

doi: 10.11720/wtyht.2023.1443

张志,徐洪苗,钱家忠,等.综合物探方法在矿泉水勘查中的应用——以泾县榔桥地区为例[J].物探与化探,2023,47(3):690-699.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1443>

Zhang Z, Xu H M, Qian J Z, et al. An application study of the comprehensive geophysical prospecting method in the exploration of mineral water: A case study of the Langqiao area, Jing County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 690-699. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1443>

综合物探方法在矿泉水勘查中的应用 ——以泾县榔桥地区为例

张志^{1,2}, 徐洪苗², 钱家忠¹, 谢杰², 陈皓龙², 朱紫祥²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省地质矿产勘查局 327 地质队, 安徽 合肥 230011)

摘要: 安徽省泾县榔桥镇马渡桥村一带具有开发优质矿泉水的巨大潜力, 然而受地质条件及含水介质非均质性影响, 其分布范围勘定以及水量、水质定量评价一直是影响矿泉水开发利用的难题。基于此, 以泾县榔桥地区为靶区开展了地面物探与水文测井联合的综合物探方法应用研究, 取得了重要进展, 主要包括: ①通过地面综合物探方法实现了花岗闪长岩中断裂构造的精确定位, 通过水文测井实现了构造裂隙水层位的精准识别; ②成功探明单孔出水量约为 50~80 m³/d 的偏硅酸型饮用天然矿泉水; ③指示了区内富水断裂构造为中浅埋深(约 75~140 m), 走向主要为 NW 向。研究成果揭示了该区赋存矿泉水构造的空间分布特征, 对后续矿泉水范围勘定具有重要意义, 同时, 泾县榔桥地区综合勘查的研究思路和技术方法具备系统性, 对相近地区矿泉水勘查具有指导意义。

关键词: 综合物探; 地下水勘查; 天然矿泉水; 泾县榔桥地区

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-0690-10

0 引言

天然矿泉水作为宝贵的液态矿产资源, 富含对人体有益的矿物质与微量元素, 其饮用和医疗价值巨大^[1-2]。榔桥镇马渡桥村位于安徽省泾县东南部, 前人在该区开展过浅层地下水检测和水文地质条件分析^[3], 认为该区具备开发优质偏硅酸型饮用矿泉水的潜力。但是, 目前的研究依然停留在初步调查阶段, 矿泉水水量、水质定量评价工作尚未系统开展。为满足政府长期规划、合理利用资源、改善民生用水等方面的需求, 迫切需要科学有效地开展矿泉水勘查工作。

地球物理探测技术具有快速无损、分辨率高、施

工高效等优势^[4-5], 已经成为地下水勘查的主要技术方法, 特别在严重缺水、基岩广泛出露等地质条件复杂的地区, 取得了诸多突出的找水成果^[6-9]。国内外学者对花岗岩类地区水文地质条件和地下水勘查技术的相关研究主要解决了以下问题: ①明确了花岗岩类及相近地区地下水勘查主要方向为寻找构造裂隙^[10-11]; ②发展形成了水文地质调查、综合物探与水文钻探结合的系统勘查模式^[12-14]; ③总结出综合利用联合剖面法、高密度电法、激电测深等传统地面物探方法可有效识别断裂构造^[15-16], 利用水文测井可替代取心方法来确定构造裂隙水层位^[17-18]。

泾县榔桥地区主要赋存榔桥岩体花岗闪长岩, 完整岩体通常不透水且含水性差。综合地质情况和前人成果, 本文以泾县榔桥马渡桥村一带

收稿日期: 2022-09-19; 修回日期: 2023-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目“基岩裂隙水非达西流与溶质非费克运移机制及其升尺度模型”(41831289); 泾县人民政府公开招标项目“泾县榔桥镇马渡桥村矿泉水勘查”(JX-CG-GK-2019-066)

第一作者: 张志(1991-), 男, 硕士, 主要从事地球物理勘查与综合研究工作。Email: 2763369850@qq.com

通讯作者: 钱家忠(1968-), 男, 博士, 教授, 主要从事水工环地质学科的教学和深层次研究工作。Email: qjiazhong@gmail.com

为研究靶区,开展了地面物探与水文测井在矿泉水勘查中的综合应用研究。通过本次综合物探工作及后期抽水试验,验证了研究区开展的综合物探方法的有效性,在一定程度上促进了矿泉水绿色勘查物探模式的发展。

1 地质概况

研究区地处榔桥镇马渡桥村,北距泾县县城约32 km,南西与旌德县三溪镇相邻,行政区划隶属宣城市泾县。

1.1 区域地质

研究区位于江南古陆北缘与扬子凹陷的交接地带,分布的地层主要为志留系—三叠系碎屑岩、碳酸盐岩。岩浆岩侵入体分布广泛,代表性岩体为榔桥岩体,岩性为花岗闪长岩,年龄为 135.8 ± 0.58 Ma^[19-20]。印支期 NE 向褶皱铸就了区内 NE 向构造为主体的构造格局,区内构造十分发育,以 NE 和 NW 向断层最为普遍,见图 1。

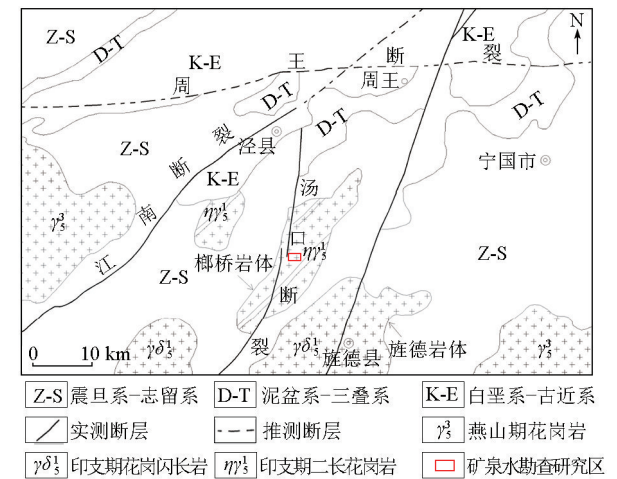


图 1 区域地质简图

Fig. 1 Regional geological sketch map

1.2 研究区地质及水文地质

研究区内主要出露榔桥岩体花岗闪长岩,平面上呈 NE 向长条状分布(图 2)。岩体风化强烈,地表多为风化层覆盖,露头情况较差。区内构造类型主要为断层和节理:断层发育规模较小;节理以剪节理为主,张节理多为 NW 或 NE 走向。

区内地下水类型主要为风化带裂隙水、基岩裂隙水和构造裂隙水。风化带裂隙水含水岩组一般由风化砂状的花岗闪长岩组成,单井出水量一般为 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{d}$;基岩裂隙水和构造裂隙水含水岩组由花岗闪长岩组成,节理、裂隙较为发育,含

较为丰富的裂隙和构造裂隙水,在导水断裂和构造有利部位单井出水量较大,可达 $50 \sim 150 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

研究区地下水补给条件良好。地下水总体径流方向自东向西,较为发育的 NW 向构造具张扭性力学特征,为天然矿泉水的形成提供了良好的储水和导水通道;加之区内花岗闪长岩次级构造裂隙和节理较为发育,对降水的入渗、地下水的运移和富集十分有利,也为天然矿泉水的形成创造了有利条件。

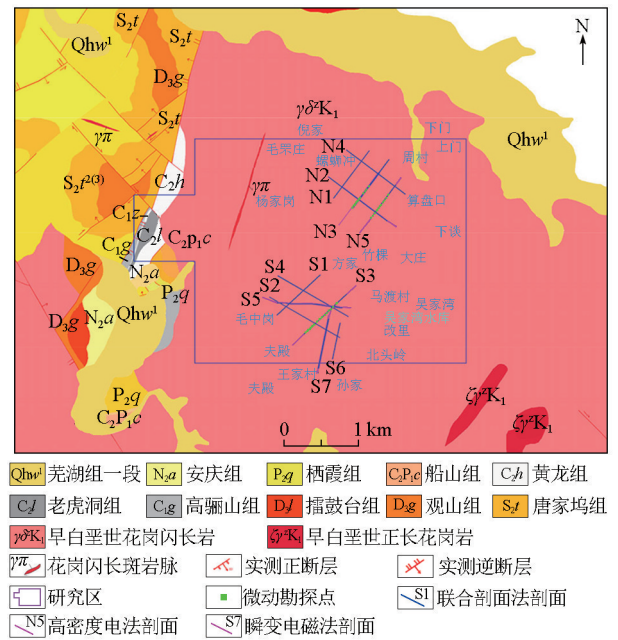


图 2 研究区地质及物探工程布置

Fig. 2 Geological and geophysical engineering layout of the study area

2 矿泉水成因模式及研究路线

根据收集到的区内地质及水文资料以及榔桥岩体及含水岩组特征、浅层地下水采集结果等资料,研究区具备向斜式的构造背景,断层破坏的核部或翼段多发育顺向深大断裂及与之配套的横向断层,与安徽省旌德、黄山地区偏硅酸型矿泉水地质条件相似^[21],应为花岗闪长岩中的断裂深循环型(图 3)。

为进一步明确研究区矿泉水形成机制,确定矿泉水异常区范围,在研究区及周边进行了约 15 km^2 的 $1:50\,000$ 水文地质调查,主要参照《 $1:50\,000$ 水文地质调查规范》(DZ0282-13727-2015)^[22]。其中民井调查点 38 处,地质(构造)调查点 85 点,地表水调查点 6 处,采集样品 44 件,分析结果见表 1。

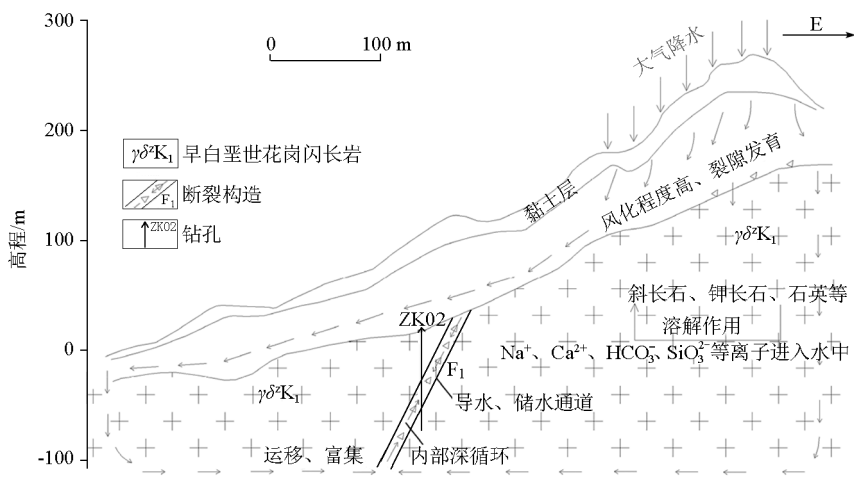


图 3 研究区矿泉水成因示意

Fig. 3 The schematic sketch of the genesis of mineral water in the study area

表 1 研究区地下水、地表水采样分析结果

Table 1 Analysis results of groundwater and surface water sampling in study area

水样	指标/(mg · L ⁻¹)					水化学类型
	偏硅酸	锶	氟	总硬度	总碱度	
浅层地下水	24.4~58.8	0.07~0.43	0.63~1.31	28.28~211.38	29.57~139.76	HCO ₃ -Ca · Mg 或
地表水(水库和溪流)	11.9~22.2					HCO ₃ -Ca · Na

通过水文地质调查,总体确定了以榔桥马渡桥村一带为本次研究靶区。受出露花岗闪长岩风化强烈且植被覆盖等影响,地质调查对断裂构造追索效果并不理想。经充分研究,设计技术线路见图 4,矿泉水勘查全过程参照《天然矿泉水资源地质勘查规范》(GB/T13727-2016)^[23]。

3 物探方法选择

通过前述总结,指示该区矿泉水勘查的主要方向为与断裂构造直接联系的裂隙水。根据前人研究和地质资料,完整花岗闪长岩电阻率 ρ_s 约为 800~2 000 $\Omega \cdot m$,而含水破碎带的电阻率 ρ_s 约为 100~800 $\Omega \cdot m$,表现为明显的低阻异常区^[24]。另一个用来寻找含水破碎带的重要参数为横波波速 v_s ,花岗岩类 v_s 一般为 2.0~3.8 km/s,断层破碎带和断裂构造在天然源面波勘探(微动)视横波速度显示低速异常或明显的速度差异^[25]。

根据花岗闪长岩中断裂构造与完整岩体的电阻率 ρ_s 、横波波速 v_s 的差异,设计了包括联合剖面法、高密度电法、瞬变电磁、天然源面波勘探(微动)的地面综合物探方法;根据含水层位的水文测井异常特征,设计了水文测井的井中物探方法。通过地井联合方法不仅能相互验证,也能进一步明细区内富水构造的空间展布情况。

3.1 联合剖面法

联合剖面法对低阻异常体具有分辨率高、异常明显的优势,可直接用来寻找断裂构造等良导目标体^[26]。一般而言,陡倾良导体正上方会出现明显的正交点,正交点通常表现同步 ρ_s^A 曲线下降和 ρ_s^B 曲线上升的交点,以及同步低交点。

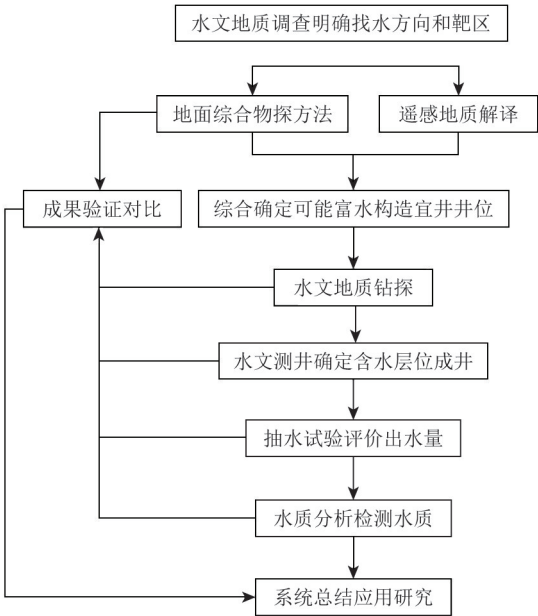


图 4 研究区矿泉水勘查技术线路

Fig. 4 The technical route map for mineral water exploration in the study area

研究区开展联合剖面法主要使用的仪器有 DJF-6 型 5 kW 发送机及 DWJ-3B 型接收机等,为北京地质仪器厂生产研发。选用 2 种不同极距 ($AO=55\text{ m}$ 、 110 m) 同点观测, $MN=10\text{ m}$, $B\infty$, AB 约为 $700\sim 1\,000\text{ m}$, 遵循《电阻率剖面法技术规程》(DZ/T0073-2016)^[27]。

3.2 高密度电法

高密度电法可以同时提供地下一定深度的横向和垂向的电性变化,具有采集效率高、地电信息丰富等优点,在工程建设、矿产勘查等领域获得了广泛的应用^[28-30]。

研究区高密度电法野外工作采用的仪器为 GD-10 型直流电法测量系统,采用温纳装置,测量点距为 10 m ,隔离系数 $1\sim 32$,最大电极数为 120 根,主要遵循《电阻率剖面法技术规程》(DZ/T0073-2016)^[25]、《电阻率测深技术规程》(DZ/T0072-93)^[31]。

3.3 瞬变电磁法

瞬变电磁法是通过在不接地回线或接地线源向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲场间歇期间观测地下半空间内二次涡流场的时间域电磁勘探方法^[32]。瞬变电磁的感应电压 U 与电阻率 ρ 的 $2/3$ 次方成正比^[33],因此瞬变电磁对电性差异的分辨率比直流电法更高。

研究区开展瞬变电磁工作使用仪器为重庆大学生产研发的 FCTEM 小回线瞬变电磁系统,该系统利用高速线性关断技术实现了大电流的高速关断^[34],达到了兼顾减小盲区 and 保证深度的目的。采用中心回线装置,测量点距 20 m ,发射磁矩 $1\,500\text{ A}\cdot\text{m}^2$,供电电流 60 A ,参照技术标准《地面磁性源瞬变电磁技术规程》(DZ/T0187-2016)^[35]。

3.4 天然源面波勘探(微动)

大量统计数据的结果表明,当以天然源面波振幅分布作为随机变量时,可以通过自相关函数研究其时间稳定性^[36]。天然源面波勘探(微动)即是从天然场的复杂信号中提取出瑞雷面波的频散特性,最后通过反演频散曲线来获取地下视横波速度 v_s 的方法^[37]。

研究区天然源面波勘探(微动)使用合肥国维有限公司生产制造的 GN201 微动探测系统,采用嵌套式等边三角形台阵,提取频散曲线所用方法为空间自相关法(SPAC),采样频率 0.25 MHz ,采集时间 30 min ,有效勘探深度约为 300 m ,参照《城市工程地球物理探测标准》(CJJ7-2017)^[38]进行施工。

3.5 水文测井

笔者根据多年的水文测井实践总结得到:富水断裂构造表现为明显低电阻率;自然电位异常幅度能反映渗透性强弱,研究区矿物离子浓度较大,对应透水性好的层段表现为明显右偏;断裂构造致岩体部分破碎,自然伽马数值明显减小。本次水文测井工作采用中地装(重庆)地质仪器有限公司生产的 JGS-1B 智能测井系统进行数据采集,测量方式为向上测量,测量点距 0.2 m ,参照《水文测井工作规范》(DZ/T0181-1997)^[39]进行施工。

4 综合物探成果及验证研究

按照研究实施进度,分地面综合物探、水文钻孔宜井井位、综合物探成果验证具体展开。

4.1 地面综合物探

区域地质资料显示主要断裂构造为 NW 向和 NE 向,据此设计投入与其垂直的物探剖面,南区布设 S1~S7 剖面,北区布设 N1~N5 剖面,如图 2 所示。本文首先通过联合剖面法对断裂构造良导体指示性好进行研究区断裂构造的全面调查,继而于有利异常位置合理布置高密度电法、瞬变电磁、微动中的一种或多种,进行查证对比及综合分析。

以 S7 及 N3 综合物探剖面成果(图 5)为例。对应联合剖面法结果显示:在正交点附近(S7 剖面 1600 点、N3 剖面 1100 点及 N3 剖面 1500 点),微动显示正对明显低速异常中心,高密度电法及瞬变电磁均表现明显低阻下凹异常。通过地面综合物探方法的相互验证,可以较为直观地筛选出潜在断裂构造异常。结合区域构造发育特征及平行剖面的综合物探异常反映,于 S7 剖面推测 F_5 断裂构造,于 N3 剖面推测 F_6 、 F_7 断裂构造,其具体展布情况见表 2。其后,分别于 S7 剖面推测 F_5 及 N3 剖面推测 F_6 断裂构造位置施工 ZK01、ZK02(图 5),经水文钻探及水文测井综合验证确为赋水断裂构造。

基于 S7 及 N3 剖面综合物探异常特征,既验证了在研究区寻找断裂构造具备充分的地球物理前提,也指示了应以联合剖面正交点位置为引导、查证对应低电阻率 ρ_s 和低横波速度 v_s 为断裂构造识别特征。结合区内主要断裂构造走向,综合推测了 7 条断裂构造(表 2),其中 F_2 断裂构造经地质调查为平移断层、 F_5 及 F_6 断裂构造得到水文测井验证。

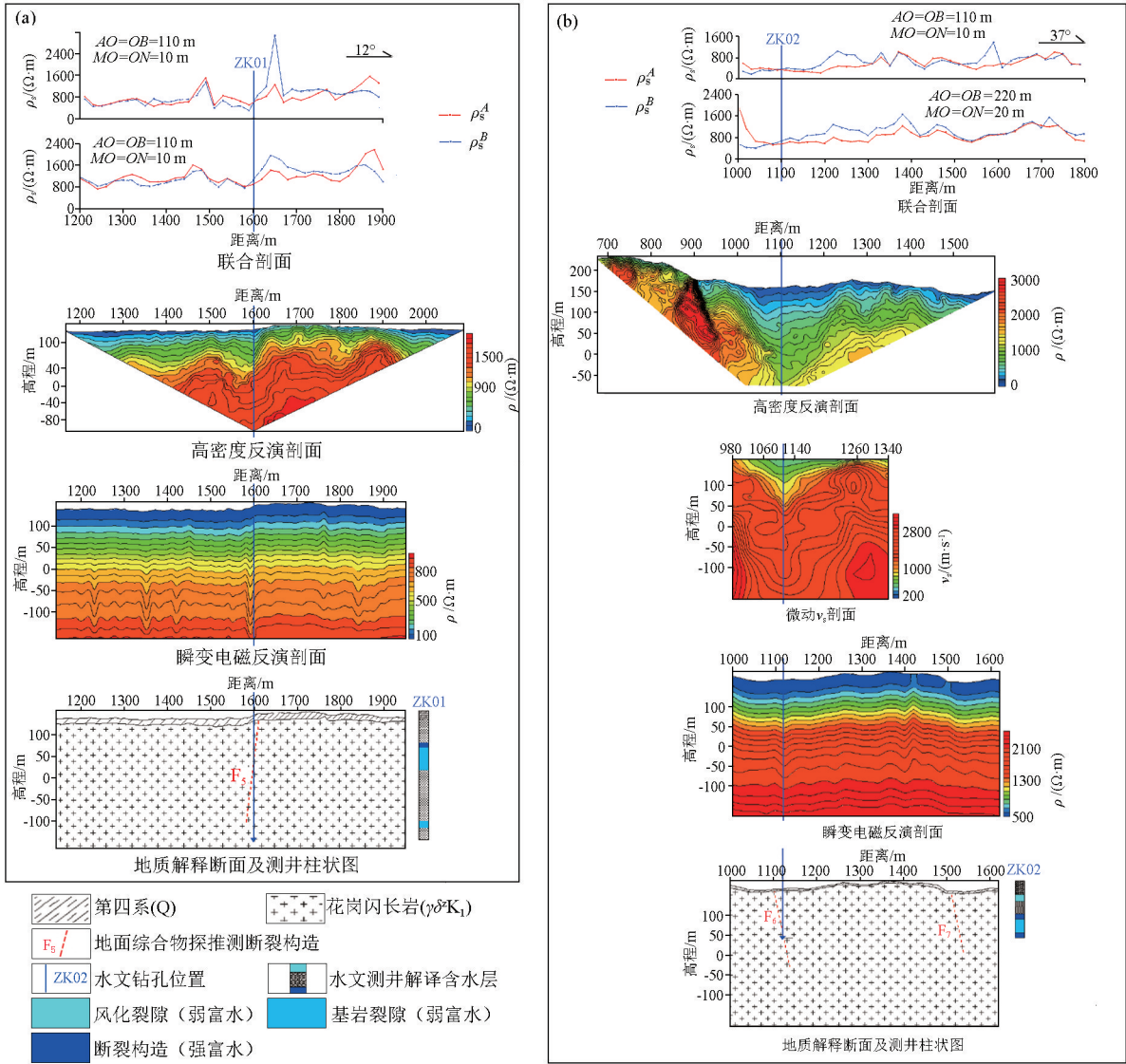


图 5 S7(a)、N3(b) 综合物探剖面成果

Fig. 5 The map of S7(a) and N3(b) integrated physical prospecting profile results

表 2 地面综合物探推测断裂构造

Table 2 Fracture structure inferred by ground-based integrated physical prospecting

推测断裂构造	走向	具体展布
F ₁	NNE	S2:1030 点—S4:1110 点
F ₂	NW	S1:1400 点—S4:1110 点
F ₃	NNE	S2:1420 点—S5:1300 点
F ₄	NNE	S7:1600 点—S4:1900 点—S3:1600 点
F ₅	NWW	S6:1420 点—S7:1600 点—S3:1120 点
F ₆	NWW	N5:1090 点—N2:1680 点— N3:1080 点—N1:1080 点
F ₇	NWW	N4:1810 点—N3:1520 点—N1:1540 点

4.2 水文钻孔宜井井位

水文钻孔的井位确定遵循以下的研究思路：
①通过遥感地质解译初步判断区内主要断裂构造的分布；②通过综合物探推测的断裂构造确定精

细目标；③通过地质调查对部分地表出露的断裂构造查明验证；④综合①、②、③成果及井位周边环境情况确定 2 处宜井井位。

图 6 为地面综合物探推测及遥感解译成果，可以看到：研究区地面综合物探推测的断裂构造与遥感地质解译的断裂构造在区域分布上相近，空间走向上吻合，符合区内断层主要为 NW 向和 NE 向的构造特征，也进一步验证了地面综合物探推测断裂构造的准确性。

经地质调查，地面综合物探推测的 F₂ 断裂构造为平移断层。该断层出露于工作区中部西边方家附近，地表出露宽度约 3~5 m，产状 227°∠85°，发育构造角砾岩，角砾成分主要为花岗闪长岩及石英碎块，硅质胶结（图 7）。

对比研究区遥感地质解译成果、露头断层调查

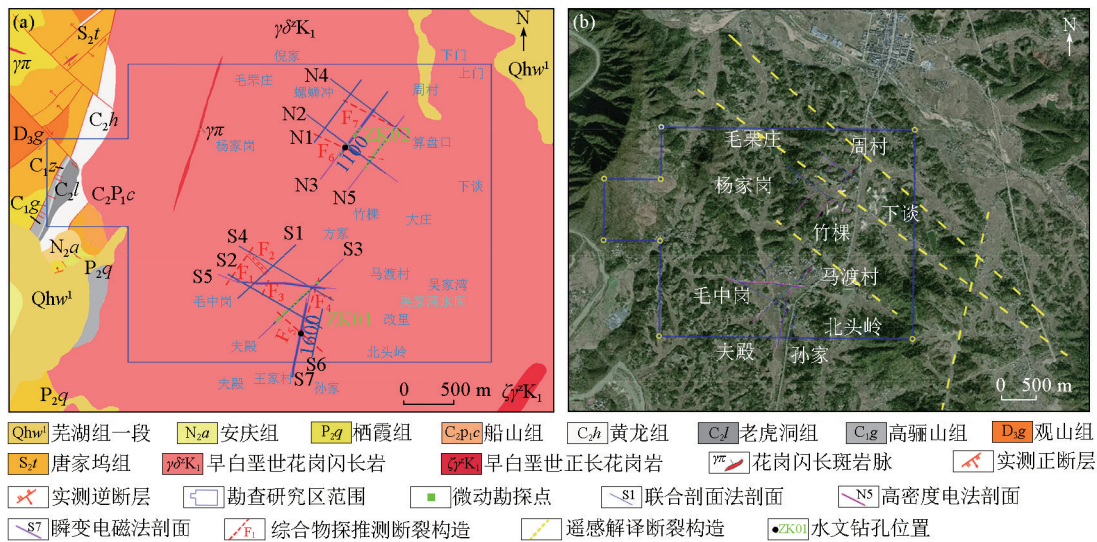


图 6 地面综合物探推测成果 (a) 及遥感解译成果 (b)

Fig. 6 The map of ground-based integrated physical prospecting results(a) and remote sensing interpretation results(b)

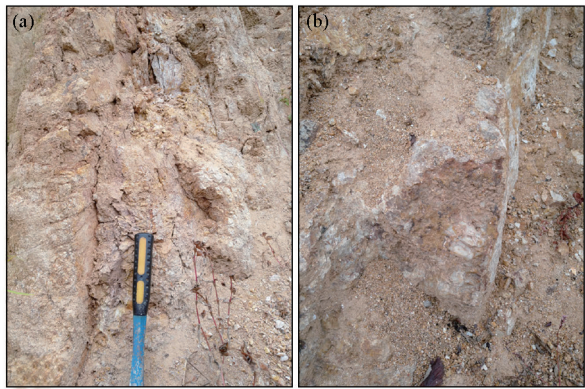


图 7 F₂ 断层面 (a) 及构造角砾岩 (b)

Fig. 7 F₂ fault surface (a) and tectonic breccia (b) in real view

成果,认为研究区地面综合物探推测的断裂构造较为准确,与实际地质情况基本相符。结合区内 NW 向断裂构造为张扭性,具备储水和导水的良好条件。综上,以地面综合物探推测的 NW 向断裂构造为重点,实地勘测水源地及周边环境状况,优选 S7 物探剖面 1600 点布设 ZK01、N3 物探剖面 1100 点布设 ZK02。其中 ZK01 位于钟山小学附近,地面综合物探反映为 F₄、F₅ 断裂构造交汇点及低电阻率低波速异常,设计孔深 300 m;ZK02 位于上谈村附近,地面综合物探反映为 F₆ 断裂构造及低电阻率低波速异常,设计孔深 300 m。

4.3 综合物探成果验证

ZK01、ZK02 均采用气动潜孔锤钻进,整孔未取心,引入水文测井方法来作为含水层判别的主要依据。ZK01、ZK02 水文测井及抽水试验等结果分别很好的验证了地面综合物探推测的 NW 向 F₅、F₆ 富水断裂构造。

4.3.1 水文测井

对于完整花岗闪长岩(隔水层),水文测井表现为高电阻率、高自然伽马及相对稳定自然电位特征;对于裂隙含水层,总体表现为低电阻率和自然电位右偏水文测井特征。而根据 ZK01、ZK02 实测结果(图 8)来看,本区裂隙含水层又可分为风化裂隙(深度较浅)、基岩裂隙及断裂构造 3 种,分别呈现不同的组合异常特征,以 ZK01、ZK02 具体情况展开。

对于 ZK01,以 150~200 m 段为完整花岗闪长岩的测井背景场,其水文测井异常特征分为 2 种:①75~85 m,表现明显低电阻率、自然电位明显右偏以及低自然伽马异常,对应变化幅值分别约为-200 Ω·m、10 mV、-40 API,且钻机描述该段较为破碎,解释为断裂构造,显示透水性好,为强富水;②85~138 m 和 256.5~300 m,表现为低电阻率、自然电位右偏异常,解释为基岩裂隙发育,显示透水性较好,为弱富水。

ZK02 中部破碎严重,致底部垮塌,水文测井最大深度为 142 m。以 52~82 m 段为完整花岗闪长岩的测井背景场,其含水层水文测井异常特征分为 3 种:①34~52 m,表现为明显低阻、自然电位右偏特征,解释为风化裂隙,显示透水性较好,为弱富水;②82~96.5 m 和 130~142 m,表现为明显低阻、自然电位明显右偏以及低自然伽马异常,对应变化幅值分别约为-400 Ω·m、30 mV、-100 API,且提钻过程中带出大量似角砾岩碎状物,解释为断裂构造,显示透水性好,为强富水;③96.5~130 m,表现为低电阻率、自然电位右偏异常,解释为基岩裂隙发育,显示透水性较好,为弱富水。

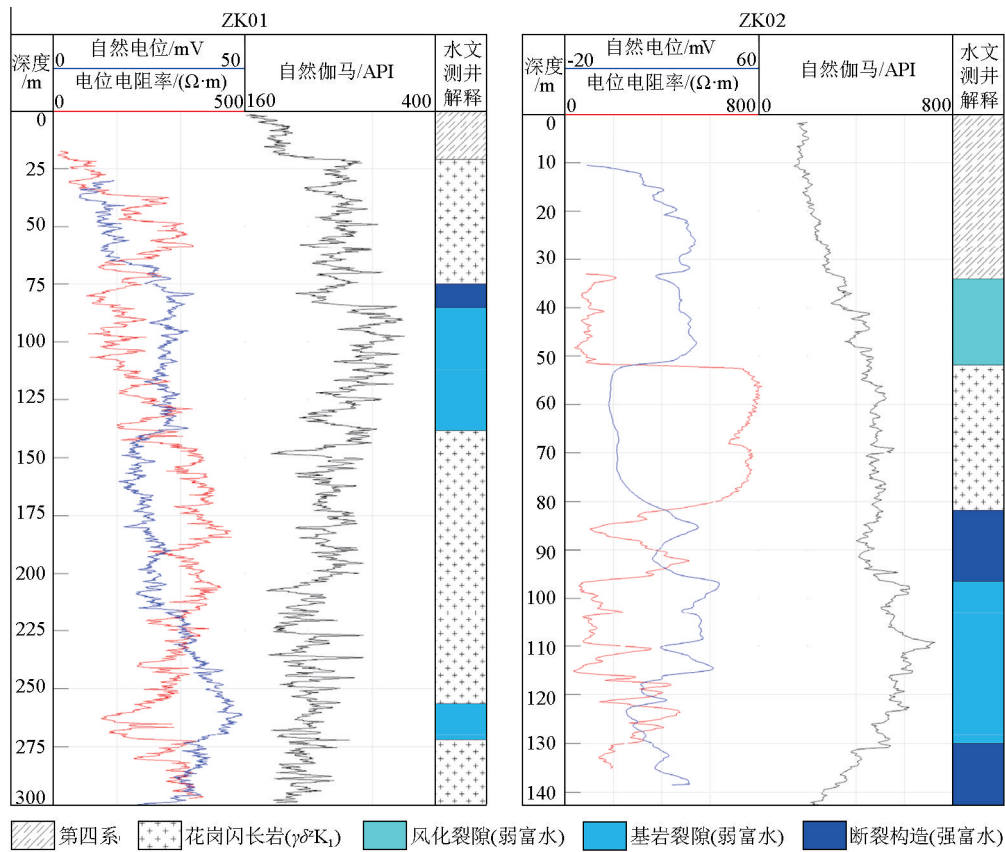


图 8 ZK01、ZK02 水文测井曲线及综合解释

Fig. 8 ZK01, ZK02 hydrological logging curves and integrated interpretation

4.3.2 抽水试验

按照水文测井解释的裂隙含水层位置下置滤水管,稳井后分别对 ZK01、ZK02 进行了 3 个落程的稳定流抽水试验,对应均取最大降深为 S3 时计算涌水量,对具体抽水时间及试验结果进行了统计(表 3)。由结果可知;当最大降深为 80 m 时,ZK01 渗透系数日出水量为 51.36 m³,当最大降深为 35.27 m 时,ZK02 日出水量为 81.69 m³,基本满足研究区矿泉水勘查单孔出水量要求。

表 3 ZK01、ZK02 抽水试验结果

Table 3 ZK01, ZK02 pumping test results

项目	ZK01	ZK02
降深(S)	S3	S3
抽水开始时刻	2021/1/4 20:30	2021/1/17 13:00
抽水结束时刻	2021/1/5 23:30	2021/1/19 12:00
抽水延续时长/h	27	47
抽水稳定时长/h	24	24
降深值/m	80	35.27
涌水量/(m ³ ·d ⁻¹)	51.36	81.69

4.3.3 水质分析

经统计(表 4),ZK01、ZK02 送检水样品偏硅酸含量达到矿泉水水质要求,其他各项主要指标均符合天然矿泉水标准。

表 4 ZK01、ZK02 水质分析主要指标结果

Table 4 Main index results of ZK01 and ZK02 water quality analysis

水文钻孔	取样时间	水样分析项	w(偏硅酸) /(mg·L ⁻¹)	w(锶) /(mg·L ⁻¹)
ZK01		40	33.50~42.70	0.09~0.10
ZK02	枯水期	38	41.50~48.10	0.17~0.19
	丰水期	39	38.80~41.33	0.22~0.23

5 结论

1)为了寻找构造裂隙水,科学投入了地井联合的综合物探方法。通过地面综合物探方法实现了花岗闪长岩中断裂构造的精确定位;通过水文测井方法实现了构造裂隙水层位的精准识别,成功探明单孔出水量约为 50~80 m³/d 的偏硅酸型饮用天然矿泉水。

2)通过联合剖面正交点、低电阻率 ρ_s 及低横波速度 v_s 地面综合物探异常推测了 7 条断裂构造,其中 NW 向 F₂ 断裂构造经查证为断层, NW 向 F₄ 和 F₆ 断裂构造得到水文测井验证,预示了其他未验证 NW 向推测断裂构造为扩大矿泉水勘查成果的重点

方向。

3)通过低电阻率、低自然伽马及自然电位明显右偏的水文测井异常精准响应,指示了区内富水断裂构造为中浅埋深(约 75~140 m),走向主要为 NW 向。该成果在很大程度上揭示了区内赋存矿泉水断裂构造的空间分布,对后续矿泉水范围勘定具有重要意义。

参考文献 (References) :

[1] 党学亚,顾小凡,曾庆铭.柴达木盆地矿泉水资源前景和开发利用条件[J].西北地质,2021,54(3):213-221.
Dang X Y,Gu X F,Zeng Q M. Prospect of mineral water resources and conditions of development and utilization in Qaidam Basin [J]. Northwest Geology,2021,54(3):213-221.

[2] 李佳林,马于曦,卞建民,等.长白山地区安图县矿泉水水化学成因及水质健康功能评价[J].中国农村水利水电,2021(6):42-48.
Li J L,Ma Y X,Bian J M,et al. Hydrochemical genesis and water quality health function evaluation of mineral water in Antu County, Changbai Mountain area [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(6):42-48.

[3] 安徽省地质矿产勘查局 312 地质队.合肥蓝星集团公司关于开发榔桥马渡水矿泉水情况说明[R].安庆,2014.
No. 312 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. Hefei Blue Star group company on the development of Langqiao Madu water mineral water description [R]. Anqing,2014.

[4] 龙慧,谢兴隆,李凤哲,等.二维地震和高密度电阻率测深揭示雄安新区浅部三维地质结构特征[J].物探与化探,2022,46(4):808-815.
Long H,Xie X L,Li F Z,et al. Two-dimensional seismic and high-density resistivity sounding reveal the shallow three-dimensional geological structure characteristics of Xiong 'an New Area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(4):808-815.

[5] 曹锐,冉瑜,吕玉香,等.物探与水文地质分析结合在岩溶地区找水定井中的应用——以黔江区罗家坝 ZK3 井为例[J].中国岩溶,2018,37(2):280-285.
Cao R,Ran Y,Lyu Y X,et al. The application of geophysical prospecting combined with hydrogeological analysis in water prospecting and well determination in karst area;Taking ZK3 well in Luojiaaba of Qianjiang District as an example [J]. Carsologica Sinica, 2018,37(2):280-285.

[6] 曹建文,夏日元,方尚武,等.云贵高原斜坡地带典型地下水富硫酸盐地区“越层找水”模式及其机理研究[J].中国地质,2019,46(2):235-243.
Cao J W,Xia R Y,Fang S W,et al. Study on the " cross-layer water search" model and its mechanism in typical groundwater sulfate-rich areas of Yunnan-Guizhou Plateau slope [J]. Geology in China,2019,46(2):235-243.

[7] 张彪,刘良志,倪进鑫,等.综合物探方法在花岗岩严重缺水地区找水勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(4):501-507.

Zhang B,Liu L Z,Ni J X,et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in water exploration in granite serious water shortage area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2015,12(4):501-507.

[8] 李国占,孙银行.地下水地球物理勘查技术模式[J].物探与化探,2010,34(2):202-204.
Li G Z, Sun Y H. Technical model of groundwater geophysical investigation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2):202-204.

[9] Hasan M,Shang Y J,Jin W J, et al. Joint geophysical prospecting for groundwater exploration in weathered terrains of South Guangdong,China[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2021,193(11).

[10] 齐信,黎清华,张再天,等.海南省琼中县花岗岩地区含水层电性特征及地下水赋存规律[J].地质通报,2021,40(6):1001-1009.
Qi X,Li Q H,Zhang Z T,et al. Electrical characteristics of aquifer and groundwater occurrence law in granite area of Qiongzong County,Hainan Province [J]. Geological Bulletin of China,2021,40(6):1001-1009.

[11] 孙银行,田蒲源,杨勤海,等.花岗岩地区物探找水——以山东临朐地区研究为例[J].矿产勘查,2021,12(9):1959-1963.
Sun Y H,Tian P Y,Yang Q H,et al. Geophysical prospecting for water in granite area; A case study of Linqu area in Shandong Province [J]. Mineral Exploration,2021,12(9):1959-1963.

[12] 杨艳林,邵长生,靖晶,等.长江中游城市群矿泉水资源勘查与发现——以咸宁市汀泗桥幅 1:50000 水文地质调查数据集为例[J].中国地质,2019,46(S2):74-94.
Yang Y L,Shao C S,Jing J,et al. Exploration and discovery of mineral water resources in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River-Taking the 1:50000 hydrogeological survey data set of Tingsiqiao Sheet in Xianning City as an example [J]. Geology in China,2019,46(S2):74-94.

[13] 刘声凯,刘海飞,黄超,等.水文地质调查与综合物探在赣南花岗岩地区找水中的应用[J].地质与勘探,2021,57(3):584-592.
Liu S K,Liu H F,Huang C,et al. Application of hydrogeological survey and comprehensive geophysical prospecting in water prospecting in granite area of Gannan [J]. Geology and Exploration, 2021,57(3):584-592.

[14] 李文鹏.“水文地质与水资源调查计划”进展[J].水文地质工程地质,2022,49(2):1-6.
Li W P. Achievements of investigation program on hydrogeology and water resources of CGS[J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2022,49(2):1-6.

[15] 李富,邓国仕,袁建飞,等.断层破碎带综合地球物理找水模式——以干田坝村探采结合井为例[J].中国岩溶,2019,38(3):344-352.
Li F,Deng G S,Yuan J F,et al. Comprehensive geophysical water exploration mode of fault fracture zone; Taking the exploration and mining combined well in Gantianba Village as an example [J]. Carsologica Sinica,2019,38(3):344-352.

[16] 屈利军,李波,周佩.综合物探方法在湘中贫水山区找水中的

- 应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(5): 835-839.
- Qu L J, Li B, Zhou P. Application of comprehensive geophysical prospecting method in water prospecting in water-poor mountainous areas of central Hunan [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(5): 835-839.
- [17] 张福彬. 综合地球物理测井参数评价地下水方法研究[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(5): 687-693.
- Zhang F B. Study on the method of evaluating groundwater by comprehensive geophysical logging parameters [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(5): 687-693.
- [18] 王志刚. 浅谈地球物理测井曲线在辽宁省阜新市构造裂隙水勘察项目中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2013(6): 225.
- Wang Z G. The application of geophysical logging curve in the exploration project of structural fissure water in Fuxin City, Liaoning Province is discussed [J]. New Technology and Products of China, 2013(6): 225.
- [19] 李双, 杨晓勇, 孙卫东. 皖南泾县榔桥岩体年代学、地球化学及成矿潜力[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 563-564.
- Li S, Yang X Y, Sun W D. Geochronology, geochemistry and metallogenic potential of Langqiao rock mass in Jing County, southern Anhui Province [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 563-564.
- [20] 李双, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 皖南泾县榔桥岩体锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素和地球化学特征及其找矿指示意义[J]. 地质学报, 2014, 88(8): 1561-1578.
- Li S, Yang X Y, Sun W D, et al. Zircon U-Pb dating, Hf isotope and geochemical characteristics of Langqiao rock mass in Jing County, southern Anhui Province and their prospecting significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(8): 1561-1578.
- [21] 马国明. 皖南黄山地区矿泉水资源分布及成因[J]. 地质学刊, 2020, 44(3): 312-317.
- Ma G M. The distribution and genesis of mineral water resources in Huangshan area of southern Anhui [J]. Journal of Geology, 2020, 44(3): 312-317.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. DZ0282-13727-2015 1: 50000 水文地质调查规范[S]. 北京: 地质出版社, 2015.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ0282-13727-2015 1: 50000 hydrogeological survey specification [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [23] 中华人民共和国国土资源部. GB/T13727-2016 天然矿泉水资源地质勘查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. GB/T13727-2016 Geological exploration specification of natural mineral water resources [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [24] 马志敬. 商都县严重缺水地区勘查方法及找水方向研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- Ma Z J. Study on exploration method and water exploration direction in severe water shortage area of Shangdu County [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014.
- [25] 徐佩芬, 李世豪, 杜建国, 等. 微动探测: 地层层和隐伏断裂构造探测的新方法[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1841-1845.
- Xu P F, Li S H, Du J G, et al. Microtremor detection: A new method for detecting stratigraphic stratification and concealed fault structures [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1841-1845.
- [26] 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等. 海口市江东新区马袅—铺前断裂第四纪活动特征[J]. 地质学报, 2022, 96(2): 403-417.
- Wang C Q, Jia L Y, Hu D G, et al. Quaternary activity characteristics of the Mayao-Puqian fault in Jiangdong New District, Haikou City [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 403-417.
- [27] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0073-2016 电阻率剖面法技术规程[S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0073-2016 Technical specification for resistivity profile method [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [28] 方熠, 张慧, 朱莹, 等. 环境与工程地球物理技术研究及应用述评[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(6): 8-18.
- Fang Y, Zhang H, Zhu Y, et al. Review on the research and application of environmental and engineering geophysical technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(6): 8-18.
- [29] 丁超, 解阳波, 张家豪, 等. 三维高密度电法揭示 SAGD 地面窜漏通道[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2022, 52(6): 2021-2033.
- Ding C, Xie Y B, Zhang J H, et al. Three-dimensional high-density electrical method reveals SAGD surface leakage channel [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(6): 2021-2033.
- [30] 陈松, 陈长敬, 罗士新, 等. 广州南沙厚覆盖区近地表地层结构分析: 基于二维地球物理多方法探测结果[J]. 地质通报, 2023, 42(1): 168-179.
- Cheng S, Cheng C J, Luo S X, et al. Analysis of near-surface stratigraphic structure in Nansha thick coverage area of Guangzhou: Based on two-dimensional geophysical multi-method detection results [J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(1): 168-179.
- [31] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0072-93 电阻率测深法技术规程[S]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T0072-93 Technical specification for resistivity sounding method [S]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [32] 刘明宏, 蔡红柱, 杨浩, 等. 地面与半航空瞬变电磁法三维联合反演[J]. 地球物理学报, 2022, 65(10): 3997-4011.
- Liu M H, Cai H Z, Yang H, et al. Three-dimensional joint inversion of ground and semi-airborne transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3997-4011.
- [33] 郝延松, 胡博, 于润桥, 等. 磁性源瞬变电磁视电阻率计算方法[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 1034-1039.
- Hao Y S, Hu B, Yu R Q, et al. Magnetic source transient electromagnetic apparent resistivity calculation method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 1034-1039.
- [34] 姜升. 瞬变电磁发射机电流波形改善技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- Jiang S. Research on current waveform improvement technology of transient electromagnetic transmitter [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [35] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0187-2016 地面磁性源瞬变电磁技术规程[S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China.

DZ/T0187 - 2016 Technical specification of ground magnetic source transient electromagnetic [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.

[36] 赵雪然. 城市地下空间勘探中的微动技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

Zhao X R. Research on micro-motion technology in urban underground space exploration [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[37] 陈实, 李延清, 李同贺, 等. 天然源面波技术在乌鲁木齐城市地质调查中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1389-1398.

Chen S, Li Y Q, Li T H, et al. Application of natural source surface wave technology in Urumqi urban geological survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1389-1398.

[38] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ7-2017 城市工程地球物理探测标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. CJJ7-2017 Geophysical exploration standards for urban engineering [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2017.

[39] 中华人民共和国地质矿产部. DZ/T0181-1997 水文测井工作规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China. DZ/T0181-1997 Hydrological logging work specification [S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.

An application study of the comprehensive geophysical prospecting method in the exploration of mineral water: A case study of the Langqiao area, Jing County

ZHANG Zhi^{1,2}, XU Hong-Miao², QIAN Jia-Zhong¹, XIE Jie², CHEN Hao-Long², ZHU Zi-Xang²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. No. 327 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Hefei 230011, China)

Abstract: The area around Maduqiao Village, Langqiao Town, Jing County has great potential for the development of high-quality mineral water. However, due to the geological conditions and the inhomogeneity of water-bearing media, the investigation of the distribution range of the mineral water in the area and the quantitative evaluation of the water quantity and quality have always been challenges to the development and utilization of mineral water in the area. With the Langqiao area of Jing County as the target area, an application study on the comprehensive geophysical prospecting method that comprehensive ground geophysical prospecting with hydrogeological logs was conducted, achieving important progress. The major results are as follows: (1) The fault structures in granodiorites were precisely located through comprehensive ground geophysical prospecting, and the horizon of tectonic fissure water was precisely identified based on hydrogeological logs; (2) The metasilicate natural mineral water for drinking with a single well water yield of 50~80 m³/d was identified; (3) The water-rich fault structures in the study area have a medium to shallow burial depths of about 75~140 m and primarily have a NW strike. These results reveal the spatial distribution characteristics of the mineral water-bearing structures in the study area and are of great significance to the subsequent investigation of the mineral water range. Moreover, the systematic research philosophy and technical methods used for the Langqiao area of Jing County in this study can guide the mineral water exploration in similar areas.

Key words: comprehensive geophysical prospecting; groundwater exploration; natural mineral water; Langqiao area of Jing County

(本文编辑: 沈效群)