

综合物探技术在重庆丁市隧道勘察中的应用

刘明¹, 杨楠^{2*}, 郑东¹, 向庆刚³, 向阳²

¹四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都

²重庆交通大学土木工程学院, 重庆

³重庆地质矿产研究院, 重庆

收稿日期: 2023年12月11日; 录用日期: 2024年1月9日; 发布日期: 2024年1月17日

摘要

长大深埋隧道中地下岩溶发育会造成涌水突泥、围岩失稳等地质灾害, 让隧道施工中存在巨大的安全隐患。丁市隧道位于渝东南岩溶区, 隧道洞身段岩溶洼地及槽谷较多, 且地下水含量丰富, 难以采用单一勘察手段查明岩溶管道及岩溶发育情况。为准确查明丁市隧道岩溶管道及岩溶发育情况, 本文应用EH4大地电磁法和声波测井两种物探技术辅助钻探技术针对不同位置、埋深的岩溶管道及岩溶发育情况进行综合分析, 并根据物探与钻探的数据对比表明, 本文提出的综合物探技术适用于复杂地形的山区和富含岩溶水的隧道。

关键词

隧道, 岩溶, 综合物探法, EH4大地电磁法, 声波测井

Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Technique in Survey of Dingshi Tunnel in Chongqing

Ming Liu¹, Nan Yang^{2*}, Dong Zheng¹, Qinggang Xiang³, Yang Xiang²

¹Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan

²School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

³Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing

Received: Dec. 11th, 2023; accepted: Jan. 9th, 2024; published: Jan. 17th, 2024

Abstract

The development of underground karst in long-buried tunnels will cause geological disasters such

*通讯作者。

文章引用: 刘明, 杨楠, 郑东, 向庆刚, 向阳. 综合物探技术在重庆丁市隧道勘察中的应用[J]. 测绘科学技术, 2024, 12(1): 31-38. DOI: 10.12677/gst.2024.121005

as instability of surrounding rock, water inrush and mud inrush, which will bring huge safety hazards in tunnel construction. Dingshi Tunnel is located in the karst area of southeast Chongqing, and there are many karst depressions and troughs in the tunnel body, and the groundwater content is rich, and it is difficult to use a single survey method to find out the karst pipeline and karst development. In order to accurately identify the karst pipeline and karst development of Dingshi Tunnel, this paper used two geophysical prospecting techniques of EH4 geomagnetic method and acoustic logging assisted drilling technology to comprehensively analyze karst pipeline and karst development at different locations and buried depths, and according to the comparison of geophysical and drilling prospecting data, the comprehensive geophysical prospecting technology proposed in this paper is suitable for complex terrain in mountainous areas and tunnels rich in karst water.

Keywords

Tunnel, Karst, Comprehensive Geophysical Prospecting Method, EH4 Magnetotelluric Method, Acoustic Logging

Copyright © 2024 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

在隧道线路经过可溶性岩石区域时, 会遭遇地下岩溶发育的地质情况, 地下岩溶发育会引起围岩失稳、涌水突泥等地质灾害, 对隧道施工带来巨大的安全隐患[1]。如何选取合适的物探方法查明岩溶的分布、规模、形态等发育特征, 并对其作出定量或定性评价, 完善施工组织设计, 是保证隧道施工的重要环节[2]。

针对传统、单一的勘察技术及方法很难查清岩溶发育特征的问题, 国内外学者以往开展了大量关于岩溶地质灾害勘探的研究, 其中物探法被广泛使用。传统的地震反射法、弹性波 CT 法、高密度电法、电测深法、瞬变电磁法、地质雷达法、可控源音频大地电磁法等各种物探方法几乎都被应用到了岩溶灾害的探测中[3] [4]。Boulytchov [5]提出利用磁法和探地雷达及电阻率法等综合方法探测岩溶等; 李彦军[6]以内昆线为例阐述了岩溶地区进行综合地质勘察的必要性和可行性; 张霄等[7]就瞬变电磁法、高密度电磁法、地震映像法在岩溶隧道病害探查中的综合应用进行了研究; 周竹生等[8]提出多数据联合反演解释将是综合物探技术发展的重要方向之一; 赵杰华等[9]提出打分法进行物探方法异常解释精度的综合评价, 选择综合得分高的物探方法进行应用。以上文献都表明综合物探法经过合理选取后在岩溶地区工程地质勘察中应用的必要性、可行性以及对如何进一步优化改正进行了分析研究。由于地质体多种物性差异的不同, 各种物探方法在同一地质体上的勘探效果各有不同。如何根据工区的地质特征选取合适的物探方法组合应用使得勘探工作具有高效性并保证工程质量是综合物探的核心。多种方法的结合为岩溶勘探提供了新的思路, 有效改善了单一物探方法的局限性, 使之成为应用最为广泛的岩溶勘察方法[10] [11] [12] [13]。

本文以重庆彭水至酉阳高速公路项目丁市隧道岩溶区域作为依托。根据丁市隧道的工程地质特征, 设计勘察深度要求。在初勘的基础上, 以钻探为主, 结合大地电磁探测(EH4)法和声波测井法两种勘察技术手段使用, 查明丁市隧道岩溶区域不良地质的发育情况及分布特征, 并提高勘察的精度。为设计公路隧道以及其施工提供可信用度高的地质资料。

2. 研究区概况

2.1. 自然地理和地质概况

丁市隧道进口位于丁市镇中坝村余家沟南侧山坡，出口位于丁市镇文家湾北侧山坡。隧道区域属亚热带湿润气候，降雨量大，作为地下水的补给来源。且隧道地处于渝东南部岩溶山区，岩性主要表现为可溶性岩，其中以灰岩、白云岩、白云质灰岩为主。地形地貌主要呈现为溶蚀槽谷地貌，碳酸盐岩在隧址区广泛分布，碳酸盐岩岩溶发育，较为发育的有地表岩溶洼地、落水洞、岩溶大泉，地下局部发育溶洞、暗河，整体上地质构造较复杂。岩石地层组合主要分为：1) 寒武系上统毛田组(C_{3m})、耿家店组(C_{3g})；2) 奥陶系下统南津关组(O_{1n})；3) 第四系崩积层(Q_{4col})、全新统残坡(Q_{4^{el+dl}})积层。其中，含水层主要为毛田组(C_{3m})、奥陶系下统南津关组(O_{1n})、寒武系上统耿家店组(C_{3g})。

2.2. 导电性特征

通过隧址区地层岩石的地球物理导电性特征，判断本工作区是否具备电磁法勘探物理前提。根据初期结果以及地质情况显示，该隧道段基岩为白云质灰岩，局部夹页岩。该段内主要岩土层的视电阻率值统计结果见表 1。

Table 1. Statistical result of apparent resistivity

表 1. 视电阻率统计结果

岩性及构造	电性特征	电阻率值变化范围 (Ω·m)	岩体完整性	电性分类
白云质灰岩	低阻	100~400	风化破碎严重、富水，岩体极破碎	V
	中低阻	400~1000	中等风化，易开裂破碎、含水性较好，岩体破碎	IV
	次高阻	1000~2000	岩体较破碎	III
	高阻	2000~6000	岩体较完整	II

依据视电阻率统计结果可知：测区内各岩性不相同、岩性相同其风化程度不同，其中电阻率最高值为 6000 Ω·m，最低值为 100 Ω·m，两者电阻率相差值最大可达 5900 Ω·m，电阻率值差异存在，因此本工作区具备电磁法勘探物理基础。

3. 物探方法原理

3.1. EH4 大地电磁法

其工作原理与大地电磁(MT)法一样，是利用宇宙中的太阳风、雷电等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源[11]。

在均匀大地和大地情况下，波阻抗 Z 是电场 E 和磁场 H 的水平分量的比值[12]：

$$Z = \left| \frac{E}{H} \right| e^{i(\varphi_E - \varphi_H)} \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{5f} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (3)$$

式中: f 是频率, Hz; ρ 是电阻率, $\Omega \cdot m$; E 是电场强度, $mv/Q \cdot m$; H 是磁场强度, nT; φ_E 是电场相位, mrad; φ_H 是磁场相位, mrad。

E 和 H 应理解为一次场和感应场的空间矢量叠加后的综合场, 简称总场。在电磁理论中, 把电磁场(E 、 H)在大地中传播时, 其振幅衰减到初始 $1/e$ 时的深度, 定义为穿透深度或趋肤深度(δ) [14]:

$$\delta = 503\sqrt{\rho/f} \quad (4)$$

由上式可知, 电阻率(ρ)和频率(f)变化导致趋肤深度(δ)的变化, 在与地下研究深度相对应的频带上进行测量。

3.2. 声波测井

钻孔声波测井是通过声速 - 孔深曲线, 以此划分不同岩体或同一岩体不同强度的速度层位[15], 进一步确定岩体风化卸荷深度及裂隙密集带、溶蚀发育带及岩溶、软弱夹层、相对隔水层空间分布。

如图 1 所示, 声波测井仪的井中探测部分由超声波发射器 T 和接收器 R1、R2 组成[16]。声波测井岩体波速计算公式为[17]:

$$V_{pm} = L/(t_2 - t_1) \quad (5)$$

用于计算隧道围岩完整性系数(K_v)值时, 必须进行岩(芯)石波速 V_{pr} 测试, 其计算公式为:

$$K_v = (V_{pm}/V_{pr})^2 \quad (6)$$

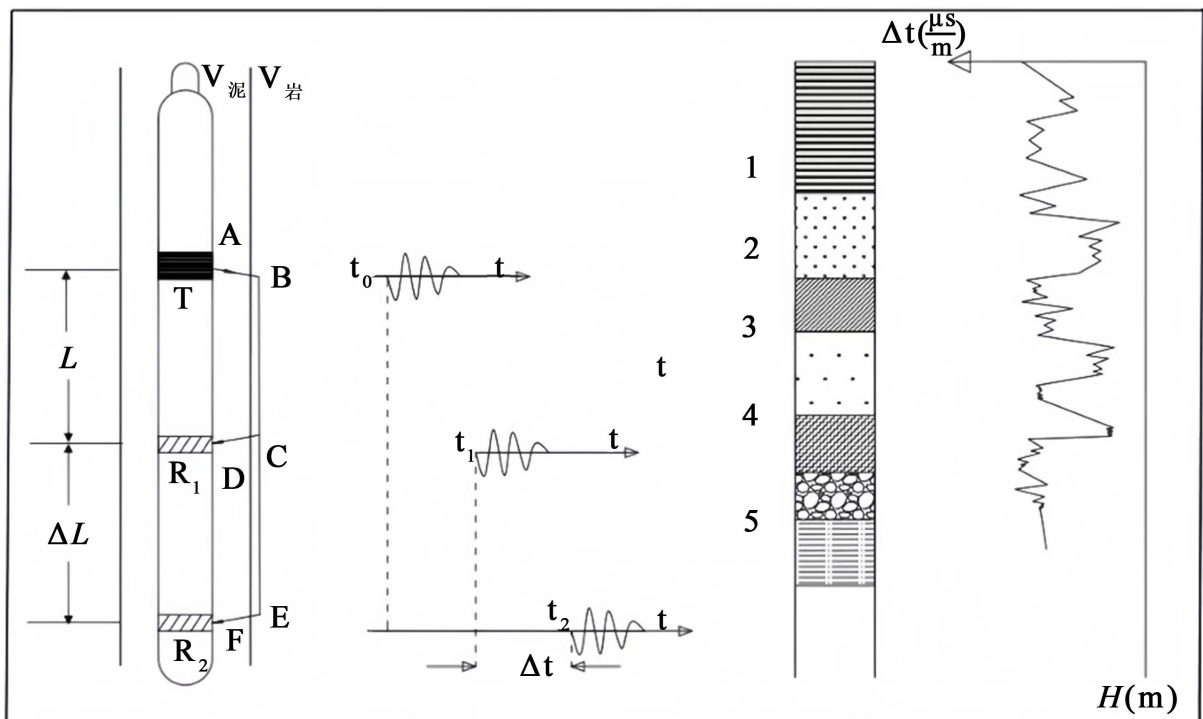


Figure 1. Schematic diagram of acoustic logging principle

图 1. 声波测井原理示意图

4. 应用实例

4.1. EH4

根据设计要求并结合实际地形条件,本次工作对隧道布置大地电磁法勘探线3条,共计3760m,点距20~40米。现将3条勘探线布置情况列于表2。

Table 2. Electromagnetic exploration line layout

表 2. 电磁勘探线布置情况

剖面类别	位置	里程桩号	长度(m)
WT1	中线	K93 + 620~K95 + 840	2220
WT2	左线	ZK93 + 620~ZK94 + 400	780
WT3	右线	YK93 + 640~YK94 + 400	760

隧址区在开发前期,位置偏僻,EH4干扰信号较少,能够保证数据质量的可靠性。通过采用EH4勘探法有效查探了隧道地表标高以下100m内的地层岩性结构、断层破碎带及不良地质体的分布特征及不良地质体的分布特征[18],由图2丁市隧道物探大地电磁法反演成果图显示,该隧道整体电阻率值较高,局部岩体破碎或富水,对隧道的建设以及后期运营有一定影响。

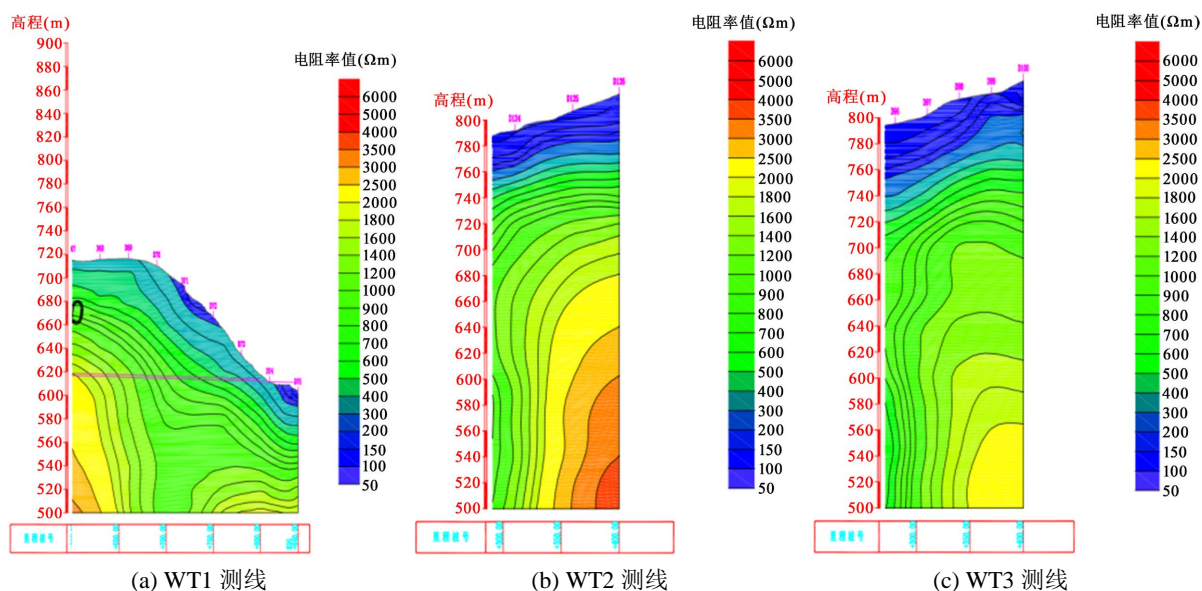


Figure 2. Inversion result diagrams of prospecting geophysical magnetotelluric method of the middle, left and right surveying lines of Dingshi Tunnel

图 2. 丁市隧道中、左、右各测线物探大地电磁法反演成果图

该几处异常区为:①隧道的进、出口段,物探反演剖面反映出电阻率整体较低,主要为IV、V类视电阻率异常区,岩体稳定性差;②隧道洞身里程K94 + 900~K94 + 938 m、K53 + 525~K54 + 150 m,表现为明显的低阻异常特征,推测为溶蚀破碎区;③隧道左线ZK94 + 170 m~ZK94 + 310 m里程及右线YK94 + 196 m~YK94 + 340 m为溶蚀塌陷坑堆积物-块石土,极破碎。

综上所述,通过勘探操作过程以及解译成果数据表明大地电磁测深法对电阻率差异较大的岩体完整

性分析、岩性分布、岩溶发育特征及富水性分析等方面的宏观判别有较好效果。具有使用方便、勘探深度大、精度高的优点，利于在地形较复杂或环境比较恶劣的地区进行工作[19]。且在地质勘探过程中实时处理数据与成像，提供更简洁的资料、直观的图像。

4.2. 钻孔声波测井

丁市隧道区内地貌主要分为剥蚀-构造梳状低中山地貌和溶蚀峰丛谷地中山地貌类型。测区灰岩多为薄层状或者夹有页岩，往往岩溶发育程度较低，寒武系中统平井组和寒武系上统耿家店组以中厚层状白云质为主，厚度大，岩石成分较纯，为区内强岩溶化地层，地表地下溶蚀强烈，岩溶形态发育，测区主要含水层分布着数量较多的地下河、落水洞、天窗。为更好地为本次勘探任务提供可靠的工程地质评价资料，利用初勘钻孔，对孔洞进一步采用单孔声波法进行测试。一般只针对基岩部分测量，松散地区可不进行。岩块波速测试成果与测井完整性系数成果见表3、表4。

Table 3. Test result table of wave velocity of borehole block

表 3. 钻孔岩块波速测试成果表

岩性	岩块长度(米)	初至波时间(微秒)	岩块速度(km/s)	完整岩块平均速度(km/s)
白云岩	0.235	43.8	5.365	
白云岩	0.178	33.7	5.282	5.398
白云岩	0.244	45.2	5.398	

Table 4. Result table of borehole acoustic logging integrity coefficient

表 4. 钻孔声波测井完整性系数成果表

钻孔编号	孔深(m)	岩性	岩体纵波速度 V_{pm} (km/s)	完整岩块纵波速度 V_{pr} (ma) (km/s)	完整性系数	完整程度
	0~74.6	无水	-	-	-	-
中坝 SZK04	74.6~265.0	中风化白云岩 夹灰岩	4.461	5.398	0.68	较完整
	265.0~316.6	中风化白云岩 夹泥质白云岩	4.291	5.398	0.63	较完整

根据声波测井成果所示，中坝 SZK04 钻孔：0~78.8 m 无水未施测；74.6~265.0 m 井段，为中风化白云岩夹灰岩，围岩完整性系数为 0.52~0.79，围岩较完整；265.0~316.6 m 井段，为中风化白云岩夹泥质白云岩，围岩完整性系数为 0.52~0.71，围岩较完整。

5. 验证对比

现场共布置 5 个钻孔，隧道洞身深孔 4 个，隧道出口 1 个。根据 5 个钻孔的现场试验结果表明，场地出露的地层有为第四系(Q₄)及奥陶系下统南津关组(O_{1n})、寒武系上统毛田组(C_{3m})和寒武系上统耿家店组(C_{3g})组成。其中，SZK02 位于丁市隧道洞身 ZK94 + 270 段内，查明了两河口伏流造成的岩溶塌陷影响深度，隧道纵横向断面与岩溶塌陷关系见图 3。

根据前述物探结果：K93 + 760m~K94 + 640 m 里程段洞身段反演电阻率为 1000~2000 Ω·m，物探推

断洞身位置为中风化白云质灰岩，围岩为 III 类视电阻率值，对应岩体完整性为较破碎。其中，K94 + 195 m~K94 + 340 m 里程段存在一向下凹陷的低阻异常，洞身段反演电阻率为 400~800 $\Omega\cdot\text{m}$ ，物探推断该段洞身位置为溶蚀塌陷坑堆积物 - 块石土，极破碎。根据钻探及物探揭露异常带，其中 K94 + 160~K94 + 360 m 段为岩溶塌陷区，两者结果基本一致。

根据前述声波测井结果：SZK04 位于 K95 + 305 m 段，且测得的围岩整体性好，印证了物探成果测得整体电阻率较高，局部岩体富水或破碎，与钻探土层结果基本符合。

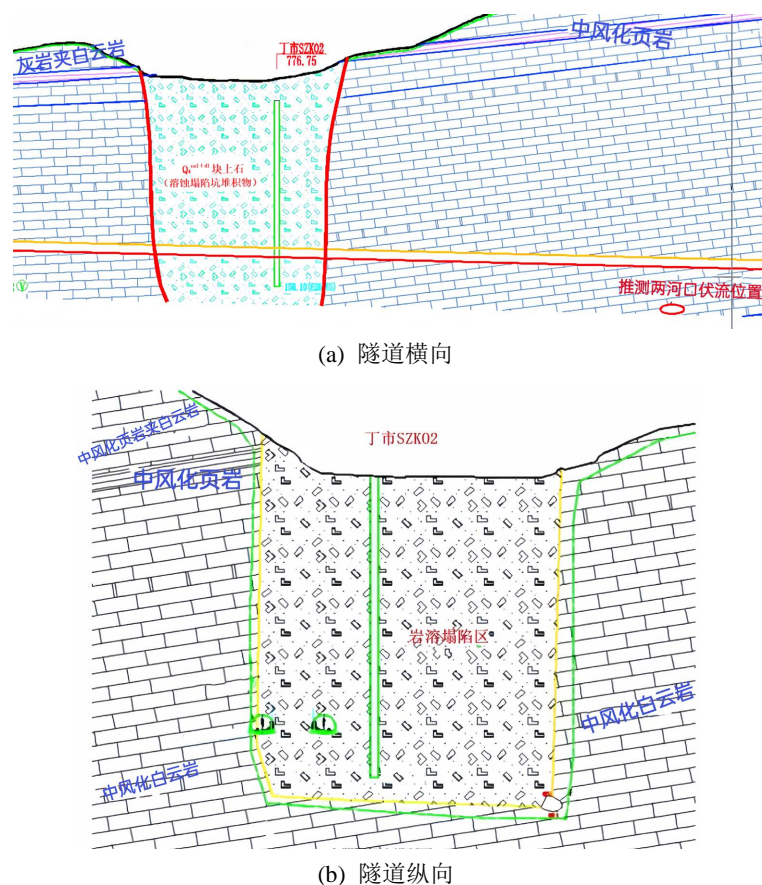


Figure 3. Relationship diagram of transverse and longitudinal karst collapse of tunnel
图 3. 隧道横纵向岩溶塌陷关系图

6. 结论

本文利用综合物探法在重庆丁市隧道岩溶区勘查中的应用实例进行研究，主要得出以下结论：

1) 在考虑勘察方法的使用特点和隧址区地质条件的基础上，以钻探为主，结合物探使用，进一步对结果比对验证。对于查明隧道岩溶发育情况和空间分布特征，数据成果精度高，达到良好的综合应用效果。

2) 综合物探法在丁市隧道勘探工作中的实际应用结果表明，单一的勘察手段应对复杂的地质情况时，存在局限性，不能保证勘探结果的精度和准确性。综合物探法从多方面对隧道岩溶区域进行勘探，更能提高勘察工作的时效性和保证数据的可靠性。对于勘察长大深埋隧道，此时就体现出综合物探法的优越性。针对工区地质条件、现有技术等如何选择更具有效率和经济效益的物探法是关键。以及解译结果的多数据联合，相互印证，才能取得较好的勘查效果，为工程施工提供可靠的地质资料。

参考文献

- [1] 张业. 综合物探方法在铁路路基岩溶勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 738-743.
- [2] 彭都, 刘伟, 赵福玉, 等. 昆明轨道交通岩溶专项勘察手段及方法[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(z2): 269-282.
- [3] 石振明, 刘镒, 彭铭, 等. 钻孔灌注桩桩底溶洞声呐探测方法及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 177-186.
- [4] 罗彩红, 邢健, 郭蕾, 等. 基于井间电磁 CT 探测的岩溶空间分布特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(s1): 669-673.
- [5] Boulytchov, A. (2000) Seismic-Electric Effect Method on Guided and Reflected Waves. *Physics and Chemistry of the Earth*, **25**, 333-336. [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(00\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(00)00054-5)
- [6] 李彦军. 岩溶地质综合勘察方法[J]. 铁道建筑, 2000(5): 8-9.
- [7] 张霄, 尹占超, 刘啸, 等. 综合物探法在运营岩溶隧道病害探查中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(10): 60-66.
- [8] 周竹生, 丰赞. 隧道勘察中的综合物探方法[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 724-731.
- [9] 赵杰华, 谭捍华, 罗强, 等. 综合物探在岩溶地区公路工程勘察中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008(3): 77-82.
- [10] 章飞亮, 孙中科. 综合物探技术在城市轨道交通岩溶勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(5): 82-86.
- [11] 李良泉. 综合物探法在铁路基底岩溶探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(3): 389-394.
- [12] 吴银龙, 陆明锋, 李琴. EH4 野外工作方法的研究与应用[J]. 四川地质学报, 2011, 31(4): 476-480.
- [13] 熊志涛, 赵德君, 文美霞, 等. 综合物探方法在武汉市毛坦港塌陷勘查中的应用[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(2): 188-192+196.
- [14] 刘永锋, 游连强, 叶佩. 综合电法在贵州岩溶地区地下水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(3): 294-299.
- [15] 王建华. 声波测井技术综述[J]. 工程地球物理学报, 2006(5): 395-400.
- [16] 彭化伟, 黄锐, 孙宝喜. 声速测井技术方法和应用[J]. 黑龙江水利科技, 2010, 38(6): 90-91.
- [17] 孙志峰, 卢华涛, 李国梁. 随钻声波测井关键技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(36): 15849-15859.
- [18] 孔令添, 王超凡, 林焯, 等. 微动法在马坑铁矿采空区的应用分析[J]. 现代矿业, 2023, 39(1): 61-65.
- [19] 张建清, 徐磊, 李鹏, 等. 综合物探技术在大坝渗漏探测中的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(1): 432-440.