

# 直流电法在地下热水勘查中的应用 ——以资溪法水温泉为例

龚育龄<sup>1,2</sup>, 王良书<sup>1</sup>, 汤洪志<sup>2</sup>, 郭令智<sup>1</sup>, 刘庆成<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地球科学系, 江苏 南京 210093;

2. 华东地质学院 资源与环境工程系, 江西 抚州 344000)

**摘 要:** 法水温泉位于江西资溪县境内。构造上, 它处在耳口—石峡断裂带上的资溪背斜与嵩市向斜之间, 产于隆起区山间盆地。热异常区面积不足  $1\text{km}^2$ , 属小型“山间盆地”型温泉。采用直流电法, 以近场源三极法为主要手段, 圈定了法水温泉区热储水破碎带。在重点区段, 还进行了电测深和联合剖面法测量, 进一步查明了破碎带的倾向、埋深及含水性。从而确定了开发地下热水的钻孔位置, 为当地政府开发利用地热能提供了必要的资料。

**关 键 词:** 直流电法 地下热水 法水温泉 山间盆地; 江西资溪县

中图分类号: P631.323

文献标识码: A

文章编号: 1006-749X(2002)01-79-07

## 1 引 言

在地下热水调查中, 地球物理勘查的主要作用是圈定含水破碎带和热储水的区域分布, 确定开采地下热水的钻孔的适宜位置<sup>[1]</sup>。实验证明, 电阻率和极化率对温度存在着一定的依从关系, 从图1可以清楚地看到, 随着温度的升高, 电阻率( $\rho_s$ )和极化率( $\eta$ )的变化情况。在中低温(小于  $60^\circ\text{C}$ )热田区, 一般为低阻异常<sup>[2~4]</sup>。由此可见, 电阻率和极化率与地下水的温度变化有着直接的依从关系。所以, 电法勘探是寻找地下热水最为直接的方法之一, 它已经成为地热能勘查的重要手段<sup>[5,6]</sup>。直流电法用于地下热水勘查已有数十年的历史, 取得了丰富的研究成果。

法水温泉位于江西资溪县境内, 天然涌水量较小。当地政府为了发展旅游业和养殖业, 拟对该区的地热资源作进一步开发利用。为了确定开采地下热水的钻孔位置, 采

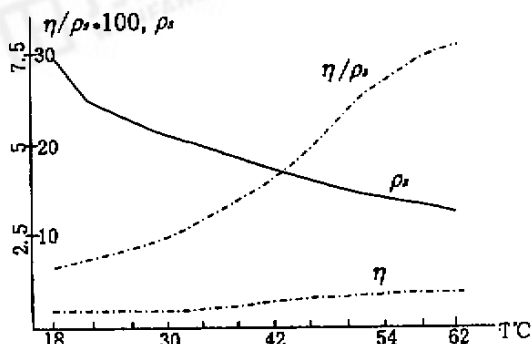


图1 温度与电参数的关系曲线

Fig.1 Relation between temperature and electric parameters

用了直流电法。以实测的视电阻率和视极化率数据为基础,研究该区地下热水的分布特征,为当地政府开发利用地下热能提供了依据。

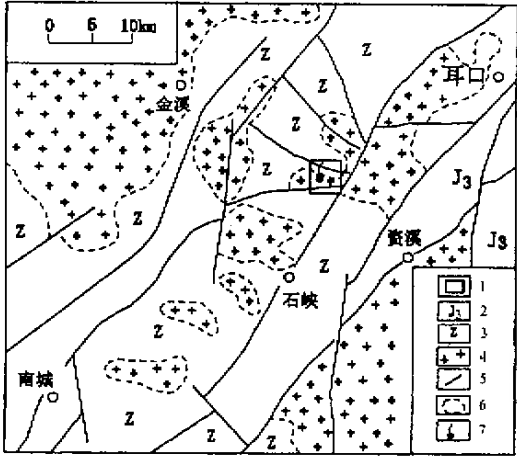
2 测区概况

2.1 地质特征

法水温泉是一个典型的中低温温泉<sup>①</sup>,前人曾在该区作过一些初步的地质、水文调查工作,但研究程度较低。

法水温泉位于武夷山隆起带西麓的资溪县境内,距资溪县城西北约 15km(图 2)。构造上,它处在耳口-石峡断裂带上的资溪背斜与嵩市向斜之间。法水温泉产于隆起区山间盆地,盆地面积不足 1km<sup>2</sup>,为局部的排泄区,盆地边缘高山林立,西北方向的出云峰海拔 1 114m,为局部的汇水区。温泉直接受变质岩系与花岗岩体的接触带控制。

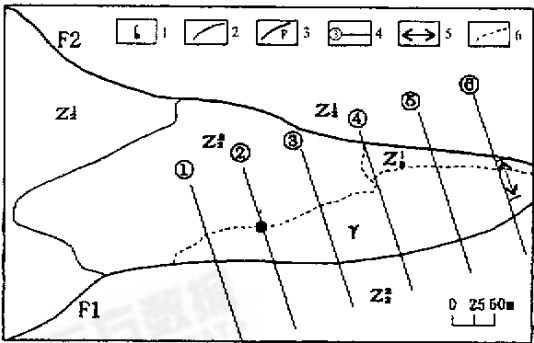
变质岩系特征 法水温泉区(以下称研究区)内出露的地层主要为变质岩系。前人将其归于震旦系上统,并划分为上、下两部分(图 3):下部( $Z_1$ )为中深变质岩系,主要为黑-灰黑色石墨石英片岩,夹多层石墨片岩;上部( $Z_2$ )为浅变质岩系,主要为灰-灰白色石英砂岩,厚度大于 150m。



1-研究区(study area);2-火山岩(volcanic rock);3-震旦系(Sinian System);4-花岗岩(granite);5-断层(fault);6-岩体界线(rock mass boundary);7-温泉(hot spring). (据 1:50 万'江西水文地质图'改编)

图 2 法水温泉区域地质略图

Fig.2 Regional geological sketch map of Fashui hot spring



1-温泉(hot spring);2-地层界线(stratigraphic boundary);3-断层(fault);4-测线(survey line);5-电测深线断(survey lines of electric sounding);6-岩体界线(rock mass boundary); $Z_1$ -石墨石英片岩(graphite quartz-schist sandstone); $Z_2$ -石英砂岩(quartz sandstone); $\gamma$ -花岗岩(granite)

图 3 研究区测线布置图

Fig.3 Map of survey lines

岩浆岩特征 研究区内曾有多次岩浆活动,但无近代火山作用及岩浆侵入。加里东期的资溪岩体、高阜岩体与光泽大岩体曾相连并构成巨大的花岗岩基底,印支期及燕山期小侵入体将加里东期花岗岩基底切割成大小不等的多个岩块。加里东期花岗岩为肉红-深肉红色似斑状中粗粒黑云母花岗岩,空间分布受 NE 向构造控制。区内花岗岩分布见图 3。

① 林强.江西的碳酸矿泉水.全国第二届地热学术会议资料,1986.

**断裂构造特征** 研究区以东有耳口-石峡断裂带、以西是鹰潭-南城断裂带,耳口-石峡断裂带是控制地下热水的主干断裂。研究区内主要有近东西向的张性断裂( $F_1$ )和NW向扭性断裂( $F_2$ )。 $F_1$ 和 $F_2$ 断裂相伴生,属耳口-石峡断裂带的伴生构造,但 $F_1$ 规模大于 $F_2$ 。区内温泉主要受 $F_1$ 张性断裂和 $F_2$ 扭性断裂控制。

**水文地质特征** 法水温泉水温 $43.5^{\circ}\text{C}$ ,流量 $3.922\text{ L/s}$ ,矿化度 $1.8\text{ g/l}$ ,属中低温地热区,碳酸钙钠型<sup>[7]</sup>,具有良好的开发前景。

## 2.2 地球物理特征

**自然电场** 研究区内石英砂岩和风化的花岗岩可以形成非常强烈的自然电场。在个别地段,电位梯度甚至大于 $2\text{ mV/m}$ 。并且由于测区内地形复杂,因此与地形及岩性有关的自然电场常呈大幅度的剧烈变化。在含石墨石英片岩的地段,由于石墨的作用也会产生强烈的自然电场,使本区的自然电场严重地干扰了人工电场的观测,特别是对二次电场的观测。但自然电位的剧变与地下水的活动和运移有密切关系。在法水温泉涌水点附近,自然电位出现明显的正异常,最大幅值为 $12\text{ mV}$ 。其它地方,没有明显规律。

**电阻率** 石英砂岩的电阻率很高,通常为 $n \times 10^2 \sim n \times 10^3 \Omega\text{m}$ ;花岗岩风化强烈,电阻率很低,通常为 $n \times 10 \sim n \times 10^2 \Omega\text{m}$ ;石墨石英片岩的电阻率变化较大,在石墨片岩上,电阻率极低,通常只有 $n \times 10 \Omega\text{m}$ ,但总的来说,石墨石英片岩以呈低阻的特征为主。

**极化率** 石英砂岩的极化率相对较高,为 $3 \sim 8\%$ ;花岗岩极化率较低,为 $1 \sim 4\%$ ;石墨石英片岩的极化率变化较大,可高达百分之十几,这种很高的极化率与石墨层的存在有关。

## 3 工作方法与技术

由于研究区温泉出露直接受变质岩系与花岗岩体的接触带控制,所以物探工作的主要任务是确定变质岩系与花岗岩体接触带(含水破碎带)的位置和含水性。考虑到研究区地热异常范围较小,且地形复杂,工作条件差,根据工作任务及研究区的地质、地球物理特征,选择直流电法应该是最佳方案。测线布置如图3所示。

### 3.1 中间梯度法

供电电极距 $AB = 600\text{ m}$ ,在中部 $200\text{ m}$ 范围内进行测量,最大旁线距离为 $100\text{ m}$ 。测量极距 $MN = 40\text{ m}$ 。试验结果表明,由于受本区较强的自然电场干扰,数据变化较大,且因为本区存在低阻层,一次电场太弱,使测量效果不理想。

### 3.2 近场源三极法

采用近场源装置是为了克服本地区低阻层存在所导致的一次电场太弱的问题。由于测量电极靠近源电极,因此一次电场大大增强。这有利于提高对二次电场的测量精度和压制自然电场的干扰,保证数据的质量。所用装置的参数为 $AM = 30\text{ m}$ , $MN = 10\text{ m}$ 。

### 3.3 三极电测深法

开展电测深工作是为了解地下垂向的电性变化。由于受地形的制约,选择三极测深的装置形式,使用的极距系列及装置系数见表1。

### 3.4 联合剖面法

由于联合剖面法可提供更丰富的地质信息,且具有分辨能力强、异常明显等特点,所以,在重点剖面上采用这种测量方法。电极距为 $AO = BO = 50\text{ m}$ , $MN = 20\text{ m}$ 。

万方数据

表 1 三极电测深极距系列及装置系数

Table 1 Three electrodes sounding arrangement & its coefficients

AO	MN/2	K	AO	MN/2	K
1.5	0.5	12.57	40.0	5.0	989.60
2.5	0.5	37.70	40.0	10.0	471.98
4.0	0.5	98.96	40.0	20.0	188.50
6.0	0.5	224.62	60.0	10.0	1099.56
6.0	3.0	28.27	60.0	20.0	502.65
9.0	3.0	75.40	60.0	30.0	282.74
9.0	5.0	35.19	90.0	20.0	1209.51
12.0	5.0	74.77	90.0	30.0	753.98
15.0	5.0	125.66	90.0	50.0	351.86
15.0	3.0	226.19	120.0	50.0	747.70
25.0	5.0	376.99	150.0	50.0	1256.64
25.0	10.0	164.93			

4 成果解释

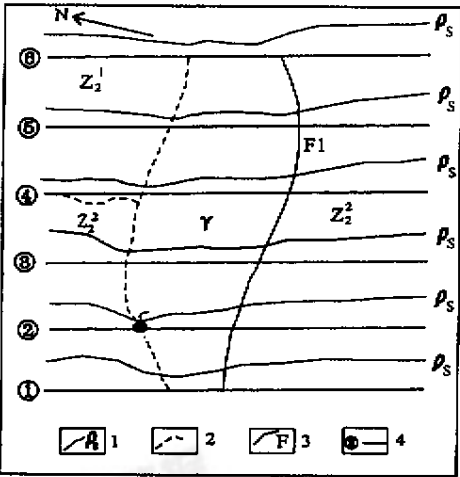
图 4 为采用近场源三极法测量获得的视电阻率曲线。由图可见 (1) 在①~③线上, 两侧视电阻率普遍较高或呈上升趋势, 是石英砂岩( $Z_2^1$ ) 的反应, 中部视电阻率普遍较低, 反映了风化花岗岩( $\gamma$ ) 的电性特征 (2) 在④~⑥线上, 以  $F_1$  断裂为界, 视电阻率南高北低, 反映了北部的石墨石英片岩( $Z_2^2$ ) 和中部的强风化花岗岩相对于石英砂岩电阻率均较低的电性特征 (3) 以④线为界, 在测区北部, 西边的视电阻率明显大于东边的, 结合地质和地球物理特征可知, 这一变化反应了浅变质岩系与深变质岩系的接触界面 (4) 根据以上视电阻率的变化特征, 并结合当地热异常现象, 可以推断图中视电阻率曲线极小点的连线就是变质岩系与花岗岩体的接触界面, 这与前人的结论基本一致。之所以有极小值出现, 是因为, 该接触界面是含地下热水的破碎带( 在第②条测线跨过该界面处有一个温泉涌出点)。在已知的  $F_1$  断裂两侧, 视电阻率有明显变化, 但未出现极小。

同时进行的近场源视极化率测量表明, 在花岗岩与石英砂岩的接触界面上, 视极化率变化不明显, 这是因为花岗岩与石英砂岩的极化率差异不大。

为了阐明热储水破碎带的特点, 作者进一步开展了联合剖面法和电测深。现以测线⑥为例综合解释如下。

图 5 至图 7 分别为第⑥条测线上进行联合剖面法测量获得的视电阻率、视极化率及半衰时( $T_h$ ) 曲线。

由图 5 可以看出, 视电阻率在 100 号点处有个正交点, 且相对两边为低阻。结合区内地质情况和热异常现象进行分析, 进一步查明了破碎带的位置和含热水的性质。图 6 可见, 尽管视



1 - 花岗岩 (granite); 2 - 石英砂岩 (quartz sandstone); 3 - 石墨石英变岩 (graphite quartz-schist); 4 - 视电阻率曲线 (apparent resistivity curves); 5 - 岩体界线 (rock mass boundary); 6 - 断层 (fault); 7 - 测线 (survey lines)

图 4 视电阻率平面剖面图

Fig.4 Apparent resistivity profiles shown in plan

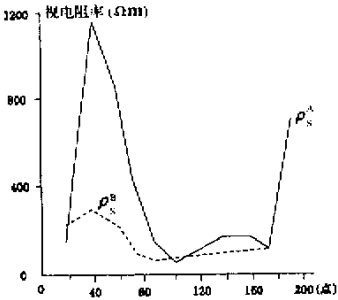


图 5 视电阻率联合剖面曲线

Fig.5 Apparent resistivity curves of combined profiles

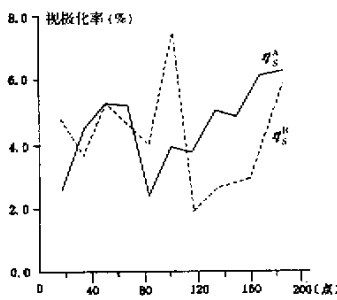


图 6 视极化率联合剖面曲线

Fig.6 Apparent polarizability curves of combined profiles

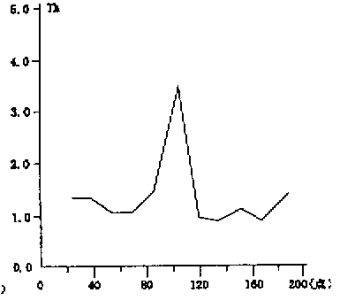


图 7 半衰时曲线

Fig.7 Time curve of half decay

极化率曲线因受干扰而呈锯齿状,但在破碎带上仍呈现明显的反交点,并且左侧  $\eta_s^B$  的极值大于右侧  $\eta_s^A$  的极值,由此判断破碎带是向左侧( NW 方向 )倾斜的。图 7 可见,破碎带的上方 Th 有极大值,这一异常特点也证明了变质岩系与花岗岩体的接触界面是一条含地下热水的构造破碎带。

图 8 和图 9 是在第⑥条测线上 60m 线段范围之内(该线段跨过岩体边界,见图 3)进行电测深获得的视电阻率和视极化率等值线断面图。由图 8

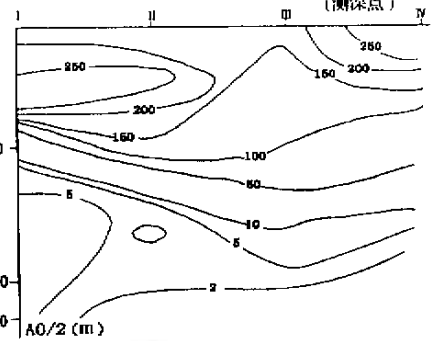


图 8 视电阻率(Ωm)等值线断面图

Fig.8 Contour-section map of apparent resistivity (Ωm)

可见,视电阻率值从浅部向深部逐渐降低(从 250m 减小到 2m),表明其下部岩层为低阻的石墨石英片岩及强风化岩体,而上部相对高阻为第四系坡积、残积层。

在图 9 上,视极化率等值线的深部为高值带,视极化率值为 5~8%,当电极距 AO 大于 100m 时,视极化率明显增大,这是破碎带在相应深度上含地下热水的反映,说明该破碎带是一条含热水的构造带,这和联合剖面法的解释结果相吻合。根据视极化率等值线断面图的特点,可以确定含水破碎带的剖面位置及倾向(约 60°)。由此得出图 9 中所表示的综合地质

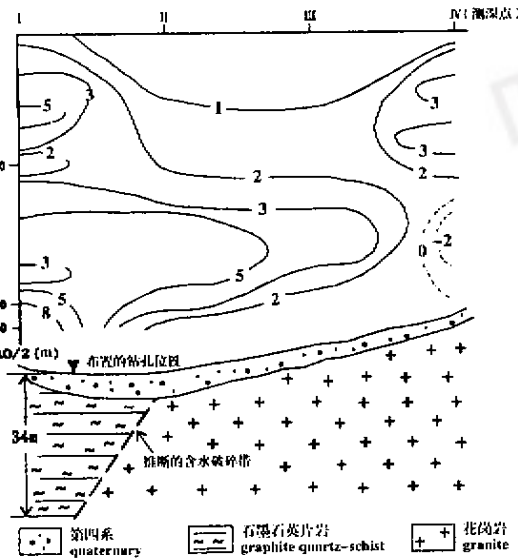


图 9 视极化率(%)等值线断面图

Fig.9 Contour-section map of apparent polarizability (%)

解释结果。

## 5 结论和建议

(1) 法水温泉区变质岩系与花岗岩体的接触界面是一条含热水的构造破碎带, 地下热水沿破碎带走向分布, 即 NEE 向分布。

(2) 根据电测深二维反演解释的结果, 认为, 在第⑥条测线 I 号与 II 号测深点之间, 距离 I 号测深点 7m 处, 破碎带的深度约为 34m。结合当地政府的规划, 并根据区内地形、地物条件, 将开采地下热水的钻孔位置布置在第⑥条测线 I 号和 II 号测深点之间最为适宜。据此, 确定了钻孔位置(见图 9)。

(3) 由于诸多因素的影响, 中间梯度法效果较差, 近场源三极法则有效地克服了电性干扰, 较好地确定了变质岩系与花岗岩体的接触界面, 电测深和联合剖面法进一步查明了破碎带的特点和含水性。

总之, 只要合理地选用电极装置形式, 直流电法对寻找法水地区这种规模较小, 且地形复杂的山间盆地温泉极其有利。

## 参考文献(References):

- [1] Rybach L, Muffler L J P eds. Geothermal Systems: Principles and Case Histories. New York. 1981. 66-76.
- [2] 钱瘦石. 含水岩石中复合参数  $\eta/\rho$  与温度的相关性研究及其地热物探的应用效果. 水文地质工程地质, 1990, (5): 55-60.  
Qian Shoushi. Correlatability between the composite parameter  $\eta/\rho$  of water-bearing rock and temperature and the effect of its application to geothermal geophysical prospecting. *Hydrogeology and Engineering Geology*. 1990, (5): 55-60.
- [3] 陈仲候主编. 工程与环境物探教程. 北京: 地质出版社, 1996. 220-225.  
Chen Zhonghou ed. Course of Engineering and Environmental Geophysical Prospecting. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 220-225.
- [4] Keller G V and Frischknecht F C. Electrical Methods of Geophysical Prospecting. Pergamon Press, Oxford. 1966. 51pp.
- [5] 王良书, Tulinius H, Flovenz O G. 冰岛南部 Bodmódsstadir 地热田的概念模型和自然状态模型. 南京大学学报, 1994, 30(2): 304-313.  
Wang Liangshu, Tulinius H and Flovenz O G. The conceptual model and natural-state model of the bodmódsstadir geothermal field in southern Iceland. *Journal of Nanjing University*, 1994, 30(2): 304-313.
- [6] Sharma V. Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press. New York. 1997. 249-253.
- [7] 黄尚瑶编著. 中国温泉资源. 北京: 中国地图出版社, 1993, 69-75.  
Huang Shangyao. Hot Spring Resources in China: Explanation of the Distribution Map of Hot Springs in China (1:600万). Beijing: China Cartographic Publishing House, 1993. 69-75.

# The Application of Direct Current Prospecting to Underground Thermal Water Investigation : Exemplified by the Fashui Hot Spring , Zixi County , Jiangxi Province

GONG Yu-ling<sup>1 2</sup> , WANG Liang-shu<sup>1</sup> , TANG Hong-zhi<sup>2</sup> , GUO Ling-zhi<sup>1</sup> , LIU Qing-cheng<sup>2</sup>

( 1. Department of Earth Sciences , Nanjing University , Nanjing 210093 , China ; 2. Department of Resource and Environmental Engineering , East China Geology College , Jiangxi 344000 , China )

**Abstract** : Located in a tectonic uplift region in Zixi county , Jiangxi province , the Fashui hot spring along the Erkou-Shixia fault belt is a typical intermountain basin type hot spring with a geothermal anomaly area less than 1km<sup>2</sup>. In order to investigate the distribution of underground thermal water of the hot spring , we used the direct current prospecting to determine the fracture belt bearing underground thermal water with the near-source field electric profiling. Further more , the inclination , depth and the water-bearing characteristics of the fracture zone were investigated by using electric sounding and combined profiling on key profile lines. The positions of boreholes are projected for development and utilization of heat energy of the hot springs.

**Key words** : direct current prospecting ; underground thermal water ; Fashui hot spring ; intermountain basin ; Zixi county in Jiangxi

收稿日期 2001-05-31 )

田 万方数据  
WANFANG DATA