王 晔,张 瑶,刘子琪,等.解磷复合菌剂对尾矿的活化作用及其促生提质效果 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6389-6397.
Wang Y, Zhang Y, Liu Z Q, et al. Activation effect of phosphorus-solubilizing compound bacterial agents on tailings and its induced growth promotion and quality improvement [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6389-6397.

解磷复合菌剂对尾矿的活化作用及其促生提质效果

王 晔,张 瑶,刘子琪,潘晓静,郭 傲,于春欣,段留生* (北京农学院,植物科学技术学院/农业应用新技术北京重点实验室/植物生产国家级实验教学示范中心,北京 102206)

摘要：收集 16 份商业化菌源样品,以有效磷含量为指标,通过初筛不同菌源解磷效果、优化接种量和复配菌种形成复合菌系,并进一步通过盆栽试验,评价尾矿配施复合菌系对小白菜生长和品质的影响.结果表明:筛选获得了 4 个高效解磷菌及适宜接种量,通过正交试验获得 3 个复合菌剂(编号为 C3、C4 和 C6),在培养第 7d 时,其解磷效果较对照提高了 7.1~7.6 倍.盆栽试验显示,磷尾矿和复合菌剂 C4 配施处理的小白菜长势较好,与对照相比,叶绿素含量提高了 15.96%,产量提高了 40.78%,且显著提高了小白菜可溶性蛋白和维生素 C 含量,分别较对照增加了 18.52%和 229.36%.综上所述,复合菌剂显著提高了磷尾矿中有效磷含量,对磷尾矿的无害化处理及高效利用具有重要的理论意义和广阔的应用潜力.

关键词：磷尾矿；解磷菌；有效磷；资源化利用；复合微生物菌剂
中图分类号：X172,X753 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6389-09

Activation effect of phosphorus-solubilizing compound bacterial agents on tailings and its induced growth promotion and quality improvement. WANG Ye, ZHANG Yao, LIU Zi-qi, PAN Xiao-jing, GUO Ao, YU Chun-xin, DUAN Liu-sheng* (National Experimental Teaching Demonstration Center for Plant Production, Beijing Key Laboratory for Agricultural Application and New Technique, College of Plant Science and Technology, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6389~6397

Abstract：In this study, 16commercial microbial samples were collected. Leveraging available phosphorus content as the screening criterion, we conducted preliminary screenings of phosphate-solubilizing efficiency in different microbial sources, optimized inoculation quantities, and developed composite microbial consortia through strain combination. Pot experiments were then carried out to evaluate the effects of tailings with composite microbial consortia on the growth and quality of Chinese cabbage. The results show that four efficient phosphorus-solubilizing bacteria were identified after delicately screening and then three composite bacterial agents (numbered as C3, C4 and C6) were obtained by orthogonal experiments. After cultivating for 7d, the phosphate-solubilizing efficiencies of these inoculants were increased by 7.1~7.6 times compared with that of comparison group. The pot experiment indicated that with phosphate tailings and composite microbial inoculant C4 were significantly improved in comparison group, that is the chlorophyll content and yield increased by 15.96% and 40.78%, respectively. Moreover, the contents of soluble protein and vitamin C in Chinese cabbage were significantly increased by 18.52% and 229.36%, respectively. In summary, the composite microbial inoculants significantly increased the available phosphorus content in phosphate tailings and demonstrated an important theoretical significance and a broad application potential in managing harmless treatment and efficient utilization of phosphate tailings.

Key words: phosphate tailing; phosphate solubilizing bacteria; available phosphorus; resource utilization; compound microorganisms

磷矿资源具有不可再生及难以替代性,是国民经济和农业生产中的重要生产资料.目前,几乎所有磷酸盐产品均是由开采的磷酸盐岩石生产所得[1],磷化工产品广泛应用于工业、建筑业和农业等领域,对保障社会生产生活具有重要意义.我国磷矿资源储量丰富,但平均品位偏低,需通过经济有效的选矿工艺进行富集处理,以满足磷矿加工的要求[2].在磷矿浮选过程中会产生大量的磷尾矿,据统计,每生产 1t 磷精矿,约产生 0.44t 磷尾矿[3].目前,磷尾矿的利用途径主要集中在基坑充填[4]、尾矿重选[5]、建筑材料制备[6]和肥料生产[7]等方向,但其综合利用率不足 10%[8].绝大多数尾矿仍以堆存方式存放于尾矿库中,不仅占用大片土地,还造成环境风险,导致土地退化和植被破坏,对人类和动物安全构成威胁[9].因此开展磷尾矿综合利用与开发研究,对推动磷尾矿合理处置和资源化利用具有重要价值,也是支撑化肥工

收稿日期：2025-04-20
基金项目：北京市属高校分类发展-都市农林特色教师队伍建设项目(11000024T000002961733)
* 责任作者, 教授, dls@bua.edu.cn

业、化工工业乃至国民经济可持续发展的迫切需求.

磷尾矿除含有磷元素外,还富含钙、镁、铁等中量元素以及锰、锌、铜等微量元素,属于低磷富中微量元素的二次资源,在农业领域具备巨大的开发空间.磷尾矿中难溶性磷占比较高,而解磷微生物能够将难溶性磷转化为植物可直接吸收利用的可溶性磷[10].已有研究表明,解磷微生物包括解磷细菌、解磷真菌、解磷放线菌等,研究较多的解磷菌,主要有芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和链霉菌属(*Streptomyces*)等[11].解磷微生物在生长、代谢和繁殖过程中,向胞外分泌大量磷酸酶、植酸酶和有机酸等,一方面,磷酸酶和植酸酶将尾矿中全磷转化为能被植物吸收利用的可溶性磷[11],另一方面,有机酸可使尾矿环境酸化,在较低的 pH 值条件下,有机酸与铁、钙、铝等离子螯合释放出磷酸根离子,进而促进磷酸盐的溶解.可溶性磷进入微生物细胞中,少量通过代谢过程转化为有机酸,大部分则储存在细胞内,与此同时,微生物活动促使大量可溶性磷被释放到环境中,为作物吸收利用提供保障[12-14].

近年来,为提高尾矿利用率,微生物活化技术因其在转化难溶性磷方面的安全性、高效作用和土壤改良作用已成为研究热点[15].已有研究表明,采用黑曲霉 5%、乳酸菌 4%、醋酸菌 3%和巨大芽孢杆菌 5%制备复合菌剂,能够高效分解磷尾矿粉,磷转化率达 78.7%[17].另有研究从磷铁尾矿中筛选出一株高效解磷菌 JP21-05,结合其形态和生理生化特征,鉴定为人参假单胞菌(*Pseudomonas ginsengisoli*),该菌株能够促进生菜侧根生长并提高植株生物量[18].表明微生物菌群通过固氮、固碳和溶解无机磷来积累养分,有效改善尾矿酸碱性和营养物质,促进植株生长[16].目前微生物在尾矿中利用的研究主要集中在复合菌剂制备[17]、菌株的筛选与鉴定[18]和微生物对尾矿的适应性和生态修复[16,19]等方面.虽在实验室层面验证了部分菌剂的解磷效能或单一菌株的促生作用,但针对复合微生物菌剂在尾矿中的实际解磷效能、菌剂与植物互作效应,以及菌剂解磷功能和作物生长需求的系统性应用研究仍较为匮乏.因此,为实现低品位磷尾矿资源再利用,提高磷尾矿的利用效率,同时可进行产业化应用,本研究选用市面上广泛应用的解磷菌剂,分析其解磷能力、优化接种量,并构建复合菌系明确其对磷尾矿的活化效果,旨在为磷尾矿资源化利用提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 尾矿样品 试验所用磷尾矿取自承德宝通矿业有限公司.尾矿粉中-0.038mm 粒级占 90%~95%.尾矿主要养分含量为:全磷 35.7g/kg,全氮 0.13g/kg,全钾 4.59g/kg,有效磷 7.33mg/kg,有机质 17.6g/kg.

1.1.2 微生物菌剂 微生物菌剂均为商业化单一菌剂,来源于 16 家厂商,分别为:枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)3 种 (T1~T3), 巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)3 种(T4~T6),地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)2 种(T7~T8),苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)(T9)、水产用短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus Meyer and Gottheil*)(T10)、弗氏链霉菌(*Streptomyces fradiae*)(T11)、胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus Krassilnikov*)(T12)、侧孢短芽孢杆菌(*Brevibacillus laterosporu*)(T13)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)(T14)、细黄链霉菌(*Streptomyces microflavus*)(T15)和不吸水链霉菌(*Streptomyces ahygroscopicus*)(T16).

1.1.3 培养基 无机磷培养基:10g 葡萄糖,10g $Ca_3(PO_4)_2$, 0.5g $(NH_4)SO_4$,0.3g KCl,0.3g $MgSO_4·7H_2O$,0.03g $FeSO_4·7H_2O$,0.03g $MnSO_4·7H_2O$, 1000mL 蒸馏水,pH 7.0.磷尾矿培养基:用等量的磷尾矿粉代替无机磷培养基中的 $Ca_3(PO_4)_2$,其他成分不变.以无机磷培养基为对照,磷尾矿培养基为筛选培养基.

1.2 试验方法

1.2.1 解磷效果试验 在磷尾矿液体培养基中,分别接种 1mL 浓度为 1.0%的不同菌剂,置于 37℃,150r/min 恒温摇床中培养,于接种后第 3d、5d、7d、9d 和 11d 取培养液测定有效磷含量.以不加菌剂为对照,每处理重复 3 次.

1.2.2 接种量试验 将试验 1.2.1 中获得的解磷效果较好的微生物菌剂,按 2%、4%、6%和 8%的接种量分别接入磷尾矿液体培养基中,将其充分混匀,放置于 37℃,150r/min 恒温摇床中培养 5d,测定培养液中有效磷含量,每处理重复 3 次.

1.2.3 正交试验 在试验 1.2.2 基础上,筛选出解磷效果最高的 4 种菌剂和适宜接种量进行 $L9(3^4)$正交试验(表 1).各处理在磷尾矿培养基中,置于 37℃恒温

生化培养箱中培养,于 3d、5d、7d、9d 和 11d 取样测定有效磷含量.

表 1　不同菌剂和接种量正交表(%)

Table 1　Orthogonal experiment table of different strains and inoculations(%)

试验处理	因素			
	T3	T9	T14	T16
C1	6	7	3	4
C2	6	6	2	3
C3	7	8	2	4
C4	7	7	3	3
C5	8	6	3	4
C6	8	7	2	5
C7	8	8	4	3
C8	6	8	4	5
C9	7	6	4	5

1.2.4　有效磷含量测定　采用钼锑钪比色法,吸取离心(10000r/min)后的培养液 2.50mL 于 200mL 三角瓶中,加入 50.0mL 0.5mol/L $NaHCO_3$,加塞,在 25℃ 200r/min 的摇床上振荡混匀 30min 后用无磷滤纸过滤,吸取滤液 10.0mL 于 50mL 小烧杯中,再加入钼锑抗显色剂 5.0mL,充分混匀,静置 30min 后在 880nm 波长下测定吸光度,并计算有效磷含量.

1.3　盆栽试验

1.3.1　盆栽试验设计　试验采用随机区组设计,供试品种为四季小白菜,设置 3 个处理:田园土(CK),田园土+磷尾矿(TW),田园土+磷尾矿+菌剂(TWJ).各处理均基施有机肥为底肥(30000kg/hm^2).有机肥养分含量为:有机质 282.73g/kg、全氮 23.8g/kg,全钾 8.96g/kg,有效磷 3.69g/kg.磷尾矿添加量为 135g,复合菌剂C4添加量为 20g.每处理重复 3 次.每盆装干土 4kg,每盆保留 6 株小白菜,收获期(约播种后 35d)取样待测.

1.3.2　测定项目与方法　培养液有效磷即可以被植物吸收利用的磷(PO_4^{3-})浓度采用钼锑抗比色法测定[20],解磷能力为含菌剂培养液的有效磷浓度减去不含菌剂培养液的有效磷浓度[20].生物量:每处理取 3 株长势一致的小白菜,去掉根部,称取鲜重并记录.叶绿素:每处理选 6 株,用 SPAD−502 型叶绿素仪选取相同叶位测定 SPAD 值.品质:采用苯酚−硫酸法测定可溶性糖含量[21];采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量[21];采用 2,6−二氯酚靛滴定法测定维生素 C 含量[22].

1.4　数据分析

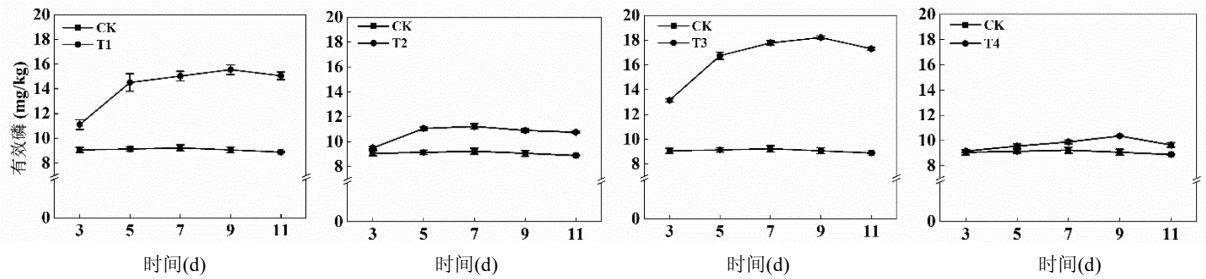
利用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,利用 SPSS 18.0 统计软件进行聚类分析、ANOVA 法进行处理间差异显著性分析(P<0.05),利用 Duncan's 法进行多重比较,采用 Origin 2021 软件作图.

2　结果与分析

2.1　不同微生物菌剂对尾矿解磷效果的影响

16 种微生物菌剂的解磷效果如图 1 所示,由图可知,不同的微生物菌剂的解磷能力差异性显著,有效磷含量峰值大多集中在接种后的第 7 和 9d.其中与对照组 CK 相比,T1、T3、T5、T9、T10、T11、T14、T15 和 T16 这 9 种微生物菌剂的解磷率增幅达到 40%以上;其中 T3、T10 在接种后的第 9d 有效磷含量分别为 18.22mg/kg 和 9.11mg/kg,解磷量分别增加 100.91%和 110.71%.其他微生物菌剂解磷效果与 CK 对照组相比解磷能力相对较差,其中 T8 低于 CK 对照组,解磷能力最弱.

进一步对 16 个菌剂不同时间的解磷量进行聚类分析,在欧式距离为 6.0 时,将 16 个菌剂分 3 类(图 2).第 I 类群含 2 个菌剂,占比 12.5%,包括 T3 和 T10,与 CK 相比,处理期间有效磷含量平均提高了 89%以上.第 II 类群含 7 个菌剂,占比 43.8%,包括 T1、T5、T9、T11、T15、T16,与 CK 相比,处理期间有效磷含量平均提高了 50%以上.第 II 类群含 7 个菌剂,占比 43.8%,包括 T2、T4、T6、T7、T8、T12 和 T13,与 CK 相比,处理期间有效磷含量平均提高了 10%以上.因此,初步筛选出 T1、T3、T5、T9、T10、T11、T14、T15 和 T16 这 9 种微生物菌剂进行下一步实验.



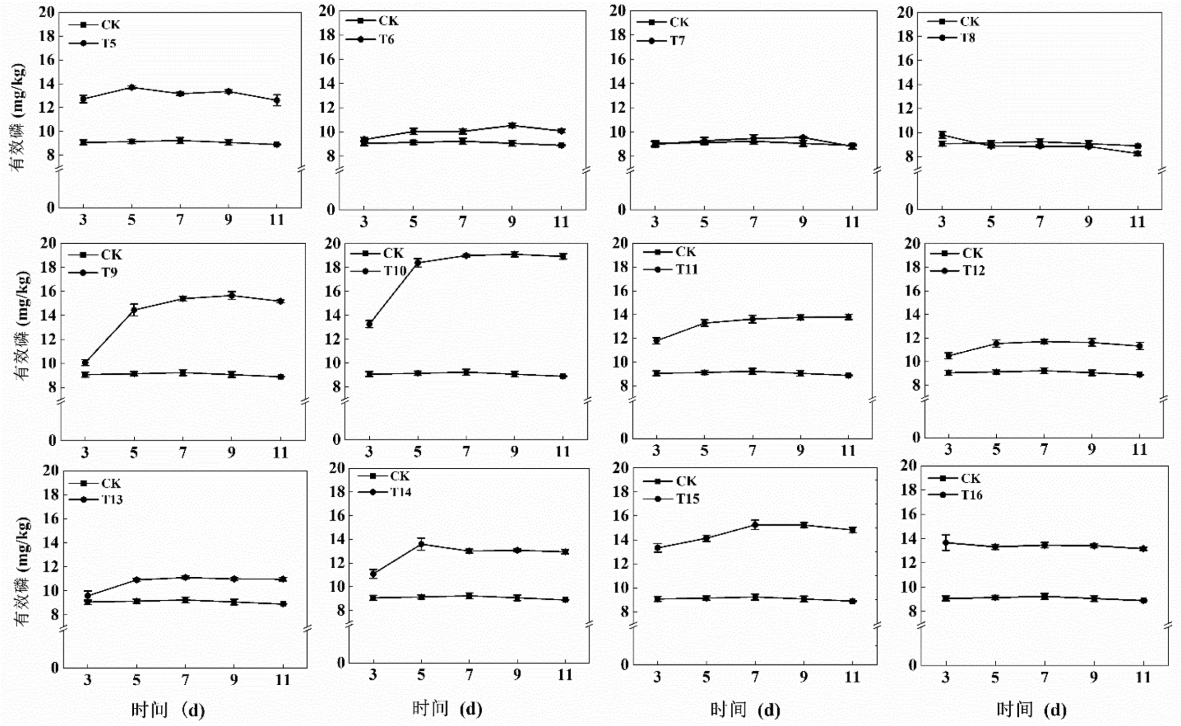


图 1 不同微生物菌剂对磷尾矿的解磷效果

Fig.1 Effects of different microbial agents on phosphate solubilization of the used phosphate tailings

图中结果为平均值±标准差(n=5)

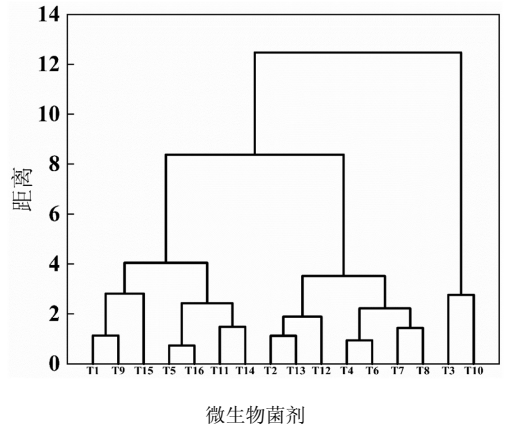


图 2 16 份微生物菌剂解磷效果聚类分析

Fig.2 Cluster analysis of phosphate solubilization effects of these 16 microbial agents

2.2 微生物菌剂不同接种量对尾矿解磷效果的影响

按照接种量为 2%、4%、6%和 8%分别接入含磷尾矿的培养基中,培养 9d 后各处理有效磷含量结果如图 3 所示.9 种微生物菌剂不同接种量的解磷能力存在显著差异(P<0.05),其中,微生物菌剂 T3(8%)、T5(8%)、T14(4%)和 T16(8%)处理的有效磷含量分别为 48.66, 50.58,45.86 和 46.66mg/kg,与 CK 相比增幅分别为 5.37、5.58、5.06 和 5.15 倍.

2.3 复合菌剂对磷尾矿解磷效果的影响

进一步优化接种量构建复合菌剂,通过 L9(3^4)正交试验(表 1)得到 C1~C9 9 种菌剂组合.各菌剂组合在接种后第 7d 有效磷含量达到峰值,C3、C4 和 C6 组合解磷效果较高,在培养第 7d 时,有效磷含量分别为 97.10,98.26,90.68mg/kg,与对照相比,解磷效果分别提高了 7.5、7.6 和 7.1 倍,其中 C4 组合解磷效果最佳(图 4).

2.4 复合菌剂对小白菜生长的影响

由图 5 可以看出,添加磷尾矿和复合菌剂的处理组植株长势较好(图 5(a)),叶绿素含量显著提高.与对照处理相比,叶绿素含量分别提高了 10.31%和 15.96%(图 5(b)).与对照相比,添加磷尾矿产量提高了 5.56%,同时添加复合菌剂后,与对照相比,产量显著提高了 40.78%(图 5(c)).

2.5 复合菌剂对小白菜品质的影响

由图 6 可以看出,添加尾矿和复合菌剂处理对小白菜可溶性糖影响不显著,但显著提高了可溶性蛋白和维生素 C 含量.单独添加磷尾矿处理 TW 显著提高小白菜维生素 C 含量,较对照增加了 34.04%.添加磷尾矿配施复合菌剂处理 TWJ,显著提高了可溶性蛋白和维生素 C 含量,较对照相比分别增加了 18.52%和 229.36%.

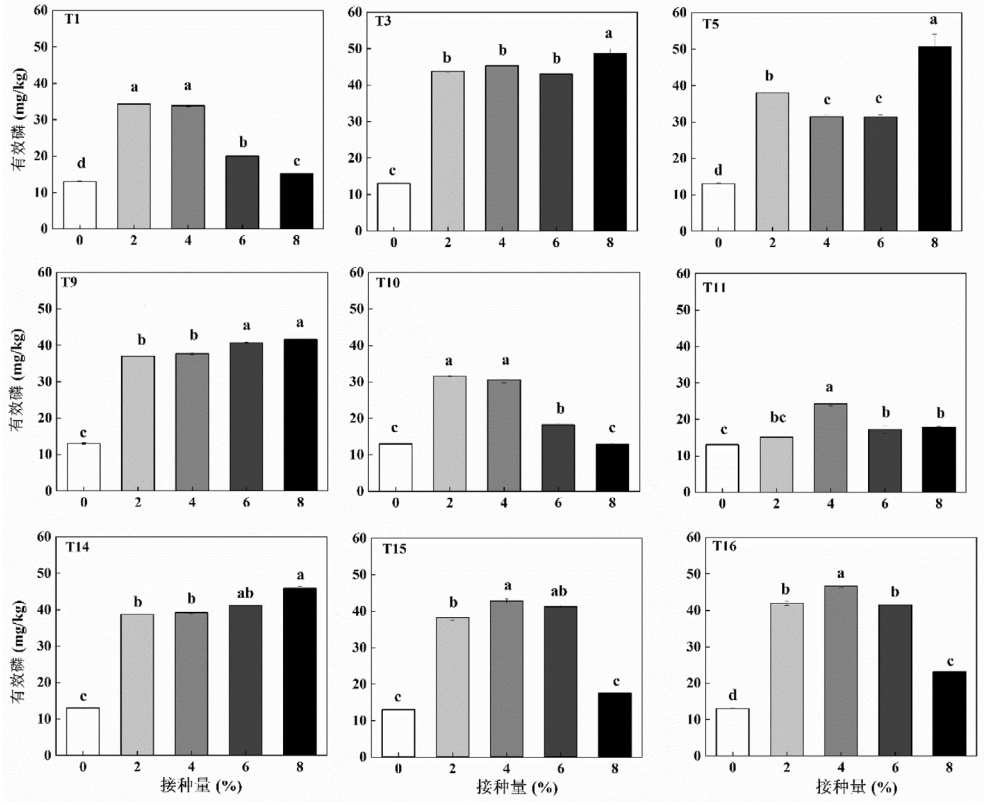


图 3　不同接种量对磷尾矿的解磷效果

Fig.3　Effects of different inoculations on phosphate solubilization of the phosphate tailings

图中结果为平均值±标准差(n=5),不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)

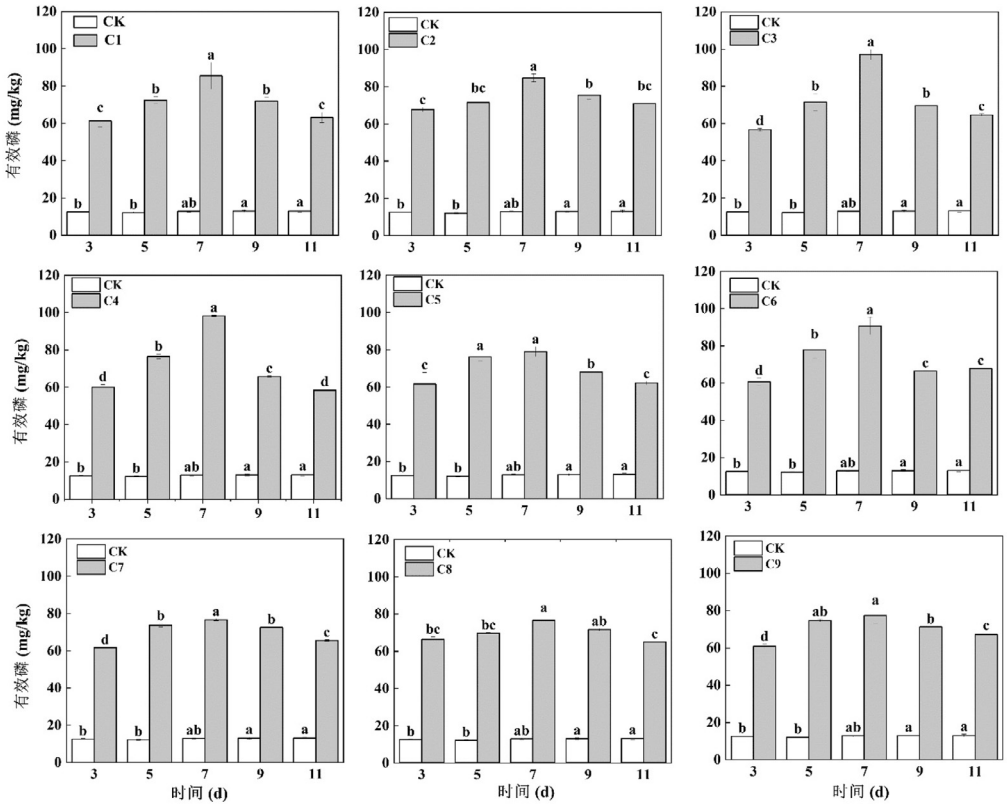


图 4　复合菌剂对磷尾矿的解磷效果

Fig.4　Effects of composite bacteriological agents on phosphate tailings

图中结果为平均值±标准差(n=5),相同颜色柱子标注有不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)

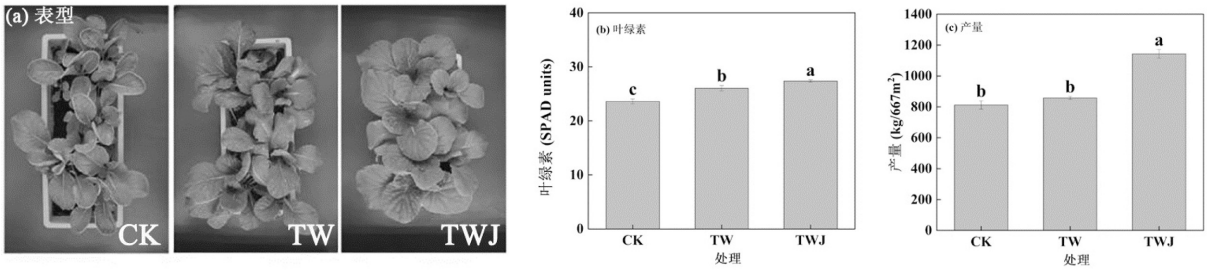


图 5 不同处理对小白菜生长的影响

Fig.5 Agronomic effects of Chinese cabbage after treated with phosphate tailings activated with the phosphate solubilizing bacteria

图中结果为平均值±标准差(n=3),不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05).下同

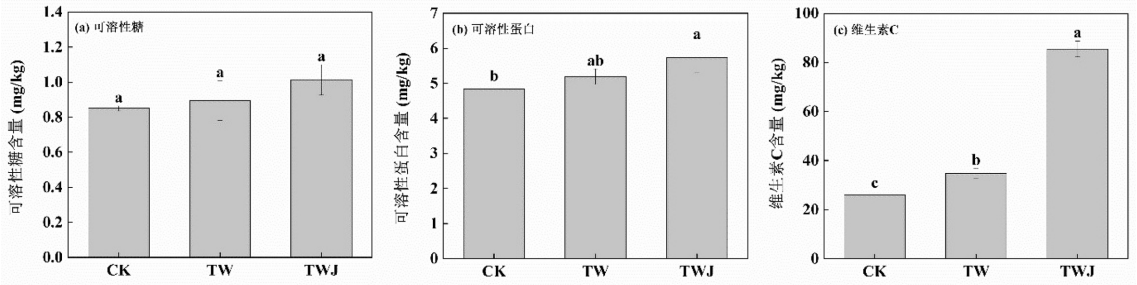


图 6 不同处理对小白菜品质的影响

Fig.6 Effect of the activated phosphate tailings on the quality of Chinese cabbage

3 讨论

磷尾矿是磷酸盐化学工业生产中产生的主要固体废弃物[23],其大量堆存导致土地资源不能充分利用,还会对周边生态环境产生持续性污染[24].研究表明,磷尾矿与天然磷矿具有相似的矿物学特征,尾矿中含有大量的钙、镁和磷等矿物元素[25],然而,大部分磷以难溶性磷酸盐形式存在,难以被植物吸收和利用,不能满足植株生长需求[26].因此,通过微生物菌剂的生物活化作用提高磷尾矿中有效磷含量,不仅能够促进磷尾矿在农业中资源化利用,还可有效减少磷素流失造成的面源污染问题,为开发尾矿的高效利用途径提供新的解决方案.

解磷菌能有效的溶解磷尾矿中的磷,近年来已报道多种微生物对磷尾矿有解磷作用[18,27-28],但大多是实验室保存单一菌种.李文等[29]检测了不动杆菌(*Acinetobacter indicus*)JL-1 对磷矿粉的动态解磷曲线,研究发现解磷菌在 12h 后快速增长,在 60h 时降解磷矿粉效果最好,解磷量为 4.65μg/mL,溶磷率为 2.34%.王应兰等[30]利用藤黄微球菌(*Micrococcus luteus*)GZU-Mic02 和巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)解离煤矸石最佳条件分别是煤矸石粒径 20 目,pH 5. 5,接菌量 100mL,培养时间 6d,有效磷含量 167.52mg/kg;煤矸石粒径 20 目,pH 8.5,接菌量 80mL,培养时间 4d,有效磷含量 155.26mg/kg.吴玥等[18]从磷铁尾矿中筛选到人参假单胞菌(*Pseudomonas panacis*)JP21-05,随培养时间增加,发酵液可溶性磷浓度增加,5d 后增速降低.本研究收集了常用的商业化芽孢杆菌属(*Bacillus*)解磷菌剂 14 份和链霉菌属(*Streptomyces*)解磷菌剂 2 份.试验表明这 16 份微生物菌剂均有一定的解磷能力,能够将磷尾矿中无法被植物吸收利用的全磷分解为可供植物体吸收的有效磷.通过聚类分析方法来筛选解磷效果较强的菌剂,其中第 I 类群为有效磷含量提高 80%以上的菌剂 2 个,第 II 类群有效磷含量提高 50%以上的菌剂 7 个,第 III 类群有效磷含量提高 10%以上的菌剂 7 个.16 份菌剂整体的解磷效果随着发酵培养时间的递增呈现出先上升后趋于平稳,有效磷含量峰值基本集中在第 7d 和第 9d,解磷能力为 9.56~19.11mg/kg, 与对照相比提高了 5.35%~100.91%.部分菌剂解磷效果后期呈下降趋势,可能因为培养液中营养物质逐渐减少,导致部分菌种死亡,被菌种分解出的可溶性有效磷再次螯合成为不

溶于水的总磷导致有效磷含量有所下降[31].

研究表明,溶磷作用是多种微生物协同作用的结果,复合菌剂的解磷效果优于单一菌剂.已有研究表明,由黑曲霉 5%、乳酸菌 4%、醋酸菌 3%和巨大芽孢杆菌 5%组成的复合菌剂对磷尾矿中磷的转化率达到 78.7%[17].本试验通过初筛和复筛获得 4 个具有较好解磷效果的菌剂,分别是枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)和不吸水链霉菌(*Streptomyces ahygroscopicus*).进一步构建了 3 种高效解磷复合菌剂,其解磷效果较对照组分别提高了 7.5、7.6 和 7.1 倍.尾矿的化学组分复杂,其内部存在着丰富的微生物群落,尾矿中某一特定微生物类群数量的变化可能引发整个微生物群落结构和功能的显著改变.通过添加复合菌剂的方式,虽可能对尾矿微生物群落的原有平衡有一定影响,但更有利于优势菌群的富集与功能发挥,从而有效促进尾矿中难溶性磷的溶解与释放,为尾矿的资源化利用提供潜在途径.

尾矿中含有多种作物必须养分元素及有益元素,包括钙、镁、硫、锌、铁、锰等,可作为农业生产中重要的养分来源[7].除了大量元素(氮、磷、钾)之外,中微量元素(钙、镁、铁等)是蔬菜生长发育必需的营养元素,参与细胞结构形成、光合作用调控以及蛋白合成等关键生理过程,对提升蔬菜产量和改善品质具有重要作用.本研究发现,与对照相比,施加尾矿(TW)处理与 CK 相比,产量提高 5.56%,差异不显著,表明 TW 处理未加菌剂因此有效磷有限,其他养分对产量贡献也较低.TWJ 处理加入菌剂后,有效磷含量增多,产量提高了 40.78%,表明菌剂通过分泌有机酸促进全磷转化成有效磷,提高产量.磷也是 ATP/NADPH 合成必需元素,直接影响光合作用(叶绿素含量)和抗坏血酸的合成[32].本研究中 TW 处理显著提高了小白菜维生素 C 含量(34.04%),而 TWJ 处理维生素 C 含量增加了 229.36%,李宇轩等[33]研究发现,小白菜对锰、铜吸收量与生物量呈极显著正相关,磷肥施用对小白菜微量元素吸收有显著交互作用.可见,尾矿中的有益元素对小白菜的产量和品质均有不同程度的提高和改善.磷对小白菜产量和品质提高是主要元素.

磷尾矿是改良土壤和提供矿质营养的良好资源[7,34].因此利用微生物或微生物肥料,有利于提高土壤肥力,改善植物营养.本试验研究表明,施用单一磷尾矿及尾矿和菌剂组合均使植株长势较好,叶绿素含量较高,产量和品质有均提高.但施用尾矿和菌剂组合效果优于单施尾矿效果,说明微生物菌剂和尾矿起到了协同作用.通过复合菌剂作用,使尾矿中有效磷含量增加,同时也影响了小白菜对中微量元素的吸收,进而增产提质.因此在尾矿中添加微生物菌剂在尾矿资源化利用,环境治理等方面,具有较好的应用前景.

4　结论

4.1　通过对 16 种商业化菌剂在尾矿中解磷效果评价,筛选出 9 种适宜在磷尾矿环境中生长并具有显著解磷效果的菌剂,可提高尾矿中有效磷含量 40%以上.

4.2　优化了高效解磷菌的接种量,进一步筛选出 4 种高效解磷菌的适宜接种量,使尾矿中的有效磷含量提高 5 倍以上,为磷尾矿的生物活化提供了优良的菌种资源.

4.3　采用正交试验构建了 3 个复合菌系均表现出显著的解磷能力,使尾矿中的有效磷含量提高 7 倍以上.

4.4　在盆栽试验中,单一施用尾矿及尾矿和菌剂配施均能显著促进小白菜生长,提高其产量和品质.其中以尾矿和菌剂配施处理的效果最为显著.

参考文献:

[1] Karunarathna M H J S, Hatten Z R, Bailey K M, et al. Reclaiming phosphate from waste solutions with Fe (III)–Polysaccharide hydrogel beads for photo–controlled–release fertilizer [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019,67(44):12155–12163.

[2] Wu J, Xiao Y, Yang X, Xu D, et al. Leaching kinetics for magnesium extraction from phosphate rock in the nitric acid method [J]. Minerals Engineering, 2022,189:107894.

[3] Yuan X M, Xie H J, Nie D P, et al. Thermogravimetric and spectroscopic analyses along with the kinetic modeling of the pyrolysis of phosphate tailings [J]. Royal Society of Chemistry Advances, 2023,13:16741–16748.

[4] 李鹏毅,张冬冬,宁　平,等.磷尾矿资源化利用研究 [J]. 化工矿物与加工, 2019,48(2):66–70.

Li P Y, Zhang D D, Ning P, et al. Study on resource utilization of phosphate tailings [J]. Chemical Minerals and Processing, 2019,48: 66–70.

[5] Boujlel H, Daldoul G, Tlil H, et al. The beneffciation processes of low-grade sedimentary phosphates of Tozeur-Nefta Deposit (Gafsa-Metlaoui basin: south of Tunisia) [J]. Minerals, 2018,9(1):2–15.

[6] Gu K, Lang L, Li D, et al. Preparation of magnesium oxysulfate cement with calcined phosphate tailings [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022,34(12):04022358.

[7] 张福锁,黄成东,申建波,等.绿色智能肥料:矿产资源养分全量利用的创新思路与产业化途径 [J]. 土壤学报, 2023,60(5):1203–1212.
Zhang F S, Huang C D, Shen J B, et al. Green intelligent fertilizer: New insight into making full use of mineral nutrient resources and industrial approach [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5):1203–1212.

[8] Gu K, Chen B, Yan P, et al. Recycling of phosphate tailings and acid wastewater from phosphate chemical industrial chain to prepare a high value-added magnesium oxysulfate cement [J]. Journal Cleaner Production, 2022,369:133343.

[9] Steiner G, Geissler B, Watson I, et al. Efficiency developments in phosphate rock mining over the last three decades [J]. Resources Conservation and Recycling, 2015,105:235–245.

[10] 赵 鑫,蔡慢弟,董倩倩,等.中低品位磷矿资源高效利用机制与途径研究进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018,24(4):1121–1130.
Zhao X, Cai M D, Dong Q Q, et al. Advances of mechanisms and technology pathway of efficient utilization of medium-low grade phosphate rock resources [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018,24(4):1121–1130.

[11] 曾汇文,李倩如,王雅士,等.土壤解磷细菌解磷机制及其促生作用综述 [J]. 湘南学院学报, 2022,43(2):12–20.
Zeng H W, Li Q R, Wang Y S, et al. Review of phosphorus-resolving mechanism and growth-promoting function of soil phosphorus-solubilizing bacteria [J]. Journal of Xiangnan University, 2022,43(2): 12–20.

[12] 马会娟,杨 成,潘志权,等.磷尾矿制备硫酸镁试验研究 [J]. 非金属矿, 2017,40(1):93–95.
Ma H J, Yang C, Pan Z Q, et al. Experimental study on the preparation of magnesium sulfate from phosphate tailings [J]. Non-Metallic Mines, 2017,40(1):93–95.

[13] 张萍花,张春丽,王红艳,等.硝酸酸解磷尾矿制备氢氧化镁工艺条件研究 [J]. 现代化工, 2017,37(5):102–105.
Zhang P H, Zhang C L, Wang H Y, et al. Study on the process conditions to produce magnesium hydroxide from phosphate tailings by using nitric acid leaching [J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37(5):102–105.

[14] 崔雅芬,巩俊花,高俊岭,等.活化磷尾矿在玉米上的应用效果研究 [J]. 磷肥与复肥, 2020,35(4):47–48.
Cui Y F, Gong J H, Gao J L, et al. Study on application effect of activated phosphorus tailings on corn [J]. Phosphate Compound Fertilizer, 2020,35(4):47–48.

[15] 杜 雷,王素萍,陈 钢,等.一株高效解磷细菌的筛选、鉴定及其溶磷能力的研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2017,3:136–141.
Du L, Wang S P, Chen G, et al. Isolation and identidication of efficient phosphate-solubilizing bacterial strain and its phosphate-solubilizing capacity [J]. Chinese soil and fertilizer, 2017,3:136–141.

[16] 刘 诺,王小丫,刘海龙.复合功能菌群应用于铁尾矿生态改良及修复研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):1045–1051.
Liu N, Wang X Y, Liu H L et al. Eco-engineering of Fe pre tailings into soil using sludge and functional microbial system [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):1045–1051.

[17] 范志平,王修俊,程艳波,等.高效分解磷尾矿粉复合微生物菌剂的制备 [J]. 河南农业科学, 2013,42(11):72–75.
Fan Z P, Wang X J, Cheng Y B, et al. Preparation of compound microorganisms with efficient decomposition of phosphate tailings powder [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013,42(11):72–75.

[18] 吴 玥,王秋颖,关体坤,等.磷铁尾矿中高效解磷菌筛选、鉴定及解磷特性 [J]. 北京农学院学报, 2022,37(4):6–12.
Wu Y, Wang Q, Guan T K, et al. Isolation, identification and phosphate solubilizing characteristics of a phosphate solubilizing bacterium from ferrophosphate tailings [J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2022,37(4):6–12.

[19] 杨正桥,邹 奇,韦 行,等.金属尾矿微生物对尾矿环境的适应与调控机制研究进展 [J]. 生态环境学报, 2024,33(1):156–166.
Yang Z Q, Zhou Q, Wei H, et al. Research progress on the adaptation and regulation mechanism of micro-organisms in metal tailings [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024,33(1):156–166.

[20] 徐云龙,周 游,郭立佳,等.产紫蓝状菌解磷条件的优化及对辣椒生长与品质的影响 [J]. 微生物学报, 2025,65(5):2175-2189.
Xu Y L, Zhou Y, Guo L J, et al. Optimization of culture conditions for phosphorus solubilization of *Talaromyces purpureogenus* with effects of promoting the growth and improving the quality of red cluster pepper [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025,65(5):2175-2189.

[21] 薛鹏英,晏 婷,吴雨清,等.肉鸭粪肥替代化肥对小白菜及土壤环境的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2024,43(4):947–954.
Xue P Y, Yan T, Wu Y Q, et al. Effects of partial replacement of chemical fertilizer by different treatments of meat duck manure on Chinese cabbage and soil environment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(4):947–954.

[22] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导 [M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007:40-42.
Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. Guidance of postharvest physiological and biochemical experiments on fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007:40-42.

[23] Yang F, Lv J, Zhou Y, et al. Co-pyrolysis of biomass and phosphate tailing to produce potential phosphorus-rich biochar: efficient removal of heavy metals and the underlying mechanisms [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30:17804–17816.

[24] Hu N, Lv Y, Lou B, et al. Preparation and performance of porous ceramsite for Ag^{+} removal in sewage treatment with total phosphorus tailings [J]. Journal of Cleaner Production, 2023,413:137515.

[25] Wu S, Liu Y, Shang L, et al. Recycling of phosphate tailings for an efficient hydroxyapatite-based adsorbent to immobilize heavy metal cations [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30: 72160–72170.

[26] Shen J, Yuan L, Zhang J, et al. Phosphorus dynamics: From soil to plant [J]. Plant Physiology, 2011,156(3):997–1005.

[27] 陈佳兴,秦　琴,邱树毅,等.磷尾矿土壤中解磷细菌的筛选及解磷能力的测定 [J].. 生物技术通报, 2018,34(6):183–189.
Chen J X, Qin Q, Qiu S Y, et al. Isolation, identification of phosphate-solubilizing bacteria derived from phosphate tailing soil and their capacities [J]. Biotechnology Bulletin, 2018,34(6):183–189.

[28] 李雪涛,许永利.解磷菌的筛选鉴定及其促生效果研究 [J]. 农业与技术, 2024,44(24):108–112.
Li X T, XU Y L. Screening and identification of phosphorous solubilizing bacteria and its growth promoting effect [J]. Agriculture and Technology, 2024,44(24):108–112.

[29] 李　文,王　陶.解磷菌 JL-1 对磷矿粉降解性能的研究 [J]. 生物技术通报, 2020,36(8):34–44.
Li W, Wang T, 2020. The characteristics of phosphate solubilization of rock phosphate by phosphate-solubilizing bacterium JL-1 [J]. Biotechnology Bulletin, 2020,36(8):34–44.

[30] 王应兰,姜　雄,吉　俐,等.基于高效解磷菌的煤矸石肥料制备及其应用潜力分析 [J]. 浙江农业学报, 2020,32(11):2035–2041.
Wang Y L, Jiang X, Ji L, et al. Preparation of coal gangue fertilizer based on high-efficiency phosphate solubilizing bacteria and its application potential [J]. Acta Agriculturae Zhejianggensis, 2020,32 (11):2035–2041.

[31] 任增良.一种复合微生物有机肥的研制及效果研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2014:31.
Ren Z L. Research of preparation and effects of a compound microbial fertilizer [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014:31.

[32] Chen G, Ran Q, Wang C, et al. Enhancing photosynthetic phosphorus use efficiency through coordination of leaf hosphorus fractions, allocation, and anatomy during soybean domestication [J]. Journal of Experimental Botany, 2025,76(5):1446-1457.

[33] 李宇轩,陈智伟,孙小飞,等.生物质炭和磷肥施用对土壤和小白菜中微量元素的影响 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2020,36(1): 42-48.
Li Y X, Chen Z W, Sun X F, et al. Effects of biochar and phosphate fertilizer application on micronutrients in soil and Chinese cabbage [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2020, 36(1):42-48.

[34] Pencea I, Turcu R, Popescu-Arges, et al. An improved balanced replicated sampling design for preliminary screening of the tailings ponds aiming at zero-waste valorization. A Romanian case study [J]. Journal of Environmental Management, 2023,331(1):117260.

作者简介：王　晔(1983-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要从事废弃物高值化利用研究.发表论文 30 余篇.wangyebua@126.com.