

王瑞丰,温来福,程久龙,等. 高密度电法与瞬变电磁法联合勘查河北承德地区基岩裂隙水[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(6): 784-790.

WANG Rui-feng, WEN Lai-fu, CHENG Jiu-long, et al. Joint Detection of Bedrock Fissure Water Using High-density Electrical Method and Transient Electromagnetic Method in Chengde Area of Hebei, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(6): 784-790.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2020. 06013

· 电磁法勘探专辑 ·

主持人: 李 貅 薛国强

高密度电法与瞬变电磁法联合勘查 河北承德地区基岩裂隙水

王瑞丰^{1,2}, 温来福^{3,4}, 程久龙^{3*}, 陈 志³, 焦俊俊³, 申国强²

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队, 河北 承德 067000; 3. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 4. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘 要: 缺水基岩山区的找水定井难度较大, 单一地球物理方法很难达到准确找水的目的。为了弥补高密度电法探测深度浅, 受地形影响较大等问题, 采用高密度电法联合瞬变电磁法对基岩山区地下水进行探测, 高效经济地实现山区地下水资源精准勘查。在探讨高密度电法和瞬变电磁法的基本原理和联合探测可行性的基础上, 介绍了联合探测的找水前提和依据, 结合河北承德地区基岩山区地下水勘查的工程应用, 讨论了地形对高密度电法的影响, 分析了两种方法的联合探测结果, 综合两者低阻异常对应区域最终确定了基岩裂隙含水区, 并通过钻孔验证了综合地球物理技术在基岩山区找水的有效性, 为今后在类似地质条件地区基岩裂隙水的勘查提供了理论和实践依据。

关键词: 高密度电法; 瞬变电磁法; 基岩山区; 地形; 联合探测; 裂隙水; 钻孔验证; 河北

中图分类号: P631. 3⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2020)06-0784-07

Joint Detection of Bedrock Fissure Water Using High-density Electrical Method and Transient Electromagnetic Method in Chengde Area of Hebei, China

WANG Rui-feng^{1,2}, WEN Lai-fu^{3,4}, CHENG Jiu-long^{3*}, CHEN Zhi³,
JIAO Jun-jun³, SHEN Guo-qiang²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Fourth Geological Team of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengde 067000, Hebei, China; 3. School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 4. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: The single geophysical method has great limitations in the exploration of water resources, especially in the areas with water-deficient bedrock mountain. In order to solve the

收稿日期: 2020-06-11; 修回日期: 2020-10-19; 网络首发日期: 2020-11-26 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190310, DD20190311); 河北省自然科学基金项目(D2020402032);

河北省地质矿产勘查开发局科研项目(454-0601-YBN-NHMN); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(19422121008-40)

作者简介: 王瑞丰(1979-), 男, 河北承德人, 河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队高级工程师,

中国地质大学(北京)工学博士研究生, E-mail: 460588530@qq.com.

* 通讯作者: 程久龙(1965-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: JLCheng@126.com.

problem of high-density electrical method, such as the shallow depth and the great influence of topography, the high-density electrical method combined with transient electromagnetic method (TEM) was used to explore groundwater in bedrock mountain area, aiming to realize accurate exploration of groundwater resources in mountain area efficiently and economically. Based on discussing the principle of high-density electrical method and transient electromagnetic method, and the feasibility of joint detection, the premise and basis of joint exploration of water resources were introduced. Meanwhile, combined with the engineering example of groundwater exploration in bedrock mountain area in Chengde area of Hebei, the influence of topography on high-density electrical method was discussed, and the joint detection results of the two methods were analyzed. The bedrock fissure water-bearing area was finally determined by combining the corresponding areas of two low resistivity anomalies, and the effectiveness of integrated geophysical techniques on the exploration of water resources in bedrock mountain area was verified by drilling holes. It provides theoretical and practical basis for the exploration of bedrock fissure water in similar geological conditions in future.

Key words: high-density electrical method; transient electromagnetic method; bedrock mountain area; topography; joint detection; fissure water; drilling verification; Hebei

0 引言

山区饮水困难问题普遍存在,严重影响人民群众的生活质量,制约了当地的经济的发展^[1]。因此,如何有效、准确以及经济地寻找地下水资源是现阶段解决山区缺水问题的有效途径。

在水文地质调查中,地球物理勘探已经成为山区找水的主要方法之一,其中包括可控源音频大地电磁法、激发极化法、瞬变电磁法(TEM)、高密度电法、电阻率测深、核磁共振等^[2-13]。但由于基岩山区地形条件复杂,加上任何一种地球物理方法都有其适用条件以及局限性,单一方法的使用存在一定的困难和风险,所以采用综合地球物理方法找水,不仅可以多角度分析研究地下岩层性质和含水性,又可以相互验证方法的有效性。郑远芳利用音频大地电磁法和电阻率测深相结合的方法,在粤西山区开展了地下水勘查^[14]。李国占等利用音频大地电磁法和激发极化法相结合的方式,在实际找水工作中取得了满意的效果^[15]。宋希利等在侵入岩地区利用可控源音频大地电磁法和电阻率测深寻找地下水,有效地提高了定井速度和成功率^[16]。孙中任等综合利用磁法勘探、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法和大地电磁法实现了深部地下水的勘查^[17]。李霞等利用基于EH4连续电导率成像系统的大地电磁法和激发极化法相互验证的勘探方法,实现了河南西部基岩缺水地区的找水示范^[18]。李富等针对断层破碎带提出了地球物理“多方法、多参数和多层

次”找水模式,克服了单一物探方法的局限性^[19]。杨秋玲等采用瞬变电磁法和激电测深综合地球物理方法开展了深层地下水富水性评价,并有效指导了井位的布置工作^[20]。

本文选取河北承德地区基岩山区作为勘查区,采用高密度电法和瞬变电磁法相结合的综合地球物理方法,在分析勘查区内水文地质条件以及两种探测方法原理的基础上,开展综合地球物理方法找水研究与应用,以期今后类似地质条件地区基岩裂隙水的勘查提供理论和实践依据。

1 勘查区地质概况及地球物理特征

勘查区位于河北承德地区东部。区内出露的地层(图1)有:元古界蓟县系铁岭组白云岩和页岩、雾迷山组白云质灰岩、洪水庄组伊利石页岩和白云岩,青白口系龙山组细粒砂岩、下马岭组页岩和泥岩;古生界寒武系上、中、下统灰岩和白云质灰岩,奥陶系下统灰岩和白云质灰岩,石炭系本溪组和太原组页岩和石英砂岩;中生界侏罗系中、下统安山岩、砂砾岩、页岩、角砾岩;新生界第四系黄土夹砂砾石层。

勘查区内地下水的主要补给来源是大气降水,同时也受地表水体渗入及上游地下径流补给。本区地下水可分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和岩溶水。松散岩类孔隙水主要分布于河谷中,含水层一般富水性强,渗透性能良好,埋藏深度为3.0~6.0 m;山间沟谷孔隙水富水性相对较差,水位埋深为2.0~8.0 m。基岩裂隙水分布不均匀,受构造控制

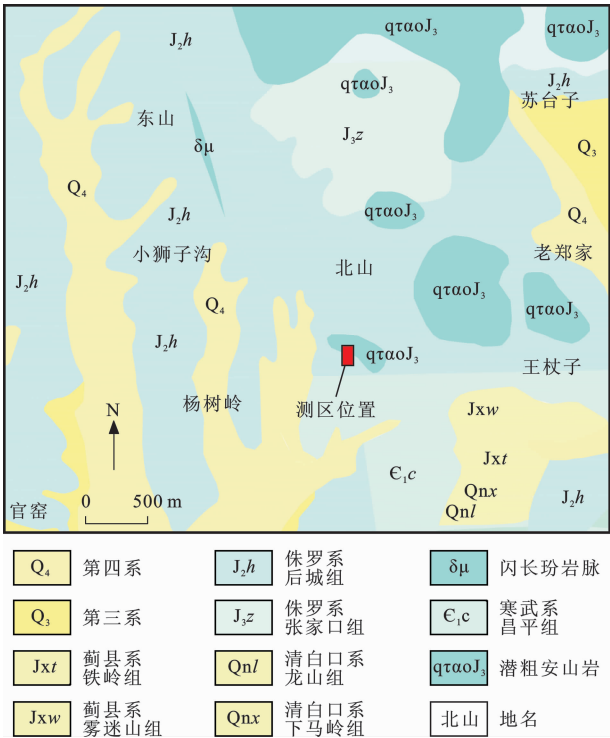


图 1 河北承德地区东部测区地质图

Fig. 1 Geological Map of Survey Area in the Eastern Chengde Area of Hebei

明显。区内以西部、南部的分水岭和阻水断裂(F₂)为隔水边界,地下水接受周边补给后汇集于石炭系—二叠系煤系地层之下的奥陶系灰岩之中;在煤系地层局部阻水作用下,地下水以泉的形式排出地表。

由勘查区地质特征可知,地层岩性主要有砂岩、灰岩、砾岩以及泥页岩。砾岩中的砾石以灰岩为主,也有白云质灰岩、燧石、石英等,其电性特征表现为高阻。当砾岩层中的砾石所占比例较大时,泥砂质成分少,含水性好,其电阻率在整体上较高,在横向上呈现相对高阻异常。当灰岩层中含破碎带时,含水性较好,其电阻率整体上较低,在横向上呈现相对低阻异常。砂岩本身的电阻率较高,但当裂隙发育充水时电阻率明显下降,在横向上呈现出相对低阻异常。上述特征都是本次高密度电法和瞬变电磁法联合探测的地球物理前提和基岩裂隙水勘查的解释依据。

2 联合探测方法及工作布置

2.1 高密度电法

高密度电法是基于直流电法的基本原理,集电剖面法和电测深法于一体,采用一次性列阵方式布极(二维或三维),利用多道或分布式形式布置,可实

现各类装置、不同排列极距的视电阻率观测,从而实现在剖面上一次性布极获取多种装置类型的地电断面分布信息。

高密度电法的物理前提是地下介质间的导电性差异。和常规电法一样,高密度电法通过 A、B 电极向地下供电流 I,然后在 M、N 电极间测量电位差 ΔU_{MN},从而可求得 M、N 电极间的视电阻率(ρ_s), ρ_s=KΔU_{MN}/I,如图 2 所示。其中, K 为装置系数。根据实测的视电阻率剖面进行计算分析,可以获得地下地层中的电阻率分布情况,从而可以划分地层、判定异常等。

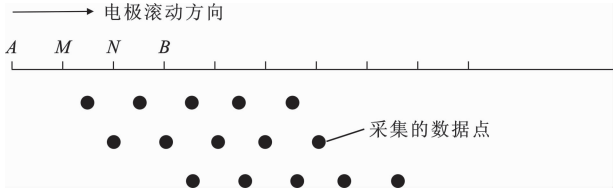


图 2 高密度电法电极排列示意图

Fig. 2 Schematic View of Electrode Arrangement in High-density Electrical Method

2.2 瞬变电磁法

瞬变电磁法是在地面敷设带有一定波形电流的发射线圈,从而在周围空间产生一次电磁场,并在地下导电岩矿体中产生感应电流,断电后感应电流由于热损耗而随时间衰减。衰减过程一般分为早、中、晚 3 期。早期电磁场相当于频率域中的高频成分,衰减快,趋肤深度小;而晚期电磁场则相当于频率域中的低频成分,衰减慢,趋肤深度大。通过测量断电后各个时间段的二次场随时间变化规律,可得到不同深度的地电特征。

2.3 联合探测基岩裂隙水的可行性和优势

基岩裂隙水通常可以分为风化裂隙水、构造裂隙水和成岩裂隙水 3 种类型,其中构造裂隙水是山区找水的主要对象^[17]。在构造运动的作用下,岩层破坏产生裂隙,在裂隙中含水或者泥沙充填后呈现出不同的电阻率,高密度电法和瞬变电磁法就是利用这种电阻率差异来达到探测地下水的目的,因此,利用这两种方法进行联合探测是可行的。

高密度电法具有探测成本低、工作效率高以及分辨率高等优势,但是探测深度较浅,受地形影响较大,同时在测量过程中,其倒梯形收敛方式易导致测线两端深部的地电信息无法获取。虽然瞬变电磁法受地形影响较小,但该方法在工作时常采用多匝回线装置,受关断影响在浅部存在勘探盲区。上述两种方法联合探测可以取长补短,优势互补。

2.4 工作布置

河北承德地区东部测区 SN 向中心位置为一条山谷,地势北高南低,东、西两侧均为基岩,在测区中部存在露天泉眼,但出水量极小,约为 $2\ 000\text{ mL}\cdot\text{d}^{-1}$ 。为有效探测地下基岩裂隙水情况,以此露天泉为中心,在山谷中布置一条测线(图 3),测线长 940 m,分别进行高密度电法和瞬变电磁法测量。其中,高密度电法使用国产 GD-10 电法仪,采用温纳装置,测量点距为 10 m,供电电压为 450 V;由于工作区为沟谷地形,无法铺设大回线,本次瞬变电磁法使用澳大利亚 Terra TEM 瞬变电磁仪,采用多匝小回线装置,发射线圈和接收线圈边长均为 2 m,匝数分别为 60 匝和 40 匝,测量点距为 5 m,供电电流不低于 5 A。

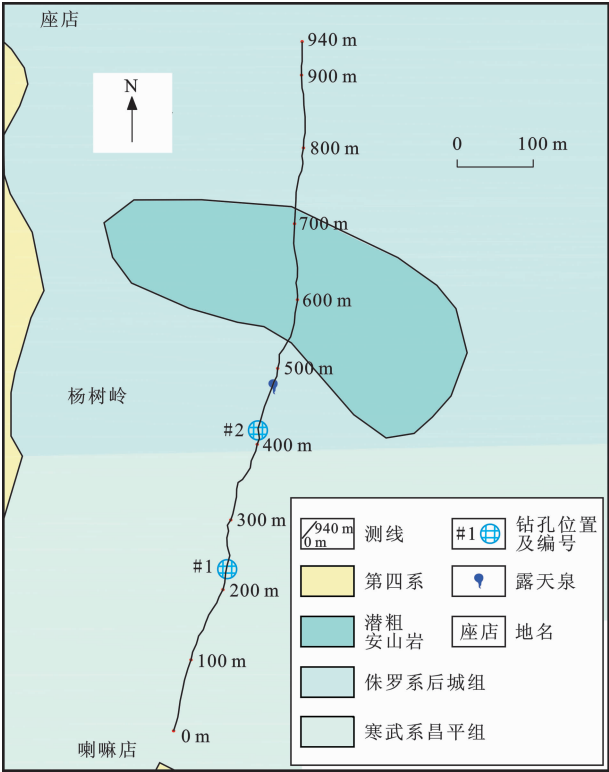


图 3 工作布置示意图
Fig. 3 Schematic View of Work Layout

3 数据处理及异常解释

3.1 数据处理

从图 3 可以看出,河北承德地区东部测区内地形起伏较大,测线北高南低,这会导致观测数据发生畸变,在反演过程中可能产生虚假异常甚至会掩盖真实异常,给资料解释的准确度以及基岩裂隙水的勘查带来困难,因此,在数据处理过程中必须进行地形影响校正。现有的地形影响校正方法较多,包括

比值校正、正交投影和保角变换^[21]、带地形的二维或三维反演^[22]等方法。

本文在高密度电法数据处理过程中,对突变点数据剔除以及圆滑之后,采用带地形的二维反演来进行地形校正处理。对于瞬变电磁法,在进行噪声剔除和曲线圆滑之后,对数据进行一维反演,最终得到探测结果。

3.2 校正结果分析及解释

3.2.1 高密度电法结果解释

图 4 和图 5 分别是地形校正前、后的高密度电法反演电阻率断面。通过对比可以发现:经过地形校正后,反演电阻率总体有所降低,但在测线 640~940 m 内电阻率有所升高;测线 0~480 m 内低阻异常范围明显变小,且反演得到的电阻率细节更加明显;同时,相对于地形校正前,校正后的低阻异常中心(测线 250、300 和 400 m 处)向南侧发生轻微偏移,说明地形对于高密度电法影响较大。

根据地形校正后反演结果反映的异常情况,结合野外记录的干扰进行综合解释(图 5)。从横向上看,断面浅部(0~10 m)电阻率呈高低相间分布。由于测线布设在沟谷,其中测线 0~460 和 760~940 m 内地表有积水,所以在断面上地表附近表现为低阻特征;测线其他区段有基岩出露,表现为高阻特征。断面深部等值线波动较大,在测线 190~460 和 760~920 m 内有相对低阻异常反映(图 5 中红色实线框圈出区域)。其中,在测线 190~460 m 内有 3 处封闭的低阻异常区,其电阻率低于 $30\ \Omega\cdot\text{m}$,根据本区地层情况,推断其为基岩裂隙含水区。而测线 480~760 m 内高阻区推测为相对完整的基岩。

3.2.2 瞬变电磁法结果解释

由于瞬变电磁法在浅部存在盲区,所以浅部的地电信息可靠性较差。考虑野外干扰情况,对瞬变电磁法反演结果进行综合解释,如图 6 所示。在深度 60~100 m 处,测线 120~490 和 700~830 m 内有相对低阻异常反映(图 6 中黄色实线框圈出区域),根据本区地层情况,推断其为相对含水区。测线 500~700 m 内表现为高阻特征,推测为相对完整的基岩。

3.3 综合解释及钻探验证

综合高密度电法和瞬变电磁法的解释结果(图 5、6)可见,从横向上看,两种探测方法电阻率变化规律基本一致,均呈现为高低相间的分布。从低阻异常分布特征来看,测线 190~460 m 内高密度电法反演结果显示为 3 处封闭的低阻异常,且异常中心

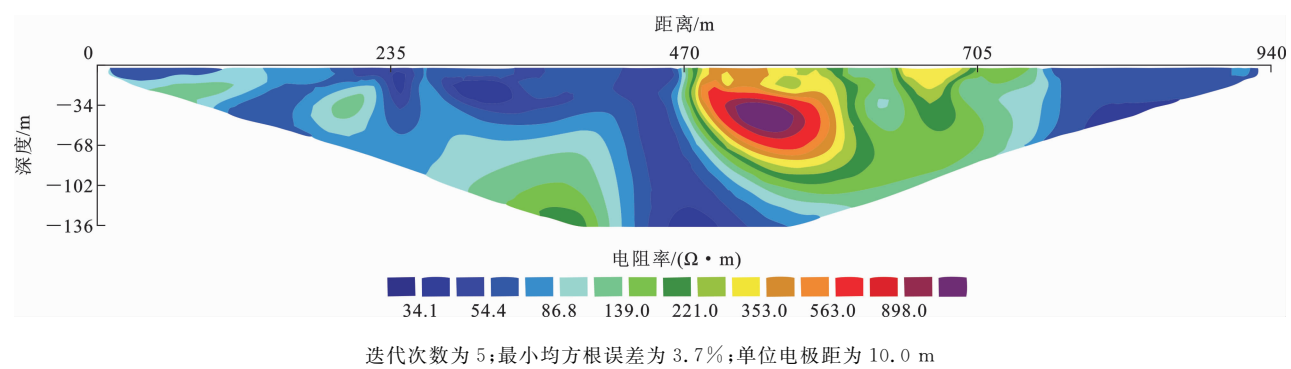


图 4 地形校正前高密度电法反演电阻率断面

Fig. 4 Resistivity Section Inverted by High-density Electrical Method Before Topographic Correction

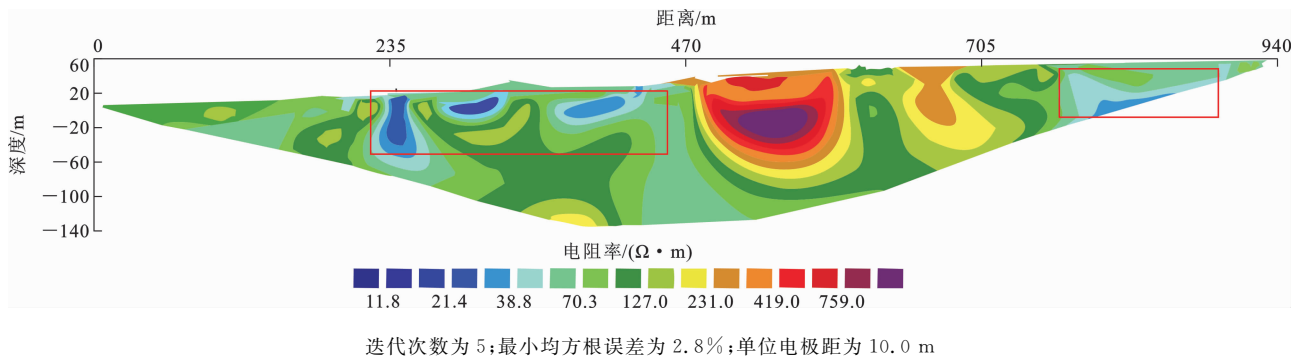


图 5 地形校正后高密度电法反演电阻率断面

Fig. 5 Resistivity Section Inverted by High-density Electrical Method After Topographic Correction

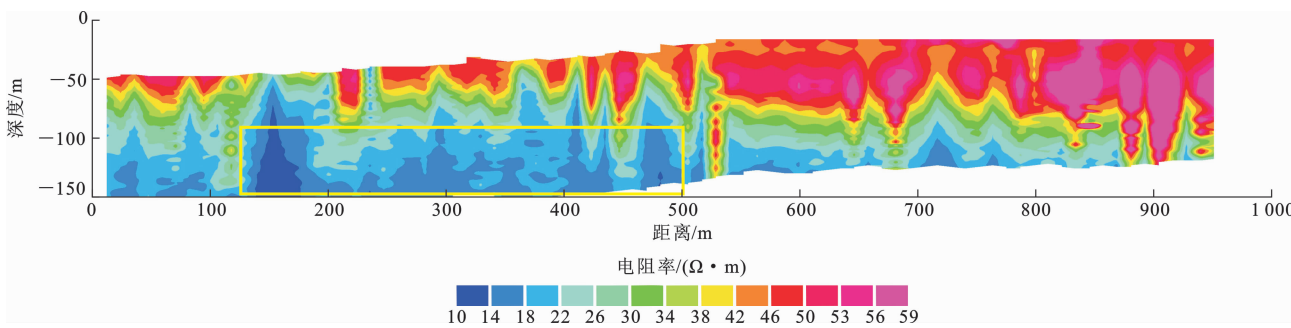


图 6 瞬变电磁法反演电阻率断面

Fig. 6 Resistivity Section Inverted by TEM

明显;而瞬变电磁法反演结果显示为片状低阻异常,没有明显的异常中心。综合两种探测方法的反演结果,推断在测线 230~260、280~330 以及370~430 m 内为基岩裂隙含水区。

根据上述综合解释成果,最终选择在测线 245、412 m 处布置 #1 和 #2 钻孔进行验证,钻孔位置如图 3 所示。其中, #1 钻孔地层上部为第四系黄土和黏土,下部为侏罗系后城组凝灰质砂砾岩; #2 钻孔地层浅部为第四系碎石土层、侏罗系后城组凝灰质砂砾岩,下部为粗安岩(图 7)。经验证,两个钻孔都揭露了含水层。其中, #1 钻孔在 15 m 深度遇裂隙层,但出水量较小,未进行抽水试验; #2 钻孔分别在 18.0、59.8 和 74.3 m 深度遇裂隙层,经过抽水

试验,单孔出水量为 56 m³ · d⁻¹。上述结果验证了高密度电法和瞬变电磁法综合地球物理技术在基岩山区找水是有用的。

4 结 语

(1)从数据处理角度来看,高密度电法受地形起伏影响较大,且无法在有限测线长度的情况下得到测线两端深部的地电信息,而瞬变电磁法可以弥补高密度电法的这一缺点,但是其在浅部存在勘探盲区,二者组合可以起到优势互补的作用。

(2)从探测效果而言,两种方法对测区地下水的勘查均有效果,但不同方法圈定的低阻异常范围和剖面特征有所差别,因此,需要综合对比不同方法圈

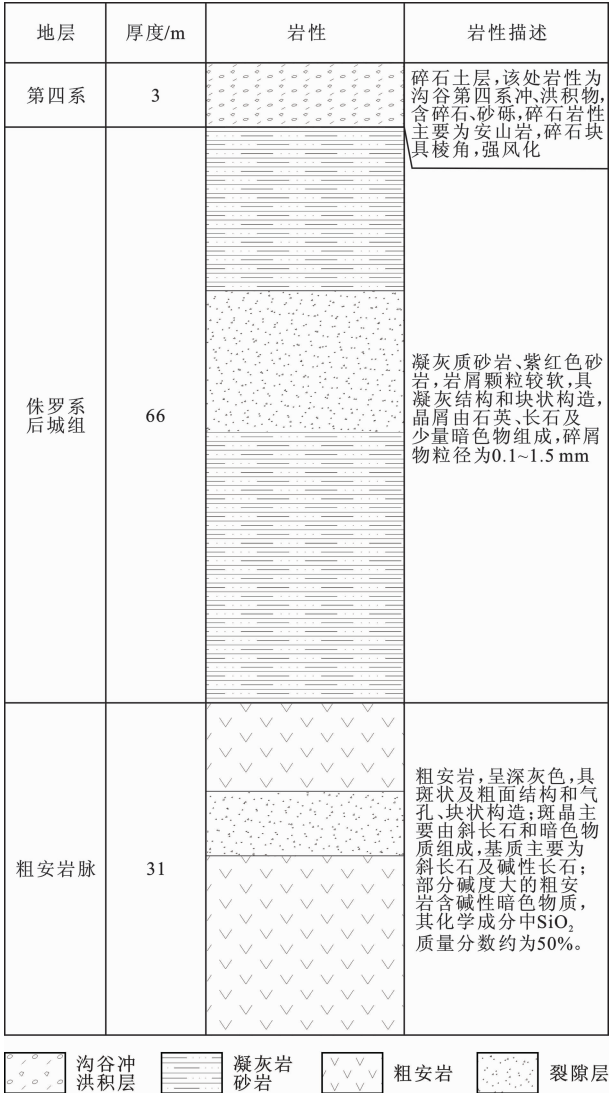


图 7 #2 钻孔柱状图
Fig.7 Column of Drill #2

定的低阻异常区,找到对应一致的异常位置推断其为裂隙含水区,并作为找水定井的依据。本次联合勘查结果以及钻孔验证情况表明高密度电法和瞬变电磁法相结合的综合地球物理技术在严重缺水的基岩山区找水是可行且有效的。

参考文献：
References：

[1] 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 Zi-ye,WU Yi,YANG Jin-sheng,et al. A Study of the Technique Framework for Groundwater Exploration in the Water-deficient Areas in Western China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology,2007,34 (2):81-86.
[2] 底青云,石昆法,王妙月,等. CSAMT 法和高密度电

法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展,2001,16 (3):53-57.
DI Qing-yun,SHI Kun-fa,WANG Miao-yue,et al. Water Resources Exploration with CSAMT and High-density Electric Resistivity Method [J]. Progress in Geophysics,2001,16(3):53-57.
[3] 张保祥,刘春华.瞬变电磁法在地下水勘查中的应用综述[J].地球物理学进展,2004,19(3):537-542.
ZHANG Bao-xiang,LIU Chun-hua. Summarization on Applications to Groundwater Exploration by Using Transient Electromagnetic Methods [J]. Progress in Geophysics,2004,19(3):537-542.
[4] 戴苗,胡祥云,吴海波,等.地面核磁共振找水反演[J].地球物理学报,2009,52(10):2676-2682.
DAI Miao,HU Xiang-yun,WU Hai-bo,et al. Inversion of Surface Nuclear Magnetic Resonance [J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(10):2676-2682.
[5] 陆云祥,陈建荣,陈华根,等.我国多参数激电测深找水应用综述[J].地球物理学进展,2011,26(4):1448-1456.
LU Yun-xiang,CHEN Jian-rong,CHEN Hua-gen,et al. Summarization on Application of Multi-parameter Direct Current Induced Polarization Sounding Method to Exploration Groundwater in China [J]. Progress in Geophysics,2011,26(4):1448-1456.
[6] 薛国强,闫述,底青云,等.多道瞬变电磁法(MTEM)技术分析[J].地球科学与环境学报,2015,37(1):94-100.
XUE Guo-qiang,YAN Shu,DI Qing-yun,et al. Technical Analysis of Multi-transient Electromagnetic Method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2015,37(1):94-100.
[7] 薛国强,陈卫营,武欣,等.电性源短偏移距瞬变电磁研究进展[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):215-226.
XUE Guo-qiang,CHEN Wei-ying,WU Xin,et al. Review on Research of Short-offset Transient Electromagnetic Method [J]. Journal of China University of Mining and Technology,2020,49(2):215-226.
[8] 底青云,薛国强,殷长春,等.中国人工源电磁探测新方法[J].中国科学:地球科学,2020,50(9):1219-1227.
DI Qing-yun,XUE Guo-qiang,YIN Chang-chun,et al. New Methods of Controlled-source Electromagnetic Detection in China [J]. Science China:Earth Sciences,2020,50(9):1219-1227.
[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.
- DONG Hao-bin, WANG Chuan-lei. Development and Application of 2D Resistivity Imaging Surveys[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 171-176.
- [10] 郑智杰, 曾洁, 赵伟, 等. 高密度电法在岩溶区找水中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1262-1267.
- ZHENG Zhi-jie, ZENG Jie, ZHAO Wei, et al. Application Research of High Density Resistivity Method in Water Exploring in Karst Area[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1262-1267.
- [11] 闫亚景, 闫永帅, 赵贵章, 等. 基于高密度电法的天然边坡水分运移规律研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2807-2814.
- YAN Ya-jing, YAN Yong-shuai, ZHAO Gui-zhang, et al. Study on Moisture Migration in Natural Slope Using High-density Electrical Resistivity Tomography Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2807-2814.
- [12] 张先林, 许强, 彭大雷, 等. 高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1862-1867.
- ZHANG Xian-lin, XU Qiang, PENG Da-lei, et al. Application of High-density Resistivity Method to Groundwater Exploration in Heifangtai[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1862-1867.
- [13] 何清立, 李霄龙, 王志勇, 等. 高密度电法在滑坡地质灾害勘查治理中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 99-104.
- HE Qing-li, LI Xiao-long, WANG Zhi-yong, et al. The Application of High Density Electrical Method to the Exploration Management of Landslide Geological Disasters[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1): 99-104.
- [14] 郑远芳. 综合物探方法在粤西山区找水中的应用[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(1): 117-119.
- ZHENG Yuan-fang. Application of Integrated Geophysical Methods in Finding Water in the Mountainous Area of Western Guangdong[J]. West-China Exploration Engineering, 2008, 20(1): 117-119.
- [15] 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 Guo-zhan, SUN Yin-hang. A Tentative Discussion on a Technological Model for Groundwater Geophysical Exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 202-204.
- [16] 宋希利, 宋鹏, 田明阳, 等. 物探方法在侵入岩地区抗旱找水定井中的应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1280-1286.
- SONG Xi-li, SONG Peng, TIAN Ming-yang, et al. Geophysical Prospecting Method in Intrusive Rocks Area Fight a Drought to Find Water Wells Set[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 1280-1286.
- [17] 孙中任, 杨殿臣, 赵雪娟. 综合物探方法寻找深部地下水[J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 52-57.
- SUN Zhong-ren, YANG Dian-chen, ZHAO Xue-juan. The Application of Integrated Geophysical Methods to the Prospecting for Deep Geothermal Resource[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 52-57.
- [18] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 等. 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[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 23-29.
- LI Xia, CHEN Wen-fang, WAN Li-qin, et al. Groundwater Location in Bedrock Mountains with Serious Water Scarcity Using a Combination of EH4 and Symmetric Quadrupole Induced Polarization[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2018, 45(1): 23-29.
- [19] 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 Fu, DENG Guo-shi, YUAN Jian-fei, et al. Comprehensive Geophysical Model for Water Prospecting in Fault Fracture Zone: A Case Study of Water Supply Well Siting at Gantianba Village[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 344-352.
- [20] 杨秋玲, 张景业, 于忠东, 等. 豫西花岗岩地区深层地下水勘查方法探讨[J]. 人民黄河, 2020, 42(7): 62-66.
- YANG Qiu-ling, ZHANG Jing-ye, YU Zhong-dong, et al. Exploration Method of Deep Groundwater in Granite Area of Western Henan Province[J]. Yellow River, 2020, 42(7): 62-66.
- [21] 熊勇. 高密度电法勘探中地形影响校正方法探讨[J]. 人民长江, 2014, 45(14): 47-48, 55.
- XIONG Yong. Discussion on Correction Method for Topographic Influence in High-density Electrical Prospecting[J]. Yangtze River, 2014, 45(14): 47-48, 55.
- [22] 薛国强, 闫述, 陈卫营. 接地源短偏移瞬变电磁法研究展望[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 177-181.
- XUE Guo-qiang, YAN Shu, CHEN Wei-ying. Research Prospect to Grounded-wire TEM with Short-offset[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1): 177-181.