

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210816001

# 金沙江上游圭利滑坡发育特征及运动过程分析\*

徐璐, 常鸣, 武彬彬, 刘沛源, 周超

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**金沙江上游构造破碎、岩体结构复杂,区内大型-巨型滑坡发育,历史上发生过多次滑坡堵江事件。圭利滑坡位于西藏江达县金沙江西岸,滑坡变形严重,大小拉裂缝、垮塌几乎覆盖整个滑坡,变形程度有不断增加的趋势,失稳后将金沙江下游造成巨大威胁。在野外调查的基础上,通过对金沙江上游圭利滑坡发育特征的分析,选取Massflow数值计算模型对该滑坡失稳运动过程进行预测分析,获取了滑坡在不同时刻的堆积状态及运动速度。结果表明,滑坡整体运动时长约为40 s,最大滑动速度达到31 m/s,最大堆积厚度为51 m;前缘向两侧扩散的最大距离约为220 m,并全部堵塞金沙江;滑坡各区域的速度曲线反映出滑坡运动过程具有突发性、彻底性、整体性、流态性的特点。

**关键词:**金沙江上游;圭利滑坡;Massflow;发育特征;运动过程

**中图分类号:** P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0845-09

## Development Characteristics and Movement Process of Guili Landslide in Jinsha River

XU Lu, CHANG Ming, WU Binbin, LIU Peiyuan, ZHOU Chao

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The upper reaches of Jinsha River are tectonically fragmented, with complex rock structures and large - giant landslides. Many landslides blocking events have occurred in history. Guili landslide is located on the west bank of Jinsha River, Jiangda County, Tibet. The overall deformation of the landslide is serious, with five deformation areas and five developed large tension cracks. According to the displacement data monitored by GNSS, the deformation of the landslide is increasing, which poses a great threat to the lower reaches of Jinsha River. Based on detailed field investigations, this paper analyzes the development characteristics of the Guili landslide. The Massflow numerical calculation model is selected to predict and analyze the movement process of the landslide. We obtain the characteristic parameters such as movement distance, accumulation thickness and velocity kinetic energy of the landslide at different moments. The simulation results show that the overall movement of the landslide takes about 40s, the maximum sliding speed reaches 31m/s, and the maximum accumula-

\* 收稿日期:2021-08-16;修回日期:2021-10-24

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0902)、国家重点研发计划(2018YFE0100100)、地表过程与资源生态国家重点实验室开放课题资助项目(2021-KF-01)资助

作者简介:徐璐(1997—),女,硕士研究生。主要从事工程地质与地质灾害防治方面的研究。E-mail:358035569@qq.com

通讯作者:常鸣(1985—),男,副教授,博士。主要从事泥石流与风险评估方面的研究。E-mail:changmxq@126.com

tion thickness is 51m, mainly accumulated in the river channel. The maximum distance of the front edge spreading to both sides is about 220m. The velocity curves of each area of the landslide show that the movement process is characterized by suddenness, thoroughness, wholeness, and fluidity. Early identification methods and numerical simulation techniques have guiding significance for geohazard mitigation.

**Keywords:** Jinsha River; Guili landslide; Massflow; developmental characteristics; movement process

## 0 引言

金沙江上游具有构造破碎、岩体结构复杂、河谷深切、强卸荷改造等多种不良因素的叠合<sup>[1]</sup>,区内大型-巨型滑坡发育,历史上发生过多次滑坡堵江事件<sup>[2-4]</sup>。2018年10月10日和11月3日,金沙江上游西藏江达县白格村先后发生两次大型高位滑坡-堰塞堵江事件,泄洪后导致金沙江大桥等多座桥梁被冲毁,影响范围波及下游1 000 km,造成150亿元的重大经济损失<sup>[5-6]</sup>。圭利滑坡位于江达县波罗乡宁巴村金沙江西岸,滑坡整体坡度较陡,且滑体土厚度较大,滑坡中前几乎全被江水浸泡,导致前缘滑体强度降低,在降雨的影响下,滑坡的变形程度不断增加,一旦大规模失稳滑入江中,将堵塞金沙江形成堰塞湖,造成类似于白格滑坡堵江的危害,潜在经济损失大于5亿元人民币,严重威胁上下游居民生命财产安全。

根据圭利滑坡的基本特征及所处的孕灾地质环境,属于典型的溃散型滑坡,而溃散型滑坡的启动具有彻底性、整体性、突发性等特点<sup>[7]</sup>。目前对于溃散型滑坡主要从成因机制、破坏机理等方面进行研究<sup>[8-9]</sup>,运动过程的研究稍显不足,近年来国内外众多学者结合数值模拟手段在滑坡的运动过程方面展开了深入研究,尤其是采用Massflow数值模拟软件在流体型、突发型滑坡、泥石流等地质灾害运动过程研究中取得较好成果:C. Ouyang等<sup>[10]</sup>采用Massflow模型对白格滑坡两次堵江事件进行了反演分析;周琦等<sup>[11]</sup>采用Massflow对黑方台地区典型的陈家8#突发型滑坡进行反演,采取单因素变量法确定滑坡参数;A. J. Horton等<sup>[12]</sup>基于Massflow模拟了泥石流物源如何在地震后的集水区中发生膨胀;李俊等<sup>[13]</sup>基于Massflow以及地震波信号参数,研究了巨型滑坡-碎屑流动力学运动过程及机理;王学良等<sup>[14]</sup>基于PFC<sup>3D</sup>和Massflow两种方法模拟溃

坝后的尾矿砂运动过程,研究了连续介质和非连续介质力学理论在数值模拟中的区别与联系。Massflow数值模拟软件的推广应用,对提升我国山地灾害的减灾防灾能力具有潜在的重要意义。

本文在野外详细调查的基础上,总结了圭利滑坡的发育变形特征,并结合无人机遥感航测建立了圭利滑坡高精度三维模型,采用Massflow软件,模拟计算了滑坡从启动到最后堆积的运动全过程。通过模拟结果分析滑坡的威胁范围,估计金沙江河道的堵塞严重程度,进而给出相应的防治建议。

## 1 滑坡概述

### 1.1 地质环境条件

圭利滑坡位于西藏江达县波罗乡宁巴村金沙江西岸,地理坐标为北纬31°07'56.04",东经98°41'24.65"。该区域为高原寒温带半湿润气候区,年平均气温7.5℃,多年均降水量650 mm,6~9月为雨季,降雨量约占全年降水量的87.2%。地貌类型为构造侵蚀高山峡谷地貌,圭利滑坡所处区域为金沙江构造带,该区以发育晚古生代-三叠纪蛇绿混杂岩(D-T)为其主要特征,其上覆上三叠统,为不整合接触。区内发育多条断裂带,其中卡贡东断层从滑坡顶部经过,对滑坡影响较大,该断层总体走向为320°,倾向为50°左右,断裂面倾角60°左右(图1)。

### 1.2 滑坡基本特征

圭利滑坡整体平面形态呈“舌”型,前缘高程为2 868 m,斜坡后缘高程为3 162 m,相对高差294 m。滑坡斜长664 m,横宽370 m,最大厚度65 m,平均厚度35 m,滑坡体积 $859 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,滑向为38°,属于土质超厚层特大型滑坡,滑坡平面及剖面如图2、3所示。南东侧以深切冲沟为界,北西侧以基岩-深切冲沟为界后缘以陡壁(滑坡滑动形成的滑坡壁)为界。圭利滑坡剖面形态呈折线型,整体陡缓交错,

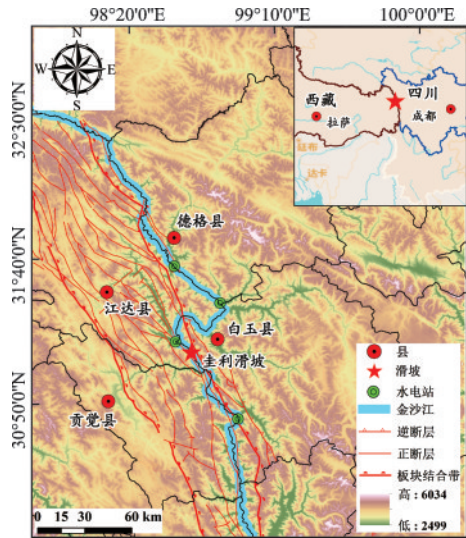


图1 研究区地理位置示意

Fig.1 Geographical location map of the research area

局部形成了小陡坎、小平台。滑坡中后部地形较陡,坡角 $22^{\circ}\sim 32^{\circ}$ ,滑坡前部因为金沙江冲刷局部形成临空面,坡度相对较陡,平均坡度 $34^{\circ}$ 。滑坡横向地形变化较小,右侧地形相对于左侧地形较陡,滑坡横向坡角 $8^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。整个滑坡坡面大小冲沟分布

较多,滑坡后缘为滑动形成的滑坡陡壁,两侧为变形和地表水冲刷形成的深切冲沟,滑坡剪出口位于金沙江水面附近,曾挤压河道,使金沙江改道,推断其为晚更新世( $Q_3$ )以前形成的古滑坡。

根据现场调查和钻探揭露情况,滑体物质以第四系崩坡积层( $Q_4^{col+dl}$ )的碎块石土为主。碎石土呈灰黄色~褐黄色,成分为片岩、变质砂岩,强风化,成棱角状,碎石直径为 $2\sim 15\text{ cm}$ ,块石直径为 $20\sim 90\text{ cm}$ 。碎块石之间夹黏粒和砂。滑体土表层含少量植物根系。滑坡中前缘还有完整性较好的片岩岩体,岩体在金沙江右侧沿岸临空面有出露(图4)。滑坡前缘相对于周围地形表现为明显的凸起,主要是由于滑坡曾失稳挤压金沙江形成,前缘临空面基岩出露较多且倾向和滑坡后缘一致,但倾角差别较大,因此临空面的岩体和后缘的岩体不连续,推测在金沙江面附近存在一级滑面。结合钻探成果,主利滑坡一共布置了3处钻孔,其中ZK1、ZK2、ZK3钻孔均揭露了滑面,滑面深度分别为 $64.02$ 、 $57.90$ 、 $54.13\text{ m}$ 。滑带沿古滑坡体内部的岩土接触面的软弱层发育,平均埋深约 $65\text{ m}$ 。主要为粉砂质黏土夹

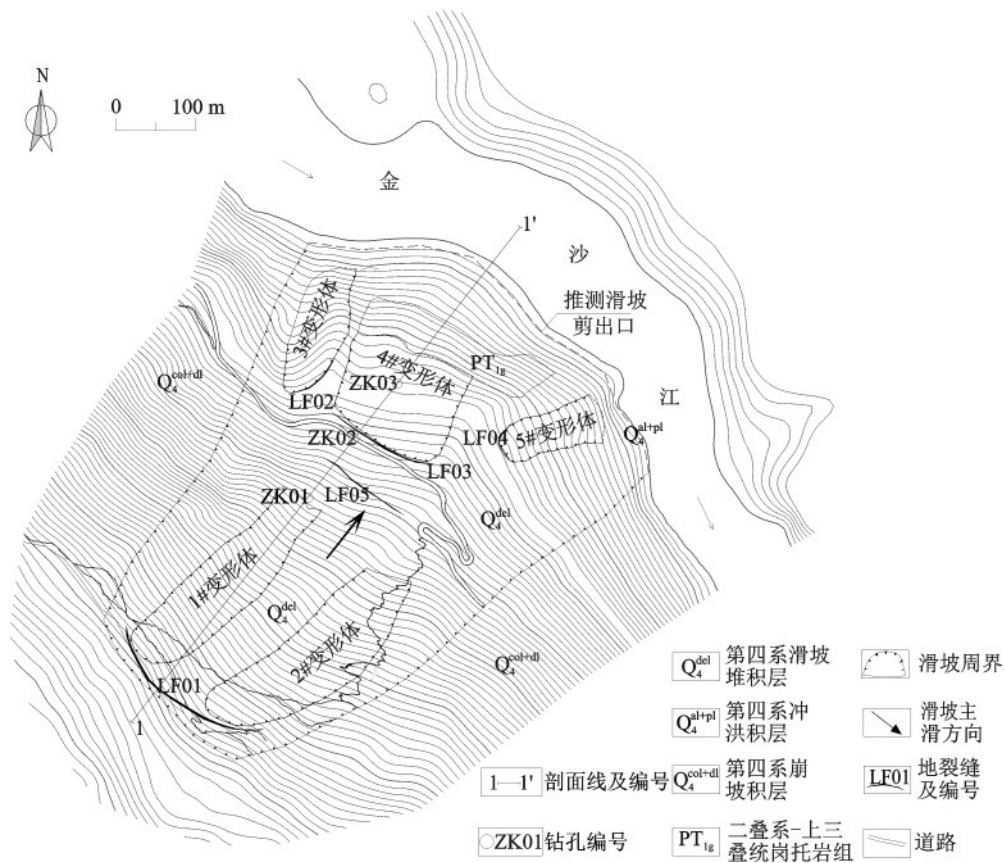


图2 主利滑坡工程地质平面

Fig.2 Engineering geological planar graph of Guili landslide

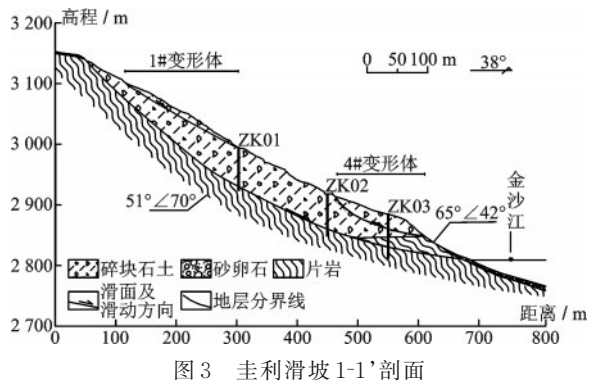


图3 圭利滑坡1-1'剖面

碎石, 碎石粒径为1~3 cm, 次圆状, 岩性为变质砂岩、片岩。滑床为二叠系岗托岩组( $PT_{1g}$ )的片岩, 产状为 $51^{\circ}\sim 65^{\circ}/52^{\circ}\sim 70^{\circ}$ , 岩层顺倾坡外, 具变质结构, 片状构造, 表层风化较强, 节理裂隙发育。

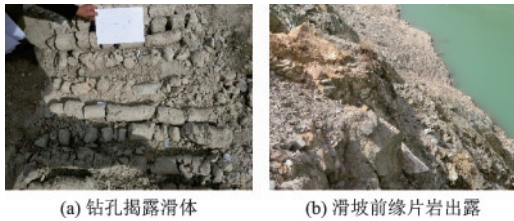


图4 现场滑体照片

Fig.4 Photos of the sliding body in the field

## 2 滑坡变形特征

### 2.1 滑坡地表变形特征

滑坡体变形严重, 大小拉裂缝、垮塌几乎覆盖整个滑坡, 整个滑坡分布有5条较大拉裂缝及5处变形体。滑坡后部: 主要表现在滑坡后缘拉裂缝

(LF01)滑动下错, 形成滑坡陡壁, 伴随表层滑塌, 形成了两处区域性滑塌即变形体1#、2#。滑坡中部: 主要表现为坡面拉裂缝(LF02)、坡面局部滑塌。滑坡两侧: 主要变形主要表现为垮塌、溜滑, 在滑坡左侧前部分布有拉裂缝(LF03), 同时发育3#变形体。滑坡前部: 滑坡前部位于金沙江右岸, 变形主要表现为拉裂缝(LF04、LF05)、垮塌, 同时发育了2处变形体4#、5#变形体(图5)。

整个滑坡变形严重, 变形范围广, 后部变形主要是由于滑坡坡度较陡, 加之滑坡体松散, 在降雨等因素影响下, 滑体重度增加, 内部强度降低, 滑体在自身重力作用下向下发生滑塌; 滑坡中部的拉裂缝、垮塌, 是由于中部修路切坡, 同时由于滑坡前部向前变形牵引中部土体形成拉裂缝, 发生垮塌。滑坡前部变形为垮塌、拉裂缝, 主要是由于前缘临空面在金沙江的掏蚀下发生垮塌, 前缘垮塌牵引着滑坡前部发生变形。若滑坡遭遇持续强降雨或地震变形可能进一步加剧, 甚至发生整体滑移。

### 2.2 滑坡变形监测分析

目前在滑坡体上布设了4处GNSS监测站, 分别位于滑坡前缘北西侧(J1)、滑坡前缘南东侧(J2)滑坡中后部(J3)和滑坡后缘(J4), 如图5(e)所示。根据各点的累积变形情况可知(图6), 滑坡一直处于变形状态, 尤其是滑坡前缘北西侧(J1)和后缘(J4)部分, 在2020年6月30日, 变形量分别达到了252和271 mm, 目前变形有减缓的趋势。滑坡前缘南东侧和中后部虽然长期变形缓慢, 但在暴雨影响下有加速变形的迹象。滑坡北西侧比南东侧变形强烈, 这与现场调查的认识基本一致。

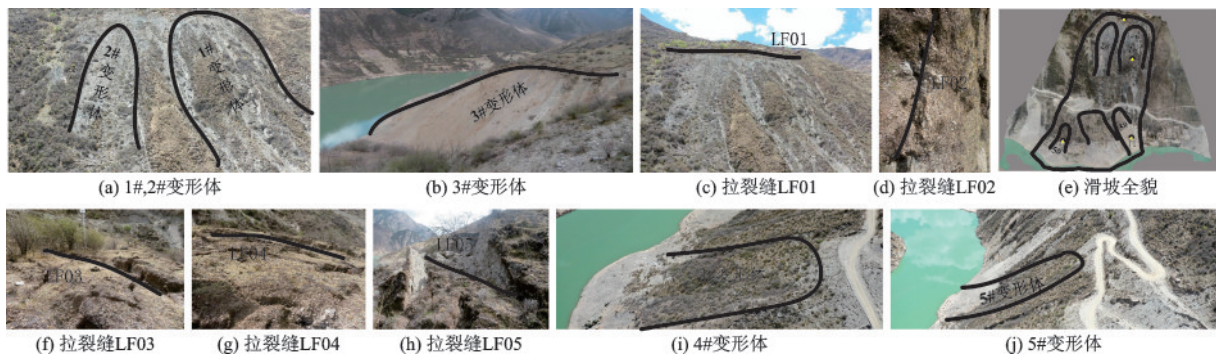


图5 滑坡全貌及局部变形分析

Fig.5 Deformation characteristics of the trailing edge

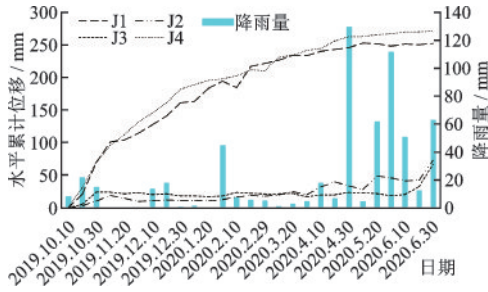


图6 圭利滑坡 GNSS 位移监测曲线

Fig.6 GNSS displacement monitoring curve of Guili landslide

### 2.3 滑坡发展变化趋势

圭利滑坡坡脚长期受金沙江江水侵蚀,形成高陡的临空面,临空面卸荷作用强烈,前缘不断受江水侵蚀而发生变形,前缘变形牵引滑坡中后部向前推移,由于滑坡滑体厚度大,坡度较陡,且滑体松散利于的地下水下渗,在暴雨条件下,滑体处于饱水状态,下滑推力将逐渐增大,该滑坡可能发生较大规模滑动变形破坏。中后部一旦发生变形将会形成较大推力向前推动前部滑体滑动,因此滑坡变形顺序为前缘变形→中后部变形→前缘滑动,变形模式属于牵引-推移式变形。且该滑坡曾经发生过一次较大规模的滑动,造成金沙江河道偏移,其变形模式也属于牵引-推移式变形。根据现场宏观判断以及监测数据分析,滑坡目前处于蠕滑变形阶段,但在遭遇强降雨后极可能失稳滑动堵塞金沙江。

## 3 基于 Massflow 的运动过程分析

### 3.1 Massflow 模型简介

Massflow 是通过对三维 Navier-Stokes 方程进行深度积分,简化 Navier-Stokes 模型,建立的基于深度积分的连续介质力学模型,从而使得复杂的三维地表过程可以通过二维积分计算获得,提升了计算效率,有效推动了地质灾害动力学数值模拟的发展<sup>[15-16]</sup>。Massflow 采用基于深度积分的连续介质力学原理以及改进的 MacCormack-TVD 有限差分方法,通过 Fortran 和 C# 语言自主编程,依据质量守恒和动量守恒方程在 Z 方向对 Navier-Stokes 方程的各个物理量进行积分(式 1、式 2)。应用自适应的分配计算资源,能够快速、高效地求解滑坡、泥石流、

溃坝等山地灾害动力过程,可以有效拓展到两相流、运动体与结构物耦合等相关问题中<sup>[17]</sup>。除此之外,Massflow 软件具有大规模并行计算、命令流一键式输入及前处理建模和后处理查看等优点,目前在 2015 年深圳光明新区滑坡<sup>[18]</sup>、2017 年四川茂县新磨村滑坡<sup>[19]</sup>等大型滑坡中得到了很好的应用。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial h_1 u_1}{\partial x} + \frac{\partial h_1 v_1}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_1 h_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 h_1 u_1^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_1 h_1 u_1 v_1)}{\partial y} =$$

$$\rho_1 u_1 z_{1bot} E_{1bot} - \tau_{1zrbot} - \rho_1 g h_1 \frac{\partial(h_1 + z_{1bot})}{\partial x} \quad (2)$$

式中, $\rho_1$ 、 $h_1$  分别为流动层 1 的密度与厚度; $u_1$ 、 $v_1$  为 x、y 方向的边界速率; $z_{1zrbot}$  为上部流动层对底部的剪应力; $z_{1bot}$  为顶部流动层的基底边界; $E_{1bot}$  为底部稳定层的夹带率; $g$  为重力加速度。

### 3.2 滑坡模型建立及参数选取

圭利滑坡地形信息从数字高程模型(DEM)中获取,通过 ArcGIS 的转换工具将 DEM 中的高程数据转换为 ASCII 格式文件,导入 Massflow 文件中,生成地形模型(图 7)。计算模型采用 5 m×5 m 的网格,将滑坡计算区域划分为 118 320 个正方形网格计算。

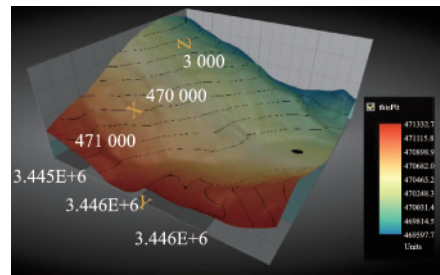


图7 滑坡地形模型示意

Fig.7 Landslide topography model diagram

通常用于山地灾害数值模拟的物理摩擦模型有: Manning 模型、Bingham 模型、Coulomb 模型、Voellmy 模型等<sup>[20]</sup>。本次模拟采用 Coulomb 模型,此模型需要 4 个参数,分别是土体密度、黏聚力、孔隙水压力以及基底摩擦系数。圭利滑坡的滑体由碎石土、片岩岩体组成。碎石土局部含有块石,土体密度值通过室内试验获得,取值为 2 100 kg/m<sup>3</sup>;滑坡在高速滑动时,土体间的黏聚力基本可以忽略<sup>[21]</sup>;孔隙水压力系数及基底摩擦系数主要以相似滑坡对比

取值,参考下游七公里处的白格滑坡,孔隙水压力系数取值为0.3,基底平均摩擦系数采用0.38<sup>[22]</sup>。

### 3.3 滑坡运动过程

斜坡整体坡度较陡,且滑体土厚度及方量都较

大,滑坡整体剪出破坏得较为迅速,最终呈现流态化的趋势滑动,在 $t=40$  s左右,滑坡整体基本停止运动,堆积情况达到收敛,主要堆积在滑坡中部及底部河道内。其中 $t=10$ 、20、30、40 s时的滑坡堆积范围如图8所示,堆积速度如图9所示。

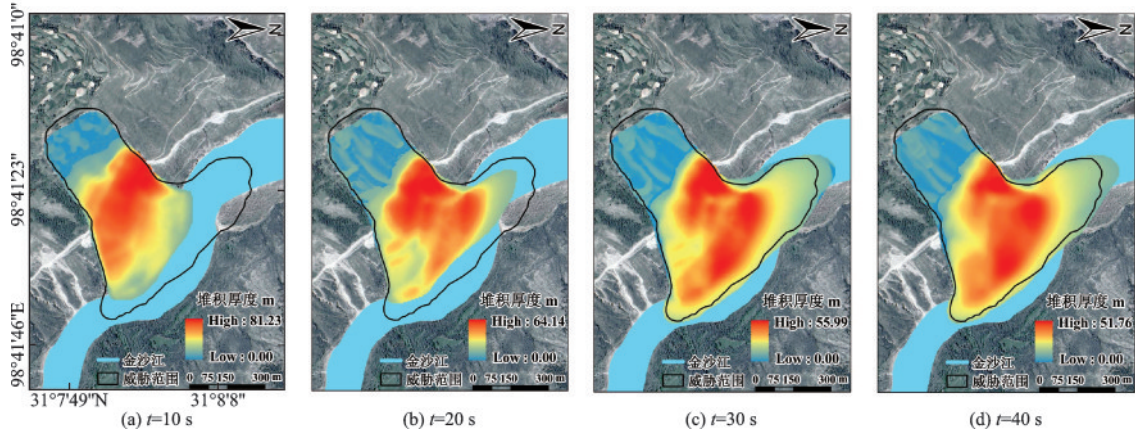


图8 不同时刻下滑坡堆积范围

Fig.8 Landslide accumulation range at different times

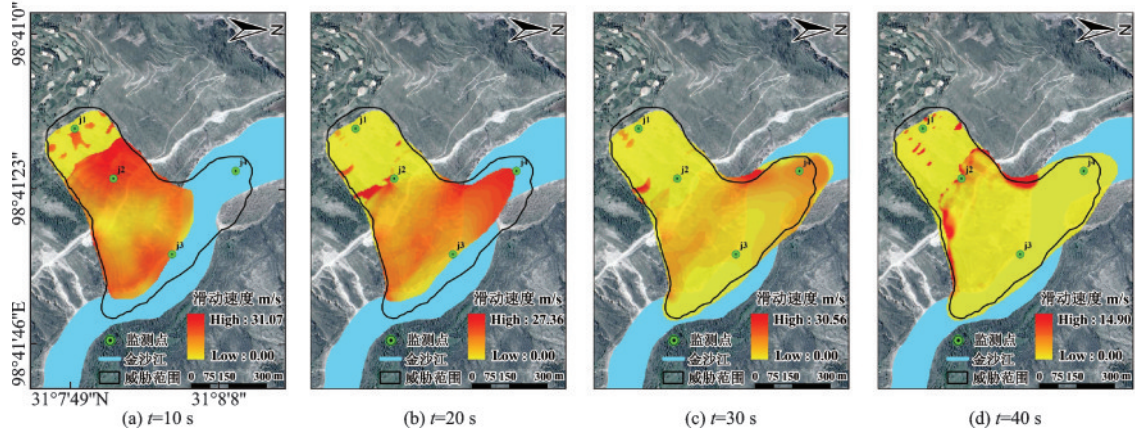


图9 不同时刻下滑坡运动速度

Fig.9 Landslide velocity at different moments

### 3.4 滑坡模拟结果分析

选择 $t=40$  s时的模拟结果,沿着滑坡的主滑方向,在滑源区(I)、流通区(II)、及堆积区(III)剖面1-1',如图10(a)所示,对圭利滑坡在竖直方向上的堆积情况进行量化分析,如图10(c)所示,纵轴表示地形高程,横轴表示滑坡沿水平方向运动距离。图中剖面显示:滑坡后缘物质滑动具有彻底性,滑源区后壁内凹呈弧形,由于滑坡方量较大,滑源区大部分物质运动到滑坡中部高程约300 m的位置开

始堆积,厚度约50 m,前缘沿主滑方向堆积至河道三分之二的位置达到收敛,且前缘表现出较大的流动性,导致最终结果出现中部堆积厚,前缘堆积较薄的趋势。

对滑坡3个区域平均运动速度进行统计分析,结合滑坡整体平均速度,绘制相应的速度-时间曲线。由图10(b)可见,滑坡整体速度可大致分为启动加速、稳定加速以及稳定堆积3个阶段。在6 s时,滑源区(I)达到启动加速最大速度,在6 s之后,随着滑坡物质的高速向下运动,滑源区(I)滑动速度也

迅速下降;流通区(Ⅱ)经历的滑坡滑动阶段最长,在第10 s时达到启动加速阶段的最大速度(10.55 m/s),10~15 s为稳定加速阶段,在此之后,随着滑坡物质向前缘扩散滑动,滑坡中部的速度逐渐减小,而两侧滑动速度迅速增大;在20 s时,堆积区(Ⅲ)即滑坡滑动最远处达到最大运动速度,之后滑坡在此处稳

定堆积。总结不同位置的滑坡曲线可以看出,在不同位置的启动加速阶段曲线斜率大,反映各区域启动的突发性;上一区域的减速阶段与下一区域的加速阶段衔接紧密,表明滑坡整体破坏迅速;最后,各区域的减速堆积阶段到最终停止运动都经过较长时间,反映了滑坡运动过程的流动性。

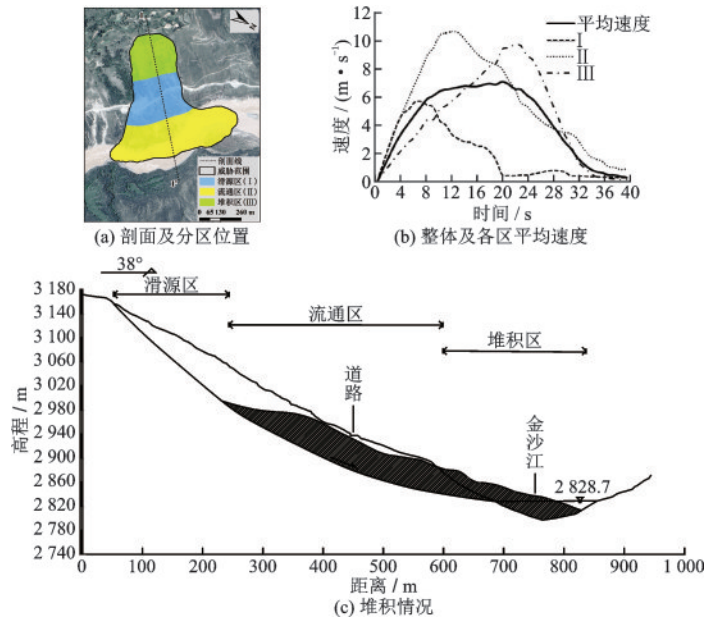


图10 滑坡模拟结果分析

Fig.10 Analysis diagram of landslide simulation results

根据数值模拟结果显示以及现场实物指标调查,滑坡整体失稳后,将金沙江堵塞形成堰塞湖,造成类似于白格滑坡堵江的严重危害,潜在经济损失巨大。因此,建议对该滑坡进行专业监测,辅以群策群防措施,针对滑坡后缘外侧设置一排截水沟,防止后侧斜坡汇水冲刷坡体、下渗降低滑体力学参数。综上,建议对该滑坡采取“专业监测+截排水沟+裂缝夯填+群测群防”的防治方案。

## 4 结论

通过对金沙江上游圭利滑坡发育特征的分析,结合Massflow数值模拟软件,进行滑坡的运动全过程模拟,得到了滑坡在不同时刻堆积厚度以及滑动速度,进一步对滑坡进行整体及分区速度分析,得到滑坡最终堆积曲线,综合地反映滑坡的运动情况及破坏程度,并给出防治建议。主要结论如下:

(1)圭利滑坡位于金沙江上游,为特大型土质

滑坡。坡体变形严重,整个滑坡分布有5条较大拉裂缝及5处变形体。滑坡目前处于蠕滑变形阶段,在遭遇强降雨后极可能失稳滑动堵塞金沙江,失稳模式属于牵引-推移式。

(2)通过Massflow软件对圭利滑坡的失稳破坏进行预测模拟,模拟结果表明,滑坡整体运动持续时间为40 s,堆积厚度约为51 m,滑坡后缘累计滑动约为210 m,前缘向两侧最大的扩散距离约为220 m。

(3)滑坡各区域的速度曲线显示,滑坡启动加速阶段时间短、减速堆积阶段时间长。滑坡运动过程具有明显的突发性、彻底性、整体性、流态性的特点,属于典型的溃散型滑坡。

(4)根据模拟结果计算,滑坡体将会在较短时间内失稳,直接阻断公路并堵塞金沙江,严重威胁到金沙江下游居民的生命财产安全,建议对该滑坡采取“专业监测+截排水沟+裂缝夯填+群测群防”的防治方案。

## 参考文献:

- [1] 彭建兵, 马润勇, 卢全中, 等. 青藏高原隆升的地质灾害效应[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 457-466.  
Peng J B, Ma R Y, Lu Q Z, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(3): 457-466. (in Chinese)
- [2] Chen J, Zhou W, Cui Z J, et al. Formation process of a large paleolandslide-dammed lake at Xuelongnang in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: constraints from OSL and 14C dating[J]. Landslides, 2018, 15: 2399-2412.
- [3] 徐则民. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. 地质论评, 2011, 57(5): 675-686.  
Xu Z M. Deposits of Zhaizicun Landslide-dammed Lake along Jinsha River and its implication for the genesis of Xigeda Formation [J]. Geological Review, 2011, 57(5): 675-686. (in Chinese)
- [4] 陈剑平, 李会中. 金沙江上游快速隆升河段复杂结构岩体灾变特征与机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1153-1167.  
Chen J P, Li H Z. Genetic mechanism and disasters features of complicated structural rock mass along the rapidly uplift section at the upstream of Jinsha River [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1153-1167. (in Chinese)
- [5] 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 Q, Zheng G, Li W L, 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)
- [6] Fan X M, Xu Q, Alonso-Rodriguez A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response [J]. Landslides, 2019, 16(5): 1003-1020.
- [7] 许强, 彭大雷, 李为乐, 等. 溃散性滑坡成因机理初探[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 995-1004.  
Xu Q, Peng D L, Li W L, et al. Study on formation mechanism of diffuse failure landslide [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 995-1004. (in Chinese)
- [8] 许强, 彭大雷, 亓星, 等. 2015年4.29甘肃黑方台党川2~#滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 167-180.  
Xu Q, Peng D L, Qi X, et al. Dangchuan 2~# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu Province: characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 167-180. (in Chinese)
- [9] 曹从伍, 许强, 彭大雷, 等. 基于物理模拟实验的黑方台黄土滑坡破坏机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 72-77.  
Cao C W, Xu Q, Peng D L, et al. Research on the failure mechanism of the Heifangtai loess landslides based on the physical simulation experiments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 72-77. (in Chinese)
- [10] Ouyang C., An H., Zhou S. et al. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China [J]. Landslides, 2019, 16: 1397-1414.
- [11] 周琪, 许强, 周书, 等. 基于数值模拟的突发性黄土滑坡运动过程研究——以黑方台陈家8#滑坡为例[J]. 山地学报, 2019, 37(4): 528-537.  
Zhou Q, Xu Q, Zhou S, et al. Movement process of abrupt loess flowslide Based on Numerical Simulation-A Case Study of Chenjia 8# on the Heifangtai Terrace [J]. Mountain Research, 2019, 37(4): 528-537. (in Chinese)
- [12] Horton A J, Hales T C, Ouyang C. Identifying post-earthquake debris flow hazard using Massflow [J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105134.
- [13] 李俊, 陈宁生, 赵苑迪. 基于地震波译的2000年易贡滑坡-碎屑流动力学过程分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10): 142-149.  
Li J, Chen N S, Zhao Y D. Analysis on debris flow dynamic process of 2000 Yigong Landslide interpreted based on seismic wave [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10): 142-149. (in Chinese)
- [14] 王学良, 孙娟娟, 周书, 等. 尾矿库溃坝运动特征模拟研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 144-151.  
Wang X L, Sun J J, Zhou S, et al. Numerical simulation study on movement characteristics of tailings dam break [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27

