

## 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛

### A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

HAN Xudong, FU Jie, LI Yanyan, WANG Gaofeng, and CAO Chen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104028>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题

Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China

李滨, 殷跃平, 高杨, 邢爱国, 黄波林, 贺凯, 赵超英, 万佳威 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 5-13

#### 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

#### 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析

An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas

高杨, 贺凯, 李壮, 高浩源, 卫童瑶, 邢爱国, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 14-23

#### 深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析

Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20 th, 2015 in Shenzhen, China

高杨, 卫童瑶, 李滨, 贺凯, 刘铮, 王学良 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 129-129

#### 基于颗粒识别分析系统的碎屑流堆积物颗粒识别和统计方法研究

Particle identification and statistical methods of a rock avalanche accumulation body based on the particle analysis system

陈达, 许强, 郑光, 彭双麒, 王卓, 何攀 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 60-69

#### 巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究

A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county

李浩, 乐琪浪, 孙向东, 杨秀元, 李刚, 李兴虎 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 13-13



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104028

# 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

韩旭东<sup>1,2</sup>, 付杰<sup>1</sup>, 李严严<sup>3</sup>, 王高峰<sup>2</sup>, 曹琛<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心/自然资源部地质环境监测工程技术创新中心, 河北保定 071051; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心/自然资源部三峡库区地质灾害—重庆巫山野外科学观测研究基地, 重庆 404700; 3. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 4. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 如何提前判识滑坡变形并对其进行早期风险评估已成为地质灾害防治领域的研究热点。文章以舟曲白龙江流域江顶崖堆积层滑坡为反分析案例, 进行了滑坡变形早期判识及风险评估综合研究, 提出了小基线集雷达干涉(SBAS-InSAR)技术解译分析、地质-力学联合分析、动力过程数值模拟分析三者相结合的滑坡变形早期判识与风险评估全流程分析模式。基于 SBAS-InSAR 技术解译能够准确地判识江顶崖滑坡的分布范围及早期形变特征, 江顶崖滑坡的变形破坏模式为牵引式, 滑坡体长度约 680 m, 宽度约 210 m。基于早期识别信息, 地质-力学联合分析表明: 江顶崖滑坡为典型的老堆积层滑坡, 前缘局部变形, 破坏模式为牵引式, 滑坡体平均厚度约 35 m, 滑床整体坡度较缓, 失稳后运移速度不大。选取符合江顶崖滑坡体滑移摩擦特征的库伦摩擦模型, 基于深度积分连续介质方程, 分析计算滑坡体的动力学过程, 结果表明: 滑坡体滑移速度不大, 最大值约为 2.2 m/s, 运动方式表现为推挤白龙江河道, 堵江可能性较小, 并且江顶崖滑坡体前缘错动完成后, 该滑坡体滑移速度从前缘到后缘快速降为 0, 表现为牵引式运动特征。本次分析结果与实际相符, 吻合度较高, 采取的综合分析方法及研究模式可用于舟曲白龙江沿岸类似滑坡的早期判识及风险评估。

**关键词:** 堆积层滑坡; 早期识别; 地质-力学分析; 动力过程模拟

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0180-07

## A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

HAN Xudong<sup>1,2</sup>, FU Jie<sup>1</sup>, LI Yanyan<sup>3</sup>, WANG Gaofeng<sup>2</sup>, CAO Chen<sup>4</sup>

(1. Innovation Center for Geological Environment Monitoring Technology of the Ministry of Natural Resources, Center for Hydrogeology and Environment, CGS, Baoding, Hebei 071051, China; 2. Chongqing Field Scientific Observation and Research Platform for Geological Hazards in the Three Gorges Reservoir Area of the Ministry of Natural Resources, Center for Hydrogeology and Environment, CGS, Chongqing 404700, China; 3. Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. College of Construction Engineering, Jinlin University, Changchun, Jilin 130026, China)

**Abstract:** How to identify deformed landslides in advance and conduct early risk assessments on them has become a research hotspot in the field of geological disaster prevention and control. In response to the above problems, the Jiangdingya landslide in the Bailong River Basin in Zhouqu is taken as a back analysis case, and a comprehensive study of the early identification and risk assessment of the landslide is carried out. In this paper, a full-process

收稿日期: 2021-04-13; 修订日期: 2021-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509600; 2019YFC1509702); 国家自然科学基金青年基金项目(41807227); 自然资源部地质环境监测工程技术创新中心开放课题(2020KFK1212007); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190646)

第一作者: 韩旭东(1990-), 男, 博士, 工程师, 主要从事工程地质与灾害方面的研究工作。E-mail: hanxudong@mail.cgs.gov.cn

analysis method is proposed, which combine the small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) technology interpretation, geo-mechanical analysis and dynamic process simulation. The research results show that the SBAS-InSAR technology interpretation can effectively identify the range of the Jiangdingya landslide and its early deformation. It may be preliminarily determined that the failure mode of the Jiangdingya landslide is trailed and the plane characteristics of the landslide body is generally about 680 m in length and 210 m in width. Based on the early identification information and through geo-mechanical analysis, it is finally identified that the instability problem of the Jiangdingya landslide is a typical deformation problem of the front edge of the old accumulation layer landslide. The failure mode is the traction slip failure, the average thickness of the landslide body is in about 35 m, the overall slope of the sliding bed is relatively slow, and the moving speed is not large after instability. On the basis of the above analyses, a Coulomb friction model that conformed to the sliding friction characteristics of the Jiangdingya landslide body is selected. Based on the depth integral continuum equation, the dynamic process of the Jiangdingya landslide body is calculated and the speed of the landslide body is monitored. In terms of velocity monitoring curves and accumulation pattern, the sliding velocity of the landslide body is not large, the maximum value is about 2.2 m/s, the overall performance is pushing the Bailong River channel, and the possibility of blocking the river is relatively small. In addition, when the displacement of the front edge of the Jiangdingya landslide body is completed, the speed of the landslide body from the front edge to the rear edge quickly drope to zero, and the movement process is characterized by the traction movement. The analysis results of the Jiangdingya landslide in this paper are consistent with the actual event of the Jiangdingya landslide. The comprehensive analysis method and research model can provide a good reference for the early identification and risk assessment of similar landslides in the Bailong River Basin in Zhouqu county.

**Keywords:** accumulation landslide; early identification; geo-mechanical analysis; dynamic process simulation

随着国家对地质灾害防治工作更高的要求及期许,如何提前判识滑坡变形,并对该滑坡进行早期风险评估已成为地质灾害防治领域最关注的焦点及难点。在滑坡变形早期判识工作方面,国外发展比较迅猛,欧洲尤其是意大利已经基本实现了基于InSAR技术的全国范围滑坡变形早期普查<sup>[1]</sup>。近年来,国内研究者积极探索用于滑坡变形早期判识的InSAR技术,在四川茂县新磨村滑坡,金沙江白格滑坡及上下游滑坡,丹巴五里牌滑坡等众多滑坡案例中得到了成功应用<sup>[2-4]</sup>。在滑坡变形早期风险评估方面,传统地质分析可以有效地预测滑坡变形失稳。在此基础上,利用斜坡稳定性力学分析计算方法,如极限平衡计算方法,有限元数值计算方法及离散元数值计算方法<sup>[5-6]</sup>,可获取滑坡变形失稳时的滑体几何信息。滑坡变形失稳后,对滑体的动力过程进行评估时,国内外研究者采用了雪橇经验模型、等效流体模型和离散元模型等进行分析,获取滑体的动力特征<sup>[7-9]</sup>。

2018年7月12日上午8时左右,白龙江甘肃舟曲南峪段江顶崖区域发生滑坡,滑坡体向白龙江河道错动,推挤白龙江河道,造成白龙江上游河道水位上涨,

国道345线中断,南峪乡段众多房屋被淹。本文以该滑坡为分析案例,综合研究滑坡变形的早期判识及风险评估。首先通过小基线集技术(SBAS-InSAR)对该滑坡进行早期形变及范围判识,然后基于地质-力学联合分析,判断该滑坡的变形失稳机制及滑体几何形态,最后通过基于深度积分的连续介质等效流体数值模型计算该滑坡的动力过程,评估其堵江风险。文章拟通过对江顶崖滑坡进行综合全面的分析,建立一套可行的滑坡变形早期判识及风险评估全流程分析模式,为舟曲白龙江沿岸类似滑坡变形的早期判识及风险评估提供借鉴。

## 1 舟曲江顶崖滑坡

甘肃舟曲县南峪乡段江顶崖滑坡位于白龙江北岸。滑坡体呈较典型“簸箕”状,滑坡体物质主要由碎石和黄土混合而成,碎石含量为65%~75%,碎石主要为灰色的炭质板岩和千枚岩岩块,局部夹有较大的灰岩岩块。此外,滑坡体中下部物质掺杂了大量的灰黑色黏土与炭质板岩以及千枚岩碎屑,遇水极易软化,抗剪强度低<sup>[10]</sup>。受连续降雨影响,2018年7月12日

上午 8 时左右,江顶崖区域发生滑坡,滑坡体长度约为 680 m,宽度约为 210 m,平均厚度约为 35 m,滑坡体总量达到了  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,为大型滑坡,见图 1(a)。



(a) 舟曲江顶崖滑坡



(b) 江顶崖滑坡区域

图 1 舟曲江顶崖滑坡和江顶崖滑坡区域遥感影像

Fig. 1 Jiangdingya landslide and remote sensing image in the Jiangdingya landslide area in Zhouqu

结合区域遥感影像可以发现,江顶崖滑坡为典型的白龙江江岸堆积层滑坡,其发育于巨型老滑坡堆积体前端,老滑坡堆积体长度约 1 600 m,宽度约 1 400 m,见图 1(b)。

## 2 InSAR 技术解译及分析

### 2.1 研究区域数据

本文使用 16 期欧洲航空局发布的哨兵-1A SAR 影像数据及 POD 精密定轨星历数据。数据拍摄时间为江顶崖滑坡失稳前的 2018 年 1 月 9 日—7 月 8 日,数据间隔为 12 d。区域地形数据采用日本宇宙航空研究所 2014—2015 年发布的较高精度的 ALOS PALSAR 观测数据,见表 1。

### 2.2 区域地表解译

SBAS-InSAR 是 Berardino 等<sup>[11]</sup>提出的一种时序 InSAR 技术解译方法。该方法通过设置时间和空间两个维度的基线阈值构建 InSAR 影像数据间的两两组合,较 PS-InSAR 技术解译方法可获取更多高相干性的 SAR 影像数据组合,提高了解释过程中对 InSAR 影像数据在时间和空间 2 个维度上的采样频率,有利于减轻解译过程中 InSAR 影像数据间的时空失相关和大气相位影响<sup>[12]</sup>。SBAS-InSAR 作为一种毫米精度的

表 1 哨兵-1 影像数据和 ALOS PALSAR 地形数据信息  
Table 1 Information of Sentinel-1A images and ALOS PALSAR topography data

数据	参数	属性
哨兵-1A	类型	SLC
	图像模式	1W
	波段及波长/cm	C, 5.5
	入射角/(°)	43.3
	轨道	升轨
	方位向分辨率/m	20
	距离向分辨率/m	5
	极化方式	同向垂直极化(VV)
ALOS PALSAR	观测模式	单极化(FBS)
	地形数据分辨率/m	12.5

InSAR 后处理算法已经被广泛认可。本文采用此技术,首先获取研究区域的地表形变速率及地表位移<sup>[13]</sup>。解译流程如下:

(1)生成 16 期哨兵-1A SAR 影像数据间的空间和时间基线关联表,空间和时间基线阈值分别设置为 80 m 和 40 d。42 对哨兵-1A SAR 影像数据组合情况,见图 2。

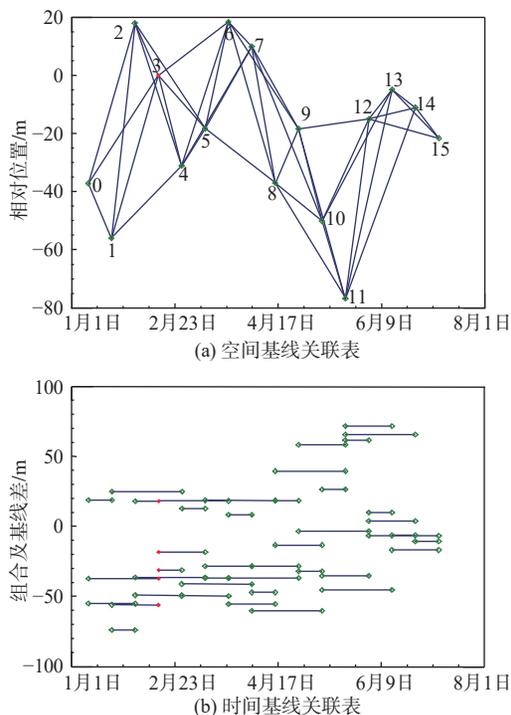


图 2 16 期哨兵-1A SAR 影像数据的空间与时间基线关联表  
Fig. 2 Association of spatial and temporal baselines of 16 periods of sentinel-1A SAR data

(2)生成 42 对哨兵-1A SAR 影像数据组合的差分干涉图,采用 16 期哨兵-1A POD 精密定轨星历数据和 ALOS PALSAR 地形数据去除差分干涉时的平地相

位,采用经典的 Goldstein 滤波方法滤除干涉相位噪声,提高信噪比,最终获取了研究区域 42 幅质量较好的 SAR 影像数据的干涉图,其中江顶崖滑坡区域 2018 年 6 月 14 日影像与 2018 年 7 月 8 日的影像差分干涉图结果示例见图 3。

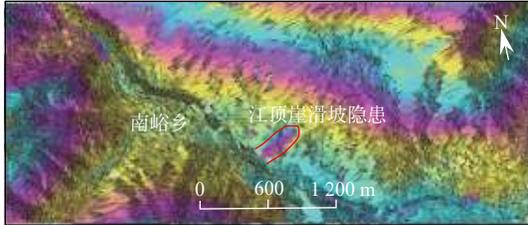


图 3 江顶崖滑坡区域 SAR 影像数据干涉相位分布  
Fig. 3 Interference phase distribution of SAR images in the Jiangdingyia landslide area

(3) 获取研究区域地表形变速率和时序地表形变,选取 40 个稳定的地表控制点用于轨道精炼及去除地形残差相位的影响,进行时空过滤计算,移除大气延迟相位,采用经典的最小费用流方法进行干涉相位解缠,最后采用奇异矩阵变换,获取研究区域雷达视线方向的地表变形速率及时序变形。江顶崖滑坡 2018 年 1 月 9 日—7 月 8 日期间平均变形速率及地表累积变形曲线,见图 4 和图 5。

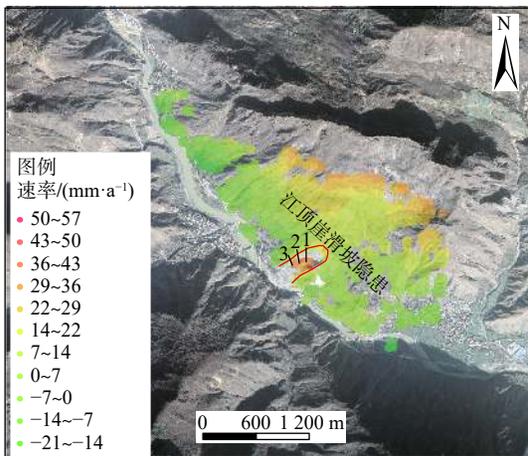


图 4 江顶崖滑坡区域地表平均变形速率  
Fig. 4 Average surface deformation rate in the Jiangdingyia landslide area

根据 SBAS-InSAR 技术解译结果,基于差分干涉图和地表变形速率图(图 3 和图 4),可以清晰辨别江顶崖滑坡的范围。从江顶崖滑坡时序累积变形曲线(图 5)看,江顶崖滑坡时序累积变形曲线是一条典型的滑坡变形斋藤曲线<sup>[14]</sup>,具有典型的 3 个阶段演化特

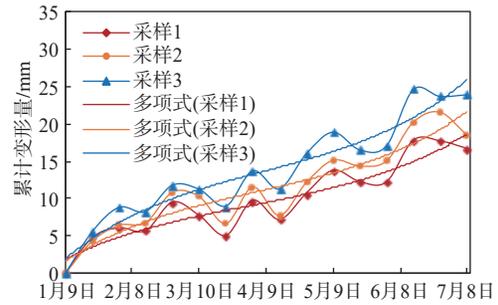


图 5 江顶崖滑坡体雷达视线方向累积变形量曲线  
Fig. 5 Cumulative deformation curves of the Jiangdingyia landslide in radar line of sight

征:(1)滑坡体初始变形阶段。江顶崖滑坡体开始变形,变形曲线变缓为减速变形特征,时间大约发生于 2018 年 3 月 10 日之前;(2)滑坡体匀速变形阶段。江顶崖滑坡体近匀速变形,变形曲线表现为等速特征,发生时间段大约从 2018 年 3 月 10 日—6 月 2 日;(3)滑坡体加速变形阶段。江顶崖滑坡体变形速率不断增加,发生时间为 2018 年 6 月 2 日以后。

### 3 地质-力学分析

SBAS-InSAR 解译结果表明,舟曲江顶崖滑坡失稳前已存在形变加速趋势,结合现场地质调查资料可以明显看出(图 6),该滑坡发育于老堆积体前缘,为典型的老堆积层滑坡前缘局部变形,坡脚长期受白龙江江水冲刷,降雨可触发其牵引式滑移破坏。从滑坡体内部物质的成分看,中下部物质中掺杂了大量的灰黑色黏土和炭质板岩碎屑,遇水极易软化,抗剪强度低,滑坡体很可能在该深度范围内滑动。为进一步获取江顶崖滑坡失稳破坏时的滑体几何数据,本文采用极限平衡分析方法对该滑坡进行力学分析计算,估算滑体的几何信息。根据文献[10]及该区域地质调查的实验数据,滑坡体物质的物理力学参数取值见表 2。本次滑坡体的滑面搜索过程,采用 GeoStuido 软件内嵌的常规剪入—剪出滑面搜索方法。为使滑面的搜索结果科学客观,滑面搜索时,不固定剪入点和剪出点,而是将剪入口设置为 SBAS-InSAR 技术解译分析过程中圈定的滑坡范围后部附近区域,将剪出口设置为江顶崖滑坡前缘坡脚处的小陡坎区域,稳定性系数计算方法采用常规的 Bishop 和 Janbu 法<sup>[15]</sup>。经计算,江顶崖滑坡的稳定性参数在 1.02~1.04,整体处于欠稳定状态,存在失稳破坏的可能,江顶崖滑坡滑体平均厚度约为 35 m,滑床整体坡度较缓,见图 7。

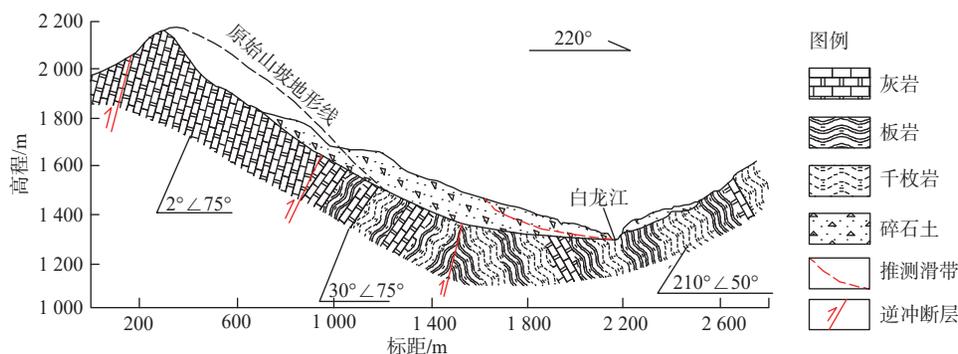


图 6 江顶崖滑坡地质剖面

Fig. 6 Geological profile of the Jiangdingya landslide

表 2 滑坡体物质物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of the landslide body

土体	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	状态
滑坡体	2 100	16	10	饱和

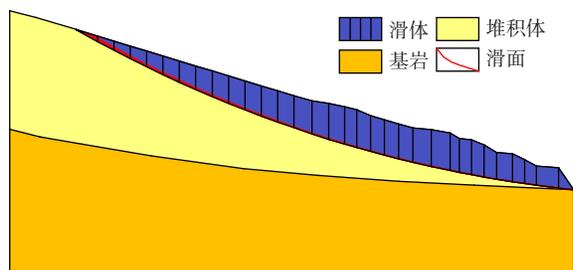


图 7 江顶崖滑坡稳定性计算模型

Fig. 7 Stability calculation model for the Jiangdingya landslide

### 4 堵江风险评估

江顶崖滑坡为典型的白龙江江岸滑坡，通过 SBAS-InSAR 技术解译及地质-力学联合分析，江顶崖滑坡失稳前已存在变形失稳趋势，具有堵江风险，本文采用基于深度积分的连续介质模型对其动力过程进行计算分析，为堵江风险评估提供分析数据，计算模型如下：

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} = s \quad (1)$$

$$q = \begin{bmatrix} h \\ uh \end{bmatrix}$$

$$f = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}$$

$$s = \begin{bmatrix} 0 \\ S_{gx} - S_{fx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $t$ ——时间；

$x$ ——笛卡尔坐标系下的 $x$ 方向坐标；

- $q$ ——守恒变量；
- $f$ —— $x$ 方向通量；
- $s$ ——源项；
- $h$ ——滑体厚度；
- $u$ —— $x$ 方向的滑移速度；
- $g$ ——重力加速度；
- $S_{gx}$ —— $x$ 方向滑床坡度项；
- $S_{fx}$ —— $x$ 方向滑体基底摩擦项。

数值计算前，采用 2 m 间距对江顶崖滑坡的滑床及前部的白龙江河道地形进行剖分，白龙江河道的地形数据参考实地调查数据及文献 [16] 中的数据。数值计算时采用 Godunov 型中心格式有限体积方法离散计算模型，采用 HLLC 格式黎曼求解器进行通量求解，采用 MUSCL 重构法和 Hancock 预测-校正格式提高 Godunov 型中心格式的时空求解精度，采用隐式格式处理基底摩擦值，数值求解过程见文献 [8, 17]。此外，舟曲江顶崖滑坡的滑床整体坡度较小，滑体不具有高速流动性特征，基底摩擦模型采用较贴合这一特征的库伦摩擦公式<sup>[18]</sup>：

$$S_{fx} = ghtan\varphi \quad (3)$$

式中： $\varphi$ ——滑体对滑床的摩擦角，本次取 16°，数值计算结果见图 8 和图 9。

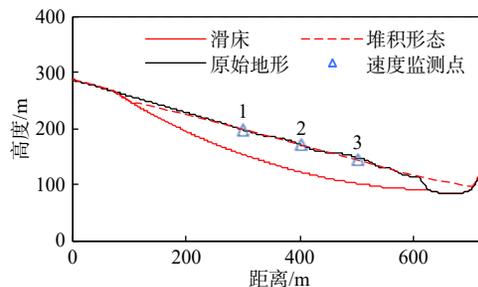


图 8 江顶崖滑体滑后几何形态

Fig. 8 Post-sliding geometry of the Jiangdingya landslide body

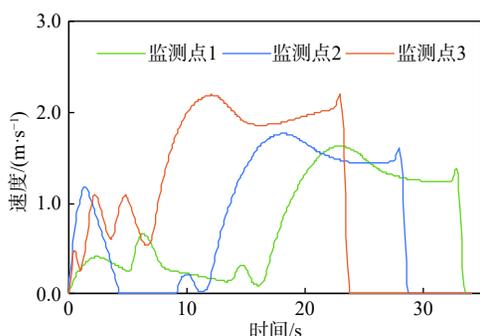


图9 江顶崖滑体滑移速度监测曲线

Fig. 9 Velocity monitoring curve of the Jiadingya landslide body

数值计算结果表明,江顶崖滑坡体运动方式大体表现为整体向前错动,前缘推挤白龙江河道,计算时间20 s后,江顶崖滑坡体前缘错动完成,从速度监测点1,2,3位置处的滑坡体速度监测曲线看:当滑坡体前缘错动完成后,滑坡体滑移速度从前缘到后缘快速降为0,表现为牵引式运动特征,并且滑坡体在向白龙江河道错动过程中,滑移速度并不是很大,最大值约为2.2 m/s,堵江风险很低。

## 5 结论

针对滑坡变形的早期判识及风险评估研究,本文提出了小基线集雷达干涉(SBAS-InSAR)技术解译分析,地质-力学联合分析,动力过程数值模拟分析相结合的滑坡变形早期判识与风险评估全流程分析模式,并选取甘肃舟曲白龙江流域江顶崖堆积层滑坡案例进行了综合研究分析,得出以下结论:

(1) SBAS-InSAR 技术解译及分析结果能准确地判识江顶崖滑坡的范围及早期形变特征,滑坡的变形破坏模式为牵引式,滑坡体长度约680 m,宽度约210 m,与江顶崖滑坡实际数据吻合。

(2) 基于早期识别信息,江顶崖滑坡的地质-力学联合分析结果表明,江顶崖滑坡为典型的老堆积层滑坡前缘局部变形,滑坡体平均厚度约35 m,滑床整体坡度较缓,失稳后运移速度不大,分析结果与现场地质调查匹配。

(3) 江顶崖滑坡的动力过程计算分析结果表明,滑坡体滑移速度不大,最大值约为2.2 m/s,运动方式表现为推挤白龙江河道,堵江可能性较小,当江顶崖滑坡体前缘错动完成后,滑坡体的滑移速度从前缘到后缘快速降为0,表现为牵引式运动特征。动力过程数值计算时采用的库伦摩擦模型符合江顶崖滑坡

的滑体滑移摩擦特征,模型选择合理。

针对江顶崖滑坡案例,本文的分析结果与江顶崖滑坡实际相符,吻合度较高,采取的综合分析方法及研究模式可用于舟曲白龙江沿岸类似滑坡的早期判识及风险评估。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] COSTANTINI M, FERRETTI A, MINATI F, et al. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 250 – 275.
- [ 2 ] DONG J, ZHANG L, LI M H, et al. Measuring precursory movements of the recent Xinmo landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 datasets[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 135 – 144.
- [ 3 ] 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. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 许强,董秀军,李为乐.基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 957 – 966. [ XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957 – 966. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 李世海,刘天苹,刘晓宇.论滑坡稳定性分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊2): 3309 – 3324. [ LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup2): 3309 – 3324. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 饶鸿,王金淑,赵志明,等.基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 154 – 162. [ RAO Hong, WANG Jinshu, ZHAO Zhiming, et al. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1):

- 154 – 162. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 殷跃平, 王文沛. 高位远程滑坡动力侵蚀犁切计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1513 – 1521. [ YIN Yueping, WANG Wenpei. A dynamic erosion plowing model of long Run-out landslides initialized at high locations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(8): 1513 – 1521. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] HAN X D, CHEN J P, XU P H, et al. A well-balanced numerical scheme for debris flow Run-out prediction in Xiaojia Gully considering different hydrological designs[J]. *Landslides*, 2017, 14(6): 2105 – 2114.
- [ 9 ] 刘广煜, 徐文杰, 佟彬, 等. 基于块体离散元的高速远程滑坡灾害动力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1557 – 1566. [ LIU Guangyu, XU Wenjie, TONG Bin, et al. Study on dynamics of high-speed and long Run-out landslide hazards based on block discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1557 – 1566. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 等. 甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 7 – 14. [ ZHANG Weixiong, ZHAI Xianghua, DING Baoyan, et al. Causative analysis and comprehensive treatment of the jiangdingya landslide in Zhouqu County of Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 7 – 14. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375 – 2383.
- [ 12 ] 许才军, 何平, 温扬茂, 等. InSAR技术及应用研究进展[J]. 测绘地理信息, 2015, 40(2): 1 – 9. [ XU Caijun, HE Ping, WEN Yangmao, et al. Recent advances InSAR interferometry and its applications[J]. Journal of Geomatics, 2015, 40(2): 1 – 9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] CHEN D H, CHEN H E, ZHANG W, et al. Characteristics of the residual surface deformation of multiple abandoned mined-out areas based on a field investigation and SBAS-InSAR: a case study in Jilin, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(22): 3752.
- [ 14 ] 亓星, 朱星, 许强, 等. 基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 832 – 839. [ QI Xing, ZHU Xing, XU Qiang, et al. Improvement and application of landslide proximity time prediction method based on saito model[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 832 – 839. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 等. 基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 100 – 107. [ ZHONG Changmao, QIU Enxi, WEI Yongxing, et al. Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 100 – 107. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王开喜, 张鹏. 舟曲白龙江城区段防洪堤设计水力学计算[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(12): 41 – 43. [ WANG Kaixi, ZHANG Peng. Hydraulic calculation of flood protection embankment design in city section of Bailong river in Zhouqu[J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2010, 46(12): 41 – 43. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] AN H, KIM M, LEE G, et al. Estimation of the area of sediment deposition by debris flow using a physical-based modeling approach[J]. *Quaternary International*, 2019, 503: 59 – 69.
- [ 18 ] HUNGR O. Simplified models of spreading flow of dry granular material[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(8): 1156 – 1168.

编辑: 张若琳