

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2025.01.004

## 一株根际多功能解磷菌的分离, 筛选及鉴定

周星朴<sup>1a</sup>, 沈依华<sup>2</sup>, 张文丽<sup>1b</sup>, 黄诗维<sup>1a</sup>, 王洁<sup>1a</sup>, 陈梦越<sup>1a</sup>, 孙劲<sup>1a\*</sup>

(1. 西昌学院 a. 资源与环境学院; b. 动物科学学院, 四川 西昌 615013; 2. 四川省烟草公司凉山州公司  
盐源分公司, 四川 盐源 615703)

**摘要:** [目的] 旨在从根际土壤中筛选高效解磷菌, 以解决土壤中难溶性无机磷和有机磷的富集问题, 同时筛选具有潜在植物促生特性的菌株。[方法] 采用蒙金娜培养基对根际土壤样本进行筛选分离, 结合形态学特征、生理生化特性及 16S rDNA 基因鉴定对菌株 L17 进行系统鉴定; 通过钼锑抗比显色法测定解磷能力, 火焰原子吸收法测定解钾能力, 碱性过硫酸钾消解法测定固氮能力, Salkowski 显色法测定吲哚乙酸 (IAA) 分泌能力。[结果] 菌株 L17 属于芽孢杆菌属 (*Bacillus* sp.), 其解磷能力为  $(78.436 \pm 0.224)$   $\mu\text{g/mL}$ , 解钾能力为  $(58.900 \pm 2.390)$   $\mu\text{g/mL}$ , 固氮能力为  $(106.610 \pm 4.580)$   $\mu\text{g/mL}$ , 吲哚乙酸分泌量为  $(71.711 \pm 1.812)$   $\mu\text{g/mL}$ 。[结论] 菌株 L17 具有显著的解磷、解钾、固氮及分泌吲哚乙酸能力, 展现出较强的植物促生潜力, 可为土壤修复复合菌剂的开发及环境污染生物降解菌剂的研究提供支持。

**关键词:** 根际促生细菌; 解磷菌; 芽孢杆菌; 促生特性

中图分类号: S144 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2025)01-0023-08

## Isolation, Screening, and Identification of a Multifunctional Phosphate-Solubilizing Bacterium from Rhizosphere Soil

ZHOU Xingpu<sup>1a</sup>, SHEN Yihua<sup>2</sup>, ZHANG Wenli<sup>1b</sup>, HUANG Shiwei<sup>1a</sup>, WANG Jie<sup>1a</sup>,  
CHEN Mengyue<sup>1a</sup>, SUN Jin<sup>1a\*</sup>

(1a. College of Resources and Environment; 1b. College of Animal Science, Xichang University, Xichang 615013, Sichuan, China; 2. Sichuan Tobacco Industrial Co., Ltd., Liangshan Prefecture Company, Yanyuan Branch, Yanyuan 615703, Sichuan, China)

**Abstract:** [Objective] This study aimed at screening high-efficiency phosphate-solubilizing bacteria from rhizosphere soil to address the accumulation of insoluble inorganic and organic phosphorus in soil, while identifying strains with potential plant growth-promoting properties. [Method] The strain L17 was isolated and screened using Pikovskayas Medium, followed by systematic identification based on morphological characteristics, physiological and biochemical properties, and 16S rDNA gene analysis. The phosphate-solubilizing ability was determined by the molybdenum-antimony anti-colorimetric method, potassium-releasing ability by flame atomic absorption spectrometry, nitrogen-fixing ability by alkaline persulfate digestion, and indole-3-acetic acid (IAA) secretion by the Salkowski colorimetric method. [Result] The experimental results showed that strain L17 belongs to the genus *Bacillus* (*Bacillus* sp.). Its phosphate-

收稿日期: 2025-01-21

基金项目: 凉山州科技计划项目 (21ZDF0181); 西昌学院“两高”人才科研支持计划项目 (LGZ202001); 国家大学生创新计划项目 (202210628023); 四川省大学生创新训练项目 (S202310628086)。

作者简介: 周星朴 (2002—), 男, 四川大竹人, 本科生, 研究方向: 环境微生物, e-mail: 18780874559@163.com。

\*通信作者: 孙劲 (1975—), 男, 四川邛崃人, 副教授, 硕士, 研究方向: 环境微生物, e-mail: sunjin\_xcc@xcc.edu.cn。

solubilizing ability was  $(78.436 \pm 0.224) \mu\text{g/mL}$ , potassium-releasing ability was  $(58.900 \pm 2.390) \mu\text{g/mL}$ , nitrogen-fixing ability was  $(106.610 \pm 4.580) \mu\text{g/mL}$ , and IAA secretion reached  $(71.711 \pm 1.812) \mu\text{g/mL}$ . [Conclusion] Strain L17 exhibits significant phosphate-solubilizing, potassium-releasing, nitrogen-fixing, and IAA-secreting abilities, demonstrating strong potential for promoting plant growth. It provides important support for the development of soil remediation microbial agents and research on biodegradation agents for environmental pollution.

**Keywords:** plant growth-promoting rhizobacteria; phosphate-solubilizing microorganisms; *Bacillus* sp.; growth promotion

## 0 引言

细菌在土壤中分布广泛,生物量庞大,在土壤表层的 0~15 cm 深度区间尤为显著,其数量可达到每克土壤  $10^8 \sim 10^9$  CFU<sup>[1]</sup>。其中,根际土壤是一个微生物种类极为丰富的生态环境,包含真菌、细菌、放线菌等多种微生物,统称为根际微生物<sup>[2]</sup>。在这些根际微生物中,有一类特殊的细菌,称为植物促生细菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR),它们能够直接或间接促进植物生长,或对植物病原菌产生拮抗作用<sup>[3]</sup>。

磷在光合作用、呼吸作用及生物生长与发育过程中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。适量的磷供应不仅能够促进植物的正常生长,还能增强作物的抗逆性和适应性<sup>[4]</sup>。据统计,全球约 43% 的耕地土壤缺乏可供植物吸收的有效磷,而在中国,约 66.7% 的耕地存在严重缺磷问题<sup>[5]</sup>。为解决植物可吸收磷元素不足的问题,农业工作者通常施用过磷酸钙、重过磷酸钙、钙镁磷肥等化学磷肥,但这些磷肥的当季利用率仅为 10%<sup>[6]</sup>。长期以来,磷肥的过量施用导致磷元素的富集,而这些积累的磷素以植物难以吸收的形式存在,如 Fe-P、Al-P、Ca-P、Mg-P、有机磷等<sup>[6]</sup>,形成了恶性循环。

随着可持续农业的不断发展,科学家逐渐聚焦于研究解磷菌剂。这类菌剂能够通过调节土壤 pH 值、增强微生物的代谢活性并促进盐碱土中磷素的有效化<sup>[7]</sup>。例如,植物所需的有机磷成分主要通过微生物的分解作用,转化为植物可直接利用的有效磷<sup>[8]</sup>。有研究<sup>[9]</sup>表明,解磷菌能够将植物难以吸收的磷转化为可利用形态,促进不溶性磷和无机磷酸

盐的溶解,使其进入土壤水相,进而被植物吸收。本研究旨在筛选出高效的根际解磷菌,为土壤改良及促植物生长提供优质的菌种资源。

## 1 材料与方 法

### 1.1 土壤样品

西昌市西昌学院安宁校区的根际土壤。

### 1.2 培养基与主要仪器

本研究使用的培养基包括无机磷培养基、LB 培养基、解钾培养基和阿须贝培养基,各培养基的成分如下。无机磷培养基:葡萄糖 10 g/L,硫酸铵 0.5 g/L,酵母浸粉 0.5 g/L,氯化钠 0.3 g/L,氯化钾 0.3 g/L,硫酸镁 0.3 g/L,硫酸亚铁 0.03 g/L,硫酸锰 0.03 g/L,磷酸钙 5 g/L,琼脂 15 g/L,pH 值为 8.9~9.2。LB 培养基:蛋白胨 10 g/L,酵母粉 5 g/L,氯化钠 0.5 g/L,琼脂 15 g/L,pH 值为 7.0~7.5。解钾培养基:葡萄糖 5 g/L,硫酸镁 0.5 g/L,三氯化铁 0.005 g/L,碳酸钙 2 g/L,钾长石粉 2 g/L,琼脂 15 g/L,pH 值为 7.0~7.5。阿须贝培养基:甘露醇 10 g/L,磷酸氢二钾 0.2 g/L,硫酸镁 0.2 g/L,氯化钠 0.2 g/L,硫酸钙 0.1 g/L,碳酸钙 5.0 g/L,琼脂 15 g/L,pH 值为 7.0~7.2。

本文使用的主要仪器有:L8 紫外可见双束分光光度计(上海仪电有限公司);LRG-260B 生物培养箱(杭州绿博仪器有限公司);QYC-2102C 恒温培养摇床(上海新苗医疗器械制造有限公司);GI54DS 立式压力蒸汽灭菌器(致微(厦门)仪器有限公司)。

### 1.3 解磷菌的筛选与分离

称取根际土壤按稀释平板涂布到蒙金娜培养基,30 °C 恒温培养 24 h,观察菌落周围的透明圈大

小,并测量菌落直径( $D$ )和透明圈直径( $d$ ),确定其解磷能力<sup>[10]</sup>。挑取平板上透明圈( $D/d$ )较明显的菌落,在蒙金娜培养基上进行重复划线,直至获得纯培养物。

#### 1.4 菌株解磷能力的测定

无机磷降解能力测定:将纯化的菌株接种LB培养基,30℃、160 r/min 恒温培养24 h,按体积分数1%接种在无机铁磷液体培养基中,30℃、160 r/min 培养5 d,10 000 r/min 离心20 min,用钼锑抗显色法测定有效磷含量<sup>[11]</sup>,以接种等体积的LB肉汤的解钾液体培养基为对照组。

有机磷降解能力测定:将纯化的菌株接种有机磷固体培养基表面,置28℃恒温箱中倒置培养4 d<sup>[12]</sup>。将纯化的菌株接种LB培养基,同样条件培养24 h,按体积分数1%接种在有机磷液体培养基中,取5 mL菌液12 000 r/min 离心2 min,吸取上清液利用钼锑抗比色法<sup>[12]</sup>测定有效磷含量,以接种等体积的LB肉汤的解钾液体培养基为对照组。

### 1.5 菌株 PGPR 特性的测定

#### 1.5.1 种子液的制定

将菌株于LB培养基活化,挑取单菌落接种于LB肉汤中,30℃、160 r/min 恒温培养24 h,用无菌水调节OD<sub>600</sub>=1.0,备用。

#### 1.5.2 PGPR 特性的定性测定

通过定性试验初步评估菌株的PGPR特性。将菌株分别接种于解钾培养基<sup>[13]</sup>、阿须贝氏培养基<sup>[14]</sup>和CAS(chromogenic agar for spore)培养基<sup>[15]</sup>中,置于30℃培养箱中培养7 d,观察菌落周围是否形成透明圈及菌落大小,以判断其解钾能力、固氮能力及产铁载体能力。同时,将菌株接种于King液体培养基中,于30℃、200 r/min 条件下摇床培养24 h,加入Salkowski比色液<sup>[16]</sup>,通过颜色变化判断其产吲哚乙酸(IAA)能力。此外,将菌株划线接种于ADF固体培养基平板上,30℃恒温培养,待菌落长出后,挑取单菌落重复划线两次,观察菌落生长情况<sup>[17]</sup>,以

评估其产ACC(1-aminocyclopropane-1-carboxylate)脱氨酶能力。

#### 1.5.3 PGPR 特性的定量测定

基于定性测定结果,该菌株未表现出产铁载体和产ACC脱氨酶能力,因此定量试验仅针对其解钾能力、固氮能力及产IAA能力进行测定。

1)可溶性钾含量的测定。将种子液按体积分数1%接种于50 mL解钾液体培养基中,于30℃、200 r/min 条件下培养7 d。培养结束后,以9 000 r/min 离心15 min,收集上清液。采用原子吸收火焰分光光度计<sup>[13]</sup>测定可溶性钾含量。对照组为接种等体积LB肉汤的解钾液体培养基。

2)总氮含量的测定。将种子液按体积分数1%接种于50 mL阿须贝氏培养基中,同时以未接种的阿须贝氏液体培养基作为空白对照,于30℃、200 r/min 条件下培养7 d。培养结束后,以9 000 r/min 离心15 min,收集上清液。参照HJ 636-2012《水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》<sup>[18]</sup>,采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定总氮含量。固氮量依据式(1)~(2)计算。

$$A_r = (A_{s220} - 2A_{s275}) - (A_{b220} - 2A_{b275}) \quad (1)$$

$$\rho(N) = (A_r - 0.04)/0.01 \quad (2)$$

式中: $A_{s220}-2A_{s275}$ 表示样品溶液校正吸光度; $A_{b220}-2A_{b275}$ 表示空白溶液校正吸光度; $A_r$ 表示样品溶液校正吸光度与空白溶液校正吸光度的差。

3)IAA产量的测定。将种子液按体积分数1%接种于King液体培养基中,于30℃、200 r/min 条件下摇床培养24 h。培养结束后,取上清液以12 000 r/min 离心15 min,采用Salkowski比色法<sup>[16]</sup>测定IAA产量。

#### 1.5.4 数据处理

每组试验数据由3次重复试验得到,试验获得的数据处理使用SPSS 20.0软件对试验数据进行统计分析,图表中数据为平均值±标准差。

## 1.6 解磷菌的鉴定

### 1.6.1 形态观察

将菌株接种到 LB 固体培养基上培养 5 d, 观察菌落颜色、菌落形状等特征, 使用光学显微镜观察菌体形态等特征观察<sup>[19]</sup>。

生理生化试验根据《常见细菌系统鉴定手册》<sup>[20]</sup>中有关属、种鉴定的内容和方法, 进行菌株的革兰氏染色、需氧性测定、赖氨酸脱羧酶试验、柠檬酸盐利用试验、淀粉水解试验、过氧化氢酶试验、葡萄糖发酵试验。

### 1.6.2 菌株 16S rRNA 基因的扩增

扩增采用细菌 16S rDNA 基因通用引物以 27F (5'AGAGTTTGATCCTGGCTCAG3') 和 1492R (5'TACGGYTACCTTGTACGACTT3') 进行 16S rRNA 基因扩增<sup>[21]</sup>。PCR 反应体系: 2×Taq PCR Master

Mix 25 μL, 引物各 0.5 μL, 模板 DNA 1 μL, 加 ddH<sub>2</sub>O 补齐至 50 μL。PCR 反应程序: 94 °C 预变性 3 min; 94 °C 变性 30 s, 55 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 90 s, 36 个循环; 72 °C 延伸 7 min, 4 °C 保温。扩增产物送成都里来生物科技有限公司测序。将所得序列上传到 NCBI 网站进行比对, 通过 MEGA 11.0 软件采用邻接法 (Neighbor-Joining) 构建系统发育树。

## 2 结果与分析

### 2.1 解磷菌的筛选与分离

在根际土壤中, 经过初步筛选、复筛以及纯化步骤后, 筛选出一株菌株, 并编号为 L17。该菌落在蒙金娜培养基上颜色为透明或乳白色, 表面光滑, 并且具有较大的透明圈 ( $D/d=2.210\pm 0.658$ )。菌株 L17 在不同培养基上的生长情况如图 1 所示。

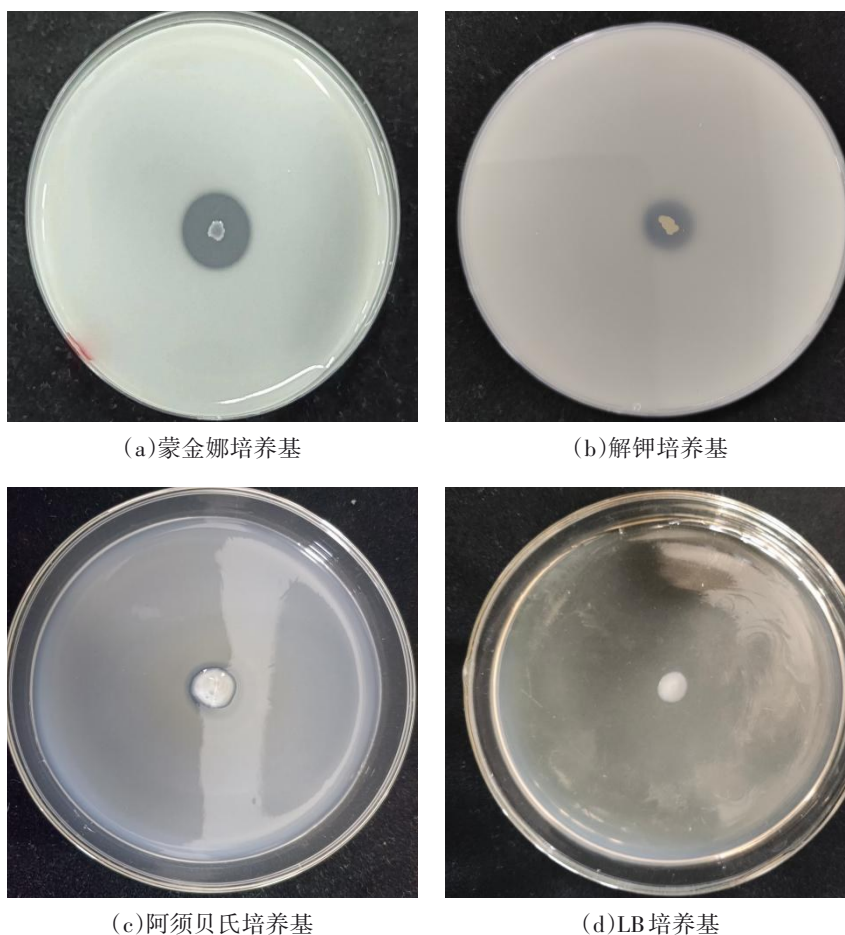


图 1 菌株在不同培养基上的生长情况

## 2.2 菌株解磷能力的测定

通过测定上清液中的磷浓度,可以评估菌株的解磷能力。以磷酸盐标准溶液质量浓度( $x$ )为横坐标,OD700nm值( $y$ )为纵坐标绘制磷酸盐标准曲线,得到标准曲线的线性回归方程式(式(3))。

$$y=0.076x-0.0211, R^2=0.9991 \quad (3)$$

由式(3)可得 L17 的降解量为(78.436±0.224) μg/mL,高于柳鑫鹏等<sup>[22]</sup>所报道的 B1432 菌株的解磷能力(59.1 mg/L)。通过观察接种在有机磷平板的菌株 L17 生长缓慢和周围无透明圈,判断该菌不具备降解有机磷的能力,菌株 L17 对于难溶解无机磷转换为植物能吸收的磷素有一定的潜力。

## 2.3 菌株 PGPR 特性的测定

### 2.3.1 定性测定

菌株 L17 在解钾培养基上形成透明圈(图 1(b)), $D/d$ 值为 1.250±0.144,具有一定的解钾能力;在阿须贝培养基上形成的菌落大且周围有透明圈(如图 1(c)),说明该菌能产生分解碳酸钙的酸;在 CAS 培养基上无橙(棕)黄色铁载体整合圈出现,说明该菌无产铁载体能力;通过 Salkowski 比色试验,确定菌株 L17 在代谢过程中能够产生 IAA;在 ADF 培养基上无法生长,说明该菌没有产 ACC 脱氨酶能力。

### 2.3.2 定量测定

以钾长石为唯一钾源,制备其标准液,测定其吸光度,并制作其标准曲线的线性回归方程(式(4))。

$$y=0.2035x-0.026, R^2=0.9972 \quad (4)$$

菌株 L17 的水溶性钾与对照 CK 相比,增加了(58.900±2.390) μg/mL,高于吴红艳等<sup>[13]</sup>筛选得到常温解钾菌 K02 的解钾能力,菌株 K02 使得发酵液中可溶性钾质量浓度提升至 41.84 mg/L。

以 KNO<sub>3</sub>作为唯一氮源,制备其标准液,测定其吸光度,并制作其标准曲线线性回归方程(式(5))。

$$y=0.0089x+0.0393, R^2=0.9947 \quad (5)$$

菌株 L17 从空气中固定的总氮质量浓度达到了(106.610±4.580) μg/mL,高于王宝杰<sup>[23]</sup>研究中固氮菌 GN-17 的固总氮量(12.26 mg/L),有利于提高土壤中氮素含量,降低化学氮肥的使用。

制备吡啶乙酸标准液,测定其吸光值,并制作其标准曲线线性回归方程(式(6))。

$$y=0.0075x+0.0264, R^2=0.9937 \quad (6)$$

解磷菌 L17 产吡啶乙酸浓度为(71.711±1.812) μg/mL,高于宋鹏等<sup>[16]</sup>研究菌株 HS5B5 发酵液中吡啶乙酸含量。

## 2.4 菌株形态学及生理生化特征

### 2.4.1 形态观察及生理生化试验结果

菌株 L17 革兰氏染色阳性,短杆状,宽 0.9~1.2 μm,长 7.0~9.0 μm,如图 2 所示。LB 培养基上的菌落形态为乳白色半透明、边缘隆起、表面粗糙干燥、有褶皱(图 1(d))。

菌株 L17 的生理生化试验结果如表 1 所示。

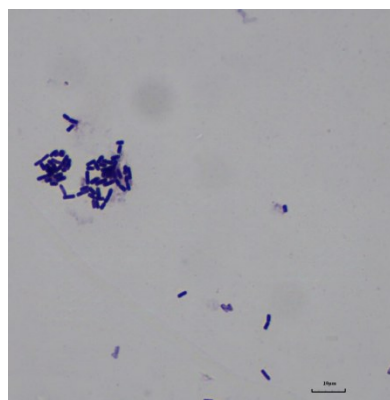


图 2 菌株 L17 菌体形态(革兰氏染色)

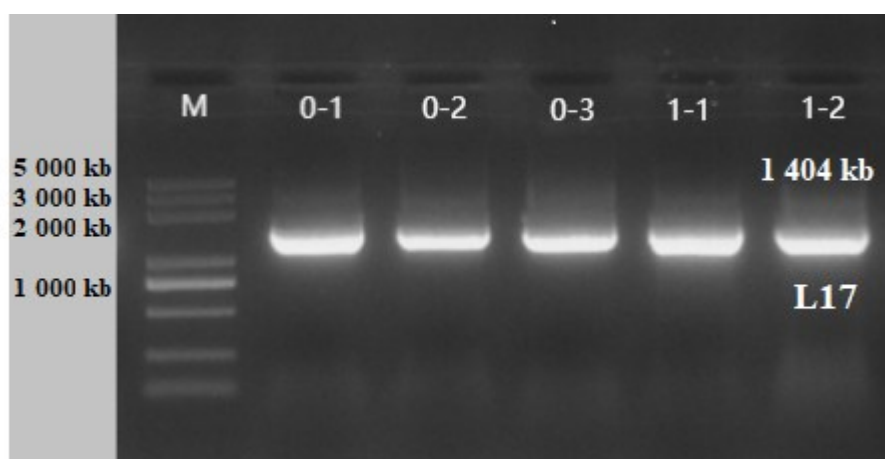
表 1 菌株 L17 生理生化试验结果

项目(生化管)	结果	项目(生化管)	结果
1%NaCl 赖氨酸脱羧酶	+	水杨素生化管	+
1%NaCl 甘露醇生化管	+	卫茅醇生化管	+
胆汁七叶苷	-	鼠李糖生化管	-
七叶苷生化管	+	枸橼酸盐生化管	-

注: +表示阳性; -表示阴性。

### 2.4.2 菌株 16S rDNA 基因序列系统发育分析

菌株 L17 的 PCR 获得长度为 1 404 kb(图 3),



注:M、0-1、0-2、0-3、1-1分别为Marker、CTE1-1、JC-7、L7、L10。

图3 菌株L17 PCR扩增产物凝胶电泳图

16S rRNA 基因序列提交于 GenBank 数据库, 登录号为 PP957419, 经过对分离的各类群代表菌株进行 16S rDNA 序列系统发育分析和鉴定, 采用 MEGA

11.0 软件的邻接法构建了系统发育树(图4)。

结合形态学及生理生化指标, L17 菌株为芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)。

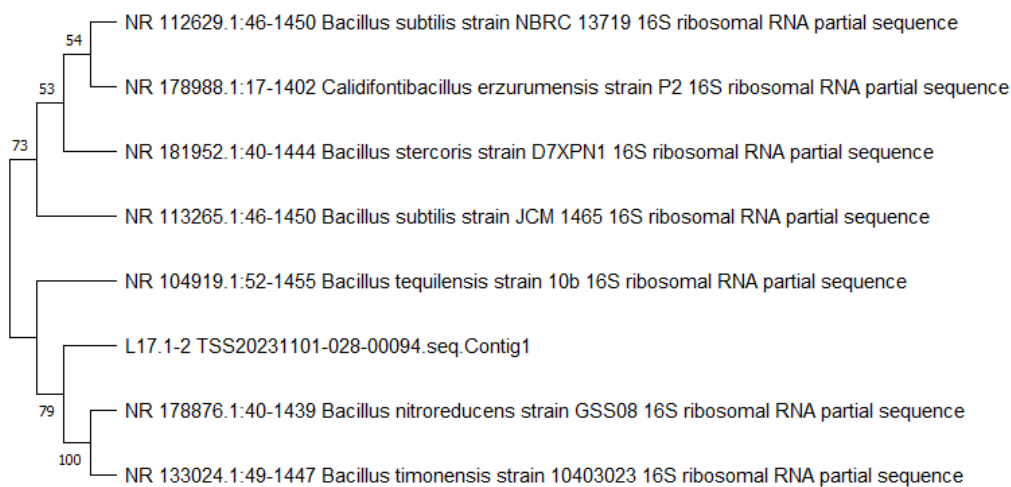


图4 菌株L17的 16S rRNA 基因序列系统发育树(邻接法)

### 3 讨论

磷元素在植物与微生物的代谢活动中扮演着多重关键角色, 对于维持植物的正常生理功能及土壤结构的稳定至关重要。在农业生产中, 过量使用传统化学磷肥不仅导致土壤质量下降, 还可能引发环境污染<sup>[24]</sup>, 农田土壤反而面临有效磷含量不足的问题。因此, 微生物磷肥的研发与应用为推动可持续农业发展提供了创新的解决途径。解磷微生物

在土壤中与磷循环相关的生物学系统中起着重要作用, 能够将难溶磷转化为可溶性磷, 从而提高磷肥的利用率<sup>[25]</sup>。本研究发现, 菌株L17在蒙金娜培养基中, 随着培养时间的延长, 溶磷圈直径先快速增大, 最后趋于平缓, 这可能与培养基中难溶磷酸盐的含量及菌株的代谢活性等因素有关<sup>[26]</sup>。

邢芳芳等<sup>[27]</sup>从大麦根际土壤中筛选出的枯草芽孢杆菌, 在以  $Ca_3(PO_4)_2$  为唯一磷源的培养基中培养 6 d, 溶解的可溶性磷质量分数达到 220.85 mg/L。

本研究筛选出的菌株L17,经过鉴定,确认其为革兰氏阳性芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)。菌株L17对不同类型的磷酸盐具有不同的溶解能力,具体表现为磷酸铁的溶解能力最强,其解磷能力为 $(78.436 \pm 0.224) \mu\text{g/mL}$ ,且与车欣宇等<sup>[25]</sup>的研究结果相似,表明菌株对不同难溶性磷酸盐的溶解能力差异显著。有研究<sup>[28]</sup>表明,解磷菌能够提高土壤养分,促进作物生长。通过对PGPR特性进行测定,结果显示,该菌株的解钾能力为 $(58.900 \pm 2.390) \mu\text{g/mL}$ ,固氮能力为 $(106.610 \pm 4.580) \mu\text{g/mL}$ ,且能够分泌出质量浓

度达到 $(71.711 \pm 1.812) \mu\text{g/mL}$ 的吲哚乙酸,这一特性与王松等<sup>[29]</sup>研究的菌株YR-P31相似,并表现出潜在促进植物生长的作用。

本研究结果表明,所获菌株L17为芽孢杆菌(*Bacillus* sp.),该菌株具有解磷、溶钾的能力,并具有一定的固氮能力及产IAA能力,具有潜在的促植物生长的能力,该菌株解磷、溶钾机制还有待进一步研究,其PGPR能力也有待通过栽培试验进一步验证。该菌株具备作为微生物复合菌肥菌种资源的潜力。

#### 参考文献:

- [1] ARCHANA B, BISHWOYOG B, SUNIL P. Variation of soil microbial population in different soil horizons[J]. *Journal of Microbiology & Experimentation*, 2015, 2(2): 75-78.
- [2] 典利,孟臻,元文哲,等. 植物根际促生菌的研究与应用现状[J]. *世界农药*, 2018, 40(6): 37-43.
- [3] SHWETA G, RAJESH K, GAURAV S. Impact of plant growth-promoting rhizobacteria on vegetable crop production[J]. *International Journal of Vegetable Science*, 2018(24): 289-300.
- [4] ASFA R, Bilal A, Mohammad S K, et al. Psychrophilic bacterial phosphate-biofertilizers: a novel extremophile for sustainable crop production under cold environment[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(12): 2451.
- [5] JANDREW R J, STEVEN B, GANESHA C. N, et al. Phosphorus recovery and recycling-closing the loop[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(1): 87-101.
- [6] CHAKRABORTY P, TRIBEDI P. Functional diversity performs a key role in the isolation of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria from soil[J]. *Folia Microbiologica*, 2019, 64(3): 461-470.
- [7] 韩明月. 解磷海洋菌的筛选及其在盐碱土改良中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2021(12).
- [8] 吕俊, 王晓姪. 溶磷微生物及其对植物促生作用的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, 309(1): 231-239.
- [9] 王海斌, 陈晓婷, 丁力, 等. 不同树龄茶树根际土壤细菌多样性的T-RFLP分析[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 775-782.
- [10] 吕俊, 于存. 一株高效溶磷伯克霍尔德菌的筛选鉴定及对马尾松幼苗的促生作用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 2923-2934.
- [11] 张静, 白燕, 普布贵吉, 等. 海螺沟冰川退缩区土壤溶磷型PGPR细菌的筛选及促生特性[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(1): 35-41.
- [12] 黎萍, 高新星, 韩昆明, 等. 花生根际微生物的分离及高效功能菌株筛选[J]. *微生物学通报*, 2023, 50(10): 4433-4447.
- [13] 吴红艳, 于森, 冯健, 等. 土壤中解钾菌K02的筛选、鉴定及培养条件优化[J]. *微生物学杂志*, 2020, 40(4): 60-65.
- [14] 高威, 左振宇, 李凌凌, 等. 一株高效解磷菌的筛选鉴定及溶磷性能[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(9): 3873-3889.
- [15] 曹宏丽, 郝尚华, 楚梦晓, 等. 1株高产铁载体菌株的筛选鉴定以及化感作用的验证[J]. *河南农业大学学报*, 2021, 55(4): 727-735.
- [16] 宋鹏, 赵彪, 李理想, 等. 1株产吲哚乙酸菌株的鉴定及发酵条件优化[J]. *饲料研究*, 2023, 46(15): 64-69.
- [17] 麦迪努尔·依力哈木, 樊永红, 依力哈木·尔西丁. 植物根际产ACC脱氨酶原油降解菌的筛选及其降解和促生特性研究

- [J]. 中国土壤与肥料, 2024(5):177-189.
- [18] 环境保护部. 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 沈萍, 范秀容, 李广武. 微生物学实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [20] 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.
- [21] 谢东, 汪流伟, 李宁健, 等. 一株多功能菌株的发掘、鉴定及解磷条件优化[J]. 生物技术通报, 2023, 39(7): 241-253.
- [22] 柳鑫鹏, 臧淑英, 智刚, 等. 盐碱土耐盐碱细菌筛选及其植物促生能力研究[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 567-576.
- [23] 王宝杰. 内蒙古草原葱属植物根际土壤功能菌筛选及其对燕麦的促生作用[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.
- [24] 廖思远, 秦延文, 刘志超, 等. 邛海流域设施葡萄园土壤养分与地下水污染特征研究[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 597-606.
- [25] 车欣宇, 彭启超, 张志鹏, 等. 一株根际解磷菌的筛选鉴定及促生作用研究[J]. 中国土壤与肥料, 2024(1): 218-225.
- [26] 池景良, 郝敏, 王志学, 等. 解磷微生物研究及应用进展[J]. 微生物学杂志, 2021, 41(1): 1-7.
- [27] 邢芳芳, 高明夫, 嵇优优, 等. 大麦根际高效溶磷菌的筛选、鉴定及促生效果研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 252-257.
- [28] 刘广超, 叶青, 车永梅, 等. 烟草根际高效解磷菌的筛选、鉴定及促生作用研究[J]. 生物技术通报, 2022, 38(8): 179-187.
- [29] 王松, 张小凡. 解磷菌株 YR-P31 的分离、鉴定、生物学特性及其促生作用[J]. 中国土壤与肥料, 2022(12): 206-212.

~~~~~  
(上接第 14 页)

- [7] 梁霞, 赵贝, 李媛, 等. 紫外长期胁迫对高世代麦长管蚜生命表参数的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6228-6234.
- [8] 杜军利, 藏绮罗, 武德功, 等. 光周期对玉米蚜生长发育及种群参数的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(9): 1534-1540.
- [9] 马亚玲, 刘长仲. 光周期对两种色型豌豆蚜生长发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1476-1483.
- [10] BRADSHAW W E, HOLZAPFEL C M. Evolution of animal photoperiodism[J]. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 2007, 38(1): 1-25.
- [11] 武德功, 陈青, 詹秋文, 等. 不同温度对高粱蚜的生长发育的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(6): 1548-1555.
- [12] 李成军, 李娟, 赵钧, 等. 饲养密度对东亚小花蝽若虫生长发育及成虫获得率的影响[J]. 烟草科技, 2022, 55(8): 35-40.
- [13] CHI H, LIU H. Two new methods for the study of insect population ecology[J]. Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica, 1985, 24(2): 225-240.
- [14] 许乐园, 米勇, 卢虹, 等. 麦长管蚜在不同温度下的年龄-龄期生命表[J]. 植物保护学报, 2014, 41(6): 673-679.
- [15] SEARLE I, COUPLAND G. Induction of flowering by seasonal changes in photoperiod[J]. The EMBO Journal, 2004, 23(6): 1217-1222.
- [16] LOPATINA E B, KIPYATKOV V E, BALASHOV S V, et al. Photoperiod-temperature interaction—a new form of seasonal control of growth and development in insects and in particular a Carabid Beetle, *Amara communis* (Coleoptera: Carabidae) [J]. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2011, 47: 578-592.
- [17] KUTCHEROV D A, LOPATINA E B, KIPYATKOV V E. Photoperiod modifies thermal reaction norms for growth and development in the red poplar leaf beetle *Chrysomela populi* (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. Journal of Insect Physiology, 2011, 57(7): 892-898.
- [18] 柴华. 光周期和温度对斑须蝽呼和浩特种群滞育的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020.
- [19] 吴珂珂, 顾钢, 赖荣泉, 等. 光周期和温湿度对烟蚜茧蜂寄生能力和繁殖的影响[J]. 昆虫学报, 2022, 65(11): 1488-1497.
- [20] 王熠, 庞士海, 纪薇, 等. 光周期对黏虫生长发育和生殖的影响[J]. 植物保护学报, 2019, 46(3): 542-548.
- [21] 武德功, 詹秋文, 黄保宏, 等. 不同光周期对高粱蚜种群参数的影响[J]. 昆虫学报, 2018, 61(4): 511-518.