工程物探技术在岩溶区工程勘察中的应用分析

黄政敏

（深圳市爱华勘测工程有限公司，广东 深圳 518100）

摘 要 岩溶区地质条件复杂，隐伏溶洞与土洞发育具有极强的不确定性和隐蔽性，传统勘察手段难以全面把控工程风险。本文系统梳理了地震波法、电法、重力磁法及井中物探等技术的基本原理，结合覆盖型岩溶与深埋岩溶的不同特征，分析了多方法联合探测在溶洞定位、塌陷预警、岩溶水探查及重大工程专项勘察中的实际应用效果。结果表明，综合运用多种物探技术，辅以钻探验证，能够有效揭示岩溶发育规律，显著提升勘察成果的可靠性，为岩溶区工程设计与施工安全提供科学决策依据。

关键词 工程物探技术；岩溶区；工程勘察

中图分类号：P631；TU412 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.017

0 引言

我国岩溶分布范围广，随着基础设施建设向山区、复杂地质环境延伸，岩溶问题成了制约工程安全和造价的主要因素。岩溶形态多变，空间分布随机，很容易造成地基不均匀沉降、地面塌陷和隧道突水等重大地质灾害。传统的钻探手段受点状控制的影响，不能很好地体现岩溶的空间分布情况，并且成本很高。工程物探技术由于具有对地下介质物性差异敏感、大面积连续探测的特点，成为岩溶勘察的主要方法。研究各种物探技术在岩溶区的应用情况以及改进措施，对提高勘察质量具有重大的现实意义。

1 岩溶发育的基本特征

岩溶发育受到地层岩性、地质构造和水文条件的共同影响，具有明显的时空不均匀性。可溶岩灰岩、白云岩、石膏等是岩溶发育的物质基础，纯度高、厚度大的岩溶化程度就越高。构造断裂带、褶皱轴部由于岩石破碎、透水性增加，常常成为地下水的优势径流通道，从而形成沿构造线延伸的串珠状溶洞或者暗河系统。地表形态上溶沟、石芽、峰林、洼地等广泛发育，地下有形态各异的溶洞、溶隙、地下河，部分地区可见大型厅堂式空洞。岩溶的垂直分带性十分明显，近地表受大气降水垂直入渗的影响，发育竖向溶蚀裂隙，向深部逐渐过渡为水平溶洞带，反映不同的地质时期基准面的变化。另外，覆盖型岩溶区普遍存在着土洞和上覆土体塌陷的情况，隐伏性较强，会对工程地基稳定性造成一定的威胁。岩溶形态多样、空间分布随机，使地质条件的连续性、均一性大打折扣，给工程勘察和灾害防治造成很大困难[1]。

2 岩溶区主要工程地质问题

2.1 地基不均匀沉降与失稳

岩溶区地基稳定性问题的关键之处在于岩体强度极度不均，因为溶洞、溶隙在空间上是无规律分布的，致使建筑荷载传递路径变得繁杂。当基础底面下存在没有探明的溶洞时，上覆岩土层由于应力集中而产生剪切破坏，造成局部塌陷。尤其在覆盖型岩溶区，由于隐伏溶洞顶板厚度和完整性差别很大，同一个建筑基础内，也可能会存在一部分处在完整基岩之上、一部分悬空在空洞之中的极端状况。地基刚度突然变化会造成建筑物差异沉降，轻者造成墙体开裂、设备倾斜，重者造成结构整体失稳。另外，岩溶裂隙的发育使岩体变得各向异性，桩基施工过程中容易出现掉钻、卡钻或者灌注混凝土大量流失的情况，大大提高了工程造价，也加大了单桩承载力的离散性，严重影响上部结构的安全储备。因此查明隐伏岩溶的空间分布规律，是保证地基处理方案科学合理的基础。

2.2 岩溶塌陷与突水灾害

岩溶塌陷属于岩溶区最具有突发性的地质灾害，在人类工程活动比较强烈的地区更为常见。其形成机制就是土体在水动力的作用下向隐伏溶洞运移，形成土洞，土洞顶板厚度不断减薄，最终造成坍塌。隧道及地下工程施工时，穿越岩溶发育地段容易造成极大的突水、突泥危险。由于岩溶管道系统同区域地下水

作者简介：黄政敏（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：岩土工程。

位有密切关系，一旦施工揭露高压富水溶腔，瞬间释放的巨大水量和水压就会直接危及施工人员的安全，还会造成地表塌陷和周边水源枯竭。水库蓄水之后水位上升，原有的渗流场会改变，进而造成库岸边坡失稳或者库区渗漏。这些灾害一般具有隐蔽性强、突发性高、连锁反应明显等特点，常规的地质测绘很难全面掌握，必须依靠细致的地球物理探测手段来发现微小的物性差别，才能有效地预测和避免这类灾难性的后果[2]。

3 常用工程物探技术原理与方法

3.1 地震波勘探技术

地震波勘探是建立在弹性波在地下介质中传播的物理基础之上的，用人工震源激发产生的压缩波和剪切波，在不同的波阻抗界面发生反射、折射来反演地质结构。在岩溶区的应用上，浅层反射波法利用溶洞和围岩之间明显的波阻抗差别，用地表检波器阵列接收地下界面反射信号，经过数字叠加、偏移归位处理后得到清晰的地下界面成像，可以有效地识别出溶洞顶底板界面以及隐伏断层破碎带。多道瞬态面波法通过分析瑞雷波的频散特性，反演得到剪切波速度剖面，对于充填软土、泥沙的溶洞和发育中的土洞有明显的低速异常，灵敏度很高。微动勘探是利用天然场地的环境振动噪声，得到高信噪比的瑞雷波信号，特别适合于城市强干扰环境下隐伏岩溶的探测。地震波法探测深度大、横向分辨率高，可以给岩溶区地基稳定性评价提供重要的岩土力学参数，但是成果解释要紧密结合地质资料，才能有效降低多解性带来的误判风险[3]。

3.2 电法勘探技术

电法勘探以岩土介质的电性差别为探测基础，观测、研究人工建立的地电场分布规律来推断地下地质体的结构和性质。高密度电阻率法用密集的电极阵列一次采集大量的数据，然后通过计算机反演得到二维或者三维的电阻率成像，在岩溶勘察中效果最好。完整的灰岩一般呈高电阻率特征，充水溶洞由于含有大量的离子溶液而形成明显的低阻异常，充填的黏土或者砂砾形成的土洞呈中低阻特征，因此可以清楚地刻画出溶洞的形态、大小和空间分布规律。地质雷达发射高频电磁波，利用介电常数的不同产生的反射波来探测浅部岩溶，对埋深几十米内的土洞、溶隙和空洞有很高的分辨率识别能力，常用于路基、隧道衬砌和建筑场地浅层的精细化扫描。可控源音频大地电磁法用人工可控的电磁场源进行探测，探测深度可达数千米，可以识别深部断裂构造和岩溶水富集带，给水利工程坝基渗漏通道探测提供深部电性结构依据，是深部岩溶勘察的重要方法。

3.3 重力与磁法勘探技术

重力勘探是根据岩石密度不同而进行物探的一种方法，用高精度重力仪测量地表重力场的细微变化，来推测地下密度界面的变化以及地质体的分布情况。岩溶区石灰岩等碳酸盐岩密度一般大于充填沉积物或者空气，大型溶洞或者地下暗河会产生明显的重力低值异常，布设高精度的重力测网并做严格的地形校正，就能圈定出溶蚀洼地、地下暗河管道和大型溶洞的分布范围，特别适合于区域岩溶发育规律的调查与评价。磁法勘探是利用岩矿石磁性不同，观测地磁场微小变化来识别地质构造的方法，虽然碳酸盐岩本身磁性较低，但是岩溶充填物如含铁锰质黏土、火山岩碎块或者热液蚀变矿物可能会引起局部磁异常，从而辅助判断溶洞的充填情况和构造背景。重力、磁法勘探对深部大体积地质体探测效果好，但是分辨率低，一般用作区域普查的方法，需要和地面高精度物探方法相结合，才能大大提高岩溶地质解释的可靠性、准确性[4]。

3.4 井中物探技术

井中物探就是在钻孔内部进行地球物理探测的工作，是联系地面物探宏观探测和钻探微观验证的技术纽带。钻孔电视依靠光学成像系统实时获取孔壁图像，可以清楚地显示溶隙发育的密度、走向和充填情况，很好地填补了钻探取芯时岩芯缺失或者破碎所造成的信息真空。井下雷达把高频电磁波天线放入钻孔里，向井周岩体发出信号并接收反射波，探测钻孔周围几米到几十米范围内的隐伏溶洞和破碎带，克服了单孔钻探只能得到一维地质信息的局限性。跨孔CT技术对一对或多对钻孔进行穿透式扫描，用发射声波或者电流场信号，利用层析成像技术重建孔间剖面的波速或者电阻率分布，可以准确地勾画出孔间岩溶发育带的连通性和空间形态。井中物探数据同地面物探成果深度整合，可以创建起高精度的三维地质模型，给复杂岩溶场地的地基处理改良，隧道支护规划以及地质灾害风险评定提供精细的地质支撑，是现代岩溶勘察不可缺少的重要部分。

4 工程物探技术在岩溶区工程勘察中的应用

4.1 隐伏溶洞与岩溶裂隙精准定位

工程物探技术对于识别隐伏溶洞有明显的优势，可以很好地克服钻探点状控制的不足。在岩溶强发育区，高密度电阻率法建立地下二维电阻率断面，清楚地显示低阻充水溶洞和高阻完整灰岩的界线，正确地确定溶洞的平面分布范围和埋藏深度。对于浅部土洞和溶蚀裂隙，地质雷达由于高频电磁波的高分辨率，可以得到厘米级的界面反射信号，清楚地显示洞体形

状和顶板厚度。对深层构造控制的岩溶发育带来说，音频大地电磁法凭借低频电磁场的大穿透深度，较好地找出深部断裂破碎带和它所伴随的溶蚀空隙。实际应用时一般会用到多种方法联合探测，即先用电磁法圈定深部异常区，再用浅层地震或者高密度电法做精细扫描，最后用少量钻孔来验证，这样就形成了从宏观构造格架到微观溶洞形态的全方位探测体系，大大提高了岩溶地质体的空间定位精度。

4.2 岩溶塌陷隐患早期识别与监测

覆盖型岩溶区土洞发育和地面塌陷具有很强的隐蔽性，物探技术是开展早期预警的主要手段。高密度电法利用定期重复测量可以观测到覆盖层内低阻异常区的变化情况，土体开始向下部溶洞流失形成土洞的时候，视电阻率断面图上会出现明显的封闭低阻圈，这是塌陷前兆的重要判断标准。面波勘探技术对于土体刚度的变化非常敏感，反演剪切波速度剖面可以发现由于潜蚀作用形成的疏松区或者脱空区，这些地方一般会存在明显的低速异常。岩溶地下水开采区用重力勘探长期监测数据，可分析地下水位下降引起土体压密或者空洞扩大的过程。将无人机载遥感和地表微形变监测技术结合起来，利用物探方法从地下物性结构、力学参数、地表形变等各方面建立塌陷风险评价模型，给城市规划、轨道交通选线、既有建筑物安全防护提供科学依据，实现由被动治理向主动预防的转变[5]。

4.3 岩溶水系统探查与水资源评价

岩溶水系统的复杂性要求它的勘查要依靠物探技术。可控源音频大地电磁法对于深部岩溶含水层的探测效果较好，可以利用视电阻率等值线图将相对高导的富水破碎带、低阻的地下暗河通道区分开来。寻找供水水源时，利用激电效应可以区分充水溶洞和干溶洞，因为充水孔隙或者裂隙中的水介质会产生明显的激电异常。对水库坝址区而言，为了查明可能存在渗漏通道的地方，常常会使用伪随机多频复电阻率法，它能同时得到电阻率以及激电相位的信息，对于低阻充水构造有着很高的分辨能力。隧道施工时，红外探水技术依靠地下水的热辐射差别，可以提前察觉到掌子面前方隐藏的隐伏含水体。对物探成果进行综合分析，可绘制出岩溶地下水径流场、划分出富水区、确定出泉点排泄点的位置，为水资源的开发利用、隧道涌水量的预测、防渗帷幕的设计等提供重要的水文地质参数[6]。

4.4 重大工程岩溶专项勘察与超前预报

根据不同的工程类型，物探技术给出相应的解决办法。在桥梁桩基工程中，跨孔声波 CT 技术对相邻的两个孔之间进行透视扫描，可以准确地了解孔间岩溶发育状况，保证桩基处在稳定的完整基岩之上，防止因为邻孔溶洞造成桩基悬空。在隧道工程中，隧道地震波超前预报系统通过掌子面后方激发弹性波，接收前方地质界面反射信号，可以提前百米探测断层、大型溶洞等危险区，给施工安全提供保障。水利水电工程中大地电磁测深技术用来探测坝基深部隐伏断裂和岩溶渗漏通道，保证大坝基础防渗安全。城市轨道交通建设时，地质雷达同面波法联合起来使用，常被用来探测盾构掘进之前存在的孤石、溶洞等隐患，从而避免刀盘受到损害以及地面出现塌陷的情况发生。这些专项物探技术应用到工程规划、设计、施工、运营的全过程之中，大大降低了由于岩溶地质灾害而造成的工程风险和经济损失[7]。

5 结束语

工程物探技术已经成为岩溶勘察的主要手段，多方法联合探测很好地解决了隐伏岩溶的识别问题。现阶段各类物探设备数字化、三维成像技术持续迭代，未来可依托三维地质建模平台整合多源探测数据，构建岩溶空间数字化数据库，为场地稳定性定量评价提供数据支撑。同时，从业人员需持续提升综合解译能力，规避单一物探手段存在的多解性缺陷，建立“物探先行、钻探验证”标准化勘察流程。对地质条件复杂、成果多解的情况还要加强物探和地质模型的耦合，用智能算法提高数据解译精度。只有将技术更新同工程实践紧密融合起来，才能对岩溶风险实施精确控制，保障工程建设全过程安全可控。

参考文献：

[1] 金小川 . 工程物探技术在岩土工程勘察中的运用研究 [J]. 中国高新科技 ,2025(24):85-87.
[2] 马欢跃 . 工程物探技术应用于岩土工程勘察中的价值探究 [J]. 中国金属通报 ,2025(09):201-203.
[3] 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.
[4] 魏巍 , 苑永健 , 崔凯 , 等 . 工程物探在复杂地质岩土工程勘察中的应用 [J]. 四川地质学报 ,2025,45(01):96-100.
[5] 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):164-166.
[6] 李欣 , 冯晖元 , 赵鹏 . 工程物探技术在岩土工程勘察中的应用 [J]. 石材 ,2024(11):87-89.
[7] 焦兴隆 . 浅析工程物探技术在岩土工程勘察工作中的应用要点 [J]. 房地产世界 ,2024(11):146-148.