

电磁测深 MT 法在平原深部地热调查中的应用

汪 琪¹, 赵志鹏², 尹秉喜², 胡伏生³

(1. 北京市水利规划设计研究院 地质所, 北京 100048;

2. 宁夏回族自治区地质调查院, 宁夏 银川 750021;

3. 中国地质大学 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘 要: 地热资源的埋藏性和地下空间的复杂性, 使得地热调查技术的选取显得尤为重要。介绍了电磁测深在地热调查中的应用现状, 针对 MT 法在深部平原埋藏型地热探寻中的缺口, 以银川盆地地热调查为例, 利用电磁测深 MT 技术解译银川盆地热储范围, 并结合盖层温度、控热断裂给予分析, 结果显示, 利用电磁测深 MT 法可以较好地圈定银川平原深部热储范围。说明了电磁测深 MT 技术在平原区深部埋藏型地热调查中是适用的。

关键词: 热储范围; 电磁测深; 银川平原; 深部地热

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

收稿日期: 2016—07—11

The Application of Magnetotelluric Sounding (MT) Method to Deep Geothermal Investigation in Plain

Wang Qi¹, Zhao Zhipeng², Yin Bingxi², Hu Fusheng³

(1. Geology Department, Beijing Water Resources Planning and Design Institute, Beijing 100048, China;

2. Ningxia Geological Survey Institute, Yinchuan Ningxia 750021, China;

3. Water Resources and Environment Institute, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the buried geothermal resources and the complexity of underground space, the selection of geothermal survey technology is particularly important. In this paper, there is an introduction to the application of magnetotelluric sounding method to geothermal investigation, aiming at the gap of MT method in exploring buried geothermal resources in deep plain. The geothermal survey of Yinchuan plain was taken as an example to determine the geothermal range by magnetotelluric sounding technology (MT), which is combined with caprock temperature and the fracture of heat controller to analyze. The result shows that using the magnetotelluric sounding (MT) method can well delineate the scope of deep geothermal reservoir in the Yinchuan plain and it illustrates that the magnetotelluric sounding technology (MT) is proper to explore buried geothermal resources in deep plain.

Key words: range of geothermal reservoir; magnetotelluric sounding; Yinchuan plain; deep geothermal

1 引言

地热调查主要是寻找地热异常区并圈定热储范围,电法在地热远景区的圈定上起到了重要的作用。常用的电法主要有 MT-宽频大地电磁测深法、AMT-音频大地电磁测深法、CSAMT-可控源音频大地电磁法、TEM-瞬变电磁法、点测深法、联合剖面法、激发极化法等^[1-3]。MT 在我国的应用实例很多,实际应用分析基于视电阻率 ρ_s ,影响岩石 ρ_s 的因素主要有岩石本身的成分、岩性、岩石水溶液的矿化度、压力、温度等。实际上,在岩石的导电率很大程度上取决于岩石孔隙或裂隙中的水溶液,故而低电阻率成为地下流体存在的一个指标,常常反映出地下岩石结构疏松、湿度大、水溶液通过存在的空隙连通性好的特点^[1]。以下为电磁测深技术 MT 在我国地热调查中的应用现状。

MT 法对地壳的地热事件很敏感,地热调查中的应用主要是查明深部地质特征和地下流体分布,从而圈定地热远景区。辽河凹陷西部运用 MT 法^[4]对地层进行了电性分层,并结合电测井资料对埋深 2000~3000 m 的低阻电性层确定岩性,定位潜在热储层,通过实际钻孔数据得到了很好地验证。黑龙江汤原断陷地区利用 MT 法结合井测温资料划定 18~25 $\Omega \cdot m$ 的电性层为地热远景区,并在后期工作中得到很好地验证^[5]。羊八井是我国唯一的一个地热城,从 1974 年起,对羊八井地热进行了全面的物探调查,以电阻率法为主,辅以电磁法、重力法,该调查利用垂向电阻率法(垂向电测深法),以 30 $\Omega \cdot m$ 圈定了羊八井地热田范围,并依据钻孔揭露地层资料和垂向电阻率曲线划分了盖层、热储层、基岩埋深,用量板法勾勒了热储层空间形态;并利用复合联合剖面法推测了地热田基岩断裂构造^[6]。

虽然 MT 法在地热方面应用较好,但在适用效果方面,存在一些需要注意的地方,研究中发现:MT 法对深大断裂反应较好,对于基岩顶部的小断裂显示不清;对上下的电性差异较大的地层且地层连续分布的反映很好,但对于古生界地层,由于电性很近,解译结果与实际差距大^[7]。TM 法的特点是勘探深度大,对低阻灵敏度,但由于测量时利用的是天然场源,存在对城区噪声抗干扰能力弱的缺点,为避免误差,需要延长测量时

间,进行多次迭代分析^[8]。

MT、AMT 和 CSAMT 适用性有所不同。CSAMT 法较之于 MT 法,在天津的地热研究中发现,由于海相沉积地层中存在盐碱层,导致人工场源的电场无法穿透,而 MT 法的电场来自天然场源,可较好地显示断裂位置和富水低阻区的分布^[9]。MT 和 AMT 都利用的是天然场源,MT 法较之 AMT 法,就地热勘查过程中的应用效果而言,AMT 法对埋深小于 1000 m 的地层解译清楚,MT 主要反映 1000 m 以下的深部的地质构造和断裂分布,能较好地推测地热流体存在的位置^[10]。

电磁测深技术 MT 在寻找热储方面已积累了丰富的经验,但仍在平原区深部地热探寻方面仍然缺少验证。本文以银川盆地为例,利用电磁测深 MT 法寻找银川平原深部 2000~4000 m 左右地热储分布区,并验证其适用性。

2 银川盆地概况

银川盆地位于宁夏北部,西靠贺兰山,东倚鄂尔多斯台地,南起青铜峡峡口冲积扇,北至石嘴山,黄河自南沿东边界而过。南北长 165 km,东西宽 42~60 km,面积 7790 km²。盆地中断裂发育,凹陷隆起构造相间分布,基底构造复杂。东面以黄河断裂 F4 与鄂尔多斯地块相连;西边为贺兰山东麓断裂 F1 与山体相连,贺兰山呈持续抬升态势,山势陡峭,主体走向 NE10°;南界断裂 F6 西北走向,位于牛首山东北麓;北缘被石嘴山南一组隐伏断裂 F5 所控制(图 1)。区内第四系沉积厚度较大,盆地中心最厚处可达 1200 m。下部为新近系和古近系的砂岩夹泥岩互层结构,其中盖层砂泥比小于 0.5,砂层砂泥比大于 0.5,砂层厚度远大于盖层。很厚的第四系可以起到很好的保温作用,地下水的主要补给是贺兰山的降水,降水从西向东缓慢渗透,经断裂储存在新近系和古近系砂岩层中,故新近系和古近系是银川盆地良好的深部含水层,具有很厚的第四系保温层。

3 MT 解译热储范围

本次研究利用银川盆地宽频大地电磁(MT)资料,三条大地电磁测深剖面 E、G、F 分布位置见图 2。此次 MT 测量采用加拿大凤凰(Phoenix)

公司 V8 及 V5 多功能电法仪, 频率响应范围为 400 Hz 到 0.000 2 Hz, 采用张量测量方式, 平均点距为 2 km, 具有较高的分辨率, 每个有效测点观测时间均大于 10 h, 勘探深度在 30 km 以上。以垂向电阻率 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 圈定热储, 考虑地温深度

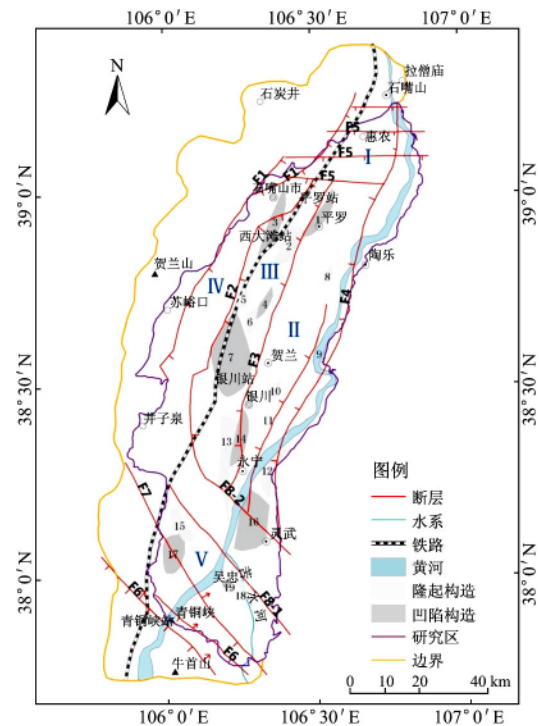


图 1 银川平原构造

Fig. 1 The geology structure of the Yinchuan plain

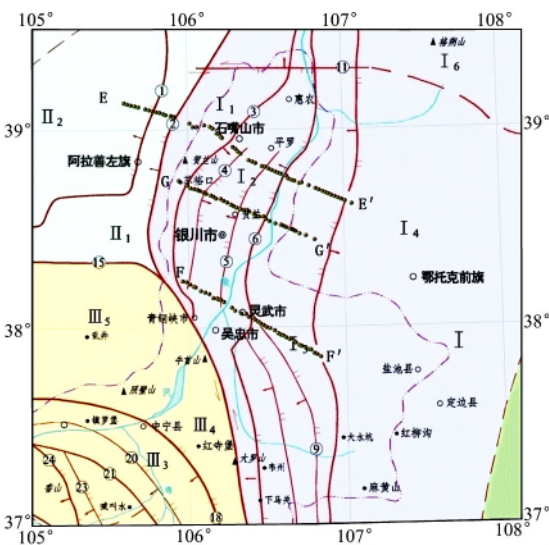


图 2 银川断陷盆地及周缘实测大地电磁剖面位置

Fig. 2 The section location of the MT in Yinchuan rift plain and its surrounding

范围 2 000~5 000 m。大地电磁解译的各个剖面地热储区域具体解释如下。

3.1 E 剖面可能地热储区域

E 剖面自西向东呈现出贺兰山褶断带与银川断陷盆地高一低阻电性分区, 大范围的低阻高导区基本都分布在银川盆地内, 推测地热储区域位于银川盆地的低阻高导区, 地层从上往下依次为第四系、新近系、古近系清水营组。E 剖面的地质构造解译, 电性结构^[11]以及可能存在的地热储区域见图 3。

银川平原的控制断裂主要是卢花台断裂(F_4)和黄河断裂(F_6), 剖面上表现为向东倾斜的正断层特征, 属张拉断裂, 是深部地热向上传导的有利通道, 深大断裂可以很好地将深部地热带到浅层地壳, 加热浅层地下水。

此外银川断陷盆地纵向上表现为低—高—低

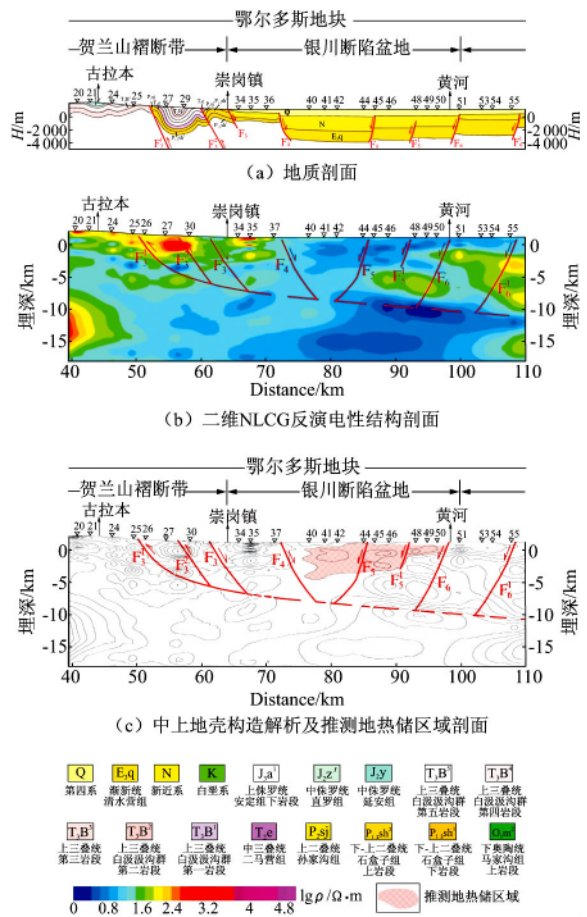


图 3 大地电磁 E 剖面推测地热储区域

Fig. 3 The area of geothermal reservoir speculated from MT profile E

电性结构特征,上部分布大面积的厚大的低阻地层,低阻高导区一般富水;中部高阻地层为古生代或更早地层的综合反映;下部为低阻地层,并被银川断裂贯穿,地下水沿断裂进入到深部地层,被加热,热水顺着相交断裂运移到上部地层中。这种结构也能很好地为深部地热水起到供热—保温作用,银川平原是地热储存在的极有利区域。

3.2 G剖面可能地热储区域

G剖面自西向东呈现出贺兰山褶皱带与银川断陷盆地高一低阻电性分区及陶乐—彭阳冲断带中高阻电性分区。大范围的低阻高导区基本都分布在银川盆地内,推测地热储区域位于银川盆地的低阻高导区,地层从上往下依次为第四系、新近系、古近系清水营组。G剖面的地质构造解译,电性结构以及可能存在的地热储区域见图4。

E剖面与G剖面整体具有相似性,经对比分析,断层在地表中低电阻覆盖层厚度与范围方面存在差异性,G剖面断裂更深,更为复杂,说明断

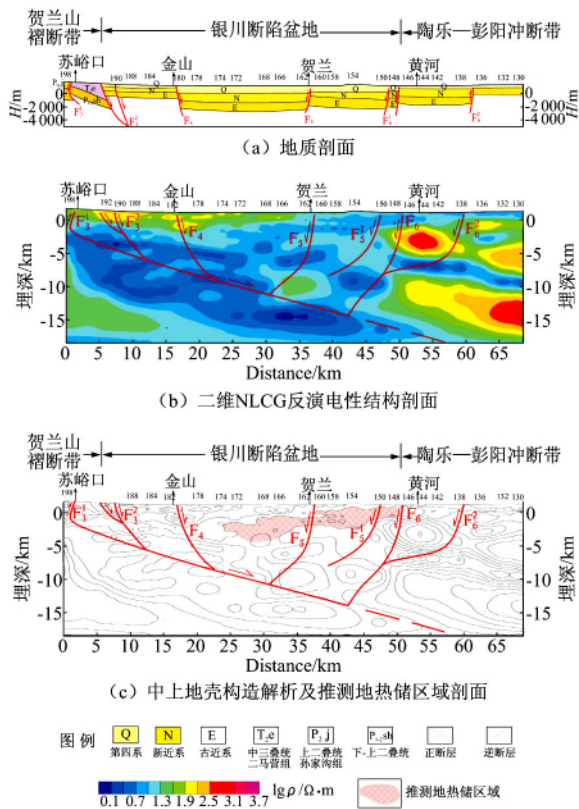


图4 大地电磁G剖面推测地热储区域

Fig. 4 The area of geothermal reservoir speculated from MT profile G

层在E剖面与G剖面上的形成时间存在差异性,推测银川断陷盆地在G剖面的断陷时间早于在E剖面上的断陷时间,G剖面上覆盖第四系细砂、粉砂岩(中低阻电阻率特征)厚度更大,很厚的第四系覆盖可以对深部地热起到很好的保温作用。

3.3 F剖面深部电性结构特征

F剖面位于银川断陷盆地的南部,横跨银川断陷盆地与陶乐—彭阳冲断带两个构造单元。从图5看,电性剖面自西向东呈现两个明显的电性差异带:银川断陷盆地深部表现为横向与纵向都非均匀分布的电性结构特征;陶乐—彭阳冲断带表现为纵向分层横向稳定的电性结构特征。F剖面银川断陷盆地控制主要断裂有卢花台断裂(F_4)、银川断裂(F_5)、黄河断裂(F_6)。卢花台断裂(F_4)和银川断裂(F_5)均表现为倾向东南的正断层特征;黄河断裂(F_6)表现为倾向西北的正断层。卢花台断裂(F_4)一直向东延伸与银川断裂在3 km左右的深度交汇,与黄河断裂在6 km左右的深度相交汇。

地表新生带低阻沉积地层厚度在2.5 km左右;低阻地层之下为古生代或更老地层的综合反

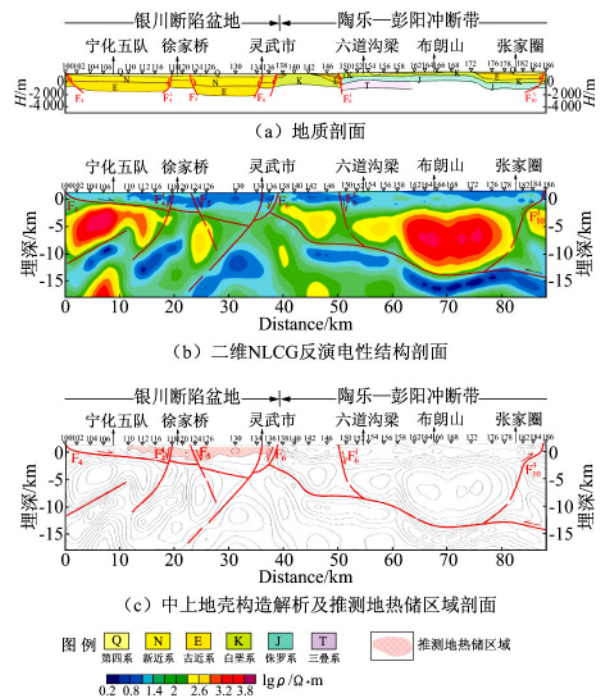


图5 大地电磁F剖面推测地热储区域

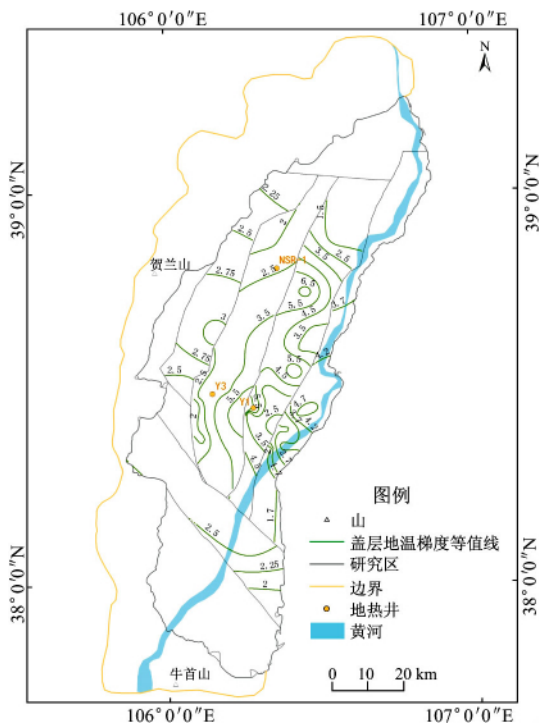
Fig. 5 The area of geothermal reservoir speculated from MT profile F

映,电阻率表现为中高阻的特征,但是在中高阻地层中间发育两条倾 70° 左右的低阻带,低阻带向上分别与芦花台断裂的分支及黄河断裂相接,银川隐伏断裂也对下面的中高阻地层形成了一定的破坏,故而该构造单元深部发育多条隐伏断裂,与银川断陷盆地中段的构造地质背景不同。该剖面的地热储推测分布在银川盆地下方的低阻高导区,但是该热储厚度较小,深部热储储存条件也不理想,比较 E、G 剖面,地热储条件较差。

所以,根据大地电磁资料推测出的银川断陷盆地地热赋存条件较好,尤其是 G 剖面存在大面积的低阻高导区,并且张拉正断层广泛分布,是极好的地热水赋存区域。由大地电磁测深综合推测的热储平面分布位置见图 7(蓝线表示地磁测深解译的地热位置)。

4 盖层地温梯度等值线

盖层温度梯度等值线也是划定热储分布范围的有效方法,一般盖层地温梯度 $>2.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的区域作为热储区域。盖层地温梯度的获得通过



裂属控热断裂,前人常利用控热断裂来划定热储边界,银川盆地控热断裂分布见图7(断层),这与电磁测深解译的边界位置基本吻合。

综上,电磁测深解译的热储位置和盖层地温、控热断裂分析结果基本吻合,确定的热储范围区如图7所示。研究区热储主要分布在银川平原的中部地区,且位于东西向二级阶梯构造的中间地堑部位。打三口深井,深度都在3000 m左右,一口是盆地北边沙湖的NSR-1,出水量最大为1770 m³/d、水温可达80℃以上;一口是Y3井,井口出水温度55℃,单井出水量1430.0 m³/d;另一口Y1井,井口出水温度67.5℃,单井出水量在400.8 m³/d。这三口地热井都在圈定的热储分布范围内,水温较高,水量较好,属中低温地热资源。

6 结 论

电磁测深技术MT法在平原深部地热调查中是适用的,这对于缺少资料地区的地热调查具有重要意义。银川平原热储主要分布在平原的中部地区,且位于东西向二级阶梯构造的中间地堑部位,热储埋藏在3000 m左右,热水的形成、赋存、径流受深大断裂控制,属中低温地热资源。

参考文献:

- [1] 肖骑彬,梁光河,徐兴旺,等.北京二十里长山—平谷盆地MT测量与地层含水性研究[J].地质科技情报,2006,25(1):90-94.
- [2] 左丽琼,王彩会,荆慧,等.综合物探方法在南通小洋口地区地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2016,13(1):123-129.
- [3] 马为.CSAMT在镜泊湖玄武岩覆盖区深部地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(4):450-454.
- [4] 刘长生.陈家凹陷MT法地热勘探实践[J].特种油气藏,2008,15(增):328-329.
- [5] 张立恩,陈少锋,姜继莲,等.MT法在地热勘探中的应用[J].石油地球物理勘探[J].2004,39(增):67-70.
- [6] 叶建中.羊八井地热物探的经验[J].物探与化探,1979(5):12-16.
- [7] 黎雪梅,聂瑞平,王连成,等.MT在天津地热勘查中的应用及主要成果[J].地质调查与研究,2010,33(1):77-80.
- [8] 李辉.大地电磁(MT)方法在黑龙江省双鸭山地区地热资源勘察中应用[J].黑龙江国土资源,2013(9):55-56.
- [9] 李鹏.天然源大地电磁法在天津静海地热勘查中的应用效果[J].资源节约与环保,2014(6):53-55.
- [10] 李华强.大地电磁测深在地热资源勘查中的应用研究[J].勘察科学技术,2013(6):61-63.
- [11] 刘志龙,叶高峰,魏文博,等.海拉尔盆地中—上地壳电性结构特征研究[J].地球物理学报,2015,58(12):4425-4435.
- [1] 肖骑彬,梁光河,徐兴旺,等.北京二十里长山—平谷