

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.02.17

基于高密度电阻率法综合反演研究 ——以摩岗岭滑坡体勘察为例

李 富, 周洪福, 宋 志, 周一敏

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 以摩岗岭滑坡勘察为例, 通过高密电法二维剖面反演, 能够清晰地反映滑坡体各层位及其相应的深度, 有效地确定滑带的深度及厚度, 确定基岩面埋深, 指导钻探的位置及深度。通过三维高密度电阻率法反演, 可对不同(二维)切片进行分析, 有效了解整个滑坡体的基本特征。通过对低阻异常体的立体显示, 更宏观地表达滑坡体的三维特征, 可以对滑坡体规模进行预测。

关键词: 滑坡; 高密度电法; 三维反演; 断层

中图分类号: P631.3⁺22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)02-0110-07

Based on the high density resistivity method comprehensive inversion research: take the case of the investigation of the landslide in Mogangling

LI Fu, ZHOU Hongfu, SONG Zhi, ZHOU Yimin

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

Abstract: Landslide is one of the common geological disasters, how to accurately detect the depth of sliding surface, to determine scale landslides and geological disaster evaluation is very important. Hill landslide survey, for example, this paper takes the hills, through inversion, the high-density electrical method two-dimensional profile can clearly reflect the depth of the landslide's horizon and its corresponding to effectively determine the depth and thickness of the sliding zone, to determine the embedded depth of bedrock surface; The location and depth of drilling. Through three dimensional inversion, the high density resistivity method can analyze the different(two-dimensional) slice, effective understanding of the basic characteristics of the whole landslide; Based on the low resistance of abnormal body stereo display, more three-dimensional characteristics of the macroscopic representation of landslide, the landslide scale can be predicted.

Keywords: landslide; high density resistivity method; the three dimensional inversion; fault

山体滑坡是常见的地质灾害之一, 尤其是西南山区最为常见, 俗称“走山”、“垮山”、“地滑”、“土溜”等, 常造成重大人员伤亡。如 2015 年 12 月 20 日, 深圳市光明新区山体滑坡造成约 80 人失联, 2016 年 7 月 1 日, 贵州毕节大方县山体滑坡造成 10 人遇难, 2016 年 8 月 12 日, 陕西省山阳县山体滑坡造成 64 人

失联, 2016 年 9 月 26 日, 云南东川山体滑坡造成 5 人遇难, 2016 年 9 月 28 日, 浙江遂昌山体滑坡造成 27 人失联。滑坡体的勘察是地质灾害防治方法之一, 如能提前探测出滑坡体的滑动面, 提前进行相应的治理, 就可以大大减少人员与财产的损失。

滑坡体勘察方法可分为破损法和无损法, 前者包

收稿日期: 2016-10-08; 修订日期: 2017-01-13

基金项目: 中国地质调查局项目资助(12120114069501; DD20160272)

第一作者: 李富(1980-), 男, 高级工程师, 硕士, 长期从事水工环方面地球物理勘探工作。E-mail: Lifu2007chengdu@126.com

括坑探、槽探、井探和钻探等方法,后者指地球物理探测方法。在地球物理探测方法中,常采用电阻率剖面法、电阻率测深法、自然电场法、高密度电阻率法、探地雷达法、瑞雷波法、瞬变电磁法、音频电磁测深法以及微波遥感、红外测温、地层测温等技术。实践表明,高密度电阻率法是相对较成熟和可靠的滑坡探测技术^[1~16]。

1 摩岗岭滑坡地质概况及地球物理特征

1.1 摩岗岭滑坡地质概况

摩岗岭滑坡位于四川省泸定县得妥乡金光村,大渡河右岸,大渡河干流自北向南从滑坡坡脚通过。摩岗岭为大渡河与磨西河切割的近南北向单薄山梁,山顶海拔 1 800 ~ 2 000 m,山梁西侧和南侧为深切的磨西沟,坡脚海拔 1 115 ~ 1 380 m,东侧为大渡河,坡脚海拔 1 115 ~ 1 125 m。摩岗岭滑坡位于摩岗岭东坡,呈“陡缓陡”台阶状地形,缓坡以下为滑坡分布区,坡体走向 N15°W(图 1)。滑坡体周边地层为康定杂岩群,岩性为花岗岩、闪长岩夹辉绿岩,局部发育有辉绿岩脉。根据 1:20 万区域地质图,推断得妥断裂西支可能从滑床通过,还需后期物探解译工作证实该断层的存在^[17~20]。具体地层及岩性如下:

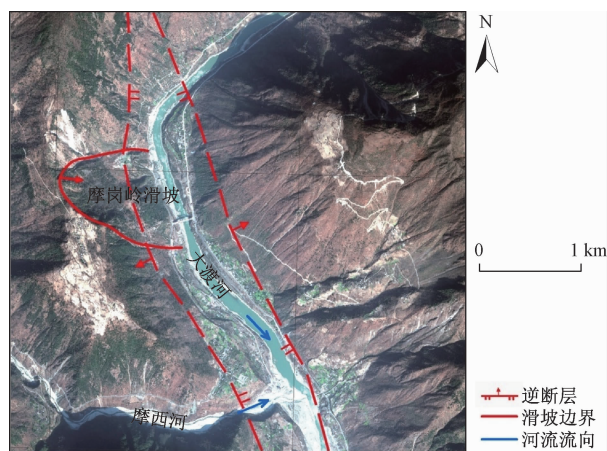


图 1 摩岗岭滑坡遥感解译图

Fig. 1 remote sensing interpretation of landslide in Mogangling

第四系崩坡积块石:以块石为主(母岩岩性为花岗岩和石英闪长岩),粒径一般为 30 ~ 80 cm,空隙度大,含约 10% 黏性土及碎石、角砾。主要分布于滑坡后缘、前缘等山体坡度较陡部位。

第四系冲积物:卵砾石夹砂及漂石,偶见植物根系。漂卵砾石成分为花岗岩、石英闪长岩、石英岩以及砂岩,中风化。该层主要分布于河流两岸。

第四系滑坡堆积:由块碎石土组成,杂乱堆积,块碎石含量约 70%,粒径一般 4 ~ 20 cm,较大者有 30 ~ 60 cm,其余为角砾和泥质,母岩岩性主要为斜长花岗岩和石英闪长岩。

晋宁期斜长花岗岩:灰白、浅灰色,具中-粗粒花岗岩结构,主要矿物为斜长石、石英,次要矿物为角闪石、黑云母等。

晋宁期石英闪长岩:灰白、灰黑色,块状结构,主要矿物为斜长石、角闪石和石英,次要矿物为黑云母等。

晋宁期混合花岗岩:浅灰色、灰白色,具中-粗粒状结构,主要矿物为长石、石英,少量角闪石和黑云母,局部呈条带状,石英具压碎裂纹和较强的波状消光。

澄江期钾长花岗岩:肉红色,具中-粗粒花岗岩结构,主要矿物为碱性长石、斜长石、石英,次要矿物为角闪石、黑云母等。斜长石因蚀变有绢云母和少量碳酸岩物质,碱性长石见较多氧化铁析出,石英具压碎裂纹和较强的波状消光。

辉绿岩脉:主要分布于滑坡上游侧,呈黏结式接触,主要由辉石和基性长石组成。

大渡河断裂南段(得妥断裂)总体呈 SN 向沿大渡河干流展布。断裂北起冷碛镇,在加郡右岸被瓦板山断裂左旋切错后,继续向南延伸,在桃子坪切过大渡河进入左岸。在花石包一带该断裂分为东西两支,在得妥一带东西两支断层,沿河谷两侧延伸,在沙坝两支断层均沿左岸延伸,全长约 60 km。断层活动以逆冲为主,其断层面倾向西,倾角较陡,通常在 60° ~ 85° 以上。据中国地震局地质研究所在得妥断裂带之小型挤压破碎带取样经测试,其测年成果为距今 $(23.1 \pm 0.62) \times 10^4$ 年,说明其最新活动时期主要为中更新世晚期。

滑坡区外围 300 km 范围内自公元 1216 年以来,共记载 7.0 ~ 7.9 级地震 7 次,6.0 ~ 6.9 级地震 21 次,5.0 ~ 5.9 级地震 71 次。据当时的地震纪念碑文记载,正是 1786 年 6 月 1 日的磨西 7.75 级地震触发了摩岗岭滑坡的形成,摩岗岭滑坡被确定为断层型滑坡。

1.2 摩岗岭滑坡物性特征

实地调查及勘探揭露可知,滑体物质组成主要为碎块石土,其中含量块碎石约占 70%,成分为石英闪长岩、花岗岩和辉绿岩,块石粒径多在 20 ~ 40 cm 之间,较大者有 30 ~ 60 cm,碎石粒径多在 5 ~ 12 cm 之间。岩块多强—中风化。块碎石间由灰黄—浅灰绿色砂土和粉土充填。

根据区域内各种地层岩石的电学性质及其完整性,将出露地层划分为两类电性组合,包括中阻类、高阻类(表1)。中阻类花岗岩的视电阻率范围为 $491 \sim 1\,377.5 \Omega \cdot m$,平均值 $949 \Omega \cdot m$ 。其次辉绿岩和石英闪长岩具高阻的视电阻率,砂岩的视电阻率为 $711.5 \sim 2\,648.8 \Omega \cdot m$ 。从以往资料与实测情况看,由于断层含水,其表现为低电阻率特征,视电阻率值小于 $400 \Omega \cdot m$,与花岗岩、辉绿岩之间存在明显的电阻率值差异,故选用高密度电阻法进行探测。

表1 摩岗岭滑坡样品物性统计表

Table 1 Statistical table of physical properties of the sample of Mogangling

岩性	块数	变化范围/ $(\Omega \cdot m)$	平均值/ $(\Omega \cdot m)$	备注
花岗岩	14	$491 \sim 1\,377.5$	948.9	中阻
石英闪长岩	8	$732.7 \sim 1\,774.5$	1\,193.6	高阻
辉绿岩	8	$711.53 \sim 2\,648.8$	1\,370.7	高阻

2 高密度电法工作方法与三维反演数据处理

2.1 高密度电阻率法工作原理、数据采集及参数设置

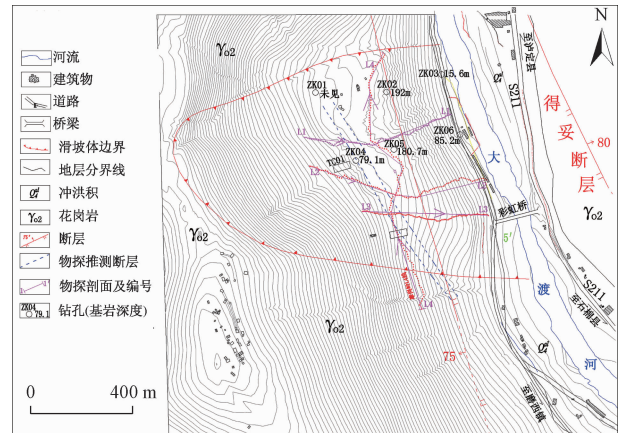
高密度电阻率法是以地下被探测目的体与周围介质之间的电性差异为基础,人工建立地下稳定直流电场,依据预先布置的若干道电极,采用预定装置排列形式进行扫描观测,研究地下一定范围内大量丰富的空间电阻率变化,从而查明和研究有关地质问题的一组直流电法勘探方法。高密度电阻率法实际上是一种阵列勘探方法。

本次使用 AGI 公司的 Supersting 高密度电法仪器,测线 120 道。测量参数设置:循环观测次数 2 次,最大观测值中误差 2%,重复观测次数 2 次,最大电流 1 000 mA,每点测量时间 1.2 s,双模式开关关闭,测量模式为电阻率。接地电阻检查以小于 1 K 欧姆为宜。

本次布置的 3 条东西向测线,基本垂直于得妥西支断层。为了探测断层的产状及位置,同时还布置了 1 条近南北向剖面,探测滑坡体的深部地质特征(图 2)。为达到较深的探测效果,本次采用三极测深装置,并在 L1 线与温纳装置进行对比,证明三极测深装置的探测数据满足质量要求。本测线共布设 100 ~ 128 个电极,电极距 6 ~ 10 m。高密度电法剖面数据处理采用国际公认的 AGI 公司开发 EarthImager 2D 高密度电法处理软件,处理中进行了地形改正。

2.2 三维资料数据处理方法

本次三维反演采用 AGI 公司开发的 EarthImager



面表层和中深部表现为中低电阻率特征,推测表层为第四系崩坡碎块石土层,由于耕地含有部分黏土,其电阻率为中低视电阻率特征。中深部的视电阻率约为 $150 \Omega \cdot \text{m}$,推测是滑坡堆积碎块石土,其含水量较多,为滑坡体的主要滑动面及其上部含水体。剖面中部和深部表现高视电阻率特征,视电阻率最大值达 $6\,000 \Omega \cdot \text{m}$,推测中部为滑坡堆积碎块体,基本不含水。深

部视电阻率特征较为完整,推测为滑坡体的底部基岩,ZK04孔基岩顶界面埋深约 84.2 m ,ZK05孔基岩顶界面埋深约 183.3 m 。从整条剖面来看,断层西部基岩的深度范围约 $0 \sim 23 \text{ m}$;断层东部基岩的深度范围 $82 \sim 200 \text{ m}$ 。由于断层含水,在水平坐标 $180 \sim 220 \text{ m}$ 处为断层破碎带,其电阻率表现为低阻异常特征,断层产状倾向西,倾角约 70° 。

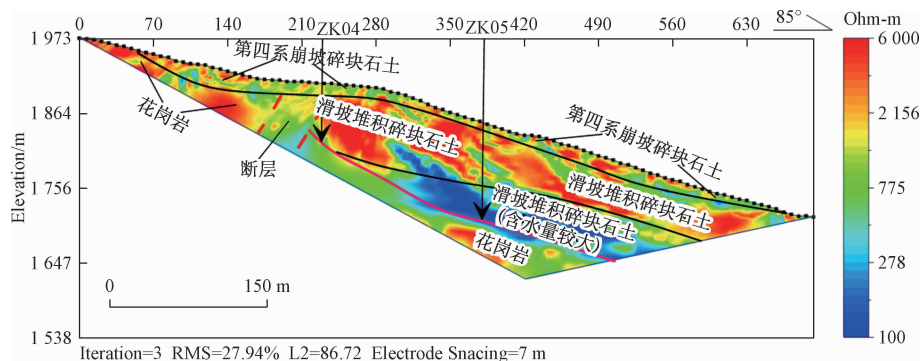


图3 摩岗岭滑坡 L1 线线高密度电阻率法探测成果图

Fig. 3 Mogangling landslide L1 line of high density resistivity method detection result map

摩岗岭滑坡 L3 线高位于摩岗岭滑坡体南部,共布设 100 个电极,电极距 6 m ,测线方向近东西向。整条剖面地表浅部和深部表现为高电阻率特征(图 4),剖面中部表现为相对低电阻率特征,滑坡体前缘也为低电阻率特征。剖面浅部为高阻视电阻率异常,视电阻率 $4\,000 \sim 6\,000 \Omega \cdot \text{m}$,推测为滑坡堆积碎块石,且地表也未见有黏土层。剖面中部表现为一低阻视电阻率异常,视电阻率 $100 \sim 1\,500 \Omega \cdot \text{m}$,推测为滑坡堆积碎块石土,主要以细砂黏土为主,碎石块较少,且滑坡体尾

部有水流出,该界面为主要是滑坡体界面。水平坐标 $140 \sim 210 \text{ m}$ 处,有一浅部高阻,中深部的视电阻率异常,视电阻率 $600 \sim 5\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 。此高阻异常为条带状向深部延伸,边部有低阻异常相伴,推测此异常为断层。由于其含水性不均一,表现为高低阻均有异常。从异常特征来看,断层产状向西倾斜。剖面深部表现为高阻视电阻率异常,视电阻率 $4\,000 \sim 6\,000 \Omega \cdot \text{m}$,此高阻异常完整、稳定,推测此异常为滑坡体基岩,基岩的深度范围 $54 \sim 232 \text{ m}$ 。

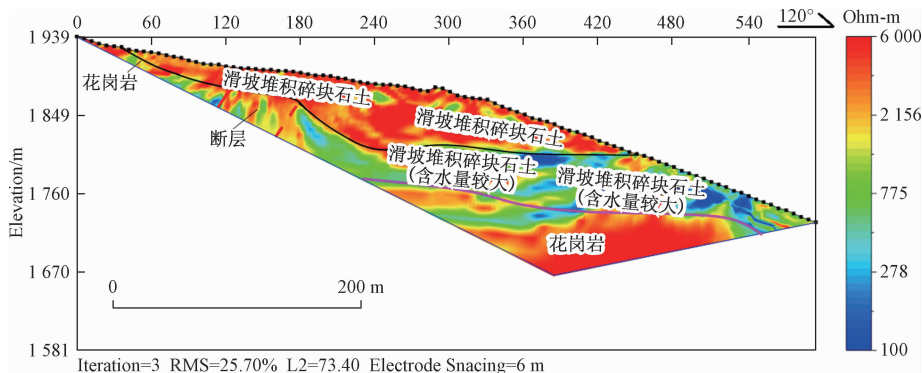


图4 摩岗岭滑坡 L3 线高密度电阻率法探测成果图

Fig. 4 Mogangling landslide L3 line of high density resistivity method detection result map

摩岗岭 L4 线位于摩岗岭滑坡体的中部,为横向剖面,主要探测滑坡体中部的地质情况。本测线共布设 124 个电极,电极距 10 m ,测线方位角 10° 。整条剖面主要是以高电阻率为主(图 5),剖面中偏北部和中偏

南部两个断层处有低电阻率的表现,并且中部高阻中夹有局部低阻。水平坐标 $330 \sim 480 \text{ m}$ 处,有条带状的视电阻率异常,视电阻率从浅到深出现带状分布,高电阻率 $3\,000 \sim 6\,000 \Omega \cdot \text{m}$,低电阻率 $100 \sim 700 \Omega \cdot \text{m}$,推

断为断层破碎带,由于其含水性不均一,出现条带状分布。从异常特征看,断层产状较陡。水平坐标 960 ~ 1 150 m,表层有低阻视电阻率异常,推断为含水碎石

土;其下部为完整性较好的高阻视电阻率异常,推断为基岩层。该处与 ZK02 钻孔较近,物探推测见基岩深度为 177.6 m。

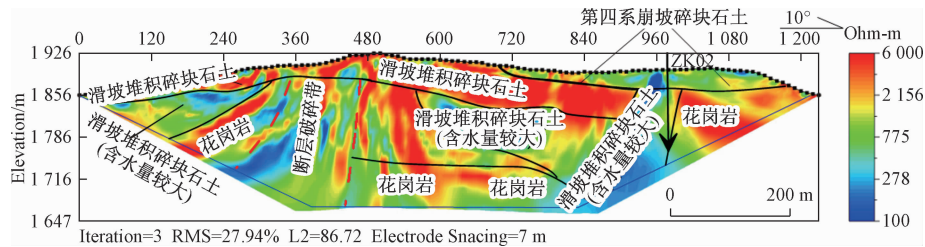


图 5 摩岗岭滑坡 L4 线高密度电阻率法探测成果图

Fig. 5 Mogangling landslide L4 line of high density resistivity method detection result map

3.2 钻孔资料验证情况

后经对摩岗岭滑坡详细勘察^[14-20],认为摩岗岭滑坡呈典型的圈椅状,主滑方向 75°,长约 450 m,沿河宽约 1 000 m,平面面积 0.45 km²,滑体平均厚度约 100 m,钻孔揭露最大厚度为 192 m (ZK02),滑坡堆积体体积约 4 500 × 10⁴ m³。滑坡坡脚位置出露岩性为石英闪长岩,局部发育似层状节理,产状为 326° ∠ 46°,另有一组与其近垂直相交的节理产状为 183° ∠ 56°,其余区域为块碎石土,块碎石成分为石英闪长岩、花岗岩和辉绿岩,块石粒径多在 20 ~ 40 cm 之间,碎石粒径多在 5 ~ 12 cm 之间,岩块多强风化、中风化。摩岗岭滑坡分为三级,其堆积体坡脚高程 1 120 m,1 120 ~ 1 330 m 为滑坡堆积体前缘,坡度约 50°;滑坡平台高程在 1 330 ~ 1 380 m 之间,坡度约 5 ~ 12°;滑坡后壁高程在 1 380 ~ 1 890 m 之间,其中 1 380 ~ 1 600 m 为崩坡积物覆盖,坡度约 35°,1 600 ~ 1 890 m 为滑坡断壁,坡度约 57°,局部可见擦痕。

收集钻孔资料,与物探推断基岩面深度进行对比(表 2),钻孔实际见基岩面深度与物探推断结果基本吻合,误差率均小于 10%,证明二维高密度电阻率法探测滑坡体是有效的。钻孔 ZK06 资料揭示滑坡冲覆于河床冲积层之上,也验证了曾堵塞大渡河的说法,由于堰塞坝大部分被大渡河冲开带走,因此前缘滑坡残留厚度较薄;同时也与物探成果图件推断滑坡堆积含

水块石层较厚相吻合,低阻异常不仅仅是滑坡界面,而是滑动面与河床冲积层的综合反映。

3.3 三维高密度电阻率法成果解释

二维高密度电阻率法反演结果仅能表达该剖面的深度地质特征,无法有效体现整个滑坡体形态,为更好地反映摩岗岭滑坡体的三维特征,有必要对 4 条高密度电阻率剖面进行三维反演。按照地球物理物性特征,低电阻率说明富水性强,高电阻率说明富水性差。

从摩岗岭滑坡高密度电法三维反演切片图 6(a)可以看出,滑坡体浅部与中部的电阻率较大,说明浅部的含水性较差,为滑坡堆积碎块石;中深部出现低阻

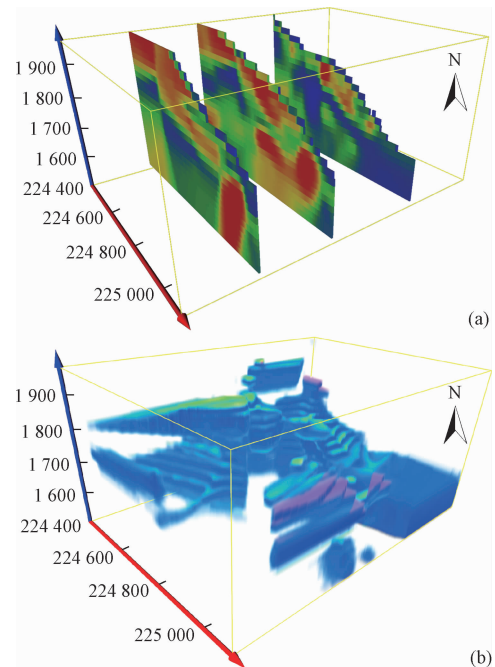


图 6 摩岗岭滑坡高密度电法三维反演切片(a)和低阻异常立体图(b)

Fig. 6 High density electrical resistivity method for 3D inversion section (a) and low resistivity anomaly (b)

表 2 高密度电阻率法探测深度与钻孔深度表

Table 2 High density resistivity method for detecting depth and drilling depth

钻孔号	基岩面深度			
	钻孔深度/m	物探推断深度/m	误差/m	误差率/%
ZK02	192	177.6	-14.4	-7.5
ZK04	79.1	84.2	5.1	6.4
ZK05	180.7	183.3	2.6	1.4

体,说明其含水性较好,且黏土或砂的含较多,证明为滑坡体的滑坡面;深部出现中高电阻体,说明其含水性较差,为基岩面。整体来看,南部基岩埋深较北部浅,北部的低阻异常范围大,说明其含水性较好,也可能是北部覆盖大渡河床冲积层较厚。

从图6(b)可以看出,中深部的低电阻体,说明其含水性较好,为滑坡界面;滑坡体滑面基本是沿视电阻率低阻异常展布,表现为西部高、东部低的特征。整体来看,南部的低阻异常规模较北部薄,可以根据低阻异常体上方的体积,预测滑坡体的规模,为后期滑坡体的勘察提供参考。

4 结论及建议

(1)通过高密电法二维反演地电断面,能够清晰地反映滑坡体各层位及其相应的深度,有效地确定滑带的深度及厚度,确定基岩面埋深,指导钻探的位置及深度。

(2)通过二维高密度电阻率法探测成果与钻孔资料的对比,深度误差均小于10%,证明了高密度电阻率法对滑坡体勘察是有效的。

(3)通过三维高密度电阻率法反演,可对不同(二维)切片进行分析,有效了解整个滑坡体的基本特征。通过对低阻异常体的立体显示,更宏观地表达滑坡体的三维特征,可以对滑坡体规模进行预测。

(4)二维、三维高密度电阻率法反演方法综合运用,充分体现各自的优势,具有较强的实用性和有效性。

参考文献:

- [1] 胡熠,谢强,陈子龙,等. 高密度电法岩溶路基注浆质量检测模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 86-91. [HU Y, XIE Q, CHEN Z L, *et al.* Model test research on grouting effect detection of Karst roadbed with high density resistivity method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 86-91. (in Chinese)]
- [2] 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 Z J, GAN F P, ZENG J. Inversion characteristics of high-density resistivity method on Karst conduits at varied depth[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(3): 292-297. (in Chinese)]
- [3] 肖宏跃,武娇阳,雷宛,等. 实验室高密度电法微测系统的模型研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4): 1464-1472. [XIAO H Y, WU J Y, LEI Y, *et al.* The Study on model in laboratory of high-density microelectrode measurement system[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(4): 1464-1472. (in Chinese)]
- [4] 向阳,李玉冰,易利,等. 排列方式及电极距对高密度电法异常响应的影响分析[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(4): 426-432. [XIANG Y, LI Y B, YI L, *et al.* The effect of array and electrode spacing on abnormal response of high-density resistivity method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(4): 426-432. (in Chinese)]
- [5] 牛建军,邱建慧. 综合物探方法在中里滑坡调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(3): 53-55. [NIU J J, QIU J H. Application of comprehensive geophysical prospecting method in the investigation of the landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(3): 53-55. (in Chinese)]
- [6] 张虎元,王少一,赵天宇,等. 利用高密度电阻率法进行盐渍土含水率的测定[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 95-101. [ZHANG H Y, WANG S Y, ZHAO T Y, *et al.* Determination of water content of saline soil with multi-electrode resistivity method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(1): 95-101. (in Chinese)]
- [7] 曾庆利,杨志法,尚彦军,等. 川藏公路102滑坡群地段基覆界面问题研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 1-6. [ZENG Q L, YANG Z H, SHANG Y J, *et al.* Study on discontinuity between bedrock and Quaternary covers in NO. 102 landslide group section of Sichuan-Tibet highway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 1-6. (in Chinese)]
- [8] 郭秀军,贾永刚,黄潇雨,等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1662-1669. [GUO X J, JIA Y G, HUANG X Y, *et al.* Application of multielectrodes electrical method to detection of slide-face position[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1662-1669. (in Chinese)]
- [9] 王士鹏. 高密度电法在水文地质和工程地质中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(1): 52-56. [WANG S P. Application of high density resistivity method in hydrology geology and engineering geology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(1): 52-56.]

- 2000, 27(1):52-56. (in Chinese)]
- [10] 姜振蛟,卞建民,查恩爽,等. 高密度电阻率成像法在水文地质领域中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2010,37(2): 21-26. [JIANG Z J, BIAN J M, ZHA E S, *et al.* The application of the electrical resistivity tomography in hydrology: An overview[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 21-26. (in Chinese)]
- [11] 肖宏跃,雷宛,孙希霁. 滑坡勘察中的高密度电阻率法异常特征[J]. 灾害学, 2008, 23(3):27-31. [XIAO H Y, LEI W, SUN X R. The anomaly characteristics of High-density resistivity method used in landslide investigation [J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(3): 27-31. (in Chinese)]
- [12] 伍开江,周启友. 岩柱中水体入渗过程的高密度电阻率成像法研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2):76-81. [WU K J, ZHOU Q Y. Study about water infiltration process in rock block using high density electrical resistivity tomography [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(2):76-81. (in Chinese)]
- [13] 江玉乐,周清强,黄鑫,等. 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 Y L, ZHOU Q Q, HUANG X, *et al.* 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. (in Chinese)]
- [14] 郭建强,彭成,孙党生. 链子崖危岩体勘察中物探技术的应用[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3):54-57. [GUO J Q, PENG C, SUN D S. Application of geophysical prospecting technique to survey the dangerous rockmass in Lianzi cliff[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(3): 54-57. (in Chinese)]
- [15] 张光保. 褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6):2716-2721. [ZHANG G B. Exploration and effectiveness analysis of high-density resistivity method on Chujiaying giant landslide site [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2716-2721. (in Chinese)]
- [16] 程庆,庾先国,葛宝,等. 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 Q, TU X G, GUO B, *et al.* The application of the high-density electrical method to the survey of CHAYUANGOU landslide in Gaochuan, Sichuan Province [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(1):69-72. (in Chinese)]
- [17] 江在雄. 1786 年大渡河地震、水患及救灾 康定—泸定磨西地震 220 周年[J]. 四川地震, 2006(3):4-9. [JIANG Z X. The 1786 Kangdin-Ludin-Muoxi earthquake, flood and relief 220th anniversary [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2006(3):4-9. (in Chinese)]
- [18] 陈桂华,闵伟,宋方敏,等. 从 1786 年磨西地震看地震地表破裂带在不同地貌区的保存[J]. 地震地质, 2011, 33(4):804-817. [CHENG G H, MIN W, SONG F M, *et al.* Preservation of Co-Seismic surface rupture in different geomorphological settings from the study of the 1786 MOXI earthquake [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(4):804-817. (in Chinese)]
- [19] 吴俊峰,王运生,张桥,等. 大渡河加郡一得妥河段大型滑坡地质灾害遥感调查[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3):113-116. [WU J F, WANG Y S, ZHANG Q, *et al.* Investigation on large-scale landslides in Daduhe rive between Jiajun county and Detuo county based on remote sensing[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(3):113-116. (in Chinese)]
- [20] 赵德军,王道永,吴德超,等. 磨西断裂变形与运动学特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(3):15-20. [ZHAO D J, WANG D Y, WU D C, *et al.* Structural deformation and kinematics of the Moxi fault in western Sichuan [J]. Sed in Entary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(3):15-20. (in Chinese)]