

doi: 10.12029/gc20200509003

李华,王东辉,张伟,杨剑,王桥,廖国忠,王春山,韩浩东,席振铎,王亮,刘胜,夏友刚,李颖,杨涛. 2023. 地球物理方法在城市地质结构精细化探测中最优方法组合研究——以成都市天府新区为例[J]. 中国地质, 50(6): 1691–1704.

Li Hua, Wang Donghui, Zhang Wei, Yang Jian, Wang Qiao, Liao Guozhong, Wang Chunshan, Han Haodong, Xi Zhenzhu, Wang Liang, Liu Sheng, Xia Yougang, Li Ying, Yang Tao. 2023. The application effect of geophysical method in fine exploration of urban geological structure and study of optimal combination method: A case study of Tianfu New Area in Chengdu, Sichuan Province[J]. Geology in China, 50(6): 1691–1704(in Chinese with English abstract).

地球物理方法在城市地质结构精细化探测中最优方法组合研究——以成都市天府新区为例

李华¹,王东辉¹,张伟¹,杨剑¹,王桥¹,廖国忠¹,王春山¹,韩浩东¹,席振铎²,王亮³,
刘胜⁴,夏友刚⁴,李颖⁴,杨涛⁵

(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;
5. 四川华地建设工程有限责任公司,四川 成都 610081)

摘要:【研究目的】成都市天府新区属于典型的西南红层地区,其地层结构呈泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩互层结构,不同岩性之间的物性差异相对较小,研究浅部地质结构探测方法,有利于实现城市三维精细地质模型的建立。【研究方法】本文在成都天府新区 4 个典型试验区,采用多种新的和传统的地球物理方法开展了地质结构精细探测试验。【研究结果】地质雷达、三分量频率共振具有较高的分辨率,其次是浅层地震勘探、高密度电阻率法、等值反磁通瞬变电磁法、微动勘探;地质雷达和等值反磁通瞬变电磁抗干扰能力最强,浅震、三分量共振、微动勘探受城市噪音干扰比较严重;采用地质雷达、三分量频率共振、高密度电阻率法、等值反磁通瞬变电磁法、浅层地震、微动勘探等方法进行组合探测,可以获得由浅至深不同深度范围内的地质结构分层。【结论】通过对比分析每种方法的探测深度、分辨率、抗干扰强度、施工效率和经济成本,形成了适应于成都市天府新区不同工况、不同探测深度的地质结构精细探测地球物理方法最优组合方案。

关键词: 地球物理方法;地质结构;最优方法组合;精细探测;城市地质调查工程;成都;四川

创新点: (1)将成都市天府新区分成 3 种不同的建设情况,进行了多方法多技术的浅部地质结构精细化探测研究;(2)形成了成都市天府新区不同工况、不同探测深度的地质结构精细探测地球物理方法最优组合方案。

中图分类号:P631 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2023)06-1691-14

The application effect of geophysical method in fine exploration of urban geological structure and study of optimal combination method: A case study of Tianfu New Area in Chengdu, Sichuan Province

LI Hua¹, WANG Donghui¹, ZHANG Wei¹, YANG Jian¹, WANG Qiao¹,

收稿日期:2020-05-09;改回日期:2020-05-23

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

作者简介:李华,男,1979年生,高级工程师,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。

LIAO Guozhong¹, WANG Chunshan¹, HAN Haodong¹, XI Zhenzhu², WANG Liang³,
LIU Sheng⁴, XIA Yougang⁴, LI Ying⁴, YANG Tao⁵

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. School of Geosciences and Info-physic, 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; 5. Sichuan Huadi Building Engineering Co., Ltd, Chengdu 618000, Sichuan, China)

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

[Objective] Tianfu New Area (TNA) of Chengdu is characterized by a typical red stratigraphy in southwest China, including interbed sedimentary rocks of mudstone, silty mudstone, argillaceous siltstone and sandstone. The difference of physical property among the above rocks is minor. Clarifying the shallow geological structure by geophysical method is favor for constructing the fine three-dimensional geological model of TNA. **[Methods]** This paper attempts to image fine geological structure in 4 typical sites of TNA through a variety of new and traditional geophysical methods. **[Results]** Ground penetrating radar (GPR) and three component frequency resonance (TCFR) have higher imaging resolution than that of shallow seismic exploration (SSE), electrical resistivity tomography (ERT), opposing coils transient electromagnetic (OCTEM) and microtremor exploration (ME). Urban noise tends to affect field data quality in SSE, TCFR and ME, but not in GPR and OCTEM. Fine geological structure from shallow to deep depth can be obtained by method assembly for GPR, TCFR, ERT, OCTEM, SSE and ME. **[Conclusions]** Under comparing and analyzing the detection depth, resolution, anti-urban noise level, construction efficiency, and economic cost of the above methods, the optimal geophysical method assembly to detect fine geological structure with different construction conditions and exploration depths in TNA of Chengdu is summarized.

Key words: geophysical methods; geological structure; optimal geophysical method assembly; fine geophysical detection; urban geological survey engineering; Chengdu; Sichuan Province

Highlights: (1) Multiple geophysical methods are applied to detect fine geological structure in the three construction conditions of Tianfu New Area; (2) The optimal geophysical method assembly to detect fine geological structure with different construction conditions and exploration depths in Tianfu New Area is summarized.

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

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

1 引 言

近年来,成都常住人口增长迅速,年均增速高达51万人,人口与城市承载力、环境资源等要素之间的矛盾越来越突出。城市地下空间的开发与利用对城市的健康、生态、节约、智能发展具有重要的现实意义(郝爱兵等,2017;杨文采等,2019;杨晓刚等,2019;李鹏岳等,2021;葛伟亚等,2022;张茂省等,2023)。为此,2017年2月,成都市人民政府与中国地质调查局在北京签署战略合作协议,共同开展成都市城市地下空间地质资源调查工作。

城市三维地质模型的建立是城市地下空间调

查的重点工作之一(陈麒玉等,2016;方寅琛等,2017;林良俊等,2017)。陈颢等(2003)提出,研究有关城市的重大问题时,地面的地图是不够的,最需要一张该城市的地下三维地图。成都市天府新区作为四川省下辖的国家级新区,目前正在努力建设新发展理念의公园城市,快速建成该区的三维地质模型对于地下空间的规划、开发利用以及交通轨道、地面建筑施工具有重大的参考价值。该区属于西南典型的红层地区,其地层结构以泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩呈不等厚互层结构为主(王子忠和许模,2011;仇开莉等,2014;邱恩喜等,2015),若能解决此类软岩地质结构的精细划分问

题,成都天府新区的三维可视化地层模型的建立便可迎难而上。

在城市地下地质结构探测过程中,具有高效、无损、抗干扰强等优点的地球物理探测技术显得尤为重要(李学军,2011;赵锴等,2017;Andersen et al.,2018;黄理善等,2022)。在该领域前人已经取得过很多成功的经验:苏茂鑫等(2011)利用地质雷达和高密度电法开展城市地铁地质超前预报取得了良好的预报效果,并证明了该组合方法的有效性;郭士礼等(2019)利用地质雷达准确识别了城市道路地下病害的类型、位置、埋深和范围;葛如冰(2011)采用高密度电阻率法开展城市地下目的物如地下管渠、防空洞、地下构筑物等方面的探测取得明显的效果;李帝铨等(2008)利用CSAMT法查明了北京新区规划区内断裂的准确位置等信息;鄯少英等(2015)利用三维地震从不同方面反映了银川市芦花台活动断层的三维空间展布形态;徐佩芬等(2012)利用微动勘探技术查明了深圳地铁7号线未风化的花岗岩“孤石”。特别是在地下的三维地图建立方面,地球物理学应发挥重要的作用(赵文津,2003;陈颢等,2003)。

然而,天府新区红层软岩多元地质结构之间的电阻率、波速、密度等物性差异相对较小,加上各种强干扰工况,单一的地球物理探测技术往往不能有效查明城市地下地质结构,必须通过综合的地球物理方法联合勘探,各方法取长补短、互相验证,才能实现对此类地层结构的精细划分。本研究的主要目的是以成都天府新区为研究区,评估不同工况、不同探测深度条件下各种地球物理方法探测地质结构的应用效果,并最终形成地质结构精细化探测的最优组合探测技术方案,以期能为今后中国红层地区或是具有类似地层结构特征的城市开展精细地质结构探测的研究及应用提供借鉴和参考。依托中国地质调查局实施的城市地质调查工程下的成都多要素城市地质调查项目,在成都市天府新区选择了4个典型试验区开展研究,涉及到的方法包括了传统的和目前国内外最新的物探技术。本文首先描述了研究区的地质背景和主要地层地球物理参数识别特征,并对4个典型试验区的现场试验效果进行详细描述,包括施工条件分析、钻孔验证信息和综合测井结果等,进而对结果进行讨论,形

成天府新区地质结构最优组合探测技术。

2 研究区地质地球物理特征

2.1 地质概况

天府新区成都直管区位于成都市区南部,东连龙泉驿区和简阳市,南接眉山市仁寿县和彭山区,西邻双流区,北靠成都高新区和锦江区。在地质上地处成都平原南部边缘地带,所处大地构造位置为新华夏系四川沉降带成都断陷的东南边缘地带,坳陷盆地内地质构造主要表现为以北北东向、北东向、南北向为主的褶皱与断裂,自东向西分别为苏码头背斜、盐井沟背斜、牧马山—普兴向斜、熊坡背斜、苏码头断裂、蒲江—新津断裂、双流—成都隐伏断裂、磨盘山—新都—广汉隐伏断裂等,构造断裂对地层的改造剧烈程度对地球物理探测结果影响也较大,在探测中应引起重视。

研究区内主要地貌为台地丘陵区,包括中丘、低丘、垄岗、平坝和河流阶地;浅表第四系为岷江水系沉积形成,零星分布在Ⅱ级阶地,层厚为几米到几十米不等,总体表现为西厚东薄的特征,部分区域基岩出露;出露或下伏地层有白垩系和侏罗系,由老到新为蓬莱镇组、天马山组、夹关组和灌口组(图1a),岩性主要由泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、砂岩等交替组成,形成具有不同力学性质的岩层互层组合(李强等,2023),单一的岩性组合基本不存在,具有典型红层软岩特征。

2.2 主要地层地球物理参数识别特征

地球物理参数作为联系地质体与地球物理场的桥梁,在开展研究之前对研究区不同岩性进行物性测试分析是必不可少的。由于目前在城市开展磁法和重力勘探干扰较多,很难获取有效的数据,所以笔者重点统计了电阻率和纵横波波速的物性参数。物性参数的获取及统计主要来源于孔旁电测深、综合测井、岩心测试和露头测试等。

各岩性层的物质成分及结构,是决定其电阻率大小的主要因素。砂砾卵石层电阻率明显高于黏土层和下伏的强风化基岩(表1),而基岩内的膏盐层电阻率也明显高于围岩,可作为电阻率法勘探的2个电性标志层;其他岩性的电阻率在 $10\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$,电性变化不大。箱线图统计(图2a)显示:从黏土—泥岩—粉砂质泥岩—泥质粉砂岩—砂岩的电阻率呈逐

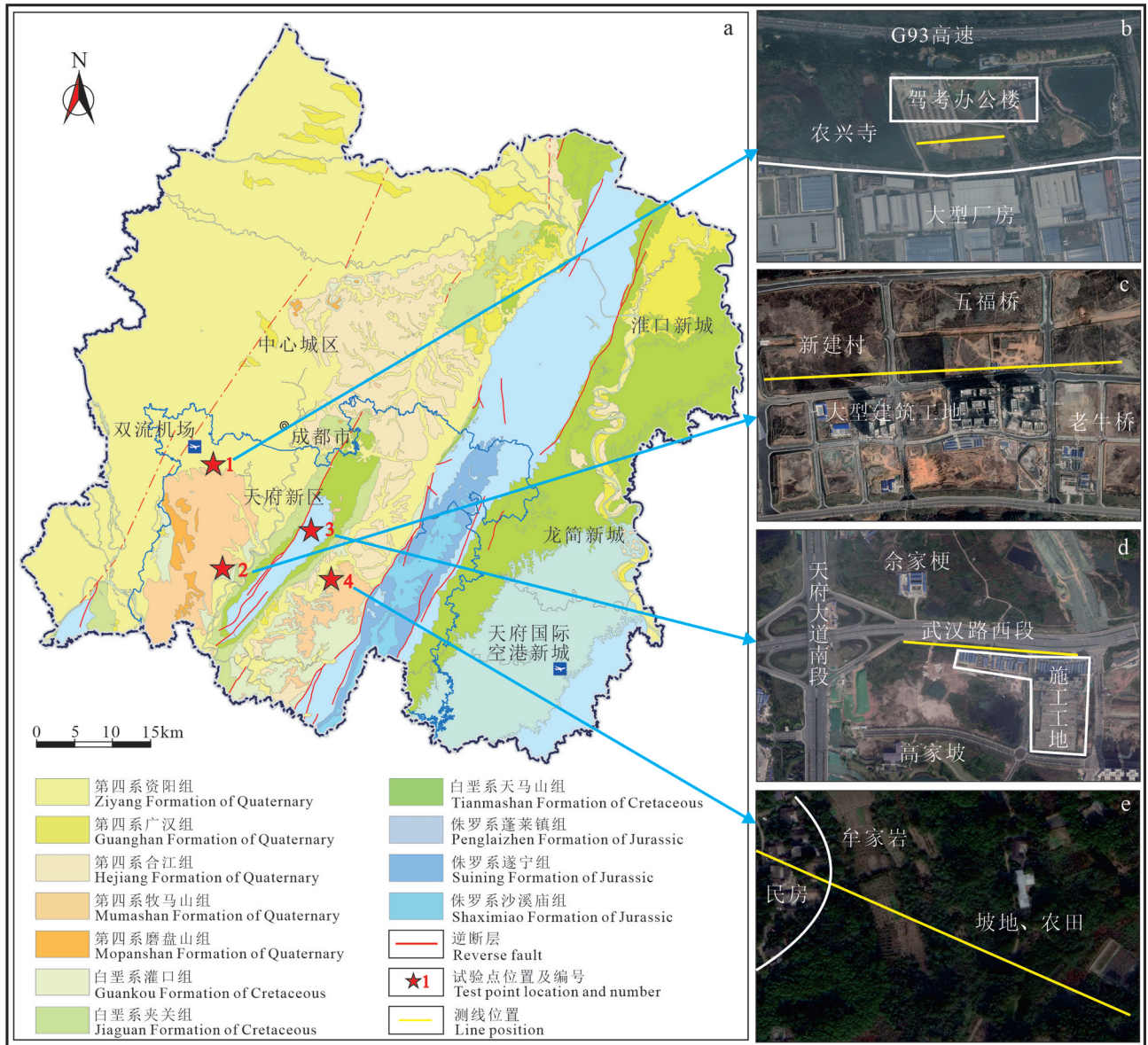


图1 成都市地质简图及试验点位置分布图

Fig.1 Geological sketch map of Chengdu City and location distribution of example points

渐增大的趋势,但是相邻地层之间电性特征差异不明显,然而浅地表的黏土层电性在平面上变化不大,且位于标志层砂砾卵石之上,易于区分;粉砂质泥岩和泥质粉砂岩电阻率值分散程度较大,与其物质成分含量不均匀有很大关系,两者电阻率值重叠范围较大,仅通过电阻率差异很难将其准确区分;而泥岩和砂岩电阻率值分布相对稳定,两者之间电阻率值相差2~5倍,中位数相差3倍,如果是厚层状泥岩或是厚层状砂岩,两者通过电阻率差异还是相对容易区分。基于以上认识,认为通过电性差异,

可以划分研究区的黏土层、砂砾卵石层、厚层泥岩、厚层砂岩及膏盐层。

波速是划分岩性、定量解释的主要参数。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。据岩土层与波速的统计对应关系(表1):波速由表土层—砂砾卵石层—泥岩层—粉砂质泥岩层—泥质粉砂岩层—膏盐富集层自上至下呈依次递增关系,黏土层与其他岩土层的波速差异达到5倍以上,易于区别。传统的面波勘探法和新方法中的混合源面

表1 成都市天府新区主要地层岩性物性参数
Table 1 Physical parameters of different lithology in Tianfu New Area of Chengdu City

岩性	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$		纵波速度 $V_p/(m/s)$		横波速度 $V_s/(m/s)$	
	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
黏土	16.73	10.45~25.67	289	182~357	107	57~141
砂砾卵石	252.54	79.58~479.43	2189	1978~2473	516	324~685
泥岩	23.03	7.13~58.81	2230	2040~2520	1100	700~1300
粉砂质泥岩	33.09	6.39~64.95	2510	2340~2760	1500	1350~1780
泥质粉砂岩	51.46	25.06~104.01	2900	2780~3250	1750	1620~1890
砂岩	66.69	24.57~189.87	3340	2850~3640	1980	1710~2140
膏盐层	405.09	124.41~932.04	4400	3850~5100	2210	1800~2460

波与三分量谐振、微动勘探法均是利用横波的速度差异来区别不同的岩土层岩性。从研究区不同岩性的横波波速箱线图统计结果(图2b)可见:基岩内膏盐层因其富集程度不同导致了波速分散程度较大,但总体上为基岩内的高速层,其第三四分位数基本与第二高速层砂岩的第一四分位数持平,所以相对易于识别;泥岩的波速分散程度同样较大,与其浅部受风化破碎程度的影响有关;粉砂质泥岩与泥质粉砂岩,波速分散程度虽然较小,但是两者之间的横波速度值重叠性还是较高,不易区别;其他岩性与相邻岩层之间的横波速度虽然差别不大,但是重叠性均较小。通过以上分析认为,研究区对不同岩性之间通过横波波速差异有一定的识别能力,特别厚层状的泥岩与厚层状的砂岩之间的差异更明显、更易于识别。

2.3 方法选择

在开展探测研究之前,笔者通过收集、分析研究前人的资料成果后,对当前主要的城市地球物理

探测技术的探测深度、主要优缺点、主要施工难点等进行了分析统计(表2),结合研究区的地质、地球物理特征,本次试验主要选取了混合源面波与三分量共振、等值反磁通瞬变电磁法、微动勘探等当前流行的新技术新方法,以及地质雷达、高密度电阻率法、浅震反射波法、浅震折射层析法等传统有效的物探方法。每个试验点均有钻孔控制,并进行了综合测井工作,用于辅助最终的成果精细解译。

3 试验探测效果分析

为了研究地球物理方法在天府新区的地层结构精细化探测中的应用效果和最优方法组合,根据研究区不同的工况、不同的地质条件特点,选择了4个典型试验区开展了探测研究,并对其探测成果进行详细的分析展示。

3.1 建筑密集区第四系厚覆盖的地层结构探测

试验点一位于成都双流龙港农兴寺附近(图

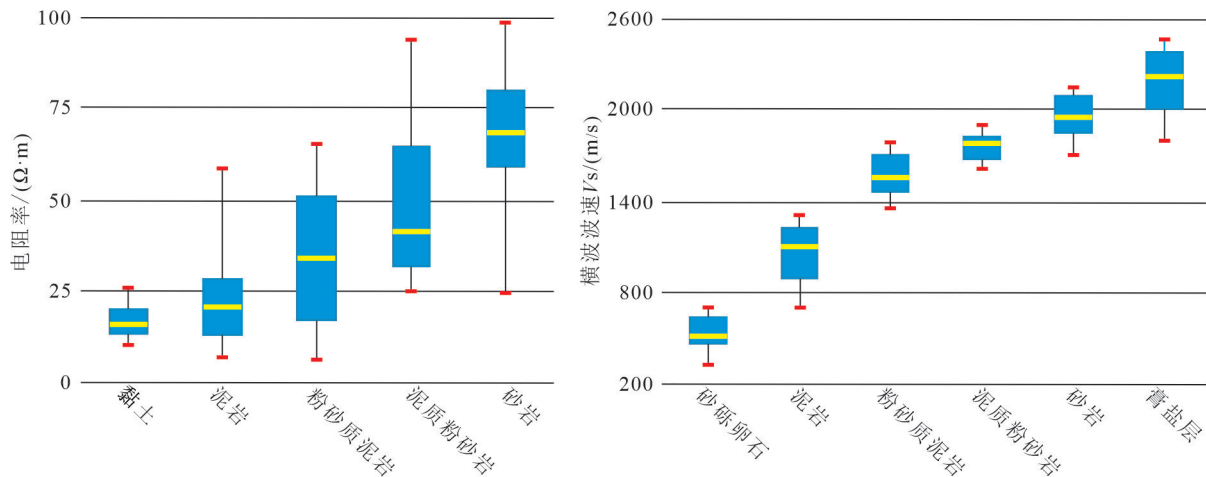


图2 成都市天府新区主要地层岩性电阻率和横波速度特征
Fig.2 Resistivity and S-wave velocity characteristics of different lithology in Tianfu New Area of Chengdu City

表2 城市地球物理探测技术探测深度和主要优缺点分析统计

Table 2 Statistics of detection depth and main advantages and disadvantages of urban geophysical exploration technology

方法名称	有效探测深度/m	主要优点	主要缺点	主要难点
地质雷达	20	可对0~20 m浅地表结构进行精细分层	探测深度有限	城市浅地表人文扰动大,解释难度大
瞬态面波法	50	可对0~50 m浅地表结构进行精细分层	受城市噪音等干扰较大	
混合源面波勘探及三分量频率谐振	100	分辨率高,采用拖缆方式施工,施工效率较高	探测深度相对较浅,成本高	受施工场地影响比较明显,适合沿街道布设
三分量共振成像	100	分辨率较高,施工效率高	深部分辨率较低	
2D高密度电阻率法	200	获取的电性数据丰富,数据采集速度快	城区游散电流、电磁干扰、人为干扰影响较大	施工场地受限严重
等值反磁通瞬变电磁	200	轻便、高效,具有强抗干扰能力	陡倾地层结构分层精度较低;深部分辨率相对较差	受磁性物体干扰较大,远离井盖、电线或铁质物2~3 m即可采集
微动勘探	200	探测深度较大,波速差异较大的地层结构探测精度较高	探测深度越大,需要的施工场地越大;成本也较高	为了提高精度,一次性布设台阵较多,建筑密集区场地选择较难
二维浅层地震勘探	300	勘探精度高、效果好的特点,对地层结构精细探测效果明显	受城市噪音干扰大,工作效率较低,成本高	城市干扰障碍多,协调困难
三维浅层地震勘探	300	面积勘探、高密度采集、信息量丰富,大大提高了分辨率,三维图像显示灵活多样	施工效率相对较低、成本更高	受到施工场地影响更明显协调更困难
音频大地电磁	2000	探测深度大,对低阻分辨率高,受地形影响小	抗电磁干扰能力差,探测深度越大,分辨率越低	城市建筑密集区无法采集数据
微重勘探	3000	探测深度大,施工灵活方便,成本非常低,适合完成面积性工作	受人为干扰影响,数据采集效率低,分辨率相对较低	城区建筑密集,地下空间复杂多样,地形改正难度大

1a),该区属于建筑密集区,测线东侧为大型厂房,西侧为G93高速公路,南侧有水塘,施工场地面积有限(图1b)。浅地表有较厚的回填土,第四系覆盖层较厚,下部为砂泥岩互层区;试验目的为对50 m以浅地质结构进行分层,并查明富水卵砾石层的分布特征。综合施工工况及探测深度考虑,设计了一条长260 m的测线,选择了高密度电阻率法和等值反磁通瞬变电磁法进行探测,测点点距均为10 m。

从探测效果来看,高密度电阻率法和瞬变电磁法反演的电阻率剖面特征非常相似(图2),从上至下电阻率明显可以分为低阻—高阻—低阻三层特征,结合ZK1的钻探信息,可将这三层分为回填土及黏土、卵砾石层、砂泥岩互层三层地质结构。两种方法的探测效果均较好,高密度电阻率法反映的信息相对更精细(图3a),但是受施工场地限制,探测深度只达到了41 m,瞬变电磁的探测结果相对粗

糙(图3b),但是探测深度可以满足要求。探测结果揭示该区富水卵砾石层的厚度大约为20 m,地层向北微倾,与地质认识相吻合。

3.2 在建区含膏岩的地层结构探测

试验点二位于天府新区国际生物城起步区(图1a)。地形主要以浅丘为主,涵盖丘陵、平坝和湖泊等。浅表为第四系覆盖层,下部为砂泥岩互层,50~200 m深度范围内含多层薄层状膏盐层。开工前,成都天府国际生物城内各大项目的建设正如火如荼,开展试验面临施工场地受限,以及钻机、吊塔、高压电线、建筑工地、车辆、噪音干扰等复杂问题,地球物理探测条件极其恶劣(图1c,图4)。试验目的:在高压电线、施工场地等强干扰条件下,开展200 m以浅的地质结构精细探测研究,特别是膏盐层的探测,并部署2口深度分别为100 m、200 m的验证钻井。设计测线总长度为1.2 km,根据各方法

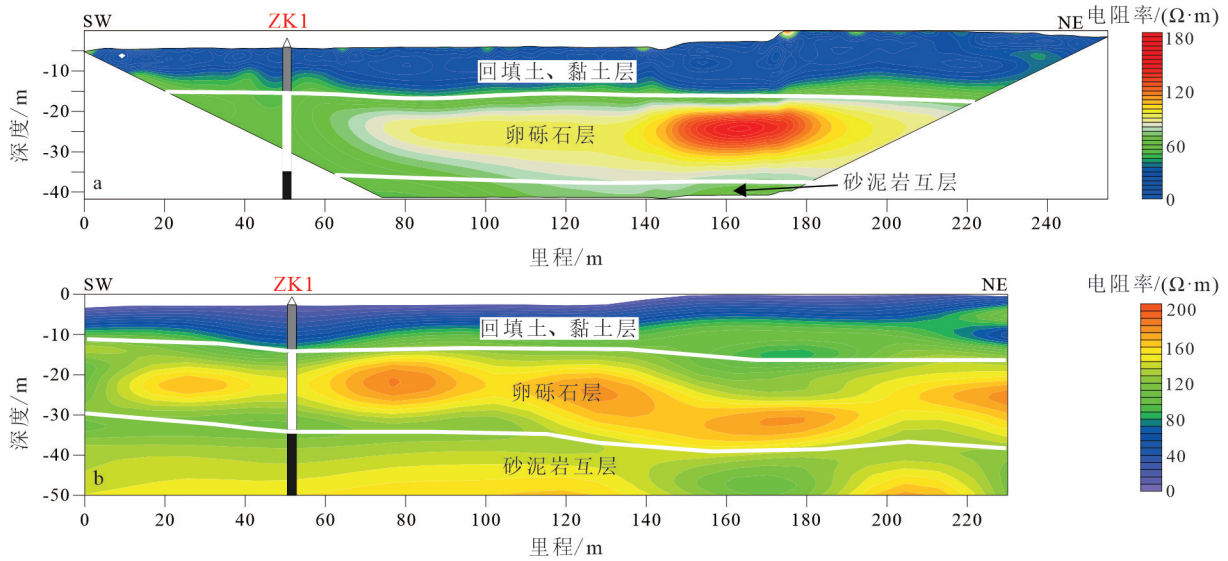


图3 试验点一综合探测成果及推断解释图

Fig.3 Comprehensive exploration results and inferential interpretation of test point 1

的适用性,在测线上分别开展了三分量谐振勘探(点距4 m)、高密度电阻率法勘探(点距10 m)、微动勘探法、等值反磁通瞬变电磁法等地球物理探测试验。其中三分量谐振勘探点距4 m,高密度电阻率法和等值反磁通法点距10 m,微动勘探法点距20 m。

从探测效果看,高密度电阻率法由于受人为干扰(预埋混凝土排水管、高压线等)的影响,电阻率分层特征不是特别明显、规律性较差(图5a),很难达到精细分层效果;微动勘探法的视S波速度差异虽然对浅部的第四系精细分层具有一定效果,但对于明晰深部含膏盐的砂泥岩互层和膏盐富集层界面不够敏感(图5b),且分辨率相对较低;三分量频

率谐振勘探获取的波阻抗比值差异对于识别膏盐层效果较好(图5c),可以用作精细结构探测的辅助手段;等值反磁通瞬变电磁电阻率反演成果所显示的电性层与地质层位对应关系良好,规律性强,通过电阻率的差异来达到不同地质结构的分层、识别膏盐层及膏盐富集层效果明显,结合钻孔信息可以准确划分膏盐层的位置(图5d),在该工区效果显著。

3.3 在建区砂泥岩频繁互层结构探测

试验点三位于天府新区武汉路东段公路旁(图1a),北侧为绿化带,西侧为天府大道主干线,南侧为施工工地,高压线、施工工地、车辆为主要干扰源(图6)。浅表即基岩出露,受苏码头背斜的影响,地



图4 试验点二现场工况

Fig.4 The site condition of test point 2

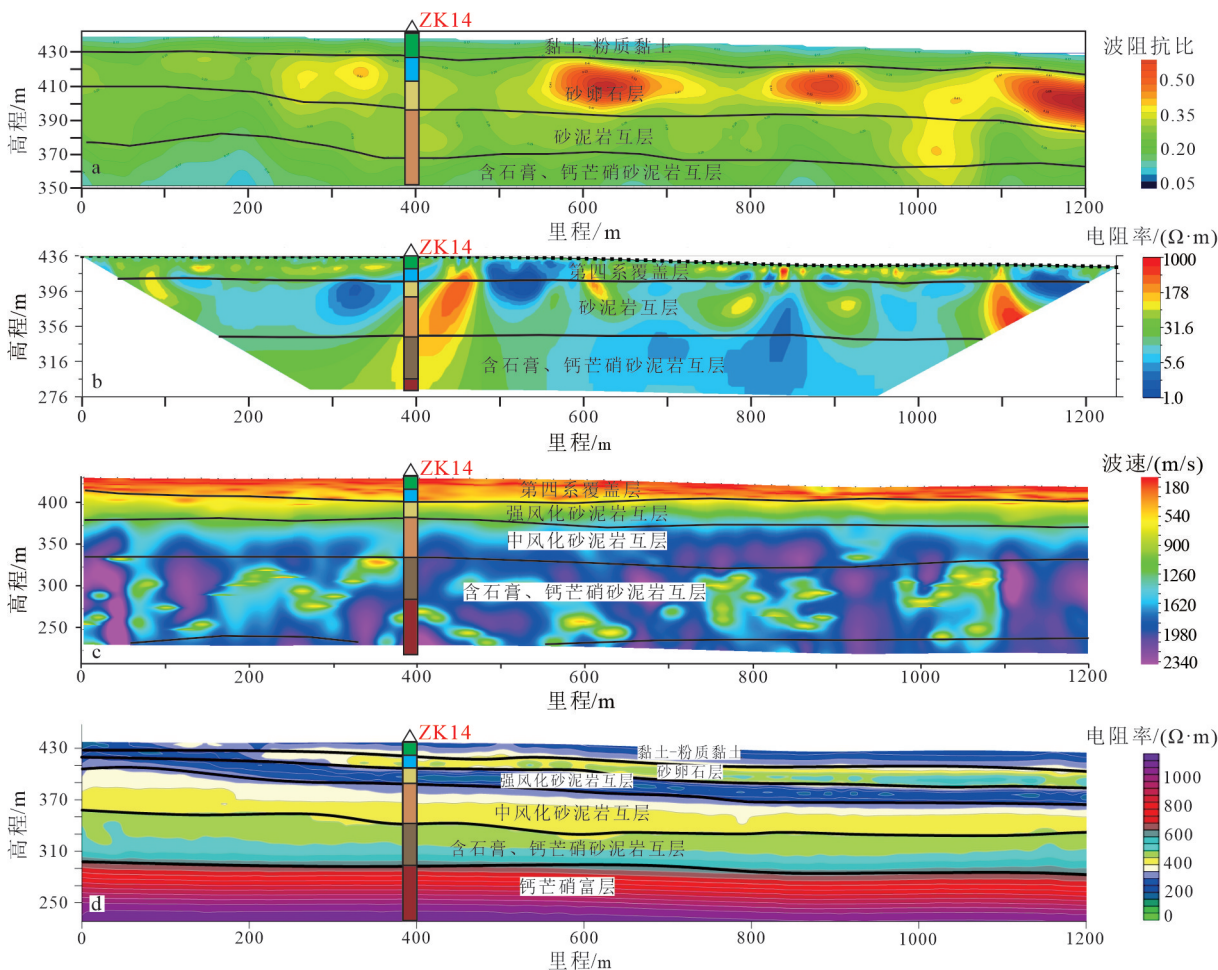


图5 试验点二综合探测成果及推断解释图

Fig.5 Comprehensive exploration results and inferential interpretation of test point 2

层往东南方向缓倾。探测目的:在高压电线、施工场地等强干扰条件下,对200 m以浅的砂泥岩频繁互层地层结构进行精细分层,剖面上有一口200 m

深的SZK01水文钻孔控制。设计试验测线长1.2 km,试验方法包括地质雷达、高密度电阻率法、浅震反射波法、微动勘探等。



图6 试验点三现场工况

Fig.6 The site condition of test point 3

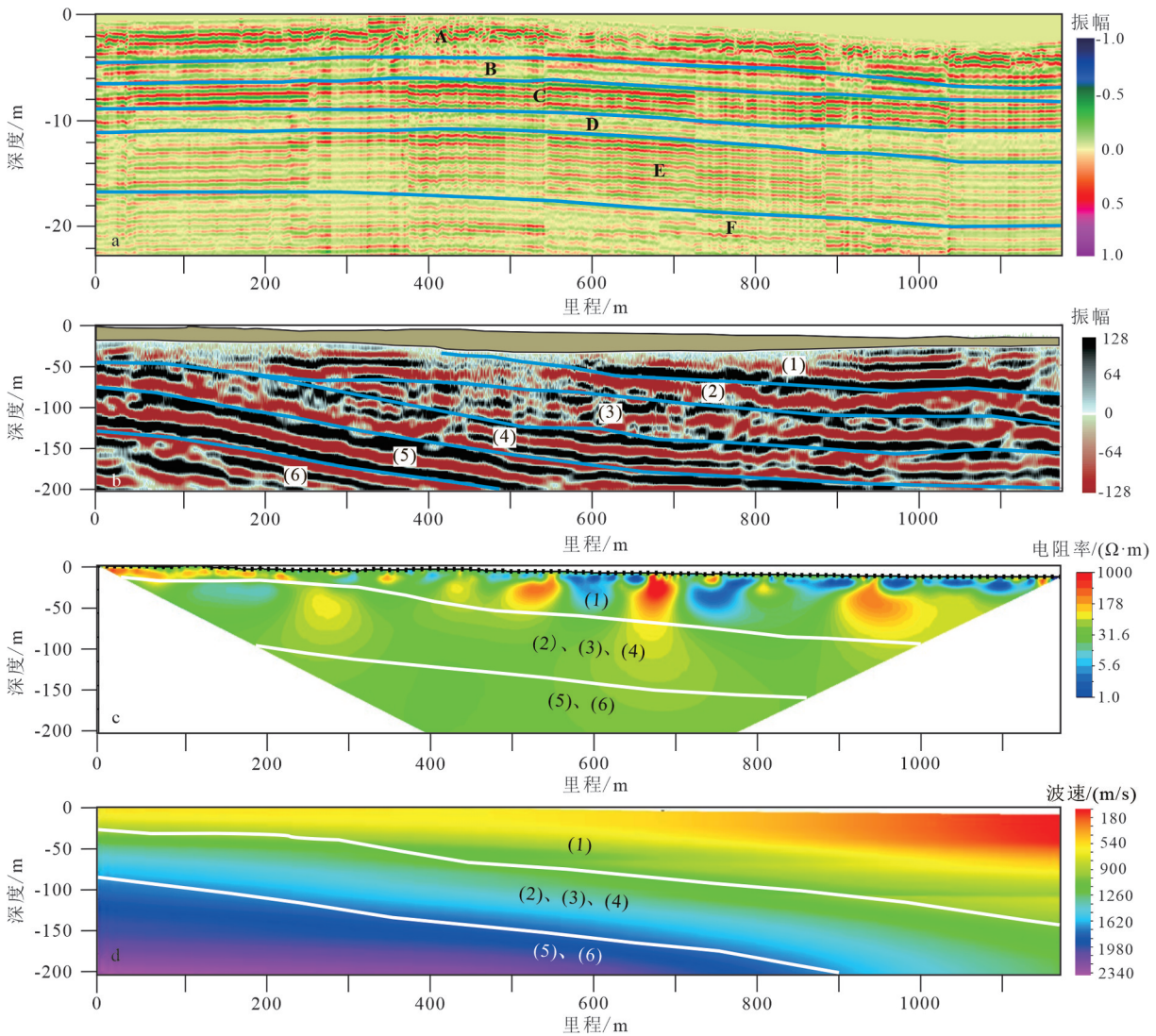


图7 试验点三综合探测成果及推断解释图

Fig.7 Comprehensive exploration results and inferential interpretation of test point 3

从探测效果看,地质雷达在0~20 m深度范围内的分层特征非常明显,根据电磁波反射波同相轴的特征,结合钻孔资料可将地表20 m范围内的地层精细地分为6层(图7a):A、C、E层为泥质粉砂岩,B、D、F层为泥岩、粉砂质泥岩;浅层地震反射波分层特征也很明显,根据地震反射波同相轴特征及钻孔信息,可将地下200 m深范围内地层结构划分为6层:(1)、(3)、(5)为泥质粉砂岩,(2)、(4)、(6)为泥岩、粉砂质泥岩,但是该方法不足之处是在浅地表存在30 m的探测盲区(图7b);高密度电阻率法电阻率分层特征一般,结合地质认识及钻孔信息,由上至下大致可分为3层,但各层之间的电阻率差异不是特别明显:第一层

与浅震(1)层对应,但弥补了浅震浅部的勘探盲区,第二层与浅震(2)、(3)、(4)合并层对应,第三层与浅震(5)、(6)层合并对应(图7c)。说明浅震在深部的分辨率要比高密度好很多;微动勘探法根据视S波速度差异分层特征也比较明显,由上至下具有两个明显的分层界面(图7d),分层结果与高密度电阻率法相似,但是分辨率强于高密度电阻率法。需要指出的是,对比4种方法的探测效果,其反映的地层倾向基本是一致的,分层界面形态及深度也大体一致,从侧面互相验证了各探测方法成果的可靠性。

3.4 建筑稀疏区砂泥岩频繁互层结构探测

试验点四于天府新区兴隆镇天明村牟家岩,除

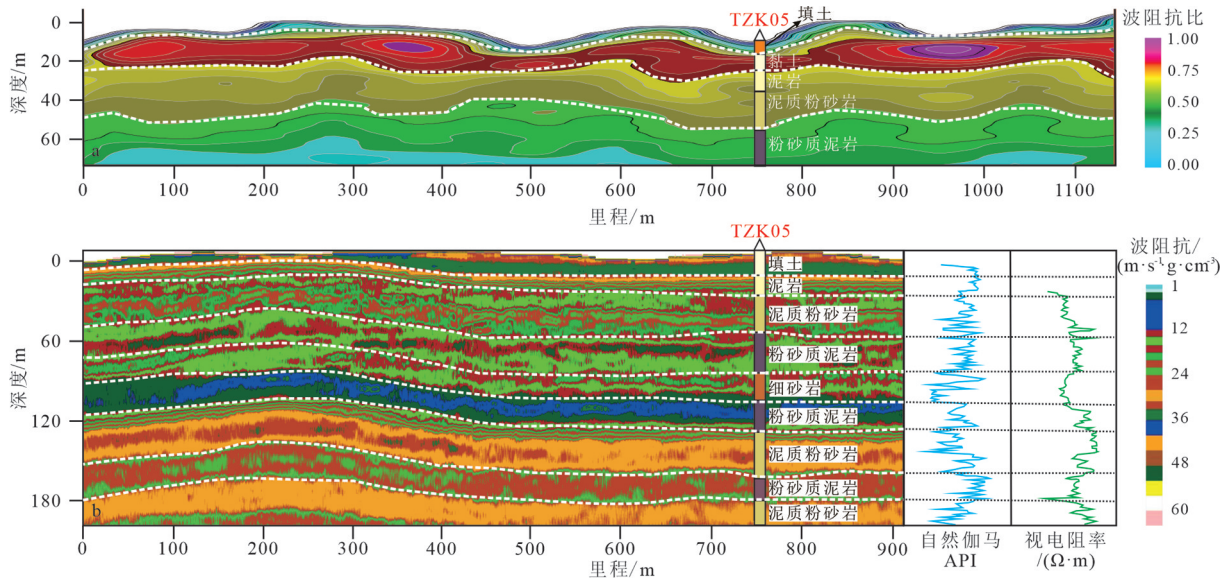


图8 试验点四综合探测成果及推断解释图

Fig.8 Comprehensive exploration results and inferential interpretation of test point 4

了少量的民房外,区内主要为农田和坡地,属于建筑稀疏区,几乎无干扰,设计试验测线长度为1.2 km (图1e)。浅地表为近4 m厚的第四系覆盖层,基岩为典型的砂泥岩互层。探测目的:在无干扰,场地开阔的条件下对200 m以浅的地层结构进行精细分层,剖面上有一口200 m深的TZK05工程钻孔控制。试验方法包括三分量共振,点距10 m;浅震反射波法,检波器间距2 m;综合测井(测量参数包括自然伽马、视电阻率等)。三分量共振成像主要用于弥补浅震反射波法浅地表的勘探盲区。

结合ZK05的钻孔信息及三分量共振成像剖面可见(图8a),第四系与白垩系灌口组之间的分界面成像清晰,第四系成岩程度较低的黏土、粉质黏土、卵石土及填土等相对松散的地层,共振响应表现为蓝色,白垩系灌口组成岩程度高的泥岩、泥质粉砂岩地层,共振响应表现为红色、黄色、绿色等色调,由上至下可将70 m深的地层精细地分为填土、黏土、泥岩及泥质粉砂岩、粉砂质泥岩4层,弥补了浅震反射波法浅地表的勘探盲区。

浅震勘探成果方面,利用综合地震速度谱、VSP测井速度、声波测井速度三种速度信息建立速度模型,对时间波阻抗剖面进行时深转换,得到深度域的波阻抗剖面,与钻孔岩性分层对比分析后,0~200 m深度范围内可以标定出9层地层结构(图8b),基本

上能够识别出主要的岩性分层,波阻抗反演大大提高了浅层地震勘探的分辨率。钻孔测井结果则提供了与其他调查结果相关的重要附加信息,根据钻孔地质编录结果与测井曲线建立的对应关系可以看出(图8b),不同的地层岩性具有不同的自然伽马值和视电阻率值,分层特征明显,可利用钻孔测井资料辅助精确划分地层岩组,识别岩性。特别是自然伽马值曲线,对于砂泥岩互层的识别效果明显,可以很好地用于辅助钻孔岩性的精确划分以及浅震剖面的精细分层;从测井的视电阻率曲线看,砂泥岩互层之间的电阻率也有一定的差异,可以用于辅助地表电法、电磁法剖面的推断解释工作。

4 最优组合探测技术讨论

4.1 探测深度上的组合

地球物理方法采用了不同的物理参数进行测量,不同的地球物理方法采用的地球物理场具有不同穿透能力,因而探测深度也不同。浅震反射波法采用弹性波进行地下探测,而弹性波在地下介质中衰减较慢,因而具有较大的探测深度(邓起东等,2003;刘保金等,2008);地质雷达是采用高频电磁波以脉冲的形式进行地下探测,高频电磁波在岩石和土壤中衰减较快,探测深度较小;高密度电阻率法是在地下建立稳定的电流场,根据电流场的分布来推测地

下介质的分布,其探测深度决定于供电电流的大小以及供电电极的间距(李志祥等,2003);微动探测是基于台阵观测的天然场源微动信号中采用数据处理与分析技术提取面波,其探测深度与台阵的观测半径及采样频率有关(徐佩芬等,2012,2013);三分量频率谐振勘探法是利用S波谐振频率对地下介质波阻抗变化的敏感性完成地下一定深度的地质体成像,本次试验有效探测深度大约100 m;等值反磁通瞬变电磁法与传统的重叠回线瞬变电磁法相似,其探测深度主要取决于线框大小及线框匝数,就目前最新的等值反磁通瞬变电磁HPTEM-18系统来看,其有效探测深度约200 m。对于成都市砂泥岩互层地质结构的探测,根据地下空间的规划和利用要求,需了解0~200 m以浅的地质结构分层情况,根据地球物理方法性质和多个探测实例,由浅到深可采用地质雷达、三分量频率共振、高密度电阻率法、等值反磁通瞬变电磁法、浅层地震、微动勘探等方法进行综合,获得不同深度上的地质结构分层。

4.2 分辨率上的组合

与探测深度对应,不同的地球物理方法具有不同的分辨率。在城市地下空间的规划和利用中,根据不同的规划对地下结构需要了解的分层精度也不同,这在方法的选择上,具有很大的变化。例如只需要了解浅地表基覆界面的位置,等值反磁通瞬变电磁法和高密度电阻率法方法是快速而廉价的方法;如果需要对第四系进一步细分黏土、卵石层、含水层等,地质雷达和三分量频率共振等方法非常有效;但如果需要对埋深大于50 m地质结构进行精细划分,需要有较高分辨率的地球物理方法,如高分辨率浅层地震方法。总之,根据理论上的认识以及实例结果,在地球物理方法的分辨率上,地质雷达、三分量频率共振具有较高的分辨率,其次是浅层地震勘探、高密度电阻率法、瞬变电磁法、微动勘探等。另外分辨率也与深度有关,探测深度越大,分辨率相对越低。

4.3 抗干扰效果的组合

在城市开展砂泥岩互层地质结构探测过程中,在不同的工况影响下各种方法的抗干扰效果不同,在方法的组合上也有差异。实践证明,采用屏蔽天线的地质雷达和等值反磁通瞬变电磁抗干扰能力最强(席振铎等,2010,2016),在建筑密集区、电

强干扰器往往也能取得效果较好的数据;高密度电阻率法则受人文干扰(如排水管、隧洞、硬化路面)较大,在没受干扰的前提下往往能取得非常好的效果(图3a),人为目标体产生的局部体积效应往往容易放大而掩盖地质结构的分层界面(图5b);浅震、三分量共振、微动勘探受城市噪音干扰比较严重,往往需要在夜间施工方能采集到较好的数据,后期数据处理难度较大。

4.4 施工效率上组合

从施工效率上考虑,以1 km勘探剖面进行概算,在施工条件较好且达到较好探测效果的前提下,地质雷达大约需要2小时、等值反磁通瞬变电磁3小时、高密度电阻率法6小时、浅震勘探和三分量共振8小时、微动勘探12小时。但在城区施工,浅震和三分量共振往往需要协调的时间更长,施工较麻烦;高密度电阻率法受施工场地影响,施工难度较大;微动勘探则相对比较灵活;地质雷达和等值反磁通瞬变电磁则适用于各种工况,施工灵活、高效、无损。

4.5 经济成本上的组合

从经济成本上考虑,浅震勘探、三分量频率共振和微动勘探造价相对较高,高密度电阻率法造价中等,而地质雷达和等值反磁通瞬变电磁法造价相对较低。

综上所述,在成都市天府新区开展城市地质结构精细化探测中,根据不同探测深度需求、兼顾方法的分辨率、抗干扰效果、施工效率和经济成本等方面统筹考虑,总结出天府新区地质结构探测方法的最优组合方案(表3):(1)在城市建筑密集区,50 m以浅采用地质雷达、三分量共振组合,100 m以浅采用地质雷达、等值反磁通瞬变电磁、三分量共振、自然伽马测井组合,200 m以浅采用地质雷达、等值反磁通瞬变电磁、微动勘探、自然伽马测井组合;(2)在城市在建区,50 m以浅采用地质雷达、三分量共振组合,100 m以浅采用地质雷达、等值反磁通瞬变电磁、三分量共振、自然伽马测井组合,200 m以浅采用地质雷达、等值反磁通瞬变电磁、浅震勘探、自然伽马测井组合;(3)在城市建筑稀疏区,50 m以浅采用地质雷达、高密度电阻率法组合,100 m以浅采用地质雷达、高密度电阻率法、三分量共振、自然伽马测井组合,200 m以浅采用地质雷达、等值反磁

表3 成都市天府新区地质结构探测方法最优组合方案

Table 3 Optimal combination scheme of geological structure detection methods in Tianfu New Area of Chengdu City

工况	50 m以浅最优 组合探测技术	100 m以浅最优 组合探测技术	200 m以浅最优 组合探测技术	方法技术编号
建筑密集区	①+④	①+③+④+⑦	①+③+⑥+⑦	①地质雷达;②高密度电法; ③等值反磁通瞬变电磁;
在建区	①+④	①+③+④+⑦	①+③+⑤+⑦	④三分量共振成像;⑤浅震勘探;
建筑稀疏区	①+②	①+②+④+⑦	①+③+⑤+⑦	⑥微动勘探;⑦自然伽马测井

通瞬变电磁、浅震勘探、自然伽马测井组合。

在采用组合探测技术开展地质结构精细化探测过程中,各种方法探测的“重叠区”成果,如30 m以浅,或者50 m以浅的探测成果,在通过钻孔信息约束反演后,以分辨率高的成果为主,分辨率相对较低的成果可以用于辅助最终成果的推断解译。

5 结论

(1)在城市各种复杂工况条件下开展地球物理探测工作时,必须要综合考虑方法的适应性、探测深度、分辨率、抗干扰强度、施工效率和经济成本等因素。

(2)在类似于成都市天府新区这种红层地区开展城市地质结构探测时,其地层结构具有砂泥岩频繁互层的多元地质结构特征,各地层之间物性差异较小,加上城市复杂条件下的强干扰工况,单一的地球物理探测技术往往不能有效查明城市地下地质结构,必须通过综合的地球物理方法联合勘探,各方法取长补短、互相验证,才能实现对此类地层结构的精细划分。

(3)从成都市天府新区开展的地质结构精细化探测效果来看,浅层地震反射波法在各种地球物理探测技术中,其分辨率最高,探测深度也大,但其成本也高,地表存在探测盲区;等值反磁通瞬变电磁抗干扰能力很强,施工效率也高,深部分辨率相对较低;高密度电阻率法受城市人文干扰和场地限制较大,探测效果时好时坏,不是太稳定;微动勘探抗干扰也较强、探测深度大,其深部分辨率一般,成本相对也高;三分量共振成像技术分辨率较高,施工效率较高,探测深度较小;地质雷达分辨率很高,但探测深度有限;综合测井的自然伽马值和视电阻率值对识别粉砂质泥岩和泥质粉砂岩的界线效果较好,可用于辅助钻孔编录完成地层岩性的辨别以及

地层的精细划分。所以在开展城市地质结构探测时,可根据实际探测深度、精度及经济成本的需求,选择不同的地球物理组合探测技术。

(4)通过此次试验研究,最终总结出成都市天府新区地质结构探测方法的最优组合方案,对中国红层地区或是具有类似地层结构特征的城市开展精细地质结构探测,具有良好的借鉴意义。

致谢:本研究涉及到了多种新方法新技术的试验工作,在此特别感谢中国科学院地质与地球物理研究所徐佩芬研究员团队、中南大学地球科学与信息物理学院席振铎教授团队、北京市水电物探研究所金荣杰老师团队在本次开展微动勘探试验研究和等值反磁通试验研究过程中提供的帮助与指导;感谢中石化石油工程地球物理公司南方分公司提供的三分量共振成像探测资料与成果;感谢参与此次试验研究的所有工作人员在野外数据采集及数据处理解释过程中付出的努力与艰辛;最后感谢审稿老师的意见与建议。

References

- Andersen T R, Poulsen S E, Thomsen P, Havas K. 2018. Geological characterization in urban areas based on geophysical mapping: A case study from Horsens, Denmark[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 150: 338–349.
- 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).
- Chen Qiyu, Liu Gang, Wu Chonglong, Li Xinchuan, Zhang Zhiting. 2016. Knowledge-driven multiple scale 3D geological modeling method in urban geological survey[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 32(4): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- 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).

- Fang Yinchun, Gong Rixiang, Li Sanfeng, Pan Shengyong, Gu Mingguang, Huang Weiping. 2017. Suitability evaluation of underground space development based on a three-dimensional geological model: Using the Jiaxing urban geological survey as an example[J]. *Shanghai Land & Resources*, 38(2): 43–45 (in Chinese with English abstract).
- Feng Shaoying, Liu Baojin, Zhao Chengbin, He Yinjuan, Tang Yali, Jia Yanxia. 2015. The application experiment of three-dimensional seismic reflection method in the detection of active faults: A case from Luhua tai fault[J]. *Seismology and Geology*, 37(2): 627–637 (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).
- Ge Weiya, Wang Rui, Zhang Qing, Xing Huaixue, Zhou Jie. 2021. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1601–1608 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- 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*, 44(4): 3 (in Chinese).
- Huang Lishan, Hou Yijun, Chen Yuanrong, Jing Rongzhong, Wang Jianchao, Zhao Yi, Li Xuebiao, Pei Chao, Zeng Youqiang, Zeng Hui. 2022. Rapid and accurate positioning concealed fault using geophysical and geochemical techniques in cities and surrounding areas—A case study of Lingui District, Guilin City, Guangxi[J]. *Geology in China*, 49(3): 929–942 (in Chinese with English abstract).
- Li Diqian, Di Qingyun, Wang Guangjie, Li Yingxian, Shi Kunfa, Yue Anping, Bai Dawei. 2008. Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing[J]. *Progress in Geophysics*, 23(6): 1963–1969 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengyue, Hang Haodong, Wang Donghui, Wang Chunshan. 2021. Current situation and development trends of suitability evaluation of urban underground space resources[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41(1): 121–128 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiang, Zhang Ji, Chen Sihong, Pu Wenbin. 2023. Investigation and evaluation of shallow geothermal energy resources in key areas of Chengdu[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(2): 271–282 (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, Lü 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).
- Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun, Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques[J]. *Geology in China*, 44(6): 1086–1101 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojin, Chai Chizhang, Feng Shaoying, Zhao Chengbin, Yuan Hongke. 2008. Seismic exploration method for buried fault and its upbreak point in Quaternary sediment area: An example of Yinchuan buried active fault[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1475–1483 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Enxi, Kang Jingwen, Zheng Lining, Guo Yongchun, He Jianjun. 2015. Study of corrosion characters of red-bed soft rock containing saline deposit in Chengdu[J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 36(S2): 274–280 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Kaili, Chu Yongbin, Zhang Zhiming, Li Hu. 2014. Spatial distribution of geological hazards in Tianfu district (Chengdu part)[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 34(2): 245–253 (in Chinese with English abstract).
- Su Maoxin, Qian Qihu, Li Shucai, Xueyiguo, Zhang Qingsong, Yuan Daohong, Nie Lichao. 2011. A method of metro advanced geological prediction under karst geology condition[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(7): 1428–1434 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zizhong, Xu Mo. 2011. Characteristics of red bed containing saline deposit and engineering geological issues of dam foundation in Sichuan Basin(I) [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 42(3): 10–12 (in Chinese with English abstract).
- Xi Zhenzhu, Liu Jian, Long Xia, Hou Haitao. 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, Huang Long, Song Gang, Hou Haitao, Wang Liang. 2016. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(9): 3428–3435 (in Chinese with English abstract).
- Xu Peifen, Shi Wen, Ling Suqun, Guo Huili, Li Zihua. 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, Li Shihao, Du Jianguo, Ling Suqun, Guo Huili, Tian Baoqing. 2013. Estimating Cenozoic thickness in the Beijing plain area using array microtremor data[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29

- (5): 1841–1845 (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 Maosheng, Dong Ying, Sun Pingping, Liu Jiang, Wang Huaqi, Feng Li. 2023. Theory and method for urban–rural integration, evaluation and cooperative detection of ground and underground space: Example from the urban geological survey of Guanzhong Plain[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 153–168 (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).
- Zhao Wenjin. 2003. Urban geology and geophysics[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(8): 558–562 (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.
- 陈麒玉, 刘刚, 吴冲龙, 李新川, 张志庭. 2016. 城市地质调查中知识驱动的多尺度三维地质体模型构建方法[J]. *地理与地理信息科学*, 32(4): 11–16.
- 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.
- 方寅琛, 龚日祥, 李三凤, 潘声勇, 顾明光, 黄卫平. 2017. 基于三维地质模型的地下空间开发适宜性评价——以嘉兴城市地质调查工作为例[J]. *上海国土资源*, 38(2): 43–45.
- 鄯少英, 刘保金, 赵成斌, 何银娟, 谭雅丽, 贾艳霞. 2015. 3维反射地震方法在活断层探测中的应用试验——以芦花台断层为例[J]. *地震地质*, 37(2): 627–637.
- 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.
- 葛伟亚, 王睿, 张庆, 邢怀学, 周洁. 2021. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J]. *地质通报*, 40(10): 1601–1608.
- 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.
- 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*, 44(4): 3.
- 黄理善, 侯一俊, 陈远荣, 敬荣中, 王建超, 赵毅, 李学彪, 裴超, 曾友强, 曾晖. 2022. 基于物探-化探技术快速精确定位评价城市及周边隐伏断层——以广西桂林市临桂区为例[J]. *中国地质*, 49(3): 929–942.
- 李帝铨, 底青云, 王光杰, 李英贤, 石昆法, 岳安平, 白大为. 2008. CSAMT 探测断层在北京新区规划中的应用[J]. *地球物理学进展*, 23(6): 1963–1969.
- 李鹏岳, 韩浩东, 王东辉, 王春山. 2021. 城市地下空间资源开发利用适宜性评价现状及发展趋势[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(1): 121–128.
- 李强, 张继, 陈思宏, 蒲文斌. 2023. 成都市浅层地热能资源调查与评价[J]. *沉积与特提斯地质*, 43(2): 271–282.
- 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.
- 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 胡秋韵, 李晓昭, 李云, 孟晖, 张礼中, 杨建锋. 2017. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. *中国地质*, 44(6): 1086–1101.
- 刘保金, 柴焯章, 鄯少英, 赵成斌, 袁洪克. 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.
- 邱恩喜, 康景文, 郑立宁, 郭永春, 贺建军. 2015. 成都地区含膏红层软岩溶蚀特性研究[J]. *岩土力学*, 36(S2): 274–280.
- 仇开莉, 褚永彬, 张志明, 李虎. 2014. 天府新区(成都部分)地质灾害空间分布特征[J]. *桂林理工大学学报*, 34(2): 245–253.
- 苏茂鑫, 钱七虎, 李术才, 薛翊国, 张庆松, 邱道宏, 聂利超. 2011. 一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 30(7): 1428–1434.
- 王子忠, 许模. 2011. 四川盆地含膏盐红层特征及坝基工程地质问题(I)[J]. *水利水电技术*, 42(3): 10–12.
- 席振珠, 刘剑, 龙霞, 侯海涛. 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.
- 席振珠, 龙霞, 周胜, 黄龙, 宋刚, 侯海涛, 王亮. 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.
- 徐佩芬, 侍文, 凌苏群, 郭慧丽, 李志华. 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, 凌苏群, 郭慧丽, 田宝卿. 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.
- 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. 基于国内典型城市对比的地下空间开发利用现状及问题分析[J]. *地学前缘*, 26(3): 69–75.
- 张茂省, 董英, 孙萍萍, 刘江, 王化齐, 冯立. 2023. 城乡融合与地上地下空间协同探测评价的理论与方法——以关中原城市地质调查评价为例[J]. *西北地质*, 56(3): 153–168.
- 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.
- 赵文津. 2003. 城市地质与地球物理[J]. *地质通报*, 22(8): 558–562.