

1965年烂泥沟滑坡前兆、高速远程运动及后期演化特征

文宝萍, 王凡

Precursors and Motion Characteristics of the 1965 Lannigou Rockslides and the Subsequent Evolution

WEN Baoping and WANG Fan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150-156

滑坡碎屑化运动物理模型相似材料特性研究

A study of the similar material characteristics of fragmenting rock mass physical model

任占强, 宋章, 林棋文, 程谦恭, 刘毅, 邓凯丰, 蒙浩, 涂津 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 132-142

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

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone

李明威, 唐川, 陈明, 史青云 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 182-190

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108065

1965 年烂泥沟滑坡前兆、高速远程运动及后期演化特征

文宝萍¹, 王 凡^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083;
2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 烂泥沟滑坡是我国最著名的巨型高速远程滑坡之一。1965 年烂泥沟滑坡活动造成近百年来最严重的单体滑坡灾害。此后, 1991 年和 2007 年滑坡又经历 2 次较大规模活动。然而, 对于 1965 年烂泥沟滑坡前兆和 2 个序次活动的成生关系、此后滑坡活动特征, 尚无定论; 对滑坡现今状态尚不清楚。本文基于多时相、多源遥感卫星影像及近期无人机测量和现场调查数据, 对上述问题进行了分析。研究发现, 1965 年滑坡前, 滑源区北侧山体开裂明显; 1965 年 11 月 22 日、23 日 2 次滑动为北、南两侧山体分别滑动; 其成生关系是: 北侧山体沿倾向坡外结构面高位剪出, 高速冲向南侧山坡, 受其冲击, 南侧山体次日沿倾向坡外结构面高位、高速滑出, 第一序次滑动规模远大于第二序次; 高速运动的部分滑坡碎屑流从流通区北侧山坡飞跃通过、且铲刮冲击强烈, 滑坡碎屑流最远运动至烂泥沟与普福河交汇处向东 2.8 km; 1991 年滑坡滑源区紧邻 1965 年北侧滑坡滑源区的西侧边界, 滑坡碎屑流终止于沟道中段; 2007 年滑坡滑源区位于 1991 年滑坡滑源区上部, 滑坡碎屑流运动距离略小于 1991 年滑坡碎屑流。目前, 滑源区西北侧、西南侧山坡上地表开裂明显, 西北侧山坡上其中一条裂缝扩展速率约 16.7 m/a, 西南侧山坡上裂缝扩展迹象不明显。因此, 西北侧山坡显示再次滑动之势, 须引起关注。

关键词: 高速远程滑坡; 遥感影像; 前兆; 成生关系; 活动特征; 发展趋势

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0072-09

Precursors and Motion Characteristics of the 1965 Lannigou Rockslides and the Subsequent Evolution

WEN Baoping¹, WANG Fan^{1,2}

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Xi'an Center of Mineral Resources Investigation of China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: The Lannigou rockslide is one of the most well-known giant and rapid rockslides with long runout in China. The 1965 Lannigou rockslides caused the most catastrophic consequence in China since 1920's, and were followed by two more rockslides in 1991 and 2007, respectively. However, it remains unclear that how precursors of the 1965 rockslides were and relationship between the two movement sequences was, so did the following activities in 1991 and 2007. Those unclear questions were explored in this paper based on 23 remote sensing satellite images taken during the period between 1965 and 2020 and the UAV image taken in 2019 as well as field survey then. It is found that: 1) tension cracks could be seen on the northern slope of the source area before the 1965 rockslides, evidencing the precursors there, 2) the 1965 rockslide first occurred on the northern slope, and subsequently induced the rockslide on the southern slope next day resulted from its strong impact, 3) rapid

收稿日期: 2021-08-20; 修订日期: 2021-09-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2008YFC1505003)

第一作者: 文宝萍(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为地质灾害防治理论与方法。E-mail: wenbp@cugb.edu.cn

granular flows of the two rockslides jumped and flew over the northern slope of the transition zone, and scrapped, entrained surficial layer there, 4) the granular flow did not reach the Jingsha River, but ended ca. 2.8 km east of the intersection between the Lannigou and the Pufu river; 5) the source area of the 1991 rockslide just neighbored the northwestern boundary of the 1965 rockslide on the northern slope, while the 2007 rockslide neighbored the upper boundary of the 1991 rockslide, and 6) the detached volumes and runouts of the 1965, 1991 and 2007 rockslides showed a decrease order. Recently, tension cracks can be clearly seen on both the northwestern and southwestern slopes. One of tension cracks on the northwestern slope is extending with a rate of 16.7 m/a, while those on the southwestern slope has shown no sign of extension since 2014, indicating that the northwestern slope may fail again. It is thus that an attention should be paid to the northwestern slope via monitoring its deformation and keeping local people away from the area likely affected.

Keywords: rapid rockslide with long runout; remote sensing satellite imagery; precursor; relationship between movement sequences; motion characteristics; evolution trend

高速远程滑坡是自然界破坏力最强、形成机理最复杂的滑坡类型。云南禄劝烂泥沟滑坡是一个典型的具有多期活动历史的巨型高速远程滑坡。近百年来,该滑坡曾于1921年、1931年、1955年、1965年、1991年、2007年发生过多次较大规模(体积 $>10^6 \text{ m}^3$)活动^[1-2]。其中,1965年11月22日、23日连续2次剧烈活动,摧毁4个村庄、造成444人遇难^[2],是我国近百年来最严重的单体滑坡灾害事件。此次滑坡还引发地震,最大震级4.4级^[1]。滑坡碎屑流运动7 km后,堵塞普福河,形成长2.7 km、高179 m堰塞坝^[1],滑坡全程不足10 min^[2],8个月后坝体溃决,形成泥石流冲入金沙江;1991年9月17日再次滑动,造成10人死亡、21头牲畜被埋;2007年7月30日又发生滑坡,所幸未造成人员伤亡^[3]。目前,滑坡后部斜坡上依然可见数条长度100 m以上拉张裂缝。1965年滑坡后,施雅风等^[1]在现场调查、访问基础上,对该次滑坡进行了较详细的描述,对其形成条件做了初步分析;徐则民^[3]、程先锋等^[2]在滑坡发生40多年后,基于调查、访问,对1965年滑坡活动特征、形成条件也做了一定研究。然而,由于滑坡地处偏远的高山峡谷区,加之当时条件有限,前人对1965年11月22日、23日2个序次活动的成生关系并无定论;尽管了解到滑坡前有地表开裂,但裂缝具体位置及其特征等并无明确信息;对1965年后2次较大规模滑坡及该滑坡发展趋势,仅做了初步分析。至今,该滑坡仍有许多未解之谜。众多谜团中,弄清烂泥沟滑坡1965年剧烈活动前的变形特征及滑坡过程中不同序次的成生关系,对认识滑坡活动机理和成灾模式至关重要;另一方面,掌握1965年后滑坡再次活动特征和目前动态,则是当前减灾防灾亟需了解的实际问题。

近20年来,随着大量高分辨率遥感卫星影像存档数据的公开,基于多时相、多源遥感卫星影像分析滑坡动态,已成为研究滑坡活动特征最有效的途径之一^[4-7]。相比传统的仪器监测途径,前者具有数据获取成本低、覆盖范围大、持续时间长的显著优势。通过对比不同期次影像上同一地段的微地貌形态、纹理及色调/灰度变化特征,可确定滑坡动态及其特征。利用经过严格正射校正、地理配准的高分辨率影像,还可通过测量同名点间距离,确定滑坡地表位移场及变化特征^[4-7]。为进一步弄清1965年烂泥沟滑坡变形前兆、2个序次滑动关系及滑坡运动特征、1965年后2次较大规模滑坡活动特征、现今滑坡动态及发展趋势,本文基于1965—2020年的多期、多源卫星影像,结合现场调查、无人机测量,分析了1965年烂泥沟滑坡变形前兆、2个序次活动的成生关系,厘定了1991年和2007年2次较大规模活动特征,评估了滑坡现今动态特征和未来活动趋势。研究结果不仅为深入认识烂泥沟滑坡活动机理奠定了基础,同时可为类似高速远程滑坡研究提供借鉴。

1 地质背景和滑坡发育特征

1.1 滑坡区地质背景

烂泥沟滑坡地处青藏高原东南缘金沙江一级支流普福河(又称白水河)西侧走向近EW的支沟(烂泥沟)沟头(图1),为典型的高山峡谷,河(沟)谷切割强烈,地质构造复杂。滑坡所在的烂泥沟段,沟头大风垭口高程3180 m,与普福河交汇处高程1100 m,沟谷切割深度1500~2080 m,沟头坡度 $35^\circ \sim 45^\circ$,沟谷两岸坡度 $>50^\circ$,局部近直立,多数地段沟底宽度不足20 m。普福河断裂带的4条断层横切烂泥沟,岩层间多为断

层接触。自沟头至其与普福河交汇段,沟内依次出露早二叠纪拉斑玄武岩($P_1\beta$)夹薄一中厚层凝灰岩,晚三叠纪—晚侏罗纪(T_3-J_3)厚层砾岩、砂岩、泥岩夹页岩,早二叠纪(P_1)厚层灰岩夹白云岩(图 1)。

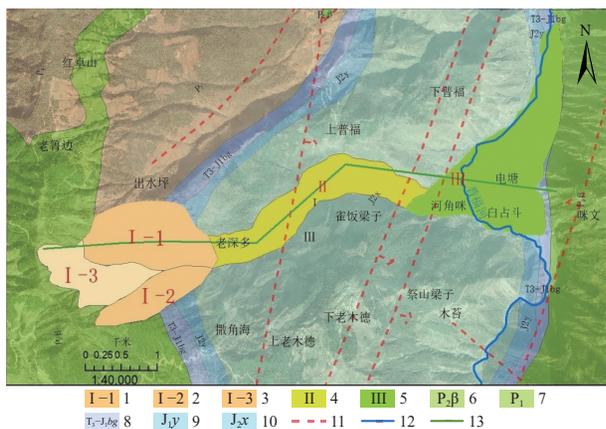


图 1 烂泥沟滑坡区平面图

Fig. 1 Simplified plan of the Lannigou rockslides

1—1-1 滑坡源区;2—1-2 滑坡源区;3—1-3 滑坡源区;4—1965 年滑坡流通区;5—1965 年滑坡堆积区;6—玄武岩;7—灰岩;8—砾岩及砂岩、泥岩;9—泥岩夹粉砂岩;10—泥岩、砂岩夹页岩;11—断层;12—普福河;13—剖面线

1.2 滑坡发育特征

烂泥沟滑坡为典型的沟道型高速远程滑坡-碎屑流,滑坡源区、流通区、堆积区基本完整(图 1)。

烂泥沟沟头为滑坡源区,面积约 2.0 km^2 。滑坡源区实为由北侧沟坡上滑坡 I-1、南侧沟坡上滑坡 I-2 和正西偏南侧沟坡上滑坡 I-3 构成的滑坡群(图 1、图 2)。其中,北侧沟坡上滑坡 I-1 和南侧山坡上 I-2 滑坡为 1965 年滑坡的滑源区;正西偏南侧沟坡上滑坡 I-3 并非独立单体滑坡,是由 1965 年滑坡后表层溜滑、蠕动的多个浅层滑坡、崩塌及 1991 年、2007 年滑坡构成的复杂滑坡群。因这些滑坡边界很难清楚划定,故笔者在此简化归并。滑坡 I-1、I-2 为主体发育在玄武岩中的块状岩类滑坡。滑坡 I-1、I-2 上部均见裸露滑面(倾角 $35^\circ \sim 38^\circ$)(图 2),显示其滑面均沿倾向坡外结构面发育,斜坡破坏模式为块体平面滑移模式。但裸露滑面处地形陡峻、表面碎石溜滑,调查人员无法接近观察。依据前人资料^[1]和笔者据现场条件推测,滑面可能沿凝灰岩夹层发育。依据滑面产状,推测滑坡 I-1、I-2 剪出口高程约 2 400 m、滑体最大厚度百米以上。滑坡 I-1、I-2 滑落后在高程 2 200 m 的老深多附近形成由玄武岩碎块石构成的缓坡平台(图 1、图 2)。

据前人资料^[1]和笔者现场调查,高程 2 200 m 滑坡平台下部至阿角迷为 1965 年滑坡碎屑流的流通区,阿



图 2 烂泥沟滑坡源区及主要滑坡 (Google Earth 2021)

Fig. 2 The source area of the Lannigou rockslides and its components

注: a、b 分别为 1991 年、2007 年滑坡源区。

角迷至普福河以东约 2.8 km 为 1965 年滑坡堆积区(图 1)。估测 1965 年滑坡从滑源区滑落总体积约 $4.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,滑坡 I-1、I-2 体积分别约 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。依照国际上普遍采用的高速远程滑坡几何参数^[8],滑坡 I-1 落距约 1 600 m,滑程约 7 000 m,表观摩擦系数约 0.23;滑坡 I-2 落距约 1 900 m,滑程约 7 000 m,表观摩擦系数约 0.27。

2 数据来源与研究方法

本次研究收集了 1965—2020 年覆盖烂泥沟的 23 个期次云量较少、成像质量较高的多源卫星影像,同时采用 2019 年 12 月 17 日无人机拍摄的滑坡影像(表 1)。其中,1965 年 11 月 7 日和 1965 年 12 月 25 日美国卫星 Keyhole 拍摄的 2 期影像恰在滑坡剧烈活动的前、后时间。所有影像经正射校正、地理配准。但由于烂泥沟所在区域非常偏僻,2014 年以前没有较高精度的 DEM 数据,故本次研究中对 2014 年之前卫星影像仅做了粗略的正射校正和地理配准。研究方法以基于影像特征的定性分析为主;2014—2020 年的 Google Earth 高清影像(18 级)分辨率为 1.0 m,故对近期拉张裂缝动态采用定性分析与定量测量相结合的方法。

3 1965 年滑坡前兆与活动特征

3.1 滑坡前兆

1965 年 11 月 7 日 2 m 分辨率的卫星影像显示(图 3),滑坡前 15 天,烂泥沟沟头南、北两侧山坡在坡脚处基本相连(图 3A、B),这与现场访问时老乡叙及滑坡前南北两侧山坡上行人、羊群可直接穿过的情形一致。北侧山坡中上部可见至少 8 条长度不等的拉

表1 研究采用的遥感卫星/无人机影像

Table 1 Remote sensing satellite/UAV images used in this study

拍摄时间/年-月-日	卫星传感器/数据源	分辨率/m	影像类型
1965-11-07	Keyhole	2	全色
1965-12-25	Keyhole	2	全色
1990-03-11	Landsat-5	30	彩色
1991-04-15	Landsat-5	30	彩色
1992-04-17	Landsat-5	30	彩色
1993-04-04	Landsat-5	30	彩色
2005-04-30	Landsat-5	30	彩色
2007-05-06	Landsat-5	30	彩色
2008-04-06	Landsat-5	30	彩色
2009-04-16	Landsat-5	30	彩色
2007-01-15	ALOS AVNIR-2	10	全色
2008-04-19	ALOS AVNIR-2	10	全色
1999-11-23	Landsat-7	15	全色
2001-12-30	Landsat-7	15	全色
2003-01-02	Landsat-7	15	全色
2005-01-07	Landsat-7	15	全色
2006-01-10	Landsat-7	15	全色
2007-01-13	Landsat-7	15	全色
2008-01-09	Landsat-7	15	全色
2009-02-03	Landsat-7	15	全色
2014-01-11	Google Earth	1	彩色
2017-01-19	Google Earth	1	彩色
2020-01-14	Google Earth	1	彩色
2019-12-17	无人机	0.1	彩色

张裂缝,东侧2条裂缝长约600 m,其他各处裂缝长度不足100 m;北侧山坡上分布以浅色调为特征的多处表层崩滑,坡脚处规模较大;南侧山坡上未见明显拉张裂缝和较大崩滑区域。上述影像特征反映,滑坡前15天,北侧山体变形迹象显著,但拉张裂缝并未贯通;南侧山体上无明显变形迹象。因此,北侧滑坡早于南侧滑坡,北侧山坡上拉张裂缝的快速发展时段很短,至少不足15天。

3.2 滑坡活动特征

(1) 源区滑坡活动序次与成因关系

对比滑坡前后影像可明显看出,2次剧烈滑动后,沟头西侧(含西南侧)斜坡地形无明显变化,但南北两侧山坡地形改变强烈。北侧山体滑坡后留下平整滑壁,滑壁东侧边界形成陡崖(图3A、B,图4A、B)。东侧边界位置与滑坡前最长裂缝位置大体一致(图3B、图4B中1区)。由此向东,沟道已被大量滑坡碎块石充填;南侧山坡上西侧支沟基本保持原始形态(图3B、图4B中4区),但东侧山梁已成为坡面较平整的凹槽,较平整坡面与滑坡I-2的滑面裸露部位大体一致(图3B、图4B中3区)。因北侧山体朝南临空、且滑

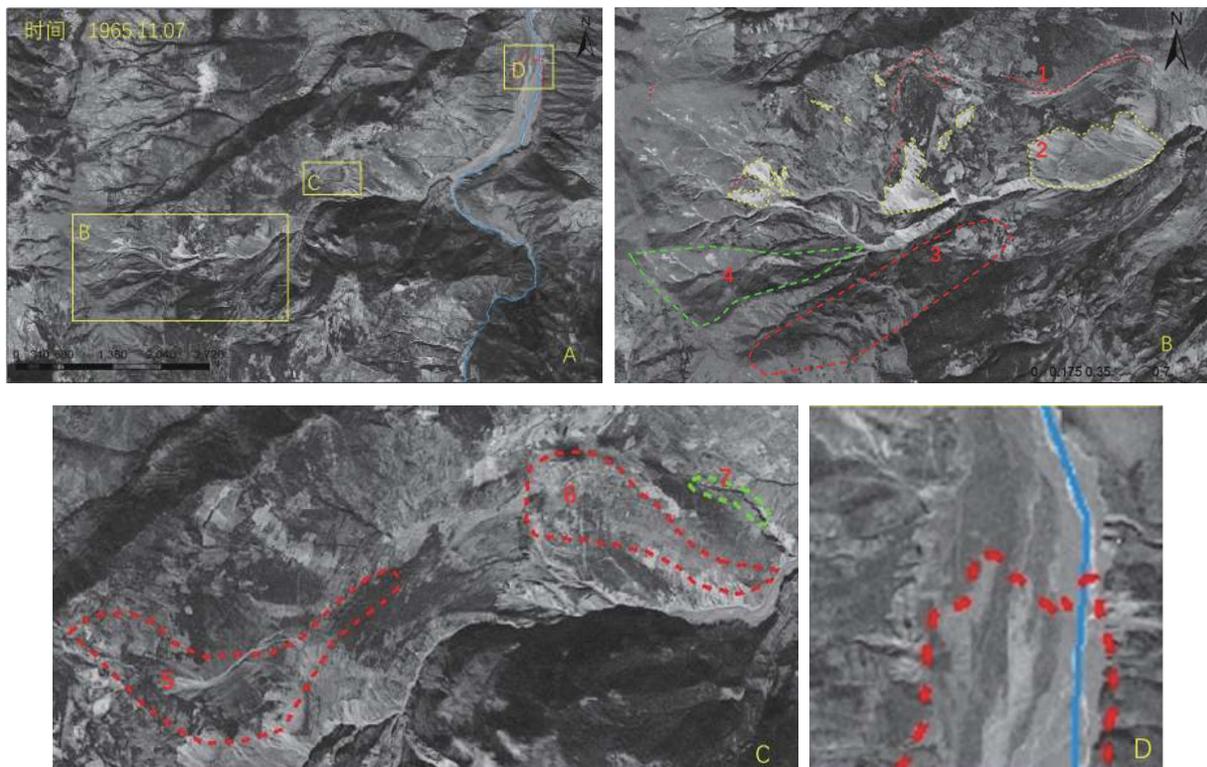


图3 1965年11月7日滑坡前烂泥沟全区及代表性局部段影像(Keyhole)

Fig. 3 The image covering the Lannigou before the 1965 sliding taken on Nov. 7, 1965 and close-up views at different sections

A—全区; B—源区; C—流通区北侧山坡局部; D—堆积区边缘; 1—地表裂缝; 2—表层滑坡、崩滑; 3—山脊; 4—支沟; 5、6—流通区北侧山坡局部突出台地; 7—流通区北侧山坡局部山脊

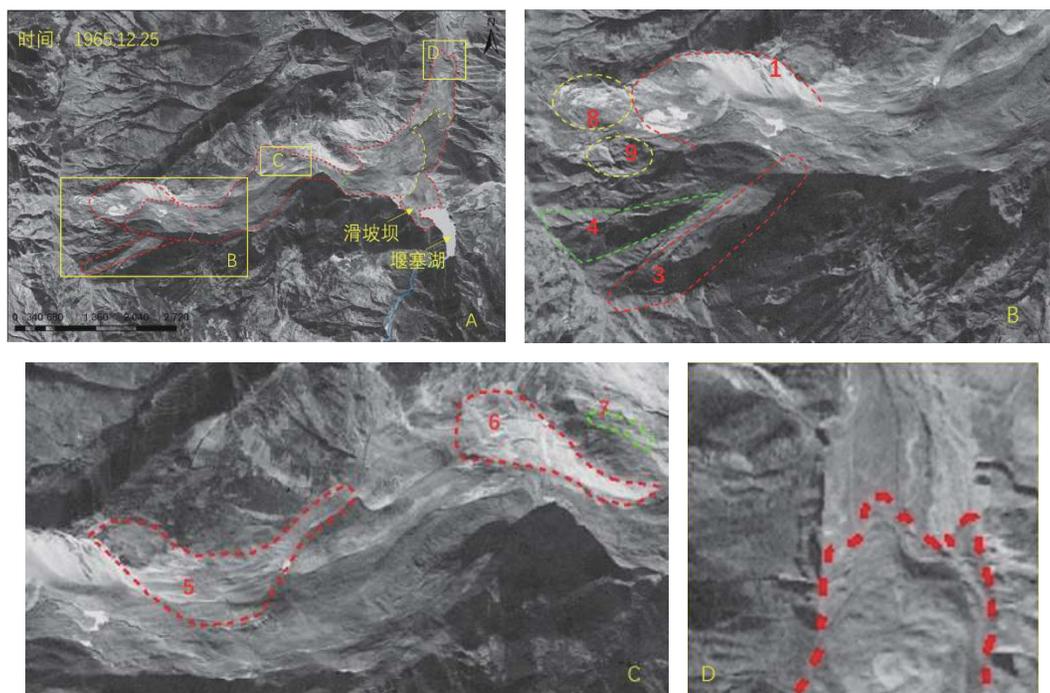


图 4 1965 年 12 月 25 日滑坡后烂泥沟全区及代表性局部段影像 (Keyhole)

Fig. 4 The image covering the Lannigou after the 1965 sliding taken on Dec. 25, 1965 and close-up views at different sections

A、B、C、D、1、3、4、5、6、7—与图 3 上滑坡前位置一致; 8—滑坡后圈椅状裂缝区; 9—滑坡后新裂缝

坡前已有显著地表开裂, 故有理由推断, 1965 年 11 月 22 日, 北侧山体沿倾向坡外结构面高位、高速剪出后冲向南侧山体, 受阻后向东侧临空方向折转冲出; 受北侧滑坡冲击, 次日南侧山体沿倾向坡外结构面高位、高速滑坡, 也向东侧临空方向折转冲出。

北侧山坡西侧在滑坡前有小冲沟发育 (图 3B, 图 4B), 滑坡后已无法识别, 表明受滑坡影响, 该处沟坡发生了小规模崩滑。滑坡后沟头西侧山坡在影像上出现 2 处纹理杂乱区域及圈椅状展布的阶梯形错落带 (图 4B 中 8、9 区), 与滑坡 I-3 分布区段大体一致。由此推测, 滑坡 I-3 中部分表层蠕滑可能与南北两侧山体滑坡后失去支撑有关。

(2) 滑坡运动与堆积特征

滑坡流通区、堆积区在滑坡前后地形改变非常显著。老深多以东的北侧沟坡上有植被的突出台地 (图 3C 中 5、6 区) 在滑坡后呈现光面特征 (图 4C 中 5、6 区), 坡上支沟 (图 4C 中 7 区) 在滑坡后消失、有块石散落, 主沟沟道内未见明显的填平、淤埋迹象; 阿角迷及其东侧、东南侧沟坡被滑坡堆积物覆盖 (图 4A), 烂泥沟与普福河交汇处及其以东沟道内水流消失 (图 4A), 两沟交汇处以东约 2.8 km 处沟道微地貌与滑坡前基本一致 (图 3D、图 4D)。上述特征显示, 滑坡运动具有显著的飞跃、铲刮特点, 滑坡碎屑流自源

区撞击向东折转后, 飞跃冲向流通区沟道北侧山坡 (上普福村下侧), 强烈冲击、铲刮这段山坡 (流通区起始段—中段), 并在临近地段散落飞石; 在阿角迷至两沟交汇处受南侧沟坡阻挡, 停积于阿角迷—两沟交汇处以东 2.8 km 一带, 压埋电塘、白占斗村, 并形成高大堰塞坝, 堵塞普福河, 碎屑流末端未及金沙江边。

4 1965 年后滑坡特征与发展趋势

4.1 1991 年滑坡特征

1991 年滑坡前卫星影像分辨仅有 30 m, 无法从影像上分辨有无地面开裂迹象。对比滑坡前后影像的微地貌可以确定, 1991 年滑坡部位紧邻 1965 年北侧滑坡西侧边界, 面积约 0.1 km², 体积 > 2 × 10⁶ m³, 滑坡碎屑流部分堆积于 2 200 m 高程平台上, 部分沿沟道流动、充填, 在沟道中段转弯处终止 (图 5)。依据影像特征估测, 此次滑坡滑程约 3 400 m, 落距约 1 000 m, 表观摩擦系数约 0.29。同样, 受影像分辨率所限, 无法分辨此次滑坡是否对流通区有冲击、铲刮作用。

4.2 2007 年滑坡前兆与活动特征

仔细对比 1999—2009 年 10 m 分辨率的影像后发现, 紧邻 1991 年滑坡上部的斜坡, 在 2001 年 12 月—2007 年 1 月的影像上出现白色条带, 2008 年 1 月 9 日影像上白色条带消失, 代之以白色斑块 (图 6)。该区

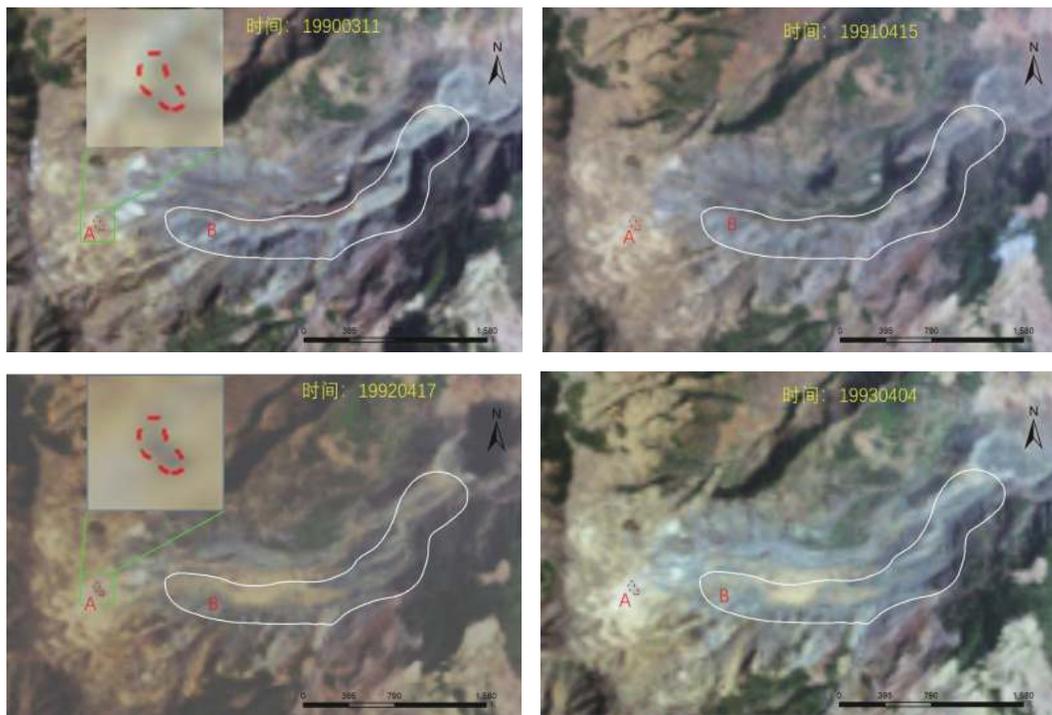


图 5 1991 年滑坡前后滑坡源区、流通区及堆积区影像特征 (A、B 分别代表同一区域) (Landsat-5)
 Fig. 5 Close-up views of the source area, transition/deposit zone on the images before and after the 1991 sliding

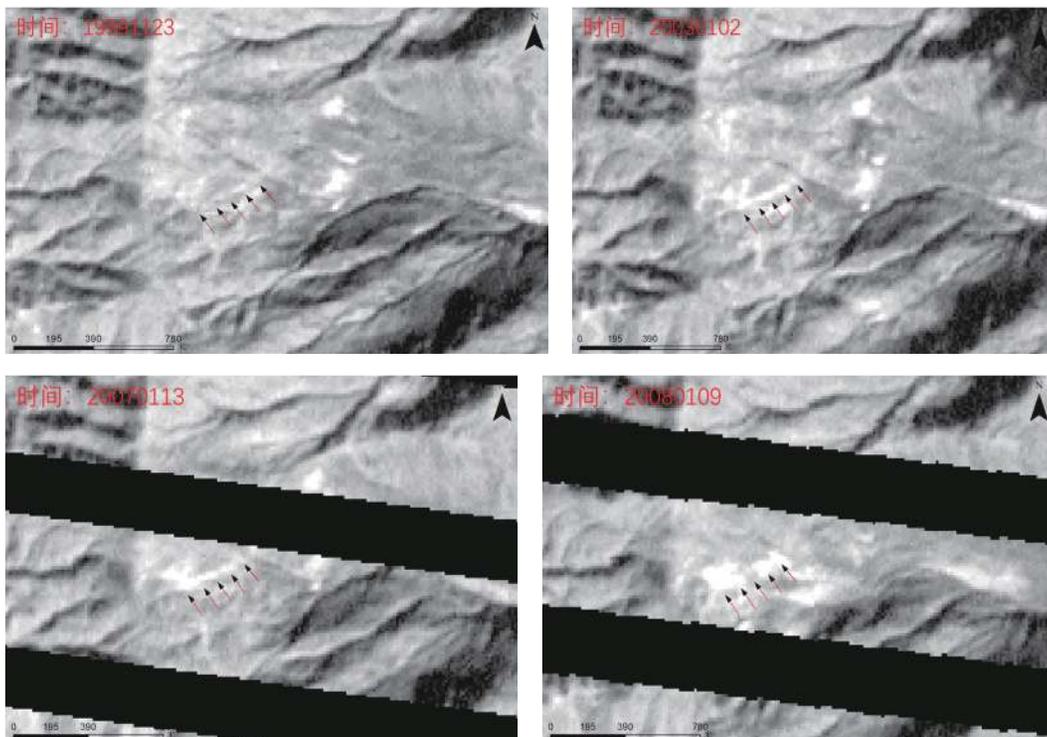


图 6 2007 滑坡前后可能的地表裂缝及其变化 (Landsat-7) (注:图中黑色条带由卫星校正器故障所致)
 Fig. 6 Close-up views of the possible tension cracks in the source area on the images before and after the 2007 sliding

域与目前所见的北侧斜坡西北侧岩壁在同一部位。以此推测,2007 年滑坡在前数年可能存在以地面开裂为主的变形前兆。

滑坡前后 10 m 分辨率的 ALOS AVNIR-2 影像显示,1991 年滑坡部位上方斜坡在 2008 年后出现一片明显的影像特征改变区域(图 7 中 1),其中心区域纹

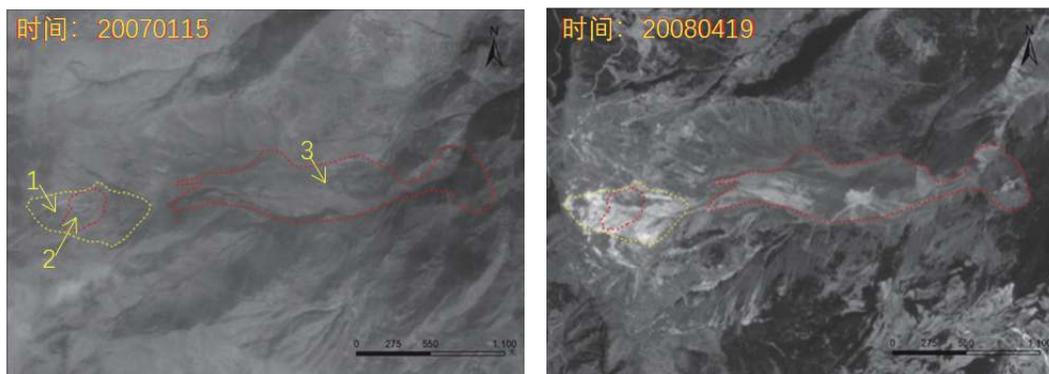


图 7 2007 年滑坡前后影像特征 (ALOS AVNIR-2)

Fig. 7 Close-up views of the source area, transition/deposit zone on the images before and after the 2007 sliding

理连续(图 7 中 2),面积约 0.07 km²,周边为白色区域; 2 200 m 平台下的沟道内出现带状延伸的浅色区域(图 7 中 3 区)。据上述现象推测,2007 年滑坡滑源区为 1991 年滑坡上方影像纹理连续区域,体积约 1.4×10⁶m³;流通区有明显的冲击铲刮迹象(图 7 中 3 区),滑坡碎屑流在沟道中段弯道处终止。该次滑坡落距约 970 m,滑程约 2 900 m,表观摩擦系数 0.33。

4.3 滑坡近期动态与变形趋势估测

尽管经历多次活动,烂泥沟滑坡滑源区陡峻地形、玄武岩内倾向坡外的优势结构面、上覆厚层残坡

积碎石土等不利因素依然存在,这些决定了滑源区斜坡仍具备易于失稳的先天条件。现场调查和高分辨率卫星影像、无人机影像等均可明确,目前至少在滑源区北侧和正西偏南侧斜坡上分布有拉张裂缝,表明斜坡已经出现变形迹象。

2014 年 1 月—2020 年 1 月分辨率 1 m 的高清影像显示,北侧斜坡 2007 年滑坡源区东侧分布 2 条走向 NE 的长大裂缝(图 8)。1#裂缝长约 300 m,但裂缝形态和长度自 2014 年以来没有明显变化;2#裂缝自 2014 年以来,一直向西扩展,2014、2017 和 2020 年同一时

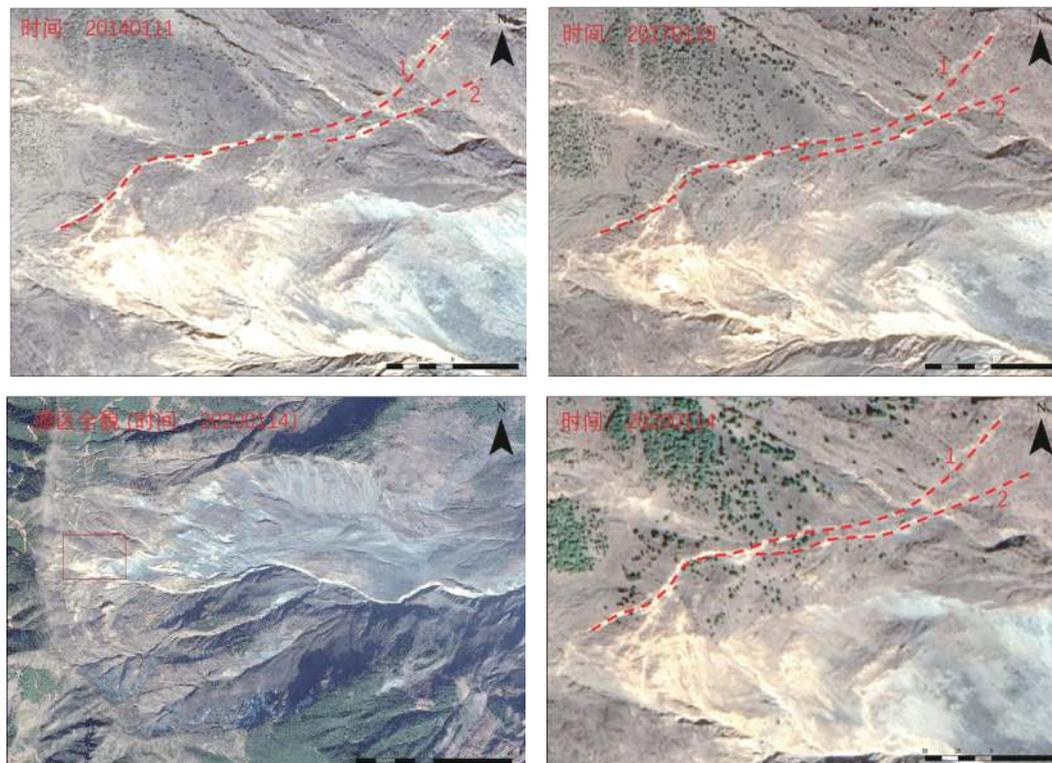


图 8 2014 年—2020 年滑源区北侧斜坡上裂缝区位置(红框区)及其变化(Google Earth)

Fig. 8 Close-up views of the tension cracks on the northern slope of the source area on the images from 2014 to 2020

期,裂缝长度分别为150, 200, 250 m, 年扩展速率约16.7 m。目前,2#裂缝与1#裂缝已基本相连。2019年12月无人机影像显示,在1#、2#裂缝上部隐约分布1条NE走向宽约40 m的裂缝带(图9)。沟头正西偏南侧斜坡上分布近SN走向断续裂缝,但裂缝长度和形态特征自2014年以来无明显变化(图10)。现场调查时,因地形太陡,北侧斜坡上裂缝无法接近观察;正西偏南侧斜坡上单体裂缝最长约100 m、宽0.1~0.3 m不等,局部段裂缝两侧错落0.2~0.3 m。

施雅风等^[1]1965年现场调查确认,滑坡后山体出现新的拉张裂缝。依据目前信息,无法判断北侧斜坡上拉张裂缝是1965年滑坡后的牵引裂缝,或为后期变形裂缝。但是,2#裂缝的持续扩展,指示北侧山坡变形正在不断发展。因该处玄武岩内依然发育倾向坡外结构面,故推测若再次滑坡,其滑动模式和运动模式与之前类似,即玄武岩块体平面滑移模式与高速远程运动模式。但是,对于再次滑坡的具体范围和发生时间,目前无法判断,需持续跟踪。

滑源区正西偏南斜坡上裂缝6年来无明显变化,至少显示其发展速率极其缓慢。现场调查发现,裂缝



图9 滑源区北侧斜坡上裂缝带(影像:20191217无人机)

Fig. 9 Close-up view of a tension crack zone on the northern slope of the source area on the UAV image in 2019

处斜坡有台阶状下错迹象,残坡积物较厚、但坡度较缓($<20^\circ$),推测裂缝为残坡积碎石土的缓慢蠕动裂缝,斜坡发生大规模快速滑移的可能性不大。

1965年以来,滑坡3次活动范围显示(图11),滑源区、流通区+堆积区均呈现逐次减小趋势,目前北侧山坡上裂缝扩展区位于2007年滑坡源区东侧,指示滑坡活动似乎在北侧山坡上较为活跃。

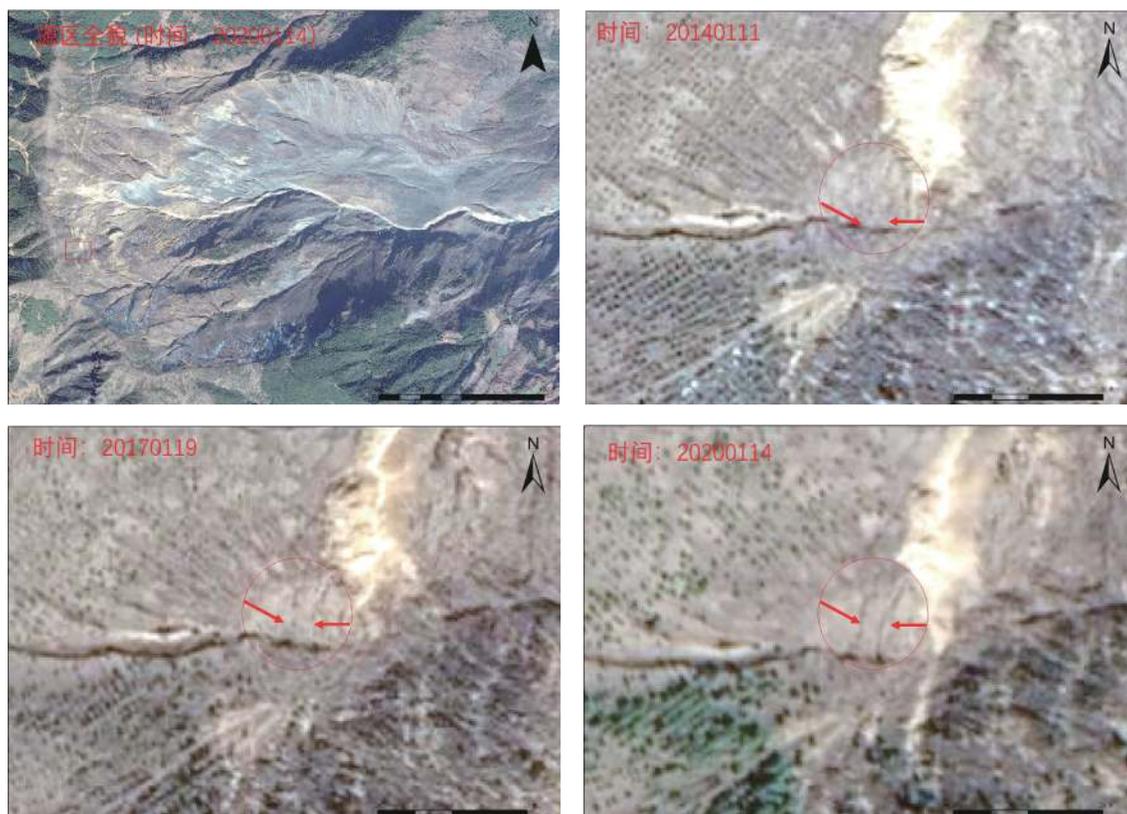


图10 滑源区正西偏南侧斜坡上裂缝区及其变化(Google Earth)

Fig. 10 Close-up views of the tension cracks on the southwestern slope of the source area on the images from 2014 to 2017

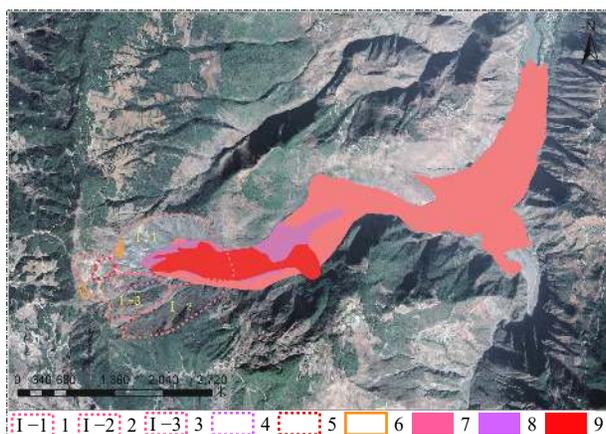


图 11 烂泥沟滑坡三次滑动和碎屑流运动 / 堆积范围和现今裂缝位置 (影像: Google Earth, 20 200 114)

Fig. 11 The source areas, transition/deposit zones of the Lannigou rockslides since 1965 and locations of present tension cracks

1—1965年11月22日滑源区; 2—1965年11月23日滑源区; 3—蠕动滑移区; 4—1991年9月17日滑源区; 5—2007年7月30日滑源区; 6—裂缝带; 7—1965年碎屑流运动+堆积范围; 8—1991年碎屑流运动+堆积范围; 9—2007年碎屑流运动+堆积范围

5 结论与建议

(1) 1965年烂泥沟滑坡剧滑前, 北侧山体有明显变形前兆, 滑前15天后缘拉张裂缝尚未贯通; 1965年11月22日、23日2次滑动序次及其关系是: 北侧山体首先滑动, 南侧山体受其冲击, 次日滑动; 滑坡碎屑流高速运动具有明显的飞跃、冲击、铲刮特征, 滑坡碎屑流未及金沙江边。

(2) 1991年滑坡源区紧邻1965年北侧滑坡西界, 滑坡碎屑流填塞沟道, 终止于沟道中段。

(3) 2007年滑坡源区紧邻1991年滑坡上界, 滑坡规模及其流通和堆积区范围小于1991年滑坡。

(4) 目前, 2007年滑坡源区东侧斜坡和滑坡群正西偏南侧斜坡有地表裂缝分布, 但后者无明显扩展迹象, 前者扩展速率约16.7 m/a, 所在斜坡段有再次滑坡可能。

(5) 尽管烂泥沟滑坡源区及沟口已无村落, 但上普福村及附近村民时常在源区斜坡上放牧、植树造林、采集药材。从防灾减灾角度, 建议告诫当地村民远离滑源区, 当地政府或相关单位对可能滑坡区段跟踪监测, 及早预警。

致谢: 感谢中国科学院成都山地灾害与环境研究所朱雷博士提供滑坡区无人机影像。中国地质大学(北京)曾启强、闫天玺参加野外调查。

参考文献 (References) :

- [1] 施雅风, 唐邦兴, 徐兵, 等. 云南省禄劝县普福河烂泥沟特大崩塌型滑坡调查研究[C]//首届全国泥石流滑坡防治学术会议论文集. 昆明: 云南科学技术出版社, 1993: 188-194. [SHI Yafeng, TANG Bangxing, XU Bing, et al. Survey of the Lannigou rock avalanche of the Pufu river, Luquan County of Yunnan province[C]// Proceedings of first symposium on landslides and debris flows. Kunming: Scientific and Technology Press of Yunnan, 1993: 188-194. (in Chinese)]
- [2] 程先锋, 祝传兵, 齐武福, 等. 云南省禄劝县普福滑坡形成条件、发展趋势与防治对策[J]. 矿产与地质, 2015, 29(3): 395-401. [CHENG Xianfeng, ZHU Chuanbing, QI Wufu, et al. Formation conditions, development tendency and preventive measures of Pufu landslide in Luquan of Yunnan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2015, 29(3): 395-401. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 徐则民. 云南禄劝县烂泥沟滑坡[C]//中国典型灾难性滑坡. 北京: 科学出版社, 2008. [XU Zemin. The Lannigou landslide in Luquan of Yunnan [C]//Catastrophic Landslides in China. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)]
- [4] BRÜCKL E, BRUNNER F K, KRAUS K. Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3/4): 149-159.
- [5] DELACOURT C, ALLEMAND P, CASSON B, et al. Velocity field of the "La Clapière" landslide measured by the correlation of aerial and QuickBird satellite images[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(15): L15619.
- [6] 蒋树, 文宝萍, 黎志恒, 等. 甘肃舟曲锁儿头滑坡活动特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 69-74. [JIANG Shu, WEN Baoping, LI Zhiheng, et al. An analysis of the activity features of the Suoertou landslide in Zhouqu County of Gansu[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 69-74. (in Chinese with English abstract)]
- [7] JIANG S, WEN B P, ZHAO C, et al. Kinematics of a giant slow-moving landslide in Northwest China: Constraints from high resolution remote sensing imagery and GPS monitoring[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 123: 34-46.
- [8] STROM A, LI L, LAN H. Rock avalanche mobility: optimal characterization and the effects of confinement[J]. *Landslides*, 2019, 16(8): 1437-1452.

编辑: 张明霞