

# 岩溶地区工程地质勘察难点及应对策略研究

王仁 梁翔宇 邢耀文

广西珠委南宁勘测设计院有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17190

**[摘要]** 本文系统阐述了岩溶地区工程地质勘察的核心难点,包括岩溶形态的复杂性与隐蔽性、土洞与地面塌陷的突发性、地下水系统的动态耦合效应以及勘察技术手段的局限性。在此基础上,深入探讨并提出了一套多维度、全过程的综合应对策略:在理念上,强调全生命周期风险管理和地质概念模型构建;在方法上,倡导多源信息融合与多尺度协同勘察;在技术上,重点论述了高密度电法、地质雷达、微动探测、三维激光扫描等物探新技术的应用优势与集成模式,并结合钻探、原位测试进行验证;在成果表达上,提倡从传统二维图纸向三维地质建模与BIM/CIM平台集成的转变。研究表明,唯有采用系统化、精细化、智能化的综合勘察方法,才能有效破解岩溶地区的勘察难题,为重大工程的安全建设和长期运营提供坚实的地质依据。

**[关键词]** 岩溶; 工程地质勘察; 勘察难点; 应对策略; 综合物探; 三维地质建模

**中图分类号:** P642.25 **文献标识码:** A

## Research on Difficulties and Countermeasures in Engineering Geological Investigation in Karst Areas

Ren Wang Xiangyu Liang Yaowen Xing

Guangxi Zhuwei Nanning Survey, Design and Research Institute Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper systematically elaborates on the core difficulties of engineering geological investigation in karst areas, including the complexity and concealment of karst morphology, the suddenness of soil caves and ground collapse, the dynamic coupling effects of groundwater systems, and the limitations of investigation technical methods. On this basis, a multi-dimensional and full-process comprehensive response strategy is deeply discussed and proposed: conceptually, emphasizing full lifecycle risk management and the construction of geological conceptual models; methodologically, advocating for multi-source information fusion and multi-scale collaborative investigation; technically, focusing on the application advantages and integration models of new geophysical prospecting technologies such as high-density electrical method, ground-penetrating radar, microtremor survey, and 3D laser scanning, combined with drilling and in-situ testing for verification; in terms of result expression, promoting the transition from traditional two-dimensional drawings to 3D geological modeling and integration with BIM/CIM platforms. Research shows that only by adopting systematic, refined, and intelligent comprehensive investigation methods can the challenges of investigation in karst areas be effectively resolved, providing a solid geological basis for the safe construction and long-term operation of major projects.

**[Key words]** Karst; Engineering Geological Investigation; Investigation Difficulties; Countermeasures; Comprehensive Geophysical Prospecting; 3D Geological Modeling

### 引言

岩溶又称喀斯特,是可溶性岩石在水溶蚀、侵蚀下形成独特地貌与水文地质现象的总称。全球分布广泛,中国西南、华南及部分华北地区构成世界最大、最复杂的岩溶区之一。国家基建推进,众多重大工程需穿越或坐落于岩溶发育区。但岩溶地质环

境特殊复杂,内部结构非均质连续,充满溶洞等地质体,空间分布不规则、随机且隐蔽。第四系松散土层常因地下水活动形成土洞,诱发地面塌陷,威胁地表构筑物。其“看不见、摸不着、变化快”的特性,让传统勘察方法力不从心,易致勘察偏差,引发设计失误、施工事故等。所以,剖析岩溶勘察难点、探索应对策略,

是学科发展所需,更是保障重大工程安全、促进区域可持续发展的迫切要求。

## 1 岩溶地区工程地质勘察的核心难点

### 1.1 岩溶形态的极端复杂性与空间隐蔽性

岩溶形态千变万化,从微观的溶孔、溶隙到宏观的巨型溶洞、地下暗河系统,尺度跨越数个数量级。其空间展布受控于原始岩性、构造裂隙、古地貌、水动力条件等多种因素,呈现出强烈的各向异性和非均质性。一个看似完整的岩体下方,可能隐藏着巨大的空腔;而一个已知的溶洞,其延伸方向、连通关系也难以预测。这种复杂性直接导致勘察点代表性严重不足,有限的钻孔或探井只能获取离散的“点”信息,无法有效控制“面”乃至“体”的岩溶发育规律,常常出现“一孔之隔,天壤之别”的情况。此外,溶洞、溶隙的边界往往呈犬牙交错状,与完整基岩之间没有清晰的界限,这不仅增加了岩体完整性评价的难度,也使得地基承载力计算缺乏可靠依据,给工程设计带来极大不确定性。

### 1.2 土洞发育与地面塌陷的突发性和难预测性

在覆盖型岩溶区,地下水在基岩面附近运移时,会不断潜蚀、搬运上覆土层中的细颗粒,久而久之在土层中形成空洞,即土洞。土洞的形成是一个缓慢的渐进过程,但其失稳塌陷却往往是瞬间发生的。这种突发性源于土洞顶板稳定性临界状态的难以判定。土洞顶板的厚度、强度与其上方荷载之间存在一个微妙的平衡,而降雨、地下水位骤降、人工抽水、振动荷载(如打桩、爆破、重型车辆通行)等外部扰动都可能打破这一平衡,触发塌陷。然而,精确评估土洞的稳定性及其临界触发条件极为困难<sup>[1]</sup>。更棘手的是,由于土洞位于地下,常规的地表监测手段(如水准测量)往往在塌陷发生前难以捕捉到明显的前兆信息,导致预警窗口期极短甚至为零,使得地面塌陷灾害具有极强的不可预见性和破坏性。

### 1.3 地下水系统的动态耦合效应

岩溶地区的地下水系统是驱动岩溶发育和诱发灾害的核心动力,它与工程活动之间存在着复杂的动态耦合关系。工程施工(如基坑开挖、隧道掘进)会显著改变原有的地下水渗流场,而水位的快速变动又会反过来影响工程安全。例如,水位的快速下降可能导致浮托力消失,使原本被水支撑的溶洞顶板或土洞顶板因自重而失稳;反之,水位的上升则可能增加静水压力,诱发新的渗透破坏。同时,岩溶含水层通常具有管道-裂隙-孔隙三重介质特征,水流路径迂回曲折,补给、径流、排泄关系异常复杂。准确查明地下水流向、流速及与地表水体的水力联系,对于评估施工降水方案、防止突涌水事故至关重要,但在实际操作中,受制于探测技术和场地条件,这一目标的实现难度极大,成为制约勘察精度的关键瓶颈。

### 1.4 传统勘察技术手段的固有限局性

面对上述复杂的地质问题,传统的单一勘察手段暴露出明显的不足。钻探虽被视为获取直接地质信息的“金标准”,但其成本高昂、效率低下,且只能提供一维柱状信息。在岩溶区,钻

孔极易因遇到溶洞或破碎带而发生偏斜、卡钻、漏失,甚至掉入空腔,不仅数据获取困难,还可能因钻孔本身成为新的渗流通道而干扰甚至恶化场地原有的水文地质条件。另一方面,地球物理勘探(物探)虽能提供二维或三维的连续剖面信息,但其反演结果存在固有的多解性。例如,低阻异常可能是充水溶洞、富水带,也可能是软弱夹层或破碎带;高阻异常则既可能代表完整基岩,也可能对应干燥的孤石。若缺乏有效的地质约束和后续的钻探验证,物探解释极易产生误判,从而将勘察工作引入歧途。

## 2 岩溶地区工程地质勘察的综合应对策略

针对上述难点,必须摒弃单一、静态、被动的勘察思维,转向系统化、全过程、多技术融合的综合勘察模式。

### 2.1 理念革新:全生命周期风险管理与地质概念模型构建

勘察工作不应止步于施工图设计阶段,而应贯穿于工程选址、可行性研究、初步设计、详细设计、施工乃至运营维护的全生命周期。不同阶段,勘察的目标、精度和侧重点应有所不同,形成一个动态反馈、不断深化的认知过程。例如,在可研阶段,重点在于区域岩溶发育分区与重大灾害风险识别;而在详勘阶段,则需聚焦于基础持力层评价与局部溶洞处置方案支撑。在此基础上,构建地质概念模型(Geological Conceptual Model, GCM)成为综合勘察的核心环节。GCM并非简单的资料汇编,而是基于对区域构造格架、地层岩性组合、古地理演化、水文地质单元等多要素的综合分析,对场地岩溶发育的主控机制进行逻辑推演,并据此预测潜在岩溶形态的空间分布规律<sup>[2]</sup>。这一模型不仅整合了现有认知,更重要的是为后续的勘察方案优化、物探方法选择、钻探布设及风险评估提供了统一的逻辑框架和科学假设,是连接宏观区域背景与微观场地细节的桥梁。高质量的GCM能够显著提升勘察工作的靶向性和经济性,避免盲目布孔和资源浪费。

### 2.2 方法优化:多源信息融合与多尺度协同勘察

为了克服单一信息源的片面性,必须充分利用一切可获得的信息,包括1:5万或更大比例尺的区域地质图、水文地质图、历史地面塌陷记录、地方志中的灾害记载、高分辨率卫星影像(如WorldView、Sentinel系列)以及既有邻近工程的勘察报告等。特别是近年来广泛应用的无人机倾斜摄影测量技术,不仅能快速获取厘米级正射影像,还能生成高精度数字表面模型(DSM)和数字高程模型(DEM),通过地形纹理和微地貌特征(如封闭洼地、线性沟槽、疑似落水点)的自动识别与解译,高效圈定岩溶发育的宏观靶区。在此基础上,实施多尺度协同勘察策略。首先,在宏观尺度上,通过区域资料分析和遥感解译,把握岩溶发育的总体格局和分区特征;其次,在中观尺度上,采用大面积、高效率的物探方法进行普查,例如沿拟建线路或建筑群布设测线间距10-20米的高密度电法或音频大地电磁法(AMT)剖面,以经济高效地圈定电阻率异常区;最后,在微观尺度上,于物探圈定的异常区内加密布置验证性钻孔(孔距可缩小至5-10米),并辅以高精度、小范围的物探手段进行详查。例如,在基坑或桩基位置,可采用中心频率为100-200 MHz的地质雷达进行浅层扫

描,有效识别3-15米深度内的土洞或基岩面起伏;对于城市敏感区,则可布设微动台阵,通过H/V谱比法或空间自相关法反演S波速度结构,无损探测深部岩溶。这种由面到点、层层递进的精细化勘察模式,能最大限度地提高勘察成果的可靠性与工程适用性。

### 2.3 技术集成: 先进物探技术的应用与验证体系

现代物探技术的发展为破解岩溶勘察难题提供了强大工具,关键在于如何根据地质概念模型选择合适的技术参数并建立闭环的验证体系。高密度电阻率法在装置选择上,温纳-施伦贝谢混合装置兼顾探测深度与分辨率,适用于大多数覆盖型岩溶区;数据采集时,电极间距(a)通常取目标体埋深的 $1/3-1/2$ ,以保证成像精度。地质雷达在岩溶勘察中,其探测效果受土层含水量和电导率影响显著,干燥砂性土中效果最佳,而在高含水黏土中衰减迅速,因此需结合现场条件灵活调整天线频率与采集方式<sup>[3]</sup>。微动探测的优势在于其被动源特性,特别适合在强电磁干扰的城市环境或生态保护区开展工作,通过布设圆形或十字形台阵,可反演地下0-100米范围内的横波速度( $V_s$ )剖面,其中 $V_s < 800\text{m/s}$ 的区域常指示破碎带或溶洞填充区。对于已揭露的大型溶洞或勘探竖井,可采用地面式或井下式三维激光扫描仪(如Faro Focus或Leica BLK系列),获取包含数百万个点的高密度点云数据,经去噪、配准和建模后,可精确计算溶洞体积、表面积及顶板曲率等地形参数,为数值模拟和支护设计提供几何基础。然而,任何物探成果都必须通过钻探、探井等“点”信息来验证。应严格遵循“物探先行圈异常、钻探验证定性质、再指导加密物探”的迭代原则。在关键控制性钻孔之间,可开展跨孔电阻率CT或地震CT,通过发射-接收对的交叉观测,重构孔间介质的物理属性分布,实现从“点-线”到“面-体”的跨越。此外,孔内综合测井(如自然伽马、声波、井径、视频)也是不可或缺的验证与补充手段,能精细刻画钻孔揭露段的岩溶充填特征与裂隙发育程度,从而构建完整的“空-天-地-孔”一体化勘察技术链。

### 2.4 成果表达: 从二维图纸到三维地质建模与智慧平台

传统的二维剖面图和平面图难以直观、全面地表达岩溶体错综复杂的三维空间关系,容易造成信息传递的失真和理解的偏差。因此,现代勘察成果亟需向更高维度发展。利用专业的三维地质建模软件(如GOCAD-SKUA、Leapfrog Geo或国产的“透明岩土”平台),将所有离散的勘察数据——包括钻孔柱状图、物

探反演剖面、原位测试数据、地质解释边界等——进行标准化处理与空间插值,构建具有真实坐标系的、可交互的三维地质结构模型。该模型不仅能直观展示溶洞、断裂、风化分带、地下水位面等关键地质要素的空间位置、形态和拓扑关系,还可支持任意方向剖切、透明度调节、属性查询及体积计算等功能,极大地提升了地质信息的表达能力和工程决策支持水平<sup>[4]</sup>。更进一步,将这一三维地质模型作为核心数据层,通过IFC或CityGML等标准格式,无缝集成到建筑信息模型(BIM)或城市信息模型(CIM)平台中。在此数字孪生环境中,结构工程师可以直观看到桩基是否穿越溶洞、隧道掘进面前方是否存在充水腔体,施工管理人员可据此制定超前地质预报方案和应急预案。这种深度融合实现了真正的“地质先行、数字驱动”,不仅能优化设计方案、规避重大风险,还能为工程全生命周期的智慧运维提供动态、可视化的地质底座,标志着工程地质勘察从经验判断迈向数据智能的新阶段。

## 3 结语

岩溶地区工程地质勘察极具挑战,其难点在于岩溶地质体复杂、隐蔽、动态且不确定。应对挑战不能依赖单一技术方法,需系统化、综合化策略。本文策略体系涵盖理念革新,如全生命周期风险管理、GCM构建;方法优化,如多源信息融合、多尺度协同;技术集成,如先进物探应用与验证;成果表达,如三维建模与智慧平台。未来,岩溶勘察技术将更智能、精准、实时,AI和ML技术有望自动处理数据、识别异常和预测风险;新型监测技术可长距离、实时监测地下水和岩体变形;数字孪生技术深度应用将推动地质风险管理智能化。持续推动技术创新与多学科融合,是破解岩溶难题、服务国家战略的必由之路。

### [参考文献]

- [1] 苟建强.岩溶地区工程地质勘察施工技术应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(19):117-119.
- [2] 李明,梁灿英.岩溶地区工程地质勘察方法探讨[J].四川建筑,2024,44(06):168-169+174.
- [3] 李重阳.岩溶地区工程地质勘察手段及应用探讨[J].内蒙古煤炭经济,2022,(03):187-189.
- [4] 吕杰.岩溶地区工程地质勘察关键技术研究[J].科技创新与应用,2021,11(16):154-156.