

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.110>



基于流变特性的高位冰岩碎屑流低温运动学机制

武尹梁¹, 常鸣^{1*}, 郭长宝², 刘吉鑫², 刘贵², 窦向阳¹

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川成都 610059
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要: 为揭示青藏高原冰岩崩转化形成的含冰碎屑流低温运动学机制, 量化含冰量与质量对流动行为的控制效应, 在智能温控条件下, 结合冰碛土浆体流变试验与含冰碎屑流物理模型试验, 利用加速度监测与 PIV (粒子图像测速法) 反演, 分析不同含冰量 (25%、50%、75%) 与质量 (10 kg、15 kg、20 kg) 对动力响应、速度场演化及堆积特征的影响。流变试验表明, 浆体屈服应力对容重高度敏感: 低容重体系中屈服应力随容重提高呈倍数增长, 高容重体系中冰碛物强化效应趋于饱和。物理模型试验揭示了含冰碎屑流冲出距离与含冰量、总质量均呈显著正相关, 二者存在非线性耦合增强效应; 含冰量通过调控颗粒接触网络主导体系流态转变, 决定了“摩擦-胶结-润滑”力学行为的演化方向; 总质量通过惯性效应调控力学行为转化强度与能量传递效率, 二者协同控制含冰碎屑流的长距离超强运移能力。建立了考虑摩擦-润滑耦合机制的“冲出距离-扩散宽度-影响范围”多元非线性预测模型 ($R^2 > 0.94$), 为青藏高原冰岩崩灾害危险范围评估提供了量化依据, 能有效指导重大工程选线、建设与运维安全。

关键词: 含冰碎屑流; 物理模型试验; 流变特性; 运动学机制; 工程地质学。

中图分类号: P642.2

文章编号: 1000-2383(2026)04-1388-15

收稿日期: 2025-12-29

Low-Temperature Kinematic Mechanisms of High-Elevation Rock-Ice Debris Flows Based on Rheological Characteristics

Wu Yinliang¹, Chang Ming^{1*}, Guo Changbao², Liu Jixin², Liu Gui², Dou Xiangyang¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: To reveal the low-temperature kinematic mechanism of ice-bearing debris flow transformed from ice-rock avalanches on the Qinghai-Tibet Plateau and quantify the controlling effects of ice content and total mass on its flow behavior, it performed integrated tests under intelligent temperature-controlled conditions. Combining rheological tests of moraine soil slurry and physical model tests of ice-bearing debris flow, it analyzed the influences of varying ice contents (25%, 50%, 75%) and total masses (10 kg, 15 kg, 20 kg) on the dynamic response, velocity field evolution, and deposition characteristics of the debris flows via

基金项目: 中国地质调查局“全国重大工程地质安全风险区划与综合评价”项目资助 (Nos. DD20221816, DD20230600601); 成都市科技项目 (No. 2025YF0500421SN); 成都理工大学珠峰科学研究计划 2.0 交叉项目支持。

作者简介: 武尹梁 (2001-), 男, 硕士研究生, 主要从事青藏高原地质灾害防控研究。ORCID: 0009-0007-9353-304X。E-mail: 2150891434@qq.com

* **通讯作者:** 常鸣 (1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事泥石流灾害冲击动力学的理论、物理实验和数值模拟以及生态地质环境综合风险评估的研究工作。ORCID: 0000-0003-0377-774X。E-mail: changmxq@126.com

引用格式: 武尹梁, 常鸣, 郭长宝, 刘吉鑫, 刘贵, 窦向阳, 2026. 基于流变特性的高位冰岩碎屑流低温运动学机制. 地球科学, 51(4): 1388-1402.

Citation: Wu Yinliang, Chang Ming, Guo Changbao, Liu Jixin, Liu Gui, Dou Xiangyang, 2026. Low-Temperature Kinematic Mechanisms of High-Elevation Rock-Ice Debris Flows Based on Rheological Characteristics. *Earth Science*, 51(4): 1388-1402.

acceleration monitoring and Particle Image Velocimetry (PIV) inversion. Rheological test results demonstrate that the yield stress of the slurry is highly sensitive to bulk density. Specifically, in low bulk density systems, yield stress increases multiplicatively with rising bulk density, whereas the strengthening effect of moraine materials tends to saturate in high bulk density systems. Physical model tests reveal that the runout distance of ice-bearing debris flow exhibits a significantly positive correlation with both ice content and total mass, with a nonlinear coupling enhancement effect observed between the two factors. Ice content dominates the flow regime transition of the system by regulating the particle contact network, which dictates the evolution direction of the “friction-cementation-lubrication” mechanical behavior. Total mass modulates the transformation intensity of mechanical behavior and energy transfer efficiency through inertial effects. Together, these two factors synergistically control the ultra-long-distance, high-mobility transport capacity of ice-bearing debris flows. It established a multivariate nonlinear prediction model for “runout distance-spread width-impact scope” that incorporates the friction-lubrication coupling mechanism, with a coefficient of determination ($R^2 > 0.94$). This model provides a quantitative basis for hazard range assessment of ice-rock avalanche disasters on the Qinghai-Tibet Plateau, and can effectively guide the route selection, construction, and safe operation and maintenance of major engineering projects.

Key words: high-elevation ice-rock avalanche-debris flow; physical model experiment; rheological property; dynamic response; engineering geology.

0 引言

冰岩崩灾害在高寒山区是常见且极具破坏性的复合型地质灾害,通常发生在冰川末端或陡峭斜坡的冰岩体区域.其形成机制涉及冻胀开裂、重力作用及冰岩界面或内部软弱结构面,导致冰岩体发生倾倒、滑塌或滚落,进而转化为碎屑流或泥石流(Chang *et al.*, 2025).狭义上,冰岩崩指大规模冰体崩解与滑移;广义上则包括冰-岩崩、冰雪崩、冰川脱离等现象,甚至涵盖冰川型滑坡与富冰滑坡等特殊类型(Pudasaini and Krautblatter, 2014; 常鸣等, 2017; 胡文涛等, 2018; Zhang *et al.*, 2023).冰岩崩转化形成的含冰碎屑流具有极强的流动性,常表现出比普通碎屑流更远的运动距离和更广的堆积范围,对下游社区、工程设施及高原生态系统构成严重威胁(常鸣等, 2017; 胡文涛等, 2018).近年来,随着全球气候变化,冰岩崩灾害的发生频率呈上升趋势,尤其自20世纪80年代以来,青藏高原地区的冰岩崩已发生超过20次,特别是近十年来,灾害事件频发(汤明高等, 2022).

气候变化是加剧冰岩崩灾害的主要因素.青藏高原近年来显著升温,湿季降水量的增加进一步加剧了冰岩崩的发生(Guo *et al.*, 2020; 周玉杉等, 2021).研究表明,降水量的增加不仅增加了冰川的物质荷载,还通过润滑作用显著降低滑动面的摩擦力,特别是当冰床接触面受热融化形成薄水膜时,滑动面摩擦力降低(Schneider *et al.*, 2011; 汤明高等, 2025).此外,地震主震可能导致冰川体开裂并打

破平衡,余震则进一步破坏冰体或岩体结构,降低其强度(王玉峰等, 2025).例如,2001年昆仑山Ms 7.9地震后,可可西里地区短期内连续发生了6次长达2~3 km的冰岩崩事件(Van der Woerd *et al.*, 2004).这些触发因素不仅影响冰岩崩的初始失稳,更对冰岩崩转化形成的含冰碎屑流的运动过程产生深远影响.地震导致的岩体破碎为碎屑流提供丰富物源,降水与冰川融水则通过改变含冰碎屑流内部的水热条件,影响其流变特性与运动性.

冰岩崩转化形成的含冰碎屑流,其超强运动性源于冰组分的复杂作用.冰组分相变引起物质组分与固体浓度持续变化,流化程度逐步增强(胡文涛等, 2018).研究表明,间隙冰融化可引发热对流及孔隙水压力上升,降低岩体稳定性(Ren *et al.*, 2021);温度升高与水热耦合作用促使冰岩混合体转化为塑性体而发生流动(Cudmani *et al.*, 2023; Arenson and Springman, 2005);富水冰层在陡坡条件下应变积累至临界值后突发断裂滑脱(Sansone *et al.*, 2021).冰组分的存在形成了“摩擦-胶结-润滑”动态转化机制:低温时冰的胶结作用增强颗粒黏聚力,运动过程中摩擦生热导致冰屑融化,胶结结构破坏并形成润滑水膜,显著降低剪切阻力.这是含冰碎屑流区别于普通碎屑流的核心特征.

尽管已有研究聚焦于冰岩崩的触发因素与灾害链演化(张永双等, 2022; 年廷凯等, 2024),但对于冰岩崩发生后转化为含冰碎屑流的运动学机制研究仍显不足,主要体现在:其一,含冰碎屑流中冰砾物与水混合形成的浆体相,其流变特性是控制整

体流动行为的关键,但当前缺乏对不同容重与含冰量条件下浆体屈服应力的系统测试(Li *et al.*, 2022);其二,现有物理模型试验多集中于纯岩屑或纯冰体,对冰岩混合体在不同含冰量与质量组合下宏观运动参数的定量研究较薄弱(Shastri *et al.*, 2021);其三,尚缺乏综合考虑冰的润滑效应、摩擦特性及横向扩散作用的冲出范围预测模型,难以为工程风险评估提供量化依据(高浩源等,2022;申艳军等,2022).随着气候变化与地震活动增强,此类灾害发生频率将持续上升(Li *et al.*, 2013;Du *et al.*, 2017),开展含冰碎屑流运动学机制的深入研究显得尤为迫切.

1 研究区概况

本文研究区天摩沟(图1)属于帕隆藏布江左岸的一级支流.帕隆藏布江发源于然乌湖南部的阿扎贡拉冰川,全长 260 km,平均流量约 990 m³/s,流域内拥有众多海拔超过 6 000 m 的山体.其中下游区域河谷地貌呈现侵蚀—堆积交替的复合形态,狭窄段为 V 型深切峡谷(谷宽 60~80 m,纵比降约 11%),宽阔段则为 U 型谷,两岸植被覆盖率达 61.5%.强烈的构造活动导致边坡岩体破碎,为泥石

流形成提供了丰富的松散固体物质(刘吉鑫等,2025),而印度洋暖湿气流带来的丰沛降水则进一步加剧了水动力条件.

天摩沟流域位于西藏林芝市波密县松绕村,总面积 17.9 km²,呈现典型的构造剥蚀型中山—高山峡谷复合地貌.主沟全长 4 km,纵比降 256%,谷坡坡度超过 35°,两侧海拔 3 800 m 以上分布有总面积约 3.62 km² 的现代冰川.流域生态系统呈现从常绿阔叶林到冰缘寒漠带的垂直带谱,冰川活动与寒冻风化作用显著影响地貌演化.物源主要来自冰碛堆积物、崩塌岩屑和坡积体,构成了巨型物源储备库(Li *et al.*, 2022;李禄等,2026).冰川的持续运移与消融通过侵蚀、推移碎屑物质及融水渗透,增强了泥石流的易发性(屈永平等,2018;常鸣等,2024;刘大瑞等,2025).天摩沟的水文特征表明,冰川消融与融水径流显著增加了沟谷系统的基础含水量,降低了泥石流的降雨临界阈值(Wei *et al.*, 2018).

历史上,天摩沟多次发生泥石流灾害,2007 年和 2010 年的强降水事件引发了大规模泥石流,造成了严重的基础设施损毁和人员伤亡(高波等,2019).近年来,冰川消融与强降水事件的叠加,进一步加剧了该流域的泥石流灾害风险.

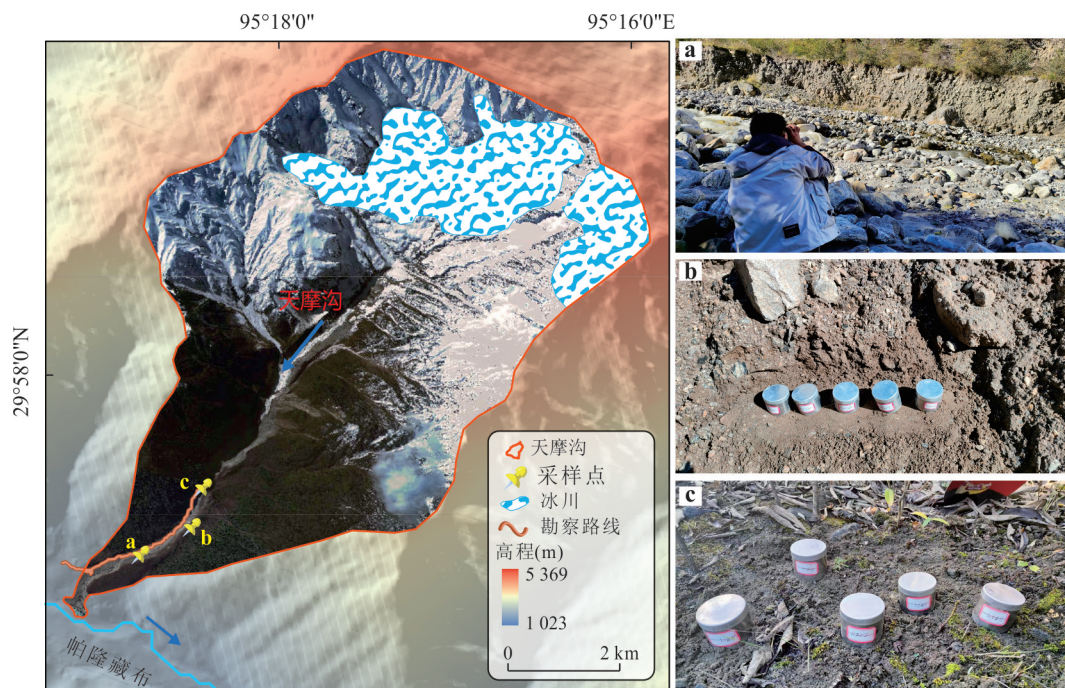


图1 天摩沟高位冰川泥石流流域概况

Fig.1 General situation of the Tianmo Gully high-altitude glacier debris flow basin

2 冰碛土物理力学性质试验

2.1 试验材料与方法

流变仪试验采用速率控制模式,剪切速率从 $0\sim 60\text{ s}^{-1}$ 线性增加,记录样品的剪切应力(τ)与剪切速率($\dot{\gamma}$)变化,得到流变曲线(图2)。每次测试采集120个数据点,确保数据的可靠性与准确性。仪器设置采用宾汉姆本构模型,最大剪切速率设为 60 s^{-1} ,剪切应力数据每秒采集一次,确保捕捉动态变化。样品加载时,将不同容重与冰碛物含量的泥石流浆体混合物注入容器,静置2 min消除材料离析后启动测试,测试过程采用预设速率增加剪切速率,从 $0\sim 60\text{ s}^{-1}$,测试结束后进行清洁操作,为下次试验做准备。

2.2 颗粒级配特征

通过筛分试验分析天摩沟土样的颗粒分布(图3),结果表明不同区域土样的级配差异明显。在堆积区,砂粒占比为25.32%,黏粒含量为3.09%,不均匀系数 $C_u=9$,曲率系数 $C_c=1$,显示该区域土样级配良好;而流通区粗颗粒占比更高, $C_u=16$, $C_c=$

0.6,表明级配较差。物源区砾石含量显著高于其他区域(表1),特别是大于2 mm的颗粒占比明显增加, $C_u=26$, $C_c=0.9$,体现冰川搬运中的混杂分选特性。细颗粒的分布呈现物源区最高,其次是流通区,堆积区最低,反映了水流对细颗粒的分选和输移作用。

2.3 冰碛土浆体流变特性

基于冰碛物质量分数梯度(0%、30%、50%)与容重差异(1.7 t/m^3 、 1.8 t/m^3 、 1.9 t/m^3),对10类试样进行5次重复的旋转流变学测试,取平均值后得到流变响应曲面(剪切速率 $\dot{\gamma}$ 与剪切应力 τ 的关系)。图4结果显示,在低容重组($1.7\sim 1.8\text{ t/m}^3$)条件下,初始剪切阶段试样呈现明显的结构破坏特征,表现为剪切应力的急剧下降(降幅超过60%)。这一过程与松散颗粒骨架的快速失稳密切相关,孔隙流体的迁移与排出进一步加剧了结构的整体破坏,使体系更易发生流动失稳。在中高剪切速率区间,试样应力在恢复过程中出现显著波动,表现出明显的不稳定性。相比之下,高容重组(1.9 t/m^3)试样展现出更强的流动稳定性,其初始屈服应力下降幅度较小,

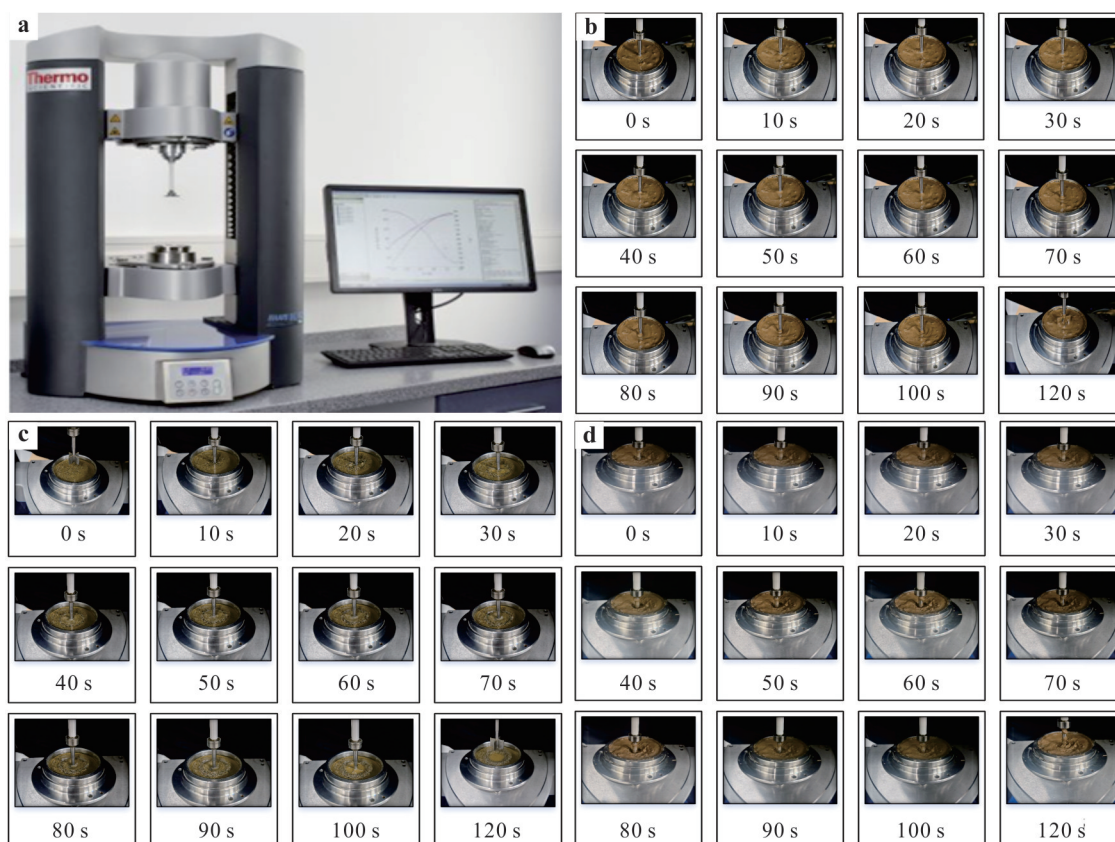


图2 不同容重冰碛土浆体流变试验过程

Fig.2 Rheological test process of moraine soil slurry with different unit weights

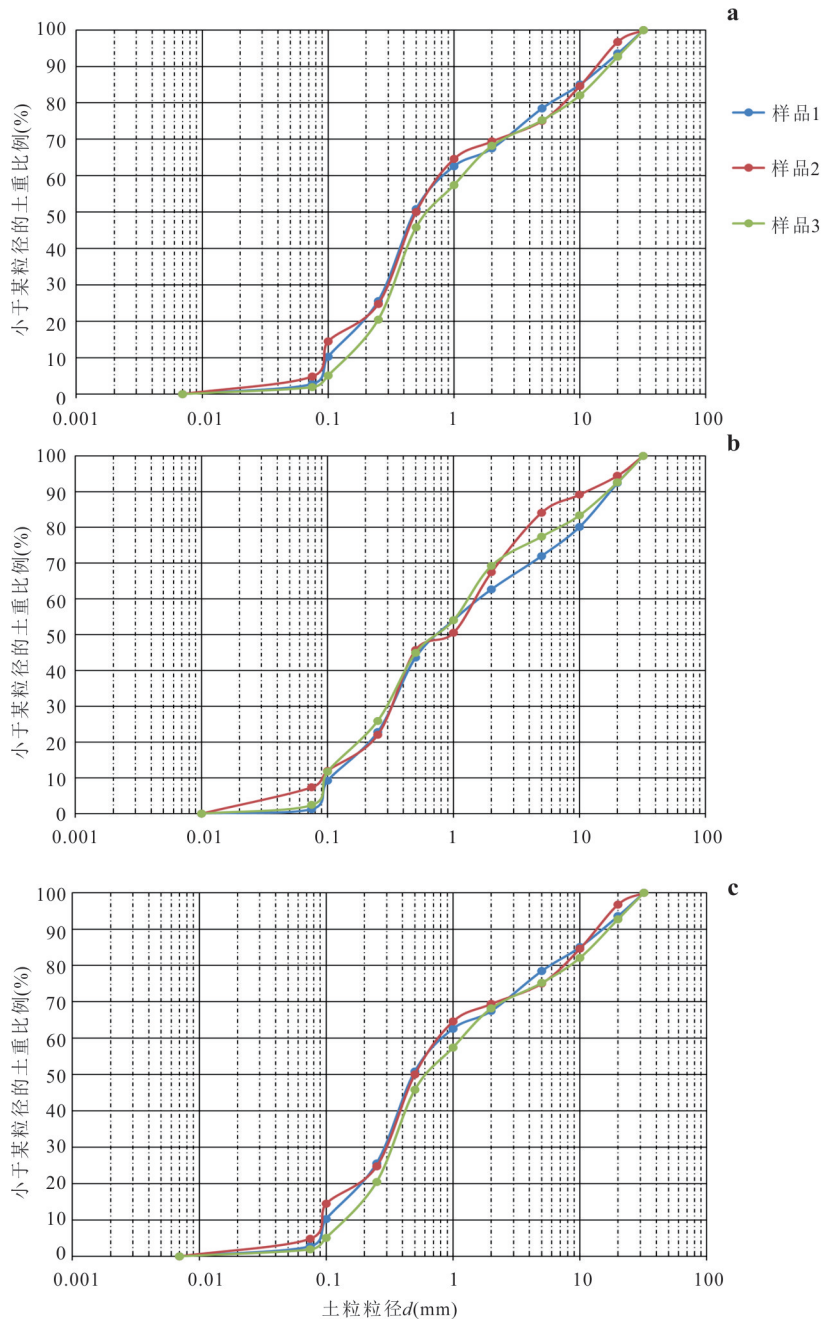


图3 天摩沟土样颗粒级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curves of soil samples from Tianmo Gully
a.物源区;b.流通区;c.堆积区

仅为低容重体系的1/4.即使在结构发生局部破坏后,体系仍能通过残余颗粒接触所形成的力链维持一定的结构完整性,最终黏性流动阶段的应力波动幅度稳定在3%以内,表现出类似于准静态扩散的流变行为.这表明,在高容重条件下,泥石流浆体具有更高的结构稳定性和流动韧性.

从表2中的流变参数对比分析可得,低容重体系(1.7~1.8 t/m³)下,浆体的屈服应力随容重的增

大呈倍数增长,且这一变化远大于在同容重范围内冰碛物含量变化带来的影响.例如,C组的屈服应力较A组增加了86%(图5).与此相反,在高容重体系(1.9 t/m³)中,冰碛物的增强效应明显减弱.以冰碛物含量从30%增至50%为例,I组的屈服应力仅比H组提高了5.8%,这一增幅显著低于低容重体系中同样变化带来的64%的增幅.这一现象表明,在高容重条件下,密实的颗粒网络接近其承载力的极

表 1 不同区域土样颗粒筛分试验数据
Table 1 Sieving test data of soil samples from different zones of Tianmo Gully

| 序号 | 颗粒分布占比(单位:%) | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-----------|--------|------|
| | >20 | 20~10 | 10~5 | 5~2 | 2~1 | 1~0.5 | 0.5~0.25 | 0.25~0.1 | 0.1~0.075 | <0.075 | |
| 堆积区 | 1 | 6.43 | 8.55 | 6.56 | 11.00 | 4.86 | 11.77 | 25.26 | 15.35 | 7.45 | 2.77 |
| | 2 | 3.24 | 12.18 | 9.57 | 5.62 | 4.84 | 14.56 | 25.29 | 10.28 | 9.59 | 4.84 |
| | 3 | 7.27 | 10.65 | 6.88 | 7.02 | 10.75 | 11.64 | 25.38 | 15.33 | 3.16 | 1.92 |
| 平均 | 5.76 | 10.49 | 7.62 | 7.79 | 7.11 | 12.59 | 25.32 | 13.76 | 6.47 | 3.09 | |
| 流通区 | 1 | 7.61 | 12.26 | 8.12 | 9.31 | 8.60 | 10.47 | 20.85 | 13.61 | 7.95 | 1.21 |
| | 2 | 5.58 | 5.29 | 5.01 | 16.66 | 16.94 | 4.81 | 23.74 | 10.03 | 4.61 | 7.34 |
| | 3 | 7.40 | 9.24 | 5.93 | 8.15 | 15.22 | 9.14 | 19.01 | 14.20 | 9.31 | 2.40 |
| 平均 | 6.95 | 9.25 | 6.50 | 11.07 | 13.18 | 8.39 | 21.09 | 12.76 | 7.43 | 3.38 | |
| 物源区 | 1 | 3.28 | 12.05 | 10.78 | 15.98 | 6.56 | 15.25 | 14.37 | 7.44 | 7.71 | 6.58 |
| | 2 | 4.57 | 5.65 | 8.44 | 21.08 | 4.31 | 10.62 | 19.73 | 13.89 | 5.76 | 5.94 |
| | 3 | 8.61 | 7.27 | 15.43 | 10.87 | 12.59 | 11.13 | 11.19 | 5.35 | 8.73 | 8.84 |
| 平均 | 5.49 | 8.33 | 11.55 | 15.98 | 7.82 | 12.33 | 15.10 | 8.89 | 7.40 | 7.12 | |

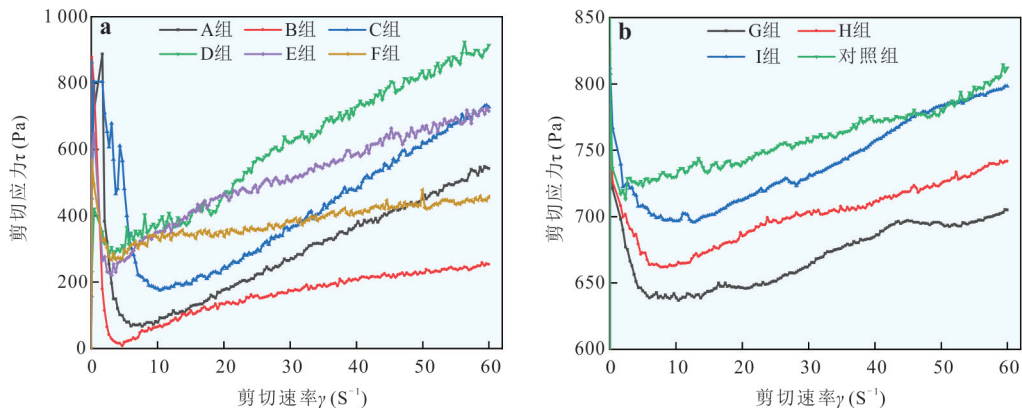


图 4 不同容重试验组流变曲线

Fig.4 Rheological curves of different bulk density experimental groups

表 2 不同分组的流变参数

Table 2 Rheological parameters of different groups

| 组别 | 容重 (t/m ³) | 冰碛物含量 (%) | 屈服应力 τ_0 (Pa) |
|-----|---------------------------|--------------|-----------------------|
| 对照组 | 1.9 | 50 | 587 |
| A组 | 1.7 | 0 | 76 |
| B组 | 1.7 | 30 | 113 |
| C组 | 1.7 | 50 | 142 |
| D组 | 1.8 | 0 | 239 |
| E组 | 1.8 | 30 | 288 |
| F组 | 1.8 | 50 | 326 |
| G组 | 1.9 | 0 | 474 |
| H组 | 1.9 | 30 | 515 |
| I组 | 1.9 | 50 | 545 |

限,冰碛物所带来的强化效果已趋于饱和.值得注意的是,尽管冰碛物的含量相同,不同容重之间的

性能差异对泥石流抗剪强度的影响更为显著,这进一步证明了容重在控制泥石流抗剪强度方面的主导作用.

进一步比对显示,天然冰碛土在高容重下屈服应力达 587 Pa,较同掺量人工配比组高约 8%,印证原状颗粒棱角与天然胶结对流动阻力的潜在贡献.但二者参数差异小于工程允许偏差值,佐证了室内配比试验对冰碛物流变特性模拟的有效性.

3 高位含冰碎屑流物理模型试验

3.1 试验设计与相似比尺

试验采用的冰岩混合体材料由规则立方体冰颗粒(10 mm×10 mm×10 mm)和碎岩颗粒组成,以模拟含冰碎屑流的物源特征.其中,岩石颗粒的级配依据天摩沟物源区、流通区及堆积区土样筛分

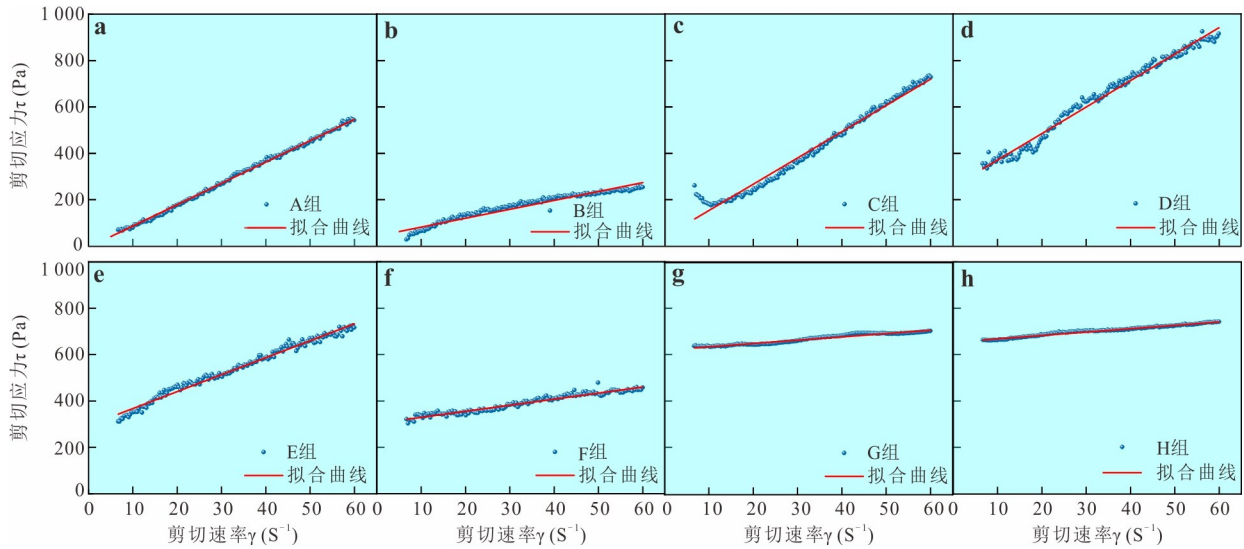


图5 不同组别流变曲线的线性拟合图

Fig.5 Linear fitting diagram of Rheological curves for different groups

表3 物理模型相似比尺

Table3 Similarity scale of physical model

| 比尺类别 | 比尺名称 | 符号 | 比尺数值 | 推导依据 |
|-------|-------|------------------|--------|---|
| 几何比尺 | 水平比尺 | λ_L | 10^2 | 原型与模型几何长度之比 |
| | 面积比尺 | λ_A | 10^4 | $\lambda_A = \lambda_L^2$ |
| | 体积比尺 | λ_V | 10^6 | $\lambda_V = \lambda_L^3$ |
| | 流速比尺 | λ_u | 10 | $\lambda_u = \lambda_L^{0.5}$ |
| 运动学比尺 | 时间比尺 | λ_t | 10 | $\lambda_t = \lambda_L / \lambda_u$ |
| | 流量比尺 | λ_q | 10^3 | $\lambda_q = \lambda_u \lambda_L^2$ |
| 动力学比尺 | 动力比尺 | λ_F | 10^6 | $\lambda_F = \lambda_p \lambda_L^3 \lambda_g$ |
| | 容重比尺 | λ_γ | 1 | 弗劳德相似要求 |
| 材料比尺 | 级配比尺 | λ_d | 1 | 模拟原型材料组成 |
| | 孔隙率比尺 | λ_n | 1 | 模拟原型堆积结构 |

结果的平均值进行配制,具体粒径占比为: $>20\text{ mm}$ (8.39%)、 $20\sim 10\text{ mm}$ (11.68%)、 $10\sim 5\text{ mm}$ (10.88%)、 $5\sim 1\text{ mm}$ (23.30%)、 $1\sim 0.1\text{ mm}$ (45.73%),以最大程度还原原型碎屑物的级配特征.通过精细筛分控制,确保试验材料的颗粒组成与野外样品相似,从而保障其物理力学性质与天然含冰碎屑物流源的一致性.

基于弗劳德数相似准则($Fr_p = Fr_m$),确定相似比尺为:水平比尺 $\lambda_L = 100$,流速比尺 $\lambda_u = 10$,时间比尺 $\lambda_t = 10$,动力比尺 $\lambda_F = 10^6$,材料容重、级配与孔隙率相似比均为1:1(表3).

3.2 试验方案

本试验在智能温控条件下开展(图6),试验平台由3部分组成:斜槽系统总长5 m,槽体长度3 m、

宽0.3 m、高0.35 m,坡度设为 25° ,以代表天摩沟沟道的平均坡度;低温环境控制试验温度为 -1°C ,旨在模拟青藏高原东南部冰岩型灾害的现场条件;监测系统则包括高速摄像机、PIV系统、加速度传感器和三维激光扫描系统,能够精确记录冰岩碎屑流的启动、运动和堆积过程.依托该智能温控试验平台,本试验设计了9组不同总质量和含冰量的试验方案(表4).

3.3 试验结果

3.3.1 动力响应特征 通过加速度传感器采集的冰岩混合体运动数据,导入Origin软件分析,绘制加速度时程曲线并进行频谱分析及滤波处理,定量提取加速度幅值、振动频率和能量分布等关键参数.

加速度响应数据显示,冰岩混合体的动力稳定性和破坏机制显著受含冰量和混合体质量的影响(图7).在相同含冰量条件下,混合体质量的增加通过惯性效应显著增强动力响应强度.以25%含冰量为例,混合体质量从10 kg增加至20 kg时,加速度波动幅度逐渐增大,振荡强度显著提升,反映了混合体质量增加促进了动能积累和能量的释放.50%含冰量工况下,混合体质量从10 kg增加至15 kg时,加速度峰值跃升至 -2 m/s^2 ,表现出惯性效应放大.

在相同质量条件下,含冰量的增加通过改变混合体的力学特性重塑了动力响应模式.25%含冰量下,冰主要以间隙填充形式存在,混合体力学性质以岩石颗粒的摩擦为主,胶结作用较弱,导致动力

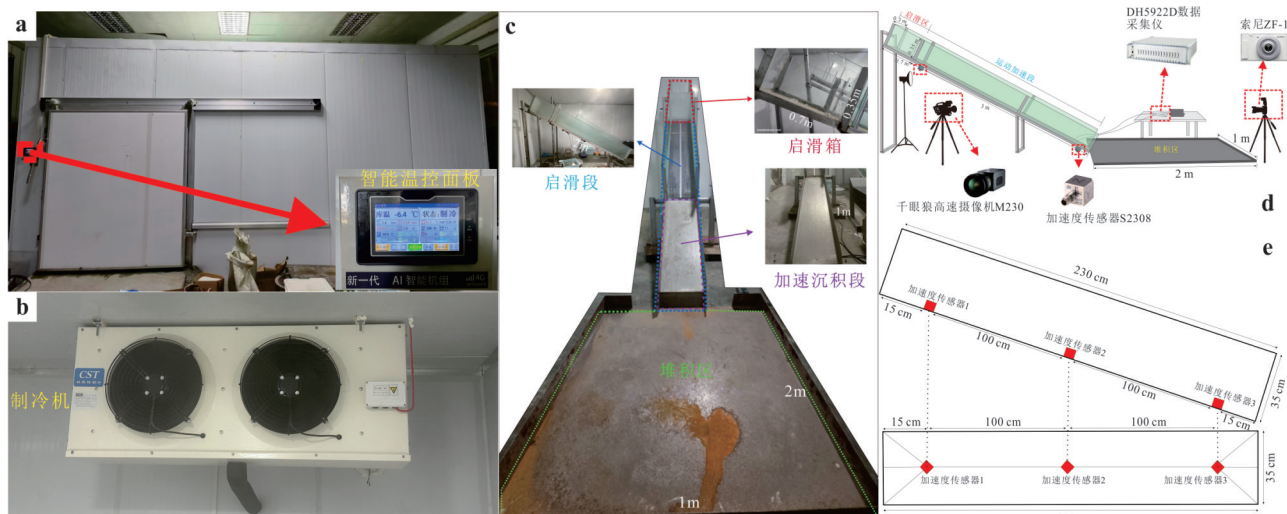


图 6 智能温控试验系统与传感器布设

Fig.6 Intelligent temperature-controlled test system and sensor layout

表 4 基于原型岩粒级配合含冰碎屑流试验方案

Table 4 Test scheme of rock-ice avalanche-debris flow based on prototype rock particle gradation

| 试验组号 | 总质量(kg) | 含冰量 | 冰质量(kg) | 岩石质量(kg) | 岩石级配(原型) |
|------|---------|-----|---------|----------|--|
| W1 | 10 | 25% | 2.50 | 7.50 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W2 | 10 | 50% | 5.00 | 5.00 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W3 | 10 | 75% | 7.50 | 2.50 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W4 | 15 | 25% | 3.75 | 11.25 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W5 | 15 | 50% | 7.50 | 7.50 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W6 | 15 | 75% | 11.25 | 3.75 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W7 | 20 | 25% | 5.00 | 15.00 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W8 | 20 | 50% | 10.00 | 10.00 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |
| W9 | 20 | 75% | 15.00 | 5.00 | 8.394%/11.684%/10.884%/23.304%/45.734% |

响应较为稳定.而 50% 含冰量下,冰的胶结作用显著增强,形成了相对完整的冰-岩胶结体系,导致动力响应强度增加.此时,冰的低温胶结特性使混合物易于发生突发性胶结断裂,表现出更高的波动幅度和更长的持续时间.

进一步分析表明,低含冰量时,混合物表现为散体颗粒特性,动力响应主要由质量控制的惯性碰撞主导,波动幅度随质量递增而增加.而高含冰量的胶结作用使混合物呈现整体受力-脆性失稳特征,动力响应则由胶结断裂与惯性效应共同控制.同质量下,波动强度显著高于低含冰量工况,且随着含冰量的增加,波动幅度逐步趋于饱和,反映出含冰量对混合体力学阈值的调控作用.

3.3.2 运动过程分析 如图 8 所示,含冰碎屑流在不同工况下的速度-时间曲线表现出显著差异,这些差异主要由惯性效应、含冰量引起的润滑效应及

岩粒级配的骨架效应共同作用.在 10 kg 工况下,冰岩混合物启动后加速阶段较短,速度迅速达到峰值,随后进入平稳衰减阶段,表明小质量体系的动量较小,启动阶段的摩擦阻力较大.随着质量增加,速度曲线的加速特征更加显著.在较大质量体系下,混合物具有更强的惯性,能够克服更多的内摩擦和槽体摩擦,导致加速过程更为迅速.大质量工况下,速度衰减平缓,表明在运动过程中动量维持更有效.在不同含冰量条件下,速度-时间曲线也存在显著差异.例如,50% 含冰量时,冰粒的润滑效应增强,速度峰值和加速速率均较高,而低含冰量条件下润滑效应较弱,加速阶段较短,衰减较快.

基于流速剖面特征进一步计算剪切速率,以揭示含冰碎屑流内部的剪切变形规律.在不同工况下,剪切速率峰值差异明显.在高含冰量条件下,剪切速率峰值显著高于低含冰量工况.这一现象表

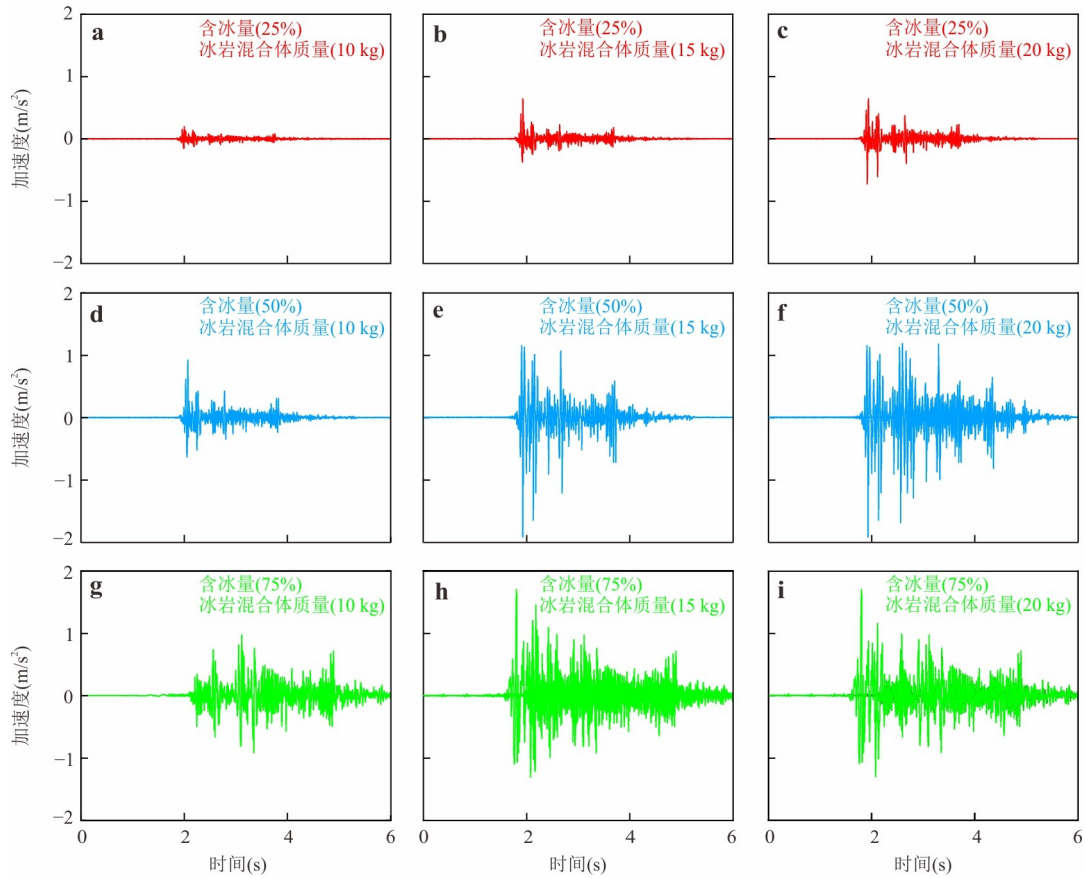


图 7 不同工况加速度数据

Fig.7 Acceleration data under different working conditions

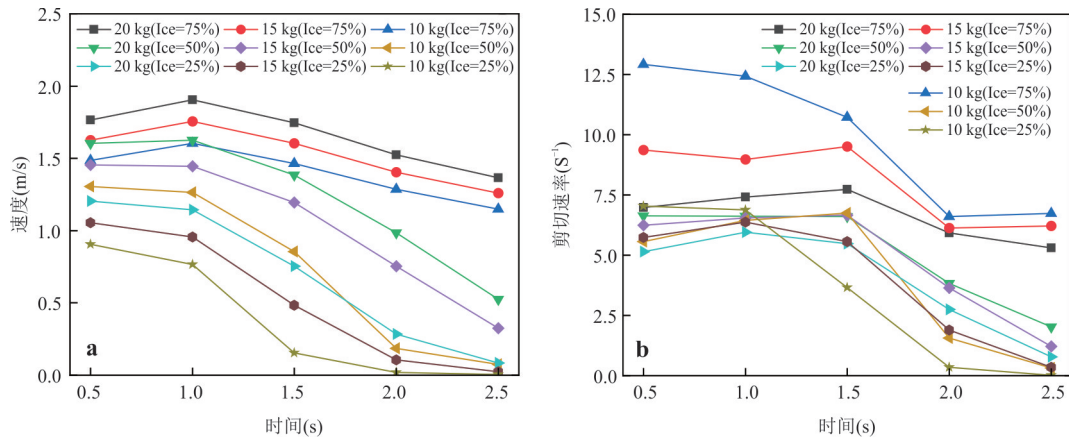


图 8 不同工况速度/剪切速率

Fig.8 Velocity and shear rate under different working conditions

明,冰的润滑效应降低了颗粒间的摩擦力,使得上表面与底面的速度差能够充分发展,导致更高的剪切速率.同时,较小的质量体系表现出较高的剪切速率峰值,这是由于其较低的颗粒接触压力使得动量传递较为高效.相比之下,较大质量体系则表现出更为平缓的剪切速率峰值,因为大质量体系的动

量均化效应使得上表面与底面的速度差较小,导致剪切速率的峰值相对较低.

3.3.3 堆积特征及影响范围分析 试验结果表明(图 9),冰岩混合体的冲出距离与含冰量及混合体总质量呈显著正相关.在 25% 含冰量条件下,冲出距离为 55~90 cm,堆积形状较为集中,摩擦力主导

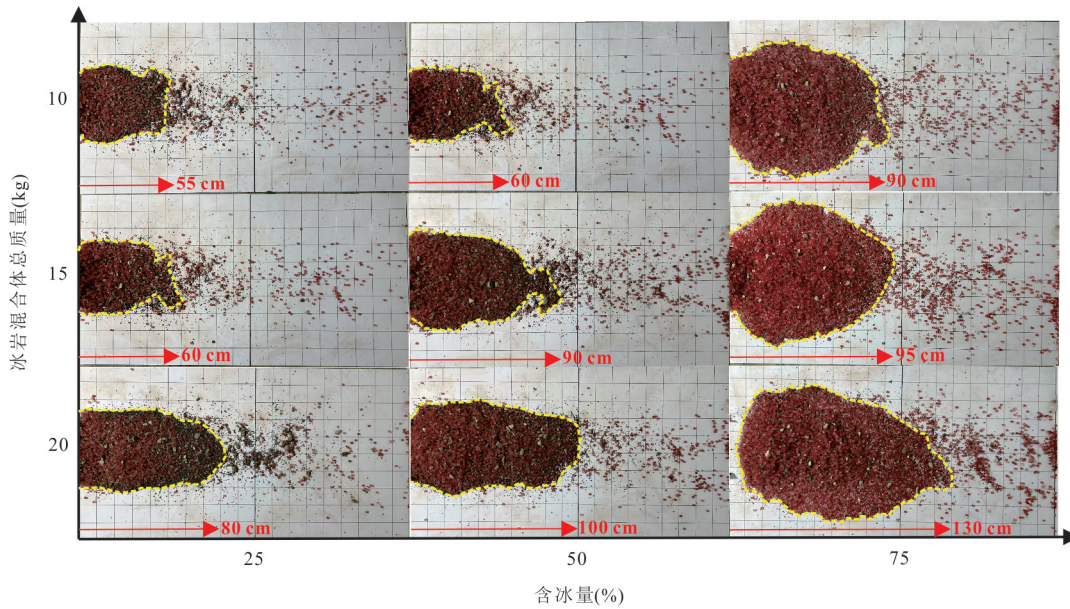


图9 不同工况下含冰碎屑流冲出距离影响范围

Fig.9 The influence range of the runout distance of ice-bearing debris flows under different working conditions

流动.在50%含冰量条件下,冲出距离增加至60~95 cm,堆积范围扩大,流动性增强;75%含冰量时,冲出距离进一步增至80~130 cm,堆积范围最广,流动性增强,表明冰的润滑效应显著减少摩擦并增强流动性.

在不同冰岩混合体的试验组中,堆积体的形态和冲出距离随含冰量和质量的变化表现出明显差异.对于10 kg组,在25%含冰量时,堆积体形态较为集中,冲出距离为55 cm,随着含冰量增至75%,堆积形态扩展为较宽的扇形,冲出距离增至90 cm,表明冰的润滑效应使混合体能够更远地流动并堆积.在15 kg组中,25%含冰量时冲出距离为60 cm,50%含冰量时增至90 cm,而75%含冰量时进一步增至95 cm,增加的质量显著提高了流动的动能,结合高含冰量的润滑作用,堆积体表现出更广泛的扩展.对于20 kg组,25%含冰量时堆积范围最小,冲出距离为80 cm,而在50%和75%含冰量条件下,冲出距离分别增至100 cm和130 cm,堆积形态进一步扩展,大质量的冰岩混合体在高含冰量条件下展现了显著的流动性,导致堆积体呈现更广泛的扇形形态.通过比较不同质量下的堆积特征,发现质量的增加对低含冰量条件下的堆积范围影响较小,而在高含冰量条件下,质量的增加有效促进了动能积累,使流动更加顺畅,堆积形态更为广泛.从堆积体的空间分布来看,低含冰量条件下堆积体较为集中,随着含冰量增大,冰的润滑效应使堆积体形态

逐渐变宽,流动性增加,堆积物质分布在更远的区域.总体来说,冲出距离与含冰量和质量呈正相关关系,尤其在含冰量(75%)和大质量(20 kg)条件下,冲出距离达到最大值,堆积物质的分布在这些条件下向远端扩展的趋势更加明显.

3.3.4 速度场演化 含冰碎屑流的速度场受含冰量和质量的耦合影响,呈现不同的动态演化规律(图10).在低含冰量条件下,冰粒填充颗粒间隙,融化后形成不连续水膜,导致颗粒间摩擦阻力主导流动,表现为局部高速区零散分布.10 kg工况下,仅少数颗粒通过局部水膜润滑快速滑动;15 kg工况下,高速区略微扩大,仍保持孤立分布;20 kg工况下,高速区集中,低速区仍占较大比例.这表明,低润滑条件下,摩擦阻力限制颗粒同步运动,只有少数颗粒突破阻力形成局部高速区.

在中含冰量条件下,冰粒的占比提升,融化后形成连续水膜,显著降低颗粒间摩擦,润滑效应主导流动.此时,速度场呈现集中高速化和流动有序性提升的特征.10 kg工况下,高速区显著扩大,且速度方向沿斜槽向下的一致性增强;在15 kg工况下,高速区形成带状分布,速度矢量方向高度统一,表现出颗粒间协同运动性提升;在20 kg工况下,虽然速度峰值略有降低,但流速分布更均匀,体现了润滑效应对摩擦的有效削弱,且颗粒的协同运动性增强,流动稳定性提升.

在高含冰量条件下,冰粒形成完全连续的水

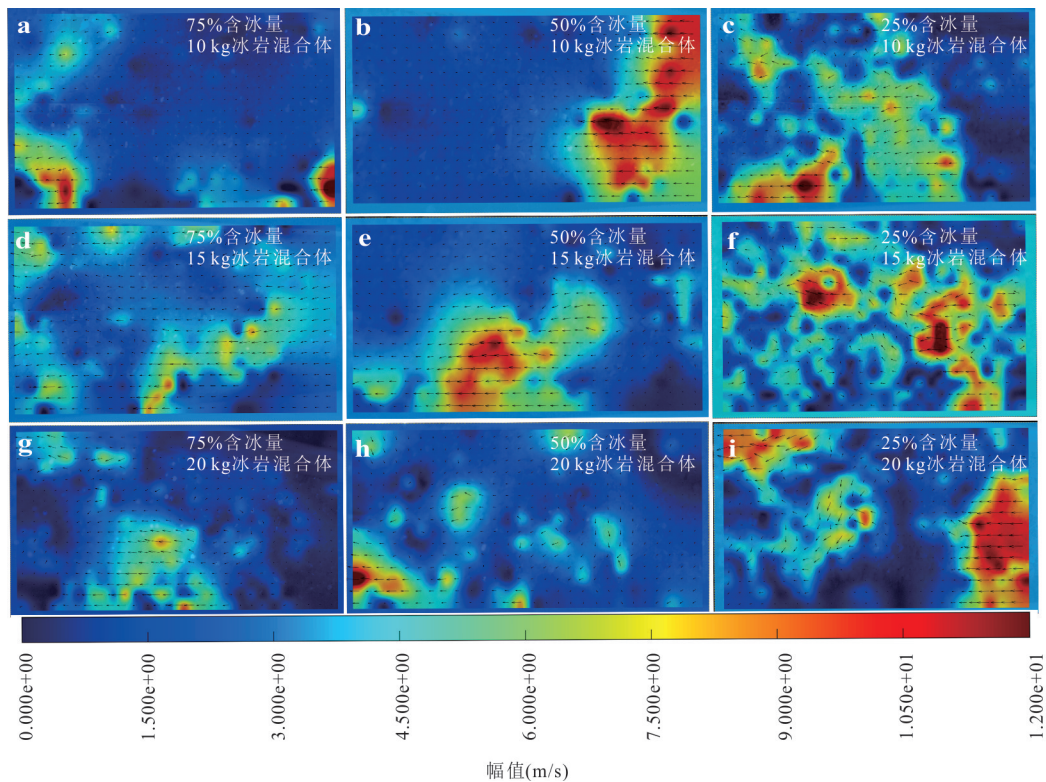


图 10 不同工况 PIV 处理分析

Fig.10 PIV processing and analysis under different working conditions

膜,极大地削弱了摩擦阻力,速度场呈现均匀分布、整体协同运动的特征.10 kg 工况下,高速区仍集中于顶部和底部,但速度方向保持一致;在 15 kg 工况下,速度场均匀性进一步提升,高速区广泛分布且速度矢量无明显紊乱;在 20 kg 工况下,速度场最为均匀,只有小幅波动,反映了强润滑条件下颗粒间无显著摩擦阻力,混合物以整体流态沿斜槽运动,流动有序性达到最优.

4 讨论

4.1 含冰量与质量对流动机制的耦合影响

含冰量与质量对含冰碎屑流冲出距离的耦合控制效应揭示了二者在颗粒尺度相互作用机制上的关联作用.纵向对比显示,在 10 kg、15 kg 和 20 kg 质量条件下,含冰量由 25% 增至 75% 时,冲出距离增幅分别达到 63.6%、58.3% 和 62.5%,且稳定在 58%~64% 的狭窄区间内.这一稳定性增幅表明,含冰量对流态转变的调控本质上源于其对颗粒间接触力学行为的根本性改变:当含冰量处于 25% 的低水平时,冰粒主要以离散的间隙填充物形式赋存于碎屑颗粒之间,未能形成连续的胶结网络,混合

体的力学响应由岩屑颗粒的滚动摩擦与滑动摩擦主导,能量通过颗粒碰撞与摩擦迅速耗散,导致冲出距离受限;随着含冰量攀升至 75%,冰粒在剪切作用下逐渐融化成液态水膜,包裹于颗粒表面并填充孔隙,将颗粒间的点接触转变为流体润滑的间接接触,显著降低了等效摩擦系数,使体系进入整体协同的润滑流态,动能得以高效维持.横向对比进一步揭示了质量惯性效应的动力学行为:在 25% 含冰量条件下,质量由 10 kg 增至 20 kg 使冲出距离增加 45.5%,而在 75% 含冰量条件下,相同质量增幅带来的绝对增量从 25 cm 提升至 40 cm,这表明惯性力的增强在润滑作用下能够更有效地转化为动能积累.当摩擦效应被削弱后,惯性力主导的动量传递效率显著提升,碎屑流整体的速度衰减曲线趋于平缓.

含冰量与质量的耦合呈现显著的非线性增强特征:20 kg 质量组中含冰量变化带来的 50 cm 冲出距离增量,远高于 10 kg 组的 35 cm.这一差异的力学本质在于,高质量体系不仅提供了更强的惯性驱动力,还通过更高的法向应力促进颗粒间水膜的均匀分布与持续存在,使润滑效应的有效作用时间延

长;惯性力与润滑效应的协同作用形成了正反馈机制,即润滑降低了运动阻力,使惯性力更充分地转化为动能,而惯性力的持续作用又维持了颗粒间的剪切稀化状态,进一步强化了润滑效果.综上,含冰量通过控制冰的存在形态及其对颗粒接触网络的调控,决定了流态转变的阶段方向;质量则通过惯性力调控颗粒碰撞频率与能量传递效率,二者在“摩擦—胶结—润滑”的动态转化过程中形成了主次关系可转换的耦合机制,为深入理解冰—岩混合体系在多因素耦合条件下的超强运动性提供了颗粒力学层面的理论依据.

4.2 基于修正模型的含冰碎屑流冲出影响范围分析

为了更准确地描述含冰碎屑流的冲出行为,本研究提出了一种考虑质量、含冰量、摩擦系数及扩散效应的修正模型,结合实际实验数据进行了拟合与验证.

4.2.1 冲出距离与摩擦系数模型 修正后的模型通过引入摩擦系数 $\mu_f(I, m)$ 考虑质量、含冰量和摩擦特性对冲出距离 L 的影响.该摩擦系数包括基础摩擦系数 μ_c 修正系数以及润滑效应、黏结效应的综合考虑:

$$L = \frac{h}{\mu_f(I, m)} (1 - \mu_c \cot \theta). \quad (1)$$

式中:释放高度 $h=1.75$ m;斜槽倾角 $\theta=25^\circ$;滑效率因子 $f(P(d))=0.328$;黏结效率因子 $g(P(d))=0.4573$.

摩擦系数 $\mu_f(I, m)$ 为:

$$\mu_f(I, m) = [\mu_{f_0} - \alpha I e^{-\beta I} f(P(d)) + \gamma I^2 g(P(d))] \left(\frac{m}{m_0}\right)^{-\delta}. \quad (2)$$

通过非线性最小二乘法拟合,将拟合参数代入(拟合参数为: $\mu_c \approx 0.118$; $\mu_{f_0} \approx 0.572$; $\alpha \approx 0.605$; $\beta \approx 0.925$; $\gamma \approx 0.305$; $-\delta \approx 0.185$)得到预测模型:

$$L = \frac{1.486}{\mu_f(I, m)}, \quad (3)$$

该模型决定系数 $R^2=0.943$,能够较好地拟合实验数据.

4.2.2 量化扩散宽度与质量、含冰量关系 基于横向扩散模型,结合质量和含冰量对扩散宽度 D 的影响,得出了以下修正模型:

$$D = W_0 + 2\beta(I, m) \cdot L, \quad (4)$$

式中:槽体宽度 $W_0=0.3$ m; $f_D(P(d))=0.328$;扩散系数 $\beta_0=0.125$;冰屑对扩散的增强系数 $\lambda_1=1.82$;扩散增强的饱和系数 $\lambda_2=1.20$;质量影响指数 $\epsilon=0.208$.

$$\beta(I, m) = \beta_0 \times [1 + \lambda_1 I e^{-\lambda_2 I} f_D(P(d))] \left(\frac{m}{m_0}\right)^{-\epsilon}. \quad (5)$$

通过拟合得到预测模型:

$$D = 2\beta(I, m) \cdot L + 0.3, \quad (6)$$

该模型决定系数 $R^2=0.946$.

4.2.3 综合影响范围模型 综合冲出距离 L 和扩散宽度 D ,得到了含冰碎屑流的影响范围 S 的模型表达式:

$$S = L \times D, \quad (7)$$

通过代入具体表达式,可以得到的显函数:

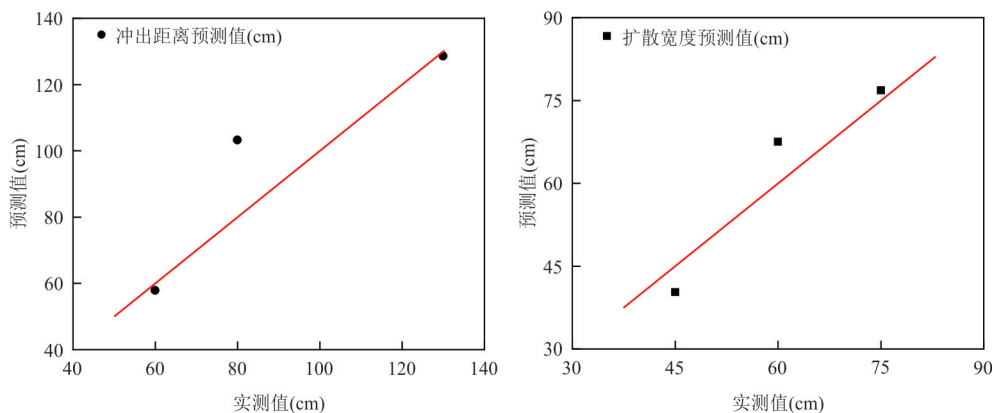


图 11 模型验证

Fig.11 Model validation diagram

$$S(I, m) = \frac{0.4458}{\mu_f(I, m)} + \frac{4.416\beta(I, m)}{(\mu_f(I, m))^2}. \quad (8)$$

4.2.4 模型验证 为检验所建模型的预测能力,将 9 组试验数据按含冰量与质量覆盖范围分为拟合组(6 组)与验证组(3 组)(图 11). 基于拟合组数据重标定模型参数后,对验证组的冲出距离与扩散宽度进行预测. 结果表明,模型预测值与实测值吻合良好,冲出距离的平均绝对百分比误差(MAPE)为 2.67%,扩散宽度为 3.15%,均低于 5% 的工程可接受阈值. 验证组涵盖了“低质量—高含冰量”(W3)与“高质量—低含冰量”(W7)等极端工况,模型仍能准确预测(相对误差 < 4%),证实了所建模型具有良好的泛化能力与预测可靠性.

5 结论

本研究在智能温控低温环境下,结合流变测试与物理模型试验再现含冰碎屑流失稳—运动—堆积全过程,揭示容重与冰碛物含量对屈服结构的影响机制,定量刻画含冰量与质量对流变特性、流动模式、速度场及冲出距离的控制规律,并构建验证了考虑摩擦—润滑与横向扩散的多元非线性“冲出距离—扩散宽度—影响范围”一体化预测模型,为灾害影响范围评估与重大工程安全选线提供量化依据.

(1)通过对不同容重和冰碛物含量条件下的泥石流浆体进行流变测试,发现容重对泥石流浆体的流变特性具有显著影响. 低容重体系(1.7~1.8 t/m³)下,浆体的屈服应力随容重的提高呈倍数增长,且这一变化远大于冰碛物含量变化带来的影响. 而在高容重体系(1.9 t/m³)中,冰碛物含量对屈服应力的增强效应明显减弱,显示出密实的颗粒网络接近承载力极限,冰碛物的强化效果趋于饱和.

(2)通过开展不同含冰量与总质量条件下含冰碎屑流运动过程的物理模型试验,探明了含冰量与总质量对其冲出距离的影响规律与耦合作用机制. 结果表明:含冰碎屑流冲出距离与含冰量、总质量均呈显著正相关,二者存在非线性耦合增强效应. 含冰量通过调控颗粒接触网络主导体系流态转变,低含冰量(25%)条件下体系以颗粒摩擦效应为主,冲出距离有限;高含冰量(75%)条件下冰体融化形成连续水膜,颗粒间等效摩擦系数显著降低,体系进入润滑主导的协同流动模式. 总质量通过惯性效应强化体系动能积累,且在高含冰量背景下,惯性

力对冲出距离的边际贡献更为突出. 二者的耦合作用呈现主次关系动态转换的特征:含冰量决定了体系“摩擦—胶结—润滑”力学行为的演化方向,总质量调控力学行为转化强度与能量传递效率,二者协同控制了含冰碎屑流的长距离超强运移能力.

(3)在考虑质量效应、含冰量调制的摩擦—润滑机制及横向扩散作用的基础上,建立了含冰碎屑流“冲出距离—扩散宽度—影响范围”一体化定量模型. 模型经试验数据非线性拟合验证(冲出距离与扩散宽度的拟合优度分别为 $R^2=0.943$ 和 $R^2=0.946$),表明灾害影响范围随冰岩混合体质量与含冰量增加而显著扩大,可为冲出影响范围的工程评估提供可靠量化依据.

References

- Arenson, L. U., Springman, S. M., 2005. Mathematical Descriptions for the Behaviour of Ice-Rich Frozen Soils at Temperatures Close to 0 °C. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2): 431–442. <https://doi.org/10.1139/t04-109>
- Chang, M., Dou, X. Y., Luo, C. P., et al., 2025. Multi-Scenario Simulations for Quantitative Assessment of Debris Flow Chain Hazards in Southwestern China. *Catena*, 253: 108900. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108900>
- Chang, M., Tang, C., Dou, X. Y., 2017. Mechanism and Hazards of Typical Glacier-Lake Burst in Southeastern Tibet. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 15(6): 115–121 (in Chinese with English abstract).
- Chang, M., Xu, Q., Wang, Y. S., et al., 2024. Development Characteristics and Disaster-Causing Mechanisms of the “8·3” Catastrophic Flash Flood and Debris Flow in Guzan, Kangding, Sichuan Province. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(11): 2136–2144 (in Chinese with English abstract).
- Cudmani, R., Yan, W., Schindler, U., 2023. A Constitutive Model for the Simulation of Temperature-, Stress- and Rate-Dependent Behaviour of Frozen Granular Soils. *Géotechnique*, 73(12): 1043–1055. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00012>
- Du, G. L., Zhang, Y. S., Yang, Z. H., et al., 2017. Estimation of Seismic Landslide Hazard in the Eastern Himalayan Syntaxis Region of Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(2): 658–668. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13124>

- Gao, B., Zhang, J. J., Wang, J. C., et al., 2019. Formation Mechanism and Disaster Characteristics of Debris Flow in the Tianmo Gully in Tibet. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46(5): 144–153 (in Chinese with English abstract).
- Gao, H. Y., Gao, Y., Yin, Y. P., et al., 2022. New Scientific Issues in the Study of High-Elevation and Long-Runout Landslide Dynamics in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 1090–1103 (in Chinese with English abstract).
- Guo, B., Zang, W. Q., Yang, F., et al., 2020. Spatial and Temporal Change Patterns of Net Primary Productivity and Its Response to Climate Change in the Qinghai-Tibet Plateau of China from 2000 to 2015. *Journal of Arid Land*, 12(1): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0070-1>
- Hu, W. T., Yao, T. D., Yu, W. S., et al., 2018. Advances in the Study of Glacier Avalanches in High Asia. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(6): 1141–1152 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. D., Wang, R., Gu, D. M., et al., 2022. Temperature and Ice Form Effects on Mechanical Behaviors of Ice-Rich Moraine Soil of Tianmo Valley nearby the Sichuan-Tibet Railway. *Engineering Geology*, 305: 106713. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106713>
- Li, F. P., Zhang, Y. Q., Xu, Z. X., et al., 2013. The Impact of Climate Change on Runoff in the Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 505: 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.052>
- Li, L., Wang, T., Wei, R. M., et al., 2026. Study on the Development Characteristics and Dynamic Process of High-Altitude Geohazards in Tianmo Gully, Southeastern Xizang. *Journal of Catastrophology*, 41(1): 71–80 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. R., Fan, G., Lin, Z. Y., et al., 2025. Experimental Study on Model of Ice Rockfall Debris Flow Blocking River and Dam Break. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(S1): 101–112 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. X., Guo, C. B., Xin, P., et al., 2025. Formation Mechanism and Research Prospect of Typical High-Altitude Debris Flow Disasters in the Eastern Tibetan Plateau. *Geological Survey of China*, 12(3): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Nian, T. K., Zhao, R. D., Zheng, D. F., et al., 2024. Advances in the Study of Ice-Rock Avalanche Disaster Chains in Yarlung Zangbo River Basin in Southeast Tibet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 55(10): 1146–1162 (in Chinese with English abstract).
- Pudasaini, S. P., Krautblatter, M., 2014. A Two-Phase Mechanical Model for Rock-Ice Avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(10): 2272–2290. <https://doi.org/10.1002/2014JF003183>
- Qu, Y. P., Xiao, J., Pan, Y. W., 2018. Preliminary Analysis on Formation Conditions of Glacier Debris Flow in Southeast Tibet—A Case of Glacial Debris Flow in Tianmo Gully. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 49(12): 177–184 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Y. H., Yang, Q. Q., Cheng, Q. G., et al., 2021. Solid-Liquid Interaction Caused by Minor Wetting in Gravel-Ice Mixtures: A Key Factor for the Mobility of Rock-Ice Avalanches. *Engineering Geology*, 286: 106072. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106072>
- Sansone, S., Zugliani, D., Rosatti, G., 2021. A Mathematical Framework for Modelling Rock-Ice Avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*, 919: A8. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.348>
- Schneider, D., Huggel, C., Haeblerli, W., et al., 2011. Unraveling Driving Factors for Large Rock-Ice Avalanche Mobility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(14): 1948–1966. <https://doi.org/10.1002/esp.2218>
- Shastri, A., Sánchez, M., Gai, X. R., et al., 2021. Mechanical Behavior of Frozen Soils: Experimental Investigation and Numerical Modeling. *Computers and Geotechnics*, 138: 104361. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104361>
- 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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(2): 643–656 (in Chinese with English abstract).
- Tang, M. G., Wang, L. N., Liu, X. X., et al., 2022. Distribution and Risk of Ice Avalanche Hazards in Tibetan Plateau. *Earth Science*, 47(12): 4647–4662 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Journal of Geomechanics*, 31(5): 940–959 (in Chinese with English abstract).
- Van der Woerd, J., Tapponnier, P., Ryerson, F. J., et al., 2004. Seismic and Structural Controls on Rock-Ice Avalanche Initiation and Mobility in the Himalayas. *Geophysical Journal International*, 157(2): 655–662.
- Wei, R. Q., Zeng, Q. L., Davies, T., et al., 2018. Geohaz-

- ard Cascade and Mechanism of Large Debris Flows in Tianmo Gully, SE Tibetan Plateau and Implications to Hazard Monitoring. *Engineering Geology*, 233: 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.013>
- Wang, Y. F., Cheng, Q. G., Lin, Q. W., et al., 2025. Research on High-Speed and Long-Runout Landslides in the Qinghai-Tibet Plateau: From Geological Phenomena to Dynamic Mechanisms. *Earth Science*, 50(10): 4071–4095 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. L., Yin, Y. P., Hu, X. W., et al., 2023. Block-Grain Phase Transition in Rock Avalanches: Insights from Large-Scale Experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(11): e2023JF007204. <https://doi.org/10.1029/2023JF007204>
- Zhang, Y. S., Ren, S. S., Guo, C. B., et al., 2022. Multi-Dynamic and Multi-Phase Evolution of High-Position Avalanche Hazards on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42(2): 310–318 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. S., Li, X., Zheng, D. H., et al., 2021. The Joint Driving Effects of Climate and Weather Changes Caused the Chamoli Glacier-Rock Avalanche in the High Altitudes of the India Himalaya. *Scientia Sinica (Terrae)*, 51(12): 2112–2125 (in Chinese).
- ### 中文参考文献
- 常鸣, 唐川, 窦向阳, 2017. 藏东南典型冰湖溃决机制及危险性研究. *南水北调与水利科技*, 15(6): 115–121.
- 常鸣, 许强, 王运生, 等, 2024. 四川康定姑咱“8·3”特大山洪泥石流发育特征及孕灾成因研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 49(11): 2136–2144.
- 高波, 张佳佳, 王军朝, 等, 2019. 西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征. *水文地质工程地质*, 46(5): 144–153.
- 高浩源, 高杨, 殷跃平, 等, 2022. 青藏高原高位远程滑坡动力学研究的新问题. *地质力学学报*, 28(6): 1090–1103.
- 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. *冰川冻土*, 40(6): 1141–1152.
- 李禄, 王腾, 魏汝明, 等, 2026. 藏东南天摩沟高位链式灾害发育特征及动力学过程研究. *灾害学*, 41(1): 71–80.
- 刘大瑞, 范刚, 林子钰, 等, 2025. 冰岩崩碎屑流堵江及溃坝模型试验研究. *岩石力学与工程学报*, 44(增刊 1): 101–112.
- 刘吉鑫, 郭长宝, 辛鹏, 等, 2025. 青藏高原东部典型高位泥石流灾害成因机制与研究展望. *中国地质调查*, 12(3): 1–18.
- 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.
- 屈永平, 肖进, 潘义为, 2018. 藏东南地区冰川泥石流形成条件初步分析: 以天摩沟冰川泥石流为例. *水利水电技术*, 49(12): 177–184.
- 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.
- 汤明高, 王李娜, 刘昕昕, 等, 2022. 青藏高原冰崩隐患发育分布规律及危险性. *地球科学*, 47(12): 4647–4662.
- 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. *地质力学学报*, 31(5): 940–959.
- 王玉峰, 程谦恭, 林棋文, 等, 2025. 青藏高原高速远程滑坡研究: 从地质现象到动力学机理. *地球科学*, 50(10): 4071–4095.
- 张永双, 任三绍, 郭长宝, 等, 2022. 青藏高原东缘高位崩滑灾害多动力多期次演化特征. *沉积与特提斯地质*, 42(2): 310–318.
- 周玉杉, 李新, 郑东海, 等, 2021. 气候变化和异常天气共同导致印度杰莫利冰-岩崩塌. *中国科学: 地球科学*, 51(12): 2112–2125.