

瑞士阿尔卑斯桦树“5·28”高位远程冰岩崩-碎屑流研究

殷跃平, 张仕林, 霍子豪, 杨超平, 陈飞宇

Study on the May 28 Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche in the Swiss Alps

YIN Yueping, ZHANG Shilin, HUO Zihao, YANG Chaoping, and CHEN Feiyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202507033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高位远程地质灾害研究：回顾与展望

Research on high-altitude and long-runout rockslides: Review and prospects

殷跃平, 高少华 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 1-18

雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流过程模拟及运动特征分析

Numerical runout modeling and dynamic analysis of the ice avalanche-debris flow in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet

李昆仲, 张明哲, 邢爱国 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 18-27

西藏地区冰崩灾害研究进展

Advances in the study of glacier avalanches in Tibet

张议芳, 刘阳, 苏鹏程, 韦方强, 黄海涛, 陈乔 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 132-145

印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究

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

殷跃平, 李滨, 张田田, 王猛, 万佳威, 刘晓杰, 高杨, 朱赛楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 1-8

西藏色东普沟2024年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究

Research on the characteristics of the Sedongpu glacial debris flow and river-damming hazards, occurred in April 15 and May 14, 2024, in Xizang, China

万佳威, 高浩源, 高杨, 肖金城, 李军, 李江山, 李浩文 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(6): 24-32

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202507033

殷跃平, 张仕林, 霍子豪, 等. 瑞士阿尔卑斯桦树“5·28”高位远程冰岩崩-碎屑流研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 1-14.

YIN Yueping, ZHANG Shilin, HUO Zihao, et al. Study on the May 28 Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche in the Swiss Alps[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 1-14.

瑞士阿尔卑斯桦树“5·28”高位远程冰岩崩-碎屑流研究

殷跃平¹, 张仕林², 霍子豪¹, 杨超平¹, 陈飞宇²

(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081;

2. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 2025 年 5 月 28 日, 瑞士南部瓦莱州阿尔卑斯山脉桦树(Birch)冰川发生高位远程冰岩崩-碎屑流灾害, 导致下游 Blatten 镇与 Ried 村被彻底摧毁, 300 余人紧急撤离, 1 人失踪。文章基于多期卫星遥感影像、灾害前后的无人机数据、滑震信号和现场视频资料, 对“5·28”Birch 高位冰岩崩-碎屑流灾害的发育特征、演化过程和成灾动力学开展了系统研究。初步结果表明: 受全球气候变暖和冻融循环共同驱动, 位于 Birch 冰川上部南侧、相对高差约 300 m 的 Nesthorn 峰频繁发生岩崩, 坠落的碎屑物质持续堆积于冰川表面, 在削弱冰川物质亏损的同时增强了冰川的塑性流动, 促使前缘鼓胀变形加剧以及冰裂缝扩展。遥感解译显示: 近 10 年来冰川面积扩张约 44%, 冰舌向前运动约 110 m。地质灾害发生过程中, 约 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的楔形崩滑体发生高位失稳, 以约 36 m/s 的速度持续冲击加载下部 Birch 冰川, 引发共计约 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的冰川及其上覆碎屑发生整体失稳, 随后转换成高速远程运动的冰岩碎屑流, 并以约 64 m/s 的平均速度冲出沟口, 在与对岸山体发生碰撞后就位堆积。这类发育于高寒、高海拔极高山区的冰岩型高位远程地质灾害在我国喜马拉雅造山带广泛分布, 严重威胁系列重大工程地质安全, 文章可为相关防灾减灾提供一定参考。

关键词: 桦树冰川; 冰川断裂; 高位远程; 冰岩崩-碎屑流

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)04-0001-14

Study on the May 28 Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche in the Swiss Alps

YIN Yueping¹, ZHANG Shilin², HUO Zihao¹, YANG Chaoping¹, CHEN Feiyu²

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: On May 28, 2025, a high-altitude and long-runout ice-rock avalanche disaster occurred at the Birch Glacier in the Alps of the Valais region in southern Switzerland. This incident completely devastated the downstream towns of Blatten and Ried, leading to the emergency evacuation of over 300 individuals, with one person reported missing. This study presents a systematic investigation into the developmental characteristics, evolutionary processes, and disaster dynamics of the “5·28” Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche, utilizing multi-temporal satellite remote sensing images, UAV data collected pre- and post-disaster, landquake signal, and on-site video footage. Preliminary results indicate that the Nesthorn Peak,

收稿日期: 2025-07-15; 修订日期: 2025-07-22

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2244227)

第一作者: 殷跃平(1960—), 男, 贵州独山人, 研究员, 从事地质灾害防治与研究工作。E-mail: yinyueping0712@qq.com

located at a relative altitude of approximately 300 meters on the south side of the upper Birch Glacier, frequently experienced rockfalls driven by a combination of global climate warming and freeze-thaw cycles. While the accumulated debris on the glacier surface suppressed glacial ablation, it enhanced plastic flow, intensified bulging at the glacier front, and promoted the expansion of ice crevasses. Remote sensing interpretation revealed that the glacier area has expanded by approximately 44% over the past decade, with the glacier tongue advancing about 110 meters. During the disaster, around $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ of wedge-shaped sliding mass experienced high-altitude instability, continually impacting the lower Birch Glacier at a velocity of about 36 m/s. This triggered a total instability involving approximately $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ of glacial material and its covered debris, which subsequently transformed into a rapidly moving ice-rock avalanche that surged out of the valley at an average speed of 64 m/s, accumulating upon collision with the opposite mountainside. Such high-altitude and long-runout geological disasters, characterized by ice-rock compositions and developed in high-mountains area, are widely distributed throughout the Himalayan orogenic belt in China, posing serious threats to the geological safety of major engineering projects. This research may provide useful references for disaster prevention and mitigation strategies.

Keywords: Birch Glacier; glacier detachment; high-altitude and long-runout; ice-rock avalanche

0 引言

据央视网晚间新闻报道, 2025 年 5 月 28 日, 位于瑞士南部瓦莱州阿尔卑斯山脉的桦树(Birch)冰川发生断裂崩塌, 造成下游 Blatten 镇与 Ried 村被彻底摧毁(<https://tv.cctv.com/2025/05/29/VIDE21JTyXLiilFWPiDdTuUq250529.shtml>)。作者等人闻讯后立即组织收集相关资料, 并开展了初步分析研究, 认为本次灾害是一起典型的高位远程冰岩崩-碎屑流灾害。所幸早在灾害发生之前, 当地管理部门监测到 Birch 冰川上方岩崩活动的加剧以及冰川表面裂缝的持续扩张, 同时冰川前缘出现了显著的鼓胀变形^[1]。因此, 于 5 月 19 日组织了 Blatten 镇 300 余居民紧急撤离, 有效避免了大规模人员伤亡, 仅有一名 64 岁的居民在此次灾害事件中失踪。

根据灾后遥感影像解译结果, Birch 冰川断裂区海拔约 2 600 m, 堆积区海拔约 1 466 m, 垂直落差达 1 134 m, 运动距离约 4 600 m。初步分析表明, 本次灾害受气候变暖和冻融循环共同驱动。首先发生失稳的是位于 Birch 冰川上方南侧 Nesthorn 峰的楔形危岩体(体积约 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$), 该岩体崩滑后持续冲击加载下方 Birch 冰川, 造成冰川断裂, 引发共计约 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的冰川物质参与整体运动。在后续的运动过程中, 高速运动的冰岩混合物与沟谷发生剧烈碰撞, 经破碎解体后迅速转化为冰岩碎屑流, 并在沿程经历冰-水热融相变、侵蚀裹挟沟谷松散物质, 成灾能力和影响范围急剧扩大, 最终堆积形成了规模超过 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的冰岩混合型堰塞体。

本次“5·28”Birch 高位冰岩崩-碎屑流是瑞士近年来最为严重的冰雪地质灾害之一。受高寒、高海拔极高山地质环境影响, 其失稳启动-远程运动-堆积成灾涉

及了冰、岩、水、冰碛物等多相介质材料在高势能驱动下的远程链动传递过程, 具有复杂的相态和物质转换, 表现出运动速度快、运动距离远、流动性强、结构复杂和成灾规模大等特征^[2-4]。在全球气候变暖加剧、冰川大规模退缩、极端强降雨频发以及陆内地震活动日益活跃的背景下, 高位冰岩崩-碎屑流灾害广泛发育于阿尔卑斯-喜马拉雅造山带及环太平洋造山带内的大型山脉中。近年来, 国际上相继发生多起震惊全球的高位远程冰岩崩-碎屑流灾害, 严重威胁重大工程建设与人民生命财产安全。1970 年 5 月 31 日, 秘鲁 Andes 山脉最高峰 Huascarán 在地震作用下发生高位冰岩崩-碎屑流灾害, 约 800 m 宽的岩体从海拔 6 200 m 处失稳, 撞击冰川并发生破碎解体, 随后侵蚀沟道内冰碛物, 导致碎屑流规模急剧放大, 平均运动速度高达 78 m/s, 运动距离约 16 km, 最终堆积体规模约 $5.0 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 摧毁了整个 Yungay 城和周边数十个村庄, 造成约 18 000 人死亡^[5-6]。1997 年 7 月, Waddington 山脉 Mount Munday 南侧发生高位冰岩崩灾害, 以花岗岩、片麻岩为主的岩体失稳, 规模约 $3.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, 在高差 850 m 的坠落过程中转换为冰岩-碎屑流, 沿沟道快速运动长达 4 km^[7]。2002 年 9 月 20 日, 俄罗斯高加索山脉 Kolka 冰川发生大规模冰岩崩-碎屑流, 灾害沿 Genaldon 山谷高速运动约 20 km, 在持续解体与冰雪融化作用下逐渐转化为泥石流, 进一步前行约 15 km, 沿途摧毁多条重要交通线路、居民房屋等基础设施, 造成 140 余人遇难, 最终堆积规模达 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 堵塞沟道形成堰塞湖^[8-9]。2021 年 2 月 7 日, 印度查莫利地区发生冰岩断裂, 约 $2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的冰岩体自海拔约 5 600 m 的陡坡处崩塌, 高速坠落至沟谷并形成冰岩崩-碎屑流, 运动速度约

57 m/s, 运动距离长达 11 km。滑体在雷尼河与里希恒河交汇处堆积, 形成堰塞坝并引发溃决洪水灾害, 冲毁下游在建的 2 座水电站, 导致 200 多人遇难^[10-11]。

高位冰岩崩-碎屑流是内动力地质作用和长期气候变化耦合作用的产物, 体现了气候变化、冰川冻土消融、岩屑堆积加载的复合影响。极高山区作为全球气候变暖的放大器, 气温升高趋势明显, 冰雪融化速率加剧, 冰川呈大面积消融退缩趋势, 同时因地形、融水、地震等内外动力作用, 极高山区冰岩型地质灾害越发突出^[11-12]。21 世纪以来, 高寒、高海拔极高山区正逐渐成为我国重大工程的主战场, 川藏铁路、雅下水电工程、中尼交通廊道等重大工程向喜马拉雅造山带推进。然而, 该区域作为全球大陆板块活动最强烈、地质构造最复杂、气候变化最敏感区域, 高位冰岩崩-碎屑流灾害极为发育^[2, 13-15], 严重威胁重大工程的地质安全。本文以瑞士“5·28”Birch 高位冰岩崩-碎屑流灾害为典型案

例, 重点围绕灾害的发育特征、演化过程和成灾动力学等开展研究, 为我国重大工程区防灾减灾提供参考。

1 区域地质特征

Birch 冰川位于瑞士西南部瓦莱州, 阿尔卑斯山脉中部, 地理坐标为: 7°50'19.56"E, 46°24'9.39"N。其南侧紧邻 Nesthorn 山峰, 峰顶海拔 3 336 m, 岩壁陡峭高耸, 坡度高达 45°~55°。东南侧与 Baltschiederjoch 山峰相邻, 海拔高程为 3 204 m。区域内角峰和刃脊交错发育, 岩体表面常年被冰雪覆盖。如图 1 所示, Birch 冰川位于 2 座山峰间的冰斗凹槽内, 整体地形呈陡-缓-陡趋势分布。上游呈典型“U”型沟谷, 地形平缓宽阔, 四周环绕陡峭冰壁。受日照辐射和冰川表面覆盖程度差异的影响, 热量分布不均, 冰舌前缘和两侧冰裂缝极为发育。沟道中段为两支冰川交汇处, 沟道收窄, 地形呈上宽下窄的漏斗状, 坡度由缓转陡。沟道下游为深切

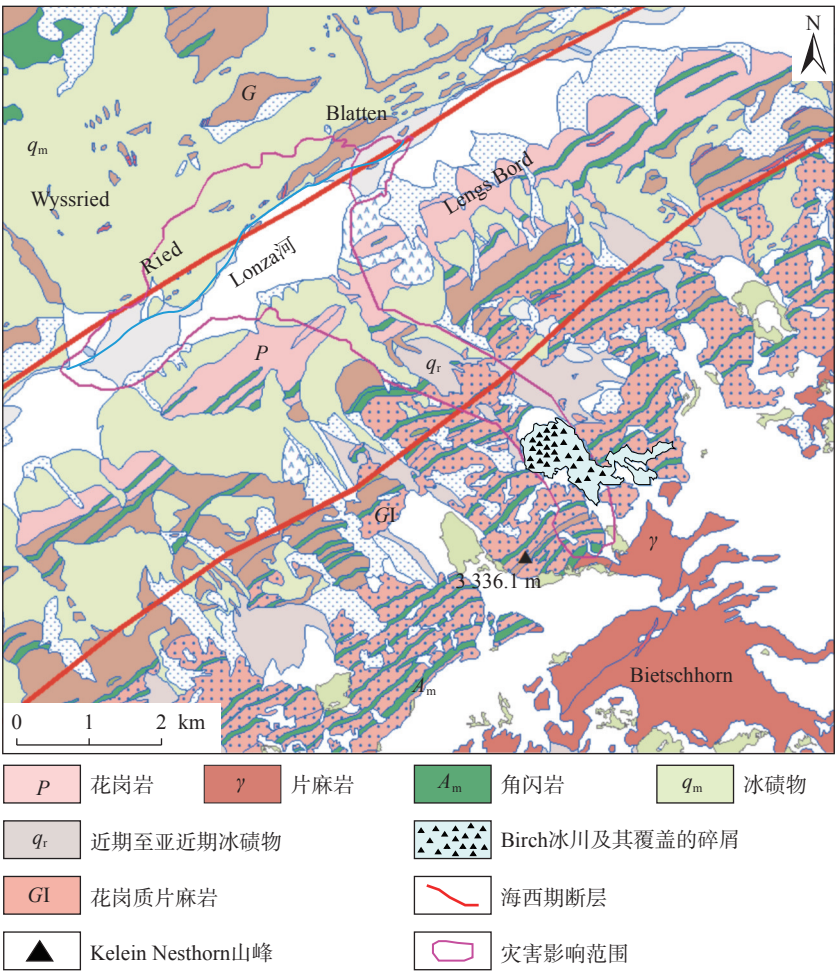


Fig. 1 Regional geological structure map of the Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche (Data source: Swiss Federal Office of Topography)

“V”型谷, 沟道极为狭窄, 两侧岩壁陡峭。沟口北侧为 Blatten 镇, 西南侧为 Ried 村, 地势平坦开阔、起伏较小。Lonza 河自东北向西南弯曲穿行于沟口堆积扇。

从区域地质构造和地层岩性上看, Birch 冰川位于阿尔卑斯山脉中西部过渡带, 距 Rhone—Simplon 断层约 10 km。该断层走向为 NW—SE, 并通过右旋与 Simplon 正断层、Embrunais—Ubaye 和 Digne 推覆体的逆冲断层相连接。此外, 冰川区发育了多条海西期断层, 正交横穿灾害运动路径, 地质构造极为复杂。Birch 冰川区域地质构造和岩性分布如图 1 所示。岩层倾向基本与山体坡向相背, 以 NW—SE 方向为主, 冰川两侧山体大面积出露花岗岩、片岩、片麻岩, 角闪岩呈条带状分布于片麻岩层之间, 多呈互层状。在气候变化和冰川作用的共同影响下, 两侧高陡岩体失稳频率明显上升, 冰川和沟谷内沉积了大量冰碛物, 冰川表面则被崩解的碎屑和冰雪覆盖。中部漏斗状缩口段的山体表面以较早时期形成的冰碛物为主, 而沟道窄陡段两侧山体为近期至亚近期的冰碛物, 与多期次冰川活动密切相关, 沟口堆积扇区以崩坡积形成的碎块石和河流冲积物为主。

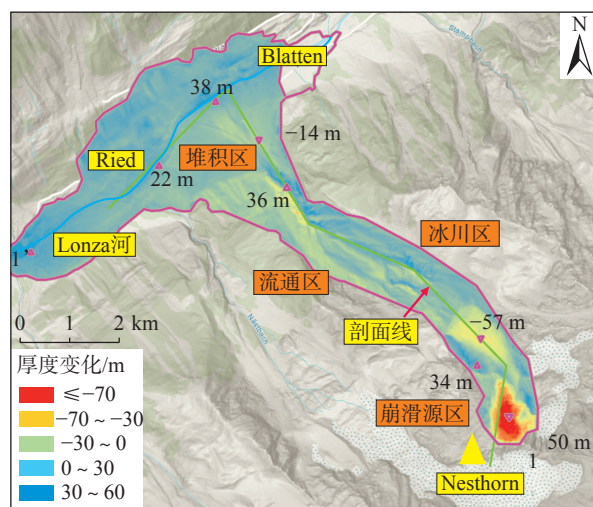
2 灾害基本特征

Nesthorn 山峰的高陡岩体沿控制性结构面发生失稳, 从海拔约 2 900 m 处坠落至下方冰川, 坠落高差约 300 m, 引发 Birch 冰川发生断裂。在后续运动过程中, 冰体在碰撞与剪切作用下破碎解体, 并与岩屑混合形成冰岩碎屑流, 沿途铲刮裹挟松散物质和表面积雪, 最终冰岩混合物以极高速度冲出沟口, 在与对岸山体发生碰撞后就位堆积, 堵塞 Lonza 河。根据动力学特征, 可将该高位冰岩崩-碎屑流灾害划分为 4 个区: 崩滑源区、冰川区、流通区和堆积区(图 2)。

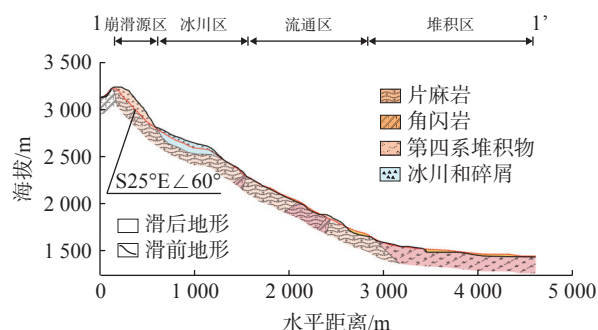
2.1 崩滑源区

崩滑体位于 Nesthorn 峰陡壁处, 坡度约 45°, 表层被冰雪覆盖, 见图 3(a)。受气候变化等外营力影响, 永久冻土大量消融, 季节性积雪和多年冰雪退缩, 裸露出片岩、片麻岩等基岩, 大气热量向岩体传导增强, 热力活动加剧。冰斗表面残留大量松散冰碛碎屑, 两侧坡体陡峭临空, 为岩体失稳提供了有利地形条件。

崩滑源区失稳前后的无人机影像如图 3 所示。崩滑体呈不规则多边形, 主要受 3 组结构面控制, 结构特征明显, 可划分为上下 2 个部分。下部崩滑体呈楔形, 失稳方向为北西, 被 3 组结构面共同切割。J1 为后缘结构面, 与坡面大角度相交, 整体呈梯形, 长边约 350 m, 短边约 200 m, 宽度约 120 m。J2、J3 分别为侧边界和底



(a) 灾害动力学分区平面图



(b) 1—1' 纵剖面图

图 2 “5·28” Birch 高位远程冰岩崩-碎屑流基本特征

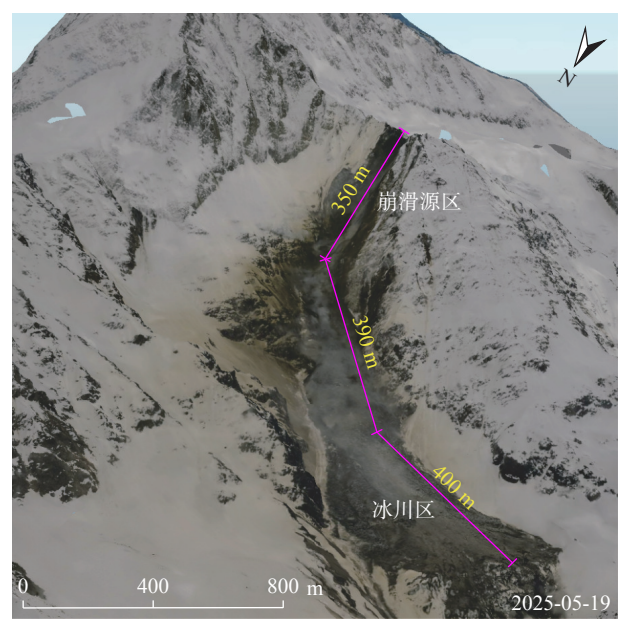
Fig. 2 Basic characteristics of the “5·28” Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche

部边界, 顺坡向延伸, 长度约 260 m。上部崩滑体呈现出上窄下宽的棱锥形, 失稳方向几近正北。J1 控制了上部崩滑体的后缘边界, 沿山体走向展布, J2 为侧向边界结构面, 与坡面近乎垂直, 宽度约 60 m, 而 J3 则为底部结构面, 长度约 130 m。

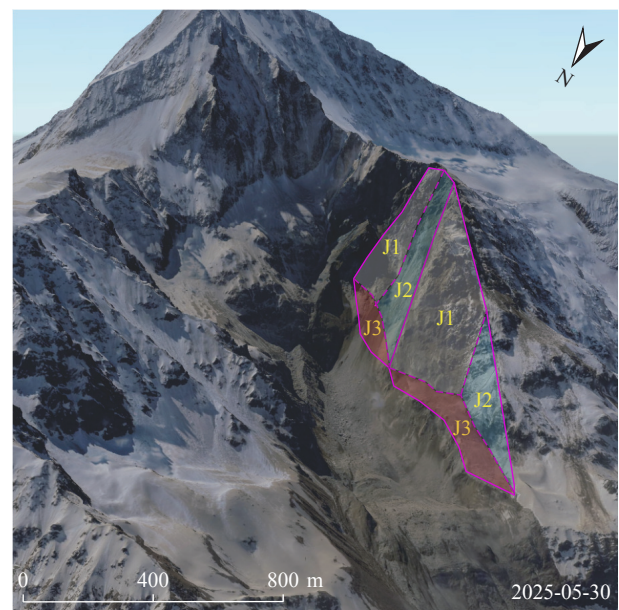
上述 3 组结构面控制了崩滑源区的形态和规模, 其形成与阿尔卑斯山脉区域构造活动密切相关。后期在自重荷载、卸荷变形和冻融循环等影响下, 结构面不断扩展延深, 显著削弱了岩体稳定性。冰雪融水是影响高寒、高海拔极高山区陡坡岩体稳定性的另一重要因素。随着冰雪融水沿裂缝向下渗入岩体, 孔隙水压力加剧了内部水热迁移, 局部水分积聚, 导致岩体抗剪强度削弱, 极易形成软弱面^[16-18]。

2.2 冰川区

Birch 冰川位于海拔约 2 650 m 的冰斗内, 三面环绕高陡山体, 地势相对平缓, 坡度 15°~25°, 其表面覆盖有高位崩滑形成的碎屑堆积物和积雪, 见图 4(a)。该冰川的冰舌前缘隆起, 并发育多条张拉冰裂缝, 横向冰裂



(a) 5月19日无人机影像



(b) 5月30日无人机影像

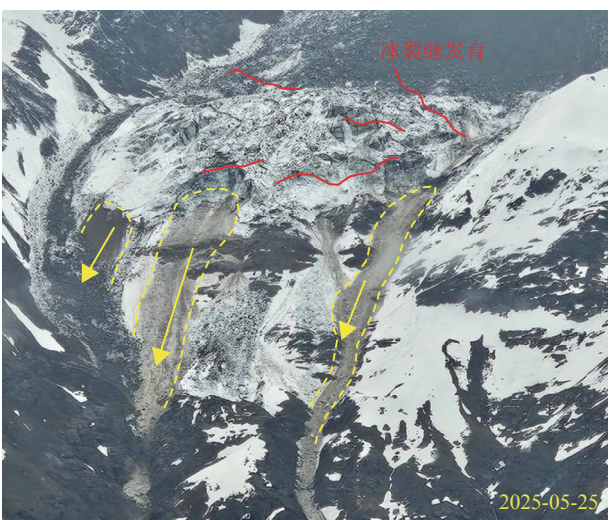
图3 崩滑源区特征(数据来源: 瑞士联邦测绘局)

Fig. 3 Characteristics of the source area (Data source: Swiss Federal Office of Topography)

缝走向多为NW—SE, 纵向冰裂缝呈大角度与横向冰裂缝相交。随着气候持续变暖, 表面冰雪融化为水, 通过冰裂缝向下入渗, 在水压力作用下冰裂缝不断扩展。同时, 由于Nesthorn峰山体连续崩塌滑落, 大量花岗岩、片麻岩等碎屑物质覆盖于Birch冰川表面, 堆积体积约 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 冰川上覆压力持续上升^[1, 16], 导致冰层内部处于较高应力状态, 基底剪切力不断增加, 冰川持续向前运动, 见图4(b)。



(a) Birch冰川海拔



(b) 冰舌前缘发育的冰裂缝

图4 冰川区特征(数据来源: ETH的Farinotti教授课题组、Schweizer Radio und Fernsehen新闻报道)

Fig. 4 Characteristics of glacial area (Data source: Professor Farinotti's research group at ETH, and news reports from Schweizer Radio und Fernsehen)

2025年5月24日起, 大量高位崩滑岩体在数日内快速倾泻, 冲击冰川并堆积于冰川表面, 上覆荷载骤增, 冰川持续变形以调整几何形态和内部应力状态, 运动速度高达 $4.0 \sim 4.5 \text{ m/d}$, 横向冰裂缝贯穿冰川前缘。5月28日, 源区岩体崩落, 形成持续冲击加载作用^[19], Birch冰川沿着下覆界面整体滑动, 导致共计约 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的冰川和上覆堆积的碎屑物发生失稳。

2.3 流通区

流通区位于冰川前缘的地形收缩带, 两侧为陡峭山壁, 沟道坡度约为 30° , 见图5a。受冰川运动、冻融风化等外营力作用影响, 周边岩体碎裂化程度较高, 沟内主

要由成分复杂、结构松散的冰碛物与崩坡积物组成。Birch 冰川断裂后沿沟道下滑和倾覆,势能迅速转化为动能,冰体猛烈撞击沟道及两侧山体,导致冰岩破碎解体,逐步向散体转化并演化为冰岩碎屑流。碎屑流对沟道持续施加强烈侵蚀作用力,侵蚀裹挟大量赋存于沟道内的松散物质,最大侵蚀深度达 57 m(图 2),致使其体积显著增加。随着滑体高速运动,碎屑颗粒发生跳跃与碰撞并进一步破碎压密,导致内部压力持续升高。冰岩接触界面产生强烈剪切摩擦,在高压与摩擦共同作用下释放大量热能,加速沟道表面和滑体内部冰雪融化,生成大量间隙流体,降低碎屑流流动阻力,使其流动性显著增强,呈现出流态化特征^[20-21]。



图 5 流通区特征

Fig. 5 Characteristics of the transition area

随后冰岩碎屑流持续加速,进入上宽下窄的漏斗状地段。随着沟道逐渐收窄、坡度增大,见图 5a,滑体运动受两侧山体约束增强,碎屑颗粒逐步压实,颗粒间咬合增强,沟道受冲击碰撞、剪切磨蚀作用更加明显。随

着沟谷进一步窄陡化,沟道坡度增至 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$,地形偏转呈钝角弯曲,导致碎屑流运动方向与沟谷轴线斜交。冰岩碎屑流以极高速度冲击左侧陡坡,发生连续高能碰撞,大量碎屑高速飞溅,烟尘瞬间弥漫,覆盖大部分沟道空间,见图 5b。期间,碎屑流动能急剧损耗,部分物质减速沉积,沟谷中最大堆积厚度达 36 m(图 2)。同时,连续的碰撞加快碎屑物质相态转换(冰-水-水蒸气)速率,大量水汽被封存于碎屑流主体中。

2.4 堆积区

Birch 冰川沟口地势平坦开阔,伴随地形急剧变缓,顺流而下的碎屑流前缘与对岸山体剧烈相撞,赋存于冰岩碎屑孔隙中的大量水汽瞬间“喷发”,见图 6(a)(b)。随后朝两侧减速扩展并淤埋 Blatten 镇,最大厚度达 38 m。部分碎屑和融水继续沿 Lonza 河道向前运动,掩埋 Ried 村,最终形成的堰塞堆积体横向跨度约 2.3 km,体积超过 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。堆积体细观上表现出无序堆叠、基质包裹碎屑的特征。基质主要为冰碛物和融水混合的细粒泥砂,黏性强,表面孔隙呈海绵状发育,表明在堆积过程中,冰雪融水从固体颗粒中分离,沿架空孔隙快速排出,剩余水分滞留于细粒之中,固化为海绵状孔隙结构,见图 6(c)(d)。

3 灾害演化特征

3.1 崩滑源区演化特征

阿尔卑斯山脉冰川持续变化,发育规律复杂,尽管区域间存在差异,但长度和面积的年均变化趋势上基本相同。过去 20 a 的观测数据显示,冰川质量持续负增长,整体处于退缩消融状态,且这种趋势不断向高海拔地区发展^[12,16]。部分年份,如 2017 年、2022 年、2023 年,受欧洲极端高温事件影响,冰川消融速度显著加剧,表明全球变暖与区域气候变化的主导作用愈加显著。

然而,在全球冰川因气候变暖普遍退缩的大背景下,Birch 冰川的演化却表现出异常趋势。本文收集了 2016 年以来的卫星遥感影像,结合地形地貌特征与永久性积雪分布,重点对崩滑源区和 Birch 冰川断裂区进行了遥感解译(图 7)。结果表明,2016—2024 年,崩滑源区覆盖面积基本保持稳定,未发生显著变化。但是,在 Birch 冰川断裂失稳前,崩滑源区岩体发生剧烈变形。2025 年 5 月 18 日,超过 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的岩体从 Nesthorn 山峰陡坡脱落,崩塌后缘高程约 3 200 m,并在一天内延展至山峰顶部,崩落的岩体全部堆积于下方冰川表面。至 5 月 21 日,累计崩滑体体积已超过 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,形成了易于失稳的前缘临空条件(图 8)。



图 6 堆积区特征(数据来源: Le Temps 新闻报道、ETH 的 Farinotti 教授课题组)

Fig. 6 Characteristics of the deposition area (Data source: Le Temps news report,Professor Farinotti's research group at ETH)

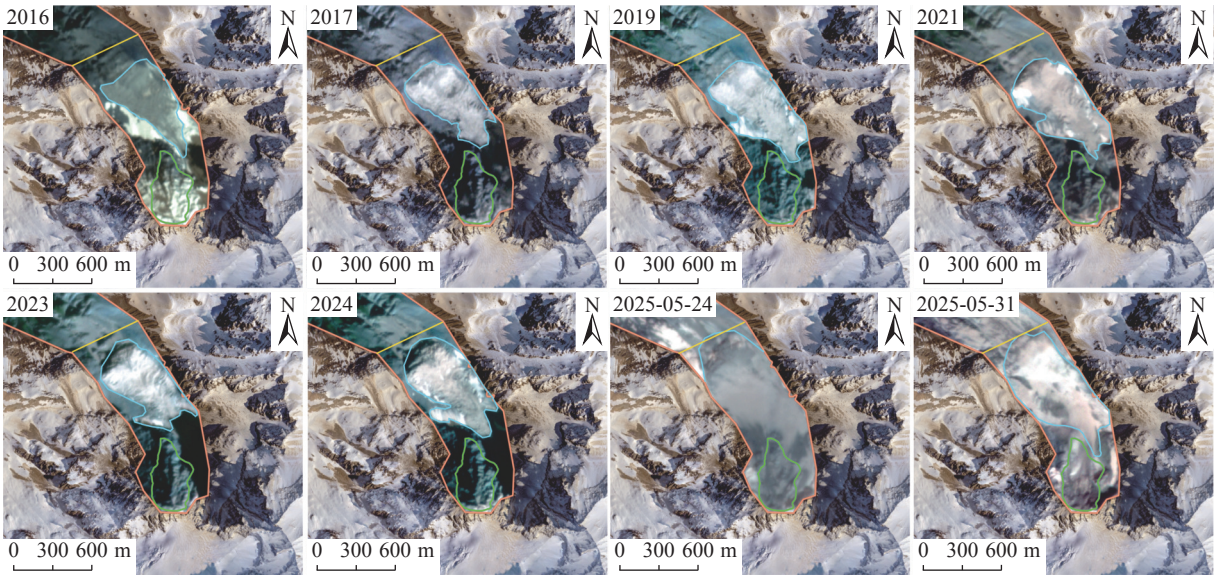


图 7 崩滑源区和冰川区多期遥感影像对比

Fig. 7 Multi-temporal remote sensing image comparison of the source area and glacier area

3.2 冰川区演化特征

2016—2025 年, 冰川面积呈持续增长趋势(图 7)。近十年内, 冰川覆盖范围由 2.02 km² 增加到 2.91 km², 前缘向下运动约 110 m, 侧缘亦朝两侧山体扩展。在不同观测时间段内, 冰川区面积变化幅度存在明显差异: 2016—2019 年, 冰川面积增加约 40%, 前缘运动距离约

60 m; 2020—2024 年, 冰川区面积增加仅约 5%, 前缘运动距离约 50 m。冰川持续向低海拔处延展, 表明了冰川处于持续运动状态。

通过解译不同年份的高程数据, 对冰川区厚度变化进行了分析。P1 为纵剖面, P2、P3、P4 为冰川区前缘、中部、后缘横剖面(图 9)。根据 2019—2024 年高程变

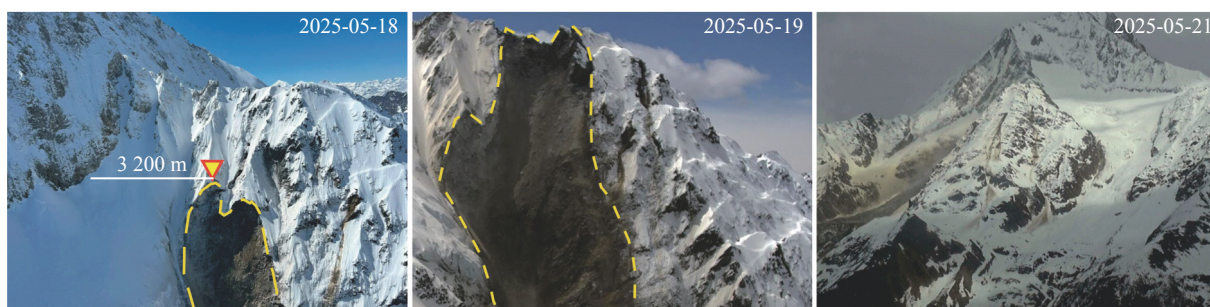
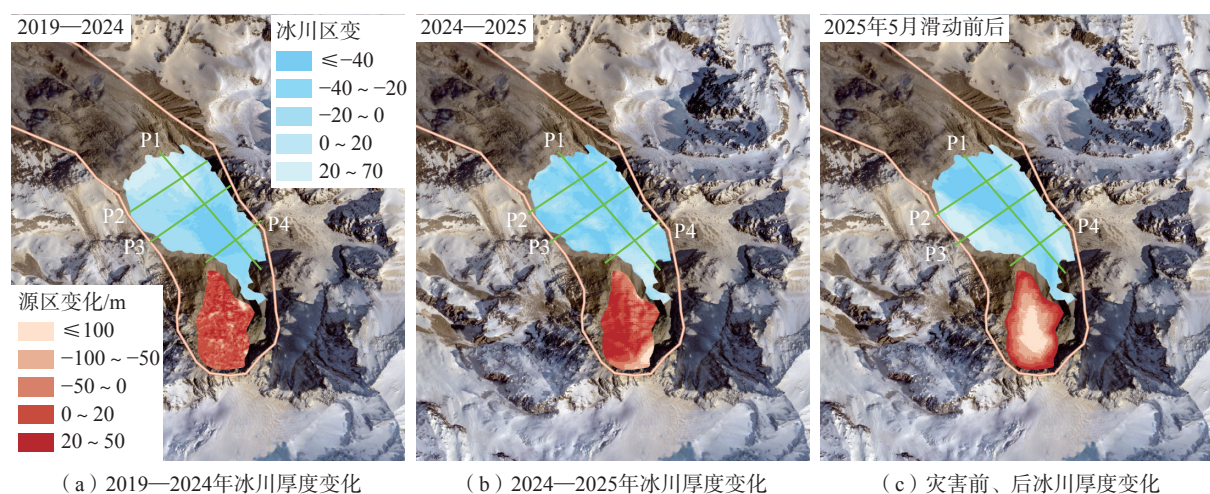


图 8 崩滑源区灾前变形演化特征(数据来源: 萨瓦勃朗峰大学 Melaine Le Roy 博士)

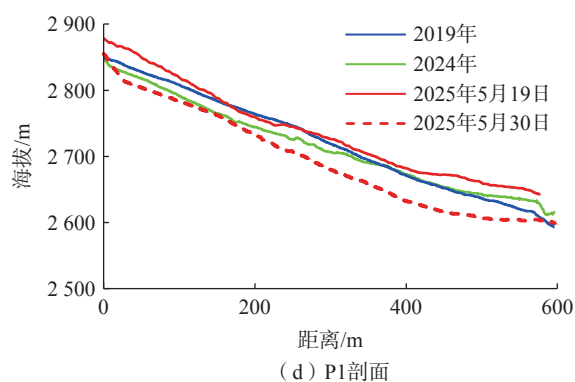
Fig. 8 Pre-disaster evolution characteristics of the source area (Data source: Dr. Melaine Le Roy from Savoie Mont Blanc University)



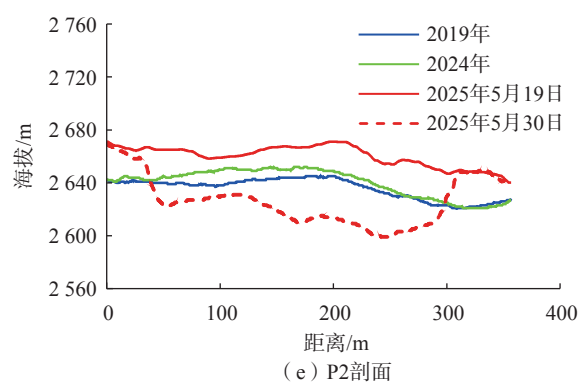
(a) 2019—2024年冰川厚度变化

(b) 2024—2025年冰川厚度变化

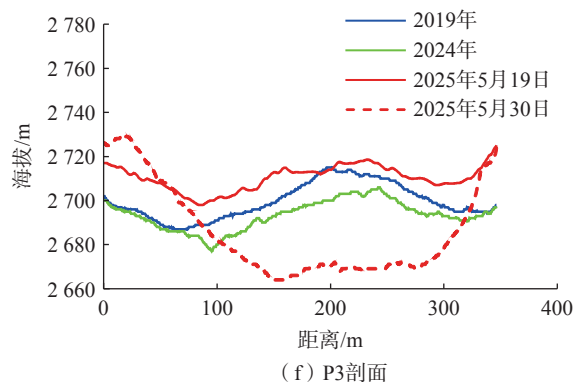
(c) 灾害前、后冰川厚度变化



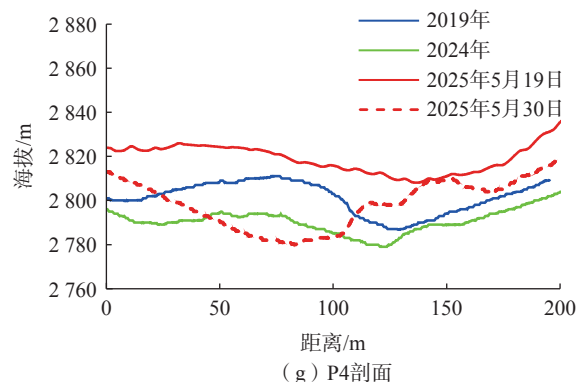
(d) P1剖面



(e) P2剖面



(f) P3剖面



(g) P4剖面

图 9 灾害演化特征(数据来源: 瑞士联邦测绘局)

Fig. 9 Evolutionary characteristics of disasters (Data source: Swiss Federal Office of Topography)

化数据, 冰川后缘约 350 m 范围内的厚度显著降低, 最大降幅达 20 m, 表明了冰川后缘物质的持续流失。而冰川前缘区域厚度明显增加, 最大增幅约 15 m。2024—2025 年, 冰川区厚度基本处于整体增加的状态, 尤其是冰川的中部和前缘, 最大增幅达 31 m。冰川厚度变化本质上与上部岩崩活动和冰川响应过程密切相关。Nesthorn 峰频繁崩落的岩体冲击冰川后缘, 导致冰川物质被剥蚀, 并随着碎屑流沿着冰川表面迁移, 在地形趋缓的冰舌区堆积。此外, 堆积在冰川表面的厚层碎屑物质对冰川演化具有重要影响: 一方面, 改变了冰体的热力特性, 削弱了与外界的热量交换, 减缓了冰川物质损失; 另外, 附加荷载增强了冰体的塑性流动, 促使前缘鼓胀变形并加剧表面冰裂缝发育。

在冰川上覆碎屑堆积荷载和气候变化的共同作用下, “5•28”Nesthorn 山峰顶部岩崩发生之前, Birch 冰川已处于欠稳定状态, 并在短时间内经历了显著的变形演化过程。如图 10 所示, 2025 年 5 月 24 日, Birch 冰川出现了明显变形, 其运动速度高达 4.0~4.5 m/d; 5 月 25 日, 冰裂缝持续扩展, 导致冰川前缘鼓胀变形加剧, 其前缘中部和左侧区域发生局部崩塌; 5 月 26 日, 冰舌以 2.5~3.0 m/d 的速度向前运动, 此时冰川表面覆盖碎屑厚度约 80 m; 直至 5 月 27 日, 冰川前缘发生大规模失稳, 并形成了远程运动的冰岩碎屑流; 5 月 28 日下午, 崩滑源区发生大规模岩崩, 崩滑体坠落撞击冰川, Birch 冰川发生整体断裂失稳。

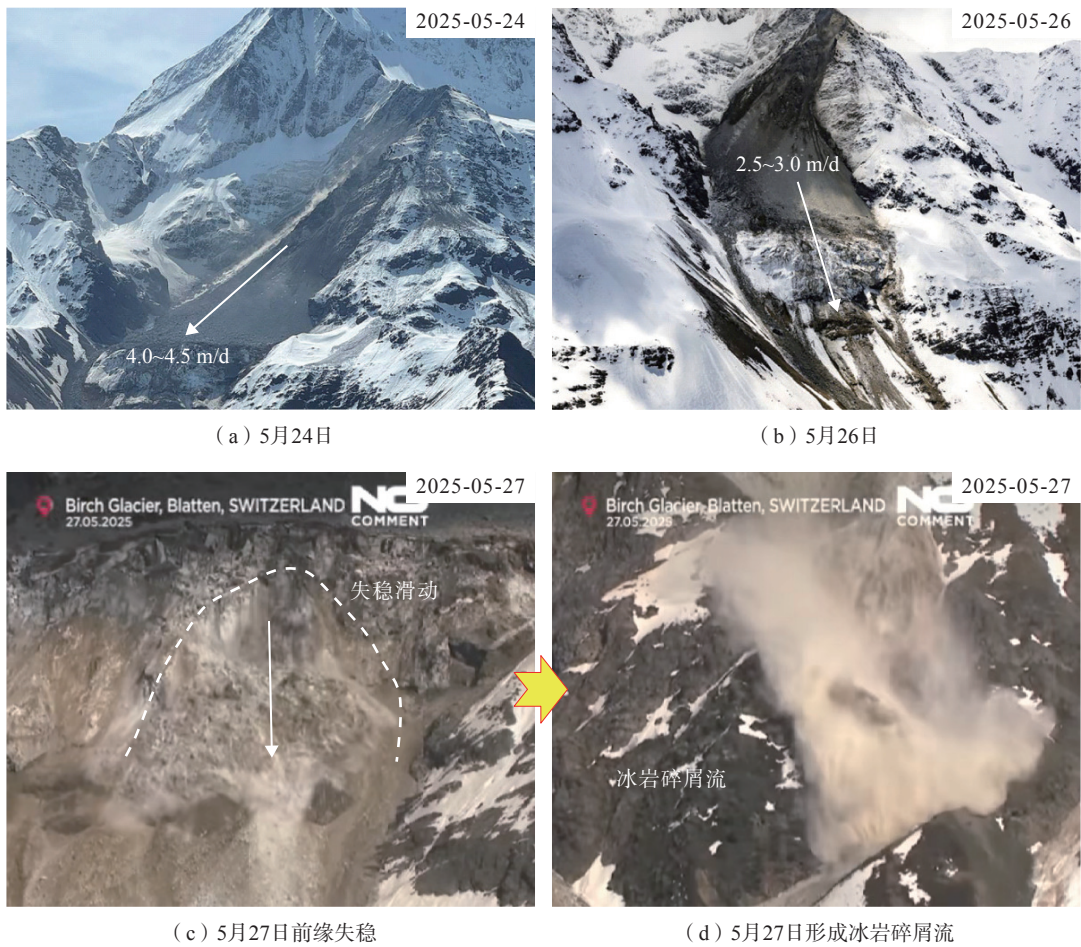


图 10 冰川区灾前变形演化特征(数据来源: 萨瓦勃朗峰大学 Melaine Le Roy 博士、Schweizer Radio und Fernsehen 新闻报道)

Fig. 10 Pre-disaster evolution characteristics of the glacial area (Data source: Dr. Melaine Le Roy from Savoie Mont Blanc University, and news report by Schweizer Radio und Fernsehen)

4 动力学特征反演

2025 年 5 月 28 日世界时间(UTC)约 13:24, 瑞士多

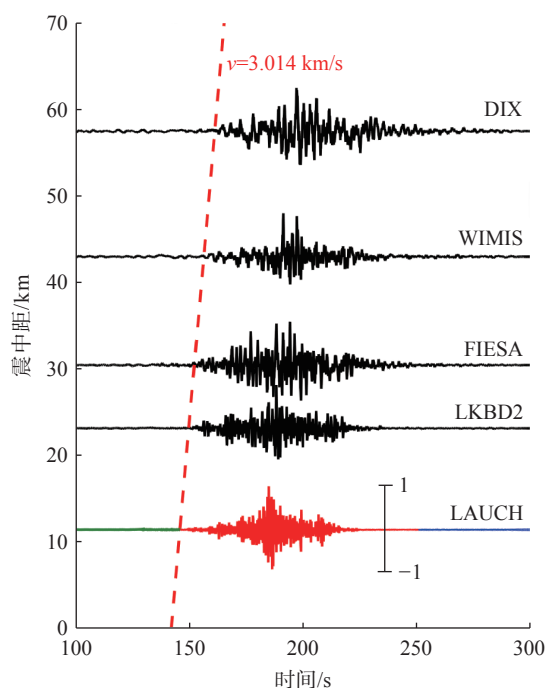
个地震台站同时监测到远超背景噪声水平的波动信号, 瑞士地震局随即确认该信号源自 Birch 冰川断裂事件中的高能冰岩碎屑物质与地表间的强烈相互作用。本

文选取了 5 个台站(LAUCH、LKBD2、FIESA、WIMIS 和 DIX)记录到的高信噪比滑震信号,用于反演本次高位冰岩崩-碎屑流的启滑时空坐标及其动力学特征。经去除仪器响应、均值、趋势项以及基线矫正等预处理后的波形如图 11(a)所示。

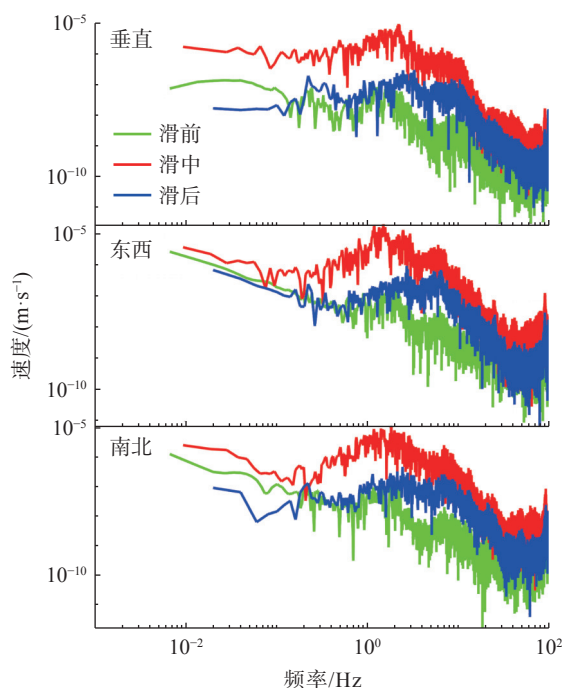
基于 5 个台站滑震信号的初至时间,采用“到时差”定位法^[22-24]反演获得灾害的位置为:7°51'2"N, 46°20'58"E。该定位结果与 Birch 冰川坐标位置基本吻合。利用 5 个台站的初至时间,结合台站与震源的距离,估算得到区域介质平均地震波传播速度约为 3.014 km/s。该波速值表明,此次灾害激发的地震波以面波为主。利用该波速值,可基本确定本次灾害发生的起始时刻为 UTC13:24:22。

根据灾后遥感影像、地形地貌特征及现场视频记

录,本次高位远程冰岩崩-碎屑流的动力成灾过程存在 6 个清晰的动力学事件,空间位置如图 12 所示。分别是: A 点,源区崩滑体失稳; B 点,高位崩滑体冲击加载 Birch 冰川后缘; C 点, Birch 冰川断裂失稳; D 点,冰岩碎屑流撞击束窄段左侧山体; E 点,冰岩碎屑流冲击对岸山体并爬高; F 点,冰岩碎屑流停止运动。根据“5·28”Birch 高位冰岩崩-碎屑流的动力学特征,本研究将其分成 4 个阶段(图 2、图 12)。结合滑震信号时频特征,可进一步揭示各个运动阶段涉及的动力学现象,并确定关键动力现象的精确时间节点,进而估算相应的动力学参数。由于地震波能量随传播距离呈现指数级衰减,由此导致较远台站记录到的滑震信号信噪比较低^[25]。因此,本研究选择距离灾害最近的 LAUCH 台站所记录到的滑震信号进行后续分析。



(a) 5个台站HHZ方向滑震信号及走时关系图
(波形振幅作归一化处理)



(b) LAUCH台站滑震信号频谱

图 11 滑震信号特征(数据来源:瑞士联邦地震局)

Fig. 11 Characteristics of the landslide signals (Data source: Swiss Seismological Service)

如图 11(b)所示, LAUCH 台站滑震信号的卓越频谱能量主要集中在 0.01 ~ 10 Hz 的宽频区间,意味着本次灾害所涉及的动力学过程极为复杂,既包含冰岩体整体滑动的低频稳态行为,也涵盖了碰撞和破碎解体等高频冲击现象^[26-27]。同时,台站背景噪声在低频段(0.01 ~ 0.1 Hz)的能量与有效滑震信号相当,该频域重叠可能对后续宏观动力学行为分析造成干扰。因此,采用模态

分解^[28]去除原始滑震信号中的低频噪声,处理结果如图 13(a)所示。结果显示,与典型的滑坡-碎屑流所激发的滑震波形不同^[29],本次灾害产生的滑震信号呈现近似左右对称的“陀螺”状,即信号逐渐从背景噪声中显现,达到峰值后迅速衰减至背景噪声水平。该特征波形推测可能与 Nesthorn 峰和 Birch 冰川先后 2 次失稳滑落过程,以及下游沟谷窄陡地形约束效应密切相关。鉴于

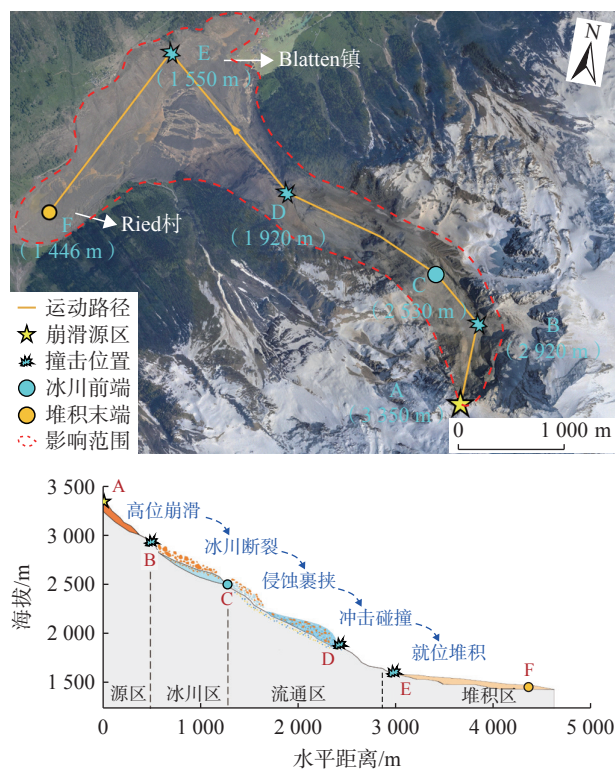


图 12 “5·28”Birch 高位冰岩崩-碎屑流关键动力过程及运动阶段划分

Fig. 12 Key dynamic processes and runout stages of the “5·28” Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche

高频与低频信号的成因机制不同,在时域上对二者进行联合分析有助于确定成灾过程中动力学事件的关键时间节点^[30]。因此,基于滑震信号主能量频带分布,将 LAUCH 台站滑震信号划分为:低频信号(频带为 0.01 ~ 0.1 Hz,波形见图 13b)、中频信号(频带为 0.1 ~ 1 Hz,波形见图 13c)和高频信号(频带为 1 ~ 10 Hz,波形见图 13d)。以第一段低频信号到时(即 13:24:34.195)作为起始时间参考点,综合分析如下:

(1)AB 段:高位崩滑源区前缘岩体崩落,撞击 Birch 冰川后缘。随着崩滑岩体启动,受重力作用,低频信号开始显现,见图 13b。约 4.38 s 后,中低频信号出现多个高频尖峰脉冲,见图 13cd,推测主要由岩体的破碎解体及零星碎屑撞击冰川所致。约 19.44 s 后,中高频信号出现首个峰值且能量突增,见图 13cdf,表明源区失稳的大部分危岩体运动至 B 点,与 Birch 冰川发生强烈碰撞,撞击速度约为 36 m/s。此阶段,因源区规模相对较小,岩体坠落高差约 300 m,滑体作用于地表的能量有限,表征滑震信号强度的阿里亚斯烈度曲线上升平缓,见图 13e。

(2)BC 段:崩滑岩体持续冲击加载 Birch 冰川(冲击时刻为 13:24:53.685),导致冰川发生断裂失稳。根据前

后 DEM 差分,计算出整体失稳规模约 $9.0 \times 10^6 \text{ m}^3$,显著大于 AB 段崩滑体规模。AB 段崩滑体冲击冰川约 4.385 s 后,低频信号出现第二个波峰,且波峰幅值约为第一个波峰的 4.5 倍,见图 13b。现有研究表明^[25],低频信号的幅值与滑体质量和加速度的乘积呈正相关关系。假设 AB 段和 BC 段滑体加速度相同,则可推断两段滑体质量比约为 1 : 3,这与 DEM 差分结果较为一致,同时也表明低频滑震信号的第二个波峰是由冰川整体加速运动产生。观察滑震信号时频图可发现,BC 段滑体运动过程中高频信号能量较低,见图 13f,这印证了 Birch 冰川在此阶段主要以整体失稳滑动为主。

(3)CD 段:受上部崩滑体冲击加载作用,Birch 冰川获得初始动能(整体失稳时刻为 13:24:54.885)。失稳后,冰川向下加速运动,滑震信号强度增长速率大幅提升,见图 13e。当冰岩碎屑流运动至 D 点时,速度约 85 m/s。由于沟道束窄,绝大部分冰岩碎屑体与左侧山体发生强烈碰撞,此时辐射的滑震信号能量最强,见图 13f。3 个频段的滑震信号均有峰值出现,但受带通滤波器非线性相移特性影响^[30],低频信号和中频信号峰现时间滞后于高频信号,将高频信号到达峰值的时间(13:25:07.19)视为碎屑流撞击 D 点。

(4)DF 段:D 点的强烈撞击导致冰岩碎屑流整体速度降低,部分碎屑体停滞于坡表,其余仍具较大动能的碎屑体形成漏斗流,冲出束口段,而后淹没 Blatten 镇。受对岸山体阻碍,冰岩碎屑流于 E 点发生碰撞,DE 段平均速度约 64 m/s,中高频信号可见清晰的撞击波峰,其能量明显低于 C 点高能冲击事件,见图 13f。冲击导致碎屑流爬高,随后转向流往 Ried 村,最终在 13:25:36.915 时刻停止于 F 点。

5 结语

(1)Birch 冰川断裂区海拔约 2 600 m,堆积区海拔约 1 466 m,垂直落差达 1 134 m,水平运动距离约 4 600 m,是一起典型的高位远程冰岩崩-碎屑流灾害。本次灾害在沟口形成了规模超过 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的堰塞堆积体,导致 Blatten 镇与 Ried 村被彻底摧毁,300 余人紧急撤离,1 人失踪。

(2)冰川发生灾难性断裂前,其上方约 300 m 南侧的 Nesthorn 峰受气候变暖与冻融循环共同驱动,频繁发生岩崩活动,对 Birch 冰川的演化过程产生关键影响。大量坠落的碎屑持续覆盖于冰川表面,改变其热力性质,在削弱冰川物质亏损的同时,厚层堆积所施加的附加荷载加剧了前缘鼓胀变形和冰裂缝扩展。近 10 年

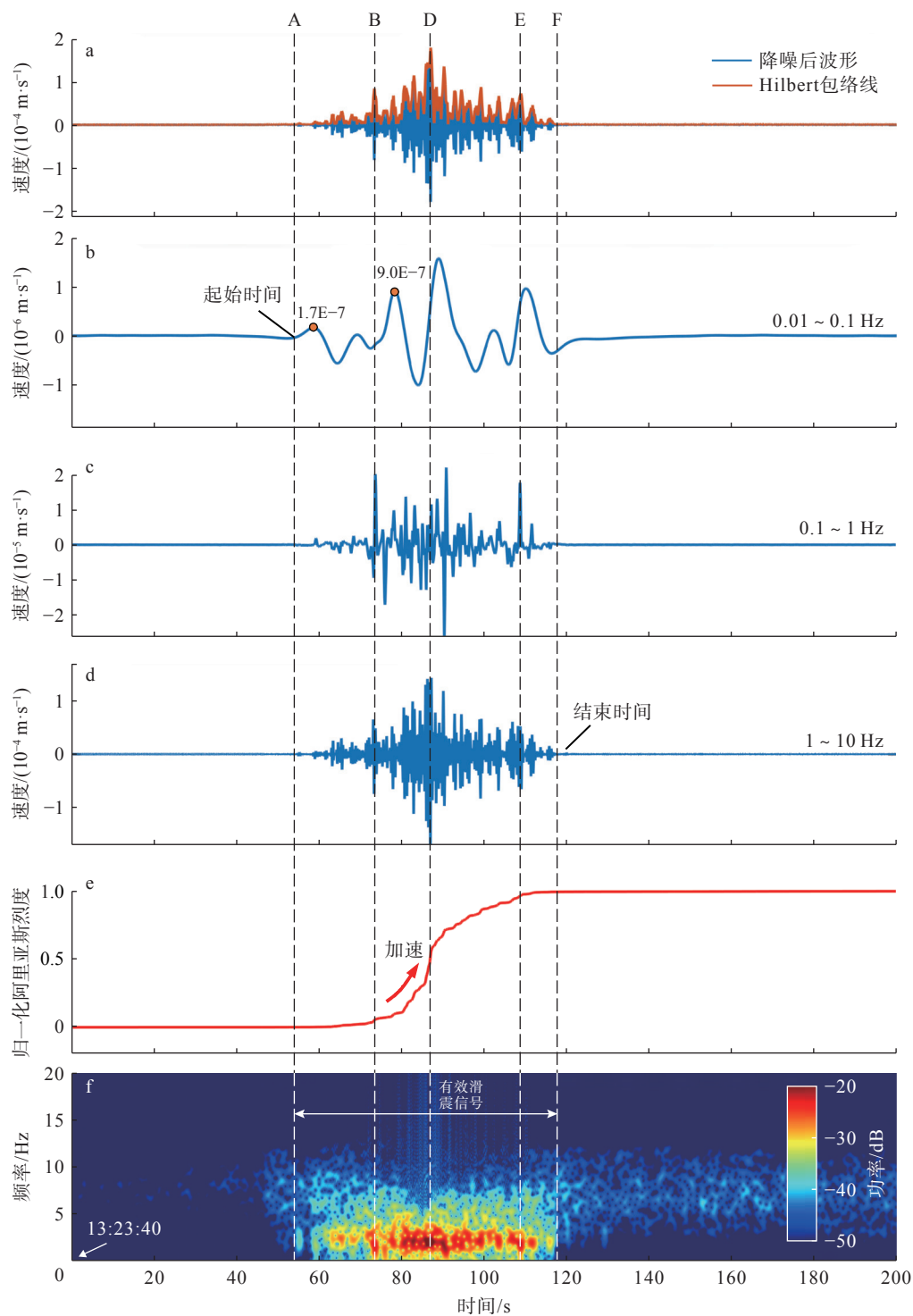


图 13 “5·28” Birch 高位冰岩崩-碎屑流滑震信号解译

Fig. 13 Interpretation of landslide signal generated by the “5·28” Birch high-altitude and long-runout ice-rock avalanche

内,冰川面积扩张约 44%,冰舌向前推进约 110 m。

(3)对成灾动力过程的反演结果表明,约 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的楔形崩滑体首先发生高位失稳,以约 36 m/s 的速度持续冲击加载下部 Birch 冰川,引发共计约 $6.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的冰川及其上覆碎屑发生整体失稳,随后转换成

高速远程运动的冰岩碎屑流,并以约 64 m/s 的平均速度冲出沟口,在与对岸山体发生碰撞后就位堆积。

(4)在全球气候变暖加剧、冰川大规模退缩、极端强降雨频发以及陆内地震活动日益活跃的背景下,发育于高寒、高海拔极高山区的冰岩型高位远程地质灾害

越发突出。在我国喜马拉雅东构造结地区,色东普沟、则隆弄沟等地已出现多起典型冰岩型灾害事件,其远程动力成灾常涉及冰-岩复合结构在极端环境内外动力耦合作用下的灾变过程,以及冰-岩-水-冰碛物等多相介质材料在高势能驱动下的链动传递和多灾种复合转换过程。深入开展此类灾害成灾机理研究,对于适应全球气候变化背景下的地质灾害防控和重大工程规划建设具有重要意义。

致谢: 感谢瑞士联邦测绘局(Swiss Federal Office of Topography, <https://www.swisstopo.admin.ch/en>)、瑞士联邦地震局(Swiss Seismological Service, <http://seismo.ethz.ch/en/home/>)、瑞士当地新闻机构 Schweizer Radio und Fernsehen(<https://www.srf.ch/>)和 Le Temps(<https://www.letemps.ch/>)、ETH 的 Farinotti 教授课题组、萨瓦勃朗峰大学的 Melaine Le Roy 博士等提供的数据支持。特别感谢西南交通大学何坤博士、中国地质大学(北京)付圣博士、奥地利格拉茨大学 Adam Emmer 博士、香港理工大学张晨阳博士在数据收集过程中提供的帮助!

参考文献(References):

- [1] DANIEL FARINOTTI, MATTHIAS HUSS, MYLÈNE JACQUEMART, et al. Fact sheet for the now-collapsed Birchgletscher, Switzerland [R]. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, and Snow and Landscape Research WSL, 2025.
- [2] YIN Yueping, LI Bin, GAO Yang, et al. Geostructures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66–101.
- [3] 杨情情, 郑欣玉, 苏志满, 等. 高速远程冰-岩碎屑流研究进展 [J]. *地球科学*, 2022, 47(3): 935–949. [YANG Qingqing, ZHENG Xinyu, SU Zhiman, et al. Review on rock-ice avalanches [J]. *Earth Science*, 2022, 47(3): 935–949. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡文涛, 姚檀栋, 余武生, 等. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1141–1152. [HU 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. (in Chinese with English abstract)]
- [5] MERGILI M, FRANK B, FISCHER J T, et al. Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with r. avaflo: Lessons learned for predictive mass flow simulations [J]. *Geomorphology*, 2018, 322: 15–28.
- [6] 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): 96–118.
- [7] DELANEY K B, EVANS S G. The 1997 Mount Munday landslide (British Columbia) and the behaviour of rock avalanches on glacier surfaces [J]. *Landslides*, 2014, 11(6): 1019–1036.
- [8] 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): 173–187.
- [9] 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): 314–321.
- [10] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 1–8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 1–8. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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.
- [12] MANI P, ALLEN S, EVANS S G, et al. Geomorphic process chains in high-mountain regions: A review and classification approach for natural hazards assessment [J]. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(4): e2022RG000791.
- [13] 彭建兵, 张永双, 黄达, 等. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应 [J]. *地球科学*, 2023, 48(8): 3099–3114. [PENG Jianbing, ZHANG Yongshuang, HUANG Da, et al. Interaction disaster effects of the tectonic deformation sphere, rock mass loosening sphere, surface freeze-thaw sphere and engineering disturbance sphere on the Tibetan Plateau [J]. *Earth Science*, 2023, 48(8): 3099–3114. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 申艳军, 彭建兵, 陈兴, 等. 高山冰川地貌区垂直分带性与地质灾害空间配置关系 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(6): 1336–1351. [SHEN Yanjun, PENG Jianbing, CHEN Xing, et al. Relationship between vertical zonality and spatial allocation of geological hazards in alpine glacial geomorphology [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(6): 1336–1351. (in Chinese with English abstract)]

- [15] ZHANG Tiantian, GAO Yang, LI Bin, et al. Characteristics of rock-ice avalanches and geohazard-chains in the Parlung Zangbo Basin, Tibet, China [J] . *Geomorphology*, 2023, 422: 108549.
- [16] KÄÄB A, JACQUEMART M, GILBERT A, et al. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers—more frequent than thought? [J] . *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 1751 – 1785.
- [17] 高少华, 殷跃平, 李滨, 等. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征 [J] . *工程地质学报*, 2024, 32(3): 996 – 1009. [GAO Shaohua, YIN Yueping, LI Bin, et al. Dynamic characteristics of the rock-ice avalanche disaster chain in the zelongnong basin, Yarlung Zangbo river canyon region [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(3): 996 – 1009. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张欣欣, 范宣梅, 王文松, 等. 高寒地区楔形体滑坡启动机制离心模型试验研究 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(5): 1202 – 1213. [ZHANG Xinxin, FAN Xuanmei, WANG Wensong, et al. Initiation mechanism of wedge landslide in alpine regions by centrifugal model test [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(5): 1202 – 1213. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 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. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province [J] . *Geology in China*, 2017, 44(5): 827 – 841. (in Chinese with English abstract)]
- [20] PUDASAINI S P, KRAUTBLATTER M. A two-phase mechanical model for rock-ice avalanches [J] . *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2014, 119(10): 2272 – 2290.
- [21] 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 – 120.
- [22] 许世民, 殷跃平, 邢爱国. 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. Characteristic analysis of the Nayong rock avalanche's kinematics based on seismic signals [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [23] LI Wei, WANG Dongpo, YI Xuebin, et al. Characterizing large rockfalls using their seismic signature: A case study of Hongya rockfall [J] . *Engineering Geology*, 2023, 323: 107222.
- [24] ALLSTADT K E, MATOZA R S, LOCKHART A B, et al. Seismic and acoustic signatures of surficial mass movements at volcanoes [J] . *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, 364: 76 – 106.
- [25] ALLSTADT K. Extracting source characteristics and dynamics of the August 2010 Mount Meager landslide from broadband seismograms [J] . *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(3): 1472 – 1490.
- [26] SCHNEIDER D, BARTELT P, CAPLAN-AUERBACH J, et al. Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model [J] . *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115(F4): 2010JF001734.
- [27] YAN Yan, CUI Yifei, GUO Jian, et al. Landslide reconstruction using seismic signal characteristics and numerical simulations: Case study of the 2017 “ 6 • 24 ” Xinmo landslide [J] . *Engineering Geology*, 2020, 270: 105582.
- [28] ZHANG Shilin, YIN Yueping, HU Xiewen, et al. Block-grain phase transition in rock avalanches: Insights from large-scale experiments [J] . *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, 128(11): e2023JF007204.
- [29] BOTTELIN P, JONGMANS D, DAUDON D, et al. Seismic and mechanical studies of the artificially triggered rockfall at Mount Néron (French Alps, December 2011) [J] . *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(12): 3175 – 3193.
- [30] HIBERT C, EKSTRÖM G, STARK C P. Dynamics of the Bingham Canyon Mine landslides from seismic signal analysis [J] . *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(13): 4535 – 4541.