

利用大功率充电法定位水库岩溶含水渗漏通道

王开勋, 贺昌坤*, 罗锐恒, 周建兵

(文山壮族苗族自治州水利电力勘察设计院, 文山 663000)

摘要: 小河尾水库自建成蓄水以来, 存在严重的库水渗漏问题, 虽经多次防渗处理, 但水库渗漏的情况仍未改善。为了确定小河尾水库地下岩溶渗漏通道位置走向, 以指导后期水库防渗工程部署, 本次选择 V8 多功能电磁法系统的大功率充电法技术对研究区水库深部岩溶含水渗漏通道进行快速准确地定位, 通过对大功率充电法探测结果特征分析及结合地质资料表明, 该水库主要存在 2 条推测北北东向岩溶含水渗漏通道, 其中 I 号岩溶渗漏通道位于灰岩与硅质岩接触带附近, II 号岩溶渗漏通道位于灰岩内部岩溶裂隙, 且两条岩溶通道具有一定的水力联系。根据物探结果特征及地质资料, 建立小河尾水库岩溶含水渗漏通道理想模型, 其渗漏通道机理为地下水对可溶岩、可溶岩与非可溶岩接触带的长期接触溶蚀作用形成。

关键词: 岩溶水库; 大功率充电法; 渗漏通道; 渗漏机理

中图分类号: X141; X143; P642.25; TV697.3⁺2 **文献标识码:** A

APPLICATION OF HIGH-POWER CHARGING METHOD IN LOCATING KARST WATER-CONTAINING SEEPAGE CHANNEL

WANG Kai-xun, HE Chang-kun*, LUO Rui-heng, ZHOU Jian-bin

(Institute of Wenshan Hydraulic and Electric Power Survey, Wenshan 663000, China)

Abstract: Since the completion of Xiaohewei reservoir, there has been a serious problem of reservoir water leakage. Although anti-seepage treatment has been carried out for many times, the leakage of the reservoir has not been improved. In order to determine the location of the underground Karst leakage channel of Xiaohewei Reservoir to guide the later deployment of the reservoir anti-seepage project, this paper selects the high-power charging method technology to quickly and accurately locate the deep Karst water-bearing leakage channel of the reservoir in the study area. The analysis of the characteristics of the detection results and the combination of geological data show that there are mainly two inferred Karst water-bearing seepage channels in the reservoir. The No. 1 Karst seepage channel is located near the contact zone between limestone and siliceous rock, and the No. 2 Karst seepage channel is located near the contact zone of limestone and siliceous rock. The channel is located in the Karst fissure inside the limestone, and the two Karst channels have a certain hydraulic connection. According to the characteristics of geophysical prospecting results and geological data, an ideal model of Karst water-bearing seepage channel in Xiaohewei Reservoir is established.

Key words: Karst reservoir; high-power charging method; leakage channel; leakage mechanism

岩溶地区因发育岩溶裂隙、溶洞等,往往容易形成地下水流通道,且形状极不规则,或集中发育,或呈网络状分布,导致水文地质条件极为复杂,因此在岩溶地区修建水利设施,岩溶渗漏往往成为影响水利设施正常运行的主要工程地质问题^[1-3]。物探方法在水库渗漏勘察中一直扮演着重要的角色,其中以常规电法、高密度电阻率法、地震波、探地雷达、井中CT、瞬变电磁法方法为主^[3-7]。其中充电法作为经典的地球物理勘探方法之一,于1920年、1932年由C. Schlumberger首先用于良导电金属矿脉探测和其他地质勘探工作,以后得到较快发展,在国内外已成功应用于地质找矿、岩溶石山区地下岩溶管道勘察、地下水勘探、水库与坝体或河堤渗漏探测、岩溶深基坑渗漏与涌水勘察等众多领域^[8-10]。例如Pant^[11]利用充电法对尼泊尔西部水电站坝址的两个钻孔进行研究,分析地下水的流向和流速,通过试验发现充电法可以有效地确定地下水的流速和流向;Mitrofan等^[12]在罗马尼亚Baile Herculane岩溶区,成功采用充电电位和电阻率法探测矿山采空区和地下岩溶管道;陈玉玲等^[13]验证了充电法可以有效地追踪和定位带有天窗、进出口特征的地下暗河;陈怡祥等^[14]分析了充电法电位异常的分层方法,给出了基于一阶差分的水平梯度计算方法,并在实测岩溶管道探测中取得了较好的应用效果;韩凯等^[15]利用多源大功率充电法对复杂岩溶含水通道进行快速准确地定位,得到含水通道的位置及走向。一直以来大功率充电法具有信号强、抗干扰能力强、分辨率高、效率高等优点,可以在较大范围内对地下岩溶含水通道发育情况进行追踪,但是,由于地质噪声、区域背景场的干扰,甚至当地下存在多个导体时,会给确定导体的位置造成困扰和物探异常解释的错误,因此其物探异常需结合其他物探勘探方法进行验证,以确保充电法解译的准确性^[14]。目前,小河尾水库自建成蓄水以来,渗漏问题突出,经防渗处理,至今渗漏仍较严重,因此,本文在系统的野外地质调查的基础上,利用大功率充电法技术有效加大探测深度,查明深部岩溶渗漏通道分布特征,预测水库渗漏通道走向,为后期防渗处理提供依据。

1 地质背景

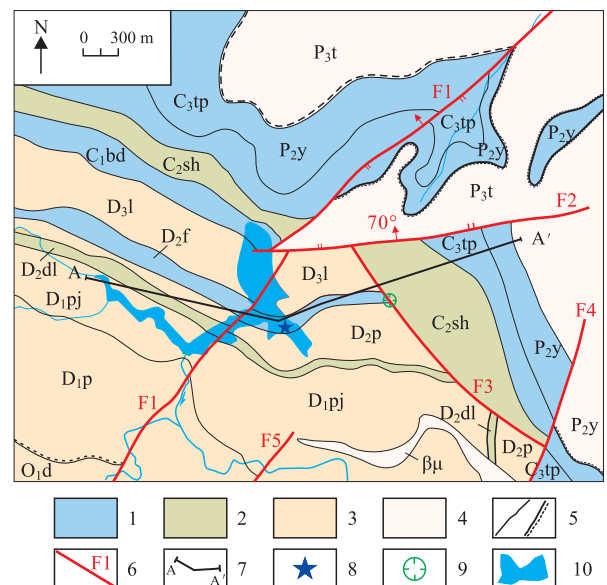
1.1 水库概况

小河尾水库是一座以城乡生活供水和灌溉为主的小(1)型水利枢纽工程,位于文山市西部薄竹山东南面的坝心乡小平坝境内,属红河流域沪江水系盘龙河一级支流,为文山市境内海拔最高的岩溶水库。

水库总库容 $3.99 \times 10^6 \text{ m}^3$,兴利库容 $3.79 \times 10^6 \text{ m}^3$,死库容 $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$,水库可供水量 $1.31 \times 10^7 \text{ m}^3$,承担着文山州政府片区、坝心乡、马塘镇、秉烈乡、红甸乡和东山乡供水,供水人口近22万人。水库于2007年竣工后未能正常蓄水及发挥工程效益。其原因是:水库存在一系列近东西向串珠状的塌陷,并可见多处渗漏点,经文山市水务局2019年11月25日~12月22日对水库入库水量、出库水量不间断水文观测,期间库水位1924.11~1924.54 m,日平均入库流量为 $0.61 \text{ m}^3/\text{s}$,水库供水出库流量为 $0.27 \text{ m}^3/\text{s}$,水库水位未上升,库区日平均渗漏流量为 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此水库存在较为严重的渗漏问题,这也是水库运行安全的一大隐患。水库管理单位虽然对整个水库库尾左岸及库底进行钢筋混凝土面板防渗处理,但是水库渗漏的情况至今仍未改善。这表明该地区的岩溶地质条件十分复杂,可能存在集中式岩溶管道或强径流带渗漏。

1.2 水文地质概况

研究区地处云贵高原南缘,滇东南岩溶山区,区内喀斯特岩溶地貌突出,地形复杂,地形坡度一般在 $35^\circ \sim 45^\circ$,总体地势西南高、东北低,属构造侵蚀、溶蚀中山沟谷地貌。区内主要出露的地层包括沉积地层和岩浆岩地层,上覆第四系沉积物,沉积地层主要由奥陶系、泥盆系、石炭系和二叠系地层组成;岩浆岩地层主要包括基性喷出玄武岩和基性侵入辉绿岩脉(图1)。



1. 较纯灰岩溶洞裂隙水; 2. 不纯灰岩溶洞裂隙水; 3. 碎屑岩裂隙水; 4. 火成岩裂隙水; 5. 地质界线; 6. 断层及编号; 7. 剖面线; 8. 渗漏区域; 9. 洼地; 10. 水库; D_{1p}. 地层代号

图1 研究区水文地质简图

在大地构造位置上,研究区位于华南褶皱系滇东南褶皱带文山-富宁褶皱束薄竹山拱褶内,受红河断裂、个旧褶皱束以及丘北-广南褶皱束等不同等级构造体系的相互干扰、切割以及复合,导致该地块遭受强烈的改造,区内沉积建造复杂多变,区内断裂构造发育,总体方向以北东向为主,北西向及近东西向次之,其中前者形成最早,是区域内构造的主体,后者形成较晚,具有良好的连续性,对北东向构造产生明显的破坏、改造和利用。该区强烈的区域构造活动、破碎的岩体、复杂的地形地貌等因素的叠加作用,为区内岩溶发育渗漏通道提供了极为有利的条件。

研究区出露碳酸盐岩、碎屑岩和岩浆岩,岩性、岩相变化复杂,地下水赋存于不同含水层之中,它的埋藏、分布、径流等都受到地质因素的制约。现按不同含水岩类,研究区内的含水岩组可以分为较纯灰岩溶洞裂隙水、不纯灰岩溶洞裂隙水、碎屑岩裂隙水和火成岩裂隙水等4个含水层组(参见图1)。较纯灰岩类溶洞裂隙含水岩组主要分布于研究区中部及北部,含水层为泥盆系分水岭组(D_2f)、石炭系坝达组(C_1bd)、他披组(C_3tp)、二叠系岩头组(P_2y)灰岩夹硅质岩、白云岩,富水强。其中泥盆系分水岭组(D_2f)灰色中厚层灰岩夹硅质岩地层为小河尾水库岩溶地下水系统主要含水层;不纯灰岩类溶洞裂隙含水岩组主要分布于研究区西北部及东部,含水层为泥盆系达莲塘组(D_2dl)、石炭系顺甸河组(C_2sh)灰岩、硅质灰岩、硅质岩,岩溶发育一般,富水较强;碎屑岩类裂隙含水岩组主要分布于研究区中部及南部,含水层为奥陶系、泥盆系硅质岩、硅质泥岩、含锰硅质页岩及泥岩、砂岩、粉砂岩不等厚互层,富水性差,为研究区地下水的隔水层;火成岩类裂隙含水岩组主要分布于研究区北东部,含水层为二叠系他痴组(P_3t)喷出岩岩体玄武质凝灰岩、微粒玄武岩和白垩系(K)侵入岩岩体花岗岩,火成岩岩石致密,透水性弱,为研究区地下水的隔水层。

大气降水是区内地表水、地下水主要补给来源,不同类型地下水补给、径流、排泄特征各异。其中小河尾水库岩溶地下水系统为圈闭的岩溶地下水系统,水库渗漏和大气降雨渗入为地下水主要补给来源,岩溶水沿地下岩溶通道向排泄区径流。

2 大功率充电法勘探方法

2.1 充电法原理及野外布置

大功率充电法是根据充电体和围岩电性差异,在良导性地质体的天然或人工露头上接上供电电极A

(通常为—组相连的铜板或组合铜棒)进行充电,另一供电电极B置于远离充电体的地方(一般垂直测线1000~1500m外),接通电源后,充电体为一等位体或似等位体,电流流经地下暗河等相对良导体形成稳定电流场,在地表上利用不极化电极M、N观测电场的分布(梯度法);N极置于无穷远处,与B极方向相反,观察M点电位(电位法),研究电场的特性,确定地下暗河的形状、走向,大致推断其埋深。大功率充电法通常有电位法和电位梯度法两种测量方式。

由于测区岩溶地质条件复杂,岩溶渗漏通道走向未知,前期防渗处理过程中发现可能存在集中式岩溶管道或强径流带渗漏,故本次野外探测遵循从已知到未知的思路,布置了4条环形测线(L1~L4)和1条与 D_2f 地层走向垂直的测线(L5)(图2)。环形测线可以消除正常场影响,并可在较大范围内对岩溶含水通道的走向进行追踪定位^[16];L5线的布置是为了确定与研究区内地表塌陷相关的岩溶渗漏通道的走向。5条测线总长度3310m,测线点距为10m,异常地段加密至5m。测点采用RTK Trimble 5800GPS系统布设,精度满足探测要求。

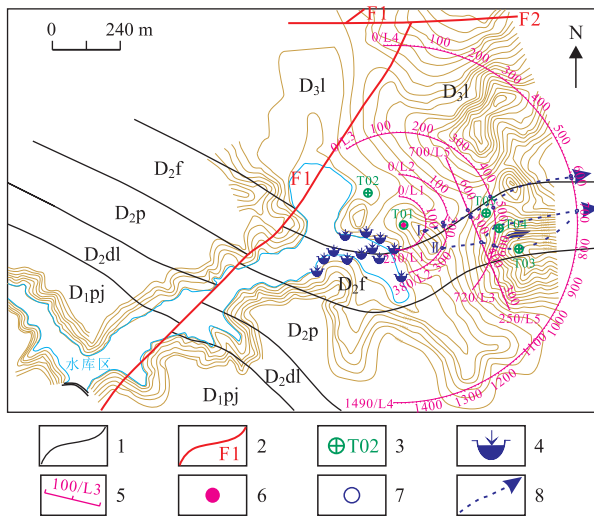
2.2 仪器及野外数据采集

大功率充电法采用加拿大凤凰公司的V8多功能电法仪。该仪器的发射系统配备了功率可达30kW的发电机,在接地电阻比较理想的状态下可以发送出几十安培的电流,在较大的范围内产生比较强的信号,大大地提高了探测的范围和精度。野外数据采集时,根据测线距充电点的距离分别对供电点供以3~8A的电流,通过强信号提高信噪比。同时为了保证数据采集质量,还做了如下措施:无穷远极布设距离大于1km,接地电阻小于1k Ω ;采用不极化电极作为测量电极,保证不极化电极的稳定性,且每对不极化电极的极差小于1mV,电流测量精度为0.1mA;接地的电阻小于2k Ω ,岩石裸露的地方不大于5k Ω ,保证不极化电极与大地的良好接触。本次大功率充电法共完成204个测点,重复性观测17个测点,占测点总数8.33%,全区均方根误差0.112%,满足充电法技术规范要求^[17],采集数据重复性好,质量可靠。

3 结果与讨论

3.1 测试结果特征分析

利用大功率充电法对所布置测线进行大功率充电,获得L1~L5这5条测线的大功率充电法归一化电位及电位梯度数据曲线图(图3、图4)。在L1



D₃l. 泥盆系榴江组硅质岩、硅质泥岩; D₂f. 泥盆系分水岭组灰岩夹硅质岩; D₂p. 泥盆系坡折落组硅质岩夹硅质页岩; D₂dl. 泥盆系达连塘组硅质岩夹灰岩、硅质灰岩; D₁pj. 泥盆系坡脚组泥岩、粉砂岩; 1. 地质界线; 2. 断层及编号; 3. 塌陷坑及编号; 4. 渗漏点; 5. 物探测线及点号/线号; 6. 充电点; 7. 充电法异常点; 8. 推测渗漏通道

图2 大功率充电法测线布置图

~L4 测线大功率充电法归一化电位与电位梯度曲线图中(图3), L1 测线在点号 130 m 位置处归一化电位梯度曲线出现近零值点, 归一化电位曲线出现极大值(图3a), 归一化电位和电位梯度的异常点吻合, 异常点与周围测点存在显著的对比, 同时 L1 测线 130 m 测点处位于泥盆系榴江组(D₃l)碎屑岩处(参见图2), 其下伏地层为泥盆系分水岭组(D₂f)碳酸岩地层, 推断点号 130 m 附近为渗漏通道在地表的投影。L2 测线在点号 200 m、210 m 及 270 m 处与周围测点对比明显(图3b), 归一化电位梯度曲线出现近零值点, 归一化电位曲线出现极大值, 且点号 200 m、210 m 位于 D₂f 碳酸岩地层与其上覆 D₃l 碎屑岩地层的分界带, 270 m 测点位于 D₂f 碳酸岩地层中, 推断点号 200~210 m 及 270 m 测点附近为渗漏通道在地表的投影。而曲线上点号 110~140 m 段可见电位值偏高(图3b), 其对应电位梯度值虽与电位值成反比关系, 但电位梯度值较为偏高, 结合现场该测点段高程发现(参见图2), 点号 110~140 m 段高程差小于 2 m, 电位梯度受地形影响不大, 推断电位异常可能是由于该段测点到充电点间的地形较平坦有关。

L3 测线在点号 460 m、490 m 处归一化电位和电位梯度异常吻合较好, 归一化电位出现极大值, 归一化电位梯度值接近零值(图3c), 在大功率充电法测线布置图上(参见图2), 可以看出 L3 测线点号

460 m 位于 D₂f 碳酸岩地层与其上覆 D₃l 碎屑岩地层的分界带, 点号 490 m 均位于 D₂f 碳酸盐岩地层, 且靠近地表塌陷点 T05, 推断该两测点下方存在渗漏通道。另外, 测点 540 m、590 m 存在电位梯度异常, 接近零值, 异常点与周围测点也存在显著的对比, 两测点归一化电位值均为较大值, 且点号 540 m、590 m 均位于碳酸盐地层, 540 m 测点靠近地表塌陷点 T04, 推断 540 m、590 m 测点下方的碳酸盐岩地层存在渗漏通道; L4 测线地形起伏大, 穿越多座山体, 测点高差可达 150 m, 归一化电位梯度曲线变化较大, 790 m~1 320 m 测点段间出现多位呈陡降趋势(图3d), 如点号 790 m、900 m、970 m、1 320 m, 但该段测点电位梯度值偏高, 电位值虽出现极大值, 但与周围测点电位值无较大显著差异, 且测点基本位于 D₂p 碎屑岩地层(参见图2), 地形高差大, 推断这些异常由于复杂的地形因素引起。而 630 m、650 m、710 m 测点电位和电位梯度异常吻合良好, 归一化电位出现极大值, 归一化电位梯度值接近零值(图3d), 结合大功率充电法测线布置图(参见图2), 630 m、650 m 测点位于碳酸岩与上覆碎屑岩交界带附近, 710 m 测点位于 D₂f 碳酸岩地层, 推断 630 m、650 m、710 m 测点下方存在着渗漏通道。

L5 测线地形整体上平坦, 高差小于 20 m。在 L5 测线归一化电位与电位梯度曲线图中(图4a), 电位极大值点分别为 520 m、525 m 和 545 m 测点, 电位梯度近零值点分别为 450 m、520 m、525 m 以及 545 m 测点, 归一化电位和电位梯度的异常点很吻合。同时, 在 L5 测线原始电位测试数据基础上, 利用 Surfer 软件绘制其电位衰减等值线断面图(图4b), 由图可得, 520~545 m 测点段电位衰减异常显著, 异常显著且与周围测点存在显著的对比。在测线布置图上 520~545 m 测点位于碳酸岩与上覆碎屑岩交界带附近, 靠近地表塌陷点 T05, 推断该测点段下方存在渗漏通道。450 m 测点归一化电位梯度值异常, 接近零值, 其电位与周围测点未表现出极大值, 且电位衰减不明显, 但该电位靠近地表塌陷点 T04 及 L3 测线 490 m、540 m 异常点, 推断该处为深度相对较浅的渗漏通道, 且该渗漏通道与 L3 测线推测渗漏通道存在水力联系。

3.2 渗漏通道的地表位置及走向

本次研究利用大功率充电法定位小河尾水库渗漏通道网络, 大功率充电法物理勘探成果表明: L1 测线异常点号为 130 m; L2 测线异常点号为 200 m、210 m、270 m; L3 测线异常点号为 460 m、490 m、540 m、590 m; L4 测线异常点号为 630 m、650 m、

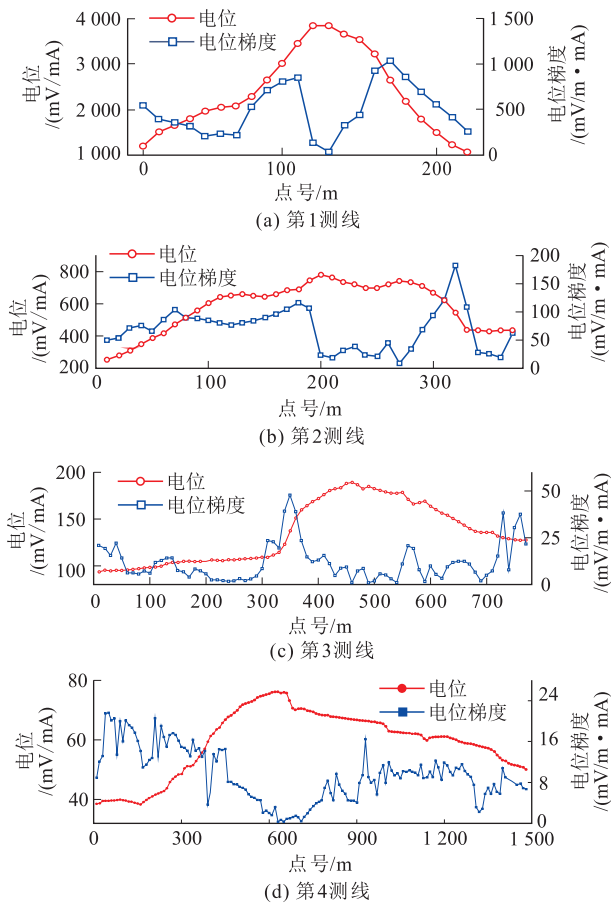


图 3 L1~L4 测线大功率充电法归一化电位与电位梯度曲线图

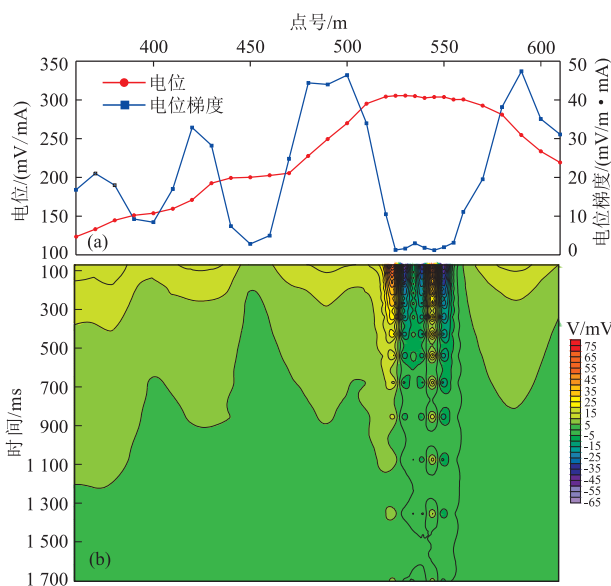


图 4 L5 测线大功率充电法归一化电位与电位梯度曲线图(a)和电位衰减等值线断面图(b)

710 m;L5 测线异常点号为 450 m 及 520~545 m 段(表 1)。结合地质资料,L1 测线 130 m 测点、L2 测线 200 m 及 210 m 测点、L3 测线 460 m 测点、L4

测线 630 m 及 650 m 测点、L5 测线 520~545 m 测点段均位于 D_2f 灰岩与其上覆 D_3l 硅质岩地层的分界带附近,其余异常点均位于 D_2f 碳酸岩地层,且靠近地表塌陷点 T04、T05(表 1、图 2)。因此,共推断了 2 个主要渗漏通道的走向,I 号岩溶渗漏通道通过 1 线 130 m 测点、2 线 200~210 m 测点、5 线 520~545 m 测点之间、3 线 460~490 m 测点之间、4 线 630~650 m 测点之间;II 号岩溶渗漏通道通过 2 线 270 m 测点、5 线 450 m 测点、3 线 540 m、590 m 测点、4 线 710 m 测点附近。I 号渗漏通道分布于 D_2f 灰岩与上覆硅质岩接触带附近,II 号渗漏通道分布于 D_2f 灰岩地层,渗漏通道走向为北东东向。由于都是通过同一充电点得到的异常,可推断两个渗漏通道具有一定的水力联系。

综合上述物探成果以及地质资料,建立了小河尾水库岩溶渗漏通道模型示意图(图 5),推断小河尾水库岩溶渗漏通道渗漏机理:地下水流在分水岭组(D_2f)灰岩、分水岭组(D_2f)灰岩与上覆地层榴江组(D_3l)硅质岩以及下伏地层坡折落组(D_2p)硅质岩的接触面上受阻,流线密集于灰岩与硅质岩的交界面上,使得灰岩发生溶蚀作用,经过长期的溶蚀形成了岩溶裂隙和小溶洞,灰岩与硅质岩接触带附近成为地下水的 I 号径流通道,灰岩内部岩溶裂隙成为地下水的 II 号径流通道,即小河尾水库库水渗漏通道(图 5)。其中 F3 断裂已超出小河尾水库施工范围区,针对该断裂对预测水路是否有影响,尚不讨论。

表 1 大功率充电法归一化电位与电位梯度异常结果

测线编号	归一化电位与电位梯度异常点	地层
L1	130	D_2f 与 D_3l 分界带
L2	200,210	D_2f
L3	460	D_2f 与 D_3l 分界带
L4	490,540,590	D_2f
L4	630,650	D_2f 与 D_3l 分界带
L4	710	D_2f
L5	520~545	D_2f 与 D_3l 分界带
L5	450	D_2f

3.3 钻孔验证

验证钻孔 ZK1、ZK2 分别位于 5 测线 520 m 测点、550 m 测点处,钻探进尺为 62.3 m、85.1 m,钻孔柱状图如图 6 所示。ZK1 位于分水岭组地层,钻孔揭露地层显示,0~35.1 m 灰岩溶蚀裂隙、溶孔发育,岩芯呈碎块状、沙状;35.1~43.5 m 钻进过程中发生掉钻;35.1~42.8 m 发育 5.7 m 溶洞,溶洞底部泥质堆积层至 43.5 m;43.5~57.9 m 溶蚀现象极

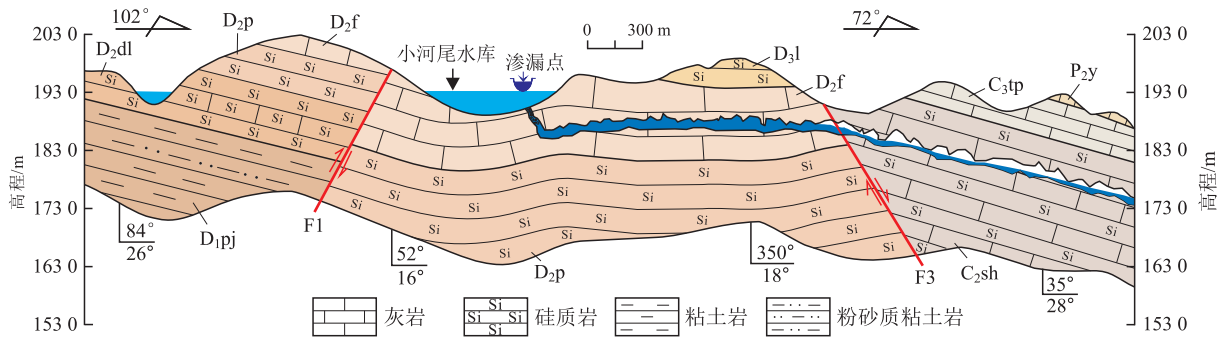


图5 小河尾水库岩溶渗漏通道模型示意图

其发育,岩芯破碎呈沙状,溶蚀裂隙面常见黄褐色铁质浸染,岩芯破碎段多为泥质胶结物,为地下水活动痕迹;57.9~62.3 m,岩芯较完整,呈短柱状、长柱状。ZK2 位于榴江组地层,钻孔揭露显示,0~5.6 m 为第四系覆盖层;5.6~24.9 m 为泥盆系榴江组硅质岩,风化严重,呈砂状、碎块状;24.9~85.1 m 为泥盆系分水岭组灰岩夹硅质岩地层,溶蚀裂隙、溶孔较发育,岩芯破碎,主要呈沙状、碎块状,局部见有溶洞、孤石;在 24.9~26.9 m、31.3~32.0 m、35.1~35.7 m、36.0~36.6 m、44.3~44.8 m、45.5~46.0 m、47.1~47.7 m、48.9~50.2 m 和 52.4~56.4 m 共 10 处位置发生掉钻或卡钻现象,其中 24.9~26.9 m 泥盆系分水岭组灰岩与榴江组硅质岩岩性界线处溶洞完全充填,泥质胶结致密,但附近 27.3 m 处岩芯见有溶蚀孔洞。验证钻孔揭露了大范围破碎灰岩和溶洞,上部的硅质岩为强风化,主要地层也能大致对应,这些较好地验证了物探地质解释的可靠性。

4 结论

(1) 小河尾水库存在严重的渗漏问题,利用 V8 多功能电磁法系统的大功率充电法对其渗漏通道进行探测,具有常规充电法无法比拟的优点:电流大、信号强、测量范围大、受地形影响小、分辨率高、电位衰减慢,特别适合远距离地位,追踪地下暗河,能准确定位渗漏通道的地表投影;通过布置环形测线,消除点源场的干扰,环形测线异常点位置较好地指示了渗漏通道的走向与分布。

(2) 通过对小河尾水库大功率充电法物探成果及地质资料进行分析讨论后发现,测区分水岭组(D₂f)灰岩中岩溶发育,主要存在 2 条北北东向岩溶含水渗漏通道,其中 I 号岩溶渗漏通道位于灰岩与硅质岩接触带附近,II 号岩溶渗漏通道位于灰岩内部岩溶裂隙,2 条岩溶通道存在一定的水力联系。

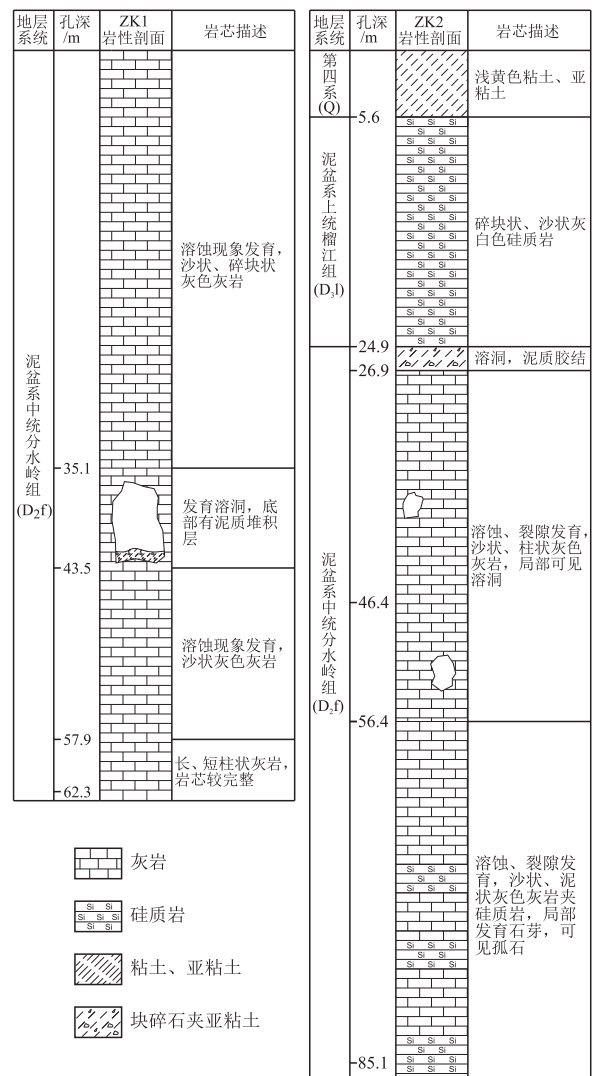


图6 小河尾水库 ZK1、ZK2 钻孔岩性柱状图

同时验证钻孔提高了大功率充电法地质解释的可靠性。

(3) 小河尾水库渗漏通道形成机理为地下水流线受上覆地层榴江组(D₃l)及下伏地层坡折落组(D₂p)碎屑岩阻隔,可溶岩、可溶岩与非可溶岩接触带长期接受地下流水侵蚀、溶蚀形成岩溶裂隙,小河

尾水库库水沿着岩溶裂隙径流,从而形成固定的岩溶渗漏通道。

参考文献

- [1] 陈贻祥, 邬健强, 黄奇波, 等. 水中自然电场法探测病态水库岩溶渗漏通道——以金鸡河水库一级水电站为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 883-891.
- [2] 卢耀如. 岩溶地区主要水利工程地质问题与水库类型及其防渗处理途径[J]. 水文地质工程地质, 1982, (4): 15-22.
- [3] 韩凯, 陈玉玲, 陈贻祥, 等. 岩溶病害水库的渗漏通道探测方法——以广西全州县洛潭水库为例[J]. 水力发电学报, 2015, 34(11): 116-125.
- [4] 赵瑞, 许模. 水库岩溶渗漏及防渗研究综述[J]. 地下水, 2011, 33(2): 20-22.
- [5] 冷元宝, 朱文仲, 何剑, 等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2): 59-62.
- [6] 葛双成, 江影, 颜学军. 综合物探方法在堤防质量检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 263-272.
- [7] 郝喆, 李喜林, 王来贵. 综合物探技术在铁路采空区探测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2015, 26(4): 67-73.
- [8] 才庆喜. 用充电法和声电法探测岩溶地下水通道[J]. 河北地质学院学报, 1984, (3): 83-90.
- [9] 欧阳耕. 充电法探测较深部暗河的探讨[J]. 铁道工程学报, 1989, (2): 184-187.
- [10] 张兆京. 大功率多源充电法在黄山铜镍矿区的应用[J]. 物探与化探, 1997, (5): 363-365+347.
- [11] Pant S R. Application of 2D-ERT in Feasibility Study of Hydropower Projects in Nepal [C]//Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Environment and Engineering Geophysical Society, 2005: 344-357.
- [12] Mitrofan Horia, Povară Ioan, Maftciu Mihai. Geoelectrical investigations by means of resistivity methods in Karst areas in Romania[J]. Environmental Geology, 2008, 55(2): 405-413.
- [13] 陈玉玲, 甘伏平, 卢呈杰, 等. 裸露岩溶区地下河管道综合地球物理方法探测研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1608-1616.
- [14] 陈贻祥, 韩凯, 甘伏平, 等. 基于一阶差分的岩溶管道充电法电位水平梯度异常分离方法[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1465-1473.
- [15] 韩凯, 郑智杰, 甘伏平, 等. 利用多源大功率充电法定位复杂岩溶含水通道的方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(05): 1501-1510.
- [16] 何裕盛. 地下动态导体充电法高精度定量解释[J]. 物探与化探, 2001, (3): 215-223.
- [17] 中国有色金属工业总公司物化探管理中心, 西北有色物化探总队. 直流充电法技术规程(DZ/T 0186-1997)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

作者简介: 王开勋(1988—), 男, 工程师, 本科, 从事水文地质与工程地质勘察工作。E-mail: 2429878473@qq.com

通讯作者: 贺昌坤(1996—), 男, 助理工程师, 硕士, 从事水文地质与工程地质勘察工作。E-mail: 2294283319@qq.com