引文格式:郭长宝,邱振东,闫怡秋,等.基于高密度电法与微动探测的大型深层滑坡空间结构特征研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):207-223.DOI:10.13203/j.whugis20240219

Citation: GUO Changbao, QIU Zhendong, YAN Yiqiu, et al. Spatial Structural Characteristics of Large Deep-Seated Landslide Based on High-Density Electrical Resistivity and Microtremor Detection[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2):207-223.DOI:10.13203/j.whugis20240219

基于高密度电法与微动探测的大型深层滑坡空间结构特征研究

郭长宝[1,2,3] 邱振东[1] 闫怡秋[1] 李彩虹[1] 刘 贵[1,2,3]
张亚楠[1] 曹世超[1] 袁 浩[1]

1 中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081
2 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,北京,100081
3 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心,北京,100081

摘 要:青藏高原东部金沙江高山峡谷发育有众多大型深层滑坡,复杂的地形地质环境与强烈的构造地质活动塑造出该区滑坡多层次、多期次、多类型叠加的演化过程。然而,针对高山峡谷区大型深层滑坡空间结构特征的研究,目前仍是地质灾害调查与防灾减灾工作中的重点和难点。在金沙江流域巴塘县地巫乡段,分布着一系列大型深层滑坡,其中地巫乡滑坡变形显著,已实施村庄搬迁避让措施,但其深部结构特征仍不清晰。为进一步研究区域大型深层滑坡空间结构特征,综合采用现场调查、遥感解译、无人机激光探测与测距(light detection and ranging,LiDAR)航测、高密度电法和微动探测等多种技术,查明地巫乡滑坡空间发育特征。研究认为,地巫乡滑坡地表变形强烈,主要表现为拉张裂缝、挡墙开裂和下错陡坎等形式,滑坡区内共识别出152个次级滑坡;高密度电法结果显示,地巫乡滑坡整体呈低电阻率状态,局部区域呈现高电阻率状态;微动探测揭示了滑坡地层结构,可划分为浅表覆盖层、中-强风化基岩层和弱-未风化基岩层3层;综合两种物探手段的探测结果认为,该滑坡发育由2~3层滑带,滑带位置电阻率变化显著,多呈低阻状态,电阻率值为100~150 Ω·m,最大埋深可达70 m。两种方法探测结果一致性较高,所获滑体厚度相对误差在10%以内。基于建立的高山峡谷区大型深层滑坡空间结构探测的物探响应技术流程,可以较好地指导高山峡谷区大型深层滑坡的空间结构探测。

关键词:高密度电法;微动探测;大型深层滑坡;无人机;LiDAR;空间结构特征

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-01-10

DOI:10.13203/j.whugis20240219 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0207-17

Spatial Structural Characteristics of Large Deep-Seated Landslide Based on High-Density Electrical Resistivity and Microtremor Detection

GUO Changbao[1,2,3] *QIU Zhendong*[1] *YAN Yiqiu*[1] *LI Caihong*[1] *LIU Gui*[1,2,3]
ZHANG Ya'nan[1] *CAO Shichao*[1] *YUAN Hao*[1]

1 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China
2 Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resourses, Beijing 100081, China
3 Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China

Abstract: **Objectives**: Large deep-seated landslides are widely distributed in the alpine canyons of the Jinsha River in the eastern Tibetan Plateau, where complex terrain, geological conditions, and intense tectonic activity jointly control landslide formation and evolution. These landslides commonly exhibit multi-layered structures, multi-stage deformation, and superimposed failure processes, posing significant challenges

基金项目:国家自然科学基金(41877279);全国重大工程地质安全风险区划与综合评价(DD20221816)

第一作者:郭长宝,博士,研究员,从事工程地质与地质灾害调查研究。guochangbao@163.com

for geological hazard investigation and risk mitigation. Accurate identification of the spatial structural characteristics and the deep sliding zones of large deep-seated landslides in alpine canyone areas remains a key and difficult issue. In the Diwu town of Batang County along the Jinsha River, a series of large deep-seated landslides have developed, among which the Diwuxiang landslide exhibits intense deformation, necessitating the relocation of the village. However, the deep structural configuration and geometry of sliding zones of this landslide have not yet been clearly revealed. This paper aims to systematically characterize the spatial structure of the Diwuxiang landslide and to explore an effective integrated geophysical investigation framework for large deep-seated landslides in alpine canyon regions. **Methods:** To further investigate the spatial structural characteristics of large deep-seated landslides in this region, an integrated approach combining field surveys, remote sensing interpretation, LiDAR (light detection and ranging) aerial surveys, high-density electrical resistivity tomography, and microtremor survey method (MSM). The spatial development characteristics of the Diwuxiang landslide are employed interpreted through the combined analysis of these methods. **Results:** The results indicate that the surface deformation of the Diwuxiang landslide is intense, characterized by widespread tensile cracks, damaged retaining walls and steep scraps. A total of 152 secondary landslides are identified within the landslide area, indicating strong internal deformation and fragmentation. High-density electrical resistivity tomography reveals that the Diwuxiang landslide generally exhibits low resistivity, with some localized areas displaying high resistivity. The MSM indicate that the stratigraphy of the landslide can be divided into a shallow cover layer (150-550 m/s), a medium-strongly weathered bedrock layer (430-840 m/s), and a weakly to unweathered bedrock layer (630-930 m/s). Combining the results from the two geophysical methods, it is concluded that the Diwuxiang landslide develops 2-3 sliding zones, with significant variability in resistivity at these locations, generally displaying low resistivity values of 100-150 Ω·m. The maximum depth of the sliding zones can reach up to 70 m. The results obtained from the two geophysical methods are in good agreement, with the relative error in the revealed thickness of the sliding body being within 10%. **Conclusions:** The integrated application of high-density electrical resistivity tomography and microtremor survey methods effectively reveals the spatial structural characteristics and deep sliding zones of large deep-seated landslides in alpine canyon areas. Based on the established geophysical response-based investigation workflow provides a reliable and efficient technical approach for detecting the spatial structure of large deep-seated landslides in alpine canyon areas and offering important guidance for geological hazard assessment, monitoring, and disaster prevention in alpine canyon areas.

Key words: high-density electrical resistivity; microtremor survey method; large deep-seated landslide; unmanned aerial vehicle; LiDAR; spatial structural characteristics

青藏高原东缘是世界上地质条件最为复杂、构造活动最为强烈的地区之一,在断裂活动、强震、河流侵蚀、降雨入渗和人类工程活动等内外动力耦合作用下,区域内发育一系列大型深层滑坡[1-2]。大型深层滑坡是指滑体厚度超过25 m,体积大于1×10^6 m^{3}的滑坡,该类滑坡具有规模大、滑带深、结构复杂、危害严重等特点[3-7],如四川巴塘茶树山滑坡[8]、西藏贡觉雄巴滑坡[9-10]等,部分滑坡发生了蠕滑→剧滑状态转换,造成重大财产损失,如2018年7月甘肃舟曲县南峪乡江顶崖古滑坡发生复活,复活体积达$4.8\times10^6\sim5.5\times10^6$ m^3,导致国道G345线中断,滑坡堆积体堵塞河道,形成的堰塞湖淹没南峪村及南峪电站[11-12];2018年10月和11月,在金沙江波罗乡段白格村先后发生2次大型高位滑坡-堵江-溃坝灾害链事件,洪水冲毁下游多座桥梁和水电站,造成严重经济损失[13]。因此,关于大型深层滑坡空间结构发育特征及其成灾机理的研究,是目前青藏高原高山峡谷区地质灾害风险防范的重要研究内容。

目前对于金沙江、怒江和澜沧江等地形极为陡峻的高山峡谷区,主要采用遥感影像、无人机等开展大型滑坡的地面调查[14-16],采用高精度地球物理探测、工程地质钻探等技术来直接揭露大型滑坡地下空间结构[8,17]。随着高密度电法、电阻率层析成像、大地电磁测深等电法勘探技术的发展,物探技术已在滑坡滑体厚度、滑带深度、富

水性、裂缝延伸和断层展布等方面取得了重要研究进展[18-19];基于折射波法、反射波法、Rayleigh面波法(微动探测)等地震勘探技术可进一步查明孤石分布特征以及地层的分层情况[20-21]。文献[22-24]通过综合物探手段查明滑坡地下空间结构,再结合工程地质钻探和现场调查验证,判识了意大利Bosco Piccolo滑坡、中国西山村滑坡、日本Azue滑坡等大型深层蠕滑型滑坡的发育特征。但是,目前对于高山峡谷区大型深层滑坡空间结构的精准判识及其在物探上的响应特征等方面的研究有待进一步加强。同时考虑复杂地质地形条件下现场工作的强度,采用何种物探手段实现滑坡的精准探测,也是目前地质灾害研究中的难点。

金沙江上游是大型深层滑坡极为发育地段,如白格滑坡、雄巴滑坡、色拉滑坡、贡伙村滑坡、地巫乡滑坡等,这些滑坡正处于蠕滑状态,其中地巫乡滑坡地表合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)最大形变速率可达−80 mm/a[25-27],目前已对该区域的村庄进行了搬迁,但关于滑坡深层空间结构特征仍不清晰,防灾减灾还存在较大需求。因此,本文采用现场调查、高分辨率遥感解译、无人机激光探测与测距(light detection and ranging, LiDAR)航测等调查方法,查明了地巫乡滑坡平面形态与地表发育特征;采用高密度电法和微动测深等物探手段探明了地下深部空间结构特征,建立了高山峡谷区大型深层滑坡空间结构探测的物探响应技术流程;基于高分辨率遥感-无人机LiDAR-地面调查-物探提出了一种高山峡谷区大型深层滑坡“空天地深”一体化调查方法,可以经济高效地完成大型深层滑坡高精度调查,为地巫乡滑坡稳定性分析和变形趋势研究以及青藏高原高山峡谷区大型深层滑坡防灾减灾工作提供相关参考。

1　地质背景

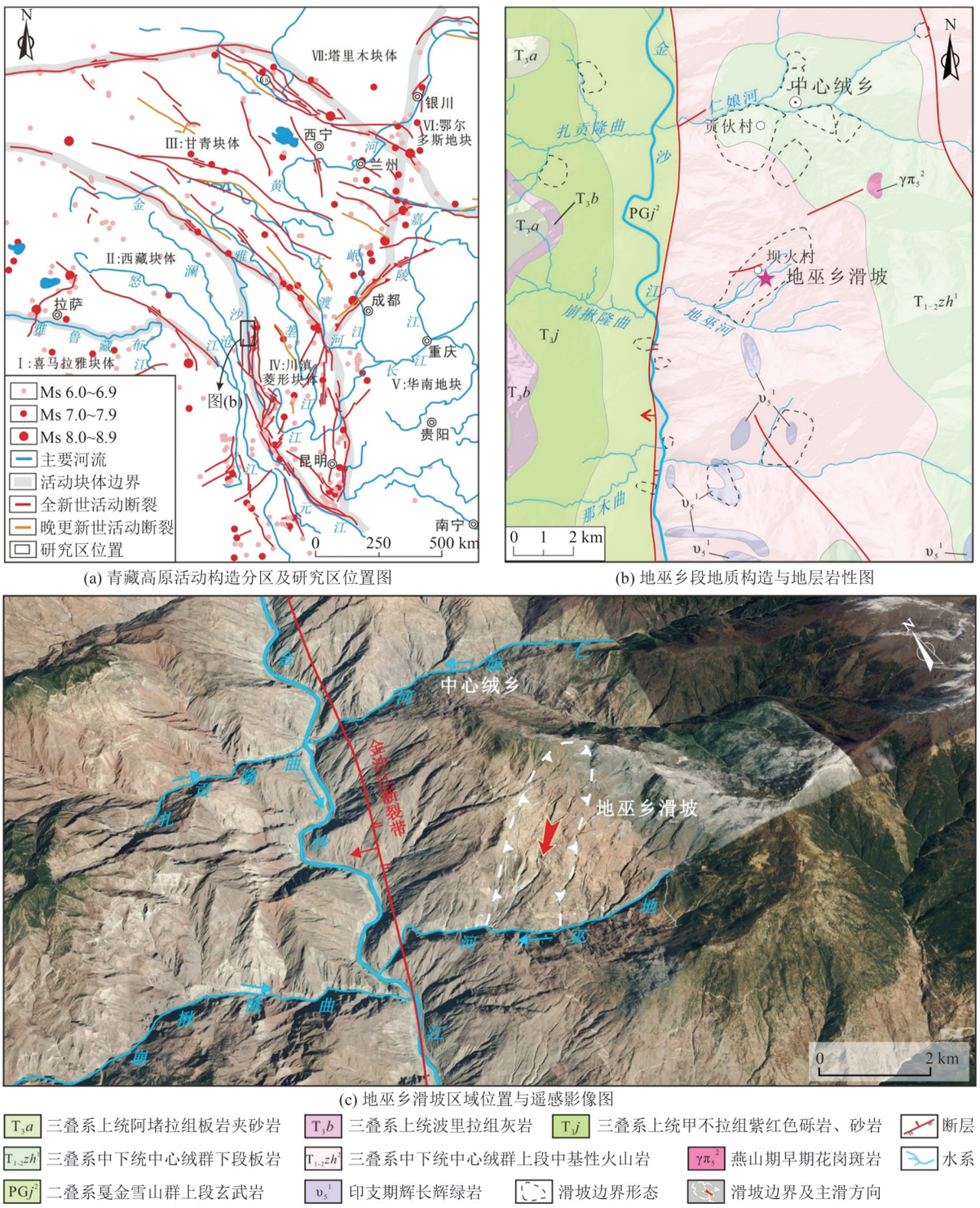
四川省巴塘县地巫乡滑坡位于金沙江上游支流地巫河的北岸,地理坐标为99°8′E、29°8′N(图1(a)、1(b))。在活跃的构造隆升作用与强烈的风化剥蚀作用下,河流侵蚀地貌、构造剥蚀地貌和冰蚀地貌等地貌类型极为发育,河谷狭窄深切,谷坡陡峻,多呈V字型。研究区内海拔一般为2 265～4 326 m,海拔最高可达4 464 m,海拔最低点为金沙江,海拔约2 255 m,极为险峻的高山峡谷地貌为滑坡的形成提供有利的地形条件。地巫乡滑坡位于金沙江干热河谷气候区,年均降雨约为400 mm,降雨多集中6月—9月,局地多暴雨,植被条件较差,水土流失严重;坡体上有农田耕种、灌溉水渠和开挖蓄水池等农业活动,滑坡前缘受地巫河侧蚀影响,进一步促进了滑坡的滑动变形。

地巫乡滑坡位于金沙江断裂带内,向西距离金沙江断裂带主断裂约3.0 km(图1(c)),曾大同断层和仁娘断层等次级断裂从滑坡周边穿越,金沙江断裂带在该段全新世活动性显著[28-29]。滑坡地层岩性复杂,表层为第四系松散堆积物,主要由残坡积、崩坡积、冲洪积等组成,以粉质粘土、碎块石土为主;下覆基岩主要为三叠系中下统中心绒群灰绿色中-基性火山岩、绿片岩夹灰黑色板岩,岩层总体产状为210°～240°∠38°～45°,其中片岩、板岩为构成滑坡体的主要岩性。受构造影响大,岩层挤压破碎,节理裂隙发育,同时存在岩浆侵入活动使地层发生蚀变,表部岩体风化程度较高,力学性质较差。根据《中国地震动峰值加速度区划图》(GB 18306—2015),区域地震动峰值加速度0.10 g,地震设防烈度为Ⅶ度,自1722年以来区内共发生9次震级Ms 5级以上地震,其中最大的一次是1870年Ms 7.5级巴塘地震[29],区内强烈的地震活动为滑坡的发生提供有利的动力条件。

2　研究方法

2.1　地质灾害调查

高分辨率遥感影像解译、无人机LiDAR测绘等技术手段在大型地质灾害调查上的应用成果较为成熟[30-31]。在地质灾害、活动断裂等已有调查研究资料的基础上,采用高分辨率遥感影像解译、无人机LiDAR测绘等技术手段,对地巫乡滑坡地表发育特征开展了现场调查。其中滑坡识别采用2.5 m分辨率的SPOT6光学遥感影像和立体相对进行遥感解译,在现场对地巫乡滑坡开展了无人机LiDAR航测,获取了0.2 m分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和0.1 m分辨率的数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)。重点对滑坡后缘、中部变形区和滑坡前缘等不同区域开展了现场地面调查,查明地巫乡滑坡地表变形发育特征,编制了滑坡平面图和剖面图,同时确定高密度电法剖面、微动勘探点的布设位置(图2)。



(a) 青藏高原活动构造分区及研究区位置图

(b) 地巫乡段地质构造与地层岩性图

(c) 地巫乡滑坡区域位置与遥感影像图

图1 四川省巴塘县地巫乡滑坡空间位置图

Fig. 1 Spatial Location Map of Diwuxiang Landslide in Batang County, Sichuan Province

2.2 高密度电法

2.2.1 高密度电法基本原理

高密度电法是一种阵列电阻率勘探方法[32],在传统电阻率法的基础上设置了较高密度的测点,通过电极向地下供电,形成人工电场,以地层岩性电阻率差异为基础,利用电场的分布与地下岩土介质的关系[33-34]。根据式(1)求得地下不同位置介质的视电阻率,获得地下介质视电阻率ρ_s的分布规律,并解译地下地质结构[35]。

$$\rho_s = \frac{K \cdot \Delta U}{I} \tag{1}$$

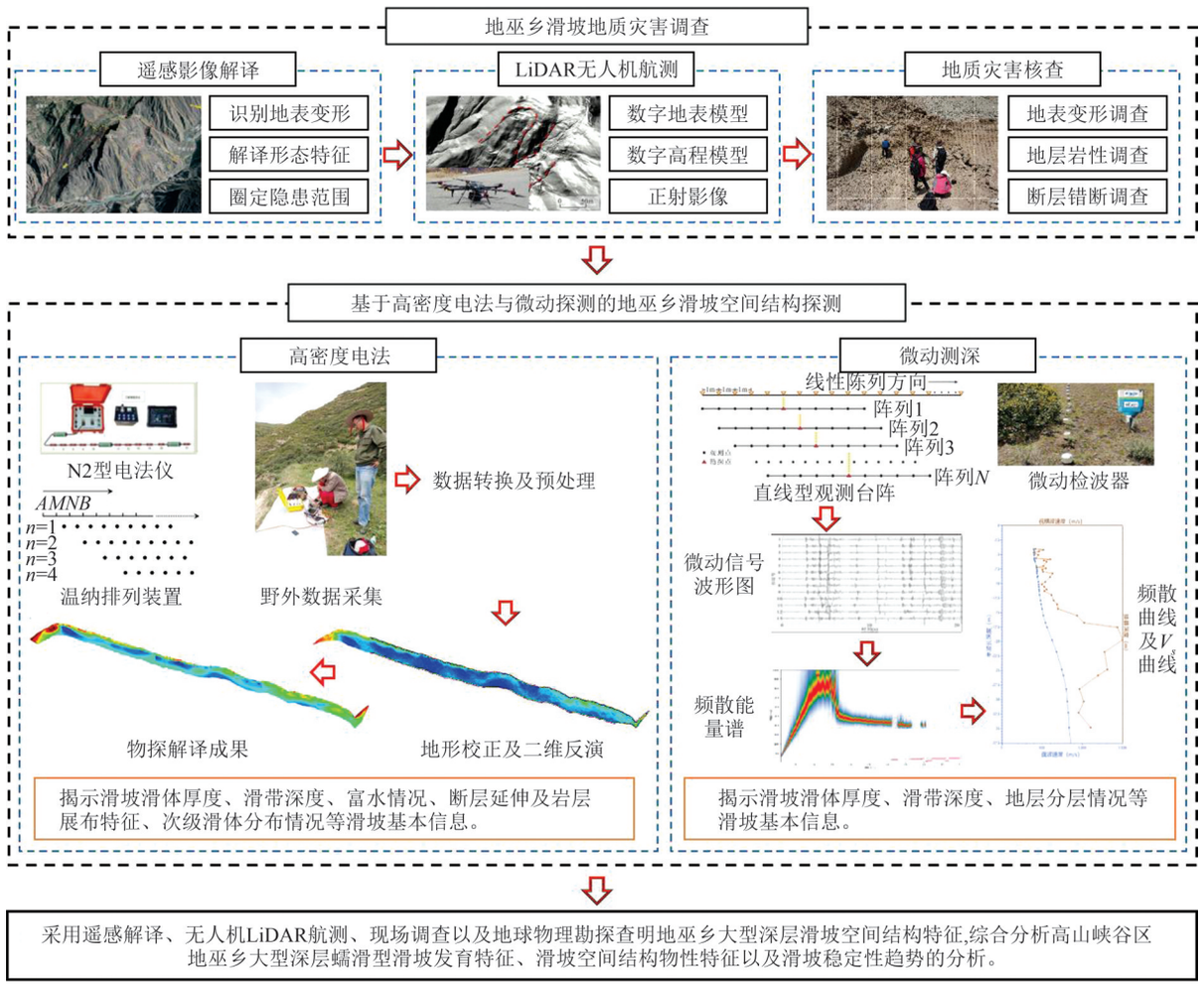


图 2　地巫乡滑坡“空天地深”一体化调查研究技术流程图

Fig. 2　Research Methodology Map of Integrated Investigation and Research on Remote Sensing, Geology Survey, and Deep Prospecting in Diwuxiang Landslide

$$K=\frac{2\pi}{\frac{1}{AM}-\frac{1}{AN}-\frac{1}{BM}+\frac{1}{BN}} \tag{2}$$

式中,K为温纳装置系数;ΔU为测量电极M、N之间电位差;I为人工电流;A、B为供电电极;AM、AN、BM、BN分别代表两电极之间的距离。

2.2.2　高密度电法数据采集及反演

高密度电法野外数据采集方式有温纳装置(α装置)、偶极装置(β装置)、微分装置(γ装置)等3种类型,其中温纳装置相对于其他两种装置抗干扰能力更强,且对垂向电性分界面反应更为灵敏[36],所以本次工作采用N2型电法仪,通过温纳排列装置进行现场数据的采集。温纳装置测量时,$AM=MN=NB=AB/3$,为一个电极间距,探测深度为$AB/3$,A、B、M、N同步向右移动,得到第一层深度的剖面线($n=1$);接着AM、MN、NB增大一个电极间距,A、B、M、N同步向右移动,得到第二层深度的剖面线($n=2$);依此类推,通过对地表不同部位人工电场的扫描测量,得到地下各点的视电阻率值(图2)。关于高密度电法数据的数据处理软件主要有瑞典Res2dinv反演软件[37]、Earthimage2D反演软件[38]、2.5维反演软件HDRMINV_YS_C[39]等,反演方法采用阻尼最小二乘法、准牛顿最优化非线性最小二乘法等。其中,中国地质大学开发的2.5维反演软件HDRMINV_YS_C反演成像结果分辨率高、探测精度准确,在俄寨村滑坡[40]、尕米寺滑坡[41]等地球物理探测中得到了广泛应用并取得良好效果,因此,本文对地巫乡滑坡的高密度电法反演采用该软件进行处理。

2.3　微动探测

2.3.1　微动探测基本原理

微动探测是指获取地球天然状态下的连续震动信号,是由文献[42-43]提出和发展的一种地球物理探测方法,目前在地质灾害调查、活动断裂探测、工程勘察中得到了广泛应用[44-45]。微动

信号包括面波和体波,其中面波能量占到总能量的70%[46]。微动探测依赖于面波中Rayleigh波的频散特性,即当Rayleigh波遇到不均匀介质时,其相速度会随频率的变化而变化。其基本原理是从野外采集的微动信号中提取出Rayleigh波的频散曲线,先通过反演得到横波波速,再根据横波波速来解译地下地质空间分布特征[47]。

2.3.2 微动探测数据采集及反演

微动探测从微动信号中提取频散曲线的方法有空间自相关法(spatial autocorrelation method,SPAC)[42]、频率波速法(frequency-wavenumber method,F-K)[43]、微动折射法(refraction microtremor method,ReMi)[48]、扩展空间自相关法(extended spatial autocorrelation method,ESPAC)[49]等。本文研究使用了A1-3C三分量微动仪,基于常用的SPAC布设直线型观测台阵(图2),观测台阵由33个检波器组成。数据采集之后,从微动信号中提取Rayleigh波频散曲线。定义$\rho(\omega,r)$为角频率的空间自相关系数,其计算式为:

$$\rho(\omega,r)=J_0(rk)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\mathrm{Re}\left[S_{ox}(\omega,r,\theta)\right]}{\sqrt{S_o(\omega)\cdot S_x(\omega,r,\theta)}}\mathrm{d}\theta \tag{3}$$

式中,ω为角频率;r为观测半径;$J_0(rk)$为第一类零阶Bessel函数;θ为面波入射角;k为波数;rk为宗量;$S_o(\omega)$、$S_x(\omega,r,\theta)$分别为在阵列圆心o处与圆周x上微动数据的功率谱;$S_{ox}(\omega,r,\theta)$是圆心处o和圆周上点x间互功率谱;Re[·]表示取复数的实部[50]。

获得ω值不同时的空间自相关系数,经过方位平均,然后与第一类零阶Bessel函数拟合,获得频率不同的Rayleigh波传播速度$c(\omega)$,进而获得Rayleigh波的频散曲线。Rayleigh波频散曲线的反演是典型的高度非线性、多参数、多极值的地球物理反演问题和最优化控制问题[51]。将提取的频散曲线采用阻尼最小二乘法反演得到相应的横波速度结构,结合现场调查结果,进而分析地下空间展布特征。

3 地巫乡滑坡发育特征与空间结构

3.1 地巫乡滑坡平面特征分析

地巫乡滑坡顶部高程为3 880 m,地巫河河面高程为2 776 m,滑坡前后缘相对高差1 114 m,整体平面形态呈长舌形(图3(a)),两侧以基岩、冲沟为界,滑坡纵长约3 800 m,横宽约1 330 m,滑坡堆积区平面面积为4.8×10^6 m^2,主滑方向为215°,地巫乡滑坡所在斜坡整体坡度约为20°~28°。

滑坡东西两侧边界清晰,西侧以基岩山脊为界,发育下错贯通的基岩侧壁,下错高度约2~20 m,擦痕清晰,野外调查发现滑坡西侧坡体发育纵向裂缝宽度约1.2~2.5 m(图3(b));东侧边界以冲沟为界,且局部地段有向冲沟内侧呈多级滑动迹象;后缘以山脊为界,前缘以地巫河为界;初步解译出①~⑤处中型以上次级滑坡(图3(a))。根据地巫乡滑坡的平面分布特征,可将其划分为滑坡后壁(Ⅰ)、中部变形区(Ⅱ)和前缘强变形区(Ⅲ)3个部分(图3(a))。

3.1.1 滑坡后壁(Ⅰ)

滑坡后壁主要位于滑坡体的顶部,分布高程主要为3 639~3 880 m,地形较缓,坡度一般为20°~25°,局部近35°。遥感解译和野外地质调查表明,滑坡后壁植被覆盖茂密,整体较稳定,通过无人机LiDAR剥除地表植被后,山体阴影结果显示,在滑坡北西侧发育次级滑坡⑤(图3(a)),其长约345 m,宽约180 m,高差约115 m,次级古滑坡后缘发育多级滑动陡坎,坎高约为12~15 m。

3.1.2 中部变形区(Ⅱ)

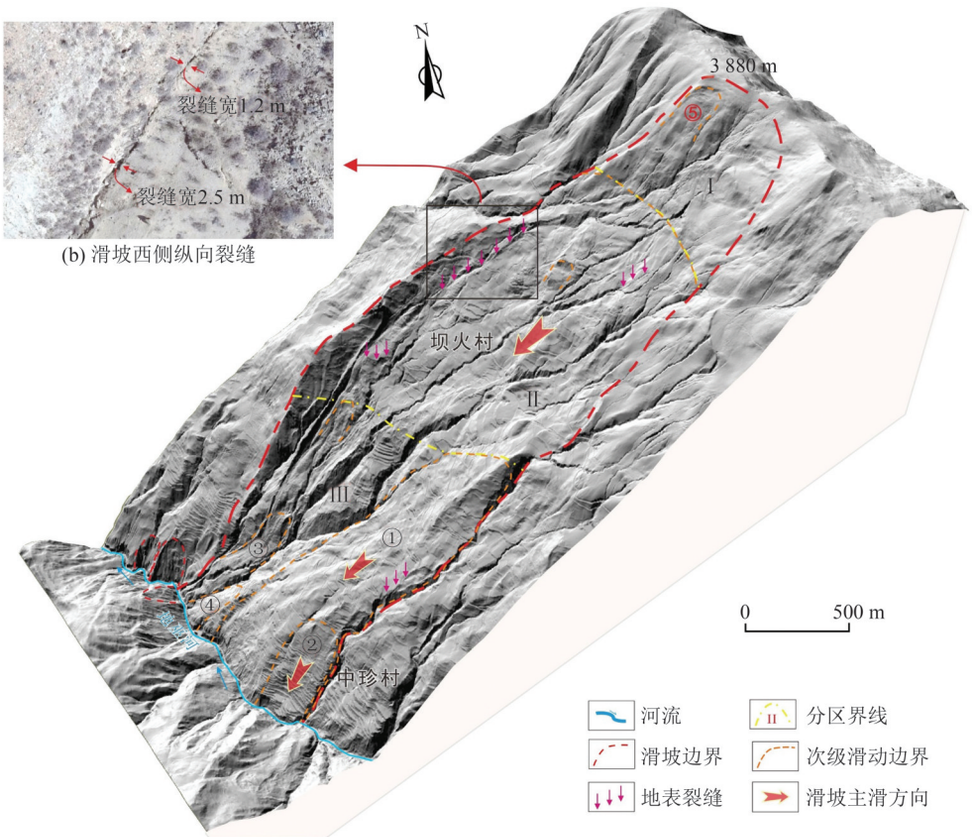
中部变形区地形较缓,主要分布在高程3 167~3 592 m范围内,汇水条件较好。该地区发育4条垂直于地巫河走向的竖向冲沟,如图4所示,其中V表示高差。中部变形区发育H1~H6多处次级滑坡和陡坎,最大陡坎高度为26 m(图4(a)~4(c))。因冲沟发育,地表变形呈现为局部下陷,坡体上挡土墙出现明显开裂、道路变形、拉张裂缝等现象(图5(a)~5(c))。

3.1.3 前缘强变形区(Ⅲ)

前缘强变形区位于滑坡堆积体前部,区内可见多级明显次级滑坡后壁,最大垂直下滑距离达42 m,次级滑坡后壁呈近陡倾弧形,滑塌或垮塌现象严重,形成高约28~42 m的下错陡坎(图4(d)),同时在前缘冲沟内发现滑坡滑带土出露,主要为粘土夹碎块石组成,整体呈流塑形态,但现场调查时滑带土含水率较低,滑带局部起伏变化不大(图5(d))。

3.2 地巫乡滑坡LiDAR影像解译分析

根据无人机LiDAR点云数据生成的高精度DEM(20 cm×20 cm)和DOM数据(10 cm×10 cm),识别地巫乡滑坡变形特征。发现地巫乡滑坡发育152处次级滑坡,次级滑体在光学影像上



(b) 滑坡西侧纵向裂缝

(a) 地巫乡滑坡三维地质模型

图 3　地巫乡滑坡无人机 LiDAR 影像解译图

Fig. 3　LiDAR Image Interpretation of Diwuxiang Landslide

呈灰白色,纹理较粗糙,而在 LiDAR 影像上次级滑体两侧边界轮廓清晰,如地巫乡滑坡后缘发育的次级滑坡⑤,通过山体阴影显示该区发生过明显的下错滑动迹象,坡体上存在多级滑动陡坎(图 6(a)),陡坎高约 12～15 m,而在光学影像上该区植被较发育,未见明显的变形特征(图 6(b));在坡体中部对大型拉张裂缝进行解译分析,LiDAR 影像上的裂缝迹象相对于光学影像特征清晰可见(图 6(c)、6(d))。由此说明 LiDAR 影像适用于复杂山区的解译工作。

基于高分辨率遥感影像和野外地质调查,对地巫乡滑坡表面发育拉裂缝位置、产状和发育特征等进行观测和统计,并投影至滑坡平面图中(图 7(a)),得到地巫乡滑坡地表裂缝玫瑰花图(图 7(b)),统计得到的地巫乡滑坡发育地表裂缝共 232 条,分析认为拉裂缝总体分布较为集中。其中,优势裂缝组走向主要为北东-南西方向,占总数的 18.5%。在这些优势拉张裂缝组中,最小宽度为 0.01 m,最大宽度为 0.2 m,延伸最长可达到 200 m。基于激光 LiDAR 测绘获取的 DEM 地形数据和光学影像数据,对解译的 152 处次级滑坡进行滑坡面积-频率密度统计分析(图 7(c)),结果显示地巫乡滑坡的次级滑坡面积主要集中于 100～400 m^2,以浅表层小型滑坡为主。

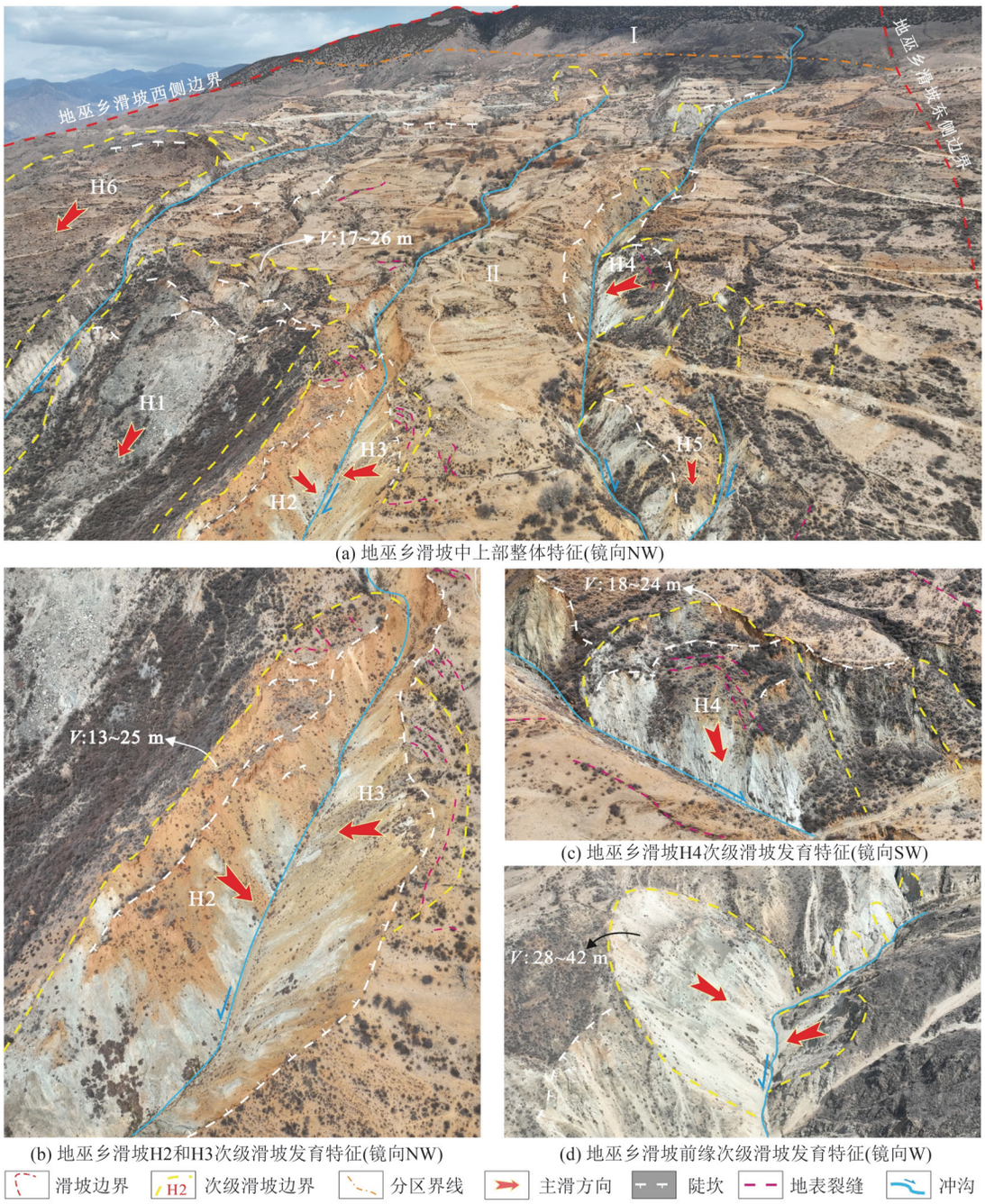
3.3　地巫乡滑坡地球物理特征分析

根据部署的 1 条高密度电法剖面 AA'、4 个微动勘探点 WD1～WD4 以及 2 个物性测试点 WX1～WX2(图 7(a)),综合分析地巫乡大型深层蠕滑型滑坡空间结构在地球物理技术上的响应特征。

3.3.1　地巫乡滑坡高密度电法响应特征分析

本文采用的高密度电法是通过地层岩性的电阻率差异来区分不同滑坡结构的展布情况,对于富水层、断层以及溶洞等特殊地质体的探测精度较高,但高密度电法对不同岩性探测的电阻率值差异较大,所以需要结合对区域上地质构造和地层岩性的充分认识,才能更符合实际情况,如文献[52]对 Xiashitang 滑坡和 Xiongwa 滑坡采用高密度电法圈定了滑坡滑带(＜10 Ω·m)、富水区(＜10 Ω·m)、基岩区(＞60 Ω·m);文献[8]对茶树山滑坡通过高密度电法划分出了滑体厚约为 30 m,滑体与基岩出电阻率差异明显,分界处推断为滑带,厚度 0.4～1.1 m。

本次从野外采集的数据可初步观测到滑坡整体的视电阻率剖面结果,滑坡滑体、滑带及基



(a) 地巫乡滑坡中上部整体特征(镜向NW)

(b) 地巫乡滑坡H2和H3次级滑坡发育特征(镜向NW)

(c) 地巫乡滑坡H4次级滑坡发育特征(镜向SW)

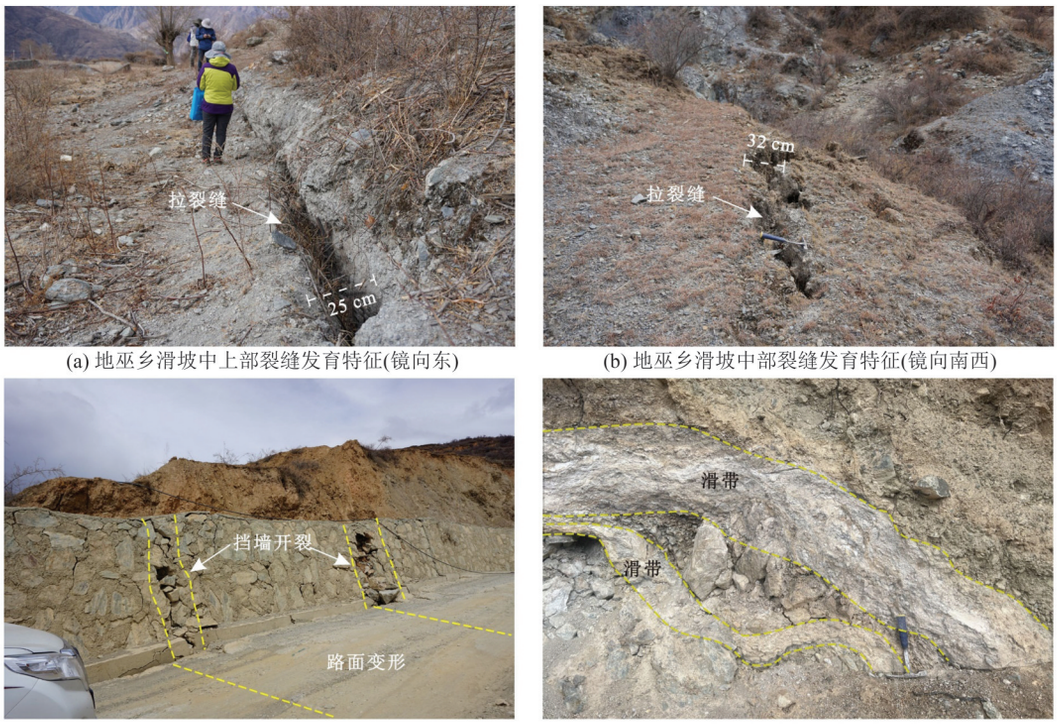
(d) 地巫乡滑坡前缘次级滑坡发育特征(镜向W)

图4 地巫乡滑坡发育特征图

Fig. 4 Characteristics Development of Diwuxiang Landslide

岩电阻率差异较为明显,但该结果精度不高、误差较大(图8(a))。为提高可靠性,使用中国地质大学2.5维反演软件对视电阻率数据进一步处理,得到分辨率较高、误差较小的反演结果剖面(图8(b))。

从反演结果中可以看出滑坡整体呈低阻状态,局部区域呈现高阻状态,高低电阻差异界面,推测为潜在滑带位置。通过现场物性测试结果,获得滑坡区域主要地层岩性电阻率参数(表1),用以解译滑坡各组成物质的发育特征。通过高密度电法解译,该滑坡可初步分为两个次级滑体,滑坡中后部滑体厚度约25~30 m,滑坡前缘堆积区滑体厚度约50~70 m。基岩岩性为灰绿色中-基性火山岩(绿片岩)夹灰黑色碳质板岩,呈低电阻特征,电阻率值为20~100 Ω·m。滑坡前部滑体是本次调查过程中地表变形较为明显的区域,该部分滑体整体呈高阻状态,电阻率在70~1 800 Ω·m之间,堆积体中含有大范围碎块石堆积区(300~600 Ω·m)、孤石(500~1 800 Ω·m)以及富水区(50~90 Ω·m);滑体与基岩分界处可见明显电阻率差异,推测为滑带位置,滑带电阻率值为100~150 Ω·m(图8(c))。

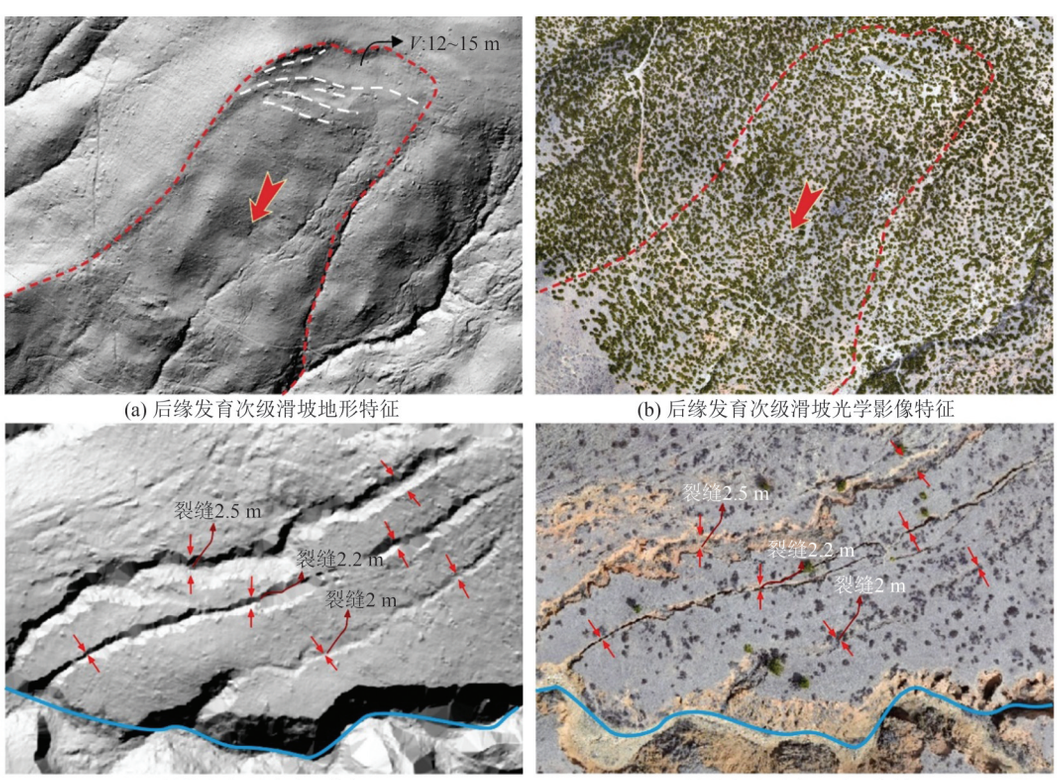


(a) 地巫乡滑坡中上部裂缝发育特征(镜向东)　(b) 地巫乡滑坡中部裂缝发育特征(镜向南西)

(c) 地巫乡滑坡中部变形特征(镜向南西)　(d) 地巫乡滑坡前缘出露滑带(镜向南西)

图 5　地巫乡滑坡典型区域地表变形特征图

Fig. 5　Surface Deformation Characteristics Map of Typical Areas in Diwuxiang Landslide



(a) 后缘发育次级滑坡地形特征　(b) 后缘发育次级滑坡光学影像特征

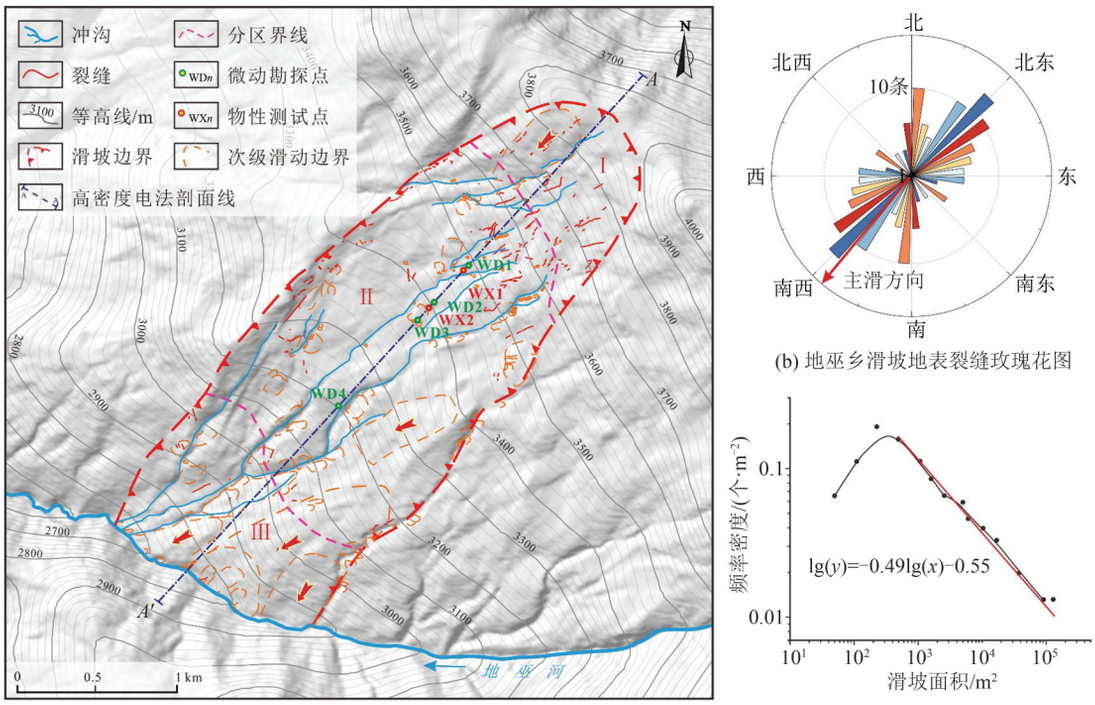
(c) 坡体发育裂缝地形特征　(d) 坡体发育裂缝光学影像特征

图 6　地巫乡滑坡 LiDAR 与光学影像对比特征

Fig. 6　Comparative Characteristics of LiDAR and Optical Images of Diwuxiang Landslide

3.3.2　地巫乡滑坡微动测深响应特征

微动勘探侧向于地层结构的划分,且对于浅表覆盖层的识别精度较高[24, 44]。文献[24]采用面波勘探手段,根据反演的横波速度特征将地层划分为碎石土层、强风化基岩层、未风化基岩层;文献[44]采用微动勘探对土石混合滑坡体进行



(a) 地巫乡滑坡工程地质平面图　(b) 地巫乡滑坡地表裂缝玫瑰花图　(c) 地巫乡次级滑坡幂律分布曲线图

图7　地巫乡滑坡物探布置平面图及地表裂缝发育特征

Fig. 7　Geophysical Layout and Surface Cracks Development Characteristics of Diwuxiang Landslide

探测,划分出滑体中孤石的分布以及各分界层的位置。

因此,本次将微动勘探点WD1、WD2、WD3布置在滑坡中部变形区(Ⅱ),WD4布置在滑坡前缘强变形区(Ⅲ)(图7(a)、图8(b))。对各微动勘探点的微动信号进行处理得到相应的频散能量谱(图9(a)、9(d)、9(g)、9(j)),拾取频散曲线(图9(b)、9(e)、9(h)、9(k)),并反演横波速度(图9(c)、9(f)、9(i)、9(l)),从各勘探点横波速度反演结构图中,可初步将地层划分为3层:浅表覆盖层、中-强风化基岩层、弱-未风化基岩层。

1)WD1微动勘探点解译WD1探测覆盖层波速为220~430 m/s,厚度为25.2 m,高密度电法在该位置揭示的覆盖层厚度为26.3 m,相对误差为4.3%;中-强风化基岩层波速为430~630 m/s,厚度为20.3 m,地下埋深在25.2~40.5 m处;弱-未风化基岩层波速630~700 m/s,厚度为54.5 m,地下埋深在40.5~95.0 m(图9(c))。

2)WD2微动勘探点解译WD2探测覆盖层波速为180~510 m/s,厚度为33.5 m,高密度电法在该位置揭示的覆盖层厚度为33.0 m,相对误差为1.5%;中-强风化基岩层波速为510~720 m/s,厚度为14.7 m,地下埋深在33.5~48.2 m处,弱-未风化基岩层波速720~900 m/s,厚度为40.8 m,地下埋深在48.2~89.0 m(图9(f))。

3)WD3微动勘探点解译WD3探测覆盖层波速为180~510 m/s,厚度为22.7 m,高密度电法在该位置揭示的覆盖层厚度为21.0 m,相对误差为8.1%;中-强风化基岩层波速为510~840 m/s,厚度为39.4 m,地下埋深在22.7~62.1 m处;弱-未风化基岩层波速840~930 m/s,厚度为37.9 m,地下埋深在62.1~100.0 m(图9(i))。

4)WD4微动勘探点解译WD4探测覆盖层波速为150~550 m/s,厚度为47.8 m,高密度电法在该位置揭示的覆盖层厚度为50.7 m,相对误差为6.1%;中-强风化基岩层波速为550~690 m/s,厚度为21.7 m,地下埋深在47.8~68.9 m处,弱-未风化基岩层波速690~830 m/s,厚度为42.1 m,地下埋深在68.9~111.0 m(图9(l))。

综合以上微动勘探点的解译分析,各微动勘探点划分地层的厚度不等、滑带地下埋深不均,在浅表覆盖层和基岩层分界处波速逐渐增大,推测该分界处为滑带所处位置,滑带埋深分别为25.2 m(WD1)、33.5 m(WD2)、22.7 m(WD3)、47.8 m(WD4),所揭示出的滑带深度、滑体厚度与高密度电法结果一致性较好,相对误差在10%以内,进一步验证了高密度电法所揭露的地巫乡滑坡空间结构的准确性。

3.4　地巫乡滑坡空间结构特征分析

本文通过高密度电法和微动探测两种物探手段,以横波速度结构变化特征来进行地层分层,以

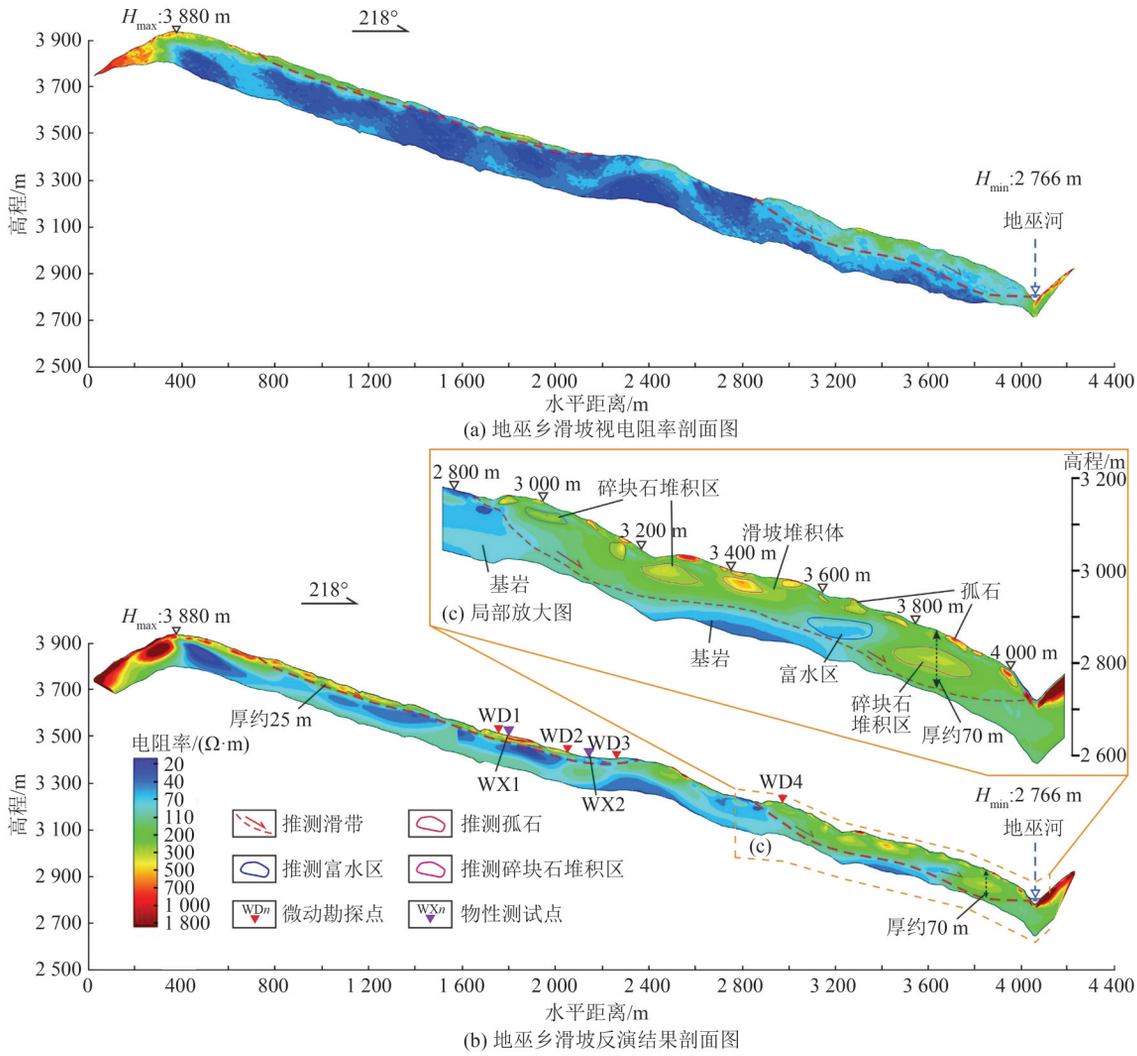


图 8　地巫乡滑坡高密度电法反演结果解译图

Fig. 8　High Density Electrical Resistivity Inversion Results Interpretation Map of Diwuxiang Landslide

表 1　地巫乡滑坡主要地层岩性电阻率参数统计表/(Ω·m)

Table 1　Statistical Table of Main Formation Lithology Resistivity Parameters of Diwuxiang Landslide/(Ω·m)

名称	碎石土	块石土	绿片岩	碳质板岩	板岩
电阻率	120～1 690	920～1 820	415～1 230	96～254	311～580

电阻率差异性来圈定滑体中各种成物质以及滑带位置,分析了地巫乡滑坡空间结构的物性响应特征(图 10),基岩岩性为灰绿色中-基性火山岩(绿片岩)夹灰黑色碳质板岩,呈低阻状态,滑体中含有大量的碎块石堆积体以及孤石分布,呈高阻状态,局部富水区呈低阻状态,滑体与基岩电阻率差异较大,分界之处推测为滑带位置;地层结构划分为横波速度较低的覆盖层滑体、横波速度中等的强-中风化基岩层、横波速度较高的弱-中风化基岩层。高密度电法解译滑坡发育两个次级滑体,分布在滑坡中后部与前部,中后部滑体厚度较浅,约 25～30 m,该部分滑体结构简单,主要由碎块石土组成;前部滑体厚度较深,约 50～70 m,该部分滑体结构复杂,由孤石、碎块石堆积区、富水区、粉质黏土等组成。根据现场调查的结果以及区域基础地质资料,该滑坡位于背斜构造内,滑坡前缘测量产状为 278°∠45°,滑坡后缘测量产状为 33°∠57°,对物探解译结果进行深入分析与完善,综合分析得到地巫乡大型深层蠕滑型滑坡的空间结构特征,并编绘了地巫乡工程地质剖面特征,其中 $F1$、$F2$ 是滑坡的两条断层(图 11)。

研究认为大型深层滑坡滑体厚度不等、滑带埋深不均,滑体最大厚度可达 70 m,且滑带所处位置为电阻率变化差异较大,多呈低阻状态,横波波速变化明显;深层滑体物质组成复杂,碎块石集中堆积成区、较大的孤石分布广泛,多呈高电阻特征,横波速度呈低速状态,但波速区间内变化频繁;同时,深层滑坡基岩埋深较大,电阻率

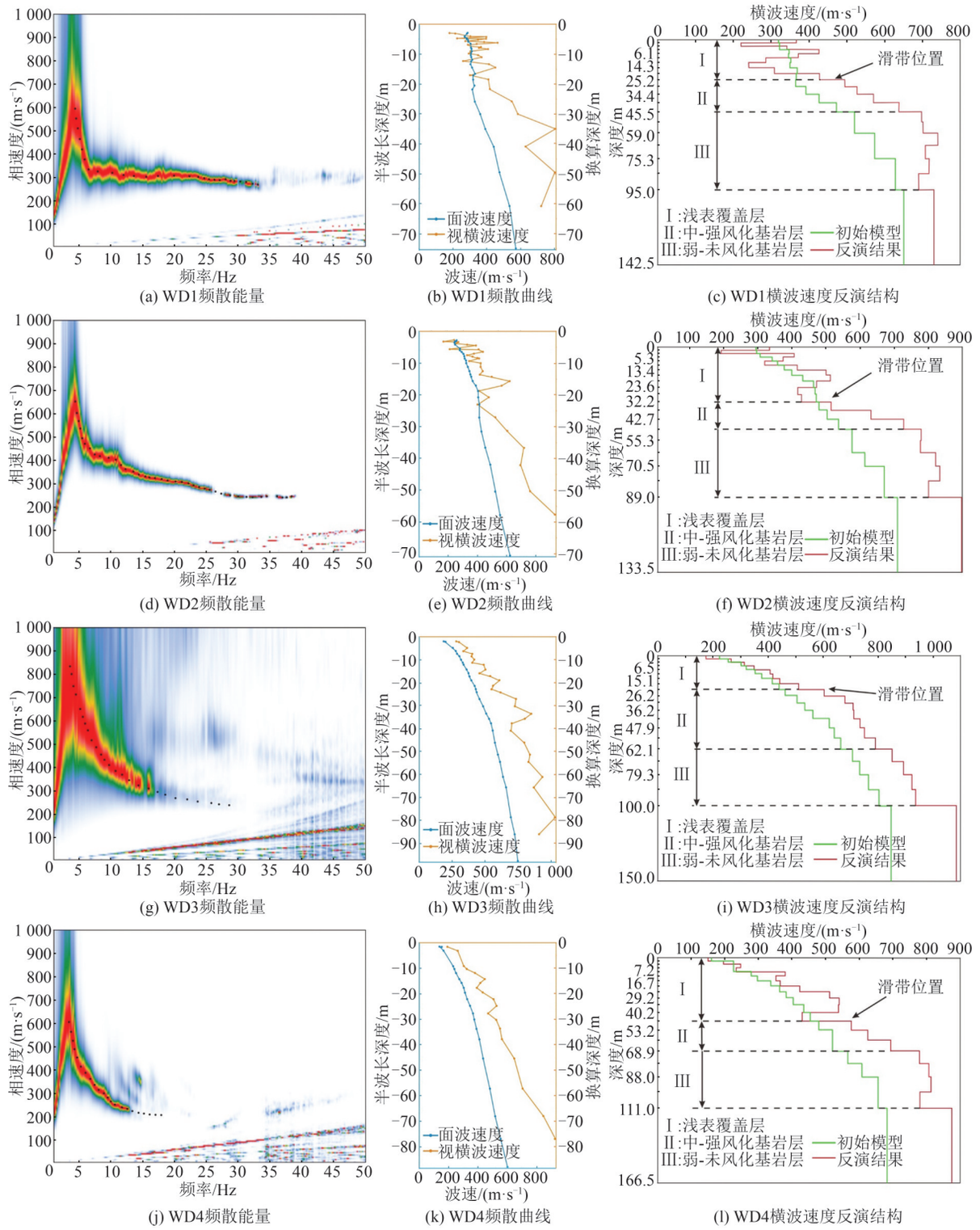


图9 地巫乡滑坡微动探测反演结果图

Fig. 9 MSM Inversion Results of Diwuxiang Landslide

变化特征稳定,横波速度变化趋于稳定。

3.5 地巫乡滑坡稳定性与发展趋势分析

大型深层蠕滑型滑坡的发生是在内外地质作用影响下,滑坡大规模失稳滑动并产生严重危害[53-56],而对于该类滑坡蠕滑变形和滑坡稳定性的研究也是地质灾害防灾减灾科技攻关的热点,在青藏高原高山峡谷区对于大型深层蠕滑型滑坡已开展大量研究,如文献[54-56]从遥感解译、InSAR变形监测、工程地质钻探以及物探等多方面探究大型深层滑坡的空间结构特征与变形特征,但并未从空间结构的角度详细地分析高山峡谷区大型深层滑坡空间结构在物探上的响应特

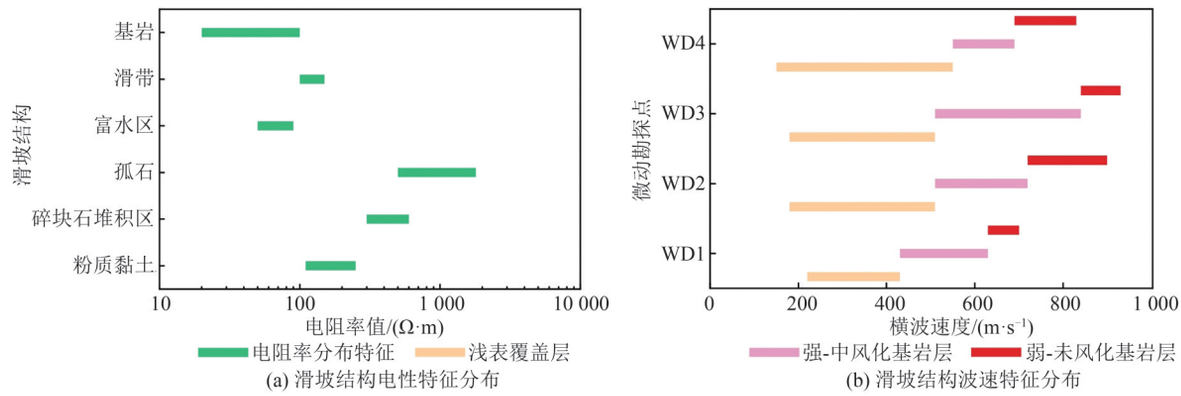


图 10　地巫乡滑坡物性特征分布图

Fig. 10　Physical Characteristics of Diwuxiang Landslide

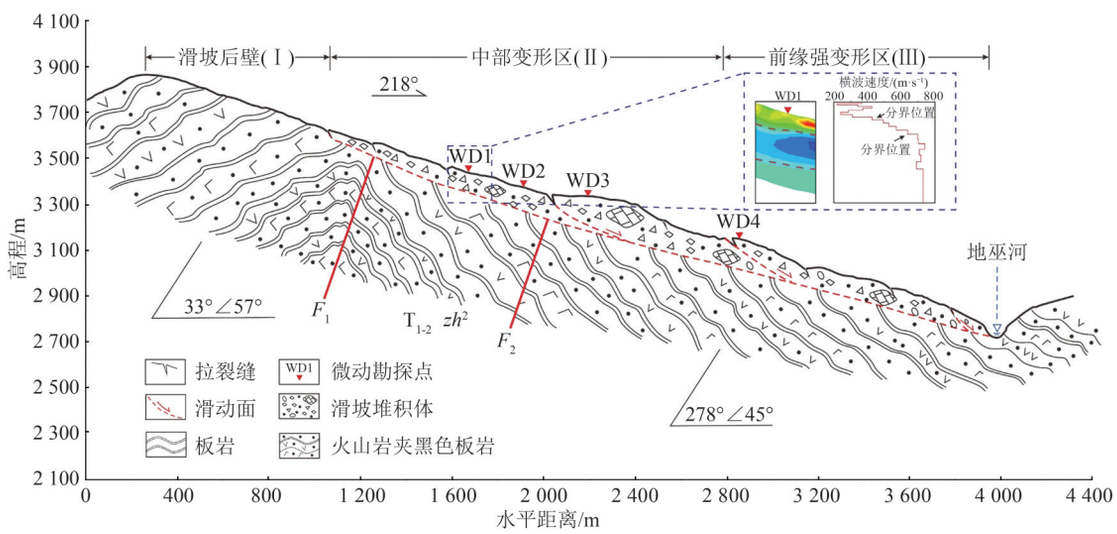


图 11　地巫乡滑坡工程地质剖面图

Fig. 11　Engineering Geological Section Profile of Diwuxiang Landslide

征。本文通过对地巫乡滑坡物探结果的详细解译,划分了滑坡体的地层结构,前缘堆积体最大厚度可达 70 m,为滑坡滑动提供了丰富的物源,且堆积体中解译出的碎块石堆积区、滑带等区域可能成为降雨入渗的优势通道,促进滑坡失稳滑动。结合已有文献对研究区段 InSAR 变形监测的分析,发现地巫乡滑坡蠕滑变形特征强烈,InSAR 监测结果显示滑坡最大形变速率可达 −80 mm/a[25-27],与现场调查发现地表变形迹象相一致,多发育冲沟、裂缝;且滑坡整体受深切强烈和地势陡峻的地形条件、河流侵蚀和季节性持续降雨等气象水文条件,以及区域内断裂活动诱发的强震作用提供的动力条件等多因素控制作用下,滑坡可能发生失稳滑动,并可能堵塞前缘地巫河。

4　结　语

本文以青藏高原东部金沙江上游高山峡谷区地巫乡大型深层蠕滑型滑坡为研究对象,通过采用遥感解译、无人机 LiDAR 航测、现场调查和地球物理勘探等工作方法进行滑坡空间结构发育特征研究,得到如下主要结论和认识:

1)本文创新提出了以地表高精度平面调查、地下精细化结构分析为一体的高分辨率遥感-无人机 LiDAR-地面调查-物探多源数据调查技术,完善和解决了在调查过程中对大型深层滑坡复杂空间结构认识不足、调查精度不高等问题。地巫乡滑坡为一大型深层蠕滑型滑坡,在空间上可划分为滑坡后壁(Ⅰ)、中部变形区(Ⅱ)和前缘强变形区(Ⅲ)3个区域,基于激光 LiDAR 测绘获取的 DEM 地形数据和光学影像数据,共解译出 152 处次级滑坡,且以浅表层小型滑坡为主。

2)地巫乡滑坡整体呈低电阻率状态,局部区域呈现高电阻率状态,滑坡滑体厚度不等、滑带埋深不均。滑坡滑体物质组成复杂,含有大范围的碎块石堆积区(300～600 Ω·m)、孤石(500～

1800 Ω·m)以及富水区(50～90 Ω·m);滑带所处位置为电阻率变化差异较大,多呈低阻状态,电阻率值为100～150 Ω·m;基岩岩性为灰绿色中-基性火山岩(绿片岩)夹灰黑色碳质板岩,呈稳定的低电阻特征,电阻率值为20～100 Ω·m。

3)地巫乡滑坡地层结构可划分为3层:浅表覆盖层、中-强风化基岩层、弱-未风化基岩层。浅表覆盖层横波速度呈低速状态,波速变化在150～550 m/s之间,横波波速变化不稳定;中-强风化基岩层横波速度呈中-高速状态,波速变化在430～840 m/s之间,横波速度稳定增加;弱-未风化基岩层横波速度呈高速状态,波速变化在630～930 m/s之间,横波速度趋于稳定。

4)4个微动勘探点所揭示的滑坡滑体分别为25.2 m、33.5 m、22.7 m、47.8 m,对应高密度电法所揭示的滑体厚度分别为26.3 m、33.0 m、21.0 m、50.7 m,两者相对误差分别为4.3%、1.5%、8.1%、6.1%,说明高密度电法和微动探测所揭示的滑带深度、滑体厚度一致性较好,进一步证明了高密度电法在滑坡整体上所揭示空间结构的准确性。

5)地巫乡滑坡蠕滑变形特征强烈,次级滑动、拉张裂缝等地表变形迹象明显,滑坡长期受区域断裂活动、河流侵蚀、季节性持续降雨等多方面耦合作用下,滑坡可能失稳滑动-堵塞地巫河等风险。

致谢:本文工作的野外无人机LiDAR测绘得到了深圳飞马机器人科技有限公司(天津)邵景程工程师的技术指导;野外地球物理勘探和数据处理得到了成都蓝天信息工程有限公司张国华高级工程师和毕志刚工程师的指导和帮助;中国地质大学(北京)倪嘉伟硕士研究生、陈文凯硕士研究生和靳峰硕士研究生参加了部分野外调查、数据处理和图件绘制工作,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

[1] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443-450.
HUANG Runqiu. Mechanism of Large Scale Landslides in Western China[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(3): 443-450.

[2] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究: 以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827-841.
YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Long Runout Geological Disaster Initiated by the Ridge-Top Rockslide in a Strong Earthquake Area: A Case Study of the Xinmo Landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2017, 44(5): 827-841.

[3] 闫开云, 李江, 许强, 等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征: 以垮梁子滑坡为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(7): 1404-1414.
YAN Kaiyun, LI Jiang, XU Qiang, et al. Accurate Interpretation of Four-Dimensional Characteristics of Red-Bed Rock Landslide by Comprehensive Remote Sensing: Taking Kualiangzi Landslide as an Example[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(7): 1404-1414.

[4] 戴可人, 许强, 邓晋, 等. 滑坡隐患InSAR广域识别研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(8): 1469-1482.
DAI Keren, XU Qiang, DENG Jin, et al. Review on Large-Scale Identification of Potential Landslides with InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(8): 1469-1482.

[5] 张永双, 刘筱怡, 吴瑞安, 等. 青藏高原东缘深切河谷区古滑坡: 判识、特征、时代与演化[J]. 地学前缘, 2021, 28(2): 94-105.
ZHANG Yongshuang, LIU Xiaoyi, WU Ruian, et al. Cognization, Characteristics, Age and Evolution of the Ancient Landslides Along the Deep-Cut Valleys on the Eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 94-105.

[6] 郭长宝, 闫怡秋, 张永双, 等. 青藏高原大型深层蠕滑型滑坡变形机制研究进展与展望[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3677-3700.
GUO Changbao, YAN Yiqiu, ZHANG Yongshuang, et al. Research Progress and Prospect of Failure Mechanism of Large Deep-Seated Creeping Landslides in Tibetan Plateau, China[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3677-3700.

[7] 陈博, 宋闯, 李振洪, 等. 四川筠连县金坪村滑坡灾前地貌变化和形变特征研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2154-2162.
CHEN Bo, SONG Chuang, LI Zhenhong, et al. Pre-Failure Deformation Mechanism and Geomorphological Change of the Jinpingcun Landslide, Junlian, Sichuan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2154-2162.

[8] ZHANG Y S, REN S S, LIU X Y, et al. Reactivation Mechanism of Old Landslide Triggered by Coupling of Fault Creep and Water Infiltration: A Case Study from the East Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(8): 291.

[9] GUO C B, YAN Y Q, ZHANG Y S, et al. Study

on the Creep-Sliding Mechanism of the Giant Xiongba Ancient Landslide Based on the SBAS-InSAR Method, Tibetan Plateau, China [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3365.

[10] 闫怡秋, 郭长宝, 张永双, 等. 基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J]. 地质学报, 2021, 95(11): 3556-3570.
YAN Yiqiu, GUO Changbao, ZHANG Yongshuang, et al. Study of the Deformation Characteristics of the Xiongba Ancient Landslide Based on SBAS-InSAR Method, Tibet, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(11): 3556-3570.

[11] GUO C B, ZHANG Y S, LI X, et al. Reactivation of Giant Jiangdingya Ancient Landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(1): 179-190.

[12] REN S S, ZHANG Y S, XU N X, et al. Mobilized Strength of Gravelly Sliding Zone Soil in Reactivated Landslide: A Case Study of a Giant Landslide in the North-Eastern Margin of Tibet Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(12): 434.

[13] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on Octorber 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534-1551.

[14] XU Q, ZHAO B, DAI K R, et al. Remote Sensing for Landslide Investigations: A Progress Report from China[J]. *Engineering Geology*, 2023, 321: 107156.

[15] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342-1354.
LU Huiyan, LI Weile, XU Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354.

[16] 付豪, 李为乐, 陆会燕, 等. 基于"三查"体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 734-746.
FU Hao, LI Weile, LU Huiyan, et al. Early Detection and Monitoring of Potential Landslides in Danba County Based on the Space-Air-Ground Investigation System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 734-746.

[17] 盛敏汉, 储日升, 危自根, 等. 基于被动源地震学方法的四川理县西山村滑坡结构与变形研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 870-878.
SHENG Minhan, CHU Risheng, WEI Zigen, et al. Review of Structure and Deformation Characteristics of the Xishancun Landslide Obtained by Passive Seismic Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(6): 870-878.

[18] YANG X H, JIANG Y W, ZHU J C, et al. Deformation Characteristics and Failure Mechanism of the Moli Landslide in Guoye Town, Zhouqu County [J]. *Landslides*, 2023, 20(4): 789-800.

[19] 郭长宝, 吴瑞安, 李雪, 等. 川西日扎潜在巨型岩质滑坡发育特征与形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 772-783.
GUO Changbao, WU Ruian, LI Xue, et al. Developmental Characteristics and Formation Mechanism of the Rizha Potential Giant Rock Landslide, Western Sichuan Province, China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 772-783.

[20] XU P F, LING S Q, LONG G, et al. ESPAC-Based 2D Mini-Array Microtremor Method and Its Application in Urban Rail Transit Construction Planning[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115: 104070.

[21] 杜亚楠, 徐佩芬, 凌甦群. 土石混合滑坡体微动探测: 以衡阳拜殿乡滑坡体为例[J]. 地球物理学报, 2018, 61(4): 1596-1604.
DU Ya'nan, XU Peifen, LING Suqun. Microtremor Survey of Soil-Rock Mixture Landslides: An Example of Baidian Township, Hengyang City [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(4): 1596-1604.

[22] NAUDET V, LAZZARI M, PERRONE A, et al. Integrated Geophysical and Geomorphological Approach to Investigate the Snowmelt-Triggered Landslide of Bosco Piccolo Village (Basilicata, Southern Italy)[J]. *Engineering Geology*, 2008, 98(3/4): 156-167.

[23] SU L J, XU X Q, GENG X Y, et al. An Integrated Geophysical Approach for Investigating Hydro-Geological Characteristics of a Debris Landslide in the Wenchuan Earthquake Area[J]. *Engineering Geology*, 2017, 219: 52-63.

[24] MA N, WANG G H, KAMAI T, et al. Amplification of Seismic Response of a Large Deep-Seated Landslide in Tokushima, Japan [J]. *Engineering*

Geology, 2019, 249: 218-234.

[25] CHEN X M, YAO X, ZHOU Z K, et al. DRS-UNet: A Deep Semantic Segmentation Network for the Recognition of Active Landslides from InSAR Imagery in the Three Rivers Region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1848.

[26] 姚鑫, 邓建辉, 刘星洪, 等. 青藏高原泛三江并流区活动性滑坡InSAR初步识别与发育规律分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 16-37.
YAO Xin, DENG Jianhui, LIU Xinghong, et al. Primary Recognition of Active Landslides and Development Rule Analysis for Pan Three-River-Parallel Territory of Tibet Plateau[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(5): 16-37.

[27] 杨成生, 董继红, 朱赛楠, 等. 金沙江结合带巴塘段滑坡群InSAR探测识别与形变特征[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(2): 398-408.
YANG Chengsheng, DONG Jihong, ZHU Sainan, et al. Detection, Identification and Deformation Characteristics of Landslide Groups by InSAR in Batang Section of Jinsha River Convergence Zone, China[J]. *Journal of Earch Sciences and Environment*, 2021, 43(2): 398-408.

[28] 祝意青, 赵云峰, 隗寿春, 等. 2022年青海门源Ms 6.9和四川泸定Ms 6.8地震震中的精准判定及思考[J]. 地震地质, 2025, 47(1): 235-245.
ZHU Yiqing, ZHAO Yunfeng, KUI Shouchun, et al. Precise Judgment and Thinking on the 2022 Menyuan Ms 6.9 and Luding Ms 6.8 Epicenters[J]. *Seismology and Geology*, 2025, 47(1): 235-245.

[29] 何彬, 周云耀, 吕永清. 结合U-Net与FPN的地震初至波拾取算法[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 82-87.
HE Bin, ZHOU Yunyao, LÜ Yongqing. Seismic First Break Picking Algorithm Combining U-Net and FPN[J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(1): 82-87.

[30] 邓博, 张会, 柏君, 等. 利用机载LiDAR的深圳市斜坡类地质灾害危险性评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1377-1391.
DENG Bo, ZHANG Hui, BAI Jun, et al. Hazard Evaluation of the Slope Based on Airborne LiDAR Data in Shenzhen, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1377-1391.

[31] 刘小莎, 董秀军, 钱济人, 等. 高植被山区泥石流物源LiDAR遥感精细识别方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(3): 400-410.
LIU Xiaosha, DONG Xiujun, QIAN Jiren, et al. Airborne LiDAR-Based Debris Flow Material Sources Remote Sensing Recognition in Lush Mountainous Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(3): 400-410.

[32] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
DONG Haobin, WANG Chuanlei. Development and Application of 2D Resistivity Imaging Surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 171-176.

[33] 苏茂鑫, 钱七虎, 李术才, 等. 一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1428-1434.
SU Maoxin, QIAN Qihu, LI Shucai, et al. A Method of Metro Advanced Geological Prediction Under Karst Geology Condiction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1428-1434.

[34] 严加永, 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 Jiayong, MENG Guixiang, LÜ Qingtian, et al. The Progress and Prospect of the Electrical Resistivity Imaging Survey[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2012, 36(4): 576-584.

[35] 李美梅. 高密度电阻率法正反演研究及应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
LI Meimei. Research on Forward Modeling and Inversion of Multi-Electrode Resistivity Method[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010.

[36] 欧阳永永, 熊章强, 张大洲. 基于不同装置的二维高密度电法勘探效果比较与分析[J]. 世界地质, 2011, 30(3): 451-458.
OUYANG Yongyong, XIONG Zhangqiang, ZHANG Dazhou. Comparison and Analysis of 2D High-Density Electrical Prospecting Effect by Different Devices[J]. *World Geology*, 2011, 30(3): 451-458.

[37] LOKE M H, BARKER R D. Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method[J]. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44(1): 131-152.

[38] DURAND J M, WANLASS J, STARK N, et al. Study of Submarine Groundwater Discharge on the West Shore of Forge River Using Electrical Resistivity Measurements and Seepage Meters[C]// Geology of Long Island and Metropolitan, New York, USA, 2011.

[39] 罗延钟. 高密度电阻率法的2.5维反演软件[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(3): 187-193.

LUO Yanzhong. 2.5-D Inversion Software for High Density Resistivity[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2006, 28(3): 187-193.

[40] 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(5): 788-797.
GUO Qiaoqiao, GUO Changbao, SHEN Wei, et al. Geophysical Exploration and Sliding Surface Discriminant Analysis of Large-Giant Ancient Landslides in Minjiang River Valley, Western Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(5): 788-797.

[41] GUO C B, WU R A, ZHANG Y S, et al. Characteristics and Formation Mechanism of Giant Long-Runout Landslide: A Case Study of the Gamisi Ancient Landslide in the Upper Minjiang River, China [J]. *Acta Geologica Sinica* (*English Edition*), 2019, 93(4): 1113-1124.

[42] AKI K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors[J]. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 1957, 35: 415-456.

[43] CAPON J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(8): 1408-1418.

[44] GAO W W, GAO W, HU R L, et al. Microtremor Survey and Stability Analysis of a Soil-Rock Mixture Landslide: A Case Study in Baidian Town, China[J]. *Landslides*, 2018, 15(10): 1951-1961.

[45] 张若晗, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 基于微动H/V谱比法的土石分界面探测研究: 以济南中心城区为例[J]. 地球物理学报, 2020, 63(1): 339-350.
ZHANG Ruohan, XU Peifen, LING Suqun, et al. Detection of the Soil-Rock Interface Based on Microtremor H/V Spectral Ratio Method: A Case Study of the Jinan Urban Area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(1): 339-350.

[46] TOKSÖZ M N, LACOSS R T. Microseisms: Mode Structure and Sources[J]. *Science*, 1968, 159(3817): 872-873.

[47] 周晓华, 林君, 张怀柱, 等. 微动中多模式面波频散曲线的映射式提取方法[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2631-2643.
ZHOU Xiaohua, LIN Jun, ZHANG Huaizhu, et al. Mapping Extraction Dispersion Curves of Multi-Mode Rayleigh Waves in Microtremors[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(8): 2631-2643.

[48] LOUIE J N. Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(2): 347-364.

[49] OKADA H, SUTO K. The Microtremor Survey Method [M]. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 2003.

[50] 王振东. 微动的空间自相关法及其实用技术[J]. 物探与化探, 1986, 10(2): 123-133.
WANG Zhendong. The Micromotional Spatial Autocorrelation Methodand Its Practical Technique[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1986, 10(2): 123-133.

[51] 田宝卿, 丁志峰. 微动探测方法研究进展与展望[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1306-1316.
TIAN Baoqing, DING Zhifeng. Review and Prospect Prediction for Microtremor Survey Method[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 1306-1316.

[52] YANG D D, QIU H J, ZHU Y R, et al. Landslide Characteristics and Evolution: What We Can Learn from Three Adjacent Landslides [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4579.

[53] FAN X M, SCARINGI G, KORUP O, et al. Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421-503.

[54] FAN X M, YANG F, SIVA SUBRAMANIAN S, et al. Prediction of a Multi-Hazard Chain by an Integrated Numerical Simulation Approach: The Baige Landslide, Jinsha River, China [J]. *Landslides*, 2020, 17(1): 147-164.

[55] 邓建辉, 高云建, 余志球, 等. 堰塞金沙江上游的白格滑坡形成机制与过程分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 9-16.
DENG Jianhui, GAO Yunjian, YU Zhiqiu, et al. Analysis on the Formation Mechanism and Process of Baige Landslides Damming the Upper Reach of Jinsha River, China[J]. *Journal of Sichuan University* (*Engineering Science Edition*), 2019, 51(1): 9-16.

[56] 许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 377-387.
XU Qiang, LU Huiyan, LI Weile, et al. Types of Potential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 377-387.

[57] GUO C B, ZHANG Y S, YUAN H, et al. Study of an Ancient Landslide Reactivation Mechanism Based on Centrifuge Model Testing: An Example of the Jiangdingya Ancient Landslide Reactivation in 2018, Gansu Province, China [J]. *Landslides*, 2023, 20(1): 127-141.