

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.
DOI: 10. 11932/karst2018y10

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

李 富, 邓国仕, 袁建飞, 王德伟, 唐业旗, 周一敏

(中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081)

摘 要: 乌蒙山贫困缺水地区水资源严重缺乏, 找水需求大、难度大。为确定 ZK12 探采结合井位置, 本文首先分析了工区找水环境因素的地层时代、含水介质类型、构造背景、水源条件和水动力条件等 5 个条件; 其次, 对富水特征的含水岩组、蓄水构造和富水地貌进行研究; 最后, 重点分析地球物理特征找水因素, 介绍了视电阻率联合剖面法、大地电磁测深法、瞬变电磁法、激电测深和地球物理测井等“多方法”应用效果, 通过视电阻率、视极化率、衰减度、半衰时等“多参数”, 确定断层裂隙水的地球物理特征, 建立由浅入深的“多层次”地球物理模式。最终, 创新性提出了乌蒙山连片贫困缺水地区重点村镇的“多方法、多参数、多层次”地球物理找水模式, 克服单一物探方法找水的局限性, 精准定井位, 对地下水勘查起到示范作用。

关键词: 大地电磁测深; 瞬变电磁测深; 激电测深; 视电阻率测井; 探采结合井

中图分类号: P633

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2019)03-0344-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

乌蒙山片区地跨云南、贵州、四川三省, 共有 39 个市县, 总人口达 2 000 多万, 属严重缺水地区。《乌蒙山连片贫困缺水地区 1: 5 万水文地质调查》项目的任务之一就是水文、环境地质调查, 解决制约当地经济发展的瓶颈——水资源短缺问题。

近几年来, 我国运用电法勘探手段寻找山区地下水资源的技术已日趋成熟, 且电法勘探分支方法的多样性基本能够满足不同深度含水地质体的勘探要求。如核磁共振法(SNMR)和高密度电阻率法(ERT)能够有效探测浅部 150 m 内的含水层分布^[1-11]; 常规电阻率法、时间域激电法(TDIP)能够识别地下约 300 m 内的含水地质体^[12-16]; 大地电磁法(MT)、瞬变电磁法(TEM)的有效勘探深度可达几百至上千米^[17-23]。通过物探方法找水的目的: 一是要对工作区宏观地质结构构造进行探测; 二是通过不同比例尺

的物探找水定井技术, 确定勘探孔、开采孔的具体位置。目前, 国内外找水定井的物探方法较多, 在不同地区, 应用不同的物探方法积累了许多成功的经验, 也吸取了不少失败的教训。

找水模式是指某一类水井或靶区的标准形式, 它能够描述或解释与找水定井有关的地形、地貌以及水文地质等各种复杂地质现象, 最终通过对大量水井或靶区特性的综合分析、概化而成^[24-27]。本文针对断层破碎带的 9 个找水因素——环境因素(5 个方面)和富水特征(4 个方面), 分析探采结合井成井的有利条件, 重点介绍地球物理特征中视电阻率联合剖面法、瞬变电磁法、大地电磁测深法、激电测深和测井等 5 种方法在普格县花山乡干田坝村的应用效果; 基于此, 提出了适合寻找断层裂隙水的地球物理综合探测找水模式, 避免了采用单一物探方法找水的局限性, 提高了对含水层的定位精度。经钻探验证, 该方法组合能有效识别地层、确定含水层深度, 总结的经验可

基金项目: 中国地质调查项目“乌蒙山连片贫困缺水地区 1: 5 万水文地质调查”(DD20160286); 国家自然科学基金项目“川西鲜水河断裂带典型地
热异常区热流体同位素及指示意义的研究”(41502245)

第一作者简介: 李富(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环方面地球物理方法研究。E-mail: lifucumt2008@163.com。

收稿日期: 2018-04-26

为类似地区开展地下水勘查提供借鉴。

1 断层破碎带的找水因素—环境条件、物性特征

工作区位于四川省凉山彝族自治州普格县,本文涉及的“探、采”结合井位于该县的花山乡干田坝村,当地群众生产、生活用水主要靠溪沟、泉水解决,长期得不到保障,由于扶贫移民搬迁,使得地势相对平缓的村镇人口剧增,原有水资源已远远不能满足群众的饮水需求,寻找新的供水水源刻不容缓。

1. 1 地层时代

工作区地层主要有二叠系峨眉山玄武岩、三叠系

白果湾组、侏罗系益门组和第四系(图 1),其中,含砂岩地层具备找水有利条件。二叠系峨眉山玄武岩分两段:一段为致密状玄武岩、杏仁状玄武岩、斜斑玄武岩组成二段底部为玄武质角砾凝灰岩、角砾集块岩等,上部为杏仁状玄武岩、斜斑玄武岩等。三叠系白果湾组岩性为为两段,一段为中—厚层状复成分砾岩、粗—细粒长石石英砂岩、石英砂岩夹中—厚层状粉砂岩、粉砂质泥岩,二段为中—厚层状细粒长英砂岩,中—厚层状粉砂岩、泥质粉砂岩夹泥岩、页岩或煤线。侏罗系益门组为泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩夹少量中—厚层状粗—细粒长石石英砂岩,底部可见厚约 30 cm 的砾质粗粒长英砂岩。第四系地层以残坡积块碎石土为主。

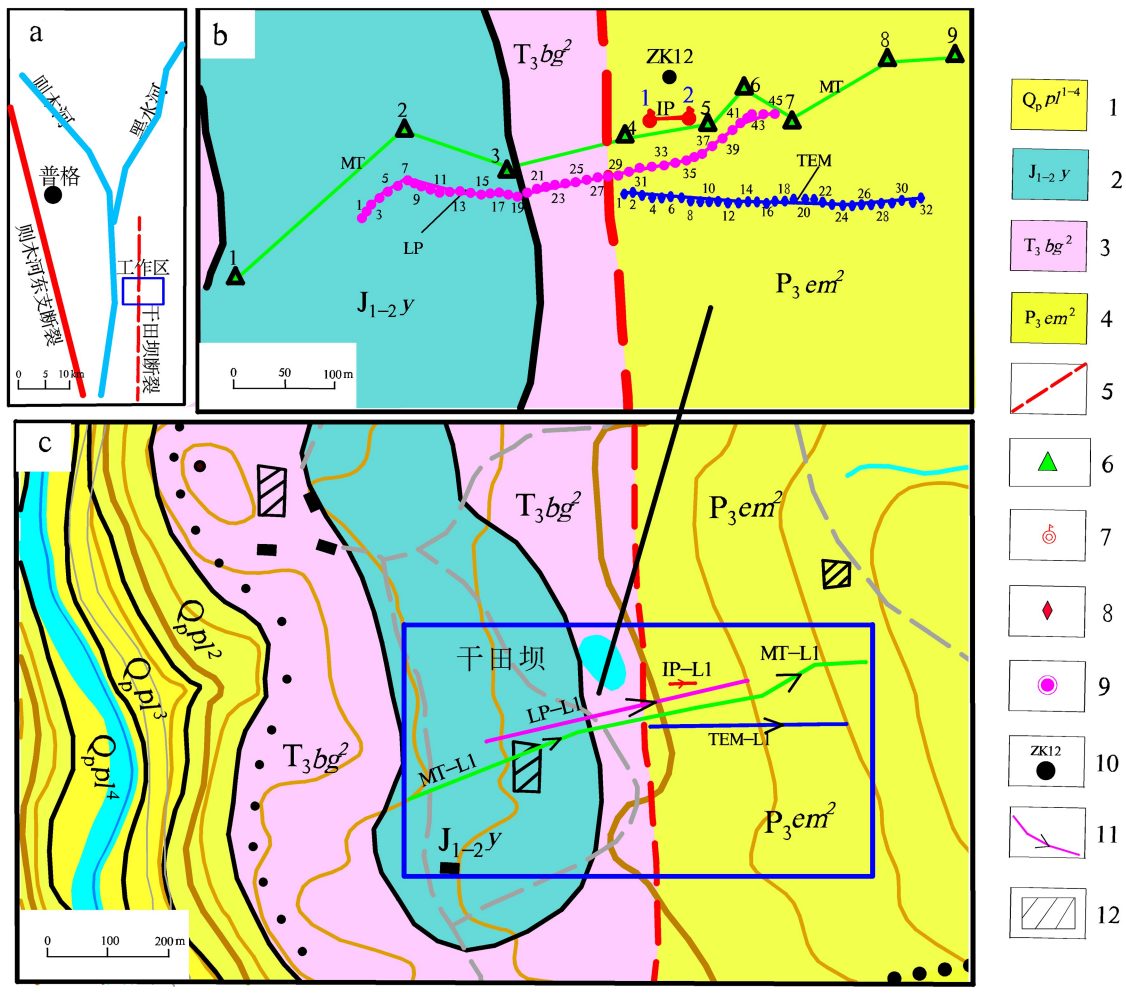


图 1 普格县花山乡干田坝村综合地球物理方法实际材料图
Fig. 1 Diagrams showing integrated geophysical methods layout and geological sketch at Gantianba village, Huashan township , Puge county
(a. 工区位置示意图, b. 综合地球物理测点位置图, c. 工区地质简图)

1—第四系 2—益门组 3—白果湾组二段 4—峨眉山玄武岩组 5—性质不明断层 6—大地电磁测深点 7—激电测深点 8—瞬变电磁测点 9—视电阻率联合剖面测点 10—钻孔位置及编号 11—物探测线 12—居民点

1.2 含水介质类型

本区含水地层主要为三叠系白果湾组和侏罗系益门组,含水层以粉砂岩、砂岩为主,富水性好,对找水非常有利;其次为断层角砾岩,其富水性一般;第四系残坡积块碎石土含水性弱,属松散层孔隙水。

1.3 构造背景

由 1:5 万普格县幅地质图可知,该区构造主要由则木河和黑水河两条主要断裂、中梁子和甘天地两个规模较大的宽缓向斜和一个紧闭洛乌沟背斜组成。ZK12 探采结合井位于黑水河分支断裂—干田坝断层破碎带上,断层破碎带及其附近裂隙发育段为主要含水层。干田坝村子周边均被第四系覆盖,根据地面地质调查,推测干田坝断层走向南北向,长约 6.4 km,东侧为峨眉山玄武岩组,西侧为三叠系白果湾组、侏罗系益门组,推测该断层为一正断层,为有利找水靶区。

1.4 水源条件

ZK12 探采结合井位于黑水河左岸斜坡中下部宽缓地段,汇水条件好,汇水面积较大,为地下水补给提供了良好的条件,水源条件以远(或近)距离侧向透

流补给为主,少量为当地降水入渗补给,地貌上具备有利汇水条件。

1.5 水动力条件

该探采结合井处于补给—径流区之间,水动力条件较好。补给来源的大气降水、冰雪融水在缓坡上汇集之后,沿断裂带内裂隙、孔隙下渗补给到地下水。ZK12 探采结合井位于干田坝断层带导水裂隙和孔隙中,地下水沿断裂带东侧相对集中径流向西侧,最终向低处的黑水河径流、排泄。

1.6 岩石(地层)物性特征

经过资料收集与物性测试(表 1),测区第四系残坡积块碎石土黏土、页岩、泥岩、粉砂岩处于低阻视电阻率区,平均视电阻率值小于 $300 \Omega \cdot \text{m}$;砂岩处于中阻视电阻率区,平均视电阻率值 $300 \sim 700 \Omega \cdot \text{m}$;玄武岩处于高阻视电阻率区,视电阻率值大于 $3\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。测区的泥岩、砂岩处于低视极化率区,平均视极化率值小于 1.5%;玄武岩为中等视极化率,平均视极化率值 1.7%;第四系残坡积块碎石土黏土、页岩、粉砂岩处于高视极化率区,视极化率值大于 2%。

表 1 工作区岩石物性统计表

Table 1 Statistical petrophysical properties in study area

岩性	样品数/件	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$			极化率/%		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
页岩	15	122.1	39.7	78.0	3.91	1.31	1.94
泥岩	15	365.6	149.8	247.2	2.04	1.11	1.43
粉砂岩	13	332.3	192.7	260.1	2.53	1.27	2.02
砂岩	34	1 699.2	177.9	653.5	2.06	0.99	1.30
玄武岩	18	5 374.4	2 230.1	4 020.7	2.57	1.01	1.69

完整砂岩表现为中等视电阻率、低视极化率的特征,粉砂岩含水层表现为低视电阻率、高视极化率特征。本区各类岩石之间电阻率、极化率特征差异明显,为综合地球物理方法找水提供了理论依据。

2 断层破碎带的找水因素—富水特征

2.1 含水岩组

含水层是能够透过并给出相当数量水的岩层,如砂土、砂岩等;隔水层是不能透过与给出水或透过与给出的水量微不足道的岩层,如裂隙不发育的基岩、页岩、板岩、致密黏土等。工作区含水岩组以粉砂岩、砂岩为主,为很好的含水层,对找水非常有利;其次为断层角砾岩也是好的含水层。工作区的页岩、泥岩为

隔水层。

2.2 蓄水构造

构造裂隙是在地壳运动过程中岩石在构造应力作用下产生的,它是所有裂隙成因类型中最常见、分布范围最广、与各种水文地质工程地质问题关系最密切的类型;具有方向性,大小悬殊,分布不均一。工作区蓄水构造为断裂旁侧蓄水构造,对找水非常有利。

2.3 富水地貌

地貌乃是一个地区内外力综合作用的产物;在山区,它反映了岩性、地质构造与地形的成因联系。地貌对地下水的补给,径流与排泄,以至水量水质的变化,都有相当大的控制作用。工作区富水地貌为东高、西低,探采结合井位于山体缓坡地带,对找水基本有利。

3 物探方法与数据采集参数

本次确定探采结合井位置采用了视电阻率联合剖面、大地电磁测深、瞬变电磁测深和激电测深等 4 种地面物探方法。

视电阻率联合剖面法采用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 多功能电法仪,剖面共布设 45 个测点,点距 10 m,走向近东西,AB/2=100 m,MN/2=20

m,无穷远极距大于 500 m。

大地电磁测深法采用美国生产的 EH-4 电导率成像系统,共布设 9 个测点,点距 40~60 m,电极距为 20 m,张量模式测量,采集频率 10 Hz~100 kHz。

瞬变电磁测深法采用澳大利亚 SM24 瞬变电磁仪器,共布设 32 个测点,点距 10 m,工作方式采用大定源装置,发射框 200 m×400 m,接收探头有效面积为 10 000 m²,发射电流 8.1 A。

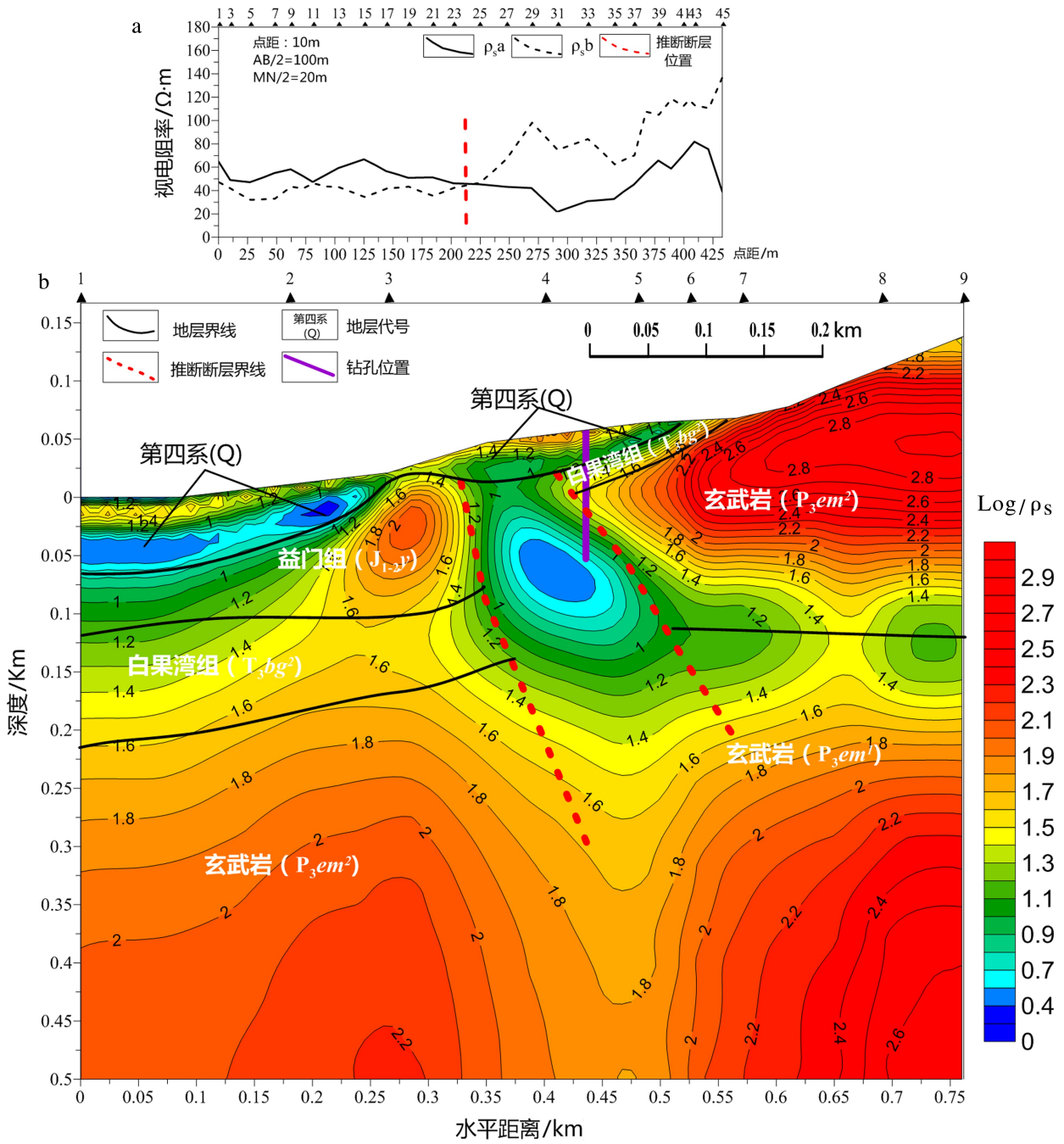


图 2 ZK12 探采结合井联合剖面(a)与大地电磁测深(b)探测成果图
Fig. 2 Diagrams showing combined profile method(a) and magnetotelluric sounding method(MT) (b) results at drilling site(ZK12)

激电测深法采用重庆地质仪器厂生产的 DZD—6A 多功能电法仪,共布设 2 个测点,点距 40 m,采用对称四极测量方式,开展密集型跑极方式,MN/2 以 2 m 的增量逐渐增加,最大 MN/2=90 m,为保证数据准确性,重复测量 3 次;供电时间 16 s,正供电、负供电各 4 次,延时 200 ms,测量参数有视电阻率、视极化率 M1~M6、衰减度、偏离度、综合参数等。

4 断层破碎带的找水因素—地球物理特征及钻探验证

根据探采结合并定井的思路,在普格县花山乡干田坝村布署“多层次”物探方法,工作先后顺序为:视电阻率联合剖面→大地电磁测深→瞬变电磁测深→激电测深→地球物理测井,最后钻探验证。

4.1 视电阻率联合剖面法

根据综合地球物理探测成果图(图 2a)可以看出,剖面低阻视电阻率异常特征明显,剖面视电阻率值变化范围为 26~155 $\Omega \cdot m$,在剖面 21 号测点处出现低阻“正交点”,视电阻率为 50 $\Omega \cdot m$,推断为隐伏断裂电性异常,初步明确隐伏断裂位置,为后期物探方法的布置指明了方向。

4.2 大地电磁测深法

根据综合地球物理探测成果图(图 2b),剖面中高、低阻视电阻率异常特征明显,视电阻率值变化范围 1~3 000 $\Omega \cdot m$ 。大地电磁测深反演结果清楚地揭示了第四系黏土层、断层破碎带、峨眉山玄武岩、益门组泥质粉砂岩、白果湾组石英砂岩和粉砂岩等岩性界线和厚度以及各地层之间的接触关系,确定了断层破碎带规模和产状(表 2);由于大地电磁测深 3 号测点与 4 号测点之间距离过大,推测的断层宽度精度较低,还需其他方法进行详细探测。

表 2 大地电磁、瞬变电磁和激电测深反演结果及推断成果表

Table 2 Inversion results and geological interpretation of magnetotelluric sounding method(MT), transient electromagnetic method(TEM) and induced polarization sounding(IP)

方法	异常特征/ $\Omega \cdot m$	异常位置/m	异常深度/m	物探解释
大地 电磁 测深	低阻视电阻率异常(1~50)	剖面 0~520	10~60	第四系黏土层
	中低阻视电阻率异常(10~80)	剖面 0~350	20~120	益门组泥质粉砂岩
	中阻视电阻率异常(40~200)	剖面 0~380	100~230	白果湾组石英砂岩、粉砂岩
	高阻视电阻率异常(200~600)	剖面 0~410	170~500	峨眉山组二段玄武岩
	低阻视电阻率异常(4~70)	剖面 350~550	20~300	断层破碎带
	中阻视电阻率异常(40~200)	剖面 400~600	0~45	白果湾组石英砂岩、粉砂岩
	高阻视电阻率异常(200~1 000)	剖面 450~760	0~130	峨眉山组二段玄武岩
	高阻视电阻率异常(200~800)	剖面 410~760	130~500	峨眉山组一段玄武岩
瞬变 电磁 测深	中高阻视电阻率异常(400~1 000)	剖面 0~310	0~15	白果湾组石英砂岩、粉砂岩
	高阻视电阻率异常(2000~10 000)	剖面 0~310	15~125	峨眉山组二段玄武岩
	低阻视电阻率异常(1~100)	剖面 0~310	120~150	峨眉山组一段玄武岩
激电 测深 法	视电阻率测深曲线出现低阻与高阻拐点,平均值 52.8 $\Omega \cdot m$ 。	1 号测点	AB/2=18、48、108	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	视极化率测深曲线在出现相对高值拐点,平均值 1.04%。	1 号测点	AB/2=24、60、99	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	视衰减度曲线出现相对高值拐点,平均值 0.4%。	1 号测点	AB/2=30、60、108	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	视半衰时曲线出现相对高值拐点,平均值 1.3 s。	1 号测点	AB/2=30、60、108	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	偏离度曲线出现相对高值拐点,平均值 6.1%。	1 号测点	AB/2=18、36、90、 126、180	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	激发比曲线出现相对高值拐点,平均值 0.019%。	1 号测点	AB/2=30、60、108	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组
	视金属因子曲线出现相对高值拐点,平均值 10 ($10^{-3} \cdot mV^{-1}$)。	1 号测点	AB/2=30、42、99	第四系/益门组/白果湾组/峨眉山组

4.3 瞬变电磁测深法

为避免断层西侧高压线对探测结果的干扰,将瞬变电磁测深布置在断层的东侧、对找水有利的靶区—

一断层上盘,并对地层进行精细分层。根据综合地球物理探测成果图(图 3),剖面中、高阻视电阻率异常特征明显,视电阻率值达 $10^4 \Omega \cdot m$ 。由表 2 可看出,

剖面浅部为中、高阻视电阻率异常特征,中部为高阻视电阻率异常特征,深部为低阻视电阻率异常特征。地层厚度变化总体特征与大地电磁测深探测结果基本一致,两者在玄武岩一段、二段接触部位均出现低阻异常,是否属于富水块段,需要开展激电测深工作进一步验证。

4.4 激电测深法

结合含水岩组的地质特征,探采结合井位应布设在砂岩较厚、且能揭露断层破碎带的位置。基于上述资料分析,在大地电磁测深 MT-L1 测线 4~5 号测点之间,开展对称四极的激电测深工作,进一步识别出富水段。

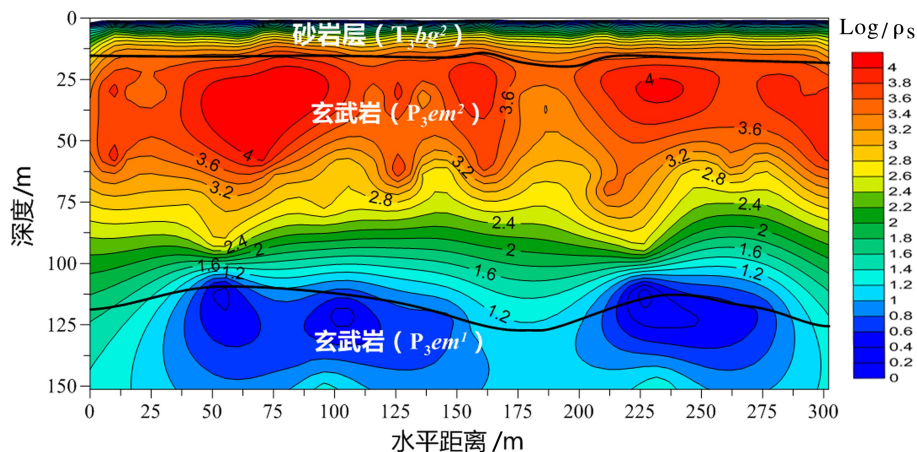


图3 ZK12探采结合井瞬变电磁测深探测成果图

Fig. 3 Transient electromagnetic sounding(TEM) results at drilling site(ZK12)

根据1号激电测深点的视电阻率、视极化率、衰减度、半衰时、偏离度值、激发比值和视金属因子等7个参数进行综合分析(表2),视电阻率值拐点值分别为 $65 \Omega \cdot m$ 、 $53 \Omega \cdot m$ 、 $45 \Omega \cdot m$,平均值为 $52.8 \Omega \cdot m$;视极化率拐点值分别为 1.1% 、 1.1% 、 1.4% ,均大于平均值 1.04% ;衰减度拐点值分别为 0.5% 、 0.5% 、 0.47% ,均大于平均值 0.4% ;半衰时拐点值分别为 $2.1 s$ 、 $1.9 s$ 、 $1.7 s$,均大于平均值 $1.3 s$;偏离度拐点值为 9.5% 、 6.6% 、 9.5% 、 10.4% 、 9.5% ,大于平均值为 6.1% ;激发比曲线拐点值分别为 0.02% 、 0.022% 、 0.042% ,大于平均值 0.019% ;视金属因子曲线拐点值为 $9.5 \times 10^{-3} \cdot mV^{-1}$ 、 $11 \times 10^{-3} \cdot mV^{-1}$ 、 $18 \times 10^{-3} \cdot mV^{-1}$,大于平均值 $10 \times 10^{-3} \cdot mV^{-1}$ (表2)。在拟定井位处视电阻率与平均值相当,另外6个参数均大于平均值(图4)。统计以上7种激电测深参数拐点对应的 $AB/2$ 坐标,求平均值后得出: $AB/2 = 25.7$ 、 52.2 、 $104 m$,推断 $25.7 m$ 为第四系与益门组地层界线, $52.2 m$ 为益门组地层与白果湾组地层或断层破碎带界线, $104 m$ 为峨眉山组与白果湾地层分界线。

根据激电测深数据,采用瑞典 RES1D 软件进行一维反演,未建初始模型,采用数据拟合,自动反演,迭代8次,均方误差为 7.9% 时获得最终模型。反演

结果显示,深度在 $24 m$ 处出现视极化率变小,视电阻率增大的拐点;深度在 $49 m$ 处出现视极化率增大,视电阻率变小的拐点;深度在 $93 m$ 处出现视极化率变小,视电阻率增大的拐点;综合分析激电综合参数变化特征,推断深度在 49 、 $93 m$ 两处为主要富水段(图4)。

4.5 综合地球物理测井

测井成果显示,整孔电阻率变化范围 $6.1 \sim 2900 \Omega \cdot m$,平均值为 $353.4 \Omega \cdot m$;自然伽玛极大值为 $13.31 \sim 204.5 API$,均值为 $51.8 API$ 。在钻孔 $72 m$ 附近出现极大值自然伽玛异常,推断该位置对应地层含泥量较高,其余孔段自然伽玛曲线较为平缓。在 $0 \sim 28.06 m$ 段出现较低视电阻率异常,其视电阻率均值约 $80 \Omega \cdot m$,结合钻孔地质编录资料,对应地层岩性为块碎石土。在 $41.06 \sim 47.86 m$ 段出现较低视电阻率异常,其视电阻率均值约 $30 \Omega \cdot m$,结合钻孔地质编录资料,推断该孔段为含水层。在 $88.9 \sim 111.06 m$ 段发生高视电阻率异常,视电阻率均值约 $1143.7 \Omega \cdot m$,结合钻孔地质编录资料,解译地层岩性为玄武岩。测井分层位置 $28.06 m$ 、 $43 m$ 、 $88.9 m$ 分别与激电测深推断的 $24 m$ 、 $49 m$ 、 $93 m$ 三层地质界面基本吻合(图5)。

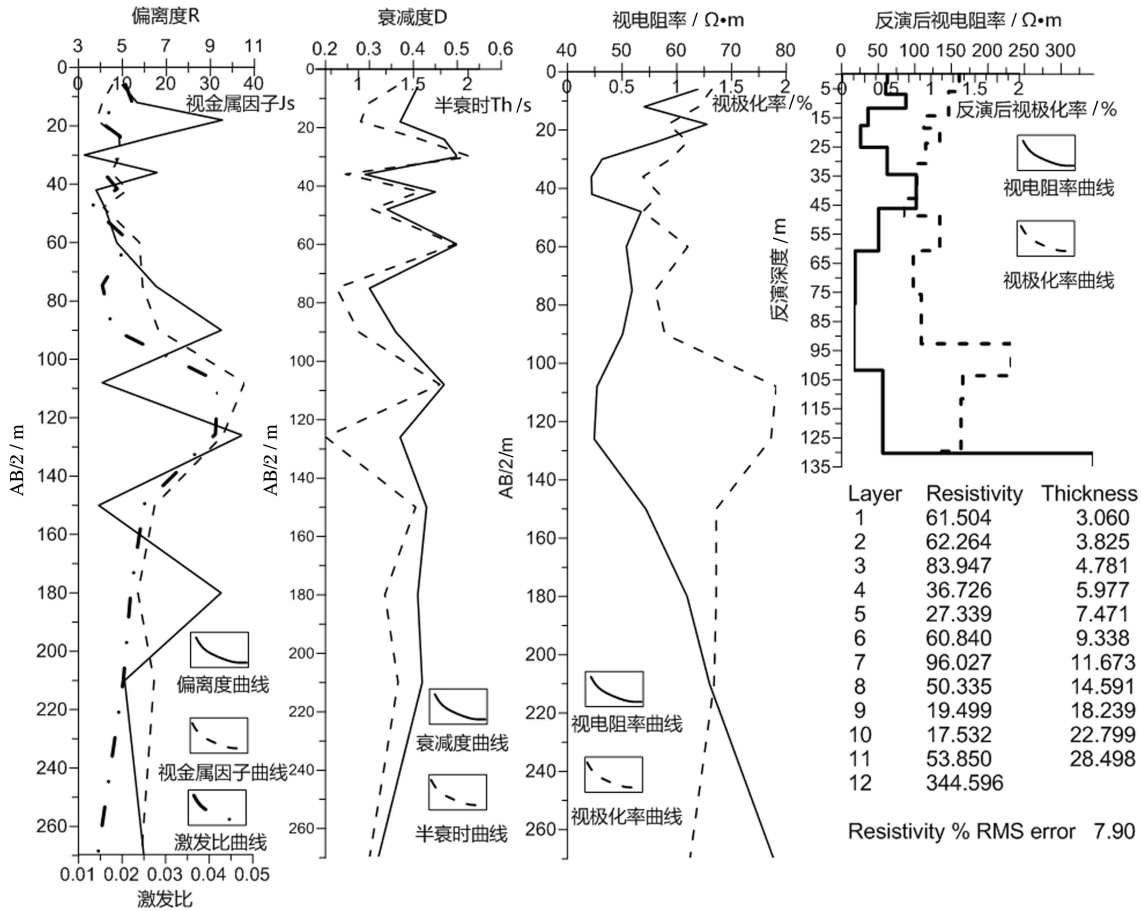


图 4 ZK12 探采结合井激电多参数成果图

Fig. 4 Multi-parameter results of induced polarization sounding(IP) at drilling site(ZK12)

4.6 钻探验证

根据钻探揭露,该钻孔由上至下地层岩性为:0~28.06 m 为第四系松散堆积体残坡积碎石土,该层属第四系松散层孔隙水,为弱含水层;28.06~31.40 m 为粉砂质泥岩,富水性较差,为隔水层;31.40~36.90 m 为砂岩,节理裂隙弱发育,富水性一般,属相对含水层;36.9~40.24 m 为断层角砾岩,富水性一般,属相对含水层;40.24~47.88 m 为砂岩,其中在 41.5~47.88 m 段节理裂隙较发育,可见节理面多处存在水蚀现象,富水性好,出水能力强,为主要含水层;47.88~65.86 m 为断层角砾岩,富水性一般,属相对含水层;65.86~88.88 m 为泥岩,富水性差,属隔水层;88.88~111.43 m 为玄武岩,富水性中等,为次要含水层(表 3)。验证了激电测深推断在 24 m、49 m、93 m 深度的富水性特征,深度误差均小于 4 m,表明激电测深效果较好。探采结合井成井后静止水位为 21.54 m,当降深 $S_{max}=13.91$ m 时,最大涌水量 $Q_{max}=427.2\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,结合当地群众实际用水需求及抽水试验,建议探采结合井允许开采量为 $300\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

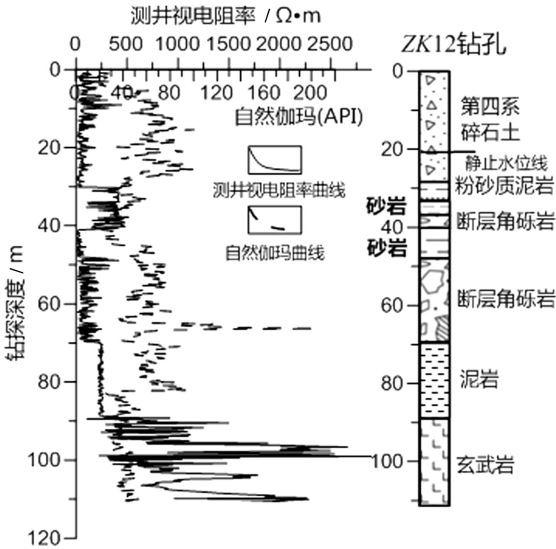


图 5 ZK12 探采结合井测井成果与钻孔验证结果图

Fig. 5 Geophysical logging comparing with drilling data(ZK12)

表 3 ZK12 探采结合井找水有利因素统计表

Table 3 Statistical favorable conditions for potential water supply well selection

找水因素	地层时代	含水介质类型	构造背景	水源条件	水动力条件	含水岩组	蓄水构造	富水地貌	地球物理特征
是否有利	○	●	●	○	●	●	●	○	●
●非常有利 ○基本有利									

5 结 论

本文综合分析了富水断层破碎带找水的有利因素:环境条件(5 个方面)、富水特征(4 个方面)等 9 个方面因素,认为研究区已具备 6 个找水有利因素,最终成功确定了 ZK12 探采结合井的成井位置。

(1)该探采井环境条件中的含水介质类型、构造背景和水动力条件均非常有利于地下水富集;地层时代和水源条件是基本有利地下水富集。

(2)该井富水特征中的含水岩组和蓄水构造均为非常有利条件,富水地貌是基本有利条件;

(3)重点介绍的该探采井富水特征中地球物理特征,采用视电阻率联合剖面、大地电磁测深、瞬变电磁测深法、激电测深、地球物理测井等多种地球物理方法对探采结合井进行综合定位。开展“多参数”激电测量,通过分析视电阻率、视极化率、衰减度、半衰时、高视金属因子、高偏离度、高激发比值等异常,确定了深部断层裂隙水的地球物理特征。开展不同深度“多层次”精细探测:视电阻率联合剖面(50 m)一激电测深(0~150 m)一瞬变电磁测深法(20~300 m)一大地电磁测深(0~500 m)。整体表现富水,其找水地球物理特征非常有利。

最终创新性提出“多方法、多参数、多层次”的综合地球物理找水模式,可有效降低单一物探方法找水带来的多解性或解释的片面性,提高找水的成功率。

到 谢:衷心感谢审稿专家和编辑同志提出的宝贵意见与建议。

参考文献

[1] 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.

[2] 林君.核磁共振找水技术的研究现状与发展趋势[J].地球物理学进展,2010,25(2):681-691.

[3] 孙银行,连捷,武毅.岩溶含水介质充填水和泥识别的地球物理勘查技术探讨[J].中国岩溶,2012,31(4):459-464.

[4] 李富,邓国仕,王德伟,等.乌蒙山区探采结合井位探测物探方法综合研究[J].地质科技情报,2017,36(5):238-243.

[5] 刘伟,甘伏平,赵伟,等.高密度电法与微动技术组合在岩溶塌陷分区中的应用分析:以广西来宾吉利塌陷为例[J].中国岩溶,2014,33(1):118-122.

[6] 程亚平,蒋灵芝,黎柳月,等.综合物探技术探测平果铝厂赤泥堆场岩溶发育特征[J].中国岩溶,2016,35(6):688-698.

[7] 周文龙,吴荣新,肖玉林.充水溶洞特征的高密度电阻率法反演分析研究[J].中国岩溶,2016,35(6):699-705.

[8] 梁海,钟建平,胡向阳.高密度电法在贵州岩溶地区找水中的应用研究[J].地下水,2017,39(6):96-97.

[9] 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):53-57,127.

[10] 刘金涛,胡晓明.高密度电法勘探在岩溶查找中的应用[J].地质科技情报,2003,22(2):100-102.

[11] 郑智杰,甘伏平,曾洁.不同深度岩溶管道的高密度电阻率法反演特征[J].中国岩溶,2015,34(3):292-297.

[12] 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.

[13] 曹金华,李桐林,刘永亮,等.激电和电磁效应对三维复电阻率正演结果的影响研究[J].地球物理学进展,2017,32(2):579-583.

[14] 孙仁斌,楚丽霞,王宁,等.时间域激电测深二维反演在内蒙古兴和盆地贫水区找水勘查中若干案例研究[J].地球物理学进展,2017,32(1):387-394.

[15] 武毅,孙银行,李凤哲.西南岩溶地区不同含水介质地球物理勘查技术[J].中国岩溶,2011,30(3):278-284.

[16] 孟奇猛,李庆仁.物探资料对昆明吴家营水源地岩溶发育研究的有效性[J].中国岩溶,1992,11(4):45-55.

[17] 焦彦杰,吴文贤,杨剑,等.云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析[J].中国地质,2011,38(3):770-778.

[18] 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.

[19] 朱庆俊,李伟,李凤哲,等.广西隆安县地下水储水构造的地质一地球物理模型及其地球物理响应特征分析[J].中国岩溶,2011,30(1):34-40.

[20] 王宇,彭淑惠,王梓澈,等.云南省抗旱井定井论证方法[J].中国岩溶,2013,32(3):305-312.

[21] 余京.综合物探在岩溶断层中找水的应用及其应用[J].地下空间与工程学报,2017,13(s1):442-445.

[22] 李丽辉,王宇.云南省迪庆香格里拉盆地地热资源勘查物探方法的应用[J].中国岩溶,2004,23(3):187-195.

[23] 肖骑彬,蔡新平,徐兴旺,等.应用大地电磁测深勘查北京平谷盆地隐伏含水岩溶系统的结构[J].吉林大学学报(地球科学版),2004(s1):60-64.

[24] 裴建国,谢运球,刘新号,等.河南省缺水山区的基本找水模式[J].中国岩溶,1994,13(3):314-321.

- [25] 王宇,袁道先,杨世瑜. 云南省岩溶水地球物理探测实践[J]. 中国岩溶,2007,26(2):155-162,169.
- [26] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶,2002,21(2):114-119.
- [27] 金权,王晓明,魏继东. 安徽北部岩溶泉分布规律及缺水山区找水方向[J]. 中国岩溶,1989,8(4):311-318.

Comprehensive geophysical model for water prospecting in fault fracture zone: A case study of water supply well siting at Gantianba village

LI Fu, DENG Guoshi, YUAN Jianfei, WANG Dewei, TANG Yeqi, ZHOU Yimin

(Chengdu Geological Survey Center, CGS, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract There is a serious shortage of water resources in the poverty-stricken areas of Wumengshan. On one hand, the demand for water supply is large and on the other hand it is difficult to locate the water sources. In this study, the aquifer environmental factors, water-bearing property and geophysical characteristics were comprehensive analyzed. As a result, borehole ZK12 was sited incorporating with the the analysis of fault zone, and the application of the methods including ground resistivity profile, magnetotelluric sounding, transient electromagnetics, IP sounding and geophysical well logging, etc. The geophysical characteristics for determining fault conductive zone was hence conducted by using the geophysical parameters such as apparent resistivity, apparent polarizability, attenuation, half-life failure, apparent visual metal factor, deviation degree, excitation ratio and etc. from which multiple level geophysical model was established. In this paper, we innovatively put forward the "multi-method, multi-parameter and multi-level" geophysical exploration method for locating critical water bearing zones for the resource demand from key villages and towns in Wumengshan with contiguous poverty and water-shortage, and overcome the limitations of a single geophysical exploration technique in locating the resources and accurate borehole siting. Through examining borehole logging data, it is confirmed that the multiple-method geophysical exploration approach can effectively determine the depth of strata and water-bearing faults, provide experiences for the geophysical exploration for water exploration, as well as play a demonstration role in groundwater exploration.

Key words magnetotelluric sounding, transient electromagnetic sounding, IP sounding, apparent resistivity logging, combined exploration and production well

(编辑 张玲)