

岩溶地区综合地球物理探测技术应用研究

齐 坤 龔伊博 李 恒

河南省地质局矿产资源勘查中心 河南 郑州 450000

摘 要：岩溶地区地质灾害与工程地质问题频发，精准探测岩溶发育特征与空间分布是工程建设与灾害防治的关键。单一地球物理方法受岩溶地质条件复杂性与地球物理场多解性制约，难以满足高精度探测需求。本文系统分析岩溶地区地质特征及其地球物理前提，评述高密度电法、探地雷达、地震勘探、瞬变电磁法等常用探测技术的适用性与局限性，提出基于优势互补的综合地球物理探测技术体系，探讨多源数据融合与联合反演策略，并总结方法优化与地质解释的技术要点。

关键词：岩溶地区；综合地球物理探测；高密度电法；探地雷达

引言

碳酸盐岩分布广，在我国岩溶地区占国土面积的三分之一以上，而以西南最为典型。岩溶易造成坍塌、地基不稳定以及突发性涌水等地质灾害，准确查明其位置、范围及其充填情况非常重要。而由于地球物理探测具有非接触、高效等特点，因此目前已成为主要手段，然而单一地球物理探测方法却存在局限性：电阻率法受到地形影响较大，探地雷达探测深度较浅，地震法难以分辨小型溶洞，瞬变电磁容易受到外界干扰。更重要的是从物理上讲，地球物理反演存在多解性问题，不同的模型可以得到相同的结果，从而造成解释的不确定性。而综合地球物理探测是通过对多种方法进行联合运用、多参数约束，利用各种物理场的不同响应来扬长避短，减少多解性和提高精度的一种有效途径。

1 岩溶地区地质特征及其地球物理前提

1.1 岩溶发育的地质控制因素与形态类型

岩溶发育程度由碳酸盐岩可溶性、地下水流动条件、构造裂隙发育情况以及气候等因素决定。根据其形态可分为溶洞（空洞型、充填型）、溶蚀裂隙带、岩溶管道、土洞以及岩溶塌陷等不同形式。溶洞大小从小至几厘米到大至几十米都有可能存在，充填物质可以是黏土、砂砾或者水；溶蚀裂隙带呈网状或线状分布，孔隙度和透水性明显大于未受侵蚀的基岩；土洞一般发生在覆盖土层与岩石表面交界处。从地球物理的角度来看，岩溶地质体可以简化成相对于周围岩层具有某种性质差别的地质体。这个差别是引起地球物理场出现异常原因，也是各种勘探方法能够利用的基础。

1.2 关键地球物理性质差异分析

岩溶地区物性差异主要表现为电阻率、波速、介电常数以及密度四个方面。完整灰岩电阻率较高（ $10^3-10^5\Omega\cdot m$ ），充水/泥溶洞明显降低（ $10-10^2\Omega\cdot m$ ），而空洞趋向无穷大，但是高阻充填或者高矿化度水流可减弱这种差别。灰岩纵波速度一般在 3500-6500m/s 之间，溶洞充水、充泥或为空气时相应速度降低到大约 1500m/s、500-1500m/s 或者 340m/s 左右，但是小溶洞需要较高频率的地震波才能探测出来。介电常数上，灰岩为 7-9，水高达 81，空气为 1，利用探地雷达就是基于这一点，但是受到含水量的影响较大。而密度上，灰岩（ $2.4-2.7g/cm^3$ ）大于充填物（ $1.2-2.2g/cm^3$ ），因此重力法能够用于识别大范围岩溶区，但是对于小规模岩溶区分辨率不足。一种物理性质不足以做出唯一解答——例如低电阻率可能是由溶洞引起的也可能是破碎带或者是富含粘土层造成的，因此需要多种物理性质综合分析来提高岩溶识别准确性。

2 常用地球物理探测技术及其适用性评述

2.1 高密度电法

高密度电法是利用一次布置大量电极，在不同电极之间进行测量以获取多种电极组合下电阻率分布，进而得到二维或者准三维电阻率剖面的方法。对于灰岩与充填溶洞之间电阻率差异具有较好响应能力，横向分辨率较高，可探测到数十至百余米深。适用于浅部（< 100m）溶洞、溶蚀裂隙带及土洞探测^[1]。但也有不足之处：一是地面地形起伏造成的不良影响；二是薄高阻覆盖层下低阻目标被掩盖；三是等值线引起纵向分辨率降低。因此在岩溶地区一般还需结合钻探或其他方式来加以验证。

2.2 探地雷达

探地雷达采用高频电磁脉冲反射成像,分辨率为厘米到分米级别,适用于浅部(<30 m)微细溶蚀裂缝、土洞以及岩溶面起伏探测。优点是速度快、连续性良好、无损、直观显示地层结构等。但是当雷达波经过富含高导黏土或者含有盐分地下水区域时会受到极大衰减而导致探测深度突然降低;另外对于深层处雷达波能量衰减严重而造成信噪比较低。因此在岩溶地区一般只用探地雷达进行局部详细检查或者是与高密度电法相结合以弥补其对浅部探测能力不足缺陷^[2]。

2.3 地震勘探方法

地震折射波法根据波沿地层界面滑行所形成的首波旅行时反演界面形态以及波速分布来研究基岩面起伏、覆盖层厚度以及大型岩溶带等。对于溶洞本身则难以发现,因为小型溶洞不易形成连续的折射波同相轴。地震反射波法(特别是浅层高分辨率反射)可以显示地层界面以及各种异常体的反射特征。溶洞顶部和底部产生的绕射波和反射波包含一定大小的信息量。但是由于岩溶区波散射严重以及能量衰减较大而导致反射波信噪比较低,因此其观测和处理都较困难。面波勘探(多道面波分析)通过利用面波频率-传播距离关系求取横波速度从而达到探测松散充填溶洞的目的并且不受纵波速度反转的影响而近年来受到重视。

2.4 瞬变电磁法

瞬变电磁法利用不接地回线或者接地线源给地下注入一个瞬变的一次场,在切断电源之后观测其二次场衰减情况,对于低阻体敏感而且不会被高阻体所屏蔽,可用于寻找地下深处充水溶洞、地下河以及岩溶富水带等。其探测深度一般为几十米至几百米之间,但是也有不足之处,即浅部有盲区(早期受到断电暂态的影响)并且对高阻空洞不敏感,还容易受到附近铁管、高压电线等人工源的干扰,在岩溶地区最好与其他方法结合使用来解决浅部的问题。

2.5 单一方法的共性局限总结

以上各种方法在岩溶探测中都面临一种困境:高频高分辨率方法探测深度较浅,而深度较大的方法分辨率较低;对电阻率差异敏感的方法不一定对波速差异敏感,反之亦然;数据反演都需要一定的先验信息^[3]。正是由于这些不足之处导致综合地球物理探测技术应运而生——多个方法的空间叠加、参数互补以及相互制约共同作用从而达到“1+1 > 2”。

3 综合地球物理探测技术体系与数据融合

3.1 综合探测的基本原则

综合地球物理探测并非各种方法简单堆砌,而是一种根据地质目的及物性差异进行“最优选择”。必须坚持三条原则:即第一,互补性原则,在组合中每一种方法对于探测深度、分辨率、敏感物性之间应相互补充,例如探地雷达(浅部高分辨率)与高密度电法(中深部电阻率成像)相结合;第二,冗余性原则,重要的异常应当由两个或两个以上的方法所指示,从而增加可靠性;第三,尺度匹配原则,方法的空间采样间距要适合于地质体尺寸大小,否则会造成过细而产生伪异常^[4]。

3.2 分层递进式组合模式

根据不同的岩溶探测目的以及精度要求,可以组成分层次、逐级推进的方式。在初步调查时,用较快的速度、较大的范围来寻找异常靶区,常用的组合方式有音频大地电磁法、可控源音频大地电磁法或高密度电法剖面等,还可使用天然场源以节约成本。其目的是找到区域性的岩溶发育带、地下河的方向以及断裂破碎带等。详细调查是在初步调查所确定的异常区域内布置较密的测线并且多种方法联合观测。一般为高密度电法+瞬变电磁法(中浅部到中深部)、高密度电法+地震折射波法(电阻率和速度同时约束)。探地雷达用于补充浅部较为详细的信息。验证是在详细调查发现的重大异常进行高精度复核以及钻孔定位。用跨孔CT或者微重力或者井中雷达等进行定点检查。整个探测最后得到的结果是一个包含异常体的位置、形状、性质以及可信度的三维地质模型。

3.3 多源地球物理数据融合技术

多源地球物理数据融合是实现综合探测“实质综合”的重要手段,可以分为三个层面:①数据层面融合:将不同方法的数据转换到同一坐标系和平面上进行叠加或者运算(例如电阻率与波速比值),得到联合异常图,简单但是缺乏物理基础;②模型层面融合:分别对每个方法的数据进行反演得到各自的物性模型,然后利用交叉梯度、聚类或者是贝叶斯的方法进行融合,比如用一个方法反演的结果给另一个方法当先验条件,提高结构的一致性和减少多解性问题;③联合反演:建立一个联合的目标函数同时拟合所有数据并且加入岩石物理的关系(比如阿奇公式、威利斯方程)约束某些参数,在此基础上进行反演求取孔隙度、含水率等^[5]。这种方法虽然很合理但是计算量很大而且需要进行区域性岩石物理标定,要慎重使用。三种融合方式从低到高依次提高岩溶识别精度及可信度。

3.4 基于地质约束的融合策略

岩溶地区综合探测数据融合需要考虑地质背景知识。可以有以下几个方面：以已有钻孔或者露头为基础构建初始模型；用地质统计学中的变异函数控制反演结果光滑度；用地质规律（例如溶洞多出现在层理或者裂隙附近）作为正则化约束条件。地层倾角以及岩性界面等信息可以在多种方法得到相同结论的基础上反馈到每个方法反演过程中。

4 方法优化与地质解释策略

4.1 采集参数优化

综合探测参数优化须考虑各种方法最佳观测时机，高密度电法根据目标埋藏深度选择合适电极间距以及排列方式，小电极间距获得良好浅部分辨率的同时布置深部剖面进行连续成像；瞬变电磁法发射频率、观测时间窗根据目标埋藏深度及地层电阻率推算趋肤深度并使用不同发射线圈实现纵向分层；探地雷达中心频率由目标埋藏深度以及介质衰减系数决定，高频率天线（>250MHz）用于浅部高分辨率成像而较低频率天线（<100MHz）可提高成像深度，在测网上所有仪器均需位于同一位置并且具有相同采样间隔以便后期叠加处理^[6]。

4.2 特殊处理技术

对于岩溶地区地球物理数据的处理有利于提高异常响应。电阻率法数据可以进行地形校正、静校正以及二维或者三维电阻率反演；探地雷达数据需要去除了背景噪声、增益补偿及偏移归位；地震数据高分辨率处理主要是绕射波分离及速度研究。而属性提取方法是从电阻率剖面中获取局部奇异值、从雷达数据中获得瞬时振幅和瞬时频率、从瞬变电磁衰减曲线上得到早期衰减常数及晚期衰减常数等，这些属性一般比原始数据更能体现岩溶信息。

4.3 综合异常的解释准则

地质解释应遵守“异常形态—物性组合—地质映射”三步法进行。即先辨别各种方法单独出现的异常——电阻率低阻或高阻团块、雷达反射弧带、速度低速区、瞬变电磁高衰减区等。再比较这些不同方法所标识的异常的空间位置关系，划分出“高置信度异常”（至少三个以上的方法共同存在）、“中等置信度

异常”（仅两个方法存在）以及“需进一步验证的异常”（只有一个方法上有表现）。最后根据典型地球物理组合来推测相应的地质情况：低电阻率+低速+强雷达反射一般为充水溶洞；高电阻率+低速+弱反射或者无反射一般为空洞；中等电阻率+低速+杂乱反射一般为充填黏土溶洞；高电阻率+高速一般为完整灰岩。

5 结语

岩溶地区由于地质条件极其复杂以及多种可能性导致单一地球物理探测难以准确判断岩溶体位置，而综合利用多种地球物理手段可以增加信息量并提高反演约束度。基于岩溶不同性质差异，阐述综合探测原理；总结高密度电法、探地雷达、地震以及瞬变电磁等方法优缺点及其相互补充关系；提出“普查—详查—验证”的分层次探测思路；介绍数据层、模型层以及联合反演结合方法，并突出地质背景的重要性；同时提出优化布线方案以及综合分析建议。未来发展方向为：研究岩溶充填物与多种属性之间的定量关系；开发基于人工智能的自动融合及异常分类软件；研制小型化、智能化适用于不同地貌类型的仪器设备；开展时序监测以便进行岩溶动态监测。

参考文献

- [1] 刘洁, 谷剑英. 综合地球物理方法在岩溶探测中的应用[J]. 东北水利水电, 2024, 42(7): 68-70.
- [2] Jacob (鲁邦) L. 裂隙水和岩溶水地球物理建模及其综合地球物理勘探[D]. 中南大学, 2023. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2023.005748.
- [3] 姜国庆, 尚通晓, 黄敬军, 等. 基于综合地球物理方法的覆盖型岩溶发育规律研究——以徐州地区为例[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(6): 2571-2579.
- [4] 陈建龙, 汤洪志, 杜春龙, 等. 综合地球物理方法在岩溶地面塌陷地质灾害调查中的应用研究[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(1): 108-110+114.
- [5] 张宇; 阳军生; 梁禹; 王小明, 三维地质建模在综合交通枢纽工程中的研究与应用[J]. 铁道建筑技术, 2025(08): 48-51.
- [6] 李蓓蓓; 杜立杰; 张杰. 物探技术在地下管线测量中的应用. 江西建材, 2022(05): 23-29