

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.04.007

引用格式:崔玉贵,姜月华,刘林,等. 高密度电法在江西于都黄麟地区地热勘查中的应用[J]. 华东地质, 2020, 41(4): 368-374.

高密度电法在江西于都黄麟地区地热勘查中的应用

崔玉贵^{1,2}, 姜月华³, 刘林³, 梅世嘉³, 张哲豪³, 周权平³, 杨辉³, 邹仁波⁴

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 4. 江西省勘察设计院, 南昌 330000)

摘要: 高密度电法具有点距小、数据采集效率高、探测精度高等优点, 在地热勘查中得到广泛应用。应用高密度电法在江西于都黄麟地区布设了 11 条测线, 对实测电阻率数据进行反演计算, 建立研究区地下二维电阻率模型, 直观刻画各剖面在不同深度电阻率变化特征。分析了 NE 向、NW 向、NNE 向 3 组断裂地下延伸及产状变化规律, 从而推测出地热水赋存有利位置。解释结果显示: 研究区围岩主要呈现相对高阻, 断裂发育区域电阻率横向变化明显且纵向有一定延伸, 破碎带由于含水异常呈现明显低阻。NE 向安远—鹰潭深大断裂与 NNE 向断裂相互作用带富水性良好, 通过布设探采结合井进一步揭示了研究区地热类型为对流型。当设计水位降深 50 m 时, 涌水量可达 920.80 m³/d, 实测水温 44.5 °C, 具有良好的开发利用前景。

关键词: 高密度电法; 地热勘查; 电阻率模型; 断裂; 江西于都

中图分类号: P631.3; P314.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2020)04-368-07

于都县地处江西省东南部、赣州市东部, 由于传统能源严重匮乏, 社会经济发展受到严重制约, 长期是国家级贫困县。自 1987 年原地质矿产部定点扶贫, 自然资源部始终助力老区脱贫攻坚。于都县在地质构造上位于华南造山系东南造山带桃山—雩山隆起、宁(都)于(都)坳陷与南武夷隆起交汇对接部位, 区内构造变形强烈, 褶皱、断裂发育, 地热资源较为丰富^[1-2]。前人曾在研究区开展过基础地质、矿产地质等相关研究^[3], 但由于地质条件复杂, 相关研究未能深入阐明研究区断裂地下展布情况, 对于地热探采、结合井布设无法起到精确指导作用。通常地下断层由于含水形成低阻, 与围岩在电阻率上存在明显差异^[4-5], 这种电阻率的差异性为电法勘探提供了重要前提, 而高密度电法集电测深法和电剖面法于一体, 数据采集速度快、数据量大、分辨率高, 在复杂地质条件下具有显著优势, 成为

地热勘探的有效手段之一^[6-11]。

本文以中国地质调查局“长江经济带地质环境综合调查工程”——“长江经济带地质资源环境综合评价”项目为依托, 在江西于都黄麟地区布置 11 条高密度测线, 采用实测电阻率数据进行反演计算, 建立研究区地下二维电阻率模型, 旨在查明各组断裂地下展布及产状变化情况, 寻找地热水赋存的可利部位, 为研究区地热开发利用提供地球物理学依据, 助力革命老区脱贫攻坚。

1 研究区地质概况

1.1 地质概况

研究区位于江西省于都县黄麟乡东部, 区内出露地层主要为下南华统上施组变余长石石英砂岩, 上南华统沙坝黄组中细粒长石石英砂岩、变余中粗

* 收稿日期: 2020-05-13 修订日期: 2020-07-27 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 中国地质调查局“长江经济带地质环境综合调查工程(编号: 0531)”和“长江三角洲经济区环境地质调查(编号: 0531189、DD20160246)”项目联合资助。

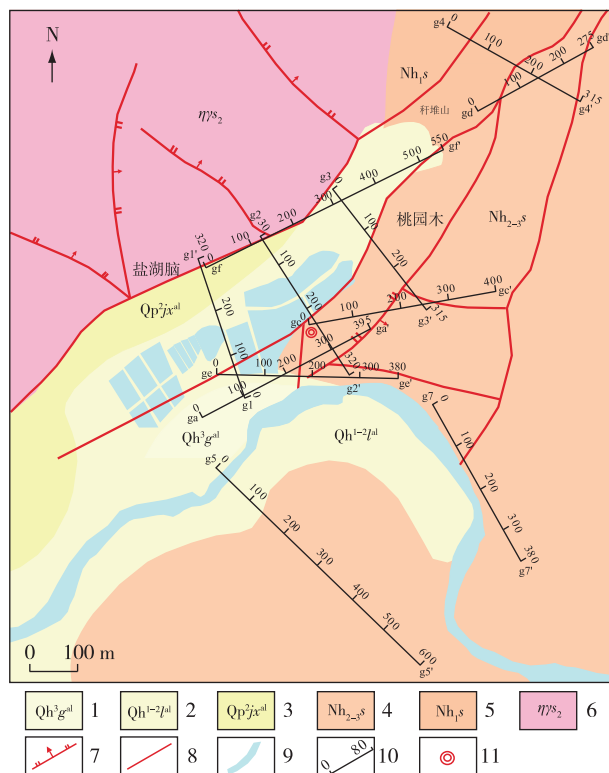
第一作者简介: 崔玉贵, 1996 年生, 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质和地热地质研究。Email: 1134152181@qq.com。

通信作者简介: 姜月华, 1963 年生, 男, 研究员, 主要从事环境地质和水文地质调查研究工作。Email: 316664105@qq.com。

粒石英砂岩及第四系。研究区四周还分布青白口系潭头群库里组、中泥盆统云山组、上泥盆统中棚组、三门滩组、樟寮组和下石炭统梓山组^[12]。

区域岩浆活动强烈,地表主要出露早志留世万田岩体,岩性为中粗粒似斑状英云闪长岩、辉绿岩脉、隐伏的玄武安山岩与英安岩脉,南部区域还出露白鹅岩体,岩性为黑云母花岗岩。

控制研究区构造格架的断裂主要有 3 组。NE 向公馆一万田断裂区域上属安远—鹰潭深断裂构造带的一部分,形成于加里东期,后经多次活动,性质较为复杂。NNE 向断裂,产状较陡,带内岩体破碎,硅化强弱不均,局部发育石英脉。NW 向断裂主要活动时期为燕山期,断裂呈张性或张扭性特征,东南段被安远—鹰潭断裂错断转为 NWW 向,裂隙发育较少,多数为泥质、砂质充填,富水性较差(图 1)。



1.第四纪赣江组;2.第四纪联圩组;3.第四纪进贤组;4.南华纪沙坝黄组;5.南华纪上施组;6.志留纪英云闪长岩;7.断层;8.不明性质断层;9.河流;10.高密度测线;11.钻孔 ZK4-1

图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1.2 水文地质概况

根据地下水赋存条件,研究区地下水类型有第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类。第四系松散岩类孔隙水含水层主要为第四系全新统冲积层下部的砂砾石层,厚 2~4 m,总体富水性较好,以大气降雨渗入和汛期河水侧向补给为主要补给来源,排泄方式主要为人工开采、平水期及枯水期向河流排泄。基岩裂隙水可分为构造裂隙水和风化网状裂隙水。构造裂隙水主要赋存于断裂破碎带内,风化网状裂隙水主要赋存于近地表岩体受风化作用形成的连通性较好的网状风化裂隙带。

1.3 地热地质概况

研究区位于赣南地区,花岗岩为加里东晚期,岩浆余热基本消失,大地热流是该区地热水资源的主要热源。迄今为止,众多学者对江西大地热流值进行过研究。李学礼等^[13]进行江西省大地热流测量,发现江西省热流值为 57.8~82.1 mW/m²,平均值为 70.5 mW/m²;丰城、永平、赣州—龙南热流值为 60~70 mW/m²;胡圣标等^[14]认为华南造山带内区域代表性的热流值为 61~95.7 mW/m²,平均值为 (72.6±8.3) mW/m²;林乐夫等^[15]利用 25 个大地热流数据进行统计分析,发现江西省实测热流平均值为 70.14 mW/m²,自赣北经赣中到赣南,地表热流值越来越高,赣南地区实测热流平均值为 76.03 mW/m²。不同学者统计数据虽有差异,但均反映出江西大地热流值总体北部低、中南部高,赣南地区具有较高地热背景值的特征^[16]。

研究区地质构造复杂,多期断裂发育。区域性安远—鹰潭深断裂切割错动了上地幔莫霍面,具有良好的控热、导热性能,为地热水的形成提供了丰富的热源,也是地热水主要的运移储存空间。研究区热储盖层为南华系变质砂岩,厚度 144.1~288.4 m,含水、导水性能较差,但质地较坚硬,结构较致密,热导率较红层等热储盖层高,隔热保温性能一般。

2 工作原理与技术方法

2.1 工作原理

高密度电法是一种集电测深法和电剖面法于一体的多装置、多极距组合阵列式勘探方法,可用于反演推测研究区地质构造及其性质,同时具有数

据采集速度快、数据量大、观测精度高等优点,是复杂地质条件下地热勘探的有效手段^[17-21]。工作时以常规直流电阻率法为基础,在探测断面上同时布置多个电极,由人工向地下发送电流,使地下形成稳定的电流场,通过自动控制转换装置对所布置的断面进行自动观测和记录。常见的测试排列方式有温纳排列、施伦贝尔(施贝 1、施贝 2)排列、温施排列、偶极-偶极排列、单极-单极排列、单极-偶极排列、三极排列、对称四极排列、中间梯度排列等,不同的排列方式解决地质问题有不同的侧重,其中温纳排列垂向分辨率好,信噪比最高^[22]。

2.2 技术方法

通过前期地质调查工作初步了解各断裂性质,为进一步查明研究区 NE 向、NW 向、NNE 向 3 组断裂地下延伸及产状变化规律,采用温纳装置,在江西于都黄麟地区共布设 11 条高密度测线。NE 向安远—鹰潭区域大断裂是重要控热、导热断裂,呈波状延伸,但其宽度不一,且多被第四系覆盖,地下展布情况不明,为研究其基本性质,垂直于 NE 向安远—鹰潭区域性大断裂布设 4 条测线(g1、g2、g3、g4)。考虑到多组断裂的组合效应可能对导水储水性产生影响,针对 NNE 向断裂布置测线 ge,针对 2 条 NE 向次级断裂布设测线 g5、g7、gc,垂直于 NW 向断裂布置测线 ga、gd、gf。为获得高质量数据,本次高密度电法勘探 g5、gf 测线选取 10 m 极距,其余各测线均选取 5 m 的密集测深点距布极,测量层数满足公式

$$nl = \text{int}((N-1)/3), \quad (1)$$

式中:nl 为测量层数,层;N 为总电极数。高密度电法具体测量参数见表 1。

表 1 高密度电法测量参数

Table 1 Measurement parameters of high-density resistivity method

测线 编号	测点 数/个	点距/ m	测量层 数/层	测线 编号	测点 数/个	点距/ m	测量层 数/层
g1	64	5	21	ga	80	5	26
g2	69	5	22	gc	80	5	26
g3	64	5	21	gd	56	5	18
g4	64	5	21	ge	77	5	25
g5	62	10	20	gf	56	10	18
g7	77	5	25				

2.3 资料处理方法

高密度电法采集的数据采用瑞典 res2dinv 软件在计算机上进行处理,由于野外采集到的原始数据受河流、农田及人工活动干扰存在坏点,首先经过预处理剔除掉这些坏点,并通过内插值法补足剔点数据,然后根据实测地面高程数据建立带地形的初始地电模型,采用圆滑模型的逐步逼近法进行迭代反演、拟合,直到模型的理论计算数据与实测电阻率数据误差达到理想范围,得到二维反演的地电断面^[23-24]。

3 研究区地球物理特征

本次物探工作主要目的是查明研究区断裂展布情况及其富水性。一般断裂含水呈现出电阻率的显著低阻而围岩高阻^[25-30],这种电性的明显差异是电法勘探的重要前提。在本次物探工作正式开展之前,首先收集研究区主要岩性的电性参数,了解其电阻率之间的差异性,为高密度电法结果解释提供基础依据。研究区岩性电阻率参数如表 2 所示。

表 2 研究区岩性电阻率参数^[31]

Table 2 Resistivity parameters of lithology in the study area^[31]

岩性	电阻率/($\Omega \cdot m$)
花岗岩	100~100 000
千枚岩	1 000~2 500
长石石英砂岩	100~1 000

4 成果解释

在高密度电法反演结果图中,断层破碎带含水呈现低阻与围岩高阻形成明显的电阻率差异是成果解释的主要依据。以 g2、gc、ge 3 条典型剖面为例进行重点分析。

4.1 测线 g2 解释结果

图 2 是测线 g2 解释结果,80 m、240 m 处位置左右两侧呈现较明显电阻率差异,90~150 m 下方较浅范围内存在没有圈闭的低阻异常。结合实地调查情况可以推测:0~80 m 主要为花岗岩,电阻率相对较低;80~240 m 为 NE 向安远—鹰潭深大断裂破碎带,倾向 SE;240~340 m 呈现明显高阻,为变质岩。

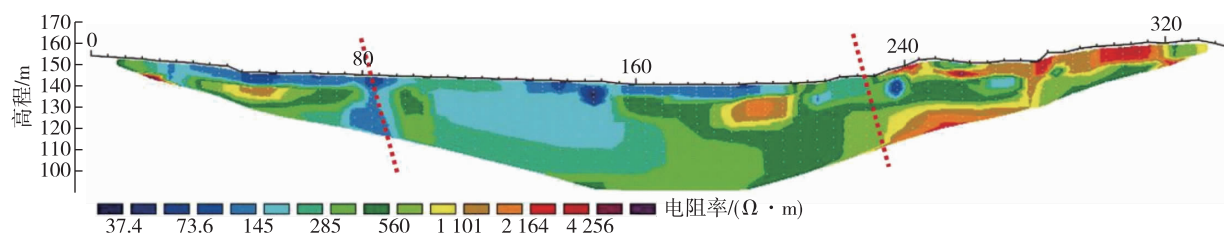


图 2 测线 g2 高密度电法反演结果图

Fig. 2 Inversion results along survey line g2 by high-density resistivity method

4.2 测线 gc 解释结果

图 3 是测线 gc 解释结果,60 m 处电阻率变化存在一定差异性,与实地调查发现的该处存在 NNE 向断裂,且倾向 SE 相吻合。290 m 下方电阻率分

布不均匀,呈现明显差异,实地调查发现该处存在 NWW 向压扭性断裂,富水性较差。310~390 m 下方存在水平低阻圈闭异常,因该处存在养鸡场,推测可能与鸡棚铁架干扰有关。

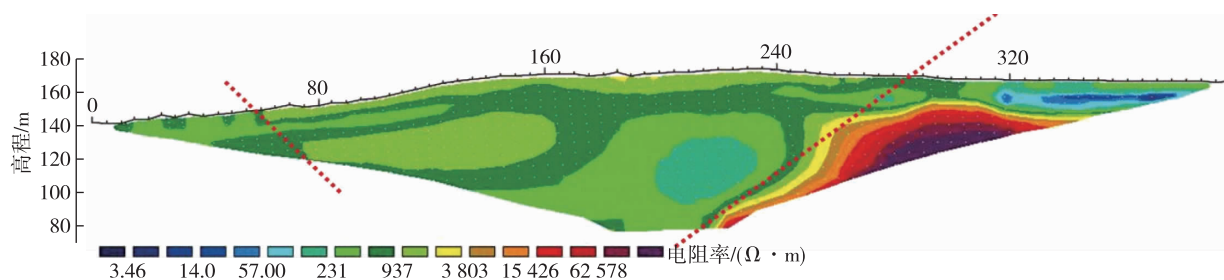


图 3 测线 gc 高密度电法反演结果图

Fig. 3 Inversion results along survey line gc by high-density resistivity method

4.3 测线 ge 解释结果

图 4 是测线 ge 解释结果,170 m 位置两侧电阻率差异明显,为一阶跃状异常,断层异常特征明显,结合实地调查分析,认为该处为 NEE 向断裂与 NE

向断裂共同作用带,170 m 位置左侧为 NE 向安远—鹰潭深大断裂破碎带,电阻率较低,右侧变质岩呈现明显高阻。170~180 m 较浅范围内有低阻圈闭,为该处铸铁水管干扰所致。

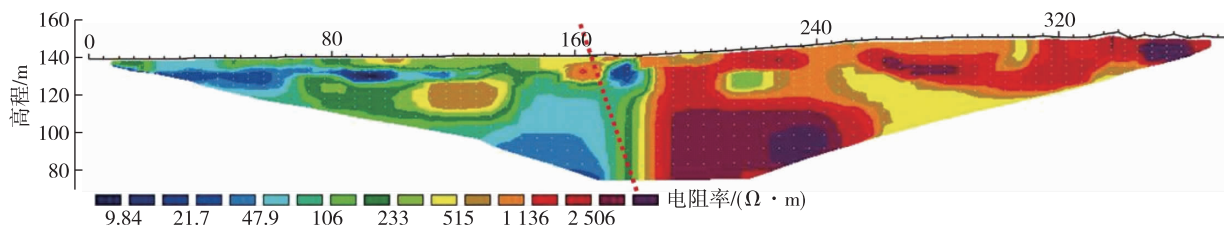


图 4 测线 ge 高密度电法反演结果图

Fig. 4 Inversion results along survey line ge by high-density resistivity method

5 钻探验证

根据地面调查并结合物探解释结果,认为物探测线 g2 与 gc 交汇处即 NE 向安远—鹰潭深大断裂

与 NNE 向断裂相互作用带为地热水赋存有利部位。NE 向安远—鹰潭深断裂在研究区走向 NE 40°,倾向 SE,倾角约 60°。NNE 向断裂走向 10°,倾向 SE,倾角约 80°,根据其产状进行延伸,选择在断裂

交汇处布设 ZK4-1 钻孔(图 5)。

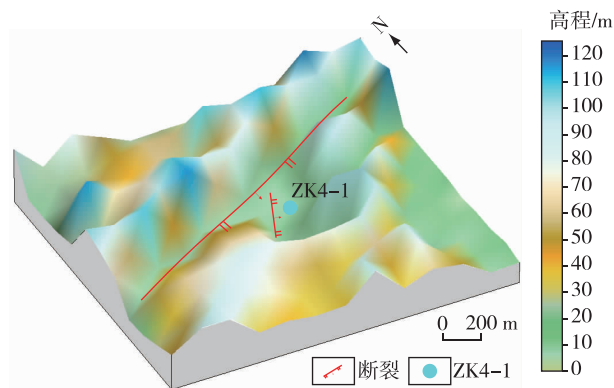


图 5 ZK4-1 钻孔布设示意图

Fig. 5 Schematic diagram for the layout of ZK4-1 borehole

根据钻探揭露, 0~10.82 m 主要为第四系, 10.82~155.86 m 为南华系变质砂岩, 155.86~406.70 m 为断层破碎带, 406.70~568.66 m 为加里东晚期中粒似斑状黑云母二长花岗岩, 406.61~426.54 m、488.0~532.88 m 为主要含水段。

对流型地热系统是近地表水通过多孔透水通道渗透到地下深处, 并在深处与热岩相遇, 然后水和(或)蒸汽等地热流体受力驱使上行, 由此产生对流循环系统^[32]。本次钻探结果印证了研究区地热水的形成主要受安远—鹰潭深大断裂控制, 地热资源类型为对流型。区域性安远—鹰潭深断裂切割错了上地幔莫霍面, 具有良好的控热及导热性能, 为地热水的形成提供了丰富的热源和运移储存空间。补给区为断裂带两侧的中低山基岩区, 补给来源为大气降水的渗入。安远—鹰潭深断裂两侧中低山基岩区植被较发育, 降雨补给充足, 受断裂影响, 两侧中低山区岩体中的次级断裂与节理裂隙发育, 降雨沿裂隙及断裂下渗, 逐步汇聚至断裂带深部破碎带及基岩裂隙密集带, 在此过程不断吸收围岩的热量形成热储层。在地形高差及水力压差下形成地下水循环系统, 部分地热流体在沿断裂上行过程中侧向渗入浅部的花岗岩、变质砂岩裂隙含水层中, 部分则在地势低洼、构造有利部位出露形成温泉。

抽水试验中钻孔最大降深 44.70 m, 涌水量 871.26 m³/d。利用曲线拟合方程, 设计水位降深 50 m 时, 涌水量可达 920.80 m³/d, 且实测水温 44.5℃, 具有良好的开发利用前景。

6 结 论

(1) 运用高密度电法基本查明了于都黄麟地区 NE 向、NNE 向、NW 向断裂的地下展布特征。NE 向安远—鹰潭深大断裂走向 NE 40°, 倾向 SE, 倾角约 60°, 规模较大, 带宽可达百米, 是研究区主要的控热储水断裂; NNE 向断裂走向 NE 10°, 倾向 SE, 产状近乎直立; NW 向断裂走向 290°~340°, 倾向 NE, 倾角 45°~65°, 其东南端受构造运动影响转为 NWW 向, 倾角 50°~70°。

(2) 于都黄麟地区围岩主要呈现高阻, 断裂发育区电阻率横向变化明显且纵向有一定延伸, NE 向安远—鹰潭深大断裂与 NNE 向断裂相互作用带由于含水呈现明显低阻圈闭, 对于探采结合井精准布设具有指导意义。该区地热类型为对流型, 当设计水位降深 50 m 时, 涌水量可达 920.80 m³/d, 实测水温 44.5℃, 具有良好的开发利用前景。

(3) 高密度电法是复杂地质条件下地热勘探的有效手段, 但受限于其勘探深度, 仅适用于浅部勘探, 在地热勘探中还需根据研究区构造产状延伸进行深入分析。由于物探结果解释具有多解性, 且实际测量中易受农田、河流及人工活动影响, 高密度电法勘探分析结果需结合地质资料进行综合分析后再加以运用。

参考文献

- [1] 唐强, 陈学君. 江西省于都县桃溪矿区矿产成矿潜力分析[J]. 世界有色金属, 2018, 513(21): 99-100.
- [2] 周龙全, 李光来, 唐傲, 等. 赣南地区石英脉型钨矿成矿流体特征[J]. 华东地质, 2016, 37(2): 136-146.
- [3] 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志·江西志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 663-781.
- [4] 沈华, 吴跃东, 金世恒, 等. 安徽霍山石英岩玉矿床地质特征与地球物理找矿方法[J]. 华东地质, 2017, 38(1): 51-57.
- [5] 姜月华, 李云, 葛伟亚, 等. 河南巩义抗旱地下水井位确定和钻探方法[J]. 华东地质, 2018, 39(2): 142-150.
- [6] 王庆峰. 高密度电法不同装置的应用效果分析[J]. 科技信息, 2012(7): 145-146.
- [7] 肖宏跃, 雷宛. 地电学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 99-103.
- [8] 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.

- [9] 董浩斌,王传雷.高密度电法的发展与应用[J].地学前缘, 2003,10(1): 171-176.
- [10] LOKE M H, CHAMBERS J, RUCKER D F, et al. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013,95: 135-156.
- [11] LOKE M H, BARKER R D. Barker. Rapid least squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(1): 131-152.
- [12] 段文兵,邓建军,邹国瑶,等.赣南于都地区水文地质调查与地热水勘查成果报告[R].南昌:江西省勘察设计研究院,2019:2-3.
- [13] 李学礼,史维浚,周文斌,等.江西大地热流[J].地质科学, 1992(增刊): 383-385.
- [14] 胡圣标,汪集旻.中国东南地区各造山带大地热流特征[J].地质论评, 1994,40(5): 387-394.
- [15] 林乐夫,王安东,孙占学,等.江西省实测地表热流值及特征[J].能源研究与管理, 2017(3): 91-94.
- [16] 李学礼,周文斌,张卫民,等.江西省大地热流与铀矿关系的初步研究[J].铀矿地质, 1993(4): 22-26.
- [17] 蔡晶晶,阎长虹,王宁,等.高密度电法在地铁岩溶勘察中的应用[J].工程地质学报, 2011,19(6): 935-940.
- [18] 刘晓,唐春,甘建军.高密度电法在江西吉安某地区地热勘查中的应用[J].工程地质学报, 2018,26(增刊): 388-391.
- [19] 刘振夏,陈植华,龚冲.高密度电法在变质岩山区找水中的应用研究[J].地下水, 2019,41(1): 81-82.
- [20] 胡旭,雷宛,张林,等.高密度电法和音频大地电磁法在四川石棉地热勘探中的应用[J].勘察科学技术, 2018, 219(5): 58-61.
- [21] 朱德兵.工程地球物理方法技术研究现状综述[J].地球物理学进展, 2002,17(1): 163-170.
- [22] MAURIELLO P, PATELLA D. Resistivity anomaly imaging by probability tomography[J]. Geophysical Prospecting, 1999,47(3): 411-429.
- [23] 陈琨,罗润林,高柱,等.综合物探方法在寻找地热温泉中的应用[J].工程地球物理学学报, 2015,12(3): 354-360.
- [24] 俞汶,雷宛,刘垒,等.高密度电法在地热勘探中的应用[J].勘察科学技术,2013(4): 49-51.
- [25] BRACE W F, ORANGE A S. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1968,73(4): 1433-1445.
- [26] STESKY R M. Electrical conductivity of brine-saturated fractured rock [J]. Geophysics, 1986,51(8): 1585-1593.
- [27] SLATER L D, Binly A, Brown D. Electrical imaging of fractures using groundwater salinity change [J]. Ground Water, 1997,35(3): 436-442.
- [28] 牛一雄,潘和平,王文先,等.中国大陆科学钻探主孔(0~2 000 m)地球物理测井[J].岩石学报, 2004,20(1): 165-178.
- [29] 沈金松,苏本玉,郭乃川.裂缝性储层的电各向异性响应特征研究 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2903-2912.
- [30] TABBAGH J, SAMOULIAN A, TABBAGH A. Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterization of cracks in soils [J]. Journal of Applied Geophysics, 2007,62(4): 313-323.
- [31] 吴建生,王家林,赵永辉,等.地球物理学入门[M].上海:同济大学出版社,2017:141-147.
- [32] 汪集旻.中低温对流型地热系统[J].地学前缘, 1996,3(3): 96-100.

Application of high-density resistivity method in geothermal exploration in Huanglin area of Yudu County, Jiangxi Province

CUI Yu-gui^{1,2}, JIANG Yue-hua³, LIU Lin³, MEI Shi-jia³, ZHANG Zhe-hao³,
ZHOU Quan-ping³, YANG Hui³, ZOU Ren-bo⁴

(1. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;*

4. *Jiangxi Institute of Survey and Design, Nanchang 330000, China*)

Abstract: The high-density resistivity method, with the advantages of small dot pitch, high data-acquisition efficiency and high detection accuracy, has been widely applied in geothermal exploration. Using the method, 11 survey lines are set up in Huanglin area of Jiangxi Province, the 2D underground resistivity model is established by inversion calculation of measured resistivity data, which visually describes the resistivity variation characteristics of each section at different depths, and the underground extension and occurrence variation of NE, NW and NNE faults are analyzed to predict the favorable location of geothermal water. The interpretation results show that the surrounding rocks in the study area have high resistance, the resistivity of fault areas has distinct lateral variation and longitudinal extension, and the fracture zone has obvious low resistance due to water cut. The water abundance in the interaction zone between NE Anyuan-Yingtian deep fault and NNE fault is good, and the integrated exploration and developing well further reveals that the geothermal system in the study area is convection type. When the designed drawdown is 50 m deep, the water inflow can reach 920.80 m³/d with measured water temperature of 44.5 °C, showing a good development and utilization prospect.

Key words: high-density resistivity method; geothermal exploration; resistivity model; fault; Yudu County of Jiangxi Province