

doi: 10.12029/gc20200615

李华, 王亮, 韩浩东, 杨剑, 王桥, 王东辉, 席振铎, 龙霞, 张伟, 廖国忠. 2020. 红层地区城市地下空间石膏富集层探测新方法——以成都市国际生物城为例[J]. 中国地质, 47(6): 1793–1803.

Li Hua, Wang Liang, Han Haodong, Yang Jian, Wang Qiao, Wang Donghui, Xi Zhenzhu, Long Xia, Zhang Wei, Liao Guozhong. 2020. A new method for detecting gypsum mineral salt enriched layer of urban underground space in red bed area: A case study of Chengdu International Biological City[J]. Geology in China, 47(6):1793–1803(in Chinese with English abstract).

红层地区城市地下空间石膏富集层探测新方法 ——以成都市国际生物城为例

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

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 湖南五维地质科技有限公司, 湖南 长沙 410205;
3. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:含石膏岩体是红层地区城市地下空间利用过程中常见的不良地质体。提前获知基岩内石膏富集地层的埋深及空间展布规律,对城市地下空间资源的开发利用以及地基承载力、持力层、基础选型等参数的确定具有重要的参考意义。本文以成都市天府新区国际生物城为研究区,选择了一种快速、无损、抗干扰能力强的全新瞬变电磁法——等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM),对白垩系灌口组红层内石膏富集层进行探测研究。首先根据研究区内不同地层的电阻率特征,建立了三层、四层、五层3种地电模型,分别进行OCTEM正演响应分析,结果表明该方法能够有效地识别出与围岩电阻率差异明显的石膏富集层;然后对2 km²的试验区开展了网度为100 m×10 m的实测扫面工作,通过反演计算建立了研究区200 m以浅的三维电性结构,结合钻孔结果综合验证与分析,成功推断出石膏富集层的空间展布形态,证明了该方法对红层地区城市地下空间石膏富集层探测的有效性。

关键词:红层;石膏富集层;等值反磁通瞬变电磁法;正演;地下空间;城市地质调查工程;成都市;四川省
中图分类号: TU91 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1793-11

A new method for detecting gypsum mineral salt enriched layer of urban underground space in red bed area: A case study of Chengdu International Biological City

LI Hua¹, WANG Liang², HAN Haodong¹, YANG Jian¹, WANG Qiao¹, WANG Donghui¹,
XI Zhenzhu³, LONG Xia², ZHANG Wei¹, LIAO Guozhong¹

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Hunan 5D Geophysyon Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 3. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

收稿日期: 2019-02-21; 改回日期: 2019-09-02

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, 硕士, 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。

通讯作者: 王亮, 男, 1989年生, 硕士, 工程师, 从事瞬变电磁方法与技术研究; E-mail: 353240527@qq.com。

Abstract: Gypsum mineral salt enriched layers are common bad geological body in the process of utilizing urban underground space in the red beds area. The detection of the burial depth and spatial distribution of gypsum-salt enriched strata in advance is of great significance for the development of urban underground space resources, the determination of foundation bearing capacity, bearing stratum and foundation type selection. Taking the International Biological City of Tianfu New District of Chengdu as the experimental area, the authors chose a fast, non-destructive and anti-jamming new transient electromagnetic method, opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM), to detect and study the gypsum-salt enriched layer in red mudstone of Cretaceous Guankou Formation. Firstly, according to the resistivity characteristics of different strata in the study area, the authors established geoelectric models such as three-layer model, four-layer model and five-layer model, and carried out OCTEM forward response analysis for these models, respectively. The forwarding calculation shows that, with OCTEM method, the gypsum salt enriched layer can be effectively identified from surrounding rocks with obvious resistivity difference. Then, the authors took the practical measurement in the test area covered about two square kilometers, and swept the field with a network of 100m×10 m. Finally, the authors obtained the inversion results and established the three-dimensional electrical structure of strata in the depth greater than 200 m in the study area. With the comprehensive verification and analysis of drilling results, the spatial distribution pattern of gypsum mineral salt enriched layer was successfully inferred, which proves that this method is effective for the detection of gypsum-salt enrichment layer in urban underground space of the red bed area.

Keywords: red bed; gypsum mineral salt enriched layer; opposing coils transient electromagnetic method (OCTEM); forward modeling; underground space; urban geological survey engineering; Chengdu; Sichuan Province

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

About the corresponding author: WANG Liang, male, born in 1989, engineer, engages in transient electromagnetic method and technology research; E-mail: 353240527@qq.com.

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

1 引 言

随着城市化程度的不断提高、城市人口的不断增加,对城市地下空间的合理开发利用变得日趋迫切。因此如何开展新时期的城市地质调查(卫万顺等,2016;林良俊等,2017),并打造地下三维可视化的城市地质模型(陈麒玉,2016;何静,2019),用以支撑地下空间的合理规划(方寅琛,2017),成为目前地质工作者的研究热点(杨文采等,2019;杨晓刚等,2019)。而在城市地下空间资源探测过程中,高效、无损、抗干扰强的地球物理探测技术显得尤为重要(Theis Raaschou Andersen et al., 2018;王亚辉等,2019)。

在西南红层地区,尤其在富膏盐红层分布的地区,城市地下空间的开发利用过程不可避免地会对深部岩层封闭环境造成破坏,并加剧地下水的循环,造成膏盐矿物的溶蚀而形成溶蚀孔洞或洞穴,从而导致地基承载力下降,同时形成的富硫酸根离子型地下水将加快对深基础的腐蚀。这些问题都

将严重威胁地下空间后期利用以及地表建筑的安全使用。因此在地下空间开发利用前查明石膏、钙芒硝等膏盐富集层的空间分布规律,对于规避富膏盐地层的工程地质问题以及工程规划设计、地基承载力、持力层、基础选型等参数的确定具有重要的指导意义。

目前国内外对含膏盐红层的研究主要集中在膏盐的成因、赋存规律、溶蚀特征(魏玉峰等,2005;邱恩喜等,2015)、易产生的不良工程地质问题(王子忠等,2011;仇开莉等,2014)等方面。由于缺乏对膏盐富集层电性特征的了解,目前报道的利用地球物理技术直接探测膏盐富集层的研究成果则相对较少,并且集中在探测含膏红层中的溶蚀孔洞特征(刘伟等,2015;孙怀凤等,2018),而并没有把重点放在膏盐富集层埋藏分布规律的探测上。国外有少量学者对钙芒硝矿床的探测进行过相关研究,主要是采用高密度电阻率法等方法探测高阻层,进而结合地质认识间接寻找芒硝矿有利存储层位,并且取得了不错的效果(Ander Guinea et al., 2009,

2014)。但城市地下膏盐富集层的探测与矿产探测有着明显的不同,城市地区的地球物理探测工作要面临各种噪声干扰、建筑场地干扰、电极接地条件受限、施工场地受限等难点,导致很多传统的地球物理手段无法施工、探测深度不够等而无法取得理想的探测效果(苏茂鑫等,2011)。

针对西南红层地区城市地下空间开发过程中富膏盐层的探测以及城市在建区强干扰的特殊工况条件下无法有效开展传统地球物理工作的问题,本文依托中国地质调查局城市地质调查工程成都多要素城市地质调查项目,以成都市天府新区国际生物城为例,提出了利用一种快速、无损、抗干扰能力强的全新瞬变电磁法——等值反磁通瞬变电磁法(席振铎等,2010,2016),探测地下200 m以浅的膏盐富集层分布规律的工作思路和方法。首先根据研究区地层结构的电性特征:砂泥岩为低阻体,膏盐富集层为相对高阻体,从简单到复杂分别建立了三层、四层、五层等多层地电模型,并利用以等值反磁通方法原理为基础推导出的正演计算公式开展OCTEM正演模拟,结果表明该方法能够有效地识别出砂泥岩互层中电阻率为高阻的膏盐富集层;然后选择国际生物城起步区内2 km²的试验区开展了野外探测试验,进行OCTEM面扫描工作。最后根据多条剖面的瞬变电磁二维反演成果,建立了试验区200 m以浅地层的三维电性结构,结合钻探成果综合验证与分析,成功推断出膏盐富集层的空间展布形态和规律。试验研究表明等值反磁通瞬变电磁法在城市复杂工况条件下可以快速获取膏盐富集层的空间分布形态,在红层地区城市地下空间探测过程中具有一定的推广价值和借鉴意义。

2 OCTEM正演研究

2.1 OCTEM方法原理

等值反磁通瞬变电磁法与传统的瞬变电磁法(TEM)有所不同(牛之琰,2007),它是一种新的探测地下纯二次场的方法。它的工作原理是采用双线圈源建立一次场零磁通面来消除一次场对接收线圈的影响(周胜等,2012;席振铎等,2016),其装置中发送部分为2个共轴平行的线圈TX,供反向等值的电流I,接收部分RX位于TX(+)和TX(-)正中间,且保持平行和同轴(图1)。

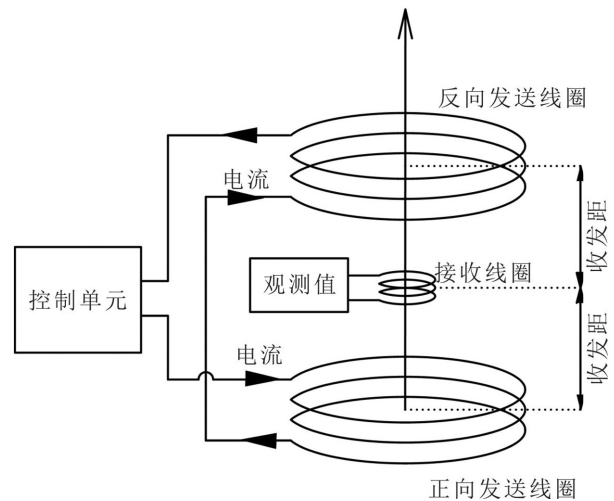


图1 等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)工作原理示意图
Fig.1 Geometry of OCTEM system

OCTEM的一次场等效为TX⁽⁺⁾和TX⁽⁻⁾两个单独线圈电流环的一次场矢量叠加,通过等效电流环磁场分量公式与矢量叠加原理可以计算得到OCTEM的一次磁场,其磁力线如图2所示。可见等值反向的双线圈电流环在中间平面磁力线是一条为零的水平线,在此平面上一次场为零,因此在该平面位置接收时将接收到纯二次场的响应。

2.2 理论基础

在地表上方距离 h 位置的水平电流环在地面产生的垂直磁场在柱坐标系下是关于 z 轴对称的,其表达式可以直接引用Nabighian and Macnae的推导

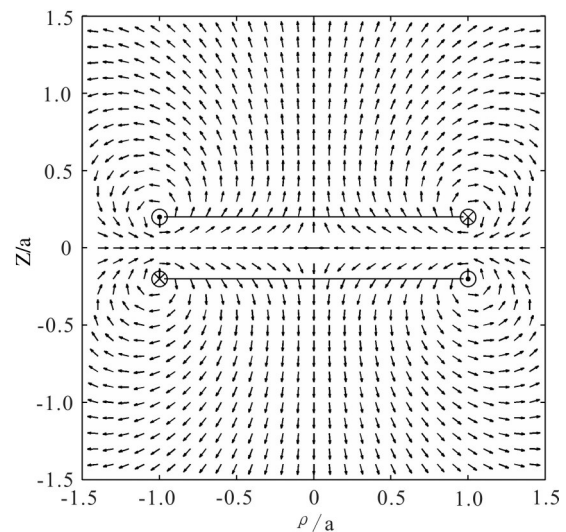


图2 等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)一次场磁力线分布图
Fig.2 Magnetic line of primary field of OCTEM

结果(Nabighian et al., 1988):

$$H_z(r,z) = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty (r_{TE} e^{\mu_0(z-h)} + e^{-\mu_0(z+h)}) \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

根据 Nabighian and Macnae 关于电磁场的描述,上式的解可以分解成一次场解与二次场解之和,因等值反磁通瞬变电磁法一次场是抵消的,仅需考虑二次场。其二次场表达式可表示为:

$$H_z^2 = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty r_{TE} e^{\mu_0(z-h)} \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

等值反磁通瞬变电磁法的接收响应可以分解为两个独立反向磁源单独作用于大地的矢量叠加结果,其接收位置 $z=-d$,单独上方磁源($h=2d$)作用时:

$$H_z^2(\text{up}) = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty r_{TE} e^{-3\lambda d} \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

单独下方磁源($h=0$)作用时:

$$H_z^2(\text{down}) = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty r_{TE} e^{-\lambda d} \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (4)$$

接收线圈接收到的二次场解即为:

$$H_z = H_z^2(\text{down}) - H_z^2(\text{up}) = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty (r_{TE} e^{\lambda d} - r_{TE} e^{-3\lambda d}) \lambda J_1(\lambda a) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (5)$$

等值反磁通瞬变电磁法测量装置位于轴心测量,此时, $r=0$, $J_0(\lambda r)=J_0(0)=1$,因此可以将上式进行简化从而得到其在频率域上的响应表达式:

$$H_z = \frac{Ia}{2} \int_0^\infty r_{TE} e^{-\lambda d} (1 - e^{-2\lambda d}) \lambda J_1(\lambda a) d\lambda \quad (6)$$

根据推导出的上式(6),可以实现对各种层状结构的正演研究。

另外,在瞬变电磁测深中,探测深度通常使用近似深度 $D=28\sqrt{\rho_a t}$ (单位为m),其中 ρ_a 为视电阻率单位为 $\Omega\cdot\text{m}$, t 为衰减时间,单位为ms。该公式适用于层状地球模型,与发送装置环路大小无关。在天府新区国际生物城试验区观测到的衰减时间为40ms,使用最小电阻率值含水层电阻率,通过计算可得到结果为560m远大于200m,可知使用该装置满足深度上要求。

2.3 算例分析

成都市天府新区国际生物城试验区地下上白垩统灌口组分布着巨厚的富含石膏、钙芒硝的泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,已实施的地勘钻孔揭示该区地层为低倾近水平状,上部为中下一中更新统牧马山组粉质黏土及卵砾石土,下部为上白垩统灌口组泥岩、粉砂质泥岩及粉砂岩,膏盐主要以薄

层状富集于灌口组基岩中。根据前人的物性研究结果:上部覆盖层和砂泥岩互层电阻率差异不明显,变化范围为 $10\sim 70\Omega\cdot\text{m}$,一般为 $50\Omega\cdot\text{m}$ 的低阻层;含水层主要为 $10\Omega\cdot\text{m}$ 的甚低阻层;膏盐层电阻率变化范围较大,为 $10^2\sim 10^3\Omega\cdot\text{m}$,其大小主要与膏盐的富集程度、厚度、产状等有关,一般膏盐层电阻率约为 $200\Omega\cdot\text{m}$,膏盐富集层的电阻率约为 $1000\Omega\cdot\text{m}$ 。

以实际地质条件为基础,遵循从简单到复杂的原则,共建立了4种多层结构的地电模型(图3),模型深度均设定为200m。其中模型一为理想状态下的单一模型(图3a),覆盖层和基岩电阻率均设定为 $50\Omega\cdot\text{m}$,可作为其他模型的对比背景模型;模型二、三、四分别如图3b、图3c、图3d所示,模型逐渐复杂,地层结构由覆盖层、含膏盐层、含水层及膏盐富集层组成。

通过对4种地电模型的OCTEM的正演结果的对比发现(图4):(1)模型一与模型二的正演结果(图4a)在衰减时间在 $0.0001\sim 0.01\text{s}$ 、 $0.01\sim 0.1\text{s}$ 之间响应幅值存在明显的差异,表明OCTEM对地电模型为3种电阻率差异的厚状地层能够有效识别;(2)模型二与模型三的正演结果(图4b)在衰减时间 $0.00001\sim 0.0001\text{s}$ 之间响应幅值存在一定的差异,但差异较小,其主要原因包括以下两个方面:一是浅部膏盐层的厚度相对较小,二是浅表层模型电阻率差异不大;(3)模型三与模型四的正演结果(图4c)在衰减时间 $0.01\sim 0.1\text{s}$ 之间响应幅值存在较明显的差异,在理论上表明OCTEM能够有效识别深部的高阻膏盐富层。总之,除特薄层之外,200m以浅范围内OCTEM能够有效分辨出电阻率差异明显的水平地层的垂向结构(图4d)。特别是在低阻围岩条件下,该方法在理论上对高阻的膏盐富集层具有良好的探测效果。

3 现场试验与数据采集

正演结果表明OCTEM方法能有效地反映膏盐富集的红层地层的垂向电性结构,为验证OCTEM方法在实际探测中的效果,本文选取成都市天府新区国际生物城起步区 2km^2 为试验区,开展了地下200m以浅地质结构的OCTEM法探测的数据采集、处理、反演及解译,并结合钻探资料进行验证分析,明确了该地区的三维电性结构特征。

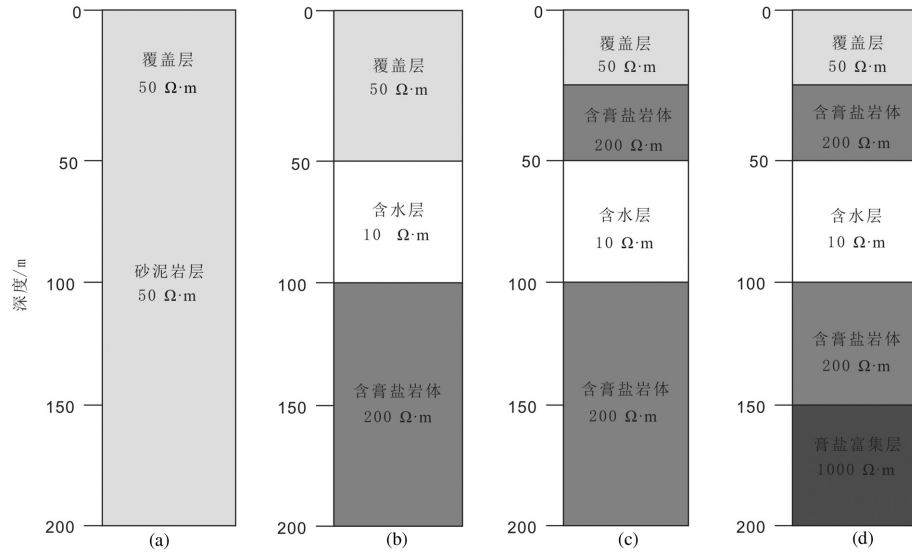


图3 多层结构地电模型示意图

Fig.3 Geoelectric model of multi-layer structures

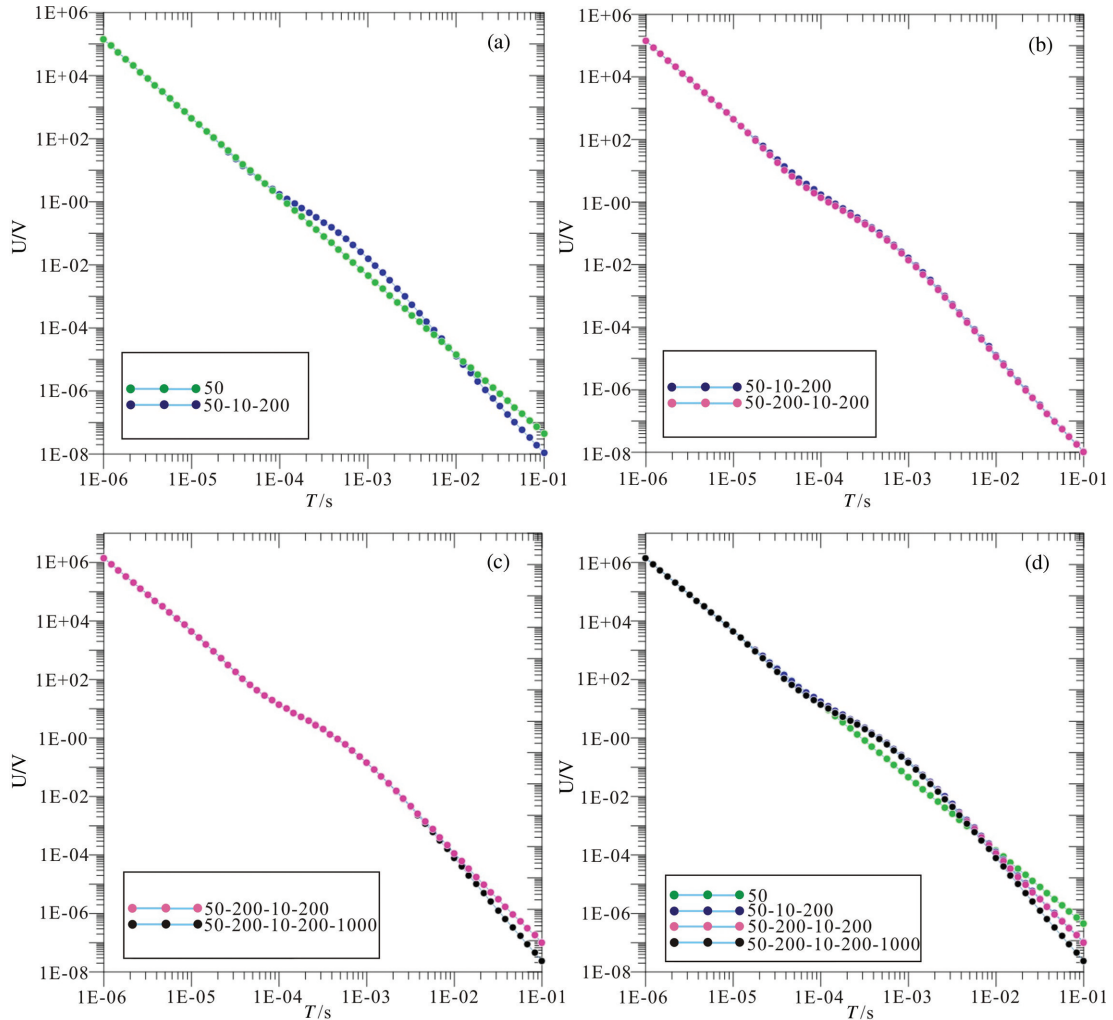


图4 不同地电模型正演结果对比图

Fig.4 Results of forward simulation of different geoelectric models

成都市天府新区国际生物城总面积约44 km²,位于成都市天府新区锦江(府河)以西、成昆铁路以东、第二绕城以北的地区。区域范围内20 m以下广泛分布白垩系灌口组含膏盐岩红层。晚白垩世时期,四川盆地由山前坳陷盆地沉积期转变为陆内盆地萎缩期,沉积盆地范围大幅减小,演变成为萎缩的、相对独立封闭的内陆咸化湖盆,在湖盆内部普遍以化学沉积为主,发育石膏、芒硝等膏盐蒸发岩系以及以富含膏盐的泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩等岩性为主的盐湖浅湖相沉积;而在盆地西北的龙门山南段前缘则沉积了近源物质的砾岩冲积扇。

本次选取生物城起步区2 km²范围作为研究区(图5)。研究区目前正在处于高度开发建设过程中,主体公路已经建成并通车,工区范围内已分布有少量建成的高层建筑物和部分在建建筑,大部分区域正在开展工程勘察和基坑施工等(图5,图6);此外该区还存在两组高压电线以及多组民用电线,电磁干扰、噪音干扰、建筑干扰十分严重,物探工况条件极其恶劣(图7)。如果在该区采用常规的电法、电磁法等地球物理方法开展工作,根本无法采

集到可靠的数据甚至无法施工。而OCTEM法作为一种新型的城市地球物理勘探方法,具有快速、无损、抗干扰能力强等特点,完全适用于城市的各种复杂工况,因此本次试验研究首选OCTEM法作为地下地质结构的探测方法。主要目的是通过OCTEM法查明深部含石膏、钙芒硝等膏盐富集层空间展布形态和规律,并探索红层地区城市地下富膏盐地层的有效探测方法。

本次采集设备使用新一代的HPTEM-18型高精度瞬变电磁系统,该系统由HPTEM天线、仪器主机、12 V外接电池以及操作电脑组成。仪器天线直径0.75 m,质量约25 kg,轻便高效。现场测线布置如图5所示,为了取得较好的探测精度,在长2 km、宽1 km的长方形范围内,按照100 m线距、10 m点距的网格密度进行OCTEM的扫面工作,共布设11条测线。正式采集之前,先进行自检调平校验。本次数据采集发射电流10.0 A、工作频率6.25 Hz、关断时间间隔为20 μs、叠加次数为300次,探测深度可达200余米,能够很好的满足探测需求。此外采集时也尽量避开电线、车辆等,保证了数据的高信噪比和高质量。

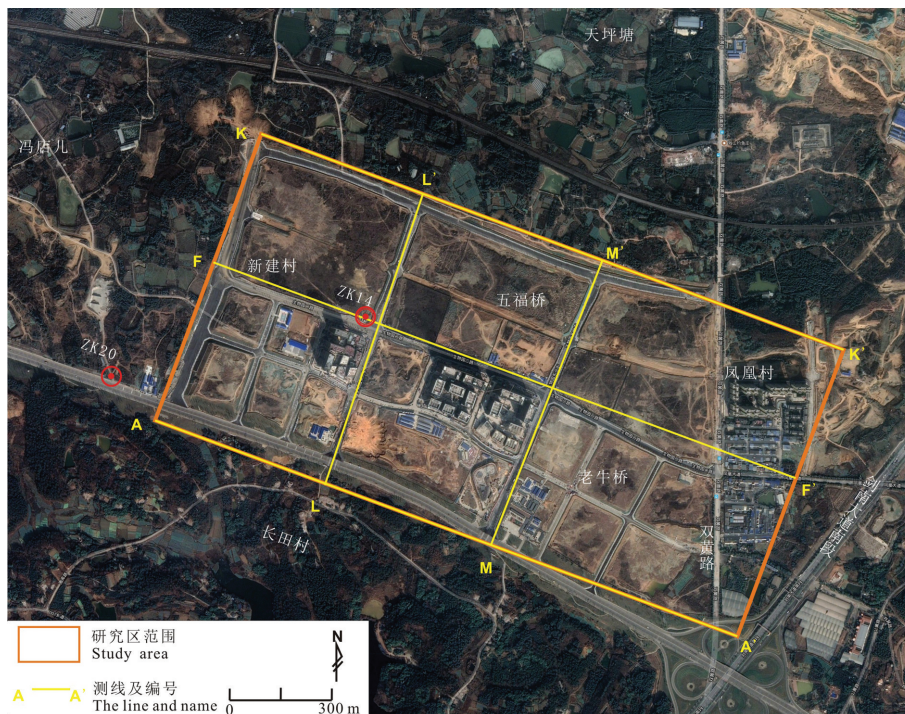


图5 研究区测线及钻孔布置图

Fig.5 Arrangement of measuring lines and drill holes in the study area

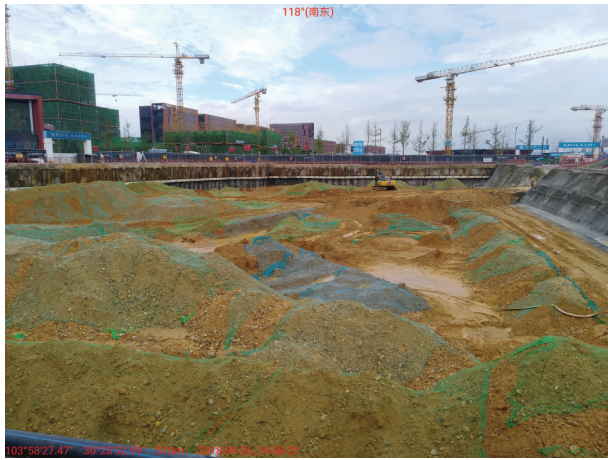


图6 研究区现场工况一
Fig.6 Working condition 1 of the test area



图7 研究区现场工况二
Fig.7 Working condition 2 of the test area

4 结果与讨论

采用OCTEM专用的HPTEM数据处理软件对采集的数据进行反演处理,共获取了11条剖面的电阻率反演剖面二维成果图。结果表明各剖面之间具有良好的衔接性、一致性及对应性:(1)各剖面的电性结构特征基本一致,从上往下均表现为低阻-中阻-低阻-中阻-高阻的多层电性结构特征;(2)各纵横剖面直接衔接较好,不存在电性突变的现象;(3)电性结构层状特征明显,并且各层厚度均有较好的对应关系,与白垩系灌口组为盐湖沉积的地

质认识基本符合,其中图8为AA'、FF'、KK'三条剖面的成果图。这一方面说明了OCTEM法在城市复杂工况条件下采集的数据是比较可靠的,同时能够从电阻率反演成果剖面上明确电性差异明显的垂向地质结构,也验证了地电模型正演结果的合理性。

根据研究区周边(永安水库边,公黄路桥下生物城中路两侧)灌口组露头,研究区基岩主要为灌口组泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩及其互层,岩石具有咸味,盐分含量较高,总体表现为低阻特征;而根据矿物的物性特征,石膏、钙芒硝的电阻率通常较高,岩石中的薄层石膏或钙芒硝含量将明

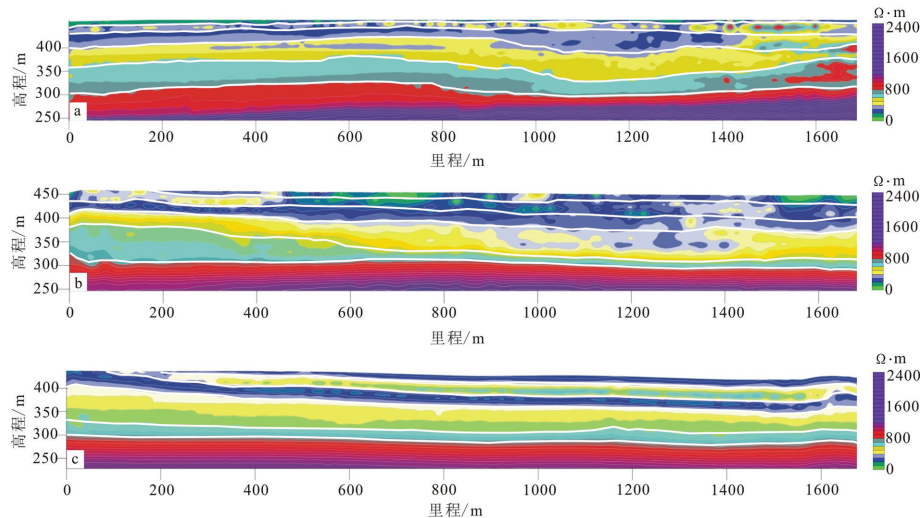


图8 OCTEM反演电阻率剖面图
a—AA'剖面;b—FF'剖面;c—KK'剖面
Fig.8 Inversion resistivity profiles of OCTEM
a—AA' profile;b—FF' profile;c—KK' profile

显提高岩体的电阻率,即膏盐对岩体的电阻率性质有着明显的增阻效应。根据以上认识,初步推断反演剖面中的中—高阻体为含膏盐岩体或膏盐富集层。为进一步验证探测成果的可靠性、明确不同电性结构对应的岩性,成都多要素城市地质调查项目在研究区实施了验证钻孔 ZK20 和 ZK14(图 5)。钻探结果揭示:(1)该区地层自上而下依次为素填土及粉质黏土层、卵砾石土层、中—强风化泥岩及粉砂岩互层、弱—微风化泥岩及粉砂岩、含石膏和钙芒硝的含膏盐红层、以钙芒硝为主的膏盐富集层;(2)基岩地层主要为灌口组泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩及其互层,地层呈低倾近水平状;(3)灌口组基岩部分层段可见针孔状的溶蚀孔洞,为钙芒硝或石膏等矿物溶蚀形成。钻孔岩心物性测试获取的电阻率—深度变化曲线表明(图 9a):(1)埋深 10~25 m 范围内的卵石土层电阻率较低,电阻率值普遍小于 40 Ω·m,卵石土层的电阻率大小与卵石大小及胶结程度密切相关;(2)基岩电阻率变化较大,变化范围从 10 Ω·m 到 300 Ω·m 以上不等;(3)50~80 m 范围内的弱—微风化泥岩粉砂岩地层的表现出中阻—低阻特征,尽管其中含有少量薄层状高阻石膏带,但该段地层岩体中针孔状溶蚀孔洞相当发育(孔径 1~5 mm),且岩石中盐分含量较高(岩石具咸味),因此总体表现出中阻—低阻特征(图 9c);(4)埋深 80~140 m 深的膏盐层,中间发育

多层薄层状石膏条带且夹少量的钙芒硝,石膏条带厚 1~5 cm 不等(图 9d),偶见少量溶蚀孔洞,该层电阻率大小与石膏条带的总体含量和厚度呈正相关性,总体上表现为中阻—高阻特征;(5)140~200 m 范围内为膏盐富集层,主要以钙芒硝为主,且夹少量薄层状的石膏条带,钙芒硝含量普遍达到了 60%~80%,最高可达 90%,钙芒硝晶体为粗晶—巨晶结构,晶体呈乳白色兰花状、竹叶状、斑块状产出,最大长达 5 cm(图 9e),钙芒硝含量及石膏条带是影响该层电阻率的最重要因素,物性测试结果表明该段因钙芒硝及膏盐富集层而表现为高阻特征。

综上所述,钻孔岩心揭示的岩石电性特征与 OCTEM 反演结果非常吻合。因此,综合 ZK14 的钻探成果进行二维电阻率剖面(FF'剖面)垂向对应刻度,获取电性结构对应的垂向地质结构变化,进而对其他瞬变电磁二维电阻率剖面进行追踪解释(图 10),最终明确 11 条剖面的垂向地质结构特征,为重现研究区三维地质结构奠定资料基础。

通过三维可视化软件,利用研究区 11 条 OCTEM 剖面的解释成果,查明并直观展现了研究区膏盐富集层的空间展布形态与分布规律(图 11、12):(1)含石膏、钙芒硝岩层埋藏深度在 80~140 m,厚度约为 60 m,总体表现出西厚东薄、南厚北薄的特征,顶板埋藏深度西北浅、东南深,并且在近地表 80~100 m 范围内石膏、钙芒硝等发生溶蚀现象,

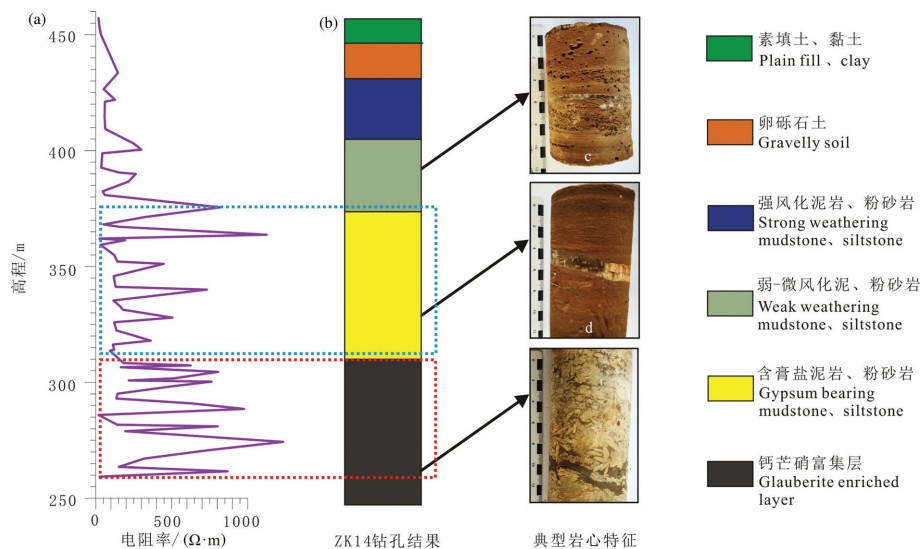


图9 ZK14钻孔结果及电阻率分布曲线图

Fig.9 Drilling results and resistivity distribution curve of No. 14 borehole

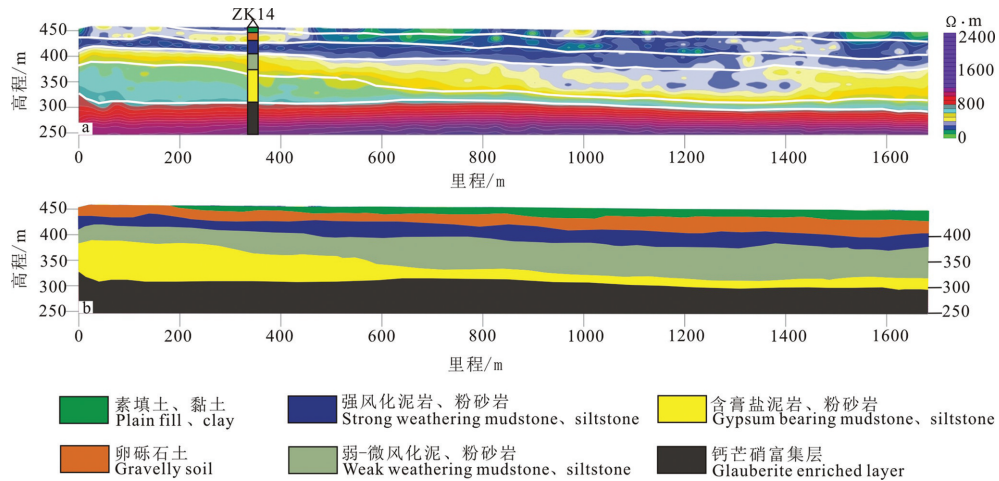


图10 FF'测线等值反磁通瞬变电磁探测成果图(a—电阻率反演剖面图;b—解译推断成果图)
 Fig.10 Detection result of FF' line by OCTEM method(a—Inversion resistivity profile;b—Interpretation profile)

形成溶孔或溶蚀软弱带,但在埋藏较深的部位,岩体受风化作用影响较弱,裂隙(含层面裂隙)不发育或弱发育,地下水循环受阻,故膏盐矿物未被溶蚀而基本保持原生状态;(2)钙芒硝富层顶板埋深起伏不大,在130~140 m之间,到200 m范围内均为钙芒硝富层。在进行深部空间开发利用过程中应特别注意深部80~200 m范围内岩体中石膏、钙芒硝等矿物吸水、溶蚀等引起的体积膨胀、地基稳定、顶板坍塌等稳定性问题以及富SO₄²⁻型水对钢筋混凝土等构筑物的腐蚀问题。

5 结 论

针对西南地区城市地下空间开发利用过程中红层富膏盐岩体的探测问题,本文通过层状地电模型的OCTEM响应正演计算分析及试验区OCTEM探测实测数据反演结果的综合验证,探索出城市地下富膏盐岩体空间展布规律的有效方法。

(1)不同电性结构模型的OCTEM正演结果表明OCTEM能够有效分辨存在电阻率差异的多层电性结构,并且目标体电阻率与基岩背景值差异越

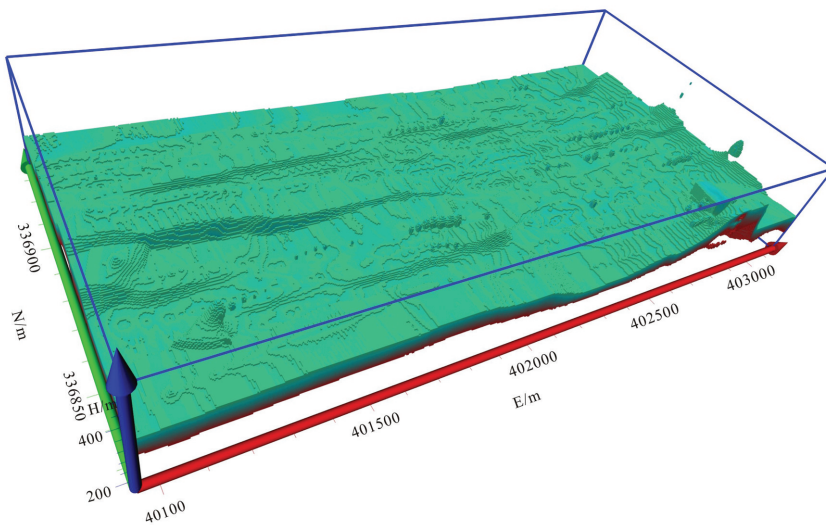


图11 研究区膏盐层空间分布图(埋深80~140 m)
 Fig.11 Gypsum mineral salt layer of the test area(burial depth 80-140 m)

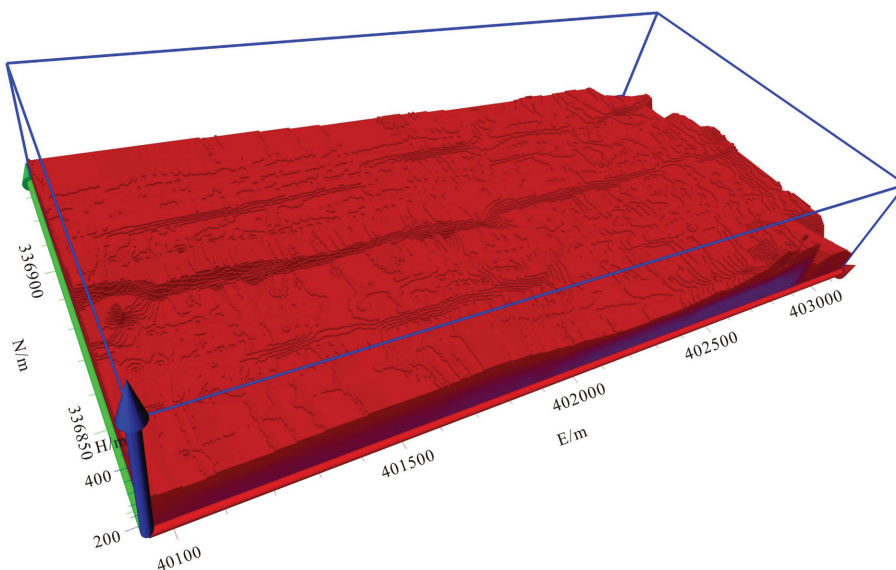


图 12 研究区膏盐富集层空间分布图(埋深 140~200 m)

Fig.12 Gypsum mineral salt enriched layer of the test area(burial depth 140–200 m)

大,瞬变电磁异常响应的幅值就越大,分层效果就越明显。

(2)在成都市天府新区国际生物城地下空间地质结构OCTEM探测反演结果表明该方法能够准确获取红层地区地下膏盐富集层的空间分布特征,证明了该方法实际应用的有效性;并且通过测线加密成网及三维可视化技术,能直观精确地展现富膏盐岩体的三维展布规律。

(3)等值反磁通瞬变电磁作为一种新的城市地球物理探测技术,具有快速、无损、抗干扰能力强等特点,它克服了众多传统物探方法在城市复杂工况条件下无法施工或是无法采集到良好数据质量的弱点,对于红层地区城市地下富膏盐岩体的探测更为有效,具有推广价值和意义。

References

- Ander Guinea, Elisabet Playà, Luis Rivero, 2009. Geoelectrical imaging supporting glauberite deposits evaluation in the Montes de Torrero area (Zaragoza) [J]. *Geogaceta*, 47: 145–148.
- Ander Guinea, Elisabet Playà, Lluís Rivero, Josep Maria Salvany. 2014. Geoelectrical prospecting of glauberite deposits in the Ebro basin (Spain)[J]. *Engineering Geology*, 174: 73–86.
- 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).
- Qiu Kaili, Chu Yongbin, Zhang Zhiming. 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).
- He Jing, He Hanhan, Zheng Guisen, Liu Yu, Zhou YuanXin, Xiao JingZe, Wang Chunjun. 2019. 3D geological modelling of superficial deposits in Beijing City[J]. *Geology in China*, 46(2): 244–254(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).
- Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun, Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017. General ideas forurban geological survey in China and key theory and techniques[J]. *Geology in China*, 44(6): 1086– 1101 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Gan Fuping, Zhang Wei. 2015. Application of geophysical prospecting to Karst collapse in red bed area[J]. *Progress in Geophysics*, 30(6): 2923–2930 (in Chinese with English abstract).
- Niu Zhilian. 2007. *Theory of Time Domain Electromagnetic*[M]. Changsha: Central South University Press, 1–298 (in Chinese).
- Qiu Enxi, Kang Jingwen, Zheng Lining. 2015. Study of corrosion characters of red- bed soft rock containing saline deposit in Chengdu[J]. *Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics*, 36 (Supp. 2): 274–280(in Chinese with English abstract).

- Su Maoxin, Qian Qihu, Li Shucai. 2011. A method of metro advanced geological prediction under karst geology conduction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(7): 1428-1434(in Chinese with English abstract).
- Sun Huaifeng, Li Kai, Chen Rujun. 2018. Experimental study on transient electromagnetic responses to shallow karst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(3): 652-661 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Wang Yahui, Zhang Maosheng, Shi Yunchao, Dong Ying, Wang Feng, Yu Fengdan. 2019. Precise detection and modeling of urban underground space based on integrated geophysical exploration[J]. Northwestern Geology, 52(2): 83-94 (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).
- Wei Wanshun, Zheng Guisen, Yu Chunlin, Xu Jixiang. 2016. Strategic thinking on China urban geological work in the next five years[J]. Urban Geology, 11(2): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Wei Yufeng, Nie Dexin. 2005. The speciality of gypsum dissolution of the Neogene red clay and its influence to engineering[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 13(2): 62-64 (in Chinese with English abstract).
- 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 [J]. Chinese J. Geophys, 59(9): 3428-3435(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).
- Zhou Sheng, Xi Zhenzhu, Song Gang. 2012. Responses of the towed transient electromagnetic sounding on deep seafloor[J]. Journal of Central South University, 43(2): 605-610(in Chinese with English abstract).
- abstract).
- ## 附中文参考文献
- 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.
- 仇开莉, 褚永彬, 张志明. 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.
- 何静, 何哈哈, 郑桂森, 刘予, 周圆心, 肖景泽, 王纯君. 2019. 北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建模[J]. 中国地质, 46(2): 244-254.
- 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.
- 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.
- 刘伟, 甘伏平, 张伟. 2015. 红层区岩溶塌陷调查地球物理勘探技术应用研究[J]. 地球物理学进展, 30(6): 2923-2930.
- 牛之琏. 2007. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1-298.
- 邱恩喜, 康景文, 郑立宁. 2015. 成都地区含膏红层软岩溶蚀特性研究[J]. 岩土力学, 36(增刊2): 274-280.
- 苏茂鑫, 钱七虎, 李术才. 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.
- 孙怀凤, 李凯, 陈儒军. 2018. 浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 37(3): 652-661.
- 王亚辉, 张茂省, 师云超, 董英, 王锋, 于峰丹. 2019. 基于综合物探的城市地下空间探测与建模[J]. 西北地质, 52(2): 83-94.
- 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.
- 卫万顺, 郑桂森, 于春林, 徐吉祥. 2016. 未来五年我国城市地质工作战略思考[J]. 城市地质, 11(2): 1-5.
- 魏玉峰, 聂德新. 2005. 第三系红层石膏溶蚀特征及其对工程的影响[J]. 水文地质工程地质, 13(2): 62-64.
- 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.
- 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): 069-075.
- 周胜, 席振铎, 宋刚. 2012. 深海拖曳式瞬变电磁的响应规律[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 43(2): 605-610.