DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.02.029

文章编号: 1006-6616 (2021) 02-0317-09

# 利用 EH4 音频大地电磁测深仪探测巧家巨型古滑坡及其结构 面特征

# 李 忠<sup>1,2</sup>, 吴中海<sup>3</sup>, 汪金明<sup>1,2</sup>, 张小兵<sup>1,2</sup>, 冯 振<sup>4</sup>, 胡萌萌<sup>3</sup> LI Zhong<sup>1,2</sup>, WU Zhonghai<sup>3</sup>, WANG Jinming<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaobing<sup>1,2</sup>, FENG Zhen<sup>4</sup>, HU Mengmeng<sup>3</sup>

- 1. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216;
- 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051;
- 3. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
- 4. 自然资源部地质灾害防治技术指导中心,北京 100081
- 1. Yunnan Geological Survey, Kunming 650216, Yunnan, China;
- 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming 650051, Yunnan, China;
- 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
- 4. Guiding Center of Geo-hazards Prevention and Mitigation Techniques, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

# LI Z, WU Z H, WANG J M, et al., 2021. Using EH4 audio-magnetotelluric sounder to detect the gigantic Qiaojia paleo-landslide and its structural characteristics [J]. Journal of Geomechanics, 27 (2): 317–325. DOI: 10.12090/j. issn. 1006–6616. 2021. 27. 02. 029

Abstract: In this study, we used the EH4 audio-magnetotelluric sounding, combining with the drilling data, to detect and define the spatial electrical properties and structural characteristics of the Qiaojia paleo-landslide. Based on the detection results, the average depth of the main sliding surface is considered to be 250 m and six faults ( $F_1$ - $F_6$ ) were identified, among which the Xiaojiang fault zone ( $F_1$ ) is the main active fault. Meanwhile, it is inferred from the sounding results and drill date that the terrace along the Jinsha River fall into four layers from the surface (Qh) to the deep, namely the sandy clay layer, gravel layer, broken limestone layer, and complete limestone bedrock. The broken limestone layer and the complete limestone bedrock are in the bedrock outcrop area from the surface to the deep. The comprehensive analysis shows that the paleo-landslide is temporarily stable at present, but along with large earthquake activity in the north section of Xiaojiang fault zone in the future, whether the paleo-landslide is likely to revive or similar paleo-landslides will reoccur in this region needs further study. Our study proved the effectiveness of the EH4 audio-magnetotelluric method in detecting gigantic paleo-landslide.

Key words: Xiaojiang fault zone; gigantic paleo-landslide; EH4 audio-magnetotelluric method; sliding surface; Qiaojia

摘 要:运用 EH4 音频大地电磁测深方法,并结合钻探资料成果,对巧家巨型古滑坡的空间结构进行探测分析;有效确定了该滑坡的空间电性和结构特征。研究发现该滑坡的主滑动面平均深度 250 m;并发现 滑坡体及邻侧存在 6 条活动断裂 (F<sub>1</sub>—F<sub>6</sub>),其中小江断裂带 (F<sub>1</sub>)为主要活动断裂。同时,综合分析电

**引用格式:** 李忠, 吴中海, 汪金明, 等, 2021.利用 EH4 音频大地电磁测深仪探测巧家巨型古滑坡及其结构面特征 [J].地质力学学报, 27 (2): 317-325. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 02. 029

基金项目:中国地质调查局项目 (DD20160268); 云南联合基金重点支持项目 (U2002211)

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grant No. DD20160268), and Key Projects of Yunnan United Fund (Grant No. U2002211).

第一作者简介: 李忠 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事地球物理研究工作。E-mail: 278618901@ qq. com

**通讯作者:**吴中海 (1974—),男,博士,研究员,从事新构造和活动构造研究。E-mail: wuzhonghai8848@ foxmail.com, wzhh4488@ sina.com 收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-01-15; 责任编辑:范二平

磁测深结果与钻探资料推断,在金沙江边台阶从地表的全新统(Qh)到深部依次推断为砂质粘土层—砂砾层—溶蚀(破碎)灰岩层—完整基岩(灰岩)层四层,其中在地表出露为灰岩的地段中,从地表到深部依次推断为溶蚀(破碎)灰岩层和完整灰岩层二层。综合分析认为,目前古滑坡暂时稳定,但是由于小江断裂带北段未来存在较明显的大地震活动背景,该古滑坡是否具有复活可能,区域上是否还会发生类似的巨型古滑坡等关键问题,值得进一步研究。文章的研究结果表明,EH4音频大地电磁法对巨型古滑坡探测是一种比较有效的地球物理方法。

关键词:小江断裂带;巨型古滑坡;EH4 音频大地电磁法;滑动面;巧家

中图分类号: P319.3+2 文献标识码: A

0 引言

巧家古滑坡是国内已知发现规模最大的巨型 古滑坡,其规模之大为世界罕见(冯振等, 2020)。巧家古滑坡位于巧家县城后山,地处小江 断裂带、大凉山大断裂带、则木河断裂带和五莲 峰断裂带的交汇区域。小江断裂带和则木河裂带 都是国内著名的强震带(张铎等, 2013),特别是 小江断裂带北段;在该地段有历史记录的地震有 数次,如东川在 1733 年发生过 7.0 级地震,在 1966年2月5日发生过6.5级地震, 巧家在1930 年5月15日发生过6.0级地震。相关学者推测在 未来时期内,小江断裂带北极有可能发生强烈地 震, 震级约为 M.6.8~7.1, 因为该地段一直处于 高应力状态(毛燕等, 2016; 张欣和王运生, 2017)。同时,位于四川省宁南县与云南省巧家县 间金沙江江上即将完工的白鹤滩水电站,其规模 仅次于三峡水电站,距上游巧家县城约 40 km (陈 友生, 2015); 白鹤滩水电站蓄水后, 巧家县城周 边低洼地区大部分将被淹没,县城都位于水位之 上。研究表明,巨型古滑坡复活在地震和断裂活 动、库水波动等因素耦合作用下风险极为突出 (吴新星和邓敏, 2010; Yin et al., 2015; Javed et al., 2017; 郑嘉豪等, 2020), 所以应对巧家古滑 坡给予高度重视。

目前,滑坡调查分析的常用工作手段有遥感解译 (谢猛,2020)、地面调查(王文瑞,2020)、工程地 质(吕擎峰等,2015;张永双等,2016)和钻探等, 但难以全面确定大型巨型古滑坡的空间结构和主滑动 面的位置和形态特征,并且存在费时、费力、单点测 量等缺点(郭秀军等,2004)。近年来物探方法在滑 坡勘察中得到了广泛应用,并取得了很多不错的效果 和反响,特别是电法技术,包括高密度(张光保, 2012;李金玺等,2013;熊晋等,2013;王磊等, 2019;韩鹏,2020)、瞬变电磁法和音频大地电磁法 等;实践表明,电阻率的分布特征可以反映构造分布 特征和地层岩性的分布状况,能够定性和定量描述出 滑坡面的形态和位置(李来喜,2009;徐兴倩等, 2015;张建成和王通,2015;郭桥桥等,2017)。因 此,文章在现场调查分析的基础上,利用EH4音频大 地电磁测深对巧家巨型古滑坡开展了探测,为深入研 究巨型古滑坡结构与稳定性提供科学依据。

1 地质背景

#### 1.1 地形地貌

巧家古滑坡位于巧家县城后山,处于金沙江 右岸药山山脉西坡轿顶山山麓缓坡,整体地势东 高西低,山坡陡缓相间。山脉呈近南北走向,山 顶高程 3100~3200 m,最低点位于金沙江河床,海 拔 634 m,高差约 2500 m;向下地形陡缓不一,高 程约 970 m 以上以陡坡为主,局部有缓斜坡,坡面 冲沟发育,地形凌乱(王双, 2016)。

#### 1.2 区域地层岩性

滑坡区域地层出露较齐全,主要以出露古生 界地层为主(图1)。寒武系地层主要分布在葫芦 口北边,岩性以碳酸盐(灰岩、白云岩)为主。 奥陶系红石崖组(O<sub>1</sub>h)主要是碎屑岩(泥岩、砂 岩);巧家组(Oq)以灰岩、粉砂岩为主;大菁组 (O<sub>3</sub>d)以白云岩为主。志留系韩家店组(S<sub>2</sub>s)以 粉砂岩、灰岩为主。泥盆系坡松冲组(D<sub>1</sub>ps)以 砂岩、泥页岩为主;曲靖组(D<sub>2</sub>q)以白云岩、灰 岩为主。二叠系梁山组(P<sub>1</sub>l)以砂岩、炭质页岩 及煤线为主;大面积出露阳新组(P<sub>1</sub>y)以灰岩、 白云岩为主;峨眉山组(Pe)玄武岩。第四系 (Q)主要分布于金沙江河谷区,以新生界山前洪 积物和金沙江冲积物的交互沉积物为主。



a—巧家古滑坡区域地质图 (据张贵等, 2017修改); b—巧家古滑坡位置示意图 (据王治华, 1996修改)

图1 巧家古滑坡区域地质及位置图

Fig. 1 Map showing the regional geology and location of the Qiaojia paleo-landslide. (a) Regional geological map of the Qiaojia paleolandslide (modified after Zhang et al., 2017). (b) Location sketch map of the Qiaojia paleo-landslide (modified after Wang, 1996)

# 2 EH4 音频大地电磁测深方法原理、 资料处理和物性特征

### 2.1 EH4 音频大地电磁测深方法原理

音频大地电磁法是利用天然音频电磁场作为 场源,研究地下电阻率结构的测深方法。EH4 是 1996年由美国两家(EMI, Geometrics)公司联合 研制的,重点解决浅、中深度范围内工程地质等 问题的一种双源型电磁系统;工作频率包括高频 模式:10 Hz~100 kHz;低频模式:0.1 Hz~1 kHz (蒋鑫和黄小喜,2011)。EH4 电磁仪器具有以下 特点(柳建新等,2008):①图像分辨率较高,为 探测较小的目标体提供可能;②同时接受 X,Y两 个方向的电场与磁场,反演 XY 电导率张量成像剖 面,对判断二维构造特别有利;③仪器设备轻, 工作效率较高;④实时监测数据采集、处理,现 场初步判断数据质量。在测线的布置上,由于 EH4是连续单点测量,可以非常灵活地应用于各 种不利地形(李树文等,2000;杜荣光等,2006; 刘国栋,2007;欧阳南,2009;谭红艳等,2011)。

#### 2.2 资料处理

测深点间距为 100 m,在断裂地段测深点加密, 间距为 50 m;野外观测采用张量模式,全频率观测 (10 Hz~100 kHz),测深点观测时间约 20 min;测 深点数据质量满足I级超过 70%,至少是II级。根据 测深点视电阻率-频率曲线形态,定性分析研究区地 下电性的分布特征,并初步建立地下介质模型,为 二维反演 (SCS-2D)的初始地电模型建立提供依 据。如图 2 所示,200 号测深点两模式(TM,TE) 曲线形态都为 Q 型,首支对应深部的灰岩,中间对 应中部的溶蚀(破碎)灰岩层和砂砾层,尾支对应 浅部的砂质粘土层和砂砾层;340 号测点两模式 (TM,TE)曲线形态都为 Q 型,浅部(高频)为溶 蚀(破碎)灰岩层,中深部(中低频)为完整基岩 (灰岩)层。AMT 资料具体处理流程见图 3,首先对



图 2 视电阻率-频率曲线图

Fig. 2 Curves of apparent resistivity vs. frequency

野外采集数据经过 IMAGEM 软件进行时间序列筛 选,剔除存在明显干扰信号时间序列片段,计算张 量阻抗(视电阻率、相位、相关度),其次经过音 频大地电磁测深(AMT)数据处理软件进行处理 (曲线编辑、模式识别(TE,TM)、静校正),再次 经过 SCS-2D 软件进行二维反演(Bostic),最后构 建电性断面图和地质解释推断图。





图 3 EH4 资料处理流程图

Fig. 3 Flow sheet of the EH4 data processing

#### 2.3 研究区物性(电性)特征

此次研究区电阻率测定采取野外露头对称小 四极的方式进行,总共测定315组;岩石电性电阻 率测试统计结果见表1。

#### 表 1 岩石电性电阻率统计表

Table 1 Statistical results of the electrical resistivity of rocks

岩性	所含地层	数量	$ ho_{ m s}$ / ( $\Omega$ ·m)	
			变化范围	平均值
粘土	Q	30	138~256	147
砂质粘土	Q	30	55~121	71
砂砾层	Q	45	392~712	1162
灰岩	$P_1y$ , $D_2q$ , $S_2s$	112	840~9743	3686
石英砂岩	$D_1 ps$	12	1429~2582	2030
玄武岩	$\mathbf{P}e$	64	116~650	310
白云岩	$D_2q$ , $S_2s$	22	2805~8321	4663

通过分析原始测量数据及表 1 可知,研究区岩 石电阻率数值从大到小依次为白云岩>灰岩>石英 砂岩>砂砾层>玄武岩>粘土>砂质粘土。其中,白 云岩电阻率平均值为 4663 Ω·m,灰岩电阻率平均 值为 3686 Ω·m,均为曲靖组 (D<sub>2</sub>q) 和韩家店冲 组 (S<sub>2</sub>s) 或阳新组 (P<sub>1</sub>y),与其他地层或岩性存 在明显电性差异。峨眉山玄武岩电阻率平均值为 310 Ω · m,与围岩阳新组(P<sub>1</sub>y) 灰岩存在明显电 性差异。第四系(Q)电阻率总体相对最小,三类 岩性存在较明显电性差异,特别是砂质粘土与砂 砾层电性差异明显。因此,巧家巨型古滑坡具备 采用 EH4 音频大地电磁测深探测的物性(电性) 条件。

## 3 古滑坡 10 线剖面视电阻率反演结 果与解释

古滑坡 10 线剖面布设古滑坡中部,位于巧家 县县城北边,离县城约 1 km,西至金沙江边,东 至滑坡顶部。剖面分为两段,西段位于 144~348 点号间,布设方位 90°;东段位于 348~556 号点 间,布设方位 54°(图 1)。

#### 3.1 剖面地质特征

剖面贯穿的地层出露较简单,由西至东地层 主要为第四系全新统 (Q),上二叠统峨眉山玄武 岩组 (Pe)和下二叠统阳新组 (P<sub>1</sub>y)。全新统 (Q)在金沙江边台阶上主要分布洪冲积层,岩性 为砾石、砂、砂质粘土或砂土;靠近山脚部位主 要分布残坡积层,岩性主要为粘土;在山上主要 是由灰岩崩塌和滑坡堆积层。玄武岩组(Pe)主 要岩性为玄武岩和含零星的火山角砾岩,阳新组(P<sub>1</sub>y)岩性为灰岩、含零星砂岩和白云岩。

#### 3.2 EH4 测深剖面反演结果与解释推断

从反演的视电阻率剖面图上(图 4)可见,EH4 测深剖面穿越 6 条断裂:小江断裂带( $F_1$ )、王家湾 断裂( $F_3$ )、沙坝-滴水岩断裂( $F_4$ )、窝塘头-以博 溪断裂( $F_2$ )、法土-下村子断裂( $F_5$ )和马厂坪子-袁家湾子断裂( $F_6$ )。除表层电性不均匀体影响外, 整条剖面自西向东整体呈中低阻—高阻—低阻—高 阻—中低阻的电性特征。结合物性(电性)测定分 析,第四系全新统(Q)砂质粘土电阻率平均值为 71 Ω·m,粘土电阻率平均值为147 Ω·m,砂砾层电阻 率平均值为1162 Ω·m,峨眉山玄武岩电阻率平均值为 310 Ω·m,灰岩电阻率平均值为3686 Ω·m。

在剖面西段,即在金沙江边台阶第四系全新 统(0) 地段(252 号点以西地段),浅层电性整 体呈低阻特征, 中深部电性呈两翼低中间呈中阻 特征;从地表到深部依次推断为砂质粘土层--砂 砾层-溶蚀(破碎)灰岩层-完整基岩(灰岩) 层四层。在已有金沙江边台阶钻孔资料中,钻孔 孔深达 300 m, 未见基岩 (王双, 2016), 所以推 断第四系全新统(0)砂质粘土层—砂砾层两层最 深处达 500 m 左右。在 252 号点以西地段,从表层 到地下约 200 m 存在低阻层, 是砂质粘土引起的低 阻,砂质粘土层平均厚度 200 m 左右,最深处为 260 m; 其下砂砾层平均厚度约 150 m, 最厚达 220 m。在 200 号点以西地段浅部,存在向西缓倾 的低阻带,应为一个向西倾次级滑动面。次级滑 动导致砂质粘土产生裂隙 (缝),充填地下水,从 而呈低阻。在152号点中深部存在近似直立的低阻 带,是受产状较陡的隐伏断裂(F<sub>3</sub>)影响,构造 运动产生一些裂隙(缝)。在224~240号点间地段 的浅部,存在两个近似水平呈长轴状展布的低阻 体,推断受拉裂槽影响(从地貌上也符合是拉裂 槽特征), 拉裂槽充填水而呈低阻。

在剖面中西段(252~320号点),地层出露二 叠系峨眉山玄武岩和阳新组灰岩,西侧相邻地层 为第四系全新统(Q),东侧相邻地层还是阳新组 灰岩。该区段除数个呈长轴状和等轴状展布的高 阻体外,岩土体电性主要呈中低阻。在248~272 号点间存在一个面积较大由数个呈长轴状和块状 展布的低阻体组成整体呈"树"状展布的近似直 立的低阻带,推断受小江断裂(F<sub>1</sub>)和次级断裂(F<sub>6</sub>)影响,构造运动特别是小江断裂带构造运动,形成充填水的岩石破碎带。其次,小江断裂(F<sub>1</sub>)是峨眉山玄武岩浆的喷发通道,玄武岩通过小江断裂带(F<sub>1</sub>)通道喷发至地表,并侵入灰岩中,在地下形成玄武岩与灰岩过渡带,所以呈低阻。局部高阻体应为阳新组灰岩。

在剖面中段(320~520号点),地层出露二叠 系阳新组灰岩。除两个向西倾斜低阻带外,整体 分为浅部中低阻溶蚀(破碎)灰岩层和中深部高 阻完整基岩(灰岩)层。两个向西倾斜低阻带分 别为断裂。

在剖面东段(520号点以东),地层出露二叠 系阳新组灰岩。除数个呈长轴状展布的高阻体外, 其余呈中低阻。520号点附近受断裂(F<sub>6</sub>)影响, 地表较破碎,地下产生破碎带,形成较宽的低阻 带。区段浅部的中低阻推断是溶蚀(破碎)灰岩 层,高阻体为较完整灰岩;深部中低阻体应为峨 眉山玄武岩,因为剖面东端点往东200m左右,可 见大面积玄武岩出露,所以中深部是玄武岩与灰 岩过渡带。

### 4 滑坡结构形态分析

根据视电阻率反演结果和滑坡地形形态特征 认为(图4),巧家古滑坡从金沙江边至山顶陡崖 长约9km, 地下溶蚀(破碎)灰岩层与完整基岩 (灰岩) 层的界面为古滑坡的主滑动面。滑坡顶部 位于 540 号点附近,海拔约 3000 m; 滑坡后缘 (壁)位于536号附近,产状很陡,近直立,表面 见零星小裂缝。滑坡后缘由于长期风化作用发生 崩塌,在坡脚形成倒石堆 (520~536 点号)。巧家 古滑坡主滑动面长约6 km, 后缘平均深度 280 m 左右。从滑坡后缘(壁)至旱谷地村台阶间的滑 体厚度较稳定,在250 m 左右;从旱谷地村台阶至 滑坡前缘厚度逐渐增大,从 300 m 逐渐增至近 550 m。滑床岩性主要是灰岩,局部为玄武岩。滑 坡体上分布数个滑动面深度为100m左右的次级滑 动,在坡面上形成若干个滑坡洼地、鼓丘、拉裂 槽与台阶,如面积较大的金沙江边台阶、县城断 陷区等。滑坡前端(金沙江边)产生一些放射状 裂缝,在金沙江边地表局部见裂缝。

根据此次工作和地质、遥感、地形和地貌资



**剖**闻忆丁巳望古语坡位直向甲尔息含; D一韵闻风谀茕来双宿坡乃恣水息含; C一驰庾及粉쌺淮咧咧闻含

图4 10线物探综合解释推断及滑坡形态示意图

Fig.4 Comprehensive interpretation of geophysical prospecting of Line 10 and schematic diagram of the landslide shape. (a) Location sketch of the section on the gigantic paleo landslide. (b) Diagram showing the section inversion results and landslide shape. (c) Diagram showing the geological- and geophysical- inferred section 料认为, 巧家古滑坡平面形态为筲箕形, 覆盖面 积约 50 km<sup>2</sup>。由于 10 线位于滑坡体中间位置, 所 以滑动面相对较深, 整个巧家古滑坡平均厚度为 250 m, 体积约为 125×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 属于巨型古滑坡。

## 5 结论

(1)通过电阻率测试建立了巧家地区的地层 岩土体模型。电阻率数值从大到小依次为白云岩> 灰岩>石英砂岩>砂砾层>玄武岩>粘土>砂质粘土, 各类岩土体电性差异明显。

(2)利用 EH4 音频大地电磁测深开展了巧家 古滑坡剖面探测。判识出 6 条近南北向活动断裂 (F<sub>1</sub>—F<sub>6</sub>),其中小江断裂带(F<sub>1</sub>)为主断裂,并 圈定了 2 个拉裂槽以及县城断陷区,基本查明了巧 家古滑坡的空间电性特征。推测结果表明,金沙 江河谷地带的岩层结构从地表到深部依次为砂质 粘土层—砂砾层—溶蚀(破碎)灰岩—完整基岩 (灰岩)层四层,滑坡区段主要为溶蚀(破碎)灰 岩—完整灰岩两层。

(3)确定了巧家古滑坡的结构特征。古滑坡 以二叠系阳新组的溶蚀(破碎)灰岩层与完整基 岩(灰岩)层的界面为主滑动面,滑面平均埋深 250 m,估算体积约125×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,属于巨型古滑坡。

(4) 针对巧家古滑坡的空间电性与结构特征 调查的应用结果说明, EH4 音频大地电磁测深法 对巨型滑坡探测是比较有效的地球物理方法。

#### References

- CHEN Y S, 2015. Development characteristics of geological disasters and engineering geological zoning for Qiaojia County and Back MoutainSlope [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 34 (2): 196-199, 208. (in Chinese with English abstract)
- FENG Z, WU Z H, CAO J W, et al., 2019. Engineering geological characteristics of gigantic pre-historic landslide along Qiaojia section of the Xiaojiangfault [J]. Acta Geoscientica Sinica, 40 (4): 629-636. (in Chinese with English abstract)
- DU R G, HU B, 2006. Application of continuous imaging system of EH4 conductance in geological exploration in Yinchangpo [J]. Mineral Resources and Geology, 20 (4-5): 534-537. (in Chinese)
- GUO Q Q, GUO C B, SHEN W, et al., 2017. Geophysical exploration and sliding surface discriminant analysis of large-giant ancient landslides in Minjiang river valley, Western Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 23 (5): 788-797.

GUO X J, JIA Y G, HUANG X Y, et al., 2004. Application of multi-

electrodes electrical method to detection of slide-faceposition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23 (10): 1662-1669. (in Chinese with English abstract)

- HAN P, 2020. Forward Modeling and Inversion of the High-Desity Resistivity Method in Detecting Karst of Different Filling Types [J]. Geology and Exploration, 56 (6): 1219-1225. (in Chinese with English abstract)
- JAVED I, XINBIN T, LING X. 2017. Landslide hazards in reservoir areas: case study of xiangjiaba reservoir, Southwest China [J]. Natural Hazards Review, 18 (4): 162-174.
- JIANG X, HUANG XX, 2011. Application of EH4 system for prospecting concealed ore deposit in the overburden area [J]. Mineral Exploration, 2 (6): 784-788. (in Chinese with English abstract)
- LI L X, 2009. Application of geophysicalprospecting to multiple and super landslide investigation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 6 (5): 575-579. (in Chinese with English abstract)
- LI S W, HAO, X, JIN K K, LIU F C, et al., 2000. Morphological interpretation of induced polarization anomaliesand its application [J]. Geology and prospecting, 36 (1): 48-50. (in Chinese)
- LIJ X, WU Y L, HANC, et al., 2013. Prediction of dumpl and slideusing resistivity imaging survey [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 32 (1): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- LIU J X, JIANG L X, YAN J B, et al., 2008. Application of EH4 electromagnetic image system in survey of tunnels engineering for expressways [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 5 (6): 652-656. (in Chinese with English abstract)
- LIU G D, 2007. The new progress of electrognetic method and instruments [M]. Beijing: EarthquakePress: 1-5 (in Chinese).
- LU Q F, BU S M, WANG S X, et al., 2015. Application of comprehensive geophysical prospecting method instability evaluation of land slide [J]. ChineseJournalofGeotechnicalEngineering, 37 (S1): 142-147. (in Chinese with English abstract)
- MAO Y, LIU Z F, YE J Q, et al., 2016. Analysis on strong earthquake risk of Xiaojiang fault zone [J]. Journal of Seismological Research, 39 (2): 213-217. (in Chinese with English abstract)
- OU Y N, 2009. Analysis of anomalies of No2、3、4 low resistance on EH-4 high frequency magnetotelluric depth in deep prospecting inTongshankou ore district [J]. Resources Environment & Engineering, 3 (4): 500-503. (in Chinese)
- TAN H Y, LV J C, LIU G X, MA S M, et al., 2011. Application of the Audio-Frequency Magnetotelluric Method to Search for Concealed Ore bodies in Southeastern Hubei Province [J]. Geology and Exploration, 47 (6): 1132-1141.
- WANG L, LI X B, SU Z D, et al., 2019. Application of high-density electrical method in loess-mudsione interface landslide investgation [J]. JournalofGeomechanics, 25 (4): 536-543. (in Chinese with English abstract)
- WANG S, 2016. Study on slope dynamic stability Baihetan Reservoir QiaojiaCounty [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

- WANG W R , 2020. Study on the development characteristics and genetic mechanism of loess landslides on the Zhonglan Railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 46 (4): 64-69. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z H, 1996. Remote sensing investigation for a huge landslide: Qiaojia County landslide [J]. Remote Sensing of Environment, 11 (4): 280-284. (in Chinese with English abstract)
- WU X X, DENG M. 2010. Formation Mechanism of Ala Landslide and Analysis on Blocking River [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 32 (3): 48-51 (in Chinese with English abstract)
- XIE M, 2020. Remote Sensing Interpretation of Engineering Geology and Route Selection for Yining-Akesu Railway Based on Multisource Data [J]. Railway Investigation and Surveying, 46 (5): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- XIONG J, WANG J S, LIAO X P, et al., 2013. Application of multi-electrodes electrical method to landslide in vestigation in mountain area highway [J]. Railway Engineering, (8): 97-100. (in Chinese)
- XU XQ, SUL J, LIANG S Q, 2015. Areview of geophysical detection methods of land slide structurechar acteristics [J]. Progressin Geophysics, 30 (3): 1449-1458. (in Chinese with English abstract)
- YIN Y, HUANG B, WANG S, LI J. 2015. Potential for a Ganhaizi landslide-generated surge in Xiluodu Reservoir, Jinsha River, China [J]. Environmental Earth Sciences, 73 (7): 3187-3196.
- ZHANG G, HU W J, LI Q, et al., 2017. Groundwater chemical characteristics of the Qiaojia district in Jinshajiang river valley, Yunnan, China [J]. Carsologica Sinica, 36 (3): 339-345.
- ZHANGG B, 2012. Exploration an deffectiveness analysis of highdensity resistivity methodon Chujiaying giantl and slidesite [J]. Progressin Geophysics, 27 (6): 2716-2721. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J C, WANG T, 2015. Application of EH4 conductivity imaging system in exploration of deep buried landslide deformation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 43 (2): 94-98. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X, WANG Y S, 2017. Activities of Xiaojiang fault zone in Baihetan hydropower station reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 25 (2): 531-540. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y S, GUO C B, YAO X, et al., 2016. Research on the Geohazard effect of active fault on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Acta Geoscientica Sinica, 37 (3): 277-286. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG D, WUZ H, LI J C, et al., 2013. An overview on earthquake-induced landslide research [ J ]. Journal of Geomechanics, 19 (3): 225-241. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG J H, HUANG B L, ZHANGQ, et al., 2020. Study on the surge in duced by the collapse of dangerous rock mass in Longmen Village in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of Geomechanics, 25 (4): 533-543. (in Chinese with English

abstract)

#### 附中文参考文献

- 陈友生,2015. 巧家县城及后山斜坡地质灾害发育特征与工程地质 分区 [J]. 成都大学学报(自然科学版),34(2):196-199,208.
- 冯振,吴中海,曹佳文,等,2019.小江断裂带巧家段巨型古滑坡 及其工程地质特征 [J].地球学报,40 (4):629-636.
- 杜荣光, 胡斌, 2006. EH4 电导率连续成像系统在银厂坡地质勘查 中的应用 [J]. 矿产与地质, 20 (4-5): 534-537.
- 郭桥桥,郭长宝,申维,等,2017. 川西岷江河谷典型大型巨型古 滑坡特征物探解译分析 [J]. 地质力学学报,23 (5):788-797.
- 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨, 等, 2004. 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, 23 (10): 1662-1669.
- 韩鹏, 2020. 高密度电阻率法在探测不同填充类型溶洞中的正反演研究 [J]. 地质与勘探, 56 (6): 1219-1225.
- 蒋鑫,黄小喜,2011. EH4 在覆盖区寻找隐伏矿床中的应用 [J]. 矿产勘查,2 (6):784-788.
- 李来喜,2009. 物探在多期次巨型滑坡勘察中的应用 [J]. 工程地 球物理学报,6(5):575-579.
- 李金玺,吴有亮,韩翀,等,2013.采用高密度电法预测矿山堆积 体滑坡面 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),32(1): 33-38.
- 李树文,郝旭,金瞰昆,等,2000. 激电异常的形态解释方法及其 应用研究 [J]. 地质与勘探,36 (1):48-50.
- 柳建新, 蒋玲霞, 严家斌, 等, 2008. EH4 电磁成像系统在高速公路隧道工程勘察中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 5 (6): 652-656.
- 刘国栋,2007. 电磁法和电磁法仪器新进展 [M]. 北京: 地震出版社:1-5.
- 吕擎峰,卜思敏,王生新,等,2015. 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,37 (S1):142-147.
- 毛燕,刘自风,叶建庆,等,2016.小江断裂带强震危险性分析 [J]. 地震研究,39 (2):213-217.
- 欧阳南, 2009. 铜山口矿区深部找矿 EH4 高频大地电磁测深低阻 2, 3, 4 异常解析 [J]. 资源环境与工程, 3 (4): 500-503.
- 谭红艳,吕骏超,刘桂香,等,2011. EH4 音频大地电磁测深方 法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用 [J]. 地质与勘探,47 (6):1132-1141.
- 王磊,李孝波,苏占东,等,2019. 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,25 (4):536-543.
- 王双,2016. 白鹤滩库区巧家县城岸坡动力稳定性研究 [D]. 成都:成都理工大学.
- 王文瑞, 2020. 中兰铁路黄土滑坡发育特征及成因机理研究 [J]. 铁道勘察, 46 (4): 64-69.
- 王治华, 1996. 特大规模滑坡遥感调查: 巧家县城滑坡 [J]. 环境 遥感, 11 (4): 280-284.
- 吴新星,邓敏. 2010. 阿拉滑坡形成机制及堵江分析 [J]. 三峡大 学学报 (自然科学版), 32 (3): 48-51.
- 谢猛,2020. 基于多源数据的伊阿铁路工程地质遥感解译及选线 [J]. 铁道勘察,46 (5):40-46.
- 熊晋,王建松,廖小平,等,2013. 超高密度电法在山区公路滑坡 勘探中的应用 [J]. 铁道建筑,(8):97-100.

- 徐兴倩,苏立君,梁双庆,2015. 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,30(3):1449-1458.
- 张光保, 2012. 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, 27 (6): 2716-2721.
- 张贵,胡文君,李倩,等,2017. 金沙江河谷巧家段地下水化学特征 [J]. 中国岩溶,36 (3):339-345.
- 张建成, 王通, 2015. EH4 电磁法在深埋滑坡变形体探测中的应用 [J]. 工程勘察, 43 (2): 94-98.

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的 语音介绍及更多文章相关资讯

- 张欣,王运生,2017. 白鹤滩水电站库区小江断裂带活动性研究 [J]. 工程地质学报,25 (2):531-540.
- 张永双,郭长宝,姚鑫,等. 2016. 青藏高原东缘活动断裂地质灾害效应研究 [J]. 地球学报, 37 (3): 277-286.
- 张铎,吴中海,李家存,等,2013. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. 地质力学学报,19 (3):225-241.
- 郑嘉豪,黄波林,张全,等,2020. 三峡库区龙门寨危岩体崩塌产 生涌浪研究 [J]. 地质力学学报,25 (4):533-543.

