

邝吉鸿,马富安,张国玮,等.基于综合物探的激电二次时差法在含碳质泥质灰岩区找水探测实践与探讨[J].世界核地质科学,2025,42(3):596-606. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.03.010

KUANG Jihong, MA Fu'an, ZHANG Guowei, et al. Practice and discussion of the induced polarization secondary time difference method in water exploration of carbonaceous argillaceous limestone areas based on integrated geophysical exploration[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42(3): 596-606 (in Chinese).

## 基于综合物探的激电二次时差法在含碳质泥质灰岩区找水探测实践与探讨

邝吉鸿<sup>1</sup>, 马富安<sup>2</sup>, 张国玮<sup>1</sup>, 李云超<sup>1</sup>

1 广西壮族自治区三一〇核地质大队, 广西 桂林 541213

2 广西有色勘察设计院, 广西 南宁 530031

**摘要** 传统的物探方法,在含碳质泥质灰岩整体呈低电阻率、高极化率特征,获取的电阻率和极化率参数无法区分水致异常,为解决此难题,提升找水成功率。以桂林绍水镇某地的含碳质泥质灰岩区为对象,采用高密度电阻率法和音频大地电磁测深法(AMT)探测低电阻率异常区,运用激电二次时差法分析圈定低电阻率异常中的水致异常,查明了地下水空间分布位置和赋存特征。结果表明:在低电阻率异常区、激电二次时差值正异常且连续较好的AB/2位置与实际含水层位置相对应,同时,对于单点或低于50 ms且连续性差的激电二次时差值区域,其含水水性较差。

**关键词** 碳酸盐岩; 高密度电阻率法; 音频大地电磁测深法; 激电二次时差法

中图分类号 P612 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)03-0596-11

## Practice and discussion of the induced polarization secondary time difference method in water exploration of carbonaceous argillaceous limestone areas based on integrated geophysical exploration

KUANG Jihong<sup>1</sup>, MA Fu'an<sup>2</sup>, ZHANG Guowei<sup>1</sup>, LI Yunchao<sup>1</sup>

1 Guangxi Zhuang Autonomous Region No.310 Nuclear Geology Brigade, Guilin 541213, China

2 Guangxi Nonferrous Survey & Design Institute, Nanning 530031, China

**Abstract:** To address the applicability challenges of geophysical water exploration methods in the Carboniferous Huangjin formation of carbonaceous-argillaceous limestone characterized by uneven development of dissolution fissure, complex hydraulic connectivity of argillaceous shale interlayers, concealed groundwater occurrence conditions, scant water resources, and improve the success rate of water

基金项目: 广西壮族自治区国土资源厅(编号: 桂国土资办[2013]262号、桂国土资办[2010]1226号)项目资助

收稿日期: 2025-02-20 改回日期: 2025-04-10

第一作者: 邝吉鸿, 男, 1985年生, 高级工程师, 从事地质资源与地质工程研究。E-mail: 250293547@qq.com

通信作者: 马富安, 男, 1968年生, 正高级工程师, 从事地质资源与地质工程研究。E-mail: 344506443@qq.com

Supported by Guangxi Zhuang Autonomous Region Department of Land and Resources (No. 桂国土资办[2013]262号, No. 桂国土资办[2010]1226号)

Received date: 2025-02-20 revised date: 2025-04-10

First author: KUANG Jihong, male, born in 1985, senior engineer, focusing on geological resources and geological engineering. E-mail: 250293547@qq.com

Corresponding author: MA Fu'an, male, born in 1968, senior engineer, focusing on geological resources and geological engineering. E-mail: 344506443@qq.com

well drilling, This paper adopts high-density resistivity and Audio-frequency Magnetotelluric Sounding (AMT) methods to detect low-resistivity anomalies in an area of Shaoshui town, Guilin. By applying the induced polarization (IP) secondary time difference method to analyze and delineate water-induced anomalies within these low-resistivity zones, the spatial distribution and occurrence characteristics of groundwater were identified. Results indicate that the AB/2 positions characterized by low-resistivity anomalies, positive induced polarization secondary time difference values with good continuity correspond to the actual aquifer locations. Meanwhile, areas with single-point values or values below 50 ms and poor continuity exhibit low water-bearing capacity.

**Keywords:** carbonate rocks; high-density resistivity method; AMT; induced polarization (IP) secondary time difference method

水资源是人类生存和发展的重要基础,特别是在经济社会快速发展的背景下,水资源是当前农业生产和发展的重要基础,特别是在水文地质条件多变和复杂的含碳质泥质灰岩地区,使得物探找水打井面临诸多挑战。因此,探索并应用更为高效、准确的物探找水技术手段显得尤为重要。屈利军(2017)利用高密度电阻率法、激电测深和音频大地电磁测深在砂岩中找水成功<sup>[1]</sup>。张志(2022)、杨传伟(2024)和刘声凯(2021)综合利用水文地质调查、高密度电阻率法和电阻率联合剖面法等多种物探方法在花岗岩地区成功找到了地下富水区域<sup>[2-4]</sup>。郑智杰(2024)通过高密度电阻率法、联合剖面法及音频大地电磁法等多种物探手段精准定位断裂破碎带位置,总结了综合物探方法在碎屑岩地区找水经验<sup>[5]</sup>。朱文科(2022)在凤阳县石灰岩地区,通过电阻率联合剖面法和高密度电法相结合,成功识别了有储水条件的构造断裂和岩溶<sup>[6]</sup>。综上所述,综合物探方法在灰岩和花岗岩地区的地下水勘查中的应用日益广泛<sup>[7-9]</sup>,通过多手段联合解析,提高了地下水勘查的准确性和效率,但在含碳质泥质灰岩中富水条件差,且多为构造和岩溶裂隙水或,成井率较低的区域运用较少,主要原因为含碳质泥质灰岩整体呈低电阻率、高极化率特征,使用电阻率和极化率无法区分水致异常。

为解决此难题,本文以绍水镇东南部含碳质泥质灰岩为例,综合利用高密度电阻率法、音频大地电磁测深法对岩层和断裂进行研究分析。由于岩石含碳质泥质的原因,其岩石电阻率与地下水的电阻率差异不大,通过在低电阻率异常的基础上运用激电二次时差法解释

含水层所在位置,综合对比分析解释成果和钻井资料,为同类型的地下水勘查提供理论依据和方法选择,提高在含碳质泥质灰岩区域地下水勘查的准确性。

## 1 研究区概况

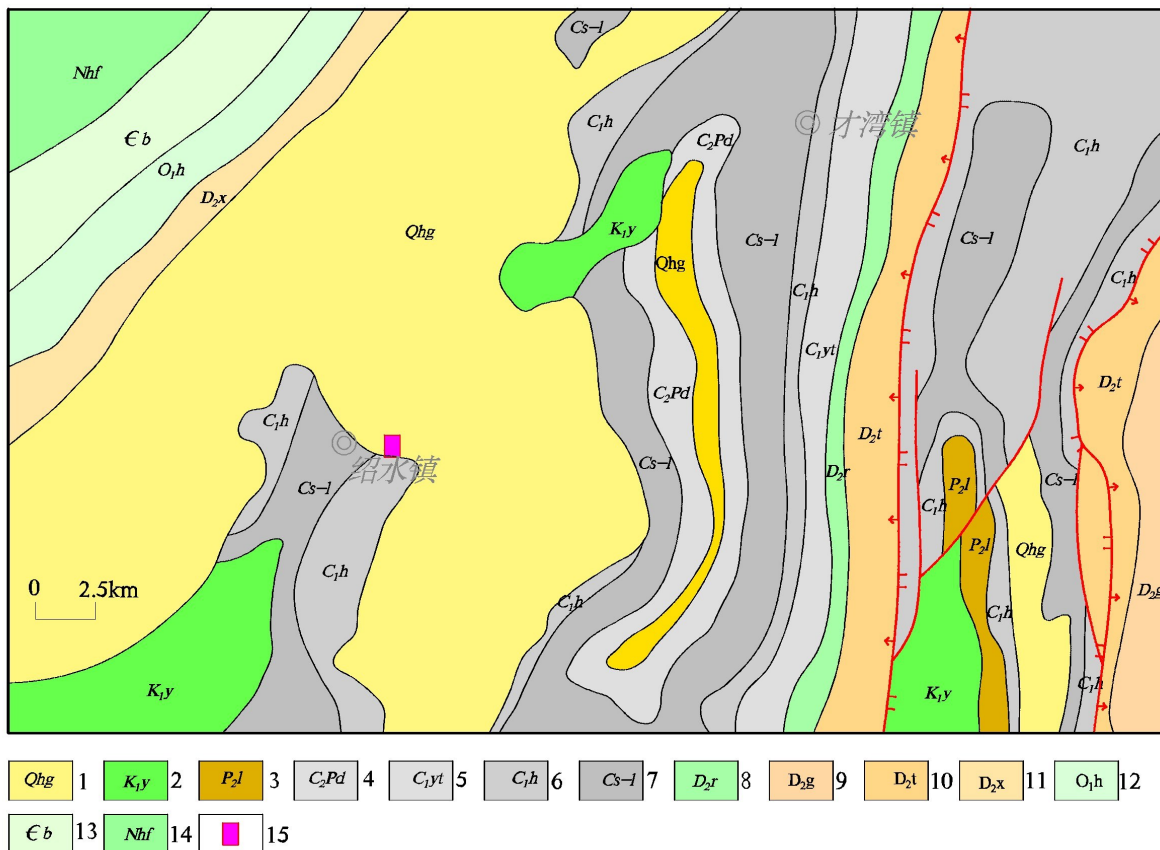
### 1.1 水文地质特征

绍水镇位于湘江北侧,白沙河从绍水镇西南部穿过(图1),主要为第四系冲洪积层(Q<sub>h</sub>g、Q<sub>pw</sub>)覆盖,其中分布在河谷沿岸I~II级阶梯的残坡积松散岩类孔隙水,水量中等,受大气降水及地表水的补给,径流、排泄条件较好,水交替作用强烈,地下水位随大气降水变化显著,钻孔涌水量介于100~1 000 t·d<sup>-1</sup>之间;分布在槽谷区冲洪积物组成的缓丘及山前洪积扇地段的松散岩类孔隙水,水量贫乏,钻孔涌水量<50 t·d<sup>-1</sup>。在绍水镇南、东南和东北部的白垩系(K)和二叠系梁山组(P<sub>2</sub>l)以砂岩、页岩和硅质岩为主,属碎屑岩基岩裂隙水,水量贫乏,枯水期地下水径流模数3 L·s<sup>-1</sup>·km<sup>2</sup>;在绍水镇东部的石炭系黄金组(C<sub>1</sub>h)岩性为灰色-灰黑色灰岩、含碳泥灰岩,夹砂岩、硅质岩薄层,属裸露型碳酸盐岩、碎屑岩互层溶洞裂隙水,水量贫乏,泉流量小于10 L·s<sup>-1</sup>,钻孔涌水量小于50 t·d<sup>-1</sup>。

测区位于绍水镇东南部,距离绍水镇约1 000 m,区内被第四系冲洪积层(Q<sub>pw</sub>)覆盖(图2),仅少量石炭系黄金组(C<sub>1</sub>h)的灰岩、泥质灰岩、炭质灰岩、砂岩和泥页岩出露,是溶蚀剥蚀丘岗地貌类型,属浅覆盖型碳酸盐岩、碎屑岩互层溶洞裂隙水。覆盖层多为亚黏土夹碎石,厚度介于2~20 m之间,区内岩溶不发育,补给

条件差,构造裂隙不甚发育,岩层岩溶化程度低,水量贫乏,泉流量 $<10\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,地下水的补给

主要来自于大气降水的入渗以及地表水和地下水侧向补给。



1—第四系桂平组; 2—第四系望高组; 3—白垩纪; 4—二叠系梁山组; 4—石炭系中上段; 6—石炭系黄金组; 7—松散岩类孔隙水, 水量中等; 8—松散岩类孔隙水, 水量贫乏; 9—基岩裂隙水, 水量贫乏; 10—裸露型碳酸盐岩裂隙溶洞穴水, 水量贫乏; 11—裸露型碳酸盐岩、碎屑岩互层溶洞裂隙水, 水量贫乏; 12—浅覆盖型上层孔隙水、下层岩溶水, 水量中等; 13—浅覆盖型上层孔隙水、下层岩溶水, 水量贫乏; 14—研究区位置。

1—Quaternary Guiping formation; 2—Quaternary Wanggao formation; 3—Cretaceous; 4—Permian Liangshan formation; 5—Middle to Upper Carboniferous; 6—Carboniferous Huangjin formation; 7—Porosity water in loose rocks, moderate water volume; 8—Porosity water in loose rocks, poor water volume; 9—Bedrock fissure water, poor water volume; 10—Exposed carbonate rock fissure-karst water, poor water volume; 11—Exposed carbonate rock and clastic rock interlayer karst fissure water, poor water volume; 12—Shallow overburden type with upper porosity water and lower karst water, moderate water volume; 13—Shallow overburden type with upper porosity water and lower karst water, poor water volume; 14—Location of the study area.

图1 研究区区域水文地质图(据桂林幅 1:200 000 水文地质图)

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area (Quoted from the 1:200 000 hydrogeological map of Guilin)

### 1.2 研究区电性特征

研究区主要岩性为:灰—深灰色灰岩、泥质灰岩、灰黑色含碳质灰岩和砂岩,地层走向以北偏东为主。覆盖层主要为石炭系黄金组(C<sub>1h</sub>)岩石形成的风化残积物、洪积物等,成分为泥质、含铁锰结核。在含磷质泥质灰岩中含薄层砂砾岩,它们拥有良好的孔隙结构和渗透性,有助于地下水通过<sup>[10-11]</sup>。但同时,含磷质泥质灰岩地层中的泥岩、页岩等不透水或低渗

透性岩石会形成的隔水层,对地下水的运移起到了阻隔作用。研究区主要为旱地,地势平坦且较为开阔,电极接地情况较好,接地电阻 $<1\ 000\ \Omega$ 。含水的裂隙、构造、泥页岩、泥灰岩呈高导电率低电阻率,而完整灰岩和砂岩呈高电阻率,并且有着一定的电阻率差异(表1),为使用电法勘探寻找地下水提供前提和依据,但低电阻率异常不一定是水致异常,需要在低电阻率异常的基础上开展激电二次时差

法区分水致异常。

因此,探测研究区石炭系黄金组( $C_1h$ )浅覆盖型碳酸盐岩、碎屑岩互层溶洞裂隙水可通过

开展高密度电阻率法、音频大地电磁测深法探寻低电阻率异常,结合激电二次时差法分析地下水埋藏位置及深度。

表1 研究区电性参数表

Table 1 Electrical parameters of the study area

岩石名称	电阻率/ $\Omega \cdot m$	极化率/%
地下水	<100	2.2~4.5
完整灰岩	1 000~100 000	0.5~1.8
第四系覆盖层	10~500	0.3~1.2
含碳灰岩	50~300	3.8~8.6
砂岩	100~450	0.5~1.3
含水岩溶构造	<500	3.2~5.1
泥灰岩	10~100	0.5~2.1

## 2 物探工作方法

根据研究区岩石结构和电性参数特征,采用高密度电阻率法、音频大地电磁测深能够对地下的低阻体进行定位,激电二次时差法则在电阻率异常的基础上用于识别岩层的含水性和非含水性,从而为钻探施工提供依据,提高打井成功率。研究区共布设物探测线7条(图2),测线编号分别为1线、2线、3线、5线、6线、7线和8线,测线部署原则为近似垂直地下水流向为NW向。采用高密度电阻率法初步寻找低电阻率异常,在电磁干扰较小的2线开展音频大地电磁测深相互印证,综合分析优选位置开展激电二次时差法确定含层位。

### 2.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法是电阻率剖面法和电阻率测深法的综合,野外测量时只需将所需的电极置于观测点上,利用程控电极转换装置和数据采集设备便可实现数据的快速和自动采集,采用扫描测量可以获得较丰富的地电断面结构特征的地质信息<sup>[12]</sup>。本次高密度电阻率法采用重庆奔腾数控技术研究所研制的WDA-1超级电法仪,测点距3 m,温纳( $\alpha$ )装置,数据采用RES2DINV最小二乘法反演,使用Surfer绘制反演成果图(图3、5)。

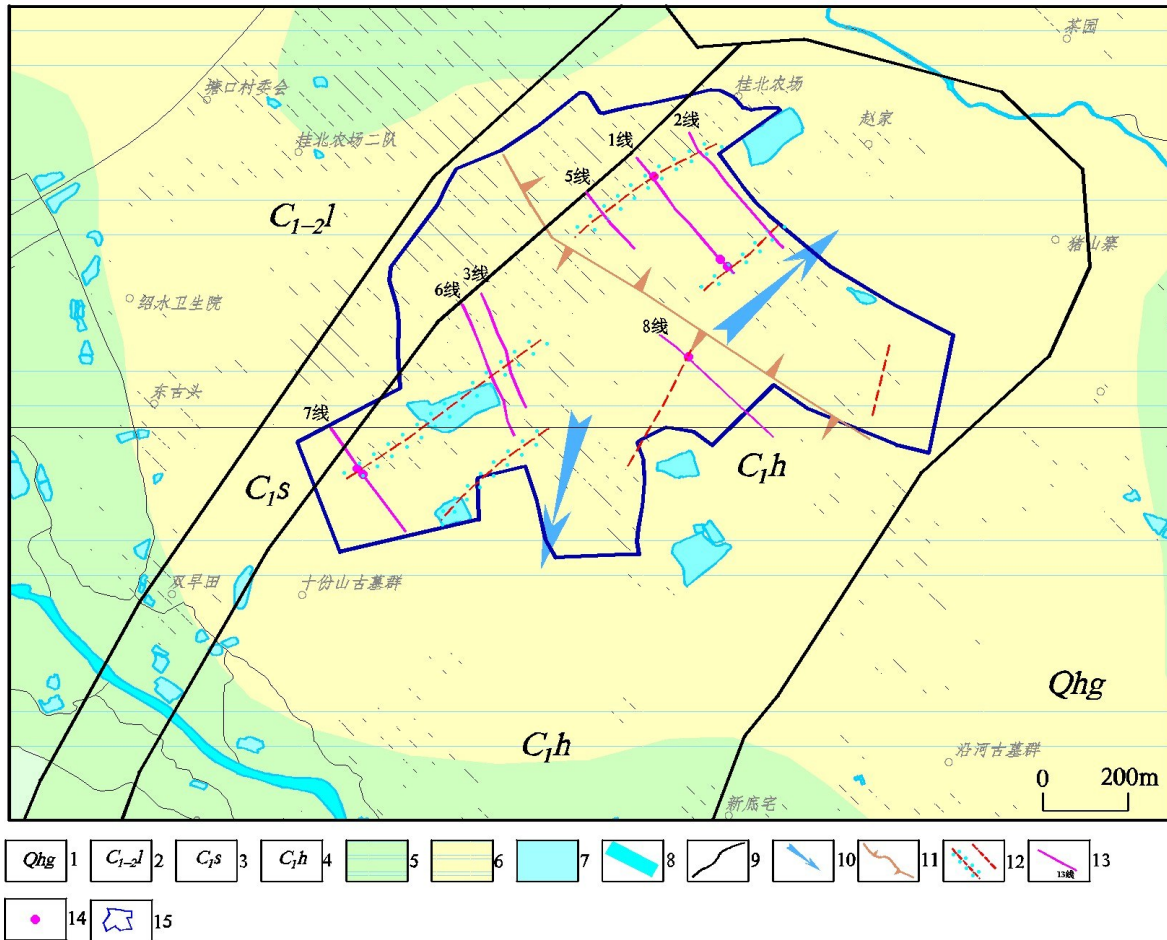
### 2.2 音频大地电磁测深法

音频大地电磁测深法(Audio-frequency Magnetotelluric Sounding,简称AMT)是观测天

然电磁场的变化,通过计算分析地下介质的电阻率分布规律,获取地质结构、资源分布或工程地质条件的地球物理勘探方法<sup>[13-14]</sup>。本次工作由于电磁干扰限制,仅在2号线布署了AMT工作,使用美国劳雷公司研制的EH4电磁成像系统,采集天然电磁场频段10~100 kHz的数据,采用张量方式测量,同时采集电场 $E_x$ 、 $E_y$ 和正交磁场 $H_y$ 、 $H_x$ , $X$ 和 $Y$ 方向电极间距20 m,测点间距10 m,叠加8次,增益范围介于5~60 db之间。

### 2.3 激电二次时差法

激电二次时差法基于岩矿石及地下水的激发极化原理,采用激电对称四极装置,通过测量激发极化电流产生的二次电位差,来确定含水层与非含水层之间的界面,进而推断出地下水位的位置。在激电二次时差测量中,使用大电流( $I_D$ )和小电流( $I_X$ )对地下介质进行激发极化,地下介质会产生不同的二次电位( $V_{2D}$ 和 $V_{2X}$ )。这两个电位分别反映了大激发电流和小激发电流作用下,在含水层和非含水层中的电场变化情况<sup>[15]</sup>。具体来说,当大激发电流通过含水层时,由于水的导电性,二次电位( $V_{2D}$ )会因为与水分子的相互作用而发生衰减,衰减的过程与含水层中地下水的分布和流动相关;而在非含水层中,二次电位( $V_{2X}$ )的变化则相对较小,因为地下介质电阻率高,对电流的响应不明显;实践表明,在含水层上,其半衰时 $S_t$ 通常出现高值异常。通过测量大、小电流激发的二次场电位衰减到一半的时间 $S_t$ 之差,即:



1—第四系桂平组；2—第四系望高组；3—石炭系寺门组；4—石炭系黄金组；5—地质界线；6—松散岩类孔隙水水量中等；7—松散岩类孔隙水水量贫乏；8—裸露型碳酸盐岩、碎屑岩互层溶洞裂隙水水量贫乏；9—季节性地表积水区（塘）；10—浅覆盖型上层孔隙水、下层岩溶水，水量中等；11—浅覆盖型上层孔隙水、下层岩溶水，水量贫乏；12—河流及流向；13—地下水流向；14—分水岭；15—推测的含水和不含水破碎带；16—物探测线及编号；17—激电测深点；18—物探工作范围。

1—Quaternary guiping formation；2—Quaternary wanggao formation；3—Carboniferous simen formation；4—Carboniferous huangjin formation；5—Geological boundary；6—Porosity water in loose rocks with moderate water volume；7—Porosity water in loose rocks with poor water volume；8—Exposed carbonate rock and clastic rock interbedded karst fissure water with poor water volume；9—Seasonal surface water accumulation area (Pond)；10—Shallow overburden type with upper porosity water and lower karst water, moderate water volume；11—Shallow overburden type with upper porosity water and lower karst water, poor water volume；12—Rivers and flow directions；13—Groundwater flow directions；14—Watershed；15—Inferred aquifer and non-aquifer fractured zones；16—Geophysical prospecting lines and numbers；17—Induced polarization sounding points；18—Scope of geophysical prospecting work.

图 2 研究区水文地质及物探工作布置图

Fig. 2 Layout map of hydrogeological and geophysical prospecting work in the study area

$$S_{dt2} = S_{tD} - S_{tX} \quad (1)$$

式(1)中： $S_{dt2}$ —激电二次时差值，ms； $S_{tD}$ —大电流供电时的二次场半衰时，ms； $S_{tX}$ —小电流供电时的二次场半衰时，ms。绘制  $S_{dt2} - \frac{AB}{2}$  曲线，其中  $\frac{AB}{2}$  表示对称四极激电测深  $AB$  供电极距的一半，而正异常所对应的位置为含水层，零或负异常所对应位置为非含水层。二次时

差正异常越大，说明激发极化放电越快，地下水越丰富<sup>[16]</sup>。

本次激电二次时差法使用重庆奔腾数控技术研究所研制的 WDA-1 超级电法仪二次时差测量模块，采用对称四极装置，双向供电，供电周期为 8 s，供电电流介于 1 000~3 000 mA 之间，接收电极使用固体不极化电极，接收极距  $MN = 10$  m，供电极距  $AB$  按等差数列增加，最

大供电极距  $AB = 200 \text{ m}$ , 共布设6个激电二次时差测深点。

激电二次时差法的准确性与系数  $K$  有关, 它是衡量二次时差数据准确度的一个指标。当电流密度  $J < 1 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$  时, 二次电位的幅度与电流是正比关系, 则有:

$$K = \frac{I_D \cdot V_{2x}}{I_X \cdot V_{2D}} = 1 \quad (2)$$

式(2)取对数:

$$K = \ln \frac{I_D \cdot V_{2x}}{I_X \cdot V_{2D}} = 0 \quad (3)$$

式(2)中:  $I_D$ —大激发电流, mA;  $I_X$ —小激发电流, mA;  $V_{2D}$ —大电流激发的二次场电位, mV;  $V_{2x}$ —小电流激发的二次场电位, mV。理想状态下  $K$  值等于零, 但在实际工作中,  $K$  值不可能做到等于零, 据统计在当  $K$  值小于 0.05 时, 可以认为激电二次时差数据是准确的<sup>[16]</sup>, 在这种情况下, 激发电流的影响在含水层和非含水层之间的差异足够大, 可以清晰地区分开来, 从而准确地反映出地下水位的位置。

### 3 数据解释与应用

#### 3.1 数据处理与解释

研究区分布在分水岭两侧(图2), 主要为第四系望高组(Qpw)覆盖的石炭系黄金组(C<sub>1</sub>h)的浅覆盖型上层松散岩类孔隙水、下层岩溶水, 因地势较高整体环境水量贫乏, 寻找地下水困难。地下岩石完整时, 电阻率一般呈现出明显高阻的状态, 在高密度电阻率剖面等值线图中呈黄色—橘色—红色显示。通常情况下, 在反演电阻率等值线图中, 等值线若呈水平平缓的层状, 通常反映地下介质具有良好的电性均匀性和稳定的层状结构, 对应的地下岩层完整性较高且横向变化微弱; 反之, 当电阻率等值线出现下凹不连续的异常形态时, 则指示地下岩层在该处存在明显的低电阻率异常, 这种低电阻率异常往往与后期构造作用导致的岩石破碎密切相关, 易形成高渗透性的地下水的径流通道<sup>[17]</sup>。

通过2、1、5线高密度电阻率数据采用 Resinv2D 软件反演, Surfer 绘制电阻率等值线图(图3a), 分析发现: 低电阻率异常区明显, 在2线30 m、1线55 m和5线70 m处的反演电阻

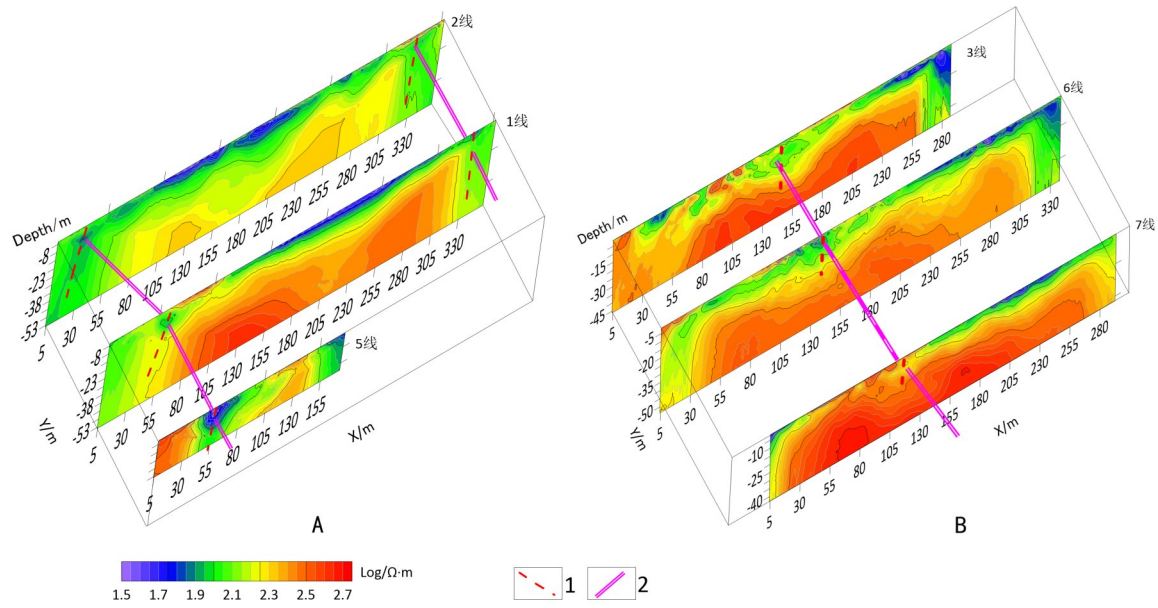
率断面图中的低电阻率异常形态相近, 空间形态呈连续性, 同时在2线音频大地电磁测深成果图(图4)中, 测线30 m附近深度45 m上下处同样存在低电阻率向下的椭圆长轴封闭异常, 与高密度电阻率异常相对应; 在2线340 m、1线340 m高密度电阻率等值线和音频大地电磁测深电阻率断面图340 m处电阻率呈“V”型低电阻率异常, 异常形态有差异, 空间呈连续状态, 推测该处存在破碎构造。两种物探方法显示该异常存在且位置吻合, 说明该处异常真实有效。在高密度电阻率测量3、6和7线(图3b)中, 3线155 m、6线150 m、7线120 m处, 低电阻率异常深度埋藏较浅, 但空间连续性较好。

8线高密度电阻率数据同样采用 Resinv2D 软件反演, Surfer 绘制电阻率等值线图(图5), 该剖面电性结构整体较稳定, 推测上层0~10 m为第四系覆盖层, 下层为灰岩、泥灰岩。在测线80~130 m之间电阻率等值线呈“V”, 幅度较宽, 向深部延伸, 电阻率值介于90~225 Ω·m之间, 随着深度增加电阻率增大, 推测为破碎带。

为验证低电阻率异常区的破碎带是否含水, 在1线55、340和345 m; 7线115、120 m; 8线95 m处布设激电二次时差测深, 通过计算半衰时差值  $S_{d/2}$ , 绘制  $S_{d/2} - \frac{AB}{2}$  曲线,  $\frac{AB}{2}$  为激电供电极距的一半。按照正异常所对应含水层位置, 零或负异常所对应非含水层解释, 推测1线55 m测点(图6a)在  $\frac{AB}{2}$  等于10~21 m、65~105 m为含水层, 激电二次时差值最大异常为310 ms; 1线340 m测点(图6b)在  $\frac{AB}{2}$  等于50~90 m为含水层, 激电二次时差最大异常为100 ms, 1线345 m测点(图6c)存在正异常, 激电二次时差最大异常为90 ms, 但异常连续差; 7线115 m测点(图6d)在  $\frac{AB}{2}$  等于20~95 m为含水层, 在120 m测点(图6e)处同样存在类似形态的激电二次时差正异常, 但激电二次时差值最大异常为60 ms; 8线95 m测点(图6f)整体激电二次时差值正异常在10~70 ms, 最大值70 ms在  $\frac{AB}{2}$  为65 m处, 但连续性差。

#### 3.2 成果验证

在含碳质泥质灰岩进行找水时, 使用高密



a—2、1和5线；b—3、6和7线。

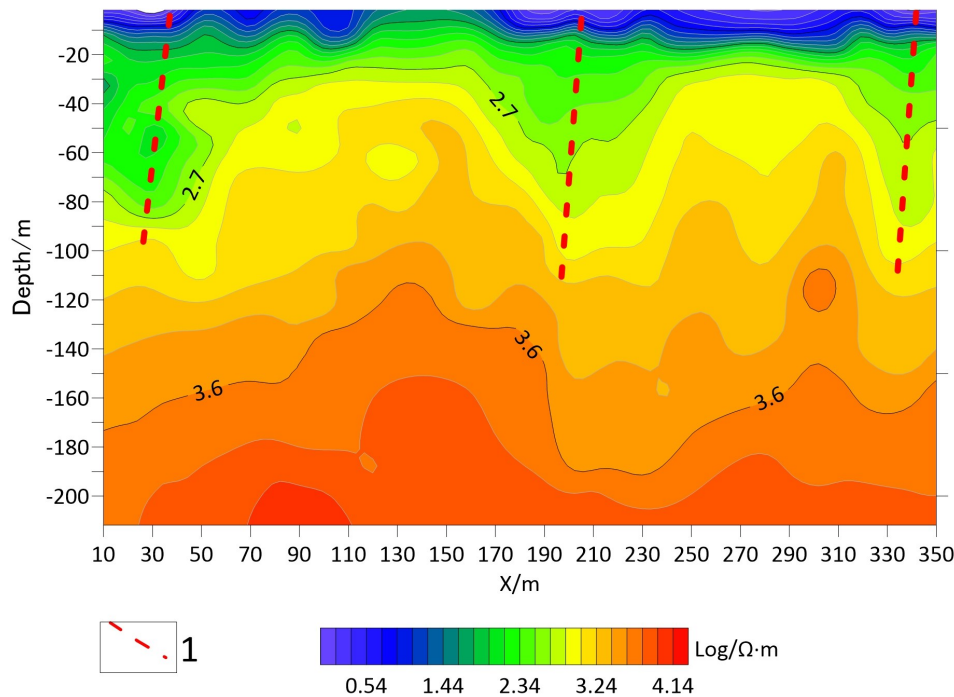
a-Line 2, 1, and 5; b-Line 3, 6, and 7.

1—推测破碎带；2—推测导水通道。

1-Inferred fracture zone; 2-Inferred water conduit.

图3 研究区高密度电阻率法反演成果及推测构造图

Fig. 3 Inversion results of high density resistivity and inferred structures in the study area



1—推测破碎带。

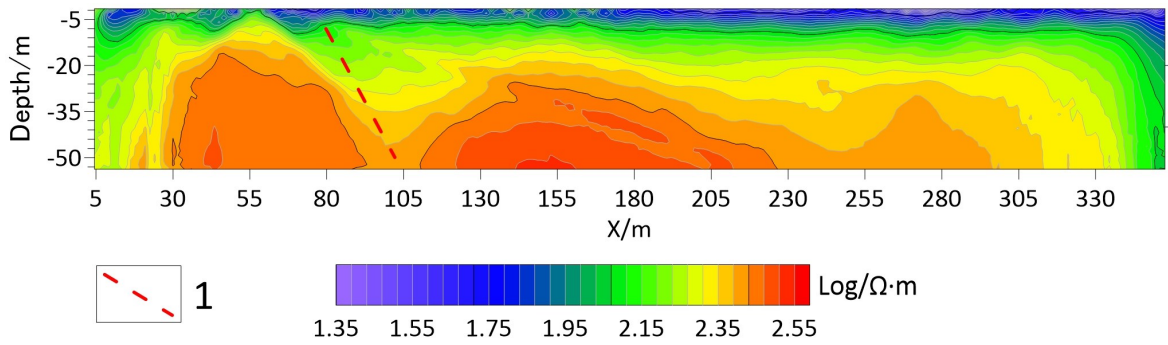
1-Inferred fracture zone.

图4 研究区2线音频大地电磁测深电阻率成果图

Fig. 4 Resistivity result profile of AMT line 2 in the study area

度电阻率法或音频大地电磁测深提取低电阻率异常信息,在低电阻率异常区开展激电二次

时差测深分析地下水致异常。根据高密度电阻率、音频大地电磁测深圈定的低阻异常和激

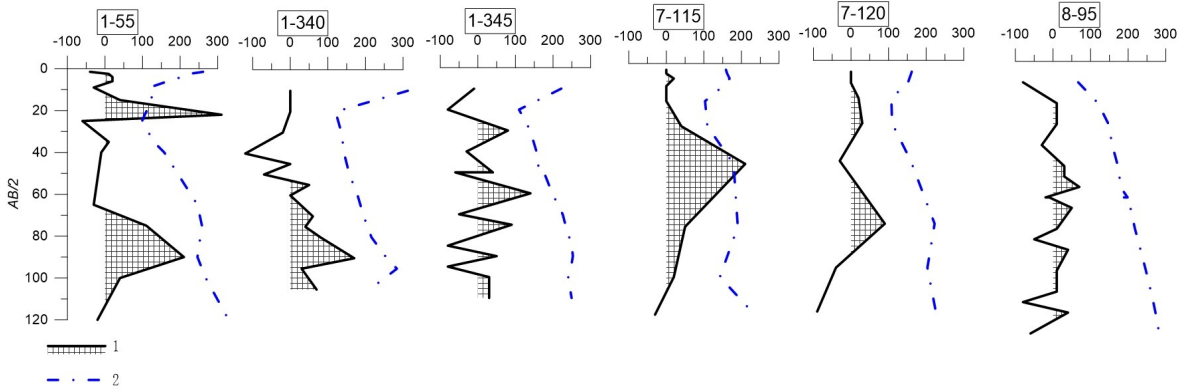


1—推测破碎带。

1-Inferred fracture zone.

图 5 研究区 8 线高密度电阻率反演成果图

Fig. 5 Inversion result profile of high density resistivity method on line 8 in the study area



a—1 线 55 m 测点; b—1 线 340 m 测点; c—1 线 345 m 测点; d—7 线 115 m 测点; e—7 线 120 m 测点; f—8 线 95 m 测点。

a—Measurement point at 55 m on line 1; b—Measurement point at 340 m on line 1; c—Measurement point at 345 m on line 1; d—Measurement point at 115 m on line 7; e—Measurement point at 120 m on line 7; f—Measurement point at 95 m on line 8.

1—激电二次时差值 (单位: ms) 曲线及正异常; 2—视电阻率曲线 (单位: Ω·m); 3—激电供电电极距 AB 的  $\frac{1}{2}$  (单位: m)。

1—Curve of secondary time difference and positive anomaly; 2—Apparent resistivity curve; 3—AB/2 of the IP power supply pole distance.

图 6 研究区激电二次时差值曲线图

Fig. 6 Profiles of the IP secondary time difference values in the study area

电二次时差测深的正异常, 选定 1 线 55 m 测点、1 线 340 m 测点、7 线 115 m 测点和 8 线 95 m 测点开展钻探验证。

1 线 55 m 测点钻井孔深 100 m, 其中 0~14 m 为含砾黏性土, 棕黄色, 硬-可塑状, 砾石含量约 20%, 砾石成分为砂岩, 砾径一般介于 5~20 mm 之间, 次圆状; 14~76 m 为泥质灰岩, 灰黑色, 中厚层状, 节理裂隙不发育, 30~45 m 岩石较破碎, 静止水位 7.50 m。水泵置入深度 25 m, 连续抽水 47 h, 水位将升 8.2 m, 水量 5.429 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

1 线 55 m 测点钻井孔深 100 m, 其中 0~14 m 为含砾黏性土, 棕黄色, 硬-可塑状, 砾石含量约 20%, 砾石成分为砂岩, 砾径一般介于 5~20 mm 之间, 次圆状; 14~76 m 为泥质灰岩, 灰黑色, 中

厚层状, 节理裂隙不发育, 30~45 m 岩石较破碎, 静止水位 7.50 m。水泵置入深度 25 m, 连续抽水 47 h, 水位降深 8.2 m, 水量 5.429 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

1 线 340 m 测点钻井孔深 97 m, 其中 0~6 m 为含砾黏性土, 棕黄色, 硬-可塑状, 砾石含量约 20%, 砾石成分为砂岩, 砾径一般介于 5~20 mm 之间, 次圆状; 7~97 m 为泥质灰岩, 灰黑色, 中厚层状, 节理裂隙不发育, 35~40 m 岩石较破碎, 静止水位 7.70 m。水泵置入深度 35 m, 连续抽水 25 h, 水位降深 17.9 m, 水量 5.022 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。

7 线 115 m 测点钻井孔深 100.5 m, 其中 0~8 m 为含砾黏性土, 棕黄色, 硬-可塑状, 砾石含量约 20%, 砾石成分为砂岩, 砾径一般介于 5~20 mm 之间, 次圆状; 9~100 m 为泥质灰岩, 灰

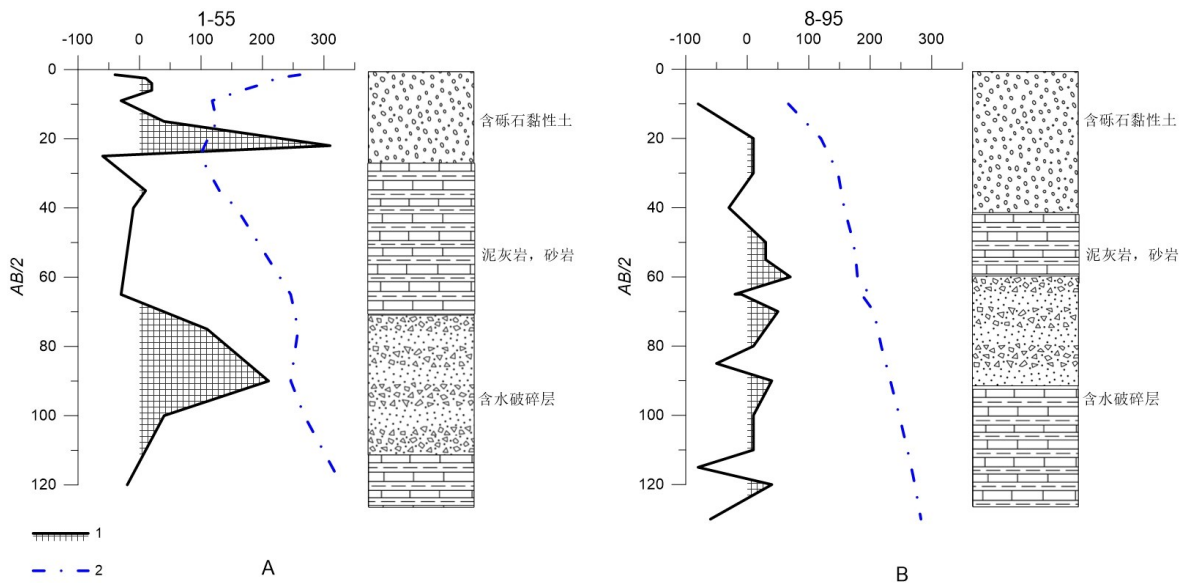
黑色,中厚层状,节理裂隙不发育,15~25 m及30~45 m处岩石较破碎,静止水位4.40 m。水泵置入深度35 m,连续抽水24 h,水位降深9 m,水量 $5.857 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

8线95 m测点钻井孔深67 m,其中0~18 m为含砾黏性土,棕黄色,硬-可塑状,砾石含量约20%,砾石成分为砂岩,砾径一般介于5~20 mm之间,次圆状;18~67 m为泥质灰岩,灰黑色,中厚层状,节理裂隙不发育,32~38 m岩石微破碎,

静止水位7.70 m。水泵置入深度35 m,使用回水装置,连续抽水5 h,水位降深23.2 m,水量 $1.3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

### 3.3 探讨

7条测线均开展高密度电阻率法探测,受场地和电磁干扰限制,仅2线开展了音频大地电磁测深法互补印证地下电性结构,在低电阻率异常的基础上,通过激电二次时差法有效地圈定含水层位(图7)。



a—1线55 m测点; b—8线95 m测点。

a—Measurement point at 55 m on line 1; b—Measurement point at 95 m on line 8.

1—激电二次时差值(单位: ms)曲线及正异常; 2—视电阻率曲线(单位:  $\Omega \cdot \text{m}$ ); 3—激电供电电极距 $AB$ 的 $\frac{1}{2}$ (单位: m)。

1—Curve of secondary time difference and positive anomaly; 2—Apparent resistivity curve; 3— $AB/2$  of the IP power supply pole distance.

图7 研究区激电二次时差值解释分析图

Fig. 7 Profiles and the lithological interpretation of IP secondary time difference values in the study area

对研究区的4个钻井实例分析表明,激电二次时差值的正异常面积与水量大小成正相关(图7a),面积越大水量也越大,具体正异常围成的面积与水量的大小需要不同地区、不同岩层进行数理统计<sup>[18]</sup>,本文不作详细分析。从钻井成果和激电二次时差值对比分析,浅表的激电二次时差值正异常多为孔隙水,和地形关系比较大,深部宽幅的正异常指示破碎岩石的孔隙率大,透水能力较强,地下水丰富,是找水打井主要寻找的地段。同时对于单点或低于50 ms的且连续性差的激电二次时差值,其破碎带含水性较弱(图7b),在使用激电二次时差数据判定地下水量时需要注意。

## 4 结论

1)综合物探方法在含碳质泥质灰岩地区的找水工作中具有明显的优势。通过采用高密度电阻率法、音频大地电磁测深、激电二次时差测深可以有效地提取地下介质的信息,组合使用这些方法,可以弥补单一参数对水致异常解释的不足,能够显著提高找水打井的成功率。

2)激电二次时差正异常的面积与水量大小成正相关,浅表的激电二次时差值的正异常多为浅部潜水,深部宽幅连续的正异常是找水打井重要目标地段。在使用激电二次时差测深时对于单点或低于50 ms的且连续性差的激电二

次时差值异常,判定地下水量需结合更多的地质、物探资料。

### 参考文献

- 1 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 Lijun,LI Bo,ZHOU Pei,et al. The application of multiple geophysical methods to water exploration in the arid areas of central Hunan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(5): 835-839(in Chinese).
- 2 张志.综合物探方法在泾县榔桥地区矿泉水勘查的应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2022  
ZHANG Zhi. Study on the application of comprehensive geophysical prospecting method in mineral water in Langqiao area of Jing county[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2022(in Chinese).
- 3 杨传伟,刘启蒙,王琳琳,等.水文地质调查与物探在岩浆岩地区找水中的应用——以田黄镇律庄村地下水勘查为例[J].地下水,2024,46(1):133-135.  
YANG Chuanwei,LIU Qimeng,WANG Linlin,et al. Application of hydro-geological survey and geophysical exploration to water search in magmatic areas:Taking the groundwater exploration of Lvzhuang village in Tianhuang town as an example[J]. Ground Water,2024, 46(1):133-135(in Chinese).
- 4 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 Shengkai,LIU Haifei,HUANG Chao,et al. Groundwater prospecting by combined hydrogeological and integrated geophysical surveys in granite areas, southern Jiangxi province[J]. Geology and Exploration, 2021,57(3):584-592(in Chinese).
- 5 郑智杰,曾洁,甘伏平,等.综合物探方法在碎屑岩地区找水中的应用——以云南宣威大路边村为例[J].中国岩溶,2024,43(2):432-440.  
ZHENG Zhijie,ZENG Jie,GAN Fuping,et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method to water detection in the clastic rock area of Dalubian village, Xuanwei, Yunnan province [J]. Carsologica Sinica,2024,43(2):432-440(in Chinese).
- 6 朱文科.综合物探方法在凤阳石灰岩地区水资源勘查中的应用[J].安徽地质,2022,32(1):53-55.  
ZHU Wenke. Application of combined geophysical methods in water resources exploration in the Fengyang limestone area[J]. Geology of Anhui,2022,32(1):53-55(in Chinese).
- 7 康方平,蒋建良,彭杰,等.综合物探方法在湖南某贫水板岩地区找水的应用研究[J].工程地球物理学报,2020,17(2):258-264.  
KANG Fangping,JIANG Jianliang,PENG Jie,et al. Application of integrated geophysical method to water search in a poor slate region of Hunan province [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(2):258-264(in Chinese).
- 8 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 Biao,LIU Liangzhi,NI Jinxin,et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to water exploration in the granite severe water shortage region [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(4):501-507(in Chinese).
- 9 黄国民,李世平,陶毅,等.广西碎屑岩地区电法找水实例[J].物探与化探,2019,43(1):77-83.  
HUANG Guomin,LI Shiping,TAO Yi,et al. A case study of water prospecting by electrical method in clastic rock area of Guangxi [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(1):77-83(in Chinese).
- 10 李菊红,孙彦良,娄佰信.瞬变电磁法在新疆哈密花岗岩地区寻找地下水资源中的应用[J].世界核地质科学,2024,41(3):540-549(in Chinese).  
LI Juhong,SUN Yanliang,LOU Baixin,et al. Application of transient electromagnetic method in searching groundwater resources in granite area of Hami,Xinjiang[J]. World Nuclear Geoscience,2024, 41(3):540-549(in Chinese).
- 11 赵俊,向龙洲,李忠,等.综合物探在水文地质调查中的应用及适用性分析[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(增刊2):110-115+123(in Chinese).  
ZHAO Jun,XIANG Longzhou,LI Zhong,et al. Application of integrated geophysical prospecting in the hydrogeology investigation and it's applicability analysis [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition),2017,39(Sup.2):110-115+123(in Chinese).
- 12 余京.综合物探在岩溶断层中找水的应用及其研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):442-445.  
YU Jing. Research and application of comprehensive geophysical exploration technique to find water at Karst

- fault[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup.1): 442-445 (in Chinese).
- 13 严小丽, 康慧敏, 王光杰, 等. AMT方法在鳌山卫花岗岩地区深部地热构造勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1945-1953.  
YAN Xiaoli, KANG Huimin, WANG Guangjie, et al. Application of AMT in deep geothermal structure exploration in Aoshanwei granite area of Qingdao[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 1945-1953 (in Chinese).
- 14 张苗红, 梁庭祥, 陈永东. 云龙县上坪子镍矿小火烧岩体含矿性及找矿方向[J]. 云南地质, 2015, 34(2): 185-188.  
ZHANG Miaohong, LIANG Tingxiang, CHEN Yongdong, et al. The ore-bearing property and prospecting of Xiaohuoshao rock body in Shangpingzi orefield, Yunlong[J]. Yunnan Geology, 2015, 34(2): 185-188 (in Chinese).
- 15 信永水. “二次时差法”原理初探[J]. 煤田地质与勘探, 1987(4): 50-54.  
XIN Yongshui. Preliminary exploration of the principle of the “Secondary Time Difference Method”[J]. Coal Geology & Exploration, 1987(4): 50-54 (in Chinese).
- 16 王程. 基于激电法半衰时探水的可行性研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(5): 597-603.  
WANG Cheng. Feasibility study of water exploration based on IP method in half decline [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(5): 597-603 (in Chinese).
- 17 符海转, 王世军, 黄泽佼, 等. 海南省陵水县高峰地热田水文地球化学特征与成因分析[J]. 世界核地质科学, 2024, 41(3): 508-521.  
FU Haizhuan, WANG Shijun, HUANG Zejiao, et al. Hydrogeochemical characteristics and genesis of Gaofeng geothermal fields in Hainan province[J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(3): 508-521 (in Chinese).
- 18 谢明魁. 二次时差法探测地下水[J]. 物探化探计算技术, 1987(4): 331-337.  
XIE Mingkui. Detection of groundwater with the method of time difference [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1987(4): 331-337 (in Chinese).