

广西南丹某锑矿区锑砷复合污染土壤组合修复技术及工程成效

潘 振, 陈俊先, 廖长君*, 谭 恒

广西博世科环保科技股份有限公司, 广西环境污染治理与生态修复技术重点实验室, 广西 南宁

收稿日期: 2026年3月20日; 录用日期: 2026年4月21日; 发布日期: 2026年5月12日

摘 要

广西南丹某废弃冶炼渣堆场地因长期堆存锑矿冶炼废渣, 遭受锑、砷等重金属严重复合污染, 锑、砷最大超标倍数分别达43倍和275倍, 浅层地下水、周边地表水同步受污, 场地生态系统极度退化, 植被覆盖率仅约1%, 土壤呈极端酸性且有机质匮乏。本项目依托国家重点研发计划项目要求, 针对性采用“生物淋洗 + 原位稳定化 + 原位阻隔 + 生态恢复”组合修复工艺技术方案, 于2024年7至10月开展场地修复工程。效果评估结果表明: 修复后土壤锑、砷浸出浓度均达标, 边界输出通量分别降低65%和42%, 异位淋洗锑砷淋洗率超90%, 植被覆盖率提升至87.92%, 全面达到国家重点研发计划项目考核指标。本工程为我国锑矿区重金属复合污染土壤的治理与生态修复提供了可复制、可推广的技术模式和工程实践经验。

关键词

锑矿区, 生物淋洗, 原位稳定化, 原位阻隔, 生态恢复

The Combined Remediation Technology and Engineering Effectiveness for the Combined Pollution of Antimony and Arsenic in the Soil of a Certain Antimony Mining Area in Nandan, Guangxi

Zhen Pan, Junxian Chen, Changjun Liao*, Heng Tan

Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration Technology, Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 潘振, 陈俊先, 廖长君, 谭恒. 广西南丹某锑矿区锑砷复合污染土壤组合修复技术及工程成效[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(5): 753-763. DOI: 10.12677/aep.2026.165075

Abstract

In a certain abandoned slag heap site in Nandan, Guangxi, due to the long-term storage of lead-zinc smelting waste, the site has suffered severe combined pollution from heavy metals such as antimony and arsenic. The maximum exceedance multiples of antimony and arsenic reached 43 times and 275 times, respectively. The shallow groundwater and surrounding surface water were simultaneously contaminated, and the ecosystem of the site was severely degraded. The vegetation coverage was only about 1%, and the soil was extremely acidic with a lack of organic matter. Based on the requirements of the key national research and development program project, this project adopted a targeted combined remediation technology scheme of “biological leaching + in-situ stabilization + in-situ barrier + ecological restoration”. The site remediation project was carried out from July to October 2024. The effect evaluation results showed that after the remediation, the leaching concentrations of antimony and arsenic in the soil met the standards, the boundary output fluxes were reduced by 65% and 42% respectively, the leaching rate of antimony and arsenic by in-situ leaching exceeded 90%, the vegetation coverage was increased to 87.92%, and all the indicators of the key national research and development program project were fully met. This project provided a replicable and scalable technical model and engineering practice experience for the treatment and ecological restoration of heavy metal-contaminated soil in China’s lead-zinc mining areas.

Keywords

Antimony Mining Area, Biological Leaching, In-Situ Stabilization, In-Situ Barrier, Ecological Restoration

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

1.1. 研究背景

锑、砷作为典型的有毒重金属，易在土壤环境中累积且迁移性强。矿区长期的冶炼生产活动极易造成锑砷复合污染，不仅破坏土壤理化性质、抑制生态系统功能，还会通过淋溶、渗透作用污染地下水和地表水，对区域生态安全及人居健康构成持续威胁[1]-[3]。我国西南喀斯特地区矿产资源丰富，锑矿开采冶炼历史悠久，遗留的重金属污染场地数量多、污染程度深，且该区域土壤层薄、石漠化特征显著，生态系统脆弱且自我修复能力差，锑砷复合污染土壤的治理与生态恢复成为该区域生态环境保护的重点与难点[4]。

广西南丹县作为我国重要的锑矿产区，长期的矿冶活动导致部分场地遭受严重的锑砷重金属复合污染，其中某废弃冶炼渣堆场地因数十年废渣堆存，土壤锑、砷超标倍数极高，地下水、地表水同步受污，植被覆盖率极低，成为典型的矿冶遗留重金属污染场地，其修复治理迫在眉睫[5]-[7]。为破解锑矿区重金属复合污染治理难题，依托国家重点研发计划项目技术支撑，针对该场地污染特征与生态现状，研发并应用“原位阻隔 + 原位稳定化 + 生物淋洗 + 生态恢复”组合修复工艺，开展针对性的土壤修复与生态重建工程[8][9]。本研究以该修复工程为研究对象，系统分析场地修复前污染特征、详细阐述修复技术方

案与实施要点,全面评估土壤、地下水及生态系统的修复效果,总结工程实施的技术创新与示范价值,旨在为我国西南喀斯特地区镉矿区及同类重金属复合污染场地的治理提供可复制、可推广的技术模式与工程实践经验,助力矿区生态环境修复与绿色可持续发展。

1.2. 场地概况

本示范工程位于广西壮族自治区河池市南丹县,场地占地面积 4788 m²,自 1966 年起作为镉矿冶炼废弃渣堆堆放地,历经数十年废渣堆积,成为典型的镉矿冶炼遗留重金属污染场地。2023 年场地环境调查结果显示,场地土壤垂直结构可划分为废渣层(0.0~7.0 m)、土壤层(7.0~9.5 m)及风化层(>9.5 m),部分点位因废渣堆积时间过长,废渣层与土壤层界限模糊,形成混合层。场地污染以镉、砷为核心特征,同时伴随铅、锌、镉等重金属复合污染,且污染物在土壤中呈垂向深度扩散特征,对场地地下水、周边地表水及生态系统造成持续性危害。

1.3. 修复前污染特征

该地修复前污染问题突出且呈现多介质复合污染特征。土壤层面重金属污染尤为严重,其中镉在废渣层 0~1 m 深度点位超标率高达 100%,最大超标倍数达 43 倍,污染最深可至 7 m,污染方量约 26,174 m³;砷污染程度更为严峻,废渣层 0~7 m 深度点位全部超标,最大超标倍数高达 275 倍,污染纵向延伸至 11 m,总污染方量约 44,156 m³,铅、锌、镉等重金属亦在特定层位存在不同程度的超标现象,形成了复杂的土壤重金属复合污染格局。

地下水环境同样受到显著威胁,浅层地下水中镉、砷浓度远超《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017) III类标准限值,最大超标倍数分别为 18 倍和 1.5 倍,反映出历史遗留废渣在长期雨淋溶作用下仍具备较强的污染物迁移释放能力,对地下水环境安全构成持续风险。

场地生态系统退化严重,植被覆盖率仅约 1%,几近裸地状态,土壤 pH 值低至 2.88,呈极端酸性,有机质含量仅 0.43%,石漠化特征明显,不利于微生物生长和植被自然恢复。区域水环境亦受牵连,矿区地表水检出镉、砷、铅、锌、镉等多种重金属超标,对周边水环境质量造成一定影响。

基于保护地下水的核心目标,本次修复通过土壤污染物迁移模型反推,确定了土壤重金属修复目标值:镉 430.63 μg/L、砷 289.26 μg/L、铅 0.59 μg/L、锌 59.5 μg/L、镉 0.29 μg/L;生态修复方面,明确植被覆盖率不低于 80%的目标,同时要求矿区周边土壤镉、砷等重金属输入量降低 40%以上,重污染土壤异位淋洗镉、砷削减率超 90%,单个场地验证面积不小于 4000 m²,全面契合国家重点研发计划项目考核要求。

2. 修复技术方案与实施

2.1. 总体技术路线

针对场地污染特征和后期无集中人为活动的规划,项目采用“原位阻隔 + 原位稳定化 + 生物淋洗 + 生态恢复”组合技术方案(图 1)。根据污染风险和深度实施分区分类精准修复:高风险污染区域选用异位淋洗技术;中低风险区域根据污染深度分别使用深层原位稳定化修复技术(3~5 m)和浅层原位稳定化修复技术(0~3 m);场地上游设置竖向硬性阻隔墙拦截地下水,下游设置柔性阻隔带净化地表径流;全区域进行立地改良、AM 真菌强化植被恢复等组合技术进行生态修复。

2.2. 关键技术实施

2.2.1. 异位淋洗技术

针对高风险污染区域(0~1 m, 450 m²),采用一体化土壤淋洗及废液净化设备进行异位处理,根据课题

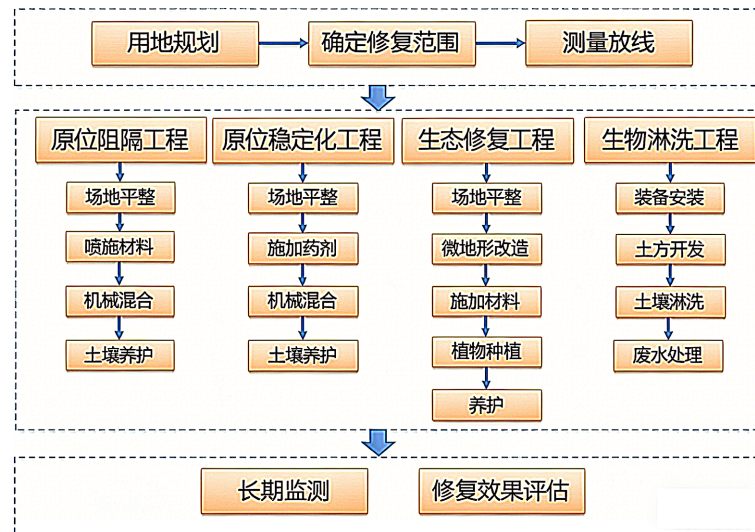


Figure 1. Technical route
图 1. 技术路线

组前期研究基础，淋洗步骤核心工艺参数为：以 0.8 mol/L 草酸溶液为淋洗剂，控制水土比 7:1，淋洗时间 3.5 h，循环淋洗 3 次[10]。

施工过程严格执行“清挖-转运-预处理-淋洗-脱水-检测-回填”全流程管控：污染土壤采用机械为主、人工为辅的方式清挖，转运至临时存放区初步脱水干化；经破碎、筛分剔除超 100 mm 大块杂物后进入淋洗反应器，通过智能远程操控系统精准控制进料速度和药剂添加量；淋洗泥浆经斜板沉淀池分离后，沉积物采用压滤机脱水，废水经处理后循环用于淋洗或达标排放。处理后土壤经生石灰调节 pH 至 7 左右，添加 2% 硅铁复合氧化材料确保浸出浓度达标后回填，实现污染土壤无害化处置。

2.2.2. 原位稳定化技术

针对中低污染区域的浅层土壤(0~1 m, 3638 m²)，采用 PMX 强力搅拌头(宽 1.6 m，直径 0.87 m)将硅铁基复合材料(添加量 2%)与污染土壤原位混合进行稳定化处理，调节含水率至 30%，养护 5 天。该技术利用零价铁的氧化去除和偏硅酸钠的中和反絮凝作用降低铈浸出浓度。搅拌头单点覆盖面积 1.6 m × 0.8 m，通过三维空间搅拌实现药剂与土壤的均匀混合，输料系统阀端流量计实时监测药剂渗入量，确保按预定比例混合。

针对中低污染区域的深层土壤(3~5 m, 800 m²)，采用气液二重管高压旋喷注射技术，先后注入 0.5% 高铁酸钾氧化剂、2.0% 硝酸铁吸附剂和 2.5% 氧化镁固化剂。控制空气压力 0.7~0.8 MPa、注浆压力 25~30 MPa、提升速度 5~20 cm/min，药剂扩散半径 0.8~3.5 m。施工前进行精准定位放线，钻机垂直度误差控制在 0.3% 以内，钻杆插入设计深度后由下向上旋喷注入，每提升 1 m 停留 20 min 释放压力，确保药剂与重金属充分反应，避免药剂涌出。

2.2.3. 梯度阻隔技术

于场地上游设置竖向刚性阻隔墙(10 m × 1.5 m × 1.5 m)，该阻隔墙以典型大宗工业固废矿渣、钢渣、脱硫石膏为胶凝材料，同时大掺量铈污染土壤/铈固废做骨料，添加量 300 kg/m³，注入时分 3 层注入，每层厚度 50 cm，填充完一层后用振捣器振实，避免出现裂缝和气泡。

场地下游设置柔性阻隔带(20 m × 1.5 m × 1.0 m)，阻隔带底部铺设矿物基-生物炭柔性阻隔材料，顶部铺设硅钙基生物矿化材料(3% 添加量)，压实度不小于 90%，定期喷施微生物菌剂(2 L/m²)，对地表径流淋

溶带出的重金属进行阻隔和净化。

2.2.4. 场地立体生态恢复技术

针对场地土壤酸化、有机质匮乏、植被难以自然恢复的问题，实施“微地形改造-基质改良-复层植被群落构建-AM真菌强化”四步恢复策略。微地形改造阶段，将高陡坡面改造成缓坡，在矿渣地表径流汇聚处设置 30 cm 宽排水沟，矿渣堆下铺设防渗层，边界硬化处理，控制水土流失。路堑开挖按设计断面测量放样，确保坡面平顺稳定，路基表面平整。

基质改良阶段，深翻土壤 0.2~0.3 m，施撒生物炭基肥(800 kg/亩)和微生物菌肥(500 kg/亩)，覆椰丝毯防止暴雨冲刷，适量浇水后自然老化 7~10 天。改良材料利用当地农林废弃物及市政污泥经炭化和好氧堆肥制成，有机质含量达 32%，氮含量达 6 g/kg，可有效改善土壤酸化状况。植被重建阶段，根据前期场地周边植物调查结果，采取当地优势植物搭配花卉混合种植的方法，具体措施为“宽叶草 + 白三叶 + 狗牙根 + 波斯菊 + 苔草”混合草种 50 g/m²。播种前种子经拌种处理防止地下害虫侵害，撒种后覆盖细土，采用喷灌方式保湿。遵循“淡肥勤施、量少次多、营养齐全”的施肥原则，播种前施复合肥 50 kg/亩，后期每隔 15 天施尿素 8~10 kg/亩，每隔 30 天施农用硫酸钾 8~10 kg/亩。AM 真菌强化阶段，施用优选 AM 菌剂 200 g/m²，提高植物抗旱和养分吸收能力，构建稳定可持续的复层植物群落，实现生态系统有效重建。

3. 修复效果评估

2024 年 10 月，严格按照《污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则(试行)》(HJ 25.5-2018)等标准规范评估修复效果，制定科学的布点采样方案(图 2 和图 3)，委托具有 CMA 资质的第三方完成样品检测。采样涵盖土壤、地下水等介质，共采集土壤样品 63 件、地下水样品 4 件，设置植被调查样方 18 个(恢复区 15 个、对照区 3 个)；实验室检测采用固体废物浸出毒性浸出方法硫酸硝酸法(HJ/T 299-2007)前处理，通过原子荧光光度计、电感耦合等离子体质谱仪等设备分析，同步开展空白样品检测、仪器稳定性核查、平行双样检测和加标回收率检测，精密度和准确度控制合格率均为 100%，确保评估结果真实、可靠、权威。



Figure 2. Sample point distribution map (left: soil sampling point distribution; right: groundwater sampling point distribution)
图 2. 采样布点图(左: 土壤采样布点; 右: 地下水布点)

3.1. 土壤修复效果

3.1.1. 浸出浓度全面达标

修复后，场地各修复区域土壤镉、砷浸出浓度均低于修复目标值(表 1、表 2)，达标率 100%，其中浅

层稳定化区域镉、砷最高浸出浓度分别为 61.4 $\mu\text{g/L}$ 、34.3 $\mu\text{g/L}$ ，深层稳定化区域镉、砷最高浸出浓度分别为 53.5 $\mu\text{g/L}$ 、33.6 $\mu\text{g/L}$ ，淋洗清挖区域镉、砷最高浸出浓度分别为 412 $\mu\text{g/L}$ 、86.0 $\mu\text{g/L}$ ，均低于安全利用值阈值，各污染物均达到安全利用要求。

Table 1. Detection results of surface (shallow) soil after site restoration

表 1. 场地修复后表层(浅层)土壤检测结果

采样点位	样品编号	采样深度 (m)	镉 ($\mu\text{g/L}$)	铅 ($\mu\text{g/L}$)	镉 ($\mu\text{g/L}$)	砷 ($\mu\text{g/L}$)	是否达到修复 目标值
ND-1	ND-1	0.5	ND	ND	113	16.7	是
ND-5	ND-5-1	0~0.5	ND	ND	23.7	ND	是
	ND-5-2	0.5~1	ND	ND	5.81	ND	是
ND-6	ND-6-1	0~0.5	ND	ND	50.6	10.2	是
	ND-6-2	0.5~1	ND	ND	6.78	13.6	是
ND-7	ND-7-1	0~0.5	ND	ND	49.0	16.0	是
	ND-7-2	0.5~1	ND	ND	29.2	27.3	是
ND-8	ND-8-1	0~0.5	ND	ND	17.6	9.26	是
	ND-8-2	0.5~1	ND	ND	2.49	ND	是
ND-9	ND-9-1	0~0.5	ND	ND	39.6	24.6	是
	ND-9-2	0.5~1	ND	ND	61.4	8.74	是
ND-10	ND-10-1	0~0.5	ND	ND	14.5	1.44	是
	ND-10-2	0.5~1	ND	ND	15.0	1.01	是
ND-14	ND-14-1	0~0.5	ND	ND	31.0	5.50	是
	ND-14-2	0.5~1	ND	ND	8.12	15.1	是
ND-16	ND-16-1	0~0.5	ND	ND	22.2	8.11	是
	ND-16-2	0.5~1	ND	ND	19.7	34.3	是

Table 2. Detection results of surface (deep) soil after site restoration

表 2. 场地修复后表层(深层)土壤检测结果

采样点位	采样深度 (m)	镉 (mg/L)	锌 (mg/L)	铅 (mg/L)	镉 ($\mu\text{g/L}$)	砷 ($\mu\text{g/L}$)	是否达到修复 目标值
ND-P1	0.2	ND	ND	ND	45.2	13.7	是
	1.5	ND	ND	ND	45.3	13.7	是
	3	ND	ND	ND	40.5	10.1	是
	5	ND	ND	ND	37.9	11.0	是
ND-P6-1	0.2	ND	0.01	ND	43.8	16.2	是
	1.5	ND	ND	ND	48.8	15.6	是
	3	ND	ND	ND	41.1	14.5	是
	5	ND	ND	ND	27.4	21.8	是

续表

ND-P6-2	0.2	ND	0.02	ND	29.5	5.62	是
	1.5	ND	ND	ND	48.5	15.6	是
	3	ND	ND	ND	47.0	19.8	是
	5	ND	ND	ND	53.5	33.6	是

3.1.2. 异位淋洗去除效率显著

异位淋洗效果尤为显著(表 3、表 4), LX-01 样品锑去除率 97.99%、砷 97.86%、铅 93.39%、锌 97.01%、镉 96.21%, 满足重污染土壤削减目标。淋洗后土壤经 pH 调节和稳定化处理, 浸出浓度全部达标后回填, 实现污染土壤无害化处置。

Table 3. Effect of soil washing test for antimony-arsenic contaminated soil

表 3. 锑砷污染土壤淋洗试验效果

样品编号	锑(mg/kg)	砷(mg/kg)	铅(mg/kg)	锌(mg/kg)	镉(mg/kg)	pH
LX-CK	804	28300	664	10200	79.2	6.95
LX-01	16.2	606	43.9	305	3.0	8.56

Table 4. Efficiency of soil washing experiment for antimony-arsenic contamination

表 4. 锑砷污染土壤淋洗试验效率

样品编号	淋洗效率(%)				
	锑	砷	铅	锌	镉
LX-01	97.99%	97.86%	93.39%	97.01%	96.21%

3.2. 地下水保护与通量降低效果

3.2.1. 地下水质量改善

修复后孔隙水检测结果显示(表 5), 浅层稳定化区域锑浓度 14~57 $\mu\text{g/L}$ 、砷 4~19 $\mu\text{g/L}$, 较修复前显著降低, 均未超出修复目标值。地下水上游点位(ND-P4、ND-P8、ND-P9)锑 3.62~7.04 $\mu\text{g/L}$ 、砷 1.37~82.6 $\mu\text{g/L}$, 部分仍超《地下水质量标准》III类标准, 但梯度阻隔墙外侧地下水下游点位 ND-P11 锑 1.76 $\mu\text{g/L}$ 、砷 8.58 $\mu\text{g/L}$, 全部重金属达标, 证明阻隔技术有效阻断了污染物向外扩散。

Table 5. Evaluation results of groundwater effectiveness testing

表 5. 地下水效果评估检测结果

点位名称	镉($\mu\text{g/L}$)	锌($\mu\text{g/L}$)	铅($\mu\text{g/L}$)	锑($\mu\text{g/L}$)	砷($\mu\text{g/L}$)
ND-P4	34.3	3910	0.24	3.62	1.37
ND-P8	6.74	541	1.05	7.04	82.6
ND-P9	1.12	404	ND	1.99	37.9
ND-P11	1.78	272	0.23	1.76	8.58

3.2.2. 污染物输出通量大幅降低

采用基于水铁矿吸附解吸反应动力学的输入输出通量模型计算(表 6、图 3、图 4), 修复后锑在场地

边界处的输出通量降低 65%，砷降低 42%，均满足项目考核指标(>40%)的要求，污染物在土壤 - 地下水系统中的迁移扩散得到有效控制。

3.3. 生态修复效果

场地生态恢复成效突出，生态恢复区平均植被覆盖度达 87.92%，较对照区(2.33%)提升 97%，远超 80%的生态修复目标。未进行基质改良的区域仅狗牙根存活，覆盖度 19.66% (表 7)；经生物炭基肥和微

Table 6. Adsorption and desorption reactions of antimony and arsenic on iron ore

表 6. 锑砷在水铁矿上的吸附解吸反应

吸附/解吸反应	logK	数据来源
$\text{Hfo_wOH} + \text{Sb}(\text{OH})_6^- \leftrightarrow \text{Hfo_wOHSbO}(\text{OH})_4^- + \text{H}_2\text{O}$	1.3	
$\text{Hfo_wOH} + \text{Sb}(\text{OH})_6^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Hfo_wOSb}(\text{OH})_4^+ + 2\text{H}_2\text{O}$	8.4	
$\text{Hfo_wOH} + \text{H}_3\text{AsO}_4 \leftrightarrow \text{Hfo_wOHAsO}_3^- + 3\text{H}^+$	-10.12	<i>minteq.v4.dat</i>
$\text{Hfo_wOH} + \text{H}_3\text{AsO}_4 \leftrightarrow \text{Hfo_wHAsO}_4^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$	2.81	
$\text{Hfo_wOH} + \text{H}_3\text{AsO}_4 \leftrightarrow \text{Hfo_wH}_2\text{AsO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	8.61	

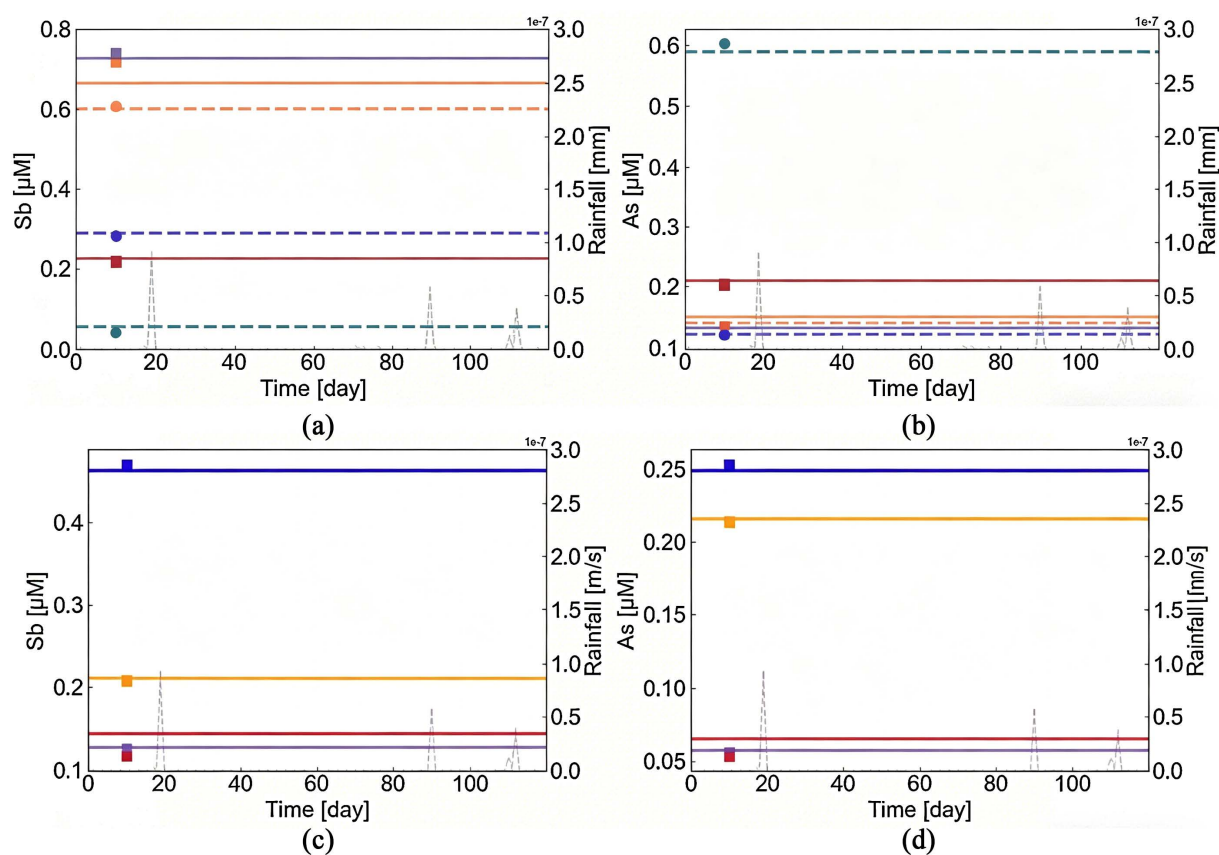


Figure 3. Changes in the content of antimony and arsenic in pore water before and after site restoration in Nandan, Guangxi: (a) (b): the data before restoration; (c) (d): the data after restoration. Points: observed values; Lines: simulated values

图 3. 广西南丹场地修复前后孔隙水中锑砷含量变化：(a) (b) 为修复前；(c) (d) 为修复后。点：观测值；线：模拟值

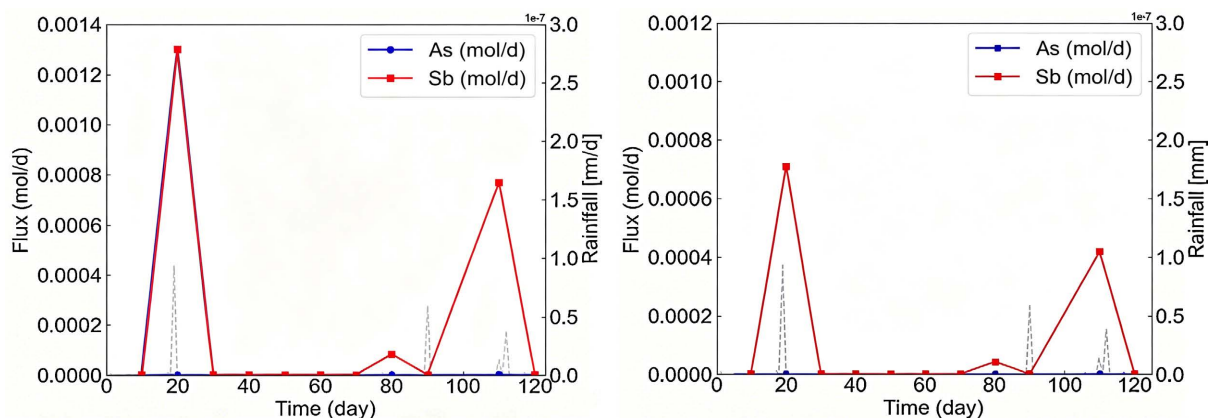


Figure 4. Sb and As output fluxes at the site boundary in Guangxi Nan Dan: The left figure shows the situation before restoration, and the right figure shows the situation after restoration

图 4. 广西南丹场地边界处的锑砷输出通量：左图为修复前、右图为修复后

Table 7. Vegetation coverage and species richness in the restoration area and the control area

表 7. 恢复区和对照区植被盖度和物种丰富度

区域	样方编号	植被盖度(%)	物种丰富度(物种数)
恢复区	FC1	42	1
	FC2	13	1
	FC3	4	1
	C1.5-1	56	1
	C1.5-2	60	1
	C1.5-3	81	1
	C3-1	92	1
	C3-2	99	1
	C3-3	100	1
	W2-1	94	1
	W2-2	86	1
	W2-3	90	1
	W4-1	100	1
	W4-2	97	1
	W4-3	100	1
对照区	CK1	1	1
	CK2	5	2
	CK3	1	1

生物菌剂改良后，狗牙根生长态势良好，形成茂密的植被覆盖，其发达的根系有效固持土壤，配合 AM 真菌强化，构建了稳定的植被群落，场地石漠化和水土流失风险显著降低，生态功能得到有效重建。

3.4. 修复长效稳定性

施工后，如图 5 所示，连续监测 300 天后土壤中锑的浸出浓度降低率稳定在 70% 左右，砷的浸出浓

度降低率稳定在 65%左右。结果表明该修复体系能够有效阻隔土壤中横向迁移的污染物,实现长效阻控。

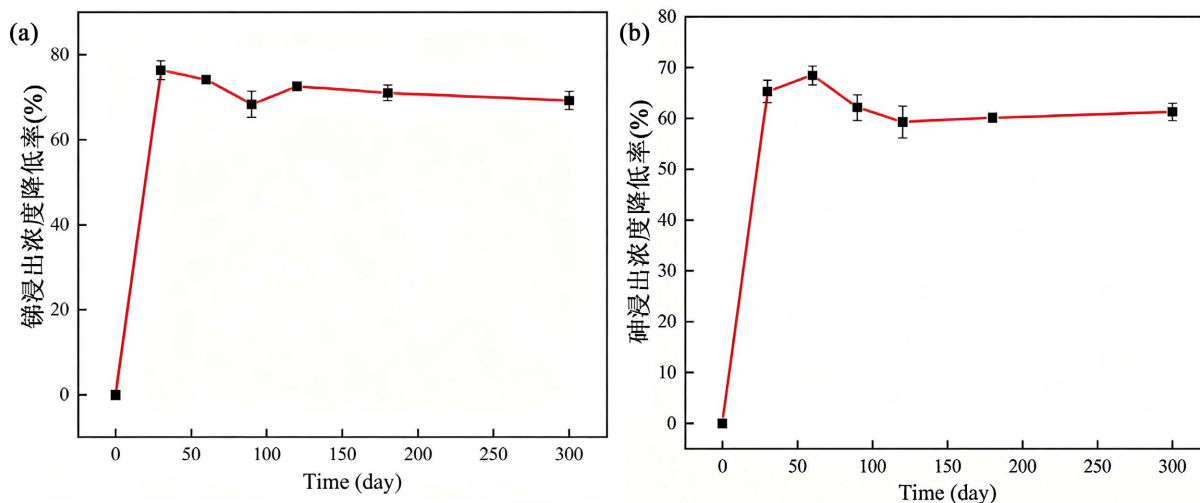


Figure 5. The reduction rates of the leaching concentrations of Sb (a) and As (b) in the soil

图 5. 土壤中锑(a)和砷(b)浸出浓度降低率

4. 修复成效综合评估

4.1. 考核指标完成情况

项目全面完成国家重点研发计划考核指标: 单个场地验证面积 4788 m² (≥4000 m²); 矿区周边土壤锑砷等重金属输入量降低 40%以上(锑 65%、砷 42%); 重污染土壤淋洗锑污染削减 90%以上(平均 96.03%); 场地土壤锑、砷浸出浓度全部达标, 实现安全利用; 生态修复植被覆盖率 87.92% (≥80%), 土壤基质改良达到植物生长要求。

4.2. 技术创新与示范价值

项目基于污染浓度梯度分区和深度差异, 采用“淋洗 + 深层稳定化 + 浅层稳定化”分级处理模式, 提升修复针对性与处理效率; 创新研发固废基阻隔材料、硅铁复合稳定化材料等系列专用修复材料, 既实现工业固废资源化利用, 又有效降低修复成本; 配套采用移动式淋洗 - 废液净化一体化装备, 通过现场智能操控与废水循环利用, 大幅减少二次污染产生; 同时运用“基质改良 + AM 真菌强化 + 乡土物种筛选”组合技术, 推动重金属污染控制与场地生态恢复工作同步推进、协同开展。

4.3. 修复成本及推广

根据项目成本概算, 综合修复成本约 1200~1500 元/吨土, 淋洗液处理药剂成本约 20~40 元/m³, 而目前主流的淋洗技术修复成本高达 2000~3500 元/吨土, 约为本项目费用的 1.6~2.9 倍。

此外, 国家层面尚无统一的修复后土壤回用标准, 地方执行缺乏规范依据, 加之重金属污染虽去除率较高但受黏土抑制、有机污染需表面活性剂增溶且效率有限、复合污染药剂协同难度大, 整体技术推广仍面临成本高昂、二次污染风险突出与标准缺位三重瓶颈。同时, 由于区域降水及地质环境差异, 亟需结合区域水文特征优化工艺路径并建立地方性技术规范。

5. 结论

广西南丹锑矿区锑砷污染土壤修复工程针对场地重金属复合污染、生态极度退化的特征, 科学采用

“原位阻隔 + 原位稳定化 + 生物淋洗 + 生态恢复”组合技术方案,通过分区分类精准修复、多技术协同实施,实现了污染土壤无害化、污染物迁移阻断化、场地生态功能化的修复目标[11][12]。修复后场地土壤镉、砷等重金属浸出浓度全面达标,污染物输出通量大幅降低,植被覆盖率显著提升,所有指标均满足国家重点研发计划项目考核要求,解决了镉矿冶炼遗留场地的重金属污染问题和生态退化问题。

本工程形成的镉矿区重金属污染土壤治理技术模式,兼具技术可行性、经济合理性和生态可持续性,为我国西南喀斯特地区镉矿区及同类重金属污染场地的修复治理提供了可复制、可推广的工程经验和和技术支撑,对推动我国矿区生态环境综合治理、实现矿产资源开发与生态环境保护协同发展具有重要的实践意义。

基金项目

广西重点研发计划(桂科 AB22080078), 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026043)。

参考文献

- [1] 李泽群, 李学先, 段明宇, 等. 喀斯特山区神渣堆场污染迁移风险与区划[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 457-467.
- [2] 冯园, 王娟, 张倩. 典型镉冶炼地块不同功能区土壤中镉、砷污染分布特征及风险评估[J]. 中国地质, 2025, 52(3): 1107-1115.
- [3] 黑儿平, 何明江, 喻华, 等. 西北和西南某废弃镉冶炼厂污染场地剖面土壤镉砷迁移性及其影响因素[J]. 环境化学, 2025, 44(3): 975-990.
- [4] Gong, Y., Yang, S., Chen, S., Zhao, S., Ai, Y., Huang, D., *et al.* (2023) Soil Microbial Responses to Simultaneous Contamination of Antimony and Arsenic in the Surrounding Area of an Abandoned Antimony Smelter in Southwest China. *Environment International*, **174**, Article ID: 107897. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107897>
- [5] 杜忠毓, 邢文黎, 薛亮, 等. 喀斯特石漠化镉矿区植物群落主要物种生态位特征及其种间联结[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2865-2880.
- [6] 赵清英, 张泽民, 谭昭, 等. 西南三个典型镉矿区镉砷赋存形态与污染特征[J]. 环境科学研究, 2024, 37(7): 1612-1625.
- [7] 姚胜勋, 韦志巧, 韦岩松. 广西南丹某尾矿库矿物元素纵向分布规律研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(2): 101-108.
- [8] Tan, X., Liang, Y., Jiang, W., Zhang, X., Guan, X., Liu, C., *et al.* (2025) Effect of Fulvic Acid Coating Layer on Surface Oxidation of Pyrite and the Interfacial Mechanism. *Environmental Technology & Innovation*, **37**, Article ID: 104022. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104022>
- [9] 蒋妍, 曹基武, 施翔, 等. 贵州 4 种乡土植物对镉矿土的适应性及金属积累特征研究[J]. 林业科学研究, 2024, 37(5): 124-135.
- [10] 谢冬燕, 曹斐姝, 陈建平, 等. 低分子有机酸对高浓度镉砷污染土壤的淋洗效率及机理研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(1): 117-127.
- [11] 刘继东, 龙吉生. 广西河池地区砒霜厂旧址污染土壤砷、镉稳定化研究[J]. 环境卫生工程, 2025, 33(2): 64-70, 76.
- [12] 罗斌. 冷水江镉煤矿区杨梅岭地块生态修复实践[J]. 现代矿业, 2025, 41(5): 200-204.