

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-04

西藏然乌湖口高位地质灾害变形特征分析

赵志男^{1,2}, 李 滨², 高 杨², 赵超英¹, 刘晓杰¹, 王 猛³

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

摘要:青藏高原持续隆升使得其周缘地带地质灾害频发, 复杂的地质背景, 造就了帕隆藏布流域链式灾害发育、堵江致灾风险高的特点。近年来, 地处帕隆藏布流域的然乌湖口地质灾害变形强烈, 本文通过光学遥感与 InSAR 监测技术, 对然乌湖口 82 道班沟内进行风险物源识别, 解译出研究区共存在高位冰崩、崩塌、冰碛物、崩滑体 4 种风险物源类型, 针对各风险物源的遥感解译数据进行特征分析, 综合然乌湖流域内的地质背景, 阐述风险物源的致灾因素及成灾模式。结合 InSAR 监测结果, 将然乌湖口右岸斜坡体及上部解译风险物源区划分为 82 道班、迫隆与哑隆三个高风险区, 并依据变形监测结果进行形变特征分析。

关键词: 然乌湖口; 82 道班; 遥感解译; InSAR 变形分析

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0025-08

Analysis on deformation characteristics of geological hazards in Ranwu Lake Estuary

ZHAO Zhinan^{1,2}, LI Bin², GAO Yang², ZHAO Chaoying¹, LIU Xiaojie¹, WANG Meng³

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China; 3. Sichuan Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: The continuous uplift of the Qinghai Tibet Plateau has led to frequent geological disasters in its surrounding areas. The complex geological background has created the characteristics of chain disaster development and high risk of river blocking in the Palongzangbu basin. In recent years, Ranwu Lake estuary, located in the Palongzangbu basin, has experienced severe geological deformation. In this paper, the risk material sources identification in 82 road class at Ranwu Lake are carried out by optical remote sensing and InSAR monitoring technology. It can be found that there are four risk source types in the study area: high-level ice debris, collapse, moraine and avalanche. Characteristics analysis and disaster risk assessment are carried out for each risk source, and based on the geological background of Ranwu Lake, this paper expounds the disaster causing factors and modes of risk material sources. Combined with the InSAR monitoring results. The slope body and its upper interpretation risk material sources areas on the right bank of Ranwu Lake estuary are divided into three high risk areas: 82 road class, Polong and Yalong, and the deformation characteristics are analyzed.

Keywords: Ranwu Lake Estuary; 82 road class; remote sensing interpretation; deformation analysis of InSAR

0 引言

青藏高原的隆起是新生代晚期亚洲大陆上发生的

最伟大的地质事件之一^[1]。由于青藏高原的多次隆升

以及河流下切作用, 为地质灾害的频繁发生提供了有利

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211540); 西藏自治区自然资源厅项目(藏财采【2020】0546)

第一作者: 赵志男(1997-), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害研究。E-mail: 1184107787@qq.com

通讯作者: 李 滨(1980-), 男, 山东滨州人, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害研究。E-mail: libin1102@163.com

条件。位于其周缘的雅鲁藏布江下游地区为崩滑流灾害发生的主要集中区域之一^[2],帕隆藏布是雅鲁藏布江的一级支流,在区域构造活动强烈、地形地貌复杂、现代冰川活动的地质背景下,加之气候变化、降雨、地震等因素的触发,造就了帕隆藏布流域地质灾害种类多、数量大、致灾性强、链式灾害发育、堵江风险性高的特征。如尖母普曲^[3-4]近 15 年来多次发生高位崩滑-碎屑流-堵江-洪水灾害链事件,造成多人伤亡和上千万的直接经济损失;1953 年 9 月下旬发生的古乡沟泥石流^[5],致使帕隆藏布堵塞,140 余人丧生,大量基础设施被毁。

由于高寒地区地质环境的特殊性,发育于极高山区的地质灾害难以进行人工实地考察。遥感影像可宏观地和细致地反映区域地貌格局的特点^[6],因此遥感技术的发展为极高山区高位冰崩、崩塌、泥石流等灾害的识别与预测提供了强有力的支撑。此技术既可对研究区域内的断裂构造信息进行捕捉^[7],如张明华^[8]对西藏墨脱公路沿线的活动断裂等进行了遥感解译与专题制图,研究了区域内活动断裂的发育特征;张瑞丝等^[9]采用 Worldview- II 遥感影像对西藏改则地区的断裂构造进行了解译。同时,遥感技术也成为地质灾害发育环境宏观调查不可缺少的先进技术^[10],如吕杰堂等^[11]对 2000 年易贡滑坡滑后的易贡湖进行湖水面积遥感监测,印证了遥感监测在地灾领域应用的可行性;李远华等^[12]利用 RS 与 GIS 技术,针对林芝地区地质灾害作出预测性评价与可视化表达;高波等^[3]利用“空-天-地”调查及研究手段,针对尖母普曲 4 次大型高位崩塌-碎屑流-堵江-洪水灾害链进行孕灾背景分析,并研究了尖母普曲的成灾模式与特征。丰富的物源条件为帕隆藏布流域内灾害频发奠定了基础,因此开展高寒地区地质灾害物源条件的遥感识别调查与分析尤为重要。王高峰等^[13]利用 RS 与 GIS 对雅鲁藏布江林芝—加查段沿线泥石流源地物源信息进行了提取与特征分析;刘洋^[14]对帕隆藏布流域内泥石流物源条件进行提取,用于泥石流灾害链的特征分析。

近年来然乌湖口地质灾害变形强烈,本文通过对帕隆藏布流域然乌湖口 82 道班主沟、两侧斜坡体及雪线上部冰川进行遥感解译识别,分析物源类型与灾变特征,旨在为川藏铁路及公路的防灾减灾工作提供科学参考。

1 然乌湖口地质背景

然乌湖位属西藏昌都八宿县境内,位于雅鲁藏布江一级支流——帕隆藏布流域上游,是藏东南外流湖区的第二大湖泊。湖面高程 3 920 m,湖水总面积约 20 km²,

湖区可分为雅错、安错与安目错三大湖,流域面积可达 1 798 km²。

然乌湖口为湖区下段安目错西侧边界与帕隆藏布干流汇入点。距今约 200 a,然乌湖口 82 道班沟内曾发生高位崩滑碎屑流形成堰塞坝,阻塞帕隆藏布,坝前水位壅高,形成现今的然乌湖。82 道班为一冰川型泥石流沟,雪线高程 4 500 m,流域面积约 9.656 km²,流域内最高海拔 5 592 m,沟口高程 3 939 m,最大高差 1 653 m,主沟长约 6 718 m,平均纵比降约为 241.47‰。

82 道班沟从上至下可分为形成区、流通区、堆积区(表 1),整体呈瓢状(图 1)。沟两侧基岩裸露,无大型支沟发育,岩性主要为下白垩统(K₁)花岗闪长岩,沟道内存在常水流,枯水期流量 1 m³/s。堆积区早期泥石流堆积扇面积约 21.67×10⁴ m²,新近泥石流堆积扇面积约 3.60×10⁴ m²。形成区与流通区内目前堆积大量冰碛物与松散崩坡积物,推测体积约为 25.00×10⁶ m³。

表 1 82 道班流域分区基本信息
Table 1 Basic information of 82 road class

分区名称	面积/km ²	主沟长/m	平均纵比降/‰
形成区	9.13	4 507	217.50
流通区	0.49	1 684	377.62
堆积区	0.036	527	64.61

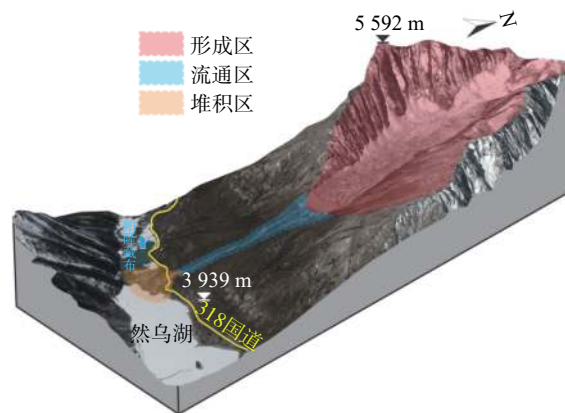


图 1 然乌湖口泥石流沟三维影像图
Fig. 1 Three dimensional image of Ranwu Lake Estuary debris flow gully

2 然乌湖口高位地质灾害风险源光学遥感解译

2.1 数据来源

由于研究区地处高寒区,人工实地调查难度较大,时效性好,覆盖范围广的遥感技术是有效的调查手段。帕隆藏布储备的光学卫星数据源有: Landsat-8、资源一号、资源三号、高分一号、高分二号、高分六号、高分七

号、TH01、珠海一号以及谷歌历史卫星影像(表 2)。无人机在然乌湖口采用空间分辨率优于 0.2 m 的常规正射航摄。

表 2 帕隆藏布卫星数据信息
Table 2 Data information of Palongzangbu satellite

光学卫星数据源	覆盖率/%	数据时间	云覆盖	雪覆盖
Landsat-8	100	2017-11-20—2020-11-20	<1%	<5%
资源一号	30.03	2020-01-14—2020-11-10	<1%	<5%
资源三号	94.30	2016-11-10—2020-11-12	<1%	<5%
高分一号	100	2014-11-29—2020-11-14	<1%	<5%
高分二号	53.47	2015-09-30—2020-11-15	<1%	<5%
高分六号	90.51	2019-03-29—2020-11-20	<1%	<5%
高分七号	17.31	2020-04-13—2020-11-11	<1%	<5%
TH01	17.96	2019-01-02—2019-01-11	<1%	<5%
珠海一号	77.99	2018-12-09—2020-03-31	<1%	<5%

2.2 地质灾害风险源遥感特征分析

收集然乌湖口雅虎影像、Google 地球、无人机影像等多源遥感数据,数据分辨率有分别为 2.0 m、1.0 m、0.15 m(表 3)。通过对然乌湖口遥感信息精确解译,发现湖口右侧 82 道班沟内发育高位冰崩、崩塌、冰碛物、崩滑体等主要物源类型及水动力条件,其中高位崩塌和冰碛物为该泥石流沟道的主要物源(图 2)。

表 3 然乌湖口地质灾害光学遥感数据
Table 3 Optical remote sensing data of geological hazards in Ranwu Lake Estuary

序号	时间	数据来源	分辨率/m	备注
1	早期	雅虎影像	2.0	融合数据
2	近期	Google地球	1.0	融合数据
3	2020-10-29	无人机影像	0.15	泥石流中下段

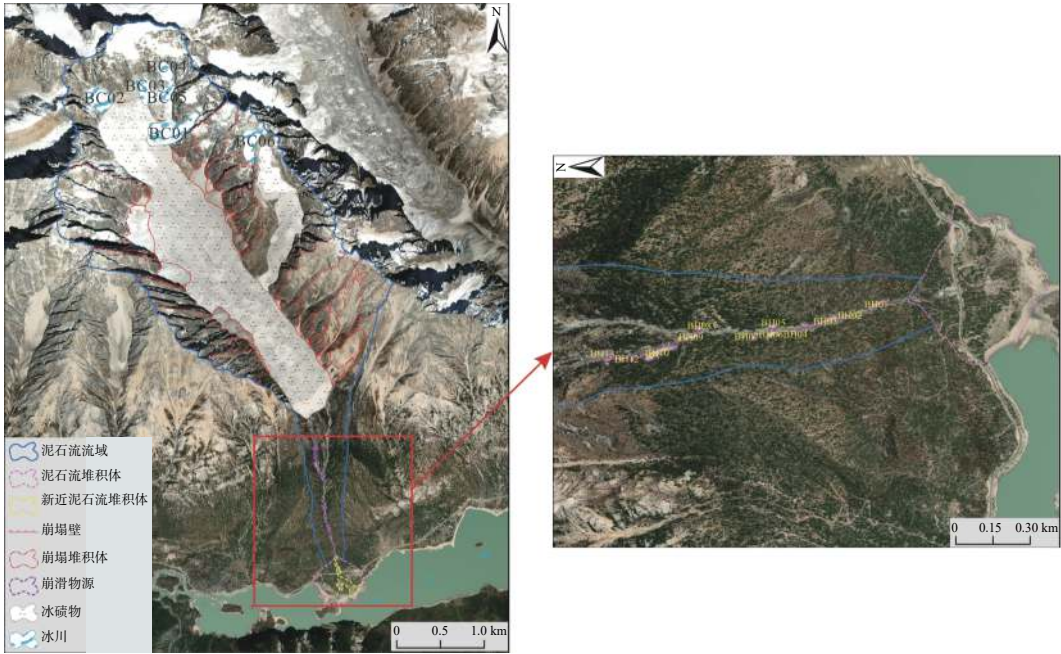


图 2 然乌湖口地质灾害遥感解译图

Fig. 2 Remote sensing interpretation map of geological hazards in Ranwu Lake Estuary

2.2.1 高位冰崩发育特征

受印度洋暖湿气流与西南季风的双重影响,帕隆藏布流域发育着我国目前面积最大的海洋性冰川群^[15]。对研究区已发生的冰崩及冰崩隐患点建立解译标志,已发生的冰崩遥感影像特征为:①冰崩源区呈浅灰色与暗棕色,铲刮区与冰崩堆积区较周围岩体在色调、纹理上区别度高;②冰崩源区呈暗褐色,冰崩物与岩体有明显界限。冰崩隐患点多位于冰川前端及末端,形态上成长条形,同时兼有多种冰川裂隙,影像上呈现暗色纹理状(表 4)。

经解译可发现流域内共发育海洋性冰川 6 处,主要分布于泥石流沟的形成区内,冰川前缘分布高程为 4 926 ~ 5 170 m,最小冰川面积为 0.027 km²,最大冰川面积为 0.117 km²,总面积达 0.346 km²。冰川后缘分布高程 5 094 ~ 5 296 m,冰川前后缘高差分布在 65 ~ 367 m,冰川后缘距沟口高差分布在 1 167 ~ 1 369 m。

山地冰川是气候变化的指示器^[16]。在全球气候变暖的背景下,降雨使冰川物质呈现正增长,温度升高使得冰川消融,近年帕隆藏布流域内海洋性冰川的物质平衡均为负值^[17],然乌湖流域内冰川面积持续萎缩,这与

表 4 然乌湖口高位冰崩物源统计表
Table 4 Statistics of high-level ice debris sources
in Ranwu Lake Estuary

编号	面积/m ²	前缘 高程/m	后缘 高程/m	前后缘 高差/m	距沟口 高差/m
BC01	117 185.75	4 929	5 296	367	1 369
BC02	64 032.728	5 046	5 165	119	1 238
BC03	46 066.955	4 995	5 094	99	1 167
BC04	36 014.778	5 159	5 281	122	1 354
BC05	27 004.282	5 035	5 251	216	1 324
BC06	55 548.666	5 170	5 235	65	1 308

气温的升高密切相关。根据波密站气象统计资料^[18],此地年平均降雨量 884.5 mm,最大降雨可达 1 127 mm,在 6—9 月期间多暴雨,此时期降雨与冰川融水会为沟道内灾害链的发生提供丰富的水动力条件。

2.2.2 高位崩塌、冰碛物堆积特征

高位崩塌常成群产出,危岩体具有高陡特征,遥感影像颜色呈亮灰色、棕灰色,形态呈条带状;有时可见危岩体节理发育,基岩破碎;崩塌堆积体在谷内或斜坡平缓地段,影像呈粗糙感。冰碛物包括冰碛堆积阶地与冰碛垄,阶地呈台阶状,冰碛垄呈条带状、弧带状地貌,斑点状纹理,色调与周围地物区分度明显。

经遥感分析解译,流域内发育高位崩塌 17 处(表 5),总面积约 3.541 km²,崩塌堆积面积 0.640 km²,崩塌源区面积 2.901 km²,主要分布在形成区周缘高陡斜坡处。流域内发育 2 处冰碛物,面积分别为 2.417 km²、0.407 km²,主要堆积在形成区主沟沟道内。

地震与降雨是触发然乌湖口高位岩体崩塌失稳的关键因素。发育于斜坡上的支沟内存在大量崩塌堆积物源,失稳后汇入主沟,增加形成区主沟内的物源累积。崩滑体运动至沟底,对于底部的堆积体具有一定的能量冲击作用,当此冲击荷载超过静止堆积体的屈服强度时^[19],会对静止的堆积体局部具有推动作用。

冰碛物堆积体不同于土体与岩体边坡,是一种无分选磨圆^[20]、宽级配^[21],架空现象普遍的堆积体,当水流流经冰碛物时会冲蚀裹挟掉其中的细颗粒物质,导致局部架空,应力集中加剧局部的变形出现垮塌,与动水流混合,极易转变为泥石流。由于其在研究区分布面积较广,为重点变形监测对象。

2.2.3 崩滑物发育特征

滑坡堆积物具有明显的色调与纹理异常,滑坡要素清晰可见,常堆积于沟谷及河道(图 3)。流域流通区沟道内两岸发育 13 处小型崩滑物源(表 6),总面积约 0.014 7 km²,最大崩滑物源面积 3 858 m²,最小崩滑物源面积 352 m²,主要分布在流域中下游主沟两岸斜坡处

表 5 然乌湖口高位崩塌、冰碛物统计表
Table 5 Statistics of high level collapses and moraines in
Ranwu Lake Estuary

编号	物源类型与分布	面积/m ²
B01	崩塌堆积/	34 007
	崩源区	92 675
B02	崩塌堆积/	117 392
	崩源区	308 142
B03	崩塌堆积/	860
	崩源区	13 099
B04	崩塌堆积/	1 823
	崩源区	50 223
B05	崩塌堆积/	6 749
	崩源区	238 141
B06	崩塌堆积/	5 458
	崩源区	251 888
B07	崩塌堆积/	37 214
	崩源区	99 637
B08	崩塌堆积/	7 554
	崩源区	51 521
B09	崩塌堆积/	31 383
	崩源区	101 061
B10	崩塌堆积/	10 777
	崩源区	67 932
B11	崩塌堆积/	39 192
	崩源区	210 429
B12	崩塌堆积/	32 823
	崩源区	39 066
B13	崩塌堆积/	14 445
	崩源区	19 994
B14	崩塌堆积/	131 017
	崩源区	714 128
B15	崩塌堆积/	77 610
	崩源区	177 990
B16	崩塌堆积/	79 078
	崩源区	311 705
B17	崩塌堆积/	12 208
	崩源区	153 766
BQ01	冰碛物	2 416 559
BQ02	冰碛物	406 753

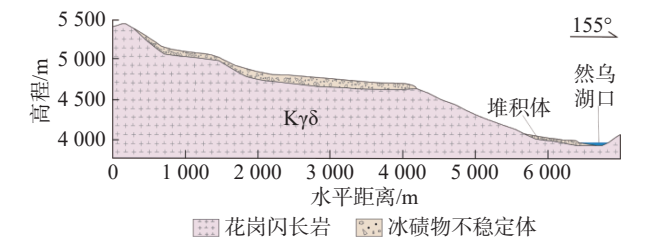


图 3 然乌湖口主沟剖面图
Fig. 3 Profile of main ditch at Ranwu Lake Estuary

(图 2),为历史崩滑-碎屑流-泥石流灾害链的残留物。由于规模及坡度限制,其单独成灾可能性小,主沟形成区暴发大规模泥石流与此处物源触发混合的可能性高。

表 6 然乌湖口崩滑物源统计表
Table 6 Statistics of avalanche source in Ranwu Lake Estuary

编号	面积/m ²
BH01	1 015
BH02	467
BH03	2 052
BH04	352
BH05	596
BH06	839
BH07	378
BH08	507
BH09	731
BH10	3 858
BH11	460
BH12	1 465
BH13	2 001

2.3 基于多期遥感影像的典型崩塌、冰碛物物源区动态分析

根据然乌湖口冰川型泥石流灾害链多期光学卫星数据和无人机航空遥感数据, 挑取典型高位崩塌和冰碛物物源区进行光学遥感动态分析。

B02 高位崩塌坡向 NW, 崩源区面积约 0.308 km², 崩塌堆积区面积约 0.117 km², 预估体积为 5.101×10⁶ m³, 距沟底高程落差约 1 260 m(图 4)。受南部嘉黎断裂带控制及印度洋板块与亚欧板块的挤压作用影像, 此处解译两组结构面, 走向 NNE 与 NWW(下同), 崩塌源区岩体受结构面切割呈碎裂结构, 坡表风化作用强烈。崩塌堆积体前缘已进入主沟, 与冰碛物共同成为泥石流物源。通过两期遥感影像对比, B02 高位崩塌变化差异不大, 说明在解译周期内, 该崩塌没有发生大规模崩滑破坏[22-27]。

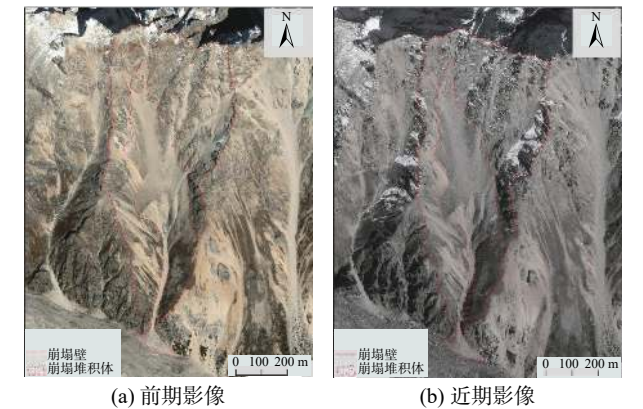


图 4 B02 高位崩塌影像图
Fig. 4 B02 high level collapse image

B14 高位崩塌坡向 NE, 崩源区面积约 0.714 km², 崩塌堆积体面积约为 13.10×10⁴ m², 预估体积为 1.507×10⁶ m³,

距沟底高程落差约 1 100 m(图 5)。结合遥感影像图 5, 崩塌源区积雪覆盖, 因结构面切割整体呈碎裂结构。通过两期遥感影像对比, 该崩塌在解译周期内发生过明显的崩滑破坏, 崩塌前缘堆积体面积具有扩大趋势。

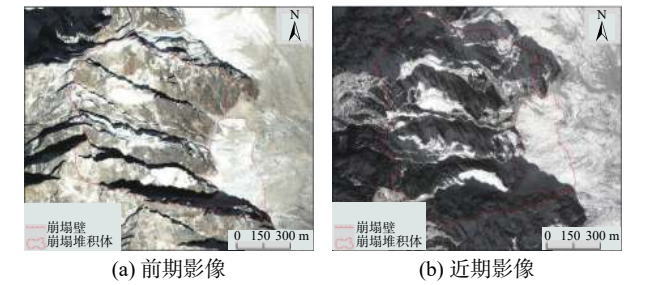


图 5 B14 高位崩塌影像图
Fig. 5 B14 high level collapse image

BQ01 冰碛物顺沟发育, 长约 3.65 km, 前缘高程 4 450 m, 后缘高程 5 030 m, 高程落差 580 m, 面积约 2.42 km², 估算体积约 1.692×10⁸ m³(图 6)。该冰碛物位于泥石流中后部, 高位堆积于泥石流沟道中, 为泥石流主要物源。从图 7 影像对比分析, 冰碛物前缘表部可见滑塌迹象, 目前处于欠稳定状态, 冰碛物块石汇入泥石流沟道中, 在重力作用下, 随着融化的积雪冲出沟道。

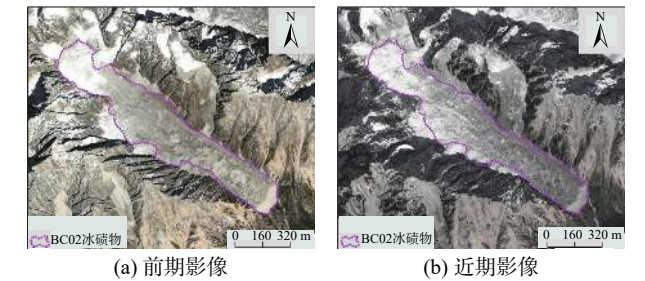


图 6 BQ01 冰碛物光学遥感影像
Fig. 6 Optical remote sensing image of BQ01 moraine

从最新的无人机影像上可以看出, BQ01 冰碛物前缘发生明显的滑塌变形, 滑塌体汇入泥石流沟道中, 多为松散块石, 最大块径高达 9.40 m, 部分中细颗粒冰碛物在重力作用和冰雪融水作用下, 成为泥石流物源冲出沟道(图 7)。

BQ02 冰碛物位于泥石流左岸, 紧接 BQ01 冰碛物, 长约 1.50 km, 前缘高程 4 675 m, 后缘高程 5 250 m, 高程落差 575 m, 面积约 0.41 km², 估算体积约 14.24×10⁴ m³(图 8)。相较于 BQ01 冰碛物, 该冰碛物的体积和分布面积更小, 其前缘与 BQ01 冰碛物相接, 亦为泥石流的物源。对比两期影像数据发现, 该处由于地处阴面坡的沟谷, 沟道后缘积雪时间较长, 影像上可见明显的雪位

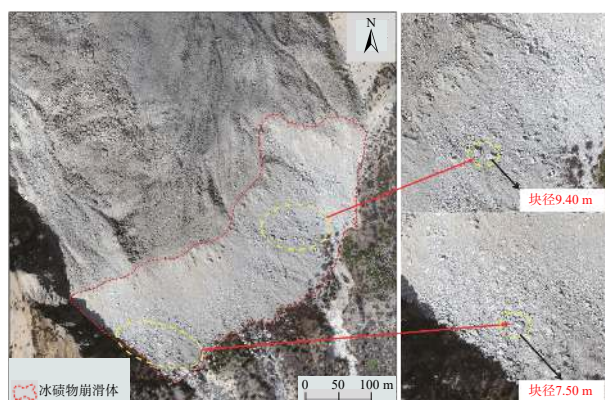


图 7 BQ01 冰碛物前缘滑塌体

Fig. 7 BQ01 front collapse of moraine

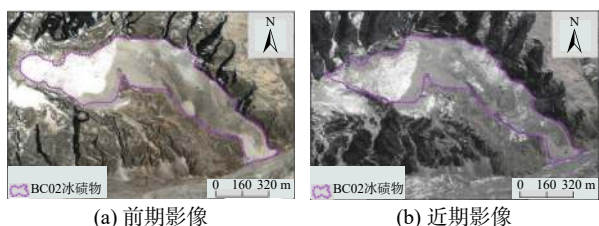


图 8 BQ02 冰碛物光学遥感影像

Fig. 8 Optical remote sensing image of BQ02 moraine

线。受冰川消融作用影响,冰碛物堆积体变形以下部变形后牵引上部冰川产生拉裂缝为主,侧部边缘裂缝也出现局部的闭合趋势,整体处于基本稳定状态。

3 基于 SAR 数据的然乌湖口区地表形变分析

采用 Sentinel-1 SAR 数据作为主要数据源开展安目错瓦巴冰川群高精度形变监测研究工作,覆盖时间为 2017 年 5 月 22 日—2020 年 7 月 29 日,共计 95 景。首先,为提高影像干涉处理的整体相干性,利用高精度轨道与增强谱分集技术 (Enhanced Spectral Diversity Method, ESDM),对数据集进行了精配准处理,其配准精度提高至 1:1 000。为进一步抑制椒盐噪声与相位噪声,对小基线数据集进行了 4:1 的多视与自适应滤波处理。由于冰川地区研究条件较差,为避免噪声点位对相位解缠结果的影响,提取了高相干点进行最小费用流解缠。最后,对解缠相位进行优化,并剔除受解缠误差严重影响的干涉对,利用 Stacking 技术计算了该地区 2017—2020 年的年均形变速率(图 9)。

然乌湖口及安目错湖区右岸斜坡体与沟道内堆积物源区可分为 3 处主要风险区,分别位于 82 道班、迫隆与哑隆沟道内,年均形变速率均已达 160 mm/a 以上,且最大值达 180 mm/a,位于迫隆山左上方山脊两侧均存在 20 到 60 mm/a 的形变,根据前文解译结果,此处已

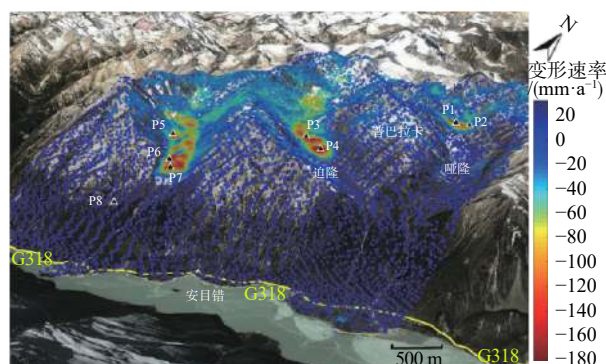


图 9 安目错冰川 2017 年 5 月—2020 年 8 月年平均形变速率图

Fig. 9 Annual average shape rate of Anmucuo glacier from May 2017 to August 2020

处于冰川所在位置,因此存在高位冰崩的风险。逐年的冰川融水也对于冰川前缘位置沟内的崩塌堆积体存在侵蚀作用,极易诱发高位冰崩-碎屑流-泥石流灾害链。此外,哑隆山后方也存在 120 mm/a 的形变,但其风险区范围要小于其余两个区域。通过图 9 可以看出,此处斜坡体与物源区冰碛物、崩塌堆积体处于欠稳定状态,威胁下方湖区周边居民生命财产安全与 G318 公路通行安全。

为进一步研究该地区斜坡与储备物源的灾变规律,解释其发育过程,利用 SBAS-InSAR 反演然乌湖口风险区的形变时间序列,分别选取 P1 至 P8 共计 8 个点位进行分析,累积形变时间序列如图 10 所示。其中,为捕捉形变的剧烈演化特征,P1、P4、P7 分别位于迫隆、哑隆以及 82 道班流域内前缘最大形变速率处;为揭示风险区内整体储备物源形变规律,提取了点 P2、P3、P5 以及 P6;为验证结果的精确性,在稳定的山坡前缘一侧提取了点 P8。

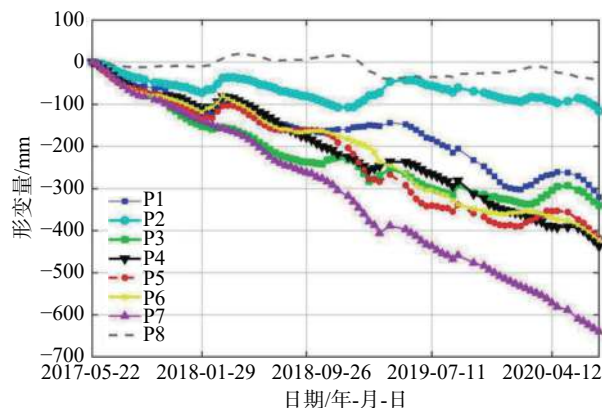


图 10 P1 至 P8 点 2017 年 5 月—2020 年 8 月时间序列形变

Fig. 10 P1 to P8 time series deformation from May 2017 to August 2020

图 10 中,提取的 8 个点累积形变量除点 P8 外,整

体均随着时间推进而逐渐下沉,形变最为严重的点位均位于物源堆积体的前缘,这是由于在重力作用下,前缘物源堆积体受到来自中后部物源的推挤作用。每个点位并非持续变形,局部均存在一定波动性变化。P8 点形变较为稳定,进一步反应了结果的精度较为可靠。

4 结论

(1)采用多源、多期次遥感数据对然乌湖口高位地质灾害进行精细化解译,物源类型为崩塌、高位冰崩、冰碛物、崩滑体。温度升高与降雨的平衡决定了高位冰崩的致灾性,冰川面积的持续萎缩表明此平衡失衡,冰川融水为灾害链发生提供丰富的水动力条件。其中冰碛物与崩塌分布面积广,为主要的物源类型,堆积于流通区的崩滑体单独致灾可能性小。

(2)通过早期雅虎影像、近期谷歌影像和无人机影像等多期次遥感数据,分析了泥石流沟内高位崩塌、冰碛物的遥感影像特征,部分崩塌如 B14 光学影像变形明显,主要冰碛物 BQ01 冰碛物前缘变形严重,加之冰碛物结构松散的特性,在内外动力的联合作用下,一旦发生整体滑动,将直接威胁下方然乌湖及 G318 国道。

(3)从 InSAR 监测结果分析,将然乌湖口右岸的斜坡体与沟内物源区划分为 3 个高风险区,平均年变形速率达 160 mm/a,最大变形量 180 mm/a,监测点并非持续变形,存在波动变形的特征。

参考文献 (References):

- [1] 李吉均,文世宣,张青松,等.青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J].中国科学,1979(6):608-616. [LI Jijun, WEN Shixuan, ZHANG Qingsong, et al. The discussion on the age, amplitude and form of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science China, 1979(6): 608-616. (in Chinese)]
- [2] 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(3):457-466. [PENG Jianbing, MA Runyong, LU Quanzhong, et al. Geological hazards effects of uplift of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Advance in Earth Sciences, 2004(3): 457-466. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 高波,张佳佳,王军朝,等.西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征[J].水文地质工程地质,2019,46(5):144-153. [GAO Bo, ZHANG Jiajia, WANG Junchao, et al. Formation mechanism and disaster characteristic of debris flow in the Tianmo gully in Tibet [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 144-153. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 余忠水,德庆卓嘎,罗布次仁,等.西藏波密县天摩沟“9·4”特大泥石流灾害成因初步分析[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):6-10. [YU Zhongshui, DE QING Zhuoga, LUOBU Ciren, et al. Preliminary analysis about the cause of “9-4” debris flow disaster in Tian mo gou, Bomi, Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(1): 6-10. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 施雅风,杨宗辉,谢自楚,等.西藏古乡地区的冰川泥石流[J].科学通报,1964(6):542-544. [SHI Yafeng, YANG Zonghui, XIE Zichu, et al. Glacier debris flow in Guxiang area, Tibet [J]. Chinese Science Bulletin, 1964(6): 542-544. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭柳平,叶庆华,姚檀栋,等.基于GIS的玛旁雍错流域冰川地貌及现代冰川湖泊变化研究[J].冰川冻土,2007(4):517-524. [GUO Liuping, YE Qinghua, YAO Tandong, et al. The glacial landforms and the changes of glacier and lake area in the Mapam Yumco Basin in Tibetan Plateau based on GIS [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007(4): 517-524. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 隋志龙,李德威,黄春霞.断裂构造的遥感研究方法综述[J].地理学与国土研究,2002(3):34-37. [SUI Zhilong, LI Dewei, HUANG Chunxia. The review of remote sensing research methods of fault structures [J]. Geography and Territorial Research, 2002(3): 34-37. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张明华.西藏墨脱公路工程地质灾害遥感勘察与解译方法[J].中国地质灾害与防治学报,2005(3):54-58. [ZHANG Minghua. Remote sensing image recognizing and interpreting for geological disasters in Motuo highway engineering of Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005(3): 54-58. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张瑞丝,陈建平,曾敏.基于Worldview-II遥感影像的西藏改则地区断裂构造解译研究及应用[J].遥感技术与应用,2012,27(2):265-274. [ZHANG Ruishi, CHEN Jianping, ZENG Min. The study of structural interpretation based on Worldview-II remote sensing image in Gaize, Tibet and its application [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(2): 265-274. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王治华.滑坡、泥石流遥感回顾与新技术展望[J].国土资源遥感,1999(3):10-15. [WANG Zhihua. Reviewing and prospecting for applying remote sensing to landslide and debrisflow investigation [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999(3): 10-15. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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(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

- Geoscientica Sinica*, 2002(4): 363–368. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李远华, 姜琦刚. 基于遥感调查与GIS分析的林芝地区地质灾害评价 [J]. 国土资源遥感, 2006(2): 57–60. [LI Yuanhua, JI Qigang. The estimation of regional geo-hazards based on reinvestigation and GIS analysis [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2006(2): 57–60. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王高峰, 唐川, 王洪德, 等. 基于RS和GIS的雅鲁藏布江林芝-加查段沿线泥石流源地物源分析 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 10–13. [WANG Gaofeng, TANG Chuan, WANG Hongde, et al. RS and GIS based analysis of material sources in debris flow origin areas along Linzhi-Jiacha section in Yarlung Zangbo River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 10–13. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘洋. 基于RS的西藏帕隆藏布流域典型泥石流灾害链分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013. [LIU Yang. Research on the typical debris flows chain based on RS in Palongzangbu Basin of Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨东旭, 游勇, 王军朝, 等. 藏东南帕隆藏布流域冰碛物典型特征及工程效应 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 841–851. [YANG Dongxu, YOU Yong, WANG Junchao, et al. Characteristics of typical glacial tills in Parlung Zangbo Basin in Southeastern Tibet and its engineering effect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 841–851. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估 [J]. 科学通报, 2000(4): 434–438. [SHI Yafeng, LIU Shiyin. The prediction of China glacier response to global warming in the 21st Century [J]. Chinese Science Bulletin, 2000(4): 434–438. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征 [J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1775–1780. [YANG Wei, YAO Tandong, XU Boqing, et al. Characteristics of recent temperate glacier fluctuations in the Parlung Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18): 1775–1780. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张斌斌. 帕隆藏布流域海洋性冰川区泥石流特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [ZHANG Binbin. Study on debris flow characteristics in temperate glacier area of Pallon Tsangpo [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 高杨, 李滨, 高浩源, 等. 高位远程滑坡冲击铲刮效应研究进展及问题 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 510–519. [GAO Yang, LI Bin, GAO Haoyuan, et al. Progress and issues in the research of impact and scraping effect of high-elevation and long-runout landslide [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(4): 510–519. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 马泽平. 川藏交通廊道冰碛物工程性质研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [MA Zeping. Study on engineering properties of the moraine in Sichuan-Tibet transportation corridor [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨栋, 王军朝, 杨东旭. 帕隆藏布流域冰碛物斜坡结构及稳定性评价方法 [J]. 人民长江, 2019, 50(1): 108–112. [YANG Dong, WANG Junchao, YANG Dongxu. Moraine slope structure in Parlung Zangbo River Basin and its stability evaluation method [J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 108–112. (in Chinese with English abstract)]
- [22] BURBNK D W, ANDERSON R S. Tectonic Geomorphology [J]. *Progress in Physical Geography*, 1991, 15(2): 193–205.
- [23] SU Z, SHI Y, et al. Response of monsoonal temperate glaciers to global warming since the Little Ice Age [J]. *Quaternary International*, 2002, 97(98): 123–131.
- [24] FUJITA K, AGETA Y. Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass-balance model [J]. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(153): 244–252.
- [25] INTRIERI E, FRASPINI, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data [J]. *Landslides*, 2017, 15(1): 123–133.
- [26] ZHAO CY, ZHONG L, et al. Large-area landslide detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA [J]. *Remote Sens Environ*, 2012, 124: 348–359.
- [27] 周学铨, 廖黎明. 西藏萨迦县地质灾害危险性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 113–116. [ZHOU Xuecheng, LIAO Liming. Geological hazard assessment in Sakya County of Tibet Autonomous Region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 113–116. (in Chinese with English abstract)]