阿尼玛卿山多次冰川滑塌链式灾害过程梳理与展望*

王忠彦[1)] 张太刚[1,2)] 王伟财[1)†]

(1)中国科学院青藏高原研究所,100101,北京; 2)兰州大学资源环境学院,730000,甘肃 兰州)

摘要 冰川滑塌是近年来涌现的一种新形式冰川灾害. 21 世纪以来,青藏高原地区发生 10 多起冰川滑塌事件,其中高原东北部阿尼玛卿山晓玛沟冰川分别在 2004、2007、2016 和 2019 年连续发生 4 次. 利用多序列遥感影像和现有资料的整合统计对近 35 年来晓玛沟冰川形态、流速特征等进行分析,厘清了 4 次冰川滑塌事件发生的诱因以及潜在的隐患点. 结果表明,4 次冰川滑塌发生前期的冰川跃动或末端前进、冰川后缘冰-岩崩、异常高温降水、易于滑动产生的基岩性质等与冰川滑塌事件的发生密切相关. 观察到冰川后缘陡坡区在 2000—2011 年间发生 4 次规模较大的冰-岩崩,为多次冰川滑塌的发生提供了物质和动力基础. 未来几年内再次发生冰川滑塌的可能性极大. 2019 年冰川滑塌发生后,晓玛沟冰川再次向前滑动;近年来,冰川后缘新发育的不稳定斜坡冰裂隙发育明显增多;斜坡冰流速的变化与下部冰川稳定性之间存在内在联系,在冰川滑塌发生的相关年份斜坡冰流速明显较快. 根据对阿尼玛卿山 4 次冰川滑塌诱因的分析以及新隐患点的判定,提出结合遥感影像和临近气象站点资料的便易手段,加强对晓玛沟内冰川形态和运动特征等的监测,以及时关注和预测未来灾害的发生.

关键词 冰崩;冰川滑塌;链式灾害;堰塞湖;冰川流速;阿尼玛卿山

中图分类号 P343.6;X43 **DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2022056

0 引言

近年来随着全球变暖和冰川退缩,高山区环境不稳定性明显增加[1-3]. 在青藏高原,冰崩、冰湖溃决洪水、滑坡等极端灾害事件频发[4-8],不断地威胁着区域居民的生命财产安全和基础设施的稳定运行[9-12]. 冰体从冰川上的脱离视发生方式、物质组成、脱离体积、冰川属性等一些特征,可以被划分为冰崩(ice avalanche)、冰-岩崩(ice-rock avalanche)以及冰川滑塌(glacier collapse or glacier detachment)[13-15]. 广义的冰崩囊括了以上这 3 种类型,而狭义的冰崩是指其物质组成以冰为主体,主要发生于悬冰川陡峭冰舌的末端,有滑移式和崩落式 2 种脱离方式[16-19]. 本文提到的冰崩所指的是狭义的冰崩. 冰-岩崩可以发生在陡峭的山谷冰川后缘陡坡上[13, 20-22],也可以在悬冰川上[15, 23],冰体常与下层基岩一同分离. 冰川滑塌是指冰川坡度较低的冰舌部分发生大规模的脱离、滑落事件,其产生的量级往往是三者中最大的. Kääb 等[14]就以脱离体积>1×10^6 m^3 和脱离区坡度< 20°来区分冰川滑塌与冰崩或冰-岩崩. 冰崩和冰-岩崩是最为常见且有较早记录的脱离方式,由于初始的势能较大,冰/岩体往往能够以极快的速度向下移动,在一些坡度大的路段也可以发生飞跃[24]. 冰川滑塌是在 2002 年高加索地区 Kolka 冰川冰舌发生大规模脱离并造成严重伤亡事件后才开始进入人们的视野[25-26],并在随后的十几年里逐渐被区分、识别和熟知[14, 27-28]. 这些冰川滑塌事件在青藏高原[29-30]、蒙古高原[31]、帕米尔高原[15],以及北美阿拉斯加[27]、南美安第斯山脉[28, 32]等地区均有被观察、记录到.

造成冰川失稳的原因多样,目前达成的共识是与长期的气候变化密切相关[33],其他的诱因有地震、地热活动、基岩性质、前期的冰川跃动、冰川自身的热力属性、冰舌几何形状、高温强降水事件等. 与常造成冰湖溃决的单一诱因不同,冰川失稳往往是多种诱因复合的结果. 2016 年阿汝 2 起冰崩事件的发生,被认定是气候变化、冰川跃动、冰舌几何形状、冰川热力状况和短期气温降水等在时空上短暂收敛所致[30]. 冰体脱离事件发生前期的高温降水或地热活动会导致融水增加,冰川内部排水系统的发挥效率影响着冰川基底摩擦的变化和冰床之间的机械耦合[34-36],当冰川的驱动应力大于基底和侧向的剪切应力时,冰川发生滑动[14, 19]. 软性或覆有松散沉积物碎屑的基岩似乎

* 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0201);国家自然科学基金资助项目(41771088)

† 通信作者:王伟财(1984—),博士,研究员. 研究方向:冰湖溃决及防灾减灾策略. E-mail: weicaiwang@itpcas.ac.cn

收稿日期:2022-03-19

是冰川滑塌发生的必要条件, 这在多起事件中均有发现[14, 27–28].

单一且直接的冰崩或冰-岩崩造成的危害受移动距离和下游居民暴露点的影响, 其致灾性往往较小. 但这些事件容易从单相的独立灾害演变为复杂的多相链式灾害. 当部分冰体脱离冰川, 在向下游快速移动的过程中可夹带路径中大量的冰雪、岩土以及水等, 形成破坏力更强的泥石流. 1962 年发生于秘鲁安第斯山脉的重大冰川泥石流灾害事件就是在这种过程下进行的, 初始的冰-岩崩体积估算为 3×10^6 m^3, 随后其在沿途 12.7 km 的路径中不断夹带、裹挟各种物质材料, 最终形成的泥石流在下游冲积扇上沉积了约 13×10^6 m^3 的物质[37]. 此次事件造成了 4 000 余人死亡[38–39]. 不幸的是, 1970 年又在同一地点发生了类似的过程, 此次更大的泥石流量级摧毁了下游的 Yungay 市, 造成约 18 000 人死亡[38]. 当这种强劲的物质流与下游主河道交汇时, 受制于自身的物质组成和与主河道的夹角关系, 会在汇口处堆积物质并阻塞河道, 形成堰塞湖. 最为典型的例子属于藏东南东色普沟的堵江事件, 2014—2021 年, 这一地区至少发生了 10 起冰崩或冰川滑塌事件, 其中有 6 次堵塞了雅鲁藏布江主河道[40–41], 上涨的河水位淹没了一些沟谷内的道路、桥梁、建筑等, 使得当地 6 000 余名村民被迫撤离[41]. 发生于 2021 年 2 月 7 日的印度 Chamoli 冰-岩崩同时进行了以上 2 个过程, 约 24.6×10^6 m^3 的冰岩体崩落后转化为泥石流, 并堵塞了河道, 造成 274 人死亡或失踪, 4 座水电站损坏, 直接经济损失约 13 亿元人民币[3, 23–24]. 当冰崩诱发冰湖溃决时, 形成的洪水会向下游传播更远, 甚至超过 100 km[42], 其致灾性往往更大. 据统计, 20 世纪以来青藏高原及周边地区因冰崩导致的冰湖溃决事件占 50% 以上[43].

在青藏高原, 冰崩、冰-岩崩以及冰川滑塌造成了许多重大破坏事件, 构成了以泥石流、堰塞湖、冰湖溃决等为主要扩展形式的链式冰川灾害[44]. 冰川滑塌与冰崩和冰-岩崩相比, 有着连续发生的重要特点, 其主要原因是发生滑塌的冰川一般规模较大, 能够及时弥补物质损失量. 在气候变暖背景下, 这一过程似乎是不可逆的[45]. 进入 21 世纪后, 在青藏高原东北部阿尼玛卿山地区同一条冰川分别在 2004、2007、2016 和 2019 年连续 4 次发生大规模滑塌事件[14, 46], 对下游的草场、道路造成严重破坏, 但目前对该事件簇的诱发因素、冰川变化与运动特征、未来再次滑塌可能等方面认知仍然不充分. 鉴于此, 本研究综合目前的科学文献、新闻报道以及前人进行的野外调查, 厘清阿尼玛卿山多次冰川滑塌事件的诱发因素及其发生过程, 根据多序列遥感影像分析 1964 年以来冰川形态特征变化, 2016 年以后剩余洁净冰川的流速变化, 探讨未来再次发生大量级冰川滑塌的可能并提出可行的建议对策. 对该代表性冰川滑塌事件簇的深入研究, 有利于增强目前对此类冰川灾害发生过程的理解, 促进我国对潜在冰川灾害点的识别、监测和防治, 服务于区域经济社会平稳发展.

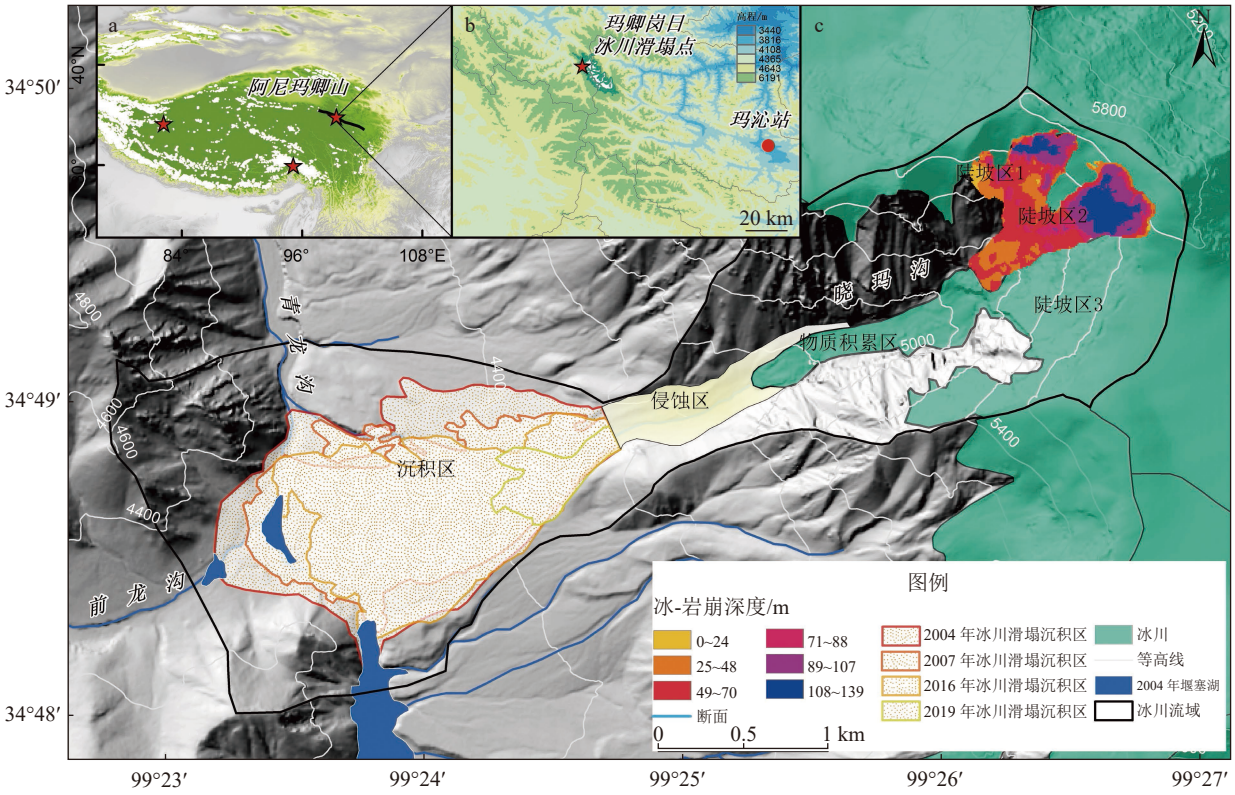
1　研究区概况

1.1　地理与气候条件　阿尼玛卿山是一条由西北到东南走向的山体, 长约 240 km, 仅其主峰玛卿岗日地区有大规模现代冰川发育(图 1-a、b). 2014 年《第二次中国冰川编目》数据显示, 玛卿岗日地区现存冰川 46 条, 总面积 102.6 km^2[47]. 区域内受到东亚夏季风与西风环流的交互影响. 距离玛卿岗日地区约 80 km 的国家气象台站——玛沁站的观测资料显示(1961—2013 年), 该地区多年平均气温为−0.2 ℃, 多年平均降水量为 514 mm, 夏季降水占全年降水的 56%~62%[48]. 近几十年来, 气温明显升高, 增温率达到 0.3 ℃·$(10\ a)^{-1}$, 但是降水无明显变化(图 2).

发生滑塌的冰川在山体西南侧的晓玛沟内, 冰川编号为 5J352E0017. 依据影响或受冰川崩解影响的区域, 将晓玛沟和下游青龙沟划分为陡坡区 1~3、物质积累区、侵蚀区和沉积区共 6 个子区域(图 1-c). 此外, 沟内还发育多条悬冰川, 为方便叙述, 后文统一将沟内冰川称为晓玛沟冰川. 根据张俊才等[46] 的现场调查, 晓玛沟内基岩以黑色的千枚状板岩和长石砂岩为主, 上覆有大量松散的冰碛碎屑物, 构成富冰多年冻土. 2004 年晓玛沟冰川第 1 次滑塌后, 对沟口侵蚀区的刨蚀深度约为 10 m, 为下游沉积区提供了丰富的物源.

1.2　多次冰川滑塌灾害链发生过程　晓玛沟分别在 2004、2007、2016 和 2019 年发生 4 起冰川滑塌事件(表 1). 先前的研究表明, 晓玛沟冰川滑塌并非单一原因导致, 前期的冰川跃动、在冰川后缘陡峭斜坡上发生的冰-岩崩、异常高温以及基岩性质等均在事件簇中发挥着重要作用[46, 49].

第 1 次冰川滑塌发生在 2004 年 1—2 月, 被当地牧民放牧时发现. 此次事件未造成人员伤亡, 但是冲出的冰岩碎屑物覆盖了 2.27 km^2 的草场, 破坏了下游的 1 条通村公路, 使得 175 户牧民通往夏秋草场的道路受阻. 最重要的是, 碎屑物在下游青龙沟内形成了长 1 530 m、宽 200 m、高 30 m 的坝体[46], 堵塞主河道长达 510 多天, 形成一个面积 0.63 km^2, 蓄水量 5.38×10^6 m^3 的堰塞湖. 该湖于 2005 年 7 月 4 日溃决, 下游 180 km 处的水文站观测到最大洪峰约 500 $m^3\cdot s^{-1}$[46].



a. 阿尼玛卿山冰川滑塌点位置；b. 最邻近国家气象台站玛沁站位置；c. 冰岩碎屑物在下游青龙沟的堆积面积变化、堰塞湖发育状况、冰川后缘冰-岩崩区深度分布(NASADEM-HMA)等.

图 1　研究区各要素分布

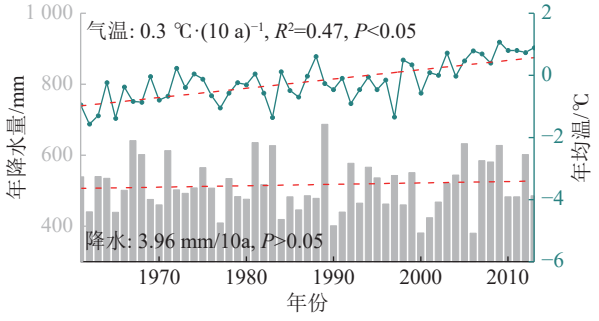


图 2　玛沁站 1961—2013 年间气温降水变化

第 2 次冰川滑塌发生于 2007 年 10 月 8 日 18:30 左右，沉积区的新碎屑物覆盖面积达到 1.54 km^2. 此次事件同样堵塞了青龙沟主河道，但是形成的堰塞湖远小于第 1 次滑塌事件，因此危害较小. 碎屑流破坏了下游新修的 3 km 公路和 2 座涵洞，受影响的牧民达 732 人，直接经济损失 14 万元.

第 3 次冰川滑塌发生在 2016 年 10 月 6 日，此次冰岩碎屑物覆盖面积达 1.43 km^2，产生的破坏与第 2 次事件相似. 第 4 次冰川滑塌发生在 2019 年 7 月，此次事件量级最小，对下游道路等未造成破坏.

2　数据与方法

2.1　冰川变化特征提取　本研究主要使用不同时间序列的卫星遥感影像(表 2)，对晓玛沟内各时期冰川面积、末端变化等信息进行人工提取. 所用到的数据集有 Corona KH-4A(2.7 m)、Landsat 系列(30 m)、ASTER (15 m)和 Sentinel-2A/B 影像(10 m). 此外，还从美国地质调查局网站(USGS)获取了 2005 年的高分辨率 Orbview-3 影像(1 m)，以分析较早时期晓玛沟内其他冰-岩崩事件和冰川发育形态特征等信息.

多源的不同采集时段的数字高程模型(DEM)将被应用到冰崩体积估算中. HMA(8 m)和 PALSAR (12.5 m)2 款 DEM 由 NASA Earth Data 网站提供，采集时间分别是 2015 和 2007 年 8 月. HMA 是由来自 DigitalGlobe 卫星的高分辨率立体图像生成的青藏高原冰川和降雪区的 DEM[50]. 相较于常用的 SRTM (30/90 m)、TanDEM-X(90 m)和 ASTER GDEM(30 m)等数字高程模型，其对地表形态特征的表现更为详细. 这 2 款产品是目前为数不多能够免费获得且具有较高分辨率和精度的 DEM [51]. 此外，还引入了 NASADEM(30 m)，以期望获得 2000 年冰崩发生前晓玛沟内冰川高程信息. 该产品由原始 STRM 信号重新计算得到，Chen 等[52] 进行的评估工作指出 NASADEM 在青藏高原冰川区的表现是中等分辨率 DEM 产品中最好的. 我们提取了这 3 款不同 DEM 在晓玛—青龙

表 1　晓玛沟和青龙沟发生的冰川滑塌和堰塞湖溃决灾害事件统计

序号	事件	时间	区域	脱离区面积/km^2	脱离区平均坡度/(°)	脱离体积/10^6 m^3	描述	诱因	来源
1	冰川滑塌	2004-01-26—02-10	积累区	0.207	22	21.5	碎屑物在沉积区堆积平均厚度约10 m, 破坏了下游大量的草场. 形成堰塞湖	冰川跃动, 冰-岩崩, 降水, 基岩性质	本研究, [46]
2	冰川滑塌	2007-10-08	积累区	0.139	16	6.54	碎屑物在沉积区堆积平均厚度约6 m. 对下游的道路、涵洞造成破坏. 形成堰塞湖	冰川跃动, 冰-岩崩, 高温降水, 基岩性质	本研究, [46]
3	冰川滑塌	2016-10-06	积累区	0.085	23	4.25	碎屑物在沉积区堆积平均厚度约5 m. 形成堰塞湖	冰川跃动, 冰-岩崩, 高温(可能), 基岩性质	本研究, [46]
4	冰川滑塌	2019-07-09—07-14	积累区	0.028	13	1.12	量级小, 形成的碎屑流未对下方道路造成破坏	冰川跃动, 冰-岩崩, 降水(可能), 基岩性质	本研究, [14]
5	堰塞湖溃决	2005-07-04	青龙沟	0.631		5.38	青龙沟主河道发育得最大的堰塞湖溃决, 发生过程缓慢, 7月5日溃决洪峰达到最大	坝体中的冰融化, 水压力增大	本研究, [46]

表 2　选取的可用遥感影像和数字高程模型

序号	影像名称	采集时间	精度/m	应用
1	KH-4A	1964-12-30	2.7	冰川边界提取
2	Orbview-3	2005-06-21	1.0	冰崩信息提取
3	Landsat4/5 TM	1986-10-31、1987-08-15、1988-02-07、1989-09-21、1990-06-20、1990-07-06、1991-09-11、1992-06-09、1993-08-31、1994-05-14、1994-11-06、1995-07-20、1997-08-10、1998-07-12、1999-07-31、2000-04-28、2001-07-04、2004-09-14、2006-09-20、2007-05-02、2007-09-23、2008-03-17、2009-08-11、2010-08-14、	30.0	冰川边界提取
4	Landsat7 ETM+	2002-08-16、2003-05-31、2004-01-26、2011-07-08	30.0	冰川边界提取
5	Landsat8 OLI	2013-04-16、2014-07-24、2015-08-12	30.0	冰川边界提取
6	ASTER	2000-10-04、2001-09-30、2002-12-13、2004-03-05、2004-09-13、2005-09-16、2006-03-27、2008-07-15、2012-09-12	15.0	冰川边界提取; 冰崩信息提取
7	Sentinel-2A/B	2016-07-30、2016-09-28、2017-08-04、2018-09-28、2019-04-26、2019-07-30、2019-08-29、2020-09-17、2021-09-07	10.0	冰川流速、边界提取
8	HMA DEM	2015	8.0	冰崩信息提取
9	PALSAR	2007-08-15	12.5	冰崩信息提取
10	NASA	2000	30.0	冰崩信息提取

沟断面上的高程信息(图 3), 并做了简单的对比评估. 可以看出 HMA 和 PALSAR 这 2 款产品在晓玛沟内的高程变化有着明显的差别, 这反映了冰川因消融退缩和崩解所带来的表面高程变化; 在下游沉积区, 二者的表现整体上相近, 但 PALSAR 要略低于 HMA, 这可能是 PALSAR 产品低估了该地区的高程. NASADEM 在积累区及以下的断面上表现较差, 且与 PALSAR 的变化幅度相同(平均偏差 39 m, 标准偏差 1.3 m); 在陡坡区要高于 HMA 和 PALSAR 这 2 款产品的表现, 同时没有表现出与其他 DEM 相同趋势的变化, 这是较为合理的. 鉴于这几款 DEM 在晓玛沟冰川上的表现精度不同, 在依据事件发生前后的地形高差变化进行冰崩体积估算时, 得出的任何准确值都存在着较大误差, 因此分别采用 NASADEM 和 PALSAR 与 HMA DEM 的高差来计算(2007—2015 年的较小值和 2000—2015 年的较大值), 仅赋予每次冰崩事件可能的体积范围.

2.2　冰川流速计算　本研究采用 Messerli 等[53] 开发的 ImGRAFT 工具, 在 Matlab 软件内完成对冰川流速的计算. 该工具采用特征跟踪法计算地表的速度场, 每次运算需要 2 张图像, 其中第 1 张图像被设定为模板图像, 第 2 张为搜索图像, 在定义的搜索框内扫描搜索图像以从模板图像中找到这些特征的最佳匹配[54]. ImGRAFT 是目前计算冰川表面流速中最好的工具之一[55]. 在南极 Polar Record 冰川上进行的对比试验表明, 通过 ImGRAFT 工具计算出的地表位移与其他类似工具如 COSI-Corr 等得出的数值一致[55]. 利用精度

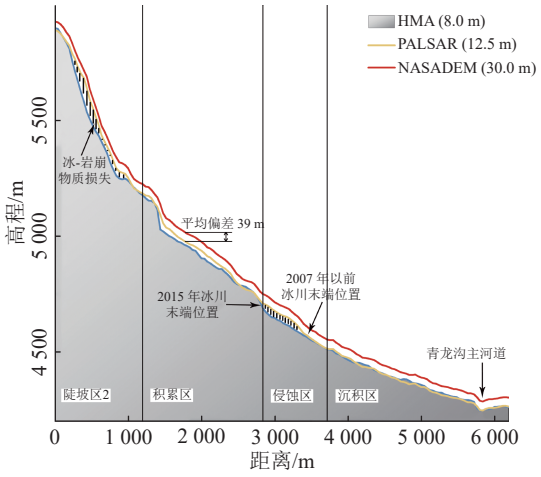


图 3 HMA、PALSAR 和 NASADEM 这 3 款数字高程模型在晓玛-青龙沟断面上表现

较好的 Sentinel-2A/B 近红外波段影像,提取出了晓玛沟陡坡区 3 在 2016—2021 年间的冰川表面流速. 计算单元与影像分辨率相同. 晓玛沟内主冰川冰舌部在经历多次滑塌与后缘冰-岩崩的影响后,表面覆盖有大量的黑色岩石碎屑,在冰川流速特征的提取上难以进行,因此不做计算分析. 速度场的不确定性是通过冰川外区域的最终剩余位移来估算的[56], 2 张 Sentinel-2A/B 的连续年影像计算得到的不确定性平均约为 5 m · a^{-1}.

2.3 气候、气象与地震分析 使用最临近站点玛沁站在 1961—2013 年的逐日观测资料,分析阿尼玛卿山冰川滑塌事件与气候变化、短期气象条件之间的关系. 2004 年冰岩体堵塞青龙沟主河道后,青海省气象局在坝体附近进行了短期气象监测,结果显示玛沁站的气温数据与该地区相比变化趋势高度一致,降水虽然偏低但仍可做有益补充[57]. 由于无法获得 2014 年以后的地表观测资料,2014—2021 年的气象数据采用 ERA5-Land 逐月再分析资料进行插补. 与观测资料相比,ERA5-Land 资料对该地区年均温的估计平均偏低约 7 ℃,对年降水量的估计则平均偏高 200 mm. 利用近 20 年的玛沁站观测资料对 2014—2021 年的 ERA5-Land 逐月气象数据进行校正,校正后的气温、降水数据与实测数据在年内各时段前后一致性较好.

此外,USGS 提供的 2000—2021 年间地震目录可用来调查阿尼玛卿山多次冰-岩崩、冰川滑塌事件与受影响范围内的地震活动之间的关系. 不同的地震强度对于周边不稳定斜坡的影响程度不同[58]. 按照 Kääb 等[30]提出的易造成冰川失稳的阈值,震级≥M4 且<M6 的地震,会对距震中 10 km 范围内的冰川不稳定区域产生影响;震级≥M6 且<M8 的地震,会影响距震中 100 km 范围内的不稳定区域;当震级≥M8 时,则会对距震中 1 000 km范围内潜在的不稳定斜坡产生影响.

3 结果与分析

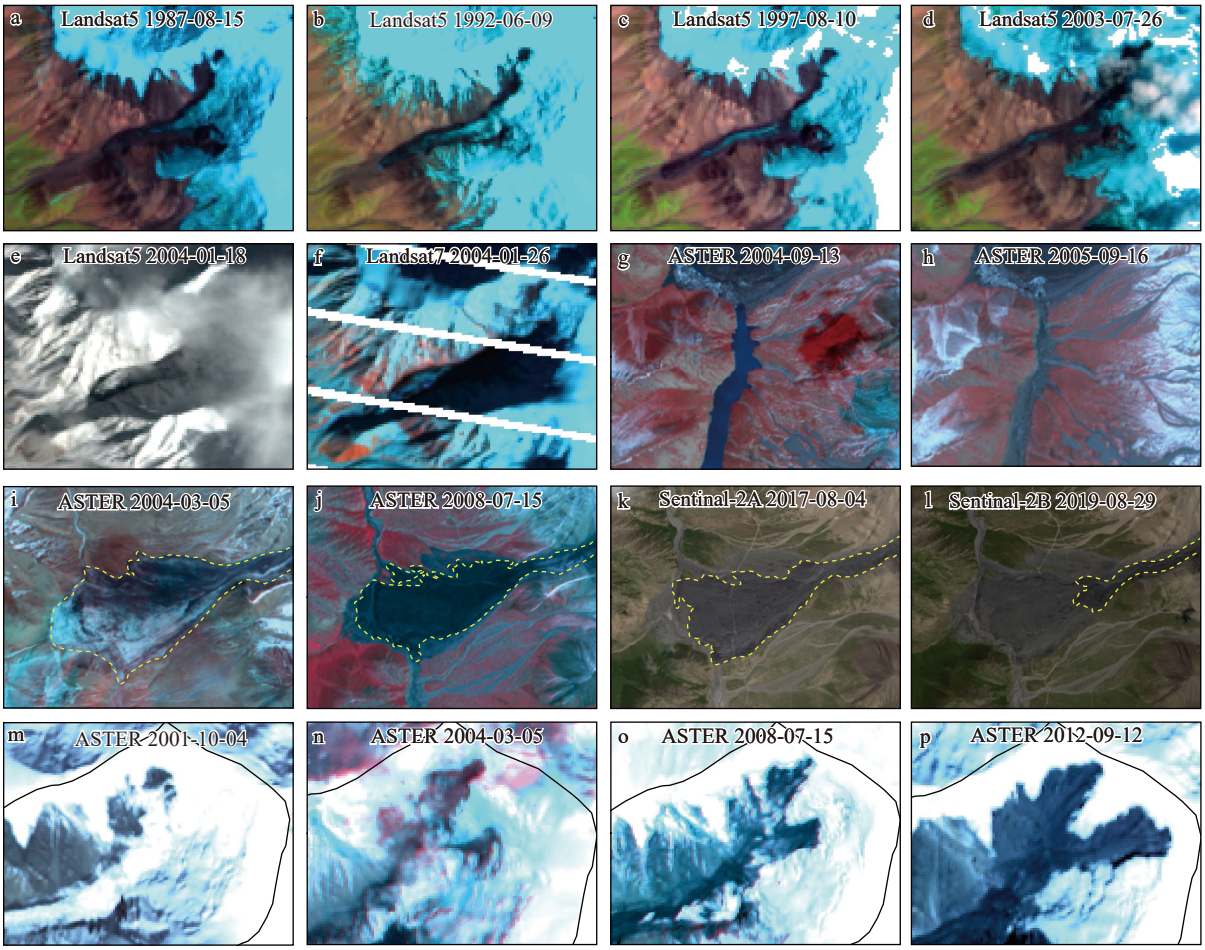
3.1 近 35 年来晓玛沟冰川变化状况 晓玛沟冰川面积变化经历了 3 个主要阶段:1986—1999 年,冰川面积基本保持稳定,尽管该冰川在 1988—1994 年发生冰川跃动,冰舌末端位置向前移动约 700 m,但对冰川面积变化的贡献并不大,冰川其他位置的消融退缩抵消了这部分增长(图 4-a~d). 2000—2016 年,晓玛沟冰川面积处于加速损失的状态,这主要是由发生在该时段内 3 次冰川滑塌事件以及 4 次量级较大的冰川后缘陡坡区冰-岩崩事件造成的(表 3). 对比玛卿岗日地区同一时期内其他冰川的变化状况,因气候变暖导致的冰川面积损失并不显著,且低于 2000 年以前的水平[59]. 2017—2021 年,冰川面积波动幅度再次减小,虽然该时段内发生 2 次冰川末端前进以及 1 次冰川滑塌事件,但是量级较小未能造成显著影响,且 2017 年以后冰川后缘再未有大规模的冰崩或冰-岩崩事件.

通过对比 1986 年以后晓玛沟冰川冰舌末端所处位置与其在 1964 年位置的相对变化,监测到了明显的 5 次冰川末端前进现象,其中 2007、2016 和 2019 年的冰川滑塌与前期冰川末端的活动时间紧密相接(图 5). 2004 年滑塌发生前同样监测到冰川有明显跃动痕迹[49],表现出中上端冰舌明显加厚,范围变大,但冰川末端并未前移. 可以明确的是,冰川跃动或末端滑动与滑塌事件密不可分(图 4-e, f).

3.2 多次冰川滑塌事件诱因 发生于 2000—2001 年陡坡区 1 和 2003—2004 年间陡坡区 2 的冰-岩崩事件,在第 1 次冰川滑塌的发生中扮演了重要作用. 2 次崩落的(3.06~8.19)×10^6 m^3 冰岩体主要堆积于冰舌的上端,造成冰舌应力分布发生变化从而失去稳定. 同时,通过对事件前 1 年气象资料的分析发现(图 6-a),气温变化并没有出现明显的偏高或偏低,但是降水量(522 mm)高于时段内多年平均水平(470 mm).

2007 年冰川滑塌事件前 1 个月平均气温为 7.38 ℃,偏高于该时段内的多年平均气温 2.23 ℃. 同时前 1 年的降水量也高于多年平均水平(图 6-b). 在 2007 年 9—11 月间,冰川后缘陡坡区 2 再次发生冰-岩崩,脱离区面积 0.022 km^2,坡度为 34°,脱离的冰岩体积为(0.42~1.22)×10^6 m^3(图 7-a~c).

对于 2016 年冰川滑塌事件,当年夏季气温高于多年平均气温 1.9 ℃,降水并无明显增多. 前期量级较大的冰川后缘冰-岩崩事件发生在 2010—2011 年,



a~d. 发生于 1988—1994 年晓玛沟冰川跃动事件；e~f. 2004 年冰川滑塌前夕观察到新的冰川跃动现象；g~h. 青龙河主河道堰塞湖溃决状况；i~l. 2004、2007、2016 和 2019 年滑塌事件在下游青龙沟形成的沉积范围；m~p. 后缘陡坡区因冰崩而损失的冰川面积.

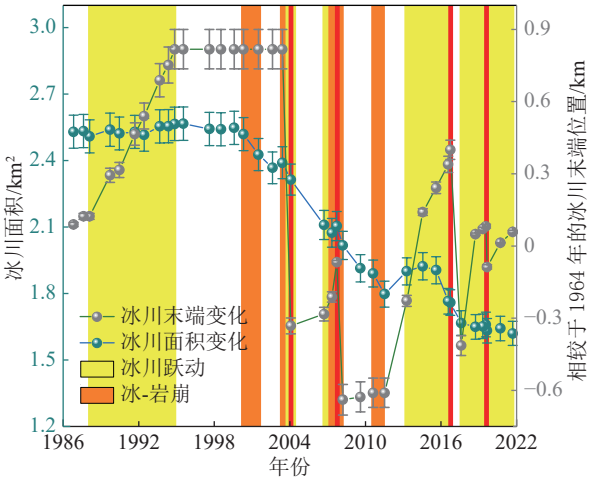
图 4　晓玛沟冰川跃动，冰川后缘冰-岩崩，冰川滑塌以及堰塞湖溃决

表 3　晓玛沟发生的量级较高的冰-岩崩事件统计

序号	时间	区域	脱离区面积/km^2	脱离区平均坡度/(°)	脱离体积/10^6 m^3	描述	诱因	来源
1	2000-04—2001-07	陡坡区1	0.107	29	2.24~6.34	在旧的不稳定的冰川后缘陡坡区1上，冰体裹挟下方岩体向下滑塌，最终碎屑物堆积在冰舌上端	地震，气候变化导致的斜坡稳定性降低	本研究，[49]
2	2003-05—2004-01	陡坡区2	0.023	36	0.82~1.85	在新的不稳定的冰川后缘陡坡区2上，冰体同下方基岩碎屑发生滑塌，最终堆积在冰舌上端	气候变化导致的斜坡稳定性降低	本研究，[49]
3	2007-09-15—11-02	陡坡区2	0.022	34	0.42~1.22	脱离区2下部进一步发生滑塌，此次事件可能是由多次小冰崩组合而成	气候变化导致的斜坡稳定性降低	本研究
4	2010-08—2011-06	陡坡区2	0.108	42	6.84~11.23	脱离区2上部进一步发生滑塌，碎屑物没有冲出沟谷，而是堆积在冰舌上端	气候变化导致的斜坡稳定性降低	本研究

崩落的体积为(6.84~11.23)×10^6 m^3，冰岩碎屑物并未冲出沟谷，而是与之前一样将物质堆积于冰舌上端. 需要指出的是，本文只列出了研究时段 4 次量级较大的冰-岩崩事件，在陡坡区 2 还存在大量此类的小型事件难以被记录. 例如，陡坡区 2 上端约 0.015 km^2 的冰川面积在 2016—2019 年间逐渐损失，体积约为 0.3×10^6 m^3，并可能对 2019 年 7 月的冰川滑塌事件起到作用. 通过地形高差分析，2019 年事件前末端冰舌厚度可估计为 40 m，滑塌体积约 1.12×10^6 m^3.

按照提出的地震阈值，分析发现在 4 次冰川滑塌发生前几个月内，并无能产生显著影响的地震事件. 能够进入统计目标的地震事件仅有 2 起，分别是发生



发生在沟内的冰川跃动、冰-岩崩和冰川滑塌事件时间段用不同颜色突出显示.

图 5 1986 年以来晓玛沟冰川面积与冰舌末端位置变化状况

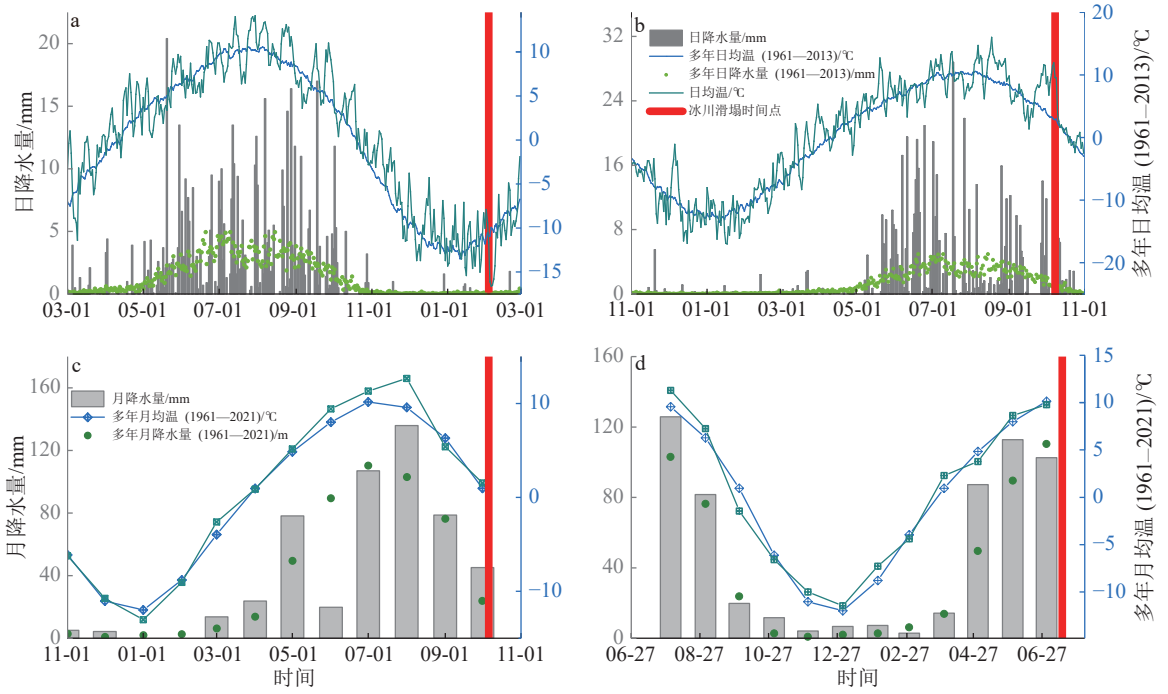
于 2000 年 9 月 12 日距晓玛沟 62 km 的 6.1 级地震和 2009 年 10 月 23 日距晓玛沟 9 km 的 5.1 级地震. 其中 2000 年的地震可能影响到了 2000—2001 年发生于陡坡区 1 的冰-岩崩事件.

3.3 冰川后缘陡坡区冰川流速变化 陡坡区 1 的基岩裸露早在 1964 年以前就存在, 在随后的几十年中逐渐发育到现在的规模(图 7-d). 2001 年以后这一区域不再发生规模较大的冰崩或冰-岩崩. 陡坡区 2 的冰川冰在 2003 年以后开始逐渐崩解, 经历了 3 次较大规模和多次小规模的坍塌后, 再难为下端冰舌提供充足的崩落式物源. 陡坡区 3 是未来最有可能发生大规模冰崩或冰-岩崩的区域, 平均坡度 37°. 近年来这一区域的冰裂隙发育明显增多, 裂隙宽度加大(图 7-e、f). 2016—2021 年冰川平均流速为 10.85 m · a^{-1}. 在冰川滑塌发生的年份或者临近年份, 斜坡上的冰流速明显较大(图 8). 在冰川流速空间分布特征上, 不同时期影像体现的结果相近, 斜坡的中部和靠近右侧陡坡区 2 的流速要大于其他地区.

4 讨论及展望

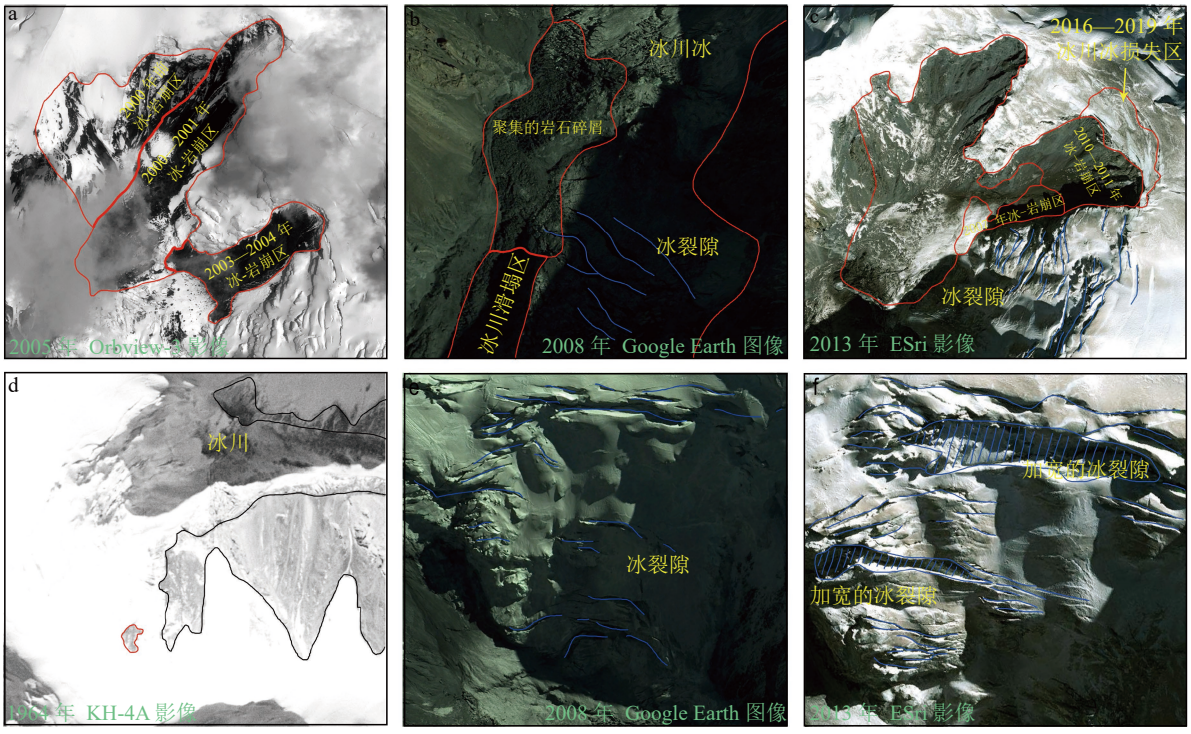
4.1 晓玛沟多次冰川滑塌事件内在联系 能够在同一地点连续发生是冰川滑塌的一个重要特征[14]. 高加索地区的 Kolka 冰川曾经在 1902 和 2002 年发生 2 次脱离事件, 分别造成 36 和 120 人死亡, 其中 2002 年事件堵塞了下游沟谷, 形成堰塞湖[26]. 阿尼玛卿山冰川滑塌与 Kolka 冰川滑塌事件较为相似, 二者均为跃动型冰川并且前期冰川后缘冰-岩崩活动对冰舌脱离具有重要作用. 不同的是, 阿尼玛卿山冰川滑塌发生频率较高.

4.1.1 *冰川滑动与基岩性质* 晓玛沟数次冰川滑塌之间存在着诸多内在联系和共性. Jacquemart[27] 的研究指出, 冰川向前的推进会造成底部岩土颗粒的重新排列, 降低冰川的剪切强度, 并且冰川的减薄会导致法向应力和驱动应力的减小, 这些会降低后续滑塌发



a~b. 玛沁站的观测资料分别展示了 2003 年 3 月—2004 年 2 月和 2006 年 11 月—2007 年 10 月这一地区的逐日气温降水变化; c~d. ERA-Land 再分析资料分别展示了 2015 年 11 月—2016 年 10 月和 2018 年 8 月—2019 年 7 月间的逐月气温降水变化.

图 6 4 次冰川滑塌事件发生前 1 年的气温及降水状况



a. 展示了 2000—2001 和 2003—2004 年产生的 2 次冰-岩崩脱离事件；b. 展示了冰岩碎屑在下方冰舌的堆积状况；c. 展示了 2007 和 2010—2011 年产生的 2 次冰-岩崩事件；d. 表示 1964 年晓玛沟冰川发育状况；e~f. 展示了冰川后缘陡坡区近 3 年来冰裂隙发育状况.

图 7　冰川后缘冰-岩崩、冰裂隙发育状况

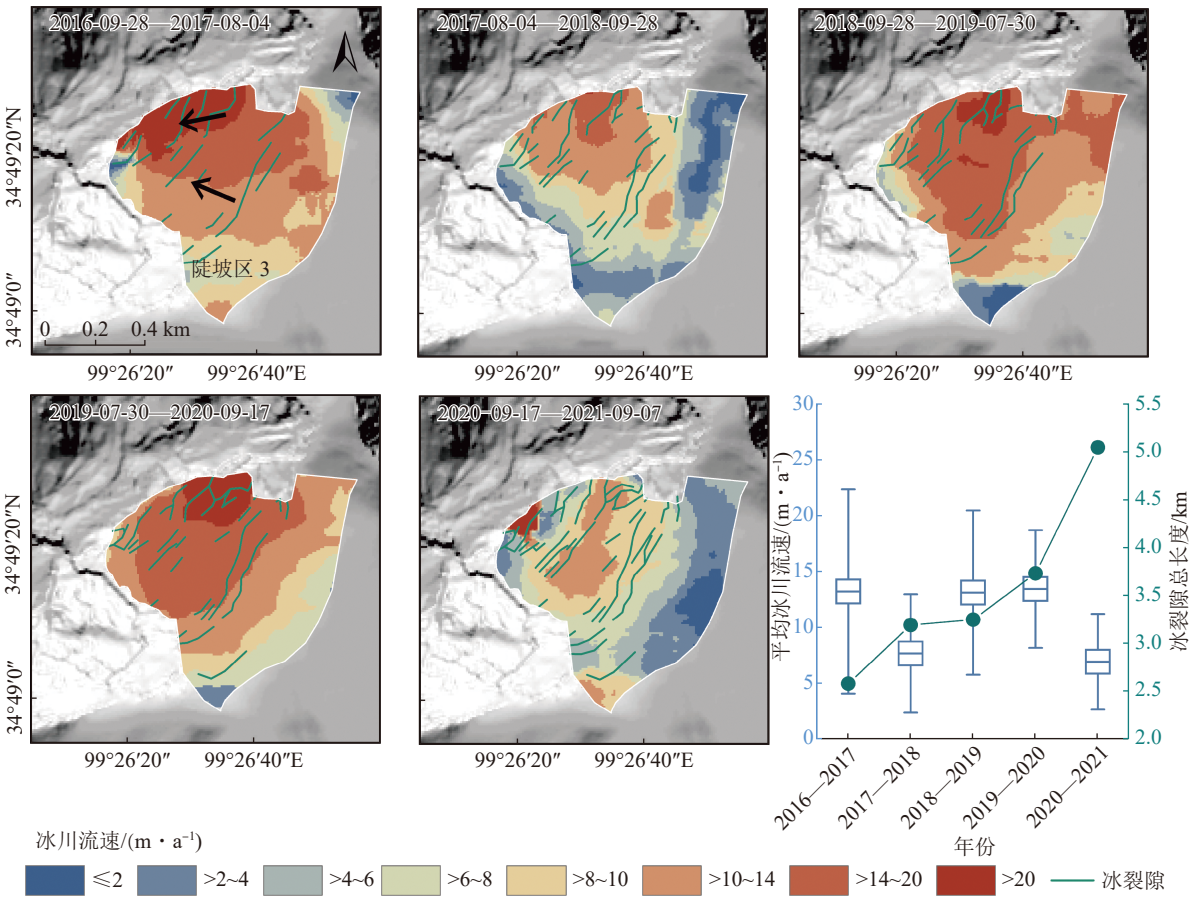


图 8　冰川后缘陡坡区 3 在 2016—2021 年间的冰川流速变化与较大冰裂隙发育状况

生时的临界条件. 在经历了2004年的事件之后,不仅观察到了晓玛沟冰川冰舌的减薄(图3),还观察到有大量松散的冰碛碎屑物按流向分布在流通通道上或已被冰川冰重新覆盖的基岩上,这无疑是不利于冰川对于自身稳定性的调控. 本质上,平坦冰舌大规模的脱离是一种失败的冰川跃动行为[14],是由大量基底摩擦损失和无法进行全局控制实现的[60]. 一般大型跃动型冰川具有良好的自我调控能力,不会出现冰舌脱离的现象,仅能够在冰舌表面观察到因应力系统巨大变化带来的冰裂隙[61],而能够发生低坡度冰舌滑塌的冰川其面积一般>4 km^2,属于中小型山谷冰川.

一个完整的跃动过程应该包括物质在冰舌中上部的积累和在月或年不等的时间尺度上向冰舌下部的物质输送[62-63],直观上表现为下部冰舌增厚、表面裂隙增多、流速加快和冰川末端前进等[64]. 晓玛沟冰川以传统的上游冰川冰补给(目前由未断裂的陡坡区3提供)和崩解物质为源汇,实现物质在冰舌上部的积累,以完成可能的跃动或滑动行为. 由于无法监测到其物质在表面的再分配过程,以及遥感影像的分辨率不足等原因,目前仅能观察到冰川末端积极的前进活动.

4.1.2 地震诱导 地震直接诱发的冰川滑塌事件是极少报道的,目前仅有发生在1988年8月9日阿尔泰地区的一起事件可能与之有关[14, 65]. 相反的是,地震对狭义冰崩或冰-岩崩的诱发却是常有的,例如:2001年10月—2002年1月期间发生于东昆仑山的6起冰崩,极有可能与同时段内一起7.8级地震有关[17];2015年4月25日发生于喜马拉雅山脉中部郎塘山谷的冰-岩崩造成超过350人死亡,此次事件被证实由7.9级Gorkha地震诱发[66]. 玛卿岗日地区断裂褶皱非常发育[46],是地震高发区,但晓玛沟冰川滑塌事件与地震诱发无关,仅有1起地震可能影响到了2000—2001年的后缘冰-岩崩. 2021年5月14日,距离晓玛沟约110 km的玛多县发生7.4级地震,青海省环境地质勘查局立刻组织专业技术队伍对玛卿岗日几十个冰川灾害隐患点进行排查,但并未发现任何的冰崩迹象.

4.1.3 气候变化与短期气象 气候与气象对于冰川滑塌的影响并不体现在直接的诱导上,更多是相较缓慢的过程. 过去的研究认为,多温型冰川的一些崩解适合用冰川跃动机制中的“水文控制”来解释[67-69],即当冰下排水系统效率较高且冰舌末端部分与基岩强耦合(或冻结)时,冰舌中上部形成高水压,当超过下部冰舌抗剪切能力时崩解随即发生[19, 70],该过程也可伴随冰川表面物质的再分配[27]. 气温降水大多以这样的方式影响冰川热力学性质,进而导致冰川失稳. 在过去几十年中,玛卿岗日地区大气温度显著上升,这会对冰川的稳定性造成影响. 2004年的晓玛沟冰川滑塌事件发生在罕见的较冷月份,且前期观察到了明显的冰川跃动现象[49],这可以用上述理论进行解释;但对于此后发生在较暖月份的滑塌事件,仅目前掌握的资料很难合理地解释整个崩解过程. 晓玛沟冰川的重塑能力很强,每次滑塌发生后末端损失的冰川冰能在2年内重新长出(指具有完整的冰舌形状),这在其他类似事件的研究中极少发现,且每次滑塌前夏季的冰川末端前进是持续进行的,因此不认为末端冰川冻结在基岩上.

4.2 未来再次崩解可能与建议对策 2019年7月晓玛沟冰川末端约0.028 km^{2}的区域发生脱离,与前3次事件相比量级较小. 此次事件发生后,剩余冰川积极响应,至2021年9月7日该冰川末端共向前推进146 m,接近2019年滑塌发生前的水平. 冰川后缘冰岩体崩落后,在冰舌上段的堆积对于4次冰川滑塌的发生十分重要,目前陡坡区1和2上的冰体已经崩落得较为充分,难以再提供大量的碎屑物,而陡坡区近3年来表现出冰裂隙发育增多、宽度加大的特点(图8). 鉴于目前晓玛沟冰川在重塑后脆弱性增加等原因,其再次发生冰川滑塌的可能性极大,目前冰川末端的前进仍在进行. 此外,观察到2016年以后陡坡区3的冰川在崩解发生的相关年份有着比往年更快的流速. 一方面,这可解释为斜坡上冰川冰对下部冰舌产生了显著的应力影响,导致其在一定程度上失去平衡,当然也从侧面反映了目前晓玛沟冰川的敏感状况;另一方面,可利用冰川后缘的冰流速变化与相应滑塌发生存在内在联系和相关性的特征,作为提供预警的重要手段,这是很容易利用现有遥感数据计算得到的.

晓玛沟下游的暴露度较小,仅有1条通村公路和几个涵洞,并且目前发生冰川滑塌的量级越来越小,未来产生灾难性事故的可能性很小. 对于防灾减灾的措施,仅建议增加便易的灾害点实时监测,通过Landsat、Sentinel等易获取的遥感影像加强对冰川形态和运动特征的观察,结合临近气象站点的观测资料,未来几年内重点关注异常高温或降水的时期,以进一步预测灾害的发生,降低可能的经济损失和人员伤亡. 但从本文对此事件簇的认知和观察来看,晓玛沟冰川极具科学价值,涉及目前仍存在争议或不清楚的冰川跃动机制、冰川滑塌和冰川冰重塑过程、冰川热力、水文状况等,晓玛沟冰川所发生的链式灾害过程为解决此类问题提供了绝佳的试验和观测场所.

4.3 冰川灾害点识别 冰川滑塌是当前全球变暖背

景下产生的新危害[27], 其展现出的发生频率和量级不低于冰崩和冰-岩崩[14, 33]. 对于此类灾害点的区分、识别以及可能产生的链式灾害的探讨, 对山区环境中的风险管理十分重要, 是未来该方向研究的热点.

目前全球范围内针对冰川灾害点的识别工作仍然较少. 较早的研究出现在欧洲阿尔卑斯山, Salzmann 等[16] 依据建立的三级评价标准对该地区潜在冰崩灾害点进行了初步识别, 首先其要求冰崩区坡度>25°, 其次通过流向模拟将下游沟谷 8 km 范围定义为潜在冰崩影响区, 三级评价依靠二级评价的结果和实地考察得出. 在青藏高原地区, 汤明高等[71] 对 40 269 条冰川中的潜在冰崩点进行了识别, 依据坡度、坡向、潜在冰崩区面积和高差等指标, 评估出 581 处隐患点. 冰川滑塌事件在全球发生超过 30 起[14, 15, 32, 41, 69], 对此类潜在冰川灾害点的识别已提出一些模糊概念和具体评价指标. 需要注意的是, 针对潜在冰川滑塌点的识别和冰崩或冰-岩崩不同, 前者需要关注冰川在过去一段时间的动态变化, 例如冰川流速和表面高程变化[72], 气候和气象条件导致的冰川热力学性质变化等[30, 73], 而后者的评估与冰湖的危险性评估相似[10, 74], 囊括了更多对现有的地貌、地质等状态的描述, 例如冰崩区的坡度、裂隙发育状况、地震密度等.

青藏高原地区有着全球中低纬度最为丰富的冰川资源[75], 在全球变暖的背景下这一地区的冰川展现出了较高的灾害潜力[3, 76], 在冰川泥石流[66]、冰崩堵江以及冰湖溃决洪水灾害方面有着丰富的案例[40, 43, 77]. 与晓玛沟临近的几条冰川在诸多形态特征上相似, 也都为跃动型冰川, 存在一定的滑塌可能. 为应对这些未来潜在冰川灾害的发生, 需要进一步对高原地区冰川进行系统化的危险性评估和风险评估, 以增强对该地区潜在灾害点的认知, 提高我国对冰川灾害点的管理、监测和防治能力, 保护高原地区日益增长的人文活动和经济建设.

5　结论

通过对阿尼玛卿山 4 次冰川滑塌发生诱因、冰川形态、运动特征的分析, 得出以下结论:

1)在冰川后缘陡坡区观察到有 4 次规模较大的冰-岩崩发生. 1964 年以来这一区域因冰川冰崩落导致的基岩裸露面积达到 0.53 km^2, 为下端冰舌提供了约(16.42~37.01)×10^6 m^3 冰岩碎屑.

2)4 次冰川滑塌的发生与前期冰川跃动或滑动、后缘陡坡冰-岩崩、异常高温降水以及易于滑动产生的基岩性质有关. 地震与这些事件的相关性较弱.

3)原来老旧的后缘冰-岩崩源区再难以为下端冰舌提供充足的崩落式物源, 而新发育的不稳定斜坡应是未来最有可能的隐患点, 其表现为冰裂隙发育明显增多. 同时, 在滑塌发生的年份或临近年份, 斜坡冰流速明显较快, 这表明后缘不稳定斜坡一定程度上影响着下部冰川的稳定性.

6　参考文献

[1] YAO T D, XUE Y K, CHEN D L, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between Monsoon and environment: multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100: 423

[2] 邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 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

[3] 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

[4] DING Y J, MU C C, WU T H, et al. Increasing cryospheric hazards in a warming climate[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 213: 103500

[5] VEH G, KORUP O, VON SPECHT S, et al. Unchanged frequency of moraine-dammed glacial lake outburst floods in the Himalaya[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(5): 379

[6] 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

[7] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377

[8] 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

[9] SCHWANGHART W, WORNI R, HUGGEL C, et al. Uncertainty in the Himalayan energy-water nexus: estimating regional exposure to glacial lake outburst floods[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(7): 074005

[10] ALLEN S, ZHANG G Q, WANG W C, et al. Potentially dangerous glacial lakes across the Tibetan Plateau revealed using a large-scale automated assessment approach[J]. Science Bulletin, 2019, 64(7): 435

[11] ZHANG T G, WANG W C, GAO T, et al. Simulation and assessment of future glacial lake outburst floods in the Poiqu River basin, central Himalayas[J]. Water, 2021, 13: 1376

[12] ZHENG G X, ALLEN S K, BAO A M, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation[J]. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 411

[13] EVANS S G, DELANEY K B. Catastrophic mass flows in the mountain glacial environment: Snow and ice-related hazards, risks, and disasters[M]. Berlin: Academic Press,

2015

[14] KääB A, JACQUEMART M, GILBERT A, et al. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers - more frequent than thought?[J]. The Cryosphere, 2020, 15(4): 1751

[15] 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

[16] SALZMANN N, KääB A, HUGGEL C, et al. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling[J]. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 2004, 58(2): 74

[17] VAN DER WOERD J, OWEN L A, TAPPONNIER P, et al. Giant, ≈ M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(3/4): 394

[18] 王伟财. 藏东南伯舒拉岭地区冰湖变化及危险性与影响分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012

[19] FAILLETTAZ J, FUNK M, VINCENT C. Avalanching glacier instabilities: review on processes and early warning perspectives[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 203

[20] LIPOVSKY P S, EVANS S G, CLAGUE J J, et al. The July 2007 rock and ice avalanches at Mount Steele, St. Elias Mountains, Yukon, Canada[J]. Landslides, 2008, 5(4): 445

[21] JIBSON R W, HARP E L, SCHULZ W, et al. Large rock avalanches triggered by the M 7.9 Denali Fault, Alaska, earthquake of 3 November 2002[J]. Engineering Geology, 2006, 83(1/2/3): 144

[22] HUGGEL C, CAPLAN-AUERBACH J, WAYTHOMAS C F, et al. Monitoring and modeling ice-rock avalanches from ice-capped volcanoes: a case study of frequent large avalanches on Iliamna Volcano, Alaska[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 168(1/2/3/4): 114

[23] KROPáČEK J, VILíMEK V, MEHRISHI P. A preliminary assessment of the Chamoli rock and ice avalanche in the Indian Himalayas by remote sensing[J]. Landslides, 2021, 18(10): 3489

[24] MARTHA T R, ROY P, JAIN N, et al. Rock avalanche induced flash flood on 07 February 2021 in Uttarakhand, India: a photogeological reconstruction of the event[J]. Landslides, 2021, 18(8): 2881

[25] HUGGEL C, ZGRAGGEN-OSWALD S, HAEBERLI 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 Sciences, 2005, 5(2): 173

[26] EVANS S G, TUTUBALINA O V, DROBYSHEV V N, et al. Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002[J]. Geomorphology, 2009, 105(3/4): 314

[27] JACQUEMART M. What drives large-scale glacier detachments? Insights from Flat Creek glacier, St. Elias Mountains, Alaska[J]. Geology, 2020, 48(7): 703

[28] FALASCHI D, KääB A, PAUL F, et al. Brief communication: collapse of 4 Mm 3 of ice from a cirque glacier in the central Andes of Argentina[J]. The Cryosphere, 2019, 13(3): 997

[29] TIAN L D, YAO T D, GAO Y, et al. Two glaciers collapse in western Tibet[J]. Journal of Glaciology, 2017, 63(237): 194

[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(2): 114

[31] AGATOVA A, NEPOP R, GANYUSHKIN D, et al. Specific effects of the 1988 earthquake on topography and glaciation of the tsambagarav ridge (Mongolian Altai) based on remote sensing and field data[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 917

[32] IRIBARREN ANACONA P, MACKINTOSH A, NORTON K P. Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(1): 2

[33] SCHNEIDER D, HUGGEL C, HAEBERLI W, et al. Unraveling driving factors for large rock-ice avalanche mobility[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(14): 1948

[34] IKEN A, TRUFFE M. The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelengletscher, Switzerland, during its advance and retreat[J]. Journal of Glaciology, 1997, 43: 328

[35] DAVISON B, SOLE A, LIVINGSTONE S, et al. The influence of hydrology on the dynamics of land-terminating sectors of the Greenland ice sheet[J]. Frontiers in Earth Science, 2019: 10

[36] NANNI U, GIMBERT F, ROUX P, et al. Observing the subglacial hydrology network and its dynamics with a dense seismic array[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(28): e2023757118

[37] EVANS S G, BISHOP N F, FIDEL SMOLL L, et al. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970[J]. Engineering Geology, 2009, 108(1/2): 96

[38] EVANS S G, CLAGUE J J. Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments[J]. Geomorphology, 1994, 10(1/2/3/4): 107

[39] LLIBOUTRY L, PAUTRE A, SCHNEIDER B. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in cordillera Blanca, Peru: I. historical failures of morainic dams, their causes and prevention[J]. Journal of Glaciology, 1977, 18(79): 239

[40] 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

[41] AN B S, WANG W C, YANG W, et al. Process, mechanisms, and early warning of glacier collapse-induced river blocking disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, southeastern Tibetan Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151652

[42] COOK K L, ANDERMANN C, GIMBERT F, et al. Glacial Lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya[J]. Science, 2018, 362(6410): 53

[43] 张太刚, 王伟财, 高坛光, 等. 亚洲高山区冰湖溃决洪水事件回顾[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1673

[44] 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

[45] ZHOU Y S, LI X, ZHENG D H, et al. The joint driving effects of climate and weather changes caused the Chamoli glacier-rock avalanche in the high altitudes of the India Himalaya[J]. Science China: Earth Sciences, 2021, 64(11): 1909

[46] 张俊才, 周保, 曹小岩, 等. 阿尼玛卿山冰崩链生灾害基本特征分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(11): 17

[47] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3

[48] 武小波, 李全莲, 贺建桥. 黄河源区阿尼玛卿山耶和龙冰川积雪中不溶微粒组成特征及环境意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1746

[49] PAUL F. Repeat glacier collapses and surges in the Amney Machen Mountain range, Tibet, possibly triggered by a developing rock-slope instability[J]. Remote Sensing, 2019, 11: 708

[50] SHEAN D. High Mountain Asia 8-meter DEMs derived from along-track optical imagery, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center [DS/OL]. 2017 [2022-02-15]. https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1431539277-NSIDC_ECS.html

[51] NIE Y, LIU W, LIU Q, et al. Reconstructing the Chongbaxia Tsho glacial lake outburst flood in the Eastern Himalaya: Evolution, process and impacts[J]. Geomorphology, 2020, 370: 107393

[52] CHEN W F, YAO T D, ZHANG G Q, et al. Towards ice-thickness inversion: an evaluation of global digital elevation models (DEMs) in the glacierized Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2022, 16(1): 197

[53] MESSERLI A, GRINSTED A. Image georectification and feature tracking toolbox: ImGRAFT[J]. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2015, 4(1): 23

[54] MESSERLI A, KARLSSON N, GRINSTED A. Brief Communication: 2014 velocity and flux for five major Greenland outlet glaciers using ImGRAFT and Landsat-8[J]. The Cryosphere Discussions, 2014, 8: 6235

[55] JAWAK S D, KUMAR S, LUIS A J, et al. Evaluation of geospatial tools for generating accurate glacier velocity maps from optical remote sensing data[C]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings, 2018, 2(7): 341

[56] LIU Q, MAYER C, WANG X, et al. Interannual flow dynamics driven by frontal retreat of a lake-terminating glacier in the Chinese Central Himalaya[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 546: 116450

[57] 严异德, 何彩青, 韩有才. 阿尼玛卿冰崩堰塞湖垮坝环境因素分析[J]. 青海科技, 2007, 14(3): 18

[58] WANG X Y, NIE G Z, WANG D W. Relationships between ground motion parameters and landslides induced by Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Science, 2010, 23(3): 233

[59] 王凯, 杨太保, 何毅, 等. 近30年阿尼玛卿山冰川与气候变化关系研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 300

[60] THøGERSEN K, GILBERT A, SCHULER T V, et al. Rate-and-state friction explains glacier surge propagation[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2823

[61] GRANT K, STOKES C, EVANS I. Identification and characteristics of surge-type glaciers on Novaya Zemlya, Russian Arctic[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55: 960

[62] MEIER M F, POST A. What are glacier surges?[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4): 807

[63] SHARP M. Surging glaciers: behaviour and mechanisms[J]. Progress in Physical Geography, 1988, 12(3): 349

[64] GUILLET G, KING O, LV M Y, et al. A regionally resolved inventory of High Mountain Asia surge-type glaciers, derived from a multi-factor remote sensing approach[J]. The Cryosphere, 2022, 16(2): 603

[65] AVDEEV V A, NARTOV S V, BALJINNIAM I, et al. Tsambagarav earthquake of 23 July 1988[J]. Geology and Geophysics, 1989, 11: 118

[66] KARGEL J S, LEONARD G J, SHUGAR D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake[J]. Science, 2016, 351(6269): aac8353

[67] LINGLE C, FATLAND D R. Does englacial water storage

drive temperate glacier surges?[J]. Annals of Glaciology, 2003, 36: 14

[68] HARRISON W, POST A. How much do we really know about glacier surging?[J]. Annals of Glaciology, 2003, 36: 1

[69] JACQUEMART M , CICOIRA A. Hazardous glacier instabilities: ice avalanches, sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers, and glacier surges[J]. Treatise on Geomorphology, 2022, 4: 330

[70] FAILLETTAZ J, FUNK M, SORNETTE D. Instabilities on Alpine temperate glaciers: new insights arising from the numerical modelling of Allalingletscher (Valais, Switzerland)[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(9): 2977

[71] 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, 2021, 64: 1

[72] WANG X W, LIU L, HU Y, et al. Multi-decadal geomorphic changes of a low-angle valley glacier in the East Kunlun Mountains: remote sensing observations and detachment hazard assessment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(9): 2791

[73] 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

[74] ZHANG T G, WANG W C, GAO T G, et al. An integrative method for identifying potentially dangerous glacial lakes in the Himalayas[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150442

[75] BOLCH T, KULKARNI A, KääB A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers[J]. Science, 2012, 336(6079): 310

[76] GAO J, YAO T D, MASSON-DELMOTTE V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia 's water supplies[J]. Nature, 2019, 565(7737): 19

[77] ZHAO C X, YANG W, WESTOBY M, et al. Brief communication: an approximately 50 mm 3 ice-rock avalanche on 22 March 2021 in the Sedongpu valley, southeastern Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 2022, 16(4): 1333

Glacier detachment chain process in the Amney Machen Mountain

WANG Zhongyan[1)] ZHANG Taigang[1, 2)] WANG Weicai[1)]

(1)Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China;
2)College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, 730000, Lanzhou, Gansu, China)

Abstract Glacial detachment is a new type of glacial hazard that has emerged recently. Since 2000, more than a dozen glacier detachments happened in the Tibetan Plateau. The Xiaomagou glacier of Amney Machen Mountain collapsed multiple times, in 2004, 2007, 2016 and 2019. Multi-sequence remote sensing images were used to analyze Xiaomagou glacier morphology and flow characteristics over the past 35 years. This combined with meteorological data and prior literatures revealed triggers for glacier collapse, glacier hazard potential in the future were identified. Previous glacier surges or slides, ice-rock avalanches at back slope, high temperature and/or precipitation, and glacier bed nature are all closely related to the occurrence of glacier collapse. Four large-scale ice-rock avalanches were observed in the glacier back slope zones from 2000-2011, which provided a material and dynamic basis for glacier collapses. The possibility of another glacier collapse in the next few years is extremely high. After the 2019 glacier detachment, Xiaomagou glacier has squirmed forward again. Newly developed unstable slope at the back edge of the glacier has been found. Increased ice crevasses were identified. Changes in slope ice velocity are likely related to relevant collapses. Understanding of triggers of Amney Machen glacier collapses, determination of potential hazard slope, together suggest that glacier morphology and movement characteristics should be monitored, remote sensing should be combined with meteorological data, to predict future disasters in a timely manner.

Keywords glacier detachment; glacier collapse; chain disasters; dammed lake; glacier velocity; Amney Machen Mountain

【责任编辑: 刘先勤】