

不同物质(土质、岩质)的岩石滑坡体高密度电法异常特征区别

吕天江,陈先童,黄启霖,宋启文,杨海龙,宋顺昌,陈德靖,杨 武

(贵州省地矿局地球物理地球化学勘查院,贵州 贵阳 550018)

[摘 要]应用物探方法对滑坡进行勘查,已成为一种经济、快捷、有效的手段,文章首先从认识两类典型滑坡(I类—土质滑坡、II类—岩质滑坡)的滑坡结构开始,从物性差异角度分析了滑体、滑面和滑床的电性特征,说明了物探方法在滑坡勘查中的有效性;通过在某已知滑坡地质体上采用高密度电法不同装置、不同极距进行测试,得出滑坡勘查中电性响应特征的一般规律,总结了高密度电法在滑坡勘查中的技术要点和“滑面”解释原则;最后对贵州地区典型的2处滑坡(土质、岩质滑坡)勘查成果进行实例分析,结果显示:两类物质(土质、岩质)的岩石滑坡地质体电性响应特征具有相同规律,均有明显的三层电性结构层(高—低—高阻)分别对应滑体、滑面、滑床,但土质滑坡地质体的软弱夹层反映在电性剖面特征上的“体积效应”更显著。

[关键词]滑坡地质体;电性特征;高密度电法;装置;体积效应;滑面解释原则

[中图分类号]P694;P642.22;P613.3 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2021)04-0419-011

1 引言

滑坡作为地质灾害的主要类型之一,长期以来对人们的生命和财产造成严重威胁,对环境和资源造成破坏;我国70%为山区,大多处于中西部,贵州省是一个山地省份,地质灾害发生尤其突出(贵州省地质环境监测院,2009),贵州在全国属于云贵高原滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷高发区(国土资源部,2012),与此同时,贵州省地质灾害研究及治理工作也很突出,近年来,开展了全省重点地区重大地质灾害隐患详细调查,全省高位隐蔽性地质灾害隐患专业排查,全省20处(以县为单位)重点区域1:1万地质灾害详查及风险评估,贵州省地质灾害综合治理三年行动等一系列调查及治理工作。

贵州重大地质灾害规模等级以小型和中型为主;灾害类型以滑坡为主,崩塌次之,地面塌陷相

对较少,泥石流和地裂缝数量少;贵州省滑坡以土质型滑坡为主,岩质滑坡占比少(吕刚,2016),物探方法应用于滑坡勘查可以为滑坡研究和治理提供有力支撑,对确定潜在滑体、了解滑面深度、掌握滑坡稳定状态等都有十分重要的作用;高密度电法被广泛地应用于地质灾害(滑坡)、水文、工程与环境地质勘查工作中(周杰等,2018),具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、解释方便、生产效率高等优点,研究高密度电法在滑坡勘查中的异常特征具有重要价值。

2 滑坡地质体结构及“三滑”的物性变化

2.1 土质、岩质物质组成的滑坡体

滑坡是指斜坡上的岩(土)体由于暴雨、地下水、地震或人为因素在重力作用下沿滑动面向下滑

[收稿日期]2021-07-08 [修回日期]2021-10-14

[基金项目]贵州省地矿局青年地质科研项目(黔地矿科合(2018)38号)。

[作者简介]吕天江(1986—),男,工程师,主要从事应用地球物理勘查工作,E-mail:645697595@qq.com。

[通讯作者]陈先童(1988—),男,工程师,长期从事应用地球物理勘查工作,E-mail:790799650@qq.com。

动的现象,滑坡主要诱因是不断降雨引起大量地表水下渗,导致滑坡面(软弱夹层或软弱面)内物质软化,物理力学性质降低,当其不能提供足够的摩擦阻力阻挡滑坡体的下滑力时,将导致滑坡的形成。在不同岩性地区滑坡的诱发因素、形成机理各不相同,均有其特殊性;沉积岩地区的滑坡大多与软弱夹层有关,滑动面基本由软弱夹层演变而来(廖全涛等,2006)。滑坡结构体主要由滑体、滑面、滑床构成,滑坡的分类方法较多,从物探勘查角度分析,按滑坡体物质组成分类与地球物理特征最为相关(李富等,2019)。按物质组成分类,滑坡可以分为两类(I类—土质滑坡、II类—岩质滑坡)。

土质滑坡:滑坡物质多由碎屑岩构成,滑坡体一般为第四系残坡积层、堆积土、粘土夹碎石、角砾土、砂泥岩、页岩等,多含碎石或块石,抗剪强度低、易风化,地表水容易下渗,沿裂隙或表土渗入土体后导致土体自重增加,土体粘聚力和内摩擦角降低,从而导致下滑(熊炜等,2014),见图1。

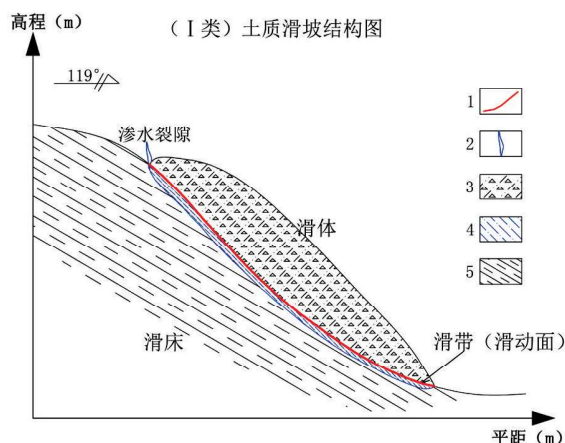


图1 I类—土质滑坡结构图

Fig. 1 Structure of class I soil landslide

1—滑面;2—渗水裂隙;3—潜在滑坡堆积体;4—软弱夹层;5—碎屑岩

岩质滑坡:滑坡物质多由硬质岩组、碳酸盐岩构成,滑面多由软质岩构成(如软弱夹层、软弱结构面、泥岩、泥灰岩等),由于软、硬岩组的差异风化,竖向张裂缝的导水,雨水通过裂缝进入坡体内部和滑动面,软化软弱夹层从而影响滑坡稳定性(元星等,2015),见图2,该类滑坡往往溶蚀、岩石节理裂隙发育程度高。认识两类滑坡结构体需要注意几点:

①两类滑坡的外界诱因均与裂缝(渗水裂隙)和软弱夹层关系密切,雨水为最重要的外界诱因。

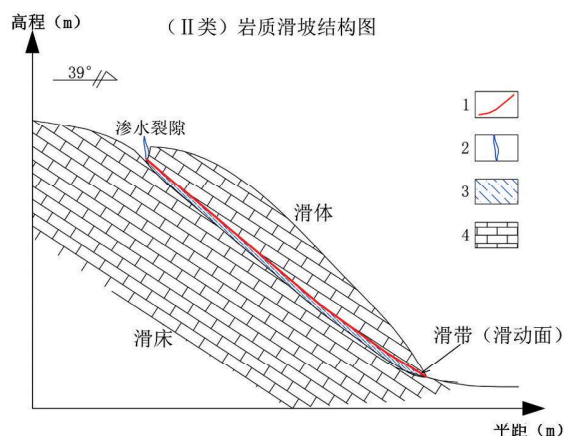


图2 II类—岩质滑坡结构图

Fig. 2 Structure of class II rock landslide

1—滑面;2—渗水裂隙;3—泥化软弱夹层;4—灰岩

②滑坡前沿具有一定临空面,坡度角 $10^{\circ} \sim 45^{\circ}$,岩层倾向与坡度角方向一致最容易形成滑坡。

③自然状态下土质滑坡较多发,但大型滑坡少,岩质滑坡占比少,但大型滑坡占比高,破坏力大。

2.2 “三滑”的物性特征

“三滑”是指一个完整的滑坡地质体由“滑体、滑面、滑床”三部分组成,滑坡结构体在电性上有明显的差异特征,一般表现为滑坡体的视电阻率大,滑动带(又称滑面,一般为软弱带演变而来)的视电阻率相对较低,下部的滑床视电阻率更高;土质滑坡滑体大多结构松散,含碎石、孔隙度大,多表现为高阻,滑面物质多为粘土、泥岩、软质岩组,由于雨水沿表层的滑体或裂隙向下渗至滑动带,使滑动带表现为明显低阻特征,滑床则由于风化程度低,岩石相对较致密为高阻;岩质滑坡则由于本身有软硬岩组相间构成,滑面(软弱夹层或软弱面)也为相对低阻反映(雨水的下渗作用会使低阻差异更明显),这为电法勘探滑坡结构体提供了有益的物质前提;应用高密度电法可以清晰地划分出潜在滑体、滑面、滑床,电性特征上表现为明显的三层结构:高—低—高阻,见表1。

2.3 “滑面”的解释原则

根据上述分析,滑坡勘查中滑面确定应从滑坡电性结构层出发,重点关注潜在滑体和软弱夹层电性特征,滑面通常由软弱夹层演变而来,为低电阻率,可以作为滑面标志层;由于电法勘探的

表 1 按滑坡地质体不同结构层分类的电性特征

Table 1 Electrical characteristics of landslide geological body according to different structural layers

滑坡地质体及结构		岩性	电阻率范围/($\Omega \cdot \text{m}$)	平均值/($\Omega \cdot \text{m}$)	电性特征
土质 滑坡	滑体	第四系、堆积土、粘土夹碎石、角砾土、砂泥岩、页岩等碎屑岩	25 ~ 3 500	541	中-高阻
	滑面	软质岩组、泥岩、粘土	20 ~ 552	118	低阻
	滑床	硬质岩组、粉砂岩、粘土岩、板岩	207 ~ 3 543	663	高阻
岩质 滑坡	滑体	硬质岩组、碳酸盐岩、破碎岩体	1 205 ~ 7 000	3 500	中-高阻
	滑面	软质岩组(软弱夹层、软弱结构面)、泥岩、泥灰岩	203 ~ 1 520	651	低阻
	滑床	硬质岩组、碳酸盐岩	1 501 ~ 8 557	3 681	高阻

“体积效应”影响,软弱夹层厚度在电性剖面上往往被放大,应以软弱夹层上界面(即与潜在滑体接触面)来确定潜在滑面位置。在灰岩区采用高密度电法工作时,雨水渗入到滑坡堆积体中,会使电阻率色谱失真(陈龙等,2019),多表现为局部低阻异常圈闭区,影响滑面深度判断,故在灰岩地区滑坡勘查中,滑面判断要认准滑坡地质体电性反映的三层结构,关注电性层反映的整体性,排除局部低阻圈闭异常区对电性剖面层厚造成的影响。

3 高密度电法简介及相关试验效果

3.1 高密度电阻率法

高密度电阻率法原理与传统电阻率方法原理完全相同,它以地下介质体的电阻率差异为地球物理前提(傅良魁,1990),通过分析研究人工场源的分布及变化规律来寻找目标异常体,它是用直流电阻率法的阵列形式;集电阻率测深法和电阻率剖面法于一体,一次布极即可以完成纵、横向二维勘探过程,既能反映地下某一深度沿水平方向岩土体的电性变化,又能提供地层沿纵向的电性变化情况(周杨等,2012)。

高密度电法不同装置,其探测效果和分辨能力会有一定差异,实际应用中常用的高密度电法装置主要有:温纳(α)、施伦贝谢尔($\alpha 2$)、偶极-偶极(β)、微分(γ),图 3 为温纳(α)装置电极排列。

测量时,AM = MN = NB 为一个电极间距,A、B、M、N 逐点同时向右移动,得到第一条剖面线;接着 AM、MN、NB 增大一个电极间距,A、B、M、N 逐点同时向右移动,得到另一条剖面线;这样不断扫描测量下去,得到倒梯形断面。

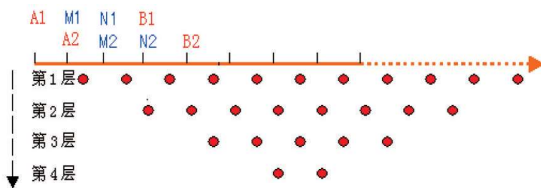


图 3 温纳(α)装置电极排列图

Fig. 3 Electrode arrangement diagram of wenner(α) device

3.2 已知滑坡地质体上不同装置的响应特征

为试验高密度电法不同装置对滑坡结构体的响应特征,选取贵州省锦屏县平略镇讲略村中培脑滑坡为测试对象,该滑坡后缘见土体开裂,滑坡呈“U”状,潜在滑动方向 80°,横宽平均 80 m,纵长 108 m,为一小型规模牵引式土质滑坡(吉海等,2021)。出露地层为第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})、青白口系平略组(Pt_3^{ldp});“三滑”物质岩性情况为:滑体—主要由含碎石粘土和碎石土组成,褐黄色、砖红色,经钻探揭露(图 4),厚度 7.0 ~ 8.5 m。其结构松散,孔隙度大,透水性强;滑面—碎石夹粘土、砂质板岩与第四系残坡积碎石土接触带;滑

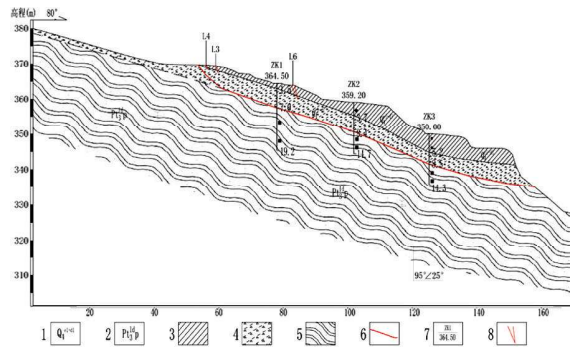


图 4 锦屏县中培脑滑坡勘查剖面

Fig. 4 Exploration section of Zhongpei Nao Landslide in Jinping county
1—第四系残坡积层;2—青白口系平略组;3—粘土;4—碎石;5—砂质板岩;6—潜在滑面;7—钻孔;8—裂缝

床一中厚层状砂质板岩,岩体节理裂隙较发育,节理裂隙紧闭,岩体较破碎。在该滑坡地质体上布置两条高密度电法测线(WT02 和 WT04),见图 5,WT02 线沿主滑方向(88°),使用仪器为重庆奔腾数控技术研究所生产的 WDA-1 超级数字直流电法仪。

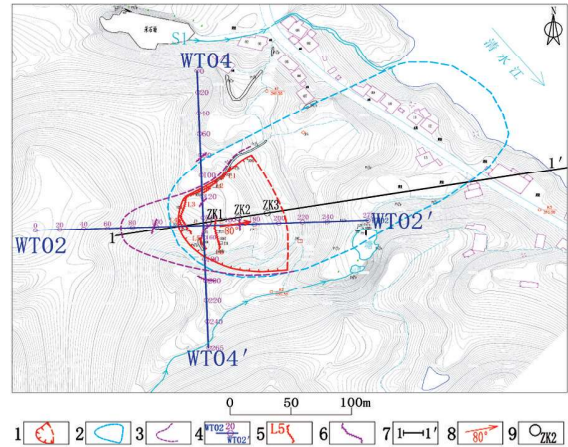


图 5 锦屏县中培脑滑坡勘查工作布置图

Fig. 5 Prospecting layout of Zhongpeinao Landslide in Jinping county
1—地质圈定滑坡范围;2—威胁范围;3—推测滑坡范围;4—物探线;5—裂缝;6—推测渗水裂隙;7—勘探线;8—主滑方向;9—钻孔

表 2 锦屏县中培脑土质滑坡体 WT02 线高密度电法不同装置观测反演结果对比表

Table 2 Comparison of inversion results of different devices observed by high-density electrical method on WT02 line of zhongpeinao earth landslide in Jinping county

装置名称	地质背景			物探背景			滑面深度(m)		最大误差(m)	备注
	滑体	滑面	滑床	滑体	滑面	滑床	推测	实际		
温纳							5.8~8.5		2.5	与 ZK1、Zk2 结果无差异,与 ZK3 结果差异较大
施伦贝尔	第四系残坡积层含碎石粘土	碎石夹粘土、砂质板岩与第四系残坡积碎石土接触带	中厚层状砂质板岩	低阻层上界面(高、中-高阻)	中-高阻		6.5~7.8	7.0~8.5	1.0	与 ZK1、Zk3 结果无差异,与 ZK2 结果差异稍大
偶极							5.9~9.0		1.0	与 3 个钻孔结果均有一定误差,均为 1.0 m 左右
微分							8.6~9.3		2.0	与 ZK1、Zk3 结果误差为 1.5 m

合解决垂向变化(例如层状结构)地质问题(M. H. Loke, 1999)。由于滑坡勘查的特殊性(地形起伏大,表层潜在滑体多为松散堆积的砾石、块石居多,接地条件差),综上,滑坡勘查中宜采用信噪比高的温纳装置。

3.3 已知滑坡地质体上不同极距(点距)的响应特征

图 7 为 WT02 试验测线上不同点距高密度反

演剖面图,装置均为温纳装置,通过分析,结合表 3 可以看出,2.5 m 极距和 5 m 极距探测效果一致,电性层横向连续性均较好,能很好的划分出滑体、滑面、滑床结构,10 m 极距效果则较差,不能很好的区分出三层电性结构层(高-低-高阻),界定滑面有困难,推测滑面深度整体误差最大。

分析原因,主要是探测极距过大造成分辨能力不足,因此,滑坡勘查中高密度测量极距建议首选 5 米,能兼具勘查效果和施工效率;10 米极距要慎用。

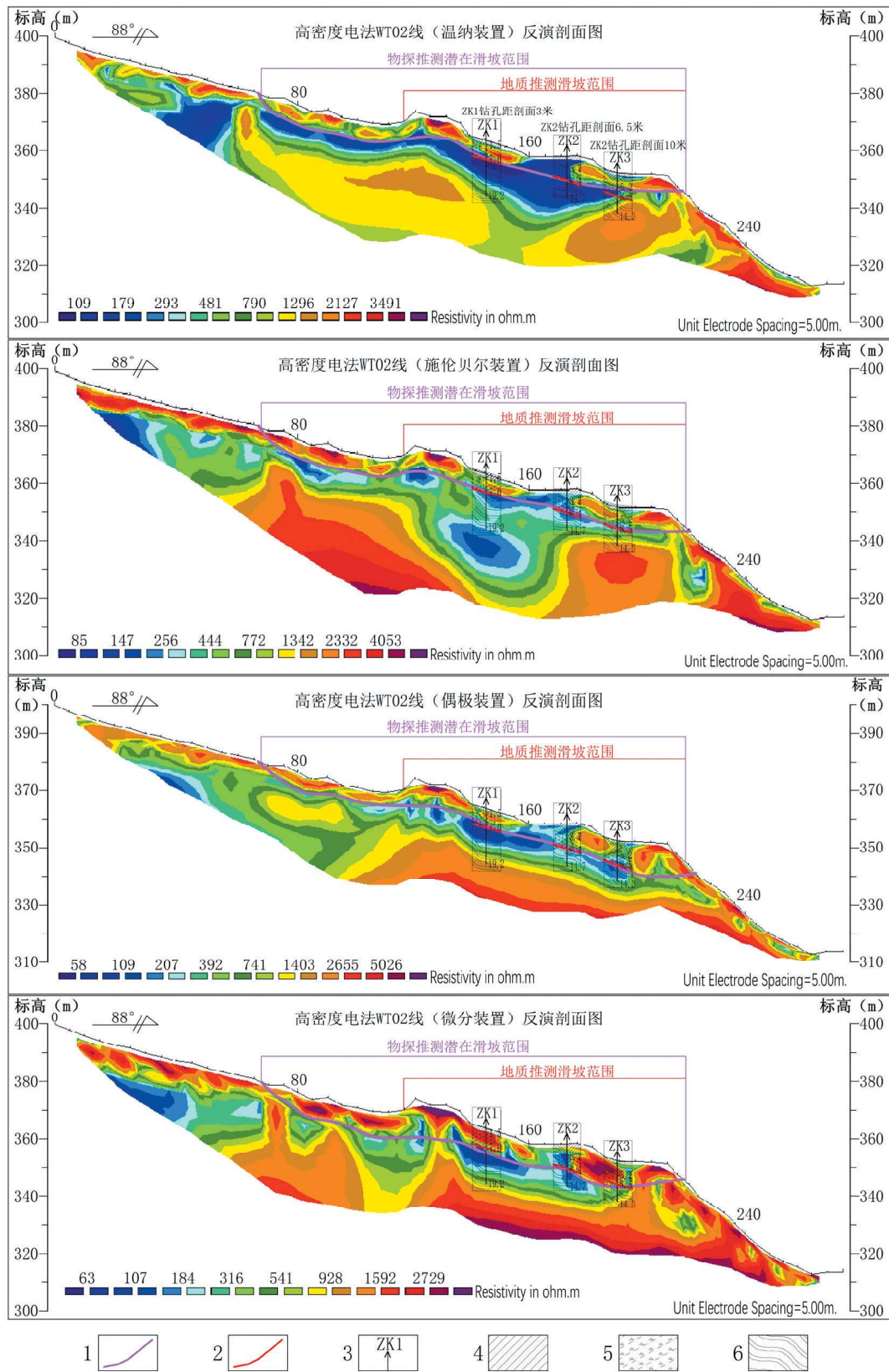


图6 锦屏县中培脑土质滑坡体 WT02 线高密度电法不同装置观测反演剖面图

Fig. 6 Inversion profiles of soil landslide in Zhongpeinao of Jinping County by high-density electrical method at WT02 line with different devices

1—物探推测潜在滑面;2—钻探揭露潜在滑面;3—工程钻孔;4—粘土;5—碎石土;6—砂质板岩

表 3 锦屏县中培脑土质滑坡体 WT02 线高密度电法不同极距观测反演结果对比表

Table 3 Comparison of inversion results of different pole distances observed by high-density electrical method on WT02 line of zhongpeinao earth landslide in Jinping county

工作极距	地质背景			物探背景			滑面深度 (m)		最大误差 (m)	备注
	滑体	滑面	滑床	滑体	滑面	滑床	推测	实际		
2.5 m	第四系残坡积层、碎石粘土和碎石土	碎石夹粘土、砂质板岩与第四系残坡积碎石土接触带	中厚层状砂质板岩	中-高阻	低阻层上界面 (高、低阻层界面)	中-高阻	5.2~9.2		3.2	与 ZK2 结果无差异,与 ZK1、Zk3 结果误差较大
5 m							5.8~8.5	7.0~8.5	2.5	与 ZK1、Zk2 结果无差异,与 ZK3 结果误差较大
10 m				层位一致性差	层位不连续	高阻层	7.8~12.5		4.3	误差较大,电性层连续性差,界定滑面有困难

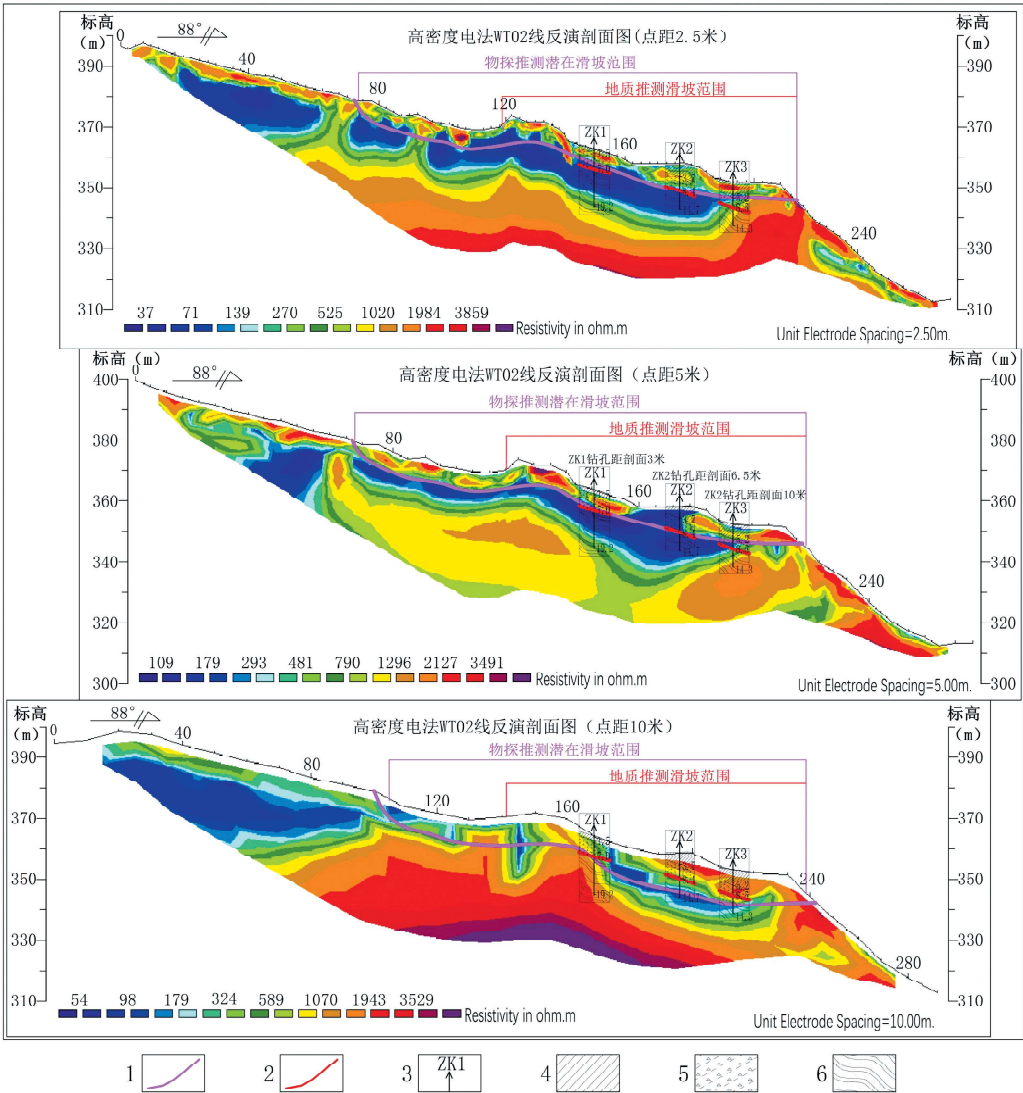


图 7 锦屏县中培脑土质滑坡体 WT02 线高密度电法不同极距观测反演剖面图

Fig. 7 Inversion profiles of different pole distances observed by high-density electrical method on WT02 line of zhongpeinao earth landslide in Jinping county

1—物探推测潜在滑面;2—钻探揭露潜在滑面;3—工程钻孔;4—粘土;5—碎石土;6—砂质板岩

4 应用实例分析

4.1 铜仁市某土质滑坡地质体的物探勘查成果

4.1.1 滑坡勘查区概况及地质特征

铜仁市境内滑坡的分布受地层岩性控制明显,滑坡主要发生在第四系松散堆积层中,次为寒武系下统九门冲组、变马冲组、杷榔组以及震旦系、前震旦系等以软质岩为主的地层中,少量分布于碳酸盐岩强风化粘土层中(麻秋景等,2009)。

该滑坡区出露地层为第四系、寒武系杷榔组(ϵ_2p),“三滑”的物质、岩性情况为:滑体—由第四系残坡积层和强风化层构成,主要为残坡积土,由灰色、黄褐色粘土、碎石组成,碎石成分为炭质页岩,粒径一般为0.2~5 cm;滑面—由碎石夹粘

土构成、粘土含量高、湿润;滑床—灰绿色薄层状粘土岩、粉砂质粘土岩,节理裂隙发育易风化。滑坡潜在滑动方向 175° ,坡向: 170° ,坡度 45° ,根据现场调查,滑坡后缘见土体明显下错约10~20 cm,为牵引式土质滑坡(吕东等,2021)。

4.1.2 物探成果分析

在滑坡勘查区共布置3条高密度电法剖面(图8),沿主滑方向(布置2条:WT2和WT3)和近垂直于主滑方向(WT1),点距5 m,测量装置采用温纳装置,物探定点采用RTK,有2条物探剖面(WT1和WT3)过地质钻孔附近;由图9可见,滑坡覆盖范围内,3条剖面均能区分出3层电性结构层(由浅至深为高-低-高阻),符合前述滑坡地质体电性结构层“模型”结果,可以通过电性结构层解译滑坡结构层(滑体、滑面、滑床),WT1线经过了3个钻孔,以下选取WT1线作重点分析。

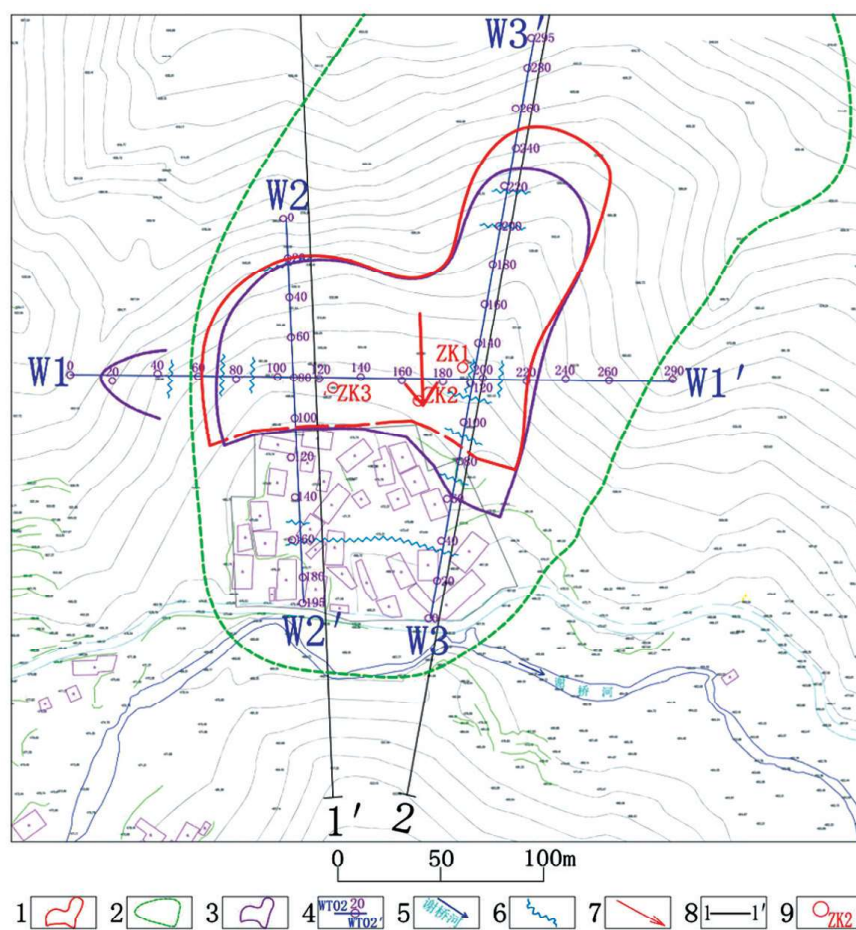


图8 铜仁市某土质滑坡勘查工作布置图

Fig. 8 Prospecting arrangement of a soil landslide in Tongren city

1—地质圈定滑坡范围;2—威胁范围;3—物探推测潜在滑坡范围;4—物探测线/测点及点位距离;5—河流;6—物探推测渗水裂隙;7—主滑方向;8—勘探线;9—工程钻孔

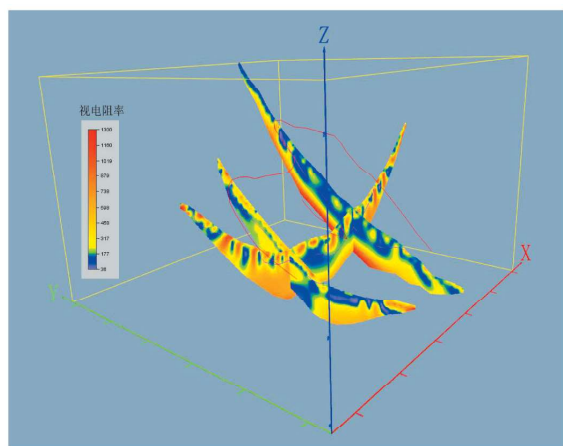


图 9 铜仁市某土质滑坡勘查高密度电法反演剖面三维显示图

Fig. 9 3D display diagram of high-density electrical inversion profile for exploration of a soil landslide in Tongren city

从 WT1 线剖面图分析,剖面电性结构层总体可分为 3 层:第一层:剖面 15 ~ 45 m, 70 ~ 225 m, 厚度 7 ~ 20 m (平均厚度 15 m) 电性特征为:表现为

一似层状高阻异常带,电阻率在 $200 \sim 1\,000\ \Omega \cdot \text{m}$,推测为潜在滑坡堆积体(由第四系残坡积层和强风化粉砂质粘土岩组成)。

第二层:剖面 13 ~ 40 m, 72 ~ 223 m, 厚度在 2 ~ 10 m, 局部厚至 13 m, 为一似层状低阻异常带,电阻率在 $40 \sim 200\ \Omega \cdot \text{m}$,推测为软弱夹层(潜在滑坡堆积体底部物质破碎、含水导致)。

第三层:剖面 0 ~ 290 m, 物探推测软弱夹层以下(中深部电性层),电阻率普遍为高值特征,电性层较完整,电阻率在 $200 \sim 1\,000\ \Omega \cdot \text{m}$,推测为寒武系杷榔组粉砂质粘土岩。

物探推测潜在滑面深度为 7 ~ 20 m (平均埋深约 15 m);此外,剖面 47 m, 73 m, 87 m, 192 m 和 207 m 出现低阻窄条状异常,部分异常与地表连通,推测为渗水裂隙;剖面 122 m 至 147 m 中深部出现局部低阻异常,推测为岩石破碎含水区,结合钻孔 ZK1-ZK3 分析,物探推测潜在滑坡堆积体、滑面深度与实际钻探结果吻合(表 4)。

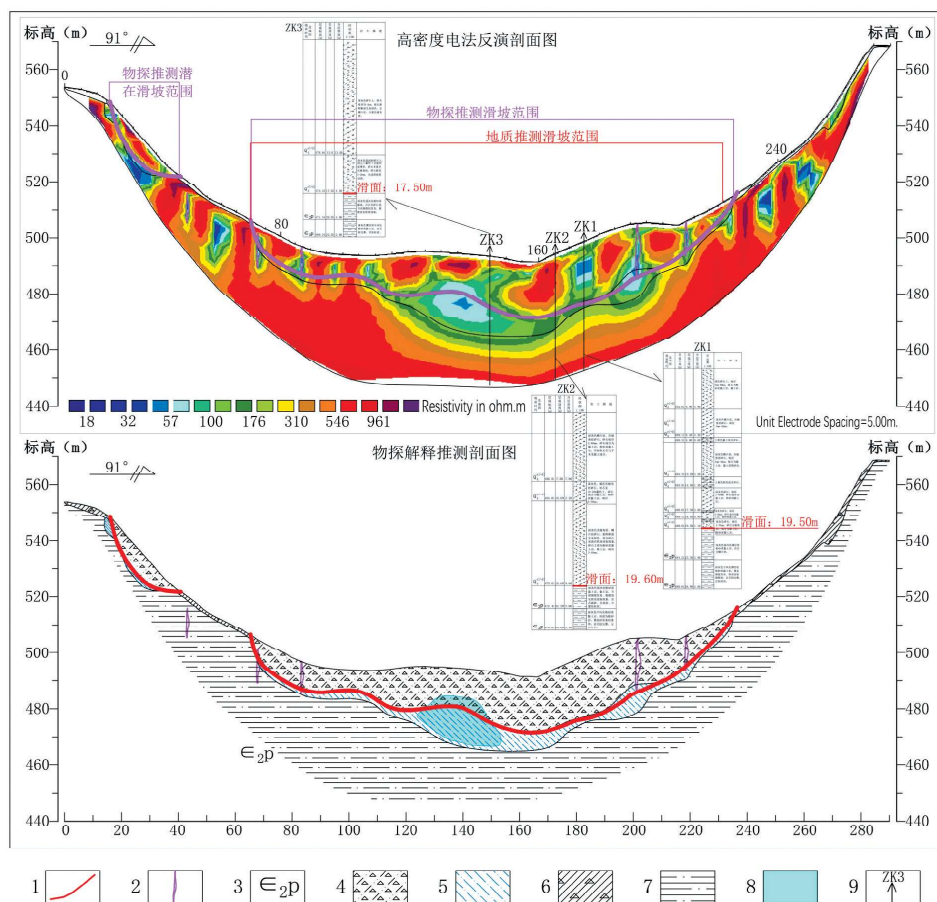


图 10 铜仁市某土质滑坡勘查 WT1 线高密度电法反演剖面图

Fig. 10 High density electrical inversion section of WT1 line for exploration of a soil landslide in Tongren city

1—物探推测潜在滑面;2—物探推测渗水裂隙;3—寒武系杷榔组;4—物探推测潜在滑坡堆积体;5—物探推测软弱夹层;6—第四系覆土;7—粉砂质粘土岩;8—物探推测岩石破碎含水区;9—工程钻孔

表 4 铜仁市某土质滑坡勘查 WT1 线高密度电法温纳装置观测反演结果钻孔验证情况表

Table 4 Borehole verification of inversion results observed by high-density electrical wenner device on WT1 line in the exploration of a soil landslide in Tongren city

验证 钻孔	地质背景			物探背景			滑面深度(m)		误差 (m)	备注
	滑体	滑面	滑床	滑体	滑面	滑床	推测	实际		
ZK1	第四系残坡积层、粘土岩、粉砂质粘土岩、碎石	碎石夹粘土、粘土含量高、湿润	粉砂质粘土岩	低-中阻	低阻层上界面(高、低阻层交界面)	高阻	21.4	19.5	1.9	钻探揭露滑体含多层粘性泥夹碎石,与电性剖面局部低阻反映吻合
ZK2				高阻			21.2	19.6	1.6	
ZK3				中-高阻		中-高阻	18.1	17.5	0.6	

4.2 兴义市某岩质滑坡地质体的物探勘查成果

4.2.1 滑坡勘查区概况及地质特征

该滑坡(图 11)位于贵州省黔西南州兴义市西南侧,为一顺层岩质滑坡。历史遥感影像分析显示,从 2014 年至 2019 年 2 月 18 日,该滑坡经历了三次滑动破坏,具有渐进后退式破坏的趋势。最后一次大规模滑动时间为:2019 年 2 月 17 日 5 时 53 分,滑动主要以后缘拉裂缝,前缘临空陡崖及右侧张拉剪切裂缝为界(冯泽涛 等,2019)。

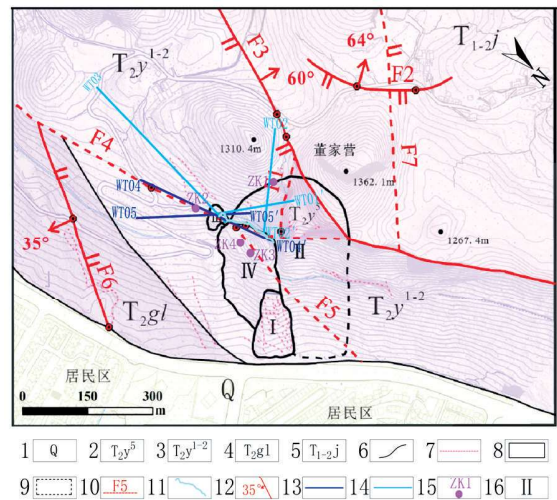


图 11 兴义市某岩质滑坡勘查工作布置图

Fig. 11 Prospecting layout of a rock landslide in Xingyi city
1—第四系;2—三叠系中统杨柳井组五段;3—三叠系中统杨柳井组一、二段;4—三叠系中统关岭组;5—三叠系中下统嘉陵江组;6—地层界线;7—裂缝;8—滑坡边界;9—推测滑坡边界;10—推测断层;11—变化裂缝;12—断层;13—应急勘查物探测线;14—物探测线;15—工程钻孔;16—滑坡分区编号

地质时代及成因	层序	层底标高(m)	层底深度(m)	分层厚度(m)	柱状图 1:200	岩土描述
T ₂ y	①	1189.50	1.50	1.50		中风化白云岩:灰白色,泥晶结构,中厚层状构造,节理裂隙发育,岩体较破碎,岩心呈柱状、碎块状,岩溶发育。
	②	1187.90	3.10	1.60		
	③	1185.90	5.10	2.00		
	④	1184.10	6.90	1.80		
T ₂ y	⑤	1180.60	10.40	3.50		泥灰岩:灰黑色,泥晶构,节理发育,岩心呈碎块状。
	⑥	1178.50	12.50	2.10		
T ₂ y	⑦	1176.70	14.30	1.80		灰色泥质白云岩,岩体多呈碎裂结构,薄层状,节理裂隙发育,岩块性脆,力学强度低。(其中20.4~20.6m段为棕黄色泥化夹层,轻微渗水)
	⑧	1172.93	18.07	3.77		
T ₂ gl	⑨	1172.02	18.98	0.91		中风化白云岩:灰白色,泥晶结构,中厚层状构造,节理裂隙发育,岩体较破碎,岩心呈柱状、碎块状。
T ₂ gl	⑩	1170.52	21.48	2.50		

图 12 兴义市某岩质滑坡勘查 ZK2 钻孔柱状图

Fig. 12 ZK2 borehole bar chart of a rock landslide exploration in Xingyi city

该滑坡区出露地层为第四系(Q)、三叠系中统杨柳井组(T₂y)、关岭组(T₂gl)、嘉陵江组(T₁₋₂j),“三滑”的物质、岩性情况为:滑体—主要为三叠系中统杨柳井组(T₂y)、三叠系中统关岭组(T₂gl)白云岩、泥质白云岩、灰岩、泥灰岩和局部第四系(Q)残坡积层构成,第四系(Q)残坡积层由红粘土、碎石土组成,碎石含量在 30% 左

右,颗粒大小 5~10 cm;滑面—主要由泥晶、泥灰岩、粘土岩构成,由岩层层理面存在的泥质薄膜充填层形成泥化软弱夹层;滑床—由细晶白云岩、白云质灰岩、灰岩、泥灰岩构成。

4.2.2 物探成果分析

在滑坡勘查区分两次共布置 5 条高密度电法剖面(图 11),测线编号 WT01~WT05,其中 WT04 和

WT05 为 2018 年 12 月应急勘查测线(最后一次大规模滑动前测量),工作极距 10 m,采用温纳装置采集数据,由于地形陡、当时滑坡正处于变形加剧期,出于安全考虑,物探测线未严格按规则布置(沿主滑方向和近垂直主滑方向),沿地形相对较理想的地段布置测线,从 WT04 线剖面图分析(图 13),同样表现为典型的三层电性结构(高-低-高阻):

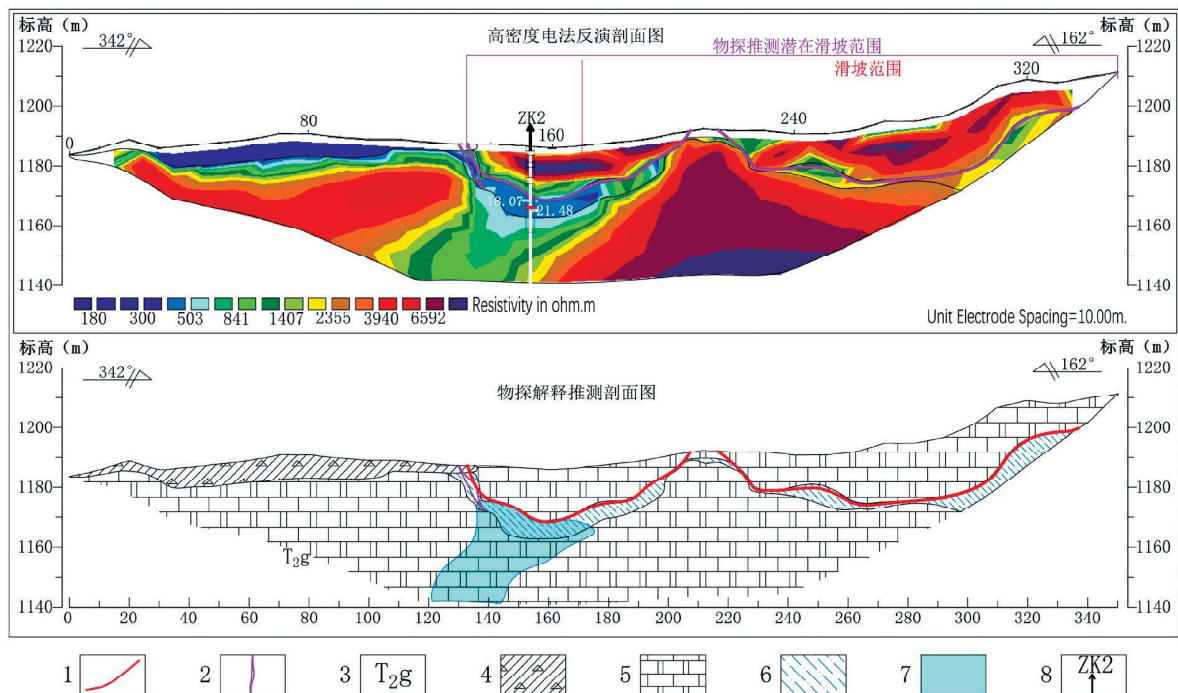


图 13 兴义市某岩质滑坡勘查 WT04 线高密度电法反演剖面图

Fig. 13 High density electrical inversion profile of WT04 line of a rock landslide exploration in Xingyi city

1—物探推测潜在滑面;2—物探推测渗水裂隙;3—三叠系中统关岭组;4—第四系浮土;5—白云岩;6—物探推测软弱夹层;7—物探推测节理裂隙发育或岩石破碎含水区;8—工程钻孔

第一层:剖面 125~205 m、220~350 m,厚度 10~20 m 电性特征:表现为一似层状高阻异常带,电阻率在 1 400~7 000 $\Omega \cdot m$,推测为潜在滑体。

第二层:剖面 130~350 m,厚度在 1~5 m,为一似层状低阻异常带,电阻率在 300~1 400 $\Omega \cdot m$,推测为软弱夹层(潜在滑面,由泥化软弱夹层演变)。

第三层:剖面 0~350 m,物探推测软弱夹层以下(中深部电性层),电阻率普遍为高值特征,电性层较完整,电阻率在 1 400~7 000 $\Omega \cdot m$,推测为关岭组白云岩。

物探推测潜在滑面深度为 10~20 m;此外,剖面 0~130 m 浅部低阻层推测为第四系浮土,剖面 130 m 出现低阻窄条状异常,异常与地表连通,推测为渗水裂隙;剖面 120~170 m 中深部

出现局部低阻异常,推测为节理裂隙发育或岩石破碎含水区,结合钻孔分析,物探推测潜在滑体、滑面深度与实际情况基本吻合(见图 12 和表 5),误差稍大,分析原因可能是由于勘查极距过大(10 m),物探定点采用手持 GPS,局部区域定点误差过大,影响物探测量效果。钻探显示孔深 0~13 m 岩溶间断发育,实际电性剖面并无反映,分析原因同样是由于高密度电法工作极距(10 m)过大,分辨率不够(岩溶高度多为 2 m 以下);孔深 18.07~21.48 m 为泥灰岩、泥质白云岩,为低阻夹层,电性差异足够大(孔深 20.4~20.6 m 泥化夹层轻微渗水),深度也较浅,故物探反映效果较明显,物探显示低阻电性层上界面与钻探结果误差仅 0.9 m,电性剖面低阻反映与实际情况吻合。

表 5 兴义市某岩质滑坡勘查 WT04 线高密度电法温纳装置观测反演结果钻孔验证情况表
Table 5 Borehole verification of inversion results observed by high-density electrical wenner device on line WT04 of a rock landslide exploration in Xingyi city

验证 钻孔	地质背景			物探背景			滑面深度 (m)		误差 (m)	备注
	滑体	滑面	滑床	滑体	滑面	滑床	推测	实际		
ZK2	白云岩、 泥质白云 岩、灰岩、 泥灰岩	由泥晶、 泥灰岩、 粘土岩构 成,岩层 理面泥弱 化软 夹层	细晶 白云 岩、白 质岩、 灰岩、 泥 灰岩	高阻	低阻层上 界面(高、 低阻层交 界面)	中-高阻	17.2	20.4 (18.07 ~ 21.48 为 泥灰岩、 泥质白云 岩)	3.2	18.07 ~ 21.48 米 为泥灰岩、泥质白 云岩,为低阻夹层, 与剖面显示低阻电 性层上界面误差仅 0.9 m

5 结论及建议

(1)两类滑坡(土质、岩质)的滑体、滑面、滑床结构具有明显电性差异,应用高密度电法可以有效区分,电性特征上表现为明显的三层结构:高-低-高阻。

(2)滑面与软弱夹层或软弱面关系密切,由于电法勘探的“体积效应”影响,软弱夹层厚度在电性剖面上往往被放大,由电性结构层来确定滑面时应以软弱夹层上界面(即与潜在滑体接触面)来确定潜在滑面深度;两类物质(土质、岩质)的岩石滑坡地质体电性特征对比来看,土质滑坡地质体的软弱夹层反映在电性剖面特征上的“体积效应”更显著。

(3)有效区分滑体、滑面、滑床三层物质结构主要由物探方法的纵向分辨率决定,高密度电法几类常规装置中,温纳装置垂向分辨率较好,且相同极距情况下,信号强,抗干扰能力佳,比较适合在地电条件较差的滑坡勘查中使用,建议首选温纳装置测量。

(4)野外施工,建议严格采用 RTK 定位,点距首选 5 米,能兼具勘查效果和施工效率;10 m 点距分辨能力有限,物性差异不是足够大时将难以有效区分出滑体、滑面、滑床结构。

[参考文献]

陈龙,甘建军,王忠林. 2019. 高密度电法在灰岩区滑坡勘查中的

应用[J]. 四川地质学报,39(3):503-507.

傅良魁. 1990. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1-256.

冯泽涛,郎元强,周礼,等. 2019. 贵州省兴义市龙井村 9 组滑坡治理工程勘查报告[R]. 成都,兴义:成都理工学院东方岩土工程勘察公司、贵州省地矿局 109 地质大队.

贵州省地质环境监测院. 贵州地质灾害及其防治[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2009.

国土资源部. 全国地质灾害防治“十二五”规划[M]. 北京:国土资源部,2012.

吉海,杨森,等. 2021. 锦屏县平略镇讲略村中培脑滑坡地质灾害勘查报告[R]. 遵义:贵州省地矿局 102 地质大队.

廖全涛,王建军,李成香,等. 2006. 高密度电法在滑坡调查中的应用[J]. 资源环境与工程,20(4):430-431.

吕刚. 2016. 贵州重大地质灾害及影响因素分析[J]. 贵州地质,33(2):108-112.

李富,周洪福,葛华. 2019. 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,43(1):215-221.

吕东,邹凤钗,冷洋洋,等. 2021. 贵州省万山区地质灾害详细调查及风险评价设计书[R]. 贵阳:贵州省地质环境监测院.

麻秋景,黄会. 2009. 贵州省铜仁市地质灾害发育分布特征及形成条件浅析[J]. 贵州地质,26(2):154-159.

元星,许强,郑光,等. 2015. 降雨诱发顺层岩质及土质滑坡动态预警力学模型[J]. 灾害学,30(3):38-42.

熊炜,范文. 2014. 秦巴山区浅表层滑坡成灾规律研究[J]. 灾害学,29(1):228-233.

周杨,陈服军,陈桂珠. 2012. 高密度电法测深原理及应用实例[M]. 郑州:黄河水利出版社.

郑冰,李柳德,等. 2015. 高密度电法不同装置的探测效果对比[J]. 工程地球物理学报,1(12):33-39.

周杰,李坤鹏,张琦,等. 2018. 天然场源面波与高密度电法在地面塌陷勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报,15(4):530-537.

M. H. Loke, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, Earth Sciences, 1999, 8.

drilling, and the other means, 13 fluorite minerals (or mineralized) were delineated in the area. We initially ascertain the distribution range occurrence state, scale, quantity, change rules of these minerals, and estimate the prospective resources. Combined with the analysis of the mineralization geological conditions and ore formation laws, we deposit fellow three mineralization prospecting quarry areas of fluorite deposit: Wangmo Dayan, Wangmo Xinchun, and Wangmo Shichun. Applying the method of solid mineral resources prediction, a prediction model is established to predict the quantity of fluorite resources in these prospective areas. It is concluded that there are large potential to find fluorite resources in the prospecting area of Wangmo Dayan fluorite mine, Similarly, in Wangmo Xinchun prospecting area, there are also potential fluorite mineral resources and have great resource potential. However, in the Wangmo Shichun prospecting area, the mineralization probability is equal to or below 0.1, which means only has the basic conditions for the mineralization with a low chance.

[**Key Words**] Fluorite Mine; Geological Features; Mineralization prospects; Baoshu-Dayan area; Wangmo County; Guizhou

(上接第 429 页)

Anomaly Features Distinctions of Rock Slide in Different Material (Soil and Rock) by High Density Electrical Method

**LV Tian-jiang, CHEN Xian-tong, HUANG Qi-lin, SONG Qi-wen, YANG Hai-long,
SONG Shun-chang, CHEN De-jing, YANG Wu**

(Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[**Abstract**] Geophysical exploration methods are used in exploration has become a economic, fast and effective method. In this paper, from the understanding two kinds of typical landslide (I classes – earthiness landslides, II – rocky landslide) landslide structure, are analyzed from the points of view of property differences of sliding body, the electrical characteristics of slip surface and slip bed, illustrates the effectiveness of geophysical prospecting methods in landslide exploration; The general law of electrical response characteristics in landslide exploration is obtained by using high-density electrical method with different devices and different pole distances on a known landslide geological body, and the technical key points of high-density electrical method in landslide exploration and the principle of “sliding surface” interpretation are summarized. Finally, the case study of two typical landslides (soil and rock landslides) in Guizhou province shows that: The electrical response characteristics of rock landslide geological bodies of the two kinds of materials (soil and rock) have the same law, and there are obvious three layers of electrical structure layer (high-low-high resistance) corresponding to the sliding body, sliding surface and sliding bed respectively, but the “volume effect” reflected in the electrical profile characteristics of the soft interlayer of soil landslide geological bodies is more significant.

[**Key Words**] Electrical characteristics of landslide geological body; High density electrical method; Device; Volume effect; Principle of slippery surface interpretation