https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.158

高速远程冰-岩碎屑流研究进展

杨情情[1,2],郑欣玉[1],苏志满[3],程谦恭[1,2*],任雨豪[1],侯本勇[1]

1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川成都 611756
2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室,四川成都 611756
3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所,四川成都 610041

摘 要: 冰-岩碎屑流是高寒山区陡峭山体斜坡区冰崩、岩崩或滑坡解体后形成的冰屑、岩块和土颗粒混合体高速流动现象.由于裹挟了冰屑,冰-岩碎屑流具有超强的运动性,屡屡引发震惊世人的灾难性事件,是全球气候变暖大背景下地质灾害研究的热点与前沿问题.通过对近40余年来的研究进展进行梳理和评述,指出了冰-岩碎屑流的概念由来和主流定义方法,阐述了其成因机制的气候敏感性,结合典型实例论述了区域发育特征,重点分析了运动特征、减阻机理和冰屑影响机制.冰-岩碎屑流的超强运动性被认为与低摩擦冰减阻机理、摩擦热融减阻机理、侧限约束减阻机理密切相关.冰屑作为材料组分和融水来源,能够降低界面摩擦、改变冰-水-岩相互作用,进而形成复杂的热-水-力耦合作用.今后应加强研究冰-岩碎屑流事件的成因机制和时空分布规律、运动特性和冰屑影响机制、过程演化观测与预警评估技术,以期揭示冰-岩碎屑流运动机理,为冰-岩碎屑流及链生灾害的科学减灾提供有力支撑.

关键词: 冰-岩碎屑流;运动机理;冰屑影响机制;气候变暖;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000-2383(2022)03-935-15 **收稿日期:** 2021-06-27

Review on Rock-Ice Avalanches

Yang Qingqing[1,2], Zheng Xinyu[1], Su Zhiman[3], Cheng Qiangong[1,2*], Ren Yuhao[1], Hou Benyong[1]

1. *Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 611756, *China*
2. *Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, MOE, Southwest Jiaotong University, Chengdu* 611756, *China*
3. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610041, *China*

Abstract: Rock-ice avalanche is a special kind of rock avalanche involving ice, rock, and soil particles, which disintegrates from rock/ice avalanches or landslides in cold high-mountain regions. As involved ice, rock-ice avalanches have extremely high mobility and enormous destructive potential, under the background of global warming, the propagation mechanism of rock-ice avalanches is a frontier scientific issue in the field of geological disasters. The representative achievements in the field of rock-ice avalanches over last forty years were reviewed briefly. The terminology and definition of rock-ice avalanche were given. The formation mechanism and its climate sensitivity were investigated, and the regional development characteristics were analyzed. The propagation mechanism and the influence of ice were studied. The extremely high mobility of rock-ice avalanches was attributed to the low friction of icy surface, fluidization of meltwater, and channeling effects. The influence of ice is complicated by the low friction of icy surface and thermo-hydro-mechanical coupling. Further investigation should be conducted in the dynamic characteristics and

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(No. 2019QZKK0905);国家自然科学基金项目(No. 41402244).

作者简介: 杨情情(1984-),女,副教授,博士,主要从事高速远程滑坡物理模型实验与数值模拟的教学与研究工作.ORCID: 0000-0001-7775-0844. E-mail: yangqq@swjtu.edu.cn

* **通讯作者:** 程谦恭,E-mail:chengqiangong@home.swjtu.edu.cn

引用格式: 杨情情,郑欣玉,苏志满,程谦恭,任雨豪,侯本勇,2022.高速远程冰-岩碎屑流研究进展.地球科学,47(3):935-949.

Citation: Yang Qingqing, Zheng Xinyu, Su Zhiman, Cheng Qiangong, Ren Yuhao, Hou Benyong, 2022. Review on Rock-Ice Avalanches. *Earth Science*, 47(3): 935-949.

propagation mechanism for improving relevant hazard mitigation.

Key words: rock-ice avalanche; propagation mechanism; influence of ice; global warming; engineering geology.

0 引言

自McSaveney(1975)开展了开拓性的研究以来,冰-岩碎屑流(rock-ice avalanche)的研究已成为全球气候变暖大背景下地质灾害研究领域的热点与前沿问题.冰-岩碎屑流作为裹挟了冰屑物质的一种特殊高速远程滑坡,表现出独特的几何学、运动学、动力学特征以及运动机理.本文从以下几个方面进行系统地梳理与述评.首先,明确了冰-岩碎屑流的概念,厘定了冰-岩碎屑流与其他广义滑坡(landslide)的区别;其次,总结了冰-岩碎屑流的几何学、运动学、动力学特征,绘制了全球冰-岩碎屑流灾害分布图,阐述了其区域发育规律及活动特征;接着,分析了冰-岩碎屑流成因的气候相关性,阐述了其运动机理及冰屑影响机制;最后,指出了冰-岩碎屑流的研究趋势以及今后研究亟待解决的关键科学问题.

1 冰-岩碎屑流的概念

1.1 概念由来

冰-岩碎屑流早期被称为glacier rock avalanche(冰川高速远程滑坡)、rock avalanches in glacial environment(冰川环境下高速远程滑坡)、glacier debris flow(冰川泥石流)等,后期逐渐被确定为rock-ice avalanche.

最早的命名可追溯到1975年McSaveney的博士论文,在此文中McSaveney博士将1964年阿拉斯加地震诱发的沿Sherman冰川运动的高速远程滑坡定名为冰川高速远程滑坡(glacier rock avalanche).接着,Evans and Clague(1988)首次采用冰川环境下灾难性高速远程滑坡(catastrophic rock avalanches in glacial environments)这一术语.这些命名强调了冰川环境的影响,但未在名称中体现冰屑这种关键元素.

Reynolds(1992)在与冰川有关的灾害(glacier-related hazards)分类中,区分了冰崩(ice avalanche)、雪崩(snow avalanche)与冰-岩碎屑流(rock-ice avalanche),是最早在正文中使用rock-ice avalanche的学者之一.Bottino *et al.*(2002)在冰川环境下高速远程滑坡(rock avalanche in glacial environment)数值模拟一文中,首次在关键词中使用rock-ice avalanche这一术语.国际上较早使用rock-ice avalanche这一术语作为题名的学者,其一为来自SG Evans和JJ Clague研究团队的Lipovsky(2004),其二为来自C Huggel研究团队的Huggel *et al.*(2005)、Kääb *et al.*(2005)、Fischer *et al.*(2006)、Noetzli *et al.*(2006).此后,该术语得到了科学界的普遍认可,并得到了广泛使用.

在我国,冰-岩碎屑流也被称为滑坡(黄润秋,2007;葛云峰等,2019)、高速远程滑坡(殷跃平,2000;刘伟,2002;胡明鉴等,2009)、碎屑流(朱平一等,2000)、崩滑-碎屑流(童立强等,2018;刘传正等,2019)、滑坡型泥石流(李俊等,2018)、冰崩(胡文涛等,2018)等.从物质组成和运动学特征来看,上述实例均应为冰-岩碎屑流.

杨情情等(2015)在论述我国西藏易贡滑坡时,引入了rock-ice avalanche这一术语,并参照地质名词的常规翻译方法,将其翻译为冰-岩碎屑流.为了论述的方便,本文统一采用冰-岩碎屑流(rock-ice avalanche)的名称.

1.2 定义

冰-岩碎屑流具有多种定义,目前得到普遍认可的定义为:一种在启动时或运动时裹挟冰屑(包括冰、雪、粒雪等)的特殊高速远程滑坡(Schneider *et al.*, 2011a;杨情情等,2015;Sosio, 2015;Yang *et al.*, 2019;Ren *et al.*, 2021),是高寒山区陡峭山体斜坡区或滑坡解体后形成的冰屑、岩块和土颗粒混合体高速流动现象.该定义突出了冰屑的参与,归纳了冰屑来源及孕灾环境,界定了其归属于高速远程滑坡的范畴.本文采用此种定义,并将符合该定义所述特征的地质现象研究进展纳入评述范围.其他定义可能偏重于强调冰-岩碎屑流的某些特性或某个阶段,简述如下.

Petrakov *et al.*(2008)定义了一种特殊的冰川灾害——灾难性冰川多相物质运动(catastrophic glacial multi-phase mass movement),其源于冰川环境下高速远程岩滑或冰崩(rock/ice avalanche),裹挟的冰屑、岩屑、水以及其他碎屑物质在运动过程中持续流态化(progressive fluidization)形成超高速流

体(ultra-high speed flow,即泥石流或洪水).超高速流体是灾难性冰川多相物质运动最为重要的运动阶段,具有介于固态与液态之间的半流态化特征.由其定义和特点可知,灾难性冰川多相物质运动是某些(通常含冰量较高的)冰-岩碎屑流发展至后期的运动阶段;完全、充分的碎屑化作用和流态化作用是冰-岩碎屑流发展为灾难性冰川多相物质运动的必要条件.然而,由于流态化程度的不同,并非所有的冰-岩碎屑流均可演变为超高速流体.因此,灾难性冰川环境多相物质运动特指某些冰-岩碎屑流经完全的流态化作用发展为超高速流体的运动阶段,应包含在广义冰-岩碎屑流的范畴内.

Sosio(2015)定义了岩-雪-冰碎屑流(rock-snow-ice avalanche).岩-雪-冰碎屑流是一种发育于冰川环境的高速远程滑坡,其启动到堆积全过程中的运动学、动力学特征受岩屑与冰雪物质(ice and snow)的相互作用控制.术语中将冰屑物质中的冰、雪分离开来,但论述中并未特别厘定冰、雪的不同作用机制和影响机理.因此,Sosio(2015)定义的岩-雪-冰碎屑流在物质组成、运动学特征等方面与本文定义的冰-岩碎屑流无异.

Allen(1985)、Van der Woerd *et al.*(2004)定义的冰崩(glacier avalanche),以及 Evans *et al.*(2009b)、Jacquemart *et al.*(2020)、Leinss *et al.*(2020)、Kääb *et al.*(2021)定义的冰川断裂(glacier detachment)可认为是某些冰-岩碎屑流事件的启动阶段,其在运动过程中裹挟岩屑发展为冰-岩碎屑流.

冰屑不仅从物质组成上厘定了冰-岩碎屑流(rock-ice avalanche)和普通(不含冰)高速远程滑坡(rock avalanche)的界限,也显著改变了冰-岩碎屑流的运动机理和动力学特征.冰屑可通过以下途径进入冰-岩碎屑流内部:(1)冰-岩碎屑流启动阶段夹带基岩裂隙或岩质碎屑孔隙中的冰屑或冰川冰(glacial ice);(2)冰-岩碎屑流运动阶段沿途铲刮下伏冰川、季节性冻土、多年冻土中的冰屑.以上两种途径中,Deline *et al.*(2015b)认为冰屑大多源自第2种途径,即冰屑通常铲刮自冰川表面.

实际上,冰-岩碎屑流是多种地质现象的综合体现.它可能源于冰崩,冰崩体在下滑过程中裹挟岩屑演变为冰-岩碎屑流,或者冰崩体冲击下方岩体触发岩崩,进而掺混形成冰-岩碎屑流;也可能源于岩崩,岩崩与表面覆盖的冰川体在下滑过程中掺混形成冰-岩碎屑流,或者岩崩体在下滑过程中铲刮冰川形成冰-岩碎屑流,或者沿程裹挟含冰碎屑物形成冰-岩碎屑流.所形成的冰-岩碎屑流在运动过程中可能主要以类似于高速远程滑坡的方式运动,也可能由于冰屑大量融化而演变为泥石流.由此可见,冰-岩碎屑流属于复合型地质过程,与单一的冰崩、雪崩、岩崩、岩滑等有所不同.主要差异如下:

(1)高速远程滑坡(或称岩屑流,rock avalanche,sturzstorm)为大型失稳基岩岩体在运动过程中经强烈碎屑化作用而形成的非常快速至极快速的岩质碎屑运动(程谦恭等,2007;张明等,2010;王玉峰等,2021);碎屑流(debris avalanche)为坡面型浅层松散堆积层失稳而形成的极快速的岩质碎屑运动(王玉峰等,2021).一般情况下,高速远程滑坡和碎屑流的物质主体为宽级配的岩屑颗粒.

(2)冰崩(ice avalanche)为在重力作用下冰川冰从冰川陡峻处或冰架边缘处崩落的现象(秦大河等,2014);雪崩(snow avalanche)为一定厚度的山坡积雪,在重力和雪融水的作用下失去平衡而产生大量积雪向下倾泻的现象(秦大河等,2014).冰崩和雪崩的物质主体为冰屑.

2　冰-岩碎屑流的基本特征与地理分布

2.1　基本特征

冰-岩碎屑流作为一种裹挟了冰屑的特殊高速远程滑坡,除了表现出方量大($>10^6$ m^3)、速度快(数十米每秒(Sosio *et al.*,2008;Sosio,2015),甚至高于 100 m/s(Shreve,1966;McSaveney,2002;Huggel *et al.*,2008))、滑距远(数公里,甚至上百公里)、能量大的特点之外,还表现出准周期性、气候敏感性和灾害链生性.

冰-岩碎屑流的运动性常用视摩擦系数(apparent friction coefficient)表征.视摩擦系数为落距与最远水平运距之比(Heim,1932),视摩擦系数越低、运动性越强.冰-岩碎屑流的视摩擦系数普遍低至0.1～0.2(Sosio,2015).笔者对比了131个冰-岩碎屑流和162个普通(不含冰)碎屑流的视摩擦系数,发现冰-岩碎屑流的视摩擦系数普遍低于同规模普通(不含冰)高速远程滑坡,即冰-岩碎屑流的运动性普遍更强,如图1所示.

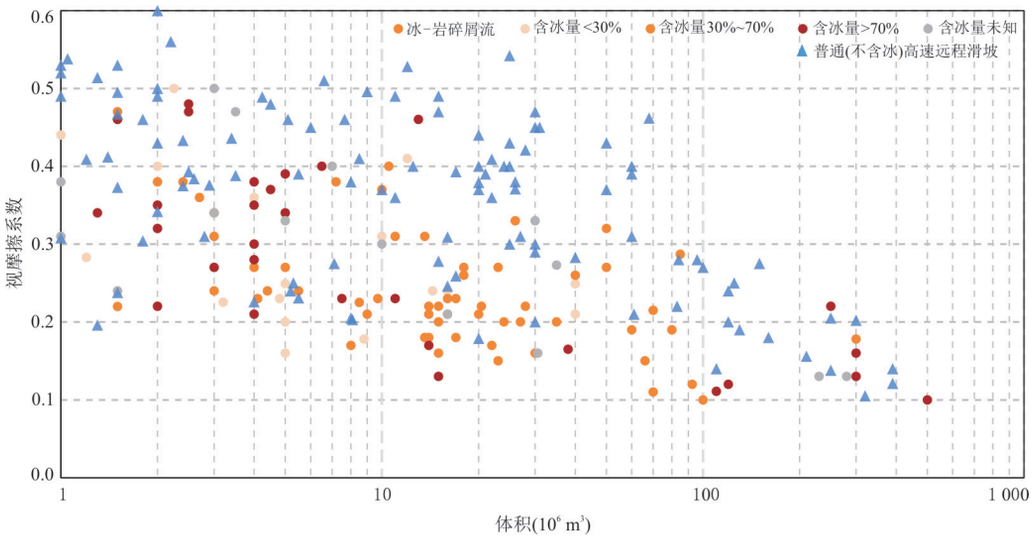


图 1 冰-岩碎屑流与普通(不含冰)高速远程滑坡的视摩擦系数对比

Fig.1 The comparison chart of apparent friction coefficient of rock-ice avalanches and rock avalanches

据 Siebert(1984)、Evans and Clague(1988)、Hampton *et al.*(1996)、Legros(2002)、黄润秋(2007)、Schneider *et al.*(2011a)、Zhang and Yin(2013)

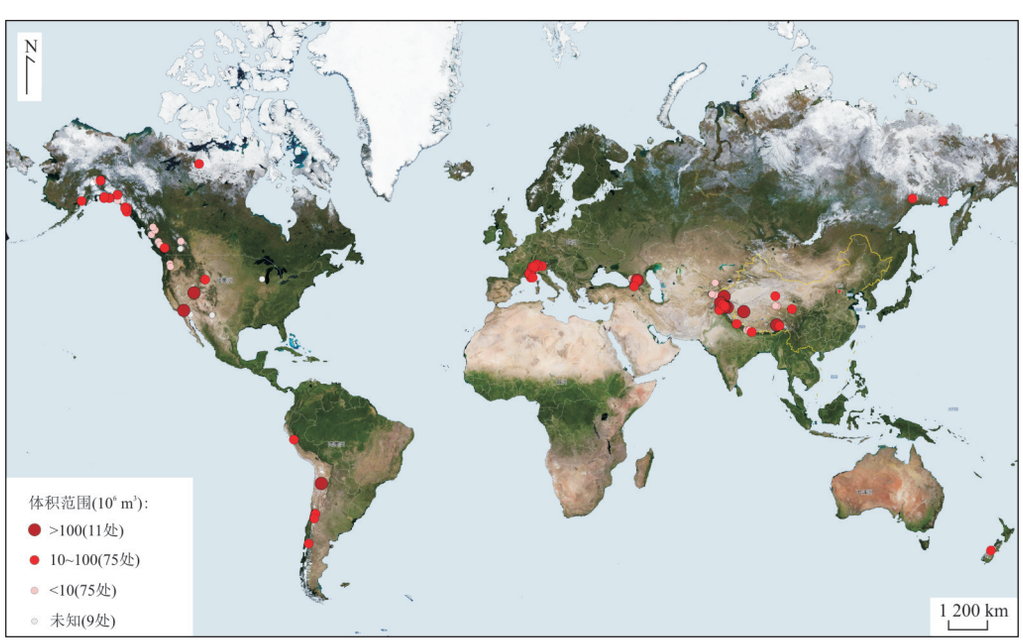


图 2 全球冰-岩碎屑流灾害分布

Fig.2 The distribution of rock-ice avalanches in the world

据 Shreve(1966)、Evans and Clague(1988)、Van der Woerd *et al.*(2004)、Fischer *et al.*(2006)、Weidinger(2006)、Huggel *et al.*(2008)、Petrakov *et al.*(2008)、Evans *et al.*(2009b);Schneider *et al.*(2011a)、胡文涛等(2018)

2.2 全球分布

冰-岩碎屑流广泛分布于地球上几乎所有的高寒山区(图 2),包括喜马拉雅-喀喇昆仑山脉、阿尔卑斯山脉、高加索山脉、阿拉斯加山脉、太平洋海岸山脉(含落基山脉和安第斯山脉)、南阿尔卑斯山脉.地外星体上亦有分布,例如火星、木星伽利略卫星、土卫八等.

2.2.1 亚洲 喜马拉雅-喀喇昆仑山脉地处被称作“世界屋脊”与“第三极”的青藏高原,发育了大量的冰-岩碎屑流.青藏高原作为全球地质灾害最为多发的区域之一,其地势高差巨大、地质构造复杂、地表侵蚀作用强烈、异常气候事件频发(崔鹏等,2017;戴福初和邓建辉,2020;彭建兵等,2020).在活跃的地壳内外动力地质作用下,青藏高原高山峡谷

区诱发的高速远程滑坡,其活动范围之大、危害程度之高、影响范围之广,为国内外具有类似地形地貌地质环境背景的其他地区所罕见(彭建兵等,2020).青藏高原及周边地区冰川发育,为冰-岩碎屑流的发育提供了极其有利的孕灾环境.

Hewitt(1988,1999)调查了发生在喜马拉雅-喀喇昆仑山脉的多个灾难性冰-岩碎屑流,详细记录了其运动及堆积特征.Van der Woerd *et al.*(2004)研究了2001年11月14日7.9级可可西里地震触发的4处冰-岩碎屑流,描绘了其运动学特征.Weidinger(2006)调查了发生在喜马拉雅山脉安纳普尔纳峰的4处巨型冰-岩碎屑流(规模$1\times10^9\sim5\times10^9$ m^3),并探讨了其启动及运动机理.胡文涛等(2018)、Kääb *et al.*(2018)记录了2016年7月17日和9月21日先后发生在我国西藏阿里地区的冰-岩碎屑流事件.Leinss *et al.*(2020)编录了塔吉克斯坦Petra Pervogo地区1973年至2019年间发生的冰-岩碎屑流事件.

1900年我国西藏波密县易贡乡扎木弄巴沟发生方量高达数亿方的巨型冰-岩碎屑流,堆积体堵塞易贡河形成易贡湖(刘国权和鲁修元,2000).2000年4月9日,该沟再次发生巨型冰-岩碎屑流(图3a),这是我国近年来发生的最大规模高速远程滑坡事件之一.超过300×10^6 m^{3}的冰-岩混合物于数分钟之内沿沟道冲出8 km,完全堵断易贡河,堰塞坝溃决洪水致使下游地区受灾区域长达450 km,印度境内130余人丧生,5万人无家可归,20多座桥梁荡然无存(殷跃平,2000;刘伟,2002;Shang *et al.*,2003;Xu *et al.*,2012).易贡冰-岩碎屑流及其次生灾害链的时空延拓性使其成为全球近期较为严重也较为罕见的地质灾害之一(崔鹏等,2014).

2018年10月17日,我国西藏米林县雅鲁藏布江左岸色东普沟上游发生冰-岩碎屑流灾害(图3b),滑体以20 m/s的平均速度运动了8 km后冲出沟口,堵塞雅鲁藏布江,堰塞坝体积高达31×10^6 m^3;同年10月29日,冰-岩碎屑流演变为冰川泥石流,冲出沟口后覆盖前次遗留的堰塞坝,导致雅鲁藏布江再次断流.该流域自2014年以来接连发生了8次冰-岩碎屑流,均造成了不同程度的堵江,现已成为国内学者重点关注的区域之一(刘传正等,2019;Hu *et al.*,2019;Wang *et al.*,2020).

2015年4月25日,尼泊尔地震触发的Langtang冰-岩碎屑流(图3c)造成了300余人丧生.14.38×10^6 m^{3}的冰-岩混合物从海拔近7 000 m的峰顶下落到海拔4 500 m处的冰川平台,然后从冰川平台"起飞"并下落到高程约3 250 m的河床,又俯冲到对面山坡爬高200 m(经爬高高度反算的运动速度

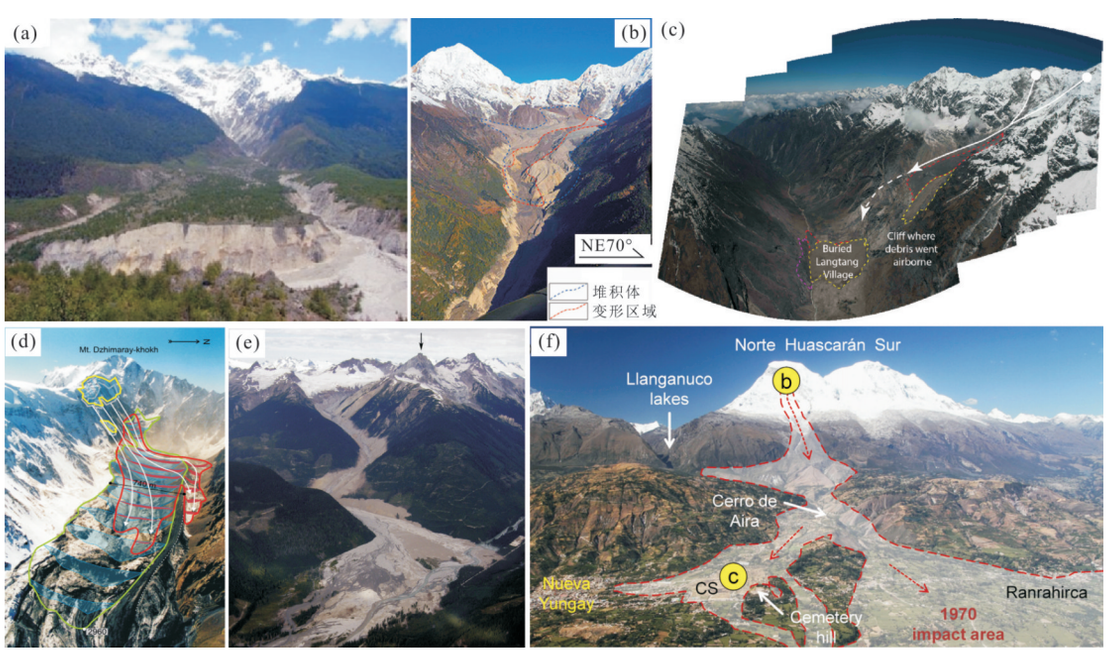


图3　典型冰-岩碎屑流实例

Fig.3　Typical examples of rock-ice avalanches

a. 中国易贡冰-岩碎屑流,笔者摄;b. 中国色东普冰-岩碎屑流,据赵永辉(2020);c. 尼泊尔Langtang冰-岩碎屑流,据Kargel *et al.*(2016);d. 俄罗斯Kolka冰-岩碎屑流,据Evans *et al.*(2009b);e. 加拿大Mt. Meager冰-岩碎屑流,据Evans and Delaney(2015);f. 秘鲁Huascarán冰-岩碎屑流,据Mergili *et al.*(2018)

为63 m/s),产生的巨大冲击气浪以92 m/s的速度爬高400 m,夷平了对面山坡的小树林(Kargel *et al.*,2016;Lacroix,2016;Fujita *et al.*,2017).

2021年2月7日,印度查莫利北部里希恒河发生大型冰-岩碎屑流事件(方量23×10^6 m^3).该冰-岩碎屑流沿沟谷高速运动,运动过程中不断铲刮、融化沟道内冰川,并迅速演变为泥石流,摧毁了沿途的大坝、桥梁和道路,造成了近200人遇难(Shugar *et al.*,2021;殷跃平等,2021).

吉尔吉斯斯坦南部Alai谷中的冰川沉积物(glacial deposit)被重新解译为冰-岩碎屑流堆积体.该冰-岩碎屑流冲出距离高达28 km,是地球上冲出距离最远的陆上非火山高速远程滑坡(subaerial non-volcanic rock avalanches)之一.该冰-岩碎屑流失稳岩体方量约4 km^3,堆积体现存方量3~5 km^3(Strom,2014).

2.2.2 欧洲 Deline(2009)描述了晚全新世以来发生在阿尔卑斯山脉最高峰——勃朗峰(Mont Blanc massif)的19个岩崩和高速远程滑坡,揭示了高速远程滑坡与冰川的相互作用,解译了堆积在冰川上的滑坡堆积体.Deline and Kirkbride(2009)对晚全新世以来发生在勃朗峰的7个冰-岩碎屑流堆积体进行了测年,揭示了该地区冰-岩碎屑流的发生具有准周期性.

1717年9月12日,方量约16×10^6~20×10^6 m^3(含10×10^6 m^{3}的冰屑)的冰-岩碎屑流沿Triolet冰川冲出7.2 km,造成7人丧生(Deline and Kirkbride,2009).2004年9月18日,意大利Punta Thurwieser山南翼发生了冰-岩碎屑流事件,2.5×10^6 m^{3}的含冰碎屑物质运动了2.9 km,平均速度为36~38 m/s(最大速度60~65 m/s),这是为数不多的有幸被拍摄下来的高速远程滑坡实例之一(Sosio *et al.*,2008).

作为亚洲与欧洲分界线的高加索山脉历史上曾发生过多次冰-岩碎屑流灾害.1902年7月3日,俄罗斯高加索地区的Kolka-Karmadon冰川失稳,75×10^6~110×10^6 m^{3}的含冰碎屑物质远程冲出14 km,造成36人死亡(Sosio,2015).2002年9月22日,该冰川再次发生整体失稳,触发了一次规模更大的冰-岩碎屑流事件(图3d),100×10^6~140×10^6 m^{3}的冰-岩碎屑物质以50 m/s的平均速度远程冲出19 km,随后演变为泥流(mudflow)又高速运动了17 km,影响范围达12.5 km^2,造成140人丧生(Huggel *et al.*,2005;Evans *et al.*,2009b).2002年Kolka冰-岩碎屑流事件因其规模极大、运动距离极远、破坏力极强而被世人熟知.

2.2.3 北美洲 有文献(Lipovsky *et al.*,2008;Jiskoot,2011)表明,前人早在1899年就曾报道过21个沿加拿大西部冰川运动的冰-岩碎屑流事件.Evans and Clague(1988)收集了加拿大西部过去30年间的冰-岩碎屑流事件,分析了冰-岩碎屑流与冰川的相互作用,并开拓性地解释了冰-岩碎屑流具有超强运动性的原因.Geertsema *et al.*(2006)整理了近年来发生在加拿大不列颠的大型灾难性滑坡,其中大部分均沿冰川运动.Jibson *et al.*(2006)编录了2002年11月3日阿拉斯加7.9级地震触发的数以千计的滑坡,其中以沿冰川运动的高速远程滑坡尤为瞩目,例如McGinnis Peak冰-岩碎屑流(20×10^6 m^3,体积含冰量10%)、Black Rapids冰-岩碎屑流(25×10^6~37×10^6 m^3,体积含冰量30%).Huggel *et al.*(2007)统计了过去45年间发生在阿拉斯加Iliamna火山附近的冰-岩碎屑流事件(方量1×10^6~30×10^6 m^3),发现该地区的冰-岩碎屑流灾害的发生频度(2~4年重现周期)相较于其他类似环境更高.针对于该地区灾害频发的特点,Huggel *et al.*(2007)提出了长期监测(航空监测、地面调查、温度监控、地震信号分析等)、早期预警(地震信号)以及灾害统计与分析相结合的防灾减灾手段.Coe *et al.*(2018)编录了1984年到2016年间发生在阿拉斯加Glacier Bay的24个冰-岩碎屑流,其普遍具有规模巨大(覆盖面积达5.5~22.2 km^2)、运动性极强(视摩擦系数小于0.3)、准周期性(平均重现周期为505天)、发生频率上升的特点.

1958年7月9日,一场8.3级地震触发的30×10^6 m^{3}冰-岩碎屑流冲至阿拉斯加南海岸图亚湾(Lituya Bay),激起了高达516 m的涌浪,创造了历史上最高的波浪爬高(wave run-up)记录(Pararas-Carayannis,1999;George *et al.*,2017).发生在2015年10月17日的北美最大非火山滑坡(non-volcanic landslide)——Tyndall Glacier冰-岩碎屑流(方量78×10^6 m^3),产生了巨大涌浪(George *et al.*,2017).2005年9月14日,规模为40×10^6~60×10^6 m^{3}的冰-岩碎屑流从高程约3 100 m的Steller山南翼倾斜而下,沿Bering冰川运动了近10 km,峰值速度超100 m/s(Huggel *et al.*,2008).2007年7月24日,加拿大Yukon地区Steele山发生了冰-岩碎屑流事件,垂直落距仅2 160 m,水平运距高

达 5.76 km,堆积体覆盖了 3.66 km^{2}的 Steele 冰川面积,该冰-岩碎屑流的超强运动性与冰融水的流态化作用有关(Lipovsky *et al.*,2008).2010 年 8 月 6 号,加拿大最大(方量 48×10^6 m^3)非火山滑坡——Mt. Meager 冰-岩碎屑流(图 3e)以 64 m/s 的平均速度在 Capricorn 冰川上高速运动,随后演变为泥石流继续运动了 12 km,视摩擦系数低至 0.172(Evans and Delaney,2015).

2.2.4　南美洲　Anacona *et al.*(2015)总结了历史上发生在智利和阿根廷的安第斯山脉的冰-岩碎屑流及其链生灾害,阐明了短期气象条件(例如强降雨、长期降雨、高温等)和地形条件的影响机制.Baldis and Liaudat(2019)编录了阿根廷中安第斯山的岩崩和高速远程滑坡,并论述了其与冻土退化的关系.

南美洲的冰-岩碎屑流灾害主要集中在安第斯山脉,其中包括举世闻名的灾难性滑坡——1962 年和 1970 年发生在秘鲁的 Huascarán 冰-岩碎屑流.1962 年 10 月 1 日,3×10^6 m^{3}冰-岩混合物从 Huascarán 北峰倾泻而下,以 47 m/s 的平均速度远程运动了 16 km,随后演变为泥石流继续流动了 39.5 km,淹没了 Ranrahirca 城,累计造成 650 人丧生(Evans *et al.*,2009a;Sosio,2015).1970 年 5 月 31 日,一场里氏 7.9 级的地震再次触发了该地区规模更大的冰-岩碎屑流(图 3f),7.5×10^6 m^{3}的含冰碎屑物质以高达 50~85 m/s 的平均速度运动了 16 km,淹没 Ranrahirca 城与 Yungay 城,造成 6 000 余人丧生,这是史上最为惨重的滑坡灾难之一(Evans *et al.*,2009a).

1987 年 11 月 29 日,方量约为 6.0×10^6 m^{3}的岩体从智利中部安第斯山脉 Cerro Rabicano 山的西坡失稳,沿途铲刮了大量冰屑物质,总体积超过 15×10^6 m^3.运动过程中演变为泥石流,总运距长达 57 km,造成至少 37 人丧生(Hauser,2002).安第斯山脉 Cerro Aconcagua 山的史前巨型冰-岩碎屑流(方量 3×10^9 m^3)沿 Horcones 冰川运动,滑体因裹挟了大量冰屑而迅速饱和,到达冰川末端后继续运动了 8 km,该冰-岩碎屑流堆积体曾被误判为后冰期冰碛垄(late-glacial moraine)(Deline,2015a).

2.2.5　大洋洲　McSaveney(2002)统计了近年来发生在新西兰最高峰——库克山(Aoraki/Mount Cook)的典型冰-岩碎屑流事件,并描述了其运动学过程.Allen *et al.*(2011)识别了 509 个发生在新西兰南阿尔卑斯山脉的晚更新世到全新世古滑坡,并揭示了与冰川退缩、冻土退化相关的冰-岩碎屑流的空间分布规律.1991 年 12 月 14 日,12×10^6 m^{3}的冰-岩混合物两分钟之内从库克山山顶下落了 2 720 m,以 60 m/s 的平均速度运动了 7.5 km,运动过程中铲刮了大量冰屑,堆积体体积高达 60×10^6~80×10^6 m^3,库克山峰顶高程因此被削低了 10 m(McSaveney,2002).

3　冰-岩碎屑流的成因与减阻机制

3.1　成因

学者普遍认为,冰-岩碎屑流具有气候高敏感性.近几十年来随着全球气温变暖、地表增湿的加剧,冰川退缩、多年冻土退化,冰-岩碎屑流及其链生灾害的发生频度和规模均呈上升态势(Geertsema *et al.*, 2006; Fischer *et al.*, 2013; Krautblatter *et al.*, 2013; Evans and Delaney, 2015; Haeberli *et al.*, 2017; Coe *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2019; Leinss *et al.*, 2020; Kääb *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2021).在全球气候变暖大背景下,冰-岩碎屑流灾害可能成为人类面临的新型地质灾害类型(Sosio,2015;胡文涛等,2018).也有学者(Allen *et al.*, 2011; Huggel *et al.*, 2012)指出无法建立气候变化与高山冰川环境地质灾害频度及规模之间的确切关系,这从侧面反映了冰-岩碎屑流的发生与气候变化之间的关系异常复杂.

冰-岩碎屑流的形成受多种因素控制,除了受斜坡类型及其岩体结构等内在因素影响外,还受地温、风化、气候变化等外部环境因素和地震、暴雨、极端天气等触发因子的影响.冰-岩碎屑流成因机制的研究并不多见,前人(Huggel *et al.*,2012;Deline *et al.*,2015b)从以下 3 个方面进行了探讨:

(1)长期气候变化.全球气候变暖引起冰川退缩、多年冻土退化.冰川的过量下蚀作用(glacial overdeepening)可增大坡体应力从而降低其稳定性;冰川侵蚀与地貌抬升可增大相对高差及坡角,为冰-岩碎屑流的发育提供有利的孕灾环境;冰川退缩可导致岩坡失去冰川冰的支撑作用,即冰川的去支撑化(glacial debuttressing);冰川冰的消融可产生平行于坡体的近地表裂隙,这种应力释放导致的裂隙降低了岩体强度,增加了其不稳定性;多年冻土中间隙冰(interstitial ice)的融化可引起破碎岩体在一定深度内产生热对流和静孔隙水压力,从而降低岩体的稳定性.

(2)短期气象条件.冻融作用下岩体中孔隙水冰相变导致岩体内部既有裂隙扩展,从而增加其不稳定性.冻融循环已被证实可引发小型落石事件,但是否能够引发大型冰-岩碎屑流尚不明确.强降雨也是触发冰-岩碎屑流的重要因素之一.

(3)地震.地震动既可作为环境因素,通过频繁作用于坡体降低岩体强度和坡体稳定性,也可作为触发因子直接造成坡体失稳引发冰-岩碎屑流事件.

3.2 减阻机制

3.2.1 低摩擦冰减阻机理 冰作为一种低摩擦材料,既可作为物质组分减阻,亦可作为冰质下伏面减阻.

(1)低摩擦的物质组分.现场调查中常通过对比冰-岩碎屑流失稳前后的源区卫星图片评估失稳冰体厚度,由此估算冰-岩碎屑流的初始含冰量.冰-岩碎屑流运动过程中铲刮下伏冰川、冻土,堆积体含冰量可十数倍于初始含冰量(例如1991年新西兰Aoraki/Mount Cook冰-岩碎屑流).目前对于冰-岩碎屑流含冰量及其沿程铲刮量的估测尚存在较大困难,由此造成的误差较大,因而难以准确评估含冰量对冰-岩碎屑流运动特征的影响.

Schneider *et al.*(2011b)通过转筒实验模拟了冰-岩碎屑流摩擦热融导致的流态化过程,首次在实验室内实现了冰-岩碎屑流从固态到流态的流态转变.实验结果表明,随含冰量的增加,冰-岩混合材料的体摩擦系数(bulk friction coefficient)呈线性降低,纯冰屑的体摩擦系数低于纯岩屑20%左右.Sosio *et al.*(2012)通过数值模拟验证了底摩擦角(basal friction angle)随含冰量线性降低.Yang *et al.*(2019)通过斜槽实验量化了含冰量对冰-岩混合材料运动性的影响.当含冰量小于30%时,冰-岩混合材料的运动性随含冰量的增加而显著增加;当含冰量大于30%时,含冰量对运动性的影响不显著.

(2)低摩擦的下伏面.McSaveney(1975)、Evans and Clague(1988)、Hewitt(1988)研究了冰-岩碎屑流沿下伏冰川的运动和堆积特征.相较于同规模的高速远程滑坡,冰-岩碎屑流沿下伏冰川运动时运距更远、速度更快、覆盖面积更广.数值模拟结果表明,冰-岩碎屑流沿下伏冰川运动时,其运动性比同规模高速远程滑坡高30%左右(Bottino *et al.*, 2002;Delaney and Evans, 2014).此外,冰川相较于其他坚硬下伏层更易被铲刮,冰-岩碎屑流通过铲刮下伏冰川可显著增加其规模,从而增强运动性(Jiskoot, 2011;Sosio *et al.*, 2012;Sosio, 2015).

3.2.2 摩擦热融减阻机理 冰-岩碎屑流运动过程中冰屑摩擦热融可产生大量冰融水,目前已发现冰屑摩擦热融的现场证据(Hewitt, 1988;McSaveney, 2002;Lipovsky *et al.*, 2008;Deline *et al.*, 2015a;Sosio, 2015)和实验证据(Schneider *et al.*, 2011b;Yang *et al.*, 2019;Ren *et al.*, 2021).De Blasio(2014)提出了沿下伏冰川运动的冰-岩碎屑流的减阻机制模型(图4),该模型指出冰-冰摩擦以及部分冰融化均可

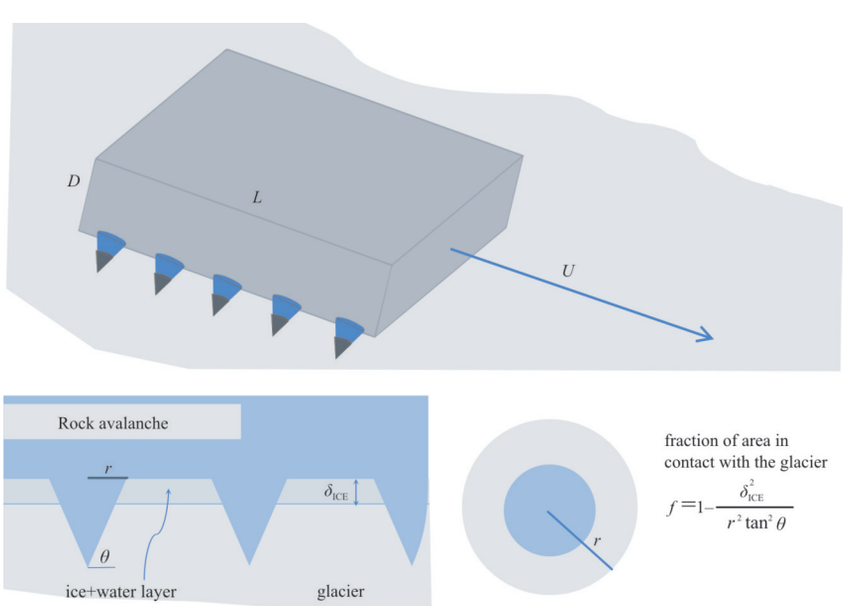


图4 沿下伏冰川运动的冰-岩碎屑流的减阻机制模型(De Blasio, 2014)

Fig.4 Mechanical model of rock-ice avalanche over glacier (De Blasio, 2014)

导致摩阻力大幅降低.Pudaidaini and Krautblatter (2014)构建了首个针对冰-岩碎屑流的两相流模型,能够反映因滑体底部润滑和内部流态化所引起的滑体动态强度降低特性,以及固液两相间的质量和动量交换过程,但其润滑因子和流态化因子的取值缺乏明确的物理意义和理论支撑.Sansone *et al.* (2021)建立了冰-岩碎屑流的三维数学模型,考虑了运动过程中的冰屑热融.大量学者(Erismann *et al.*, 2001; McSaveney, 1975, 2002; Sosio *et al.*, 2012; De Blasio, 2014)估算了冰-岩碎屑流运动过程中的当量融水量.冰融水既可通过增加孔隙水压力减阻,亦可通过改变基底层流态减阻.当融水量较少时,液态粒间水润滑颗粒表面可促进冰屑-岩屑混合材料的运动(Ren *et al.*, 2021),此时冰融水主要起润滑作用(lubrication);随着融水量的逐步增多,滑体可发生整体流态化而演变为泥石流,此时冰融水主要起流态化作用(fluidization).目前还难以预测冰-岩碎屑流运动过程中是否能够发生流态化作用,流态化作用发生与否主要取决于滑体总体积和冰屑体积、地形、流通路径上可供铲刮的湿润下伏层等因素(Petrakov *et al.*, 2008).

3.2.3　侧限约束减阻机理　侧碛垄(lateral moraine)或冰蚀槽(glacial trough)可阻止冰-岩碎屑流在运动过程中的侧向扩离(lateral spreading),增大流深并降低能耗,从而促进其运动,即沟道作用(channelling)可提高冰-岩碎屑流的运动性.侧限流(confined flow)的运动性比非侧限流(non-confined flow)高 70%～115%(Jiskoot, 2011).

4　今后研究应解决的关键科学问题

冰-岩碎屑流具有准周期性、气候敏感性和灾害链生性,屡屡引发震惊世人的灾难性事件,其运动机理和冰屑影响机制已成为全球气候变暖大背景下地质灾害研究领域的热点与前沿问题.历经 40 余年的发展,国内外学者通过现场调查、室内实验、理论分析和数值模拟等技术手段,已在冰-岩碎屑流动力学机理研究方面取得了丰硕成果,对冰-岩碎屑流的科学认识已有了长足发展.然而,由于冰-岩碎屑流灾害往往发生在人迹罕至的险峻山区,在其突发性、不可重复性、运动学特征及流态转变机制复杂性、灾害链生危险性等特点的制约下,人们对于冰-岩碎屑流的认识还不够全面、研究不够深入,可借鉴的经验和方法有限,存在的主要问题包括:

(1)在原型调查方面,目前对冰-岩碎屑流实例的认识极大依赖于事后描述(规模、冲出距离、覆盖范围等),直接观测数据极少,对其运动学过程及冰屑影响机制缺乏直接认识;尚未发展出针对冰-岩碎屑流的现场调查方法,特别是如何判识冰屑消融后的冰-岩碎屑流堆积体,目前普遍存在冰-岩碎屑流的误判问题.卫星遥感方法可以对比事件发生前后的影像数据,提取物质组成、运动特征等参数,但存在实时性较差、时空分辨率不高、受天气和区域地形因素影响较大等不足.

(2)在室内物理模型实验方面,受冰屑易融易碎难保存等因素制约,冰屑影响较难模拟,试验结果可重复性较差;受场地及温度条件的限制,尚未发展出既可模拟冰-岩碎屑流的运动和堆积过程,又可模拟冰屑持续摩擦热融导致其流态转变的实验方法.

(3)在数值模拟方面,由于冰-岩碎屑流裹挟了大量物理力学性质迥异的材料(例如岩、冰、雪、水、气等),固液气三相间的相互作用以及固液转化机制异常复杂,至今尚未发展出通用的、能够完全反映冰-岩碎屑流物理本质的数学模型.

(4)在防灾减灾方面,由于缺乏冰屑影响机制的地质证据和实验证据,冰-岩碎屑流的运动机理研究尚处于起步阶段,难以有力支撑冰-岩碎屑流灾害监测预警、危险性评估、应急处置、工程防治等防灾减灾工作.

综上所述,冰-岩碎屑流的研究任重而道远.为了更全面、深入地开展冰-岩碎屑流的研究,今后的研究可重点关注以下关键科学问题:

(1)冰-岩碎屑流事件的时空分布规律.冰-岩碎屑流主要分布在高寒山区,但受限于不同地区的地形、构造、气象等条件上的差异而呈现出不尽一致的活动特征.已有学者对全球各地冰-岩碎屑流事件进行了详尽分析,可在这些工作的基础上初步构建全球冰-岩碎屑流灾害数据库,系统梳理成因条件、运动特征、堆积特性等活动特征,揭示时空分布规律.除此之外,还可发展事件特征解译新技术,比如通过远震技术(teleseismic technique)重建冰-岩碎屑流动力学过程;通过滑坡堆积体地质解译或测年技术,判识历史时期甚至史前冰-岩碎屑流事件,进一步丰富和完善既有冰-岩碎屑流的事件信息;还可通过对地形形变、温度变

化等灾变因素的遥感观测和地面监测,建立冰-岩碎屑流隐患点的长期观测站点,服务高寒山区重大基础设施建设,并通过建立区域性监测站网,系统地研究冰-岩碎屑流的活动规律.

(2)冰-岩碎屑流的成因机制.加强源区岩质边坡温度监测,获取多源温度数据,建立热扰动(thermal perturbation)与高寒山区边坡稳定性的关系,量化高纬度多年冻土退化对岩质边坡稳定性的影响;监测冰川前进(glacier advance)、冰川运动速度、冰裂隙数量、冰川凸起(crevassed bulge)等异常现象,这些异常现象可能是冰-岩碎屑流的发生前兆.

(3)冰-岩碎屑流运动特性的冰屑影响机制.发展冰-岩碎屑流的现场调查方法,分析堆积体地貌学与沉积学特征,捕捉冰屑影响机制的残留痕迹;发展室内物理模型实验方法,研发冰屑标准化制作工艺和冰屑影响模拟方法,重现冰-岩碎屑流的运动过程以及流态转变过程,着重研究冰屑含量和冰融水在各个运动阶段的影响机制;发展数值模拟方法,开展多学科交叉研究和多因素耦合分析,深入揭示冰屑热融过程机制以及冰-岩-水相互作用对冰-岩碎屑流运动和堆积特征的影响.

References

Alean, J., 1985. Ice Avalanche Activity and Mass Balance of a High-Altitude Hanging Glacier in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 6: 248－249. https://doi.org/10.1017/s026030550001048x

Allen, S. K., Cox, S. C., Owens, I. F., 2011. Rock Avalanches and Other Landslides in the Central Southern Alps of New Zealand: A Regional Study Considering Possible Climate Change Impacts. *Landslides*, 8(1): 33－48. https://doi.org/10.1007/s10346-010-0222-z

Anacona, P. I., Mackintosh, A., Norton, K. P., 2015. Hazardous Processes and Events from Glacier and Permafrost Areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1): 2－21. https://doi.org/10.1002/esp.3524

Baldis, C. T., Liaudat, D. T., 2019. Rockslides and Rock Avalanches in the Central Andes of Argentina and Their Possible Association with Permafrost Degradation. *Permafrost and Periglacial Processes*, 30(4): 330－347. https://doi.org/10.1002/ppp.2024

Bottino, G., Chiarle, M., Joly, A., et al., 2002. Modelling Rock Avalanches and Their Relation to Permafrost Degradation in Glacial Environments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(4): 283－288. https://doi.org/10.1002/ppp.432

Cheng, Q. G., Zhang, Z. Y., Hang, R. Q., 2007. Study on Dynamics of Rock Avalanches: State of the Art Report. *Journal of Mountain Science*, 25(1): 72－84 (in Chinese with English abstract).

Coe, J. A., Bessette-Kirton, E. K., Geertsema, M., 2018. Increasing Rock-Avalanche Size and Mobility in Glacier Bay National Park and Preserve, Alaska Detected from 1984 to 2016 Landsat Imagery. *Landslides*, 15(3): 393－407. https://doi.org/10.1007/s10346-017-0879-7

Cui, P., Chen, R., Xiang, L. Z., et al., 2014. Risk Analysis of Mountain Hazards in Tibetan Plateau under Global Warming. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 10(2): 103－109 (in Chinese with English abstract).

Cui, P., Jia, Y., Su, F. H., et al., 2017. Natural Hazards in Tibetan Plateau and Key Issue for Feature Research. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 32(9): 985－992 (in Chinese with English abstract).

Dai, F. C., Deng, J. H., 2020. Development Characteristics of Landslide Hazards in Three-Rivers Basin of Southeast Tibetan Plateau. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 3－15 (in Chinese with English abstract).

De Blasio, F. V., 2014. Friction and Dynamics of Rock Avalanches Travelling on Glaciers. *Geomorphology*, 213: 88－98. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.001

Delaney, K. B., Evans, S. G., 2014. The 1997 Mount Munday Landslide (British Columbia) and the Behaviour of Rock Avalanches on Glacier Surfaces. *Landslides*, 11(6): 1019－1036. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0456-7

Deline, P., 2009. Interactions between Rock Avalanches and Glaciers in the Mont Blanc Massif during the Late Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 28(11－12): 1070－1083. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.09.025

Deline, P., Akçar, N., Ivy-Ochs, S., et al., 2015a. Repeated Holocene Rock Avalanches onto the Brenva Glacier, Mont Blanc Massif, Italy: A Chronology. *Quaternary Science Reviews*, 126: 186－200. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.004

Deline, P., Hewitt, K., Reznichenko, N., et al., 2015b. Rock Avalanches onto Glaciers. Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396452-6.00009-4

Deline, P., Kirkbride, M. P., 2009. Rock Avalanches on a Glacier and Morainic Complex in Haut Val Ferret (Mont

Blanc Massif, Italy). *Geomorphology*, 103(1): 80－92. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.020

Erismann, T. H., Abele, G., 2001. Dynamics of Rockslides and Rockfalls. Springer, New York.

Evans, S. G., Bishop, N. F., Fidel Smoll, L., et al., 2009a. A Re-Examination of the Mechanism and Human Impact of Catastrophic Mass Flows Originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108(1－2): 96－118. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.020

Evans, S. G., Clague, J. J., 1988. Catastrophic Rock Avalanches in Glacial Environments. Proceedings, 5th International Symposium on Landslides, Lausanne. Rotterdam.

Evans, S. G., Delaney, K. B., 2015. Catastrophic Mass Flows in the Mountain Glacial Environment. In: Haeberli, W., Whiteman C., eds., Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, Amsterdam. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394849-6.00016-0

Evans, S. G., Tutubalina, O. V., Drobyshev, V. N., et al., 2009b. Catastrophic Detachment and High-Velocity Long-Runout Flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002. *Geomorphology*, 105(3－4): 314－321. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.008

Evans, S.G., Delaney, K.B., 2015. Chapter 16 -Catastrophic Mass Flows in the Mountain Glacial Environment. Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters, Academic Press, Boston, 563－606.

Fischer, L., Huggel, C., Kääb, A., et al., 2013. Slope Failures and Erosion Rates on a Glacierized High-Mountain Face under Climatic Changes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8): 836－846. https://doi.org/10.1002/esp.3355

Fischer, L., Kääb, A., Huggel, C., et al., 2006. Geology, Glacier Retreat and Permafrost Degradation as Controlling Factors of Slope Instabilities in a High-Mountain Rock Wall: The Monte Rosa East Face. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(5): 761－772. https://doi.org/10.5194/nhess-6-761-2006

Fujita, K., Inoue, H., Izumi, T., et al., 2017. Anomalous Winter-Snow-Amplified Earthquake-Induced Disaster of the 2015 Langtang Avalanche in Nepal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(5): 749－764. https://doi.org/10.5194/nhess-17-749-2017

Ge, Y. F., Zhou, T., Huo, S. L., et al., 2019. Energy Transfer Mechanism during Movement and Accumulation of Rockslide Avalanche. *Earth Science*, 44(11): 3939－3949 (in Chinese with English abstract).

Geertsema, M., Clague, J. J., Schwab, J. W., et al., 2006. An Overview of Recent Large Catastrophic Landslides in Northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83(1－3): 120－143. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.028

George, D. L., Iverson, R. M., Cannon, C. M., 2017. New Methodology for Computing Tsunami Generation by Subaerial Landslides: Application to the 2015 Tyndall Glacier Landslide, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 44(14): 7276－7284. https://doi.org/10.1002/2017gl074341

Haeberli, W., Schaub, Y., Huggel, C., 2017. Increasing Risks Related to Landslides from Degrading Permafrost into New Lakes in De-Glaciating Mountain Ranges. *Geomorphology*, 293: 405－417. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009

Hampton, M. A., Lee, H. J., Locat, J., 1996. Submarine Landslides. *Reviews of Geophysics*, 34(1): 33－59. https://doi.org/10.1029/95rg03287

Hauser, A., 2002. Rock Avalanche and Resulting Debris Flow in Estero Parraguirre and Río Colorado, Region Metropolitana, Chile.. In: Evans, S. G., DeGraff, J. V., eds., Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms. Geological Society of America, Boulder.

Heim, A., 1932. Bergsturz und Meschenleben. Frets und Wasmuth, Zurich.

Hewitt, K., 1988. Catastrophic Landslide Deposits in the Karakoram Himalaya. *Science*, 242(4875): 64－67. https://doi.org/10.1126/science.242.4875.64

Hewitt, K., 1999. Quaternary Moraines vs Catastrophic Rock Avalanches in the Karakoram Himalaya, Northern Pakistan. *Quaternary Research*, 51(3): 220－237. https://doi.org/10.1006/qres.1999.2033

Hu, K.H., Zhang, X.P., You, Y., et al., 2019. Landslides and Dammed Lakes Triggered by the 2017 *M*s 6.9 Milin Earthquake in the Tsangpo Gorge. *Landslides*, 16(5): 993－1001. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01168-w

Hu, M. J., Cheng, Q. G., Wang, F. W., 2009. Experimental Study on Formation of Yigong Long-Distance high-Speed Landslide. *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. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(6): 1141－1152 (in Chinese with English abstract).

Huang, R. Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Slid-

ing Mechanisms in China since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433－454 (in Chinese with English abstract).

Huggel, C., Caplan-Auerbach, J., Gruber, S., et al., 2008. The 2005 Mt. Steller, Alaska, Rock-Ice Avalanche, a Large Slope Failure in Cold Permafrost. In: Kane, D. L., Hinkel, K. M., eds., Proceeding of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks.

Huggel, C., Caplan-Auerbach, J., Waythomas, C. F., et al., 2007. Monitoring and Modeling Ice-Rock Avalanches from Ice-Capped Volcanoes: A Case Study of Frequent Large Avalanches on Iliamna Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 168(1－4): 114－136. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.08.009

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. https://doi.org/10.1002/esp.2223

Huggel, C., Zgraggen-Oswald, S., Haeberli, W., et al., 2005. The 2002 Rock/Ice Avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: Assessment of Extraordinary Avalanche Formation and Mobility, and Application of QuickBird Satellite Imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(2): 173－187. https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005

Jacquemart, M., Loso, M., Leopold, M., et al., 2020. What Drives Large-Scale Glacier Detachments? Insights from Flat Creek Glacier, St. Elias Mountains, Alaska. *Geology*, 48(7): 703－707. https://doi.org/10.1130/g47211.1

Jibson, R. W., Harp, E. L., Schulz, W., et al., 2006. Large Rock Avalanches Triggered by the *M* 7.9 Denali Fault, Alaska, Earthquake of 3 November 2002. *Engineering Geology*, 83(1－3): 144－160. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.029

Jiskoot, H., 2011. Long-Runout Rockslide on Glacier at Tsar Mountain, Canadian Rocky Mountains: Potential Triggers, Seismic and Glaciological Implications. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2): 203－216. https://doi.org/10.1002/esp.2037

Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., et al., 2005. Remote Sensing of Glacier- and Permafrost-Related Hazards in High Mountains: An Overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(4): 527－554. https://doi.org/10.5194/nhess-5-527-2005

Kääb, A., Jacquemart, M., Gilbert, A., et al., 2021. Sudden Large-Volume Detachments of Low-Angle Mountain Glaciers-More Frequent than Thought? *The Cryosphere*, 15(4): 1751－1785. https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021

Kääb, A., Leinss, S., Gilbert, A., et al., 2018. Massive Collapse of Two Glaciers in Western Tibet in 2016 after Surge-Like Instability. *Nature Geoscience*, 11(2): 114－120. https://doi.org/10.1038/s41561-017-0039-7

Kargel, J. S., Leonard, G. J., Shugar, D. H., et al., 2016. Geomorphic and Geologic Controls of Geohazards Induced by Nepal's 2015 Gorkha Earthquake. *Science*, 351(6269): 140－150. https://doi.org/10.1126/science.aac8353

Krautblatter, M., Funk, D., Günzel, F. K., 2013. Why Permafrost Rocks Become Unstable: A Rock-Ice-Mechanical Model in Time and Space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8): 876－887. https://doi.org/10.1002/esp.3374

Lacroix, P., 2016. Landslides Triggered by the Gorkha Earthquake in the Langtang Valley, Volumes and Initiation Processes. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 1－10. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0423-3

Legros, F., 2002. The Mobility of Long-Runout Landslides. *Engineering Geology*, 63(3－4): 301－331. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00090-4

Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., et al., 2020. Glacier Detachments and Rock-Ice Avalanches in the Petra Pervogo Range, Tajikistan (1973－2019). *Natural Hazards and Earth System Sciences*. doi: 10.5194/nhess-2020-285.

Li, J., Chen, N. S., Liu, M., et al., 2018. Analysis of Main Factors for Landslide-Triggered Debris Flow in Zhamunong Gully on April 9th, 2000. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 16(6): 187－193 (in Chinese with English abstract).

Lipovshy, P. S., Huscrift, C.A., Lewkowicz, A. G., 2004. The Nines Creek Ice and Rock Avalanche: An Example of the Impact of Climate Change on Catastrophic Geomorphic Processes in the Kluane Ranges, Yukon Territory, Canada. American Geophysical Union, San Francisco.

Lipovsky, P. S., Evans, S. G., Clague, J. J., et al., 2008. The July 2007 Rock and Ice Avalanches at Mount Steele, St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *Landslides*, 5(4): 445－455. https://doi.org/10.1007/s10346-008-0133-4

Liu, C. Z., Lü, J. T., Tong, L. Q., et al., 2019. Research on Glacial/Rock Fall-Landslide-Debris Flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet. *Geology in*

China, 46(2): 219－234 (in Chinese with English abstract).

Liu, G. Q., Lu, X. Y., 2000. Analysis on the Causes of Collapse, Landslide and Debris flow in Zhamunong Gully, Yigong, Tibet. *Tibet Science and Technology*, (4): 15－17 (in Chinese).

Liu, W., 2002. Study on the Characteristics of Huge Scale-Super Highspeed-Long Distance Landslide Chain in Yigong, Tibet. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(3): 9－18 (in Chinese with English abstract).

McSaveney, M. J., 1975. Sherman Glacier Rock Avalanche of 1964: Its Emplacement and Subsequent Effects on the Glacier Beneath it (Dissertation). Ohio State Unversity, Columbus.

McSaveney, M. J., 2002. Recent Rockfalls and Rock Avalanches in Mount Cook National Park, New Zealand. *GSA Reviews in Engineering Geology*, 15: 35－70. https://doi.org/10.1130/REG15-p35.

Mergili, M., Frank, B., Fischer, J. T., et al., 2018. Computational Experiments on the 1962 and 1970 Landslide Events at Huascarán (Peru) with R. Avaflow: Lessons Learned for Predictive Mass Flow Simulations. *Geomorphology*, 322: 15－28. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.08.032

Noetzli, J., Huggel, C., Hoelzle, M., et al., 2006. GIS-Based Modelling of Rock-Ice Avalanches from Alpine Permafrost Areas. *Computational Geosciences*, 10(2): 161－178. https://doi.org/10.1007/s10596-005-9017-z

Pararas-Carayannis, G., 1999. Analysis of Mechanism of Tsunami Generation in Lituya Bay. *Science of Tsunami Hazards*, 17(3): 193－206.

Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan—Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377－2389 (in Chinese with English abstract).

Petrakov, D. A., Chernomorets, S. S., Evans, S. G., et al., 2008. Catastrophic Glacial Multi-Phase Mass Movements: A Special Type of Glacial Hazard. *Advances in Geosciences*, 14: 211－218. https://doi.org/10.5194/adgeo-14-211-2008

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

Qin, D. H., Yao, T. D., Ding, Y. J., et al., 2014. A Dictionary of Cryosphere Science. China Meteorological Press, Beijing (in Chinese).

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

Reynolds, J. M., 1992. The Identification and Mitigation of Glacier-Related Hazards: Examples from the Cordillera Blanca, Peru. In: McCall, G. J. H., Laming, D. J. C., Scott, S. C., eds., Geohazards. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0381-4_13

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., Haeberli, W., et al., 2011a. 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

Schneider, D., Kaitna, R., Dietrich, W. E., et al., 2011b. Frictional Behavior of Granular Gravel-Ice Mixtures in Vertically Rotating Drum Experiments and Implications for Rock-Ice Avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 69(1): 70－90. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.07.001

Shang, Y. J., Yang, Z. F., Li, L. H., et al., 2003. A Super-Large Landslide in Tibet in 2000: Background, Occurrence, Disaster, and Origin. *Geomorphology*, 54(3－4): 225－243. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00358-6

Shreve, R. L., 1966. Sherman Landslide, Alaska. *Science*, 154(3757): 1639－1643. https://doi.org/10.1126/science.154.3757.1639

Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., et al., 2021. A Massive Rock and Ice Avalanche Caused the 2021 Disaster at Chamoli, India Himalaya. *Science*, 372(6552): eabh4455. https://doi.org/10.1126/science.abh4455.

Siebert, L., 1984. Large Volcanic Debris Avalanches: Characteristics of Source Areas, Deposits, and Associated Eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22(3－4): 163－197. https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90002-7

Sosio, R., 2015. Rock-Snow-Ice Avalanches. Landslide Hazards, Risks, and Disasters. In: Shroder, J. F., Davies, T., eds., Elsevier, Amsterdam. 191－240. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396452-6.00007-0

Sosio, R., Crosta, G. B., Chen, J. H., et al., 2012. Modelling Rock Avalanche Propagation onto Glaciers. *Quaternary Science Reviews*, 47: 23－40. https://doi.org/

10.1016/j.quascirev.2012.05.010

Sosio, R., Crosta, G. B., Hungr, O., 2008. Complete Dynamic Modeling Calibration for the Thurwieser Rock Avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology*, 100(1－2): 11－26. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.012

Strom, A., 2014. Catastrophic Slope Processes in Glaciated Zones of Mountainous Regions. In: Shan, W., Guo, Y., Wang, F. W., et al., eds., Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_1

Tong, L. Q., Pei, L. X., Tu, J. N., et al., 2020. A Preliminary Study of Definition and Classification of Ice Avalanche in the Tibetan Plateau Region. *Remote Sensing for Land & Resources*, 32(2): 11－18 (in Chinese with English abstract).

Van der Woerd, J., Owen, L. A., Tapponnier, P., et al., 2004. Giant, ～*M*8 Earthquake-Triggered Ice Avalanches in the Eastern Kunlun Shan, Northern Tibet: Characteristics, Nature and Dynamics. *Geological Society of America Bulletin*, 116(3): 394－406. https://doi.org/10.1130/b25317.1

Wang, W. P., Yang, J. S., Wang, Y. B., 2020. Dynamic Processes of 2018 Sedongpu Landslide in Namcha Barwa-Gyala Peri Massif Revealed by Broadband Seismic Records. *Landslides*, 17(2): 409－418. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01315-3

Wang, Y. F., Lin, Q. W., Li, K., et al., 2021. Review on Rock Avalanche Dynamics. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 164－181 (in Chinese with English abstract).

Weidinger, J. T., 2006. Predesign, Failure and Displacement Mechanisms of Large Rockslides in the Annapurna Himalayas, Nepal. *Engineering Geology*, 83(1－3): 201－216. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.032

Xu, Q., Shang, Y. J., van Asch, T., et al., 2012. Observations from the Large, Rapid Yigong Rock Slide-Debris Avalanche, Southeast Tibet. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5): 589－606. https://doi.org/10.1139/t2012-021

Yang, Q. Q., Su, Z. M., Chen, L. Z., et al., 2015. Flume Tests on Influence of Ice to Mobility of rock-Ice Avalanches. *Journal of Engineering Geology*, 23(6): 1117－1126 (in Chinese with English abstract).

Yang, Q. Q., Su, Z. M., Cheng, Q. G., et al., 2019. High Mobility of Rock-Ice Avalanches: Insights from Small Flume Tests of Gravel-Ice Mixtures. *Engineering Geology*, 260: 105260. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105260

Yin, Y. P., 2000. Rapid Huge Landslide and Hazard Reduction of Yigong River in the Bomi, Tibet. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 27(4): 8－11 (in Chinese with English abstract).

Yin, Y. P., Li, B., Zhang, T. T., et al., 2021. The February 7 of 2021 Glacier-Rock Avalanche and the Outburst Flooding Disaster Chain in Chamoli, India. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 1－8 (in Chinese with English abstract).

Zhang, M., Yin, Y. P., 2013. Dynamics, Mobility-Controlling Factors and Transport Mechanisms of Rapid Long-Runout Rock Avalanches in China. *Engineering Geology*, 167: 37－58. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.010

Zhang, M., Yin, Y. P., Wu, S. R., et al., 2010. Development Status and Prospects of Studies on Kinematics of Long Runout Rock Avalanches. *Journal of Engineering Geology*, 18(6): 805－817 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. H., 2020. Study on the Barrier Lake Event for Landslide-River Blocking of Sedongpu Valley on Yarlung Zangbo River in Tibet of China. *Journal of Hebei GEO University*, 43(3): 31－37 (in Chinese with English abstract).

Zhu, P. Y., Wang, C. H., Tang, B. X., 2000. The Deposition Characteristic of Supper Debris Flow in Tibet. *Journal of Mountain Research*, 18(5): 453－456 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

程谦恭, 张倬元, 黄润秋, 2007. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势. 山地学报, 25(1): 72－84.

崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等, 2014. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析. 气候变化研究进展, 10(2): 103－109.

崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等, 2017. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题. 中国科学院院刊, 32(9): 985－992.

戴福初, 邓建辉, 2020. 青藏高原东南三江流域滑坡灾害发育特征. 工程科学与技术, 52(5): 3－15.

葛云峰, 周婷, 霍少磊, 等, 2019. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制. 地球科学, 44(11): 3939－3949.

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. 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. 冰川冻土, 40(6): 1141－1152.

黄润秋, 2007. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制.

岩石力学与工程学报, 26(3): 433－454.

李俊, 陈宁生, 刘美, 等, 2018.2000年易贡乡扎木弄沟滑坡型泥石流主控因素分析. 南水北调与水利科技, 16(6): 187－193.

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(2): 219－234.

刘国权, 鲁修元, 2000. 西藏易贡藏布扎木弄沟特大型山体崩塌滑坡、泥石流成因分析. 西藏科技, (4): 15－17.

刘伟, 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析. 中国地质灾害与防治学报, 13(3): 9－18.

彭建兵, 崔鹏, 庄建琦, 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战. 岩石力学与工程学报, 39(12): 2377－2389.

秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等, 2014. 冰冻圈科学辞典. 北京: 气象出版社.

童立强, 裴丽鑫, 涂杰楠, 等, 2020. 冰崩灾害的界定与类型划分: 以青藏高原地区为例. 国土资源遥感, 32(2): 11－18.

王玉峰, 林棋文, 李坤, 等, 2021. 高速远程滑坡动力学研究进展. 地球科学与环境学报, 43(1): 164－181.

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. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究. 水文地质工程地质, 27(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.

张明, 殷跃平, 吴树仁, 等, 2010. 高速远程滑坡–碎屑流运动机理研究发展现状与展望. 工程地质学报, 18(6): 805－817.

赵永辉, 2020. 中国西藏雅鲁藏布江色东普沟滑坡–堵江堰塞湖事件研究. 河北地质大学学报, 43(3): 31－37.

朱平一, 王成华, 唐邦兴, 2000. 西藏特大规模碎屑流堆积特征. 山地学报, 18(5): 453－456.