引用格式：汤明高，赵欢乐，许强，等，2025. 青藏高原典型冰岩崩灾害机理及地质力学模式[J]. 地质力学学报，31（5）：940−959. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025119

Citation: TANG M G，ZHAO H L，XU Q，et al.，2025. Mechanism and geological mechanics pattern of typical ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：940−959. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025119

青藏高原典型冰岩崩灾害机理及地质力学模式

汤明高[1,2]，赵欢乐[1,2]，许　强[1]，李　广[1,2]，冉　旭[1,2]，喻永恒[1,2]，钟益华[3]，郭道静[1,2]，朱　星[1]

TANG Minggao[1,2]，ZHAO Huanle[1,2]，XU Qiang[1]，LI Guang[1,2]，RAN Xu[1,2]，YU Yongheng[1,2]，ZHONG Yihua[3]，GUO Daojing[1,2]，ZHU Xing[1]

1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室（成都理工大学），四川 成都 610059；
2. 成都理工大学环境与土木工程学院，四川 成都 610059；
3. 四川大学灾害重建与管理学院，四川 成都 610200

1. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*;
2. *College of Environment and Civil Engineering*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *Sichuan*, *China*;
3. *Institute for Disaster Management and Reconstruction*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610200, *Sichuan*, *China*

Mechanism and geological mechanics pattern of typical ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau

Abstract: ［**Objective**］The increasingly frequent ice and rock avalanche hazards on the Tibetan Plateau pose a serious threat to human life and major projects. ［**Methods**］To further reveal the mechanisms of ice and rock avalanches and fill the gap in the classification of geological mechanics patterns,engineering geological and geomechanical methods were applied to derive the following. ［**Results**］The ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau result from slope deformation and failure under special geographical, geological, and climatic conditions. The steep terrain and diverse structure provide the spatial and boundary conditions for the formation of ice and rock avalanches. Earthquakes promote further cracking and fragmentation of the ice and rock masses. Climate warming leads to the infiltration of meltwater along the crevasses and boundaries, which significantly reduces the strength of the sliding surface (band), and can even form a short-term high-pressure water head, triggering the ice and rock avalanches. The "discontinuity" serves as a critical threshold for ice and rock avalanches, primarily manifested through instantaneous or progressive failure in the bonding between instability zones, lateral walls, base beds, and parent glaciers. ［**Conclusion**］Ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau can be categorized into four geological mechanics patterns: the creep-fracture type (subdivided into "loading-induced pressure melting-water-induced creep-fracture" and "weathering-induced water-induced creep-fracture"), the creep-toppling type, the wedge slip type, and the collapse type (subdivided into "cave collapse" and "erosion collapse"). These patterns may coexist, interact, and chain-react within the same glacial basin. ［**Significance**］This study holds both theoretical and practical significance for advancing the scientific understanding of cryospheric hazards and supporting disaster prevention and mitigation efforts on the Tibetan Plateau.

Keywords: Tibetan Plateau; ice and rock avalanche; climate change; earthquake; genetic mechanism; geological mechanics patterns

基金项目：国家自然科学基金项目（42377199，41941019）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42377199 and 41941019).

第一作者：汤明高（1978—），男，博士，教授，研究方向为斜坡变形破坏机理及灾害监测预警防治。Email：tmg@cdut.edu.cn

收稿日期：2025−09−02；**修回日期**：2025−09−13；**录用日期**：2025−10−10；**网络出版日期**：2025−10−15；**责任编辑**：范二平

摘　要：青藏高原日益频发的冰岩崩灾害对人类生命、重大工程等构成严重威胁。为深入揭示冰岩崩成因机理、填补地质力学模式分类空白，采用工程地质和地质力学方法分析得出，青藏高原冰岩崩是特殊地理、地质和气候环境下斜坡变形破坏的产物。高陡地形和多元结构为冰岩崩的形成提供了临空和边界条件；地震促使冰岩体进一步开裂破碎；气候变暖导致冰雪融水沿裂隙与边界渗流，显著降低滑动面（带）强度，甚至形成短时高压水头，进而触发冰岩崩。“解约束”是决定冰岩崩的临界点，主要表现为冰岩失稳区与侧壁、底部基床及母冰川黏结的瞬时或渐进失效。青藏高原冰岩崩分为 4 类：蠕滑−拉裂型（细分为加载压融−水致蠕滑−拉裂、气象生水−水致蠕滑−拉裂）、蠕滑−倾倒型、楔块滑移型和坍塌型（细分为空穴坍塌、侵蚀坍塌）。这些模式在同一冰川流域内可以共同发育、相互耦合、链生成灾。该研究对于科学认识冰冻圈灾害，指导青藏高原防灾减灾具有理论和现实意义。

关键词：青藏高原；冰岩崩；气候变化；地震；成因机理；地质力学模式

中图分类号：P343.6; P694　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)05−0940−20

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025119

0　引 言

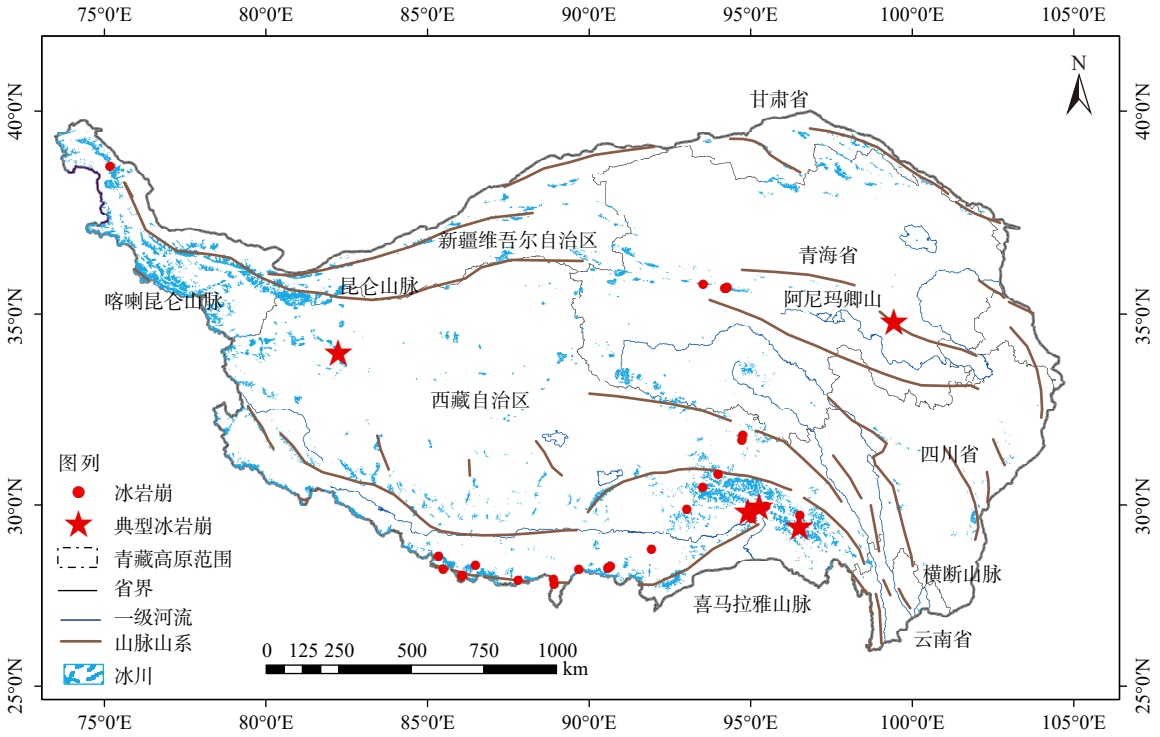
青藏高原及周边的冰川数量约占全球山岳冰川总数的 45.4%，是全球气候变化敏感区。冰岩崩（Ice and rock avalanche）是一类由冰川或冰−岩混合体突发性失稳、滑移甚至产生高速远程碎屑流的地质现象。狭义上，冰岩崩主要指冰崩（Ice/glacier avalanche/collapse），即冰川因内部应力失衡或外部触发因素，发生大规模冰体崩解、滑移并沿坡向下运动的现象（Cuffey and Paterson, 2010）；广义上，其范畴可扩展至“冰−岩（或岩−冰）崩（Ice-rock/Rock-ice avalanche/collapse）”“冰−雪崩（Ice-snow avalanche/collapse）”和“冰川脱离（Glacier detachment）”等术语，同时涵盖“冰川型滑坡（Glacier landslide）”与“富冰滑坡（Ice-rich landslide）”等特殊类型，文中均沿用其广义范畴。冰岩崩是冰冻圈剧烈的破坏形式之一，突发性强、规模大、影响范围广，对下游社区、工程设施及高原生态构成严重威胁。据统计，20 世纪 80 年代开始青藏高原冰岩崩发生频率呈增加趋势，进入 21 世纪后冰岩崩次数高达 20 余次，尤其是近 10 年来冰岩崩灾害事件频发（Tang et al., 2024）。

近几十年来，青藏高原显著升温（年均增幅达 0.032℃/a）与降水模式改变（湿季降水增加）构成的暖湿化趋势，已成为冰岩崩灾害加剧的主控因子（陈虹举等, 2017; Kääb et al., 2018）。降水增加不仅可增大冰川物质荷载与驱动力，渗入的雨水还通过润滑作用进一步降低滑动面的摩擦力（裴丽鑫, 2019）。冰床接触面受热融化形成的薄水膜，通过润滑作用显著降低界面摩擦力（Shorder et al., 2015）。地形坡度与冰床性质直接影响冰川的稳定性，温冰川（活动层厚度大、基底滑动显著）的失稳临界坡度约为 30°，而冷冰川（基底冻结、滑动弱）则需要更高的坡度（约 45°）才会失稳（Röthlisberger, 1977; Faillettaz et al., 2015）。冰床岩性差异亦显著影响滑动速率，硬质冰床底部滑动速率（0.65～0.90 m/d）远高于软质冰床（0.07～0.60 m/d; 王潍诚和王杰, 2022）。地震主震导致冰川体开裂甚至打破平衡，余震反复作用则进一步破坏冰体或岩体结构，降低其强度（胡文涛等, 2018; 杨情情等, 2022）。2001 年昆仑山 M_S 7.9 地震后，可可西里地区短期内连续发生 6 次规模长达 2～3 km 的冰岩崩事件（Van der Woerd et al., 2004; 裴丽鑫, 2019）。冰岩崩的发展本质上是冰川系统内部热量与水分流动耦合演化的结果（Wang et al., 2020）。对于含富水冰层的冰川，当冰床坡度较陡且富水冰层分布广泛时，应变积累至临界值将引发下部冰体的突发断裂与滑脱（王宁练等, 2013）。对于冰−岩混合体，冰缘岩土中间隙冰的融化可引发破碎岩体内热对流与静孔隙水压力上升，降低岩体稳定性（杨情情等, 2022）。温度升高为高位灾害体的水热迁移与软弱面形成提供初始驱动；上覆冰雪压力促使冰−岩混合体转化为塑性体并发生流动，形成塑性流动层；融水持续渗入则导致冰岩体液态水含量增大、内摩擦角与黏聚力降低而失稳（崔鹏等, 2019; 申艳军等, 2022）。气候变化、地震活动与地形地质等多因素协同耦合作用下的冰岩崩形成机理，还有待深入研究探讨（Huggel et al., 2004; 邬光剑等, 2019; Zhang et al., 2023; Jiang et al., 2025）。

相比冰岩崩机理研究而言，地质力学模式及分类研究较为零散，从而制约了对冰岩崩灾害系统规律的认知。Perla(1980)提出块体破坏、冰板破坏、冰−基岩破坏三分法。Alean(1985)提出两分法：类型Ⅰ(源区基岩面大且坡度恒定)进一步分为I_a(冰−岩大面积冻结)与I_b(冰−岩小面积或无冻结)，类型Ⅱ(冰从基岩坡度突变处脱落)。Margreth and Funk(1999)归纳为陡崖−楔块破坏型与斜坡−板状破坏型。Huggel et al.(2004)将Ⅰ型称为“斜坡型(Ramp)”、Ⅱ型称为“陡崖型(Cliff)”。国内Wang et al.(2020)及《冰冻圈灾害学》(温家洪等，2020)也沿用此分类。Pralong(2006)综合地形、物质平衡与破坏模式，提出五类模式(陡崖−物质平衡−板状破坏型、陡崖−物质失衡−板状破坏型、斜坡−物质平衡−板状破坏型、斜坡−物质失衡−板状破坏型、陡崖−物质失衡−楔块破坏型)，实现了分类维度的拓展。然而目前仍存在两大核心问题：①基于现象的分类体系，未充分整合变形破坏力学机理要素，难以全面反映冰岩崩的内在过程；②相较于欧洲阿尔卑斯山区的分类研究，青藏高原特殊环境(高海拔、强冻融、活跃构造)下的冰岩崩地质力学模式分类尚属空白，亟待结合区域特征开展系统研究。

1 研究区背景

青藏高原是全球最年轻的高原，北起昆仑山脉，南抵喜马拉雅山脉，西至帕米尔高原，东达横断山脉，总面积约为250×10^4 km^2(图1)，平均海拔超4000 m，被称作“世界屋脊”“世界第三极”。其独特的高原环境为冰川发育提供了有利的地形和水热条件，是全球中低纬度地区冰川最为发育、分布最密集的地区之一(王宁练等，2019)。随着全球气候变暖，“高原放大效应”使得青藏高原气候持续向暖湿化发展(Xu et al., 2019; You et al., 2021)。冰冻圈环境的变化加剧了青藏高原冰川灾害的孕育与演化，其发生频率和规模都呈上升趋势(Wang et al., 2024)。青藏高原冰川灾害类型包括冰岩崩、冰湖溃决洪水(GLOFs)、冰川泥石流等，涉及冰冻圈、岩石圈、水圈、生物圈等多圈层(邬光剑等，2019)。复杂的地形地貌与地质构造导致青藏高原成为气候变化最敏感、自然灾害活动最剧烈的地区之一(彭建兵等，2023)。



底图据自然资源部网站，审图号：GS(2019)1823号

图1 青藏高原及历史冰岩崩分布

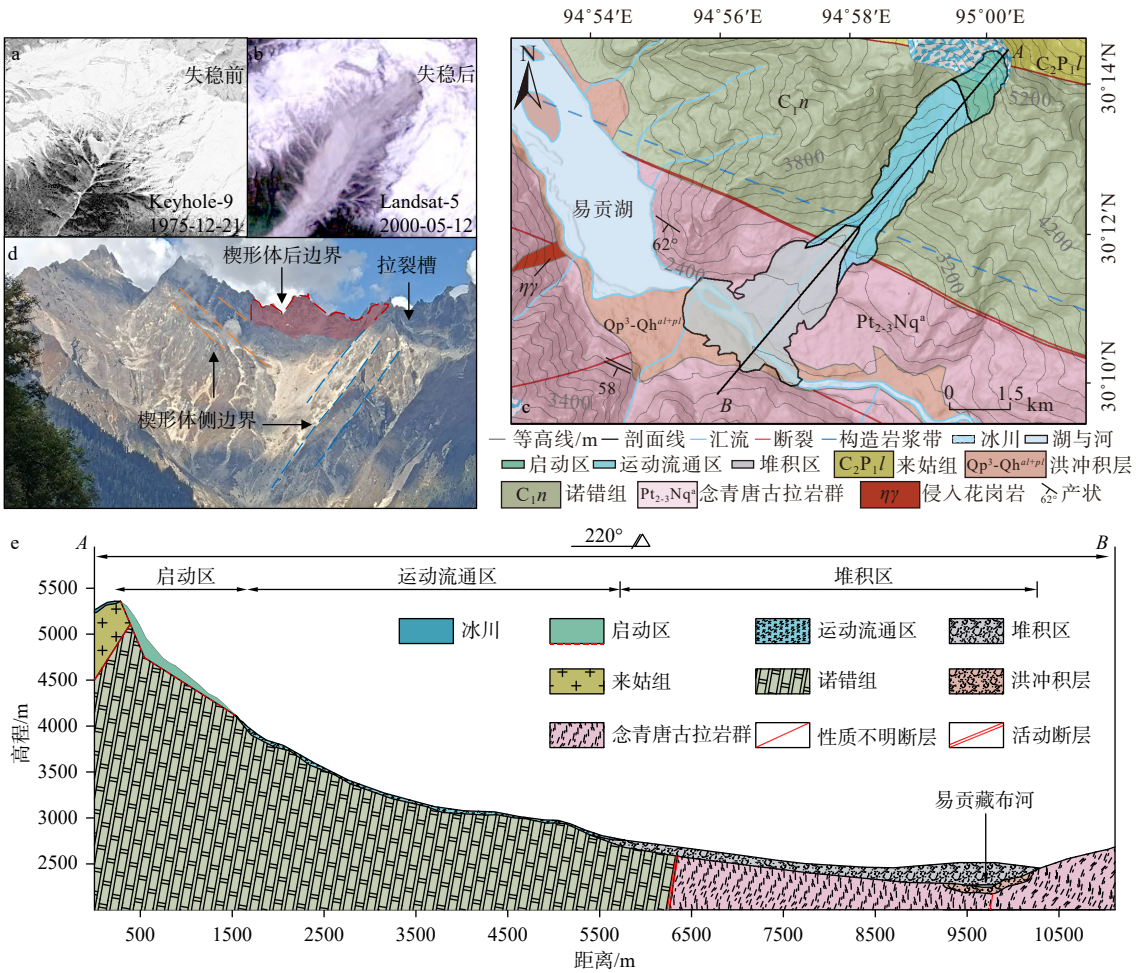
Fig. 1 Distribution of historical ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau (base map from the website of the Ministry of Natural Resources, Approval No: GS(2019)1823)

2　典型冰岩崩工程地质特征及成因机理

2.1　易贡冰岩崩

易贡冰岩崩位于西藏波密县易贡藏布河扎木弄沟(95°0′7.36″E, 30°14′7.50″N)，通称为易贡滑坡。2000 年 4 月 9 日，冰岩崩碎屑堵塞易贡藏布河形成堰塞湖(图 2a)。2020 年 6 月 10 日，堰塞湖溃决，造成灾难。

易贡冰岩崩是在冰雪赋存的地质环境中，由楔形岩体失稳破坏引发的灾害。其地处极高山峡谷，沟谷形态上陡下缓。根据历史影像追溯，滑源区常年被冰雪覆盖(图 2a、2b)。下伏岩性主要为花岗岩，发育 2 组主控结构面：①倾向南东(103°∠21°)的低角度逆冲断裂(属叠瓦式推覆构造)；②倾向南西(243°∠72°)的高角度走滑断裂(嘉黎断裂分支)，其与后缘北东向拉裂槽共同切割形成楔形体(图 2c—2e; 许强等, 2007; 辛鹏等, 2022)。沟谷中下部为大理岩(图 2c、2e)。易贡冰岩崩运动过程可分为 3 段(图 2e)。崩滑启动区(海拔为 4400～5520 m)：楔形岩体(体积为 0.3×10^8～0.4×10^8 m^3)沿前述主控结构面滑脱。运动流通区(海拔为 2900～4400 m, 坡度为 16°～27°)：冰岩崩碎屑在运动中裹挟沟内大量松散堆积物，转化为高速碎屑流。堆积区(海拔为



a—冰雪覆盖下的源区(失稳前影像)；b—失稳后影像；c—易贡冰岩崩工程地质平面图(据 1:20 万地质图修改，https://geocloud.cgs.gov.cn)；d—楔形体源区边界(镜向 NE)；e—易贡冰岩崩工程地质剖面图

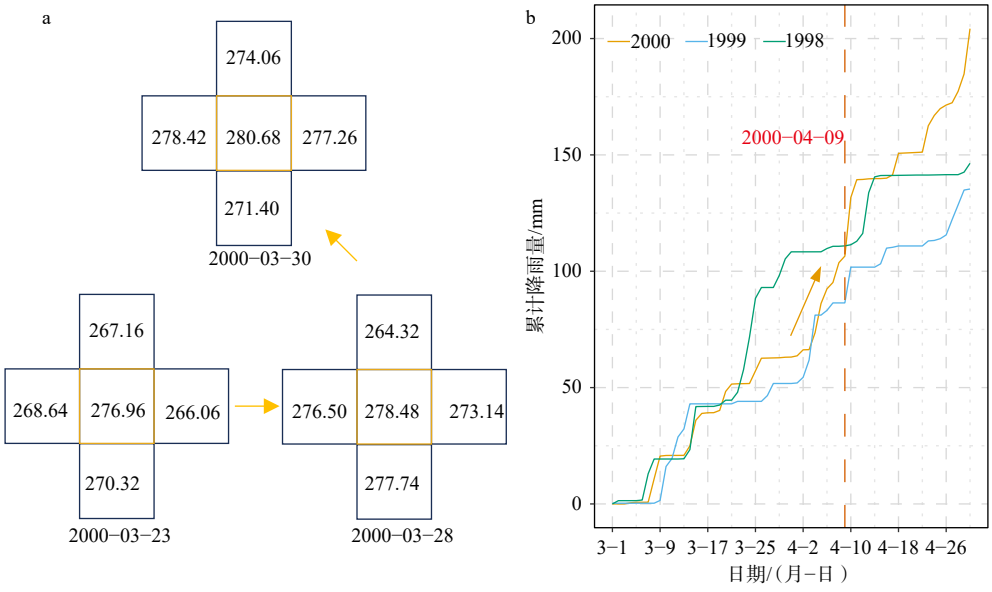
图 2　易贡冰岩崩特征

Fig. 2　Characteristics of the Yigong ice and rock avalanche

(a) Source area under snow and ice cover (pre-failure imagery); (b) Post-failure imagery; (c) Engineering geological plan of the Yigong ice and rock avalanche (modified from the 1: 200,000-scale geological map); (d) Boundary of the wedge-shaped source area (NE facing); (e) Engineering geological profile of the Yigong ice and rock avalanche

2200～2900 m)：碎屑流最终形成“喇叭状”堆积扇(长和宽约为2.5 km，平均厚度为60 m)，总体积约为2.8×10^8～3.0×10^8 m^3，完全堵塞易贡藏布河(殷跃平，2000；袁浩等，2023)。堆积区前部可见“锥状”堆积体(底部直径1～17 m)，结构为块石核心外裹细碎屑层(表部常覆泥膜)；低洼处分布有喷水冒砂坑(直径≤30 cm)，可见孔隙水压力骤升和土体液化现象。高速运动还引发超强气浪，摧毁沟缘树木，呈定向倒伏(许强等，2007)。

易贡冰岩崩是青藏高原东缘构造−地形−气候耦合作用结果。该区域受嘉黎断裂(走滑性质)与易贡−鲁朗断裂(逆冲性质)交汇控制，岩体破碎(图2c—2e)。1900年曾发生类似灾害，存在的多期古崩滑堆积体(体积≥1.6×10^8 m^3)是构造活动和冰川侵蚀共同作用的历史结果(袁浩等，2023)。2000年3—4月发生异常升温(气温较周围高出2～8 K)，导致冰雪加速融化。冰岩崩发生前9天累计降雨量达42.9 mm(图3；郭广猛，2005；Zhou et al., 2016)，水体下渗软化软弱夹层并增大孔隙水压力，显著降低了结构面的抗剪强度(黏聚力c从1.0 MPa骤降至0.1 MPa；胡明鉴等，2009；刘铮等，2020)，进而引发冰岩崩灾害。



a—冰岩崩处与周围像素的地表温度(单位：K；据郭广猛，2005修改)；b—易贡冰岩崩区2000年3月1日—5月4日的累积降雨量与1998年、1999年同时期降雨量对比(据Zhou et al., 2016修改)

图3 易贡冰岩崩与气象的关联

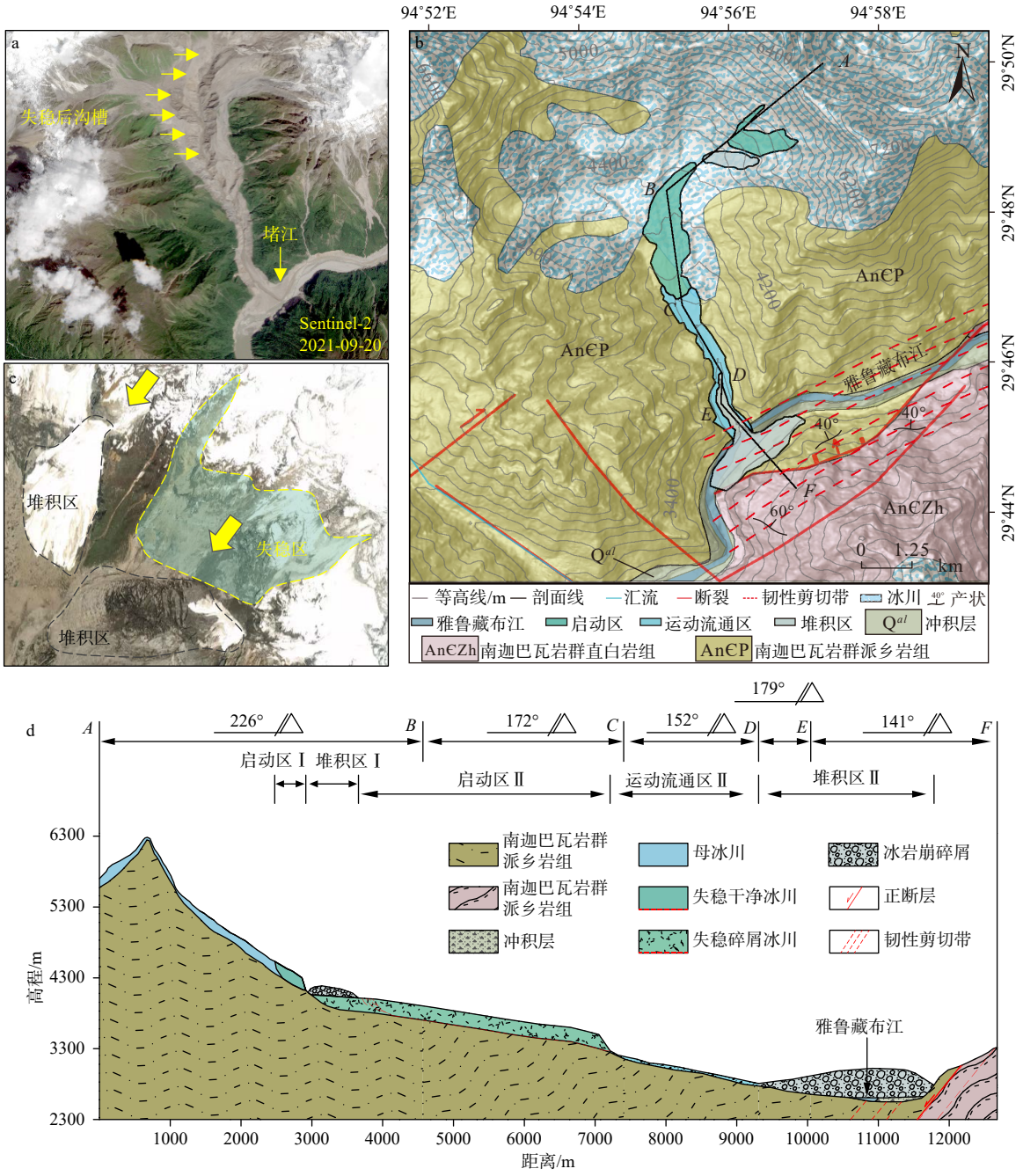
Fig. 3 Correlation between the Yigong ice and rock avalanche and meteorological conditions

(a) Land surface temperature of the ice and rock avalanche area and surrounding pixels (Unit: K; modified from Guo, 2005); (b) Accumulated rainfall in the study area from March 1 to May 4, 2000, in comparison with that from the same period in 1998 and 1999 (modified from Zhou et al., 2016)

2.2 色东普冰岩崩

色东普冰岩崩位于西藏米林县雅鲁藏布江大峡谷下游左岸色东普流域(94°55′37.31″E，29°49′25.28″N)。2014年以来该区域多次发生冰岩崩，冰岩崩碎屑流冲入雅鲁藏布江并堵塞河道，形成堰塞湖(图4a)。

色东普冰岩崩是在冰川与冰碛共同赋存的地质环境中、高位冰岩崩及其碎屑加载导致沟槽低角度冰川滑动破坏引发的链生灾害。该区地形呈现陡→缓的阶梯状形态，沟谷三面环山，形似漏斗。峰顶发育海洋型冰川，延伸至沟谷，被高位冰岩崩碎屑物堆积污化，表现为表碛覆盖型冰川(图4b、4c)。区内受东喜马拉雅构造结影响，发育墨脱断裂、米林断裂等活动断裂。基岩以南迦巴瓦群片岩、片麻岩等变质岩为主，岩体长期受到挤压,较破碎，易风化(图4b、4d)。色东普冰岩崩运动过程可分为多段(图4b、4d)。启动区Ⅰ(海拔为4300～6300 m)：受气象和地形影响，发育高位悬冰川冰岩崩。堆积



a—整条低角度碎屑覆盖冰川滑动破坏；b—色东普冰岩崩工程地质平面图（据 1∶20 万地质图修改，https://geocloud.cgs.gov.cn）；c—冰岩崩碎屑物加载；d—色东普冰岩崩工程地质剖面图

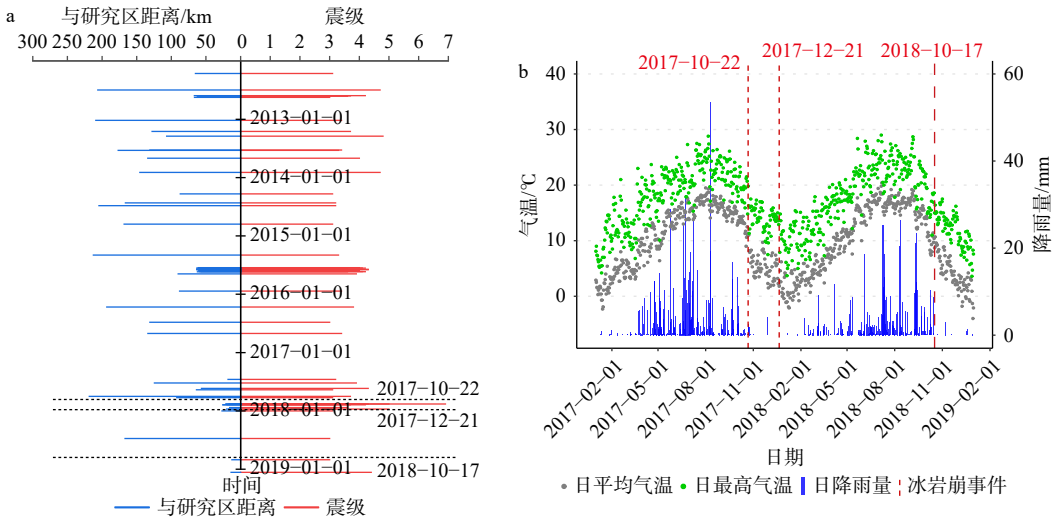
图 4　色东普冰岩崩特征

Fig. 4　Characteristics of the Sedongpu ice and rock avalanche

(a) Sliding failure of the entire low-angle debris-covered glacier; (b) Engineering geological plan of the Sedongpu ice and rock avalanche (modified from the 1:200,000-scale geological map, https://geocloud.cgs.gov.cn); (c) Debris loading of the ice and rock avalanche; (d) Engineering geological profile of the Sedongpu ice and rock avalanche

区Ⅰ（海拔为 4000～4300 m、坡度<15°）：冰岩崩碎屑堆积于沟谷冰川之上，形成附加荷载。启动区Ⅱ（海拔为 3500～4000 m）：表碛覆盖型冰川在水力（压融、沟谷内降水和冰雪融水汇集）作用下失稳，从陡坎处滑出。运动流通区Ⅱ（海拔为 2800～3500 m）：破碎冰岩块夹带沟谷沉积物形成碎屑流。堆积区Ⅱ（海拔为 2500～2800 m）：大量碎屑冲入河道，堵塞雅鲁藏布江。

色东普冰岩崩是气候变暖、地震扰动、高陡地形、岩体破碎等多因素耦合作用的结果。气候变暖的长期作用与冰川消融是冰岩崩活跃的核心诱因。1977—2018年，该区域冰川面积减少了约23.6%，冰裂隙广泛发育利于冰川融水入渗（张龙宇等，2024；Yang et al., 2023）。地震扰动显著加剧了岩体破碎程度。2017年11月18日发生的M_W 6.4林芝地震（震源深度为8 km、震中距色东普沟2.7 km）破坏了冰川及堆积物的完整性，加剧了冰岩体的破碎。震后冰岩崩频率显著增加（如2018年10月发生的连续2次堵江事件），体现出地震的滞后效应（图5a；童立强等，2018）。降水与劣化作用为冰岩崩提供了触发条件。色东普流域夏季、秋季降水量占全年降水量的80%以上，2018年10月冰岩崩事件前2—4日降雨量骤增，增加了松散堆积物容重并降低其抗剪强度（图5b）。冰岩崩的形成过程可概括为：气候变暖→地震冰岩裂隙扩展→融水下渗→孔隙水压升高→底部摩擦系数降低→失稳滑动（Li et al., 2024; Jiang et al., 2025）。



a—冰岩崩事件与历史地震关系；b—冰岩崩事件与气象关系

图5 色东普冰岩崩与地震、气象的关联（据刘昕昕，2021修改）

Fig. 5 Correlation between the Sedongpu ice and rock avalanche and seismic activity and meteorological conditions (modified from Liu, 2021)

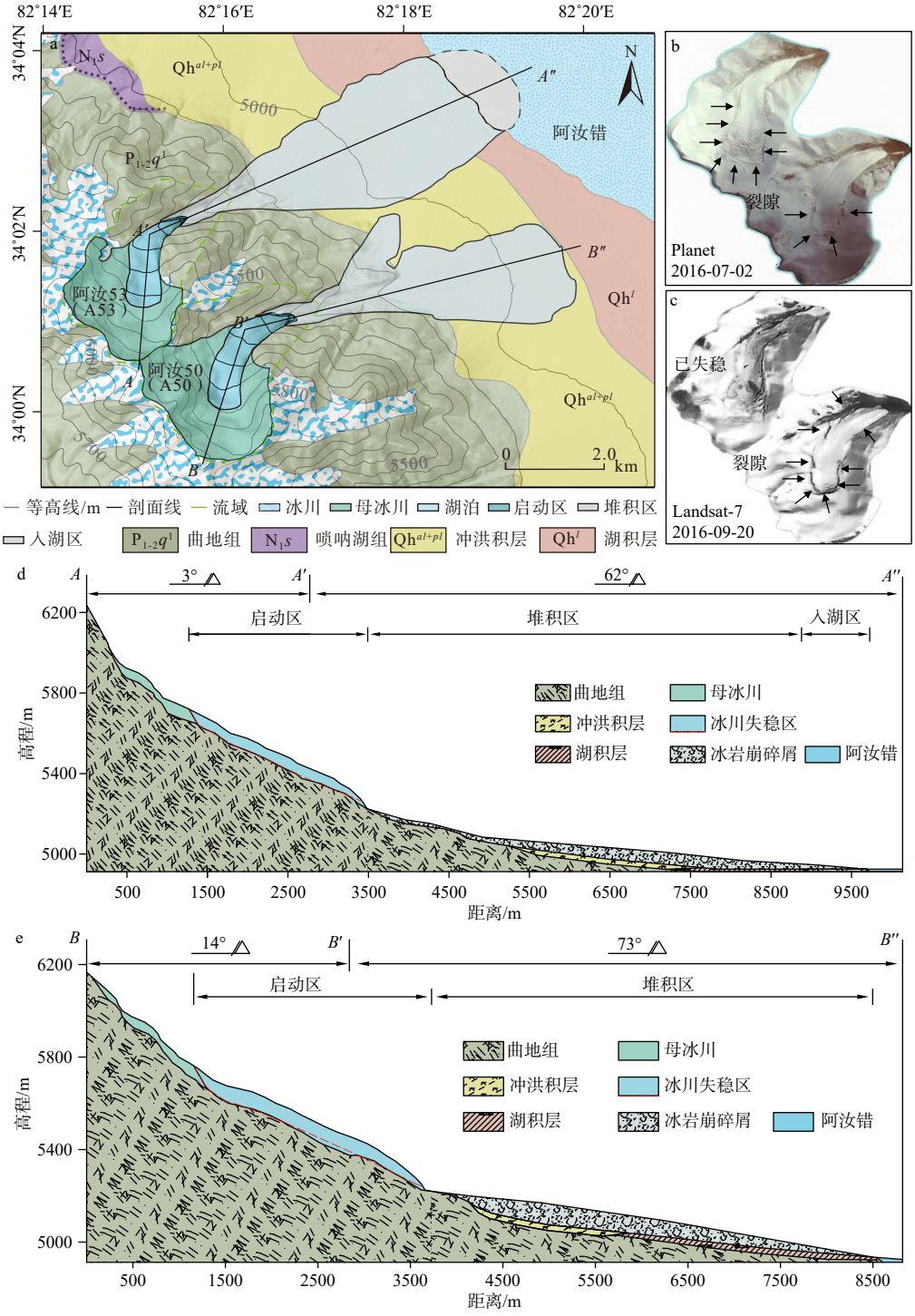
(a) Correlation between ice and rock avalanches and historical earthquakes; (b) Correlation between ice and rock avalanches and meteorological conditions

2.3 阿汝冰岩崩

阿汝冰岩崩位于西藏日土县东汝乡阿汝错冰川群（82°15′11.28″E, 34°0′54.24″N），涉及2条冰川（53号冰川与50号冰川，其以一道刃脊相隔；图6a）。2次冰岩崩分别发生于2016年7月17日与9月21日：第1次为53号冰川冰岩崩，造成9名群众遇难、数百头牲畜被埋及大面积草场破坏；第2次为50号冰川冰岩崩，未造成人员伤亡。

阿汝冰岩崩是在冰川与冰碛共同赋存的地质环境中、因低角度冰川滑动失稳引发的灾害。冰川呈多温结构，裂隙发育（图6b、6c），底部为0℃温性冰，上层为<−1 ℃的冷性冰，热力状态不稳定（Gilbert et al., 2018; Kääb et al., 2018）。基岩以软弱细粒沉积岩（砂岩、粉砂岩）为主；冰碛物富含黏土/粉砂（黏土占比14%、粉粒占比68%、碎石占比18%），内摩擦角低（<20°），含冰率均超过40%（Kääb et al., 2018; Lei et al., 2021; 孟秋杰等，2024）。阿汝冰岩崩运动过程可分为3段（图6d、6e; Kääb et al., 2018, 2021）。启动区（海拔为5300～5800 m）：坡度为12.3°～13°（远低于传统冰岩崩临界坡度30°），冰川体积分别为68×10^6 m³（53号）与83×10^6 m³（50号），干净冰川自背隙处分离，受出山口侧壁阻挡转向滑出；堆积区（海拔为5000～5300 m）：远程运动堆积于开阔草场，冰川体积分别约为72×10^6 m³（53号）与102×10^6 m³（50号）。入湖区（海拔为5000 m）：部分碎屑冲入阿汝错，引发湖啸。

阿汝冰岩崩是气候变暖背景下冰川结构转型、液态水超量输入、基岩与冰碛特性共同作用的结



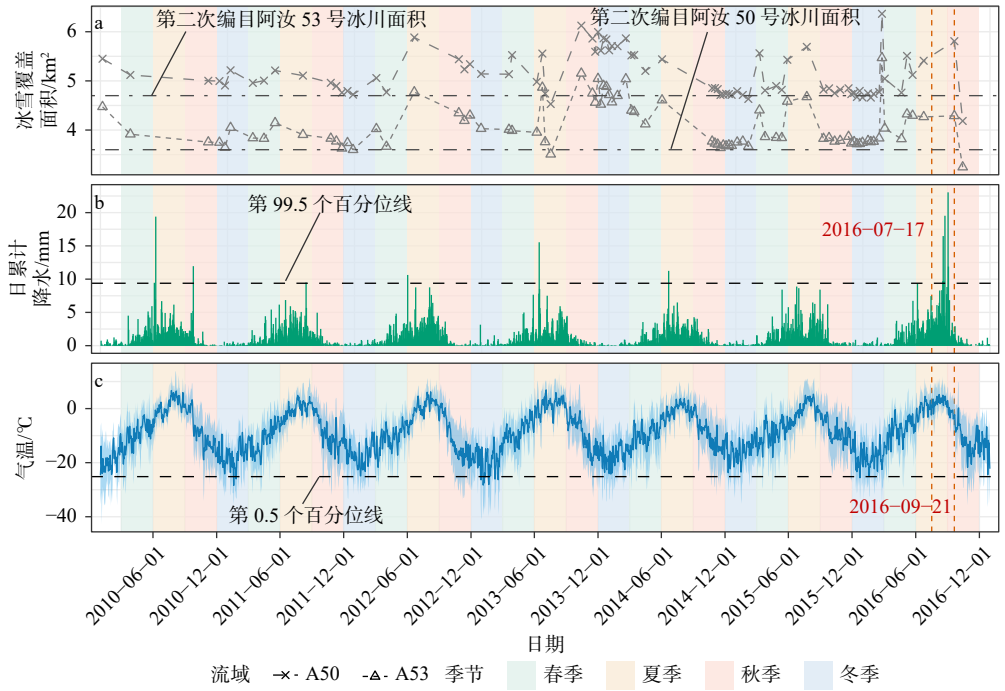
a—阿汝冰岩崩工程地质平面图（据 1:20 万地质图修改，https://geocloud.cgs.gov.cn）；b—冰川后缘出现密集背隙和侧缘出现羽状裂隙；c—阿汝 53 号冰川冰岩崩与 50 号冰川失稳区裂隙圈闭；d—阿汝 53 号冰川冰岩崩工程地质剖面图；e—阿汝 50 号冰川冰岩崩工程地质剖面图

图 6　阿汝冰岩崩特征

Fig. 6　Characteristics of the Aru ice and rock avalanche

(a) Engineering geological plan of the Aru ice and rock avalanche (modified from the 1:200,000-scale geological map, https://geocloud.cgs.gov.cn); (b) Development of dense bergschrunds at the trailing edge of the glacier and "feather-shaped" crevasses along the glacier margins; (c) Ice and rock avalanche of Aru Glacier No. 53; crevasses encircled the failure zone of Aru Glacier No. 50; (d) Engineering geological profile of Aru Glacier No. 53 ice and rock avalanche; (e) Engineering geological profile of Aru Glacier No. 50 ice and rock avalanche

果。其形成机制可归纳为以下关键环节：①气候变暖触发冰川结构转型。1970—2016年，阿汝地区年均气温上升1.7±0.5℃，导致冰川由冷性向多温/温性结构转化（邬光剑等，2019）。②液态水输入加剧力学失衡。2016年春季（2—4月）异常降雪与夏季强降雨使液态水输入量达近5年峰值（图7）。融水与降水通过冰裂隙下渗至基底，形成高压孔隙水，降低有效正应力；同时，细粒冰碛物低渗透性导致冰下排水系统受阻，水压持续累积，基底摩擦系数降至0.05～0.10（Wei et al., 2024; Jiang et al., 2025）。③冰川失稳的渐进过程。底部温性冰区因融水润滑发生加速滑动（滑动速度>20 cm/d），上部冷性冰区形成拉张裂缝并逐渐贯穿至基底（图6b—6c; Kääb et al., 2018; Wang et al., 2021）。基底阻力向侧向剪切力转移，导致冰川边缘裂隙扩展（图6c）；其中，53号冰川末端因冰川底部与基床冻结粘连，形成“黏着点（Sticking spots）”，出现应力集中，引发渐进式破坏；50号冰川则因侧向剪切力突增发生脆性崩塌。当基底摩擦系数降至0.1以下且驱动应力超过冰体抗剪强度时，冰川整体失稳（Gilbert et al., 2018）。尽管历史地震非主因，但其可能加剧裂隙发育，为融水下渗提供通道（张议芳等，2023）。



第99.5个百分位线是一个数值，表示在所有数据中（2010—2016年），有99.5%的数据都小于或等于这个值，只有0.5%的数据大于这个值；第0.5个百分位线同理

a—遥感解译的流域内冰雪覆盖面积；b—冰岩崩事件与CMFD2.0（中国区域地面气象要素驱动数据集v2.0）（1951—2024）降水的关系；c—冰岩崩事件与CMFD2.0气温的关系

图7 阿汝冰岩崩与气象的关联

Fig. 7 Correlation between the Aru ice and rock avalanche and meteorological conditions (note: 99.5% of the data points (2010–2016) fall at or below the 99.5th percentile line, while only 0.5% exceed it. The 0.5th percentile line is analogous)

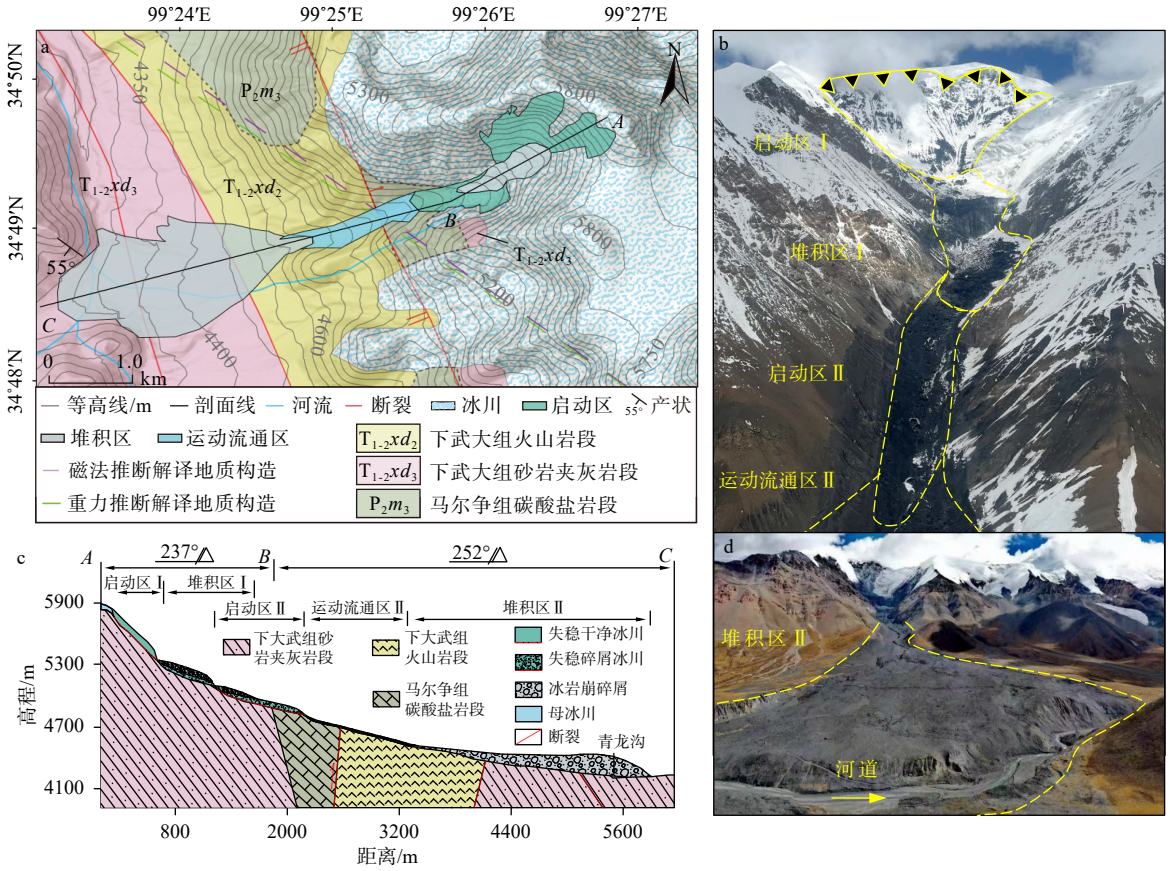
(a) Remote-sensing-derived snow and ice cover area within the watershed; (b) Relationship between ice and rock avalanches and CMFD2.0 (China Meteorological Forcing Dataset v2.0 (1951–2024)) precipitation; (c) Relationship between ice and rock avalanches and CMFD2.0 air temperature

2.4 阿尼玛卿山冰岩崩

阿尼玛卿山南坡晓玛沟流域（99°26′34.69″E, 34°49′31.75″N）2004年以来至少发生了4次较大规模的冰岩崩（时间分别为2004年2月、2007年10月8日、2016年10月6日以及2019年7月9日）。这些冰岩崩事件摧毁了牧民草场，堵塞青龙沟主河道形成堰塞湖，溃决后破坏公路，影响下游群众达732人。

阿尼玛卿山冰岩崩是在冰川与冰碛共同赋存的地质环境中、高位冰岩崩及其碎屑加载导致沟槽

低角度污化冰川滑动破坏引发的灾害。沟脑被悬冰川覆盖，沟谷污化冰川呈黑色（图 8a、8b），下伏岩层为千枚状板岩夹砂岩。阿尼玛卿山冰岩崩运动过程可分为多段（图 8；张俊才等，2019）。启动区Ⅰ（海拔为 5300～5900 m）：受地形影响，沟脑陡坡（坡度>30°）悬冰川冰岩崩。堆积区Ⅰ（海拔为 5000～5300 m）：冰岩崩碎屑超载堆积于粒雪盆和沟谷冰川之上。启动区Ⅱ（海拔为 4800～5000 m）：在压融、降水和冰雪融水汇集作用下低角度污化冰川失稳；运动流通区Ⅱ（海拔为 4500～4800 m）：破碎冰岩块运动夹带富冰冻土块和黑色千枚状板岩碎屑组成碎屑流沿 U 型谷流通；峰值流速为 103 m/s，流量峰值在运动后 40 s 时达到 0.25×10^6 m^3/s，整个运动过程约 140 s（Zhang et al., 2023），堆积区Ⅱ（海拔 4300～4800）：碎屑物堆积于青龙沟上，堵塞河道形成堰塞湖。2004 年冰岩崩碎屑堆积范围约为 2.26 ± 0.11 km^2，青龙沟堰塞湖容积达 538×10^4 m^3（郭万钦等，2023）。



a—阿尼玛卿山冰岩崩工程地质平面图（据 1∶20 万地质图修改，https://geocloud.cgs.gov.cn）；b—阿尼玛卿山冰岩崩源区（镜向 NE）；c—阿尼玛卿山冰岩崩工程地质剖面图；d—阿尼玛卿山冰岩崩全景图（镜向 NE）

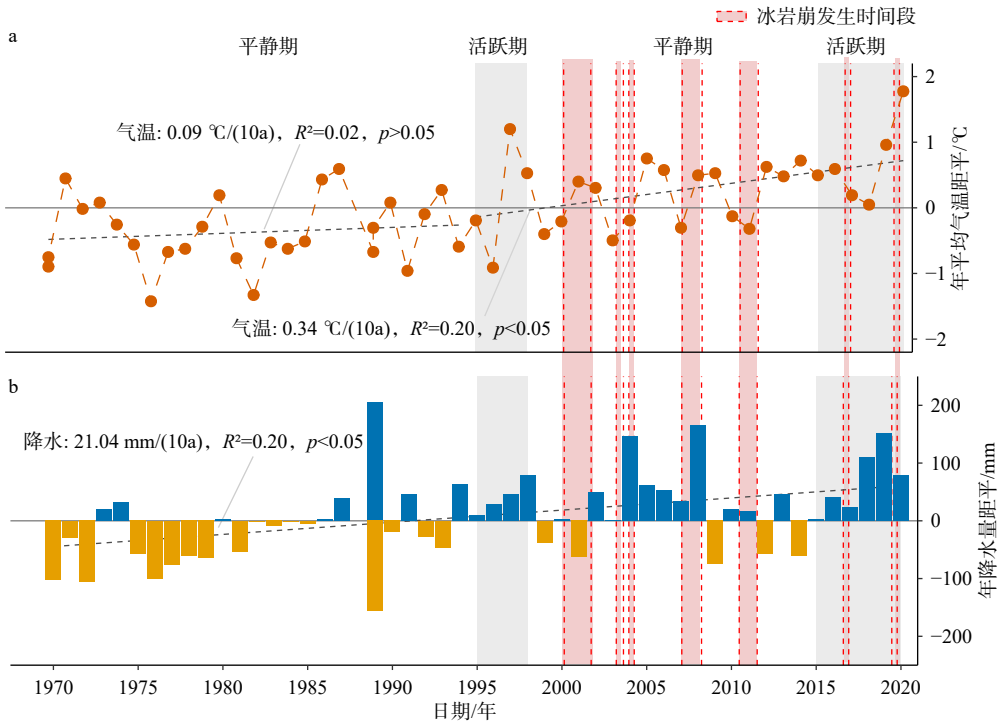
图 8　阿尼玛卿山冰岩崩特征

Fig. 8　Characteristics of the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche

(a) Engineering geological plan of the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche (modified from the 1:200,000-scale geological map, https://geocloud.cgs.gov.cn); (b) Source area of the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche (NE facing); (c) Engineering geological profile of the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche; (d) Panoramic view of the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche (NE facing)

阿尼玛卿山冰岩崩由碎屑加载、异常冰下水文、气候变暖多种因素共同驱动形成。①冰岩碎屑加载效应。冰川后缘陡坡（坡度>30°）的冰岩崩（如 2000—2011 年间发生的 4 次大规模冰岩崩），向低角度的冰舌区输送大量碎屑物质，加载压融导致剪切应力超过基床摩擦强度，引发滑塌（Paul, 2019；王忠彦等，2022；Zou et al., 2023；Wang et al., 2025）。②软弱基底与冰下水文异常。千枚状板岩夹砂岩抗剪

强度低，易被冰川刨蚀形成富冰碎屑（含冰量>60%），从而降低了基床的有效摩擦系数（张俊才等，2019）。暖季融水渗入基岩裂隙，起到润滑冰床和软化冰碛物的作用，加剧了冰川滑动（吴俊辉等，2025）。③气候变暖的长期影响。1990—2021年间区域气温上升了0.81 ℃（升温速率为0.034 ℃/a），导致冰川退缩、雪线上升，后缘陡坡冰裂隙发育更为显著（图9; Pan et al., 2022; 王忠彦等，2022; 郭万钦等，2023）。④短期天气异常的触发作用。如2007年冰岩崩前1个月气温异常偏高2.23 ℃，2016年夏季整体气温达历史最高，异常高温显著加速了冰川表面融化和冰岩崩解（王忠彦等，2022）。此外，冰川跃动（如维格勒当雄冰川2017—2021年的热控型跃动事件）导致后缘冰体失稳崩塌，所产生的碎屑又加载到下游低角度冰舌上，形成跃动→碎屑加载→滑塌的恶性循环（图8，图9; 吴俊辉等，2025）。



a—阿尼玛卿山冰岩崩与气温的关系（R^2—决定系数，衡量回归模型拟合优度的指标；p—p值，判定假设检验结果的一个参数）；b—阿尼玛卿山冰岩崩与降水的关系

图9 阿尼玛卿山冰岩崩与气象的关联（据Pan et al.，2022；王忠彦等，2022修改）

Fig. 9 Correlation between the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche and meteorological conditions (modified from Pan et al., 2022; Wang et al., 2022)

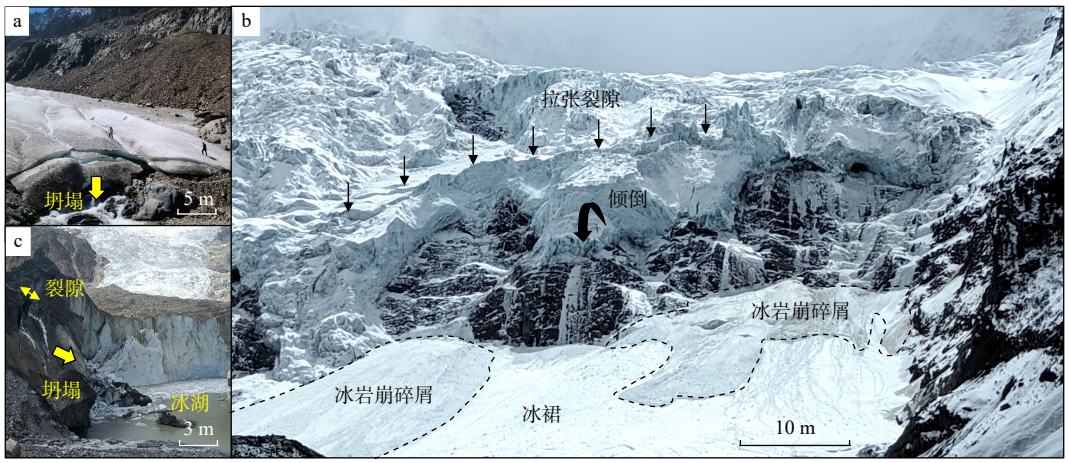
(a) Correlation between the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche and air temperature (R^2 (R-squared): coefficient of determination, a metric that quantifies the goodness-of-fit of a regression model; p (p-value): statistical measure used to determine the significance of the results in a hypothesis test); (b) Correlation between the Amney Machen Mountains ice and rock avalanche and precipitation

2.5 东嘎冰岩崩和米堆冰岩崩

在青藏高原冰川之乡波密县和八宿县调查发现，还存在如下典型小规模冰岩崩。

东嘎冰川冰岩崩（96°53′43.00″E，29°12′12.00″N）位于八宿县然乌镇，在冰川末端发育一冰洞，坐落在底碛上，以砾石、砂砾为主，粒径一般介于2～10 cm，呈次棱角—亚圆状，泥质胶结；冰川正下方有一条宽约8 m的河道。冰洞顶部在重力作用下坍塌，表现为冰体出现多条拉张裂隙，最长约28 m、宽约40 cm，深约60 cm；冰舌沿裂缝出现断裂而产生冰崩（图10a）。

米堆冰川冰岩崩（96°30′56.51″E，29°24′49.45″N）位于西藏波密县，冰川粒雪盆处的悬冰川时常发生倾倒破坏（图10b）。由于粒雪盆长年累月汇集冰雪物质，促进冰川蠕滑，当冰川运动至粒雪盆边缘形成冰瀑布，较陡的地形坡度、缓慢的冰川基底滑动以及较快的冰川蠕动使得表面的速度大于基底速度，裂隙从表面向基底发展，形成上宽下窄的裂隙，



a—东嘎冰川冰岩崩；b—米堆冰川冰岩崩；c—米堆冰川高位冰岩崩

图 10　东嘎冰岩崩与米堆冰岩崩

Fig. 10　Dongga and Midui ice and rock avalanches

(a) Ice and rock avalanche of the Dongga Glacier; (b) Ice and rock avalanche of the Midui Glacier; (c) High-elevation ice and rock avalanches at Midui Glacier

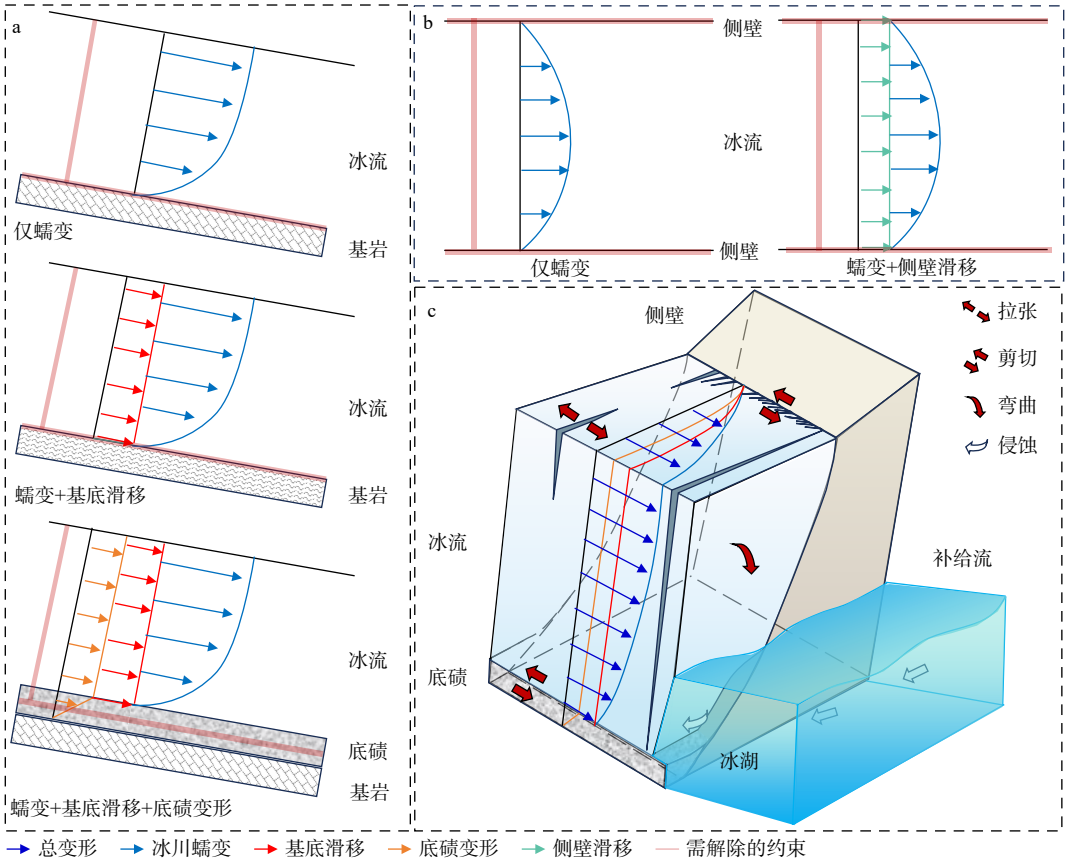
在重力作用下发生倾倒，碎冰体堆积在坡底形成冰裙，对下游冰川进行物质补给，同时也形成下游冰川附加荷载。这种冰岩崩形式强烈依赖冰下地形，通常发育在悬冰川上（Kaushik, 2023）。此外，米堆冰川浮冰舌边缘也呈现出大面积破坏，浮冰舌舷高约 10 m，临空向发育长约 20 m、宽约 1 m 的冰裂隙，由于其他流域冰川融水汇流成河从侧向流入该流域，侵蚀浮冰舌下方，在蠕变和重力作用下冰川坍塌（图 10c）。

3　青藏高原冰岩崩地质力学模式

基于现场调查和典型冰岩崩案例分析，结合工程地质和地质力学对青藏高原冰岩崩的发生机理进一步研究。冰岩崩的物质组成包括冰川冰和冰岩混合体，具有冰岩二元结构。力学机理方面，冰体具有与岩体类似的变形破裂单元，在内外力作用下可发生蠕变、滑移、拉裂、弯曲（轻微）、侵蚀等，而蠕变是冰川在重力作用下最基本的变形特征，称为冰川流动（图 11），属于冰川运动的重要组成部分。冰川运动受其热力学状态与地质条件共同控制：冷冰川通常冻结于基岩之上，其运动以冰川蠕变为主（图 11a、11b）；而温冰川底部常覆盖大量冰碛物，因此冰川运动由蠕变、基底滑移和底碛变形共同作用（图 11a、11b）。冰川的变形破坏与其运动不稳定性密切相关（Cuffey and Paterson, 2010）。这种不稳定性多源于冰下水压升高——由排水不畅或无法排水所致，也可来自冰−基黏结的渐进失效和冰−基摩擦减弱。当冰川不稳定区与母冰川、侧壁和基床边界约束通过拉张和剪切作用显著减弱甚至完全解除时，即为解约束（图 11c），在边界处表现为拉张裂隙和羽状剪切裂隙（图 11c），此后冰川将进入剧烈的不稳定状态，最终触发冰岩崩。而这些约束强弱由边界处组成物质的抗拉强度与抗剪强度决定。综合考虑物质组成、变形破坏力学机理及组合特征、地形地质条件，将冰岩崩地质力学模式归纳为 4 类：蠕滑−拉裂型、蠕滑−倾倒型、楔块滑移型和坍塌型（表 1）。

3.1　蠕滑−拉裂型

此类模式常形成于山地槽谷冰川。黏附于基岩的冰川沿着内部软弱界面（带）或冰−岩界面剪切蠕滑、后缘拉裂，直至突破界面（带）抗剪强度而发生破坏（汤明高等, 2023; 孟秋杰等, 2024; Chang and Xing, 2025）。通常坡度需超过 25°（Alean, 1985）、甚至需要大于 45°（冷性冰川、自身强度较高），且可能释放出特别大的冰量，体积最大可超过 1.0×10^6 m^3（Salzmann et al., 2004）。近年来低角度冰岩崩打破了这种坡度和规模的传统认知（Kääb et al., 2021），一般山地冰川的 U 形谷段，冰体的下滑力通常小于滑动面（带）的抗滑力，但在液态水异常输入的情况下，这类低角度冰川也能发生冰岩崩。其原因是液态水使冰川基底解冻，冰下水扩容，水压（或底碛孔隙水压）增加，进而导致冰下抗剪强度（黏结力与摩擦力）降低，底部、侧部边界以及与母冰川的黏结约



a—边界约束下的冰川蠕滑剖面图；b—边界约束下的冰川蠕滑平面图；c—边界约束下的冰川变形破坏示意图

图 11 冰川变形破坏示意图

Fig. 11 Schematic diagram of glacier deformation and failure

(a) Profile view of boundary-constrained glacier creep and sliding; (b) Plan view of boundary-constrained glacier creep and sliding; (c) Schematic sketch of boundary-constrained glacier deformation and failure

束被解除，发生剪切和拉裂破坏。驱动低角度冰岩崩发生的关键在于液态水输送，而冰雪融水和降雨是主要来源。阿尼玛卿山冰岩崩、色东普冰岩崩低角度启动区，由于曾经被后缘高位冰岩崩的碎屑加载，导致槽谷里低角度冰川底部产生压融作用，生成压融液态水，弱化冰川边界约束，突破冰川基底物质强度阈值，使冰川滑动破坏，此类冰岩崩可归纳为加载压融−水致蠕滑−拉裂型（图 12），类似案例还有瓦莱州冰岩崩（殷跃平等，2025）。此外在气候变暖的长期影响下，冰川融水与短期极端降水叠加，液态水从冰裂隙（尤其是背隙）和冰川边界输入，造成冰川底碛或冰岩界面抗剪强度降低，以及水压驱动下冰川失稳，此类冰岩崩可归纳为气象生水−水致滑移型（图 13），典型案例为阿汝冰岩崩、阿尔卑斯山马尔莫拉达冰岩崩（Bondesan and Francese, 2023; Francese et al., 2025）以及 Ghiacciaio Superiore di Coolidge 冰岩崩（Pralong, 2006）。

3.2 蠕滑−倾倒型

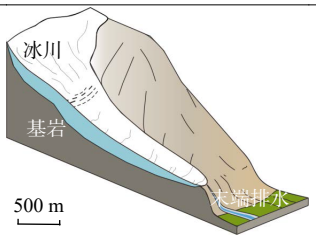
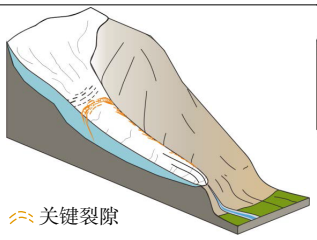
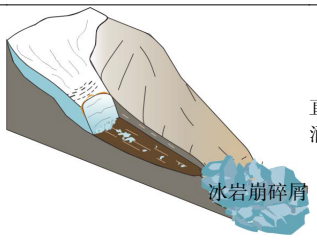
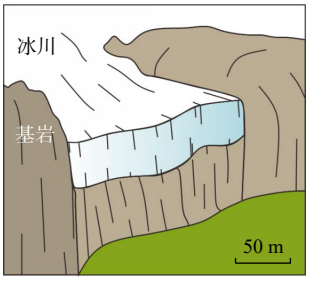
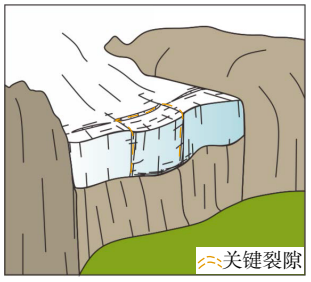
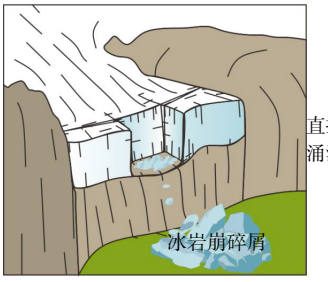
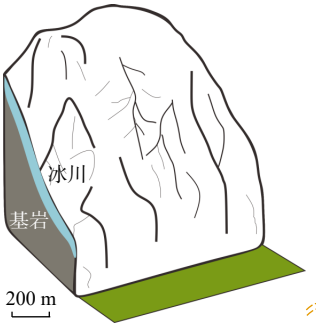
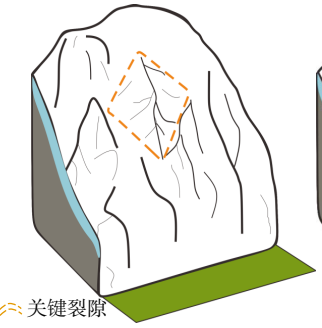
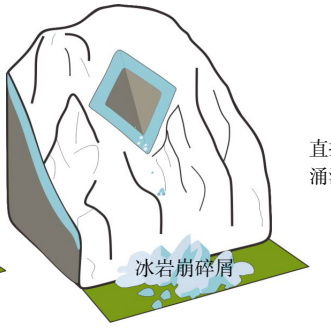
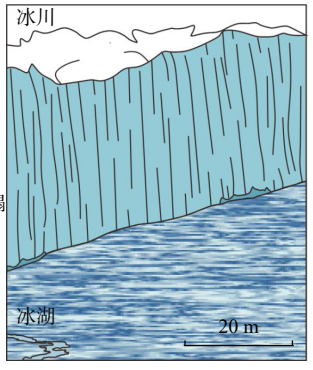
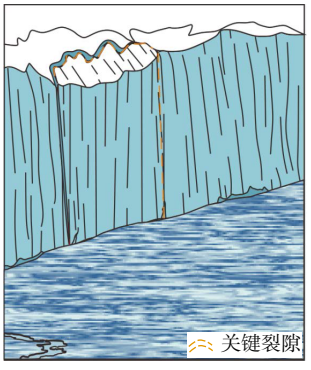
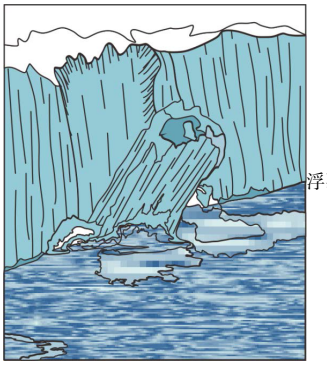
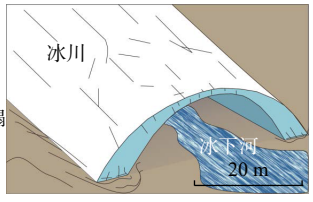
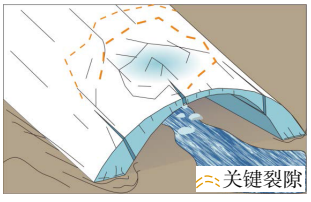
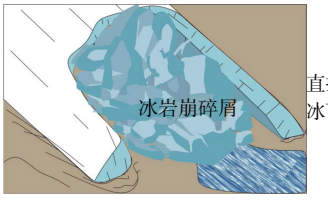
该模式多见于山地冰川悬谷、粒雪盆出口、角峰刃脊坡面以及平顶冰川陡坎（崖）处。这些区域冰川较厚，底部地形平缓，下伏基岩多为硬质岩。冰川表面发育裂隙，在重力或渗浸融化作用下，裂隙呈上宽下窄状扩展。同时，冰川分裂块体在自重作用下产生垂直于裂隙走向、指向临空侧的力矩。当抗滑力矩小于下滑力矩时（类似挡土墙倾倒失稳），冰体发生旋转倾倒破坏，坠落滚动堆积于坡脚形成冰裙。因冰川厚度大于冰川流线向分裂块体分离厚度，这类冰岩崩规模通常较小。典型案例如上述米堆冰川粒雪盆冰岩崩以及阿尔卑斯山的 Gutzgletscher 冰岩崩和 Mönchgletscher 冰岩崩（Pralong, 2006）等。

3.3 楔块滑移型

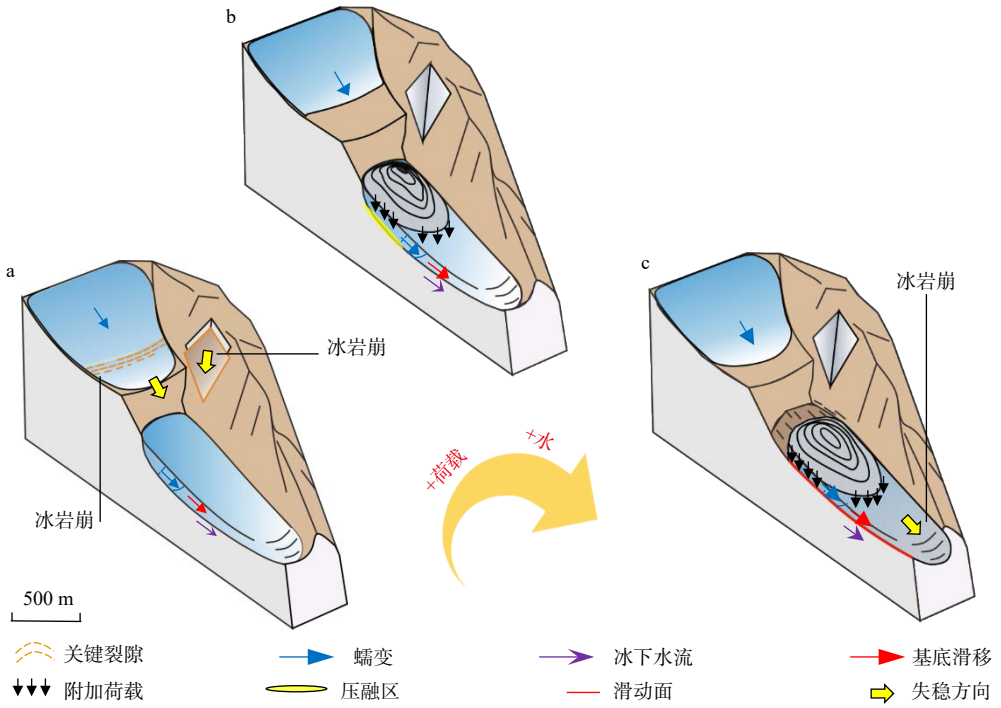
该模式由 2～3 组结构面（可含卸荷面）交切成楔形体，滑动面与切割面均为软弱结构面，整体通

表 1　青藏高原冰岩崩地质力学模式

Table 1　Geological mechanics patterns of ice and rock avalanches on the Tibetan Plateau

类型	亚型	发育	变形破坏	运动堆积/浸没/漂浮	成灾
蠕滑–拉裂型*		 槽谷冰川，具有临空面	 蠕滑–背隙拉张、侧缘羽状剪切裂隙–失稳	 高速远程碎屑流–堆积	直接灾害、堵溃灾害、涌浪、冰湖溃决灾害
蠕滑–倾倒型		 悬冰川，具有临空面	 蠕滑–上宽下窄型拉张裂隙–倾倒	 坠落–滚动–堆积	直接灾害、堵溃灾害、涌浪、冰湖溃决灾害
楔块滑移型		 角峰、刃脊坡面，岩体结构面发育，具有临空面	 蠕滑–卸荷、背隙拉张裂隙和冰面剪切裂隙–失稳	 高速远程碎屑流–堆积	直接灾害、堵溃灾害、涌浪、冰湖溃决灾害
坍塌型	侵蚀坍塌	 浮冰舌，具有临空面	 侵蚀–上宽下窄型拉张裂隙–坍塌	 坠落–浸没/漂浮	浮冰灾害、涌浪
	空穴坍塌	 冰洞顶部，冰下河、湖顶部	 融化空穴–环状裂隙–坍塌	 坠落–堆积	直接灾害、堵溃(堵塞冰下河道)灾害

注：*蠕滑–拉裂型可分为2个亚类，加载压融–水致蠕滑–拉裂型和气象生水–水致蠕滑–拉裂型；图中尺寸为示意性标注(据案例数据)，旨在说明各种模式冰岩崩规模



蠕变、冰下水流、基底滑移的箭头大小表示其作用的强弱

a—冰缘物质临界失稳状态；b—失稳碎屑物加载-压融阶段；c—水致蠕滑-拉裂阶段

图 12 加载压融-水致蠕滑-拉裂型冰岩崩

Fig. 12 Loading-induced pressure melting and water-induced creep-fracture (arrow sizes denote the intensity of creep, subglacial water flow, and basal slip)

(a) Critical failure state of periglacial material; (b) Loading and pressure melting of failed debris; (c) Water-induced creep–fracture

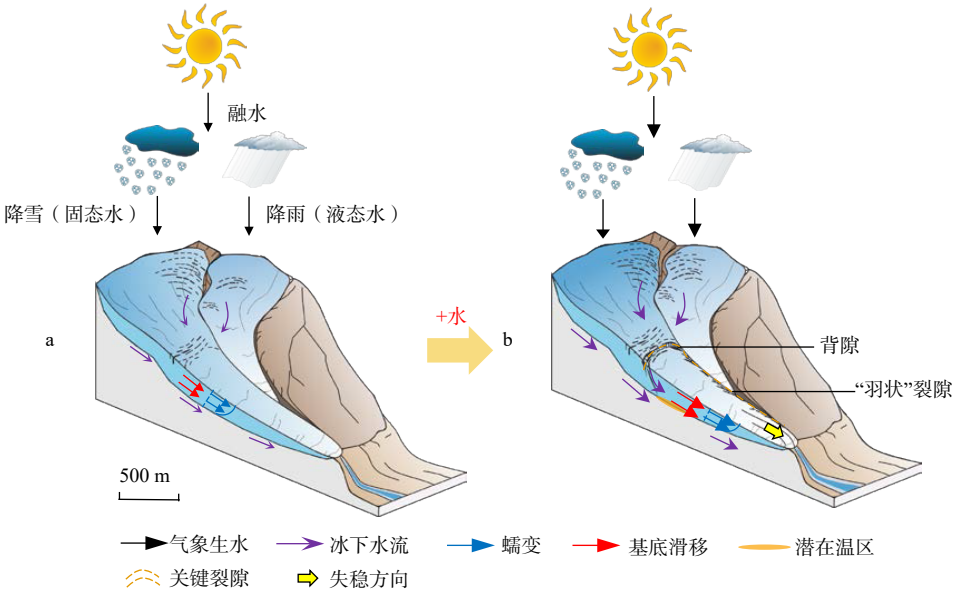
常呈倒三角形或梭形。下伏基岩节理裂隙发育，陡倾结构面提供临空条件，易发于高陡冰岩混合带。由于冰川融水进入岩体节理裂隙中形成短时高压水头，或者是融水再冻结时的冻胀力使得裂隙扩张，冰岩体在重力作用下剪切-失稳-滑移。典型案例如西藏易贡冰岩崩、印度查莫利冰岩崩（Shugar et al., 2021; Fan et al., 2022）。

3.4 坍塌型

侵蚀坍塌型冰岩崩常见于山地冰川浮冰舌或大陆冰川冰架（如南北极冰盖，规模可能巨大），由于冰湖水或海水侵蚀作用（Gräff et al., 2025），在重力作用下冰体沿缺陷面（多为裂隙、渗浸冻结面或结构面）与母冰川发生剪切、拉裂、下坠；一旦破坏面贯通，冰体便脱离母冰川，坠入水中，规模不一。其可能引发涌浪或形成漂浮冰块、冰山。案例如米堆冰川冰岩崩。空穴坍塌型冰岩崩则发育于山地冰川冰舌和平缓段，冰川融水作用在冰舌下部或冰川内部形成空洞；在重力、水汽热对流或冰下湖排水（Ogier et al., 2025）等因素作用下，冰川沿缺陷面发生剪切、拉裂、下坠，堆积于地面。案例如东嘎冰川冰岩崩以及阿尔卑斯山的 Rhône 冰川冰岩崩（Ruols et al., 2024）、Tête Rousse 冰川冰岩崩（Brondex et al., 2025）等。这类坍塌式冰岩崩会破坏冰川结构的完整性，使降水和融水从坍塌处汇入冰下水系，导致基床水压增加，可能引发次生冰岩崩或冰下湖爆发性洪水。

3.5 不同模式冰岩崩共生演化

这些模式的冰岩崩在流域内的发育情况各异，既可以像易贡冰岩崩、阿汝冰岩崩那样独立发育，也可能相互关联共同发育，如色东普冰岩崩、阿尼玛卿山冰岩崩和米堆冰川冰岩崩多种模式共存（图 14）。在色东普沟和阿尼玛卿山的晓玛沟流域，高位存在蠕滑-拉裂型冰岩崩（Li et al., 2024; Jiang et al., 2025）、楔块滑移型冰岩崩（Zhao et al., 2022; Gao et al., 2025）或蠕滑-倾倒型冰岩崩，这些冰岩崩的碎屑物堆积至沟谷内的低角度冰川上，会带来诸多影响，如加载压融、冰面破碎化、冰川污化等，特别是额外的固（冰岩碎屑）、液（液态水）物质补充，会促使沟谷里低角度冰川发生加载压融-水致蠕滑-拉裂型冰岩崩。在米堆流域，粒雪盆边缘频繁的蠕滑-



气象生水、蠕变、冰下水流、基底滑移的箭头大小表示其作用的强弱

a—冰岩崩孕育阶段；b—气候变暖的长期影响（产生冰雪融水）叠加短期极端天气事件（高温或降水）影响（产生大量冰雪融水或雨水）而产生水致蠕滑–拉裂

图 13　气象生水–水致蠕滑–拉裂型冰岩崩

Fig. 13　Meteorological water-induced creep fracture (arrow sizes denote the intensity of meteorological water, creep, subglacial water flow, and basal slip)

(a) Initiation of an ice and rock avalanche; (b) Combined effects of long-term climate warming (generating ice-snow meltwater) and short-term extreme weather events (high temperature or precipitation) produce substantial meltwater or rainfall, leading to water-induced creep fracture

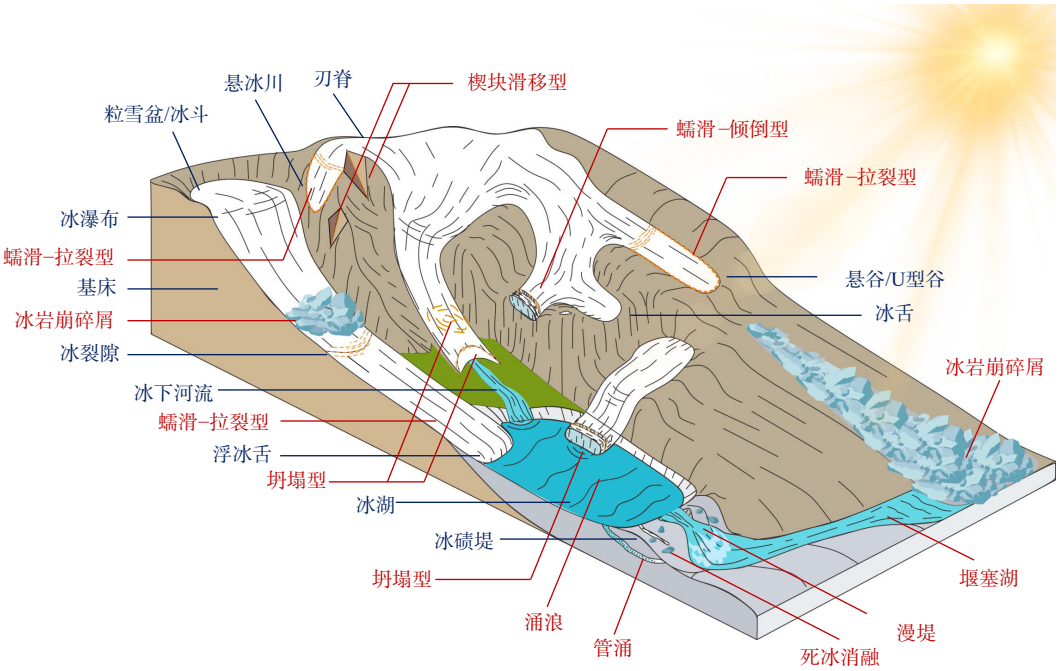


图 14　不同模式冰岩崩共生演化关系

Fig. 14　Co-evolution among different patterns of ice and rock avalanches

倾倒型冰岩崩，碎屑物成为浮冰舌物质补给的一部分，会促进浮冰舌流动，进而在冰川末端形成侵蚀坍塌型冰岩崩。不同类型的冰岩崩既反映了冰川活动特征，又在某种程度上代表了冰川稳定性状

态。冰岩崩可能在单个流域内反复发生，如色东普流域和晓玛沟流域；可能直接致灾（这取决于威胁对象的暴露位置），也可能链生成灾，如冰岩崩–冰湖溃决–洪水，冰岩崩–碎屑流–堵江溃决–洪水等。

4 结论

基于典型冰岩崩灾害调查和资料收集，采用工程地质和地质力学理论方法，系统分析归纳了青藏高原冰岩崩的特征、成因机理及地质力学模式：

（1）青藏高原冰岩崩是在特殊地理、地质和气候环境下的斜坡变形破坏的产物。冰川是物质基础，地形条件和地质构造为冰岩崩形成提供了临空和边界条件，气候变化和地震加剧了冰岩崩的形成演化。地震活动可导致冰岩体开裂破碎，也可能直接触发冰岩崩发生；气候变暖致使冰雪消融，融水沿裂隙与边界渗流，降低滑动面（带）的抗剪强度，甚至形成短时高压水头，诱发崩滑发生。冰岩崩形成过程中，解约束现象决定了冰岩崩形成的临界点，主要表现为冰岩失稳区与侧壁、底部基床及母冰川黏结的瞬时或渐进失效。

（2）青藏高原冰岩崩地质力学模式分为4类。蠕滑–拉裂型又可细分为加载压融–水致蠕滑–拉裂型与气象生水–水致蠕滑–拉裂型两类，前者由冰川加载产生的压融作用引发，后者则由短期内极端降水或融水导致。蠕滑–倾倒型，冰岩体在蠕滑过程中因力学失衡发生倾倒。楔块滑移型，冰岩体在特定地质结构控制下，以楔块形式沿滑动面发生滑移。坍塌型包括空穴坍塌和侵蚀坍塌两类，空穴坍塌多因冰舌下部或冰川内部出现空腔而自身稳定性丧失导致，侵蚀坍塌则与水体的侵蚀、浮力等因素相关。这些模式在同一条沟道流域内可相互耦合、共同发育。不同类型的冰岩崩反映了冰川不同的活动特征和稳定性状态，既可直接成灾，也会链生成灾。

认识和理解冰岩崩的机理及地质力学模式是防灾减灾的基础，未来仍需进一步探究冰岩崩的物理过程，研究地质、地震、气候等多因素和热力–水力–力学多场耦合作用，建立更加精确的物理模型和数值模拟等方法，加强冰川及冰岩崩灾害的观测与预警工作，科学有效地防范冰岩崩灾害风险。

References

ALEAN J, 1985. Ice avalanches: some empirical information about their formation and reach[J]. Journal of Glaciology, 31(109): 324-333.

BONDESAN A, FRANCESE R G, 2023. The climate-driven disaster of the Marmolada Glacier (Italy)[J]. Geomorphology, 431: 108687.

BRONDEX J, GAGLIARDINI O, GILBERT A, et al. , 2025. How to model crevasse initiation? Lessons from the artificial drainage of a water-filled cavity on the Tête Rousse Glacier (Mont Blanc range, France)[J]. EGUsphere, 2025: 1-34. In press

CHANG W B, XING A G, 2025. Warming-driven weakening of basal ice layer as a critical cause of ice avalanche activation[J]. Cold Regions Science and Technology, 236: 104513.

CHEN H J, YANG J P, TAN C P, 2017. Responsivity of glacier to climate change in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 39(1): 16-23. (in Chinese with English abstract)

CUFFEY K M, PATERSON W S B, 2010. The physics of glaciers[M]. Burlington: Butterworth-Heinemann.

CUI P, GUO X J, JIANG T H, et al., 2019. Disaster effect induced by Asian Water Tower change and mitigation strategies[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34(11): 1313-1321. (in Chinese with English abstract)

FAILLETTAZ J, FUNK M, VINCENT C, 2015. Avalanching glacier instabilities: review on processes and early warning perspectives[J]. Reviews of Geophysics, 53(2): 203-224.

FAN X M, YUNUS A P, YANG Y H, et al., 2022. Imminent threat of rock-ice avalanches in High Mountain Asia[J]. Science of the Total Environment, 836: 155380.

FRANCESE R G, VALENTINO R, HAEBERLI W, et al. , 2025. Failure of Marmolada Glacier (Dolomites, Italy) in 2022: data-based back analysis of possible collapse mechanisms[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 25, 3027-3053.

GAO S H, GAO Y, YIN Y P, et al., 2025. Characteristics of massive glacier-related watershed geohazard chains in the eastern Himalayan Syntaxis, China[J]. Journal of Earth Science, 36(3): 1181-1197

GILBERT A, LEINSS S, KARGEL J, et al., 2018. Mechanisms leading to the 2016 giant twin glacier collapses, Aru Range, Tibet[J]. The Cryosphere, 12(9): 2883-2900.

GRÄFF D, LIPOVSKY B P, VIELI A, et al., 2025. Calving-driven fjord dynamics resolved by seafloor fibre sensing[J]. Nature, 644(8076): 404-412.

GUO G M, 2005. A new understanding of the Yigong landslide in Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 276-276. (in Chinese)

GUO W Q, SHANGGUAN D H, JIANG Z L, et al., 2023. Study on basic characteristics of glacier surges on the Anyemaqen Mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 45(2): 480-496. (in Chinese with English abstract)

HU M J, CHENG Q G, WANG F W, 2009. Experimental study on formation of Yigong long-distance high-speed landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(1): 138-143. (in Chinese with English abstract)

HU W T, YAO T D, YU W S, et al., 2018. Advances in the study of glacier avalanches in high Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 40(6): 1141-1152. (in Chinese with English abstract)

HUGGEL C, HAEBERLI W, KÄÄB A, et al., 2004. An assessment proced-

ure for glacial hazards in the Swiss alps[J]. Canadian Geotechnical Journal, 41(6): 1068-1083.

JIANG R C, ZHANG L M, LU W J, et al., 2025. A thermal-hydro-mechanical coupled analysis model for climate-driven movements of valley glaciers (THM-GA 1.0)[J]. Engineering Geology, 355: 108264.

KÄÄB A, LEINSS S, GILBERT A, et al., 2018. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability[J]. Nature Geoscience, 11(2): 114-120.

KÄÄB A, JACQUEMART M, GILBERT A, et al., 2021. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers–more frequent than thought?[J]. The Cryosphere, 15(4): 1751-1785.

KAUSHIK S, 2023. Ice aprons and hanging glaciers: new insights from optical and SAR remote sensing of the Mont-Blanc massif (western European Alps)[D]. Chambéry: Université Savoie Mont Blanc.

LEI Y B, YAO T D, TIAN L D, et al., 2021. Response of downstream lakes to Aru glacier collapses on the western Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 15(1): 199-214.

LI Y, CUI Y F, HU X, et al., 2024. Glacier retreat in eastern Himalaya drives catastrophic glacier hazard chain[J]. Geophysical Research Letters, 51(8): e2024GL108202.

LIU X X. 2021. Disaster mechanism and simulation of cataclysmic process of the ice avalanche in Sedongpu basin, Milin County, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

LIU Z, LI B, HE K, et al., 2020. An analysis of dynamic response characteristics of the Yigong Landslide in Tibet under strong earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 26(4): 471-480. (in Chinese with English abstract)

MARGRETH S, FUNK M, 1999. Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches — two case studies from the Swiss and Italian Alps[J]. Cold Regions Science and Technology, 30(1-3): 159-173.

MENG Q J, SONG Y X, HUANG D, et al., 2024. Mechanism of shear strength degradation of subglacial debris under thawing[J]. Rock and Soil Mechanics, 45(1): 197-212. (in Chinese with English abstract)

OGIER C, FISCHER M, WERDER M A, et al., 2025. Definition, formation and rupture mechanisms of water pockets in alpine glaciers: Insights from an updated inventory for the Swiss Alps[J]. Journal of Glaciology, 71: e82.

PAN B T, GUAN W J, SHI M H, et al., 2022. Different characteristics of two surges in Weigeledangxiong Glacier, northeastern Tibetan Plateau[J]. Environmental Research Letters, 17(11): 114009.

PAUL F, 2019. Repeat glacier collapses and surges in the Amney Machen mountain range, Tibet, possibly triggered by a developing rock-slope instability[J]. Remote Sensing, 11(6): 708.

PEI L X, 2019. The preliminary study of characteristics and types of ice avalanche disaster in the Tibetan Plateau[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

PENG J B, ZHANG Y S, HUANG D, et al., 2023. 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, 48(8): 3099-3114. (in Chinese with English abstract)

PERLA R I, 1980. Avalanche release, motion, and impact[M]//COLBECK S C. Dynamics of snow and ice masses. Amsterdam: Elsevier.

PRALONG A, 2006. Oscillations in critical shearing, application to fractures in glaciers[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 13(6): 681-693.

RÖTHLISBERGER H, 1977. Ice avalanches[J]. Journal of Glaciology, 19(81): 669-671.

RUOLS B, KLAHOLD J, FARINOTTI D, et al. , 2024. 4D imaging of a near-terminus glacier collapse feature through high-density GPR acquisitions[J]. EGUsphere, 2024: 1-26. In press

SALZMANN N, KÄÄB A, HUGGEL C, et al., 2004. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling[J]. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 58(2): 74-84.

SHEN Y J, CHEN S W, ZHANG L, et al., 2022. High-altitude initiation, dynamic collapse and phase transformation of mountain snow-ice melt geological disaster chain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 44(2): 643-656. (in Chinese with English abstract)

SHORDER J F, HAEBERLI W, WHITEMAN C, 2015. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters[M]. Amsterdam: Elsevier.

SHUGAR D H, JACQUEMART M, SHEAN D, et al., 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya[J]. Science, 373(6552): 300-306.

TANG M G, LIU X X, LI G, et al., 2023. Mechanism of ice avalanche in the Sedongpu sag, Yarlung Zangbo River basin—an experimental study[J]. Earth Science Frontiers, 30(4): 405-417. (in Chinese with English abstract)

TANG M G, LI G, ZHAO H L, et al., 2024. Advances in ice avalanches on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 21(6): 1814-1829.

TONG L Q, TU J N, PEI L X, et al., 2018. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Engineering Geology, 26(6): 1552-1561. (in Chinese with English abstract)

VAN DER WOERD J, OWEN L A, TAPPONNIER P, et al., 2004. Giant, ～M8 earthquake-triggered ice avalanches in the eastern Kunlun Shan, northern Tibet: Characteristics, nature and dynamics[J]. Geological Society of America Bulletin, 116(3-4): 394-406.

WANG C, FAN J H, WANG Q, et al. , 2021. Use of L-band SAR data for Monitoring Glacier Surging next to Aru Lake[J]. Procedia Computer Science, 181, 1131-1137.

WANG H, WANG B B, CUI P, et al., 2024. Disaster effects of climate change in High Mountain Asia: State of art and scientific challenges[J]. Advances in Climate Change Research, 15(3): 367-389.

WANG N L, XU B Q, PU J C, et al., 2013. Discovery of the water-rich ice layers in glaciers on the Tibetan Plateau and its environmental significances[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 35(6): 1371-1381. (in Chinese with English abstract)

WANG N L, YAO T D, XU B Q, et al., 2019. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34(11): 1220-1232. (in Chinese with English abstract).

WANG Q K, LI B, XING A G, et al., 2025. A 15-year history of repeated ice-rock avalanches from a single source area in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Landslides, 22(1): 235-253.

WANG W C, WANG J, 2022. Influencing factors and values of the basal

shear stress in glaciers in western China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 58(1): 39-46, 56. (in Chinese with English abstract)

WANG X, LIU Q, LIU S Y, et al., 2020. Manifestations and mechanisms of mountain glacier-related hazards[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 12(6): 436-446.

WANG Z Y, ZHANG T G, WANG W C, 2022. Glacier detachment chain process in the Amney Machen Mountain[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 58(6): 950-962. (in Chinese with English abstract)

WEI M D, ZHANG L M, JIANG R C, 2024. A conceptual model for evaluating the stability of high-altitude ice-rich slopes through coupled thermo-hydro-mechanical simulation[J]. Engineering Geology, 334: 107514.

WEN J H, WANG S J, MA L J, et al. , 2020. Cryosphere disaster science[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

WU G J, YAO T D, WANG W C, et al., 2019. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpines[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 34(11): 1285-1292. (in Chinese with English abstract)

WU J H, LI J, GUO L, et al., 2025. Remote sensing monitoring and surge mechanisms analysis of the Amney Machen mountain Glaciers[J]. Chinese Journal of Geophysics, 68(5): 1695-1710. (in Chinese with English abstract)

XIN P, WANG T, LIU J M, et al., 2022. The geological structure and sliding mode of the slopes in the Yigong landslide source area, Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 1012-1023. (in Chinese with English abstract)

XU Q, WANG S T, CHAI H J, et al. , 2007. The rock avalanche-flow landslide event in Yigong of Tibet[C]//Proceedings of the first academic conference on rock mechanics and engineering examplesin China. Sanya: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering: 53-58. (in Chinese)

XU X D, DONG L L, ZHAO Y, et al., 2019. Effect of the Asian Water Tower over the Qinghai-Tibet Plateau and the characteristics of atmospheric water circulation[J]. Chinese Science Bulletin, 64(27): 2830-2841.

YANG Q Q, ZHENG X Y, SU Z M, et al., 2022. Review on rock-ice avalanches[J]. Earth Science, 47(3): 935-949. (in Chinese with English abstract)

YANG W, WANG Z Y, AN B S, et al., 2023. Early warning system for ice collapses and river blockages in the Sedongpu Valley, southeastern Tibetan Plateau[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23(9): 3015-3029.

YIN Y P. 2000. Rapid huge landslide and hazard reduction of Yigong river in the Bomi, Yibet[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 27(4): 8-11. (in Chinese with English abstract)

YIN Y P, ZHANG S L, HUO Z H, et al., 2025. 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, 36(4): 1-14. (in Chinese with English abstract)

YOU Q L, KANG S C, LI J D, et al., 2021. Several research frontiers of climate change over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 43(3): 885-901. (in Chinese with English abstract)

YUAN H, GUO C B, WU R A, et al., 2023. Research progress and prospects of the giant Yigong long run-out landslide, Tibetan Plateau, China[J]. Geological Bulletin of China, 42(10): 1757-1773. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J C, ZHOU B, CAO X Y., et al., 2019. Analysis of basic characteristics of glacial collapse chain hazards in Animaqing mountain[J]. Yellow River, 41(11): 17-21. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L Y, LI S M, YU S J, et al., 2024. Research on pre-disaster deformation of Sedongpu Basin based on SBAS-InSAR and offset-tracking[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 44(6): 630-635. (in Chinese with English abstract)

ZHANG T G, WANG W C, SHEN Z H, et al., 2023. Understanding the 2004 glacier detachment in the Amney Machen mountains, northeastern Tibetan Plateau, via multi-phase modeling[J]. Landslides, 20(2): 315-330.

ZHANG Y F, LIU Y, SU P C, et al., 2023. Advances in the study of glacier avalanches in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 34(2): 132-145. (in Chinese with English abstract)

ZHAO C X, YANG W, WESTOBY M, et al., 2022. Brief communication: an approximately 50 Mm^3 ice-rock avalanche on 22 March 2021 in the Sedongpu valley, southeastern Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere, 16(4): 1333-1340.

ZHOU J W, CUI P, HAO M H, 2016. Comprehensive analyses of the initiation and entrainment processes of the 2000 Yigong catastrophic landslide in Tibet, China[J]. Landslides, 13(1): 39-54.

ZOU C B, JANSEN J D, CARLING P A, et al., 2023. Triggers for multiple glacier detachments from a low-angle valley glacier in the Amney Machen Range, eastern Tibetan Plateau[J]. Geomorphology, 440: 108867.

附中文参考文献

陈虹举，杨建平，谭春萍，2017. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究[J]. 冰川冻土，39(1)：16-23.

崔鹏，郭晓军，姜天海，等，2019.“亚洲水塔”变化的灾害效应与减灾对策[J]. 中国科学院院刊，34(11)：1313-1321.

郭广猛，2005. 对西藏易贡特大滑坡的新认识[J]. 地学前缘，12(2)：276.

郭万钦，上官冬辉，蒋宗立，等，2023. 阿尼玛卿山冰川跃动基本特征研究[J]. 冰川冻土，45(2)：480-496.

胡明鉴，程谦恭，汪发武，2009. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索[J]. 岩石力学与工程学报，28(1)：138-143.

胡文涛，姚檀栋，余武生，等，2018. 高亚洲地区冰崩灾害的研究进展[J]. 冰川冻土，40(6)：1141-1152.

刘昕昕. 2021. 西藏米林县色东普沟冰崩灾变机理及灾变过程模拟[D]. 成都：成都理工大学.

刘铮，李滨，贺凯，等，2020. 地震作用下西藏易贡滑坡动力响应特征分析[J]. 地质力学学报，26(4)：471-480.

孟秋杰，宋宜祥，黄达，等，2024. 正融冰川碎屑冰冻体剪切强度劣化机制研究[J]. 岩土力学，45(1)：197-212.

裴丽鑫，2019. 青藏高原地区冰崩灾害特征与类型的初步研究[D]. 北京：中国地质大学(北京).

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[J]. 地球科学，48(8)：

3099-3114.
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[J]. 冰川冻土, 44(2): 643-656.
汤明高, 刘昕昕, 李广, 等, 2023. 雅鲁藏布江色东普沟冰崩机理试验研究[J]. 地学前缘, 30(4): 405-417.
童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等, 2018. 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, 26(6): 1552-1561.
王宁练, 徐柏青, 蒲健辰, 等, 2013. 青藏高原冰川内部富含水冰层的发现及其环境意义[J]. 冰川冻土, 35(6): 1371-1381.
王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等, 2019. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 34(11): 1220-1232.
王潍诚, 王杰, 2022. 底部剪切应力影响因素及其在中国西部冰川研究中的取值[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 58(1): 39-46, 56.
王忠彦, 张太刚, 王伟财, 2022. 阿尼玛卿山多次冰川滑塌链式灾害过程梳理与展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 58(6): 950-962.
温家洪, 王世金, 马丽娟, 等, 2020. 冰冻圈灾害学[M]. 北京: 科学出版社.
邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等, 2019. 青藏高原及周边地区的冰川灾害[J]. 中国科学院院刊, 34(11): 1285-1292.
吴俊辉, 李佳, 郭磊, 等, 2025. 阿尼玛卿山冰川遥感监测及跃动机理分析[J]. 地球物理学报, 68(5): 1695-1710.
辛鹏, 王涛, 刘甲美, 等, 2022. 西藏易贡滑坡源区坡体赋存的地质结构及其滑动模式[J]. 地质力学学报, 28(6): 1012-1023.
许强, 王士天, 柴贺军, 等, 2007. 西藏易贡特大山体崩塌滑坡事件[C]//中国岩石力学与工程实例第一届学术会议论文集. 三亚: 中国岩石力学与工程学会工程实例专业委员会: 53-58.
杨情情, 郑欣玉, 苏志满, 等, 2022. 高速远程冰-岩碎屑流研究进展[J]. 地球科学, 47(3): 935-949.
殷跃平, 2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 27(4): 8-11.
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[J]. 中国地质灾害与防治学报, 36(4): 1-14.
袁浩, 郭长宝, 吴瑞安, 等, 2023. 西藏易贡高位远程滑坡研究进展与展望[J]. 地质通报, 42(10): 1757-1773.
游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等, 2021. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. 冰川冻土, 43(03): 885-901.
张俊才, 周保, 曹小岩, 等, 2019. 阿尼玛卿山冰崩链生灾害基本特征分析[J]. 人民黄河, 41(11): 17-21.
张龙宇, 李素敏, 禹孙菊, 等, 2024. 基于 SBAS-InSAR 与 Offset-Tracking 的色东普流域灾前形变探究[J]. 大地测量与地球动力学, 44(6): 630-635.
张议芳, 刘阳, 苏鹏程, 等, 2023. 西藏地区冰崩灾害研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 34(2): 132-145.

第一作者简介:

汤明高，男，博士，现任成都理工大学教授、博士生导师、地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室副主任，曾任土木工程系主任。获自然资源部科技领军人才、四川省学术和技术带头人、四川省地质灾害防治工作先进个人等荣誉称号。主要从事斜坡变形破坏机理及灾害监测预警防治研究，主持国家和省部级项目 30 余项，获国家科技进步二等奖、四川省科技进步一等奖等 10 项，第一/通讯作者发表 SCI/EI 等论文 100 余篇，授权发明专利 20 余项，参编专著/规范 14 部。

