气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌

周玉杉¹, 李新^{1*}, 郑东海^{1†}, 李志伟², 安宝晟¹, 汪赢政³, 姜德才^{4,5}, 苏建宾¹, 曹斌¹

1. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室, 国家青藏高原科学数据中心, 北京 100101;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000;

4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000;

5. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: xinli@itpcas.ac.cn

† 通讯作者, E-mail: zhengd@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2021-06-27; 收修改稿日期: 2021-09-01; 接受日期: 2021-09-08; 网络版发表日期: 2021-10-13

国家自然科学基金项目(批准号: 41988101, 42001381)、博士后创新人才支持计划项目(编号: BX20200343)和博士后科学基金面上项目(编号: 2020M670480)资助

摘要 冰崩(包括冰-岩崩塌)是最具破坏性的山地灾害之一, 严重威胁周边地区的安全. 尽管相关事件在全球山地区域频繁发生, 但由于观测数据缺乏, 只有极少数冰崩事件得到了深入的研究. 针对2021年2月7日发生在印度杰莫利地区的冰-岩崩塌事件, 本研究利用高时空分辨率的卫星影像发现: 此次事件是由冰川下附基岩滑坡引起的冰-岩崩塌, 其中崩塌源区的面积为 $2.89 \times 10^5 \text{m}^2$, 物质损失为 $2.46 \times 10^7 \text{m}^3$, 对应的平均高度变化为 -85m . 同时, 冰-岩体整体沿斜坡滑动大约起始于2017年夏季, 并于此后表现出明显的季节性滑动特征(主要在夏季). 在冰-岩体滑动的启动期, 区域内出现异常的强降雨; 在崩塌触发前40天内, 区域内出现显著的冬季升温. 对比多个时期的数字高程模型进一步发现, 崩塌区域的冰川(或冰-岩体)几何形态可能一直处于变化之中(即冰川下部加速变薄, 而上部变化不明显), 这与整个地区气候变暖的现状是相吻合的. 综合上述发现并结合地貌特征分析, 得出如下结论: 此次印度杰莫利冰-岩崩塌事件主要是由气候变化和异常天气共同作用于陡峭且易断裂的地形和地质条件造成的. 本研究不仅为高海拔地区的冰川或斜坡不稳定性研究提供了新的证据, 而且也凸显了在喜马拉雅山和世界其他高山区开展冰崩风险识别和评估的迫切性.

关键词 冰崩, 喜马拉雅山, 山地灾害, 气候变化, 遥感

中文引用格式: 周玉杉, 李新, 郑东海, 李志伟, 安宝晟, 汪赢政, 姜德才, 苏建宾, 曹斌. 2021. 气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌. 中国科学: 地球科学, 51(12): 2112–2125, doi: [10.1360/N072021-0169](https://doi.org/10.1360/N072021-0169)

英文引用格式: Zhou Y, Li X, Zheng D, Li Z, An B, Wang Y, Jiang D, Su J, Cao B. 2021. The joint driving effects of climate and weather changes caused the Chamoli glacier-rock avalanche in the high altitudes of the India Himalaya. Science China Earth Sciences, 64(11): 1909–1921, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9844-0>

1 引言

冰崩(包括冰-岩崩塌)(ice/ice-rock collapse)是一种冰体(或冰-岩体)快速崩塌的自然过程(比如悬冰川的坠落, 或者低角度冰川的快速垮塌或脱离), 同时也是冰川失稳的最典型现象之一(Deline等, 2021; Leinss等, 2021). 由于冰崩具有较强的流动性, 其对下游地区造成的影响一般可以延伸到几十公里的范围(Schneider等, 2011; Kääb等, 2018, 2021). 因此, 冰崩不仅影响着山地景观的演变和侵蚀, 而且也是高山地区最具破坏性的自然灾害(Braathen等, 2004; Schneider等, 2011). 自20世纪60年代以来, 不同量级的冰崩事件被广泛的报道, 比如在欧洲阿尔卑斯山(Faillettaz等, 2011, 2015; Fischer等, 2013)、阿拉斯加-育空地区(Lipovsky等, 2008; Jacquemart等, 2020)、高加索地区(Huggel等, 2005)、安第斯山脉(Falaschi等, 2019)和亚洲高山区(van der Woerd等, 2004; Kääb等, 2018; Leinss等, 2021, Wang等, 2021), 并且部分事件造成了严重的人员伤亡和经济损失. 然而, 由于缺乏相关实测数据, 绝大多数的冰崩事件都未能得到深入研究. 尽管如此, 当前研究的基本共识是, 冰崩规模和发生频率的增加与气候变化密切相关(Schneider等, 2011).

2021年2月7日, 印度杰莫利地区(喜马拉雅山西段南达昆提峰附近)发生了灾难性的冬季山洪事件. 基于卫星影像和实地调查的快速分析发现, 该洪水事件是由上游高山区的冰川和岩石整体崩塌诱发, 并对下游长达55km范围内的地区造成了严重影响(Martha等, 2021). 该事件共造成200多人死亡或失踪, 并对基础设施造成严重破坏(其中包括两座水电站)(图1). 在喜马拉雅山地区, 具有如此破坏性的冰崩事件还未见诸报道. 而且, 由于冰川区的极端崩塌事件通常发生在夏季(意味着高温、更多的融水或降水), 这一冬季事件更显反常. 此外, 在气候变暖背景下, 喜马拉雅山地区冰川物质加速流失(Zhou等, 2018; Maurer等, 2019; Shean等, 2020), 加之该地区处于构造活跃的地震多发区(Kargel等, 2016; Sharma等, 2020), 气候变化和地震活动的相互作用使得斜坡或者冰川失稳的成因更加复杂. 因此, 探究印度杰莫利冰-岩崩塌事件演变过程和潜在触发机制具有重要意义, 并且亟待解决.

最近的一项研究较为全面的重建了此次冰-岩崩塌灾害链的全过程, 但其主要侧重于分析崩解产生的碎

屑流的演变和对下游地区的影响(Shugar等, 2021). 仅就冰-岩崩塌本身而言, 当前研究对其演化过程、产生原因和触发机制的解译相对简略, 值得进一步深入研究. 因此, 本文进行了如下研究: (1) 利用超高空间分辨率的卫星数据并基于大地测量法对该事件进行更加全面的量化分析(包括冰崩源区面积、体积变化、平均高度变化、坡度变化等); (2) 利用密集的多源时序卫星影像回溯更加准确的演变过程; (3) 通过整合多方面的定量和定性信息(如冰川厚度变化、地貌分析、地震活动、气候和气象分析等), 对触发原因和机制给出更加明确的解释. 本文的研究结果将为喜马拉雅山和其他高山区的冰崩灾害监测提供一些新的见解和启示.

2 研究区域

此次冰-岩崩塌事件发生在印度北阿坎德邦杰莫利地区, 靠近喜马拉雅山西段的南达昆提峰(海拔为6309m)(图1). 该地区的气候主要受印度夏季季风控制, 同时也部分受西风带影响(Shugar等, 2021). 1981~2020年期间的ERA5-Land再分析资料结果显示, 该区域年均降水量约为1770mm, 其中夏季降水(6~8月)占年降水总量的54%; 年平均气温约为2.1℃, 其中夏季和冬季(12月至次年2月)平均气温分别为10.2℃和-6.3℃(网络版附图S1, <http://earthcn.scichina.com>). 此外, 该区域地形极为复杂, 具体表现为坡度陡, 垂直落差大. 特别是在此次冰崩区域, 地形坡度平均约为38°, 距离下方河谷约2.5~3.0km, 对应的最大垂直落差约为1750m(图1).

3 数据和方法

本研究主要利用高分辨率的TanDEM-X和Pléiades数据来获取此次冰-岩崩塌事件的基本信息(如体积变化), 并进一步结合SRTM DEM和HMA DEM数据分析周边区域的冰川厚度变化. 同时, 本研究还利用Sentinel-2影像计算崩解区年际尺度的表面位移, 进一步结合其他高分辨率影像(如高分1号, Planet)进行地貌特征分析. 此外, 本研究还基于ERA5-Land再分析资料深入分析了研究区内的气候和天气变化特征. 表1汇总了本研究所用数据的详细信息和使用目的, 具体的数据处理过程如下.

图 1 研究区域概况

(a)底图是Sentinel-2的真彩色图像(RGB: 波段432组合), 黄线代表冰川边界(世界冰川编目v6.0数据)(RGI Consortium, 2017); (b)和(c)分别为冰崩区域的地形图和坡度图; (d)冰-岩崩塌区的三维视图

3.1 冰崩事件前后的DEM生成

对于崩塌前该区域的高程信息, 本文使用一景2018年获取的TanDEM-X双站模式数据并利用雷达干涉测量技术来提取数字高程模型(digital elevation model, DEM). 具体来说, 首先利用2021年最新发布的

NASA DEM数据(空间分辨率为30m)来进行参考地形相位的模拟. 随后, 从原始干涉相位中减去模拟的地形相位, 即可得到与高度变化相关的干涉相位(Li等, 2017). 进一步采用最小费用流方法对干涉相位进行解缠, 其中用于掩模处理的相干性阈值设置为0.7. 在解缠相位图中, 采用多项式拟合法检查并去除残余的轨

表 1 本研究中使用的遥感数据的主要信息^{a)}

卫星平台	获取时间	空间分辨率	用途
SRTM DEM	2000-02	30.0m	参考DEM, 高程变化估计
TanDEM-X	2018-05-16	~2.0m	高程变化估计
HMA DEM	2015-05-07	8.0m	高程变化估计
Pléiades-1A	2021-02-10	全色波段: 0.5m 多光谱波段: 2.0m	高程变化估计, 地貌分析
Sentinel-2	2016-09-19(A) 2017-10-14(A) 2018-09-19(A) 2019-10-24(B) 2020-10-28(B)	近红外波段: 10.0m	位移估计, 地貌分析
高分1号	2020-10-06	全色波段: 2.0m 多光谱波段: 8.0m	地貌分析
Planet	2021-02-06	全色波段: 0.5m 多光谱波段: 2.0m	地貌分析
ERA5-land	1979~2020	0.1°×0.1°	气候和气象分析

a) “A”和“B”分别表示Sentinel-2A和Sentinel-2B卫星。需要说明的是, 对于Sentinel-2卫星数据, 本文只给出了用于估计表面位移的影像信息

道误差。在此过程中, 本研究并未考虑在叠掩和阴影区域的相位信号(Du等, 2017)。最后, 通过相位与高度转换公式将解缠的相位转换为高程差(Li等, 2018), 并进一步将其与参考DEM相加得到最终高分辨率的TanDEM-X DEM(10m)。上述雷达数据处理过程主要通过GAMMA软件完成。

为获取崩塌后的高程信息, 本文获取了2021年2月10日(冰崩后第三天)Pléiades卫星拍摄的超高分辨率的光学立体像对(前后视成像配置, 空间分辨率为0.5m), 并基于摄影测量方法来提取冰崩后的DEM(Berthier等, 2014; Rieg等, 2018)。为了克服该地区缺乏高精度地面控制点的问题, 研究中利用新生成的TanDEM-X DEM(2018年)来提供水平和垂直方向的参考信息, 并采用影像自动匹配技术进行控制点和连接点的识别。最后, 经过人工检查(主要是删除一些位于山谷和山脊处的坐标精度相对低的候选点), 共生成12个控制点和42个连接点, 空三解算的模型残差为0.45个像素。基于上述处理过程, 最终生成了分辨率为10m的Pléiades DEM。上述光学影像处理过程通过PCI Geomatica软件完成, 详细的数据处理过程和说明可参考Zhou等(2019a)。

3.2 冰崩区高程变化估计及其不确定性评估

本文采用大地测量法(即DEM差分法)来估算冰崩

区及其临近区域在2000~2021年内三个子时段的高程变化(Zhou等, 2017)。首先, 采用一种稳健的三维几何解析方法对所使用SRTM DEM(2000年)、HMA DEM(2015年)、TanDEM-X DEM(2018年)和Pléiades DEM(2021年))进行数据配准, 配准精度一般为1/10个像素(Nuth和Kääb, 2011)。随后, 为了尽可能减弱因雷达信号穿透冰川导致的高程偏差的影响, 研究中采用了依据冰川表面类型分别进行穿透校正的策略。具体而言, 首先利用多阈值决策方法生成该区域的冰川表面分类图, 主要分为雪盖区、裸露冰区和表碛覆盖区(Zhou等, 2019b)。随后, 在C波段SRTM DEM的穿透校正中, 裸露冰区和雪盖区的雷达穿透校正系数分别采用1.7m和5.1m(Kääb等, 2012); 在X波段TanDEM DEM的穿透校正中, 相应的校正系数分别为0.5m和4.0m(Lambrech等, 2018; Liu等, 2019; Leinss和Bernhard, 2021)。考虑到上述两种短波雷达在表碛覆盖区的穿透深度可以忽略(Lambrech等, 2018), 本研究在表碛覆盖区未进行穿透校正。

对于冰川厚度变化的不确定性($\sigma_{M,i}$), 主要来自两个方面: 初始的冰川高程变化的不确定性($\sigma_{M,e}$)和雷达穿透深度估计的不确定性($\sigma_{M,p}$)。根据误差传播定律, 最终的冰川厚度变化的不确定性可由公式(1)计算得到。其中, 对于上述两个来源的不确定性($\sigma_{M,i}$), 本研究均利用非冰川区高度变化的标准差来近似表示, 它们

可以通过公式(2)计算得到(Rolstad等, 2009). 其中, i 代表不确定性的来源类型(即“ p ”或“ e ”), S 代表冰川面积. S_{cor} 表示有效的相关区域, 可以计算为 πd^2 , 其中 d 是非冰川区域的自相关距离(本文假定为500m)(Brun等, 2017).

$$\sigma_{\Delta h, t} = \sqrt{\sigma_{\Delta h, e}^2 + \sigma_{\Delta h, p}^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta h, i} = \begin{cases} \sigma_{\Delta h, i}, & S \leq S_{\text{cor}}, \\ \sigma_{\Delta h, i} \sqrt{\frac{S_{\text{cor}}}{SS}}, & S > S_{\text{cor}}. \end{cases} \quad (2)$$

3.3 冰崩区表面位移估计和地貌分析

本文基于Sentinel-2的近红外波段影像(即波段8, 空间分辨率为10m)并利用影像互相关算法计算获取了2016~2020年间崩塌区的年际表面位移. 相关数据处理通过COSI-Corr软件包完成(Lacroix等, 2018; Ding等, 2020). 在进行常规的影像互相关计算之前, 本研究首先对Sentinel-2数据之间的定位误差(特别是当不同平台的影像进行对比时, 如Sentinel-2A与Sentinel-2B)进行了检查和校正. 随后, 选择频域相关计算器进行数据处理, 其中初始搜索窗口大小设置为64×64像素, 最终窗口为16×16像素. 同时, 采样步长设置为2, 对应于最终分辨率为20m的位移场. 对于其他配置参数, 研究中采用默认设置, 即鲁棒性迭代因子设置为2, 相关性掩膜阈值设置为0.9(COSI-Corr用户手册, 2017). 此外, 为了进一步回溯冰-岩崩塌的演化过程, 研究中还将近250张光学卫星影像(包括Planet、高分1号 and 几乎所有存档的Sentinel-2影像)进行了基于目视解译的崩塌区地貌变化分析.

3.4 气候和气象变化分析

本文使用ERA5-Land再分析资料来进行崩塌区及周边区域的气候和天气变化分析. 首先, 从气候数据仓储网站(<https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>)下载了1981年1月1日至2021年2月7日(冰崩当天)的逐月和逐小时两种时间分辨率的数据(空间分辨率为0.1°×0.1°), 并将其分别转换为年平均和日平均的数据. 在数据处理过程中, 本文主要使用了气温、总降水量和降雪量三个气候变量. 随后, 以30年(即1981~2010年)的年平均值和日平均值分别作为参考基准数据进行气候变化和天气变化分析(即气温和总降水量的异

常检测)(Cao等, 2020). 同时, 为了更好地理解冰-岩崩塌触发原因, 研究中也对降雪量和总降水量进行了对比分析, 以此来区分降雨和降雪事件. 值得注意的是, 由于缺乏该地区的站点气象观测数据, 难以在研究区评估ERA5-Land再分析数据集的可靠性, 但临近区域的评估结果显示ERA5-Land的气温和降水数据与站点观测有较强的相关性(Azam和Srivastava, 2020; Chen等, 2021). 因此, 可以推测该数据集在本研究区域应该是相对可靠的.

4 结果

4.1 冰崩区的地貌和体积变化

图2展示了此次印度杰莫利冰-岩崩塌事件前后的地貌和高程变化. 从地貌变化的形态特征来看(图2a和图2b), 此次事件属于冰川-岩石滑坡, 即冰川下附基岩滑坡引起的冰川和岩石整体崩塌, 崩塌区域的海拔高度大约在5000~5600m. 崩塌的源区长约794m(指水平距离), 顶部最宽处约为608m, 总面积为 $2.89 \times 10^5 \text{ m}^2$. 需要说明的是, 该崩塌源区的边界是根据高度变化图人工勾画完成(图2c). 同时, 计算得到的崩塌区物质流失的体积为 $2.46 \times 10^7 \text{ m}^3$, 对应的在整个源区范围内平均高度变化为-85m. 上述结果与Shugar等(2021)的结果相对一致, 其计算的体积损失为 $2.69 \times 10^7 \text{ m}^3$, 平均厚度变化为-80m. 此外, 崩塌源区的高度变化呈现出明显的空间趋势, 即崩塌体厚度由两侧向中间、由低海拔向高海拔逐渐增大(图2c), 并在崩塌区中上部(海拔约5500m处)达到最大变化(约-170m). 这些特征也可从横向和纵向的剖面变化图反映出来(图2d~2g). 同时, 三个横向剖面线呈现出“U”型变化特征(图2和网络版附图S2), 这也再次证明此次崩塌属于滑坡事件.

4.2 冰崩事件的演化过程

图3梳理了杰莫利冰-岩崩塌演变过程中的重要事件和时间线. 具体来说, 在2017年5月27日至9月19日之间, 冰川顶部(即冰川和背靠山体的交界处)已出现明显的裂缝(图4a, 4b). 这主要是由冰-岩体沿下坡方向的整体滑动造成的, 其平均位移约为15m(图5a). 滑动前后影像的可视化分析表明崩塌区的表面位移是空间异质的, 即源区中部区域滑动相对显著(网络版附图S3). 同时, 顶部两侧似乎受到拉拽作用, 并没有表现

图2 印度杰莫利冰-岩崩塌事件前后的地貌和高程变化

(a) 冰-岩崩塌前的全色图像(高分1号卫星, 拍摄时间为2020年10月6日, 空间分辨率为2m); (b) 冰-岩崩塌后的真彩色影像(Pléiades卫星, 拍摄时间为2021年2月10日, 空间分辨率为2m); (c) 2018~2021年的崩塌区高程变化图(黑线表示高度变化的等值线); (d)~(g) 分别表示四个剖面的高度变化(对应的崩塌前后的高程剖面见网络版附图S2), 具体位置见图(c)

出显著的位移. 这种位移变化的空间模式表明, 滑动很可能是由冰川下附基岩的运动造成的. 在此之后的2017年秋季和冬季, 没有发现明显的滑动. 直至2018年7~9月初, 冰-岩体开始进一步滑动(约10m)(图5b), 冰川顶部裂缝扩张, 随后在该年的秋季和冬季再次趋于稳定. 此后, 在2019年和2020年均发现类似的情况, 即冰-岩体在夏季滑动, 在其他季节保持稳定. 但与前两年相比, 后两年位移幅度相对较小(约5m)(图5c和图5d). 值得注意的是, 2020年10月末冰川所在斜坡最高处出现了一条基岩裂隙(图3, 图4g). 这可能是由基岩断裂造成的, 同时也是冰川下附基岩进一步演变的征兆. 该裂隙在随后的11月和12月缓慢扩张, 而从2021

年1月初到2月6日(即冰崩前一天)呈现出明显的持续变长(主要沿着横向)(图3, 图4h~4p). 直至2月7日, 冰-岩体恰好沿着该基岩裂隙发生崩塌. 综上所述, 此次崩塌事件从启动到最终触发历时大约三年半时间, 并表现出明显的季节性滑动特征(主要是夏季), 同时在2020/2021年冬季出现异常的基岩裂隙扩张. 需要说明的是, 在2020/2021年冬季并未发现明显的整体滑动. 但是, 根据基岩裂隙的演变过程, 可以推测冰-岩体在此期间可能经历了蠕变的过程. 此外, 考虑到光学影像匹配受到诸多因素的影响(如季节性雪盖、相对低的影像分辨率), 本研究中的表面位移估计可能并不是非常精确, 但也提供了相对粗略的定量评估.

图3 印度杰莫利冰-岩崩塌过程中的重要事件和时间线

图4 印度杰莫利冰-岩体崩塌前的地貌演化情况

(p)为Planet蓝色波段影像, 其余均为Sentinel-2真彩色影像

5 讨论

关于印度杰莫利冰-岩崩塌的原因, Shugar等

(2021)主要从崩塌源区的地形和地质条件方面给出了初步讨论. 然而, 此前的相关研究已经发现并证实, 冰崩的触发因素多且复杂, 主要包括: (1) 地质和地形条

图5 2016~2020年期间冰-岩崩塌区域年际尺度的表面位移

件(如表面坡度、基底岩性等); (2) 地震活动; (3) 几何形状变化; (4) 融水和降水等液态水的大量输入; (5) 崩塌体底部的热状态的变化等(Faillettaz等, 2015; Gilbert等, 2018; Kääb等, 2018; Falaschi等, 2019; Jacquemart等, 2020). 有关上述因素的详细分析如下.

在本研究中, 我们发现该崩塌事件发生后, 崩解源区地表坡度由 38° 转变为 32° , 这表明滑坡基底的坡度仍然非常陡峭(网络版附图S2). 这种地形特征会显著增加冰川失稳的可能性. 通过对高分辨率影像的目视分析, 本研究还发现滑坡体底部的大部分区域(主要在中上部区域)相对粗糙, 表现为岩石碎片散布(网络版附图S3). 这说明此处的岩性特征很可能是相对松软或易断裂的, 这也被Shugar等(2021)开展的实地调查所证实. 上述地形和地质条件易于发生滑坡或者崩塌, 因此其在该崩塌事件中起到了关键作用. 随后, 本研究从美国地质调查局收集了以崩塌区为中心、半径为200km范围内的地震记录. 统计结果显示, 在2016年1月1日至2021年2月7日期间总共有23次地震, 震级介于4.0~5.2(网络版附图S5, 网络版附表S1). 然而, 仅从发生时间的角度来看, 地震记录与本研究观测到的冰-岩体的滑动模式几乎完全不同步. 因此, 在很大程度上, 可以排除地震触发作为这一事件的启动和最终崩塌的直接原因. 至于地震活动在冰-岩崩塌的长期演变中是否扮演着重要角色, 当前很难给出相对确定的解释.

此外, 本研究得到的多个时段的冰川厚度变化结果表明, 崩塌区及其周边地区的冰川经历了加速的厚度减薄, 变化速率分别为 $(-0.09 \pm 0.07) \text{ m a}^{-1}$ (2000~2015年), $(-0.31 \pm 0.07) \text{ m a}^{-1}$ (2015~2018年)和

$(-0.31 \pm 0.07) \text{ m a}^{-1}$ (2018~2021年)(图6a~6c). 由于在崩塌源区没有得到有效的厚度变化结果(形成数据空洞), 通过对附近冰川厚度变化的分析发现, 冰川减薄向高海拔地区一直延伸至~5200m处. 这个近似的冰川物质平衡线正好横向穿过了冰-岩体(图6d), 意味着冰川(或冰-岩体)的几何形状在过去一直发生着变化. 其消融模式(即冰川下部冰面显著减薄, 而上部无明显变化)也在光学影像中得到体现(图4f). 这会导致沿下坡方向的驱动力增加, 同时冰川前端或者下部的自我支撑力下降, 特别是在陡峭的斜坡上(Kos等, 2016; Dai等, 2020; Storni等, 2020). 同时, 崩塌源区的纵剖面高度变化在一定程度上也反映了这种“头重脚轻”的几何结构(图2g). 此外, 已有研究发现喜马拉雅山中西部广大地区的冰川整体上都经历了长期的表面减薄, 并呈现加速趋势(网络版附图S6), 变化速率分别为 $(-0.07 \pm 0.15) \text{ m a}^{-1}$ (1975~2000年)和 $(-0.14 \pm 0.15) \text{ m a}^{-1}$ (2000~2016年)(Maurer等, 2019). 这与该地区气候变暖的环境背景是吻合的, 如图7所示. 在喜马拉雅山及其南侧区域(包括崩塌区), 1981~2020年期间长期的降水趋势在空间上变化较大且均未通过显著性检验(图7a和7c). 然而, 山脉两侧的气温均呈现统计显著的升温(图7b). 特别是在崩塌区, 气温的上升速率为 $0.14^\circ\text{C} (10\text{a})^{-1}$ (图7d). 结合上述结果, 本研究认为冰川(或冰-岩体)几何形状的变化实际上是由于气候变暖引起的长期演变的结果.

天气变化分析表明, 在滑动启动期(即在2017年5月27日至9月19日之间), 崩塌区累计降水(主要为降雨)异常高达127.41mm, 平均气温异常仅为 0.08°C (图8a). 这表明在此期间冰-岩体系统中可能有大量液态水输

图6 崩塌区及其周边区域冰川厚度变化速率图和等高线图

其中等高线间隔为200m, 图中红线表示海拔5200m处的等高线

入, 这为滑动带来了很强的外部驱动力. 同时, 在崩塌触发前的6个月(即2020年10月1日至2021年2月7日), 平均气温异常为 0.68°C , 累积降水异常(主要是降雪)为 -108.37mm (图8b). 这表明2020/2021年冬季相对干燥且存在异常变暖. 特别是在2021年1月1日至2月7日期间(崩塌前约40天内), 可以观察到平均气温异常为 2.26°C 的显著冬季变暖事件, 这也导致了异常的冬季消融. 这可在光学影像中得到证实, 即在2020/2021年冬季, 可以清晰地看到新的冬季降雪很快就开始融化(图4). 这种现象在此前还从未出现过, 因为在此前几年的冬季, 崩塌区几乎完全是被积雪所覆盖(网络版附图S7). 上述冬季的融水在冰-岩体的蠕变过程中可能

发挥着复杂的作用(比如基底润滑或者冻胀效应), 并且可能是最终崩塌触发的直接诱因. 此外, 冰-岩体的季节性滑动模式(主要指夏季)也意味着融水或降雨在该崩塌演进过程中扮演着重要角色. 因此, 可以推测该事件的季节性滑动过程主要是受水文驱动因素控制.

至于冰川底部的热状态变化情况, 推测冰川很可能是完全冻结在下附基岩上. 这是因为如果冰川底部热状态发生变化, 冰体一般会以冰崩或冰瀑的形式直接从冰川系统中脱离或坠落, 或者至少会在冰川主干表面出现冰裂缝(Faillietaz等, 2015; Kääb等, 2018). 然而, 这些现象均未发生. 对于冰川下附岩石体的基底的热状态, 其变化可能较为显著. 这是因为崩塌源区位于

图 7 冰崩区及其周边区域气候变化情况

印度西北部年降水量(a)和年平均气温(b)的变化趋势及其显著性水平(1981~2020)。白色五角星代表崩塌区域的格点位置。(c)和(d)分别代表以崩塌区格点为中心,周边邻域5个像素内的总降水量和年均气温的平均变化趋势

典型的冻土地带(Gruber, 2012; Gruber等, 2017), 长期的气候变暖会导致冻土温度上升, 同时造成冻土退化。这一点已经在全球范围内被大量的观测所证实(Hock等, 2019)。尽管已有研究表明, 冻土退化(特别是在陡峭的基岩处)极易导致斜坡失稳(即发生冰川或岩石崩解)(Gruber和Haeberli, 2007; Fischer等, 2013), 但本文推测由气候变暖导致的冻土退化可能是此次印度杰莫利崩塌事件的原因之一, 但并不是决定性因素。这是因为在该区域并没有发现任何通常伴随着冻土退化而发生的小量级的岩石崩解事件。另外, 在基岩的顶部裂缝处潜在的液态水的渗入也可能对滑坡基底造成了多方面的影响: 如导致基岩处更快更深的冻土解冻、冻胀效应引起基岩体积膨胀, 以及导致冰-岩体剪切强度的下降(Gruber和Haeberli, 2007)。从经验上讲, 这些过程(可能在短期时间尺度上)可能在该崩塌事件的演变和触

发中发挥了关键作用。

综上所述, 本文认为杰莫利冰-岩崩塌事件很可能是由气候变化和天气异常共同作用于陡峭的斜坡和易断裂的地质条件上造成的。具体来说, 长期的气候变暖导致崩塌体出现了“头重脚轻”的几何变化, 然后异常的强降雨诱发了冰-岩体的滑动, 在经过持续滑动之后由异常的冬季升温事件触发了最终的崩塌。另外, 本文也推测此次崩塌事件可能是相关事件在喜马拉雅山区的前兆。因为该事件与世界范围内其他高山区的崩塌事件(如阿尔卑斯山冰-岩崩塌事件(Fischer等, 2013))在多个方面表现出高度的相似性, 如物质损失的量级和崩塌前异常的升温等。但是需要指出的是, 关于冰崩的驱动机制的准确解译在当前是非常困难的。本研究主要是基于遥感观测, 因此仅能给出基于分析的解译。此外, 从本文的分析来看, 一旦这种基底滑

图 8 冰川岩石体滑动启动(a)和最终崩解触发(b)前后逐日的天气异常

动开始启动,那么整个演变过程将是不可逆的,冰崩早晚会发生。这也说明潜在冰崩的早期识别对于相关灾害的预警和防控具有重要意义,特别是对于附近人口密集、环境复杂且处于变化之中的喜马拉雅山地区。

6 结论和启示

关于2021年2月7日发生在印度杰莫利地区的冰-岩崩塌事件,本研究利用多源遥感数据发现,该事件属于冰-岩体滑坡,即冰川下附基岩的滑动导致了冰-岩体的整体崩塌。此次事件导致冰川和岩石物质损失为 $2.46 \times 10^7 \text{ m}^3$,崩塌源区的平均高度变化约为 -85 m ,源区面积为 $2.89 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。同时,本研究发现冰-岩体在2017年夏天就已开始滑动,并在此之后呈现出明显的季节性滑动模式(主要在夏季)。这意味着该事件的演变过程很大程度上受到水文驱动因素的影响。在滑动开始期间和崩塌触发之前,区域内分别出现了强降雨和异常且显著的冬季升温事件。另外,由区域气候变

暖造成的冰川表面的差异化变薄模式反映了冰-岩体几何形状经历了长期的改变。综合这些发现表明,印度杰莫利冰-岩崩塌事件可归因于气候变化和异常天气的联合影响。本研究为气候变暖背景下高海拔地区(特别是亚洲高山区)的斜坡或冰川不稳定性研究提供了新的有价值的证据。同时,本研究也为冰崩相关的灾害预警提供了启示:对于亚洲和世界其他高山区,迫切需要对具有高冰崩风险的冰川进行识别。具体而言,首先是全面综合地开展冰川多要素变化监测(如地形、地质、冰川几何、冰裂缝和流速等),其次是定期开展潜在触发因素的变化监测(如气温和降水,特别是极端天气事件)。此外,本研究也证明了高时空分辨率遥感数据对于监测极端灾害事件和探索其演化过程及潜在机制的重要性。

致谢 感谢国家自然科学基金委和中国博士后科学基金会对本研究的支持。感谢两位匿名审稿专家提供的宝贵建议。感谢中国自然资源部陆地卫星遥感应用中心、德

国宇航局等机构对本研究提供的数据支持.

参考文献

- Azam M F, Srivastava S. 2020. Mass balance and runoff modelling of partially debris-covered Dokriani Glacier in monsoon-dominated Himalaya using ERA5 data since 1979. *J Hydrol*, 590: 125432
- Berthier E, Vincent C, Magnússon E, Gunnlaugsson Á Þ, Pitte P, Le Meur E, Masiokas M, Ruiz L, Pálsson F, Belart J M C, Wagnon P. 2014. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *Cryosphere*, 8: 2275–2291
- Braathén A, Blikra L H, Berg S S, Karlsen F. 2004. Rock-slope failures in Norway; type, geometry, deformation mechanisms and stability. *Norw J Geol*, 84: 67–88
- Brun F, Berthier E, Wagnon P, Kääb A, Treichler D. 2017. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016. *Nat Geosci*, 10: 668–673
- Cao B, Gruber S, Zheng D, Li X. 2020. The ERA5-Land soil temperature bias in permafrost regions. *Cryosphere*, 14: 2581–2595
- Chen Y, Sharma S, Zhou X, Yang K, Li X, Niu X, Hu X, Khadka N. 2021. Spatial performance of multiple reanalysis precipitation datasets on the southern slope of central Himalaya. *Atmos Res*, 250: 105365
- COSI-CORR User's Guide. 2017. Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation. California Institute of Technology, USA. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/index.html
- Dai C, Higman B, Lynett P J, Jacquemart M, Howat I M, Liljedahl A K, Dufresne A, Freymueller J T, Geertsema M, Ward Jones M, Haeussler P J. 2020. Detection and assessment of a large and potentially tsunamigenic periglacial landslide in Barry Arm, Alaska. *Geophys Res Lett*, 47: e89800
- Deline P, Gruber S, Amann F, Bodin X, Delaloye R, Failletaz J, Fischer L, Geertsema M, Giardino M, Hasler A, Kirkbride M, Krautblatter M, Magnin F, McColl S, Ravel L, Schoeneich P, Weber S. 2021. Ice loss from glaciers and permafrost and related slope instability in high-mountain regions. In: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier. 501–540
- Ding C, Zhang L, Liao M, Feng G, Dong J, Ao M, Yu Y. 2020. Quantifying the spatio-temporal patterns of dune migration near Minqin Oasis in northwestern China with time series of Landsat-8 and Sentinel-2 observations. *Remote Sens Environ*, 236: 111498
- Du Y N, Xu Q, Zhang L, Feng G C, Li Z W, Chen R F, Lin C W. 2017. Recent landslide movement in Tsaoling, Taiwan tracked by TerraSAR-X/TanDEM-X DEM time series. *Remote Sens*, 9: 353
- Failletaz J, Sornette D, Funk M. 2011. Numerical modeling of a gravity-driven instability of a cold hanging glacier: Reanalysis of the 1895 break-off of Altelsgletscher, Switzerland. *J Glaciol*, 57: 817–831
- Failletaz J, Funk M, Vincent C. 2015. Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Rev Geophys*, 53: 203–224
- Falaschi D, Kääb A, Paul F, Tadono T, Rivera J A, Lenzano L E. 2019. Brief communication: Collapse of 4 Mm³ of ice from a cirque glacier in the Central Andes of Argentina. *Cryosphere*, 13: 997–1004
- Fischer L, Huggel C, Kääb A, Haeberli W. 2013. Slope failures and erosion rates on a glacierized high-mountain face under climatic changes. *Earth Surf Proc Land*, 38: 836–846
- Gilbert A, Leinss S, Kargel J, Kääb A, Gascoin S, Leonard G, Berthier E, Karki A, Yao T. 2018. Mechanisms leading to the 2016 giant twin glacier collapses, Aru Range, Tibet. *Cryosphere*, 12: 2883–2900
- Gruber S. 2012. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *Cryosphere*, 6: 221–233
- Gruber S, Fleiner R, Guegan E, Panday P, Schmid M O, Stumm D, Wester P, Zhang Y, Zhao L. 2017. Review article: Inferring permafrost and permafrost thaw in the mountains of the Hindu Kush Himalaya region. *Cryosphere*, 11: 81–99
- Gruber S, Haeberli W. 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *J Geophys Res*, 112: F02S18
- Hock R, G Rasul, C Adler, B Cáceres, S Gruber, Y Hirabayashi, M Jackson, A Kääb, S Kang, S Kutuzov, A Milner, U Molau, S Morin, B Orlove, H Steltzer. 2019. High mountain areas. In: Pörtner H O, Roberts D C, Delmotte V M, Zhai P, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegria A, Nicolai M, Okem A, Petzold J, Rama B, Weyer N M, eds. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2/>
- Huggel C, Zraggen-Oswald S, Haeberli W, Kääb A, Polkvoj A, Galushkin I, Evans S G. 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: Assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 5: 173–187
- Jacquemart M, Loso M, Leopold M, Welty E, Berthier E, Hansen J S S, Sykes J, Tiampo K. 2020. What drives large-scale glacier detachments? Insights from Flat Creek glacier, St. Elias Mountains, Alaska. *Geology*, 48: 703–707
- Kargel J S, Leonard G J, Shugar D H, Haritashya U K, Bevington A, Fielding E J, Fujita K, Geertsema M, Miles E S, Steiner J, Anderson E, Bajracharya S, Bawden G W, Breashears D F, Byers A, Collins B, Dhital M R, Donnellan A, Evans T L, Geai M L, Glasscoe M T, Green D, Gurung D R, Heijnen R, Hilborn A, Hudnut K, Huyck C,

- Immerzeel W W, Jiang L M, Jibson R, Kääb A, Khanal N R, Kirschbaum D, Kraaijenbrink P D A, Lamsal D, Liu S Y, Lv M Y, McKinney D, Nahirnick N K, Nan Z T, Ojha S, Olsenholler J, Painter T H, Pleasants M, Pratima K C, Yuan Q I, Raup B H, Regmi D, Rounce D R, Sakai A, Shangguan D H, Shea J M, Shrestha A B, Shukla A, Stumm D, van K M, Voss K, Wang X, Weihs B, Wolfe D, Wu L Z, Yao X J, Yoder M R, Young N. 2016. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepals 2015 Gorkha earthquake. *Science*, 351: aac8353
- Kääb A, Berthier E, Nuth C, Gardelle J, Arnaud Y. 2012. Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488: 495–498
- Kääb A, Leinss S, Gilbert A, Bühler Y, Gascoin S, Evans S G, Bartelt P, Berthier E, Brun F, Chao W A, Farinotti D, Gimbert F, Guo W, Huggel C, Kargel J S, Leonard G J, Tian L, Treichler D, Yao T. 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nat Geosci*, 11: 114–120
- Kääb A, Jacquemart M, Gilbert A, Leinss S, Girod L, Huggel C, Falaschi D, Ugalde F, Petrakov D, Chernomorets S, Dokukin M, Paul F, Gascoin S, Berthier E, Kargel, J S. 2021. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers-more frequent than thought? *Cryosphere*, 15: 1751–1785
- Kos A, Amann F, Strozzi T, Delaloye R, Ruetz J, Springman S. 2016. Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland. *Geophys Res Lett*, 43: 12,466–12,474
- Lacroix P, Bièvre G, Pathier E, Knies U, Jongmans D. 2018. Use of Sentinel-2 images for the detection of precursory motions before landslide failures. *Remote Sens Environ*, 215: 507–516
- Lambrecht A, Mayer C, Wendt A, Floricioiu D, Völksen C. 2018. Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier. *J Glaciol*, 64: 637–648
- Leinss S, Bernardini E, Jacquemart M, Dokukin M. 2021. Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 21: 1409–1429
- Leinss S, Bernhard P. 2021. TanDEM-X: Deriving InSAR height changes and velocity dynamics of great aletsch glacier. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens*, 14: 4798–4815
- Li G, Lin H, Ye Q. 2018. Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to ~2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry. *Remote Sens Environ*, 206: 336–349
- Li J, Li Z W, Zhu J J, Li X, Xu B, Wang Q J, Hu J. 2017. Early 21st century glacier thickness changes in the Central Tien Shan. *Remote Sens Environ*, 192: 12–29
- Lipovsky P S, Evans S G, Clague J J, Hopkinson C, Couture R, Bobrowsky P, Ekström G, Demuth M N, Delaney K B, Roberts N J, Clarke G, Schaeffer A. 2008. The July 2007 rock and ice avalanches at Mount Steele, St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *Landslides*, 5: 445–455
- Liu L, Jiang H, Wang H, Ma N, Xu H. 2019. Accelerated glacier mass loss (2011–2016) over the Puruogangri ice field in the inner Tibetan Plateau revealed by bistatic InSAR measurements. *Remote Sens Environ*, 231: 111241
- Martha T R, Roy P, Jain N, Kumar K V, Reddy P S, Nalini J, Sharma S V S P, Shukla A K, Durga R K H V, Narender B, Rao P V N, Muralikrishnan S. 2021. Rock avalanche induced flash flood on 07 February 2021 in Uttarakhand, India—A photogeological reconstruction of the event. *Landslides*, 18: 2881–2893
- Maurer J M, Schaefer J M, Rupper S, Corley A. 2019. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Sci Adv*, 5: eaav7266
- Nuth C, Kääb A. 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere*, 5: 271–290
- RGI Consortium. 2017. Randolph Glacier Inventory—A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. DigitalMedia, Colorado, USA
- Rieg L, Klug C, Nicholson L, Sailer R. 2018. Pléiades tri-stereo data for glacier investigations—Examples from the European Alps and the Khumbu Himal. *Remote Sens*, 10: 1563
- Rolstad C, Haug T, Denby B. 2009. Spatially integrated geodetic glacier mass balance and its uncertainty based on geostatistical analysis: Application to the western Svartisen ice cap, Norway. *J Glaciol*, 55: 666–680
- Schneider D, Huggel C, Haeberli W, Kaitna R. 2011. Unraveling driving factors for large rock-ice avalanche mobility. *Earth Surf Proc Land*, 36: 1948–1966
- Sharma Y, Pasari S, Ching K E, Dikshit O, Kato T, Malik J N, Chang C P, Yen J Y. 2020. Spatial distribution of earthquake potential along the Himalayan arc. *Tectonophysics*, 791: 228556
- Shean D E, Bhushan S, Montesano P, Rounce D R, Arendt A, Osmanoglu B. 2020. A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance. *Front Earth Sci*, 7: 363
- Shugar D H, Jacquemart M, Shean D, Bhushan S, Upadhyay K, Sattar A, Schwanghart W, McBride S, de Vries M V W, Mergili M, Emmer A, Deschamps-Berger C, McDonnell M, Bhambri R, Allen S, Berthier E, Carrivick J L, Clague J J, Dokukin M, Dunning S A, Frey H, Gascoin S, Haritashya U K, Huggel C, Kääb A, Kargel J S, Kavanaugh J L, Lacroix P, Petley D, Rupper S, Azam M F, Cook S J, Dimri A P, Eriksson M, Farinotti D, Fiddes J, Gnyawali K R,

- Harrison S, Jha M, Koppes M, Kumar A, Leinss S, Majeed U, Mal S, Muhuri A, Noetzli J, Paul F, Rashid I, Sain K, Steiner J, Ugalde F, Watson C S, Westoby M J. 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373: 300–306
- Storni E, Hugentobler M, Manconi A, Loew S. 2020. Monitoring and analysis of active rockslide-glacier interactions (Moosfluh, Switzerland). *Geomorphology*, 371: 107414
- van der Woerd J, Owen L A, Tapponnier P, Xiwei X, Kervyn F, Finkel R C, Barnard P L. 2004. Giant, ~M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics. *Geo Soc Am Bull*, 116: 394–406
- Wang W C, An B S, Wu G J, Yang W, Zhu H F, Guo Y H, Gao Y, Bai L, Zhang F, Zeng C, Wang L, Zhou J, Li X, Li J, Wang Z Y, Zhao Z J, Fu X D, Chen Y Y, Liu J S, Li J L, Yao T D. 2021. Process and mechanism of the glacier collapse induced river blocking disasters occurred at the Sedongpu valley in the Grand Canyon of Yarlung Tsangpo River. *Sci Total Environ*, under review
- Zhou Y S, Li Z W, Li J. 2017. Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH-9 images and SRTM DEM. *J Glaciol*, 63: 331–342
- Zhou Y S, Li Z W, Li J, Zhao R, Ding X L. 2018. Glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs. *Remote Sens Environ*, 210: 96–112
- Zhou Y S, Hu J, Li Z W, Li J, Zhao R, Ding X L. 2019a. Quantifying glacier mass change and its contribution to lake growths in central Kunlun during 2000–2015 from multi-source remote sensing data. *J Hydrol*, 570: 38–50
- Zhou Y S, Li Z W, Li J, Zhao R, Ding X L. 2019b. Geodetic glacier mass balance (1975–1999) in the central Pamir using the SRTM DEM and KH-9 imagery. *J Glaciol*, 65: 309–320

(责任编辑: 郭正堂)