

综合物探技术在城市地铁勘察中的研究与案例浅析

李乾坤¹, 胡清茂¹, 赵晓亮², 郑江波²

(1. 徐州地铁集团有限公司, 徐州 221000;

2. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 在城市地铁勘察中, 岩溶、断裂及软土等不良地质是主要工程隐患, 严重威胁着工程后续的施工建设安全, 在常规地质勘察之外, 有必要采用有效且适宜于城市环境的物探手段予以查明, 提高勘察资料的可靠度和覆盖面。城市环境复杂, 场地条件限制多, 不同物性干扰强, 整体物探环境恶劣。笔者以徐州地铁4、5号线勘察为例, 首先针对具体场地条件进行物探环境评估; 其次对各种物探方法进行技术适应性分析, 提出场地环境与技术方法的最佳耦合; 最后, 总结出一套适用性与操作性强的物探技术模式。综合对比分析结果表明: ①微动、瞬变电磁等技术可作为城区主要的地面物探手段, 能初步查明岩溶、断裂等地质体的位置与赋存特征; ②在岩溶精细探测上, 孔间CT(电磁波)技术能进一步圈定岩溶的发育规模和空间位置; ③地面与孔间物探的合理选用或联合应用, 能够提供不同勘察阶段、不同勘察精度所需的地质资料, 满足城市地铁勘察需求。

关键词: 不良地质体; 徐州地铁4、5号线; 地铁勘察; 微动; 瞬变电磁; 地震映像; 孔间CT

中图分类号: P631; U231.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.02.10

0 引言

在城市地铁勘察中, 岩溶、断裂及软土等不良地质是主要工程隐患, 但由于城市环境复杂、限制因素众多, 常规地质调查、钻探、挖探及触探等手段无法做到快速响应, 不能做到全覆盖、连续性勘察, 存在勘察空白。物探技术快捷、灵活、场地适用性强的特点则正好适应于城市勘察环境^[1-2]。在地铁勘察中, 针对具体场地条件进行物探环境评估, 并对各种物探方法进行技术适应性分析, 寻求场地环境与技术方法的最佳耦合, 形成合理科学的综合物探技术模式。工程应用以徐州地铁4、5号线勘察工程为例, 综合对比分析结果表明, 微动、瞬变电磁等技术可作为城区主要的地面物探手段, 可以初步查明岩

溶、断裂等地质体的位置与赋存特征^[3-7]; 在岩溶精细探测上, 孔间CT(电磁波)技术能进一步圈定岩溶的发育规模和空间位置^[8-9]; 地面与孔间物探的综合应用, 则能够提供不同勘察阶段、不同勘察精度所需的地质资料, 满足城市地铁勘察需求^[10-13]。

1 城市物探工况环境与技术模式研究

1.1 城市物探工况环境特征

城市地铁工程的主要建设环境多位于城区, 而城区是一座城市的核心建成区域, 是具有行政、经济、交通、生活等城市功能的地理区域, 也是人类各项活动的集中平台。城市地表工况复杂、地物分布密集、人类活动频繁, 电磁、振动、地下空间等导致的各种物性干扰与限制性因素众多, 物探总体环境品

收稿日期: 2022-10-19

第一作者: 李乾坤(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通工程勘察设计管理和研究工作, E-mail: 420090935@qq.com。

通信作者: 胡清茂(1969—), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事轨道交通工程勘察设计管理和研究工作, E-mail: huqingmao@xzdtjt.com。

质恶劣。

物探技术本质上是对各种自然或人工物理场进行精确测量,基于物理场的异常变化及分布来反演目标体的结构信息,以达到探测目的。

在城市开展物探工作,所面临的基本就是作业环境、物理环境及功能性环境的合成或叠加,与非城区环境存在着巨大的差别。城区物探环境从其构成、特征来看,对物探方法的开展,基本都是负面性、限制性的,且具有非常强的复杂性、特殊性和困难性。具体分析如下:

1) 作业环境

物探方法的外业开展是通过在实地布设仪器设备测量物探场来实现的。各种仪器设备都需要以特定的装置布设形式来放置,而装置布设均需要一定的空间。城市密集的建构筑物、复杂的路网、硬化的地表形成构成了物探装置布设障碍,导致大部分物探方法不能灵活在城区开展。

2) 物理环境

城市物理环境复杂,振动环境、电磁环境、热环境等相互叠加交织,使得被测物理场弱化、干扰或变

得更为复杂。主要表现在交通、工业活动产生波动场干扰;电力、通信设备、金属物体产生的电磁场干扰;硬化地表、不均一地层及地下空间产生的物理场耦合干扰。

3) 功能性环境

从城市运行管理角度看,功能性环境包括城市中各种人文活动、交通及生产活动、市容美化、文明卫生管理等,主要对物探工作开展的时间段、外业布设均造成限制。

以上述城市环境产生的制约性为前提,从物探方法类型、物理前提、外业布设、数据采集、干扰源、制约类型等方面具体分析,归纳出主要物探方法与城市制约环境的关系及表现,见表 1。

1.2 城市物探环境评估

在物探软、硬件性能一定的条件下,对物理场的测量精度和分析效果则主要受外部因素制约,而复杂的城市物探环境则增强、放大了这些外部制约因素。通过对城市物探环境的制约性本质及表现的分类归纳,以制约本质、表现为评估基础,以制约效果为评估标准,作出城市物探环境品质综合评估,见表 2。

表 1 物探方法与城市制约环境关系分析

Tab. 1 Analysis of the relationship between geophysical prospecting methods and urban restricted environment

物探方法	物理场	物性差异	目标参数	装置布设要求	测试方式	主要干扰源	制约环境
地震折射	弹性体波	弹性波速度	纵波速度	一维较大空间,宜非硬化地表	连续剖面	工业、交通振动	作业及物理环境
地震反射	弹性体波	波阻抗	弹性波速度、反射几何特征	一维较大空间,宜非硬化地表	连续剖面	工业、交通振动及城市运行	作业及功能性环境
瞬态瑞雷波	面波	瑞雷波速度	瑞雷波速度	一维较小空间,宜非硬化地表	非连续点测	工业、交通振动	作业及物理环境
微动	面波	瑞雷波速度	瑞雷波速度	点状较小空间	非连续点测	城市运行	功能性环境
高密度电法	直流电场	导电性	视电阻率	一维较大空间,非硬化地表	连续剖面	电磁场、硬化地表	作业及物理环境
瞬变电磁	时间域电磁场	导电性	视电阻率	点状较小空间	非连续点测	电磁场、金属物	作业及物理环境
探地雷达	时间域电磁场	介电性	电磁波速度、反射几何特征	点状较小空间	连续剖面	电磁场、金属物	作业及物理环境
大地电磁	频率域电磁场	导电性	视电阻率	一维或二维较大空间,	非连续点测	电磁场、金属物	作业及物理环境
地震 CT	弹性体波	弹性波速度	弹性波速度	点状较小空间	孔间	工业、交通振动、城市运行	物理及功能性环境
电磁波 CT	时间域电磁场	介电性	吸收率	点状较小空间	孔间	电磁场、金属物、城市运行	物理及功能性环境
电阻率 CT	直流电场	导电性	视电阻率	点状较小空间	孔间	电磁场、金属物、城市运行	物理及功能性环境

表 2 城市物探环境综合评估

Tab. 2 Comprehensive assessment of urban geophysical environment

干扰源	制约环境	制约表现	受制约方法	解决对策	环境评估
交通	物理及功能性	随机振动、电磁场及时空干扰	所有方法	错时开展	差
工业生产、人文活动	物理及功能性	随机振动、电磁场及时空干扰	所有方法	错时开展	差
电力设备、金属(建筑)物	物理	电磁场及时空干扰	直流、交流电法	选择非电磁类方法	一般
不均一地层	物理	局部伪异常	所有方法	针对性数据处理与解释	一般
硬化地表	作业及物理	削弱信号发射及接收	插入式接地方法(弹性波及直流电法)	选择被动源、感应类方法	一般
地下空间	物理	局部伪异常	所有方法	针对性数据处理与解释	一般
地面空间	作业及功能性	不能连续探测	非点测类方法	选择线状装置、点测类方法	一般

1.3 物探技术模式

由于城市物探环境的复杂性,各种地质、地球物理前提和边界条件对物探成果皆具有较大的影响,使得单一物探方法技术的应用都存在着一定的条件性和局限性。采用两种及两种以上不同原理(物性前提)的物探方法即综合物探则能相互佐证、相互补充,更全面、更准确地探查目标体,减少多解性、增加定量性。需要强调的是,综合物探绝对不是多种物

探方法的随意选取,也不是投入的方法和手段越多越好,而应根据城市场地环境、工程需求、物理前提等,因地制宜、因时制宜,寻求场地环境与技术方法的最佳耦合,达到方法适用、技术可靠且成本可控。

基于前两节的分析,以勘察任务类型为基础,从物探目的、方法组合、适用条件、应用原则及综合解译 5 个方面分类归纳,建立适用于城市地铁物探的工作模式,见表 3。

表 3 城市地铁综合物探工作模式

Tab. 3 Urban subway comprehensive geophysical prospecting work patterns

任务类型	物探目的	方法及组合	适用条件	应用原则	综合解译
覆盖层、基岩风化层及岩性分界探查	确定覆盖层厚度,划分基岩风化层与岩性分界面	①微动+高密度电法;②微动+瞬变电磁	电磁干扰较小,非硬化地表采用组合①;硬化地表采用组合②	微动做贯通探查;电磁类方法进行局部复杂段、异常段电性参数校核	以速度、频谱参数确定土石分界;电性参数侧重风化层的识别划分
断裂(破碎带)探查	查明断裂(破碎带)的平面位置、埋深、走向、倾角等地质特征	①地震反射;②微动+高密度电法;③微动+瞬变电磁	深大(活动)断裂采用组合①;规模较小断裂(破碎带)、电磁干扰较小,非硬化地表采用组合②;硬化地表则采用组合③	地震反射进行局部精细化探查;微动做靶区选定,电磁类方法进行局部复杂段、异常段电性参数校核	以速度参数划定断裂带平面位置;地震反射信息确定断裂上断点、断距、倾向等;电磁方法确定断裂电性特征
岩溶(空洞)探查	圈定岩溶(空洞)的平面位置、埋深、规模等特征	①微动+瞬变电磁;②微动+地震CT;③微动+电磁波CT	电磁干扰较小,硬化地表采用组合①;精细化探查、钻孔充水条件下,采用组合②、钻孔无水采用组合③	微动为主要手段,瞬变电磁进行局部复杂段、异常段电性参数校核;CT方法做孔间精细探查	以速度参数识别圈定岩溶异常;电性参数间接确定岩溶充填特征;CT侧重精细刻画岩溶形态
孤石探查	圈定孤石的平面位置、埋深、规模等特征	①微动+瞬变电磁;②微动+地震CT;③微动+电磁波CT	电磁干扰较小,硬化地表采用组合①;精细化探查、钻孔充水条件下,采用组合②、钻孔无水采用组合③	微动为主要手段,瞬变电磁进行局部复杂段、异常段电性参数校核;CT方法做孔间精细探查	以速度参数识别圈定孤石异常;电性参数佐证微动异常;CT侧重精细刻画孤石发育形态
软弱夹层探查	查明软弱夹层的平面位置、埋深、厚度等特征	①微动+高密度电法;②微动+瞬变电磁	电磁干扰较小,非硬化地表采用组合①;硬化地表则采用组合②	微动做贯通探查;电磁类方法进行局部复杂段、异常段电性参数校核	以速度参数识别软弱夹层异常;电性参数佐证微动异常并提供含水特征
地下管道探测	查明地下管道的平面位置、埋深	①微动+地震映像;②微动+地质雷达	电磁干扰较大时采用组合①;电磁干扰较小、浅埋管道探测采用组合②	微动侧重中深部探查;地震映像做反射信息校核;地质雷达侧重中浅部非金属管道探查	以速度参数重点识别管道平面位置;映像及雷达反射几何信息佐证校核管道平面及埋深特征

2 工程案例剖析

2.1 岩溶探测

1)徐州地铁4号线西贺站~杨山路站区间为既有城市道路,交通繁忙,地表全硬化,钻孔漏水严重,物探主要制约类型为作业及物理环境,采用技术模式为瞬变电磁+电磁波CT。

初勘地面瞬变电磁成果(图1)以及初勘钻探成果(图2)显示,在西贺站~杨山路站区间(K22+100~K22+145)段岩溶强烈发育。瞬变电磁剖面成果图中,溶洞(充填型、混合型)相对于较完整围岩而言均

为较明显低阻闭合或半闭合区域,依此圈定出被高阻围岩包裹的低阻异常体或土石界面的低阻下凹区(横、竖向梯度变化较大)推定解释为溶洞。因此在隧道中线位置增加验证钻孔3孔(D4X5Q16Z60、D4X5Q16Z61、D4X5Q16Z63),验证钻孔揭示溶洞位置埋深与地面瞬变电磁解译溶洞位置、埋深对应较好(图1,表4),同时为精细查明D4X5Q16Z04号孔附近岩溶发育情况,布置D4X5Q16Z60~D4X5Q16Z61、D4X5Q16Z61~D4X5Q16Z63孔透CT2对。CT探测结果表明,如图3,在隧道洞身范围及结构顶底板内均有溶洞发育,影响盾构施工安全。

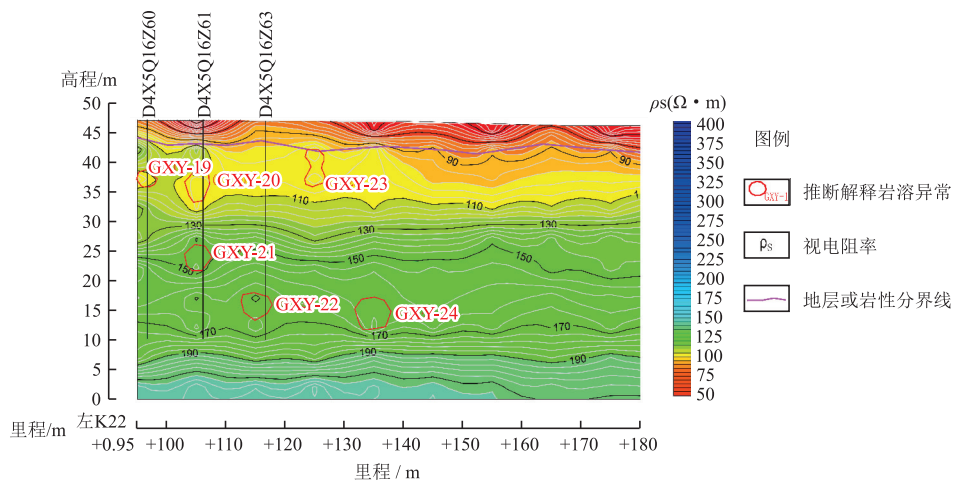


图1 瞬变电磁视电阻率断面成果图

Fig. 1 TEM apparent resistivity section results

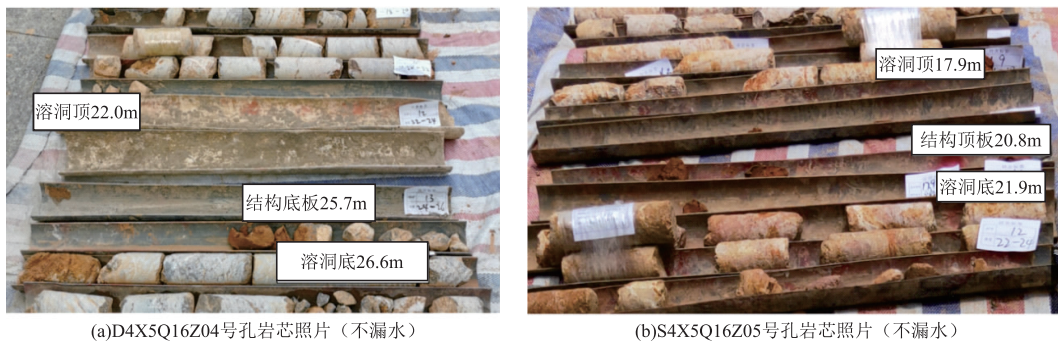


图2 钻孔岩芯照片

Fig. 2 Photos of verified borehole cores

表4 初勘物探异常与钻孔验证情况表

Tab. 4 Shows the preliminary geophysical anomaly and borehole verification

勘察阶段	岩溶编号	物探定性	顶板埋深	底板埋深	验证情况	
					验证孔	揭露溶洞埋深/m
初勘阶段	GXY-19	溶洞	8.4	11.4	D4X5Q16Z60	8.0~8.9、9.4~12.3
	GXY-20	溶洞	8.8	15	D4X5Q16Z61	3.4~11.0、14.7~15.0、24.0~27.7
	GXY-21	溶洞	20.8	25.6		

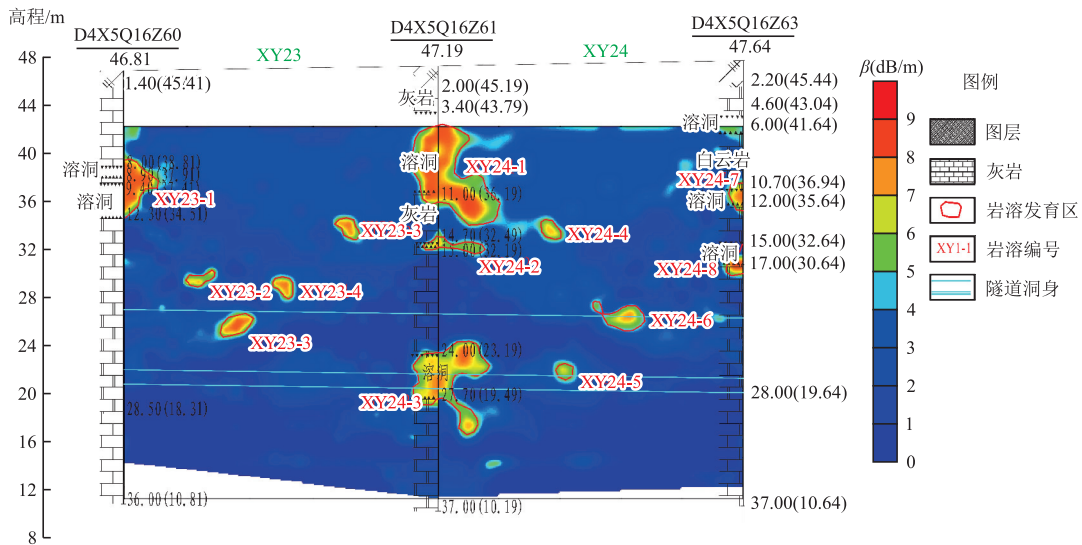


图 3 电磁波 CT 断面成果图
Fig. 3 Section results of electromagnetic wave CT

2)徐州地铁 5 号线和平路站~骆驼山站区间为既有城市道路,交通繁忙,钻孔漏水严重,主要制约类型为物理及功能性环境,详勘阶段采用技术模式为电磁波 CT。

和平路站~骆驼山站区间 D5Q11X3Z11 钻孔在深度 22.5 m~33.5 m(11 m 溶洞)、38.5 m~41.2 m(2.7 m 溶洞)揭示较大溶洞,利用孔间电磁波 CT 布置了 4 对电磁波 CT,测线编号为 HL1~HL4(图 4),CT 探测结果表明,如图 5,溶洞部分侵入到盾构隧道结构范围内,影响盾构施工安全。

2.2 断层破碎带探测

区域构造资料显示,徐州地铁 4 号线西贺站~杨山路站区间发育 F₃₄ 断层,该区间为既有城市道路,交通繁忙,地表全硬化,物探主要制约类型为作业及物理环境,采用技术模式为地震映像+瞬变电磁,夜间作业。

初勘地震映像和瞬变电磁综合探测结果表明,如图 6、图 7,地震映像反射波同相轴出现明显不连续、反射信号衰减严重,经解译为断层破碎带位于 K22+220 位置附近。瞬变电磁视电阻率剖面横向上在 K22+220 附近在横向上有明显陡降、错动现象,出现低阻下巴区域,推测为断层位置。后期与钻探成果验证,推测断层位置与钻孔揭露位置基本一致。

2.3 土石界面探测

徐州地铁 5 号线师范大学站~和平路站区间位于城区主干道,初勘钻探发现风化槽。该区间交通繁忙,电磁干扰严重,物探主要制约类型为物理及功能性环境,采用技术模式为微动,夜间作业。

通过钻孔分层资料对视横波速度标定后,如图 8,微动断面成果图与详勘钻探剖面成果对比可以看出,在微动视横波速度剖面图中,依据速度变化梯度,结合初勘阶段邻近钻孔揭示岩性界面标定分界速度值,确定本工区土石界面分界速度值在 450 m/s 左右,以此标定值划分土石界线。最终在详勘阶段各钻孔揭示的地层分界面与视横波速度分界面基本一致,且提供了覆盖面更广的连续勘察资料。

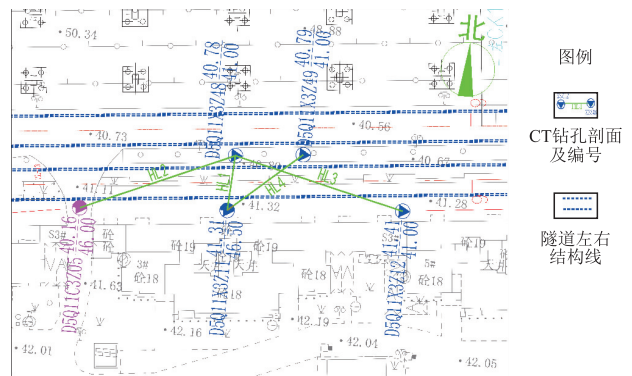


图 4 电磁波 CT 测线布置图
Fig. 4 Layout of CT survey line for electromagnetic wave

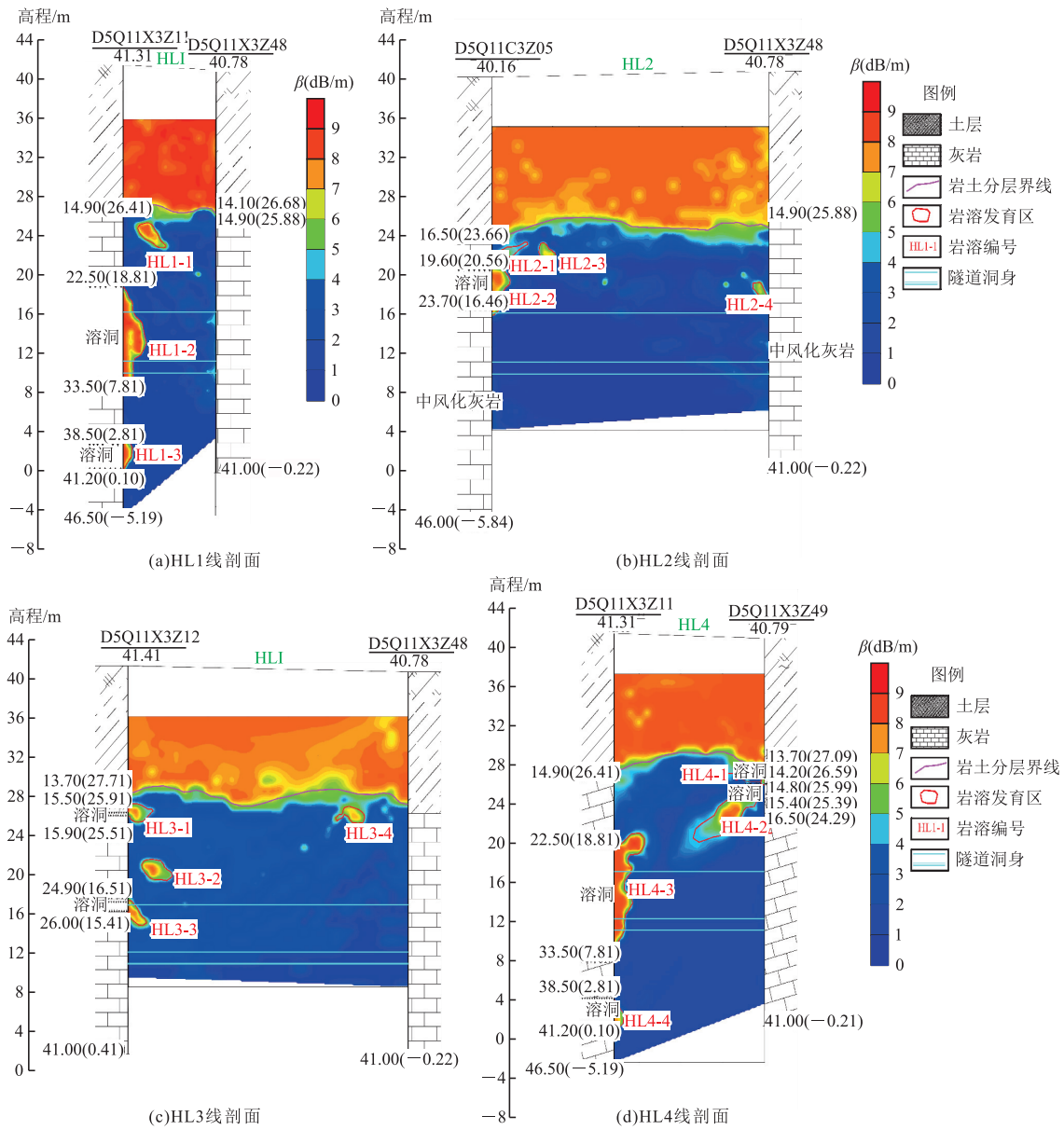


图 5 电磁波 CT 断面成果图

Fig. 5 Section results of electromagnetic wave CT

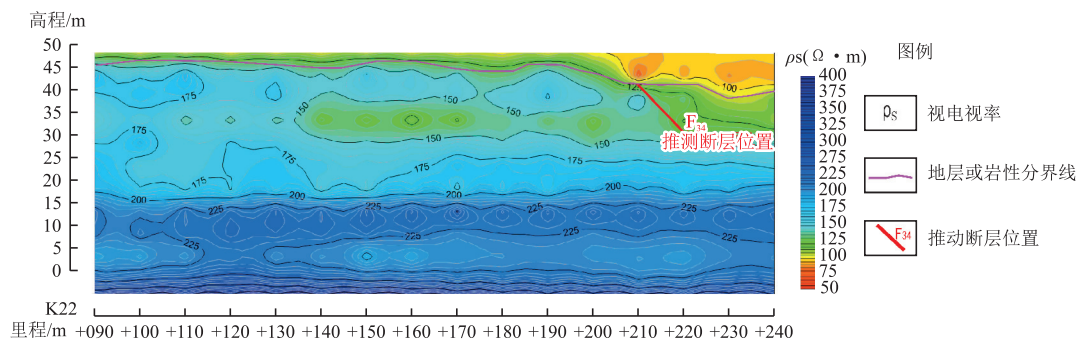


图 6 瞬变电磁视电阻率断面成果图

Fig. 6 TEM apparent resistivity section results

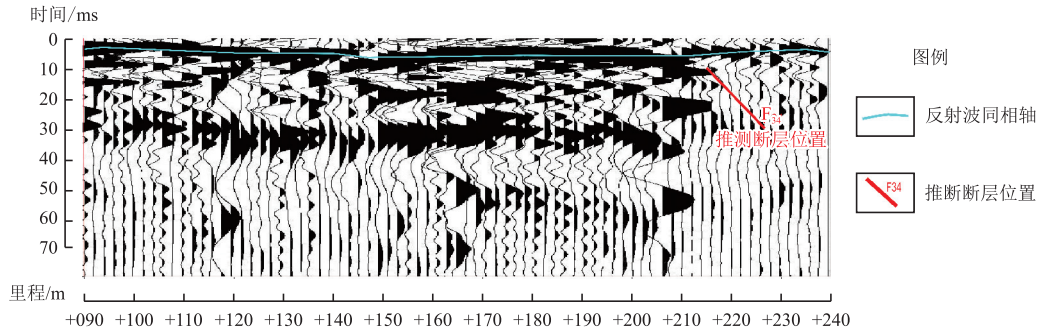


图 7 地震映像断面成果图
Fig. 7 Section results of seismic image

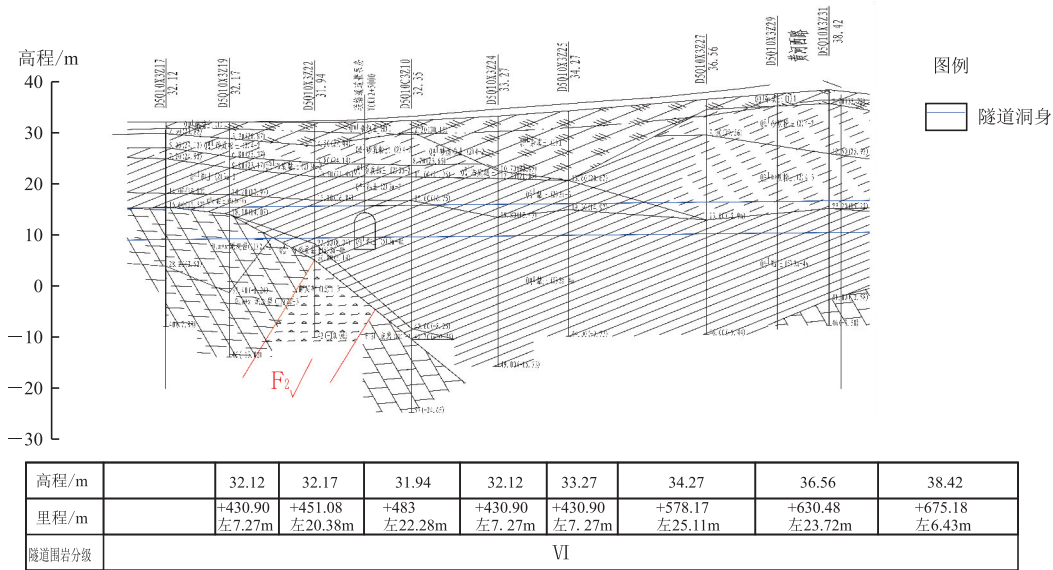
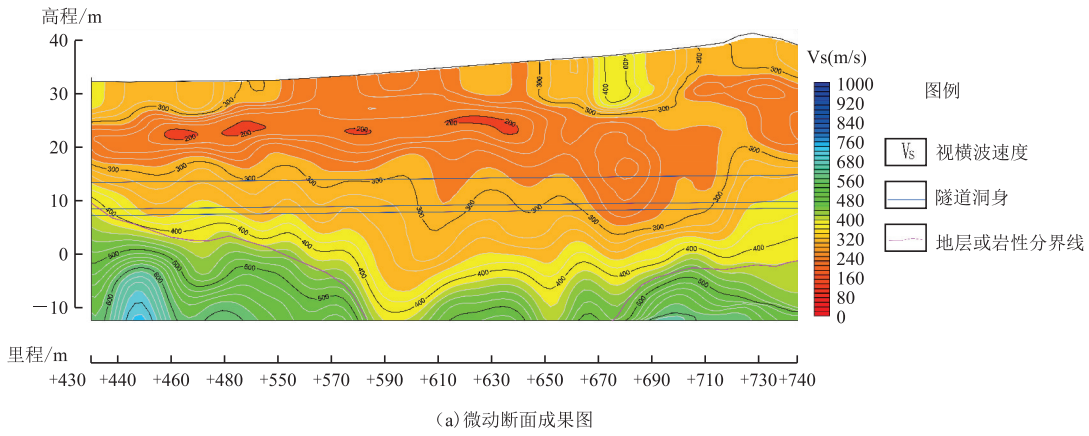


图 8 微动视横波速度断面与钻孔地质剖面对比图

Fig. 8 Comparison of microtremor apparent S-wave velocity section and borehole geological section

3 结论

1) 通过对城区物探环境的分析和评估,以场地

工况环境与技术方法的最佳耦合为原则,以方法适用、技术可靠且成本可控为目的,概要性地总结出了城市地铁物探模式。

2) 基于徐州地铁 4、5 号线案例分析,微动、瞬变

电磁、地震映像等地面物探技术的合理选用及组合可以初步查明岩溶、断裂等地质体的位置与赋存特征;孔间 CT(电磁波)技术可以进一步圈定岩溶的发育规模和空间位置。

3)根据物探手段结合钻探综合岩溶探测结果,对隧道底隐伏岩溶,建议根据溶洞规模、埋深、填充情况采取针对性处理加固措施;另外位于隧道顶部的部分溶洞,为使隧道顶部的地层和工作面岩土体保持稳定,防止拱顶坍塌和工作面土体流失,减少地表沉降,必要时对其进行加固处理。在施工过程中需加强支护和防水措施,如遇溶洞可采用注浆加固等措施。

4)综合物探技术能够作为有效勘察手段,提供不同勘察阶段、不同勘察精度所需的地质资料,满足地铁勘察需求,使得地铁勘察资料更加全面与完善。

参考文献:

- [1] 李世安,李耐宾,周华贵.城市轨道交通岩溶施工勘察方法应用研究[J].铁道勘察,2020,46(3):63—67.
LI S A, LI N B, ZHOU H G. Application study of karst investigation methods in urban rail transit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2020, 46(3): 63—67. (In Chinese)
- [2] 刘铁华,刘铁,程光华,等.复杂城市环境下地球物理勘探技术研究进展[J].工程地球物理学报,2020,17(6):711—720.
LIU T H, LIU T, CHENG G H, et al. Research progress of geophysical exploration technology in complex urban environment[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6): 711—720. (In Chinese)
- [3] 杨祥森,林昀,崔德海.地震映像法在铁路隐伏岩溶勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2007,4(5):470—474.
YANG X S, LIN Y, CUI D H. Application of seismic imaging method to exploration of hidden karst under railway tunnel[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(5): 470—474. (In Chinese)
- [4] 席振铎,龙霞,周胜,等.基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J].地球物理学报,2016,59(9):3428—3435.
XI Z U, LONG X, ZHOU S, et al. Shallow transient electromagnetic method based on the principle of equivalent antiferromagnetic flux [J]. Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3428—3435. (In Chinese)
- [5] 李耐宾,裴世建.微动技术在大连地铁岩溶勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2019,16(5):580—585.
LI N B, PEI S J. The application of microtremor technology to karst survey of the dalian subway[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(5): 580—585. (In Chinese)
- [6] 徐佩芬,侍文,凌苏群,等.二维微动剖面探测“孤石”:以深圳地铁7号线为例[J].地球物理学报,2012,55(6):2120—2128.
XU P F, SHI W, LING S Q, et al. Mapping spherically weathered “Boulders” using 2D microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen [J]. Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2120—2128. (In Chinese)
- [7] 刘黎东.微动技术在城区不良地质体勘察中的应用研究[J].铁道工程学报,2019,36(5):1—5.
LIU L D. The Application and study of microtremor technology in the urban unfavorable geologic body survey[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(5): 1—5. (In Chinese)
- [8] 段春龙,杨亚磊.电磁波CT技术在岩溶勘查和注浆检测方面的应用[J].工程地球物理学报,2017,14(4):435—441.
DUAN C L, YANG Y L. Application of Electromagnetic Wave CT to Karst Exploration and Grouting Detection [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(4): 435—441. (In Chinese)
- [9] 蒋富鹏,肖宏跃,刘垒,等.高密度电法在工程岩溶勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2013,10(3):389—393.
JIANG F P, XIAO H Y, LIU L, et al. Application of high-density electrical method to karst exploration [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(3): 389—393. (In Chinese)
- [10] 周超,刘怡,赵思为.综合物探在城市地下空间调查隐伏断层探测中的应用[J].工程地球物理学报,2022,19(1):64—70.
ZHOU C, LIU Y, ZHAO S W. Application of integrated geophysical methods in the detection hidden faults in urban underground space investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(1): 64—70. (In Chinese)
- [11] 龚选波,张继伟,周玉凤,等.综合物探技术在深圳地铁16号线岩溶勘察中的应用[J].工程勘察,2018,46(7):62—67.
GONG X B, ZHANG J W, ZHOU Y F, et al. Application of comprehensive geophysical technology in karst investigation in Line No. 16 of Shenzhen Metro [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(7): 62—67. (In Chinese)
- [12] 付德俊,汤昌旺,负鹏.综合物探在某房建高层基础岩溶勘察中的应用[J].工程地球物理学报,2019,16(1):

- 111—115.
- FU D J, TANG C W, YUN P. Application of comprehensive geophysical prospecting to karst prospecting of a high-rise building foundation[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(1): 111—115. (In Chinese)
- [13] 王鹏飞, 李勇, 李富, 等. 综合电法勘探在“红层地区”找水中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(5): 659—664.
- WANG P F, LI Y, LI F, et al. Application of comprehensive electrical exploration in finding water in “red layer”[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(5): 659—664. (In Chinese)

Comprehensive geophysical prospecting technique in urban subway survey study and case analysis

LI Qiankun¹, HU Qingmao¹, ZHAO Xiaoliang², ZHENG Jiangbo²

(1. Xuzhou Urban Rail Transit CO., LTD. Xuzhou 221000, China;

2. China Railway Liuyuan Group CO., LTD. Engineering Survey Institute, Tianjin 300308, China)

Abstract: In subway investigation, undesirable geological conditions such as karst, fracture, and soft soil are the main hidden dangers of the project, which seriously threaten the safety of the subsequent construction of the project. In addition to the conventional geological survey, it is necessary to adopt effective and suitable geophysical methods for the urban environment to improve the reliability and coverage of survey data. The urban environment is complex, the site conditions are limited, the interference of different physical properties is substantial, and the overall geophysical environment is harsh. Taking the survey of Xuzhou Metro Lines 4 and 5 as an example, this paper firstly evaluates the geophysical environment according to the specific site conditions; secondly, analyzes the technical adaptability of various geophysical methods, and proposes the best coupling of the site environment and technical methods; finally, summarizes the set of geophysical technology models with strong applicability and operability. The results of the comprehensive comparative analysis show that ①microtremor, transient electromagnetic, and other technologies can be used as the main ground geophysical means of urban areas and can preliminarily identify the location and occurrence characteristics of karst, fracture, and other geological bodies; ②in the fine detection of karst, Interhole CT (electromagnetic wave) technology can further delineate the development scale and spatial location of karst; ③Reasonable selection or combined application of ground and inter—pore geophysical exploration can provide geological data required for different survey stages and different survey accuracy, and meet the needs of urban subways.

Keywords: undesirable geological body; Xuzhou metro line 4 and 5; subway exploration; microtremor; transient electromagnetic; seismic image; interhole CT