

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-01

印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究

殷跃平¹, 李 滨², 张田田², 王 猛³, 万佳威², 刘晓杰⁴, 高 杨², 朱赛楠¹

(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081; 4. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 2021 年 2 月 7 日, 印度查莫利北部里希恒河发生高位冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链, 造成下游 20 km 外的水电站和桥梁设施破坏, 死亡、失踪人口近 200 人。文章运用多期高分辨率遥感影像, 对比分析了印度查莫利里希恒河流域高位冰岩山崩灾害发生前后滑源区、堆积区变化特征, 初步探讨了山崩的运动过程。结果显示: 2013 年以前, 崩滑体蠕滑位移量较小, 其表面冰雪覆盖层裂缝发育不明显; 2013—2017 年, 崩滑体蠕滑位移量显著增加, 冰雪覆盖层可见多达 62 处大小不一的冰裂缝, 最长 513 m; 2021 年 2 月 5 日卫星影像显示这些冰裂缝已发生连接、贯通, 最大宽度为 15 m, 并于 2 月 7 日发生失稳、破坏。据滑后遥感影像, 该崩滑体由 4 组不同方向的大型结构面切割而成, 面积约 0.32 km², 平均厚度约为 70 m, 体积约 23×10⁶ m³。崩滑体失稳、解体后以碎屑流沿沟谷向下高速运动, 受地形拦挡, 部分碎屑颗粒在地形急变带堆积且形成堰塞坝。堰塞坝体溃决后, 形成山洪灾害。

关键词: 查莫利山崩; 高位远程地质灾害; 洪水灾害

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0001-08

The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India

YIN Yueping¹, LI Bin², ZHANG Tiantian², WANG Meng³, WAN Jiawei²,
LIU Xiaojie⁴, GAO Yang², ZHU Sainan¹

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Sichuan Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: On 7 Feb 2021, a high-location glacier-rock avalanche and dammed the river, and late caused outburst flooding disaster on the Rich Ganges River in northern Chamoli, India, that destroyed hydropower stations and bridge facilities more than 20 kilometers downstream, and claimed nearly 200 deaths. This paper uses multi-period high-resolution remote sensing images to compare and analyze the characteristics of the landslide source area and accumulation area before and after the high-location ice rock landslide disaster in the Ganges River Basin of Chamoli, India, and preliminarily discuss the movement process of the landslide. The results show that before 2013, the creep displacement of the avalanche landslide was small, and the cracks in the ice and snow cover on the surface were not obvious. From 2013 to 2017, the creep displacement of avalanche landslides increased significantly, and as many as 62 ice cracks of various sizes were visible in the ice and snow cover, with the longest being 513 m. Satellite images on February 5, 2021 showed that these ice cracks had been connected and penetrated, with a maximum width of 15 m, and they were unstable and damaged on February 7. According to the post-sliding remote sensing

收稿日期: 2021-05-14; 修订日期: 2021-05-28

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20211540)

第一作者: 殷跃平(1960-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治技术研究工作。E-mail: yyueping@mail.cgs.gov.cn

image, the collapsed landslide was cut from 4 sets of large structural surfaces in different directions, with an area of about 0.32 km^2 , an average thickness of about 70 m, and a volume of about $23 \times 10^6 \text{ m}^3$. The collapsed landslide body loses stability and disintegrates and moves down the valley with a debris flow at high speed. Due to terrain blocking, some debris particles accumulate in the rapid terrain change zone and form a barrier dam. After the barrier dam body breaks, a mountain torrent disaster is formed.

Keywords: Chamoli avalanche; high-location & long run-out geological disaster chain; outburst flood disaster

0 引言

据 2021 年 2 月 9 日环球时报报道, 印度北阿坎德邦查莫利 (Chamoli) 地区发生冰川断裂, 断裂的冰川坠入阿勒格嫩达河后导致河流决堤并引发巨大洪水, 造成至少 20 人死亡, 177 人失踪, 下游二座在建的水电站被毁 (<http://www.chinanews.com/gj/2021/02-09/9408307.shtml>)。作者迅即利用遥感影像进行初步分析, 认为该灾害的形成不仅与冰川断裂有关, 而且主要受控于喜马拉雅主中央断裂带和藏南拆离系之间的聂拉木群片麻岩体。该区位于青藏高原周缘, 地理位置为 79.732°E , 30.375°N , 分析探究其形成背景和致灾原因, 对于指导我国西藏地区类似灾害的防范, 具有重要意义。

强烈的板块运动和地震活动, 以及气温升高导致大面积冰雪体、冻土发生融化, 使得该地区冰崩、雪崩、泥石流、冰湖溃决、岩崩等地质灾害频发^[1-2]。近十年来, 印度在查莫利地区实施了多个重大水电和道路工程, 加之季节性极端降雨作用, 崩滑流地质灾害十分严重^[3]。查莫利地区曾于 1999 年发生过 6.6 级地震, 地震诱发多处大型山体滑坡, 如 Gangangaon 滑坡和 Gppeshwar 滑坡^[4]。SANGEETA 等^[5-6]采用相对频率法 (RFR) 对 Chamoli 地区地震滑坡进行危险性区划, 结果显示超过 30% 地区为地震滑坡高发地区, 并建立了地震诱发滑坡的空间预测模型。我国西藏地区, 也发生多起类似灾害, 例如 2000 年西藏贡嘎木弄沟发生大规模山体滑坡, 滑体体积 $2.8 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 滑程约 10 km, 形成巨型堰塞湖^[7]; 2014 年以来, 色东普流域内发生多达 8 次高位碎屑流堵江事件^[8]。

一般而言, 这种高位远程复合型地质灾害的滑源区位于高山、极高山地区, 具有撞击粉碎和动力侵蚀效应, 进一步转换为高速远程滑动的碎屑流或泥石流^[9]。其形成的灾害链具有分布广、破坏性强、高速远程等特点。同时, 滑源区早期识别难度大、隐蔽性强, 难以对其危险性进行合理评估。此次查莫利高位山崩灾害链事件引起了国内外学者的广泛关注, 本文将通过对比分

析灾害发生前后多期次遥感影像, 对其滑源区、堆积区进行对比分析, 并探讨失稳后的链动成灾过程。

1 灾害基本特征

2021 年 2 月 7 日, 里希恒河 (Rishi Ganga) 支沟雷尼河 (Rontigad) 左岸斜坡冰岩体从海拔约 5 600 m 高程处失稳, 并与海拔为 3 800 m 处谷底发生相撞。滑体在运动过程中不断撞击、铲刮并发生解体, 产生大量岩崩和冰雪崩, 激起大量灰尘, 平铺于西侧的山谷, 并形成堵沟。山崩诱发的洪水灾害造成下游雷尼 (Raini) 水电站、塔波万 (Tapovan) 水电站, 以及一座桥梁被洪水冲毁。从区域构造及地层上来看 (图 1), 查莫利高位山崩位于喜马拉雅造山带次级构造单元高喜马拉雅 (GHM) 地体内, 地质构造复杂, 区内山体走向基本与岩层走向一致, 以 NW—SE 和 NE—SW 两组方向为主。河谷以“U”型和“V”型为主, 大面积出露前寒武系结晶花岗岩、寒武-奥陶系花岗岩及片麻岩等地层。高喜马拉雅 (GHM) 地体北侧为特提斯-喜马拉雅 (THM) 地体, 南侧依次为低喜马拉雅 (LHM) 地体、次喜马拉雅 (SHM) 地体。这些地体之间的边界自北向南依次为藏南拆离断裂 (STD)、主中央冲断裂 (MCT)、主边冲断裂 (MBT)^[10-11]。受板块活动影响, 区域地震活动频繁, 高原快速隆升, 河流迅速下切, 风化、卸荷作用强, 近区域性深大断裂附近斜坡岩体内大型结构面十分发育, 这些大型结构面往往将岩体切割形成大小不一的危岩块体, 在降雨、重力、地震等因素驱动下, 极易形成崩滑流灾害。从地形上看 (图 2), 该地区地形崎岖、斜坡陡峭, 属高山峡谷地貌, 流域内最高点为楠达德维山 (Nanda Ghunti) 主峰 7 816 m, 最低点为沟口 2 373 m, 高差 3 936 m, 平均坡度 33° 。流域中上游沟谷坡度整体小于 25° , 在冰川侵蚀和山体岩崩作用下, 该区域覆盖大量冰碛物等碎屑物质, 为该流域发生泥石流等灾害提供了丰富的物源^[12-15]。

2 灾害源区特征

查莫利山崩滑源区位于南达昆提峰西侧近北西走向海拔 5 600 m 的陡倾坡体之上, 岩体表面常年冰雪覆

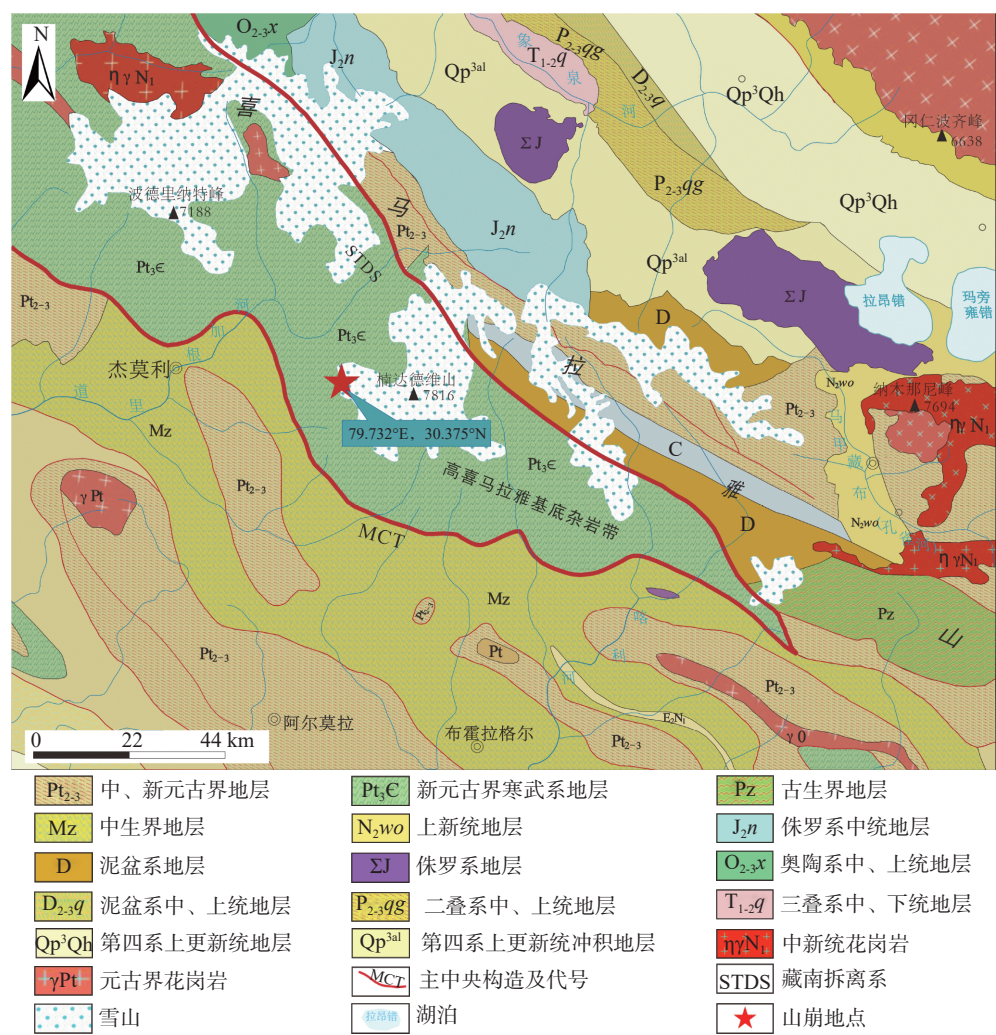


图 1 查莫利山崩灾害位置地质构造及图

Fig. 1 Location and geological structure map of the Chamoli avalanche disaster

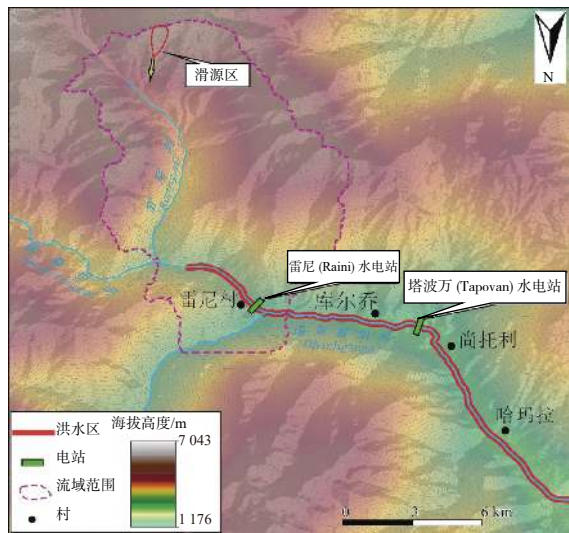


图 2 查莫利山崩及周边地区地形图

Fig. 2 Topographical map of Chamoli avalanche and surrounding area

盖, 坡度为 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。从 2013 年和 2015 年遥感影像上 (图 3), 滑源区表面无明显变化, 冰雪覆盖层裂缝发育不明显。但据图 3(c), 2017 年 10 月 7 日滑源区卫星影像, 滑体表面冰雪覆盖表面可清晰识别出 62 条拉裂缝, 最长 513 m, 最短 15 m, 平均长度 73 m, 呈弧形或直线型展布, 但冰裂缝之间尚未发生连接、贯通。在 2021 年 2 月 5 日卫星影像图 4(a) 上, 滑体后缘拉裂缝逐步连接、贯通, 形成一条长约 630 m、宽约 10 m 裂缝。同时, 滑体东、西两侧边界裂缝也开始发生连接、贯通, 长度分别约为 750 m、950 m, 裂缝宽度 10 ~ 15 m。从拉裂缝形态、规模上来看, 贯通后的后缘及侧边界裂缝较为平直、延伸远 (>500 m), 推测这些裂缝可能受岩体内部大型结构面控制。

据图 4(b), 在 2021 年 2 月 9 日高分一号卫星影像上, 山崩发生以后, 滑源区平面呈不规则四边形, 面积约 0.32 km^2 。滑体后缘深度约 150 m, 前缘深度约为

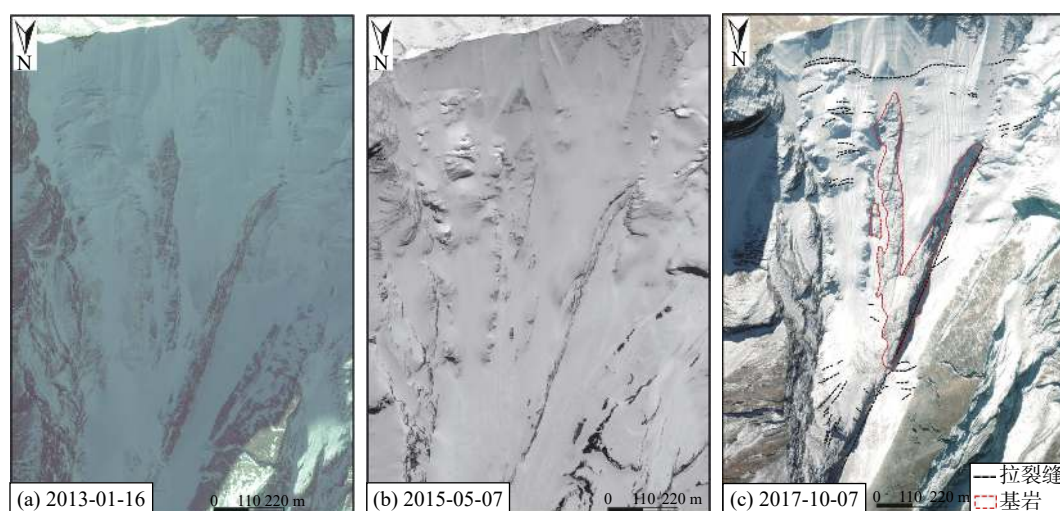


图 3 查莫利山崩灾害前滑源区多期遥感影像图

Fig. 3 Multi-phase RS images of the Chamoli avalanche potential before disaster

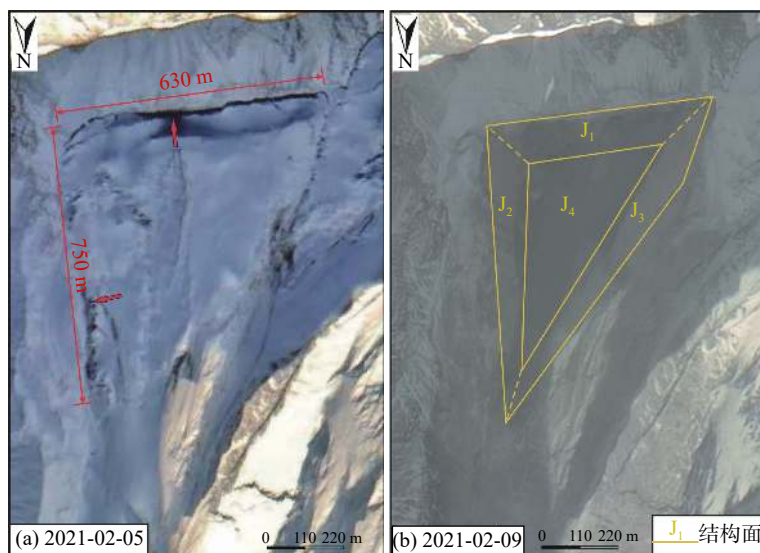


图 4 查莫利山崩灾害滑源区 2 月 5 日及 2 月 9 日影像对比

Fig. 4 Image comparison of the Chamoli avalanche two days before and after disaster

50 m, 平均厚度约为 70 m, 构成了南厚北东薄的不规则楔形体结构, 体积约 $23 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。图 4(b) 滑源区发育 4 组方向基岩结构面。其中 J_1 为后缘结构面, 沿山体走向展布, 与坡面近于垂直, 长度约为 630 m。 J_2 、 J_3 结构面分别为侧边界结构面, 顺坡延伸, 长度分别为 750 m 和 950 m, 相距 300 ~ 1 200 m。 J_4 为顺坡向结构面, 南侧宽约 300 m, 北侧宽约 85 m, 东侧长约 600 m, 西侧长约 800 m。以上 4 组结构面控制了滑体的形态、规模, 分析认为这种大型结构面的形成与高喜马拉雅地区板块强烈的快速隆升挤压活动有关。此外, 早期结构面张开度小, 冰雪覆盖条件下难以识别。后期在重力卸荷、冰劈、冻融等作用下, 这些结构面开始扩展, 以致上覆冰

雪覆盖层拉裂, 裂缝逐渐发育、凸显。

2016 年崩滑区西侧斜坡曾发生一起冰崩事件, 滑源区面积约 0.18 km^2 (图 5)。冰川裹挟大量岩体碎屑下滑, 沿沟谷运动、堆积, 堆积区位于坠落点下方宽缓地带, 坡度小于 20° , 长度约为 2.3 km, 为 2017 年 2 月大规模山崩灾害提供了大量物质基础。综上所述, 2015 年以前, 崩滑体蠕滑速率较慢、位移量较小, 加之常年冰雪覆盖, 冰裂缝发育不明显。2015—2017 年, 由于崩滑体下滑位移量大, 结构面拉裂至一定宽度, 冰雪覆盖层表面可见多条裂缝, 但裂缝长度不一、宽度较小, 相互之间未发生连接。2017 年至 2021 年 2 月 5 日, 崩滑体蠕滑位移量进一步加大, 不连续的裂缝相互连接、贯

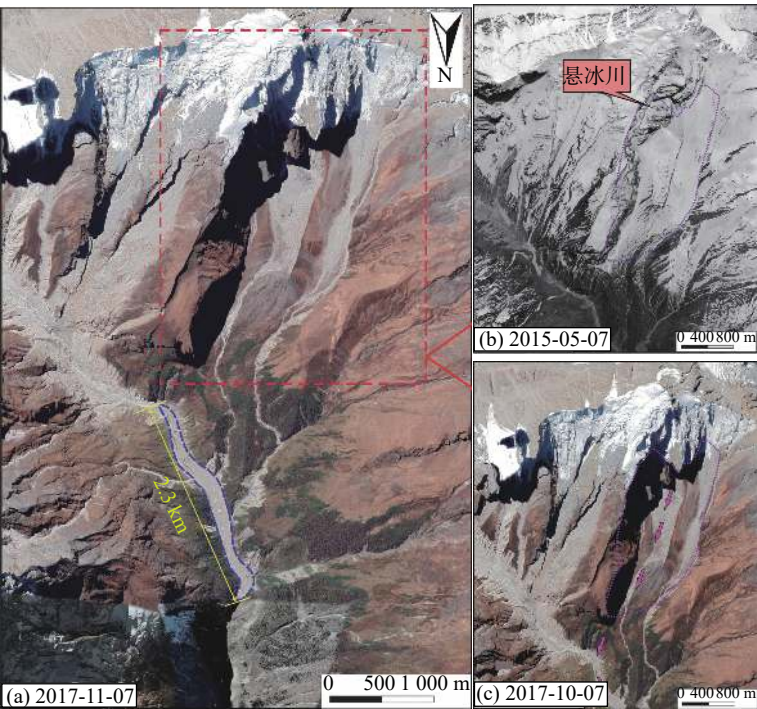


图5 2016 年冰崩前后遥感影像图

Fig. 5 Comparison of RS images before and after the glacier avalanche in 2016

通, 裂缝宽度达到 10 m 以上。最终, 崩滑体在 2021 年 2 月 7 日发生下滑, 沿沟谷铲刮老崩坡积物, 形成堵溃。

3 堰塞和洪水区特征

崩滑体流通区位于海拔 2 400 ~ 3 600 m 沟谷内, 高差约 1 200 m, 长约 14 km, 呈管道状, 上宽下窄, 平均坡度约为 20°。据 2021 年 2 月 5 日高分遥感影像, 流通区内冰雪覆盖, 无碎屑流运动痕迹(图 6)。2021 年 2 月 7 日, 崩滑自高位失稳崩滑后, 以高速坠落至沟谷内, 并与沟谷地面发生碰撞、解体, 形成碎屑流。从滑后遥感影像可知(图 7), 碎屑颗粒沿沟谷呈管道流运动, 且运动过程中不断对老崩坡积体、谷底冰川及两侧松散堆积物进行铲刮、裹挟, 导致滑体体积进一步增大, 且混合了大量赋存在沟谷中的地表水, 形成泥石流。在与里希恒河(Rishi Ganga)交汇处, 雷尼河(Rontigad)沟谷发生近 90°急变拐弯, 高速运动的碎屑流在拐弯处与对面山体发生碰撞, 导致运动速度骤降而发生堆积, 形成面积约 0.6 km² 的堰塞坝, 堵塞了沟谷。近坝体处洪水痕迹海拔约为 2 440 m, 与谷底高差约为 90 m, 河面宽度变化 110 ~ 400 m。从 2 月 8 日遥感影像来看, 坝体已发生溃决, 近沟谷左岸形成一条长约 800 m、宽 30 ~ 60 m 的溢洪道(图 7)。据当地水文站监测资料, 洪水到达焦希默特村(Joshimath)时, 道里根加河(Dhauliganga)水位

抬升约 16 m, 7 h 后水位开始下降, 并逐渐趋于平稳。

4 讨论

查莫利崩滑体从海拔约 5 600 m 坠落, 以管道碎屑流沿沟谷快速运动, 运动距离长达 11 km, 并在与里希恒河(Rishi Ganga)交汇处发生堆积, 形成堰塞坝, 进一步诱发洪水灾害, 其链动模式可概化为高位远程山崩-堵江-洪水灾害链。根据剖面图(图 8), 可将查莫利高位

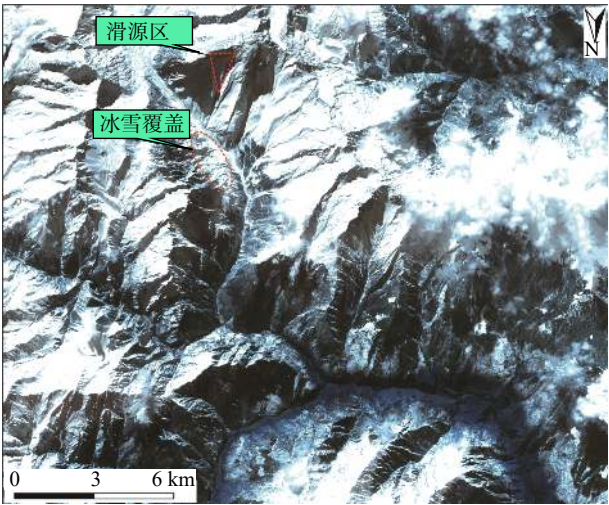


图6 山崩前堰塞区和洪水区遥感影像(2021 年 2 月 5 日)

Fig. 6 RS image of damming site and flooding way two days before avalanche on 5 Feb 2021

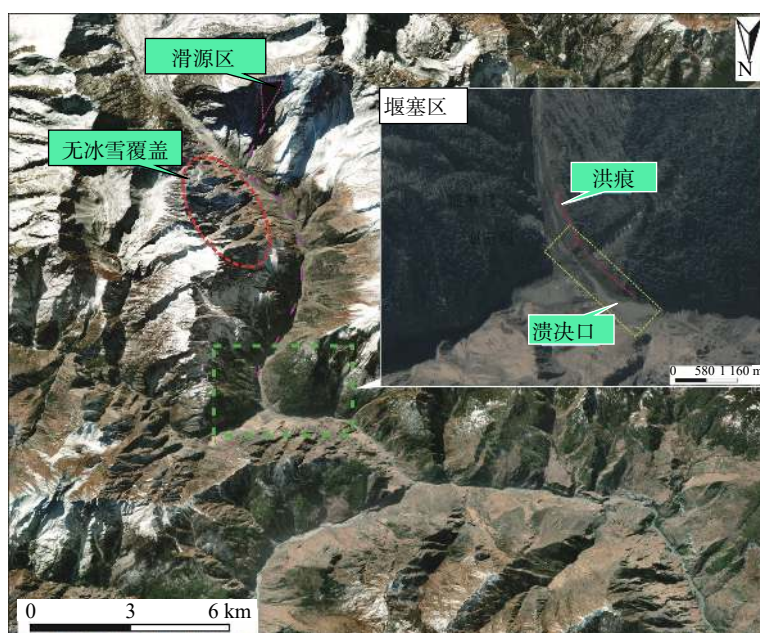


图 7 山崩后堆积区卫星遥感影像 (2021 年 2 月 8 日)

Fig. 7 RS image of damming site and flooding way a day after avalanche on 8 Feb 2021

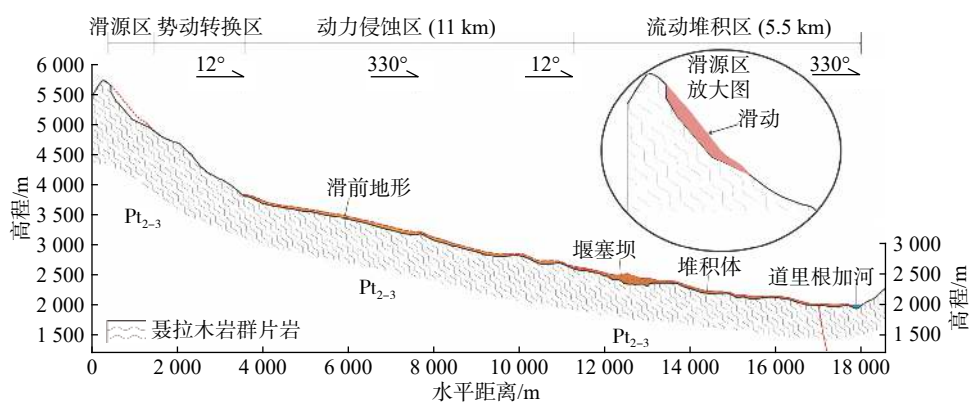


图 8 查莫利冰岩山崩堵溃洪水灾害链动过程及分区

Fig. 8 Disaster chain and dynamic zoning of the Chamoli glacier-rock avalanche and outburst flooding

远程山崩-堵江-洪水灾害链运动过程分为四个区: 滑源区、势动转换区、动力侵蚀区、流动堆积区。

①滑源区: 滑体位于雷尼河(Rontigad)左岸陡峭斜坡, 常年冰雪覆盖。受区域强烈构造活动影响, 斜坡岩体结构面十分发育。一方面, 这些结构面的形成破坏了岩体的完整性, 恶化其力学性质。另一方面, 4 组不同方向大型结构面将岩体切割成不规则楔形体, 形成易滑结构体(图 9)。在重力作用的驱使下, 易滑体长期处于蠕滑状态。并且, 随着蠕滑位移量增加, 结构面受拉张开, 向冰雪覆盖层扩展致冰裂缝发育。当滑体下滑力大于抗滑力时, 未贯通段岩体发生剪断, 形成山崩灾害。而造成滑体失稳的原因可能与降雪引起覆盖层重量增加、冰劈、地震活动等因素有关。

②势动转换区: 滑体自海拔 5 600 m 下滑, 坠落至谷底, 约 1 800 m 高差, 势能迅速转换为动能, 高速与地面碰撞、解体, 形成碎屑流。

③动力侵蚀区: 碎屑流强力撞击和冲击沟道内老崩坡积物及两侧松散堆积体, 不断铲刮、裹挟松散堆积体一起向沟下游运动, 进一步增加了滑体体积, 平均运动速度约为 25 m/s。滑体与地面碰撞、解体以及铲刮运动过程中产生的热量将沟道与碎屑颗粒中赋存裹挟的冰雪、冰川融化。融水降低了滑体与地面的摩擦, 而部分气化的水体形成巨大的气化压力, 形成水气垫层。在水、气垫层耦合作用下, 铲刮距离长达为 11 km。受地形阻挡, 碎屑流运动方向发生 3 次转变, 导致运动速度急剧下降(图 8、图 9)。同时, 沟谷坡度整体较缓, 大部



图9 查莫利高位山崩灾害链时间过程遥感影像分区

Fig. 9 RS-based time process zoning of disaster dynamic of the Chamoli avalanche and flooding chain

分碎屑颗粒沿途发生堆积。

④流动堆积区: 里希恒河 (Rishi Ganga) 与雷尼河 (Rontigad) 交汇处沟道走向由 180° 转为 95° , 高速运动的碎屑流与对面山体相撞, 速度骤降而发生堆积, 形成堰塞坝, 前缘部分碎屑颗粒继续沿河道向前运动, 并逐步堆积。固体颗粒发生堆积后, 运动过程中融化的冰雪及赋存在沟道中的水从固体颗粒中分离, 并汇入干流, 形成洪水灾害(图9)。

5 结论

本文运用多期遥感影像, 对印度查莫利“2·7”高位冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链形成前后的灾害源区、堆积区特征进行分析, 并初步探讨了山崩发生以后的运动过程。基于上述研究, 得出以下结论:

(1) 通过对比分析灾害发生前后滑源区、堆积区遥感影像, 崩滑体为4组方向大型结构面切割而成的不规则楔形体, 且长期处于蠕滑运动状态。2015年以前, 崩滑体蠕滑位移量较小, 结构面张开度也相对较小, 加之常年积雪的影响, 不足以在冰雪覆盖层形成裂缝。2017年, 随着滑移位移量进一步增大, 冰雪覆盖层表面可见62处冰裂缝发育, 长度在15~513 m, 影像上表现为黑色条纹, 识别度高。2021年2月5日, 崩滑体后缘拉裂缝及两侧裂缝已发生连接, 形成贯通裂缝。2021年2月7日, 崩滑体失稳下滑, 并在第三个沟道转弯处发生堆积, 形成堰塞坝, 面积约 0.6 km^2 , 其铲刮距离长

达12 km。

(2) 崩滑体高位失稳后, 以高速与下方沟谷发生碰撞、解体, 转换为碎屑颗粒, 特殊的管道状沟谷为碎屑颗粒以流体形式运动提供了有利地形条件。碎屑颗粒在运动过程中不断铲刮、融化沟道内的冰川, 且与冰川融水混合, 转换为泥石流。受沟谷平缓地形影响, 大部分碎屑物质沿途发生堆积。前端碎屑物质在地形急变带与对面山体相撞、堆积形成堵沟。而在惯性作用下, 大量赋存在碎屑颗粒中的水迅速分离, 导致干流长达25 km 范围发生洪水灾害, 其链动过程为高位远程山崩-堵江-洪水灾害链。

我国西藏地区多次发生这种因特大山体崩滑堰塞堵江溃决形成的流域性山洪灾害, 因此, 加强链动成灾机理和防灾减灾对策的研究, 对保障该区重大水电开发工程和边境城镇的地质安全非常重要。

参考文献 (References):

- [1] DESHMUKH A, OHE N, HASTAK M. Impact of flood damaged critical infrastructure on communities and industries [J]. *Built Environment Project and Asset Management*, 2011, 1(2): 156–175.
- [2] GRUBER S, HAEBERLI W. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1–10.

- [3] CHAUHAN S, SHARMA M, ARORAM K. Landslide Susceptibility Zonation Of The Chamoli region, Garhwal Himalayas, using logistic regression model [J] . *Landslide*, 2010, (7): 411 – 423.
- [4] SARAF A K. Cover: IRS-1C-PAN depicts Chamoli earthquake induced landslides in Garhwal Himalayas, India [J] . *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 2345 – 2352.
- [5] SANGEETA B, MAHESHWARI K. Earthquake-Induced Landslide Hazard Assessment of Chamoli, District Uttarakhand Using Relative Frequency Ratio Method [J] . *Indian Geotech Journal*, 2019, 49(1): 108 – 123.
- [6] SANGEETA B, MAHESHWARI K, KANUNGO P D. GIS-based pre-and post-earthquake landslie susceptibility zonation with reference to 1999 Chamoli earthquake [J] . *J Earth Syst*, 2020, 129(55): 1 – 20.
- [7] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2000, 27(4): 8 – 11. [YIN Yueping. Research on the characteristics and disaster mitigation of giant landslides on the Bomi-Yigong Expressway in Tibet [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27(4): 8 – 11. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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. [TONG Liqiang, TU Jienan, PEI Lixin, et al. Preliminary discussion on the frequent occurrence of detrital flow events in the Sedongpu watershed of the Karabai Peak of the Yarlung Zangbo River [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1552 – 1561. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例 [J] . *中国地质*, 2017, 44(5): 827 – 841. [YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Study on the characteristics of remote disasters of high-location landslides in strong earthquake areas: Taking Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province as an example [J] . *Chinese Geology*, 2017, 44(5): 827 – 841. (in Chinese with English abstract)]
- [10] HEIM A, GANSSER A. Central Himalayas-Geological obsevratons of the Swiss expedition [J] . *Science Naturelles*, 1939, 73: 1 – 245.
- [11] 崔军文, 朱红, 武长得, 等. 亚东-格尔木 CGT, 青藏高原岩石圈变形及其动力学 [M] . 北京: 地质出版社, 1992: 1–164. [CUI Junwen, ZHU Hong, WU Changde, et al. Yadong-Golmud CGT, Lithospheric deformation and dynamics of the Qinghai-Tibet Plateau [M] . Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1–164. (in Chinese)]
- [12] 高杨, 贺凯, 李壮, 等. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 14 – 23. [GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 14 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题 [J] . *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 5 – 13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of southwest China [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 5 – 13. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 许世民, 殷跃平, 邢爱国, 等. 基于地震信号的贵州纳雍崩塌-碎屑流运动特征分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 1 – 8. [XU Shimin, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Characteristic analysis of the Nayong rock avalanche ' skinematics based on seismic signals [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 戴兴建, 殷跃平, 邢爱国. 易贡滑坡-碎屑流-堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 1 – 8. [DAI Xingjian, YIN Yueping, XING Aiguo. Simulation and dynamic analysis of Yigong rockslide debris avalanche dam breaking disaster chain [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]