

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2020.04.013

音频大地电磁法在泸沽湖地区地热勘查中的应用

朱丽丽,左焕成,龚旭,李功振

(四川省冶金地质勘查院,成都 610051)

摘要: 利用音频大地电磁测深(AMT)在泸沽湖地区进行地热资源勘查,在分析地热形成条件的基础上,通过音频大地电磁测深和大地电磁测深(MT)数据联合反演,结合地热资源赋存有关的水文地质条件,对反演图件进行推断解释,查明了区内主要断裂构造位置、产状、规模及地下热储层深度,取得了较好的应用效果。

关键词: 音频大地电磁测深;地热;断层;泸沽湖;四川省

中图分类号: P631;P618.33 **文献标识码:** A

0 引言

地热作为一种绿色的清洁能源,因其具有功能多、用途广的特点,近年来受到人们的青睐,地热资源的勘探、开发-利用力度明显增强^[1-4]。泸沽湖位于四川省盐源县和云南省宁蒗县交界部位,为雅砻江水系理塘河的支流;湖泊属于高原断层溶蚀陷落成因,面积 50.1 km²,最大水深 105.3 m,是我国第三大深淡水湖泊。周边主要居住有摩梭人、彝族和普米族,优美的自然环境和奇特的多民族风情使泸沽湖成为著名的旅游景区,积极、合理的勘探和开发该地区地热水资源,将对景区的长期发展、生态和环境保护具有重要意义。本文在充分收集利用前人资料的基础上,在区内选取典型的靶区,采用音频大地电磁测深(AMT)结合大地电磁测深(MT)的物探勘查方法,初步查明了研究区断裂构造的位置、空间分布特征及热储层的埋藏深度与分布范围,为地热勘探提供了依据。

1 研究区地热形成条件

研究区地貌区划属横断山系切割山地峡谷区,

横断山北段高山峡谷亚区和滇东盆地山原区,滇西北中山山源亚区交界地带。泸沽湖周边群山环绕,大气降水经基岩裂隙、岩溶裂隙等渗入地下热储层,地下水补给来源充沛。

1.1 地层岩性条件

研究区地层出露较为连续,出露较完整的石炭系、二叠系和中-下三叠统。区内最下部地层为中泥盆统(D_2)含硅质泥晶灰岩,上面依次覆盖中上石炭统(C_{2-3})泥灰岩夹硅质岩,下二叠统(P_1)生物碎屑灰岩,西漂落组(P_{1x}),上二叠统杨家坪组(P_{2y})、黑泥哨组(P_{2h})和长兴组(P_{2c}),下三叠统腊美组(T_1l)和中三叠统北衙组(T_2b)等地层(图1)。区内具有富水性较强的下二叠统(P_1)生物碎屑灰岩,其岩性较为稳定,厚度约 300 m,均为浅灰-灰色生物碎屑灰岩,透水性好,是区内优质的储水层位。其上覆的下二叠统西漂落组,上二叠统杨家坪组、黑泥哨组和长兴组多以致密状玄武岩、致密状玄武岩夹凝灰岩、砂岩、沉凝灰岩夹灰岩、泥岩等,为良好的隔水层和盖层。

1.2 构造条件

研究区内大断裂发育、切割深、规模大,区域地下水沿断裂带部分位置下渗,与深部热液混合变热,在地质构造控制下作深层循环,并沿地壳薄弱地带渗流通道向浅部运移,在断裂带周边以温泉的形式

收稿日期: 2020-04-09; 改回日期: 2020-09-02; 责任编辑: 余和勇

作者简介: 朱丽丽(1987—),女,工程师,硕士,主要从事地球物理勘查工作。通信地址:成都市成华区地勘路6号,四川省冶金地质勘查院;邮政编码:610051;E-mail:545262634@qq.com

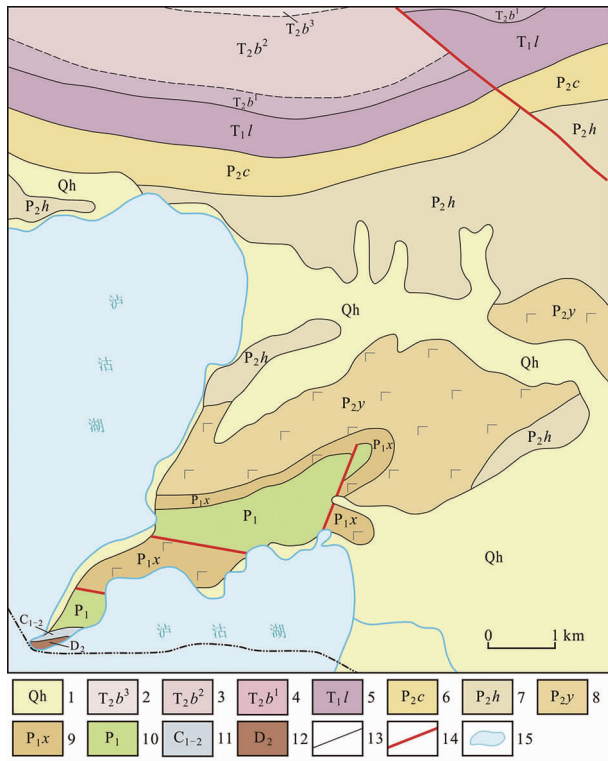


图 1 泸沽湖研究区地质略图

Fig. 1 Geological sketch of Lugu lake area showing strata distribution

1. 第四系全新统; 2. 中三叠统北衙组三段; 3. 中三叠统北衙组二段;
4. 中三叠统北衙组一段; 5. 下三叠统腊美组; 6. 上二叠统长兴组;
7. 上二叠统黑泥哨组; 8. 上二叠统杨家坪组;
9. 下二叠统西漂落组; 10. 下二叠统(未分);
11. 中-上石炭统; 12. 中泥盆统; 13. 地质界线;
14. 断裂; 15. 湖泊

出露地表。区内发育 7 条断裂构造(图 2), 与热水形成关系密切的注夸—海门断裂破碎带(F_1), 全长约 30 km, 以小洛水村为界, 其西断裂走向为 130° , 其东断裂发生转向, 走向约 105° , 倾向 NE, 倾角 $> 70^\circ$, 向南凸出明显, 与区域构造样式一致。破碎带宽度 200~300 m, 破碎带内主要为上二叠统黑泥哨组的玄武岩、泥灰岩, 发生动力变质后极为破碎, 破碎带内如形成导热通道, 将是地热开发的有利位置。

1.3 地下水补给径流条件

区内热矿水的形成属于地下水深循环热交换水热对流型地热水系统, 研究区属高中山, 热矿水含水层深埋于地下, 其上有厚层玄武岩、凝灰岩、砂泥岩等构成相对的隔水顶板。地下热水的补给区在研究区北西部和南东部山区, 海拔 3500~4000 m, 岩石裸露, 褶皱、断裂发育, 接受大气降水补给, 本区年降雨量为 1000 mm, 雨水沿岩层面、断裂破碎带、裂

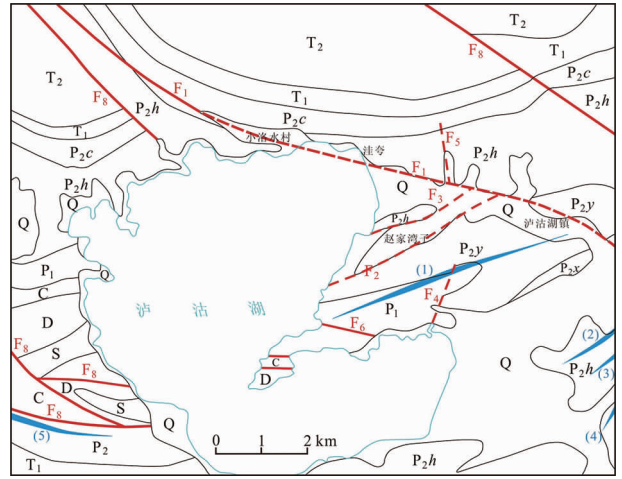


图 2 泸沽湖区域构造图

Fig. 2 Map showing regional structure of in Lugu lake

隙、溶隙渗入地下深部, 通过远距离运移, 形成地下热水迳流, 呈封闭式向北西迳流运动, 向深部循环, 并吸收围岩温度和可溶盐类后, 汇集形成热矿泉水。

2 研究区地球物理特征

为了解研究区地层、岩性的电性特征, 特采集测定了区内主要地层(岩性)的物性标本电阻率参数(表 1)。分析可知, 区内各地层(岩性)具有一定的差异, 用音频大地电磁测深和大地电磁测深圈定断层破碎带、划分不同岩性界面具备了良好的物性前提。

3 方法技术

本次选择音频大地电磁测深(AMT)结合大地电磁测深(MT)的物探勘查手段。AMT 采集频率范围为 10400~0.35 Hz, 浅层分辨率高, 工作效率高; MT 采集频率 320~0.001 Hz, 探测深度大, 易于探测深部的断裂构造。两种方法受高阻层屏蔽作用影响小, 对高导体反应灵敏。能有效探测与地下热水有成因关系的断裂构造空间位置和基底构造形态, 为地热钻探布孔提供依据^[4-7]。本次工作共布设 3 条 AMT 剖面, 编号为 P1、P2 和 P3, 测线方位角 167° ; P1 剖面长 5.45 km, P2 长 2.85 km, P3 长 2.1 km。点距为 50 m, P1 和 P3 测线重点段 AMT 点距 25 m。MT 测点布设在 P1 剖面, 点距 200 m, 起点编号为 P1-0(剖面起点位置为 0 m), 终点编号为 P1-5450(剖面终点位置为 5450 m)。

表 1 研究区地层(岩性)电阻率特征

Table 1 Statistics of characteristics of lithologies of strata and the resistivity of the study area

地层	岩性	电阻率/ $\Omega \cdot m$	备注
下二叠统(P_1)	生物碎屑灰岩,灰岩	2000~10000	深埋地下、岩溶发育、富水时,电阻率较低($20 \sim 200 \Omega \cdot m$)
中泥盆统(D_3)	含硅质泥晶灰岩	800~3000	透水性、含水性较下二叠统生物碎屑灰岩差,电阻率较高
中—上石炭统(C_{2-3})	泥灰岩夹硅质岩		
下二叠统西漂落组(P_{1x})	致密状玄武岩	1000~5000	含水性、透水性较差,电阻率较高
上二叠统杨家坪组(P_{2y})、 黑泥哨组(P_{2h})、长兴组(P_{2c})	致密状玄武岩夹凝灰岩 砂岩		
下三叠统腊美组(T_{1l})	凝灰岩夹灰岩		
中三叠统北衙组(T_{2b})	泥岩	10~50	
第四系全新统(Qh)	残坡积层	<100	由于断裂中含水、岩石破碎,电阻率值整体相对较低
断裂破碎带		<100	由于断裂中含水、岩石破碎,电阻率值整体相对较低

资料处理分为野外资料预处理和资料后续处理。预处理的主要目的是将时间序列数据转换为频率域测深曲线数据,即将 V8 采集的时间序列数据经 SSMT 2000 软件从时间序列变换到频率域并计算出视电阻率和阻抗相位。后续处理是对阻抗文件进行格式转换之后,采用 MTEDITOR 软件处理,对数据进行飞点剔除等处理,输出 EDI 格式文件,使用 WINGLINK 软件进行二维反演。

4 成果解释

4.1 推断解释准则

(1) 岩石地层电阻率与地层的岩性、含水性、孔隙度和渗透率,地下水的矿化度,地层所处温度等因素有关。孔隙度大、含水性好、地下水矿化度高、地层温度高的岩石地层电阻率值相对较低,因此,通过电阻率参数可以判别热储构造。

(2) 岩性界面或断裂构造电阻率垂向等值线图表现出在岩性界面或断裂的一侧较小范围内电阻率梯度变化明显,或在岩性界面和断裂两侧电阻率有较大的差异。断裂构造的错动,一般会形成破碎带,在垂直于构造布置的测线电阻率断面图表现为较陡立的低阻异常,平行或近平行于构造布置的测线断层电阻率特征可能表现为水平分布或较缓分布的低电阻带。

4.2 P1 剖面分析

图 3 为 P1 剖面的音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图。剖面电性结构纵向分层、横向分块,由浅至深电阻率由低→高→低。浅表的 20~100 m,电阻率低,电阻率值 0~150 $\Omega \cdot m$,推测为第四系覆盖层的反映。

剖面平距 1100~1400 m、标高 2000~2700 m

之间岩体电阻率存在明显的梯度带,推断为 F_1 断裂,倾向 NNW,倾角约 70° ,断裂破碎带的宽度约为 300 m,随着深度的加大,破碎带的宽度逐渐变小。

剖面平距 1200~1300 m,地表露头为灰岩,该灰岩的电阻率较高。

剖面平距 1300~4500 m、深度 400~2800 m,电阻率相对较高,推测是二叠系下统的西漂落组和上统的杨家坪组、黑泥哨组致密玄武岩、凝灰岩、玄武岩及灰岩透镜体的反映;这些地层岩石完整性较好,主要为致密玄武岩,形成了较好的热储盖层,为深部可能的热水存储提供了一定的构造-岩性条件。

剖面平距 4500~5100 m,地表主要出露灰岩,地层产状 $113^\circ \angle 32^\circ$,推测随着深度增加,该套灰岩地层可能向北西向延伸,厚度约为 300~400 m,浅部的灰岩地层临近背斜核部,顶部受到张性力的影响,连通性好,赋存水易向深部流通,导致电阻率较高; F_1 和 F_2 断裂穿过深部的灰岩地层,顶部为致密玄武岩盖层,深部的灰岩地层赋水能力和储水客观条件相对比浅部的灰岩好,是较为理想的热储层。随着深度的增加,

剖面的南东端出现大量低阻层,同时在 P1 剖面的深部电阻率也呈持续降低状态,推测其可能为泥盆系-石炭系的泥晶灰岩。由于灰岩中泥质含量较多,故而岩石的电阻率较低。

4.3 P2 剖面分析

图 4 为 P2 剖面音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图。浅层 20~80 m 电阻率低,电阻率值范围 0~70 $\Omega \cdot m$,推测为第四系覆盖层,厚约 100 m。

平距 600~1000 m、标高 1500~2600 m 之间岩体电阻率存在明显的梯度带,与周围岩体电阻率有明显差别,推断为 F_1 断裂的反映,梯度带的倾向 NE、倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$,与 P1 剖面推测的 F_1 断裂为同

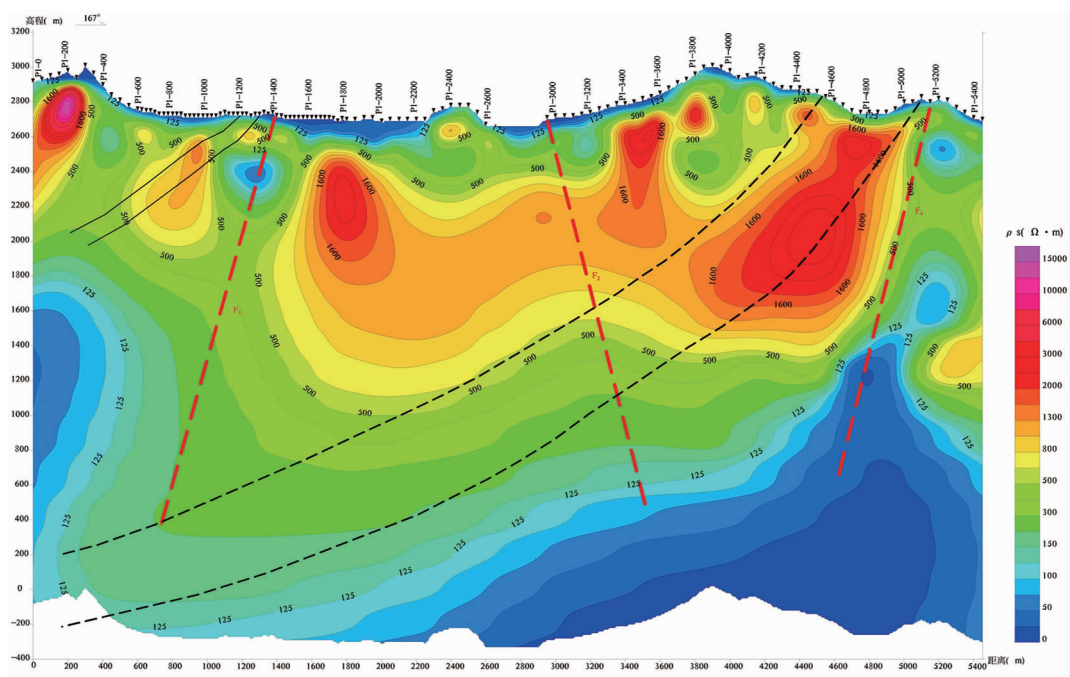


图 3 P1 音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图

Fig. 3 Apparent resistivity section of 2D inversion of magnetotelluric sounding data (P1)

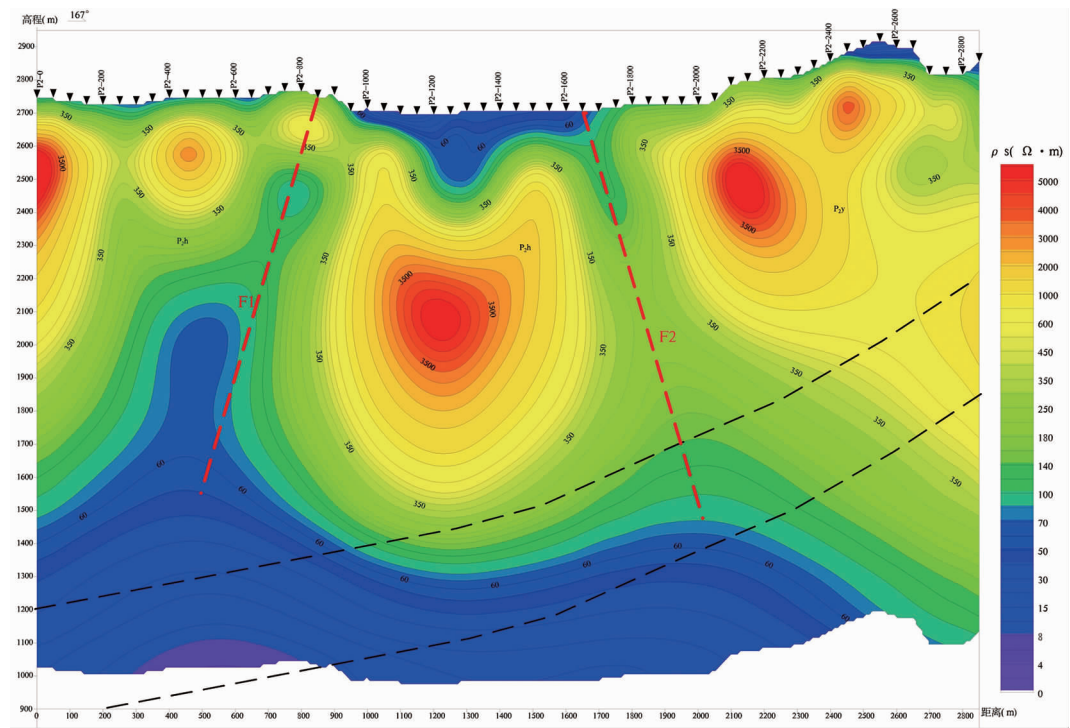


图 4 P2 音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图

Fig. 4 2D inversion of apparent resistivity section of audio magnetotelluric sounding (P2)

一断裂。

平距 1000~1600 m、标高 1500~2700 m 之间的岩体电阻率值为 200~5000 $\Omega \cdot \text{m}$, 相对较高, 且结构完整, 推测可能为二叠系下统的西飘落组与上统的杨家坪组、黑泥哨组致密玄武岩、凝灰岩玄武岩及灰岩透镜体的反映。

与 P1 剖面相似, 深部存在有厚 300~400 m 的低阻体条带, 推断可能为二叠系下统(P₁)生物碎屑

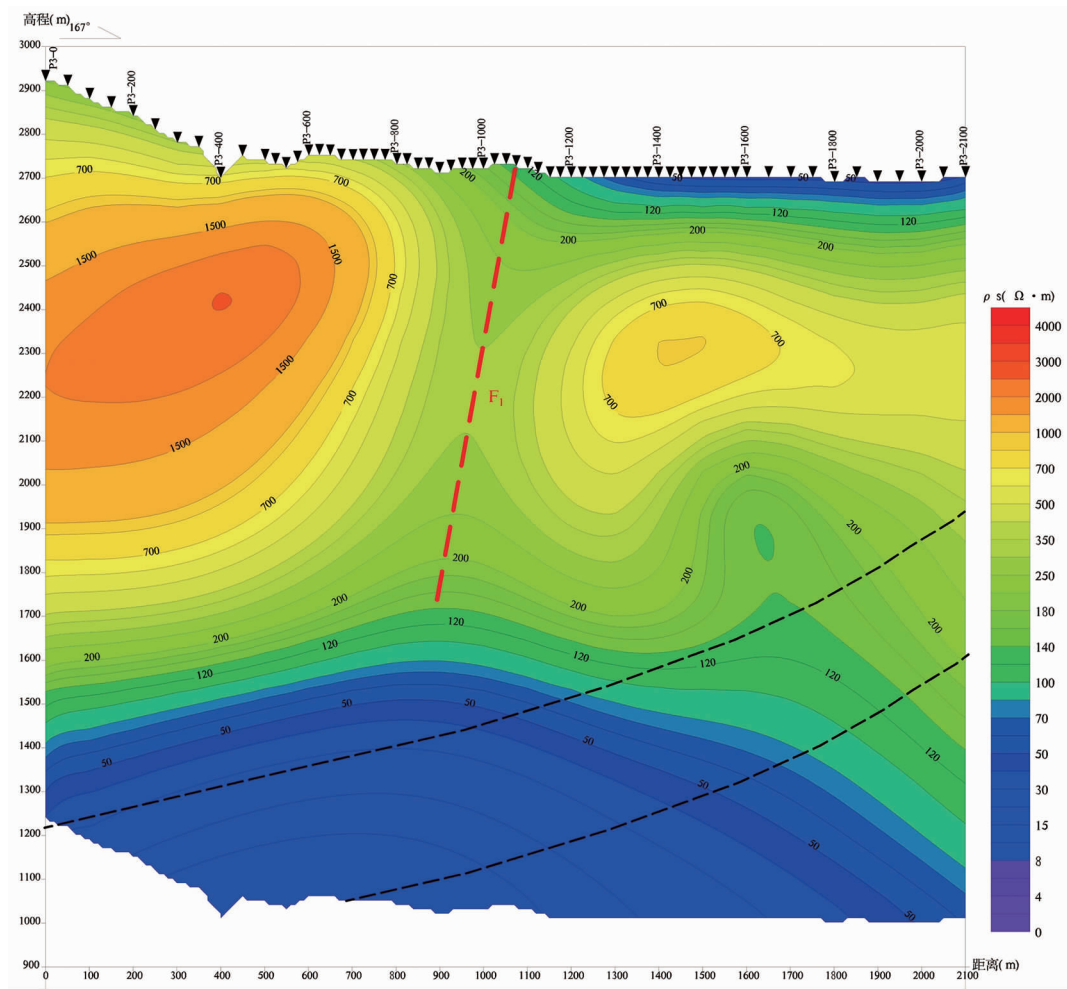


图5 P3 音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图

Fig. 5 2D inversion of apparent resistivity section of audio magnetotelluric sounding (P3)

灰岩所致。该套地层之下则为泥盆系-石炭系的泥晶灰岩。

4.4 P3 剖面分析

图5为P3剖面音频大地电磁测深二维反演视电阻率断面图。P3剖面同样可明显推断出 F_1 断裂。P3剖面的电性结构与另2条剖面相似,剖面南段的浅表出露第四系覆盖层,厚约100 m。

标高1500~2700 m之间的岩体电阻率相对较高,且结构完整,推测为二叠系下统的西飘落组与上统的杨家坪组、黑泥哨组致密玄武岩、凝灰岩玄武岩及灰岩透镜体的反映。

与P1剖面相似,深部有厚约300~400 m的低阻体条带,表明可能为二叠系下统(P_1)的生物碎屑灰岩。该套地层之下则是泥盆系-石炭系的泥晶灰岩。

综合物探AMT剖面视电阻率解译资料显示,P1剖面平距1100~1400 m、标高2000~2700 m岩体,P2剖面平距600~1000 m、标高1500~2600 m岩体和P3剖面平距900~1150 m、标高1700~2500 m岩体的电阻率都存在明显梯度变化带,与周围的岩体电阻率有显著差别,推断异常为断裂引起,3条剖面所推断的断裂均为注夸—海门断裂(F_1)。该断裂在P1剖面的深部切截了二叠系的灰岩,研究区内褶皱、断裂等构造活动较为频繁,该断裂成为有利的导热、导水通道。结合地形地貌、地质构造、水文地质条件、综合物探剖面资料等因素,推断区内寻找地热水的有利地段为注夸—海门断裂(F_1)破碎带的北侧,主要热储含水带为断裂破碎带内含水,具有远程补给、深层水热沿断裂带循环的特点。

5 结论

本次工作通过大地电磁测深(MT)和音频大地电磁测深(AMT)数据联合反演,兼顾了浅层地质构造分辨率和深部断裂走向,提升工作效率的同时也增强了反演结果的可信度。结合研究区地质资料、音频大地电磁测深反演资料,确定了热储断裂带位置及盖层、热储层的埋深及空间分布,说明所选用的物探方法是正确、有效的,利用地球物理方法进行前期地热资源调查是十分必要的。但是,引起地下电阻率变化的因素很多,利用音频大地电磁测深法勘查地热资源,需要结合已知地质、地球物理特征和其他有关资料进行综合研究,才能做出合理的地质解释。综合分析认为,音频大地电磁测深(AMT)方法

在该区寻找地热资源是有效可行的。

参考文献:

- [1] 孙海川,刘永亮,邵程龙. 综合物探在海石湾地区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探,2019,43(2):290-297.
- [2] 刘会毅,徐坤,国吉安,等. 综合物探方法在安徽沱湖地区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2018,15(5):648-654.
- [3] 刘振华. 综合物探技术在邯郸地热田勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2013,10(1):111-116.
- [4] 关铎. 借鉴国外经验,促进我国地热产业政策发展[J]. 水文地质工程地质,2011,38(2):1-5.
- [5] 胡宁,张良红,高海发. 综合物探方法在嘉兴地热勘查中的应用[J]. 物探与化探,2011,35(3):319-324.
- [6] 张炯,黄少鹏,傅饶,等. 大地电磁测深在火山区地热研究中的应用[J]. 岩石学报,2017,33(1):279-281.
- [7] 马晓东,刘洪波,白锦林. 综合物探在莘县地区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探,2014,38(3):461-464.

Application of audio magnetotelluric method in geothermal exploration in Lugu lake area

ZHU Lili, ZUO Huancheng, GONG Xu, LI Gongzhen

(Sichuan Institute of Metallurgical Geology Exploration, Chengdu 610051, China)

Abstract: Audio Magnetotelluric (AMT) method has been applied in exploring geothermal resources in Lugu Lake area. On the basis of analyzing the forming conditions of geothermal resources, magnetotelluric sounding and audio magnetotelluric sounding data are jointly inversed and the hydrogeological conditions combined to interpret and infer the inversion map. Location, occurrence and size of major faults and depth of the geothermal reservoirs in the study area are made clear. The application result is good.

Key Words: Audio Magnetotelluric sounding; geothermal resources; fault; Lugu lake area; Sichuan province