

doi: 10.12029/gc20220506

李华,王东辉,张伟,王桥,杨剑,廖国忠,韩浩东,席振铎,王亮,刘胜. 2022. 地球物理探测技术在成都市浅表地质结构调查中的应用研究[J]. 中国地质, 49(5): 1438-1457.

Li Hua, Wang Donghui, Zhang Wei, Wang Qiao, Yang Jian, Liao Guozhong, Han Haodong, Xi Zhenzhu, Wang Liang, Liu Sheng. 2022. Application research of geophysical exploration technology in the investigation of shallow geological structure in Chengdu [J]. Geology in China, 49(5): 1438-1457(in Chinese with English abstract).

地球物理探测技术在成都市浅表地质结构调查中的应用研究

李华¹,王东辉¹,张伟¹,王桥¹,杨剑¹,廖国忠¹,韩浩东¹,席振铎²,王亮³,刘胜⁴

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川 成都 610081;2. 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083;3. 湖南
五维地质科技有限公司,湖南 长沙 410205;4. 中石化石油工程地球物理公司南方分公司,四川 成都 610000)

摘要:【研究目的】查明城市浅表地质结构特征,对于城市地下空间规划、开发区建设、地质灾害评价等有着重要的指导意义,而无损、抗干扰能力强的地球物理探测技术在提供城市地区地下地质信息方面可以发挥关键作用。【研究方法】为了支撑成都市浅表的三维地质填图工作,本文应用11种新、老地球物理探测技术,开展了成都市浅表地质结构的探测研究。【研究结果】研究结果表明:(1)地质雷达对于近地表的地质结构成像、建筑结构识别分辨率较高;(2)瞬态面波、混合源面波、三分量频率谐振法对50 m以浅的地质结构识别能力强,分辨率很高,但探测深度有限;(3)微动勘探法和高密度电阻率法对50 m以浅的地质结构分辨率较高,但深部分辨率一般;(4)等值反磁通瞬变电磁抗干扰能力强,施工效率高,50 m以浅分辨率较高,50~200 m深度范围内分辨率一般,对膏岩泥岩有较好的识别能力;(5)半航空瞬变电磁可弥补了常规物探方法无法进入特殊场地施工的不足;(6)浅层地震勘探对于浅地表50~300 m深度范围内的砂泥岩互层的变化特征和断层结构特征效果较好,配合自然伽马曲线,可有效识别砂泥岩的岩性界面;(7)音频大地电磁可有效识别成都平原深大断裂的空间分布形态。【结论】综合各种地球物理方法的优缺点,建立了成都市浅表地质结构的地球物理组合探测技术方案,以期能为今后的城市浅表地质结构调查提供参考。

关键词:地球物理;地质结构;地下空间利用;断裂;组合探测技术;成都市;城市地质调查工程

创新点:(1)首次尝试使用半航空瞬变电磁法探测城市大型垃圾填埋场的基底形态,并取得良好的探测效果;弥补了常规物探方法无法进入此类场地施工的不足。(2)通过对33个典型实例点探测成果综合研究,初步形成了成都市多元地质条件、复杂工况条件下0~200 m的地下空间结构地球物理组合探测技术指导方案,并创新以“一图一表”的方式进行表达,简单易懂。

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)05-1438-20

Application research of geophysical exploration technology in the investigation of shallow geological structure in Chengdu

LI Hua¹, WANG Donghui¹, ZHANG Wei¹, WANG Qiao¹, YANG Jian¹, LIAO Guozhong¹,
HAN Haodong¹, XI Zhenzhu², WANG Liang³, LIU Sheng⁴

收稿日期:2020-09-23; 改回日期:2020-10-27

基金项目:中国地质调查局项目(DD20189210, DD20190033, DD20221733)和国家自然科学基金青年基金(41804144)联合资助。

作者简介:李华,男,1979年生,硕士,高级工程师,目前主要从事工程地质、环境地质方面的地球物理勘查技术应用与研究;

E-mail:23841719@qq.com。

通讯作者:王东辉,男,1982年生,硕士,高级工程师,从事水工环、城市地质调查相关工作;E-mail:16216813@qq.com。

(1.Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2.School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;3. Hunan 5D Geophyson CO., LTD, Changsha 410205, Hunan, China; 4. SINOPEC Geophysical Corporation, Nanfang Branch, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: This paper is the result of the geological survey engineering.

[Objective] There is great significance to find out the characteristics of urban shallow geological structure for urban underground space planning, development zone construction, geological disaster evaluation. While the nondestructive and strong anti-interference geophysical exploration technology can play a key role in providing urban underground geological information. **[Method]** In order to support the three-dimensional geological mapping of Chengdu City, 11 kinds of new and old geophysical exploration techniques are used to study the shallow geological structure of Chengdu City. **[Results]** The results show that: (1) GPR has a high resolution for the formation structure imaging and human structure identification near the surface; (2) Transient surface wave, mixed source surface wave and three-component resonance method have a strong recognition ability for the geological structure with a shallow depth of 50m, although the resolution is very high, but the detection depth is limited; (3) Microtremor survey method and high-density resistivity method have a better resolution for the geological structure with a shallow depth of 50 m, but under the deep of 50 m, the resolution is general, especially the high-density electrical method is greatly disturbed by humanity, and the detection effect is not stable; (4) Opposing coils transient electromagnetic method anti-interference ability is strong, the construction efficiency is high, the resolution is better in the range of 0–15 m, and general in the range of 50–200 m, which has a good identification ability for gypsum mudstone; (5) The semi-airborne TEM method can effectively identify the base form of Chang'an landfill and make up for the lack of conventional geophysical methods that the special site for detection; (6) The shallow seismic exploration has a good effect on the variation characteristics and fault structure characteristics of the sand shale interbedding within the depth range of 50–300 m underground, and can effectively identify the lithology interface of the sand shale in combination with the natural gamma curve; (7) The audio-frequency magnetotelluric method can effectively identify the deep fracture in Chengdu Plain. **[Conclusions]** Based on the merits and demerits of various geophysical methods, a combined geophysical exploration scheme of shallow geological structure in Chengdu is established under conditions of multiple geological structures and complex working conditions, which is expected to provide a reference for the investigation of urban shallow geological structure in the future.

Key words: geophysics; geological structure; underground space utilization; fault; combined exploration technology; Chengdu City; urban geological survey engineering

Highlights: (1) It is the first time to use semi aero transient electromagnetic method to detect the basement morphology of large urban landfill, and good detection results have been achieved; It makes up for the shortage that conventional geophysical methods cannot enter such sites for construction. (2) Based on the comprehensive research on the detection results of 33 typical example points, the guiding scheme for geophysical combination detection technology of underground space structures in Chengdu is formed under conditions of multiple geological conditions and complex working conditions from 0 to 200 m, and it is innovatively expressed in the form of "one figure and one table", which is simple and easy to understand.

About the first author: LI Hua, male, born in 1979, senior engineer, mainly engaged in the application and research of geophysical exploration technology in engineering geology and environmental geology; E-mail: 23841719@qq.com.

About the corresponding author: WANG Donghui, male, born in 1982, senior engineer, engaged in hydrogeology, engineering geology, environmental geology and urban geological survey; E-mail: 16216813@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey(No.DD20189210, No.DD20190033, No.DD20221733) and National Natural Science Foundation of China (No. 41804144).

1 引言

近年来,随着中国城镇化进程的加快,城市人口与承载力、环境资源等要素之间的矛盾日益突出。城市地下空间的开发与利用对城市的健康、生

态、节约、智能发展变得尤为重要(郝爱兵等,2017;杨文采等,2019;杨晓刚等,2019)。在此背景推动下,成都、西安、杭州、南昌、青岛、延安等城市相继开展了新一轮的多要素城市地质调查工作,重点对城市地下200 m以浅的地层结构进行详细描述,最

终形成一个具有三维地质信息的数据库,用于未来城市地下空间规划、工程建设或环境评价的相关研究。应用到的信息资料包括地质报告、地形图、遥感影像图、钻孔数据、城市及邻区的地质露头特征、地球物理信息等。本文正是依托2017—2020年中国地质调查局和成都市政府联合出资开展的成都市地质调查工作,展开了成都市浅表地质结构的探测研究与应用,为成都市的三维地质格架的建立提供基础数据。

成都市浅表地质结构调查的主要内容包括浅表人文扰动层人文建造的形态及分布、第四系覆盖层厚度、地下地层岩性的划分、城市主要断裂的几何分布特征、特殊岩土体的埋深及厚度、钙芒硝采空区的分布形态、长安垃圾填埋场的基底探测与渗透安全性评价等。在城市地下地质结构探测过程中,高效、无损、抗干扰强的地球物理探测技术显得尤为重要(李学军,2011;赵锴等,2017;Theis et al., 2018)。特别是在地下的三维地层建立方面,地球物理学可以发挥重要的作用(赵文津,2003;陈颢,2003)。地层是层状展布的地层面分割的空间实体,是最主要的地质现象之一,成都市地层结构极其复杂,为典型的砂泥岩软硬夹层结构,有些地层存在交叉或尖灭,层与层之间是紧密的相邻关系。一维的钻孔信息往往具有离散、有限、稀疏、不规则等特点,将具有二维或三维特征的地球物理信息添加到一维钻孔数据基础上可以达到细化地质结构图的效果。

自20世纪50年代初至今,前人在成都平原以不同地质目的开展过一些小比例尺的电测深、重力、地震、航磁等物探工作:电测深工作多布置于盆地中以解决覆盖层厚度为目的,重力、地震、航磁主要是解决大地构造及油气构造为目的,推断结果属宏观推论性见解。在对浅地表0~200 m范围内的地层岩性精细分层,特殊岩土体、采空区、垃圾填埋场等方面的探测研究几乎为空白,远远无法满足当今城市高精度三维地质建模的要求,本次开展的研究工作,对于填补成都市浅表地质结构精细化探测的空白具有重要的意义。

本研究主要目的是采用人工源和天然源的地球物理数据推断和研究成都市浅表地质结构特征、特别是地下0~200 m范围内地层岩性变化特征。前

人已经先后对城市地球物理技术的应用与发展做过详细的综述,并列举了目前国内外常用的及最新的城市地球物理技术(陈颢,2003;李学军,2011;Vema et al., 2011; Miller, 2013; Werkema and Lane, 2015; Bridle, 2016; 李万伦,2018),本研究在此基础上,将这些方法真正用于成都市进行试验研究,结合成都市的不同工况、不同地质条件来评估每种方法的探测效果。试验研究过程中使用了11种地球物理探测技术:地质雷达用于近地表的地层结构、人文建造成像;瞬态面波、混合源面波和三分量共振用于研究地下100 m以浅的地层岩性精细划分;等值反磁通瞬变电磁、高密度电阻率法、微动勘探法、浅层地震勘探用于研究地下200 m以浅的地层岩性变化特征、城市隐伏断层结构特征、特殊岩土体埋深及厚度、地下采空区的分布形态等;半航空瞬变电磁用于探测长安垃圾填埋场的基底形态,弥补了常规物探方法无法进入垃圾填埋场施工的不足;音频大地电磁用于研究控制深部构造断裂的几何特征和深覆盖区的松散层厚度;综合测井法用于获取不同地层岩性对应的视电阻率、自然伽玛、声波速度值。文中重点围绕这些方法技术的基本原理、适用条件、应用效果等方面进行了详细分析和归纳总结。这些方法技术基本上是当前城市地质调查中应用最广泛、最有成效的地球物理技术,或是近年来研发的新方法新技术,在新一轮的城市多要素城市地质调查中具有广泛的应用前景。最后综合分析各种地球物理方法的优缺点后,建立了成都市多元地质结构、复杂工况条件下浅表地质结构的地球物理组合探测技术方案,以期能为今后的城市浅表地质结构调查提供参考。

2 区域地质地球物理特征

2.1 区域地质背景

成都市位于成都平原东南隅,成都平原在构造上是成都断陷盆地(又称成都凹陷),其西侧为龙门山山前断裂带,东侧紧邻龙泉山西坡断裂,它的形成与龙门山推覆构造带的活动有着密切的关系,是一西陡东缓受喜马拉雅期两侧断裂对冲形成的构造盆地(图1a)。第四纪以来,随着青藏高原的抬升和地壳物质向东南的滑动,导致龙门山带由北西向南东强烈挤压、推覆,在山前形成了相对下陷的第

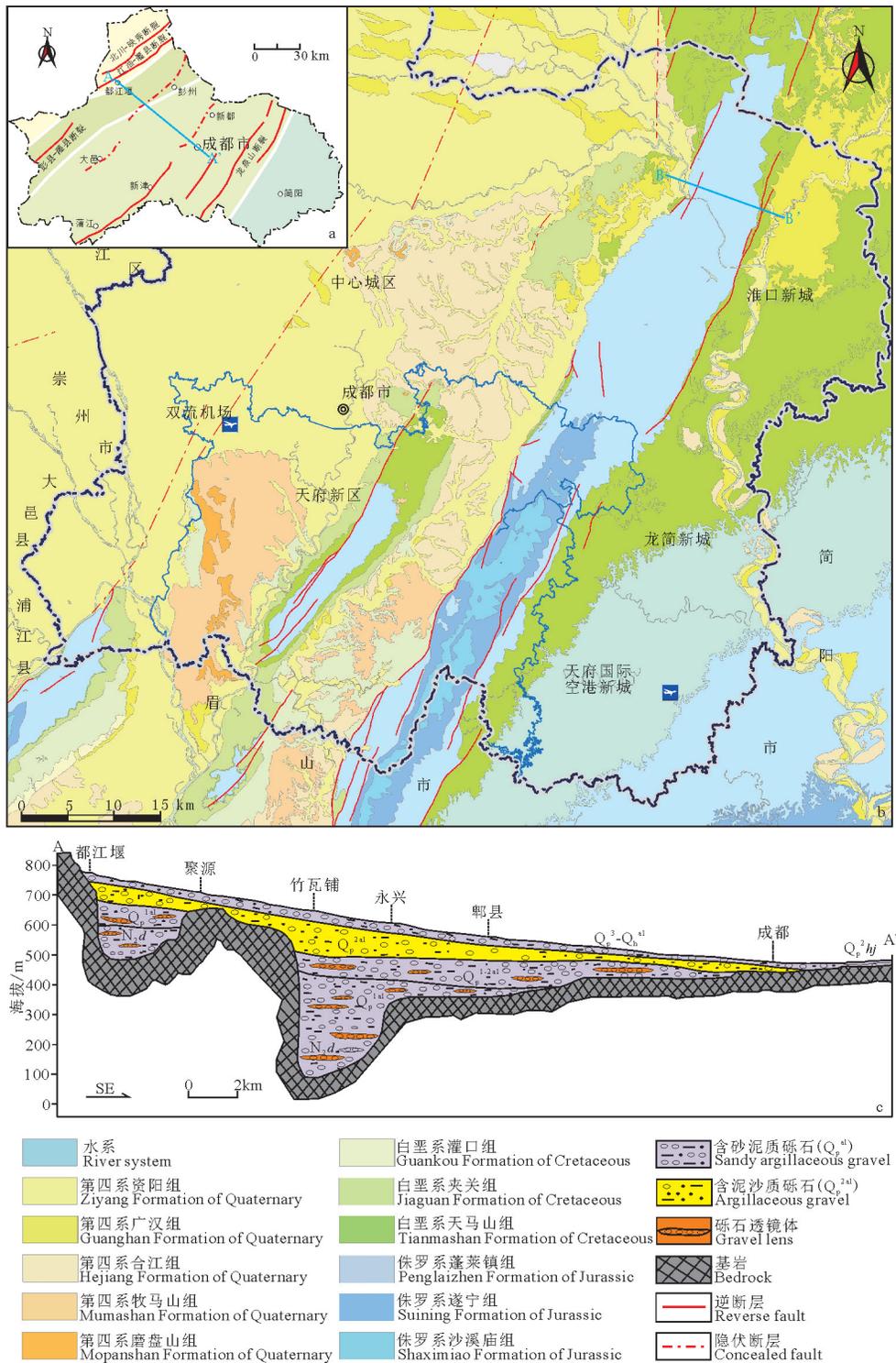


图1 成都市综合信息图

a—构造位置图;b—地质图;c—都江堰—成都市第四纪地质地貌剖面图(据四川地矿局成都水文地质工程地质队,1985资料●修改))

Fig.1 comprehensive information map of Chengdu City

a—Structural location map; b—Geological map; c—Dujiangyan—Chengdu Quaternary geological and geomorphic profile map (modified from Chengdu Hydrogeological Engineering Geological Team,Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources,1985)

四纪断陷盆地。断陷盆地边缘由一系列北东向的褶曲、断裂构成,这些断裂有的部分出露地表,有的则全部隐伏于第四纪覆盖层之下,规模较大,一般延长在30 km以上,多表现为逆冲断层,均系中新统以来的活动断层,可分为西部边缘构造带、东部边缘构造带和中央凹陷三个部分,分别以彭州—大邑断裂和蒲江—新津断裂及新都—德阳断裂为界(图1a)。其中,东部边缘构造带:由一系列箱状短轴背斜及宽缓向斜组成,轴向北35°东,呈雁列,褶曲两翼不对称,且西翼陡,东翼缓,有挠曲现象。

成都市地层出露较齐全,主要为上三叠统、中生界碎屑沉积岩及零星的古近系—新近系和第四系松散堆积层(图1b)。中生代以前的地层主要由碳酸盐类岩石及火山岩组成,它们与岩浆岩体主要分布于龙门山隆起褶带;中生代的地层,侏罗系沙溪庙组、遂宁组、蓬莱镇组和白垩系天马山组、夹关组、灌口组,其出露受地质构造控制。侏罗系主要在龙泉山背斜核、翼及苏码头背斜核部呈北东向展布,几乎全为红层,上统主要是红色泥岩、砂岩、粗砂岩,中统是红色、紫红色、灰色等杂色砂岩、粉砂岩、泥质夹泥灰岩,下统由紫红色砂泥岩组成;白垩系广泛分布于成都平原,下统、中统、上统均很发育,多为砖红、紫灰、紫红或夹紫色的砂岩、砾岩、粉砂岩及泥质岩,砂岩及泥岩呈不等厚互层;古近系—新近系零星出露于成都坳陷盆地边缘,古近系岩性为棕红色泥岩夹泥质粉砂岩、灰质角砾岩、泥页岩,含石膏和芒硝,新近系大邑砾岩主要为黄灰色砾岩夹岩屑砂岩透镜体;第四系广布于成都平原,为黏性土和砂卵石堆积,北西厚南东薄,竹瓦铺至茶店子间为第四纪最厚的中心沉陷区,其两侧分布受龙门山山前隐伏断裂和蒲江—新津—德阳隐伏断裂所控制,第四系沉积等厚线长轴方向沿龙门山作N30°E方向延伸,据2019年最新的钻孔资料修正,最大厚度达到了571 m,在郫县竹瓦铺附近(图1c)。

本次试验研究过程中,涉及到的地层主要为白垩系灌口组、夹关组、天马山组和侏罗系蓬莱镇组等,地层的岩性以泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩、砾岩为主。

2.2 地球物理特征

物性参数是联系地质体与地球物理场的桥梁,是开展地球物理探测的前提。笔者通过收集前人

的研究成果以及本次试验过程中完成的多个钻孔的综合测井、岩心测试、露头测试及三分量共振测试等资料,综合统计了成都市区主要地层岩性的物性参数(表1)。

通过分析研究表1中统计的物性参数可知,不同地层相同岩性之间地球物理特征相似。从电性特征来看,岩土层的岩性特征与电阻率具有一定的对应关系,覆盖层中的卵砾石层电阻率明显高于黏土层和下伏的强风化基岩;而岩石地层中的膏盐和砾岩电阻率也明显高于围岩,这三个高阻层可作为电阻率法勘探的三个电性标志层,用于界定上、下的低阻层,其他岩性的电阻率均在10~100 Ω·m,变化幅度较小相对稳定。相同岩性风化程度越高,节理裂隙越发育,电阻率相对越低;反之,风化程度越低,电阻率相对越高。

波速的垂向变化主要受各岩土层的物质成分、结构、构造含水饱和度、风化破碎程度等因素的控制,是划分岩性、定量解释的主要参数。表1中显示S波速在覆盖松散层中的响应值明显小于基岩层的响应值,同样在相同岩性条件下,S波速响应值与岩石的风化程度关系密切,风化程度越高则S波速度越小,可通过获取S波的地球物理技术来实现对浅地表地层结构进行精细划分;P波除了与风化程度有关外,对垂向不同岩性之间的响应也比较敏感,波速由黏土—卵砾石—泥岩—粉砂质泥岩—泥质粉砂岩—砂岩—膏盐富集层自上至下呈依次递增关系,垂向分层特征较明显。

岩石层中的泥岩、砂岩与自然伽马的对应关系明显,从砂岩到泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩,随着粒度的逐渐变细及泥质含量的增加,其自然伽马的响应值也逐渐增大。因成都市大部分地区浅表为复杂多元的砂泥岩互层地质结构,所以综合测井获取的自然伽马值往往变化较大。通过自然伽马值,可以对钻孔岩心进行定量精细划分,辅助修正野外钻孔编录,有助于提高地质结构分层精度。表1中的波阻抗比值是一个相对值,是通过三分量谐振测量数据处理后提取所得,其中卵砾石层波阻抗比值最大,从试验效果来看,波阻抗比值对60 m以浅的地层有良好的反映,能实现浅部地层结构的精细划分。

综上所述,成都市各地层不同岩性之间,无论

表1 成都市主要地层岩性物性参数统计
Table 1 Statistics of physical parameters of main strata in Chengdu City

地层	岩性	电阻率范围 /平均值($\Omega \cdot m$)	横波波速范围 /平均值(m/s)	纵波速度范围 /平均值(m/s)	自然伽马范围 /平均值(API)	波阻抗比范围/平均值
第四系	粉质黏土	18.2~38.6/25.5	106~382/248	335~1082/650	—	0.01~0.16/0.08
	成都黏土	8.7~22.9/14.3	102~375/215	—	—	—
	卵砾石层	79.6~479.4/252.5	324~685/516	1578~2473/2189	26~107/66	0.26~0.9/0.53
灌口组/ (K _{1g})	泥岩	7.1~58.8/23.0	700~1300/1100	2040~2520/2230	41~146/89	0.28~0.62/0.45
	粉砂质泥岩	6.4~64.9/33.1	1350~1780/1500	2340~2760/2510	33~124/81	0.02~0.35/0.22
	泥质粉砂岩	25.1~104.0/51.5	1620~1890/1750	2780~3250/2900	7~120/63	0.07~0.26/0.19
	砂岩	24.6~189.9/66.7	1710~2140/1980	2850~3640/3340	8~109/33	0.11~0.27/0.17
	含膏岩泥岩	124.4~932.1/405.1	1800~2460/2210	3850~5100/4400	11~62/30	—
	砾岩	125.6~319.2/241.3	—	—	—	—
夹关组/ (K _{1j})	泥岩	5.6~52.4/21.4	650~1200/1020	2000~2490/2210	36~182/97	0.22~0.71/0.41
	粉砂质泥岩	8.7~60.5/29.8	1270~1830/1480	2310~2720/2490	29~155/88	0.01~0.45/0.27
	泥质粉砂岩	20.4~128.1/53.6	1500~1830/1690	2730~3310/2880	11~123/69	0.11~0.32/0.22
	砂岩	15.2~227.8/67.2	1610~2080/1910	2820~3620/3320	5~117/38	—
天马山组/ (K _{1t})	泥岩	8.4~65.2/35.6	810~1480/1220	2120~2790/2450	20~125/67	0.15~0.58/0.37
	粉砂质泥岩	9.2~88.1/47.4	1570~1980/1730	2570~2980/2740	23~102/58	0.04~0.33/0.19
	泥质粉砂岩	20.7~155.6/69.8	1660~2140/1890	2990~3430/3190	3~98/46	0.03~0.19/0.14
	砂岩	30.5~277.3/97.2	1920~2440/2120	3120~3950/3570	5~86/24	—
	砾岩	106.2~663.8/362.5	—	—	—	—
蓬莱镇组/ (J _{1p})	泥岩	3.6~52.8/21.5	670~1230/1010	1960~2420/2120	53~192/109	0.16~0.71/0.41
	粉砂质泥岩	9.5~73.2/28.6	1160~1650/1450	2270~2680/2450	46~169/98	0.03~0.44/0.18
	泥质粉砂岩	14.6~112.1/46.8	1470~1710/1690	2650~3180/2840	18~135/84	0.02~0.21/0.12
	砂岩	16.3~162.4/59.4	1600~2180/1820	2720~3610/3290	22~121/52	—
	灰岩	543.7~3889.5/1762.6	—	—	—	—
	砾岩	89.4~755.1/386.3	—	—	—	—

是在电阻率、波速方面,还是在自然伽马、波阻抗比值方面,均表现出一定的物性差异,可通过一种或多种物性差异特征实现对浅地表地质结构的精细分层,具备地球物理勘探前提。

3 地球物理探测应用与效果分析

3.1 地质雷达测量

地质雷达(Ground Penetrating Radar)是一种用于确定地下介质分布情况的高频电磁技术,基于地下介质的电性差异,一个天线发射高频电磁波,另一个天线接收地下介质反射的电磁波,对接收到的信号进行处理、分析、解译以达到探测目的。它是目前分辨率最高的工程地球物理方法,已经被广泛应用于基岩探测、地质分层、岩溶及空洞探测(王永等,2004;闫长斌等,2005;黄毓铭等,2017;Lai et al.,2018;郭士礼等,2019)。在城市地质调查中该

方法的最大不足之处就是探测深度有限,其探测深度除了与选择的天线的中心频率有关外,与介质的介电常数也关系密切,介质的相对介电常数越大,电磁波传播的速度就越慢,衰减系数越大,探测的深度就小。

本次试验使用瑞典 MALA GeoScience 公司的 RAMAC/GPR 系统地质雷达探测近地表的地层结构、人文建造。选择了其中 2 条地质雷达剖面进行分析(图 2)。第一条剖面位于成都市锦城广场北侧,近东西走向,穿过已运行的地铁 1 号线,周边建筑密集,人流量大、车辆多,干扰较严重,选择 100 MHz 的屏蔽天线进行 0.5 m 等间距模式采集数据;第二条剖面位于天府新区独角兽岛,近南北走向,周边干扰较少,属于在建区,地面堆积回填土不平整,选择 50 MHz 的 RTA 超强地面耦合天线(非屏蔽)进行 1 m 等间距的数据采集。2D 数据根据双向走时和经过路程进行可

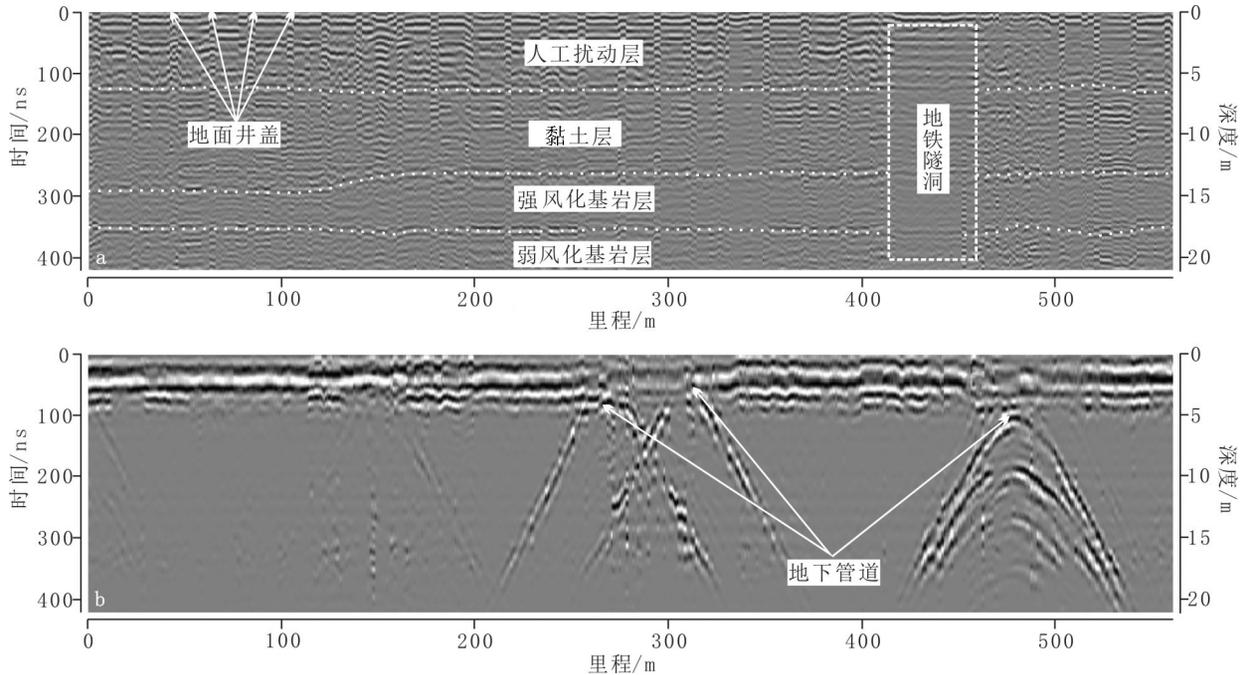


图2 地质雷达剖面探测结果图
Fig.2 Results of GPR profile detection

可视化,时深转换速度取 1.0×10^8 m/s。

在图2中,展示了2条剖面的探测成果:第一条剖面分辨率相对较高,根据雷达波反射特征,可以将浅地表20多米的地层结构分为4层(图2a),第一层为人工扰动层,反射波同相轴比较凌乱,同时受多个地面井盖的影响,沿剖面方向具有高振幅交替变化的特征,抛物线状的高振幅位置代表地面井盖的位置,第二、三、四层反射波强度逐渐减弱,同相轴也越趋连续,分别对应黏土层、强风化基岩层和弱风化基岩层,另外在剖面里程420~460 m处出现了直线状的震荡波异常,该异常正是地铁1号线隧洞的反映。第二条剖面分辨率相对较低(图2b),浅地表的高振幅区域为回填土和卵石层的反映,下部的低振幅区域则代表基岩,基覆界面分层明显,另剖面中还存在多处弧形反射异常,可推断为该区预埋的混凝土管道。

3.2 面波勘探测量

面波勘探,也称弹性波频率测深,它可以反演出浅地表结构的剪切波速度,弥补了反射地震浅地表的探测盲区。具有经济、高效、高分辨率、适用场地小等优点,主要应用于查明地下介质的速度结构并进行地层划分、管道及埋藏物探测、地下空洞、岩

溶探测等领域(Socco and Strobbia, 2004; Sirles et al., 2013; 夏江海等, 2015)。面波法又分为主动源面波法和被动源面波法(刘庆华等, 2015),在工程上应用较多瞬态面波法就是主动源面波法,而当前城市地质勘探中关注比较多的微动勘探法中利用的“微动”则为被动源,微动是一种由体波(P波和S波)和面波(瑞利波和拉夫波)组成的复杂振动,并且面波的能量占信号总能量的70%以上,从地表的微动信号中提取Rayleigh波相速度频散曲线,再通过对频散曲线的反演,获得地下介质的横波速度结构达到勘探目的方法称为微动勘探法(徐佩芬等, 2012, 2013; Nakata, 2016)。主动源对浅部地层的探测精度高,但探测深度较浅;被动源探测深度深,但信号的高频段易受人为噪声的干扰,对浅部地层的探测精度较低,当前又流行将两者相结合进行勘探,称之为联合面波勘探或是混合源面波勘探(Craig and Hayashi, 2016; 丰赞等, 2018)。本次试验分别采用了瞬态面波、混合源面波和微动勘探法进行研究对比。

3.2.1 瞬态面波测量

采用北京水电物探研究所的SWS-6A型工程勘探与工程检测仪探测50 m以浅的地层结构,每个

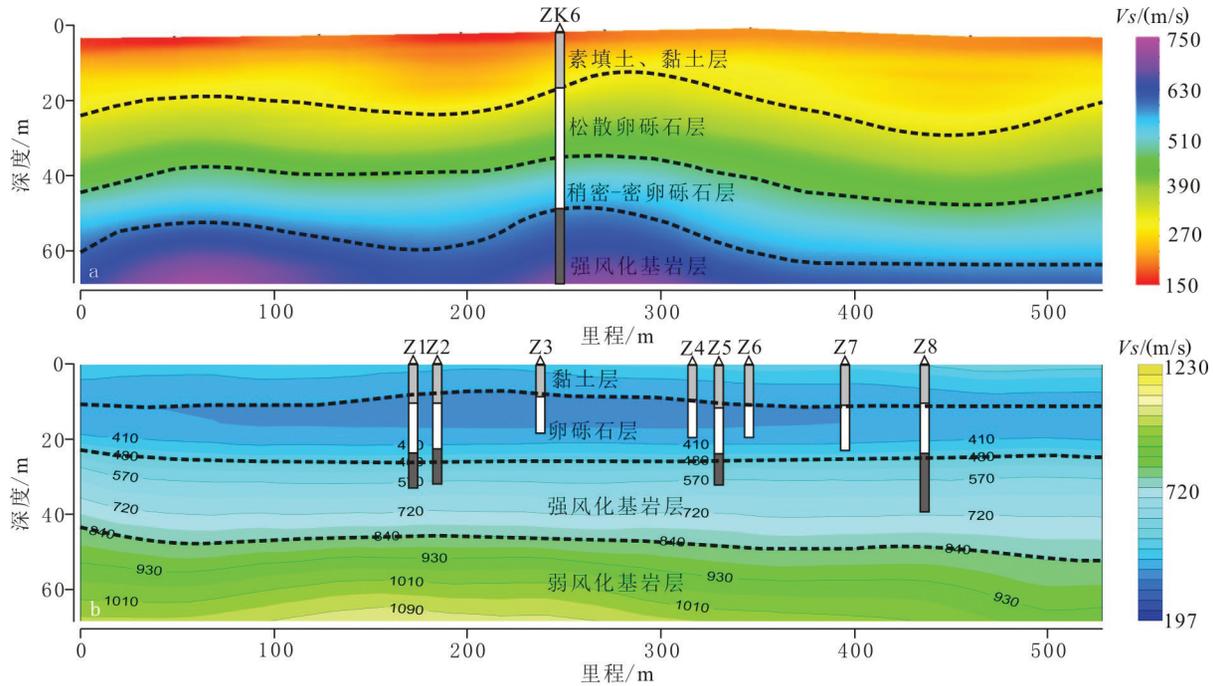


图3 瞬态面波、混合源面波剖面S波速度结构及解释推断图

Fig. 3 S-wave velocity structure and interpretation of transient surface wave and mixed source surface wave profile

测点共布设24个地震道,60磅落重激发,10 Hz速度检波器接收,道间距为2 m,最小偏移距为2~8 m。剖面位于牧马山台地北端、成都市双流机场旁,台地基底较为稳定。施工场地为硬化水泥路面,采用纸杯结合黏土与泡沫粘合剂的方式埋置检波器,改善检波器与路面的耦合条件。周边建筑较密集,人流量大、车辆较多,干扰较严重。

图3a中展示了试验剖面的S波速度谱图,结合钻孔编录结果对其进行标定后,可将测深范围内的地层结构分为4层:表层黏土面波波速为150~340 m/s,黏土层厚度不均,为13~25 m;其下从松散卵砾石层到稍密-密卵砾石层面波波速逐渐递增,波速为340~600 m/s;整个覆盖层较厚,为50~60 m;基岩波速相对较大,为600~990 m/s,为砂泥岩地层,成层性较好,基性较均匀性,由面波单点反演分层结合等速度谱图,可较准确反映各层厚度深度及构造大致形态。

3.2.2 混合源面波测量

试验剖面位于天府国际生物城起步区,该区属于在建区,周边已有少量建成建筑物,大部分区域正在开展钻探和基坑施工等,噪音、建筑干扰十分严重。使用法国Sercel428全数字地震系统、50道VLS型4.5 Hz单分量检波器、采用拖缆式采集方式,沿着一

条近东西走向的沥青路面进行数据采集,道间距为4 m,最小偏移距52 m,单炮排列长度196 m,炮距为4 m。采集过程中,震源在前,拖动整个系统前行,实现高密度、高效率的工作(Brodic et al., 2015)。

图3b中展示了该试验剖面其中一段的S波速度剖面图,将该区收集的大量工程勘察钻孔资料投影到成果图上进行标定解译:剖面由上而下表现为S波速度逐渐递增的特征,以S波速度值550 m/s为基覆界面分界线,之上为第四系覆盖层,之下为基岩层。第四系内部根据钻孔标定可进一步分为黏土层和卵砾石层上下两层;下伏基岩上部为强风化泥岩,速度值域区间在550~910 m/s,下部弱风化基岩层,S波速度值在910~1090 m/s。

3.2.3 微动测量

采用日本的MTKV-3C型微动勘察仪系统和1 Hz单分量摆进行微动数据采集。根据成都市城区工况的施工条件,通过试验后选择了观测半径为 $r=0.9$ 、10、20和40 m的四重圆形观测台阵,探测点间距20 m,探测深度能达到200 m。采样率为100 Hz,放大倍数16,每个勘探点微动数据记录时长20 min。

图4中展示了微动试验剖面其中一段的S波速度剖面图,探测深度200 m,根据剖面上的钻孔标

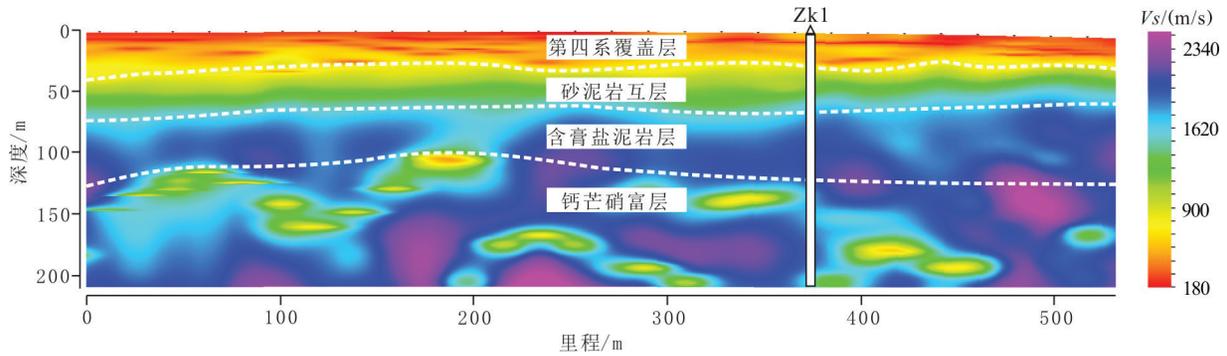


图4 微动勘探剖面S波速度结构及解释推断图

Fig.4 S-wave velocity structure and interpretation of microtremor survey profile

定,可将200 m深的地层分为4层:第一层为第四系覆盖层,埋深在0~40 m,视S波速度为180~700 m/s,该层横向上有一定变化,基本稳定发育,以均匀岩性中夹杂非层状显著低速物,构成具显著不均匀性的层状特征;第二层为砂泥岩互层,层厚稳定在25~30 m,视S波速度700~1300 m/s,岩性相对均匀;第三层为含膏盐泥岩层,钻孔揭示局部发育钙芒硝,钙芒硝呈薄层或团块状,岩体完整性一般,溶蚀孔洞局部较发育,层厚稳定在45~65 m,对应的视S波速度为1300~2400 m/s,属于均匀的相对高速层;第四层为钙芒硝富层,层厚大于80 m,该层以泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主,岩心较完整、性硬、溶蚀孔洞不发育,对应的视S波速度为2100~2460 m/s,属于不均匀的高速层。

3.3 三分量频率谐振/共振测量

三分量频率谐振勘探方法是建立在地震波的相互干扰和干涉基础上,利用不同物性和构造体对纵横波和面波的“共振效应”,提高信号对目标体的探测能力和精度(黄洪冠等,2012;Bignardi,2017;张晓波等,2019)。本次试验根据两种不同工况、不同地质条件,选取2种不同的设备进行试验研究。

第一条剖面同样位于天府国际生物城在建区,周边区域正在开展钻探和基坑施工等,噪音、建筑干扰十分严重。使用法国Sercel428全数字地震系统、60道VHL3型2 Hz三分量检波器进行数据采集,道距为4 m,最小偏移距100 m,单炮排列长度76 m,炮距为4 m,采集方式为拖缆式,在城市硬化路面上施工大大提高了施工效率。从波阻抗比值剖面看(图5a),总体特征呈层状分布,波阻抗比值范围为0.05~0.5,浅层的黏土层埋深0~10 m;深部含

膏盐泥岩层波阻抗比值为0.019~0.315,埋深大于50 m,中间根据不同的波阻抗特征和钻孔信息,还划分了卵石层和砂泥岩互层,卵石层比值相对最高,埋深在10~38 m,其下伏的砂泥岩互层埋深在38~50 m。

第二条剖面位于天府新区东山大道二段东北侧,在浅层地震测线上开展了三分量共振技术勘探,结合层析和钻孔资料,对浅部地层进行分层。剖面周边为建筑稀疏区,大部分位于庄稼地或草地上,干扰较小。使用正交三分量高灵敏度短周期2.5 Hz无线地震检波器进行数据采集,接收道数30,点距10 m,采集时间15 min,排列长度290 m。从波阻抗比值剖面可知(图5b),本区第四系黏土层与白垩系灌口组之间的分界面成像清晰,白垩系灌口组为成岩程度高的泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、砂岩等相对致密坚硬的地层,其强风化层共振响应表现为红色、黄色等暖色调,微风化层共振响应表现为浅黄色、绿色等色调;第四系主要为成岩程度较低的黏土、粉质黏土、填土等相对松散的地层,共振响应表现为绿色、蓝色等冷色调。

3.4 瞬变电磁测量

3.4.1 等值反磁通瞬变电磁

等值反磁通瞬变电磁法是一种新的城市地球物理探测方法,与传统的瞬变电磁法区别在于其采用双线圈源建立一次场零磁通面来消除了一次场对接收线圈的影响,直接接收地下纯二次场响应,达到消除“盲区”的目的(席振铎等,2010,2016),具有关断时间短、动态范围大、采样率高、系统噪音低、抗干扰能力强、施工效率高等优点,在工程地质调查和灾害地质调查中已经出现了很多成功的探

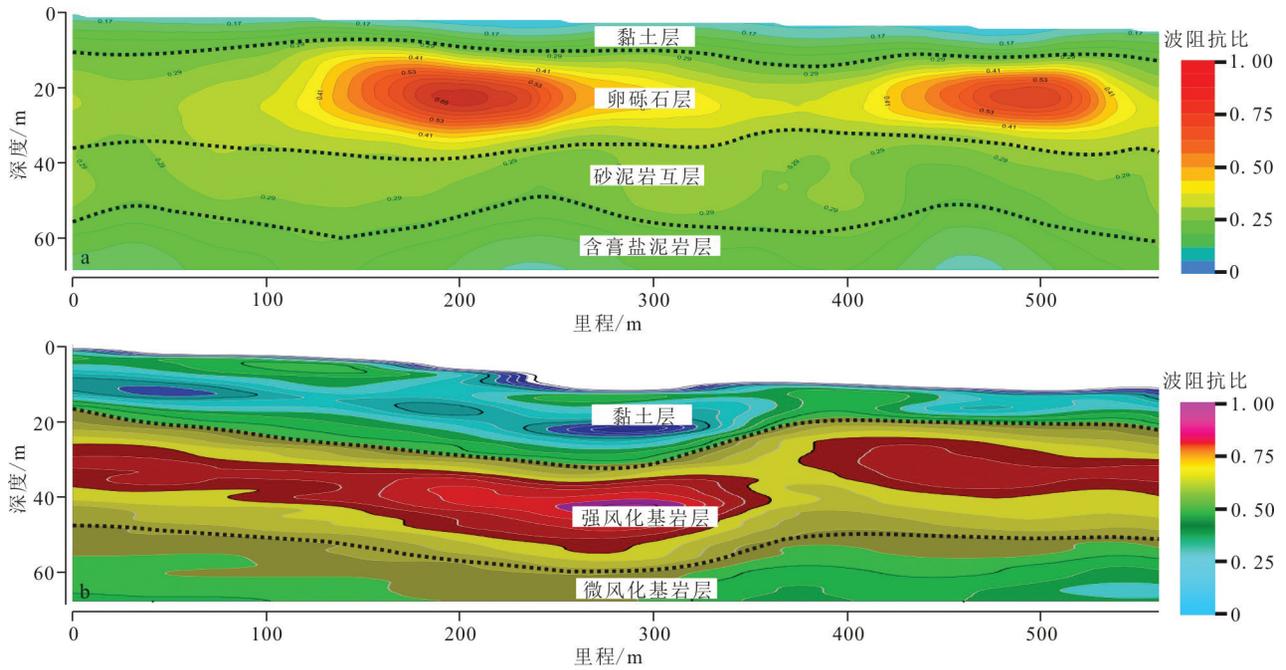


图5 三分量共振波阻抗比值解释剖面图
 Fig.5 Interpretation profile of three component resonant wave impedance ratio

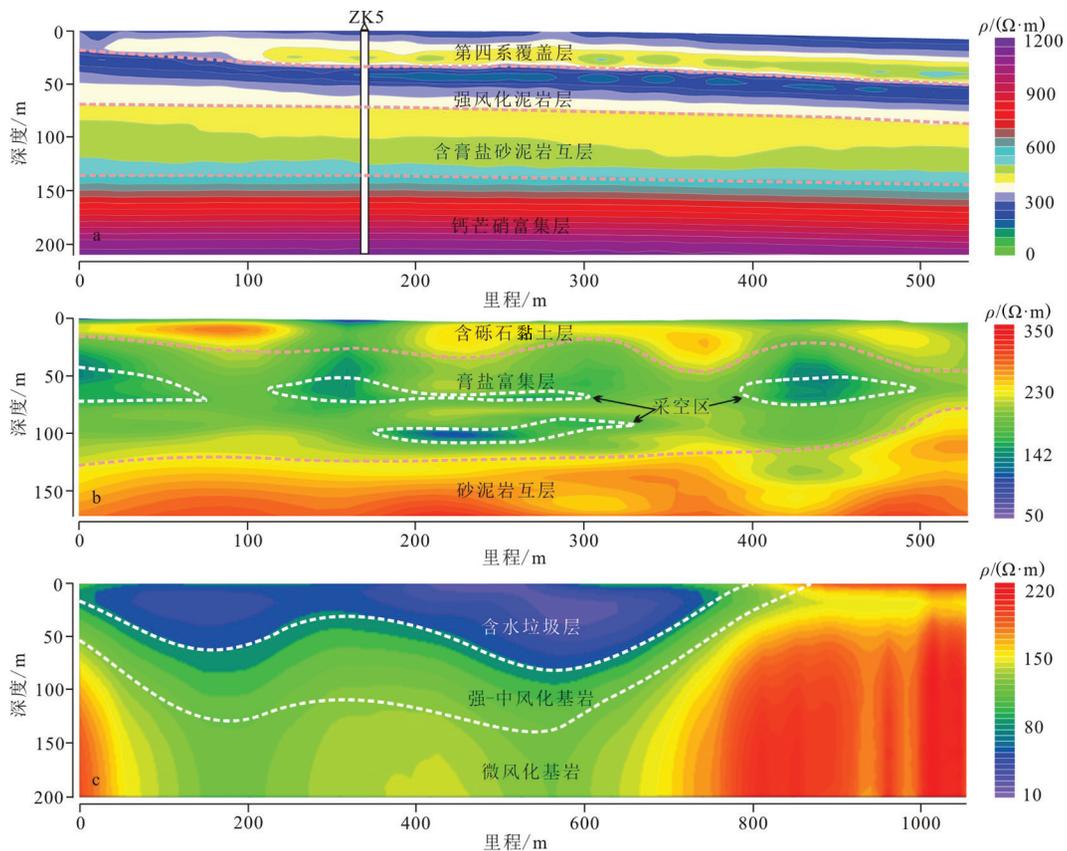


图6 瞬变电磁法反演解释剖面图
 Fig.6 Inversion and interpretation profile of TEM method

测案例(赖刘保等,2016;高远,2018,2019)。

选取其中2条试验剖面成果进行分析,第一条剖面位于天府国际生物城在建区,主要是探测200 m以浅地质结构以及膏盐层等分布形态,测线范围内有大型施工场地、两组高压线、来回车辆等干扰,高压线对数据质量影响较大;第二条剖面位于新津芒硝老矿区,主要试验层状采空区的探测效果,剖面穿越新津金华镇街道,大部分区域都有电线、车辆或是障碍物等干扰源;本次试验使用湖南五维地质科技有限公司最新的HPTEM-18系统进行数据采集,点距10 m,发送频率选用6.25 Hz,发射电流10 A以上,叠加次数根据干扰强度的不同在600~1200次不等。

图6a中展示了第一条剖面的试验成果,该剖面电阻率从上至下呈低阻—中阻—低阻—中阻—高阻的多层电性结构特征,横向变化比较均匀,不存在电性突变、歼灭等现象,与该区为盐湖相沉积的地质背景相符合。根据经过剖面的钻孔编录信息,地层结构由上至下可划分为4层:第四系覆盖层、强风化泥岩层、含膏岩砂泥岩互层、钙芒硝富集层。钙芒硝层作为目标层,由于其石膏、钙芒硝等矿物含量较高的原因,导致了整个层位的电阻率增大,属于相对高阻层。

图6b中展示了第二条剖面的试验成果。据现场调研,新津芒硝老矿区的采矿方式主要为水采,将水注入芒硝矿层将其溶解后抽出,钙芒硝矿主要是层状赋存,所以采空区也是以层状为主,同一区域估计有一层或多层采空区。本次的探测成果与调研结果比较吻合,根据电阻率的变化特征由上至下可划分为含砾石黏土层、膏盐富集层、砂泥岩基岩层。采空区主要位于50~100 m深的膏盐富集层内,水采后留下薄层状的空洞表现为低阻特征,展示的这一段探测成果明显地划分了两层采空区。

3.4.2 半航空瞬变电磁

与地面瞬变电磁相似,半航空瞬变电磁利用地面发射线圈或长导线向地下供电激发地下介质体产生信号,通过无人机携带的线圈采集电磁场信号,达到勘探地下异常体的目标。其信噪比较低,探测深度较浅,但施工效率高,但是勘探效率较高(Smith et al., 2001),最主要的是其可以在人类很难或是无法涉足的场地如沼泽、火山、垃圾填埋场、水域等工况施工(Ito et al., 2011),弥补常规物探方法

在此类地区无法施工的缺陷。

选取长安垃圾场作为试验区开展试验研究,通过探测垃圾填埋场的分层结构来评估其对地下水资源及环境污染的危险性。整个垃圾场占地7.18 km²,面积大、臭味重,人很难进入其中开展常规地球物理探测工作。选取了成都理工大学王绪本教授团队自主研发的无人机半航空瞬变电磁勘查系统开展试验,采用1.2 km的长导线线源,50 kW的柴油发电机、30 kW的大功率反射机及反射电缆,测线线距50 m,完成了对整个垃圾场的扫面测量工作。

图6c中展示了其中一条剖面的试验成果。剖面反演的电阻率值具有中间低、两边高、浅部低、深部高的特征,与现场地质调查结果相符,中间浅部电阻率最低部分为含有垃圾液的垃圾填埋物的综合反映,之下为相对高阻的强—中风化基岩,底部及两侧的高阻体为完整基岩的反映。综合多条测线的试验成果可推断,长安垃圾填埋场底下基岩相对完整、没有明显的断层经过、节理裂隙不发育,对地下水资源及环境的污染危险性较小。

3.5 高密度电阻率测量

高密度电阻率法(multi-electrode resistivity method)是一种阵列勘探方法,它集中了电剖面法和电测深法的优点,以岩、土导电性的差异为基础,研究人工施加稳定电流场的作用下地中传导电流分布规律,达到勘探地下目标体的目的。近年来该方法先后在重大场地的工程地质调查、坝基及桥墩选址、采空区及地裂缝探测等众多工程勘查领域取得了明显的地质效果和显著的社会经济效益(董浩斌等,2003;郭秀军等,2004),同时在城市调查方面的成功案例也较多(李志祥等,2003;葛如冰,2011;黄毓铭等,2017)。

本次高密度电阻率法试验的主要目的是研究该方法在城市不同工况下、不同地质条件下对地下地层岩性变化特征的响应效果。选取其中两条试验剖面成果进行分析,第一条位于成都双流县龙港公园附近,测线走向近南北,受南北两侧的城市交通干道限制,测线只能布设524 m长,点距4 m,东西两侧有大厂房建筑,属于建筑密集区区域。第二条剖面位于天府国际生物城在建区,测线范围内地面上有大型施工场地、高压线、部分已建成建筑等,地下有埋设的各种管道、电线、电缆等,测线沿着绿化

带布设,长度为1260 m,点距10 m。试验使用稳定性较好的美国supersting-R8密度电法仪器系统,测量参数设置为:循环观测次数2次,允许的最大观测误差2%,重复观测2次,最大电压为100~300 V,最大电流2 A,每点测时间1.2 s。数据处理采用AGI公司研发的Earth-Imager 2D高密度电法处理软件。

图7a中展示了第一条剖面的试验成果,图中电阻率分层特征明显,由上至下表现为低—高一低的电性特征,结合钻孔信息可判断3个电性特征层分别为回填土及黏土、卵砾石层、砂泥岩互层的反映,中间的卵砾石层分布相对稳定,埋藏深度由西南往北东缓慢变深,由11 m增大到15 m,总体比较平缓,厚度为18~25 m变化,为主要富水层。图7b展示了第二条剖面的试验成果,总体上,自上至下表现为中低阻—中高阻—低阻特征,层状特征较差,与沉积盆地的地质认识不符。据现场调查,剖面里程440~460 m、1080~1100 m处,有预埋的混凝土排水管道与测线大角度交汇,导致这两处表现为高阻特征,破坏了整条剖面的原始电性特征的分布规律,破坏了整条剖面的原始电性特征的分布规律,含石膏、钙芒硝的膏盐层在该剖面上表现为相对低阻体,层位分布信息受到了严重干扰,分层效果不明显,无法达到预期地层划分目的。

3.6 浅震反射波测量

在所有的地球物理勘探方法中,地震勘探无疑是最重要的,主要是因为它抗干扰能力强、分辨率高,能识别小规模地下目标体的特征。地震勘探最常见的

方法包括反射波法和折射波法,其中反射波法应用最广泛,其工作原理是从地表向下激发地震波,遇到弹性不同的分界面时就会产生反射波,据接收到的反射波旅行时间、振幅、速度、频率等参数信息,可以用于推断地下地层或岩石的性质,从而达到勘探目的。浅层地震勘探也是城市地质调查最主要的方法之一,它在确定隐伏活动断裂的分布形态及地层层位划分中效果显著(邓起东等,2003;徐明才等,2005;朱涛等,2007;刘保金等,2008;鄯少英等,2015)。

本次浅震反射波法试验的主要目的是识别城市中隐伏断裂的空间分布形态、对砂泥岩互层的地质结构进行精细划分。试验剖面位于天府新区公兴镇—合江镇,长度约14 km,施工工况包含了水域、大型商业广场、政府办公区、居民小区、主干道、地铁、高速公路、大型施工场地等几乎所有的城市元素,施工条件极其复杂。采用法国生产的428XL地震采集系统,便携式震源及电火花震源激发,单点、低频高灵敏度的SmartSolo无缆节点仪接收,较高密度(最小炮点距2 m,检波点距2 m)+较大排列长度(单边239 m)的观测技术,确保多波场的地震数据的获取。同时为了获得更准确的地震速度资料,提高解译精度,结合了长剖面上3个钻孔的VSP测井资料、6个钻孔的声波时差资料以及地震叠加速度谱进行综合分析,获取试验区的速度模型用于地震资料的时深转换计算。

选取长剖面上的两小段典型剖面进行成果分

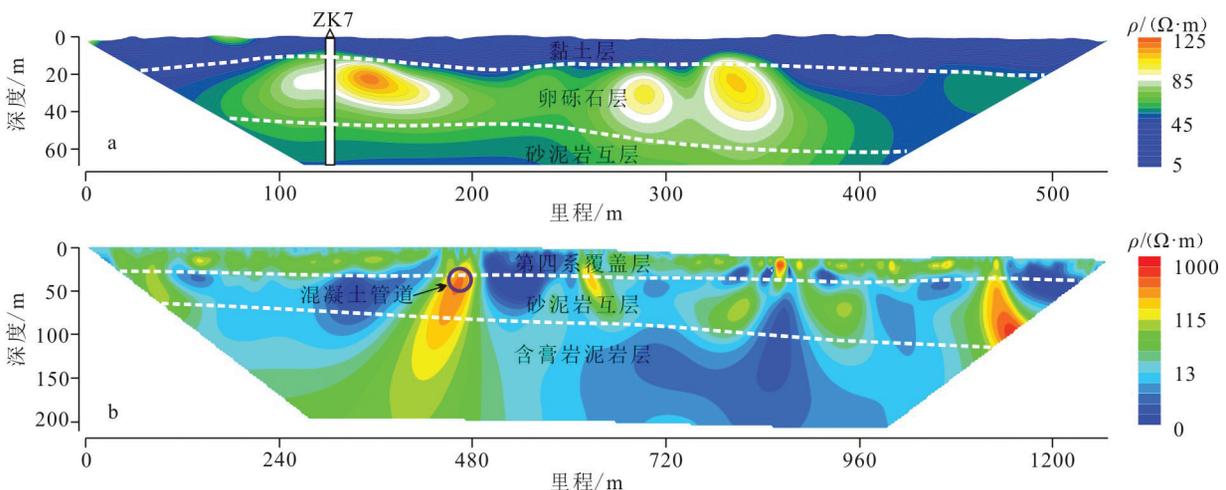


图7 高密度电阻率法反演解释剖面图

Fig.7 Inversion and interpretation profile of multi-electrode resistivity method

析。图8a展示了一段2.35 km长的反射波深度剖面成果,该段剖面长度范围内地层岩性为一套厚800~1300 m的侏罗系蓬莱镇组的河湖相红色砂岩、泥岩互层沉积,在地震剖面上表现为强弱振幅规律变化的特征,测深范围内蓬莱镇组未见底。根据深度剖面特征,结合附近钻孔的岩性分层,识别出了蓬莱镇组内部泥岩与砂岩的2个反射界面H1和H2。H1反射层位于浅部,是一组反射特征明显、振幅强、连续性好的反射波组,属于基岩界面反射,容易追踪;H2反射层位于中深部,是一组反射特征较明显、振幅较强、连续性较好的反射波组。根据剖面上同相轴的错断情况以及上、下反射波组之间的相互关系,在剖面中部解释了2条呈“入”字形分布的断层F1、F2,以及另一条陡倾的F3。其中,断层F1明显错断了反射波同相轴H1、H2及以下的的所有反射波同相轴,断距由浅到深逐渐增大;F2错断了反射波同相轴H2,F3错断了同相轴H1。从这3条断层在剖面上的特征和断层规模来看,F1应该是该区的主要隐伏断层——苏码头断层,F2是其分支断层,F3为次级断

层。通过深度剖面可以进一步判读出各断层的位置、倾向、倾角、上断点埋深等空间分布信息。

经过反演计算可将反映地下地层、岩体之间速度差别的反射系数转化为指示岩层物性变化规律的波阻抗值。图8b展示了一段过钻孔的波阻抗反演剖面及综合测井成果图,在地下0~200 m范围内,结合钻孔信息可识别出9层砂泥岩互层的地质结构,探测精度达到了预期效果,特别是在浅部有一套泥岩的薄层在波阻抗剖面有清晰反映,厚度最薄处约10 m,波阻抗反演大大提高了浅震反射波勘探的分辨率。综合测井可以获取自然伽玛、视电阻率、声波速度等重要参数,可为浅震勘探定量解译及提供了重要的相关附加信息(张晓波等,2019;肖昆等,2020),据钻孔编录与测井曲线对应关系(图8b右),不同的地层岩性所对应的自然伽马值和视电阻率值差异明显,砂岩表现出相对低伽马、高电阻特征,泥岩表现出相对高伽马、低电阻特征,可利用综合测井资料辅助浅震反射波剖面精确划分地层岩组,识别岩性,亦可用于辅助地表电法、电磁法

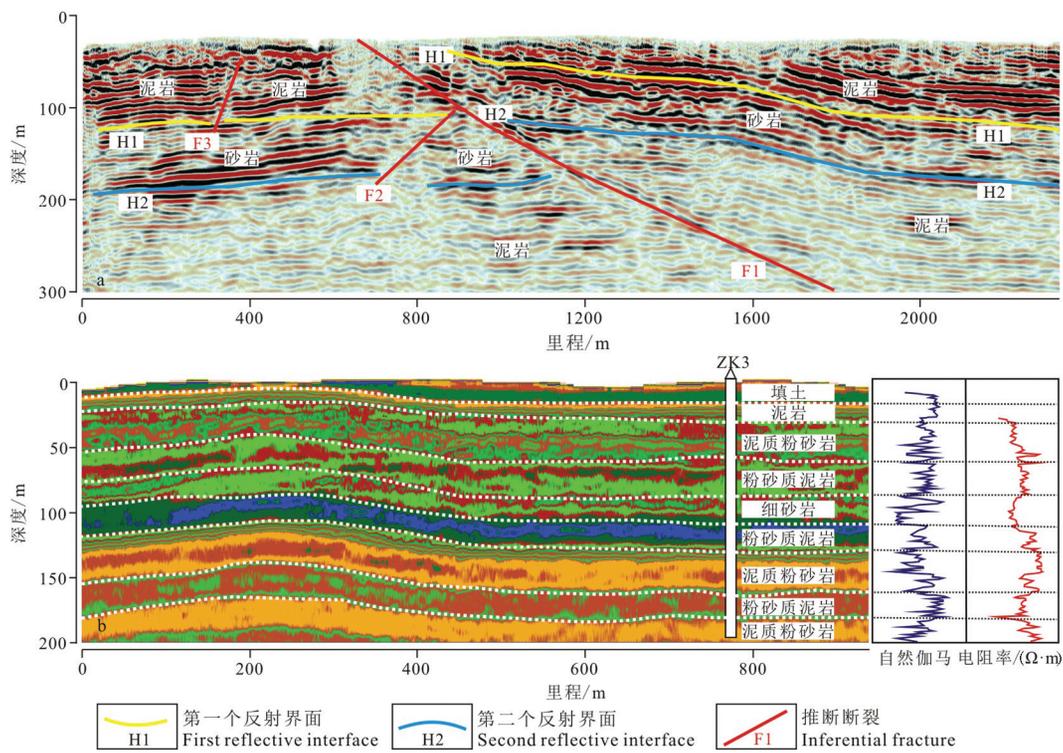


图8 浅震反射波法勘探成果图
a—地震反射波深度剖面;b—波阻抗反演剖面
Fig.8 Exploration results of shallow seismic reflection method
a—Seismic reflection depth profile; b—Wave impedance inversion profile

剖面的推断解译工作。

3.7 音频大地电测量

在所有的电磁法家族中,音频大地电磁法属于天然源电磁法,它是根据电磁感应原理研究电磁场在空间、时间上的分布规律,计算地壳在不同深度范围内的电阻率,建立地下的电阻率模型,获取研究区近地表沉积物特征、深基岩的信息以及断层和裂缝的位置(董树文等,2012;冯兵等,2014;闵刚等,2014)。作为一种中浅部勘探技术,相较于传统直流电法,具有工作效率高、不受高阻层屏蔽和对低阻层分辨率较高等优点(闵刚等,2017)。

本次大地电磁试验目的是探测成都平原深大断裂的几何分布特征和成都西部深覆盖区的松散层厚度。选取一条垂直构造方向部署试验剖面成果进行分析,剖面位于成都市东北角金堂—双槐一带,横跨龙泉山,测线长度16 km,点距250 m(图1b中BB'剖面),主要探测龙泉山东、西坡断裂的构造特征以及主要地层的分布形态。数据采集采用加拿大凤凰公司(Phoenix)生产的V5、V8多功能电法工作站,观测Ex、Ey、Hx、Hy四个参数。工作前首先对仪器及磁探头进行标定,开展一致性试验、采集试验等工作,确定了最优工作参数:采集时间1.5 h,电极距50 m、接地电阻小于 $1000 \Omega \cdot \text{m}$,同时采用远参考数据才采集方案,最大限度地克服城市及周边的各种人文干扰。

图9展示了试验剖面金堂—双槐的电性结构特征,总体上电阻率异常值较小,普遍在 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 以下,地下0~1 km范围内的浅表层为高-低阻薄互层,1~3 km为大套的块状或似层状结构,以高低阻相间分布,结合地质认识解释了白垩系、侏罗系、三叠系3套地层单元。由于龙泉山构造的剥蚀作用,

白垩系在地表仅有零星的残余地层且埋深较浅,侏罗系地层埋深主要在地下2~3 km范围内,在龙泉山构造带被抬升剥蚀了一部分地层。根据电性结构横向的不连续性及纵向的条带状低阻异常特征,推断了3条断裂带,F1规模较小,为一条次级断裂,与F2一起组成了龙泉山西坡断裂,F3为龙泉山东坡断裂,这三条主干断裂共同组成了龙泉山断裂带,其间还发育一系列的局部次级背斜构造以及向斜构造。从电性异常上来看,西坡断裂的抬升规模明显要大于东坡断裂,这似乎表明龙泉山构造带在该段的主要断裂构造作用可能是龙泉山西坡断裂。

4 讨论

本次研究综合了33个实例点的成果,部分成果来源于成都市财政实施的《成都市城市地下空间地质资源调查》项目中的地球物理探测成果。上述第3章节主要展示了一些较为典型的案例。以下将依据其展示的成果分析,对各种方法在探测精度、探测深度、抗干扰能力、施工效率、经济成本等方面的表现展开讨论。

4.1 探测精度、深度、抗干扰能力对比

从地质雷达的探测效果来看,与传统认识相同,地质雷达在城市调查中采用屏蔽天线进行探测,是近地表探测方法中分辨率最高,抗干扰能力最强的,能精确识别像地铁隧洞、管道等各种人为建造,实现浅地表的地质精细划分,缺点是探测深度太浅,且对于城区的浅部雷达剖面数据包含的信息量非常大(图2a),需要经验丰富的物探工程师进行推断解释才能得出最准确的探测结果。

对于面波勘探测量,其探测深度明显要大于地质雷达,在干扰较小的情况下,无论是传统的瞬态面

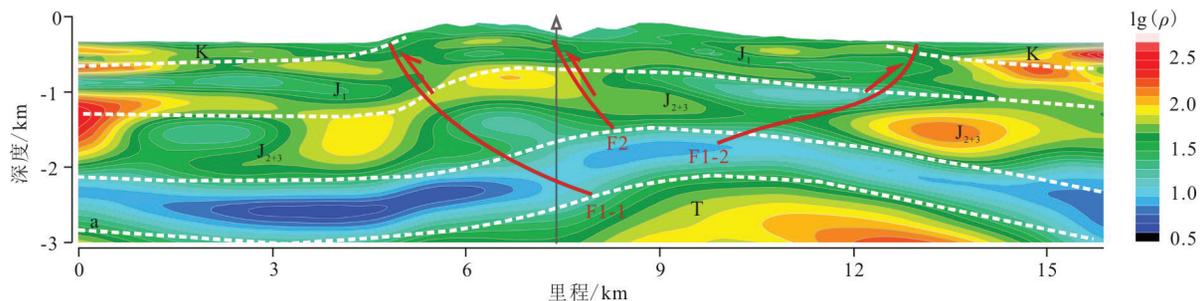


图9 成都市金堂—双槐音频大地电磁反演解释剖面图

Fig.9 Audio magnetotelluric inversion interpretation profile of Jintang-Shuanghuai in Chengdu City

波法,还是最新的混合源面波法、微动勘探法,都能取得较精确的探测效果;在干扰较强的情况下,瞬态面波法采集高质量的数据相对困难,混合源面波勘探加入了人工源后其抗干扰能力更强,两者探测深度一般在50~70 m(图3);微动测量可通过增大观测台阵半径和增加台阵数量达到加大探测深度和精度的目的,对于含膏岩地区的砂泥岩互层地质结构有一定的识别能力,但深部分辨率相对较低(图4)。

三分量频率谐振/共振勘探,本次试验采用了两种仪器,均取得不错的探测效果,第一条剖面工况较差、干扰较强,三分量频率谐振使用了混合源激发,较好地压制了一些噪音的影响,第二条剖面干扰较小则采用了天然源,在取得良好数据质量的前提下两种设备的分辨率较好,探测深度均为60 m左右,测深范围内能有效识别出卵砾石层、基岩面、强风化和微风化分界面等,同时对含膏岩泥岩层也有一定的异常反映(图5),适合用于浅地表探测。

等值反磁通瞬变电磁和半航空瞬变电磁均为新技术新方法。等值反磁通瞬变电磁在强干扰的在建区工况条件下,仍然可采集到良好的数据,结合钻孔信息和反演电阻率等值线图可追踪刻画200 m以浅的基覆界面、膏岩层界面和钙芒硝富集层界面等地质结构(图6a、b),同时对100 m以浅的多层芒硝采空区也有一定的识别能力(图6c),分辨率较好,有较好的推广价值。半航空瞬变电磁探测作为一种新技术,也取得了较好的试验效果,在200 m以浅深度范围内能明显地识别出垃圾层、强一中风化基岩和微风化基岩(图6),分辨率基本达到了试验目的要求,最主要是该方法弥补常规地球物理方法无法进入垃圾填埋场这种特殊工况施工的缺陷,可在成都市三岔湖等水域、龙泉山陡峭地区等特殊工况下推广使用,有助于实现城市地质调查全区覆盖的目标。

高密度电阻率法作为传统的地球物理方法,在城市地质调查中应用较多。从本次试验效果来看,该方法最主要的缺陷就是在城市施工受场地限制影响非常大,影响电极的排列长度,导致测量深度无法保证,同时城市各种人文干扰程度对数据质量影响也非常大,如第一条剖面受场地影响,探测深度只有60 m左右,但是人文干扰较小,数据质量好,60 m以浅能良好地识别出各主要岩性层位(图

7a),达到探测目的;第二条剖面则受在建区预埋管道、工业电流等人文影响,数据质量较差,反演成果无法满足实际试验目的(图7b)。总体上说,该方法在城市地质调查中抗干扰能力相当较差,探测深度及分辨率不稳定,与探测工区的人文环境关系密切,有一定的适用性,但综合以往实践经验,高密度电阻率法在取得良好数据质量的前提下,对断裂的探测效果显著。

本次试验的浅震反射波勘探法在激发端和接收端、数据采集方式及数据处理方法等方面均进行了改良,城市各种复杂工况条件下均能采集到质量较高的数据。从探测结果来看,通过地震波反射剖面能准确识别城市中隐伏断裂的空间分布形态(图8a);经过反演计算得到的波阻抗反演剖面,添加上经过测井曲线定量约束修正的钻孔信息,可对200 m以浅的地层岩性进行精细划分(图8b),在探测深度、分辨率、抗干扰能力上均表现突出,特别是在深部的分辨率要比其他地球物理技术的深部分辨率要高得多,适合用于区域控制性大剖面测量以及典型示范区的高精度探测。

音频大地电磁法抗干扰能力小,只有在城市郊区电磁干扰较小的区域,才可以采集到质量相对较好的数据,探测深度可达到2~3 km,虽然对地层的分辨率较低,但结合地质认识,基本能把深大断裂的构造特征形态划分出来(图9),可为整个成都平原的基础地质研究提供可靠的地球物理证据。

4.2 工作效率、经济成本对比

从工作效率和经济成本上对比,地质雷达、等值反磁通瞬变电磁、半航空瞬变电磁、瞬态面波勘探施工灵活、高效,工作效率最高、经济成本最低;高密度电阻率法、天然源三分量共振、微动勘探、音频大地电磁施工效率一般、经济成本较高;浅震勘探、混合源面波及三分量共振在城区施工协调工作量大、时间更长,施工效率较低、成本最高。

4.3 建立成都市地球物理组合探测技术

综上所述,所试验的各种城市地球物理方法均有其优缺点,其适用范围、探测深度、探测精度、施工效率、经济成本均各不相同。在开展城市地质调查过程中,可以根据不同的勘探目的来选择不同的方法组合进行探测,实现在最经济的条件下取得需要的勘探深度和精度的目标。实际上,在缺

少钻孔或是钻孔稀疏的情况下,单一地球物理技术往往只能推算出一种地球物理参数,想要准确确定地层岩性非常困难,因为特定地层岩性可能具有一个或多个近似的地球物理参数值,相互使用不同的和互补的物性参数能起到有效地约束地球物理解译的作用,为整个剖面提供明确的地质解释,弥补城区钻孔稀疏的缺陷。所以要最大限度地提高地球物理方法的应用效果,最好的办法是进行方法组合探测,发挥其优势,克服其弱点,可解决或减少地下地球物理模型多解性。众多的国内外的研究和工工作已经证明,地球物理组合探测可以取得非常好的效果(Kwon et al., 2006; Kim et al., 2007; Grandjean et al., 2011; Theis et al., 2018; 戚邦申等, 2019)。

为此,笔者根据本次的综合研究成果,初步建立了成都市多元地质条件、复杂工况下条件下0~200 m的地下空间地球物理组合探测技术方案。为了便于参考和借鉴,首先按照施工难易程度及干扰强度等因素,将城市工况分为建筑密集区、在建区和建筑稀疏区3种;然后依据地球物理技术对不同

地质条件的敏感性,将成都市分为平原+第四系厚覆盖+隐伏断裂发育区、台地+膏盐发育区、丘陵+第四系覆盖薄区、低山+地层陡倾+断裂发育区、宽谷中丘+第四系覆盖薄区、垃圾填埋区或水域区以及典型示范区七类。综合工况与地质条件,明确了成都市地下空间0~200 m地球物理探测工作的工况、地质条件组合分区图(图10)。最后结合上述梳理的各种地球物理探测方法的优缺点及33个实例点的试验成果,总结了成都市0~200 m地下空间结构地球物理组合探测技术指导方案(表2)。

5 结 论

(1)本文在总结分析成都市不同地层的泥岩、粉沙质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩等常见岩性的物性差异基础上,采用了11种方法和15种不同的物探设备技术,开展了成都市浅表地质结构精细化探测的试验研究,并取得了较好的研究成果,认为将二维的地球物理信息与一维离散的钻孔信息相结合,可有效支撑、改进或是否定之前的地质认识,准确界定基覆界面的深度、第四纪松散层的厚度及内部分层、不同地层单

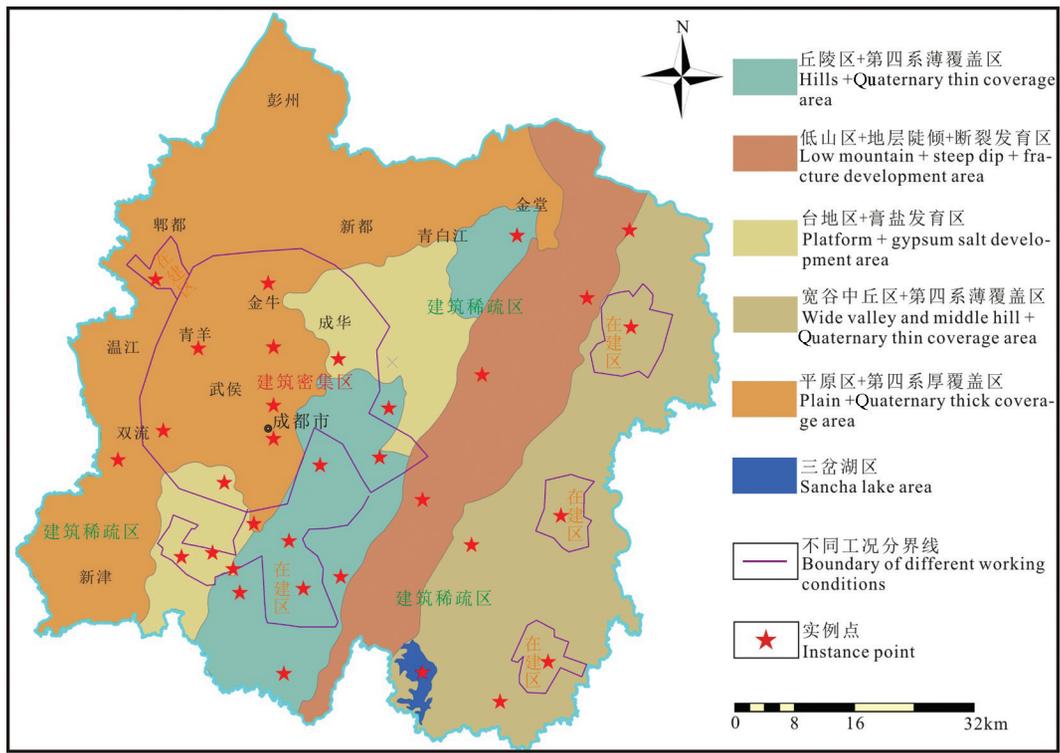


图10 成都市不同工况、不同地质条件分区图
Fig.10 Zoning map of different working conditions and geological conditions in Chengdu City

表2 成都市不同工况、不同地质条件下最优探测方法组合

Table 2 Optimal combination of detection methods under different working conditions and geological conditions in Chengdu City

类	工况 亚类	地质 条件	200 m以浅精细探测		100 m以浅精细探测		备注1 条件代号	备注2 方法代号	
			第一优选组合	第二优选组合	第一优选组合	第二优选组合			
建 筑 密 集 区	干扰较强、建 筑、道路杂乱 无章	I	②+⑧	③+⑧	②+⑤	③+⑥	I-平原区+第四系厚覆 盖区(大于50 m)+隐 伏断裂发育区; II-台地区+膏盐发育 区; III-丘陵区+第四系覆盖 薄区(小于20 m); IV-低山区+地层陡倾+ 断裂发育区; V-宽谷中丘区+第四系 覆盖薄区(小于20 m); VI-垃圾填埋区或水域 区; VII-典型示范区+地下 结构精细探测区	①浅层地震勘 探 ②等值反磁通 瞬变电磁 ③微动 ④高密度电阻 率 ⑤瞬态面波 ⑥地质雷达 ⑦半航空瞬变 电磁 ⑧三分量频率 谐振/共振 ⑨电阻率测深 ⑩综合测井	
		II	②+③	③+⑧	②+⑧	③+⑥			
		III	②+⑧	③+⑤	②+⑥	③+⑥			
		IV	②+③	③+⑧	②+⑥	③+⑧			
	干扰较强、建 筑、道路规律 有序	I	①+⑤	②+⑤	①+⑤	②+⑥			
		II	①+②	③+②	①+⑥	③+⑥			
		III	①+⑧	②+⑧	①+⑥	②+⑥			
		IV	①+②	①+③	①+⑥	③+⑥			
	在 建 区	干扰较强、场 地狭小	VII	①+⑥+⑧+⑩	②+⑥+⑧+⑩	①+⑥+⑧+⑩			②+⑥+⑧+⑩
			I	①+⑤	②+⑤	①+⑤			②+⑥
			II	②+⑧	①+⑧	②+⑥			④+⑥
			III	①+⑧	③+⑤	①+⑥			②+⑧
V			①+⑧	②+⑤	②+⑥	④+⑧			
建 筑 稀 疏 区	干扰较弱、场 地开阔	VII	①+⑧+⑩	②+⑧+⑩	①+⑧+⑩	②+⑧+⑩			
		I	④+⑤	⑨+⑤	④+⑥	⑨+⑥			
		II	①+⑤	②+⑤	①+⑤	⑨+⑥			
		III	④+⑧	②+⑧	④+⑤	⑨+⑥			
		IV	①+④	②+④	①+④	②+⑨			
		V	④+⑧	⑨+⑧	④+⑥	⑨+⑥			
VI	①+⑦	④+⑦	②+⑦	④+⑦					

元的岩性变化特征及岩性划分等。

(2)在城市开展大规模的地球物理探测往往是很难的,对传统浅震勘探法在激发端、接收端、数据处理流程中静校正问题和低信噪比问题的改良改进,大大提高了其在城市开展浅表地质勘探的适应性、工作效率和探测精度;引进的一些新技术新方法如半航空瞬变电磁、等值反磁通瞬变电磁、混合源面波与三分量频率谐振勘探、微动勘探等,在特定工况、不同地质条件下,可取得良好的探测效果,具有良好的推广价值。

(3)结合取得的试验成果,对每种地球物理技术在探测深度、精度、抗干扰能力、工作效率、施工成本等方面进行了分析讨论,每种方法的优缺点各不相同。建议实际工作中,通过多种地球物理方法组合探测,可以充分发挥其优势,克服其弱点,最大限度地提高地球物理方法的应用效果,同时可解决或减少地下地球物理模型多解性。

(4)本次研究最后提出的成都市地球物理组合探测技术方案只是抛砖引玉,期望对中国红层地区或是具有类似地层结构特征的城市开展城市浅表

地质结构调查有一定的指导和借鉴意义。由于实例有限,无法完全覆盖成都市域的所有工况及地质条件,肯定存在一些不足之处需要今后通过更多的实例研究进行补充完善。建议在下一步开展的成都市浅表地质结构探测时,在注重对传统地球物理技术进行改进改良的同时,继续开展新技术的研究与应用,使城市地球物理探测的优势最大化。

致谢:感谢中南大学地球科学与信息物理学院刁振铎老师团队、中国科学院地质与地球物理研究所徐佩芬老师团队在本次试验研究过程中提供的帮助与指导,感谢四川省地质矿产勘查开发局物探队、中石化石油工程地球物理公司南方分公司、四川华地建设工程有限责任公司等参与“成都市城市地下空间地质资源调查”项目实施的单位、公司提供的各种数据和资料。感谢审稿老师提出的宝贵修改意见与建议。

注释

①四川地矿局成都水文地质工程地质队. 1985. 成都平原水文地质工程地质综合勘察评价报告[R].

References

- Bignardi S. 2017. The uncertainty of estimating the thickness of soft sediment with the HVSR method: A computational point of view on weak lateral variations[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 145(8):28–38.
- Bridle R. 2016. Introduction to this special section: Near– surface modeling and imaging[J]. *The Leading Edge*, 35(11): 938–939.
- Brodic B, Malehmir A, Juhlin C, Dynesius L, Bastani M, Palm H. 2015. Multicomponent broadband digital– based seismic landstreamer for near– surface applications[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 123(2):227–241.
- Chen Yu, Chen Longsheng, Yu Sheng. 2003. Urban geophysics:A new discipline of earth science[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 23(4):1–4(in Chinese with English abstract).
- Craig M, Hayashi K. 2016. Surface wave surveying for near– surface site characterization in the east San Francisco Bay area, California[J]. *Interpretation*, 4(4): 59–69.
- Deng Qidong, Xu Xiwei, Zhang Xiankang, Wang Guangcai. 2003. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 93– 104(in Chinese with English abstract).
- Dong Haobin, Wang Chuanlei. 2003. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 171–176(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Li Tingdong, Chen Xuanhua, Wei Wenbo, Gao Rui, Lü Qingtian, Yang Jingsui. 2012. Progress of deep exploration in mainland China: A review[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12):3884–3901(in Chinese with English abstract).
- Feng Bin, Li Jianguo, Zhao Bin, Wang Yu, Wang Junlu, Zhang Jifeng. 2014. The application of audio magnetotelluric method (AMT) in Naling Yudu– Gan County ore– concentrated area Yinkeng demonstration plot to survey deep mineral resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(4): 669– 675(in Chinese with English abstract).
- Feng Shaoying, Liu Baojin, Zhao Chengbin, He Yinjuan, Tan Yali, Jia Yanxia. 2015. The application experiment of three– dimensional seismic reflection method in the detection of active faults:A case from Luhutai fault[J]. *Seismology and Geology*, 37(2): 627– 637 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yun, Sha Chun. 2018. Combined use of active and passive surface waves in the deep overburden area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42(2):392–397(in Chinese with English abstract).
- Gao Yuan. 2018. The application of opposing coils transient electromagnetics method in geological hazard investigation of town[J]. *Coal Geology & Exploration*, 46(3): 152–156(in Chinese with English abstract).
- Gao Yuan. 2019. The application effect on detecting goat of gypsum mine by opposing coils transient electromagnetics method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(6): 1404– 1408(in Chinese with English abstract).
- Ge Rubing. 2011. The application of high– density resistivity to detecting urban underground objects[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(1):136–139(in Chinese with English abstract).
- Grandjean G, Gourry J C, Sanchez O, Bitri A, Garambois S.2011. Structural study of the Ballandaz landslide (French Alps) using geophysical imagery[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 75(4): 531–542.
- Guo Shili, Duan Jianxian, Zhang Jianfeng, Li Xiuzhong. 2019. Application of GPR in urban road hidden diseases detection[J]. *Progress in Geophysics*, 34(4): 1609– 1613(in Chinese with English abstract).
- Guo Xiujun, Jia Yonggang, Huang Xiaoyu. 2004. Application of multi– electrode resistivity method to detection of slide– face position[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(10): 1662–1669(in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Lin Liangjun, Li Yamin. 2017. Vigorously promote the multi– factor urban geological survey of accurate service urban planning and construction management of the whole process[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (4): Hydrogeological, Engineering and Environment Geology Forum(in Chinese with English abstract).
- Huang Hongguan, Xu Shengfeng. 2012. The application of resonance method of hydrocarbon detection in volcanic reservoir prediction[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(10):47–50(in Chinese with English abstract).
- Huang Yuming, Zhang Xiaofeng, Xie Shangping, Miao Sida, Huang Chengmin, Shi Weijian. 2017. Application of integrated geophysical method to Karst cave exploration of metro engineering in Nanning[J]. *Progress in Geophysics*, 32(3): 1352–1359(in Chinese with English abstract).
- Ito H, Mogi T, Jomori A, Yuuki Y, Kiho K, Kaieda H, Suzuki K, Tsukuda K, Allah S.2011.Further investigations of underground resistivity structures in coastal areas using grounded– source airborne electromagnetic[J]. *Earth, Planets and Space*, 63(8): 9–12.
- Kim J H, Yi M J, Hwang S H, Song Y, Cho S J, Synn J H. 2007. Integrated geophysical surveys for the safety evaluation of a ground subsidence zone in a small city[J]. *Geophysics Engineering*, 4: 332–347.
- Kwon H S, Song Y, Yi M J, Chung H J, Kim K S. 2006. Case histories of electrical resistivity and controlled source magnetotelluric surveys for the site investigation of tunnel construction[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 11: 237–248.
- Lai Liubao, Chen Changyan, Zhang Hui, Bai Chaoxu, Su Zhaofeng, Jia Hui, Xiao Min, Hou Haitao. 2016. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease[J]. *Progress in Geophysics*, 31(6): 2743– 2746(in Chinese with English abstract).

- Lai W W, Derobert X, Annan P. 2018. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation International*, 96: 58–78.
- Li Wanlun, Liu Sufang, Tian Qianning, Lü Peng, Jiang Chongxin, Jia Linxiao. 2018. Reviews in urban geophysics[J]. *Progress in Geophysics*, 33(5): 2134–2140(in Chinese with English abstract).
- Li Xuejun. 2011. Applications and development of city geophysical prospecting in China[J]. *Progress in Geophysics*, 26(6): 2221–2231 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhixiang, Mao Xianjin, Han Ming, Lv Ming, Long Delong. 2003. An application of high-density resistivity method to surveying blind fault[J]. *Journal of Seismological Research*, 26(3): 275–278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojin, Chai Chizhang, Feng Shaoying. 2008. Seismic exploration method for buried fault and its up break point in Quaternary sediment area: An example of Yinchuan buried active fault[J]. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1475–1483(in Chinese with English abstract).
- Liu Qinghua, Wang Kaiming, Lu Laiyu. 2015. Review on the active and passive surface wave exploration method for the near-surface structure[J]. *Progress in Geophysics*, 30(6): 2906–2920(in Chinese with English abstract).
- Miller R. 2013. Introduction to this special section: Urban geophysics[J]. *The Leading Edge*, 32(3) :248–249.
- Min Gang, Wang Xuben, Zhang Bin, Yu Qian, Wei Wei. 2014. Shale gas exploration test in the Cengong area of northeastern Guizhou based on AMT method[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 49(4): 815–824(in Chinese with English abstract).
- Nakata N. 2016. Near-surface S-wave velocities estimated from traffic induced love waves using seismic interferometry with double beam forming[J]. *Interpretation—A Journal of Subsurface Characterization*, 4(4): 23–31.
- Qi Bangshen, Feng Chengjun, Tan Chengxuan, Zhang Peng, Meng Jing, Zhang Chunshan, Yang Weimin, Yang Xiaoxiao, Lei Xiaodong. 2019. Application of comprehensive geophysical-drilling exploration to detect the buried North Boundary active Fault Belt of Yanqing–Fanshan Basin in Sangyuan town, Beijing–Zhangjiakou area[J]. *Geology in China*, 46(3): 468–481(in Chinese with English abstract).
- Sirles P, Sheehan J, Pendrigh N. 2013. Passive near-surface seismic data where all else fails[J]. *The Leading Edge*, 32(3): 308–314.
- Smith R S, Annan A P, McGowan P D. 2001. A comparison of data from airborne, semi-airborne and ground electromagnetic systems[J]. *Geophysics*, 66(5):1379–1388.
- Socco L, V Strobbia C. 2004. Surface-wave method for near-surface characterization:A tutorial[J]. *Near Surface Geophysics*, 2(4):165–185.
- Theis Raaschou Andersen, Søren Erbs Poulsen, Peter Thomsen. 2018. Geological characterization in urban areas based on geophysical mapping: A case study from Horsens, Denmark[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 150: 338–349.
- Verma S K, Sharma S P. 2011. Urban Geophysics Preface. *Physics and Chemistry of the Earth*[J]. Parts A/B/C, 36(16): 1209–1210.
- Wang Yong, Tan Chun, Zeng Lai. 2004. Application of georadar method in urban subsurface structures investigation[J]. *Shanghai Geology*, (4):45–47(in Chinese with English abstract).
- Werkema D, Lane J. 2015. Introduction to this special section:Near surface geophysics[J]. *The Leading Edge*, 34(1): 150–152.
- Xi Zhenzhu, Liu Jian, Long Xia. 2010. Three-component measurement intransient electromagnetic method[J]. *Journal of Central South University:Science and Technology*, 41(1): 272–276 (in Chinese with English abstract).
- Xi Zhenzhu, Long Xia, Zhou Sheng. 2016. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection. *Chinese J. Geophys.*, 59(9): 3428–3435(in Chinese with English abstract).
- Xia Jianghai, Gao Lingli, Pan Yudi. 2015. New findings in high-frequency surface wave method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 2591–2605(in Chinese with English abstract).
- Xiao Kun, Zou Changchun, Lu Zhenquan, Li Hongxing, Qin Zhen, Ge Kunpeng. 2020. The acoustic log method of estimating gas hydrate saturation in gas hydrate reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1664–1674(in Chinese with English abstract).
- Xu Mingcai, Gao Jinghua, Liu Jianxun, Rong Lixin. 2005. Application of the seismic method to detecting active faults[J]. *Earthquake Research in China*, 21(1):17–23(in Chinese with English abstract).
- Xu Peifen, Shi Wen, Ling Suqun. 2012. Mapping spherically weathered “Boulders” using 2D microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(6): 2120–2128(in Chinese with English abstract).
- Xu Peifen, Ling Suqun, Du Jianguo. 2013. Estimating Cenozoic thickness in the Beijing plain area using array microtremor data, *Seismol[J]. Res. Lett.*, 84(6): 1039–1047(in Chinese with English abstract).
- Yan Changbin, Xu Guoyuan. 2005. Conception of ground penetrating radar applied in municipal solid waste landfills[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26(10):1689–1691(in Chinese with English abstract).
- Yang Wencai, Tian Gang, Xia Jianghai, Yang Bo. 2019. The prospect of exploitation and utilization of urban underground space in hilly areas of South China[J]. *Geology in China*, 46(3):447–454(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaogang, Wang Rui, Huang Wei. 2019. Status and challenges of underground space development and utilization in China based on comparative analysis of typical Chinese cities[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(3): 69–75(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaobo, Wang Chengshan, Wang Zhihui, Li Hailong, Li Weirong, Wang Qiangmao. 2019. Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis of the Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11):

- 2935-2946(in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenjin. 2003. Urban geology and geophysics[J]. Geological Bulletin of China, 22(8): 558-562(in Chinese with English abstract).
- Zhao Pu, Jiang Jie, Wang Xiurong. 2017. Urban Underground Space Exploration Key Technologies and Development Trend[J]. Coal Geology of China, 29(9): 61-66(in Chinese with English abstract).
- Zhu Tao, He Zhengqin, Feng Rui, Hao Jinqi., Zhou Jianguo, Wang Hualin, Wang Shuoqing. 2007. Experiment on joint detection by seismic reflection and electrical imaging: With an example of exploration of active fault in Zibo City[J]. Seismology and Geology, 29(2): 373-380(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈颢, 陈龙生, 于晟. 2003. 城市地球物理学发展展望[J]. 大地测量与地球动力学, 23(4): 1-4.
- 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 王广才. 2003. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. 地学前缘, 10(1): 93-104.
- 董浩斌, 王传雷. 2003. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 10(1): 171-176.
- 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 魏文博, 高锐, 吕庆田, 杨经绥. 2012. 我国深部探测技术与实验研究进展综述[J]. 地球物理学报, 55(12): 3884-3901.
- 冯兵, 李建国, 赵斌, 王玉, 王瑁璐, 张继锋. 2014. 音频大地电磁法在南岭于都—赣县矿集区银坑示范区深部矿产资源探测中的应用[J]. 地质学报, 88(4): 669-675.
- 鄯少英, 刘保金, 赵成彬, 何银娟, 谭雅丽, 贾艳霞. 2015. 三维反射地震方法在活断层探测中的应用试验——以卢花台断层为例[J]. 地震地质, 37(2): 627-637.
- 丰赓, 沙椿. 2018. 面波联合勘探在深厚覆盖层地区应用实例分析[J]. 物探与化探, 42(2): 392-397.
- 高远. 2018. 等值反磁通瞬变电磁法在城镇地质灾害调查中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 46(3): 152-156.
- 高远. 2019. 等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J]. 物探与化探, 43(6): 1404-1408.
- 葛如冰. 2011. 高密度电阻率法在城市地下目的物探测中的应用[J]. 物探与化探, 35(1): 136-139.
- 郭士礼, 段建先, 张建锋, 李修忠. 2019. 探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 34(4): 1609-1613.
- 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨. 2004. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 23(10): 1662-1669.
- 郝爱兵, 林良俊, 李亚民. 2017. 大力推进多要素城市地质调查精准服务城市规划建设运行管理全过程[J]. 水文地质工程地质, (4): 水工环论坛.
- 黄洪冠, 徐胜峰. 2012. 谐振法油气检测技术在火山岩储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 34(10): 47-50.
- 黄毓铭, 张晓峰, 谢尚平, 苗思达, 黄成民, 史唯剑. 2017. 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, 32(3): 1352-1359.
- 赖刘保, 陈昌彦, 张辉, 白朝旭, 苏兆锋, 贾辉, 肖敏, 侯海涛. 2016. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 31(6): 2743-2746.
- 李万伦, 刘素芳, 田黔宁, 吕鹏, 姜重昕, 贾凌霄. 2018. 城市地球物理学综述[J]. 地球物理学进展, 33(5): 2134-2140.
- 李学军. 2011. 我国城市物探工作的应用与发展[J]. 地球物理学进展, 26(6): 2221-2231.
- 李志祥, 毛先进, 韩明, 吕明, 龙德龙. 2003. 高密度电阻率法在隐伏断层探测中的应用[J]. 地震研究, 26(3): 275-278.
- 刘保金, 柴焯章, 鄯少英. 2008. 第四纪沉积区断层及其上断点探测的地震方法技术: 以银川隐伏活动断层为例[J]. 地球物理学报, 51(5): 1475-1483.
- 刘庆华, 王凯明, 鲁来玉. 2015. 主动源和被动源面波浅勘方法综述[J]. 地球物理学进展, 30(6): 2906-2922.
- 闵刚, 王绪本, 张兵, 余谦, 魏葳. 2014. AMT法在黔东南岑巩地区的页岩气勘探试验[J]. 石油地球物理勘探, 49(4): 815-824.
- 戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 张鹏, 孟静, 张春山, 杨为民, 杨肖肖, 雷晓东. 2019. 京张地区延坝盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段综合地球物理及钻孔地层剖面研究[J]. 中国地质, 46(3): 468-481.
- 王永, 谭春, 曾来. 2004. 地质雷达方法在城市地下建(构)筑物权属调查中的应用[J]. 上海地质, (4): 45-47.
- 席振铎, 刘剑, 龙霞. 2010. 瞬变电磁法三分量测量方法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 41(1): 272-276.
- 席振铎, 龙霞, 周胜. 2016. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法[J]. 地球物理学报, 59(9): 3428-3435.
- 夏江海, 高玲利, 潘雨迪. 2015. 高频面波方法的若干新进展[J]. 地球物理学报, 58(8): 2591-2605.
- 肖昆, 邹长春, 卢振权, 李红星, 秦臻, 葛坤朋. 2020. 基于声波测井的冻土区孔隙水合物储层水合物饱和度估算方法[J]. 地质学报, 94(5): 1664-1674.
- 徐明才, 高景华, 刘建勋, 荣立新. 2005. 应用于城市活断层调查的地震方法技术[J]. 中国地震, 21(1): 17-23.
- 徐佩芬, 侍文, 凌甦群. 2012. 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, 55(6): 2120-2128.
- 徐佩芬, 李世豪, 杜建国. 2013. 微动探测: 地层分层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 29(5): 1841-1845.
- 闫长斌, 徐国元. 2005. 探地雷达应用于城市固体废弃物填埋场的构想[J]. 岩土力学, 26(10): 1689-1691.
- 杨文采, 田钢, 夏江海, 杨波. 2019. 华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J]. 中国地质, 46(3): 447-454.
- 杨晓刚, 王睿, 黄伟. 2019. 亮华南丘陵地区城市地下空间开发利用前景[J]. 地学前缘, 26(3): 69-75.
- 张晓波, 王成善, 王志辉, 李海龙, 李伟荣, 王强茂. 2019. 广东省潼湖生态智慧区浅层地球物理探测与地层物性分析[J]. 地质学报, 93(11): 2935-2946.
- 赵文津. 2003. 城市地质与地球物理[J]. 地质通报, 22(8): 558-562.
- 赵锴, 姜杰, 王秀荣. 2017. 城市地下空间探测关键技术及发展趋势[J]. 中国煤炭地质, 29(9): 61-66.
- 朱涛, 何正勤, 冯锐, 郝锦琦, 周建国, 王华林, 王砚卿. 2007. 地震-电成像联合探测试验——以淄博市活断层探测为例[J]. 地震地质, 29(2): 373-380.