

有机肥复合聚丙烯酰胺对铁尾矿的改良效果

海龙¹, 许毅¹, 魏驰文¹, 姜永丰², 孙殿兴², 孙瑞珩²

[1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司歪头山铁矿, 辽宁 本溪 117000]

摘要: [目的] 探究有机肥和聚丙烯酰胺(PAM)按不同比例配制的改良剂对铁尾矿改良效果的影响, 为铁尾矿的改良提供科学依据。[方法] 通过室内土培试验和盆栽试验, 设计有机肥(5%, 6%, 7%)和聚丙烯酰胺添加比例(0.05%, 0.10%, 0.15%)结合室内理化性质分析, 同时选用狗牙根(*Cynodon dactylon*)作为先锋植物, 分析植株的生长指标, 探究不同有机肥和聚丙烯酰胺添加比例下对铁尾矿的改良效果。[结果] ①添加改良剂能够显著提高尾矿的养分, 改善尾矿的pH值, 相较于对照组有机质提高71%~179%。②不同配比改良剂的加入均降低了尾矿的渗透系数, 改善了尾矿的结构, 提高了尾矿的保水保肥能力。③改良剂的加入显著提升植株发芽率, 最高增幅达60%。并且促进株高与根长生长, 株高与根长分别增加140%~290%和98%~247%。[结论] 有机肥和聚丙烯酰胺的加入能够改善尾矿的理化性质, 研究推荐的最优配比方案为: 铁尾矿: 有机肥: 聚丙烯酰胺=100: 6: 0.1。

关键词: 土壤改良剂; 有机肥; 铁尾矿; 聚丙烯酰胺; 理化性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0022-07

中图分类号: S156.2, S156.99

文献参数: 海龙, 许毅, 魏驰文, 等. 有机肥复合聚丙烯酰胺对铁尾矿的改良效果[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 22-28. Hai Long, Xu Yi, Wei Chiwen, et al. Improvement effects of organic fertilizer combined with polyacrylamide on iron tailings [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 22-28.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.008

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.008

Improvement effects of organic fertilizer combined with polyacrylamide on iron tailings

Hai Long¹, Xu Yi¹, Wei Chiwen¹, Jiang Yongfeng², Sun Dianxing², Sun Ruiheng²

[1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning

123000, China; 2. Waitoushan Iron Mine, Benxi Iron and Steel (Group) Mining Co., Ltd. Benxi, Liaoning 117000, China]

Abstract: [Objective] The effect of composite amendments comprised of organic fertilizer (OF) and polyacrylamide (PAM) in different proportions for iron tailings remediation were investigated, in order to provide scientific insights for ecological rehabilitation. [Methods] Through laboratory soil cultivation and pot experiments, the addition ratios of organic fertilizer (OF) (5%, 6%, 7%) and PAM (0.05%, 0.10%, 0.15%) were designed and the indoor physical and chemical properties were analyzed, and *Cynodon dactylon* was selected as a indicator pioneer plant to analyze the growth indicators of the plants in order to explore the improvement effects on iron tailings under different addition ratios of organic fertilizers and polyacrylamide. [Results] ① The addition of amendments can significantly enhance the nutrients, improve the pH value of tailings, and increase the organic matter by 71%—179% compared with the control group. ② The addition of different ratios of amendments reduced permeability coefficient (K) and improved the structure of tailings, and enhanced their water and nutrient retention capacity. ③ The addition of amendments significantly increased the germination rate of plants, with the maximum increase reaching 60%. And it promotes the growth of plant height and root length, increasing them by

收稿日期: 2025-08-26

修回日期: 2025-09-17

采用日期: 2025-09-19

资助项目: 辽宁省教育厅基本科研项目“低品质固废复合膏体充填采矿围岩变形与地压控制研究”(LJ242410147078); 本溪钢铁(集团)矿业有限责任公司歪头山铁矿科研项目“高压辊磨超细尾矿制备复合生态复垦土技术研究”

第一作者: 海龙(1975—), 男(蒙古族), 辽宁省阜新市人, 博士, 副教授, 主要从事充填采矿、固体废弃物综合利用与灾害控制等方面的研究。Email: hailong8901@163.com.

通信作者: 许毅(2001—), 男(汉族), 湖南省岳阳市人, 硕士研究生, 研究方向为矿山生态修复。Email: 2076971704@qq.com.

140%—290% and 98%—247% respectively. [Conclusion] The addition of OF and PAM can improve the physical and chemical properties of tailings. The optimal ratio is iron tailings : OF : PAM=100 : 6 : 0.1.

Keywords: soil amendment; organic fertilizer (OF); iron tailings; polyacrylamide (PAM); physicochemical properties

铁尾矿是选矿过程中产生的主要固体废弃物,截至 2024 年,中国铁尾矿的堆积量已超过 3.0×10^9 t^[1]。中国铁尾矿的综合利用率仅约 7%,堆存的尾矿形成的尾矿坝引发了一系列问题,如占用土地、污染环境、尾矿坝失稳等生态问题^[2]。堆存的铁尾矿养分含量低,植被定植困难,保水保肥性能差,不利于植物生长^[3]。铁尾矿土壤化改良能优化尾矿性质,提高尾矿养分,解决所带来的环境问题^[4-5]。因此,铁尾矿改良对中国生态环境保护具有重要的意义^[6]。

近年来,微生物应用于尾矿修复的研究呈现持续增长趋势。张翠青等^[7]对比 5 种丛枝菌根真菌对铁尾矿的改良效果,发现 *Funneliformis mosseae* 菌株显著提高基质有效磷含量(提升 68%)。刘诺等^[8]提出由耐性枯草芽孢杆菌与固氮菌构建的复合菌群体系,该体系可通过产酸作用将铁尾矿 pH 值从 9.2 降至 7.5。以上技术在修复铁尾矿的过程存在受环境条件的制约,修复周期长,成本高昂等问题。因此具有高效且经济的原位修复技术成为研究热点,植物修复技术作为原位修复技术中的一种,具有治理成本低廉,治理过程在原来的位置上修复,无需太大的变动与周围环境兼容性高的优势^[9]。然而对于污染程度严重的土壤并不适合进行植物修复。

有机肥作为改良剂的加入能有效解决周期长,成本高昂的问题。李想等^[10]阐述了有机肥对铁尾矿的改良效果,有机肥显著降低了尾矿密度,提高孔隙度,并中和碱性,给植物生长创造有利条件。费玲云等^[11]研究指出,单一有机肥的加入对尾矿的改良效果较差。聚丙烯酰胺在土壤改良中具有多功能性,能够有效改善土壤的理化性质,提高土壤的保水、保肥和抗侵蚀能力^[12]。Sun Bo 等^[13]揭示了聚丙烯酰胺

对铁尾矿持水能力、渗透速率和饱和导水率的影响规律,低质量浓度的聚丙烯酰胺对尾矿表层的保水能力是有利的。聚丙烯酰胺单独使用无法解决根本的养分缺乏和结构不良问题。聚丙烯酰胺施用在铁尾矿中,其效果高度依赖有机质或黏粒载体,而有机肥单独施用存在持水性差的缺陷,单一改良剂无法同时解决结构劣化、养分匮乏、水分流失这 3 大问题^[14]。因此两种及以上改良剂的协同改良效果潜力巨大。鉴于此,为了改善聚丙烯酰胺和有机肥分别在单独施用下的局限性,弥补有机肥复合聚丙烯酰胺协同改良的空白,本研究选择有机肥和聚丙烯酰胺,通过复配构建不同配比的改良剂,探究不同配比改良剂对铁尾矿理化性质的影响。同时,选择狗牙根为先锋植物,研究狗牙根的株高、根长和发芽率的变化,阐述不同配比改良剂对铁尾矿的改良效果。最终确定最优的配比方案。该方案不仅可为铁尾矿的改良提供科学依据,还可为解决铁尾矿堆积带来的生态环境问题提供可行的技术路线。

1 材料与方法

1.1 试验材料

材料主要包括铁尾矿,聚丙烯酰胺和有机肥。有机肥使用充分发酵的羊粪,其养分含量为有机质 62.1%,全氮为 2.3%,全磷为 3.2%,全钾为 0.8%。聚丙烯酰胺采用阴离子型且分子量为 1 000 万,采购于鑫邦环保科技有限公司。1 000 万分子量的阴离子型聚丙烯酰胺分子链长具有较强的桥接能力,外观为一种细纱状白色粉末。铁尾矿于 2025 年 5 月初取自辽宁省本溪市歪头山铁尾矿库,其理化性质详见表 1。

表 1 铁尾矿的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of iron tailings

项目	含水率/%	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
数值	5.68	8.25	4.80	1.28	47.68	6.38×10^{-4}

按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》,通过颗粒筛分试验确定铁尾矿粒径的分布情况,颗粒筛分试验采用米淇 ZDS-200 电动振动筛分机。根据尾矿分类标准,该尾矿属于尾粉砂。筛分试验结果详见表 2。

1.2 试验设计

为探究不同配比方案对铁尾矿理化性质的影响,采用室内土培试验。细化梯度^[15-16]的配比方案如表 3 所示,将 9 种不同处理方案和对照组置于土培槽内,进行室内培养,培养期间保持尾矿湿度为田间持

水量的 70%。培养 60 d 后,用环刀取样,测定尾矿的养分和 pH 值的变化。为了筛选最优的配比方案,量化不同配比处理对植物生长的差异化影响,设计采用盆栽试验,选取 30 个规格统一的圆形塑料盆(直径:20 cm,高度:15 cm),共包含 10 组配比处理方案,每组分别设置 3 个平行试验。每盆装入 400 g 铁尾矿,采用干混法将铁尾矿、聚丙烯酰胺和有机肥按照配比充分混合。选用狗牙根为先锋植物,将狗牙根种子提前 4 h 进行浸泡处理,把浸泡完的种子平铺在纸巾上,选取颗粒饱满的 450 粒狗牙根种子,每盆种入种子 15 粒。定期浇水养护,将植物盆栽培养 60 d,过程中保证充足的水分和阳光。第 3 d 起观测狗牙

根的发芽率,每 3 d 观测 1 次,直到第 15 d 后不再观测。60 d 后,测量植物的株高和根长数据。

表 2 铁尾矿的颗粒组成

Table 2 Particle composition of iron tailings

颗粒分级/mm	比例/%
1~2	0.42
0.5~1	5.95
0.25~0.5	23.58
0.1~0.25	39.26
0.075~0.1	12.56
≤0.075	18.23

表 3 铁尾矿改良试验设置

Table 3 Design of different treatments of iron tailings

处理编号	CK	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
铁尾矿/g	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
有机肥/g	0	5	6	7	5	6	7	5	6	7
聚丙烯酰胺/g	0	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15

1.3 指标测定方法

采集尾矿样本,经过自然风干,研磨后进行养分含量测定。有机质测定采用重铬酸钾容量法-稀释热法,速效磷测定采用碳酸氢钠法,速效钾测定采用乙酸铵浸提-火焰光度法,pH 值采用 pH 计进行测定,具体测定方法参照《土壤农化分析》^[17]。渗透系数测定采用常水头法试验过程中水温为 20℃,采用无气水,保证无气泡影响试验结果。植株生长状况采用直接测量法评估。在铁尾矿表层剪取植株,使得地上部分(茎)与地下部分(根)分离。直尺测量植株主茎基部到顶部的长度为株高;将附着于尾矿的根系通过清水冲洗收集后吸干多余水分后用镊子拉直后尽快测量。根长和茎高数据由两人单独测量并取平均值,误差>2 mm 的数据重新测量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2023 对试验数据进行统计处理,使用 SPSS 16.0 进行数据分析。用单因素差异性分析(One-way ANOVA)和双因素重复测量方差分析(Two-way repeated-measures ANOVA)比较不同处理组间的差异,使用 Tukey 检验, $p < 0.05$ 表示差异有统计学意义;通过 Pearson 进行相关性分析,用 Origin2024 软件绘图。

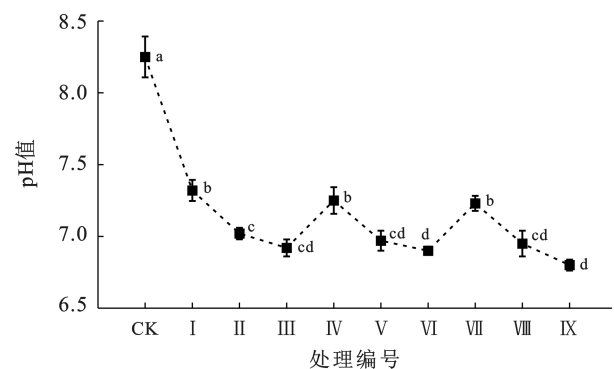
2 结果与讨论

2.1 改良剂不同配比下铁尾矿的理化性质

2.1.1 改良剂不同配比下铁尾矿的 pH 值变化

合适的 pH 值是植物生长的必要条件,且能影响

养分的有效性。图 1 为不同有机肥和聚丙烯酰胺添加量下尾矿 pH 值的变化。对照组中铁尾矿的 pH 值为 8.25。经不同配比的处理后,处理组的 pH 值均呈现不同程度的下降,变化范围为 7.32~6.81。其中,IX 处理的 pH 降幅最大,最大降幅达 1.44。有机肥的施用能改善土壤的 pH 值。I,II,III 组试验结果表明,当聚丙烯酰胺添加量恒定时,铁尾矿 pH 值的降幅随有机肥添加量的增加而增大。这可能与有机肥降解过程中产生的有机酸类物质积累有关。有机肥添加量提升导致降解产物中草酸、乙酸等有机酸浓度升高,从而强化体系酸化效应^[18]。I,IV,VII 组试验结果表明,当有机肥添加量恒定时,不同聚丙烯酰胺添加量的铁尾矿 pH 值无显著差异($p \geq 0.05$),表明聚丙烯酰胺对铁尾矿 pH 值的调节作用不明显。



注:①不同小写字母表示不同处理间有显著差异($p < 0.05$);
②各处理编号含义见表 3。下同。

图 1 改良剂不同配比下铁尾矿的 pH 值变化
Fig.1 pH value change of iron tailings under different amendment ratios

2.1.2 改良剂不同配比下铁尾矿的养分变化

合理施用有机肥能有效提升土壤肥力^[19]。图 2 为不同有机肥及聚丙烯酰胺添加量对铁尾矿中速效磷、速效钾和有机质含量的影响。由图 2 可知,相较于对照组,速效磷含量从 1.28 mg/kg 提升到 20.15~26.39 mg/kg, IX 处理的速效磷含量为 26.39 mg/kg, 高于其他处理组。速效钾含量从 47.68 mg/kg 提升至 280.32~330.15 mg/kg, 有机质含量从 4.8 g/kg 提升至 8.2~13.4 g/kg。总体而言,铁尾矿中速效磷、速效钾和有机质含量均随有机肥添加量的增加而显著提升,尤以速效磷的增幅最为显著。这表明有机肥的施用是提升铁尾矿养分水平的关键因素,与梁元

振等^[20]观点一致。I, IV, VII 组处理试验结果表明,在相同有机肥添加量下,不同聚丙烯酰胺添加量处理的铁尾矿,其速效磷、速效钾和有机质含量无显著差异($p \geq 0.05$)。

尽管如此,数据总体呈现随聚丙烯酰胺添加量增加,上述养分含量略有升高的趋势。这可能与聚丙烯酰胺的保肥能力有关,即较高聚丙烯酰胺添加量有助于减少养分的流失。可见有机肥能显著提高铁尾矿的速效磷、速效钾及有机质含量,而聚丙烯酰胺对养分含量的直接影响相对有限,与杨莹莹^[21]的研究一致。其主要作用可能体现在通过保肥能力减少养分流失。

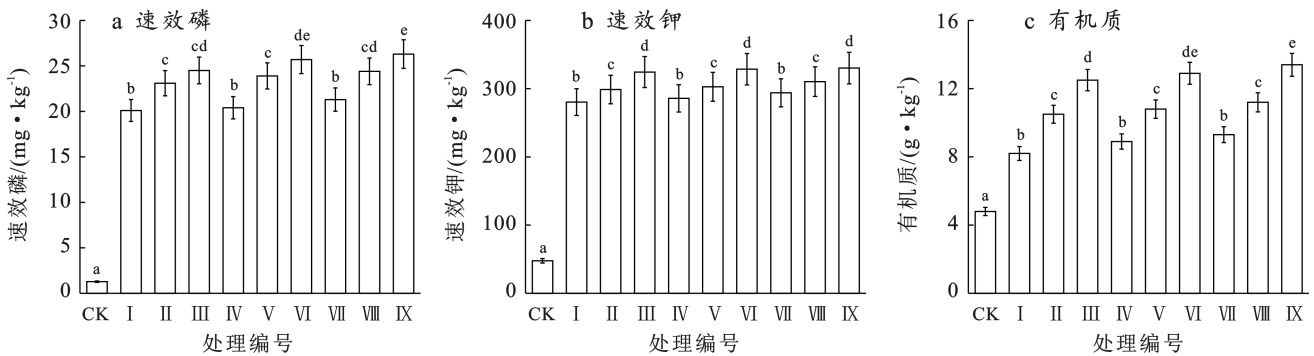


图 2 不同配比改良剂铁尾矿的养分变化

Fig.2 Nutrient change of iron tailings under different ratios of amendment

2.2 改良剂不同配比下铁尾矿的渗透系数

渗透系数作为表征多孔介质导水能力的关键参数,通过调控水分—氧气—养分的动态平衡,直接影响植物的生长指标。如图 3 所示,试验结果表明,所有处理组基质的渗透系数均低于对照组,CK 与各处理组间的渗透系数有显著差异($p < 0.05$),证明聚丙烯酰胺与有机肥的协同作用可有效降低铁尾矿的渗透性。

0.15%),渗透系数呈显著递减趋势(降幅达 65.2%~94.3%),这可能由于聚丙烯酰胺溶于水后形成三维网状凝胶结构,通过物理架桥作用堵塞孔隙通道^[22]。有机肥添加量对渗透系数的影响较弱但具协同性,其添加量从 5% 增至 7% 时,渗透系数仅额外降低 6%~15%。这主要归因于有机肥降解过程中产生的腐殖质,其表面官能团(-COOH, -OH)通过氢键作用促使细颗粒黏聚成团粒结构,进一步填充了土壤孔隙^[23]。

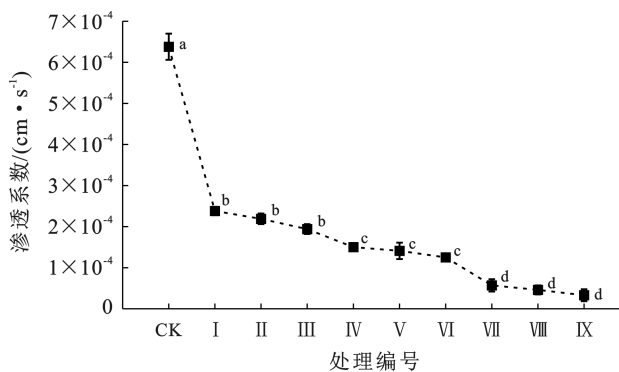


图 3 改良剂不同配比下铁尾矿的渗透系数

Fig.3 Permeability coefficient of iron tailings under different ratios of amendment

聚丙烯酰胺在渗透系数的变化中起主导作用:随着聚丙烯酰胺添加量的增加(0.05%, 0.10%,

2.3 不同配比下植物的生长指标

2.3.1 不同配比下植物的发芽率

发芽率是植物生长过程中最重要的指标之一。如图 4 所示,种子发芽率在培养 12 d 之后趋于稳定,从第 3 d 起处理组间发芽率即出现显著差异($p < 0.05$),12 d 达极显著水平($p < 0.001$)。处理组的发芽率均高于对照组,表明聚丙烯酰胺与有机肥的加入可有效提升种子发芽率并缩短发芽周期。其中,处理组 V 的发芽率达到峰值,较对照组(CK)提高 60%。聚丙烯酰胺添加量对发芽率的影响呈现非线性关系:当添加量为 0.10% 时发芽率最高,0.15% 次之,0.05% 最低。这可能是因为随着聚丙烯酰胺添加量的增大,聚丙烯酰胺的保水特性锁住基质中大部

分水分,为种子萌发创造了良好生长环境;但聚丙烯酰胺浓度如果过大就会抑制种子的萌发^[24-25]。可能是因为聚丙烯酰胺是长链高分子化合物,长链结构在低浓度时,能形成水凝胶网络帮助尾矿保水,但高浓度时,链段相互缠绕形成紧密结构通过增加尾矿的黏度,使种子吸水产生障碍,从而抑制种子的发芽。

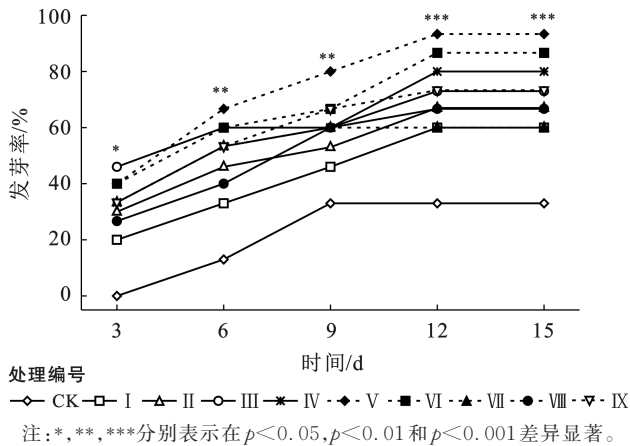


图 4 不同配比下植物的发芽率

Fig.4 Germination rate of plants under different ratios of amendment

2.3.2 改良剂不同配比下植物的株高和根长

测量结果如图 5 所示,处理组的狗牙根生长指标均优于对照组,表明处理措施对其生长具有促进作用。其中, V 组处理(聚丙烯酰胺添加量为 0.10%)的株高达到峰值 39.0 cm,且该处理下植株整体生长状态最佳。根系作为植物主要的营养器官,承担着吸收与运输水分、无机盐及营养物质等关键功能,其发达程度是决定植物生长的重要因素^[26]。由图 5 可见,处理组的根长均大于对照组,且以 V 组处理的根长最长,达到 54.0 cm。当施用的有机肥处于同一浓度水平时(处理 II, V, VIII),0.15% 的聚丙烯酰胺(VIII)形成较为紧密的尾矿,在植株生长期可能会抑制根系的呼吸作用,使得长势受限。当施用的聚丙烯酰胺处于同一水平浓度时(处理 IV, V, VI),7% 的有机肥已经超过先锋植株生长的最佳用量,过量的有机肥在分解过程中使得基质中碳氮比失衡,导致植株氮吸收量降低,影响植株生长。高欣等^[27]研究表明有机肥施用存在阈值,并不是越多越好。整体上,根长和株高变化趋势相似,两者均在聚丙烯酰胺添加量为 0.10% 时达到最大值(根长为 54.8 cm,株高为 39.2 cm)。I, IV, VII 处理结果表明,在相同有机肥添加量下,不同聚丙烯酰胺处理试验的根长和茎高均有显著差异($p < 0.05$),在聚丙烯酰胺添加量为 0.05% 时最低(根长 24.06 cm,株高 32.5 cm)。当聚

丙烯酰胺添加量增至 0.15% 时,根长和株高均较聚丙烯酰胺添加量为 0.10% 时下降(根长降幅 21.1%,株高降幅 9.9%)。这表明聚丙烯酰胺对狗牙根生长的促进作用具有剂量依赖性,中等剂量(0.10%)的促进效应最为有效。结果表明,有机肥和聚丙烯酰胺的加入对先锋植物的生长具有明显的促进作用。

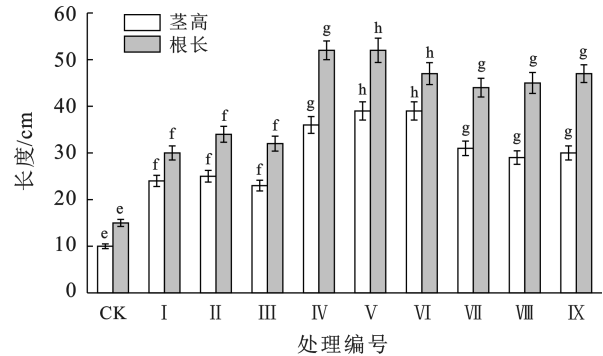


图 5 改良剂不同配比下植物的根长和茎高

Fig.5 Root length and stem height of plants under different ratios of amendment

2.4 相关性分析

由以上分析可知,不同处理组对铁尾矿的理化性质如 pH 值、速效钾、有机质等指标以及先锋植物狗牙根的发芽率、株高和根产生影响。为了进一步了解不同指标之间的相关性,利用 SPSS 16.0 软件对指标进行 Pearson 相关性分析(图 6)。

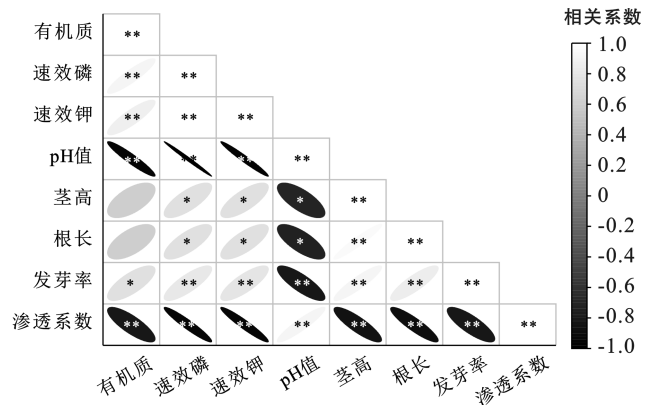


图 6 不同处理条件下植物生理生化指标的相关性

Fig.6 Correlation of plant physiological and biochemical indicators under different amendment treatments

由图 6 可知,呈正相关($p < 0.05$)的指标包括:有机质与速效钾、株高、根长;发芽率与株高、根长;呈负相关($p < 0.05$)的指标包括:pH 值与速效磷、有机质;渗透系数与株高、根长;pH 值越高,先锋植物的根长、株高的就越低,越不利于生长。pH 值过低或过高,会改变基质中营养元素的有效性不利于植物生长。陈雪娇等^[28]在植株生长过程中发现,当 pH 值过

高,基质中的磷元素会与钙结合形成难溶的磷酸钙,导致植物缺磷。当 pH 值过低,在酸性环境中钙、磷的溶解度降低,植物难以吸收,影响植株生长。这与肖强等^[29]观点一致。虽然相关系数表明了变量之间的关联程度,但不能确定因果关系。由于多个变量之间存在相互关联,研究它们之间的交互作用对于更深入了解尾矿性质和植物生长规律至关重要。

3 结论

(1) 有机肥和聚丙烯酰胺的加入大幅提高了尾矿中的有机质、速效磷和速效钾的含量,其中 3 者的含量均随有机肥添加量的增加而增大,尤以速效磷的增幅最为显著。聚丙烯酰胺添加量的增加对 3 者含量的影响并不大。同时改善了尾矿的 pH 值,达到适合植物生长的范围。

(2) 通过盆栽试验发现,铁尾矿在添加有机肥和聚丙烯酰胺后,狗牙根的株高、发芽率等生长指标均有明显改善,先锋植物狗牙根株高增加了 140%~290%,根长增加了 98%~247%,发芽率从对照的 33% 增加至 60%~93%。其中处理组 V 的植物生长情况最佳,最优的配比方案为铁尾矿:有机肥:聚丙烯酰胺=100 g:6 g:0.1 g。

(3) 研究表明,通过有机肥复合聚丙烯酰胺来改良铁尾矿的技术方案具有可行性,可为铁尾矿的资源化利用提供了技术支持,不仅解决了铁尾矿堆存带来的环境问题,更推进了绿水青山的理念,未来仍需深入验证该改良方法的长期效果,实现尾矿坝的可持续治理。

参考文献 (References)

- [1] Grilo C F, Chassagne C, da S Quaresma V, et al. The role of charge reversal of iron ore tailing sludge on the flocculation tendency of sediments in marine environment [J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 117:104606.
- [2] 安如意,王辉,李晟洲,等.“双碳”背景下铁尾矿库生态修复技术方向与策略[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2022, 74(6):82-91.
An Ruyi, Wang Hui, Li Shengzhou, et al. Technology direction and strategy of ecological restoration in iron tailings pond under the background of double carbon [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 2022, 74 (6) : 82-91.
- [3] 张进德,郗富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(21):7921-7930.
Zhang Jinde, Xi Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21):7921-7930.
- [4] 费启鸥,贾艳杰,刘述栋,等.铁尾砂资源化利用及铁矿区土壤修复技术研究进展[J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(7):37-46.
Fei Qiou, Jia Yanjie, Liu Shudong, et al. Research progress on resource utilization of iron tailings and soil remediation technology in iron mining area [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(7):37-46.
- [5] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1):173-184.
Liu Jiaoxian, Cui Jun, Liu Hongbao, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1):173-184.
- [6] 路畅,陈洪运,傅梁杰,等.铁尾矿制备新型建筑材料的国内外进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5):5011-5026.
Lu Chang, Chen Hongyun, Fu Liangjie, et al. Research progress on the preparation of new building materials using iron tailings [J]. *Materials Review*, 2021, 35(5) : 5011-5026.
- [7] 张翠青,毕银丽,于淼,等.不同丛枝菌根真菌对铁尾矿基质的改良效果[J]. *金属矿山*, 2010(8):171-174.
Zhang Cuiqing, Bi Yinli, Yu Miao, et al. The modified effect of *Arbuscular mycorrhizal* fungi on the Fe tailings substrate [J]. *Metal Mine*, 2010(8):171-174.
- [8] 刘诺,王小丫,刘海龙,等.复合功能菌群应用于铁尾矿生态改良及修复[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(2):1045-1051.
Liu Nuo, Wang Xiaoya, Liu Hailong, et al. Eco-engineering of Fe ore tailings into soil using sludge and functional microbial system [J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(2):1045-1051.
- [9] 郭梦凡,王冲,曲明山,等.复耕土壤改良与培肥研究进展[J]. *中国农学通报*, 2025, 41(19):103-109.
Guo Mengfan, Wang Chong, Qu Mingshan, et al. Research progress on soil improvement and fertilization for recultivation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(19):103-109.
- [10] 李想,张宝娟,李继泉,等.保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2):554-562.
Li Xiang, Zhang Baojuan, Li Jiquan, et al. Effects of combined application of water retention agent and organic fertilizer on physic-chemical properties of iron tailings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2):554-562.
- [11] 费玲云,邹伟民,周美彦,等.尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展[J]. *能源环境保护*, 2025, 39(4):48-60.
Fei Lingyun, Zou Weimin, Zhou Meiyuan, et al. Current status of tailings resource utilization and research

- progress on ecological utilization [J]. *Energy Environmental Protection*, 2025, 39(4):48-60.
- [12] 张澍,张光辉,张勇,等.聚丙烯酰胺对花岗岩砂土分离与产沙过程的影响[J].*水土保持通报*, 2024, 44(1): 68-75.
Zhang Shu, Zhang Guanghui, Zhang Yong, et al. Effects of polyacrylamide on detachment and sediment production process of granite-derived sandy soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1): 68-75.
- [13] Sun Bo, Lyu Chunjuan, Bi Rutian, et al. Effects of polyacrylamide molecular weight and mass concentration on water transport characteristics of iron tailings [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11:6252.
- [14] 孙羽丰,魏忠义,李秀凤.不同改良措施对铁尾矿 pH 值及速效养分含量的影响[J].*安徽农业科学*, 2007, 35(26):8077-8078.
Sun Yufeng, Wei Zhongyi, Li Xiufeng. Effects of different improving measures on the pH value and available nutrients of iron tailings [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(26):8077-8078.
- [15] 邵社刚,李婷,朱立安,等.土壤改良剂 PAM 在生土改良中的应用及效果[J].*西南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 48(6):97-103.
Shao Shegang, Li Ting, Zhu Li'an, et al. Application and effect of soil conditioner PAM in improve immature soil [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 48(6):97-103.
- [16] 马啸驰,白亚涛,韩烽,等.菇渣有机肥施用量对不同质地土壤养分提升及葡萄幼苗生长的影响[J].*农业环境科学学报*, 2025, 44(2):428-439.
Ma Xiaochi, Bai Yatao, Han Feng, et al. Effects of application amounts of spent mushroom substrate compost on soil fertility and grapevine growth in different textural soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(2):428-439.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] Hinsinger P, Plassard C, Tang Caixian, et al. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review [J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1):43-59.
- [19] 申梦雪,郝芮,刘新伟,等.化肥减量配施秸秆和有机肥对酸化土壤改良及侵蚀阻控的影响[J].*水土保持学报*, 2024, 38(6):333-342.
Shen Mengxue, Hao Rui, Liu Xinwei, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with straw and organic fertilizer application on soil acidification mitigation and erosion control [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6):333-342.
- [20] 梁元振,赵京考,吴德亮,等.秋施有机肥对土壤生物学、理化性状及玉米产量的影响[J].*水土保持研究*, 2017, 24(3):113-118.
Liang Yuanzhen, Zhao Jingkao, Wu Deliang, et al. Effects of application of organic fertilizer in autumn on the soil biological, physical and chemical properties and maize yield [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(3):113-118.
- [21] 杨莹莹.不同修复措施下侵蚀红壤的团聚体稳定性与肥力特点[D].湖北 武汉:华中农业大学, 2010.
Yang Yingying. The aggregate stability and fertility characteristic of eroded red soil with different restoration measures [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [22] 吴婕,朱钟麟,郑家国,等.秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J].*西南农业学报*, 2006, 19(2): 192-195.
Wu Jie, Zhu Zhonglin, Zheng Jiaguo, et al. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(2):192-195.
- [23] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社, 2002:57-67, 355-357.
Lin Dayi. *Soil Science* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002:57-67, 355-357.
- [24] 孙波,吕春娟.聚丙烯酰胺在土壤改良中的应用[J].*水土保持应用技术*, 2020(6):23-26.
Sun Bo, Lü Chunjuan. Application of polyacrylamide in soil improvement [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2020(6):23-26.
- [25] 李晓华,李维国.聚丙烯酰胺对几种植物种子萌发及生长的影响[J].*中国生态农业学报*, 2002, 10(4):77-79.
Li Xiaohua, Li Weigu. Effects of polyacrylamide on germination and growth of several plant seeds [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(4):77-79.
- [26] Campanelli A, Ruta C, De Mastro G, et al. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in alleviating salt stress in *Medicago sativa* L. var. *icon* [J]. *Symbiosis*, 2013, 59(2):65-76.
- [27] 高欣,赵雪淞,赵凤艳,等.化肥有机替代对连作花生田土壤有机碳和微生物群落的影响[J].*生态学杂志*, 2023, 42(1):99-107.
Gao Xin, Zhao Xuesong, Zhao Fengyan, et al. Effects of organic substitution of chemical fertilizers on soil organic carbon and microbial community in continuous cropping peanut fields [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(1):99-107.

- Zheng Lichen, Yu Wantai, Ma Qiang, et al. Advances in the integrated evaluation of farmland fertility [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5):156-161.
- [19] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2):176-183.
Wang Jianguo, Yang Linzhang, Shan Yanhong. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(2):176-183.
- [20] 孙绪博, 张宏凯, 孙婴婴. 基于模糊数学模型的沿黄河滩地土壤质量综合评价: 以韩城市下峪口为例[J]. 环境工程, 2017, 35(S2):537-540, 536.
Sun Xubo, Zhang Hongkai, Sun Yingying. Comprehensive evaluation of soil quality along the Yellow River beach based on fuzzy mathematical model: A case study of Xiayukou in Hancheng City [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(S2):537-540, 536.
- [21] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报, 2023, 60(5):1248-1263.
Zhao Xueqiang, Pan Xianzhang, Ma Haiyi, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5):1248-1263.
- [22] Tian Dashuan, Niu Shuli. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(2):024019.
- [23] 张福锁. 我国农田土壤酸化现状及影响[J]. 民主与科学, 2016(6):26-27.
Zhang Fusuo. Present situation and influence of farmland soil acidification in China [J]. Democracy & Science, 2016(6):26-27.
- [24] 曹小闯, 钟楚, 马庆旭, 等. 不同典型地带性土壤氮素分布特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3):688-696.
Cao Xiaochuang, Zhong Chu, Ma Qingxu, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen and its influence factors in different typical zonal soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3):688-696.
- [25] 张玲玉, 赵学强, 沈仁芳. 土壤酸化及其生态效应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6):1900-1908.
Zhang Lingyu, Zhao Xueqiang, Shen Renfang. Soil acidification and its ecological effects [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(6):1900-1908.
- [26] 李文婷, 黄顺生, 许伟伟, 等. 淮南市土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2025(1):1-14.
Li Wenting, Huang Shunsheng, Xu Weiwei, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of soil pH in Huai'an City [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(1):1-14.
- [27] 李雪梅, 舒英格. 不同土地利用类型下土壤养分变化及生态化学计量特征分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(28):62-69.
Li Xuemei, Shu Yingge. Analysis of soil nutrient changes and ecological stoichiometry under different land use types [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(28):62-69.
- [28] 连旭东, 张璐, 刘思汝, 等. 作物产量对土壤 pH 的响应差异及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(9):1618-1629.
Lian Xudong, Zhang Lu, Liu Siru, et al. Response of crop yield to soil pH and the influencing factors [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(9):1618-1629.
- [29] Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2019, 2019:5794869.
- [30] 陈娟, 郭宁, 王艳平, 等. 有机肥对复垦新增耕地土壤综合肥力及麦玉周年产量的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(增刊 1):195-202.
Chen Juan, Guo Ning, Wang Yanping, et al. The effect of organic fertilizer on the comprehensive fertility of newly reclaimed farmland soil and the annual yield of wheat and corn [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2024, 39(Suppl.1):195-202.

(上接第 28 页)

- [28] 陈雪娇, 韩航, 侯晓龙, 等. 水土保持植物类芦对土壤酸胁迫的形态生理响应[J]. 草业学报, 2017, 26(4):143-149.
Chen Xuejiao, Han Hang, Hou Xiaolong, et al. The morphological and physiological responses of the soil and water conservation plant *Neyraudia reynaudiana* to acid stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(4):143-149.
- [29] 肖强, 郑海雷, 陈瑶, 等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4):373-376.
Xiao Qiang, Zheng Hailei, Chen Yao, et al. Effects of salinity on the growth and proline, soluble sugar and protein contents of *Spartina alterniflora* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4):373-376.