

DOI: 10.5846/stxb201905291118

罗明, 周妍, 鞠正山, 魏洪斌, 张世文. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架. 生态学报, 2019, 39(23): 8911-8919.

Luo M, Zhou Y, Ju Z S, Wei H B, Zhang S W. Technological model and benefit pre-evaluation of eco-environmental rehabilitation engineering of typical mines in the Nanling area of Northern Guangdong Province under the pilot framework of the eco-restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8911-8919.

粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估

——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架

罗 明^{1,2}, 周 妍^{1,2}, 鞠正山^{1,2}, 魏洪斌^{1,2}, 张世文^{2,3,*}

1 自然资源部国土整治中心, 北京 100035

2 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

3 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001

摘要: 广东粤北南岭山区地处国家生态安全格局“两屏三带”中的南方丘陵山地带的核心区, 由于历史上有色金属矿产无序开采、选矿和冶炼等活动, 导致区域生态环境问题突出, 并造成下游区域土壤、水、农作物污染。修复历史遗留矿山、做好源头控制是解决区域生态环境问题的关键所在。以典型矿山废弃地单元(废土堆)为例, 提出其生态修复工程技术模式与关键技术, 开展修复效益预评估方法和实践研究。研究结果表明: 粤北南岭山区矿区生态环境问题主要包括矿山植被破坏和水土流失问题突出、地质灾害风险隐患较大、矿山周边水土污染严重几个方面; 矿山生态修复应以防控安全隐患为基础, 以恢复生态功能为主要目标, 同时治理矿山水土污染。构建了遵循山水林田湖草系统共治的“依山就势”重塑地形、“因势利导”疏导水流、“柔性防护”稳定边坡的粤北南岭废土堆立体生态修复模式, 提出了相应的场地平整、清污分流、土壤改良、边坡生态袋植生、立体植被配置等生态恢复关键技术; 建立了包括涵养水源、保持水土、净化环境及净化水质 4 个方面的生态效益评估模型, 废土堆修复后生态效益预计可达到 66754.25 元/a。研究结果可为粤北南岭山区及类似区域山水林田湖草系统共治提供技术支撑。

关键词: 粤北南岭; 典型矿山; 生态修复; 工程技术模式; 效益预评估

Technological model and benefit pre-evaluation of eco-environmental rehabilitation engineering of typical mines in the Nanling area of Northern Guangdong Province under the pilot framework of the eco-restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands

LUO Ming^{1,2}, ZHOU Yan^{1,2}, JU Zhengshan^{1,2}, WEI Hongbin^{1,2}, ZHANG Shiwen^{2,3,*}

1 Land Consolidation and Rehabilitation Center of the Ministry of Natural Resource, Beijing 100035, China

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

3 College of Earth and Environmental Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract: Nanling mining area in northern Guangdong Province is located in the core area of the southern hilly and mountainous region of the “two screens and three belts” of the national ecological security pattern. Due to historical disorderly mining, beneficiation, and smelting activities of non-ferrous metal minerals, the problems of the regional ecological environment are clear, as well as soil, water, and crop pollution in downstream areas. Restoring historical mines and controlling the sources are essential for solving the problems of regional ecological environments. Taking typical mine

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0800701)

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-09-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shwzhang@ aust.edu.cn

abandoned land units (waste dumps) as examples, in this paper, the engineering technology model and key technologies of ecological restoration were proposed, and pre-evaluation methods and practical research on repair benefits were performed. The results revealed that ecological environment problems in the Nanling mining area of northern Guangdong include: outstanding vegetation destruction and soil erosion in mines, a high risk of geological hazards, and serious soil and water pollution around mines. Mine ecological restoration should be based on the prevention and control of potential safety hazards, with restoration of ecological functions as the main objective, and control of soil and water pollution in mines. This paper constructed a three-dimensional ecological restoration model of Nanling waste dump in northern Guangdong, which follows the co-governance of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system, and remolds terrain according to the situation, guides water flow according to the situation, and stabilizes slopes with flexible protection. The key technologies of ecological restoration, such as site leveling, clearing and diverting, soil improvement, ecological bag planting of slope, and three-dimensional vegetation allocation, are proposed. It also establishes an ecological benefit evaluation model including water conservation, soil and water conservation, environmental purification, and water quality purification. It is estimated that the ecological benefit of waste dumps after restoration can reach 66754.25 yuan/a. These research results provide technical support for the co-management of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system in the Nanling area of northern Guangdong and similar areas.

Key Words: Nanling area in northern Guangdong; typical mines; ecological restoration; engineering technology model; benefit pre-evaluation

矿山生态修复是缓解矿产资源开发与矿山环境保护矛盾的关键^[1]。由于对矿山生态系统各要素之间的流动性、经济与环境之间的协调性、污染因素之间的相互影响等考虑不足,相关部门各自为战,规划治理缺乏统一性、系统性和整体性,导致目前我国矿山生态修复总体效果不尽理想,生态环境问题仍然严重^[2]。习近平总书记在《关于〈中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定〉的说明》中指出:“山水林田湖是一个生命共同体,由一个部门负责领土范围内所有国土空间用途管制职责,对山水林田湖进行统一保护,统一修复是十分必要的”^[3]。在全国生态环境保护大会上习近平总书记进一步指出“山水林田湖草是生命共同体,要统筹兼顾、整体施策、多措并举,全方位、全地域、全过程开展生态文明建设”。因此,矿山生态修复也应该在山水林田湖草生命共同体理论框架下,探索整体保护、系统修复、综合治理技术。

广东粤北南岭山区地处国家生态安全格局“两屏三带”中的南方丘陵山地带的核心区,是华南地区的重要生态屏障,是关系到粤港澳大湾区可持续发展的关键区域。粤北南岭山区矿产资源丰富,早期盲目无序开发导致当地生态环境问题突出,特别是历史上的私挖乱采后留下大量的废土堆场,造成矿区水土流失、环境污染。近年来,韶关市高度重视生态文明建设,在粤北南岭山区持续开展大规模整顿和规范矿产资源开发秩序工作,先后关闭了一批生态环境问题突出的小型矿山,从源头上遏制生态环境恶化,并将粤北南岭山区作为矿山地质环境重点治理区和土壤污染综合防治先行区。2018年,广东粤北南岭山区山水林田湖草生态保护修复工程列入国家第三批试点工程。当前矿山生态环境问题识别不清,生态修复的技术模式针对性不强^[4-6],矿山修复的可持续性较差,故在山水林田湖草生态保护修复试点框架下开展矿山,特别是废土堆生态修复技术模式和生态效益评估研究,对于科学、精准治理矿山生态环境至关重要。

本文以粤北南岭山区为研究对象,在山水林田湖草生态保护修复试点框架下,分析矿区生态环境问题及其修复途径,探讨典型矿山废弃地单元(废土堆)的山水林田湖草修复工程技术模式与关键技术,初步评估修复后的生态效益,为当地乃至全国同类区域山水林田湖草生态修复试点工作提供技术支撑。

1 粤北南岭山区矿区生态环境问题识别

粤北南岭山区在生态环境质量整体良好的同时也存在突出的生态环境问题,区域内曾发生过多起水体重金属污染和农田土壤污染事件。其中,矿山及土壤生态修复区主要包括大宝山矿、凡口铅锌矿、乐昌铅锌矿等重点矿山及其周边区域,该区域矿山开采和冶炼活动较多,生态环境恶劣。

(1) 矿山植被破坏和水土流失问题突出,地质灾害风险隐患较大。由于长期的有色金属矿产开采、选矿和冶炼等活动,尤其是一些民采矿山一度无序开采,遗留了大量的矿山地质环境问题。如占用与损毁土地资源、植被破坏、地下含水层破坏与污染、地形地貌景观破坏和水土流失等。粤北南岭山区地处广东省北部,丘陵山地多,地质构造较为复杂,地质环境脆弱,矿产资源的长期开采在破坏地质环境的同时也留下了大面积的采空区,存在较大的地质灾害风险。

(2) 矿山周边水土污染严重。来自矿石、废石堆和尾矿坑中的硫化物矿物,经氧化后形成的大量酸性矿山废水引起水体酸化及周围土壤、水体重金属污染,部分矿区周边废水、废渣等问题较为突出^[7]。粤北南岭山区大宝山矿区水体、土壤均呈现酸性,pH 值小于 5,特别是采矿场和尾矿库^[4]。土壤的营养元素含量普遍较低,其中有机质含量在各排土场中最低,一般不超过 5 g/kg。粤北南岭山区地处珠江流域的北江和东江上游,采矿废石在堆放过程中,由于风化和淋滤以及选矿、洗矿产生的含有镉、铜、锌、铅等数种严重超标的重金属污水直接对下游的珠江三角洲经济区农业生产灌溉和居民健康造成了巨大的威胁^[8]。

2 粤北南岭山区矿区生态修复途径

粤北南岭山区矿山开发和冶炼活动较多,生态环境污染严重,该区域的生态修复应以恢复自然生态功能、治理矿山和土壤污染以及防控环境风险等为主。实现粤北南岭山区生态修复的途径主要有:

(1) 加快推进矿区环境污染综合整治,切实改善周边水土环境质量。以大宝山矿、凡口铅锌矿等矿山作为重点,从源头上预防控制和消除矿山重金属、水污染隐患。

(2) 推进土壤治理修复,建立生态修复示范工程,改善土壤环境质量。启动大宝山新山片区历史遗留民采集中区生态修复示范等工程,推进历史遗留典型地块治理与修复。根据韶关市遗留废弃或无主矿山、采选矿及冶炼点专项调查结果,选择典型地块开展修复示范工程。

(3) 建立土壤污染综合防治先行区,做好先行示范引领。对污染治理修复项目进行分类管理,建立土壤污染修复责任主体认定指引,明确责任主体及责任范围。采用多元投资模式,带动更多社会资本参与土壤环保工程项目建设。鼓励科研院所、高等学校、重点企业等组建土壤先行保护联盟,促进先进技术示范推广。

3 粤北南岭山区典型矿山单元生态恢复的工程技术模式

3.1 典型矿山废弃地单元生态恢复的工程技术模式

粤北南岭山区大宝山矿区在 30 多年的矿产开采过程中,由于长期的非法民采、民选活动形成了废土堆、采矿坑等,严重地破坏了地形地貌景观,滑坡、水土流失等地质灾害问题严重;同时还导致了矿产资源无法综合利用、植被消失、生态毁坏、地下水含水层被破坏与污染等环境问题;裸露废土堆场金属硫化物通过长期的氧化产生大量的重金属及高浓度的硫酸盐,给周边地区造成严重的环境污染。广东省山水林田湖草生态保护修复试点工程强调从源头控制,重点在于水。采用清污分流措施、拦水渠技术,从根本上治理酸性与重金属超标矿水外排的问题。生态保护修复试点工程的难点是废土堆,粤北南岭山区的废土堆是由历史上民采活动导致的,是大宝山矿区最重要的污染源地,土壤侵蚀的过程复杂、部位集中、类型多样、强度剧烈^[9]。废土堆中弃渣弃土堆放,其颗粒大小不均,结构松散,遇到强降雨、大风或重力作用下,容易发生沉陷、滑坡、泥石流等地质灾害,严重威胁生命财产安全。此外,废土堆往往含有硫、重金属等污染物,在降水条件下硫容易氧化并产生酸性水导致重金属不断溶出^[10]。废土堆由于水分条件差、土壤贫瘠、生物活性低,其生态恢复一直是矿区生态修复的重点和难点^[5]。

遵循“‘依山就势’重塑地形、‘因势利导’疏导水流、‘柔性防护’稳定边坡”的山水林田湖草系统共治原则,开展粤北南岭山区废土堆生态修复工程设计。根据粤北南岭山区新山片区历史遗留矿山生态恢复治理示范区中废土堆的特征,确定其修复技术模式为原状基质改良-直接立体植被配置。综合考虑平台、排水沟以及施工需要,对示范区域进行分区,最终获得 6 个区(图 1 和表 1)。根据示范需求和研发的技术类型,结合不同

分区 pH,以及实际工程施工及原状情况分区采取不同的修复技术模式和参数。通过生态修复达到以下标准:建立免维护、不退化的植被系统,植被覆盖率达到 90%以上、植物品种达到 7 种以上;严控土壤酸化,减少土壤中铅镉等主要重金属污染排放,土壤中重金属有效态含量降低 50%。



图 1 废土堆工程分区与工程技术模式

Fig.1 Engineering zoning and engineering technology model of waste soil pile

表 1 不同分区的生态修复技术组合

Table 1 Combination of eco-remediation technologies in different regions

生态修复技术 Ecological restoration technology		分区 I Zone I	分区 II Zone II	分区 III Zone III	分区 IV Zone IV	分区 V Zone V	分区 VI Zone VI
地貌重塑 Landform reconstruction	场地修整	•	•	•	•	•	•
	生态袋	•	•	•	•	•	•
	清污分流	•	•	•	•	•	•
土壤重构 Soil reconstruction	土壤培肥改良无机肥	•	•	•	•	•	•
	微生物肥	•		•	•	•	•
	土壤调理剂	•	•	•	•	•	•
污染防控	零价铁负载生物炭	•		•	•	•	•
	生石灰	•	•	•	•	•	•
	马尾松	•	•	•	•	•	•
植被设置 Vegetation establishment	樟树		•	•	•		•
	大叶女贞			•		•	
	泡桐	•	•		•		•
灌木	苎麻	•		•	•	•	•
	红麻		•	•	•		•
	狗牙根	•	•			•	
草本	高羊茅		•	•			
	铺地黍				•		•
	百喜草		•	•	•		
	象草	•			•	•	
	纤毛鸭嘴草		•	•	•		•
	芒萁	•		•	•	•	•
	五节芒		•	•		•	

3.2 典型矿山废弃地单元生态恢复的关键技术

3.2.1 场地平整

根据区域水文、地质、气候环境条件,结合边坡地形地貌特点、排水沟设置,原位整地。在确保施工安全的前提下,不大动土方,结合施工道路修建及场地排水沟设置需要,进行适当的地形整理;对于边坡而言,适当进行削坡降级,构筑缓冲平台;边坡修整优先采用人工“之”字道路及放射状条沟作业,辅助修坡,坡面修整只要能满足人工种植操作需要即可,尽量减少机械施工对坡体的负荷压力^[11]。

由于无系统的截排水系统,受降雨及周围山水等因素影响,导致坡面部分区域出现冲沟,结合场地整理对沟谷进行就近挖方填方,适当回填并机械碾压;大型泥石流冲沟就地取土填充生态袋安息角 40°垒砌叠坎,采用生态袋就近填充坡面形成的松散土体来构筑沟谷两侧生态袋墙,柔性拦截坡面冲刷体,模拟自然山体、自然沟壑进行修整,并设置生态袋拦挡坝来防止松散土体冲刷至下部区域,保持边坡稳定性,以消除滑坡或泥石流地质灾害隐患。

3.2.2 清污分流

根据地形地貌、地质结构合理修筑截洪沟,将地表径流合理有序地导出;对泥石流的水源进行调节和分流,对形成泥石流的固体物源进行稳固,对泥石流在冲沟中的运动进行控制和消能。采用清污分流措施,在平台处修建清污分流排水沟,并提出 3 种排水沟设计(图 2)。素混凝土水沟伸缩缝最大间距为 10 m,缝宽为 20 mm,缝内填塞涂沥青木丝板;水沟下部土方均需压实,防止雨水渗流导致水底沟掏空,造成水沟破坏;可以根据现场地形,适当调整梯形沟侧壁的斜坡率。

3.2.3 土壤改良

根据土壤检测分析结果适时适地选择配方。对于强酸性、高度产酸的样点区域,在施工过程中可采取浅层隔离或多次补给改良材料的方式,在后期维护过程中也应特别注意对这些点位进行观察,避免返酸现象的发生。在实际中,可以通过快速调节 pH、添加有机物改变氧化还原环境以抑制产酸微生物生长以及添加微生物菌剂等一系列手段来改善土壤的理化性质^[12]。

对废土堆进行简单修整,无需覆土,既能避免二次环境损毁,亦可减少成本。修整后施加无机肥、微生物肥、土壤调理剂、零价铁负载生物炭(固化、稳定)和生石灰等,进行原状土壤基质的改良(图 2),具体常规施量如下:无机肥 10500 kg/hm²;微生物肥 2250 kg/hm²;土壤调理剂(天然的石灰石、白云石、含钾页岩)5 g/m²;零价铁负载生物炭 2—3 g/100 g 土;生石灰 30000 kg/hm²;土壤改良基质 120000 kg/hm²。

3.2.4 边坡生态袋植生

生态袋是一种由聚丙烯为原材料制成的袋子,近些年主要运用于边坡防护绿化,如荒山矿山修复、高速公路边坡绿化、河岸护坡等^[6],其主要特点为耐腐蚀性强、微生物难分解、易于植物生长、抗紫外线、使用寿命长^[13]。生态袋植生步骤依次是坡面初步改良、生态袋准备与安装、铺草皮、挖穴种植营养袋植物、再覆盖土壤种子库、撒播草种、覆盖遮荫等。

(1)坡面修整、清理。破碎的边坡应作加固处理;做到坡面整洁,坡面的松石、不稳定的土体要固定或清除;锐角物体要磨成钝角以免划破生态袋表面;坡面如有涌泉和浸水,则要做好导水盲沟。除了要保留的植被外,其他的植物要连根清理干净;坡顶要考虑截水沟,中间平台、坡角设排水沟。

(2)生态袋准备与安装。生态袋铺设前,将区域内废弃土及混合改良基质、保水剂、生长剂等一些微生物菌剂、谷壳锯末等植物纤维材料掺合料转运至坡顶平台,混合堆沤成植生土。生态袋安装时应首先挂线,按设计距离 0.8 m 纵横挂线,纵横线之间的交点即为所有锚杆钻孔点。顺边坡放下未装植生土的生态袋,然后在边坡顶部填装植生土,当填充土至锚孔附近时,根据锚孔位置进行锚杆锚固,锚杆在边坡外保留一定长度,继续填充植生土,填充完生态袋后,锚杆打入设计的深度。对土质边坡可待生态袋填充布设好后再按设计间距和位置直接钉入锚杆锚固。生态袋应填充饱满(厚度约 23—25 cm),填充安装后的袋体厚度、宽度应大体一致,大面平整、线形顺直、连接紧固(图 2)。

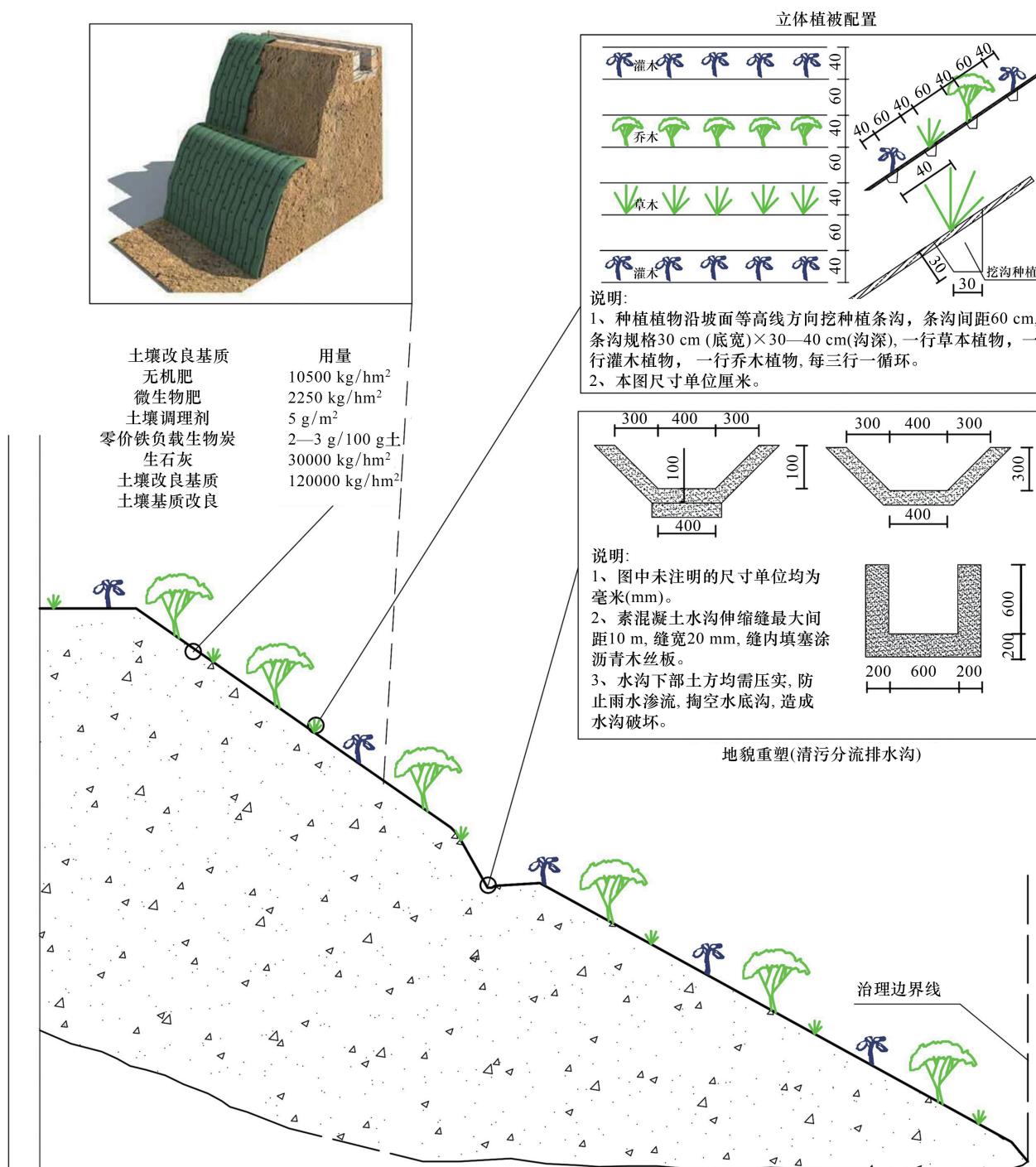


图2 典型矿山废弃地修复技术图

Fig.2 Restoration technology map of typical mine wasteland

3.2.5 立体植被配置

矿区废土堆植被的自然恢复相当缓慢。矿区植被恢复与重建工程可通过以下途径实现:第一,主要通过人为改善立地条件,使废土堆基本适应植物生长。第二,根据立地条件,选择引种对各种限制因子有耐力、能固土、固氮、根系发达、根蘖性强、枝叶繁茂、能长时间覆盖地面,有效地阻止风蚀和水蚀。第三,优先选择乡土品种,播种栽培较容易、种子发芽力强、苗期抗逆性强、易成活的植物^[14-15]。物种选择的依据:1)具有优良的水土保持作用;2)具有较强的适应脆弱环境和抗逆境的能力;3)生活能力强,有固氮能力,能形成稳定的植被

群落;4)根系发达,能形成网状根固持土壤;5)播种或栽培较容易,成活率高并兼顾森林景观提升。植物种植方案主要采取种、播相结合,营养袋苗种植+撒播种子的方法,形成“先锋植物、长期定居植物、短期植物、四季植物更替”的人工群落系统。实行草灌相结合,尽快形成能够覆盖表层土壤的植物群落^[16-18]。

根据上述物种选择原则,结合当地的气象气候条件,以及《造林技术规程》(GB/T 15776—2016)^[19]、《生态公益林建设 技术规程》(GB/T 18337.3—2001)^[20],选择造林树种主要为马尾松、胡枝子、盐肤木、紫穗槐;草种主要以豆科草类为主,目的是利用豆科作物的固氮能力,改良土壤,主要选择大叶草、狗牙根。废土堆采用“乔-灌-草”立体配置模式,乔灌木栽植密度约为 2 株/m²,乔木、灌木、草本比例为 1: 3:1,草种播种标准为 50 g/m²。植被类型选择马尾松、樟树、大叶女贞、泡桐、苎麻、红麻、狗牙根等。具体施工时,按照不同植物地上地下部分的分层布局,充分利用多层次空间生态位,保证整个植被体系的稳定性。种植植物沿坡面等高线方向挖种植条沟,条沟间距为 60 cm,条沟规格为 30 cm(底宽)× 30—40 cm(沟深),一行草本植物,一行灌木植物,一行乔木植物,每三行一个循环(图 2)。

4 矿山修复生态效益预评估

国外学者针对矿山废弃地修复生态效益已陆续开展了研究^[21-27]。Costanza 等提出了市场价格法和替代成本法,成为国际上生态系统价值评估研究的重要里程碑^[21];而以 Pearce 等为代表的环境经济学派,认为支付意愿是评估生态效益经济价值的恰当的计量方法^[22];国际生态协会从生态恢复的结构与功能自我维持、生态系统抗干扰能力及与相邻生态系统的有物质能量的交流 3 个方面提出了评价生态恢复质量的 9 个特征指标^[23]。20 世纪 60 年代开始,我国相继在东北、四川等地开展了生态效益定位与计量研究,并对生态效益进行评价^[24-25],生态修复带来的生态效益主要表现在涵养水源、保持水土、净化环境及净化水质的生态效益等方面^[26-27]。针对山水林田湖草生态修复试点框架下矿山生态修复特点,建立矿山修复生态效益评估模型,并以废土堆为例,进行案例研究。

4.1 矿山修复生态效益评估模型

4.1.1 涵养水源效益评估

采用地下径流增长法对废土堆生态修复后可产生的涵养水源效益进行评价^[28]。

$$Q = \sum (S_i \times J \times R \times C_i) \quad (1)$$

式中, Q 为植被生态系统与裸地相比较涵养水分的增加量(m³/a); S_i 为第 i 种类型林草地的面积(hm²); J 为评价区的年均降雨量(mm); R 为不同区域的侵蚀性降雨比例(本文取 0.6); C_i 为林草生态系统与裸地比较减少径流的效益系数。阔叶林、针叶林、竹林、灌丛(含草地)与疏林等不同植被的减少径流的效益系数分别为 0.39、0.36、0.22、0.16^[29-30]。

采用影子工程法对森林植被涵养水源的效益进行价值评价,计算出涵养水源的经济价值。

$$V = Q \times P \quad (2)$$

式中, V 为年涵养水源的经济价值(元/a); Q 为涵养水源的总量(m³/a); P 为单位蓄水费用(0.67 元/m³)。

4.1.2 保持水土效益评估

采用有、无植被的土壤侵蚀差异量来计算减少土壤侵蚀量。

$$W = \sum S_i \times T_i \quad (3)$$

式中, W 为植被减少土壤侵蚀量(t/a); S_i 为第 i 种类型植被的面积(hm²); T_i 为第 i 种类型植被的单位土壤保持量(t hm⁻² a⁻¹)。幼林、成林、经济林、灌丛(含草地)与疏林和其他单位土壤保持量分别是 3.59、5.24、4.41、4.83、2.96 t hm⁻² a⁻¹^[29-30]。

根据我国 1 m³库容的水库工程费用计算减少泥沙淤积的经济价值,从而估算水土保持的经济价值。

$$E = W \times P_{\text{水}} \quad (4)$$

式中, E 为植被保持水土的经济价值 (元/a); W 为植被水土保持的总量 (t/a); $P_{\text{水}}$ 为单位蓄水费用 (0.67 元/ m^3)^[31]。

4.1.3 净化环境效益评价

以生态修复后植被对阻滞空气粉尘污染物的生态效益进行评价来计算净化环境效益。

$$Y = \sum S_i \times C_i \quad (5)$$

式中, Y 为植被阻滞粉尘的量 (t/a); S_i 为第 i 类植被类型的面积 (hm^2); C_i 为第 i 类植被阻滞粉尘的能力 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)。阔叶林、针叶林阻滞粉尘的能力分别是 $10.11 \text{ t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $33.20 \text{ t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ^[32]。

采用影子工程法对植被净化环境的效益作价值评价,用削减粉尘的平均单位治理费用来评估净化粉尘的价值,计算出净化环境的经济价值。

$$M = m \times Y \quad (6)$$

式中, M 为净化粉尘的经济价值 (元/a); m 为单位除尘运行成本 (170 元/t); Y 为植被阻滞粉尘的量 (t/a)。

4.1.4 净化水质效益评估

采用影子工程法计算改善水质效益。

$$N = Q \times P \quad (7)$$

式中, N 为改善水质的价值 (元/a); Q 为涵养水源的总量 (m^3/a); P 为净化水质的价格 (1.00 元/ m^3)^[30]。

4.2 废土堆修复后生态效益预评估

基于以上方法,对废土堆生态修复后的生态效益进行预评估。该区域废土堆总生态恢复面积为 8 hm^2 ,采用立体植被配置,扣除相关配套设施用地,预计修复为阔叶林、针叶林和灌丛、疏林(含草本)面积全部为 7.5 hm^2 ,其中阔叶林中预测幼林面积为 5 hm^2 ,成林面积为 2.5 hm^2 。

通过工程及技术修复,预计效果为废土堆涵养水源量为 $6879.60 \text{ m}^3/\text{a}$,减少土壤侵蚀量为 67.28 t/a ,阻滞粉尘能力为 324.83 t/a 。采用影子工程法计算涵养水源、保持水土、净化环境、净化水质间接带来的经济价值分别为 4609.33 元/a 、 45.07 元/a 、 55220.25 元/a 、 6879.60 元/a ,可得废土堆生态修复工程生态效益总价值为 66754.25 元/a (表 2)。

表 2 废土堆生态修复工程生态效益估算

Table 2 Estimation of ecological benefit of waste soil pile ecological restoration project

评估模块 Evaluation modules	生态量指标 Index of ecological quantity	生态量 Ecological quantity	效益/(元/a) Benefit
涵养水源效益 Benefits of water conservation	涵养水源量 (m^3/a)	6879.60	4609.33
保持水土效益 Benefits of soil and water conservation	植被减少土壤侵蚀量 (t/a)	67.28	45.07
净化环境效益 Benefits of environmental purification	阻滞粉尘量 (t/a)	324.83	55220.25
净化水质效益 Benefits of water quality purification	—	—	6879.60
总计 Total/(元/a)		66754.25	

5 结论与讨论

以粤北南岭山区为研究对象,重点开展山水林田湖草生态保护修复试点框架下的粤北南岭山区典型矿山废弃地单元生态修复技术模式和效益预评估研究。

(1) 粤北南岭山区生态环境整体良好,但由于开采活动频繁,仍存在一些生态环境问题,主要表现为矿山植被破坏和水土流失问题突出、地质灾害风险隐患较大和矿山周边水土污染严重。应以恢复生态系统功能为主体,开展针对土壤和水体污染的综合整治修复技术,切实改善土壤和水体环境。

(2) 通过对典型矿山废弃地单元生态恢复工程技术模式的研究,确定废土堆为原状基质改良-直接立体植

被配置的修复模式,同时提出了场地平整、清污分流、土壤改良等典型矿山生态恢复关键技术。

(3) 针对山水林田湖草生态修复试点框架下矿山生态修复特点,从涵养水源、保持水土、净化环境、净化水质 4 个方面构建了矿山修复生态效益评估模型,通过对废土堆修复生态效益预评估可知,该区域废土堆总生态恢复面积将达到为 8 hm^2 ,生态修复工程生态效益总价值预计为 66754.25 元/a,其中净化环境收益最高为 55220.25 元/a。

(4) 当前矿山生态修复局限于单个矿区^[8-11],较少考虑各环境要素之间的系统协调性,不同区域生态环境问题差异较大,导致其修复的技术模式针对性不强,尚不能全面得解决生态环境问题。故从“山水林田湖草”生命共同体角度,探索基于“整体保护、系统修复、综合治理”的矿区生态系统恢复重建理论、方法与途径是关键一步。本文开展的生态恢复效益评价重点关注废土堆,内容上侧重于植被恢复效益,如何在山水林田湖草生态修复系统治理框架下综合考虑水土污染修复等难以量化生态环境指标,建立更加全面的生态效益评估体系,开展系统全要素综合评价是今后研究的重点方向。

参考文献 (References):

- [1] 董文龙,白涛,杨旭,尹晓蛟. 矿区生态修复研究. 环境科学与管理, 2016, 41(1): 146-148.
- [2] 邹长新,王燕,王文林,徐德琳,林乃峰,李文静. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 961-967.
- [3] 成金华,尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2): 1-6.
- [4] 丘英华,吴林芳,廖凌娟,曹洪麟. 广东大宝山矿区周边植被现状及矿区植被恢复重建. 广东林业科技, 2010, 26(5): 22-27.
- [5] 王金满,郭凌俐,白中科,杨睿璇,张萌. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223-232.
- [6] 珊丹,何京丽,刘艳萍,梁占岐,荣浩. 草原矿区排土场恢复重建人工植被变化. 生态科学, 2017, 36(2): 57-62.
- [7] 林初夏,黄少伟,童晓立,卢文洲,谭志远,吴永贵,聂呈荣,徐颂军. 大宝山矿水外排的环境影响: III. 综合治理对策. 生态环境, 2005, 14(2): 173-177.
- [8] Naicker K, Cukrowska E, McCarthy T S. Acid mine drainage arising from gold mining activity in Johannesburg, South Africa and environs. Environmental Pollution, 2003, 122(1): 29-40.
- [9] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. Chemosphere, 2003, 50(6): 775-780.
- [10] 刘云浪,刘先国. 攀西钒钛磁铁矿排土场生态修复调查研究: 以四川攀枝花市红格矿山为例. 地质科技情报, 2018, 37(6): 258-265.
- [11] 陈波. 矿山排土场生态恢复实践——以德兴铜矿水龙山为例. 江西建材, 2017, (22): 278-279.
- [12] 向慧昌,廖伯营,丁凤玲,李燕晓,闫彬彬. 大宝山矿区生态恢复的基本思路与途径. 安徽农业通报, 2013, 19(22): 80-81, 107-107.
- [13] 孙小杰,张辉,杜绍伟. 高陡岩石边坡软体护坡技术设计及施工实践. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 78-81.
- [14] 谭文雄. 广东矿区生态环境问题及生态恢复的探讨. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2008, 21(4): 1-2.
- [15] 曾辉. 试谈矿山生态治理中植被的选择与配置. 防护林科技, 2013, (3): 37-37, 53-53.
- [16] 谷金锋,蔡体久,肖洋,李长江,沈涛. 工矿区废弃地的植被恢复. 东北林业大学学报, 2004, 32(3): 19-22.
- [17] Izquierdo I, Caravaca F, Alguacil M M, Hernández G, Roldán A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 3-10.
- [18] 陈影,张利,董加强,赵文廷. 废弃矿山边坡生态修复中植物群落配置设计——以太行山北段为例. 水土保持研究, 2014, 21(4): 154-157, 162-162.
- [19] 国家林业局. GB/T 15776—2016 造林技术规程. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [20] 国家质量技术监督局. GB/T 18337.3—2001 生态公益林建设 技术规程. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [21] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [22] Pearce D. Auditing the earth: the value of the world's ecosystem services and natural capital. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 1998, 40(2): 23-28.
- [23] Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. The SER International Primer on Ecological Restoration. Tucson, Arizona: Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004.
- [24] 何利平. 森林生态效益评价研究存在的问题与建议. 山西科技, 2006, (5): 75-76, 78-78.
- [25] 周湘山. 四川省洪雅县退耕还林工程生态效益评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [26] 关军洪,郝培尧,董丽,李雄. 矿山废弃地生态修复研究进展. 生态科学, 2017, 36(2): 193-200.
- [27] 李芬,李妍菁,赖玉珮. 城市矿山修复生态效益评估研究. 环境保护, 2018, 46(2): 55-58.
- [28] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [29] 郗才涛. 淳安县生态公益林的环境效益研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [30] 王晶晶. 磷矿山废弃地生态修复的生态效益评价[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014.
- [31] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,陈丽华,饶良懿,陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. 生态学报, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [32] 赵阳. 典型矿山生态恢复效果与生态效益评价——以焦作缝山公园为例[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.