基于NbS的广东省矿山全生命周期生态安全监管策略*

宫清华[1,2],李宽[3],刘博文[1,2],刘旭[3],高中原[3],梁耀辉[3],王娟[1,2],曾晓[3]

(1.广东省科学院广州地理研究所 广东 广州 510070;
2.广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广东 广州 510070;
3.广东省土地开发整治中心, 广东 广州 510635)

摘要:为满足新时期背景下矿山生态安全监管系统化、法治化、科学化、长周期、民主化的监管需求,研究构建了一套基于自然的解决方案(NbS)的综合监管框架。该框架依据问题对象、设计尺度、方案自然属性、效益评估、方案可行性、方案管理流程、适应性管理模式、可持续性方面的8项设计准则,聚焦矿山开采全生命周期的矿山生态安全监管,包括矿山勘察设计、开采运营和闭坑维护阶段。针对广东省矿山生态环境保护与经济发展矛盾、开发空间和保护空间重叠、矿业开发引发的生态环境问题严重等矿山生态安全所面临的风险与挑战,从"前瞻布局、源头控制、强化自然、协同自然、多方共治、技术革新"6个方面,探讨新时期广东省矿山生态安全监管的创新路径和策略。以期为广东省乃至全国的矿山生态安全监管提供科学依据。

关键词:基于自然的解决方案;矿山生态安全;全生命周期;监管策略;广东省

中图分类号:TD167; X171.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0271-09

Regulatory Strategy for Full Life Cycle Ecological Security of Mines in Guangdong Province Based on NbS

GONG Qinghua[1,2], *LI Kuan*[3], *LIU Bowen*[1,2], *LIU Xu*[3], *GAO Zhongyuan*[3], *LIANG Yaohui*[3], *WANG Juan*[1,2], *ZENG Xiao*[3]

(1.Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510070, China;
2.Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou, Guangdong 510070, China;
3.Guangdong Provincial Land Development and Consolidation Center, Guangzhou, Guangdong 510635, China)

Abstract: To meet the regulatory demands of systematization, legalization, scientization, long-cycle operation and democratization for mine ecological security in the context of the new era, a comprehensive regulatory framework based on Nature-based Solutions (NbS) was established through relevant research. This framework is formulated in accordance with 8 design criteria, namely problem objects, design scales, natural attributes of solutions, benefit evaluation, solution feasibility, solution management processes, adaptive management modes and sustainability, and focuses on the ecological security supervision of mines throughout the full life cycle of mining activities, including the stages of mine survey and design, mining operation, and mine closure and maintenance. In response to the risks and challenges faced by mine ecological security in Guangdong Province, such as the contradiction between mine ecological and environmental protection and economic development, the overlap between development space and protection space, and the severe ecological and environmental problems caused by mining development, innovative paths and strategies for mine ecological security supervision in Guangdong Province in the new era are explored from six aspects, including forward-looking layout, source control, nature enhancement, nature coordination, multi-stakeholder governance, and technological innovation. This study aims to provide a scientific basis for mine ecological security supervision in Guangdong Province and even across the whole country.

Key words: Nature-based Solution, Mine ecological security, Full life cycle, Regulatory strategy, Guangdong Province

---

* **收稿日期**:2025-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(42271091);广东省科学院优势学科及与技术领域建设项目(2023GDASZH-2023010104, 2022GDASZH-2022010104)

作者简介:宫清华(1981—),女,内蒙古赤峰人,博士,研究员,主要从事自然地理与生态安全研究。E-mail:gongqh1@gdas.ac.cn

通信作者:高中原(1994—),女,安徽枞阳人,硕士,工程师,主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail:767956443@qq.com

0 引言

生态安全指的是在一定区域内,人类社会的可持续发展不因自然资源的枯竭、生态环境的恶化而受到威胁的状态,包括生态系统的结构完整、功能良好、自我维持能力强等多个方面。矿区生态安全的目标是确保矿区的自然资源和生态环境能够在开发利用过程中维持其功能不受破坏,或者在受到破坏后能够得到有效的恢复与治理,从而支持矿区及其周边区域的人类生存和可持续发展。矿产资源与人类文明之间存在着密切且深远的关系,矿产资源为人类文明的发展提供了物质基础和支持。煤炭和石油是第一次工业革命和第二次工业革命的原料和动力,铀、锗、硅、锂、稀土等被称为第三次工业革命的"维生素"。在 21 世纪初期,我国所使用的 95%以上的能源、80%以上的工业原材料和 70%以上的农业生产资料都来自于矿产资源[1]。矿产资源的开发利用为产业发展和社会经济进步提供了支撑,但同时也会造成地貌破坏、地质灾害、土地资源损毁、环境污染及生态破坏等问题。*Nature* 和 *Science* 曾连续发表关于全球废弃矿山生态环境问题的文章,文章显示,在全球范围内受采矿影响的土地面积达 6.6 万 km^2,各类废弃矿山超过 100 万座,随着全球能源结构的调整,废弃矿山数量增加成为历史必然,闲置矿业空间不仅会造成资源的巨大浪费,还有可能诱发后续的安全、环境及社会问题,矿区的生态环境保护和治理成为全球生态保护和修复的重点和难点[2-4]。我国矿产资源开发历史悠久,长期高强度、大规模的矿产开采导致我国因矿山开采占用或损毁土地面积约 360 万 hm^2[5]。

矿山生态安全监管是实现资源开发与环境保护、经济发展与生态安全相协调的重要手段,也是国家治理体系中的重要组成,可对矿山开采活动在自然资源利用、地形地貌、水土环境及生物多样性等方面进行全面管理,限制矿山企业破坏环境的行为,减少对生态系统的破坏,保障公共健康,维护生态安全,以确保矿山开采活动不会对生态环境造成不可逆转的损害。我国的矿山生态安全监管伴随着矿业发展、环境保护意识提升以及政策法规完善而不断演进。2009 年前,由于国家经济发展对矿产资源的迫切需求,以优先保障矿产资源的开发为主。2009—2019 年,国家开始重视矿山生态环境保护,出台了系列矿山地质环境保护和土地复垦政策,重点着力于矿山地质环境保护和土地复垦。2019 年至今,随着生态文明建设的深入,矿山生态安全监管进入整体保护、系统修复和综合治理的综合性和系统性监管阶段。目前对于矿山生态安全监管的研究集中在有关监管的法规与政策、监管体系建设、监管公众参与社会监督、监管技术等方面[6]。矿山生态安全监管研究体现了从法律法规、技术方法、政策建议到实际操作的全方位、多层次的发展。

生态文明和双碳战略目标等新的时代背景赋予了矿山生态安全监管新的使命。在新的时代背景下,矿山生态安全旨在寻求在保证生态平衡与环境承载力的前提下,提高矿产资源的开发利用效率,实现矿区的长期稳定发展。矿山生态治理从传统的灰色工程措施逐渐发展到强调以"自然恢复为主,人工修复为辅"的治理模式,提倡全生命周期的生态保护与治理。新时期矿山生态安全监管在监管目标、监管模式、监管体系和监管时段等方面都发生了深刻变化。传统的矿山生态安全监管重点关注某个要素或者某个环节,监管措施往往在一定程度上忽视了对矿山生态环境风险的系统管理与控制,缺乏全生命周期的系统性监管理论支持,在制度框架、市场规则、责任主体、基层力量等方面仍存在诸多不足,特别是在协调生态环境与经济、社会发展关系方面仍然面临诸多挑战。亟需通过新的理念、新的技术和新的标准破解矿山生态安全监管中遭遇的瓶颈和问题。就矿产资源开发活动而言,基于自然的解决方案(Nature-based Solution, NbS)是一种基于可持续发展的要求,以最大限度地利用自然生态功能和过程,减少或者避免开采活动对生态系统的负面影响为目标,强调利用自然生态系统的恢复力和仿效自然的模式,解决多重社会挑战的主流化选择[7]。基于自然的解决方案是人类处理人与自然辨证关系的一种模式。

本研究首先对 NbS 理念进行了概述,并与矿山全生命周期管理的概念框架相结合,探讨了新时期矿山生态安全监管的时代需求和 NbS 理念指导下的矿山生态安全监管准则。分析研判广东省矿山生态安全风险现状,识别了现存的挑战和问题,提出了基于 NbS 的矿山全生命周期生态安全监管策略,旨在优化监管体系,强化矿山企业的环境管理责任,提高生态保护和恢复效率,以期能够为广东省乃至全国的矿山生态安全监管提供科学依据。

1 基于 NbS 的矿山全生命周期生态安全监管准则

1.1 新时期矿山生态安全监管的时代需求

在生态文明和双碳目标的大背景下,要求矿山生态安全监管系统化、法治化、科学化、长周期、民主化是一种发展趋势。NbS 具有自组织性、生态友好、可持续性和多功能性的特点,强调尊重自然过程,追求长期可持续性,提供多样化的解决方案,降低长期成本,并鼓励多方利益相关者参与。因此 NbS 的理念可为新时期矿山安全监管提供指导。具体来说,新时期矿山生态安全监管具有如下特点。

(1) 监管对象具有整体性和系统性特征。矿山生态系统具有整体性、协同性、公共性特征,需兼顾矿山所在区域的各类自然资源要素,须按照生态系统的完整性和系统性,全面考虑矿山及周边的山水林田湖草等要素,以及山上山下、地上地下及流域上下游的生态联系,对矿山所在区域的生态系统进行统一监管[8]。新时期的监管对象从传统的土地复垦和地质环境的管理,延拓到对地质地貌、水土环境、生物多样性等多要素的系统监管。且监管空间需兼顾生态系统上下游的关系。

(2) 监管链条由开采后治理向全生命周期转变。传统的矿山生态环境保护工作重点放在开采后的生态治理。但新时期矿山生态安全监管端口前移,监管链条延伸到矿产勘察设计、矿山开采、采后治理的全生命周期动态监管。强调"源头防御、过程严管",从源头上减少对生态环境的破坏。

(3) 监管多元化和民主化。传统的监管主要以政府为主导,在新时期矿山生态安全监管中,政府的角色逐渐从主导者转变为引导者和服务者。政府通过制定政策、提供服务和监管等方式,引导矿业企业按照绿色化、低碳化的方式进行开发。现代化矿山生态安全监管倡导多主体的协同,要求政府、企业、社区、非政府组织以及公众等利益相关者共同参与监管过程。

(4) 监管手段多元化和科学化。现代化的矿山生态安全监管是运用现代科技手段和方法对矿业空间进行高效、精准、全面的监管,包括采用先进的地理信息系统(GIS)、遥感技术、大数据分析、人工智能等,以提高监管的智能化、自动化和精细化水平。建立矿山智能数字管理平台,实现矿山开采、运输、安全保障、经营管理等全过程的数字化和智能化监管。

1.2 矿山生态安全监管准则

世界自然保护联盟(IUCN)于 2020 年正式发布了《IUCN 基于自然的解决方案全球标准》,分别从自然解决方案所解决的问题对象、设计尺度、方案的自然属性、效益评估、方案可行性、方案管理流程、适应性管理模式等 8 个方面提出了基于自然的解决方案准则[9]。本研究以基于自然的解决方案理念为指导,基于其准则,针对矿山生态安全监管全过程的 3 个阶段,构建一套面向矿山全生命周期的矿山生态安全监管理论框架(见表 1)。

表 1 基于 NbS 理念的矿山生态安全监管准则

Table 1 Ecological safety regulatory guidelines of mines based on the NbS concept

准则	勘察设计阶段	矿山开采和运营阶段	矿山闭坑和后期管护阶段
准则 1	生态系统本底状况。	开采过程中导致的生态环境破坏现状。	生态系统服务功能的成效。
准则 2	应考虑矿山所在地的流域、山体等自然地理单元。	生态环境破坏和土地损毁的区域。	生态系统服务功能的服务范围。
准则 3	生态系统恢复力分析。	考察修复工程的实施进度。	重点关注生态修复的成效。
准则 4	修复工程费用测算的合理性和可行性。	基金计提和使用的合理性。	社会资本参与生态修复。
准则 5	协调矿山开采涉及的政府-企业-社区-公众等各方利益关系,并进行规划设计。	公众对矿山企业的生态环境行为进行监督评价。	社区和公众参与矿山的生态安全监管和恢复工作。
准则 6	评估生物多样性、水文地质、土壤质量并识别重要生态敏感区和生态重要区,确定潜在影响,制定生态保护和恢复措施。	"边开采,边修复"的执行情况。	通过恢复治理实现经济、社会和生态功能的协调统一。
准则 7	明确方案修编的前置条件。	对开采中的生态环境变化进行实时监测和预警。	因地制宜分类推进废弃矿山综合开发。
准则 8	遵循绿色矿山建设标准。	是否采用生态友好型开采技术。	恢复矿山原本土地利用方式,实现可持续发展。

NbS 通过认识自然和模拟自然,建立具有多功能性和适应性的自组织系统,通过利用和学习自然系统的过程来解决社会、经济和环境问题,强调保护和修复自然生态系统的重要性。NbS 制定的 8 项基本准则为:准则 1,需要明确所对应的社会挑战,识别解决的问题和对象;准则 2,基于自然规律选择解决社会挑战的适宜尺度;准则 3,强调保护和修复自然生态系统的重要性;准则 4,要具有经济可行

性;准则 5,包容性治理,强调社区和公众的参与和合作,与利益相关者沟通,平衡和权衡多方利益;准则 6,强调方案具有多功能性和复合性的特点,不仅能解决社会问题,还可以为社会和环境提供其他益处;准则 7,强调适应性、自组织性、可扩展性和复制性,NbS 需不断根据环境条件和社会需求的变化做出调整;准则 8,主流化与可持续性[9]。

依据 NbS 的 8 项准则,在勘察设计阶段重点监管矿山规划设计中的生态保护与恢复的规划和设计。矿山生态保护和修复规划方案应准确定位矿山生态系统的特征和问题。勘察规划设计方案中的管理单元应考虑矿山所在的流域、山体等自然地理单元以及单元上的自然生态系统的生态过程,方案能否实现生态空间格局和与矿产资源开采权衡与协同;要考察是否统筹布局矿产资源开发利用空间、自然生态保护空间、仿自然的生态工程措施等设施和资源,是否按照"自然恢复为主,人工修复为辅"原则开展恢复措施设计,是否已协调矿山开采涉及的政府-企业-社区-公众等各方的利益关系,并制定了规划方案;监管标准应遵循绿色矿山建设标准,确保新建矿山按照绿色、低碳、循环的原则进行规划、设计和建设;开展详细的生态影响评估,包括生物多样性、水文地质、土壤质量等方面的评估,识别和保护重要的生态敏感区域和生态重要性区域,确定矿山开采对生态环境的潜在影响,根据评估结果,制定针对性的生态保护与恢复措施。

在矿山开采和运营阶段依据八项准则重点监管是否采用生态友好型开采技术,减少开采过程中造成的土地破坏、水土资源消耗及生态环境扰动和破坏。监管"边开采,边修复"的执行情况,对开采过程中造成的生态破坏进行及时修复,对矿山开采过程中的生态环境变化进行实时监测和预警。建立公众监督机制,对矿山企业的生态环境行为进行监督和评价。

在矿山闭坑与后期管护阶段依据八项准则重点监管治理恢复工作的多功能性、适应性、自组织性和可持续性,在矿山闭坑或结束生产后,实施生态修复和恢复措施,恢复生态系统的结构和功能,比如通过土地复垦、种草复绿等方式,恢复矿山区域的自然景观和生态价值。同时关停、废弃矿山的恢复治理应实现其经济功能、社会功能与生态功能等多元功能的协调统一,鼓励社区和公众参与矿山的生态安全监管和恢复工作,提高公众的环保意识和参与度。

2 广东省矿山生态安全面临的风险

2.1 重要的成矿带与粤北生态特别保护区存在空间冲突

广东省地处欧亚板块与太平洋板块交接处,分布有南岭成矿带、武夷成矿带和粤西-桂东成矿带 3 条重点成矿区带,包括南岭、莲花山脉、罗浮山脉、云雾山脉等主要山脉[10]。广东省境内的重要成矿带,特别是南岭成矿带位于我国生态安全格局"三区四带"中的南方丘陵山地带的核心区,是关系到我国生态安全的核心区域,南岭山区是粤港澳大湾区的重要生态屏障[11]。在当前广东省由珠三角地区、沿海经济带、北部生态发展区构成的"一核一带一区"区域发展新格局中[12],将北部丘陵山地带定位为北部生态发展区,该区域作为全省重要的生态屏障,以保护和修复生态环境、提供生态产品为首要任务[13]。北部生态发展区中,粤北地区位于北江和东江流域的上游,粤西地区位于鉴江、漠阳江流域上游,粤东地区位于韩江流域上游。分布有大量的河流水系和大中型水库及水库集雨区,是北江和东江饮用水源型河流的重要水源涵养区,是保障粤港澳区域 6 500 余万人口(全国人口的 4.7%)和 9 万多亿经济总量(全国 GDP 的 11.1%)的"生命水""政治水"和"经济水"水源安全的关键区域。粤北山区生物多样性丰富,自然历史文化遗产众多,在全国具有非常重要的生态地位。

由于广东省重要的成矿带与北部生态发展区存在空间重叠,造成生态发展区内矿山开发造成的生态问题多。有矿山开发的活动区域不仅是全省的重要生态功能区、饮用水源地,而且也是重要的农业生产区,矿山重金属污染不仅会严重影响当地居民的生产和生活,更为严重的是,重金属所引起的水源污染对下游的珠江三角洲经济区农业生产灌溉和居民健康造成了严重的威胁[14]。山区矿产开采历史悠久,老旧矿山较多,矿山地质环境保护工作起步较晚、基础薄弱。由于历史原因和一些民采矿山的无序开采,以及矿山企业在以往开采活动中存在认识和技术的局限,造成了大量历史遗留矿山,导致系列矿山地质环境问题和矿山生态安全隐患。

2.2 矿山规模小且点多面广导致生态安全监管困难

广东省的矿产资源虽然丰富,但矿山的规模普遍较小。全省共发现矿产 151 种,其中已查明资源

储量的矿产 105 种,矿产地 2 988 处[15]。大中型生产规模矿山占全省矿山总数的 29.3%,小型矿山占矿山总数的 70.7%。小型矿山所占的比例大,规模小,开发水平低,开采点多、面广、线长,具有较强的流动性,容易引发环境污染和安全隐患,加大了广东省矿产资源的保护成本与环境治理的压力,从而使矿产资源的开发与保护、破坏与治理矛盾更加激烈。

广东省 21 个地市均分布有不同类型的矿山。矿山生态环境问题是由矿业开发活动引起的,与开采方式及其空间分布特点有关。铀主要分布在韶关;铅、锌、铜、钨、锡、钼等有色金属以及铁、锰主要分布在韶关、河源、梅州等;金、银等贵金属以及铌、钽等稀有金属主要分布在肇庆、佛山、惠州;稀土矿产地和稀土资源潜力区主要分布在韶关、清远、肇庆、河源、梅州、揭阳[15]。这种点多面广的空间分布现状导致监管难度增加,监管部门需要投入较多的人力、物力和财力来覆盖所有的矿山点。由于矿山数量多且分散,监管部门在人员、资金和技术等方面的资源有限,难以对所有矿山进行有效的监管。小规模的矿山往往缺乏完善的环保设施和管理制度,增加了环境污染和生态破坏的风险。同时,有些矿山采用落后的开采技术,对环境的破坏更为严重。

2.3 矿山生态环境问题类型多样且监管内容庞杂

矿山开采造成地貌破坏、地质灾害、土地资源损毁、环境污染及生态破坏等问题。广东省矿山开采方式以露天开采非金属矿山和井工开采有色金属矿山为主,非金属矿山露天开采占矿山总量的 92%。露天开采大中型矿山多为建筑石材及砖瓦黏土矿,此类矿山易在采石场和堆放场形成崩塌、滑坡等地质灾害。井工开采的金属矿山、煤矿、石灰岩矿、盐矿易引发采空区和岩溶地层塌陷、地表沉降等地质灾害,同时疏干地下水会影响或破坏含水层;废石堆、排土场及尾矿库压占、污染土地情况较普遍且严重。广东省的矿山生态问题具有分布广泛、局部集中的特点[16]。矿山生态环境问题分布于矿产资源集中的粤北和粤东北的山区。

矿山开采引发的生态环境问题复杂多样,具有区域性强、治理周期长且技术流程复杂、治理目标多样等特点,造成生态安全监管任务庞杂,对监管制度保障和技术标准要求比较高。矿山环境问题中以占用与破坏土地资源的问题最为严重。据统计,仅韶关市矿山占用与破坏的各类土地总面积达 193.73 km^2;开发矿产资源诱发的地质灾害及隐患 66 起;矿坑排水造成地下水位下降的区域面积达 9.75 km^2;露天开采建筑用花岗岩、灰岩等非金属矿严重破坏了地形地貌景观,并造成了较严重的水土流失。矿山生态安全问题涉及到发改、自然资源、林业、环保、水利等多个部门,需多部门协同制定系统的法规制度,明确矿山生态环境保护和治理的责任主体、监管要求和处罚措施。需要建立科学的监测体系,对矿山生态环境进行实时监测和定期评估,及时发现和解决问题;对矿山废水、废渣、废气等污染源进行严格控制,确保其达标排放或进行无害化处理;要求采取有效的生态修复措施,对被破坏的矿山生态系统进行恢复和重建,提高其安全性、稳定性和可持续性;同时加强公众对矿山生态环境保护的认知和参与度,提高公众的环保意识和环保行为,以全面保障矿山生态环境的健康和可持续发展。

2.4 战略性矿产资源需求迫切加剧生态风险

战略性矿产资源是指对国家安全、经济和社会发展具有重要意义的矿产资源。这些资源通常具有稀缺性、不可再生性和高经济价值,对于保障国家经济安全、推动科技进步和产业升级具有重要作用,其需求随着全球经济的复苏和新兴产业的快速发展而日益迫切。战略性矿产资源广泛应用于新兴科技、清洁能源、国防等多个领域,成为了影响经济发展的重要因素。例如,稀土、锂、钴等矿产在新能源汽车、电子信息、航空航天等行业中发挥着不可替代的作用。而在矿山开采过程中,植被、土壤等易遭受不同程度的破坏,造成水土流失、水质污染、空气污染、生物多样性受损问题,对生态平衡和生物多样性保护构成了严重威胁。当前矿业发展正面临生态环境保护日趋严格,开发和保护之间的矛盾依然突出的问题,破解资源开发与环境保护之间矛盾的任务十分艰巨。

3 基于 NbS 的广东省矿山生态安全监管策略

基于 NbS 的矿山生态安全监管需顺应采矿周期的变化,将 NbS 的八项准则运用于勘察设计、开采运营、闭坑与后期管护 3 个阶段。以推进生态优先、绿色发展为导向的矿业高质量发展新模式为总目标,按照“开采前重点着力规划编审、开采中重在监测和过程控制,闭坑后重在适应性管理”的原则,根据矿山勘察设计阶段、开采运营阶段和闭坑管护三个阶段的不同特点,将矿山生态保护、修复、治理贯穿于矿产资源开采的全过程,建立基于 NbS 理念

的矿山生态安全监管体系。

3.1 前瞻布局:推进生态优先和绿色发展为导向的矿业高质量发展新模式

广东省的主要成矿带位于全省乃至全国的重要生态安全屏障区域,这些区域的生态状况不仅关系到当地群众的生存发展,也关系到粤港澳大湾区乃至全国的生态安全。广东省需主动探索以“创新驱动,高效利用,绿色发展”为导向的矿业高质量发展新路子,妥善处理好矿产资源勘查开发和生态环境保护的关系[16-19];主动适应新一轮产业革命所带来的矿产资源需求变化,调整优化矿产资源产业结构,创新驱动发展矿业新质生产力;推动矿业产业向高端化、智能化、绿色化方向发展,提升产业附加值和竞争力;聚焦镓、锗、铟、铬铁矿、锆、铪、铌、钽、钒、稀土以及金等战略性矿产资源,铅、锌、钨、锡等优势矿产以及绿色钢铁、有色金属、稀土材料、绿色建材等产业和民生所需的矿产资源,建立以大中型矿山企业为主体的矿业发展新格局,集约、节约、高效利用矿产资源。

严格坚持生态优先、全面推进绿色矿山建设[20]。充分发挥政府的引导和推动作用,落实矿山企业的主体责任,完善绿色矿山建设的标准体系。在市场主体、标准制定、机制创新、监管强化和责任落实等方面深入探讨绿色矿业的发展内涵。针对矿产资源勘查、开采、利用和加工等产业链的各个环节,制定具体的绿色矿业实施路径,从而推动全省绿色矿业的发展。坚持全面治理、协调发展。坚决遏制矿山环境问题增量,加快消减矿山环境问题存量。全面推进绿色矿山建设,促进矿产资源勘查开发与生态环境保护相协调。

3.2 源头控制:勘察设计阶段重点监管生态保护修复方案的整体性和系统性

传统的矿山生态安全监管往往是在问题出现后才进行,无法从根本上解决问题。NbS 理念指导下的矿山生态安全监管强调源头控制,即在矿业活动开始前就进行充分的规划和评估,预测可能出现的问题,并制定相应的治理措施。通过源头控制,可以显著降低生态破坏和环境污染的风险,为后续的保护和修复工作奠定坚实基础[20]。在矿山勘察设计阶段,充分摸查矿山及周边区域的生态系统本底状况,对生态系统恢复力进行分析,强调山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,以完整的人-地关系地域系统为基本保护和修复单元,兼顾自然单元和行政单元,充分考虑系统内外的协同保护和修复。优化方案服务年限,明确方案修编程序及条件。根据不同的矿种、规模等因素,可以适当缩短并细化各种方案的服务年限,以实现差异化的服务。建立现场评审前的方案预审制度,扩大专家筛选专业范围,纳入自然资源、地质、造价、环保、林业、生态等相关领域的专家。促使评审更加聚焦方案的系统性和科学性[17]。

3.3 强化自然效用:开采运营阶段重在监管生态保护和修复模式

传统上矿山开采运营阶段的生态安全监管重点在开采过程中的生态治理,治理措施以工程措施为主,忽略了自然的恢复能力。基于自然的解决方案(NbS)在生态恢复治理中充分利用自然生态系统的恢复能力,以应对生态损害问题,还原自然力量恢复生态功能和模仿自然规律增强人工系统的生态功能。目前矿区生态保护修复措施的设计忽略或低估了矿区生态工程与周边自然生态系统的生态联系,矿区生态恢复工程对气候变化等不确定性的适应性不强。因此在 NbS 理念的指导下,开采运营阶段按“边开采、边治理、边恢复”的模式,重点监管是否采用生态友好型开采技术,减少开采过程中土地破坏、水土资源消耗及生态环境扰动和破坏。坚持生态优先,以恢复和营造良好的生态环境和取得最佳的生态效益为目的,采用科学合理的工程措施和生物措施,以及恰当的管护措施,及时治理恢复矿山地质环境,复垦矿山损毁土地[21]。按照生态系统的整体性、系统性及其演化规律,统筹兼顾矿山与周边地区的生产和生活,坚持自然恢复与人工修复相结合,充分发挥自然修复能力,宜耕则耕、宜林则林、宜建则建、宜湿则湿、宜荒则荒。合理确定生态修复方向、技术方法和防治措施,提高投入产出效率,根据矿山经济状况,最大限度地获得矿山生态修复后的经济效益和生态效益。矿山生态修复宜与周边自然环境和景观相协调,加强绿色矿山建设。监管部门制定矿山生态修复年报制度,要求矿山企业定期向监管部门报送生态修复情况,以便及时掌握矿山地质环境的动态变化,指导矿山生态修复工作的有序开展[22]。

3.4 协同自然:闭坑管护期重在促进自然恢复和适应性管理

确保矿区生态系统功能的多样性、稳定性和可持续性是矿区生态安全监管的最终目标。NbS 主张治理恢复工作的开放性、多功能性、适应性、自组

织性和可持续性,强调动态监管,即根据生态系统的实际情况和地质条件的变化,及时调整监管策略和方法。这种动态监管的方式有助于更好地适应生态环境变化的需要,提高监管的针对性和有效性。在闭坑管护期间,应尊重自然生态系统的演替规律和内在机理,避免过度干预,让自然生态系统有时间和空间进行自我修复。通过保护和恢复生物多样性,增强生态系统的稳定性和抵抗力,提高生态系统的自我修复能力。采用科学合理的生态修复技术,如植被恢复、水土保持、土壤改良等,促进受损生态系统的恢复。根据生态系统的变化和人类活动的影响,动态调整管理策略,确保监管措施的有效性和适应性。建立完善的监测和评估体系,对生态系统的恢复情况进行实时监测和评估,为管理决策提供科学依据。鼓励社区居民参与生态保护和修复工作,提高公众对生态保护的认识和参与度,形成全社会共同保护生态环境的良好氛围。

3.5 多方共治:推动多方参与共创新型监管模式

传统的生态监管方式往往是在问题出现后才进行监管,且监管主体以政府和企业为主。而基于 NbS 理念的监管主体更具包容性和多元性,构建由矿山开采责任主体、政府、公众等多方参与的合作机制,以推动矿山全生命周期生态安全监管体系的完善和创新。政府在矿山生态环境监管中发挥着主导作用,负责制定和执行相关法律法规、政策规划,以及监督和管理矿山企业的行为。政府通过制定严格的环保标准和监管措施,确保矿山企业在开采过程中减少对环境的破坏,并推动生态修复和可持续发展。矿山企业是矿山生态保护的直接参与者,承担着保护环境和恢复生态的主体责任。企业应采用先进的开采技术和设备,减少资源浪费和环境污染。社区是矿山生态安全的重要利益相关方,其参与和监督对于确保矿山治理效果至关重要。社区可以通过组织居民参与矿山环境的监测、评估和修复工作,提高居民对矿山环境问题的认识和参与度。同时,社区还可以发挥监督作用,对矿山企业的行为进行监督,确保其遵守相关法律法规。非政府组织在矿山生态安全监管中发挥着重要的支持和合作作用,可以提供技术支持、资金援助和宣传教育等方面的帮助,推动矿山环境的改善和可持续发展。科研机构在生态安全监管中提供智力支持和技术创新。通过监管模式创新可以增强监管效果、促进利益共享、提高公众参与度以及推动技术创新,为矿山生态环境可持续发展提供有力保障。

3.6 技术革新:运用智能化信息技术提高监管效率

基于 NbS 的生态安全监管强调运用现代科技手段和方法,对矿区生态安全进行高效、精准、可持续的监测和评估。创新矿山生态修复监管技术手段是提高监管效率、确保生态修复工作有效实施的重要途径。充分发挥新一代信息技术在矿山监管中的应用,推广遥感监测、无人机遥感等技术在矿山监管中的作用,遥感监测技术具有大范围、高精度、实时监测等特点,能够实现对矿山生态修复区域的全面监测。通过卫星遥感、无人机遥感等手段,可以获取矿山生态修复区域的影像数据,进行土地利用变化监测、水土环境变化、地质灾害预警等,及时发现生态修复过程中存在的问题和不足,为监管部门提供科学依据。研究制定矿山生态环境遥感监测标准,建立矿山生态修复监管系统,实现数据的统一管理和分析,提高监管效率。探索使用大数据分析技术,实现对矿山生态修复效果的量化评估,为监管部门提供科学依据[23-24]。

4 结论

矿山生态安全监管是实现资源开发与环境保护、经济发展与生态安全相协调的重要手段,也是国家治理体系中的重要组成,新时期赋予矿山生态安全监管更系统的任务和要求,亟需引入新的理念、技术和标准,以破解矿山生态安全监管中遭遇的瓶颈和问题。本文首先对 NbS 理念进行了概述,并与矿山全生命周期管理的概念框架相结合,探讨了新时期矿山生态安全监管的时代需求和 NbS 理念指导下的矿山生态安全监管准则。分析研判广东省矿山生态安全风险现状,识别了矿山现存的挑战和问题,提出了基于 NbS 的矿山全生命周期生态安全监管策略,旨在优化监管体系,强化矿山企业的环境管理责任,提高矿山生态保护和恢复效率。以期能够为广东省乃至其他地区的矿山生态安全监管提供科学依据。

(1) 生态文明和双碳目标等新的时代背景赋予了矿山生态安全监管系统化、法治化、科学化、长周期、民主化的监管需求。基于自然的解决方案(NbS)具有自组织性、生态友好、可持续性和多功能性的特点,强调尊重自然过程,追求长期可持续性,提供多样化的解决方案,降低长期成本,并鼓励多方利益相关者参与。因此 NbS 的理念可为新时期矿

山安全监管提供指导。

(2) NbS 从所解决的问题对象、设计尺度、方案的自然属性、效益评估、方案可行性、方案管理流程、适应性管理模式等方面提出了 8 项准则。本文基于 NbS 的理念,针对矿山勘察设计、开采运营和闭坑维护 3 个阶段,构建了一套面向矿山全生命周期的生态安全监管框架。

(3) 针对广东省矿山生态环境保护与经济发展的矛盾、开发空间和保护空间重叠、矿业开发引发的生态环境问题严重等矿山生态安全面临的风险与挑战,探讨基于 NbS 的广东省矿山生态安全监管策略,从"前瞻布局、源头控制、强化自然、协同自然、多方共治、技术革新"6 个方面,探讨新时期广东省矿山生态安全监管的创新路径和策略。

矿山生态安全监管是个系统复杂的任务,本文是在基于自然解决方案(NbS)理念的支持下,对广东省矿山生态安全全生命周期监管策略做了一些探索,理论深度与实施策略仍有待进一步提升。

参考文献(References):

[1] 邵安林,刘畅,岳星彤,等.新时期我国矿产资源行业高质量发展路径[J].金属矿山,2024(1):2-6.
SHAO Anlin, LIU Chang, YUE Xingtong, et al. Path of high-quality development of China's mineral resources industry in the new era[J]. Metal Mine,2024(1):2-6.

[2] LIN Gang, ZHAO Yanan, FU Jingying, et al. Renewable energy in China's abandoned mines[J]. Science,2023,380:699-700.

[3] BAO Z, PTACEK C J, BLOWES D W. Extracting resources from abandoned mines[J]. Science, 2023, 381:731-732.

[4] GOLDTHAU A, TAGLIAPIETRA S. Energy crisis: five questions that must be answered in 2023[J]. Nature,2022,612:627-630.

[5] 许晓明,胡国峰,邵雁,等.我国矿山生态修复发展状况及趋势分析[J].矿产勘查,2022,13(增刊 1):309-314.
XU Xiaoming, HU Guofeng, SHAO Yan, et al. Analysis on the development status and trend of mine ecologica restoration in China [J]. Mineral Exploration, 2022, 13 (Suppl.1):309-314.

[6] 刘瑛,林小爱,乔占瑞,等.持证矿山生态修复监管模式探讨:以德兴市为例[J].矿业研究与开发,2024,44(11):197-203.
LIU Ying, LIN Xiaoai, QIAO Zhanrui, et al. Exploration of the supeivision model of ecological restoration of licensed mines:a case study of Dexing city[J].Mining Research and Development,2024,44(11):197-203.

[7] 罗明,周旭,周妍."基于自然的解决方案"在中国的本土化实践[J].中国土地,2021(1):12-15.
LUO Ming, ZHOU Xu, ZHOU Yan. Localization practice of "Nature-based Solution" in China[J].China Land,2021(1):12-15.

[8] 霍守亮,张含笑,金小伟,等.我国水生态环境安全保障对策研究[J].中国工程科学,2022,24(5):1-7.
HUO Shouliang, ZHANG Hanxiao, JIN Xiaowei, et al. Countermeasures for assuring water ecological environment security in China[J].Strategic Study of CAE,2022,24(5):1-7.

[9] 宫清华,叶玉瑶,王钧,等.粤港澳大湾区防灾韧性空间规划策略研究[J].规划师,2021,37(3):22-27.
GONG Qinghua, YE Yuyao, WANG Jun, et al. Resilient disaster prevention space planning of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J].Planners,2021,37(3):22-27.

[10] 高中原,李伟秋,李霞,等.矿山地质环境保护与土地复垦方案编制实施监管的问题及建议[J].世界有色金属,2024(11):136-138.
GAO Zhongyuan, LI Weiqiu, LI Xia, et al. Issues and suggestions on the supervision of the preparation and implementation of mining geological environment protection and land reclamation plans[J]. World Nonferrous Metals, 2024(11):136-138.

[11] 罗明,周妍,鞠正山,等.粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估:基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架[J].生态学报,2019,39(23):8911-8919.
LUO Ming, ZHOU Yan, JU Zhengshan, et al. Technological model and benefit pre-evaluation of eco-environmental rehabilitation engineering of typical mines in the Nanling area of Northern Guangdong Province under the pilot framework of the eco-restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(23):8911-8919.

[12] 邱跃,汤妙吉.区域发展战略背景下图书馆舆情知识服务运行机制研究:基于信息生态视角[J].图书馆工作与研究,2022(2):22-29+50.
QIU Yue, TANG Miaoji. Research on the operating mechanism of library public opinion knowledge service under the background of regional development strategy: based on the perspective of information ecology[J]. Library Work and Study,2022(2):22-29+50.

[13] 邓伟平.北部生态发展区规划下金融业支持的重点和方向[J].广东经济,2020(8):46-49.
DENG Weiping. Focus and direction of financial support for the plan of the Northern ecological development area[J]. Guangdong Economy,2020(8):46-49.

[14] 杨崇曜,周妍,陈妍,等.基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索[J].地学前缘,2021,28(4):25-34.
YANG Chongyao, ZHOU Yan, CHEN Yan, et al. Ecosystem conservation and restoration through Nature-based Solutions[J].Earth Science Frontiers,2021,28(4):25-34.

[15] 田美玲.金属矿山生态修复关键技术研究进展[J].能源与节能,2024(10):112-114.
TIAN Meiling. Research progress on key technologies of ecological restoration in metal mines[J].Energy and Energy Conservation,2024(10):112-114.

[16] 国家特邀国土资源监察专员赴广东调研组.广东省矿产资源开发与矿山环境保护调研报告[J].中国国土资源经济,2008(4):4-6+46.
Investigation Group in Guangdong of National Specially Invited Supervisory Commissioner of Land and Resources. The report on mineral resource development and mine environmental protection in Guangdong Province[J].Natural Resource Economics of China,2008(4):4-6+46.

[17] 范振林,马正己.中国矿业高质量发展问题探讨[J].中国国土资源经济,2022,35(8):17-26.
FAN Zhenlin, MA Zhengji. Discussion on high-quality devel-opment of China's mining industry [J]. Natural Resource Economics of China,2022,35(8):17-26.

[18] 罗世兴,张萌.矿业高质量发展系统耦合协调特征及障碍分析[J].国土资源科技管理,2024,41(5):15-25.
LUO Shixing, ZHANG Meng. On analysis of coupling coord-ination characteristics and obstacles of high quality develop-ment system in the mining industry[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2024,41(5):15-25.

[19] 赵焱.湖南省矿业经济高质量发展对策研究[J].中国国土资源经济,2024,37(7):77-82.
ZHAO Yan. Research on high quality development countermeasures of miningin Hunan Province[J]. Natural Resource Economics of China,2024,37(7):77-82.

[20] 白中科,杨侨,白甲林.论绿色矿山建设的源头管控与过程监管[J].中国矿业,2018,27(8):75-79.
BAI Zhongke, YANG Qiao, BAl Jialin. Discussions of sourcecontrol and process supervision for green mine construction[J].China Mining Magazine,2018,27(8):75-79.

[21] 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.
LUO Ming, YING Lingxiao, ZHOU Yan. Analysis and implications of the guidelines on global standards for Nature-based Solutions[J].China Land,2020(4):9-13.

[22] 罗明,鞠正山,魏洪斌.基于自然的重金属污染矿地解决方案:以广东省大宝山矿业废弃地为例[J].中国土地,2020(1):39-41.
LUO Ming, JU Zhengshan, WEI Hongbin. Nature-based Solutions for heavy metal contaminated mining land: a case study of Dabao mountain mining abandoned land in Guangdong Province[J].China Land,2020(1):39-41.

[23] 张航,卢小平,张晓强,等.面向矿山监管的无人机视频关键帧影像动态提取方法[J].遥感信息,2020,35(1):112-116.
ZHANG Hang, LU Xiaoping, ZHANG Xiaoqiang, et al. Dynamic extraction method of key frame image of UAV video for mine supervision[J].Remote Sensing Information, 2020,35(1):112-116.

[24] 宋猛,李文超,李克庆.我国矿产资源监管体系改革路径探讨:基于因子评价与国际经验分析[J].矿业研究与开发,2024,44(2):228-234.
SONG Meng, LI Wenchao, LI Keqing. Discussion on the reform path of China's mineral resources regulatory system: based on factor evaluation and international experience analysis[J].Mining Research and Development,2024,44(2):228-234.