

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

齐信^{1,2}, 黎清华^{1*}, 张再天¹, 王晓晗¹, 代涛³

QI Xin^{1,2}, LI Qinghua^{1*}, ZHANG Zaitian¹, WANG Xiaohan¹, DAI Tao³

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 华北地质勘查局五一九大队, 河北 保定 071051

1. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. 519 Team North China Geological Exploration Bureau, Baoding 071051, Hebei, China

摘要:海南省琼中县侵入岩分布广泛, 历经白垩纪、侏罗纪、三叠纪、二叠纪侵入期, 以花岗岩、花岗闪长岩为主。地质构造相对不发育, 岩体完整性好, 岩石结构致密, 地下水富水性差异大, 找水难度大。在地质调查、物探勘探、水文钻探相互验证的基础上, 较系统地分析了花岗岩区断裂构造裂隙水、风化壳网状裂隙-孔隙水和接触带型基岩裂隙水3种地下水类型的赋存规律及含水层电性特征。研究表明, 断裂构造裂隙水主要赋存于构造破碎带中, 尤其是走向北西的张性或张扭性构造带中, 一般富水性好, 水量大; 风化壳网状裂隙-孔隙水分布普遍, 多赋存于沟谷或山间凹谷地貌的风化壳中, 一般富水性差, 水量小; 接触带型基岩裂隙水主要赋存于花岗岩与沉积岩、花岗岩与变质岩、不同侵入期次花岗岩接触带上, 富水性差异大。在视电阻率等值线断面上, 花岗岩断裂构造裂隙水呈现为陡降低阻“条带”或“漏斗”状异常电性特征曲线; 花岗岩风化壳网状裂隙-孔隙水呈现为“洼地”或“凹槽”状低阻电性特征; 接触带型基岩裂隙水呈现为“层”或“带”状低阻电性特征曲线。

关键词:花岗岩; 地下水类型; 赋存规律; 电性特征; 地球物理探测

中图分类号: P588.12⁺1; P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)06-1001-09

Qi X, Li Q H, Zhang Z T, Wang X H, Dai T. Electrical characteristics and storage rules of groundwater in granite area of Qiongzong County, Hainan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 1001-1009

Abstract: Intrusive rocks, mainly granite and granodiorite, are widely distributed in Qiongzong County of Hainan Province. They were emplaced in Cretaceous, Jurassic, Triassic, and Permian. It is difficult to find groundwater because of the relatively underdeveloped structure, good integrity and dense structure of rocks and various water richness of groundwater. Based on the mutual verification of geological survey, geophysical exploration and hydrologic drilling, this paper systematically analyzes the electrical characteristics and storage rules of three types of groundwater (structural fissure water, weathered crust netted fissure-pore water and contact bedrock fissure water) in granite area. The research results show that structural fissure water mainly exists in the structural fracture zone, especially in NW-trending tensional structural zones with good water richness and large water volume. The weathered crust netted fissure-pore water is widely distributed, mostly in the weathering crust of gully or mountain valley landform with poor water richness and low water volume. The contact type bedrock fissure water is mainly distributed in the contact zone of granite and sedimentary rocks, granite and

收稿日期: 2020-08-28; 修订日期: 2020-10-29

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》(编号: DD20190304)

作者简介: 齐信(1983-), 男, 在读博士生, 高级工程师, 从事水文地质、工程地质、环境地质调查与研究。E-mail: qx_cdut@126.com

* 通信作者: 黎清华(1978-), 男, 博士, 教授级高工, 从事水文地质、环境地质研究。E-mail: tsinghua_li@126.com

metamorphic rocks, and sub-granite of different stages, and its water abundance is greatly different. On resistivity isopleth section, the structural fissure water of granite is electrically characterized by "stripe" and "funnel" abnormal curves with steeply decreasing resistance, and the electrical characteristics of granite weathered crust netted fissure-pore water by "lowland" and "groove" shape low resistance electrical characteristics, and contact bedrock fissure water by "layer" and "band" shape with low resistance.

Key words: granite; types of groundwater; storage rules; electrical characteristics; geophysical exploration

花岗岩区地下水资源分布复杂、相对贫乏,多数钻井涌水量小于 $100 \text{ m}^3/\text{d}^{[1]}$,找水难度大,一直都有“找水禁区”之称^[2]。由于花岗岩结构致密,孔隙度较小,地下水赋存一般较深,受地表影响甚小,水质多为优良,且富含 H_2SiO_3 及 Sr、Zn 等矿物质元素,具有矿泉水开发利用的价值。开展花岗岩区地下水勘探与开发利用工作,不仅可以有效地解决当地居民安全饮水需求,而且有利于探索“地质调查+”扶贫新思路,加快推进脱贫攻坚与乡村振兴战略有效衔接。

在花岗岩区进行地下水资源勘探,首先要明确地下水含水层结构类型,确定找水方向,然后根据不同含水层结构类型,部署与之适应的地球物理探测方法。花岗岩属于块状岩类,主要的地下含水层结构类型为:花岗岩断裂构造裂隙及岩脉构造裂隙含水带、花岗岩风化网状裂隙-孔隙含水层(带)、侵入接触型基岩裂隙含水层(带)等。20 世纪 70 年代以来,国内外学者开始运用高密度电阻率法^[3-6]、音频大地电磁测深法^[7]、可控源音频大地电磁测深法^[8-9]、地面核磁共振法^[10-13]等物探方法探查地下水。前人研究主要针对花岗岩区的地下水类型与特征、地下水富集规律、地下水的补径排条件等进行了详实的研究,对含水层的电性特征及赋存规律研究不多。国内外学者^[6, 14-15]对玄武岩区和变质岩区的地下水赋存规律与含水层的电性特征进行了研究,识别出地下水的富集部位,有效解决了居民的缺水问题。开展花岗岩区含水层的电性特征及地下水赋存规律研究,识别花岗岩区的含水层物探曲线特征,总结地下水赋存规律,对于有效指导和解决花岗岩区的缺水问题具有重要的科学研究价值和社会经济效益。

海南琼中县是自然资源部的定点扶贫县,季节性缺水较严重,安全饮水是制约琼中县社会经济发展的重要障碍之一。琼中县地质调查工作程度较低,未开展过水文地质及地下水赋存规律方面的调查与研究。琼中县主要为花岗岩分布区,地下水分布不均,找水难度大,打井找水成功率低。按照自

然资源部、中国地质调查局脱贫攻坚总体工作部署,精准对接琼中县需求,中国地质调查局武汉地质调查中心在琼中县集中连片贫困缺水地区部署找水打井工作,围绕缺水村开展水文地质调查,重点部署地球物理探测工作,结合地球物理勘探与地质调查结果,精准确定钻井孔位,成功破解了琼中县花岗岩区的找水难题。

1 研究区地质概况

1.1 地层分布及岩性特征

花岗岩在琼中县广泛分布,可划分为白垩纪、侏罗纪、三叠纪、二叠纪 4 个侵入期,分布面积约占县域面积的 86% (图 1)。其中,白垩纪侵入岩(γK)分布在琼中县南部、西部、中部等地区,岩性为花岗斑岩、细粒黑云母二长花岗岩、粗中粒含斑黑云母正长花岗岩、细中粒斑状黑云母正长花岗岩;侏罗纪侵入岩(γJ)分布在县中北部、北部黎母山镇西部、什运乡西部、上安乡中部等区域,岩性为中细粒黑云母正长花岗岩、中粒黑云母正长花岗岩、粗中粒斑状角闪黑云二长花岗岩、闪长岩;三叠纪侵入岩(γT)主要分布于湾岭镇西部与黎母山镇大部分地区,出露面积较大,岩性为花岗斑岩、中细粒黑云母正长花岗岩、中粒斑状黑云母二长花岗岩、粗中粒巨斑状角闪黑云二长花岗岩;二叠纪侵入岩(γP)主要分布于琼中县中部、长征及什运西北地区,岩性为细中粒含斑石英二长岩、细中粒石英二长闪长岩、细中粒含斑石榴子石黑云母正长花岗岩、中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩、中细粒花岗闪长岩。

1.2 断裂构造特征

断裂构造对基岩地下水的赋存、分布规律起控制作用,是找水定井的关键^[16]。一般张性断裂、新近活动的断裂导水、富水性较好^[17]。琼中县地处区域地质构造北东向与北西向 2 组构造交会部位附近,且受到研究区东西向、北东向、北西向和南北向 4 组地质构造控制(图 1)。野外调查见北西向断裂多截切北东向断裂,构造行迹及力学性质表现为张

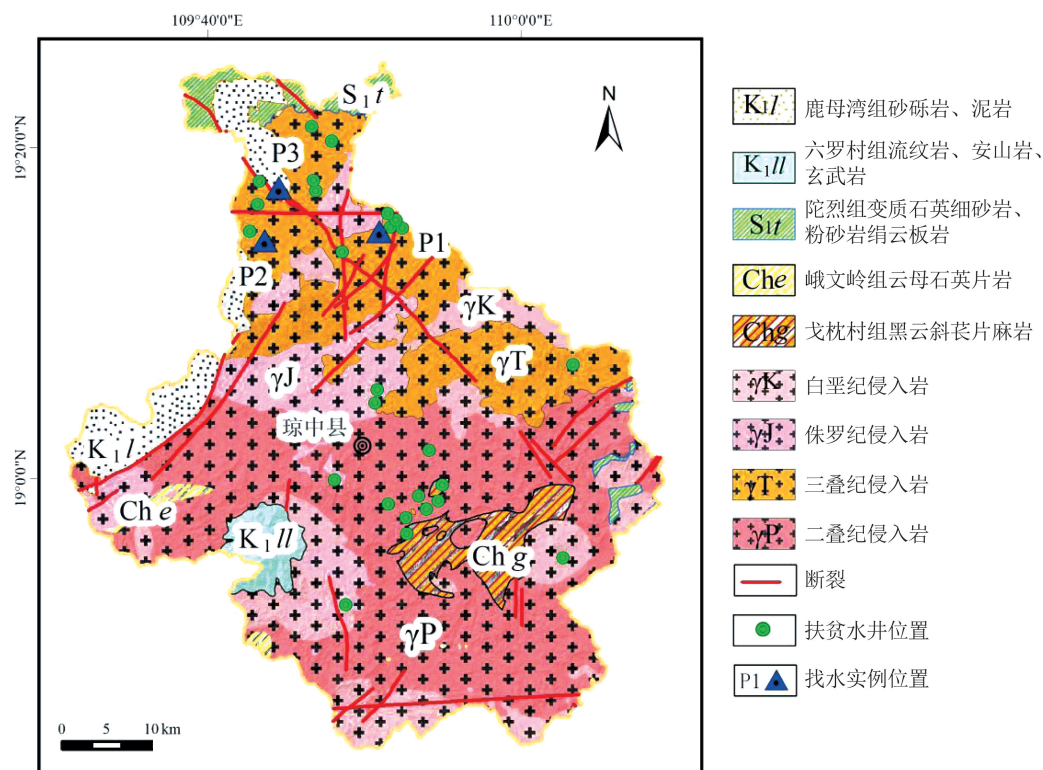


图1 海南省琼中县地质简图及水井分布图

Fig. 1 Simplified geological map showing distribution of well in Qiongzong County of Hainan Province

性、张扭性特征,产生于喜马拉雅等构造运动期,形成时代相对晚,是区的主要控水断裂,因此,探查北西向断裂为该区寻找构造裂隙水的主要方向。

1.3 地下水类型及赋存特征

琼中县地下水赋存介质主要为花岗岩含水岩组。根据含水层结构特征,可将琼中县地下水划分为断裂构造裂隙水、风化壳网状裂隙-孔隙水和接触带型基岩裂隙水3种类型。

花岗岩断裂构造裂隙水主要赋存于断裂构造带和侵入岩脉中,是花岗岩区较重要的地下水类型,呈条带状分布,具有埋藏深、富水好的特征。其富水性除与补给条件密切相关外,主要取决于构造带的力学性质及规模,北西向张性或张扭性断裂为该区主要的控水断裂。

花岗岩风化壳网状裂隙-孔隙水赋存于花岗岩风化壳内裂隙和孔隙内,具有分布广泛、埋藏浅的特征。根据钻孔资料数据统计分析,琼中县花岗岩风化壳钻孔揭露厚度一般为3.0~11.0 m,在沟谷内最大厚度为20.8 m。风化壳厚度受地形地貌、地质构造影响差异性大,在沟谷地带或断裂构造带,风

化壳厚度大,且凡是构造裂隙发育的地方,风化裂隙发育的规模和深度一般较大。风化壳区地下水埋深一般小于5.0 m,风化壳网状裂隙-孔隙含水层厚度往往不大,富水性较差。琼中县农村集中供水大口井主要开采利用风化壳中浅层地下水,每天出水量一般为5~40 m³/d,受季节性影响波动大,在干旱枯水季节,水量严重不足。但在构造带附近,该层地下水与深部断裂构造裂隙水有互为补充的水力联系,深层地下水可以有效补充风化壳浅层地下水,地下水富集性较好。

花岗岩侵入接触带型基岩裂隙水主要分布在花岗岩与沉积岩、花岗岩与变质岩及不同侵入期次花岗岩接触带处,呈带状分布,富水性差异大,花岗岩与沉积岩、变质岩接触带处,尤其是侵入接触断裂破碎带处,富水性较好。不同侵入期次花岗岩接触带处,地下水相对贫乏,富水性一般较差。

2 研究方法及适用范围

本次研究在区域地质资料分析、野外水文地质调查的基础上,部署地球物理勘探工作,圈定找水

靶区,实现精确定孔。地球物理勘探的目的是识别不同物性差异下的低阻异常带,精细刻画构造带空间展布及发育特征。根据探测不同地下水类型和控制不同含水层深度的约束条件,分别选取音频大地电磁测深法、高密度电阻率法、可控源音频大地电磁测深法,识别花岗岩区不同的含水层结构类型,各有优缺点及适用范围。

音频大地电磁测深法具有施工方便、探测深度大等优点,能够详细探测深部断裂破碎带,寻找构造裂隙水和有效划分岩性界线,但分辨率低。高密度电阻率法垂向分辨率高,操作简单,但探测深度有限,对探测浅部地质体具有很好的分辨率和效果^[6],适用于有效深度范围内探测断裂破碎带,寻找构造裂隙水并兼顾基岩风化网状裂隙水。可控源音频大地电磁测深法抗干扰能力强、探测深度大,能够刻画储水构造的空间特征,但是勘探精度不高。

3 电性特征及赋存规律

3.1 断裂构造裂隙水

花岗岩若没有受构造作用影响,岩石结构都很完整,其透水性及含水性都很差,一般可视作相对隔水层^[18]。但在构造作用下,花岗岩裂隙发育处多为地下水富集区。故花岗岩断裂构造裂隙水是花岗岩区最重要的地下水类型,也是找水的重点目标。在电阻率断面上,该类地下水含水层结构的图像一般较直观,具有清晰的含水层边界,多呈现陡降低阻“条带”或“漏斗”状异常曲线。

受新构造运动影响,琼中县发育北东、北西、东西走向断裂。在断裂带内岩体整体呈碎块状,碎块之间的裂隙较大,为地下水富集提供了较好的存储空间,富水性总体好。断层带富水性差异大,各个部位受力性质不同导致裂隙性质亦不同,在同一断裂带附近的钻井,其富水程度变化都很大^[17]。综合对比,琼中地区走向北西的张性或张扭性构造带中,一般地下水富集好,水量较丰富,是寻找地下水的重点方向。因为张性或张扭断裂是在较低围压条件下产生的,裂隙张开度大、延伸性好,当后期没有岩脉或其他物质充填的情况下,其透水性和富水性都较好。不过最终确定水文孔位,仅依靠物探结果是不够的,需要结合水文地质调查资料进行综合分析判断。

3.2 风化网状裂隙-孔隙水

花岗岩风化网状裂隙-孔隙水主要赋存于花岗

岩风化后形成的岩土体裂隙和孔隙中,是花岗岩区普遍存在的地下水类型。在电阻率断面上,该类含水层与洼地地形地貌近似,呈现“洼地”或“凹槽”状低阻电性特征曲线。

该类地下水主要受降雨补给,富水程度主要取决于花岗岩风化程度、风化壳厚度及地形地貌条件的组合,从而形成同一类型地下水不同富集程度的地段。一般认为,花岗岩风化程度越强烈、风化壳厚度越大、花岗岩风化壳土体颗粒越大,富水性会越好。地形地貌也是重要决定条件,负地形对该类地下水富集有利,如谷地、洼地、掌心地等。琼中县降雨较丰富,属于花岗岩地貌区,有大面积的汇水洼地,尤其是有较好的地下水补给条件及汇水条件,地下水补给相对充足,水量相对稳定。花岗岩洼地地貌区,地表水相对丰富,水、岩作用相对强烈,岩土体一般较破碎,风化深度较大,多呈囊状、蜂窝状,其下部基岩面亦呈洼地区,形成具有局部加深的蓄水空间,有利于地下水储,水量通常较丰富,电性特征呈“凹槽洼地型”低阻带。

3.3 接触带型基岩裂隙水

在琼中县除广泛分布花岗岩外,还有长城系俄文岭组(Ch_e)和戈枕村组(Ch_g)变质岩与志留系陀列组(S₁t)、白垩系鹿母湾组(K₁l)和六罗村组(K₁ll)沉积岩,接触带型基岩裂隙水主要赋存于花岗岩与沉积岩或变质岩的接触带位置。在视电阻率断面上,花岗岩与不同地层的接触带界面清晰,接触带型基岩裂隙含水层呈现“层”或“带”状低阻电性特征,低阻带边界与侵入接触带实际位置基本一致。

不同侵入岩边界在琼中县广泛分布,接触带型基岩裂隙水在琼中县也较典型。一般来说,岩相差异越大,接触带裂隙、空隙越发育,地下水富集程度越好。因此,花岗岩与变质岩或沉积岩地层接触带位置多为地下水富水地段,是花岗岩分布区典型的找水打井靶区。因为在花岗岩侵入时期,当岩浆逐渐冷却时,体积逐渐收缩,使冷却后的花岗岩与围岩之间存在裂隙,导致接触带裂隙或接触带断裂破碎带裂隙呈张开的带状分布,具备储存地下水的空间条件,尤其是侵入接触断裂位置,可以形成接触带型蓄水断裂构造带,一般富水性好,水量较大,该类型地下水应引起关注。

4 找水实例

在2019—2020年期间,共部署31口井,其中29

口井成功出水(图 1),成功率达到 93.5%。对 29 口扶贫井地下水类型进行分类(表 1),最大水位降深为 18.99~78.45 m,单井最大涌水量为 50~840 m³/d。根据物探电性特征分析地下水类型,17 口井为断裂构造裂隙水,9 口井为风化壳网状裂隙-孔隙水,3 口井为接触带型基岩裂隙水。其中,榕木村(P1)、南吉村(P2)、毛枧村(P3)分别代表断裂构造裂隙

水、风化壳网状裂隙-孔隙水和接触带型基岩裂隙水典型类型。选取该 3 个缺水村为找水实例,研究花岗岩区含水层电性特征及地下水赋存规律。

4.1 榕木村断裂构造裂隙水找水实例

榕木村位于黎母山镇西北部(图 1, P1 位置),南渡江一级支流腰子河北东走向从该村周边通过。腰子河两岸 1~2 km 范围为河谷基座阶地地貌类型,

表 1 单孔最大涌水量及地下水类型划分

Table 1 The maximum water inflow of a single drilling and the classification of groundwater types

村 名	井深/m	最大水位降深/m	最大涌水量/(m ³ ·d ⁻¹)	区域地层	地下水类型
岸山村	150	36.40	206	二叠纪侵入岩(γP)、长城系戈枕村组(Chg)	接触带型基岩裂隙水
毛枧村	251.82	36.51	720	三叠纪侵入岩(γT)、白垩系鹿母湾组(K ₁ l)	接触带型基岩裂隙水
加刷村	182	32.60	192	三叠纪侵入岩(γT)、白垩系鹿母湾组(K ₁ l)	接触带型基岩裂隙水
深涯村	123	45.60	192	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
深涯村	200	65.00	60	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
上瑞村	179	38.70	192	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
什日宛村	120	43.20	192	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
长征居	220	36.50	480	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
南涯村	202	45.20	268	侏罗纪侵入岩(γJ)	断裂构造裂隙水
干埔村	66	28.60	480	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
大埔村	185	34.70	840	侏罗纪侵入岩(γJ)	断裂构造裂隙水
茅桥	100.66	52.68	150	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
橡胶园	200.16	75.45	187	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
榕木村	168	58.05	603	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
深联队	100	18.99	737	二叠纪侵入岩(γP)	断裂构造裂隙水
山心村	161	29.60	192	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
大丰居	100.2	55.38	241	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
高利埔村	200	60.50	480	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
罗运村	185	30.50	550	侏罗纪侵入岩(γJ)	断裂构造裂隙水
双万村	141	48.10	144	三叠纪侵入岩(γT)	断裂构造裂隙水
头鹿村	160	56.50	60	二叠纪侵入岩(γP)	风化壳网状裂隙-孔隙水
百花村	180	73.30	50	二叠纪侵入岩(γP)	风化壳网状裂隙-孔隙水
槟榔园	213	73.30	57	白垩纪侵入岩(γK)	风化壳网状裂隙-孔隙水
大保村	300.1	36.51	75	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
新进农场五队	120.7	36.31	78	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
新进农场四队	192	78.45	86	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
南吉村	150	32.75	357	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
南吉村	120	51.63	86	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
风流村	171	57.50	132	三叠纪侵入岩(γT)	风化壳网状裂隙-孔隙水
合 计			8087		

为第四系松散堆积层覆盖,堆积层厚度 5~15 m。腰子河两岸少见基岩出露,河谷处为花岗岩出露,岩性为黎母岭侵入单元中粗粒斑(巨斑)状黑云母二长花岗岩。花岗岩岩体节理发育,局部呈劈理状,表明基岩储水条件好,是寻找富水含水层的良好靶区。在本区域采用音频大地电磁测深法,电极距 20 m,叠加次数为 16 次,选择 50 Hz 陷波器进行工频滤波,划分岩性界线、断层延伸和走向,确定含水赋存位置。

从音频大地电磁测深法剖面(图 2)可知,该类含水层具有剖面纵向上浅部电阻率较低,深部中高阻的电性特征,总体呈现低阻到高阻的变化规律。从区域平面上分析,南东向区域地貌呈正地形,电性特征曲线呈高电阻率带,北西区域地貌呈负地形,电性特征曲线呈低电阻率带。根据地质资料及电性特征,综合认为浅部低阻应为覆盖层或风化层的反映,深部中高阻为花岗岩基岩的反映。剖面在 400~500 点号附近,电阻率等值线畸变,纵向呈“条带”和“漏斗”状,电阻率值为 100~200 $\Omega \cdot m$,且向深部延伸。同时,剖面在 660~700 点号之间的电阻率等值线畸变纵向呈“条带”和“漏斗”状,电阻率值为 200~400 $\Omega \cdot m$,且向深部有一定的延伸。2 条纵向低阻条带均在音频大地电磁测深剖面反映中较清晰,根据电性特征,推测“条带”状、“漏斗”状纵向低阻异常带为断裂破碎带的反映。综合对比 2 处低阻带,剖面 400~500 点号处的富水性优于剖面 660~700 点号处。因此,井位定于剖面 435 m 处,钻孔出水量 187 m^3/d ,主要出水段为埋深 100~250 m 断裂构造破碎带。

4.2 南吉村风化网状裂隙-孔隙水找水实例

南吉村位于琼中县黎母山镇西部(图 1, P2 位置),地形相对平坦,周边地质构造不发育,该村大部分大口井和潜水井出水量很小,旱季无法满足该村居民用水需求,是找水打井难度极大的地区。结合该村水文地质条件特点,把寻找地下水的主要方向确定为花岗岩风化网状裂隙-孔隙水。根据花岗岩风化网状裂隙-孔隙的物性特点,采用效果较好的高密度电阻率方法,探查花岗岩区风化壳富水地段,是本次物探工作的目的。本次采用 $\alpha 2$ (温纳-施伦贝谢尔)采集装置,点距 5 m。

根据高密度电阻率物探剖面(图 3),在 370~

550 点号范围出现“凹槽洼地型”低阻带,电阻率值为 18~100 $\Omega \cdot m$,推测该区为深部囊状风化壳地段,具有较厚的风化层和凹形储水结构,以及很好的富水性。从区域平面上分析,在测点 380~800 号范围,地形相对低缓,风化壳厚度相对大,具有较好的储水空间,富水性较好,电性特征曲线呈低电阻率带。因此,井位定在“凹槽型”低阻带中部,井位定于测点 470 点号位置,部署钻孔深度 100 m,钻探出水量达到 241 m^3/d ,主要出水段为 30~80 m 花岗岩风化壳岩土体带,取得良好的效果,是典型的找水打井成功案例。

4.3 毛枧村接触带型基岩裂隙水找水实例

毛枧村位于琼中县西侧的县境部位(图 1, P3 位置),根据区域地质资料分析,该处为花岗岩与白垩系鹿母湾组(K_1l)的接触带位置。为查找接触带型基岩裂隙水赋存范围,部署了多条可控源音频大地电磁测深(CSAMT)探测接触带型基岩裂隙水的富水地段。使用 V8 多功能电法采集系统,最大发射功率 30 kW,采用赤道偶极装置,供电电极距 $AB=1000$ m,收发距 8~10 km,测量电极距 $MN=20$ m,测量频率范围 1~9600 Hz。

由勘探结果可知(图 4),鹿母湾组厚度为 200~350 m,呈西南厚、北东薄,厚度分布不均。该地层岩体总体显示低阻异常,局部包裹高阻岩体。经分析,白垩系鹿母湾组(K_1l)岩性为红色砂砾岩与粉砂质泥岩互层状,粉砂质泥岩为隔水层,局部呈现高阻现象。与之接触的下部花岗岩岩体较完整,富水性差,整体呈高阻体。鹿母湾组与花岗岩接触带,由于岩浆冷却导致接触带断裂破碎带裂隙呈张开的带状分布,透水性和储水性好,沿侵入接触带电性曲线呈“层状”和“带状”分布。

根据毛枧村可控源音频大地电磁测深物探剖面分析,剖面在 0~500、700~870 号点处的富水性较好。从区域平面上分析,侵入接触断裂带呈北西向延伸,与区域断裂分布一致,侵入接触断裂带下盘呈高阻电性特征,侵入接触断裂带上盘呈低阻电性特征。考虑到施工条件,井位定于剖面 410 m 处。钻探深度 251 m,上部 200 m 揭露地层为鹿母湾组,下部 51 m 揭露地层为花岗岩,钻探出水量 720 m^3/d ,主要出水段为 100~230 m 接触带破碎位置。

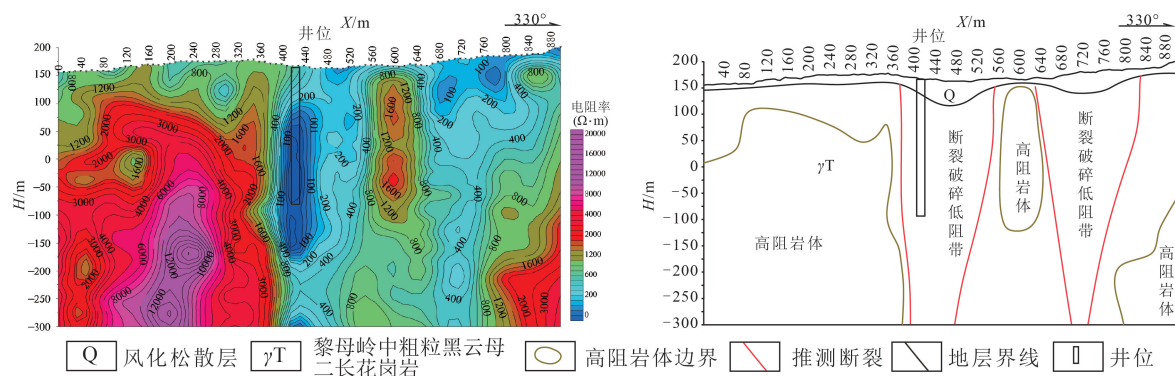


图 2 榕木村音频大地电磁测深法(EH4)物探剖面与地质解译剖面图

Fig. 2 Audio-frequency magnetotelluric geophysical profile and geological interpretation section of Rongmu Village

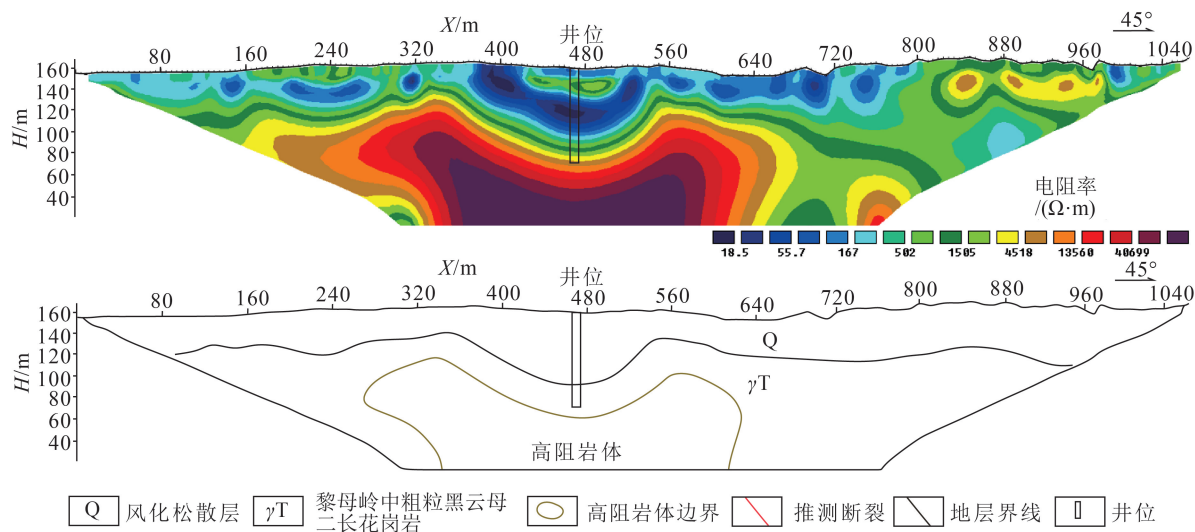


图 3 南吉村高密度电阻率剖面与地质解译剖面图

Fig. 3 The high density resistivity profile and geological interpretation section of Nangji Village

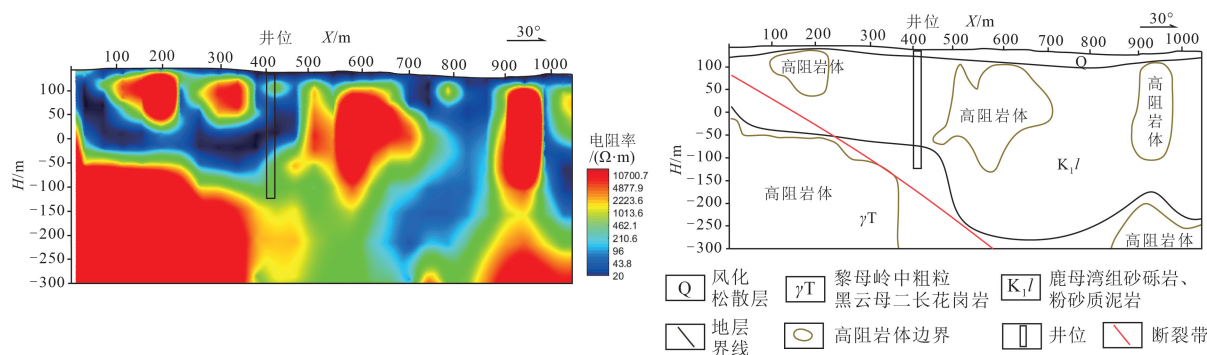


图 4 毛枧村可控源音频大地电磁测深(CSAMT)物探剖面与地质解译剖面图

Fig. 4 The CSAMT geophysical profile and geological interpretation section of Maozong Village

5 讨 论

5.1 找水方法对比

音频大地电磁测深法、高密度电阻率法、可控源音频大地电磁测深法均是利用视电阻率差异来探测地下水富水情况的常规物探方法,各有优缺点。音频大地电磁测深法和可控源音频大地电磁测深法勘探深度较大,均可探测深部断裂构造裂隙水,音频大地电磁测深法探测精度优于可控源音频大地电磁测深法,但可控源音频大地电磁测深法抗干扰能力高于音频大地电磁测深法。高密度电阻率法垂向分辨率高,抗干扰能力介于音频大地电磁测深法和可控源音频大地电磁测深法之间,但是探测深度有限,更多适用于探测花岗岩风化壳网状裂隙-孔隙水和浅部断裂构造裂隙水。

考虑到不同地下水类型、不同含水层结构及深度、不同干扰强度、不同分辨率效果等因素,建议野外工作可采用两种或两种以上的物探方法,进行优化组合探测,以扬长避短。多种物探方法相互补充和验证,可大大提高找水打井的成功率,该方面国内外学者已取得一系列成功案例^[2, 19-20]。

5.2 电性特征曲线差异成因

对不同含水岩组及其围岩电阻率的地球物理特征进行梳理统计(表2),建立了不同地下水类型含水层的电性特征曲线。花岗岩区地下水主要蕴藏在坚硬的花岗岩或围岩接触带的裂隙或孔隙中,由于裂隙和孔隙成因、规模、产状、形态等不同,围岩电阻率值范围为 $200 \sim 9000 \Omega \cdot m$,裂隙和孔隙含水岩组电阻率值范围为 $10 \sim 500 \Omega \cdot m$,电阻率的差异使不同地下水类型的电性特征曲线形态具有一定的差异性。

花岗岩区断裂构造产状多呈陡倾角,沿断裂带裂隙垂直发育,且裂隙密度随着基岩深度向下渐疏,断裂构造带裂隙呈现出“条带状”或“漏斗状”,

地下水沿着断裂构造带赋存于裂隙中,因此,断裂构造带含水层电性资料反映出“条带状”或“漏斗状”明显的低电阻率异常,反之,即是判别该地下水类型为断裂构造裂隙水;接触带型基岩裂隙水与断裂构造裂隙水在电性特征的表现形式上略有不同,它以“层或带”状低阻电性特征为主,划分花岗岩与变质岩或沉积岩地层接触带位置,且在接触带具备储存地下水的空间条件,是判别形成接触带型断裂构造特征的重要标志;而电性资料反映出“洼地”或“凹槽”状的低电阻率异常,一般是在一定的深度范围内存有较厚的低阻层结构,相当于下部为隔水底板,而“洼地”或“凹槽”型风化壳具有较好的富水性,它显示出典型的风化网状裂隙-孔隙水的电性特征,反之亦然。

6 结 论

(1)琼中县花岗岩区地下水分布不均,找水难度大。地下水富集受地形地貌、地质构造、地层岩性、岩石风化程度、侵入接触关系等多种因素的控制。根据含水层结构特征,可将琼中县花岗岩区地下水划分为断裂构造裂隙水、风化壳网状裂隙-孔隙水和侵入接触带型基岩裂隙水3种类型。系统地分析了3种地下水类型的含水层电性特征及赋存规律,成功破解了琼中县花岗岩区找水难题。

(2)琼中县花岗岩区不同的地下水类型具有不同的赋存规律。断裂构造裂隙水主要赋存于断裂构造破碎带中,尤其是走向北西的张性或张扭性构造带中,一般富水性好,水量大;风化壳网状裂隙-孔隙含水层分布普遍,多赋存于沟谷或山间凹谷地貌的花岗岩风化壳中,一般富水性差,水量小,在风化强烈、巨厚的囊状凹槽型风化壳中,富水性较好;接触带型基岩裂隙水主要赋存于花岗岩与沉积岩、花岗岩与变质岩、不同侵入期次花岗岩接触带上,富水性差异大。花岗岩与沉积岩、变质岩接触带处,

表2 不同地下水类型含水岩组地球物理特征

Table 2 Geophysical characteristics of water-bearing rock formations of different groundwater types

地下水类型	电阻率值范围/($\Omega \cdot m$)		电性特征曲线形态
	围岩	含水岩组	
断裂构造裂隙水	400~9000	50~500	边界清晰,呈陡降低阻“条带”或“漏斗”状异常电性特征曲线
风化网状裂隙-孔隙水	200~5000	10~150	呈“洼地”或“凹槽”状低阻电性特征曲线
接触带型基岩裂隙水	400~7000	100~400	呈“层”或“带”状低阻电性特征曲线

富水性较好。不同侵入期次花岗岩接触带处,地下水贫乏,富水性较差。

(3)花岗岩区不同的地下水类型和含水层结构呈现出不同的电性特征。在电阻率等值线断面上,花岗岩断裂构造裂隙含水层电阻率值为 $50\sim 500\ \Omega\cdot\text{m}$,呈现为陡降低阻“条带”或“漏斗”状异常电性特征曲线;花岗岩风化壳网状裂隙-孔隙含水层电阻率值为 $10\sim 150\ \Omega\cdot\text{m}$,呈现为“洼地”或“凹槽”状低阻电性特征曲线;接触带型基岩裂隙含水层电阻率值为 $100\sim 400\ \Omega\cdot\text{m}$,呈现为“层”或“带”状低阻电性特征曲线。

致谢:论文在撰写过程中得到中国地质大学(武汉)谢先军教授和陈剑文副教授的指导,中国地质调查局水文地质环境地质调查中心张福存教授提出了宝贵建议,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 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,(3): 46-48.
- [2] 田蒲源,朱庆俊.综合物探在花岗岩严重缺水地区地下水勘查中的应用[J].地下水,2012,(3): 125-127.
- [3] 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.
- [4] Schirov M, Legchenko A, Creer G. A new direct noninvasive groundwater detection technology for Australia[J]. Explor. Geophys., 1991, 22: 333-338.
- [5] Shen X, Liu L, Li P. Determining water well sites based on electrical structure in Taobei District of Baicheng[J]. Global Geology, 2020, 23(3): 173-179.
- [6] Naziya J, Singh N P. Identification of fracture zones for groundwater exploration using very low frequency electromagnetic (VLF-EM) and electrical resistivity (ER) methods in hard rock area of Sangod Block, Kota District, Rajasthan, India [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2018, 7: 195-203.
- [7] 杨剑,王永华,焦彦杰,等.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.
- [8] 吴璐苹,石昆法,李荫槐,等.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.
- [9] Chen J, Li Z, Tian B, et al. Using the CSAMT method to predict deep mineralisation of copper and molybdenum: a case study of the Zhongxingtun area in Inner Mongolia, China [J]. Exploration Geophysics, 2020, 51(2): 203-213.
- [10] 潘玉玲,贺颢,李振宇,等.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.
- [11] Pan Y, Jean B. Surface nuclear magnetic induction system and its application in hydrogeological investigations [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2000, 9(2): 37-43.
- [12] 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.
- [13] 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]. J. Appl. Geophys., 2008, 66: 104-117.
- [14] 李慧杰,朱庆俊,李伟,等.山东临朐新生代玄武岩地下水赋存规律及电性特征[J].南水北调与水利科技,2012,10(6): 65-69.
- [15] 刘伟朋,卢放,韩振,等.阜平县太古界变质岩区地下水的赋存规律与电性特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(6): 170-177.
- [16] 李巨芬,李伟,冯庆达,等.山东临朐盆地新构造运动特征及其对地下水的控制作用[J].水文地质工程地质,2020,47(1): 28-36.
- [17] 邓启军,李伟,朱庆俊,等.河北坝上张北县玄武岩区蓄水构造特征与找水实践[J].地质通报,2020,39(12): 1899-1907.
- [18] 黄道顺.花岗岩裂隙水的赋存特征及找水要点[J].矿产保护与利用,2005,4: 51-54.
- [19] 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.
- [20] 李国占,王璇.综合物探在花岗岩地区找水应用效果[J].勘察科学技术,2009,4: 55-57.