

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.

DOI: 10.11932/karst2024y008

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

郑智杰^{1,2,3}, 曾洁^{1,3}, 甘伏平^{1,3}, 陈吉礼⁴, 卢秀华^{1,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009; 3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 4. 广西壮族自治区三〇七核地质大队, 广西 贵港 537100)

摘要: 为探索地球物理方法在碎屑岩地区找水应用的有效性, 文章以云南宣威大路边村为研究对象, 选取高密度电阻率法、联合剖面法、音频大地电磁法对碎屑岩层进行找水研究。结果表明: 三叠系上统飞仙关组(T₃f)碎屑岩富水性中等, 含水性较均匀; 受地面场地狭窄限制, 高密度电法及联合剖面法测线长度有限, 探测深度较浅, 受碎屑岩电阻率小的影响, 其找水应用效果不佳, 在可探测的深度范围内较难识别基岩裂隙等找水有效异常, 需结合其他物探方法甄别异常; 音频大地电磁法找水应用效果相对较好, 具有较高的横向分辨率, 可有效识别碎屑岩中的断裂破碎带及构造裂隙带, 表现为相对低阻异常特征; 视电阻率单支测深曲线能有效分辨不同深度的岩土层结构, 具有较高的纵向分辨率, 对裂隙破碎带有较好指示意义。在地面场地较为狭窄的碎屑岩地区开展找水工作, 音频大地电磁法结合视电阻率单支测深曲线能取得较好效果, 以音频大地电磁法确定碎屑岩地区中的裂隙发育带位置, 以视电阻率单支测深曲线确定裂隙发育带的深度。

关键词: 高密度电阻率法; 联合剖面法; 音频大地电磁法; 视电阻率测深曲线; 碎屑岩; 找水

创新点: 利用联合剖面法、高密度电阻率法及音频大地电磁法对云南宣威大路边村碎屑岩地层找水进行研究, 通过综合物探方法的相互验证, 类比分析探测结果与钻井资料, 探讨各物探方法的适用性。

中图分类号: P642.22; P631.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0432-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

水资源是基础自然资源, 地下水作为水资源的重要组成部分, 在保障居民生活、支持社会发展及维护生态平衡等方面具有不可替代的作用^[1]。目前, 中国仍存在多个缺水自然村, 地下水的勘探和开采与

当地人们的生活息息相关。地球物理勘查是地下水调查与勘探重要方法之一, 近年来, 国内外学者应用不同的地球物理方法寻找地下水并取得了较好效果^[2-9]。地面核磁共振法^[10]和双频激电法^[11]用于花岗岩地区寻找地下水取得了较好效果; 激电测深法和高密度电法组合在红层地区^[12]和花岗岩地区^[13]寻

资助项目: 基本科研业务费项目“采集参数变化对跨孔电磁波CT响应特征的影响研究”(2022002); 广西重点研发计划项目“漓江流域峰丛谷地水资源安全保障关键技术研发与示范”(2020AB22013); 中国地质科学院基本科研业务费项目“雪峰隆起西南缘氮气成因类型及富集规律研究”(JKYQN202372)

第一作者简介: 郑智杰(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 物探方法应用。E-mail: zhengzhijie@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 曾洁(1986—), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 水文地质。E-mail: zengjie@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2023-04-20

找地下水均取得了较好的勘探效果;刘加文等^[14]将自然电场法用于砂砾岩地区寻找地下水;郑智杰等^[15]利用高密度电法在岩溶区开展找水工作,总结出岩溶区的找水模式;薛胜利等^[16]将利用激电测深法用于砂砾石地层寻找地下水;张彪等^[17]利用音频大地电磁法和高密度电法组合在花岗岩地区寻找构造裂隙水并进行了技术方法总结;王丽妍等^[18]总结了高密度电法与音频大地电磁法组合方法在泥质灰岩地区寻找构造裂隙水的勘探效果;康方平等^[19]利用高密度电法、联合剖面法及激电测深法等组合方法在贫水板岩地区找到了优质地下水,解决了当地百姓生活用水难的问题;刘声凯等^[20]利用联合剖面法及高密度电法在赣南宁都县花岗岩地区开展了地下水勘查工作,并结合水文地质勘察,总结出花岗岩地区的找水方法与技术。上述研究中,利用单一物探方法寻找地下水的成功案例相比综合物探组合方法少。目前,大部分找水打井工作位于岩溶区和花岗岩地区^[21-25],碎屑岩地区虽有研究^[26-29],但成井率相较于岩溶区较低。碎屑岩地层富水条件相比碳酸盐岩地层差,含水类型多为裂隙水和层理水,碎屑岩电阻率低,容易对有效物探异常形成干扰,单一的物探方法应用效果不佳。

本文以云南宣威大路边村为研究对象,利用联合剖面法、高密度电阻率法及音频大地电磁法对碎屑岩地层进行找水应用研究,分析单一物探方法的不确定性和多解性及其适用性,通过综合物探方法的相互验证,类比分析探测结果与钻井资料,以期为相同场地、地质背景条件下物探方法的选择提供理论依据,避免方法选择的盲目性,节约时间和成本。

1 研究区概况

1.1 水文地质特征

研究区位于北盘江流域,地势北低南高,地形起伏大,高差 150~250 m,地貌为侵蚀中山槽谷类型。研究区出露地层为三叠系下统飞仙关组(T_1f)紫红、灰绿色粉砂质泥岩、泥岩、砂岩夹灰岩、泥灰岩等,地层倾向南南东,倾角 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。研究区位于田坝向斜西北翼,距离核部约 1 km,该向斜轴 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 走向,核部为三叠系下统飞仙关组(T_1f)地层,两翼为石炭系(C)至二叠系(P)地层。研究区内主要含水岩层为三叠系下统飞仙关组(T_1f)紫红、灰绿色粉砂质泥岩、

泥岩、砂岩地层,含水介质以裂隙为主。该裂隙含水层以碎屑岩、火成岩、变质岩中的非可溶硬质脆性岩层为主,层间裂隙含水层、断裂含水带、风化裂隙含水层普遍存在,裂隙水的埋藏分布受岩层层面及不同岩性地层的组合形式、地质构造控制更加明显。该裂隙含水层在云南省均有分布,出露面积为 $26.38\times 10^4\text{ km}^2$, 占全省面积的 66.95%,具有典型代表性。大气降水沿裂隙、节理入渗补给地下水,径流方向由南向北,最终在槽谷中富集。研究区位于田坝向斜核部附近,节理及裂隙发育,地下水具有较大赋存空间(图 1)。

1.2 地球物理特征

黏土、碎屑岩、砾岩、含水裂隙等介质的电阻率变化值及平均值见表 1。粗砂岩和砾岩呈相对高电阻率值的特征,其他介质电阻率值均很小且差异不大。研究区内含水层为三叠系下统飞仙关组(T_1f),主要为砂质泥岩、泥岩、砂岩夹灰岩、泥灰岩等,含水介质以裂隙为主,随着岩性变化、岩石风化程度等不同,介质的电阻率值会发生改变,研究区内含水层电阻率值一般小于 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

2 研究方法

根据研究区地形、地貌等特点,结合探测对象分布特征及岩土体电性差异,在研究区布置 1 条物探测线,测线方位均为 318° ,测线长度均为 295 m(图 1b),在该测线采用联合剖面法、高密度电阻率法及音频大地电磁测深法测量,测量参数均为视电阻率。

2.1 联合剖面法

联合剖面法是在测线上顺序布置供电电极 A、测量电极 M、N 和供电电极 B,在测线的中垂线方向上布置“无穷远”极 C,距离一般大于 $AB/2$ 距的 5 倍以上,A 或 B 分别与 C 组合,分别供电测量获得视电阻率 ρ_sA 和 ρ_sB 。绘制视电阻率 ρ_sA 和 ρ_sB 的曲线图,通过不同极距的 ρ_sA 和 ρ_sB 的曲线形态(正交点、反交点、同步起伏等)评价地下地质体的导电性,推测地下地质体的产状、地下异常体的空间形态;通过曲线异常段与背景值的相对大小、变化剧烈程度估算地下地质体的位置和宽度。

此次联合剖面法测量点距为 5 m,供电电极 A、B 距离测量点的距离均为 77.5 m($AO=BO=77.5\text{ m}$)。

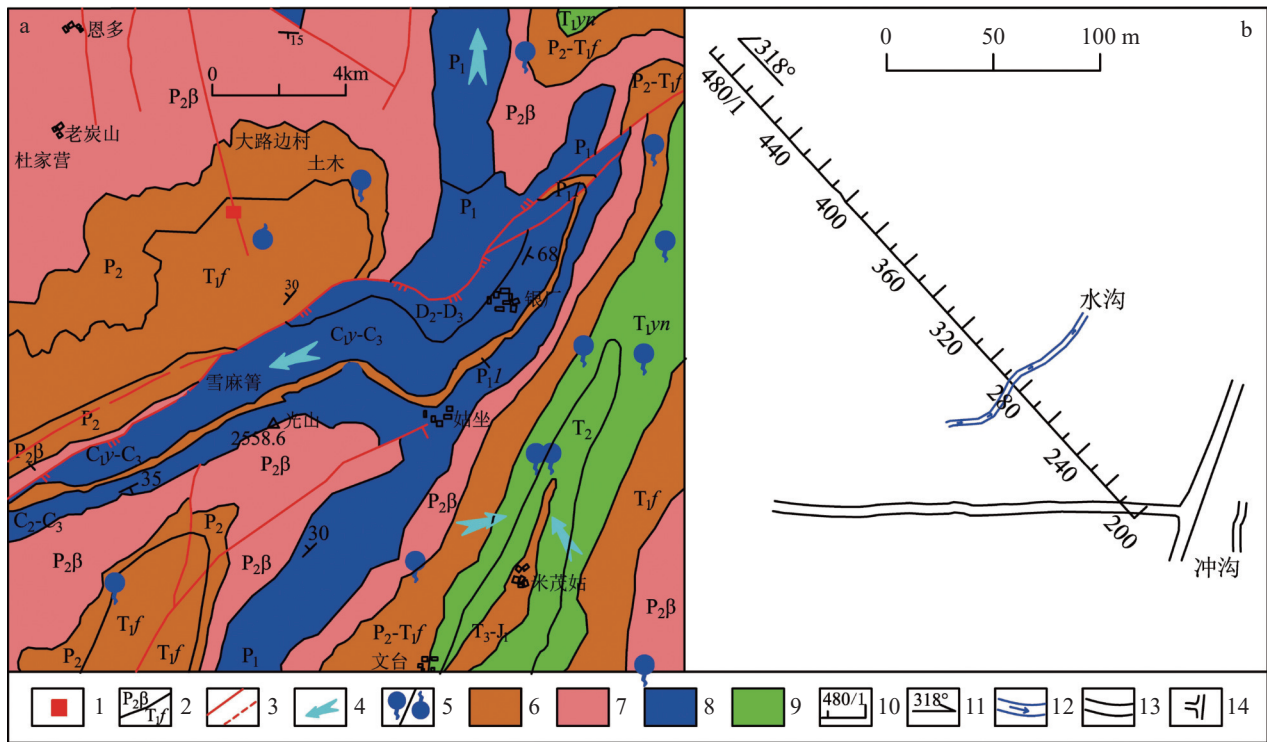


图 1 研究区水文地质简图 (a) 及物探测线布置图 (b)

1. 物探测区 2. 地层及地层界线 3. 查明断层/推测断层 4. 地下水流方向 5. 下降泉/上升泉 6. 碎屑岩裂隙含水层 7. 岩浆岩裂隙含水层 8. 碳酸盐岩岩溶含水层 9. 碳酸盐岩夹碎屑岩岩溶裂隙含水层 10. 测线 (点号/线号) 11. 测线方位 12. 水沟 13. 冲沟 14. 村路

Fig. 1 Hydrogeological map of the study area (a) and line layout map of geophysical prospecting (b)

1. geophysical prospecting area 2. strata and stratigraphic boundaries 3. fault identification/fault prediction 4. direction of groundwater flow 5. descending spring/ascending spring 6. clastic fractured aquifer 7. magmatic fissure aquifer 8. karst aquifer of carbonate rock 9. carbonate rock with karst fissure aquifer of clastic rock 10. survey line (point/line number) 11. survey line orientation 12. ditch 13. gully 14. village road

表 1 岩土层电阻率物性参数表

Table 1 Resistivity parameter of rock and soil layer

介质类型	电阻率变化范围/ $\Omega\cdot m$	电阻率平均值/ $\Omega\cdot m$
黏土	10~100	55
泥岩	10~20	15
粉砂岩、细砂岩	10~100	50
中砂岩	100~250	120
粗砂岩	100~450	280
砾岩	100~410	250
充水充泥裂隙	80~200	60~120

注: 据《广西碎屑岩地区电法找水实例》。

Note: Based on "A case study of water prospecting by electrical method in clastic rock areas of Guangxi".

仪器采用重庆奔腾仪器厂生产的 WGMD-3 型多功能数字直流激电仪。

2.2 高密度电阻率法

高密度电阻率法以介质的电性差异为前提, 采用多道电极和多芯电缆人工建立地下稳定直流电场, 通过程控式多路电极转换器选择不同的电极组合方

式和不同的极距间隔, 实现供电和测量电极的自动跑极、自动供电、自动观测、自动记录、自动计算及自动存储, 以获取地下介质的电阻率分布规律, 进而推断地下的地质结构和构造, 解决水文地质与工程地质问题。

此次勘探选择施伦贝尔($\alpha 2$)装置进行对称四极电测深测量, 测量点距为 5 m, 采集层数为 20 层。仪器采用重庆奔腾仪器厂生产的 WGMD-3 型多功能数字直流激电仪。

2.3 音频大地电磁法

音频大地电磁法是在地面一定范围内测量正交的电磁场分量, 计算视电阻率及阻抗相位, 达到探测不同埋深地质目标体电磁性特征的一种频率域电磁测深方法。视电阻率(ρ_s)计算公式如下:

$$\rho_s = \frac{1}{\omega \mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}$$

式中: μ 为磁导率; $\omega=2\pi/T$, 为电磁场的圆周率(T 为周期); H_y 为 y 方向上的磁场强度; E_x 为 x 方向的电

场强度。

此次数据采集仪器为 EH-4 连续电导率剖面仪, 产于美国 GEOMETRICS 公司。仪器参数设置: 磁棒垂直测线布设 (H_y), 电极沿测线布设 (E_x), 磁棒和电极布设交角小于 3° ; 数据采集方式为标量采集, 点距 10 m, 电极距 20 m; 工作低频段频率为 10~1 000 Hz, 高频段频率为 750~100 000 Hz, 叠加次数为 8 次, 信号增益变化范围为 2~80 db。

3 结果与讨论

3.1 联合剖面法

由图 2 可知, 测区内岩土体电阻率较小, 均小于

200 $\Omega \cdot m$, 视电阻率变化幅度较小, 与表 1 物性参数基本一致, 400~410 m、440~460 m 测点段等局部电阻率变化较大, 受地表碎石土及砾石影响。视电阻率联合剖面的 ρ_s^A 和 ρ_s^B 曲线分异性不明显, 两曲线基本重合, 随极距的增大变化依然不明显, 整个剖面电阻率呈锯齿状变化, 较难提取有用的异常信息。

3.2 高密度电阻率法

由图 3 可知, 浅层段电阻率变化较大 (0~4 000 $\Omega \cdot m$) 且电阻率分布不均匀, 380 m 测点后电阻率值急剧增大, 受地表砾石及碎石土影响。忽略地表砾石及碎石土的影响, 整个断面视电阻率值基本小于 200 $\Omega \cdot m$, 与表 1 电阻率值基本一致, 受限于地表场

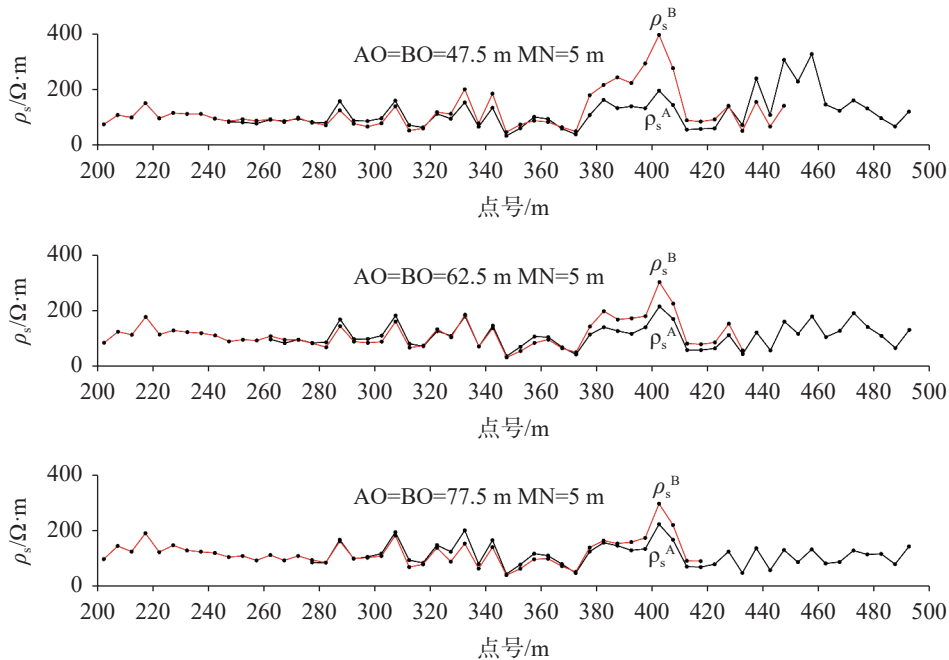


图 2 联合剖面法视电阻率曲线图

Fig. 2 Apparent resistivity curve of combined profile method

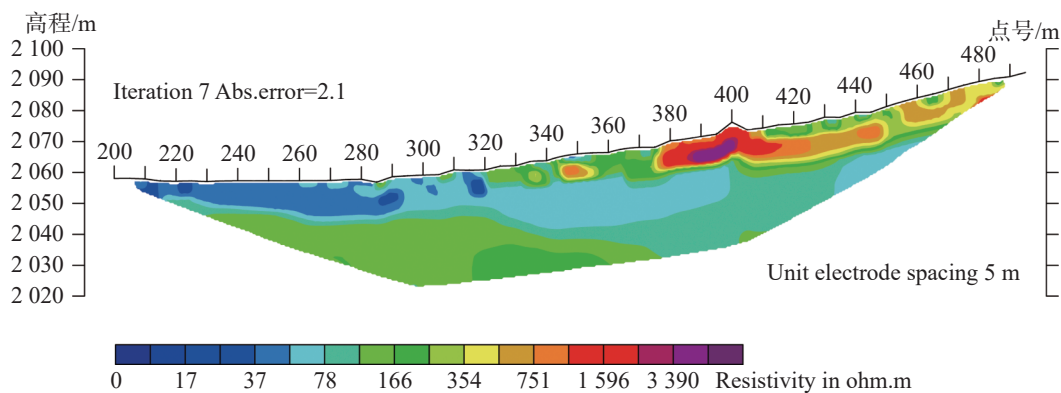


图 3 高密度电阻率法视电阻率反演等值线断面图

Fig. 3 Contour section of inversion of apparent resistivity by high-density resistivity method

地条件限制,测线长度及探测深度有限,在可探测的深度范围内,视电阻率值分布较为均匀且变化范围较小,测区内电阻率无明显异常变化,较难辨别裂隙、破碎带等有效异常。

3.3 音频大地电磁法

由图 4 可知,断面图中浅部电阻率较小,埋深

0~150 m 电阻率值较小,小于 $300\ \Omega\cdot\text{m}$,整个断面电阻率值均小于 $900\ \Omega\cdot\text{m}$,与钻孔揭露的岩性吻合。220~290 m 测点段,深度 10~190 m 存在低电阻率值异常,结合水文地质资料(图 1),测线附近发育北西—南东向断层,推断为裂隙带或断裂破碎带;230~270 m 测点段,深度为 10~190 m 存在相对更低电阻异常,推测为富水带。

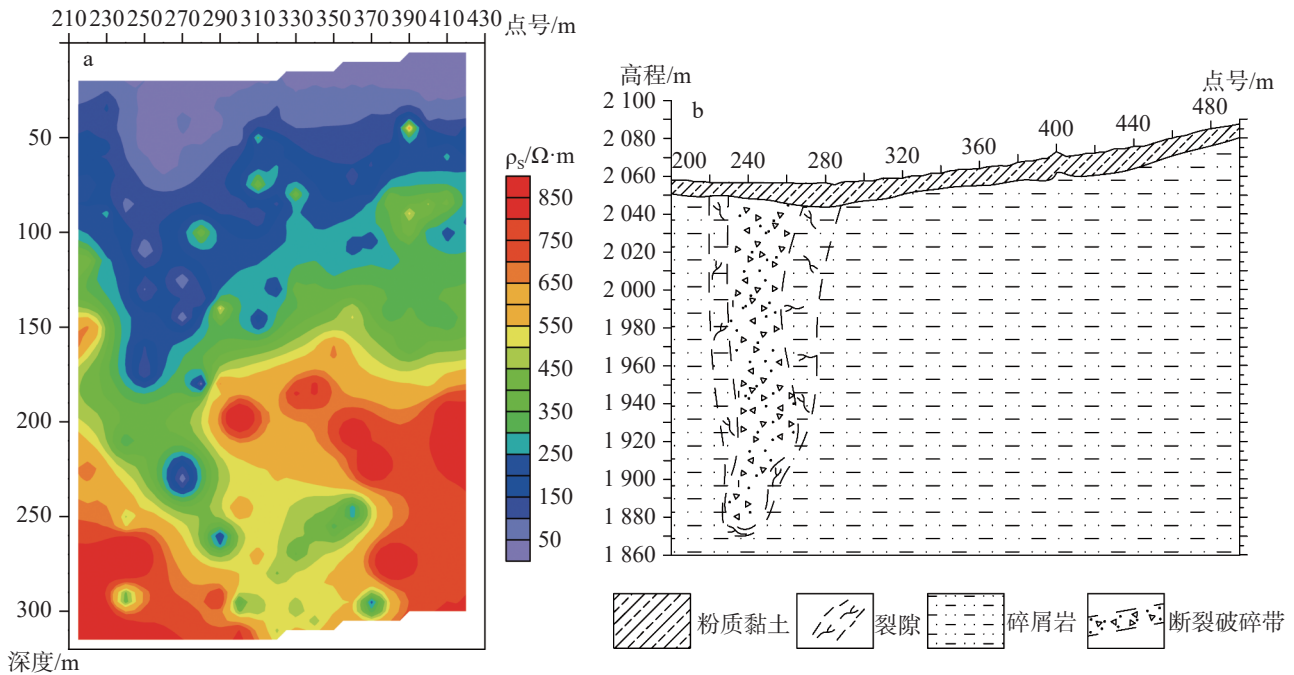


图 4 音频大地电磁法反演视电阻率等值线断面图(a)及地质解释剖面图(b)

Fig. 4 Contour section of inversion of apparent resistivity by audio magnetotelluric method (a) and geological profile (b)

3.4 与钻孔资料对比分析

结合场地施工条件及综合物探反演结果异常分布情况,最终将钻孔布设于 1 线 270 m 测点,其钻孔揭示静止水位为 6.15 m、降深为 31.44 m 时的涌水量为 $366.267\ \text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。通过该测点的视电阻率测深曲线可知,0~7 m 电阻率值较小,有逐渐增大趋势,对应钻孔揭示的第四系土层,在 7 m 处电阻率出现拐点,推测该拐点为岩土分界点;7.00~126.15 m 电阻率均小于 $80\ \Omega\cdot\text{m}$,对应钻孔揭示的三叠系下统飞仙关组(T_3f)灰绿、紫红色泥岩、粉砂质泥岩夹少量灰岩;126.15 m 以深电阻率呈现继续逐步增大趋势,推测 126.15 m 附近为岩性分界点,126.15 m 以深对应钻孔揭示的二叠系上统宣威组(P_3x)深灰、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹炭质泥岩、页岩。13.72~126.15 m 段,电阻率单支测深曲线出现两处“V”型锯齿状异常,推测该异常由断裂破碎带或含水裂隙引起;视电阻

率单支测深曲线的电阻率分层与钻孔资料基本一致(图 5,表 2)。

3.5 讨论

受地表场地狭窄影响,测线长度有限,高密度电阻率法及联合剖面法探测深度较浅,受上伏地层碎屑岩电阻率低的影响,人工电源场主要集中于上伏碎屑岩低阻层流动,深部电流信号较弱,因此,在可探测的横向和垂向范围内,联合剖面法视电阻率曲线呈现 ρ_sA 和 ρ_sB 曲线基本重合,曲线分异性不明显,无明显的正交点或同步低阻段,较难识别有效异常,高密度电阻率法视电阻率反演等值线断面图中,整个剖面呈现低阻现象,电阻率变化较为均匀,无明显的低阻变化段,较难分辨裂隙及破碎带等有效异常。此种条件下联合剖面法和高密度电阻率法在碎屑岩地区找水应用效果不佳,在碎屑岩地区应用高密度电阻率法和联合剖面法进行找水工作时,建议在场地条

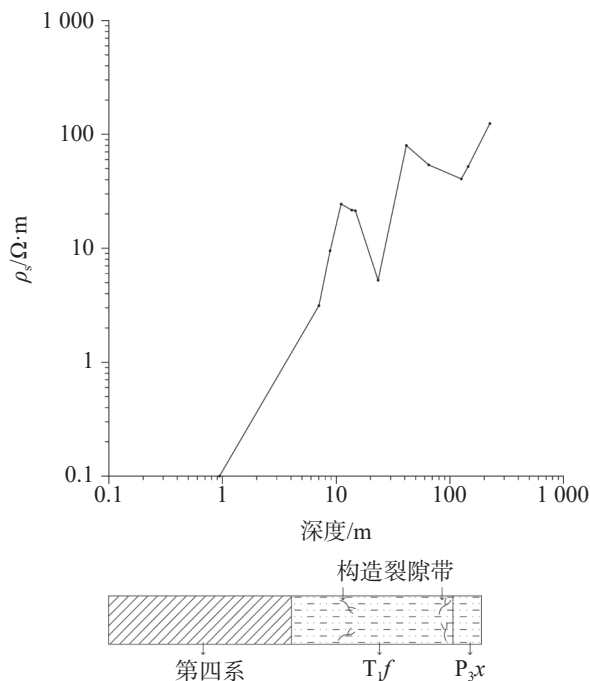


图 5 270 m 测点视电阻率单支测深曲线综合解译图
Fig. 5 Diagram of comprehensive interpretation of apparent resistivity sounding curve at 270-meter position

件允许条件下尽量延长测线长度,同时加大人工电源场的供电电压,增强信噪比,以获得深部地质信息,进而识别有效异常。音频大地电磁测深视电阻率反演断面等值线图中,研究区内视电阻率值虽较小,但含水裂隙或破碎带的视电阻率值相对更小,在 220~290 m 测点段存在相对低阻异常,音频大地电磁法利

用介质的电、磁物性差异,能较好的区分含水裂隙与碎屑岩地层,因此音频大地电磁法在碎屑岩地区寻找裂隙水的可靠性高。

场地狭窄的碎屑岩地区,建议开展音频大地电磁法结合视电阻率单支测深曲线找水应用工作,音频大地电磁法利用不同频率天然电磁场和介质的电、磁物性差异开展工作,不受场地狭窄影响,有效探测深度较大,实际应用中可先通过音频大地电磁法查明裂隙带的发育位置,再利用视电阻单支测深曲线确定裂隙的发育深度,进而为钻孔布设提供位置和深度信息,但单一的物探方法可能存在多解性,在场地狭窄的碎屑岩地区,当存在多个异常时,如果仅采用单一物探方法,缺少辅助方法对有效异常进行识别,会造成找水打井的失败。而在场地宽阔的碎屑岩地区,可通过增加测线长度及增大供电电压的方法,增大探测深度,提高联合剖面法及高密度电法信噪比,获取深部地质信息,圈定可能的异常发育位置,再结合音频大地电磁法对上述异常进行有效甄别,从而减少单一物探方法的多解性,最后利用视电阻率测深法确定钻孔深度,增加找水打井的成功率。受工期紧及没有合适震源的影响,此次未开展地震法的应用研究,因地震法受电阻率影响小,建议在场地条件允许及具备合适震源的情况下,进行地震勘探法在此种地质背景下的应用研究。

表 2 270 m 测点钻孔岩土体特征表

Table 2 Table of rock and soil characteristics at the drilling hole of 270-meter position

钻孔深度/m	岩土体特征
0~4.1	第四系(Q)黄褐色黏土、耕植土
4.1~111.0	三叠系下统飞仙关组(T ₁ f)灰绿、紫红色泥岩、粉砂质泥岩夹少量灰岩
111.0~195.0	二叠系上统宣威组(P ₃ x)深灰、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹炭质泥岩、页岩

其中: 92.4~93.8 m裂隙发育,为该井的主要出水段; 12.6~13.5 m裂隙较发育,为钻孔的次要出水段。

4 结 论

- (1)受地表场地狭窄限制,高密度电法及联合剖面法测线长度有限,探测深度较浅,受碎屑岩电阻率小的影响,高密度电法及联合剖面法找水应用效果不佳,在可探测的深度范围内较难识别基岩裂隙等找水有效异常,需结合其他物探方法对异常进行有效甄别。
- (2)音频大地电磁法找水应用效果相对较好,具

- 有较高的横向分辨率,可有效识别碎屑岩中的断裂破碎带及构造裂隙带,钻孔应布设于探明的节理、裂隙破碎带等地下水赋存空间较大的位置,异常特征为低阻中相对更小的低阻区域。
- (3)视电阻率单支测深曲线能有效分辨不同深度的岩土层结构,具有较高的纵向分辨率,电阻率极小值附近对应裂隙破碎带发育位置,通过钻孔资料的深度校正,可较好指示裂隙破碎带的发育深度。
- (4)在场地较为狭窄的碎屑岩地区开展找水工

作,用音频大地电磁法确定碎屑岩中的裂隙发育带位置,用视电阻单支测深曲线确定裂隙的发育深度,二者结合能取得较好效果。

参考文献

- [1] 刘亚明. 延安市地下水监测浅析[J]. 陕西水利, 2012(6): 132-133.
- [2] 刘道涵, 徐俊杰, 齐信, 郭健强. 基于高密度电法的城市岩溶地下水通道三维电性成像[J]. 中国岩溶, 2023, 42(6): 1331-1338.
LIU Daohan, XU Junjie, QI Xin, WU Jianqiang. Three-dimensional electrical imaging of urban karst groundwater channels based on electrical resistivity tomography[J]. Carsologica Sinica, 2023, 42(6): 1331-1338.
- [3] Sonkamble S, Satishkumar V, Amarendra B, Sethurama S. Combined ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity applications exploring groundwater potential zones in granitic terrain[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(8): 3109-3117.
- [4] Tassy A, Maxwell M, Borgomano J, Arfib B, Guglielmi Y. Electrical resistivity tomography (ERT) of a coastal carbonate aquifer (Port-Mi-ou, SE France)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 601-608.
- [5] 高阳, 熊华山, 彭明涛, 江兆南, 樊奔. 渝东南岩溶储水构造高密度电阻率法异常特征[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1108-1115.
GAO Yang, XIONG Huashan, PENG Mingtao, JIANG Zhaonan, FAN Ben. High density electrical prospecting anomaly analysis of water-bearing structure in karst area of southeast Chongqing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40(6): 1108-1115.
- [6] 陈貽祥, 黄奇波, 覃小群, 韩凯, 肖琼, 苗迎, 杜成亮, 贺德煌. 自然电场法与高密度电法联作在西江中下游岩溶区找水中的应用[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 684-697.
CHEN Yixiang, HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, HAN Kai, XIAO Qiong, MIAO Ying, DU Chengliang, HE Dehuang. Application of self-potential and high-density resistivity method to the water exploration in karst terrain of middle-lower reaches of Xijiang river[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 684-697.
- [7] 张振杰, 胡潇, 谢慧. 直流电测深法优化组合在河西走廊山前戈壁区的找水效果[J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1186-1193.
ZHANG Zhenjie, HU Xiao, XIE Hui. The effect of the application of optimal combination of direct electric sounding method to water exploration in pediment Gobi area of the Hexi Corridor[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(6): 1186-1193.
- [8] 赵俊, 向龙洲, 李忠, 王家生. 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(Suppl.2): 110-115, 123.
ZHAO Jun, XIANG Longzhou, LI Zhong, WANG Jiasheng. Application of integrated geophysical prospecting in the hydrogeology investigation and its applicability analysis[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 39(Suppl.2): 110-115, 123.
- [9] 刘天云, 罗锐恒, 胡顺强, 赵永宾, 潘晓东, 刘伟. 文山水库尾水岩溶渗漏水文地质条件与管道位置识别[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 88-99.
LIU Tianyun, LUO Ruiheng, HU Shunqiang, ZHAO Yongbin, PAN Xiaodong, LIU Wei. Hydrogeological conditions of karst leakage and identification of pipeline location in Xiaohewei reservoir, Wenshan[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 88-99.
- [10] 曹光奇, 周仲华. 地面核磁共振找水方法在花岗岩地区的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(2): 108-113.
CAO Guangqi, ZHOU Zhonghua. Application of the surface nuclear magnetic resonance method to detecting groundwater in granite regions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(2): 108-113.
- [11] 柳建新, 龚露, 刘海飞, 麻昌英, 曹创华. 双频激电法在新疆戈壁滩找水中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 745-751.
LIU Jianxin, GONG Lu, LIU Haifei, MA Changying, CAO Chuanghua. Application of dual-frequency induced polarization method for detecting groundwater in Gobi, Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(6): 745-751.
- [12] 王鹏飞, 李勇, 李富, 杨帆, 李雪梅, 张文鑫. 综合电法勘探在“红层地区”找水中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(5): 659-664.
WANG Pengfei, LI Yong, LI Fu, YANG Fan, LI Xuemei, ZHANG Wenxin. Application of comprehensive electrical exploration in finding water in "Red Layer"[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 41(5): 659-664.
- [13] 时彦芳, 李波. 综合电法在花岗岩地区找水中的应用效果分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 363-368.
SHI Yanfang, LI Bo. Analysis on the application effect of integrated electrical method in water prospecting in granite regions[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(4): 363-368.
- [14] 刘加文, 王治军, 杜志伟. 自然电场法在场地地下水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, 6(5): 612-615.
LIU Jiawen, WANG Zhijun, DU Zhiwei. Application of natural electric field in site groundwater exploration[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2009, 6(5): 612-615.
- [15] 郑智杰, 曾洁, 赵伟, 甘伏平. 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 Zhijie, ZENG Jie, ZHAO Wei, GAN Fuping. Application research of high density resistivity method in water exploring in karst area[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1262-1267.
- [16] 薛胜利, 凌丹丹. 激电测深在延安地区浅层地下水调查评价中的应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(6): 1463-1472.
XUE Shengli, LING Dandan. Application of the induced polar-

- ization sounding method to the survey of shallow groundwater in the Yan'an area[J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(6): 1463-1472.
- [17] 张彪, 刘良志, 倪进鑫, 刘江山. 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, LIU Jiangshan. 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.
- [18] 王丽妍, 胥博文, 杨毅, 辛玉齐. 高密度法和音频大地电磁法在地下水勘查中的应用[J]. *地下水*, 2016, 38(6): 83-84.
- [19] 康方平, 蒋建良, 彭杰, 曹创华, 姚海鹏. 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, CAO Chuanghua, YAO Haipeng. 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.
- [20] 刘声凯, 刘海飞, 黄超, 肖立权, 李望明, 隆兴民, 赵敬德. 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, XIAO Liquan, LI Wangming, LONG Xingmin, ZHAO Jingde. Groundwater prospecting by combined hydrogeological and integrated geophysical surveys in granite areas, southern Jiangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(3): 584-592.
- [21] 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.
- ZHENG Zhijie, GAN Fuping, ZENG Jie. Inversion characteristics of high-density resistivity method on karst conduits at varied depths[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(3): 292-297.
- [22] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平. 不同深度谷地对高密度电法探测地下岩溶管道的影响试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(34): 12-17.
- ZHENG Zhijie, ZENG Jie, GAN Fuping. Experimental study on the influence of different valley depth on the high density resistivity method to detect underground karst pipeline[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(34): 12-17.
- [23] 严学春, 何帅, 沈小庆, 张德实, 张德全. 高密度电阻率法在贵州东部山区找水中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(5): 558-564.
- YAN Xuechun, HE Shuai, SHEN Xiaoqing, ZHANG Deshi, ZHANG Dequan. Application of high density resistivity method to exploration of water in eastern mountain area of Guizhou[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(5): 558-564.
- [24] 郑智杰. 地形起伏对高密度电法探测地下岩溶管道的影响试验研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 230-236.
- ZHENG Zhijie. Experimental study on influence of terrain fluctuation to high density resistivity method for detecting underground karst pipes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 230-236.
- [25] 郭健强, 赵茹玥, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 朱超强. 综合电法在岩溶山区地下水勘探中的应用: 以湖南怀化长塘村为例[J]. *物探与化探*, 2020, 44(1): 93-98.
- WU Jianqiang, ZHAO Ruyue, GAN Fuping, ZHANG Wei, LIU Yongliang, ZHU Chaoqiang. The application of electrical prospecting method to groundwater exploration in karst mountainous areas: A case study of Changtang village, Huaihua area, Hunan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(1): 93-98.
- [26] 李富, 邓国仕, 袁建飞, 王德伟, 李华, 唐业旗, 周一敏. 确定探采结合井位的综合物探方法技术研究: 以乌蒙山区为例[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(3): 1218-1225.
- LI Fu, DENG Guoshi, YUAN Jianfei, WANG Dewei, LI Hua, TANG Yeqi, ZHOU Yimin. Combination of exploration and mining technology research method of geophysical exploration wells: In Wumeng mountain area as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(3): 1218-1225.
- [27] 郭嵩巍, 闫强. 瞬变电磁法在内蒙古乌拉特前旗明安镇西找水工程中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(7): 2564-2572.
- GUO Songwei, YAN Qiang. Application of transient electromagnetic methods in water exploration of the west of Ming'an town in Wulateqianqi, Inner Mongolia[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(7): 2564-2572.
- [28] 郭健强, 甘伏平, 张伟, 刘永亮, 魏巍, 朱超强. 音频大地电磁法在怀化方石坪村红层找水中的应用研究[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 918-924.
- WU Jianqiang, GAN Fuping, ZHANG Wei, LIU Yongliang, WEI Wei, ZHU Chaoqiang. Application of audio magnetotelluric method to find water in the red beds of the Fangshiping village, Huaihua City[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(6): 918-924.
- [29] 黄国民, 李世平, 陶毅, 杨承丰, 曾庆仕. 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 Guoming, LI Shiping, TAO Yi, YANG Chengfeng, ZENG Qingshi. 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.

Application of comprehensive geophysical prospecting method to water detection in the clastic rock area of Dalubian village, Xuanwei, Yunnan Province

ZHENG Zhijie^{1,2,3}, ZENG Jie^{1,3}, GAN Fuping^{1,3}, CHEN Jili⁴, LU Xiuhua^{1,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 4. No.307 Nuclear Geological Brigade of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guigang, Guangxi 537100, China)

Abstract The development of fractured and fissured zones characterized by strong water abundance is limited in the clastic rock aquifer with generally poor water-rich properties. Additionally, the small contrast in electrical properties between the water storage structures and the clastic rock makes water detection difficult. In order to explore the effectiveness of geophysical methods in water detection in clastic rock areas, the high-density resistivity method, combined with profile method and audio frequency magnetotelluric method (EH4) are used to study the water detection in clastic rock strata in Dalubian village, Xuanwei, Yunnan Province. The study findings may provide a theoretical basis for the selection of geophysical methods under the same site condition and the same geological background so as to avoid blind method selection and to save time and cost.

The study area is located in Xuanwei county, Yunnan Province, belonging to the Beipan river basin. The terrain is low in the north and high in the south, with large undulations and a height difference of 150–250 m. The terrain falls into the type of the eroded middle-mountain trough valley. The exposed strata in the study area are purplish red or greyish-green sandy mudstone, mudstone, sandstone interbedded with limestone, mudstone, etc. of the lower Triassic Feixianguan Formation(T_1f). The study area is located in the northwest wing of Tianba syncline, about 1 km away from the core. The core is composed of the Feixianguan Formation (T_1f) of the lower Triassic, and the two wings are composed of the Carboniferous (C) to Permian (P) strata. The main aquifer in the study area is composed of purplish red or greyish green sandy mudstone, mudstone, and sandstone layers of the Feixianguan Formation (T_1f) in the lower Triassic, with fractures as the main aquifer medium. The fractured aquifer is mainly composed of insoluble hard and brittle rock layers in clastic rocks, igneous rocks, and metamorphic rocks. Interbedded fractured aquifers, fractured aquifers, and weathered fractured aquifers are commonly present. Atmospheric precipitation infiltrates along cracks and joints to recharge groundwater, with runoff direction from south to north, and is ultimately enriched in valleys. The study area is located near the core of the Tianba syncline, with well-developed joints and fractures, and a large storage space for groundwater.

The results show that the clastic rocks of Feixianguan Formation (T_1f) in the upper Triassic system are at medium-level water abundance, with uniform water content. Constrained by the narrow ground, the lengths of survey lines in high-density electrical method and the combined profiling method are limited, and hence the small detecting depths. Affected by the small resistivity of clastic rocks, the effect of using high-density electrical method and combined profile method in water detection is not good, because it is difficult to identify effective anomalies such as bedrock fractures within the detectable depth range by these methods. Therefore, it is necessary for us to combine other geophysical methods to effectively distinguish the anomalies. The audio frequency magnetotelluric method with high lateral resolution can effectively identify the development sections of structural fault fracture zones and fracture zones in clastic rocks. The anomaly is characterized by relatively low resistance. The apparent resistivity sounding curve, with a high vertical resolution and good indication significance for fracture, can effectively distinguish the structure of rock and soil layers at different depths. To carry out water detection in the clastic rock area with relatively narrow ground site, the audio frequency magnetotelluric method combined with apparent resistivity sounding curve can achieve good results. The audio frequency magnetotelluric method can determine the location of fracture development zone in clastic rock areas, and apparent resistivity sounding curve can determine the depth of fracture development zone.

Key words high-density resistivity method, combined profile method, audio frequency magnetotelluric method, apparent resistivity sounding curve, clastic rock, water detection

(编辑 黄晨晖)