基于全周期协同治理尾矿资源回收与采场空间释放一体化模式研究*

黄荣伟[1]，胡光坡[2]，王振攀[2,3]

（1.华刚矿业股份有限公司， 北京 100039；
2.中铁资源集团勘察设计有限公司， 河北 廊坊市 065000；
3.河北省非煤矿山岩土工程技术创新中心， 河北 廊坊市 065000）

摘要：随着全球矿业向绿色、可持续方向转型，露天矿山在扩帮延深中普遍面临既有尾矿库压占采场境界的严峻挑战。针对这一“尾矿压境”难题，以非洲某铜钴矿尾矿库治理工程为背景，提出了一种“水力-机械协同、资源-空间-安全多目标优化”的尾矿全周期治理一体化新模式。该模式构建了融合“目标协同、技术协同、管控协同”的理论框架，其核心在于通过大型绞吸式采砂船水力开采与机械采掘的时空耦合工艺，同步实现尾矿资源高效回收与采场空间安全释放。工程实施了“空-天-地”一体化监测网络，并创新性地采用“分期蓄水、动态预警”的主动控制策略，确保了紧邻高陡采场边坡作业的安全，施工期北帮截渗坝体最大水平位移稳定在67.4 mm。实践表明，该模式成功处理尾矿约8 320 kt，释放采场空间超4.2×10^6 m^3，经济效益、安全效益与环境效益显著，为解决这一共性矿业难题提供了可复制的系统性技术方案。

关键词：尾矿资源化；绞吸式采砂船；水力开采；边坡稳定性；多源监测

中图分类号：TD926.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0279-10

Research on Integrated Mode of Tailings Resource Recovery and Stope Space Release Based on Full-Cycle Collaborative Governance

Huang Rongwei[1], *Hu Guangpo*[2], *Wang Zhenpan*[2,3]

(1.LA Sino-Congolaise Des Mines S.A., Beijing 100039, China;
2.China Railway Resources Group Survey and Design Co., Ltd., Langfang, Hebei 065000, China;
3.Hebei Province Technology Innovation Center of Non-coal Geotechnical Engineering, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: As global mining is transforming towards green and sustainable development, open-pit mines are generally confronted with a severe challenge that existing tailings storage facilities encroach on the stope boundary during slope expansion and deepening. To address the problem of “tailings encroachment”, a new integrated model for full-cycle tailings management featuring “hydraulic-mechanical collaboration and multi-objective optimization of resources, space and safety” was proposed based on a tailings management project of a copper-cobalt mine in Africa. A theoretical framework integrating “objective coordination, technical coordination and management coordination” was established by this model. Its core lies in adopting the spatiotemporal coupling technology of hydraulic mining with large cutter suction dredgers and mechanical excavation, so as to realize efficient recovery of tailings resources and safe release of stope space simultaneously. An integrated “space-air-ground” monitoring network was deployed in the project, and a proactive control strategy of “phased water impoundment and dynamic early warning” was innovatively adopted. The safety of operations adjacent to the high and steep stope slope is guaranteed by these measures. During construction, the maximum horizontal displacement of the north-side seepage cut-off dam is maintained at 67.4 mm. Practice shows that approximately 8 320 kt of tailings are treated and over 4.2×10^6 m^3 of stope space are released by this model. Distinct economic, safety and environmental benefits are achieved, and a replicable and systematic technical solution is provided for this common problem in the mining industry.

Key words: Tailings resource utilization, Cutter suction dredger, Hydraulic mining, Slope stability, Multi-source monitoring

* **收稿日期**：2026-05-13
基金项目：中国中铁股份有限公司2025年重大专项研发课题(2025-专项-03)
作者简介：黄荣伟(1968—)，男，河南南阳人，高级工程师，主要从事有色金属矿山采矿技术、安全工程方面的研究。E-mail：2646958629@qq.com

0 引言

矿产资源是现代工业的基石,其可持续开发长期面临资源接续、生产扩张与环境保护的多重压力。露天矿山因其高效性被广泛采用,但随开采范围扩大,早期建于采场境界附近的尾矿库已从附属设施转变为制约矿山生命周期的关键瓶颈,即“尾矿压境”难题[1-3]。这些库体不仅永久占压宝贵的采矿空间,而且其中堆存的尾砂因历史选矿技术限制,仍含有大量有价金属,形成了兼具资源价值与潜在环境风险的“人工矿床”[3-4]。与此同时,尾矿库溃坝事故在全球范围内屡有发生,对下游地区的安全构成长期威胁[5]。因此,如何系统性地破解“尾矿压境”困境,同步实现资源回收、空间释放与风险消除,已成为推动矿业绿色转型的前沿课题。

当前,尾矿治理技术,如再选回收、膏体充填、生态复垦等,多聚焦于单一维度[6-9]。再选技术侧重于回收有价成分,但对大规模库体清挖及空间释放关注不足[6];充填技术旨在减少库区用地和风险,却无法直接解决尾矿库占压采矿空间的根本矛盾[7-8];对于尾矿库的整体清挖,传统机械干采法在处理饱和细粒尾砂时,存在效率低下、成本高昂、作业安全风险大等明显劣势[9]。现有研究大多聚焦于工艺环节或局部技术优化,缺乏从项目全生命周期视角对“资源-空间-安全”进行系统性协同优化的理论框架与完整工程实践[10]。

依托刚果(金)某铜钴矿尾矿库治理工程,该尾矿库堆存的可采尾矿量约为 8 320 kt(Cu 和 Co 的平均品位分别为 0.76%、0.111%),同时占压了采场二期扩帮所必需的超过 420 万 m^3 的关键空间,且库内尾砂呈高含水饱和状态,承载力极低,并紧邻数百米高陡采场边坡。针对上述工程难题,本文提出并验证一种“水力-机械协同、资源-空间-安全多目标优化”的尾矿全周期一体化治理新模式,详细阐述其理论框架、工艺体系和主动风险管控策略,并通过工程量化数据验证其综合效益。

1 工程概况

本研究的工程载体——刚果(金)某铜钴矿尾矿库治理项目。该尾矿库位于采场北部、选冶厂南部,其空间毗邻关系如图 1 所示,库内堆存尾砂厚度平均约为 10 m,最深处为 15 m,总计堆存尾矿量约为 18 568.5 kt。区域气候分为旱季和雨季,水文地质条件复杂,尾砂多呈饱和状态,这既为水力开采提供了便利,也带来了边坡稳定和地基处理难题。项目设计的年处理能力为 1 500 kt,总工期约 3.4 a,要求在不影响矿山主体生产、确保采场边坡绝对安全的前提下,完成尾矿清挖与资源回收。

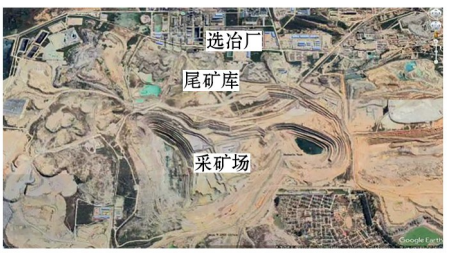


图 1 矿区区位卫星图

Fig.1 Satellite map of the mining area

上述高含水饱和尾砂、软弱地基与紧邻高陡边坡的工程条件,使传统治理手段面临严峻挑战。具体而言,在此类软弱地基上,于紧邻数百米高陡采场边坡的敏感区域进行大规模清挖,传统机械开采方法存在效率低下、成本高昂,且极易诱发边坡失稳与渗流破坏的极高安全风险。因此,该项目的成功实施依赖于一套能够系统协同资源、空间释放与边坡安全的一体化治理技术。

2 理论框架

2.1 基于协同论的系统架构

尾矿库与采场的协同治理是一个涉及战略、经济、技术与安全的复杂系统[11]。本研究以协同论为基础,将尾矿库重新定义为集“可开采资源单元”“可改造空间单元”与“需动态管控的风险源”于一体的复合工程系统,构建“目标-技术-管控”三层协同理论框架。目标协同层明确项目需同步实现三大核心目标:资源回收量 R 最大化、采场空间释放量 S 最优化、全生命周期治理成本 C 最小化;技术协同层实现水力开采与机械采掘两大子系统的空间互补、时序衔接与功能增强;管控协同层通过“多源监测→动态预警→决策反馈→工程执行”的闭环,将“分期蓄水、动态检验”的主动策略与标准化管理体系相融合。

2.2 多目标优化决策模型及其应用

为量化求解目标协同层中的矛盾与权衡,建立如下多目标优化模型:

$$\min F(x)=[-R(x),-S(x),C(x)]^{\mathrm{T}} \quad (1)$$

式中:$R(x)$ 为尾矿资源回收量,t;$S(x)$ 为采场空间释放量,m^3;$C(x)$ 为综合治理成本,元;决策变量

x 涵盖开采工艺参数、设备配置及作业时序等。模型的核心应用在于项目前期的科学比选与方案决策。在可行性研究阶段,采用费用现值法对多种备选方案进行量化评估:

$$PV=\sum_{t=0}^{T}C_t(1+r)^t \tag{2}$$

式中:PV 为费用现值;C_t 为第 t 年的净现金流或运营成本;T 为评估周期;r 为折现率。通过费用现值法的量化比选支持核心技术经济决策。

2.3 边坡稳定性的理论分析

边坡稳定性是贯穿设计、施工全过程的核心约束,体现在静态、动态两个层面[12]。

(1) 设计阶段的静态验算。采用简化毕肖普法进行边坡稳定性极限平衡分析,安全系数 F_s 的求解公式为:

$$F_s=\sum[c'\cdot l+(W-u\cdot l)\cdot\tan\varphi']/m_a\div\sum(W\cdot\sin\alpha) \tag{3}$$

式中:c' 为有效黏聚力,kPa;φ' 为有效内摩擦角,(°);l 为条块底面长度,m;W 为条块质量,kN/m;u 为孔隙水压力,kPa;α 为条块底面倾角,(°);修正系数 $m_a=\cos\alpha+(\tan\varphi'\cdot\sin\alpha)/F_s$。

基于尾砂物理力学参数,对机械采掘边坡进行验算。根据《尾矿设施设计规范》(GB 50863—2013)的要求,该边坡的安全系数不能低于 1.25。水力开采的核心安全风险在于施工期蓄水荷载对邻近采场自然边坡稳定性的动态影响。对此,本项目未采用单一的、静态的安全系数作为控制指标,因为其无法反映水位变化过程的瞬态风险。创新性地采用了“分期蓄水、动态检验”的主动控制策略,即通过控制单次蓄水荷载、监测边坡实时响应、设定量化预警阈值的方式,对边坡稳定性状态进行全过程、动态化管控。该方法将安全控制从“静态验算”提升为“动态管控”,更适用于水力开采工况的风险管控模式。

(2)施工阶段的动态控制机理。施工期最大的风险源于水力开采蓄水引起的渗流场变化。基于有效应力原理,土体抗剪强度取决于有效应力 $\sigma'=\sigma-u$。库区水位抬升导致孔隙水压力 u 增大,从而降低有效应力 σ',削弱边坡稳定性。“分期蓄水、动态检验”策略正是对此理论的主动应用:通过控制单次水位抬升幅度(即控制 u 的增量),并预留足够静置观测时间(允许 u 消散、σ'重新调整),实现对边坡稳定性状态的渐进式测试与主动管理。

3 水力-机械协同开采系统设计

3.1 技术方案比选与决策

评估采用“初步筛选→详细比选”的两阶段法。首先,基于技术可行性,对饱和尾砂的适应性、工艺成熟度及矿区作业条件,对四类主流方案进行定性筛选。水枪冲采方案因难以在开阔库区形成有效冲刷工作面,导致效率低下而被排除;推土机配合砂泵方案在输送高浓度尾砂浆时易发生堵管,可靠性不足。采砂船方案与挖掘机配汽车方案在技术上均可行,故对这两个方案进行了详细比选。对这两种技术可行的方案进行了全生命周期费用现值分析(折现率 $r=8\%$,评估周期 $T=5$ a):采砂船方案初始设备投资 264.7 万美元,年均运营成本 157.9 万美元,总费用现值约 792.9 万美元;纯机械方案年均运营成本 270.0 万美元,总费用现值 1079.3 万美元。采砂船方案在费用现值上具备约 26.5% 的显著经济优势。综合技术适应性与经济性,确定以大型绞吸式采砂船水力开采为核心、机械采掘为协同的工艺路线。

3.2 绞吸式采砂船水力开采系统

水力开采子系统的核心设备是 2 500 m^3/h 的大型绞吸式采砂船。其工作原理是通过前端铰刀旋转切割、扰动饱和尾砂,形成泥水混合物,再由船上离心泵通过浮管和岸管将尾砂浆输送到远处的浓缩或分选系统。为确保大型设备在非洲内陆现场顺利投用,项目团队在尾矿库滩涂上修建了承载能力经严格验算的组装平台和船坞。地基承载力平板载荷试验结果表明:各检测点在加载至设计荷载(200 kPa 和 400 kPa)时,累计沉降量均较小(平均 4.62 mm),p-s 曲线平缓光滑,满足承载力要求,为后续 180 t 履带吊重型吊装作业提供了安全保障。绞吸式采砂船的主要技术参数见表 1。

表 1 绞吸式采砂船的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the cutter suction dredger

序号	参数名称	参数值	备注
1	设计生产能力	2 500 m^3/h	泥浆质量浓度 10%～15%
2	船长×船宽	22.5 m×7.7 m	—
3	最大挖深	14.9 m	覆盖全部厚度
4	总装机功率	约 3 200 kW	—
5	主电机功率	900 kW/10 kV	—
6	铰刀功率	550 kW	—
7	水下泵功率	1 200 kW	—
8	排距	约 5 km	可按工况配置
9	排管通径	Φ450 mm	—
10	定位系统	钢桩台车+定位锚	保障横挖精度

管道摩阻损失水头h_f满足达西-韦斯巴赫公式:

$$h_f = f \cdot (L/D) \cdot v^2/2g \quad (4)$$

式中:f为达西摩擦因数;L为管道长度,m;D为管径,m;v为泥浆流速,m/s;g为重力加速度,m/s^2。

泵扬程H须满足$H \geqslant h_f + \Delta z + h_{locahl}$,其中$\Delta z$为地形高差,$h_{locahl}$为局部水头损失,确保2 500 m^3/h设计流量下系统正常运行。

采砂船主要由铰刀、龙门架、泥泵、主电机舱、驾驶室、机舱、排泥管、定位柱、变压器等组成。

3.3 机械采掘子系统

机械采掘子系统在协同体系中承担3项核心功能:一是为水力开采开辟作业条件,构筑施工道路、排水沟和硬化组装平台;二是处理绞吸船无法有效覆盖的边角区域及需精确修坡的边坡;三是在尾矿库与采场北帮之间填筑截渗坝体,隔离水力开采区与采场,保障采场边坡安全。创新采用"排水疏干、分层反揭"工艺:预先开挖排水沟疏干作业面,严格执行"正方向采掘3 m深,随即反向采挖2 m用于作业平台换填"的循环作业模式,有效改善地基承载性能,确保重型设备安全高效运行。该工艺设计通过严格的边坡稳定性验算,确保了在软弱地基上作业时形成的开挖边坡具有足够的安全储备,其最小安全系数计算值为1.361,满足规范要求,从理论上保障了机械采掘作业的边坡安全。

3.4 水力-机械协同时空耦合机制

3.4.1 空间分区协同原则

库区在平面上划分为南、北两个主采区,确立"先南后北"的开采顺序,优先处理对采场二期扩帮构成直接压占的南侧区域,以最快速度释放关键采矿空间。在垂直方向上采用"分层开采"策略,将尾砂分为两个主要作业层,匹配绞吸船的最佳挖深。在单个采区内,进一步细分为水力核心开采区与机械协同作业区:水力区位于库区中部开阔地带,便于绞吸船展布作业;机械区负责处理临近最终边坡、坝体及边角的区域,并填筑压实截渗坝体[13-15]。

3.4.2 时序衔接协同策略

两种工艺在时间上形成"机械先行、水力主导、机械收官"的精密衔接链条。

(1)准备与开路期(机械主导):完成区域排水疏干、施工道路修筑,完成截渗坝体填筑与压实,为水力开采创造安全的作业边界和稳定的地基条件。

(2)主体开采期(水力主导,机械辅助):绞吸式采砂船进入核心区进行大规模、连续水力开采,同期机械设备对水力开采形成的侧向边界进行修整并维护交通网络。

(3)收尾与整平期(机械主导):完成库底残留尾砂的清理、边坡的最终修整及场地平整,达到设计标高和坡度要求。

上述时序衔接关系在图2的热力图中得到了量化呈现。从颜色(颜色标识见电子版)分布的整体格局来看,颜色由左至右逐步由深蓝(低水力占比)过渡至橙红(高水力占比),再在阶段7略微回落,清晰体现了开采工艺演进的时序逻辑,即:项目初期以机械换填为主,中后期逐步过渡至水力开采主导,收尾阶段因坝体结构复杂而重回机械方式。从各区域的横向对比来看,南采区(Ⅰ区)的水力化进程最为超前,阶段3时水力占比已达到55%,阶段6达到峰值90%;南采区中部和东部的水力化起步略晚,峰值分别为85%和80%,但整体趋势一致。北采区3个子区域(西部、中部、东部)在阶段4之前水力占比均为0,表明前期完全依赖机械作业。自阶段5起,随蓄水计划推进,水力占比迅速攀升,至阶段6分别达到95%、95%和90%的最高值,体现了北采区在蓄水完成后大规模切换为水力采掘的工程决策。南北坝体作为关键结构物,全程水力占比均低于50%,阶段7甚至降至0,反映了坝体开采以机械方式为主、最后收尾的安全策略。从全项目维度综合计算,累计水力开挖的方量约占总开采量的57%,累计机械开挖方量约占43%,整体工艺路线体现了以水力采掘为主体、机械作业为补充与保障的协同框架。

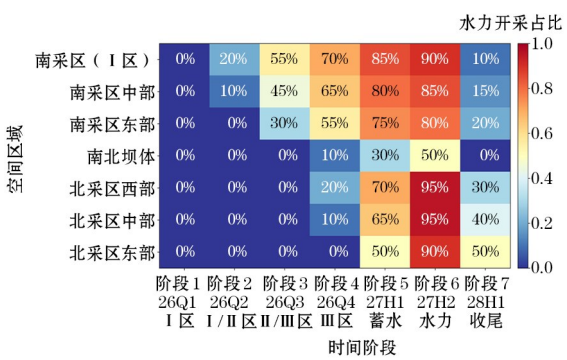


图2 水力-机械协同时空效率矩阵热力图

Fig.2 Heatmap of spatiotemporal efficiency matrix for hydraulic-mechanical synergy

3.4.3 协同效果量化评价指标

为衡量"水力-机械协同"模式的有效性,设定以下可量化的核心评价指标。

(1)综合采掘效率。以核心水力装备大型绞吸式采砂船的额定生产能力2 500 m^3/h为量化基准。

该能力是基于尾砂粒径、浓度、输送距离等参数综合设计确定,代表了协同系统中主力单元的最高理论效率。机械采掘的协同,通过处理边角盲区、修筑道路、维护边界,保障了水力单元能够持续、稳定地在最优工况下运行,从而将设备的设计效率转化为项目的全局综合开采效率,克服了纯机械开采效率低下的瓶颈。

(2) 协同安全裕度。通过机械采掘构筑的实体隔离坝体与水力开采的"分期蓄水"策略共同作用,将边坡稳定安全系数从自然状态提升至设计验算值1.361,并通过施工期动态监测确保变形速率受控,量化评估了协同模式带来的安全保障。

3.5 基于多目标权衡的关键参数确定

在"水力-机械协同"的工艺框架下,年处理能力是联动资源、空间、成本三大目标的核心决策变量。它不仅直接决定了资源回收速度 $R'(x)$,也主导了空间释放进度 $S'(x)$,并显著影响运营成本 $C'(x)$。该参数的确定是多目标优化思想在工程尺度上的具体应用。

(1) 1 500 kt/a 处理规模的确定依据。

年处理规模的确定主要考量因素包括:可采资源总量(8 320 kt)与合理的项目服务年限(约 7 a);匹配矿山生产衔接对空间释放的紧迫性要求(需在约定工期内完成);在投资强度与生产运营经济性之间寻求平衡。通过对比不同规模方案下的内部收益率(*IRR*)、投资回收期等关键指标,1 500 kt/a 的方案能在可控的投资成本下,最优化地满足资源回收、空间释放的时间要求,并实现可观的经济效益(*IRR* 为 17.35%),因此确立设计规模为 1 500 kt/a。

(2) 关键参数的量化关系。

资源回收速度 R':即为设计年处理能力,1 500 kt/a。

空间释放进度 S':项目需释放的空间总量>4.2×10^6 m^3。按设计规模及尾砂平均密度估算,年均释放空间约 0.6×10^6 m^3,从而确保在服务年限内完成全部空间的释放。

运营成本 C':根据可行性研究测算,在 1 500 kt/a 的处理规模下,项目的达产年平均经营成本为157.9 万美元/a。此成本是与处理规模相匹配的、经优化的运营支出。

因此,1 500 kt/a 的确定并非单一目标决策,而是在资源、空间、成本构成的约束空间中,寻找到的一个能够系统性满足工程、经济与时间要求的最优解,体现了多目标协同优化的实质。

4 多源信息融合的边坡稳定性动态管控

4.1 风险识别与监测网络构建

在紧邻高大露天采场边坡的尾矿库进行大规模水力开挖时,最大的风险来自作业中形成的水塘对邻近边坡渗流场和应力场的改变。管控体系以"监测先行、预警联动、分级控制、应急兜底"为原则,系统辨识三大主要风险源:水力开采蓄水体的静水压力与渗流作用会软化边坡岩土体、降低其抗剪强度;开采作业本身的振动和荷载会扰动尾矿坝和地基;区域强降雨可能迅速抬升库内水位,加剧渗流威胁。针对上述风险,在尾矿库周边、截渗坝体及采场北帮相关区域构建了"空-天-地"一体化多源立体监测网络,布设高精度 GNSS 实时监测点 26 个,形成密集监测网络,如图 3 所示。

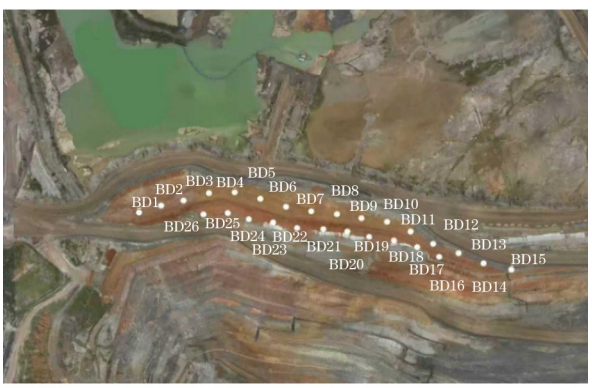


图 3 现场 RTK 监测点布置航拍图

Fig.3 Aerial view of RTK monitoring point layout on site

4.2 预警模型与主动控制策略

4.2.1 多级预警阈值体系及其设定依据

为实时捕捉边坡稳定性演变,建立了以位移速率为核心的多级预警模型,设定三级预警阈值:黄色预警(水平位移速率≥1.0 mm/d)、橙色预警(≥2.5 mm/d)、红色预警(≥5.0 mm/d)。该阈值体系基于以下依据。

(1) 阈值参考了类似边坡工程监测经验及行业惯例建议的基准值,确保了方法的通用性与可比性。

(2) 鉴于本项目尾矿砂呈高含水、低强度的流塑状态,且开采区紧邻数百米高的采场主边坡,失效后果极为严重。因此,在常规阈值基础上进行了保守化修正,采用了更严格的控制标准,旨在风险萌发初期即触发响应,为主动干预留出充足的安全裕度。

4.2.2 基于预警等级的主动控制逻辑与参数调整

预警的核心价值在于驱动工程行为的动态调整,并制定了与预警等级联动的、具体可操作的水力

开采参数调整逻辑(见表 2),从而实现了从“状态感知”到“控制执行”的闭环。

4.2.3 “分期蓄水、动态检验”策略的量化执行

将水力开采所需的蓄水过程严格分为三期(目标水深 1 m、2 m、3 m)。每一期蓄水达到目标值后,均执行不少于 12 h 的静置观测期,此期间所有监测点位移速率均必须低于 1.0 mm/d(黄色预警阈值),方可进行下一期蓄水或正常开采作业。这种“加载-观测-判定-再加载”的循环,将大规模蓄水带来的不确定性风险分解为多个可控、可测、可停的步骤,实现了对岩土体非线性响应过程的前瞻性主动管理。

基于上述蓄水过程的实测数据,图 4 定量揭示了累计水位上升幅度与边坡累计位移之间的统计关系。结果显示,拟合方程为 $y=9.769x-0.308$,即水位每累计上升 1.0 m,边坡累计位移约增加 9.769 mm。统计检验表明,p 值约为 0(远小于 0.05 的显著性水平),样本量 $n=104$,统计显著性充分,R^2 值约为 0.51,说明水位变化能够解释边坡位移变异的约 51%,这一相关性在工程地质背景下具有合理性。散点分布在累计水位上升 1.0 m、2.0 m、3.0 m 这 3 个水平处,呈线性递增;在同一水位水平内,较新观测点的位移普遍高于较早观测点,体现了边坡响应的时滞效应,即水位抬升后边坡的响应需要一定时间才能充分显现。该量化关系为后续蓄水阶段的位移阈值预设和监测频次加密提供了直接依据。

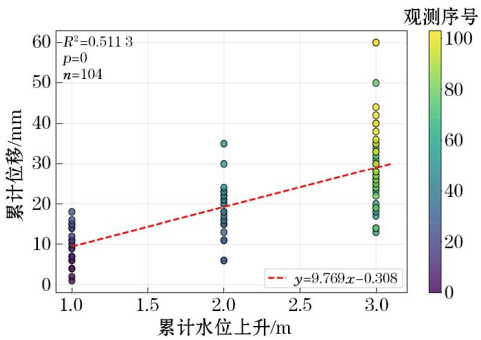


图 4 累计位移与累计水位上升的回归

Fig.4 Regression between cumulative displacement and cumulative water level rise

表 2 基于监测预警等级的水力开采主动控制逻辑

Table 2 Active control logic for hydraulic mining based on monitoring and warning levels

预警等级	核心监测指标状态	水力开采参数调整	配套管理行动
黄色预警(关注)	单个或多个监测点位移速率持续≥1.0 mm/d;或出现新增微小裂缝。	1. 开采强度:降低铰刀横移速度至≤20%。 2. 开采区域:优化开采顺序,避免向位移异常点方向推进。 3. 监测频率:提升异常区域监测频率至 2 h/次。	1. 开展专项巡检,排查地表渗水、裂缝。 2. 组织召开预警分析会,研判发展趋势。 3. 检查排水系统是否通畅。
橙色预警(警告)	多点位移速率≥2.5 mm/d;或裂缝呈加速发展趋势;或局部渗流异常。	1. 开采作业:暂停位移异常点所在扇形区域(约 90°范围)的水力开采作业。 2. 设备位姿:将绞吸船调整至远离异常区域的安全位置。 3. 泥浆浓度:严格控制出矿浓度,避免因浓度过低导致库内水量增加。	1. 启动应急会商,项目负责人现场指挥。 2. 准备应急排水设备(大功率水泵)并预置到位。 3. 限制非必要人员进入预警区域。
红色预警(危急)	位移速率≥5.0 mm/d;或出现明显滑移迹象;或监测数据中断。	1. 全面停工:立即停止库区内全部水力开采及邻近机械作业。 2. 设备处置:绞吸船停机,必要时排空排泥管道,将船移至安全区。 3. 应急排水:立即启动强排预案,全力降低库区水位。	1. 启动最高级别应急预案,组织现场人员按预定路线紧急撤离。 2. 上报业主及监管单位,并通知邻近采场采取避险措施。 3. 开展全面的地质与安全评估,未经许可不得复工。

本研究预警体系是基于“分期蓄水、动态检验”策略,建立的一套以水位变化为控制变量、以位移响应为监测指标的工程控制逻辑。具体而言,通过图 5 建立的累计水位上升(ΔH)与累计位移的量化关系($\Delta D\approx 9.769\cdot\Delta H$),将每次蓄水的荷载增量($\Delta H$)与相应的预期边坡位移响应相关联。预警阈值(如 1.0, 2.5, 5.0 mm/d)的设定,旨在确保实际位移发展速率 v 不超过基于预期位移增量和允许观测时间推算出的控制标准,从而间接地、定量地保障了在每一步荷载增加后,边坡的稳定性状态始终远离临界点。这种方法将静态的稳定性验算($F_s=1.361$)扩展为动态的、全过程的稳定性控制。

4.3 实测监测结果与分析

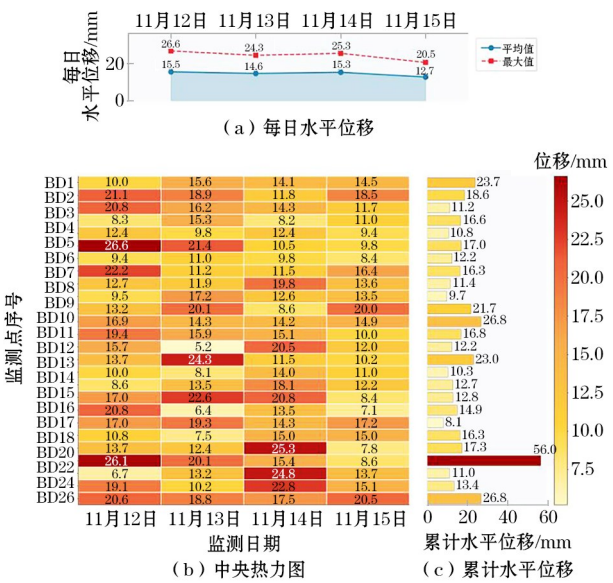
项目实施过程中的实际监测数据充分验证了该体系的有效性。以北帮截渗坝体为例,表 3 列出了截至 2024 年 12 月北帮截渗坝体关键监测点的累计位移结果。BD1 和 BD2 监测点累计水平位移分别为 67.4 mm 和 59.0 mm,当出现较大位移时,迅速采取应急措施,有效控制了变形发展,后续数据趋于稳定;BD3 和 BD4 监测点的位移量正常,安全状况良好。

表 3 北帮截渗坝体关键监测点累计位移

Table 3 Cumulative displacement of key monitoring points on the north embankment cutoff wall

序号	点号	累计水平位移 ΔS/mm	ΣX/mm	ΣY/mm	ΣZ/mm	状态评估
1	BD1	67.4	44	51	174	趋于稳定，持续关注。
2	BD2	59.0	−37	46	246	趋于稳定，持续关注。
3	BD3	12.2	7	10	13	正常
4	BD4	16.3	11	12	11	正常

除坝体监测外，在尾砂回采区也部署了监测点。图 5 为尾砂回采监测的时空演化图，由中央热力图、顶部曲线与右侧条形图共同呈现 26 个监测点在 2024 年 11 月 12 日至 2024 年 11 月 15 日的本期 ΔS 与累计 ΔS 分布。结果显示，高位移热点在各日轮动出现：BD6(11 月 12 日，26.6 mm)、BD15(11 月 13 日，24.3 mm)、BD22(11 月 14 日，25.3 mm)依次达到单期峰值。图 5(a)曲线表明，每日平均位移由 15.5 mm 缓降至 12.7mm，最大值同步从 26.6 mm 回落至 20.5 mm，整体呈现收敛态势。图 5(c)累计条形图揭示 BD23 以约 56 mm 显著高于全场，BD12、BD26 均达 26.8 mm，BD1、BD15、BD11 次之。由此可知，监测区域日均位移速率整体趋稳并略有下降，但 BD23 累计变形远超其他点位，构成全场首要预警目标，BD12、BD26、BD15、BD11 等次活跃点需持续跟踪，警惕速率二次上行。综合来看，监测区整体变形可控，但 BD23 持续显著增长，须作为核心预警对象重点管控。



(a) 每日水平位移 (b) 中央热力图 (c) 累计水平位移

图 5 尾砂回采监测时空演化

Fig.5 Spatiotemporal evolution of tailings sand back-mining monitoring

5 全周期标准化安全与质量保障

5.1 安全管理体系

安全管理体系以“风险预控、本质安全”为核心思想，建立以项目经理为第一责任人的安全生产责任制网络。安全风险量化评估采用风险矩阵法：风险等级 $K=P\times C$，其中 P 为事故发生概率评分(1～5 级)，C 为事故后果严重程度评分(1～5 级)，划分为低风险($K\leqslant 4$)、中风险($4<K\leqslant 12$)和高风险($K>12$)三类。通过对全过程作业项目逐一开展风险辨识，共识别高风险项目 7 项，对每项风险均制定专项管控方案。

5.2 全过程质量控制与环境保护量化指标

(1) 资源回收质量控制指标：要求最终尾渣铜残余品位低于 0.1%，钴残余品位低于 0.02%，确保设计选矿回收率(Cu 为 40.80%，Co 为 30.73%)得以实现。通过在线监测与定期取样分析，动态优化分选参数，实现资源回收效益最大化。

(2) 空间释放与工程实体质量指标：库底场地清挖完成后，任意 30 m×30 m 范围内的标高偏差不得超过±0.3 m，确保释放出的空间能够满足大型采矿设备进场作业及后续利用的基底要求。

(3) 环境保护过程控制指标：施工区域周边总悬浮颗粒物(TSP)浓度日均值控制在 0.9 mg/m^3 以内，通过作业面喷雾、道路硬化、运输车辆遮盖及非作业区及时覆盖等措施，确保扬尘排放受控。

(4) 安全风险过程控制指标：依据“分期蓄水”策略，每期蓄水达目标水深后的静置观测时间不少于 12 h，且观测期内所有边坡监测点位移速率均须小于 0.5 mm/d，上述双重条件同时满足方可进行下一阶段作业。

6 综合效益分析与创新性讨论

6.1 与传统机械干采方案的对比基准

为客观评估“水力-机械协同”一体化模式的优越性，以详尽的方案比选数据为基准。若采用业界常规的“纯机械(挖掘机＋自卸卡车)干采”方案处理本项目高含水尾砂，其年均运营成本高达 270.0 万美元，计算得出的全生命周期费用现值(PV)达 1 079.3 万美元。相比之下，本研究提出并实施的“以大型绞吸船水力开采为核心、机械采掘为协同”的方案，虽需增加专用船舶投资，但其凭借水力开采的连续高效优势，年均运营成本显著降低至 157.9

万美元,费用现值仅为 792.9 万美元。两相比较,协同方案在经济性上具备约 26.5%的显著优势。此量化对比不仅奠定了采纳本模式的决策基础,更清晰揭示了传统机械方法在处理饱和细粒尾砂时成本高昂的固有缺陷。

6.1.1 经济效益分析

项目总投资 4 126.01 万美元,达产年均销售收入 2 574.01 万美元,年均利润总额约 557.41 万美元。图 6 为尾矿库铜钴资源回收项目的现金流动态与风险量化分析,进一步展示了项目的财务表现。如图 6(a)累计现金流曲线所示,项目一次性投入 4 126.01 万美元,第 2 年起进入运营阶段,年经营现金流约 1 112.0 万美元(含年利润 557.4 万美元与年折旧 554.6 万美元),累计现金流稳步上升,投资回收期约为 3.93 a,至第 7 年末累计净现金流达到约 2 790.0 万美元,表明项目资金回笼速度较快。

关键财务指标:税前财务内部收益率(*IRR*)为 17.35%。如图 6(b)情景分析所示,在乐观情景(价格上浮 20%、成本下降 10%)下,*IRR* 可达 23.1%;在基准情景下 *IRR* 为 17.3%;即使在悲观情景(价格下跌 15%、成本上升 15%)下,*IRR* 仍有 12.8%,均高于 10%的行业基准收益率。这说明项目在不同市场条件下均具备经济可行性。敏感性分析同样表明,即使在悲观市场情景下,*IRR* 仍可保持在 12.8%以上,展现了较强的经济韧性和抗风险能力。

如图 6(c)和图 6(d)蒙特卡洛模拟结果所示,通过 5 000 次模拟,*NPV* 均值约为 1.1 万美元,且大部分分布在正值区间,*IRR* 均值约为 29.4%,远超 10%基准线,绝大多数模拟结果均满足投资回报要求。

综合来看,该项目财务表现稳健,抗风险能力较强,具有良好的投资价值和经济可行性。

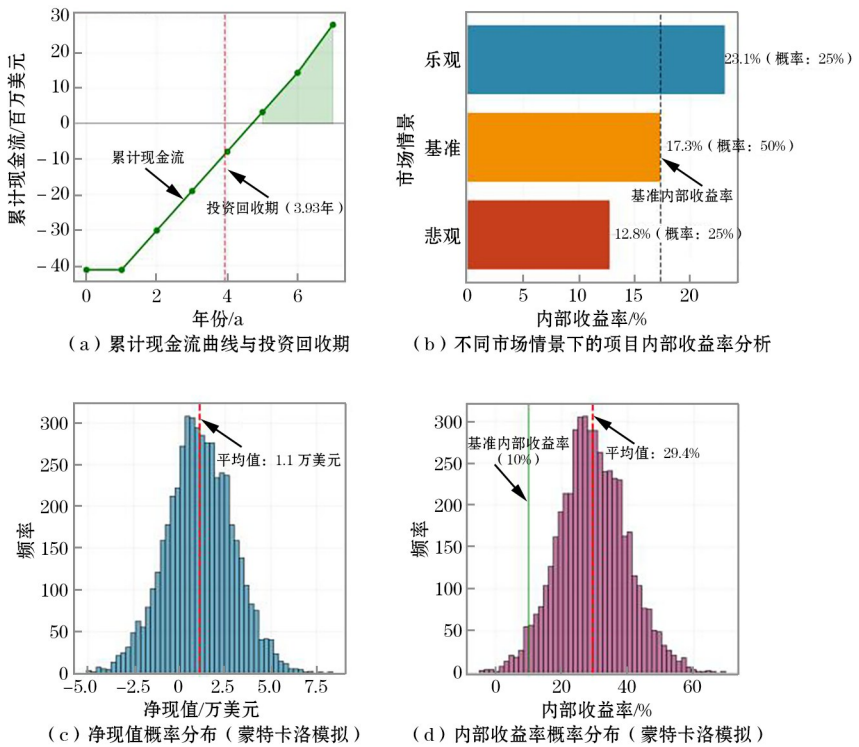


图 6 尾矿库铜钴回收项目的现金流与风险分析

Fig.6 Cash flow and risk analysis of copper and cobalt recovery projeet from the tailings pond

6.1.2 资源与空间效益

资源方面,项目设计年处理尾矿 1 500 kt,服务年限内可处理尾矿约 8 320 kt,设计选矿回收率为铜 40.80%、钴 30.73%,盘活了长期搁置的资源资产。空间方面,通过清挖尾矿库,为二期扩帮工程直接释放出超过 420 万 m^3 的战略空间,彻底解决了制约矿山未来产能接续的关键瓶颈。

6.1.3 安全与环境效益

安全方面,设计阶段通过严格验算(简化 Bishop 法)确保机械采掘边坡安全系数达 1.361,满足规范要求;施工期通过“分期蓄水、动态检验”策略与一体化监测网络,将邻近采场边坡最大水平位移

控制在 67.4 mm，变形趋势经统计检验趋于收敛（$p>0.05$），系统性消除了高位尾矿库的长期溃坝风险。环境上，扬尘 TSP 浓度日均值控制在不超过 0.9 mg/m^3，实现了治理过程本身的绿色化。

6.2 与现有文献的对比

表 4 将本研究核心特征与近期代表性文献中的技术途径进行对比，现有研究多在单一目标（如资源再选、膏体充填、生态修复）或稳定性分析单一环节上深化[11-12,16-18]。本研究首次实现了从“多目标系统设计”“多工艺时空协同”到“多源监测预警联动”的完整链条整合与工程实证，在系统性和主动风险管控方面形成了鲜明特色。

表 4 本文治理模式与现有尾矿处理技术的对比

Table 4 Comparison between the proposed governance model and existing tailings treatment technologies

对比维度	传统再选/充填技术[6-9]	尾矿库生态修复[11]	边坡稳定性监测[12]	本研究（水力-机械协同模式）
核心目标	资源回收或风险消除	生态恢复	安全监控	资源回收+空间释放+安全控制
技术焦点	选矿工艺或胶结材料	土壤与植被	监测方法与模型	水力与机械工艺的时空耦合集成
风险管控	被动设计，后期监测	不涉及	事后预警或分析	“分期蓄水、动态检验”的主动荷载控制
系统性	单一环节优化	末端治理	局部状态感知	全周期、多目标、多技术系统集成

7 结论

本研究通过非洲某铜钴矿的重大工程实践，提出并验证了一种水力-机械协同的尾矿资源化与采场空间释放一体化治理新模式，主要结论如下。

（1）以“目标-技术-管控”协同为核心的三层理论框架，运用多目标优化模型与简化 Bishop 法边坡稳定性分析，为统筹解决资源回收、空间释放与安全保障的多目标冲突问题提供了定量决策工具。

（2）通过技术经济比选，确定以大型绞吸式采砂船（2500 m^3/h）水力开采为核心、机械采掘为协同的工艺体系，同时解决了软弱地基处理、大型装备现场组装及精细化边坡修整等关键技术难题。

（3）实施“分期蓄水、动态检验”主动风险管控策略，结合“空-天-地”一体化监测网络，建立三级预警体系，将最大水平位移有效控制在 67.4 mm 内并使其趋于稳定，系统性消除了高位尾矿库的长期溃坝风险。

（4）该模式同步实现了 8 320 kt 可采尾矿的资源化利用（选矿回收率铜为 40.80%、钴为 30.73%）、超过 420 万 m^3 采矿空间的释放以及长期环境风险的消除。项目税前财务内部收益率达 17.35%，投资回收期 3.93 a，即使在悲观市场情景下 *IRR* 仍高于 12.8%，展现了突出的综合效益与抗风险能力。

本研究为全球“尾矿压境”这一共性矿业难题提供了经过全方位验证的工程解决方案，对促进矿业循环经济发展与绿色矿山建设具有重要借鉴意义。

参考文献（References）：

[1] 费玲云，邹伟民，周美彦，等.尾矿资源化利用现状及生态化利用研究进展[J].能源环境保护，2025，39(4)：48-60.
Fei Lingyun，Zou Wweimin，Zhou Meiyan，et al. Current Status of tailings resource utilization and research progress on ecological utilization [J]. Energy Environmental Protection，2025，39(4)：48-60.

[2] 施灿海，刘明生，程立家，等.尾矿综合利用研究进展及工程实践[J].中国矿业，2024，33(2)：107-114.
Shi Canhai，Liu Mingsheng，Cheng Lijia，et al. Research progress and engineering practice on comprehensive utilization of tailings [J]. China Mining Magazine，2024，33(2)：107-114.

[3] Abbadi A，Mucsi G. A review on complex utilization of mine tailings：recovery of rare earth elements and residue valorization [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2024，12(3)：113118.

[4] Sarker S K，Haque N，Bhuiyan M，et al. Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering，2022，10(3)：107622.

[5] Jia Xiaoling，Zhan Yan，Tian Xiang. Recent advances in treatment technologies and resource utilization of mine tailings in Hunan Province，China[J]. Processes，2025，13(9)：2957.

[6] 程海勇，吴爱祥，吴顺川，等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报，2022，44(1)：11-25.
Cheng Haiyong，Wu Aixiang，Wu Shunchuan，et al. Research status and development trend of solid waste backfilling in metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering，2022，44(1)：11-25.

[7] 胡松涛，朱庚杰，张军童，等.胶东地区黄金矿山细尾砂胶结充填应用研究[J].黄金科学技术，2024，32(3)：425-436.
Hu Songtao，Zhu Gengjie，Zhang Juntong，et al. Application research on cemented fine tailings backfill of gold mines in the Jiaodong area [J]. Gold Science and Technology，2024，32(3)：425-436.

[8] Xue Gaili, Yilmaz E, Wang Yongding. Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2023,30(8):1455-1473.

[9] Ting W K, Hasan A. Stress behaviour of cemented paste backfill within temperature controlled stope model [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment,2023,37(10):996-1015.

[10] Yang Yong, Zhang Minsi, Hu Gaojian, et al. Simulations of goaf surface subsidence via filling control[J]. PLOS One, 2022,17(1):e0261740.

[11] Yan Baoxu, Jia Hanwen, Yang Zhen, et al. Goaf instability in an open pit iron mine triggered by dynamics disturbance: a large-scale similar simulation[J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2023, 37 (8): 606-629.

[12] Jiao Huazhe, Yang Wenbo, Shen Huiming, et al. Study on multi-layer filling treatment of extra-large goaf and its underground application[J]. Materials,2022,15(16):5680.

[13] 李杰林,高乐,杨承业,等.大型复杂采空区群的稳定性数值分析及隐患区域预测[J].黄金科学技术,2022,30(3):315-323.
Li Jielin, Gao Le, Yang Chengye, et al. Numerical analysis of stability of large complex goaf group and prediction of hidden danger area [J]. Gold Science and Technology,2022, 30(3):315-323.

[14] 周逸文,张涛,段隆臣,等.我国矿山采空区综合治理研究综述[J].安全与环境工程,2022,29(4):220-230.
Zhou Yiwen, Zhang Tao, Duan Longchen, et al. Summary of research on comprehensive treatment of mine goaf in China [J]. Safety and Environmental Engineering,2022,29 (4):220-230.

[15] 曲强,孙雅飞,赵振华,等.采空区稳定性评价方法与治理措施研究现状及展望[J].水利水电技术(中英文),2024,55(增刊1):418-421.
Qu Qiang, Sun Yafei, Zhao Zhenhua, et al. Research status and prospect of stability evaluation methods and control measures for goaf[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(Suppl.1):418-421.

[16] 蓝晓聪,林国钦,罗武.绿色矿山建设与矿山生态修复协同发展探究[J].世界生态学,2024,13(4):481-485.
Lan Xiaocong, Lin Guoqin, Luo Wu. Research on the coordinated development of green mine construction and mine ecological restoration [J]. International Journal of Ecology,2024,13(4):481-485.

[17] 李大猛,孙东,余辉,等.绿色矿山建设与矿山生态修复关联探析[J].世界有色金属,2023(22):162-165.
Li Daming, Sun Dong, Yu Hui, et al. Research on the relationship between green mining construction and ecological restoration in mines [J]. World Nonferrous Metals,2023(22):162-165.

[18] Cacciuttolo C, Atencio E. In-pit disposal of mine tailings for a sustainable mine closure: a responsible alternative to develop long-term green mining solutions[J]. Sustainability, 2023,15(8):648.