

引用格式:Chu Duo,Caiwang Dunzhu,Lawang Dunzhu,*et al.* Monitoring Glacier Avalanches in Tibet Using Sentinel-2 Imagery[J].Remote Sensing Technology and Application,2022,37(6):1289-1301.[除多,才旺顿珠,拉旺顿珠,等.Sentinel-2监测西藏冰崩灾害[J].遥感技术与应用,2022,37(6):1289-1301.]  
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1289

## Sentinel-2监测西藏冰崩灾害

除多<sup>1,2</sup>,才旺顿珠<sup>3</sup>,拉旺顿珠<sup>4</sup>,索朗塔杰<sup>1,2</sup>,平措桑旦<sup>1,2</sup>,多吉扎西<sup>4</sup>,  
明玛次仁<sup>3</sup>,平措<sup>3</sup>

- (1. 青藏高原大气环境科学研究所,西藏 拉萨 850000;
2. 青藏高原大气环境研究重点实验室,西藏 拉萨 850000;
3. 西藏改则县气象局,西藏 改则 859200;
4. 西藏日土县气象局,西藏 日土 859700)

**摘要:**利用 Sentinel-2 卫星遥感数据监测了 2016 年和 2018 年发生在西藏阿汝错和色东普沟的冰崩灾害,重现了两次冰崩灾害事件全过程,2022 年 2 月还对阿汝错冰崩区进行了实地调查。结果表明:阿汝错 53 号冰崩是一起冰川前部断裂解体后发生的冰崩,冰崩体于 2018 年 7 月全部消融,而阿汝错 50 号冰崩是一起典型的冰川前部垮塌产生的冰崩,2021 年 6 月 22 日仍有冰崩体面积 0.58 km<sup>2</sup>。2017 年和 2018 年 4 次大规模冰崩—岩崩—碎屑流事件不仅对色东普沟地表地貌形态和沟口水流状况产生了重要影响,对色东普流域造成了重大灾害。西藏东西两次冰崩灾害事件是气候变暖和局地强降水作用在特定的高山冰雪地形地貌结构上发生的。其中,阿汝错冰崩事件是由气候和天气驱动的外力强迫作用在该区多温 and 软性基岩的冰川特性上引起的,是一起历史罕见的低角度冰川的巨大灾难性不稳定事件。气候变暖引起的冰雪消融和局地强降雨是色东普沟冰崩—岩崩灾害事件发生的主要诱发因素,且呈多发、频发、周期性特点,今后很长的时间内仍会多次发生。

**关键词:**冰崩;冰冻圈灾害;Sentinel-2;地面调查;西藏

**中图分类号:**TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2022)06-1289-13

### 1 引言

人类活动与山地冰冻圈的交互日益增加加剧了冰冻圈灾害风险。陡峭的山坡和高地形起伏及地震活动使山区容易发生极具破坏性的物质运动。冰川和冻土对气候变化的敏感性正在加剧这些物质运动和灾害过程<sup>[1]</sup>。青藏高原及周边地区是除南、北两极地区之外全球最重要的冰川资源富集地<sup>[2]</sup>。作为“亚洲水塔”的重要组成部分,青藏高原及周边地区冰川对亚洲地区水资源压力的缓解具有重要意义,特别为我国西部地区的水资源安全、生态安全和社会经济发展提供重要保障<sup>[2-3]</sup>。随着

气候变暖的持续和人类活动的增加,青藏高原及周边地区冰川整体处于快速消融状态,不仅影响冰川水资源储备,增大了冰川自身的不稳定性,加剧了灾害发生风险<sup>[4-5]</sup>。

在全球气候变暖大背景下,青藏高原过去相对稳定的冰川已经变得越来越不稳定,有的还出现了剧烈运动和强烈消融,进而导致各种冰川灾害的发生<sup>[4]</sup>。冰崩等以往罕见的冰冻圈灾害时有发生。2016 年和 2018 年,在西藏西北部阿里和东南部林芝先后发生了大规模冰崩事件。这两种类型完全不同的冰川连续发生冰崩灾害事件,很可能说明目前

收稿日期:2022-03-25;修订日期:2022-10-21

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0603、2019QZKK010312),西藏自治区科技创新基地自主研究项目(XZ2021JR0001G),国家自然科学基金项目(41561017、42061014)。

作者简介:除多(1969—),男,西藏白朗县人,博士,正研级高工,主要从事卫星遥感应用研究。E-mail:chu\_d22@hotmail.com

青藏高原的冰川整体上处于不稳定状态,灾害发生概率与空间范围正逐渐增大<sup>[4-5]</sup>。冰川灾害有时还引发次生灾害,形成一个从冰冻圈开始,继而影响到岩石圈、水圈、生物圈、人类圈的灾害链,延长和放大灾害后果<sup>[6]</sup>。

青藏高原冰雪快速消融和冰冻圈灾害风险不断加大的情况下,及时有效地监测和了解冰冻圈灾害发生地点、规模和动态变化成为制定防灾减灾决策和采取应对措施的首要任务和前提。然而,冰冻圈灾害区域一般地处高寒、高海拔偏远地区,经济欠发达,基础设施薄弱,抵御和应对自然灾害的能力弱,难以用常规的地面观测来完成灾害监测和调查,如青藏高原冰冻圈灾害多发生在海拔 4 000 m 以上的高山区,使得遥感技术成为冰冻圈灾害监测最为有效手段。尤其是,以卫星遥感为主的监测方法已在冰崩、冰川跃动和雪崩等冰冻圈灾害监测、应急响应和风险评价中得到了广泛应用,已成为全球山地冰冻圈灾害监测的主要手段。

李壮等<sup>[7]</sup>通过实地调查,结合 Landsat 等多期遥感影像以及 InSAR 雷达数据,对色东普沟高位地质灾害发育特征进行分析,结果表明 2018 年的两次灾害事件物源来自于 1 处高位岩崩区和 3 处高位冰崩区。柴波等<sup>[8]</sup>利用高分卫星资料和谷歌地球影像结合模型对西藏聂拉木县嘉龙错冰湖溃决危险性进行了评价,结果表明冰崩和雪崩是高山区冰湖溃决的重要致灾因子,嘉龙错上方冰川存在发生滑坡的可能性。汤明高等<sup>[9]</sup>利用 Google Earth、GF-2 和 ZY-3 高分辨率遥感影像系统研究了青藏高原冰崩隐患数量、类型、发育规律及危险性,以期为应对青藏高原冰崩灾害及防灾减灾提供科学支撑。2002 年 9 月发生在高加索山脉的 Kolka 冰崩是一起罕见的巨型冰崩灾害,冰崩体积达  $130 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,造成了 130 多人遇难<sup>[10]</sup>。Kääb 等<sup>[11]</sup>利用 ASTER 卫星遥感数据通过提取数字高程等数据对 Kolka 冰崩进行了分析,重建了此次冰崩的动力学过程。Pandey<sup>[12]</sup>利用谷歌地球高分辨率卫星影像对印度喜马拉雅马偕尔的岩石冰川进行第一次综合编目,结果表明研究区共有 516 个岩石冰川,所占面积大约为  $353 \text{ km}^2$ ,其中 59% 的以冰川为源头,而 41% 为岩屑为源头。相关更多的研究工作关注基于 Landsat 等卫星遥感影像分析亚洲高山区中部冰川的跃动特征,从而为冰川跃动灾害监测和防治提供重要支撑<sup>[13-15]</sup>。Kääb 等<sup>[16]</sup>建议综合多种遥感技术对冰崩

等冰冻圈灾害过程的潜在威胁进行评估,能够从一定程度上减少冰川灾害造成的损失。

在全球变暖趋势下,冰崩、冰川跃动、雪崩、冰湖溃决等冰冻圈灾害在青藏高原及其周边地区呈逐渐增多趋势,受灾范围也在不断扩大<sup>[4-7]</sup>。研究表明,在青藏高原,西藏的冰崩隐患点数量最多,占整个青藏高原的近 60%,且大部分位于喜马拉雅山脉和念青唐古拉山及其东延高山<sup>[9]</sup>。因此,对未来青藏高原特别是西藏冰冻圈灾害监测和应对措施提出了更高的要求。利用高分辨率卫星遥感图像对冰崩高危险区的冰川进行有针对性的动态监测,进而开展冰崩灾害风险评估和预警,是防灾减灾和减轻灾害损失的重要途径。Sentinel-2 相比 Landsat 等卫星遥感数据无论从空间分辨率还是从重访周期、波谱分辨率和图像宽幅都实现了革命性跨越。卫星传感器有专门用于冰雪监测和云雪识别的短波红外波段,使得 Sentinel-2 在冰雪和冰冻圈灾害监测中具有其他高分辨率卫星遥感数据无可比拟的优势。

为此,研究利用 Sentinel-2 卫星遥感数据监测了 2016 年西藏阿里阿汝错和 2018 年西藏林芝色东普的冰崩灾害发生、发展全过程,展示了 Sentinel-2 在冰冻圈灾害监测和应急响应中的巨大应用潜力。研究工作对于青藏高原冰冻圈灾害监测和应急响应以及全球其他类似的灾害监测和应急服务具有重要的借鉴意义。

## 2 数据与方法

### 2.1 Sentinel-2 卫星遥感数据

欧盟委员会和欧洲航天局(ESA)于 2003 年共同推出地球环境与安全监测计划(Global Monitoring for Environment and Security, GMES)。该计划的主要目标是通过欧洲及部分非欧洲国家现有和未来发射的卫星以及现场观测数据进行协调管理和集成,实现环境与安全的实时动态监测,为决策者提供数据,以帮助制定环境法案,同时对诸如自然灾害和人道主义危机等紧急状况作出响应,保证欧洲的可持续发展和提升国际竞争力。2012 年 12 月,欧盟委员会将该计划更名为“哥白尼计划”。哥白尼计划是迄今最为宏大的地球观测计划,它提供精确、及时和方便获取的信息以改进环境的管理,了解和减轻气候变化的影响,确保民众安全。

Sentinel 系列是哥白尼计划的核心组成部分,

主要对陆地和海洋环境变化进行连续监测,为自然灾害预警及灾后应急提供帮助<sup>[17-21]</sup>。Sentinel-2是一个极轨多光谱高分辨率光学成像卫星组,是到目前为止全球唯一能够免费获取的空间和光谱分辨率最高、重访周期最短、幅宽最大的光学遥感卫星。目前,Sentinel-2由A、B两颗极地轨道卫星组成,分别于北京时间2015年6月23日和2017年3月7日发射升空,位于离地面786 km高度的太阳同步轨道上,彼此位置相距180°。Sentinel-2通过A、B两颗卫星组成星座协同观测,大大提高了卫星对地观测周期,每5 d就能提供一次从地球56°S到83°N范围陆地表面影像数据。今后C星和D星陆续投入运行后,卫星重访周期提高一倍,其在环境和灾害监测、应急管理响应时间和时效性提升一倍。Sentinel-2已经成为哥白尼计划卫星系列中应用最广泛的卫星,60%的数据下载量来自Sentinel-2卫星。Sentinel-2卫星遥感数据已在全球环境变化、农作物生长、土地覆盖变化制图、自然灾害(如洪水、林火、滑坡、地震和火山喷发等)监测、应急管理及救援等方面得到了广泛应用。

Sentinel-2卫星的波段设计源自其设计阶段与广大用户广泛讨论的结果,同时继承了Landsat和SPOT卫星的成功经验<sup>[22-24]</sup>。卫星上搭载了一个采

用推扫式成像模式的多光谱成像仪(MSI),是新一代多光谱光学成像仪,共有13个波段,其中波段4(红)、3(绿)、2(蓝)和近红外波段8的地面分辨率为10 m,3个植被红边波段5、6、7和两个短波红外波段11、12及窄近红外波段8a的地面分辨率为20 m,其余波段1、9和10的地面分辨率为60 m,详见表1。

Sentinel-2卫星影像采用了与Landsat 8影像一致的UTM投影,提供L1C和L2A两种产品,其中L1C是经过传感器辐射定标和几何配准的大气上层表观反射率产品,L2A则是经过云检测和大气校正后的标准地表反射率产品。用户可以从欧空局(ESA)官网下载Sentinel-2大气校正插件Sen2Cor对L1C产品进行大气校正,生产L2A级别产品。Sentinel-2 L1C产品在UTM投影基础上按美国军用格网系统(MGRS)进行分幅,将每条UTM投影带按南北向细分为20个区域,再进一步分割为109.8 km×109.8 km的格网。用户直接可以从哥白尼计划官方网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)免费下载L1C和L2A产品。ESA还提供卫星遥感数据处理和分析工具SNAP,方便用户显示和处理Sentinel和Landsat系列等卫星遥感数据。

表1 Sentinel-2 MSI传感器波段  
Table 1 Bands of Sentinel-2 MSI sensors

波段	中心波长/nm	波段宽度/nm	空间分辨率/m	主要用途
Band 1-Coastal and aerosol(海岸与气溶胶)	443	20	60	大气校正
Band 2-Blue(蓝波段)	490	65	10	对植被气溶胶散射敏感
Band 3-Green(绿波段)	560	35	10	绿色峰值,对植被总叶绿素敏感
Band 4-Red(红波段)	665	30	10	叶绿素最大吸收波段
Band 5-Vegetation red edge (植被红边波段1)	705	15	20	植被监测
Band 6-Vegetation red edge (植被红边波段2)	740	15	20	植被监测
Band 7-Vegetation red edge (植被红边波段3)	783	20	20	植被监测
Band 8-NIR(近红外波段)	842	115	10	植被叶面积监测
Band 8a-Narrow NIR(窄近红外波段)	865	20	20	用于水汽吸收参考
Band 9-Water vapour(水汽波段)	940	20	60	水汽吸收大气校正
Band 10 SWIR-cirrus(短波红外卷云波段)	1 375	30	60	大气校正中的薄卷云监测
Band 11 SWIR1(短波红外波段1)	1 610	90	20	积雪监测,云雪识别
Band 12 SWIR2(短波红外波段2)	2 190	180	20	气溶胶光学厚度计算

## 2.2 Sentinel-2目标识别方法

归一化积雪指数NDSI(Normalized Difference Snow Index)是卫星遥感定量识别冰雪的主要方法。计算NDSI的Sentinel-2 MSI传感器对应波段是绿波段3和短波红外波段11,计算公式如下:

$$\text{NDSI} = [\text{Band3} - \text{Band11}] / [\text{Band3} + \text{Band11}] \quad (1)$$

Hall等<sup>[25-27]</sup>发现,当NDSI大于等于0.40时能够较好地识别地表积雪,并且能够区分大部分云。在此基础上,利用水体在近红外波段反射率低而雪在该波段具有较高反射率的光谱特性,近红外波段的



反射率大于 0.11 消除水体对积雪判识的影响<sup>[28]</sup>。ESA 提供的 Sentinel-2 大气校正插件 Sen2Cor 中有积雪检测算法。该算法中 NDSI 的积雪识别阈值下限为 0.2, 同时近红外波段 8a 的反射率大于 0.15 时, 该像元识别为积雪像元。

在阿汝错冰崩体识别方法上, 在 ENVI5.6 遥感图像处理软件中除了采用上述的 NDSI 计算方法之外, 还用了可见光单波段阈值设定和目视解译相结合的方法对冰崩体面积进行定量计算; 对色东普沟高位地质灾害影响范围识别上则以目视解译方法为主。

主要技术路线是, 首先从哥白尼计划官方网站下载研究区 L1C 或 L2A 图像。若用于目视解译则下载 10 m 分辨率的 L1C 数据即可, 如果用于计算 NDSI 等定量应用则需要下载 L2A 产品, 但图像的分辨率也会降至 20 m。下载好的 L1C 图像直接可以用 ESA SNAP 软件中打开, 利用该工具可以进行 Band4-3-2 真彩色等波段合成和图像增强, 以期达到最佳显示效果, 最后导出后直接可以在 ArcGIS 10.0 中进行目视解译和制图等。

### 3 冰崩监测

#### 3.1 阿汝错冰崩监测

##### 3.1.1 遥感监测

2016 年 7 月 17 日, 西藏阿里地区日土县阿汝错湖区的 53 号冰川发生了崩塌, 冰崩体携带大量碎屑物质向偏东方向滑动约 7 km 后快速冲入阿汝错, 产生 20 m 高的湖啸, 导致湖泊水位上涨 9 m, 阿汝错湖水向对岸前推了约 240 m。此次冰崩造成当地 9 名牧民遇难, 数百头牲畜被埋, 大量草场被毁<sup>[29]</sup>。9 月 21 日, 同一冰川群的 50 号冰川再次发生冰崩<sup>[4-5, 29-30]</sup>。如此大规模的冰川崩塌事件连续发生在一直以来冰川活动较为稳定的青藏高原内陆地区, 极为罕见<sup>[29-31]</sup>。冰崩发生后, 冰崩体的后期融化使其下游湖美玛错水位上涨迅速, 2016—2019 年湖泊水位升高 3 m, 冰体融化对湖泊扩张的贡献率达到 23%<sup>[32]</sup>。

Sentinel-2 获取的卫星遥感图像很好地记录了此次冰崩事件发生的过程。图 1(a) 是 53 号冰川发生崩塌 4 d 后于 2016 年 7 月 21 日 Sentinel-2 卫星首次观测到的冰崩灾害实况卫星遥感影像图。经测量, 冰崩堆积体长 6.80 km、宽 2.45 km、面积为 9.67 km<sup>2</sup>, 平均厚度约 7.5 m<sup>[5]</sup>, 冰崩体积约为  $68 \times 10^6 \text{ m}^3$ <sup>[30]</sup>, 冰崩扇淹没湖泊最长距离 675 m, 淹没湖泊面积

0.75 km<sup>2</sup>。

2016 年 7 月 21 日至 2017 年的春季由于研究区为冷季气温较低的时段, 冰崩体消融速度较为缓慢(图 2), 2017 年 5 月 14 日的冰崩体面积仍有 7.01 km<sup>2</sup>, 冰崩体面积减少了 27.5%。这一期间冰崩体面积波动是由于春季降雪导致冰崩体被积雪覆盖引起的。研究发现, 冰崩体的消融过程并非是像冰川那样从外围到里的逐渐萎缩消融过程, 而是冰崩体不同区域破碎化的消融过程(图 1(c))。2017 年 5 月 14 日至 9 月 26 日是冰崩体快速消融的阶段, 与研究区内气温最高时段一致。2017 年 5 月 14 日至 7 月 8 日消融达到 2.98 km<sup>2</sup>(图 1(d)), 消融面积达到每 10 d 0.54 km<sup>2</sup>, 7 月 8 日至 8 月 15 日共计减少面积 2.10 km<sup>2</sup>, 每 10 d 的消融面积达到 0.55 km<sup>2</sup>。8 月至 9 月的消融速度出现了明显减少, 为 0.21 km<sup>2</sup>/10 d, 不及 7 月至 8 月消融速度的一半。2017 年 9 月 26 日冰崩体面积出现冰崩发生以来的最小, 仅 1.06 km<sup>2</sup>。Sentinel-2 卫星图像显示, 之后残留的冰崩体一直存在, 而且被积雪覆盖之后面积略有波动(图 2)。2018 年 6 月 8 日冰崩体面积降至 1 km<sup>2</sup> 以下, 为 0.95 km<sup>2</sup>, 7 月 8 日仅剩下 0.14 km<sup>2</sup>(图 1(e))。可以看出, 53 号冰崩残留体最终于 2018 年 7 月正式全部消融, 从冰崩发生至完全消融先后持续了 2 a 整的时间。

同样, 阿汝错 50 号冰崩发生于 2016 年 9 月 21 日, Sentinel-2 监测到的最近一次晴空图像是 2016 年 10 月 9 日的图像(图 1(b))。该图监测显示, 50 号冰崩体长 5.80 km、宽 1.90 km、面积为 6.75 km<sup>2</sup>, 平均厚度超过 30 m<sup>[5]</sup>, 估算的冰崩体约为  $83 \times 10^6 \text{ m}^3$ <sup>[30]</sup>。大部分冰崩体滑向偏东的阿汝错方向, 但未到达阿汝错湖岸, 距湖岸最近距离约 1 km。少部分冰崩体滑向东北方向, 面积 0.84 km<sup>2</sup>, 占 50 号冰崩体面积的 12%。

2016 年 10 月 9 日之后, 冰崩体进入了逐渐消融和面积不断减少的过程(图 2)。至 2017 年 4 月 24 日面积减少至 5.78 km<sup>2</sup>, 这一阶段由于湖区气温较低, 不利于冰体的消融, 面积减少速度缓慢(图 1(c))。2017 年 5 月两景图像上, 由于积雪覆盖出现了冰崩体面积略有增加的情况。从图 2 中可以看出, 5 月中旬至 8 月中旬冰崩体消融速度明显加快, 但是相比 53 号冰崩体其消融速度非常缓慢, 主要原因是 50 号冰崩体很厚, 达到 30 m, 需要更长的时间融化。冰崩残留体较薄的条件下, 气温上升引起冰崩体的破碎化, 加速其消融。11 月之后消融速度出现了明显

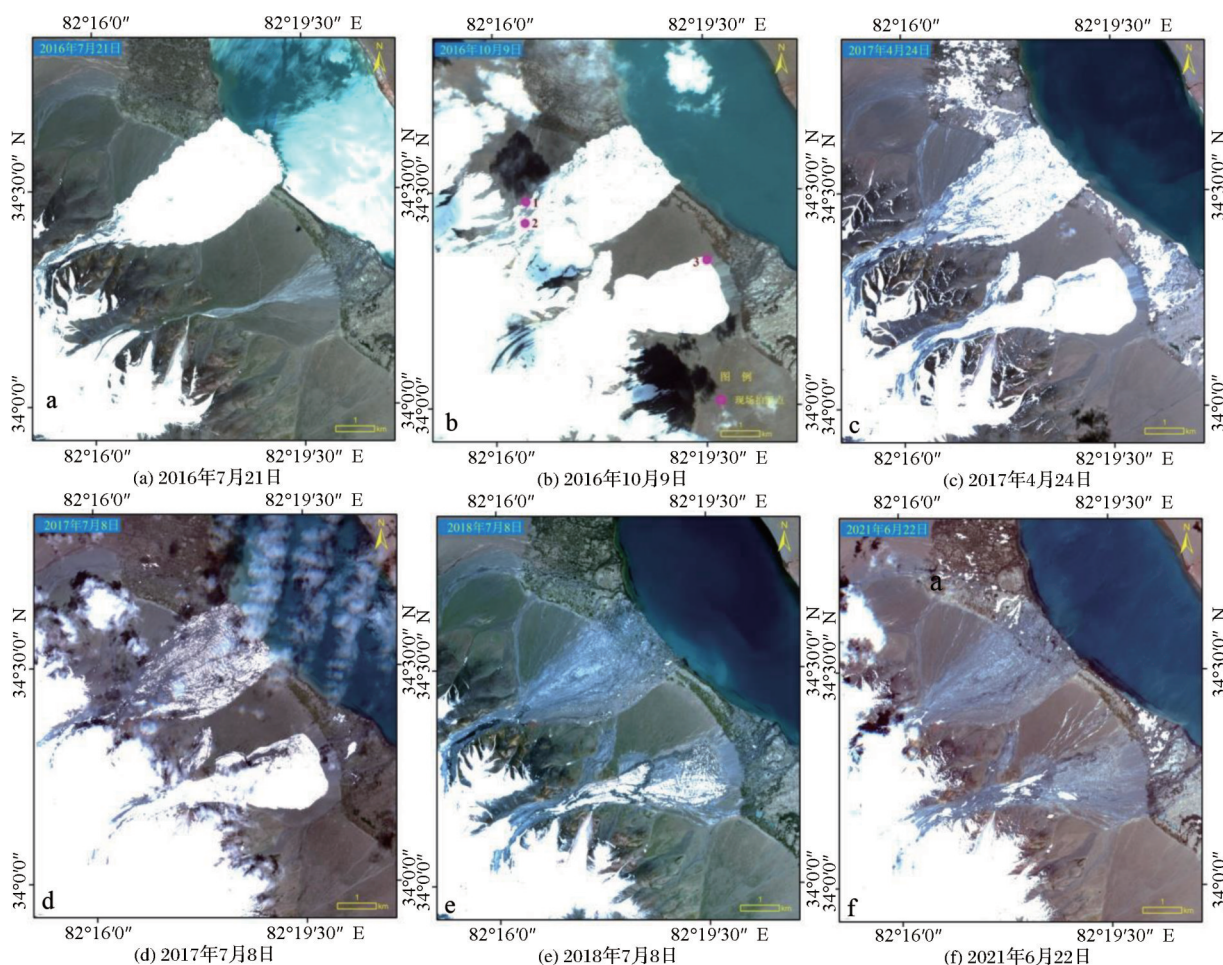


图1 Sentinel-2 卫星监测的西藏阿汝错 53 号和 50 号冰崩体融化及面积变化过程

Fig.1 The melting process of Arutso No. 53 and 50 glacier avalanches by Sentinel-2 images

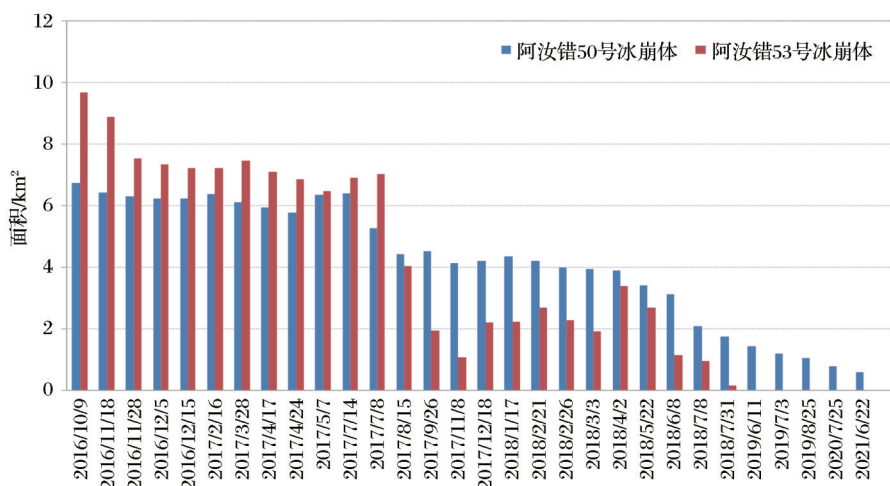


图2 Sentinel-2 卫星监测的西藏阿汝错 53 号和 50 号冰崩体面积变化

Fig.2 Area change of Arutso No. 53 and 50 glacier avalanches by Sentinel-2 images

减少,直至下一年的春季,冰崩体面积减少幅度不大。2017年11月8日冰崩体面积为4.13 km<sup>2</sup>,过了5个月之后,2018年4月2日冰崩体面积仍保留有3.89 km<sup>2</sup>,仅减少了0.24 km<sup>2</sup>。2018年7月31日的面

积为1.74 km<sup>2</sup>,之后冰崩体消融和面积减少也非常缓慢,2019年7月3日和2020年7月25日分别是1.18 km<sup>2</sup>和0.76 km<sup>2</sup>,至2021年6月22日,50号冰崩体的残留堆积体面积仍有0.58 km<sup>2</sup>(图1(f))。



### 3.1.2 地面调查

2022年2月16日,对阿汝错53号和50号冰崩发生区域行了实地调查。地面调查同样表明,53号冰崩体中的冰体部分已全部消融,现场基本是大小岩石和碎石等冰崩残留体,个别大的石头直径在1 m以上(图3(a))。从现场可以看出,53号冰川是在山体斜坡上的冰川在重力作用下冰川前部断裂解体后发生了冰崩。由于山体坡度较大,冰川发生断裂后快速向东冲向阿汝错,约7 km之后最后冲入湖中。现场还发现,冰川发生断裂后53号冰川的后半部分保留完好,而且随着冰川物质的累积,冰川在不断发育,今后仍存在再次发生冰崩的可能性(图3(b))。50号冰崩体现场整体上与此类似,冰崩

体中的冰体部分已基本消融,现场覆盖物基本上是由岩石、碎石和泥土等组成,个别大石头直径也在1 m以上。

从现场调查可以看出,阿汝错50号冰川的冰崩更有可能是一次冰川垮塌,是在山体斜坡上的冰川在重力作用下发生了垮塌,进而发生了冰崩(图3(c))。由于50号冰川的山体坡度小于53号冰川,冰川发生崩塌后向东冲向阿汝错方向,但冰崩体运动速度要小于53号冰崩体,所以冰崩体最终未到达湖泊。其冰崩体面积也小于53号冰崩体,两者相差 $2.92\text{ km}^2$ ,但是其估算的冰崩体积大于53号冰崩体 $15\times 10^6\text{ m}^3$ ,表明该冰崩体厚度远大于53号冰崩体,使得崩塌体后部至今仍有未消融的冰体。



图3 2022年2月16日阿汝错冰崩区现场调查照片

Fig.3 Field investigation photos taken on February 16, 2022 in glacier avalanche sites

### 3.1.3 原因分析

冰崩是指冰川突然崩解而垮塌的现象<sup>[2]</sup>。西藏冰川作为青藏高原和亚洲高山区冰川的主要组成部分,历史上冰崩灾害事件时有发生。例如,1940年亚东上康布地区的冰川突然滑动,1954年年楚河上游桑旺错后方冰川的滑动,造成了400多人死亡,卡若拉川曾先后于1963年7月、1975年9月和1978年8月都发生过冰崩,巨大冰块下滑到公路路面上,1950年8月藏东南南迦巴瓦峰则隆弄冰川因地震引

发巨大冰崩,一度造成雅鲁藏布江断流<sup>[33]</sup>。这些冰崩都曾引起冰川洪水、泥石流、公路和河流堵塞等,造成很大的生命和财产损失,但是这些冰川的冰舌所在地形部位很陡,几乎是在悬冰舌的情况下发生了灾难性的冰川崩塌和滑动。相反,阿汝错冰崩是一起历史罕见的低角度山地冰川的大规模冰崩灾害事件,冰崩体积合计达 $151\times 10^6\text{ m}^3$ 。之前,2002年报道的体积为 $130\times 10^6\text{ m}^3$ 的高加索山脉Kolka冰崩被认为是全球唯一的大量冰崩流动和跃动相伴

的灾难性冰川崩塌事件<sup>[34]</sup>。无论是低角度山地冰川还是悬冰川,冰川崩塌一般都发生在盛夏高温多雨时期。

2016年在阿汝错流域发生的两次冰崩灾害性事件迅速成为国内外焦点,国际上许多知名科学家纷纷研究此次冰崩发生的原因<sup>[5,30]</sup>。冰崩是冰川不稳定的表现,主要发生因素包括气候、地形、冰体热力状况、基岩不稳定性及地震活动等<sup>[4]</sup>。近年来,全球气候变暖逐渐被发现可能是引发冰崩灾害的主要深层次原因<sup>[4-5]</sup>。Kääb等<sup>[30]</sup>通过卫星遥感、数值模拟和野外调查对阿汝错冰崩事件的起因进行了系统研究,结果表明阿汝错两次冰崩事件不存在单一的触发因子,是多种因素综合作用的结果,是气候、天气驱动的外力强迫作用在特定的多温和软性基岩的冰川特性上引起的,是一起历史罕见的低角度冰川的巨大灾难性不稳定事件<sup>[30]</sup>。

### 3.2 色东普沟冰崩—岩崩监测

色东普沟位于西藏米林县雅鲁藏布江下游左岸加拉白垒峰下方,属于念青唐古拉山脉东延高山峡谷区。流域面积67 km<sup>2</sup>,近南北向发育,上游地形宽阔陡峭,冰川发育,中下游地形狭窄,呈阶梯状“V”字型。流域最高点为加拉白垒峰,海拔高度7 294 m,最低点为沟口与雅鲁藏布江交汇处,海拔2 746 m,高差4 548 m<sup>[7,35]</sup>。色东普沟主沟长约7.6 km,入江处沟口宽度230 m。

色东普沟地处藏东南高山峡谷地带,由于受气温、强降水、地震以及特殊地形地貌条件的综合影响,该流域地质灾害频发,历史上发生过多起高位地质灾害,多次造成雅鲁藏布江堵江事件。Sentinel-2自发射以来记录了色东普沟冰崩—岩崩—碎屑流—堰塞湖—溃决洪水灾害链的发生发展过程。

色东普沟及其周边第一张晴空 Sentinel-2 卫星图像接收日期是2015年12月6日(图4(a))。该卫星图像上显示,色东普沟内除了主沟、冰川下部冰碛物及冰雪覆盖区之外的堆积体上都长有植被,主沟中部阶地的高地上也长有植被,水流从高地两旁通过。这些地表特征足以说明,色东普沟在过去较长一段时间内相对稳定,未发生过大的碎屑流事件。由于历史上曾发生过碎屑流堵塞河道事件,江内一直有堵江残留体造成的江心滩,其长约1.7 km,宽439 m,面积 $39.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。此处河道宽646 m,68.0%的河道处于堵塞状态,江水两侧过流,以左侧河道为主。已有记录和卫星遥感图像解译结果表

明,1984年之前大规模堵江事件后水流从河道左侧自然漫顶过流,1984—2013年相对稳定,未发生大规模堵江事件,2014年色东普冰崩造成大规模堵江事件,最后水流仍从左侧自然漫顶过流<sup>[35]</sup>。

2016年3月5日的 Sentinel-2 图像显示,河道堆积区由于水位下降而面积稍有变大之外,河道总体形态和水流状况与2015年12月6日基本一致(图5(a))。2016年5月24日,河道总体形态、江心滩面积和水流状况等与2015年12月6日基本一致,见图4(b)。可见,2015—2016年色东普沟较稳定,未出现大规模碎屑流和堵江情况。

2017年11月5日的 Sentinel-2 图像显示,原有的江心滩基本被淹没,露出两处小块江心滩,合计面积仅 $3.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,同时在沟口出现了 $5.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的冲积扇,表明之前沟内出现了大规模碎屑流事件(图5(b))。据文献记录,2017年10月22日色东普沟口出现堵江,崩滑冲击过程曾引起强烈地面震动,水位上涨约30 m后坝体自然溃决。此次堵江很可能是由加拉白垒峰西侧冰川整体断裂后形成的,是一起冰崩—岩崩—碎屑流造成的冰崩—堵溃链式灾害<sup>[35-36]</sup>。

2017年12月30日的 Sentinel-2 卫星图像显示,沟口出现了 $56.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的大型冲积扇,水流从原来的河道左侧改为右侧通过(图4(c))。说明在此之前色东普沟发生过大规模碎屑流事件。根据文献,2017年12月21日色东普沟发生冰崩事件,导致冰崩—岩崩—碎屑物再次堵塞雅鲁藏布江形成堰塞湖,堵江72 h后堰塞体自然溃决,河流从河道右侧通过。对比事件前后 Sentinel-2 遥感影像显示,冰崩是触发此次滑坡事件的主要因素,也是一起典型的冰崩—堵溃链式灾害。此次冰崩与2017年11月18日的林芝6.5级地震密切相关。该地震对流域造成严重扰动,破坏了冰川、冰碛物和沟谷堆积物的完整性和稳定性,变得更加松散,为之后的冰崩—碎屑流事件提供了环境条件和丰富的物质基础<sup>[36]</sup>。

2018年夏季6月8日的 Sentinel-2 图像更为直观地显示了2017年底多次冰崩碎屑流和两次堵江事件之后色东普流域全景及沟口堵塞处的清晰情景(图4(d))。可以看出,从冰雪覆盖下端到沟口段整个沟道被冰崩—岩崩—碎屑流刮铲、深切和水流侵蚀痕迹清晰,原有沟内堆积体上的植被全部消失,成为裸露的地表,沟道两侧被碎屑流刮铲后裸



露地表明显增大。相比2017年底,沟口冲积扇面积减少至 $43.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,右侧河道明显加宽,水流更为畅通。

2018年10月17日色东普沟发生高位冰崩—岩崩—碎屑流,崩滑体冲出沟口并堵塞雅鲁藏布江,形成堰塞湖,历时56 h后堰塞坝体溃决,水流通过堰塞湖右岸自然漫顶过流。针对此次冰崩—碎屑流发生过程的研究表明,色东普沟后部加拉白垒峰西北偏西侧海拔6 000 m左右近山顶部位发生冰崩岩崩,在重力作用下沿陡峻斜坡向南南西崩滑,断裂解体后迅速滑塌铲刮沟道并裹挟碎屑物转向南南东冲击,沿途再次解体,快速奔流,铲刮沟底和两侧,最终冲出沟口堵塞雅鲁藏布江,形成堰塞湖<sup>[35]</sup>。冰崩岩崩最高点至沟口总长10.2 km。10月29日色东普沟再次发生冰崩—碎屑流—泥石流,冲出沟口,堆积在已有堰塞体之上,导致再次堵塞雅鲁藏

布江,24 h后江水自然过顶漫流<sup>[7,36]</sup>。针对灾害发生区域山高谷深,人烟稀少,交通困难的实际,提出了适应自然、全面避让和适当疏导的防灾减灾对策<sup>[35]</sup>。两次冰崩—碎屑流—堰塞湖—溃决洪水灾害链造成20多个村庄被淹,近6 000人受灾。2018年10月31日获取的Sentinel-2卫星图像很好地记录了此次大规模冰崩碎屑流事件。原有的沟口冲积扇被新的碎屑物覆盖后雅鲁藏布江被完全堵塞,沟口冲积扇总面积达 $72.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,堰塞湖水位上涨后沟口水域面积明显加大,流域后部中间高位山沟右侧南南西向的冰川岩石崩滑区极为明显(图4(e))。

2018年11月30日的Sentinel-2卫星图像显示了雅鲁藏布江堰塞湖自然溃决1个月之后的色东普沟沟口情景(图4(f))。河流水位显著下降后水流两侧漏出大面积冲积扇,面积达 $95.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,河流从

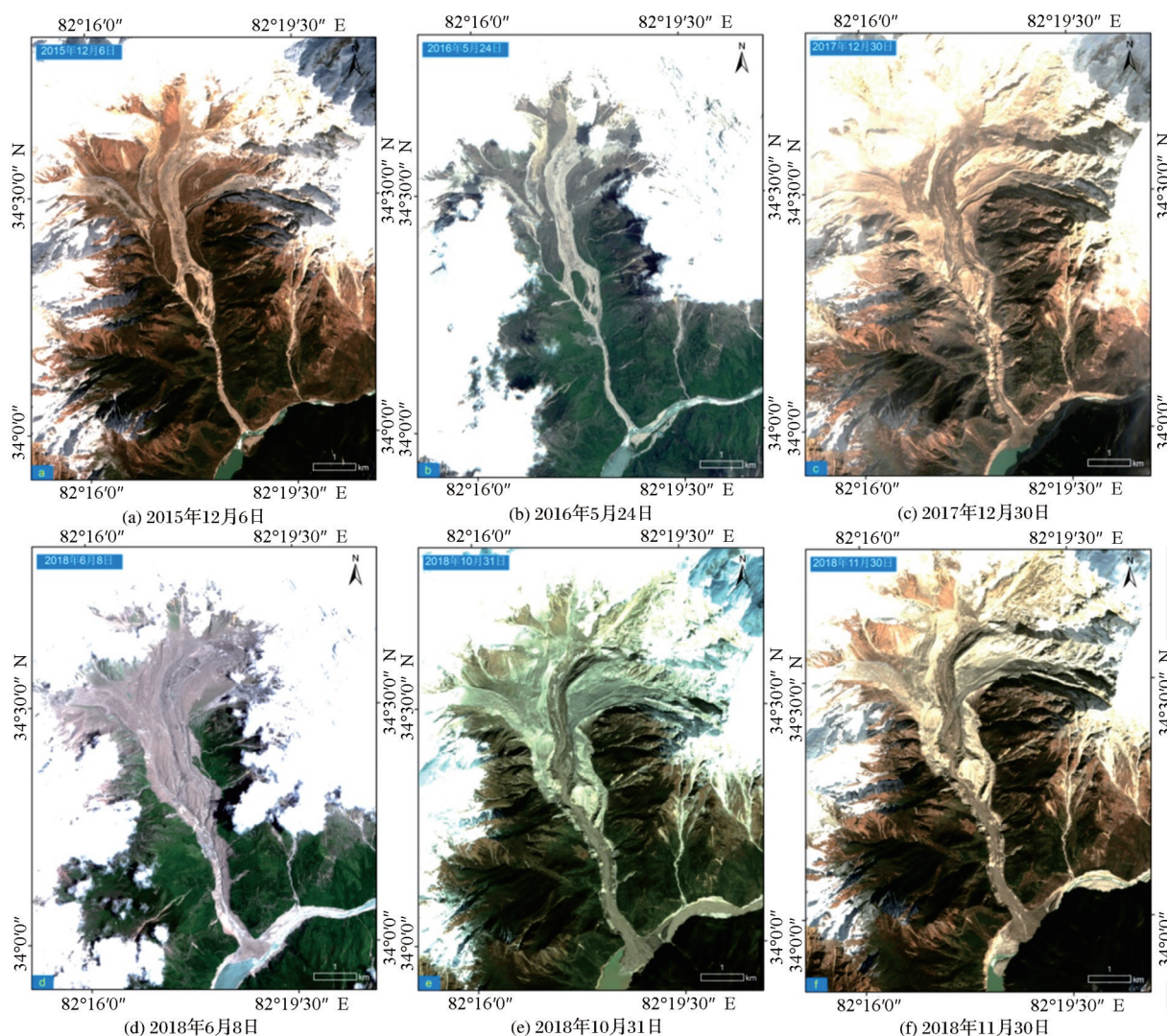


图4 色东普沟冰崩—碎屑流 Sentinel-2 卫星遥感影像图

Fig.4 Sentinel-2 images of ice and rock avalanches in Sedongpu basin



沟口大型冲积扇右侧通过。河道处于严重堵塞状态,最窄处河道宽不到50 m。

2015年12月6日和2018年6月8日两张遥感影像(图4(a)和图4(d))对比可以发现,图4(d)上色东普沟中后段堆积体上的植被几乎全部消失,沟道下段两侧山体被刮铲的面积明显增大,沟口出现了大面积的冲积扇,2015年沟口对岸残留的洪积扇全部淹没消失,水流从原来的左侧改道为右侧。2018年10月17日和29日的两次大规模冰崩—岩崩—碎屑流使得沟内刮铲侵蚀下切程度和沟口堆积体面积进一步增大,沟口的堵塞程度进一步加剧,水流宽度进一步收窄。

2017年和2018年4次冰崩—碎屑流事件不仅对流域造成了重大灾害,对色东普沟沟口水流状况和地貌形态产生了重大影响。特别是2017年11月18日林芝6.5级地震之后发生的2017年12月21日冰崩—碎屑流对流域影响最大,沟口大量堆积体导致雅鲁藏布江水流长期从河道左侧改道从右侧流过,河道处于严重堵塞状态,最窄处不到50 m。

色东普沟冰川属于海洋型冰川,冰川物质累积和消融比大陆型冰川更为剧烈,气候变暖引起冰雪消融,在局地强降水和地震等因素作用在色东普沟有利地形地貌条件下,经常引发冰崩及相关灾害链<sup>[37]</sup>。同时,色东普沟属于藏东南高山高寒地区,日夜温差大,沟谷后部冰雪所在高山冻融作用强烈,碎裂松动岩体分布较广,沟内时常发生岩崩<sup>[38]</sup>。

特别是,色东普沟特殊地形地貌下的“漏斗效应”放大了冰川融化和集中降雨对松散堆积体的影响,加剧了沟内滑坡的孕育、形成及后期演化<sup>[39]</sup>。因此,在气温上升、强降水、地形地貌和地震等因素的综合作用下,色东普沟冰崩灾害呈多发频发态势,且具有一定的周期性,今后很长的时间内仍会多次发生<sup>[40]</sup>。

除了此次发生在喜马拉雅东段的冰崩—岩崩—碎屑流灾害事件之外,2021年2月7日,喜马拉雅西段查莫里地区发生了特大规模岩崩—冰崩—泥石流事件,导致超过200人死亡或失踪和两座水电站被毁的重大灾害链事件<sup>[1]</sup>。在喜马拉雅东西两侧的危害事件中,高山冰雪和山体岩石的高位崩塌是灾害触发的直接原因。喜马拉雅西段南坡下游人口密集、水电开发集中,灾害链末端造成的损失更为严重<sup>[41-46]</sup>。色东普沟相较于查莫里流域不存在水电站等大型基础设施,加之人类居住和活动有限,造成的灾害损失有限。然而,喜马拉雅流域高位崩塌造成的重大灾害链事件凸显了高寒山区冰冻圈灾害监测预警和可持续发展理念的极端重要性。

#### 4 主要结论与建议

本研究利用 Sentinel-2 卫星遥感数据重现了西藏阿里和林芝的冰崩灾害发生全过程,展现了其在青藏高原冰冻圈灾害监测领域的应用情况和前景。得出的主要结论和建议如下:

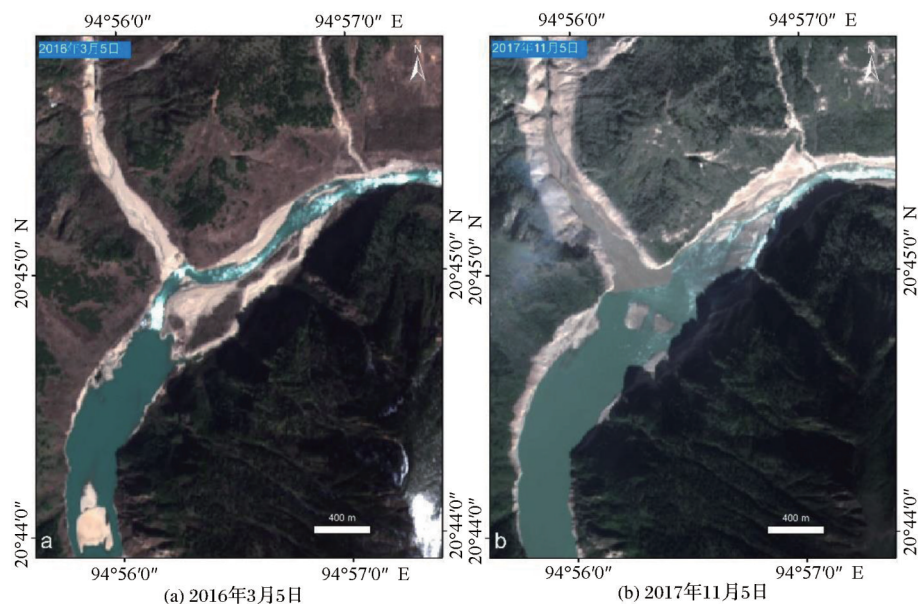


图5 色东普沟口 Sentinel-2 卫星遥感影像图

Fig.5 Sentinel-2 images of Sedongpu basin outlet

(1) 阿汝错 53 号冰崩是在山体斜坡上的冰川在重力作用下冰川前部断裂解体后发生了冰崩,而且随着冰川物质的累积和发育,今后仍有可能再次发生;阿汝错 50 号冰崩则是一起典型的冰川前部垮塌产生的冰崩。

(2) Sentinel-2 监测显示,阿汝错 53 号冰崩体最终于 2018 年 7 月全部消融,从崩塌至最后消融先后持续了 2 a 的时间,而 50 号冰崩体厚度远大于 53 号冰崩体,消融速度缓慢,2021 年 6 月 22 日仍有 0.58 km<sup>2</sup> 的冰崩残留体。2017 年和 2018 年色东普沟大规模冰崩—岩崩—碎屑流事件不仅对色东普沟地貌地表景观和河口水流状况产生了重要影响,对上下游流域造成了重大灾害。

(3) 在全球变暖持续和青藏高原环境总体变暖变湿的大背景下,高原冰冻圈灾害趋于活跃,及时监测和掌握这些灾害发生和变化特点是防灾减灾的第一步。喜马拉雅流域东西两次高位崩塌造成的重大灾害链事件凸显了山区灾害监测和可持续发展理念的重要性。因此,建议系统开展青藏高原和喜马拉雅高山区灾害风险调查,加强遥感和地面监测,逐步建立监测预警体系。未来,藏东南念青唐古拉山及其东延高山和喜马拉雅山区仍是青藏高原冰崩、雪崩和冰湖溃决等冰冻圈灾害发生的重点区域,应给予高度关注,进一步加强监测调查研究和预警预测,降低灾害风险,提高山区可持续发展能力。

(4) 目前国产 GF-1 等高分系列高分辨率卫星遥感传感器波段数较少,基本上是红绿蓝和近红外 4 波段加上全色波段,使得在地表植被参数和积雪等冰冻圈要素的定量遥感监测中的应用受到了限制。所以,建议未来国产高分辨率卫星遥感传感器中除了增加短波红外波段,收窄近红外波段宽度外,还需要增加气溶胶、水汽吸收和卷云检测等波段,从而用传感器自身波段观测值直接进行大气校正,进而更好地应用于地表植被和积雪等陆地生态系统参数的量化遥感监测和反演。

(5) 在全球环境和灾害监测以及应急响应中除了目前可免费获取的 Sentinel-2 高分辨率卫星遥感数据之外,利用商业卫星提供的遥感数据也是重要的选项。其中,美国 Planet 公司拥有全世界最大的遥感卫星群,为用户提供快速更新的、定制化的高分辨率商用卫星影像。公司提出“利用空间帮助地球生命”的口号,其使命是“通过每日对地球所有陆

地进行成像,使全球变化可见、可达和可行动”。Planet 公司在世界上首次研发成功微卫星群技术,已拥有 200 多颗卫星,是世界上唯一具有全球高分辨率、高频次、全覆盖能力的遥感卫星系统。它们组成卫星群,保证在世界任何陆地区域每天获取 3—5 m 分辨率的影像,实现每天监测全球一次,对灾害监测和评估、应急救援管理等具有不可比拟的优势。

#### 参考文献 (References):

- [1] Shugar D H, Jacquemart M, Shean D, *et al.* A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya [J]. *Science*, 2021, 373 (6552): 300–306. DOI: 10.1126/science.abh4455.
- [2] Yao Tandong, Yu Wusheng, Wu Guangjian, *et al.* Glacier anomalies and relevant disaster risks on the Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64 (27): 2770–2782. [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.]
- [3] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers [J]. *Science*, 2010, 328: 1382–1385. DOI: 10.1126/science.1183188.
- [4] Wu Guangjian, Yao Tandong, Wang Weicai, *et al.* Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34 (11): 1285–1292. [邬光剑, 姚檀栋, 王伟才, 等. 青藏高原及周边地区的冰川灾害 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34 (11): 1285–1292.]
- [5] Hu Wentao, Yao Tandong, Yu Wusheng, *et al.* Advances in the study of glacier avalanches in High Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40 (6): 1141–1152. [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.]
- [6] Wang Shijin, Xiao Cunde. Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64 (9): 891–901. [王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势 [J]. *科学通报*, 2019, 64 (9): 891–901.]
- [7] Li Zhuang, Li Bin, Gao Yang, *et al.* Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32 (3): 33–41. [李壮, 李滨, 高杨, 等. 雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感译解 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32 (3): 33–41.]
- [8] Chai Bo, Tao Yangyang, Du Juan, *et al.* Hazard assessment



- of debris flow triggered by outburst of Jialong glacial lake in Nyalam County, Tibet [J]. *Earth Science*, 2020, 45 (12): 4630-4639.[柴波,陶阳阳,杜娟,等.西藏聂拉木县嘉龙湖冰湖溃决型泥石流危险性评价[J].*地球科学*,2020,45(12):4630-4639.]
- [9] Tang Minggao, Wang Lina, Wang Xinxin, *et al.* Distribution and risk of ice avalanche hazards in Tibetan Plateau [J]. *Earth Science*, 2022, 47(12): 4647-4662.[汤明高,王李娜,刘昕昕,等.青藏高原冰崩隐患发育分布规律及危险性[J].*地球科学*,2022,47(12):4647-4662.]
- [10] Huggel C, Zraggen-Oswald S, Haeblerli W, *et al.* The 2002 rock/ice avalanche at Kolka /Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2005, 5(2): 173-187. DOI: 10.5194/nhess-5-173-2005.
- [11] Kääb A, Wessels R, Haeblerli W, *et al.* Rapid imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2003, 84(13): 117-124. DOI:10.1029/2003EO130001.
- [12] Pandey P. Inventory of rock glaciers in Himachal Himalaya, India using high-resolution Google Earth imagery [J]. *Geomorphology*, 2019, 340: 103-115. DOI: 10.1016/j. geomorph. 2019.05.001.
- [13] Li Zhijie, Wang Ninglian, Hou Shanshan. Monitoring recent surging of the North Kyzkurgan Glacier in central Pamir by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(5): 1267-1276.[李志杰,王宁练,侯姗姗.帕米尔中部 North Kyzkurgan 冰川跃动变化遥感监测[J].*冰川冻土*, 2021, 43(5): 1267-1276.]
- [14] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, *et al.* Monitoring recent surging of the Yulinchuan glacier on north slopes of Muztag range by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 765-774.[郭万钦,刘时银,许君利,等.木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测[J].*冰川冻土*, 2012, 34(4): 765-774.]
- [15] Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, *et al.* Monitoring recent surging of the Karayaylak Glacier in Pamir by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 11-20.[张震,刘时银,魏俊锋,等.新疆帕米尔跃动冰川遥感监测研究[J].*冰川冻土*, 2016, 38(1): 11-20.]
- [16] Kääb A. Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and ASTER data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, 2002, 57(1): 39-52. DOI: org/10.1016/S0924-2716(02)00114-4.
- [17] Zhong Hanxiao, Bian Jinhu, Li Ainong. Radiometric consistency between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI imagery in mountainous terrain [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(3): 428-438.[钟函笑,边金虎,李爱农. Landsat-8 OLI 与 Sentinel-2 MSI 山区遥感影像辐射一致性研究[J].*遥感技术与应用*, 2018, 33(3): 428-438.]
- [18] Aschbacher J, Milagro-Pérez M P. The European Earth monitoring (GMES) programme: Status and perspectives [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 3-8. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.028.
- [19] Baetens L, Desjardins C, Hagolle O. Validation of Copernicus Sentinel-2 cloud masks obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask processors using reference cloud masks generated with a supervised active learning procedure [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 433. DOI: 10.3390/rs11040433.
- [20] Drusch M, Del Bello U, Carlier S, *et al.* Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 25-36. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.
- [21] Richter R, Louis J, Berthelot B. Sentinel-2 MSI - Level 2A Products Algorithm Theoretical Basis Document [R]. VEGA Space GmbH, 2011, Issue 1.8.
- [22] Berger M, Moreno J, Johannessen J A, *et al.* ESA's sentinel missions in support of earth system science [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 84-90. DOI: 10.1016/j. rse. 2011.07.023.
- [23] Hagolle O, Huc M, Pascual D V, *et al.* A multi-temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT-2, VENUS, Landsat and Sentinel-2 images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1747-1755. DOI: 10.1016/j. rse.2010.03.002.
- [24] Zhu Z, Wang S, Woodcock C E. Improvement and expansion of the FMask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 269-277. DOI: 10.1016/j. rse.2014.12.014.
- [25] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Theoretical Basic Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms [R], 2001, NASA.
- [26] Cao Yungang, Liu Chuang. The development of snow-cover mapping from AVHRR to MODIS [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(5): 15-19.[曹云刚,刘闯.从 AVHRR 到 MODIS 的雪盖制图研究进展[J].*地理与地理信息科学*, 2005, 21(5): 15-19.]

- [27] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54 (2) : 127-140. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P.
- [28] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, *et al.* MODIS snow-cover products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83 (1-2) : 181-194. DOI: 10.1016/S0034-4257 (02) 00095-0.
- [29] Tian L, Yao T, Gao Y, *et al.* Two glaciers collapse in western Tibet[J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63, 237: 194-197. DOI:10.1017/jog.2016.122.
- [30] Kääb 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: 114-120. DOI: 10.1038/s41561-017-0039-7.
- [31] Yang Dandan, Yao Tandong, Wu Guangjian, *et al.* Study of air temperature variations during the past 100 years in the Aru ice core, western Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(1) : 124-134. [杨丹丹, 姚檀栋, 邬光剑, 等. 青藏高原西部阿汝冰芯记录的近 100 a 气温变化研究[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(1): 124-134.]
- [32] Lei Y, Yao T, Tian L, *et al.* Response of downstream lakes to Aru glacier collapses on the western Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15: 199-214. DOI: 10.5194/tc-15-199-2021.
- [33] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, *et al.* *Glaciers in Tibet* [M]. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. *西藏冰川* [M]. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [34] Kääb A, Jacquemart M, Gilbert A, *et al.* Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers—more frequent than thought? *The Cryosphere*, 2021, 15: 1751-1785. DOI:10.5194/tc-15-1751-2021.
- [35] Liu Chuanzheng, Lü Jietang, Tong Liqiang, *et al.* Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu basin along Yarlung Zangbo River in Tibet[J]. *Geology in China*, 2019, 46(2) : 219-234. [刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究[J]. *中国地质*, 2019, 46(2): 219-234.]
- [36] Tong Liqiang, Tu Jienan, Pei Lixin, *et al.* Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1552-1561. [童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6): 1552-1561.]
- [37] Wang W, Yang J, Wang Y, Dynamic processes of 2018 Sedongpu landslide in Namcha Barwa-Gyala Peri massif revealed by broadband seismic records [J]. *Landslides*, 2020, 17: 409-418. DOI:10.1007/s10346-019-01315-3.
- [38] Chen C, Zhang L, Xiao T, *et al.* Barrier lake bursting and flood routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124603. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124603.
- [39] Zhao Yonghui. Study on the barrier lake event for landslide-river blocking of Sedongpu valley on Yarlung Zangbo River in Tibet of China[J]. *Journal of Hebei Geo University*, 2020, 43(3): 31-37. [赵永辉. 中国西藏雅鲁藏布江色东普沟滑坡-堵江堰塞湖事件研究[J]. *河北地质大学学报*, 2020, 43(3): 31-37.]
- [40] Zhao C, Yang W, Westoby M, *et al.* An approximately 50 Mm<sup>3</sup> ice-rock avalanche on 22 March 2021 in the Sedongpu valley, southeastern Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2022, 16: 1333-1340. DOI:10.5194/tc-16-1333-2022.
- [41] Nie Y, Pritchard H D, Liu Q, *et al.* Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2: 91-106. DOI: 10.1038/s43017-020-00124-w.
- [42] Delaney K B, Evans, S G, The 2000 Yigong landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: review, remote sensing analysis, and process modelling [J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 377-393. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.06.020.
- [43] Armstrong R L, Rittger K, Brodzik M J. *et al.* Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: Separating melt water sources in river flow [J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19: 1249-1261. DOI: 10.1007/s10113-018-1429-0.
- [44] Muhammad S, Tian L. Changes in the ablation zones of glaciers in the western Himalaya and the Karakoram between 1972 and 2015[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 505-512. DOI:10.1016/j.rse.2016.10.034.
- [45] Kraaijenbrink P D A, Stigter E E, Yao T, *et al.* Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply [J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11: 591-597. DOI: 10.1038/s41558-021-01074-x.
- [46] Liu J, Wu Y, Gao X. Increase in occurrence of large glacier-related landslides in the high mountains of Asia [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 1635. DOI:10.1038/s41598-021-81212-9.



## Monitoring Glacier Avalanches in Tibet Using Sentinel-2 Imagery

Chu Duo<sup>1,2</sup>, Caiwang Dunzhu<sup>3</sup>, Lawang Dunzhu<sup>4</sup>, Suolang Tajie<sup>1,2</sup>,  
Pingcuo Sangdan<sup>1,2</sup>, Duoji Zhaxi<sup>4</sup>, Mingma Ciren<sup>3</sup>, Ping Cuo<sup>3</sup>

(1. *Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China;*

2. *Tibet Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment Research, Lhasa 850000, China;*

3. *Gaize Meteorological Bureau, Gaize 859200, China;*

4. *Rutog Meteorological Bureau, Rutog 859700, China)*

**Abstract** Sentinel-2 is a high-resolution optical Earth observation mission within the GMES (Global Monitoring for Environment and Security) programme, which is renamed Copernicus in 2012, jointly implemented by the EC (European Commission) and ESA (European Space Agency) for global land observation with high revisit capability to provide enhanced continuity of data so far provided by SPOT and Landsat. Copernicus is the most ambitious Earth Observation programme to date. It provides accurate, timely and easily accessible information to improve the management of the environment, understand and mitigate the effects of climate change and ensure civil security. At present, Sentinel-2 is one of the most important data source for remote sensing monitoring and application research, and has been widely used in monitoring natural disasters such as floods, forest fires, landslides, volcanic eruptions, and emergency response and humanitarian crises around the globe, and there are also great potentials in detecting glacier and ice and supporting relief efforts for cryospheric disaster.

In this study, the glacier and ice avalanches occurred in Arutso Lake basin in northwestern Tibet and Sedongpu basin in southeastern Tibet in 2016 and 2018 were investigated using Sentinel-2 images and field surveys, and the evolution process of two events were reproduced, which has important reference significance for monitoring cryospheric hazard, emergency relief and management in other mountain regions on the world. Study shows that Arutso No. 53 glacier avalanche completely melted away in July 2018 after lasting for two years from occurrence to final disappearance, while the area of Arutso No. 50 glacier avalanche is 0.58 km<sup>2</sup> left on June 22, 2021 because of more thickness compared to Arutso glacier No. 53. Four large-scale ice-rock avalanche and debris flow events in the Sedongpu basin in 2017 and 2018 not only had significant impacts on the river flow, landscape and landform in the basin, but also caused great disasters in the basin and downstream.

Two glacier and ice avalanche events were caused by climate warming and local heavy precipitation, acting on specific topographic and geomorphic structure of glacier properties in high mountains. Specifically, Arutso glacier avalanche was caused by climate- and weather-driven external forcing, acting on specific polythermal and soft-bed glacier properties and is an unprecedented large catastrophic instability of low angle mountain glaciers. Glacier and snow melting caused by climate warming and heavy rainfall are main triggering factors for ice and rock avalanche in the Sedongpu basin, which is a typical hazard cascades originating from cryosphere, followed by rock fall, debris flow, dammed lake, and lake outburst flood disaster. It often occurs in the Sedongpu basin and will continue to occur for a long time in the future, and the high mountain ridge covered with ice and snow in the right side of back of the basin is still a high-risk area for ice and rock avalanches in the future.

**Key words:** Glacier avalanche; Cryospheric hazard; Sentinel-2; Field survey; Tibet