基于缓解层级框架的矿山全生命周期生物多样性保护策略分析*

杨春[1,2,3,4]，陆晓惠[1,2]，周科平[1,2]，康蔼黎[5]，杨珊[1,2]，常方蓉[1,2]，周诗彤[6]，陈立伟[5]

(1.中南大学 资源与安全工程学院， 湖南 长沙 410083；
2.中南大学 矿业生物多样性研究与促进中心， 湖南 长沙 410083；
3.广西华锡集团股份有限公司， 广西 柳州市 545006；
4.中国矿业大学 矿业学院， 江苏 徐州市 221008；
5.野生生物保护学会， 北京 100012；
6.湖南工程职业技术学院 工程管理学院， 湖南 长沙 410151)

摘要：生物多样性保护日益成为全球关注的热点与可持续发展的核心议题，如何在矿业开发过程中有效嵌入生物多样性保护要求，已成为企业履行社会责任与提升综合竞争力的重要路径。我国矿业生物多样性保护工作正处于由政策驱动向技术融合和系统化实践逐步转型的阶段，亟需在方法体系和实施路径上进一步细化与提升。基于国际通行的生物多样性管理工具——缓解层级框架，系统梳理并提炼了矿山不同阶段需重点关注的生物多样性保护行动路径：项目开发阶段，开展系统的生物多样性基线调查与社会经济影响评估，制定针对性的生物多样性管理计划；项目运营阶段，严格落实管理计划，持续监测生态变化并动态调整管理措施；运营至闭坑过渡阶段，实施系统性的生态恢复或修复工作，力求重建稳定、具备自我调节能力的本地生态系统；闭坑阶段，聚焦生态系统功能的长期稳定与土地的可持续利用，构建闭环管理与生态补偿机制，确保生态保护与区域发展协调共进。以马达加斯加Ambatovy镍钴矿为典型案例，分析其基于缓解层级理念的生物多样性保护实践，旨在为我国建设全生命周期生物多样性友好型矿区提供借鉴，助力矿业企业走向高质量、绿色发展之路。

关键词：矿业生物多样性；全生命周期管理；缓解层级框架；生态保护；可持续发展

中图分类号：TD167　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)02-0226-13

Analysis of Biodiversity Conservation Strategies for the Whole Life Cycle of Mines Based on the Mitigation Hierarchy Framework

YANG Chun[1,2,3,4], *LU Xiaohui*[1,2], *ZHOU Keping*[1,2], *KANG Aili*[5], *YANG Shan*[1,2], *CHANG Fangrong*[1,2], *ZHOU Shitong*[6], *CHEN Liwei*[5]

(1.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2.Center for Biodiversity Research and Promotion in Mining, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3.Guangxi China Tin Group Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545006, China;
4.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;
5.Wildlife Conservation Society, Beijing 100012, China;
6.Department of Project Management, Hunan Vocational College of Engineering, Changsha, Hunan 410151, China)

Abstract: Biodiversity conservation becomes an increasingly prominent global concern and a central element of sustainable development, integrating biodiversity protection into mining activities is essential for fulfilling corporate social responsibility and enhancing overall competitiveness. China's biodiversity conservation efforts in the mining sector are currently undergoing a transition from being primarily policy-driven to increasingly characterized by technological integration and systematic practice, with an urgent need for further refinement and enhancement of methodological frameworks and implementation pathways. Grounded in the mitigation hierarchy framework, an internationally accepted biodiversity management tool, it systematically sorts out and refines the key biodiversity conservation action paths that need to be focused on in different phases of mines. In

* **收稿日期**：2025-07-26
基金项目：湖南省学位与研究生教学改革研究项目(2024JGYB019)；中南大学学位与研究生教育教学改革研究项目(2024JGB014)
作者简介：杨春(1992—)，男，甘肃庆阳人，博士，副教授，从事金属矿采矿工程教学与科研工作。E-mail：chunyang@csu.edu.cn
通信作者：周诗彤(1993—)，女，江苏淮安人，博士，讲师，从事工程管理教学与大宗固废低碳处置技术研究工作。E-mail：zhou3460321@163.com

the project development phase, comprehensive baseline biodiversity assessments and socio-economic impact evaluations were conducted to inform tailored biodiversity management plans. During the operational phase, effective implementation of management plans was ensured through continuous ecological monitoring and adaptive management. In the transition phase from operation to closure, systematic restoration and rehabilitation efforts were carried out, striving to rebuild stable, self-regulating local ecosystems. At closure, the focus shifted to long-term ecosystem functionality and sustainable land use, supported by closed-loop management and ecological compensation mechanisms to align environmental conservation with regional development. Taking the Ambatovy Nickel and Cobalt Mine in Madagascar as a representative case, the biodiversity conservation practices under the mitigation hierarchy framework was analyzed. The study aims to provide insights for the development of biodiversity-friendly mines across the whole life cycle in China, thereby supporting mining enterprises in achieving high-quality and green development.

Key words: Mining biodiversity, Whole life cycle management, Mitigation hierarchy framework, Ecological conservation, Sustainable development

0 引言

矿产资源作为支撑人类社会与经济可持续发展的核心自然资源,其重要性不言而喻[1]。中国作为矿产资源种类繁多的国家,尽管资源丰富,却面临着地域分布不均、质量优劣差异大等挑战,难以充分满足快速增长的工业与经济发展需求[2-3]。鉴于此,中国矿业企业积极寻求海外投资路径,以保障国家资源安全,维持经济的可持续发展。然而,这一进程伴随各国不同的政治、经济、社会、环境等因素的考验,需要企业兼顾投资所在国家和区域的可持续发展,在日常运营与长远战略规划中进行精细化布局,落实多维度有效管理[4-5]。在上述各种因素中,采矿项目开发对自然生态系统和生物多样性会产生的潜在影响,日益受到国际社会和各国政府的重视[6-7]。

近年来,国内外多起矿产资源开发引发的环境事故,如巴西马里亚纳尾矿库决堤事件[8]、哥伦比亚安蒂奥基亚省金矿汞污染[9]、南非 Jagersfontein 尾矿坝溃坝事件[10]、伊春鹿鸣矿业尾矿库泄漏事故[11]等,均对当地环境质量、生物多样性和生态系统完整性及居民健康造成了严重影响。此外,长江经济带典型矿业城市的空气质量分析[12]、密苏里州铅矿区对野生动物生理指标的影响研究[13]、煤矿开采对美国河流生物多样性的影响研究[14]、以及铜陵富铜尾矿库下游重金属污染特征研究[15]等,均揭示了矿业活动对生物多样性的负面影响。矿业虽是社会经济发展的重要驱动力,但其全生命周期的活动也对自然生态构成了严峻挑战[16-17]。

面对生物多样性保护形势日益凸显的挑战,国际社会已经采取了多项积极措施,致力于通过政策完善、技术革新、研究深化和合作拓展应对生物多样性的丧失问题[18-20]。这些行动的核心是推动全球范围内的生物多样性保护,从而确保生态系统的稳定与人类福祉的可持续性[21]。最早的全球性生物多样性保护框架是 1992 年联合国环境与发展大会通过的《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD)[22]。该公约标志着国际社会在生物多样性保护方面的首次正式承诺,提出了全球生物多样性保护的战略目标和行动方针。2021 年,中国以大会主席国身份举办了第十五届生物多样性公约缔约方大会,在推动全球生物多样性保护方面发挥了积极的领导作用[23]。大会于 2022 年 12 月的第二阶段会议通过了"昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架"(Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework),基于全球 196 个成员国共同决议,为全球生物多样性的保护和恢复设定 2025 年愿景和 2030 年行动目标。该框架为各国制定和执行国家行动计划提供了明确的指导方向,进一步强化了全球对生物多样性保护的集体承诺[24-25]。该框架强调全球范围内的政策协调、资金支持和技术共享,呼吁各国政府、企业及社会各界加强合作,共同应对生物多样性危机,确保物种、生态系统和基因多样性得到有效保护[26]。在此背景下,各国政府不断通过政策强化保护生物多样性。2024 年,中华人民共和国生态环境部发布《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030 年)》[27],并编制《生物多样性保护重大工程实施方案》,以此支持国家战略与行动计划落地落实,全面提升生物多样性治理水平。2025 年 7 月 1 日,新修订的《中华人民共和国矿产资源法》施行,首次设立矿区生态修复专章,实现了相关制度由零星分散的生态保护规定到集成性生态修复制度的根本性转变[28]。莫桑比

克政府通过颁发生物多样性补偿指令,加强了在生物多样性保护中的政策引导和抵偿机制的应用[29]。

在矿业企业层面,巴西淡水河谷(Vale)、力拓(Rio Tinto)、纽蒙特(Newmont)、美国铝业(Alcoa)等全球矿业领域大型企业也在积极推进生物多样性保护相关政策。英美资源(Anglo American)于2023年发布了生物多样性团体技术标准(Biodiversity Standard),明确了公司生物多样性保护关键目标和最低强制性要求。2024年,紫金矿业集团股份有限公司发布了《生物多样性保护指南》,全面识别矿业活动全生命周期可能涉及的生物多样性影响,将生物多样性保护理念融入矿产资源开采的全过程。这些政策的完善展示了全球在生物多样性保护方面的积极努力,体现了各国政府、企业和社会组织应对生物多样性危机方面的共同责任和合作精神。

在当前国际形势和矿业生物多样性保护需求日益紧迫的背景下,作为生物多样性保护的重要参与者和贡献者,矿业企业承担着义不容辞的环境责任[30-32]。本研究通过系统梳理行业报告和相关文献,重点阐述了基于缓解层级框架的矿山全生命周期生物多样性影响管理和保护规范体系。这一研究不仅有助于推动矿业生物多样性影响管理理念和实践的普及,更为矿业企业提供了一套可操作的实施指南。通过落实这些管理措施,企业能够在有效识别和管理生物多样性风险和影响的同时,优化资源配置,降低运营成本,从而提升社会认可度和市场竞争力。生物多样性议题在矿业管理中的主流化将为我国矿业企业实现经济效益与生态效益的协调发展提供理论依据和实践指导,推动我国主导的"昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架"的履约实践,深入践行生态文明战略,提升我国在全球矿业治理和生物多样性保护领域的话语权和影响力,为全球生态安全贡献中国智慧和中国方案。

1 缓解层级框架概述

缓解层级(Mitigation Hierarchy)是一种系统化的生态影响管理框架,主要用于将开发活动对生物多样性和生态系统服务的负面影响降至最低,甚至通过抵偿措施产生增量。它提供了一套循序渐进的方法,确保在项目规划、建设、运营和关闭等过程中,以最有效和最可持续的方式系统化减少生态损害。缓解层级在环境影响评估、可持续资源管理、采矿、基础设施建设和土地利用规划等多个领域得到广泛应用,并已成为全球公认的生态影响管理最佳实践之一。根据跨部门生物多样性倡议(Cross Sector Biodiversity Initiative, CSBI)的定义[33],缓解层级是一套系统化的行动框架(见图1),旨在预测并尽可能规避对生物多样性和生态系统服务的影响;在不可避免的情况下,采取措施将影响降至最低;当影响已然发生时,实施恢复或修复措施;对于仍然存在的显著残余影响,则通过抵偿机制进行弥补,从而使项目趋向于达到生物多样性零净损失,甚至净增益。

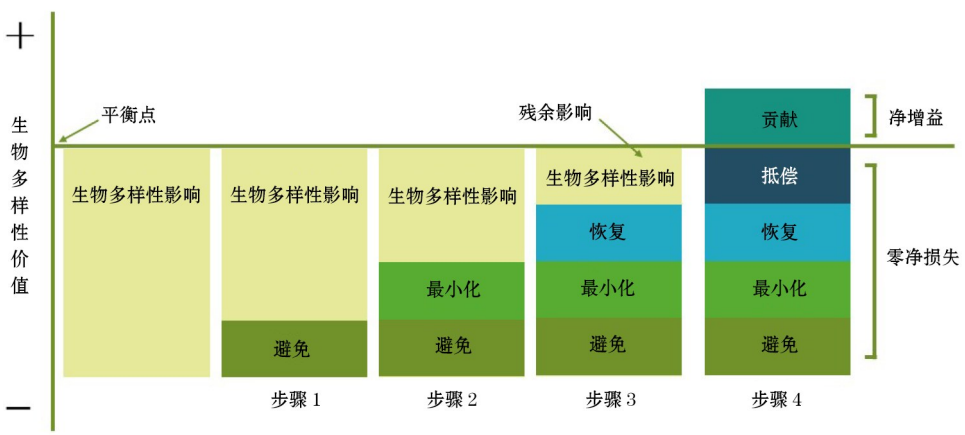


图1 缓解层级框架[34]

Fig.1 Mitigation hierarchy framework[34]

缓解层级行动步骤如下。

(1) 避免(Avoidance):避免是缓解层级的首要步骤,旨在通过项目规划阶段的合理布局和设计,尽可能规避对生物多样性和生态系统服务的影响。具

体而言,在矿山规划阶段,需要确保矿山和相关外围基建的选址避开国际上公认的、各国法律或社会公约认定的、各国明确的原住民和当地社区所有的生态敏感区域,包括但不限于项目所在的国家、地区法律法规规定的保护地、世界自然或文化遗产地、缔约国正式列入世界遗产暂定名录的地区、被列为国际自然保护联盟(IUCN)保护地管理类别Ⅰ~Ⅲ的区域、其他国际公认的生物多样性重点区域、关键生物多样性区域和生态敏感区域,以及当地社区居民或原住民确认的具有当地文化特征属性的区域。对这些生态敏感区域的规避,可以从事先预防的角度避免对各类濒危物种和重要生态系统的潜在影响。除了从选址上进行规避以外,在矿山建设和运营阶段,需要调整施工时间,在野生动物繁殖季节暂停或限制施工活动,以降低对其种群繁衍的影响。避免策略通常是降低潜在负面影响最直接、最经济且最有效的方法,这要求企业在项目的早期阶段就将生物多样性保护纳入决策过程。我国2011年颁布的《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》,明确提出"生态保护红线"建设要求[35];2017年印发的《建立国家公园体制总体方案》[36],均属于典型缓解层级避免范畴。

(2) 最小化(Minimization):当某些影响无法规避时,应采取措施降低其范围、强度或持续时间,以尽量减少对生物多样性和生态系统的不利影响。例如在矿区建设过程中,尽可能保留当地植物和原来的植被;在矿区道路建设中,通过设计野生动物通道、设立野生动物标识等,以减少道路对动物活动或迁徙的阻碍;在矿区运营和闭矿阶段,按照国内国际标准管理排污系统和废弃物,将矿区对周边水生生态系统的污染降至最低,确保周围居民和生态系统水源安全。在海上油气开发过程中,优化作业方式以减少水下噪声污染,降低对海洋哺乳动物(如鲸类)的影响。在高强度开发区域,可通过构建植被缓冲带和实施污染控制措施,减少空气、噪声和水污染的扩散与影响。有效的最小化措施可以减少或消除部分负面影响,使开发活动对生态系统的干扰降至最低。

(3) 恢复/修复(Restoration/Rehabiliation):对于无法完全避免或最小化的影响,恢复措施旨在修复或改善受损的生态系统,使其恢复到接近项目开发前的自然状态,即生物多样性和生态系统较为完整的状态。例如在露天采矿活动结束后,通过覆土复绿、本地植被恢复和土壤修复,促进矿区植被群落和土壤机构及微生物的自然恢复。在河流疏浚或水坝建设后,采取措施恢复湿地生态系统,种植本地水生植物或调整水流模式,以增强水生生物的环境质量。在森林砍伐区域,实施本地树种的重新种植,以促进森林生态系统的恢复。尽管恢复可以改善生态状况,但在许多情况下,完全恢复至受损前的生态状态极具挑战性,因此应优先考虑前两个步骤,以减少对生态系统的破坏,降低修复所需成本。2024年,我国针对矿山生态修复集中发布了《绿色矿山评价通则》(GB/T 44823—2024)、《矿山土地复垦与生态修复监测评价技术规范》(GB/T 43935—2024)、《金属矿土地复垦与生态修复技术规范》(GB/T 43933—2024)、《煤矿土地复垦与生态修复技术规范》(GB/T 43934—2024)、《石油天然气项目土地复垦与生态修复技术规范》(GB/T 43936—2024)等规范标准,建立了先进的矿山生态修复量化指标体系,标志着我国在矿山生态修复领域已从国际跟跑转向领跑。

(4) 抵偿(Offsets):当前三步措施仍无法完全消除影响时,抵偿作为最后的手段,旨在弥补残余影响,以实现零净损失或净增益。抵偿通常包括以下两种类型:一种是生态修复抵偿(Rehabilitation Offsets),通过生态恢复措施修复受影响区域或在其他区域建立替代性栖息地,例如,湿地被开发破坏后,在其他地区创建类似结构和功能的湿地,以维持相应的生态功能;另一种是避免损失抵偿(Averted Loss Offsets),通过保护矿区以外的、现有的高价值生态系统,实现在该地点的生物多样性保护,抵消在矿区造成的生物多样性损失。例如,为了抵消因开发导致的森林损失,可以资助邻近地区的森林保护项目,防止进一步的砍伐。抵偿往往是衡量标准最为复杂且成本最高的缓解措施。因此,项目方应更倾向于在早期阶段采取有效的避免、最小化和恢复/修复措施,以尽量减少对生态系统的影响。

缓解层级的核心目标是通过系统化的环境管理,尽可能降低人类活动对生物多样性的影响。避免、最小化和恢复/修复共同作用,以减少项目对生态系统的残余影响。当然,在某些情况下,即便这些措施得到充分应用,仍然可能需要额外的抵偿措施,以确保项目整体的生物多样性零净损失乃至净增益,从而贡献项目所在地区的生态系统的完整性和社会经济可持续性发展。

2 矿山全生命周期生物多样性保护策略

国际采矿与金属委员会(International Council on Mining and Metals, ICMM)于2006年发布了《采矿与生物多样性优良实践指南》(Good Practice Guidance for Mining and Biodiversity,以下简称"指南")[37],该指南为矿业企业提供了一个系统性的方法框架,旨在全生命周期内有效管理矿业开发对生物多样性的影响,并推动矿业行业向更加可持续的方向发展。作为全球矿业行业的领先组织之一,ICMM致力于在矿业活动中平衡资源开发和环境保护之间的关系,并通过该指南提供清晰的指引,帮助矿业公司在其运营过程中采取科学、合规、具有实际意义的生物多样性保护措施。ICMM的指南着眼于如何整合生物多样性保护与矿业开发目标,确保矿业项目能够在尊重生物多样性和生态系统的基础上推进。这一目标特别重要,因为矿业活动通常涉及对大片自然生态系统的影响,包括土地变更、水资源使用和污染物排放等,因此需要从项目规划到关闭各阶段针对性地采取措施。指南强调采矿活动的全生命周期管理,即从矿区的选址、勘探、开发、运营、复垦到最终的闭坑阶段,都需要考虑对生物多样性产生的影响。这种全周期管理方法有助于矿业企业在初期就识别已有的或潜在的影响,主动采取管理措施,并确保干预措施贯穿整个矿山开发过程,避免因影响没有得到管理而面临的政策、财务和社会风险。矿业项目全生命周期生物多样性整合示意见图2。

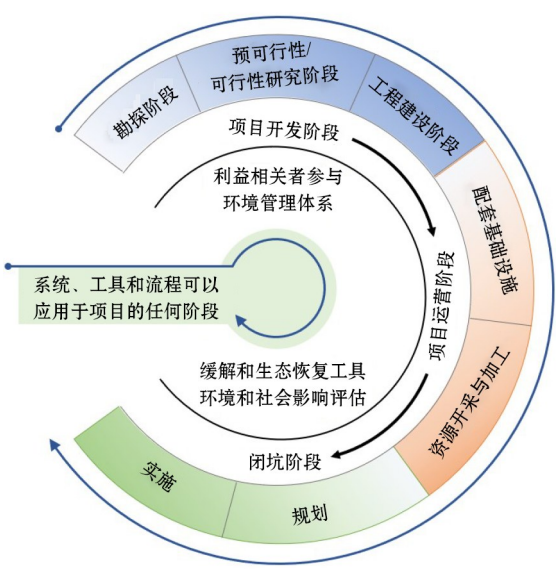


图2 矿业项目全生命周期生物多样性整合示意

Fig.2 Schematic diagram of biodiversity integration in the whole life cycle of mining projects

2.1 项目开发阶段

不同公司对项目开发的不同阶段所用术语不同,但可总结为三个主要阶段:勘探、预可行性研究和可行性研究,以及工程建设。

2.1.1 勘探阶段

在矿产勘探阶段,核心任务是寻找具有经济开采价值的矿藏。这一阶段通常由初级采矿公司主导,有时会得到大型采矿公司的资金支持。勘探工作具有"高风险、高回报"的显著特征,一旦发现优质矿藏,投资回报率将十分可观。由于中小勘探公司往往缺乏专业的环境保护团队,在生物多样性保护方面需要政府、行业协会等多方力量共同参与。以加拿大勘探开发者协会(Prospectors and Developers Association of Canada,PDAC)发布的《e3 Plus:负责任勘探框架》(e3 Plus:A Framework for Responsible Exploration)[38]为例,该文件专门为中小勘探公司提供了包括生物多样性保护在内的环境管理指导。值得注意的是,虽然初期勘探对生态环境影响较小,但随着勘探工作的深入,特别是进入详勘阶段后,可能对当地生物多样性造成显著影响。因此,企业从勘探初始就应当重视可能产生的生态影响。

具体而言,在勘探准备阶段建议采取以下措施:一是研读当地环保法规,系统梳理勘探区域涉及的生物多样性保护要求;二是核查保护区分布,通过地理信息系统明确项目是否涉及自然保护区等敏感区域;三是收集生态本底数据,充分掌握勘探区域的生物多样性特征,预判可能的生态风险。目前,国际领先矿业企业已形成行业共识。例如,国际采矿与金属委员会成员企业均承诺,绝不在世界遗产地开展勘探,严格遵守各类自然保护区规定,并主动采取生态修复措施。在极特殊情况下,经政府特批方可在保护区内开展勘探,但必须接受最严格的环境监管。需要特别注意的是,随着我国新修订的《矿产资源法》实施,勘探中发现古生物化石等必须立即上报。如果前期调研不足,企业很可能因后期保护区划设而面临项目搁置风险。虽然全球大多数勘探区域不在保护地范围内,但企业仍需借助专业评估工具,主动规避生物多样性敏感区,这既是履行社会责任的要求,也是防范经营风险的必要举措。纳米比亚Skorpion锌矿在勘探过程中,制定了环境管理计划,广泛吸纳利益相关方参与,针对脆弱的Sperrgebiet生态环境制定了严格的钻探和土地使用规范。通过日常监督、现场检查和定期审计,所有

钻探区和通道在勘探结束后都得到了有效的恢复,大面积土地以低成本回归原始状态。

2.1.2 预可行性研究和可行性研究阶段

矿业项目的预可行性研究阶段通常在勘探工作取得初步成果后启动,该阶段与勘探后期工作可能存在时间上的交叉。尽管预可行性研究与可行性研究在实践操作中存在一定程度的边界模糊性,但两者在研究目标和内容深度上具有本质区别。前者着重于确定矿产储量在经济上是否具备可行性,并研究多个备选方案;而后者则聚焦于验证已探明矿产储量的经济可行性,深入讨论并确定优选的开发方案。

在矿业项目预可行性研究阶段,开展系统的生物多样性本底调查与影响评估是确保项目环境可行性的关键环节。项目主体应当组织专业团队对矿区及周边区域进行全面的生态调查,重点包括:区域生物区系特征调查,涵盖动植物物种组成、种群数量及其空间分布格局;关键生态要素评估,着重调查保护物种和指示物种的分布特征,分析生态系统服务功能价值,评估重要遗传资源的保护状况;生态空间格局分析,明确生物多样性要素的空间异质性特征及其保护现状。在获取详实的本底数据后,需建立多维度评估体系:首先开展技术经济评估,对拟采用的采矿工艺、选矿流程、废弃物处置方式、水资源利用方案及尾矿库选址等进行可行性分析;其次实施环境影响预评估,通过构建开发活动与生态环境的响应关系模型,预测不同开发情景下的潜在生态影响;同时进行社会影响分析,系统评估项目开发可能引发的社会经济效应。此外,该阶段应重点分析不同开采方式对生态敏感区的累积性影响,并将环境社会影响因素作为方案比选的核心指标,为后续可行性研究提供科学依据和技术支撑。

当项目进入可行性研究阶段,其采矿可行性将得到更为清晰的界定与明确。企业会深入采集关于已探明矿储量以及潜在矿储量的详尽信息,并据此为矿山开发拟定详细的设计方案。生产计划方面,不仅会精准确定所需矿石产量,还会制定出科学合理的废石处理方案。同时,针对矿山的基础设施、处理设施、废物处理设施以及相关附属设施,也会进行全面且细致的布局规划。此外,闭坑计划也将在该阶段予以正式规划,并有机融入项目的整体设计体系之中。鉴于可行性研究阶段所确定的设计方案已具备较强约束性,在后续实施过程中若要进行更改或增添内容,将面临极大的困难与挑战。因此,在这一阶段对预可行性研究阶段所获取的数据进行全面审查与及时更新显得尤为关键。这一审查与更新过程需建立在更为精细的设计方案以及更为深入的环境与社会影响评估的基础之上。通过全面且深入的评估,确保对拟议项目可能对生物多样性产生的潜在影响形成充分认知,进而有效规避不利影响,并进一步优化生物多样性影响管理、保护以及保育方案的设计,以保障项目在开发与运营过程中实现与生物多样性的和谐共生。

在可行性研究阶段结束时,必须开展全面的环境和社会影响评估,重点聚焦以下生物多样性相关事项:(1)重新核查项目所在地的相关法律法规和政策要求,明确可能受影响的保护区域及物种;(2)对已收集的生物多样性基线数据进行系统评估,研判当地生物多样性的生态价值及其面临的主要威胁;(3)分析项目可能对生物多样性造成的直接和间接影响,包括对利益相关方的潜在连锁效应;(4)探讨拟采取缓解措施的可操作性及预期效果,评估剩余影响对生物多样性和利益相关方的长期影响;(5)提出生物多样性保护或提升的替代方案,对其技术经济可行性进行论证。针对采矿项目可能对生物多样性造成的负面影响,需制定分级缓解策略。将生物多样性保护措施纳入环境管理体系,明确施工阶段的针对性缓解行动,并根据运营和闭矿阶段的特点动态调整。通过系统化措施降低项目全生命周期对生物多样性和生态系统的累积负面影响,确保损失可控。在评估中统筹技术可行性与利益相关方诉求,尤其关注原住民和社区对生物多样性的依赖、权益及文化关联,通过协商机制将其纳入管理计划。

可行性研究阶段是协调项目经济性、技术性与环境社会可持续性的关键环节。通过强化生物多样性保护措施、完善利益相关方参与机制,可推动矿业项目在合规框架下实现环境友好与社会共赢,为长期可持续发展奠定基础。西澳大利亚的Ravensthorpe镍矿项目位于生态高度敏感的农业区,紧邻菲茨杰拉德河(Fitzgerald)国家公园及生物圈保护区。为补偿开发导致的栖息地损失,项目通过购买650 hm^2 邻近灌木林地作为保护性补偿,并对600 hm^2 已开垦农田实施植被恢复,以扩展Bandalup生态廊道。项目团队在可行性研究中识别出700多种植物,包括当地特有物种和新物种,并通过基础设施避让、逐步复垦、设立禁采区和物种迁移等专项措施,最大限度降低生态干扰。

2.1.3 工程建设阶段

在采矿项目的建设阶段,生物多样性往往面临最直接、最显著的影响。施工活动通常需要清除地表植被、扰动土层结构,以便为道路、厂房等基础设施建设创造条件。这些改变不仅会直接破坏地表动植物的栖息环境,还可能影响土壤微生物群落和水文地质结构,进而对生态系统造成长期影响。尽管可行性研究阶段已制定了建设方案并完成了环境影响评估,但实际施工过程中,许多利益相关方仍可能因准备不足而难以有效应对环境风险。因此,在施工启动初期,应通过专项培训和社区宣导,确保施工团队和周边居民充分了解潜在影响,并积极配合缓解措施的实施,以最大程度降低生态破坏。

施工过程中,道路建设和其他线性基础设施的建设(如专用铁路、输送浆料或精矿的管道、输电线路等)可能会导致栖息地的隔离或碎片化,从而直接影响动植物分布和多样性。线性基础设施的不当选址可能会切断不同动植物种群之间的自然联系,进而改变生态系统的结构与功能,增加生态环境发生重大甚至不可逆转变的风险。与此同时,基础设施建设还可能对地表水系统、湿地和地下水资源造成负面影响。例如,溪流和河流流量的变化可能会对邻近的动植物栖息地或河流生态系统产生影响,若影响范围较大,甚至可能干扰下游社区依赖的渔业资源。在偏远地区,生态系统的原真性和完整性尚未受到大规模人为干扰,但外来资源开发项目不仅会造成土地利用模式改变、当地动植物减少,而且可能引入外来入侵物种,进而威胁当地的生物多样性。项目相关的交通建设也可能导致外来人员涌入,增加对当地自然资源的过度开发或非法利用风险,这些潜在风险需要通过全面评估和管理加以应对。

土地清理活动往往是导致栖息地破坏的主要因素。清理土地不仅直接破坏了野生动植物的栖息环境,特别是珍稀濒危物种的栖息地,还可能间接触发与环境保护相关的违规风险。此外,土地开垦可能对周边依赖生物多样性的社区居民的生产和生活造成重大影响,最直接的表现就是自然资源的减少与质量下降,特别是水资源和动植物资源等。如果项目需要对当地社区进行搬迁,新的安置地也可能对生物多样性带来额外压力。这些风险是由采矿行为对土地利用方式改变引发的连锁反应。因此,在基线调查阶段应识别并规划相应的解决方案。为了确保方案的可行性和有效性,应采用多情景模拟方法,测试不同方案在技术可行性和资源投入方面的效果,并与利益相关方进行充分沟通,以确保相关措施的顺利实施。

建筑材料采购的过程也可能对生物多样性产生显著影响。为了减少这些影响,相关的潜在风险和缓解措施应当纳入环境影响评估和详细设计阶段进行考虑。此外,与施工相关的工人及其生活基础设施建设也可能对生物多样性造成不利影响。新建项目及其周边基础设施可能吸引外来移民,从而加剧对当地自然资源的过度消耗。承包商在交付合同时通常会面临较大的压力,这可能导致对环境监测计划中承诺的针对生物多样性影响的缓解措施疏忽或敷衍。为确保生物多样性和受影响利益相关方得到充分保护,设计缓解措施时必须考虑到实际操作中的挑战。同时,应明确分配缓解措施的责任,并加强施工过程中的监督,确保各项保护措施的有效实施。

总之,在项目建设阶段,尽管许多影响可能是不可避免的,但通过提前规划、实施适当的缓解措施,并加强各方协调与监督,可以有效减轻施工带来的环境冲击,最大限度地保护生物多样性和生态系统的完整性。

2.2 项目运营阶段

矿山运营或作业是采矿公司的核心业务,涵盖矿石提取与加工、废料处理及产品运输等所有相关活动。这一阶段不仅是开始生产以抵消建设成本和相关支出的关键,还涉及辅助基础设施的运营问题。辅助基础设施的建设通常需要 1～3 a,但可能持续运营数十年。新项目开发期间的重点是预测和减轻对生物多样性及生态系统产生的直接影响,而运营阶段不仅需要持续减轻相关影响,还需为保护和增强生物多样性提供时空条件。近年来,新的采矿项目越来越重视环境和社会影响评估,通过详细的调查和规划来管理其对生物多样性的影响。对于那些已经运营了一段时间的现有采矿作业,或在生产初期对生物多样性考虑有限的采矿作业,虽然错过了计划阶段的最佳基线设立时机,但仍需通过开采过程中的阶段性评估和监测,识别潜在风险并采取相应措施。

2.2.1 辅助基础设施

辅助基础设施的潜在影响主要发生在设计和建造期间,后续的基础设施维护和运营,也可能影响生物多样性。因此,在规划阶段需要尽可能涵盖维护

运营阶段的影响和风险识别,以便配备解决和应对方案。比如,对于杂草和害虫防治,需配备对生物多样性友好的病虫害管理方法,优先考虑非化学控制的病虫害管理方法,在必须使用化学除害剂的情况下,所选用的除害剂应对非目标物种的动植物毒性低,不造成严重影响。

2.2.2 矿石开采、加工和废弃物处置

矿山开采对生物多样性的影响不仅限于矿井区域和开采初期的建设阶段,还逐渐扩展至矿坑土地清理、向新区域的扩张以及配套基础设施的建设。大型且运营周期较长的矿山往往会经历多次扩张,这些扩张往往伴随新的基础设施建设和运营,对生物多样性和生态系统所带来的直接、间接影响,通过时空累计,可能与开采新矿山时产生的影响相当。因此,扩张时需要对环境和社会影响进行评估,或者更新初期的环境评估。除了土地清理对当地动植物的生存和活动造成干扰外,采矿过程中涉及的爆破、挖掘以及将矿石运输至加工设施等环节也可能对生态系统的结构和功能产生影响,同时这些活动所产生的光污染、声音干扰对特定动植物也会产生影响。例如,矿山排水或地表水流改道可能改变水文地质状况,污水排放到具有高生态价值的湿地或河岸地区、低酸性地下水或高金属污染物从废石或尾矿储存区迁移、抽取地表水或地下水用于矿物加工等,均可能影响湿地、河岸和水生生物多样性[39]。冲积矿床的砂矿开采通常位于河床或湿地浅层矿床,这对水生生态系统的保护带来了额外挑战[40]。

此外,矿石通过筛分、破碎、研磨等物理过程或浸出等化学方法转化为精矿或最终产品时,会产生尾矿[41]。尾矿库的影响主要体现在三个方面:首先,初始足迹对环境的影响具有不可避免性,因此尾矿库选址是对运营、修复成本及关闭后责任影响最大的设计因素;其次,尾矿可能含有流动的液体和金属污染物,这些污染物可能渗入地下水或流入地表溪流,对生态造成影响;最后,尽管事故发生的概率较低,一旦发生,将可能造成灾难性后果[42-43]。尾矿的处理方式会对生物多样性产生不同影响,常见的陆地储存方法包括在山区或平地建立尾矿库。在降水量大于蒸发量的国家,如加拿大和挪威,可以在现有水体周围建造挡水大坝,将尾矿置于水面以下,防止硫化物尾矿氧化并减少酸排放。这种方法对生物多样性的影响通常局限于局部区域,但一旦发生破坏,可能对下游地区造成严重影响。海下排尾是一种将矿山尾矿排放到海洋中的方法,通常用于矿产资源开采过程中产生的尾矿处理,其工艺包括去除尾矿中危害较大的化学物质,再用海水稀释以降低浮力,最终通过水下管道将处理后的尾矿排放到80～100 m 的深度[44]。其目的是将尾矿释放到热跃层和光合带以下,形成“密度流”沉入海洋。支持者认为,海下尾矿处理方法对底栖生物的影响较小,但批评者指出,管道破裂和尾矿扩散的不可预测性使其对环境效益存在疑虑,应谨慎采用。无论采用哪种尾矿处理方法,都必须评估其对生物多样性的影响,并根据具体情况确定最适合的管理方案。风险评估程序应用于识别潜在影响,并根据评估结果合理选择尾矿管理方法。尾矿管理应符合监管机构、利益相关方的要求,以确保生态安全。

2.3 闭坑阶段

矿山闭坑计划是实现负责任采矿的重要环节,其核心在于通过系统性规划确保矿区土地实现可持续转型。该计划不仅需要统筹经济效益与生态保护的平衡,更要建立全周期的环境管理机制,包括污染防控、生态修复及社会经济转型等关键内容。在生物多样性方面,闭坑计划应当超越简单的恢复原状,着眼于创造生态增值机会,通过科学修复技术和管理创新,使受采矿影响的生态系统具备更高水平的生物多样性及更完善的生态服务功能。同时,计划还需充分考虑矿区转型后的长期监测和维护机制,保障闭坑成果的持久性,最终实现环境效益、社会效益和经济效益的协同发展。

2.3.1 闭坑规划

在矿山闭坑阶段,科学制定切实可行的生物多样性恢复目标与指标体系至关重要。这些目标不仅为生态重建工作提供明确指引,更是衡量闭坑成效的关键基准,使监管机构和利益相关方能够客观评估矿山是否达到出让要求。在具体实施过程中,应当建立动态管理体系,将闭坑视为生态修复的起点而非终点,通过渐进式、迭代式的管理方法与各利益相关方持续协作,不断完善修复方案。目标制定需要统筹考虑多重因素,包括现行法律法规要求、现有技术水平、矿区原始生态状况、各方利益诉求及闭坑后的长期土地规划等,确保方案既符合规范要求又具备可操作性。更重要的是,这些目标必须系统性地融入矿山全生命周期管理体系,从前期规划设计到后期维护管理,保持各阶段工作的连贯性和协调性,最终实现生态效益最大化,为矿区可持续发展奠

定坚实基础。巴布亚新几内亚 Misima 矿通过与政府和社区协商,制定了兼顾生态恢复与当地生计需求的闭矿复垦战略,目标是形成稳定、多样化且具有恢复力的生态系统。复垦采取分阶段植被恢复方式:先用草本与豆科固土,再种植速生树种,最后引入顶级林木,并培育约 70 种树苗。到 2004 年停产时,约 80%的扰动区已复垦,实现了逐步恢复森林、提升生物多样性和满足社区长期需求的目标。

2.3.2 闭坑实施

采矿属于临时性土地利用活动,其最终目标是将矿区恢复至某种“生产性”用途。广义而言,生态修复指为使采矿用地达到商定的闭矿后用途而采取的措施,最终目标是建立一个与现有生态系统尽可能相似且生机勃勃的本地生态系统。在闭坑阶段目标制定过程中,企业需要通过充分沟通来避免误解或预期落差,妥善管理各方的期望。企业应关注该地区或同纬度相近生态系统中的其他矿山的成功经验和最新可行的措施。在收益与成本不符合实际的情况下,恢复还应兼顾其他能为生物多样性带来价值的目标。例如,首先,恢复具有改善本地生态系统功能的物种,如控制侵蚀或固氮的物种,或具有美学价值的本地物种,并防止引入非本土物种。其次,如果土地有其他用途,如生产食品、药品或文化价值,恢复生物多样性可以与其他目标兼容。最后,恢复关键物种,如稀有或受威胁的植物,或恢复适合稀有或受威胁物种栖息的生态环境。生物多样性恢复目标的具体时限应由公司、监管机构和当地其他利益相关方共同讨论决定,但通常没有强制性规定。在制定这些目标时,采矿公司和监管机构、其他利益相关方合作,探索长期维持生物多样性保护所需的管理要求、执行责任及管理费用的筹措方式。美国铝业公司(Alcoa)在西澳大利亚的 Jarrah 森林铝土矿开采后,以恢复接近原始状态的森林为核心目标,通过设定阶段性里程碑,最终在复垦区实现了与天然 Jarrah 森林相同水平的本地植物物种丰富度。该公司目前致力于保持这一成果,并建立了科学化的最佳复垦实践体系。

2.4 马达加斯加 Ambatovy 镍钴矿生物多样性保护实践案例

2.4.1 项目概况

Ambatovy 是马达加斯加一家大型镍钴矿企业,现由日本 Sumitomo 与韩国 KOMIR 两家企业运营。矿区位于马达加斯加首都以东 80 km 的 Moramanga 镇附近。红土矿浆通过一条 220 km 长的管道从矿区输送到位于马达加斯加东海岸 Toamasina 附近的选厂及冶炼厂。矿山于 2007 年奠基建设,2012 年开始运营。2014 年 1 月,Ambatovy 镍钴矿达到商业化生产的要求,这是该矿设施逐步实现全面产能释放的重要里程碑,预计矿山运营周期约为 29 a[45]。马达加斯加是全球生物多样性热点地区,物种特有率极高,同时也面临高度威胁[46]。由于大规模森林砍伐,原始森林仅剩约 10%。Ambatovy 镍钴矿矿区位于东部雨林走廊南端的高生物多样性区域,矿区东北侧是 Ankeniheny-Zahamena 森林走廊,东侧是 Torotorofotsy 湿地和 Mantadia 国家公园。矿区附近森林栖息着 14 种狐猴、32 种其他哺乳动物、122 种鸟类、近 200 种爬行动物与两栖动物、50 种鱼类(其中 25 种为特有物种),以及超过 1 580 种植物(包括 250 种兰花),占马达加斯加已知植物物种的 10%以上。Ambatovy 镍钴矿于 2006 年作为试点项目加入了商业与生物多样性抵偿计划(Business and Biodiversity Offsets Programme,BBOP),旨在借助并助力生物多样性保护最佳实践的迭代与推广[40-41]。

2.4.2 缓解层级措施

在生物多样性管理方面,Ambatovy 镍钴矿主要遵循两个标准——商业与生物多样性抵偿计划发布的生物多样性抵偿标准[47]、国际金融公司发布的社会和环境可持续性绩效标准[48]。这两个标准要求在进行生物多样性抵消之前,必须先采取缓解层级的前三个步骤,然后依据生物多样性抵消标准的原则,设计和实施抵消措施。

(1) 避免。

在项目设计阶段,项目方系统性地制定了一系列规避措施,以最大限度降低对当地生物多样性和生态系统的影响。首先通过严格控制矿山作业面积,将开发范围压缩至最小必要规模;同时在矿体上方专门划定了两处总面积达 306 hm^2 的非地带性森林保护区,实施严格保护。为防范水土流失风险,项目配套建设了沉积坝系统,有效保障下游流域生态安全。在基础设施布局方面,管线走向经过多方案比选,主动避让了碎片化森林等生态敏感区域;选厂选址则优先利用沿海既有退化土地,避免占用矿山周边原生环境。这些措施从空间布局、工程设计和生态保护三个维度,构建了系统的风险防控体系。

(2) 最小化。

项目方采用循序渐进的定向森林清理方案,通过精细化管理将生态影响降至最低。采用劳动密集型人工方式进行有计划的分区清理,从地块中心逐步向边缘推进,为野生动物的活动或迁移创造缓冲空间,使其能够自然迁徙至项目通过 50 a 长期租约保护的 3 500 hm^2 保育林区。整个清理作业严格遵循"清理前-清理中-清理后"三阶段管理流程:在清理准备阶段,专业团队会全面普查动植物资源,标记需要移植的珍稀植物(特别是所有兰科植物等重点保护物种),并对存在鸟兽巢穴的树木实施保护性暂缓清理;在作业实施阶段,系统开展动植物抢救工作,重点保护哺乳动物、鸟类、爬行类和两栖类等野生动物;在后期处理阶段,将木材资源合理分配给当地社区,灌木枝条制成生态覆盖物,表层土壤科学储存用于场地修复。这种全周期、精细化的管理模式,既保障了工程进度,又兼顾了生物多样性保护与社区利益共享的多重目标。

(3) 恢复/修复。

Ambatovy 镍钴矿自 2015 年起便采用渐进式修复策略持续推进。根据最初制定的 35 a 修复规划,项目旨在重建与周边森林生态系统相协调的多功能替代林。修复工程的核心目标是实现生物多样性零净损失,重点聚焦两大方向:一方面尽可能恢复关键生态价值(如濒危物种种群重建),另一方面着力维护受项目影响的生态系统服务功能与价值。为确保修复成效,项目团队开展多维度修复试验,通过生产基地苗圃培育常规树苗,同时与塔那那利佛大学合作,在实验室采用组织培养技术繁育珍稀及难成活物种。

(4) 抵偿。

为抵偿项目运营造成的生物多样性剩余损失,Ambatovy 镍钴矿制定了多元化的生态抵偿方案,指导原则源于 BBOP 工具,并通过第三方专家定期合规审计。当前复合补偿方案涵盖 5 个区域:矿区内 306 hm^2 非区域性森林、3 338 hm^2 保护区、距矿区 70 km 的 Ankerana 区域(5 715 hm^2)、CFAM 走廊片区(7 269 hm^2)以及 Torotorofotsy 湿地周边 3 876 hm^2 森林。通过"面积×生态状况"指标对森林条件与增益潜力进行量化评估,结合长期保护措施,实现"避免损失"型补偿,防止在"常规情景"下的进一步森林破坏与重点物种丧失,助力实现森林及生物多样性无净损失。

2.4.3 保护效果评价

马达加斯加 Ambatovy 镍钴矿项目在开发之初便承诺遵循缓解层级原则,力求实现生物多样性零净损失甚至净增益目标。项目采取了一系列系统性的生态保护与恢复措施,包括避让重要栖息地、实施就地和迁地保护、物种救护、生态廊道建设及大规模森林封育与恢复。Ambatovy 镍钴矿项目设立了独立科学咨询委员会,通过遥感、现场调查和模型评估等手段持续监测生物多样性变化。同时,该矿区一直获得不同研究机构的长期关注。截至 2021 年,第三方研究机构的研究显示,项目已基本实现采矿导致的森林损失与保护修复森林面积的平衡,接近零净损失目标[49]。此外,野生动植物监测数据显示,如狐猴、金蛙等特有物种在生态抵偿区内种群恢复良好。研究人员也指出,这些保护措施在评估对当地物种和居民的实际影响方面仍存在不足。企业在追求生物多样性零净损失目标的同时,更要注重对当地群众生产生活的保障。项目方必须重点关注受影响社区的基本生计和发展需求,通过有效管控社会风险,让生态保护工作更好地兼顾社会公平正义[50]。总体而言,Ambatovy 镍钴矿是全球矿业领域实施生物多样性零净损失与生态抵偿的典型案例,为其他矿业项目在生态保护与可持续发展方面提供了有益参考[51-52]。

3 全球视野下矿业生物多样性保护路径展望

在全球视野下,矿业生物多样性保护将是一项核心议题,其重要性不言而喻。尽管 ICMM 于 2006 年发布的《采矿与生物多样性优良实践指南》提出了具体措施,并在多个案例中取得了成功,但由于各国企业在认知水平、技术能力、政策执行力及资源配置等方面存在差异,全球范围内的矿业生物多样性保护行动仍表现出不均衡性与差异化,亟需通过国际合作与经验共享推动整体水平的提升。

为实现矿业企业的长远可持续发展,需从以下维度推进矿业生物多样性影响管理实践。第一,积极倡导并实践多学科交叉的教学模式,聚焦于矿业生物多样性保护领域,旨在培养具备高度生态保护意识与先进技术能力的矿业从业人员,此举不仅能提升行业整体的可持续发展能力,也是保护生态环境、促进人与自然和谐共生的关键举措。第二,以政府为主导,通过政策与法规约束,将生物多样性保护

作为核心理念纳入矿业开发的规划与设计阶段,从价值链优化、企业商誉提升及市场竞争优势构建等战略高度出发,构建一套涵盖利益相关方广泛参与、协同共治的矿山生物多样性管理体系。第三,着力加强专业机构在生物多样性保护方面的能力建设,通过强化培训、资源共享与技术交流,为矿业企业提供科学、可行的生物多样性保护实践方案。同时,深化国际合作,借鉴国际先进经验,结合我国创新技术和理念,共同应对矿业活动对生物多样性的挑战,提升全球矿业行业的可持续发展水平与社会责任感,促进全球生态文明的共同进步。

4 结论

(1) 以缓解层级框架为核心,系统阐述了矿山全生命周期生物多样性保护的策略。从项目初期的勘探规划,到运营期的动态管理,直至闭坑后的长期管护,论证了将生物多样性保护作为一条核心主线,深度嵌入矿业开发价值链各环节的必要性与可行性。

(2) 通过对马达加斯加 Ambatovy 镍钴矿生物多样性案例的剖析,进一步验证了该框架在国际先进实践中的有效性与科学性,其“避免—减小—恢复/修复—抵偿”的系统性路径为全球矿业实现生态友好转型提供了经验借鉴。

参考文献(References):

[1] 郭娟,胡容波,周起忠,等.2024 年中国矿产资源形势回顾与展望[J].中国矿业,2025,34(1):37-45.
GUO Juan, HU Rongbo, ZHOU Qizhong, et al. Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2024 [J]. China Mining Magazine,2025,34(1):37-45.

[2] 王秋舒,宋崇宇,李文,等.中国矿业国际合作发展历程和现状分析[J].地质与勘探,2022,58(1):229-238.
WANG Qiushu, SONG Chongyu, LI Wen, et al. The history and current situation of China's mining international cooperation[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(1): 229-238.

[3] 赵国君,李兴武,欧阳鑫,等.我国矿产资源综合利用标准体系构建研究与思考[J].矿业研究与开发,2025,45(8):272-278.
ZHAO Guojun, LI Xingwu, OUYANG Xin, et al. Research and thinking on the construction of standard system for comprehensive utilization of mineral resources in China[J]. Mining Research and Development,2025,45(8):272-278.

[4] 王小龙,鲁裕民,杨明,等.中国矿业企业海外运营风险及管控:以贵州锦丰项目管理为例[J].中国矿业,2022,31(增刊1):43-46.
WANG Xiaolong, LU Yumin, YANG Ming, et al. Overseas operation risks and coping strategy of Chinese mining enterprises: taking Guizhou Jinfeng project management as an example[J]. China Mining Magazine, 2022,31(Suppl.1):43-46.

[5] 杨春,常方蓉,杨珊.矿业生物多样性保护初探[M].长沙:中南大学出版社,2023.
YANG Chun, CHANG Fangrong, YANG Shan. Preliminary study on biodiversity conservation in mining [M].Changsha:Central South University Press, 2023.

[6] MORA Pedro, GALLARDO-GARCÍA Jesús, LLAMAS Bernardo. Biodiversity recovery at environmental mining restorations[M]//JHARIYA M K, MEENA R S, BANERJEE A, et al. Natural Resources Conservation and Advances for Sustainability. Amsterdam:Elsevier,2022:139-150.

[7] 叶鑫,石松林,顾羊羊,等.紫金矿山生态影响与生态修复效果研究[J].环境生态学,2019,1(1):84-90.
YE Xin, SHI Songlin, GU Yangyang, et al. Study on ecological impact and ecological restoration effects of Zijin mining[J]. Environmental Ecology,2019,1(1):84-90.

[8] MARTINS Bruna de Almeida, TAKAHASHI Jacqueline Aparecida. Metal-rich mine-tailing spills in brazil and the consequences for the surrounding water bodies[J]. Water, Air, & Soil Pollution,2022,233(11):473.

[9] CORDY Paul, VEIGA Marcello M, SALIH Ibrahim, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia:the world's highest per capita mercury pollution[J]. Science of the Total Environment,2011,410: 154-160.

[10] MARAIS Lochner, KEMP Deanna, VAN der Watt Phia, et al. The catastrophic failure of the Jagersfontein tailings dam:an industrial disaster 150 years in the making[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2024, 109:104585.

[11] 罗清月,魏健,李明月,等.鹿鸣矿业尾矿库泄漏事件环境应急过程解析与总结[J].环境工程技术学报,2022,12(6):1963-1971.
LUO Qingyue, WEI Jian, LI Mingyue, et al. Analysis and summary of the environmental emergency response process of Luming mining tailings pond leakage accident[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6): 1963-1971.

[12] 牛司平,于江华,程一松.长江经济带典型矿业城市马鞍山市大气污染特征及颗粒物潜在源研究[J].环境科学学报,2022,42(2):283-297.
NIU Siping, YU Jianghua, CHENG Yisong. Air pollution and potential contributors of particulate matter in Ma'anshan,a typical mining city from Yangtze Economic Zone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(2): 283-297.

[13] BEYER W Nelson, CASTEEL Stan W, FRIEDRICHS Kristen R, et al. Biomarker responses of Peromyscus leucopus exposed to lead and cadmium in the Southeast Missouri Lead Mining District [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2018,190(2):104.

[14] GIAM Xingli, OLDEN Julian D, SIMBERLOFF Daniel. Impact of coal mining on stream biodiversity in the US and its regulatory implications[J]. Nature Sustainability,2018,1(4):176-183.

[15] 蒋硕,刘丙祥,宋小鹏,等.铜陵某富铜尾矿库下游重金属污染特征与生态风险[J].地球与环境,2024,52(3):354-364.
JIANG Shuo, LIU Bingxiang, SONG Xiaopeng, et al. Pollution characteristics and ecological risk of heavy metals in the downstream of a copper-rich tailings pond in tongling [J]. Earth and Environment,2024,52(3):354-364.

[16] CAMPBELL Tristan, DIXON Kingsley W, BRADSHAW Sidney D, et al. Standards-based evaluation inform ecological restoration outcomes for a major mining activity in a global biodiversity hotspot [J]. Restoration Ecology, 2024, 32(8):e14236.

[17] 甄文郡.矿区生态重建中生物多样性与可持续发展[J].农业灾害研究,2024,14(7):104-106.
ZHEN Wenjun. Biodiversity and sustainable development in ecological reconstruction of mining areas [J]. Journal of Agricultural Catastrophology,2024,14(7):104-106.

[18] VIRAH-SAWMY Malika, EBELING Johannes, TAPLIN Roslyn. Mining and biodiversity offsets: a transparent and science-based approach to measure "no-net-loss"[J]. Journal of Environmental Management,2014,143:61-70.

[19] 黄栋良,梅金华,何卫平.湖南矿山地质环境破坏影响评价及防治研究[J].矿业研究与开发,2021,41(9):118-124.
HUANG Dongliang, MEI Jinhua, HE Weiping. Impact evaluation and prevention research on mine geological environment destruction in Hunan[J]. Mining Research and Development,2021,41(9):118-124.

[20] 冯姗姗,田婷,常江,等.国外采矿坑湖生态修复研究进展与启示[J].矿业研究与开发,2023,43(10):51-59.
FENG Shanshan, TIAN Ting, CHANG Jiang, et al. Research advances and implications of ecological restoration of mine pit lake aboard [J]. Mining Research and Development,2023,43(10):51-59.

[21] ASKA Bora, FRANKS Daniel M, STRINGER Martin, et al. Biodiversity conservation threatened by global mining wastes[J]. Nature Sustainability,2024,7(1):23-30.

[22] MUNSON Abby. The united nations convention on biological diversity[M]. The "Earth Summit" Agreements: A Guide and Assessment. London:Routledge,2019:75-84.

[23] 张丽荣,罗明,朱振肖,等.《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》指引下中国生物多样性主流化实施路径探析[J].广西植物,2023,43(8):1356-1365.
ZHANG Lirong, LUO Ming, ZHU Zhenxiao, et al. Implementation path of biodiversity mainstreaming in China under theguidance of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework[J]. Guihaia,2023,43(8):1356-1365.

[24] 臧明月,刘立,马月,等.《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》下的中国城市生物多样性保护[J].生物多样性,2025,33(5):144-153.
ZANG Mingyue, LIU Li, MA Yue, et al. China's urban biodiversity conservation under the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework [J]. Biodiversity Science, 2025,33(5):144-153.

[25] 徐靖,王金洲.《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》主要内容及其影响[J].生物多样性,2023,31(4):7-15.
XU Jing, WANG Jinzhou. Analysis of the main elements and implications of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework[J]. Biodiversity Science, 2023, 31(4):7-15.

[26] 耿宜佳,田瑜,李俊生,等."2020 年后全球生物多样性框架"进展及展望[J].生物多样性,2020,28(2):238-243.
GENG Yijia, TIAN Yu, LI Junsheng, et al. Progress and prospects of the Post-2020 Global Biodiversity Framework [J]. Biodiversity Science,2020,28(2):238-243.

[27] 姜雪原,徐嘉忆,盛学敏,等.《中国生物多样性保护战略与行动计划(2023—2030 年)》与《昆蒙框架》的协同与差异[J].生物多样性,2025,33(3):29-37.
JIANG Xueyuan, XU Jiayi, SHENG Xuemin, et al. Synergies and differences between the China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2023—2030) and the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework[J]. Biodiversity Science,2025,33(3):29-37.

[28] 中华人民共和国矿产资源法[J].中华人民共和国最高人民检察院公报,2025(1):1-10.
Mineral resources law of the people's republic of China[J]. Gazette of the Supreme People's Procuratorate of the People's Republic of China,2025(1):1-10.

[29] KEITH David A, GHORABA Somaya Magdy M, KALY Eric, et al. Contributions of the IUCN red list of ecosystems to risk-based design and management of protected and conserved areas in Africa[J]. Conservation Biology,2024,38(3):e14169.

[30] 香宝,马广文,李咏红,等.成渝经济区矿产资源开发对其生态环境影响评价[J].环境科学与技术,2011,34(增刊 1):361-367.
XIANG Bao, MA Guangwen, LI Yonghong, et al. Entironment impact assessment of mineral resources development in Cheng-Yu economic zone[J].Environmental Science & Technology,2011,34(Suppl.1):361-367.

[31] GASTAUER Markus, PINHEIRO Taise, CALDEIRA C F, et al. Large-scale forest restoration generates comprehensive biodiversity gains in an Amazonian mining site[J]. Journal of Cleaner Production,2024,443:140959.

[32] ETUI Imelda Dossou, STYLO Malgorzata, DAVIS Kenneth, et al. Artisanal and small-scale gold mining and biodiversity:a global literature review[J]. Ecotoxicology, 2024,33:485-504.

[33] JACOB Céline, VAISSIERE Anne-Charlotte, BAS Adeline, et al. Investigating the inclusion of ecosystem services in biodiversity offsetting[J]. Ecosystem Services,2016,21:92-102.

[34] UN Global Compact IUCN. A framework for corporate action on biodiversity and ecosystem services[R]. New York:United Nations Global Compact Office,2012.

[35] 林勇,樊景凤,温泉,等.生态红线划分的理论和技术[J].生态学报,2016,36(5):1244-1252.
LIN Yong, FAN Jingfeng, WEN Quan, et al. Primary exploration of ecological theories and technologies for delineation of ecological redline zones[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(5):1244-1252.

[36] 建立国家公园体制总体方案[J].生物多样性,2017,25(10):1033-1036.
Overall plan for establishing a national park system[J]. Biodiversity Science,2017,25(10):1033-1036.

[37] GARDNER John H, PARSONS Andrew S. ICMM'S good practice guidance on mining and biodiversity[J]. Proceedings America Society of Mining and Reclamation,2006:660-670.

[38] CARON Joanie, DURAND Suzanne, ASSELIN Hugo. Principles and criteria of sustainable development for the mineral exploration industry[J]. Journal of Cleaner Production,2016,119:215-222.

[39] 刘文颖,肖利萍,梁冰.矿山酸性废水治理的研究及 SAPS 技术展望[J].矿业研究与开发,2008(1):71-73.
LIU Wenying, XIAO Liping, LIANG Bing. Study on the treatment of acid mine drainage by SAPS and the development prospect of SAPS[J]. Mining Research and Development,2008(1):71-73.

[40] VAN DOVER C L, ARDRON J A, ESCOBAR E, et al. Biodiversity loss from deep-sea mining[J]. Nature Geoscience,2017,10(7):464-465.

[41] 李悦,王坤,张名亮,等.某铁尾矿库周边地下水污染运移预测及控制方案模拟[J].矿业研究与开发,2024,44(4):152-160.
LI Yue, WANG Kun, ZHANG Mingliang, et al. Groundwater pollution migration prediction and control scheme simulation around an iron tailings reservoir[J]. Mining Research and Development,2024,44(4):152-160.

[42] 李揽月,伍玲玲,胡林,等.关于两种微生物协同加固铀尾砂及防止铀元素迁移的试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):138-145.
LI Lanyue, WU Lingling, HU Lin, et al. Experimental study on synergistic reinforcement of uranium tailings by two microorganisms and prevention of uranium migration[J]. Mining Research and Development,2022,42(9):138-145.

[43] SCHOENBERGER Erica. Environmentally sustainable mining:the case of tailings storage facilities[J]. Resources Policy,2016,49:119-128.

[44] PEDERSEN Kristine B, LEJON Tore, JENSEN Pernille E, et al. Impacts of climate change on metal leaching and partitioning for submarine mine tailings disposal[J]. Marine Pollution Bulletin,2022,184:114197.

[45] DICKINSON Steven, BERNER Pierre O. Ambatovy project: mining in a challenging biodiversity setting in Madagascar[J]. Malagasy Nature,2010,3:2-13.

[46] MONTEIRO Antonio T, ROSA Sophia, ANDREONE Franco, et al. Anthropogenic landscape change and amphibian diversity in tropical montane biodiversity hotspots: insights from satellite remote sensing in the Madagascar highlands[J]. Environment, Development and Sustainability,2025,27(3):7219-7242.

[47] PENCA Jerneja. Biodiversity offsetting in transnational governance[J]. Review of European, Comparative & International Environmental Law,2015,24(1):93-102.

[48] ROMIANINGSIH Ni Putu Wulan, UTOMO Suyud Warno, HAMZAH Udi Syahnoedi. A comparative study of different practices in environmental impact assessment[J]. Journal of Environmental Science and Sustainable Development,2023,6(1):51-70.

[49] TA Lynda Hubert, CAMPBELL Bonnie. Environmental protection in Madagascar: biodiversity offsetting in the mining sector as a corporate social responsibility strategy[J]. The Extractive Industries and Society,2023,15:101305.

[50] JONES Julia PG, RATSIMBAZAFY Jonah, RATSIFANDRIHAMANANA Anitry N, et al. Last chance for Madagascar's biodiversity[J]. Nature Sustainability, 2019,2(5):350-352.

[51] DEVENISH Katie, DESBUREAUX Sébastien, WILLCOCK Simon, et al. On track to achieve no net loss of forest at Madagascar's biggest mine[J]. Nature Sustainability, 2022,5(6):498-508.

[52] DEVENISH Katie, WILLCOCK Simon, GOODENOUGH Kathryn M, et al. No evidence of increased forest loss from a mining rush in Madagascar's eastern rainforests[J]. Communications Earth & Environment,2024,5(1):489.