

赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移特征

蒋旭升, 成官文, 刘杰, 俞果, 陈诗奇, 韩庆坤, 王路洋

引用本文:

蒋旭升, 成官文, 刘杰, 俞果, 陈诗奇, 韩庆坤, 王路洋. 赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 833–841.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0945>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟降雨条件下赤泥对土壤盐碱化的影响

刘继东, 杜平, 任杰, 陈娟, 刘小莲, 徐刚, 吴明红

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1836–1843 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0242>

酸雨淋溶条件下赤泥中重金属在土壤中的迁移特性及其潜在危害

刘继东, 任杰, 陈娟, 刘小莲, 徐刚, 吴明红, 杜平

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 76–84 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0965>

土壤铅镉的磷酸盐钝化及其在模拟酸雨下的淋溶特征

姚臻晖, 周慧平, 涂理达, 庞中正

农业环境科学学报. 2023, 42(3): 529–538 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0421>

5种新烟碱类农药在农田土壤中的吸附和淋溶行为

胡传鹤, 李永涛, 尚梦如, 陈欣敏, 田卓迅, 林学明

农业环境科学学报. 2023, 42(3): 539–546 <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0023>

广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强, 田康, 刘本乐, 张晓辉, 卞子金, 黄标, 袁旭音, 吴龙华, 罗栋源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987–998 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蒋旭升, 成官文, 刘杰, 等. 赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 833–841.
JIANG X S, CHENG G W, LIU J, et al. Migration characteristics of salts and heavy metals with rainwater leaching in the co-ecological disposal area consisting of red and dehydrated mineral mud[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4): 833–841.

赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移特征

蒋旭升¹, 成官文¹, 刘杰^{1,2*}, 俞果^{1,2}, 陈诗奇¹, 韩庆坤¹, 王路洋¹

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 自然资源部南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 南宁 530022)

摘要:为探究在平果铝土矿赤泥和脱水矿泥协同生态处置区盐分和重金属随雨水淋溶的迁移规律,以及对周边土壤的影响,在生态处置区和周边土壤不同深度的土层埋设淋溶盘进行田间小区试验,对每月淋溶液中的重金属和盐分含量进行监测,最后收集不同深度的基质样品,对其重金属和盐离子含量进行测定。结果表明:5—10月,赤矿泥(赤泥和脱水矿泥按照干质量比1:3进行翻堆混匀而成)基层Na盐的平均淋溶量达到 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,其中8月份Na的淋溶量达到 $108 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。生态处置8个月后,赤矿泥pH从9.06降低到8.70,电导率(EC)降低了80.0%,Na盐含量降低了70.4%。赤矿泥基层中的Na盐随着雨水淋溶侧面迁移至周边土壤,导致周边1.5 m范围内的土壤pH和EC值显著增加($P < 0.05$),但迁移影响范围在3 m内。赤矿泥基层中的Cd、Cr和As随雨水淋溶的流失量在 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 以下。经过8个月的雨水淋溶,赤矿泥和周边土壤中Cd和As的含量没有显著变化。研究表明,赤矿泥基层用于矿区生态处置有利于改善赤矿泥基层的高盐碱性,而赤矿泥中Na盐的迁移对周边土壤盐碱性的影响有限,同时赤矿泥基层用于矿区生态处置的重金属污染风险可控。

关键词:赤泥;脱水矿泥;雨水淋溶;离子迁移;重金属

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)04-0833-09 doi:10.11654/jaes.2022-0945

Migration characteristics of salts and heavy metals with rainwater leaching in the co-ecological disposal area consisting of red and dehydrated mineral mud

JIANG Xusheng¹, CHENG Guanwen¹, LIU Jie^{1,2*}, YU Guo^{1,2}, CHEN Shiqi¹, HAN Qingkun¹, WANG Luyang¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Technical Innovation Center of Mine Geological Environmental Restoration Engineering in Southern Karst Area, Ministry of Natural Resources, Nanning 530022, China)

Abstract: This study explored the migration characteristics of salt and heavy metals leached by rain in the co-ecological disposal area consisting of red and dehydrated mineral mud in the Pingguo bauxite mining area of southern Guangxi. A field experiment was carried out by burying leaching trays at different depths of soil in the ecological disposal area and surrounding soil to monitor the content of heavy metals and salts in the monthly leaching solution. The matrix samples at different depths were subsequently collected, and the contents of the heavy metals and salt ions were determined. From May to October, the average leaching amount of Na salt in the red mine mud base

收稿日期:2022-09-23 录用日期:2022-10-31

作者简介:蒋旭升(1999—),男,广西桂林人,博士研究生,主要研究方向为矿山环境的生态修复。E-mail:jiangxusheng@glut.edu.cn

*通信作者:刘杰 E-mail:liujie@glut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41867022);广西自然科学基金重点项目(2020GXNSFDA297018);中国铝业股份有限公司科技计划项目(GXZZ201903)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41867022); The Key Program of the Natural Science Foundation of Guangxi, China (2020GXNSFDA297018); Project for Technology Plan of Aluminum Corporation of China Ltd.(GXZZ201903)

(made by turning and mixing red mud and dehydrated mineral mud at a dry weight ratio of 1:3) reached $51.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$, whilst the leaching volume of Na in August reached $108 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$. After eight months of ecological treatment, the pH of the red mine mud decreased from 9.06 to 8.70, the electrical conductivity (EC) decreased by 80.0%, and the Na salt content had decreased by 70.4%. The Na salt in the red mine mud base migrated to the surrounding soil along with the rain leaching, significantly increasing ($P < 0.05$) the pH and EC values of the surrounding 1.5 m of soil. However, the migration influence range was within 3 m. For ecological disposal, the total loss of Cd, Cr, and As in the red mine mud base layer with rainwater leaching was less than $0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$, whilst the heavy metal contents of Cd and As in the red mine mud and surrounding soil showed no significant changes. Therefore, the application of a red mine mud base for ecological disposal in the mining area was beneficial for the reduction of the high salinity in the red mine mud base. In contrast, the migration of sodium salt in the red mine mud had a limited impact on the salinity of the surrounding soil. Furthermore, the risk of heavy metal pollution from ecological disposal in mining areas could be controlled.

Keywords: red mud; dehydrated mineral mud; rainwater leaching; ion transport; heavy metal

氧化铝生产的工艺特点造成其在洗选和提炼过程中会产生大量矿泥和赤泥等固体废物^[1-2]。赤泥具有碱性强、盐分高、环境风险高和资源化利用难等特点^[3]；矿泥具有含水率高、粒径小、颗粒表面带负电、比阻高等特点^[4]。由于缺乏经济可行的资源化综合利用技术，目前赤泥和矿泥主要以堆存为主^[5-6]。大量堆存的赤泥和矿泥不但占用大量土地资源，而且还存在堆存库溃坝造成周边土壤及水污染等环境隐患，严重制约着氧化铝行业的可持续发展^[7]。

近40年，规模化处置赤泥和矿泥被世界铝业协会列入 *Alumina Technology Roadmap* 优先研究主题，国内外竞相对此展开了大量的研究^[8]。研究发现，生态处置技术是一种具有吸引力的赤泥和矿泥处置途径^[9]。该技术通过对赤泥和矿泥进行基质改良，使改良后的赤泥和矿泥具备植物生长的基本条件，然后进行规模化堆存，最后通过植被恢复技术加速生态处置区赤泥和矿泥的土壤化和无害化^[10-11]。最近，中国铝业广西分公司对赤泥和脱水矿泥协同生态处置技术进行了初步的探索。张宇玲等^[12]通过将脱水矿泥和赤泥混合后进行基质改良，使混合基质达到了类土壤水平和植物生长的基本条件。然而，该研究成果还需要实际生态处置工程应用以进一步验证其可行性。另外，由于矿业生产活动以及桂西地区背景值高^[13]，导致赤泥和脱水矿泥中具有较高含量的重金属(Cd、Cr、As等)^[14]。而积累在赤泥和脱水矿泥中的盐分和重金属可能会通过降雨淋溶作用污染周边土壤和地下水体^[15-16]。但在赤泥和脱水矿泥协同生态处置工程实践中，其盐分和重金属随着雨水淋溶的迁移特征还不明确，影响其盐分和重金属迁移的主要环境因子也还不清楚。

本文通过监测和比较分析广西平果铝土矿赤泥和脱水矿泥协同生态处置区基层和周边土层中盐分

和重金属随着雨水淋溶的迁移量，结合基质以及周边土壤盐分和重金属的时空变化，探究了基层对地下和周边土壤的影响，阐述了基质中盐分和重金属的迁移特征，并通过主成分分析阐明了影响其盐分和重金属迁移的主要环境因子，以期为推进赤泥和脱水矿泥协同生态处置工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年5—12月在广西平果铝二矿复垦示范基地($23^{\circ}23'9.23''\text{N}$, $107^{\circ}30'44.57''\text{E}$)进行。该地区属于高温多雨亚热带季风气候，光照充足，雨量充沛，年平均气温为 22.09°C ，年平均降雨量为 $1\,313.76 \text{ mm}$ ，无霜期345 d以上，每年降雨主要集中在6—9月。试验区的场地建设于2021年3月完成，淋溶盘铺设于2021年4月底完成，试验区种植作物为紫云英，6月中旬出现自然定植植物。

1.2 试验区布置

试验区场地宽12 m、长16 m、高1.2 m。2021年1月，采用挖掘机将赤泥与0.6%的三氯化铁粉剂混合翻堆降碱，重复翻堆3~4次，混合物料堆放30 d后，再重新翻堆2次，采用挖掘机将赤泥和脱水矿泥按照干质量比1:3进行翻堆混匀(即赤矿泥)，并继续堆放30 d，再用铲车分层推平、压实。试验区分为3个区域(图1)：试验区A，上层(0~0.4 m)堆存矿区土壤，下层(0.4~1.2 m)堆存赤矿泥；试验区B，全部堆存赤矿泥(0~1.2 m)；试验区C，全部堆存矿区土壤(0~1.2 m)。淋溶盘直径60 cm、高10 cm，材质为304不锈钢，呈漏斗状，淋溶盘内铺满鹅卵石过滤，接口连接橡胶管，淋溶液使用1 L棕色塑料瓶在每月月底收集(5—12月)。分别在4个位置埋设淋溶盘，埋设位置：L1位于试验区A，0.4 m深处；L2位于试验区B，1.2 m深处；L3

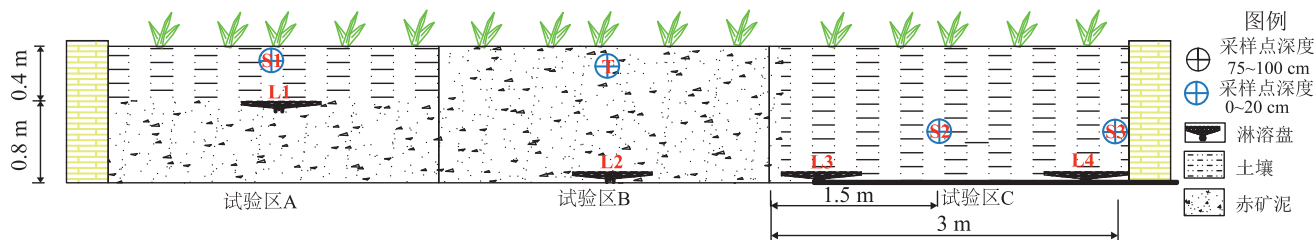


图1 试验区场地剖面图

Figure 1 Profile of test site

位于试验区C,距离试验区B侧方0.5 m处,1.2 m深;L4位于试验区C,距离试验区B侧方3 m处,1.2 m深。每个位置放置3个淋溶盘进行重复试验。试验区的土壤采取网格布点取样:S1为赤矿泥基层上的土壤;S2为赤矿泥基层周边1.5 m的土壤;S3为赤矿泥基层周边3 m的土壤;T为赤矿泥基层。使用取土钻分别于2021年4、8月和12月采集样品($n=4$)。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤理化性质测定

赤矿泥基质和周边土壤的pH值(水土比2.5:1)和氧化还原电位用PHS-3C型pH计测定;电导率(EC,水土比5:1)用哈希HQ30d测定。取过100目筛的样品,经由浓硝酸-浓盐酸-高氯酸(体积比为5:4:2)消解后,采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(PerkinElmer Optima 7000 DV)同时测定消煮液中的Cd和Cr的含量,经硝酸-盐酸(体积比为1:1)水浴消解,采用原子荧光光谱仪(AFS-9700)测定As含量,使用土壤成分标准物质GBW07405(GSS-5)进行质量控制,保证加标回收率控制在80%~110%。样品经乙酸铵(水土比5:1)浸取,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定盐离子(K、Ca、Na、Mg)含量。土壤中阳离子交换量(CEC)采用三氯化六氨钴浸提-分光光度法^[17]测定,有机碳(SOC)采用重铬酸钾-油浴加热法^[18]测定,土壤容重采用环刀法(NY/T 1121.4—2006)测定,土壤孔隙度通过土壤容重和土壤比重求得^[19]:

$$P_i = (1 - r_s / d_s) \times 100\%$$

式中: P_i 为土壤孔隙度,%; r_s 为土壤容重, $g \cdot cm^{-3}$; d_s 为土壤比重, $g \cdot cm^{-3}$ 。

1.3.2 淋溶液盐分和重金属浓度测定

淋溶液样品经针孔过滤器(0.45 μm)过滤后加硝酸酸化至50 mL离心管中,而后置于4 $^{\circ}C$ 下保存待测,每次取样时间间隔为30 d。样品盐离子浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定,重金属浓度采用电感耦合等离子体质谱仪(NexION350X)测定。

1.4 数据处理与分析

试验数据通过Excel 2016软件进行整理,采用Origin 2018软件绘制等值线图,采用统计分析软件SPSS 19.0进行差异性分析及相关性分析。Kolmogorov-Smirnov检验用于在Two-way ANOVA检验前检查数据的正态性。使用Two-way ANOVA方法分析不同月份赤矿泥基质和周边土壤的盐分和重金属含量的差异变化($P < 0.05$),使用Duncan法进行事后多重比较。以赤矿泥基质和周边土壤的理化性质为因子,使用R 4.1.3中R包factoMineR和factoextra进行主成分分析,并使用R包ggplot2绘图。

2 结果与讨论

2.1 基质及周边土壤盐分的迁移特征

由图2可知,从5月到12月,基层及周边土层淋溶水量呈递减趋势。6月中旬及9月下旬降雨量较大;5月和6月淋溶水量较大,平均达到 $866.5 mL \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$;而10月下旬及12月上旬降雨量低,11月和12月各基层淋溶水量都在 $150 mL \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ 以下,其中12月的L3和L4淋溶盘没有收集到淋溶液。L2的每月淋溶水量在6—8月低于L3和L4,而在9—12月的淋溶水量高于L3和L4。淡水长时间洗涤有利于盐碱土团粒结构的形成,从而使土壤导水能力增加^[20]。赤矿泥基质类似于盐碱土^[12],长时间雨水淋溶使其导水性增加,从而使收集到的淋溶水量得以增加^[21]。这说明随着处理时间的增加,赤矿泥基质的土壤结构得以改善。

每月处置区淋溶液中盐分的监测数据如图3所示。处置区K的淋溶主要发生在L2区域,淋溶量在 $0.5 \sim 12.7 mg \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$,另外3个区域的淋溶量都低于 $2.0 mg \cdot m^{-2} \cdot 月^{-1}$ 。4个区域Ca和Mg的淋溶主要集中在5—9月,其中L3和L4随着处置时间的增加,Ca和Mg的淋溶量逐渐降低并趋于0,而L1和L2区域每月Ca和Mg的淋溶量随着淋溶水量的变化而变化。这

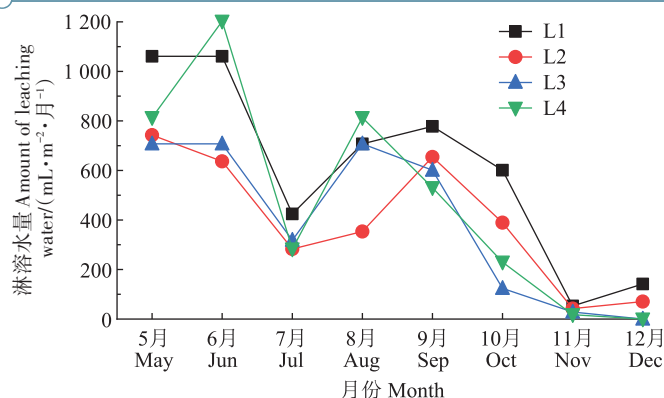


图2 每月不同基层的淋溶水量

Figure 2 Amount of leaching water in different base layers per month

是因为L1区域的淋溶盘深度较浅,受雨水淋溶影响更大,L2中水溶性Ca和Mg的含量较高。Li等^[22]发现,赤泥中的化学结合碱会在堆置过程中缓慢溶解产生Na离子,Na离子随着雨水淋溶会向下迁移。L2区域每月Na的淋溶量随着淋溶水量的变化而变化,5—10月的平均淋溶量达到了 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,其中8月

份Na的淋溶量达到了 $108.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。L1区域Na的淋溶主要集中在5—9月,平均淋溶量为 $18.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。L3区域Na的淋溶主要集中在5月和6月,淋溶量分别为 $100.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 和 $30.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。L4区域5—12月Na的淋溶量都低于 $20.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,其中7—12月Na的淋溶量都低于 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。这说明赤矿泥基层Na的侧面淋溶迁移影响范围在3 m内。

经过8个月的生态处置,赤矿泥的pH从9.06降低到8.7,EC(含盐量)显著降低了80%(图4),Na盐含量降低了70.4%(图5)。盐分在土壤中随自由水的运动主要为重力下渗运动和水蒸发随毛细水向上运动^[23]。在此生态处置过程中,赤矿泥中的盐分随雨水淋溶作用向下的迁移量大于随雨水蒸发毛细作用向上的迁移量^[24],从而导致赤矿泥基质中的盐含量显著降低。这表明在降雨量较大的湿润地区,赤矿泥在生态处置过程中不易导致地表盐渍化^[25]。这可能得益于赤泥和脱水矿泥的混合以及氯化铁的添加,打破了赤泥中化学结合碱的溶解平衡,导致可溶性Na盐含量增加^[26]。同时,赤矿泥基质导水能力的增加,提高

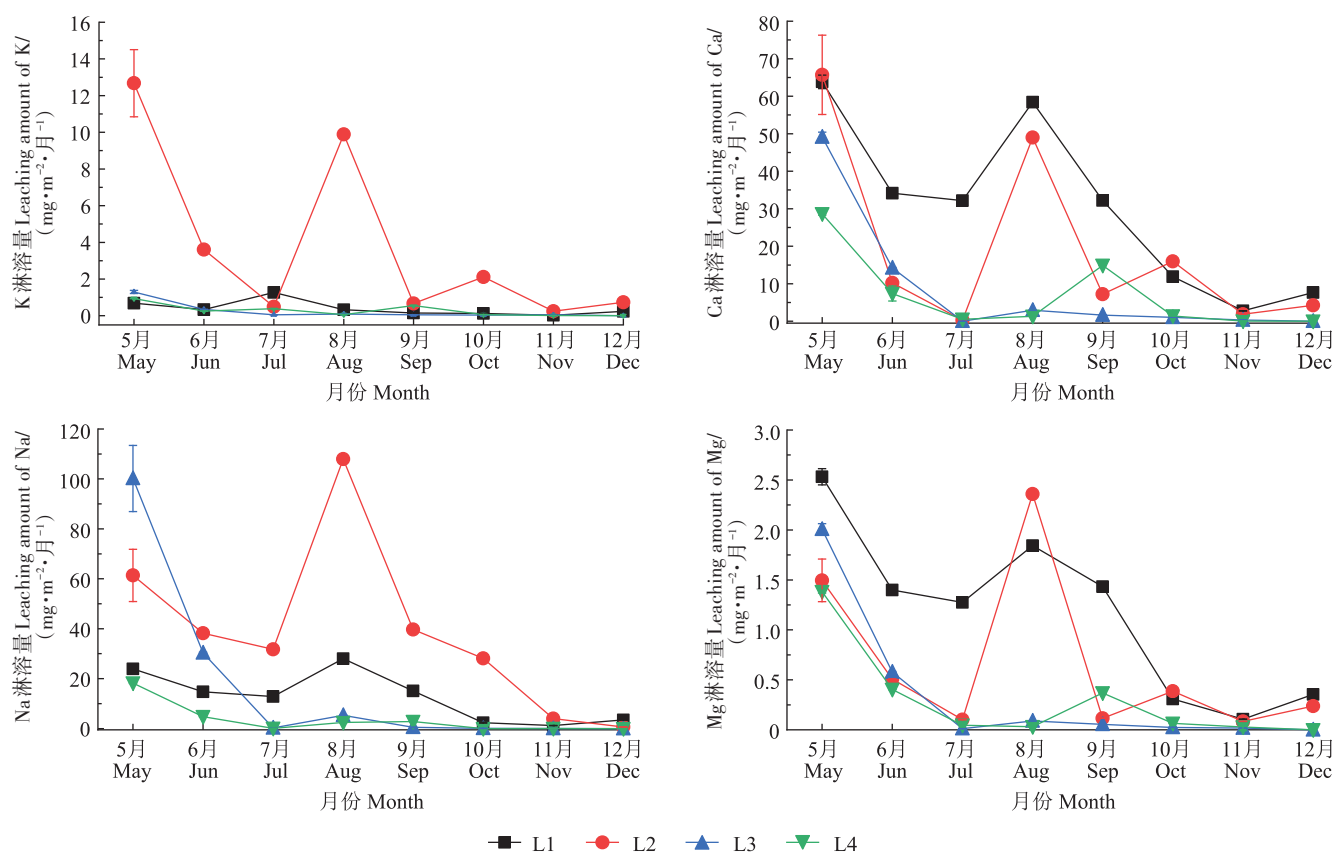
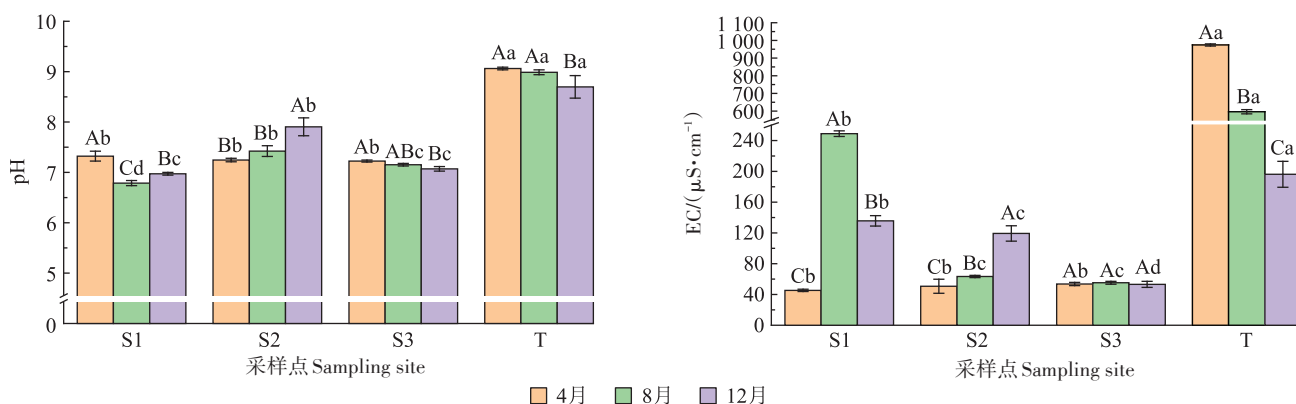


图3 每月不同基层盐分的淋溶量

Figure 3 Leaching amount of salt in different base layers per month

了可溶性Na盐向下迁移的速率。此外,随着紫云英以及自然定植的植物在赤矿泥上的生长,植物根系分泌的有机酸^[27]进一步导致了赤矿泥pH的持续降低,致使赤矿泥基层的盐碱性得到明显改善,从而有利于植物群落的发展。12月份收集的周边土壤S1和S2中Na含量相较于4月有显著增加($P<0.05$),这是因为

赤矿泥基层中的Na盐通过毛细作用向上迁移以及淋溶作用向侧面迁移至周边土壤中^[28],这也导致了周边1.5 m土壤pH和EC值的显著增加,但pH和EC值没有超过8和 $0.25\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,并不会影响植物的正常生长^[29]。而S3的Na含量并没有增加,反而有所降低,这进一步说明赤矿泥基层的淋溶迁移影响范围在3 m



不同小写字母表示同一月份不同样品数值间存在显著差异($P<0.05$, $n=4$)。不同大写字母表示同一月份不同样品数值间存在显著差异。下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among the values of different samples in the same month ($P<0.05$, $n=4$). Different capital letters indicate significant differences among the values in different months of the same sample. The same below.

图4 赤矿泥基质及周边土壤的pH和EC

Figure 4 pH and EC of the red mine mud and surrounding soil

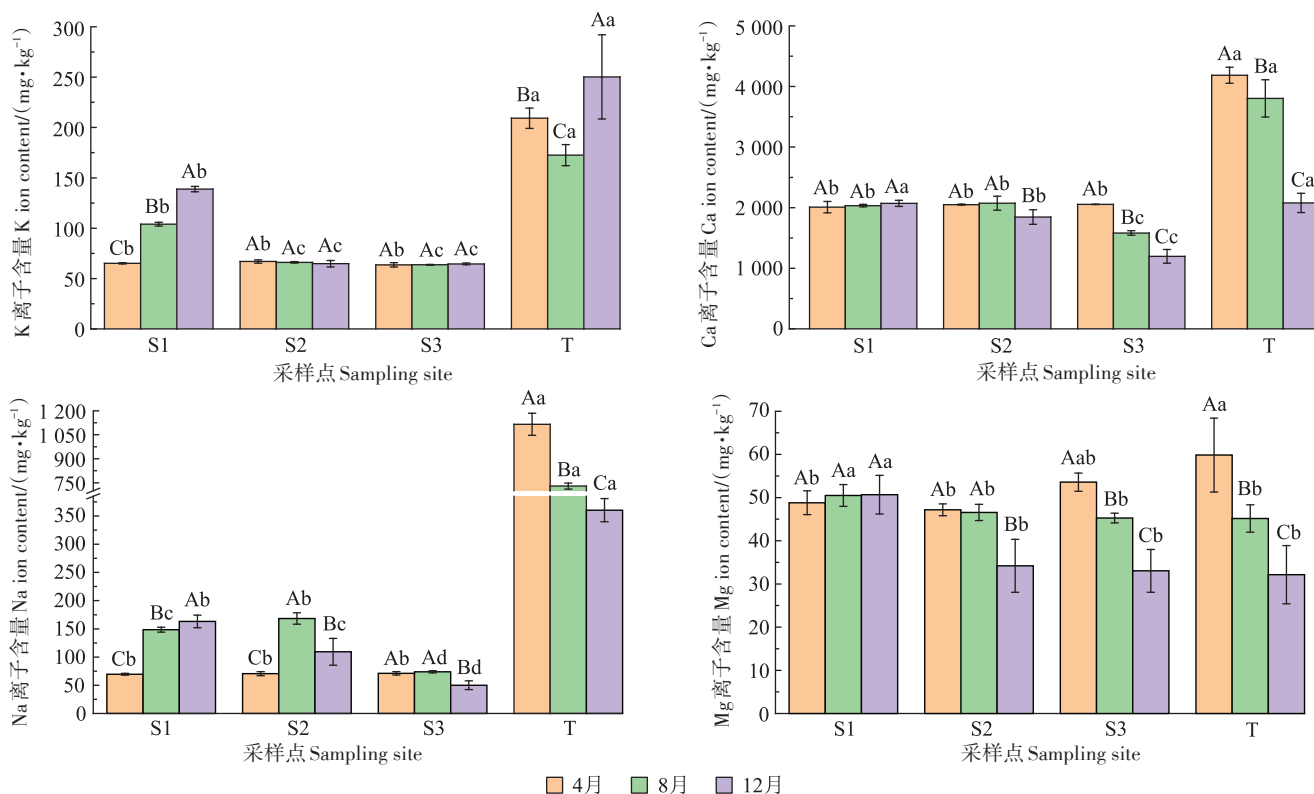


图5 赤矿泥基质及周边土壤的盐离子含量

Figure 5 Salt ion content of red mine mud and surrounding soil

内。这些结果表明赤矿泥基层随着植物生长和雨水淋溶,其高盐碱风险降低,而赤矿泥中Na盐的迁移对周边土壤盐碱性的影响有限。Pietrzyk等^[30]通过调查位于波兰南部的Gorka废弃赤泥库周边的土壤指标,发现在废弃30 a后残留的赤泥仍然会导致附近20 m内的土壤盐碱性上升。这说明赤泥经过与脱水矿泥协同生态处置后,大幅缩小了对周边环境的影响范围,降低了潜在的环境风险。此外,赤矿泥基质中的Ca和Mg也出现明显的流失,Ca和Mg元素是土壤的“保健性营养元素”,如果后续赤矿泥中Ca和Mg持续的流失不利于植物的生长^[31],本课题研究会持续关注。

2.2 基质及周边土壤重金属的变化特征

每月对处置区淋溶液中重金属的监测结果如图6所示。赤矿泥基层Cd和Cr每月的淋溶量在 $70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 以下;As在 $220 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 以下,相较于矿区土壤的淋溶量更高。赤矿泥基层中Cd的淋溶量在10月达到最高值,Cr和As的淋溶量在8月达到最高值,随后降低。As作为类金属元素,在土壤中主要以阴离子形态存在,As离子解吸量会随着赤矿泥pH的降低而减小,迁移能力会随之减弱^[32]。刘继东等^[16]发现赤泥经酸雨淋溶后,As、Cd和Cr的可迁移性显著增强。而赤泥与脱水矿泥混合后,基层软黏性的土壤质地不利于重金属的迁移^[33-34],同时添加的氯化铁在赤矿泥基层中生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮凝物会对重金属离子进行网捕吸附^[35]。赤矿泥基层周边土壤中重金属的淋溶趋势与矿区土壤呈一致性,表明受赤矿泥重金属侧面迁移的影响较小。生态处置8个月后,除了S3土壤中Cr含量有所增加,但并没有超过农用地土壤风险管控值^[36],随着处置时间增加,赤矿泥和周边土壤中Cr、Cd和As的含量都没有显著变化(图7)。这些结果表明,赤矿泥基层用于矿区生态处置的重金属污染风险可控。然而,赤矿泥基质中的多种重金属的长期有效性和协同效应还需要进一步研究。

2.3 赤矿泥基层中Na盐和重金属迁移的影响因素

本研究选取了可能影响赤矿泥基层中Na盐和重金属迁移的10个环境因子(pH、EC、SOC、CEC、K、Ca、Mg、孔隙度、容重和淋溶水量)对其进行主成分分析,如图8所示,根据特征值大于1的原则选取了影响赤矿泥基层Na盐迁移的两类主要因子,其累积贡献比达到92.3%,其中主成分1贡献率为79.7%,主成分2贡献率为12.6%。由图8可知,主成分1与Na呈正相关性,载荷系数为0.990,说明主成分1反映的是变量Na

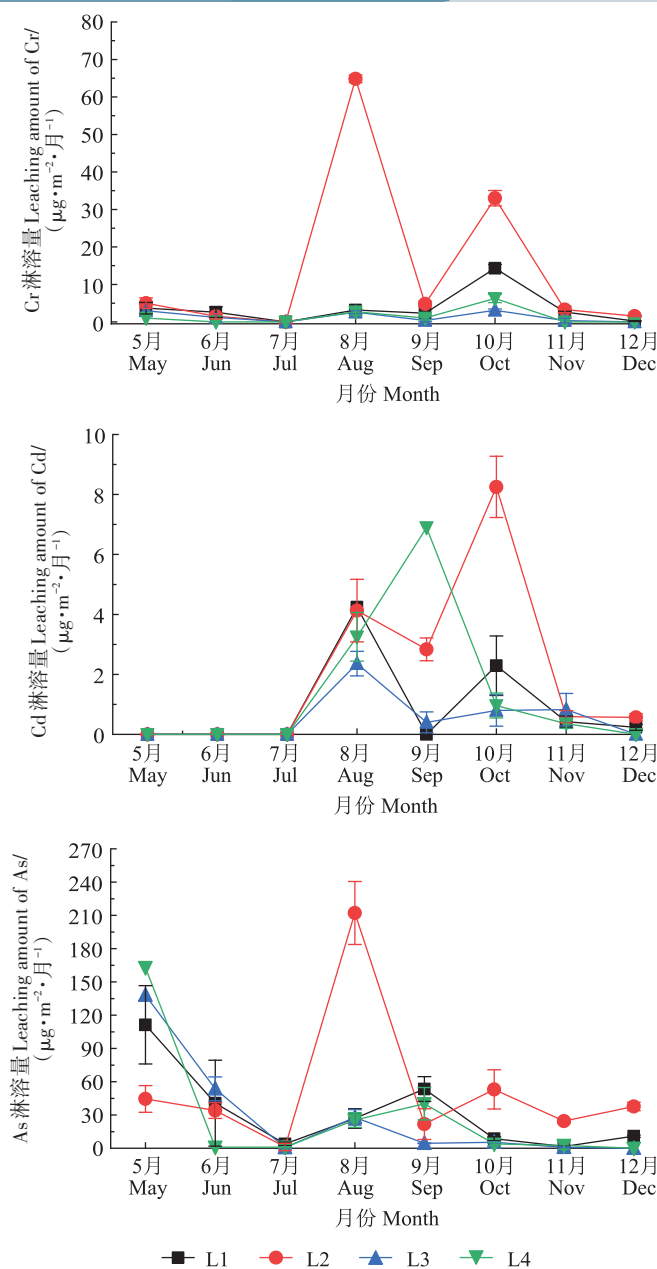


图6 每月不同基层重金属的淋溶量

Figure 6 Leaching amount of heavy metals in different base layers per month

的信息。而主成分1与pH、EC、Ca、Mg和容重具有正相关性,载荷系数分别为0.766、0.997、0.909、0.910和0.985,与CEC、SOC、K、孔隙度和淋溶水量呈负相关,载荷系数分别为-0.989、-0.98、-0.402、-0.950和-0.761。其中,CEC和SOC在主成分1上的投影长于其他环境因子且呈负相关,说明CEC和SOC是影响Na迁移的主要因素。Parisi等^[25]的研究表明,土壤中高含量的有机质和CEC使土壤具有更高的缓冲能力,从而有利于缓冲Na离子的迁移。在生态处置初期,赤矿泥

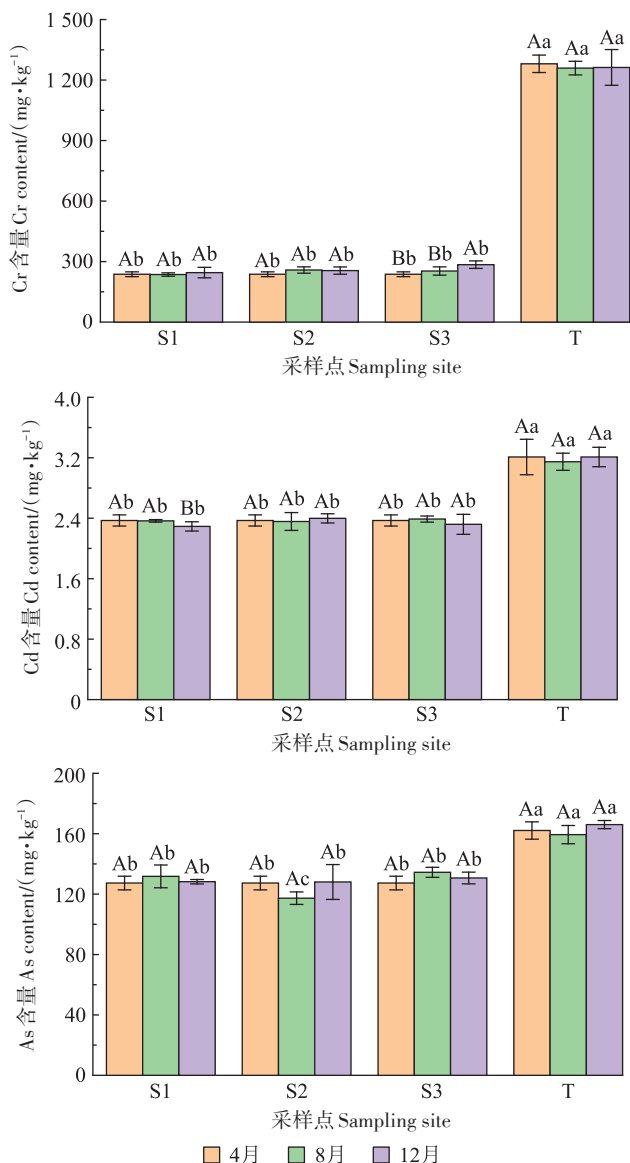


图7 赤矿泥基质及周边土壤的重金属含量

Figure 7 Heavy metal content in red mine mud and surrounding soil

中Na盐量的降低有利于植物群落的建立^[10-11]。而随着处置区植物群落的发展,植被凋落物和根系分泌物的输入,导致赤矿泥中有机质和CEC的增加^[15-16],从而缓冲了Na离子的迁移,稳定了赤矿泥基质中的Na盐,降低了对周边环境的影响。

影响赤矿泥基层重金属迁移的有3类主要因子,累积贡献比达到86.2%,其中主成分1贡献比为60.8%,主成分2贡献比为13.9%,主成分3贡献比为11.5%。由图9和表1可知,主成分2与Cd和As呈正相关性,载荷系数分别为0.608和0.665,说明主成分2反映的是变量Cd和As的信息。主成分3与Cr呈正

相关性,载荷系数为0.917,说明主成分3反映的是变量Cr的信息。而主成分2与pH、Ca、孔隙度和淋溶水量呈负相关性,载荷系数分别为-0.222、-0.273、-0.206和-0.551。其中Ca和淋溶水量在主成分2上的投影长于其他环境因子且呈负相关,说明Ca和淋溶水量是影响Cd和As迁移的主要因素。相较于其他环境因子,主成分3与Mg和淋溶水量具有更强的负相关性,载荷系数分别为-0.192和-0.130,说明Mg和淋溶水量是影响Cr迁移的主要因素。结合上述结果,在赤矿泥基层用于矿区生态处置的重金属污染风险可控的情况下,赤矿泥基质中重金属Cr、Cd和As的迁移主要受淋溶水量的影响,这与Sun等^[37]评估正常水稻田土壤中重金属流动性的研究结果一致。在

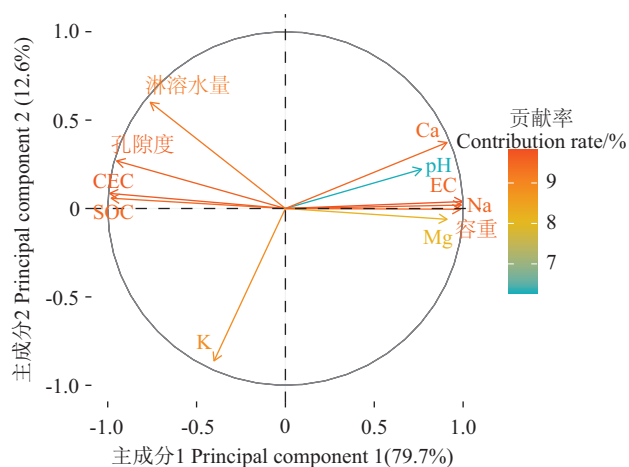


图8 环境因子对赤矿泥基层Na盐迁移影响的主成分分析

Figure 8 Principal component analysis of environmental factors influencing migration of Na salt in the red mine mud base

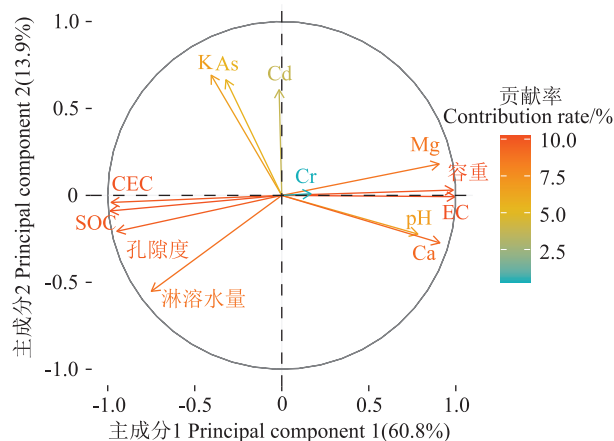


图9 环境因子对赤矿泥基层重金属迁移影响的主成分分析

Figure 9 Principal component analysis of environmental factors influencing migration of heavy metals in the red mine mud base

表1 环境因子对赤矿泥基层重金属迁移影响的载荷系数

Table 1 Load coefficients of environmental factors affecting the migration of heavy metals in red mine mud base

环境因子 Environmental factor	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分3 Principal component 3
pH	0.782	-0.222	0.350
EC	0.996	-0.007	-0.034
Ca	0.909	-0.273	-0.134
Mg	0.904	0.181	-0.192
CEC	-0.986	-0.089	0.003
容重	0.985	0.031	-0.116
孔隙度	-0.947	-0.206	-0.085
SOC	-0.980	-0.040	-0.008
淋溶水量	-0.749	-0.551	-0.130
K	-0.405	0.691	0.390
Cr	0.168	0.009	0.917
Cd	-0.015	0.608	-0.528
As	-0.321	0.665	0.049

赤矿泥生态处置过程中,基质中的重金属稳定性高,迁移能力弱,雨水淋溶造成的重金属流失主要受到降雨量和降雨周期的影响。

3 结论

(1)5—10月,赤矿泥基层Na盐的平均淋溶量达到了 $51.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$,其中8月份Na的淋溶量达到了 $108.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。生态处置8个月后,赤矿泥pH从9.06降低到8.70,电导率降低了80.0%,Na盐含量降低了70.4%,赤矿泥基层的盐碱性得到明显改善。

(2)赤矿泥基层中的Na盐随着雨水淋溶侧面迁移至周边土壤中,导致周边1.5 m土壤pH和电导率显著增加,但迁移影响范围在3 m内,其中阳离子交换量和土壤有机碳是影响Na盐迁移的主要因素。

(3)生态处置过程中,赤矿泥基层中的Cd和Cr随淋溶的流失量很低。尽管As存在一定的扩散风险,但每月流失量在 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下,赤矿泥和周边土壤中Cd和As的含量没有显著变化,赤矿泥基层用于矿区生态处置的重金属污染风险可控,其中赤矿泥基质中重金属迁移主要受淋溶水量的影响。

参考文献:

[1] 孙坚,耿春雷,张作泰,等.工业固体废弃物资源综合利用技术现状[J].材料导报,2012,26(11):105-109. SUN J, GENG C L, ZHANG Z T, et al. Present situation of comprehensive utilization technology of industrial solid waste[J]. *Materials Reports*, 2012, 26(11):105-109.

[2] 杜长学,彭振斌,杨传德,等.铝土矿矿泥固化技术的试验研究[J].工程地质学报,2006,14(1):117-121. DU C X, PENG Z B, YANG C D, et al. Experimental study of solidification technology of the bauxite mine slime[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(1):117-121.

[3] 南相莉,张延安,刘燕,等.我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J].过程工程学报,2009,9(增刊1):459-464. NAN X L, ZHANG T A, LIU Y, et al. Main categories of red mud and its environmental impacts[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2009, 9(Suppl1):459-464.

[4] MOMADE F W Y, SRAKU-LARTEY K. Studies into the preparation of alum from slime waste from the Awaso Bauxite Washing Plant[J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 101(3/4):93-98.

[5] RUBINOS D A, SPAGNOLI G, BARRAL M T. Chemical and environmental compatibility of red mud liners for hazardous waste containment[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13(3):773-792.

[6] POWER G, GRAEFE M, KLAUBER C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices[J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 108(1/2):33-45.

[7] VERMA A S, SURI N M, KANT S. Applications of bauxite residue: a mini-review[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(10):999-1012.

[8] KOSSOFF D, DUBBIN W E, ALFREDSSON M, et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation[J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 51:229-245.

[9] XUE S G. Soil formation in bauxite residue: The most promising way to large-scale and ecological disposal[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(2):265-267.

[10] VIGNESHWARAN S, UTHAYAKUMAR M, ARUMUGAPRABU V. Potential use of industrial waste-red mud in developing hybrid composites: a waste management approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276:124278.

[11] XUE S, ZHU F, KONG X, et al. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (red mud)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(2):1120-1132.

[12] 张宇玲,成官文,韦桥权,等. MgCl_2 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 Y L, CHENG G W, WEI Q Q, et al. Conditioning of salinity and alkalinity in red mud by MgCl_2 and dehydrated mineral slime[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(3):937-945.

[13] 郭颖,李玉冰,薛生国,等.广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险[J].环境科学,2018,39(7):3349-3357. GUO Y, LI Y B, XUE S G, et al. Risk analysis of heavy metal contamination in farmland soil around a bauxite residue disposal area in Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7):3349-3357.

[14] RUYTERS S, MERTENS J, VASSILIEVA E, et al. The red mud accident in Ajka (Hungary): Plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(4):1616-1622.

[15] 廖月清,陈明,郑小俊,等.模拟酸雨条件下生物炭配施沸石对江

- 西某钨矿区Pb、Cd、W的淋溶效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 319–326. LIAO Y Q, CHEN M, ZHENG X J, et al. Leaching effect of biochar and zeolite on Pb, Cd and W in tungsten ore area of Jiangxi Province under simulated acid rain conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 319–326.
- [16] 刘继东, 任杰, 陈娟, 等. 酸雨淋溶条件下赤泥中重金属在土壤中的迁移特性及其潜在危害[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 76–84. LIU J D, REN J, CHEN J, et al. Migration characteristics and potential hazards of heavy metals from bauxite residue to soil under simulated acid rain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 76–84.
- [17] 蒋旭升, 刘杰, 李海翔, 等. 复垦铅锌矿尾砂库的植被恢复和基质演变[J]. 环境工程, 2021, 39(12): 220–226. JIANG X S, LIU J, LI H X, et al. Vegetation restoration and substrate amendmnet of a re-claimed lead-zinc mine tailings pond[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(12): 220–226.
- [18] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3): 33–39. SHEN H, CAO Z H, HU Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carban in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 33–39.
- [19] 于亚泽, 焦燕, 杨文柱, 等. 不同灌溉方式旱田土壤 N_2O 排放和氮素淋溶特征[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 813–825. YU Y Z, JIAO Y, YANG W Z, et al. Characteristics of N_2O emissions and nitrogen leaching from upland soils under drip or furrow irrigation[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(2): 813–825.
- [20] YIN C Y, ZHAO J, CHEN X B, et al. Desalination characteristics and efficiency of high saline soil leached by brackish water and Yellow River water[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107461.
- [21] WITHEETRIRONG Y, TRIPATHI N K, TIPDECHO T, et al. Estimation of the effect of soil texture on nitrate-nitrogen content in groundwater using optical remote sensing[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(8): 3416–3436.
- [22] LI X F, GUO Y, ZHU F, et al. Alkalinity stabilization behavior of bauxite residue: Ca-driving regulation characteristics of gypsum[J]. *Journal of Central South University*, 2019, 26(2): 383–392.
- [23] ZONG R, HAN Y, TAN M, et al. Migration characteristics of soil salinity in saline-sodic cotton field with different reclamation time in non-irrigation season[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107440.
- [24] CHAMBERLAIN S D, HEMES K S, EICHELHANN E, et al. Effect of drought-induced salinization on wetland methane emissions, gross ecosystem productivity, and their interactions[J]. *Ecosystems*, 2020, 23(3): 675–688.
- [25] PARISI A, MONNO V, FIDELIBUS M D. Cascading vulnerability scenarios in the management of groundwater depletion and salinization in semi-arid areas[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018, 30: 292–305.
- [26] XING Y, ZHOU K, ZHANG X, et al. Application of recycled ferric chloride for alkalinity regulation of bauxite residue[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 305: 127174.
- [27] FRESCHET G T, ROUMET C, COMAS L H, et al. Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: Current understanding, pitfalls and future research needs[J]. *New Phytologist*, 2021, 232(3): 1123–1158.
- [28] 杜学军, 闫彬伟, 许可, 等. 盐碱地水盐运移理论及模型研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 713–721. DU X J, YAN B W, XU K, et al. Research progress on water-salt transport theories and models in saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 713–721.
- [29] 王文杰, 关宇, 祖元刚, 等. 施加改良剂对重度盐碱地土壤盐碱动态及草本植物生长的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2835–2844. WANG W J, GUAN Y, ZU Y G, et al. The dynamics of soil alkali-salinity and growth status of several herbal plants after krilium addition in heavy soda saline-alkai soil in field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2835–2844.
- [30] PIETRZYK SOKULSKA E, KULCZYCKA J. Impact of landfilling of red mud waste on local environment: The case of Gorka[J]. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi-Mineral Resources Management*, 2015, 31(2): 137–156.
- [31] OSEMWOTA I O, OMUED J A I, OGBOGHODO A I. Effect of calcium/magnesium ratio in soil on magnesium availability, yield, and yield components of maize[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(19/20): 2849–2860.
- [32] ZENG F, ALI S, ZHANG H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 84–91.
- [33] 张文杰, 焦卫国, 耿潇, 等. 优先流条件下典型重金属迁移的试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2020: 1–7 [2022–08–14]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0358>. ZHANG W J, JIAO W G, GENG X, et al. Experimental investigation on migration of typical heavy metals under preferential flow[J/OL]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020: 1–7 [2022–08–14]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0358>.
- [34] ALTUNDOGAN H S, ALTUNDOGAN S, TUMEN F, et al. Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud[J]. *Waste Management*, 2002, 22(3): 357–363.
- [35] YOO J C, SHIN Y J, KIM E J, et al. Extraction mechanism of lead from shooting range soil by ferric salts[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, 103: 174–182.
- [36] 李勛之, 姜璐, 王国庆, 等. 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 577–585. LI X Z, JIANG R, WANG G Q, et al. A comprative study of soil environmental standards for agricultural land among different countries and its implication for China[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 577–585.
- [37] SUN R, GAO Y, YANG Y. Leaching of heavy metals from lead-zinc mine tailings and the subsequent migration and transformation characteristics in paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2022, 291: 132792.

(责任编辑:李丹)