

基于多源数据融合的水文地质勘察技术研究与应用

柳建新

四川省第七地质大队，四川 乐山 614000

摘要：随着水文地质勘察需求日益复杂，对勘察技术的精度与效率提出了更高要求。传统单一勘察手段已难以满足复杂地质环境下的全面分析需求。多源数据融合技术通过整合遥感、地质雷达、地球物理、电法、水文监测等多类数据，实现信息互补与协同解释，大幅提升了勘察工作的准确性与科学性。本文基于当前水文地质勘察存在的技术瓶颈，系统探讨了多源数据融合技术的理论基础、核心方法与工程实践路径，分析其在复杂地质区域中的优势与关键突破点，为推动我国地质勘察信息化、智能化、精细化提供了技术支撑。

关键词：多源数据融合；水文地质；勘察技术；信息化；协同分析

DOI: 10.63887/fns.2025.1.4.12

引言

水文地质勘察作为工程建设、城市规划、水资源开发与生态保护等多领域决策的基础环节，其精度与效率直接影响工程安全性与资源合理配置。长期以来，我国在地质勘察领域积累了丰富经验，但在信息融合、数据智能处理和跨平台协同应用方面仍存在不足。随着遥感卫星、无人机测绘、智能传感器等技术不断涌现，海量异构数据被持续采集并应用于地质工作，亟需一种系统化、集成化的技术路径加以整合。多源数据融合技术正是在此背景下兴起，通过融合多类空间、时间与属性维度信息，为水文地质建模、风险识别与精细评估提供有力工具。本文结合工程案例，探讨多源数据融合在水文地质勘察中的实际应用，旨在推动勘察模式由“粗放获取”向“智能解析”转变。

1 水文地质勘察中多源数据融合的理论基础与发展现状

1.1 多源数据融合技术的核心理念与分类

多源数据融合（Multi-source Data Fusion）是指通过对不同来源、不同类型、不同精度的数据进行一体化处理，以获取更完整、更一致、更可靠的地质信息的方法。该技术起初应用于军事侦察与遥感成像，近年来逐渐拓展至资源调查、地质灾害监测、水文建模等领域。在水文地质勘察中，常见的数据源包括：遥感影像数据（如 Landsat、Sentinel）、航空/地面地质

雷达、重力/电磁/电阻率等物探数据、水文钻孔与监测数据、地形与 DEM 高程数据，以及历年地质文献与经验数据。

数据融合可分为三个层次：数据层融合（如空间配准与插值）、特征层融合（如形态学提取与属性重构）与决策层融合（如专家系统与机器学习判别）。在实际操作中，常通过 GIS 平台对各类空间数据进行叠加分析，并结合人工智能算法（如支持向量机、神经网络）实现自动解译。通过融合分析，可以提升勘察区域水位、渗流、含水层分布等的识别精度，降低单源数据偏差带来的判断风险。

1.2 水文地质勘察中技术瓶颈与融合需求

传统水文地质勘察多依赖钻探与地面物探，具有成本高、周期长、覆盖范围有限等问题，且受限于局部点位信息，难以全面刻画地下水系统的时空结构。在高填方区、岩溶发育带、软弱地基区域，常常出现信息不对称、层位识别困难、参数误判等问题，严重影响后续工程设计与施工风险控制。而多源数据融合技术正可通过综合分析填补传统勘察“盲区”。

当前，我国经济正处于高速增长转向高质量发展的关键时期。基于工程勘察作为我国工程建设的重要环节。在重大工程建设中，水文地质环境复杂多变，传统方法已难以满足深层结构精准探测、动态监测与系统建模的需要。例如，南水北调、海绵城市、地下

空间开发等项目均对含水层划分、渗流路径识别与地下水环境演变提出了高精度要求,推动着勘察手段向融合化、智能化升级^[1]。

2 多源数据融合在水文地质勘察中的关键技术路径与集成方法

2.1 异构数据预处理与标准化集成框架

实现多源数据的协同分析,首要步骤是数据的标准化处理。不同数据源之间在坐标系统、时间尺度、分辨率、数据格式等方面存在显著差异,若不统一处理,容易导致融合失真。通常采用的预处理方法包括坐标变换、投影统一、数据去噪、重采样、插值优化等。在空间数据方面,遥感与 DEM 数据需通过几何纠正与配准精度控制,确保与物探断面、钻探柱状图实现空间同步;在属性数据方面,需通过归一化、主成分分析等方法去除冗余信息,提取关键特征变量,为后续融合建模打下基础。

在此基础上,构建一个统一的地质数据集成平台成为核心任务。当前常用的是基于 GIS 的三维建模与可视化分析平台,将钻探剖面、水位数据、电阻率图、雷达图像等整合于一个三维空间模型中,支持多维动态查询与交互式解译。某些项目已引入 BIM+GIS 架构,进一步实现工程信息与地质数据的联动管理,使地下水动力场与建筑基础模型同步可视。基于这种集成方式,不仅提升了勘察成果表达效率,也为设计施工提供实时决策支持^[2]。

2.2 核心算法模型与融合应用实例

融合算法是数据处理的技术核心。在水文地质勘察中,主要采用贝叶斯融合、证据理论、多尺度加权分析、地统计建模、深度学习等方法。其中,基于卷积神经网络(CNN)的遥感图像识别算法,已被广泛用于识别地表断裂带、地貌类型与植被覆盖情况;而支持向量机(SVM)和随机森林(RF)则被用于判别地下水赋存区域与含水层类型。地统计学则擅长通过克里金插值与协方差函数分析,对钻探点之间的地下结构进行定量预测。

例如,在某大型城市地下空间开发项目中,融合高密度电法剖面图与钻孔水位数据,通过三维地质建

模平台复现地下水渗流路径,提前识别出软弱夹层与高渗透带,为后续基坑降水与支护设计提供了重要依据。再如,在岩溶发育严重的西南地区,结合遥感断裂识别、电磁测深与水文钻探资料,成功实现了对暗河系统的定位,为桥梁基础方案选择起到关键作用。

正如研究指出:工程勘察质量关乎整个工程质量,加之具有一定“不确定性”、“过程不可逆”的工程勘察工作决定了其质量受岩土变化多、波动大、过程短、检验困难等影响。在这种背景下,多源数据融合不仅能够提高风险识别的前瞻性与准确性,还能通过数据反演手段,为缺测区域提供间接参数估计,极大补全了常规勘察的空间盲点。

此外,融合数据还可被引入智能模拟与预测系统中,如基于 FEM 或 MODFLOW 的地下水数值模拟模型,通过不断引入实测数据优化边界条件与参数设定,实现含水层厚度、渗透系数、水位变化等动态预测功能。尤其在汛期或重大施工扰动前夕,能有效评估渗流失稳、地下水突涌等灾害风险,实现预警与风险应对^[3]。

3 融合技术在典型水文地质环境中的应用价值与实践成效

3.1 岩溶、软土、断裂带等复杂地质区的融合技术优势

我国的典型水文地质环境中,如西南喀斯特地区岩溶发育剧烈、长三角与珠三角区域软土广布、华北平原断裂活动频繁,常规勘察手段在这些环境下准确性与适应性受限。多源数据融合技术的引入,使得对地下含水层、渗流路径、隐伏断裂与软弱夹层的识别变得更加可行且高效。

在岩溶发育区,传统物探易受强反射干扰,无法明确溶洞边界与形态。而通过融合遥感识别的断裂信息、电法高导异常、钻探空腔资料与地下水化学参数,构建的三维岩溶模型更真实地反映出地下空洞连通性与水文动力特征,为防治岩溶塌陷、桥梁选址、地下工程支护设计提供科学依据。

软土地基区中,多源数据融合同样发挥显著效能。如在上海某重大工程中,通过整合钻探孔隙比、电阻率成像图、土工试验参数与地质年代数据,自动提取

了软土厚度变化分布图与沉降敏感性区划图。结果显示,融合分析结果比单一钻孔法可减少 30%以上的参数误判,显著提升了设计依据的稳定性与经济性。

3.2 融合技术助力区域地下水资源调查与环境监测

多源数据融合技术不仅适用于工程建设项目的地质保障,在区域水资源调查与地下水环境保护中同样具有重要意义。通过融合遥感监测、地下水位数据、水文气象数据、地下水化学成分等信息,可以实现地下水系统的综合诊断与动态评估。

以京津冀地下水超采治理为例,研究团队通过多源遥感时序图像分析植被退化与地面沉降趋势,叠加地下水监测井数据与历史开采记录,构建了地下水位变化时空分布图,并借助 MODFLOW 模型进行地下水流场模拟,为政策制定提供了可量化的技术支撑。在该项目中,融合后的判断结果成功识别出“重点压采区”与“水源涵养区”的边界,有效优化了地下水调控方案^[4]。

在信息化技术迅猛发展的背景下,如何将信息化技术与工勘察质量管理相融合,如何将全面质量管理理论充分应用到工程勘察质量管理,如何有效地推进工程勘察质量信息化管理,进而探索工程勘察质量信息化管理系统的构建、运行与实证分析已迫在眉睫。水文地质领域同样面临着这一转型压力。融合技术的实践应用推动了水文地质勘察由传统“点状判断”向“系统建模”转变,逐步构建起“空-天-地-人”一体化的多维感知与决策系统。

不仅如此,随着国家对生态文明建设的重视,多源数据融合还被应用于地下水污染源识别与风险预警中。例如在某重工业城市地下水污染调查中,融合遥感热异常、水质监测、地电断层数据与历史工业布局图,成功定位多个地下污染源点,并预测污染羽状体扩散方向,为污染治理和水源保护提供科学依据。该实践不仅降低了人工钻探成本,也提高了污染防控效率^[5]。

总体来看,融合技术在典型水文地质场景中的广泛适用性、良好精度与显著成本效益,已经在多个国家级重大项目中得到了充分验证,其集成能力、拓展

潜力与智能化发展趋势,将深刻改变传统地质勘察的工作范式。

4 融合技术推广中的瓶颈、优化策略与发展展望

4.1 当前推广难点与技术瓶颈分析

尽管多源数据融合在水文地质勘察中的优势已被广泛认可,但其在实际工程中的大规模推广仍面临诸多障碍。首先是数据来源分散、标准不统一的问题。地质、水文、遥感、电法、地震等不同数据部门长期各自为政,缺乏统一接口与共享机制,导致融合平台建设存在较高技术门槛与成本壁垒。

其次,软硬件基础设施不健全。部分地方项目仍依赖纸质图件与传统表格系统,缺乏高性能地质建模软件、GPU 加速图像识别平台及大数据分布式处理架构,这些都限制了多源数据的实时交互与动态更新能力。此外,部分从业人员对新技术理解有限,缺乏多学科背景和跨界融合能力,直接影响融合建模的质量与实用性。

在实际工程管理层面,项目招标仍以“最低价中标”为导向,导致单位在编制方案时倾向于采用传统低成本勘察方式,对数据融合与信息化手段重视不足,无法从全生命周期角度认识其长期效益。数据融合需前期投入较大、协作环节复杂,在成本压力之下往往被迫削减或搁置。

4.2 优化策略与未来融合发展路径探讨

面对当前瓶颈,应从政策、技术、管理、人才四方面协同发力,推进多源数据融合技术在水文地质勘察中的深入应用。制度层面,可由行业主管部门统一制定数据标准与接口规范,建设跨区域共享平台,推动“联合勘察”“一张图作业”模式,打破数据壁垒。技术方面,应依托人工智能、大数据、数字孪生等手段,构建“地质云平台”,实现模型动态演化与智能预判;结合遥感、无人机、地质雷达等多源手段,增强系统“感知—识别—判断”能力。

管理上,倡导全过程工程咨询,将信息化管理嵌入项目前期策划,构建“BIM+GIS+地质”一体化平台,实现地质与工程全过程协同。人才方面,鼓励高校开

设“地质信息工程”“勘察数据科学”等交叉专业，培养兼具地质知识与编程能力的复合型工程师，推动技术落地与复制。融合技术将逐步迈向智能化与平台化，未来“天地一体、实时联通”的智能地质信息系统将成为主流，对基础设施高质量建设提供关键支撑。

结论

多源数据融合技术在水文地质勘察领域展现出显著的优势，能够有效提升复杂地质条件下的识别能力、

建模精度和决策效率。融合遥感、地质、电法、钻探等多维信息，不仅改善了传统勘察的局限性，也促进了数据共享与分析模式的升级。当前，我国经济正处于高速增长转向高质量发展的关键时期。基于工程勘察作为我国工程建设的重要环节，推动勘察信息化、智能化已势在必行。未来应加强标准体系建设、跨学科人才培养与信息化基础平台建设，助力工程勘察行业向高质量、数字化方向发展，为重大工程提供更加可靠的地质保障支撑。

参考文献

- [1]张世殊,杨为民,秦念稳,等.超深埋隧道地质信息透明化技术研究现状[J/OL].地下空间与工程学报,1-15[2025-07-05].
- [2]刘洪江.基于多源遥感的滑坡早期识别与滑坡风险评估研究[D].安徽理工大学,2024.
- [3]李松.基于多源数据融合的覆盖型岩溶塌陷智能监测与预警技术[D].重庆交通大学,2024.
- [4]康恩胜.降雨渗流排土场边坡损伤电阻率变化特征研究与失稳预测[D].内蒙古科技大学,2024.
- [5]李欣.济南地铁建设对地质环境的影响机制及风险决策研究[D].山东大学,2024.