

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.074>



三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义： 以万州区四方碑滑坡为例

林松^{1,2}, 王薇^{1,2*}, 邓小虎², 查雁鸿², 周红伟², 程邈^{1,2}

1. 地震预警湖北省重点实验室, 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071

2. 武汉地震工程研究院有限公司, 湖北武汉 430071

摘要: 滑坡是最严重的地质灾害之一, 查明滑坡形态特征及滑坡形成机制对于滑坡体稳定性分析、滑坡灾害风险管理和政府治理决策等方面具有重要意义。前人研究滑坡形态及其形成机制较少结合地球物理实测方法, 其工程地质剖面绘制多局限于点信息的获取方式, 而结合地球物理实测方法有利于从线、面同时获取更丰富的滑坡体地质信息, 更加准确量化滑移面埋深和透视滑床形态。鉴于此, 以灾害频发的三峡库区万州区为研究对象, 采用网格高密度电法实测区内不同深度地层的电阻率值, 并以此生成二维电阻率剖面和构建滑床三维形态; 同时, 将剖面电性分布特征与钻孔资料及地质调查资料相结合, 对滑坡区地层结构、滑移面埋深以及滑床形态等多个影响滑坡的重要因素综合分析。结果表明, 在研究区开展网格高密度电法实测工作, 可获取地层电性结构特征以及构建滑坡体三维形态; 实测剖面显示四方碑滑坡属于古滑坡, 且存在拉裂槽现象。将实测剖面获取的滑移面埋深和构建的三维滑床形态进行钻孔标定, 可对滑坡体内部结构及物质组成进行“透视”, 从而为滑坡形成机制分析提供依据, 同时也给其他类似区域地质调查中的滑坡稳定性评价及预测预报工作提供理论指导和技术参考。通过高密度电法揭示三峡库区典型滑坡体三维形态特征的理论方法和技术路线成功引入滑坡形成机制分析, 可为研究滑坡形成机制和理论提供新思路, 具有推广意义。

关键词: 三峡库区; 滑坡; 地球物理; 滑床形态; 拉裂槽。

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2019)09-3135-12

收稿日期: 2019-02-26

Geophysical Observation of Typical Landslides in Three Gorges Reservoir Area and Its Significance: A Case Study of Sifangbei Landslide in Wanzhou District

Lin Song^{1,2}, Wang Wei^{1,2*}, Deng Xiaohu², Zha Yanhong², Zhou Hongwei², Cheng Miao^{1,2}

1. Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology of China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2. Wuhan Institute of Earthquake Engineering Co. Ltd., Wuhan 430071, China

Abstract: Landslide is one of the most serious geological disasters. Finding out the morphological characteristics of landslide and the formation mechanism of landslide is of great significance to landslide stability analysis, risk management of landslide hazards and government decision-making. Previous studies on landslide morphology and its formation mechanism are seldom combined with geophysical approach. The engineering geological profile drawing is limited to the acquisition of point-level information. The combination of geophysical measurement methods is conducive to obtaining more abundant landslide geological information from

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41572354)。

作者简介: 林松 (1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为地震地质和工程地震。ORCID: 0000-0002-9752-2360。E-mail: ls6102212@163.com

*通讯作者: 王薇, ORCID: 0000-0002-4153-4346。E-mail: smilevivi0821@163.com

引用格式: 林松, 王薇, 邓小虎, 等, 2019. 三峡库区典型滑坡地球物理实测及其意义: 以万州区四方碑滑坡为例. 地球科学, 44(9): 3135-3146.

two-three dimension, and to quantifying the buried depth of sliding surface and perspective sliding bed morphology more accurately. In view of this, we take the hazardous Wanzhou area in the Three Gorges reservoir area as the research object, and apply high density grid resistivity method to measure resistivity values of different depth strata in the study area, to generate two-dimensional resistivity profiles for the first time so that we can further construct three-dimensional shape of sliding bed. At the same time, the important factors affecting the landslide, such as the stratum structure, the depth of the slip surface and the shape of the slip bed, are comprehensively analyzed by integration of the electrical features of the section with the borehole data and geological survey data. The results show that the high-density grid resistivity method can accurately acquire the electrical structure characteristics of the stratum and construct a three-dimensional shape of the landslide body. The measured profile shows that the Sifangbei landslide belongs to an ancient landslide, and there exists the phenomenon of drawing crack trough. By calibrating the buried depth of the slip surface obtained from the measured profile and the three-dimensional slip bed configuration, the internal structure and material composition of the landslide body can be “perspective”, which provides a basis for the analysis of the formation mechanism of the landslide, as well as theoretical guidance and technical reference for the evaluation and prediction of landslide stability in the other similar regional geological surveys. The theoretical method and technical route of revealing the three-dimensional morphological characteristics of typical landslides in the Three Gorges Reservoir area by high-density electrical method are successfully introduced into the analysis of landslide formation mechanism, which can provide new ideas and approach for the study of landslide formation mechanism and theory, and can be widely used in many areas.

Key words: Three Gorges Reservoir area; landslide; geophysics; sliding bed morphology; drawing crack trough.

0 引言

三峡库区滑坡地质环境复杂,地质灾害发生机理和影响因素具有不确定性(王芳,2017).近年来,众多学者从滑坡成因机制(邓清禄和王学平,2000;简文星和杨金,2013;张明等,2014)、岩土体参数与稳定性(汪斌等,2008;谷天峰等,2013;罗渝等,2014;汪丁建等,2016)、位移变形规律等因素对滑坡体进行了分析与研究,以便对突发性滑坡在发生时间、地点、规模及影响范围方面进行预测.万州区地处三峡库区腹心,而滑坡灾害是该区最主要的地质灾害之一,该区近年来逐渐成为国内滑坡研究的热点:王佳佳等(2014)基于GIS和信息量,张俊等(2016)通过地层岩性、地质构造、水系分布等致灾因子分别对该区的滑坡灾害易发性进行了评价研究;刘磊等(2016)利用降雨影响对该区进行危险性动态评价研究,取得了卓有成效的成果.长期以来,传统的滑坡调查手段多以观测水位变化、进行位移监测、形变分析、调查诱发原因以及降雨量等因素为主,而滑移面形态特征主要以通过钻孔资料绘制的地质剖面为依据.由于受滑坡区地形起伏较大、民用电干扰严重及其他干扰源较多等因素影响,在滑坡区开展地球物理实测工作难度较大,故前人对滑坡机制的分析较少结合地球物理实测数据.地球物理实测数据能真实反映滑坡体地层结构和滑床形态的整体特征,打破仅靠钻孔等局部资料来推断地层结构和滑床形态的局限.因此,在滑坡区开展

精细地球物理实测工作显得尤为重要.

近年来,随着地球物理探测方法基础理论研究的不断深入以及勘探设备的更新,无论是外业数据采集还是室内资料分析和处理,都取得了质的飞跃.因此地球物理勘查的分辨率和信噪比得到了进一步的提高(徐兴倩等,2015),应用领域也越来越广(朱德兵,2002;Vafidis *et al.*, 2005;Hemeda and Pitilakis, 2010;林松等,2017;罗登贵等,2017).针对滑坡区地质调查,也有不少学者将地球物理探测手段引入其中,在滑坡地质灾害排查(金维民和杜兵建,2004)、滑坡工程防治(冯希杰等,2003)、滑移面埋深(Bruno and Martillier, 2000)和滑坡体积与面积估算(王敏等,2003)等方面做了大量工作.这些工作多基于地震反射、地震折射和面波等地震勘探方法.由于受地形限制以及干扰源的影响,地震勘探方法很难取得理想效果.相比地震勘探,高密度电法对滑坡体中的粘土、坡积物、水以及破碎带更加敏感,且受地形影响以及震动干扰较小,其结果能更好地反映滑移面形态特征.近10年来,国外大多数学者利用高密度电法在滑坡体内部结构和滑动面(Torgoev *et al.*, 2013)、滑坡体裂缝和破裂面(le Roux *et al.*, 2011)、滑坡监测(Ristic *et al.*, 2012)和稳定性研究(Epada *et al.*, 2012)等方面做过相关研究工作.国内学者利用高密度电法主要是查明滑移面形态(孔繁良等,2008;何清立等,2016)、分析滑坡工程地质特点(江玉乐等,2008)和滑坡的稳定性评价.虽然取得一定成果,但滑坡形态仅局限在二维结构

上,且由于地形复杂等原因,实测数据有限,无法对实测数据进行网格分析与研究,很难获取滑床真实三维形态特征,因此并未对其形成机制进行论述和探讨.

本文以万州区(即研究区)四方碑滑坡体为例,在滑坡范围内进行网格高密度电法实测,通过量化处理,结合钻孔资料,查明了滑坡体地层结构、滑移面埋深、滑床形态等信息;准确获取了横向与纵向的工程地质剖面;构建了滑坡体及内部滑床三维形态.相比二维剖面,三维形态能提供更加丰富的滑床信息,从而对滑坡形成机制的分析提供更有力的实测数据支撑.这种结合多种技术手段和实测数据构建滑坡体三维空间分布的研究方法将对后期估算滑坡体荷载、评价滑坡体稳定性以及为地质灾害风险决策和突发性滑坡预报提供参考依据.

1 研究区地质特征及概况

1.1 地质构造

三峡库区在构造历史上经历过3次较强烈的构造运动,分别为前震旦纪的晋宁运动、侏罗纪末的燕山运动和早第三纪末的喜山运动.燕山运动期间发生强烈的褶皱和断裂,塑造了区内构造总体框架(殷跃平, 2004).研究区位于万县复向斜北东段近轴部,南临方斗山背斜、北靠铁峰山背斜(图1),构造条件主要表现为背斜和向斜交替,形态上呈现背斜紧闭、向斜宽阔的隔档式梳状构造特征(图2).区内四方碑滑坡地处由万县向斜、黄柏溪向斜和新场背斜组成的雁行式排列万县复向斜内,该复向斜为不对称屈形,走向 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,向斜核部平缓开阔,靠近背斜核部的两翼地层产状突然变陡,在铁峰山附近靠近北翼的地层甚至发生倒转现象,形成倒转背斜(刘雪梅,2010).

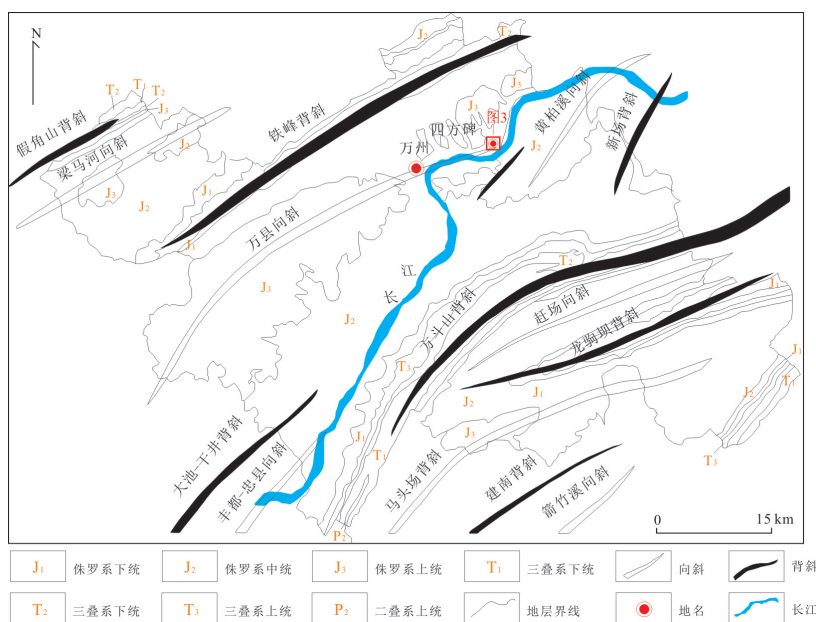


图1 万州区周围构造纲要图

Fig.1 The structural sketch map of Wanzhou district

改自《长江三峡水利枢纽库区万县市迁建城镇新址地质论证报告》,长江水利委员会综合勘测局,1996

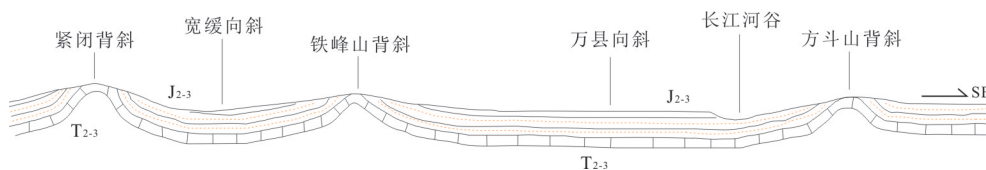


图2 万州区“隔档式”褶皱带示意图

Fig.2 Sketch of Jura-type fold in Wanzhou district

引自刘雪梅(2010)

1.2 地层岩性

研究区内出露岩层均为沉积岩,从第四系及侏罗系上统蓬莱组(J_3p)到三叠系下统大冶组(T_1d)均有出露.钻孔资料显示,万县复向斜内出露的地层包括侏罗系上统的遂宁组(J_3s)部分层位、中统的上沙溪庙组(J_2s)、以及不同成因的第四系松散堆积层(表 1).

侏罗系上统遂宁组(J_3s):该段地层部分出露于天子城、太白岩等山顶地段.主要物质成分由泥质粉砂岩、紫红色泥岩以及褐红色粉砂岩等不等厚互层组成,局部地层含紫灰色细粒长石砂岩.

上沙溪庙组(J_2s):分为上沙溪庙组第二(J_{2s}^2)段和第三段(J_{2s}^3).第二段(J_{2s}^2)主要出露于附马古滑坡和四方碑滑坡等地.主要物质成分为褐红色粉细砂岩夹紫红色泥岩、泥质粉砂岩以及紫灰色长石石英砂岩.第三段(J_{2s}^3)主要出露于万州城区,主要物质成分由粉砂岩,粉砂质粘土岩,紫红、褐红夹灰黄、灰绿色细砂岩以及泥岩等岩性变化较大的多个层位组成.

第四系(Q):主要为人工堆积、冲洪积、坡崩积物、残坡积及滑坡堆积物等松散土石体.

1.3 四方碑滑坡概况

1.3.1 滑坡边界 四方碑滑坡地处重庆万州区钟鼓楼街道吊龙村 1 组,滑坡邻近长江北岸,地理位置为东经 $108^{\circ}29'18.65''$ 、北纬 $30^{\circ}51'45.69''$.滑坡体前缘接近长江河床,其高程为 110 m,后缘基岩呈陡崖出露状态,其高程为 325 m;主滑坡剖面长约 840 m,滑坡体横向宽度约 430 m,坡度 $13^{\circ}\sim 20^{\circ}$,厚度 5~40 m;通过测量与估算,滑坡体表面积 $3.16\times 10^5\text{ m}^2$,总体积约 $9.03\times 10^6\text{ m}^3$ (李旭,2010).滑坡平面图如图 3 所示.

1.3.2 工程地质条件 滑坡位于长江北岸,三峡库区水位高于邻近长江的滑坡前缘水位,属于涉水滑坡,库区水位的升降对滑坡的运动速度具有明显影

响(李旭,2010);滑坡后缘上方为沟谷,降雨时汇聚雨水,向下流经滑坡体,大部分雨水汇聚后迅速排入长江,小部分雨水渗入滑坡体,对滑坡稳定造成影响.滑坡区属于侵蚀堆积、河谷低山丘陵地貌,地形上表现为平缓层斜坡.根据地质调查,局部斜坡上部覆盖较厚的第四系冲积、坡积物及崩滑物质等成因的粉质粘土夹碎石块;钻孔资料显示斜坡下伏侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s)砂岩与泥岩互层.

1.3.3 滑坡研究现状 近年来,不少学者对四方碑滑坡形态特征进行了研究:李旭(2010)利用地质调查和钻孔资料对滑坡物质组成进行了分析,同时综合考虑了地形地貌、岩土性质、持续降水或强降雨以及人类工程活动对滑坡的影响,并通过钻孔资料构建了主滑坡工程地质剖面图(位置与图 3 中 AA' 相同);肖婷等(2018)依据三峡水位在 175~145 m 不同降速与 50 年一遇暴雨进行工况分析,计算多种工况下滑坡的稳定性及破坏概率.尽管学者们从不同方面对四方碑滑坡进行了综合分析与研究,但在其滑坡形态特征上仅仅依靠钻孔资料还远远不够,尤其缺乏滑坡三维形态分析.而滑坡形态特征及滑移面在三维空间的起伏状态可为滑坡稳定性分析、滑坡预报判断、以及形成机制分析等提供重要信息和依据,因此,地球物理实测工作显得及其重要.

2 地球物理方法实测揭示滑坡体形态特征

2.1 方法原理及前提条件

论文选取了高密度电法进行场地实测.高密度电法属于直流电法勘探的范畴,兼具电测深和电剖面的特点,它是利用地下介质的电阻率差异对人工建立的稳定地下电场进行分析和研究,从而达到探明地层结构及地质构造目的的一种主动源电法勘探方法(江玉乐等,2008;何清立等,2016);测量结果为二维视电阻率断面,该方法可在横向上和纵向

表 1 研究区地层岩性

Table 1 Summary of stratigraphic lithology in the study area

系	统	组	地层代号	厚度(m)	岩性描述
第四系			Q	0.5~90.0	人工堆积、冲洪积、崩积、坡积、残坡积及滑坡堆积物
侏罗系	上统	遂宁组	J_{3s}	>10.0	泥质粉砂岩、紫红色泥岩、褐红色粉砂岩细粒长石砂岩
	中统	上沙溪庙组	J_{2s}^2	>25.0	褐红色粉细砂岩夹紫红色泥岩、紫灰色长石石英砂岩以及泥质粉砂岩
		第二段			
		上沙溪庙组	J_{2s}^3	7.0~50.0	褐红、灰绿色细砂岩,粉砂岩,紫红杂灰黄粉砂质粘土岩及泥岩
		第三段			

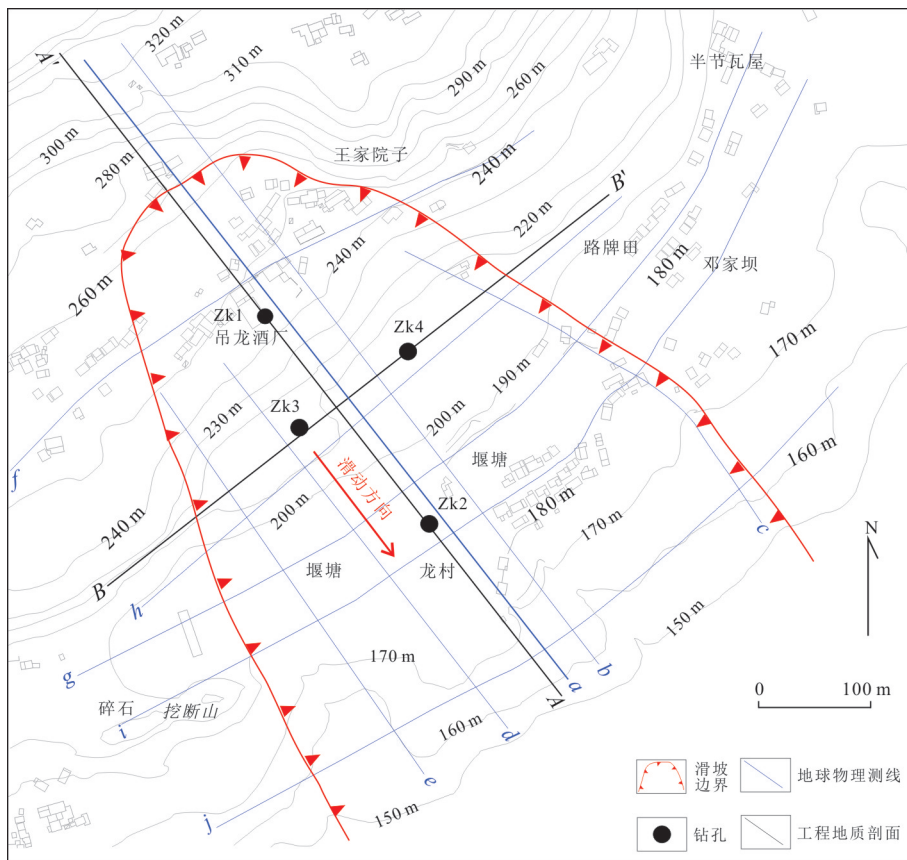


图3 四方碑滑坡平面图

Fig.3 Plane map of Sifangbei landslide
滑坡体边界参考肖婷等(2018)

上同时反映地下某一深度范围内的电性变化特征.其探测深度与测线长度和极距成正比,一般可到几十米深,最深可达上百米,影响高密度电法探测深度的因素主要包括测线长度、排列装置形式、电极间距、隔离系数以及地层物性等.研究区内第四系冲洪积、崩积、坡积和滑坡堆积物等与侏罗系中泥质粉砂岩、泥岩及细粒长石砂岩等岩土体存在明显的导电性差异,为高密度电法探测提供了前提条件.此外,滑坡体内部存在的滑块在长期演化与移动的过程中其位置会发生变化,而滑块对应位置的电阻率值也会发生相应变化,同样为高密度探测分析提供了有利依据.

2.2 实测方案及参数选取

综合前期地质调查成果与现场地质环境,在四方碑滑坡区范围内采用网格布线进行高密度电法探测工作,共计10条测线(图3).试验选取温纳装置进行野外数据采集,其观测系统如图4所示,详细采集参数为:水平极距选取5 m和10 m;最小隔离系数为1,最大隔离系数为22;总电极数视排列长度而

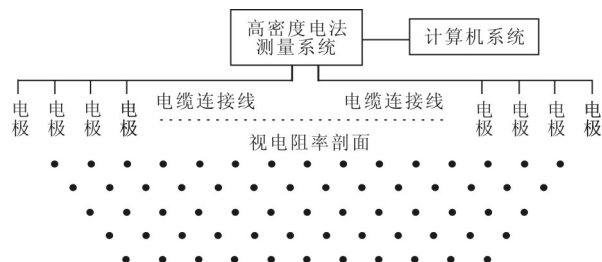


图4 高密度电法观测系统

Fig.4 High Density Electrical observation system

定,最大电极数为90.

2.3 数据处理与反演

高密度电法数据处理是一个人机交互的过程.由于存在工业用电和民用电等干扰源,数据采集过程中可能会存在一些误差甚至是错误.在反演之前需要对数据进行预编辑与处理,主要目的是剔除数据较大或较小的电流和电压值(本次剔除范围为电流小于10 mA、电压小于0.3 mV的数据);然后根据视电阻率曲线变化的主要趋势,通过人工进行视电阻率数据曲线的修正与圆滑,将数据采集过程中产

生的视电阻率突变点删除(张光保,2012),以保证反演计算过程中均方根误差小于5%。本文利用Loke and Barker(1996a)所提及的新最小二乘法算法进行反演,该算法具有在反演过程中能够依据数据质量以及不同类型地质情况对阻尼系数和平滑滤波器进行调节的优点,算法的基本方程为(Loke and Barker, 1996b):

$$(J^T J - \mu F) d = J^T g,$$

(1)

其中: $F = f_x f_x' + f_z f_z'$, f_x 为水平平滑滤波系数矩阵, f_z 为垂直平滑滤波系数矩阵; J 为偏导系数矩阵; J^T 为 J 转置矩阵; μ 为阻尼系数; d 为模型参数修改矢量; g 为残差矢量。

针对工区地质情况,论文选取的阻尼系数范围为0.03~0.18,阻尼系数随着地层深度的增加而递增,论文选取的反演梯度设置为1.05倍,视电阻率值限制在0.2~10倍平均值范围内。预处理后,将加入标高的数据文件按照上述参数进行反演,通过迭代误差和钻孔资料选取合适的视电阻率剖面(图5)。

2.4 实测结果与地质解译

通过现场实测,共获取10条测线的二维高密度电法电阻率剖面,本文选取其中4条主要剖面与钻孔信息进行标定和对比,并对结果进行陈述。

图6分别为主滑坡*a*测线、*b*测线实测二维高密度电法电阻率剖面。2条测线相互平行,方向自SSE向NNW,滑坡前缘均始于长江,测线终断于滑坡后缘垂直高度为50 m的陡崖处。*a*测线剖面长度为730 m、*b*测线剖面长度为750 m,2条剖面高差起伏较大,起点与终点垂直高差近150 m。由于地层电性差异显著,2条测线所反映的电阻率剖面上滑移面形态特征非常明显。结合钻孔岩性资料可知:电阻

率大于40 Ω·m的层位为侏罗系中统上沙溪庙组(J_{2s})由砂岩与泥岩互层组成的滑床;电阻率小于40 Ω·m的层位为第四系人工堆积、冲洪积、崩积、坡积、残坡积及滑坡堆积物;*a*测线滑移面深度10~35 m,*b*测线滑移面深度5~25 m。2条剖面的对比结果显示:滑移面深度自SWW向NEE方向逐渐变浅;*a*、*b*测线剖面尾部基岩出露,滑移面埋深较浅;*a*测线剖面0~460 m段、*b*测线剖面0~480 m段滑移面起伏不大。2条测线剖面分别显示2处电阻率低值异常:(1)*a*、*b*测线剖面320~370 m处滑移面突然变深,电阻率较低,在地貌上和地表存在的堰塘相吻合。(2)*a*测线剖面480~520 m处、*b*测线剖面520~570 m处电阻率为8~20 Ω·m,滑移面界线反映不清,低电阻率值几乎穿透整个剖面;由于下伏基岩为泥岩和砂岩,可排除由溶洞或者溶蚀现象以及破碎等原因导致的低阻,因此,该处低电阻率异常推测(后经钻孔证实)由古滑坡过程中拉裂所形成的拉裂槽导致。

图7为*h*测线和*i*测线的二维高密度电法电阻率剖面。2条测线相互平行,方向自SWW向NEE,与主滑坡*a*测线、*b*测线方向垂直。*h*测线剖面260 m、310 m处分别与主滑坡*a*测线500 m、*b*测线520 m处相交(M、N为交叉点)。*h*测线电阻率剖面上地层结构分界线明显,电阻率大于40 Ω·m的层位为侏罗系中统上沙溪庙组(J_{2s})由砂岩与泥岩互层组成的滑床;电阻率小于40 Ω·m的层位为第四系人工堆积、冲洪积、崩积、坡积、残坡积及滑坡堆积物。*h*测线剖面滑移面深度38~52 m,滑移面埋深较深;*i*测线剖面滑移面深度15~30 m,滑移面深度与主滑坡*a*、*b*测线剖面滑移面深度基本一致。与图6对比显示:(1)*h*测线分别与主滑坡*a*测线500 m、*b*测线520 m处相交,测线剖面反映的滑移面埋深较深、与图6推断的拉裂槽位置高度吻合,从而印证了图6中拉裂槽结论的正确性;(2)*h*测线、*i*测线剖面滑移面深度自SWW向NEE均逐渐变浅,与图6滑移面深度变化趋势一致。

2.5 构建滑坡体三维曲面形态

论文通过网格布线实测,得到了10条二维高密度电法电阻率剖面。以4条主要剖面为例,根据相对位置关系构建不同视角的三维示意图(图8),清晰地显示了滑坡体的滑移面形态和滑动方向。同一位置在不同电阻率剖面上呈现的电阻率特征和地层结构应该是一致的。笔者分别对比*a*测线与*h*测线、*b*测

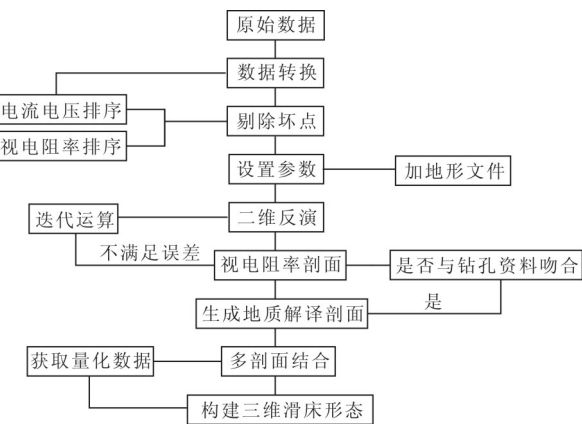


图5 数据处理流程

Fig.5 Data processing flow

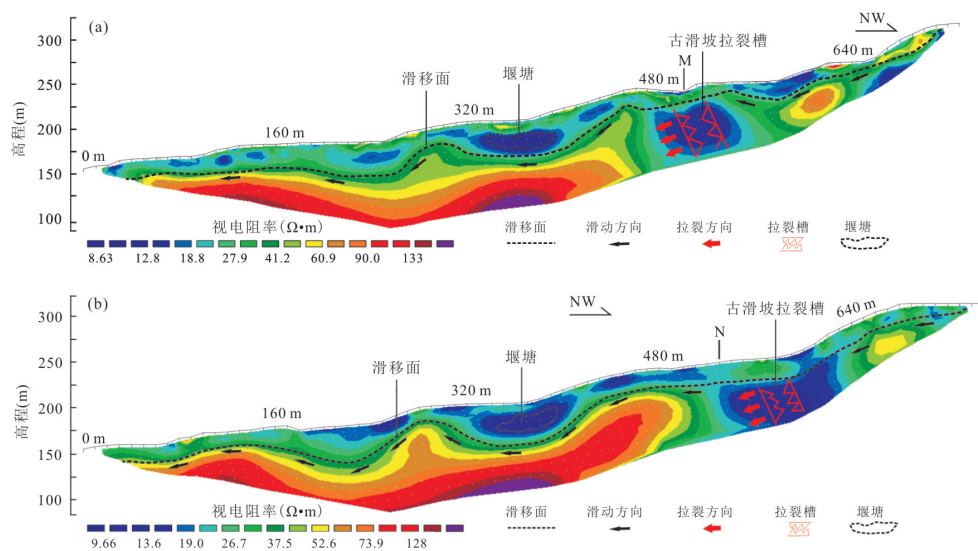


图 6 a 测线(a)和 b 测线(b)的电阻率剖面与地质解译

Fig.6 Resistivity profile and geological interpretation of Line a (a)and Line b (b)

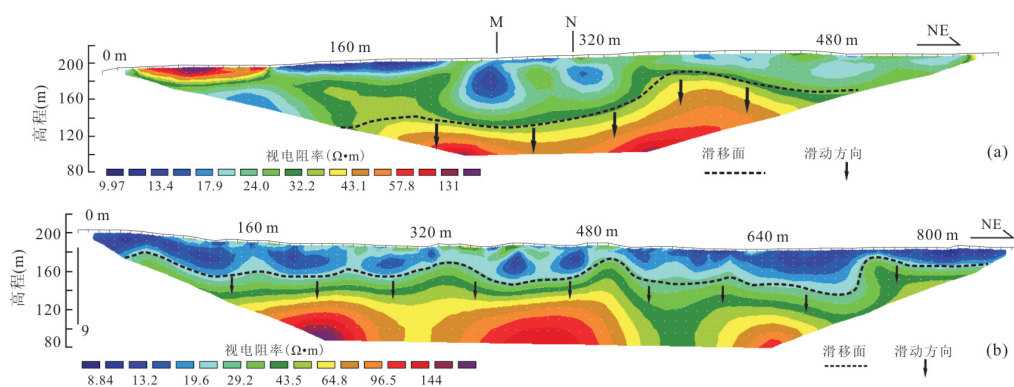


图 7 h 测线(a)和 i 测线(b)的电阻率剖面与地质解译

Fig.7 Resistivity profile and geological interpretation of Line h (a)and Line i (b)

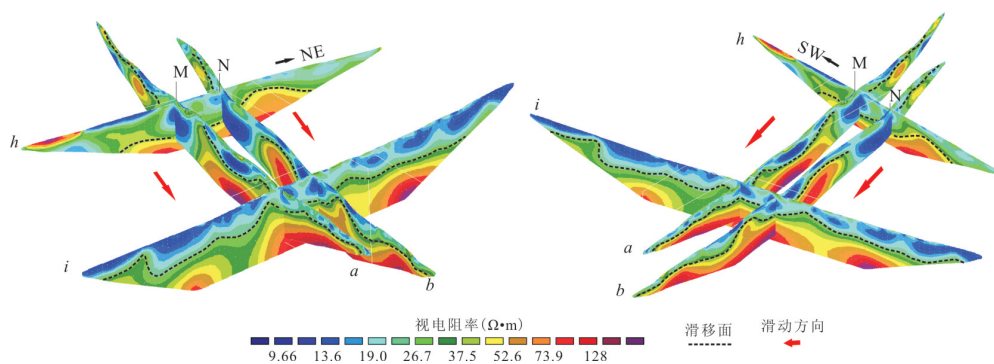


图 8 不同视角网格电阻率剖面三维示意图

Fig.8 3D sketch of grid resistivity profile with different view angles

线与 h 测线在交叉点 M、N 处呈现的电阻率值和界面深度信息,发现交叉点处均表现为低电阻率值,且深度一致(图 8),由此可得出 2 点结论:(1)对于同

一位置的地质体,纵向和横向的电阻率剖面反映的异常特征相同,均是对物性差异的真实反映;(2)纵向和横向的电阻率剖面在交叉点位置可相互验证.

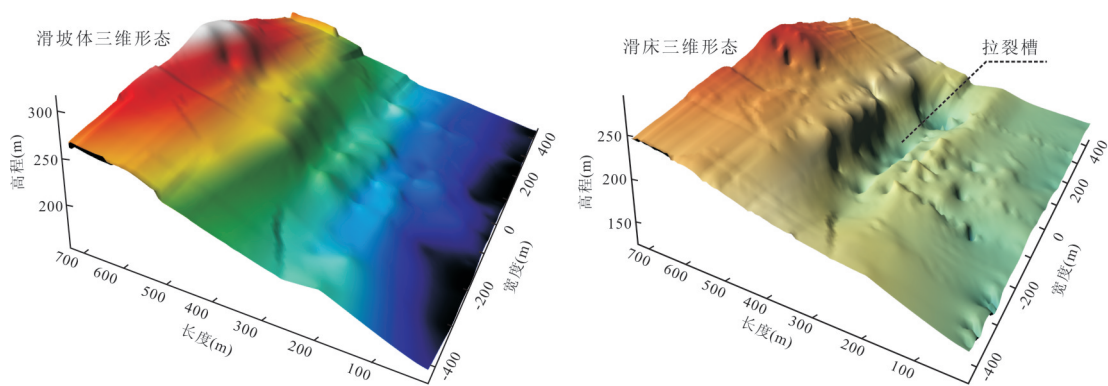


图9 滑坡体及滑床三维形态特征

Fig.9 3D morphological characteristics of landslide body and sliding bed

多条测线结合钻孔资料,可对获取的二维高密度电阻率剖面进一步量化处理,从而得到更多的滑移面深度信息和滑床形态.通过网格化数据分析,以此构建滑坡体和滑床三维曲面(图9).滑坡体三维形态非常直观地展示了滑坡形态和起伏特征,而滑床三维形态则更加清晰地揭示了掩盖在上覆地层下部的基岩骨架.通过滑床三维图,在长度480 m处,拉裂槽发育规模清晰可见;滑床上部更陡,和基岩面直接出露有关;滑床下部较为平缓,更接近河床.此外,对比滑坡体三维形态和滑床形态,利用曲面积分公式可估算滑坡体荷载体积;通过钻孔提供的密度信息可进一步计算滑坡体荷载重量,为滑坡形成机制和稳定性分析提供依据.

3 滑坡形态特征与形成机制初步探讨

3.1 滑坡形态特征

图10a、图10b分别为以高密度电法实测结果为依据,结合钻孔资料获取的四方碑滑坡工程地质纵、横剖面图.分析图10a可知:(1)四方碑滑坡在高程和地貌上自上而下分为后缘的围岩(陡崖)、中部的古滑坡体、前缘的松散堆积体,滑坡特征具有明显的“上崩下滑”特点,滑坡地貌与地质结构十分相近,地貌上表现为平缓的滑体,中后缘分布拉裂槽并形成堰塘.(2)从物质组成上来看,滑床为上沙溪庙组(J_{2s})砂岩、泥岩互层,岩层产状160°∠5°,滑面相对平直,埋深10~40 m.滑坡体主要由坡积物、人工填土、崩积物及陡崖组成,其中,滑坡前缘由松散堆积土、坡积物以及粘土夹碎石组成;滑坡中缘存在古滑坡拉裂槽,拉裂槽上部为后期自然坡积物和

人工填土,下部以古滑坡滑动过程中原岩解体形成的碎裂岩为主;后缘陡崖为石英砂岩.图10b显示:滑移面深度为38~62 m,滑移面深度至滑坡体右边界向左边界逐渐变浅.结合高密度电阻率剖面信息,判断BB'工程地质剖面位于拉裂槽所在位置,因此,第四系厚度相对较厚.

3.2 滑坡形成机制初步探讨

滑坡形成机制分析需要结合位移变形、诱因、水库水位变化、降雨量等因素进行综合考量,但综合利用地球物理(如高密度电法实测剖面)数据、钻孔资料以及地质调查资料可对滑坡体滑移面形态、深度、水位等方面的特征进行分析,并获得更完整的三维空间信息,从而为滑坡形成机制分析提供更多维度、更全面准确的参考依据.

高密度电法平行纵剖面获得的地球物理数据在四方碑滑坡的应用有效揭示了该滑坡体滑移面的形态、埋深以及拉裂槽的位置;平行横剖面的对比验证了纵剖面提供拉裂槽位置的准确性以及拉裂槽的深度信息.鉴于滑移面相对平稳,笔者推测滑坡体早期的滑坡堆积、崩坡积物经过漫长的地质历史时期演化后,相对于现今的滑床趋于稳定状态.通过高密度电法实测工作,四方碑滑坡机制主要体现在:(1)滑坡后缘电阻率值较高,与基岩出露相吻合,其形成机制主要是长期风化作用以及地震活动导致的崩塌,与长江水位变化关系不大.(2)纵向二维高密度剖面显示滑坡中部存在低阻异常,滑移面不连续,低电阻率值几乎穿透整个二维剖面,h测线视电阻率剖面揭露的上覆地层厚度相比平行的i测线揭露的地层厚度大25~40 m;实测剖面显示四方碑滑坡为古滑坡,在历史上的某个时期存在拉裂现象,导致中部形成拉裂槽;三维曲面更加立

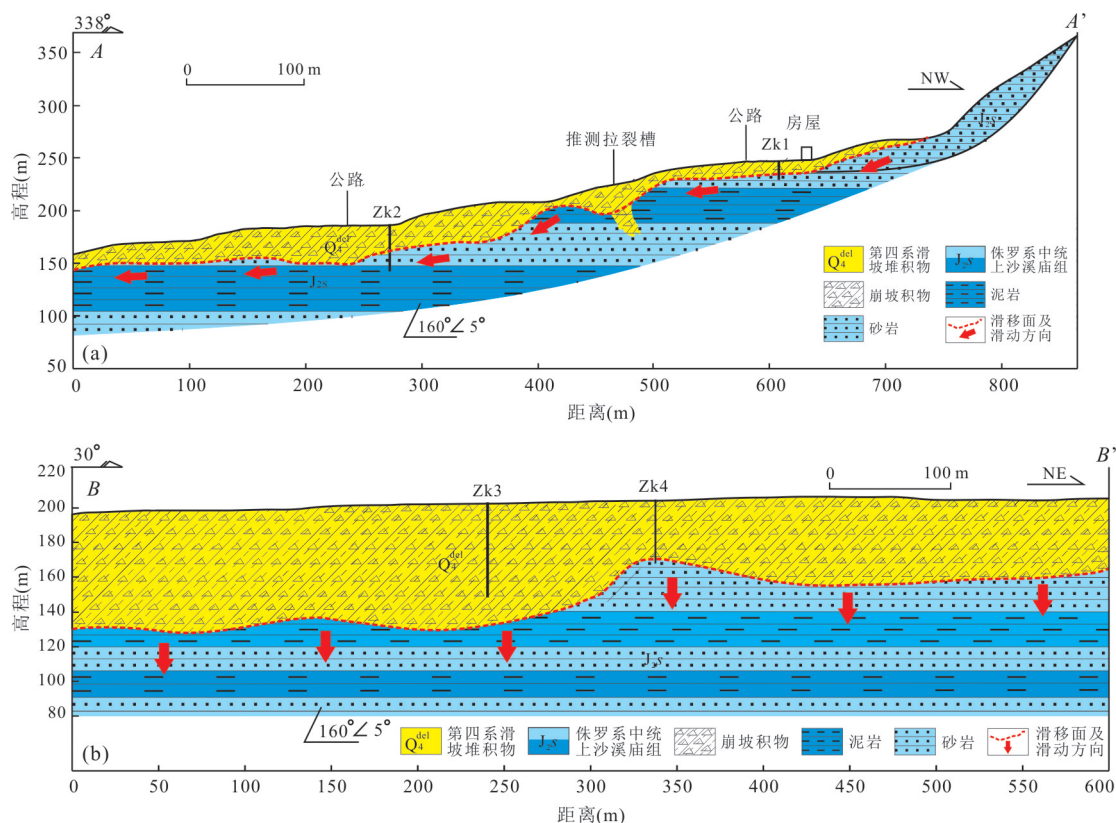


图10 四方碑AA' (a)和BB' (b)工程地质剖面

Fig.10 Engineering geological profile AA' (a) and profile BB' (b) of Sifangbei landslide

体地揭示了这一现象,在滑床中部存在深约50 m、宽约60 m的深沟,方向自SW向NE,深沟被后期坡积物等填充导致了低阻异常的产生。(3)滑坡体前缘视电阻率界面平稳,上覆地层厚度较薄,电阻率小于 $40 \Omega \cdot \text{m}$ 的层位为第四系人工堆积、冲洪积、坡积、残坡积及滑坡堆积物,大于 $40 \Omega \cdot \text{m}$ 的层位为砂岩与泥岩组成的滑床;二维剖面与三维滑床形态均显示滑坡前缘滑床埋深较浅,其形成机制主要和降雨、三峡蓄水有关,三峡蓄水变化和后期降雨作用导致滑坡出现滑移,滑坡前缘位移出现变形与高密度实测反映的中部拉裂槽可互相印证。

滑坡的前缘、中部、后缘在地质历史演化过程中存在较大联系,笔者通过地球物理实测分析认为:四方碑滑坡前缘受到江水浸润后,上覆地层中的粘土、堆积物产生滑移,并逐渐随着江水流失,从而导致中部滑坡体失去支撑力或支撑力减弱,由于荷载较重,中部地层受到重力作用进而产生拉裂现象,最终形成中部拉裂槽;在暴雨作用下,拉裂槽部位容易充水,对滑移面形成润滑作用,致使拉裂槽逐渐扩大,进而影响滑坡后缘,后缘覆盖层在拉裂作用下形成垮塌,基岩直接出露,因此在长期的风

化作用下形成陡崖,在外力作用下发生崩塌现象。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文以充分了解区域构造背景、地层岩性情况为前提,在研究区开展了地球物理实测工作,通过对原始数据的精细处理,结合钻孔等地质资料进行标定,获取了多条高密度电法实测剖面。剖面显示的滑移面形态特征非常明显,滑移面深度精确,变化方向清晰。其中,纵向测线剖面显示2处电阻率低值异常:①a测线、b测线剖面320~370 m处滑移面突然变深,电阻率较低,与地貌上和地表的堰塘相吻合。②a测线剖面480~520 m处、b测线剖面520~570 m处电阻率为 $8 \sim 20 \Omega \cdot \text{m}$,滑移面界线反映不清,低值电阻率几乎穿透整个剖面,推测为古滑坡过程中拉裂所形成的拉裂槽。横、纵测线对比显示:①h测线分别与主滑坡a测线500 m、b测线520 m处相交,测线剖面反映的滑移面埋深较深、与图6推断的拉裂槽位置高度吻合,而钻孔资料也证实拉裂槽的存在,进一步印证了图6中拉裂槽结论的正确

性. ② h 、 i 测线剖面滑移面深度自 SW 向 NE 均逐渐变浅, 与图 6 滑移面深度变化趋势一致. 三维曲面直观显示了滑床形态特征, 下部滑床界面以拉裂槽为界, 将滑坡分为前缘、中部、后缘, 前缘滑床埋深接近长江河床, 形态平稳; 中部拉裂形成深沟, 后期被第四系物质填充, 滑坡形态较为稳定; 后缘滑床基岩出露, 形态以陡崖为主.

刘雪梅(2010)通过地质调查、钻孔等资料分析认为, 研究区典型的滑坡是由于古滑坡过程中形成了拉裂槽, 而暴雨作用致使拉裂槽内部充水之后, 地下水沿下伏较为软弱的泥岩层顶面渗透, 从而导致泥岩层的软化. 与此同时, 渗透的地下水将在有限的空间内产生浮托力, 浮托力使上覆地层沿软化的泥岩层平移, 进而产生滑坡. 但这种滑坡机制受限于地形复杂以及资料的局限性, 始终没有得到定论. 论文通过地球物理实测剖面 and 钻孔标定, 查明滑移面埋深和三维滑床形态, 证实四方碑滑坡存在拉裂现象. 三维曲面直观显示了拉裂槽的规模和具体位置, 笔者分析认为四方碑滑坡为平推式滑移—拉裂型滑坡, 属于沿层面平移滑动的基岩滑坡, 其滑动面倾角不大, 坡体沿滑移方向的重力作用较小, 因此滑坡相对稳定.

由于滑块移动过程中, 电阻率随着块体滑动而发生变化, 后期若将对滑坡物质进行定年, 通过不同时间段的高密度电法实测结果对比, 可为定年样品的采集提供详细位置信息. 同时结合定年信息和不同时期实测数据对比, 可更加准确地分析滑坡演化过程.

4.2 结论

(1) 以论文提出的网格高密度理论方法和技术路线, 对四方碑滑坡进行地球物理实测, 将实测二维电阻率剖面与钻孔资料进行对比解译, 获取了在滑移面具体形态、埋深、起伏状况等方面更为详细的工程地质剖面; 通过网格实测构建的滑坡体三维曲面, 对滑坡体滑移面信息和滑床进行透视, 更加直观、真实地显示了掩盖在滑坡体内部的滑床形态. 此外, 通过地球物理实测并结合钻孔资料, 证实四方碑滑坡存在拉裂槽, 并分析了滑坡前缘、中部、后缘之间的联系和相互影响关系.

(2) 网格高密度方法的成功引入, 对滑坡形成机制分析和理论提出新思路, 在今后的滑坡研究中将滑坡调查的其他手段与地球物理方法结合, 可更加准确地获取滑坡体三维形态信息和地层结构特

征, 为滑坡形成机制分析提供有益参考. 此外, 通过高密度电法对复杂地区滑坡体的地层结构、内部物质组成及滑坡体内部块体运动状态进行周期实测, 其结果可为滑坡稳定性预测提供依据.

References

- Bruno, F., Martillier, F., 2000. Test of High-Resolution Seismic Reflection and Other Geophysical Techniques on the Boup Landslide in the Swiss Alps. *Surveys in Geophysics*, 21(4): 333–348.
- Deng, Q.L., Wang, X.P., 2000. Growth History of Huangtupo Landslide: Down-Slope Overlapping-Landsliding-Modification. *Earth Science*, 25(1): 44–50 (in Chinese with English abstract).
- Epada, P. D., Sylvestre, G., Tabod, T. C., 2012. Geophysical and Geotechnical Investigations of a Landslide in Kekem Area, Western Cameroon. *International Journal of Geosciences*, 3 (4) : 780–789. <https://doi.org/10.4236/ijg.2012.34079>
- Feng, X.J., Li, Z.S., Song, L.S., et al., 2003. Seismic Exploration of Boqishan Landslide in Baoji. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 30 (4) : 55–58 (in Chinese with English abstract).
- Gu, T.F., Wang, J.D., Wang, N.Q., et al., 2013. Geological Features of Loess Landslide at Lüliang Airport and Its 3D Stability Analysis. *Rock and Soil Mechanics*, 34 (7): 2009–2016 (in Chinese with English abstract).
- He, Q.L., Li, X.L., Wang, Z.Y., et al., 2016. The Application of High Density Electrical Method to the Exploration Management of Landslide Geological Disasters. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 13(1): 99–104 (in Chinese with English abstract).
- Hemeda, S., Pitilakis, K., 2010. Serapeum Temple and the Ancient Annex Daughter Library in Alexandria, Egypt: Geotechnical - Geophysical Investigations and Stability Analysis under Static and Seismic Conditions. *Engineering Geology*, 113 (1–4) : 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.02.002>
- Jian, W.X., Yang, J., 2013. Formation Mechanism of No.1 Part Slide of Huangtupo Landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 38 (3) : 625–631 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.L., Zhou, Q.Q., Huang, X., et al., 2008. Application of the High Density Resistivity Method to Landslide Prediction. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35(5): 542–546 (in Chinese with English abstract).

- Jin, W.M., Du, B.J., 2004. Application of Shallow Seismic Prospecting in Landslide Surveying. *Coal Geology of China*, 16 (Suppl.): 91—93 (in Chinese with English abstract).
- Kong, F.L., Chen, C., Sun, G.J., et al., 2008. Application of Multi-Electrodes Electrical Method to Landslide Investigation in Qingjiang Shuibuya Reservoir. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 5(2): 201—204 (in Chinese with English abstract).
- le Roux, O., Jongmans, D., Kasperski, J., et al., 2011. Deep Geophysical Investigation of the Large Séchilienne Landslide (Western Alps, France) and Calibration with Geological Data. *Engineering Geology*, 120 (1—4): 18—31. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.004>
- Li, X., 2010. Study on Prediction Criteria and Forecasting Model of Sifangbei Landslide (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Lin, S., Tang, Q.J., Li, Y., et al., 2017. Analysis and Characteristics of Faults around Danjiangkou Reservoir, West Hubei Province. *Earth Science*, 42(10): 1830—1841 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Yin, K.L., Wang, J.J., et al., 2016. Dynamic Evaluation of Regional Landslide Hazard Due to Rainfall: A Case Study in Wanzhou Central District, Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(3): 558—569 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X.M., 2010. A Study on Geomorphographic Character and Landslide Evolution in Wanzhou City, Three Gorges Reservoir (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Loke, M. H., Barker, R. D., 1996a. Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method. *Geophysical Prospecting*, 44(1): 131—152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- Loke, M. H., Barker, R. D., 1996b. Practical Techniques for 3D Resistivity Surveys and Data Inversion. *Geophysical Prospecting*, 44(3): 499—523. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00162.x>
- Luo, D.G., Liu, J.P., Jin, C., et al., 2017. Instantaneous Seismic Attributes and Response Characteristics of Active Faults. *Earth Science*, 42(3): 462—470 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., He, S.M., He, J.C., et al., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39(9): 1357—1363 (in Chinese with English abstract).
- Ristic, A., Abolmasov, B., Govedarica, M., et al., 2012. Shallow-landslide Spatial Structure Interpretation using a Multi-Geophysical Approach. *Acta Geotechnica Slovenica*, 9(1): 47—59.
- Torgoev, A., Lamair, L., Torgoev, I., et al., 2013. A Review of Recent Case Studies of Landslides Investigated in the Tien Shan Using Microseismic and Other Geophysical Methods. Springer, Berlin, 285—294.
- Vafidis, A., Economou, N., Ganiatsos, Y., et al., 2005. Integrated Geophysical Studies at Ancient Itanos (Greece). *Journal of Archaeological Science*, 32(7): 1023—1036. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.02.007>
- Wang, B., Zhu, J.B., Tang, H.M., et al., 2008. Study on Creep Behavior of Slip Band Soil of Huangtupo Landslide. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 25(1): 49—52 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D.J., Tang, H.M., Li, C.D., et al., 2016. Stability Analysis of Colluvial Landslide Due to Heavy Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 37(2): 439—445 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., 2017. Reserach on Landslide Risk Assesment and Management in Wanzhou District. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).
- Wang, J.J., Yin, K.L., Xiao, L.L., et al., 2014. Landslide Susceptibility Assessment Based on GIS and Weighted Information Value: A Case Study of Wanzhou District, Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(4): 797—808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, M., He, Z.C., Shi, X.M., et al., 2003. Application of the Combined Geophysical Methods on Mengdong River Landslide Survey. *West-China Exploration Engineering*, 15(11): 168—170 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, T., Yin, K.L., Yang, B.B., et al., 2018. Stability and Deformation Trend Prediction of the Sifangbei Landslide in the Three Gorges Reservoir. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 29(1): 10—14 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.Q., Su, L.J., Liang S.Q., et al., 2015. A Review of Geophysical Detection Methods of Landslide Structure Characteristics. *Progress in Geophysics*, 30(3): 1449—1458 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., 2004. The Major Geological Disasters in the Three Gorges Reservoir Area Resettlement Site and Prevention. Geologic Publishing House, Beijing (in Chinese).

- Zhang, G.B., 2012. Exploration and Effectiveness Analysis of High-Density Resistivity Method on Chujiaying Giant Landslide Site. *Progress in Geophysics*, 27(6): 2716—2721 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Yin, K.L., Wang, J.J., et al., 2016. Evaluation of Landslide Susceptibility for Wanzhou District of Three Gorges Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(2): 284—296 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., Hu, R.L., Yin, Y.P., et al., 2014. Study of Mechanism of Landslide Induced by Rainfall in Gently Inclined Red Stratum in East Sichuan Basin. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(S2): 3783—3790 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.B., 2002. Summarization of Engineering Geophysics in Major of Geophysical Prospecting and Information Technique. *Progress in Geophysics*, 17(1): 163—170 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 邓清禄, 王学平, 2000. 黄土坡滑坡的发育历史: 坠覆—滑坡—改造. *地球科学*, 25(1): 44—50.
- 冯希杰, 李忠生, 宋立胜, 等, 2003. 宝鸡簸箕山滑坡地震勘探. *水文地质工程地质*, 30(4): 55—58.
- 谷天峰, 王家鼎, 王念秦, 等, 2013. 吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析. *岩土力学*, 34(7): 2009—2016.
- 何清立, 李霄龙, 王志勇, 等, 2016. 高密度电法在滑坡地质灾害勘查治理中的应用. *工程地球物理学报*, 13(1): 99—104.
- 江玉乐, 周清强, 黄鑫, 等, 2008. 高密度电阻率法在滑坡探测中的应用. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 35(5): 542—546.
- 简文星, 杨金, 2013. 三峡库区黄土坡滑坡 I 号崩滑体成因. *地球科学*, 38(3): 625—631.
- 金维民, 杜兵建, 2004. 浅层地震勘探在滑坡勘查中应用. *中国煤田地质*, 16(增刊): 91—93.
- 孔繁良, 陈超, 孙冠军, 等, 2008. 高密度电法在清江水布垭库区滑坡调查中的应用. *工程地球物理学报*, 5(2): 201—204.
- 李旭, 2010. 三峡库区四方碑滑坡预报判据研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 林松, 唐启家, 李媛, 等, 2017. 鄂西丹江口水库区域周边断裂构造解析及特征. *地球科学*, 42(10): 1830—1841.
- 刘磊, 殷坤龙, 王佳佳, 等, 2016. 降雨影响下的区域滑坡危险性动态评价研究——以三峡库区万州主城区为例. *岩石力学与工程学报*, 35(3): 558—569.
- 刘雪梅, 2010. 三峡库区万州区地貌特征及滑坡演化过程研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 罗登贵, 刘江平, 金聪, 等, 2017. 活断层的地震响应特征与瞬时地震属性. *地球科学*, 42(3): 462—470.
- 罗渝, 何思明, 何尽川, 等, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. *地球科学*, 39(9): 1357—1363.
- 汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 等, 2008. 黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性研究. *长江科学院院报*, 25(1): 49—52.
- 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等, 2016. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析. *岩土力学*, 37(2): 439—445.
- 王芳, 2017. 万州区滑坡灾害风险评价与管理研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 王佳佳, 殷坤龙, 肖莉丽, 等, 2014. 基于 GIS 和信息量的滑坡灾害易发性评价——以三峡库区万州区为例. *岩石力学与工程学报*, 33(4): 797—808.
- 王敏, 何振才, 师学明, 等, 2003. 综合地球物理方法在猛洞河地带滑坡调查中的应用. *西部探矿工程*, 15(11): 168—170.
- 肖婷, 殷坤龙, 杨背背, 等, 2018. 三峡库区四方碑滑坡稳定性与变形趋势预测. *中国地质灾害与防治学报*, 29(1): 10—14.
- 徐兴倩, 苏立君, 梁双庆, 等, 2015. 地球物理方法探测滑坡体结构特征研究现状综述. *地球物理学进展*, 30(3): 1449—1458.
- 殷跃平, 2004. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及其防治研究. 北京: 地质出版社.
- 张光保, 2012. 褚家营巨型滑坡的高密度电法勘察及效果分析. *地球物理学进展*, 27(6): 2716—2721.
- 张俊, 殷坤龙, 王佳佳, 等, 2016. 三峡库区万州区滑坡灾害易发性评价研究. *岩石力学与工程学报*, 35(2): 284—296.
- 张明, 胡瑞林, 殷跃平, 等, 2014. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究. *岩石力学与工程学报*, 33(S2): 3783—3790.
- 朱德兵, 2002. 工程地球物理方法技术研究现状综述. *地球物理学进展*, 17(1): 163—170.