

新形势下水工环地质勘察技术及其应用分析

刘 猛

天津华北地质勘查局核工业二四七大队 天津 301800

摘 要：水工环地质勘察作为资源开发、工程建设和生态保护的基础工作，在新形势下面临机遇与挑战。在生态文明建设与数字化转型的新形势下，水工环地质勘察技术正从传统模式向智能化、多目标协同方向升级。本文系统梳理了水文、工程、环境地质勘察的关键技术，包括同位素示踪、三维地质建模、微震监测等，并深入探讨其在重大工程建设、生态修复及城市地质安全保障中的具体应用。研究表明，新技术的融合应用显著提升了勘察精度与效率，有效支撑了资源开发、工程安全与环境保护的协同发展。

关键词：新形势下；水工环地质勘察；关键技术；具体应用

引言：“双碳”目标、新型城镇化建设对地质勘察的精准性与时效性提出更高要求，而极端气候与人类活动加剧引发的地质灾害、环境污染问题，倒逼勘察技术向智能化、动态化转型。传统勘察手段已难以满足复杂地质条件与多目标协同需求，亟需整合遥感、物联网、大数据等新技术，构建适应时代发展的勘察技术体系。本文基于此背景，分析关键技术发展趋势与应用路径，旨在为行业技术升级与可持续发展提供支撑。

1 新形势下水工环地质勘察概述

新形势下，水工环地质勘察是融合水文地质、工程地质与环境地质研究的综合性技术领域，旨在为资源开发、工程建设和生态保护提供科学依据。在生态文明建设、新型城镇化加速及数字化技术蓬勃发展的背景下，其内涵与外延不断拓展，逐渐从传统资源勘探向多目标、智能化方向转型。政策层面，“双碳”目标与绿色发展理念推动勘察技术向生态友好型转变。国家对重大工程建设的地质安全评估、矿山生态修复及地下水污染防治提出更高要求，促使勘察工作从单一资源勘查转向资源-环境协同评价。如在城市地下空间开发中，需同步开展地质稳定性、地下水动态及环境承载力分析，保障工程建设与生态保护的平衡。技术革新为水工环地质勘察注入新动能。传统钻探、物探方法与遥感（RS）、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）深度融合，形成“空天地”一体化监测体系。无人机航测与激光雷达技术大幅提升地形地貌勘察效率；大数据与人工智能算法的应用，使地质灾害预测预警精度显著提高。环境需求变化则倒逼勘察模式转型。面对极端气候引发的滑坡、泥石流等地质灾害，以及人类活动导致的地面沉降、土壤污染等问题，水工环地质勘察需更注重区域地质环境演变规律研究^[1]。通过建立长期监测网络，实时掌握地质体

变化，为灾害防控与生态修复提供精准数据支撑。

2 新形势下水工环地质勘察关键技术

2.1 水文地质勘察技术

在新形势驱动下，水文地质勘察技术包含以下数据采集、模拟分析及监测预警全流程，成为地下水资源科学管理的重要支撑。（1）同位素示踪技术。作为地下水运动研究的核心手段，基于自然界中同位素的分馏特性与人工示踪剂的可控性，构建起地下水循环系统解析体系。天然稳定同位素在降水、蒸发、径流等水文过程中会发生分馏，通过分析其比值变化，可追溯地下水补给区海拔、气候条件及补给来源；放射性同位素因具有已知的半衰期，可用于测定地下水年龄，揭示地下水更新速率。该技术突破传统水文地质调查的局限性，实现对地下水流系统的物质来源与时间尺度的量化分析。（2）三维地质建模与数值模拟技术。依托多源数据融合与计算技术革新，重塑了水文地质研究范式。通过整合地质钻孔、地球物理测井、地震勘探等离散数据，结合GIS空间分析技术，构建包含地层结构、岩性参数、水力特征的三维地质模型。在此基础上，运用MODFLOW、Feflow等专业数值模拟软件，基于达西定律、质量守恒方程等理论，对地下水流系统进行数学刻画，可实现对地下水水位动态、溶质运移过程及水量均衡的定量模拟。技术发展趋势向多物理场耦合（如流-固-热耦合）与高分辨率精细化方向演进，以应对复杂水文地质条件下的模拟需求。（3）分布式光纤传感技术。基于光时域反射（OTDR）、布里渊散射（BOTDR/BOTDA）等原理，实现对地下水流场的分布式监测。当光纤受地下水位升降、温度变化或土体变形影响时，光信号的后向散射特性（如光强、频率、相位）发生改变，通过解调算法可反演沿程地下水位、流速及水温参数。该技术突破传统

点式监测的局限性,监测距离可达数十公里,空间分辨率达厘米级,具备实时性、抗电磁干扰等优势,尤其适用于大型灌区、岩溶地区等区域的地下水动态监测。

2.2 工程地质勘察技术

以下工程地质勘察技术聚焦地质体稳定性评价与灾害风险防控,通过多学科交叉融合,形成覆盖地表至深部的勘察技术体系。(1)无人机遥感与激光雷达(LiDAR)技术。构建了空基三维地质信息采集平台。无人机搭载的高分辨率光学相机可获取厘米级地面影像,经多视立体匹配算法生成正射影像(DOM)与数字表面模型(DSM);LiDAR系统利用脉冲激光扫描,穿透植被覆盖层直接获取地表地形信息,生成高精度数字高程模型(DEM)。通过多源数据融合与图像解译技术,可识别断层、褶皱、滑坡等地质构造,量化分析地形坡度、坡向、切割深度等工程地质参数。该技术在山区铁路选线、大型水电工程前期勘察中,可显著提升地形地貌数据采集效率与准确性。(2)微动探测技术。基于天然场源的被动式地球物理方法,利用地球表面持续存在的微振动信号,通过密集台阵观测获取Rayleigh波频散曲线。通过反演算法,可获取地下介质的横波速度结构,进而推断地层分层、岩性变化及软弱夹层分布。相比传统主动源地震勘探,该技术无需人工激发震源,适用于城市、居民区等复杂环境下的浅层地质结构探测,在地铁沿线地基勘察、城市地下空间开发中具有显著优势。(3)微震监测技术。以岩体破裂过程中的能量释放为监测对象,基于声发射理论构建实时监测网络。在目标区域布置三分量加速度传感器,采集岩体微破裂产生的地震波信号(通过时差定位算法确定微震事件的空间位置与发震时刻。结合震源机制解、能量-时间序列分析,可量化岩体内部应力集中程度与损伤演化过程,为边坡稳定性评价、地下洞室岩爆预警提供动态数据支持。

2.3 环境地质勘察技术

环境地质勘察技术以生态保护与污染防控为核心,构建起从快速检测到动态预测的全链条技术体系,具体如下:(1)高光谱遥感技术。利用地物在数百个连续光谱波段的反射、吸收特性,建立物质成分光谱识别模型。通过航空/卫星高光谱影像采集,结合光谱库匹配、混合像元分解等算法,可定量反演土壤重金属含量、植被叶绿素浓度、水体悬浮物及污染物成分。相比多光谱遥感,其光谱分辨率达纳米级,能够捕捉地物细微光谱差异,实现污染类型识别与程度分级,为生态修复工程提供空间分布数据。(2)地球物理探测技术。基于地下介质物性差异(电性、磁性、弹性等),发展出多元化

探测方法。探地雷达(GPR)通过发射高频电磁波,利用介质界面反射信号构建地下结构剖面,可探测深度数米内的空洞、管道及污染界面;电磁感应法基于法拉第电磁感应定律,测量地下介质电导率分布,快速圈定污染羽水平范围;高密度电法通过阵列电极采集地下电阻率数据,经反演成像技术获取地层结构与污染带垂向分布。(3)物联网与大数据技术。构建环境地质监测的“感知-传输-分析”一体化平台。通过部署土壤温湿度、水质pH值、电导率等传感器,结合卫星通信、5G网络实现数据实时传输;利用云计算平台存储海量监测数据,采用机器学习算法挖掘数据时空规律,建立环境地质变化预测模型^[2]。

3 新形势下水工环地质勘察技术的具体应用

3.1 在重大工程建设中的应用

3.1.1 在跨流域调水工程中的应用

水文地质勘察以水资源可持续利用为核心目标,形成全链条技术应用体系。在水源地勘察阶段,通过氢氧稳定同位素比值分析,结合降水同位素高程效应模型,反演地下水补给区的海拔高度与气候条件,确定补给来源与季节变化规律;利用碳-14、氡等放射性同位素测定地下水年龄,评估含水层更新能力,为取水规模提供依据。输水线路勘察中,三维地质建模整合钻孔岩性数据、地震波速剖面及电测深成果,构建包含含水层、隔水层空间分布的精细模型;运用MODFLOW等数值模拟软件,设置调水前后的边界条件,量化分析调水对沿线地下水水位、径流方向的影响,优化渠道走向与泵站布局。

3.1.2 在工程地质勘察的应用

采用微动探测与高密度电法联合勘察技术。微动探测通过布设台阵采集天然振动信号,反演地下横波速度结构,识别隐伏断裂与软弱夹层;高密度电法通过电极阵列获取视电阻率数据,经三维反演成像确定基岩面起伏与地层含水量分布,为渠道防渗设计提供参数。无人机遥感搭载LiDAR设备,对复杂地形区域进行倾斜摄影测量,生成厘米级精度的数字高程模型与三维实景模型,辅助设计倒虹吸、渡槽等水工建筑物的空间姿态与结构尺寸^[3]。

3.1.3 在深埋隧道工程中应用

微震监测系统沿隧道轴线呈网格化布设加速度传感器,实时采集岩体破裂产生的微地震波信号。通过震源定位算法确定微震事件空间位置,结合波形特征分析岩体损伤演化趋势,提前预警岩爆、塌方风险。分布式光纤传感技术采用布里渊光时域分析原理,将传感光缆埋设于衬砌与围岩界面,监测沿线温度、应变变化,实现

对渗流路径、围岩收敛变形的毫米级精度监测，为二次衬砌施作时机提供决策依据。

3.2 在生态修复工程中的应用

3.2.1 在矿山地质环境治理中的应用

环境地质勘察构建了“污染识别-风险评估-修复设计”的技术链条。高光谱遥感采用无人机载成像光谱仪，在可见光-近红外波段采集矿山废弃地光谱数据，通过光谱角匹配与混合像元分解算法，识别重金属（如镉、铅）污染区域与植被叶绿素含量分布，绘制污染程度分级图。地球物理探测采用探地雷达与瞬变电磁法组合，探地雷达利用高频电磁波探测浅层尾矿库防渗层完整性，瞬变电磁法通过感应电流探测深部采空区积水状态，为防渗帷幕设计与采空区注浆方案提供数据支撑。

3.2.2 在水土保持工程中的应用

无人机遥感获取流域高分辨率DOM影像，结合数字地形分析提取坡度、坡长、汇流面积等参数，基于通用土壤流失方程计算土壤侵蚀模数，圈定水土流失高风险区域。工程地质勘察采用探地雷达对滑坡体进行剖面扫描，通过反射波同相轴连续性分析确定滑动面位置与厚度；结合钻孔取芯与原位测试，获取滑带土物理力学参数，优化抗滑桩的桩长、间距设计。物联网监测网络部署雨量计、土壤湿度传感器与视频监控设备，实时采集降雨强度、土壤含水量及坡面侵蚀影像，通过机器学习算法建立水土流失预测模型，动态调整植被恢复与工程措施的实施强度。

3.3 在城市地质安全保障中的应用

3.3.1 在城市地下空间开发中的应用

工程地质勘察以风险防控为导向，构建多技术协同体系。微动探测与电磁感应法组合应用，微动探测获取地下300m深度范围内的地层分层信息，识别隐伏断裂带；电磁感应法通过多频测量快速圈定地下空洞、废弃管线分布，为地铁盾构区间、综合管廊选线规避风险。三维地质建模整合地质钻孔、物探剖面与市政管线数据，构建包含基岩面、含水层、地下障碍物的三维可视化模型，采用BIM技术进行管线碰撞检测与施工模拟，优

化地下结构设计方案。

3.3.2 在水文地质勘察在基坑工程中的应用

沿基坑周边埋设分布式光纤传感器，利用布里渊散射效应监测地下水位变化，通过水位-应变关系模型预警突涌风险。基于有限元数值模拟，建立基坑降水与周边建筑物沉降的耦合模型，分析降水引起的孔隙水压力消散与土体固结过程，优化降水井布局与抽水量控制方案。

3.3.3 在地面沉降监测中的应用

采用InSAR技术与水准测量协同作业。InSAR通过多时相卫星影像干涉处理，获取毫米级精度的地表形变场，识别沉降漏斗分布范围；水准测量在关键区域设置基岩标与分层沉降标，监测不同深度土层压缩量^[4]。物联网传感器实时采集地下水开采量、孔隙水压力及建筑物沉降数据，通过灰色预测模型、神经网络算法建立地面沉降动态预测模型，结合城市规划划定地下水禁采区、限采区，制定分层止水、人工回灌等综合防控措施。

结束语：本研究系统剖析了新形势下水工环地质勘察技术的核心突破与应用成效。从同位素示踪、微震监测等关键技术创新，到重大工程、生态修复等领域的实践应用，展现了勘察技术在保障工程安全、推动生态保护中的重要价值。但技术标准不足、复杂地质适应性有限等问题仍待解决。未来需进一步推动多技术深度融合，加强人工智能、区块链等前沿技术的应用，构建智能化、动态化的地质勘察体系，以更好地服务于国家重大战略与社会可持续发展。

参考文献

- [1]李杰.新形势下水工环地质勘察技术及其应用[J].冶金与材料,2023,43(3):109-111.
- [2]王凤春.新形势下水工环地质勘察技术及其应用分析[J].水利电力技术与应用,2024,6(2):33-34.
- [3]童品贤.新形势下水工环地质勘察技术及其应用浅析[J].科学与信息化,2022(14):50-52.
- [4]张雷.新形势下水工环地质勘察技术及其应用[J].世界有色金属,2021(8):209-210.