

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2021.03.006

综合物探方法在琼中地区地下水勘查中的应用

任磊¹, 代涛¹, 齐信^{2,3*}, 薛宝林¹, 焦尚斌¹

REN Lei¹, DAI Tao¹, QI Xin^{2,3}, XUE Bao-Lin¹, JIAO Shang-Bin¹

(1. 华北地质勘查局五一九大队, 河北 保定 071051; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205;

3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

(1. 519 Team of North China Geological Exploration Bureau, Baoding 071051, Hebei, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China)

摘要:物探方法是寻找地下水的重要勘查手段之一。在查明区域水文地质条件的基础上, 本文采用音频大地电磁测深和高密度电阻率法对海南省琼中县榕木村花岗岩区深部赋水断裂破碎带的位置、深度、规模和产状特征进行了探测, 结果表明: 赋水断裂破碎带主要表现为“凹槽”状或“条带”状低阻异常; 可以采用激电半衰时(T_h)、偏离度(r)以及视电阻率(ρ_s)等参数进行断裂破碎带含水层位置判别。通过水文地质钻探揭露, 含水层位置与物探解译结果基本一致, 证明激电半衰时和偏离度以及视电阻率等参数可以较可靠地确定赋水构造的位置和深度。综合物探勘查方法为水文地质钻井孔位设计提供了有效技术支撑, 可对在类似地区进行地下水探测提供参考。

关键词:音频大地电磁测深; 高密度电阻率法; 地下水勘查; 花岗岩区; 海南琼中县

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2021)03-0321-09

Ren L, Dai T, Qi X, Xue B L and Jiao S B. The Application of Comprehensive Geophysical Prospecting Method in Groundwater Exploration in Qiongzong County, Hainan Province. *South China Geology*, 2021, 37(3): 321-329.

Abstract: Geophysical prospecting is one of the important exploration methods to find groundwater. Based on the investigation of regional hydrogeological conditions, the authors mainly used the audio-frequency magnetotelluric sounding and high density resistivity to detect the location, depth, scale and occurrence of the deep water-bearing fault in the Rongmu granite area, Qiongzong County, Hainan Province. The water-bearing fracture zone shows the groove- or strip-shape low resistance anomaly, and can be identified its aquifer position according to its IP half decay time (T_h), deviation degree (r) and apparent resistivity (ρ_s). The hydrogeological drilling revealed the aquifer location to be basically consistent with the result of geophysical interpretation, which proves that the above comprehensive method can be used to accurately determine the location and depth of water-bearing structures. The comprehensive geophysical exploration provides both effective technical support for borehole location design of hydrogeological drilling and useful experience for future

收稿日期: 2021-4-20; 修订日期: 2021-5-20

资助项目: 中国地质调查局项目“海口江东新区综合地质调查(DD20190304)”

第一作者: 任磊(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工环地质勘查工作, E-mail: hk519renlei@163.com

* 通讯作者: 齐信(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质的调查与研究工作, E-mail: qx_cdut@126.com

groundwater exploration in other similar areas.

Key words: audio magnetotelluric sounding; high density resistivity method; groundwater exploration; Granite area; Qiongzong County, Hainan

地下水资源的开发利用与社会经济发展具有密切关系^[1]。物探方法是寻找地下水的重要勘查手段之一,在地下水勘查工作中起着举足轻重的作用。我国自1950年已经开始把电法勘探应用于舟山岛地下水勘查工作中^[2],后经过几十年的研究和探索实践,水文物探方法从常规的电阻率法^[3-4]逐步发展到高密度电阻率法^[5-6]、激发极化法^[7-9]、瞬变电磁法^[10-12]、可控源音频大地电磁法^[13-14]等。1990年以来,水文物探技术研究的热点转移到基岩山区,为了解决勘查难度和范围较大等问题,物探找水技术有了飞速发展,主要有音频大地电磁法^[15-16]、电法测井法^[17]、地面核磁共振法^[18-21]、浅层高分辨率地震^[22]等,测量参数从单一的电阻率发展到视电阻率、自然电位、极化率、半衰时、衰减度、偏离度等综合地球物理参数^[23-25],逐步形成了一套完善的地下水勘查技术体系。

琼中县地处海南岛中部,位于热带海洋季风区北缘,境内山峦重叠,地形西南高、东北低,地势自西南向东北倾斜。受气候、地貌、地质等条件的制约,琼中县每年的缺水时间长达5个月,且地处铁、锰超标的原生劣质水分布区,季节性、水质型缺水问题突出,农村生活用水存在较大的供需矛盾;另外,还存在地下水资源开发利用率低等问题^[26-27]。榕木村位于琼中县集中连片缺水地区中北部,地下水类型主要是花岗岩区基岩裂隙水,但因该地区断裂构造总体不发育,打井找水困难,是琼中县典型的缺水地区。本文在了解掌握区域水文地质条件的基础上,在琼中县榕木村工作区首先采用音频大地电磁测深和高密度电阻率法查明赋水断裂构造发育特征,圈定有利富水地段,针对有利富水地段采用激电半衰时、偏离度等地球物理参数对含水层位置进行判别,经钻探验证,取得了较好的勘探效果。依据勘探成果,总结了不同物探方法的应用特点和综合物探找水经验,可为在类似地区进行地下水探测提供参考。

1 水文地质概况及地球物理特征

1.1 水文地质概况

本文研究范围为琼中县榕木村,区内地层出露较少,主要是第四系松散覆盖层;花岗岩分布广泛,且具有多期次侵入的特点,主要有三叠纪(γT)、侏罗纪(γJ)、白垩纪(γK)三期花岗岩,岩性主要为花岗斑岩、细粒黑云母二长花岗岩、粗中粒含斑黑云母正长花岗岩、细中粒斑状黑云正长花岗岩等;断裂构造分为北西向、北东向、近南北向三组(图1)。

研究区内地下水类型主要为基岩构造裂隙水,地下水赋存介质主要为花岗岩含水岩组,具有埋藏深、富水性好的特征,其富水性除补给条件外,主要取决于断裂带的力学性质及规模,尤其是北西向断裂为该区主要控水断裂,也是本次地下水勘查工作的主要探测对象。

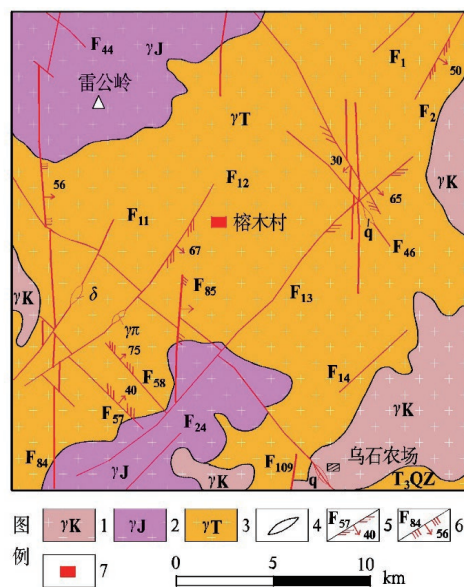


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1- 白垩纪花岗岩; 2- 侏罗纪花岗岩; 3- 三叠纪花岗岩; 4- 岩脉; q. 石英脉、 δ . 闪长岩脉、 $\gamma \pi$. 花岗斑岩脉; 5- 压扭性断裂及其产状、编号; 6- 压性断裂及其产状、编号; 7- 研究区位置

1.2 地球物理特征与物探方法选择

区内第四系覆盖层主要表现为低阻特征,视电阻率值在 $100 \sim 1000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间;结构完整的花岗岩因其富水性较差,主要表现为高阻特征,视电阻率值大于 $10000 \Omega \cdot \text{m}$;断裂破碎带则常因裂隙发育、赋水而表现为低阻异常特征,视电阻率值在 $100 \sim 5000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间^[28]。这些不同地质体的物性差异,为研究区实施物探找水工作提供了条件。

采用不同物探方法组合以及多参数的综合判定,能够有效地克服单一物探方法本身固有的局限,更准确地确定钻井孔位。考虑到基岩构造裂隙水是本区的主要探测目标,结合含水层结构、埋藏深度以及不同物探方法的优缺点,确定工作思路和物探方法组合。当断裂构造含水时,相应深度岩石电性参数会发生改变,视电阻率数值会明显不同于相同深度围岩的正常值,因此,本次研究首先采用音频大地电磁测深和高密度电阻率法两种物探方法,开展联合物探剖面组合探测,相互补充和验证,查明不同深度范围的断裂构造发育特征,结合水文地质条件,初步圈定有利富水地段;其次,在有利富水地段,结合电阻率特征,采用半衰时和偏离度的对应关系,精确判别含水层的埋藏深度。

2 工作方法原理及技术

2.1 音频大地电磁测深

音频大地电磁测深是通过观测地层电性参数在纵向及横向上的变化规律来研究地层岩性结构、破碎带位置的一种先进的频率域电磁法勘查技术,其主要特点是探测深度大,分辨率高。该探测深度

是指在均匀半空间中的趋肤深度,它以表达电磁波随频率变化衰减的特性而定,其趋肤深度公式(1)如下:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (\text{m}) \quad (1)$$

式中,频率 f 的单位是 Hz,电阻率 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

由式(1)可知,趋肤深度会随着电阻率和频率变化而变化,所获取的测量数据信息是在地下研究深度相对应的某一个频率上进行的。即频率越高趋肤深度越浅,反之,频率越低趋肤深度越深。由音频大地电磁测深的工作原理以及研究区目标层的深度,本次工作频率为 $10 \sim 100000 \text{ Hz}$,主要是研究地下 500 m 范围的电性特征。

资料处理上主要是通过傅里叶变换来获得电场和磁场实虚分量数据,进而计算对应频率的电阻率和相位数据。在对原始数据进行解编、剔非值、去噪等预处理编辑的基础上进行一维 BOSTICK 反演和带测点高程的快速松弛二维反演。本次使用的设备是美国劳雷公司研制的连续电导率仪(EH-4),它是通过测量不同岩石的电阻率值来获取地下深部的电性资料,数据流程和仪器野外工作布置见图2。

2.2 高密度电阻率法

本次使用的高密度设备是重庆奔腾数控技术研究所研发的 WDA-1 超级数字直流电法仪。高密度电阻率法的基本工作原理与常规电阻率法大体相同(图3),是以岩土体的电性差异为基础的一种探测方法,根据在施加电场作用下地层传导电流的分布规律,推断地下具有不同电阻率的地质体的赋存情况。

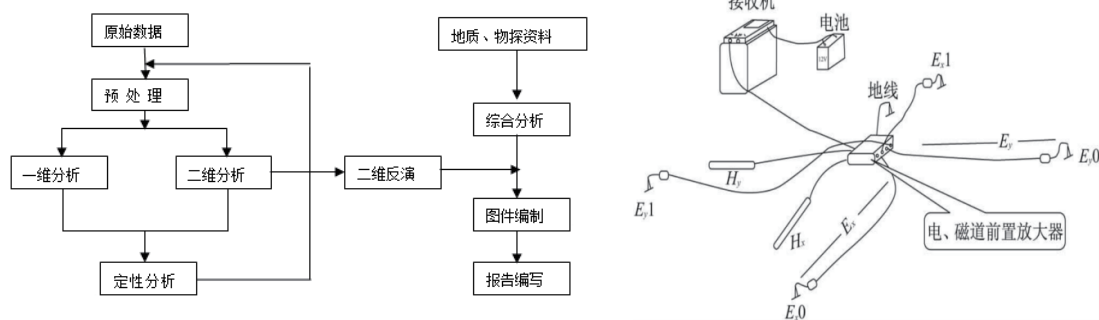


图2 工作流程图和野外工作布置示意图

Fig. 2 Work flow diagram and fieldwork layout diagram

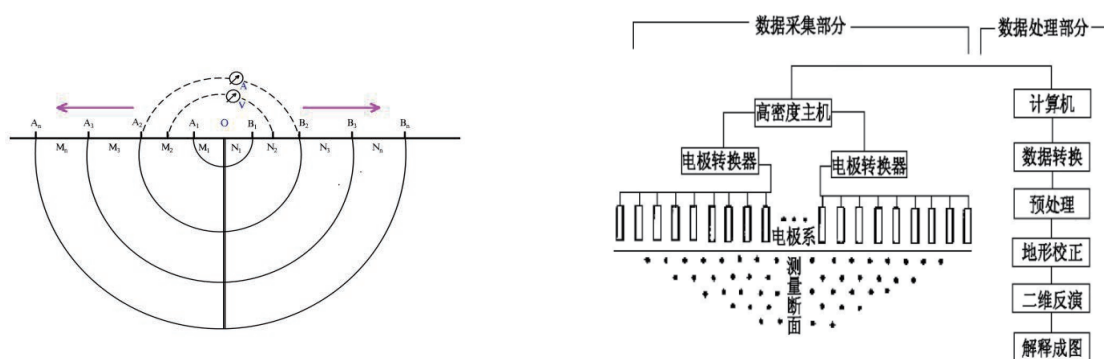


图3 高密度电阻率法工作原理和流程图

Fig. 3 Working principle and flow chart of high density resistivity method

高密度电阻率法的物理前提是地下介质间的导电性差异。和常规电阻率法一样,通过 A、B 电极向地下供电流 I ,然后在 M、N 极间测量电位差 ΔV ,从而可求得该点 (M、N 之间) 的视电阻率值,计算公式如下:

$$\rho_s = K \times \Delta V / I \quad (2)$$

根据实测的视电阻率剖面,进行计算、分析,便可获得地层中的电阻率分布情况,从而可以划分地层,判定异常等。在本次工作中主要研究浅部 50 m 深度范围内的电性特征。

2.3 激电测深半衰时参数

激电半衰时测深是电法勘探的一个重要分支 (图 4),受地形起伏和围岩电阻率不均匀性的影响较小,对相对富水带及其埋深反映较直观。

半衰时参数是断电后二次场 ΔV_2 第一个取样值衰减到一半时所反应的时间。这一参数是根据实践经验总结出来且行之有效的参数,目前已广泛应用于找水勘查工作。半衰时大,表示极化介质二次场放电慢;而半衰时小,则表示放电速度快。在含水岩体上,其半衰时 (T_h) 通常都以高值异常形式出现。

偏离度参数是实测衰减曲线与直线方程的拟合程度,用均方相对偏差 r 表示,并称其为“偏离度”。综合研究表明,偏离度 (r) 与含水量有负相关关系,即含水量增加时偏离度减小,含水层的偏离度 (r) 表现为低值。因此,通过激发极化法测量 (电阻率) 所反映二次场振幅大小及衰减快慢的半衰时、

偏离度等参数,可判断含水层位置及富水性情况。

3 工作部署

本次在榕木村附近共计布设 EH4 音频大地电磁测深 40 个物理点,布设高密度电阻率法剖面长度 400 m 以及激电半衰时测深 (测量地球物理参数包括:视电阻率、半衰时、偏离度) 2 个物理点 (图 5、表 1)。

高密度电阻率法和 EH4 音频大地电磁法完全重合布设,激电半衰时测深在剖面解释异常的中部布设 2 个测点,用以确定深部的含水层位置 (图 5)。

经现场试验调试,EH4 使用单点张量测量的采集方式,采集低频 - 中频 - 高频段的数据,叠加次数 20 次,个别测点根据实际情况进行调整,工频滤波选择 50 Hz 陷波器,通过该方法获得了详细的深部电性特征。

为获得更精准的浅部垂向分辨率,高密度电阻率法采用施伦贝谢尔 a2 装置,采集层数 30 层,获得了较为理想的勘探数据。

激电半衰时测深使用 WDA-1 超级数字直流电法仪,直接读取半衰时 (T_h),偏离度 (r) 等地球物理参数。选用装置型式为等比对称四极装置,最大极距 $AB/2=500$ m; $MN=AB/10$,供电电流 I_P 为 50 ~ 600 mA,观测电位 >100 mV。

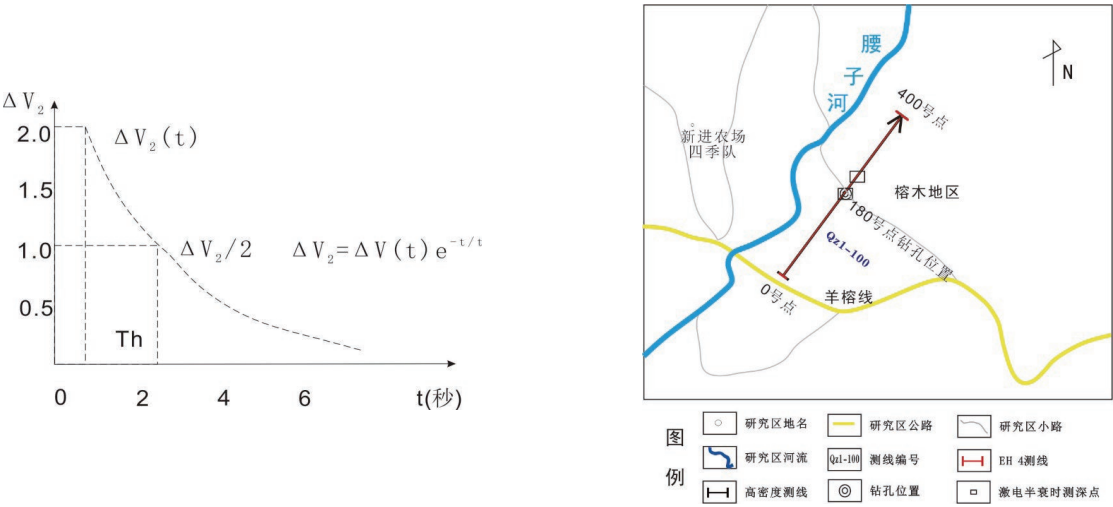


图 4 激电二次电位衰减曲线及半衰时

Fig. 4 Decay curve and half decay time of IP secondary potential

图 5 研究区工作部署图(榕木村)

Fig. 5 Survey line position of the study area (Rongmu village)

表 1 研究区测线布置情况表

Table 1 Statement of Survey line layout in the study area

剖面号	起点编号	结束点编号	测线长度 (m)	点距 (m)	物理点数	工作方法
QZ1	0	400	400	10	40	音频大地电磁测深
	0	400	400	5	80	高密度电阻率法
	190	210	20	10	2	激电半衰时测深

4 物探资料分析和解释

从高密度电阻率法和音频大地电磁测深物探综合剖面图(图 6)可见,两条综合剖面电阻率能清晰地显示含水断裂构造位置,其主要表现为在浅部电阻率相对较低,深部为中高阻的电性特征,总体呈现为从浅部到深部电阻率从低到高的变化规律。

结合野外水文地质调查资料,两条剖面电性特征勘查结果基本吻合,其中音频大地电磁测深在垂向分辨率和细节上更为清晰地刻画了深部电性特征的变化情况。两条剖面在 180 ~ 200 号点附近、深度 200 m 以内视电阻率呈现出低阻特征,视电阻率值在 100 ~ 5000 Ω·m 之间变化,低于两侧地层视电阻率的数值,且向深部有一定的延伸,呈“凹槽”状或“条带”状,推测为断裂破碎带的反映。该断裂倾向南西,倾角 85 度,近似直立,为正断层。两种物探方法参数的断面图皆能够比较明显地反应出断裂破碎带位置。

针对剖面的 180 ~ 200 m 附近解译的断裂破

碎带位置开展了激电半衰时测深工作,对视电阻率(ρ_s)、激电半衰时(Th)和偏离度(r)三个地球物理参数进行了解译(图 7)。

激电测深半衰时 Th 曲线的首支在 660 ~ 790 ms 之间变化且呈上升趋势,推测为第四系覆盖层的反映;中部在 860 ~ 920 ms 之间变化,推测为花岗岩上部风化层含水引起。当 AB/2 为 350 m 时,Th 出现峰值,为 940 ms;另一含水参数偏离度 r 值在此处亦有异常反应,r 值下降至 5.4%,据此推测该深度有含水层存在。根据电阻率曲线综合分析,在 AB/2=15 ~ 40 m 和 AB/2=200 ~ 350 m 两段的视电阻率曲线形态趋于平缓,视电阻率值分别在 790 ~ 913 Ω·m,而与之相关的半衰时曲线呈上升趋势、偏离度曲线则逐级降低,进而判定含水层的深度在 AB/2=15 ~ 40 m 和 AB/2=200 ~ 350 m 位置两个主要区段;在 AB/2=400 m 之后视电阻率曲线呈上升趋势,以及其它两参数的半衰时 Th 反向下降和偏离度 r 反向上升的表现形式,认为深部

基岩相对完整。

通过对研究区电性特征的综合研究分析认为, 三个参数相结合的方式能更为直观清晰地判定含在对剖面成果解译出的断裂破碎带位置的基础上, 水层的深度位置等信息。

再以视电阻率(ρ_s)、激电半衰时(T_h)和偏离度(r)

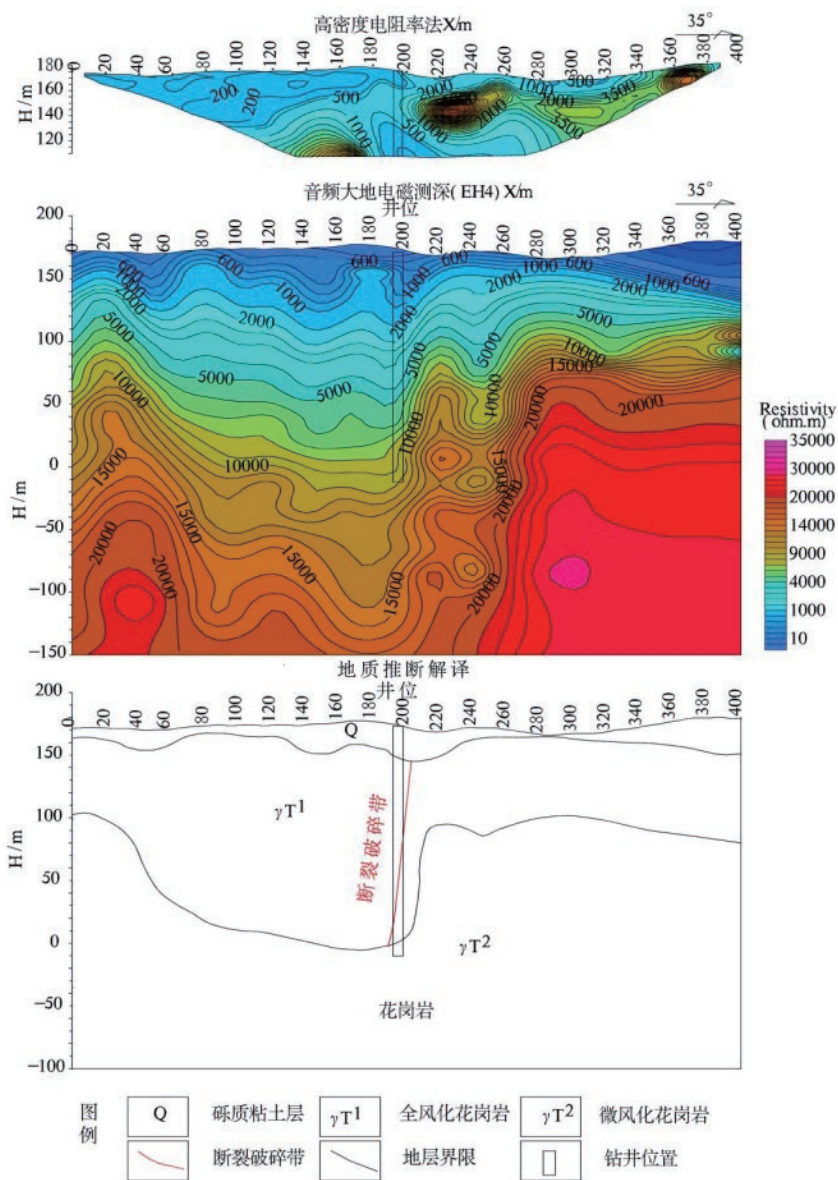


图 6 高密度电阻率法和音频大地电磁测深剖面及地质推断解译图

Fig. 6 Profile of high-density resistivity method and audio-frequency magnetotelluric sounding and geological interpretation map

5 钻孔验证与探测效果分析

5.1 钻孔 LMSSK07 验证情况

经过综合分析,最终井位定于剖面 180 ~ 200 号点处,设计深度 170 m。钻孔 LMSSK07 在 11 m 深处穿过第四系覆盖层进入花岗岩,花岗岩体裂隙较发育;至 145 m 深度钻穿断裂破碎带,进入较完

整花岗岩,至 168 m 深终孔(图 8)。抽水试验结果分析,单孔涌水量为 160 ~ 175 m³/d,主要出水地段位于 50 ~ 120 m 深度的断裂破碎带。

5.2 不同物探方法的探测效果分析

在对研究区物探成果资料和钻孔 LMSSK07 资料分析的基础上,对不同物探方法的优势和劣势进行了分析总结(表 2)。

根据钻孔揭露数据以及不同物探方法在深度大,在本次工作中最大反演深度可达 1000 m, 几米至几百米范围内获取的电性信息结果表明,能够详细探测深部断裂破碎带和有效划分岩性音频大地电磁测深法施工方便,效率高,探测深界线,但施工受自然、人为电磁干扰较大,垂向

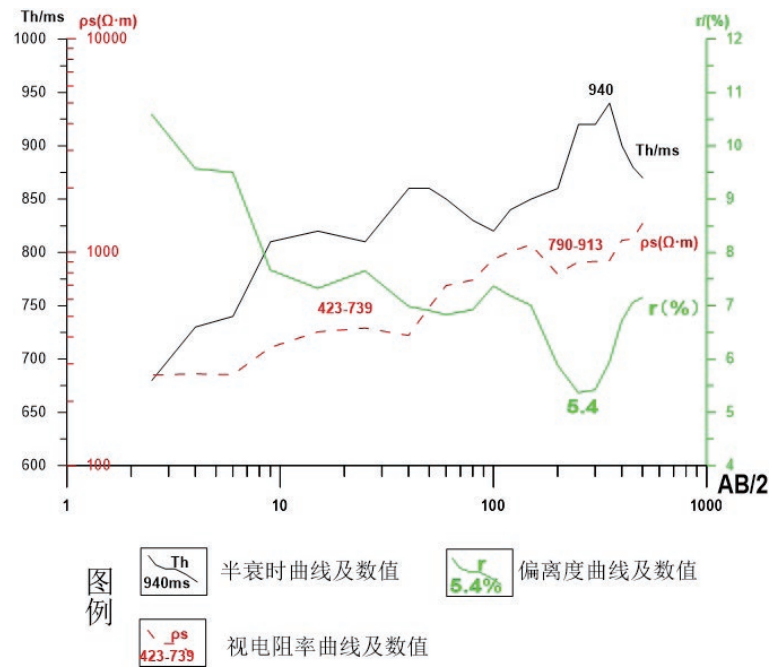


图 7 激电测深半衰时(Th)、偏离度(r)和视电阻率(ρs)曲线综合图

Fig. 7 Integrated diagram of IP sounding half-life, deviation and apparent resistivity curve

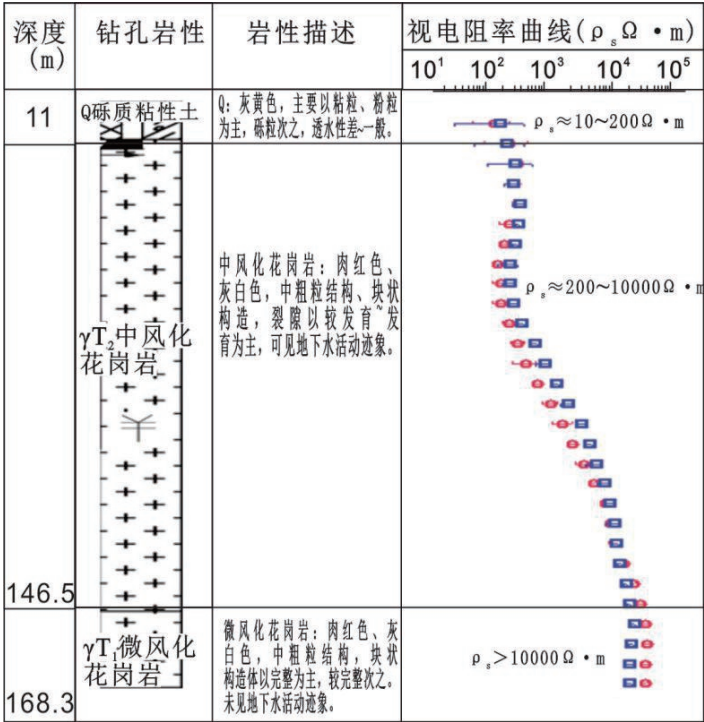


图 8 LMSSK07 钻孔岩性与视电阻率曲线图

Fig 8 Lithology and apparent resistivity curve of LMSSK07 Borehole

分辨率较低,勘探精度为 5-10 m;高密度电阻率法施工效率高,勘探深度在 0-200 m 之间,施工受自然、人为干扰较小,勘探精度 2-5 m,适用于探测浅部断裂破碎带;激电半衰时测深的偏离度 (r)和半衰时 (Th)综合物理参数工作效率较低,勘探深度受 AB 极距控制,本次工作中勘探深度最大为 300 m,但在判定含水层位置及埋深方面有更为精确的效果。

表 2 榕木村花岗岩区不同地球物理方法探测效果

Table 2 Summary of exploration effects of different geophysical methods implemented in the Rongmu granite area

工作方法	勘探深度 (m)	勘探精度 (m)	探测效果	时效性(优越性)
高密度电阻率法	0-200	2-5	1. 垂向分辨率高,能有效探测浅部断裂破碎带,寻找构造裂隙水。 2. 探测深度有限。	效率高
音频大地电磁测深 EH4	0-1000	5-10	1. 探测深度较大,能够详细探测深部断裂破碎带和有效划分岩性界线; 2. 垂向分辨率较低。	效率高
偏离度 (r) 和半衰时 (Th) 综合地球物理参数	0-300	1-5	1. 工作方法简单,准确率高; 2. 分辨率高,能够精准确定含水层位置和埋深。	效率低

6 结论

(1)榕木村花岗岩区找水实践证明,音频大地电磁测深和高密度电阻率法相结合能有效地探测不同深度的断裂破碎带;赋水断裂破碎带主要表现为“凹槽”状或“条带”状低阻异常。视电阻率(ρ_s)、激电半衰时(Th)和偏离度(r)三个参数相结合能更为直观清晰地判定含水层的深度位置等信息。

(2)音频大地电磁测深法施工方便,探测深度大,能够详细探测深部断裂破碎带和有效划分岩性界线,但垂向分辨率低;高密度电阻率法垂向分辨率高,但探测深度有限,适用于探测浅部断裂破碎带;激电半衰时测深工作效率较低,但在判定含水层位置及埋深方面有更为精确的效果。

(3)在花岗岩地区采用音频大地电磁测深、高密度电阻率法以及激电半衰时测深相结合的方法寻找基岩构造裂隙水,具有较好的探测效果,可为以后在类似地区开展找水工作提供技术参考。

参考文献:

- [1] 吴价城. 论海南省的水资源开发利用与经济开发的关系[J]. 勘察科学技术, 1989, (6): 1-5.
- [2] 陆云祥, 陈建荣, 陈华根, 刘军强, 徐岳行, 张琴希. 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.
- [3] 林鸿岑. 用井液电阻率法确定出水段和地下水流动状态[J]. 物探与化探, 1983, 7(5): 311-313.
- [4] 刘磊, 罗士新, 陈长敬. 常规电法在英山县温泉镇地热资源勘查中的应用[J]. 华南地质与矿产, 2015, 31(2): 182-187.
- [5] 张先林, 许强, 彭大雷, 赵宽耀, 刘伦, 任敬. 高密度电阻率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.
- [6] Schirov M, Legchenko A, Creer G. A new direct noninvasive groundwater detection technology for Australia[J]. Exploration Geophysics, 1991, 22: 333-338.
- [7] 段来成. 土壤吸附汞测量与直流激电法结合寻找地下水[J]. 物探与化探, 2008, 32(6): 619-621.
- [8] 杨湘生. 综合电法在黄花国际机场后勤基地找水中的应用[J]. 物探与化探, 2009, 33(4): 403-405.
- [9] 刘得福, 吕旭红, 任多魁. 综合电法在祁连山山前缺水寻找地下水的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(1): 41-44.
- [10] 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, 29(3): 537-542.
- [11] 稽艳鞠, 王艳, 林君, 朱凯光, 李海生, 陈祖斌. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J]. 工程勘察, 2005, 20(3): 64-67.
- [12] 薛国强, 李琳, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-2200.

- [13] 吴璐苹, 石昆法, 李荫槐, 李松浩. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712-717.
- [14] 底青云, 石昆法, 王妙月, 王 若, 李英贤, 张庚利, 于昌明, 张美根, 许 琨, 连长云. CSAMT 法和高密度电阻率法探测地下水资源 [J]. 地球物理学进展, 2001, 26(3): 53-57.
- [15] 伍 岳. EH4 电磁成像系统在砂岩地区勘查地下水的应用研究 [J]. 物探与化探, 1999, 23(5): 335-346.
- [16] 杨 剑, 王永华, 焦彦杰, 吴文贤, 杨俊波. EH4 电磁系统在西南抗旱救灾找水中的应用 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 754-757.
- [17] 王紫维, 马建初, 姜天健, 陈润富, 刘汉乐. 海南石碌矿区基于电法测井数据的水文地质参数求解 [J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(4): 481-487.
- [18] 潘玉玲, 贺 颢, 李振宇, 李国安, 姜焕忠. 地面核磁共振找水方法在中国的应用效果 [J]. 地质通报, 2003, 22(2): 135-139.
- [19] PanY L, Bernard J. Surface Nuclear Magnetic Induction System and Its' Application in Hydrogeological Investigations [J]. CT Theory and Applications, 2000, 9(s1): 37-43.
- [20] Legchenko A, Valla P. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(1): 3-20.
- [21] Wattanasen K, Elming S. Direct and indirect methods for groundwater investigations: a case study of MRS and VES in the southern part of Sweden[J]. Journal of Applied Geophysics, 2008, 66: 104-117.
- [22] 段佳松. 浅层地震折射波法配合电测深法在花岗岩地区找水 [J]. 地质与勘探, 1999, 55(3): 46-48.
- [23] 李金铭. 激电找水的新参数 - 偏离度 [J]. 勘察科学技术, 1993, (6): 52-56.
- [24] 刘春雷. 激电测深衰减度参数在实际应用中的发现 [J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 460-463.
- [25] 许 艳, 王洪杰, 殷继广, 张洪亮, 李 刚. 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.
- [26] 徐磊磊, 刘海清, 金 琰, 侯媛媛, 赵云龙. 海南省水资源开发利用特点及主要水资源问题 [J]. 热带农业科学, 2017, 37(9): 120-127.
- [27] 周祖光. 海南省水资源供需分析 [J]. 水利经济, 2005, 23(3): 7-54.
- [28] 齐 信, 黎清华, 张再天, 王晓晗, 代 涛. 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.