

矿山生态修复技术方法研究与展望

张进德, 杨利亚, 田磊, 王娜, 王志一

Exploring methods and technical measures for mine ecological restoration

ZHANG Jinde, YANG Liya, TIAN Lei, WANG Na, and WANG Zhiyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502064>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长江经济带江苏段废弃露天矿山分布与生态修复遥感调查研究

Distribution and ecological restoration of abandoned open-pit mines in Jiangsu section of the Yangtze River Economic Belt

李丽, 杨金中, 陈栋, 于航, 邢宇, 汪洁 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 183-190

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174-181

经济下行压力下的生态修复产业化问题研究

李中建

水文地质工程地质. 2020, 47(1): 181-184

矿山水土污染与防治对策研究

A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China

张进德, 田磊, 裴圣良 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 157-163

改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用

A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou

范明明, 裴向军, 杜杰, 肖维阳, 周立宏, 杨华阳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 183-190

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502064

张进德, 杨利亚, 田磊, 等. 矿山生态修复技术方法研究与展望 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 16-25.

ZHANG Jinde, YANG Liya, TIAN Lei, et al. Exploring methods and technical measures for mine ecological restoration[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 16-25.

矿山生态修复技术方法研究与展望

张进德^{1,2}, 杨利亚^{1,2}, 田磊², 王娜², 王志一²

1. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081;
2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 我国是世界重要的矿业大国, 长期大规模、高强度的矿产资源开发遗留下数量众多的废弃矿山, 严重破坏了矿山所在地的生态环境, 已成为我国国土空间生态修复工作的重点和难点问题。为了适应当前国土空间生态修复新形势和新要求, 支撑服务矿山生态修复工作, 基于已发布实施的《矿山生态修复技术规范》, 在总结以往矿山地质环境治理和生态修复工程实施经验的基础上, 阐述了矿山生态修复总体思路与基本原则, 明确了矿山生态修复的工作流程; 提出了矿山基础调查技术方法和生态影响分级标准, 以及矿山生态修复参照系统构建方法; 最后根据矿山场地地质环境条件和生态破坏程度归纳出自然恢复、辅助修复和生态重建 3 种生态修复模式, 并给出了不同模式下的技术措施。研究为进一步规范我国矿山环境保护与综合治理工作, 加快推进矿山生态修复提供参考。

关键词: 矿山; 生态地质; 生态环境; 生态影响; 生态修复

中图分类号: X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0016-10

Exploring methods and technical measures for mine ecological restoration

ZHANG Jinde^{1,2}, YANG Liya^{1,2}, TIAN Lei², WANG Na², WANG Zhiyi²

1. Key Laboratory of Mine Ecological Effects and Systematic Restoration, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;
2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: China is a major mining country in the world, and has experienced extensive ecological degradation at mine sites due to long-term, large-scale, and high-intensity mineral resource extraction. The resulting proliferation of abandoned mines has severely damaged local ecosystems, posing a critical and complex challenge for the ecological restoration of territorial spaces. In response to the new situation and requirements of current ecological restoration of territorial space, and to better support mine ecological restoration, based on the already implemented technical standards for mine ecological restoration, this study outlined the overall approach and basic principles of mine ecological restoration and clarified the business process of mine ecological restoration. Technical methods for basic investigation of mines and criteria for grading ecological impact, as well as methods for constructing reference systems for mine ecological restoration were proposed. It summarized three ecological restoration models—natural recovery, assisted recovery, and ecological reconstruction—based on the geological

收稿日期: 2025-02-21; 修订日期: 2025-03-25

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20230801201); 国家级地质环境监测与预报项目(DD202512004)

第一作者: 张进德(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事矿山环境治理与生态修复工作。E-mail: 2313642235@qq.com

通讯作者: 王娜(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事环境遥感与生态修复研究。E-mail: wangna512006@163.com

environmental conditions and degree of ecological damage of mine sites, and then provided corresponding ecological restoration technical measures for each model. The objective is to further standardize the mine environmental protection and comprehensive management in China and accelerate the progress of mine ecological restoration.

Keywords: mines; geologic environment; ecological environment; ecological impact; ecological restoration

矿产资源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,在几千年以前,我们的祖先就学会了如何开发和利用矿产资源^[1]。新中国成立以来,我国矿业在十分薄弱的基础上得到了长足发展,特别是改革开放以后矿产资源的开发规模和强度不断加大,矿业活动为我国国民经济的快速发展做出了巨大贡献。然而长期高强度、大规模的矿产资源开发留下数量众多的废弃矿山,严重破坏了矿区生态环境。据统计,历史时期我国矿山数量曾经达到 25 万座,随着开采资源的枯竭、矿业秩序的整顿和生态环保红线的限制,矿山数量大大缩减。据 2017—2018 年中国地质调查局以市、县为单元的全国矿山地质环境调查数据,截至 2018 年仍有大大小小的各类矿山 14.7 万余座,其中废弃矿山约 9.9 万座^[2]。总体上我国矿山点多面广,矿山生态破坏“欠账”较多。

随着我国生态文明建设的持续推进,迫切需要加快国土空间生态修复工作,破解高质量发展与矿山生态保护矛盾问题,开展矿山生态修复是实施国土空间生态修复工作的重要任务之一。为加快解决历史遗留的废弃矿山生态环境问题,2019 年自然资源部出台了《关于建立激励机制加快推进矿山生态修复的意见》,在政策引导方面进行了创新^[3],探索性地提出市场化运作、开发式治理、科学化利用的矿山生态修复模式,破解资金投入不足的难题。2022 年自然资源部办公厅印发《“十四五”历史遗留矿山生态修复行动计划》,指导各地科学部署和实施“十四五”历史遗留矿山生态修复工作,力争完成历史遗留矿山生态修复面积 $18.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$,有效解决重点区域、重要流域^[4]内历史遗留矿山生态破坏问题,使周边人居环境明显改善,废弃土地综合利用水平明显提升,区域生态系统服务功能逐步恢复。

近年来,我国矿山的生态修复工作取得了积极进展^[5-7]。中央财政设立专项资金支持历史遗留废弃矿山生态修复工作。自 2019 年财政部、自然资源部组织实施历史遗留废弃矿山生态修复示范工程项目以来,截至 2024 年,中央财政累计投入专项补助资金 120

多亿元,实施了近 80 个废弃矿山集中开采区的生态修复项目,大大加快了全国历史遗留废弃矿山生态修复工作,取得了显著成效。在中央环保督察工作的监督下,各级地方政府加大了废弃矿山生态修复工作力度。在并不宽余的财政预算中仍然拿出大量资金投入矿山生态修复,落实《“十四五”历史遗留矿山生态修复行动计划》,加快偿还矿山生态破坏“欠账”。

为有效指导各地开展矿山生态修复工作,受自然资源部国土空间生态修复司的委托,笔者牵头编制了 7 项矿山生态修复系列行业技术标准^[8-14],涵盖了煤炭、金属、建材、化工、稀土、油气共 6 个矿种。截至目前,该系列技术标准已全部得到批准并颁布实施。在回顾矿山生态修复系列技术标准编制过程,总结标准编制思路、理念与指导思想,归纳梳理矿山生态修复技术方法等基础上,本文以详略结合的方式阐述了开展矿山生态修复的业务逻辑、工作方法和技术措施,旨在推进矿山生态修复工作的规范化管理,引导科学开展矿山生态修复工作。

1 矿山生态修复技术思路与原则

在新形势和新时代背景下,矿山生态修复的技术思路是:依据矿山周边区域生态系统功能重要性^[15]、人居环境与经济社会发展状况,综合考虑自然条件、地形地貌条件、矿山生态问题及其危害程度等,坚持山水林田湖草沙一体化保护修复的理念,依靠自然恢复能力^[16],结合必要的人工修复措施,分区、分级、分类推进矿山生态修复工作,消除地质安全隐患,改善水土环境,有效恢复生态功能,使因采矿活动破坏的场地地质环境达到稳定、损毁土地得到复垦利用、生态系统功能得到恢复或改善^[8,17]。总体思路中优先强调保障地质安全的先导作用,进而考虑恢复生态、兼顾景观的先后序次。

基于上述总体思路,开展矿山生态修复应坚持以下基本原则^[8]:一是统筹考虑矿山所处区域生态功能以及各生态要素相互依存、相互影响、相互制约等特点,尊重生态系统演替规律,自然恢复与人工修复相

结合,人工修复为自然恢复创造条件,最大限度发挥自然恢复能力,避免过度工程治理^[18];二是根据矿区所在的地理单元、气候条件、生态系统结构特征和功能、地质背景、社会经济状况,以及国土空间规划确定的生态空间、农业空间、城镇空间布局^[19-20],充分发挥国土空间规划引领作用,依据规划确定的土地用途,宜林则林、宜耕则耕、宜水则水、宜建则建、宜荒则荒;三是综合考虑矿山生态问题的多样性、复杂性、多因性和地域性特征,针对不同规模、不同矿种、不同开采方式的各类矿山^[1],立足生态系统完整性,采用不同的生态修复技术方法;四是按照经济合理、技术可行的原则,合理确定生态修复方向、模式和技术措施^[21-22],提高投入产出效率,最大限度发挥矿山修复后的综合效益^[8]。

2 矿山生态修复的工作流程

矿山生态修复工作流程包括:基础调查与问题识别、方案编制、方案实施、监测与管护、成效评估。工作流程体现了矿山生态修复的业务逻辑和关键技术环节。

基础调查与问题识别明确了适用于矿山生态修复工作调查内容与方法和分析评价方法;方案编制明确了矿山生态修复方案编制方法;方案实施中的技术措施强调了在消除地质安全隐患基础上,根据实际情况合理选择自然恢复措施、辅助再生措施和生态重建措施^[23-24];监测与管护提出了矿山生态修复工程的跟踪监测内容、方法与管护措施;成效评估明确了矿山生态修复工作结束后的成效评估内容与方法(图 1)。

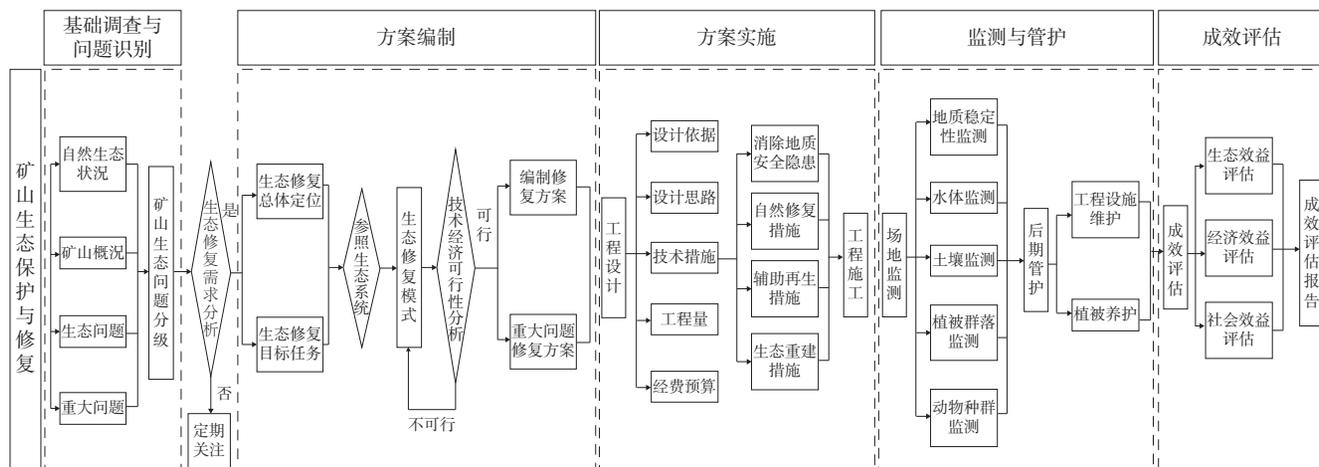


图 1 矿山生态修复工作流程图

Fig. 1 Flowchart of the business process for mine ecological restoration

3 矿山基础调查技术方法

开展矿山基础调查的目的是掌握矿山基本概况,摸清矿山自然生态状况,查明矿山生态问题。与以往矿山地质环境调查^[25]相比,更加注重以下 4 个方面的调查:一是地表-地下的综合调查,从地质环境扩展到生态环境,涵盖了自然、地质、生态等多个方面;二是区域-场地生态系统的调查,突出水体、土体、植被、动物等生态要素;三是生态影响与生态损毁调查;四是场地条件与生态修复适宜性的调查。

3.1 调查内容

(1) 矿山基本情况

矿山基本情况主要包括矿山名称、地理位置、矿山面积、建矿时间、闭坑或废弃时间、开采矿类与矿种、采区范围、开采深度层位、方式、规模以及矿山周

边已实施的修复治理工程情况等。

(2) 自然生态状况

自然生态状况主要包括气候、水文、水体、土壤、植被、动物,生态系统类型、结构、功能,以及生态功能定位、生态保护红线、重要生态敏感区、自然保护地等区域自然生态条件;地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、工程地质、地壳表层基岩、风化壳、包气带、成土母质、土壤类型等矿山地质环境条件。

(3) 矿山生态影响

矿山生态影响主要包括受采矿活动影响的矿区及周边危岩体、不稳定边坡、地面塌陷、地裂缝等地质环境破坏情况;采矿活动影响的矿区及周边地表水、地下水水质与水量变化情况;采矿活动造成的土地挖损、压占、沉陷、侵蚀、污染情况;采矿活动造成的地形改变、景观破碎、植被破坏情况;因地质环境

破坏、土地资源损毁、地貌景观破碎、水资源与水环境破坏导致的生态系统结构破坏、功能衰退、生物多样性减少、生物生产力降低情况。

3.2 调查方法

(1) 遥感调查。通过遥感影像解译矿山生态状况和生态问题。

(2) 踏勘。采用路线穿越与追索相结合的方法, 初步了解矿山自然生态与地质环境概况。

(3) 物探。通过对工作区的实际踏勘, 选用合适的物探方法。对于单一方法不易明确判定或较复杂的矿山生态问题, 须采用 2 种或 2 种以上物探方法组合。

(4) 钻探。主要用于岩溶山区和重大生态问题区。

(5) 山地工程。采用坑探、槽探、井探、硐探等方法, 调查探测对象的规模、边界、物质组成、形成条件等, 获取现场试验参数等。

(6) 样品采集与分析测试。现场采集岩(土)体样品、土壤样品、水体样品、植被样品等, 开展分析测试。

3.3 生态影响评估分级

(1) 评估方法

采用工程类比法、层次分析法、加权比较法、相关分析法及模糊综合评判法等方法进行矿山生态影

响评价。

(2) 评估分级^[8]

I 级: 场地存在严重矿山地质环境破坏问题, 地质灾害安全隐患极为突出, 或场地存在具有影响环境安全的严重水土污染问题, 或存在严重土地损毁、水资源破坏, 植被生境受到严重影响, 生态退化严重。

II 级: 场地存在一定的矿山地质环境破坏问题, 地质稳定性较差, 或场地局部存在水土污染^[26], 存在一定程度土地损毁、水资源破坏, 局部植被盖度与质量受到影响, 物种生境条件较为稳定, 生态系统结构与功能较为完好。

III 级: 场地不存在矿山地质环境破坏问题和水土污染, 地质稳定性与水土质量良好, 地表仅存在少量土地损毁或水资源破坏, 仅局部植被盖度与质量受到影响, 物种生境条件稳定, 生态系统结构与功能完好。

3.4 矿山生态修复参照系统构建

采取与历史资料对比分析或矿山周围同类型地区综合调查等方法, 构建矿山生态修复参照生态系统^[8, 27], 主要包括生态系统结构、生境条件、生态胁迫因素、物种组成、生态系统功能和外部交换等 6 个属性要素, 各属性要素的指标构成与分解详见表 1。

表 1 矿山生态修复参照系统构成与指标

Table 1 Components and indicators of mine ecological restoration reference system

属性要素	指标构成
生态系统结构	生态系统空间构成、生态景观特性、生物多样性
生境条件	地形地貌类型、水土条件、水文气象条件、光热条件
生态胁迫因素	地质安全隐患、地表破损、岩石裸露、水土流失、植被破坏、水土污染、土地损毁、外来物种入侵
物种组成	植物物种类型、动物物种类型、本地先锋物种类型、特色物种类型
生态系统功能	水源涵养、水土保持、防风固沙、碳汇能力、生物多样性
外部交换	与周边区域的空间连通性和景观协调性, 包括地貌连通性、水系连通性、植被连通性, 风向一致性、光照一致性、坡向一致性

4 矿山生态修复技术方法

4.1 矿山生态修复定位与方向

根据国土空间规划确定的生态空间、农业空间、城镇空间布局, 结合矿山未来用地规划、开发利用方式和土地用途等, 综合确定矿山生态修复的定位。

依据矿山生态修复定位, 结合修复场地地质安全、水土环境、水资源平衡等场地条件, 确定地面塌陷区、露天采场、工业广场、废料场、排土场、废石堆等矿山场地的修复方向^[8], 详见表 2。

4.2 矿山生态修复目标

确定矿山生态修复目标时, 优先考虑如何消除矿区范围内各类场地的地质安全隐患, 其次考虑如何提

升场地修复后的利用价值, 盘活矿山废弃地转型利用^[2], 最后考虑修复或重建矿区生态系统。

(1) 地质灾害安全隐患消除。明确消除地质灾害安全隐患的类型数量, 保障修复区域各类场地地质安全稳定。

(2) 废弃地转型利用。明确修复成农用地的数量指标, 进一步细分为耕地、园地、林地、草地、其他农用地的数量指标; 修复成建设用地的数量指标, 进一步细分为建筑物建设用地数量和构筑物建设用地数量。

(3) 生态系统修复与重建。修复受损生态系统应明确采用自然恢复和人工辅助方式使受损生态系统基本达到参照生态系统的标准; 生态系统重建应明确采用地貌重塑、土壤重构、植被重建方式^[31]重建矿区

表 2 矿山生态修复定位与方向
 Table 2 Positioning and direction of mine ecological restoration

生态修复定位	矿山生态修复方向
农业空间	矿山位于国土空间规划的农业空间区域,修复方向优先考虑恢复农业生产功能,宜耕则耕、宜园则园、宜林则林、宜水则水;无法恢复农业生产功能的应恢复生态系统功能
城镇空间	矿山位于国土空间规划的城镇空间区域,修复方向优先考虑恢复城镇开发利用条件,盘活工矿废弃地利用;矿山及周边自然生态景观良好或矿山拥有悠久矿业开发历史、珍贵矿业遗迹和丰富矿业文化,可考虑创建矿山主题公园 ^[28-29] ,提升城市生态品质;无法恢复城镇开发利用条件,应恢复生态系统功能、提升生态质量
生态空间	矿山位于国土空间规划的生态空间区域,修复方向优先考虑恢复生态系统功能。生态保护红线内 ^[30] ,须修复生态系统,禁止任何开发活动或改变生态用地的用途;生态保护红线外,可考虑在不妨碍现有生态功能的前提下,适度开展国土开发、资源和景观利用,但严格限制建设占用等不可逆变化

生态系统并达到或超过参照生态系统的标准。

4.3 矿山生态修复模式及适宜的场地条件
 根据矿山生态影响评估分级结果确定矿山生态

修复模式,包括自然恢复、辅助修复和生态重建 3 种模式。不同矿山生态修复模式及适宜的场地条件^[8]见表 3。

表 3 矿山生态修复模式及适宜的场地条件
 Table 3 Mine ecological restoration models and their suitable site conditions

矿山生态修复模式	适宜的场地条件
自然恢复	场地具备一定的水土条件,仅存在轻微地质环境破坏,不存在水土污染,地质稳定性良好,地表仅存在少量土地损毁或水资源破坏,仅局植被盖度与质量受到影响,物种生境条件稳定,生态系统结构与功能完好 ^[8]
辅助修复	场地存在一定的矿山地质环境破坏,地质稳定性较差,或场地局部存在水土污染,存在一定程度土地损毁、水资源破坏,部分植被盖度与质量受到影响,物种生境条件较为稳定,生态系统结构与功能基本完好 ^[8]
生态重建	场地存在严重矿山地质环境破坏,地质条件不稳定,或场地存在具有影响环境安全的重大水土污染问题,或存在严重土地损毁、水资源破坏,地表植被生境受到严重影响,生态退化严重 ^[8]

4.4 矿山生态修复工程措施

我国矿山类型、数量众多,开采强度与方式各异,采矿活动造成的生态问题复杂多样。在考虑生态修复技术措施时必须厘清问题的前因、后果、轻重,明确生态修复次序,在此基础上才能“对症下药”,“标本兼治”。

4.4.1 矿山生态修复先导工程技术措施

(1) 消除地质安全隐患

采取清理、疏导、拦挡、固化等工程措施消除矿山废弃渣土安全隐患。采取清除、锚固、拦挡、支护等工程措施消除矿山危岩体安全隐患。采取坡体锚固、削坡卸荷、垫脚堆坡、坡脚拦挡、疏导排水等工程措施消除矿山不稳定边坡隐患。采取爆破、拆除、回填、封堵、加固、综合利用等工程措施消除矿山废弃井口安全隐患。采取回填、整平等工程措施消除矿山地表开裂和地面塌陷坑安全隐患^[8]。

(2) 地表水污染治理

在排土场和尾矿库中设置截排水系统,减少入渗量,控制污染源头。封闭各种废弃巷道,隔绝空气,减少氧化作用,对矿坑排水实施清、污分流。采用中和沉淀法、硫化沉淀浮选法、离子交换法、置换法和电解法等进行酸性废水处理^[32]。通过添加化学试剂、水

化学分离、离子交换等方法进行重金属污染废水处理^[33]。

(3) 地下水污染治理^[34]

采用防渗帷幕灌浆措施封堵遭受破坏的含水层顶底板漏洞或破碎带,防止受污染或不良水质的含水层与其它含水层串通^[35],阻断地下水污染途径。对于废石堆场和尾矿库等 2 类固体废弃物可采用原址异位治理,采用四周防渗措施。禁止用渗坑、渗井方式排放废水。采用封闭截流法把污染地下水封闭在一定范围内,控制扩散,条件具备的可以采用抽干换水方法恢复水质。污染的浅层地下水可采用抽出受污染地下水,自然恢复地下水位,改善水质。

(4) 土壤污染治理

通过控制土壤中有机化合物、土壤 pH 值、土壤温度、土壤微生物、肥料等提高有害元素的萃取。土壤污染严重,污染物清除困难,土壤污染原位处置难度大,可以采用清除被污染的土壤异地集中存放,再回填清洁土壤恢复土地原有功能。

4.4.2 基于自然恢复模式的常用技术措施

采取封闭修复场地、拆除废弃设施等措施,消除影响自然恢复的生态胁迫因子。禁止在修复场地内翻土、取石、搬运、垦殖等人类活动,排除外界干扰,减少对场地的扰动。在不需重新引种林草植被的

前提下, 依赖场地和周边生态系统自我愈合能力^[36-37], 促进植被再生和生物种群恢复^[8]。

4.4.3 基于辅助修复模式的常用技术措施

通过坡面修整、采坑回填、废石(渣)清理、土壤改良、截排水等人工辅助措施进行场地的土地整治, 改善土壤功能, 为植被恢复提供条件。综合考虑修复场地的坡度、高度、朝向、岩性、风力风向、周边环境等因素, 筛选适地先锋植物物种^[38], 采取补植、补播、抚育、间伐、杂灌草清除等人工辅助措施, 加快场地生态系统结构和功能的修复。禁止引入对当地生物多样性造成威胁的外来物种^[8]。

4.4.4 基于生态重建模式的常用技术措施

(1) 地貌重塑

通过边坡修理、废石(渣)清理、平台整理、采坑

回填、地表开挖、台阶修筑、道路修建、挖深垫浅、矿井封堵等工程措施重塑地形。采取场地平整、表土保护、土石配置、客土覆盖等工程措施进行土地整治。通过铺设防渗层和修筑排洪沟、暗沟、截水墙、水塘等工程措施重构截排水系统^[8]。

(2) 土壤重构

在矿山地貌重塑基础上, 依靠本地的岩土条件、水热与温湿条件等, 充分利用采矿剥离的表土和采矿遗留的废石(渣)、尾矿砂(渣)、粉煤灰等固体废弃物, 通过培肥改良、土层置换、表土覆盖、土层翻转、化学改良、生物修复等措施, 重构土壤剖面结构与土壤肥力条件^[8]。常见矿区土壤改良措施参见表 4, 不同场地用途对应的土壤重构质量要求见表 5。

表 4 矿区土壤改良参考措施^[8, 39]

Table 4 Reference measures for soil improvement in mining areas^[8, 39]

改良方式	常用方法
土壤结构改良	①原土过筛: 将场地的表土经过人工或机械筛土, 去除粗颗粒石块、瓦砾、杂物等, 改善土质结构, 原土过筛后再重新摊平; ②基质调配: 向土壤中添加黏结材料、保水材料、轻质颗粒(珍珠岩、陶粒、蛭石类)、有机纤维、腐殖肥等物料, 改善土质结构; 当土壤过砂或过黏时, 可采用黏土或砂土相互掺混的办法;
土壤肥力改良	③化学改良: 使用石灰、石膏、磷石膏、氯化钙、硫酸亚铁、腐殖酸钙等化学改良剂, 调节土壤酸碱度至中性 ①添加肥料: 向表土层中施加有机肥、无机肥、复合肥料、复混肥料等提高土壤肥力; ②绿肥改良: 选择豆科、禾本科、十字花科作为绿肥作物, 采用套种、轮作、混播等种植方式, 通过适当的播种与管理, 最终实现翻压还田, 改善土壤肥力;
土壤活力改良	③原地沤肥: 采集场地附近的野生杂草、树叶、农作物秸秆等, 采用原地翻压、堆土、施水等措施沤制绿色肥料, 改善土壤肥力; ④客土覆盖: 采取异地肥力较好的客土摊铺到场地地表土之上, 覆土厚度 ^[2] 根据复垦方向确定 ①生物改良: 向表土层中添加微生物菌剂、微生物肥料、生物有机肥、土壤调理剂等改善土壤活力; ②封育养护: 封闭场地, 将有机物料铺覆于场地之上, 通过喷灌、滴灌、微灌等施水措施改善土壤水分条件

表 5 不同场地用途对应的土壤重构质量要求^[40]

Table 5 Soil reconstruction quality requirements for different land uses^[40]

修复场地用途	土壤重构质量要求
场地修复后 用作耕地	有效表土厚度不小于 40 cm, 土壤质地以砂壤土和砂质黏土为主, 砾石含量不超过 20%, 有机质含量不小于 1.5%, pH 值介于 6.0~8.5 之间, 控制土壤容重不超过 1.45 g/cm ³
场地修复后 用作园地	有效表土厚度不小于 40 cm, 土壤质地以砂壤土和砂质黏土为主, 砾石含量不超过 20%, 有机质含量不小于 1.5%, pH 值介于 6.0~8.5 之间, 控制土壤容重不超过 1.45 g/cm ³
场地修复后 用作林地	有效表土厚度不小于 20 cm, 土壤质地以砂土和粉黏土为主, 砾石含量不超过 30%, 有机质含量不小于 1%, pH 值介于 5.5~8.5 之间, 控制土壤容重不超过 1.5 g/cm ³
场地修复后 用作草地	有效表土厚度不小于 20 cm, 土壤质地以砂土和壤质黏土为主, 砾石含量不超过 20%, 有机质含量不小于 1%, pH 值介于 6.0~8.5 之间, 控制土壤容重不超过 1.45 g/cm ³

(3) 植被重建

依据重塑的地貌形态和重构的土壤条件, 充分考虑植被配置的多样性、适应性、先锋性和抗逆性, 合理配置矿山植被重建空间^[41]。根据场地条件, 筛选出根系发达、固氮能力强、生长速度快、播种栽植容易、成活率高、病虫害少、抗水土流失能力强、易管护的适生植物和先锋植物。通过林、草、花、卉、乔、灌种植结合, 合理部署植被疏密和覆盖区域^[8]。

5 展望

(1) 加强矿山生态修复基础理论研究。矿山生态修复工作涉及采矿、地质、环境、生态、土壤、生物等多学科交叉问题。科学实施矿山生态修复必须加强生态系统演替规律的研究, 强化矿区生态系统多要素耦合共生、自我维持、自我调节机制研究, 通过地质过程、生态水文过程、土壤过程、植被过程、景观过程的研究, 揭示生态系统多要素耦合共生对维持区域生

态系统健康稳定的内在作用机理,为矿山生态修复分类施策提供依据。

(2)加快矿山生态修复关键技术、材料、装备研发。加快矿区生态系统多要素协同修复、综合治理关键技术和一体化生态修复模式方法集成技术研发。加快矿山生态修复材料如绿色软体护坡材料^[2]、重金属钝化材料、人工复合材料和生物材料等的研发与应用。加快矿区表土剥离与土石渣分选装备、装配式生态修复工程施工装备、固体废弃物资源化利用装备等的研发。提升对矿山生态修复工作的支撑能力。

(3)深入开展矿山地下空间综合利用研究。矿山地下空间综合利用是矿山生态修复的重要方向^[42-45],通过收集和分析国内外矿山地下空间综合利用成功案例,结合我国大量废弃井工矿山的实际情况,根据开采矿种、开采深度、地下巷道的空间展布、硐室围岩稳定性等基础条件,从能源转换、试验空间、储料空间、医疗空间、文娱空间等 5 个方面,考虑地下空间综合利用的可行性,提升矿山转型利用价值。

6 结论

(1)矿山生态修复工作贯穿于生态问题识别诊断、修复方案论证、现场施工和跟踪评估全过程,其业务流程主要包括基础调查与问题识别、方案编制、方案实施、监测与管护、成效评估 5 个环节。

(2)开展矿山基础调查是实施生态修复工程的重要支撑。与传统的地质调查工作相比,在调查内容上更加强调地表-地下的综合调查、区域-场地生态系统的调查、生态影响与生态损毁调查和场地条件与生态修复适宜性的调查;在调查方法上统筹使用遥感、物探、钻探、山地工程等多种方法。

(3)构建矿山生态修复参照系统有利于分类施策、精准修复。矿山生态修复参照系统主要由生态系统结构、生境条件、生态胁迫因素、物种组成、生态系统功能和外部交换等 6 个属性要素构成,可采用历史资料溯源或矿区周边样方、样地调查等方法进行构建。

(4)矿山生态修复方向应根据国土空间规划确定的生态空间、农业空间、城镇空间布局确定;生态修复模式应依据适宜的场地条件确定,主要包括自然恢复、辅助修复和生态重建 3 种模式。

(5)矿山生态修复技术措施必须优先考虑地质安全隐患消除和水土污染治理等先导工程措施。在此基础上按照递进式修复思路采取相应的修复措施,优先考虑自然恢复措施,自然恢复难以达到目标,再进

一步考虑辅助修复措施,辅助修复无法实现目标,最后考虑生态重建措施。

参考文献 (References) :

- [1] 张进德.我国矿山地质环境调查研究 [M].北京:地质出版社,2009. [ZHANG Jinde. Investigation and study on mine geological environment in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [2] 张进德,郝富瑞.我国废弃矿山生态修复研究 [J].生态学报,2020,40(21):7921-7930. [ZHANG Jinde, XI Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7921-7930. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 樊笑英,姜杉钰,杜雪明.我国矿山生态保护与修复政策体系研究 [J].上海国土资源,2024,45(2):5-9. [FAN Xiaoying, JIANG Shanyu, DU Xueming. Research on the system and policy of mine ecological protection and restoration in China[J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(2): 5-9. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 潘彬,赵艳玲,王少卿,等.生态网络构建视角下矿山生态修复重点区域识别——以辽宁省建平县为例 [J].金属矿山,2024(3):258-268. [PAN Bin, ZHAO Yanling, WANG Shaoqing, et al. Identification of key areas of mine ecological restoration from the perspective of ecological network construction: A case study of Jianping county, Liaoning province[J]. Metal Mine, 2024(3): 258-268. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 白光宇,张进德,田磊,等.我国“矿山复绿”行动进展及对策建议 [J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(2):153-155. [BAI Guangyu, ZHANG Jinde, TIAN Lei, et al. Mining complex green action advanced steadily and countermeasures of China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2): 153-155. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张进德,江峰,田磊,等.矿山地质环境治理专项实施情况探析 [J].中国国土资源经济,2014,27(1):17-20. [ZHANG Jinde, JIANG Feng, TIAN Lei, et al. Discussion and analysis on the implementation of special projects to address serious mining geo-environmental problems[J]. Natural Resource Economics of China, 2014, 27(1): 17-20. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 关军洪,郝培尧,董丽,等.矿山废弃地生态修复研究进展 [J].生态科学,2017,36(2):193-200. [GUAN

- Junhong, HAO Peiyao, DONG Li, et al. Review on ecological restoration of mine wasteland[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(2): 193 - 200. (in Chinese with English abstract)
- [8] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 1 部分: 通则: TD/T 1070.1—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 1: General rules: TD/T 1070.1—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [9] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 2 部分: 煤炭矿山: TD/T 1070.2—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 2: Coal mines: TD/T 1070.2—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [10] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 3 部分: 金属矿山: TD/T 1070.3—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 3: Metal mines: TD/T 1070.3—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [11] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 4 部分: 建材矿山: TD/T 1070.4—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 4: Building materials mines: TD/T 1070.4—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [12] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 5 部分: 化工矿山: TD/T 1070.5—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 5: Chemical mines: TD/T 1070.5—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [13] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 6 部分: 稀土矿山: TD/T 1070.6—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 6: Rare earth mines: TD/T 1070.6—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [14] 中华人民共和国自然资源部. 矿山生态修复技术规范 第 7 部分: 油气矿山: TD/T 1070.7—2022[S]. 北京: 地质出版社, 2022. [Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 7: Oil and gas mines: TD/T 1070.7—2022[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2022. (in Chinese)]
- [15] 胡华浪, 李伟方, 孙冠楠. 矿区生态系统质量和生态完整性评价[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(4): 203 - 208. [HU Hualang, LI Weifang, SUN Guannan. Ecosystem quality and ecological integrity assessment in mining area[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(4): 203 - 208. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 贾梦旋, 王金满, 李禹凝, 等. 基于自然解决方案的矿山生态修复研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 209 - 221. [JIA Mengxuan, WANG Jinman, LI Yuning, et al. Ecological restoration of mines based on nature-based solution: A review[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(8): 209 - 221. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李树志, 李学良, 尹大伟. 碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 286 - 292. [LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 286 - 292. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 雷少刚, 卞正富, 杨永均. 论引导型矿山生态修复[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 915 - 921. [LEI Shaogang, BIAN Zhengfu, YANG Yongjun. Discussion on the guided restoration for mine ecosystem[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 915 - 921. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 柯新利, 肖邦勇, 郑伟伟, 等. 城镇-农业-生态空间划定的多情景模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(3): 580 - 591. [KE Xinli, XIAO Bangyong, ZHENG Weiwei, et al. Urban-agricultural-ecological space zoning based on scenario simulation[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3): 580 - 591. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 姜昀, 王文燕. 生态环境分区管控与国土空间规划关系研究[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(1): 11 - 16. [JIANG Yun, WANG Wenyan. Relationship between ecological environment zoning control and territorial spatial planning[J]. *Journal of Environmental Engineering*

- Technology, 2025, 15(1): 11 - 16. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 白中科. 国土空间生态修复若干重大问题研究 [J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 1 - 13. [BAI Zhongke. The major issues in ecological restoration of China's territorial space[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 1 - 13. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王柯, 张建军, 邢哲, 等. 我国生态问题鉴定与国土空间生态保护修复方向 [J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7685 - 7696. [WANG Ke, ZHANG Jianjun, XING Zhe, et al. Identification of ecological problems in China and the direction of ecological protection and restoration of national space[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7685 - 7696. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 庞雅月, 朱梓铭, 叶宗达, 等. 国土空间生态修复理想模式与区划方法探索 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(4): 933 - 943. [PANG Yayue, ZHU Ziming, YE Zongda, et al. Exploration on the ideal model and zoning method of territorial ecological restoration[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2022, 47(4): 933 - 943. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张濛文, 苏腾, 张富刚, 等. 新时期我国国土空间生态修复理念与模式探讨 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1573 - 1580. [ZHANG Yingwen, SU Teng, ZHANG Fugang, et al. Conception and framework of land ecological restoration for a new stage in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1573 - 1580. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 李建中, 张进德. 我国矿山地质环境调查工作探讨 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 169 - 172. [LI Jianzhong, ZHANG Jinde. Discussion on the work of mine geo-environmental investigation of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 169 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张进德, 田磊, 裴圣良. 矿山水土污染与防治对策研究 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 157 - 163. [ZHANG Jinde, TIAN Lei, PEI Shengliang. A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 157 - 163. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 唐辉, 彭建, 徐冬梅, 等. 国土空间生态修复基线: 理论认知、划定框架与关键议题 [J]. 自然资源学报, 2024, 39(12): 2768 - 2782. [TANG Hui, PENG Jian, XU Dongmei, et al. Ecological restoration reference of terrestrial space: Theoretical recognition, identification framework and key issues[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(12): 2768 - 2782. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 甄莎, 高伟明, 张忠慧. 中国国家矿山公园现状研究 [J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 11 - 17. [ZHEN Sha, GAO Weiming, ZHANG Zhonghui. Research on the current situation of national mine parks in China[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 11 - 17. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 温冰, 周建伟, 王永辉. 国外矿山公园建设的启示 [J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(3): 82 - 86. [WEN Bing, ZHOU Jianwei, WANG Yonghui. Enlightenment of construction of mine park in foreign[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(3): 82 - 86. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 高吉喜. 探索我国生态保护红线划定与监管 [J]. 生物多样性, 2015, 23(6): 705 - 707. [GAO Jixi. Exploring the delineation and supervision of ecological protection redlines in China[J]. Biodiversity Science, 2015, 23(6): 705 - 707. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建 [J]. 中国土地科学, 2018, 32(11): 1 - 9. [BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. China Land Science, 2018, 32(11): 1 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 张鑫, 张焕祯. 金属矿山酸性废水处理技术研究进展 [J]. 中国矿业, 2012, 21(4): 45 - 48. [ZHANG Xin, ZHANG Huanzhen. Progress in research of metal mine acid wastewater treatment[J]. China Mining Magazine, 2012, 21(4): 45 - 48. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 樊小磊, 詹作泰, 高柏, 等. 重金属废水处理技术研究进展 [J]. 中国有色冶金, 2023, 52(4): 112 - 127. [FAN Xiaolei, ZHAN Zuotai, GAO Bai, et al. Treatment technology and principle of heavy metal wastewater[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(4): 112 - 127. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 刘琴, 刘文芳. 我国地下水污染治理技术研究综述 [J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊 2): 158 - 162. [LIU Qin, LIU Wenfang. Review on the groundwater pollution treatment technology in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Sup2): 158 - 162. (in Chinese with English abstract)]

- [35] 刘琴, 刘文芳. 我国地下水污染治理技术研究综述 [J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊 2): 158 - 162. [LIU Qin, LIU Wenfang. Review on the groundwater pollution treatment technology in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Sup2): 158 - 162. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 徐炳连, 王美乾, 吴静. 广西矿山地质环境治理恢复措施探讨 [J]. 西部探矿工程, 2012(1): 125 - 126. [XU Binglian, WANG Meiqian, WU Jing. Discussion on restoration measures of mine geological environment in Guangxi[J]. West-China Exploration Engineering, 2012(1): 125 - 126. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 刘祥宏, 尹勤瑞, 辛建宝, 等. 生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望 [J]. 生态环境学报, 2022, 31(7): 1476 - 1488. [LIU Xianghong, YIN Qinrui, XIN Jianbao, et al. Technology research progress and prospects of natural vegetation restoration and its artificial promotion[J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(7): 1476 - 1488. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 郑婷婷, 杨莉, 贾卓霏, 等. 基于生态系统“受损-恢复力-修复潜力”评价的内蒙古生态空间分区及保护修复策略 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1901 - 1909. [ZHENG Tingting, YANG Li, JIA Zhuofei, et al. Ecological space zoning and conservation and restoration strategies based on the evaluation of ecosystem “damage-resilience-restoration potential” in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1901 - 1909. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 韩煜, 赵伟, 张淇翔, 等. 不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究 [J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 120 - 125. [HAN Yu, ZHAO Wei, ZHANG Qixiang, et al. Effects of different vegetation patterns on ecological restoration in mining wasteland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 120 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 吴大付, 杨雪芹, 王旭东, 等. 不同土壤结构改良剂处理的磷淋溶特性的研究 [J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1102 - 1105. [WU Dafu, YANG Xueqin, WANG Xudong, et al. Effect of different soil structure modifiers on phosphorus eluviation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1102 - 1105. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 中华人民共和国国土资源部. 土地复垦质量控制标准: TD/T 1036—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [Ministry of Land and Resources of the People’s Republic of China. Completion standards on land reclamation quality: TD/T 1036—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)]
- [42] 张泽宇, 吴晓静, 梁一鹏, 等. 乌拉山废弃矿山生态恢复的近自然植被空间配置模式 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1164 - 1171. [ZHANG Zeyu, WU Xiaojing, LIANG Yipeng, et al. Spatial allocation pattern of near-natural vegetation for ecological restoration of abandoned mines in the Wula Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1164 - 1171. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 霍超, 王蕾, 谢志清, 等. 新时期我国煤矿地下空间综合利用现状及展望 [J]. 地质论评, 2024, 70(4): 1455 - 1468. [HUO Chao, WANG Lei, XIE Zhiqing, et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of underground space in coal mines in China in the new period[J]. Geological Review, 2024, 70(4): 1455 - 1468. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 吉莉, 刘峰, 尚建选, 等. 关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 281 - 289. [JI Li, LIU Feng, SHANG Jianxuan, et al. Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 281 - 289. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 孙好想, 李晓昭, 卞夏, 等. 金属非金属矿山地下空间现状及开发利用研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 375 - 385. [SUN Haoxiang, LI Xiaozhao, BIAN Xia, et al. Study on the status and utilization of underground space in metallic and non-metallic mines[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(2): 375 - 385. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华