

解磷菌对土壤有效磷影响及机制研究

张庆格¹, 徐乐言¹, 张奇², 宋菲菲², 王献鑫¹, 刘丛丛¹, 徐爱玲^{1,*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛洁宝生态科技有限公司, 青岛 266525)

摘要: 土壤中有效磷含量的不足是制约土壤肥力的主要因素, 将土壤中的无效磷转化为有效磷是提高土壤肥力的重要途径。将解磷菌以不同剂量加入到土壤中, 通过研究土壤 pH、磷酸酶活性、有效磷含量变化以及磷素组分转化情况确定解磷效果。在解磷菌的处理下, 土壤的 pH 均有所降低, 磷酸酶活性和有效磷含量显著提高, 磷素组分向有利于植物吸收的方向转化。土壤最显著处理组提高磷酸酶活性 64.39%; 提高有效磷含量 79.55%; 活跃态磷组分 H_2O-P 增加了 11.79 mg/kg, $NaHCO_3-Pi$ 增加了 12.41 mg/kg, $NaHCO_3-Po$ 增加了 9.57 mg/kg; 低活跃态磷组分 C. HCL 降低了 18.34 mg/kg, 残留态磷降低了 24.95 mg/kg。该解磷菌有良好的解磷能力, 为提高土壤肥力提供了理论依据。

关键词: 解磷菌; 复合菌剂; 土壤理化性质; 酶活性; 磷素

中图分类号: X172 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2025)05-0082-07

Effect of phosphorus solubilizing bacteria on effective phosphorus in soil and its mechanism

ZHANG Qingge¹, XU Leyan¹, ZHANG Qi², SONG Feifei²,
WANG Xianxin¹, LIU Congcong¹, XU Ailing^{1,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Qingdao Jiebao Ecological Technology Co., Ltd., Qingdao 266525, China)

Abstract: Insufficient effective phosphorus in the soil is the main factor limiting soil fertility, and converting ineffective phosphorus into effective phosphorus in the soil is an important way to improve soil fertility. The phosphorus solubilizing bacteria were added to the soil at different doses and the effect of phosphate solubilization was determined by studying the changes in soil pH, phosphatase activity and effective phosphorus content and the transformation of phosphorus components. Under the treatment of phosphorus solubilizing bacteria, the soil pH was reduced, the phosphatase activity and effective phosphorus content are significantly increased, and the phosphorus components are transformed to a direction favorable to plant uptake. The phosphatase activity of the most significant soil treatment group was increased by 64.39%, and the effective phosphorus content was increased by 79.55%. The active phosphorus components, H_2O-P , were increased by 11.79 mg/kg, $NaHCO_3-Pi$ by

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MC193)

作者简介: 张庆格(1998—), 男, 河北邢台人。硕士, 研究方向为环境微生物。E-mail: 1215155937@qq.com。

* 通信作者: 徐爱玲(1982—), 女, 山东德州人。博士, 教授, 主要从事污水处理生物技术、环境微生物制剂、环境生物技术等方面的研究。E-mail: xalcsu@sina.com。

12.41 mg/kg, and $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ by 9.57 mg/kg. The low active phosphorus fraction C. HCL was reduced by 18.34 mg/kg and the residual phosphorus was reduced by 24.95 mg/kg. This phosphorus solubilizing bacteria has a good phosphorus solubilizing ability, which provides a theoretical basis for improving soil fertility.

Key words: phosphorus solubilizing bacteria; compound microorganism; soil physical and chemical properties; enzyme activity; phosphorus

磷占地球岩石圈的 0.7%, 是第 11 丰富的元素, 但磷却是仅次于氮的最重要的关键元素, 植物的生长所必须的无机元素中, 磷是不可或缺的一部分, 在作物的生长过程中不仅限于激活根际初期的生长, 还可以提高植物对抗外界环境变化的能力^[1]。它参与了植物的能量转化、呼吸作用、DNA 和 RNA 的合成等基本代谢过程。磷还是 ATP(细胞内能量的主要供应者)和 DNA 分子的组成成分, 对于植物细胞的正常功能发挥着至关重要的作用。它可以增强植物的抗逆性, 使植物更好地适应不良环境, 提高光合作用的效率, 促进叶片叶绿素的合成, 增加光能的吸收和利用, 促进植物的生长发育和作物的成熟^[2], 此外, 磷还可以促进根系的生长, 增加根毛的数量和长度^[3], 提高植物对土壤中磷的吸收能力, 从而显著提高经济作物的产量, 并提升产品的品质。

虽然整体来讲我国土壤储磷量丰富, 但是能被植物直接利用的磷却少之又少。如北方石灰性土壤全磷含量很高, 但是只有不足 5% 的磷是以能被植物吸收利用的形态存在于土壤中。我国目前用施加磷肥的方法来增加土壤中的有效磷以提高农作物的产量, 然而土壤中施加的磷元素超过 70% 会与 Ca^{2+} 、 Al^3 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 等离子结合, 形成不溶性磷化合物, 从而难以被植物吸收利用^[4]。有效磷在土壤中的含量不仅会受到磷的矿化和固定化过程的影响, 还会受到与土壤表面吸附、解析、溶解和沉淀作用的影响。研究表明, 土壤中存在一些微生物, 它们不仅能够促进氮循环, 更是在土壤磷循环中起着至关重要的作用, 称之为解磷微生物。它们可以将土壤中一些植物无法吸收的磷酸盐转化为可利用形态, 参与了土壤磷循环的关键过程, 如无机磷的溶解、有机磷的矿化和固定化。其中众多菌株在激活土壤中不溶性磷、提高作物产量方面表现出显著的效果^[5], 而有些菌株甚至已经实现商品化生产^[6]。

吕俊等^[7]从马尾松根际土中分离出一株具有溶磷能力的菌株 WJ2, 鉴定为伯克霍尔德氏菌属, 其溶磷量达 244.13 mg/L, 该菌株对提高土壤有效磷含量和促进马尾松幼苗生长的效果显著。魏畅等^[8]从砂质潮土中分离筛选出一株高效溶磷菌 W6, 鉴定为弯曲芽孢杆菌, W6 菌株展示出在促进磷素形态从难溶性向有效性转变方面的卓越能力, 可显著促进小麦根际的生长与发育。目前研究多集中在单一菌株对土壤中有效磷含量以及磷素转化情况的影响, 而复合菌剂对土壤理化性质以及有效磷含量的影响研究较少。因此, 本研究通过前期从土壤中分离筛选出有解磷功能的菌株, 制成复合菌剂后, 以不同剂量加入到土壤中, 并对菌剂的溶磷效果和溶磷特性进行研究, 开发一种具有经济效益、高效且环境友好型的解磷菌肥, 给绿色农业的发展提供科学依据。

1 实验材料与方方法

1.1 材料

1.1.1 土壤来源

分离筛选解磷菌的土壤为林地土, 砂质土, 来源于青岛理工大学祥园餐厅旁的树林。土培实验土壤选用田园土, 砂质土, 来源于青岛理工大学牡丹园, 田园土土壤的理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤的理化性质

| 土壤类型 | pH | 有机质/(g·kg ⁻¹) | 有效磷/(g·kg ⁻¹) | 速效钾/(g·kg ⁻¹) | 速效氮/(g·kg ⁻¹) | 总磷/(g·kg ⁻¹) | 总氮/(g·kg ⁻¹) |
|------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 田园土 | 6.82 | 1.79 | 5.46 | 128 | 33.4 | 0.38 | 2.81 |

1.1.2 培养基

难溶性无机磷液体培养基: 葡萄糖 5.0 g、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.25 g、NaCl 0.15 g、KCL 0.15 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot$

7H₂O 0.15 g、FeSO₄ 0.015 g、MnSO₄ 0.015 g、磷酸三钙 5 g、蒸馏水 500 mL, pH=7.2~7.5, 121 °C 灭菌 20 min。

在液体培养基中加入琼脂 15~20 g 制成无机磷固体培养基。

1.2 方法

1.2.1 解磷菌株的分离

在青岛理工大学祥园餐厅旁的树林用五点取样法采取深度为 10~15 cm 的根际土壤 5 g 装入保鲜袋中, 将土壤样品混合均匀, 置于 250 mL 三角瓶中, 加入 100 mL 无菌水, 在 30 °C、180 r/min 摇床进行振荡, 振荡后静止 10 min, 取土壤菌悬液 0.1 mL。用无菌水稀释土壤菌悬液, 取合适梯度悬液涂布于固体培养基中, 将恒温生化培养箱设置为 28 °C, 将培养基倒置培养 24~48 h, 挑选出能在固体筛选培养基平板上生长的菌落, 在 LB(肉膏蛋白胨培养基)平板上反复划线纯化后于 4 °C 冷藏。

1.2.2 解磷菌的富集

将 100 mL 无机磷液体培养基加入到 250 mL 锥形瓶中, 用接种环挑取能在固体筛选培养基上生长的菌落, 在恒温摇床培养 2 d(温度 28 °C, 转速 180 r/min), 吸取锥形瓶底部菌液进行转接, 重复多次进行解磷菌的富集。

1.2.3 菌剂的制备

将在固体筛选培养基平板上生长的单菌株进行富集, 取新无机磷液体培养基, 将富集后的菌剂以 1% 的接种量接种其中, 然后在温度为 28 °C, 转速为 180 r/min 摇床培养 7 d, 探究菌剂的解磷效果。

1.2.4 解磷能力测定

本实验采用钼锑抗比色法^[9]进行测定。

1.2.5 菌剂的接种

实验于 2023 年 7 月 1 日—2023 年 8 月 20 日在实验室进行, 采用土培形式, 每盆各加土壤 500 g, 土壤实验设置 5 个处理组, 每个处理组共有 2 个平行组。处理组加入不同剂量的复合菌剂, 复合菌剂浓度为 10⁸ CFU/mL, 各处理组土壤以 T 加上接种复合菌剂的量命名, 即 T1—T5 为田园土接种复合菌剂的量为 1~5 mL, 空白对照组则接种等体积的无菌水。将所有组均放入 28 °C 恒温培养箱进行培养, 每日定期翻土保持土壤疏松, 接种等量去离子水保持土壤湿润, 保证土壤中菌群的正常生长繁殖。

1.2.6 复合菌剂微生物群落结构

将复合菌剂进行离心浓缩得到富集的菌泥, 将菌泥按照 DNA 提取试剂盒的使用说明提取样品 DNA, 利用德国 Implen 公司微量核酸蛋白分析仪(德国 Nanophotometer)检测提取 DNA 质量浓度与纯度。检测合格 DNA 样品保存于-20 °C 下, 并送往上海美吉生物医药科技有限公司使用 Illumina MiSeq 平台进行 16S rDNA 高通量测序。细菌的通用引物序列为: 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'), 扩增 16S rRNA 的 V3—V4 区域。

1.2.7 样品指标测定方法

土壤 pH: 土水质量体积比 1:2.5, 振荡 30 min 后离心, 上清液用 pH 计测定。

碱性磷酸酶活性的测定: 磷酸苯二钠比色法。

土壤有效磷含量的测定: 采用双酸浸提-钼蓝分光光度法测定。

土壤磷素的转化和土壤磷分级: 土壤磷分级参考文献[10-11]进行。

1.3 数据分析

所有试验数据均采用 Excel 2016 和 Origin 2018 软件处理并绘图, 采用 SPSS 17.0 软件对碱性磷酸酶活性以及磷素含量进行单因素方差分析(ANOVA)并进行 LSD 多重比较, 采用 SPSS17.0 对数据进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 菌株的分离与筛选及解磷能力测定

本研究从林地土壤中分离出两株解磷菌, 分别命名为 XY-1 和 XY-2。解磷菌 XY-1 的菌落呈不规则

圆形,菌落不透明呈白色,表面湿润黏稠,边缘不整齐,有微微隆起,有明显的溶磷圈,该单菌株制备的菌剂7 d的溶磷量为156.29 mg/L;解磷菌XY-2的菌落呈不规则圆形,菌落透明,表面湿润黏稠,边缘不整齐,无隆起,无溶磷圈,该单菌株制备的菌剂7 d溶磷量122.76 mg/L;两菌株与富集产物制备的复合菌剂7 d的溶磷量为236.42 mg/L。因复合菌剂的解磷效果最好,所以后续将对复合菌剂进行研究。

2.2 复合菌剂群落组成分析

对复合菌剂进行高通量测序得到群落组成结构,鉴定复合菌剂主要菌种包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)39.11%、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)25.13%、伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)16.09%、*norank_f_Alcaligenaceae*(黏乳产碱杆菌)10.83%、鞘脂单胞菌属(*Sphingomonas*)8.26%以及其他菌属(others)0.58%。

2.3 不同复合菌剂接种量对土壤 pH 的影响

由图1可知,在加入复合菌剂后,土壤的pH值随时间呈先降低再升高的趋势。土壤各处理组与不接种菌空白对照组相比,所有处理组的土壤pH值均降低,在21 d时达到最低,土壤pH由6.84降低至 $(6.65 \pm 0.03) \sim (6.71 \pm 0.02)$,但各处理组之间pH值无显著差异($P > 0.05$)。

2.4 不同复合菌剂接种量对土壤磷酸酶活性的影响

酶活性的高低一定程度上影响并反映着微生物功能的强弱,本次所得到的结果为碱性磷酸酶活性。由图2可以看到土壤在复合菌剂处理下碱性磷酸酶活性均有所增加,且随时间呈上升趋势,随接种量呈先增加后减少的趋势。在7、17与39 d时与对照组相比,各处理组均增加了土壤中碱性磷酸酶的活性,相比对照组提高磷酸酶活性9.8%~64.39%;接种菌剂3 mL处理组效果最显著,相对于对照组增加磷酸酶活性0.85、1.47、1.66 mg/(g·d),且与其他处理组差异显著($P < 0.05$)。

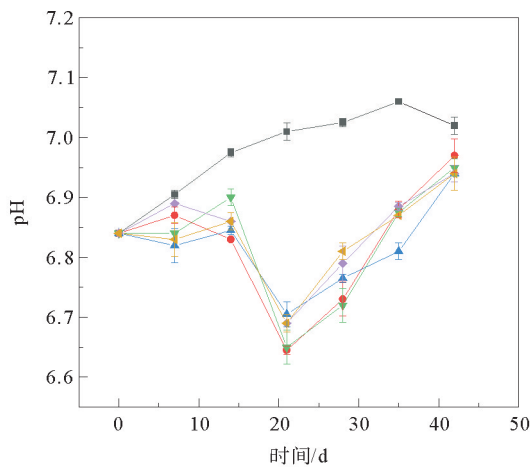


图1 土壤pH的变化趋势

—■— 未接种菌剂; —●— 接种菌剂1 mL; —▲— 接种菌剂2 mL;
—▼— 接种菌剂3 mL; —◆— 接种菌剂4 mL; —◆— 接种菌剂5 mL

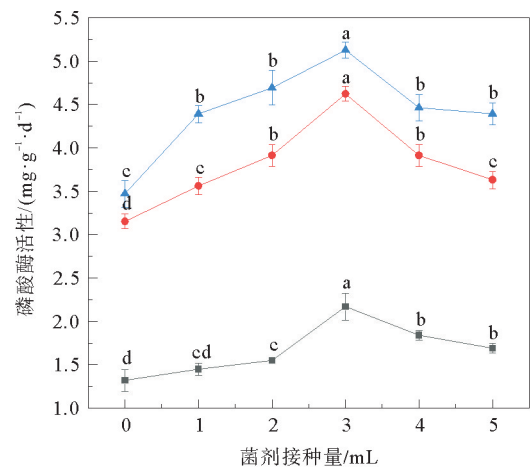


图2 土壤磷酸酶活性变化

a、b、c、d代表不同剂量菌剂接种下有显著差异($P < 0.05$);
—■— 7 d; —●— 17 d; —▲— 39 d

2.5 不同复合菌剂接种量对土壤中有效磷含量的影响

由图3可以看到,在加入复合菌剂后,有效磷的含量随时间呈上升趋势,随接种量呈先增加后减少的趋势,在7、17与39 d时与对照组相比,各处理组土壤中有效磷的含量均增加,相比对照组增加有效磷含量30%~79.55%;其中接种3 mL菌剂处理组对该土壤有效磷含量影响最显著,相对于对照组分别增加有效磷含量7.16、13.15、19.24 mg/kg。

2.6 不同复合菌剂接种量对土壤中磷素组分的转化

由表2可以看到,在加入复合菌剂后,与对照组相比,T1—T5处理组均显著增加了土壤中水提取态磷(H_2O-P)、 $NaHCO_3-P_i$ 、 $NaHCO_3-P_o$ 、 $NaOH-P_i$ 的含量($P < 0.05$),水提取态磷的添加量具体表现为 $T3(11.79 \text{ mg/kg}) > T4(7.67 \text{ mg/kg}) > T2(7.34 \text{ mg/kg}) > T5(6.44 \text{ mg/kg}) > T1(3.64 \text{ mg/kg})$; $NaHCO_3-P_i$ 的添加量具体表现为 $T3(12.41 \text{ mg/kg}) > T2(7.4 \text{ mg/kg}) > T4(6.32 \text{ mg/kg}) > T1(6 \text{ mg/kg}) >$

T5(5.01 mg/kg);NaHCO₃-Po 的添加量具体表现为 T3(9.57 mg/kg)>T4(8.74 mg/kg)>T5(8.19 mg/kg)>T2(6.44 mg/kg)>T1(4.54 mg/kg);NaOH-Pi 的添加量具体表现为 T3(9.69 mg/kg)>T4(8.63 mg/kg)>T2(7.7 mg/kg)>T1(6.24 mg/kg)>T5(4.65 mg/kg)。T3 处理组对这三种形态磷含量影响最显著,相对于对照组水提取态磷(H₂O-P)增加了 11.79 mg/kg、NaHCO₃-Pi 增加了 12.41 mg/kg、NaHCO₃-Po 增加了 9.57 mg/kg、NaOH-Pi 增加了 9.69 mg/kg。对于 NaOH-Po 的含量,各处理组与对照组之间均无显著差异($P>0.05$)。对于低活跃态磷,T1—T5 处理组均显著降低了 C. HCL 和残留态磷的含量($P<0.05$),且处理组之间也有显著差异($P<0.05$)。C. HCL 的减少量具体表现为 T3(18.34 mg/kg)>T4(10.26 mg/kg)>T2(8.62 mg/kg)>T5(6.6 mg/kg)>T1(5.19 mg/kg);残留态磷的减少量具体表现为 T3(24.95 mg/kg)>T4(20.07 mg/kg)>T2(18.87 mg/kg)>T1(16.64 mg/kg)>T5(16.33 mg/kg)。T3 处理组对 C. HCL 和残留态磷的含量降低影响最显著,相对于对照组 C. HCL 降低了 18.34 mg/kg,残留态磷降低了 24.95 mg/kg。

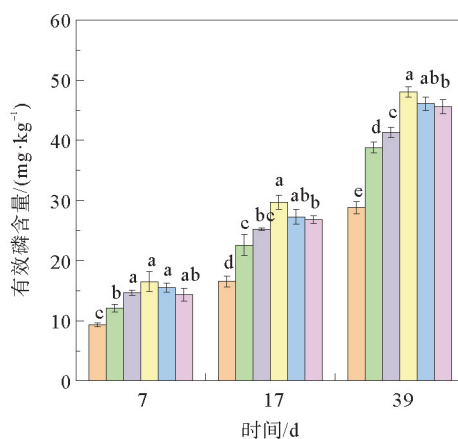


图3 土壤中有有效磷含量变化

a、b、c、d、e代表不同剂量菌剂接种下有显著差异($P<0.05$);

未接种菌剂; 接种菌剂1 mL; 接种菌剂2 mL;
接种菌剂3 mL; 接种菌剂4 mL; 接种菌剂5 mL

表2 接种复合菌剂后田园土中磷素含量

mg/kg

| 土壤 | H ₂ O-P | NaHCO ₃ -Pi | NaHCO ₃ -Po | NaOH-Pi | NaOH-Po | C. HCL | 残留态磷 |
|----|--------------------|------------------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| T0 | 13.47±1.12 d | 18.62±0.95 c | 24.05±0.99 d | 35.22±0.98 d | 47.61±0.83 ab | 151.84±0.82 a | 94.79±0.81 a |
| T1 | 17.11±1.19 c | 24.62±1.32 b | 28.59±0.79 c | 41.46±1.07 bc | 49.02±0.89 a | 146.65±0.58 b | 78.15±0.86 b |
| T2 | 20.81±0.59 b | 26.02±1.09 b | 30.49±0.93bc | 42.92±0.91 ab | 46.22±0.93 b | 143.22±0.76 c | 75.92±0.98 c |
| T3 | 25.26±0.69 a | 31.03±1.07 a | 33.62±1.17 a | 44.91±1.13 a | 47.44±0.59 ab | 133.5±0.59 d | 69.84±0.89 d |
| T4 | 21.14±0.86 b | 24.94±1.29 b | 32.79±1.23 ab | 43.85±0.93 ab | 46.58±0.69 b | 141.58±0.81 c | 74.72±0.92 c |
| T5 | 19.91±0.76 b | 23.63±0.86 b | 32.24±0.42 ab | 39.87±0.96 c | 46.25±0.91 b | 145.24±1.06 b | 78.46±0.64 b |

注:T0 为未加入菌剂的对照组。

3 讨论

本研究前期从林地土壤中分离出具有溶磷能力的菌株并制成复合菌剂,高通量测序测定复合菌剂中主要微生物为假单胞菌属(*Pseudomonas*)和伯克霍尔德里氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)这两类主要微生物包括于目前被证实具有溶磷能力的溶磷细菌种类之中。芽孢杆菌属(*Bacillus*)、伯克霍尔德里氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)等是多年生林木根际土壤中的优势溶磷细菌^[12]。

溶磷菌在生长代谢过程中会分泌有机酸,土壤有机酸的增加会降低土壤的 pH 值,磷酸钙等微溶的矿物磷就会在土壤中被溶解^[13];土壤中一些金属阳离子,如 Fe³⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等会与有机酸进行螯合,有机酸离子通过物理竞争等机制占据与无机磷酸盐(Pi)吸附相同的位点^[14],从而释放了磷酸根离子。假单胞菌属(*Pseudomonas*)、伯克霍尔德里氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)等作为本研究复合菌剂中主要的解磷菌,可以通过分泌有机酸来降低土壤的 pH,促进微溶的矿质磷溶解。薛冬等^[15]研究发现假单胞菌属(*Pseudomonas*)可以分泌葡萄糖酸和草酸,其磷的增容量达到 1313 mg/L,伯克霍尔德里

氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)可以分泌醋酸、柠檬酸、琥珀酸等有机酸,其磷的增容量最高可以达到 499.85 mg/L。假单胞菌属(*Pseudomonas*)还拥有产生质子降低 pH 的途径,从而使磷酸盐溶解,土壤的 pH 改变均与解磷效率存在一定的相关性。

土壤中酶活性的高低能在一定程度上反映土壤的生态状况,土壤酶不仅能提升土壤中的有机质被植物根系吸收的效果,还能使土壤中的一些游离态的营养离子数量增加。本研究结果显示,与对照组相比,加入复合菌剂后土壤中的碱性磷酸酶活性均有不同程度的提高,这与刘赛男等^[16]研究一致。土壤在所测磷酸酶活性中有 2 次增幅,第 2 次的增幅明显要低于第 1 次的,这是由于 Pi 会通过自身浓度高低来调节磷酸酶的产生。当 Pi 处于一个较低的环境中时,由 *PhoB* 构成的 PHO 调节因子会激活与 Pi 信号相关的具有转录功能的操纵子调控元件,于是具有 *phoA* 基因编码的碱性磷酸酶就会大量表达;当 Pi 浓度不断增加后,会抑制碱性磷酸酶的活性^[17]。

作为能被植物直接吸收利用的磷,有效磷的含量直接决定着土壤的肥力情况以及植物的生长情况,溶磷菌能够增加土壤中有效磷含量并提高植物对磷的利用率,促进植物生长。本研究中加入复合菌剂后,各处理组与对照组相比,土壤中的有效磷含量均显著增加,BARRA 等^[18]的研究结果也发现了溶磷细菌在提高有效磷方面扮演着积极的角色;碱性磷酸酶的活性与微生物磷素的充足程度之间存在明显的相关性^[19],张雪梅等^[20]的研究结果表明,解磷菌能够增加有效磷含量的重要因素之一是酶活性的增强,尤其是磷酸酶的活性。在本研究中田园土中的 T3 处理组有效磷含量最高且土壤磷酸酶活性也是最强的,这与之前研究结果相符合。

溶磷微生物具有转化土壤磷组分的能力,激活土壤中的磷素,从而提升土壤的肥力,王文静^[21]从大豆根际土中筛选出解磷菌并将其施入土壤中,使不同形态的有机磷转化成无机磷,从而改变了土壤中磷素的结构。土壤中 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 被视为活跃态磷,植物极易吸收并利用来增加有效磷含量,尤其在极为贫瘠的土壤情况下,有效磷含量很低而 H_2O-P 则会成为土壤有效磷的直接补充源^[22]。本实验土壤在加入复合菌剂后,土壤中各处理组均显著提高了土壤中 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaHCO_3-Po$ 的含量,均显著降低了土壤中 C. HCL 和残留态磷的含量,与魏畅等^[8]的研究结果一致。 $NaHCO_3-Po$ 在微生物磷中扮演着主要的供应来源,又能增加 $NaHCO_3-Pi$ 的含量,土壤活性磷的含量可以利用该复合菌剂分解土壤有机体磷素或通过矿化土壤磷素得到增加。 $NaOH-Pi$ 和 $NaOH-Po$ 极易与 Fe、Al 等氧化物相结合,在土壤中形成难溶性磷酸盐,需经过长期的地球化学作用才能被植物吸收利用^[23]。索炎炎等^[24]的研究发现接种解磷菌后土壤中 $NaOH-Pi$ 的含量均有所增加,这与本研究的结果相似。

在各处理组之间,田园土中 T3 处理组在磷素转化过程中效果最显著,由于土壤中并没有植物可以吸收利用的有效磷,所以在复合菌剂接种量超过最适量后,土壤中的活跃态磷含量也会重新固定于土壤中再次形成中等活跃态的磷,中等活跃态磷也会转化成难以被植物吸收利用的低活跃态磷。

4 结论

1) 该复合菌剂的溶磷量为 236.42 mg/L,假单胞菌属(*Pseudomonas*)、伯克霍尔氏菌属(*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia*)为菌剂中主要溶磷菌种类。

2) 在土壤加入复合菌剂后,土壤的 pH 均有所降低,但各处理组与对照组之间无显著性差异;土壤中各处理组均显著增加了有效磷的含量,提高了磷酸酶的活性;在土壤中磷素的转化中,复合菌剂显著提高了土壤中 H_2O-P 、 $NaHCO_3-Pi$ 、 $NaHCO_3-Po$ 的含量,将土壤中中等活跃的磷转化为活跃态磷,显著降低了 C. HCL 和残留态磷的含量,将低活跃态磷转化为中等活跃态磷,使土壤磷组分向有利于植物吸收利用的方向转化。

3) 在复合菌剂以不同剂量加入到土壤中时,T3 处理组相对于其他处理组效果最显著,土壤 pH 由 6.84 降低至 6.65,提高土壤磷酸酶活性 64.39%,增加有效磷含量 79.55%。

参考文献(References):

[1] 张晗菡,魏清岗,穆春华,等.玉米应答低磷胁迫机制研究进展[J].山东农业科学,2019,51(6):175-180.

- ZHANG Hanhan, WEI Qinggang, MU Chunhua, et al. Advances in research on mechanism of response to low phosphorus stress in maize[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(6): 175-180.
- [2] 朱凤飞. 番茄耐低磷胁迫的转录组分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
ZHU Fengfei. Transcriptome analysis of tomato tolerance to low phosphorus stress[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [3] 昂叶菲, 郭悦, 陈慧颖, 等. 植物磷营养与非生物胁迫的互作机理及其在农业上的潜在应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(12): 2345-2359.
ANG Yefei, GUO Yue, CHEN Huiying, et al. Interaction between plant phosphorus nutrition and abiotic stress responses and its potential application in agricultural production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(12): 2345-2359.
- [4] 冶庚康, 俄胜哲, 陈政宇, 等. 土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(1): 96-102.
YE Gengkang, E Shengzhe, CHEN Zhengyu, et al. The forms and classification methods of phosphorus in soil: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(1): 96-102.
- [5] 苏辉兰, 余炳锋, 廖彩凤, 等. 解磷菌对油菜的促生作用[J]. 湖南农业科学, 2023(3): 31-35.
SU Huilan, YU Bingfeng, LIAO Caifeng, et al. Effects of phosphate-solubilizing microorganisms on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* var. *longifolia*) [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2023(3): 31-35.
- [6] VESSEY J, HEISINGER K. Effect of *Penicillium bilaii* inoculation and phosphorus fertilisation on root and shoot parameters of field-grown pea[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2001, 81(3): 361-366.
- [7] 吕俊, 潘洪祥, 于存, 等. 马尾松根际溶磷细菌 *Paraburkholderia* sp. 的筛选、鉴定及溶磷特性研究[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 147-156.
LÜ Jun, PAN Hongxiang, YU Cun, et al. Screening, identification and phosphate-solubilizing characteristics of phosphate-solubilizing *Paraburkholderia* sp. from pinus massoniana rhizosphere soil[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(9): 147-156.
- [8] 魏物, 戚秀秀, 吴越, 等. 砂质潮土高效溶磷菌的筛选鉴定、条件优化及应用[J]. 生物技术通报, 2021, 37(4): 85-95.
WEI Chang, QI Xiuxiu, WU Yue, et al. Screening, identification, condition optimization and application of efficient phosphate solubilizing bacteria in sandy fluvo aquic soil[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(4): 85-95.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
BAO Shidan. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [10] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations I[J]. Journal of the Soil Science Society of America, 1982, 46(5): 970-976.
- [11] HU B, YANG B, PANG X, et al. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest[J]. Geoderma, 2016, 279: 61-69.
- [12] 秦艳秋, 史晓艺, 谷子谦, 等. 不同植物根际土壤有益细菌种类及其功能鉴定[J]. 北京农学院学报, 2023, 38(2): 31-37.
QIN Yanqiu, SHI Xiaoyi, GU Ziqian, et al. Identification of beneficial species and their main function in rhizosphere soil of different plants[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2023, 38(2): 31-37.
- [13] ANDERSSON K O, TIGHE M K, GUPPY C N, et al. Incremental acidification reveals phosphorus release dynamics in alkaline vertic soils[J]. Geoderma, 2015, 259/260: 35-44.
- [14] LAN M, COMERFORD N B, FOX T R. Organic anions' effect on phosphorus release from spodic horizons[J]. Soil Science Society of America journal, 1995, 59(6): 1745-1749.
- [15] 薛冬, 黄向东, 杨瑞先, 等. 牡丹根际溶磷放线菌的筛选及其溶磷特性[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1645-1652.
XUE Dong, HUANG Xiangdong, YANG Ruixian, et al. Screening and phosphate-solubilizing characteristics of phosphate-solubilizing actinomycetes in rhizosphere of tree peony[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1645-1652.
- [16] 刘赛男, 杜慧婷, 黄玉威, 等. 生物炭与解磷菌配合施用对磷胁迫水稻苗期生长及根际磷素有效性的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1560-1569.
LIU Sainan, DU Huiting, HUANG Yuwei, et al. Effects of biochar application and phosphorus-solubilizing bacteria on rice seedling growth and rhizosphere phosphorus availability under phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1560-1569.
- [17] TORRIANI-GORINI A, YAGIL E, SILVER S. Phosphate in microorganisms: Cellular and molecular biology[M]. Washington D C: American Society for Microbiology Press, 1994: 197-203.
- [18] BARRA P J, PONTIGO S, DELGADO M, et al. Phospho bacteria inoculation enhances the benefit of P-fertilization on Lolium perenne in soils contrasting in P-availability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 136: 107516.
- [19] 杨文娜, 余砾, 罗东海, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 540-549.
YANG Wenna, YU Luo, LUO Donghai, et al. Effect of combined application of biochar with chemical fertilizer and organic fertilizer on soil phosphatase activity and microbial community[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 540-549.