

一种解磷菌剂对植物根际土壤磷含量、酶活性及细菌群落的影响

姜琦

日照航海工程职业学院教务处, 山东 日照

收稿日期: 2026年4月29日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年6月17日

摘要

本研究旨在探究一种由菌株MZ2 (*Bacillus paramycoides*)和MF2 (*Paenarthrobacter* sp.)混合制成的解磷菌剂, 设置不同接种量(0%, 3.0%, 5.0% (v/m))处理, 对两栖蕹菜(*Rorippa amphibia*)根际土壤有效磷含量、酶活性及细菌群落结构的影响。研究结果显示, 接种5.0%的菌剂(ZF-5组)能最显著地增加土壤有效磷含量; 菌剂施用能促进土壤蔗糖酶和中性磷酸酶的活性; 接种菌剂显著改变了细菌群落结构, 提高了物种丰度和多样性, 并使具有磷酸盐转运的假单胞菌属(*Pseudomonas*)、具有溶解磷酸盐作用的考克氏菌属(*Kocuria*)和具有反硝化作用的脱硝菌属(*Denitromonas*)等功能性细菌的相对丰度增加, 但对硫杆菌属(*Thiobacillus*)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)等优势菌属具有一定的抑制作用。研究认为, 该解磷菌剂能有效活化土壤磷素、提高酶活性并改善微生物群落, 具有应用潜力。

关键词

解磷细菌, 根际土壤, 有效磷, 酶活性, 微生物群落

The Effect of a Phosphorus-Solubilizing Bacterial Agent on Phosphorus Content, Enzyme Activity, and Bacterial Community in Plant Rhizosphere Soil

Qi Jiang

Academic Affairs Office, Rizhao Marine Engineering Vocational College, Rizhao Shandong

Received: April 29, 2026; accepted: June 9, 2026; published: June 17, 2026

Abstract

This study aims to explore the effects of a phosphate-solubilizing bacterial inoculum, formulated from a mixture of strains MZ2 (*Bacillus paramycoides*) and MF2 (*Paenarthrobacter* sp.), on the available phosphorus content, enzyme activity, and bacterial community structure in the rhizosphere soil of *Rorippa amphibia*, under different inoculum treatments (0%, 3.0%, and 5.0% (v/m)). The results show that inoculating with 5.0% of the inoculum (ZF-5 group) significantly increases the soil available phosphorus content. The application of the inoculum promotes the activities of soil sucrase and neutral phosphatase. Inoculation with the inoculum significantly alters the bacterial community structure, enhances species richness and diversity, and increases the relative abundance of functional bacteria such as *Pseudomonas*, which has phosphate transport capabilities, *Kocuria*, which has phosphate-solubilizing effects, and *Denitromonas*, which has denitrification capabilities. However, it has a certain inhibitory effect on dominant bacterial genera such as *Thiobacillus* and *Sphingomonas*. The study suggests that this phosphate-solubilizing inoculum can effectively activate soil phosphorus, enhance enzyme activity, and improve microbial communities, indicating its potential for application.

Keywords

Phosphorus Solubilizing Bacteria, Rhizosphere Soil, Available Phosphorus, Enzyme Activity, Microbial Community

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

磷是植物生长发育所必需的营养元素之一，能够促进植物根际生长。解磷细菌在土壤中的解磷机制如图1所示。土壤中难以直接利用的磷主要包括有机磷和矿物态磷，绝大部分磷是以与 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 等离子结合形成的矿物态形式存在[1]；而少部分磷以 HPO_4^{2-} 和 H_2PO_4^- 等可溶性磷酸盐的形态存在，能够被植物直接吸收利用，被称为“有效磷”[2]。解磷微生物能够有效地将土壤中的无效磷转化为有效磷，例如，芽孢杆菌属、假单胞菌属等都是有效的解磷菌剂，能够溶解土壤中的难溶性磷酸盐，释放出的磷能够促进植物生长[3]。Amit Pande等[4]通过探究解磷细菌的解磷机理表明，解磷细菌能够通过产生多种有机酸溶解难溶性磷酸盐；Feng K和Vazquez P等[5][6]研究显示解磷细菌主要通过产生有机酸溶解Ca-P、Fe-P、Al-P等矿物态磷。除此之外，当土壤处于缺磷状态时，解磷细菌能够通过分泌磷酸酶、植酸酶等各种酶类水解有机磷，转化为可溶性磷后供植物利用[7][8]。

土壤酶是反映土壤肥力和土壤养分循环的重要指标之一，例如，蔗糖酶、脲酶和磷酸酶等参与土壤碳、氮和磷等化学循环[9]。土壤微生物是土壤微循环系统的重要组成部分，其群落结构对提高土壤肥力具有重要意义，在植物生长发育中发挥着至关重要的作用[10]。施入外源功能微生物可能会改变土壤微生物群落结构，从而改善土壤微生态环境[11]。

本研究通过研究施用解磷细菌对两栖焯菜(*Rorippa amphibia*)根际土壤有效磷含量、酶活性和细菌群落的影响，为解磷细菌改善土壤微环境生态提供科学依据。

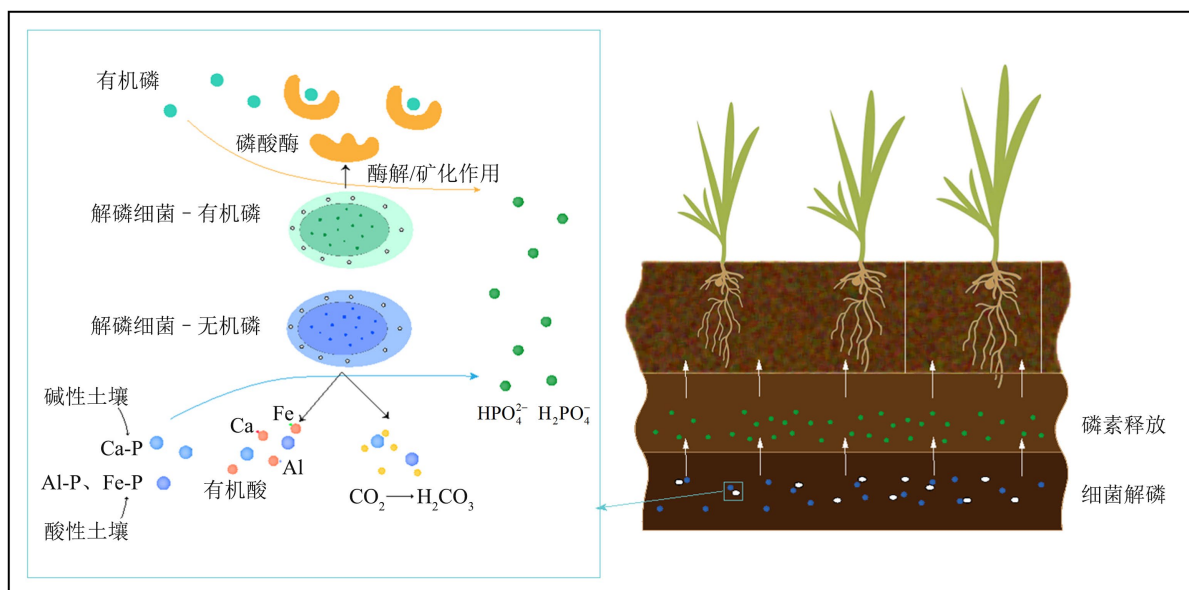


Figure 1. Phosphate solubilization mechanism of bacteria

图 1. 细菌的解磷机理

2. 材料及方法

2.1. 供试菌剂及土壤

解磷菌剂：利用平板涂布法分离自抚顺西露天矿区煤矸石自燃及风化土壤的细菌，通过研究其解磷能力，从中筛选出解磷能力较强的两株细菌分别为 MZ2 (*Bacillus paramycooides*) 和 MF2 (*Paenarthrobacter* sp.)。利用牛肉膏蛋白胨液体培养基在 30℃、160 r/min 条件下振荡培养 24 h，经离心后重新悬浮于无菌蒸馏水中，MZ2 和 MF2 有效活菌数分别为 3×10^8 CFU/mL 和 2×10^8 CFU/mL，以 v:v = 1:1 混合制成菌剂。

土壤样品：从抚顺西露天矿区内采集的油页岩贫矿、绿色泥岩、煤矸石、煤矸石自燃土和油页岩半焦，经除杂，破碎，研磨，过 20 目筛，按照 m:m:m:m = 5:2:2:1 比例进行混合，由于该土样保水性较差，不利于植物生长，因此将前述土壤与校园普通土壤按照 m:m = 3:2 比例进行混合。为了尽可能模拟真实生态修复过程中的矿区土壤环境，土壤样品不作灭菌处理。

2.2. 试验设计

Table 1. Experimental design

表 1. 试验设计

组别	对照组	实验组	
处理	未接种	接种量 3.0% (v/m)	接种量 5.0% (v/m)
根际土壤	ZF-0	ZF-3	ZF-5

将供试土壤装盆(1500 克/盆)，生长状况相近的两栖蕹菜植株缓苗 12 d 后种植。具体试验设计见表 1，对照组为未接种菌剂的土壤，即 1500 g 供试土样中加入 75 mL 无菌蒸馏水，土壤样品编号为 ZF-0，实验组为接种不同比例菌剂的土壤，依次接种量为 3.0%、5.0% (v/m)，即在 1500 g 土壤中分别加入 45.0 mL

菌剂 + 30.0 mL 无菌蒸馏水、75.0 mL 菌剂，土壤样品编号分别为 ZF-3、ZF-5。按照一定周期测定不同接种比例下根际土壤磷素含量和土壤酶活性；检测种植前后的土壤微生物群落变化。

2.3. 测定项目及实验方法

土壤有效磷含量的测定：土壤磷经 NaHCO_3 和无磷活性炭浸提后采用钼锑抗比色法测定可溶性磷含量[12]。

土壤酶活性的测定：土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定；土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定；土壤中性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法方法测定。

土壤 DNA 提取和 PCR 扩增：委托上海欧易生物医学科技有限公司，采用 DNA 抽提试剂盒对土壤样本的基因组 DNA 进行提取，通过琼脂糖凝胶电泳和 NanoDrop2000 检测 DNA 浓度；采用 Takara 公司的 Tks Gflex DNA Polymerase 进行目的区域(土壤细菌 16S rRNA 序列 V3-V4 区，对应引物为 343F 和 798R)进行 PCR 扩增，确保扩增效率和准确性。PCR 产物经电泳检测后使用磁珠纯化，纯化后开展二轮扩增，对 PCR 产物进行 Qubit 定量。根据 PCR 产物浓度进行等量混样，并上机测序。

2.4. 数据处理分析

土壤有效磷含量和土壤酶活性使用 Excel2016 进行数据整理，利用 Origin 软件作图。利用 SPSS 软件进行统计分析，采用单因素方差分析(ANOVA)和多重比较法进行差异显著性分析。

生物信息分析委托上海欧易生物医学科技有限公司进行。使用 Illumina MiSeq 或 NovaSeq 测序生成原始双端序列；使用 Vsearch 软件对优质序列 valid tags 进行 OTU 分类；土壤微生物群落的 alpha 多样性指数分析包含物种丰富度(Chao 值)和物种多样性(Shannon 指数和 Simpson 指数)计算；根据群落结构分布统计所得相对丰度数据，利用 Origin 软件作图。

3. 结果与分析

3.1. 解磷细菌在不同接种量下对根际土壤磷含量的影响

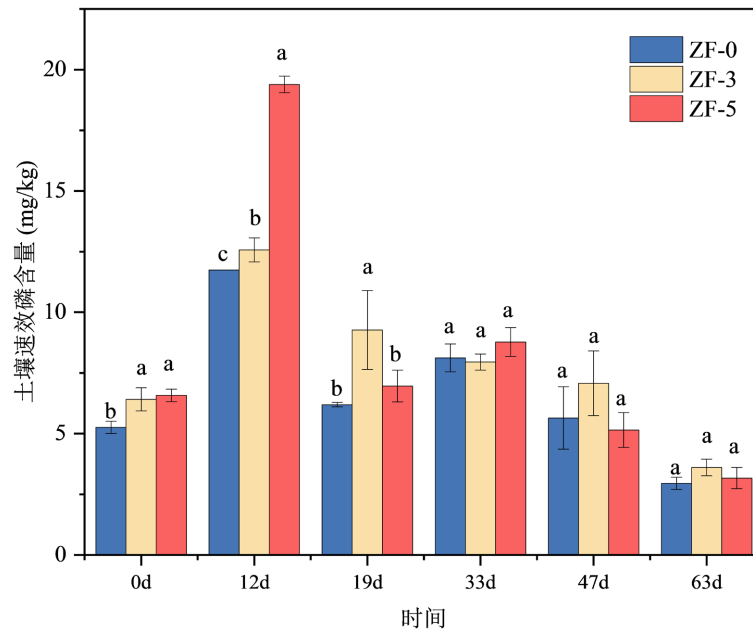
不同解磷菌剂接种量下根际土壤有效磷含量如图 2 所示，空白土壤有效磷含量在 5.00~8.00 mg/kg，低于 10.00 mg/kg，处于缺磷状态。在种植植物第 12 天时，根际土壤中有效磷含量均有不同程度的上升，增加量由大到小依次为 ZF-5 (12.81 mg/kg) > ZF-0 (6.49 mg/kg) > ZF-3 (6.16 mg/kg)；ZF-5 组有效磷含量达 (19.39 ± 0.34) mg/kg，比对照组 ZF-0 的 (11.75 ± 0.00) mg/kg，提高了 65.02%，表明接种 5.0% 的解磷菌剂能够提升根际土壤有效磷含量。随着植物生长过程中不断吸收土壤中的磷素，有效磷含量逐渐降低。

3.2. 解磷细菌在不同接种量下对土壤酶活性

解磷菌剂的施用对土壤酶活性的影响如表 2 所示，接种菌剂对土壤脲酶活性的影响不明显，在第 33 天和第 63 天时，实验组的脲酶活性有所降低；接种菌剂对蔗糖酶活性和中性磷酸酶活性的提高较为显著 ($P < 0.05$)，在第 63 天时，相较于对照组，实验组的蔗糖酶活性和中性磷酸酶活性均保持在相对较高的水平。结果表明接种解磷菌剂有利于土壤蔗糖酶和中性磷酸酶活性的提高。

3.3. 解磷细菌对根际细菌群落的影响

在种植植物第 63 天时，通过分析 Chao 值判断细菌的丰富度；分析 Shannon 指数和 Simpson 指数用于判断样本中的物种多样性和均匀度[13]，结果如表 3 所示。相比于对照组，实验组的 OTUs、Chao 值、Shannon 指数和 Simpson 指数均增加，表明接种解磷菌剂能够明显改变土壤微生物丰富度和多样性。



注：图中数据为平均值 \pm 标准误差。不同处理差异显著用不同小写字母表示($P < 0.05$)。

Figure 2. The influence of different inoculation amounts of phosphorus-solubilizing bacteria on rhizosphere soil phosphorus content

图 2. 不同接种量的解磷细菌对根际土壤磷含量的影响

Table 2. The influence of different inoculation amounts of phosphate-solubilizing bacteria on rhizosphere soil enzyme activity

表 2. 不同接种量解磷细菌对根际土壤酶活性的影响

指标/组别	0 d			33 d			63 d		
	ZF-0	ZF-3	ZF-5	ZF-0	ZF-3	ZF-5	ZF-0	ZF-3	ZF-5
蔗糖酶活性	6.73 \pm 0.06c	7.76 \pm 0.01b	9.35 \pm 0.00a	18.46 \pm 0.19b	17.35 \pm 0.27c	21.75 \pm 0.90a	14.08 \pm 0.16c	21.26 \pm 0.22a	20.42 \pm 0.25b
脲酶活性	0.22 \pm 0.01a	0.19 \pm 0.00b	0.22 \pm 0.00a	0.31 \pm 0.04a	0.30 \pm 0.01a	0.19 \pm 0.00b	0.19 \pm 0.01b	0.20 \pm 0.00b	0.21 \pm 0.00a
中性磷酸酶	0.19 \pm 0.00b	0.19 \pm 0.00b	0.28 \pm 0.01a	0.36 \pm 0.02a	0.45 \pm 0.04a	0.41 \pm 0.05a	0.10 \pm 0.02b	0.23 \pm 0.04a	0.32 \pm 0.13a

注：不同处理差异显著用不同小写字母表示($P < 0.05$)。

Table 3. Rhizosphere soil microbial community abundance and diversity

表 3. 根际土壤微生物群落丰度和多样性

样本	OTUs	alpha 多样性指数分析		
		Chao	Shannon	Simpson
ZF-0	3142	3414.6819	9.0972	0.9862
ZF-3	3340	3563.8049	9.5238	0.9936
ZF-5	3283	3512.0707	9.1648	0.9889

在第 0 天和第 63 天时根际土壤细菌群落在门水平排名前 15 的相对丰度如图 3 所示, 排名前 5 的优势菌门依次为变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、芽单胞菌门(*Gemmatimonadetes*); 另外, 相对丰度较高的菌门还包括酸杆菌门(*Acidobacteria*)、硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)、梭杆菌门(*Fusobacteria*)、纤维杆菌门(*Fibrobacteres*)等。在初始土壤中, 相比于对照组, 实验组中放线菌门、厚壁菌门相对丰度增加, 拟杆菌门、芽单胞菌门相对丰度减少。在第 63 天时, 对照组和实验组中变形菌门相对丰度显著增加, 放线菌门和厚壁菌门相对丰度显著减少; 相比于对照组, 实验组中拟杆菌门相对丰度增加, ZF-3 组的芽单胞菌门相对丰度增加, 变形菌门相对丰度减少。

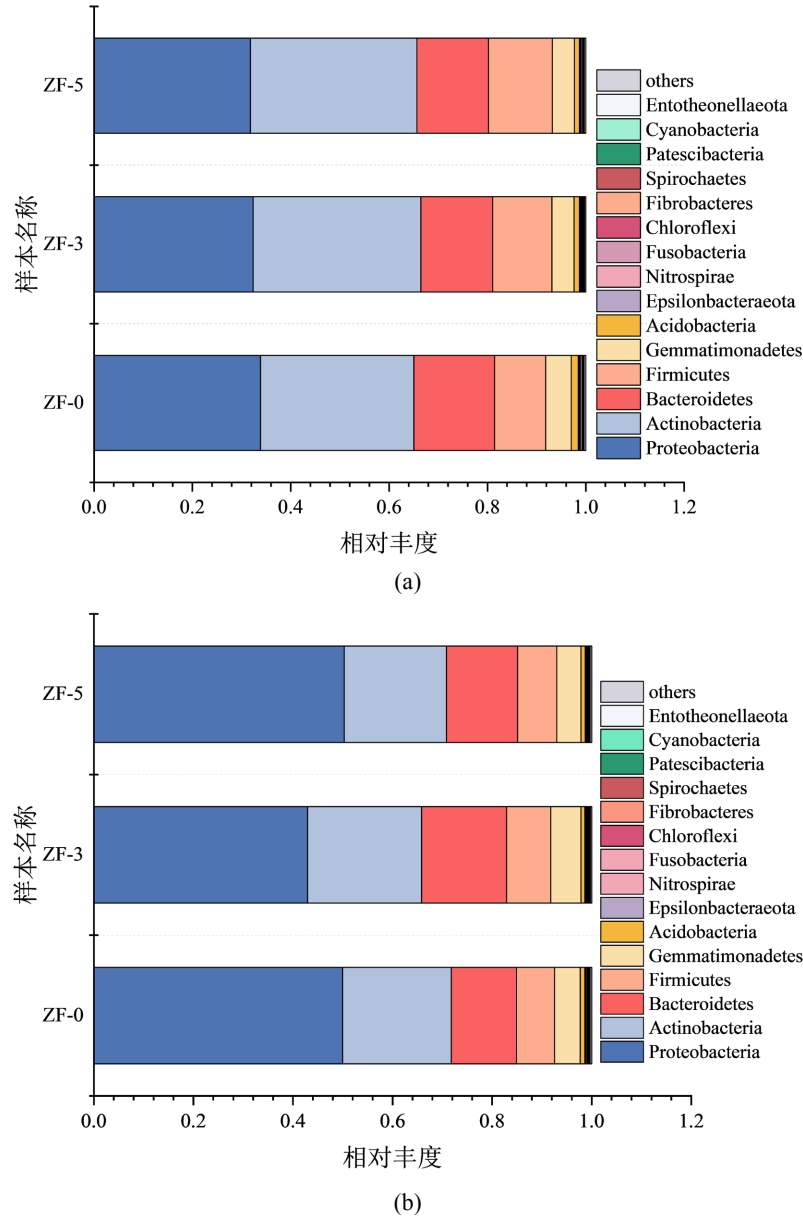


Figure 3. Relative abundance of rhizosphere soil bacterial community structure at phylum level. (a) Relative abundance at 0 days; (b) Relative abundance at 63 days
图 3. 根际土壤细菌群落结构在门水平下的相对丰度。(a) 0 d 时的相对丰度; (b) 63 d 的相对丰度

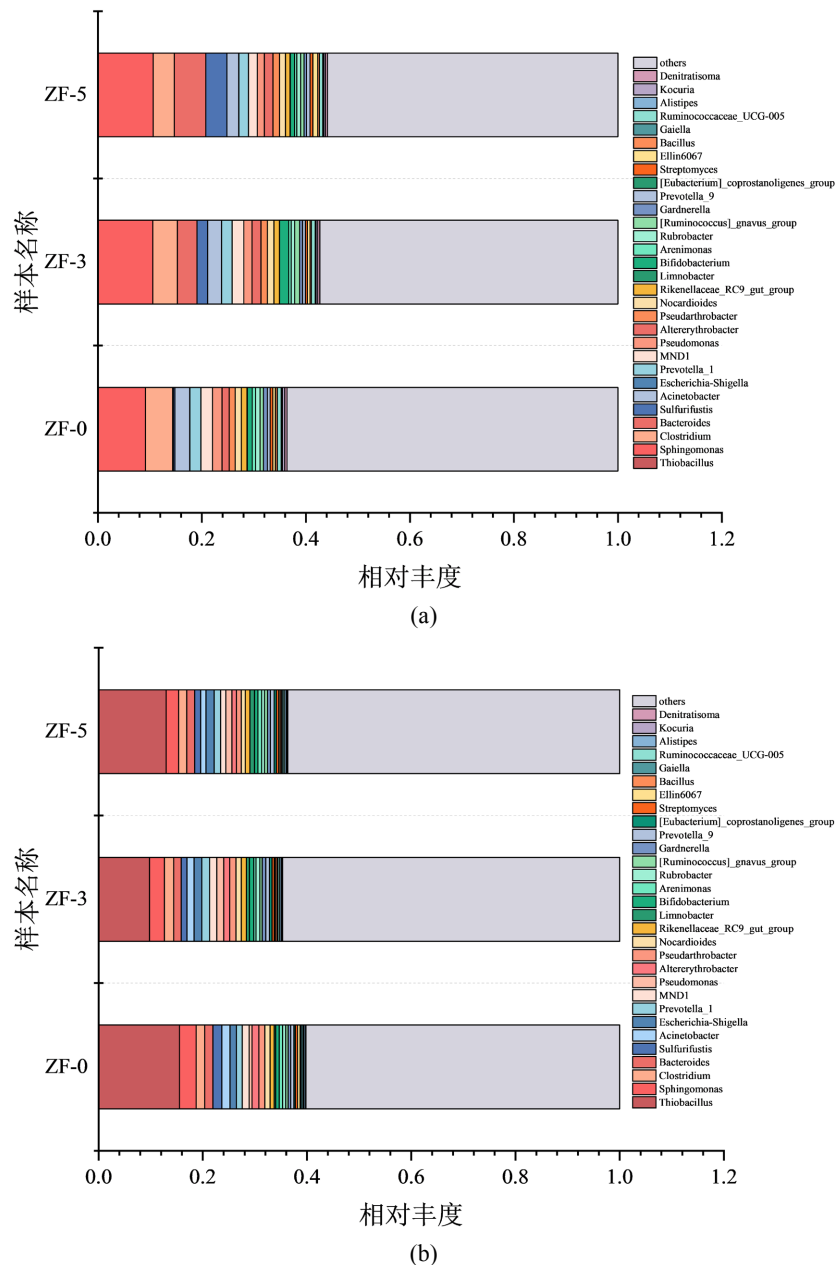


Figure 4. Relative abundance of rhizosphere soil bacterial community structure at the genus level. (a) Relative abundance at 0 days; (b) Relative abundance at 63 days
图 4. 根际土壤细菌群落结构在属水平下的相对丰度。(a) 0 d 时的相对丰度; (b) 63 d 的相对丰度

在第 0 天和第 63 天时根际土壤细菌群落在属水平排名前 30 的相对丰度如图 4 所示, 硫杆菌属 (*Thiobacillus*)、鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*) 为优势菌属; 还包括梭菌属 (*Clostridium*)、拟杆菌属 (*Bacteroides*)、*Sulfurifustis* 属、不动杆菌属 (*Acinetobacter*)、普雷沃菌属 (*Prevotella*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、交替赤杆菌属 (*Altererythrobacter*)、假节杆菌属 (*Pseudarthrobacter*) 等。在初始土壤中, 相较于对照组, 实验组的鞘氨醇单胞菌属、拟杆菌属和 *Sulfurifustis* 属相对丰度增加, 梭菌属相对丰度减少。在第 63 天时, 对照组和实验组中硫杆菌属相对丰度明显上升, 分别增加 15.5%、9.76%、12.94%, 不动杆菌属、考克氏

菌属(*Kocuria*)和芽孢杆菌属(*Bacillus*)相对丰度明显减少;而相比于对照组,实验组中硫杆菌属、鞘氨醇单胞菌属、拟杆菌属、*Sulfurifustis* 属、不动杆菌属相对丰度降低,假单胞菌属、普雷沃菌属(*Prevotella*)、*Limnobacter* 属、芽孢杆菌属和考克氏菌属相对丰度增加,ZF-5 组中梭菌属和脱硝菌属(*Denitromonas*)相对丰度增加。

4. 讨论

4.1. 解磷细菌对土壤磷含量的影响

本研究结果表明,施用 5.0% (v/m)的解磷菌剂能够显著提升植物根际土壤磷素含量。这与 Sun 等[14]的研究结果一致,解磷细菌能够促进与磷转化相关的代谢途径或磷溶解物质的产生,从而提高磷利用率。Silva 等[15]研究表明从植物根际土壤分离出的解磷细菌具有促进植物生长的作用。施用解磷菌剂能够通过提高土壤中可溶性磷含量促进植物生长。

4.2. 解磷细菌对土壤酶活性的影响

蔗糖酶活性与土壤有机质、土壤呼吸强度、碳、磷等因素有关,与土壤肥力密切相关[16],ZF-5 组土壤蔗糖酶活性在接种 33 天后提升明显;土壤磷酸酶活性与土壤速效磷含量呈显著正相关[17],这与本研究磷素含量先上升后下降,并且在 33 d 时中性磷酸酶活性保持较高水平,在种植 63 天时活性有所下降相符合。土壤蔗糖酶和中性磷酸酶活性提高可能与土壤中有益菌群增加有关[13],解磷菌剂的施用改变了土壤微生物群落结构,增加了功能性菌群丰度,参与土壤碳、氮、磷循环,也进一步说明解磷菌剂对土壤酶活性产生了有利的影响。

4.3. 解磷细菌对土壤细菌群落的影响

本研究发现,施用解磷菌剂对土壤微生物的 OTUs、Chao 值、Shannon 指数和 Simpson 指数均有显著影响,能够调节植物根际土壤细菌群落结构,尤其是功能性细菌群落的丰富度和多样性。在门水平上,变形菌门(*Proteobacteria*)相对丰度显著上升,而放线菌门(*Actinobacteria*)与厚壁菌门(*Firmicutes*)相对丰度下降;在属水平上,梭菌属、假单胞菌属、普雷沃菌属、水生杆菌属、芽孢杆菌属、脱硝菌属和考克氏菌属相对丰度增加。Peter 等[18]对分离出的多个假单胞菌菌株进行基因组分析表明,假单胞菌具有植物促生特性,例如维生素和辅因子生物合成以及磷酸盐转运等营养获取系统;Alexander 等[19]研究表明芽孢杆菌菌株对小麦生长具有良好的促进作用,并且能够提高小麦抗旱性;脱硝菌属则具有反硝化作用,从而参与土壤氮素循环[20];考克氏菌属具有磷酸盐溶解、耐盐性和抗干旱等植物促生特性[21],证实功能性微生物对植物根际土壤微生态环境的改善。实验组中硫杆菌属和鞘氨醇单胞菌属相对丰度降低,可能的原因是施用解磷菌剂影响了植物根际土壤优势菌属的生长。

5. 结论与展望

解磷菌剂的施用显著提升根际土壤有效磷含量,提高土壤蔗糖酶和中性磷酸酶活性,并且使植物根际土壤细菌群落发生演替,提高土壤细菌丰富度和物种多样性,并且优化土壤功能性细菌的比例,能够从碳循环、氮循环、磷循环等多方面对土壤环境进行调节,从而起到有效促进植物生长的作用。

本研究存在一定的局限性。首先,实验为盆栽条件下进行,未能完全模拟大田环境中的土壤异质性与气候波动。其次,供试土壤为特定配方土,其理化性质与自然土壤存在差异,可能影响菌剂的定殖与功能表达,限制结论的普适性。最后,本研究仅针对土壤部分指标进行探究,且未直接建立“菌剂-群落-植物生长”之间的因果链,可进一步研究与探讨。

因此, 建议在大田或更接近自然土壤的条件下验证解磷菌剂的效果; 结合植物生理与养分吸收指标, 构建菌剂-土壤-植物互作的系统模型; 利用宏基因组或转录组技术, 解析关键功能微生物在碳、氮、磷循环中的代谢通路与活性变化。

参考文献

- [1] 吴红艳, 孙翠焕, 郭玲玲, 等. 解磷生物肥对设施土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 微生物学杂志, 2024, 44(4): 57-65.
- [2] 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.
- [3] Rezakhani, L., Motesarezadeh, B., Tehrani, M.M., Etesami, H. and Mirseyed Hosseini, H. (2019) Phosphate-Solubilizing Bacteria and Silicon Synergistically Augment Phosphorus (P) Uptake by Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plant Fertilized with Soluble or Insoluble P Source. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **173**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.060>
- [4] Pande, A., Pandey, P., Mehra, S., Singh, M. and Kaushik, S. (2017) Phenotypic and Genotypic Characterization of Phosphate Solubilizing Bacteria and Their Efficiency on the Growth of Maize. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, **15**, 379-391. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.06.005>
- [5] Feng, K., Lu, H.-M., Sheng, H.J., et al. (2004) Effect of Organic Ligands on Biological Availability of Inorganic Phosphorus in Soils. *Pedosphere*, **14**, 85-92.
- [6] Vazquez, P., Holguin, G., Puente, M.E., Lopez-Cortes, A. and Bashan, Y. (2000) Phosphate-Solubilizing Microorganisms Associated with the Rhizosphere of Mangroves in a Semiarid Coastal Lagoon. *Biology and Fertility of Soils*, **30**, 460-468. <https://doi.org/10.1007/s003740050024>
- [7] 潘林, 弥春霞, 徐青山, 等. 解磷细菌解磷机制研究进展及其在水稻上的应用[J]. 中国稻米, 2024, 30(3): 1-9.
- [8] Tarafdar, J.C. and Marschner, H. (1994) Efficiency of VAM Hyphae in Utilisation of Organic Phosphorus by Wheat Plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, **40**, 593-600. <https://doi.org/10.1080/00380768.1994.10414298>
- [9] 李昌骏, 李婷, 李露露, 等. 生物质炭负载解钾菌对土壤酶活性与微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1531-1542.
- [10] Häkkinen, L., Heinonsalo, J., Palojärvi, A., Pitkänen, J., Toivonen, M., Tuomivirta, T., et al. (2026) Arable Soil Microbial Communities Are Affected by Plant Community and Agricultural Management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **407**, Article 110440. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2026.110440>
- [11] 王志远, 杨成德, 金梦军. 枯草芽胞杆菌 262XY2' 在玉米根部的定殖动态及对土壤微生物群落的影响[J]. 植物保护学报, 2025, 52(5): 1219-1230.
- [12] Spagnoletti, F.N., Tobar, N.E., Fernández Di Pardo, A., Chiocchio, V.M. and Lavado, R.S. (2017) Dark Septate Endophytes Present Different Potential to Solubilize Calcium, Iron and Aluminum Phosphates. *Applied Soil Ecology*, **111**, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.11.010>
- [13] 肖娴, 桂一峰, 朱艳, 等. 微生物菌肥对水稻土壤细菌群落结构与活性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(10): 2174-2181.
- [14] Sun, L., Tao, Z., Liu, X. and Wu, Z. (2023) Effects of Phosphate-Solubilizing Bacteria on Phosphorus Components, Humus and Bacterial Community Metabolism during Spent Mushroom Substrate Composting. *Environmental Technology & Innovation*, **32**, Article 103341. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103341>
- [15] da Silva, E.P., Braulio, C.D.S. and Santos, A.F.D.J. (2026) Biotechnological Potential of Burkholderia and Paraburkholderia Spp. from the Caatinga Biome: Phosphorus and Potassium Solubilization and Growth Promotion in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *South African Journal of Botany*, **193**, 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2026.04.003>
- [16] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1175-1184.
- [17] 彭艳, 江燕, 刘代铃, 等. 有机质和微生物菌剂对苦荞连作农艺性状及土壤酶活性的影响[J]. 分子植物育种, 2023, 21(4): 1287-1293.
- [18] Kämpfer, P., Lipski, A., Lawrence, K.S., Olive, W.R., Newman, M.M., McInroy, J.A., et al. (2026) *Pseudomonas corni* sp. nov., *Pseudomonas oplopanacis* sp. nov., *Pseudomonas salicis* sp. nov., *Pseudomonas rosaecicularis* sp. nov., *Pseudomonas artemisiae* sp. nov., *Pseudomonas imperatae* sp. nov. and *Zestomonas ipomoeae* sp. nov., Isolated from Rhizospheres Showing Plant Growth Promoting Potential. *Systematic and Applied Microbiology*, **49**, Article 126719. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2026.126719>

- [19] Govin-Sanjudo, A., Rojas Badia, M.M., Jacquard, C. and EsmaeL, Q. (2026) Bacillus Strains Enhance Wheat Growth and Resilience to Drought and Fusarium Stress. *Plant Stress*, **21**, Article 101381. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2026.101381>
- [20] Deng, Y., Ruan, Y.J., Taherzadeh, M.J., Chen, J., Qi, W., Kong, D., *et al.* (2021) Carbon Availability Shifts the Nitrogen Removal Pathway and Microbial Community in Biofilm Airlift Reactor. *Bioresource Technology*, **323**, Article 124568. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124568>
- [21] Mauceri, A., Puccio, G., Faddetta, T., Abbate, L., Polito, G., Caldiero, C., *et al.* (2024) Integrated Omics Approach Reveals the Molecular Pathways Activated in Tomato by Kocuria Rhizophila, a Soil Plant Growth-Promoting Bacterium. *Plant Physiology and Biochemistry*, **210**, Article 108609. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108609>