

不同生长环境下太白贝母根际解磷细菌的筛选及其接种效应研究

王 凯^{1,2}, 施志芬^{1,2,3}, 王盼盼², 王光志¹, 马 强^{4*}, 周 浓^{2*}

1. 成都中医药大学药学院, 四川 成都 611130

2. 重庆三峡科技大学生物与食品工程学院, 三峡库区道地药材绿色种植与深加工重庆市工程研究中心, 重庆 404020

3. 红河职业技术学院 现代农业学院, 云南 红河 661199

4. 重庆三峡医药高等专科学校 基础医学部, 重庆 404120

摘要: **目的** 筛选太白贝母 *Fritillaria taipaiensis* 根际土壤高效解磷细菌, 为微生物菌肥的有效开发提供数据支撑。**方法** 从 10 个产地的太白贝母根际土壤中筛选和鉴定解无机磷细菌和有机磷细菌, 经分离、纯化以及解磷能力的定性定量分析, 并结合生理生化和 16S rDNA 技术鉴定菌株, 之后通过盆栽实验测定其接种效果。**结果** 最终从 10 个不同产地的太白贝母根际土壤中筛选得到 42 株解无机磷细菌和 31 株解有机磷细菌。解磷能力定量结果显示, 解无机磷细菌中菌株 WP2-2 表现出最强的解磷能力, 增磷量为 231.30 mg/L, 其次是菌株 WP7-2, 增磷量为 211.05 mg/L。解有机磷细菌中菌株 YP3-1 的解磷能力最强, 增磷量为 28.57 mg/L, 菌株 YP5-1 次之, 增磷量为 22.30 mg/L。经鉴定, WP2-2 为普城沙雷氏菌 *Serratia plymuthica*, WP7-2 是蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus*, YP3-1 和 YP5-1 同属蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*。盆栽试验结果显示, 接种解磷细菌能够改变太白贝母鳞茎和须根的全磷含量, 在一定程度上影响鳞茎总生物碱含量。**结论** 菌株 WP2-2、WP7-2、YP3-1、YP5-1 可作为太白贝母根际微生物菌肥开发的候选菌株, 为后续需解磷细菌与有效成分相关基因调控之间的研究提供了理论基础。

关键词: 太白贝母; 解磷细菌; 根际土壤; 分离鉴定; 接种效应

中图分类号: R282.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2026)11-4364-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.11.023

Screening of phosphate-solubilizing bacteria from rhizosphere of *Fritillaria taipaiensis* in different habitats and its inoculation effect

WANG Kai^{1,2}, SHI Zhifen^{1,2,3}, WANG Panpan², WANG Guangzhi¹, MA Qiang⁴, ZHOU Nong²

1. College of pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611130, China

2. College of Food and Biological Engineering, Chongqing Sanxia University of Science and Technology, Chongqing 404020, China

3. College of Modern Agriculture, Honghe Vocational and Technical College, Honghe 661199, China

4. Department of Basic Medicine, Chongqing Three Gorges Medical College, Chongqing 404120, China

Abstract: Objective To screen high-efficiency phosphate-solubilizing bacteria (PSB) in the rhizosphere soil of *Fritillaria taipaiensis* and provide data support for the development of microbial fertilizers. **Methods** Rhizosphere soil samples were collected from ten production areas. Strains of inorganic phosphate-solubilizing bacteria (IPSB) and organic phosphate-solubilizing bacteria (OPSB) were isolated and purified. Their phosphate-solubilizing capacities were evaluated qualitatively and quantitatively, and the strains were identified based on physiological and biochemical characteristics as well as 16S rDNA sequencing. The effects of selected strains were further verified using pot experiments. **Results** A total of 42 IPSB and 31 OPSB strains were isolated. Quantitative analysis showed that among the IPSB strains, WP2-2 exhibited the strongest solubilizing capacity, increasing available phosphorus by 231.30 mg/L, followed by WP7-2 (211.05 mg/L). Among the OPSB strains, YP3-1 showed the highest phosphorus solubilization (28.57 mg/L).

收稿日期: 2025-12-02

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2023NSCQ-LMX0010)

作者简介: 王 凯, 硕士研究生, 研究方向为中药品种、质量与资源开发应用研究。E-mail: wangkai720607@163.com

*通信作者: 马 强, 副教授, 主要从事药用植物有效成分的提取及活性研究。E-mail: maqiang@cqtmc.edu.cn

周 浓, 教授, 硕士生导师, 主要从事中药资源与炮制研究。E-mail: erhaizn@126.com

followed by YP5-1 (22.30 mg/L). Strain WP2-2 was identified as *Serratia plymuthica*, WP7-2 as *Bacillus cereus*, and both YP3-1 and YP5-1 were also identified as *B. cereus*. Pot experiments revealed that inoculation with these PSB strains altered the total phosphorus content in bulbs and fibrous roots, and also influenced the total alkaloid content in the bulbs. **Conclusion** The strains WP2-2, WP7-2, YP3-1, and YP5-1 show great potential for developing specialized microbial fertilizers for the cultivation of *F. taipaiensis*.

Key words: *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li; phosphate-solubilizing bacteria; rhizosphere soil; separation and identification; inoculation effect

土壤中存量较为充足的磷元素不能被植物直接吸收利用是限制农作物生长发育的一个重大原因。激活土壤中的难溶态磷，促进有效磷供应，对推动我国农业可持续发展有着十分重要的作用^[1]。解磷微生物（phosphate solubilizing microorganisms, PSMs）可通过酸解、酶解等方式将难溶的磷素转变为速效磷素，从而提高作物对磷素的利用率^[2]。

利用土壤解磷微生物来改善土壤磷素缺乏的情况，减轻土壤因施肥带来的板结、污染问题，对友好型农业举措的推广意义重大。近年来关于友好型农业研究也较多，且不局限于大麦、小麦、玉米等农作物上^[3-5]。何建清等^[6]从多个区域的青稞根围土壤中筛选到 2 株具有较好活性的解磷菌，并通过种子发芽及盆栽促生长实验，发现这 2 株菌对提高小麦株高、根系长度和鲜质量的效果显著。宋娟等^[7]从枫香 *Liquidambar formosana* Hance. 根际土壤中分离和鉴定有效解磷菌，筛选出的解磷菌均显示出良好的解磷特性，并具有作为生物肥料的潜力，可进一步评估所筛选菌株的特性，开发其商业应用。朱芙蓉等^[8]、杜慧慧等^[9]从药用植物滇重楼的根际土壤中筛选解磷细菌，得到 1 株具有高效解无机磷能力的芽孢杆菌属 *Bacillus* 菌株，以及 1 株高效解有机磷的芽孢杆菌菌株，其皆可作为滇重楼微生物菌肥的候选菌种。除此之外，在磷素营养改造的复垦

土壤中^[10]，高寒草甸栽培牧草的微生物菌肥开发等方面都有涉及^[11]。不同生长环境土壤生长的解磷细菌种类和能力有差异，研究潜力巨大。

本研究以前期课题组从太白贝母 10 个产地根际土壤中分离出的解无机磷细菌和解有机磷细菌为研究对象，以解磷圈的有无和液体培养基中的实际增磷量为依据进行筛选，并对最终筛选、鉴定得到的菌株进行不同条件下的解磷能力研究以及盆栽接种效应研究，以期得到能用于太白贝母人工栽培种植的优势解磷细菌菌株。

1 材料与仪器

1.1 材料

课题组从重庆、云南、四川、湖北等 10 个产地采集太白贝母鳞茎及其根际土壤，经重庆三峡科技大学周浓教授鉴定为百合科太白贝母 *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li 的鳞茎及其根际土壤，从根际土壤中分离出来的解无机磷细菌和解有机磷细菌作为后续实验开展的基础，具体采集点信息见表 1。

1.2 试剂

无机磷细菌固体培养基（批号 HB8670，中国青岛海博生物技术有限公司），有机磷细菌固体培养基（批号 HB8673，青岛海博生物技术有限公司），KG203-03 细菌基因组提取试剂盒[天根生化科技（北京）有限公司]，其他试剂均为分析纯。

表 1 10 个不同产地太白贝母根际土壤样品来源信息

Table 1 Source information of rhizosphere soil samples of *F. taipaiensis* from 10 different origins

编号	采样地点	经纬度	海拔/m
1	重庆巫溪县红池坝社区三组西流溪（野生）	N31°36'26.07"/E108°49'18.75"	1 783
2	四川省广元市朝天区青林村	N32°35'10.06"/E106°13'17.34"	1 760
3	云南省宁蒗县翠玉乡洋涧槽	N27°31'04.91"/E100°35'39.14"	3 372
4	重庆市巫溪兰英乡西安村	N31°24'57.64"/E109°56'53.72"	1 612
5	重庆市城口县明中乡四合村二组小龙潭	N31°41'14.08"/E108°56'52.59"	1 562
6	重庆市巫山县当阳乡里河村五组忍子坪	N30°46'07.21"/E109°36'33.99"	1 538
7	湖北省恩施州新塘乡太山庙社区狮子口	N30°08'13.18"/E109°47'21.21"	1 926
8	重庆市奉节兴隆镇西槽村白果淌孟缘药谷	N30°45'47.47"/E109°36'38.96"	1 915
9	陕西省宝鸡市太白县塘口村	N34°03'25.82"/E107°23'40.79"	1 625
10	重庆市巫溪县红池坝社区一组	N31°37'32.05"/E108°57'20.71"	1 769

1.3 仪器

FA1004 型电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、ZXS-D0A1270 型生化培养箱(上海智诚分析仪器制造有限公司)、2540MK 型高压灭菌锅(上海善志仪器设备有限公司)、TRobot II PCR 仪(Biometra 股份有限公司)。

2 方法

2.1 培养基的配制

2.1.1 解无机磷细菌液体培养基 取葡萄糖 10 g、硫酸铵 0.5 g、酵母浸粉 0.5 g、氯化钠 0.3 g、氯化钾 0.3 g、硫酸镁 0.3 g、硫酸锰 0.03 g、硫酸亚铁 0.03 g、磷酸三钙 5.0 g, 121 °C 灭菌 20 min, 制得解无机磷细菌液体培养基。

2.1.2 解有机磷细菌液体培养基 取葡萄糖 10 g、硫酸铵 0.5 g、酵母浸粉 0.5 g、氯化钠 0.3 g、氯化钾 0.3 g、硫酸镁 0.3 g、硫酸锰 0.03 g、硫酸亚铁 0.03 g、碳酸钙 1.0 g、卵磷脂 0.2 g, 121 °C 灭菌 20 min, 解有机磷细菌液体培养基。

2.1.3 牛肉膏蛋白胨培养基 取牛肉膏 3 g、蛋白胨 10 g、氯化钠 5 g、蒸馏水 1 000 mL, 121 °C 灭菌 20 min。液体培养基添加 15 g/L 琼脂, 即得到固体培养基。

2.2 解磷细菌的筛选

以固体培养基上解磷圈的有无以及解磷圈直径(D)与菌落直径(d)的比值(D/d), 即可溶性指数, 作为太白贝母根际土壤解磷细菌解磷能力的初步筛选依据。以液体培养基中增磷量作为 2 次筛选(定量)的依据, 定性与定量的具体步骤参照杜慧慧等^[9]方法进行。即初步筛选(定性): 在对应的无机磷和有机磷固体培养基上培养, 每株设 3 次重复。28 °C 下培养 5~7 d, 筛选出具有解磷特征(解磷圈)的菌株。二次筛选(定量): 将前期分离并保存完好的菌株解冻, 取 100 μL 菌液加入到 10 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基中, 密封好于摇床上激活培养, 激活 24 h 后, 将 200 μL 该液体接种到 25 mL 无机磷、有机磷液体培养基中, 以无菌水作对照, 摇床(28 °C、180 r/min)振荡培养 5 d, 离心机 4 000 r/min 离心 10 min, 用钼锑比色法检测上清液中有效磷含量, 并测定、记录对应发酵上清液的 pH。

2.3 解磷细菌菌株鉴定

将纯化后的菌株平板划线, 恒温培养箱 28 °C 下培养 3~4 d, 观察并记录菌落的形态、干湿状况、大小和颜色。参照《常见细菌系统鉴定手册》^[12]进行菌

株的生理生化鉴别实验。

2.4 分子生物学鉴定

参照细菌 DNA 提取试剂盒说明提取解磷细菌的总 DNA, 采用细菌通用引物 27F(5'-AGAGTTT-GATCCTGGCTCAG-3')和 1492R(5'-GGTTACCTT-GTTACGACTT-3'), 进行 PCR 扩增, 反应程序为 95 °C、5 min; 94 °C、30 s, 55 °C、30 s, 72 °C、1 min, 共 35 个循环; 4 °C 保存。PCR 反应体系为(25 μL): 2×PCR 预混液 11 μL、上游引物 2 μL、下游引物 2 μL、DNA 模板 3 μL, 补水至 25 μL。PCR 产物交于生工生物工程(成都)有限公司进行测序, 测序结果进行 blast 比对, 下载标准菌株, 后用 MEGA 7.0 构建发育树。

2.5 对不同磷源的解磷能力的测定

2.5.1 解无机磷细菌 在“2.1.1”项中解无机磷细菌液体培养基的基础上, 用羟基磷灰石、磷酸铝、磷酸锌水合物以及铁磷作为不同种类磷源替代磷酸三钙, 研究筛选出的 2 株优势菌株(WP2-2 和 WP7-2)对不同无机磷源的溶解能力^[13-15]。

2.5.2 解有机磷细菌 在“2.1.2”项中解有机磷细菌液体培养基的基础上, 在以葡萄糖作为碳源时, 以氯化铵、尿素为氮源, 在以硫酸铵作为氮源时, 以葡萄糖、可溶性淀粉分别为碳源, 研究筛选出的优势菌株(YP3-1 和 YP5-1)在不同碳、氮源条件下对卵磷脂的溶解能力^[16]。

2.5.3 接种效应 借助太白贝母盆栽试验, 检测解磷细菌的实际解磷能力。试验设有空白对照组(CK)和接菌处理组, 于太白贝母盆栽种植满 8 个月后, 采收太白贝母鳞茎及根际土壤样品。具体处理过程和植株地上部分的生长情况以及接菌后土壤理化性质和土壤肥力的变化测定参照文献处理^[17-18]。全磷含量的测定采用浓硫酸-高氯酸法进行。总生物碱含量的测定参照《中国药典》2025 年版中^[9]川贝母项下有效成分含量检测方法进行。

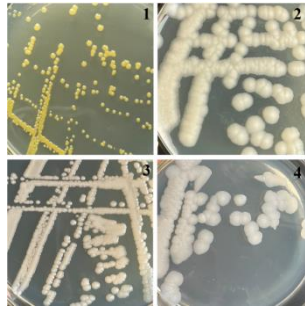
2.6 数据分析

采用软件 Microsoft Excel 2016、SPSS 23.0 进行数据统计与分析, 用 MEGA 7.0、Origin 2023 以及 GraphPad Prism 8.0 作图。

3 结果与分析

3.1 菌株形态学观察

解无机磷细菌和解有机磷细菌的菌落形态相似, 菌落多以圆形、白色居多, 少部分为乳白色或者微黄色, 菌落凸起或者扁平, 表面或干燥或湿润, 边缘大多整齐, 少数边缘不整齐。部分菌株的菌落形态见图 1。



1-WP1-8, 2-WP1-4, 3-YP6-1, 4-YP5-1。

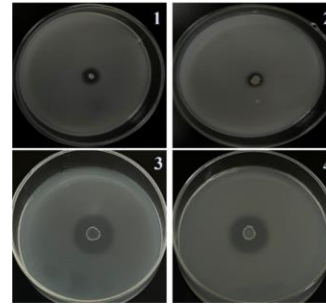
图1 部分菌落形态图

Fig. 1 Morphology of partial colonies

3.2 解磷细菌解磷能力定性分析

部分菌株的定性解磷情况见图2。经过筛选出来的42株解无机磷细菌菌株和31株解有机磷菌株解磷圈大小和可溶性指数分别见表2和表3。

42株解无机磷细菌菌株存在解磷圈，且42株菌的可溶性指数存在差异(表2)，可溶性指数范围为1.10~2.58。31株解有机磷菌株存在解磷圈(表3)，且31株解有机磷细菌的可溶性指数之间存在差异，来源于野生品根际土壤的解磷菌可溶性指



1-WP7-2, 2-WP9-3, 3-YP1-5, 4-YP4-3。

图2 部分菌株解磷圈图

Fig. 2 Phosphorus solubilization halos of partial strains

数在2.30~3.79，而栽培品根际土壤筛选的解磷细菌的可溶性指数在1.17~4.66，其中菌株YP2-1的可溶性指数最大，为4.66，菌株YP9-1的可溶性指数最小，为1.17(表3)。

菌株的可溶性指数只是初步筛选的手段，并不能作为其最终解磷细菌能力强弱的依据，菌株具体解磷能力的强弱还需借助菌株在液体培养基中的解磷情况即液体培养基中增磷量的大小进行判断。

表2 解无机磷细菌的解磷圈和菌落直径及可溶性指数 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 2 Phosphorus solubilizing halo, colony diameter, and solubility index of inorganic phosphate-solubilizing bacteria ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

菌株	菌落直径/cm	解磷圈直径/cm	可溶性指数	菌株	菌落直径/cm	解磷圈直径/cm	可溶性指数
WP1-1	0.57±0.04	0.85±0.03	1.51±0.06defghij	WP7-1	0.80±0.03	1.13±0.12	1.43±0.19fghij
WP1-2	0.48±0.04	0.80±0.03	1.68±0.12cdefgh	WP7-2	0.30±0.03	0.65±0.06	2.19±0.22ab
WP1-3	0.70±0.03	0.87±0.03	1.24±0.07hij	WP8-1	0.55±0.06	0.78±0.02	1.46±0.16efghij
WP1-4	0.50±0.03	0.75±0.03	1.51±0.08defghij	WP8-2	0.85±0.06	1.12±0.09	1.31±0.02ghij
WP1-5	0.57±0.04	0.85±0.03	1.51±0.06defghij	WP8-3	0.47±0.04	0.88±0.02	1.93±0.18bcd
WP1-6	0.60±0.08	1.03±0.13	1.73±0.09cdefg	WP8-4	0.43±0.06	0.80±0.06	1.90±0.23bcde
WP1-7	0.43±0.07	0.85±0.05	2.05±0.25bc	WP8-5	0.75±0.06	0.88±0.04	1.19±0.10j
WP1-8	0.25±0.03	0.63±0.03	2.58±0.21a	WP9-1	1.03±0.04	1.16±0.10	1.12±0.06j
WP2-1	0.75±0.03	0.95±0.10	1.26±0.1hij	WP9-2	0.70±0.03	0.79±0.05	1.13±0.04j
WP2-2	0.70±0.03	0.97±0.09	1.38±0.08fghij	WP9-3	0.47±0.04	0.70±0.05	1.51±0.09defghij
WP3-1	0.60±0.03	0.93±0.12	1.54±0.12defghij	WP9-4	0.93±0.09	1.03±0.13	1.10±0.04j
WP4-1	1.22±0.06	1.45±0.06	1.19±0.02j	WP9-5	0.63±0.06	0.77±0.06	1.22±0.06ij
WP4-2	0.52±0.09	0.88±0.04	1.79±0.25bcdef	WP9-6	0.83±0.04	0.97±0.07	1.16±0.07j
WP4-3	0.55±0.06	1.05±0.06	1.94±0.2bcd	WP9-7	0.37±0.04	0.43±0.04	1.17±0.06j
WP4-4	0.83±0.04	1.03±0.07	1.24±0.02hij	WP9-8	0.40±0.03	0.55±0.03	1.40±0.16fghij
WP4-5	1.12±0.03	1.72±0.09	1.54±0.04defghij	WP9-9	0.52±0.04	0.85±0.08	1.65±0.08cdefghi
WP4-6	0.47±0.09	0.63±0.09	1.40±0.16fghij	WP9-10	0.43±0.07	0.49±0.10	1.12±0.03j
WP5-1	0.43±0.07	0.53±0.12	1.21±0.08ij	WP10-1	0.55±0.09	0.77±0.07	1.42±0.10fghij
WP5-2	0.43±0.04	0.72±0.09	1.66±0.13cdefghi	WP10-2	0.73±0.06	0.93±0.06	1.28±0.05ghij
WP6-1	0.65±0.08	0.82±0.07	1.26±0.04hij	WP10-3	0.42±0.04	1.05±0.10	2.53±0.11a
WP6-2	0.57±0.04	1.13±0.13	2.00±0.19bc	WP10-4	0.52±0.04	0.73±0.06	1.42±0.01fghij

WP为解无机磷细菌，WP后的数字1~10为表1中采集地的编号。同列中不同字母表示在P<0.05的水平上差异显著，下同。

WP refers to inorganic phosphate-solubilizing bacteria, and the numbers 1—10 following WP correspond to the site numbers in Table 1. The same applies below. Different letters in the same column indicate significant differences at P<0.05 levels, same as below.

表3 解有机磷细菌的解磷圈和菌落及其直径比值 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 3 Phosphate solubilization halo, colony and their diameter ratio of organic phosphate-solubilizing bacteria

($\bar{x} \pm s, n = 3$)

菌株	菌落直径/cm	解磷圈直径/cm	可溶性指数	菌株	菌落直径/cm	解磷圈直径/cm	可溶性指数
YP1-1	0.26±0.02	0.83±0.03	3.19±0.30cdefgh	YP5-1	0.54±0.03	1.30±0.03	2.41±0.10ihijkl
YP1-2	0.21±0.03	0.77±0.08	3.79±0.17cdefgh	YP6-1	0.37±0.04	1.07±0.04	2.96±0.22defghij
YP1-3	0.35±0.06	1.04±0.10	3.01±0.23defghij	YP6-2	0.48±0.04	0.90±0.03	1.89±0.18klmn
YP1-4	0.19±0.02	0.73±0.07	3.87±0.59abc	YP6-3	1.22±0.02	2.38±0.04	1.96±0.06klmn
YP1-5	0.39±0.04	1.23±0.06	3.18±0.16cdefgh	YP7-1	0.50±0.03	1.37±0.42	2.66±0.67ghijk
YP1-6	0.95±0.06	2.53±0.04	2.68±0.13fghijk	YP7-2	0.57±0.05	0.81±0.03	1.42±0.12mn
YP1-7	0.27±0.04	0.64±0.12	2.30±0.13ijkl	YP7-3	0.55±0.05	0.77±0.04	1.40±0.05mn
YP2-1	0.26±0.01	1.21±0.02	4.66±0.10a	YP8-1	0.36±0.02	0.79±0.07	2.22±0.19jklm
YP2-2	0.31±0.02	1.24±0.02	4.04±0.23ab	YP8-2	0.41±0.03	1.34±0.08	3.31±0.10bcdefg
YP3-1	0.63±0.07	2.32±0.14	3.72±0.25bcde	YP8-3	0.38±0.02	1.22±0.06	3.22±0.04bcdefgh
YP4-1	0.55±0.04	0.78±0.02	1.44±0.09mn	YP8-4	0.43±0.05	1.47±0.09	3.44±0.28bcdefg
YP4-2	1.07±0.07	2.62±0.07	2.47±0.10hijkl	YP9-1	1.28±0.02	1.50±0.05	1.17±0.03n
YP4-3	0.30±0.03	1.04±0.05	3.50±0.17bcdef	YP9-2	0.26±0.03	0.81±0.10	3.13±0.06cdefghi
YP4-4	0.47±0.04	1.36±0.05	2.95±0.35efghij	YP9-3	1.24±0.03	2.14±0.05	1.72±0.01lmn
YP4-5	0.30±0.03	1.10±0.08	3.65±0.18bcde	YP10-1	1.43±0.04	1.85±0.03	1.29±0.04n
YP4-6	0.31±0.06	1.12±0.15	3.74±0.26bcde				

YP 为解有机磷细菌, YP 后的数字 1~10 为表 1 中采集地的编号。

YP refers to organic phosphate-solubilizing bacteria, and the numbers 1—10 following WP correspond to the site numbers in Table 1

3.3 解磷细菌解磷能力定量分析结果

以液体培养基中实际增磷量的多少作为解磷能力的定量依据, 通过钼锑抗比色法, 得到解磷细菌定量的解磷情况如表 4、5 所示。如表 4 所示, 42 株解无机磷细菌的解磷能力不一, 分离自同一产地的菌株也不例外, 其解磷能力各有差异。其中菌株 WP2-2 的解磷能力最强, 溶磷量为 244.99 mg/L, 增磷量为 231.30 mg/L, 菌株 WP7-2 的解磷能力次之, 溶磷量为 224.74 mg/L, 增磷量为 211.05 mg/L。分离自野生样品根际土壤的解无机磷菌株, 有效增磷量在 56.93~151.20 mg/L, 分离自其他栽培产地的菌株, 增磷量在 9.52~231.30 mg/L。解磷菌株对无机磷矿化的过程伴随着酸性物质的产生, 所以会造成发酵上清液 pH 的降低, 与不接菌的空白对照相比, 各菌株发酵上清液的 pH 均有不同程度的降低。但 pH 的降低程度与增磷量的多少并无明显的数量关系, 就如菌株 WP2-2, 增磷量最高, 但发酵上清液的 pH 并非最低, 菌株 WP4-2 的增磷量最低, 但其发酵上清液的 pH 非最高。

菌株解有机磷能力定量测定结果如表 5 所示, 相同实验条件下, 菌株 YP3-1 表现出的解磷能力最强, 液体培养基中溶磷量达到 34.70 mg/L, 增磷量为 28.57 mg/L。其次是菌株 YP5-1, 其溶磷量为 28.43 mg/L, 增磷量为 22.30 mg/L。溶磷量的增加伴随着 pH 值的降低, 然而, 经过比对发现, 发酵上清液 pH 的降低与溶磷量的增加之间并没有明确的定量关系, 即使是分离自同一产地根际土壤的各菌株, 解

磷能力也不尽相同。

3.4 解磷细菌的鉴定

解无机磷细菌菌株的生理生化鉴别情况见图 3, 对 42 株解无机磷菌株进行了多项生理生化实验, 其中包括革兰染色、接触酶、淀粉水解、柠檬酸反应以及明胶反应等。革兰染色结果表明, 42 株解无机磷细菌中, 有 23 株为革兰阳性菌, 19 株为革兰阴性菌。菌株的接触酶反应均为阳性, 吡啉反应均为阴性。

解有机磷细菌菌株的生理生化鉴别情况见图 4, 对筛选得到的 31 株解有机磷菌株进行接触酶、淀粉水解反应、硝酸还原反应、革兰氏染色等 12 项生理生化测定, 其中 31 株菌接触酶反应皆为阳性, 吡啉反应皆为阴性, 有 8 株菌的淀粉水解反应为阳性, 其余为阴性, 15 株菌的硝酸反应为阴性, 大部分菌株蔗糖、葡萄糖发酵呈阳性。菌株 YP1-1、YP3-1、YP5-1、YP6-1、YP7-2、YP9-3、YP10-1 是革兰阳性菌, 其余是革兰阴性菌。

解无机磷细菌系统发育树的构建情况见图 5。结果显示, 42 株解无机磷细菌菌株分别属于芽胞杆菌属 *Bacillus*、肠杆菌属 *Enterobacter*、沙雷氏菌属 *Serratia*、泛菌属 *Pantoea* 以及不动杆菌属 *Acinetobacter*。WP9-4、WP8-4、WP9-5、WP1-5、WP5-1、WP9-8、WP7-2、WP2-1、WP9-7、WP9-1、WP6-1、WP3-1 为蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*; WP9-3、WP8-5、WP4-1 属于巨大芽胞杆菌 *B. megaterium*; WP9-6、WP1-1、WP4-3、WP4-4、WP10-3, 为路

表4 解无机磷细菌的溶磷量、增磷量以及上清液 pH ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 4 Phosphorus solubilization capacity, phosphorus increment and supernatant pH of inorganic phosphate-solubilizing bacteria ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

菌株	溶磷量/(mg·L ⁻¹)	增磷量/(mg·L ⁻¹)	pH	菌株	溶磷量/(mg·L ⁻¹)	增磷量/(mg·L ⁻¹)	pH
WP1-1	91.32±3.13	77.63±3.13no	4.01±0.04rst	WP7-1	034.05±1.51	020.36±1.51st	4.85±0.04h
WP1-2	115.90±1.80	102.21±1.8jkl	4.17±0.03pqr	WP7-2	224.74±8.63	211.05±8.63b	4.31±0.01mnop
WP1-3	70.62±3.82	56.93±3.82q	3.92±0.02stu	WP8-1	056.54±2.59	042.85±2.59r	5.18±0.09g
WP1-4	125.65±2.75	111.96±2.75ij	4.84±0.05h	WP8-2	185.92±1.69	172.23±1.69c	3.69±0.03wx
WP1-5	84.00±1.14	70.31±1.14op	4.47±0.04klm	WP8-3	144.19±1.69	130.50±1.69gh	4.14±0.07qr
WP1-6	114.97±3.95	101.28±3.95jkl	4.62±0.02jk	WP8-4	181.06±3.17	167.37±3.17c	3.82±0.03uvw
WP1-7	101.52±5.03	87.83±5.03mn	4.22±0.03opq	WP8-5	176.13±2.17	162.44±2.17cd	3.63±0.02x
WP1-8	164.89±2.14	151.20±2.14de	4.09±0.01qrs	WP9-1	32.92±1.13	019.23±1.13st	6.25±0.04a
WP2-1	185.36±2.09	171.67±2.09c	4.39±0.01lmn	WP9-2	79.18±2.75	065.49±2.75pq	6.11±0.03ab
WP2-2	244.99±5.66	231.30±5.66a	3.81±0.02uvw	WP9-3	134.59±1.22	120.90±1.22hi	4.32±0.02mnop
WP3-1	160.06±2.88	146.37±2.88ef	3.69±0.01wx	WP9-4	111.05±1.84	097.36±1.84klm	6.02±0.13bcd
WP4-1	39.95±1.04	26.26±1.04s	5.93±0.03cde	WP9-5	120.54±3.53	106.85±3.53jk	4.54±0.07jkl
WP4-2	23.21±1.75	9.52±1.75t	6.10±0.01ab	WP9-6	139.70±1.01	126.01±1.01gh	5.62±0.11f
WP4-3	158.49±5.40	144.80±5.4ef	4.85±0.08h	WP9-7	108.55±1.69	094.86±1.69lm	4.64±0.04ij
WP4-4	39.84±2.41	26.15±2.41s	6.10±0.04abc	WP9-8	73.54±1.02	059.85±1.02pq	5.78±0.04ef
WP4-5	159.32±2.41	145.63±2.41ef	4.35±0.04mno	WP9-9	80.26±3.35	066.57±3.35opq	4.88±0.02h
WP4-6	140.19±4.02	126.50±4.02gh	4.37±0.03lmno	WP9-10	138.55±1.66	124.86±1.66h	4.87±0.03h
WP5-1	184.76±2.28	171.07±2.28c	4.59±0.02jk	WP10-1	52.02±2.02	038.33±2.02r	4.80±0.05hi
WP5-2	106.41±2.96	092.72±2.96lm	5.91±0.07de	WP10-2	58.00±3.61	044.31±3.61r	5.85±0.06de
WP6-1	29.26±1.49	015.57±1.49st	4.24±0.02nopq	WP10-3	150.05±4.52	136.36±4.52fg	3.89±0.03tuv
WP6-2	109.33±4.17	095.64±4.17klm	3.73±0.04vwxy	WP10-4	167.01±1.79	153.32±1.79de	4.11±0.07qr

表5 解有机磷细菌的溶磷量、增磷量及上清液 pH ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 5 Phosphorus solubilization capacity, phosphorus increment and supernatant pH of organic phosphate-solubilizing bacteria ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

菌株	溶磷量/(mg·L ⁻¹)	增磷量/(mg·L ⁻¹)	pH	菌株	溶磷量/(mg·L ⁻¹)	增磷量/(mg·L ⁻¹)	pH
YP1-1	22.26±0.26	16.13±0.26d	3.41±0.10hij	YP5-1	28.43±0.18	22.30±0.18b	4.70±0.04c
YP1-2	08.30±0.34	02.17±0.34klmn	7.04±0.08a	YP6-1	10.02±0.23	3.89±0.23ij	3.35±0.08ij
YP1-3	06.91±0.09	00.78±0.09o	3.48±0.07ghi	YP6-2	7.75±0.37	1.62±0.37lmno	3.93±0.06efg
YP1-4	07.01±0.32	00.88±0.32o	3.85±0.23efghi	YP6-3	13.53±0.25	7.40±0.25h	3.58±0.05ghi
YP1-5	08.53±0.26	02.40±0.26kl	3.81±0.25efghi	YP7-1	16.81±0.17	10.68±0.17f	6.74±0.09a
YP1-6	08.34±0.54	02.21±0.54klm	4.16±0.20def	YP7-2	7.23±0.34	1.10±0.34mno	3.53±0.14ghi
YP1-7	07.17±0.06	01.04±0.06no	3.54±0.04ghi	YP7-3	13.34±0.60	7.21±0.60h	4.53±0.10cd
YP2-1	08.47±0.68	02.34±0.68kl	4.29±0.27cde	YP8-1	17.82±0.17	11.69±0.17f	4.19±0.08def
YP2-2	17.85±0.56	11.72±0.56f	3.40±0.07hij	YP8-2	19.31±0.12	13.18±0.12e	3.47±0.03ghi
YP3-1	34.70±0.34	28.57±0.34a	2.91±0.10j	YP8-3	10.74±0.16	4.61±0.16i	3.60±0.09ghi
YP4-1	27.07±0.25	20.94±0.25c	3.81±0.04efghi	YP8-4	7.82±0.37	1.69±0.37lmno	3.70±0.33fghi
YP4-2	09.80±0.15	03.67±0.15ij	3.64±0.09ghi	YP9-1	9.83±0.27	3.70±0.27ij	3.65±0.22ghi
YP4-3	15.41±0.23	09.28±0.23g	3.74±0.08fghi	YP9-2	9.41±0.10	3.28±0.10jk	3.62±0.08ghi
YP4-4	13.47±0.34	07.34±0.34h	3.51±0.15ghi	YP9-3	8.99±0.29	2.86±0.29jk	3.53±0.13ghi
YP4-5	09.76±0.12	03.63±0.12ij	3.54±0.07ghi	YP10-1	10.02±0.31	3.89±0.31ij	6.18±0.10b
YP4-6	08.56±0.25	02.43±0.25kl	3.90±0.24efgh				

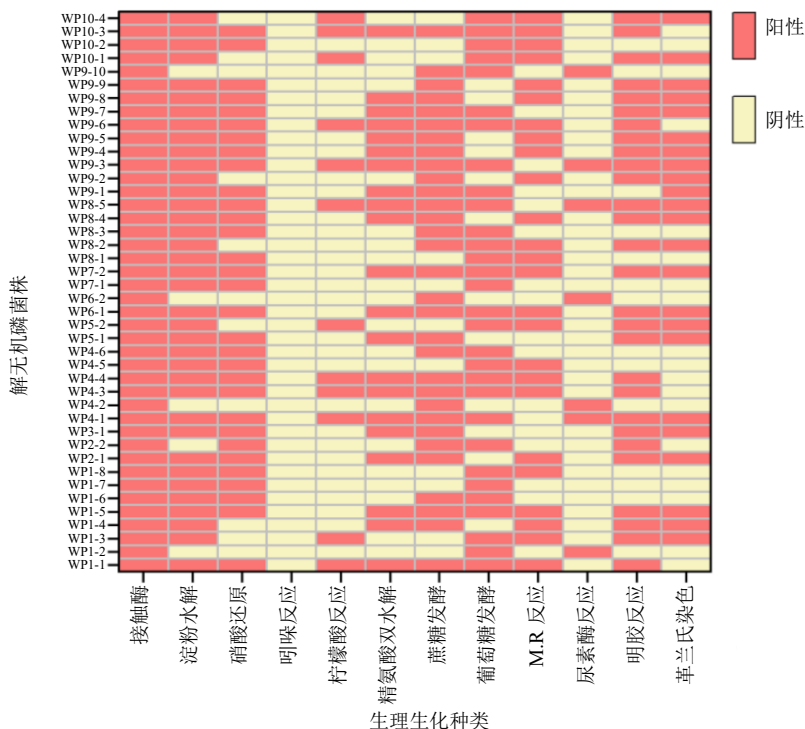


图3 解无机磷细菌的生理生化情况统计热图

Fig. 3 Heatmap of physiological and biochemical characteristics of inorganic phosphate-solubilizing bacteria

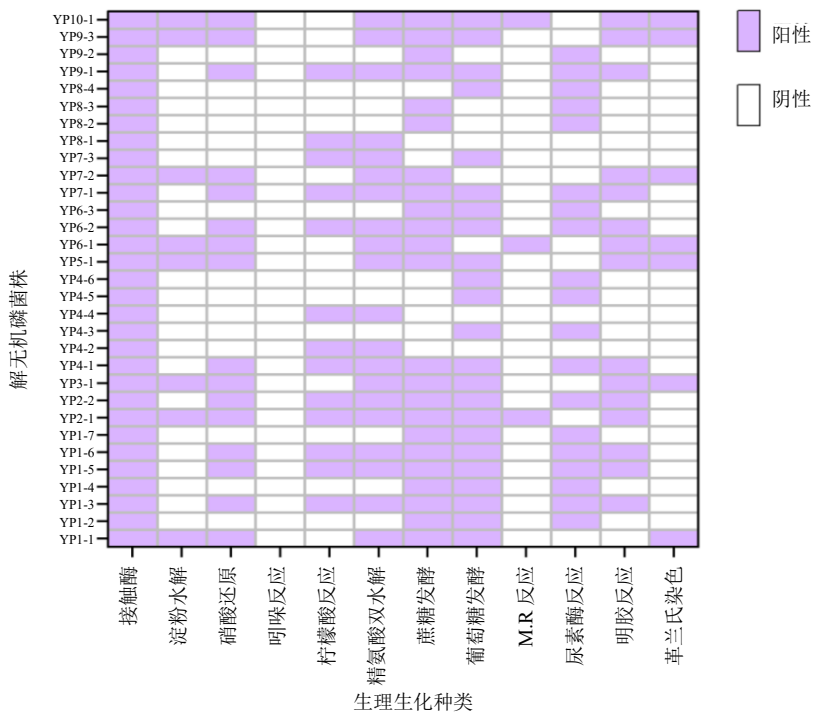


图4 解有机磷细菌的生理生化情况统计热图

Fig. 4 Heatmap of physiological and biochemical characteristics of organic phosphate-solubilizing bacteria

德维希肠杆菌 *Enterobacter ludwigii*; WP2-2 属于普城沙雷氏菌 *S. plymuthica*; WP8-2、WP1-4、WP9-9、WP9-2, 为草状芽孢杆菌 *Bacillus mycoides*; WP10-1、WP10-4、WP5-2、WP1-3 属于阿氏芽孢

杆菌 *B. aryabhatai*; WP8-1、WP10-2、WP7-1、WP1-7、WP1-6、WP4-5、WP4-6、WP8-3、WP1-8, 为成团泛菌 *Pantoea agglomerans*; WP4-2、WP6-2、WP9-10、WP1-2 为醋酸钙不动杆菌 *Acinetobacter*

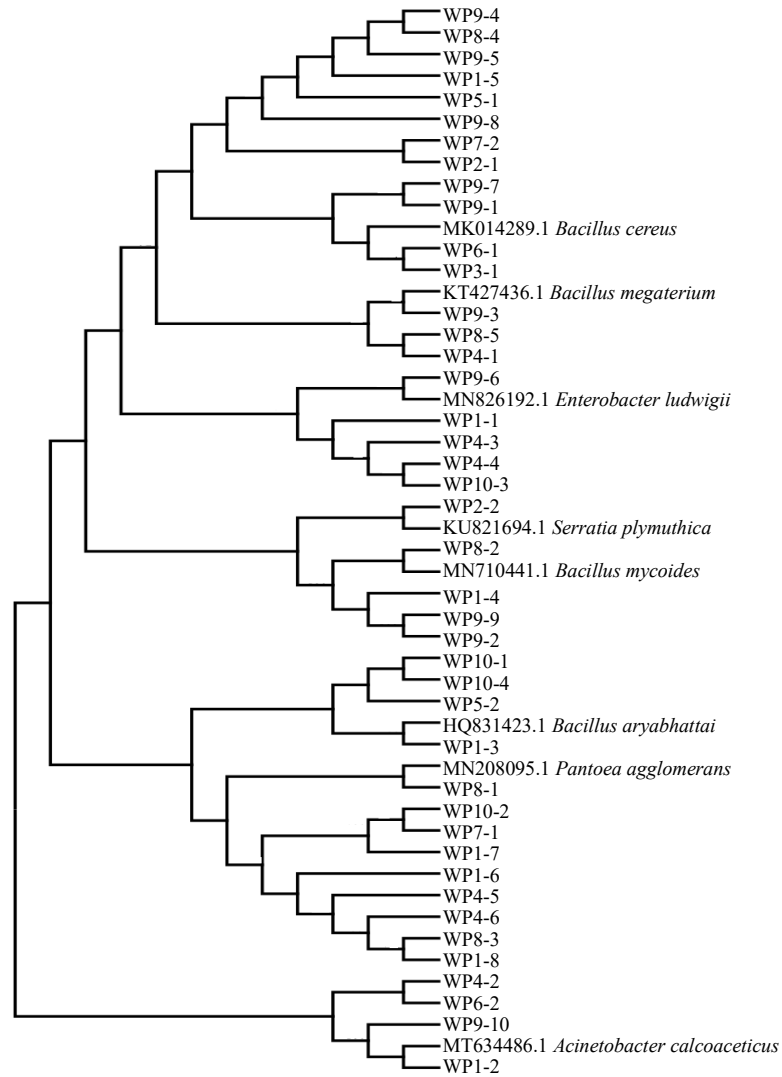


图5 解无机磷菌株的发育树

Fig. 5 Phylogenetic tree of inorganic phosphate-solubilizing bacterial strains

calcoaceticus; 结合对解无机磷菌株解磷能力的测定, 优势菌株 WP2-2 为普城沙雷氏菌 *S. plymuthica*, 优势菌株 WP7-2 为蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*。

解有机磷细菌系统发育树的构建情况如图 6, YP7-1、YP4-1、YP9-1、YP1-3、YP6-2、YP2-2、YP1-5、YP1-6 属于洋葱伯克霍尔德氏菌 *Burkholderia cepacia*; YP5-1、YP3-1、YP10-1、YP7-2、YP6-1、YP9-3 属于蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*; YP2-1 为阿氏肠杆菌 *Enterobacter asburiae*; YP4-2、YP8-1、YP4-4、YP7-3 为皮特不动杆菌 *A. pittii*; YP1-1 为苏云金芽孢杆菌 *B. thuringiensis*; YP4-6、YP9-2、YP4-5、YP8-2、YP1-2、YP1-7、YP6-3、YP1-4、YP8-3、YP8-4、YP4-3 为醋酸钙不动杆菌 *A. calcoaceticus*。31 株

解有机磷细菌可以归属到 4 个不同的属, 分别是伯克霍尔德氏菌属 *Burkholderia*、芽孢杆菌属 *Bacillus*、肠杆菌属 *Enterobacter*、不动杆菌属 *Acinetobacter*; 结合上述对菌株解有机磷能力的测定, YP3-1、YP5-1, 这 2 株优势菌株皆为蜡状芽孢杆菌 *B. cereus*。

3.5 解磷细菌对不同磷源的解磷能力分析

如图 7 所示, 筛选出的 2 株解无机磷细菌 (WP2-2 和 WP7-2) 对除磷酸三钙以外的 4 种磷源的溶解能力总体表现为铁磷 > 磷灰石 > 磷酸铝 > 磷酸锌, 就具体某种磷源来说, WP2-2 对铁磷和磷酸锌的溶解能力强于 WP7-2, 在磷灰石中, WP7-2 的能力强于 WP2-2, 2 株菌在磷酸铝中的表现能力相似。同时, 菌株的解磷过程还伴随着液体培养基 pH 的变化, 磷源不同, pH 变化情况也不同。

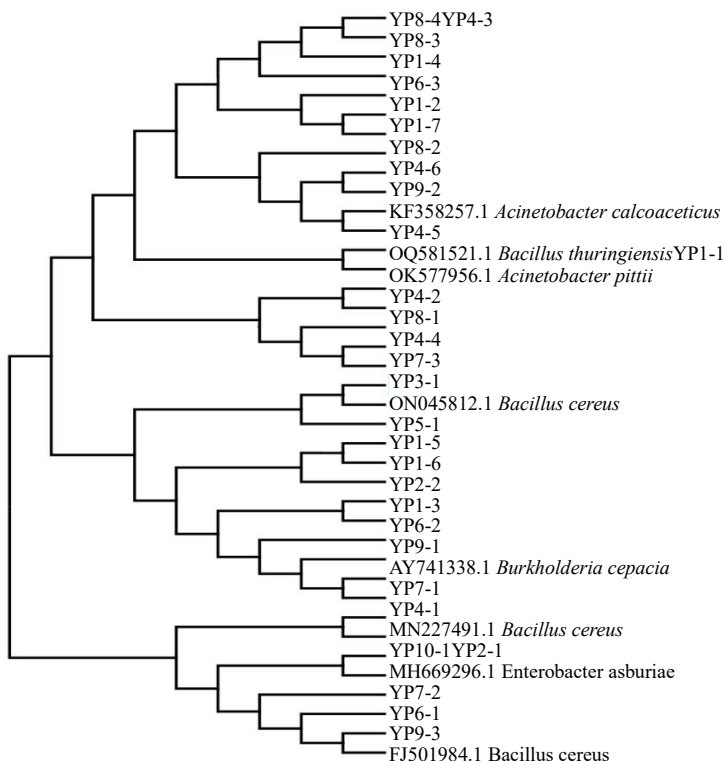


图 6 解有机磷菌株的发育树

Fig. 6 Phylogenetic tree of organic phosphate-solubilizing bacterial strains

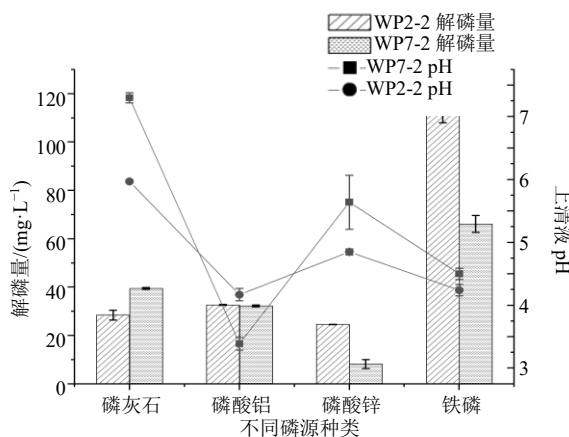
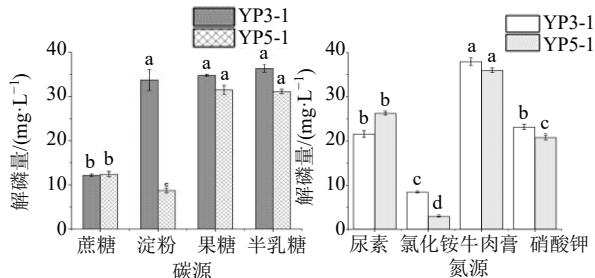


图 7 解无机磷细菌对不同磷源的溶解能力

Fig. 7 Solubility ability of inorganic phosphate-solubilizing bacteria to different phosphorus sources

如图 8 所示,筛选出的 2 株解有机磷细菌(YP3-1 和 YP5-1)在不同氮源、碳源环境下对卵磷脂的溶解能力不同。在以牛肉膏为氮源时,2 株菌皆具有较好的解磷能力,使用尿素和硝酸钾为氮源时,2 株菌的解磷能力差别不大,使用氯化铵的效果最差。在使用不同碳源时,2 株菌的表现也存在差异,在果糖、半乳糖条件下,2 株菌的表现能力较好,



不同字母表示差异显著 $P < 0.05$ 。

Different letters indicate significant differences $P < 0.05$.

图 8 解有机磷细菌在不同碳源、氮源条件下的解磷能力
Fig. 8 Phosphorus solubilization ability of organic phosphate-solubilizing bacteria under different carbon and nitrogen sources

在淀粉条件下菌株 YP3-1 的表现能力较好。在使用蔗糖为碳源时,对 2 株菌的能力影响不大,2 株菌表现出的溶磷能力相似。

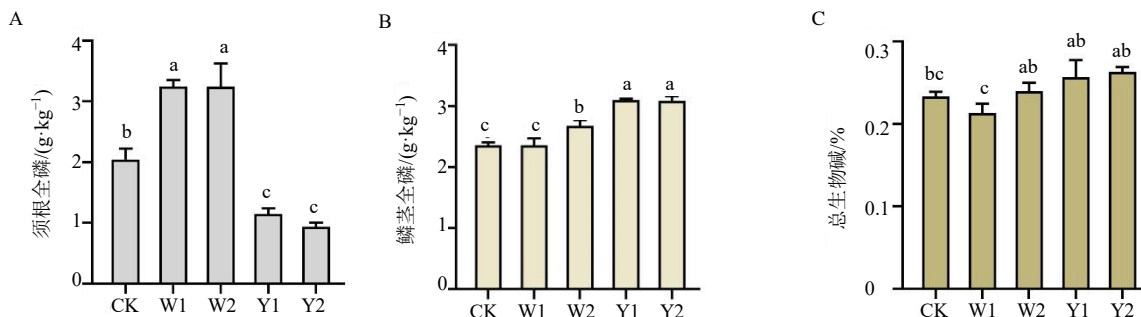
3.6 接种效应研究

综合 2 次筛选结果,将能力最优的 2 株解无机磷细菌编号为 W1、W2,2 株能力最优的解有机磷细菌编号为 Y1 和 Y2。接种解磷细菌后太白贝母植物的株高、茎粗、叶厚、叶片数皆优

于对照组, 接菌后土壤肥力也得到了提升, W1、W2、Y1、Y2 根际土壤中速效磷的含量为 67.98~85.80 mg/kg, 分别是 CK 的 1.19、1.44、1.43、1.50 倍。

对接菌处理后太白贝母须根全磷含量、鳞茎全磷含量, 鳞茎总生物碱含量进行了测定, 结果如图 9 所示。W1、W2 的须根全磷质量分数明显高于 CK

组。接种解无机磷细菌 *B. cereus* (W1) 对鳞茎全磷含量的影响不大, W2、Y1、Y2 组的鳞茎全磷含量皆高于 CK 组。CK 组和接菌组的总生物碱百分含量在 0.22%~0.26%, 皆大于《中国药典》2025 年版规定的 0.05%。从含量柱状图 (图 9-C) 中可以观察到, W1 组的总生物碱含量低于 CK 组, W2 与 CK 区别不大, Y1 和 Y2 组的总生物碱含量高于 CK 组。



不同字母表示差异显著 $P < 0.05$ 。

Different letters indicate significant differences $P < 0.05$.

图 9 须根全磷 (A)、鳞茎全磷 (B)、鳞茎总生物碱 (C) 含量

Fig. 9 Total phosphorus in roots (A), total phosphorus in bulbs (B), total alkaloid content in bulbs (C)

4 讨论

本研究通过对 10 个不同产地太白贝母根际土壤解磷细菌的筛选和鉴定, 获得了 42 株具有解无机磷能力的细菌。这些细菌分属于芽孢杆菌属、肠杆菌属、泛菌属、不动杆菌属和沙雷氏菌属这 5 个属。结合产地分析, 经鉴定得到解无机磷细菌最多的 3 个产地分别是, 陕西省太白县 10 株、重庆市巫溪县 (野生) 8 株、重庆市巫溪县兰英乡 6 株。其中高效解无机磷菌株 WP2-2 (*S. plymuthica*) 分离自四川省广元市的土壤样品、WP7-2 (*B. cereus*) 分离自湖北省恩施州的土样。通过分离和鉴定 10 个根际土壤样品, 得到了 31 株解有机磷细菌。其中伯克霍尔德氏菌属有 8 株、芽孢杆菌属有 7 株、肠杆菌属有 1 株、不动杆菌属 15 株。鉴定得到解有机磷菌株最多的前 3 个产地分别是重庆市巫溪县 (野生) 7 株、巫溪县兰英乡 6 株、奉节县 4 株。其中优势菌株 YP3-1 (*B. cereus*) 分离于云南省宁蒗县、YP5-1 (*B. cereus*) 分离于重庆市城口县, 由此可见, 即使相同菌株都分离自太白贝母的根际土壤, 但因生长环境不一, 可分离、鉴定的解磷细菌的解磷能力也有差异。

在解磷细菌的分布方面, 解磷细菌的分布受土壤性质的影响较大, 与土壤有机物质含量、pH、植

物类型、轮作方式等因素紧密相关。在林启美等^[20]的研究中, 农田、林地、草地和菜地这 4 种生态系统, 解有机磷细菌主要是以芽孢杆菌属 *Bacillus*、假单胞菌属 *Pseudomonas*、固氮菌属 *Azotobacter* 为主, 而解无机磷细菌的种属优势在这 4 种生态系统中表现不统一。吴凡等^[21]从桑树根际土壤鉴定得到 19 株解磷细菌, 分属于假单胞菌属 *Pseudomonas*、贪噬菌属 *Variovorax*、和根瘤菌属 *Rhizobium*。朱德旋等^[22]从北方寒地种植的不同农作物根际土壤中分离出 26 株解磷细菌, 筛选后得到一株高效解无机磷细菌, 属于伯克霍尔德菌属 *Burkholderia*。郭艺鹏等^[23]从新疆红枣根际土壤中筛选、鉴定出了 4 个属的解磷细菌, 分别是芽孢杆菌属 *Bacillus*、不动杆菌属 *Acinetobacter*、假单胞菌属 *Pseudomonas*、肠杆菌属 *Enterobacter*。

解磷细菌的解磷能力受到多种因素的影响, 其中菌株种类与磷源的影响较大。李宁等^[24]以磷酸铝、磷酸铁、植酸钙和卵磷脂替代磷酸钙作为磷源, 测定 2 个菌株的能力, 发现菌株对不同磷源的活化情况不同, 各有优势。韩雪娇^[13]研究 21 株解无机磷细菌的溶磷能力, 发现其对磷酸钙的溶解能力均高于对磷酸铝和磷酸铁的溶解能力。陈倩颖等^[25]研究菌株在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 KNO_3 、 NH_4NO_3 、尿素和 KNO_2

这5种氮源条件下的溶磷能力,发现以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为氮源时,菌株显示出最强的解磷能力。这一研究结果与杨慧等^[26]的研究结果一致。本研究筛选出的2株解无机磷细菌对除磷酸三钙的其他不同磷源的溶解能力也存在差异,整体表现为,无机铁磷>磷灰石>磷酸铝>磷酸锌,并且磷源不同,培养液体pH的变化也不同。在对2株解有机磷细菌的研究中,改变氮源、碳源时,会明显影响菌株对卵磷脂的利用能力。在以牛肉膏为氮源,果糖和半乳糖为碳源时,2株解有机磷菌株表现出的能力较好。不同的菌株对同种磷源,或者是同种菌株面对不同磷源,表现出的解磷能力都不一样。在不同碳源、氮源条件下,溶磷情况也不一样,培养过程中pH的变化也不一样,这可能与解磷细菌的不同解磷机制有关^[27]。

解磷细菌作为一种常见的根际促生菌,能够有效促进土壤难溶性磷向有效磷的转变,从而促进植物的生长和品质的提升。李卓蔚等^[28]研究表明,接种解有机磷菌能够有效提高滇重楼根际土壤速效磷含量,并增加重楼皂苷含量。在赵晶晶等^[29]的研究中,接种解磷细菌可以显著提高滇重楼各部位磷含量及叶片保护酶活性,从而提高滇重楼的品质和药用价值。在张建海等^[30]的研究中,接种丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌对太白贝母的生物量有显著提高作用,同时提高了太白贝母有效成分含量。植物-微生物相互作用可以诱导或增强次生代谢物的产生,包括酚类、生物碱、萜类化合物和植物激素。微生物不仅可以激活特定的代谢途径,还可以共享生物合成途径或充当诱导剂,这有助于生态系统恢复活力和生物技术创新^[31]。本研究中解磷细菌的施加在一定程度上影响了太白贝母有效成分的含量,为后续需解磷细菌与有效成分相关基因调控之间的研究提供了理论基础。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 秦利均, 杨永柱, 杨星勇. 土壤溶磷微生物溶磷、解磷机制研究进展 [J]. 生命科学研究, 2019, 23(1): 59-64.
- [2] Rodríguez H, Fraga R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion [J]. *Biotechnol Adv*, 1999, 17(4/5): 319-339.
- [3] Hariprasad P, Niranjana S R. Isolation and characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria to improve plant health of tomato [J]. *Plant Soil*, 2009, 316(1): 13-24.
- [4] 邢芳芳, 高明夫, 糕优优, 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(S1): 252-257.
- [5] 李美. 溶磷菌筛选及对小麦、玉米促生长作用研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [6] 何建清, 张格杰, 赵伟进, 等. 青稞根际解有机磷细菌的筛选及对青稞种子萌发和幼苗的促生效应 [J]. 高原农业, 2018, 2(6): 601-606.
- [7] 宋娟, 徐国芳, 赵邢, 等. 枫香根际解有机磷细菌筛选及其促生效应 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(3): 95-104.
- [8] 朱芙蓉, 杜慧慧, 周浓, 等. 滇重楼根际土壤解无机磷细菌的分离与鉴定 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 155-162.
- [9] 杜慧慧, 朱芙蓉, 杨敏, 等. 不同生境滇重楼根际解磷菌的筛选与鉴定 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(4): 915-922.
- [10] 乔志伟, 洪坚平, 方翌, 等. 溶磷细菌对复垦土壤有效磷及各形态无机磷含量的影响 [J]. 河南农业科学, 2017, 46(9): 50-55.
- [11] 蔺宝璐, 杨文权, 赵帅, 等. 高寒草甸植物根际溶磷菌的筛选鉴定及其溶磷与促生效果 [J]. 草地学报, 2022, 30(11): 3132-3139.
- [12] 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: 374-390.
- [13] 韩雪娇. 杨树根际土壤解磷细菌的筛选、解磷特性及其油菜促生效应研究 [D]. 淮阴: 淮阴工学院, 2020.
- [14] 李豆豆, 尚双华, 韩巍, 等. 一株高效解磷真菌菌株的筛选鉴定及解磷特性 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2384-2392.
- [15] 骆韵涵, 柯志滨, 钟超, 等. 红树林土壤解磷菌的分离鉴定及解磷特性 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2664-2673.
- [16] 晋婷婷, 任嘉红, 刘瑞祥. 南方红豆杉根际解有机磷细菌的鉴定及其解磷特性和促生作用研究 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(9): 1819-1827.
- [17] 曹冠华, 张雪, 马诗婷, 等. 阳春砂仁根内生真菌解磷功能评价及分类学鉴定 [J]. 中草药, 2020, 51(5): 1316-1323.
- [18] Shi Z F, Pan F M, Kong X T, et al. Effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria on the physiology, biochemistry, and expression of genes related to the protective enzyme system of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. *Phyton*, 2024, 93(2): 247-260.
- [19] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 38.
- [20] 林启美, 赵小蓉, 孙焱鑫, 等. 四种不同生态系统的土壤解磷细菌数量及种群分布 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 34-37.
- [21] 吴凡, 崔萍, 夏尚远, 等. 桑树根际解磷细菌的分离鉴

- 定及解磷能力测定 [J]. 蚕业科学, 2007, 33(4): 521-527.
- [22] 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.
- [23] 郭艺鹏, 王海儒, 孙林琦, 等. 枣根际解磷细菌的分离筛选及 16S rDNA 鉴定 [J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(6): 811-816.
- [24] 李宁, 王珊珊, 马丽丽, 等. 两株高效溶磷菌的溶磷能力及其对玉米生长和红壤磷素形态的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 275-283.
- [25] 陈倩颖. 解有机磷细菌的分离鉴定及其解磷特性研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2009.
- [26] 杨慧, 范丙全, 龚明波, 等. 一株新的溶磷草生欧文氏菌的分离、鉴定及其溶磷效果的初步研究 [J]. 微生物学报, 2008, 48(1): 51-56.
- [27] Halder A K, Chakrabartty P K. Solubilization of inorganic phosphate by *Rhizobium* [J]. *Folia Microbiol*, 1993, 38(4): 325-330.
- [28] 李卓蔚, 郎佳琪, 孟琦, 等. 接种解有机磷细菌对滇重楼品质及土壤肥力的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(16): 156-164.
- [29] 赵晶晶, 郭冬琴, 杨敏, 等. 不同剂量解磷菌对滇重楼生长发育的影响 [J]. 环境化学, 2022, 41(2): 761-769.
- [30] 张建海, 冯彬彬, 吴翠色. 丛枝菌根真菌对太白贝母生长及质量标志物的影响 [J]. 中国中医药信息杂志, 2020, 27(7): 88-93.
- [31] Araque Gelves D I, Andreoli de Souza G C, Salvador M J, et al. Impact of plant-microorganism interaction: A key driver for the production of bioactive metabolites of interest in the pharmaceutical, agricultural, cosmetic, and food industries [J]. *J Plant Growth Regul*, 2025: 236-250.

[责任编辑 时圣明]