

Construction of Ecological Restoration Models for Abandoned Metal Mine Areas in Southwest China

Jiarong Zhou

Sichuan Provincial Institute of Comprehensive Geophysical Survey, Chengdu, Sichuan, 618000, China

Abstract

Abandoned metal mine areas in Southwest China have formed complex ecological problems due to long-term mining, with prominent issues such as fragmented terrain, soil pollution, vegetation degradation, and hydrological imbalance, which pose a threat to regional ecological security. The soil in these areas is affected by heavy metals and waste, leading to deterioration of fertility and structure, making natural vegetation recovery difficult and causing a sharp decline in biodiversity. Water bodies and the atmosphere are also polluted by wastewater, dust, and flying dust, damaging the surrounding environment and affecting residents' health. To address these issues, four models are constructed: coordinated soil improvement and vegetation restoration, integrated terrain reshaping and hydrological restoration, coupled biological remediation and ecological engineering, and industrial integration and ecological restoration. Through technological integration and systematic restoration, the aim is to restore ecological functions, achieve regional sustainable development, and provide reference for similar regions.

Keywords

Southwest China; abandoned metal mine areas; ecological restoration model; soil improvement

西南地区金属矿山废弃地生态修复模式构建

周佳荣

四川省综合地质调查研究所, 中国·四川成都 618000

摘要

西南地区金属矿山废弃地因长期开采形成复杂生态问题, 地形破碎、土壤污染、植被退化及水文失调等问题突出, 对区域生态安全构成威胁。其土壤受重金属与废弃物影响, 肥力与结构恶化, 植被难以自然恢复, 生物多样性锐减; 水体与大气亦因废水、粉尘及扬尘污染, 破坏周边环境并影响居民健康。针对这些问题, 构建土壤改良与植被恢复协同、地形重塑与水文修复集成、生物修复与生态工程耦合、产业融合与生态修复联动四大模式, 通过技术集成与系统修复, 旨在恢复生态功能, 实现区域可持续发展, 为同类地区提供借鉴。

关键词

西南地区; 金属矿山废弃地; 生态修复模式; 土壤改良

1 引言

近年来, 国家高度重视矿山生态修复, 《“十四五”矿山生态修复指导意见》明确提出“以绿色发展为导向, 推进历史遗留矿山生态修复, 强化科技支撑与模式创新”。西南地区是我国重要矿产资源基地, 长期开采遗留大量金属矿山废弃地, 存在地形破碎、土壤污染等问题, 破坏区域生态平衡, 威胁水资源安全与居民健康。因此, 亟需探索适应西南复杂地质与气候条件的生态修复模式。通过分析废弃地特征及影响, 结合土壤改良等技术路径, 构建多维度协同修复模式, 为西南矿山生态修复提供科学支撑, 推动“绿水青山就是金山银山”理念落地。

【作者简介】周佳荣(1982-), 男, 中国广东汕头人, 硕士, 工程师, 从事地质灾害防治、矿山生态修复研究。

2 西南地区金属矿山废弃地的特征

西南地区金属矿山废弃地具有鲜明且复杂的特征。从地形地貌来看, 由于长期大规模的矿山开采活动, 如露天开采形成的巨大采坑、地下开采导致的地面塌陷和山体开裂等, 使得地形变得支离破碎, 起伏剧烈。原本连绵的山脉被切割得千疮百孔, 形成了众多深浅不一的坑洼和陡峭的边坡。土壤方面, 开采过程中剥离的表土随意堆放, 导致土壤层变薄, 而且大量的尾矿、废渣堆积, 覆盖了原有的土地, 这些废弃物中重金属含量高, 使得土壤的物理和化学性质发生极大改变, 土壤肥力严重下降, 保水保肥能力变弱。植被状况上, 因开采活动的干扰和破坏, 原生植被几乎被完全清除, 土壤条件的恶化又使得植被难以自然恢复, 植被覆盖率极低, 生态系统遭到严重破坏, 生物多样性锐减。水文特征也发生显著变化, 开采活动改变了原有的地表径流和地下水

系,导致地表水流失加剧,地下水位下降,还可能引发矿坑积水等问题,对周边的水资源平衡造成严重影响。

3 金属矿山废弃地对环境的影响

3.1 对土壤和植被的破坏

金属矿山废弃地严重破坏土壤和植被。开采产生的废渣、尾矿等废弃物含大量重金属和有害物质,如铅、锌、镉等,经雨水冲刷和渗透进入土壤,导致土壤污染。土壤重金属超标,酸碱度和养分结构改变,物理和化学性质恶化,肥力下降,保水保肥能力减弱,植被难以正常生长。原生植被在开采时被大规模清除,后续新植被难以自然萌发和定植,人工种植也常因土壤贫瘠和污染而生长不良、成活率低。植被覆盖率降低加剧水土流失和土壤侵蚀,形成恶性循环,土壤和植被生态功能难以恢复(如图1)。



图1 金属矿山对土壤和植被的影响图

3.2 对水体和大气环境的污染

金属矿山废弃地对水体和大气环境也带来了严重的污染。在水体方面,开采过程中产生的废水含有大量的重金属离子和悬浮物,这些废水未经有效处理直接排放或渗漏到周边的地表水和地下水中,导致地表水的水质恶化,水体富营养化,水生生物的生存环境受到严重破坏,许多鱼类和水生植物因水质污染而死亡或消失。同时,地下水也受到污染,影响了周边居民的饮用水安全。在大气环境方面,矿石的开采、破碎和运输过程中会产生大量的粉尘,这些粉尘中含有重金属颗粒和有害物质,弥漫在空气中,降低了大气环境质量。



图2 金属矿山对水体的污染图

4 西南地区金属矿山废弃地生态修复模式构建

4.1 土壤改良与植被恢复协同模式

西南地区金属矿山废弃地土壤因长期重金属浸出与结构扰动丧失生产力,其修复需突破“改土”与“植绿”割裂,构建精准协同技术链。首先基于土壤地球化学调查,量化重金属形态与理化参数,针对性设计改良方案。针对强酸性土壤,按交换性酸含量算石灰施用量,同步添加腐熟牛羊粪与农林废弃物生物炭。生物炭多孔结构吸附重金属离子,降低生物有效性;牛羊粪补充的有机质与铁铝氧化物络合,形成稳定复合物;石灰中和酸度,激活土壤酶活性。三类改良剂协同作用,降低土壤容重,提升孔隙度,改善通气性与保水性。

植被恢复需匹配改良后的土壤功能梯度:乔木层选构树、刺槐,构树的速生特性可快速形成地上覆盖,刺槐的根瘤菌固氮能力能逐步提升土壤肥力;灌木层配火棘、马桑,火棘的匍匐茎可沿地表扩展,短期内覆盖度较高,减少雨水冲刷;草本层播狗牙根与白三叶混配,狗牙根的浅根系固定表层土壤,白三叶的深根系穿透底层,形成垂直根系网络。更关键的是,植被生长过程中,根系分泌的有机酸可进一步活化土壤中的磷、钾养分,植物残体分解后增加土壤微生物量——修复一定年限后,土壤脲酶活性与磷酸酶活性显著提升,标志着土壤生态功能从“被动修复”转向“主动循环”。这种协同并非简单时序叠加,而是通过土壤改良为植被提供初始基质,植被反过来强化土壤修复效果,形成“土-植”互馈的动态平衡。

4.2 地形重塑与水文修复集成模式

金属矿山废弃地地形破碎核心问题是“地表-地下”水文连通性断裂,采坑、塌陷致径流无组织漫流,地下水系萎缩使区域水位下降。地形重塑遵循“顺势消纳、微地形营造”原则:浅采坑用尾矿砂分层回填,既消纳尾矿又填充坑体;深采坑先钻探确定空洞范围,注入混合浆液固化坑壁,再用废石与土壤混合回填至距地表一定距离,预留空间建人工湿地。塌陷区采用注浆与回填组合,先注浆液止塌陷,再回填表层土恢复地形。微地形营造是关键,用挖掘机打造缓坡、垄沟与凹地,缓坡减少雨水冲刷,垄沟引导径流至凹地集蓄,降低地表径流系数,提升土壤入渗率。

水文修复需与地形重塑深度联动:沿地形等高线修建生态截水沟,沟底设置沉沙池,拦截泥沙与重金属颗粒;排水渠采用明渠与生物滞留池组合——明渠排放多余径流,生物滞留池种植特定植物,通过植物根系与基质吸附净化径流中的氮磷与重金属。地下水位修复依赖实时监测:每平方公里设置若干口监测井,当水位低于临界值时,利用矿坑积水或再生水回灌——回灌井深度穿透含水层底板,采用“慢灌慢排”方式,确保水分有效补给。此外,在采坑底部构建潜流湿地和表面流湿地系统:潜流湿地填充特定基质与砾石,种植特定水生植物,表面流湿地种植其他水生植物。湿地通

过基质吸附、植物吸收与微生物降解,可将径流中重金属与氮磷污染物浓度显著降低。地形重塑为水文修复提供空间载体,水文修复则保障地形稳定的生态功能,二者集成实现“地形-水文-生态”的系统耦合。

4.3 生物修复与生态工程耦合模式

生物修复与生态工程耦合以“生物主导、工程辅助”为核心,针对重金属污染与生态功能退化痛点。生物修复聚焦“植物-微生物”协同:植物选蜈蚣草、东南景天等超富集植物,经测算确定最佳种植密度,确保根系接触污染土壤;同时接种耐重金属芽孢杆菌与假单胞菌,前者分泌螯合剂助植物吸收重金属,后者降解土壤多环芳烃,接种后土壤多环芳烃降解率达一定比例以上。微生物与植物互惠,芽孢杆菌在根系形成根际微生物膜供氮,植物通过根系分泌物为微生物供碳源,形成“根际微生态循环”。

生态工程环节为生物修复提供支撑:构建人工生态系统时,模拟西南地区原生常绿阔叶林结构——乔木层选樟、楠木,灌木层选杜鹃、山茶,草本层选蕨类,通过分层种植形成稳定的垂直结构,为微生物与植物提供多样化生境。生态缓冲带设置在修复区周边,宽一定距离,种植耐干旱灌木——缓冲带的地被植物拦截外界径流带来的污染物,灌木根系固定土壤,减少水土流失。更核心的是,生态工程通过微环境调控提升生物修复效率:在修复区上方搭建遮阳网,降低夏季高温对特定植物的伤害,控制适宜温度,促进生物量提升;在土壤表面覆盖稻草,减少水分蒸发,保持土壤湿度在合理范围,促进微生物活性。这种耦合模式将生物的自我修复能力与工程的调控功能结合,既解决了单纯生物修复效率低的问题,又避免了单纯工程修复生态功能单一的缺陷,实现修复效果的可持续性。

4.4 产业融合与生态修复联动模式

产业融合与生态修复的联动需构建“生态为基、产业为魂”的循环体系,将修复成果转化为经济价值,反哺后续修复。生态农业方面,利用修复后的土壤适配作物:轻度污染区种植天麻、黄精等中药材——天麻生长需疏松透气的土壤,修复后的土壤恰好满足;中度污染区种植猕猴桃、蓝莓等耐酸性果树——猕猴桃根系浅,适合表层改良土壤,蓝莓对土壤酸碱度的要求与改良后土壤匹配。种植方式采用轮作与间作:天麻与大豆轮作,大豆根瘤菌固氮提升土壤肥力,

减少化肥使用;猕猴桃与三叶草间作,三叶草覆盖地表减少水土流失,同时作为绿肥增加土壤有机质。

生态旅游方面,依托修复景观打造主题游线:改造废弃矿井为地质博物馆,展示开采历史与修复过程;利用采坑建观景平台,铺设步道并种植本地乔灌木;开发“矿山修复体验”项目,增强游客环保意识。按特定比例用旅游收入养护修复区,形成资金反哺。绿色矿业方面,采用充填采矿法,用尾矿与废石填充地下采空区;进行尾矿资源化利用,将尾矿砂作混凝土骨料用于道路铺设或建筑墙体。产业联动关键在于利益共享:生态农业合作社让农民参与种植销售,旅游公司雇佣当地居民,绿色矿业企业支付生态修复保证金。该模式将生态修复与区域经济发展绑定,为修复提供资金,为居民创造就业,实现“生态-经济-社会”效益协同提升。

5 结语

西南地区金属矿山废弃地生态修复是区域可持续发展的关键环节。通过土壤改良与植被恢复协同、地形重塑与水文修复集成、生物修复与生态工程耦合、产业融合与生态修复联动四大模式,针对性解决土壤污染、地形破碎、生态功能退化等问题,实现了从“单一修复”到“系统治理”的转变。这些模式不仅恢复了废弃地的生态功能,更通过产业联动将生态价值转化为经济价值,形成“修复-利用-反哺”的良性循环。未来,需进一步强化科技支撑与政策引导,推动修复模式精准化、智能化,为西南地区乃至全国矿山生态修复提供可复制、可推广的经验,筑牢生态安全屏障,实现人与自然和谐共生。

参考文献

- [1] 史淑艳. 矿山废弃地重金属污染及生态环境修复技术研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(2):101-105.
- [2] 史淑艳. 矿山废弃地重金属污染及生态环境修复技术研究[J]. 2025.
- [3] 张芳芳. 矿山废弃地景观规划设计研究[D]. 浙江农林大学, 2023.
- [4] 刘帅. 金属矿山废弃地生态复绿技术研究现状及应用探讨[J]. 资源节约与环保, 2024(9):87-91.
- [5] 朱博良. 金属矿山废弃地生态恢复与可持续技术研究[J]. 世界有色金属, 2023(5):175-177.
- [6] 梅振然, 赵中秋, 杨侨, 等. 我国金属矿山废弃地生态修复研究进展及趋势分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(10):102.