

doi: 10.11720/wtyht.2017.4.14

曹彦荣,宋涛,韩红庆,等.用广域电磁法勘查深层地热资源[J].物探与化探,2017,41(4):678-683.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.14

Cao Y R, Song T, Han H Q, et al. Exploration of deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(4): 678-683. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.4.14

用广域电磁法勘查深层地热资源

曹彦荣^{1,2}, 宋涛², 韩红庆², 孟云琪²

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 江苏省有色金属华东地质勘查局 八一四队, 江苏 南京 210007)

摘要: 使用广域电磁法勘查了江苏省仪征市捺山地区的深层地热资源, 查明了工区的第一热水储层和第二热水储层, 钻遇储层出水量大、温度高。勘查结果显示广域电磁法是一种高效的深层地热能资源地球物理勘查方法, 具有深度大、分辨率高、野外数据采集快等优点, 勘查深度超过 1 500 m, 是深层地热能资源勘查主要的地球物理勘查方法。

关键词: 广域电磁法; 地热; 广域电阻率

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2017)04-0678-06

0 引言

狭义的地热资源是指地下稳定、清洁、温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的热水。根据埋藏深度对地热资源进行划分, 目前仍没有统一的定论, 但一般来说, 埋藏深度 $\leq 200\text{ m}$ 的热水为浅层地热资源, 埋藏深度在 $200 \sim 1\,500\text{ m}$ 之间的热水为中层地热资源, 埋藏深度 $\geq 1\,500\text{ m}$ 的热水为深层地热资源。中、深层地热资源具有分布广、资源储量大、水质不受污染、出水稳定等优点, 集“热、矿、水”为一体而能被综合利用, 从而成为市场潜力大、发展前景广、日益受到人们重视的清洁能源^[1-3]。

常规勘查地热资源的地球物理方法有重力方法, 磁力方法, 对称四极测深法、大地电磁测深法 (MT) 和可控源音频大地电磁法 (CSAMT)。重力、磁力方法主要用于勘查与地热资源相关的构造; 对称四极测深法主要用于浅层地热资源的勘查; MT 法适用于勘查深层地热资源的构造; CSAMT 法使用了人工场源, 实践中有效勘查深度小于 $1\,500\text{ m}$ ^[4-5]。笔者将广域电磁法应用在江苏省仪征市捺山地区的深层地热资源勘查中, 取得了良好的效果。

1 广域电磁法基本原理

均匀大地表面水平电流源的电场沿 x 方向的分量表示为

$$E_x = \frac{I\rho dL}{2\pi r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (1)$$

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

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN} \quad (2)$$

则式(1)可以转换为

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \cdot \frac{1}{f_{E-E_x}(ikr)} \quad (3)$$

$$f_{E-E_x}(ikr) = 1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)。$$

式中, $f_{E-E_x}(ikr)$ 为 r 、 k 、 ρ 及 φ 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。

式(3)定义了广域电阻率, 是整个广域电磁法

收稿日期: 2017-01-13

作者简介: 曹彦荣 (1985-), 男, 南京大学硕士研究生, 从事地球物理勘查科研、生产工作。

万方数据

的基础,用适合全域的,不进行简化的公式进行计算机编程迭代反演,在包括远区、过渡区甚至一部分近区的广大区域内开展电磁测深,扩展了人工源电磁法的观测范围,因此将其称为广域电磁法^[4]。

应用广域电磁法进行深层地热勘查的优势在于:①广域电磁法定义的电阻率公式是没有经过任何简化的电偶极源公式,反应的是地下真实的电阻率,可以在满足偶极子条件的广大区域开展测量工作,用较小的收发距即可获得较大的勘查深度^[4];②相对于CSAMT法发射电流一般为10 A而言,广域电磁法的发射电流超过100 A,信噪比得到了极大的提高,深部热储区的电阻率分辨率也得到了较大的提高。

2 工区地质、水文和地球物理特征

2.1 地质特征

工区位于江苏省仪征市月塘镇,总面积3.2 km²(图1),工区地层见表1。

在工区东侧,基性岩喷发活动痕迹明显,从而为地热资源的勘查奠定了良好的基础。基性岩喷发活动为中心式喷发,喷发形成的基性岩由玄武岩、火山碎屑岩组成,以玄武岩为主,岩石覆盖在新近系雨花台组(N_y)之上^[10-11]。基性岩喷发活动发生于新近纪中新世晚期,距今约1 000 万年。

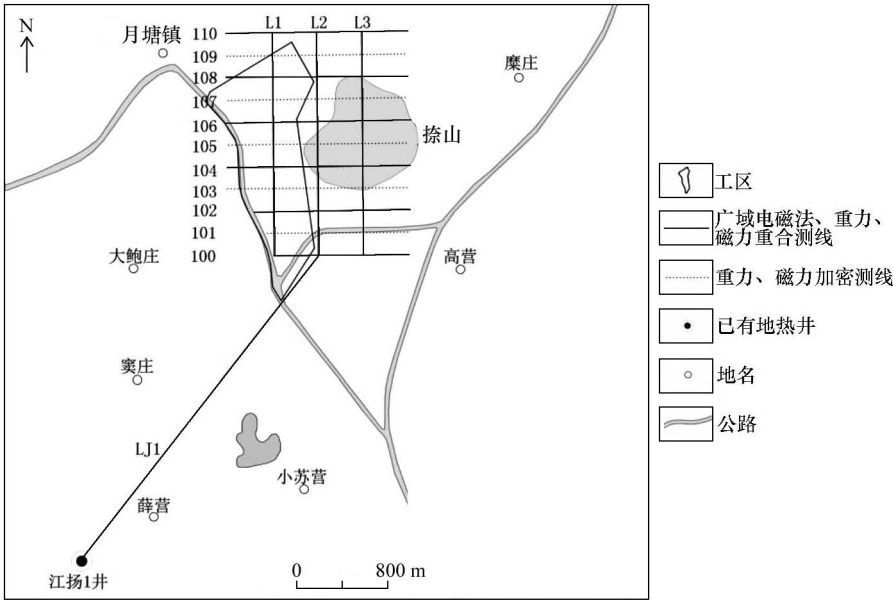


图1 月塘镇工区物探测线布置

表1 工区地层概况

序号	地层名称	特征描述
1	第四系东台组(Qd)	上部土黄色黏土层夹灰色粉砂层;中部灰白色砂、砾层;下部灰白色砂、砾石层
2	新近系雨花台组(Ny)	上部灰绿色黏土、灰白色砂、砾石层;中部块状浅棕色黏土;下部灰白色砂、砾石层
3	白垩系浦口组(K ₂ p)	棕色泥岩、膏质钙质砂岩、含砾砂岩、砂砾岩
4	侏罗系象山群(J ₁₋₂ x)	上部褐红、灰紫粉砂岩泥岩、灰白石英砂岩、灰色细砂岩;中部灰、棕黄细砂岩、泥质粉砂岩、暗紫、深灰粉砂质泥岩、细砂岩;下部褐灰、灰紫粉砂岩、细砂岩、石英细砂岩夹砂质泥岩
5	奥陶系(O)	灰岩、白云岩、硅质岩为主,岩溶、裂隙较发育

2.2 水文特征

1) 第四系—新近系孔隙水

东台组(Qd)、雨花台组(Ny)多为松散沉积物,所以孔隙度大,加上南方降雨充沛,因此此两套地层
万方数据

富水性好,为区域上强含水层。由于埋深小,不是热水储层。

2) 基岩裂隙水

基性岩(N_B):裂隙发育一般,为浅层裂隙含水

层,属弱含水层。由于埋深小,不是热水储层。

浦口组(K_2p):中砂岩、砂砾岩,岩性脆,所以裂隙发育,但由于地层中含泥岩、膏质钙质,导致含水性分布不均匀,为中强含水层。由于埋深小,区域上不是热水储层。

象山群($J_{1-2}x$):含水性因岩性的不同而不同,显层状分布特征。中下部细砂岩,性脆,裂隙发育,为中强含水层,区域上属第一热水储层,工区外的江扬1井即抽取该层热水(图1)。

表 2 工区物性分层

地层	岩性	密度/(g/cm^3)	平均电阻率/($\Omega \cdot m$)	磁化率/ $10^{-5}SI$
第四系—新近系($Qd-Ny$)	松散沉积物、砂砾、黏土	2.10(低密度层)	9(低阻层)	7~46(弱磁性)
浦口组(K_2p)	砂岩、砾砂岩	2.39(中密度层)	41(中阻层)	
象山群($J_{1-2}x$)	泥岩、粉砂岩和细砂岩	2.47(中密度层)	25(低阻层)	
奥陶系(O)	灰岩	2.70(高密度层)	270(高阻层)	>1000(高磁性)
基性岩($N\beta$)	玄武岩、火山碎屑岩	2.80(高密度层)	>1000(高阻层)	

3 野外施工

3.1 测线布置

野外测线布置如图1,广域电磁法测线共10条,测线总长度18.35 km,点距50 m,共计376个测点。根据测线走向分为3种类型:EW走向测线6条,线距400 m,编号为100、102、104、106、108、110;SN向测线3条,编号为L1、L2、L3,线距400 m;测线LJ1连接江扬1井,,长度3 400 m。

断裂具有导水、导热的作用,有利于地热资源的形成,为印证广域电磁法对断裂的解释精度,还布置了与广域电磁法同点位的重力、磁力测线。另外在工区内的EW向加密了5条重力、磁力测线,编号101、103、105、107、109,测线网度为200 m×50 m,总长度20 km^[13]。

3.2 数据采集

施工中,广域电磁法供电方式为偶极供电,测量水平电场分量 E_x ,野外布置采用 $E-E_x$ 工作模式。

供电电极距为1 km,收发距10 km,发射采用大功率发电机发射,最大供电电流110 A,最小发射电流75 A。工作频率选取11频组、9频组、7频组、5频组、3频组和1频组,确保所有的频组均匀分布,频率最高为8 192 Hz,频率最低为0.011 7 Hz。

4 成果解释

把野外采集到的数据输入到根据公式(3)编制

3) 碳酸盐岩裂隙岩溶水

奥陶系(O),埋藏深,表层经长时间抬升剥蚀,形成大面积古风化壳、溶蚀带,裂隙发育,为深层中强含水层,区域上属第二热水储层。

2.3 地球物理特征

为了精确反演工区广域电磁法采集的数据,采集了工区内外不同地层共120块标本进行了密度、磁化率与电阻率的测定,物性分层见表2,为工区广域电阻率的反演和重磁电联合解释奠定了基础^[12]。

出来的数据处理系统中,根据工区物性分层(表2)结合野外地质踏勘,可得到测线剖面综合解释。下面以106线和L2线为例进行说明^[14-15]。

4.1 106 测线剖面解释

100测点为测线西端点,132测点为测线东端点。根据广域电磁法反演剖面(图2a)可以发现:100~118测点,0~-50 m,低阻层,呈水平层状,属第四系—新近系;118~132测点,高阻层,为基性岩出露区;-50~-300 m,中阻层,解释为白垩系浦口组,其中东部电阻相对高区域解释为浦口组局部砾石聚集区引起的局部高阻;-300~-2 200 m低阻带,推测为侏罗系象山群细砂岩、粉砂岩与泥岩,从江扬1井揭露的资料分析可知,该套地层有数层含水层,孔隙度高,含水量大,且有一定的埋深,有F3和F4正断层,导热、导水条件较好,为工区第一热水储层;-2 200~-2 600 m为低阻到高阻过渡带,呈不规则分布,由于区域上奥陶系与侏罗系不整合接触,奥陶系长时间遭受风化剥蚀作用,顶部发育灰岩溶蚀带,推测该过渡带为古风化壳,具有较好的热储条件,为本区第二热水储层。

布格重力异常(图2b)显示总体西低东高,反映基底总体向东显上升趋势。重力水平总梯度显示,断层发育位置为109号点附近发育正断层F3,倾向W,倾角80°;121号点发育正断层F4,倾向W,倾角85°(图2c)。

磁力异常西部较平稳,显示下部没有隐伏岩浆岩发育,115号点向东跳动剧烈,正负异常伴生,反

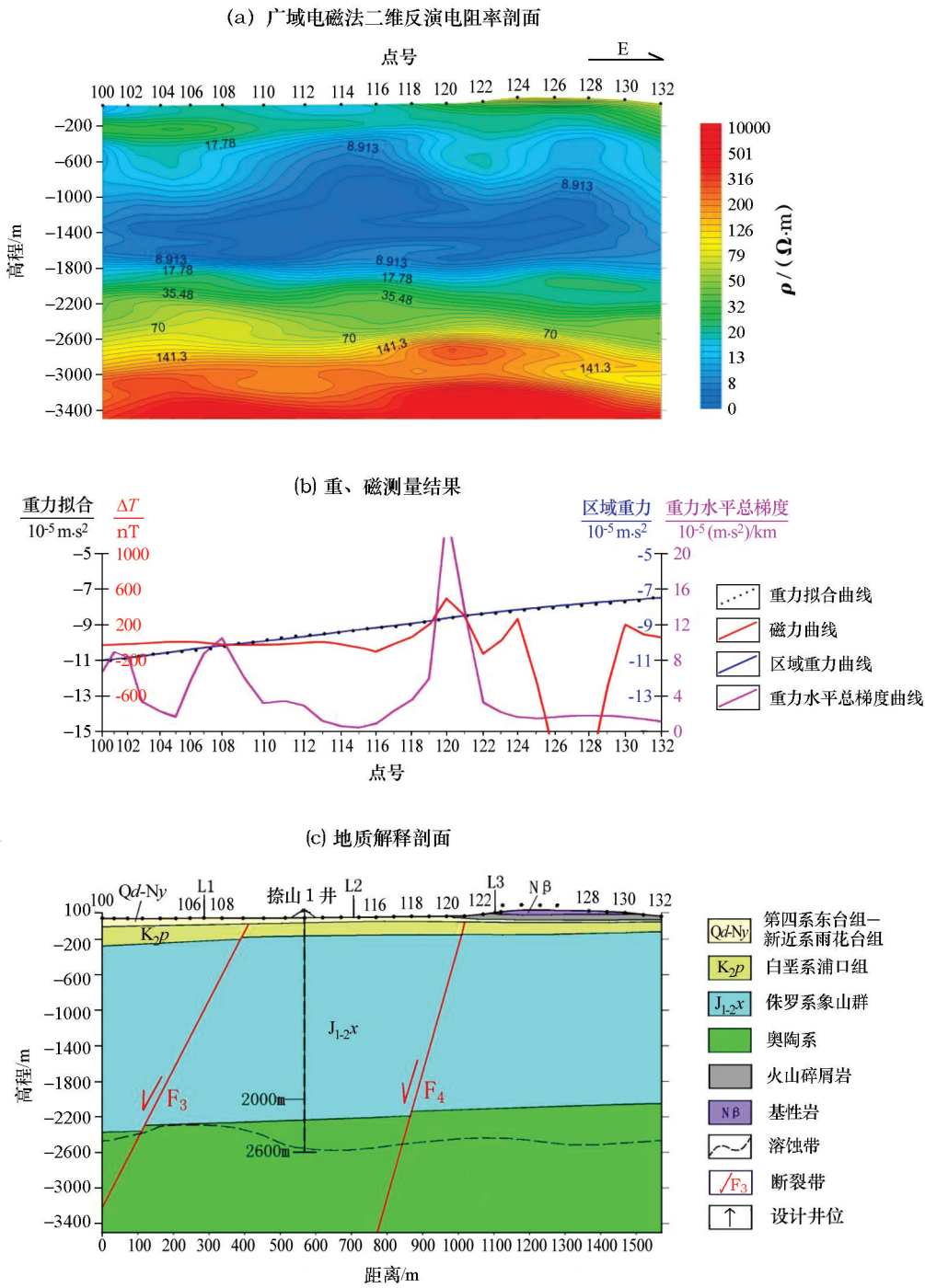


图 2 月塘镇测区 106 线物探勘探结果

映岩浆岩的存在。

4.2 L2 测线剖面解释

从广域电磁反演断面(图 3a)看:表层 0~50 m,除 112~122 号测点高阻层为基性岩出露区外,其余地方为低阻层,呈水平层状,属第四系一新近系;-50~-260 m,中阻层,推测为白垩系浦口组;-260~-2 200 m,低阻层,推测为侏罗系象山群,从江扬 1 井揭露的资料分析可知,该套地层有数层含水层,孔隙度高,含水量大,且在本区有一定的埋深,F4 正断

层具有较好的导热、导水条件,为工区第一热水储层-2 200~-2 700 m 为低阻到高阻过渡带,呈不规则分布,由于区内奥陶系与侏罗系不整合接触,奥陶系长时间遭受风化剥蚀作用,顶部发育灰岩溶蚀带,推测该过渡带为岩溶发育的古风化壳,具有较好的热储条件,为本区第二热水储层。剖面上端点 S 为 100 号测点,N 为 140 号测点。112~114、123~130 号测点为新近系雨花台组;114~123 号测点为基性岩出露,其它地方被第四系覆盖。

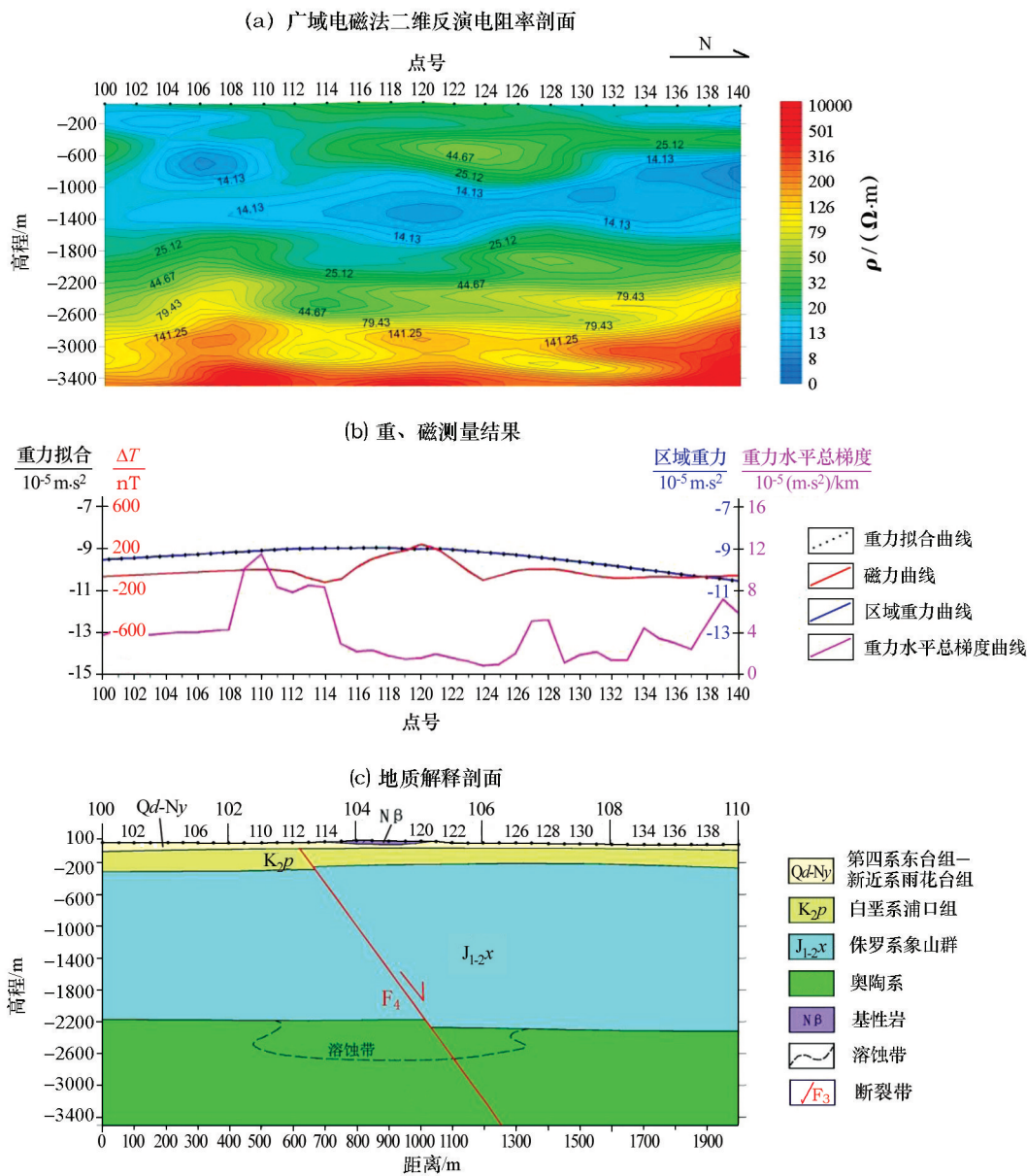


图 3 月塘镇测区 L2 线物探勘查结果

区域重力异常显示基底南北向起伏较小。重力水平总梯度显示 112 号测点发育有正断层 F4,倾向 N, 倾角约为 85°。剖面中段磁力异常有起伏,显示有基性岩存在,两端趋于平稳,回归正常场。

5 地热井钻探

为了验证广域电磁法的结果,在 106 测线 112 点处布置了设计井——捺山 1 井(图 2),该井位于 L2 测线西 138 m,井深 2 600 m。在该处设计地热井理由有:设计井濒临剖面中段,而剖面中段磁力异常有波动,显示有基性岩存在,从而具有良好的热源基础;位于 F3、F4 两条正断层之间,具有较好的导热、导水条件,广域电阻率反演推断深部 2 200~2 600 m

附近溶蚀带发育,地下水丰富。

通过钻孔验证,工区第一热水储层为侏罗系粉砂岩、细砂岩含水层,深度 800~1 500 m,发育数层含水层,出水量为 621 m³/d(自流量),出水温度为 46℃;奥陶系溶蚀带为工区第二热水储层,含水层深度 2 550 m,出水量 872 m³/d(自流量),出水温度 57.5~74.2℃,平均热水温度 66℃,平均地温梯度 2.58℃/100 m。

6 结论

1) 广域电磁法在深层地热资源勘查中,获得的资料质量佳、可信度高、细节丰富,是一种高效的深层地热资源勘查地球物理方法,勘查深度超过

1 500 m。

2) 对称四极测深法主要用于浅层地热资源的勘查;MT 法适用于勘查深层地热资源的构造,但对构造的分辨率较低;CSAMT 法受制于“远区”测量,人工信号受到严重削弱,深层地热能资源的开发,使得广域电磁法有望成为主要的地球物理勘查方法。

3) 为了印证广域电磁法对断裂的解释精度,最好布置几条重力、磁力测线。

参考文献:

[1] 陈墨香,汪集旸.中国地热资源形成特点和潜力评估[M].北京:地质出版社,1994.

[2] 郝雅玲,师谦友.西安市低碳旅游发展现状及策略研究[J].河南科学,2015,33(6):1025-1031.

[3] 李勇.陕西省安康市循环经济发展评价研究[J].河南科学,2015,33(5):854-856.

[4] 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.

[5] 陈雄.地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究[D].长春:吉林大学,2016.

[6] 鲍力知.广域电磁法的主要特点[J].贵州地质,2013,30(1):9-13.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 朱裕振,许聪悦.广域电磁法深部找矿实验效果[J].物探与化探,2011,35(6):743-746.

[10] 周晓丹,仇晓燕,等.江苏仪征捺山火山机构及玄武岩石柱林[J].江苏地质,2007,31(3):212-217.

[11] 胡秀艳.扬州市江都区地热资源前景分析[J].地质学刊,2014,38(2):339-342.

[12] 刘磊,胡雪冰.车排子地区东北部火山岩岩性-测井相特征及识别[J].河南科学,2016,34(6):936-942.

[13] 中华人民共和国国土资源部.浅层地热能勘查评价规范[S].2009:DZ/T 0225-2009.

[14] 符超,袁博,李学兰.广域电磁法在保靖页岩气勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2016,13(4):416-422.

[15] 李爱勇,朱春生,杨生.南京汤山温泉形成条件探讨[J].矿产勘查,2010,1(6):546-549.

Exploration of deep geothermal energy resources
with wide field electromagnetic method

CAO Yan-Rong^{1,2}, SONG Tao², HAN Hong-Qing², MENG Yun-Qi²

(1.School of Earth Science and Engineering,Nanjing University,Nanjing 210023,China; 2.No.814 Geological Party,East China Bureau of Nonferrous Metal Geological Exploration,Nanjing 210007,China)

Abstract: The basic principle and advantages of wide field electromagnetic method have been introduced. Deep geothermal resources in Nashan area of Yizheng, Jiangsu province have been explored by way of wide field electromagnetic method, and identified the first hot water reservoir and second hot water reservoir which have big output and high temperature. Results show that wide field electromagnetic method is an effective geophysical exploration method for deep geothermal energy resources. It has advantages of deep survey, high resolution, fast data acquisition and so on. Its exploration depth is more than 1 500 meters. So, it will become main geophysical exploration method for deep geothermal energy resources.

Key words: wide field electromagnetic method; geothermal; resistivity of wide field electromagnetic method

(本文编辑:沈效群)