第 44 卷第 5 期　　物　探　与　化　探　　Vol.44,No.5
2020 年 10 月　　GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION　　Oct.,2020

doi: 10.11720/wtyht.2020.0228
曾何胜,徐元璋,刘磊,等.广域电磁法在复杂电磁干扰环境的应用研究——以某市周边地热勘查为例[J].物探与化探,2020,44(5):1031-1038.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0228
Zeng H S,Xu Y Z,Liu L,et al.Researches on the application of wide field electromagnetic method to the complex electromagnetic interference environment:Exemplified by the geothermal exploration around a city[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(5):1031-1038.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0228

广域电磁法在复杂电磁干扰环境的应用研究
——以某市周边地热勘查为例

曾何胜,徐元璋,刘磊,唐宝山,张祎然,李义,陈宇峰
(湖北省地质局 地球物理勘探大队,湖北 武汉　430056)

摘 要: 广域电磁法通过人工接地场源建立谐变电磁场,向地下发送不同频率的交变电流,观测一个或多个电磁场分量,以广域视电阻率探测不同埋深地质目标体。该方法以大功率、强信号的人工场压制干扰场来提高信噪比,从而获得有效观测数据。在高压线、铁路、厂房、矿区、变电站、城市周边等复杂人文噪声干扰环境下,干扰场信号幅值达到几百甚至几千微伏,其强度大于广域电磁人工场信号,难以达到压制效果。本文以某市周边地热资源大深度勘探为例,对复杂电磁干扰环境下广域电磁法的应用进行研究,取得了质量良好的观测数据,经反演解释清晰刻画了地层、构造的空间展布特征,提供了两处地热资源有利区。该例为复杂电磁干扰环境下广域电磁法应用提供了方向。

关键词: 广域电磁法;复杂电磁干扰环境;地热资源大深度勘探
中图分类号: P631.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-8918(2020)05-1031-08

0　引言

工区自奥陶系至第四系地层均有出露,印支运动之前主要为地层沉积。自印支运动开始,构造运动频繁,主要发育 NE、NW 向断裂构造。以广域电磁法物探手段开展大深度地热资源勘查[1]。

但工区测线布置在城市周边,以志留系为主的浅表低阻层厚度较大,同时人文干扰较为严重,数据质量难以达到要求。如何能采集到质量良好的野外数据成了该工区广域电磁法作业的难点。

人工源电磁勘探方法采取的主要抗干扰措施有:利用大功率手段增加电偶极距[2]或磁极距[3];增加叠加次数和重复观测累加信号[4];进行频谱分析后采用叠加、平滑、滤波等手段[5];可控源采用全区视电阻率、磁道参考替换等技术[6];TEM 采用双极性同步采样方式、工频 50 Hz 陷波器等[7];脉冲干扰信号设置采样时窗进行排除[8]。天然场电磁勘探方法抗干扰措施有:张量阻抗分析、远参考分析、Robust 估计及甘布尔的互功率谱法[9]。还有采用综合物探[10]等。

因工区干扰信号复杂[11]且干扰强度大,上述压制干扰措施在工区内收效甚微。本文采用的抗干扰措施为对工区干扰信号进行全天监测,分析不同时间段干扰信号综合强度,利用干扰强度小的时间段进行野外数据采集,分析信噪比,从而获取野外有效数据,解决大深度地热资源勘查问题[12]。

1　工区地质及地球物理特征

1.1　地质特征

区内震旦纪至中三叠世期间,基本处于沉降过程,沉积了一套以碳酸盐岩为主的沉积岩层;自中三叠世晚期印支运动开始,区内构造变动趋于强烈频繁,形成了 EW 向、NE 向、NNE 向等一系列不同性质、不同特点的构造形迹。区内奥陶系娄山关组

收稿日期: 2020-05-07; **修回日期**: 2020-07-15
作者简介: 曾何胜(1987-),男,工程师,主要从事常规电法及电磁法的应用研究工作。Email:360644941@qq.com

万方数据

(O_1l)至第四系(Q)地层均有出露。测线布置为NW向(垂直于NE、NNE向断裂构造)。

1.2 地球物理特征

论文采用的物性资料是实地“小四极”电性测定及前人在区内物性工作成果的统计。如表1所示,白垩系(K)、志留系(S)、寒武系下段($\in_1$)的砂岩、粉砂岩、炭质(泥)页岩等地层表现为低电阻率、低密度特征;三叠系(P)、二叠系(T)、奥陶系(O)、寒武系中上段($\in_{2-3}$)等碳酸盐岩地层表现为中高电阻率、高密度特征;因为主要为沉积地层,磁性上没有明显差异。即地热资源盖层(白垩系、志留系)表现为相对低电阻率、低密度特征,储水层(三叠系、二叠系、奥陶系及寒武系等碳酸盐岩)表现为相对高电阻率、高密度特征。构造断裂带附近因岩石破碎、导水性较好,电阻率、密度与完整围岩差异较大。综上所述,地热资源盖层、储水层及导热(水)通道(断裂构造)的电阻率、密度存在明显差异,为勘探提供了物性基础。

表1 某市工区周边地热资源调查物性统计

Table 1 Statistics of the physical properties for geothermal resources investigation in surrounding areas of a city

序号	地质层位	主要岩性	电阻率范围/(Ω·m)	密度/(g·cm^{-3})	磁化率/(10^{-5}SI)
1	白垩系 K	粉细砂岩	10~500	2.404~2.559	0~10
2	三叠系 T	白云岩、角砾状白云岩、泥晶灰岩	1851~3442	2.612~2.683	7~15
3	二叠系 P	灰岩、生物屑灰岩、瘤状泥灰岩	1560~2582	2.674~2.742	12~17
4	石炭系 C	灰岩、细晶白云岩、细砂岩、炭质页岩	368~2343	2.598~2.766	1~19
5	泥盆系 D	石英砂岩	300~982	2.624~2.716	3~15
6	志留系 S	粉砂岩、泥质粉砂岩	79~341	2.342~2.437	1~29
7	奥陶系 O	生物屑灰岩、泥晶灰岩	998~2722	2.579~2.708	0~16
8	寒武系 ϵ_{2+3}	细晶白云岩、泥质白云岩、白云质灰岩	974~3902	2.636~2.736	8~14
9	寒武系 ϵ_1	粉砂岩、页岩、炭质页岩	12~224	2.426~2.584	10~17

2 广域电磁法原理简介(E-E_x装置)

广域电磁法是何继善院士相对于传统可控源音频大地电磁法(CSAMT)和磁偶源频率测深法(MELOS)提出来的[13]。该方法摒弃了CSAMT方法远区信号微弱的劣势[14],扩展了观测范围,也摒弃了MELOS方法的校正方法,保留了计算公式中的高次项,既不是沿用卡尼亚公式,也不是把非远区校正到远区,而是用适合全域的公式计算电阻率,拓展了人工源电磁法的测量范围,加大了勘探深度[15]。E-E_x装置只测量电信号,在一定程度上提高了方法的抗干扰性[16]。

均匀大地表面水平电流源的电场沿x方向的分量表示为:

$$E_x = \frac{I\mathrm{d}L}{2\pi\sigma^3}[1 - 3\sin^2\varphi + \mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1 + \mathrm{i}kr)] , \quad (1)$$

式中:I为供电电流,dL为电偶极源的长度,i为虚数,k为均匀半空间的波数,r为观测点距离电偶极源中心的距离,ρ为电阻率,φ为电偶极源中心到接收点矢径与电偶极源(AB)的夹角。

令
$$K_{E\text{-}E_x} = \frac{2\pi r^3}{\mathrm{d}L \cdot MN} , \quad (2)$$

则式(1)可以转换为:

$$\rho_\alpha = K_{E\text{-}E_x}\frac{\Delta V_{MN}}{I}\frac{1}{f_{\varepsilon\text{-}\varepsilon x}(\mathrm{i}kr)} , \quad (3)$$

式中:$f_{E\text{-}E_x}(\mathrm{i}kr)$为$r$、$k$、$\rho$及$\varphi$构成的复函数,称为$E$-$E_x$方式广域电磁测深的电磁效应函数,反映地下电磁传播的特性,其采集点处分量示意如图1。

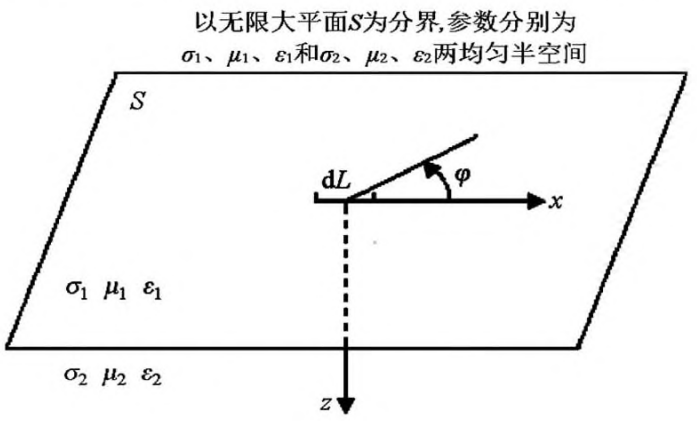

图1 采集点处分量示意

Fig.1 Component diagram at collection point

3 广域电磁法在复杂电磁干扰区的应用效果

3.1 工区复杂电磁干扰强度评估

如图2所示,工区布置的测线经过高压线密集区、大型变电站、铁路等电磁干扰环境复杂区。按照规范要求,在开工作业前对复杂电磁干扰场强度进行评估,通过试验以确定广域电磁法在该工区的适用性。

万方数据

图 2　测线周边电磁干扰环境示意

Fig.2　Schematic diagram of electromagnetic interference environment around survey line

在测线上分段选取试验点进行干扰场观测。对某点上 74 个频率进行干扰场数据采集,单支曲线如图 3 所示,有以下几个特征:

1)单支曲线幅值大致处于 100~3 500 μV 区间,在 256 Hz 附近达到极值,干扰场信号强度整体高于广域电磁法人工场信号。

2)8 192~48 Hz 的中高频段,干扰场幅值约 300~3 500 μV;48~0.011 7 Hz 的低频段,干扰场幅值约 100~250 μV。中高频段干扰场幅值大于低频段,即中高频段受干扰影响相对较大。

图 3　工区内某点噪声水平评估曲线

Fig.3　Evaluation curve of noise level at a point in the work area

干扰场信号强度评估结论:工区内干扰场幅值达到几百至几千微伏,广域电磁法野外数据采集受干扰场影响较大。

3.2　复杂电磁干扰环境下场源试验

广域电磁法在该工区的装置选择 9.5 km 收发距场源进行试验。为保证人工源信号强度,发射端供电电流为 122 A。同测点人工场与干扰场信号幅值曲线对比如图 4 所示。

从图 4 中可以看出:

1)人工场信号(蓝色曲线)与干扰场信号(红色曲线)形态一致,且幅值大小非常接近。

2)两种场源信号幅值大致处于 100~3 000μV 之间,呈锯齿状,形态杂乱。

人工场源信号强度试验结论:从以上两点并结合干扰场评估曲线特征,测点处人工场信号基本被干扰场信号淹没,试验采集数据的信号源主要为干扰场,原施工方案下难以采集到人工场源(收发距 9.5 km)的信号。

3.3　分析工区复杂电磁干扰特征

在测点上以 7 频组(中频段)进行长时间干扰电磁场幅值监测,观测幅值的变化,以达到了解复杂电磁干扰场规律、特征的目的,图 5 为某点 8:00~18:00 的干扰场幅值监测曲线。

如图 5 所示,横轴为时间轴(24 小时制),纵轴为干扰场幅值。发现复杂电磁干扰场规律和特征如下:

1)8:10~9:50、14:00~16:00 两时间段内(绿色虚线框),干扰场幅值小于 20 μV,干扰强度小;

万方数据

图 4 工区某点人工场与天然场信号幅值曲线对比

Fig.4 Comparison of the electric field amplitude curves between the signal of human workshop and natural field

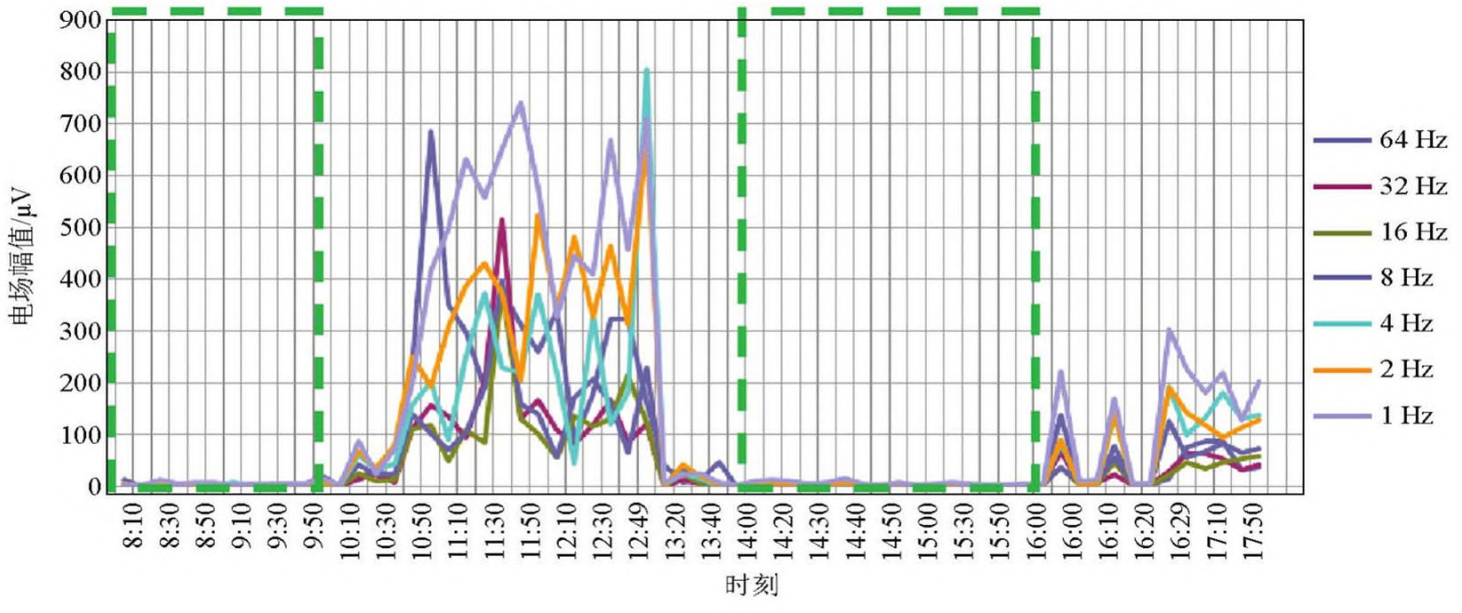

图 5 工区干扰场幅值 12 小时监测曲线

Fig.5 Interference field amplitude monitoring curve for 12 hours

2)9:50~14:00、16:00~18:00 两个时间段干扰场幅值大,幅值大小分别达到 700、300 μV,干扰强度大。

分析监测曲线,不同时间段内干扰场幅值存在很大的区别。选取干扰场幅值较小且稳定的时间区段进行广域电磁法作业试验。

经现场排查,结合电磁干扰场分时间段特征和中高频信号强度较大特征分析,推测该工区干扰电磁场主要来源于高压线、变电站等人文干扰,分时间段干扰强度变化推测跟用电量等人文干扰活跃程度有关。

3.4 选取干扰强度小的时间区段进行人工场试验

同测点人工场与干扰场幅值曲线对比如图 6 所示。

1)干扰场信号幅值基本小于 5 μV,而人工源信号幅值达到 60 μV,人工场信号幅值远大于干扰场。

2)人工场信号幅值曲线圆滑、稳定,达到了人工场有效压制干扰场的目的。

从而判定 8:10~9:50、14:00~16:00 两个时间区段内可以进行广域电磁法野外作业。在干扰场幅值较小的 8:10~9:50、14:00~16:00 两个时间区段进行人工源试验,工区某点(收发距 9.5 km)的人工场信号幅值单支曲线如图 7 所示,该曲线形态清楚,质量等级为二级,质量可靠。

在干扰强度小时间段人工场试验结论:在 8:10~9:50、14:00~16:00 两个时间区段广域电磁野外作业数据质量良好,能满足规范要求。

3.5 采取分时间段作业后的应用效果分析

3.5.1 地质模型

图 8 为通过地表及区域地质资料推测的某市地热资源调查剖面 1 线地质模型。从模型分析,主要盖层为志留系砂岩地层,储水层为奥陶—寒武系白云岩地层,控热导热构造为断裂破碎带 F_1、F_2、F_3。在该处地热资源具有良好的盖、储、通地质条件。

万方数据

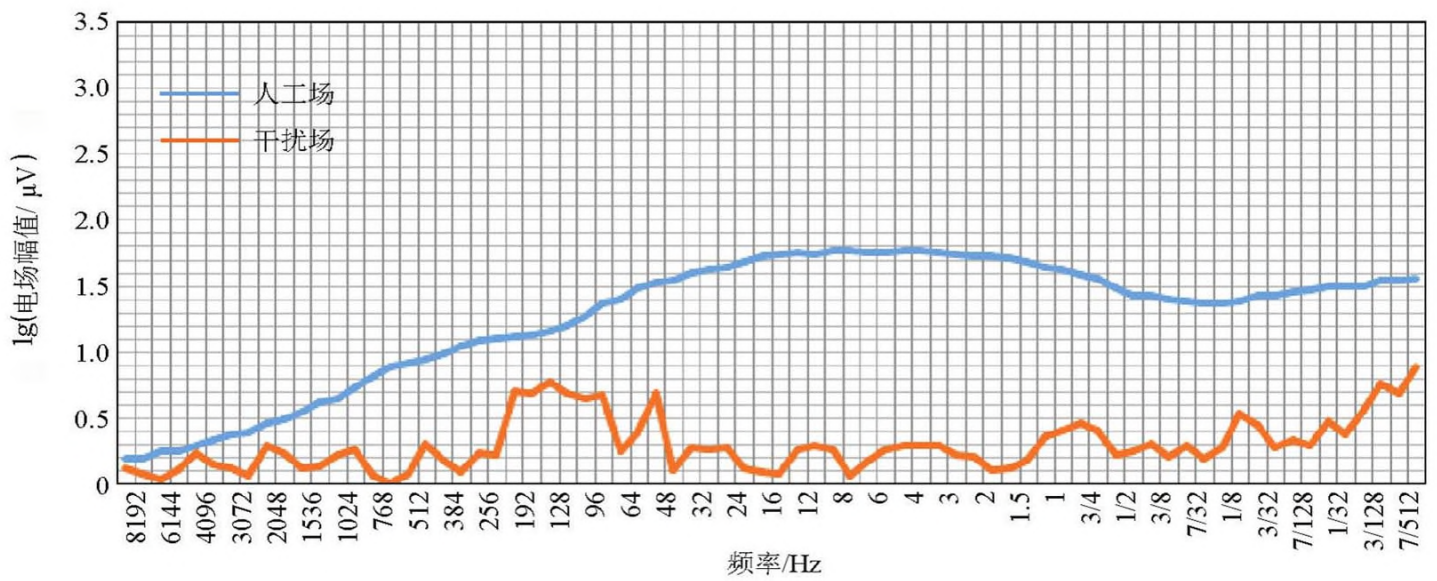

图 6　工区某点在 8:10~9:50、14:00~16:00 时间区段人工场与天然场信号幅值曲线对比

Fig.6　Comparison of the electric signal curves of artificial field and interference field at a certain point in the work area at 8:10~9:50,14:00~16:00

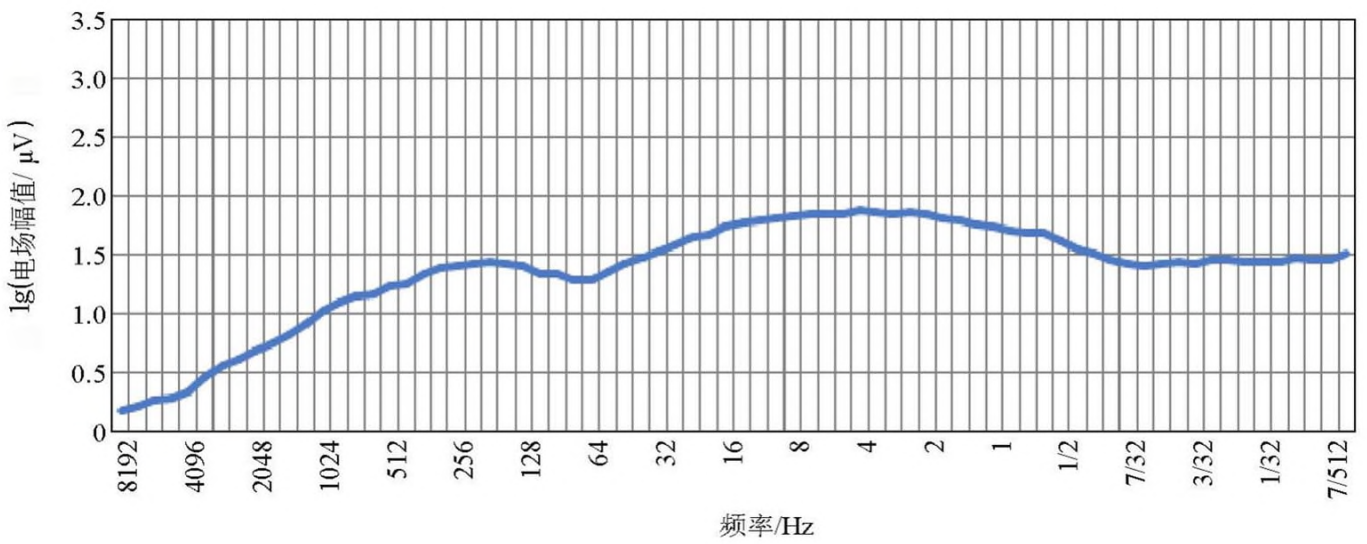

图 7　工区某点在 8:10~9:50、14:00~16:00 时间区段人工电场幅值单支曲线

Fig.7　A single curve of artificial field amplitude at 8:10~9:50,14:00~16:00

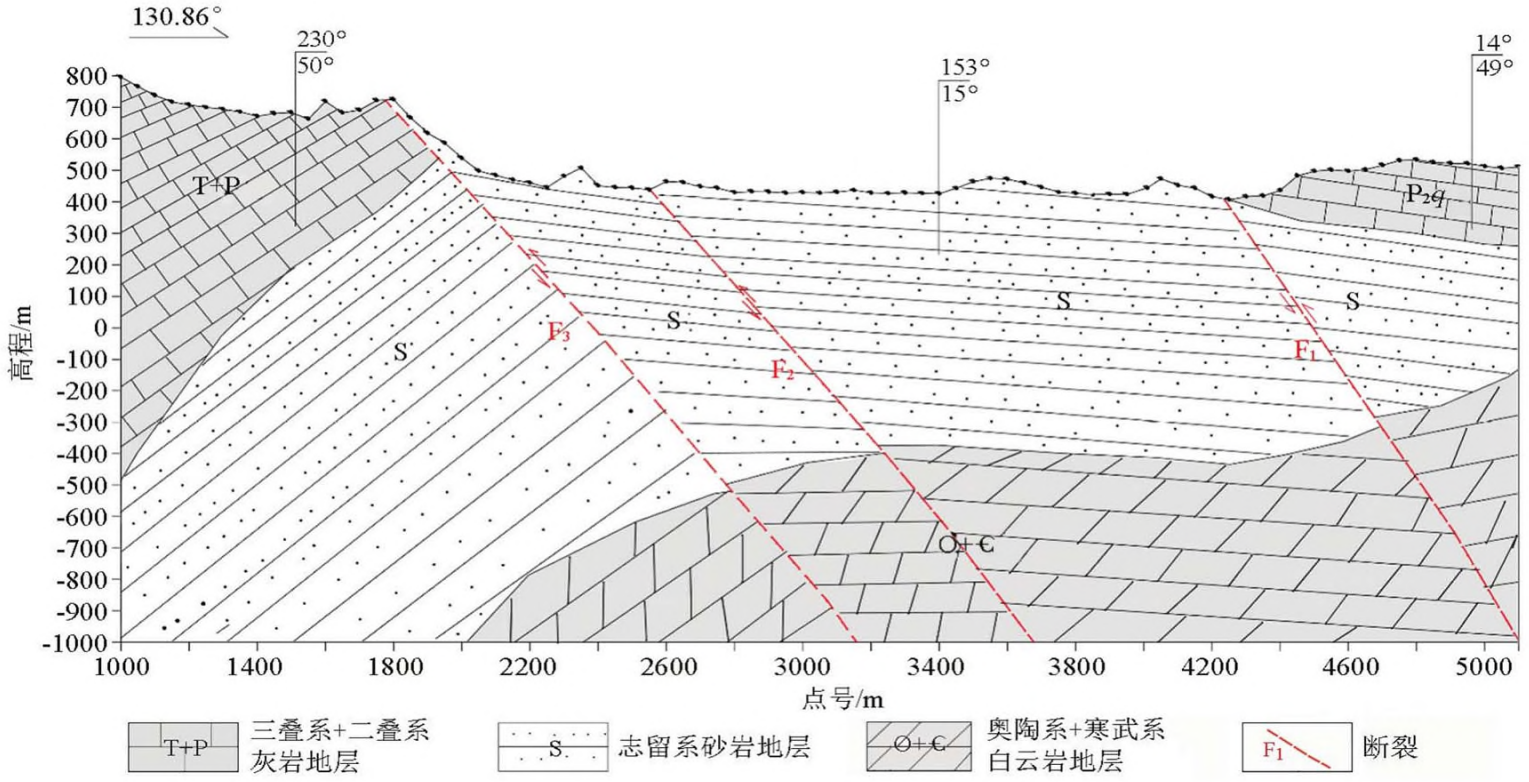

图 8　某市地热资源调查剖面 1 线地质模型

Fig.8　Geological model of line 1 for geothermal resources survey section

万方数据

3.5.2 广域成果分析

在 8:10~9:50、14:00~16:00 两个时间段内对剖面 1 线进行广域电磁野外作业,整体数据质量良好。以广域电磁法成果为主,结合已有地质等资料,分析地层—物性模型,进行工区地层及地质结构特征综合解释,成果断面图如图 9 所示。

1) 地层分析解释

点号 1050~2000 段:地层向 NE 倾斜。标高约 -500 m 往上,视电阻率为几百至 1 万 Ω · m,表现为高阻,结合地质资料,推测为三叠系—泥盆系灰岩等碳酸盐岩地层;标高-500~-1 700 m,视电阻率小于 100 Ω · m,表现为低阻,推测为志留系粉砂岩、砂岩地层;标高-1 700~-2 500 m 段,视电阻率整体表现为中高阻,推测为奥陶系及寒武系中上段白云岩地层。

点号 2000~4250 段:标高-700 m 往地表,视电阻率为几十至几百 Ω · m,表现为中低阻,推测为志留系纱帽组、罗惹坪组、新滩组粉砂岩、砂岩地层;标高-700~-2 000 m,视电阻率为几百至几千 Ω · m,表现为中高阻,推测为奥陶系和寒武系中上段白云岩地层;标高-2 000 m 往深部,视电阻率小于 100 Ω · m,表现为低阻,推测为寒武系下段泥质页岩、泥岩地层。

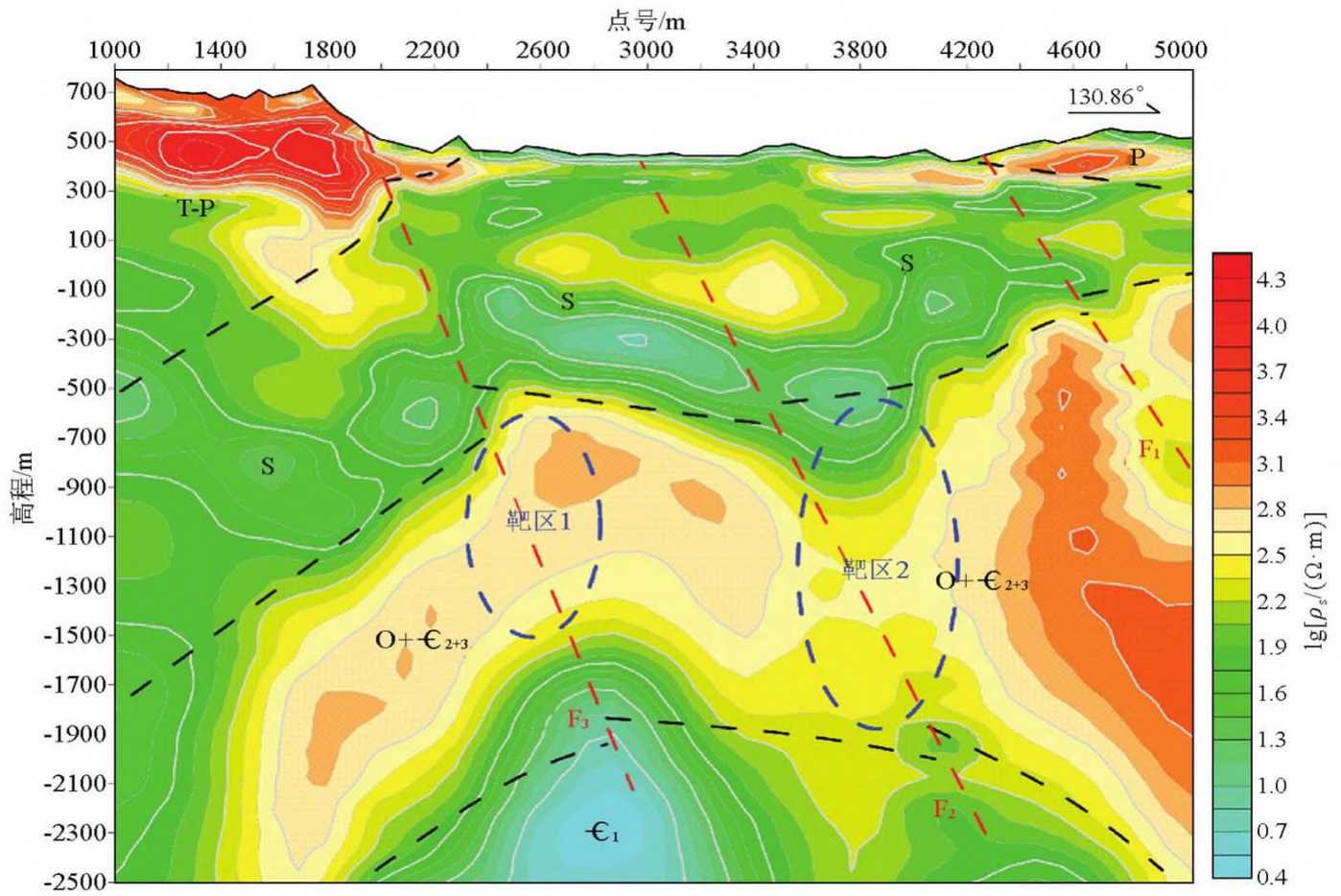

图 9 某市地热资源调查剖面 1 线广域电磁成果图

Fig.9 Wide field electromagnetic results of line 1 of geothermal resources survey profile

点号 4250~剖面大号端:标高 400 m 往上厚度约 200 m,视电阻率为几千至 1 万 Ω · m,表现为高阻,结合地质资料推测为二叠系灰岩地层;标高 200~-100 m,视电阻率小于 100Ω · m,表现为低阻,推测为志留系粉砂岩、砂岩地层;标高-100 m 往深部,视电阻率表现为中高阻,推测为奥陶—寒武中上段白云岩地层。

2) 构造分析解释

点号 1900 和 2900 附近,从地表至深部,视电阻率曲线在横向上存在间断、错动现象,推测存在两条断裂破碎构造带 F_3、F_2。往剖面大号端(SE)倾斜,倾角约 70°,较为陡立,延伸至寒武系下段地层乃至更深。

点号 4200 m 附近,标高-1 000 m 往上,视电阻率曲线存在线性的在横向间断、错动现象,推测在该处存在断裂破碎带 F_1。往剖面大号端(SE)倾斜,倾角约 65°~70°,较为陡立。

通过分析认为,地层整体呈背斜构造,小号端往 NW 倾斜。地热资源盖层志留系砂岩地层厚度约 1 200 m;地热资源储水层奥陶—寒武系中上段白云岩地层厚度约 1 200~2 000 m;控热导热构造为断裂构造带 F_1、F_2、F_3,往剖面大号端(SE)倾斜,倾角约 65°~70°。通过广域电磁法勘探提供了两处地热资源有利靶区(蓝色虚线椭圆圈定)。

利用广域电磁法勘探查明了三叠—二叠系灰岩、志留系砂岩、奥陶—寒武系白云岩地层以及构造

万方数据

的产状及空间展布特征,符合地质模型规律,为地热资源钻孔提供了依据。

4　结论

1)对比剖面地质模型,可以看出通过 8:10~9:50、14:00~16:00 两个时间段观测,广域电磁法在本次大深度地热资源勘查中取得了良好的效果。

2)广域电磁法只测量电场数据进行广域视电阻率计算,不测量磁场数据,从而避免了磁场信号的干扰。相比于其他电磁类方法,一定程度上提高了在人文干扰区勘测的适用性,这是广域电磁法一突出优势。

3)广域电磁法反演结果清晰地反映了地下 3 km 以浅的地层和构造,证明广域电磁法是大深度勘探的有效工具。

4)广域电磁法应用于复杂电磁干扰环境时,建议先进行干扰场 12 h 或者 24 h 监测,了解电磁干扰场强度,摸清了工区电磁干扰规律,避开强干扰时间段进行观测。

5)本文以长时间监测干扰电磁场幅值的方法,来研究分时间段特征,达到了本次施工目的;也通过干扰评估单支曲线了解高、中、低频段信号干扰强度差异。下一步计划继续研究干扰信号频率本身特征,拟通过滤波手段改善复杂电磁干扰区广域电磁法的信号质量。

参考文献(References):

[1] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065-1072.
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods[J].Journal of Central South University:Science and Technology,2010,41(3):1065-1072.

[2] 米晓利,朱永山,周自涵,等.大功率建场测深法在油区高干扰区深层地热勘探方面的试验研究[J].工程地球物理学报,2018,15(6):742-748.
Mi X L,Zhu Y S,Zhou Z H,et al.The Experimental research of high power excited electric field sounding method in deep geothermal exploration of high interference region of oil field[J].Chinese Journal of Engineering Geophysics,2018,15(6):742-748.

[3] 年兴平.抗干扰电法在可可塔勒铅锌矿区中的应用[J].新疆有色金属,2019(1):77-78.
Nian X P.Application of anti-interference electric method in Keotale lead zinc mine[J].Xinjiang Nonferrous Metals,2019(1):77-78.

[4] 武军杰,邓晓红,张杰,等.强干扰区电磁法勘探抗干扰措施及效果分析[J].物探化探计算技术,2013,35(1):40-46.
Wu J J,Deng X H,Zhang J,et al.Anti interference measures and effect analysis of electromagnetic exploration in strong interference area[J].Computing Techniques for Geophysical and Geochmical Exploration,2013,35(1):40-46.

[5] 黄昌庆.基于强干扰区电磁法勘探抗干扰措施及效果探讨[J].世界有色金属,2018(11):241-242.
Huang C Q.A discussion on anti-jamming measures and effects based on electromagnetic interference method in strong jamming area[J].World Nonferrous Metals,2018(11):241-242.

[6] 黄敏,张开元.强干扰区可控源音频大地电磁勘探处理研究[J].中国西部科技,2015,14(1):26-28,34.
Huang M,Zhang K Y.The explore on CSAMT data processing affected by strong electromagnetic disturbance[J].Science and Technology of West China,2015,14(1):26-28,34.

[7] 封绍武,刘文增,杨晓东.强干扰区瞬变电磁法勘查采空区效果[J].物探与化探,2010,34(2):195-197.
Feng S W,Liu W Z,Yang X D.The effectiveness of applying the transient electromagnetic method in high interference area to the exploration of mined out areas[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2010,34(2):195-197.

[8] 汤井田,徐志敏,肖晓,等.庐枞矿集区大地电磁测深噪声的影响规律[J].地球物理学报,2012,55(12):4147-4159.
Tang J T,Xu Z M,Xiao X,et al.Effect rules of strong noise on magneto telluric (MT) sounding in the Luzong ore cluster area[J].Chinese Journal of Geophysics,2012,55(12):4147-4149.

[9] 白登海,王立凤,孙洁,等.城市活断层探测中电磁噪音和环境干扰对浅层电磁方法的影响[J].地震地质,2002,24(4):549-556.
Bai D H,Wang L F,Sun J,et al.Effects of urban noise on electromagnetic methods[J].Seismology and Geology,2002,24(4):549-556.

[10] 胡耀星.综合电法在干扰区石墨矿勘查中的应用[J].中国非金属矿工业导刊,2015(4):29-33.
Hu Y X.Application of comprehensive electrical method in the jamming area of graphite ore deposit[J].China Non-metallic Minerals Industry,2015(4):29-33.

[11] 颜廷杰,王赛昕,马一行,等.人文干扰对电法勘探的影响及应对措施[J].矿产勘查,2016,7(4):634-639.
Yan T J,Wang S X,Ma Y X,et al.Influence of human interference on application of electrical prospecting and corresponding anti-interference measures[J].Mineral Exploration,2016,7(4):634-639.

[12] 黄力军.物探方法在地热调查中的应用效果[J].物探与化探,1988,12(2):129-133.
Huang L J.The application result of geophysical method in geothermal survey[J].Geophysical and Geochemical Exploration,1988,12(2):129-133.

[13] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.
He J S.Wide-field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M].Beijing:Higher Education Press,2010.

[14] 李帝铨,胡艳芳.强干扰矿区中广域电磁法与 CSAMT 探测效果对比[J].物探与化探,2015,39(5):967-972.

万方数据

Li D Q, Hu Y F. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferential mining area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 967-972.

[15] 鲍力知.广域电磁法的主要特点[J].贵州地质,2013,30(1):9-13.
Bao L Z. Main features of the wide-field electromagnetic method [J]. Guizhou Geology, 2010, 30(1): 9-13.

[16] 郑冰.过渡区条件下广域电磁法探测深度问题的理论研究[J].物探与化探,2016,40(1):78-82.
Zheng B. A theoretical study of the detection depth of WFEM under the condition of transition zone[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 78-82.

Researches on the application of wide field electromagnetic method to the complex electromagnetic interference environment: Exemplified by the geothermal exploration around a city

ZENG He-Sheng, XU Yuan-Zhang, LIU Lei, TANG Bao-Shan, ZHANG Yi-Ran, LI Yi, CHEN Yu-Feng

(*Geophysical Exploration Party of Hubei Bureau of Geology, Wuhan* 430056, *China*)

Abstract: The wide field electromagnetic method establishes a harmonic electromagnetic field through an artificial ground field source, sends alternating currents of different frequencies to the ground, and surveys one or more electromagnetic field components to detect geological targets of different buried depths with wide field apparent resistivity. In this method, high power and strong artificial field is used to suppress the interference field to improve the signal-to-noise ratio. Under the environment of complex human noise interferences such as high voltage line, railway, factory building, mining area, substation and periphery of the city, the amplitude of interference field signal reaches hundreds or even thousands of microamplitude, and its intensity is greater than that of wide field electromagnetic artificial field signal, so it is difficult to achieve the suppression effect. In this paper, the large-scale exploration of geothermal resources around a city was taken as an example to study the application of wide field electromagnetic method in the complex electromagnetic interference environment, with good quality observation data obtained. This example provides a direction for the application of wide area electromagnetic method in the complex electromagnetic interference environment.

Key words: wide field electromagnetic method; complex electromagnetic interference environment; large-scale exploration of geothermal resources

(本文编辑:叶佩)

万方数据