

doi: 10.11720/wtyht.2020.0216

危志峰, 陈后扬, 吴西全. 广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1009-1018. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0216>

Wei Z F, Chen H Y, Wu X Q. The application of wide field electromagnetic method to geothermal exploration in Yichun[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1009-1018. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0216>

广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用

危志峰, 陈后扬, 吴西全

(江西省地质矿产勘查开发局 物化探大队, 江西 南昌 330000)

摘要: 测区为第四系覆盖, 地层分界不明显, 断层错综等地质条件复杂, 且附近有高压输电线、国道等强干扰地区深部进行地热勘查。通过收集和分析测区已有地质资料, 确定该区地热成矿模型, 采用高密度电法和广域电磁法相结合, 提高成果分辨率, 划分出地层分界和断层等地质信息, 推断出地热成矿有利部位。经钻探验证, 取得较好的地热勘查效果。

关键词: 广域电磁法; 地热; 高密度电法

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)05-1009-10



0 引言

江西地区经济的快速发展和人们物质水平的提高, 致使地热旅游产业规模不断扩大, 宜春市温泉地热水开发利用规模与日俱增^[1]。工作区位于宜春市 WS 部, 毗邻明月山 5A 级景区, 为地热水资源为优势产业的黄金地段, 与温汤温泉位于同一大断裂, 是寻找“温汤式”对流型地热水资源的有利地区。地热水是地下沿着断裂构造的裂隙进行深循环获得梯度增温而形成, 为断裂裂隙水热对流型中、低温地热水^[2]。对流型地热属中、深层地热, 埋藏深度在 200~1 500 m^[3]。常规地热勘查地球物理方法如直流电法、大地电磁测深法(MT)和可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)等, 均无法满足工作区对地热勘查的深度、分辨率等要求。近年来, 广域电磁法^[4-5]以其抗干扰能力强、勘探深度大、分辨率高、工作效率高^[6]、成本低等优势在国内得到很好的推广, 本次采用高密度电阻率法和广域电磁法相结合的方式来解决工作区地层、构造等地质问题, 进一步研究工作区地热形成条件。本次地热勘查取得了较好的效果。

1 地质环境背景

工作区位处江西省域西部, 北侧紧邻宜春主城区, 萍(乡)—乐(平)拗陷带西段之南侧, 武功山岩浆核杂岩(也有的称之为武功山变质核杂岩、武功山热穹窿、武功山隆起、武功山复背斜等)NE 部^[7], 区内出露的基岩地层为早古生代寒武纪地层, 具片麻状构造的加里东期花岗岩发育, 地质构造形迹以 NE 向断裂和 NW 向断裂为特色^[8], 工区地质图见图 1。

1.1 地层

区内所发育的基岩地层为寒武纪地层, 以温汤断裂带(工作区内大致以梅花河河谷)为界, 南部可以划分为寒武系外管坑组变粒岩(ϵ_{wt}), 北部可以归属为牛角河组(ϵ_{1n})。第四纪松散冲、堆积物层统称为联圩组(Qhl)^[9]。

寒武系外管坑组主要岩性为片麻状石榴黑云斜长变粒岩、弱片麻状斜长二云变粒岩、黑云更长变粒岩夹石榴黑云片岩、片麻状黑云更长变粒岩夹黑云片岩、石榴黑云斜长片麻岩、黑云角闪变粒岩夹石榴黑云片岩。

收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-07-15

基金项目: 宜春市袁州新城建设有限公司投资项目

作者简介: 危志峰(1984-), 男, 硕士, 主要从事电法、电磁法勘探工作。

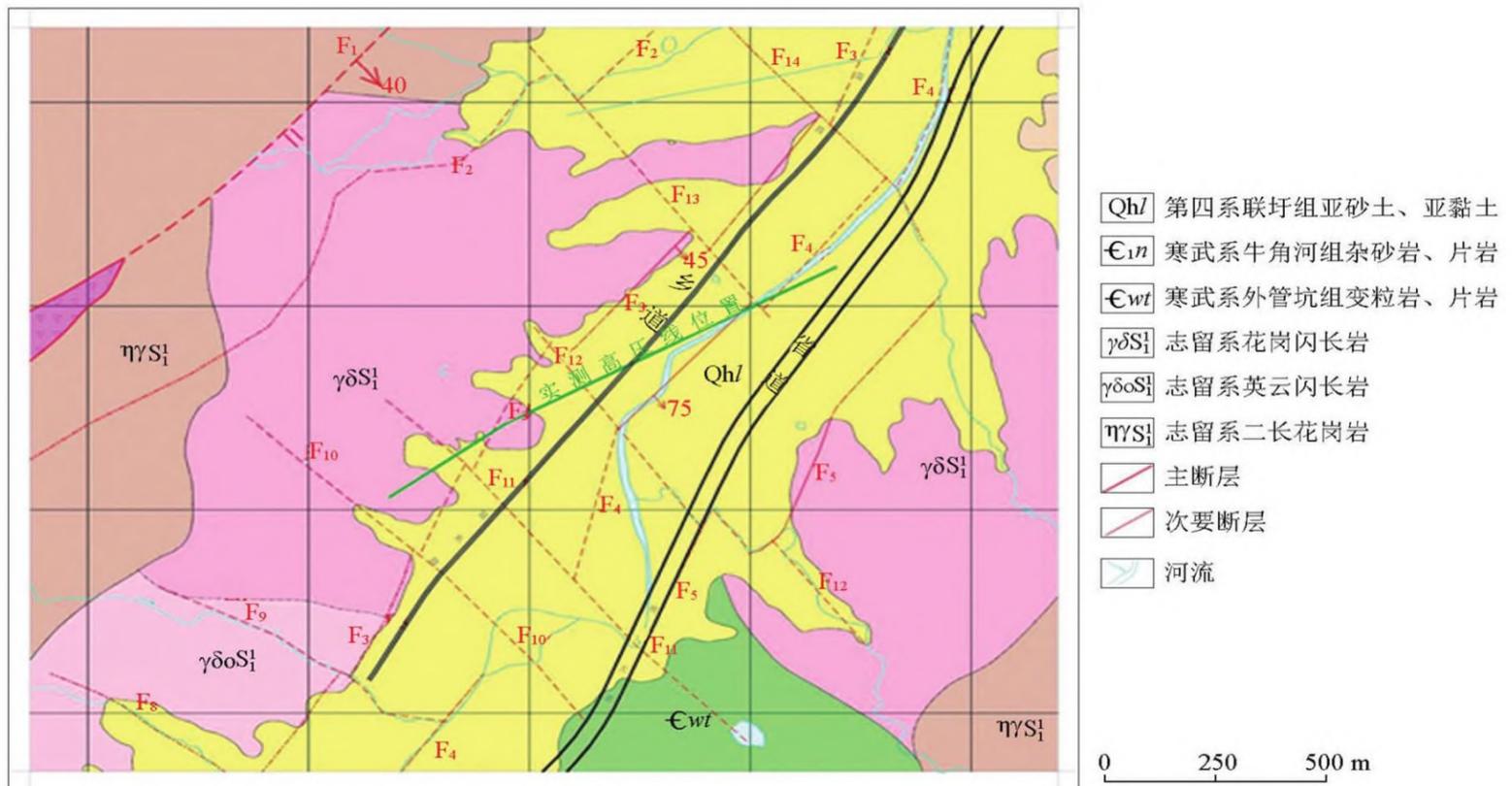


图 1 工作区地质图

Fig.1 Geological map of work area

寒武系牛角河组主要分布于调查区北部,呈推覆构造的推覆体由南往北叠覆于奥陶纪岩体或志留纪岩体之上。其岩性组合是以一套含炭岩石组合为标志,也就是说该套岩系具有牛角河组的标型岩石组合特征。

1.2 构造

本区位于武功山复背斜的 WN 翼,自加里东运动以来,由于混合岩化作用和岩浆活动,本区遭受多期次构造运动的叠加改造,不同层次的构造形迹交织在一起,具有复杂造山带的一般特征。区内发育的一系列断裂构造往往具有继承性、长期或多期活动的特点,早期深层次的韧性变形带被后期表壳相的脆性断层利用和改造。武功山岩浆核杂岩的形成、发展过程中,在区内留下了丰富多彩的构造形迹。其中与地热水具有成因联系的是 NE 向和 NW 向两组断裂构造。以 NE 向规模最大,以温汤(区内为望高尖) F₁ 断裂为代表。根据勘探资料, F₁ 断裂严格控制着热水的分布与运移,为区内重要导热构造。NW 向断裂则主要起导水作用。

1.3 岩浆岩

区内发育的岩浆岩为以片麻状构造为特征的二长花岗岩—花岗闪长岩—英云闪长岩等花岗岩类。区内岩体的侵位是受加里东期扬子板块与华南板块碰撞造山作用引起的大规模中酸性岩浆上侵入。岩体中片麻理、眼球状、条纹—条带状构造、矿物拉伸线理、旋转碎斑系和片麻理褶皱均很发育,拉伸线理

指向为北倾。

1.4 水文地质条件

根据地下水的运移、赋存特征,区内地下水主要有第四系松散岩类孔隙水和基岩裂隙水两大类型。

第四系松散岩类孔隙水主要分布于河谷两岸地带的全新统及上更新统冲积层之中,含水岩组具二元结构。地下水主要赋存于下部的粗砂及砾卵石层中。

基岩裂隙水地下水主要赋存于节理裂隙及构造裂隙中,距断层近的构造富水性一般较好,如本区受 NE 和 NW 两组断裂控制的地下水资源。区域上属于水量丰富区。

2 地热地质特征

2.1 区域地热异常带特征

本区位于武功山复背斜的西北翼,地质构造极为复杂,其中 NE 向 F₁ 断裂为导热构造, NW 向次级走滑断裂为导水构造。温汤—鼻田地热异常带已发现的最高水温可达 68℃,其中温汤温泉达 65~66.5℃,枫树下、梅花桥等隐伏地热水一般达 35~45℃。水温变化特征受断裂构造的严格控制,在平面上和垂向上均具有明显的规律性。属典型的沿构造断裂带展布的呈带状分布的对流型温泉密集带,即隆起断裂型地热带。

与温汤地热田处于同一构造带上的仙巩、社埠

街、潮溪、黄源水库及萍乡万龙山等地^[10],无论地形地貌、地层岩性,还是地质构造上都与温汤地热田类似,在这些地段寻找“温汤式”地热田可能性较大。

2.2 典型地热异常区特征

区内最典型的地热异常区属宜春温汤温泉群,出露于宜春市西南温汤镇境内,距市区 21 km。距本次工作区南西 7.5 km,且同处温汤大断裂上盘。因此,详细了解温汤地热异常特征可极有力指导本区寻找“温汤式”隐伏地热水资源。

2.2.1 温汤地热水文地质条件^[10]

第四系松散砂砾石层和基岩裂隙中赋存着孔隙水和裂隙水。其中孔隙水由于含水的砂砾石层厚度较小,单井出水量一般小于 50 m³/d;而基岩裂隙水主要赋存于张性断裂破碎带中。

1) 地热水水温。温汤地热水最高水温可达 68℃,一般 65~66.5℃。水温变化特征受断裂构造的严格控制,在平面上和垂向上均具有明显的规律性。①垂向上:地下水水温随深度而变化,深度增加,水温逐渐增高,并当揭露到断裂时,温度达到最高值,当穿过断裂构造带时,水温又逐渐回落。②平面上:最高温度分布在张性断裂带内,自张性断裂带向外侧,钻孔最高温度逐渐降低;沿张性断裂带走向上,水温由出露点向 SE 逐渐增高。

2) 水化学特征。温汤地热水无色、无味、透明,地下水化学类型为 HCO₃-Na 型水,矿化度 176.62~201.57 mg/L,总硬度为 17.32~30.02 mg/L,pH 值 7.6~7.9。污染指数 *P* 值 0.47~0.63,污染程度属未污染;质量评价分值 *F* 值 2.13~4.28,质量级别属良

好一较差级。勘察资料表明地热水含较多的氟(1.9~3.5 mg/L)和可溶硅(100~150 mg/L)。

3) 地热水的动态变化。①水位(流量):地下水水位长期观测资料反映,在未大规模开发利用地下热水之前,地热水的动态特征与大气降雨等关系均不密切,水位(流量)均较稳定。②水质:20 世纪 70 年代初期勘察中,采集了大量的地下水样(包括地热水和常规水),取样分析测试结果反映,地热水的水质年际变化(主要组分)不大,但地热水的特征组分(*F*、可溶性 SiO₂)相差较大,这可能与地下水回灌和测试误差有关。现阶段,地下水已开发利用了 30 余年,期间始终进行着地下水的回灌。部分因开采井结构设计不合理,地热水与其他非地热水混合后,导致水质有一定变化。③水温:天然状态下的水温变化很小,一般小于 1℃,从多年地下水回灌情况反映,地热水的水温变化仍然不大,水温稳定。

2.2.2 温汤地热成因^[10]

1) 构造条件。宜春温汤温泉分布于温汤断裂(深大断裂)带上,该断裂带延伸长度超过 60 km,还分布有万龙山、夏家坊和梅花桥地热异常区(本工作区即处在梅花桥地热异常区内)。温汤断裂带在温汤温泉地区表现为以 *F*₁¹ 为主干断裂,与其同序次伴生断裂 *F*₁²、*F*₁³、*F*₁⁴ 一起构成的叠瓦式组合,可称为 *F*₁ 断裂系统,它们走向近乎平行都为 NEE 向,倾向 SE,都具压扭性,但 *F*₁¹ 规模大,其他伴生断裂规模较小。另外 *F*₁ 断裂中还发育 NW 向张性结构面,与 *F*₁¹ 形成入字形构造(图 2)。

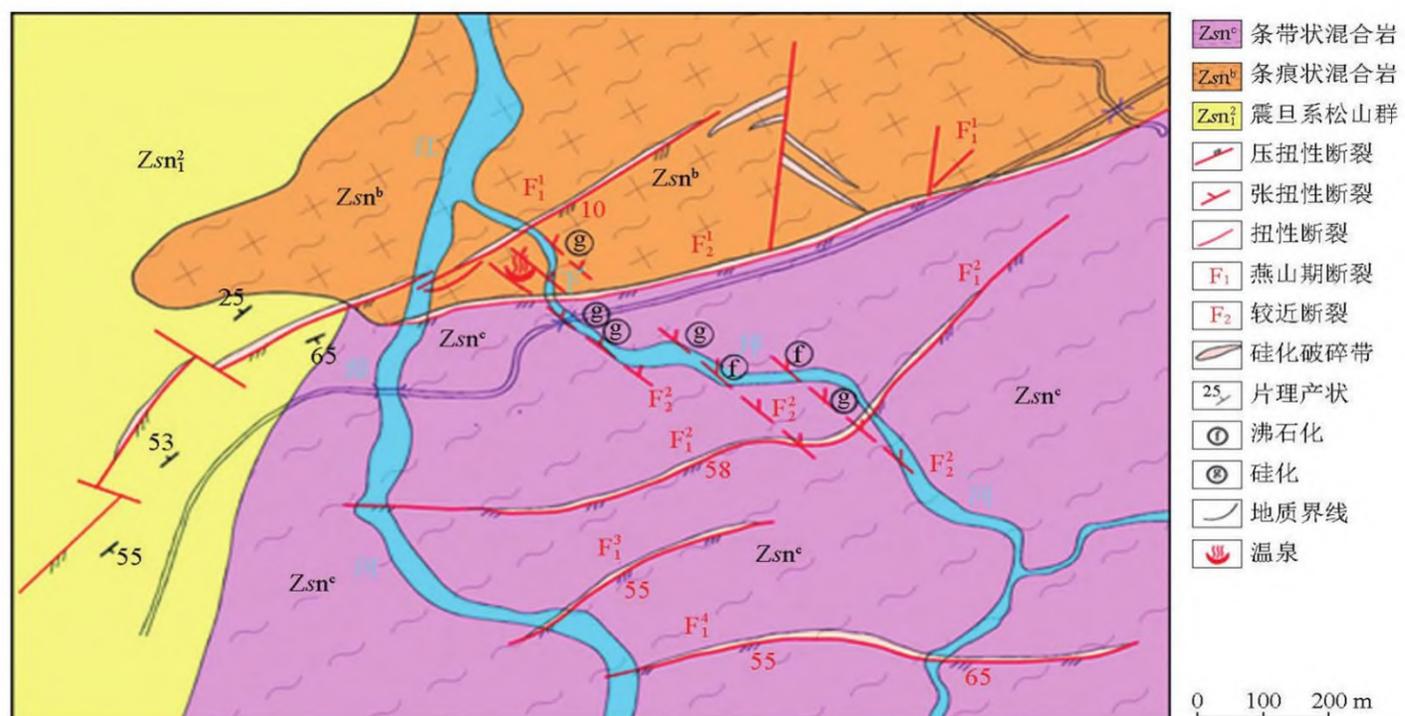


图 2 宜春温汤温泉地热地质图^[5]

Fig.2 Geothermal geological map of Yichun Wentang hot spring

根据地质水文资料可知温汤地热田以 NE 向断裂为控热断裂, NW 向次级走滑断裂主要起导水作用, 温汤地热田严格受断裂控制, 地热水赋存在温汤断裂破碎带中, 热储层为带状断裂、裂隙含水层, 富水性强, 水热活动强烈。地下热水在断层带内受水的连续压力控制, 温度不同的热水之间的热量交换以对流方式为主。地热田盖层厚度小, 不具保温性能, 构成开放型带状热储对流型地热田。

2) 地热水循环。根据温汤温泉群出露的地形、地质条件分析, 地下热水主要由大气降雨补给, 经深循环形成。根据地质资料, 区内大面积分布加里东期花岗岩, 导水性相对较弱, 主要由南部武功山区大气降水, 经岩体裂隙、节理、构造破碎带等, 入渗补给地下水。当 NW 向次级导水构造深切 NE 向控热构造时, 地下水循环深度大, 循环路径长, 速度缓慢, 能够充分吸收断层带深部的热能并和围岩发生溶滤作用, 通过复杂的深循环, 经大地热流加热, 在深处一定部位汇集, 沿断裂通道向北径流, 形成温度较高、富含多种微量组分的热热水, 主要赋存于 NW 向次级张扭性构造裂隙、孔隙中, 部分至温汤附近, 遇阻水体(构造), 以上升泉形式排泄于地表, 形成温泉。

2.3 地热勘查方向

工作区位于温汤—万龙山地热带之温汤—梅花桥段。该地热带形成于武功山加里东期花岗岩体北部, 导热构造为温汤—新泉 NE 向压扭性断裂带。其北东段走向 NEE, 南西段走向 NE, 总体走向 40° 左右, 向 SE 倾斜, 倾角 50°~70°, 沿断裂带有明月山、青龙山、万龙山、新泉等一串燕山早期花岗岩株分布。燕山运动时是一条重要的地热带。温汤地热田恰在该断裂带上, 经前人研究构造结点成熟思路, 沿该带勘查, 通过钻孔揭露, 自北西至南西新发现了袁州区鼻田(梅花桥)、袁州区夏家坊、袁州区白马、袁州区洪江、芦溪县万龙山、新泉等一串隐伏型地下热水。这些点地下热水形成于 NE 向导热断裂与 NW 向断裂的结点地区, 且大致呈等距分布。

本区是寻找对流性地热水资源的有利地区。地热水主要赋存于断裂构造带状破碎带中, 以断层上盘岩层为盖层, 形成机理为深循环地热增温型, 即大气降水沿断裂带深循环, 在正常地温梯度下吸收地球内热增温形成热水。地热水主要来源为大气降水, 其形成与分布主要受断裂构造控制(图 3)。地热田附近隆起山地区的大气降水通过各级断裂、裂隙垂直渗入, 不断吸收地球内热增温形成地热水, 同时溶滤沿途围岩的微量元素形成地热流体的特殊组分。当继续下行至区域控热断裂 F_1 时, 由于该断裂

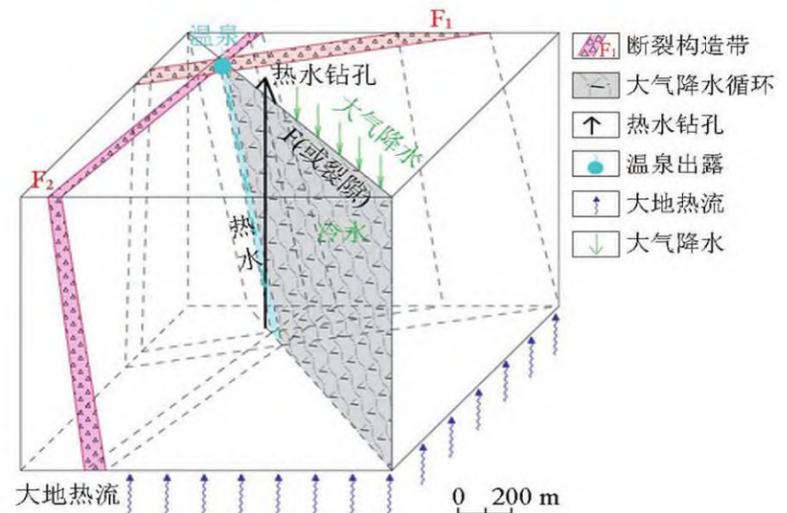


图 3 “温汤式”对流型地热水资源形成模式示意^[5]

Fig.3 Schematic diagram of the convective geothermal water resource formation mode of "Wentang type"

的导热性及阻水性, 地下热水继续加热, 并向导水断裂 F_2 或 F_1 碎裂岩及其分支断裂汇集, 并赋存于 F_2 与 F_1 交汇复合部位或 F_1 碎裂带及其分支断裂内, 形成带状地热水资源。部分可能沿裂隙、断裂上涌, 以温泉的形式出露于地表, 由于上升速度快, 沿途散热量小, 尚来不及与其围岩达成热平衡, 热水主流带附近形成局部的热异常, 热异常中心地温梯度比正常梯度高 2~3 倍以上。

综上所述, 该区地热水主要储存于 NE (或 NNE) 与 NW 等断裂的复合部位, 区域断裂 F_1 主要起控热、导热作用, 常常成为地热田的隔水边界(热水壁), 钻探可在断裂复合部位附近 F_2 导水断裂带内揭露地热水^[11-13]。

3 数据采集和处理

3.1 工作布置

为获取地表往深部完整的地质信息, 选择高密度电阻率法结合广域电磁法的物探组合手段, 前者用于 300 m 深度以浅电性结构探测, 后者因其探测深度大、抗干扰能力强、纵向分辨率高等优势^[5], 主要用于追索断裂构造在深部延伸情况。为了提高反演的准确性, 针对工作区 NE 向约 4 km 处已知地热孔布置 MHQ5 线参照剖面, 方位角 130°, 剖面长度 2.3 km。围绕测区, 部署 WN1、WN2 线, 方位角 130°, 剖面长度均为 2.5 km, 重点探索 NE 向温汤断裂系统空间展布; 部署 EW1、EW2 线, 方位角 40°, 剖面长度均为 2.5 km, 探索 NW 向次级走滑导水断裂分布情况(图 4)。在此基础上, 综合分析 NE 向与 NW 向构造空间关系, 研究已知地热孔与构造关系, 为本区部署验证钻孔提供重要参考依据。

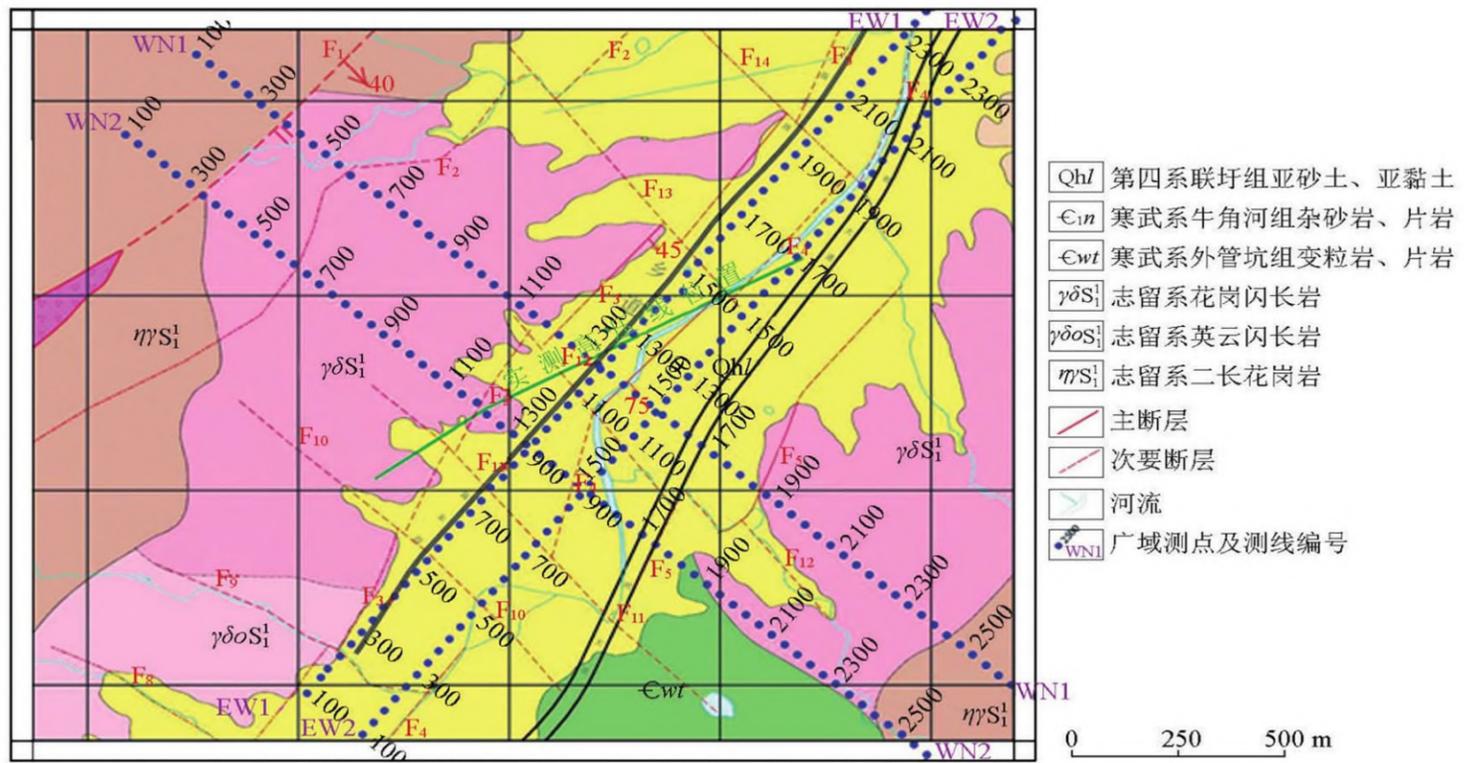


图 4 测线布置

Fig.4 Survey line layout

3.2 数据采集

确定最佳收发距,保证较强的广域电磁信号,压制干扰,同时满足勘探深度对收发距的要求(收发距一般为勘探深度的 3~5 倍)^[5]。本次进行了 9 km、11.5 km 和 14.5 km 三个距离的收发距实验,发射源避开深大断裂、大型水域等影响测量信号因素。接收部分考虑到地形结构和强噪声干扰,选取测区地势平坦、干扰背景小的测点,做收发距实验,并采集了天然电场信号进行对比。

图 5、图 6 和图 7 为上述收发距 9 km、11.5 km 和 14.5 km 的广域电场信号与天然电场信号对比,各收发距的广域电场信号均大于天然电场信号,广域电场信号形态、强度与天然电场截然不同,广域电场信

号连续性较好,信噪比较高,具有独立性,能有效压制天然电场信号。

根据实验结果,本次数据采集收发距确定为 12 km;WN1、WN2 线及验证剖面 MHQ5 共用一个发射源,WN1 与 WN2 收发距确定大约为 11 km,验证剖面 MHQ5 收发距确定大约为 14 km。

本次广域电磁法共部署 4 条测线,实测广域电磁法物理点 308 个,质量检查点 10 个,检查率 3.25%,其中广域电场最大均方相对误差 4.49%,广域视电阻率最大均方相对误差 3.43%。广域电场最小均方相对误差 1.22%,广域视电阻率最小均方根误差 1.44%。本次广域电磁法勘探达到行业要求。

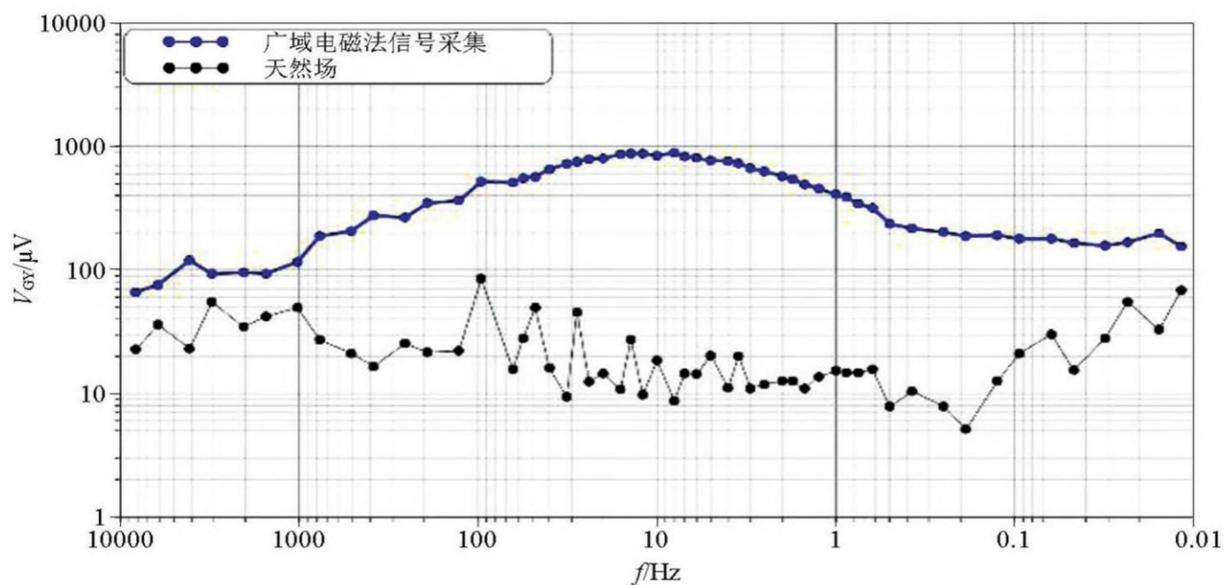


图 5 收发距 9 km 采集电场信号

Fig.5 Signal diagram of electric field collected with a receiving and transmitting distance of 9 km

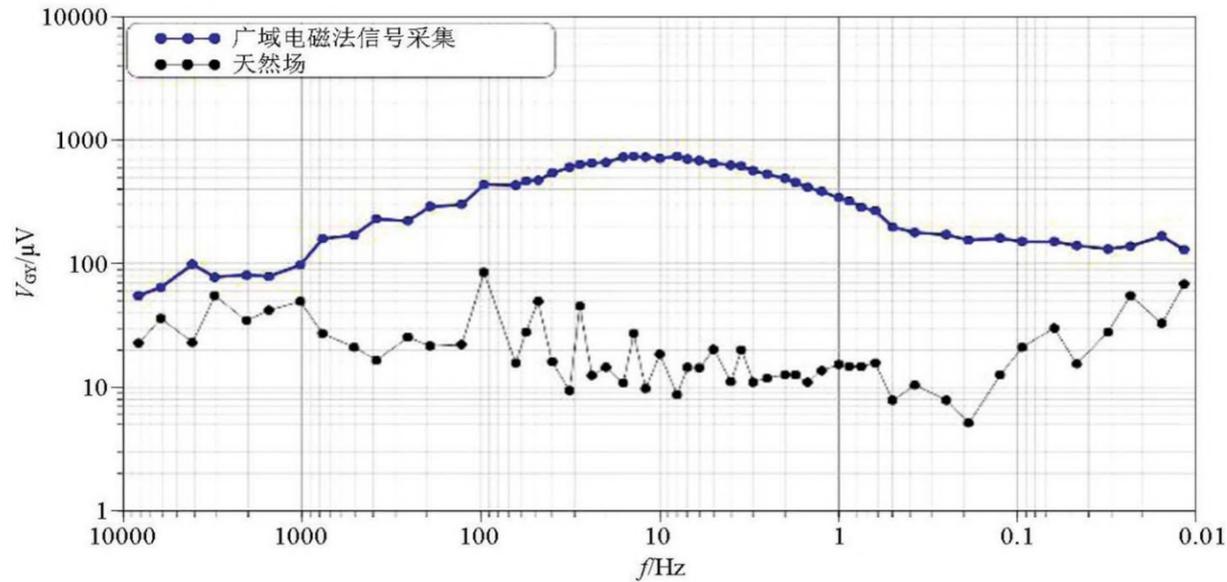


图 6 收发距 11.5 km 采集电场信号

Fig.6 Signal diagram of electric field collected with a receiving and transmitting distance of 11.5 km

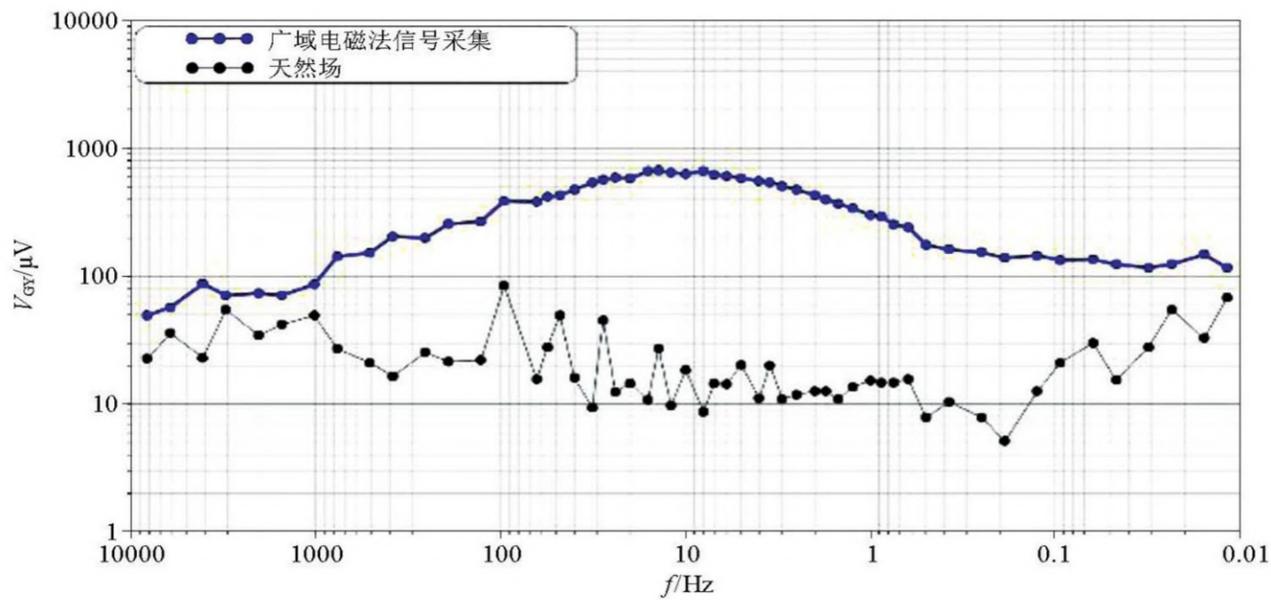


图 7 收发距 14.5 km 采集电场信号

Fig.7 Signal diagram of electric field collected with a receiving and transmitting distance of 14.5 km

3.3 数据处理

3.3.1 预处理

预处理主要是空间属性的建立及测点编辑,是处理中非常关键的基础工作。如果各测点的观测系统设置不正确就不能得到正确的采集数据。本次广域电磁法预处理工作具体按以下几项进行:

1) JSGY-2 V2.0 接收系统软件对单频点电场、电流数据进行频点和曲线合成,根据实测发射电流、发射电极坐标、接收电极坐标和电场强度,通过计算机迭代得到广域视电阻率值^[9]。

2) 剔除各测点广域电场、视电阻率曲线的明显畸变频点,通过频谱分析和时空变换滤波方法,消除 50 Hz 干扰和其他高频背景噪声。

3) 沿测线横向筛查广域视电阻率曲线类型突变的测点,本次获得的广域电场、视电阻率曲线总体横向继承性较好。

4) 广域视电阻率与电场呈复杂的非线性关系,因此,首先针对电场进行静态校正,再用静态校正后的电场计算广域视电阻率。本区个别物理点因明显处于峭壁、陡坎、河流和建筑物附近,广域电磁法电场曲线相对旁侧曲线有“位移”现象,但曲线类型基本一致,均采用平移法进行静态校正。

5) 地形校正是用于消除由地形起伏引起的广域视电阻率曲线的畸变。本次资料处理主要采取带起伏地形(带坐标)、带场源的 WFEM 软件进行处理、反演以直接消除地形影响。

3.3.2 定性分析

可靠的原始数据是保障获得地球物理客观事实的先决条件。本次定性分析主要利用广域视电阻率曲线类型图、等频率广域视电阻率曲线图等资料,具体从以下几个方面开展。

1) 曲线类型分析。利用预处理后的成果数据,

绘制曲线类型图、等频率广域视电阻率曲线图,分析不同地质体上方曲线类型变化规律,定性分析电性分层与地质分层的关系。

2) 开展频率—广域视电阻率拟断面定性分析,初步确定断面的电性分布、基底起伏、构造分布、标志层划分等特征。

3) 结合验证剖面测点广域视电阻率曲线类型分析经验,对本区广域视电阻率曲线开展一维定性解释,为后续的二维反演解释提供初始模型。

3.3.3 反演

本次反演计算工作采用中南大学编制的 WFEM 软件(广域电磁法资料处理解释软件系统)。

1) 一维反演。本次一维反演主要作为二维反演的一个中间环节,其成果为下一步的二维反演提供初始模型。

2) 二维反演。地表实测的广域视电阻率,是地下不同电性介质及构造的综合响应。本次采取带起伏地形(带坐标)、带场源的广域电磁法二维反演计算,能较好地压制地形干扰、场源效应等影响,提高反演成果的可靠度。反演过程中结合地质资料,多次反复,逐渐修正模型,减少反演拟合误差,降低反演解释的多解性。

最终的地质解释建立在二维反演成果上进行(图 8)。

4 成果推断解释

4.1 物探推断解释标志

区内出露细粒—中细粒花岗结构,电阻率随致密程度增加而更高,视电阻率普遍大于 $3000 \Omega \cdot m$ 。寒武系牛角河组(ϵ_1n)和外管坑组变粒岩(ϵwt)呈推覆构造的推覆体由南往北叠覆于岩体之上。牛角河组主要分布于工作区北部,总体为一套含炭变质岩,根据区域物性参数^[14]和本次物探测量成果,视电阻率普遍大于 $2000 \Omega \cdot m$ 。外管坑组变粒岩为一套中深变质岩系,其内局部夹大理岩化灰岩,视电阻率与牛角河组相当,普遍大于 $2000 \Omega \cdot m$ 。

4.2 异常解释

通过上述分析,对各断面的电性特征、基底起伏、构造分布等有了初步的了解,在此基础上建立初始模型进行二维反演,结合以往地质、地热孔等资料,编制物探推断解释成果图。各剖面成果详述如下。

4.2.1 WN1 线、WN2 线和 MHQ5 线推断解释

图 9 为 MHQ5 线、WN1 线和 WN2 线物探综合断面,由上到下分别为:地质平面、高密度电法和广域电磁法成果剖面。3 条剖面覆盖的地质结构基本相似,垂交的地层由 NW 往 SE 为 ϵ_1n 、 $\eta\gamma S_1^1$ 、 $\gamma\delta S_1^1$ 、 ϵ_1wt ,整体呈叠瓦式推覆构造型式。

1) MHQ5 线为参照剖面。总体来看, MHQ5 线高密度电法反演断面和广域电磁法反演断面浅部较吻合。广域电磁法反演断面深部为高阻区(反演 $\rho_{广域} > 3000 \Omega \cdot m$),表现为扭曲状隆起形态,其原始广域视电阻率的分布亦有此特征(详见 MHQ5 线等频率 $\rho_{广域}$ 曲线)。结合地质及物性资料推测为隐伏 $\eta\gamma S_1^1$ 岩体。

中浅部断续分布中高阻块体(反演 $\rho_{广域} > 3000 \Omega \cdot m$),呈等轴状或圆晕状,推测应是 ϵ_1n 、 $\eta\gamma S_1^1$ 推覆体引起。它们与深部高阻区之间存在一向 SE 缓倾的中低阻异常带(反演 $\rho_{广域} < 2000 \Omega \cdot m$),结合地质资料,推测为推覆构造 F_1 引起。中浅部中高阻块体之间以低阻条带分隔开来,推测为构造 F_2 、 F_3 、 F_4 之反映,根据它们各自的产状分析,在深部很可能与主推覆构造 F_1 汇合为一体,多条构造汇集发育部位为主要富水区,推测富水区 I 为浅部构造裂隙水(冷水),富水区 II 为已获验证的地热水资源,水温 $42 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) WN1 线和 WN2 线推断解释。根据高密度电法和广域电磁法测量成果,WN1 线和 WN2 线电性

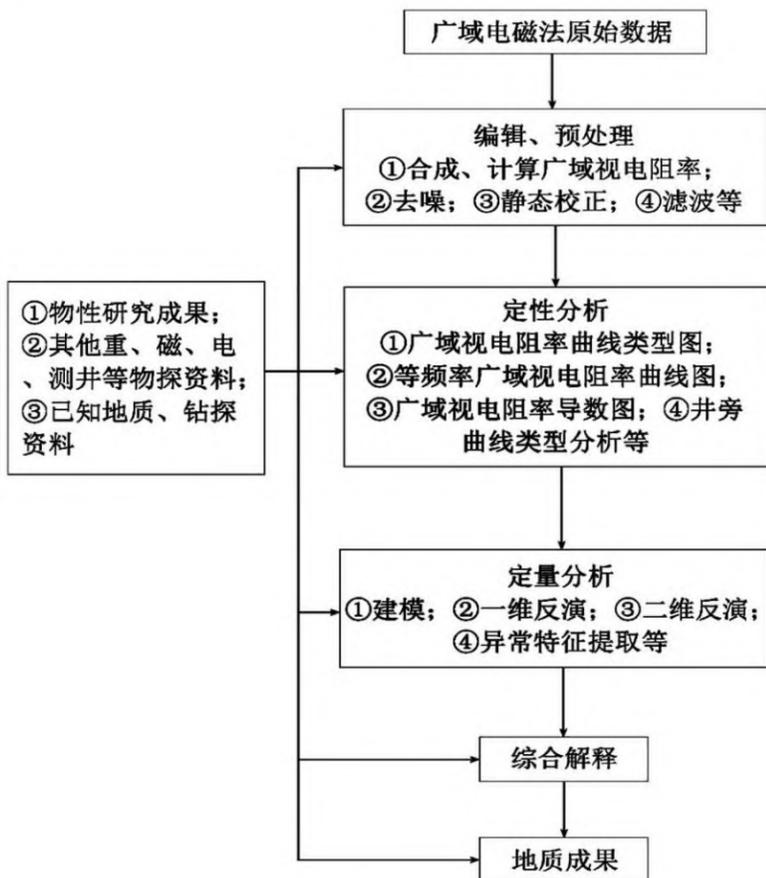


图 8 数据处理流程

Fig.8 Data processing process

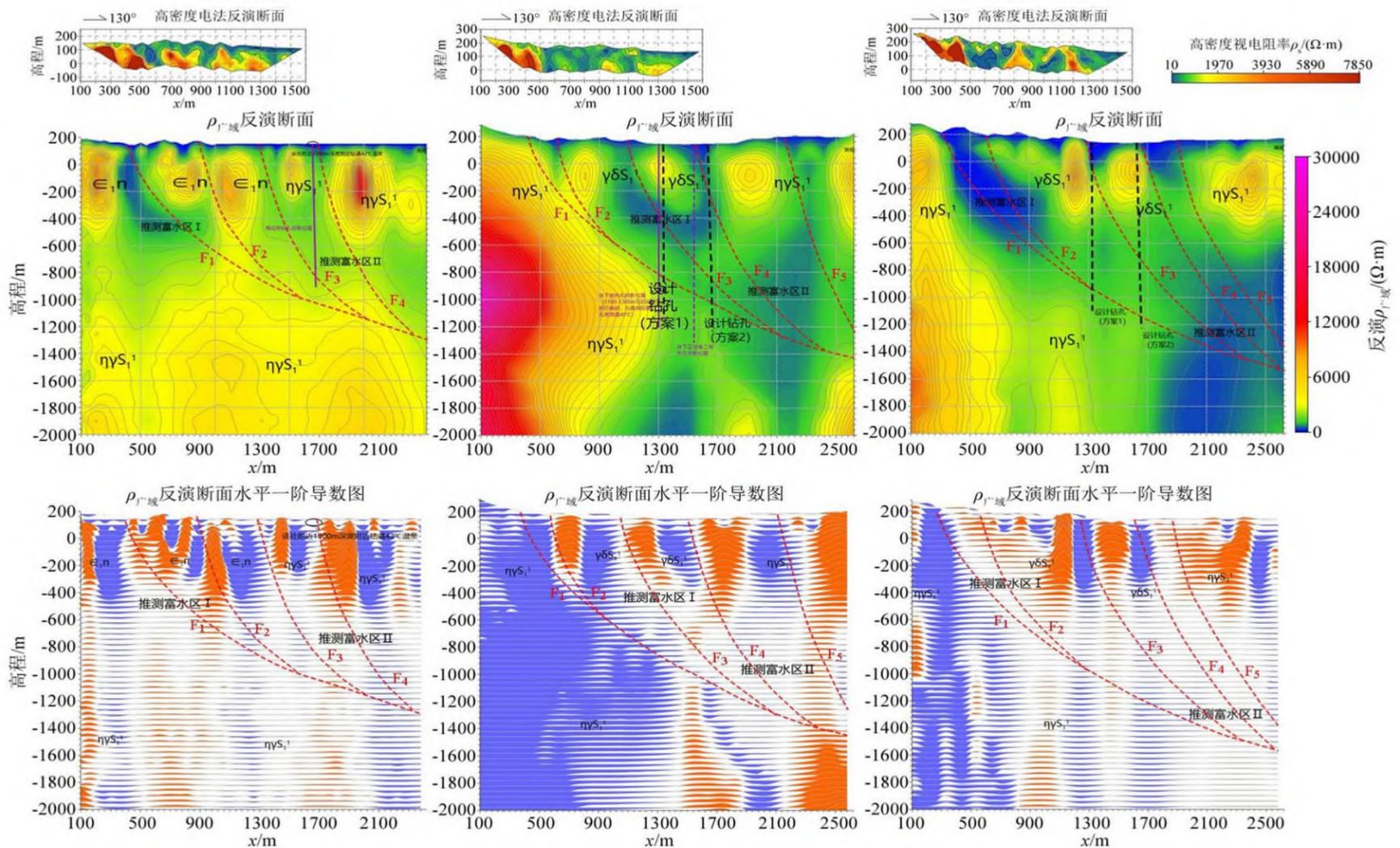


图9 MHQ5线(左)、WN1线(中)和WN2线(右)物探推断解释成果

Fig.9 Results of geophysical inference and interpretation of MHQ5 line (left), WN1 line (middle) and WN2 line (right)

结构基本相似,总体表现为NW高、SE低,深部高、中浅部低异常特征。NW段100~400号点地段出露志留系二长花岗岩,反演 $\rho_{广域}$ 和 $\rho_{高密度}$ 均超过 $3\ 000\ \Omega \cdot m$,形成本区高电阻背景异常。

与MHQ5线覆盖的地质情况有所差异的是,WN1线和WN2线中部有志留纪岩体于后期侵入。结合物性资料,志留纪花岗岩电阻率相对较低,反演 $\rho_{广域}$ 和 $\rho_{高密度}$ 均在 $3\ 000\ \Omega \cdot m$ 以下,当构造、裂隙、节理等发育而充水时,往往表现为低阻,视电阻率小于 $500\ \Omega \cdot m$ 。对比WN1线、WN2线与MHQ5线广域电磁法反演断面可见,WN1线、WN2线断面中部中高阻、低阻异常体均有分布,多成扭曲岩株状形态,推测为志留纪岩体后期侵位特征之反映。中浅层则与MHQ5线相似,断续分布中高阻块体(反演 $\rho_{广域} > 2\ 000\ \Omega \cdot m$),呈等轴状或圆晕状,推测应是 S_3y 、 O_2l 、 O_2g 推覆体引起。它们与深部高阻区、中高阻扭曲岩株状异常之间存在一向南东缓倾的低阻异常带(反演 $\rho_{广域} < 2\ 000\ \Omega \cdot m$),结合地质资料,推测为推覆构造 F_1 引起。中浅层的中高阻块体之间同样以低阻条带分隔开,推测为构造 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 ,结合其产状、规模情况,推测 $F_1 \sim F_5$ 在深部汇集的可能性较大,多条构造汇集发育部位为主要富水区。

推测富水区I为 F_1 、 F_2 、 F_3 交汇部位,推测主要赋存构造裂隙水(冷水);富水区II为 $F_1 \sim F_5$ 在深部交汇部位,WN1线、WN2线均在南东侧深部表现为大面积带状低阻异常(反演 $\rho_{广域} < 1\ 000\ \Omega \cdot m$),推测为隐伏地热水有利靶区。

4.2.2 综合推断

结合工作区附近的施工地热孔(钻孔位置如图10所示),本次广域电磁法测量成果显示,工作区地热条件与前述“温汤式”对流型地热水资源形成模式吻合,验证了本区寻找隐伏地热水资源的结论。

5 结论

- 1)广域电磁法勘查深度大,分辨率高,对低阻异常有很好的反映,广域电磁法应用工作区,能有效地识别控热、导水构造,获取地热水资源储存位置。
- 2)工作区地热水为对流性地热水,地热水主要储存于NE(或NNE)与NW向等断裂的复合部位,区域断裂 F_1 主要起控热、导热作用,常常成为地热田的隔水边界(热水壁)。
- 3)广域电磁法在工作区地热勘探中提供了可靠的地质构造信息,是针对中、深层地热资源勘查有

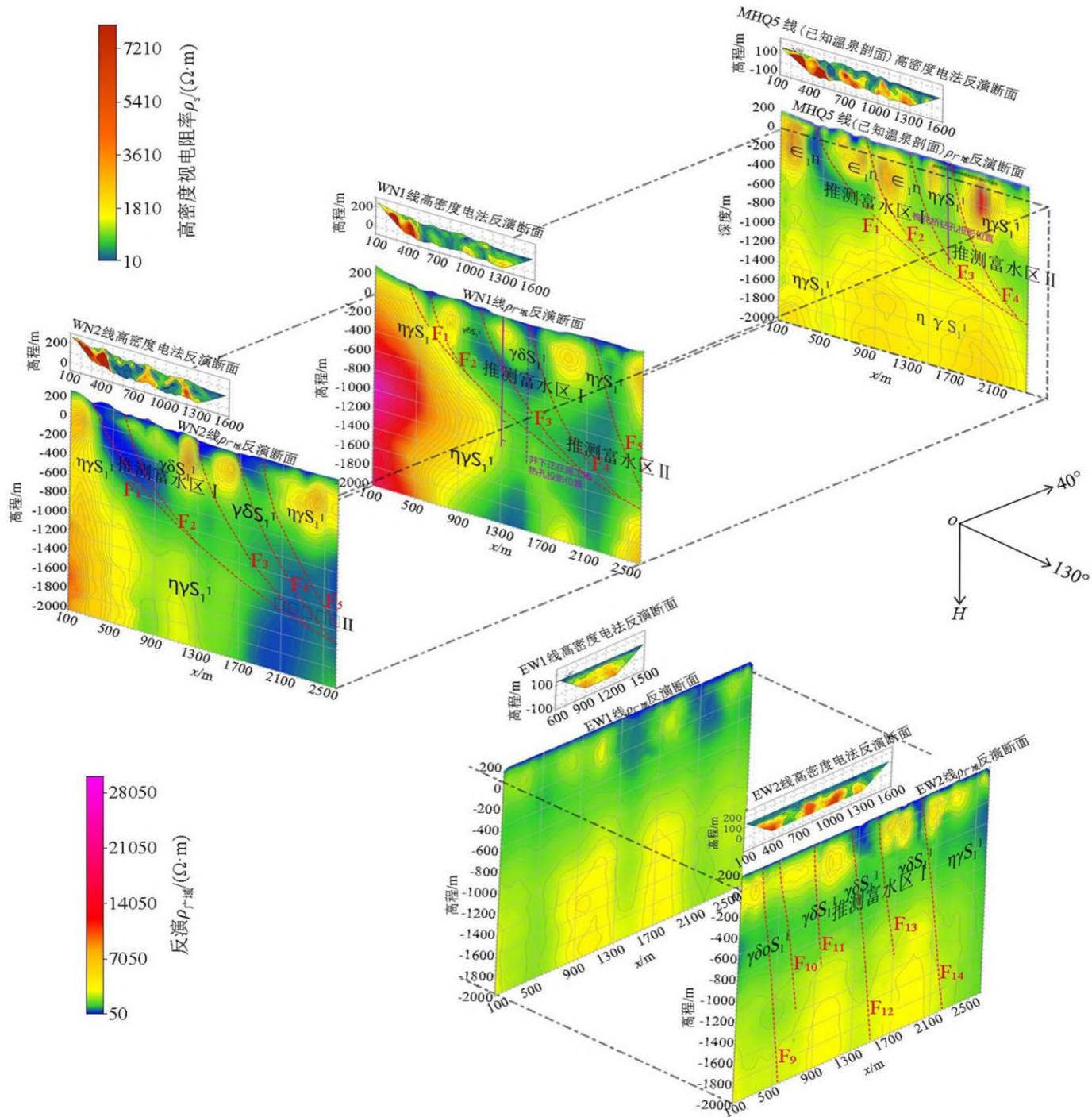


图 10 物探推断解释成果三维切片图

Fig.10 Three dimensional section of geophysical inference and interpretation results

效的地球物理勘探方法。

致谢:感谢湖南继善高科提供良好的平台,感谢李帝铨老师的指点,感谢江西地质矿产勘查开发局物化探大队广域电磁法项目组所有同事的辛勤付出。

参考文献 (References) :

[1] 张学真.浅谈江西地热资源的开发利用[J].东华理工大学学报:社会科学版,2013,32(4):510-513.
Zhang X Z.The discussion about the geothermal resources exploitation and utilization in Jiangxi province[J].Journal of East China Institute of Technology:Social Science,2013,32(4):510-513.

[2] 汪集.中低温对流型地热系统[J].地学前缘,1996(3):97-99,101-104.
Wang J.Low-medium temperature geothermal system of convective

type[J].Earth Science Frontiers,1996(3):97-99,101-104.

[3] 曹彦荣,宋涛,韩红庆,等.用广域电磁法勘查深层地热资源[J].物探与化探,2017,41(4):678-683.
Cao Y R,Song T,Han H Q,et al.Exploration deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(4):678-683.

[4] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报:自然科学,2010,41(3):1065-1072.
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods[J].Journal of Central South University: Science and Technology,2010,41(3):1065-1072.

[5] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.
He J S.Wide-field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M].Beijing:Higher Education Press,2010.

[6] 李帝铨,胡艳芳.强干扰矿区中广域电磁法与CSAMT探测效果对比[J].物探与化探,2015,39(5):967-972.

- Li D Q, Hu Y F. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferences mining area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(5): 967-972.
- [7] 刘细元, 杨细浩, 聂龙敏, 等. 江西武功山岩浆核杂岩基本特征 [J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 468-474.
- Liu X Y, Yang X H, Nie L M, et al. Basic characteristics of the magma core complex at Wugongshan Jiangxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(3): 468-474.
- [8] 王森林. 江西省武功山地区地热水控制因素及勘查方向探讨 [J]. *科技创新导报*, 2018, 15(36): 39-40.
- Wang M L. Discussion on the control factors and exploration direction of geothermal water in Wugong Mountain area of Jiangxi Province [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2018, 15(36): 39-40.
- [9] 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省环境地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development. *Environmental geology of Jiangxi Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [10] 辛田军. 江西省温汤地热田地热水成因机理及开发利用前景 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
- Xin T J. Wantang geothermal field and water resources formation mechanism and utilization prospect research in Jiangxi province [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [11] 白细民. 江西省地热水资源形成模式与勘查方向探讨 [C] // 江西省地质学会, 2014 江西地学新进展——江西省地质学会成立五十周年学术年会论文专集, 2014: 73-80.
- Bai X M. Discussion on the formation model and exploration direction of geothermal water resources in Jiangxi Province [C] // Jiangxi Geological Society, *New progress in Jiangxi geology in 2014: Symposium of papers on the 50th Anniversary of Jiangxi Geological Society*, 2014: 73-80.
- [12] 郑乾墙, 钟鸣, 邓有平. 江西地热控制因素研究 [J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(3): 261-264.
- Zheng Q Q, Zhong M, Deng Y P. Control factors of geothermy in Jiangxi province [J]. *Journal of East China Institute of Technology: Social Science*, 2009, 32(3): 261-264.
- [13] 陈冬生, 杨金华. 江西省地热资源成因及分布规律探讨 [J]. *江西煤炭科技*, 2011(3): 121-122.
- Chen D S, Yang J H. Probe into causes and distribution law of geothermal resources in Jiangxi province [J]. *Jiangxi Coal Science & Technology*, 2011(3): 121-122.
- [14] 言会. 江西省区域岩石物性数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Yan H. *Jiangxi regional petrophysical data book* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.

The application of wide field electromagnetic method to geothermal exploration in Yichun

WEI Zhi-Feng, CHEN Hou-Yang, WU Xi-Quan

(*Geophysical & Geochemical Exploration Party of Jiangxi, Nanchang 330000, China*)

Abstract: This study area is not only covered by Quaternary strata, with unclear stratigraphic division and complex faults, but also strongly interfered by high-voltage transmission lines and corridors in deep geothermal exploration. Through collecting and analyzing the existing geological materials in the survey area, the geothermal metallogenic model of the area was constructed. The combination of high-density electrical method and wide field electromagnetic method was used to improve the resolution of the results, divide the geological information such as stratigraphic and fault, and infer the favorable position of geothermal mineralization. It has been proved by drilling that good geothermal exploration effect can be achieved.

Key words: wide field electromagnetic method; geothermal energy; high-density electrical method

(本文编辑: 叶佩)