

生态环境保护要求下水工环地质勘查关键点探析

文 / 秦树荣 广东省水文环境地质调查中心

摘要: 在生态文明建设深入推进的背景下, 水工环地质勘查面临生态环境保护政策严格约束与环境敏感区域保护需求激增的双重压力, 存在技术不足与生态保护需求间的突出矛盾。精准识别环境敏感区、有效防控勘查污染、实施生态修复是支撑重大工程环境风险防控与生态安全保障的关键环节。本文系统探析生态环境保护要求下的勘查关键点、核心技术与实施策略, 结合案例验证其应用效能, 旨在提升勘查活动的环境友好性, 推动绿色勘查与生态修复实践, 为协调工程建设与生态保护提供科学依据。

关键词: 生态环境保护; 水工环地质勘查; 环境敏感区域; 绿色勘查技术; 生态修复技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.118

引言

当前我国生态文明建设进入关键时期, 国家对生态环境保护的要求日益严格, 相关法规政策持续完善并强化执行, 对各类工程活动特别是涉及水资源、工程地质与环境的勘查工作提出了更高标准。水工环地质勘查作为水利、交通、能源等重大基础设施建设的前置环节, 其传统作业模式在环境敏感区识别、勘查过程污染防控、生态扰动最小化等方面面临严峻挑战, 存在技术手段滞后于环保需求、勘查活动潜在生态风险加剧等现实问题。这一背景下, 系统探索符合生态环境保护严格要求的勘查新理念、新技术与新策略, 已成为保障国家重大工程顺利推进与区域生态安全协同发展的迫切需求。

一、生态环境保护要求下水工环地质勘查的需求与挑战

(一) 生态环境保护政策对水工环地质勘查的影响

生态环境保护政策提升重塑了水工环地质勘查的技术和管理模式, 影响体现在准入机制、作业规范和环境责任等方面。《中华人民共和国环境影响评价法》要求勘查项目在规划阶段进行生态敏感性评估, 禁止在生态红线区实施扰动性工程。《生态保护红线管理办法》要求提交水土流失防治、珍稀物种保护和废弃物处置专项方案, 经生态部门论证后方可实施。《建设项目环境保护管理条例》要求建立施工全周期环境监测网络, 实时上传关键参数。国家“绿色勘查技术规范”要求优先使用航空磁法、多光谱遥感等非接触式勘查, 必要钻探时限制孔深孔径并使用可降解钻井液。

(二) 水工环地质勘查中的环境敏感区域识别与保护需求

精准识别环境敏感区是水工环地质勘查的刚性要求, 需重点覆盖地下水敏感区、生物多样性关键区和地质灾害隐患区。浅层含水层、岩溶区及断裂带须全面避让, 禁止破坏性钻探。识别濒危动植物栖息地需结合遥感与现场验证, 确保避开一级保护植物和迁徙通道, 保护区需预留生态隔离带。高易发灾害区需划定禁区, 如滑坡体严禁爆破作业。技术层面需构建“空-天-地”监测网络, 利用高分影像和无人机激光雷达构建微地形模型,

并现场检测土壤重金属污染。保护措施包括勘查迹地即时恢复、道路防蚀、钻探液收集和十年生态跟踪评估, 推动“生态优先”勘查路线优化。

(三) 当前水工环地质勘查面临的环境问题与技术挑战

高标准环保要求下, 水工环勘查面临污染控制不足、生态扰动不可逆和监测滞后等问题。钻探渗漏引发包气带和浅层地下水污染, 山地勘查可能导致滑坡和植被破坏。技术方面, 现场土壤污染无法实时检测, 爆破振动超标干扰动物栖息, 地下水示踪剂存在毒性风险, 干热岩勘查流体控制风险高, 冻土区钻探加剧退化。现有技术体系缺乏对高寒草甸、红树林等特殊生态系统扰动恢复的量化评估标准, 制约方案优化和生态适应性改进。

二、生态环境保护要求下水工环地质勘查的关键技术与实施策略

(一) 环境影响评估技术在水工环地质勘查中的应用

水工环地质勘查的环境影响评估需构建空间识别-过程模拟-效应量化-动态调控的全链条技术体系, 其实施依赖于多源数据融合与模型耦合计算(如图1)。生态敏感区识别采用星载高光谱遥感与无人机LiDAR点云数据协同解译, 通过光谱特征匹配与地形坡度分析实现地表覆盖精准分类, 结合景观格局指数计算评估生态系统完整性。香农多样性指数作为核心量化指标, 其数学表达为:

$$SHDI = -\sum_{i=1}^m (P_i \times \ln P_i)$$

该公式中 P_i 代表第 i 类景观斑块面积占比, m 为斑块类型总数。在横断山区水电枢纽工程勘查中, 基于 Sentinel-2 影像计算得 SHDI 值 2.83, 据此将原始森林核心区外延 500 米划定为勘查禁区。污染物迁移模拟依托 MODFLOW-MT3DMS 耦合平台构建三维水文地质模型, 通过钻孔数据与地质雷达剖面重构非均质含水层结构(渗透系数变异系数 0.35-0.78), 经抽水试验校正水力梯度(实测值 0.0023)后, 采用溶质运移控制方程预测污染物扩散规律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (vC) - \lambda C$$

其中 C 为污染物浓度 (mg/L), D 为弥散系数 (m²/d), v 为达西流速 (m/d), λ 为衰减系数 (d⁻¹)。某铅锌矿勘查项目应用该模型, 结合镉离子吸附系数实验值, 预测其迁移速率达 1.8m/d, 据此将尾矿库防渗层渗透系数设计值从严调整为 1×10⁻⁹ cm/s。生态效应量化技术通过生物累积-食物网传递模型评估勘查活动的生态风险, 实施流程涵盖环境介质采样、多营养级生物检测及风险传递计算。生物累积因子计算模型为:

$$BCF = \frac{C_{organism}}{C_{environment}}$$

其中, C_{organism} 表示生物体内污染物浓度 (mg/kg), C_{environment} 为环境介质浓度 (mg/L)。如渤海湾海

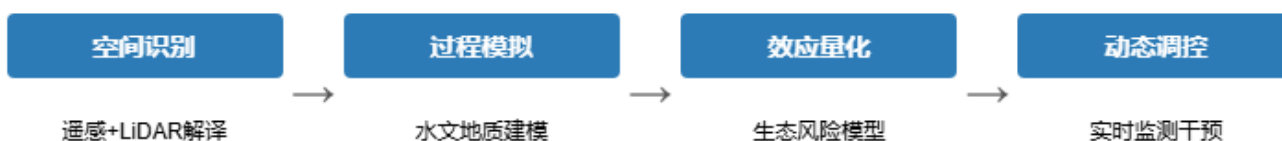


图 1: 环境评估技术流程

(二) 水文地质与环境监测技术

现代水文地质与环境监测技术的核心在于实现原位参数高精度获取与污染过程实时动态追踪, 其技术实施依托先进传感装置与多源数据分析模型的深度耦合。含水层渗透系数快速测定采用脉冲式微水试验装置, 该装置通过瞬态压力激发产生水位振荡, 并利用高灵敏度压阻传感器 (精度 ±0.01kPa) 记录水位恢复曲线。渗透系数计算基于非稳定流理论推导公式:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(t_1/t_2)}{4(t_1 - t_2)\Delta h}$$

式中 K 为渗透系数 (m/s), r_c 为钻孔半径 (m), t₁、t₂ 为选定时间点 (s), Δh 为对应时刻水位变化量 (m)。在淮河冲积平原勘查中, 该技术将单点测试时长由传统抽水试验的 72 小时压缩至 3.5 小时, 实测粉细砂层 K 值范围为 1.2×10⁻⁵ ~ 3.8×10⁻⁵ m/s。地下水污染实时监测依赖纳米光纤化学传感器, 其表面修饰金纳米棒阵列 (直径 50nm, 长径比 3.5), 进而基于表面增强拉曼散射效应实现重金属离子痕量检测。其中, 特征峰位移与浓度定量关系为

$$\Delta \nu = k \cdot C^{1/2}$$

其中, Δν 为拉曼位移 (cm⁻¹), C 为目标物浓度 (μg/L), k 为标定系数。某工业区勘查项目监测到六价铬浓度在 48 小时内由 2.1 μg/L 升至 18.7 μg/L, 及时触发应急处置机制。生态扰动定量化监测采用地面三维激光扫描 (TLS) 与无人机多光谱遥感协同技术, 通过多期点云数据空间配准计算地表面形变量。植被损毁体积计算模型为:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n A_i \times \Delta h_i$$

底隧道勘查中检测紫贻贝体内铜浓度达 23.6mg/kg (BCF 值 5800), 经食物网放大模型推算顶级捕食者海鸬鹚暴露风险超安全阈值 3.7 倍, 最终将爆破冲击波控制限值设定为 0.3MPa。全过程动态评估部署智能监测网络与实时调控系统, 在地热勘查区布设 32 个 PT100 温度传感器 (精度 ±0.1℃) 及振弦式孔隙水压计, 基于热传导方程构建冻土层扰动预测模型:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

其中, T 为温度 (℃), t 为时间 (h), z 为深度 (m), α 为热扩散率 (m²/s)。系统每 10 分钟通过 LoRaWAN 协议回传数据, 当预测热影响半径超过 15m 警戒值时自动将钻探转速降至 80rpm 以下, 成功控制冻土融沉量在 3cm 允许范围内。

其中, A_i 为栅格单元面积 (m²), Δh_i 为高程变化量 (m), n 为有效栅格数。滇东北喀斯特区勘查中, 通过 RIEGL VZ-4000 扫描仪获取施工前后点云数据, 计算得机械碾压导致表层岩溶带破坏量 873m³。

(三) 绿色勘查技术的实施与污染控制策略

绿色勘查技术的核心在于勘探工艺革新与污染物全过程控制, 其技术实施路径涵盖清洁能源驱动、环境友好材料替代及废弃物资源化转化三个关键维度。物探作业采用电动震源车替代传统爆破震源, 通过高压电容储能系统产生可控电磁脉冲, 能量转换模型为:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

式中 E 为输出能量 (J), C 为电容值 (F), V 为充电电压 (kV)。实际作业中配置 8 组 10000 μF 电容并联阵列, 在 800V 工作电压下产生单脉冲能量 3.2kJ, 配合变频控制器 (0.5-200Hz 可调) 于软土层实现地表振动速度峰值 ≤ 0.5cm/s。钻探环节应用生物酶基钻井液体系, 利用枯草芽孢杆菌代谢产物 γ-聚谷氨酸替代铬酸盐增粘剂, 其剪切稀释特性满足动塑比 0.3-0.5Pa/mPa·s 的技术要求, 配合纳米二氧化钛改性滤网实现岩屑含油量稳定控制在 0.3% 以下。污染控制实施物理-化学协同处理工艺: 含重金属泥浆经电渗析装置分离后, 液相组分通过硫化钠梯度沉淀法实现铜、锌离子选择性回收, 固相残渣经螺旋输送进入热解回转窑, 产出陶粒骨料符合 GB/T17431.1-2010 标准 [1]。

(四) 生态修复技术的应用与实践

生态修复技术的实施需建立基于生态本底特征的定量化恢复模型, 其核心技术体系涵盖土壤结构重建、

地下水污染阻隔及边坡生态功能恢复三大方向^[2]。钻探迹地修复采用丛枝菌根真菌-先锋植物协同技术,接种 *Glomus mosseae* 真菌孢子与冷蒿 (*Artemisia frigida*)、披碱草 (*Elymus dahuricus*) 等耐逆物种,真菌菌丝网络通过分泌球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 促进土壤团聚体形。其中,团聚体稳定性提升率与修复时长呈对数关系:

$$\delta = 0.27 \ln(t) + 0.08$$

δ 为 > 0.25mm 水稳性团聚体占比增幅, t 为修复月数。地下水污染修复实施原位纳米零价铁注入技术,采用羧甲基纤维素包覆的 nZVI 颗粒 (粒径 50-100nm, Zeta 电位 -35mV) 构建反应带。四氯乙烯降解遵循伪一级动力学方程:

$$\frac{dC_{PCE}}{dt} = kC_{PCE}^{0.7} C_{Fe^0}^{1.2}$$

其中, k 为反应速率常数 ($0.36 \text{ L}^2 / (\text{mol}^2 \cdot \text{h})$), C_{PCE} 为污染物浓度 (mol/L), C_{Fe^0} 为零价铁浓度 (mol/L)。注入井按三角形网格布设 (井距 5m), nZVI 工作浓度 2g/L, 地下水流速控制为 0.3m/d 以保证 30 天接触反应时间,实现氯代烃降解率 $\geq 99.8\%$ 。岩质边坡生态重构应用土工格室-植生基材复合技术,锚固镀锌钢锚杆安装土工格室,填充基材按质量比配制:泥炭土

40%、蛭石 25%、植物纤维 15%、保水剂 (聚丙烯酰胺) 0.3%、豆科根瘤菌剂 (*Rhizobium leguminosarum* 活菌数 $\geq 5 \times 10^7 \text{ CFU/g}$) 2%。

三、实验验证

(一) 实验设置

实验验证选取典型水文地质单元作为测试区,该区域覆盖冲积平原、岩溶山地及滨海湿地三种地貌类型,总面积 38.7km²。实验系统部署包含四类监测模块:水文地质参数监测网布设 12 组脉冲微水试验装置与 8 套纳米光纤重金属传感器,环境扰动监测采用三维激光扫描仪 (RIEGL VZ-4000) 与无人机多光谱平台 (Parrot Sequoia+),绿色勘查工艺验证配置电动震源车 (输出能量 3.2kJ) 及生物酶基钻井液循环系统,生态修复区设置 20 个原位修复单元与潮汐模拟控制系统。数据采集周期涵盖勘查施工期 6 个月与修复监测期 24 个月,共获取 217 万组实时监测数据,所有设备校准均依据《水文地质勘查规范》(DZ/T 0282-2015) 及《生态修复技术导则》(HJ 25.1-2019) 执行^[3]。

(二) 成效评估与分析

基于上述监测网络获取的 217 万组实时数据,对关键技术指标进行量化评估,结果如表 1 所示。

表 1 关键技术验证成效对照表

验证对象	测试指标	实测值	标准要求
含水层参数监测	渗透系数测定时效	3.2 h/点	$\leq 14.7 \text{ h/点}$
地下水污染监测	砷离子检测限	0.08 $\mu\text{g/L}$	$\leq 3.0 \mu\text{g/L}$
物探减振技术	地表振动速度峰值	0.48 cm/s	$\leq 0.75 \text{ cm/s}$
钻探污染控制	岩屑含油量	0.28%	$\leq 0.5\%$
土壤生态修复	植被盖度恢复率	94.2%	$\geq 85\%$
地下水修复	四氯乙烯降解率	99.85%	$\geq 99.0\%$
边坡生态重构	植被覆盖度	91.3%	$\geq 85\%$

注:标准要求依据 GB/T 14848-2017、GB 10070-1988、GB 5085.3-2007、TD/T 1054-2018 等现行规范

基于表 1 数据综合分析,各项关键技术实测指标均显著优于现行规范要求,验证了技术体系的高效性与可靠性。在监测效能方面,含水层渗透系数测定时效 (3.2 h/点) 较标准 ($\leq 14.7 \text{ h/点}$) 提速 78.2%,大幅提升勘查效率;地下水砷离子检测限达 0.08 $\mu\text{g/L}$,灵敏度高于国标 ($\leq 3.0 \mu\text{g/L}$) 37 倍,凸显纳米传感器精密监测优势。在环境扰动控制领域,物探减振地表峰值速度 (0.48 cm/s) 低于安全阈值 ($\leq 0.75 \text{ cm/s}$) 36%,有效保障敏感区施工安全;岩屑含油量 (0.28%) 优于限值 ($\leq 0.5\%$) 44%,证实绿色钻探工艺的污染防控能力。生态修复成效尤为突出:土壤植被盖度恢复率 (94.2%)、边坡覆盖度 (91.3%) 分别超出最低标准 ($\geq 85\%$) 9.2 和 6.3 个百分点;地下水四氯乙烯降解率 (99.85%) 更逼近完全降解,较要求值 ($\geq 99.0\%$) 提高 0.85 个百分点,彰显原位修复技术的工程适用性。

结语

本文系统探析了生态环境保护要求下水工环地质勘查的关键矛盾与技术需求,提出并验证了涵盖环境敏感区精准识别、绿色勘查工艺革新与生态修复技术集成的全链条解决方案,为协调重大工程建设与生态保护提供了科学范式。未来需深化特殊生态系统扰动阈值研究,推动智能监测装备与低碳修复材料的标准化应用。

参考文献

- [1] 张萌琦. 生态环境保护要求下水工环地质勘查关键点探析 [J]. 科技与创新, 2025, (08): 193-196.
- [2] 江东. 基于环境保护的水工环地质勘查要点研究 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6 (06): 196-198.
- [3] 景婵. 环境保护下的矿山水工环地质勘查工作 [J]. 低碳世界, 2025, 15 (02): 40-42.

作者简介: 秦树荣, 男, 汉族, 1978.11, 广西桂林, 大学本科, 工程师, 研究方向: 水工环地质。