

The Application of Comprehensive Geophysical Method in the Geological Investigation of Karst Area in Southwest China

Chao Wang, Dong Li, Hang Zhang

CCCC Second Highway Consultants Company Limited, Wuhan Hubei
Email: 843149497@qq.com

Received: Feb. 20th, 2020; accepted: Mar. 5th, 2020; published: Mar. 12th, 2020

Abstract

The karst problem has always been an important problem in our geological investigation. Comprehensive geophysical method plays an important role in Karst Exploration and can obtain geological information such as scale, location and filling of karst. As a geophysical method, high-density electrical method is often used in engineering geological investigation. In this paper, high-density electrical method is used to determine karst development in the investigation area, and electromagnetic wave CT method is used to verify each other, which has achieved good results, providing some experience and reference for future engineering geological investigation in karst area.

Keywords

Karst, High Density Electrical Method, Electromagnetic Wave CT, Comprehensive Geophysical Method

综合物探方法在西南岩溶地区地质勘察中的应用

王超, 李冬, 张行

中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉
Email: 843149497@qq.com

收稿日期: 2020年2月20日; 录用日期: 2020年3月5日; 发布日期: 2020年3月12日

摘要

岩溶问题一直是我国地质勘察工作的重要问题。综合物探方法在岩溶勘察中起着重要作用，能够获得岩溶的规模、位置、充填物等地质信息。高密度电法作为物探方法的一种，经常用于工程地质勘察工作当中。本文主要利用高密度电法确定勘察区岩溶发育情况，并结合电磁波CT方法互相印证，取得了良好的效果。为以后岩溶区工程地质勘察提供一些经验和借鉴。

关键词

岩溶，高密度电法，电磁波CT，综合物探方法

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩溶现象在我国广泛分布和发育。岩溶现象是碳酸盐岩、卤盐类岩、硫酸盐岩等可溶性岩石被水化学溶蚀为主，蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅的地质作用，以及由这些作用所产生的现象的总称。由于它容易引起塌陷、不均匀沉降、突水等地质灾害，对工程建设产生巨大的影响，因此对岩溶进行勘察具有非常重要的意义[1]。

由于岩溶是由可溶性岩石被水化学溶蚀而形成的，故岩溶的产生类型也各种各样，主要有溶洞、钟乳洞、岩溶裂隙、溶孔等。岩溶按照充填物质可以划分为两类，一类充填物为空气等高电阻物质，一类充填物为水、淤泥质土、黏土等低阻物质。由于充填物的不同导致岩石与充填物之间存在物性差异，而岩石与充填物的物性差异成为地球物理勘探解决岩溶问题的主要依据[2]。

在工程地质勘察中常用的地球物理方法主要为电磁法勘探、地震勘探、重磁勘探、综合测井等。由于工作区地质条件的差异，要结合实际地质勘察条件选择使用适用的物探方法。高密度电法受周边电磁的干扰较小，同时能适应复杂的地形变化，是工程地质勘察中最常用的物探方法。在工程地质勘察中高密度电法主要用来确定覆盖层厚度、划分基岩风化层、确定岩性破碎带、圈定含水层等[3]。因此，高密度电法被广泛的应用于岩溶勘察中。电磁波CT成像技术最早在医疗领域得到普遍应用，20世纪80年代后期才被引入到物探领域中，目前主要有声波、地震波、弹性波和电磁波、电阻率等几种CT方法。随着相关理论技术逐渐成熟，电磁波CT技术已经被广泛用能源矿产勘察、工程地质勘察和水文地质勘察等方面[4]。

相较于常规地质方法，综合物探方法能有效地勘探地下岩溶地质条件。刘崧等人通过物探方法寻找岩溶地下水、探测溶洞，解决了传统地质方法无法解决的问题[5]。邓凯等人利用综合物探方法勘探高速公路中的岩溶塌陷区，查明了塌陷区地层结构及岩溶破碎带，并划分了塌陷区范围，取得较好的效果[6]。黄毓铭等人为了查明研究区溶洞发育情况，采用高密度电法与地质雷达相结合对研究区内的溶洞进行探测[7]。王成楠等人利用目的体物性差异，采用高密度电法和探地雷达结合对抚州校园内地下空洞进行探测[8]。许波利用高密度电法、电磁波CT、井下电视、井液电阻率测井等方法对白石窑枢纽船闸工程进行探测，取得了较好的效果[9]。潘纪顺等人综合应用高密度电阻率法和瞬变电磁法对鹤辉高速溶洞进行勘

查, 验证综合物探方法勘查溶洞方面具有可行性和有效性[10]。

本文通过建立高密度电法理论模型进行正反演模拟, 并结合高密度电法、电磁波 CT 在西南岩溶地区工程地质勘察中的应用效果, 总结综合物探方法在勘察岩溶地区的经验, 为以后勘察岩溶区提供参考。

2. 高密度电法理论与正演模拟

高密度电法是以岩、土的电性差异为基础, 研究人工施加稳定电流场的作用下地下传导电流分布规律的一种勘探方法。其工作原理如图 1 所示。由于它采用了多电极高密度一次布极并实现了跑极和数据采集的自动化, 因此相对常规电阻率法来说, 它具有许多优点: 1) 由于电极的布设是一次完成的, 测量过程中无需跑极, 因此可防止因电极移动而引起的故障和干扰; 2) 在一条观测剖面上, 通过电极变换或数据转换可获得多种装置的视电阻率断面等值线图; 3) 可进行资料的现场实时处理与成图解释; 4) 成本低、效率高[11]。由于高密度电法与常规电法相比有以上一些优点, 因此自 20 世纪 80 年代由日本引进该法后, 经过国内单位对方法、仪器的研制开发与生产, 很快在水文、工程、环境等领域中得到了推广应用并取得了良好的效果[12]。

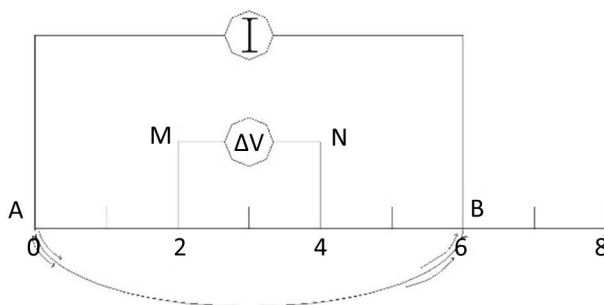


Figure 1. Schematic diagram of high density electrical method
图 1. 高密度电法工作原理示意图

通过建立岩溶地区典型的高密度电法理论模型, 分析高密度电法二维理论反演模型的电性响应特征。结合高密度电法实测资料, 总结高密度电法在岩溶地区勘察的规律与经验。

高密度电法正反演理论模型

结合工作区实际情况, 建立低阻体正演模型, 设低阻异常体的电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 低阻模型宽 20 m, 高 15 m, 埋深 10 m, 围岩电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$, 测量装置为温纳装置, 电极总数为 60 个, 电极间距为 5 m。低阻体模型如图 2 所示:

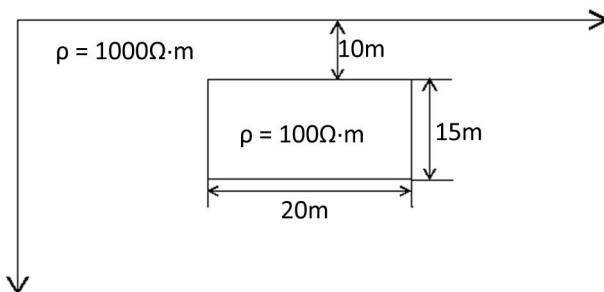


Figure 2. Forward model
图 2. 正演模型示意图

图3为低阻体地电模型的正演视电阻率断面图。从图中可以看出,正演结果对低阻体有很好的反映,图中低阻的范围相对于低阻体较大,向两侧和下部延伸。低阻中心在低阻异常体模型的下部,由于背景围岩的电阻率与低阻异常体的电阻率差距较大,导致视电阻率断面图中的低阻体的视电阻率较大。

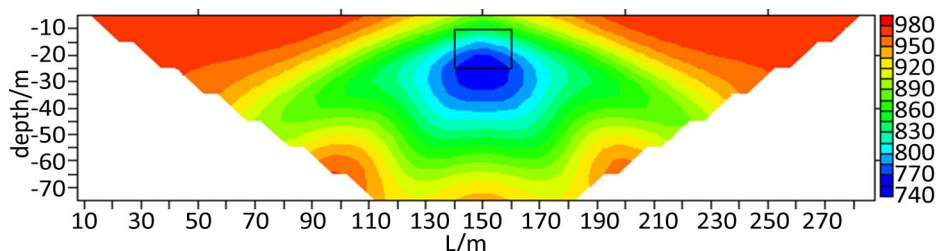


Figure 3. Section of apparent resistivity of low resistivity

图3. 低阻体视电阻率断面图

对正演结果加入5%的随机噪声,然后进行反演,反演结果如图4所示,反演共迭代4次,RMS误差为4%,从反演结果可以看出,反演能较好的体现出低阻体模型的边界。视电阻率也比较接近模型电阻率,为200 Ω·m。

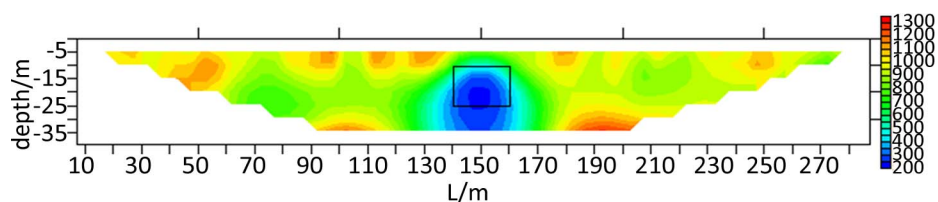


Figure 4. Apparent resistivity profile of low resistivity inversion

图4. 低阻体反演视电阻率断面图

3. 电磁波 CT 原理

电磁波 CT 法是利用无线电波(工作频率 0.5~32 MHz)在两个钻孔中分别发射和接收,根据不同位置上接收的场强的大小,来确定地下不同介质分布的一种地下地球物理勘查方法,也称井中无线电波透视法。其工作原理如图5所示。

由于电磁波 CT 是利用电磁波在地下半空间的辐射、传播和接收,满足电磁波理论。其在地下半空间的发射和接收满足以下公式:

$$E = \frac{E_0 f_s f_R e^{-\beta dr}}{R}$$

式中: E ——场强幅值的观测值; E_0 ——初始场强辐射值; R ——电磁波沿直线传播的路径长度; f ——与发射和接收天线有关的方向因子函数; β ——地下介质的吸收系数[13]。

电磁波在地下传播的衰减系数满足下面公式:

$$\beta = \left\{ \frac{u_r \varepsilon_r}{2} \left[1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: ω ——天线角频率; β ——衰减系数; u_r ——介质的相对磁导率—待测介质的电导率; ε_r ——待测介质的相对介电常数[13]。

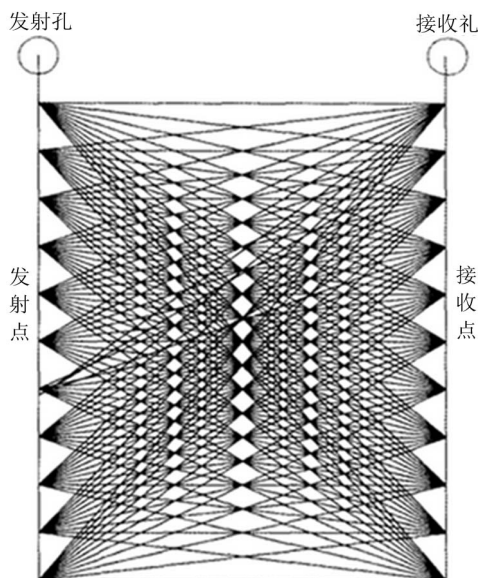


Figure 5. Working principle of electromagnetic wave CT

图 5. 电磁波 CT 工作原理图

上式表明：当电磁波在各种地下介质(例如各种岩石、矿石、矿体、岩溶和裂隙带)中传播时，由于电磁波在岩溶洞穴和裂隙带等不同介质中的吸收系数(β)不同，电磁波的吸收系数远大于围岩的吸收系数，因此岩溶洞穴和断裂带后面的场强要小得多，从而表现出负异常。像阴影一样，我们利用这种差异来推断目标地质体的结构和形状[14]。

4. 实测资料处理应用

4.1. 工作区地质概况

工作区属构造剥溶蚀侵蚀中低山峡谷地貌区，深切 V 型峡谷地形，切割深度约 430 m。主要由碳酸盐岩组成，以灰岩、白云岩、铁铝岩为主。工作区，多形成廊道式峡谷，谷坡陡崖发育，高达数十至数百米，两岸碳酸盐岩分布地段，洼地、漏斗发育，岸壁上悬挂有水平溶洞。根据勘察资料，桥位区基岩大面积出露，地层岩性为二叠系下统栖霞组(P₁q)灰岩、石炭系下统大塘组 + 摆佐组(C₁d + b)灰岩夹铁铝岩、寒武系中上统娄山关群(ϵ_{2-3} ls)及中统石冷水组(ϵ_2 s)白云岩。

工作区地表水发育，主要为河水。地下水主要为岩溶水，地下水埋藏较深，主要补给来源为大气降水，补给方式主要通过地表溶、沟槽下渗、注入。由于工作区节理裂隙及岩溶发育，地表水和孔隙水渗入溶孔、裂隙和溶洞中，这就成为了高密度电法勘探岩溶的物性条件。表 1 即为工作区地下介质的物性参数：

Table 1. Physical parameters of main underground media in the work area

表 1. 工区主要地下介质物性参数

地下介质	水	黏性土	灰岩	空气
电阻率值 ρ_s ($\Omega \cdot m$)	<100	1~100	1~100	∞
相对介电常数 ϵ_r	81	81	15~20	1

4.2. 资料采集与资料处理

根据工作区现场条件和探测目的，整个工区共分为两个小工区，共布设高密度电法测线 8 条，采用

温纳装置进行探测, 电极距为 5 m, 电极总数为 60 个。电磁波 CT 共布设 12 对, 为了既能满足透射距离又能保证接收质量, 电磁波 CT 工作频率选用 4~12 MHz, 频率间隔为 2 MHz, 采用定发采集方式, 移动步距 1 m。物探布置图如图 6 所示:

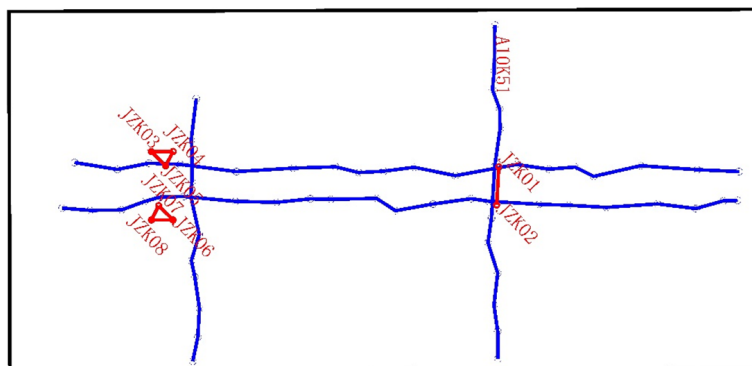


Figure 6. Arrangement of geophysical exploration lines
图 6. 物探测线布置图

由于地形起伏等条件会导致高密度电法部分测量数据出现异常, 为了保证资料成果的准确性, 在对高密度电法数据进行处理时, 应先对高密度电法的“坏点”进行剔除, 再对数据进行处理, 处理过程要保证资料的真实可靠, 避免过多的人为因素的干扰。针对本工作区, 高密度电法和电磁波 CT 的具体处理流程如图 7 所示:

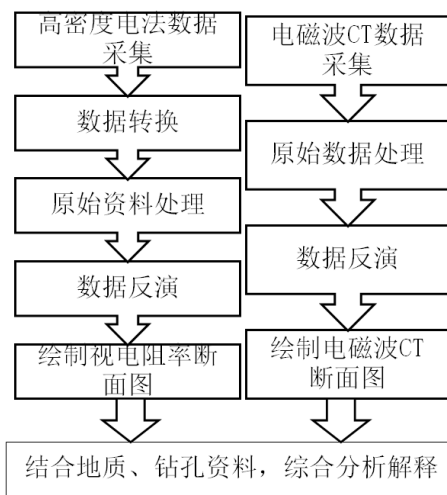


Figure 7. Flow chart of data processing
图 7. 资料处理流程图

实际工作中, 资料成果的分析解释一般以地质资料作为基础, 物探异常特征作为依据, 逐步完善, 遵循由已知到未知, 先定性分析后定量分析, 由点到面的原则, 进行综合分析解释。

4.3. 资料成果分析

高密度电法 A10K51 测线总长度为 290 m, 视电阻率断面图如图 8。A10K51 测线视电阻率断面图中 80~114 m 段局部视电阻率较低, 为低阻异常, 存在溶洞及岩溶沟槽发育, 高程范围约为 1226~1260 m, 130~163 m 段溶蚀裂隙较发育, 165~290 m 段表层相对视电阻率较低, 存在岩溶沟槽、溶蚀裂隙发育。

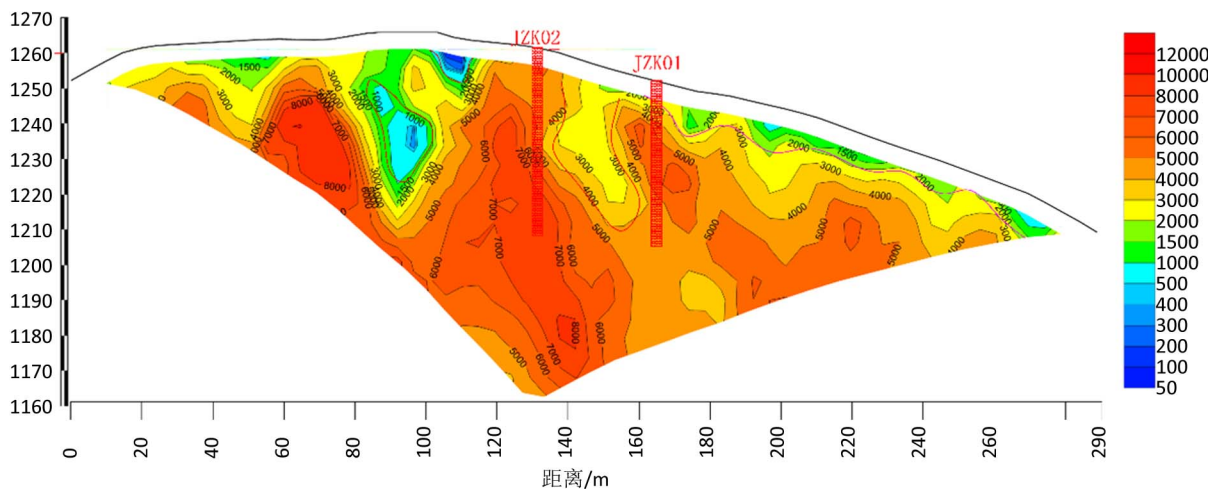


Figure 8. Section of line apparent resistivity of A10K51 high density electrical method

图 8. 高密度电法 A10K51 测线视电阻率断面图

图 9 为 A10K51 测线钻孔 JZK01 和钻孔 JZK02 之间的电磁波 CT 成果图。两孔的间距 32.8 m, JZK01 孔发射, JZK02 孔接收。根据吸收系数等值线分析, 吸收系数范围在 0.1~0.5 dB/m, 上部吸收系数较高, 推测为岩溶沟槽发育, 中下部溶蚀裂隙较发育。

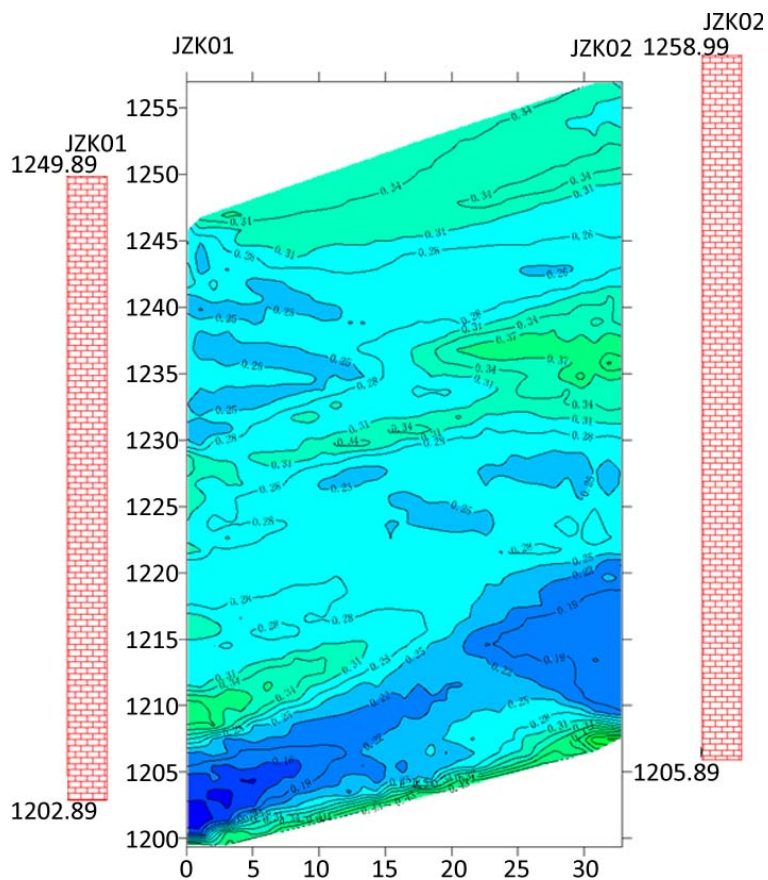


Figure 9. Isometric diagram of absorption coefficient of electromagnetic wave CT

图 9. 电磁波 CT 吸收系数等值线图

综合钻探、高密度电法和电磁波 CT 等资料分析, A10K51 线表层以溶沟、溶槽为主, 下部多以溶蚀裂隙、溶蚀小孔为主, 岩体完整度较好。高密度电法成果与电磁波 CT 成果吻合度较好, 均揭示了 130~163 段溶蚀裂隙发育区。

5. 结论

1) 高密度电法具有分辨率高、工作效率高, 受环境干扰小等优点, 在岩溶勘察探测中发挥了重要作用, 是解决岩溶勘察问题的重要手段。在调查地下岩溶的发育情况, 电磁波 CT 也是一种比较有效的方法, 它在反映地下溶孔、溶隙、溶洞的发育具有更突出的作用。

2) 地下介质的物性差异是综合物探方法勘探岩溶的前提条件, 含填充物岩溶、未填充岩溶与围岩之间具有明显的电性差异, 岩溶与围岩对电磁波吸收系数的不同决定了物探的探测效果。

3) 在西南地区某高速公路特大桥的勘察工作中, 采用高密度电法与电磁波 CT 相结合的综合勘察方式, 同时发挥出两种方法优点, 互相验证、补充, 避免了采用单一物探方法的多解性, 明显地提高了勘察工作的准确性与精度。

参考文献

- [1] 张丽芬, 曾夏生, 姚运生, 等. 我国岩溶塌陷研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 126-130.
- [2] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平, 等. 高密度电法在柳州太阳村镇岩溶塌陷区调查中的应用研究[J]. 地质与勘探. 2017, 53(1): 124-132.
- [3] 刘万恩. 高密度电法探测基岩起伏和隐伏断裂中的应用[J]. 上海地质, 2007(3): 51-53.
- [4] 贾辉, 陈昌彦, 张辉, 等. 电磁波 CT 和直流电法在近郊山区工程地质勘察中的应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(8): 87-91.
- [5] 刘崧. 物探方法在岩溶勘查中的应用综述[J]. 地质科技情报, 1997, 16 (2): 85-91.
- [6] 邓凯, 沈云发, 张玉池. 综合物探方法在高速公路岩溶塌陷探测中的应用分析[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 54-57.
- [7] 黄毓铭, 张晓峰, 谢尚平, 等. 综合物探方法在南宁地铁溶洞探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1352-1359.
- [8] 王成楠. 综合物探方法在城市地下空洞探测中的应用研究[C]//江西省地质学会 2018 年论文汇编(四). 江西省地质学会, 2018: 5.
- [9] 许波. 综合物探方法在岩溶区勘察中的应用[J]. 四川水泥, 2018(12): 333-334.
- [10] 潘纪顺, 连光明, 冷元宝, 等. 综合物探方法在鹤辉高速公路溶洞勘查中的应用[J]. 华北水利水电大学学报, 2015, 36(2): 49-53.
- [11] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [12] 邓凯, 沈云发, 张玉池. 综合物探方法在高速公路岩溶塌陷探测中的应用分析[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(1): 54-57.
- [13] 周欣, 刘涛, 尹极, 等. 电磁波 CT 技术在溶洞勘察中的应用效果分析[J]. CT 理论与应用研究, 2012. 21(4): 659-666.
- [14] 喻春. 井间电磁波 CT 在工程中的应用[J]. 西部探矿工程, 2015(9): 167-170.