

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.04

EH4 和对称四极激发极化联合技术的 严重缺水基岩山区找水研究

李霞^{1,2}, 陈文芳³, 万利勤², 侯丽丽⁴, 王海刚², 何庆成⁵, 王金生¹, 秦同春², 田小维⁶

(1. 北京师范大学水科学研究院/地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100088;

2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质环境调查院, 河南 郑州 450002; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 5. 中国地质科学院, 北京 100037; 6. 横滨国立大学风险共生社会创造中心, 日本 横滨 240-8501)

摘要: 我国基岩山区普遍存在人畜饮水困难问题, 因此解决干旱地区的严重缺水问题已刻不容缓。通过 1:5 万水文地质图幅调查寻找到研究区断裂蓄水构造, 从赋水空间、汇水区和径流通道三方面确定了赵老园村找水靶区。采用 EH4 和对称四极激发极化相互验证的地球物理勘探方法, 在 EH4 剖面的基础上, 共做激发极化测深点 7 个、对称四极电测深点 2 个, 通过分析 EH4 连续电导率剖面 and 激电测深曲线, 确定探采结合井位, 实现了在基岩缺水山区高效经济地找水示范。该联合技术具有减少物探资料解译成果多解性、降低勘探成本和风险等优点, 解译结果验证了侵入岩与围岩蚀变带、断层构造破碎带等是基岩山区地下水相对富水区, 为今后该类岩浆岩严重缺水山区找水提供合理可行的技术借鉴和参考。
关键词: EH4; 激发极化法; 对称四极; 严重缺水区; 太行山区; 找水研究

中图分类号: P641.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0023-07

Groundwater location in bedrock mountains with serious water scarcity using a combination of EH4 and symmetric quadrupole induced polarization

LI Xia^{1,2}, CHEN Wenfang³, WAN Liqin², HOU Lili⁴, WANG Haigang²,

HE Qingcheng⁵, WANG Jinsheng¹, QIN Tongchun², TIAN Xiaowei⁶

(1. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100088, China; 2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Henan No. 1 Institute of Geo-Environment Survey, Henan Bureau of Geo-Exploration & Mineral Development, Zhengzhou, Henan 450002, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. Center for Creation of Symbiosis Society with Risk, Yokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan)

Abstract: The deficiency of drinking water is a common problem in mountain areas of China. It is urgent to solve the problem of serious water shortages in arid areas. Based on the 1:50 000 hydrogeological map, the fractured water storage structures were found in the studied area. The water target area for the Zhaolaoyuan village was determined from three aspects: water supply spaces, watersheds and runoff channels. Based on the

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-10

基金项目: 太行山区 1:5 万水文地质调查(9 幅)(12120114010801); 全国地下水与地面沉降信息系统建设(DD20160299)

第一作者: 李霞(1984-), 女, 工程师, 博士研究生, 主要从事水文地质环境地质相关研究工作。E-mail: lx2003cg@163.com

通讯作者: 侯丽丽(1987-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事地下水和土壤污染防控相关研究。E-mail: lili.hou@cnu.edu.cn

EH4 profiles, seven polarized sounding points and two symmetrical quadrupole sounding points were obtained by the EH4 and symmetric quadrupole excitation polarization. By analyzing the EH4 continuous conductance speed profiles and the measured depth curves, locations of the mining wells were determined, which can be used as an example of efficiently finding groundwater in water scarcity mountain areas. This joint technology has advantages of reducing the interpreted solutions of geophysical data and the exploration cost and risks. The interpreted results show that the groundwater storage zones are intrusive rocks and the surrounding rock alteration zones and the fault structured zones. The results may provide technical references for locating groundwater in magmatic rock areas of serious water scarcity.

Keywords: EH4; induced polarization; symmetric quadrupole; serious water scarcity area; Taihang Mountain area; groundwater exploration demonstration

人畜饮水困难问题在我国多数山区普遍存在,严重阻碍了人民生活水平的提高和社会经济的发展。2009 年 8 月,我国西南地区出现百年一遇的旱情,旱灾致使饮水困难人口达 1 807.1 万人,造成直接经济损失达 236.6 亿元^[1]。因此,解决干旱地区的严重缺水问题已刻不容缓。河南西部山区是我国北方有名的干旱缺水山区之一,面积约 $7.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省总面积的 47.3%^[2]。区内地层岩性富水性极差,鲜有集中供水井,一遇干旱,河流干涸,居民饮水只能靠拉水^[3]。但区内断裂构造发育,因此在构造发育且汇水有利地带寻找有供水意义的地下水是有效解决当地人畜用水困难的根本途径。

地球物理勘探是缺水山区找水的主要方法之一^[4],它能对深部地层含水情况进行勘查,基本查明地面以下一定深度的地层含水情况^[5]。对于缺水山区而言,通常地下水埋藏较深,不适合采用勘探深度较浅的物探方法。目前在水文地质调查中,深部勘探可采用的主要物探技术有:电测深法、高密度电阻率法、瞬变电磁法、大地电磁测深法(EH4)、核磁共振法、激发极化测深法等^[6-8]。缺水山区因地形条件较复杂,常规的物探方法由于地形的异常容易歪曲甚至掩藏了有意义的地点信息,尽管可通过数值法、地形校正法等压制地形干扰,但这些干扰仍难以从根本上消除。相较而言,EH4 利用人工发射信号补偿天然信号某些频段的不足,获得高分辨率的电阻率成像,能够探测隐伏断层、破碎带及侵入—接触带的位置、产状、性质,能够测定覆盖层厚度、确定基岩面形态,探测地层构造、岩性特征及松散层厚度、岩性结构^[9],并且具有工作简便,效率高,勘探分辨率较高,受地形限制小,成本适中等优点,既满足研究区工作精度要求,又符合缺水地区经济落后的实际情况。同时,电测深法是研究垂向地质构造的地球物理方法,用于探测地层、岩性在垂直方向

的电性变化,使用对称四极测深时,具有受场地限制影响小、异常明显、分层细等优点。激发极化法是利用激电二次场的大小与衰减快慢的不同推断岩体的含水情况^[10-11],该方法能充分利用激电场的时间(频率)特性,不受地形起伏和围岩不均影响,对研究区裂隙水的水位埋深和富水带反映比较直观,具有测深方法简单,定性定量解译方法成熟,成本较低等优点。

本文选取河南西部严重缺水基岩山区作为研究区进行找水研究。区域地形地质条件复杂,地层岩性以岩浆岩为主,断层发育,破碎带较多,且经济基础落后。在综合分析水文地质条件的基础上,考虑到物探资料解译成果的多解性,为减少勘探风险,降低勘探成本,采用 EH4 和对称四极激发极化相互验证的技术方法选择靶区进行探采找水示范。结果表明,该联合技术适合严重缺水基岩山区构造裂隙带找水,通过查明侵入岩与围岩蚀变带、断层构造破碎带确定地下水相对富水区,采用两种相互验证的技术方法提高勘探成功率,降低勘探成本,为今后缺水山区找水提供了合理有效的技术依据和示范。

1 研究区概况

研究区位于河南省西部洛阳市西南基岩山区,主要行政区为嵩县北部,与宜阳县南部相邻。区域属大陆性半湿润、半干旱气候,降水量偏少,蒸发作用较强。据 1995—2014 年降水和蒸发资料分析,研究区多年平均降水量为 688.09 mm,而多年平均蒸发量为 1 323.37 mm,是多年平均降水量的 1.9 倍。研究区地处秦岭山脉向华北平原延伸余脉之一的熊耳山脉东段南部,该山脉南接伏牛山系,北邻崤山,地势西陡东缓^[12]。研究区地貌类型为流水地貌的侵蚀剥蚀低山,地面海拔标高近 600~700 m(图 1)。

研究区出露地层自老到新依次为:中元古界熊耳

群和中细粒石英砂岩夹砾岩、页岩的汝阳群,中生界白垩系火山碎屑岩系的九店组,新近系洛阳组和第四系。地层岩性多以岩浆岩为主(图 2)。

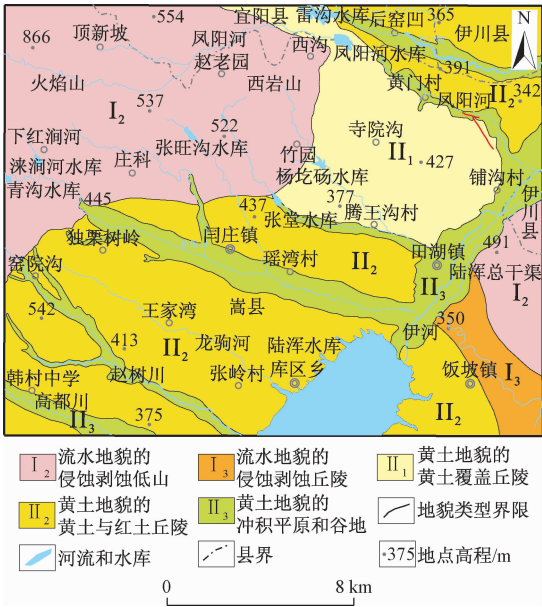


图 1 研究区地貌简图
Fig.1 Geomorphological sketch in the study area

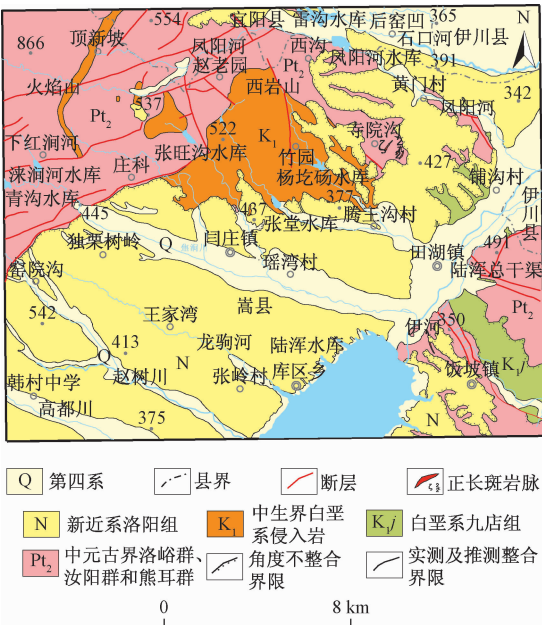


图 2 研究区地质构造简图
Fig.2 Geological tectonic sketch in the study area

2 确定找水靶区

研究区西部主要以中基(基)—中酸(酸)性侵入火山熔岩为主的岩浆岩,另有正长斑岩脉分布。中元古界熊耳群地层岩性主要为灰紫色流纹斑岩、英安斑

岩夹灰紫色安山岩及安山玢岩,顶部夹透镜状石英岩。区内岩浆活动频繁,结晶基底变形变质强烈,盖层断裂构造发育。这些侵入岩体与围岩接触带和构造裂隙破碎带是基岩山区地下水的相对富水区^[13]。基岩山区地下水相对富水区应具备三个条件:(1)有相对丰富的赋存地下水空间;(2)地貌条件相对低洼,容易汇集大气降水;(3)处在地下水径流排泄区,一般分布在沟谷切割区和上游地层相对破碎下游地层相对完整的阻隔区^[14]。侵入岩与围岩接触带和构造裂隙破碎带受热液侵蚀变质、热胀冷缩等作用,或构造张力和压力作用,造成地层破碎、裂隙发育。大气降水入渗后,赋存在这些破碎的地层内,形成相对富水区。这些富水区为研究区找水提供了重要靶区。

闫庄镇赵老园为研究区的一个富水区,也是本文的找水靶区。赵老园村位于嵩县县城北约 19 km,属严重缺水山区。该区为典型的侵蚀剥蚀低山地貌,地形起伏明显,海拔高度在 500 ~ 1 000 m,相对高差 150 ~ 300 m。分水岭多呈狭长平稳屋脊状,沟谷纵坡降较大,多为“V”型谷^[3],地貌低洼处具备一定的汇水面积,是找水的有利部位。冲沟底部为薄层的第四系坡积物覆盖,靶区位于两组断裂的交汇部位,走向大致为北西向、北东向,经长期构造变动,构造裂隙较发育。近地表有风化裂隙发育,浅部为构造裂隙密集带和地形低洼的风化裂隙发育带,微含裂隙潜水,但分布极不均匀。而在两组断裂交汇部位的深部,具备一定的导水通道和储水空间,具有赋存地下水的条件。

3 EH4 剖面布置及解译

在靶区沿线布置 EH4 连续电导率剖面,剖面方向自西北向东南(图 3)。野外测点使用高精度手持 GPS



图 3 赵老园村 EH4 和对称四极激发极化法点位布置图
Fig.3 Point distribution map of the EH4 and symmetric quadrupole induced polarization in the Zhaolaoyuan village

进行定点和量距。相对于测点的中心点用罗盘寻找确定两条相互垂直的方向 (+/-2°) 布设电极“X”方向和“Y”方向,电极距为 $E_x = E_y = 30$ m。把 X 磁棒放到离前置放大器 (AFE) 大于 5 m 处,把 Y 探头放在至少离 X 探头 2 m 的地方,并使任何一探头至少相距 0.5 m 以远,避免因距离太近造成的耦合干扰。使用高频系统进行勘察。

野外采集时间序列数据,通过付氏变换转换到频率域,利用四个场分量的自功率谱或互功率谱计算出阻抗张量,并显示四个相关分量的相对振幅、相位和相干度等参数,实时显示视电阻率测深曲线。对野外数据预处理后,进行 FFT 变换,获得电场和磁场虚、实分量和相位数据,进行一维 BOSTICK 反演,将频率变换为深度;在一维反演的基础上,用二维成像软件进行快速自动二维反演,并根据地质地球物理条件修正反演结果。使用 SURFER 8.0 对反演得到的数据进行 Kringing 网格化,采用 Spline Smooth 方法对网格化数据进行圆滑处理,获得更好的赵老园村 EH4 电导率剖面图 (图 4)。

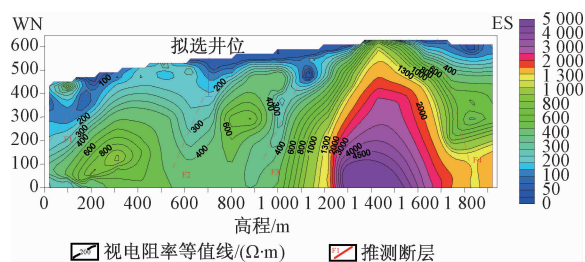


图 4 赵老园村 EH4 电导率剖面图

Fig. 4 EH4 conductivity profile in the Zhaolaoyuan village

剖面方向 0 ~ 150 m 浅部 (0 ~ 40 m) 视电阻率值出现高值封闭圈,为砂卵石夹黏土的反映;40 ~ 80 m 视电阻率值较低,为黏土及安山岩风化壳的反映;80 m 以下视电阻率增高,大于 $100 \Omega \cdot m$,为较完整安山岩的反映。剖面方向 150 ~ 1 950 m 浅部 (0 ~ 10 m) 视电阻率值较低,为黏土或基岩风化壳的反映;向下数值增高,为安山岩的反映。视电阻率等值线在剖面方向 150 ~ 300 m、550 ~ 750 m、950 ~ 1 150 m、1 650 ~ 1 800 m 处变陡,分别为断层 (F1、F2、F3、F4) 的反映。

4 对称四极激发极化法测点布置及解译

在 EH4 连续电导率剖面分析的基础上,在 F1、F2、F3 断层附近布置 7 个激电测深点,在 F2、F3 断层附近分别布置 1 个对称四极电测深点。采用高精度数字化直读电阻率仪器 DZD-4 型,供电时间 8 s,供电方

式为正负双向供电,占空比 1:1,二次场测量延时 250 ms。测量电极采用 NP-50LX 固体不极化电极,极差 < 0.5 mV,漂移 $< \pm 1$ mV/24。本次研究供电电极距 (AB/2) 最小为 3 m,最大为 340 m;测量极距 MN/2 = 1/5 (AB/2)。测深点布置位置见图 3。

经过解译得出 7 个激发极化测深点视电阻率 (ρ_s)、视极化率 (η)、半衰时 (Th)、衰减度 (D) 曲线和 2 个对称四极测深点视电阻率曲线,见图 5、图 6。

由点位布置图 (图 3) 和激发极化测深曲线图 (图 5) 可以看出,7 个点的视极化率值都小于 1%,说明该区域岩石不存在矿化性。1、2 号点位置相距较近,布设于 F3 断层附近。1 号点在 AB/2 = 3 ~ 340 m 视电阻率曲线上升较陡,大于 40° ,没有明显的缓倾段,说明下部基岩 (安山玢岩) 裂隙发育较差。2 号点在 AB/2 = 3 ~ 6 m 视电阻率数值较低,为黏土夹碎石的反映,在 AB/2 = 6 ~ 25 m 视电阻率曲线缓慢上升,上升角度约 30° ,为基岩裂隙较发育 (破碎) 的反映,在 AB/2 = 25 ~ 340 m 视电阻率曲线上升较陡,上升角度约 45° ,为完整基岩的反映,下部没有明显的缓倾段,说明下部基岩 (安山玢岩) 裂隙发育较差。1、2 号点视电阻率曲线下部均没有出现明显的缓倾段,说明没有很好的导水裂隙发育,不适合成井。

5 号点位于研究区西部 F1 断层附近。该点在 AB/2 = 3 ~ 40 m 视电阻率曲线数值较低,为黏土夹碎石的反映,在 AB/2 = 40 ~ 340 m 视电阻率曲线上升较缓,上升角度小于 30° ,为基岩破碎或断层带的反映。但 5 号点曲线下部没有完整基岩的反映,因此没有很好的隔水底板存在,故也不适合成井。

3、4、6、7 点所处位置相近,布设于 F2 断层附近。3 号点在 AB/2 = 3 ~ 40 m 视电阻率曲线数值较低,上升较缓,上升角度约 30° ,为基岩裂隙较发育 (破碎) 的反映;在 AB/2 = 40 ~ 150 m 视电阻率曲线上升较陡,上升角度约 45° ,为完整基岩的反映;在 AB/2 = 150 ~ 180 m 出现明显的缓倾段,为基岩 (安山玢岩) 裂隙或破碎的反映;在 AB/2 = 180 ~ 340 m 视电阻率曲线上升较陡,为完整基岩的反映。4 号点在 AB/2 = 3 ~ 40 m 视电阻率曲线数值较低上升较缓,上升角度约 30° ,为基岩裂隙较发育 (破碎) 的反映;在 AB/2 = 40 ~ 340 m 视电阻率曲线上升较陡,上升角度约 45° ,为完整基岩的反映。6 号点在 AB/2 = 3 ~ 25 m 视电阻率曲线数值较低上升较缓,在 AB/2 = 180 ~ 225 m 视电阻率曲线变缓,上升角度约 30° ,为基岩裂隙较发育 (破碎) 的反映;在 AB/2 = 25 ~ 180 m 和 AB/2 = 225 ~

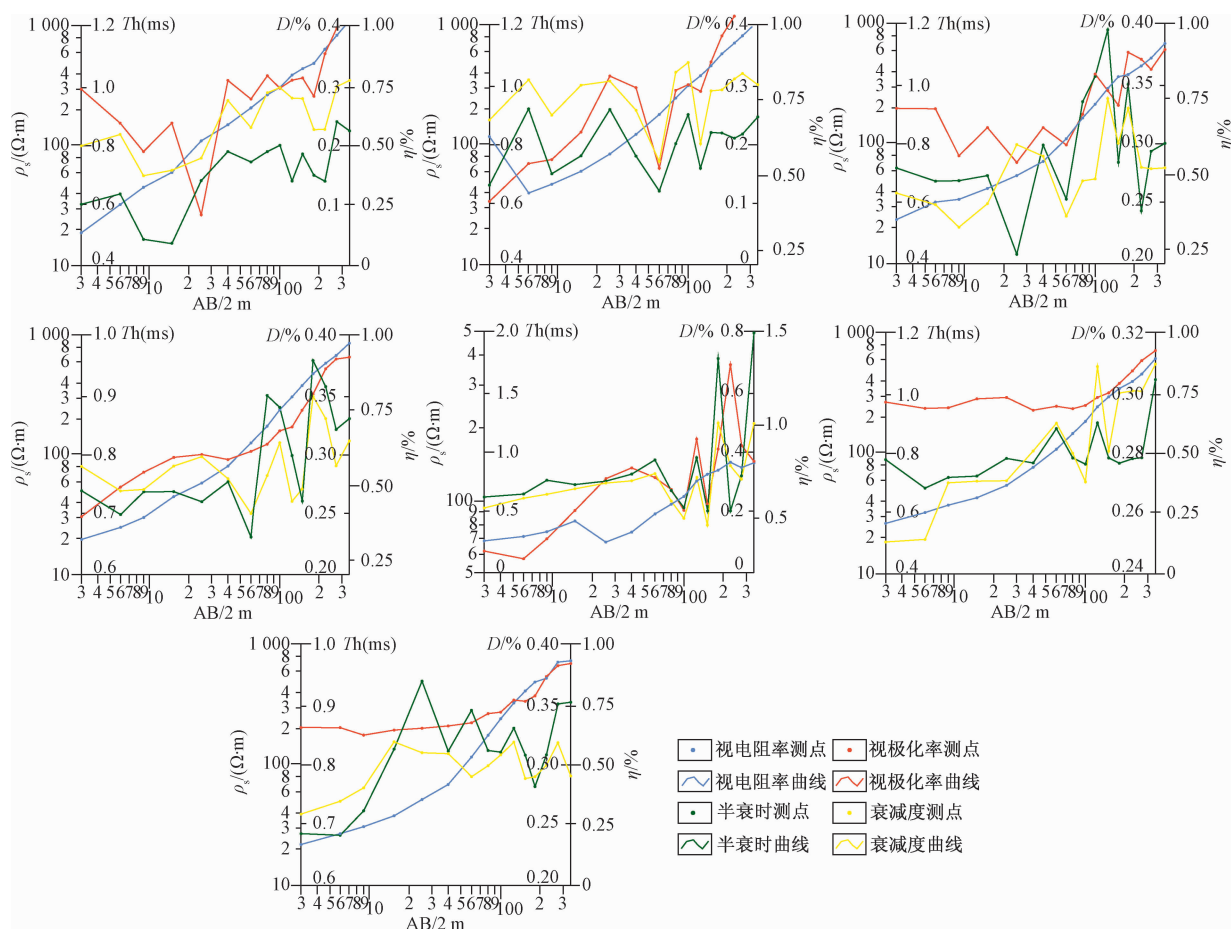


图5 激发极化测深曲线

Fig. 5 Induced polarization sounding curve of different points in the Zhaolaoyuan village

340 m 视电阻率曲线上升较陡,上升角度约 45° ,为完整基岩的反映。7号点在 $AB/2 = 3 \sim 40$ m、 $AB/2 = 180 \sim 225$ m 和 $AB/2 = 270 \sim 340$ m 视电阻率曲线上升较缓,上升角度约 30° ,为基岩裂隙较发育(破碎)的反映;在 $AB/2 = 40 \sim 180$ m 和 $AB/2 = 225 \sim 270$ m 视电阻率曲线上升角度约 45° ,为完整基岩的反映。4号点解译结果与3、6、7点明显不一致,其下部为完整的基岩反映,没有很好的储水裂隙。相反,3、6、7点解译说明该区域存在较为完整的隔水顶底板(完整基岩反映)和一定厚度的含水层(基岩裂隙或破碎反映),即存在覆盖层型的基岩裂隙蓄水构造和边界或底部为阻水构造,同时3号点出现破碎带的深度为 $150 \sim 180$ m,6、7号点出现破碎带的深度为 $180 \sim 225$ m 之间,结合缺水山区找水的实际需要,在3号点位钻探明显优于6、7号点。

在山区找水相关研究中发现,由视电阻率和视极化率确定储水构造的发育情况后,其含水层的富水性需要结合辅助参数衰减度和半衰时分析判断^[15-17],该

参数都是反映二次场衰减特征,衰减度表征了二次场衰减的速度参数,衡量二次场放电快慢,在含水层表现为高值^[18]。半衰时主要反映以地下水含量因素为主的地层二次场衰减特征。在视电阻率异常区段,重点结合相应的半衰时异值特征,能够较准确定位出含水层深度及富水性。本研究中3号点在 $AB/2 = 3 \sim 40$ m、 $150 \sim 180$ m 深度出现视电阻率曲线缓倾段时,其半衰时曲线在 $AB/2 = 150 \sim 180$ m 时出现数值上升。同时衰减度迅速上升,表现出明显的高值异常,综合验证了该位置深度处为含水破碎带。6、7号点在 $AB/2 = 180 \sim 225$ m 深度时,半衰时曲线也有明显的数值上升,进一步推断该深度存在富水的基岩裂隙构造。7号点的异变明显高于3、6号点,推测其裂隙更为发育,破碎带更明显,同时富水性应该更优,在后期经济条件允许或实际需要的情况下可考虑进一步开采。

由点位布置图(图3)和对称四极电测深曲线图(图6)可以看出,1号点在 $AB/2 = 3 \sim 25$ m 视电阻率曲线数值较低,上升较缓,上升角度约 30° ,为基岩裂

隙较发育(破碎)的反映;在 $AB/2 = 25 \sim 340$ m 视电阻率曲线上升角度约 45° ,为完整基岩的反映。2号点在 $AB/2 = 3 \sim 6$ m 视电阻率数值较低,为黏土夹碎石的反映,在 $AB/2 = 6 \sim 25$ m 和 $AB/2 = 40 \sim 225$ m 视电阻率曲线上升较陡,上升角度约 45° 和 40° ,为完整基岩的反映;在 $AB/2 = 25 \sim 40$ m 和 $AB/2 = 225 \sim 400$ m 视电阻率曲线上升变缓,为基岩裂隙较发育(破碎)的反映。

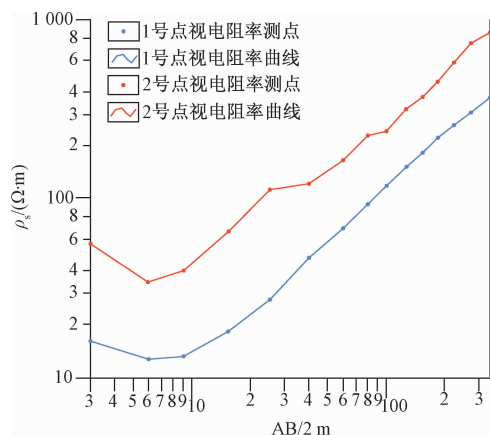


图6 赵老园村1、2号点对称四极电测深曲线

Fig.6 Symmetrical four-pole electrical sounding curve of points No.1 and 2 in the Zhaolaoyuan village

5 探采结合孔找水实现

综合EH4电导率剖面图和对称四极激发极化测深视电阻率曲线,参考视极化率、半衰时和衰减度等曲线,得出研究区物探解译剖面图(图7),在F2断层穿过的基岩裂隙破碎带3号激发极化测深点成井条件较好,具备一定的汇水面积、储水空间和导水通道,主要裂隙发育段在100~180 m,成井深度相较于其他点较浅,深度在180 m左右即可。

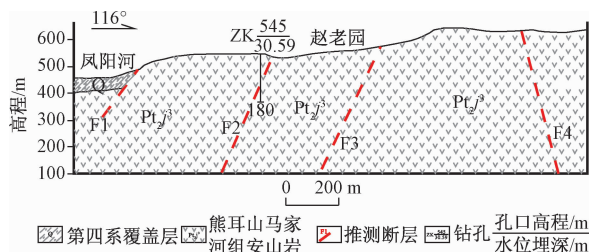


图7 赵老园村物探解译剖面图

Fig.7 Geophysical interpretation profile in the Zhaolaoyuan village

以3号点作为探采结合井位,钻孔孔深180 m,经抽水试验测得涌水量 $15 \sim 25$ m^3/d ,虽然水量不大,但在严重缺水山区可进行农村集中供水水源,解决当地

300余名村民长期存在的饮水困难问题。验证了基于EH4和对称四极激发极化法联合方法在基岩缺水山区找水是可行的。

6 结论

(1)在EH4剖面解译的基础上选定有利地段进行对称四极激发极化测深验证,对断层破碎带及侵入—接触带的位置、产状、发育情况以及是否存在成井条件进行分析,为缺水山区基岩找水提供可靠依据。

(2)采用EH4法清晰刻画出基底的埋深和起伏,通过分析研究区7个激发极化测深点视电阻率、视极化率、半衰时、衰减度曲线,得出3、6、7点存在覆盖层型的基岩裂隙蓄水构造,但3号点出现破碎带的深度为150~180 m,相较其他两点的深度较浅,考虑到缺水山区落后的经济条件,确定该点为探采结合井位。同时,根据半衰时曲线结果得出,7号点180~225 m深度处的基岩破碎程度更发育,存在富水性更好的基岩裂隙构造,在后期经济条件允许等情况下可考虑进一步成井开发。

(3)通过水文地质调查、地球物理勘探实践,综合地层富水性和经济现实等因素,成功实现探采结合井,涌水量 $15 \sim 25$ m^3/d 。该实例验证了在严重缺水的基岩山区,侵入体与围岩接触蚀变带、断层破碎带(断层交汇带)等是主要的地下水富集区这一理论,为今后基岩缺水山区找水提供了参考。

参考文献:

- [1] 李华,焦彦杰,吴文贤,等.西南岩溶地区找水的地球物理方法探讨[J].水文地质工程地质,2011,38(5):1-6. [LI H, JIAO Y J, WU W X, et al. A tentative analysis on the geophysical technique which is compatible for groundwater exploration at karst area in Southwest of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 1-6. (in Chinese)]
- [2] 李保群.河南基岩山区找水方法应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2004:1-5. [LI B Q. Applied research on methods of groundwater searching in bedrock mountain area in Henan [D]. Beijing: China University of Geosciences in Beijing, 2004:1-5. (in Chinese)]
- [3] 陈文芳,夏飞雪,张一博,等.太行山区河南省田湖幅1:5万水文地质调查[R].郑州:河南省地质矿产勘查开发局第一地质环境调查院,2015:188-212. [CHEN W F, XIA F X, ZHANG Y B, et al. 1:50000 hydrogeology survey of Tianhu map sheet in Taihang mountain area in Henan [R]. Zhengzhou:

- Henan No. 1 Institute of Geo-Environment Survey Attached to Henan Bureau of Geo-Exploration & Mineral Development, 2015: 188 - 212. (in Chinese)]
- [4] 韩子夜, 武毅, 杨进生, 等. 西部严重缺水地区地下水勘查技术方法体系研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(2): 81 - 86. [HAN Z Y, WU Y, YANG J S, *et al.* A study of the technique framework for groundwater exploration in the water-deficient areas in western China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(2): 81 - 86. (in Chinese)]
- [5] 张云峰. 基岩裂隙水地区找水经验浅谈[J]. 勘查科学技术, 2004(4): 51 - 52. [ZHANG Y F. Water finding experience in bedrock fracture area [J]. Exploration science and technology, 2004(4): 51 - 52. (in Chinese)]
- [6] 李伟, 朱庆俊, 王洪磊, 等. 西南岩溶地区找水技术方法探讨[J]. 地质与勘探, 2011, 47(5): 918 - 923. [LI W, ZHU Q J, WANG H L, *et al.* On methods of finding water in the Karst zones of Southwest China[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(5): 918 - 923. (in Chinese)]
- [7] 刘伟, 李泽坤. 饮水困难地区地下水勘察新技术的应用[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 147 - 151. [LIU W, LI Z K. Advanced geophysical means on groundwater exploration in drinking-water lacking regions[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(1): 147 - 151. (in Chinese)]
- [8] 潘玉玲, 张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000: 5 - 20. [PAN Y L, ZHANG C D. Surface nuclear magnetic resonance theory and methods[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000: 5 - 20. (in Chinese)]
- [9] 郭建强, 武毅, 邵汝君. Stratagem TM EH4 电导率成像系统简介及应用[J]. 物探与化探, 1998, 22(6): 458 - 464. [GUO J Q, WU Y, SHAO R J. A brief description of the Stratagem TM EH4 electrical conductivity image forming system and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 22(6): 458 - 464. (in Chinese)]
- [10] 郭邵华. 激发极化法在岩溶区找水的探讨[J]. 中国煤田地质, 1998, 17(增刊1): 85 - 86. [GUO S H. Probe into induced polarization method in water research in karstic region[J]. Coal Geology of China, 1998, 17(Sup 1): 85 - 86. (in Chinese)]
- [11] 李金铭. 激发极化法方法技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 50 - 73. [LI J M. Induced polarization method of technical guidelines [M]. Beijing: Geological Press, 2004: 50 - 73. (in Chinese)]
- [12] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 等. 河南嵩县北部基岩山区地下水水化学特征和环境同位素特征分析[J]. 地球学报, 2017, 38(3): 403 - 412. [LI X, CHEN W F, WAN L Q, *et al.* An analysis of hydrochemical characteristics and environmental isotopic characteristics of the groundwater in the bedrock mountain area in northern Songxian County, Henan Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(3): 403 - 412. (in Chinese)]
- [13] 沈照理, 刘亚光, 杨成田, 等. 水文地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 147 - 150. [SHEN Z L, LIU Y G, YANG C T, *et al.* Hydrological geology [M]. Beijing: Science Press, 1985: 147 - 150. (in Chinese)]
- [14] 李智民, 刘云彪, 赵德君, 等. 鄂北严重缺水地区地下水富集模式与找水实践[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(6): 899 - 903. [LI Z M, LIU Y B, ZHAO D J, *et al.* Water searching practice and enrichment modes of groundwater in serious water shortage areas of northern Hubei [J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(6): 899 - 903. (in Chinese)]
- [15] 许艳, 王洪杰, 殷继广, 等. 激电测深半衰时参数在东平山丘区找水中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 684 - 687. [XU Y, WANG H J, YIN J G, *et al.* The application of half decay time parameter of IP to exploration of underground water in the hilly area of Dongping [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 684 - 687. (in Chinese)]
- [16] 李金铭. 激电找水[M]. 北京: 地质出版社, 1996. [LI J M. IP groundwater prospecting[M]. Beijing: Geological Press, 1996. (in Chinese)]
- [17] 陈贻祥, 甘伏平, 韦吉益, 等. 泰安地区岩溶富水构造激电测深法异常类型[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 427 - 432. [CHEN Y X, GAN F P, WEI J Y, *et al.* Types and genesis of IP anomalies in the water-rich structure of Taian karst area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(3): 427 - 432. (in Chinese)]
- [18] 刘慧娥, 李松涛, 周光红, 等. 激电测深法在内蒙古中部地区寻找地下水源中的应用[J]. 西南科技大学学报, 2013, 28(2): 46 - 51. [LIU H E, LI S T, ZHOU G H, *et al.* The application of IP sounding method to seek underground water in Central Inner Mongolia [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2013, 28(2): 46 - 51. (in Chinese)]