



金沙江上游沙东滑坡发育特征与堵江溃决预测分析

郑顺祥, 王军, 鄢勇, 刘文, 赵恒, 杨钧翔, 范雄安, 张毅, 王猛, 余天彬

Development characteristics and river blocking outburst analysis of Shadong landslide in the upper reaches of Jinsha River

ZHENG Shunxiang, WANG Jun, YAN Yong, LIU Wen, ZHAO Heng, YANG Junxiang, FAN Xiongan, ZHANG Yi, WANG Meng, and YU Tianbin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析

Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River

吴瑞安, 马海善, 张俊才, 杨志华, 李雪, 倪嘉伟, 钟宁 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 120–128

白龙江流域中上游第四纪沉积物的发育特征及其灾害效应

Development characteristics and disaster effect of the Quaternary sediments in the middle and upper reaches of the Bailongjiang River Basin

陈宗良, 叶振南, 王志宏, 王高峰, 高幼龙, 田运涛 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 29–29

青藏高原巴塘断裂带地震滑坡危险性预测研究

Predicting seismic landslide hazard in the Batang fault zone of the Qinghai-Tibet Plateau

杨志华, 郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 任三绍 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 91–101

左江中游岩溶峰林区河流交互带水化学特征与控制因素

Hydrochemical characteristics and control factors of karst hyporheic zones in the karst peak forest region of the middle reaches of the Zuo River

黄奇波, 覃小群, 程瑞瑞, 李腾芳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 1–8

川藏铁路卡子拉山滑坡发育特征与防灾减灾对策

Characteristics of Kazila mountain landslide and its mitigation measures on the Sichuan-Tibet Railway

铁永波, 徐伟, 梁京涛, 蒙明辉, 李富, 赵聪 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 129–136

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones

张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167–174



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306054](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306054)

郑顺祥, 王军, 鄢勇, 等. 金沙江上游沙东滑坡发育特征与堵江溃决预测分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 160-170.
ZHENG Shunxiang, WANG Jun, YAN Yong, et al. Development characteristics and river blocking outburst analysis of Shadong landslide in the upper reaches of Jinsha River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 160-170.

金沙江上游沙东滑坡发育特征与堵江溃决预测分析

郑顺祥¹, 王军², 鄢勇¹, 刘文², 赵恒³, 杨钧翔³, 范雄安⁴, 张毅⁴, 王猛², 余天彬²

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司, 四川成都 610095; 2. 四川省综合地质调查研究所(稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室), 四川成都 610081; 3. 华电金沙江上游水电开发有限公司叶巴滩分公司, 四川甘孜 627153; 4. 华电金沙江上游水电开发有限公司巴塘(拉哇)分公司, 四川甘孜 627650)

摘要: 沙东滑坡位于金沙江结合带内, 复活变形迹象明显, 极可能形成滑坡-堵江-洪水灾害链, 严重威胁沿线重大工程建设、交通设施以及人民生命财产安全。采用多源遥感动态监测、工程地质调查、数值模拟等方法, 分析滑坡的复活变形特征, 探讨滑坡堵江溃决的危险性。结果表明: 沙东滑坡为巨型滑坡, 体积约 $23\ 045 \times 10^4 \text{ m}^3$, 目前处于蠕滑变形阶段, 2018—2023 年存在持续变形, 滑坡变形区主要集中在斜坡前缘, 下游侧变形比上游侧强烈。沙东滑坡沿基覆界面滑动, 表现为牵引式渐进破坏, 在稳定性分析的基础上, 建立了 3 种潜在失稳模式: ①天然工况下, C3 次级滑体前缘失稳, 滑坡持续过程约 35 s, 滑体最大速度达 30 m/s, 堵江堰塞坝高度约 90 m, 堰塞湖库容约 $1.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约 3 535 m^3/s , 最大洪峰高度约 14 m; ②暴雨工况下, II-2 区失稳, 堵江堰塞坝高度约 133 m, 堰塞湖库容约 $4.10 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约 11 315 m^3/s , 最大洪峰高度约 31 m; ③暴雨+地震工况下, II-1、II-2 区同时失稳, 堵江堰塞坝高度约 153 m, 堰塞湖库容约 $5.66 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约 19 960 m^3/s , 最大洪峰高度约 45 m。沙东滑坡堵江风险高、致灾性强, 建议采用天-空-地-内一体化的手段进行持续监测, 研究滑坡的预警阈值, 精准管控重大地质灾害风险。

关键词: 发育特征; 堵江溃决; 金沙江上游; 沙东滑坡

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0160-11

Development characteristics and river blocking outburst analysis of Shadong landslide in the upper reaches of Jinsha River

ZHENG Shunxiang¹, WANG Jun², YAN Yong¹, LIU Wen², ZHAO Heng³, YANG Junxiang³, FAN Xiongan⁴, ZHANG Yi⁴, WANG Meng², YU Tianbin²

(1. Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610095, China;
2. Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey(Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province), Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Yebatan Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co. Ltd., Ganzi, Sichuan 627153, China;
4. Batang (Lawa) Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co. Ltd., Ganzi, Sichuan 627650, China)

收稿日期: 2023-06-29; 修訂日期: 2023-09-27

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 四川省地质调查研究院财政资金项目(SCIGS-CZDXM-2024006); 华电金沙江上游水电开发有限公司科研项目(JS-LW-FW/ZX-084; JS-YBT-FW/YF-2022-30); 部-省合作四川地质灾害遥感项目(SCDZRS-2023)

第一作者: 郑顺祥(1974—), 男, 正高级工程师, 从事水电建设工程管理工作。E-mail: 603512012@qq.com

通讯作者: 刘文(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事遥感地质与地质灾害调查研究工作。E-mail: liuwen2009.hi@163.com

Abstract: The Shadong landslide, located in the Jinsha suture belt, exhibits significant signs of deformation. It is a high risk of developing into a disaster chain of landslide, river blockage, and flood, posing a serious threat to major engineering construction, transportation facilities, and people's lives and property. In this study, multi-source remote sensing dynamic monitoring, engineering geological survey, and numerical simulation were used to analyze the deformation characteristics and explore the risk of river blocking outburst of the Shadong landslide. The results show that the Shadong landslide is a giant landslide with a volume of approximately $23\ 045 \times 10^4 \text{ m}^3$. The landslide is currently in the stage of creep deformation, with continuous deformation from 2018 to 2023. The reactivation deformation area of the landslide is mainly concentrated at the front edge of the slope, and the deformation on the downstream side is stronger than that on the upstream side. The Shadong landslide slides along the bedrock cover interface, exhibiting a traction type progressive failure. Based on stability analysis, three potential instability modes have been established. Under natural conditions, the leading edge of the secondary landslide C3 is unstable, with the landslide event lasting around 35 seconds. The maximum speed of the landslide reaches 30 m/s. The height of the barrier dam is about 90 m, and the barrier lake capacity is about $1.62 \times 10^8 \text{ m}^3$, with a maximum flood flow of approximately $3\ 535 \text{ m}^3/\text{s}$ and a flood peak height of approximately 14 m at the dam site of the Lava Power Station after the barrier dam failure. Under storm conditions, instability occurs in zone II-2, forming a 133-meter-high barrier dam with a lake capacity of approximately $4.10 \times 10^8 \text{ m}^3$. The maximum flood flow could reach $11\ 315 \text{ m}^3/\text{s}$, with a maximum flood peak height of approximately 31 m at the Lava Power Station. In the event of both storm and earthquake conditions, II-1 and II-2 zone are unstable at the same time, resulting in the height of the barrier dam of approximately 153 m, with a barrier lake capacity of approximately $5.66 \times 10^8 \text{ m}^3$. The maximum flood flow is approximately $19\ 960 \text{ m}^3/\text{s}$, with a maximum flood peak height of approximately 45 m at the dam site of the Lava Power Station after the barrier dam failure. Given the high risk of river blockage and the catastrophic potential of the Shadong landslide, continuous monitoring through integrated sky, air, ground, and interior methods is recommended. Additionally, further study is needed to establish early warning thresholds and accurately manage the risk of major geological disasters.

Keywords: development characteristics; river blocking outburst; the upper reaches of Jinsha River; Shadong landslide

第四纪以来,随着青藏高原的快速隆升,金沙江新构造运动活跃,主要表现为断裂复活、地震等,具有继承性、新生性和节奏性。金沙江断裂带大致以 NE 向的巴塘断裂和 NW 向的德钦—中甸一大具断裂为界,可分为北、中、南 3 段^[1],各段活动周期、强度存在差异性。金沙江上游已发生的地震震源深度一般 5~10 km^[2],均属浅源地震,破坏性强,地震活动破坏山体的稳定性,增加地质灾害发生的风险。在强烈的内外动力地质作用下,金沙江上游河道坡降大、地面切割强烈,山高谷深,为典型的高山峡谷区,V 型河谷发育,岩体破碎、分水岭狭窄,极易发生山体滑坡。在金沙江上游直门达—石鼓段共发育 87 处堵江滑坡隐患点^[3],相关学者以典型堵江滑坡为研究对象,开展堵江滑坡的形成机制与稳定性评价^[4~8]、灾情应急与监测^[9~10]、堵江危险性分析^[11]、古滑坡堰塞湖溃坝堆积物粒度特征分析^[12]等方面的研究。

金沙江上游巴塘—白玉段堵江滑坡以白格滑坡、沙东滑坡、色拉滑坡等为典型代表。白格滑坡滑源区岩体变形过程至少经历了 50 a^[13],2018 年 10 月 11 日白格滑坡第一次失稳,堰塞湖库容约 $2.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,回水最高淹没至原波罗乡政府大楼一层,堰塞湖溃决峰值流量达到 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ 。11 月 3 日第二次失稳,堰塞湖库容约 $5.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,回水最远淹没至白玉县金沙乡,堰塞湖溃决峰值流量达到 $3.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$,洪水造成西藏、四川、云南等省(自治区)多处房屋、桥梁、道路受损^[14]。由此可见,堵江滑坡具有强烈的灾害链效应,易形成滑坡-堵江-洪水灾害链。沙东滑坡为古滑坡,有复活变形的迹象,目前处于蠕滑变形阶段,存在大规模失稳的风险,极可能形成滑坡-堵江-洪水灾害链,严重威胁沿线重大工程建设、交通设施以及人民生命财产安全。李雪等^[4]通过遥感解译和现场调查研究了沙东滑坡的发育特征和形成机理,认为滑坡处于深层蠕滑变

形中, 目前缺乏对滑坡失稳后的运动过程模拟和堵江溃决预测分析。本文采用雷达卫星 InSAR 形变监测、无人航空摄影测量、工程地质调查、数值模拟等方法, 开展沙东滑坡遥感动态监测, 分析滑坡的变形特征、活动现状以及失稳模式, 模拟滑坡的失稳运动过程, 探讨滑坡堵江溃决的风险, 为防范和管控流域重大地质灾害链提供技术支撑, 助力流域地质灾害预警能力和防治水平的提高。

1 地质背景

沙东滑坡位于西藏贡觉县沙东乡雄巴村金沙江右岸, 地形切割强烈, 山高谷深, 为典型的高山峡谷区(图 1), 斜坡完整性差、岩体破碎, 具备发生山体滑坡

的地貌条件。滑坡区属典型高原气候, 点状暴雨现象突出, 年平均降水量 480 mm, 降雨主要集中在 6—9 月。滑坡区出露第四系滑坡堆积($Q_{h^{del}}$)碎块石类土体、第四系冲洪积($Q_{h^{apl}}$)卵砾石类土体、二叠系一下三叠统岗托岩组(PT_g)较硬-较软层状云母石英片岩岩组。

沙东滑坡位于金沙江断裂带上, 构造线方位以南北向为主, 北东向、北西向次之。主要分布有卡多拉多断裂(F1)、金沙江结合带西界断裂(F2)、金沙江结合带东界断裂(F3)、汪布堆—麦拉断裂(F4)、边坝断裂(F5)、桶底卡—格绒断裂(F7)、巴巴—黄草坪断裂(F8)。其中桶底卡—格绒断裂(F7)的分支断裂罗麦—沙东断裂从滑坡中部通过, 对滑坡影响较大, 断裂总体走向约 $341^{\circ}\sim 2^{\circ}$, 断层面倾向西, 倾角 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。

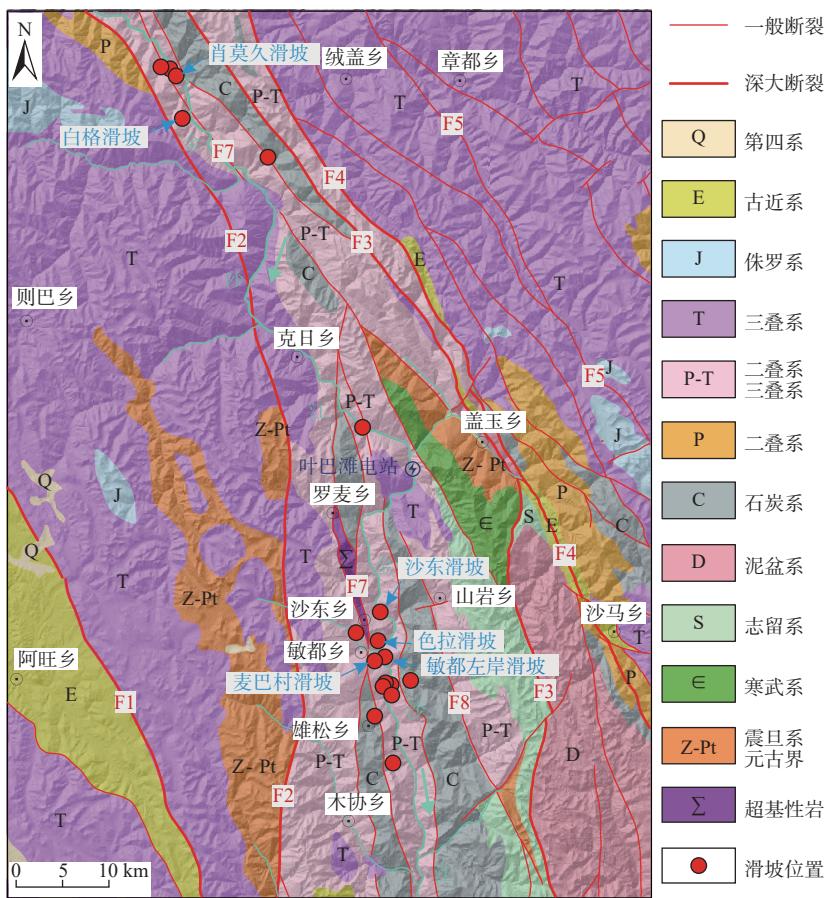


图 1 巴塘至白玉段堵江滑坡分布图(底图据 1:25 万地质图、滑坡数据引自文献 [3])

Fig. 1 Distribution of landslides in the Batang Baiyu Section of the Jinsha River (The base map after the 1:250 000 Geological Map and landslide data adapted from Ref.[3])

受印度板块向欧亚板块的 NNE 向持续挤压作用, 金沙江断裂带新生代以来发生持续隆升和挤压构造变形, 是现今地球表面地形地貌和地质构造演化最复杂、构造活动最强烈的地区之一, 中国地震台网公开

的地震历史数据显示, 自 1900 年 1 月以来, 金沙江巴塘—白玉段区域上发生地震 5 次, 震级 3.1~3.3, 地震活动破坏山体的稳定性, 使岩体变得更加松散、破碎, 节理、裂隙更加发育。

2 基本特征

沙东滑坡平面形态呈不规则矩形, 前缘以江面为界, 后缘以陡坎为界, 上游侧以冲沟为界, 下游侧以山脊为界, 见图2a。滑坡前缘高程2 660~2 670 m, 后缘高程3 759~3 850 m, 高差1 099~1 180 m。沙东滑坡呈陡-缓-陡的阶梯状地形, 高程3 150 m以下至河床地形坡度约30°, 高程3 150~3 430 m之间地形坡度约15°, 高程3 430 m以上地形坡度约35°(图2b)。滑坡纵长2 599 m, 横宽2 934 m, 面积 $691 \times 10^4 \text{ m}^2$, 已有钻孔、物探资料综合显示, 滑体中部基覆界面厚度30~

50 m, 野外调查表明, 沙东滑坡滑体具有中间厚、边缘薄的特点, 按平均厚度30 m估算, 沙东滑坡体积约 $23 045 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为巨型滑坡。滑坡上游侧主滑方向60°, 下游侧主滑方向33°。根据滑坡的物质组成、地形地貌、变形特征, 将沙东滑坡分为I区、II-1区、II-2区、II-3区、II-4区、II-5区、II-6区、II-7区。滑坡沿基覆界面滑动, 滑体物质为碎块石土, 结构松散。滑床物质为二叠系一下三叠统岗托岩组(PT₁g)云母石英片岩, 滑坡后缘基岩产状240°~249°∠33°~37°, 岩体呈强风化。

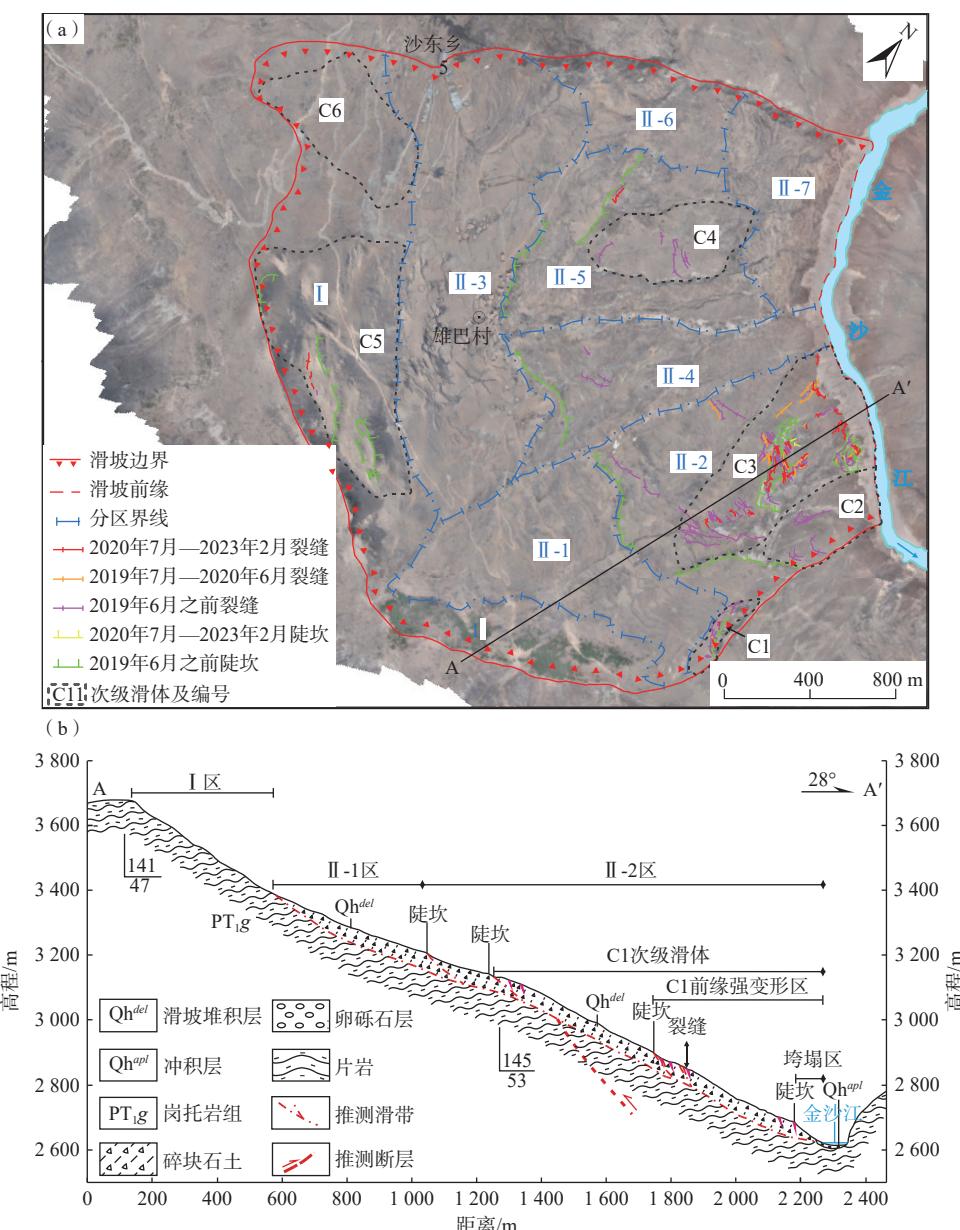


图2 沙东滑坡变形分区及工程地质剖面图

Fig. 2 Deformation zoning and engineering geological profile fo Shadong landsilde

3 滑坡复活变形特征

3.1 滑坡地表变形特征

I 区组成滑源区, 位于斜坡上部滑坡堆积区上方至山脊区域, 大部分地区基岩裸露, 岩性为云母石英片岩, 见图 3a, 局部缓坡平台处可见残坡积层, 因公路

开挖局部浅表层有溜滑迹象, 见图 3b。滑源区前缘高程 3 361~3 519 m, 后缘高程 3 759~3 850 m, 高差 331~398 m, 纵长 106~648 m, 横宽 2 934 m, 面积 $168 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $3 360 \times 10^4 \text{ m}^3$, 发育 C5、C6 次级滑体(图 3c), 未见新近变形迹象, 该区整体基本稳定。

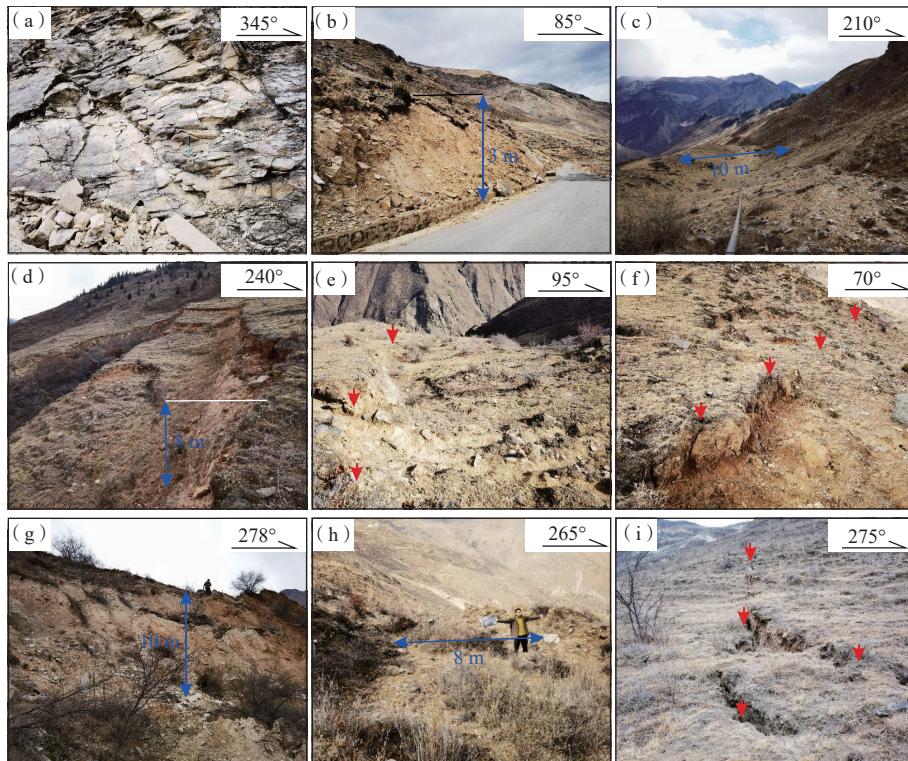


图 3 沙东滑坡变形特征

Fig. 3 Deformation characteristics of Shadong landslide

注: (a) 为滑源区云母石英片岩; (b) 为滑源区公路开挖局部溜滑; (c) 为滑源区 C5 次级滑体老滑坡洼地; (d) 为滑坡堆积区 C1 次级滑体陡坎; (e) 为滑坡堆积区 C1 次级滑体裂缝(LF012); (f) 为滑坡堆积区 C1 次级滑体裂缝(LF011); (g) 为滑坡堆积区 C3 次级滑体陡坎; (h) 为滑坡堆积区 C3 次级滑体洼地; (i) 为滑坡堆积区 C3 次级滑体裂缝(LF106)。

II-1 区、II-2 区、II-3 区、II-4 区、II-5 区、II-6 区、II-7 区共同组成滑坡堆积区(图 2a)。

II-1 区位于滑坡体中部下游侧, 出露第四系滑坡堆积碎块石类土体, 前缘高程 3 198 m, 后缘高程 3 361 m, 高差 163 m, 纵长 396 m, 横宽 1 179 m, 面积 $70 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $3 500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 未见新近变形迹象, 天然工况下基本稳定, 但易受 II-2 区牵引式变形破坏影响, 暴雨、地震等工况下处于欠稳定状态。

II-2 区位于滑坡前缘下游侧, 出露第四系滑坡堆积碎块石类土体, 前缘高程 2 612 m, 后缘高程 3 198 m, 高差 586 m, 纵长 1 236 m, 横宽 919 m, 面积 $110 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $3 300 \times 10^4 \text{ m}^3$, 变形表现为陡坎、裂缝、洼地, 新近变形迹象明显, 发育 C1—C3 等 3 处次级滑体

(图 3d—i), 以 C3 次级滑体前缘变形最为强烈, 天然工况下处于欠稳定状态。该区域斜坡呈近直线形, 坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$, 发育 4 条较大冲沟, 是滑坡区降雨等地表水的主要排泄通道。前缘近河谷区地形变陡, 坡度约 40° , 在河水冲刷作用下垮塌变形迹象明显。

II-3 区位于滑坡体中部上游侧, 出露第四系滑坡堆积碎块石类土体, 前缘高程 3 185~3 309 m, 后缘高程 3 476~3 519 m, 高差 210~291 m, 纵长 476 m, 横宽 2 053 m, 面积 $129 \times 10^4 \text{ m}^2$, 估算体积约 $6 460 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。坡度相对较缓, $10^\circ \sim 20^\circ$, 为居民区和耕地分布区, 未见变形迹象, 整体基本稳定。出露 3 处下降泉, 流量 $0.5 \sim 2 \text{ L/s}$ 不等, 泉点附近可见地下水溢出带。

II-4 区位于滑坡体前缘中部, 出露第四系滑坡堆

积碎块石类土体。变形区前缘高程2615 m,后缘高程3336 m,高差721 m,纵长1320 m,横宽460 m,面积 56×10^4 m²,估算体积约 1680×10^4 m³,后缘可见老的滑坡陡坎和裂缝,未见新近变形迹象,整体较稳定。

II-5区位于滑坡体中前缘上游侧,出露第四系滑坡堆积碎块石类土体。变形区前缘高程2759 m,后缘高程3279 m,高差520 m,纵长954 m,横宽769 m,面积 80×10^4 m²,估算体积约 2400×10^4 m³。斜坡呈近直线形,坡度 $20^\circ \sim 30^\circ$,局部发育陡坎,陡坎高度1~5 m,变形表现为老的下错陡坎、裂缝、洼地,未见新近变形迹象,整体基本稳定,区域内发育4条较大冲沟,为降雨等地表水的主要排泄通道。

II-6区位于滑坡体中前缘上游侧,出露第四系滑坡堆积碎块石类土体。前缘高程2869 m,后缘高程3174 m,高差305 m,纵长681 m,横宽404 m,面积 31×10^4 m²,估算体积约 930×10^4 m³。变形表现为冲沟两侧的局部垮塌,坡体整体基本稳定。

II-7区位于滑坡体前缘上游侧,出露第四系冲洪积卵砾石类土体,原为居民区,现已全部搬迁,用地类型以耕地为主,前缘高程2618 m,后缘高程2759~2869 m,高差141~251 m,纵长872 m,横宽548 m,面积 44×10^4 m²,估算体积约 1320×10^4 m³,未见变形迹象,

整体基本稳定。前缘近河谷区地形变陡,坡度约 45° ,在河水的冲刷作用下存在持续垮塌变形。

3.2 滑坡变形多源遥感动态监测

采用2019年6月、2020年6月、2023年2月的无人机光学影像对比解译表明(表1、图4a—c),2019年6月之前沙东滑坡发育裂缝94处、陡坎32处,2019年7月—2020年6月新增裂缝21处,2020年7月—2023年2月新增裂缝67处、陡坎2处,裂缝和陡坎数量呈逐年递增的趋势,指示存在持续变形,主要分布在I区、II-1区、II-2区、II-3区、II-4区、II-5区、II-7区。其中,II-2区裂缝和陡坎发育数量最多,变形最强烈,与野外调查结果一致。裂缝类型以拉张裂缝为主,分布在次级滑体的后缘,呈多级弧形断续分布,裂缝未完全贯通,裂缝走向以 10° 和 115° 为优势方位(表2、图4e),次级滑体侧翼局部见极少量羽状剪

表1 沙东滑坡遥感数据源信息表

Table 1 Remote sensing data source of Shadong landslide

序号	成像时间	数据源	分辨率/处理方法
1	2019-06-30	无人机航测	0.2 m
2	2020-06-15	无人机航测	0.2 m
3	2023-02-20	无人机航测	0.2 m
4	2018-11-08— 2022-04-22	Sentinel-1A (升轨、C波段)	Stacking-InSAR、 SBAS-InSAR

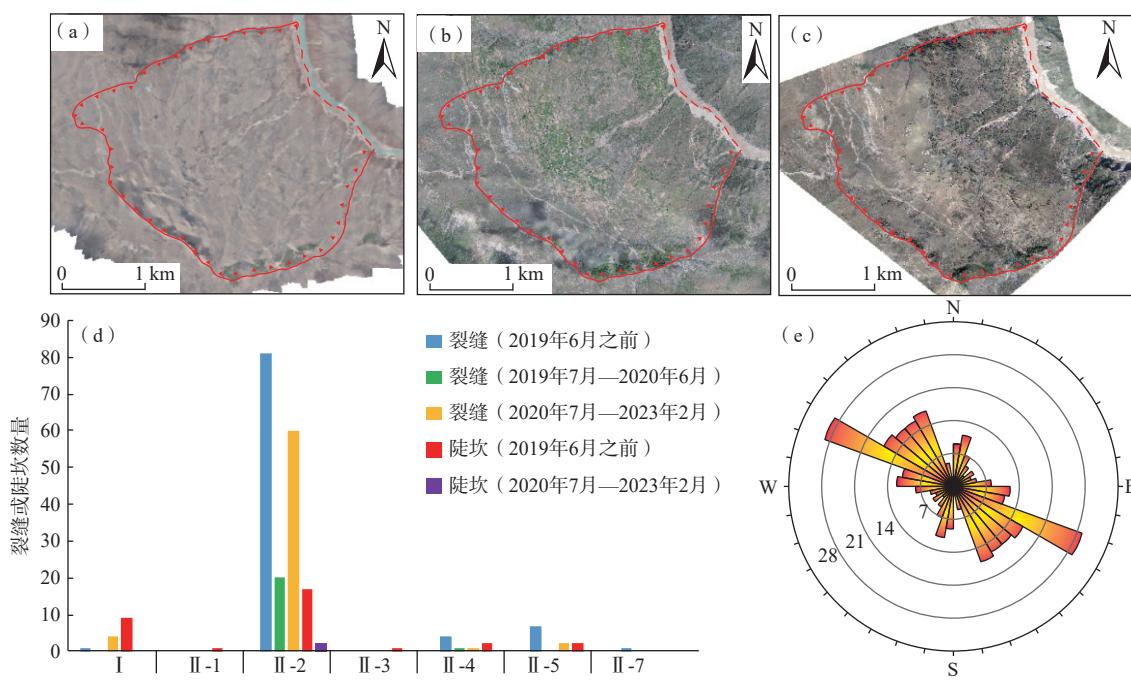


图4 沙东滑坡多期光学影像、裂缝柱状图及走向玫瑰图

Fig. 4 Multiphase optical remote sensing images, cracks histogram, and rose diagram of Shadong landslide

注:(a)为2019年6月无人机影像,分辨率0.2 m;(b)为2020年6月无人机影像,分辨率0.2 m;
(c)为2023年2月无人机影像,分辨率0.2 m;(d)为裂缝及陡坎数量柱状图;(e)为裂缝走向玫瑰图,数字代表裂缝数量。

表 2 沙东滑坡长度大于 100 m 裂缝信息

Table 2 Cracks information of Shadong landslide with a length of more than 100 m

编号	影像特征	分布区域	长度/m	走向/(°)	下挫/cm	张开度/cm	类型	成像时间
LF001	灰色, 呈弧形展布	II-5区	195	139	3~10	5~10	拉张裂缝	2019-06-30
LF003	灰色, 呈弧形展布	II-5区	101	131	5~10	5~10	拉张裂缝	2019-06-30
LF006	灰色, 呈弧形展布	II-5区	122	4	5~10	5~10	拉张裂缝	2019-06-30
LF011	灰色, 呈弧形展布	II-2区	183	158	50~70	30~40	拉张裂缝	2019-06-30
LF016	灰色, 呈弧形展布	II-2区	146	122	15~20	15~25	拉张裂缝	2019-06-30
LF020	灰色, 呈弧形展布	II-2区	178	92	10~20	20~25	拉张裂缝	2019-06-30
LF021	灰色, 呈弧形展布	II-2区	172	60	10~20	20~25	拉张裂缝	2019-06-30
LF022	灰色, 呈弧形展布	II-2区	300	69	50~70	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF023	灰色, 呈弧形展布	II-2区	159	106	50~70	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF024	灰色, 呈弧形展布	II-2区	181	98	20~30	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF025	灰色, 呈弧形展布	II-2区	123	104	20~30	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF032	灰色, 呈弧形展布	II-2区	158	163	30~40	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF036	灰色, 呈弧形展布	II-2区	145	157	30~40	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF037	灰色, 呈弧形展布	II-2区	122	118	20~30	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF038	灰色, 呈弧形展布	II-2区	166	92	20~30	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF041	灰色, 呈马蹄形展布	II-2区	103	126	50~70	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF043	灰色, 呈弧形展布	II-2区	164	6	50~70	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF058	灰色, 呈弧形展布	II-4区	153	84	20~30	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF063	灰色, 呈弧形展布	II-2区	174	79	50~60	20~40	拉张裂缝	2019-06-30
LF064	灰色, 呈弧形展布	II-2区	190	71	50~60	20~40	拉张裂缝	2019-06-30
LF066	灰色, 呈弧形展布	II-2区	104	115	30~40	20~30	拉张裂缝	2019-06-30
LF106	灰色, 呈弧形展布	II-2区	130	9	30~40	20~30	剪切裂缝	2020-06-15
LF107	灰色, 呈弧形展布	II-2区	107	17	30~40	20~30	剪切裂缝	2020-06-15
LF108	灰色, 呈弧形展布	II-2区	106	118	20~30	20~30	拉张裂缝	2020-06-15

切裂缝, 宏观变形特征与滑坡位移-时间曲线的匀速变形阶段一致^[15]。

采用 2018 年 11 月 8 日—2022 年 4 月 22 日的哨兵数据对滑坡进行 InSAR 持续监测, 从获取的形变速率分布图来看(图 5a), 滑坡变形区域主要集中在斜坡中前缘, 下游侧变形比上游侧强烈, 局部因变形较大出现失相干, 中部缓坡平台和后缘变形比较微弱, 变形区域与滑坡范围吻合性较好, 最大年均变形速率为 90 mm/a, 位于 II-2 区前缘。在滑坡体上布置了 8 个监测点开展时序分析(图 5b), 指示滑坡存在持续变形, 其中 S6—S8 监测点分布在滑坡下游侧变形区, 累计变形量 20~27 cm, S7 监测点累计变形量达到最大为 27 cm, 位于 II-2 区; S4—S5 分布在滑坡中前部, 累计变形量 9~19 cm; S1—S3 分布在滑坡上游侧变形区, 累计变形量 8~21 cm。

4 堵江溃决预测分析

4.1 滑坡潜在失稳模式分析

沙东滑坡的孕育形成受地形地貌、岩土体结构、断裂构造与地震、降雨、河流侵蚀和人类工程活动等

多因素的影响。滑坡所在斜坡呈陡-缓-陡的阶梯状地形, 前缘有较好的临空区间, 具备发生滑坡的地形条件。受金沙江结合带长期构造挤压, 滑坡区岩体节理裂隙发育, 结构破碎, 呈强风化。伴随着青藏高原隆升, 地质历史时期金沙江上游地震频发, 河谷两岸发育大量古滑坡, 研究区以沙东滑坡、色拉滑坡、丁巴滑坡为代表。白格滑坡 2018 年 10 月 10 日、11 月 3 日先后两次形成的滑坡-堵江-洪水灾害链, 在沙东滑坡前缘形成的最大洪峰高度 50~60 m, 洪水冲刷引起斜坡前缘的大规模垮塌, 加之金沙江流水长期对坡脚的侧向侵蚀作用, 共同影响沙东滑坡的整体稳定性。在沙东滑坡的中后缘有房屋建设、道路工程等人类工程活动, 局部可见溜滑变形, 对滑坡主要起到加载的作用。综合分析多期雷达卫星数据、无人机光学遥感数据, 沙东滑坡处于持续变形中, 滑坡前缘呈局部多级复活, 并有向后扩展的趋势, 变形迹象主要表现为多级台阶状陡坎、弧形裂缝, 前缘下游侧变形强于上游侧。现场调查表明沙东滑坡为老滑坡堆积体的复活, 大致沿基覆界面滑动, 前缘滑体失稳下滑并牵引后部滑体渐进破坏, 为牵引式滑坡。

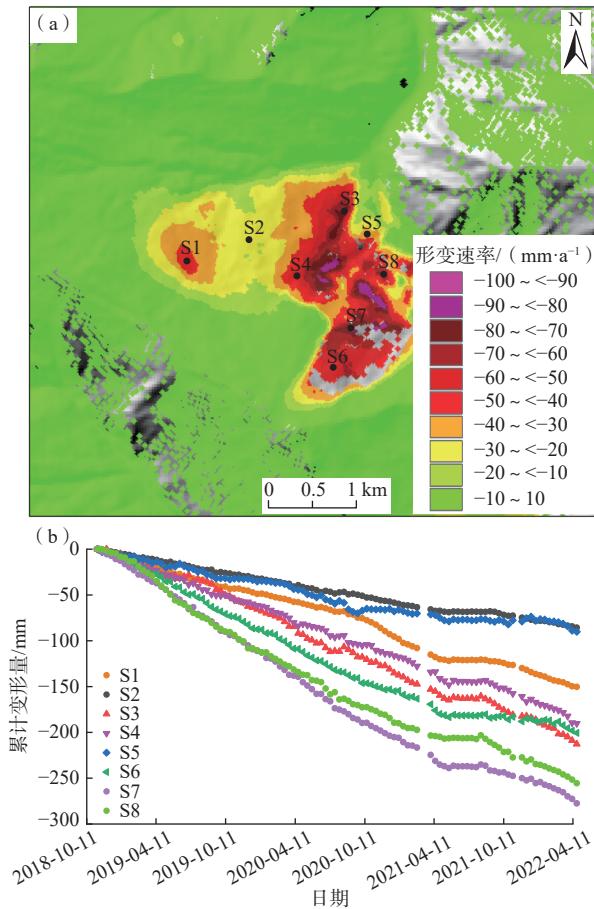


图 5 沙东滑坡 InSAR 形变监测图

Fig. 5 InSAR deformation monitoring of Shadong landslide

4.2 滑坡运动过程模拟

前文分析表明,C3 次级滑体前缘在天然工况下处于欠稳定状态,失稳的可能性最大,运用 Massflow 软件对沙东滑坡 C3 次级滑体前缘开展滑坡运动过程模拟。首先将无人机机载 LiDAR 获取的数字高程模型(DEM)导入 Massflow 程序中,建立用于计算的三维地形模型。为便于计算,将模型设置为单层单相流,忽略演化过程中密度的变化和惯性力对重力加速度的影响。选择适用于滑坡灾害的 Coulomb-viscous 模型作为基底阻力模型,滑坡计算参数采用滑带土残余强度,通过现场调查、室内试验,沙东滑坡滑体土的密度取值 2.18 g/cm^3 ,内聚力平均值为 57.25 kPa ,内摩擦角平均值为 28.95° ,滑体土成分为碎石土,基底摩擦系数取 0.4。

Massflow 模拟计算总时长为 35 s,滑坡基本停止运动,模拟得到的滑坡运动过程如图 6 所示。 $t < 10 \text{ s}$ 为滑坡体失稳下滑初始阶段,滑体从滑源区启动沿临空面向下运动,巨大势能转化成动能,滑坡体在失稳

下滑以后,速度逐渐增大,滑坡龙头速度增加最快,最大速度可达 25 m/s 左右; $10 \text{ s} \leq t < 30 \text{ s}$ 为滑坡加速下滑阶段, $10\sim15 \text{ s}$ 时滑坡前缘运动至江底,滑坡体沿沟道进行滑动, $15\sim30 \text{ s}$ 时滑体基本运动至金沙江底并开始堆积,最大速度约 30 m/s ;当 $t \geq 30 \text{ s}$ 后,由于滑体物质缺乏补充,同时沿途铲刮、碰撞消耗大量动能,滑坡体开始减速并逐渐堆积在坡脚处。在 35 s 时,除了在沟道和某些陡坡部分有缓慢移动外,滑坡体速度几乎为零,说明滑坡体基本已经停止运动,最大堆积厚度约 95 m 。

4.3 滑坡堵江预测分析

柴贺军等^[16]通过分析国内外典型堵江滑坡天然坝形态,发现坝底宽度是天然坝高度的 8~10 倍,提出完全堵江的最小土石方量计算公式为:

$$V_{\min} = H^2 B (7 - 0.5 \cot \varphi)$$

式中: V_{\min} ——滑坡完全堵江最小土石方量/ m^3 ;

H ——平均河水深度/ m ;

B ——河床宽度/ m ;

φ ——堵江岩土体饱水状态下的内摩擦角/(°)。

根据 2023 年 2 月无人机影像和数字高程模型(DEM),沙东滑坡处金沙江洪水期水面平均宽度约 110 m ,河水深度约 $20\sim25 \text{ m}$,岸坡坡度约 35° ,河床高程 2660 m 。将沙东滑坡堵江断面简化为梯形,对沙东滑坡滑体开展饱水直剪试验,获得其内摩擦角(φ)为 18.4° 。据此计算沙东滑坡形成堵江的最小土石方量为 $37.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

黄润秋等^[17]分析了 32 个堵江天然堆石坝的相关参数,提出天然堆石坝的体积 V_d 和坝高 H_d 存在如下的关系: $H_d = -355.73 + 65.01 \times \lg V_d$, 相关系数 $r = 0.8736$ 。据前文对沙东滑坡目前各区的宏观变形特征和稳定性分析可知,可能形成堵江的失稳情况组合为(图 7a、表 3):①天然工况下,C3 次级滑体前缘失稳,估算堵江高度 90 m ,与滑坡运动过程模拟的堵江高度吻合较好;②暴雨工况下,II-2 区失稳,估算堵江高度 133 m ;③暴雨+地震工况下,II-1、II-2 区失稳,估算堵江高度 153 m 。

堰塞坝体溃决模式与堰塞坝的几何形态和坝体物质的特殊构成关系密切。白格滑坡第一次堵江和第二次堵江堰塞坝在人工开挖泄流槽的情况下最终是坝顶溢流模式破坏。沙东滑坡和白格滑坡在河床条件、水动力条件、滑体物质组成等方面具有一定的相似性,推测沙东滑坡失稳后形成堰塞坝的破坏模式

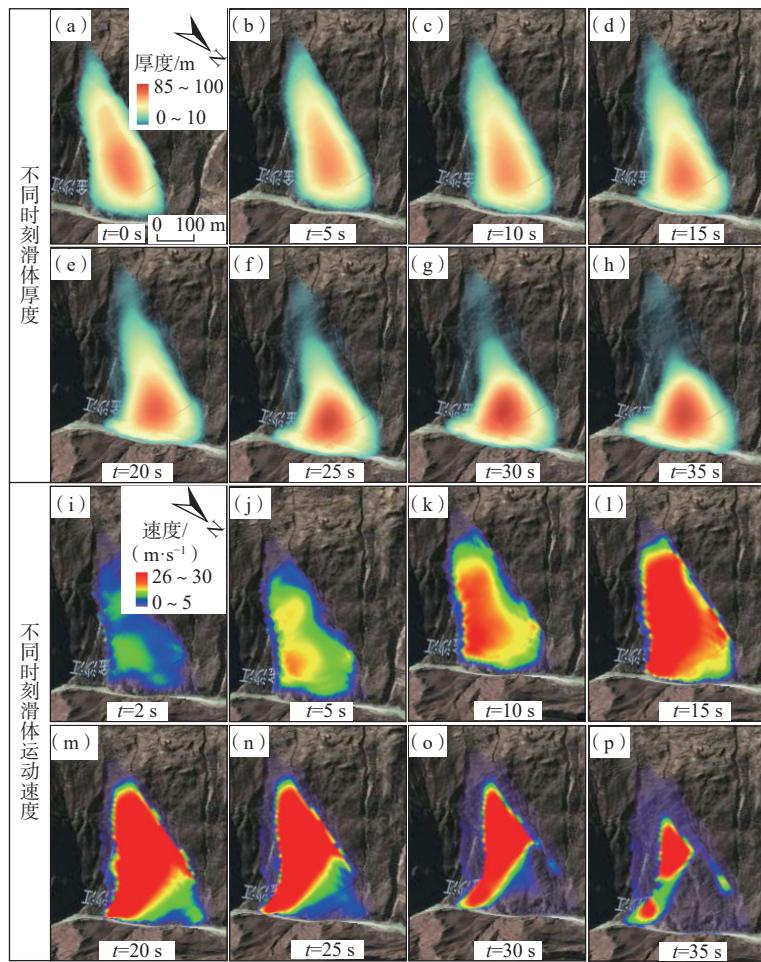


图 6 数值模拟天然工况 C3 次级滑体前缘失稳不同时刻滑体情况

Fig. 6 Numerical simulations of the sliding mass at different times during the instability of C3 front edge under natural conditions

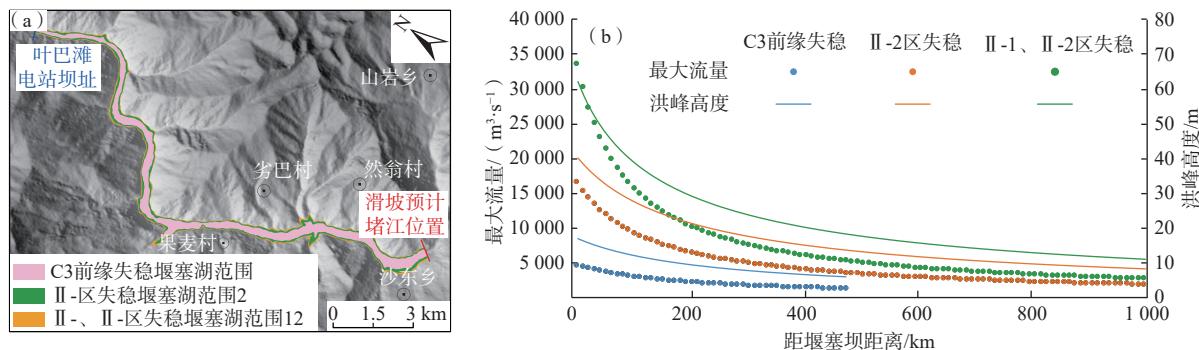


图 7 沙东滑坡堵江溃决预测图

Fig. 7 River blockage and collapse prediction of Shadong landslide

为坝顶溢流模式, 漫决方式应为逐渐全漫。对不同失稳模式下形成的堰塞坝漫决后下游不同距离进行最大洪水量和最大洪水高度预测分析, 计算时按堰塞坝下游间隔递增 10 km 进行计算。

沙东滑坡堰塞湖漫决后最大洪水预测采用经验公式^[18]:

$$Q_{LM} = \frac{W}{\frac{W}{Q_{max}} + \frac{L}{V_{max} K}}$$

式中: Q_{LM} ——最大洪水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

L ——距堰塞坝址距离/m;

W ——堰塞湖库容/ m^3 ;

Q_{max} ——堰塞坝址最大流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

表3 沙东滑坡不同失稳模式下堰塞湖规模

Table 3 Barrier lake scales under different instability modes of Shadong landslide

失稳组合模式	失稳块体	堵江方量/(10 ⁴ m ³)	堵江高度/m	堰塞湖最高水位高程/m	堰塞湖库容/(10 ⁸ m ³)
①	C3前缘	720	90	2 750	1.62
②	II-2区	3 300	133	2 793	4.10
③	II-1区 II-2区	6 800	153	2 813	5.66

V_{\max} ——洪水的最大流速,本次取值4.0 m/s;

K ——经验系数,本次取值1.3。

参照白格滑坡堵江溃决相关数值^[14],初步确定天然工况下C3前缘失稳时堰塞坝址最大流量为5 000 m³/s,暴雨工况下II-2区失稳时堰塞坝址最大流量为18 000 m³/s,暴雨+地震工况下II-1区、II-2区失稳最大流量为38 000 m³/s。

当C3前缘形成堰塞坝溃决后,下游10 km处的最大洪水流量约4 720 m³/s,最大洪峰高度约17 m,至拉哇电站坝址处最大洪水流量约3 535 m³/s,最大洪峰高度约14 m(图7b)。当II-2区失稳形成堰塞坝溃决后,下游10 km处的最大洪水流量约16 600 m³/s,最大洪峰高度约40 m,至拉哇电站坝址处最大洪水流量约11 315 m³/s,最大洪峰高度约31 m。当II-1区、II-2区失稳形成堰塞坝溃决后,下游10 km处最大洪水流量约33 655 m³/s,最大洪峰高度约62 m,至拉哇电站坝址处最大洪水流量约19 960 m³/s,最大洪峰高度约45 m。

5 结论

(1)沙东滑坡位于金沙江结合带内,平面形态呈不规则矩形,体积约23 045×10⁴ m³,为一巨型滑坡。滑坡沿基覆界面滑动,滑体物质为碎块石土,滑床物质为二叠系一下三叠统岗托岩组云母石英片岩。

(2)沙东滑坡目前处于蠕滑变形阶段,可划分出7个变形区,2018—2023年存在持续变形,主要集中在斜坡前缘,下游侧变形比上游侧变形强烈。沙东滑坡的孕育形成受地形地貌、岩土体结构、断裂构造与地震、降雨、河流侵蚀和人类工程活动等多因素的共同影响,破坏模式为牵引式渐进破坏。

(3)在稳定性分析的基础上,建立了沙东滑坡3种潜在失稳模式:①天然工况下,C3次级滑体前缘失稳,滑坡持续过程约35 s,滑体最大速度达30 m/s,堵江堰塞坝高度约90 m,堰塞湖库容约1.62×10⁸ m³,堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约3 535 m³/s,最大洪峰高度约14 m;②暴雨工况下,II-2区失稳,堵

江堰塞坝高度约133 m,堰塞湖库容约4.10×10⁸ m³,堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约11 315 m³/s,最大洪峰高度约31 m;③暴雨+地震工况下,II-1、II-2区同时失稳,堵江堰塞坝高度约153 m,堰塞湖库容约5.66×10⁸ m³,堰塞坝溃决后拉哇电站坝址处最大洪水流量约19 960 m³/s,最大洪峰高度约45 m。沙东滑坡堵江风险高、致灾性强,建议采用天-空-地-内一体化的手段对沙东滑坡进行持续监测,开展滑坡的预警阈值研究,精准管控重大地质灾害风险。

参考文献 (References) :

- [1] 常玉巧,陈立春,张琦.金沙江断裂带构造地貌与断裂活动特征研究[J].国际地震动态,2019,49(8):142–143. [CHANG Yuqiao, CHEN Lichun, ZHANG Qi. Analysis of tectonic geomorphology and activity characteristics of the Jinsha river fault[J]. Recent Developments in World Seismology, 2019, 49(8): 142 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵博,高原,刘杰,等.2010年以来四川地区中强地震震源机制反演及深度确定[J].地球物理学报,2019,62(1):130–142. [ZHAO Bo, GAO Yuan, LIU Jie, et al. Focal mechanism inversion and source depth locating of moderate-major earthquakes in the Sichuan region since 2010[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(1): 130 – 142. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘文,王猛,朱赛楠,等.基于光学遥感技术的高山极高山区高位地质灾害链式特征分析——以金沙江上游典型堵江滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(5):29–39. [LIU Wen, WANG Meng, ZHU Sainan, et al. An analysis on chain characteristics of highstand geological disasters in high mountains and extremely high mountains based on optical remote sensing technology: a case study of representative large landslides in upper reach of Jinsha River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 29 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李雪,郭长宝,杨志华,等.金沙江断裂带雄巴巨型古滑坡发育特征与形成机理[J].现代地质,2021,35(1):47–55. [LI Xue, GUO Changbao, YANG Zhihua, et al. Development characteristics and formation mechanism of the xiongba giant ancient landslide in the Jinshajiang tectonic zone[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 47 – 55. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 朱赛楠,殷跃平,王猛,等.金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究——以金沙江色拉滑坡为例[J].岩土工程学报,2021,43(4):688–697. [ZHU Sainan, YIN Yueping, WANG Meng, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of

- long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: case study of sela landslide in Jinsha River, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 688 – 697. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈菲, 王塞, 高云建, 等. 白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析 [J]. 工程科学与技术, 2020, 52(5): 71 – 78. [CHEN Fei, WANG Sai, GAO Yunjian, et al. Evolution of the cracking zones at the site of the baige landslides and their future development[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(5): 71 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 1 – 9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 利用国产遥感卫星进行金沙江高位滑坡灾害灾情应急监测 [J]. 遥感学报, 2019, 23(2): 252 – 261. [TANG Yao, WANG Lijuan, MA Guochao, et al. Emergency monitoring of high-level landslide disasters in Jinsha River using domestic remote sensing satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(2): 252 – 261. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 唐尧, 王立娟, 马国超, 等. 基于“高分+”的金沙江滑坡灾情监测与应用前景分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1082 – 1092. [TANG Yao, WANG Lijuan, MA Guochao, et al. Disaster monitoring and application prospect analysis of the Jinsha River landslide based on “Gaofen+”[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 1082 – 1092. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 吴瑞安, 马海善, 张俊才, 等. 金沙江上游沃达滑坡发育特征与堵江危险性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 120 – 128. [WU Ruian, MA Haishan, ZHANG Juncai, et al. Developmental characteristics and damming river risk of the Woda landslide in the upper reaches of the Jinshajiang River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(5): 120 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈松, 陈剑, 刘超. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物粒度分维特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 78 – 85. [CHEN Song, CHEN Jian, LIU Chao. Analysis of grain size fractal feature of outburst deposits induced by the Xuelongnang Paleolandslide-Dammed lake in the upper Jinsha River[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2): 78 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [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 october 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534 – 1551. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 余志球, 邓建辉, 高云建, 等. 金沙江白格滑坡及堰塞湖洪水灾害分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 286 – 292. [YU Zhiqiu, DENG Jianhui, GAO Yunjian, et al. Analysis on baige landslide and barrier lake flood disasters in Jinsha River[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(2): 286 – 292. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 唐辉明, 李长冬, 龚文平, 等. 滑坡演化的基本属性与研究途径 [J]. 地球科学, 2022, 47(12): 4596 – 4608. [TANG Huiming, LI Changdong, GONG Wenping, et al. Fundamental attribute and research approach of landslide evolution[J]. Earth Science, 2022, 47(12): 4596 – 4608. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 滑坡堵江的基本条件 [J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 41 – 46. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan. The main conditions of landslide dam[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(1): 41 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2001. [HUANG Runqiu, WANG Shitian, ZHANG Zhuoyuan, et al. A study on the dynamic processes and engineering environmental effects of the shallow surface crust in southwest China[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2001. (in Chinese)]
- [18] 李炜. 水力计算手册 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. [LI Wei. Hydraulic calculation manual (Second Edition) [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese)]