

矿山生态修复技术体系构建

卢誉之¹, 陈银萍¹, 曹 渤¹, 李玉强²

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070;
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

摘要: 无序的矿山开采作业会破坏矿山区域土壤结构, 造成水土流失, 使植被生长、水资源、大气环境和人类生命活动受到严重的威胁。因此, 矿山废弃地的生态保护和修复管理极为重要。通过查阅文献, 分析了矿山废弃地的各类生态问题, 以土壤和植被为主要生态要素归纳了物理性、化学性和生物性三大类矿山生态修复核心技术, 并针对目前已有矿山生态修复技术体系的不足, 从降低灾害发生风险、矿山生态修复技术选择和景观生态重建3个方面入手, 构建出一套适用于我国实际的生态修复技术体系, 主要包括风险预警技术、土地重建防固技术、土壤基质改良技术、水资源重建技术、植被生态恢复技术和景观生态养护技术6个方面, 旨在为生态修复技术的筛选和优化提供更多的科学参考, 为提高矿山生态修复效率和解决矿山区域水土流失等问题提供更有力的技术支撑。

关键词: 矿山废弃地; 生态修复技术; 修复思路; 体系构建

中图分类号: X53

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202307049

Construction of technique system for mine ecological restoration

LU Yuzhi¹, CHEN Yinping¹, CAO Bo¹, LI Yuqiang²

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Unregulated mining operations can lead to the disruption of soil structure in mining areas, resulting in soil erosion and posing significant threats to vegetation, water resources, atmospheric conditions, and human livelihoods. Consequently, the importance of ecological conservation and restoration management for abandoned mining sites is underscored. A comprehensive literature review was conducted, and various ecological issues associated with mining wastelands were analyzed. Core ecological restoration techniques can be categorized into 3 major classes, primarily addressing soil and vegetation, encompassing physical, chemical, and biological aspects. In response to the prevailing inadequacies in the existing mining ecological restoration technology framework, particular attention was given to three key areas: risk mitigation, the selection of mining ecological restoration techniques, and landscape ecological reconstruction. A comprehensive ecological restoration technology system suitable for the practical implementation in China was formulated, including risk assessment technologies, land reclamation and stabilization, soil matrix improvement, water resource restoration, vegetation ecological recovery, and landscape ecological maintenance. This paper could provide a scientific basis for the selection and refinement of ecological restoration techniques, and offer a robust technical support for the enhancement of mining ecological restoration efficiency and the resolution of issues such as soil erosion in mining regions.

Keywords: mine wasteland; core technology of ecological restoration; ideas for restoration; system construction

CLC number: X53

矿业在经济增长和科学发展的过程中起着重要的支撑作用, 人们生活质量的提升源于对矿物资源的高使用率。在早期矿产资源开采时, 由于没有较明确的开采规定和开采后续生态保护工作, 矿山

的生态系统遭到了严重的损害^[1], 破坏了土壤中的养分循环和植被生长^[2], 造成了周围耕地农业经济损失; 期间产生的废水通过土壤孔隙下渗至地下水中造成重金属污染, 随后流入农田、河流和海洋中,

收稿日期: 2023-07-23

录用日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260316); 国家自然科学基金项目(31971466)

作者简介: 卢誉之(2000—), 女, 硕士研究生。研究方向: 污染生态学。E-mail: lyz1720149102@163.com

通信作者: 陈银萍(1974—), 女, 博士、教授、硕导。研究方向: 污染生态学。E-mail: yinpch@mail.lzjtu.cn

引用格式: 卢誉之, 陈银萍, 曹 渤, 等. 矿山生态修复技术体系构建[J]. 环境保护科学, 2023, 49(5): 41-50.

通过食物链对人类造成不可逆的损害,阻碍社会可持续发展^[3-4]。因此,矿山废弃地的生态修复工作至关重要。

欧美发达国家对矿山生态修复的研究有着悠久的历史。美国在 1977 年制定的《地表采矿控制和复垦法》(SMCRA)中要求在申请煤炭开采许可证时必须要有有效的恢复计划,以规范煤炭开采对环境的影响,使得采矿业在确保矿区环境得到有效治理的同时实现了长期发展^[5],时隔 3 年,美国又颁布了《环境应对、赔偿和责任综合法》,也称《超级基金法》,全面的为环境修复工作提供了有力的支持。20 世纪 70 年代以来,美国的矿山修复率达 70% 左右^[6]。德国也颁布了《德国矿产资源法》《联邦矿产法等法规,对政府管理、监督措施、审批程序和处罚制度等全方面做出严格规定^[7]。国外针对不同性质的矿山生态问题采用了相对应的修复方法,如土壤改良剂法、生物反应器技术^[8]、客土回填^[9]、植生袋修复^[10]等。除了应用单一的修复技术外,也常将多种修复技术联合应用,例如土壤改良固化剂与喷播技术联合、客土回填与阻隔墙法联合^[8]等。SPANIDIS et al^[11]提出了一种多准则方法(MCDM),这一方法是将层次分析法(AHP)和恢复方案排序技术(TOPSIS)结合起来,便于改进生态恢复方案和选择最优方案。以褐煤矿区的生态修复及管理等问题为例,作者应用此方法提出了 3 种不同层次的修复方案,分别是技术式修复、自然演替式修复和组合式修复,使得褐煤矿区风险因子有更全面客观的评价,很大程度上提高了所选择生态修复技术的客观性和可靠性。

近年来,我国也相继出台了关于矿山生态修复的政策。2009 年发布并实施了《矿山地质环境保护规定》[国土资源部令第 44 号]^[12],首次把矿区地面坍塌、含水层破坏和地貌景观破坏等问题纳入保护规定,而在 2019 年该规定进行修订后,将落实地质灾害恢复治理方案和土地复垦方案的合并作为新的重点。2011 年,发布了《矿山地质环境保护与恢复治理方案编制规范: DZ/T0223—2011》^[13],该标准增强了专业性并规范了各类要求。2016 年,发布了《土壤污染防治行动计划》[国发(2016)31 号]^[14],提出并实施了政府、企业和社会相辅相成的土壤污染防治体系。同年,还发布了《关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见》^[15]。2019 年,发

布了《关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》[自然资规(2019)6 号]^[16],激励了社会资本投入^[17]。2021 年,最新发布的《国务院办公厅关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见》提出对历史遗留矿山严重问题开展合理修复^[18],可知,我国系统的、综合的修复理念在进一步加强。除此之外,我国还提出了很多矿山生态修复技术,如“堆状地面”土壤重构法^[19]、三维网植草防护技术^[20]、“草-灌-乔”多效联合种植复垦模式^[21]和稳定化修复技术^[22]等。我国最经典的修复体系为边坡防护、土壤防护和植被绿化^[23]。耿侃^[24]将陡峭创面生态修复技术体系总结为安全监测技术、坡体加固技术、喷附基质技术、植生袋修复技术、人工土壤技术和植被养护技术;徐飞等^[25]将露天矿山生态修复技术总结为六类,分别是地形重建技术、固定土壤技术、土体安全防范技术、截排集蓄水技术、绿化重建和养护恢复技术。WU^[26]分析了矿山地质环境现状和存在的问题,采用了 5 种修复模式:浮动平台修复模式、挡墙蓄土修复模式、客土喷播修复模式、乔灌种植修复模式和生态草毯修复模式,同时使用层次分析法和模糊综合评价法,总结出了一套生态综合评价体系,分析发现利用该生态综合评价体系,可以有效恢复矿区生态系统,并大大提高了生物多样性。这些政策的实施和技术的提出,推动了我国矿山生态修复技术研究的快速发展,截至 2020 年底,我国已修复废弃矿山面积 90 万 hm^2 ,修复率约 30%^[27],但仍低于澳大利亚、德国和英国等发达国家 80% 左右的矿山生态修复率^[28]。

通过对比国内外相关法律法规和修复技术可知,我国在矿山修复技术应用和规划实施这 2 个方面尚有欠缺,是因为我国矿区废弃地存在的问题复杂繁多,治理重点多为土地复垦,导致生态修复技术水平较弱^[29];许多矿山并没有将水污染治理作为重点;开采活动产生的固体废渣也没有采取合理的措施回收再利用^[30];还缺少对特色矿区景观的美学改造思维^[31]。所以缺乏一套可以将多种生态修复技术优化集合成的全面且成熟的生态修复技术体系,使得在实际应用的过程中,生态修复技术可以变得更高效。

我国废弃矿区的主要生态特征是地灾风险高、水土流失严重和地形地貌破坏,因此矿山生态修复的根本目的是将其被破坏的生态系统恢复和重建,

以改善矿区人民的生活环境和可持续发展^[25,32]。文章通过总结归纳的方法,将土地恢复利用和景观绿化重建作为主要修复目标,以废弃矿山特征为基础理论,梳理了矿山废弃地生态修复思路,进而总结构建出一套适用于我国各类矿山生态破坏和环境污染等问题的生态修复技术体系,为生态修复技术的优化、筛选和应用提供理论依据,为更大程度修复我国矿山废弃地生态破坏和环境污染问题提供客观帮助。

1 矿山生态修复技术

矿山生态修复技术可以根据每个技术的性质分为三大类,分别是物理性修复技术、化学性修复技术以及生物性修复技术,见表1。矿山生态破坏和环境污染问题涉及多个生态要素,如土壤、植物、水资源和大气等。其中土壤是矿山开采过程中最容易被破坏的一个生态要素。开采矿山时,机器通过破坏山体表层土壤和深层挖掘作业,导致矿山地貌产生较大改变,矿山废弃地的土壤和含水层结构遭到破坏,造成了土壤环境的生态失衡,土壤中养分元素大量流失,使得植被自愈能力损失,此外还包括有色金属矿山废弃地产生的重金属污染。由此可见,矿山废弃地的土壤修复是其他生态因素修复的前提^[33]。

1.1 矿山地表土壤修复

1.1.1 物理性修复技术 常用矿山地表土壤的物理性修复技术包括碎石废土转移回填、客土填充法、隔离法和电动力学法。

(1)碎石废土转移回填是指在矿山开采作业前,先将表层及亚层的土壤移除进行密封保存,等到开采作业全部完成后将其填埋回原地。在此过程中,尽管表层、亚层土壤结构已遭到破坏,但土壤中所含的养分和植物种子得以保存,使得这部分地区植被恢复能力依旧保持稳定且高效,但此种方法只适用于即将开采的新矿山和新建的废弃矿渣场^[32-33]。欧洲许多国家应用了这项技术,其研究结果表明,在采用碎石废土转移回填的地区,修复效果较好,反之,生物多样性和生态修复速度明显较慢^[9]。

(2)耕植土回填法是指在表面覆盖一层未受污染且适合植物生长的耕植土,不仅可以起到固定尾矿和防止自然灾害的作用,而且还可以为植物生长

创造条件,从而达到修复土壤的目的,但此方法所需土壤量和成本都较大。文献[38]研究表明,覆盖土厚度为10~15 cm时植被覆盖率能达到良好的效果。

(3)隔离法是指用混凝土、水泥等防渗水性好的材料将污染的土壤与水资源分隔开,以阻止土壤中的污染物转移至周边环境^[21]。通常适用于范围不大,土壤污染严重,存在易迁移和分解的污染物^[39]。

(4)电化学法是指将电极放入有污染的土壤后输入电流,利用电泳、离子交换等方法使污染物在土壤中迁移^[22]。矿山土壤中的金属通常可以起到半导体的作用,在修复过程中电阻引起的电流会不断损耗。因此,在相同的修复时间内,使用脉冲电流对重金属的去除率比使用直流电流更高^[38]。此方法要求土壤的传导性较好,但是此方法能耗损失大,容易受到电极和土壤中其他复杂成分的影响^[22]。

1.1.2 化学性修复技术 化学性修复技术适用于重金属污染系数较大的土壤,但化学反应所产生的新化合物很容易残留至土壤中,与某些原本无污染的化学成分结合后,会形成新的污染物,所以在使用化学性修复技术的同时,需同时使用其他修复技术与之相互补。常用矿山地表土壤的化学性修复技术包括缓解重金属毒性、改性固化抑制法和土壤淋洗法。

(1)缓解重金属毒性是指加入一些特定的金属离子,可以缓解土壤中重金属离子的浓度,从而降低重金属污染的程度。加入 Ca^{2+} 可以有效降低其他重金属离子的浓度,还可以减少植物对污染金属离子的吸收^[1]。KUZNETSOV et al^[40]在森林土壤中加入8~16 t/hm²的沸石,经测量观察发现,可迁移重金属Pb、Ni和Cu的含量有明显的减少。

(2)改性固化抑制法是指使用改性试剂,使土壤中的重金属固化,从而抑制重金属引起的污染问题^[21]。目前常用的稳定剂为石灰、由铁氧化物和铝氧化物构成的赤泥、秸秆和生物炭^[41]。有学者研究表明,在添加硬化剂后,污染物中的重金属离子会与Ca、P、 PO_4^{3-} 、 OH^- 等元素和离子发生络合反应,形成稳定络合物^[10]。

(3)土壤淋洗法是指利用特定的萃取液淋洗土壤来就地清除土壤中的污染物,对淋洗出的萃取液进行回收、重新利用和最终处理处置,此方法适用于高渗透性、土壤颗粒较粗的土壤。REDDY et al^[42]

研究表明,相对于水和表面活性剂等其他萃取液而言,0.2 M 乙二胺四乙酸(EDTA)是最有效的萃取液,其可以淋洗掉工业污染土壤砂中 25% ~ 75% 的 Cu、Zn 和 Pb。

表 1 矿山生态修复核心技术

Table 1 Core technologies for ecological rehabilitation of mines

生态要素	要素类型	分项工程	修复技术	优缺点	适用范围
土壤	物理性修复技术		碎石废土转移回填 ^[29,32]	优点: 较好储存壤养分和种子库 缺点: 成本高、管理难度大	新开采矿山和新建废弃矿渣场
			客土填充法	优点: 固定尾矿、防灾、创造植物生长条件 缺点: 土壤需求量大、成本高	面积较小的修复工程、矿山土层较薄或是缺少土壤
			隔离法 ^[21]	优点: 操作简单、二次污染少 缺点: 使用范围较小	面积不大、土壤污染严重、污染物易迁移和分解的土壤
			电动力学法 ^[21]	优点: 成本低、可控性强 缺点: 能耗大, 易受到电极和土壤杂质的影响	适用于传导性较好的土壤
	地表土壤	化学性修复技术	缓解重金属毒性 ^[1]	优点: 降低土壤中重金属离子浓度 缺点: 存在二次污染的风险	适用于重金属污染系数较大的土壤
			改性固化抑制法 ^[21]	优点: 有效有害成分迁移、提高土壤肥力、见效快 缺点: 存在二次污染的风险	低污染风险区
			土壤淋洗法	优点: 污染物去除效率高、处理速度快并且可以处理多种污染物 缺点: 容易造成二次污染、成本高、破坏土壤结构	适用于高渗透性、土壤颗粒较粗的土壤
	土壤	生物性修复技术	土壤动物修复技术	优点: 提高土壤松散度、提供养分、富集重金属 缺点: 修复周期长	有污染的废弃地中或较为贫瘠的土壤中
			草本植物修复技术	优点: 预防水土流失、提高土壤肥力、固土能力高 缺点: 生长周期长、焚烧处理易产生二次污染、深处污染处理效果差	矿山表面
		物理性修复技术	微生物修复技术	优点: 使烂叶腐化并提供营养物质 缺点: 修复周期较长, 常规工艺菌剂处理效率较低	适用于含有重金属污染的土壤和地下水等环境
锚固法			优点: 支护效果好、施工简单、有利于机械化操作 缺点: 不能防止各锚杆之间裂隙岩石的剥落	斜坡1; 1.00 ~ 1.75和相对破碎岩质边坡, 坡面高度≤ 12 m	
边坡土壤	物理性修复技术	铁网喷洒基质植物	优点: 保持水土、减少扬尘、恢复裸露岩壁 缺点: 后期养护效果受人为干扰影响较大、人工成本较高	较陡峭的边坡	
		坡脚挡土墙绿化法 ^[34-35]	优点: 具有支撑保护和绿化作用 缺点: 成本高、工艺对基础稳定性要求高	松散的跛脚岩土处	
		植被混凝土坡面绿化	优点: 保持水土、涵养水源、恢复裸露岩壁 缺点: 后期养护效果受人为干扰影响较大、人工成本较高	人工基层厚度15 ~ 30 cm且坡面缺少土壤、坡度较缓	
	生物性修复技术	植生袋修复法 ^[35]	优点: 具有防护和绿化的双重作用 缺点: 对材料应用和施工技术要求较高	裸岩边坡并且人工基层厚度8 ~ 10 cm	
		草灌木种植修复法 ^[36]	优点: 植物繁殖快、易存活且可以提供养分 缺点: 灌木生长条件较为严苛, 须保持草本植物间距	较平缓的边坡	
		土壤改良+生态袋联合修复法	优点: 植被生长、土壤酸化和氮元素流失控制较好 缺点: 在普通边坡、未做窗格式混凝土肋的高边坡上不易锚固	稀土矿区土壤	
植物	表层土壤	生态注浆技术 ^[37]	优点: 使表层土壤趋于稳定, 增加防渗性 缺点: 后期容易形成冲沟	块状、土壤孔隙大、较少植物生长的地区	
		植生基材喷附技术 ^[37]	优点: 保存了土壤的抗腐蚀能力和蓄水能力, 并能够提供大量养分 缺点: 基质附着较不稳定	河床滩地和矿山岩石边坡	

1.1.3 生物性修复技术 生物性修复技术可分为动物修复技术、植物修复技术、微生物修复技术和植物—微生物联合修复技术。

(1) 动物修复技术: 矿山地表土壤的动物修复技术主要是利用蚯蚓、蚂蚁、鼯鼠和兔子等土壤动物改变土壤层次结构和松散程度。这些土壤动物

在土壤中的迁移活动起到疏松土壤和增大土壤颗粒相互间隙的作用, 可以将深层土壤的营养物质带向表面土层; 土壤动物会将枯枝烂叶拖入深层土壤空隙较大的地方, 在进食时会在消化道将土壤与枯枝烂叶相融合, 再经排泄将消化物排出, 为土壤提供养分的同时还提高了修复速率^[21]; 土壤动物还具

有富集重金属的能力,对重金属污染的土壤起到了一定的修复作用^[22]。BOYER et al^[43]对蚯蚓进行了一系列试验,经研究发现蚯蚓不仅可以改善土壤的理化性质,还可以降低土壤中重金属离子的浓度。

(2)植物修复技术:常用的一种植物修复技术是在矿山废弃地土壤上种植一些有特质的草本植物。这类草本植物具有生长能力强、耐干旱性强、根系健壮且吸收力好和富集能力强等特点,可以有效防止水土流失和土壤养分的丧失;其固氮作用也可以提高土壤中的肥力和动物的存活率。植物的根系也可以修复土壤重金属污染^[22],但植物体内富集重金属较多后,需及时砍伐后焚烧,但进行焚烧处理后容易产生二次污染。MONTIEL-ROZAS et al^[44]的研究结果表明,在长期受微量元素污染影响的土壤中,地线(*Terram operimentum*)是最适合稳定土壤中污染物的物种,从而减少向茎部的转移,提高根际环境的生化质量。在尾矿库中生长的雀稗草(*Paspalum thunbergii* Kunth ex Steud)能够通过增加叶片中脯氨酸的浓度来减少活性氧化物造成的损害,在受铁矿开采和其他人类活动影响的地区显示出自身提取锌、锰、镍和铬的潜力^[45]。

(3)微生物修复技术:微生物修复技术是指通过微生物的生长和分解等生命活动,可以提高矿山废弃地土壤的养分循环和土壤有机物的积累^[21],可以降解废弃地土壤中的有机污染物,还可以富集重金属元素降低土壤重金属污染的程度,减少土壤污染物对其他环境的危害。微生物对土壤表面的枯枝烂叶有促进腐化作用,这些植物残枝枯叶经微生物分解后形成腐殖质,给土壤提供了大量的营养物质,同时也可促进植物根系对土壤中营养物质和水分的吸收^[26, 46]。BANDYOPADHYAY et al^[47]提出, β -葡萄糖苷酶在细胞降解的催化反应中发挥到重要作用,并通过释放出的葡萄糖作为能量来源以维持土壤中微生物生物量的代谢活性。

(4)植物-微生物联合修复技术:植物-微生物联合修复技术是目前一种较新且高效的生态修复技术,它是将单一植物与特殊的微生物联合起来,从而促进植物吸收营养,增强植物抗逆性,增强植物的修复能力。两者在技术层面上协同互补的同时极大程度的强化了修复效果,缩短了一定的修复时间。该技术常用于修复矿区废弃地重金属污染。

WU et al^[48]对超积累镉植物——东南景天(*Sedum alfredii*)分别进行了接种或不接种促进植物生长菌(PGPB)荧光假单胞菌,实验结果表明,PGPB 荧光假单胞菌改变了东南景天植物体内的吡啶乙酸等化学物质的浓度,促使其侧根生长,提高了吸附积累镉的效率。亦有研究表明,在银合欢(*Leucaena glauca*)根际接种根瘤菌可以有效促进根基周围固氮根瘤菌的生成,对银合欢根部生长起到刺激作用。而在钼(Mo)污染的土壤中接种根瘤菌,也可以促进对 Mo 的吸收,有效减少土壤中 Mo 浓度,达到修复的效果^[49]。

1.2 矿山边坡土壤修复

常用的边坡土壤修复技术包括坡度比法、锚固法、铁网喷洒基质植物法、坡脚挡土墙绿化法和土壤改良+生态袋联合修复法。

(1)坡度比法是指对坡面高度不超过 12 m 矿山边坡,通过挖掘、填充和装置安全平台控制矿山坡面的高度和坡度,使矿山坡面保持稳定,不易发生坍塌、滑坡等地质灾害的技术^[49]。

(2)锚固法是指利用锚杆将矿山边坡的张力传递到另一稳固的土壤层中,以避免滑坡、坍塌等地质灾害的发生,常用于稳定高陡边坡土壤^[34]。

(3)铁网喷播基质植物法是指在坡面上铺挂一定大小参数的包塑镀锌铁丝网,固定完成后可以使包塑镀锌铁丝网与土壤基面形成一体。第一次先喷洒 12 cm 以上的植物基质,第二次再喷洒 2 cm 以上的植物种子和营养物质。该方法适用于较陡峭的边坡。有学者通过将镀锌铁丝网与植物喷播技术相结合,对裸露高陡岩壁进行修复后,再采用喷灌技术对其进行养护,达到了较好的生态修复效果^[50]。

(4)坡脚挡土墙绿化法是指在松散的坡脚岩土处用混凝土砌成挡土墙,可以对周围环境起到非常重要的支撑保护作用。在挡土墙内的土壤中种植植物,也可起到绿化的作用^[34, 47]。

(5)土壤改良+生态袋联合修复法是将天然碱性材料沸石、石灰、凹凸棒粘土与有机肥按一定比例加入土壤中,调节土壤 pH、提高固定和利用氮氮效率,以此来改良土壤基质。再将改良后的土壤装入生态袋中,放置成稳定的生态边坡。随后将草灌类植物种子人工喷播在生态袋表面,这些植物种子可以在改良后的土壤中存活,并且长势良好,达到了恢复矿山边坡植被生长修复的目的^[51-52]。

目前我国使用的矿山坡面植物修复技术包括植生袋修复法、植被混凝土坡面绿化、草灌木种植修复法。

(1)植生袋修复法适用于人工基层厚度 15~30 cm 且坡面缺少土壤、坡度不是很陡的条件下,先对矿山边坡坡面土层清理平整和压实,将装有植被恢复基材的植生袋整齐放入需要修复的土壤区域,经浇水培养,实现对该区域的生态修复^[35]。RONG et al^[10] 研究发现,植生袋有效减缓了地表内的径流流动,增加了入渗径流流量,对坡面土壤起到了一定的固结作用,很大程度上减少了土壤水分侵蚀。

(2)植被混凝土坡面绿化是利用特定混合比例制定的混凝土和植物种子配方,将客土、有机物、腐殖质、水泥和存水剂等基材混匀,浇于矿山边坡坡面,使其达到防护和绿化的双重效果^[5],该方法适用于裸岩边坡并且人工基层厚度 8~10 cm,并且该技术对于材料应用和施工技术要求较高,不适用于较大面积的矿山生态修复。

(3)草灌木修复种植法是在矿山边坡坡面种植草本植物,因其具有繁殖快,易存活等特点,能在较短时间内浅层绿化坡面,草灌木植物的生长代谢过程中也会对土壤中的污染物质起到修复的作用。草本植物种植适用于干旱草原和较陡峭的矿山边坡。随着群落演替,草本植物会被灌木植物取代,草本植物的残根枯叶给灌木植物生长提供了大量的养分。又因灌木植物的根系比草本植物的根系更为坚韧,对边坡能起到更好的防护作用,灌木植物的种植修复适用于较平缓的边坡^[36]。

1.3 矿山植被修复

常见的矿山植被修复技术有生态注浆技术和植生基材喷附技术。生态注浆技术是在空隙大、坚硬、无植物生存的表层土壤,按科学的比例配置土壤、植被基材和水后,对表层土壤进行注浆作业,这些物质可以使表层土壤趋于稳定,使其防渗透性能好,较大程度上保存了土壤中的水分跟养料,以供植物生长。此方法适用于块状、土壤空隙大和有较少植物生长的地区^[37]。

植生基材喷附技术是用由存水剂、胶合剂、腐殖质和土壤改良等基质材料混合而成的植物生态基质材料,喷洒在缺乏肥力且植物不易生长的土壤中,较大程度保存了土壤中的抗腐蚀能力和蓄水能

力,为植物生长提供了大量的养分条件。这些基质材料也可以与挂网技术综合使用。该技术适用于河床滩地和矿山岩石边坡等范围内^[37]。

2 体系构建

本文归纳构建的矿山生态修复体系是基于土地恢复利用和景观绿化重建这两个主要目标,在构建体系前理清修复思路,有利于更全面的建立整体体系。不论是废弃矿山或是新建矿山,在开采过程中会破坏原有坡面或土地表层植被,造成水土流失从而形成大面积陡峭高耸的开采平台,使得山体极不稳定造成坍塌现象频发,在极端天气下还会发生泥石流等灾害,对人民生命安全造成严重损失^[32]。因此,矿山生态修复的第一步是要降低灾害发生风险,采取必要措施以保证周围居民生活环境安全;第二步是矿山生态修复技术选择,因地制宜选择生态修复技术是解决环境问题的关键;第三步景观生态重建,矿区景观重建不仅可以创造出特色生态景观,还会提高当地生态经济效率。

2.1 矿山废弃地生态修复思路

2.1.1 降低灾害发生风险 矿山开采后会使得地表出现大面积空洞,还会使深层土壤间空隙变大,增大了发生地表坍塌下陷的风险和矿山边坡发生滑坡的概率。若遇到降雨、地震等自然现象,这些灾害的风险将会更大,会直接或间接对周围建筑甚至是居民产生危害。因此,可采用土壤固定的措施减小土壤张力,以降低自然灾害发生的风险^[25,30]。

2.1.2 矿山生态修复技术选择 根据矿山实际土壤基质、重金属污染程度、植被生长情况、边坡岩性及其稳定性破坏程度、矿山整体污染状况以及其他外部条件,如降雨、地下水位变化和人类生存活动等因素的影响,因地制宜选定适合的矿山生态修复技术,有效改善矿山生态污染问题,提高生态资源的利用率,加强矿山废弃地的生态经济效益^[23]。

2.1.3 景观生态重建 景观生态重建是依据矿区环境的空间格局分布、生物物种的多样性、生物群落的稳定性、植物个体的生长和种植美化设计方案,创造美丽的绿色生态景观^[11]。最主要的是选择合适的绿色植物,使得植物既可以高效的改善矿山土壤基质,又可以美化生态环境。在景观重建的过程中,可对矿山当地独有的生态景象适当保留,进

行一系列环境修复后,将周边的自然景色与矿山生态相结合,达到景观观赏的效果^[53]。

2.2 技术体系构建

矿山生态环境破坏主要有以下几个方面:地表环境破坏、易引发地震和泥石流等灾害、地下水水位下降并且水体污染严重、植被生长破坏、环境污染如酸碱性、毒性和重金属对人体的危害等^[32]。本文汇总了常见的矿山生态修复技术,并将矿山主要环境问题与构建体系思路相结合,从风险预警技术、土地重建防固技术、土壤基质改良技术、水资源重建技术、植被生态恢复技术和景观生态养护技术这6个方面着手,构建出一套矿山生态修复技术体系,见表2。

(1)风险预警技术。矿山废弃地的地理环境非常复杂,边坡土层结构较不稳定,遇到降雨、地震等自然现象,极易引起山体滑坡和土层坍塌。因此,使用遥感技术、移相干涉技术、3S技术、GPS全球定位系统、地面穿透雷达技术(GPR)和兴趣点(POI)联合多重缓冲分析等技术,对矿山废弃地的土层失稳和地质灾害等情况进行全面预防监控,达到提前避免这些自然灾害的发生,极大程度的保护矿山废弃地周边的生态环境和人们的生命健康以及财产安全的目的。SONG et al^[3]应用铁矿遥感的生态指数(IM-RSEI)中国山东省南四湖地区的铁矿产业密集矿区的生态环境变化进行了评估。

(2)土地重建防固技术。此项技术的目标是对矿山废弃地的土地现状进行综合分析后,对矿山废弃地进行土地重建和边坡的防固,降低对周围土壤环境、植物生长和水资源,甚至是对人类生活的威胁,为后期土壤基质改良、土壤生产力的提高以及植被生态修复等技术建立基础。其中涵盖的技术有土地重建、防护技术和加固技术这3种。魏忠义等^[19]采用土壤重构法,对安太堡露天煤矿中裸露的“堆状地面”进行复垦,将表层土壤按一定方式进行排列堆积,堆积好的深层土壤松散性高,可以起到自动填充裂缝的作用,也可将下渗入土体的雨水储存起来,为植被生长建立较良好的营养环境。

(3)土壤基质改良技术。此项技术是通过通过对矿山废弃地土壤基质进行改良,能够恢复矿山土壤的肥力和土层结构,很大程度上可以提高土壤的抗侵蚀性和水土保持能力^[35],给植物提供良好的生长环

境。该技术涵盖的技术有物理改良、化学改良、生物改良和综合改良这4类工程。BURGER^[59]将回收后的表土、凋落生物层、种子库和粗木屑等有机材料,放置在再生矿区土壤的表面,构成土壤改良层,以增加矿区地表土壤的有机质成分和提高养分循环效率。马志林^[60]利用BS活性土壤修复技术修复河南省某矿区废弃地和陡峭边坡,这项技术联合应用了喷播技术与土壤菌,并使用高营养活性、团聚结构稳定的生物基材,帮助改良和提高矿区废弃地土壤的肥力和提高植被生长的速率。在喷播修复8个月之后,植被生长覆盖率达到90%。经调查发现,一些植物如猪屎豆、含羞草、野扁豆、合欢树等,都适应生长于矿山废弃地中,对其余植被生长起着重要作用^[61]。

(4)水资源重建技术。此项技术是通过适当设计的重塑地貌和景观重新分配水分,重新调整水的流动,维持水文平衡。利用一些截排水工程,修筑截水沟和排水沟以减少地表径流或洪水进入矿山坡地中,防止下渗至地面以下的水流量过多,造成土壤肥力的流失和植被损害。该技术包括截排水和水源重建这2类工程。放置松散的再生矿砂可以恢复水文的流动路径,确保水的渗透、储存、排水和地下水补给等水文过程的正常,达到保持水文稳定的目的^[59]。同时也会改善土壤渗透性,促进植被生长^[62]。

(5)植被生态恢复技术。此项技术是建立在土壤重建防固和土壤基质改良的基础上应用。综合考量矿山废弃地不同理化性质的土壤和该地区的日照、降水等天气情况,选择适合的草木本植物,应用挂网喷种或人工播种等技术种植,使这一区域的植物群落保持生态平衡,发生群落演替。该技术包括植被养护、喷灌养护和工程改造这两类工程。在巴西,具有固氮能力的豆科植物,有效的提高了严重退化土壤中的碳氮含量^[63]。在有豆科植物的修复点上,提高了有机质矿化率,并将分解代谢多样性恢复到圭亚那自然土壤的水平^[64]。许莉^[50]的研究中主要应用到植被混凝土喷种技术,同时结合铺设镀锌铁丝网和锚杆固定等辅助技术,对北京某白云岩矿区的裸露岩壁进行修复,该区域一月内的植被生长覆盖率达到65%,加以养护后生态恢复效率良好。

表 2 矿山生态修复技术体系构建
Table 2 Construction of mine ecological restoration technology system

技术类型	一级工程	二级工程	具体技术措施
风险预警技术	坡体预警	滑坡、坍塌	遥感 ^[3] 、干涉雷达、GPS全球定位技术、3S技术、地面穿透雷达(GPR)技术 ^[54] 、兴趣点(POI)联合多重缓冲分析 ^[5]
		削坡	浅孔定向爆破、CO ₂ 致裂技术、边坡比法、削坡平台法 ^[34]
土地重建 防固技术	土地重建 ^[11]	清坡	履带式机器碎石、人工清理、机械清理
		填坡	客土回填、坡脚回填
		地表结构	分离注浆技术、采矿填充、浅垫充填 ^[5]
		砌石防护	砌石挡墙护坡、石笼挡墙护坡、浆砌片石骨架护坡、普通石料护坡
	防护技术	砌格防护	格栅挡土护坡、土工格室护坡
		植被防护	植被混凝土、鱼鳞坑、植生袋防护、钻孔植被护坡、等高绿篱护坡、三维植被网防护
		综合防护	回填压脚+浆砌片石格构技术防护边坡 ^[35]
	加固技术	挡墙	锚杆固定 ^[34] 、挡土墙、防滑柱、混凝土灌浆 ^[56]
		挂网	铁丝网砼筑围堰加固、防护网、三维网固土
		生态技术	生态灌浆技术、微生物低温灌土、生态型围堰防护技术
物理改良	/	表土转换 ^[32] 、客土回填 ^[8] 、隔离法、犁耕、倾倒土技术 ^[54]	
化学改良	无机改良	化学养料、撒石灰调节pH ^[57] 、化学溶剂、电化学法、药剂、土壤淋洗 ^[58]	
	有机改良	城市固废、无毒污水污泥、生活垃圾、泥炭、动物粪便 ^[54]	
土壤基质改良技术	生物改良	/	土壤动物、酶、微生物菌根、豆科植物固定/降解/提取
	综合改良 ^[44]	物理-化学	水泥-石灰固化/稳定化、水泥-火山灰固化/稳定化
		微生物-化学	化学淋洗+微生物捕获
		植物-化学	加入EDTA/DTPA螯合剂
		植物-微生物	固氮根瘤菌/AM真菌 ^[44] +植物根际
水资源重建技术	截排水	坡顶界线外延修筑截水沟、截水盲沟 ^[56]	
	排水	坡面坡脚平台/挡土墙外侧/废弃地内修筑排水沟、排水廊道、排水孔 ^[56]	
植被生态恢复技术	水源重建	浅层地下水拦蓄水坝、开凿渗水井、清污分流、生态系统回收法 ^[54]	
	土壤播种 ^[58]	喷播 ^[58]	挂网植被喷播、植被混凝土、三维网格喷播 ^[20] 、种植土造林
		人工种植	“草—灌—乔”种植技术、撒播植物种子、植生槽、条播
	坡面植被修复/		攀附植物垂直绿化、基材注浆、生态植被袋、生态植被毯、植生基材喷附、钻孔绿化 ^[56]
景观生态养护技术	景观养护	植被养护	浇水、施肥、病虫害防治、苗木补植、无纺布覆盖措施 ^[11]
		喷灌养护	旋转雾状喷灌
	景观管理	工程改造	火山口填充、体型修复绿化、文化景观维护、水利梯田改造、摩岩石刻
		封禁管理	禁止捕猎、采摘、放牧
景观管理	水分管理	定期喷灌抗旱	
	植物管理	补种树种、定时施肥、平茬复壮	

(6)景观生态养护技术。此项技术包括景观养护和景观管理这两类工程,是矿山生态修复过程中较为重要的一项技术。对矿山废弃地修复尚未完成的土壤和植被进行一段时间的保护和培养,提高土壤肥力,加强土壤结构的稳固;增强植物的存活率和根系的健壮程度。同时也要注意对矿山该区域

的管理,使其能够更快的恢复到最好的生态水平。在此阶段,要积极促进土壤—水源—植被—景观之间的相互作用,提高该矿区生态系统的价值。德国北戈尔吧公园便是建立在露天废弃地之上,保留并加深了矿区的生态特色,着重于对废弃矿区所存的景象再利用,通过修复区域生态环境,提高了

动植物生存率,增强了生态经济效益。徐州邱山山体改造工程在解决邱山山体的生态和安全问题后,将山体复绿作为工程重点,并根据当地环境特色进行了景观设计,使修复后的山体与自然相融合,成为徐州市第一个景观山体公园^[31]。

3 总结

(1)以土壤和植被为主要生态要素,分析了常用各类矿山生态修复技术及其适用范围和优缺点,并根据每个技术的性质分为物理性、化学性和生物性3大类,为之后矿山生态修复技术的选择提供理论协助,以期可以更为清晰和精准的应用生态修复技术,达到更明显的修复效果。

(2)通过分析矿山各类生态破坏和污染问题,厘清了降低灾害发生风险、矿山生态修复技术选择和景观生态重建3大矿山废弃地生态修复的基本思路,以风险预警技术、土地重建防固技术、土壤基质改良技术、水资源重建技术、植被生态恢复技术和景观生态养护技术为主干,梳理并构建出一套适用于解决我国矿山生态破坏和环境污染问题的矿山生态修复技术体系。

(3)为修复复杂矿山生态问题提供了新的思路,可以利用多种生态修复技术联用的多适应性,取长补短,有针对性的将复合生态修复技术的效率达到最大、修复成本降至最低。但是该生态修复技术体系缺乏一定的实践基础,期望在今后的研究中,可以将该技术体系更多的应用于实际矿山生态修复中。

参考文献

- [1] 张楚. 露天矿山生态修复技术及效果评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [2] WANG H F, LIU H L, YANG T H, et al. Mechanisms underlying the succession of plant rhizosphere microbial community structure and function in an alpine open-pit coal mining disturbance zone[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325: 116571.
- [3] SONG W, GU H H, SONG W, et al. Environmental assessments in dense mining areas using remote sensing information over Qian'an and Qianxi regions China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146: 109814.
- [4] DING T T, DU S L, ZHANG Y H, et al. Hardness-dependent water quality criteria for cadmium and an ecological risk assessment of the Shaying River Basin, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 198: 110666.
- [5] XIAO W, DENG X Y, HE T T, et al. Using POI and time series Landsat data to identify and rebuilt surface mining, vegetation disturbance and land reclamation process based on Google Earth Engine[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 327: 116920.
- [6] 王美仙, 贺然, 董丽, 等. 美国矿山废弃地生态修复案例研究[J]. *建筑与文化*, 2015(12): 99 - 101.
- [7] 严家平, 徐良骥, 阮淑娟, 等. 中德矿山环境修复条件比较研究——以德国奥斯那不吕克 Piesberg 和中国淮南大通矿为例[J]. *中国煤炭地质*, 2015, 27(11): 22 - 26.
- [8] 王伟. 矿山生态环境保护与恢复治理评价指标体系的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [9] HOLMES P M, RICHARDSON D M. Protocols for restoration based on recruitment dynamics, community structure, and ecosystem function: perspectives from South African fynbos[J]. *Restoration Ecology*, 1999, 7(3): 215 - 230.
- [10] RONG H, SHAN D, HE J L. Ecological restoration modes of soil and water conservation on the mining wasteland in northern grassland[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020, 194: 04008.
- [11] SPANIDIS P M, ROUMPOS C, PAVLOUDAKIS F. A multi-criteria approach for the evaluation of low risk restoration projects in continuous surface lignite mines[J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2179.
- [12] 中华人民共和国中央人民政府. 国土资源部令 44 号. 矿山地质环境保护规定[EB/OL]. http://www.gov.cn/flfg/2009-03/05/content_1251130.htm.
- [13] 中华人民共和国国土资源部. 中华人民共和国地质矿产行业标准: DZ/T 0223—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [14] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[EB/OL]. [2016-05-31] http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [15] 中华人民共和国中央人民政府. 关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见[EB/OL]. [2016-07-01] https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201611/t20161124_368161.htm.
- [16] 中华人民共和国中央人民政府. 自然资源部关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见[EB/OL]. [2019-12-24] http://www.gov.cn/xinwen/2019-12/25/content_5463827.htm.
- [17] 赵玲. 2022 年中国矿山生态修复行业政策分析: 监管与扶持并行[EB/OL]. [2023-08-11] https://www.sohu.com/a/582855151_120950203.
- [18] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见[EB/OL]. [2021-11-10] https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-11/10/content_5650075.htm.
- [19] 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法[J]. *煤炭学报*, 2001(1): 18 - 21.
- [20] 张盛生, 田成成, 贾升安. 青海矿山地质环境恢复治理中三维网的应用——以湟中县上新庄华山采砂场地质环境治理为例[J]. *青海环境*, 2013, 23(1): 34 - 36.

- [21] 屈向阳. 矿山土壤生态修复技术研究[J]. 西部资源, 2021(6): 78 – 80.
- [22] 胡亮, 贺治国. 矿山生态修复技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 40 – 45.
- [23] 金一鸣. 矿山废弃地工程绿化技术模式生态修复效益研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [24] 耿侃. 矿山高陡创面生态脆弱性与修复技术体系[C]//中国环境科学学会 (Chinese Society for Environmental Sciences). 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第四卷). 2019: 798 – 802.
- [25] 徐飞, 焦玉国, 唐丽伟, 等. 泰安市山水林田湖草生态修复区废弃露天矿山治理模式与技术体系研究[J]. 山东国土资源, 2022, 38(6): 63 – 71.
- [26] WU J M. Comprehensive analysis of environmental ecological restoration effect of mining area under the planting of arbor and shrub plant landscape[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(10): 1 – 12.
- [27] 胡丹丹. 废弃矿山生态修复实证分析[J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(7): 149 – 151.
- [28] 刘露. 矿山废弃地植被生态修复设计研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- [29] 翟文龙. 国内外矿山生态修复现状与对策分析[J]. 有色金属 (矿山部分), 2022, 74(4): 115 – 118.
- [30] 田丽丽. 矿山生态环境问题及环境保护措施[J]. 世界有色金属, 2022(5): 220 – 222.
- [31] 梁好雅. 矿山废弃地生态修复与景观设计研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [32] 魏艳, 侯明明, 卿华, 等. 矿业废弃地的生态恢复与重建研究[J]. 矿业工程, 2007(1): 52 – 55.
- [33] 杨华明, 李建文. 冶金矿山生态修复技术的进展[J]. 鞍钢技术, 2017(6): 1 – 7.
- [34] 李剑韬, 叶汉遼. 矿山污染生态修复技术[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(2): 66 – 70.
- [35] 朱晓勇, 胡国长. 花岗岩露天关闭矿山生态修复技术应用[J]. 地质与勘探, 2022, 58(1): 168 – 175.
- [36] 陈影, 张利, 董加强, 等. 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[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 154 – 157.
- [37] 曹波, 刘菊芳, 孙保平. 北京市废弃矿山工程绿化技术模式研究[J]. 水土保持应用技术, 2008(5): 38 – 40.
- [38] SUN W, JI B, KHOSO S A, et al. An extensive review on restoration technologies for mining tailings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(34): 33911 – 33925.
- [39] 陈章, 杨悦. 矿山生态修复现状及技术浅析[C]//江西省地质学会. 江西地学新进展 2021-江西省地质学会第十一次会员代表大会暨江西省地质学会 2021 年学术年会论文集, 2021: 213 – 217.
- [40] KUZNETSOV M N, MOTYLEVA S M, LEONICHEVA E V, et al. Zeolite effect on heavy metal content in grey forest soil in conditions of technogenic pollution[J]. Russian Agricultural Sciences, 2009, 35(3): 179 – 181.
- [41] GRAY C W, DUNHAM S J, DENNIS P G, et al. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud[J]. Environmental Pollution, 2006, 142(3): 530 – 539.
- [42] REDDY K R, AL-HAMDAN A Z, ALA P. Enhanced soil flushing for simultaneous removal of PAHs and heavy metals from industrial contaminated soil[J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2011, 15(3): 166 – 174.
- [43] BOYER S, WRATTEN S D. The potential of earthworms to restore ecosystem services after opencast mining—a review[J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(3): 196 – 203.
- [44] MONTIEL-ROZAS M M, MADEJÓN E, MADEJÓN P. Evaluation of phytostabilizer ability of three ruderal plants in mining soils restored by application of organic amendments[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 431 – 436.
- [45] RIOS C O, SIQUEIRA-SILVA A I, PEREIRA E G. Revegetation of mining-impacted sites with a tropical native grass: Constraints of climate seasonality and trace-element accumulation[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 326: 116655.
- [46] 王娜. 矿区废弃地土壤生态恢复研究进展[J]. 南方农业, 2020, 14(13): 51 – 54.
- [47] BANDYOPADHYAY S, MAITI S K. Evaluation of ecological restoration success in mining - degraded lands[J]. Environmental Quality Management, 2019, 29(1): 89 – 100.
- [48] WU Y J, MA L Y, LIU Q Z, et al. The plant-growth promoting bacteria promote cadmium uptake by inducing a hormonal crosstalk and lateral root formation in a hyperaccumulator plant Sedum alfredii[J]. Journal of hazardous materials, 2020, 395: 122661.
- [49] 魏远, 顾红波, 薛亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107 – 114.
- [50] 许莉. 植被混凝土技术于北京某地区裸岩治理的应用[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(7): 40 – 45.
- [51] 梁天昌, 欧莉莎, 张朝玉. 矿山废弃地生态修复技术研究[J]. 环保科技, 2021, 27(5): 59 – 64.
- [52] 刘斯文, 黄园英, 韩子金, 等. 离子型稀土矿山土壤生态修复研究与实践[J]. 环境工程, 2015, 33(11): 160 – 165.
- [53] 黄玉. 矿山废弃地生态修复与景观营造[J]. 现代园艺, 2021, 44(24): 153 – 154.
- [54] FENG Y, WANG J M, BAI Z K, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12 – 25.
- [55] REN J C, KANG X T, TANG M, et al. Coal mining surface damage characteristics and restoration technology[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9745.
- [56] 武剑. 露天矿山边坡稳定化治理与生态修复技术探究[J]. 西部资源, 2022(3): 99 – 100.

亿元,假设环境损害发生后水资源价值为 326.65 亿元,即造成 0.53 亿元的水资源价值损害,要求有关责任主体承担相应责任。

由于每个城市的具体情况不同,应该根据当地的实际情况调整参数。其次,资源的价值随着时间、空间以及时空背景下的自然和人类活动是会发生动态变化的^[1],而且各地数据繁杂,计算量大,因此要建立地方环境资源信息平台,通过实时监测,掌握每个时间点的环境资源信息,提高环境责任险的活动效率。值得注意的是,在我国环境责任险发展并不成熟的背景之下,通过环境资源价值核算的方法鉴定环境损害价值并作为理赔依据并不是研究理赔金额判定的终点,而是从不同角度出发的起点之一,如何判定理赔金额还有很大的研究空间,也将会成为未来重点研究方向。

此外,环境资源价值核算的应用领域并不局限于环境责任险,其对掌握我国环境资源的基本国情,掌握一手研究资源具有重要意义;环境资源价值核算对于预测环境资源变化、制定环境保护政策、协调环境与经济关系、促进“五位一体”全面发

展具有不可替代的作用。

参考文献

- [1] 罗爱明. 发展绿色保险的意义、面临的问题及国际借鉴[J]. *海南金融*, 2021(12): 68-73.
- [2] 姚卓鹏, 张生超. 论“十四五”期间我国环境责任保险实施困境与出路[J]. *环境保护与循环经济*, 2022, 42(3): 93-99.
- [3] 时钰. 我国推进环境污染责任保险的问题与对策建议[J]. *中国物价*, 2021(12): 78-80.
- [4] 姜文来. 水资源价值模型研究[J]. *资源科学*, 1998(1): 37-45.
- [5] 姜文来. 水资源价值初论[J]. *中国水利*, 1999(7): 10-11.
- [6] 杨昭飞. 武汉市水资源资产价值量化研究[D]. 武汉: 中南财经政法大学, 2019.
- [7] 冯欣, 姜文来, 刘洋, 栗欣如. 水资源价值模糊数学模型研究进展[J]. *资源科学*, 2021, 43(9): 1834-1848.
- [8] 王锐. 济南市城区水资源价值模糊综合评价[J]. *资源开发与市场*, 2006(1): 30-31.
- [9] 赵平萍, 温小虎, 毕延凤, 王勇. 青岛市水资源价值模糊综合评价[J]. *人民黄河*, 2010, 32(7): 66-67.
- [10] 方兰, 李军. 论我国水生态安全及治理[J]. *环境保护*, 2018, 46(增 1): 30-34.
- [11] 姜文来, 王华东. 水资源价值时空流研究[J]. *中国环境科学*, 1998(增 1): 10-13.
- [57] 程睿. 露采金属矿山采坑境界面生态修复技术研究[J]. *湖南生态科学学报*, 2022, 9(1): 50-57.
- [58] PRACH K, TOLVANEN A. How can we restore biodiversity and ecosystem services in mining and industrial sites?[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(14): 13587-13590.
- [59] BURGER J A. Sustainable mined land reclamation in the eastern US coalfields: A case for an ecosystem reclamation approach[C]// *Proceedings of the national meeting of the American society of mining and reclamation*, bismark, ND, USA. 2011, 15: 113-141.
- [60] 马志林. BS 活性土壤生态修复技术的研究与应用——以河南省鲁山县矿山废弃地为例[J]. *水土保持应用技术*, 2013(1): 9-11.
- [61] 杨期和, 刘德良, 李姣清, 等. 粤东北矿山废弃地植被恢复模式探讨[J]. *亚热带植物科学*, 2012, 41(1): 10-14.
- [62] ZHANG L, WANG J M. Prediction of the soil saturated hydraulic conductivity in a mining area based on CT scanning technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 383: 135364.
- [63] CHAER G M, RESENDE A S, CAMPELLO E F C, et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil[J]. *Tree Physiology*, 2011, 31(2): 139-149.
- [64] COUIC E, TRIBONDEAU A, ALPHONSE V, et al. Positive effect of ecological restoration with fabaceous species on microbial activities of former guyanese mining sites[J]. *Molecules*, 2022, 27(6): 1768.