

岩溶地区综合工程物探技术勘察方法及成果分析

马学东

中石化石油工程设计有限公司 山东 东营 257000

摘要：岩溶地区地质特征独特复杂，对工程建设影响大。综合工程物探技术勘察方法多样，地震勘探可反演地质结构，电法勘探能探测不同深度地质信息，磁法勘探可圈定火成岩体、查明断裂，雷达探测能精准探测岩溶洞穴。勘察成果分析包括数据处理与解释、岩溶发育特征分析、地质构造分析和工程地质评价，通过这些分析可准确评估场地稳定性、地基承载能力和地下水影响，为工程建设提供科学依据，保障工程安全顺利进行。

关键词：岩溶地区；综合工程物探技术；勘察方法；成果分析

引言：岩溶地区因独特地质特征，在工程建设中面临诸多挑战。其地壳运动活跃、岩性多样、水文地质条件复杂，地貌形态丰富，如溶洞、溶蚀谷等广泛分布。这些因素可能引发岩溶塌陷、地基不均匀沉降等问题，严重威胁工程安全。因此，准确勘察岩溶地区地质情况至关重要。综合工程物探技术能有效探测岩溶分布、规模等信息，为工程设计和施工提供科学依据，降低工程风险，保障工程建设的顺利进行和长期稳定。

1 岩溶地区地质特征概述

岩溶地区，又称喀斯特地区，其地质特征独特且复杂，对工程建设、生态环境等方面有着深远影响。从地

质构造上看，岩溶地区地壳运动较为活跃，普遍位于地壳活动带。岩性特征方面，碳酸盐岩是岩溶地区的主要岩石类型，硅质岩如砂岩、石英岩等也有一定分布，虽溶蚀作用较弱，但对岩溶地貌的形成也有贡献。水文地质条件复杂是岩溶地区的显著特点，地下水丰富，流量大且水质好，是生态系统的重要组成部分。其流动性强，水流速度快、路径复杂，这也是岩溶地貌形成的重要因素^[1]。岩溶地区的地貌形态丰富多样，在我国岩溶洞穴总面积约为5.8万平方千米，主要以一下形态特征（如表1）。

表1 岩溶地貌特征

大类	亚类	形态特征	常见规模	工程地质影响
地表岩溶	溶沟	溶蚀的沟槽状凹陷，深度数厘米至数十厘米	宽2-30cm，深5-50cm	影响地基，增加开挖难度
	石芽	溶沟间残留的牙状、刃状凸起岩脊	高0.2-2m	地基不均匀，需爆破清除
	石林	高耸的石芽群，呈柱状、锥状、塔状	高5-30m	大型桩基持力层选择困难
	溶蚀洼地	封闭或半封闭的碟状、盆状凹陷	直径数十至数百米	易积水，地基软弱
	溶蚀漏斗	漏斗状塌陷坑，平面呈圆形或椭圆形	直径5-50m，深2-30m	渗漏通道，塌陷风险高
	天窗	地下河顶部塌陷形成的与地表连通的开口	直径数米至数十米	安全隐患，需特殊处理
地下岩溶	溶洞	地下岩体中形成的空洞，形态多样	小型（< 10m ³ ）至大型（> 10 ⁵ m ³ ）	承载力丧失，塌陷风险
	落水洞	连通地表与地下水的垂直通道	0.5-5m，深数米至百余米	地表水直接渗入，隐患大
	竖井	近垂直的筒状溶蚀通道，较落水洞规模更大	直径3-20m，深20-200m	整体失稳风险
	地下河	地下的流水通道系统，可发育多层	长度数公里至百余公里	涌水、突泥风险高
	溶蚀裂隙	沿节理、层面发育的张开裂隙	宽数毫米至数十厘米	渗漏通道，岩体完整性差
	岩溶管道	地下水的集中径流通道，常呈管状	直径0.1-2m	

2 岩溶地区综合工程物探技术勘察方法

2.1 地震勘探方法

岩溶地区地质条件复杂，地震勘探方法在该地区综合工程物探技术勘察中发挥着重要作用。地震勘探主要

是利用不同介质波速差异进行勘探，主要方法有地震波CT层析成像技术、井间超声波层析成像技术、瑞雷波面法、地震折射波法、地震散射剖面法等（如表2）。

表2 地震法勘探介绍与对比

具体方法	基本原理	探测深度	主要优势	典型局限性	探测目标
地震波CT层析成像	利用人工震源激发地震波，通过井间或井地间波速差异反演介质结构	20~200m (井间距)	成像直观，精度高，可获取速度分布图	需钻孔配合，成本较高，现场布设复杂	精细探测溶洞、破碎带、岩溶管道空间形态
井间超声波层析成像	井间发射/接收超声波，利用声波走时或振幅衰减成像	10~100m	分辨率极高，可识别小规模溶洞及充填物性质	要求钻孔内耦合良好，受气泡、泥浆影响大	桩基、隧道等关键部位岩溶精确定位
瑞雷波面波法	利用面波（瑞雷波）在层状介质中的频散特性反演剪切波速度结构	5~30m	快速、无损，抗干扰能力强，适应复杂地表	探测深度较浅，对横向变化敏感度一般	浅层覆盖层划分、土洞、浅部溶蚀带探测
地震折射波法	记录折射波初至时间，利用折射界面深度与波速关系解释地层分层	10~80m	能准确划分覆盖层/基岩界面，效率较高	存在“隐蔽层”问题，对低速夹层不敏感	确定风化层厚度、基岩面起伏、溶蚀凹槽
地震散射剖面法	检测非均匀体（如溶洞、裂隙）产生的散射波场，成像地质异常体	0.5~20m	不损坏路面，对交通影响极小，识别孤立异常体能力强	探测深度浅，数据处理较复杂	城市地铁、道路下方的浅部溶洞、土洞、脱空

2.2 电法勘探方法

在岩溶地区综合工程物探技术勘察中，电法勘探是

利用不同地层电性差异进行勘探，主要是低电变化特征

进行异常点划分，主要有高密度电法、大地电磁测深法、激发极化法、瞬变电磁法。可控源音频大地电磁法

等（如表3）。

表3 电法勘探介绍与对比

具体方法	基本原理	探测深度	主要优势	典型局限性	探测目标	方法大类
高密度电法	多电极阵列供电测量，获取地下电阻率断面	20~150m	中~高（米级）	信息量大，层析成像，对充填型溶洞敏感	地形起伏影响大，需良好电极接地	普查岩溶发育带、溶洞、破碎带、土洞
大地电磁测深法	利用天然电磁场，测量地表正交电场/磁场分量，反演深部电性结构	100m~数km	低（十米~百米级）	探测深度大，无需人工源，不受高阻层屏蔽	分辨率低，受工业干扰影响大	深部岩溶发育规律、基底构造、地热资源
激发极化法	测量二次极化电位，获取极化率、半衰时等参数	20~100m	中（数米级）	可区分溶洞充填物（粘土/水/空气）性质	受地表电磁干扰大，解释多解性强	判断溶洞充填状态、富水性、泥化程度
瞬变电磁法	脉冲磁场激发，测量二次场衰减曲线，获取视电阻率	30~300m	中（米~十米级）	对低阻（充水溶洞）反应灵敏，高阻覆盖穿透力强	浅部盲区（<10m），对高阻空洞不敏感	深部充水溶洞、地下河、富水断裂带
可控源音频大地电磁法（CSAMT）	人工可控频率源，测量卡尼亚电阻率，频率测深	50~1500m	中（十米级）	探测深度大，分辨率优于MT，抗干扰较强	近场效应影响，设备昂贵，数据处理复杂	深部岩溶管道、隐伏断裂、地热构造

2.3 磁法勘探方法

在岩溶地区综合工程物探技术勘察中，磁法勘探方法

独具优势且发挥着重要作用，它利用各种岩（矿）石间的

磁性差异所引起的磁场变化来查明地下地质构造的物探方法，磁法勘探一般分为地面磁测和航空磁测两种，另外地质雷达也是一种光伏应用的电磁技术（如表4）。

表4 磁法勘探介绍与对比

具体方法	基本原理	探测深度	主要优势	典型局限性	探测目标	方法大类
地面/航空磁测	测量地磁场总场或垂直分量，分析磁性体引起的磁异常	数米~数km（取决于目标磁性规模）	低（数十~百米级）	能快速圈定火成岩体、隐伏断裂、热液蚀变带	对非磁性岩溶本身不直接响应，属间接勘探	推断控岩控溶构造、地热异常区、岩浆岩分布
地质雷达（含桩孔雷达）	发射高频电磁波，接收反射回波，记录双程走时	0.5~30m（高阻介质可更深）	很高（厘米~分米级）	分辨率极高，图像直观，无损快速	受导电层（粘土、高矿化水）强烈衰减	浅层溶洞、土洞、裂隙、管道精细定位

3 岩溶地区综合工程物探技术勘察成果分析

3.1 数据处理与解释

在岩溶地区综合工程物探技术勘察中,数据处理与解释是至关重要的环节,它直接关系到对勘察成果的准确理解和应用。(1)数据预处理。对采集到的原始数据进行初步处理,包括去除噪声、校正误差等操作,以提高数据的质量和可靠性,为后续的深入分析奠定基础。

(2)异常识别。通过对处理后的数据进行分析,识别出可能存在的异常区域。这些异常可能与岩溶洞穴、断裂带等地质构造相关,是判断地下地质情况的重要线索。

(3)模型建立。根据物探数据和地质信息,建立合适的地质模型。模型可以直观地展示地下地质结构,帮助工程师更好地理解岩溶地区的地质特征,为工程设计提供依据。(4)成果验证。将物探成果与其他地质资料进行对比和验证,如钻探数据、地质测绘结果等。通过多源数据的相互印证,提高勘察成果的准确性和可信度。

(5)报告编制。将数据处理与解释的结果整理成详细的报告,包括物探方法、数据处理过程、异常分析、地质模型等内容。报告应清晰、准确地呈现勘察成果,为工程决策提供全面的信息^[2]。

3.2 岩溶发育特征分析

岩溶发育特征分析是岩溶地区综合工程物探技术勘察成果分析的关键部分,能为工程建设提供重要依据。从空间分布看,岩溶在水平和垂直方向上都有特定规律。水平方向上,岩溶可能呈条带状、片状分布,与地质构造、地层岩性密切相关,如断层附近岩溶往往更发育。垂直方向上,不同深度岩溶发育程度不同,浅层岩溶受地表水溶蚀影响大,深层岩溶则与地下水活动有关。岩溶形态多样,常见有溶洞、溶蚀裂隙、溶槽等。溶洞大小不一,小的仅几立方米,大的可容纳数千人^[4]。溶蚀裂隙宽窄不同,影响着岩体的完整性和稳定性。溶槽则多分布在地表或近地表,会改变地形地貌。岩溶发育还受多种因素影响,地层岩性方面,碳酸盐岩等可溶性岩石是岩溶发育的物质基础。地质构造上,断裂、褶皱等会增加岩石的透水性,促进岩溶发育。气候条件中,降水丰富、气温较高的地区,岩溶作用更强烈。通过对岩溶发育特征的分析,能准确评估其对工程的影响,为工程规划、设计和施工提供科学指导,降低工程风险^[3]。

3.3 地质构造分析

在岩溶地区综合工程物探技术勘察成果分析里,地

质构造分析是明确地下地质情况、评估工程稳定性的重要步骤。(1)断层识别。利用物探数据中的异常特征,如地震波的反射、折射异常以及电法勘探中的电阻率突变等,来精准识别断层的位置、走向和规模。断层的存在可能会破坏岩体的完整性,增加工程建设风险。

(2)褶皱构造分析。通过分析地层的形态和产状变化,判断褶皱的类型和发育程度。褶皱构造会影响岩石的应力分布,对工程基础的稳定性产生影响,在工程设计中需要充分考虑。(3)节理裂隙研究。节理裂隙是岩溶发育的重要通道,通过物探方法确定其密度、方向和连通性。这有助于了解地下水的运移规律,以及岩溶洞穴的形成和分布情况,为工程防水和地基处理提供依据。

(4)地层接触关系判断。明确不同地层之间的接触方式,如整合接触、不整合接触等。这对于了解地质演化历史和地层的稳定性至关重要,在隧道、桥梁等工程建设中,地层接触关系会直接影响工程的选址和设计。

(5)构造应力场分析。结合地质构造特征和物探数据,推断构造应力场的方向和大小。构造应力会影响岩体的力学性质,对工程结构的安全性有重要影响,在工程设计中需要合理考虑构造应力的作用。

结语:未来,面对岩溶地区复杂地质条件下的工程建设需求,持续优化物探技术、提高勘察精度与效率迫在眉睫。一方面,需对现有地震、电法、磁法及雷达等物探技术进行深度改良,借助新技术提升数据采集与处理能力,让探测结果更精准。另一方面,强化多物探方法的综合运用,发挥不同方法优势,实现信息互补,全面且深入地掌握地质情况。如此一来,能为岩溶地区工程建设规划、设计与施工提供更可靠依据,有效规避潜在风险,切实保障工程在复杂地质环境下的安全与稳定。

参考文献

- [1]包勇春.岩溶地区岩土工程勘察中溶洞发育规律及稳定性评价方法[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2026(2):034-037.
- [2]仇国庆.岩溶地区住宅项目工程地质勘察技术研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(3):045-048.
- [3]于佳.岩溶地区水平定向钻穿越地质勘察技术方法探析[J].中国科技期刊数据库工业A,2025(9):054-057.
- [4]王迎法,许汉华,牟儒,卢江.综合勘察方法在岩溶区桥梁勘察中的应用分析[J].江西建材,2023(1):170-171+174.