

doi: 10.6046/zrzyg.2021076

引用格式: 刘文,王猛,宋班,等. 基于光学遥感技术的冰崩隐患遥感调查及链式结构研究——以西藏自治区藏东南地区为例[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 265–276. (Liu W, Wang M, Song B, et al. Surveys and chain structure study of potential hazards of ice avalanches based on optical remote sensing technology: A case study of southeast Tibet[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 265–276.)

基于光学遥感技术的冰崩隐患遥感调查及链式结构研究 ——以西藏自治区藏东南地区为例

刘文, 王猛, 宋班, 余天彬, 黄细超, 江煜, 孙渝江

(四川省地质调查院(稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室), 成都 610081)

摘要: 西藏自治区藏东南地区冰川广布, 在全球变暖背景下, 冰川失稳现象凸显, 冰崩隐患的光学遥感调查对该区域防灾减灾工作具有实际意义。根据遥感影像上冰崩隐患的色调、形态、纹理、阴影等特征, 建立遥感解译标志, 开展研究区冰崩隐患的遥感解译。在藏东南地区共解译出冰崩隐患 232 处, 其中大型 47 处, 特大型 147 处, 巨型 38 处, 结合地形地貌、地质环境特征, 分析了其基本特征和空间分布规律, 划分出 4 个集中分布区、2 个集中分布带。研究区冰崩隐患具有明显的链式特征, 根据冰崩隐患与其可能引起的次生灾害之间的时空关系, 将藏东南冰崩灾害链分为冰崩–冰湖溃决–泥石流灾害链、冰崩–碎屑流–堰塞湖–洪水灾害链、冰崩–碎屑流灾害链等 3 种类型, 分别以米堆沟、尖母普曲、则隆弄沟为例, 基于光学遥感技术对其动态变化特征、链式结构进行了详细分析, 以期为藏东南地区冰崩灾害的深入研究提供基础资料。

关键词: 光学遥感; 冰崩隐患; 灾害链; 藏东南

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2022)01–0265–12

0 引言

冰崩灾害指在重力作用下, 位于斜坡上的冰川发生断裂、崩塌、解体形成碎屑流或造成冰湖溃决洪水及堰塞湖溃决洪水等威胁人民生命财产安全的现象^[1]。冰崩常发生在高山极高山区, 地点偏远、人烟稀少、难以接近, 遥感技术是进行冰崩研究不可或缺的手段之一。Sangewar^[2]认为遥感技术彻底改变了目前与冰川/雪有关的研究设想, 它可在最小时间框架内同时研究更大的区域, 利用遥感技术可以研究冰川衰退模式、冰川运动记录、古冰川以及冰川诱发的灾害等, 并列举了在印度查谟、喀什米尔、喜马拉雅尔、北阿坎德、锡金等地区的成功应用。在已发生的冰崩灾害方面, Leinss 等^[3]利用 Landsat1—8、Sentinel-2, ASTER, WorldView 等多种卫星影像, 研究了塔吉克斯坦 Petra Pervogo 山脉 1973—2019 年间的冰崩事件, 认为该地区冰崩主要有 4 个集中分布区, 高温、软弱且细粒的沉积物可能是该区冰崩发生

的关键因素; Gilbert 等^[4]利用气象数据、遥感影像和三维热力模型, 重建了西藏阿里地区阿鲁错冰川崩塌前的热力学状态、冰川厚度以及崩塌时冰崩体的运动速度、基底剪切应力和冰崩的破坏性, 并与 2002 年发生于高加索山脉科尔卡冰川冰崩事件进行对比分析, 认为富含黏土和泥砂的冰碛物在阿鲁错冰崩和科尔卡冰崩中扮演着重要角色; Kääh 等^[5]认为这 2 处巨型低角度冰崩是在气候等外力作用下, 气温升高导致冰体与下伏沉积物间的摩擦力不断减小, 进而引发的大规模冰崩。在冰崩灾害应急方面, Wang 等^[6]以灾害应急条件下高效监测冰雪崩为出发点, 提出了一种基于 Sentinel 卫星数据的积雪覆盖成图方法, 该方法利用应急条件下获取的 SAR 图像和多光谱图像, 挖掘 Sentinel 数据在雪盖制图领域的应用潜力, 数据处理时间小于 2 h, 可以满足灾害应急监测要求。在冰崩隐患动态监测与预警方面, Margreth 等^[7]对阿尔卑斯山脉艾格尔峰西侧的悬冰川进行了遥感动态监测, 在 2015 年悬冰川前部的正后方出现冰裂缝, 认为是冰崩发生的前

收稿日期: 2021–03–17; 修订日期: 2021–07–12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“雅鲁藏布江下游水电发区地质安全性评价”(编号: DD20211540)及西藏自治区自然资源厅项目“基于 InSAR 与高分影像的高位冰崩、滑坡、崩塌灾害预判研究”(编号: 藏财采【2020】0546)共同资助。

第一作者: 刘文(1990–), 男, 硕士, 工程师, 主要从事遥感地质与地质灾害调查工作。Email: liuwen2009_hi@163.com。

通信作者: 王猛(1980–), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害遥感应用研究。Email: wangmengscrs@qq.com。

兆,潜在冰崩体达 8 000 m³,威胁少女峰滑雪区及相关区域的生命财产安全,提出了监测预警等建议,为冰崩灾害的预防提供了基础资料。

青藏高原及周边地区平均海拔超过 4 000 m,具有除南极、北极之外最大的冰储量,有“亚洲水塔”之称^[8]。在全球变暖背景下,作为全球气候变化的敏感区,青藏高原冰川表现出状态失常,其中以藏东南地区冰量亏损及面积萎缩幅度最大,主要表现为冰川消融加速、冰川失稳等,受内外动力作用的共同影响,与冰川运动有着密切关系的冰崩灾害发生频率逐年上升^[9]。近年来,青藏高原冰崩灾害受学者的广泛关注,研究成果主要集中在冰崩灾害的物质组成、运动特征、成因、类型划分等方面^[1,10-11],缺乏对冰崩灾害分布规律和链式结构的相关报道。本文以光学遥感技术为手段,在藏东南地区开展冰崩隐患遥感调查,分析总结冰崩隐患的基本特征和分布规律,讨论冰崩隐患的链式结构和动态变化趋势,以为藏东南地区冰崩灾害的研究和防灾减灾工作提供基础资料。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

研究区属于喜马拉雅东构造结,地处欧亚板块与印度洋板块会聚、碰撞的核心部位,是青藏高原东南缘构造最复杂的地区。根据岩浆岩组合、火山—沉积建造、变质/变形作用、地质构造等区域地质资料,区内自南向北可划分出 3 个主要地质单元:高喜马拉雅变质体、雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带以及拉萨地体^[12]。东、西边界分别以右旋为主的墨脱—阿尼桥走滑断裂带和以左旋为主的东久—米林走滑断裂带为界。北边界由一系列 NW 向断裂组成,包括嘉黎断裂带、西兴拉断裂带、雅鲁藏布江缝合带以及巴青—类乌齐走滑断裂带等^[13-14]。研究区断裂主要呈近 EW 向和近 NS 向展布,其次为 NNE 向、NE 向、NW 向,其断裂属性、规模、活动时间、活动强度具有明显差异。近 EW 向断裂一般规模较大,有些具深大断裂性质,多为逆冲、逆冲兼走滑断层,第四纪早期、中期仍有活动。近 NS 向、NNE 向、NE 向及 NW 向断裂单条规模一般不大,其中近 NS 向、NNE 向、NE 向断裂常集中分布,构成近 NS 向或 NNE 向的拉张、剪切断裂带,形成于第四纪初期,晚第四纪以来活动十分明显,总体呈现东强西弱、北强南弱的趋势。

1.2 数据源

研究区选用 Landsat8、高分一号、高分二号、

WorldView-2 和无人机航摄等多源卫星数据,空间分辨率包括中高分辨率 15 m,2.0 m,0.8 m,0.5 m 和 0.2 m(表 1)。优选云覆盖 <1%,雪覆盖 <5% 的卫星数据开展不同精度的解译工作。

表 1 光学遥感数据一览表

Tab. 1 List of optical remote sensing data

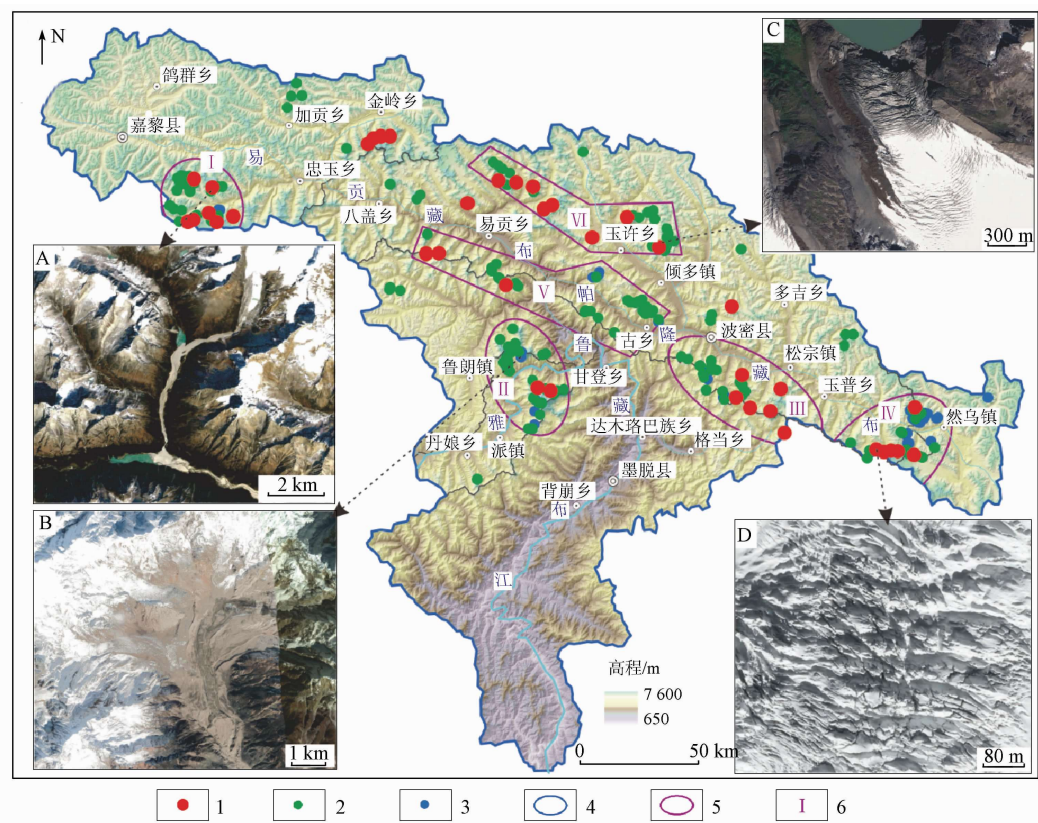
数据范围	数据源	分辨率/m	时相	用途
研究区	Landsat8	15	2017 年 11 月 20 日— 2020 年 11 月 20 日	用于研究区 冰崩隐患区 域性光学遥 感解译
	GF-1	2	2014 年 1 月 2 日— 2020 年 11 月 15 日	
尖母普曲	WorldView-2	0.5	2006 年 4 月 30 日	用于尖母普 曲典型点光 学遥感解译
	GF-1	2	2015 年 7 月 25 日	
	GF-1B	2	2019 年 11 月 7 日	
则隆弄沟	WorldView-2	0.5	2017 年 12 月 4 日	用于则隆弄 沟典型点光 学遥感解译
	GF-2	0.8	2019 年 6 月 2 日	
	无人机航摄	0.2	2020 年 10 月 20 日	
米堆沟	WorldView-2	0.5	2001 年 11 月 14 日	用于米堆沟 典型点光学 遥感解译
	WorldView-2	0.5	2013 年 2 月 12 日	
	WorldView-2	0.5	2014 年 11 月 8 日	
	WorldView-2	0.5	2015 年 2 月 7 日	
	WorldView-2	0.5	2017 年 12 月 12 日	
	无人机航摄	0.2	2020 年 10 月 31 日	

2 研究方法

本文以已有资料为基础,通过实地观察典型冰崩灾害的特征,并与光学遥感影像对照,根据遥感影像上冰崩灾害的色调、形态、纹理、阴影等特征,建立遥感解译标志,开展研究区冰崩隐患的遥感初步解译。初步解译后,选取高位冰崩多发区开展野外踏勘,系统建立冰崩隐患解译标志,以此为基础开展冰崩隐患详细解译,并开展野外验证。本次遥感解译工作参照《地质灾害遥感调查技术规定》(DD2015—01)、《遥感地质解译方法指南》(DD2011—03)等技术标准,研究区冰崩隐患区域性光学遥感解译满足 1:50 000 比例尺精度要求,典型点光学遥感解译满足 1:2 000 比例尺精度要求。

冰崩隐患点遥感影像特征:①在形态上潜在冰崩体呈舌形、长条形等形态,多位于冰川末端,冰川前端亦可见,地势较陡(图 1C);②潜在冰崩体因冰川各部分运动速度不均匀形成有各种冰裂隙,影像上呈暗色纹理状,以横裂隙为主,侧裂隙和纵裂隙次之(图 1D、表 2)。已发生的冰崩灾害遥感影像特征:①冰崩源区影像上呈浅灰色、暗棕色,地势较陡,下游冰崩碎屑物堆积区与周围岩体色调、地貌有明显差异(图 1B);②冰崩源区影像上呈暗褐色调,地势较陡,冰崩灾害发生后碎屑流堵塞沟道,铲刮区与周围岩体在色调、纹理上有明显差异,局部形成堰

塞湖(图 1A); ③冰崩源区影像上呈暗棕色,地势较陡,冰崩导致冰湖溃决,溃口与周围岩体在色调、纹理上有明显差异(表 2)。



1. 巨型冰崩隐患; 2. 特大型冰崩隐患; 3. 大型冰崩隐患; 4. 研究区范围; 5. 冰崩隐患集中分布区带; 6. 分布区带编号

图 1 研究区冰崩隐患分布

Fig. 1 Distribution of ice avalanche disaster in study area

表 2 冰崩隐患光学遥感解译标志一览表

Tab. 2 List of signs for optical remote sensing interpretation of ice avalanche

类型	直接解译标志				间接解译标志
	颜色	形态	冰裂隙发育情况	(潜在)冰崩体位置	
冰崩隐患点	白色、灰色	舌形、长条形、梨形、不规则形等	以横裂隙为主,侧裂隙和纵裂隙次之	多位于冰川末端	潜在冰崩区前缘往往呈陡坎状或发育跌水坎,与斜坡前缘高差大
已发生的冰崩灾害	冰崩前呈白色、灰色,冰崩后呈浅灰色、暗棕色	冰崩前呈舌形、长条形、不规则形	冰崩前可见冰裂隙	多位于冰川末端	地势较陡,堆积区与周围地质体在色调、地貌上有明显差异
	冰崩前呈白色、灰色,冰崩后呈暗褐色	冰崩前呈舌形、长条形、不规则形	冰崩前可见冰裂隙	多位于冰川末端	地势较陡,冰崩灾害发生后有明显铲刮区,堆积物堵塞沟道,局部形成堰塞湖
	冰崩前呈白色、灰色,冰崩后呈暗棕色	冰崩前呈舌形、近三角形、不规则形	冰崩前可见冰裂隙	多位于冰川末端	地势较陡,冰崩导致冰湖溃决,溃口与周围岩体在色调、纹理上有明显差异

3 结果与分析

3.1 冰崩灾害基本特征

本次共解译出冰崩隐患 232 处,高程分布在 3 450 ~ 5 620 m 之间,其中高程 3 500 ~ 5 000 m 有 139 处, > 5 000 m 有 93 处。前后缘高差分布在 100 ~ 2 500 m 之间,其中 < 500 m 有 90 处, [500, 1 000) m 有 83 处, [1 000, 2 000) m 有 54 处, ≥ 2 000 m 有 5

处。从规模上来看,刘金花等^[15]研究认为藏南卡鲁雄峰地区冰川平均厚度约 30 m; Röthlisberger^[16]提出冰崩的形成机理类似于山体滑坡,本次以 30 m 厚度估算潜在冰崩体的体积,以滑坡规模等级的标准划分冰崩隐患的规模,其中大型 47 处,特大型 147 处,巨型 38 处。从潜在冰崩体分布的地形特征来看,主要分布在“上陡下缓”的靠椅型地形中坡度较陡的斜坡处,多位于冰川末端,冰川前端也有发育,潜在冰崩体上常发育横向冰裂缝。

3.2 冰崩灾害空间分布规律

研究区冰崩隐患主要分布在冰川数量众多、素有冰川之乡的波密县 114 处,其次是嘉黎县 40 处、米林县 31 处、八宿县 23 处、巴宜区 13 处、边坝县 9 处、墨脱县 2 处。冰崩隐患的形成与地形地貌、冰川分布等条件关系密切,结合地质环境背景,在研究区划分为 4 个集中分布区、2 个集中分布带(图 1)。

3.2.1 冰崩灾害集中分布区

1) 依嘎村集中分布区(Ⅰ)。位于研究区西部,总体呈近圆形展布,直径约 28 km,识别出冰崩隐患 40 处,其中大型 8 处、特大型 25 处、巨型 7 处。冰崩隐患主要发育在洛穷弄沟、洛弄弄沟、衣布沟两侧的高山、极高山区。

2) 鲁朗—派镇集中分布区(Ⅱ)。位于研究区中部,总体近 NNW 向展布,长约 50 km,宽约 30 km,识别出冰崩隐患 36 处,其中大型 7 处、特大型 27 处、巨型 2 处。冰崩隐患主要沿南迦巴瓦峰、加拉白垒峰等极高山四周分布。

3) 扎木镇集中分布区(Ⅲ)。位于研究区中东部,总体近 NW 向展布,长约 57 km,宽约 30 km,识别出冰崩隐患 26 处,其中大型 4 处、特大型 16 处、巨型 6 处。该集中分布区冰川十分发育,冰崩隐患主要发育在容错冰川、康削冰川、撒龙冰川等冰川的末端。

4) 然乌镇集中分布区(Ⅳ)。位于研究区东部,总体近 NE 向展布,长约 35 km,宽约 20 km,识别出冰崩隐患 45 处,其中大型 23 处、特大型 16 处、巨型 6 处。冰崩隐患主要发育在然乌湖两侧的高山、极高山区,以米堆冰川、来古冰川等冰川为分布中心。

3.2.2 冰崩灾害集中分布带

1) 易贡—古乡集中分布带(V)。位于研究区中部,总体近 NW 向带状展布,长约 100 km,宽约 17 km,识别出冰崩隐患 33 处,其中大型 4 处、特大型 26 处、巨型 3 处。冰崩隐患主要发育在帕隆藏布、易贡藏布干流两侧的高山、极高山区,且右岸数量多于左岸。

2) 玉许乡集中分布带(VI)。位于研究区中北部,总体近 EW 向带状展布,长约 89 km,宽约 15 km。共计冰崩隐患 26 处,其中特大型 18 处、巨型 8 处。冰崩隐患主要发育在帕隆藏布、易贡藏布支流的高山、极高山区,多位于冰川末端。

3.3 冰崩灾害链式结构

灾害链一般指原生灾害及其引起的一种或多种次生灾害所形成的灾害系列^[17]。在藏东南地区,随着气温的逐年升高,冰雪加速消融,冰川不断退缩,

冰湖数量增多、面积增大,冰碛物规模增大,导致冰崩及其次生灾害发生的概率增加,常以灾害链的形式成灾。本文基于光学遥感解译成果,根据冰崩隐患与其可能引起的次生灾害之间的时空关系,将藏东南冰崩灾害链分为以下 3 种类型:①冰崩—冰湖溃决—泥石流灾害链,以格嘎沟、然则日阿错、金翁错、米堆沟为代表;②冰崩—碎屑流—堰塞湖—洪水灾害链,以色东普沟、然乌湖口、尖母普曲为代表;③冰崩—碎屑流灾害链,以则隆弄沟、柏隆隆巴为代表。

3.3.1 冰崩—冰湖溃决—泥石流灾害链

以冰崩为主要诱因的冰湖溃决是我国西藏自治区典型的地质灾害类型之一,具有突发性强、规模大、破坏力强和危害范围广等特点,往往造成下游地区遭受惨重的生命财产损失^[18],研究区冰崩—冰湖溃决—泥石流灾害链中比较容易发生溃决的冰湖为冰川终碛湖,其末端与冰舌的距离很近,冰崩体运动至冰湖中易形成涌浪,致使冰湖溃决,洪水与沟道中冰碛物、滑坡、崩塌、沟道堆积等物源相互作用最终形成泥石流。研究区此类型灾害链以格嘎沟、然则日阿错、金翁错和米堆沟为代表,现以米堆沟为例,应用光学遥感的手段分析该类型冰崩灾害链的链式结构与动态变化特征。

根据米堆沟光学卫星影像及数字高程模型,米堆沟沟口和沟中部分别是米堆冰川旅游集散地和米堆村所在地,以米堆村为界,米堆村以北沟深且狭窄,米堆村以南为典型的冰川 U 型谷,冰川发育。米堆沟流域面积约 122.9 km²,沟口高程约 3 600 m,最高点高程约 6 335 m(位于流域正后方),高差 2 735 m,主沟两侧发育大小支沟近 11 条。米堆沟内发育潜在冰崩体 6 处,主要水动力条件及物源类型有冰湖 15 处、冰碛物 3 处、崩塌 21 处等(图 2)。潜在冰崩体面积介于 $9.5 \times 10^4 \sim 6.6 \times 10^6$ m² 之间,总面积约 1.5×10^7 m²,主要分布在米堆沟后部。潜在冰崩体前缘高程分布在 4 030 ~ 5 350 m 之间,后缘高程分布在 5 100 ~ 6 040 m 之间,前后缘高差分布在 100 ~ 2 000 m 之间,后缘距沟口高差分布在 1 500 ~ 2 430 m 之间。冰湖主要分布在冰碛物堆积体上,面积介于 $61 \sim 2.4 \times 10^5$ m² 之间,总面积约 2.7×10^5 m²,高程介于 3 820 ~ 4 700 m 之间。冰碛物总面积约 5.0×10^6 m²,主要分布在米堆冰川前缘的沟道内,沿主沟分布。崩塌成片分布,总面积约 1.3×10^7 m²,崩塌堆积体总面积约 4.2×10^6 m²,崩源区总面积约 9.1×10^6 m²,主要分布在主沟中前部左、右两岸的高陡斜坡处。



图 2 米堆沟遥感解译图

Fig.2 Remote sensing interpretation map of Miduigou

根据 2001—2020 年遥感数据,潜在冰崩体冰裂隙在 2001—2020 年间呈逐渐增多的趋势。图 3 为米堆冰川冰裂隙及冰湖多期遥感影像对比,图中红色箭头所指位置为冰裂隙,蓝色箭头所指位置为局部崩落体。在 2001—2013 年之间局部存在崩落现象(图 3(a)—(b)),2014—2020 年间冰裂隙在数量和规模的增长速度加快(图 3(c)—(f)),原来的数条小裂隙已经贯通成大裂隙,增加了末端冰体的不稳定性。冰湖水体面积在 2001—2020 年间亦呈规律性变化,2001—2017 年间呈逐渐增大的趋势,至

2020 年湖水面积增长显著,多个小冰湖已贯穿形成一个大冰湖(图 3(g)—(1))。潜在冰崩体裂缝规模、冰湖水体面积的急剧增加,可能会导致冰川内部流动水不断增多、摩擦力不断减小,在重力作用下当冰川向下运动的驱动力大于静摩擦力时引发冰崩,形成冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害,直接威胁米堆村、米堆冰川旅游集散地及国道 318,若泥石流运动至米堆沟口堵塞帕隆藏布,必将形成更大的灾害链。

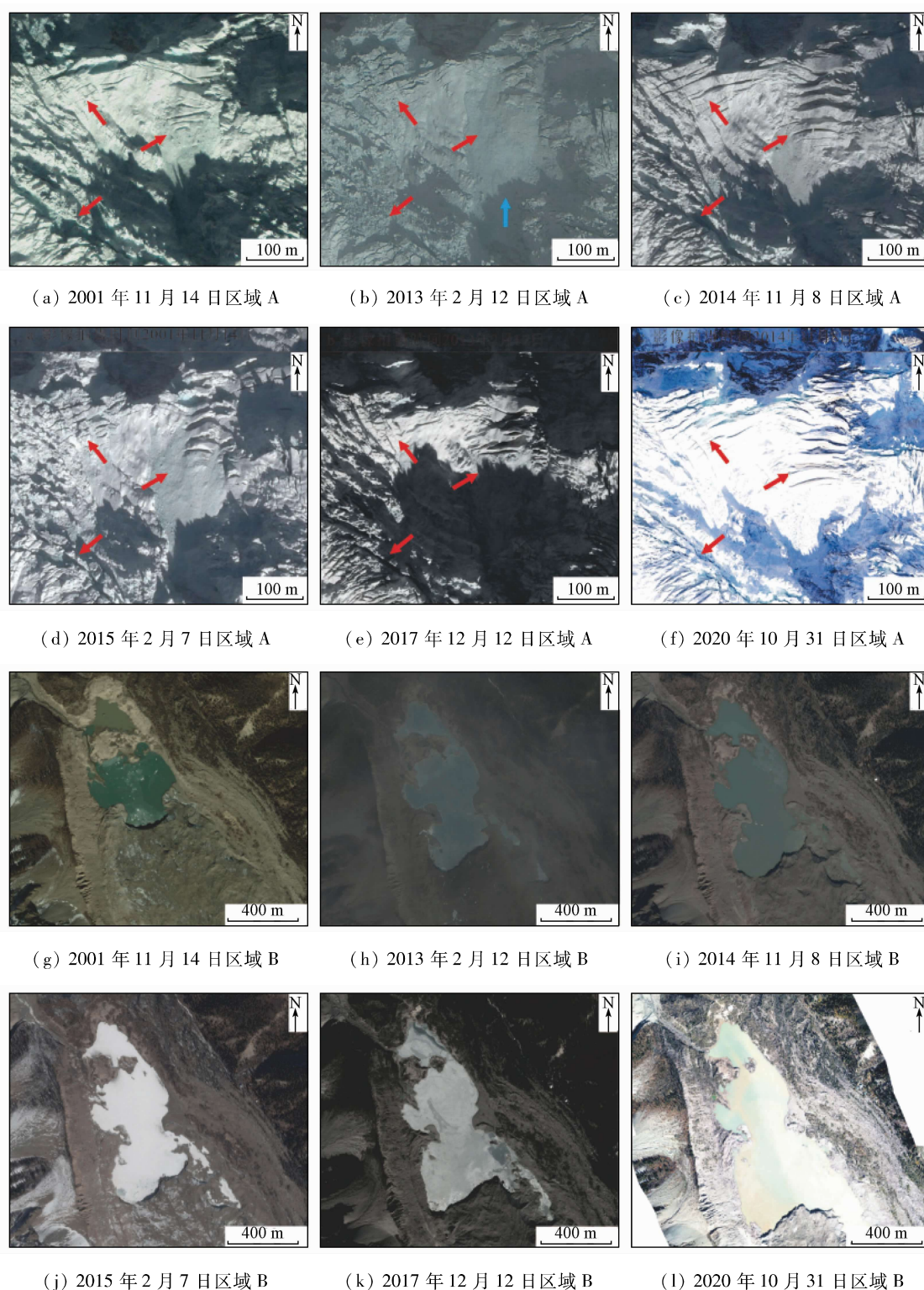


图 3 米堆冰川冰裂隙及冰湖多期遥感影像对比

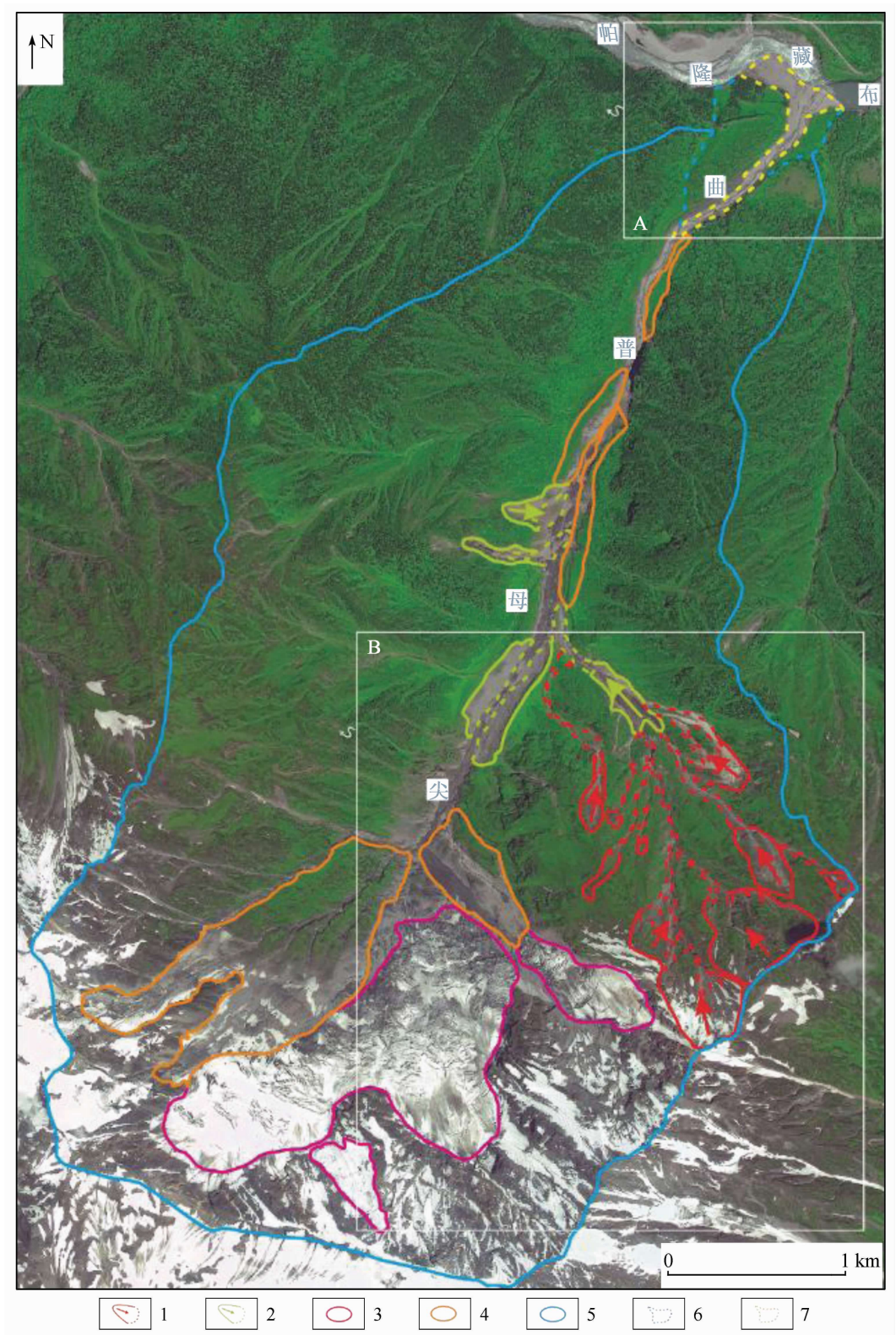
Fig. 3 Comparison of multiphase remote sensing images of ice crevasse and glacial lake in Midui Glacier

3.3.2 冰崩—碎屑流—堰塞湖—洪水灾害链

此类灾害链的潜在冰崩体主要分布在雅鲁藏布江、帕隆藏布、易贡藏布两侧的高山、极高山区,潜在冰崩体失稳可向下高速运动,并铲刮沟道中崩塌、滑坡堆积体以及冰碛物等物源,进一步演化为碎屑流直达河道中,形成冰崩—碎屑流—堰塞湖—洪水灾害链,该类型灾害链为研究区主要的冰崩链式灾害,以色列东普沟、然乌湖口和尖母普曲为代表,常具多发性。现以尖母普曲为例,应用光

学遥感的手段分析该类型冰崩灾害链的链式结构与动态变化特征。

根据尖母普曲光学卫星影像及数字高程模型可知,尖母普曲流域面积约 17.6 km^2 ,沟口高程约 $3\,600 \text{ m}$,最高点高程约 $5\,550 \text{ m}$ (位于流域右后方),高差 $1\,950 \text{ m}$,主沟两侧发育小支沟 2 条,沟口汇入帕隆藏布,沟口对岸为国道 318 和村庄。尖母普曲内发育潜在冰崩体 3 处,主要物源类型有崩塌 9 处、滑坡 5 处、沟道堆积 5 处(图 4)。



1. 崩塌界线及主崩方向; 2. 滑坡界线及主滑方向; 3. 潜在冰崩体; 4. 沟道堆积; 5. 流域界线; 6. 早期泥石流扇; 7. 晚期泥石流扇

图 4 尖母普曲遥感解译图

Fig.4 Remote sensing interpretation map of Jianmupuqu

潜在冰崩体面积介于 $9.7 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^6 \text{ m}^2$ 之间,总面积约 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^2$ 。潜在冰崩体主要分布在尖母普曲后部,前缘高程分布在 $3\,820 \sim 4\,685 \text{ m}$ 之间,后缘高程分布在 $4\,600 \sim 5\,240 \text{ m}$ 之间,前后缘高差分布在 $510 \sim 1\,100 \text{ m}$ 之间,后缘距沟口高差分布在 $1\,000 \sim 1\,640 \text{ m}$ 之间。滑坡分布在沟道中部两侧斜坡上,总面积约 $2.9 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑坡源区总面积

约 $2.3 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑坡堆积体总面积约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^2$,部分堆积体伸入沟道已被冰雪融水带走。沟道堆积物总面积约 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^2$,主要分布在尖母普曲中部的沟道内、后缘的缓坡处,沿主沟分布。崩塌成片分布,总面积约 $7.9 \times 10^5 \text{ m}^2$,崩源区总面积约 $5.7 \times 10^5 \text{ m}^2$,崩塌堆积体总面积约 $2.2 \times 10^5 \text{ m}^2$,分布在主沟中部右岸的高陡斜坡处。

根据尖母普曲 2006—2019 年间遥感数据,对尖母普曲潜在冰崩体、沟道物源、沟口扇形堆积进行对比分析。尖母普曲在 2006 年 4 月 30 日—2019 年 11 月 7 日之间至少发生 2 次高位地质灾害。第一次为 2006—2015 年之间,该次高位地质灾害使尖母普曲沟道宽度由约 50 m 增宽至约 65 m,同时形成大规模泥石流,堵塞帕隆藏布形成了堰塞湖,摧毁了沟口对岸的 318 国道和房屋,致使 318 国道改道,从遥感影像可知,该次高位地质灾害主要物源为冰崩

体、崩塌、滑坡和沟道堆积物,冰川的加速融化可能是其主要水动力条件之一;第二次为 2015—2019 年之间,该次高位地质灾害使尖母普曲沟道宽度由约 65 m 增宽至约 93 m,再次形成大规模泥石流,摧毁了沟对岸左侧帕隆藏布河流阶地的房屋和农田,该次高位地质灾害主要物源为第一次高位地质灾害物源区不稳定块体的进一步解体(图 5),图 5(d)—(f)中红色箭头指示运动方向。

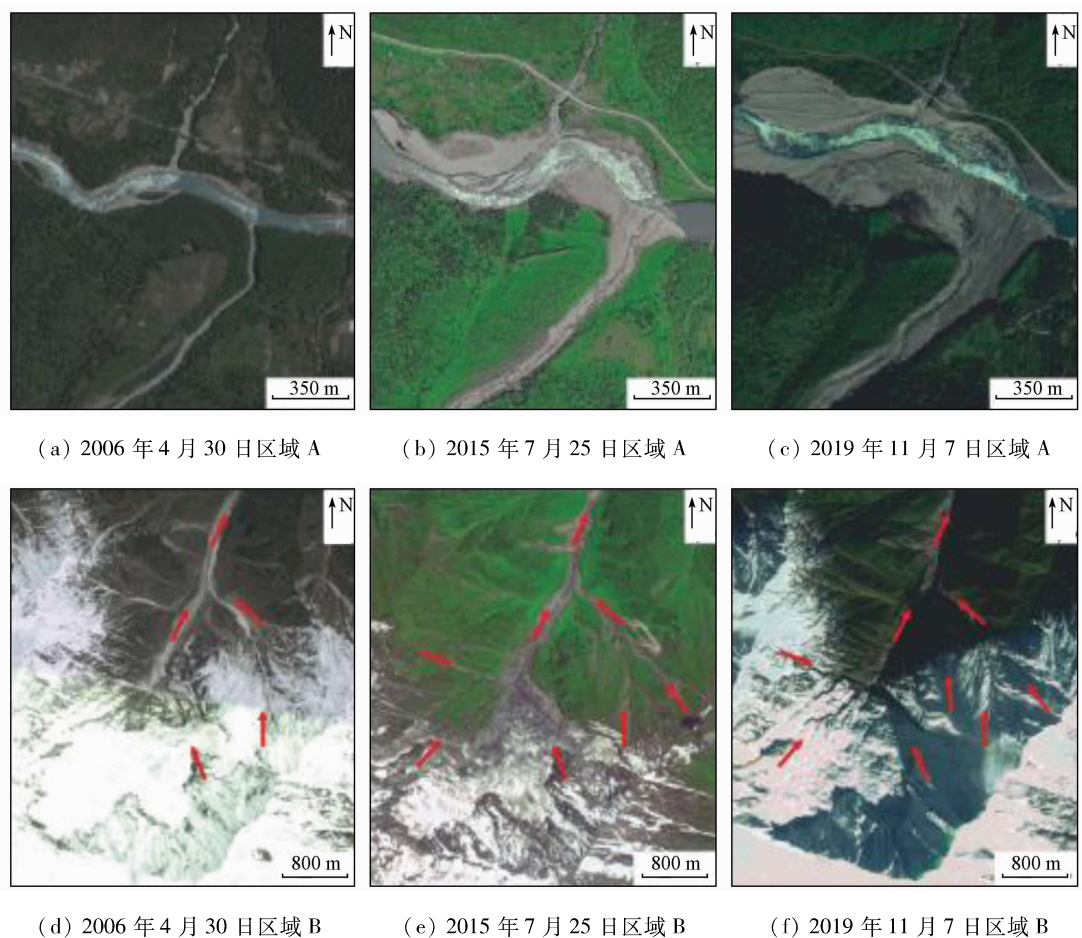


图 5 尖母普曲泥石流堆积扇、潜在冰崩体及沟道物源多期遥感影像对比

Fig. 5 Comparison of multiphase remote sensing images of debris flow fans, potential ice avalanches and channel sources in Jianmupuqu

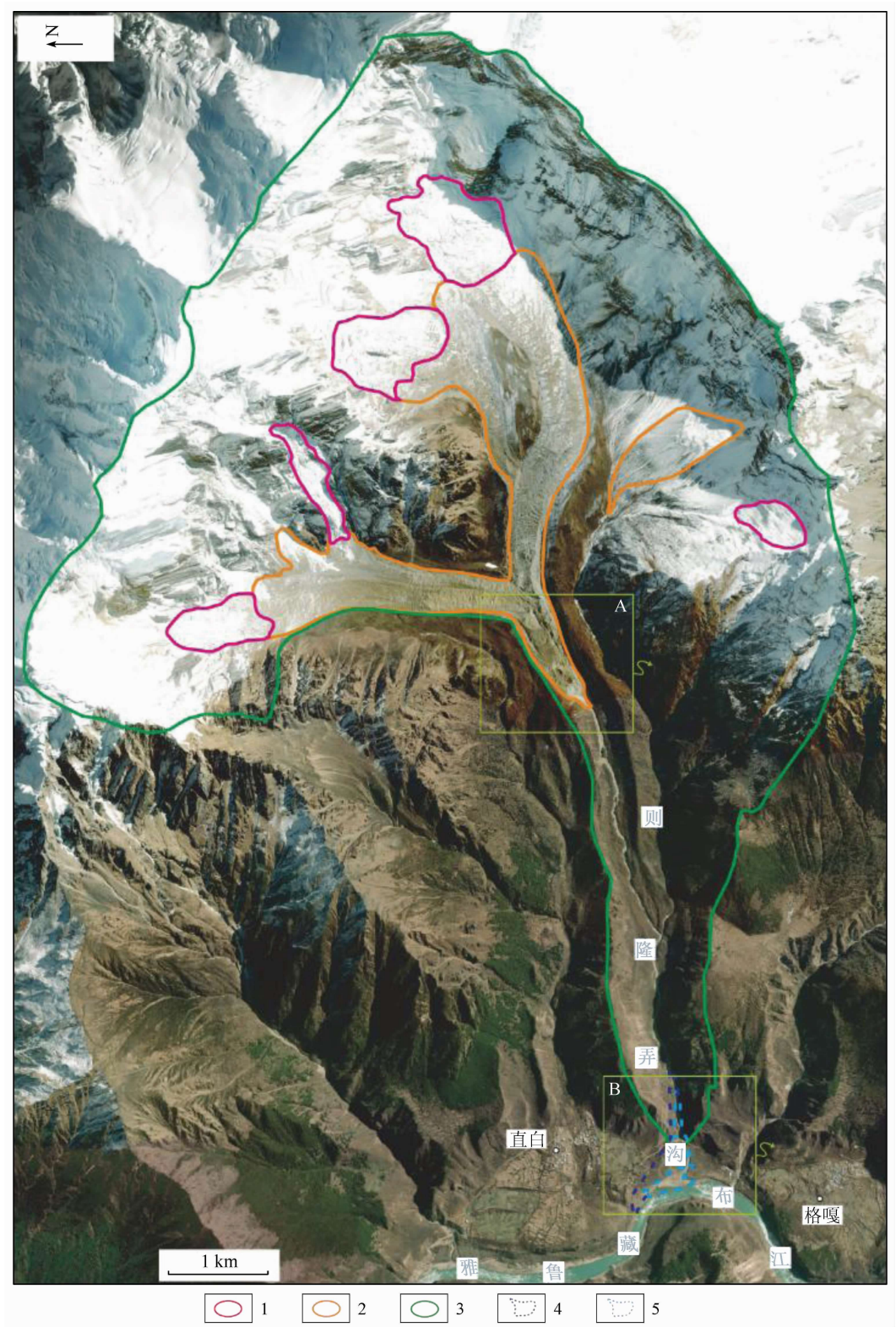
多期光学遥感影像表明,近年来尖母普曲后缘冰川活动强烈,冰川融化速度加快,加之崩塌、滑坡、沟道堆积物等物源十分丰富,同时受西南季风影响,尖母普曲地区降水丰富且多暴雨,目前尖母普曲高位地质灾害处于欠稳定状态,可能发生冰崩—崩塌—泥石流—堰塞湖—洪水链式灾害,直接威胁 318 国道和沟口对岸村庄的生命财产安全。

3.3.3 冰崩—碎屑流(泥石流)灾害链

该类灾害链主要表现为潜在冰崩体脱离冰川迅速向下运动,解体并铲刮、浸润沟道冰碛物形成碎屑流,破坏沿途村庄、公共交通设施等,造成巨大的生命财产损失,以则隆弄沟和帕隆藏布为代表。本文

以则隆弄沟为例,应用光学遥感的手段分析该类型冰崩灾害链的链式结构与动态变化特征。

根据则隆弄沟光学卫星影像及数字高程模型,则隆弄沟流域面积约 41 km²,沟口高程约 2 850 m,最高点高程约 7 780 m(位于流域正后方的南迦巴瓦峰),高差 4 930 m,主沟两侧发育大小支沟 5 条。则隆弄沟中后部呈“V”字形,2 条冰川沟谷在海拔约 4 000 m 处相交汇,在地貌形态上形成三面环山、一面出口的斗状地形。沟内发育潜在冰崩体 5 处,以及呈带分布的冰碛物等主要物源类型(图 6)。潜在冰崩体面积介于 $2.1 \times 10^5 \sim 8.2 \times 10^5$ m² 之间,总面积约 2.4×10^6 m²,主要分布在则隆弄沟后部和左



1. 潜在冰崩体; 2. 冰碛物; 3. 流域界线; 4. 早期泥石流扇; 5. 晚期泥石流扇

图6 则隆弄沟遥感解译图

Fig.6 Remote sensing interpretation map of Zelongsongou

侧中部,潜在冰崩体前缘高程分布在4 500~4 720 m 之间,后缘高程分布在5 080~5 610 m 之间,前后缘高差分布在360~1 110 m 之间,后缘距沟口高差分布在2 230~276 m 之间。冰碛物总面积约 $5.2 \times 10^6 \text{ m}^2$,分布在沟道中、后部,沿主沟及支沟分布。根据则隆弄沟2017—2020年间遥感数据,对则隆弄沟后缘冰碛物、沟口泥石流扇进行对比分析。海拔约4 000 m 处为则隆弄沟高位地质灾害形成区与流

通区的分界点,分界点以上地形较缓,在冰川融水作用下,冰碛物等物源沿冰川沟谷往下移动,在分界点处逐渐积累;分界点以下的流通区沟道中颜色一直较浅,说明冰碛物呈不稳定状态(图7(a)—(c))。在2017—2020年以前,则隆弄沟口泥石流扇面积呈逐渐减小趋势(图7(d)—(e))。2020年夏季,可能因潜在冰崩体的脱离并向下运动,一部分冰崩体因摩擦生热转化成为冰雪融水并浸润冰碛物,分界点

附近的冰碛物发生蠕变开始下滑形成碎屑流(泥石流)(图 7(c))。直白沟大桥附近地势逐渐开阔,碎屑流(泥石流)呈扇形分开直接冲击大桥左右桥墩,致使左岸桥墩错位约 40 cm,并切穿老泥石流扇形

成新的泥石流堆积扇(图 7(f)),形成了冰崩-碎屑流(泥石流)灾害链,由于冰碛物等物源长期处于不稳定状态,该灾害链极有可能再次发生。

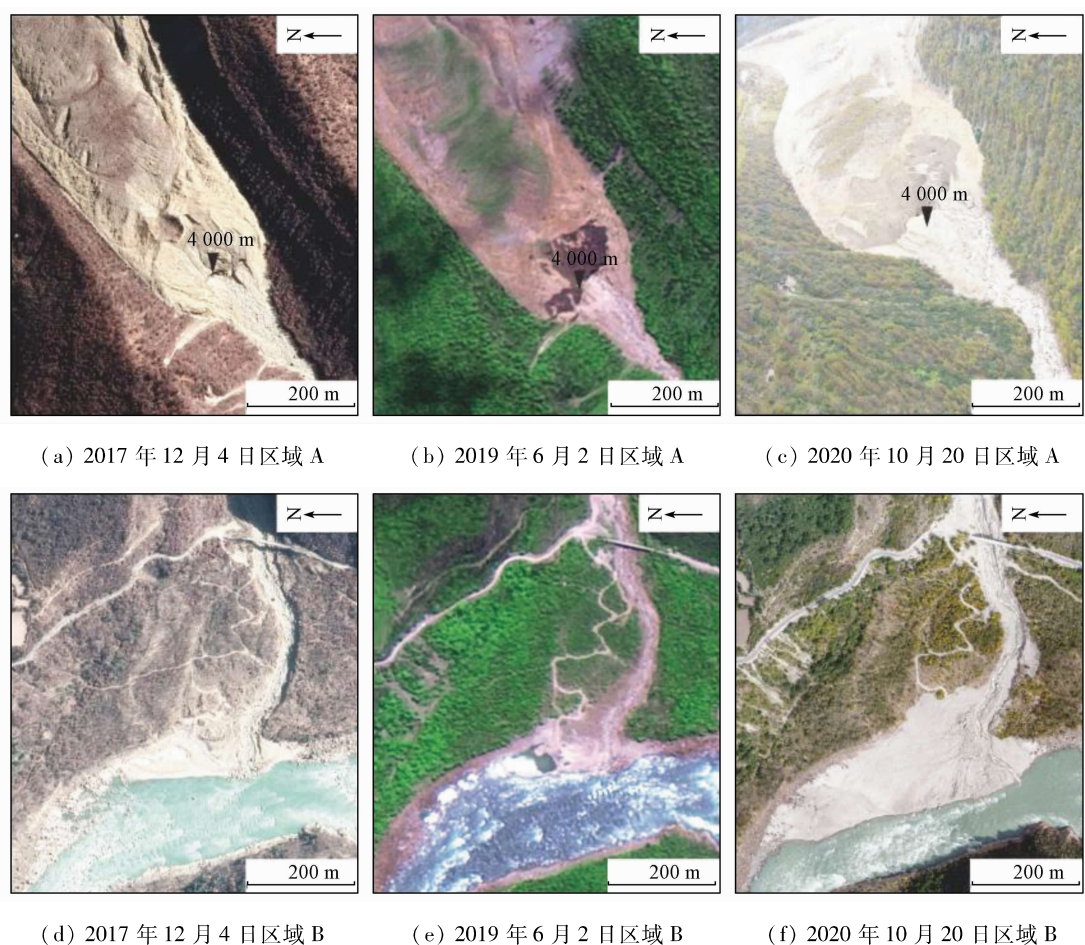


图 7 则隆弄沟泥石流堆积扇、沟道物源多期遥感影像对比

Fig. 7 Comparison of multiphase remote sensing images of debris flow fans and channel sources in Zelongsonggou

4 结论

1) 根据遥感影像上冰崩隐患的色调、形态、纹理、阴影等特征,分别建立了冰崩隐患点和已发生的冰崩灾害的遥感解译标志,开展研究区冰崩隐患的遥感解译,共解译出冰崩隐患 232 处,结合地形地貌分析了其基本特征。

2) 结合地质环境背景,将研究区冰崩灾害点划分为依嘎村集中分布区(I)、鲁朗—派镇集中分布区(II)、扎木镇集中分布区(III)、然乌镇集中分布区(IV)等 4 个集中分布区,以及易贡—古乡集中分布带(V)、玉许乡集中分布带(VI)等 2 个集中分布带。

3) 基于光学遥感解译成果,根据冰崩隐患与可能引起的次生灾害之间的时空关系,将研究区冰崩灾害链分为冰崩-冰湖溃决-泥石流灾害链、冰崩-碎屑流-堰塞湖-洪水灾害链、冰崩-碎屑流灾害链等 3 种类型,分别以米堆沟、尖母普曲、则隆

弄沟为例,基于光学遥感技术详细分析了其链式结构和动态变化特征。

参考文献(References):

- [1] 童立强,裴丽鑫,涂杰楠,等. 冰崩灾害的界定与类型划分——以青藏高原地区为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 11-18. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 02.
Tong L Q, Pei L X, Tu J N, et al. A preliminary study of definition and classification of ice avalanche in the Tibetan Plateau region [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 11-18. doi:10.6046/gtzyyg. 2020. 02. 02.
- [2] Sangewar C V. Remote sensing applications to study Indian glaciers [J]. Geocarto International, 2012, 27(3): 197-206.
- [3] Leinss S, Bernardini E, Jacquemart M, et al. Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973-2019) [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(5): 1409-1429.
- [4] Gilbert A, Leinss S, Kargel J, et al. Mechanisms leading to the 2016 giant twin glacier collapses, Aru Range, Tibet [J]. The Cryosphere, 2018, 12(9): 2883-2900.
- [5] Käab A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers

- in western Tibet in 2016 after surge-like instability[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(2): 114–120.
- [6] Wang S, Yang B, Zhou Y, et al. Snow cover mapping and ice avalanche monitoring from the satellite data of the sentinels [J]. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII – 3: 1765–1772.
- [7] Margreth S, Funk M, Tobler D, et al. Analysis of the hazard caused by ice avalanches from the hanging glacier on the Eiger west face [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 144: 63–72.
- [8] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1203–1209.
- Yao T D, Wu G J, Xu B Q, et al. Asian water tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203–1209.
- [9] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2770–2782.
- Yao T D, Yu W S, Wu G J, et al. Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2770–2782.
- [10] 裴丽鑫. 青藏高原地区冰崩灾害特征与类型的初步研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Pei L X. The preliminary study of characteristics and types of ice avalanche disaster in the Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [11] 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1141–1152.
- Hu W T, Yao T D, Yu W S, et al. Advances in the study of glacier avalanches in high Asia[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1141–1152.
- [12] Geng Q R, Pan G T, Zheng L L, et al. The eastern Himalayan syntaxis: Major tectonic domains, ophiolitic mélanges and geologic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(3): 265–285.
- [13] Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(4): 356–372.
- [14] Ding L, Zhong D L, Yin A, et al. Cenozoic structural and metamorphic evolution of the eastern Himalayan syntaxis(Namche Barwa) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 423–438.
- [15] 刘金花, 易朝路, 李英奎. 藏南卡鲁雄峰枪勇冰川新冰期冰川发育探讨[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(2): 348–354.
- Liu J H, Yi C L, Li Y K. Reconstruction of the neoglacial glaciers in the Qiangyong valley, Mt. Kalung, south Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(2): 348–354.
- [16] Röthlisberger H. Ice avalanches[J]. *Journal of Glaciology*, 1977, 19(81): 669–671.
- [17] 黄宗理, 张良弼. 地球科学大辞典——应用学科卷[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- Huang Z L, Zhang L B. A dictionary of earth sciences[M]. Beijing: Geological Press, 2005.
- [18] 刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1335–1347.
- Liu J K, Zhang J J, Gao B, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1335–1347.

Surveys and chain structure study of potential hazards of ice avalanches based on optical remote sensing technology: A case study of southeast Tibet

LIU Wen, WANG Meng, SONG Ban, YU Tianbin, HUANG Xichao, JIANG Yu, SUN Yujiang
(*Sichuan Institute of Geological Survey (Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource)*, Chengdu 610081, China)

Abstract: Glaciers are widely distributed in southeast Tibet. Glacier instability is prominent in this region against the backdrop of global warming. Surveys of the potential hazards of ice avalanches using optical remote sensing are practically significant for disaster prevention and mitigation in the region. According to the hue, morphology, texture, and shadow characteristics of the potential hazards of ice avalanches on remote sensing images, this study established the symbols of remote sensing interpretation of potential hazards of ice avalanches in the study area. Based on this, a total of 232 potential hazards of ice avalanches were interpreted in southeast Tibet, including 47 large, 147 super large, and 38 giant ones. Then, this study analyzed the essential characteristics and spatial distribution of the potential hazards based on the characteristics of terrain, landform, and regional geological environment. Consequently, four concentrated distribution areas and two concentrated distribution zones were determined. The potential hazards of ice avalanches in the study area show distinct chain characteristics. According to the spatio-temporal relationships between the potential hazards and their possible secondary disasters, the ice avalanche disaster chains in southeast Tibet can be divided into three types, namely, ice avalanche – glacial lake

outburst flood – debris flow disaster chains, ice avalanche – debris flow – barrier lake – flood disaster chains, and ice avalanche – debris flow disaster chains. Taking the potential hazard chains of ice avalanches in Miduigou, Jianmupuqu, and Zelongnonggou as examples, this study analyzed the dynamic change characteristics and chain structure of these potential hazard chains using optical remote sensing technology. The purpose is to provide basic data for an in – depth study on potential hazards of ice avalanches in southeast Tibet.

Keywords: optical remote sensing; potential hazards of ice avalanches; disaster chain; southeast Tibet

(责任编辑: 李 瑜)