

污泥-五种植物协同对赤矿泥土壤化处置的促进作用

徐敏¹, 成官文¹, 岳远隋¹, 徐晓宇¹, 杜诚豪¹, 王云龙¹, 曾玉辉¹,
冯杰², 农国武², 黄振艺²

(1. 桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 中国铝业股份有限公司 广西分公司, 广西 平果 531400)

[摘要] 为解决赤泥、矿泥的规模化、无害化处置问题,考察污泥-五种植物协同作用对控碱赤泥、脱水矿泥土壤化矿坑原位生态复垦的影响。结果表明,污泥-五种植物协同作用能显著降低赤矿泥基质的盐碱性,提高土壤化处置赤矿泥基质养分、酶活性和微生物的多样性,其中,pH值、全盐含量分别降至8.50、1.50 g·kg⁻¹,达到了矿山生态环境保护与恢复治理技术规范的要求;有机质、全氮、全磷在植物第一生长季的含量达到了全国第二次土壤普查标准中的三级水平;施加污泥后赤矿泥基质碱性磷酸酶和脲酶最高活性分别达到0.17 mg·g⁻¹2h⁻¹、2.05 mg·g⁻¹24h⁻¹。该方法为赤泥、矿泥土壤化处置规模化生态处理提供了新思路。

[关键词] 赤泥; 矿泥; 土壤化; 污泥-植物协同作用; 原位生态修复; 无害化处置; 规模消纳

[中图分类号] X758; TF821 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)06-0111-08

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.06.014

赤泥是铝土矿提炼氧化铝后排出的铝工业大宗固废,而提炼1 t氧化铝产生1~2 t赤泥^[1-2],2018年,赤泥全球库存达到46×10⁸ t,年均增长约2×10⁸ t,我国赤泥年产量达到6 900×10⁴ t^[3];矿泥是洗矿中产生的矿业固体废物以浆状形式排出后形成的沉淀物^[4],我国矿泥堆存量已超过3.5×10⁸ t,利用率不足4%,赤泥、矿泥的堆存为环境与安全带来巨大风险^[5]。

目前,矿泥资源化的主要途径是制备氧化铁红、聚合氯化铝铁、高铝水泥、煤矸石砖等^[6];赤泥综合利用的主要途径是用于制备生产建筑材料、陶瓷和吸附材料,还可以提取有价金属等^[7],但受技术可操作性、产品竞争力、生产成本、物理费用以及放射

性等局限,难以推广和实施^[8],因而赤泥土壤化修复的技术思路逐渐引起学者的关注。COURTNEY和薛生国^[9]研究发现利用石膏无机矿物材料作为改良剂,可以在一定程度上改善赤泥的土壤性质,有效降低可交换钠比例,促进植物生长;胡树翔等^[10]发现添加生物质可大幅度提升赤泥基质中微生物群落的活性和多样性,并增强土壤酶活性。但目前为止尚没有成熟的推广技术方法。经课题组初步探究,张宇玲等^[11]研究发现黑麦草种子发芽率在控碱赤泥与脱水矿泥组合成的赤矿泥基质达到99.67%;段绍彦等^[12]研究发现,矿坑周边坡耕地土壤理化性质与赤泥-矿泥土壤化处置赤矿泥基质特性较为互补,能够为赤泥-矿泥土壤化处置提供适宜环境空间。在此研究基础上,课题组进行了实际生态处置工程应用,开展赤泥-矿泥土壤化矿坑原位生态复垦研究,要考察外源施加污泥及不同种类的植物下赤矿泥基质的盐碱、养分、酶活、微生物多样性的变化特征及相互关系,以期赤泥、矿泥土壤化处置和规模化消纳提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验场地及材料

赤泥和脱水矿泥取自中国铝业股份有限公司广

[收稿日期] 2023-03-16

[第一作者] 徐敏(1997—),女,硕士研究生,从事赤泥矿泥土壤化处置研究。

[通信作者] 成官文(1962—),男,教授,博士,硕士研究生导师,从事水体污染控制工程研究。

[基金项目] 广西重点研发计划(桂科 AB20297039);中国铝业股份有限公司科技攻关项目(gxzz201903);矿泥土壤化处置示范及赤泥矿泥土壤化处置技术工程应用(gxzz202210)。

[引用格式] 徐敏,成官文,岳远隋,等. 污泥-五种植物协同对赤矿泥土壤化处置的促进作用[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(6):111-118.

西分公司。赤泥 pH 值为 11.12 ~ 11.18; 脱水矿泥 pH 值为 7.01 ~ 7.06。赤泥和脱水矿泥主要化学成分见表 1。

表 1 赤泥、脱水矿泥的化学组分

Table 1 Chemical compositions of red mud and dehydrated mineral slime

| 样品 | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | SiO ₂ | Na ₂ O | TiO ₂ | MgO | 其他 |
|------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------------------|------------------|------|-------|
| 赤泥 | 30.40 | 18.40 | 15.79 | 15.32 | 10.58 | 6.97 | 0.27 | 2.27 |
| 脱水矿泥 | 13.87 | 35.27 | 1.92 | 31.43 | 0.38 | 4.61 | 0.14 | 12.08 |

示范研究场地位于北纬 23°22'52"、东经 107°30'57", 属于中国铝业股份有限公司广西分公司矿山采空区。根据前期研究成果^[11,13], 赤泥按 3.3 g·kg⁻¹石膏粉、5 g·kg⁻¹FeCl₃、3.3 g·kg⁻¹MgCl₂ 配比控碱, 陈化 90 d 后与脱水矿泥按 1:4 (干重比) 在采矿矿坑进行土壤化处置: 混匀、摊平、压实后, 再表层覆盖 10 cm 场地整理杂土, 选取其中长 16 m、宽 3.5 m 的示范研究场地作为污泥-五种植物协同作用对控碱赤泥、脱水矿泥土壤化矿坑原位生态复垦进行研究。试验选择经小试初步筛选的翠芦绿 (R)、鬼针草 (S)、狗牙根 (B) 3 种草本植物和桑树 (M)、桉树 (E) 2 种乔木植物, 分别种植在 5 块同等大小的样区 (每块样区面积: 2.8 m × 3.5 m = 9.8 m²), 且植物种类区域间隔为 0.5 m。在 2021 年 4 月施加一次污泥肥料。

场地土壤化处置覆土前赤矿泥基质盐碱及其养分指标: pH 值 8.86, 全盐 5.02 g·kg⁻¹, 有机质 2.23 g·kg⁻¹, 全氮 0.62 g·kg⁻¹, 全磷 0.73 g·kg⁻¹, 速效钾 269.33 mg·kg⁻¹。与正常耕地土相比, 试验场地赤矿泥基质具有高盐碱, 除速效钾外其他养分含量呈现较低的特征。

1.2 试验方法与分析

按“S”形选取 5 个采样点, 采集 20 cm 处赤泥-矿泥处置赤矿泥基质样品, 等量混匀为 1 个混合样。将取回的土样分成 4 部分: 其一烘箱烘干后过 10 目 (孔径约 1.65 mm) 筛测定 pH 值; 其二室内自然风干 (全干状态) 后过 100 目 (孔径约 0.165 mm) 筛测定水溶性盐分和养分; 其三室内自然风干 (半湿半干状态) 后过 10 目筛, 存于 4 °C 冰箱内用于测定赤矿泥基质酶活性; 其四保存于装有干冰的保温箱中用于土壤微生物群落分析。

本文微生物多样性采用 16SRNA 扩增子测序技术; 对赤矿泥基质的脲酶活性、碱性磷酸酶活性分别

用苯酚-次氯酸钠比色法、磷酸苯二钠比色法进行测定; 赤矿泥基质 pH 值、全盐含量、有机质、全磷、速效钾分别用电位法、残渣烘干质量法、水合热重铬酸钾氧化-比色法、酸溶-钼锑抗比色法、乙酸铵提取法进行测定; 全氮用元素分析仪测定。赤矿泥基质养分基于第二次全国土壤普查养分分级指标进行评估^[14]。采用 Excel 与 SPSS22.0 统计软件进行数据处理及统计分析, 用 QIIME2 (2019.4) 和 R 语言 ggplot2 进行微生物物种组成分析, 用皮尔森 (Person) 相关系数进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 污泥-五种植物协同作用对赤矿泥基质盐碱的影响

污泥-五种植物作用下矿泥土壤化处置 20 cm 处赤矿泥基质的盐、碱测定结果统计见图 1。

2021 年, 施加污泥利于植物生长, 强化了植物的蒸腾作用及其全盐的迁移, 并随地表径流而减少, 不同植物种类赤矿泥基质全盐含量下降大小排序为: B > S > R > E > M。其中, 种植 B 赤矿泥基质全盐含量下降了 2.07 g·kg⁻¹, 低于轻度盐渍化标准, 其他植物类型也降到了轻度盐渍化区间, 五种植物都有较好的去盐效果, 其中植物 B 效果显著。进入 2021 年、2022 年季节轮替时, 植物进入休眠期, 气候变得较为干旱, 毛细管及水分蒸发作用导致全盐向表层迁移进入冬春年轮更替, 全盐含量明显增加; 进入夏季, 植物生长旺盛, 除 R 植物组外, 其他 S、M、B、E 植物组全盐含量又分别减少了 0.02、0.96、0.33、1.88 g·kg⁻¹, 显示植物生长能不同程度地消减赤矿泥基质全盐量。植物能通过扩散过程或载体、离子泵的主动转运对盐离子进行吸收, 后利用茎叶中的盐腺排出, 推进了赤矿泥基质全盐量的降低^[15]。

赤矿泥基质的 pH 值在 2021 年呈现下降趋势,

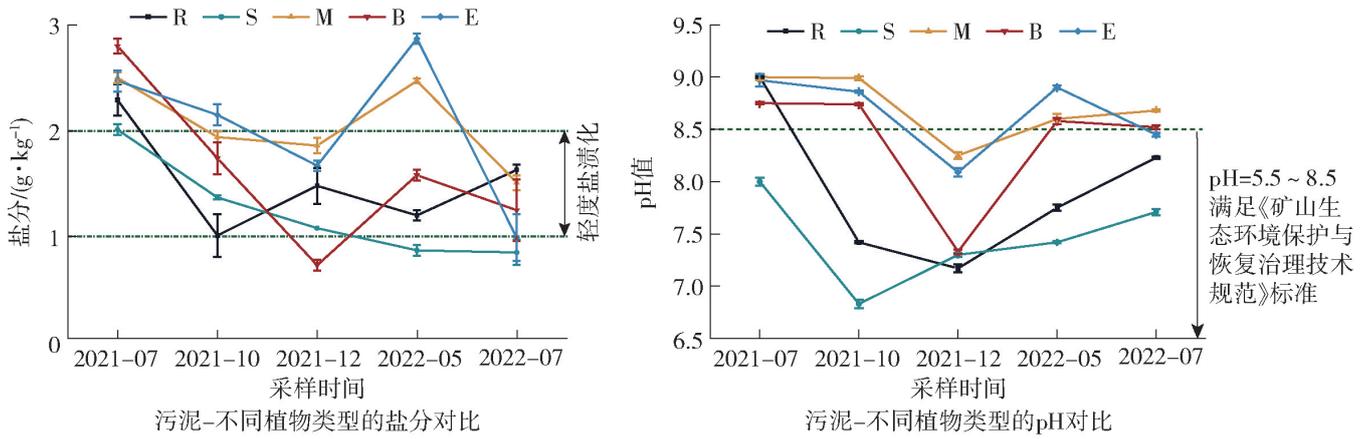
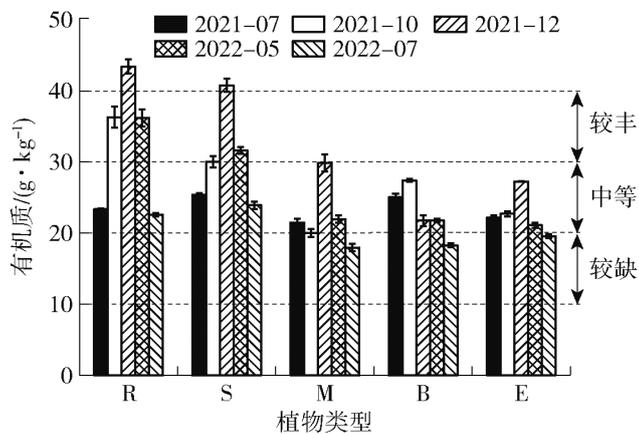


图1 污泥-五种植物协同下赤矿泥基质的盐碱变化

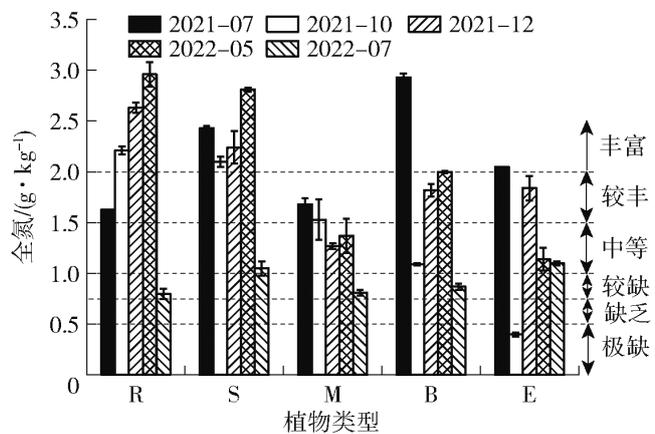
Fig. 1 Saline-alkali change of red mineral mud substrate under the coordination of sludge and five kinds of plants

pH 值达到了矿山生态环境保护与恢复治理技术规范的要求,2021 年 R、S、M、B、E 各种类赤矿泥基质 pH 值分别下降了 1.83、0.70、0.75、1.42、0.88, 均有不同程度的控碱作用,2022 年伴随全盐的运移转化,赤矿泥基质的 pH 值呈现类似上升趋势,除 M、B 植物组外 pH 值仍低于 8.50。污泥提供养分维持植物正常生长,植物产生的根系分泌物中的草酸、氨基酸、乳酸等有机酸^[16],降低赤矿泥基质中的 pH 值。

赤矿泥基质盐、碱显示类似的年度变化规律,说明其盐、碱物质具有类似的迁移转化或变化规律:污泥促进了植物生长,植物生长强化了盐、碱物质的迁移,二者的协同作用使赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质的盐、碱达到了正常范围,也表明污泥-植物的协同作用更利于赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质的控盐与控碱。



(a) 污泥-不同植物类型的有机质对比



(b) 不同植物类型的总氮对比

图2 污泥-五种植物协同下赤矿泥基质的有机质、全氮变化

Fig. 2 Changes of organic matter and total nitrogen in red mineral mud substrate under the coordination of sludge and five kinds of plants

2.2 污泥-五种植物协同作用下赤矿泥基质养分的变化

施加污泥后五种不同植物作用下的赤泥矿泥土壤化处置 20 cm 处赤矿泥基质的有机质、氮磷钾测定结果统计见图 2 和图 3。

赤矿泥基质有机质含量的变化见图 2(a)。污泥有机质较高,施加污泥后的赤矿泥基质有机质含量从 $2.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到了 $20.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到了全国第二次土壤普查第三级标准以上^[14]。2021 年,不同植物的生长周期、生长特性、凋落物及其分解过程的差异导致各植物在赤泥矿泥土壤化处置中的有机质含量呈现较大差异, R、S、M、B、E 组赤矿泥基质有机质含量分别增加了 20.08、15.39、8.41、-3.28、 $5.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,一年生植物 R、S 进入冬季整株枯萎腐烂,而多年生植物 M、B、E 进入休眠期,仅叶子凋落腐烂,使得种植植物 R、S 的赤矿泥基质有

机质增加量明显高于 M、B、E 组赤矿泥基质,低矮草本植物 B 因生物量低、根系作用浅,对取样深度范围内赤矿泥基质有机质的补偿少。进入来年,为研究植物生长对赤矿泥基质肥分及其赤矿泥基质的改良效果,未追加污泥。2022 年,种植多年生植物 M、B、E 赤矿泥基质有机质下降量为:11.93、3.46、7.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,小于种植一年生植物 R、S 赤矿泥基质有机质的下降量:20.84、16.86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,表明一年生植物在春季枝叶复苏对有机质需求量大。

不同植物种类的全氮、全磷、速效钾含量统计见图 2(b)和图 3(a)、图 3(b)。赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质在施加污泥后的全氮含量均在 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及以上(图 2(b)),达到了全国第二次土壤普查第三级标准以上,全磷含量均在 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及以上(图 3(a)),达到了全国第二次土壤普查第一级标准以上,速效钾含量均在 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及以上(图 3(b)),处于全国第二次土壤普查标准第三级中等以上^[14],达到了植物正常生长需求范围。从不同植物类型看,氮磷钾含量发生了较大差异。土壤氮以有机态氮为主^[17],有机氮的升高直接增加全氮含量,2021 年 7 月为控碱赤泥、脱水矿泥土壤化矿坑原位生态复垦初期,刚施加的污泥能为赤矿泥基质提供大量有机氮,污泥对全氮的供应量大于植物生长吸收量,此时全氮含量较高;2022 年 7 月输入赤矿泥基质的有机残茬量减少的累积效应降低了有机质生

成,导致有机态氮减少,此外植物处于生长期对氮的需求量也增加,全氮的供应量低于植物生长吸收量,致使 2022 年 7 月时的五种不同植物类型的赤矿泥基质中全氮含量均低于 2021 年 7 月的同期水平土壤全氮降低。除植物 R 外,种植植物 S、M、B、E 赤矿泥基质全氮含量变化趋势一样,全氮含量在 2021 年 10 月、2022 年呈现下降,究其原因可能与植物生长有关。氮是植物体内蛋白质和叶绿素的主要成分,植物快速生长对氮的吸收导致土壤中的全氮含量下降。2022 年 5 月,E 地块赤矿泥基质全氮含量为 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于其他植物,这是因为桉树生长的生物量大,且一直吸收氮素用于细胞的生长和分裂。2021 年种植 S、M、B、E 植物组赤矿泥基质全磷含量一直增加,植物 B 赤矿泥基质全磷增加量为 $1.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高于其他植物组的增加量,磷元素主要促进植物发芽和生根,植物 B 的生物量最小,对全磷的吸收量较少,使得全磷积累量最大。由图 3(b)可知赤矿泥基质速效钾含量处于较缺状态,是因为速效钾是可被作物直接吸收利用的钾素部分^[18],再加上水溶性钾、可交换性钾是速效钾主要形态,也是土壤中钾流失的主要形态^[19],区域强烈的淋溶作用使其受到耗损,共同导致赤矿泥基质速效钾含量处于较缺状态。2021 年 7 月,种植 S 后赤矿泥基质速效钾含量为 $47.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显低于其他植物组,表明草本植物 S 的快速生长对速效钾需求量大。

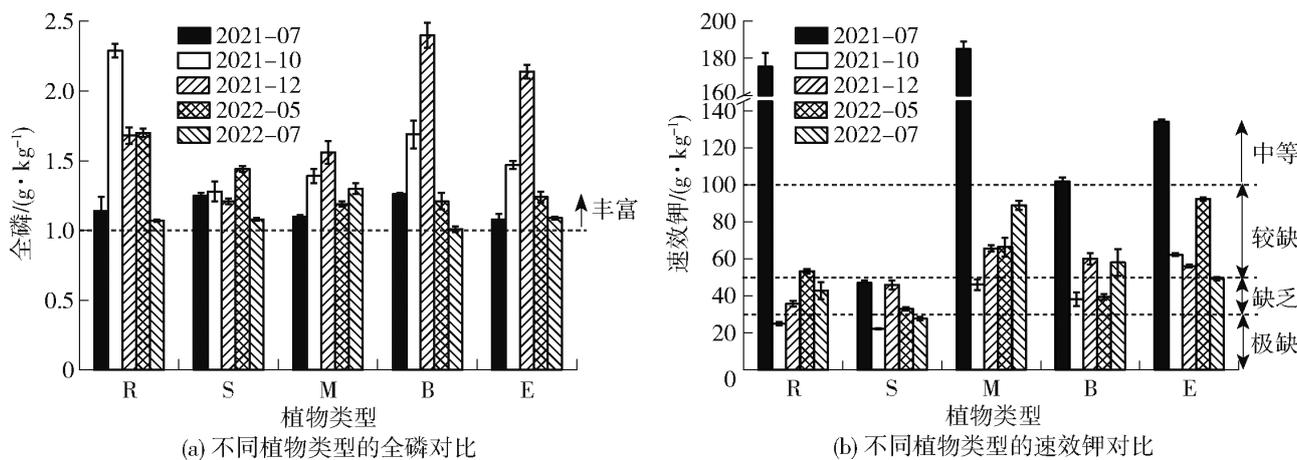


图 3 污泥-五种植物协同下赤矿泥基质全磷、速效钾的变化

Fig. 3 Changes of total phosphorus and available potassium in red mineral mud substrate under the coordination of sludge and five kinds of plants

2.3 污泥-五种植物协同作用下赤矿泥基质微生物多样性与酶活性

土壤酶作为土壤中各种生物化学反应的重要催

化剂,其能反映土壤中各种生化过程的动向与强度,其活性还在一定程度上表征了土壤中微生物的状态、土壤理化性质及肥力状况^[20-21]。表 2、图 4 为

2022年7月赤矿泥基质的多样性指数和细菌门水平下物种丰富度统计。表明群落丰富度的 Chao 指数和物种指数分别在 3 000、2 800 以上,综合考虑群落的丰富度和均匀度的香农指数和辛普森指数分别在 8.7、0.99 以上,与纯赤泥的 Chao 指数、香农指数和辛普森指数 934.05、7.83、0.99^[22] 相比,污泥-植物协同下赤矿泥基质的 Chao 指数、香农指数明显大于纯赤泥,辛普森指数无变化。OTUs 归类结果显示,赤矿泥基质中相对丰度大于 1% 的菌门共有 5 个,分别为变形菌门 (Roeobacteria) 34.08% ~

49.44%、放线菌 (Atinbaternr) 27.14% ~ 41.44%、酸杆菌门 (Aidobacterial) 6.97% ~ 11.15%、绿弯菌门 (Chloroflexi) 4.11% ~ 7.03%、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 1.92% ~ 4.40%,这 5 种菌门相对丰度占细菌总 OTUs 的 90.17% ~ 95.44%。说明污泥-植物协同作用为微生物提供了良好的生存环境,致使赤矿泥基质微生物多样性、丰富度发生了明显提升。污泥的添加和植物的生长有效地促进了微生物在赤矿泥土壤化处置过程中大量定殖扩增及优势种群的建立。

表 2 2022 年 7 月份赤矿泥基质细菌的生物多样性指数

Table 2 Biodiversity index of red mineral mud matrix bacteria in sludge area in July 2022

| 多样性指数 | R | S | M | B | E |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Chao 指数 | 3 887.05 ± 298.46 | 4 434.61 ± 226.16 | 3 079.93 ± 654.15 | 3 139.11 ± 505.36 | 3 143.78 ± 469.06 |
| 香农指数 | 9.99 ± 0.54 | 10.57 ± 0.30 | 9.57 ± 0.36 | 9.63 ± 0.14 | 8.78 ± 0.72 |
| 辛普森指数 | 0.990 8 ± 0.01 | 0.996 6 ± 0.00 | 0.991 3 ± 0.01 | 0.994 1 ± 0.00 | 0.966 0 ± 0.02 |
| 物种数目 | 3 732.33 ± 373.20 | 4 290.40 ± 195.14 | 2 898.50 ± 545.57 | 2 954.43 ± 453.74 | 2 941.10 ± 419.34 |
| 覆盖度指数 | 0.990 ± 0.002 | 0.989 ± 0.001 | 0.992 ± 0.04 | 0.991 ± 0.03 | 0.990 ± 0.02 |

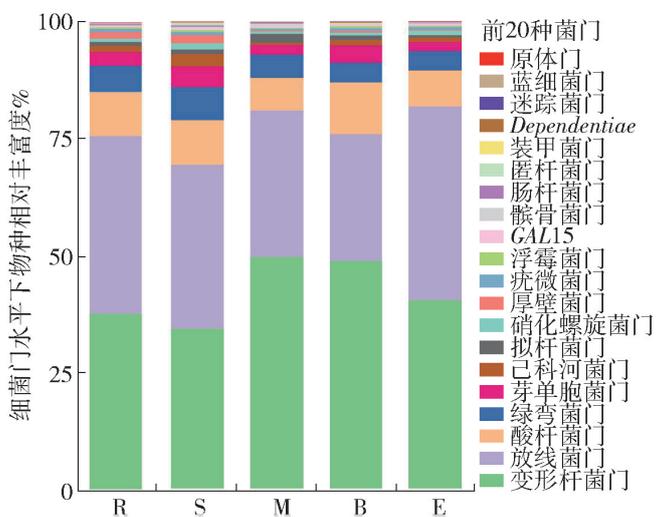


图 4 2022 年 7 月份赤矿泥基质细菌门水平的群落组成

Fig. 4 Community composition at the level of matrix bacteria phylum in red mineral mud in July 2022

微生物和土壤酶之间存在共代谢效应,土壤微生物多样性的提升对应着酶活性的提升。图 5 为试验场地施加污泥后不同植物协同作用下的赤矿泥土壤化处置 20 cm 处赤矿泥基质的酶活性测定结果。

2021 年施加污泥后各植物组赤矿泥基质碱性磷酸酶、脲酶的酶活性呈增加趋势,酶活与植物生长、植物根际范围内赤矿泥基质养分及微生物丰富

度之间关系密切^[23],污泥施加使得基质肥力、微生物丰富度增加致使酶活性增强。各植物属性及生物量存在明显差异,导致各植物组赤矿泥基质酶浓度也存在着较大区别。图 5(a) 显示各植物组赤矿泥基质碱性磷酸酶活性在 2022 年 5 月达到最高值,后经夏季生长,而在 2022 年 7 月又降低到低值;图 5(b) 显示脲酶活性在当年 12 月达到最高值,来年 5 月有所降低,但 7 月又有所抬升。碱性磷酸酶的积累滞后脲酶活性,并在来年 5 月彼此分别处于峰顶与峰谷,出现时空差,产生这种差异在于赤矿泥基质酶活性是由赤矿泥基质性质、水热条件、赤矿泥基质生物种类及数量以及植物物种组成等多种因素决定的,同时不同种类酶的活性对环境变化的敏感程度也不完全相同^[24]。从植物类别看 E 组的碱性磷酸酶、脲酶活性均偏低,而 S、R 组的碱性磷酸酶、脲酶活性高于 E 组。出现这一现象可能与植物根系深度作用范围有关,S 为一年生草本植物,生物量大、覆盖度较高,赤矿泥基质中根系发达,其分泌物和脱落细胞提高了酶活性,地表植物枯枝落叶的分解又使赤矿泥基质酶活性得到不同程度增强。

2.4 赤矿泥基质盐碱、养分、酶活性的相关性分析

图 6 为赤矿泥基质盐碱、养分、酶活性之间的相

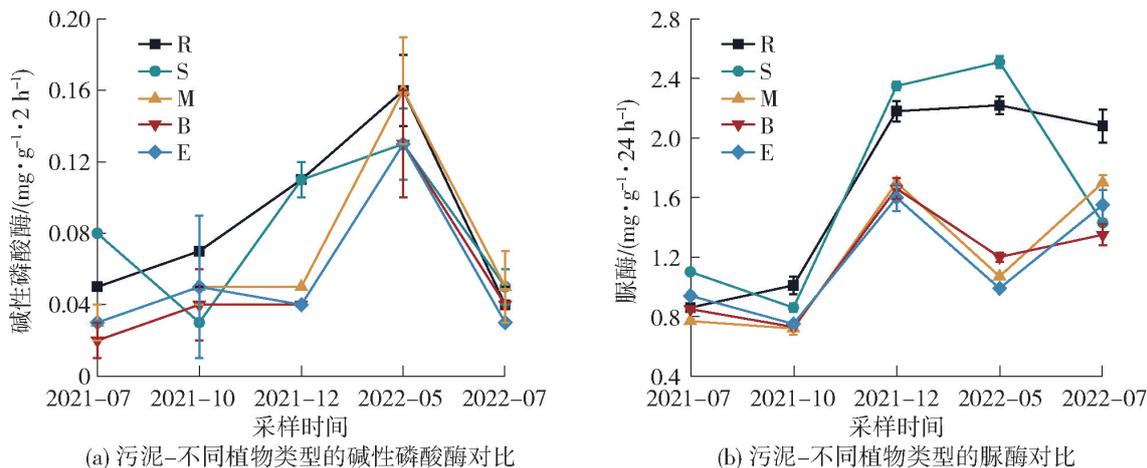


图5 污泥-五种植物协同下赤矿泥基质的酶活性变化

Fig.5 Changes of enzyme activity in red mineral mud substrate under the coordination of sludge and five kinds of plants

关性统计。赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质的盐碱与速效钾呈极显著正相关,与其他养分、酶活指标之间呈极显著负相关。说明污泥中速效钾含量能使赤矿泥基质的盐碱变高,而投加污泥或赤矿泥基质有机质和氮磷元素的增加、酶活性的提升能促进赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质盐碱调控效果,促进土壤化处置赤矿泥基质改良或者生态修复。

而促进或影响脲酶与碱性磷酸酶的活性;与此同时,赤矿泥基质中的脲酶、碱性磷酸酶活性反过来又参与植物和微生物残体的分解、污泥物质组分的转化,以及赤矿泥基质养分固定与释放,如磷酸酶为适应性酶,在赤矿泥基质有效磷含量低时磷酸酶活性增强^[25]。可见,对于营养组分匮乏的赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质,适量补充含有有机质、氮、磷的肥料利于植物生长及其根系的发育、植物根际土壤微生物系统的构建与土壤酶活性的提高,但钾的增加具有负面影响。

脲酶、碱性磷酸酶间存在显著正相关,表明在赤泥矿泥土壤化处置生态修复过程中,当同一底物被多种酶同时作用时,几种酶之间既能相互释放多种信号物质刺激对方,影响赤矿泥基质的生物活性与肥力,进而改良赤矿泥基质的理化性质、肥力状况与微生物群落^[20],又维持自身相对独立的酶促反应。

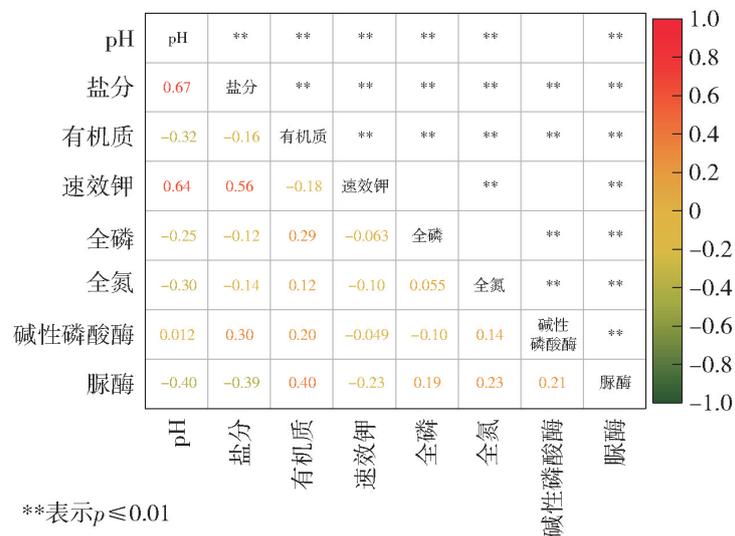


图6 赤矿泥基质盐碱、养分、酶活性的相关性

Fig.6 Correlation of salt, alkali, nutrient and enzyme activity in red mineral mud substrate

脲酶与有机质、全氮、全磷呈极显著正相关,与速效钾呈极显著负相关;碱性磷酸酶与有机质、全氮呈极显著正相关,与速效钾、全磷呈极显著负相关。可见酶活性与养分之间具有一定的相互作用,赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质施加或补充有机质、全氮、全磷有助于植物及其根际微生物的生长繁殖,从

3 结论

1) 污泥-植物协同作用能明显降低赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质的盐碱,使得一年后赤矿泥基质 pH 值低于 8.5,盐度降到轻度盐渍化,达到了矿山生态环境保护与恢复治理技术规范的要求,同时利于土壤化处置赤矿泥基质有机质和氮磷元素的增加、酶和微生物系统的活性提升。

2) 污泥-植物协同作用一个生长周期后,赤泥矿泥土壤化处置赤矿泥基质的有机质、全氮、全磷含量达到了全国第二次土壤普查标准中三级水平。

3) 施加污泥有助于植物生长、根系分泌物的脱

落及其根际微生物的生长与繁殖,使得脲酶与碱性磷酸酶的活性得到明显提升。

4) 污泥-耐盐碱植物协同是赤泥矿泥土壤化处置规模化原位生态修复的有效方法。

[参考文献]

- [1] 岳晶晶, 刘钟森, 程越迈, 等. 不同种植植物对赤泥盐离子迁移与分布的影响[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 46-50.
YUE Jingjing, LIU Zhongsen, CHENG Yuemai, et al. Effects of different planting plants of soil salt ions migration and distribution in bauxite residue [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 46-50.
- [2] Shengguo Xue, Xiangfeng Kong, Feng Zhu, et al. Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite residue in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(13): 12822-12834.
- [3] XUE Shengguo, WU Yujun, LI Yiwei, et al. Industrial wastes applications for alkalinity regulation in bauxite residue: A comprehensive review [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 268-288.
- [4] 韦桥权, 成官文, 张宇玲, 等. 铝土矿选洗矿泥混凝沉降试验及机理研究[J]. 金属矿山, 2022(7): 198-205.
WEI Qiaoquan, CHENG Guanwen, ZHANG Yuling, et al. Experimental and mechanism research on coagulation settlement of bauxite ore dressing slime [J]. Metal Mine, 2022(7): 198-205.
- [5] 耿超, 郭士会, 刘志国, 等. 赤泥资源化综合利用现状及展望[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(5): 37-45.
GENG Chao, GUO Shihui, LIU Zhiguo, et al. Current situation and prospect of red mud resource comprehensive utilization [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(5): 37-45.
- [6] 施晓燕, 何国伟, 杨威强, 等. 平果铝洗矿矿泥资源化途径研究[J]. 化学工程与装备, 2013(7): 44-47.
SHI Xiaoyan, HE Guowei, YANG Weiqiang, et al. Research on the recycling way of aluminum washing slime in Pingguo [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2013(7): 44-47.
- [7] 经文波, 黄儒德, 任佳龙. 利用含镍污泥和赤泥固废资源提取镍铁研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 18-23.
JING Wenbo, HUANG Rude, REN Jialong. Study on ferronickel extracted from solid waste resources of nickel-bearing sludge and red mud [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(6): 18-23.
- [8] C Klauber, M Graefe, G Power. Bauxite residue issues: II. options for residue utilization [J]. Hydrometallurgy, 2011, 108(1-2): 11-32.
- [9] COURTNEY R, Xue S G. Rehabilitation of bauxite residue to support soil development and grassland establishment [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(2): 353-360.
- [10] 胡树翔, 吕十全, 王新, 等. 生物质对赤泥壤质化改良的促进作用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(10): 3402-3409.
HU Shuxiang, LYU Shiquan, WANG Xin, et al. Amelioration effect of cornstalk biomass on soil genesis of red mud [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(10): 3402-3409.
- [11] 张宇玲, 成官文, 韦桥权, 等. MgCl₂和脱水矿泥对赤泥盐碱性的调控[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 937-945.
ZHANG Yuling, CHENG Guanwen, WEI Quaoquan, et al. Conditioning of salinity and alkalinity in red mud by MgCl₂ and dehydrated mineral slime [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 937-945.
- [12] 段绍彦, 成官文, 解庆林, 等. 平果铝土矿矿区周边坡地、耕地土壤基础理化性质空间差异 [J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(1): 201-209.
DUAN Shaoyan, CHENG Guanwen, XIE Qinglin, et al. Spatial difference of basic soil physical and chemical properties of sloping land and cultivated land around Pingguo bauxite mining area [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(1): 201-209.
- [13] 成官文, 张燎, 韦桥权, 等. FeCl₃赤泥控碱及离子效应研究 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 996-1005.
CHENG Guanwen, ZHANG Liao, WEI Qiaoquan, et al. Study on alkali control and ion effect of FeCl₃ red mud [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(2): 996-1005.
- [14] 全国土壤普查办公室. 第二次全国土壤普查暂行技术规程 [Z]. 1979.
National Soil Census Office. Interim Technical Regulations for the Second National Soil Survey [Z]. 1979.
- [15] 侯冠群, 来剑斌, 李静, 等. 成土时间对黄河三角洲植物及微生物演替的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8839-8859.
HOU Guanqun, LAI Jianbin, LI Jing, et al. Driving force of soil age on vegetation and microbial succession in the Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21): 8839-8859.
- [16] 李稹, 黄娟, 姜磊, 等. 人工湿地植物根系分泌物与根际微环境相关性的研究进展 [J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 41-45.
LI Zhen, HUANG Juan, JIANG Lei, et al. Research advances in the relation between plant root exudates and rhizosphere micro-environment in the made-made wetland [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 41-45.
- [17] 寇太记, 刘德鸿, 徐晓峰, 等. 臭氧污染对水稻土物理结构和氮磷钾含量的影响 [J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1164-1169.
KOU Taiji, LIU Dehong, XU Xiaofeng, et al. Effect of ozone pollution on physical structure and contents of nitrogen, phosphorus and potassium of paddy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(6): 1164-1169.
- [18] 沈甜, 王琼瑶, 崔永亮, 等. 植物根际促生细菌对蒲儿根富集铜及土壤理化性质的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 572-580.
SHEN Tian, WANG Qiongyao, CUI Yongliang, et al. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on the copper enrichment ability of *Sinosenecio oldhamianus* and physicochemical properties

- of soil [J]. *Journal of Agro Environment Science*, 2020, 39 (3): 572 – 580.
- [19] 王圣, 陈科希, 袁源远, 等. 江西省旱地土壤质地与土壤化学性状的相关性研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 65 – 71.
WANG Sheng, CHENG Kexi, YUAN Yuanyuan, et al. Correlation between soil texture and soil chemical properties in dry land of Jiangxi province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 65 – 71.
- [20] 梁卿雅, 王旭, 刘文杰, 等. 不同林龄桉树人工林的土壤理化性质及脲酶活性[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(3): 450 – 455.
LIANG Qingya, WANG Xu LIU Wenjie, et al. Soil physical and chemical properties and soil urease activity in eucalyptus plantation of different planting age [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(3): 450 – 455.
- [21] 刘高远, 和爱玲, 杜君, 等. 玉米秸秆还田量对砂姜黑土酶活性、微生物生物量及细菌群落的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1033 – 1040.
LIU Gaoyuan, HE Ailing, DU Jun, et al. Effects of maize straw returning amount on soil enzyme activity, microbial biomass, and bacterial community in lime concretion black soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 1033 – 1040.
- [22] 董梦阳, 董远鹏, 徐子文, 等. 赤泥改良过程中微生物群落及酶活性恢复研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 913 – 922.
DONG Mengyang, DONG Yuanpeng, XU Ziwen, et al. Resilience of soil microbiome and enzyme activity with soil amelioration of Bayer process red mud [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(2): 913 – 922.
- [23] Jiabao LI, Ting XIE, He ZHU, et al. Alkaline phosphatase activity mediates soil organic phosphorus mineralization in a subalpine forest ecosystem[J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115376.
- [24] 范艳春, 王鹏程, 肖文发, 等. 三峡库区 2 类典型森林 5 种土壤酶季节动态及其与养分的关系[J]. *华中农业大学学报*, 2014, 33(04): 39 – 44.
FAN Yanchun, WANG Pengcheng, XIAO Wenfa, et al. Seasonal dynamics of soil enzymes and its relationship with nutrients for two forests in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2014, 33 (4): 39 – 44.
- [25] 兰宇, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期不同施肥棕壤玉米地酶活性的时空变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1197 – 1204.
LAN Yu, HAN Xiaori, YANG Jinfeng, et al. Temporal and spatial dynamics of enzyme activities under long-term fertilization in a maize growing brown soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5): 1197 – 1204.

Promoting effect of sludge and five kinds of plants cooperation on soil formation of red mud and mineral mud

XU Min¹, CHENG Guanwen¹, YUE Yuansui¹, XU Xiaoyu¹, DU Chenghao¹, WANG Yunlong¹, ZENG Yuhui¹, FENG Jie², NONG Guowu², HUANG Zhenyi²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Guangxi Branch of Aluminum Corporation of China Limited, Pingguo 531400, China)

Abstract: To explore the problem of large-scale and harmless disposal of the red mud and mineral mud, the study of in-situ ecological reclamation of alkali-control red mud and dewatered ore mud soiled mine pits was carried out by using the synergism of sludge and five kinds of plants cooperation. The findings demonstrated that the sludge and five kinds of plants cooperation could significantly lower the salt alkalinity of the red mud and mineral mud matrix and improve nutrients, enzyme activity, and microbial diversity of the red mud and mineral mud matrix used for soil chemical disposal. Among these, the pH and total salt levels were decreased to 8.50 and 1.50 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, meeting the technical specifications for mine ecological environmental protection and restoration management. In accordance with the second national soil census criteria, the levels of organic matter, total nitrogen, and total phosphorus in plants' first growth season met the tertiary criterion. After sludge application, the greatest alkaline phosphatase and urease activity in the red mud and mineral mud matrix were 0.17 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ and 2.05 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} 24\text{h}^{-1}$, respectively. It offered a fresh concept for soil formation and large-scale ecological treatment of red mud and mineral mud.

Key words: red mud; mineral mud; soil formation; sludge-plant synergy; in-situ ecological restoration; harmless disposal; scale consumption