

刘永亮, 张伟, 刘振宇, 等. 高密度电阻率法和音频大地电磁法在猴场滑坡结构探测中的应用[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 441-453.
DOI: 10.11932/karst20240208

高密度电阻率法和音频大地电磁法 在猴场滑坡结构探测中的应用

刘永亮^{1,2,3}, 张伟^{1,2,3}, 刘振宇⁴, 易连兴^{1,2,3}, 吴秋菊⁴, 梁楠⁴,
甘伏平^{1,2,3}, 邬健强⁵, 韩凯^{1,2,3}

- (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, 广西 桂林 541004;
2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004;
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. 广西壮族自治区地质环境监测站,
广西南宁 530201; 5. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205)

摘要: 文章采用高密度电阻率法和音频大地电磁法对贵州省威宁县猴场滑坡区进行探测, 探究从浅部到深部岩溶及裂缝发育情况、岩溶滑坡体底界面形态及滑坡体结构特征。通过音频大地电磁法划分了滑坡区地层结构, 发现滑坡区发育浅部和深部两层岩溶, 尤其在灰岩与泥页岩界面处的深部岩溶, 加之煤层开采形成的采空区, 是触发滑坡的背景条件; 通过高密度电阻率法探测出的裂缝及岩溶发育区域, 是滑坡体进一步位移拉裂的脆弱区。分析认为, 岩溶发育破坏了滑坡体原来的整体性, 使岩溶山体劣化成零散块体, 是导致滑坡的关键因素之一。

关键词: 地球物理; 岩溶山体; 滑坡; 高密度电阻率法; 音频大地电磁法

创新点: 创新高密度电阻率法和音频大地电磁法的探测、解译组合应用, 为大深度滑坡山体结构探测和岩溶发育识别做出突破, 从结构上分析潜在滑坡拉裂面及滑坡底界面, 为滑坡体稳定性分析提供有效技术方法。

中图分类号: P642.22; P631 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0441-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国山体滑坡灾害事件频发, 对人民生命、财产安全造成重大损失。据调查统计, 仅2020年前三季度, 发生地质灾害7 711起, 其中滑坡4 742起。山体

滑坡灾害调查工作一直被高度重视, 查明滑坡的诱发因素和成灾过程是防治灾害发生的前提, 很多学者针对滑坡成因机制、滑坡特征和滑动过程进行了细致地研究, 产生很多重要的研究成果^[1-8]。而在滑坡体稳定性分析和治理方案的设计过程中应用地球

资助项目: 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》(编号: 2020AB22013)、广西重点研发项目《桂中岩溶复杂区页岩气“甜点”预测技术研发》(编号: 桂科 AB23026062)、广西壮族自治区地质环境监测站项目《漓江流域石山区小流域综合整治关键技术研发与示范》(编号: 桂自然资函【2021】415)、中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目《管道型含水构造二维大功率充电法正演模拟研究》(编号: 2021007)

第一作者简介: 刘永亮(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 从事电磁法理论、三维正反演技术及岩溶地质勘探方法研究。E-mail: liuyongliang198718@163.com。

收稿日期: 2023-02-27

物理技术不可或缺,它能准确地确定滑坡体和滑动面,成为解决工程与环境问题学科交叉发展及应用的前沿研究领域,引起工程界的广泛关注。徐兴倩等对主、被动源地震法、高密度电阻率法、激发极化法以及电磁法在滑坡探测应用中的适用性、分辨率和准确度进行了系统的调查和评述^[9]。其中高密度电阻率法应用最为广泛^[10-16],得益于其快速、廉价、无损的优点,与浅层地震方法结合^[17-21],可降低多解性的影响,提高探测解译的准确度。国外对该方法的应用研究已较为深入,如探测滑坡体内部结构和滑动面^[22],分辨滑坡体裂缝和破裂面^[23],分析地下水循环特征^[24],建立水文力学地质模型^[25],评价滑坡体稳定性^[26]等。研究以关键地质问题出发,溯本求源,值得探讨。在滑坡体结构的探测研究方法中,高密度电阻率法应用广泛,然而单一利用该方法存在多解性的影响,使得解译资料可靠性降低。浅层地震方法与高密度电阻率法的综合应用,能够有效降低多解性的影响,但两种方法都是浅部探测方法,不能应对大深度发育的滑坡底界面和深部水循环特征的探测研究。

2006 年 1 月 27 日贵州毕节市威宁县猴场镇发生山体崩塌,引起学者关注,并开展滑坡体监测和研究。林锋等^[27-28]建立了猴场滑坡发生的概念模型和数值评价模型。冯亮等^[29]通过环境地质条件和现场崩塌堆积场景推演了崩塌过程,得出“么岩脚崩塌属于上硬下软边坡的‘倾倒型’崩塌”,并提出采煤活动是引起崩塌的最重要的原因。易连兴^[30]调查并分析了滑坡区域岩溶发育特征和水文地

质条件,发现滑坡区灰岩与下伏碎屑岩接触带岩溶强发育。认为接触带上的岩溶空间、煤层采空区,以及由褶皱构造和长期扰动形成的滑坡区后缘垂直大型拉裂缝导致不同区域岩层失稳,是岩层下沉或滑坡的基本影响因素,地下水低水位和地下水浮力减小是滑坡区域岩层失稳或滑坡的主要触发因素,并提出并建立了负压水动力场对滑坡或岩层下沉的影响作用新型成灾模式。猴场滑坡地区缺乏有效的物探资料,对滑坡体岩溶发育特征以及拉裂面、滑坡底界面的空间结构特征缺乏有效认知,使得上述研究难以有效分析滑坡山体的稳定性,无法对潜在的滑坡灾害做出准确评估。

本文采用高密度电法和音频大地电磁法综合探测猴场滑坡地区滑坡体内、外部地质结构,岩溶空间发育特征,以及滑动、拉裂面展布情况。通过两种方法综合解译,对滑坡山体结构、岩溶裂隙、拉裂面及滑坡底界面展布特征有了清晰认识,为猴场滑坡体稳定性分析及做出正确的防治减灾措施奠定基础。该探测组合技术,能有效应对大深度发育的滑坡体结构探测,也为岩溶山体岩溶发育特征及水循环特征的探测研究提供思路。

1 水文地质及地球物理特征

猴场滑坡区地处扬子陆块西南缘,黔北台隆-六盘水断陷的威宁西北向构造变形区内,属于威水背斜东北翼的次级宽缓背斜核部,断裂构造不发育,地层平缓,主要地层见表 1。

表 1 猴场滑坡区地层岩性表
Table 1 List of strata and lithology in Houchang landslide area

地层划分	主要岩性特征	厚度/m
栖霞茅口组(P ₂ q+m)	灰至深灰色厚层至块状灰岩夹燧石灰岩、白云质灰岩	约200
梁山组(P ₂ l)	细砂岩、石英砂岩、石英粉砂岩夹灰色页岩、炭质页岩及煤层。层煤多以煤线及透镜体产出,目前发现可采稳定煤层只有1层,位于灰岩与梁山组接触面以下35~50 m深度,可采厚度0.5~0.8 m	110~130

猴场滑坡地区以岩溶峰丛洼地或沟谷地貌为主,灰岩地层广泛分布,且岩溶强发育。地表发育有规模较大的溶蚀沟槽、洼地、谷地以及落水洞,地下则发育规模较大的洞穴和管道,水平和垂向岩溶裂隙以及管道均发育强烈,具有较好的相互连通性和地下水的补给、赋存和运移条件。栖霞茅口组灰岩地层与下伏梁山组碎屑岩地层接触带或附近发育有大

型溶洞或管道。滑坡体后缘区域地下岩溶也强发育,发育有地下管道或洞穴(图 1)。2006 年 1 月 27 日猴场镇发生山体崩塌,崩塌边缘长度近 1 km,后缘发育多条裂缝,其中一条已能在卫星图上清晰查看(图 2)。

测区主要出露栖霞茅口组灰岩和梁山组碎屑岩,包括细砂岩、石英砂岩、石英粉砂岩夹灰色页岩、炭质页岩及煤层。页岩、炭质页岩及煤层电阻率最低,

细砂岩、石英砂岩、石英粉砂岩等碎屑岩电阻率高于页岩、炭质页岩及煤层的电阻率,而灰岩电阻率相对最高。探测的目的,一是岩溶特征及裂缝原位识别,二是探测栖霞茅口组灰岩与梁山组碎屑岩分界面,划分滑坡体底界面。前者以高密度电法探测为主,岩溶和裂缝发育于灰岩内部,往往内部填充泥质和水,相对完整灰岩电阻率较低,个别填充空气,则电阻率相对较高,以此可从电阻率性质上对其探测识别。后者采用音频大地电磁法探测,灰岩与砂页岩电阻率相差较大,易于区分,但需要有一定测深能力的方法穿透上覆灰岩。音频大地电磁法探测深度相对较大,可以探测至梁山组碎屑岩地层深度以下,足以探测岩性界面以及滑动面。

2 方法简介、工作部署及质量评价

2.1 方法简介

高密度电法是以不同岩石之间导电性能差异为基础的一种阵列勘探方法,通过接地电极在地下建立人工电场,电极布设一次完成,测点密度大、信息量大、工作效率高。测量过程中,通过自动转换装置控制电极间的不同排列组合,实现直流电法勘探中的各种装置形式的探测,充分发挥物探技术在勘察中的优势。

在地面顺序布置测点及接地铜棒,并通过电缆与仪器相连接(图3)。供电电极以一定的极距关系相对 MN 中点向外侧移动,测量供电电流及 MN 间的电位差,计算获得一条视电阻率随极距变化的曲线,探测深度随极距的增大而增大,异常的深度变化可以通过极距的对应关系来换算,多点视电阻率断面等值线可反映地下介质的电性变化特征。

音频大地电磁法是通过在地表观测天然音频电磁场来研究地下岩层的电学性质及其分布特征的一种地球物理探测方法。该方法与大地电磁法的原理和工作方法相同,只是使用的频率范围不同,从 10 Hz 到 100 kHz,对浅部的地质体分辨率较高(图4)。其原理概述为:在某个观测点上,测量由天然场源产生的电场和磁场分量,同一频率的电磁场的比值(E/H)称为阻抗,该阻抗是介质电性的函数。而电磁场的穿透深度伴随频率变化,频率与穿透深度成反比。因而可以通过在单个测点上测量不同频率阻抗的振幅和相位,达到了了解不同深度介质电性的分布

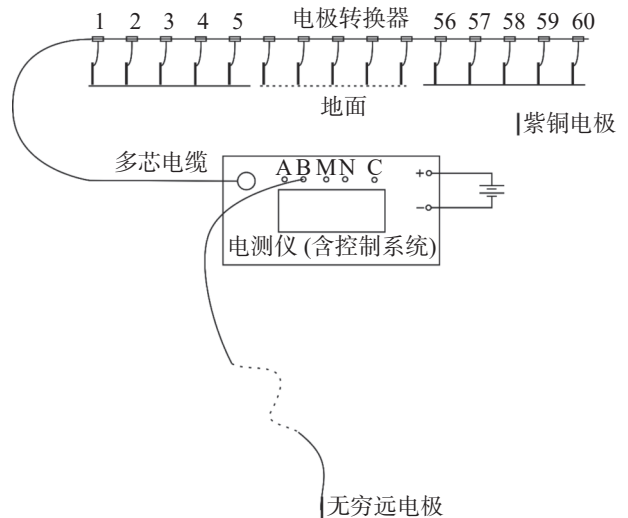


图3 高密度电阻率法测量装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of high-density resistivity method

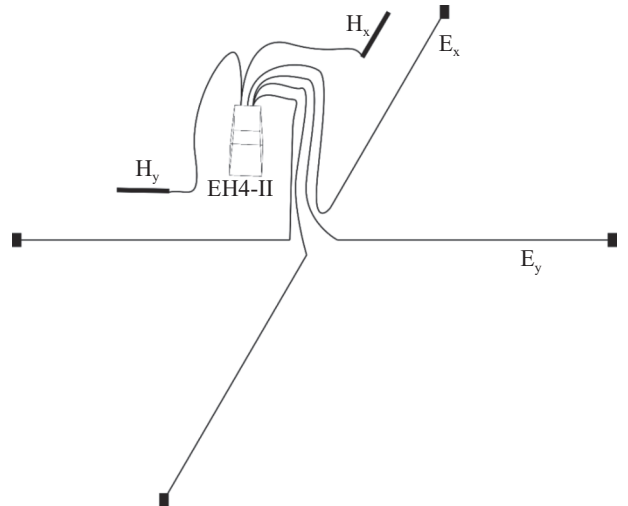


图4 音频大地电磁法测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of audio-frequency magnetotelluric method

特征的目的。其观测的基本参数为:正交的电场分量(E_x, E_y)和磁场分量(H_x, H_y)的时间序列。通过傅立叶变化将时间域的电磁信号变成频谱信号,得到 E_x, E_y, H_x, H_y ,最后计算卡尼亚视电阻率。

2.2 工作部署

猴场滑坡体边缘呈北西-南东方向展布,在该地区布置4条测线(图5),具体信息见表2。采用的物探方法包括高密度电阻率法和音频大地电磁法。

高密度电阻率法数据采集采用高密度电法仪WDZJ-3型仪器,测量极距MN=点距=10~11 m,电极(铜电极)60根,无穷远极垂直测线布置(OC长约2 000 m),具体布测情况见表3。采集的数据利用

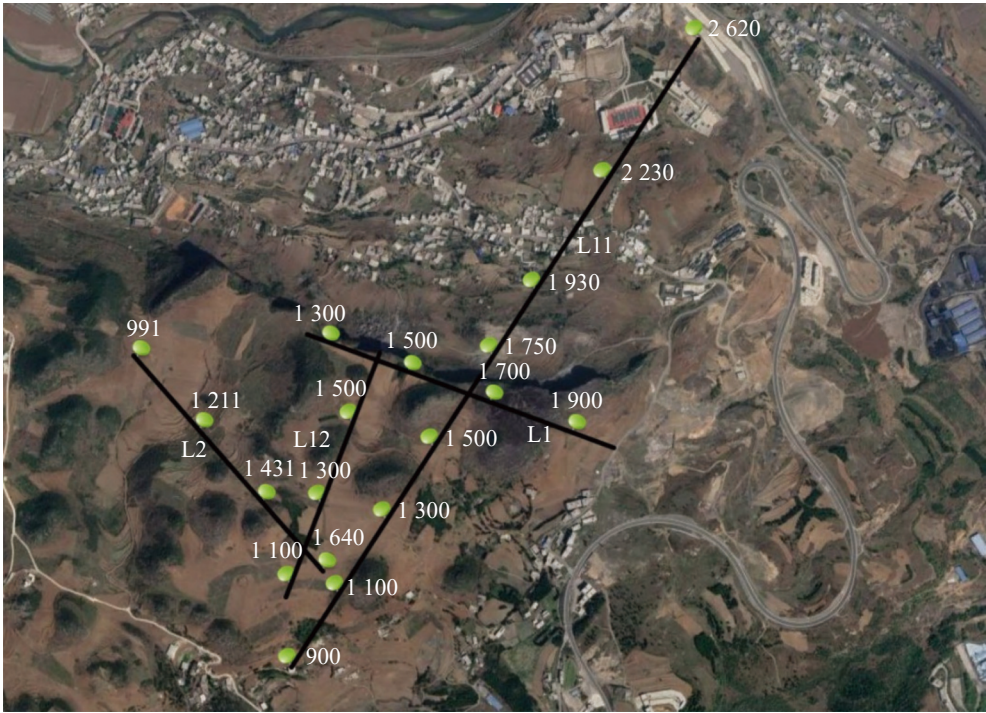


图 5 测线布置图

Fig. 5 Layout of survey lines

表 2 测线布置信息表

Table 2 Information of line survey arrangement

测线编号	测线长度/m	测线方位/°	点距/m
L1	690	110	10
L2	590	139	10
L11	1 700	33	10~200
L12	649	21.2	11

表 3 高密度电阻率法测量情况表

Table 3 Information of high-density resistivity method

测线	测线长度/m	测点数/个	点距/m	测点起始编号	装置类型
L1	590	60	10	1 310~1900	对称四极和三极测深
L2	649	60	11	991~1 640	对称四极和三极测深
L11	590	60	10	1 080~1 670	对称四极和三极测深
L12	590	60	10	1 080~1 670	对称四极和三极测深

res2dinv 软件进行反演,反演迭代次数设置为 7 次,设置拟合精度为 5%。

高密度电阻率法的数据反演结果受多解性影响严重,为改善多解性的影响,采用两种测深装置(对称四极测深和三极测深)采集数据,通过反演结果对比,划分出异常位置、电性特征、空间结构等相似或相近的异常作为可靠异常,增强解译结果的可靠性。同时,测线经过图 2 中两处可见裂缝的位置,通过实际发育的裂缝,检验高密度电阻率法反演结果的准

确性。

音频大地电磁法采用 EH4- II 型仪器采集数据,每个测站测量 1 个物理点,采集 37 个频率,范围 10~100 000 Hz,包括低频段和高频段两种频带,数据采集叠加次数 8~12 次,点距 10~200 m,张量采集,具体布测情况见表 4。采取异常发育地区采用密集点测量,背景地区采用稀疏点测量的策略。利用 scs2d 反演软件对采集数据进行反演,迭代 8 次,设置拟合精度为 5%。

表 4 音频大地电磁法测量情况表

Table 4 Information of audio-frequency magnetotelluric method

测线	测线长度/m	测点数/个	点距/m	测点起始编号	装置类型
L1	690	39	10~20	1270~1960	张量
L11	1 700	36	10~200	920~2 620	张量

2.3 质量评价

野外数据采集严格按照相关标准进行仪器自检、开工/收工及重复性等质量检查。

高密度电阻率法开工前后数据对照表表 5, 检查区段为 L1 线 1 400~1 500 m, 供电电压均采用 90 V,

均方根为 2.05%, 满足精度要求。在数据采集过程中, 进行了重复性检查, 检查区段为 L11 线 1 100~1 240 m, 检查点数 15 个, 供电电压采用 180 V, 计算数据均方根误差为 1.37%。根据开工前后数据对照以及重复性数据检查, 数据质量良好, 满足精度要求。

表 5 高密度电阻率法开工前后数据对照表

Table 5 Contrast of data before and after the use of high-density resistivity method

高密度电阻率法开工/收工测量数据												均方根误差
点号	1400	1410	1420	1430	1440	1450	1460	1470	1480	1490	1500	
开工前数据	702.2	413.7	610.5	575	603.8	655.4	592.4	697	870	692	770.2	2.05%
收工后数据	701.3	410.9	613.6	575.1	604	655.6	591	696.5	869.5	691.5	769.7	

音频大地电磁法采取重复性数据检查措施, 分别对 L11 线 1 450、1 620 和 L1 线 1 530、1 760 点进行重复性测量(图 6), 数据曲线重复性较好, 通过计算, 数据整体均方根误差为 4.33%。

通过数据质量检查, 高密度电阻率数据和音频大地电磁数据整体质量良好, 数据均方根误差均小于 5%, 满足相关规范要求。通过现场仪器质量检测,

确保了本次物理探测数据的准确性和可靠性。

3 结果与分析

该地区的岩性比较单一, 岩层产状近于水平, 上覆灰岩厚度近 200 m。通过 1 线和 11 线两条相互近于垂直的测线, 采用音频大地电磁法探测滑坡底界

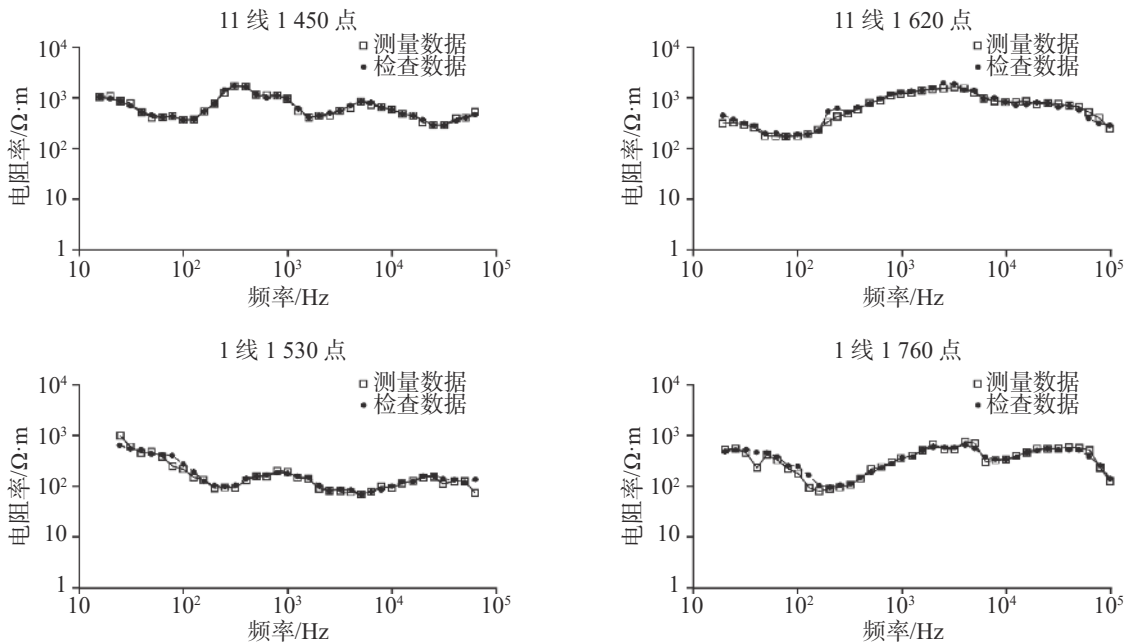


图 6 音频大地电磁数据重复性检查曲线对比图

Fig. 6 Contrast of repetitive check curves of audio-frequency magnetotelluric data

面的空间展布情况。

1线的反演结果如图7, 在200 m深度(高程1700 m)有明显的低阻层, 厚度约30 m, 判断为梁山组的页岩、炭质页岩和煤层。页岩、炭质页岩和煤层以下及以上至白虚线(推测为灰岩与碎屑岩岩性界线)范围为梁山组细砂岩、石英砂岩、石英粉砂岩等碎

屑岩, 其电阻率相对较高。白虚线以上为栖霞茅口组灰岩, 其电阻率最高, 岩性比较完整, 岩性界面处岩溶不发育, 因此滑坡体下界面基本与灰岩和碎屑岩交界面相一致。在测线东侧浅部30 m深度左右有水平向的岩溶裂隙带发育, 表现为低阻, 判断该处岩溶裂隙带内部充填了泥质等低阻物质。

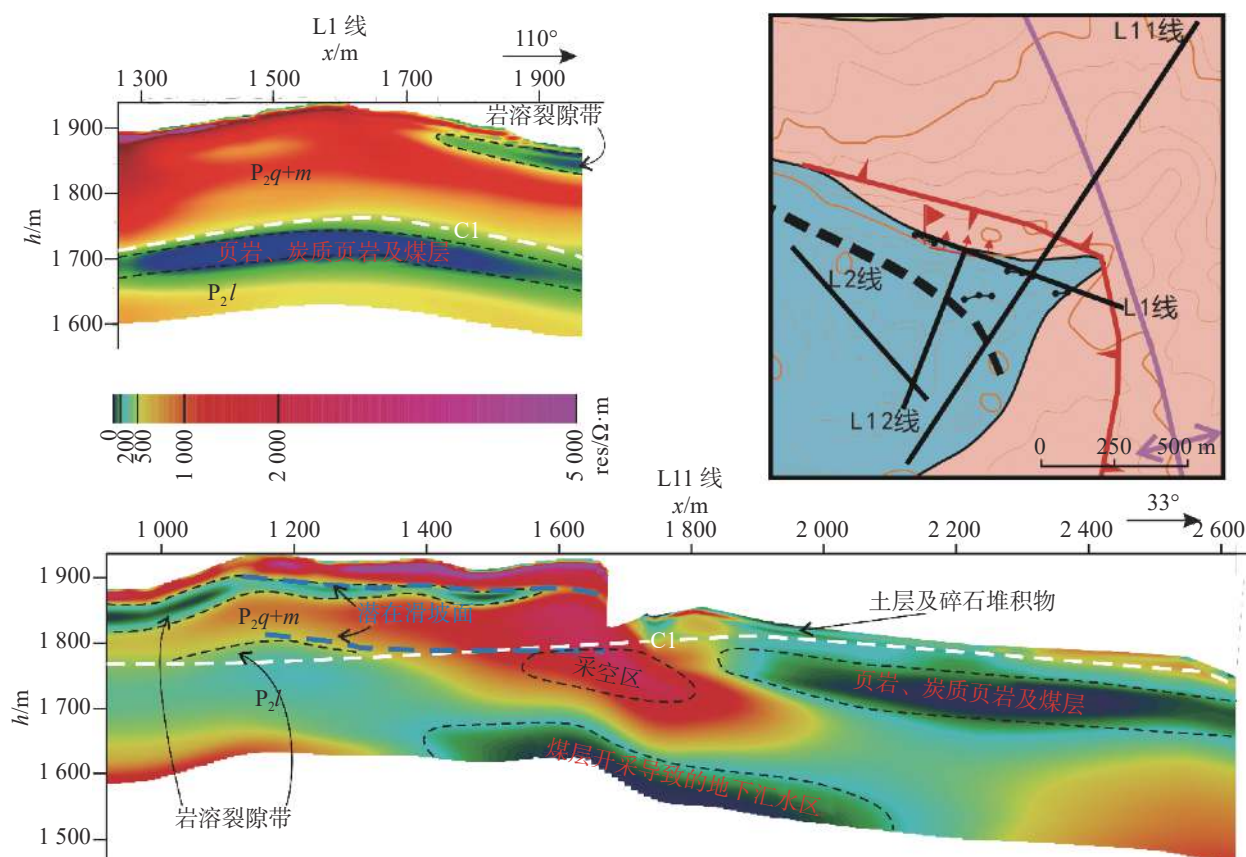


图7 音频大地电磁反演解译成果图

Fig. 7 Results of audio-frequency magnetotelluric inversion

11线的反演结果如图7, 在测线的东南侧浅部50 m深度左右同样存在水平向岩溶裂隙带发育, 内部充填泥质等低阻物质, 该岩溶裂隙带已用黑线圈出。图中白线标记的C1线为栖霞茅口组灰岩与梁山组碎屑岩的岩性界面, 与1线反演结果相同, 灰岩的电阻率高于碎屑岩电阻率。测线1700 m位置为断崖处, 断崖下面有煤层开采的巷道, 测线1500~1900 m段的地下煤层已开采, 图中已用黑线圈出采空区。采空后, 该位置的电性表现为高电阻率性质, 与灰岩电性相近而难于区分, 并且破坏了原有的电性分布。在1000~1400 m段, 深部低电阻率区域呈拱形向上突起, 判断在岩性界面上的灰岩中存在岩溶发育现象。从1900 m位置至测线东北端, 梁山组

地层内探测到更为低阻的页岩、炭质页岩和煤层, 厚度约30 m, 埋深约50 m左右。测线中间最深部存在低电阻率区域, 处于采空区之下, 判断为煤层开采以及山体滑坡导致岩性破碎, 形成地下汇水区。受煤层开采以及岩溶发育等多种因素影响, 推测有两层近水平方向的潜在滑动面。一是浅部由强烈发育的岩溶形成的脆弱面, 发育深度50 m左右; 二是岩性界面岩溶及煤层开采形成的深部潜在滑动面, 上部灰岩与下部砂、页岩形成上硬下软的结构特征。推测的两层潜在滑动面, 如图7中蓝虚线所示。

山体裂缝的探测对探测方法的横向分辨率有较苛刻的要求, 所以采用高密度电阻率法, 并通过两种测深装置采集数据, 通过反演结果对比, 来解译可靠

的异常,降低多解性的影响。高密度电阻率法探测测线有 4 条,分别为 1 线、2 线、11 线和 12 线,其数据反演解译结果如图 8-图 11。在 1 线 1850 m 和 11 线 1565 m 处已看见裂缝,宽度 1~2 m。从裂缝位置的地电特征来看,地表土层内表现出局部相对高阻性质(相对于低阻土层),这是因为裂缝位置被空气充填。裂缝的深部则出现近于垂向的低阻带,因为裂缝会更容易促进岩溶的发育,水土流入其中而表现为低电阻率特征,低阻带的宽度也大于裂缝宽度,

而两侧为高电阻率的灰岩。所以,该地区山体裂缝的特征是“地表低阻层内的局部高阻区,与地下高阻岩体中的垂向低阻带”。该地区一些岩溶裂隙带的地电特征与之类似,都有垂向低阻带特征,区别在于土层内没有局部高阻区。以此特征为依据,解译 4 条测线中的裂缝以及岩溶裂隙带的位置,其中山体裂缝位置用红线(实线或虚线)标出,岩溶裂隙用蓝虚线标出。

1 线解译岩溶裂隙带位置 2 处,分别在 1600 m

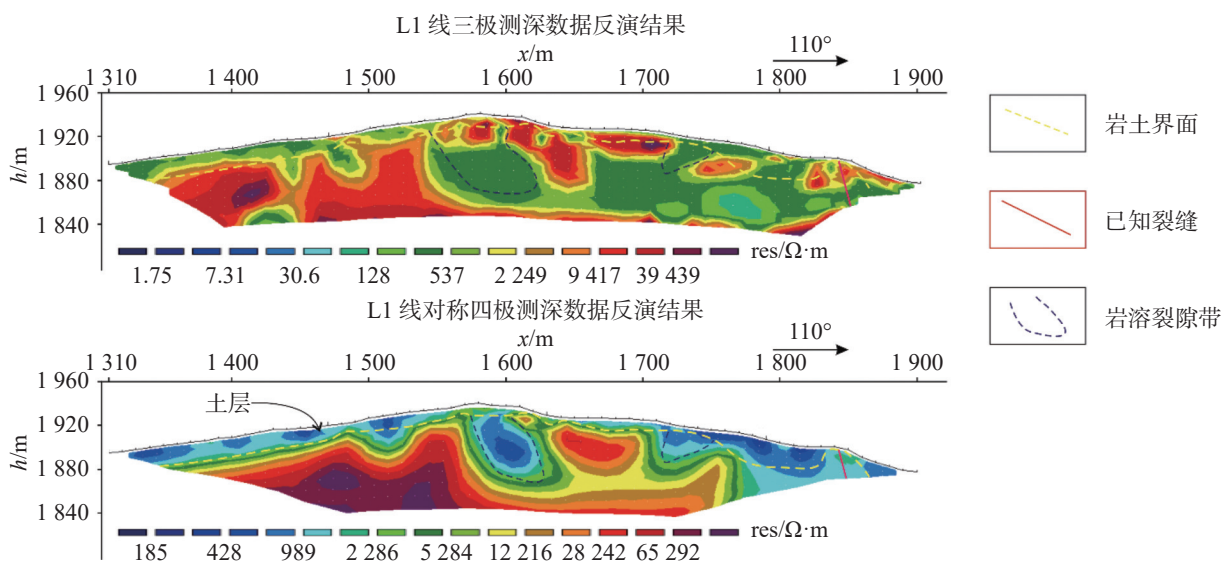


图 8 L1 线高密度电阻率法数据反演及解译结果图

Fig. 8 Results of inversion and interpretation of high-density resistivity data of Line 1

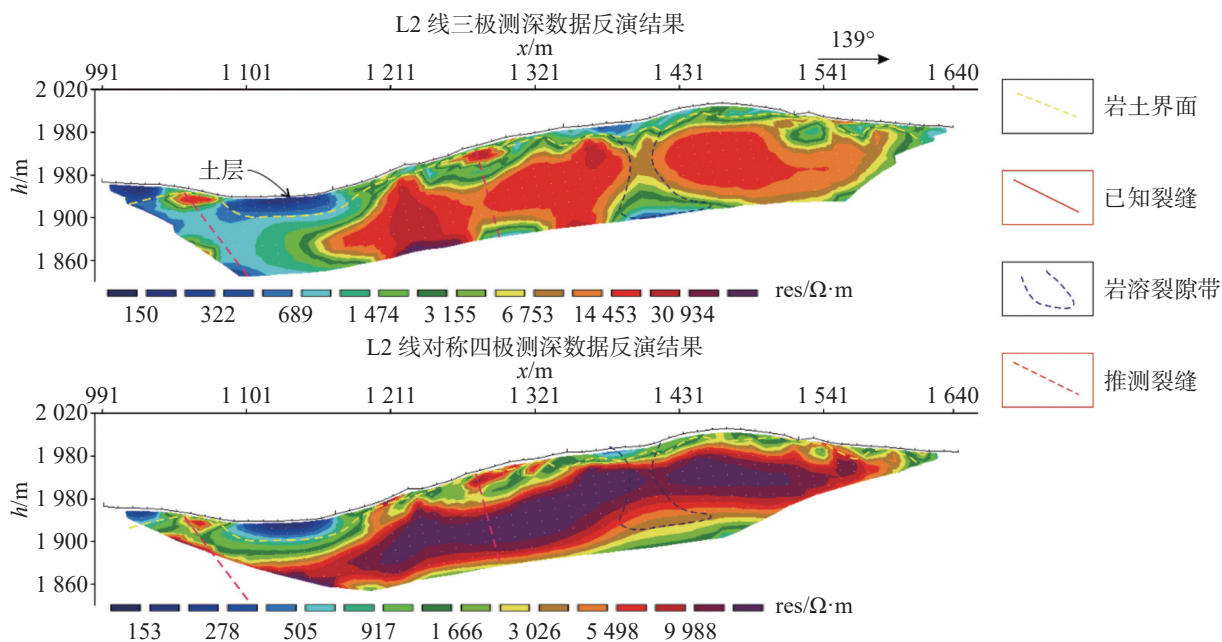


图 9 L2 线高密度电阻率法数据反演及解译结果图

Fig. 9 Results of inversion and interpretation of high-density resistivity data of Line 2

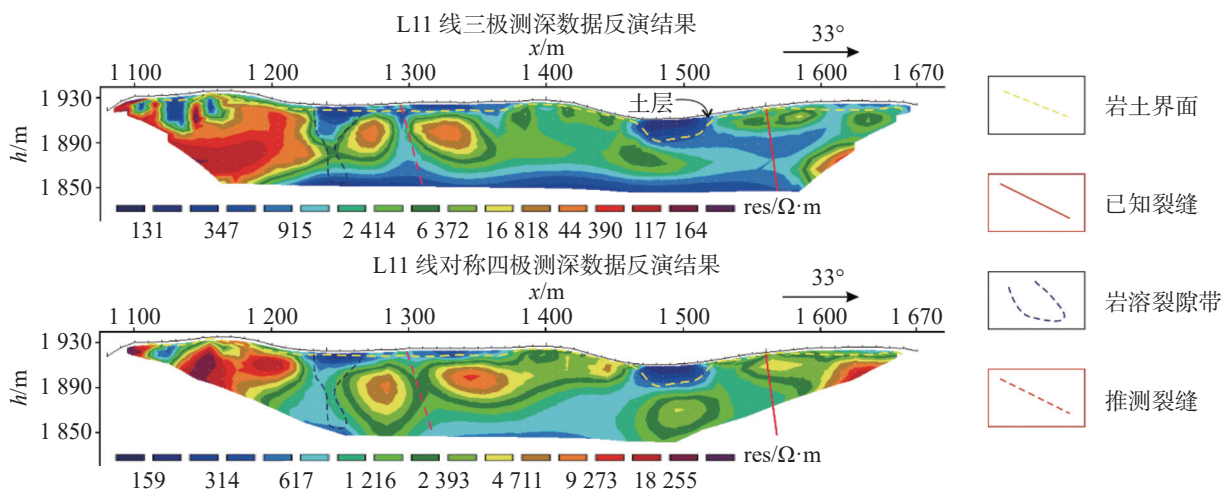


图 10 L11 线高密度电阻率法数据反演及解译结果图

Fig. 10 Results of inversion and interpretation of high-density resistivity data of Line 11

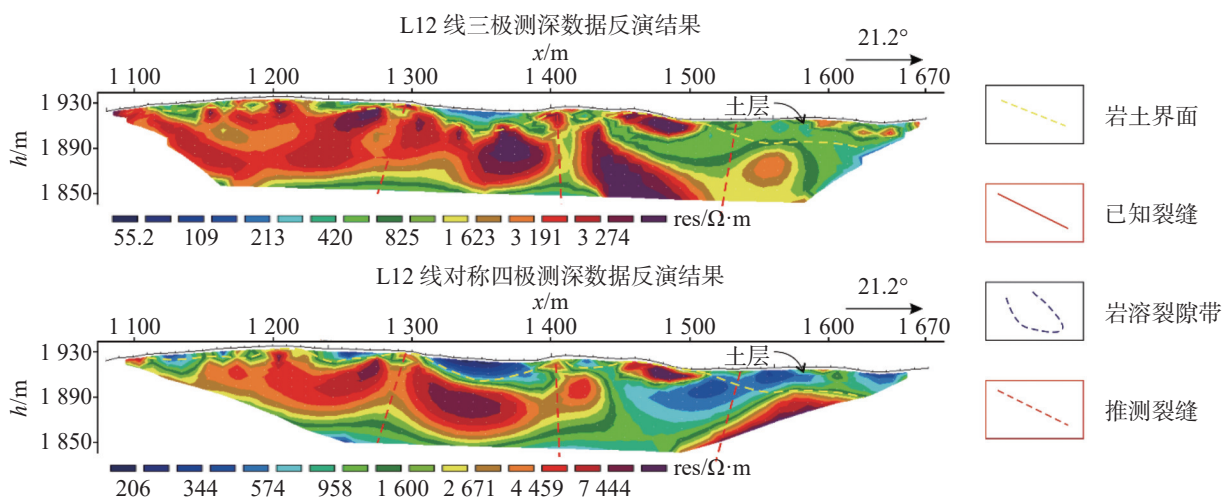


图 11 L12 线高密度电阻率法数据反演及解译结果图

Fig. 11 Results of inversion and interpretation of high-density resistivity data of Line 12

和 1 740 m 处。测线 1 560 m 至 1 900 m 段 40 m 深度左右存在水平向发育的岩溶裂隙带, 呈现低阻特征, 判断内部被泥质等低电阻率物质充填。1 850 m 位置地面可见山体裂缝, 在浅部土层内存在局部高阻区, 下覆呈现低阻特征, 位于水平发育的岩溶裂隙带内。

2 线解译山体裂缝 2 处, 分别为 1 024 m 和 1 277 m 位置。相比来看, 在 1 024 m 位置的深部岩体内, 垂向低阻带较宽, 判断其裂缝较大, 而 1 277 m 位置深部垂向低阻带较窄, 裂缝较小; 解译岩溶裂隙带 1 处, 在 1 398 m 位置, 因为该处浅部土层内没有“局部高阻区特征”, 只有岩溶裂隙导致的垂向低阻带特征, 判断其为岩溶裂隙带。该测线最深部隐约可见水平向岩溶裂隙带发育, 内部被泥质等物质充填, 表现为低电阻率特征, 发育深度在 60 m 以上。

11 线 1 565 m 位置地面已见裂缝, 规模较大。从反演结果中能看到该位置地表土层内的局部高电阻率特征, 且深部存在很宽的低阻带。除此之外, 在 1 300 m 位置也有山体裂缝的电性特征存在, 但深部垂向低阻带较窄, 所以该裂缝较小。在 1 240 m 位置也有垂向低阻带, 但地表土层内没有局部高电阻率特征, 判断该处发育有岩溶裂隙带。该测线深部 50 m 左右有水平向的低阻构造, 判断有被泥质等低电阻率物质充填的岩溶裂隙带发育。

12 线解译山体裂缝有 3 处, 分别在 1 300 m、1 400 m 和 1 530 m 位置。其中 1 300 m 和 1 400 m 深部垂向低阻带宽度较窄, 这两处裂缝较小。1 530 m 处土层内“局部高阻特征”较不明显, 推测该处裂缝内部分被泥土充填, 深部垂向低阻带较宽, 说明该处

裂缝较宽。该测线水平向岩溶裂隙带发育深度与 2 线相近,在 60 m 以上。

根据 4 条高密度电阻率法数据反演解译结果,1 线 1850 m、11 线 1565 m、12 线 1530 m 和 2 线 1024 m 这 4 个位置为规模较大的裂缝,判断为同一条裂缝,如图 12 红虚线标出的裂缝 1,该裂缝近东西向,为山体前缘规模较大的裂缝。其余裂缝规模较小,为

次级裂缝,推测有两条,如图 12 中红虚线标记的裂缝 2 和裂缝 3。裂缝 2 呈北东-南西向展布,东北端起始于裂缝 1,在地面已看见该裂缝,向西南延伸穿过 12 线 1400 m 处,但并没有经过 2 线而终止。裂缝 3 呈北西-南东向展布,穿过 11 线 1300 m、12 线 1300 m 和 2 线 1277 m 这 3 处位置,为山体后缘裂缝。

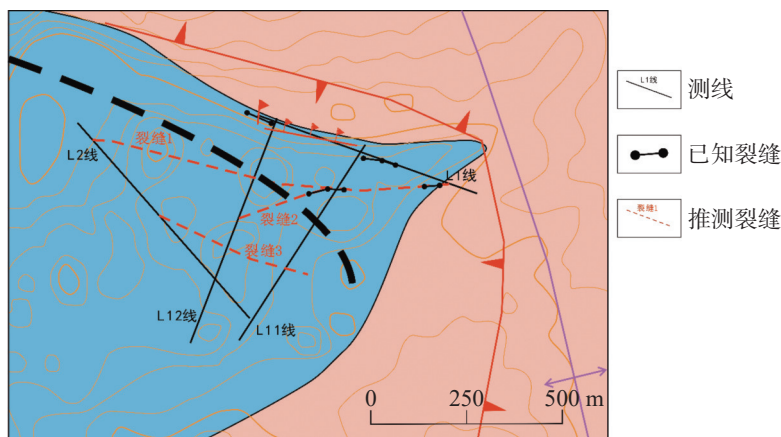


图 12 滑坡山体裂缝空间展布解译成果图

Fig. 12 Spatial distribution of landslide cracks

从音频大地电磁法和高密度电法综合探测结果来看,在 30~60 m 以上深度范围内有层状岩溶裂隙带发育,该岩溶裂隙带发育深度由东北向西南逐渐变大,呈现低阻特征,其内部被泥质等低电阻率物质充填。另外,在栖霞茅口组灰岩底界面的深部存在岩溶裂隙带,主要发育在滑坡山体南部,距断崖有 300~600 m 的距离,范围相对较小。这两层岩溶构造则为山体滑动提供了脆弱的滑动层面。

4 结 论

通过音频大地电磁法和高密度电法对猴场滑坡地区进行了探测和解译,对滑坡山体的裂缝以及岩溶情况有了一定的研究和认识,得出以下结论:

(1)根据不同岩性层组的电性特征划分了栖霞茅口组与梁山组的岩性界面,并进一步在部分区域的梁山组碎屑岩内划分出页岩、炭质页岩和煤层。其中栖霞茅口组灰岩电阻率最高,梁山组细砂岩、石英砂岩、石英粉砂岩等碎屑岩电阻率大小居中,而页岩、炭质页岩和煤层的电阻率最低。

(2)灰岩内部发育有两层近水平向发育的岩溶

裂隙带:一层是在 30~60 m 以上深度范围的浅部岩溶裂隙带,内部被泥质等低电阻率物质充填,该岩溶层发育深度由东北向西南逐渐变大;另一层是在栖霞茅口组灰岩底界面的深部岩溶裂隙带,主要发育在滑坡山体南部,距断崖有 300~600 m 的距离,呈现低阻特征。这两层岩溶构造层为滑坡的再生提供了软弱层面。

(3)滑坡山体发育有 3 条山体裂缝,包括 1 条前缘较大的裂缝以及后缘 2 条次级裂缝,裂缝具有“地表低阻层内的局部高阻区,与地下高阻岩体中的垂向低阻带”的特征。其中裂缝 1 穿过地表已见裂缝,规模较大,裂缝 2 和裂缝 3 为探测推测裂缝,异常规模相对较小,为后缘次级裂缝。此外,探测到一些浅部垂向岩溶裂隙带,这些岩溶裂隙带以及裂缝破坏了岩溶山体的整体性,随着岩溶逐渐发育,岩溶山体逐渐劣化成零散碎块,可能逐步在一些极端条件下崩塌或滑坡。

(4)音频大地电磁法和高密度电法结合,能有效探测岩溶山体滑坡结构特征,可综合得到岩溶空间发育特征、裂缝位置以及滑坡底界面展布等信息,为深入而全面地分析滑坡体稳定性提供重要依据。

参考文献

- [1] 王佳运, 李林, 郑定国, 武立. “8.12”山阳滑坡视向滑动特征与运动过程[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 111-116.
WANG Jiayun, LI Lin, ZHENG Dingguo, WU Li. Characteristics of apparent dip slide and movement process of the “8.12” Shanyang rockslide[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 111-116.
- [2] 胡惠霞, 刘瑾, 黄健. 堡只村山体滑坡成因分析及防治对策[J]. 山西建筑, 2018, 44(22): 55-56.
HU Huixia, LIU Jin, HUANG Jian. Cause analysis and prevention countermeasures of landslide in the Baozhi village[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(22): 55-56.
- [3] 尹努寻, 候林洋, 曹兴民, 李勋梅. 不合理采矿工程活动对基岩顺层滑坡的影响: 以纳雍县姑开乡胜利村冲子山体滑坡为例[J]. 中国矿业, 2020, 29(2): 353-355.
YIN Nuxun, HOU Linyang, CAO Xingmin, LI Xunmei. Influence of unreasonable mining engineering activities on bedrock landslide: Taking Chongzi landslide in Shengli village, Gukai township, Nayong county as an example[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(2): 353-355.
- [4] 廖健宗. 古西村鹤山片特大型滑坡群地质灾害的特征和成因探讨[J]. 西部资源, 2020(5): 80-82.
LIAO Jianzong. The characteristics and causes of geological disasters of Heshan landslide group in Guxi village[J]. Western Resources, 2020(5): 80-82.
- [5] 陈见, 梁维亮, 唐文, 高安宁, 廖铭超. 广西全州县广坑漕山体滑坡成因分析[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 89-92, 97.
CHEN Jian, LIANG Weiliang, TANG Wen, GAO Anning, LIAO Mingchao. Analysis on the causes of landslide in Guangkengcao, Quanzhou, Guangxi[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(4): 89-92, 97.
- [6] 李海军, 董建辉, 朱要强, 邹银先, 丁恒. 贵州发耳煤矿尖山营滑坡特征及成因机制[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 345-351.
LI Haijun, DONG Jianhui, ZHU Yaoqiang, ZOU Yinxian, DING Heng. Characteristics and genesis mechanism of Jianshanying landslide in Faer coal mine, Guizhou Province[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 345-351.
- [7] 肖剑. 贵州省某复合式山体滑坡主要成因分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 40-44.
XIAO Jian. Analysis of main causes of a compound landslide in Guizhou Province[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 40-44.
- [8] 李向红, 赵洁妮, 伍静, 王存真, 陈国连, 郑传新. 桂林“5.9”山体滑坡的暴雨成因分析[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 95-99.
LI Xianghong, ZHAO Jieni, WU Jing, WANG Cunzhen, CHEN Guolian, ZHENG Chuanxin. Analysis on the heavy rain causes of the landslide on May 5th in Guilin City[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 95-99.
- [9] 徐兴倩, 苏立君, 梁双庆. 地球物理方法探测滑坡体结构特征研究现状综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(3): 1449-1458.
XU Xingqian, SU Lijun, LIANG Shuangqing. A review of geophysical detection methods of landslide structure characteristics[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(3): 1449-1458.
- [10] 王磊, 李孝波, 苏占东, 常晁瑜, 彭达. 高密度电法在黄土-泥岩接触面滑坡勘察中的应用[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 536-543.
WANG Lei, LI Xiaobo, SU Zhandong, CHANG Chaoyu, PENG Da. Application of high-density electrical method in loess-mudstone interface landslide investigation[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 536-543.
- [11] 王磊, 蔡晓光, 李孝波, 苏占东, 常晁瑜, 彭达. 西吉县西南山区典型黄土地震滑坡高密度电法物探解译分析[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(1): 351-357.
WANG Lei, CAI Xiaoguang, LI Xiaobo, SU Zhandong, CHANG Chaoyu, PENG Da. Interpretation analysis of high-density electrical prospecting of typical seismic loess landslides in the southwestern mountainous area of Xiji county[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(1): 351-357.
- [12] 孔繁良, 陈超, 孙冠军. 高密度电法在清江水布垭库区滑坡调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2): 201-204.
KONG Fanliang, CHEN Chao, SUN Guanjun. Application of multi-electrodes electrical method to landslide investigation in Qingjiang Shuibuya reservoir[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(2): 201-204.
- [13] 胡承林, 雷宛, 李红梅, 李敏. 高密度电法在新疆某矿区滑坡勘察中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(4): 430-434.
HU Chenglin, LEI Wan, LI Hongmei, LI Min. Application of the high-density resistivity method to landslide investigation in a mine of Xinjiang[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(4): 430-434.
- [14] 江玉乐, 周清强, 黄鑫, 张朝霞. 高密度电阻率法在滑坡探测中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(5): 542-546.
JIANG Yule, ZHOU Qingqiang, HUANG Xin, ZHANG Zhaoxia. Application of the high density resistivity method to landslide prediction[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2008, 35(5): 542-546.
- [15] 杨德龙, 朱丽丽, 黄凡, 葛宝, 董湘龙. 高密度电阻率法在某滑坡探测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(3): 12-15.
YANG Delong, ZHU Lili, HUANG Fan, GE Bao, DONG Xianlong. Applying the method of high density resistivity in the survey of a landslide[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(3): 12-15.
- [16] 程庆, 虞先国, 葛宝, 李怀良, 王诗东. 高密度电阻率法在四川高川茶园沟滑坡勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(1): 69-72.
CHENG Qing, TUO Xianguo, GE Bao, LI Huailiang, WANG Shidong. The application of the high-density electrical method to the survey of Chayuangou landslide in Gaochuan[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(1): 69-72.

- [17] 刘建明. 多道瞬态面波法及高密度电法在滑坡勘查中的应用[J]. 华北自然资源, 2019(4): 26-29.
LIU Jianming. Application of multi-channel transient surface wave method and high-density electrical method in landslide exploration[J]. Huabei Natural Resources, 2019(4): 26-29.
- [18] 李好. 高密度电法和瞬态瑞利波法在长江沿岸滑坡探测中的综合应用[J]. 工程勘察, 2015, 43(5): 83-91.
LI Hao. Comprehensive application of high-density electrical method and transient Rayleigh wave method in landslide detection along the Yangtze River[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(5): 83-91.
- [19] 周官群, 翟福勤, 郝志超, 曹煜, 陈兴海, 陈光明, 王宗涛, 苗园园. 高密度电阻率法及地震反射共偏移法在九华山滑坡体探查中的应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 872-876.
ZHOU Guanqun, ZHAI Fuqin, HAO Zhichao, CAO Yu, CHEN Xinghai, CHEN Guangming, WANG Zongtao, MIAO Yuanyuan. The application of the multi-electrode resistivity method and reflection seismic method to the landslide detection in the Jiuhua mountain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 872-876.
- [20] 张玉池, 温佩琳, 周屹, 李业君. 综合物探在滑坡地质灾害勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(Suppl.1): 9-10, 127.
ZHANG Yuchi, WEN Peilin, ZHOU Yi, LI Yejun. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of landslide geological disasters[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(Suppl.1): 9-10, 127.
- [21] 张宗辉, 喻璀璨. 综合物探技术在两水滑坡勘察中的应用[J]. 四川地质学报, 2020, 40(1): 147-151.
ZHANG Zonghui, YU Cuican. The application of comprehensive geophysical exploration technology to the Shuangshui landslide investigation[J]. Journal of Sichuan Geology, 2020, 40(1): 147-151.
- [22] Torgoev A, Lamair L, Torgoev I, Havenith H B. A review of recent case studies of landslides investigated in the Tien Shan using microseismic and other geophysical methods[J]. Earthquake-Induced Landslides, 2013: 285-294.
- [23] Le Roux O, Jongmans D, Kasperski J, Schwartz S, Potherat P, Lebrout V, Lagabriele R, Meric O. Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data[J]. Engineering Geology, 2011, 120(1-4): 18-31.
- [24] Marescot L, Monnet R, Chapellier D. Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps[J]. Engineering Geology, 2008, 98(1-2): 18-28.
- [25] Carpentier S, Konz M, Fischer R, Anagnostopoulos G, Meusbürger K, Schoeck K. Geophysical imaging of shallow subsurface topography and its implication for shallow landslide susceptibility in the Urseren valley, Switzerland[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 83: 46-56.
- [26] Epada D P, Sylvestre G, Tabod T C. Geophysical investigations of a landslide in Kekem area, western Cameroon[J]. International Journal of Geosciences, 2012, 3(4): 780-789.
- [27] 林锋, 孙赤, 冯亮. 近水平煤层开采诱发崩塌形成机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 8-12.
LIN Feng, SUN Chi, FENG Liang. Formation mechanism research of collapse induced by mining in nearly horizontal coal bed[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 8-12.
- [28] 林锋, 冯亮, 孙赤, 张维顺, 曾辉. 强烈岩溶控制型崩塌形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(3): 408-414.
LIN Feng, FENG Liang, Sun Chi, ZHANG Weishun, ZENG Hui. Formation mechanism of rock fall controlled by intensively developed karst[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 408-414.
- [29] 冯亮, 毕芬芬. 威宁县猴场镇幺岩脚崩塌破坏机制初步研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2013(3): 42-43.
FENG Liang, BI Fenfen. Preliminary Study on the mechanism of collapse and failure at Yaoyanjiang in Houchang town, Weining county[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2013(3): 42-43.
- [30] 易连兴. 负压水动力场对岩溶滑坡的作用: 以威宁猴场滑坡为例[J]. 山地学报, 2020, 38(5): 691-698.
YI Lianxing. Influence of negative hydrodynamic pressure field on landslide: A case study of Houchang landslide in Weining, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(5): 691-698.

Application of high-density resistivity method and audio-frequency magnetotelluric method in the detection of landslide structure in Houchang town

LIU Yongliang^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3}, LIU Zhenyu⁴, YI Lianxing^{1,2,3}, WU Qiuju⁴, LIANG Nan⁴,
GAN Fuping^{1,2,3}, WU Jianqiang⁵, HAN Kai^{1,2,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO/National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 4. Geological Environment Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi 530201, China; 5. Wuhan Center of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract The frequent occurrence of landslides in China has done great harm to people's lives and property. In the stability analysis of landslides and the design of treatment scheme, the application of geophysical technologies has become a frontier research field in engineering and environment in terms of interdisciplinary development and application. The Houchang landslide in Weining county, Bijie City, Guizhou Province is a typical karst landslide. The landslide area is dominated by karst peak-cluster depressions or gullies, in which limestone strata are widely distributed, and karst is strongly developed. Since the collapse and landslide in 2006, the scale of tensile cracks in rock mass has gradually increased. In order to explore the causes of collapse, scholars have deduced the collapse process, established the conceptual model of landslide and studied the karst hydrogeological conditions. However, due to the lack of detection data, the structural characteristics of landslides have not been fully understood.

In this study, the high-density resistivity method and audio-frequency magnetotelluric method were used to detect the landslide area, and the structural characteristics of landslides were revealed from the development of shallow karst and cracks, and the bottom interface of karst landslide. The stratigraphic structure of landslide area was divided by audio-frequency magnetotelluric method, and the lithologic interface between Qixia–Maokou Formation and Liangshan Formation was defined according to the electrical characteristics of different lithologic strata. Furthermore, the clastic rocks of Liangshan Formation in some areas were divided into shale, carbonaceous shale and coal seam.

It is found that there are two layers of karst development: one is the karst fracture zone in the shallow part of the karst mountain, which is filled with mud and other low-resistivity substances, and the development depth of the karst layer gradually increases from northeast to southwest; the other is the deep karst fracture zone at the bottom interface of limestone in Qixia–Maokou Formation, which is mainly developed in the southern part of the landslide mountain, showing low-resistance characteristics. These two layers of karst structures provide a weak layer for landslide regeneration. Cracks and karst development areas have been detected by high-density resistivity method. There are three mountain cracks in the landslide mountain, including one with a large front edge and two secondary cracks at the rear edge. The cracks show the characteristics of "local high-resistance zone in the low-resistance layer on the surface and vertical low-resistance zone in the underground high-resistance rock mass". In addition, some shallow vertical karst fracture zones were detected, which destroyed the integrity of karst mountain. With the development of karst, karst mountain deteriorated into scattered fragments, which may gradually collapse or landslide under some extreme conditions. It is considered that the development of karst, especially the deep karst at the interface between limestone and shale, is one of the key factors leading to landslides. Together with the goaf formed by coal seam mining, karst development is the background condition that may trigger landslides, which in turn can deteriorate karst mountains into scattered blocks and gradually into collapses and landslides. The combination of audio-frequency magnetotelluric method and high-density electrical method can effectively detect the structural characteristics of karst landslides, and can comprehensively obtain the characteristics of karst spatial development, crack location and distribution of landslide bottom interface, which can provide an important basis for in-depth and comprehensive analysis of landslide stability.

Key words geophysics, karst mountain, landslide, high-density resistivity method, audio-frequency magnetotelluric method

(编辑 张玲)