

基于岩土勘察的矿产资源开发地质风险评估与防控研究

沈黄剑*, 刘 锐, 林凡超

(广东省地球物理勘查院, 广州 510800)

摘 要:矿产资源开发面临滑坡、突水突泥等地质灾害,精准防控地质灾害是实现矿产资源可持续发展的保障和前提。岩土勘察是揭示风险源的基础手段,但数据不确定性及驱动风险评估与防控决策的有效性仍需突破。本文系统梳理基于岩土勘察的地质风险评估与防控研究,剖析勘察技术在风险评估参数获取中的作用与局限,评述定性/半定量、数值模拟、AI 驱动等风险评估模型,总结源头防控、过程监控到综合管理的策略。指出现有数据融合、模型验证等瓶颈,前瞻智能勘察、AI+评估、数字孪生等方向。本研究成果可为提升矿产资源开发的安全、效益与可持续性提供参考。

关键词:岩土勘察;地质风险评估;风险防控策略;数值模拟;人工智能

中图分类号:P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)11-0077-9

0 引言

矿产资源是国民经济发展的重要基础,但其开发过程中面临滑坡、崩塌、突水突泥、岩爆等地质灾害的严峻挑战,严重威胁安全、效益与生态。精准防控地质风险是实现矿产资源可持续发展的核心^[1-5]。岩土勘察作为揭示风险源的基础手段,其获取的地质结构、岩土力学、水文地质等参数是风险评估的关键支撑^[6]。新技术提升了勘察广度与精度,但数据的空间变异性、不确定性及如何有效驱动风险评估与防控决策仍是难点^[7]。

现有研究在风险评估模型(矩阵法、数值模拟、机器学习等)与防控技术方面成果显著,但仍存在不足:(1)对勘察数据在风险全链条中的核心驱动作用及不确定性传导的系统综述不足;(2)缺乏勘察信息驱动的全生命周期(勘探-设计-开采-闭坑)风险动态评估与防控优化的深度整合;(3)对多源数据融合、多尺度模型耦合、AI 深度应用等前沿方向的综合评述与展望有待加强^[8]。

为此,本文聚焦“基于岩土勘察的矿产资源开发地质风险评估与防控”领域,旨在系统

梳理与整合研究现状、方法及挑战。重点内容:(1)剖析勘察技术在风险参数获取中的作用、局限与不确定性表征;(2)评述基于勘察数据的风险评估模型(定性/半定量、数值模拟、AI 驱动)的原理、适用性与局限;(3)总结从勘察出发的源头防控、过程监控到综合管理的策略;(4)指出现有瓶颈(如数据融合、模型验证、动态评估)并前瞻方向(智能勘察、AI+评估、数字孪生、韧性防控)。本研究成果将为深化理解岩土勘察的基础作用、发展精准智能的风险管控技术提供参考,服务于提升矿产资源开发的安全、效益与可持续性。

1 岩土勘察数据获取、表征及其在风险识别中的关键作用

1.1 关键勘察目标参数与地质风险源关联

岩土勘察通过获取多维度参数揭示地质风险源的物理本质,其核心关联体现在:地质结构参数(断层、节理密度与产状)直接控制岩体破裂模式,如断层带渗透率升高可使突水风险提升 3-5 倍;岩土力学参数(强度、渗透性)决定介质稳定性阈值,岩体质量分级(RMR/Q 系统)整合

表 1 关键勘察参数与地质风险源关联表

勘察参数类别	典型技术手段	关联地质风险类型	工程应用案例
地质结构与构造	钻探、地质雷达、三维激光扫描	边坡失稳、突水突泥、围岩坍塌	断层带突水通道识别,节理岩体边坡稳定性评估
岩土体物理力学性质	室内试验(单轴压缩、三轴剪切)、原位测试(SPT、CPT)	岩体强度不足、渗透失稳、地表沉降	尾矿库坝体渗透系数测定,地下硐室围岩分级
水文地质条件	抽水试验、地下水监测井、示踪试验	突涌水、渗流破坏、尾矿库溃坝	隧道富水区注浆参数设计,矿井疏干排水系统规划
地应力场	水压致裂法、空心包体应力解除法	岩爆、大变形、巷道片帮	深部金属矿巷道支护参数优化
不良地质体	高密度电法、探地雷达、微动探测	采空区塌陷、溶洞突水、软弱夹层滑移	煤矿采空区三维建模,岩溶区桩基持力层选择
地形地貌与地表变形	InSAR、LiDAR、无人机摄影测量	边坡滑坡、地表沉降、泥石流	露天矿高陡边坡变形监测,尾矿库坝体位移预警

岩芯完整性与节理间距,实现围岩失稳风险的初步量化;水文地质参数(含水层厚度、渗透系数)与突涌水灾害链直接相关,某煤矿帷幕注浆设计中渗透系数误差 $\pm 5\%$ 可导致堵水效率波动 20%;地应力场特征(量值与方向)主导深部岩爆风险,最大主应力与巷道夹角超过 30° 时,片帮概率增加 40%。不良地质体(采空区、软弱夹层)的空间定位精度(如探地雷达对 5m 内隐伏溶洞的识别率达 85%)直接影响局部失稳风险预判,而 InSAR 监测(精度 $\pm 2\text{mm}/\text{年}$)通过捕捉地表沉降速率异常(如 $>5\text{mm}/\text{月}$)预警边坡蠕变破坏^[9]。

岩土勘察的目的和任务是获取与地质风险直接相关的多维度参数,这些参数构成地质风险识别和风险与危害程度的界限值和阈值(表 1)。

1.2 勘察技术进展与多源数据融合挑战

勘察技术呈现“传统方法精准化、物探技术立体化、空天地一体化”趋势:定向钻探(岩芯采取率 $>90\%$)与自动化岩芯扫描(裂隙识别效率提升 60%)深化传统方法精度;三维地震勘探(分辨率 $<5\text{m}$)与微震监测(破裂定位误差 $<10\text{m}$)实现隐伏构造动态成像;InSAR-LiDAR-无人机摄影测量构建地表变形监测网(覆盖效率

提升 10 倍)^[10]。然而,多源数据融合面临三重挑战:(1)时空基准不统一(如卫星影像与钻孔数据坐标偏差 $>0.5\text{m}$)导致空间配准误差;(2)数据模态异构(物探网格模型与钻探结构化数据)引发语义鸿沟;(3)实时动态数据(如掘进面随揭露更新的地质编录)与静态勘察模型的联动机制缺失,某铁矿因未整合施工期 CT 探测数据,导致风险评估滞后 2 周^[11]。

1.3 不确定性量化与三维地质建模

勘察及其取得的各类数据不确定性源于空间变异性(参数变异系数 $\text{CV} = 15\% - 40\%$)、测试误差(岩样尺寸效应导致强度高估 $10\% - 20\%$)与解释多解性(物探异常地质成因匹配度 $<70\%$)^[12]。地质统计学通过变差函数(如岩体弹性模量变程 80m)与克里金插值量化空间相关性,但对非连续界面(如断层尖灭点)刻画能力不足(模型误差 $>15\%$)。三维地质建模依赖“数据驱动-概念约束-随机模拟”框架,钻孔密度 $<5\text{孔}/\text{km}^2$ 时层面误差 $>5\text{m}$,而随机模拟(如 SISYPHUS 算法)虽能生成多套等概率模型,但计算耗时随网格细化呈指数增长(百万单元模型单次运行需 48 小时)。当前挑战在于:参数分布假设(如正态分布忽略渗透系数对数特性)导

表 2 基于勘察参数的边坡风险半定量分级示例

风险等级	RMR 评分范围	主要勘察指标	防控建议
极高风险	< 40	裂隙密度>10 条/m, 黏聚力<50 kPa	超前加固, 优化开采顺序
高风险	40-60	裂隙密度 5-10 条/m, 黏力 50-100 kPa	加强监测, 局部支护
中风险	60-80	裂隙密度<5 条/m, 黏聚力>100 kPa	常规监测, 动态调整

致不确定性表征失真;多尺度数据(点-线-面)耦合缺乏物理机制约束,从岩芯试验到岩体宏观强度的尺度升级仍依赖经验公式(误差 $\pm 25\%$)^[13]。

1.4 基于勘察信息的风险识别框架

勘察数据驱动的风险识别遵循“数据解译-要素提取-风险映射”路径:通过叠加地质图、参数等值线与地形数据,圈定高风险复合区域(如断层带+高渗透区定义为突水高危区),某铜矿以此识别出 12 处岩爆危险硐段(占比 8%);工程地质类比法(案例匹配度>80% 时风险预判准确率达 75%)与专家经验法(德尔菲法一致性系数 0.6-0.7)实现定性筛查;采用 RMR(岩体质量评分)、Q 系统等指标,划分风险区域(表 2);基于勘察参数构建的指标体系(如尾矿库风险指标权重差异>20%影响最终等级)通过 AHP-熵权法组合赋权,将突水风险概率量化为 0.1-0.9 的连续值。现存瓶颈包括:小样本数据场景下模型泛化能力不足(样本量<30 时误判率>30%);动态勘察数据(如随开挖更新的裂隙产状)未能实时融入风险识别模型,导致前期评估与现场实际偏差达 40%^[14]。

2 基于岩土勘察信息的地质风险评估模型与方法

2.1 风险评估方法论框架

地质风险评估方法论围绕“风险识别-概率量化-后果评估”三要素展开,形成四大核心方法体系(表 3)^[15]。

2.1.1 风险矩阵法

风险矩阵法通过勘察数据界定风险事件发生概率(P)与后果严重性(C)的等级组合,构建

二维评估矩阵(如 5×5 分级体系)。以边坡失稳风险为例,基于节理间距(<1m 判定为“极密”)与潜在滑体体积(>10⁴m³判定为“灾难性”),结合工程经验划定风险等级(高/中/低)。该方法操作简便,适用于初步筛查(如勘探阶段风险预评估),但存在两大局限:(1)概率与后果分级依赖专家主观判断(不同团队分级一致性系数仅 0.68);(2)忽略了参数间的耦合效应(如渗透系数与地应力的交互影响突水概率)^[16]。

2.1.2 概率风险评估

基于勘察数据的统计特征(均值、标准差、分布形态),通过蒙特卡洛模拟(MCS)、一次二阶矩法(FORM)等量化风险发生概率。某铁矿利用 120 组岩样强度数据(服从正态分布, $\mu = 85\text{MPa}$, $\sigma = 15\text{MPa}$),结合极限平衡法模拟边坡稳定系数(F_s),当 $F_s < 1.0$ 的频率达 15%时判定为高风险。概率方法显著提升量化精度,但高度依赖数据质量:当勘察样本量<30 时(如罕见不良地质体),参数分布估计误差可达 20%-30%,导致概率计算偏差放大。

2.1.3 模糊综合评价

针对勘察信息中的模糊概念(如“软弱夹层厚度较大”),引入模糊集理论构建隶属度函数。以突水风险评估为例,将含水层渗透系数($k > 10^{-5}\text{m/s}$ 隶属度 0.8)、断层带宽度(>5m 隶属度 0.9)等参数映射至[0,1]区间,通过层次分析法确定权重(如 k 权重 0.35),最终输出综合模糊风险等级。该方法能够有效处理定性描述的不确定性,但隶属函数构建缺乏客观依据(如三角分布与正态分布的选择导致结果差异 12%),且忽略参数间的物理机制关联。

2.1.4 风险指数法

基于勘察参数构建多层次指标体系(如目

表 3 核心评估方法对比表

方法	数据基础	核心优势	关键局限	典型应用场景
风险矩阵法	定性/半定量勘察结论	快速分级、可视化强	主观性强、忽略参数耦合	勘探阶段风险初筛
概率风险评估	参数统计分布特征	不确定性量化、概率预测	数据依赖性强、小样本误差大	开采期定量风险评估
模糊综合评价	模糊性勘察描述	处理语义不确定性	隶属函数主观性、机制关联缺失	概念模型风险排序
风险指数法	多维度勘察参数组合	指标体系化、系统集成能力	指标权重稀释、敏感参数易被忽略	全生命周期风险普查

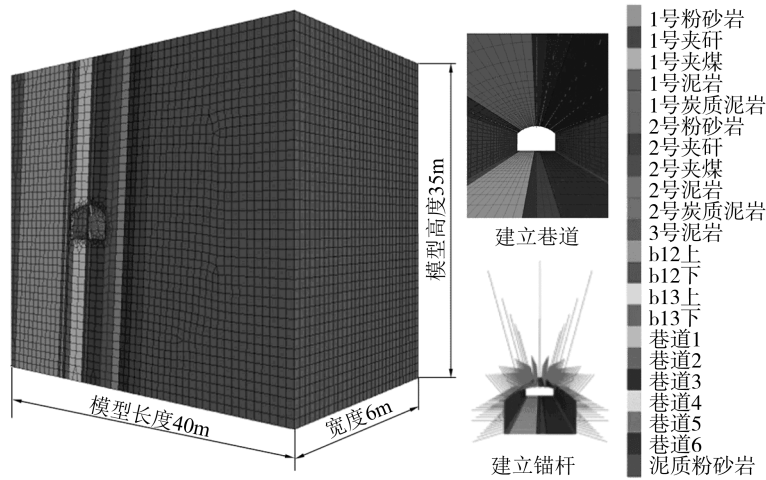


图 1 Flac3D 数值计算巷道模型与支护构建

标层-准则层-指标层),通过熵权法、证据理论等确定权重,计算综合风险指数(RI)。某尾矿库风险评估指标体系包含地质结构(0.30)、岩土力学(0.25)、水文地质(0.25)、环境因素(0.20)四大准则层,22项具体指标(如坝基渗透系数权重0.18)。风险指数法适用于多源数据融合,但存在“指标过载”问题:当指标数>15时,权重稀释效应导致敏感参数(如断层倾角)的影响被弱化(贡献率下降15%)。

2.2 数值模拟技术在风险评估中的核心应用

数值模拟通过构建地质体力学模型,实现风险演化过程的可视化与定量化,成为连接勘察数据与工程响应的桥梁。

2.2.1 确定性模拟

基于勘察获取的地质模型(如三维地层网格)与力学参数(弹性模量、黏聚力),如图1所

示,采用有限差分法(Flac3D)、离散元法(UDEC/PFC)模拟岩体变形破坏过程。某金属矿应用Flac3D模拟巷道开挖,输入勘察得到的地应力数据($\sigma_H = 35\text{MPa}$, $\sigma_h = 20\text{MPa}$, $\sigma_v = 28\text{MPa}$),预测出最大主应力集中区(应力增高系数1.8),指导支护方案优化(锚杆间距从1.5m加密至1.0m)。多场耦合模拟(COMSOL)进一步揭示渗流-应力-损伤耦合机制:当承压水压力超过岩体抗拉强度20%时,突水通道扩展速率提升3倍。

2.2.2 不确定性传播

将勘察参数的不确定性(如强度参数变异系数 $CV = 25\%$)引入数值模型,通过随机有限元(SFEM)或响应面法(RSM)分析输出变量的概率分布。某露天矿边坡稳定性分析中,考虑岩体黏聚力($\mu = 20\text{kPa}$, $\sigma = 5\text{kPa}$)与内摩擦角($\mu =$

30°, $\sigma=3^\circ$) 的随机性, SFEM 计算得到稳定系数 F_s 的均值 1.35、标准差 0.12, 当置信水平 95% 时 $F_s > 1.2$ 的概率达 82%, 为边坡角优化(从 48° 调整至 50°) 提供量化依据。

2.2.3 模型可靠性瓶颈

数值模拟精度受限于三大要素:(1) 参数输入质量: 室内试验参数与原位岩体力学特性差异可达 15%–30% (如岩样单轴强度高估现场岩体 20%); (2) 边界条件简化: 地应力场反演误差(主应力方向偏差 $> 15^\circ$ 时, 巷道变形模拟误差增加 40%); (3) 本构模型适用性: 摩尔-库仑模型对节理岩体剪胀效应的描述误差达 25%, 而离散元模型计算效率低(百万单元模型单次运行需 72 小时)。

2.3 数据驱动与人工智能模型的应用探索

随着勘察数据积累与计算能力提升, 数据驱动方法突破传统力学模型的假设限制, 成为风险评估的新型工具。

2.3.1 机器学习

(1) 风险分类: 随机森林(RF)模型利用勘察数据(断层密度、渗透系数、地应力比)训练, 在某煤矿突水风险预测中准确率达 85%, 较传统统计模型(逻辑回归)提升 12%。关键在于特征工程: 通过 SHAP 值分析发现, 断层与含水层交切距离的重要性权重达 0.32, 远超单一参数(如渗透系数权重 0.18)。

(2) 异常检测: 卷积神经网络(CNN)处理微震信号时频图像, 识别岩爆前兆信号的 F1 分数达 0.89, 较人工判读效率提升 5 倍。某金矿部署的实时监测系统中, CNN 模型提前 2 小时预警岩爆事件, 成功率达 78%。

(3) 知识图谱: 构建“勘察参数-风险事件-防控措施”三元组图谱, 实现风险评估知识的结构化表达。当输入某铜矿勘察数据(节理间距 0.8m, 地应力比 1.5), 图谱推理输出岩爆风险等级 IV 级, 匹配历史案例的相似解决方案(预应力锚索 + 钢纤维喷混凝土)。

2.3.2 深度学习

Transformer 模型处理长序列监测数据(位

移、水压、声发射), 在地表沉降预测中均方根误差(RMSE)达 3.2mm, 较 LSTM 模型降低 40%。某尾矿库应用案例显示, 结合勘察初始参数(坝体材料密度、渗透系数)的迁移学习模型, 在新工况(极端降雨)下的预测精度提升 25%。然而, 深度学习模型的“黑箱”特性导致工程解释困难(如某突水预测模型误判案例的归因准确率仅 55%), 且对数据质量敏感(噪声数据占比 $> 10\%$ 时性能下降 30%)。

2.3.3 工程适用性挑战

数据驱动模型面临三大痛点:(1) 可解释性鸿沟: SHAP、LIME 等解释工具的工程置信度不足(特征归因一致性 $< 70\%$); (2) 小样本泛化难题: 罕见灾害(如溶洞突水, 样本量 < 20) 场景下模型过拟合率达 40%; (3) 跨域迁移限制: 不同矿区地质条件差异导致模型迁移精度下降(跨矿应用准确率平均降低 18%)。

2.4 动态风险评估与预警阈值研究

矿产开发过程中, 地质条件随开采活动动态演化, 需构建“勘察基准模型-实时监测数据-风险动态更新”的闭环评估体系。

2.4.1 动态更新方法

(1) 贝叶斯更新: 利用开采期揭露的新勘察数据(如新增断层产状), 修正先验风险概率。某铅锌矿通过贝叶斯网络, 将掘进面揭露的软弱夹层厚度(从预测 3m 更新为 5m) 融入模型, 突水风险概率从 12% 提升至 28%, 触发临时注浆加固措施。

(2) 数据同化: 将实时监测位移(精度 $\pm 1\text{mm}$) 与数值模型耦合, 通过(集合卡尔曼滤波) EnKF 反演岩体力学参数。某露天矿应用中, 参数反演误差较初始勘察值降低 40%, 边坡失稳风险评估的实时性从 24 小时缩短至 15 分钟。

2.4.2 预警阈值设定

阈值设定需兼顾勘察背景与工程响应特性:

(1) 力学机制型阈值: 基于极限平衡理论, 确定边坡失稳的位移速率临界值(如连续 3 天 $> 10\text{mm/day}$), 某铁矿应用该阈值提前 3 天预警滑

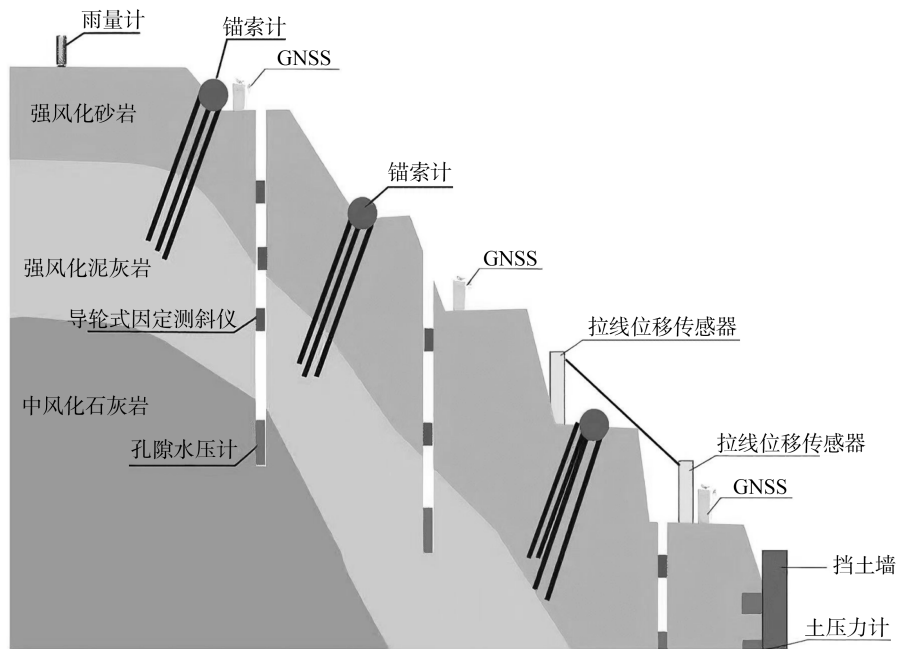


图 2 边坡结构安全监测系统图

坡,避免经济损失约 2000 万元。

(2) 统计型阈值:利用历史监测数据(如 200 组涌水量数据)构建 GPD 模型,确定极端突水事件的阈值($Q > 500 \text{m}^3/\text{h}$,超越概率 1%),较经验阈值($Q > 300 \text{m}^3/\text{h}$)的漏警率降低 25%。

(3) 多参量耦合阈值:融合位移(D)、声发射能量(E)、水压(P)的三维阈值曲面($D > 20 \text{mm} \cap E > 10^4 \text{counts} \cap P > 1.5 \text{MPa}$),某煤矿突水预警的准确率从单参量的 65% 提升至 82%。

2.4.3 实时性与普适性矛盾

当前动态评估面临双重挑战:(1) 计算效率瓶颈:多模型耦合的实时更新需毫秒级计算(如 1000 次/秒蒙特卡洛模拟),现有硬件条件下延迟达 3-5 秒,影响预警时效性;(2) 阈值适应性差:统一阈值在不同矿区的表现差异显著(如某金矿有效阈值在相似地质条件的银矿误警率达 35%),缺乏基于地质背景的自适应调整机制。

3 地质风险防控策略与基于勘察的决策支持

3.1 勘察指导下的优化设计与风险规避

3.1.1 开采方案与工程布局优化

精准化岩土勘察数据是源头风险规避的基

础。基于三维地质模型与地应力场分布特征,可优化矿体开采方案。某金属矿通过详细勘察确定断层带位置及地应力优势方向,将巷道轴线与最大主应力方向夹角控制在 15° 以内,使巷道片帮风险降低 40%;在露天矿设计中,利用岩土学参数(如岩体强度、节理间距)结合数值模拟,动态调整边坡角,某铁矿通过该方法将边坡角从 45° 安全提升至 52° ,减少剥离量 12%,显著提高经济效益。

3.1.2 支护与防治水工程设计

边坡与地下工程支护方案需以专项勘察揭示的地质条件为依据。在边坡支护中,通过原位测试获取的土体抗剪强度、地下水位等参数,可精准设计锚杆长度、预应力大小及挡墙结构。某露天矿边坡基于勘察数据采用“预应力锚索+格构梁”联合支护,使边坡安全系数从 1.15 提升至 1.38;在防治水工程方面,水文地质勘察数据(含水层渗透性、断层导水性)直接决定帷幕注浆方案与疏排水系统布局。某煤矿通过高密度电法探明含水层分布,设计的帷幕注浆堵水率达 85%,在快速且减少大量钻探工作量和节约资金的前提下,有效控制了突水风险。

3.2 监测预警与工程治理

3.2.1 监测网络优化与实时预警

地质风险评估成果指导监测网络的科学布设。根据地质风险类型与等级,确定监测点位置、类型及频率。在高风险边坡区域,采用 InSAR、GNSS 与光纤监测技术构建立体监测网,实现毫米级位移实时监测;在地下工程中,通过微震监测系统与应力传感器组合,捕捉岩体破裂前兆。某金矿部署的智能监测系统,结合机器学习算法分析监测数据,提前 36 小时预警岩爆事件,预警准确率达 82%。如图 2 所示,边坡结构安全监测系统方案利用物联网独有的感、传、知、用技术,对边坡的几个关键指标实时监测,通过获得灾害发生前的特征信息,预测结构可能发生的破坏,确保过往人员、车辆生命财产安全,为防灾减灾提供依据,为管理者的科学决策提供数据支撑。

3.2.2 工程治理与应急响应

当监测数据触发风险预警阈值时,需及时采取工程治理措施。针对巷道变形,可采用超前支护、注浆加固等手段;对于突水风险,可启动排水降压、局部封堵等应急方案。某铜矿在监测到涌水量异常增加后,迅速实施“引流-注浆”联合处置,48 小时内控制住险情。智能化施工设备(如自动注浆机器人、智能锚杆钻机)的应用,显著提升工程治理效率与质量,降低人工预判和响应实施延迟的风险。

3.3 综合防控体系与管理策略

3.3.1 闭环风险管理流程构建

构建“勘察-评估-设计-施工-监测-反馈”的闭环风险管理流程。通过数字化平台整合多阶段数据,实现风险动态追踪与决策优化。某大型矿山企业建立的全生命周期管理系统,将勘察数据、设计方案、施工记录及监测信息统一管理,使风险处置效率提升 30%,管理成本降低 25%。

3.3.2 双重预防机制与应急预案

基于地质风险评估结果实施风险分级管控与隐患排查治理双重预防机制。将矿山不同的

功能区域划分为高、中、低风险等级,并有针对性的制定专项的防控措施;定期开展隐患排查,建立隐患数据库,实现整改闭环管理。同时,制定完善的地质风险应急预案,明确应急响应流程、资源调配方案,并通过实战演练提升应急处置能力。某煤矿通过年度应急演练,将突水事故平均响应时间从 40 分钟缩短至 15 分钟。

3.3.3 全生命周期管理信息系统

利用 BIM、GIS 与物联网技术构建全生命周期风险管理信息系统。该系统可直观展示矿山地质条件、工程布局及风险分布,支持多方案模拟对比与决策推演。某铁矿的数字管理平台集成了三维地质模型、开采进度计划及实时监测数据,为管理者提供可视化决策支持,有效降低管理盲区与决策失误率。

4 结论

本文系统梳理基于岩土勘察的矿产资源开发地质风险评估与防控研究成果,通过岩土勘察获取地质结构、岩土力学等多维度参数揭示风险源,运用风险矩阵法、数值模拟、AI 模型(如机器学习、深度学习)等开展风险评估,采取勘察指导下的优化设计、监测预警与工程治理、综合防控体系构建等策略,并涉及动态风险评估与多参量耦合预警阈值设定。本次研究结果显示,岩土勘察是风险评估的基础,当前存在数据融合、模型验证等瓶颈,前瞻智能勘察、AI+评估、数字孪生等方向;与前人相比,本文更注重勘察数据在风险全链条的核心驱动及全生命周期动态评估与防控优化的整合,补充了多源数据融合、多尺度模型耦合及 AI 深度应用的综合评述。尚存在如下不足:数据融合面临时空基准不统一等挑战,模型验证难、动态评估实时性不足,AI 模型存在可解释性鸿沟、小样本泛化及跨域迁移限制等问题。

参考文献(References):

- [1] 查道静. 新型勘察技术在复杂地质岩土工程勘察中的应用[J]. 建材发展导向, 2025, 23(08): 49-51.

- [2] 熊定一,王孝磊,邢光福.从超大陆旋回看前寒武纪伟晶岩型锂矿的形成[J].华东地质,2023,44(01):1-12.
- [3] 倪斌,黄照强,郭健,等.基于机载和星载高光谱遥感的武夷山成矿带蚀变矿物信息识别研究[J].华东地质,2023,44(01):67-81.
- [4] 黄德华.基于 InSAR 技术的大同市云冈矿区地面沉降监测[J].华东地质,2023,44(04):476-484.
- [5] 朱义坤,赵景怀,缪旭煌,等.综合物探方法在蚌埠隆起金多金属矿勘查中的应用——以怀远双沟勘查区为例[J].华东地质,2023,44(01):82-92.
- [6] 李科玉.工程地质勘察中水文地质问题的危害性[J].黑龙江国土资源,2023,21(02):40.
- [7] 陆德官.基于边坡工程的岩土工程勘察技术分析[J].中国新技术新产品,2024,12(24):93-95.
- [8] 罗耀全.矿山岩土工程勘察中物探技术及数字化分析[J].中国金属通报,2024,12(12):164-166.
- [9] 郑玉涛,卢俊.岩土工程勘察中钻探工艺的选择研究[J].建材世界,2023,44(02):84-86+103.
- [10] 吴鹏琴,冯勇,李进勇,等.岩土工程勘察过程控制要点分析[J].西部探矿工程,2024,36(12):57-59+62.
- [11] 祝敏刚,闵勇章,童伟,等.南沙地区复杂地形地质条件下岩土工程的勘察及技术应用[J].水电站设计,2023,39(04):13-17.
- [12] 韩颖.矿产资源开发中的环境风险评估与管理策略研究[J].世界有色金属,2024,39(08):208-210.
- [13] 简易明.岩土工程勘察在矿产中的有效应用[J].中国金属通报,2022,10(10):219-221.
- [14] 路亚飞.矿产地质勘查风险的成因及规避措施[J].世界有色金属,2020,10(09):233-234.
- [15] 周旋.矿山地质勘探与岩土勘察工程[J].世界有色金属,2019,13(12):210-211.
- [16] 周鹏.矿产地质勘察风险的成因及规避探讨[J].世界有色金属,2018,12(11):157+159.

作者简介:

第一作者/通讯作者:沈黄剑,1995 生,男,江苏南通人,广东省地球物理勘察院,助理工程师,主要研究方向为岩土工程。Email:1194069214@qq.com

Research on Geological Risk Assessment and Prevention and Control of Mineral Resources Development based on Geotechnical Investigation

SHEN Huangjian^{*}, LIU Rui, LIN Fanchao

(Guangdong Geophysical Prospecting Institute, Guangzhou 510800, China)

Abstract: The development of mineral resources is faced with geological disasters such as landslides and water and mud inrush disasters, which is essential to ensure sustainable resource development. Geotechnical investigation is a basic means to reveal risk sources, but breakthroughs are still needed in the uncertainty of data and the effectiveness of driving risk assessment and prevention and control decisions. This paper systematically reviews the research on geological risk assessment and prevention and control based on geotechnical investigation, analyzes the role and limitations of investigation technologies in the acquisition of risk assessment parameters, reviews risk assessment models such as qualitative/semi-quantitative, numerical simulation, and AI-driven ones, and summarizes strategies from source prevention and control, process monitoring to comprehensive management. It points out the bottlenecks such as existing data fusion and model verification, and looks forward to the directions of intelligent investigation, AI+assessment, digital twin, etc. The research results can provide a reference for improving the safety, benefits, and sustainability of mineral resource development.

Key words: geotechnical investigation; geological risk assessment; risk prevention and control strategies; numerical simulation; artificial intelligence