

帕隆藏布东滑坡堵江风险评估

周学钺, 徐争强, 胡 , 张继宏

Risk assessment of blocking the river by Jiaodong landslide in Parlung Zangbo

ZHOU Xuecheng, XU Zhengqiang, HU Yi, and ZHANG Jihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-05>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测

Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology: A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet

李海, 杨成生, 惠文华, 朱赛楠, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 10-17

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

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

基于MSBAS技术的金沙江上游色拉滑坡形变分析

Deformation analysis of Sela landslide in the upper reaches of Jinsha River based on MSBAS technology

熊国华, 杨成生, 朱赛楠, 董继红, 张勤 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 1-9

基于机器学习的滑坡崩塌地质灾害气象风险预警研究

Exploring early warning and forecasting of meteorological risk of landslide and rockfall induced by meteorological factors by the approach of machine learning

李阳春, 刘黔云, 李潇, 顾天红, 张楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 118-123



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-05

帕隆藏布绞东滑坡堵江风险评估

周学钺¹, 徐争强¹, 胡 祎¹, 张继宏²

(1. 四川省核工业地质调查院, 四川 成都 610052;

2. 内蒙古第三地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010011)

摘要:文章以绞东滑坡为例, 利用多期光学影像和 Sentinel-1A 降轨数据对绞东滑坡的崩滑时间和历史活动性进行了分析, 根据分析结果将绞东滑坡斜坡区划分为三个区域, 其中两个已滑滑区(A区、C区)和一个潜在滑区(B区)。在此基础上, 通过滑坡碎屑流和岩体势能之间的计算方程反演了已滑滑区的体积规模和滑体平均厚度, 并基于已滑滑区对潜在滑区可能造成的灾情进行了预测, 认为潜在滑区在全部滑坡的情况下存在堵江风险。文中研究认为, 在遥感手段识别滑坡活动性的基础上, 利用遥感影像、DEM 等数据, 通过计算滑坡碎屑流和岩体势能之间的关系, 可进行实测数据难以获取区域的滑坡规模与滑体平均厚度估算, 进而进行险情评估, 为滑坡防治提供指导。

关键词:绞东滑坡; 遥感; InSAR; 滑坡-碎屑流; 堵江风险

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0036-05

Risk assessment of blocking the river by Jiaodong landslide in Parlung Zangbo

ZHOU Xuecheng¹, XU Zhengqiang¹, HU Yi¹, ZHANG Jihong²

(1. Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu, Sichuan 610052, China; 2. Inner Mongolia Third Geological and Mineral Exploration and Development Co. Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010011, China)

Abstract: Taking Jiaodong landslide as an example, this paper analyzes the collapse time and historical activity of Jiaodong landslide by using multi-phase optical images and sentinel-1A orbit reduction data. According to the analysis results, the slope area of Jiaodong landslide is divided into three areas, including two already sliding areas (area A and area C) and one potential sliding area (area B). On this basis, through the calculation equation between landslide debris flow and potential energy of rock mass, the volume scale and average thickness of the sliding mass of the sliding landslide are inverted. Based on the prediction of the possible disaster caused by the sliding landslide to the potential sliding area, it is considered that the potential sliding area has the risk of blocking the river under the condition of full unloading. This study believes that on the basis of remote sensing means to identify landslide activity, using remote sensing images, DEM and other data, through calculating the relationship between landslide debris flow and potential energy of rock mass, we can estimate the landslide scale and average thickness of the area where the measured data are difficult to obtain, and then carry out risk assessment to provide guidance for landslide prevention and control.

Keywords: Jiaodong landslide; remote sensing; InSAR; landslide debris flow; river blocking risk

收稿日期: 2021-03-02; 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 林芝市巴宜区自然资源局项目(YDLZCG-1924)

第一作者: 周学钺(1989-), 男, 工程师, 主要从事遥感地质方面工作。E-mail: zhouxuecheng_rs@qq.com

通讯作者: 徐争强(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事遥感方面工作。E-mail: 84008181@qq.com

0 引言

绞东滑坡位于林芝市巴宜区鲁朗镇老排龙地段。据历史影像推测,绞东滑坡首次滑塌时间约在 2000 年 5 月 4 日至 2000 年 8 月 8 日,见图 1A 区。2000 年 6 月 10 日易贡湖溃决^[1],随后形成的高速大流量洪水流对下游河道造成了巨大冲击^[2],处于洪流下游回型弯区域的绞东滑坡受洪峰冲击,斜坡稳定性出现波动(文章认为,绞东滑坡首滑大概率是易贡湖溃决形成的洪流冲击所诱发),至今该滑坡仍处于活动状态,对其下方帕隆藏布以及雅鲁藏布江河道造成威胁。

易贡滑坡灾情发生后,国内外有关学者对灾害链模拟^[2],滑坡机理^[3-6]、动力学等方面进行了研究,对易贡滑坡流域内其它潜在的隐患区(体)辐射较少,对绞东滑坡的研究为空白,而绞东滑坡地处帕隆藏布左岸,一旦大规模滑塌将有堵塞帕隆藏布的风险,进而影响雅鲁藏布江及下游两岸人民的生命财产安全,因此对绞东滑坡进行深入研究具有重要的应用价值。

鉴于绞东滑坡发生至今一直存在的活动性以及潜在威胁对象的重要性,文中借助 RS、GIS 对绞东滑坡堵江风险展开了评估,为下一步预防与治理提供思路。

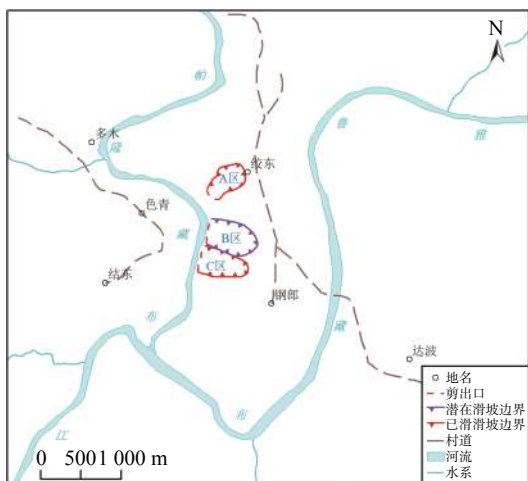


图 1 绞东滑坡区位示意图

Fig. 1 Location diagram of Jiaodong landslide

1 绞东滑坡基本情况

绞东滑坡后缘高程 2 030 ~ 2 092 m,前缘高程 1 585 ~ 1 590 m,最大落差达 515 m,主滑方向 214°。滑体长 260 ~ 640 m,前缘横向宽约 200 ~ 350 m,滑体厚度 5 ~ 12 m,已发生两次滑塌事件,体积共约 $51.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,推测仍有 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上潜在滑体。综合判断,绞东滑坡为大型顺向浅表层滑坡。

1.1 地质环境背景

绞东滑坡位于帕隆藏布河道北东侧山坡中上部,地形起伏大、切割深。滑坡面基岩大面积出露,后缘外侧近山脊,地形稍缓。坡面整体坡向 $210^\circ \sim 280^\circ$,坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。已有滑面呈负地形地貌,降雨时滑坡后缘和两侧坡体形成的水流均向滑坡区汇集,为滑坡的形成提供了有利条件。

滑坡区出露的地层为一套蛇绿混杂岩构造岩片,滑坡中上部为混杂带基质,下部为石英片岩岩片。区内岩层倾向总体在 $220^\circ \sim 280^\circ$,倾角较大,在 $70^\circ \sim 82^\circ$ 。区内构造线主要方向为南东向,构造规模大小不一,断层破碎带发育、断层面倾角通常大于 60° 、性质为正断兼小规模走滑。

1.2 绞东滑坡特征分析

为理清绞东滑坡的危险性,必要对滑坡特征进行进一步分析,尤其是潜在滑体规模、分布位置等。由于研究区域位于深切无人区内,滑坡实测数据难以获得,依据现有的影像资料和 DEM 资料亦难以直接获得滑坡体规模。为有效估算滑体规模,在前人研究的基础上引入缺乏实地测量数据区域的高位滑坡体规模估算方法。

近年来,研究人员对滑坡碎屑流运动的距离有诸多研究^[7-11],其中郑光等^[11]首次建立了滑坡碎屑流和岩体势能之间的基本公式,并加以验证,结果符合性较好。具体公式如下:

$$L = 23.45 \cdot \frac{(d/B)^{0.34} \cdot (\tan \alpha)^{0.613}}{\mu} (V \cdot H)^{0.25} \quad (1)$$

式中: L ——碎屑流运动水平位移距离;

d ——碎屑体最大粒径;

B ——滑面宽度;

α ——滑面倾角;

μ ——摩擦系数;

V ——滑坡体体积;

H ——滑坡体最大垂直位移距离。

由于绞东滑坡所在斜坡面已发生两次滑坡灾害,根据遥感影像可直接获取 L 和 B 的值,并可估测 d 的值,而根据 DEM 则可获取 H 和 α 的值, μ 则可依据 HEIM^[12] 1932 年提出的 $\mu = H/L$ 计算。

由上可知,在已知 L 、 H 、 B 、 d 、 α 、 μ 的前提下,计算滑坡体体积 V 则成为可能,因此式(1)可改写为:

$$V = \left[\frac{L \cdot \mu}{23.45 \cdot (d/B)^{0.34} \cdot (\tan \alpha)^{0.613}} \right]^4 \div H \quad (2)$$

将绞东滑坡已知数据代入式(2), 计算结果见表 1。

通过表 1 计算可以看到, 基于式(2)计算得到的滑坡体体积与现场估算的滑坡体体积接近率超过 90%。在缺乏准确资料的情况下, 利用式(2)进行滑坡体规模估算是可行的。当然, 文中的检验数据有限, 该模型的通用性尚待进一步检验。

根据前文, 在缺乏准确资料的情况下, 通过模型计算得到了绞东滑坡两个滑体的体积, 而滑体平均厚度则可根据 $h_{\text{平均}}=V/S$ 计算得到, 其中 $h_{\text{平均}}$ 为滑体平均厚度, S 为滑体表面积(表 2)。

表 1 高位滑坡体体积计算模型检验计算表
Table 1 Check calculation table of high-level landslide volume calculation model

参数	L /m	B /m	H /m	d /m	α /(°)	μ	$V_{\text{计算}}$ /m ³	$V_{\text{现场估算}}$ /m ³	接近率 /%
北侧滑体	728	15	515	1.5	40	0.71	16 143	15 000	92.92
南侧滑体	579	218	428	1.5	35	0.74	544 436	500 000	91.84

表 2 高位滑坡体平均厚度计算表
Table 2 Calculation table of average thickness of high-level landslide mass

滑坡体	$V_{\text{现场估算}}$ /m ³	$S_{\text{投影面积}}$ /m ²	$S_{\text{表面积}}$ /m ²	$h_{\text{平均}}$ /m
北侧滑体	15 000	16 359	19 971	0.75
南侧滑体	500 000	65 199	79 593	6.28

1.3 潜在滑坡体分布位置及规模分析

绞东滑坡斜坡区已发生两次滑坡事件。为进一步分析滑坡影像特征, 绘制了滑坡三维影像图(图 2)。

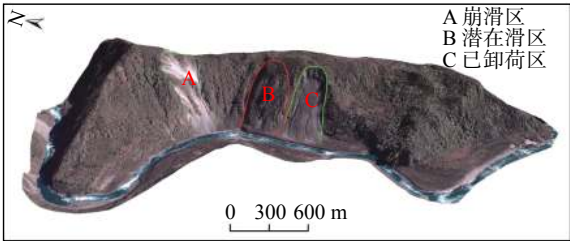


图 2 绞东滑坡斜坡区三维影像图
Fig. 2 3D image of Jiaodong landslide slope area

根据图 2 可直观发现, 北侧滑体(A 区)主体以崩滑为主, InSAR 监测显示的形变迹象较弱, 实地堆积体较少, 至目前尚未形成大规模崩滑现象; 南侧滑体(C 区)已发生滑动, 堆积体较多, InSAR 监测显示其滑面仍存在明显形变迹象; 中部区域(B 区)左侧为已滑坡区, 右侧为沟谷带, 其形态上符合潜在滑坡地貌。

综合 A、B、C 三个区域的活动特性, 考虑其地质环

境的一致性, 认为 B 区可能存在和 C 区相似的地表活动性, 而 C 区已发生滑坡, 则本文关注的再发灾害的重点区域应该为 B 区。

结合遥感影像和 DEM, 获取 B 区的参数, 潜在滑区表面积 284 648 m², 参照计算 C 区的滑坡体平均厚度, 则可知 B 区潜在滑体体积为 1 787 592 m³。

2 绞东滑坡活动性分析

根据历史光学影像, 自首滑后, 于 2014 年(具体时间未知)在绞东滑坡南侧约 500 m 处的钢郎一带再次发生滑塌事件, 见图 3C、图 4C 区。此次滑塌虽未在绞东滑坡原址, 但二者在空间上同属一个微斜坡单元, 故认为是同一个滑坡。

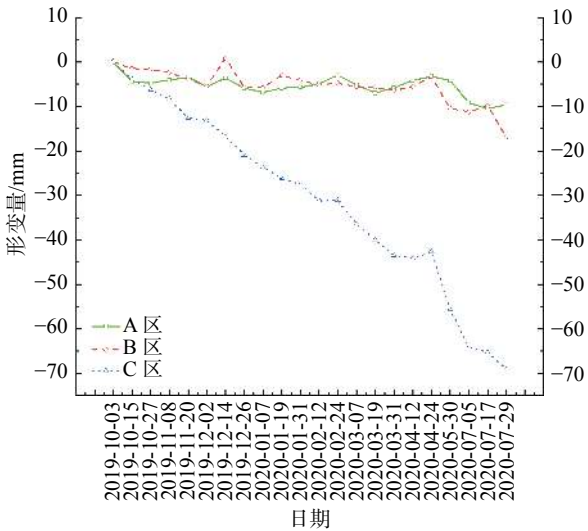


图 3 绞东滑坡三处斜坡区平均形变时序曲线图
Fig. 3 Time series curve of average deformation in three slope areas of Jiaodong landslide

依据光学影像获取绞东滑坡两次活动的时间节点, 由于光学传感器的成像特点, 仅据此难以获取更详细的滑坡活动信息。为进一步探索绞东滑坡的活动性, 选用 2019—2020 年共 22 景 Sentinel-1A 降轨数据, 22 景日期见图 3 横坐标。基于 POD 精密定轨星历数据对原始数据进行了修正, 再结合 ALOS 12.5m DEM 数据采用 PS-InSAR 对滑坡区域进行形变分析(图 4)。

由图 4 可知, 绞东滑坡存在两处已滑塌区域, 目前均存在活动迹象, 其中南侧滑坡体形变速率总体较高。对南侧滑坡体进一步分析, 平均形变速率-34.09 mm/a, 最大形变速率为-96.13 mm/a, 形变速率 ≥ 50 mm/a 的 PS 点共 10 个, 其中除一个点位于后缘下方约 180 m 处外, 其余 9 个点集中分布于滑体中下部, 形变速率突出(LOS 方向即视线方向, 正代表靠近 LOS 方向, 负代表远离 LOS 方向)。为充分反映滑坡体活动情况, 文章对

绞东滑坡的平均形变量进行时序分析(图 3),发现,A 区与 C 区自 2019 年 10 月 3 日至 2020 年 4 月 24 日之间相对稳定,之后出现形变迹象;B 区自 2019 年 10 月 3 日至 2020 年 7 月 29 日呈持续形变迹象,在 2020 年 4 月 24 日至 2020 年 7 月 5 间有加速形变趋势。

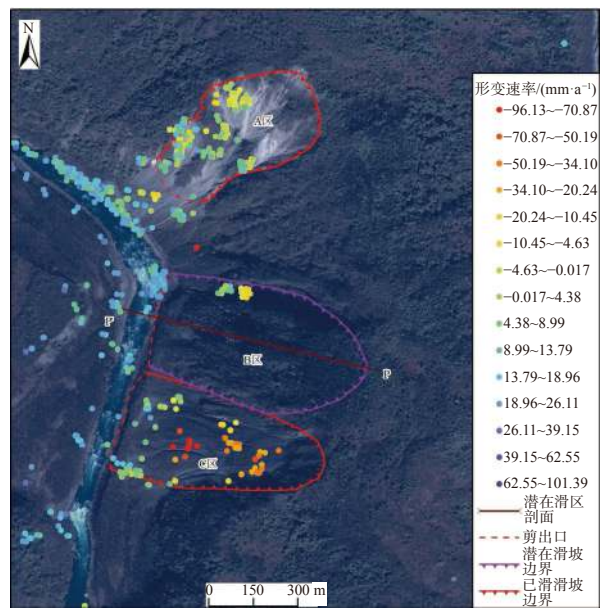


图 4 绞东滑坡形变速率图(2019 年 10 月 3 日至 2020 年 7 月 29 日, LOS 方向)

Fig. 4 Deformation rate diagram of Jiadong landslide (October 3, 2019 to July 29, 2020, LOS direction)

注:影像底图为 GF-2 数据,时相为 2020 年 2 月 21 日。

综合分析表明,绞东滑坡所在斜坡坡体目前仍处于不稳定状态,滑坡再发性较高。

3 绞东滑坡堵江风险性

绞东滑坡直接威胁对象为帕隆藏布以及雅鲁藏布江河道,在理清绞东滑坡斜坡区潜在高危区域后,进一步分析其堵江风险至关重要。

3.1 绞东滑坡潜在堵江类型分析

由前文可知,B 区和 C 区具有相似的地质环境背景,假设 B 区在某刻发生了滑坡灾害,认为其滑面倾角、碎屑流最大粒径以及摩擦系数均与 C 区相同,即 $\alpha=35^\circ$, $d=1.5\text{ m}$, $\mu=0.74$ 。同时,根据遥感影像和 DEM 测算,再发滑坡的 $H=457\text{ m}$, $B=297\text{ m}$,代入式(1),可求得 $L=23.45\cdot\frac{(d/B)^{0.34}\cdot(\tan\alpha)^{0.613}}{\mu}\cdot(V\cdot H)^{0.25}=713.2\text{ m}$

即,假定该次推测滑体碎屑流前部无地形阻挡,则碎屑流最大滑移平距为 713.2 m(图 5)。

图 5 为绞东滑坡潜在滑区(B 区)地形示意图。由图 5 可知,潜在滑区前部为河道区,宽约 90 m,之后便

是缓坡区。假设 B 区全部滑坡,碎屑流倾泻而下,必然覆盖现有河道区,止于对岸斜坡 1 588 m 高程点(无地形阻挡下碎屑流终止点与实际地形的交汇点)以下。基于该假设,则 B 区全部滑坡时会造成河道完全堵塞。

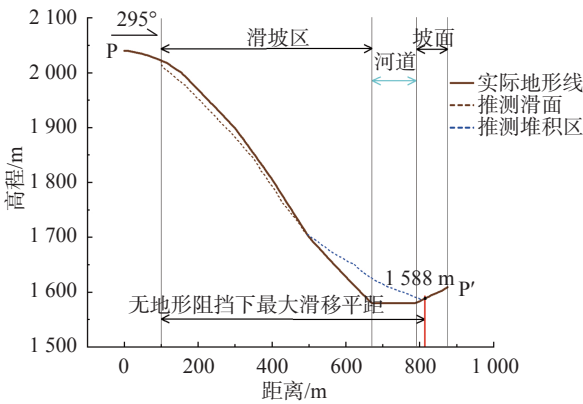


图 5 绞东滑坡潜在滑区(B 区)地形剖面示意图

Fig. 5 Topographic profile of potential sliding area(B) of Jiadong landslide

3.2 绞东滑坡潜在堵江坝体分析

前文可知,若绞东滑坡 B 区全部滑坡则会造成河道完全堵塞,因此对堰塞坝体高度有必要进一步分析。目前常见的堰塞坝高度估算方法主要为一般经验公式法和离散元软件 PFC 模拟^[13-14],吴建川等^[4]认为基于 PFC 软件模拟可获得更准确的数据。有鉴于此,本文引用梁承洋^[13]基于 PFC 计算得出的冰碛物滑坡堵江坝高快速评估表(表 3)来快速评估绞东滑坡潜在堵江坝体的最小坝高。

绞东滑坡坡脚沟谷宽 W 约 90 m,河谷坡度 α 约 35° ,B 区潜在滑体体积 V 为 $1\,787\,592\text{ m}^3$,滑坡宽度 B 为 297 m,对应的单位宽度体积为: $V_{\text{单位宽度}}=V_{\text{总}}/B\approx 6\,000\text{ m}^3$,根据表 3,绞东滑坡潜在堵江坝体最小坝高大致在 32 ~ 35 m。

表 3 滑坡堵河最小坝高快速评估表					
Table 3 Quick evaluation table for minimum dam height of landslide blocking river					
河谷底宽 W/m	河谷坡度 $\alpha/(\text{^\circ})$	不同松散堆积体体积 $V_{\text{单位宽度}}$ 下的坝体高度/m			
		2 000 m^3	4 000 m^3	6 000 m^3	8 000 m^3
40	30	18.71	31.93	40.33	47.36
	35	22.28	33.43	44.79	52.52
	40	23.26	34.53	48.73	55.73
80	30	14.37	26.86	33.41	41.71
	35	14.67	28.33	35.84	45.68
	40	15.04	31.71	38.07	49.17
120	30	11.26	18.05	28.06	36.23
	35	11.39	19.51	32.76	37.38
	40	11.97	21.61	34.00	39.19

综上, 绞东滑坡 B 区斜坡若在同一时段全部滑坡, 则存在造成帕隆藏布完全堵塞进而威胁下游雅鲁藏布江的风险。帕隆藏布是雅鲁藏布江的主要支流之一, 一旦引起堵塞将引起系列严重后果。

4 结论

(1) 文中以绞东滑坡为例, 利用历史遥感影像、DEM 等数据, 通过滑坡碎屑流和岩体势能之间的计算公式, 估算了已滑滑坡的体积规模和平均厚度, 并基于已滑滑坡预测潜在滑坡可能造成的灾情风险。本次针对绞东滑坡堵江风险评估的研究方法, 可尝试应用于其他区域滑坡风险评估。

(2) 绞东滑坡目前存在两个已滑滑区(A 区、C 区) 和一个潜在滑区(B 区), 通过对潜在滑区分析, 认为绞东滑坡 B 区尚存在 $1\,787\,592\text{ m}^3$ 潜在滑体, 若该部分滑体在同一时段全部滑坡则存在堵塞帕隆藏布的风险, 堵江堰塞坝最小坝高在 $32\sim 35\text{ m}$ 。

(3) 持续开展 InSAR 监测, 掌握绞东滑坡斜坡形变趋势, 有助于绞东滑坡潜在灾情的早期识别, 进而开展预防及治理工作。

参考文献 (References):

- [1] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探 [J]. 地球学报, 2002, 23(4): 363–368. [LYU Jietang, WANG Zhihua, ZHOU Chenghu. A tentative discussion on the monitoring of the Yigong landslide-blocked lake with satellite remote sensing technique [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 363–368. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 戴兴建, 殷跃平, 邢爱国. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 1–8. [DAI Xingjian, YIN Yueping, XING Aiguo. Simulation and dynamic analysis of Yigong rockslide-debris avalanche-dam breaking disaster chain [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(5): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8–11. [YIN Yueping. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong river in the Bomi, Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2000, 27(4): 8–11. (in Chinese with English abstract)]
- [4] SHANG Y J, YANG Z F, LI L H, et al. A super-large landslide in Tibet in 2000: Background, occurrence, disaster, and origin [J]. Geomorphology, 2003, 54(3/4): 225–243.
- [5] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡大滑坡成因探讨 [J]. 地球科学, 2003, 28(1): 107–110. [LYU Jietang, WANG Zhihua, ZHOU Chenghu. Discussion on the occurrence of Yigong landslide in Tibet [J]. Earth Science, 2003, 28(1): 107–110. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 胡明鉴, 程谦恭, 汪发武. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 138–143. [HU Mingjian, CHENG Qiangong, WANG Fawu. Experimental study on formation of Yigong long-distance high-speed landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 138–143. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡—碎屑流研究 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445–454. [YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at dazhai in Guanling of Guizhou Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445–454. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 雷先顺, 朱大勇, 刘诚, 等. 考虑滑道坡度和宽度的滑坡模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1281–1288. [LEI Xianshun, ZHU Dayong, LIU Cheng, et al. Model test study of the effect of slope angle and chute width on landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(5): 1281–1288. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张明, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程滑坡-碎屑流运动机理研究发展现状与展望 [J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 805–817. [ZHANG Ming, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 805–817. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 姜云, 尹金平. 华蓥山溪口滑坡—碎屑流 [J]. 地质灾害与环境保护, 1992, 3(2): 51–58. [JIANG Yun, YIN Jinping. Xikou landslide debris flow in Huayingshan [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1992, 3(2): 51–58. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郑光. 滑坡—碎屑流远程运动距离研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [ZHENG Guang. Study on the long-runout distance of rock avalanche [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [12] HEIM A. Landslides and human lives [M]. Vancouver, B C: Bitech Publishers, 1932: 93–94.
- [13] 梁承洋. 川藏交通廊道冰碛物滑坡堵江风险及线路对策研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015. [LIANG Chengyang. Study on the risks of moraine landslides blocking river along Sichuan-Tibet transportation corridor and disaster reduction strategies in route engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴建川, 张世殊, 吴爽, 等. 基于 PFC3D 的滑坡堰塞坝堆积过程与形态模拟 [J]. 人民长江, 2020, 51(4): 135–141. [WU Jianchuan, ZHANG Shishu, WU Shuang, et al. Simulation on accumulation process and form of a barrier dam based on PFC3D [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 135–141. (in Chinese with English abstract)]