



基于NbS的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径

王金满 冯宇 叶甜甜 贾梦旋 高亭玉 刘悦 吴大为 李明刚

引用本文：

王金满, 冯宇, 叶甜甜, 等. 基于NbS的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 377–391.

WANG Jinman, FENG Yu, YE Tiantian. Theoretical framework and technical pathway for the integrated ecological restoration throughout the overall life cycle of mining based on NbS[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 377–391.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0797>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自然解决方案的矿山生态修复研究进展

Ecological restoration of mines based on Nature-based Solution: a review

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 209–221 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1306>

关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考——基于生态修复视角

Some thoughts on green development strategy of coal industry: from aspects of ecological restoration

煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/daa798c3-3985-410d-8610-a2cc03b92fd2>

基于无人机倾斜摄影测量技术的露天矿生态修复研究

Study on ecological restoration of open pit mines based on UAV oblique photogrammetry technology

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a26bf3d9-c86d-410b-b9d5-d10ff41f4f85>

矿山设备全生命周期信息集成与工况判别算法研究

Life-cycle information integration and working condition discriminational gorithm of mine equipment

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1cd2a30e-4178-4e7e-8905-d941f454a213>

北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术

Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 323–333 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1902>

煤 – 水协调共采全生命周期影响因子研究

Study on influencing factors of coal–water coordinated mining based on theory of full life cycle

煤炭科学技术. 2021, 49(12): 243–251 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/69acd79e-dce1-4328-93f7-5a8858539935>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王金满, 冯宇, 叶甜甜, 等. 基于 NbS 的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 377–391.

WANG Jinman, FENG Yu, YE Tiantian, et al. Theoretical framework and technical pathway for the integrated ecological restoration throughout the overall life cycle of mining based on NbS[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 377–391.

基于 NbS 的全生命周期矿山生态修复理论框架及技术路径

王金满^{1,2}, 冯宇^{1,2}, 叶甜甜¹, 贾梦旋¹, 高亭玉¹, 刘悦¹, 吴大为¹, 李明刚³

(1. 中国地质大学(北京) 土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;

3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 矿山生态修复是国土空间生态保护和修复的重点和难点。当前, 矿区生态修复注重自然恢复, 向系统性、整体性和可持续性方面转变。采用文献梳理、对比分析和归纳总结的方法, 结合基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)准则, 建立了全生命周期的矿山生态修复全过程实施技术框架, 包括保护与预防控制、复垦修复、管理维护、监测评估和适应性管理, 提出了基于自然的修复技术促进矿山生态修复的技术路径。首先, 将 NbS 理念融入矿山生态保护及预防控制阶段, 应采取避让措施、重要物种保护、物种采集利用等手段来减轻矿山开采对生态环境的破坏, 提升矿山生态系统的自恢复能力, 降低成本效益; 其次, 将 NbS 引入地貌重塑、土壤重构、植被重建和景观营建等具体修复措施中, 通过模拟自然过程激发矿山生态系统自恢复, 提供科学、高效和可持续的修复方案; 再次, 将 NbS 准则融入矿山生态修复管理维护阶段, 围绕基础设施、土壤与植被及生态系统功能维持进行管理维护, 符合当前生态系统修复的主流方式; 最后, 基于 NbS 进行矿山开采前、开采中、开采后全周期监测评估, 并对比不同恢复情景开展适应性管理。基于 NbS 理念的理论框架和技术路径为新时期矿山生态修复提供重要理论指导, 有助于实现矿山生态系统全生命周期的整体保护、系统修复和综合治理。

关键词: 矿山生态修复; 国土空间生态保护; 基于自然的解决方案; 全生命周期管理

中图分类号: X171 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)01-0377-15

Theoretical framework and technical pathway for the integrated ecological restoration throughout the overall life cycle of mining based on NbS

WANG Jinman^{1,2}, FENG Yu^{1,2}, YE Tiantian¹, JIA Mengxuan¹, GAO Tingyu¹, LIU Yue¹, WU Dawei¹, LI Minggang³

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Technology Innovation Center for Ecological Restoration in Mining Areas, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China)

Abstract: Ecological restoration in mining area is a focal point and challenge in the terrestrial ecological conservation and restoration in China. Currently, ecological restoration in mining areas emphasis on natural recovery, transitioning towards a more systematic, integrated, and sustainable solution. This study synthesizes existing literature, conducts comparative analyses, and summarizes key findings to propose a holistic approach. The proposed technical framework spans the overall lifecycle of ecological restoration, covering key stages such as protection and prevention, reclamation and restoration, management and maintenance, monitoring and evaluation, and adaptive management. Initially, the integration of NbS concepts in the stages of ecological protection and prevention involves strategies such as avoidance measures, protection of crucial species, and the utilization of species collection to mitigate the ecological damage caused by mining. This integrated approach serves to enhance the self-recovery capacity of ecosystem and reduce costs. Subsequently, incorporating NbS prin-

收稿日期: 2024-06-15 策划编辑: 黄小雨 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.12438/cst.2024-0797

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大专项资助项目(ZD20232317)

作者简介: 王金满(1979—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授。E-mail: wangjinman@cugb.edu.cn

通讯作者: 冯宇(1989—), 男, 山西晋城人, 博士, 副教授。E-mail: fy@cugb.edu.cn

ciples into specific restoration measures, such as landform reshaping, soil reconstruction, vegetation restoration, and landscape rebuilding, stimulate the self-recovery of mine ecological systems of mimicking natural processes. This method provides scientifically sound, efficient, and sustainable restoration solutions. Moreover, incorporating NbS principles into the management and maintenance of mine ecological restoration focuses on the preservation of infrastructure, soil, vegetation, and the maintenance of ecosystem functionality. These practices align with contemporary mainstream approaches to ecosystem restoration. Lastly, conducting the overall life cycle monitoring and evaluation including the before, during and after mining processes, and the adaptive management can be applied through comparative analysis. Overall, the framework and technical pathways designed in this study provide valuable insights for advancing ecological restoration practices in the new era, ultimately contributing to the holistic protection and sustainable management of restored ecosystems in mining areas throughout its overall life cycle.

Key words: ecological restoration in mining area; terrestrial ecological conservation and restoration; Nature-based Solutions; overall life cycle management

0 引言

矿山土地损毁和生态破坏伴随着矿山开采的全过程,矿山生态修复已成为国土空间生态保护和修复的重点和难点^[1-2]。通过40 a的生态修复实践,我国的矿山生态修复取得显著成效;然而,受历史欠账多、政策法规不完善、管理和技术等因素的影响,矿山生态修复的缺口仍然很大。当前,中国矿山生态修复研究主要聚焦于地貌、土壤、植被、景观和生物多样性等生态要素修复技术、修复成效评估与监测技术等方面^[3-7],基于生态系统、恢复力和社会生态系统理论等开展了新的探索^[8-10]。随着生态文明理念的深入,对矿山生态修复提出了新的要求^[11-12],矿山生态修复也越来越注重自然恢复。然而,由于缺少指导矿山生态系统性修复的做法^[13],关于矿山生态修复全生命周期的理论也并不完善,矿山生态修复遭遇的瓶颈和问题,亟待通过新理念、新技术和新标准实现破解。

近年来,基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)由于其先进的生态保护理念和对多种生态系统广泛的包容性,逐步成为应对多重社会挑战的主流化选择。NbS是指“保护、可持续管理和恢复自然的和被改变的生态系统的行动,能有效和适应性地应对社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性效益”^[14]。NbS理念呼吁向自然学习,重视人与自然生态系统的互惠互利,这与我国生态文明的理念高度统一^[15]。因而,探索基于自然的生态系统自恢复技术成为未来矿山生态修复的必由之路。2022年11月,国际恢复生态学学会(SER)发布了世界上首部矿山生态修复国际标准——《矿山场地生态修复和恢复的国际原则与标准》,不仅阐释了矿山生态修复对利益相关方的潜在影响,还对矿山生态修复的各阶段目标进行了

规范^[16],对全球矿山生态的全过程恢复具有重要指导意义;2024年5月,自然资源部发布《煤矿土地复垦与生态修复技术规范》等4项国家标准,科学指导煤矿、金属矿和陆上油气项目的土地损毁、复垦修复和监测评价工作,对复垦修复的全过程进行了规定^[17],是全国首批专门针对正在生产矿山生态修复的国家标准,对在产矿山“边开采、边修复”提出要求。

随着“联合国生态恢复十年”行动计划和基于自然的解决方案的持续推进,矿区生态恢复也开始摒弃传统灰色生态工程措施^[18],注重基于自然的恢复手段、提倡采矿全生命周期的生态系统恢复和开展适应性管理^[19],矿山复垦的各阶段、全流程和新技术的应用,将成为未来矿山生态修复的重点研究领域。当前,中国正处在深化生态文明理念、践行“两山”理论和落实绿色矿山建设的重要时机,亟待融入NbS理念于矿山生态修复的全过程中,探索矿山开采全过程的生态修复技术路径。然而,过去矿山生态修复仅关注于某一阶段、某个环节的修复工作,缺乏各阶段、各环节的联动,缺乏全生命周期的视角来统筹和指导整体矿山生态修复工作。因此,本文基于全生命周期视角,对NbS在矿山生态修复的技术路径进行联动探索,系统性地规划和实施生态修复,以期为推进矿山生态修复的实施提供理论指导和技术参考。

1 基于NbS的全生命周期矿山生态修复理论框架

1.1 矿山生态修复的新时代需求

基于NbS的生态修复是用于提升矿山生态环境的重要解决方案,是对已破坏的矿山生态系统进行修复,以实现可持续管理的目标^[20-21]。当前, NbS在我国生态文明建设中受到了广泛认可与应用,运用

NbS 进行矿山生态修复是对以往传统修复理念及方法的优化,未来在中国矿山生态修复具有较大发展潜力^[22-23]。基于 NbS 的保护修复技术在矿山生态修复领域得到了初步应用,如地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现、生物多样性重组与保护等环节;全生命周期理论是一种连续性、系统性的阶段管理模式,在经济、环境、技术等领域已广泛应用,但在矿山生态修复领域涉及较少。

目前矿山修复过程中在一定程度上融入了 NbS 理念,但缺乏全生命周期的视角来统筹和指导整体矿山生态修复工作,缺乏联动性、整体性和系统性的考虑。针对矿山生态修复过程繁多的特点,片面关

注单一阶段无法准确评估生态修复的效果。因此,矿山生态修复过程中需要借助 NbS 理念,从全生命周期视角出发,围绕保护和预防控制、复垦修复、管理维护、监测与适应性管理等各个阶段开展深入研究,结合各个阶段特点,以提高生态系统稳定性、保障矿山生态安全和实现可持续发展。

1.2 理论框架

本研究以 NbS 为指导,基于其理念与准则,针对矿山生态修复实施全过程中的实施保护及预防控制、复垦修复、管理维护、监测评估与适应性管理等 4 个阶段构建了一套面向全生命周期的矿山生态修复理论框架(图 1)。

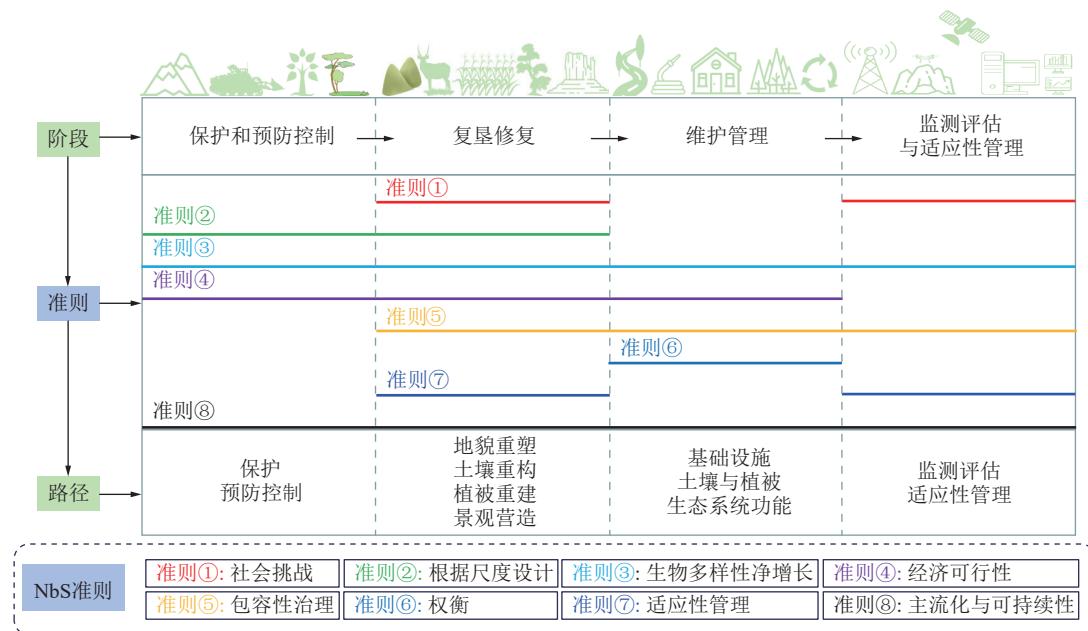


图 1 基于自然的全生命周期矿山生态修复理论框架

Fig.1 Nature-based technical framework for the overall life cycle ecological restoration in mining area

世界自然保护联盟(IUCN)提出了 NbS 实施的 8 项基本准则和 28 项指标^[24-25]。准则①明确了 NbS 所应对的一个或多个社会挑战;准则②提出根据面临挑战的尺度开展生态修复;准则③强调 NbS 应带来生物多样性净增长和保证生态系统完整性;准则④、准则⑤注重经济可行性和社会公平性;准则⑥强调 NbS 需要公平地权衡,以实现其主要目标和继续提供多种效益;准则⑦基于证据对自然解决方案进行适应性管理;准则⑧强调 NbS 要实现可持续性与主流化^[26]。NbS 具有经济高效,长久可持续,多重效益,可以自维护、减少后期维护成本,最大化协同、最小化权衡等特点^[27-28]。

矿山生态保护及预防控制阶段的重点是生态系统保护的方法,强调采矿优化设计保护矿区生态系

统、预防矿山生态退化、生物多样性丧失等问题^[29]。矿山复垦修复阶段需要考虑当前面临及需要解决的社会挑战,该阶段包括地貌重塑、土壤重构、植被重建和景观营建技术,从景观尺度开展矿山生态修复,在实施过程中做到技术、经济可行^[21]。管理维护阶段需根据矿山全生态要素进行系统管理维护,及时发现并解决问题、调整管理及维护手段,达到经济可行性、生态系统完整性、可持续性^[30]。监测与适应性管理阶段贯穿矿山生态修复实施全过程,重视基于证据的适应性管理,结合适应性管理策略、及时调整措施,包容性应对风险与意外影响,形成适合矿山的主流化和可持续性生态修复方案^[31]。通过保护与预防控制、复垦修复、管理维护、监测与适应性管理 4 个阶段形成有中国本土特色的全生命周期矿山生

态系统修复解决方案,实现矿山生态保护修复与矿产资源开发利用目标的协同。

2 基于NbS的矿山生态保护和预防控制技术路径

传统的矿山生态保护和预防控制措施往往侧重于末端治理,即在环境问题出现后进行修复和补救。这些方法虽然能在一定程度上缓解环境问题,但往往成本高、周期长,且难以完全恢复生态系统的原有功能和稳定性。NbS的核心理念是利用自然过程和生态系统服务解决环境问题,减少人为干预的负面影响,通过恢复自然景观和生态功能,NbS能够有效提升生态系统的弹性和自我修复能力^[32]。将NbS理念引入矿山生态保护和预防控制措施中强调在矿山开采前和开采过程中,就通过科学规划和管理,减少对生态系统的破坏,同时利用自然的力量促进生态系统的恢复和重建,可减少矿山开采过程中资源浪费和生态破坏,实现资源循环利用,降低生态修复成本。基于NbS的矿山生态保护和预防控制措施在全生命周期的体现是一个系统性、综合性的过程。从矿山规划、建设、运营到闭坑修复的各个阶段,NbS理念均发挥着关键作用。NbS的可持续性特点有助于在矿山全生命周期生态修复中实现长期的生态、经济和社会效益^[33]。

2.1 保护措施

基于NbS的矿山生态保护措施主要包括避让、

减缓和重要物种与人文保护(图2)。避让措施是根据矿山开发特点、生态环境功能要求和区域环境敏感程度,重点确定矿产开发过程中特殊环境及敏感保护目标。减缓措施是结合资源空间分布特征、生态状况等,优化矿山开采工艺流程,减少或者控制矿山建设、开采扰动量和扰动范围,最大限度减少地质环境问题、土地资源和生态系统受损。重要物种与人文保护是根据矿区及周边受到地方、国家法律法规或国际法保护的野生生物物种,以及人文特征特殊保护要求,需要确定保护的重要物种、人文景观、文物等保护对象与保护目标。

在露天矿生态保护措施中,避让措施要求在矿山规划阶段,通过评价模型构建如PSR模型、VSD模型等进行详细的环境影响评估,识别生态敏感区和关键物种栖息地,避免在这些区域进行开采活动。NbS准则③强调了生物多样性与生态系统完整性,将NbS与避让措施相结合可以最大限度地减少对生态系统的破坏,保护生物多样性和维持生态平衡^[34]。将NbS准则③和准则⑧与减缓措施相结合,通过工程措施、生物措施、蓄水保土耕作措施等进行植被覆盖和水土保持工程^[35],减少水土流失、增加水源涵养;通过自然风障和植被屏障,降低粉尘和噪声污染;通过建立生态走廊和迁地保护区,可以有效保护矿区及周边的珍稀植物和动物种群。这些措施不仅有助于生态保护,还能够提升生态系统的自我修复能力,使生态系统持续稳定发展。此外,保护具有文化和

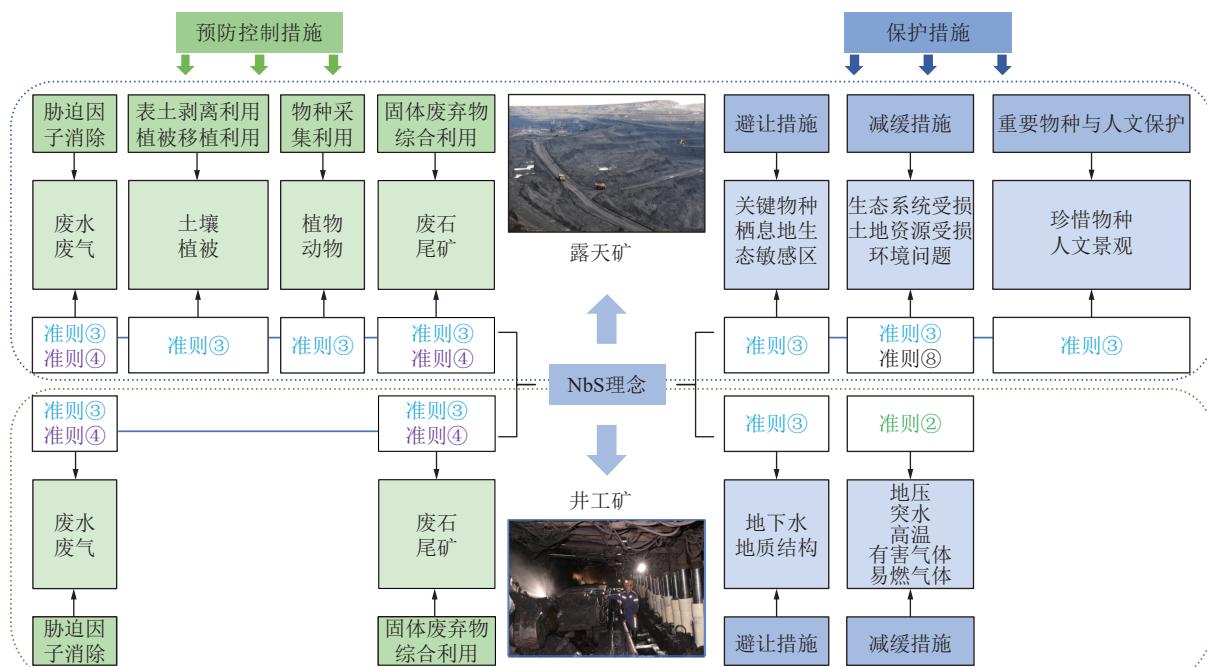


图2 基于NbS理念的矿山生态修复保护和预防控制措施

Fig.2 NbS-based ecological restoration protection and prevention measures in mining area

历史价值的景观和遗址,能够在生态修复的同时,保留和传承当地的文化遗产^[36]。

在井工矿生态保护措施中,基于 NbS 准则③强调的生态系统完整性,避让措施要求在开采前通过地质勘探技术(如钻探、物探等)和专业软件对地质数据进行模拟和分析,了解地下地质条件,避免在地质不稳定的区域进行开采,确保开采活动不会对地下水和地质结构造成严重影响。减缓措施则是要结合地下开采的复杂环境,在采矿时结合 NbS 准则②,从小尺度工作面到大尺度整个矿区尺度出发,考虑矿石分布、岩性等因素,开展沉陷预计,并根据沉陷预计结果在整个矿区尺度上优化开采设计与工艺流程,减少或避让对具有文化和历史价值的景观和遗址的影响。

2.2 预防控制措施

生态保护预防控制措施主要包括固体废物综合利用、物种采集利用、表土剥离利用与植被移植利用和胁迫因子消除(图 2)。固体废物综合利用鼓励优先对固体废弃物资源化综合利用,并选用合适的固体废物处理技术,加大综合利用量,减少对地形地貌的破坏和土地的压占,确实不能利用的可用于回填。物种采集利用是充分收集或采集受损区的种子资源并加以保存,必要时在矿区当地通过营建种子资源收集圃,防止遗传基因流失,尤其对土源缺乏地区。表土剥离利用与植被移植利用是遵循因地制宜和生态保护的原则,珍惜和保护矿山土壤资源和土壤种子库,对地表植被及剩余生物群以及自然恢复的部分植被进行保护利用。胁迫因子消除是通过采取一系列措施和方法对造成地质环境破坏、潜在污染、水土流失和煤矸石自燃等危险因子进行消除。

NbS 提倡通过技术手段对废石和尾矿进行综合利用,减少废物堆积对环境的影响。例如,将废石用于道路建设和建筑材料,将尾矿处理后用于生产水泥和砖块,或用于地下采空区回填。这种资源的循环利用不仅减少了环境污染,还提高了矿山开采的经济效益,符合 NbS 准则③和准则④。在露天矿山开采过程中,合理采集和利用周边的植物和动物资源是 NbS 准则③所强调生物多样性和生态系统完整性的重要举措。通过人工繁育和合理利用,保护原生植物资源和野生动物种群,维持生态系统的平衡和稳定。将 NbS 准则③与表土剥离利用与植被移植利用相结合,在露天矿山开采前剥离并储存表层土壤,避免表土流失和土壤退化。在修复过程中,利用储存的表土进行植被恢复,同时将原生植被移植到

适宜区域,保持植物多样性和生态系统稳定性。这种方法能够有效提高生态修复的效果,促进生态系统的自然恢复^[37]。基于 NbS 准则③和准则④,通过污染治理和环境退化治理消除影响生态系统健康的胁迫因子,维持生态系统稳定性。例如,对矿山废水和废气进行处理,防止污染扩散。这些措施能够有效减少矿山开采对环境的负面影响,减少经济损耗,提高生态修复的整体效果^[38]。

3 基于 NbS 的矿山复垦修复技术路径

在矿山复垦修复领域,NbS 的引入标志着一种全新生态修复思路的诞生。常规方法对于矿山复垦往往侧重于直接的人工干预,忽略了与周边自然环境的协调性,并且过程较为单一,缺乏生态考量,可能导致地貌形态与原生环境差异较大。与此相比 NbS 技术体系涵盖了地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观营建和生物多样性保护等多个方面,旨在通过模拟和强化自然全过程,促进矿山生态系统的自我恢复和可持续发展。

对于废弃矿井而言,其修复工作往往面临着更为严峻的环境挑战,如地表塌陷、土壤污染、生态系统退化等^[39-41]。在此情境下,基于 NbS 的修复措施侧重于快速恢复生态平衡,消除潜在的环境风险,并为后续的土地再利用奠定坚实基础。而在产矿山则需要在保障安全生产和持续开采的前提下,同步实施生态修复措施^[42-43]。基于 NbS 的修复策略在这里体现为最小化开采活动对周边环境的影响,通过优化开采方案、实施边开采边修复的策略,确保生态系统的连续性和稳定性。

尽管废弃矿井与在产矿山在生态修复的具体实施上可能存在差异,但基于 NbS 的矿山复垦修复技术为两者提供了相同的核心思路:即通过模拟和强化自然过程,促进矿山生态系统的自我恢复和可持续发展。基于 NbS 的矿山复垦修复技术不仅关注短期内的生态修复效果,更着眼于生态系统的长期稳定性和健康性,为矿山废弃地的生态修复提供了更加科学、高效和可持续的解决方案^[43-44]。

3.1 地貌重塑技术

在矿山的全流程复垦修复生产过程中,地貌重塑都是修复高扰动矿山生态修复最基础的一步,也是确保生态恢复、资源可持续利用以及生态安全的重要措施^[45-46]。NbS 方法强调以自然恢复力为基础,通过科学规划、合理设计和精细施工,针对重塑地貌人工扰动较大、景观不协调和稳定性不足等问题,

融入 NbS 方法采用一系列基于自然的复垦技术与方法来实现矿山地貌的有效重塑和生态环境的全面恢复^[47]。

露天矿的地貌重塑主要发生在排土场、废石场(图 3)。根据 NbS 准则③及准则④, NbS 项目应带来生物多样性增长和经济具有可行性, 依托采矿设计、岩土比例、剥采比等关键指标, 进行科学选址, 并采用仿自然地貌工艺, 实施过程中, 有序进行分层剥离、分类排放、分区整形, 同时充分考虑流域水文地貌特征, 尽量减少对永久基本农田、草原和公益林等敏感保护目标的占用, 稳定后的排土场平台最终应形成 2°~3°的反坡, 控制平台径流汇集到边坡形成冲沟。通过融入 NbS 的设计, 确保重塑地貌的安全、稳定和无污染。此外, 依据 NbS 准则⑦进行适应性管理, 针对集中分布的矿山群, 充分结合各露天煤矿开采进度和推进境界, 统筹各露天煤矿山采、排空间和时序, 制定各露天煤矿山“少占地(减少外排)、多

回填(减少遗留矿坑)、先进适用的采、排互用优化方案; 具体工作中优化排土作业流程, 控制水土流失, 形成平台、边坡相间的规则地形, 为现代农业机械化操作创造有利条件。

井工矿的地貌重塑主要发生在塌陷地。遵循基于 NbS 的地貌重塑原则, 确保土地资源的可持续利用, 同时保护并恢复自然生态系统。针对原有地形坡度较大的区域, 依据 NbS 准则④, 参照梯田建设标准, 实施坡改梯工程, 提高土地利用效率, 保护自然地貌的完整性, 促进生态系统的恢复和稳定。依据 NbS 准则⑧中对于项目可持续性的要求, 对于塌陷较轻的土地, 进行表土剥离和地表整平工程, 消除开采塌陷带来的不利影响, 恢复土地功能。而对于未稳沉的塌陷地, 依据 NbS 准则①和准则③, 优先考虑当前面临的挑战, 并且对于自然可能造成的不利影响, 采用预回填治理技术, 以确保土地在稳沉后能够得到有效利用。

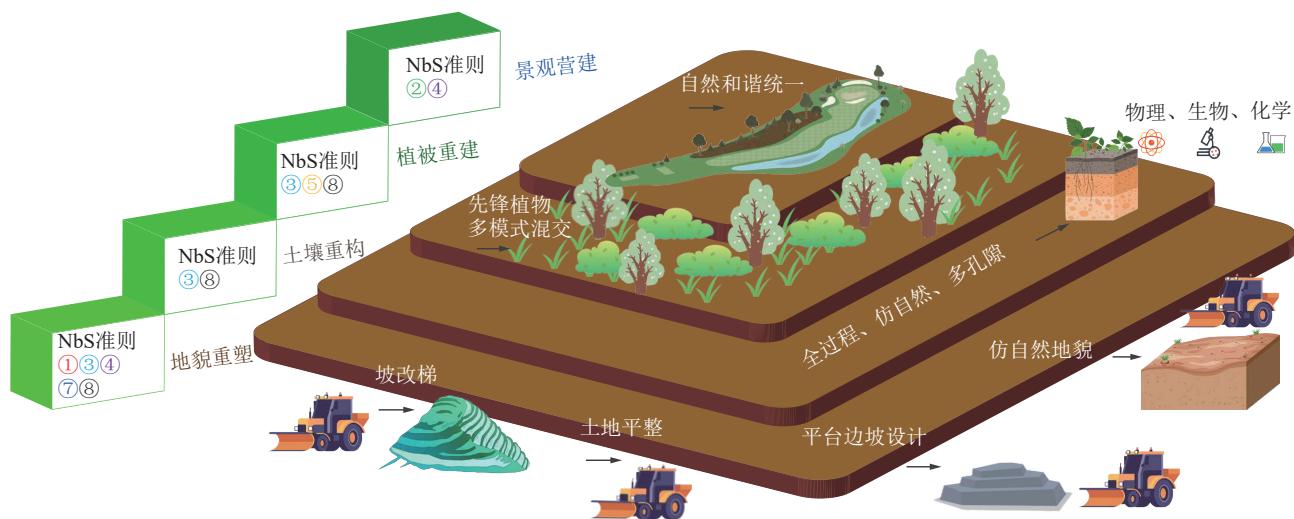


图 3 基于 NbS 的矿山复垦修复技术
Fig.3 NbS-based reclamation and restoration technology in mining area

3.2 土壤重构技术

在矿山生态修复中, 土壤重构至关重要^[31,48-50]。传统土壤重构技术仅关注土壤某一方面的修复, 如土壤的物理结构或肥力恢复, 而未能全面考虑土壤的物理、生物和化学营养过程^[31], 而针对露天矿与井工矿的生产特点, 实施基于 NbS 的土壤重构技术, 不仅能改善土壤质地、增加孔隙度和持水能力, 还能够促进土壤生物多样性和化学营养平衡的恢复, 有效保护生态系统^[18]。

依据 NbS 准则③和准则⑧, 土壤重构需要在提

升生物多样性与生态系统完整性的同时, 注重可持续性。针对露天矿, 治理区表土覆盖前应进行清理平整深翻处理, 清除地面建筑物、构筑物及其他相关设施, 清除硬化地面并挖除地基部分设施。复垦为耕地的, 有效土层厚度、土壤容重、砾石含量等指标应符合耕地的相关标准。对恢复区土壤进行深翻处理, 以恢复土壤的自然层次和结构, 有利于土壤生态系统的完整性和稳定性。优化排土工艺, 缩短回填表土时间, 应减少二次倒土。复垦为耕地时, 应首先使用剥离表土, 充分利用前期收集的土源进行

复垦。

针对井工矿塌陷地的土壤重构,融入 NbS 准则的同时也要根据具体情况采取不同策略。具备表土剥离条件的区域,应优先进行表土剥离;对高潜水位矿山,在塌陷前进行表土剥离是更为理想的选择。对于非积水塌陷地或季节性积水塌陷地,及时填补地表裂缝,并结合地形特点进行土壤剖面重构。常年积水的塌陷地则采用“挖深垫浅”法,结合抬田措施恢复农用地或建设用地,同时确保回填物料满足环境保护标准。

3.3 植被重建技术

植被选择与配置影响矿山生态系统的功能和稳定性,进而影响整个矿山生态系统的可持续^[51-52]。在矿山植被恢复过程中,融入 NbS 准则,意味着将自然过程和生态系统的自恢复能力作为核心,合理选择和配置植物物种,并设计植被群落配置模式。

在植物选择方面,遵循 NbS 的准则③和准则⑤,强调生态系统的保护和恢复以及包容性治理。基于矿山成功的土地复垦实践经验以及植物试验筛选区的研究成果,选择先锋植物和适生物种。在气候条件较为恶劣的矿区,优先选择地带性的抗逆性乡土植物;而在气候条件相对较好的矿区,则选择可以有效控制地表径流的乔木、灌木和草本物种,并兼顾能够展现自然性、层次美视觉效果的物种。

在植被群落配置模式选择上,根据 NbS 准则 3,以生物多样性重组和保护为目标,优先利用矿区剥离的草皮和移植的物种。根据不同生物气候带矿区所在的气候条件、坡向、坡度、地表物质组成等因素,灵活选择乔灌混交、灌草混交、乔草混交、乔灌草混交等多种模式,以构建稳定、多样的植被群落。

在植被配置过程中,结合 NbS 准则③和准则⑧,强调利用生态系统的自我恢复能力和可持续性要求,充分考虑到不同生物气候带矿区的环境特点,精准确定乔灌草的配置密度和种植方式。特别关注植物根系的发达程度、固土和固氮效果、生长速度、生命周期以及枝叶繁茂程度等因素,这些特性对于控制高陡边坡崩塌、坡面泥流等风险至关重要。

3.4 景观营建技术

在矿山景观营建中,基于 NbS 理念在深入理解和尊重矿区受损的水系、生物多样性和景观廊道基础上,从景观尺度出发,恢复并重建这些廊道的连通性和功能性,使其与原生态系统达到和谐统一。

具体来说,在景观营建过程中,融入 NbS 准则②,从景观尺度出发,充分利用采矿过程中形成的便利

条件,重新梳理和规划水系网络,疏通绿脉和水脉,优化矿区的整体景观格局,为生态系统的自我恢复创造有利条件。同时,对于“矿业遗迹”以及与矿业相关的艺术、知识和文化遗产,结合 NbS 准则④,依据经济可行性原则,将矿山“变废为宝”,通过有意识的空间和场所营造,不仅保护了珍贵的遗产,也为矿山文化的传承和科学传播提供了有力支撑。对露采场、排土场、工业场地等重要节点赋予新的功能,通过文化功能重构与提升,这些曾经的工业生产场所将逐渐转变为具有教育、科研和休闲功能的绿色空间。

4 基于 NbS 的矿山生态修复管理维护技术路径

在矿山生态修复中,管理维护阶段极其重要,它是实现 NbS 核心理念的重要手段之一,涵盖了基础设施管理维护、土壤与植被管理维护以及生态系统功能维持 3 个方面(图 4)。基于 NbS 的矿山生态修复管理维护措施是一个全面且系统的过程,它从小尺度到大尺度进行系统性管理维护,旨在确保矿山生态修复系统在整个生命周期内能够持续、稳定地发挥预期功能。从全生命周期视角融入 NbS,通过科学的管理维护,可以确保矿山生态修复项目的长期效益和可持续性。在管理维护过程中,需要对其资源或系统的运行状况进行监测、评估和改进,及时发现并解决潜在问题,以保证其正常运行和长期效益。利用 NbS 进行管理维护的目标是提高矿山生态修复的资源或系统使用效率、降低运行成本、减少对环境的影响。

4.1 基础设施管理维护

基础设施的建设与维护是保障矿山生态修复工作顺利进行的基础。NbS 理念强调利用自然的力量进行基础设施的建设与维护^[53]。对于矿山生态修复,NbS 的基础设施建设类方法要求对矿山生态修复过程中涉及的各类公共设施进行定期维修、保养、更新及改进工作。提倡建立符合生态原理的维护措施,减少人工干预,提高系统的稳定性和生态性。同时,NbS 准则⑥-指标 6.3 要求定期检查已建立的保障措施,以达到不破坏整个矿山 NbS 稳定性的目标。因此,NbS 要求加强对基础设施的管理与维护,在时间尺度上,重点分为初期、中期、后期 3 阶段执行管理维护。对于初期维护阶段,结合适度人工引导建设必要的防护设施,如挡土墙、截水沟等,并定期管护,发现设施运行不正常或损毁及时修复与替换。对于中期维护阶段,进行定期的植被修剪、除草、病虫害

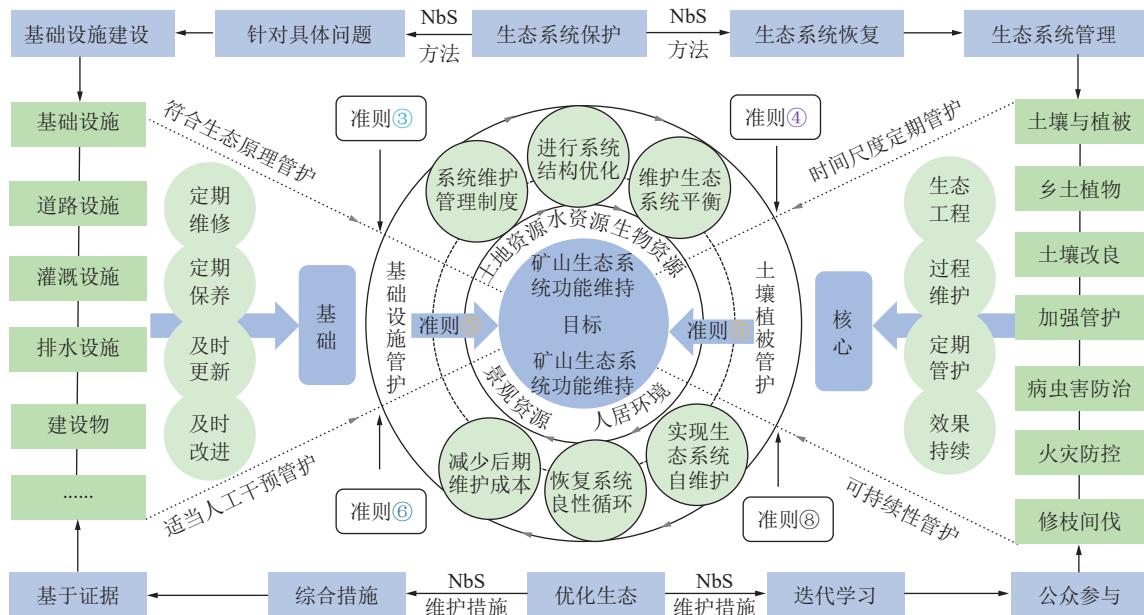


图4 基于NbS的矿山生态修复管理维护实现路径

Fig.4 NbS-based ecological restoration management and maintenance pathway in mining area

防治等工作，并对土壤进行必要的补充施肥和结构调整，加强防护设施的维护和管理。对于后期维护阶段，应减少直接的人为干预，但仍需进行定期的管护，以增强基础设施的自然韧性，确保其生态功能的正常发挥。

4.2 土壤与植被管理维护

土壤质量与植被恢复是矿山生态修复的核心内容^[3,54]。NbS理念注重利用乡土植物和生态工程技术进行土地改良和植被恢复。通过引入适宜的植物种类，采用植物种植、造林等方式，提高土壤肥力和植被覆盖率，促进生态系统的恢复与稳定。此外，NbS准则⑥指出要保证实施NbS近远期效益的权衡，并在时间尺度上，强调修复过程及其成效需要在可能长达数十年的长期过程中逐步实现，以确保生态系统能够充分恢复，进而达到自我维持的稳定状态，从而达成修复的可持续目标^[55-56]。因此，在NbS理念指导下的土壤与植被管理维护研究，应在复垦修复的全过程中，加强重构土壤、重建植被的管护与健康管理，避免二次受损与退化。在时间尺度上，重点管护时间为复垦前期3~5 a，但对于生态脆弱的煤矿空间，管护可延续至6~10 a；管护内容主要包括病虫害防治与火灾防控以及修枝与间伐^[3]。在NbS理念方针下及时发现并解决问题，确保修复效果的持久性。

4.3 生态系统功能维持

生态系统功能的维持是矿山生态修复的最终目标。NbS准则⑧提出要使NbS实施的项目主流化并

具有可持续性，同时，NbS目标是实现“最好和最高”修复水平，NbS准则③与准则④在生态与经济两方面强调了NbS的优势是可以自维护且减少后期维护成本^[57]。利用NbS对矿山生态系统维护具有重要指导意义，但矿山生态系统在时空尺度上变化十分复杂，因此，在生态系统功能维持方面的管理维护阶段，着重聚焦于空间尺度实施分区管理维护策略，对关键区域强化管护，一般区域则进行常规管理。通过优化空间布局，合理配置植被，构建高效监测网络，逐步实现精准管理维护并跨区域强调协同管理。同时，定期评估生态系统服务，反馈调整管理策略，以大数据、人工智能等科技为支撑，确保管护科学性、有效性和可持续性。

通过基于自然的方法，建立完善的矿山生态系统维护管理制度，确保生态系统功能维持的多样性、稳定性与可持续性。NbS准则③强调提升生物多样性与生态系统完整性，识别加强生态系统整体性与连通性的机会并整合到NbS策略中^[58]。NbS理念强调通过保护生物多样性、维护生态平衡等方式来实现生态系统功能的恢复与维持^[59]。因此，在修复过程中，注重保护矿区内外的重要生态系统，加强对矿区关键物种和生物多样性保护与管理，对生态系统的生物种群、群落组成和结构进行优化，使复垦修复后的生态系统由形态恢复逐步过度到功能恢复，使受损矿区生态系统恢复良性循环。同时，通过对生态系统管理与维护等手段，维持生态系统的相对稳定性，保障土地资源、水资源、生物资源、景观资源

和人居环境的可持续利用。为确保矿山生态修复系统实现“最好和最高”修复水平,需要结合NbS方法将基于自然的管理维护技术融入到矿山生态修复的全生命周期中。

5 基于NbS的矿山生态修复监测评估与适应性管理技术路径

基于自然的矿山监测评估与适应性管理需顺应采矿周期性变化,根据需要NbS准则中的①③⑦⑧

项适用于指导监测与管理工作的开展,具体实现路径如下图5所示。基于NbS的监测评估是确保修复效果持续性和环境稳定性的基础,能够为适应性管理提供数据支持。适应性管理基于生态系统的不确定性和对生态系统认识的时限性,通过评估结果采用管理政策和实践措施来获得经验,并根据生态系统变化情况,修正、改进管理政策和实践措施^[60],并在此过程中进一步增强NbS对矿山生态系统的正向影响。二者管理贯穿矿山生态修复工程的全过程,

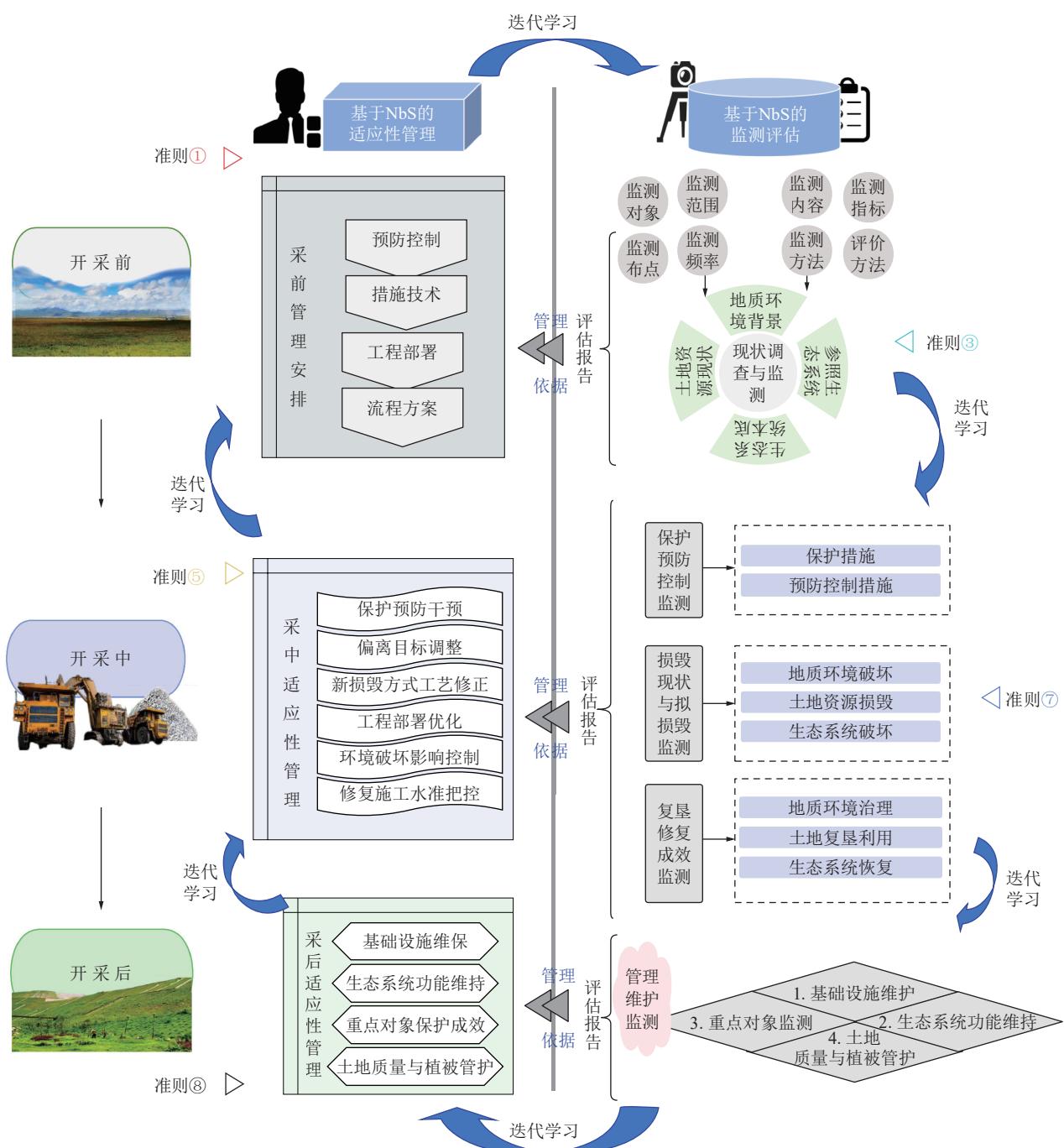


图5 基于NbS的矿山监测评估与适应性管理实现路径

Fig.5 NbS-based monitoring and evaluation and adaptive management pathway in mining area

从开采前项目的规划与设计阶段开始,持续到修复结束后的长期监测和维护,包容性应对风险与意外影响,确保修复目标的有效实现。

5.1 监测评估

监测和评估是了解NbS是否有效干预社会挑战的有力措施,基于NbS的矿山生态修复全生命周期监测评估流程需保障精准覆盖矿山在工程启动的全部过程。根据指标7.2对监测行动有所参照的要求,应严格制定监测评估方案,确定监测对象范围、内容指标、布点频率以及监测和评价方法,同时明确整体流程。科学评估监测随矿山活动进程完成开采前、开采中和开采后的监测,以及对各阶段进行评估,根据评估结果编写报告,为适应性管理提供科学依据。

对于矿山来说,矿产资源开采区、采矿影响区及参照生态系统构成了生态修复的监测范围。基于自然应全面了解自然,NbS强调基于已知资料针对性开展保护修复行动,因此监测的内容与指标应满足全面、定量、规范的要求,按照全生命周期过程进行布置。开采前监测需获取矿山地质环境背景、土地资源现状和生态系统本底的基值和参照值,同时掌控矿产资源开采前矿山及周边区域地下水环境和土壤环境背景;开采中人为因素加剧对自然环境的破坏,同时监测力度相应加强,明确保护预防控制、损毁现状与拟损毁、复垦修复成效、矿山开采保护预防控制措施落实情况;开采后按照NbS可持续性管理要求,追踪监测已复垦区的管理维护、已复垦修复的基础设施维护、土地质量与植被管护、生态系统功能维持的水平。总的来说,与传统监测过程相比,NbS指导下的内容与指标的选择需综合生态系统要素与尺度^[61],全面覆盖工程实施范围与矿山影响范围,根据生态修复目标和标准,在不同尺度与层级分别设立。NbS十分强调对自然的各项行动要有据可依,这意味着数据来源的必须可靠、详细、稳定。因此要实现对矿区的全生命周期监测,应建立可溯源的监测集群与数据库。针对修复单元建立具有典型性、代表性的监测点、监测线、监测网,综合考虑自然地理条件、开采矿种、开采方式、损毁情况、复垦修复措施与目标、监测对象和管理需求等,确定监测周期及频次,确保数据采集准确、及时和全覆盖,构建维护监测矿山生态修复时空信息数据库。

随着高性能对地观测、物联网、大数据等现代技术的快速发展,多样化、全面化、及时化、智慧化^[62-64]已成为当下矿山监测的新特征与新趋势。结

合NbS对灵活管理的高要求,监测设备及方法的选择应向高质量转变,科学规范地借助BDS、RS、GIS,乃至天地空一体化及生态大数据分析等手段,对矿山生态修复进行全程监测,补足常规监测手段缺乏实时反馈与动态报告的短板。当前无人机航测、遥感影像技术、雷达探测、三维激光扫描等技术已可以满足高精度监测水平与多用途的要求^[65-67],此外遥感云计算平台和EarthDataMiner^[68-69]等先进的大数据分析工具也为监测数据的收集、处理和分析提供了强大的支持,通过智慧大数据平台对矿山历史数据和实时数据的挖掘,能够掌握矿山生态修复全周期各指标宏观的、多维度的时空关联特性^[70]。NbS能够有效地适应矿山生态系统监测内容的多样性,指导评价在矿山全周期的不同阶段,针对差异性指标,采取相应的方法进行处理。对于约束性、预期性、基本值指标,矿山生态修复可针对性采用单因子比较、趋势评价、专家评价、生态恢复轮可视化等方法,通过这些方法对监测区域的矿山地质环境、土壤植被、生态系统的破坏情况与恢复治理成效等开展定量定性评价,并判断其未来变化趋势。最后综合监测数据与评估结果编制报告,给出适应性管理修正、改进技术管理措施的对策及建议。

5.2 适应性管理

在常规情况下,管理的过度干预或力度不足均会对矿山生态修复的整体成效产生不利影响。然而,与此相对的,NbS的适应性管理,其核心正是在于有效应对环境不确定性,通过持续不断的监测、科学评估及灵活调整管理策略,以增强管理的针对性和实效性。对矿山而言,通过全过程分析监测评估,及时性发现修复工程目标的偏离、措施的未达预期、意外风险的干扰,识别修复过程中出现的问题和挑战,并在恰当时机适时做出调整具有重要意义。

适应性管理采取措施的时机决定着干预成功的概率与成效。根据监测所得的评估结果综合判断,对实施技术成熟、风险可控且结果可期的工程和措施,要及时实施。NbS提倡对自然施以最小扰动以实现最大效果,对于矿山应尽量采取自然恢复和辅助再生的方法,充分利用生态系统的自然恢复力,有效避免时机延误和不必要成本的增加。然而,对于评估后存在不确定性、难以预测后效的工程和措施,须持审慎态度,通过深入研究和实验验证,确保生态系统的稳定性和安全性,避免冒然动工带来的潜在风险。在地貌重塑、土壤重构、植被重建和景观营建过程中,应尤其遵循适应性管理原则,每一步骤都须

经过科学论证和有效实施, 在主要过程中精准把控施工水平, 以此确保后续修复效果的质量呈现。此外, 建立迭代学习框架至关重要, 这一框架能够使适应性管理在基于自然的解决方案(NbS)干预措施的全生命周期中不断优化和改进。通过监测评估与干预措施的持续进行, 能够实现持续学习与管理的反馈循环, 确保适应性管理在实践中不断得到经验并有效优化, 直到得到最优决策。

基于全周期跟踪监测评估结果, 对照工程的复垦修复目标, 根据减缓保护、预防控制、复垦修复工程措施、技术手段的效果, 及时发现并解决保护预防、复垦修复过程中新产生的生态问题及潜在生态风险。在结果和风险可控的原则下, 借鉴已有经验做法, 对可能导致偏离复垦修复目标或者对因复垦修复造成新的损毁的生产工艺、预防控制和复垦修复措施和技术、工程部署和时序安排等, 由采矿权人组织技术论证后进行相应调整修正, 因地制宜。由于生态系统的复杂、动态和自组织性质, 在管理大多数生态系统时, 存在一定程度的不确定性, 同时也意味着生态系统具有更大的恢复力, 因此在调整措施时仍应以自然恢复为主, 人工修复为辅。根据生态系统退化、受损程度, 合理选择保育保护、自然恢复、辅助再生和生态重建等措施, 恢复生态系统结构和功能, 增强矿区生态系统稳定性和生态产品供给能力。

6 结论与建议

6.1 结 论

本研究基于 NbS 的八项准则, 将 NbS 理念全面融入矿山保护与预防控制、矿山复垦修复、矿山管理维护、矿山监测评估和适应性管理 4 个阶段全生命周期的矿山生态修复中, 探索建立了高联动性、系统综合的矿山生态修复理论框架与技术路径, 形成的结论如下:

1) 将 NbS 理念引入全生命周期矿山生态修复保护和预防控制措施中, 通过避让措施、减缓措施、重要物种与人文保护、固体废物综合利用、物种采集利用, 表土剥离利用与植被移植利用和胁迫因子消除等手段可大幅度减少对矿山生态环境的破坏, 提高矿山生态系统的自我修复能力, 同时还提高矿山生态修复的经济效益。

2) 强调通过模拟和强化自然过程, 综合地貌重塑、土壤重构、植被重建和景观营建等关键技术, 遵循科学、高效和可持续的解决方案, 提出了 NbS 的全生命周期矿山复垦修复工程实施技术路径, 促进

矿山生态系统的自我恢复和可持续发展。

3) 依据 NbS 核心理念、原则与指标提出了矿山生态修复的 NbS 管理维护阶段实现路径, 创新性的从基础设施管理维护到以土壤植被为核心的管理维护到最终实现整个矿山生态系统功能维持三方面进行系统的管理维护, 有助于实现矿山生态系统的多样性、稳定性与可持续性。

4) 通过科学、系统的监测评估手段, 对开采前、中、后各阶段矿山生态修复情况进行全面掌握, 利用现代化高新技术及大数据分析等工具, 实现全周期、多维度的生态变化监测。通过适应性管理, 根据生态系统的不确定性及时调整管理策略, 以确保矿山生态系统整体保护、系统修复和综合治理目标的实现。

6.2 建 议

基于 NbS 理念的修复在我国矿山推广应用过程中, 现阶段面临技术支撑不足、政策法规不完善、修复效果评估体系不健全等挑战。针对上述问题, 未来应加大对 NbS 理念在矿山生态修复中的基础理论研究力度, 探索适合我国国情的修复技术和方法, 形成系统的、可操作的指导体系, 鼓励技术创新, 推动新技术、新材料在修复项目中的应用; 完善政策法规, 提供政策保障修订和完善相关政策法规, 明确 NbS 理念在矿山修复中的应用要求, 为 NbS 理念的推广制定针对性的政策支持和激励。政策措施和激励机制; 应基于《IUCN 基于自然的解决方案全球标准》等标准, 研究制定 NbS 理念下的矿山修复效果评估指标体系, 完善监测手段, 为矿山修复项目提供科学、客观的评价依据。

参考文献(References):

- [1] 张进德, 鄒富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7921–7930.
ZHANG Jinde, XU Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7921–7930.
- [2] 陈浮, 朱燕峰, 骆占斌, 等. 黄土高原露天煤矿复垦土壤-植被系统恢复力及协同/权衡关系[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4590–4602.
CHEN Fu, ZHU Yanfeng, LUO Zhanbin, et al. Resilience and synergy/trade-off relationship of soil-vegetation system in dump reclamation of surface coal mines on the Loess Plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4590–4602.
- [3] 白中科, 师学义, 周伟, 等. 人工如何支持引导生态系统自然修复[J]. 中国土地科学, 2020, 34(9): 1–9.
BAI Zhongke, SHI Xueyi, ZHOU Wei, et al. How does artificial-

- ity support and guide the natural restoration of ecosystems[J]. *China Land Science*, 2020, 34(9): 1-9.
- [4] 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.
- [5] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1751-1757.
- HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [6] 肖武, 陈文琦, 何厅厅, 等. 高潜水位煤矿区开采扰动的长时序过程遥感监测与影响评价[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 922-933.
- XIAO Wu, CHEN Wenqi, HE Tingting, et al. Remote sensing monitoring and impact assessment of mining disturbance in mining area with high undergroundwater level[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 922-933.
- [7] 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.
- [8] 张绍良, 杨永均, 侯湖平. 新型生态系统理论及其争议综述[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5307-5314.
- ZHANG Shaoliang, YANG Yongjun, HOU Huping. Overview of novel ecosystems theory and its critiques[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(17): 5307-5314.
- [9] 杨永均, 张绍良, 侯湖平, 等. 基于非线性动力学模型的矿山土地生态系统恢复力机制[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 3174-3184.
- YANG Yongjun, ZHANG Shaoliang, HOU Huping, et al. Resilience mechanism of land ecosystem in mining area based on nonlinear dynamic model[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 3174-3184.
- [10] 尚志敏, 张绍良, 侯湖平, 等. 关闭矿山社会生态系统恢复力评价研究: 以徐州市大黄山矿区为例[J]. *中国矿业*, 2019, 28(3): 58-65.
- SHANG Zhimin, ZHANG Shaoliang, HOU Huping, et al. Study on the evaluation of social-ecological system resilience of the closed mine: a case study of the dahuangshan mining area, Xuzhou City[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(3): 58-65.
- [11] 陈淳, 华子宜, 郭维红, 等. 美丽中国视域下矿山生态修复: 逻辑演进、科学内涵和行动方略[J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(2): 1-11.
- CHEN Fu, HUA Ziyi, GUO Weihong, et al. Mining ecological restoration from the perspective of beautiful China: logical evolution, scientific connotation, and action programs[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(2): 1-11.
- [12] 李全生, 李琳, 方杰, 等. 北方防沙带大型露天煤矿区生态保护与修复技术[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 323-333.
- LI Quansheng, LI Lin, FANG Jie, et al. Ecological protection and restoration technology of large-scale open-pit coal mining area in the northern sand-proof belt[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 323-333.
- [13] 夏嘉南, 李根生, 卞正富, 等. 露天矿内排土场近自然地貌重塑研究: 以新疆黑山露天矿为例[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(11): 213-221.
- XIA Jianan, LI Gensheng, BIAN Zhengfu, et al. Research on the reshaping of the near-natural landform of the internal dump for open-pit mine: a case study of Heishan open-pit mine, Xinjiang, China[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 213-221.
- [14] IUCN. Resolution 69 on Defining Nature-based Solutions (WCC-2016-Res-069)[R]. Hawaii: World Conservation Congress, 2016.
- [15] 罗明, 翟紫含, 陈妍. 生态文化的回归: 我国生态文明建设中NbS理念的应用[J]. *中国土地*, 2021(6): 9-12.
- LUO Ming, ZHAI Ziyan, CHEN Yan. The return of ecological culture: The application of NbS concept in China's ecological civilization construction[J]. *China Land*, 2021(6): 9-12.
- [16] YOUNG R E, GANN G D, WALDER B, et al. International principles and standards for the ecological restoration and recovery of mine sites[J]. *Restoration Ecology*, 2022, 30(S2): e13771.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 煤矿土地复垦与生态修复技术规范: GB/T 43934—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [18] 贾梦旋, 王金满, 李禹凝, 等. 基于NbS的矿山生态修复研究进展 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1-13[2024-07-12]. <http://kns.cnki.net/kems/detail/11.2402.TD.20240126.1143.002.html>.
- JIA Mengxuan, WANG Jinman, LI Yuning, et al. Ecological restoration of mines based on NbS: A review[J/OL]. *Coal Science and Technology*, 1-13[2024-07-12]. <http://kns.cnki.net/kems/detail/11.2402.TD.20240126.1143.002.html>.
- [19] 官炎俊, 王娟, 周伟, 等. 露天矿区土地复垦适应性管理: 内涵解析与框架构建[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(2): 102-112.
- GUAN Yanjun, WANG Juan, ZHOU Wei, et al. Adaptive management of land reclamation in opencast mining areas: connotation analysis and framework construction[J]. *China Land Science*, 2023, 37(2): 102-112.
- [20] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 449-459.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 449-459.
- [21] 姜杉钰, 谭丽萍, 冯聪, 等. 系统观下的矿山生态修复关键技术体系构建 [J/OL]. 环境科学, 1-13[2024-07-12]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202402068>.
- JIANG Shan-yu, TAN Li-ping, FENG Cong, et al. Construction on key technology system of mine ecological restoration under system perspective[J]. *Environmental Science*, 1-13[2024-07-12]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202402068>.
- [22] 常俊杰, 刘乐. 基于自然解决方案的矿山生态修复[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(3): 107-109.

- CHANG Junjie, LIU Le. Mine ecological restoration based on natural solution[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(3): 107–109.
- [23] 王金洲, 徐靖. “基于自然的解决方案”应对生物多样性丧失和气候变化: 进展、挑战和建议[J]. *生物多样性*, 2023, 31(2): 231–236.
- WANG Jinzhou, XU Jing. Nature-based solutions for addressing biodiversity loss and climate change: Progress, challenges and suggestions[J]. *Biodiversity Science*, 2023, 31(2): 231–236.
- [24] 联合国环境规划署. 支持可持续发展的基于自然的解决方案[M]. 内罗毕: 联合国环境规划署, 2022.
- [25] 世界自然保护联盟. 基于自然的解决方案全球标准 NbS 的审核、设计和推广框架第一版 [EB/OL]. (2023-09-14)[2024-04-27]. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Zh.pdf>.
- [26] International Union for Conservation of Nature. Draft2: Global Standard for Nature-based Solutions[R]. Gland: IUCN, 2019.
- [27] 罗明, 应凌霄, 周妍. 基于自然解决方案的全球标准之准则透析与启示[J]. *中国土地*, 2020(4): 9–13.
- [28] 周旭, 陈妍, 周妍, 等. 《IUCN 基于自然的解决方案全球标准》下的生态保护修复管理对策研究[J]. *风景园林*, 2022, 29(6): 20–25.
- ZHOU Xu, CHEN Yan, ZHOU Yan, et al. Research on management countermeasures for ecological conservation and restoration under the IUCN global standard for nature-based solutions[J]. *Landscape Architecture*, 2022, 29(6): 20–25.
- [29] 马蓉蓉, 黄雨晗, 周伟, 等. 祁连山山水林田湖草生态保护与修复的探索与实践[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8990–8997.
- MA Rongrong, HUANG Yuhua, ZHOU Wei, et al. Exploration and practice of ecological protection and restoration about mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in the Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8990–8997.
- [30] 雷少刚, 夏嘉南, 卞正富, 等. 论露天矿区近自然生态修复[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4): 2021–2030.
- LEI Shaogang, XIA Jianan, BIAN Zhengfu, et al. Near-natural ecological restoration in open-pit mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4): 2021–2030.
- [31] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 试论国土空间整体保护、系统修复与综合治理[J]. *中国土地科学*, 2019, 33(2): 1–11.
- BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Overall protection, systematic restoration and comprehensive management of land space[J]. *China Land Science*, 2019, 33(2): 1–11.
- [32] EGGERMONT H, BALIAN E, AZEVEDO J M N, et al. Nature-based solutions: new influence for environmental management and research in Europe[J]. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(4): 243–248.
- [33] COHEN-SHACHAM E, WALTERS G, JANZEN C, et al. Nature-based solutions to address global societal challenges[M]. Gland: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2016.
- [34] SONTER L J, ALI S H, WATSON J E M. Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2018, 285(1892): 20181926.
- [35] 邓彪, 陈航, 李恒, 等. 排土场植被覆盖度及地形变化对流域水土流失的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 299–308.
- DENG Biao, CHEN Hang, LI Heng, et al. Influence of dump vegetation coverage and topographic changes on soil and water loss in drainage basin[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 299–308.
- [36] LINDENMAYER D B, LIKENS G E. Effective ecological monitoring[M]. Earthscan, 2010.
- [37] BRADSHAW A D. *The restoration of land: the ecology and reclamation of derelict and degraded land*[M]. Blackwell Science, 2010.
- [38] TORDOFF G M, BAKER A J M, WILLIS A J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1-2): 219–228.
- [39] 于昊辰, 卞正富, 陈淳, 等. 矿山土地生态系统退化诊断及其调控研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 214–223.
- YU Haochen, BIAN Zhengfu, CHEN Fu, et al. Diagnosis and its regulations for land ecosystem degradation in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 214–223.
- [40] 王根锁, 刘宏磊, 武强, 等. 碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 321–328.
- WANG Gensuo, LIU Honglei, WU Qiang, et al. Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 321–328.
- [41] 李全生, 李琳. 东部草原区露天煤矿减损开采与生态系统修复技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 484–492.
- LI Quansheng, LI Lin. Technology and application of damage reduction mining and ecosystem restoration of open-pit coal mines in eastern grassland area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 484–492.
- [42] 胡振琪, 李根生, 袁冬竹. 东部煤粮复合区采煤沉陷地边采边复时机[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 373–387.
- HU Zhenqi, LI Gensheng, YUAN Dongzhu. Timing of concurrent mining and reclamation in coal-grain overlapping areas with mining-induced subsidence, Eastern China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 373–387.
- [43] 胡振琪, 肖武, 赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 351–359.
- HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 351–359.
- [44] 崔君, 魏海英, 王晓军. 基于NbS的矿山可持续性评价研究: 以北岳恒山露天矿区为例[J]. *中国矿业*, 2022, 31(5): 69–74.
- CUI Jun, WEI Haiying, WANG Xiaojun. Research on assessment of sustainability in coal mine based on NbS of Hengshan Open-pit Mining Area[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(5): 69–74.
- [45] 刘佳鑫, 刘刚, 刘普灵. 黄土区沟道阶梯状边坡水土流失防治措施与机理[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 65–69.

- LIU Jiaxin, LIU Gang, LIU Puling. Measures and mechanism to prevent water loss and soil erosion on multi-stair slope in loess area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 65–69.
- [46] 叶艳妹, 陈莎, 边微, 等. 基于恢复生态学的泰山地区“山水林田湖草”生态修复研究[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8878–8885.
- YE Yanmei, CHEN Sha, BIAN Wei, et al. Ecological restoration strategies of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands Life Community in Mountain Tai region based on the principle of restoration ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8878–8885.
- [47] 胡振琪, 理源源, 李根生, 等. 碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 474–483.
- HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gengsheng, et al. Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 474–483.
- [48] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230–238.
- WANG Jinman, ZHANG Meng, BAI Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in open-pit coal mine dump in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 230–238.
- [49] 马静, 华子宜, 尤云楠, 等. 东部平原矿区复垦土壤微生物多样性驱动土壤多功能性变化[J/OL]. 土壤学报, 1–17[2024–07–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240527.1403.002.html>.
- MA Jing, HUA Ziyi, YOU Yunnan, et al. The microbial diversity of reclaimed soil drives its multifunctional variation in the eastern plain mining area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024: 1–17 [2024–07–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240527.1403.002.html>.
- [50] 王凡, 曹银贵, 王玲玲, 等. 土壤微生物及酶活性对露天矿不同土壤重构方式的响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 249–260.
- WANG Fan, CAO Yingui, WANG Lingling, et al. Response characteristics of soil microorganisms and enzyme activities to different soil remodeling modes in open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 249–260.
- [51] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 植被恢复对黄土高原矿区重构土壤理化性质、酶活性以及真菌群落的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 1–7.
- LI Pengfei, ZHANG Xingchang, HAO Mingde, et al. Effects of vegetation restoration on soil physicochemical properties, enzyme activities, and fungal community of reconstructed soil in a mining area on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 1–7.
- [52] 马静, 华子宜, 程彦郡, 等. 植被恢复类型对露天矿山复垦土壤丰富和稀有微生物类群的影响[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 363–377.
- MA Jing, HUA Ziyi, CHENG Yanjun, et al. Impacts of vegetation restoration type on abundant and rare microflora in reclaimed soil of open-pit mining area[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 363–377.
- [53] 周伟奇, 朱家璐. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5137–5151.
- ZHOU Weiqi, ZHU Jiali. Review on Nature-based Solutions and applications on urban waterlogging mitigation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5137–5151.
- [54] 陆兆华, 张琳. 露天煤矿排土场边坡植被恢复群落稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 334–344.
- LU Zhaohua, ZHANG Lin. Ecological stability evaluation of re-vegetation community on open-pit coal mine dump slopes[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 334–344.
- [55] 王夏晖, 刘桂环, 华妍妍, 等. 基于自然的解决方案: 推动气候变化应对与生物多样性保护协同增效[J]. 环境保护, 2022, 50(8): 24–27.
- WANG Xiaohui, LIU Guihuan, HUA Yanyan, et al. Nature-based solutions: promote synergies between climate change response and biodiversity conservation[J]. Environmental Protection, 2022, 50(8): 24–27.
- [56] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 26–36.
- WANG Jun, YING Lingxiao, ZHONG Lina. Thinking for the transformation of land consolidation and ecological restoration in the new era[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 26–36.
- [57] 王志芳, 简钰清, 黄志彬, 等. 基于自然解决方案的研究视角综述及中国应用启示[J]. 风景园林, 2022, 29(6): 12–19.
- WANG Zhifang, JIAN Yuting, HUANG Zhibin, et al. A review of nature-based solutions research perspectives and enlightenment thereof to the application in China[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(6): 12–19.
- [58] 罗明, 刘世梁, 张琰. 基于自然的解决方案(NbS)优先领域初探[J]. 中国土地, 2021(2): 4–11.
- LUO Ming, LIU Shiliang, ZHANG Dan. A first look at Nature-Based Solutions (NbS) priority areas[J]. China Land, 2021(2): 4–11.
- [59] 陈梦芸, 林广思. 基于自然的解决方案: 利用自然应对可持续发展挑战的综合途径[J]. 中国园林, 2019, 35(3): 81–85.
- CHEN Mengyun, LIN Guangsi. Nature-based solutions: a comprehensive approach of using nature to meet the challenges of sustainable development[J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(3): 81–85.
- [60] 中华人民共和国自然资源部. 国土空间生态保护修复工程实施方案编制规程: TD/T 1068—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [61] 自然资源部办公厅, 财政部办公厅, 生态环境部办公厅. 《自然资源部办公厅财政部办公厅生态环境部办公厅关于印发〈山水

- 林田湖草生态保护修复工程指南(试行))》的通知》: 自然资源办发〔2020〕38号 [EB/OL]. (2020-9-18) [2024-5-24]. https://mnr.gov.cn/gk/tzgg/202009/t20200918_2558754.html.
- [62] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [63] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.
- [64] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系构建与建设内容解析 [J]. 智能矿山, 2024, 5(5): 2-12.
- [65] 任天航, 郑莉, 何也. 现代测绘地理信息技术在智慧矿山环境治理中的应用进展 [J]. 稀有金属, 2024, 48(3): 427-439.
REN Tianhang, ZHENG Li, HE Ye. Application progress of modern surveying and mapping geographic information technologies in smart mining environmental governance [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2024, 48(3): 427-439.
- [66] 肖武, 任河, 赵艳玲, 等. 无人机遥感支持下的煤矸石山自燃监测与预警 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 412-421.
XIAO Wu, REN He, ZHAO Yanling, et al. Monitoring and early warning the spontaneous combustion of coal waste dumps supported by unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 412-421.
- [67] 刘举庆, 李军, 王兴娟, 等. 矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 346-358.
LIU Juqing, LI Jun, WANG Xingjuan, et al. Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 346-358.
- [68] 潘海冬. 测绘地理信息技术在矿山地质勘查工作中的应用发展 [J]. 中国金属通报, 2022(5): 103-105.
PAN Haidong. Development of mapping geographic information technology application in mining geological survey work [J]. China Metal Bulletin, 2022, (9): 103.
- [69] 尹展, 张建国, 陈星霖, 等. 植被覆盖区老旧矿山边部遥感蚀变信息提取技术探讨 [J]. 地质与资源, 2024, 33(2): 187-195.
YIN Zhan, ZHANG Jianguo, CHEN Xinglin, et al. Alteration information extraction by remote sensing technology around old mines in vegetation-covered areas [J]. Geology and Resources, 2024, 33(2): 187-195.
- [70] LIU J, WANG W, ZHONG H. EarthDataMiner: a cloud-based big earth data intelligence analysis platform [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 509(1): 012032.