绿色矿业

文章编号：1004-4051(2023)09-0062-08 DOI：10.12075/j.issn.1004-4051.20220835

有色金属矿山酸性露采边坡原位固化阻隔技术方法研究

许辉标[1]，蓝选庆[2]，朱秋华[2]，杨鸿翔[1]，蓝晓聪[3]，朱　敏[1]，谢桂芳[2]，蒋　颖[4]，卫晓锋[4,5]

（1. 紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿，福建 上杭 364200；
2. 紫金矿业集团股份有限公司，福建 上杭 364200；
3. 紫金环保科技股份有限公司，福建 上杭 364200；
4. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司，北京 100012；
5. 哈密红石矿业有限公司，新疆 哈密 839000）

摘　要：有色金属矿山露采形成的高陡边坡、土壤酸化是生态修复的主要技术难点。以福建紫金山金铜矿露采边坡为研究对象，通过野外调查和土壤分析，研究边坡酸化控制方法。矿区包括终了境界中的裸露岩石、排土场岩土混合物和选矿过程产生的残渣物等三种基质组成的各类边坡；研制了两种阻氧覆盖酸化控制方法，一种是由砂土 35%～45%、氧化钙 5%～10%、水泥 10%～20%、聚丙烯酸钾 150～200 g、有机螯合剂 20～60 kg 组成的薄层状固化隔离覆盖材料(1 m^3)；另一种是由中和渣 80%～90%、微生物菌肥 5%～10%、有机肥 1%～5% 配制的厚层状中和介质覆盖材料(1 m^3)。工程应用情况显示表层土壤 pH 值由 2.78～5.05 上升至 8.21～8.56，硫平均含量下降 70%，土壤酸化得到有效控制，立体植物群落逐渐恢复。该研究为有色金属矿山露天终了境界的生态修复治理提供了工业实践示范。

关键词：酸性露采边坡；固化阻隔；有色金属矿山；紫金山金铜矿

中图分类号：TD862; X53　　**文献标识码：**A

Study on in-situ solidification barrier technology of acid open-pit mining slopes in non-ferrous metal mines

XU Huibiao[1], LAN Xuanqing[2], ZHU Qiuhua[2], YANG Hongxiang[1], LAN Xiaocong[3], ZHU Min[1], XIE Guifang[2], JIANG Ying[4], WEI Xiaofeng[4,5]

(1. *Zijinshan Gold-Copper Mine, Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang* 364200, *China*;
2. *Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang* 364200, *China*;
3. *Zijin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shanghang* 364200, *China*;
4. *Sino-Zijin Resources Co., Ltd., Beijing* 100012, *China*;
5. *Hami Redstone Mining Co., Ltd., Hami* 839000, *China*)

收稿日期：2022-11-08　　**责任编辑：**刘硕

基金项目：紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿国家级绿色矿山建设规划项目资助

第一作者简介：许辉标(1984—)，男，福建龙岩人，高级工程师，主要从事矿山环境管理等工作，E-mail：xuhuibiao@163.com。

通讯作者简介：蒋颖(1997—)，女，湖南永州人，硕士研究生，初级工程师，主要从事环境污染治理及生态地质环境调查评价研究，E-mail：jiangyingdhs@163.com。

引用格式：许辉标，蓝选庆，朱秋华，等. 有色金属矿山酸性露采边坡原位固化阻隔技术方法研究[J]. 中国矿业，2023，32(9)：62-69.

XU Huibiao, LAN Xuanqing, ZHU Qiuhua, et al. Study on in-situ solidification barrier technology of acid open-pit mining slopes in non-ferrous metal mines[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9): 62-69.

Abstract：The open-pit mining of non-ferrous metal mines has caused environmental problems such as high and steep slopes and soil acidification, which is the main technical difficulty in ecological restoration. Taking the acid open-pit mining slopes of Zijinshan Gold-Copper Mine in Fujian as the study object, through the field investigations and soil sample analysis, the control method of slope acidification is studied. The mining area includes all kinds of slopes composed of bare rock on the end boundary, rock and soil mixture in the dump and residue produced in the mineral processing process. Two kinds of oxygen barrier covering acidification control methods have been developed, one is invented with 35%-45% sandy soil, 5%-10% calcium oxide, 10%-20% cement, 150-200 g potassium polyacrylate, 20-60 kg organic chelating agent for 1 m^3 of material; the other is prepared by 80%-90% neutralizing slag, 5%-10% microbial fertilizer and 1%-5% organic fertilizer for 1 m^3 of material. The results of the engineering practice performance show that the pH value of the surface soil has increased from 2.78-5.05 to 8.21-8.56, and the average content of sulfur has decreased by 70%, the soil acidification has been controlled effectively, and the three-dimensional plant community have restored gradually. The study provides the industrial practice demonstration for the ecological restoration and treatment of the open-pit end boundary in non-ferrous metal mines.

Keywords：acid open-pit mining slope；solidification barrier；non-ferrous metal mine；Zijinshan Gold-Copper Mine

0　引　言

有色金属露采矿山一般会形成巨大的终了境界坑，其中，露采边坡和排土场边坡具有地形陡峭、坡度高、土壤层薄、立地条件差的特点。在湿热气候条件下，大量含硫化物矿石或矿渣受物理因素、化学因素及生物因素的综合影响会产生一种对环境造成极大破坏的酸性水分（acid mine drainage, AMD）[1]，其主要成分是硫元素形成的各种金属硫化物，属于强酸性物质，含有大量可溶性有害金属物质[2]。如果直接排放入河流、湖泊等水体，会导致水体 pH 值一定程度降低，逐渐酸化并造成水生植物生长环境的破坏，降低水体的自净功能，威胁水生生物生存[3]。如果酸性水分进入土壤，强酸性硫化物和大量重金属离子会使土壤酸化和毒化，不利于植物生长，导致枯萎死亡。通过食物链的传递和富集作用，重金属元素会极大地危害人体健康[4-5]。

目前对矿山酸性水分的治理主要集中于矿井水、矿坑水、尾矿淋滤水和生物堆浸的浸出液等源头控制，控制方法主要是通过碱中和沉淀法、硫化物沉淀法、氧化还原法和微生物还原法等技术方法提高其 pH 值，降低重金属离子含量[6-8]。露采边坡的酸性水浸出过程缓慢，属于一种隐形的土壤环境损害，针对金属矿山开采形成的酸性露采边坡的生态修复治理技术研究相对薄弱，仅有少部分学者研究了酸性边坡的产酸过程和控制措施，提出了客土喷播、鱼鳞坑、垒起生态袋、生态挡墙等措施[9]。然而工程应用表明，采用简单的人工种植和客土喷播工艺进行酸性边坡的生态修复，无法有效控制围岩或者矿体硫化物氧化后形成的酸性水浸出，会持续渗出冲刷边坡，影响生态系统的自我修复效果[10-11]。

针对福建紫金山金铜矿酸性露采边坡的基质特征，研究了薄层状固化隔离材料和厚层状中和介质材料等两种阻氧覆盖控制酸性水材料。工程应用表明表层土壤酸化得到有效控制，植被群落不断恢复。该研究成果可为有色金属矿山的生态修复治理提供实践案例。

1　矿山基本概况

1.1　地质环境特征

紫金山金铜矿位于福建省、江西省和广东省交界处的龙岩市上杭县以北 14.6 km 处，2008 年被评为“中国第一大金矿”。矿区处于亚热带季风气候区，气候温和，雨量充沛，无酷热严寒，降雪少，霜期短，最大年降雨量为 2 502.1 mm，最小年降雨量为 1 053.9 mm，年均降雨量为 1 604.1 mm，雨季多集中于每年 5 月和 6 月，最长连续降雨天数 31 d，总降雨量 440.3 mm，日最大降雨量 242 mm。地表水系主要有西侧的汀江及东侧的旧县河。矿区主要分布有红壤、黄壤、紫色土、草甸土等四种土壤类型，处于中亚热带常绿阔叶林地带，受长期人为活动的影响，常绿阔叶林原生植被都被针阔混交林、针叶林次生植被所代替，构成了大面积的常绿针叶林次生植被[12]。

矿区出露大面积燕山早期的粗粒花岗岩、细粒花岗岩和燕山晚期的火山次火山岩，在火山口周边和北西向构造裂隙中分布隐爆角砾岩。矿体主要处于中细粒花岗岩中，其次是英安玢岩和隐爆角砾岩，属于一种金铜共生高硫、浅成中低温热液型矿床。金主要赋存于潜水面（600～640 m）以上的氧化带中，金属矿物主要为褐铁矿、针铁矿。铜矿床则赋存于

氧化带以下，金属矿物主要为蓝辉铜矿、铜蓝，少见黄铜矿[13]。截至 2019 年底，累计探明可利用黄金资源储量 316 t 金属量，平均品位为 0.327 g/t，累计探明铜矿资源储量 242 万 t 金属量，远景资源储量超过 500 万 t 金属量，平均品位为 0.428%[14]。1992 年开展金矿工业性堆浸试验，1993 年 7 月开始开采金矿，截至 2020 年底，金矿开采已经进入尾声。1998 年铜矿进行湿法提铜工艺实验室研究，采矿对象为采标高在 148 m 以上的露天剥离金铜矿矿体中的铜矿和埋深在标高−100～100 m 的铜矿。

1.2 矿山废弃地基质特征

通过野外调查发现，研究区采矿活动及其他生产活动形成的矿山废弃地基质类型主要为终了境界中的裸露岩石、排土场等岩土混合物和选矿过程产生的各类生产残渣物[15-16]。

1)终了境界中的裸露岩石：主要分布于露天采场的终了境界，物质组分主要为各类强风化及蚀变的花岗岩。该矿区最终露天境界平面上部东西宽 1 800 m、南北长 1 300 m，最低台阶标高 496 m，最高台阶标高 1 024 m，采坑边坡总高度 528 m，安全平台宽度为 7～25 m，扫清平台为 25～45 m，台阶边坡高度为 24 m，坡面角多为 70°，目前已经形成了 16 级平台，平台标高分别为 652 m、676 m、700 m、724 m、748 m、772 m、796 m、820 m、844 m、868 m、892 m、916 m、940 m、964 m、988 m 和 1 012 m，采坑边坡总体边坡角为 49°～50°。裸露岩石分布区的土壤层基本缺失，仅有个别区域残存岩石碎块，形成大小不一的砾石层，沿岩石裂隙常伴有酸性物质渗出，pH 值介于 3.21～4.78。

2)排土场等岩土混合物：主要来源于露天开采过程中剥离围岩、采矿废石堆积的松散体，物质成分为各类围岩碎石和表层剥离土壤。露天采场位于矿区北侧，采用“上土上排，下土下排”方式堆积排土，由低标高处按一定台阶高度逐层向高标高处逐级排堆，每级平台留有一个安全平台宽度，形成各级平台稳固斜坡式的废石土场，其台阶高度 30 m，安全平台宽度 30 m，总边坡角 23°，下方设置拦渣坝。该类基质的土壤团聚体结构为 2～10 mm，容重低，土壤样品中有大量可见粗孔，结构疏松。基质组分 pH 值介于 4.14～4.21，呈酸性，养分元素全钾、有效钾含量及重金属元素镉、铜、铅和锌含量较高。

3)选矿过程产生的各类生产残渣物：主要来自于金铜矿堆浸渣和中和硫酸钙渣。其中，金铜矿堆浸渣在金铜堆浸场区通过逆排方式逐级堆筑，形成稳定平台，填方边坡坡度约 40°，坡高为 15 m 左右，平台宽 5～8 m。基质组分 pH 值介于 2.78～5.80，养分含量及重金属元素含量低。此外，还有一种为中和硫酸钙渣，是矿山酸性水分中和的产物，土壤团聚体结构＜2 mm，容重高，结构致密。基质组分 pH 值介于 7.86～7.98，呈碱性，氮、磷、钾、有效氮、有效磷和有效钾等养分元素含量较高，有机碳含量介于 0.34%～1.11%，铜、镉、锌、砷重金属元素含量较高。

1.3 生态修复的关键问题

露采矿山的生态修复技术难点是高陡边坡、基质缺失和土壤酸化的治理，而酸性露采边坡的治理前提是控制产酸过程。以往露采矿山生态修复往往关注地表植被的恢复，忽视土壤环境的改良，因为土壤是生命的物质载体和养分来源，土壤缺少或者质量差直接影响生态修复的可持续性，导致自我恢复和更替能力缺乏。因此，紫金山金铜矿露采矿山边坡的生态修复关键问题是构建一个控制酸性水产生的阻隔层，重构一个最佳、稳定的土壤物理、化学和生物环境。

2 土壤酸化原位控制研究

2.1 固化阻隔材料研究

沿酸性水渗出的露采边坡构建一层含有固化阻隔剂的阻隔层，隔离和封闭原来的裸露边坡，控制边坡硫化物的氧化，减少酸性水的产出[17]，同时构建植物生长所需的基质层，提供植物根系生长空间和养分水分。根据矿山废弃地的立地条件和基质特征，筛选和研发了薄层状固化隔离和厚层状中和介质等两种阻氧覆盖控制酸性水材料。

1)薄层状固化隔离材料。以黏(砂)土为骨料，添加一定比例水泥、石灰及其他添加材料，材料配比(1 m^3)：砂土 35%～45%、氧化钙 5%～10%、水泥 10%～20%、聚丙烯酸钾 150～200 g、有机螯合剂 20～60 kg。采用喷播方式喷射于裸露边坡上，喷射厚度 2～5 cm，在各类边坡表面形成具有一定强度的固化阻隔层，阻挡边坡表面硫化物与空气及雨水接触，减少酸性水的产出。水泥、氧化钙和水发生水化反应，在螯合剂的配合下可有效固定边坡表面的重金属离子[18]。由 80% 的耕植土，15% 的稻壳、菌菇肥或有机肥，4% 的土壤调理剂和 1% 的复合肥、钙镁磷肥组成有机营养客土，利用液压湿喷机或多功能喷浆机喷射构建 8～10 cm 基质层。

2)厚层状中和介质材料。以中和硫酸渣为骨料，添加一定比例的微生物菌、有机肥。组分配比为(1 m^3)：中和渣 80%～90%、微生物菌肥 5%～10%、有机肥 1%～5%。采用机械铺撒方式覆盖于裸露的

边坡上，覆盖厚度 20～30 cm，以构建一种物理阻隔基质层，减少硫化物与空气、雨水接触面，降低酸性水渗出，底部中和介质层会逐步得到改良，并提供一个适合植物生长的中性土壤环境。

2.2　阻氧隔离层构建

根据边坡结构、物质组分及植被群落等特点，在典型废弃地使用不同固化阻隔材料，构建阻氧隔离层，控制酸性水的产生[19]，具体工作方法为边坡类型调查→特征因子剖析→固化阻隔层设置→基质层构建→植被层恢复→管护与抚育、监测（表 1）。

1）边坡类型调查：调查矿区立地条件特征，包括不同修复区的地形地貌、基质类型和物质组分，分析矿区的水文特征，尤其是坡面径流过程。

2）特征因子分析：调查剖面裂隙水来源、坡面冲刷实体径流方向，采集相关样品，分析围岩及残留矿体的矿物成分、酸性环境下浸出的重金属元素、酸化边坡和裂隙水的 pH 值、产酸过程分析和裂隙水的污染特征等。

3）固化阻隔层设置：根据边坡酸性水产出路径，设置固化阻隔层，采用喷射或者覆盖方式将阻隔层附着于坡面，提升坡面 pH 值，固化坡面重金属元素的迁移，避免雨水冲刷，减少水土流失。

4）基质层构建：根据边坡阻隔层类型和特点，分别选用喷播或者撒盖方式构建供植物生长的基质层。

5）植被层恢复：根据周边植物群落和坡面立地条件特征，筛选合适的植物种群，采用喷播或者撒播方式附着于坡体基质层表面。

6）管护与抚育、监测：构建植物抚育管护措施，对坡面环境和修复效果进行持续监测。

3　土壤酸化控制效果评价

3.1　样品采集及测试

在不同类型矿山废弃地分别采集浅表层-中间层-基质层的土壤/基质样品，共计采集样品 36 件，土壤样品采集使用 GPS 定点，采用“S”形或“X”形采集组合样点进行混合，去除碎石、杂物、植物残体后自然风干，然后将样品土壤研磨并过筛孔尺寸为 0.850 mm 的筛网，测试土壤的 pH 值。将样品土壤过筛孔尺寸为 0.075 mm 的筛网，测试土壤中元素含量值。样品分析测试按规范要求加 10% 空白样与平行样控制，分析方法准确度和精密度采用《土壤成分分析标准物质》（GBW 07439）控制，各重金属的加标回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

3.2　控制产酸效果

在应用薄层状原位阻隔材料和厚层状中和介质材料的边坡废弃地，分析结果表明：自基质层至浅表层土壤呈现“pH 值上升，养分元素含量增加，重金属元素含量降低”的变化趋势（表 2 和图 1），说明该材料产生了阻隔中和作用。

将原位固化阻隔和中和介质材料铺设于酸性废石的表面形成覆盖层，覆盖层材料往往直径较小，尤其是中和介质材料，以黏土成分为主，能够高效减少金属硫化矿物与氧气的接触，阻止了硫化物矿石在裸露空间的暴露，减少了与空气、雨水的共同作用，降低了氧化反应，产酸的过程受阻[20]，因此，由基质层至浅表土壤层 pH 值自 2.78～5.05 上升至 8.21～8.56，硫（S）平均含量下降 70%，表层土壤中硫酸根离子等

表 1　典型受损区域酸性水控制方法应用

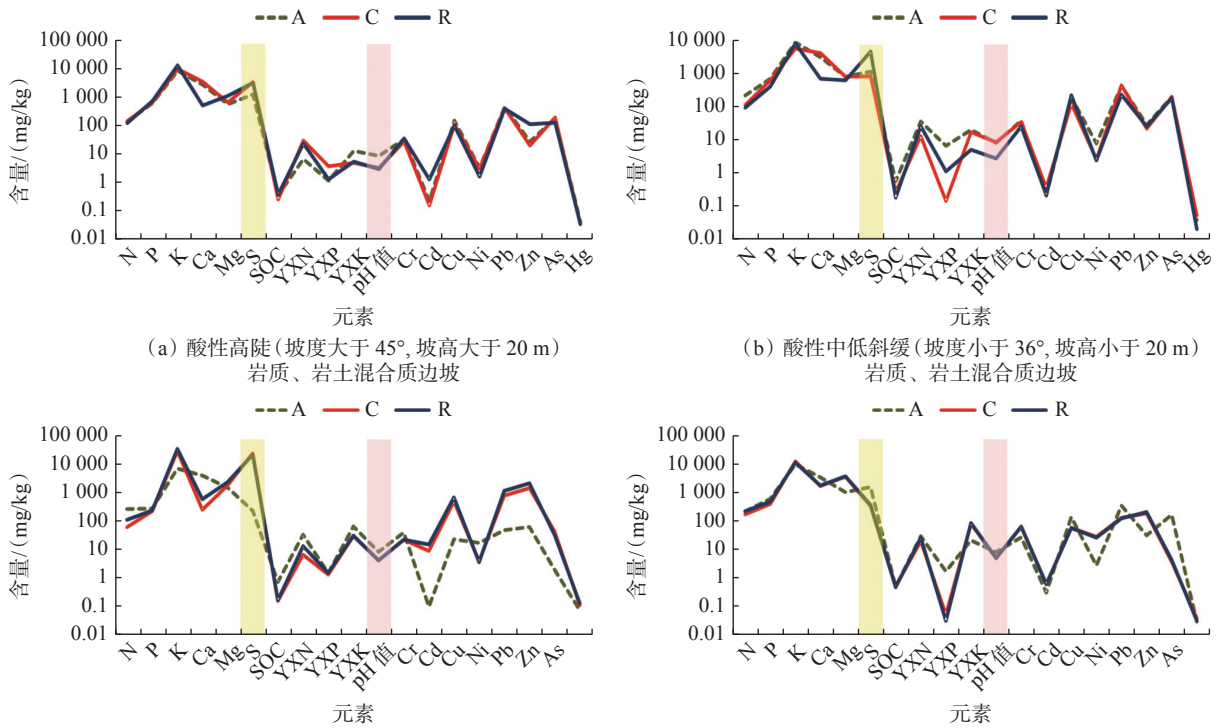
Table 1　Application of acid water control methods in typical damaged areas

受损斑块名称	露天采场东南段	终了排土场	金矿堆浸渣
受损成因、状况评价	露天采场境界	采矿废石堆渣	金矿选矿堆渣
受损状况	岩石裸露、酸性水渗出	强酸性土壤，土壤条件差，土壤中重金属含量偏高	土壤层缺乏，无酸性水渗出
固化阻隔材料	薄层状固化隔离材料为主	厚层状中和介质材料为主	未采用
修复工艺方法	薄层封阻喷播工艺	薄层封阻喷播技术和厚层中和覆盖工艺	近自然植物群落种植工艺
植物群落组合	狗牙根、刺槐、马尾松、决明子、苜蓿等乔、灌草配置	狗牙根、刺槐、决明子、苜蓿等乔、灌草配置	先锋树种马尾松为主，混种秋枫、香樟等阔叶乔木和油茶、紫薇、双荚槐等
工程持续时间	2018—2021 年	2016—2021 年	2013—2020 年
经验总结	先后“铺设木隔板分割边坡+挂铁丝网+干喷客土”“铺设土工格栅防护+外设生态棒+液压喷播+草帘覆盖”“在坡面打孔种植马尾松苗”和“平台覆土种植藤类植物形成垂直绿化效果”等试验，采用薄层封阻喷播技术效果最佳，达到经济与生态效益最佳	“紫金山排土场边坡原位改良法复垦试验”和“排土场 923 小平台温室盆栽试验”，采用“基质改良-种植耐性植物”的手段，实现较好的生态修复效果	有效实现了金矿渣废弃地的系统治理

表 2 不同矿山废弃地表层土壤/基质元素值

Table 2 Values of soil/matrix elements in different mine wastelands

元素	表层土壤				废弃地基质			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
N/(mg/kg)	140.00	263.00	212.50	51.84	96.00	226.00	138.50	59.29
P/(mg/kg)	276.00	724.00	555.25	193.74	236.00	735.00	468.25	206.15
K/(mg/kg)	6 881.93	9 970.08	8 656.37	1 310.77	8 392.80	33 870.06	16 752.40	11 586.28
Ca/(mg/kg)	2 765.86	3 930.81	3 351.91	485.26	514.58	1 772.44	896.94	590.06
Mg/(mg/kg)	566.89	1 489.60	981.51	389.64	651.32	3 763.20	1 961.51	1 390.88
S/(mg/kg)	226.60	1 574.00	1 063.65	582.22	374.10	21 252.00	7 409.53	9 408.84
SOC/%	0.36	0.73	0.54	0.16	0.17	0.48	0.30	0.16
YXN/(mg/kg)	6.62	36.42	26.49	13.52	13.24	26.49	22.35	6.27
YXP/(mg/kg)	1.14	6.70	2.77	2.63	0.03	1.53	0.99	0.66
YXK/(mg/kg)	12.84	64.36	29.75	23.39	5.12	86.18	31.86	38.17
pH 值	8.21	8.56	8.36	0.15	2.78	5.05	3.73	1.07
Cr/(mg/kg)	27.00	39.60	34.60	5.86	22.20	63.50	36.75	18.70
Cd/(mg/kg)	0.10	0.31	0.21	0.09	0.22	14.97	4.26	7.15
Cu/(mg/kg)	22.76	198.40	127.44	74.46	57.40	670.90	264.43	280.77
Ni/(mg/kg)	2.82	17.20	7.78	6.68	1.60	26.50	8.52	12.01
Pb/(mg/kg)	47.80	453.00	322.70	188.90	126.00	1 156.00	478.75	464.78
Zn/(mg/kg)	27.29	61.60	37.46	16.22	25.76	2 123.00	617.67	1 006.34
As/(mg/kg)	1.97	204.80	138.30	92.20	4.42	188.65	87.60	84.83
Hg/(mg/kg)	0.03	0.07	0.05	0.02	0.02	0.13	0.05	0.05



（a）酸性高陡（坡度大于 45°, 坡高大于 20 m）岩质、岩土混合质边坡

（b）酸性中低斜缓（坡度小于 36°, 坡高小于 20 m）岩质、岩土混合质边坡

（c）酸性中低斜缓（坡度小于 36°, 坡高小于 20 m）岩质、岩土混合质边坡

（d）无酸水渗出的中低斜缓（坡度小于 36°, 坡高小于 20 m）岩土混合质边坡

A-表层土壤；C-中间土壤；R-废弃地基质

图 1 不同矿山废弃地土壤/基质元素变化曲线图

Fig. 1 Variation curves of soil/matrix elements in different mine wastelands

酸化物质组分降低，土壤由强酸性转为弱碱性，说明边坡区的土壤酸化得到有效控制。表层土壤中镉（Cd）、铜（Cu）、铅（Pb）和锌（Zn）含量分别为 0.21 mg/kg、127.44 mg/kg、322.70 mg/kg 和 37.46 mg/kg，

相比于基质中的重金属含量，分别下降了 95.1%、51.9%、32.6% 和 93.9%。重金属元素在水化过程中，通过化学吸收、吸附、沉降、离子交换和钝化等方式与水泥等碱性组分发生物理作用及化学反应，在螯合作用与水解作用下，形成螯合物或氢氧化物沉淀（胶体），残留于水泥中或者附着于水化形成的水化硅酸盐胶体表面[21]，使得表层土壤重金属元素含量呈现下降趋势。因此，在浅表土壤层水泥等碱性组分为主的土壤环境中，会抑制重金属元素的迁移，在一种中性的土壤环境中，土壤的养分元素总量和其活性态组分会释放转换，因此表层土壤中磷（P）、钾（K）、钙（Ca）和镁（Mg）等矿质养分元素成分明显增加，利于修复区植物生长及恢复。

3.3　植物群落恢复

生态修复过程中植物筛选以乡土树种为主，按照乔-灌-草相结合方式筛选植物类型。2022 年，对不同类型矿山废弃地开展样方调查，一般乔木层样方调查面积为 20 m²×20 m²，灌木层样方调查面积为 5 m²×5 m²，草本层样方调查面积为 1 m²×1 m²。调查结果显示：2013—2022 年植被的群落结构、物种多样性等显著提高[22-23]，植物群落恢复效果对比如图 2 所示。

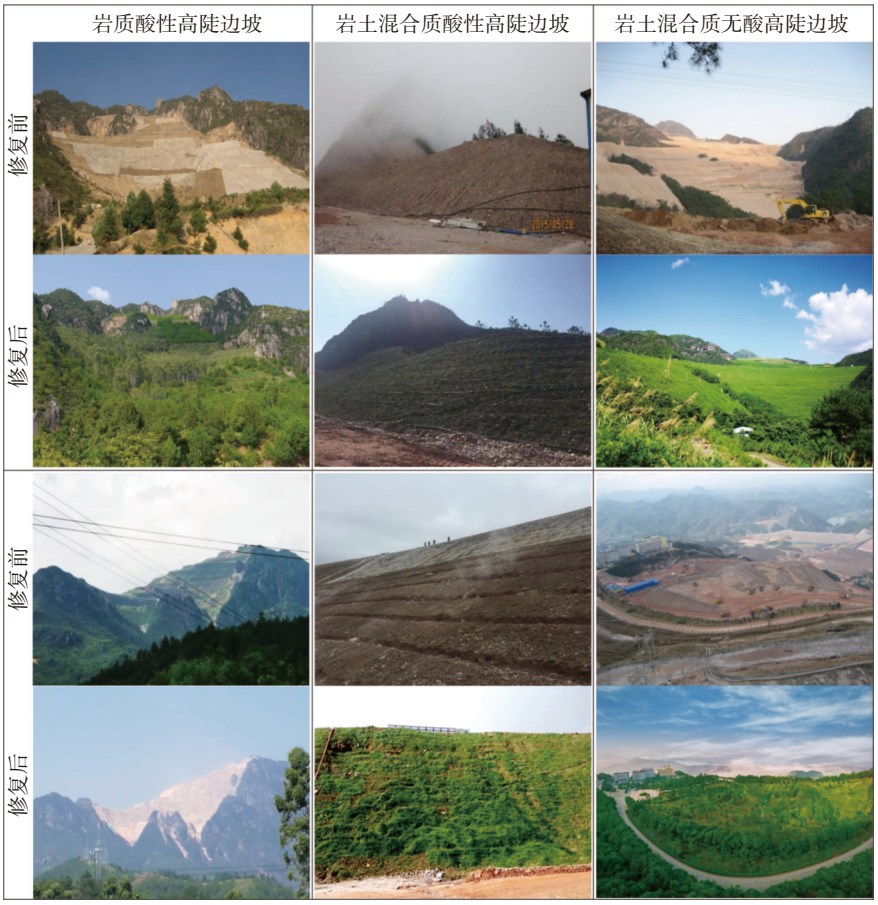


图 2　不同受损区生态修复工程实践效果对比

Fig. 2　Comparison of practical effects of ecological restoration in different damaged areas

1）岩质酸性露采边坡。以东南矿段 B 矿段为例，修复面积为 15.78 hm²，该场地 20 m²×20 m² 的样方中有马尾松 78 株，马尾松平均高度为 6.0 m，平均胸径为 10 cm。乔木层除马尾松外，还有巨尾桉 8 株，乔木层盖度为 85%。灌木层以山牡荆为优势种，常见伴生灌木有巨尾桉幼树、山胡椒、白背枫、金樱子、华南悬钩子、车桑子、杜鹃花、锈毛莓、木莓、檵木、小叶石楠、野牡丹等，层盖度为 20%；草本层以藿香蓟为优势种，常见伴生草本植物有五节芒、黑莎草、香薷、苦苣菜、苎草、活血丹、狗尾草、芒萁、地桃花、黄花酢浆草、苏门白酒草等，层盖度约为 20%；层间植物主要有菝葜、垂穗石松、薯蓣等。

2）岩土混合酸性露采边坡。以矿区排土场为例，该场地 5 m²×5 m² 样方中有马尾松 18 株，马尾松平均高度为 2 m，平均胸径为 2.5 cm；灌木层以马尾松为优势种，常见伴生灌木有木荷、山鸡椒、白背枫、野漆、赤楠、黧蒴锥幼树、木姜子等植物，层盖度为 25%；草本层以五节芒为优势种，常见伴生草本植物

有地茎、黑莎草、狗牙根、岗松、华南毛蕨、狗脊蕨、凤尾蕨等，层盖度约为 30%；层间植物主要有土茯苓、显齿蛇葡萄等。

3）无酸岩土混合露采边坡。以福建省新华都工程有限责任公司附近的金矿渣废石场为例，生态恢复面积为 2.55 hm^2，该场地 20 m^2×20 m^2 样方中有马尾松 132 株，马尾松平均高度为 7 m，平均胸径为 10 cm；乔木层除马尾松外，还有木荷 8 株，山鸡椒 4 株，香樟 3 株，乔木层盖度为 75%；灌木层以柄果海桐为优势种，常见伴生灌木有卵叶小蜡、双荚决明、胡枝子、杜茎山、金樱子、华南悬钩子、檵木、毛泡桐等，层盖度为 30%；草本层以短颖马唐为优势种，常见伴生草本植物有蟛蜞菊、常山、五节芒、三叶鬼针草、地胆草、边缘鳞盖蕨、乌毛蕨等，层盖度约为 15%；层间植物主要有轮环藤、薯蓣、光叶菝葜、显齿蛇葡萄等（图 2）。

4 结 论

1）露采边坡的基质类型主要包括终了境界中的裸露岩石、排土场等岩土混合物和选矿过程产生的各类生产残渣物等三种，其中前两种存在酸性水浸出问题，土壤酸化严重。

2）研制薄层状固化隔离与厚层状中和介质等两种酸性阻隔材料，配比分别为砂土 35%～45%、氧化钙 5%～10%、水泥 10%～20%、聚丙烯酸钾 150～200 g、有机螯合剂 20～60 kg 和中和渣 80%～90%、微生物菌肥 5%～10%、有机肥 1%～5%，采用不同的施工技术方法构建了阻氧覆盖隔离层。

3）典型修复区表层土壤 pH 值由 2.78～5.05 上升至 8.21～8.56，硫平均含量下降 70%，产酸过程得到有效控制，土壤养分含量增加，重金属含量下降。以马尾松为主的乔木生长良好，以卵叶小蜡、双荚决明等灌木和短颖马唐等草本为主立体群落逐渐恢复。

参考文献（References）：

[1] 丁翠，李琦，郭楚玲，等. 酸性矿山废水对稻田土壤微生物菌群结构的影响[J]. 环境科学学报，2019，39(9)：3080-3089.
DING Cui, LI Qi, GUO Chuling, et al. Responses of microbial communities in paddy soils to the intrusion of acid mine drainage[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(9): 3080-3089.

[2] SÁINZ A, GRANDE J, DELATORRE M, et al. Characterisation of sequential leachate discharges of mining waste rock dumps in the Tinto and Odiel rivers[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 64(4): 345-353.

[3] 白中科. 国土空间生态修复若干重大问题研究[J]. 地学前缘，2021，28(4)：1-13.
BAI Zhongke. The major issues in ecological restoration of China's territorial space[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 1-13.

[4] 倪师军，李珊，李泽琴，等. 矿山酸性废水的环境影响及防治研究进展[J]. 地球科学进展，2008，23(5)：501-508.
NI Shijun, LI Shan, LI Zeqin, et al. Progress in the research of acid mine dranage impact and remediation[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 501-508.

[5] BATTEN K, SCOW K. Sediment microbial community composition and methylmercury pollution at four mercury mine-impacted sites[J]. Microbial Ecology, 2003, 46(4): 429-441.

[6] 张子间，刘家弟，卢杰，等. 微电解-生物法处理酸性重金属矿山地下水[J]. 金属矿山，2006(4)：69-72.
ZHANG Zijian, LIU Jiadi, LU Jie, et al. Treating acidic heavy metal-containing mine underground water by micro electrolysis microbe method[J]. Metal Mine, 2006(4): 69-72.

[7] JIN S, FALLGREN P H, MORRIS J M, et al. Source treatment of acid mine drainage at a backfilled coal mine using remote sensing and biogeochemistry[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 188(1): 205-212.

[8] 王柱强，胡巍. 矿山酸水成因分析及治理技术评价[J]. 中国矿业，2010，19(5)：37-40.
WANG Zhuqiang, HU Wei. Causal analysis of acid mine drainage and evaluation of some control techniques[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(5): 37-40.

[9] 廖志刚. 永平铜矿露天采场边坡柔性生态治理技术探讨[J]. 湖南有色金属，2017，33(4)：64-67.
LIAO Zhigang. Discussion on flexible ecological treatment technology of slope in open-pit stope of Yongping Copper Mine[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2017, 33(4): 64-67.

[10] 胡文凯，钱建平，张坤. 金属矿山废弃地分析及植物修复技术研究[J]. 四川地质学报，2020，40(3)：450-454.
HU Wenkai, QIAN Jianping, ZHANG Kun. Analysis of metal mine wasteland and study of phytoremediation technology[J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(3): 450-454.

[11] 李建中，张进德. 我国矿山地质环境调查工作探讨[J]. 水文地质工程地质，2018，45(4)：169-172.
LI Jianzhong, ZHANG Jinde. Discussion on the work of mine geo-environmental investigation of China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(4): 169-172.

[12] 江福贤. 紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿矿山地质环境保护与恢复治理方案[R]. 上杭：紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿，2018.

[13] 叶鑫，石松林，顾羊羊，等. 紫金矿山生态影响与生态修复效果研究[J]. 环境生态学，2019，1(1)：84-90.
YE Xin, SHI Songlin, GU Yangyang, et al. Study on ecological influence and ecological restoration effect of mine in Zijin Mountain[J]. Environmental Ecology, 2019, 1(1): 84-90.

[14] 张锦章. 紫金山矿集区地质特征、矿床模型与勘查实践[J]. 矿床地质，2013，32(4)：757-766.
ZHANG Jinzhang. Geology exploration model and practice of Zijinshan ore concentrated area[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(4): 757-766.

[15] 陈明勇，武丽艳. 紫金山高硫型铜金矿床表生氧化带金矿体矿物学特征及演化[J]. 矿物学报，2022，42(3)：329-342.

CHEN Mingyong, WU Liyan. A study on the mineralogical characteristic and alteration evolution of gold orebodies in the supergene oxidized zone of the Zijinshan high-sulfur (HS) epithermal Cu-Au deposit[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2022, 42(3): 329-342.

[16] 王二朋. 福建省上杭紫金山金铜矿水土保持生态建设[J]. 亚热带水土保持, 2015, 27(2): 52-53.
WANG Erpeng. Ecological construction of the water and water conservation of golden copper mine, Shanghang, Fujian Province[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2015, 27(2): 52-53.

[17] 黄骤屹, 陈雪峰, 郭媛媛, 等. 基于植被-土壤-微生物生态原理的边坡土壤持续肥力保证技术研究[J]. 交通世界, 2021(29): 8-12.
HUANG Zhouyi, CHEN Xuefeng, GUO Yuanyuan, et al. Research on the technical research of the slope soil continuous fertility guarantee technology based on vegetation-soil-microbial ecological principles[J]. Transpo World, 2021(29): 8-12.

[18] 刘玉华. 金属硫化物矿山酸性开采边坡原位固化及厚层基材喷射技术研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 95-99.
LIU Yuhua. Study on in-situ solidification and thick base material sparing technology of acid minning slope in metal sulfide mine[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 95-99.

[19] 程睿. 我国露采金属矿山采场边坡植被恢复技术实践[J]. 亚热带水土保持, 2017, 29(2): 64-67.
CHENG Rui. Practice of vegetation restoration technology for mining slope of open pit metal mines in China[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2017, 29(2): 64-67.

[20] 苏绘梦, 黄景春, 王玲, 等. 高陡岩质边坡植被根系发育地境特征研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 56-62.
SU Huimeng, HUANG Jingchun, WANG Ling, et al. Characteristics of vegetation below-ground habitat of root mass on the condition of high-steep rock slopes[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(11): 56-62.

[21] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 316-325.
XIE Longtao, PAN Jianjun, BAI Haoran, et al. GIS-based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland olls: a case study of a town of Jiangning, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 316-325.

[22] 罗琳, 杨璐, 谢红彬, 等. 生态修复背景下矿山公园生态系统服务价值: 以福建紫金山为例[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2171-2179.
LUO Lin, YANG Lu, XIE Hongbin, et al. Ecosystem service value of mine park under ecological restoration background: a case study of Zijin Mountain in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(11): 2171-2179.

[23] 紫金矿业集团股份有限公司紫金山金铜矿. 陆域生态环境现状与变化评价[R]. 2022.