

文章编号: 1001-1749(2023)05-0646-08

高密度电法在多期次滑坡勘察中的应用研究

——以半坡村滑坡为例

辛超¹, 黄超², 付荣翔², 庞咏², 黄辉², 叶雷², 刘达²

(1. 江西省地质调查勘查院矿产勘查所, 南昌 330000;

2. 中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650100)

摘要: 滑坡是主要的地质灾害之一, 严重危害当地居民的生命及财产安全, 研究其诱发形成机理对于以后的治理具有重要的指导意义。利用 res2dmod 软件建立模型, 用 res2dinv 软件对模型数据进行反演, 从理论上验证高密度电法在滑坡勘察中的有效性。同时, 运用高密度电法, 结合地质剖面及工程钻孔资料, 构建工程地质剖面, 揭示滑坡剖面形态特征、滑体组成与结构及滑面特征, 对滑坡形成机制进行勘察研究。

关键词: 高密度电法; 滑坡; 数值模拟; 地球物理

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.05.11

0 引言

富源县位于云南省地质灾害次重点防治区中的富源一师宗滑坡次重点防治亚区, 区内地质灾害以滑坡为主^[1]。半坡村滑坡位于富源县恩洪一老厂煤层勘查区内, 地处大则勒煤矿矿界附近, 该滑坡地裂缝每年持续扩张, 多次破坏道路, 对半坡村产生多处房屋裂缝、地面裂缝、地面塌陷等问题。虽然半坡村于2018年6月整村搬迁, 但半坡村滑坡仍然处于活动状态, 威胁其东部的S204省道, 探明其地下空间形态、滑面位置、成因机制对以后的灾害治理具有重要的指导意义。

滑坡的基本特征主要包括平面和剖面形态特征、滑体组成与结构及滑面特征, 是研究其变形特征和成因机制的重要依据^[2]。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^[3]。钻孔资料能够清楚地反映地层结构, 但由于施工成本大, 无法大面积布设, 只能局部布设。通过地球物理勘察, 能够真实反映滑坡体的地下空间结构及滑面位置。加以钻孔进行验证, 既能保证工作精度又能控制施工成本。

随着现在地球物理理论的研究不断深入及仪器设备的勘察精度不断提高, 不少学者将地球物理勘察方法引入到滑坡调查当中, 对滑坡的基本特征进行勘察。能运用于滑坡勘察的地球物理方法有地震法(地震反射法、地震折射法、地震面波法、微动勘察和陆地声纳法)、电法(高密度电阻率法、自然电位法和激发极化法)及电磁法(地质雷达)^[4]。杨成林^[5]等运用探地雷达对赵子秀山滑坡进行勘探; 程庆^[6]等运用高密度电阻率法对四川高川茶园沟滑坡进行勘探; 许新刚等运用瑞利面波法对秦岭一小型滑坡进行勘察; 金维民^[8]等运用等浅层地震勘探方法对下垢坪斜坡进行勘察。近10年来, 高密度电法是滑坡勘察主要工作手段^[9-15], 利用高密度电法查明滑移面形态、分析滑坡工程地质特点和滑坡的稳

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20208075)

第一作者: 辛超(1993—), 男, 学士, 工程师, 主要从事地球物理电法、磁法工作, E-mail: 18288726080@163.com。

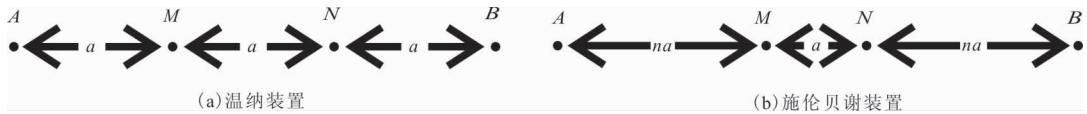


图1 温纳装置、施伦贝谢装置电极排列示意图

Fig. 1 Diagram of electrode arrangement of Wenner device and Schlumberger device

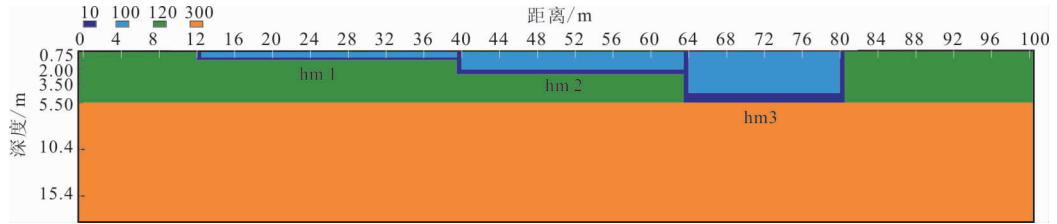


图2 模型剖面及电性参数

Fig. 2 Model profile and electrical parameters

定性评价^[3]。

首先通过 res2dmod 软件构建滑坡模型进行数值模拟,使用 res2dinv 软件对正演数据进行反演计算。通过反演结果与模型进行对比,从理论上验证高密度电法在滑坡勘察中的有效性。以半坡村滑坡为例,在滑坡范围内布设高密度电法剖面,查明滑坡体地层结构、滑床形态、滑面埋深等信息,通过工程钻孔验证反演结果的可靠性,构建工程地质剖面,研究诱发形成机理,分析致灾成因。

1 高密度电法工作原理

高密度电法属于直流电阻率法的一种,通过 A、B 供电电极向地下供电,用 M、N 测量电极测量电位差,以计算出视电阻率 ρ_s 。

$$\rho_s = K \frac{\Delta U}{I} \quad (1)$$

高密度电法是一种阵列勘探方法,能够一次布设几十至上百根电极,利用程控电极转换开关,能够实现数据的自动采集。高密度电法装置已多达十多种,其中常用的有温纳装置和斯伦贝谢装置(图 1)。这两种视电阻率计算公式分别为:

$$\rho_s^{a1} = 2\pi a \frac{\Delta U}{I} \quad (2)$$

$$\rho_s^{a2} = n(n+1)\pi a \frac{\Delta U}{I} \quad (3)$$

式中: ρ_s^{a1} 、 ρ_s^{a2} 分别为温纳装置和斯伦贝谢装置的视电阻率; ΔU 为两种装置 M 和 N 测量点之间的电位差; I 为供电电流; a 为电极距。

2 数值模拟

为验证高密度电法在滑坡勘察中的有效性,利用 res2dmod 软件进行数值模拟,构建滑坡模型,剖面长度为 100 m,剖面布设 101 根电极,电极距为 1 m。采用有限差分法进行网格剖分:网格列间距采用每相邻两电极为 4 个网格单元等间距剖分;网格行间距采用不等间距剖分,共分 17 层,分别为 0.25 m、0.5 m、0.75 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、3.5 m、4 m、4.5 m、5.5 m、10.4 m、15.4 m、30.4 m、60.4 m、120.4 m。

构建如图 2 所示模型:上部为地表风化层,电阻率为 $120 \Omega \cdot \text{m}$,位置在 5.5 m 以浅;下部为基岩层,电阻率为 $300 \Omega \cdot \text{m}$,位置在 5.5 m 以深;上部存在三条滑面,电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,底部埋深分别为 1 m、2.5 m 和 5.5 m;在滑面上为松散层,电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

利用 res2dinv 软件,采用最小二乘法对正演数据(图 3)进行反演计算,从反演拟断面图(图 4)可知,高密度电法能够有效识别多期次滑坡的多条滑面位置,并且随着滑面埋深越深,反演滑面埋深位置越接近实际模型(表 1)。

3 应用实例

如图 5 所示,半坡村滑坡地理位置为,位于富源县营上镇块块河右岸一级支流左岸半坡村,东部为 S204 省道,受构造活动及地层岩性的控制,周围地形地貌极为复杂地形地貌复杂,总体以溶蚀—侵蚀

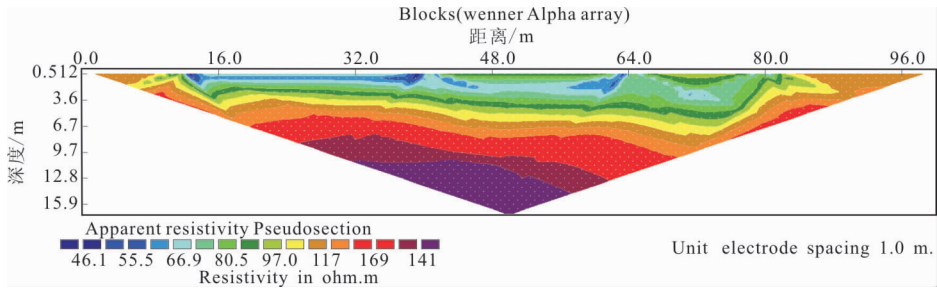


图 3 模型正演拟断面图

Fig. 3 Simulation section of the forward model

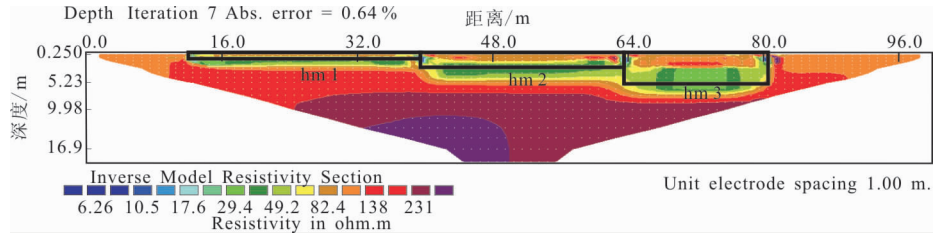


图 4 模型反演拟断面图

Fig. 4 Simulation section of the inversion model

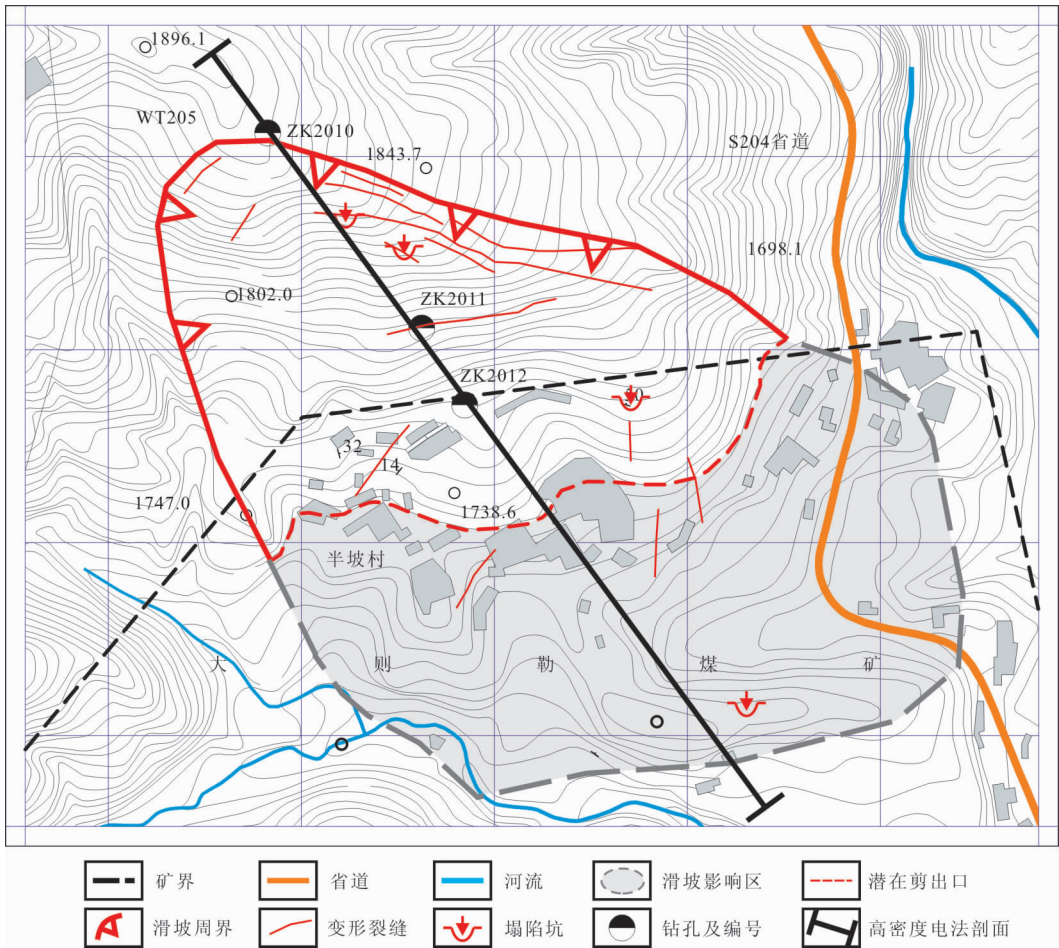


图 5 半坡村滑坡平面图

Fig. 5 Landslide plan of Banpo Village

表 1 滑面埋深误差对比表

Tab. 1 Comparison table of buried depth error of sliding surface

滑面编号	模型滑面埋深	反演滑面埋深	误差比
	/m	/m	/%
hm1	1	2.5	142
hm2	2.5	4.71	88.40
hm3	5.5	7.14	29.80

地貌(中切山地)和侵蚀构造地貌(中山剥蚀—侵蚀地貌)为主,山脉和河流多呈北北东向展布。滑坡后部山脊高程为 1 896.1 m,滑坡后缘高程为 1 883 m,滑坡前缘高程为 1 673 m,滑坡高差为 210 m,主滑方向为 140°,滑坡体长约 500 m,宽约 670 m。通过测量估算,滑体表面积为 $33 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $396 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.1 测区地质概况

根据 1996 年出版的《云南省岩石地层》和 2000 年《中国地层指南及中国地层指南说明书》,结合测区不同构造单元内部的构造特征、地层层序及生物组合特征,测区地层隶属于华南地层大区之扬子地层的曲靖地层小区。根据地质剖面资料揭示,测区内出露的主要地层为:峨眉山组玄武岩、茅口组灰岩、宣威组砂岩、泥岩。

3.2 测区地球物理概况

物性测量工作采用露头测量、标本测量及水文钻孔三侧向电阻率测量等 3 种物性测定方式,共测量 4 种岩性电阻率,露头测量 123 个点(图 6),测量标本 120 块(图 7)。从测量结果来看(图 8),各测定方法测量的各岩性电阻率高低分布特征基本一致,泥岩、砂岩电阻率基本一致,玄武岩电阻率略大于砂岩、泥岩电阻率,灰岩电阻率远大于其他岩石电阻率。综合考虑,各电阻率从小到大以此为泥岩、砂岩、玄武岩、灰岩。

3.3 野外数据采集

为查明半坡村滑坡的基本特征及诱发形成机理,沿半坡村滑坡走向布设 1 条长 1 195 m 的高密度电法剖面 L1,使用深圳赛盈地脉公司生产的 GD-10 高密度电阻率法测量系统,采用温纳装置方式进行测量,最小隔离系数为 1,最大隔离系数为 39。为满足测量分辨率要求,采用 5 m 电极距进行测量。由于测线较长,采用滚动排列模式进行测量,第一次布设 108 个电极,每次滚动 12 个电极,共布设 240 个电极(图 9)。

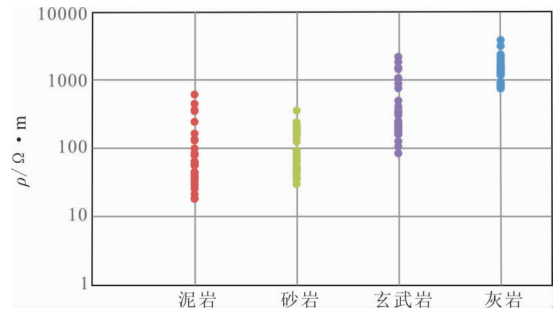


图 6 露头测量各岩性电阻率分布图

Fig. 6 Resistivity distribution of each lithology measured on outcrop

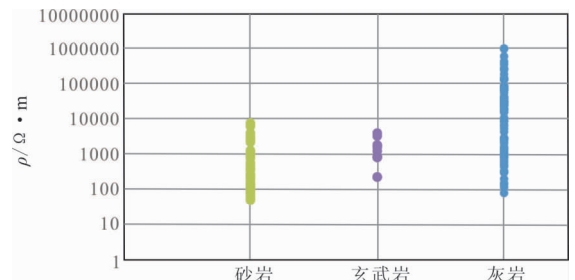


图 7 标本测量各岩性电阻率分布图

Fig. 7 Resistivity distribution of each lithology measured by specimen

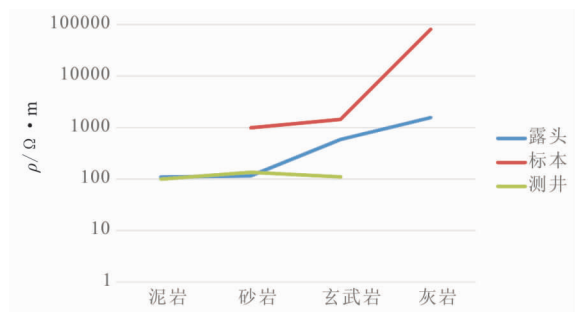


图 8 物性测量各岩性电阻率平均值分布图

Fig. 8 Average resistivity distribution of each lithology in physical property measurement

3.4 成果资料解释

从 WT205 线反演图(图 11)可知,剖面视电阻率值主要表现为西高东低的特征,变化范围在 $3.8 \Omega \cdot \text{m} \sim 3\ 507 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,电阻率幅值较为分散,反映岩性较为复杂。通过与地质剖面对比,高密度电法能够准确的反映出各岩性界线位置,各岩性视电阻率与物性测量结果基本一致,玄武岩电阻率在 $43 \Omega \cdot \text{m} \sim 77 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,灰岩电阻率在 $430 \Omega \cdot \text{m} \sim 2\ 400 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,砂岩、泥岩电阻率在 $7 \Omega \cdot \text{m} \sim 77 \Omega \cdot \text{m}$ 之间。

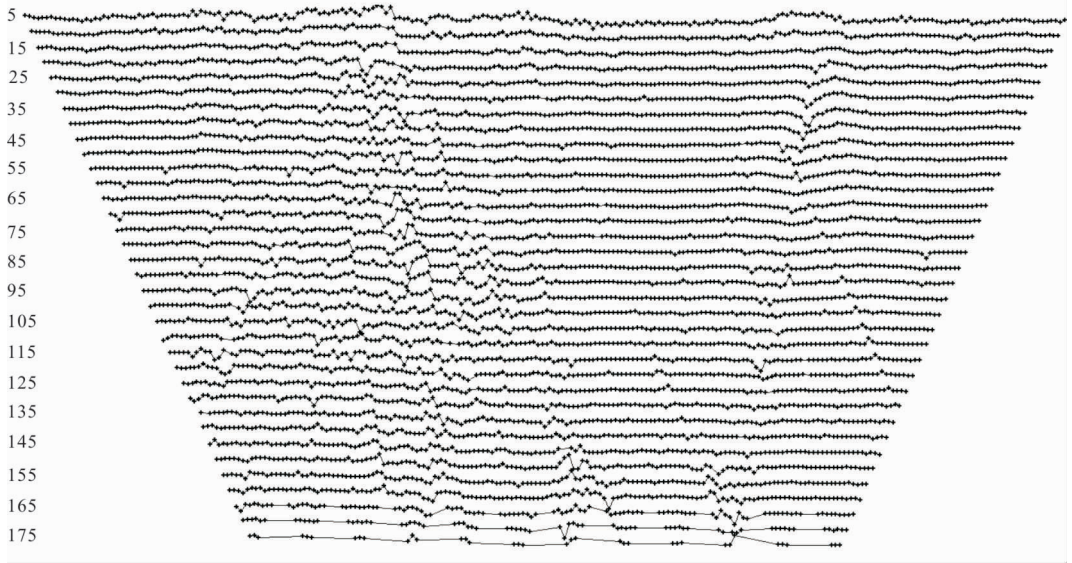


图 9 高密度电法视电阻率数据剖面图

Fig. 9 Apparent resistivity data profile of high density electrical method

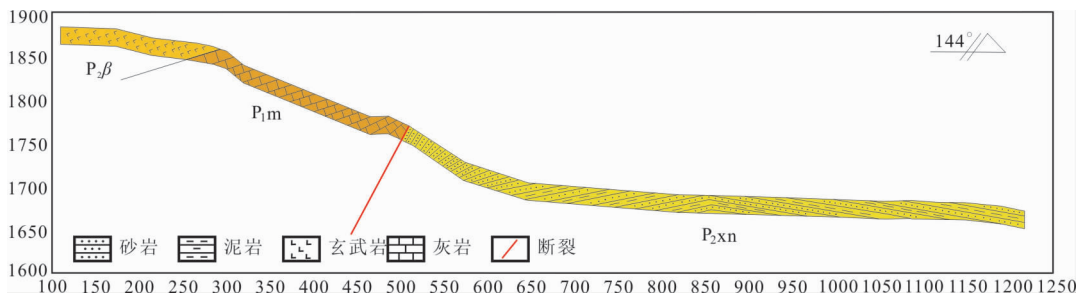


图 10 地质剖面图

Fig. 10 Geological profile

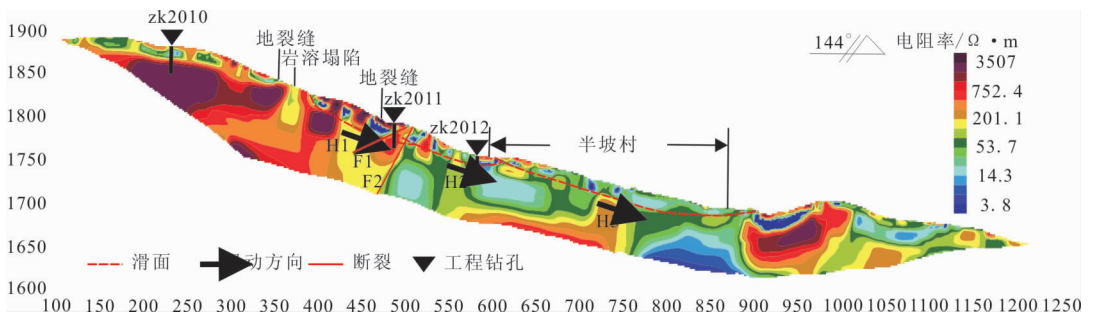


图 11 高密度电法反演拟断面图

Fig. 11 Pseudo-section diagram of high-density electrical inversion

根据 WT205 剖面反演图(图 11),结合地质剖面(图 10)及物性资料,共推测 4 个岩溶塌陷区、1 个采空区和 3 条滑面。岩溶塌陷区电性特征表现为中等电阻率异常,视电阻率在 $129 \Omega \cdot m \sim 201 \Omega \cdot m$ 之间,由于塌陷导致岩石较为松散,含水率较高,相对灰岩视电阻率降低。该区域的煤矿为地下开采模

式,多数煤矿未进行回填或少数采取煤矸石进行回填,采空区电性特征表现为高阻异常,视电阻率在 $312 \Omega \cdot m \sim 3507 \Omega \cdot m$ 之间。h1、h2、h3 滑面的电性特征都表现为串珠状低阻异常,视电阻率在 $3.8 \Omega \cdot m \sim 14.3 \Omega \cdot m$ 之间,由于滑面含水量较高,相对滑坡体及滑床视电阻率较低,滑面最大埋深分

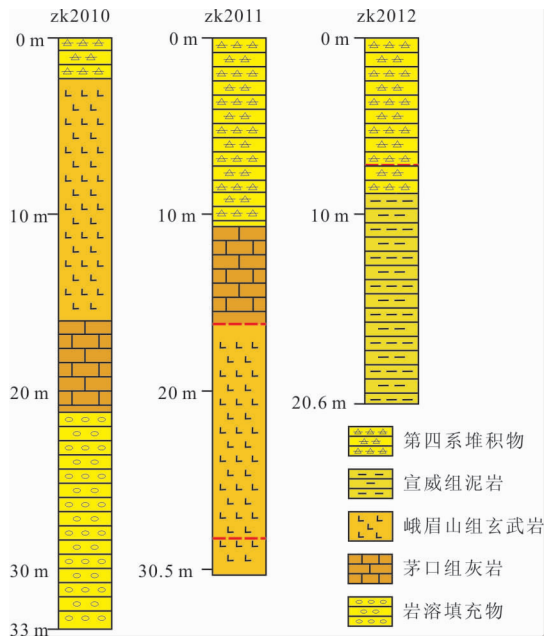


图 12 工程钻孔柱状图

Fig. 12 Borehole column diagram

别为 25.2 m、19.9 m、19.1 m。

根据高密度电法测量结果,在剖面上布设 zk2010、zk2011、zk2012 三个工程钻孔(图 12)对高密度电法的推测结果进行验证。工程钻孔 zk2010 在 21.09 m 以深,可见岩溶填充物,主要岩性为砾岩,成分以玄武岩、灰岩为主,基质为灰色粘土、灰黄色砂土等,基底式胶结,与推测的岩溶塌陷区基本一致。工程钻孔 zk2011 在 16.24 m 和 28.88 m 处见滑带粘土,验证了该位置推测的两条滑带的存在,但滑带埋深推测结果与实测结果有所差异。工程钻孔 zk2012 在 7.22 m 处见滑带粘土,验证了该位置推测的一条滑带的存在,但滑带埋深推测结果与实测结果有所差异。通过对比可以发现,随着滑面埋深越深,推测结果与实测结果的误差比越小,这与数值模拟结果一致(表 2)。

表 2 实测数据滑面埋深误差对比表

Tab. 2 Comparison of buried depth error of sliding surface in measured data

工程钻孔	滑面埋深		误差比/%
	物探推测/m	钻孔实测/m	
zk2011	11.38	16.24	29.90
	22.24	28.88	22.99
zk2012	10.66	7.22	47.64

3.5 滑坡形态特征与形成机制初步探讨

3.5.1 滑坡形态特征

根据高密度电法的实测结果,结合地质剖面、工程钻孔资料,获取半坡村滑坡工程地质剖面图(图 13)。分析图图 13 可知:①半坡村滑坡在高程、地貌上自上而下分为后缘的围岩、中部的滑坡体和前缘的松散堆积物;②从物质组成上来看,滑床由茅口组灰岩和宣威组砂岩、泥岩组成,宣威组砂岩、泥岩 $352^\circ \angle 18^\circ$;滑坡体由茅口组灰岩、峨眉山组玄武岩和第四系碎石土组成;滑面由高至低逐渐平缓,埋深在 8 m~26 m。

3.5.2 滑坡形成机制探讨

通过高密度电法剖面获得的半坡村滑坡的电法数据,有效揭示了该滑坡的剖面形态特征、滑体组成与结构及滑面特征,对滑坡形成机制分析提供了全面准确的参考依据。通过高密度电法测量工作,结合地质剖面及钻孔资料,笔者认为半坡村滑坡形成机制分为两部分:①滑坡后缘的地裂缝最为密集,并在地裂缝密集区观察到有岩溶塌陷区的存在,结合通过高密度电法推测的地下岩溶塌陷区的位置,埋深较浅的岩溶塌陷区位于地裂缝密集区内,推测该区域的地裂缝由岩溶塌陷与滑坡综合因素所形成;②滑坡中部和后缘的砂岩、泥岩的倾向与滑坡体的滑动方向相反,地层较为稳定,不易产生滑坡,滑坡后缘的滑坡剪出口位于高密度电法推测的采空区位置,采空区规模 $110 \times 75 \text{ m}^2$,推测该区域的滑坡主要由于采空区所形成。

半坡村滑坡推测存在 3 个滑面,形成机制较为复杂,并非单一因素影响所致。推测该滑坡的地质历史演化过程为:半坡村滑坡后缘的灰岩在水蚀作用下形成多个不连续的岩溶塌陷区,导致地表存在多条地裂缝及地表塌陷;又由于灰岩地层较为稳定,只形成地层局部变形。后期由于大则勒煤矿开采至半坡村滑坡山脚,在坡脚附近形成采空区,局部发生塌陷失稳,致使坡脚失去支撑,引起坡体结构失去平衡,加剧地层形变,形成三阶滑坡。

4 结论

1)通过数值模拟及应用实例,验证了高密度电法在多次滑坡勘察中的有效性,能够有效识别多条滑面。

2)半坡村多次滑坡其滑坡体主要表现为局部不连续高阻异常电性特征,3条滑面主要表现为串

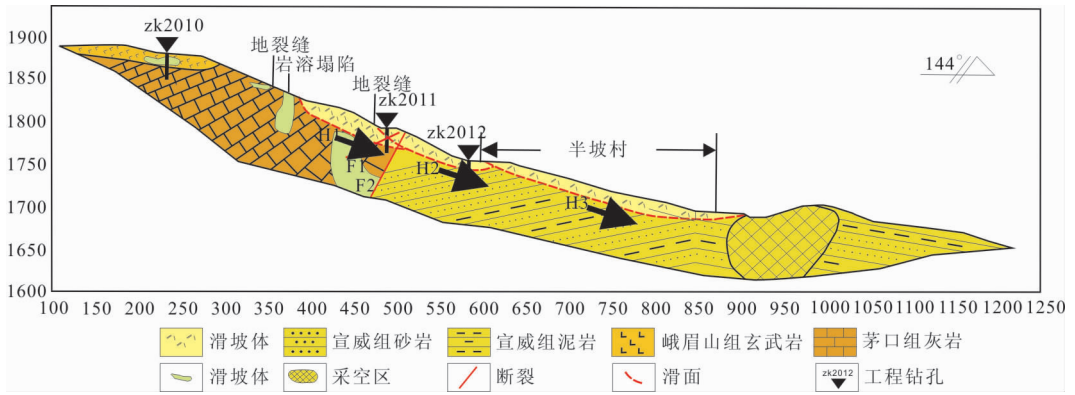


图 13 工程地质图

Fig. 13 Engineering geological map

珠状低阻异常电性特征。

3) 通过高密度电法剖面、地质剖面及工程钻孔资料, 构建半坡村滑坡工程地质剖面, 揭示滑坡剖面形态特征、滑体组成与结构及滑面特征, 分析滑坡形成机制, 得出半坡村滑坡是由于岩溶塌陷及后期煤矿开采形成采空区所致。

参考文献:

- [1] 丁星好, 戴塔根, 包从法, 等. 云南滇中地区地质灾害防治区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(02): 69-75.
DING X Y, DAI T G, BAO C F, et al. Zoning of geological hazard control in central Yunnan[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2011, 22(02): 69-75. (In Chinese)
- [2] 吴玮江, 宿星, 刘伟, 等. 黄土-泥岩接触面滑坡的特征与成因[J]. 冰川冻土, 2014, 36(05): 1167-1175.
WU W J, SU X, LIU W, et al. Characteristics and genesis of landslide on loess-mudstone interface[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(05): 1167-1175. (In Chinese)
- [3] 林松, 王薇, 邓小虎, 等. 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[J]. 地球科学, 2019, 44(09): 3135-3146.
LIN S, WANG W, DENG X H, et al. Geophysical measurement of typical landslides in the Three Gorges Reservoir area and its significance: A case study of Sifangbi landslide in Wanzhou district [J]. Journal of Earth Sciences, 2019, 44(09): 3135-3146. (In Chinese)
- [4] 徐兴情, 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(03): 1449-1458.
XU X Q, SU L J, LIANG S Q. Review on the current

research status of geophysical methods for detecting the structural characteristics of landslides[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(03): 1449-1458. (In Chinese)

- [5] 杨成林, 陈宁生, 施蕾蕾. 探地雷达在赵子秀山滑坡裂缝探测中的应用[J]. 物探与化探, 2008(02): 220-224.
YANG C L, CHEN N S, SHI L L. Application of ground penetrating radar in crack detection of Zhaozixiushan landslide[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008(02): 220-224. (In Chinese)
- [6] 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(01): 69-72.
CHENG Q, TUO X G, GE B, et al. Application of high density resistivity method to the exploration of Chayuangou landslide in Gaochuan, Sichuan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(01): 69-72. (In Chinese)
- [7] 许新刚, 岳建华, 李娟娟, 等. 面波勘查技术及在滑坡地质调查中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(03): 1367-1372.
XU X G, YUE J H, LI J J, et al. Surface wave exploration technology and its application in landslide Geological survey [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(03): 1367-1372. (In Chinese)
- [8] 金维民, 杜兵建. 浅层地震勘探在滑坡勘察中应用[J]. 中国煤田地质, 2004(S1): 97-99.
JIN W M, DU B J. Application of shallow seismic exploration in landslide exploration [J]. Coal Geology of China, 2004(S1): 97-99. (In Chinese)
- [9] 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(01): 215-221.
LI F, ZHOU H F, GE H. Electrical characteristics of

- different types of landslide using high density resistivity method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(01): 215—221. (In Chinese)
- [10] 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(04): 872—876.
ZHOU G Q, ZHAI F Q, HAO Z C, et al. Application of high density resistivity method and seismic reflection common migration method to the exploration of landslide in Jiuhuashan mountain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(04): 872—876. (In Chinese)
- [11] 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, 36(5): 535—540.
XU S Q, LI D Q, YANG L P, et al. Forward and inverse simulation of high density resistivity of landslide and its application in engineering emergency[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 36(5): 535—540. (In Chinese)
- [12] 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(06): 2716—2721.
ZHANG G B. High density electrical investigation and effect analysis of zhujiaying giant landslide[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(06): 2716—2721. (In Chinese)
- [13] 闫亚景, 闫永帅, 赵贵章, 等. 基于高密度电法的天然边坡水分运移规律研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(07): 2807—2814.
YAN Y J, YAN Y S, ZHAO G Z, et al. Study on moisture migration in natural slope using high-density electrical resistivity tomography method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(07): 2807—2814. (In Chinese)
- [14] 甘建军, 陈炳贵, 刘晓, 等. 高密度电法与 GMD 法在灰岩区滑坡勘察中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(06): 2429—2436.
GAN J J, CHEN B G, LIU X, et al. Application of high-density electrical method and GMD method in landslide exploration in limestone area[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(06): 2429—2436. (In Chinese)
- [15] 郭桥桥, 郭长宝, 申维, 等. 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*, 2017, 23(05): 788—797.
GUO Q Q, GUO C B, SHEN W, et al. Geophysical exploration and interpretation analysis of typical large—giant Paleo—landslide characteristics in Minjiang river Valley, Western Sichuan[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(05): 788—797. (In Chinese)

Application of high—density electrical method in multi—stage landslide investigation: take the Banpo village landslide as an example

XIN Chao¹, HUANG Chao², FU Rongxiang², PANG Yong², HUANG Hui², YE Lei², LIU Da²

(1. Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute Mineral Exploration Institute, Nanchang 330000, China;
2. Kunming Comprehensive Survey of the Natural Resources of the Chinese Geological Survey, Kunming 650100, China)

Abstract: Landslide is one of the main geological disasters that seriously endangers residents' lives and property. The study of its formation mechanism has important guiding significance for future governance. In this paper, Res2DMOD software is used to build a model, and Res2DINV software is used to invert the model data to verify the effectiveness of the high—density electrical method in landslide investigation theoretically. At the same time, using the high—density electrical method, combined with geological profile and engineering borehole data, the engineering geological profile is constructed to reveal the morphological characteristics of the landslide profile, the composition and structure of the landslide body, and the characteristics of the landslide surface, and the formation mechanism of landslide is investigated and studied.

Keywords: high density electrical method; landslide; numerical simulation; geophysics