

# 基于Geofluv模型的土壤改良和植物措施 对粤北某废弃离子型稀土矿山联合修复研究

于波<sup>1</sup>, 明俊男<sup>2</sup>, 莫国浩<sup>2</sup>, 李建和<sup>1</sup>, 尤永春<sup>1</sup>, 符加方<sup>3</sup>, 郝银龙<sup>2</sup>, 李红图<sup>2</sup>, 张慧<sup>3</sup>,  
余少嘉<sup>2</sup>, 陈宇航<sup>2</sup>, 万茂绿<sup>2</sup>, 陈森<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>广东省环境地质勘查院, 广东 广州

<sup>2</sup>广东省地质建设工程集团公司, 广东 广州

<sup>3</sup>南雄市自然资源局, 广东 南雄

收稿日期: 2022年9月11日; 录用日期: 2022年10月10日; 发布日期: 2022年10月18日

## 摘要

为探究离子型稀土矿山生态修复有效的治理方法和措施, 本文通过对粤北某典型稀土矿山的生态调查与问题识别, 提出采用近自然地貌重塑模型(Geofluv模型)的土壤重构与植被重建联合修复措施。通过对比治理前后水样和土壤的理化性状以及土壤动物和植被群落的变化组成, 表明联合修复措施可以明显改善治理区的水土气生条件, 在免养护条件下生态环境恢复效果明显。

## 关键词

离子型稀土矿山, 近自然地貌重塑, 土壤重构, 植被重建, 生态修复

## A Joint Restoration Study on Soil Improvement and Plant Measures Based on the Geofluv Model on a Waste Ionic Rare Earth Mine in Northern Guangdong

Bo Yu<sup>1</sup>, Junnan Ming<sup>2</sup>, Guohao Mo<sup>2</sup>, Jianhe Li<sup>1</sup>, Yongchun You<sup>1</sup>, Jiafang Fu<sup>3</sup>, Yinlong Hao<sup>2</sup>,  
Hongtu Li<sup>2</sup>, Hui Zhang<sup>3</sup>, Shaojia Yu<sup>2</sup>, Yuhang Chen<sup>2</sup>, Maolv Wan<sup>2</sup>, Sen Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Institute of Environmental Geology Exploration, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Guangdong Geological Construction Engineering Group Corporation, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>Nanxiong City Natural Resources Bureau, Nanxiong Guangdong

\*通讯作者。

文章引用: 于波, 明俊男, 莫国浩, 李建和, 尤永春, 符加方, 郝银龙, 李红图, 张慧, 余少嘉, 陈宇航, 万茂绿, 陈森. 基于 Geofluv 模型的土壤改良和植物措施对粤北某废弃离子型稀土矿山联合修复研究[J]. 矿山工程, 2022, 10(4): 412-420. DOI: 10.12677/me.2022.104046

## Abstract

In order to explore the effective treatment methods and measures for ecological restoration of ionic rare earth mines, through the ecological investigation and problem identification of a typical rare earth mine in northern Guangdong, the soil reconstruction and vegetation reconstruction joint restoration measures of the near-nature landform remodeling model (Geofluv model) are proposed. By comparing the physicochemical characteristics of water samples and soils before and after treatment, as well as the variation composition of soil fauna and vegetation communities, it is shown that the joint remediation measures can significantly improve the water and soil gas conditions in the treatment area, and the ecological environment restoration effect is obvious under the condition of no maintenance.

## Keywords

Ionic Rare Earth Mine, Near-Nature Landform Remodeling, Soil Reconstruction, Vegetation Reconstruction, Ecological Restoration

Copyright © 2022 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

粤北花岗岩风化壳中普遍赋存稀土元素, 因其开发方式简易和价格不断攀升, 非法盗采稀土矿猖獗, 近年来经过严厉打击, 非法采矿基本杜绝, 但搬山运动式的桶浸、池浸、堆浸和原地钻孔浸矿等开采工艺和浸矿剂的使用[1], 造成开采区土地损毁、植被破坏、水土流失、土壤酸化、土层结构破坏、重金属污染等生态问题, 尤其遇到强降雨造成水土流失污染农田和河流, 加剧了矿区生态环境的退化, 植被恢复极其困难[2]。

近年来关于废弃稀土矿山治理的土壤改良和植被恢复已有不少研究, 土壤改良主要包括物理改良和化学改良。植被恢复研究主要集中在开采后的边坡植被重建技术等方面, 筛选出了一些适合稀土矿废弃地生长的植物。已有的稀土矿区治理效果研究发现, 在前期人工施肥等栽培条件下, 植被能正常生长, 随着时间的推移, 植物会出现明显的生长衰退, 尤其是乔灌木, 很难存活, 少数存活十多年后依然无长大迹象[2]。稀土矿山废弃地因其开采工艺使得污染成分复杂, 仅用一种修复技术效果并不明显, 要根据其地形地貌和形成机制, 选取合适的修复技术对稀土矿山废弃地进行联合修复[3]。本文依据粤北某废弃离子型稀土矿山联合修复的工程实践, 提取出联合修复治理的关键环节, 为废弃稀土矿生态环境治理及植被恢复提供借鉴。

## 2. 研究区生态现状

研究区废弃稀土矿山沟壑纵横, 沟谷尾砂淤积严重, 沟床被抬高, 水土流失严重; 土体酸化, 营养物质匮乏, 植被稀少; 原有地形地貌生态景观破坏严重、坍塌等地质灾害情况频发。通过地表水、土壤采样检测分析, 综合矿区周围环境和植被分布、地理地质和气象水文条件、土壤酸碱性和营养元素指标等生态治理恢复要素[4], 识别研究区的主要生态问题为土地损毁、地形地貌景观破坏、水土流失、土壤酸化、地灾隐患。

### 3. 联合修复研究

研究区的生态修复遵循植被自然修复为主、人工修复为辅的理念,根据现场条件,通过近自然地貌重塑、土壤重构与植被重建三种修复措施的联合治理,对治理区水、土、气、生进行人工干预调节,实现了前期低维护后期免养护的低成本修复,经过三年的生态效果跟踪评价,达到了生态修复长期健康稳定。

地形、土壤与气候是影响区域植被组成与分布的重要影响因素[5]。因为地形、土壤以及植被之间存在着相互影响、相互作用的关系,土壤与地形变量显著地影响着植被和物种的空间分布[6]。植被恢复与重建的效果很大程度上是由土壤质量的好坏所决定的,土壤理化特性不仅影响着植被群落的生长、发育、生物量和物种多样性等功能指标[7],也决定着植被的演替方向和发展进程。土壤是植被发展的基础,植被同样也影响着土壤特性的形成和发育,在一定程度上改善土壤理化性质[8]。同样,植被恢复作为生态环境治理的重要措施之一,可以充分利用土壤-植被复合系统的功能,改善区域生态环境[9]。地形特征影响着植被分布以及植被格局,是植被恢复的另一主要影响因素[10]。植被群落、土壤条件均受坡度、坡位、海拔等景观特征的影响[11],大量的研究证明海拔、坡度和坡向等微地形是影响群落变化与植被空间分布的主要环境梯度[12],地形可以部分地影响土壤水分的再分配,以及养分和土壤颗粒的积累和输出,从而间接影响植被的分布[13][14][15]。

#### 3.1. 近自然地貌重塑

地貌重塑是针对矿区的地形地貌特点,结合采矿设计、开采工艺及土地损毁方式,通过采取有序排弃、土地整形等措施,重新塑造一个与周边景观相互协调的新地貌,最大限度消除和缓解对植被恢复、土地生产力提高有影响的因素,总体来说,地貌重塑是矿区修复土地质量的基础[16]。

Geofluv 模型是美国 Carlson 软件公司在 AutoCAD 平台上针对废弃矿山地形设计开发的模型,也是 2009 年美国露天开采与复垦办公室推荐的地貌修复应用模型[17]。该模型以流域为设计单元,以流域地貌学为理论基础,通过构建相对稳定的坡面和沟道来实现坡面产流产汇间动态平衡[17]。

修复项目前期,开展了无人机倾斜摄影测量工作。通过搭载多组镜头的无人机摄影,实现全方位、多角度的拍摄效果,实现对地物状况的真实反映;通过无人机的低空数据处理,获取高清的立体影像特征数据,建立项目区空间三维地理信息模型[18],实现了稀土矿区规模、形态及危害性的可视化和直观化,为 Geofluv 模型应用提供数据支撑。

该模型完整的实践应用过程主要包括[19]:① 获取模型基础数据:在周围寻找与治理区气候、土壤及地表覆被类似的环境条件区域作为参照,计算和统计参照区地貌特征参数。② 依据未干扰前的地貌及周边衔接区地形状态,选取最佳的水系分布重新规划区域水系网,以确保其符合设计标准。③ 完成治理区地形重建:根据场地内边坡的坡向、坡度、高度、汇水面积等因素对各参数进行调整,使之符合近自然地形重塑的要求。④ 依靠输出的地形数据信息对现场进行放样、指导施工,对重塑地貌进行表土和植被重建,并在区域最终汇水口监测水文和整体侵蚀状况。

重塑后的地貌从凸坡自然过渡到凹坡,大大减少截排水沟的设置,保证治理区后期的生态用水,实现向天要水的矿山生态修复免养护模式,同时仿自然的地形地貌具有不同的坡向和坡度,这种不同微立地环境条件促进了治理区后期生物多样性的发展。

#### 3.2. 土壤重构

土壤重构的目的是为后期植被重构奠定基础,使土地达到可利用状态[20]。主要有清理工程、平整工程、土壤改良工程,具体措施有场地清理、场地平整、覆盖表土、翻耕土地、生石灰拌合表土等。

场地清理:主要为拆除各废弃稀土矿区内建构物、清理场地内残留的废弃土石方和采坑、废弃水

管和塑料膜及各矿区内的裸露地。

场地平整：主要填整各矿区的集液池、高位池、采坑、注液孔及小的冲沟，优先取用场地清理残留的废弃土石方和剥离的裸露地，主要采用机械清理，辅以人工，平整后采用人工覆土措施。

土壤改良：主要针对 30 cm 以内表层土壤进行改良，对废弃矿区内污染较严重的浸酸区按平均每亩用量 0.4 吨生石灰的标准，提高 pH 值。

土壤培肥：采用两种方式进行土壤培肥。先取用待整治矿区附近养殖场厩肥为原料，与原状土进行翻耕混合，其作用为：提供植物养分；提高土壤养分的有效性；改良土壤结构，促进土壤团粒结构形成[21]；在此基础上混播绿肥草种。

土地翻耕：为了使覆盖的表土与原土地结合，设计对坑穴处土壤进行翻耕，翻耕厚度 30~50 cm。

### 3.3. 植被重建

生态治理修复的关键是经过土壤改良后在生态恢复条件成熟时，及时对修复完成的土地进行植被恢复，构建植被自然演替的基础条件[22]。在本项目中，对绿化区域及时进行生物复垦，快速恢复植被，有效地控制水土流失、改善区内生态环境，是实现矿山地质环境治理恢复的关键环节，主要内容有植被品种的筛选和植被护坡工艺。

#### 1) 植被品种的筛选：豆科和水保植物

通过混播豆科和水保植物等人工干预调控手段促进植物群落的拓殖与演替。选用的豆科植物主要有木豆、猪屎豆、山毛豆、多花木兰、三叶草等，要求草种净度 > 95%、发芽率 > 85%。豆科植物向周围植物提供有效氮来源，活化根际的土壤磷环境，促进治理区生态系统的养分循环[22]。选用的水保植物主要有宽叶雀稗、牡荆、马塘草、圆雀稗、画眉草、百喜草、狗尾草、狗牙根、柱花草、山苍子等耐酸、根系发达、适生的多年生混合草籽，要求草种净度 > 95%、发芽率 > 85%。水保植物在中后期迅速在地表形成天然覆盖层，快速达到水保作用，实现矿区土壤有机质快速富集作用[23]，加速治理区植被的正向演替。人工撒播草种的播种密度为草籽 2~2.5 Kg/亩。

#### 2) 植被护坡工艺：椰丝草毯+混播水保植物草籽综合护坡

有研究表明[24]，植物纤维毯可有效阻挡雨滴溅蚀，减少坡面的土壤侵蚀，且在降雨强度为 1.01 mm/min 时纤维毯防护坡面的渗透系数最高。同时，不同材质的植物纤维毯防护效果差异显著，在降雨强度不高于 2.02 mm/min 时，椰丝草毯的防护性能优于麦秸秆纤维毯。本项目采用椰丝草毯和混播水保植物草籽的综合护坡方式，初期由椰丝草毯发挥防冲刷、保水、滞水的功能[25]，后期形成由植物草毯和椰丝草毯共同发挥固坡、防止水土流失的功能。

## 4. 生态修复效果

### 4.1. Geofluv 模型地形塑造对植物群落多样性的影响

通过 Geofluv 模型对治理区地形地貌的重塑，使各处地形产生空间异质性，包括海拔、坡向、坡度、温度、土壤含水量等不同微立地环境条件。其中坡向使光热和水分在微立地环境内重新分配，对群落的物种丰富度和生物多样性产生重要影响[26]。坡向主要影响光照条件，也间接影响到土壤水分、温度等环境条件，不同坡向环境条件见表 1，植物群落分布及特征见表 2。

本文选取坡底、阳坡、阴坡和坡顶，研究塑造的地形因子对植物群落多样性的影响。由于稀土矿沙化严重，保水保肥性差，水分对于植物生长显得尤为重要，阴坡较为潮湿，水湿条件提供了适宜更多植物生长的小环境，坡顶阳光充足，适合更多种类生存，植物多样性高[27]。可见地形因子对植物群落多样性具有一定影响，生境条件好的地方，植物多样性高。随着恢复的时间进程，野生植物种逐渐代替了原有人工种植的植

物,以坡顶和坡底最为显著。不同微立地植被盖度与植物多样性相对应,肖培青等[27]研究表明,盖度为65%以上的坡面具有较好的保持水土作用,随多样性的增加植被盖度增加,且各坡向植被盖度均在90%以上。

**Table 1.** Environmental conditions of different micro-sites in rare earth ore treatment points

**表 1.** 稀土矿治理点不同微立地环境条件

治理点 1	海拔(m)	气压(Pa)	气温(°C)	10 cm 地温	20 cm 地温	土壤含水量(%)
坡顶	689.7	30	32.4	20.5	17.8	17.35
坡底	682.5	33	35.7	25.2	19.5	23.57
阴坡	691.7	28	30.5	23.4	18.8	44.38
阳坡	684.9	33	36.2	20.8	17.3	18.62

**Table 2.** Number and abundance of species in different microcubine plant communities at rare earth ore treatment sites

**表 2.** 稀土矿治理点不同微立地植物群落的物种数及多度

治理点 1	科数	属数	物种数	总个体数	第一优势种个体数
坡顶	9	9	15	256	152
坡底	7	8	16	175	113
阴坡	7	7	11	163	24
阳坡	6	6	12	148	92

## 4.2. 水土修复效果

治理前土样检测时间为2020年4月24日;治理后水样、土样检测时间为2022年1月10日。从治理前后水土检测的对比数据显示(见表3、表4),治理后土壤全钾含量比治理前平均提高26.1%,治理后土壤全氮含量比治理前平均提高53.3%,治理后土壤全磷含量比治理前平均提高16.1%,说明豆科植物对土壤氮含量的提升有明显效果。土壤有机质含量平均提升61.4%,说明水保植物快速富集土壤有机质作用明显,为后期植被恢复和正向演替奠定的坚实的基础。治理后的土样和水样pH值均在适宜范围内,有利于植物生长。从治理前后的氨氮含量看,治理区周边地表水环境质量从III类及以下提升到I类[28],治理区周边地表水质得到显著改善。

**Table 3.** Comparison of soil sample detection data after rare earth ore treatment

**表 3.** 稀土矿治理后土样检测数据对比

序号	矿区名称	全钾%		全氮 mg/kg		全磷 mg/kg		有机质 g/kg		pH	
		治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后
1	治理点 1	2.61	3.30	82.5	155	248	408	1.10	4.95	4.71	6.21
2	治理点 2	3.52	3.77	85.8	128	267	293	1.37	3.57	6.84	7.18
3	治理点 3	2.68	3.39	41.3	120	245	252	1.92	3.57	5.22	6.18
4	治理点 4	1.39	3.15	31	96.0	382	442	1.10	2.75	4.45	6.22

**Table 4.** Water sample detection data after treatment of rare earth mines

**表 4.** 稀土矿治理后水样检测数据

序号	矿区名称	pH		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)		氨氮(mg/L)	
		治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后
1	治理点 1	4.36	6.55	28.6	1.2	53.6	0.035

Continued

2	治理点 2	3.63	6.85	64.4	7.1	96.9	0.032
3	治理点 3	5.53	6.54	13.4	8.1	0.819	0.063
4	治理点 4	3.83	6.65	24.2	1.6	0.466	0.043

### 4.3. 治理区土壤动物多样性

从土壤动物群落组成看(见表 5、表 6), 甲螨亚目、中气门亚目、等节跳科在四个治理点的群落占比分别为 78%、65.7%、98.1%和 76.8%, 集中度比较高, 这也与四个治理点的治理方式以及植被组成相似度高有密切关系。但治理点 1 蛭蚰科群落占比 5.8%、治理点 2 圆跳科和小蚓类群落占比分别为 12.7%和 10.8%、治理点 4 棘跳科群落占比为 10.7%, 可以看出四个治理点已经因各自的空间异质性出现了不同偏向的土壤动物群落组成。

Table 5. Soil fauna biodiversity in the treatment area

表 5. 治理区土壤动物生物多样性

	丰度(个/m <sup>2</sup> )	类群数	多样性指数	均匀度指数	丰富度指数
治理点 1	2936	12	1.707	0.687	2.135
治理点 2	3616	12	1.787	0.719	2.052
治理点 3	2750	4	1.063	0.660	0.786
治理点 4	6807	12	1.794	0.647	2.503

Table 6. Status of soil fauna biodiversity in the treatment area

表 6. 治理区土壤动物生物多样性情况

	治理点 1		治理点 2		治理点 3		治理点 4	
	捕获数	百分比	捕获数	百分比	捕获数	百分比	捕获数	百分比
甲螨亚目	78	45.1	84	39.4	53	32.7	136	33.9
中气门亚目	21	12.1	19	8.9	22	13.6	107	26.7
等节跳科	36	20.8	37	17.4	84	51.8	65	16.2
圆跳科	8	4.6	27	12.7	0	0	6	1.5
前气门亚目	0	0	0	0	0	0	3	0.7
小蚓类	4	2.3	23	10.8	0	0	0	0
双尾目	0	0	0	0	0	0	2	0.5
蛭蚰科	10	5.8	10	4.7	0	0	4	1
土跳科	5	2.9	1	0.5	0	0	0	0
棘跳科	0	0	3	1.4	0	0	43	10.7
长角跳科	0	0	1	0.5	2	1.2	0	0
疣跳科	1	0.6	0	0	0	0	9	2.2
双翅目(幼虫)	0	0	0	0	0	0	2	0.5
缨翅目	4	2.3	2	0.9	0	0	6	1.5
鞘翅目(幼虫)	3	1.7	4	1.9	0	0	7	1.7
鳞翅目	0	0	1	0.5	0	0	0	0
蠕虫科	2	1.2	0	0	0	0	0	0
毛马陆目	1	0.6	0	0	0	0	0	0

#### 4.4. 地貌景观以及社会经济的提升效果

经过航拍影像图测算及现场调查, 研究区植被覆盖率达到 95%以上。通过综合整治, 不仅防治了水土流失和土地沙化(见图 1), 也减少和消除裸露矿区地质环境恶化对周边农林及附近村民造成的影响, 有利于社会的可持续发展。尤其对于在矿区周围的居民和农户来说, 非法开采稀土矿区的生态环境治理, 让他们更加珍惜身边的青山绿水以及宝贵的稀土资源, 村民自觉成为保护稀土资源的哨兵。通过对损毁土地的复垦利用以及地灾隐患的治理, 治理点已经有农户在治理区内养牛放牧, 良好的治理效果促进了当地的农林业经济发展。另外, 降低因水体富氮氮化和水土流失对流域造成的危害, 获得间接的经济效益。该治理工程的实施有效保护周边宝贵的稀土资源, 恢复被泥沙污染的农用地, 对尾砂堆积区实行造田复垦, 增加了日益紧张的耕地资源。

通过对治理后的植物群落多样性、土壤动物多样性、水土修复等的提升效果分析, 表明本联合修复的模式短期内能够达到快速护坡固土的作用。通过 Geofluv 模型塑造的各坡向植物均以草本为主, 随着生态系统恢复力的提高, 地表植被覆盖以及土壤动物多样性的增加, 物种演替还在进行, 植被产生的枯落物在土壤中积累和腐解, 现场测量的枯落物厚度在 10 cm 以上, 使土壤有机质快速富集, 养分循环使地表植被覆盖增加, 植物群落多样性得到提高[29], 研究区的生态在朝着正向演替和发展。



Figure 1. Fixed-point photographs taken in the governance area (front, middle and rear)

图 1. 治理区定点拍摄照片(前中后)

## 5. 结论与思考

### 5.1. 结论

1) 近自然地貌重塑通过对地形因子的塑造和调整间接影响了植物群落多样性。通过坡面的塑造影响微立地条件的高度、光照条件, 使坡顶土壤含水量(17.35%)水分和坡地的土壤含水量(23.57%)产生明显差异、阳面气温(30.5℃)和坡面气温(36.2℃)产生明显差异, 通过第一优势种个体数的差异可以得出这些因素直接影响了治理区的植物群落多样性。

2) 土壤重构和植被重建改善了治理区的水土条件, 为区域生态恢复创造了良好的条件。首先是土壤全氮、土壤有机质和土壤 pH 分别达到了 124.75 mg/kg、3.71 g/kg 和 6.4, 周边水样的 pH 和氨氮含量分别达到 6.6、0.043 mg/L, 其次是土壤动物丰度和多样性指数平均达到 4027 个/m<sup>2</sup>、1.588。通过以上数据以及植被覆盖率达到 95%以上可以说明, 土壤重构和植被重建措施改善的水土条件已经通过土壤动物多样性和植被恢复效果体现出来。

### 5.2. 思考

各矿山生产性质、规模、开采方式、产品类别以及建设条件各不相同[30], 因此后期的修复治理模式也应有所差异, 根据各矿山的场地条件主要的矿山生态修复方式主要有自然恢复、辅助再生、生态重建以及转型利用[31]。本治理项目中的废弃稀土矿因场地存在重大地质安全隐患, 具有影响环境安全的重大水土污染问题, 严重土地损毁、水资源破坏, 地表植被生境受到严重影响, 生态退化严重, 因此采用生

态重建的方式进行修复治理。通过该生态治理修复工程的成功实施，可以发现这一类矿山生态修复的关键点在于：

1) 在稀土矿生态修复中，地貌重塑是基础，土壤重构是核心，植被重建是关键，修复健康稳定的生态系统是目标。

2) 矿山水资源属于刚性约束，要避免盲目绿化耗水[32]，修复中的植物选择也要以水而定，量水而行，科学评估修复生态承载力。通过地形重塑实现向天要水的矿山生态修复免养护模式，最大限度地利用了大气水和地表水。

3) 生态系统的重建是关键，不是工程措施就可以直接达到的，更需要遵循自然演替规律。本治理项目通过混播豆科和水保植物等人工干预调控手段促进生态系统的养分循环、植物群落的拓殖与演替，是值得参考借鉴的生态修复方式。

## 致 谢

本研究涉及环境地质、土壤修复、植被恢复等相关领域和关键技术，涉及专业范围广、技术难度大，现场情况复杂。感谢南雄市人民政府和南雄市自然资源局对本研究的大力支持，特别是南雄市自然资源局符加方副局长、生态修复股张慧、刘小详同志、南雄市土地储备中心陈桂泰高级工程师对本研究提供的指导和帮助；感谢仲恺农业工程学院园艺园林学院陈平教授团队多次深入现场的探讨交流；感谢广东省自然资源厅授予本修复项目“广东省国土空间生态修复十大范例”提名奖。

## 参考文献

- [1] 王友生. 稀土开采对红壤生态系统的影响及其废弃地植被恢复机理研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [2] 陈敏, 张大超, 朱清江, 聂锦霞. 离子型稀土矿山废弃地生态修复研究进展[J]. 中国稀土学报, 2017, 35(4): 461-468.
- [3] 刘天祥. 粤北某一离子吸附型稀土矿床地质特征分析[J]. 甘肃冶金, 2019, 41(5): 40-44.
- [4] 吴华, 朱柱, 徐冬冬. 矿山工业场地生态治理修复研究——以某铜矿为例[J]. 有色冶金节能, 2022, 38(3): 86-89+94.
- [5] Whittaker, R.J., Willis, K. and Field, R. (2001) Scale and Species Richness: Towards a General Hierarchical Theory of Species Diversity. *Journal of Biogeography*, **28**, 453-470. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00563.x>
- [6] Glaser, B., Turrion, M.B., Solomon, D., et al. (2000) Soil Organic Matter Quantity and Quality in Mountain Soils of the Alay Range, Kyrgyz, Affected by Land Use Change. *Biology and Fertility of Soils*, **31**, 407-413. <https://doi.org/10.1007/s003749900187>
- [7] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [8] 戴全厚, 刘国彬, 姜峻, 等. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(9): 429-434.
- [9] Srinivasan, M.P., Bhatia, S. and Shenoy, K. (2015) Vegetation-Environment Relationships in a South Asian Tropical Montane Grassland Ecosystem: Restoration Implications. *Tropical Ecology*, **56**, 201-217.
- [10] 张艳, 赵廷宁, 史常青, 等. 坡面植被恢复过程中植被与土壤特征评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 124-131.
- [11] McDonald, D.J., Cowling, R.M. and Boucher, C. (1996) Vegetation-Environment Relationships on a Species-Rich Coastal Mountain Range in the Fynbos Biome. *Plant Ecology*, **123**, 165-182. <https://doi.org/10.1007/BF00118269>
- [12] Zhang, J.T., Xi, Y. and Li, J. (2006) The Relationships between Environment and Plant Communities in the Middle Part of Taihang Mountain Range, North China. *Community Ecology*, **7**, 155-163. <https://doi.org/10.1556/ComEc.7.2006.2.3>
- [13] Canton, Y., Del Barrio, G., Sole-Benet, A., et al. (2004) Topographic Controls on the Spatial Distribution of Ground Cover in the Tabernas Badlands of SE Spain. *Catena*, **55**, 341-365. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00108-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00108-5)
- [14] Fu, B.J., Liu, S.L., Ma, K.M., et al. (2004) Relationships between Soil Characteristics, Topography and Plant Diversity

- in a Heterogeneous Deciduous Broad-Leaved Forest near Beijing, China. *Plant and Soil*, **261**, 47-54.  
<https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000035567.97093.48>
- [15] Zuo, X.A., Zhao, H.L., Zhao, X.Y., *et al.* (2008) Plant Distribution at the Mobile Dune Scale and Its Relevance to Soil Properties and Topographic Features. *Environmental Geology*, **54**, 1111-1200.  
<https://doi.org/10.1007/s00254-007-1104-0>
- [16] 寇晓蓉, 白中科, 杜振州, 等. 黄土区大型露天煤矿企业土地复垦质量控制研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 957-965.
- [17] 胡振琪, 赵艳玲. 矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9): 2-7.
- [18] Martín, M.C., Martín, D.J.F., Nicolau, I.J.M., *et al.* (2016) Effects of Topography and Surface Soil Cover on Erosion for Mining Reclamation: The Experimental Spoil Heap at El Machorro Mine (Central Spain). *Land Degradation & Development*, **27**, 145-159. <https://doi.org/10.1002/ldr.2232>
- [19] 林洪, 周伶俐, 王继琼. 无人机倾斜摄影技术在大比例尺测图中的应用[J]. 中国金属通报, 2021(11): 118-119.
- [20] 蔡煜, 王景燕, 龚伟, 等. 柑橘林下养鸡对土壤团粒结构分形特征的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 225-232.
- [21] 陈航. 草原露天煤矿内排土场近自然地貌重塑模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [22] 韩扬眉. “好邻居”豆科树木的“利己主义” [N]. 中国科学报, 2020-07-14(003).
- [23] 赵昱, 喻武. 不同株龄紫穗槐对退化黑土土壤理化性质的影响[J]. 高原农业, 2021, 5(4): 353-360.
- [24] 张莉, 王金满, 刘涛. 露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1235-1246.
- [25] 韩建文, 郭生新, 李光耀, 等. 张唐铁路路基边坡防护工程应用及其效果分析[C]//2017 年第九届边坡工程大会论文集. 2017: 21-23.
- [26] 张琳. 不同植物组合对稀土矿场土壤生态修复的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.
- [27] 肖培青, 姚文艺, 李莉, 等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究, 2013(3): 1-5.
- [28] 中华人民共和国生态环境部. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 国家环境保护总局、国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [29] 丁齐. 喷播基材的力学性质及生态功能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2014.
- [30] 辽宁省人民政府办公厅关于印发辽宁省深入推进结构调整“三篇大文章”三年行动方案(2022-2024 年)的通知[J]. 辽宁省人民政府公报, 2022(8): 2-48.
- [31] 张新平. 土壤改良和植物对赣南某离子型稀土尾矿联合修复研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西农业大学, 2021.
- [32] 邓铭江. 旱区水资源集约利用内涵探析[J]. 中国水利, 2021(14): 8-11+14.