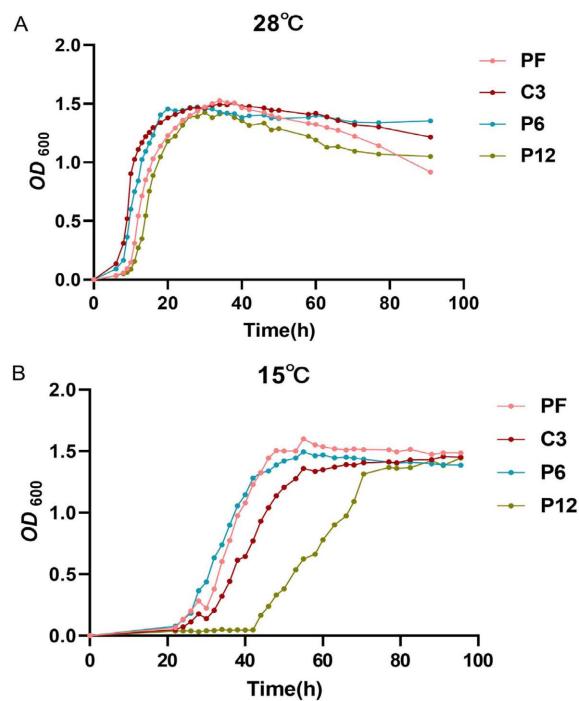
如图 3 所示, 与 28°C 下的生长曲线相比, 低温环境下四种菌株均可以生长, 但进入对数期的速度变慢。另外, 温度下降, 明显抑制了铜绿假单胞菌 P12 进入对数期的时间。

### 3.3.2. 不同盐浓度下生长曲线的测定

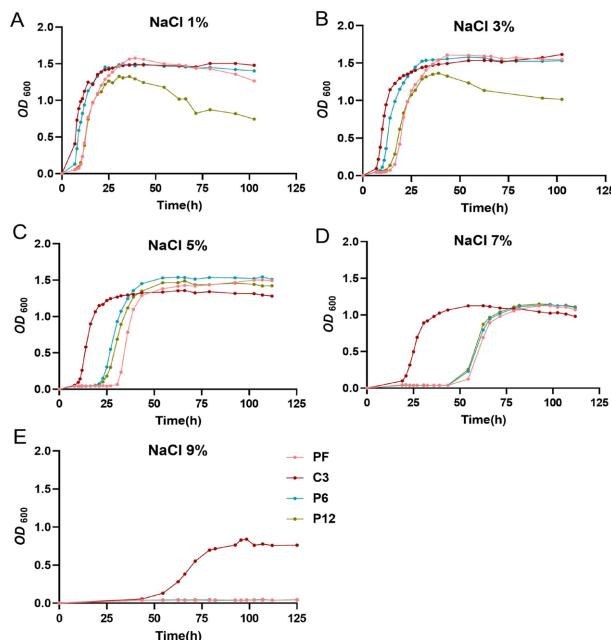
高盐不仅会影响微生物体内酶的活性, 还会使微生物细胞外的渗透压发生变化。如图 4, 结果表明, 随着盐浓度的升高, 四种菌株的生长都受到抑制, 进入对数期的时间都延长。相比其他三种菌株, 神户肠杆菌 C3 在盐浓度为 1%、3%、5%、7% 时, 较快地进入对数期。在盐浓度为 9% 时, 只有神户肠杆菌 C3 可以生长。这表明神户肠杆菌 C3 耐盐能力比较强。



**Figure 2.** Based on the 16S rRNA gene sequences, a phylogenetic tree was constructed to elucidate the phylogenetic relationships among three strains and their closely related strains  
**图 2.** 基于 16S rRNA 基因序列构建三种菌株及亲缘关系  
 相邻菌株的系统发育树



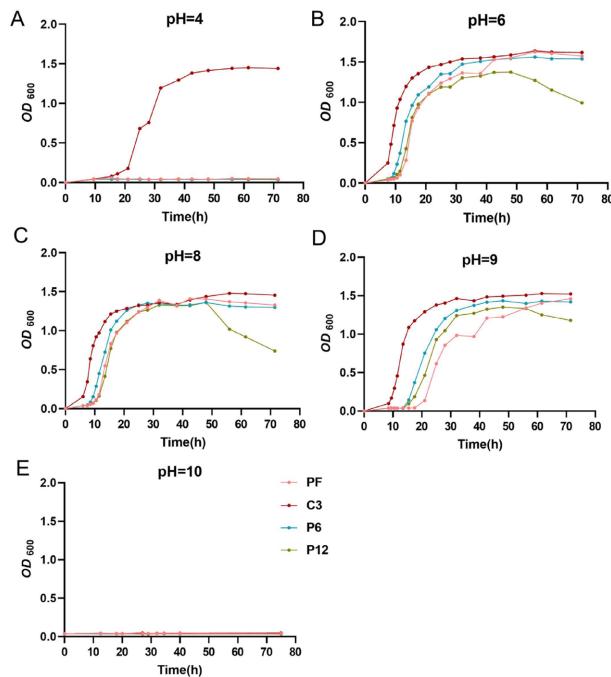
**Figure 3.** Effects of different temperature conditions on the growth of four strains  
**图 3.** 不同温度条件对四种菌株生长的影响



**Figure 4.** Effects of different salt concentrations on the growth of four strains  
**图 4.** 不同盐浓度对四种菌株生长的影响

### 3.3.3. 不同酸碱条件下生长曲线的测定

酸碱胁迫会影响微生物的生长速率。如图 5, 在  $\text{pH} = 4$  的时候, 只有神户肠杆菌 C3 才能生长。在  $\text{pH} = 6、8、9$  的时候, 神户肠杆菌 C3 进入对数期的时间最快, 且在平台期时具有最大的菌含量, 这表明神户肠杆菌 C3 耐酸碱的能力都比较强。在  $\text{pH} = 10$  的时候, 四种菌株都不能生长。

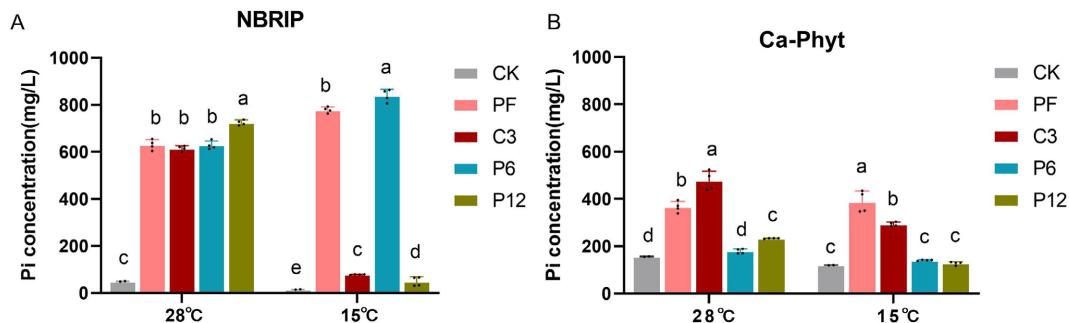


**Figure 5.** Effects of different acid-base conditions on the growth of four strains  
**图 5.** 不同酸碱条件对四种菌株生长的影响

### 3.4. 胁迫条件下微生物的解磷能力

#### 3.4.1. 低温下微生物的解磷能力

通过测定低温环境下菌株的解磷能力，可以判断筛选到的解磷菌在低温胁迫下是否可以解磷。如图6(A)所示，在无机磷 NBRIP 培养基中，低温抑制了神户肠杆菌 C3、铜绿假单胞菌 P12 的解磷能力。但是荧光假单胞菌 PF、恶臭假单胞菌 P6 在低温条件下，解无机磷的能力增强。如图6(B)所示，在植酸钙培养基中，在 28℃ 条件下，恶臭假单胞菌 P6 和铜绿假单胞菌 P12 解植酸钙的能力很弱，恶臭假单胞菌 P6 完全没有，铜绿假单胞菌 P12 略微有一点。荧光假单胞菌 PF 解植酸钙的能力在低温条件下没有被降低。



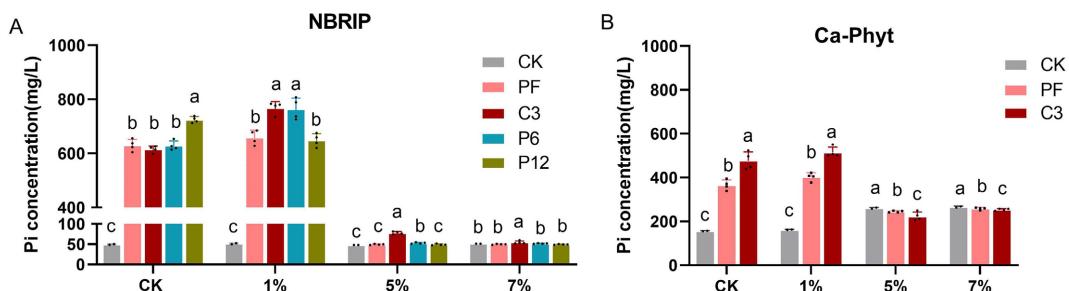
注：不同字母(a、b、c、d、e)表示各处理组之间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

Figure 6. Effect of temperature on phosphorus soluble content of four strains

图 6. 温度对四种菌株溶磷量的影响

#### 3.4.2. 不同盐浓度下，微生物的解磷能力

如图7，在无机磷培养基中，随着盐浓度的升高，四种菌株解无机磷的能力都降低。其中，在盐浓度为 5% 和 7% 时，相比其他三种菌株，神户肠杆菌 C3 具有最高的解无机磷能力。在植酸钙培养基中，在盐浓度为 5% 和 7% 时，CK 的溶磷量分别为 260 mg/L、266 mg/L，荧光假单胞菌 PF、神户肠杆菌 C3 与不加盐的 CK 相比，磷含量降低，推测被 PSB 溶解的有机磷用于细菌自身生长。



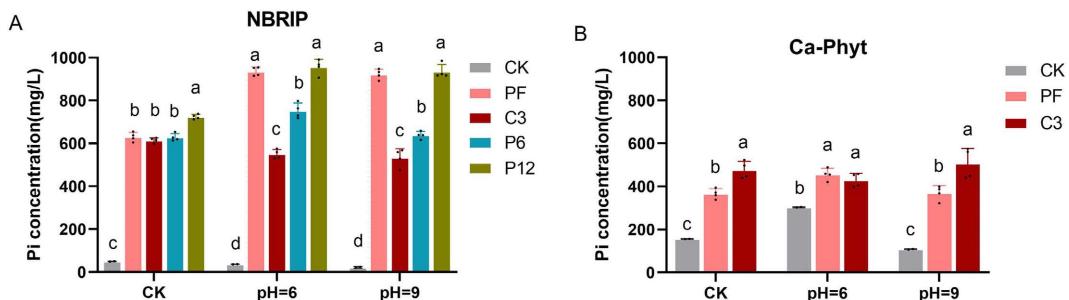
图注：横坐标的 CK 代表不加盐的培养基，右侧的 CK 代表不加菌的空培养基。不同字母(a、b、c)表示各处理组之间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

Figure 7. Effect of salt concentration on phosphorus soluble content of four strains

图 7. 盐浓度对四种菌株溶磷量的影响

#### 3.4.3. 不同酸碱条件下，微生物的解磷能力

如图8，在无机磷 NBRIP 培养基中，当  $pH = 6$  时，神户肠杆菌 C3 的解磷能力最低，铜绿假单胞菌 P12 的解磷能力最强。在  $pH = 9$  时，同样如此。在有机磷植酸钙培养基中， $pH = 6, 9$  时，CK 的溶磷量分别为 369 mg/L、120 mg/L，荧光假单胞菌 PF、神户肠杆菌 C3 与不加盐的 CK 相比，溶磷含量增加。



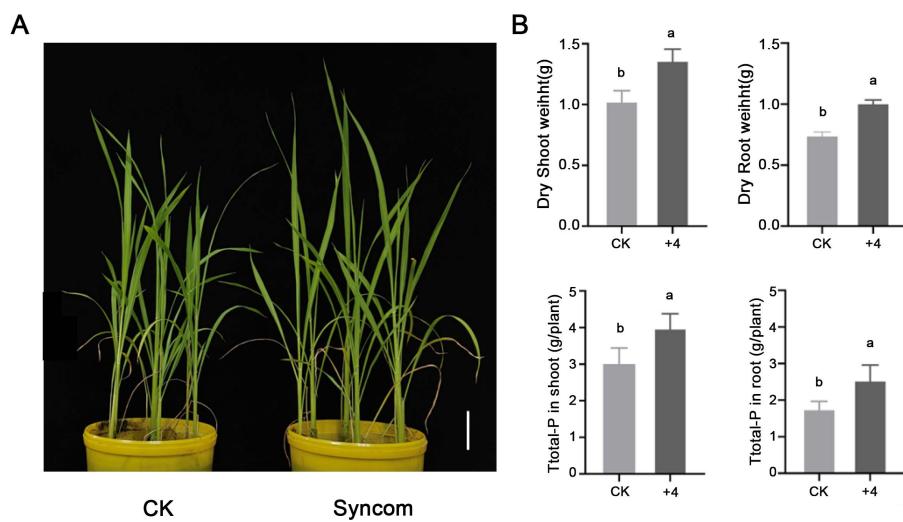
图注：横坐标上的 CK 表示不调 pH 的培养基，右侧的 CK 表示不加菌的空培养基。不同字母(a、b、c、d)表示各处理组之间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

**Figure 8.** Effect of different pH on phosphorus soluble content of four strains

**图 8.** 不同 pH 对四种菌株溶磷量的影响

### 3.5. 菌株的促生能力

如图 9(A)所示，施加混合菌后水稻生长明显变好。如图 9(B)，地上部和根部干重、全磷含量都增加，推测加解磷菌后，把固定在土壤中的难溶磷释放出来，促进了植物对磷的吸收，进而提高了水稻的生长。今后将测试在胁迫条件下，解磷菌是否仍有解磷能力。



图注：不同字母(a、b)表示各处理组之间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

**Figure 9.** Determination of the growth-promoting effects and physiological indicators of mixed bacteria on rice

**图 9.** 混合菌群对水稻促生效果和生理指标的测定

## 4. 讨论

磷作为三大营养元素之一，是作物生长必不可少的营养元素。在土壤中，磷素大多以难溶性磷酸盐的形态存在，植物难以直接吸收利用。土壤中存在大量微生物，从水稻土中筛选分离出解磷菌，可以促进土壤中磷素的释放，提高植物对磷的吸收，提升作物的产量和质量。本研究从水稻土中筛选分离出三株解磷菌，C3 神户肠杆菌(*Enterobacter kobei*)、P6 恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)、P12 铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)。

低温导致土壤水分的温度下降，进而影响微生物活性。在低温条件下，土壤溶液的粘度增加，磷酸

盐的溶解度降低，从而减少了可供植物吸收的有效磷。研究发现，与 28℃下的生长曲线相比，低温环境下四种菌株均可以生长，但进入对数期的速度变慢。另外，温度下降，明显抑制了铜绿假单胞菌 P12 进入对数期的时间。在 28℃条件下，四种菌株解无机磷的能力都强于解有机磷。在无机磷 NBRIP 培养基中，低温抑制了神户肠杆菌 C3、铜绿假单胞菌 P12 的解磷能力。但是荧光假单胞菌 PF、恶臭假单胞菌 P6 在低温条件下，解无机磷的能力增强。在植酸钙培养基中，在 28℃条件下，恶臭假单胞菌 P6 和铜绿假单胞菌 P12 解植酸钙的能力很弱，P6 完全没有，P12 略微有一点。荧光假单胞菌 PF 解植酸钙的能力在低温条件下没有被降低。

盐胁迫不仅会影响微生物体内酶的活性，还会使微生物细胞外的渗透压发生变化。而且还会增加土壤中可溶性盐(如 NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 等)的浓度。这些盐在水中解离，释放出钠离子(Na<sup>+</sup>)和其他离子，增加土壤溶液的离子强度。这种高离子强度环境会影响土壤中磷酸根离子(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)的溶解度，使其容易与钙(Ca<sup>2+</sup>)、铝(Al<sup>3+</sup>)或铁(Fe<sup>3+</sup>)等金属离子结合，形成难溶的磷酸盐沉淀，从而降低土壤中磷的有效性。研究发现，随着盐浓度的升高，四种菌株的生长都受到抑制，进入对数期的时间都延长。其中神户肠杆菌 C3 在盐浓度为 1%、3%、5%、7% 时，相比其它三种菌株，较快地进入对数期。在盐浓度为 9% 的时候，只有神户肠杆菌 C3 可以生长。因此，神户肠杆菌 C3 耐盐能力比较强。在无机磷培养基中，随着盐浓度的升高，四种菌株解无机磷的能力都降低。其中，在盐浓度为 5% 和 7% 时，相比其他三种菌株，神户肠杆菌 C3 具有最高的解无机磷能力。在植酸钙培养基中，在盐浓度为 5% 和 7% 时，CK 的溶磷量分别为 260 mg/L、266 mg/L，荧光假单胞菌 PF、神户肠杆菌 C3 与不加菌的 CK 相比，磷含量降低，推测被溶解的有机磷用于细菌自身生长。

酸碱胁迫不仅会影响微生物的活性，还会影响土壤中磷的化学形态，进而影响磷的有效性。在酸性土壤中，铝、铁与磷的结合会导致磷被固定；在碱性土壤中，钙的过量会形成不溶性钙磷化合物。因此，保持土壤 pH 在适宜范围内是确保磷有效性的关键。研究发现，神户肠杆菌 C3 耐酸碱的能力都比较强，在 pH = 4 的时候，只有神户肠杆菌 C3 才能生长。在 pH = 6、8、9 的时候，神户肠杆菌 C3 进入对数期的时间最快，且在平台期时具有最大的菌含量。在 pH = 10 的时候，四种菌株都不能生长。在无机磷 NBRIP 培养基中，当 pH = 6 时，神户肠杆菌 C3 的解磷能力最低，铜绿假单胞菌 P12 的解磷能力最强。在 pH = 9 时，同样如此。在有机磷植酸钙培养基中，pH = 6、9 时，CK 的溶磷量分别为 303 mg/L、369 mg/L，荧光假单胞菌 PF、神户肠杆菌 C3 与不加菌的 CK 相比，溶磷含量增加。

研究发现，施加单菌对水稻生长作用不明显，施加混合菌后水稻生长明显变好，地上部和根部干重和全磷含量都增加，推测加解磷菌后，把固定在土壤中的难溶磷释放出来，促进了植物对磷的吸收，提高了水稻的生长。本研究为提高农业生产中磷资源的利用提供理论基础，同时也为微生物菌肥提供优良的菌株资源。

## 参考文献

- [1] 吴紫燕, 麋芳, 干华磊, 张莹莹, 袁东华, 吴家胜, 毛伟力. 一株具有促生溶磷功能的木霉菌 Tr940 的筛选及其在番茄上的应用[J]. 生物灾害科学, 2022, 45(2): 156-164.
- [2] 贾萌萌, 刘国明, 黄标. 设施菜地利用强度对土壤磷形态分布及其有效性的影响——以江苏省水耕人为土和潮湿雏形土为例[J]. 土壤, 2021, 53(1): 30-36.
- [3] Su, Q.Q., Ding, H.J., Li, X.F., et al. (2023) Microbial Phytase and Its Role in Phytate Mineralization in Soils: A Review. *Environmental Chemistry*, **42**, 1366-1380. <https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2021110108>
- [4] Yang, X.L., Cao, X.Y., Wu, B.X., Xu, Q.J. and Liu, X. (2023) Microbial Phytase Activity in Soils and Methods to Improve the Activity and Application: A Review. *Microbiology China*, **50**, 2687-2708.
- [5] 姜焕焕. 耐盐碱解磷菌与磷石膏联用改良盐碱土的效果与机制[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,

- 2019.
- [6] Liu, Y.J., Zhang, L.H., Zhang, H., *et al.* (2023) Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Soil Phosphorus Cycle: A Review. *Microbiology China*, **50**, 3671-3687.
  - [7] Jiang, H.H., Li, J.Q., Chen, G., *et al.* (2021) Phosphate Solubilizing Microorganisms and Application Progress in Saline-alkaline Soil. *Soils*, **53**, 1125-1131.
  - [8] Zhuang, Z., Cheng, H., *et al.* (2017) Research Progress on Ecological Functions and Phosphorus Release Mechanism of Low Molecular Organic Acids. *Subtropical Agriculture Research*, **13**, 276-282.  
<https://doi.org/10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2017.04.011>
  - [9] Zhang, C., Chen, H., Dai, Y., Chen, Y., Tian, Y. and Huo, Z. (2023) Isolation and Screening of Phosphorus Solubilizing Bacteria from Saline Alkali Soil and Their Potential for Pb Pollution Remediation. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **11**, Article 1134310. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1134310>
  - [10] Yu, H., Wu, X., Zhang, G., Zhou, F., Harvey, P.R., Wang, L., *et al.* (2022) Identification of the Phosphorus-Solubilizing Bacteria Strain JP233 and Its Effects on Soil Phosphorus Leaching Loss and Crop Growth. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article 892533. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.892533>
  - [11] Bai, K., Wang, W., Zhang, J., Yao, P., Cai, C., Xie, Z., *et al.* (2024) Effects of Phosphorus-Solubilizing Bacteria and Biochar Application on Phosphorus Availability and Tomato Growth under Phosphorus Stress. *BMC Biology*, **22**, Article No. 211. <https://doi.org/10.1186/s12915-024-02011-y>