

基于多源遥感数据的高位滑坡特征分析

王 猛, 何德伟, 贾志宏, 胡至华

Analysis of high-position landslide characteristics based on multi-source remote sensing data: A case study of the Yanwo Village landslide in Rongshan Town, Lizhou District, Guangyuan City

WANG Meng, HE Dewei, JIA Zhihong, and HU Zhihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202211045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金沙江结合带高位远程滑坡灾害链式特征遥感动态分析

Remote sensing dynamic analysis of chain characteristics of long range and high position landslide in Jinsha River junction zone: A case study of Baige landslide

黄细超, 余天彬, 王猛, 朱赛楠, 宋班, 刘文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 40-51

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

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

刘文, 王猛, 朱赛楠, 余天彬, 黄细超, 宋班, 江煜, 孙渝江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 29-39

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

多源遥感数据在新疆精河县震后滑坡调查中的应用

Deformation failure mode and stability analysis of dangerous rock mass in Shitandi Village, Fuping

王娜, 徐素宁, 王赛, 丁志磊, 李文娟, 彭令 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(4): 58-63

基于数据挖掘技术的白水河滑坡多场信息关联准则分析

Analysis on association rules of multi-field information of Baishuihe landslide based on the data mining

陈锐, 范小光, 吴益平 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 1-8



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202211045

王猛, 何德伟, 贾志宏, 等. 基于多源遥感数据的高位滑坡特征分析——以广元市利州区荣山镇岩窝村滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 57-68.

WANG Meng, HE Dewei, JIA Zhihong, et al. Analysis of high-position landslide characteristics based on multi-source remote sensing data: A case study of the Yanwo Village landslide in Rongshan Town, Lizhou District, Guangyuan City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 57-68.

基于多源遥感数据的高位滑坡特征分析 ——以广元市利州区荣山镇岩窝村滑坡为例

王 猛¹, 何德伟², 贾志宏³, 胡至华⁴

(1. 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; 2. 中建鸿腾建设集团有限公司, 四川 成都 610213; 3. 成都市地质环境监测站, 四川 成都 610095; 4. 绵阳科技城发展投资(集团)有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 2021年10月6日13时许, 四川省广元市利州区荣山镇岩窝村三组发生高位滑坡灾害。滑坡造成4处民房、3条电力线路被毁, 掩埋170 m长的乡村公路, 堵塞河道350 m。利用高位滑坡滑前多期卫星数据、滑坡滑后高精度无人机航空影像以及机载LiDAR数据等多源遥感信息源, 采用三维立体+时间的四维分析方法, 研究高位滑坡特征及其滑动模式。从高位滑坡发育背景入手, 通过高位滑坡滑前变形特征以及高位滑动过程动态分析, 总结高位滑坡变形破坏特征及滑动模式。根据滑坡已经发生过程推演及后部残留滑坡体稳定性分析结果, 预测分析高位滑坡未来滑动的三种滑动模式: 一是滑坡后缘继续错落和活动, 挤压前部滑坡体直接剪出; 二是滑坡后缘继续错落和活动, 沿着已有滑坡通道发生推移式滑坡; 三是前部滑坡体启动, 引发中后部滑坡体发生牵引式滑坡。高位滑坡在西南山区屡见不鲜, 在早期地质灾害隐患调查中应有效识别、加强防灾减灾措施。

关键词: 多源遥感; 高位滑坡; 变形特征; 破坏特征; 滑动模式

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2023)06-0057-12

Analysis of high-position landslide characteristics based on multi-source remote sensing data: A case study of the Yanwo Village landslide in Rongshan Town, Lizhou District, Guangyuan City

WANG Meng¹, HE Dewei², JIA Zhihong³, HU Zhihua⁴

(1. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Institute of Comprehensive Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Zhongjian Hoton Construction Group Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610213, China; 3. Chengdu Geological Environment Monitoring Station, Chengdu, Sichuan 610095, China; 4. Mianyang Science Technology City Development Investment (Group) Co. Ltd., Mianyang, Sichuan 621000, China)

收稿日期: 2022-11-23; **修订日期:** 2023-07-24 **投稿网址:** <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国华电集团有限公司科研项目(JS-LW-FW/ZX-084; JS-YBT-FW/YF-2022-30); 成都市地质环境监测站委托项目(2068-2340ZHBC-1621)

第一作者: 王 猛(1980-), 男, 重庆北碚人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害遥感应用研究工作。E-mail: wangmengscrs@qq.com

通讯作者: 何德伟(1980-), 男, 四川眉山人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价与防治工作。

E-mail: 68195493@qq.com

Abstract: On October 6, 2021, a high-position landslide disaster occurred in Yanwo Village, Rongshan Town, Lizhou District, Guangyuan City, Sichuan Province, around 13: 00. The landslide resulted in the destruction of 4 houses, 3 power lines, the burial of a 170-meter-long rural road, and the blockage of a 350-meter-long river channel. By utilizing a variety of remote sensing information sources, including multi-period satellite data before and after landslide, high-precision UAV aerial images, and airborne LiDAR data, the characteristics of high landslide and its sliding mode are studied by using a four-dimensional analysis approach combining three-dimensional space with time. Starting from the development background of high landslide, the deformation and failure characteristics and sliding mode of high landslide are summarized by analyzing the deformation characteristics before sliding and the dynamic procession of the high landslide. Based on the deduced landslide progression and the stability evaluation of the residual landslide at the rear, three sliding modes for future high-position landslide events are predicted and analyzed: Firstly, the back edge of landslide continues to be disjointed and move, causing a direct shear failure of the front part of the landslide by squeezing. Secondly, the trailing edge of the landslide continues to be disjointed and move, resulting in the sliding landslide occurs along the existing landslide channel. Thirdly, the initiation of the front part of the landslide trigger a tractional landslide in the middle and rear parts of the landslide. High-position landslides are common in the southwest mountainous areas, and during early geological hazard investigations, they should be effectively identified, and disaster prevention and mitigation measures should be strengthened.

Keywords: multi-source remote sensing; high-position landslide; deformation characteristics; failure characteristics; sliding mode

0 引言

高位滑坡由于剪出口位置高、临空条件好、潜在势能大,常发生高速远程运动,并伴随滑坡—碎屑流—堰塞湖灾害链^[1-2]。国内曾经出现过类似运动过程中发生转向造成重大事故的高位滑坡灾害事件。2004年12月3日凌晨3时40分,贵州省纳雍县鬃岭镇左家营村岩脚组后山发生山体滑坡,造成13人受伤、44人死亡。崩塌堆积体遇阻后分为东西两支,并缓解了其冲击力,否则造成的灾难更大^[3]。2009年6月5日下午3时重庆市武隆铁矿乡鸡尾山山体滑坡事故,直接导致山对面一矿场和当地村民被掩埋。崩滑体西侧结构面的延伸方向在崩滑体中前部发生了明显的转折,这一转折为崩滑体向东侧陡崖临空方向滑出提供了条件^[4]。滑坡体视倾角方向斜坡为滑坡体提供了转向滑动的临空面;沿视倾角方向滑动前缘存在一相对稳定的块体,形成了整体滑动^[5]。2013年7月10日上午10时,都江堰市中兴镇三溪村一组五里坡发生特大型高位山体滑坡,造成161人遇难。崩滑体沿着相对高差270m的斜坡剪出,在运动了300m后,受前方沟道地形限制与沟谷发生撞击、碎裂、在洪水作用下转换为泥石流^[6]。张涛等^[7]通过现场调查、遥感影像解译和无人机航拍图像,确定了高位滑坡滑动全过程,并采用Rockfall软件模拟源区滑体的运动路径、速度与能量。滑坡加载失稳后,沿节理面及砂泥岩软弱部位向东侧临空面滑动,遇到五

里坡山坡脚后受到挤压,向南转向沿沟槽滑流,并推挤沟槽中的土体^[8]。在强降雨作用下碎屑流饱和并迅速转化为泥石流高速流动,受沟道地形影响再次发生偏转涌向下游的三溪村^[9]。2015年8月12日零时30分,陕西省山阳县中村镇烟家沟村突发山体滑坡,造成8人遇难、57人失踪。山阳滑坡体在视向高位滑动剪出后,历经了2次碰撞折返,最远滑动距离达到600m,前部相对稳定块体在下滑驱动块体的挤压作用下产生溃屈破坏,并促使下滑驱动块体沿西侧溶蚀结构面产生脆性剪断,形成整体滑动^[10]。2017年8月28日10时40分,贵州省毕节市纳雍县张家湾镇普洒社区大树脚组发生山体滑坡灾害,导致8人受伤、35人死亡。滑坡经历“渐进损伤”、“临界崩滑”、“解体破碎”、“震荡抛射”和“堆积压实”动力响应阶段,在3种作用及相应的3个变形阶段,滑坡体宏观变形始终表现出明显的“下座”和“顺时针旋转”特征^[11]。灾害发生后碎屑流堆积体呈“裤衩状”,后缘拉陷槽在灾前的楔形沉降变形和地下水所产生的侧向推挤作用和底劈作用是整体崩塌发生的直接触发因素,崩塌发生前的降雨过程对崩塌的发生有重要的促进作用^[12]。2018年10—11月,西藏自治区江达县白格村发生特大型高位岩质滑坡-堰塞湖灾害,造成金沙江断流2日,王立朝等^[13]基于地质调查、多期遥感影像解译、现场变形监测及其数值方法等对白格滑坡进行深入的探讨与分析。

西南岩溶山区的“高位滑坡”剪出口高差通常大于

50 m, 具有高速远程运动特征, 运动过程中具有冲击铲刮、破碎解体、气垫和流化四种动力学效应^[14]。与一般滑坡相比, 高位滑坡的形成条件具有一定独特性, 受地形、地震、降雨、人类活动等共同作用的影响, 其中地震和降雨是高位滑坡最重要的诱发因素, 陡峻的地形、滑坡前后缘高差较大, 更容易孕育高位滑坡^[15]。滑坡的变形破坏阶段根据其受力和位移程度可分为蠕动挤压阶段、滑动破坏阶段和稳定阶段^[16]。刘雄^[17]对这类山体滑坡进行了研究, 认为失稳模式具有复合型, 通常上部基岩发生侧向崩落, 堆积于次级斜坡上, 在崩塌不断堆积加载和暴雨等因素作用下, 转化为堆积层滑坡体。

2021年10月6日13时许, 四川省广元市利州区荣山镇岩窝村三组发生高位滑坡(简称“10·6”岩窝村滑坡), 体积约 $3.40 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的山体滑坡在滑动过程中3次转向, 瞬间摧毁沿途大量梯田及中部的森林, 完全摧毁4处民房及3条电力线路, 掩埋坡脚170 m乡村公路, 堵塞河道350 m, 并形成堰塞湖, 威胁坡脚500 kV超高压直流线路的安全, 无人员伤亡, 但造成严重经济损失。本文利用滑后高精度无人机航空影像、机载LiDAR数据等多源遥感信息源, 采用三维立体+时间的四维分析方法, 研究高位滑坡特征及其滑动模式。有利于早期地质灾害隐患调查中进行有效识别, 提前防灾减灾。

1 研究区概况

“10·6”岩窝村滑坡所在的广元市利州区多年平均气温 $16.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降雨量为 941.8 mm , 集中在5—9月, 占全年的 84.38% 。根据1971年以来气象资料统计, 降雨最多年份出现在1981年, 降雨量 1587.2 mm , 最少年份出现在1997年, 降雨量 666.4 mm 。降水时段分布不均, 多集中于7—8月份。区内最大日降雨量为 185.9 mm , 最大小时雨量为 81.5 mm , 10 min 雨强为 26.7 mm 。高强度降雨在时间分布上不均匀, 多形成大—暴雨和局部暴雨, 集中暴雨和持续降雨成为该地区诱发地质灾害的主要因素。

滑坡区位于扬子陆块北部边缘地带, 龙门山断裂带北东段, 区域构造稳定性差, 地震烈度达Ⅷ度。滑坡区属于构造侵蚀低山地貌, 山体为北东—南西走向, 最高点山脊高程约 1050 m 。地形为北东—南西向沟槽。最低点位于前缘河流, 高程 $580 \sim 600 \text{ m}$, 相对高差约 450 m 。滑坡区位于寺沟河右岸, 属嘉陵江流域。流域沟谷纵坡相对较大, 发育单斜山“V”型谷至宽谷“U”型谷地形。地形条件复杂, 切割强烈, 相对高差大, 势能优越。该区发育的三叠系须家河组与侏罗系白田坝组煤系地层的

砂岩、砾岩、泥岩和红层区的砂岩与泥岩互层, 软弱结构面、节理裂隙发育, 斜坡结构松散, 岩层倾角 $15^\circ \sim 25^\circ$, 斜坡坡度 $40^\circ \sim 50^\circ$ 。区域构造和岩性为高位滑坡灾害的发育提供了有利条件。

“10·6”岩窝村滑坡平面形态近似呈一“长条”型, 纵长约 1400 m , 在滑动过程中发生了3次转向, 呈近似西南—东南—西南方向滑动。滑坡体面积约 $17 \times 10^4 \text{ m}^2$, 周长约 2.32 km 。平均厚度约 20 m , 滑坡体体积约 $340 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。后部整体下错略微解体, 中前部完全解体并整体下滑, 前缘滑坡舌堵塞寺沟河形成堰塞湖。后期在滑坡体上又发育了泥石流, 再次堵塞河道(图1)。

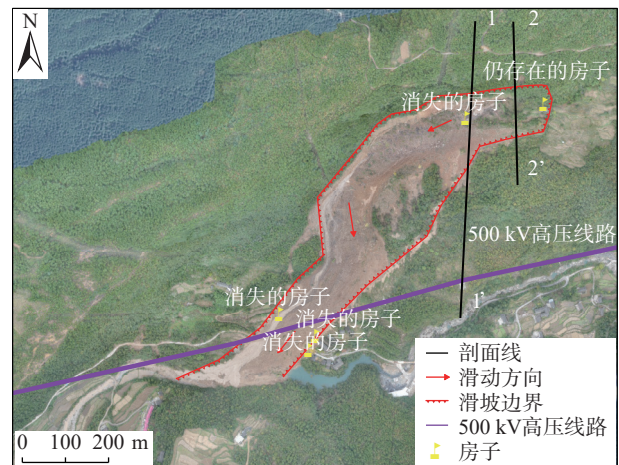


图1 “10·6”岩窝村滑坡无人机航测影像

Fig. 1 “Oct. 6th” Yanwo Village landslide aerial survey photography image of UAV

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

滑坡发生后, 通过多源遥感技术对滑坡发生前、发生过程以及发生后的数据和资料进行了收集、分析和整理, 并于2021年10月和2021年11月进行了2次野外调查, 获取了丰富而详实的第一手资料。

(1) 滑坡发生前数据

主要有1:200 000广元幅地质图(1967年出版)、南江幅地质图(1966年出版), 1:200 000广元幅综合水文地质图(1976年出版)、《四川省广元市市中区地质灾害调查与区划报告》(四川省华地建设工程有限责任公司—〇一分公司, 2003年7月)、《四川省“5·12”地震灾区广元市利州区地质灾害应急排查总结报告》(湖南省地质环境监测总站, 2008年6月)、《汶川地震灾区广元市利州区震后地质灾害详细调查与区划报告》(四川省广汉地质工程勘察院, 2010年3月)等滑坡

表 1 岩窝村滑坡多源遥感数据列表
Table 1 List of multi-source remote sensing data for the Yanwo Village landslide

序号	数据日期	数据类型	分辨率/m	数据来源
1	2013-02-12	光学卫星	0.5	Google地球
2	2013-03-05	光学卫星	0.5	Google地球
3	2013-04-01	光学卫星	0.5	Google地球
4	2014-10-05	光学卫星	0.5	Google地球
5	2014-11-30	光学卫星	0.5	Google地球
6	2015-05-29	光学卫星	0.5	Google地球
7	2016-06-07	光学卫星	0.5	Google地球
8	2018-01-17	光学卫星	0.5	Google地球
9	2019-06-03	光学卫星	0.5	Google地球
10	2019-09-22	光学卫星	0.5	Google地球
11	2020-03-17	光学卫星	0.8	高分二号卫星
12	2020-04-30	光学卫星	0.8	高分二号卫星
13	2020-05-05	光学卫星	0.8	高分二号卫星
14	2020-07-13	光学卫星	0.8	高分二号卫星
15	2021-01-21	光学卫星	0.8	高分二号卫星
16	2021-02-05	光学卫星	0.8	高分二号卫星
17	2021-02-20	光学卫星	0.8	高分二号卫星
18	2021-03-01	光学卫星	0.8	高分七号卫星
19	2021-09-19	光学卫星	0.8	高分七号卫星
20	2021-09-20	光学卫星	0.8	高分二号卫星
21	2021-10-17	无人机航空影像	0.2	深圳飞马机器人科技有限公司
22	2021-10-26	激光雷达数据	0.05	深圳飞马机器人科技有限公司
23	2021-10-26	无人机航空影像	0.2	深圳飞马机器人科技有限公司
24	2021-11-28	无人机航空影像	0.2	深圳飞马机器人科技有限公司

区地层岩性、地貌、产状、地质构造、地下水类型及涌水量等数据,以及 Google Earth 高分辨率影像 10 幅(2013 年 2 月 12 日—2019 年 9 月 20 日)、国产高分 2 号卫星影像(2020 年 2 月 5 日—2021 年 9 月 20 日)10 幅合计 20 期次滑坡区历史卫星影像等历史卫星影像(表 1)。

(2) 滑坡发生后数据

滑坡发生后进行了 3 次无人机航测和 1 次无人机载 LiDAR 测量:分别在 2021 年 10 月 17 日、2021 年 10 月 26 日、2021 年 11 月利用深圳飞马机器人科技有限公司的 D2000 电动多旋翼无人机对滑坡区进行了无人机测量,得到场地高精度的数字地表模型(DSM)、数字高程模型(DEM)和数字正射影像图(DOM);在 2021 年 10 月 26 日,利用深圳飞马的 D2000 无人机搭载轻型激光雷达(D-LiDAR2000)穿透植被,获取了滑坡区高精度激光雷达点云数据,制作了大比例尺高精度的数字高程

模型(DEM)。其平面精度可达到 0.05 m,高程精度可达 0.10 m。

2.2 研究方法

采用多源遥感技术获取高位滑坡历史卫星数据以及滑坡滑后高精度无人机航空影像以及机载 LiDAR 数据,采用三维立体+时间的四维分析方法,从高位滑坡发育背景入手,通过高位滑坡历史变形特征以及高位滑动过程动态分析,总结高位滑坡变形破坏特征,预测分析高位滑坡未来滑动的 3 种滑动模式,本文采用的研究方法如图 2 所示。

3 结果

3.1 高位滑坡历史变形特征

根据历史影像卫星数据、地质灾害区划报告和野外调查,将滑坡变形分为 3 个阶段,分别为 2021 年 10 月之前的缓慢变形阶段、2021 年 10 月 3—6 日的急剧滑动阶段和 2021 年 10 月 6 日之后的停滑阶段。

3.1.1 缓慢变形阶段

从最早 2013 年的影像发现,滑坡已存在,规模和范围较小。早期滑坡发生在中下部,处于上、下梯田之间的森林之间,面积约 10 000 m²,周长 500 m。主滑方向为南偏西,为松散堆积层浅表层滑坡,见图 3(a)。2013 年全年滑坡范围均未扩大,变形没有进一步加剧。2014 年由于下部滑坡体土壤和植被的生长覆盖,滑坡规模减小到约 6 500 m²,直到 2015 年 5 月滑坡范围一直保持减小趋势,变形未加剧,见图 3(b)(c)。

2016—2018 年由于中下部土壤和植被的自然修复能力,滑坡范围进一步缩小,达到约 2 500 m²。表明 3 年间该滑坡未发生变形破坏,变形没有加剧,见图 3(d)。

根据 2019 年 6 月的影像,滑坡并没有进一步扩大范围,变形没有进一步加剧。但是在滑坡体下部又形成了新的小规模滑塌,横向长约 60 m,纵向长约 10 m,滑塌面积约 600 m²。滑坡体不稳定,坡体在缓慢蠕动、变形,见图 4(a)。2019 年 9 月,由于雨季雨水的渗浸,经过土壤的自我调节和植被生长旺盛,下部小范围滑塌体被林木覆盖,恢复如初,滑坡上部仅存约 1 500 m²的地表裸露范围,见图 4(b)。

2020 年 5 月到 2021 年 3 月,归功于土壤和植被的自然调节和修复能力,滑坡范围和面积几乎未发生变化。表明近 1 年滑坡没有发生明显变形,变形破坏特征不明显,见图 4(c)。2021 年 9 月,滑坡范围进一步缩小到 1 400 m²,且仅存在上部,见图 4(d)。

通过对 2013—2021 年近的 20 幅卫星影像分析,滑

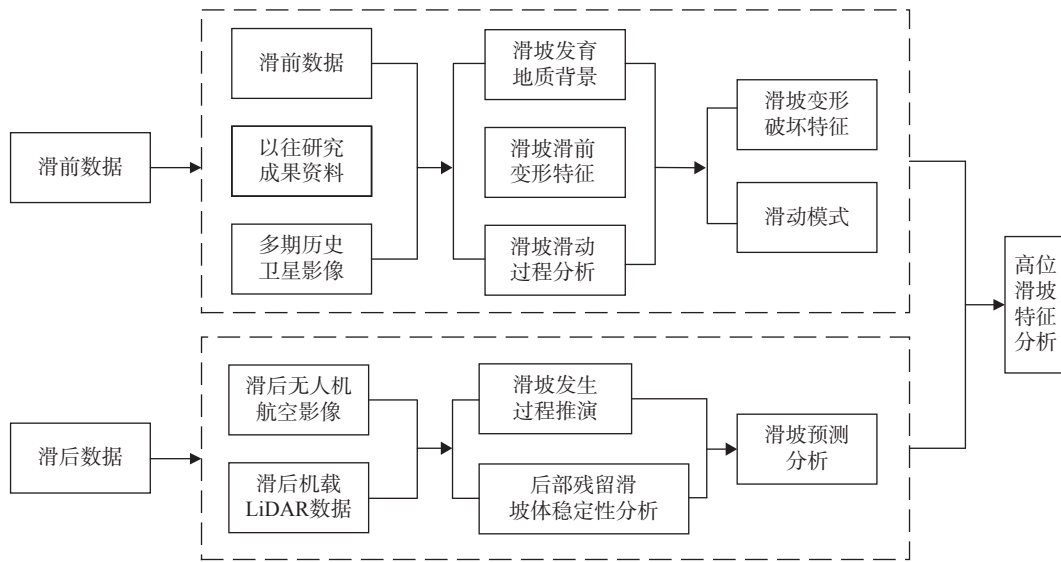


图 2 研究工作流程图

Fig. 2 Workflow chart of the research process

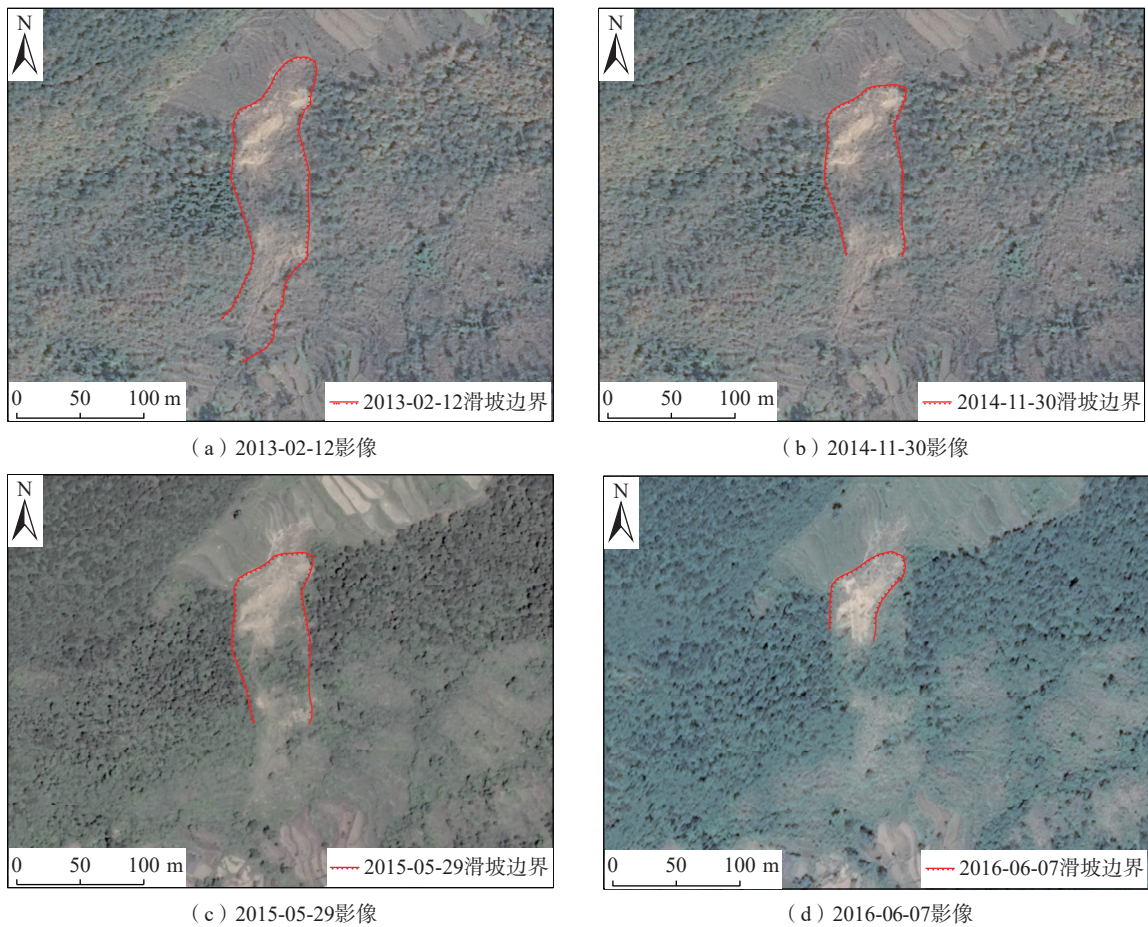


图 3 2013—2016 年滑坡变形影像

Fig. 3 Landslide deformation images from 2013 to 2016

坡规模、面积和范围不仅没有扩大,还有减小的趋势。2021 年 10 月之前为滑坡的缓慢变形阶段,持续时间

20 年以上,在该阶段滑坡仅在中部发生局部变形,且变形迹象不明显,无变形破坏事件发生。

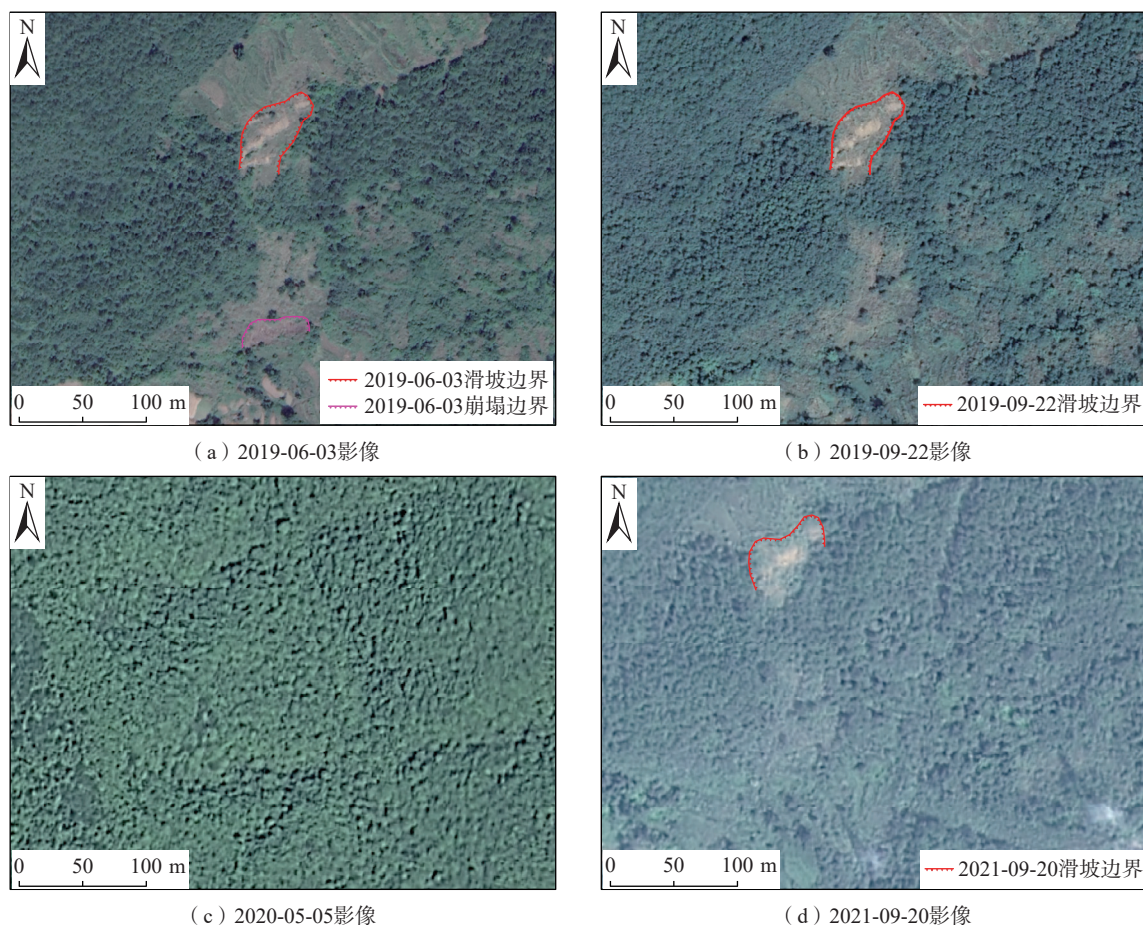


图 4 2016—2021 年滑坡变形影像
 Fig. 4 Landslide deformation images from 2016 to 2021

3.1.2 急剧滑动阶段

2021 年 10 月 3 日, 由于 9 月以来的持续强降雨, 坡体固体物质被持续浸泡和冲刷, 岩质变软, 岩体强度和抗剪强度降低, 水压力增加, 边坡抗滑力下降, 后部山体整体向西南方发生崩塌下错, 毁坏上部梯田及房屋。在 10 月 4 日和 5 日的暴雨作用下, 斜坡岩土体不断软化和劣化, 岩土体强度和抗剪强度均下降, 坡体孔隙水压力进一步增加, 破坏了坡体极限平衡稳定状态, 边坡稳定性显著下降。

2021 年 10 月 6 日中雨, 13 时寺沟河坡脚因洪水冲刷失去支撑先滑动, 诱发中后部岩土体发生牵引式滑坡, 平面上发生 3 次转折, 中后部主滑方向为西南, 中部主滑方向为东南, 前部再次转为西南方向滑动。在滑动过程中瞬间摧毁沿途的公路、梯田、森林、电力线及房屋。

2021 年 10 月 3—6 日为滑坡的第二阶段, 滑坡至少发生 2 次急剧滑动, 并产生大规模整体失稳破坏, 造成财产损失。

3.1.3 停滑阶段

2021 年 10 月 6 日滑坡后, 滑坡后壁不再扩展, 裂缝、两侧边界不再扩展, 右侧陡壁不再扩展, 滑坡处于停滑阶段, 坡体基本稳定, 属于滑坡的第三个阶段。

从平面上看, 滑坡体后部宽度约 100 m, 长度约 650 m; 中部宽约 150 m, 最宽处约 170 m, 长度约 300 m; 前部宽约 150 m, 长度约 450 m。

从空间上看, 滑坡整体地形坡度为 20°~25°, 其中滑坡前部坡度稍缓, 为 15°~20°, 滑坡中部坡度稍陡, 为 20°~30°, 中后部坡体坡度稍缓, 约 10°~15°。

根据野外调查, 滑坡体物质结构松散零乱。前部滑体覆盖层较厚, 厚度为 15~33 m, 主要为黏土和粉质黏土, 土体含水量大, 处于饱和状态, 可塑—软塑, 混少量块碎石土, 块碎石含量分布不均匀; 滑体中部覆盖层较厚, 厚度为 10~25 m, 滑体物质以黏土和粉质黏土为主, 含水量较前部少, 处于稍湿润—湿润状态, 可塑状, 混定量碎石和块石, 含量约为 10%; 滑体后部地层同样以黏土和粉质黏土为主, 含水量较前部和中部少, 处于

稍湿润状态,可塑,碎块石含量较多,含量约为 20%,主要集中在滑坡后壁和右侧边界陡壁下方。

滑体前部和中部坡体由滑坡碎屑流物质转化而来,完全解体重塑,表明滑坡位移大,速度较快。滑体后部坡体虽然完全解体,但仍然保留原始结构,说明滑坡位移相对较小,运动速度较慢,陡壁下的松散物质已经被搬运带走,形成宽阔的拉槽。

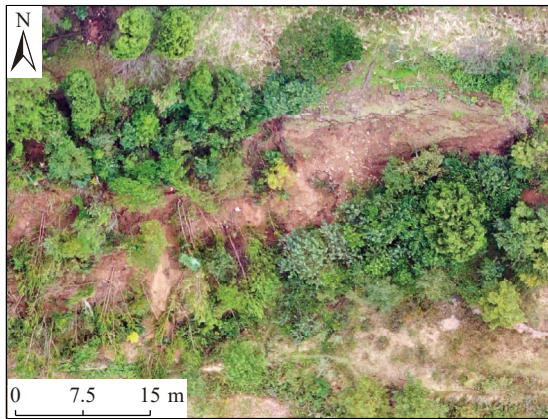
3.2 高位滑坡破坏特征

2次现场调查结合多期次无人机航测影像充分表明,“10·6”岩窝村滑坡边界清晰,其边界条件主要受地形及基岩结构面控制。滑坡后缘以山顶公路为界,斜坡坡度较陡,坡度 35°~45°,覆盖层较薄,局部地段基岩裸露,岩体近乎直立。滑坡后壁以中上部拉裂陡壁为界,滑坡前缘直接堵塞寺沟河形成堰塞湖,滑坡左侧边界上

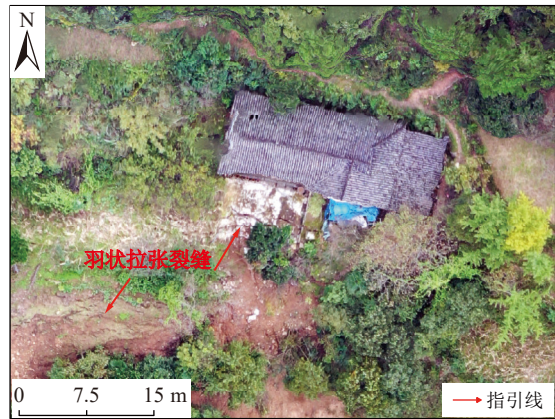
部为梯田与森林结合处,下部以冲沟为界,滑坡右侧边界上部为滑动拉裂陡壁,中部为滑坡体冲击原始森林形成的边界斜坡,下部为原梯田边缘斜坡(图 1)。

滑坡后部左侧边界形成规模不一的下错拉裂斜坡,见图 5(a),斜向延伸约 100 m,平均高差约 12 m,平均坡度约 25°。后部房子的地面可见横向羽状剪切拉张裂缝,见图 5(b)。

滑坡后部的滑体从左侧边界滑出,沿西南方向滑动,在运动的过程中碰撞、铲刮沿途的第四系松散物质及树木,并发生解体,形成次级小滑坡,与大滑坡在中部边界处相交,成为大滑坡左侧的最远边界,见图 6(a)。滑坡中后部剪出口右侧斜坡由于被基岩所阻挡,无法直接滑至坡下,只能向左变向,留下侧壁一系列分级呈阵性的滑动遗迹,见图 6(b)。



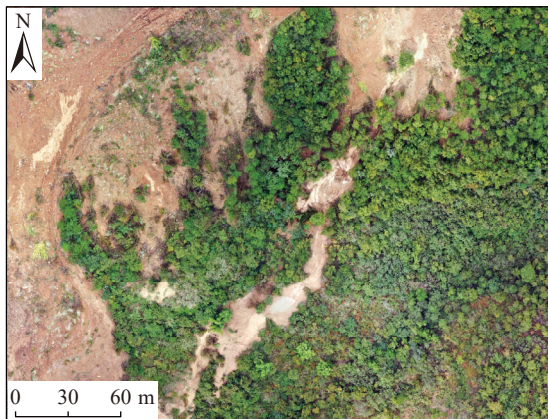
(a) 滑坡左侧边界拉裂斜坡



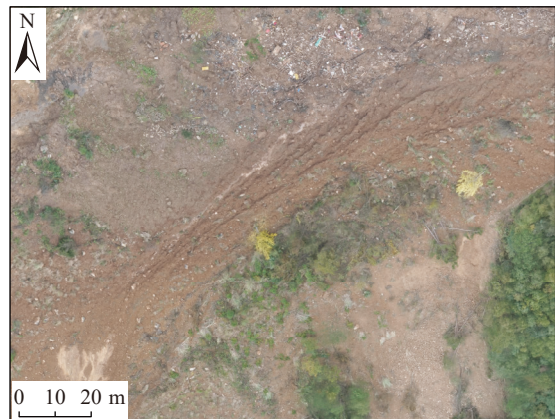
(b) 前部房子地面的羽状拉张裂缝

图 5 滑坡形成的拉张裂缝

Fig. 5 Tensional fissure triggered by the landslide



(a) 次级小滑坡形成贯通边界



(b) 滑坡左侧分级阵性滑动痕迹

图 6 纵向边界特点

Fig. 6 Longitudinal boundary characteristics

滑坡左侧边界公路发育贯通的拉裂剪切裂缝,与坡向垂直,横向沿公路展布,推断滑坡继续蠕滑变形,

内部应力释放剪切坡体形成(图 7)。滑坡舌前缘堵塞寺沟河,形成堰塞湖,水面最宽处约 40 m,回水长度约

400 m, 水深约 5 m(图 8)。



图 7 公路横向贯通裂缝

Fig. 7 Transverse penetrating crack



图 8 滑坡前缘堰塞湖

Fig. 8 Landslide front edge barrier lake

据调查测量,“10·6”岩窝村滑坡导致后缘形成滑坡后壁和直立陡坡。滑坡后缘水平位移累计高达 5~10 m,垂直位移累计达 20~30 m,目前形成的后壁为一近直立砂岩夹粉砂岩的斜坡,坡度 70°~90°(图 9),坡体表面岩体节理裂隙发育,发育多组优势节理面。



图 9 滑坡后壁直立陡坡照片

Fig. 9 Photograph of the steep vertical backslope of the landslide

滑坡破坏特征极其明显,表现出明显的滑移迹象。滑坡后部原为梯田,全部被毁,原有一房屋,被夷为平地,完全无完整框架(图 10)。从散落的房屋碎屑判断水平移动距离最少约 60 m,最远约 200 m,垂直位移约 40 m。

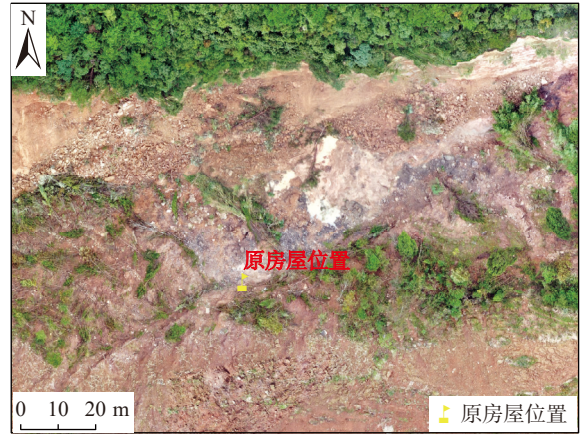


图 10 滑坡后原房子荡然无存

Fig. 10 Former houses completely destroyed after landslide

4 高位滑坡稳定性及其滑动模式预测分析

4.1 高位滑坡稳定性分析

边坡常用的稳定性评价主要采用定性、定量以及非确定性等方法。定量评价主要通过模型简化,采用数值计算的方式,进行半定量评价^[18],如极限平衡法^[19]、无单元法^[20]、有限单元法^[21]、离散单元法^[22]等;非确定性分析评价主要采用数学计算方法,建立数学模型,如可靠度评价^[23]。

滑坡稳定性定量评价主要采用极限平衡法,计算常用的方法有瑞典圆弧法、瑞典条分法、毕肖普法及简布法,国内主要采用传递系数法。皋兰山滑坡滑面可视为圆弧面,亦可简化为折线形,稳定性评价选用了费伦纽斯法、毕肖普法、简步法^[24]。传递系数法又被称为不平衡推力法或剩余推力法,主要有两种解法,一种是增大下滑力法,另一种是强度折减法。强度折减法作为一种成熟可靠的方法,被广泛应用于滑坡的稳定性计算中,取得了较好的结果^[25-26]。

1955 年毕肖普考虑了条间力的作用,并假定土条之间的合力是水平的,导得的安全系数表达式:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'_i]}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{R}} \quad (1)$$

式中: F_s ——安全系数;

m_{ai} ——第 i 个条块的计算系数;

- c'_i ——第 i 个条块的黏聚力/kPa;
- b_i ——第 i 个条块的水平宽度/m;
- W_i ——第 i 个条块重量/kN;
- u_i ——第 i 个条块的孔隙水压力/kPa;
- ϕ'_i ——第 i 个条块的有效内摩擦角/(°);
- α_i ——各条块滑面段的倾斜角度/(°);
- Q_i ——第 i 个条块的水平地震力/kN;
- e_i —— Q_i 到圆滑圆心的竖向距离/m;
- R ——滑面半径/m。

简化毕肖普法计算原理是假定滑动面为圆弧,且滑面为连续面;采用极限平衡分析条分法,假定滑坡体和滑面以下的土条均为不变形的刚体,并且其稳定安全系数以整个滑动面上的平均抗剪强度与平均剪应力之比来定义。

毕肖普法适用于圆弧滑动面的稳定性计算,且满足所有条块力的平衡条件。

目前滑坡后壁已经形成新的临空面,滑坡后缘存在再滑动风险,并且后部大量堆积体分布拉张裂缝,解体较严重,存在继续滑移可能。因为滑坡后壁较陡立,滑

坡物质解体明显,故假定滑动面为圆弧且滑面为连续面。因此,选择两条有代表性的纵剖面对滑坡的稳定性进行分析和计算。采用简化毕肖普法利用 GEO5 边坡稳定分析软件自动搜索滑动面,在正常工况下,对两条剖面的滑坡体进行稳定性分析和计算。岩土体主要物理力学指标见表 2。

表 2 岩土体主要物理力学性质指标
Table 2 Key physical and mechanical properties of rock and soil mass

岩土名称	天然重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然抗剪强度指标	
			黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑体	17.0	17.6	16.0	15.0
粉质黏土(硬塑)	18.0	18.2	18.0	23.0
基岩	20.0	20.4	30.0	15.0

1-1'、2-2'两条纵剖面线位于滑坡后部,连接前缘和后壁。1-1'剖面线(图 11)较 2-2'长,但高程低。1-1'剖面线全长约 650 m,后缘到后壁山体,前缘到寺沟河河底。2-2'剖面线全长约 205 m,后缘距离后壁约 15 m,前缘止于梯田下部 30 m 外的森林。

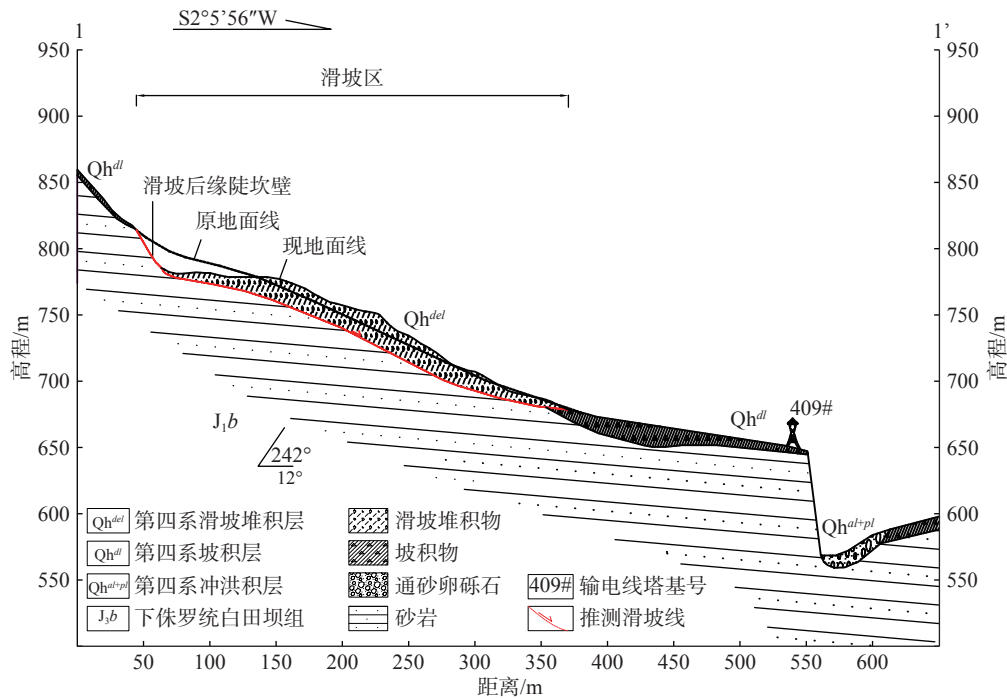


图 11 1-1'纵剖面

Fig. 11 Profile 1-1' longitudinal cross-section

1-1'剖面在铁塔以上斜坡整体坡度约 20°,其中后壁以上斜坡坡度约 35°,滑坡区宽度约 320m,坡度约 15°,下部长度约 270m,坡度约 10°。斜坡上陡下缓,后壁即为有效临空面,滑坡区为松散滑坡堆积体,裂隙发

育,结构疏松,易于滑动。

从图 11 同样看出,坡体中上部陡,下部缓,斜坡存在滑动的可能。

从计算结果看出,滑面抗滑力比滑动力少约 300 $\text{kN}\cdot\text{m}$,

相差不大,但抗滑力矩比滑动力矩少 27 000 kN·m,差别较大,计算得出安全系数为 0.90,小于正常工况下的安全系数 1.35。坡体处于欠稳定状态,滑坡区不稳定,前缘会被掩埋。

2-2'剖面(图 12)与 1-1'剖面坡形相似,但斜坡整体

坡度相对较大,坡度约为 30°,其中后壁以上斜坡坡度约 40°,滑坡区宽度约 162 m,坡度约 25°,前缘斜坡坡度约 30°。斜坡上部陡,中部缓,下部又变陡,滑坡区堆积滑坡松散体,下部坡体提供有利的地形,滑坡区又成为前缘滑坡继续滑动的物源。

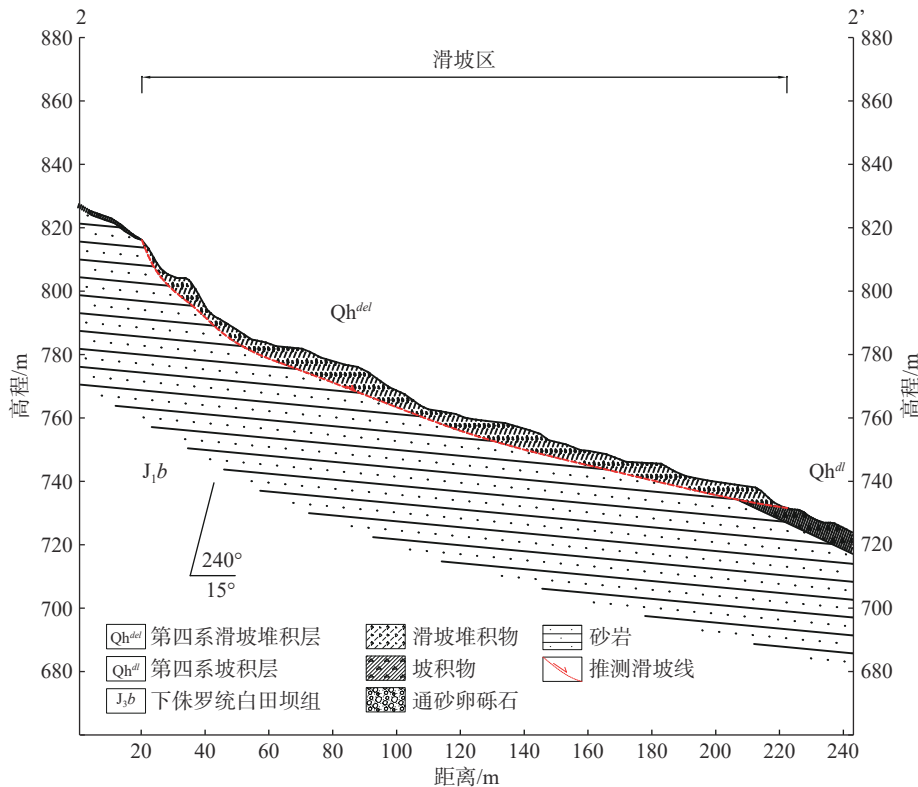


图 12 2-2'纵剖面

Fig. 12 Profile 2-2' longitudinal cross-section

2-2'剖面(图 12)与 1-1'剖面类似,斜坡上陡下缓,存在滑坡风险。由于 2-2'剖面与 1-1'剖面计算参数相同,边界条件相似,坡形也类似,因此两个剖面的安全系数较接近。从计算结果看,2-2'剖面滑坡体安全系数为 0.91,也小于正常工况下的安全系数 1.35。坡体同样不稳定,滑坡区不稳定,前缘会被掩埋。

通过 2 个剖面的稳定计算分析,滑坡后部目前处于不稳定状态,暂时未滑动。未来在地震、降雨或人类活动的影响下,坡体难以保持平衡状态,可能会重新滑动,产生新的灾害。

4.2 高位滑坡发展趋势分析

据历史资料,2002 年以前该滑坡至少发生过 1 次小规模滑动,2021 年 10 月 3 日后部山体发生较大规模下错滑动,2021 年 10 月 6 日该滑坡发生大规模整体滑动破坏。

“10·6”滑坡发生后,坡体内积累的下滑势能得到释

放,下部坡体稳定,中部坡体较为稳定,后部坡体不稳定。

由于滑坡体下错和滑移,后部滑坡体开裂并解体。目前滑坡高陡后壁已形成新的临空面,导致后缘坡体失去有效支撑,面临开裂可能性,加剧下错风险。目前整体较为稳定,整体发生大规模滑动的可能性小,但是局部滑动的可能性大,尤其后部坡体不稳定。根据滑坡已经发生过程推演及后部滑坡体稳定性分析结果,该滑坡可能存在三种滑动模式,一是后缘继续错落和再次活动,挤压前期滑坡体物质使得滑坡体直接沿坡下剪出;二是后缘继续错落和再次活动,沿着已经形成的滑坡通道发生推移式滑坡;三是前部滑坡体重新启动,引发中后部滑坡体发生牵引式滑坡。防灾形势严峻。

5 结论

(1)高位滑坡具有滑前的缓慢变形阶段和临滑的急

剧变形阶段,缓慢变形阶段持续数十年之久,急剧变形阶段常伴随有强降雨作用,运用光学遥感技术可实现不同变形阶段的动态监测。岩窝村滑坡变形破坏具有明显的3个阶段:即滑坡缓慢变形阶段,急剧滑动阶段和滑坡停滑阶段。岩窝村滑坡隐患形成于2002年以前,2013—2021年的光学卫星影像表明近9a滑坡变形迹象较弱。2021年9月以来的持续强降雨加剧了滑坡的变形,在水的作用下坡体物质被持续浸泡和冲刷,岩体抗剪强度降低,边坡稳定性显著下降,2021年10月滑坡体最终失稳破坏引发链式灾害。

(2)高位滑坡滑源区常具有有利的地形条件,愈陡峭的地形更容易孕育高位滑坡的发生。岩窝村滑坡所在斜坡体具有上陡下缓的地貌条件,后壁为新的临空面,滑坡区物质组成松散,裂隙发育,结构疏松,容易诱发新的滑坡;通过稳定性计算,滑坡后部安全系数在0.9~0.91,坡体处于不稳定状态,未来滑动风险大。

(3)高位滑坡具有明显的分区特征,可大致分为滑源区、滑流区、堆积区,如西藏易贡滑坡、金沙江白格滑坡。岩窝村滑坡滑源区位于斜坡顶部,滑体整体下错略微解体,滑流区位于斜坡中部,失稳块体完全解体并整体下滑,堆积区直达寺沟河形成堰塞湖。

(4)根据滑坡已经发生过程推演及后部滑坡体稳定性分析结果,预测未来滑坡可能存在3种滑动模式:一是沿纵断面方向滑动;二是顺原有通道发生推移式滑坡;三是沿原有通道发生牵引式滑坡。

该滑坡在2021年10月之前作为小型潜在不稳定斜坡存在了若干年,仅仅半个月就演变成大型高位滑坡造成严重破坏,形成机理、发生机制、运动具体过程较为复杂,需要做进一步的研究。我国西南山区及西北地区存在大量类似这类“开始很小、长时间静止、瞬时大规模爆发”的滑坡,滑坡发生前变形特征不明显,如何在早期地质灾害隐患调查中应有效识别、制定判定依据、及早发现、主动排查并积极防范,是未来研究的方向。

参考文献(References):

- [1] WEIDINGER J T. Landslide dams in the high mountains of India, Nepal and China—stability and life span of their dammed lakes[J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2006, (1): 67–80.
- [2] YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. The June 2017 Maoxian landslide: Geological disaster in an earthquake area after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(11): 1762–1766.
- [3] 刘传正, 郭强, 陈红旗. 贵州省纳雍县岩脚寨危岩崩塌灾害成因初步分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(4): 120–121. [LIU Chuanzheng, GUO Qiang, CHEN Hongqi. Preliminary analysis on the causes of dangerous rock collapse in Yanjiaozhai, Nayong County, Guizhou Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(4): 120–121. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 许强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009年6·5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(4): 433–444. [XU Qiang, HUANG Runqiu, YIN Yueping, et al. The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: Characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(4): 433–444. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2): 217–226. [YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide: A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2): 217–226. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 梁京涛, 成余粮, 王军, 等. 2013年7月10日四川省都江堰三溪村五里坡特大滑坡灾害遥感调查及成因机制浅析[J]. *工程地质学报*, 2014, 22(6): 1194–1203. [LIANG Jingtao, CHENG Yuliang, WANG Jun, et al. Remote sensing investigation and formation mechanism on Wulipo landslide of July 10, 2013 in Sanxi Village, Dujiangyan, Sichuan Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1194–1203. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张涛, 杨志华, 张永双, 等. 四川茂县新磨村高位滑坡铲刮作用分析[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 138–145. [ZHANG Tao, YANG Zhihua, ZHANG Yongshuang, et al. An analysis of the entrainment of the Xinmo high-position landslide in Maoxian County, Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 138–145. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 温铭生, 方志伟, 王阳谷. 都江堰市五里坡特大滑坡灾害特征与致灾成因[J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 448–453. [WEN Mingsheng, FANG Zhiwei, WANG Yanggu. Characteristics and disaster causes of Wulipo landslide in Dujiangyan City[J]. *Geoscience*, 2015, 29(2): 448–453. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王佳运, 张茂省, 贾俊, 等. 都江堰中兴镇高位滑坡泥石流灾害致灾成因与发展趋势[J]. *西北地质*, 2014, 47(3): 157–164. [WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. The cause and development tendency of the high-locality landslide and debris flow disaster of Zhongxing Town, Dujiangyan City[J]. *Northwestern Geology*, 2014, 47(3): 157–164. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王佳运, 石小亚, 武立, 等. “8·12”山阳滑坡视向滑动成

- 因机理[J]. 西北地质, 2018, 51(3): 232 - 239. [WANG Jiayun, SHI Xiaoya, WU Li, et al. Formation mechanism of apparent dip slide in the Shanyang "8·12" landslide[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(3): 232 - 239. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 崔芳鹏, 李滨, 杨忠平, 等. 贵州纳雍普洒滑坡动力触发机制离散元模拟分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 524 - 534. [CUI Fangpeng, LI Bin, YANG Zhongping, et al. Discrete element modelling on dynamic triggering mechanism of the Pusa landslide in Nayong County, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 524 - 534. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 肖锐铎, 陈红旗, 冷洋洋, 等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 3 - 9. [XIAO Ruihua, CHEN Hongqi, LENG Yangyang, et al. Preliminary analysis on the failure process and mechanism of the August 28 collapse in Nayong County, Guizhou Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 3 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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)]
- [14] 高杨, 贺凯, 李壮, 等. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 14 - 23. [GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest Karst Mountain areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 14 - 23. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王得双, 梁收运, 赵红亮. 高位滑坡特征与防治[J]. 地质灾害与环境保护, 2018, 29(3): 5 - 11. [WANG Deshuang, LIANG Shouyun, ZHAO Hongliang. Characteristic of high-locality landslide and prevention[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2018, 29(3): 5 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 上官力. 高位陡倾崩塌堆积体滑坡形成机理研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015. [SHANGGUAN Li. Research on genetic mechanism of the high dipping landslide composed of collapse deposit[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘雄. 新滩大滑坡机制探讨[J]. 岩土力学, 1986, 7(2): 53 - 60. [LIU Xiong. Discussion of the mechanism for Xintan beach landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 1986, 7(2): 53 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 等. 基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 35 - 42. [QU Jingjing, LU Yan, WU Shuliang, et al. Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 35 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 杨学堂, 王飞. 边坡稳定性评价方法与发展趋势[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(2): 103 - 106. [YANG Xuetao, WANG Fei. Evaluation method of slope stability and its developing trend[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(2): 103 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 周维垣, 寇晓东. 无单元法及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 5 - 9. [ZHOU Weiyan, KOU Xiaodong. Element free method and its application in geotechnique engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 5 - 9. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. [WANG Xucheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)]
- [22] GHABOUSSI J, BARBOSA R. Three-dimensional discrete element method for granular materials[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1990, 14(7): 451 - 472.
- [23] 李元松, 高晖, 陈峰, 等. 乌尉高速公路边坡稳定性综合评价[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 150 - 156. [LI Yuansong, GAO Hui, CHEN Feng, et al. Comprehensive assessment of slope stability in Wu - Yu highway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 150 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 殷跃平, 张作辰, 黎志恒, 等. 兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 302 - 310. [YIN Yueping, ZHANG Zuochen, LI Zhiheng, et al. Occurrence and hazard assessment on loess landslide of Gaolanshan in Lanzhou[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 302 - 310. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王述红, 朱承金, 张紫杉, 等. 基于动态强度折减 DDA 法的边坡多滑面稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1084 - 1091. [WANG Shuhong, ZHU Chengjin, ZHANG Zishan, et al. Stability analysis of multi-slip surface of slope based on dynamic strength reduction DDA method[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1084 - 1091. (in Chinese with English abstract)]
- [26] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59 - 70.