

doi: 10.11720/wtyht.2019.1087

李富,周洪福,葛华.不同类型滑坡体的高密度电阻率法勘察电性特征[J].物探与化探,2019,43(1):215-221.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1087

Li F,Zhou H F,Ge H.Electrical characteristics of different types of landslide bodies investigated by high-density electrical method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(1):215-221.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1087

# 不同类型滑坡体的高密度电阻率法勘察电性特征

李富,周洪福,葛华

(中国地质调查局 成都地质调查中心,四川 成都 610081)

**摘要:**中国西南地区滑坡灾害严重,滑坡勘察中判断滑坡体类型、规模等非常重要。文中总结了滑坡体的不同分类方法及电性特征,通过对 20 多个滑坡体的高密度电阻率法勘察资料进行综合分析,明确了不同类型滑坡体的电阻率特征差异明显;重点介绍了土质滑坡、岩石滑坡和破碎岩石滑坡等 3 个高密度电法探测实例的异常特征。实践证明,利用高密度电阻率法能从电阻率异常特征来推断滑坡体的类型、物质组成,其结果对滑坡体勘察及后期治理、钻探施工起到指导作用。

**关键词:**滑坡;高密度电阻率法;电阻率;基岩面;地质灾害监测

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2019)01-0215-07

## 0 引言

山体滑坡是常见的地质灾害之一,尤其在中国西南山区最为常见。山体滑坡是指山体斜坡上某一部分岩土在重力(包括岩土本身重力及地下水的动静压力)作用下,沿着一定的软弱结构面(带)产生剪切位移而整体向斜坡下方移动的现象。中国西南地区滑坡造成严重人员伤亡和巨大经济财产损失。2017 年 6 月 24 日,四川茂县山体滑坡,发现遇难者遗体 10 具,几十人失联;2017 年 8 月 28 日,贵州省毕节市纳雍县张家湾镇发生山体滑坡,灾害涉及 34 户,3 人死亡,32 人失联。灾难事例表明,滑坡体的勘察任务紧急且非常重要,如能提前探测出滑坡体的滑动面进行相应治理,就可以减少人员与财产的损失。

由于滑坡体勘察复杂多变,单靠某一种方法往往难以奏效,必须综合地质、地球物理方法才能准确解决滑坡地质问题。滑坡体勘察的方法可分为无损法和破损法,前者指地球物理探测方法,后者包括坑探、槽探、井探和钻探等方法。在物探方法中,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<sup>[1-6]</sup>;实践表明,高密度电阻率法是相对较成熟和可靠的滑坡体探测技术<sup>[7-18]</sup>。笔者近几年来开展了 20 多个不同类型滑坡体的高密度电阻率法探测,积累了大量实际资料。本文旨在总结不同类型滑坡的高密度电阻率探测特征,为滑坡体详细勘察、治理和钻探等工作提供参考依据。

## 1 高密度电法基本原理

### 1.1 工作原理

高密度电阻率法是为满足浅部精细勘查的实际需要而研制的一种电法勘探系统。现场测量时只需将电极设置在一定间隔的测点上,测点密度远较常规电阻率法大,一般在 1~10 m,然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换开关上。电极转换开关是一种由单片机控制的电极自动换接装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式、极距及测点的转换。测量信号用电极转换开关送入微机工程电测仪,并将测量结果依次存入随机存储器。由于一条剖面地表测点总数是固定的,因此,极距扩大时,反

收稿日期:2018-03-08;修回日期:2018-07-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41502245);中国地质调查局地质调查项目(DD20160272,DD20160286)

作者简介:李富(1980-),男,高级工程师,主要从事水、工、环方面的应用地球物理研究工作。Email:lfu@cgs.cn

映不同勘探深度的测点数将依次减少,整条剖面的测量结果便可以表示成一种倒三角形(或倒梯形)二维断面的电性分布。

相对于常规电测深和电剖面法,高密度电阻率法有以下特点:①由于电极布设是一次完成的,这不仅减少了因电极设置而引起的故障和干扰,而且为野外数据的快速和自动测量奠定了基础;②能有效的进行多种电极排列方式的扫描测量,因而可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地质信息;③野外数据采集实现了自动化或半自动化,不仅数据采集速度快,而且避免了由于手工操作所出现的错误;④可以对资料进行预处理并显示剖面曲线形态,脱机处理后还可自动绘制和打印各种成果图件;⑤与传统的电阻率法相比,高密度电阻率法成本低、效率高,信息丰富,解释方便,勘探能力显著提高;⑥由于高密度电阻率法采用自动读数,在工业流散电流干扰较大的矿区工作时不易保证观测质量,特别是大极距时更是如此;⑦高密度电阻率法主要用于勘探浅部的电性异常体,在水文物探中常用于浅部裂隙带、采空区等的精细勘探。

高密度电阻率法常用装置类型有温纳装置、偶极装置和微分装置。偶极和微分装置的探测结果对于异常的反映相似,温纳装置更适合于探测电性界面变化较小的情况,比值参数的处理方法能够更加清晰地显示异常体的几何形状。本文采用国内常用的温纳装置形式,更有利于划分滑坡体的各层界面。

## 1.2 数据处理方法

数据处理采用国际公认 AGI 公司研发的 EarthImager 2D 高密度电法处理软件。EarthImager 2D 高密度电法处理软件具体步骤:①启动 EarthImager 2D,打开二维 STG 数据文件,加入地形反演文件,设置反演参数,参数设置要充分考虑原始数据的范围;②对采集的数据进行统计,查看数据质量,对不合格的数据进行剔除;③采用最小二乘法进行反演,如果不收敛,用直方图删除数据,继续反演,确保其收敛;④显示图像、调整颜色、输入图名、保存图像、保存反演结果。

## 2 各类滑坡的分类及其电性特征

目前滑坡的分类方案很多,各方案所侧重的分类原则不同,有的根据滑动面与层面的关系,有的根据滑坡的动力学特征,有的根据规模、深浅,有的根据岩土类型,有的根据斜坡结构,还有根据滑动面形状甚至根据滑坡时代等等;这些分类方案各有优缺

点,至今仍在应用。也有人提出不少综合分类方案,但是这些方案尚未得到公认。滑坡分类方案有待进一步探讨<sup>[19-20]</sup>。下面仅重点介绍几类。

1)按滑坡体物质组成分类,可以分为岩质滑坡、土质滑坡两类。岩质滑坡包括岩石滑坡、破碎岩石滑坡,其中岩石滑坡还可适当详细划分,有人认为可分为软硬互层岩组滑坡,软弱岩岩组滑坡,坚硬、半坚硬岩岩组滑坡等。土质滑坡包括堆积土滑坡、黄土滑坡、黏质土滑坡和堆填土滑坡。这种分类已在国内外得到广泛应用。

2)以滑坡体规模分类,按滑坡深度可分为浅层滑坡(<6 m)、中层滑坡(6~20 m)、厚层滑坡(20~50 m)、巨厚层滑坡(>50 m);按滑坡体积大小分为小型、中型、大型、巨型滑坡。

3)按滑动面与层面关系的分类是较早的一种分类,应用很广,可分为均质滑坡(无层滑坡)、顺层滑坡和切层滑坡三类。均质滑坡是发生在均质的没有明显层理的岩体或土体中的滑坡,其滑动面不受层面的控制,而是决定于斜坡应力状态和岩土抗剪强度的相互关系;滑面呈圆柱形或其他二次曲线形;在黏土岩、黏性土和黄土中较常见。顺层滑坡一般是指沿着岩层层面发生的滑动,特别是软弱岩层易成为滑坡面,那些沿着断层面大裂隙面的滑动,以及残坡积物顺其与下部基岩的不整合面下滑的均属于顺层滑坡的范畴。切层滑坡的滑面切过岩层面而发生的滑坡称为切层滑坡;滑坡面常呈圆柱形,或对数螺旋曲线。

4)按滑动力学性质分类,主要是按始滑位置(滑坡源)引起的滑坡力学特征进行分类。这种分类对滑坡的防治有很大意义,一般根据始滑部位不同分为推落式、平移式、牵引式和混合式。推落式滑坡主要是由于斜坡上部张开裂缝发育或因堆积重物和在上部进行建筑等,引起上部失稳始滑而推动下部滑动。平移式滑坡的滑动面一般较平缓,始滑部位分布于滑动面的许多点,这些点同时滑移,然后逐渐发展连接起来。牵引式滑坡首先是在斜坡下部发生滑动,然后逐渐向上扩展引起由下而上的滑动,这主要是斜坡底部受河流冲刷或人工开挖而造成的。混合式滑坡是始滑部位上下结合,共同作用引起的;混合式滑坡比较常见。

5)按滑坡时代分类,可分为现代滑坡、老滑坡、古滑坡、埋藏滑坡。

6)其他分类主要包括以下几种:①按滑坡主滑面成因类型分类:堆积面滑坡、层面滑坡、构造面滑坡、同生面滑坡;②按滑动形式分类:转动式滑坡、平

移式滑坡;③按滑动历史分类:首次滑坡、再次滑坡。

综上所述,现有的滑坡分类绝大部分都是依据滑坡某一单方面特征的归纳,它们都能反映滑坡在该特定方面的差异特征,各有其科学、实用意义。根据 20 多个滑坡的物性资料统计,按滑坡体物质组成分类与地球物理特征最为相关;岩石滑坡中软硬互层岩组滑坡,坚硬、半坚硬岩岩组滑坡,由于成岩物质较致密,且含水少,一般表现为中高阻异常特征;

软弱岩岩组滑坡由于主要含泥岩,主要为黏土矿物,表现为中阻异常;破碎岩石滑坡由于断层破碎带裂隙较大、储存水较困难而表现为高阻异常;土质滑坡中堆积土滑坡、黄土滑坡和黏质土滑坡,由于含水性较好,表现为低阻特征;堆填土滑坡由于含有砾石、碎块石等,表现为中阻异常。各类滑坡体之间存在明显的电阻率差异(表 1),可以用高密度电阻率法进行探测。

表 1 按滑坡体物质组成分类的滑坡电性特点

Table 1 Electrical characteristics of landslide according to material composition of landslide body

| 电性特征 | 岩组                          | 电阻率范围/( $\Omega \cdot m$ ) |
|------|-----------------------------|----------------------------|
| 低阻   | 堆积土滑坡、黄土滑坡和黏质土滑坡            | 1~100                      |
| 中阻   | 堆填土滑坡,软弱岩岩组滑坡               | 80~200                     |
| 高阻   | 破碎岩石滑坡,软硬互层岩组滑坡,坚硬—半坚硬岩岩组滑坡 | 200~10000                  |

### 3 土质滑坡探测实例

#### 3.1 测线布置

土质滑坡高密电法探测实例的物探测线位于甘洛县玛麻村哈七组滑坡体中西部,为纵向剖面,共布设 128 个电极,电极距 5 m,测线方向为 45°。

#### 3.2 工作区地质概况

工区表层以第四系全新统坡积、洪积和滑坡堆积为主,深部为侏罗系中统新村组砂岩。

#### 3.3 探测资料推断解释及钻探验证

土质滑坡高密电法探测实例的整条剖面主要是以低电阻率为主(图 1),范围在 15~100  $\Omega \cdot m$ ,剖面浅部表现为低阻异常,深部表现为相对高阻异常。

在剖面 1~50 测点,浅部存在低阻异常,电阻率

范围为 15~40  $\Omega \cdot m$ ,厚度约为 20~30 m,推测为第一级滑坡体,主要为第四系粉质黏土层;其深部有相对高阻异常,约 40~70  $\Omega \cdot m$ ,推测为滑床,高阻异常由砂岩层引起,厚度约 28~65 m。测线旁侧的 ZK04 见基岩深度为 28.5 m,验证了物探推断成果。

在剖面 45~128 测点,浅部存在低阻异常,范围为 15~40  $\Omega \cdot m$ ,厚度约 5~50 m,推测为第二级滑坡体。该处浅部的低阻异常体主要是由于第四系粉质黏土层引起,局部相对高阻异常由碎石土引起;从异常特征来看,剖面中部的滑坡体深度(约 40 m)比剖面的尾部(深度约 10 m)滑坡体厚。测线旁侧 ZK01 见基岩深度为 18.8 m,而 ZK03、ZK06 见基岩深度均大于 50 m,物探成果得到了有效验证。在该处深部有相对高阻异常,电阻率约 40~70  $\Omega \cdot m$ ,推测为滑床,岩性以砂岩为主,厚度约 25~65 m。

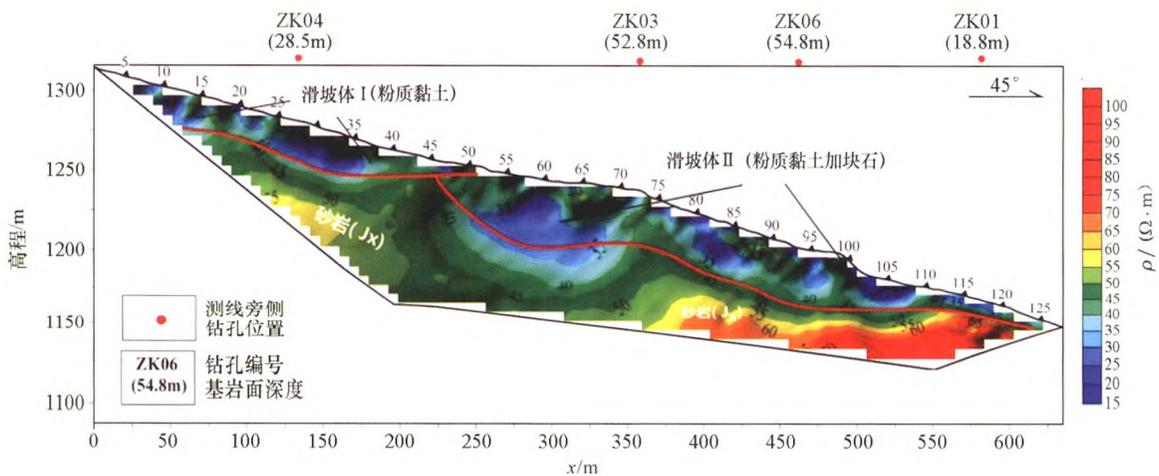


图 1 玛麻村哈七组滑坡高密度电法探测反演电阻率断面

Fig.1 The results of the detection of high density electrical method in Haqi group of Mama village

高密度电阻率法反演成果清晰划分滑坡体为两级滑坡体,浅部的低阻异常主要由第四系粉质黏土夹碎块石引起,深部的相对高阻异常为滑床(砂岩)引起;钻探成果对物探推断成果验证效果较好。土质滑坡由于含水量相对充分,表现出低阻特征,电阻率值约  $1 \sim 100 \Omega \cdot m$ 。

#### 4 岩石滑坡探测实例

##### 4.1 测线布置

岩石滑坡实例物探测线位于西昌市大箐乡胜利村鹅掌河4号滑坡体中西部,为纵向剖面;本测线共布设80个电极,电极距5m,测线SW向。

##### 4.2 工作区地质概况

工区出露地层为第四系和侏罗系。第四系松散堆积层为一套弱固结的底砾岩,以砂岩、泥岩为主。侏罗系下统益门组岩性为砂岩、泥岩、页岩,节理裂隙、构造裂隙发育。

##### 4.3 探测资料推断解释及钻探验证

整条剖面主要是以中等电阻率为主(图2),电

阻率范围为  $5 \sim 300 \Omega \cdot m$ ,剖面浅部和深部表现为相对高阻异常,中部表现为相对低阻异常。在1~20测点,浅部存在高阻异常,电阻率范围为  $125 \sim 300 \Omega \cdot m$ ,厚度范围为  $10 \sim 20 m$ ,推测为益门组砂岩层,主要由完整砂岩表现为高阻;其深部存在一层低阻异常,电阻率范围为  $65 \sim 145 \Omega \cdot m$ ,厚度范围为  $10 \sim 15 m$ ,推测为益门组页岩层。

在20~70测点,浅部存在局部相对高阻异常,电阻率范围为  $65 \sim 185 \Omega \cdot m$ ,厚度约  $20 \sim 30 m$ ,推测为滑坡体表层,主要由碎块石引起;中部出现明显的低阻异常,电阻率范围为  $5 \sim 65 \Omega \cdot m$ ,厚度约  $5 \sim 18 m$ ,推测为滑坡界面,主要由含水、且破碎页岩引起。中深部为高阻异常,电阻率约  $165 \sim 300 \Omega \cdot m$ ,推测为滑床,异常由基岩层引起,厚度约  $30 \sim 65 m$ 。深部存在一层低阻异常,电阻率范围为  $45 \sim 125 \Omega \cdot m$ ,厚度范围为  $10 \sim 20 m$ ,推测为益门组页岩层。测线旁侧ZK01、ZK02孔见基岩深度分别为  $16 m$ 、 $18 m$ 。在剖面68~80测点,存在一层低阻异常,电阻率范围为  $5 \sim 65 \Omega \cdot m$ ,厚度范围为  $15 \sim 35 m$ ,推测为第四坡积物,主要以黏土为主。

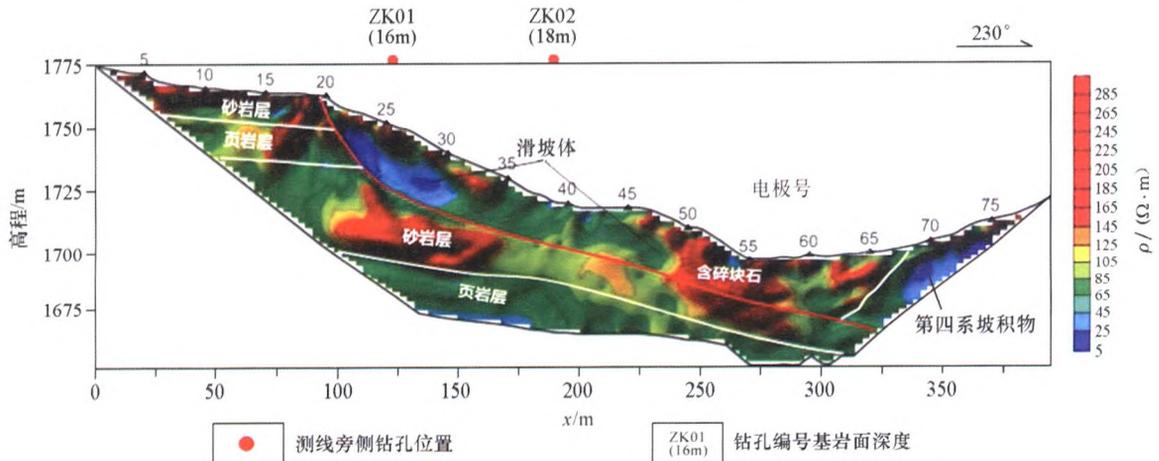


图2 鹅掌河4号滑坡高密度电法探测反演电阻率断面

Fig.2 Results of the high density electrical method in the landslide of the Ezhang river

整体来看,滑坡体主要表现出的中高阻、低阻电阻率特征分布不均匀;55号测点堆积大量碎块石土,表现为高阻异常;地表可见后缘陡坎和前缘边界,滑坡体形态特征明显;砂岩表现为高阻异常特征;页岩层表现为低阻,页岩破碎且含水是该滑坡形成的主要原因。从滑坡体勘察结果分析,认为该滑坡为中型中层岩土质切层滑坡,岩质滑坡由于含水相对较少,表现特征为中、高阻,电阻率值约  $25 \sim 300 \Omega \cdot m$ 。

#### 5 破碎岩石滑坡探测实例

断层(破碎岩石)滑坡通常具有分布范围广、破坏性强、规模大等特点。

##### 5.1 测线布置

破碎岩石滑坡实例的物探测线位于巧家县城后山滑坡体中下部,为纵向剖面,共布设248个电极,电极距10m,测线NE向。

## 5.2 工作区地质概况

滑坡体发育于第四系,滑体物质主要由第四系滑坡堆积含碎石粉质黏土及碎石土组成。含碎石粉质黏土主要分布在斜坡表层,根据钻探资料显示,后部土体较厚,厚度约 20~40 m,中部土体厚度 10~20 m,前部土体厚度较薄,一般在 1~3 m。碎石土分布于滑坡中部,下覆于含碎石粉质黏土层。滑床物质主要为阳新组白云质灰岩,岩芯整体较完整,层间多软弱夹层(潜在滑动带),为典型的易滑地层,为滑

坡的产生提供了物质条件。

小江断裂带从滑坡前缘通过,断裂带在该处宽约 400~500 m,在内部发育 60°~75°的破裂面。且滑坡位于水坪子背斜西翼,在区域上形成了江北顺向坡地貌,为滑坡的形成提供了有利条件。

## 5.3 探测资料推断解释及钻探验证

整条剖面主要是以中高电阻率为主,电阻率范围为 0~2 000  $\Omega \cdot m$ ,剖面浅部以低阻电阻率异常为主,剖面深部以高阻电阻率异常为主(图 3)。

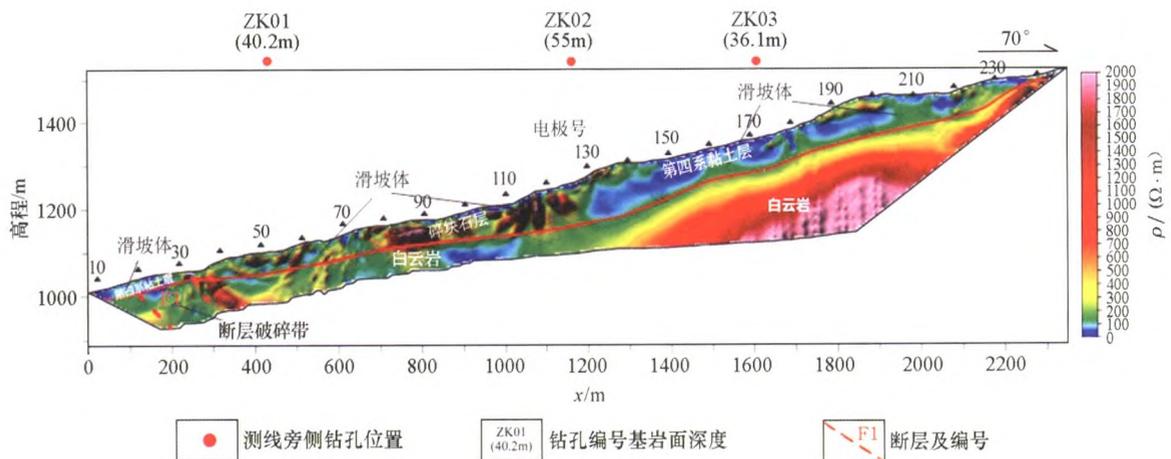


图3 巧家县城后山滑坡高密度电法探测反演电阻率断面

Fig.3 The detection results of the high density electrical method in Houshan landslide of Qiaojia County

整条剖面浅部低阻电阻率异常特征明显,电阻率约 0~300  $\Omega \cdot m$ ,厚度约 10~80 m,推断为滑坡体。1~35 号测点以低阻电阻率为主,主要由第四系黏土层引起;35~130 号测点以相对高阻为主,高阻异常不连续,有局部块体,主要由滑坡体中含有碎石土引起;130~248 测点以低阻为主,主要由第四系黏土层引起。

对滑坡体物质基本特征有所区分,滑坡体上部以低电阻率的黏土层为主,滑坡体中部以高电阻率基岩碎块石为主,滑坡体的尾部以低阻率的黏土层为主。由于小江断裂带作用,把原本向西的单斜地层变为向东倾的地层。推测在 35~248 号测点深部,基岩形态为“U”字形;ZK02 的见基岩深度比 ZK01、ZK03 见基岩深度大,由此推断结果得到证明。在 18~30 号测点,深部存在中低阻异常,电阻率约 200~600  $\Omega \cdot m$ ,推测为隐伏断层破碎带(图 3 红色虚线),宽度约 100~150 m;其两边均为完整高阻异常。35~40 号测点正下方的高阻异常特征非常明显,异常形态较陡,倾角约 65°,推断为断层破碎带东侧的边界,与地质特征基本对应。在 35~130 号测点,深部存在中高阻异常,电阻率约 200~1 200  $\Omega \cdot m$ ,推测为阳新组白云质灰岩,厚度约 80~140

m。由于高密度电阻率法的探测深度有限,且该处基岩较深,基岩的形态特征不是很明显。在 130~248 号测点,深部存在高阻异常,电阻率约 200~2 000  $\Omega \cdot m$ ,推测为阳新组白云质灰岩,厚度约 120~200 m,电阻率异常形态很完整,基岩的形态特征很明显。

滑坡体勘察认为该滑坡属特大型超深层滑坡,运动形式为推移式。整条剖面高阻异常主要由基岩(灰岩)引起。滑坡体由于含水量相对充分,主要表现为中低电阻率特征;滑坡体破碎岩石表现为局部高阻特征,电阻率值约 1 000  $\Omega \cdot m$ 。

## 6 结论

通过对高密度电阻率法得到的 20 多个滑坡体勘察资料综合分析,得出不同类型滑坡体的电阻率特征异常差异明显:土质滑坡体显示为低阻特征,岩石滑坡的异常特征为中、高阻,破碎岩石滑坡体显示为高阻特征。

通过对土质、岩石和破碎岩石类滑坡的高密度电法探测成果分析研究,高密度电阻率法能通过电阻率异常特征推断滑坡体的类型、物质组成,对滑坡

体勘察及后期治理、钻探施工起到指导、示范作用。

**致谢:**衷心感谢审稿专家与编辑部同志提出的宝贵意见与建议。

### 参考文献(Reference):

- [1] 刘康和.电阻率法的数据处理及在断层探测中的应用[J].人民长江, 1994(4):28-31.  
Liu K H. Data processing of resistivity method and its application in fault detection [J]. Yangtze River, 1994(4):28-31.
- [2] 张玉池, 温佩琳, 周屹, 等.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(s1):9-10.  
Zhang Y C, Wen P L, Zhou Y, et al. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of landslide geological disasters[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2007, 31(s1):9-10.
- [3] 吕擎峰, 卜思敏, 王生新, 等.综合物探法在滑坡稳定性评价中的应用研究[J].岩土工程学报, 2015(s1):142-147.  
Luy Q F, Bu S M, Wang S X, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in stability evaluation of landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015(s1):142-147.
- [4] 袁广祥, 唐民安, 吴琦, 等.基于综合物探技术的大型堆积体滑坡勘察[J].工程勘察, 2010, 38(11):75-79.  
Yuan G X, Tang M A, Wu Q, et al. Application of comprehensive geophysical exploration technology to large accumulation landslide [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(11):75-79.
- [5] 刘崧.物探方法在研究三峡库区滑坡中的应用前景[J].地质科技情报, 1994(3):81-89.  
Liu S. Prospects for application of geophysical methods to the study of landslides in the reservoir area of the Three Gorges[J]. Geological Science and Technology Information, 1994(3):81-89.
- [6] 许强, 李为乐, 董秀军, 等.四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J].岩石力学与工程学报, 2017, 36(11):2612-2628.  
Xu Q, Li W L, Dong X J, et al. The Xinmocu landslide in Maoxian, Sichuan: Characteristics and failure mechanism [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11):2612-2628.
- [7] 严加水, 孟贵祥, 吕庆田, 等.高密度电法的进展与展望[J].物探与化探, 2012, 36(4):576-584.  
Yan J Y, Meng G X, Luy Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(4):576-584.
- [8] 周锡明, 陈超, 王佩业.高密度电法在山区浅表层结构调查中的应用[J].物探与化探, 2012, 36(2):198-201.  
Zhou X M, Chen C, Wang P Y. The application of the high density resistivity method to the investigation of shallow layer structure in the mountain area [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(2):198-201.
- [9] 苏兆锋, 陈昌彦, 肖敏, 等.精细高密度电阻率法在白云岩矿采空区中的应用[J].物探与化探, 2012, 36(b10):45-47.  
Su Z F, Chen C Y, Xiao M, et al. The application of precise high density resistivity method to the detection of goaf in a dolostone mine [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(b10):45-47.
- [10] 高阳, 熊华山, 彭明涛, 等.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 Y, Xiong H S, Peng M T, et al. High density electrical prospecting anomaly analysis of water-bearing structure in karst area of southeast Chongqing [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2016, 40(6):1108-1115.
- [11] 陈益杰.对高密度电阻率法探测技术的一些改进[J].物探与化探, 2009, 33(6):707-709.  
Chen Y J. Some improvements in high density resistivity detection technique [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(6):707-709.
- [12] 韦卫明.高密度电法在工程勘察应用中的体会[J].煤炭技术, 2011, 30(2):134-136.  
Wei W M. Density resistivity explore of experience in application [J]. Coal Technology, 2011, 30(2):134-136.
- [13] 程庆, 虞先国, 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, Tuo X G, Ge B, et al. The application of the high density electrical method to the survey of Chayangou landslide in Gaochuan, Sichuan province [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(1):69-72.
- [14] 徐顺强, 李德庆, 杨利普, 等.滑坡体高密度电阻率正反演模拟及其在工程抢险中的应用[J].物探化探计算技术, 2014(5):535-540.  
Xu S Q, Li D Q, Yang L P, et al. Forward and reverse modeling of high density resistivity of landsliding and its application in the emergency project [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014(5):535-540.
- [15] 周官群, 翟福勤, 郝志超, 等.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 G Q, Zhai F Q, Hao Z C, et al. The application of the multi-electrode resistivity method and reflection seismic method to the landslide detection in the jiuhua mountain [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2015, 39(4):872-876.
- [16] 张先林, 许强, 彭大雷, 等.高密度电法在黑方台地下水探测中的应用[J].地球物理学进展, 2017, 32(4):1862-1867.  
Zhang X L, Xu Q, Peng D L, et al. Application of high density resistivity method to groundwater exploration in Heifangtai [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4):1862-1867.
- [17] Xu D, Hu X Y, Shan C L, et al. Landslide monitoring in southwestern China via time-lapse electrical resistivity tomography [J]. Applied Geophysics, 2016(1):1-12.
- [18] 肖翔, 刘之葵, 高伊航.高密度电法在黄土滑坡勘察中的应用[J].人民长江, 2015, 46(17):49-52.  
Xiao X, Liu Z K, Gao Y H. Application of high density resistivity method in loess landslide exploration [J]. Yangtze River, 2015, 46(17):49-52.
- [19] 黄润秋.中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J].第四纪研

究, 2003, 23(6):443-450.

Huang R Q. Mechanism of large scale landslides in western China

[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 23(6):443-450.

[20] 刘广润, 晏鄂川, 练操. 论滑坡分类[J]. *工程地质学报*, 2004,

10(4):339-342.

Liu G R, Yan E C, Lian C. Discussion on classification of landslides

[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 10(4):339-342.

## Electrical characteristics of different types of landslide bodies investigated by high-density electrical method

LI Fu, ZHOU Hong-Fu, GE Hua

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

**Abstract:** The landslide in southwest China has caused serious casualties and huge economic and property losses. It is very important to determine the type and scale of landslide. First, this paper introduced the principle and data processing method of high density resistivity method. Second, we summarized the different classification methods and physical characteristics of the landslide. Finally, through the comprehensive analysis of more than 20 landslide survey data obtained by high density resistivity method, it is held that the apparent resistivity characteristics of the different types of landslide are different obviously. With practical examples, this paper mainly deals with three abnormal characteristics of high density resistivity method detection, i.e., the soil landslide, rock landslide and broken rock landslide. It is proved that the high-density electrical method can deduce the type and material composition of the slope from the abnormal characteristics of the apparent resistivity, and provide guidance and demonstration for the investigation of the landslide body and the later management and drilling construction.

**Key words:** landslide; high-density electrical method; resistivity; bedrock surface; geohazard monitoring

(本文编辑:沈效群)