

瑞士瓦莱州 Blatten 高位远程崩滑碎屑流成灾特征与级联放大效应

李滨¹, 高杨^{1*}, 庄宇², 刘晓杰³, 张晗¹, 秦林鹏⁴, 郭桢^{4,5}, 殷跃平⁶

1 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

2 湖南大学土木工程学院, 长沙, 410082

3 兰州理工大学土木工程学院, 兰州, 730050

4 同济大学土木工程学院, 上海, 200092

5 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海, 200092

6 中国地质环境监测院, 北京, 100081

摘要: 2025 年 5 月 28 日瑞士瓦莱州布拉滕村 (Blatten) 上游发生高位远程冰岩崩事件, 滑体体积为 830 万方, 运动距离为 3300 米, 堆积面积为 2.66 平方公里, 滑坡堆积导致 1 人遇难, 300 名居民撤离, 隆扎河堰塞断流。本文综合遥感调查、滑震信号解译和动力学数值模拟等方法, 揭示了瑞士 Blatten 高位远程冰岩碎屑流动力成灾过程与级联放大效应。结果表明: (1) 瑞士 Blatten 滑坡发生过程主要呈现为高位冰岩崩加载-冰川融化变形-高位远程碎屑流成灾三个地质演化阶段; (2) 该滑坡具有强烈的级联放大效应, 上部危岩体逐渐坍塌堆积于 Birch 冰川之上, 随着冰川上覆堆积逐渐积累和冰川强度的逐渐弱化, 最终发生整体失稳, 造成了此次巨大规模成灾; (3) 冰屑和融水显著降低了滑体运动阻力, 促进碎屑流低摩擦远程致灾。综上研究, 认为在高位远程滑坡调查、风险评估与早期预警中, 应充分考虑多次小滑坡累积成大灾的级联放大效应, 该级联放大效应将大幅提高灾害的破坏力和危害性。瑞士 Blatten 滑坡为我国西部山区城镇风险区划和重大工程建设中面临的高位远程地质灾害风险提供了重要警示作用。

关键词: 瑞士 Blatten 滑坡; 失稳启动; 级联放大效应; 动力学分析; LPF3D

中图分类号: TU443 收稿日期: 2025-08-26

Characteristics and cascading effects of the Blatten avalanche in the Swiss Alps

Bin Li¹, Yang Gao^{1*}, Yu Zhuang², Xiaojie Liu³, Han Zhang¹, Linpeng Qin⁴, Zhen Guo^{4,5}, Yueping Yin⁶

1 Institute of Geo-Mechanics, Chinese Academy of Geo-Sciences, Beijing, 100081

2 College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 410082

3 School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050

4 College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092

5 Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai, 200092

6 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing, 100081

Abstract: On 28 May 2025, a large rock-ice avalanche occurred at the Blatten village in Valais, Switzerland. The failure mobilized approximately 8.3 million m³ of material, traveled 3,300 m, and deposited over an area of 2.66 km². The Blatten avalanche caused one fatality, buried the Blatten village and dammed the Lonza River. Integrating remote sensing analysis, seismic signal interpretation and numerical modeling, this study reconstructs the event and identifies its pronounced cascade amplification effects. The failure evolved through three distinct stages: high-altitude collapse, glacier melting and deformation, and transformation into a long-runout avalanche. Progressive debris accumulation and gradual glacier weakening were the key drivers of the large-scale hazard. In addition, low-friction ice and meltwater markedly reduced motion resistance, facilitating the long-runout movement. These findings highlight the need to account for the potential of multiple small-scale failures cascading into catastrophic events in avalanche risk assessments. The Blatten disaster offers important implications for hazard zoning and the planning of major infrastructure projects in high-mountain regions of western China.

Key words: Blatten avalanche; avalanche initiation; cascade amplification effect; dynamic analysis; LPF3D

0 引言

2025年5月28日,瑞士阿尔卑斯Blatten地区发生高位冰岩崩灾害,该事件表现出特殊的“级联效应”(殷跃平等,2025)。5月18日至27日,Kleines Nesthorn山体海拔3320 m位置处发生多期次垮塌,塌落的岩质碎屑堆积于Birch冰川之上。随着上覆压力增大和冰屑融化,最终于5月28日下午发生特大冰岩崩。约830万方的冰岩碎屑体倾斜而下,沿途铲刮裹挟地面松散堆积,并形成碎屑流,最终堆积体面积达2.66平方公里,摧毁了Blatten村。由于预警及时,300余名村民于灾害前近乎完成搬迁,1人遇难。分析探究其形成背景和致灾原因,对指导我国西部山区城镇风险区划和重大工程地质安全具有重要意义(彭建兵等,2023; Deng et al., 2025; Duncan et al., 2014; Petley, 2025a, 2025b; SwissInfo, 2025)。

受全球气候变暖、极端强降雨重现期缩短、降雨增温等影响,大面积冰雪体、冻土发生融化,高寒山区冰岩崩灾害呈多发高发态势(Gruber & Haeberli, 2007; Kääb et al., 2018; Ekström & Stark et al., 2018; Roe et al., 2017; 殷跃平等, 2021a; 高少华等, 2024; 年廷凯等, 2024)。近十年来,欧洲阿尔卑斯山地区发生了多起高位远程冰岩崩灾害

(Marcer et al., 2021),引起了地质灾害研究领域的重点关注。2017年8月23日,Cengalo地区发生冰岩崩-泥石流,300万方的冰岩体高位失稳,铲刮了60万方的冰屑,形成冰岩碎屑流。巨大的撞击能和摩擦热促使冰屑融化,形成泥石流后,远程运动约6.5 km,在Bondo村造成了8人死亡(Mergili et al., 2020)。2023年和2024年,Fluchthorn和Scerscen地区(Zhuang et al., 2025)再次发生特大冰岩崩,该类型灾害已成为阿尔卑斯山区最具破坏力的地质灾害之一(Pfluger et al., 2020)。中国喜马拉雅地区亦是高位远程冰岩崩高发区,2021年印度Chamoli冰岩泥石流致灾距离超15 km,造成超200人死亡,引起了国内外学者的广泛关注(殷跃平等, 2021b; Shugar et al., 2021; Jiang et al., 2021)。我国西藏地区也发生了多起冰岩崩灾害,2000年4月易贡扎木弄沟发生高位冰岩崩,堆积体积近3亿方,滑距约10 km,形成巨型堰塞湖(殷跃平, 2000; Zhuang et al., 2020; Li, Y et al., 2024); 2014年以来,色东普流域发生多次巨型冰岩崩事件,堵塞雅鲁藏布江,对上下游人居安全和基础设施运营造成重大威胁(刘传正等, 2019; Zhang et al., 2022; Gao et al., 2023)。

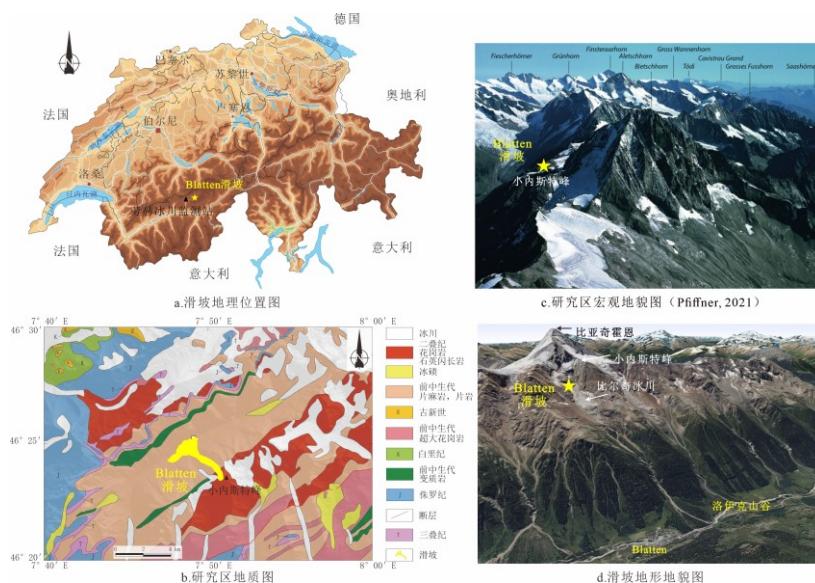


图1 瑞士瓦莱州Blatten滑坡地理位置与地质图

Fig.1 Location and geological map of the Blatten avalanche in Valais, Switzerland

相较于常规岩土体滑坡,冰岩崩启动于高海拔冰川区,运动过程中势动能转化大,具有启动位置高、致灾范围大和破坏力强等特点(杨情情等, 2015; Dong et al., 2024; Schneider et al., 2011),其特殊的含冰物质及相态转化效应,常使其表现出复

杂的链动成灾过程(申艳军等, 2022; Fan et al., 2025; Zhang et al., 2025)。高位冰岩崩一经发生,极易造成重大人员伤亡和财产损失。因此,如何分析此类高位启动、高速远程和链动成灾的特殊滑坡的成灾模式,提出隐患区早期识别和风险定量评估

方法，是当今地质灾害防灾减灾的一大难题。此次瑞士 Blatten 冰岩崩因其特殊的级联效应和巨大的灾难性，引起了国内外学者的广泛关注。本文综合遥感调查、滑震信号解译和动力学数值模拟等方法，揭示了瑞士 Blatten 村高位远程冰岩碎屑流动力成灾特征与级联放大效应，认为在高位远程滑坡调查、风险评估与早期预警中，应当充分考虑多次小滑坡累积成大灾的级联放大效应，尤其是在有悬冰川分布的高陡沟谷地形影响。

1 研究区地质环境背景

研究区位于瑞士南部瓦莱州（Valais）布拉滕村（Blatten）附近，经纬度为 46°24' N，7°50' E，区域内最高位置为比奇峰（Bietsch），高程 3717m，最低海拔位置位于勒奇河谷中，高程 1355m，属于典型高山冰川地貌，地形极为陡峭（图 1）。比奇峰下方海拔 3320m 位置处为内斯特峰（Kleines Nesthorn），下方海拔 2580m 和 3000m 之间分布有面积为 0.2 平方公里的布里奇（Birch）悬冰川，比奇峰和内斯特峰前期曾多次发生冰岩崩灾害，成为了布里奇冰川物源的主要补给来源。滑坡堆积区为阿尔卑斯山脉勒奇河谷（Lötschental），河谷三面被坡度陡峭山谷包围，滑坡最大地形垂直高差达 2000m。勒奇河谷中有隆扎河（Lonza River）等河流流经，上游发育有阿尔卑斯山脉中最大和最长的冰川阿莱奇（Aletsch）冰川，冰川融水是勒奇河谷

隆扎河的重要补给来源。

地质构造特征：滑坡区在构造位置上属于赫尔维西推覆系，其由结晶基底岩石（花岗岩、片麻岩和片岩）及上覆沉积物组成。赫尔维西推覆系可划分为上、下两个单元。下赫尔维西单元由 Aar 地块及其沉积盖层组成；Aar 地块结晶基底被抬升并沿逆冲断层向北移动；中生代沉积盖层发生褶皱并被挤入基底岩石中；新生代盖层由复理石和磨拉石组成（Pfiffner, 2021）。上赫尔维西单元主要由两个推覆体组成：下部为 Axen 推覆体，上部为 Drusberg 推覆体。Axen 推覆体主要由侏罗系组成，地层经历了强烈的褶皱变形和断裂作用；Drusberg 推覆体主要由白垩纪灰岩组成（Pfiffner, 2021）。赫尔维西推覆系是典型的褶皱-推覆带，其中沉积岩序列从其花岗岩基底上剥离，并被推覆数千公里形成褶皱带。褶皱带的形成伴随着与推覆作用同时发生的多次大规模褶皱作用（Dick and Burkhard, 1988），这一过程导致了大量褶皱、逆冲断层、走滑断层和正断层的形成（图 1b）。研究区内强震事件相对较少，附近布里格和施塔尔登曾发生多次 5 级以上古地震事件：布里格曾发生 1755/12/9 5.7 级地震、1837/01/24 5.4 级地震、1924/04/15 5.2 级地震、1960/03/23 5.0 级地震。施塔尔登曾发生 1855/07/25 6.2 级地震、1855/07/26 5.5 级地震、1880/07/04 5.2 级地震、1855/08/24 5.0 级地震（瑞士地震局）。

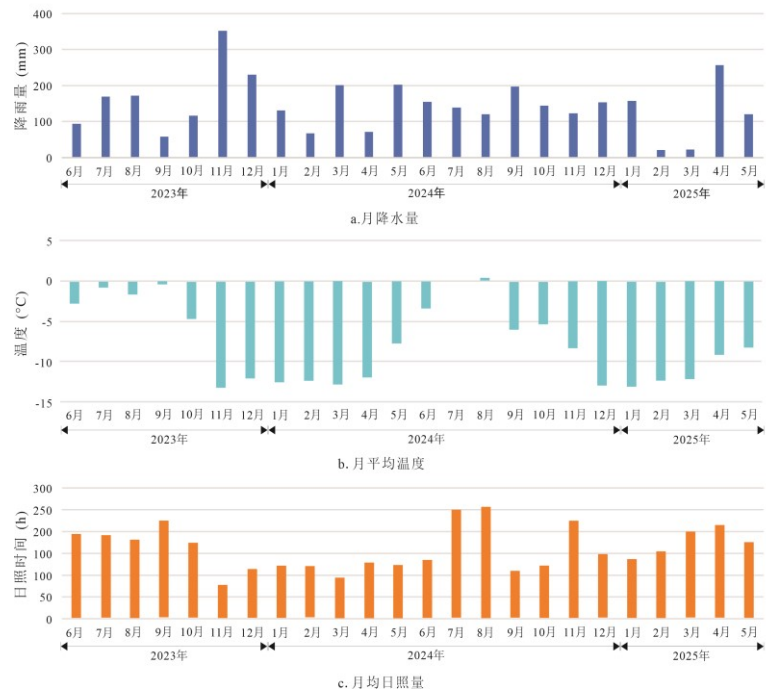


图 2 瑞士瓦莱州 Blatten 滑坡附近比奇峰气象台站数据

Fig.2 Meteorological data from the Bietschhorn station near the Blatten avalanche

地层岩性与斜坡结构：滑坡区位于阿尔卑斯山脉北部边缘，阿尔卑斯山脉由欧亚板块与非洲板块碰撞形成，该区域以推覆构造和褶皱带为主，岩层破碎且断层较为发育。根据 1: 50 万瑞士地质图及相关资料，研究区主要出露前中生代变质岩（包括片麻岩、片岩、变花岗岩）、二叠纪侵入岩（包括花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩）、中生代（三叠纪、侏罗纪和白垩纪）沉积岩、古近纪沉积岩和第四纪冰碛物。滑源区岩性主要为花岗岩，下部为片麻岩和片岩，优势构造结构面倾向为 SE，产状为 $130^{\circ}\angle 85^{\circ}$ ，斜坡方向为 NW，斜坡结构类型属于反倾斜坡，岩体风化较为强烈。

气象水文条件：瓦莱州属于温带大陆性气候，但受海拔和地形影响，垂直气候差异显著。近年来

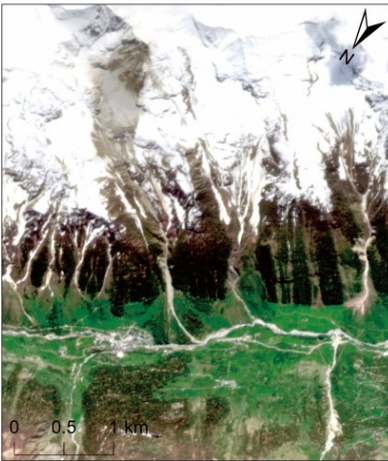
全球气候变暖趋势明显，瑞士冰川近两年体积减少 10%，2023 年全球冰川融水量超 6000 亿吨，创历史纪录（据世界气象组织《全球水资源状况报告》）。该地区降水较为丰富，降水形式随季节和海拔变化，冬季以降雪为主，夏季则多降雨。根据距离滑坡灾害距离最近的瑞士气象局比奇峰台站（瑞士气象局 Meteoswiss）监测数据（图 2），近两年研究区内最大降水量为 352.6mm，最低气温为 -13.3°C ，同时发生在 2023 年 11 月，最大日照时间为 256 小时，发生在 2024 年 8 月。滑坡发生前 1 个月，降水量显著增加，2025 年 4 月降水量超过 250mm，日照时间和气温逐渐上升的趋势（图 2），对滑坡变形和高位启动具有重要影响。



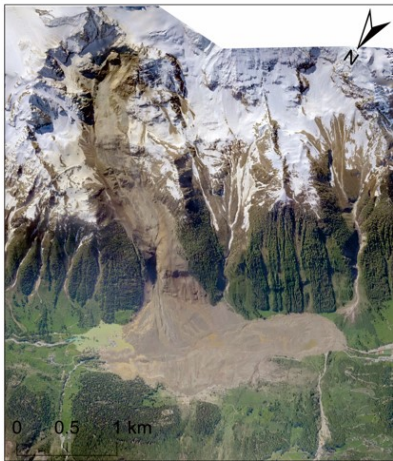
a. 瑞士瓦莱州Blatten滑坡全貌



b. Blatten滑坡滑前遥感影像



c. 高位冰岩崩遥感影像(24日)



d. Blatten滑坡滑后遥感影像(30日)

图 3 瑞士瓦莱州 Blatten 滑坡全貌与多时序遥感影像图（收集于 https://www.rapidmapping.admin.ch/index_de.html）
Fig.3 Overview and multi-temporal remote sensing images of the Blatten avalanche

2 Blatten 滑坡基本情况

2025 年 5 月 28 日瑞士瓦莱州布拉滕村 (Blatten) 上游发生高位远程冰岩崩事件, 滑体体积量为 830 万方。自 5 月 18 日开始内斯特峰高位冰岩山体陆续发生多次冰岩崩事件 (岩崩为主), 总体积规模达 550 万方, 堆积体停积在布里奇悬冰川之上。多次小规模崩滑灾害对布里奇冰川产生冲击加载和重力加载作用, 导致冰川应力状态重新调整, 同时冰体融化导致滑体材料强度逐渐弱化, 冰川物源产生较大变形, 以至于在 5 月 28 日 550 万碎屑堆积与 280 万方冰川物源同时下滑, 形成了高

位、高速、远程的崩滑碎屑流, 体现了多次小崩滑累积成大灾的级联放大效应 (图 3)。

2.1 滑坡运动分区 (综合遥感)

根据遥感数据分析、DEM 差值、视频分析等技术手段调查结果, 5 月 28 日滑坡水平运动距离 3300m, 高差 1700m, 后缘最小横宽 390m, 前缘堆积最大横宽 2500m, 滑坡影响区面积为 2.66 平方公里, 最大堆积厚度超 30m。根据滑坡运动堆积特征, 可将滑坡影响区主要分为高位物源区 (冰岩崩区和冰川区)、流通区、洒落区和堆积区的四个运动区 (图 4)。

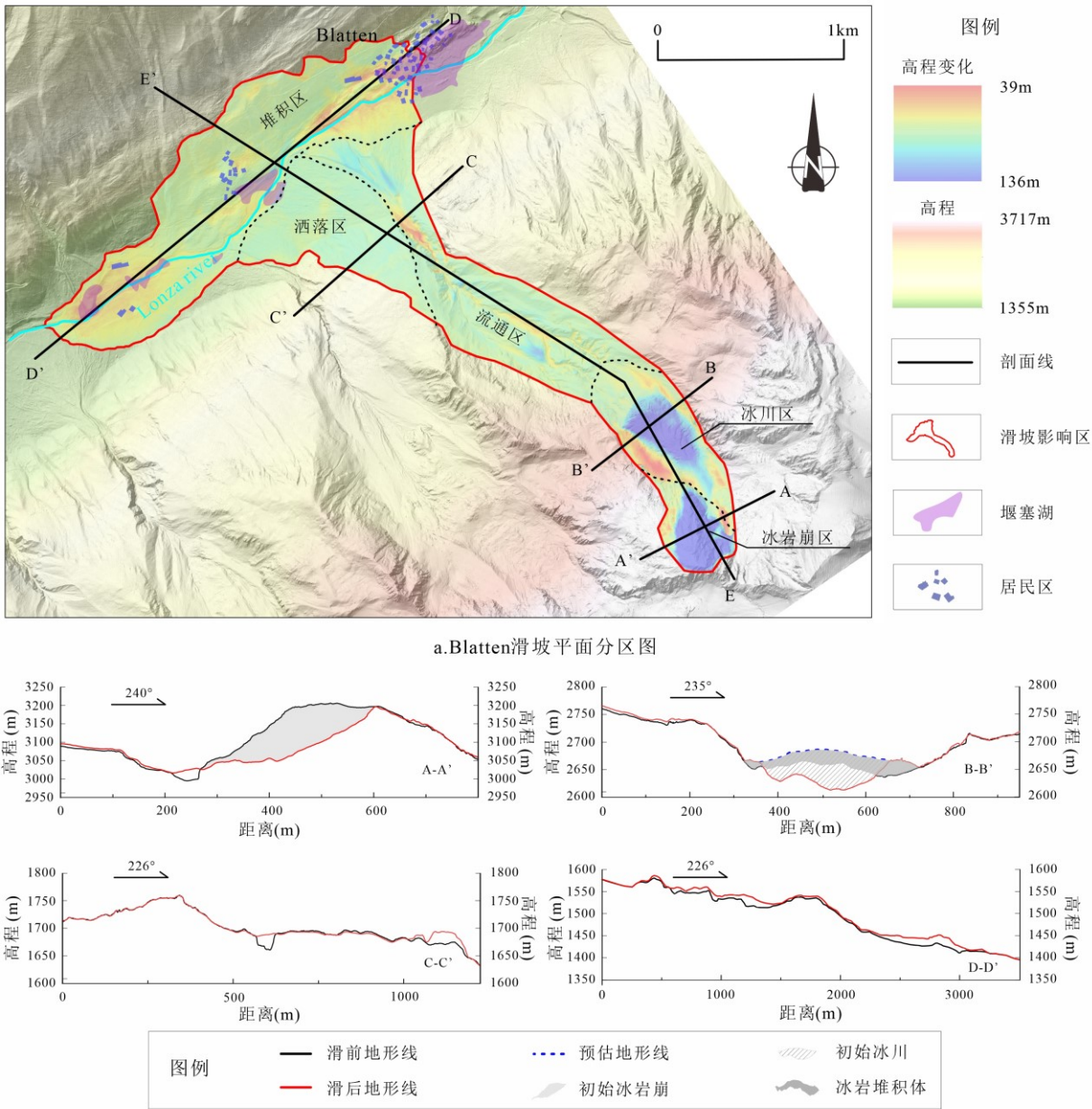


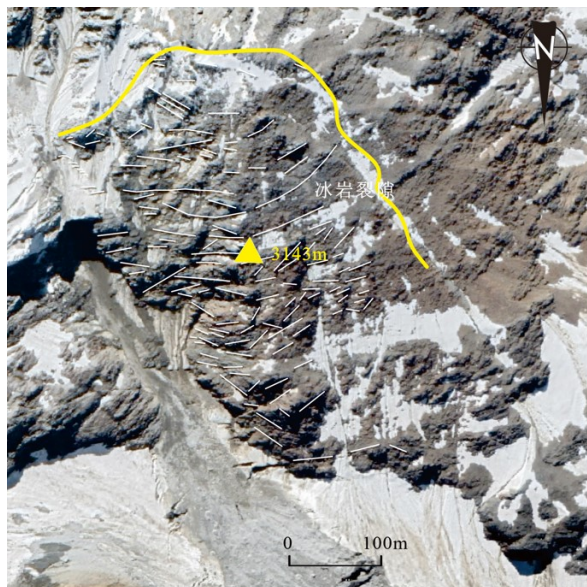
图 4 瑞士瓦莱州 Blatten 滑坡平面分区与横剖面图

Fig.4 Zone division and cross-sectional profiles of the Blatten avalanche

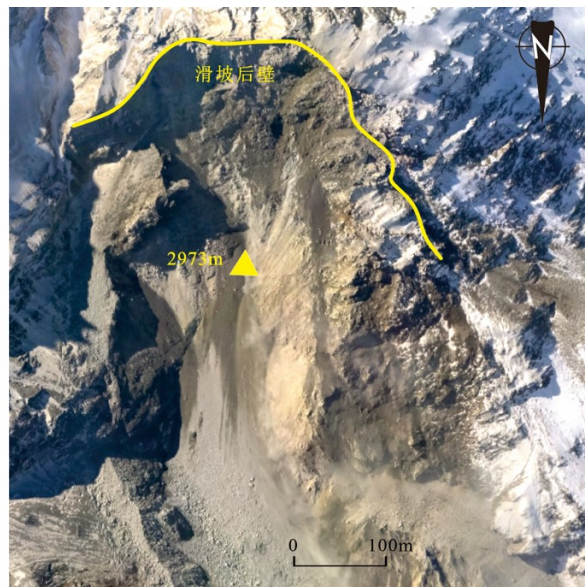
I 高位物源区

冰岩崩物源：高位物源区（冰岩崩区）位于海拔高程 2687m~3337m，高差 650m，纵长 460m，横宽 435m，平面面积约 14.80 万平米，通过差分计算滑前/滑后 DEM 数据，该区发生 550 万方物质亏损。基于滑前影像（图 5a），冰岩崩区前期发育多条横向裂缝，裂缝走向近 E-W 向，与主崩方向呈大角度

相交，密集发育的长大横向拉裂缝为冰雪冻融渗水提供了优势通道，严重影响了冰岩崩岩体结构的稳定性。基于滑后影像（图 5b），冰岩崩发生后，其后缘呈圈椅状地形，形成高差约 100m 的崩滑陡壁，坡体表部残留有大量松散崩落堆积物，在坡体中部形成凹槽冲沟，为后续冰岩崩的崩落提供了利好地形条件。



a. 高位滑源区滑前遥感影像



b. 高位滑源区滑后遥感影像



c. 高位滑源区照片



d. 高位冰岩崩后缘照片

图 5 高位物源区（冰岩崩区）影像对比分析图

Fig.5 Image analysis of the collapse area

冰川物源区：冰川物源区位于海拔高程 2580m~3000m，高差 720m，纵长 980m，横宽 400m，平面面积约 32.40 万平米，通过差分计算滑前/滑后 DEM 数据，该区发生 280 万方物质亏损。基于滑前影像（图 6a），冰川上覆碎屑发育多条拉裂缝，其中后部裂缝呈“羽状”分布在堆积体两侧，前缘冰舌处裂缝受自重应力作用密集发育，呈“扇形”分布；冰川前缘悬空高度约 120 米，坡脚发育 5 处崩滑堆

积体，体积约 517 万方，堆积体多呈松散状顺坡堆积。基于滑后影像（图 6b），冰岩崩堆积体下滑后堆积到冰川表面，在堆积体加载作用下冰川中前部发生滑动破坏，部分侧缘因未受到冰岩崩堆积体加载作用未能直接下滑。

II 流通区：流通区是高位滑坡高速运动冲击关键区段，影响着滑坡运动过程的转向、飞溅和侵蚀。位于海拔高程 1498m~2580m，高差 1032m，沟长

2400m，平面面积约 64 万平方米，顺冲沟形成，呈管道状，地形呈上陡下缓，出山口以上坡度 35°，出山口以下坡度 15°（图 7）。流通区中后部发育沟道残留堆积的物源，在自重应力和冰雪冻融流水冲刷作用下，此两处沟道物源有明显的溜滑迹象，顺沟冲出成为堆积体；流通区中部发育大量崩滑物源，此类物源规模较小，多为坡表残留的松散堆积

体；流通区出口因沟道侧蚀作用，在高速冲击下，滑体冲击飞溅导致下方洒落区大片森林植被、松散覆盖层等物质被裹挟带走。流通区出山口为坡脚残留堆积体，残留堆积体积约为 174 万方，其物质成分以细颗粒松散堆积体为主，表部发育辫状流通道。

III 洒落区：洒落区位于出山口下游侧，平面形

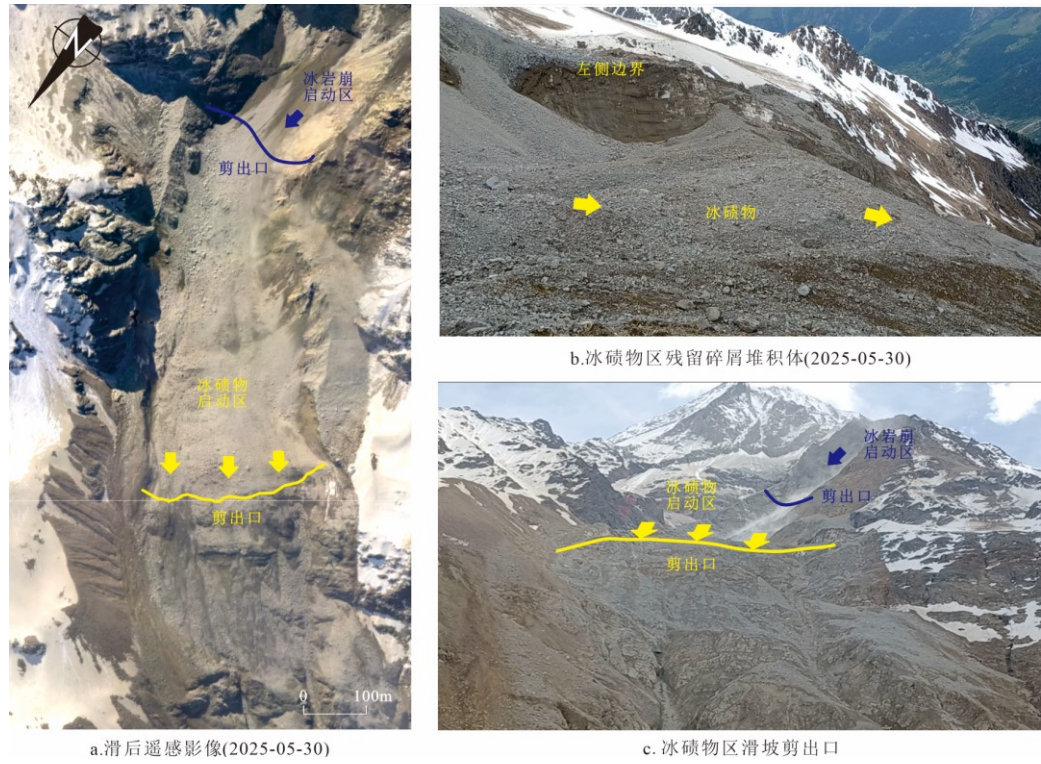


图 6 高位物源区（冰碛物区）影像对比分析图
Fig.6 Images of the debris-covered glacier

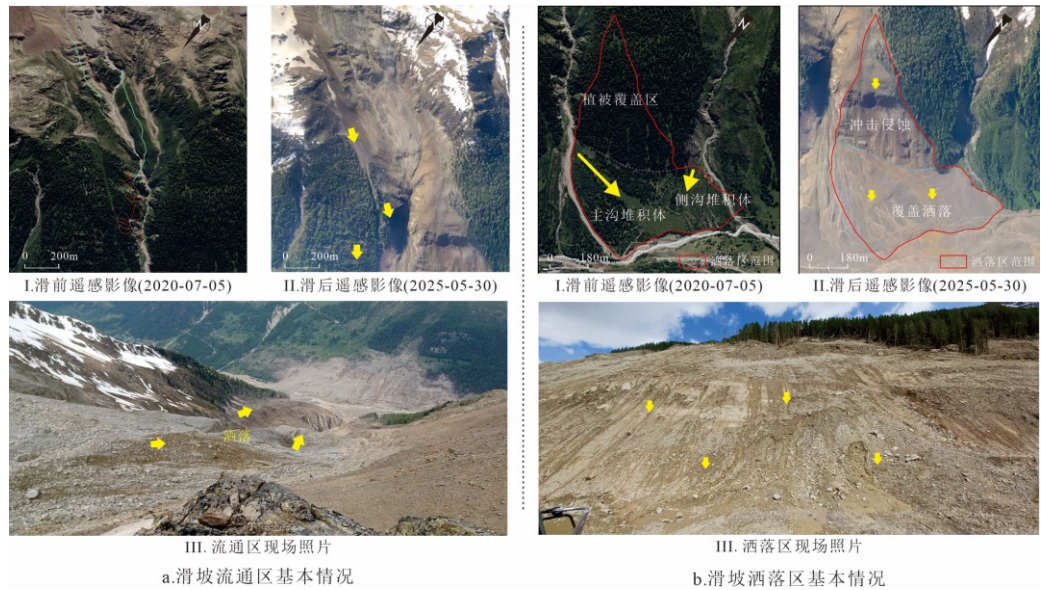


图 7 流通区与洒落区遥感影像及现场照片
Fig.7 Remote sensing images and field observations of the propagation and deposit area

态近似成三角形，面积约 41 万平方米，地形呈上陡下缓，堆积体以上坡度 40°，出山口以下坡度 14°

（图 7）。基于滑前影像，该区整体植被茂密，中后部地形高陡，植被以乔木为主；中前部为两处冲沟

堆积体叠加区，其中上游侧为 Brich 冲沟早期堆积体，下游侧冲沟为比奇沟早期堆积体。受滑坡运动和气浪冲击影响，该区表部植被完全消失，揭示出裸露地形，中后部高陡区高大乔木消失后坡表发生了溜滑变形，两处早期冲沟堆积体表部覆盖大量松散堆积体。

IV 堆积区：堆积区主要位于沟口河道右岸，堆积体顺河展布，平面形态成宽带状，面积约 1.13 平

方公里，体积约 830 万方。该区为人类工程活动强烈区域，分布有大量的居民住宅，交通干线与乡村道路交错，左岸缓坡上开辟为居民牧场，右岸斜坡上零星有居民住宅。滑坡堆积体将区内住房、道路、河流全部掩盖，表部形成大小不一的堆积体堰塞湖，其中位于上游侧的堰塞湖面积 0.13 平方公里，湖内可见未被完全淹没居民住房（图 8）。

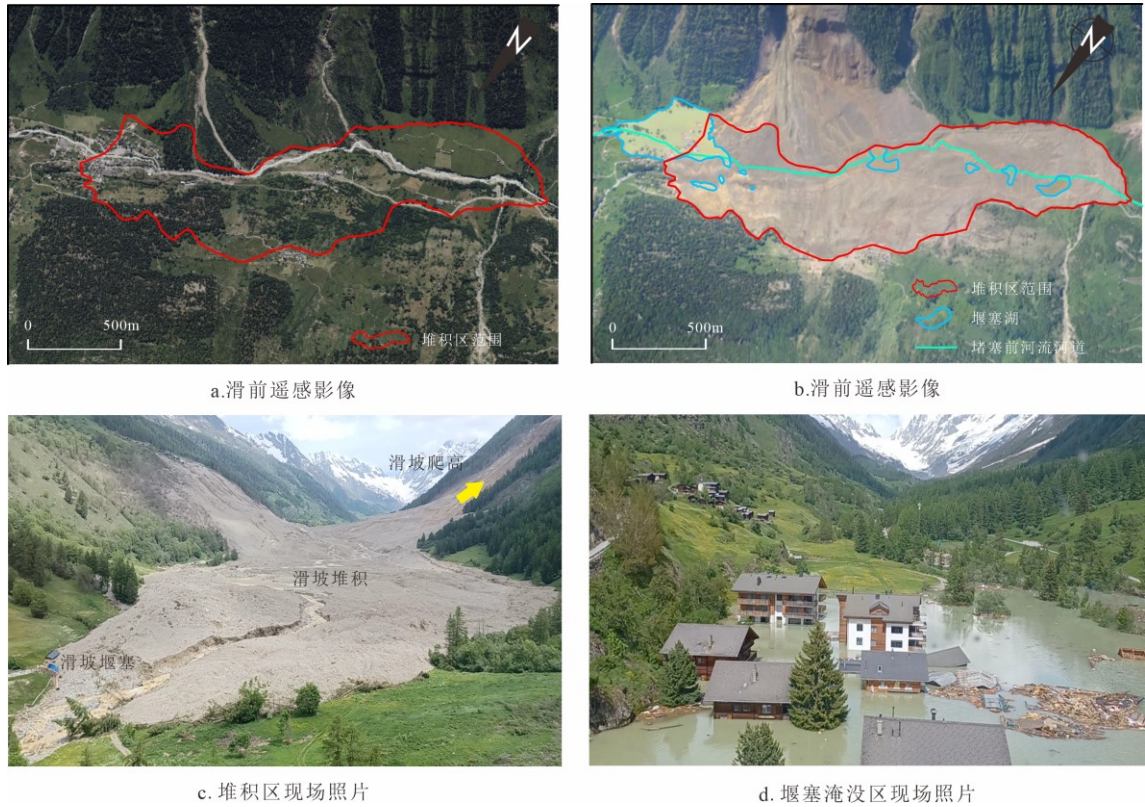


图 8 堆积区影像对比分析图（收集于 https://www.rapidmapping.admin.ch/index_de.html）

Fig.8 Image analysis of the deposit area

2.2 滑坡震动信号解译

内斯特峰高位冰岩山体自 2025 年 5 月 18 日起进入频繁活动阶段，至 5 月 28 日期间发生多次小规模冰岩崩滑，这期间由于影像数据缺失，地震信号解译成为还原滑坡演化全过程的重要技术手段。我们解译了瑞士 LAUCH 台站 5 月 13 日-6 月 13 日几次重大震动事件，并对 5 月 28 日高位远程滑坡运动堆积过程进行了重点分析。

（1）LAUCH 台站震动数据分析

根据距离滑坡源区近处 LAUCH 台站监测的滑坡活动信号，我们分析了 2025 年 5 月 13 日-6 月 13 日期间的震动累积能量特征。这些信号通常具备高频和弱能量的特征，在此次观测中为 0.5-5Hz 频带范围。因此，我们计算 0.5-5Hz 频带范围的累计功率谱密度随时间变化（Hibert et al., 2014; Hugge et al., 2012），结果表明：观测期间共有三次显著活动带来了剧烈的能量爆发，分别是 5 月 13 日希腊 6.0

级地震、5 月 28 日滑坡和 6 月 3 日希腊 4.9 级地震（地震目录，<https://orfeus-eu.org/webdc3/>）。此外，还包括一次能量快速累积阶段（图 9），与 5 月 19 日后发生的数十次小型垮塌信号有关（<http://www.seismo.ethz.ch/de/earthquakes/switzerland/massmovements/>）。

（2）5 月 28 日高位远程滑坡滑震信号分析

针对距离固定地震台站几十至上百公里的大型滑坡事件，其运动范围相较于震中距可忽略不计。因此，在滑坡运动过程中，由其加速或减速所产生的对地表的作用力可近似为单点力。本文选择分布在 20–120 km 范围内、在 10–200 s 频段内具有较高信噪比（SNR）的宽频带地震台站，用于反演滑坡动力学过程中的力源-时间函数。反演结果的方差缩减率达到 91%，表明反演结果具有较高的可靠性。基于所反演的力源-时间函数及事件信号的时频谱特征，可将此次滑坡运动过程分为三个主要

阶段（图 10）：

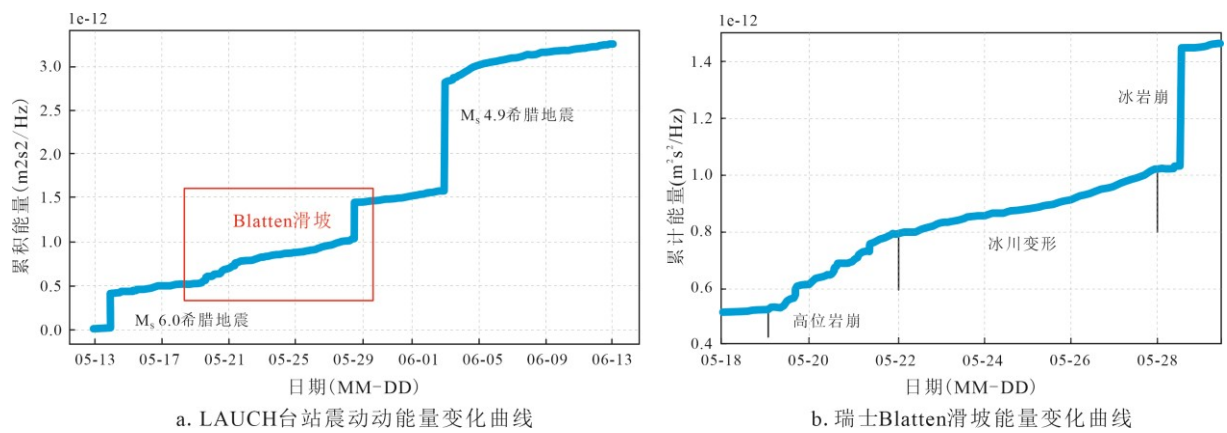


图 9 距离滑坡源区最近台站的能量-时间关系

Fig.9 Energy-Time relationship at the station closest to the avalanche area

(1) 加速运动：灾害启动 40s 内，垂向、东向和南向荷载值迅速增大，表明碎屑流开始沿坡面向下加速运动，整体运动方向为北西。滑体平均速度超 40m/s，同时，运动过程中呈现出显著的高频信号，对应于碎屑流剧烈的碰撞作用与颗粒破碎过程。

面和对岸山体发生的剧烈碰撞。滑震信号分析得到的碎屑流运动关键节点与视频影像相一致(图 11)。

(3) 流动堆积：碎屑流回落至山谷内，并发生横向扩展和堆积。该阶段滑震频率显著降低，但高频成分仍然存在，表明该阶段滑体仍保持较高的速度沿沟谷向两侧扩散运动。随后，各方向地震力幅值和滑震信号频率显著降低，滑体已基本停止运动，仅存在少量的内部蠕动和侧向变形。最终于 150 s 后，滑体基本停止运动。

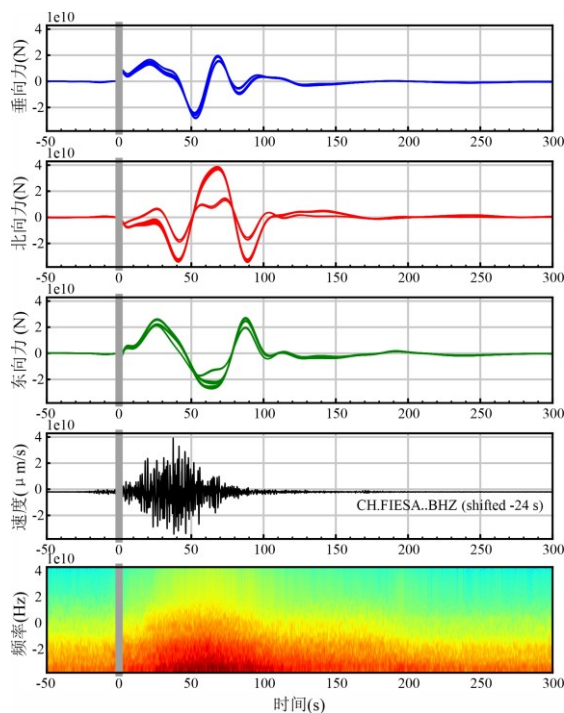


图 10 基于地震信号反演灾害事件的力-时间函数以及对应的原始地震信号的时频谱

Fig.10 Force-time function and time-frequency spectrum of the Blatten avalanche-induced seismic signals

(2) 冲击回落：灾害启动约 40s 后，垂向地震力方向发生偏转，此时碎屑流已抵达谷底并猛烈撞击对岸山坡，形成显著爬升。滑体发生挥洒效应和运动方向偏转，并随后回落至山谷中。该阶段，碎屑流运动速度显著降低，并经历运动方向转变。此外，滑震信号仍以高频信号为主，对应于滑体与地



图 11 Blatten 冰岩崩运动关键节点视频影像

Fig. 11 Recorded video of the Blatten avalanche

2.3 瑞士 Blatten 滑坡演化过程

根据 DEM 差值、图像分析和地震动解译结果，按照时间进程，Blatten 滑坡发生过程主要分为五个阶段：

(1) 滑坡前兆分析：基于 2024 年 1 月 3 日至 2025 年 5 月 21 日获取的 43 景 Sentinel-1 升轨影像数据，获取了 Blatten 冰岩崩滑前的时空形变演化特征。图 12a 展示了该灾害体失稳前的地表年平均形变速率。图 12a 中，正值（红色）表示山体朝向卫星视线方向运动，负值（蓝色）表示远离卫星视线方向运动。Sentinel-1 形变结果表明，失稳前滑源区呈现显著地表形变，最大年形变速率超 80mm/y。于山体不同位置提取 4 个点进一步分析该灾害失稳前的形变时间演化特征，如图 12b 所示。由图可见，Blatten 冰岩崩在失稳前存在明显的形变加速信号，

其中 P1 点位于高位冰岩崩区域，2024 年 1 月 3 日至 2025 年 5 月 21 日期间累积形变超过 60 mm，且在 2025 年 3 月 10 日形变出现加速。P2 点位于布里奇冰川分布区域，2024 年 1 月 3 日至 2025 年 5 月 21 日期间累积形变接近 80 mm，且在 2024 年 12 月 4 日形变出现加速。P3 与 P4 点位于下方沟道区域，累积形变超过 80 mm，且 P3 点在 2024 年 11 月 22 日形变出现加速。

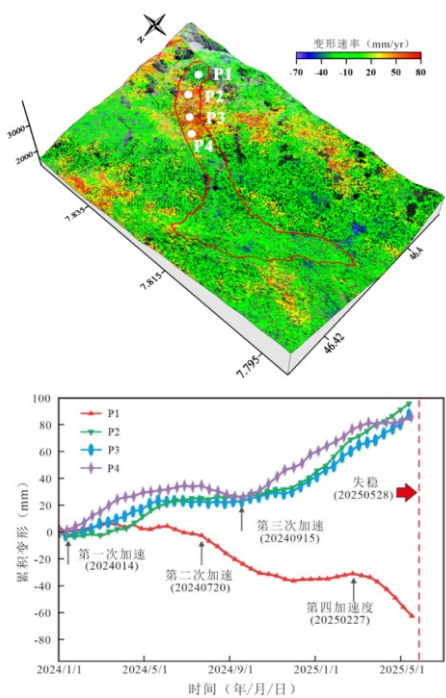


图 12 瑞士 Blatten 滑坡 2024-01-03 至 2025-05-21 时间序列 InSAR 形变监测图

Fig.12 Time-series InSAR deformation monitoring of the Blatten landslide, Switzerland, from 2024-01-03 to 2025-05-21

(2) 高位冰岩崩加载: 5 月 18 日-5 月 22 日期间，比奇峰下方的内斯特峰 (Kleines Nesthorn) (高程 3320m) 发生多次冰岩崩 (图 13)，并堆积在海拔 2580m 和 3000m 之间的布里奇冰川之上。5 月 18 日内斯特峰高位冰岩山体出现大变形岩体错落，裂隙扩展延伸趋势逐渐增强，山体下部位置首先产生剪出并形成凌空面，随后冰岩山体由下向上逐渐发生坠落，19 日-21 日滑坡震动信号数据显示共发生有 11 次滑震事件，多以高位冰岩崩为主，形成冰岩碎屑堆积体，并停积在布里奇冰川上方，堆积面积为 0.14 平方公里，并没有形成大规模远程运动。DEM 差值数据显示，累积体积量为 550 万方。多次小型冰岩崩灾害加载作用成为后期大规模失稳滑动的关键诱发因素，不仅显著增加了 5 月 28 日高位崩滑灾害体的体积规模，同时导致原本稳定的冰川材料强度减弱和坡体稳定性下降，具有显著的体积放大级联效应 (图 14)。

(3) 冰川融化变形: 5 月 22 日-5 月 27 日期间，瑞士地震局记录到冰川底部日均微震事件增多，显示源区材料深层滑移加速。随着冰体融化和孔隙水压力上升，冰川物质强度逐渐减弱，并发生强烈变形，具相关报道日变形量超过 4m (Daniel et al., 2025)。前一阶段高位冰岩崩多次冲击加载作用导致冰川物源材料强度逐渐减弱，冰体融化导致含水量增加，孔隙水压力显著提升，坡体形变加剧，表现出显著的强度弱化级联效应。

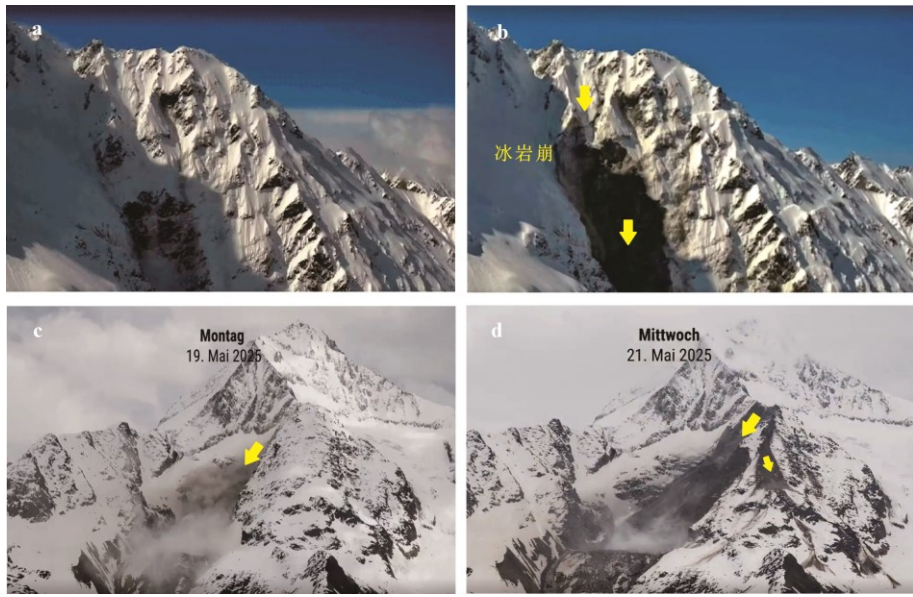
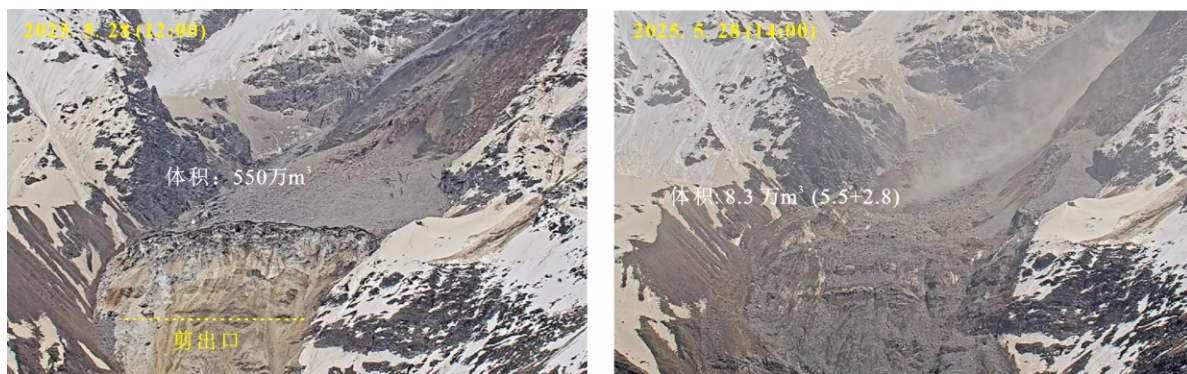
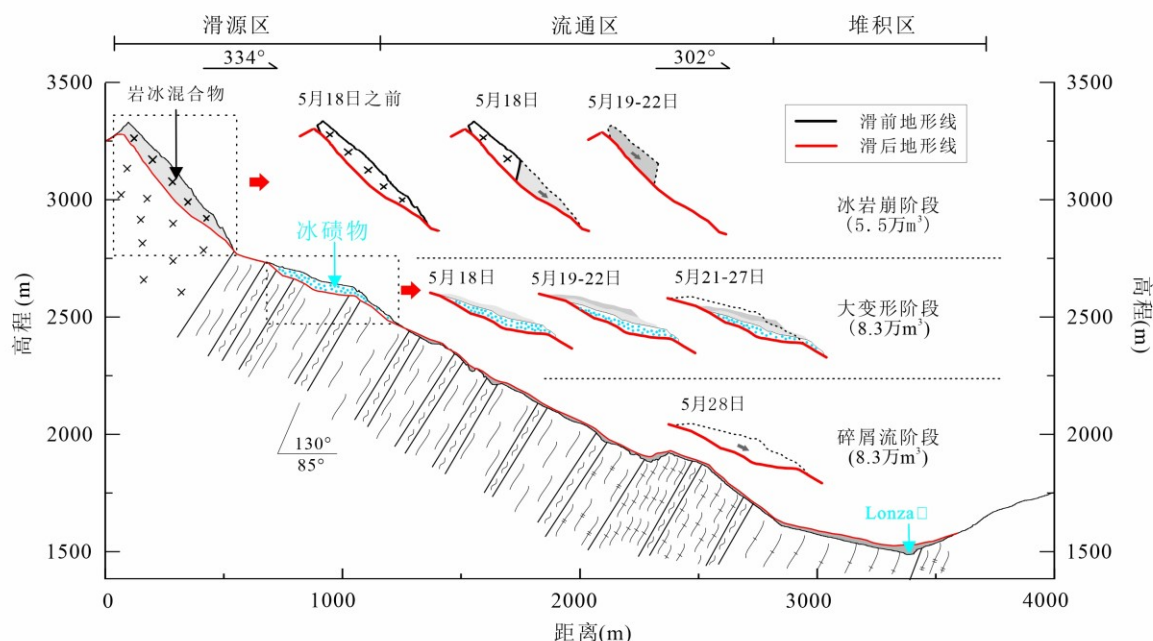


图 13 瑞士 Blatten 滑坡的高位冰岩崩滑加载阶段
Fig.13 Loading phase of the rock-ice collapse onto the glacier



a. 5月28日瑞士Blatten滑坡启动区



b. 瑞士Blatten滑坡纵剖面E-E'与演化过程图

图 14 瑞士 Blatten 滑坡的冰碛物坡体变形阶段

Fig.14 Deformation of the debris-covered glacier

(4) 远程运动堆积: 5月28日 UTC 时间 13:24 比奇冰川位置处, 体积方量约为 830 万方的冰川物质与前期冰岩崩堆积共同破坏失稳, 从海拔 2580 米处整体剪出, 以碎屑流冲入山谷, 产生相当于 3.1 级地震的地震动 (图 9)。根据滑坡现场监测视频预估滑坡前缘最大运动速度超 50m/s, 结合地震动信号和遥感影像综合分析, 滑坡整体运动过程经历了高位失稳启动 (高位启动)-势动能转化 (高速冲击)-裹挟覆盖树木 (减速运动)-堆积堰塞 (调整堆积) 四个阶段, 高速运动滑体与运动路径的不动岩土体发生了强烈撞击, 视觉角度上形成了超百米高的扬尘和气浪, 翻越裹挟了洒落区内大片森林树木 (图 15)。

(5) 堰塞湖次生灾害: 碎屑流最大堆积厚度超 30 米, 据瑞士国家广播电视台(SRF)发布的无人机画面, Blatten 村约 90%区域被夷平, 房屋、教堂及农田被埋, 仅边缘零星建筑残留。5月28日冰岩崩碎屑物阻断隆扎河后形成堰塞湖, 库容以 100 万立方米/日速度扩张, 导致多处建筑物被水淹没, 湖水高度达 10-15 米 (图 15d)。冰岩崩碎屑物堆积体渗透性差, 湖水持续积蓄, 堰塞湖可能瞬时溃洪冲毁下游甘佩尔-施泰格 (Gampel-Steg) 等居民区。布里奇冰川仍存有不稳定冰川残留体, 高位冰岩崩冲击区裸露碎屑岩体及沉积物易受侵蚀, 在夏季融雪及降雨条件下, 未来可能会再次形成崩滑灾害。

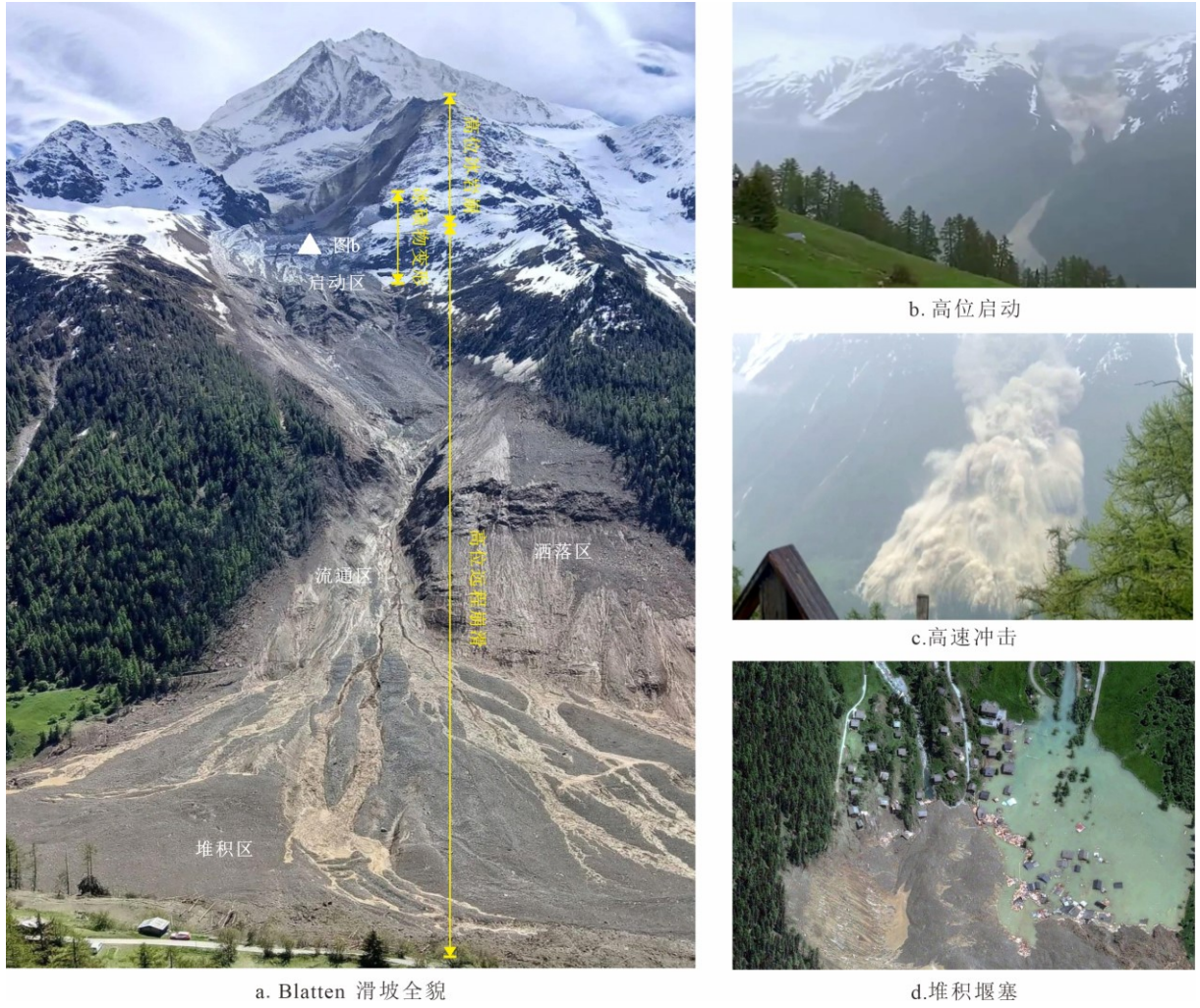


图 15 瑞士 Blatten 滑坡的高位远程崩滑阶段
Fig.15 Rapid movement and long runout of the Blatten avalanche

3 级联动力学过程数值模拟

3.1 数值方法

相较于低海拔坠落高差较小的崩滑碎屑流，瑞士 Blatten 滑坡的坠落高差超 1500m，具有显著的高速势流体运动特征，高速运动的岩土材料的稀疏和超稀疏物理状态显著增加。该高位远程滑坡不仅呈现了多阶段演化，同时在运动过程中还呈现了多物理状态的势流运动特征。为还原整个滑坡运动堆积过程，数值模拟方法是最有效的计算手段。本项研究采用基于多体动力模型和多算法耦合的 LPF3D 数值模拟方法，对 5 月 28 日瑞士 Blatten 滑坡的整个演化过程和高速运动过程进行反演模拟计算。LPF3D 数值软件以光滑粒子流体动力学算法 (SPH) 为基础，并将传统的 SPH 方法升级成可用于离散颗粒的 SDPH 方法。滑体材料采用多体动力学模型进行计算，使得数值计算粒子表征质量、密度、速度、

加速度等物理量，同时也承载着体积分数、浓密程度和颗粒实际粒径等固体的物理力学属性。可以实现高位崩滑体的浓密状态、稀疏状态和超稀疏状态之间转化耦合的三维计算 (Gao et al. 2024a, 2024b)，三种状态分别采用理想弹粘塑性模型、颗粒体动力学本构和接触力学本构进行计算。具体数值模拟参数选取见表 1。模型中基底摩阻力 f_r 采用随孔隙水压力系数提高而降低的关系式表征：

$$f_r = \sigma(1 - r_u) \tan \phi \quad (1)$$

式中： σ 为基底法向应力； r_u 为孔隙水压力系数； ϕ 为内摩擦角。

3.2 实际滑坡过程模拟

(1) 5 月 28 日滑坡演化计算结果

Blatten 滑坡数值模拟结果如图 16 和 17 所示，根据其动力学特征可划分为加速运动、冲击回落和流动堆积三个阶段。滑坡总历时约 150 s，自 Birch 冰川区至沟谷内堆积区，最大运动距离 3.3 km。失

表 1 数值模拟参数表
Table 1 数值模拟参数表

几何参数		滑体参数		边界参数		算法参数	
滑体体积 (万 m ³)	密度 (kg/m ³)	内聚力 (Pa)	内摩 擦角(°)	泊松 比	摩擦系 数	孔隙水 压力系 数	临界体积分 数(浓 密/稀疏/超 稀疏) (%)
830	2730	40000	35	0.25	0.5	0.7	0.57/0.02

稳初期，滑体前缘少量物质开始缓慢下滑，随后滑体主体发生整体破坏，以碎屑流的形式沿沟道向下运动。此时，滑体进入加速运动阶段，平均速度超

50m/s，前缘速度更是超 80m/s，并在 40-60s 时高速撞击对岸山体（图 16a，图 17）

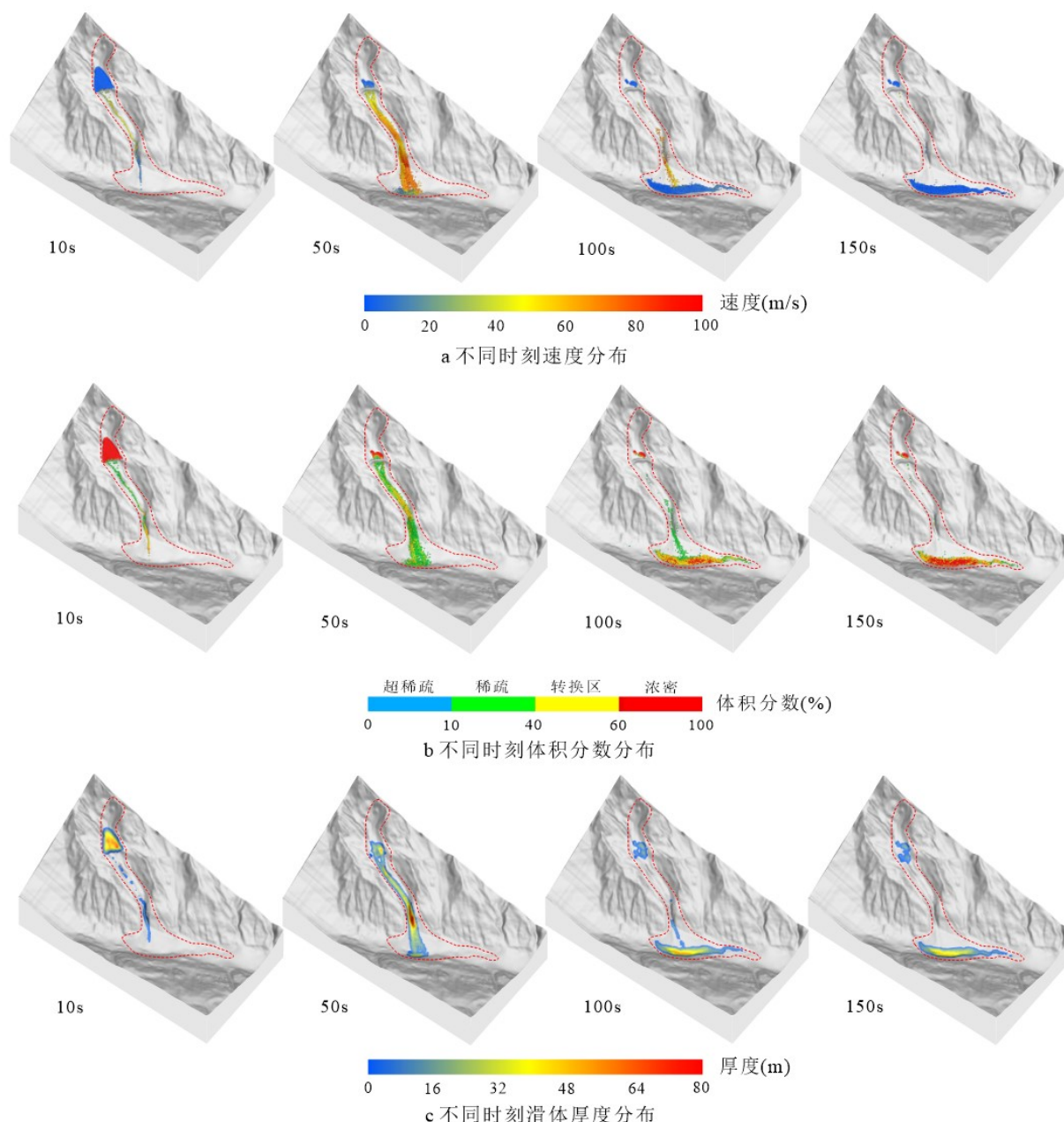


图 16 Blatten 滑坡模拟结果

Fig.16 Modeling results of the Blatten avalanche

该阶段滑体动能达到峰值，高速运动过程中，受内部剪切碰撞作用影响，滑体体积分数逐渐降低（图 16b），呈现相对稀疏的态势运动致灾。此时，滑体

流态化运动特征显著增强，表现出极高的流动性。

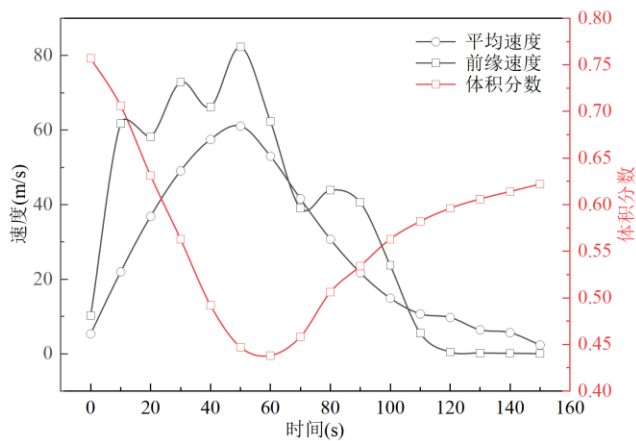
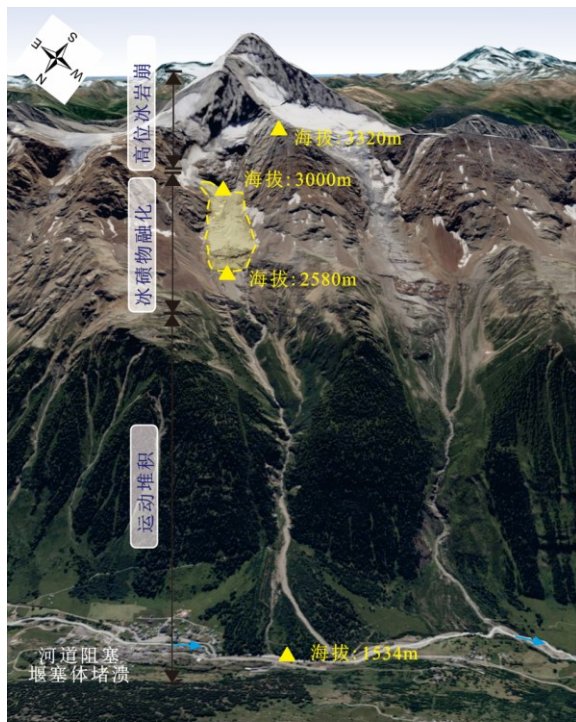


图 17 Blatten 滑坡速度与体积分数演化规律

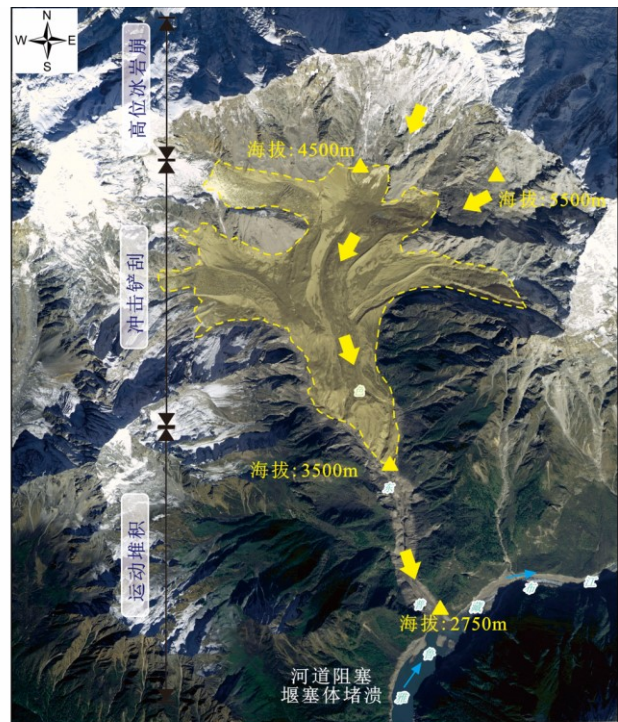
Fig.17 Evolution of velocity and volume fraction of the Blatten avalanche

撞击对岸山坡后，滑体发生爬坡并迅速回落，促使滑坡碎屑沿沟谷向上下游扩散运动。运动速度显著降低，但仍保持超 20 m/s 的速度运动扩散。此时，随着滑体自身能量衰减，自身体积分数开始增大，呈现致密状运动。直至 150 s 后，滑体基本停止运动，平均速度趋近于 0，并呈现致密状堆积，体积分超过 60%。模拟获得的滑坡运动特征与关键时间节点与滑震信号分析结果高度吻合，验证了数值模型有效性。

Blatten 滑坡最终堆积分布模拟如图 16c 所示。



a.瑞士Blatten冰岩崩碎屑流
(高位冰岩崩-冰碛物融化-远程运动堆积)



b.中国色东普冰岩崩碎屑流
(高位冰岩崩-冰碛物融化-远程运动堆积)

图 18 Blatten 滑坡（Google Earth 影像）与中国色东普滑坡（Planet 影像）对比图

Fig.18 Comparison between the Blatten avalanche and the Sedongpu landslide in China

滑体集中堆积于勒奇河谷中，最大堆积厚度超 30 m，仅有少量碎屑残留于运动路径的坡面上，与现场观测结果相吻合。该堆积分布体现了 Blatten 滑坡的超高流动性，数值模拟中，碎屑流等效摩擦系数仅 0.15，显著低于常规岩土质高位远程滑坡。低摩擦冰和融水显著降低了滑体运动阻力，促使碎屑流堆积于平坦的河谷地形 (Munch et al., 2024; Zhuang et al., 2024)。

4 讨论

瑞士阿尔卑斯山区 Blatten 高位远程冰岩崩滑灾害受到了国内外广泛关注，也为我国高山与极高山地区此类地质灾害的防灾减灾工作带来了深刻警示和启发，尤其是喜马拉雅东构造结的重大工程建设区和人口居住区。我国东构造结地区近七十年来已发生过色东普、易贡、则隆弄等 20 余次特大高位冰岩崩地质灾害链事件 (Yin and Xing, 2012; Gao et al., 2023; 高少华等, 2024)，这类灾害具有复合型成灾与级联放大效应，增加了灾害早期预警和风险评估的难度。

本文结合瑞士瓦莱州 Blatten 和中国西藏色东普两个高位远程冰岩崩碎屑流成灾特征 (图 18)，从以下三个方面进行讨论：

（1）地质力学成灾模式：在高海拔地区冰川与冰碛物对滑坡的成灾模式影响关键，冰碛物的主动融化和被动铲刮是导致灾害规模放大的两种主要模式。瑞士 Blatten 滑坡属于高位冰岩崩-冰川物质融化-远程运动堆积的复合成灾模式，布里奇冰川冰碛物坡率为 470‰，长度 670 米，不利于冰岩崩碎屑流长期停积，在冰体融化作用下，短期内即发生高位崩滑，导致灾害规模放大显著。中国西藏色东普碎屑流属于高位冰岩崩-冰碛物铲刮-远程运动

堆积的复合成灾模式，沟内冰碛物坡率为 260‰，长度 3800 米，为冰岩崩碎屑流停积提供了较好的平台，有利于小规模冰岩崩碎屑体的长期累积，根据中国地质调查局无人机航飞数据，色东沟内冰碛物最大堆积厚度近 400m，而超高位启动的大规模冰岩崩往往会冲击铲刮冰碛物，导致灾害规模放大。两个灾害案例呈现了不同的级联放大成灾模式。

表 2 阿尔卑斯与喜马拉雅典型高位远程冰岩碎屑流灾害数据对比

Table 2 Comparison of typical long-runout rock-ice avalanches between the Alps and Himalayas							
滑坡名称	灾害时间	体积方量 (万 m ³)	坠落高差 (m)	冰碛物区长 (m) / 坡率 (‰)	运动距离 (m ³)	最大运动速度 (m/s)	成灾模式
瑞士 Blatten 滑坡	2025.5.28	820	1700	630/470	3300	>30	高位冰岩崩-冰碛物融化变形-远程运动堆积
中国色东普碎屑流	2018.10.27	3000	2778	4300/260	9700	>100	高位冰岩崩-冲击铲刮-远程运动堆积

（2）风险评估技术方法：高位远程崩滑碎屑流运动全过程呈现高速、非定常、物理状态多样的运动特征，滑体材料呈现浓密类固态、稀疏类液态、超稀疏类气态的多相态特征，单一物理状态难以完全表征。符合高位远程地质灾害的实际物理力学过程数值计算方法。冰碛物的擎托作用导致灾害级联放大效应极为显著，主要由体积方量增加和材料强度弱化的两个原因。三维多相态动力学模型更好的解决了颗粒飞溅洒落的过程。

（3）高位灾害风险管控：根据瑞士邦政府公报及相关资料（https://www.sohu.com/a/900837796_121124519?scm=10001.325_13-109000.0.0.5_32&spm=smcpc.channel_248.block3_308_NDdFbm_1_fd.20.1749090568577fwXgRpV_324），瑞士 Blatten 滑坡发生时间线如下，2010 年后当地永久冻土层升温显著，自 2020 年以来，当地科研机构通过地基雷达（GB-InSAR）、冰川运动 GPS、永冻土温度链等技术手段对冰川及岩体进行实时监测，2022 年以来永久冻土层加速退化，孔压上升导致岩体稳定性逐渐减弱。2025 年 5 月中旬布里奇冰川出现异常位移，上方内斯特峰岩体裂隙逐渐扩展变宽，2025 年 5 月 19 日政府发布预警对居民进行疏散。2025 年 5 月 28 日瑞士瓦莱州冰岩混合崩塌事件，瑞士当局采取的系统性后续措施，以崩塌点为中心半径 5 公里区域（覆盖

Fieschertal 山谷下游居民点），进行人员疏散及交通管制，封闭 A19 山区公路及阿莱奇冰川观光缆车。针对阻断隆扎河形成的堰塞湖，瑞士陆军工兵部队在堆积体安装实时水压传器进行监测，同时开挖深度 4 米、长 120 米导的流槽用以控制水位，并发布洪水预警。

相较之下，我国西南高原地区如色东普等高位冰岩崩灾害监测体系仍处于发展阶段，受制于高海拔、复杂地形和技术布设难度，预警链条存在监测手段分散、数据共享不足、响应环节割裂等问题。目前主要依赖于遥感影像、无人机航测和事后调查，实时监测与快速响应能力相对薄弱。

从 Blatten 事件的经验来看，针对青藏高原等区域的高位远程冰岩崩灾害防控，可获得以下几点启示：（1）建立长期空-天-地一体化监测体系，将遥感影像、雷达干涉、GNSS、温度监测、无人机影像等数据融合，以捕捉岩体和冰川的演化特征；（2）强化科研与政府协同机制，推动灾害风险等级评估与行政预警联动；（3）完善堰塞湖应急泄流与交通管制预案，建立现场应急技术支撑体系；（4）构建多源信息共享与公众预警平台，提高高海拔地区灾害防控的社会韧性。这一系列措施将助力于我国在未来应对类似高位远程冰岩崩灾害时，实现从事后处置向事前预防的转变，提升预警的科学性和响应的高效性。

5 结论

2025 年 5 月 28 日瑞士瓦莱州布拉滕村 (Blatten) 上游发生高位远程冰岩崩事件, 滑体体积量为 830 万方, 摧毁了 Blatten 村。本文通过综合遥感调查、滑震信号解译和动力学数值模拟等方法, 揭示了瑞士 Blatten 高位远程冰岩碎屑流动力成灾全过程, 为我国西部山区城镇风险区划和重大工程建设中面临的高位远程地质灾害风险提供了重要警示作用。

(1) 2025 年 5 月 28 日瑞士 Blatten 滑坡水平运动距离 3300 m, 高差 1700 m, 后缘最小横宽 390m, 前缘堆积最大横宽 2500m, 滑坡影响区面积为 2.66 平方公里, 最大堆积厚度超 30m。根据滑坡运动堆积特征, 可将滑坡影响区主要分为高位物源区 (冰岩崩区和冰碛物区)、流通区、洒落区和堆积区的四个运动区。瑞士 Blatten 滑坡发生过程主要呈现为高位冰岩崩加载-冰川融化变形-高位远程崩滑成灾三个地质演化阶段。

(2) 瑞士 Blatten 滑坡源自于 5 月 18 日开始内斯特峰高位冰岩山体陆续发生多次冰岩崩事件, 总体积规模达 550 万方, 堆积体停积在布里奇悬冰川之上。多次小规模崩滑灾害对布里奇冰川的碎屑冰碛物产生冲击加载和重力加载作用, 导致冰碛物的应力状态重新调整, 同时由于冰体融化导致滑体材料强度逐渐弱化, 冰碛物物源产生较大变形, 以至于在 5 月 28 日 550 万冰岩崩堆积体与 280 万方冰碛物物源同时下滑, 形成了高位、高速、远程的崩滑碎屑流, 体现了多次小滑坡累积成大灾的级联放大效应, 冰岩碎屑流体积的逐渐累积和冰碛物强度的逐渐弱化是导致此次灾害巨大规模成灾的关键原因。

(3) 基于多体动力学数值软件 LPF3D 反演了 5 月 28 日 Blatten 冰岩碎屑流的运动演化过程。滑体经历了加速运动、冲击回落和流动堆积三个阶段, 其最大速度超 50m/s, 滑体体积分数经历了先降低再增大的趋势。数值仿真得到的碎屑流动力学特征和堆积分布与场调查结果相吻合, 该数值方法可为高位远程滑坡风险评价提供技术支撑。

致谢 感谢瑞士联邦测绘局 (Swiss Federal Office of Topography, <https://www.swisstopo.admin.ch/en>)、瑞士地震局 (Swiss Seismological Service, <http://seismo.ethz.ch/en/home/>)、瑞士当地新闻机构

Schweizer Radio und Fern sehen (<https://www.srf.ch/>) 和 LETEMPS (<https://www.letemps.ch/>)、VAWGlaciology- ETH Zurich & WSL Sion 等提供的数据支持。特别感谢香港理工大学张晨阳博士在数据收集过程中提供的帮助。云南重点研发计划项目 (202403AA080001-4) 对 LPF3D 软件研发支持。

Reference

- Daniel, F., Matthias, H., Mylene, J., et al., 2025. Fact sheet for the now-collapsed Birchgletscher, Switzerland. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, and Snow and Landscape Research WSL. Report.
- Deng, Y., Gao, Q., Wang, X., Fan, X., 2025. A large-scale rock avalanche-debris flow cascading hazard in the Sedongpu catchment, southeastern Tibetan Plateau. *Landslides*, 22(1):109-120.
- Dong, Z.B., Su, L.J., Hu, B.L., Miao, S.S., 2024. Friction behaviors and flow resistances of rock-ice avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 220:104130.
- Duncan, J.M., Wright, S.G., Brandon, T.L., 2014. Soil strength and slope stability. John Wiley & Sons.
- Ekström, G., Stark, C.P., 2013. Simple scaling of catastrophic landslide dynamics. *Science*, 339(6126):1416-1419.
- Fan, X.M., Feng, Z.T., Ni, T., Deng, Y., Zhang, J., Dai, L.X., 2025. The friction behavior of rock - ice avalanches in relation to rock - ice segregation: Insights from flume physical experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 130(1):e2024JF007904.
- Feng, Z., Fan, X.M., Ni, T., Deng, Y., Zou, C.B., Zhang, J., Xu, Q., 2023. How ice particles increase mobility of rock - ice avalanches: Insights from chute flows simulation of granular rock - ice mixtures by discrete element method. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(8):e2023JF007115.
- Gao, H.Y., Yin, Y.P., Li, B., Gao, Y., Zhang, T.T., Liu, X.J., Wan, J.W., 2023. Geomorphic evolution of the Sedongpu Basin after catastrophic ice and rock avalanches triggered by the 2017 Ms6.9 Milin earthquake in the Yarlung Zangbo River area, China. *Landslides*, 20(11):2327-2341.
- Gao, Y., Li, B., Gao, H., Gao, S., Wang, M., Liu, X., 2023. Risk assessment of the Sedongpu high-altitude and ultra-long-runout landslide in the lower Yarlung Zangbo River, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(9):360.
- Gao, Y., Li, B., Zhang, H., Wu, W., Li, J., Yin, Y., 2024a. Numerical modeling of mixed two-phase in long runout flow-like landslide using LPF3D. *Landslides*,

21(3):641-660.

- Gao, Y., Yin, Y., Li, B., Zhang, H., Wu, W., Gao, H., 2024b. Multistate transition and coupled solid–liquid modeling of motion process of long-runout landslide. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(7):2694-2714.
- Gao, Y., 2025. LPF3D model to calculate the evolution of the Blatten event[Software]. Available online: <https://www.lpf3d.com/>
- Gruber, S., Haeberli, W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature - related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2).
- Hibert, C., Ekström, G., Stark, C.P., 2014. Dynamics of the Bingham Canyon Mine landslides from seismic signal analysis. *Geophysical Research Letters*, 41:4535-4541.
- Huggel, C., Clague, J.J., Korup, O., 2012. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1):77-91.
- ICCI, 2023. 10% of Swiss glacier ice lost within the past two years. Available online: <https://iccinet.org/10-of-swiss-glacier-ice-lost-within-the-past-two-years/>
- Kääb, A., et al., 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. *Nature Geoscience*, 11(2):114-120.
- Li, Y., Cui, Y.F., Hu, X., Lu, Z., Guo, J., Wang, Y., Wang, H., Wang, S.F., Zhou, X., 2024. Glacier retreat in Eastern Himalaya drives catastrophic glacier hazard chain. *Geophysical Research Letters*, 51(8):e2024GL108202.
- Marcet, M., Cicoira, A., Cusicanqui, D., Bodin, X., Echelard, T., Obregon, R., Schoeneich, P., 2021. Rock glaciers throughout the French Alps accelerated and destabilised since 1990 as air temperatures increased. *Communications Earth & Environment*, 2:81.
- Mergili, M., Jaboyedoff, M., Pullarello, J., Pudasaini, S.P., 2020. Back calculation of the 2017 Piz Cengalo–Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2):505-520.
- Meteoblue Weather Maps, 2021. Available online: https://www.meteoblue.com/en/climate-change/blatten_switzerland_2661478
- Munch, J., Zhuang, Y., Dash, R.K., Bartelt, P., 2024. Dynamic thermomechanical modeling of rock - ice avalanches: Understanding flow transitions, water dynamics, and uncertainties. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 129(10):e2024JF007805.
- Petley, D., 2025a. The 28 May 2025 update on the landslide threatening Blatten in Switzerland. Available online: <https://eos.org/thelandslideblog/blatten-4>
- Petley, D., 2025b. The incipient major rock slope failure at Blatten in Switzerland. Available online: <https://eos.org/thelandslideblog/blatten-1>
- Pflugger, F., Weber, S., Steinhauser, J., Zangerl, C., Fey, C., Fürst, J., Krautblatter, M., 2025. Massive permafrost rock slide under a warming polythermal glacier deciphered through mechanical modeling (Bliggspitze, Austria). *Earth Surface Dynamics*, 13(1):41-70.
- Roe, G.H., Baker, M.B., Herla, F., 2017. Centennial glacier retreat as categorical evidence of regional climate change. *Nature Geoscience*, 10(2):95-99.
- Schneider, D., Huggel, C., Haeberli, W., Kaitna, R., 2011. Unraveling driving factors for large rock–ice avalanche mobility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(14):1948-1966.
- Shugar, D.H., et al., 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373(6552):300-306.
- SwissInfo, 2025. Blatten glacier fractures increase sharply. Available online: <https://www.swissinfo.ch/eng/various/blatten-vs-glacier-fractures-increase-sharply/89418301>
- Yin, Y.P., Xing, A.G., 2012. Aerodynamic modeling of the Yigong gigantic rock slide-debris avalanche, Tibet, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(1):149-160.
- Zhang, T., Yin, Y., Li, B., et al., 2022. Characteristics and dynamic analysis of the October 2018 long-runout disaster chains in the Yarlung Zangbo River downstream, Tibet, China. *Natural Hazards*, 113(3):1563-1582.
- Zhang, Z.Y., Liu, D.R., Fan, G., Li, C.J., Hu, Y.X., Zhou, J.W., 2025. Movement characteristics of rock-ice avalanches: Insights from flume tests. *Cold Regions Science and Technology*, 104538.
- Zhuang, Y., Yin, Y., Xing, A., et al., 2020. Combined numerical investigation of the Yigong rock slide-debris avalanche and subsequent dam-break flood propagation in Tibet, China. *Landslides*, 17:2217-2229.
- Zhuang, Y., Dash, R.K., Bühler, Y., Chen, R., Bartelt, P., 2025. Fluidization and snow cover effects in rock-ice-snow avalanches: Lessons from Piz Cengalo, Fluchthorn, and Piz Scerscen events. *Computers and Geotechnics*, 186:107456.

附中文参考文献

- 高少华, 殷跃平, 李滨, 等, 2024. 雅鲁藏布江大峡谷则隆弄高位冰岩崩灾害链动力学特征. 工程地质学报, 32(3): 996-1009.
- 彭建兵, 张永双, 黄达, 等, 2023. 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. 地球科学, 48(8): 3099-3114.
- 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等, 2019. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江灾害初步研究. 中国地质, 46(02): 219-234.
- 年廷凯, 赵润东, 郑德凤, 等, 2024. 藏东南雅江流域冰-岩崩灾害链研究进展. 水利学报, 55(10): 1146-1162.
- 申艳军, 陈思维, 张蕾, 等, 2022. 冰雪型地质灾害链高位萌生, 动力溃散及物相转化过程剖析. 冰川冻土, 44(2): 643-656.
- 杨情情, 苏志满, 陈锣增, 等, 2015. 冰屑对冰-岩碎屑流运动特性影响作用的初步分析. 工程地质学报, 23(6): 1117-1126.
- 殷跃平, 2000. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究. 水文地质工程地质, (4): 8-11.
- 殷跃平, 李滨, 张田田, 等, 2021. 印度查莫利 “2·7” 冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 1-8.
- 殷跃平, 朱赛楠, 李滨, 等, 2021. 青藏高原高位远程地质灾害, 北京: 科学出版社.
- 殷跃平, 张仕林, 霍子豪, 等, 2025. 瑞士阿尔卑斯桦树 “5·28” 高位远程冰岩崩-碎屑流研究. 中国地质灾害与防治学报, 36(4): 1-14.