

水文·工程·环境

超长电磁波技术在城市地热资源勘察中的应用 —以郑州市老鸦陈地热田为例

谢山立¹, 袁广祥²

(1. 河南省地矿建设工程(集团)有限公司, 河南郑州 450007; 2. 华北水利水电学院, 河南郑州 450011)

[摘要]在进行地热资源勘察中,地球物理方法是很重要的,尤其是在城市中。以郑州市老鸦陈地热田为例,利用超长电磁波技术进行城市地热资源的勘察。首先根据已有的钻孔,建立地层和热储异常解释的标志曲线;其次,根据郑州的地质条件,布置10个测点;最后,根据标志曲线,对各测点的地层、断层和热储异常进行解释。勘察结果表明,郑州地热田主要由三种类型:西南浅部基岩中的地热水、基岩顶面以上地热水、深部基岩中的地热水。

[关键词]超长电磁波 城市 地热资源 老鸦陈地热田 郑州

[中图分类号]P641.72 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2012)05-1016-7

Xie Shan-li, Yuan Guang-xiang. Application of ultra-long electromagnetic wave technology to exploration of urban geothermal energy resources: An example in the Laoyachen geothermal field [J]. *Geology and Exploration* 2012, 48(5): 1016-1022.

地热能是蕴藏在地球内部巨大的自然能源,已成为21世纪能源发展中不可忽视的可再生能源之一,也是可再生能源大家庭中最现实和最具竞争力的资源之一。据估算,我国2000 m以浅的地热资源所含的热能相当于2500亿吨标准煤,保守估计可以开发其中的500亿吨。目前,我国直接利用地热资源的热能达到45373 TJ/yr,设备容量3687 MWt,并且开采利用量以每年10%的速度增长。无论是哪种地热资源,在开发之前都要对其进行资源评估,对于资源的评估离不开现场勘察。

目前,地热资源勘察的主要方法与技术包括一些常规方法如地热地质、地球化学、地球物理、钻探和一些新技术新方法如遥感遥测和计算机模拟等(周厚芳等,2003)。由于地球物理勘探具有效率高、成本低、深度大且适用范围广的优点,因此,在地热资源勘察中具有其它方法无法替代的优势(应勇等,2006)。各种电磁方法在各种地质构造环境和各种规模的地热区内的应用都取得了很好的效

果,例如,在开封凹陷区地热资源调查中采用了大地电磁测深方法(赵建粮等,2010),利用可控音频大地电磁法(CSAMT)对松山断裂型地下热水进行了勘探(吴璐莘等,1996),利用瞬变电磁法(TEM)在云南省腾冲地区1000多米深处发现地热储层(李文尧等,2002),高频大地电磁测深在抚州地热区热储构造勘察中取得了较明显的效果(叶益信等,2011)。反射和折射地震法也已用于一些地区的热储勘探,并取得了不错的效果(Majer *et al.*, 1979)。

常规的电磁方法虽然已得到很广泛的应用,但进行地热探测(尤其是深层探测)时,由于相对场强较小(量级在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$),频率较低,人工发射功率受到限制(王友善,1995),同时城区的建筑也会对人工发射的电磁波产生干扰。地震的方法需要震源设备发射地震波,发射大功率地震波会影响城市的日常秩序,而小功率地震波会受到城市内施工、车辆震动的影响。这时利用高强度的天然场源便成了一个很好的选择(李百寿等,2009)。超长

[收稿日期]2012-03-14; [修订日期]2012-06-08; [责任编辑]郝情情。

[第一作者]谢山立(1979年-)男,2004年毕业于华北水利水电学院,获学士学位,工程师,长期从事水工环地质的生产及科研工作。

E-mail: xieshanli@126.com。

电磁波探测技术就是利用采集到的天然超长电磁波,探测20~10000m深度内的地下地质构造和岩性界面,可以应用于地质勘探中,如:基岩起伏面的探测、地下水的探测和海洋油气勘探(侯贵廷等,2001)。

本文以郑州市老鸦陈地热田为例,利用超长电磁波探测技术,划分重要地质界面埋深,分析断裂构造特征,查明地下热储异常分布,为郑州市老鸦陈地热田地热资源的合理持续开发提供依据。

1 超长电磁波探测技术原理与方法

利用超长电磁波进行地下探测,其结果反映在超长电磁波频谱曲线,即采集到的数据经过频谱分析后所得到的深度-振幅分布曲线。该频谱曲线的纵坐标为深度,单位为m;横坐标为接收到的超长电磁波能量,与振幅呈正比,单位为 μV (侯贵廷等,2001)。大量实践证明:超长电磁波曲线幅值、变化幅度及曲线形态的稀疏与致密、均匀与跳跃起伏变化等特征,与岩石的完整与破碎、致密与松散、富水与贫水、胶结成岩程度的高低等物性特征密切相关。具体表现为:岩石越致密、完整、成岩胶结程度越高、密度越大、赋水性越差,超长电磁波曲线越趋于幅值低、变化幅度小、同时曲线形态越趋于平稳、均匀、致密;相反岩石越松散、破碎、成岩胶结程度越低、密度越小、赋水性越好,超长电磁波曲线幅值则越高、变化幅度大,同时曲线形态越趋于稀疏、杂乱,常呈大幅度的起伏跳跃变化。

此次探测所用超长电磁波探测仪为北京大学石油天然气研究中心研制的BD-V型超长电磁波探测仪。该仪器接收场源为天然大地电磁场中的 $10^2 \sim 10^{-4} \text{ Hz}$ 低频交变电磁信号,探测深度范围30~10000m,最小采样步长为2m。

2 地质概况

2.1 地层岩性

郑州地区跨华北地层区豫西地层分区的高箕小区和华北地层区的华北平原开封小区,位于两个地层小区的结合部位。区内出露地层主要为第四系,基岩出露较少,仅在三李、奶奶碛沟一带有零星出露,分别为寒武系上统(C_3)、石炭系中上统、二叠系上统及新近系,研究区中奥陶系(O)、三叠系(T)仅见于钻孔中。

第四系和新近系(区内缺失古近系)的松散岩类,具有良好的导水性能和含水性能,尤其是砂层、

中细砂、中粗砂更具有良好的导水性能和含水性能。但是由于其导水性能太强,地下水在其间流速较大,因此热量易散失,不易形成较好的地下热田。而新近系下部的砂岩层则既有一定的导水性能,且其上覆的泥岩又是良好的隔热隔水盖层,在有利的地质构造条件下,极易形成一定规模的地热田。

新近系下伏的三叠系、二叠系砂泥岩以及石炭系页岩、粘土岩明显较新近系致密坚硬,胶结成岩程度较高。根据该区附近石油钻孔物性的统计结果(表1),新近系岩层的储水、赋水条件明显优于下伏三叠系、二叠系岩层。在该地层中如果没有深大断裂的切穿,则很难形成储水、赋水条件。

表1 郑州老鸦陈地热田附近石油钻孔物性的统计结果
Table 1 Porosity and permeability values acquired by drill bores near the Laoyachen geothermal field in Zhengzhou city

地层	孔隙度(%)			渗透率		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
新近系	20.78	15.74	17.9	47.84	<0.1	16.84
二叠系	6.12	1.98	4.25	0.6	0.07	0.22
三叠系	5.62	1.16	2.77	<0.1	<0.1	<0.1

2.2 地质构造

郑州地区构造属华北地区的南缘,秦岭东延部分的高箕山区,地处荥巩大背斜北翼东端与华北沉降带开封拗陷西南边缘的结合带。特点是构造运动剧烈,断裂、断块发育,古地形复杂。影响区内的主要构造体系有纬向、经向及新华夏、北西向构造体系,以前两组最为发育,后两组仅有小褶皱及断裂。工作区受区域大地构造的影响,近东西向和北西向构造比较发育。

老鸦陈地热田的地质构造主要为断层构造,分为北西向和东西向两组,共6条断层(表2)。这六条断层均为开启型张性正断层,是深层地下水对流、运移、富集的良好通道。尤其是老鸦陈断层,上部断点距地表仅几米,下部断至数千米深部,它不仅是上部松散岩类孔隙水向下运移、渗透的良好通道,更易于下部岩溶裂隙中深层地下热水上涌,并且形成地下水的对流和热交换的良好通道条件。另外,该区地下软流圈凸起,莫霍面上隆和区域性深大断裂带及活动性断裂带的存在,也为该区地下热水的形成、运移、上涌、赋存创造了极其良好的地壳深部构造条件。

表 2 老鸦陈地热田的主要断层构造

断层	倾向(°)	倾角(°)	断距(m)	长度(km)	宽度(m)
老鸦陈断裂	33~60	60~75	250~400	35	350~420
柳林断层	0~50	70	150~300	12	320
古荥断层	50	70	400	20.5	300
中牟断层	11	65	300	9.5	360
上街断层	9	70	200	17.5	300
须水断层	3~13	65	>200	34	300

3 建立标志曲线

为了使超长电磁波技术的探测顺利进行和分析对比,在进行探测之前,首先应做一个超长电磁波探测实验,确定与超长波曲线形态对应的地层及热储异常。此次探测,根据测区已知钻孔旁超长波曲线特征分析,结合区域地质资料,建立该测区主要岩性段的曲线解释标志。

3.1 建立地层解释标志曲线

研究表明,岩石的物性特征变化是引起超长波曲线形态特征变化的主要因素。岩石的致密与疏松、完整与破碎、成岩及胶结程度的高低、富水性的差异,都会引起曲线形态特征的一系列相应变化。所以在已知钻孔旁进行超长波曲线特征分析,就可建立本测区主要岩性段的曲线解释标志。

根据郑州的地层特征,选择两处位置进行超长电磁波探测实验。一处选择基岩埋深较浅的测区西南三李村附近 ZK12-4 钻孔(资料来源于 1:50 万《河南省基岩地质图》)附近进行,该钻孔地质剖面 and 附近超长波测点曲线地质解释如图 1 所示。一处选择基岩埋深较大的省高速公路管理局钻孔旁进行,该钻孔地质剖面及其附近测点超长波曲线地质解释如图 2 所示。

通过对比分析认为:两钻孔附近超长波曲线地质解释结果与已知钻孔地质剖面比较吻合,其探测曲线可做为本测区主要岩性段地质解释的标志曲线。

3.2 建立热储异常解释标志曲线

根据大量已知地热井旁超长波探测曲线解释,热储异常标志曲线划分依据曲线形态的变化特征。异常曲线形态反映特征与正常地层曲线形态反映特征明显不同,曲线幅值一般较大且幅值的变化幅度也较大,曲线上下起伏变化均匀,整体形态平稳,与正常地层曲线相交处常有突然大幅度上升的特点(这点也是与新生界地层高幅值曲线形态的不同之

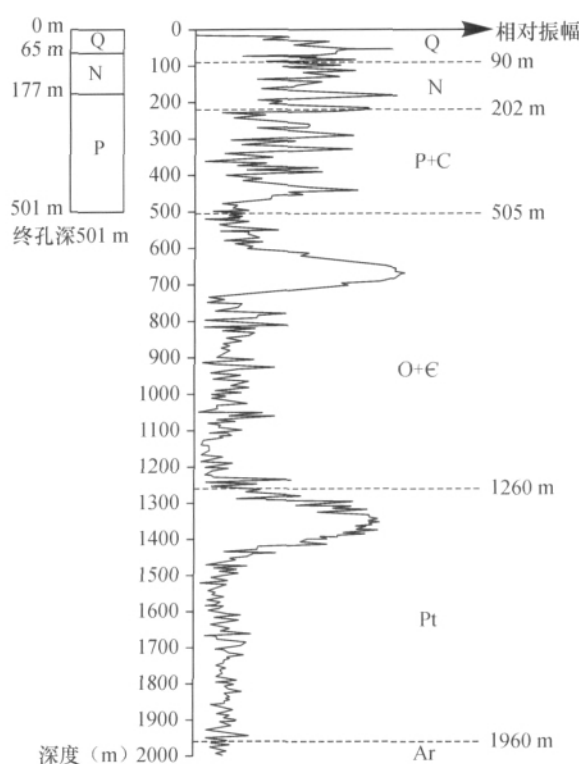


图 1 ZK12-4 钻孔地质剖面(左)与钻孔附近超长波曲线解释(右)

Fig. 1 Geological section of the drillhole ZK12-4 (left) and explanation using ultra-long electromagnetic wave technology near the hole(right)

处)。上述曲线异常形态的出现,一般认为与地下水和地热温度有关,是地下热储异常的间接反映。

研究区内典型热储异常标志曲线解释选择河南省农科院地热井附近的测点探测曲线进行,具体如图 3 所示:该钻孔揭露第四系(Q)厚度为 210 m;上第三系(N)底界埋深为 1090 m,钻孔揭露该地层底部有赋存地下热水的砂砾岩和中粗砂互层存在;该测点超长波曲线地质解释结果表明第四系(Q)厚度为 220 m,上第三系(N)底界埋深为 1020 m,曲线反映该地层底部热储异常有两段,埋深分别为 635~690 m 和 805~900 m。需要指出的是:这里所指的热储异常段,其间可能有不含水的泥岩层或者完整岩石存在,只不过在此区段上含水的砂砾岩及中粗砂互层或者岩石破碎带较为集中,所以真正热储异常段厚度要小于超长波解释厚度,超长波解释的基岩热储异常段也具有这种性质。

4 超长电磁波探测工作的布置

根据郑州市区地质的特征,在城区内布置一条北东向的测线 A-A'(如图 4)。A-A'测线方位

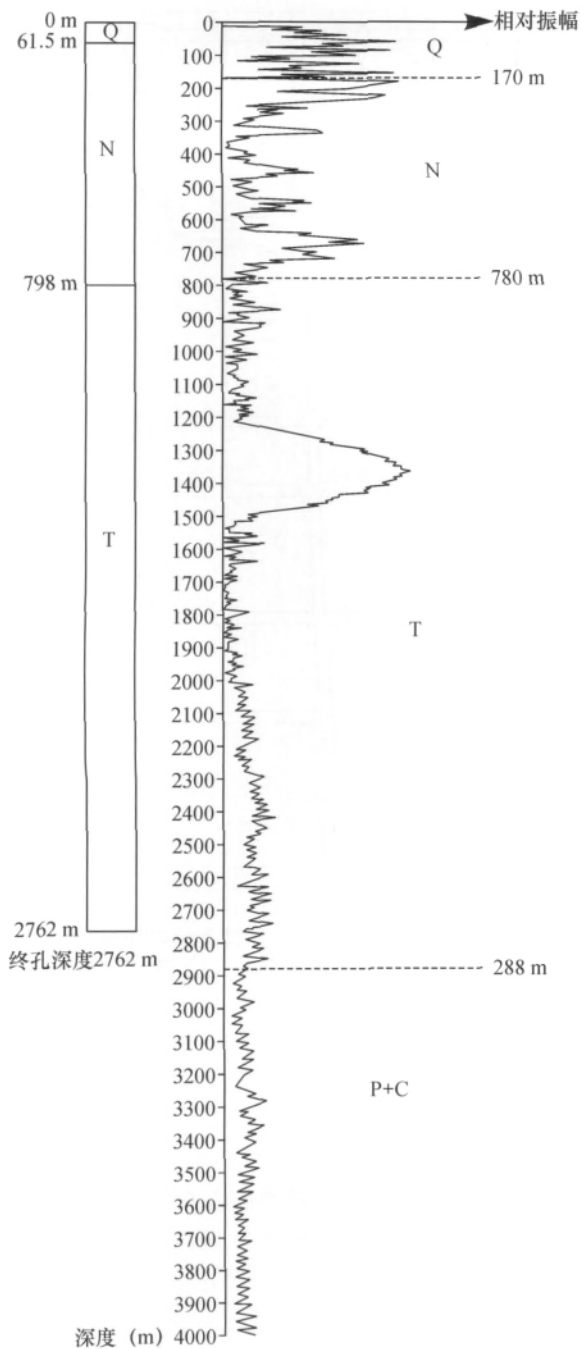


图 2 省高速公路管理局附近钻孔地质剖面(左)与钻孔附近超长波曲线解释(右)

Fig. 2 Geological section of the drill hole near the provincial Expressway Authority (left) and explanation using ultra - long electromagnetic wave technology near the hole(right)

40° 穿越城区,长度约 8.4 km,测点数 10 个,平均点距 933 m。每个物理测点数据采样从地下 30 m 开始,测深均为 4000 m,采样步长 2 m,信号放大倍数 0.4。

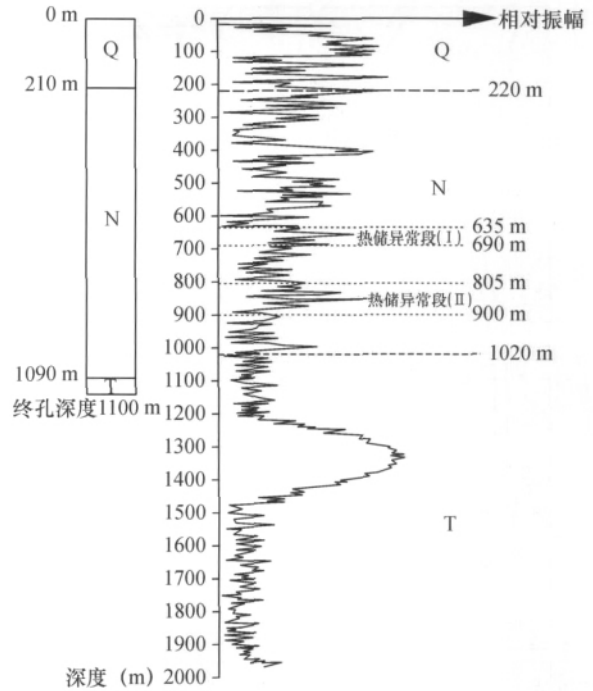


图 3 省农科院附近钻孔地质剖面(左)与钻孔附近超长波曲线解释(右)

Fig. 2 Geological section of drill hole near Henan Academy of Agricultural Sciences (left) and explanation using ultra - long electromagnetic wave technology near the hole(right)

5 超长电磁波曲线地质解释

5.1 主要地质界面埋深解释

研究区内工业电网纵横交错,各测点距电磁干扰源的方位和距离不同,所受干扰程度各不相同,造成部分曲线形态不同程度畸变。所以在曲线地质解释过程中,应具体分析各种干扰对曲线造成的不良影响,不应刻意追求每一条所测曲线与解释标志曲线形态特征完全一致,而应结合已有地质资料,由已知到未知,去伪存真,仔细分析各种交变电磁干扰信号及场源信号自身变化在曲线上的不同反映特征。

研究区内 A - A' 测线主要地质界面埋深解释结果如图 5 所示,由此图可见:测区由西南向东北,第四系(Q)地层厚度由 50 m 增大至 220 m,新近系(N)地层底界埋深由 600 m 增大至 1020 m,下伏基岩三叠系(T)地层,底界埋深由 2800 m 增大至 3390 m,三叠系(T)地层下伏地层为二叠系(P)和石炭系(C),其底界埋深均大于 4000 m。

5.2 断裂构造解释

断裂构造解释是在地层结构解释基础上进行

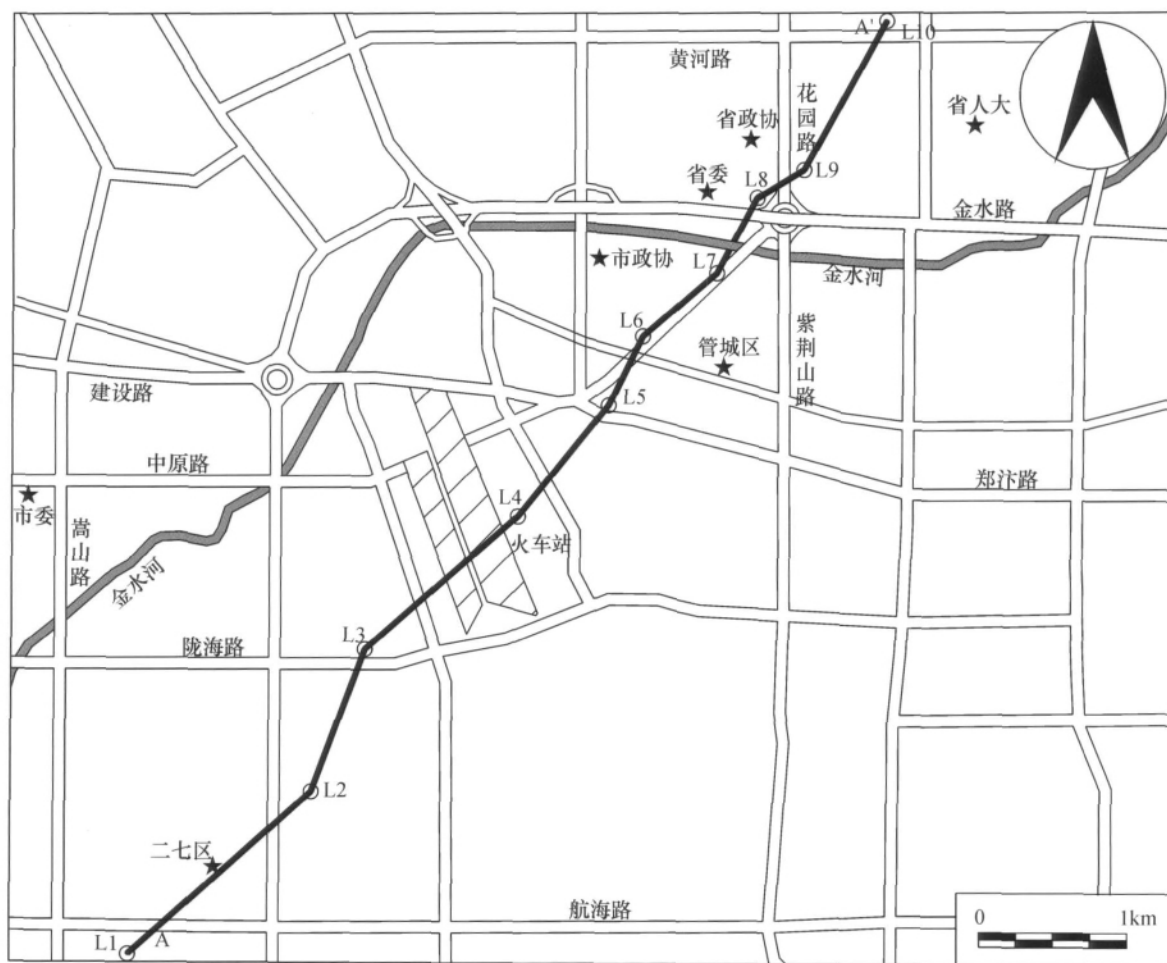


图4 超长电磁波探测工作布置图

Fig. 4 Map showing work deployment of ultra-long electromagnetic wave survey

的,根据测线上相邻测点解释出的相应各岩性段厚度及埋深变化,结合已知地质资料,进行综合分析推断,通过超长波曲线断裂构造解释,可以发现 A - A' 剖面共穿过 2 条断裂,它们分别是须水断裂和老鸦陈断裂。各断裂在解释剖面上的位置分布如图 5 所示。

根据工作目的,本次断裂构造解释重点对断裂构造老鸦陈断裂进行了分析解释。在 A - A' 剖面上,该断裂倾向北东,倾角 72° 。断层两侧有明显差异,北东盘下降,南西盘上升,该断层控制了古近系的沉积,形成时间可能在喜山运动早期,断层断距 150 m,控制了新近系和第四系的沉积,造成了测区东西两侧的地势差异。结合有关资料分析可知,断层在市区附近的新近界底板没有错动显示,说明新近纪以来基本上是上稳定的。

5.3 热储异常解释

据区域地质资料,测区西南为嵩箕穹褶断束、荥

巩背斜北翼,中部为郑州断阶,北东部属开封凹陷,超长波断裂构造解释结果说明断裂构造在测区广泛分布,且相互作用。某些断裂的发育具有一定规模,在断阶及凹陷内沉积了厚达千米以上的松散堆积层,形成了测区内断裂深循环型和沉积盆地型两种地热田,相应的热储结构分别为带状热储结构和层状热储结构。

前述曲线热储异常形态特征,仅为标准形态之反映,因为在具体探测中,曲线往往受各种各样干扰影响,造成热储异常曲线段的形态畸变,所以在具体解释时,应根据实际地质情况综合分析,使解释结果更符合客观实际。

对比热储异常解释标志曲线,结合研究区的实际地质情况,通过对 10 条超长波探测曲线进行热储异常段划分,解释结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,新近系地层中,在 L1 测点未见热储异常,在 L2 ~ L4 测点有 1 段热储异常, L5 ~ L8 测点有 2 段热

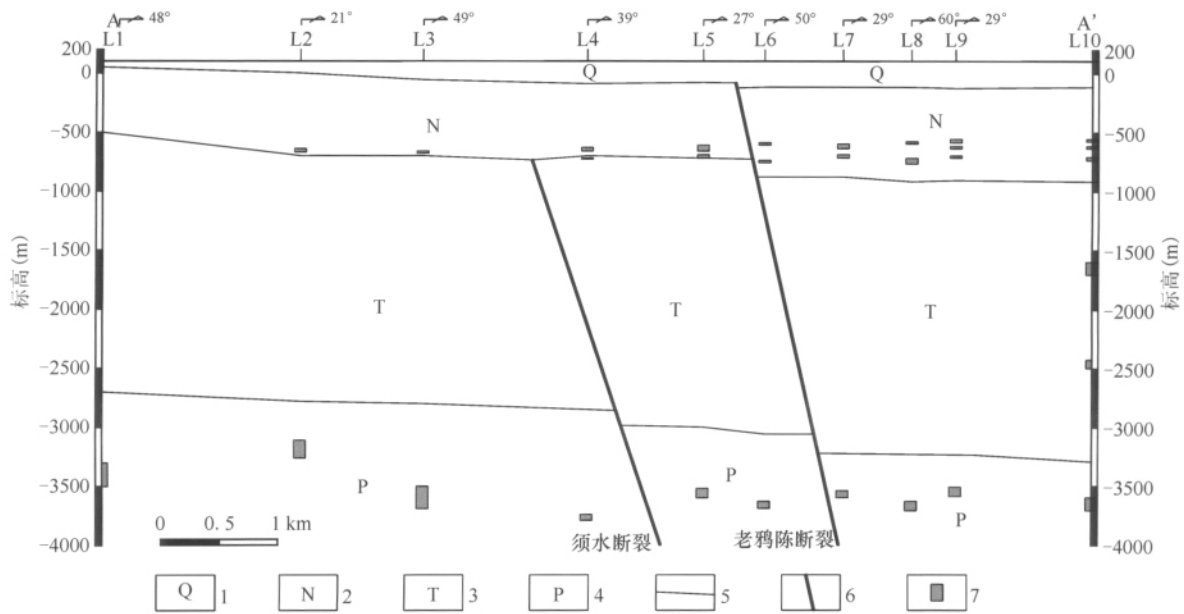


图 5 A - A' 测线超长电磁波地质解释剖面

Fig. 5 Geological interpretation of the A - A' profile of ultra - long electromagnetic wave survey

1 - 第四系; 2 - 新近系; 3 - 三叠系; 4 - 二叠系; 5 - 地层界线; 6 - 断层; 7 - 热储异常段

1 - Quaternary; 2 - Neogene; 3 - Triassic; 4 - Permian; 5 - stratigraphic boundary; 6 - fault; 7 - geothermal anomalous section

储异常 L9 ~ L10 测点有 3 段热储异常; 三叠系地层中除 L2 测点有 3 段热储异常外, 其它测点均有 2 段热储异常; 在二叠系地层中, 各测点均有 1 段热储异常。

6 结论

郑州市城区主要岩性段之间的物性特征如密度、破碎与完整、赋水性、疏松与致密、胶结成岩程度等都具有一定差异, 这为超长电磁波探测提供了地球物理前提。通过超长电磁波勘察, 初步查明了研究区内 0 ~ 4000 m 深度段内的地层结构及基底岩系。查明了测区隐伏断裂的分布特征。

初步圈定了热储异常及深部埋藏区段。研究区内地热田整体属于沉降盆地 - 构造裂隙型地热田, 基本可分为三种类型: 一是研究区西南一带, 基岩埋藏较浅, 受当地断裂控热和导热作用, 形成的地下热储埋深一般较浅为几百米, 其分布与断裂构造密切相关; 二是基岩顶面以上热储层, 主要赋存于上第三系 (N) 地层下部的砂砾岩和中粗砂互层中, 该热储层的分布受控于较厚上第三系 (N) 地层的埋藏规律; 三是郑州市城区基岩以下地热水, 主要赋存于三叠系 (T)、二叠系 (P) 或更深的奥陶系 (O) 和寒武系 (Є) 地层中, 其形成机理为地下水在基岩地层中的

深大断裂附近对流并形成一定程度的热交换, 然后富集于该断裂附近。

超长电磁波探测技术利用的是天然电磁场, 不需要人工场源激发, 与常规地球物理勘探相比具有明显的优势。在具体勘察过程中, 可以利用超长电磁波技术不需要人工激发场源和钻孔的优势, 增加测点分布密度, 详细查明测区断裂构造分布特征和热储异常区。由于城区建筑密集, 各种信号、电磁场复杂, 干扰因素很多, 因此目前的超长电磁波探测仪在抗干扰方面需进一步改进, 以提高曲线解释精度。

[References]

Hou Gui - ting, Yi Xue - lei, Qian Xiang - lin, Zhao Wei - ming. 2001. The application of ultra - long electromagnetic wave remote sensing to deep petroleum exploration under Bohai Sea [J]. Acta Scientiarum Naturalium University Pekinensis, 37(1): 81 - 88 (in Chinese with English abstract)

Li Bai - shou, Qing Qi - ming, Hou Gui - ting, Zhang Ze - xun, Ye Xia. 2009. Applications of the passive Super Low Frequency (SLF) electromagnetic technique to exploration of geothermal energy sources [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 24(2): 699 - 706 (in Chinese with English abstract)

Li Wen - yao, Liao Zhong. 2002. The application of TEM to geothermal exploration in Tengchong [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 26(5): 368 - 371 (in Chinese with English abstract)

Majer E L, McEvelly T V. 1979. Seismological investigations at the Gey-

- sers geothermal field[J]. Geophys. 44: 246 - 269
- Wang You - shan. 1995. The characteristics of spectrum and dispersion of electromagnetic wave reflected by the subsurface formations[J]. Chinese Journal Geophysics, 38(01) : 129 - 136(in Chinese with English abstract)
- Wu Lu - ping, Shi Kun - fa, Li Yin - huai, Li Song - hao. 1996. Application of CSAMT to the search for groundwater[J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 39(05) : 712 - 724(in Chinese with English abstract)
- Ye Yi - xin, Deng Ju - zhi, Fang Gen - xian. 2011. The test research of high frequency magnetotelluric sounding to reservoir structure survey: taking the Fuzhou geothermal area in Jiangxi province as an example [J]. Geology and Exploration, 47(4) : 0649 - 0653(in Chinese with English abstract)
- Ying Yong, He Lan - fang, Yang Lun - kai, Zhao Xiao - ming, He Xiao - hua. 2006. Application of comprehensive geophysical prospecting to the geothermal survey of J County [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 3(4) : 251 - 256(in Chinese with English abstract)
- Zhao Jian - liang, Chen Tian - zhen, Zhang Jin, Deng Xiao - ying, Cai Kun. 2010. The application of the MT method to the investigation of geothermal resources in Kaifeng depression[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 34(2) : 163 - 166(in Chinese with English abstract)
- Zhou Hou - fang, Liu Chuang, Shi Kun - fa. 2003. A review of study on geothermal resources exploration [J]. Progress in Geophysics, 18(4) : 656 - 661(in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 侯贵廷, 衣学磊, 钱祥麟, 赵维明. 2001. 超长电磁波遥测技术在渤海深部油气勘探中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 37(1) : 81 - 88
- 李百寿, 秦其明, 侯贵廷, 张泽勋, 叶霞. 2009. 被动式超低频电磁法在深部地热资源勘察中的应用 - 以 JR - 119 井及 JR - 168 井为例[J]. 地球物理学进展, 24(2) : 699 - 706
- 李文尧, 廖忠. 2002. 瞬变电磁法在腾冲寻找地热中的应用[J]. 物探与化探, 26(5) : 368 - 371
- 王友善. 1995. 地层电磁反射波的频谱及频散特性[J]. 地球物理学报, 38(01) : 129 - 136
- 吴璐苹, 石昆法, 李荫槐, 李松浩. 1996. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 39(5) : 712 - 724
- 叶益信, 邓居智, 方根显. 2011. 高频大地电磁测深(EH - 4) 在热储构造 勘查中的试验研究 - 以抚州地热区为例[J]. 地质与勘探, 47(4) : 649 - 653
- 应 勇, 何兰芳, 杨轮凯, 赵晓鸣, 何小华. 2006. 综合物探在 J 地区地热水勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 3(4) : 251 - 256
- 赵建粮, 陈天振, 张晋, 邓晓颖, 蔡琨. 2010. MT 法在开封凹陷地热资源调查中的应用[J]. 物探与化探, 34(2) : 163 - 166
- 周厚芳, 刘闯, 石昆法. 2003. 地热资源探测方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 18(4) : 656 - 661

Application of Ultra - long Electromagnetic Wave Technology to Exploration of Urban Geothermal Energy Sources: An Example in the Laoyachen Geothermal Field

XIE Shan - li¹, YUAN Guang - xiang²

(1. China Henan Geological & Mineral Resources Construction Engineering(Group) CO. LTD, Zhengzhou Henan 450007;

2. North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450011)

Abstract: Geophysical technology plays a critical role in exploration of the geothermal energy sources, especially in cities. In this study, we utilized the ultra - long electromagnetic wave technology to explore urban geothermal resources in the Laoyachen geothermal field, Zhengzhou City. We defined standard curves of strata and geothermal anomalies for ultra - long electromagnetic waves based on the three known drill boreholes, and established 10 stations according to the geology in Zhengzhou. Then, we interpreted the strata, faults and geothermal anomalies on each station based on the standard curves. The results of the exploration by the ultra - long electromagnetic wave method suggest that there are three types of geothermal reservoirs in the Laoyachen geothermal field: geothermal water in the shallow basement rock in the southwest, geothermal water above top of basement rock and hot water in deep basement rock.

Key words: ultra - long electromagnetic wave, urban geothermal energy sources, Laoyachen geothermal field, Zhengzhou