

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.02.009

基于综合物探的城市地下空间探测与建模

王亚辉¹,张茂省^{2*},师云超¹,董英²,王锋¹,于峰丹²

(1. 陕西地矿物化探队有限公司,陕西 西安 710043;2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,自然资源部黄土地质灾害重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:地下空间开发利用是解决城市诟病的有效途径,城市强干扰环境下地下空间精准探测已成为多学科交叉研究的热点,也是当前研究的难点。以大西安西咸新区为研究区,采用钻孔揭露、实验测试、多参数地球物理测井、地面地球物理勘探组合方法开展了地下空间精准探测与建模研究。通过综合地球物理勘探,获取了每层土体的多参数地球物理特征。结合钻孔揭露与实验测试资料,建立了基于钻孔资料的地面物探与测井校准与耦合,为地下空间地质结构模型赋予了物理属性。提出高密度电法、微动台阵观测和浅层地震勘探与多参数地球物理测井方法相结合,可作为城市强干扰环境下地下空间物探工作的最优方法组合。

关键词:多参数测井;井间综合物探;地下空间;精准探测

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)02-0083-12

Precise Detection and Modeling of Urban Underground Space Based on Integrated Geophysical Exploration

WANG Yahui¹, ZHANG Maosheng^{2*}, SHI Yunchao¹, DONG Ying², WANG Feng¹, YU Fengdan²

(1. Shaanxi Geology and Mining Geophysical and Geochemical Exploration Team Co. Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/ Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Underground space development and utilization is an effective way to solve urban ills. The precise detection of underground space under strong urban interference has become a hot topic in multidisciplinary research and also serves as the difficulty of current research. Taking Xi'an-Xianyang New District as the study area, the research on accurate detection and modeling of underground space has been carried out by using borehole exposure, experimental test, multi-parameter geophysical logging and ground geophysical exploration combined method. Multi-parameter geophysical characteristics of each layer of soil have been acquired through using integrated geophysical exploration. Based on the drilling exposure and experimental test data, the ground geophysical and logging calibration and coupling have been established based on drilling data, and then the physical proper-

收稿日期:2018-12-22;修回日期:2019-04-10

基金项目:国家重点研发项目(2018YFC1504700),国家自然科学基金重点项目(41641011、41530640),中国地质调查局项目(DDT20190463、DD20160261、DD20189270)联合资助

作者简介:王亚辉(1979-),男,陕西武功人,工程师,主要从事地球物理勘探应用与研究。E-mail:10075344@qq.com

* 通讯作者:张茂省(1962-),男,陕西咸阳人,研究员,博导,主要从事水工环地质调查与研究。E-mail:xazms@126.com

ties have been assigned to the underground space geological structure model. It is proposed that high-density electrical method, micro-motion array observation and shallow seismic exploration combined with multi-parameter geophysical logging method can be used as the optimal combination method for underground space geophysical exploration under strong urban interference environment.

Keywords: multi-parameter logging; inter-well integrated geophysical exploration; underground space; precise detection

0 引言

城市地下空间是一种新的国土资源,通过城市地下空间资源开发利用来缓解占用大量的土地资源、建筑空间拥挤、环境污染严重、交通堵塞、停车难、城市综合防灾能力薄弱等(程光华,2013)。2016年9月,中国地质调查局与西安市人民政府签订协议,明确了开展西安市城市地质调查与地下空间探测合作内容,要求按照地下、地上“两个西安”的总体目标,开展西安城市地下空间调查与探测工作,促进西安国土空间综合开发利用,服务“数字西安”和“智能西安”建设,使西安成为向深部要空间和综合利用国土空间的典范(张茂省等,2018)。

西安市地质条件复杂,活动断裂、地裂缝、黄土湿陷等诸多重大地质问题威胁着地下空间的安全利用。城市强干扰环境下地下空间精准探测已成为多学科交叉研究的热点,基于综合物探的城市地下空间精准探测与建模是当前研究的难点之一。笔者选取具有典型性和代表性临近渭河的沣东新城作为试点研究区,采用了多参数地球物理测井、高密度电法、浅层地震、微动台阵观测等新的物探方法相结合,完成F15和F16孔多参数地球物理测井200 m;微动台阵观测16个点,采样间隔100 m;浅层地震1800 m,采样间隔4 m;高密度电法2010 m,采样间隔7 m;及2040 m,采样间隔5 m。重点开展了城市强干扰环境下工程地质钻孔之间水平向与垂向多维地球物理勘探,将物探数据与地下空间评价参数进行综合分析融合研究,为城市地下空间地质结构剖面模型赋予物性参数属性。

1 地下空间综合探测技术方法

1.1 地质背景

西安市位于关中断陷盆地中部,地质构造属沉

降凹陷区,基底片岩及花岗岩上覆盖5500~6000 m厚度的新生界沉积,其中第四系沉积厚达914~1095 m。试验区位于西安市西北部的沣东新城,地处渭河二级阶地之上,地形宽展平坦。沣东新城地跨西安凹陷与咸阳凸起2个次级构造单元交汇部,以渭河断陷为界,前者为渭河谷底,后者为黄土台塬。新生代以来,区内以垂直升降运动为主,沉积了巨厚的新生代地层(张茂省等,2014)。区内第四系沉积稳定,地形起伏小,无大的断裂构造。主要岩性由杂填土、黄土、粉质粘土、中砂、细砂和砾石组成。

1.2 干扰源分析及改进思路

城市建筑物密集,人类活动频繁,地上地下管线路网线路复杂,属强干扰环境。依据干扰源性质将城市地质勘查的干扰源主要分电磁波干扰源和是声波干扰源2类(金荣杰,2017)。试验区电磁波干扰源主要包括当地民用380 V高压线所产生的电磁波信号,该电磁波干扰信号的特点是强度较小,频率稳定,但干扰的持续时间长。改进方法及思路:在开展高密度电法工作时,在设计测线阶段必须提前进行实地踏勘,尽量避开工业用超高压线,避开或远离地下管线路,尽可能的减少测线与管线的接触面积。在高电磁波信号干扰环境下,应以浅层地震、微动台阵和测井资料为参考基准对高密度电阻率法数据及时进行检测和校验。试验区声波干扰源主要有测线西南部的西宝高速铁路列车通行所产生的噪声信号,该声波干扰信号的特点是震动幅度剧烈,无固定频率,但干扰的持续时间极短。改进方法及思路:在开展浅层地震和微动台阵工作时,应尽可能的避开列车通行和人类活动较为剧烈的时间段,以最大限度地减少非有效声波信号对测量数据的干扰。在强声波信号干扰环境下,应以高密度电法和测井资料为参考基准对浅层地震和微动台阵数据及时进行检测和校验。

1.3 精准探测方法选择

本次试验研究工作布设有F15和F16两口工程地质钻孔,孔间距为1.5 km,试验剖面选址位于

西安市西北部的沣东新城师家营新村附近,向北距离渭河约 2 km(图 1)。试验区地势平缓地形起伏小,平

均海拔高度为 380 m。表层 3~10 m 覆盖层堆积物主要为人工填土和耕地,下部为古河道砂体未成岩。

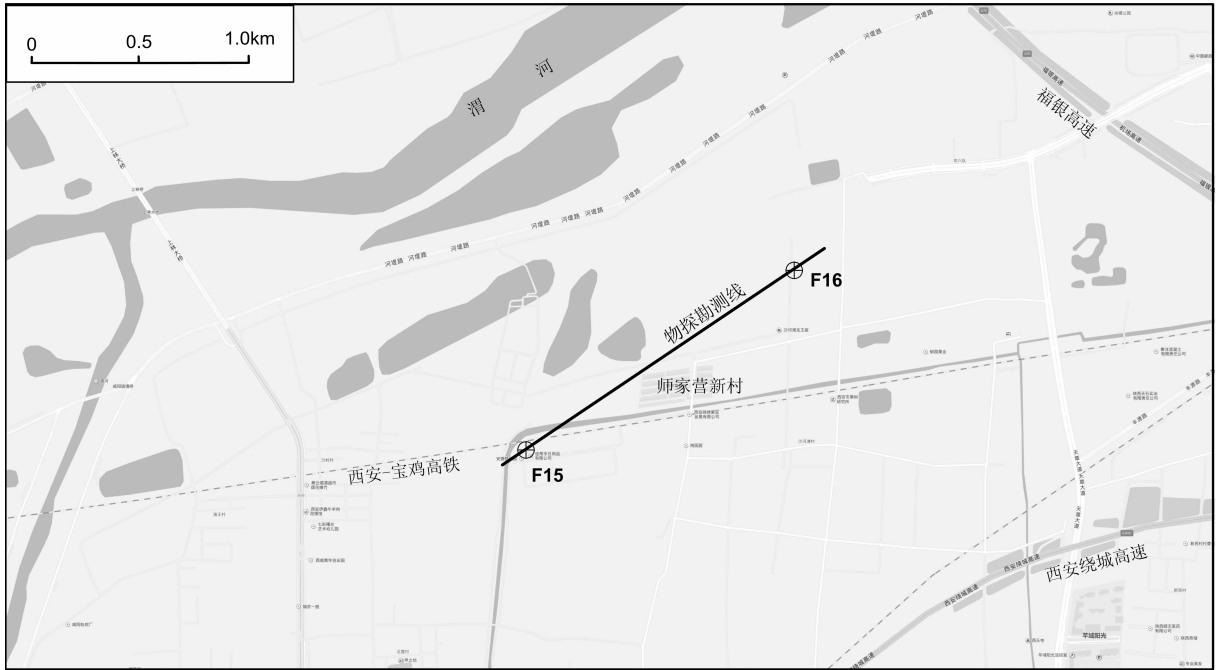


图 1 试验剖面选址位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location of the test section

本次试验工作在垂向上对 F15 和 F16 两个工程地质钻孔进行了多参数地球物理测井,主要参数包括自然电位、自然伽玛、三侧向电阻率、深浅侧向电阻率、补偿密度、补偿声波、补偿中子、磁化率、极化率、井径、井斜和井温 13 种。对多参数测井资料的精准处理与解释,可用于对试验剖面控制点岩性、电阻率值、波速值及力学强度指数的标定与控制。在收集钻探编录资料和测井解释成果的基础之上,在水平向上开展了井间综合物探工作,主要工作方法包括高密度电法、浅层地震和微动台阵观测。对井间综合物探数据的精准解释,可用于研究整个试验剖面的地层岩性、含水层特征及工程地质属性(表 1)。

针对浅层地震、高密度电法以及微动台阵观测这 3 种地面物探方法,每一种方法的资料处理与解释笔者仅参照 F16 钻孔的钻探编录和测井解释成果,依据钻孔资料对地面物探资料进行标定,反推另一个钻孔 F15 的岩性分层、含水层及工程力学强度指数,并通过反演推断出整个实验剖面的综合地质解释结论,精准识别其岩性层、含水层以及声波强反射界面,以此来验证这 3 种物探方法的准确性及有

效控制范围。综合分析试验所获得的浅层地震反射波叠加时间剖面、高密度电阻率反演剖面以及微动台阵观测反演剖面,并依据各方法所代表的不同物性特征与测井资料所获得的综合成果进行一致性对比与研究,从而得出多种物探方法相融合的综合地质解释结论,构建城市地下空间地质结构物探解译模型,总结出一套适用于城市地质调查的物探方法组合及地下空间地质结构反演模型(陈麟玉等, 2016)。

2 地球物理异常特征分析

2.1 多参数地球物理测井异常特征

根据 F16 钻孔的多参数测井曲线异常特征(图 2),结合孔隙度及渗透率等参数,综合分析该钻孔的物理属性与工程地质属性。F16 钻孔在 0.00~9.25 m 段,9.25 m 以上孔内无钻井液,故电性曲线均不可用,自然伽马值较高,密度值低,声波时差值高,井径扩大,推断该段岩性为人工填土,地层结构疏松。在 9.25~16.65 m、47.00~55.45 m、76.35~

表 1 精准探测示范 2018 年度工作量统计表
Tab. 1 2018 annual workload Statistical table for precision detection demonstration

工作方法	工作内容	采样间隔 (m)	工作量 (m)	施工 时间
多 参 数 地 球 物 理 测 井	自然电位测井	0.05	200	
	自然伽玛测井	0.05	200	
	三侧向电阻率测井	0.05	200	
	深浅侧向电阻率测井	0.05	200	
	补偿密度测井	0.05	200	
	补偿声波测井	0.05	200	2018.09
	补偿中子测井	0.05	200	~
	伽玛能谱测井	0.05	200	2018.10
	磁化率测井	0.05	200	
	极化率测井	0.05	200	
	井温测量	0.05	200	
	井斜测量	0.05	200	
	井径测量	0.05	200	
井 回 综 合 物 探	高密度电法	7	2 010	
	高密度电法	5	2 040	2018.10
	浅层地震勘探	4	1 800	~
	微动台阵观测	100	1 500	2018.12

85.80 m 层段,电阻率值较高,自然伽玛值低,密度达中值,声波时差值低,井径局部变大,自然电位负异常明显,深浅侧向电阻率相互分离,孔隙度大,渗透率高,推断该段岩性为中砂与细砂,地层结构中密,为含水层段。在 16.65~21.15 m、29.15~31.40 m、55.45~61.45 m 层段,电阻率值低,自然伽玛值较高,密度值高,声波时差值较高,井径曲线平滑,深浅侧向电阻率重合,孔隙度小,渗透率低,自然电位贴近基线,推断该段岩性为粉土与粉质粘土,地层结构密实,为隔水层段。在 21.15~29.15 m、31.40~38.15 m、38.15~43.75 m、43.75~47.00 m、88.65~97.05 m 层段,电阻率值较高,自然伽玛值较低,密度中值,声波时差值较高,井径曲线平滑,深浅侧向电阻率基本重合,孔隙度较大,渗透率小,推断该段岩性为中砂,地层结构密实。

多参数地球物理测井很好地解决了垂向上的岩性识别、含水层划分及工程力学强度指数计算问题,在单点上实现了对地下空间的精准探测,但无法对整个试验剖面的工程地质概况有一个全面系统的描述。

2.2 高密度电法异常特征

本次高密度电法工作采用 5 m 和 7 m 电极距在同一位置、不同时间进行了地质勘探,5 m 电极距的分辨率大于 7 m 电极距,但勘探深度小于 7 m 电极距。本次高密度电法结合已知钻探资料和测井资料,主要参考 5 m 电极距二维反演剖面进行中上部解释,底部深度差异区的解释以 7 m 电极距二维反演剖面为主。

依据 2 种不同电极距的高密度电法二维反演剖面图(图 3),高密度电阻率法对整个浅层覆盖层的黄土和填土界面反映清晰,辨识度较高;在电性差异较为明显的粉砂层、细砂层和中砂层分层结果与地质钻探结果一致。在测线 280~450 m 位置,深度 0~10 m 范围内电阻率为异常高值,结合现场踏勘情况判定为污水河边人工开挖建筑垃圾回填区;在测线 280~320 m 位置,深度 35~83 m 范围内电阻率值为异常低值,判定为含水层;在测线 430~490 m 位置,深度 10~45 m 范围内电阻率值为异常低值判定为含水层;在测线 1 180~1 290 m 位置,深度 40~100 m 范围内电阻率值为异常低值,判定为含水层;在测线 1 200~1 435 m 位置,深度 0~30 m 范围内电阻率值为异常高阻,结合现场踏勘情况判定为原始沟壑生活垃圾回填区。

高密度电阻率法很好地解决了城市地下空间含水层的识别及其富水性能的判定问题,但无法准确识别地下空间的薄层岩性和判定岩土体的工程力学强度。

2.3 浅层地震勘探异常特征

根据地震水平叠加剖面的波组特征,对各测线剖面范围内能量较强、连续性较好并可能具有一定地质意义的各反射波(组)进行了对比追踪和层位标定(图 4),在各测线的地震反射波水平叠加时间剖面上解释出 T1、T2、T3、T4 四组层位。地层产状近水平,并对各层位在试验钻孔上的进行了标定。从时间剖面上看,T1、T2 同相轴总体较平稳且连续性较好,由于受到上覆地层界面的屏蔽作用,T3 和 T4 波组连续性较差。本次浅层地震勘探基本查明了

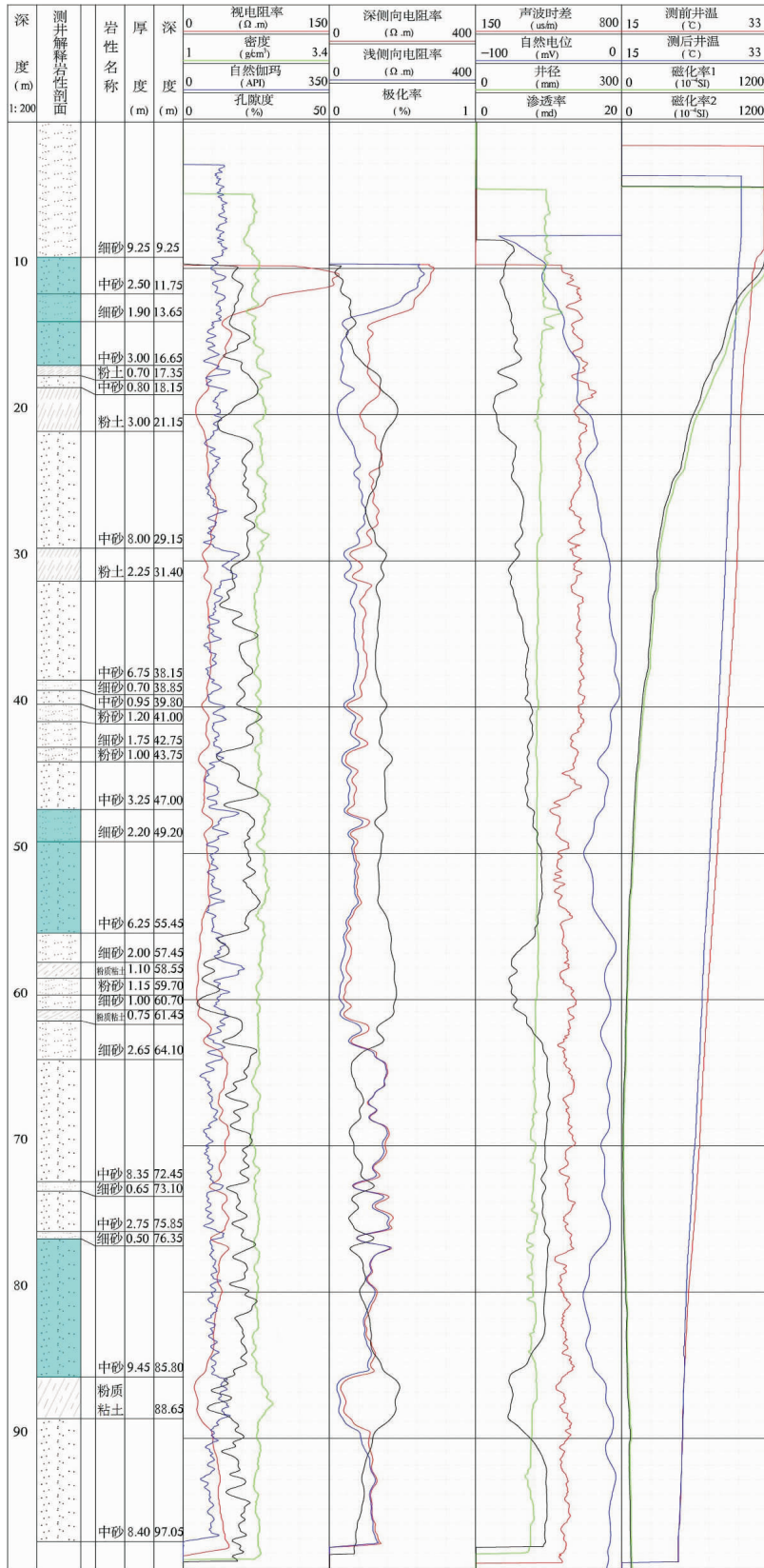


图 2 F16 钻孔多参数测井曲线异常特征图

Fig. 2 Curve anomaly characteristic map of F16 drilling multi-parameter logging

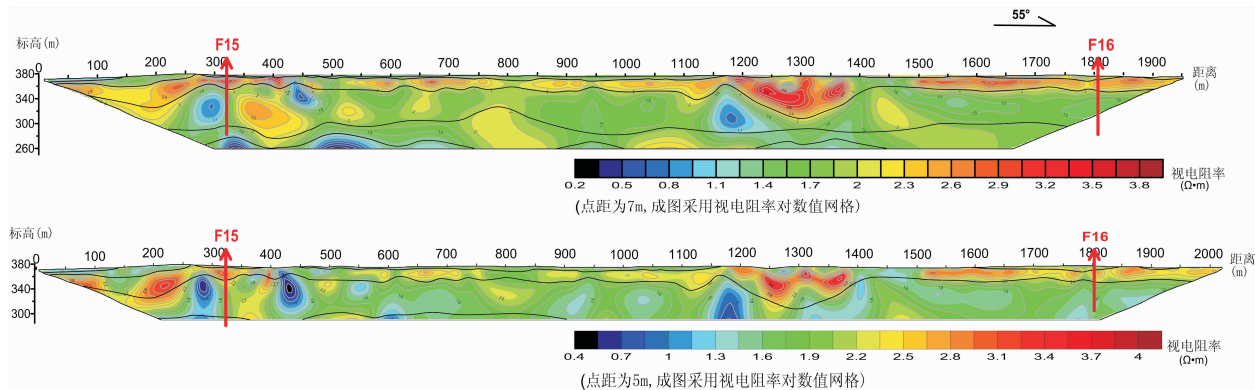


图3 高密度电法二维反演剖面图

Fig. 3 Two-dimensional inversion profile of high-density electrical method

120 m 以浅的地层埋藏情况及构造发育情况, 时间剖面对构造形态的反映比较直观, 充分利用其提供的构造信息, 可以对试验区地质构造做出合理的解

释。由于新生界厚度较大, 本次地震勘探并未能获取到基岩高速层的反射波组, 试验区综合层位标定结果表 2。

表2 地震反演综合层位标定结果表

Tab. 2 Calibration result table of seismic inversion comprehensive horizon

层位	地质界面	波组特征	岩性
T1	第四系层位	同相轴较连续, 较稳定, 能量较强, 产状近水平, 局部有异常	中砂
T2	第四系层位	同相轴较连续, 较稳定, 能量较强, 产状近水平, 局部微有起伏	中砂
T3	第四系层位	同相轴不连续, 不稳定, 能量弱, 产状近水平, 局部微有起伏	中砂
T4	第四系层位	同相轴不连续, 较不稳定, 能量较弱, 产状近水平, 局部微有起伏	钻孔未揭示

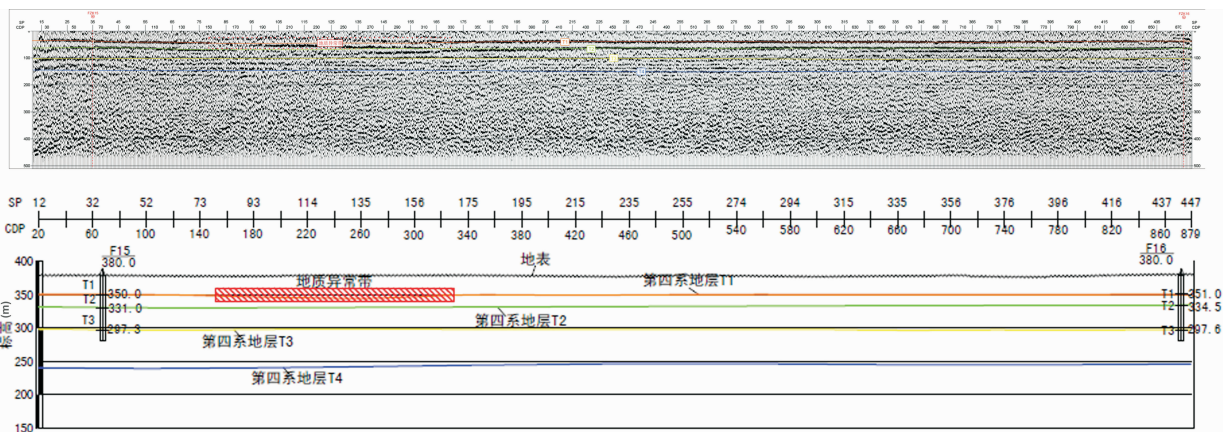


图4 浅层地震叠加时间和地质推断剖面图

Fig. 4 Shallow seismic superposition time profile and geological inference profile

通过本次二维地震勘探可知, 在测线 200 ~ 554 m 段(长度 354 m)发现 T1 波组的下沉或相位突变, 初步解释为地质异常带。结合现场踏勘情况推测, 可能与该处的道路施工有关。勘查区新生界

厚度较大, 在测线段范围第四系地层 120 m 以浅均未发现断层。根据本次地震解释的 T1、T2、T3、T4 四个反射层位, 从地震水平叠加时间剖面上分析, T1、T2 波组整体比较连续, 稳定性较好, T3、T4 波

组由于埋深较大,连续性、稳定性稍差,局部出现的波组特征的变化可能与新生界内地层岩性变化以及构造有关。利用测井声波曲线和叠加速度谱推算各层的时深转换速度,得到测线各层位的时深转换信息(表 3)。对测线的地震时间剖面 and 地质推断剖面图(图 4)分析认为:第四系 T1、T2、T3 和 T4 波组在测线范围内广泛分布且近乎水平,局部略有起伏;T1、T2、T3 和 T4 波组平均埋深从浅至深分别为 29 m、45.5 m、82.5 m 和 123.75 m, T1、T2、T3 波组在测井深度范围内, T4 波组已经超过测井深度。在测线的小号段 200~554 m 发现长度 354 m 的地质异常带,可能与地表道路建筑施工有关。

浅层地震勘探很好地解决了城市地下空间声波强反射界面的识别以及地层完整性与压实状况的判定问题,但无法精细地划分地下空间的地层岩性并判定其含水状况。

表 3 浅层地震时深转换信息表

Tab. 3 Time-depth conversion information table for shallow earthquakes

层位	平均时间 (ms)	时深转换速度 (m/s)	平均埋深 (m)	地质界面
T1	43	1 350	29.0	第四系层位
T2	65	1 400	45.5	第四系层位
T3	110	1 500	82.5	第四系层位
T4	150	1 650	123.75	第四系层位

2.4 微动台阵观测异常特征

本次微动台阵观测采用嵌套式三角形工法布设,可通过改变三角形最大边长的方法来获得不同深度的面波探测结果。实验剖面为钻孔 F15 和 F16

之间的连线剖面,剖面长度为 1.5 km,采样间隔为 100 m。根据每一个测量点的频散曲线拐点,绘制了微动台阵面波波速剖面和地质推断剖面图(图 5)。再参考 F16 钻孔的测井资料进行地质分层,微动台阵观测异常特征解译为:①层厚度为 15 m 左右,面波波速为 225 m/s,结合钻孔资料判释为细砂。②层厚度为 6 m 左右,面波波速为 340 m/s,结合钻孔资料判释为粉土。③层厚度为 7 m 左右,面波波速为 320 m/s,结合钻孔资料判释为中砂。④层厚度为 3 m 左右,面波波速为 295 m/s,结合钻孔资料判释为粉土。⑤层厚度为 27 m 左右,面波波速为 500 m/s,结合钻孔资料判释为细砂。⑥层厚度为 6 m 左右,面波波速为 436 m/s,结合钻孔资料判释为粉质黏土。⑦层厚度为 8 m 左右,面波波速为 488 m/s,结合钻孔资料判释为中砂。⑧层厚度为 4 m 左右,面波波速为 618 m/s,结合钻孔资料判释为细砂。⑨层厚度为 21 m 左右,面波波速为 580 m/s,结合钻孔资料判释为中砂。⑩97~100 m 处,面波波速为 615 m/s,结合钻孔资料判释为粉土。

微动台阵观测法较好地解决了城市地下空间岩性的识别和声波强反射界面的判定问题,但无法准确识别地下空间的含水层并判定其富水性能。

3 基于钻孔资料的地面物探与测井校准与耦合

3.1 综合物探与测井岩性参数校准与耦合

通过对综合物探地质分层与测井资料地质分层的对比分析(表 4)可以得出:①综合物探地质剖面

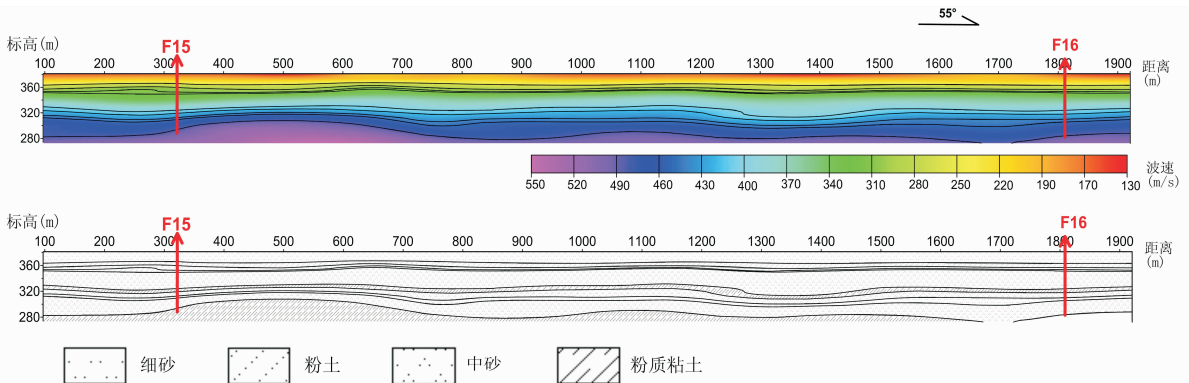


图 5 微动台阵面波波速和地质推断剖面图

Fig. 5 Micro-motion table wavewave velocity profile and geological inference profile

表4 综合物探与测井地质分层对比表

Tab. 4 Geological stratification comparison table of integrated geophysical exploration and logging

序号 序号	F15 钻孔测井分层			综合物探分层			F16 钻孔测井分层	
	深度(m)	厚度(m)	岩性	深度(m)	厚度(m)	岩性	深度(m)	厚度(m)
1	1.80	1.80	填土				9.25	9.25
2	7.35	5.55	细砂				11.75	2.50
3	9.35	2.00	粉砂	10	10	粉砂	13.65	1.90
4	15.85	6.50	中砂	15	5	中砂	18.15	4.50
5	17.40	1.55	粗砂				21.15	3.00
6	19.35	1.95	粉质粘土	21	6	粉土	29.15	8.00
7	29.00	9.65	中砂	28	7	中砂	31.40	2.25
8	32.00	3.00	细砂	31	3	粉土	39.80	8.40
9	39.75	7.75	中砂				41.00	1.20
10	41.25	1.50	细砂				42.75	1.75
11	47.00	5.75	中砂				43.75	1.00
12	47.80	0.80	圆砾				47.00	3.25
13	59.10	11.30	中砂	58	27	中砂	49.20	2.20
14	60.35	1.25	细砂				55.45	6.25
15	73.10	12.75	中砂				57.45	2.00
16	73.95	0.85	粉质粘土				58.55	1.10
17	75.90	1.95	中砂				59.70	1.15
18	76.50	0.60	粉质粘土				60.70	1.00
19	84.85	8.35	中砂	64	6	粉质粘土	61.45	0.75
20	87.55	2.70	粉质粘土				64.10	2.65
21	89.70	2.15	细砂	82	18	中砂	85.80	21.70
22	93.00	3.30	中砂	86	4	粉质粘土	88.65	2.85
23				97	11	中砂	97.05	8.40

的分层结果与 F16 钻探和测井资料的一致性达 90%，与 F15 钻探和测井资料的一致性达 80% 左右。所以综合物探资料经过钻探资料标定后在研究区具有很好的地质分层作用。②综合物探资料的地层划分解释精度不够。因为各地面物探方法的采样间隔不同且最小分辨率大于 4 m，原始数据采集的信息量不足，所以反演解释的精度不够。在 200 m 以浅范围内能较为准确地识别主要岩性界面，但不能很好的反映浅层地表及地下空间范围内直径较小的地质异常体。③综合物探资料识别并划分地层岩性的主要依据是地下空间不同深度的电性差异和波速差异(曹积飞等, 2011)，而多参数综合测井资料划分岩性的主要依据是自然伽玛、自然电位、视电阻率和补偿密度这 4 个参数。所以把微动台阵观测数据

和高密度电法数据与测井资料中的自然伽玛、自然电位、视电阻率和密度这 4 个参数融合到一起，综合运用并相互验证可以更准确地识别和划分地层岩性。

3.2 综合物探与测井含水层参数校准与耦合

通过对综合物探含水层划分与测井资料含水层划分的对比分析(表 5)可以得出:①F15 钻孔位置测井资料所划分的 9.35~17.40 m 的含水层富水性能较差, 76.5~84.85 m 的含水层富水性能较好; F16 钻孔所划分的 3 个含水层富水性能较差。②能有效判定地下空间含水性能的主要物探方法为高密度电法, 其他地面物探方法对城市地下空间含水层的识别能力有限, 整体贡献值较小。③综合地面物探资料识别并划分含水层的主要依据是地下空间不同范围的电性差异, 而多参数综合测井资料划分含水

表 5 综合物探与测井含水层对比表

Tab. 5 Aquifer comparison table of integrated geophysical and logging

序号	F15 钻孔含水层		综合物探含水层			F16 钻孔含水层	
	深度(m)	厚度(m)	测线位置(m)	深度(m)	富水性	深度(m)	厚度(m)
1	9.35~17.40	8.05	280~320	35~85	较好	9.25~16.65	7.40
2			430~490	10~45	较好	47.00~55.45	8.45
3	76.5~84.85	8.35	1180~1290	40~100	较好	76.35~85.80	9.45

层的主要依据是自然伽玛、自然电位、视电阻率、孔隙度和渗透率这 5 个参数。所以,把高密度电阻率数据和测井资料中的自然伽玛、自然电位、视电阻率、孔隙度和渗透率这 5 个参数融合到一起,综合运用并相互验证可以更加准确地识别含水层并判定其富水性能。

3.3 综合物探与测井工程力学参数校准与耦合

通过对综合物探强反射界面与测井资料岩石力学强度指数的对比分析(表 6)可以得出:①F15 钻孔全孔地层岩体较完整,其中 84.85~87.55 m 力学强度指数最小,平均为 6.83 MPa;87.55~95.05 m 力学强度指数最大,平均为 7.90 MPa;F16 钻孔全孔地层岩体较完整,其中 31.40~43.75 m 力学强度指数最小,平均为 6.10 MPa;85.80~88.65 m 力学强度指数最大,平均为 8.70 MPa。②时深转换

速度差异最大的反射界面 T3 在 82.00 m,与测井资料岩石力学强度指数差异最大的层位深度一致。T1、T2 反射界面处也存在明显地岩石力学强度指数差异。③能有效判定地下空间岩石完整性和弹性力学参数的主要物探方法是浅层地震和微动台阵观测,其他物探方法对研究地下空间岩土体的完整性和弹性力学参数贡献值很小。④综合地面物探资料识别并确定强反射界面的主要依据是地下空间不同深度岩性层的波速差异,而多参数综合测井资料确定岩石完整性和力学参数的主要依据是声波时差、井径和补偿密度这 3 个参数。所以把浅层地震数据和微动观测数据与测井资料的声波时差、井径和补偿密度这 3 个参数融合到一起,综合运用并相互验证可以更加准确地识别强反射界面,判定岩土体完整性及其工程力学性质。

表 6 综合物探与测井力学参数对比表

Tab. 6 Comparison table of mechanical parameters of integrated geophysical exploration and logging

序号	F15 钻孔工程力学参数		综合物探强反射界面		F16 钻孔工程力学参数	
	深度(m)	强度指数(MPa)	深度(m)	时深转换速度(m/s)	深度(m)	强度指数(MPa)
1	1~17.40	7.11			1~16.65	6.58
2	17.40~19.35	6.85	T1-29.0	1350	16.65~31.40	6.62
3	19.35~73.10	7.37			31.40~43.75	6.10
4	73.10~76.50	7.21	T2-45.5	1400	43.75~55.45	8.62
5	76.50~84.85	7.11			55.45~85.80	7.30
6	84.85~87.55	6.83	T3-82.0	1500	85.80~88.65	8.70
7	87.55~95.05	7.90	T4-123.75	1650	88.65~97.05	7.32

4 地下空间地质结构与物理属性剖面建模

依据钻探与试验测试资料实现对城市地下空间工程地质层的精准划分,参照钻探与试验测试的地

质分层成果,运用数值统计与一致性比对方法校准物探测井与地面物探资料,实现从工程地质层位到其物理属性的正演过程。此正演过程的精度随钻孔数量和试验测试资料的增加而增加,钻探资料和试验测试越丰富正演模型的准确度越高。反过来在三维地质结构建模中,依据大量正演试验所求取的工

程地质资料与物探资料相关性,通过对测井资料与地面物探资料的联合反演连接和刻画2个钻孔之间的地质结构模型(陈麟玉等,2016)。针对每一个工程地质层及其含水层,运用多参数测井与井间综合物探方法,可利用自然伽玛、自然电位、视电阻率、补偿密度和微动台阵观测资料赋予其岩性地质参数,可利用自然伽玛、自然电位、深浅侧向电阻率、孔隙度、渗透率和高密度电法资料赋予其水文地质参数,可利用自然伽玛、自然电位、补偿声波、补偿密度、井径和浅层地震资料赋予其工程力学参数。

通过对多参数地球物理测井资料与井间综合物探资料的综合研究,可初步建立起城市地下空间地质结构与物理属性模型。在城市地质调查工作中将微动台阵观测和高密度电法与多参数地球物理测井相结合,可用于解决城市地下空间岩性的精准划分和地质分层问题;将高密度电法与多参数地球物理测井相结合,可用于确定城市地下空间含水层的厚度并判定其富水性强弱;将浅层地震和微动台阵与多参数地球物理测井相结合,可有效识别城市地下空间的声波强反射界面并判断地层压实状况。所以,西安地下空间准探测地球物理勘探的最优方法组合是高密度电法、浅层地震和微动台阵观测3种地面物探方法与多参数测井方法相结合。

根据对研究区地下空间地质结构与物理属性模型(图6)的综合分析,本次试验研究的综合地质解释结论为:0.00~17.40 m段为细砂、中砂、粉砂互层,电阻率值高,自然电位负异常,密度值低,波速值低,孔隙度大,渗透率较高,工程力学强度指数中低,推断该段地层中密孔隙较发育。其中,9.35~17.40 m是一个富水性能较差的含水层段;17.40~19.35 m段为粉质粘土,电阻率值低,自然电位紧贴基线,密度值中高,波速值较低,孔隙度小,渗透率低,工程力学强度指数中低,推断该段地层密实;19.35~73.10 m段为中砂、细砂互层夹杂有古河道圆砾石,电阻率值中高,自然电位正异常,密度值中低,波速值较高,孔隙度较大,渗透率较低,工程力学强度指数中高,推断该段地层密实;73.10~76.50 m段为粉质粘土夹中砂,电阻率整体值低,自然电位近基线,密度值中高,波速值较高,孔隙度小,渗透率低,工程力学强度指数中高,推断该段地层密实;76.50~84.85 m段为中砂粒级较统一,电阻率值高,自然电位负异常,密度值中值,波速值较低,孔隙度大,渗

透率高,工程力学强度指数中高,推断该段地层较为坚硬但孔隙发育,是一个富水性能较好的含水层段;84.85~87.55 m段为粉质粘土夹细砂,电阻率值低,自然电位正异常,密度值中高,波速值较高,孔隙度小,渗透率低,工程力学强度指数较高,推断该段地层密实;87.55~95.00 m段为细砂,中砂互层,电阻率值低,自然电位正异常,密度值中值,波速值较高,孔隙度较小,渗透率低,工程力学强度指数高,推断地层较密实;95.00~124.00 m段为中砂,电阻率值低,自然电位正异常,密度值中值,波速值高,孔隙度较大,渗透率低,工程力学强度指数高,推断该段地层密实。试验剖面位于渭河平原二级阶地,在0~200 m深度范围内全部为第四系,从上到下主要地层岩性依次为填土、粉质粘土、粉土,细砂、中细砂互层、粉土夹细砂、中砂,地层自西向东近似水平展布,局部略有起伏,在测线280~450 m位置深度0~10 m范围与测线1200~1435 m位置深度0~30 m范围,存在2处人类近期活动所产生的建筑垃圾和生活垃圾回填区。在试验剖面上未发现有明显的断裂或褶皱,所以本次实验剖面的地质构造解释结论为区内无构造异常。

5 结论

(1)多参数地球物理测井与高密度电法、微动台阵观测和浅层地震勘探3种地面物探方法相结合,是现有技术条件下城市地质勘探的最优方法组合。利用自然伽玛、自然电位、深浅侧向电阻率和补偿密度测井解决地下空间岩性层的识别与划分;利用自然伽玛、自然电位、深浅侧向电阻率、补偿密度和补偿中子测井解决地下空间含水层的识别与划分;利用补偿声波、补偿密度和井径测井解决地下空间工程力学问题;利用自然伽玛和伽玛能谱测井解决放射性污染调查与环境质量监测问题;利用磁化率测井解决第四系沉积物古气候环境研究问题。

(2)微动台阵观测主要用于识别与划分地层岩性,高密度电法主要用于识别与划分地下含水层,浅层地震勘探主要用于识别地下空间强反射界面与判断岩土体完整性。

(3)利用钻探与岩土测试资料对城市地下空间工程地质层进行精准划分,运用数值统计与一致性比对方法校准物探测井与地面物探资料,实现从工

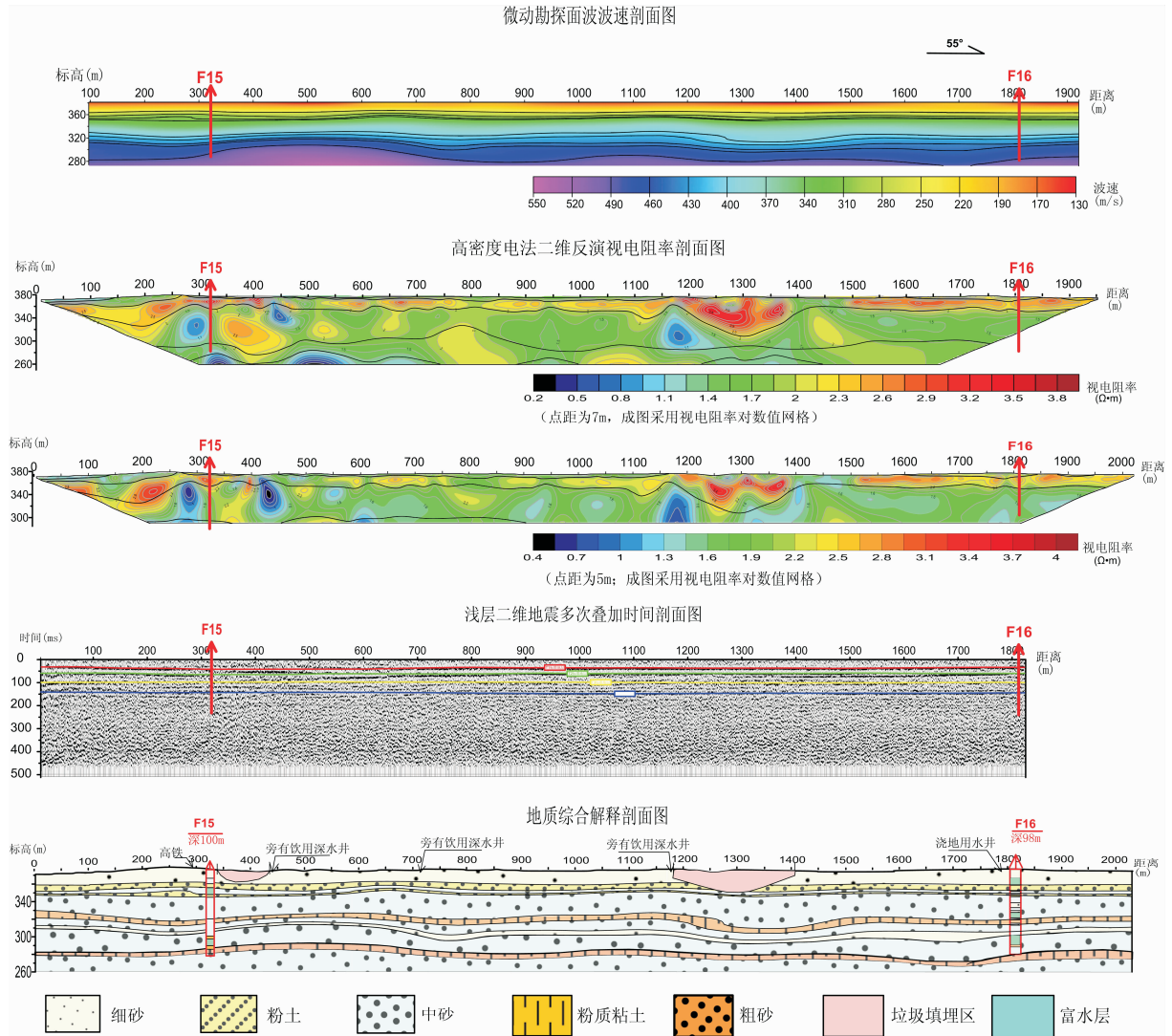


图 6 研究区地下空间地质结构与物理属性剖面建模示意图

Fig. 6 Schematic diagram of section modeling of geological structure and physical properties of underground space in the study area

程地质资料到物理属性的正演过程。反过来在三维地质结构建模中,依据大量正演试验求取工程地质资料与物探资料的相关性,通过对测井资料与地面物探资料的联合反演连接和刻画两个钻孔之间的地质结构模型。

(4)针对每一个工程地质层及含水层,可利用自然伽玛、自然电位、深浅侧向电阻率、补偿密度测井资料和微动台阵观测资料赋予其岩性地质参数,可利用自然伽玛、自然电位、深浅侧向电阻率、孔隙度、渗透率测井资料和高密度电法资料赋予其水文地质参数,可利用补偿声波、补偿密度、井径测井资料和浅层地震勘探资料赋予其工程力学参数。

参考文献(References):

张茂省,王化齐,王尧,等. 中国城市地质调查进展与展望[J]. 西北地质,2018,51(4):11-13.

ZHANG Maosheng, WANG Huaqi, WANG Yao, et al. Progress and prospect of urban geological survey in China [J]. Northwest Geology, 2018, 51(4): 11-13.

金荣杰. 智能微动勘探技术在城市地下空间地质调查中的应用[J]. 工程勘察,2017,12(2):19-24.

- JIN Rongjie. Application of Intelligent Micro-motion Exploration Technology in Urban Underground Space Geological Survey [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 12(2): 19-24.
- 张茂省,董英,刘洁. 论新型城镇化中的城市地质工作[J]. 兰州大学学报, 2014, 50(5): 580-588.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, LIU Jie. Discussion of Urban Geological Work in New Urbanization [J]. Journal of Lanzhou University, 2014, 50(5): 580-588.
- 李继军,汪启年. 重磁电综合解释方法在天津城市三维地质结构调查中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(5): 21-26.
- LI Jijun, WANG Qinian. Application of Gravity and Magneto-electric Comprehensive Interpretation Method in 3D Geological Structure Survey of Tianjin City [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(5): 21-26.
- 曹积飞,李红阳,李英杰,等. 综合物探方法在内蒙灰山铜镍矿找矿中的应用研究[J]. 西北地质, 2011, 44(1): 52-58.
- CAO Jifei, LI Hongyang, LI Yingjie, et al. Application of integrated geophysical prospecting method in prospecting Cu-Ni deposit of the Ultrabasic type in Huishan, Inner Mongolia [J]. Northwest Geology, 2011, 44(1): 52-58.
- 张茂省. 大西安城市地质调查与地下空间应用实施方案 [R]. 西安:中国地质调查局西安地质调查中心, 2016.
- ZHANG Maosheng. Large Xi'an Urban Geological Survey and Underground Space Application Implementation Plan [R]. Xi'an: Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, 2016.
- 程光华. 中国城市地质调查丛书[M]. 北京:科学出版社, 2013.
- CHENG Guanghua. China Urban Geological Survey Series [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- 陈麒玉,刘刚,吴冲龙,等. 城市地质调查中知识驱动的多尺度三维地质模型构建方法[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(4): 33-37.
- CHEN Qiyu, LIU Gang, WU Chonglong, et al. Knowledge-Driven multiple scale 3D geological modeling method in urban geological survey [J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(4): 33-37.