

# 山区高速公路煤矸石边坡生态修复及绿化技术研究

马宗源<sup>1,2\*</sup>, 刘文军<sup>2</sup>, 周宁<sup>2</sup>, 谢文洁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州交通职业大学道路与桥梁工程系, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵阳锦程创艺园林景观工程有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年8月18日; 录用日期: 2024年9月24日; 发布日期: 2024年10月9日

## 摘要

基于山区高速公路边坡开挖后外露煤矸石地层的生态修复及绿化问题, 根据煤矸石的性质和区域气候及植被特点, 采用喷淋改性 + 覆盖封闭 + 选植绿化的基质改良和人工选植绿化技术, 节约了施工成本, 有效提高了山区煤矸石边坡的生态修复水平及绿化植被成活率。依托在建高速公路路堑开挖边坡外露煤矸石的实际工程, 通过喷淋含有微生物菌剂的保水剂通过微生物改性表层煤矸石土层, 再使用水泥混合土对煤矸石进行覆盖封闭, 最后通过人工选植及建植达到煤矸石边坡绿化的目的。通过本次研究有助于进一步提高山区交通基础设施绿色生态建设水平, 为相关工程提供参考借鉴。

## 关键词

山区高速公路, 边坡, 煤矸石, 生态修复, 边坡绿化

# Study on Ecological Restoration and Greening Technology of Highway Gangue Slope in Mountainous Area

Zongyuan Ma<sup>1,2\*</sup>, Wenjun Liu<sup>2</sup>, Ning Zhou<sup>2</sup>, Wenjie Xie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Road and Bridge Engineering, Guizhou Communications Polytechnic University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>Guiyang Jincheng Chuangyi Landscape Engineering Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Aug. 18<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 24<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 9<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 马宗源, 刘文军, 周宁, 谢文洁. 山区高速公路煤矸石边坡生态修复及绿化技术研究[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(5): 1111-1118. DOI: 10.12677/aep.2024.145142

## Abstract

The ecological restoration and greening of exposed coal gangue following expressway slope excavation in the mountainous region is a severe problem for mountain traffic construction and maintenance. This study considered the nature of coal gangue, regional climate, and vegetation characteristics, utilizing matrix improvement and artificial planting techniques such as spray modification, cover closure, and planting. These measures reduced construction costs and significantly enhanced the ecological restoration level of coal gangue slopes in mountainous areas while improving the survival rate of green vegetation. This study used spraying to modify the surface coal gangue soil layer using microbial bacteria-containing water-retaining agents. Subsequently, cement-mixed soil was used to cover the coal gangue before greening was achieved through artificial planting and construction. This study can enhance green ecological construction standards for mountain transport infrastructure while providing valuable insights for related projects.

## Keywords

Mountain Highway, Slope, Coal Gangue, Ecological Restoration, Slope Greening

Copyright © 2024 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

煤矸石主要有天然和人为产生两种类型，天然煤矸石是指成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低且比煤坚硬的黑灰色岩石；人为产生的煤矸石主要是煤炭生产及加工过程中产生的固体废物[1]-[3]。煤矸石中的主要成分是三氧化二铝和二氧化硫，另外还有含量不等的锰、铜、铁、铬、铅及汞等重金属元素[4] [5]。裸露的煤矸石经受长时间的日晒雨淋后将会风化粉碎，吸水后极易崩解，从而产生粉尘。煤矸石经雨水淋蚀后会产生带酸性的废水污染周围土地，而且煤矸石中的重金属元素也会逐步向土壤、空气及水源中迁移[6]。人类工程活动常会开挖含有煤矸石的山体造成大量煤矸石地层暴露在外，经过风化及雨水冲刷造成土壤侵蚀、地下水污染等；同时由于表层土壤流失，造成煤矸石山基质养分含量低、土壤酸碱度失衡、持水能力差，导致后期种植的植被几乎无法正常生长[7] [8]。

目前，煤矸石的基质改良方法主要分为物理、化学和生物三种。物理方式主要是通过覆土、覆泥等改善煤矸石的理化性质；化学方式主要是通过添加一些溶液与肥料，与煤矸石发生反应，消解煤矸石中不利于植物生长的元素；生物方式主要是利用植物、土壤微生物等改善煤矸石基质的物理结构和化学性质，提供适宜植物生长的条件[2] [6] [9]。煤矸石外露山坡生态修复的主要措施是土地复垦及生态护坡，其中土地复垦主要是通过人工表层覆土(包括客土喷播、厚层基材喷播、植生袋法、植生网法及土工格栅植草等技术)及土壤改良等措施恢复煤矸石山土壤理化性质[10]。表层覆土后随着土壤有机质、速效养分等含量逐步增加，土壤理化性质得到改善，植被逐渐成活，生态得到恢复。表层覆土方法效果虽好，但往往需要大量的表层覆土(一般需要 50 cm 以上覆土厚度)，如周边无法获取理想土壤，则需花费较高成本远距离运输覆土。为解决覆土问题，可采用生态护坡技术，即通过喷护特定基材防护层及建植植被，利用植物与岩、土体的相互作用(根系锚固作用)对边坡表层进行防护和加固，使之既能满足对边坡表层稳定的要求又能恢复边坡自然生态环境，是一种有效的煤矸石外露山坡护坡、固坡的手段。但生态护坡的

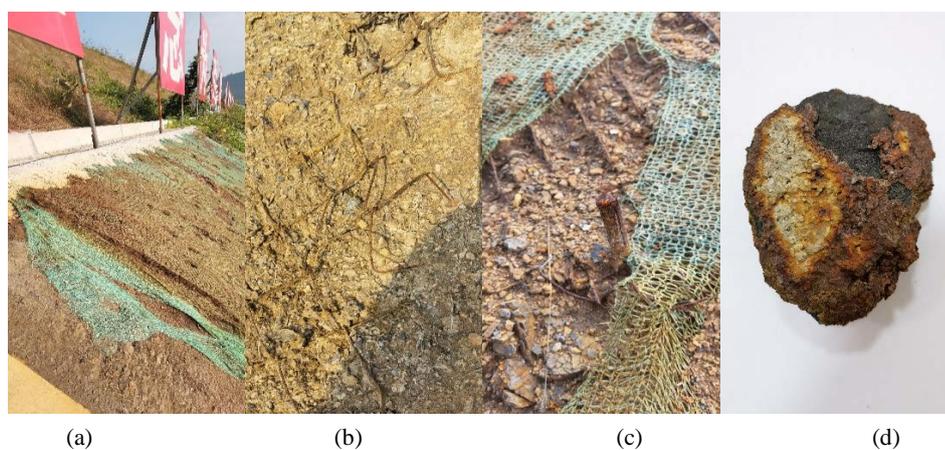
施工成本根据基材防护层的材料及施工技术而异,需要因地制宜地制定生态护坡方案。本研究基于贵州典型山区高速公路煤矸石地层边坡开挖后的生态修复及绿化问题,根据不同风化程度煤矸石的性质和特点,分别选择不同的基质改良技术和边坡防护技术,有效提升了煤矸石边坡的生态修复水平及绿化植被成活率。通过喷淋含有微生物菌剂的保水剂改性表层煤矸石土层,再使用水泥混合土对煤矸石进行覆盖封闭,最后通过人工选植及建植达到煤矸石生态修复及边坡绿化的目的。通过本次研究有助于进一步提高山区交通基础设施的绿色生态建设水平,对构建绿色交通体系具有积极意义。根据本研究思路及成果,期望对山区煤矸石地层边坡的生态修复及绿化工程设计和施工提供参考和借鉴。

## 2. 工程概况

以在建六枝至安龙高速公路(简称六安高速)三标路堑边坡开挖外露煤矸石为工程依托开展研究工作。前期开展了现场调研工作,绿化前期在边坡表层喷洒了约 8 cm 厚度的草种和土壤的混合物并铺设了钢丝网。夏季雨水冲刷下渗使含有煤矸石的地层产生酸性废液,导致大片绿化区域的植被枯萎(图 1 所示),并严重锈蚀了坡体钢丝网及锚杆(图 2 所示)。煤矸石分布区域 1: 桩号 K21+464~660 左右两侧边坡,面积约 2500 m<sup>2</sup>; 区域 2: 桩号 ZK22+590~820 左侧第一、二级边坡锚杆框架植草、第三、四级边坡加强型拱形骨架,面积约 1500 m<sup>2</sup>。经过对边坡外露煤矸石的现场采样及室内化学成分测试,得到了该区域边坡煤矸石的化学成分检测结果(如表 1 所示),可以看出该处煤矸石的砷、汞、锰等有毒金属均超出规定范围 [11]-[13]。



**Figure 1.** On-site photo of the coal gangue slopes on both sides of the Lu'an Expressway before treatment  
**图 1.** 六安高速路堑两侧煤矸石边坡未处理前的现场照片



**Figure 2.** Partial photos of the slopes on both sides of the road cutting of the Lu'an Expressway No. 3 beam yard: (a) filter corrosion, (b) wire mesh corrosion (c) anchor rod corrosion, (d) coal gangue after immersion in water  
**图 2.** 六安高速三标梁场路堑两侧边坡局部照片: (a) 滤网腐蚀, (b) 钢丝网锈蚀, (c) 锚杆锈蚀, (d) 浸水之后的煤矸石

**Table 1.** Chemical composition test results of coal gangue on the slope  
**表 1.** 边坡煤矸石化学成分检测结果

采样位置	检测项目及结果									
	水分	铬	镉	铅	砷	汞	铜	铁	镍	锰
	%	μg/g	μg/g	μg/g	mg/kg	mg/kg	μg/g	%	μg/g	μg/g
K21 + 550	3.61	151	0.19	11.7	11.8	0.157	87.7	9.65	61.6	476
K21 + 560	3.51	154	0.25	12.5	11.7	0.050	88.6	10.40	98.3	3378
YK21 + 470	4.09	183	0.56	12.1	6.76	0.049	132.1	12.00	108.3	3980
K21 + 540 第一级	7.09	197	0.23	13.6	9.42	0.259	63.9	7.57	34.7	326
K21 + 540 第二级	4.44	240	0.21	16.7	4.71	0.064	95.9	10.46	62.3	391
YK21 + 500 第二级	3.78	220	0.19	10.1	3.76	0.0067	962	8.80	55.7	383

### 3. 煤矸石边坡生态修复

#### 3.1. 实施方案

##### (一) 喷淋改性

对坡体表面进行封闭处理之前,在煤矸石区域喷淋含有微生物菌剂的保水剂,利用微生物菌群改善煤矸石的基质性质,本次研究选择枯草芽孢杆菌配置菌剂。枯草芽孢杆菌是一种植物根基促生细菌,不仅能抑制植物的枯萎病、根腐病,还可以提高植物抗性、促进植物生长、改良土壤和植物品质[14]。保水剂可以增加基质保持水分的能力,有利于植物的生长,加入微生物菌剂保水剂后,养护一段时间再覆盖封闭层及植生基材。将枯草芽孢杆菌菌剂,按比例和水进行混合,搅拌均匀直至微生物菌剂全部溶解,注意水温应满足要求。选择成品保水剂和微生物菌剂溶液混合,将微生物菌剂溶液和保水剂进行混合,加入到植生基材中,采用机械喷洒在煤矸石边坡表面,注意需将煤矸石浸湿。

##### (二) 覆盖封闭

采用水泥混合土技术对研究场地两侧边坡进行喷护覆盖封闭处理。以水泥混合土为临时生境构筑载体,将边坡工程防护与生态修复有机结合,既达到了工程防护要求,又实现了工程创面生态结构与功能的重建。随着坡体植被生长,植物根系会穿透水泥混合土层深入改性后的煤矸石地层,并逐步达到表层煤矸石地层修复目的。即使水泥混合的表土松散失效后煤矸石地层仍然不会暴露于外部环境中,即达到了永久生态修复的目的。水泥混合土生态构筑技术,同属水泥基类生态护坡技术,具有工程防护和生态修复双重功能,主要适用于 60° 以下的各类边坡的生态防护。植被混凝土技术还可以进一步进行扩展,联合采用植生基材基层和防冲刷面层(固化剂),可适用所有类型边坡的生态防护,并且具有突出的生态效果和成本优势,进一步加速修复后期的植被群落演替及凸显立体生态景观。通过调整合理的水泥混合比例,达到临时封闭 + 植物根系穿透并修复表层煤矸石地层的目的。采用防冲刷面层 + 植生基材 + 植物物种选配方案,利用水泥混合土隔离煤矸石与外部环境的接触,实现边坡工程防护和生态修复,逐步实现生态系统的稳定发展。

##### (三) 绿化方案

人工建植植被恢复在选植时首先要考虑到植物的适宜性,其次要优先考虑本地植物,易养护管理。此外,还需遵循物种多样性的原则,采取乔木、藤本、灌木和草本相结合的方式[15]。结合研究区所在地区的气温气候条件,为满足良好的美观性能和生态恢复功能,在保证植物生长的前提下降低成本,分春秋两季进行喷播,草灌比约为 2:1,人工建植植物的配比情况详见表 2。植物生长期,前期以草本为主,

后期以灌木为主。其中，狗牙根、千里光、高羊茅和白三叶是草本植物，长春油麻藤、(青)花椒、刺梨、杜娟为花灌木类。初期选植方案为草灌混合，有利于植被的生长。喷播种子后，用无纺布进行覆盖，雨水较多时节，使用  $16\text{ g}\sim 18\text{ g}/\text{m}^2$  的无纺布进行覆盖，防止水流对坡面和种子的冲刷，并且可以起到保水、保温作用，利于草种的发芽和生长，覆盖无纺布后用 U 型钉固定。施工完成后定期进行喷水、补种、施肥和病虫害防治养护。

**Table 2.** Artificial plant ratio table

**表 2.** 人工建植植物配比表

春播草灌方案	比例	秋播草灌方案	比例
狗牙根	30%	狗牙根	8%
千里光	6%	千里光	8%
高羊茅	12%	高羊茅	30%
长春油麻藤	12%	白三叶	8%
花椒	20%	青花椒	23%
刺梨	20%	杜娟	23%

### 3.2. 实施过程

在煤矸石中混合含有微生物菌剂的保水剂，加入微生物菌剂可以改善煤矸石的微观环境，降低重金属毒性，提高煤矸石的可溶性营养元素含量，促进植物的生长。加入微生物菌剂保水剂后，养护一段时间再喷播  $10\text{ cm}$  厚度的水泥混合土对表层煤矸石进行封闭处理。具体步骤如下：

**制备微生物菌剂溶液：**选取枯草芽孢杆菌菌剂，按比例和水进行混合，搅拌均匀直至微生物菌剂全部溶解，注意水温应满足要求。枯草芽孢杆菌是一种植物根基促生细菌，不仅能抑制植物的枯萎病、根腐病，还可以提高植物抗性、促进植物生长、改良土壤和植物品质。

**制备保水剂：**称取一定质量的腐植酸，加入去离子水，搅拌均匀；然后加入适量丙烯酸，采用恒温油浴锅冰水浴的方式，边搅拌边缓慢逐滴加入  $2\text{ mol/L}$  的氢氧化钠至所需中和度，再加入适量丙烯酰胺、过硫酸钾，在水浴  $40\text{ }^\circ\text{C}$  下搅拌，再加入适量交联剂，静置反应  $2\text{ h}$ ；最后取出溶液，采用电热鼓风干燥箱  $60\text{ }^\circ\text{C}$  干燥至恒重，粉碎研磨，即制得腐植酸基的腐植酸钾-丙烯酸-丙烯酰胺保水剂。保水剂除自己制备外，也可选用成品保水剂。喷洒微生物保水剂。

**表层喷淋：**将微生物菌剂溶液和保水剂进行混合，采用机械喷洒在煤矸石边坡表面，注意需将表层煤矸石均匀浸湿。处理过程照片如下图 3 所示。

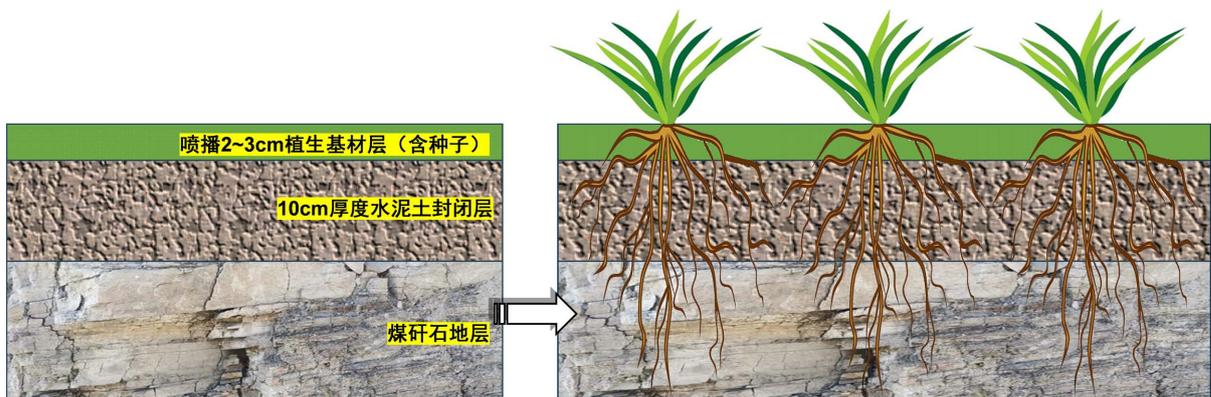


(a) 枯草杆菌



**Figure 3.** Photo of the on-site construction of ecological restoration of coal gangue slope  
**图 3.** 煤矸石边坡生态修复现场施工照片

本方案主要采用水泥混合土 + 植生基材的生态修复技术对梁场附近左右两侧煤矸石地层边坡进行喷护覆盖封闭处理及绿化(水泥土封闭 + 植生基材绿化技术如图 4 所示意)。利用水泥土 + 植生基材层隔离煤矸石与外部环境的接触, 实现边坡工程防护和生态修复, 逐步实现边坡的生态系统的稳定发展。水泥混合土封闭处理后边坡的现场照片如图 5 所示。经过生态修复和绿化施工半年后的边坡现场照片如图 6 所示。



**Figure 4.** Schematic diagram of cement soil sealing + vegetation substrate greening  
**图 4.** 水泥土封闭 + 植生基材绿化示意图



**Figure 5.** On-site photo of the slope after cement-soil sealing treatment  
**图 5.** 水泥混合土封闭处理后边坡的现场照片



**Figure 6.** On-site photo of the slope after ecological restoration and greening for half a year  
**图 6.** 经过生态修复和绿化半年后的边坡现场照片

本研究成果在山区交通运输领域运用将产生较大经济效益，以一条 100 公里的高速公路为例，采用本科研成果将节约费用在千万元以上。以本次修复及绿化为例，经济效益计算依据如下：

1) 水泥混合土基材 + 防冲刷面层施工造价估算： $100 \text{ 元}/\text{m}^2 \times \text{约 } 5000 \text{ m}^2 \approx 50 \text{ 万元}$ 。相比覆土及植生带等( $150\sim 200 \text{ 元}/\text{m}^2$ )费用节约约百万元，相比植被混凝土( $200\sim 300 \text{ 元}/\text{m}^2$ )节省费用约 200 万元。

2) 治理之后可有效防止煤矸石对空气、水源及土地方面的环境污染，节省环境整治费用近千万元。

#### 4. 结论

针对山区边坡开挖导致煤矸石地层外露产生环境污染问题，本次研究提出了喷淋改性、覆盖封闭及选植绿化的技术方案，并在贵州山区典型高速公路边坡工程中进行实施应用，得到了良好的施工效果，并节省了一定的施工成本。通过本次研究得到如下主要结论。

通过使用喷淋枯草芽孢杆菌剂及保水剂混合溶液对表层煤矸石进行微生物降解，有效降低了煤矸石的腐蚀性及毒性。使用水泥混合土对外露煤矸石区域进行喷护覆盖封闭，可有效防止雨水冲刷。该方案可操作性强，绿化植被成活率高，适用于土壤稀缺的多山地区，尤其是西南喀斯特山区。水泥混合土覆盖封闭层具有较好的防雨水冲刷特性，并且合适厚度的水泥混合土能够保证植物根系较容易穿透封闭层深入下部煤矸石地层实现长期生态修复的目的。

本文提出的生态恢复及绿化技术成本低见效快，治理之后可有效防止煤矸石对空气、水源及土地方面的环境污染，节省后期一系列环境整治费用。本研究的相关成果在山区交通运输领域推广运用能够产生较大且直接的经济效益。

通过对山区高速公路外露煤矸石边坡的生态恢复及绿化技术的研究,有助于进一步提高山区交通基础设施的绿色生态建设水平,打造绿色交通品牌,能够解决山区交通运输领域煤矸石等固废的整治及环保问题。

## 基金项目

贵州交通建设集团有限公司科技项目(山区公路煤矸石边坡生态修复及绿化技术研究);黔科合平台人才项目(CXTD [2021] 008)。

## 参考文献

- [1] 于桂芬, 杨亚平, 崔焱森. 潞安集团煤矸石山边坡生态治理工程技术——以王庄煤矿为例[J]. 中国水土保持, 2010(10): 66-68.
- [2] 杨鑫光, 李希来, 王克宙, 等. 煤矸石山生态恢复的主要路径[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7740-7751.
- [3] 何才生, 曹炜, 刘海石, 等. 煤矸石边坡植被恢复探讨——以郴州市青年大道煤矸石边坡为例[J]. 湖南林业科技, 2012, 39(3): 50-52.
- [4] Sun, Y., Xiao, K., Wang, X., Lv, Z. and Mao, M. (2020) Evaluating the Distribution and Potential Ecological Risks of Heavy Metal in Coal Gangue. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 18604-18615. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11055-w>
- [5] Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P. and Zerbi, G. (2004) Phytoextraction of Heavy Metals by Canola (*Brassica napus*) and Radish (*Raphanus sativus*) Grown on Multicontaminated Soil. *Environmental Pollution*, **132**, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.04.001>
- [6] 袁伟嘉, 易文, 张建. 不同风化程度的煤矸石生态边坡工程技术[J]. 科技与创新, 2022(23): 153-155.
- [7] 刘万杰, 李正鹏, 马利利, 等. 矿区煤矸石渣土基质配比和密度对植被生长和养分平衡的影响[J]. 青海农林科技, 2022(2): 18-23.
- [8] 冯国宝, 阮梦颖, 李海波, 等. 浅析常村煤矿矸石山植被生态重建技术及效益[J]. 中国煤炭, 2021, 47(2): 76-82.
- [9] 李军保, 赵国平, 董强, 等. 榆林沙区煤矸石平台植被恢复优化模式研究[J]. 陕西林业科技, 2021, 49(2): 42-46.
- [10] Bai, D., Yang, X., Lai, J., Wang, Y., Zhang, Y. and Luo, X. (2022) *In Situ* Restoration of Soil Ecological Function in a Coal Gangue Reclamation Area after 10 Years of Elm/Poplar Phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, **305**, Article ID: 114400. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114400>
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 212-2008 煤的工业分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T22105.1-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法 第1部分: 土壤中总汞的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T22105.2-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法 第2部分: 土壤中总砷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 甄莉娜, 李侠, 李朕, 等. 煤矸石山不同植被根际可培养微生物数量的动态变化[J]. 草地学报, 2021, 29(6): 1224-1233.
- [15] Bokar, H., Traoré, A.Z., Mariko, A., Diallo, T., Traoré, A., Sy, A., *et al.* (2020) Geogenic Influence and Impact of Mining Activities on Water Soil and Plants in Surrounding Areas of Morila Mine, Mali. *Journal of Geochemical Exploration*, **209**, Article ID: 106429. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106429>