

doi: 10.11720/wtyht.2020.1526

董耀,李光辉,高鹏举,等.微动勘查技术在地热勘探中的应用[J].物探与化探,2020,44(6):1345-1351.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1526>

Dong Y, Li G H, Gao P J, et al. The application of fretting exploration technology in the exploration of middle and deep clean energy[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1345-1351. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1526>

微动勘查技术在地热勘探中的应用

董耀¹, 李光辉¹, 高鹏举², 任静¹, 肖娟¹

(1. 河南省航空物探遥感中心, 河南 郑州 450053; 2. 中国地质科学院 勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 随着能源改革进一步推进, 地热能这种中深层清洁能源的勘探开发利用迫在眉睫, 目前勘探开发利用重点在中深层位, 且主要在城区, 限制了常规地震、大地电磁等物探方法的使用, 需引进新方法。本文通过微动勘查技术在某城区开展相关实验, 对比以往高精度重力、大地电磁测深、地热孔等资料, 验证了本次微动实验成果, 解释推断的地层划分和构造位置与已知资料基本吻合, 值得进一步研究和推广, 对实现微动勘查技术在中深层地热能资源快速勘探开发具有重要意义。

关键词: 微动勘查技术; 频散曲线; 中深层清洁能源; 地热井

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)06-1345-07

0 引言

煤、石油、天然气等常规能源的开采、使用带来一定的环境问题, 能源升级和环境保护已成为全球迫切需要解决的问题。目前, 我国已进入中深层清洁能源——地热能开发利用高峰。对于中深层的地热勘探, 经济、快捷有效的地球物理方法主要为^[1]: 高精度重力测量、大地电磁测深, 人工地震等^[2]。不同的探测方法均存在一定的局限^[3]。

高精度重力测量具有探测效率高、施工成本低等方面优势明显, 但在建筑区、城市地质工作中近区、中区地改困难, 目前仍然在探索中。人工地震勘探的勘探深度大, 地层岩性分辨率高、误差小, 但是其成本高, 施工方法复杂。在城市人口稠密区或景区工作较为困难; 大地电磁测深虽然相对成本低、费时短, 但其异常解释存在多解性, 且工作时易受干扰^[4], 建筑区域电磁勘探很难实现地质效果。

微动勘查利用天然源面波法, 具有简便、快捷、低成本、对周围环境无特殊要求的特点^[5], 在电、

磁、重、震干扰严重的城镇开展地质勘查方法优势明显。引进微动勘查技术, 开展应用研究, 解决城市地质问题意义重大。微动探测技术通过天然场源微动信号提取频散曲线、相速度, 经反演获取相应深度视横波速度, 进而刻画视横波速度结构图。微动探测技术通过分析地质体与围岩(土)的波速差异, 查明或解决有关城市工程地质问题^[6]。微动探测技术不同于传统的瞬变电磁、地质雷达、电阻率法等, 该方法受场地电磁干扰及高低速夹层、低阻高导层屏蔽作用影响较少^[7]; 较适合城市闹市区复杂场地和电磁环境, 是一种环保、抗干扰能力强、探测深度大、适用范围广的新型物探技术^[7], 具有良好的工程应用前景。为检验微动探测技术在城市地质地热勘探中的应用效果, 选择豫北某县城两已知地热井并设置微动测线, 在综合以往物探、地质成果的基础上, 开展实验应用研究, 取得了较好的成果。

1 实验区地质概况

1.1 地层概况

选择豫北某县城作为实验研究区, 结合以往物

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2020-09-27

基金项目: 河南省地矿局科研项目(豫地矿科研[2018]11号); 河南省航空物探遥感中心自主科研项目(豫航物遥[2018]25号)

作者简介: 董耀(1987-), 男, 河南新蔡人, 工程师, 2013年硕士毕业于中国地质大学(北京), 研究方向为综合地震、电磁法、重力勘探等。

Email: dongyaocugb@163.com

探、地质和钻探资料可知,区内地层从老至新依次为太古宇、震旦系、寒武系、奥陶系中统马家沟组、石炭系上统本溪组与太原组、二叠系下统山西组、下石盒子组与上统上石盒子组、三叠系、侏罗系、白垩系及新生界的古近系、新近系及第四系^[8]。

1.2 地热地质条件

根据地热资源形成与控制其分布的主要地质条件,实验区地热系统主要为沉积盆地传导型和断裂构造对流型地热田^[9]。

实验区地热田位于东濮凹陷埋藏型地热田的东部,是由新生界盖层、新生界热储层、中生界、古生界热储层构成的地热系统^[10]。实验区地下热水的热储:寒武—奥陶系岩溶裂隙热储^[11];聊兰断裂带状热储。

1.3 构造

实验区位于新华夏第二沉降带东濮凹陷与菏泽凸起的交汇地带,区域地质构造简单(图1),工区位于菏泽凸起的西部边缘。东濮凹陷区内长期处于沉降状态,沉积了巨厚的松散堆积层^[10],构造形迹以断裂和褶皱为主,均呈隐伏状态,区内地质构造主要特点是继承性和差异性运动,燕山运动以来,随着华北平原的沉降,本区仍继续下降,堆积了巨厚的新生界沉积物,新近系及第四系总厚度达1 100 m 以上。工作区 NNE 向构造主要为聊兰断层。根据以往物探、地质工作,断层切割的最新地层为新近系,落差大于3 000 m,近期尚有地震活动。该区为良好的实验场地。

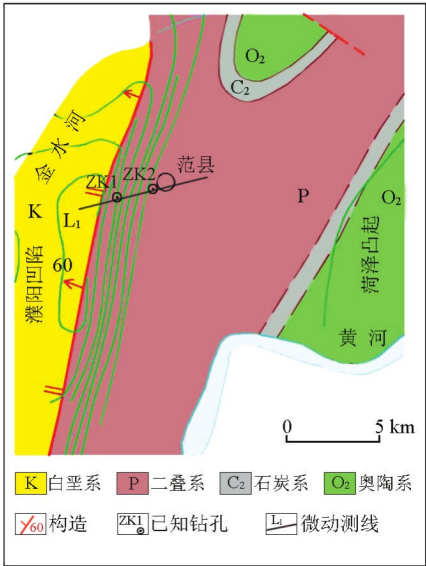


图 1 区域地质图

Fig.1 Regional geological map

万方数据

2 地球物理基础

2.1 区域重力场特征

该区地球物理场较简单,主要表现为 NW—WS 向重力低值区。NE、E、ES 三面被重力梯度陡变带所围绕,重力梯度值在 $(-7 \sim 19) \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{km}$ 之间,见图2,微动测线中间为重力梯度最大值,推断为近 SN 向构造带。

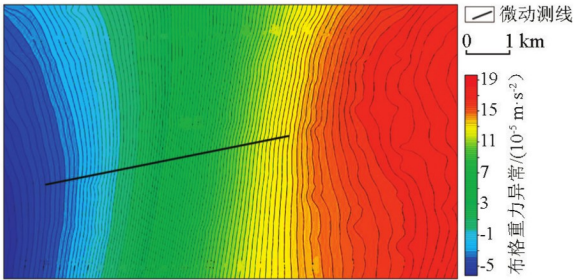


图 2 区域布格重力异常图

Fig.2 Regional bouguer gravity anomaly map

2.2 区域磁场特征

研究区为区域磁场变现为升高的正磁和大片高强度负磁(图3);展布方向为 NE—SW 向、NW—SE 向,极个别的为等轴。局部异常不太发育,多叠加在正磁场之上。偶见以正、负伴生形式插入负背景磁场之中,图中范县位于梯度带中心,推断为近 SN 向构造带。

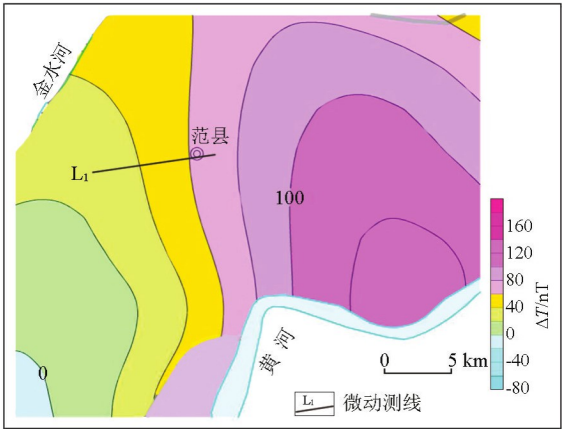


图 3 区域磁场特征

Fig.3 Regional magnetic field characteristics

2.3 地层的电性特征

从本区电性参数(表1)可知,本区地层电阻率从新到老有逐渐增大的趋势,新生界、中生界地层电阻率一般小于 $200 \Omega \cdot \text{m}$ ^[12];石炭系、奥陶系及寒武系在 $60 \sim 1500 \Omega \cdot \text{m}$ 。

表 1 河南省地层、岩矿物性统计

Table 1 Statistics of strata and rock mineralogy in Henan Province

地层单位			主要岩性	电阻率/(Ω·m)
界	群(系)	代号		
新生界	第四系	Q	黄土	10~200
	新近系—古近系	E-N	粘土岩、砂岩	3~200
中生界	白垩系	K	泥岩、粉砂质泥岩、泥灰岩、砾岩	100~200
	侏罗系	J	石英砂岩、泥岩、煤层、砾岩	100~200
	三叠系	T	砂岩、粉砂岩、泥岩互层	80~200
古生界	二叠系	P	砂岩、页岩、粘土岩	20~400
	石炭系	C ₂	粘土岩、炭质页岩、灰岩	60~200
	奥陶系	O	灰岩	
	寒武系	Є	白云岩、灰岩、页岩	60~1500
古元古界	震旦系	Z	石英岩、白云大理岩、绢云石英片岩	100~350
太古宇		Ar	黑云斜长片麻岩、斜长角闪片岩、黑云变粒岩、二云石英片岩	100~2000

3 微动探测基本工作原理

3.1 微动特点

微动是一种没有特定震源的微弱振动,其振幅约为 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ mm}^{[13]}$ 。微动震源主要分为人类活动和自然场两大类,人类活动包括各种机械振动、道路交通等,产生的信号频率大于 1 Hz ,属高频信号源,通常被称为常时微动;自然场包括海浪对海岸撞击,河水流动,风、雨、气压变化等,信号频率小于 1 Hz ,属于低频信号源,通常被称为长波微动。震源距离台阵较近时,微动波场包含体波和面波^[14];震源距离台阵较远时,微动波场主要包含面波^[14]。

微动是由体波和面波组成,其中面波的能量占信号能量的70%以上,大部分的能量以基阶模式传播,实际应用中常利用面波中的瑞利波信息。

3.2 空间自相关函数

如图4所示,假设将1点视为空间坐标原点,在1点布设一个测点,以1点为圆心, r 为半径的圆周上设置 n 个测点,形成一个圆形观测台阵,其中圆周上第3个测点与第4、2个测点相邻,且测点间的角度相等为 θ 。那么可得1点与3点记录的空间自相关函数为:

$$S(r, \theta_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X^*(t, 0, 0) X(t, r, \theta_i) dt, \quad (1)$$

整理可得:

$$\bar{S}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} h(\omega, \phi) d\omega d\theta \cdot \exp[ikr\cos(\theta - \phi)] d\theta$$

万方数据

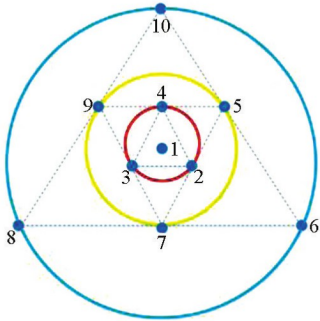


图 4 微动面波观测系统

Fig.4 Observation system of fretting surface wave

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} h(\omega, \phi) J_0(kr) d\omega d\phi, \quad (2)$$

其中: $J_0(k_r)$ 为零阶第一类 Bessel 函数。那么可得:

$$\begin{aligned} \bar{S}(r, \omega_0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} P(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0) J_0(kr) d\omega \\ &= S_0(\omega_0) J_0[k(\omega_0)r], \end{aligned} \quad (3)$$

定义空间自相关系数 $\rho(r, \omega_0)$ 为:

$$\begin{aligned} \rho(r, \omega_0) &= \bar{S}(r, \omega_0) / S_0(r, \omega_0) \\ &= J_0[k(\omega_0)r]. \end{aligned} \quad (4)$$

从上式分析,空间自相关系数与 ω 有关,且呈零阶第一类 Bessel 函数形式变化,因瑞利波数与相速度 $c(\omega)$ 之间有 $k(\omega) = \omega / c(\omega)$,式(4)可写成:

$$\rho(r, \omega) = J_0[r\omega / c(\omega)]. \quad (5)$$

空间自相关法 (SPAC) 是固定距离 r ,从圆形台阵采集的微动数据中在计算任意频率 f_0 的空间自相关系数 ρ_0 ,拟合第一类零阶 Bessel 函数^[15],求取相对应的相速度 $c(f_0)$;进而逐个获取所需频带范围内的 f - c 频散点,经过光滑处理以后,获得连续的频散曲线。对于某一给定频率 f 来说,满足上式的 c 值不止一个。亦即一个 f 对应多个 c ,即多解性较

强,应用较麻烦。

冈田广、凌甦群等优化了空间自相关方法,即扩展的空间自相关法(ESPA C)^[16],该方法可以在不同观测半径的多重阵列中使用。固定频率 f , 即 $f=f_0$, $c(f_0)=c_0$, $B=2\pi f_0/c_0$ (B 为常数), 则:

$$\rho(f)=J_0[Bf/c(f)]。$$

(6)

相速度 c 是距离 r 的函数,为单值函数关系,当有多个 r 的情况,与第一类零阶贝塞尔函数拟合,可以计算出唯一相速度值 c ,极大提高了计算速度。

4 微动实验数据采集

实验研究工作采用采集站位 GN201,检波器为 PS-D01 超高灵敏度低频速度传感器。

4.1 地热孔实验

实验点选择在某地热孔(微动测点 13 号点),孔深:1 300 m。台阵半径实验(台阵最大半径 500、600、700 m);台站实验(一重圆、二重圆、三重圆);实验点观测时间 2h,对比分析了 0.5、1、1.5、2 h 单点

频散曲线图。

具体的实验工作如下:通过不同台阵半径实验对比分析,台阵半径越大,低频信息越丰富、连续(图 5);通过台站实验对比分析,检波器越多,频散曲线越连续(图 6);通过采集时间对比分析,时间越长,频散曲线越连续(图 7)。

通过台阵半径实验,结合 1 300 m 钻孔深度,600 m 半径台阵反演的有效探测深度达 1 500 m(图 5),满足研究实验目的,最终确定选择 600 m 半径台阵进行采集。测深与台阵半径关系约为 2.5 倍关系。

经实验分析,该研究区采用三重圆台阵施工(半径 150、300、600 m),采集时间为 1.5 h。

4.2 反演

微动面波频散可视为由地层厚度、横波速度、密度、泊松比决定的非线性函数问题,其反演计算实质上是一个多极值问题^[17],反演结果在较大程度上依赖初始模型,结合遗传算法是目前微动数据反演应用较多的方法,在一定程度上减少了多极值问题,处理结果逐渐趋向单一稳定。

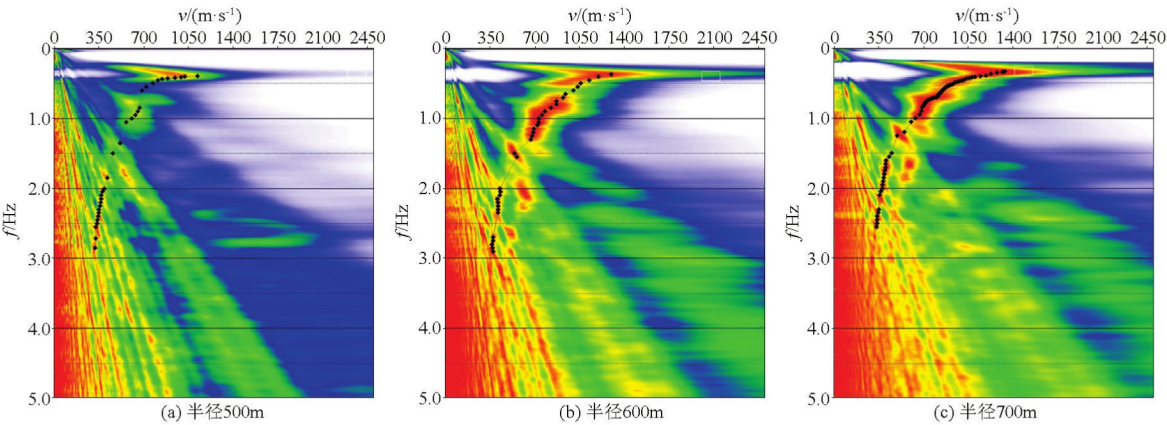


图 5 实验点最大半径有效探测深度实验

Fig.5 Maximum radius effective sounding depth test of test site

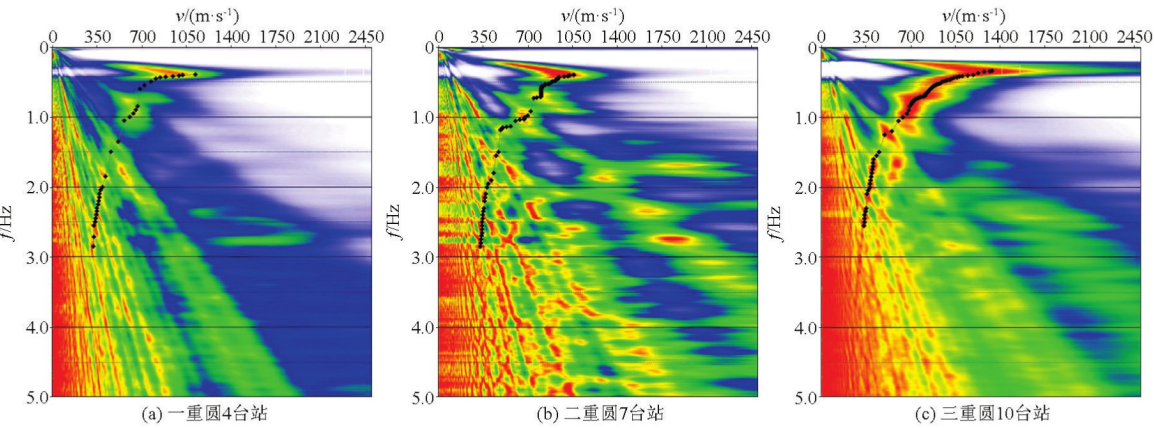


图 6 实验点台站有效探测实验

Fig.6 Test point station effective detection test

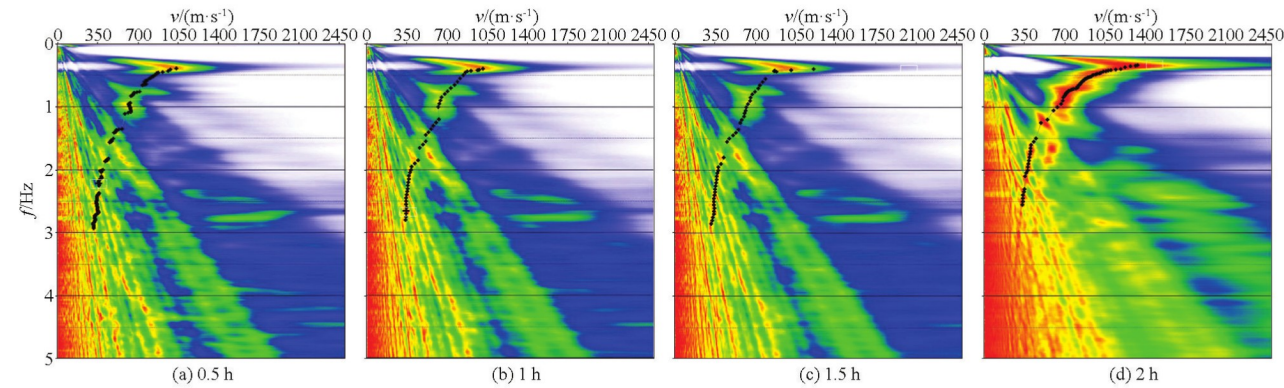


图 7 实验点 600 m 最大台阵半径有限时间实验

Fig.7 Test point 600 m maximum array radius finite time test

通过 Geogia Surface plus 软件集合频散曲线反演获得相速度、似横波速度剖面。本文选择豫北某地两个已知地热钻孔作为地质理论模型。

从图 8 可以看出,微动视横波速度值由浅入深逐渐增大,最小值 100 m/s,最大值 1900 m/s,上部和下部速度等值线异常似层状稳定,中部等值线异常形态表现为不稳定变化。似横波速度剖面在 1 827~2 400 m 段等值线表现为同向扭曲。结合剖面上两个已知地热井,第四系底界 271.8、232.9 m,对应的视横波速度值为 800 m/s;新近系底界 1 520 m(ZK1)深处对应的视横波速度值为 1 700 m/s,ZK2 地热孔 1 260 m 深度处(灰岩)对应视横波速度值在 1 700 m/s 左右。ZK1 钻入古近系 181.05 m,对应视横波速度值逐渐增大;ZK2 新近系下伏地层为寒武系,视横波速度值变化不大。

将微动剖面与已知钻孔地质成果对比,认为剖面视横波速度值小于 800 m/s 异常为第四系反映,视横波速度值在 800~1 700 m/s 为新近系反映。按照此原则推断解释地层剖面,地质解释成果与区域地质资料吻合较好,符合实际地质情况,在 1 827~

2 400 m 视横波速度等值线扭曲段推断解释为断裂 F₁ 反映,断距 220 m 左右,倾角 70°,从 ZK1 地热井底穿过,由此可知 ZK1 地热井终孔地处 F₁ 断裂影响带内。F₁ 断裂的推断很好地解释了 ZK1 地热井地处地下水有利位置。结合以往资料,推断解释为白衣阁断层(F₁),为聊兰断裂干支。

在 1 825~5 700 m 位置范围内,微动面波信息微弱,反演深度较浅,附近龙古 1 井及龙古 2 井揭露奥陶—寒武系灰岩厚度大于 782 m(未穿)、1 202 m(覆盖层下为灰岩),认为巨厚奥陶系—寒武系灰岩面起伏较大,对微动面波吸收衰减较强(与弹性波性质近似),未能接收到有效微动面波信息。

图 9 为早几年完成的大地电磁剖面,自上而下电性层显示为低阻—中高阻—高阻特征。浅部 200~400 m 为连续低阻,电阻率对数值小于 1.3,推测为第四系;下部 150~1 600 m 为低阻层,厚度约 700~1 200 m,电阻率对数值小于 1.6,推测为新近系;中高阻层电阻率对数值小于 2.0,主要位于 F₁ 断层左侧,推测为古近系、白垩系、侏罗系,厚度约 2 000 m;下部相对高阻层,推测为石炭系、奥陶系、寒武系。

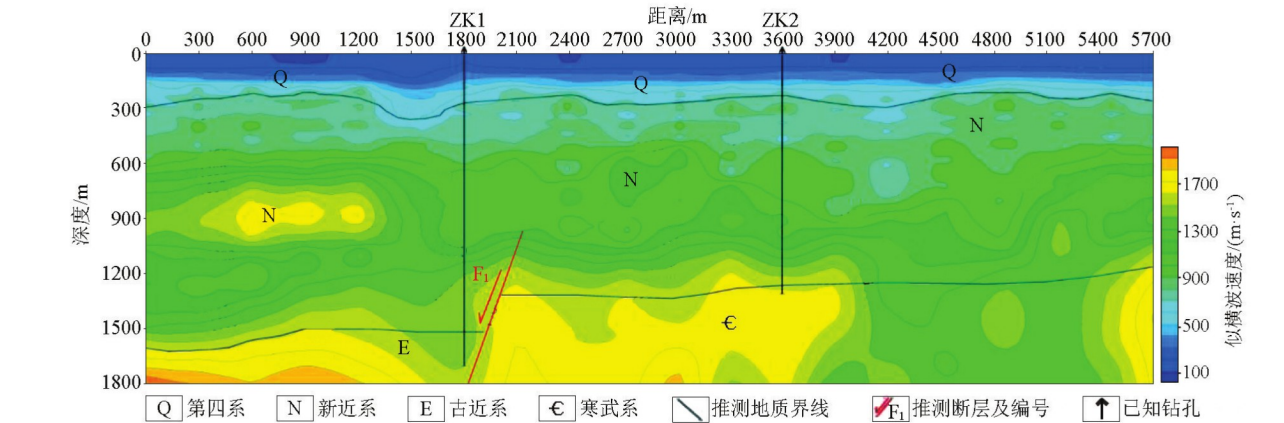


图 8 反演的似横波速度剖面

Fig.8 Inversed S-wave-like velocity profile

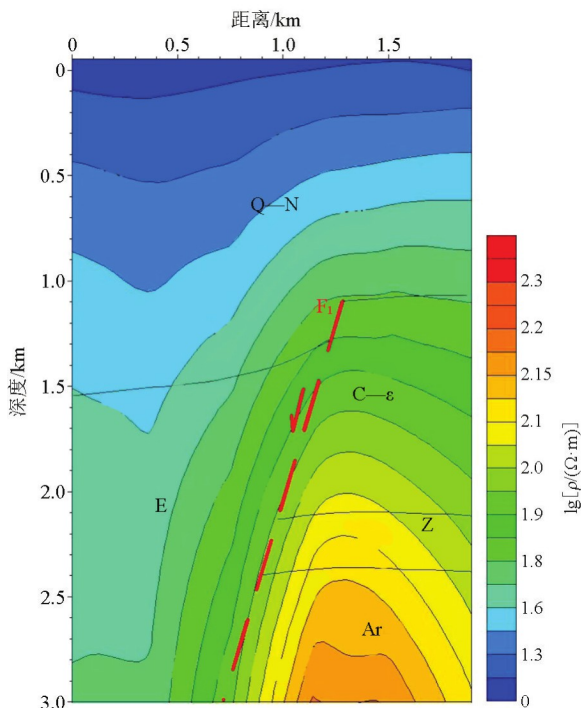


图 9 大地电磁剖面

Fig.9 Magnetotelluric profile

从横向上看,电性特征主要表现为团块状、条带状的高低阻分布形态。其中测线 0.5~1.3 km 处出现显著电性梯级带,推测存在断裂,定为 F_1 ,断裂特点为西倾正断层,倾角约 73° ;结合地质资料,确定为聊兰断裂,断距大于 2 000 m。

5 讨论

目前,天然源微动探测技术最优方案为圆形台阵,通过提取低频微动频散曲线,反演获取纵横波速度,能够进行地层划分、地质构造判定。该方法在城市的复杂环境条件下使用,能取得较好的效果。缺点在于 ESPAC 处理分辨率较低,效率低;另外,可能对灰岩(尤其是表层起伏较大的地层)内部构造判定较为困难,该方法在灰岩地区的应用需进一步研究。

参考文献 (References):

[1] 曾昭发,陈雄,李静,等.地热地球物理勘探新进展[J].地球物理学进展,2012,27(1):168-178.
Zeng Z F, Chen X, Li J, et al. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 168-178.

[2] 唐建伟,丁建荣,郝天珧.徐闻地区综合地球物理勘探方法应用研究[J].地球物理学进展,2008,23(3):800-807.
Tang J W, Ding J R, Hao T Y. Application study of comprehensive geophysical methods in the Xuwen area[J]. Progress in Geophys-

ics, 2018, 23(3): 800-807.

[3] 何继善,柳建新.隧道超前探测方法技术与应用研究[J].工程地球物理学报,2004,1(4):293-298.
He J S, Liu J X. A study of the tunnel advanced detection technology and its application[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 293-298.

[4] 邓起东,徐锡伟,张先康,等.城市活动断裂探测的方法和技术[J].地学前缘,2003,10(1):93-104.
Deng Q D, Xu X W, Zhang X K, et al. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 93-104.

[5] 于森,林君.天然源面波在采空区探测中的应用[J].煤炭技术,2013,32(12):85-87.
Yu M, Lin J. Application of natural source surface waves in goaf survey[J]. Coal Technology, 2013, 32(12): 85-87.

[6] Okada H. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method[J]. Exploration Geophysics, 2006, 37(1): 73-85.

[7] 高艳华,黄溯航,刘丹,等.微动探测技术及其工程应用进展[J].科学技术与工程,2018,18(23):146-155.
Gao Y H, Huang S H, Liu D, et al. Microtremor detection technology and its new progress in engineering application[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(23): 146-155.

[8] 吕新爱,闫晓珂,邹雨霖,等.偃龙煤田府店勘查区煤质特征分析与评价[J].内蒙古煤炭经济,2018(15):45-46.
Lyu X A, Yan X K, Zou Y L, et al. Analysis and evaluation of coal quality in Yanlong coalfield[J]. Coal Economy of Inner Mongolia, 2018(15): 45-46.

[9] 张古彬,王现国,罗新杰.三门峡盆地地下热水形成条件分析及保护研究[J].人民黄河,2011,33(7):81-82.
Zhang G B, Wang X G, Luo X J. Analysis and protection research on formation conditions of geothermal water in Sanmenxia basin[J]. Yellow River, 2011, 33(7): 81-82.

[10] 张天增,吕志涛,王伟峰.河南省开封市汴西新区地热资源特征分析[J].资源导刊:地球科技版,2013(11):65-68,71.
Zhang T Z, Lyu Z T, Wang W F. Analysis on characteristics of geothermal resources in Bianxi new area, Kaifeng city, Henan Province[J]. Resources Guide: Earth Science and Technology Edition, 2013(11): 65-68, 71.

[11] 苏媛媛.豫东下古生界地热资源潜力评价[J].山东煤炭科技,2017(6):185-187.
Su Y Y. Potential evaluation of lower Paleozoic geothermal resources in eastern Henan[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2017(6): 185-187.

[12] 程远,秦曦,赵晓晓,等.东秦岭钼铅锌银多金属矿集区地球物理场特征及综合信息找矿模型[J].地质与勘探,2018,54(4):747-761.
Cheng Y, Qin X, Zhao X X, et al. Geophysical characteristics and prospecting model based on comprehensive information in the molybdenum, lead, zinc and silver polymetallic ore concentration area of the East Qinling Mountains[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(4): 747-761.

[13] 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].

地球物理学进展, 2009, 24(1):326-334.

Sun Y J,Xu P F, Lin T Q,et al.Microtremor survey method and its progress[J].Progress in Geophysics,2009,24(1):326-334.

[14] 刘宏岳,黄佳坤,孙智勇,等.微动探测方法在城市地铁盾构施工“孤石”探测中的应用——以福州地铁1号线为例[J].隧道建设, 2016, 36(12):1500-1506.

Liu H Y, Huang J K, Sun Z Y, et al. Application of microtremor method to boulders detection in urban metro shield construction: case study of Fuzhou metro line No. 1 [J].Tunnel Construction, 2016,36(12):1500-1506.

[15] 王未来,吴建平,房立华.利用地脉动信息约束沉积层区域台站下方速度结构反演[J].地震学报, 2011,33(1):28-38.

Wang W L, Wu J P, Fang L H. Application of microseismic data to constraining inversion for velocity structure beneath stations in sedimentary area[J].Acta Seismologica Sinica,2011,33(1):28-38.

[16] 冈田广,凌甦群.微动利用の地下构造探查に关する最近の研究について[R].北海道大学大学院研究报告,1994.

Okada H, Ling S Q. About a recent study on the surveying geologic structures by using the Microtremor Survey Method[R].Report of Hokkaido University (in Japanese), 1994.

[17] 何正勤,丁志峰,贾辉,等.用微动中的面波信息探测地壳浅部的速度结构[J].地球物理学报,2007,50(2):492-498.

He Z Q, Ding Z F, Jia H, et al. To determine the velocity structure of shallow crust with surface wave information in microtremors[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(2):492-498.

The application of fretting exploration technology
in the exploration of middle and deep clean energy

DONG Yao¹, LI Guang-Hui¹, GAO Peng-Ju², REN Jing¹, XIAO Juan¹

(1.Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450053, China; 2.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: With the further advancement of the energy reform, the exploration, development and utilization of geothermal energy in the middle and deep clean energy are imminent. At present, the exploration, development and utilization focus on the middle and deep level, mainly in urban areas, which limits the use of conventional seismic, magnetotelluric and other geophysical prospecting methods, and new methods need to be introduced. In this article, through micro exploration technology in some urban areas to carry out the relevant experiments, comparison of previous high precision gravity, magnetotelluric sounding, geothermal hole data, verified the micro test result, interpretation of stratigraphic classification and tectonic position was consistent with known data, deserves further research and promotion, to realize micro exploration technology in deep geothermal energy in the fast exploration and development is of great significance.

Key words: fretting exploration technology; dispersion curve; middle deep clean energy; geothermal well

(本文编辑:叶佩)