

综合物探探测豫北灰岩区薄覆盖层隐伏断层方法研究

朱 瑞, 任云峰, 熊 奇, 薛 寒

Study on the method of comprehensive geophysical prospecting for detecting the thin overburden buried faults in limestone area in northern Henan

ZHU Rui, REN Yunfeng, XIONG Qi, and XUE Han

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例

Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example
何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 47-56

平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析

§{suggestArticle.titleEn}

房浩, 李巧灵, 雷晓东, 王海刚, 李晨, 关伟, 何 水文地质工程地质. 2020, 47(1): 153-160

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones
张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area
梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

不同风化程度下灰岩抗剪强度特性及估算模型研究

A study of shear strength characteristics and estimation model of limestone under different weathering degrees
邓涛, 廖军, 王陈宾, 唐刚, 钱小龙, 龚洪苇 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 71-80

西藏波密冰川覆盖区大型河流与断裂带地下水转化关系

Transformation characteristics of the large-flow river and groundwater in the fault zone in the glacier-covered area of Bomi in Tibet
马剑飞, 李向全, 张春潮, 付昌昌, 白占学, 王振兴 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 23-33



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211058

朱瑞, 任云峰, 熊奇, 等. 综合物探探测豫北灰岩区薄覆盖层隐伏断层方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 154-166.
ZHU Rui, REN Yunfeng, XIONG Qi, et al. Study on the method of comprehensive geophysical prospecting for detecting the thin overburden buried faults in limestone area in northern Henan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 154-166.

综合物探探测豫北灰岩区薄覆盖层 隐伏断层方法研究

朱 瑞, 任云峰, 熊 奇, 薛 寒

(河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016)

摘要: 隐伏断层的精准识别对于水利建设工程至关重要。物探是快速识别隐伏断层的有效方法。由于地球物理问题的多解性, 单一物探方法又带有片面性。如何选用优化物探方法组合快速准确识别隐伏断层, 是目前亟须解决的难点和热点问题。在综合分析豫北太行山灰岩区各类岩土体物性特征和现场地质条件的基础上, 分别对 F1 小尺度张扭性正断层和 F16 大尺度扭性平移-正断层开展高密度电法、地震反射波法、折射层析法和瞬态瑞雷面波法等综合物探方法的探测研究工作。研究发现, 折射层析法和地震反射波法联合探测成果分别从横波速度和反射波同相轴变化特征完整揭示了 F1 断层的发育特征。而对于 F16 断层, 高密度电法、地震反射波法和瞬态瑞雷面波法综合探测成果异常区高度吻合, 折射层析法也取得一定效果。经钻探和孔内电视验证, F16 断层规模庞大, 并伴生溶洞, 与物探结果吻合。研究结果表明, 地震反射波法和折射层析法相结合探测类似 F1 断层, 可有效降低解译成果的多解性, 节省探测成本。采用高密度电法普查、地震反射波法和瞬态瑞雷面波法详查, 实现了类似 F16 断层的快速准确识别。两种组合探测技术能够快速确定灰岩区两类典型薄覆盖层隐伏断层的位置、深度、产状和性质, 有效避免探测工作的盲目性和片面性, 为类似工况的高效探测提供了新思路, 也将会在该领域发挥更大作用。

关键词: 灰岩区; 薄覆盖层; 隐伏断层; 综合物探; 精准探测

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0154-13

Study on the method of comprehensive geophysical prospecting for detecting the thin overburden buried faults in limestone area in northern Henan

ZHU Rui, REN Yunfeng, XIONG Qi, XUE Han

(Henan Water & Power Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

Abstract: Accurate identification of the buried faults is crucial for the water conservancy projects construction. Geophysical exploration is an effective method for identifying buried faults quickly. However, due to the multi-solution nature of geophysical problems, a single geophysical method is also one-sided. Therefore, the selection of an optimized combination of geophysical methods to identify buried faults quickly and accurately is currently a difficult and hot issue to be addressed. Based on the comprehensive analysis of the physical characteristics of various rock and soil masses and on-site geological conditions in limestone area of Taihang Mountain in northern

收稿日期: 2022-11-21; 修订日期: 2023-03-31

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 信阳市四水共治及城市供水工程科研项目(YSY2023JF070); 河南省水利厅水利攻关科技项目(GG201907)

第一作者: 朱瑞(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质工程和工程物探方面的研究工作。E-mail: huashuizhurui@163.com

Henan, the comprehensive geophysical exploration methods such as electrical resistivity tomography, seismic reflection survey, refraction tomography and transient Rayleigh surface wave method were carried out for the F1 small-scale tensional torsional normal fault and F16 large-scale torsional translational normal fault respectively. It is found that the combined exploration results of refraction tomography and seismic reflection survey fully revealed the development characteristics of F1 fault from the characteristics of shear wave velocity and reflection wave events respectively. For the F16 fault, the comprehensive detection results of electrical resistivity tomography, seismic reflection survey, and transient Rayleigh surface wave method are highly consistent in the abnormal areas, and the refraction tomography has also achieved complete results. F16 fault was verified by drilling and borehole television to be massive and associated with caves, which is consistent with the physical results. The research results show that the combination of seismic reflection survey and refraction tomography for detecting similar F1 fault can reduce the multiplicity of interpretation results and save exploration costs effectively. Using electrical resistivity tomography, seismic reflection survey and transient Rayleigh surface wave method for detailed investigation, rapid and accurate identification of faults similar to F16 has been achieved. The two combined detection techniques can determine the location, depth, occurrence and nature of two types of typical thin overburden buried faults in limestone areas quickly, and could reduce blindness and one-sidedness in the detection work effectively, provide a new idea for efficient detection for similar condition. The proposed method could play a greater role in this field.

Keywords: limestone area; thin overburden; buried fault; comprehensive geophysical prospecting; accurate detection

山区断层常常被较薄的第四纪松散沉积层覆盖, 形成薄覆盖隐伏断层而成为工程勘察的难点。豫北太行山灰岩区发育两类典型薄覆盖隐伏断层: 一类为小尺度钙质胶结型张扭性正断层, 发育规模较小, 断带重胶结, 岩体完整性较好, 不易识别和探测; 另一类为大尺度扭性平移-正断层, 系山前断裂之次级断层, 规模庞大, 断层及其影响带地层紊乱并伴生溶洞。传统勘察以钻探和地质测绘为主, 只能获取点状或地表出露信息, 单一物探方法又具有较强的多解性和片面性, 勘察效果有限。而综合物探技术通过观测岩土体多种物性响应特征, 快速高效获取丰富的二维、三维物探成果, 相互佐证, 再加以钻探验证, 可实现复杂地质条件下隐伏断层的快速、精确定位^[1-5]。

目前, 工程上常用于探测薄覆盖隐伏断层的物探方法以高密度电法、地震法和电磁测深技术为主。21 世纪以来, 国内许多学者对薄覆盖隐伏断层的探测进行了应用和研究, 尝试应用综合物探技术实现地质构造的精准定位^[6-10]。何正勤等^[11]运用浅层地震波法对复杂隐伏断层进行探测, 实现了沿海地区淤泥、黏土和砂层多重互层情况下隐伏断层的精确定位。李华强等^[12]进一步验证了高分辨率二维地震在隐伏断层探测中对断层性质识别的优越性。鄞少英等^[13]针对薄覆盖区隐伏断层, 联合应用折射地震数

据和浅层反射地震, 两种方法实现了优势互补。李建军等^[14]采用探地雷达探测东昆仑断裂带东部浅覆盖区隐伏活动断层, 能够清晰地刻画隐伏断层的形态特征并对上部岩土分层, 证明探地雷达可作为探测薄覆盖区隐伏活动断层的有效方法。姜国庆等^[15]以废黄河断裂为例, 通过正演模拟和实测数据反演处理详细研究了薄覆盖隐伏断层的电场响应特征, 取得良好效果; 李文鹏等^[16]在黑河中游盆地南部山区采用音频大地电磁法, 清晰反映了山区隐伏基岩断裂和山盆边界上发育叠瓦状的两级断裂接触关系。林承灏等^[17]介绍了以电成像法为主、浅层地震反射波法为辅的综合物探方法对隐伏断层进行探测的应用实例, 经钻孔验证, 电成像与浅层地震联合方法在薄覆盖区隐伏断层探测中具有精确、可靠、经济的优势, 同时具有较强的应用价值。李富等^[18]综合运用高密度电法、大地电磁法和土壤氦气法 3 种物化探方法, 并结合地质测绘和钻探资料综合处理与解译, 精确定位了安宇河东支秧财沟隐伏活动断裂; 朱瑞等^[19]运用二维、三维高密度电法成功探测了灰岩区山前断裂, 并揭示了断层三维空间发育特征。尽管在隐伏断层探测方面已有大量研究和应用, 但多局限于单一物探手段或是多种物探方法的简单叠加, 并未针对某种地质问题形成一套成熟高效的联合探测技术。也未见到通过对

比研究多种物探方法探测效果进而提出针对灰岩区两类典型隐伏断层的高效联合探测方法。

基于此, 优选高密度电法、地震反射波法、瞬态瑞雷面波法和折射层析法对两条隐伏断层进行综合探测, 详细分析各种物探方法对两种断层的综合探测效果, 并根据断层对物探方法的响应特征, 提炼出一套针对灰岩区两类典型薄覆盖隐伏断层探测的优化物探方法组合。

1 工区地质概况

研究区为一拟建水库场地, 位于豫北太行山南缘, 河谷走向近南北, 两岸为低山山体, 水库坝址位于研究区中部(图 1)。坝址区地层及物理参数统计见表 1。

表 1 工区地层物理参数统计
Table 1 Physical parameters statistics of the site stratigraphic

地层时代	代号	岩性	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	纵波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横波速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
第四系	Q	重粉质壤土、粉质黏土	15 ~ 50	300 ~ 400	200 ~ 300
		碎石土、泥卵石	50 ~ 200	400 ~ 1 800	300 ~ 800
奥陶系	O	灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩	400 ~ 5 000	2 000 ~ 5 000	1 000 ~ 3 000
		断层角砾岩	400 ~ 5 000	1 500 ~ 1 800	1 000 ~ 1 200
		断层破碎带	15 ~ 200	1 000 ~ 1 500	800 ~ 1 000

F1 断层出露于上坝址左岸山坡, 钻孔 CLSZK3 也揭露了该断层, 说明断层横切河床, 隐伏于河床覆盖层。根据地质测绘信息推测覆盖层厚约 3 ~ 10 m, 为卵石混合土。断层平面走向 20° ~ 25°, 与河床走向近垂直, 倾向北西, 倾角大于 80°, 属于张扭性正断层^[20], 断面呈舒缓波状, 并伴随溶蚀现象。断层上、下两盘地层有明显错动, 实测断距约 1.5 m。经过两盘错动之后断带重胶结, 肉眼可见钙质胶结断层角砾岩(图 2), 断层出露规模较小, 地表出露视宽度约 1.5 m。

F16 断层出露于下坝址左岸山坡, 为扭性平移-正断层, 断层带由钙质胶结糜棱岩组成。断层两侧有断层泥, 厚 3.0 ~ 5.0 cm。断层北盘向西, 南盘向东, 北盘影响带地层紊乱, 岩体破碎, 局部见角砾岩(图 3), 可见宽度 3.0 ~ 10.0 m。断层走向约 45°, 倾向南东, 倾角约 75°。根据走向判断, 该断层隐伏于河床和右岸山体覆盖层, 属于大型山前断裂之次级断层。

2 综合物探方法介绍

2.1 高密度电法

高密度电法又叫电阻率层析成像(electrical resistivity tomography, ERT), 以介质电性差异为基础, 研究在人工电场作用下, 通过获取并分析海量电阻率数据

统计结果显示, 工区覆盖层和基岩在电阻率和纵、横波速度上均存在较大差异, 钙质胶结断层和围岩存在一定的速度差异, 山前断裂带地层紊乱形成典型的低速、低阻带, 为物探工作提供了良好的前提条件。在大地构造上, 工区地处晋东南部山字型构造弧顶内侧, 太行山台拱南麓。区内岩层总体走向北东向或近东西向, 呈现平缓单斜构造特征。区内断层构造较发育, 主要由一套近东西向高倾角正断层组成, 属于太行山南缘山前断裂, 局部发育小型褶皱, 受区域构造应力影响, 主断裂两侧发育多条次级断层^[20]。选择区内 F1 断层和 F16 断层进行综合研究。其中, F1 代表小尺度钙质胶结型张扭性正断层, F16 代表大尺度扭性平移-正断层。

的分布规律, 从而查明地质结构的一种电探方法^[21-22]。覆盖层与基岩具有明显的电性差异, 为开展高密度电

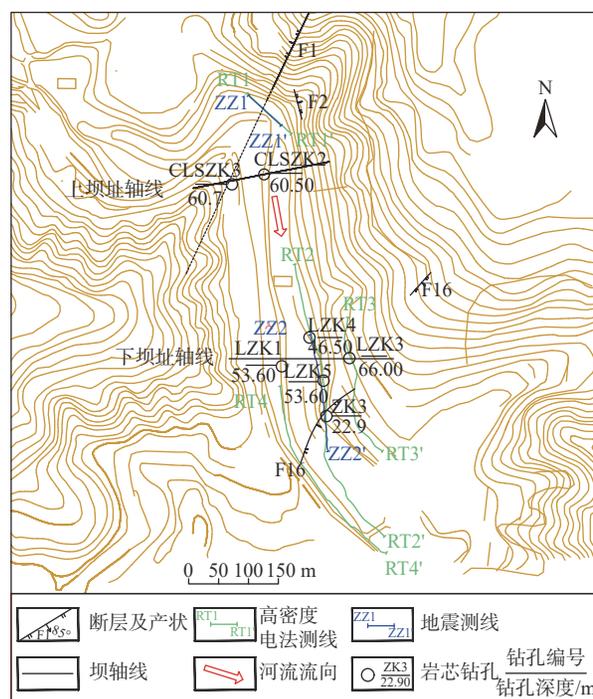


图 1 工作区地形及物探测线布置图
Fig. 1 The layout plan of the topography and geophysical survey line of the work area

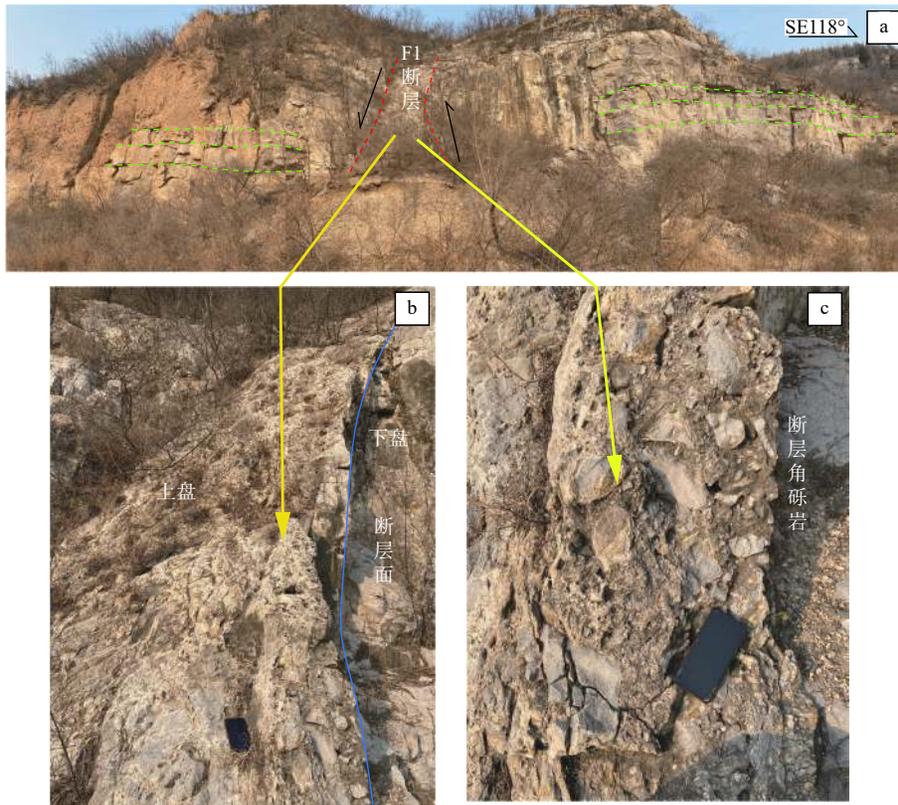


图 2 上坝址左岸 F1 断层

Fig. 2 Fault F1 on the left bank of the upper dam site

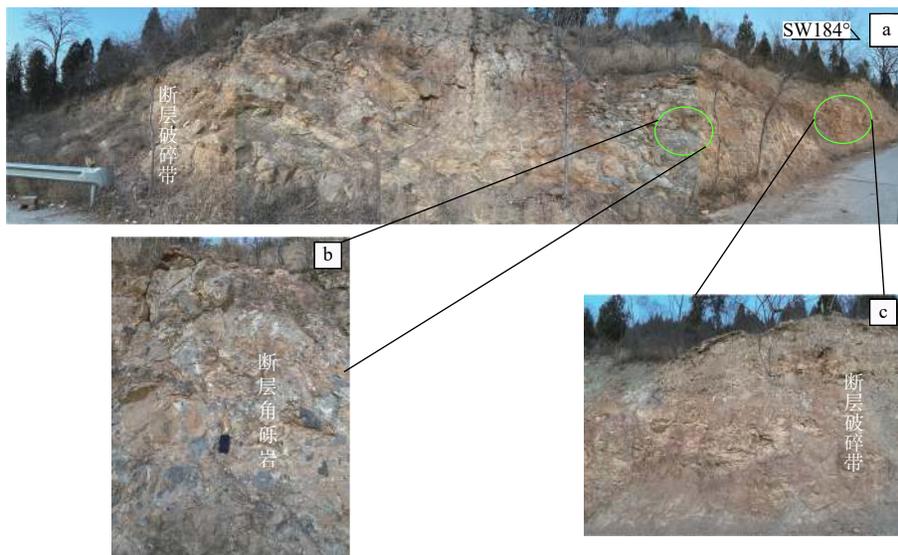


图 3 下坝址左岸 F16 断层

Fig. 3 Fault F16 on the left bank of the lower dam site

法提供了良好的前提条件。本次工作使用重庆地质仪器厂研制的 DZD-8 型分布式高密度电法仪, 利用 Geogiga Rimgager 软件对数据进行最小二乘反演处理。

2.2 地震反射波法

地震反射波法是以介质的弹性差异为基础, 分析地震反射波叠加剖面同相轴的变化, 探明地下结构的

物探方法^[23]。该方法在地层和复杂断裂划分上具有较高精度^[24-25]。隐伏断层往往会引起反射波同相轴的错断、缺失、扭曲或分叉。本次工作采用短排列、小道距、多次覆盖的工作方式。现场采用合肥国为电子有限公司研制的 GS201 型分布式地震仪, 采用灵活的 12 磅锤击震源。现场测线布置如图 1 所示, 数据处理

采用 Geogiga Seismic Pro 软件。

2.3 地震折射层析

地震折射层析(地震折射 CT)是利用折射波初至走时,通过射线追踪正演和非线性迭代逐层反演得到地下介质速度结构的一种地震勘探方法。与传统折射法相比,无需对时距曲线进行分层和拼接,对速度渐变和地层速度横向不均匀的地层均能得到合理精确的速度结构,解决实际生产中的许多难题^[26-29]。本次地震折射层析是利用反射记录中的初至波,进行射线追踪反演,得到纵波速度成果。

2.4 瞬态瑞雷面波法

瞬态瑞雷面波勘探方法是 1887 年英国人瑞雷发现并迅速发展起来的一种近地表弹性波勘探新技术^[30]。利用面波频散特性,从人工激发地震记录中分离面波成分,提取频散曲线并进行反演处理,获得地层面波速度,继而解译地质结构。与常规弹性波勘探相比,该方法同时应用了波的动力学和运动学特征,因此具有较高的分辨率^[31-32]。现场数据采集所用仪器与反射波法相同,仅更换为 4.5 Hz 低频检波并配备 70 kg 落锤震源以获取丰富的面波数据。

3 隐伏断层综合物探探测

3.1 F1 断层探测

F1 断层出露于上坝址左岸山坡,走向与河道近垂直,隐伏于河床覆盖层。在河床内垂直断层走向自上游至下游布设物探测线(图 1),分别采用高密度电法(测线 RT1)、地震反射波法(测线 ZZ1)和地震折射层析(测线 ZZ1)进行联合探测。高密度电法和地震测线基本重合,方向一致。高密度电法采用 1 m 电极距,温纳装置,一次测量完成,测线长 100 m;地震反射采用多次覆盖观测系统,道间距 2 m,偏移距 10 m,炮间距 4 m,24 道滚动采集,覆盖次数为 6 次;地震折射层析是利用反射记录中的初至波,进行射线追踪反演,得到纵波速度成果。

高密度电法反演电阻率剖面(图 4a)显示高阻、低阻电阻率特征明显,电阻率范围为 50~1 500 $\Omega\cdot\text{m}$ 。结合地质、钻探和物性资料对高密度电法反演剖面进行地质解释。剖面整体分为两层,电阻率曲线近水平发育,推测地层较稳定,与河床第四纪冲洪积地层发育规律一致。剖面浅部电阻率普遍小于 200 $\Omega\cdot\text{m}$,推测为覆盖层,以泥卵石和重粉质壤土为主。测线平距 0~60 m,覆盖层逐渐加深,厚度范围 5~9 m,底部发育高程 193~195 m。平距 60 m 之后,该层逐渐变薄直至

基岩出露。覆盖层局部发育孤立低阻团,分析认为河床分布有不均匀泥卵石,加之灰岩渗透性较差,物探作业期间正值汛期,雨水下渗遇到重粉质壤土透镜体富集所致。剖面下部电阻率范围值为 200~1 500 $\Omega\cdot\text{m}$,推测为下伏灰岩,基岩面起伏较大,随着测线平距增大,基岩面先下降后上升,测线平距 100 m 处,基岩埋深小于 1 m,与测线末端靠近山体有关。剖面下部电阻率随深度增加逐渐增大,未见低阻异常,推测基岩较完整。在已知 F1 断层处,高密度电法反演剖面显示,下伏基岩电阻率曲线稳定平滑,无异常跳变现象,断层出露处无明显异常响应。右岸钻孔 CLSZK3 显示,岩芯呈柱状,钙质胶结,岩体完整,断层带为角砾岩,性质与地表出露一致。综合分析断层出露特征和 CLSZK3 钻孔信息,推测由于断层带钙质胶结完整性较好,断层角砾岩与上下两盘灰岩电阻率差异较小,从而大大降低了高密度电法的敏感性,难以识别断层异常,需要借助其他物探方法查明断层特征。

为进一步研究 F1 断层对人工电场的微观响应特征,提取 190, 192, 195 m 高程电阻率值并研究其随水平距离的变化规律(图 5a),在平距 20~60 m,3 个高程电阻率曲线均呈现无规律的高低跳变波动现象,与河床覆盖层不均匀的特征相呼应。平距 37 m 处对应 F1 断层出露位置,但 190 m 高程电阻率曲线并未出现明显低阻异常,进一步证明断层带与围岩电阻率差异较小,致使高密度电法未能有效识别。

地震折射层析结果如图 4(b)所示。在剖面高程 195 m 附近,速度梯度变化较大,为明显突变界面,上部速度范围值为 600~1 600 m/s,推测为泥卵石夹重粉质壤土。下部速度范围值为 1 600~5 600 m/s,推测为完整灰岩。基岩面发育高程为 191~196 m,埋深 4~9 m,与高密度电法结果一致。测线平距 35~40 m 处发育囊状低速异常带,倾向上游,视倾角约 50°,与左岸出露产状基本一致。低速带中心波速为 1 800 m/s,明显低于围岩波速,同时异常中心与 F1 断层平面位置一致。由于采用短排列、小道距导致有效探测深度有限,未能完全揭露断层深部发育特征,也致使异常带呈现囊状而未下探。鉴于该方法探测效果的局限性,应采用地震反射波法进一步探测断层深部发育情况。

为识别 F1 断层对地震波场的微观响应特征,提取 190, 192, 195 m 高程纵波速度值并研究其随水平距离的变化规律(图 5b),在平距 40 m 处,3 个高程纵波速度曲线均出现明显低速异常,位置与 F1 断层出露一致。进一步印证了折射层析技术对 F1 断层探测的

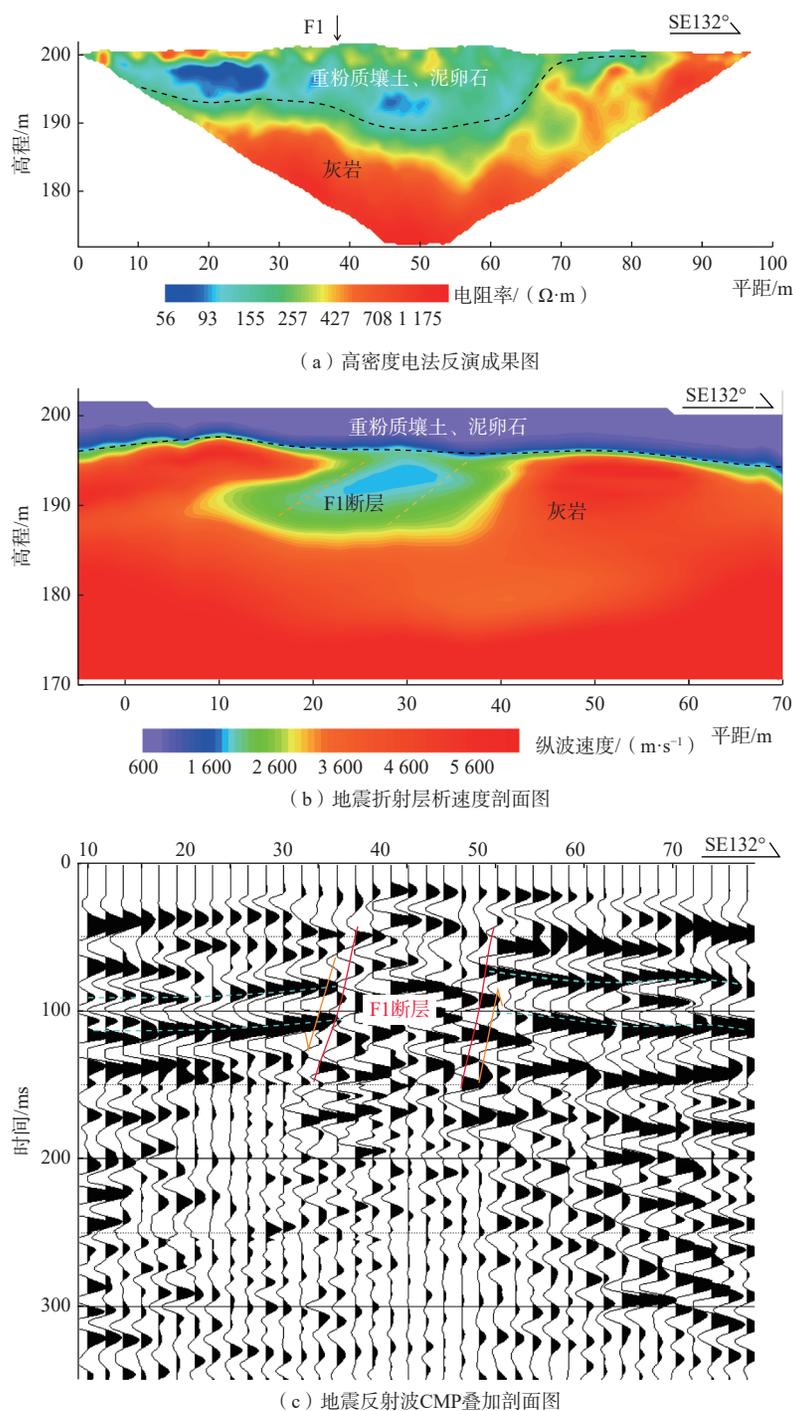


图 4 F1 断层综合物探成果图

Fig. 4 The Comprehensive geophysical prospecting results of fault F1

有效性, 揭示了断层与围岩体的速度特征。

地震反射波探测结果如图 4(c) 所示。35 ~ 40 ms 发育连续同相轴, 换算深度约 10 ~ 12 m, 在测线平距 30 ~ 50 m 附近同相轴紊乱, 推测该层为基覆界面, 结果与高密度电法和折射层析基本一致。图中 100 ms 处发育两组连续同相轴, 换算深度约 100 m, 在测线平距 35 ~ 45 m, 波形紊乱, 同相轴错断, 并发育绕射波, 推

测为 F1 断层。探测结果进一步说明了该断层在深部地层仍有发育。根据对两组同相轴的追踪, 结果显示, 在平距 45 m 后该组同相轴向上小幅度抬升。综合判断, 该断层为正断层, 倾向上游, 视倾角约 70°。

高密度电法反演结果根据电阻率变化特征, 直观反映了由卵石与重粉质壤土构成的二元地层结构的不均匀性, 同时揭露了下伏基岩面的起伏形态, 基岩

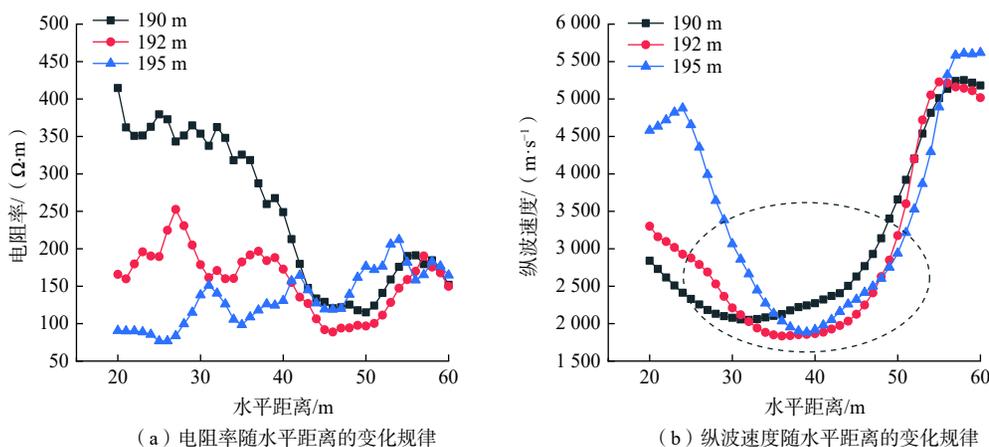


图 5 F1 断层关键高程不同物性参数随水平距离变化规律

Fig. 5 Variation law of different physical parameters of fault F1 key elevation with horizontal distance

面埋深与地震折射层析结果基本一致, 但该方法对 F1 断层反应不敏感。借助地震折射层析探测结果明确了断层位置及产状, 而地震反射结果根据同相轴错位特点, 进一步揭示了断层性质及深部发育情况, 其形态特征与折射层析探测结果高度吻合。可见, 同时采用折射层析和地震反射波法, 探测结果优势互补, 可快速高效准确识别钙质胶结型隐伏断层, 并有效降低单一物探方法多解性和施工成本。

3.2 F16 断层探测

F16 断层出露于下坝址左岸山坡, 隐伏横切河床, 与 F1 断层相距约 600 m。在河床内垂直断层走向自上游至下游布设物探测线(图 1)。高密度电法(测线 RT2)测线长 495 m, 电极距 5 m, 温纳装置, 一次测量完成; 地震测线起始于高密度测线的 140 m 处, 采用多次覆盖观测系统, 道间距 2 m, 偏移距 10 m, 炮间距 4 m, 24 道滚动采集, 覆盖次数为 6 次; 地震折射层析是利用反射记录中的初至波, 进行射线追踪反演, 得到纵波速度成果。面波测线剖面起点位于高密度电法测线 170 m 处, 采用 4.5 Hz 低频检波器, 追逐观测系统, 道间距 2 m, 偏移距 10 m, 炮间距 4 m, 24 道滚动采集, 获取高密度频散曲线。

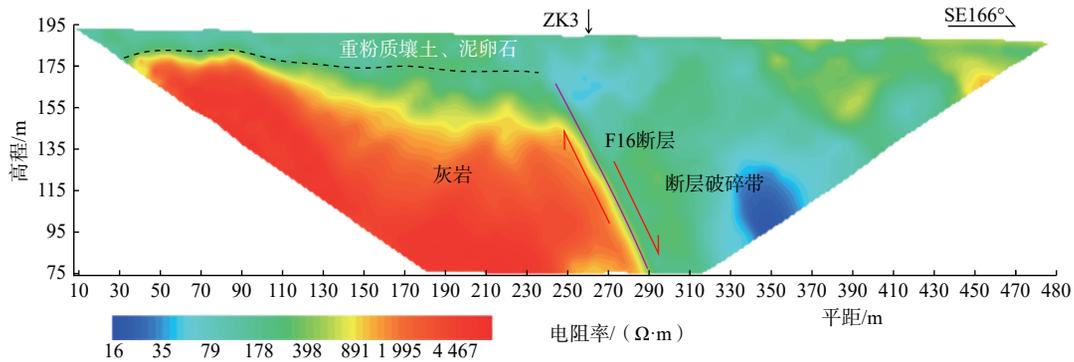
高密度电法反演剖面(图 6a)显示, 高阻、低阻电阻率呈现明显的分区特征。测线平距 0 ~ 260 m, 电阻率曲线分层较好, 但整体起伏较大, 高程 175 ~ 185 m, 电阻率小于 200 $\Omega \cdot m$, 推测为泥卵石夹重粉质壤土, 局部发育高阻晕团, 电阻率约 300 $\Omega \cdot m$, 表明河床覆盖层地层不均匀, 符合河床覆盖层二元地层结构特征。剖面下部电阻率范围值为 200 ~ 6000 $\Omega \cdot m$, 推测为完整灰岩, 基岩面埋深 10 ~ 20 m, 沿测线平距增大方向逐渐加深, 整体起伏较大。在测线平距 260 m 处基岩面

突然下降, 探明下切深度 120 m, 该处形成视倾角约 70°的陡崖, 同时电阻率值骤降, 并在测线平距 260 ~ 430 m 之间形成大范围低阻异常区, 局部发育甚低阻和高阻晕团。在地质测绘的基础上, 依据地质地貌学逻辑辩证法, 排除两岸冲沟下切可能, 判定该处异常为 F16 断层形成的大规模破碎带。为验证高密度电法推测结果, 在平距 260 m 处布设钻孔 ZK3, 揭露覆盖层厚度 19 m, 为重粉质壤土与泥卵石二元结构。在孔深 21.7 m 处发现溶洞(图 7), 钻探期间正值盛夏, 终孔之后, 孔口冒风, 推测溶洞延伸较远, 具有一定规模。

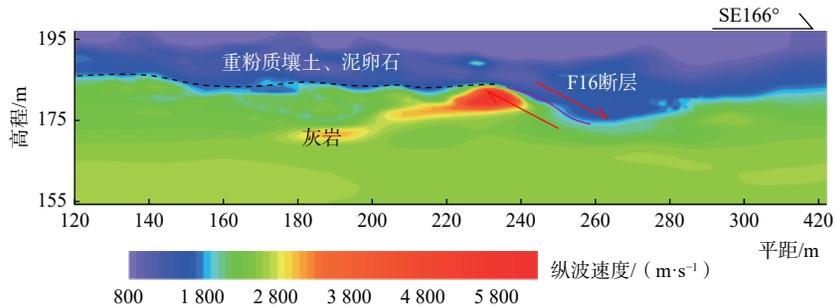
为进一步研究 F16 断层对人工电场的微观响应特征, 提取图 6(a)剖面 175, 179, 183 m 高程电阻率值并绘制其随水平距离的变化曲线(图 8a)。曲线图显示在平距 240 m 处, 三个高程电阻率值均骤降, 最低至 60 $\Omega \cdot m$, 与等高程电阻率值形成鲜明对比, 从微观上揭示了断层带电阻率特征。

地震折射层析反演结果如图 6(b)所示。速度剖面整体分为两层, 高程 185 m 以上纵波速度为 800 ~ 1600 m/s, 推测为泥卵石夹重粉质壤土; 下部 1600 ~ 3000 m/s, 为下伏灰岩。速度梯度在高程 185 m 处变化最大, 推测为基岩面。基岩面埋深 15 ~ 18 m, 沿测线平距增大方向逐渐加深, 最深处达 21 m。在测线平距 240 ~ 260 m 处, 基岩面略有起伏, 形成囊状低速带, 位置与高密度电法判定 F16 断层结果一致, 但断层产状有所出入。分析认为, 可能是由于断层处下伏完整基岩面起伏变化剧烈, 导致基于层状介质原理的折射层析法不能准确识别断层产状。

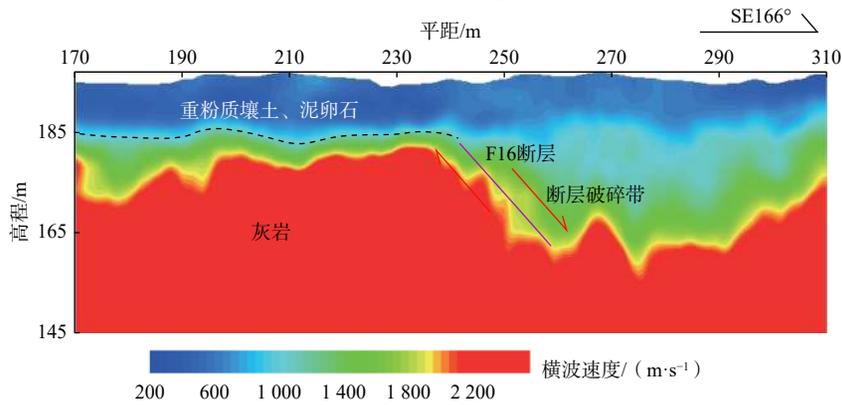
瞬态瑞雷面波反演成果如图 6(c)所示。视横波速度剖面显示, 测线平距 170 ~ 250 m 范围内, 剖面上部速度为 200 ~ 800 m/s, 下部速度为 800 ~ 2200 m/s,



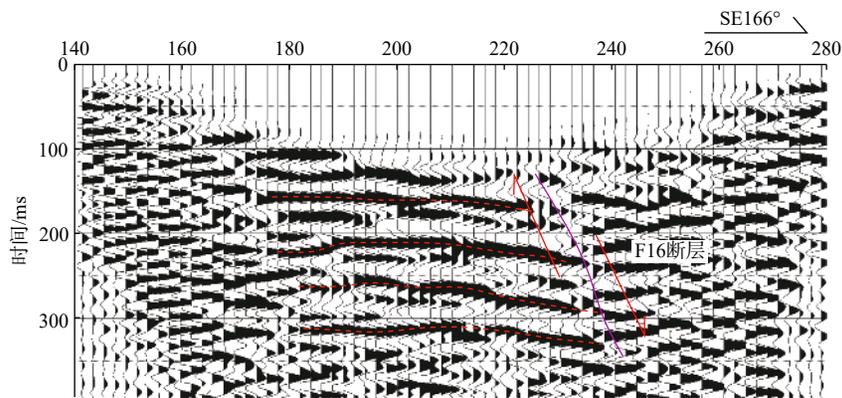
(a) 高密度电法反演成果图



(b) 地震折射层析速度剖面图



(c) 瞬态瑞雷波反演成果图



(d) 地震反射波CMP叠加剖面图

图 6 F16 断层综合物探成果图

Fig. 6 The comprehensive geophysical prospecting results of fault F16

在高程 185 m 处速度梯度变化最大, 形成清晰的速度突变界面, 推测为基岩面, 与折射层析结果相互印证,

弥补了高密度电法对基岩面的探测误差。在测线 250 m 处, 基岩面急速下降至高程 155 m, 并在测线平距 250 ~

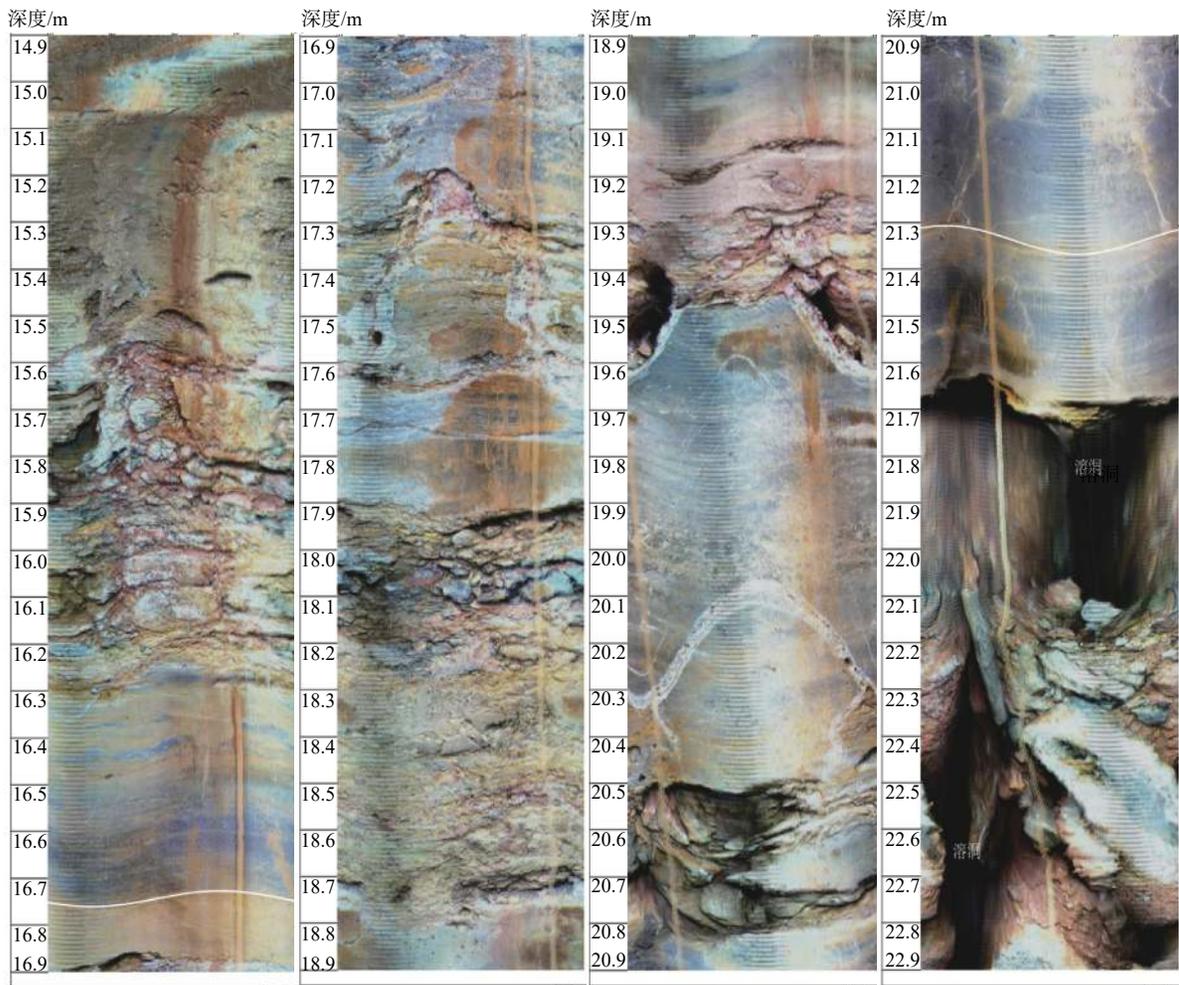


图 7 ZK3 孔内电视揭露断层及溶洞

Fig. 7 Fault and karst cave exposed by ZK3 borehole television

310 m 范围内形成大片低速异常带,其发育位置正好位于高密度揭露异常范围内,可判定为 F16 断层。断层面清晰,倾向下游,视倾角约 70°,这与高密度电法探测结果一致。

为更全面识别 F16 断层的微观速度特征,提取图 6(b)(c)高程 175, 179, 183 m 纵、横波速度值并研究其随水平距离的变化规律,见图 8(b)(c)。在平距 240 m 处,三个高程视纵、横波速度均突然下降,至平距 260~270 m 段出现最低值,与等高程速度值差异较大,揭示了 F16 断层带内部典型的低速特征。

地震反射波探测结果如图 6(d)所示。图中 120~280 ms 发育多组连续同相轴,换算深度约 100~200 m,说明深部发育多套反射地层。在测线平距 230~240 m 处,多组同相轴发生错断,之后有所下降,断点连线倾向下游,倾角约 70°,与高密度电法和瞬态瑞雷面波异常位置一致,同时也表明该断层错断深部地层。综合判断,平距 230~240 m 为隐伏 F16 断层,断面清晰,上

盘下降,为正断层。

高密度电法反演结果从宏观上展示了覆盖层和断层的整体概况,而通过地震折射层析、瞬态瑞雷面波和地震反射波在高密度电法异常区域的精细探测,准确刻画了覆盖层厚度以及下伏基岩面起伏形态。由速度异常精确识别了断层位置、形态和埋深,而通过反射波同相轴的错断特征,揭示了断层的性质。由此可见,以高密度电法、瞬态瑞雷面波和地震反射波法相结合为主的探测组合可作为此类断层的优化探测方案。三种方法由整体到局部,互为补充,层层递进,有效避免了探测工作的盲目性,也弥补了单一物探方法的不足,将大大降低施工成本,提高探测结果的准确性。地震折射层析也可作为辅助探测手段。

为查明 F16 断层的三维空间特征,分别在河道左右两岸自上游至下游各增设 1 条高密度电法测线 RT3 和 RT4(图 1)。结果显示:高密度电法获得了良好的低阻异常,异常特征与测线 RT2 一致。将 3 条测线反

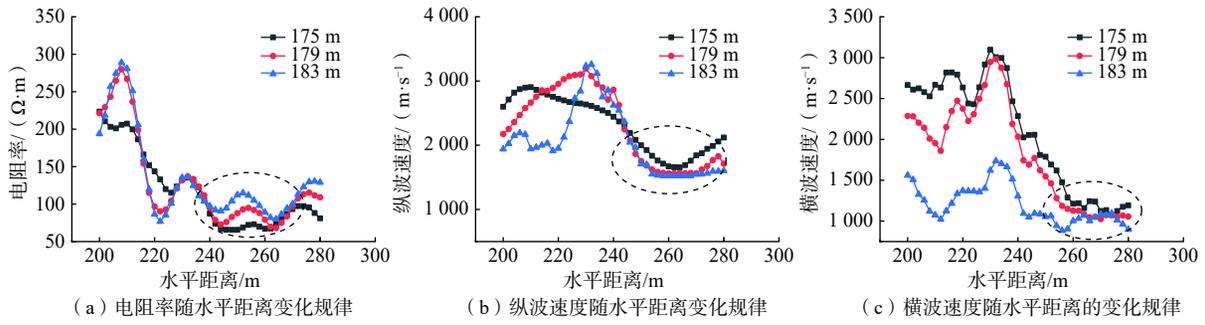


图 8 F16 断层关键高程不同物性参数随水平距离变化规律

Fig. 8 Variation law of different physical parameters of fault F16 key elevation with horizontal distance

演剖面展示在三维空间中(图 9), 异常带连线, 直观反映了断层走向及空间发育特征。将异常带展示在平面

图(图 1)中, 其连线延伸线恰好经过下坝址左岸山坡断层出露点(图 3), 进一步揭示 F16 断层的平面走向。

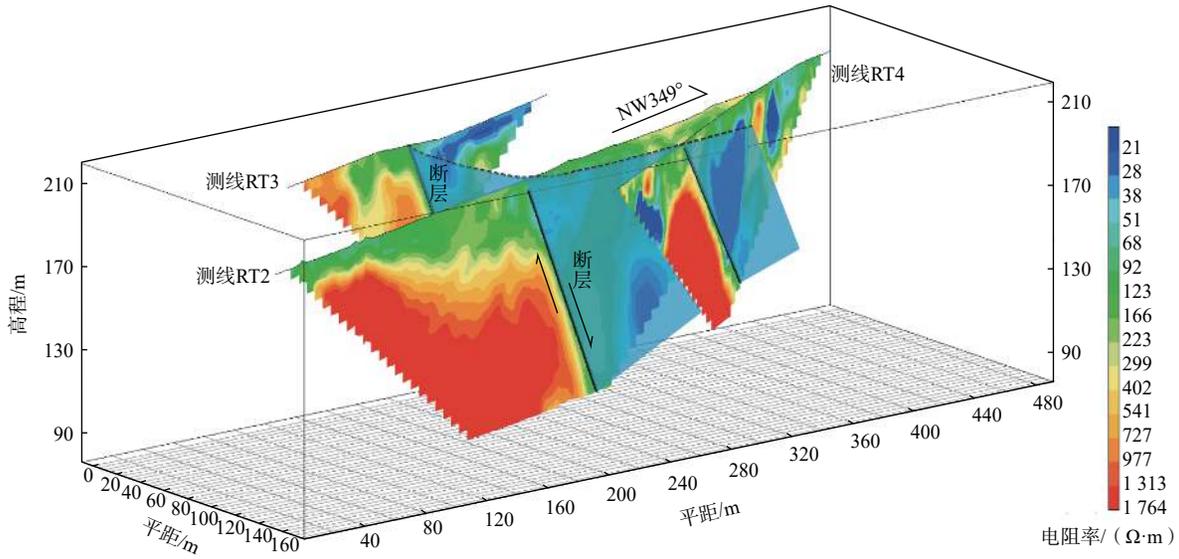


图 9 下坝址高密度电法三维成果图

Fig. 9 The 3D results of electrical resistivity tomography at lower dam site

3.3 探测结果分析

4 种物探方法探测两种断层的统计结果详见表 2。F1 断层为小尺度薄覆盖钙质胶结型张扭性正断层, 折射层析和地震反射分别根据横波速度和反射波同相轴变化特征, 揭示了断层的位置、深度、产状、性质等, 两种方法相互补充, 可作为此类断层的优选探测组合; 而对于 F16 大尺度扭性平移-正断层, 借助高密度电法实现了快速普查。在电法异常区采用折射层

析、瞬态瑞利面波和地震反射波进行详查。详细分析四种方法的探测结果发现, 高密度电法、瞬态瑞雷面波和地震反射波探测结果分别从不同角度揭示断层的单一特征, 各种特征相互补充, 相互印证, 层层递进, 最终确定了断层唯一性的空间发育特征。3 种方法相结合, 为该类断层的高效探测提供了首选方案。折射层析也可作为辅助手段。同时高密度电法三维成果图直观展示了断层的空间发育特征。

表 2 断层和覆盖层地球物理响应特征统计表

Table 2 The statistical table of geophysical response characteristics of different faults and overburden

物探方法	F1断层	F16断层	薄覆盖层
高密度电法	未见明显异常	大范围低阻异常区, 局部发育低阻团	电阻率分布连续稳定, 局部发育低阻团
地震反射波法	同相轴错断、分叉, 发育绕射波	同相轴错断、分叉, 发育绕射波	同相轴平稳连续
地震折射层析	囊状低速带, 而未下探	囊状低速带, 而未下探	纵波速度分布连续稳定, 局部发育低速度团
瞬态瑞利面波	面波不发育	大范围低速异常区, 局部发育低速团	横波速度分布连续稳定, 局部发育低速度团

4 结论与建议

(1) 针对 F1 小尺度张扭性钙质胶结型正断层, 折射层析和地震反射波法组合根据速度和反射波同相轴变化特征, 揭示了断层位置、深度、形态及性质, 两种方法探测结果相互印证, 互为补充, 准确查明了断层特征。

(2) 先采用高密度电法普查、再运用瞬态瑞雷面波和地震反射波法详查, 层层递进, 避免了探测工作的盲目性, 也弥补了单一物探方法的不足, 实现了对 F16 大尺度扭性平移-正断层的有效探测。该组合为类似断层的高效探测提供了一种优化方法。

(3) 高密度电法施工效率高, 能够通过获取丰富的地电信息, 实现工区地质结构的快速探测。但探测结果误差较大, 需要借助地震方法进一步查明各异常所代表的地质意义。地震折射层析和瞬态瑞雷面波探测结果准确明了, 但探测深度有限, 宜作为地震反射波法和高密度电法的辅助手段。

(4) 文中仅仅利用 4 种物探技术试图探索一种高效低廉的组合探测方法, 并未穷尽所有可能的工程物探技术。但经过探测发现, 上述组合探测方法已经可以全方位揭露断层特征。不失为一种具有潜在推广价值的探测技术, 建议在类似工况推广应用。

参考文献 (References) :

- [1] BLOUIN M, GLOAGUEN E. Comprehensive geophysical data integration and stratigraphic contacts delineation in a regional hydrogeological characterization study[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2015, 20(2): 183 - 193.
- [2] METWALY M, ELAWADI E, MOUSTAFA S S R, et al. Combined inversion of electrical resistivity and transient electromagnetic soundings for mapping groundwater contamination plumes in Al quwy'yia area, Saudi Arabia[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2014, 19(1): 45 - 52.
- [3] 包勋, 汤浩, 朱照拔, 等. 综合物探技术在探测隐伏断层中的应用 [J]. *人民珠江*, 2016, 37(12): 29 - 32. [BAO Xun, TANG Hao, ZHU Zhaoba, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method to buried fault detection[J]. *Pearl River*, 2016, 37(12): 29 - 32. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 蒋全科, 雷宛, 黄霄寒, 等. 应用综合电阻率法勘察隐伏断层 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(3): 378 - 384. [JIANG Quanke, LEI Wan, HUANG

Xiaohan, et al. An application of prospecting concealed fault with multi-resistivity method[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(3): 378 - 384. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 赵勇, 王志辉, 罗水余, 等. 综合物探技术在北京山前平原隐伏断层探测中的应用 [J]. *城市地质*, 2013, 8(2): 38 - 41. [ZHAO Yong, WANG Zhihui, LUO Shuiyu, et al. The application of comprehensive geophysical exploration technique to buried fault detection in piedmont plain of Beijing[J]. *Urban Geology*, 2013, 8(2): 38 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 等. 综合物探法在柳州泗角村岩溶塌陷区调查中的应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(5): 143 - 149. [ZHENG Zhijie, AO Wenlong, ZENG Jie, et al. Application of integrated geophysical methods to Karst collapse investigation in the Sijiao Village near Liuzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(5): 143 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 153 - 160. [FANG Hao, LI Qiaoling, LEI Xiaodong, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered Karst collapse in plain areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(1): 153 - 160. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 何军, 刘磊, 黎清华, 等. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 47 - 56. [HE Jun, LIU Lei, LI Qinghua, et al. Techniques for detecting underground space in hidden karst region: Taking Wuhan as an example[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 47 - 56. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 罗尧东, 代群威, 董发勤, 等. 九寨沟“8·8”地震背景下火花海钙华坝体无损探测分析 [J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 147 - 156. [LUO Yaodong, DAI Qunwei, DONG Faqin, et al. Study on non-destructive detection technology on travertine dam in sparkling lake under the background of “8·8” earthquake in Jiuzhaigou valley[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 147 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 赵虎, 张泉, 谭建秋, 等. 基于综合物探方法的公路不稳定边坡潜在滑面探测 [J]. *中国地质灾害与防治学*

- 报, 2022, 33(1): 117 - 122. [ZHAO Hu, ZHANG Quan, TAN Jianqiu, et al. Detection of the potential failure zones of the unstable slopes along highway using comprehensive geophysical methods[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 117 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 何正勤, 陈宇坤, 叶太兰, 等. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用 [J]. 地震地质, 2007, 29(2): 363 - 372. [HE Zhengqin, CHEN Yukun, YE Tailan, et al. Application of shallow seismic exploration in detection of buried fault in coastal areas[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(2): 363 - 372. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李华强, 刘桂梅, 王建新, 等. 高分辨率二维地震勘探在城市活动断层探测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 87 - 91. [LI Huaqiang, LIU Guimei, WANG Jianxin, et al. Application of high-resolution two-dimensional seismic exploration for urban active fault[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 87 - 91. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 鄞少英, 龙长兴, 高锐, 等. 高分辨折射和浅层反射地震方法在活断层探测中的联合应用 [J]. 地震学报, 2010, 32(6): 718 - 724. [FENG Shaoying, LONG Changxing, GAO Rui, et al. Joint application of high-resolution refraction and shallow reflection seismic exploration approach to active fault survey[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(6): 718 - 724. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李建军, 张军龙. 探地雷达在探测隐伏活动断层中的应用 [J]. 地震, 2015, 35(4): 83 - 89. [LI Jianjun, ZHANG Junlong. Application of GPR in surveying underlied active faults[J]. Earthquake, 2015, 35(4): 83 - 89. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 姜国庆, 徐士银, 金永念, 等. 薄覆盖层隐伏断层电场响应特征研究——以废黄河断裂为例 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1824 - 1833. [JIANG Guoqing, XU Shiyin, JIN Yongnian, et al. Electric field response characteristics of buried fault with thin overburden layer: The example of Feihuanghe fault[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1824 - 1833. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李文鹏, 邵新民, 祁晓凡, 等. 黑河中游盆地南部山区地下水对平原区侧向径流补给量的估算 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 1 - 10. [LI Wenpeng, SHAO Xinmin, QI Xiaofan, et al. Estimation of groundwater lateral flow in the southern mountainous area of the middle Heihe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 1 - 10. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 林承灏, 王雷, 黎哲君, 等. 电成像与浅层地震联合在浅覆盖区隐伏断层探测中的应用 [J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 133 - 140. [LIN Chenghao, WANG Lei, LI Zhejun, et al. Application of collocated resistivity tomography and shallow seismic method to the detection of concealed faults in areas with thin covers[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(1): 133 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李富, 周洪福, 唐文清, 等. 物化探方法在隐伏活动断裂探测中综合研究——以安宁河秧财沟断裂为例 [J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1199 - 1205. [LI Fu, ZHOU Hongfu, TANG Wenqing, et al. Comprehensive study of geophysical and geochemical methods in detecting buried active faults: Taking the Yangcaigou fault in Anning River as an example[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(3): 1199 - 1205. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 朱瑞, 李朝辉, 时向阳, 等. 三维高密度电法在隐伏断层探测中的应用 [J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 106 - 109. [ZHU Rui, LI Zhaohui, SHI Xiangyang, et al. Application of 3D electrical resistivity tomography to buried fault detection[J]. Yellow River, 2019, 41(11): 106 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 康继武, 严希敏, 张庆智. 河南修武西村至焦作龙洞地质构造特征——兼论太行山东南麓压扭性正断层的形成机制 [J]. 焦作矿业学院学报, 1981(1): 45 - 55. [KANG Jiwu, YAN Ximin, ZHANG Qingzhi. Geological structural characteristics from Xiuwuxi Village to Jiaozuo Longdong, Henan Province: Also on the formation mechanism of compression-torsion normal fault at the southern foot of Taihang Mountain[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 1981(1): 45 - 55. (in Chinese)]
- [21] 马凤山, 底青云, 李克蓬, 等. 高密度电阻率法在海底金矿含水构造探测中的应用 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4432 - 4438. [MA Fengshan, DI Qingyun, LI Kepeng, et al. Application of high-density resistivity method in detecting water-bearing structures at a seabed gold mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4432 - 4438. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李世峰, 金瞰昆, 周俊杰. 资源与工程地球物理勘探

- [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. [LI Shifeng, JIN Kankun, ZHOU Junjie. Geophysical exploration of resources and engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)]
- [23] 单娜琳, 程志平, 刘云祯. 工程地震勘探 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. [SHAN Nalin, CHENG Zhiping, LIU Yunzhen. Engineering seismic exploration [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese)]
- [24] 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等. 城市活动断裂探测的方法和技术 [J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 93 - 104. [DENG Qidong, XU Xiwei, ZHANG Xiankang, et al. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 93 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 杨歧焱, 彭远黔, 尼玛, 等. 日喀则城市活断层地球物理勘探方法和成果 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2137 - 2147. [YANG Qiyang, PENG Yuanqian, NIMA, et al. Methods and results of geological prospecting along active faults in urban Xigazê[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2137 - 2147. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 王立会, 梁久亮, 彭刘亚. 初至波层析成像技术在隐伏断裂探测中的应用 [J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(1): 29 - 36. [WANG Lihui, LIANG Jiuliang, PENG Liuya. Application of first break tomography technology in detecting hidden fault[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2015, 24(1): 29 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘江平, 王莹莹, 刘震, 等. 近地表反射和折射法的进展及应用 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3286 - 3305. [LIU Jiangping, WANG Yingying, LIU Zhen, et al. Progress and application of near-surface reflection and refraction method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(9): 3286 - 3305. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 李满树, 方伍宝, 周腾, 等. 初至波走时信息在复杂地区近地表速度反演中的应用 [J]. 石油物探, 2004, 43(1): 72 - 75. [LI Manshu, FANG Wubao, ZHOU Teng, et al. Inversion of near-surface velocity through first-arrival travelttime in complex region[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(1): 72 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 陈爱萍, 梁波, 邹文, 等. 初至波地震层析技术及其在四川复杂地区的应用 [J]. 世界地质, 2006, 25(4): 440 - 444. [CHEN Aiping, LIANG Bo, ZOU Wen, et al. First-arrival seismic tomography and its application in complex area of Sichuan[J]. Global Geology, 2006, 25(4): 440 - 444. (in Chinese with English abstract)]
- [30] RAYLEIGH L. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1885(1): 4 - 11.
- [31] 张维, 何正勤, 胡刚, 等. 用面波联合勘探技术探测浅部速度结构 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 2199 - 2206. [ZHANG Wei, HE Zhengqin, HU Gang, et al. Detection of the shallow velocity structure with surface wave prospecting method[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 2199 - 2206. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 安好收, 罗传根. 浅层纵横波联合勘探在活动断层探测中的应用 [J]. 物探与化探, 2019, 43(3): 543 - 550. [AN Haoshou, LUO Chuangen. The application of combined exploration of shallow P-wave and S-wave to active fault detection[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 543 - 550. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农