

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110022

张议芳, 刘阳, 苏鹏程, 等. 西藏地区冰崩灾害研究进展 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 132-145.

ZHANG Yifang, LIU Yang, SU Pengcheng, et al. Advances in the study of glacier avalanches in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 132-145.

## 西藏地区冰崩灾害研究进展

张议芳<sup>1,2</sup>, 刘 阳<sup>1,3</sup>, 苏鹏程<sup>4</sup>, 韦方强<sup>1,2</sup>, 黄海涛<sup>5</sup>, 陈 乔<sup>1</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 4. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境  
研究所, 四川 成都 610041; 5. 峨眉山市应急管理局, 四川 峨眉山 614200)

**摘要:**随着全球气候的变暖, 青藏高原地区冰川消融、退缩加剧, 稳定性降低, 增加了冰崩灾害的发生频率。西藏地区作为青藏高原的主体部分, 其冰川的稳定影响着我国及周边国家的水源及生命财产安全。文章通过梳理国内外冰崩的研究现状, 整理了西藏地区冰崩灾害的定义; 从地形因素、构造运动和气候作用角度分析了冰崩形成机制; 归纳分析了冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害、冰崩—堵溃—泥石流链式灾害、冰崩—直接型泥石流(山洪)灾害 3 种类型冰崩灾害链的特征; 阐述了目前冰崩灾害监测预警的手段及特点, 认为多种监测方式联合是冰崩灾害监测的发展趋势, 展望了冰崩灾害的研究体系, 以期能为后续的研究工作提供思路。

**关键词:**西藏地区; 冰崩; 冰湖溃决; 泥石流; 灾害链

**中图分类号:** P694

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-8035(2023)02-0132-14

## Advances in the study of glacier avalanches in Tibet

ZHANG Yifang<sup>1,2</sup>, LIU Yang<sup>1,3</sup>, SU Pengcheng<sup>4</sup>, WEI Fangqiang<sup>1,2</sup>, HUANG Haitao<sup>5</sup>, CHEN Qiao<sup>1</sup>

(1. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Architecture and Urban Planning of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 5. Emergency Management Bureau of Emeishan City, Emeishan, Sichuan 614200, China)

**Abstract:** With the global warming, glaciers in the Qinghai-Tibet Plateau are melting and retreating rapidly, and the stability of glaciers are decreasing. As the main part of the Qinghai-Tibet Plateau, stability of glaciers affect the safety of water, life and property in China and neighboring countries. This paper summarized the research status of ice avalanches at home and abroad, and reorganized the definition of ice avalanche disasters in Tibet; Analyzed the formation mechanism of ice avalanche from the topography, tectonic movement and climate; Summarized and analyzed the characteristics of three types of ice avalanche disaster chains. Ice avalanche- glacial lake outburst- debris flow chain disaster, ice avalanche-blocking and outburst - debris flow chain disaster, ice avalanche-debris flow (flash flood) chain disaster; Described the current methods and characteristics of ice avalanche disasters monitoring and warning, and it is believed that the trend is for a combination of multiple monitoring

**收稿日期:** 2021-10-23; **修订日期:** 2022-02-06

**投稿网址:** <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

**基金项目:** 西藏自治区自然资源厅防治能力体系建设项目(2020-0890-2); 西藏自治区日喀则市科技计划项目(RKZ2020kj01); 浙江省岩石力学与地质灾害重点实验室开放基金(ZJRMG-2019-01)

**第一作者:** 张议芳(1995-), 女, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害监测预警研究。E-mail: zhangyifang@cigit.ac.cn

**通讯作者:** 陈 乔(1982-), 男, 四川遂宁人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事岩石力学、声学、地质灾害预警研究。

E-mail: chenqiao@cigit.ac.cn

methods for ice avalanche disaster monitoring. The research system of ice avalanche disasters is prospected in order to provide ideas for future research work.

**Keywords:** Tibet; glacier avalanches; glacial lake outburst; debris flow; disaster-chain

## 0 引言

近年来,受人为活动和气候变化等因素的影响,全球气候变暖趋势加剧,冰冻圈因此受到严重影响,大面积的冰川消融退缩,导致冰川的失稳现象逐渐增加,同时受地形、地震等内外作用力的影响,使得冰崩灾害的发生概率增加,并由此引发诸如冰湖溃决、滑坡、堰塞湖、泥石流等冰川链式灾害,给下游的人民群众的生活带来极大的安全隐患,也对国家的重大工程的开展造成极大的威胁<sup>[1-3]</sup>。例如 1950 年西藏林芝地区发生的则隆弄冰崩—堵江链式灾害<sup>[2-3]</sup>,1953 年西藏波密地区古乡沟冰崩—泥石流链式灾害<sup>[2]</sup>,1962 年秘鲁安第斯山脉 Huascaran 地区冰崩—碎屑流链式灾害,1970 年秘鲁 7.7 级地震触发 Nevados Huascaran 冰崩<sup>[4]</sup>,1965 年阿尔卑斯山脉 Allalin 冰崩<sup>[5-7]</sup>,2002 年俄罗斯境内的 Kolka 冰崩—泥石流灾害<sup>[8-9]</sup>,2003 年新西兰 Franz Josef 冰川两次发生冰崩—洪水链式灾害<sup>[10]</sup>,2004 年青海省玛沁县大武乡的阿尼玛冰崩—堵河灾害<sup>[3]</sup>,2012 年锡亚琴冰川争端区域冰崩—岩崩事件<sup>[3]</sup>,2015 年新疆公格尔九别峰冰川跃动和冰崩<sup>[1,11]</sup>,2016 年西藏阿里地区阿汝村两次冰崩<sup>[1]</sup>,以及 2021 年印度北阿肯德邦一处水力发电大坝附近发生冰崩—山洪链式灾害<sup>[12-13]</sup>,均导致大量的人口失踪死亡,公共设施、耕地牧场被毁。受多因素尤其受气候变暖影响,冰川稳定性降低<sup>[14]</sup>,促使未来冰崩发生的可能性增加,严重威胁当地及下游地区甚至周边国家的民众的生命财产安全<sup>[15]</sup>。

冰崩作为新型灾害近年来受到国内外研究者的广泛关注。冰崩最早记录于 1767 年,瑞士地质学家、气象学家和登山家 Saussure<sup>[16]</sup>在登山过程中详细记录了阿尔卑斯冰川的运动和雪崩现象。随后 1849 年和 1895 年国外有两次关于冰崩的简单记载<sup>[3]</sup>。直至 20 世纪后,人们才逐渐对冰崩有了一定的认识。1968 年 Crandell 对冰崩进行初步的定义<sup>[2]</sup>,即大量的冰迅速的从山坡或者陡崖上运动下来的过程。1977 年瑞士冰川学家 RÖTHLISBERGER<sup>[17]</sup>对冰崩进行简单的分类,一类是出现在冰崖下的陡峭冰川坡上,冰崩后产生的碎片保留在冰川上,可以重新结合或形成新的冰舌;第二类冰雪崩类似于山体滑坡的事件,其中相当一部分冰体从冰川的陡峭部分上掉下来,移动到超过冰川原始位置的地方,有时会造成灾难性的后果。Margreth 等<sup>[18]</sup>基于

1996 年 9 月和 1997 年 1 月 Gutzgletscher 冰崩进行冰雪崩危害评估,并对冰崩的形成机理和研究的难点进行分析,其认为冰崩就是冰体在重力作用下从冰川上破裂下降到斜坡上并形成小块冰块的过程。

相较于国外冰崩灾害的研究,国内对于单独的冰崩灾害研究比较少,更多的是对冰崩可能引发的冰湖溃决、冰川泥石流等次生灾害进行研究。1986 年吕儒仁等<sup>[19]</sup>首次在研究中提出 1964 年发生在工布江达县唐不朗沟内的一次冰湖溃决泥石流事件是由于上游冰川发生滑坡式的冰崩,导致大量的冰川碎屑物冲入冰湖中,造成冰湖水位突涨并溃决,最终导致此次泥石流灾害发生。随后刘晶晶等<sup>[20]</sup>、程尊兰等<sup>[21]</sup>、姚晓军等<sup>[22]</sup>通过对西藏自治区发生的冰湖溃决事件进行分析,认为冰崩是诱发冰湖溃决的主要因素之一,而冰崩发生又与气温的逐渐升高相关。胡文涛等<sup>[1]</sup>针对全球范围内发生过的重大冰崩灾害进行梳理、总结,研究了冰崩体的物质组成和运动特征,同时总结出可能影响冰崩灾害的发生原因,并提出相关的研究方法。

总体而言,国内外学者对冰崩灾害的研究已开展了大量的工作,积累了较多的经验,为后续对冰崩灾害的准确定义、类型划分、形成机制分析、灾害链分类方式以及进一步开展室内外试验、监测等工作提供了参考依据。由于冰崩发生的频数相对较少,研究相对分散,尤其是对西藏地区的冰崩的研究还没有形成完整的体系,制约着西藏地区冰崩灾害及其灾害链评估、监测预警、工程防治等领域的发展,由此,本文通过整理西藏地区已有的冰崩记录,归纳出其形成机制、分析冰崩灾害链的类型及其影响、总结目前相关监测预警手段,以及对未来冰崩灾害研究的展望,以期能为后续的研究工作提供一定的参考。

## 1 冰崩灾害的定义

目前学术界对于冰崩灾害还没有相对统一的定义,就冰崩的定义而言,吴积善等<sup>[23]</sup>认为冰崩是由于冰川的跃动或者强烈消融,导致处在陡坡上的冰体,在重力作用下向下滑动,或者沿着薄弱层出现断裂,形成大块崩落。钟敦伦等<sup>[24]</sup>认为冰崩是分布在陡急斜坡上的冰川,在重力作用下沿着冰川内部的某一剪切破裂面或脆弱面迅速脱离母体并倾倒或滑塌、坠落的现象,具有和

崩塌类似的特征。《冰冻圈科学辞典》将冰崩定义为在重力作用下冰川从冰川陡峻处或者冰架边缘处崩落的现象,多发生在冰川末端,有时也会发生在冰川的中上部<sup>[25-26]</sup>。

2 冰崩形成机制分析

冰崩发生的本质是能量的释放<sup>[27]</sup>,冰崩的发生受多重因素的共同作用。童立强等<sup>[28]</sup>通过对色东普流域频繁堵江事件进行分析,总结出 4 点主要原因:阶梯状地形、沟口碎屑物堵塞河道的状态、海洋型冰川以及冰裂隙较多,另外地震、降雨等也是诱发冰崩造成堵江的原因之一。沈永平等<sup>[29]</sup>通过已有资料以及现场考察对新

疆冰雪灾害的类别、成因以及分布的范围进行总结,冰崩主要由于冰川的坡度较大,从而造成不稳定断裂,气候的变化使冰体更易发生断裂。刘淑珍等<sup>[30]</sup>认为冰舌的裂隙发育情况很大程度上反映冰崩或冰滑坡发生的概率,冰舌的裂隙越发育,越有利于冰崩的发生。刘秧<sup>[31]</sup>通过研究冰川条件和温度条件来探究其对冰崩或冰滑坡的影响规律,认为冰川坡度越大、坡向越靠近南方,冰川面积越大,气温升高都有助于冰崩的形成。总体而言,冰崩的发生与其所在的地理环境以及冰体自身的发育状态有着密切的关系。

据不完全统计,新中国成立以来,西藏地区发生了 45 次冰崩(表 1),通过对文献进行梳理,归纳出冰崩产

表 1 1949—2020 年西藏地区冰崩统计  
Table 1 Ice avalanche statistics in Tibet from 1949 to 2020

| 地点                           | 年月                           | 成因 | 成灾形式              | 地区    |
|------------------------------|------------------------------|----|-------------------|-------|
| 则隆弄冰川 <sup>[3,32]</sup>      | 1950年8月                      | 地震 | 冰崩—泥石流—堵塞坝        | 米林县   |
| 桑旺错 <sup>[22,33-34]</sup>    | 1954年7月                      | 气候 | 冰崩—冰湖溃决—泥石流—洪水    | 康马县   |
| 次仁玛措 <sup>[22,35]</sup>      | 1964年                        |    | 冰崩—冰湖溃决           | 聂拉木县  |
| 章藏错 <sup>[34]</sup>          | 1964年                        |    | 冰崩—洪水—泥石流         | 聂拉木县  |
| 隆达错 <sup>[20]</sup>          | 1964年8月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 吉隆县   |
| 吉莱错 <sup>[33,35]</sup>       | 1964年9月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 定结县   |
| 达门拉咳错 <sup>[20,33-35]</sup>  | 1964年9月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 工布江达县 |
| 阿亚错 <sup>[20,33-35]</sup>    | 1968年/1969年/1970年8月          |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流—洪水    | 定日县   |
| 坡戈错 <sup>[20,33-35]</sup>    | 1972年7月                      | 高温 | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 索县    |
| 坡戈冰湖 <sup>[35]</sup>         | 1974年7月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—洪水        | 丁青县   |
| 扎日错 <sup>[20,33-35]</sup>    | 1981年6月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 洛扎县   |
| 次仁玛措 <sup>[20,35-38]</sup>   | 1981年7月                      | 高温 | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 聂拉木县  |
| 印达普错 <sup>[22,35]</sup>      | 1982年8月                      |    |                   | 定结县   |
| 金错 <sup>[39]</sup>           | 1982年8月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—洪水—泥石流    | 定结县   |
| 培龙沟上游 <sup>[21,34]</sup>     | 1983年7月/1984年8月/1985年6月      | 气候 | 冰崩—临时性冰湖—冰湖溃决—泥石流 | 林芝县   |
| 光谢错 <sup>[20-21,33,40]</sup> | 1988年7月                      | 气候 | 冰崩—冰湖溃决—泥石流—堵江    | 波密县   |
| 热杰错 <sup>[35]</sup>          | 1992年9/10月                   |    | 冰崩—冰湖溃决           | 亚东县   |
| 夏嘎湖 <sup>[35]</sup>          | 1995年5月                      | 高温 | 冰崩—洪水             | 乃东县   |
| 扎那泊 <sup>[35]</sup>          | 1995年6月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流       | 吉隆县   |
| 扎木弄沟 <sup>[41]</sup>         | 2000年4月                      | 地震 | 冰崩—滑坡—堰塞湖—泥石流     | 波密县   |
| 龙纠错 <sup>[35,39]</sup>       | 2000年8月                      |    |                   | 康马县   |
| 冲巴吓错 <sup>[42]</sup>         | 2000年8月                      |    | 冰滑坡—冰湖溃决—泥石流      | 康马县   |
| 嘉龙错 <sup>[20,21,34-35]</sup> | 2002年5/6月                    |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流—洪水    | 聂拉木县  |
| 得嘎错 <sup>[20,21,34]</sup>    | 2002年9月                      |    | 冰崩—冰湖溃决—泥石流—洪水    | 洛扎县   |
| 浪错 <sup>[22,39,43]</sup>     | 2007年8月                      |    |                   | 错那县   |
| 尖母普曲 <sup>[34]</sup>         | 2008年4月                      |    | 冰崩—泥石流—洪水         | 林芝县   |
| 折麦错 <sup>[39,44]</sup>       | 2009年7月                      |    |                   | 错那县   |
| 错嘎湖 <sup>[22,39]</sup>       | 2009年7月                      |    |                   | 边坝县   |
| 给曲冰湖 <sup>[39]</sup>         | 2010年7月                      |    |                   | 定结县   |
| 然则日阿错 <sup>[3]</sup>         | 2013年7月                      | 气候 | 冰、雪崩—冰湖溃决—洪水—泥石流  | 嘉黎县   |
| 那隆藏布沟 <sup>[35]</sup>        | 2014年6月                      | 气候 | 冰崩—泥石流—冰湖溃决—洪水    | 波密县   |
| 土拉沟冰湖 <sup>[35]</sup>        | 2015年7月                      | 气候 | 冰崩堵塞管涌通道—冰湖溃决—洪水  | 边坝县   |
| 阿汝村 <sup>[1,3,45]</sup>      | 2016年7/9月                    | 气候 | 冰崩                | 日土县   |
| 色东普沟 <sup>[3,11]</sup>       | 2014年/2017年10/12月/2018年7/10月 | 降雨 | 冰崩—碎屑流—堵江         | 米林县   |

生的原因主要为地形因素、构造运动、气候作用。

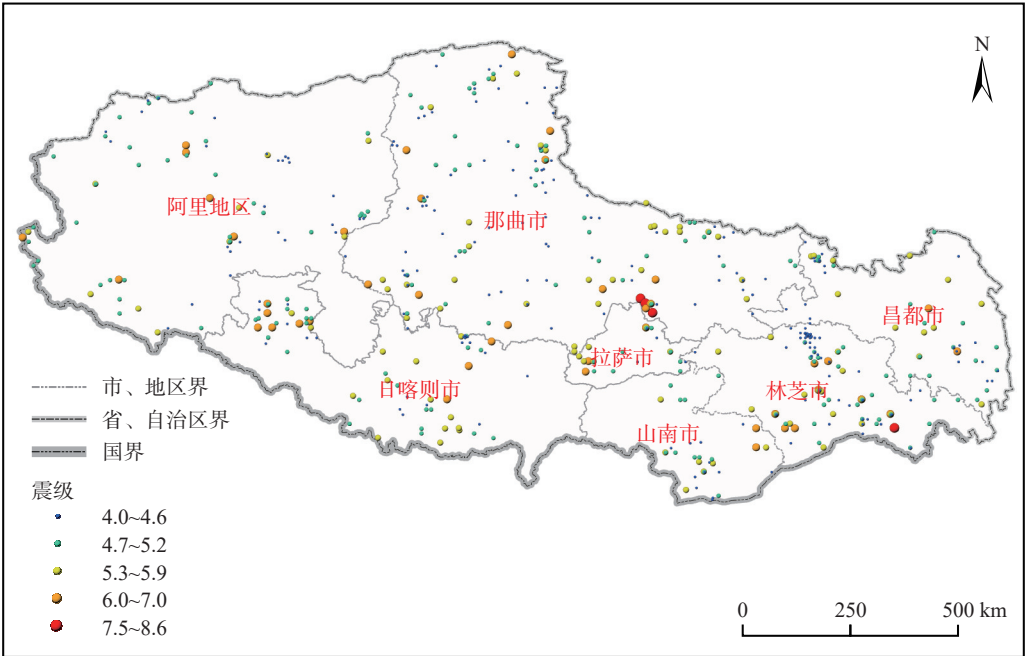
2.1 地形因素

坡度是冰崩发生的重要因素之一,冰川的稳定性与冰川坡度有着密切的联系<sup>[31, 46]</sup>,经验表明,温带冰川的坡度约 30°时变得不稳定,冷冰川的极限坡度约为 45°<sup>[17]</sup>。冰川坡度与冰川剪应力呈正相关,即冰川坡度越大,冰川运动的速度越快,易形成冰裂缝<sup>[47]</sup>,另外冰川坡向越靠近南方,日照越多,辐射也就越强<sup>[31, 48-49]</sup>,加之冰川的海拔以及表面覆雪程度不同造成冰川表面热量分布不均匀,促进冰川裂隙的发育,有利于冰崩的产生<sup>[50-51]</sup>。此外,冰川在前进过程中还会受到冰川底部基岩地形的影响,底部基岩地形复杂,导致冰川各部分前进方向和速度不一致,促进冰裂隙的发育,也为冰崩提供了有利的条件<sup>[52]</sup>。

2.2 构造运动

常见的诱发冰崩的构造运动有火山、地震等。2002 年 9 月,俄罗斯 Kolka 冰川发生冰崩,诱发泥石流,时速高达 300 km/h,形成多个堰塞湖,超 120 人丧命。该地区在 7 月 14 日和 8 月 22 日发生过两次地震,冰崩之后有硫化氢气味出现,且冰川尽头有高达 60 °C 的温泉存在,故判断该冰崩灾害是地震和火山活动的共同作用所致<sup>[53]</sup>,即局部不稳定的地质构造与该地区的地热活动相互作用为冰崩灾害的发生提供了有利条件<sup>[54]</sup>。

西藏地区地震断裂带分布密集,地震频发(图 1),地震是该地区诱发冰崩的主要构造运动,由于冰川表面存在大量的冰裂缝,地震发生所释放的能量改变了冰体的内部应力,使得冰裂缝进一步扩展、贯穿,诱发冰崩(图 2)。1950 年 8 月 15 日的则隆弄冰崩—泥石流灾害



审图号: 藏S(2023)002号

图 1 1949—2020 年西藏地区里氏 4.0 级以上地震分布图

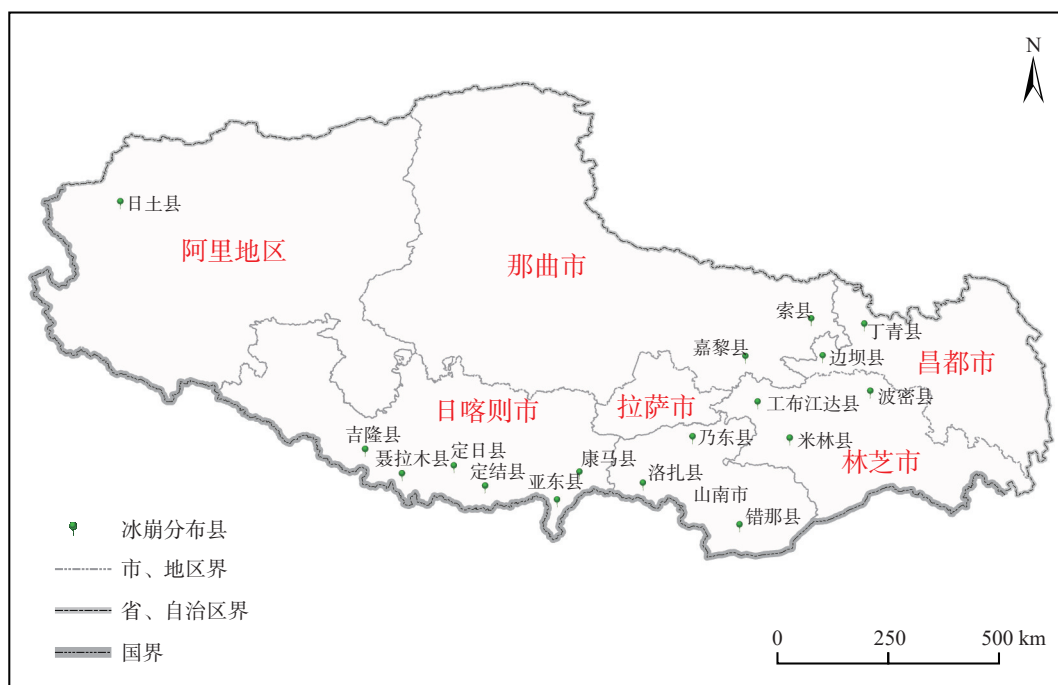
Fig. 1 Distribution of seismic with Richter scale above 4.0 in Tibet from 1949 to 2020

系西藏墨脱发生里氏 8.5 级地震所致<sup>[36]</sup>。

2.3 气候因素

全球气候变暖是诱发冰崩的重要原因,气候变暖导致冰川活动层的厚度增加,加速冻融过程<sup>[29]</sup>,促使冰川底部的不稳定性增加。杜军等<sup>[55]</sup>通过对西藏地区近 50 年的极端气候事件进行分析表示,西藏地区近 50 年的极端气温呈显著上升的趋势,而高海拔地区的增温速率及幅度明显大于低海拔地区<sup>[56]</sup>。根据表 1 统计的冰崩记录,米林县、聂拉木县、定结县以及林芝县(2015 年

前为林芝县)发生冰崩频数较高(图 3),结合该四个县所对应气象台站监测到的年平均气温及 20-20 时降雨量数据进行分析(定结县选择其邻近气象台站数据,即定日县气象台站),西藏地区近 70 年的气温均呈上升趋势,降雨呈先增加后减少的波动趋势(图 4),而气候变化加速了高原冰川末端的消融,消融水或降雨沿着冰裂缝下渗并进一步扩展裂缝<sup>[31, 57-58]</sup>,减弱了上部冰体与冰床之间的摩擦阻力<sup>[59-60]</sup>,最终诱发冰崩。1986 年 9 月 16 日,喀喇昆仑 K2 高峰受高强度降水影响发生冰雪



审图号: 藏S(2023)002号

图 2 1949—2020 年西藏地区冰崩分布图

Fig. 2 Ice avalanche distribution in Tibet from 1949 to 2020

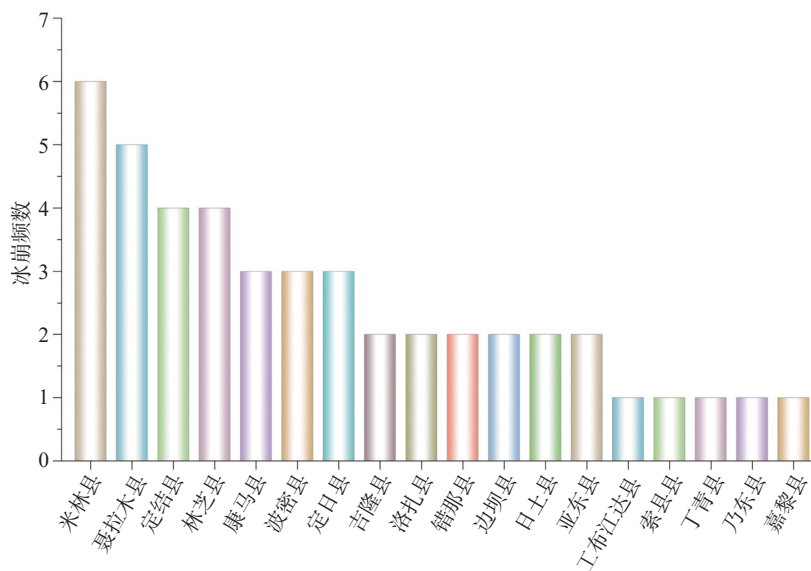


图 3 1949—2020 西藏各地区冰崩统计

Fig. 3 Ice avalanche statistics in Tibet from 1949 to 2020

崩<sup>[61]</sup>。2013 年 7 月 5 日,然则日阿错系气温升高导致冰崩入湖造成冰湖溃决灾害<sup>[62]</sup>。

### 3 冰崩灾害链

我国 80% 以上的冰川集中发育在海拔为 4 500 ~ 6 500 m 的范围内<sup>[63]</sup>,具有较大的势能,在冰崩灾害发生的过程中会伴随着剧烈的物质迁移与能量转换,当冰崩

的规模达到一定的程度,极有可能激发不同的灾害,进而形成灾害链<sup>[64-65]</sup>,同时随着全球气候变暖以及四季更替,西藏地区冻土反复的冻融交替,造成土质松散,为灾害链的发生提供了大量的物源。崔鹏等<sup>[66]</sup>分析了冰滑坡、冰崩导致的冰湖溃决的机制和条件,并归纳出 6 种由此导致冰湖溃决泥石流演化模式。朱颖彦等<sup>[67]</sup>按照对中巴喀喇昆仑公路的毁坏直接间接情况将

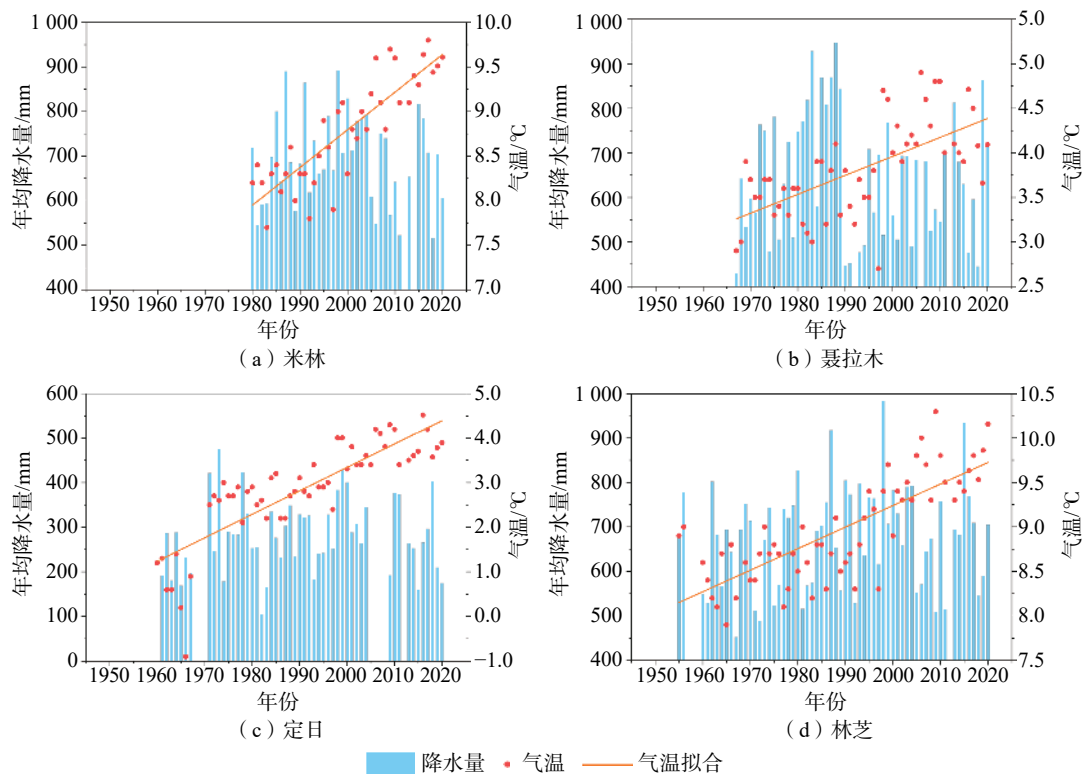


图 4 西藏地区近 70 年年平均降水量、气温变化图

Fig. 4 Variation of annual mean rainfall and temperature in Tibet in recent 70 years

灾害分为冰川灾害和冰川地质灾害,其中冰川地质灾害就呈灾害链的形式毁坏中巴公路。刘传正等<sup>[68-69]</sup>将雅鲁藏布江色东普沟的冰川灾害总结为冰崩—岩崩—滑坡—碎屑流—堵江—堰塞湖—溃决洪水的灾害链形式。张俊才等<sup>[11]</sup>对阿尼玛卿山冰崩灾害链进行分析,归纳出阿尼玛卿山晓玛沟冰崩链生灾害的形式为冰崩—碎屑流—堰塞湖—溃决洪水灾害链,是较为典型的高寒地区山地灾害链,且在同一区域多次发生同样类型的链生灾害,具有明显的空间和时间双重灾害链属性。童立强等<sup>[3]</sup>以青藏高原地区的冰崩灾害归纳为 3 种类型,分别为冰崩直接灾害、冰崩—冰湖溃决灾害和冰崩—堵溃链式灾害,分别对三种类型的冰崩造成的危害进行阐述。赵永辉等<sup>[70]</sup>通过对雅鲁藏布江色东普沟的滑坡堵江事件进行研究,总结出堵江事件的演化过程为冰崩、岩崩—滑坡—碎屑流—堵江。Jia 等<sup>[71]</sup>也对雅鲁藏布江堵江灾害链进行路径分析,认为灾害链的发展演化过程为冰川融水—松散冰碛物动员—沿侵蚀槽陡坡迁移形成冰川泥石流—形成坝塞堵塞河道—堰塞湖。万佳威等<sup>[72]</sup>将嘉黎断裂带沿线的成灾模式划分为高位崩滑直接堵江形式、高位崩滑形成碎屑流堵江形式、高位泥石流堵江形式和冰湖溃决形式 4 类。

根据表 1 的成灾形式可知,冰崩灾害主要分为冰崩

直接灾害和冰崩链式灾害,而冰崩链式灾害最终基本以泥石流或洪水形式呈现,因此根据发生泥石流的形式,将冰崩链式灾害分为冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害、冰崩—堵溃—泥石流链式灾害、冰崩—直接型泥石流(山洪)灾害 3 类。

3.1 冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害

冰湖溃决主要由冰崩、冰滑坡或冰川跃动引起,少数由冰崩和管涌共同诱发<sup>[64]</sup>。其中喜马拉雅山地区有记录的冰碛湖溃决灾害都具有冰雪崩入湖形成涌浪从而诱发溃决的成因<sup>[42]</sup>。冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害的冰川体毗邻冰湖,部分冰川的前缘(冰舌)深入冰湖,冰川内部裂隙在水位波动以及冻融交替的过程中逐渐扩张形成裂隙面,当冰体下滑力大于抗滑力时失稳崩落<sup>[73]</sup>。冰川体、冰舌失稳瞬间入湖造成水位迅速上涨并形成涌浪冲击终碛堤,导致溢流型溃决<sup>[66]</sup>,或者在涌浪的掏蚀下,终碛堤内形成管涌通道,造成堤坝溃决<sup>[31]</sup>,诱发泥石流、滑坡等一系列的次生灾害。1981 年,喜马拉雅山南坡的次仁玛措冰崩入湖造成冰湖溃决,进一步形成泥石流,摧毁沿章藏布沟两岸的道路、桥梁、电站,造成尼泊尔境内 200 多人罹难<sup>[36-37]</sup>。

3.2 冰崩—堵溃—泥石流链式灾害

冰崩—堵溃—泥石流链式灾害可进一步细分为冰

崩—碎屑流—堵溃—泥石流链式灾害和冰崩—直接堵溃—泥石流链式灾害,受冰川及基岩体的坡度和冰崩体的规模以及运动距离的约束<sup>[27]</sup>。冰崩—碎屑流—堵溃—泥石流式灾害在冰川崩落后快速移动,形成碎屑流,裹挟沿途的物源前进,造成下游江河堵塞,形成暂时性堰塞湖,溃决后可形成洪水或泥石流,严重威胁下游的居民点以及工程设施。冰崩—直接堵溃—泥石流式灾害主要是高位的冰川崩落后由于受基岩体坡度较陡影响,直接坠入江河堵塞河道,该类型灾害主要分布在河谷陡峭处,冰崩的同时可能伴随着岩崩。1950年8月15日,西藏墨脱发生里氏8.5级地震,导致则隆弄冰川突然崩落,形成冰川泥石流,掩埋了直白村,致使全村100余人死亡,同时碎屑物堵塞上游峡谷形成大坝,于1953年9月29日在持续高温降雨的作用下溃决造成古乡沟特大泥石流灾害<sup>[36]</sup>。2018年10月,西藏林芝市色东普沟上游发生冰崩,冰崩体及碎屑流堵塞雅鲁藏布江,2天后堰塞湖溃决,导致孟加拉国地区受到洪水的威胁<sup>[57, 69]</sup>。

### 3.3 冰崩—直接型泥石流(山洪)灾害

冰崩的发生为泥石流及后续的次生灾害提供了水源和固体物质,胡桂胜等<sup>[74]</sup>对西藏林芝地区的泥石流类型进行分析,归纳出三类冰雪崩型泥石流<sup>[75]</sup>,其中两类为冰崩—直接型泥石流,一是冰雪崩过程中直接形成泥石流,当气温高达15℃,冰体融化,使内部孔隙水压力增加,随着压力的增加,摩擦系数逐渐减小<sup>[9]</sup>,流动性增强,当土砂含水量达13%,便可形成泥石流<sup>[36]</sup>,即当满足上述条件便可形成冰雪崩直接型泥石流,该类型的泥石流速度快、破坏性强,但规模通常比较小;二是冰崩体与上游沟道的冰雪融水相遇形成的泥石流;冰崩—直接型泥石流灾害通常发生在较偏远地区的地方,或规模较小,对下游影响较弱,但为下一次的泥石流启动提供了一定的物源,具有一定的成灾规模。

通过归纳,可以总结出冰崩灾害链的如下几个特点:

(1)突发性、爆发性强,难以预报,且容易导致大规模的毁灭性灾难<sup>[76]</sup>。

(2)海拔落差小,灾害链危害相对小,过程较缓;海拔落差大,灾害发生迅猛,过程迅速,毁灭性极强,危害更大。

(3)灾害主要集中发生在6—9月,气温升高,积雪融化,降水增多,具有明显的季节性(图5)。

(4)冰崩—冰湖溃决—泥石流链式灾害主要集中在日喀则地区与山南地区,即喜马拉雅山脉中段及南段区域,该区域冰湖分布广泛,受气候影响较为明显;冰

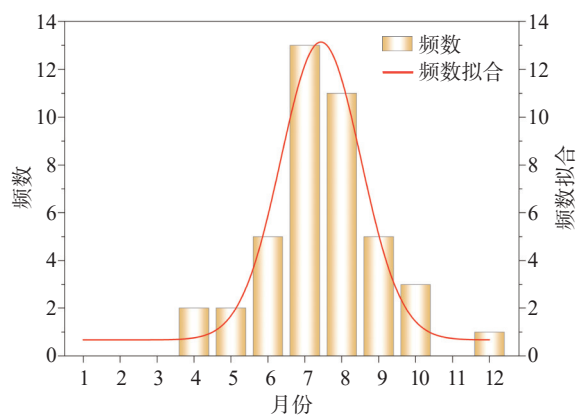


图5 1949—2020年西藏地区冰崩发生月份分布图

Fig. 5 Monthly distribution of ice avalanche in Tibet from 1949 to 2020

崩—堵溃—泥石流链式灾害主要集中在林芝地区与昌都地区交界处,即雅鲁藏布江大峡谷区域,该区域冰川高程落差较大<sup>[77]</sup>,降雨充沛且集中<sup>[78]</sup>,物源补给丰富,为进一步造成堵江提供大量物源;冰崩—直接型泥石流(山洪)灾害主要相对比较分散,取决于冰崩的体积,同时受雨季影响较大(图2)。

## 4 冰崩灾害监测

近年来冰崩灾害及其诱发的链式灾害频发、严重危害到下游民众的生命财产安全,因而有必要对冰崩灾害进行监测,通过对目前的在西藏地区的冰崩灾害监测方式进行梳理,主要为遥感技术和地震仪监测两种方式。

### 4.1 遥感技术

西藏地区冰川分布广泛,且环境恶劣,传统的人工勘察的方式无法对冰崩灾害进行有效的定位与监测,而遥感技术可以很好地弥补这一不足,能对冰川进行大范围的监测,通过对遥感影像进行解译,可以很快对危险区域进行锁定,尤其针对高位远程的冰崩灾害,目前西藏地区乃至整个亚洲地区对于冰崩灾害的监测主要是借助遥感技术进行大范围的早期识别、风险预估和灾后的应急处理、灾后恢复。

张晓宇等<sup>[79]</sup>通过高精度遥感结合多光谱遥感地表位移监测技术对茶隆隆巴曲地区发生冰雪崩的规模及频率进行分析,认为该地区主要以小规模冰雪崩为主。汤明高等<sup>[80]</sup>基于高分影像对青藏高原地区的冰崩隐患进行识别,建立了青藏高原冰崩灾害隐患信息数据库,同时总结出冰崩隐患的发育分布规律,并对识别的冰崩隐患进行单体危险性分级评价。Käab等<sup>[45]</sup>基于卫星遥感、数值模拟结合野外调查对2016年西藏地区

阿汝村的两次冰崩进行分析,表明可以通过最先进的卫星监测和模型方法对偏远地区的冰崩灾害进行早期的预警。刘传正等<sup>[69]</sup>利用卫星图像解译雅鲁藏布江色东普沟冰川活动情况,并分析崩滑—碎屑流造成堵江事件的成因,以及对冰崩—滑坡—碎屑流这一链式灾害的发展趋势进行评估。Dokukin 等<sup>[7]</sup>通过卫星图像发现在冰崩发生前,冰裂缝的扩展速度明显加快。李军等<sup>[32]</sup>基于多时相光学遥感影像和 InSAR 形变数据对则隆弄区域进行综合解译,总结出则隆弄高位链式地质灾害的演化形式。李壮等<sup>[81]</sup>结合多源多期的遥感影像和 InSAR 数据对色东普沟 2018 年的高位地质链式灾害划分为形成区、流通区和堆积堵溃区,并对其发育变形特征进行分析。刘勇等<sup>[82]</sup>基于 InSAR 技术对色东普流域的冰崩碎屑流运动区的地面变形进行研究,通过 InSAR 变形结果为冰崩事件的发生机理以及冰崩碎屑流的运动特征分析提供依据。董继红等<sup>[83]</sup>人通过星载雷达来监测加拉白垒峰地区的冰川运动情况,进而为冰崩灾害的发生及影响范围提供判断依据。Salzmann 等<sup>[4]</sup>开发了一种基于统计参数、地理信息系统(GIS)建模技术和遥感技术可对潜在危险地区进行探测的方法。雷添杰等<sup>[84]</sup>利用无人机航空遥感系统进行灾害的监测评估以及应急救援。

## 4.2 地震仪

冰崩被认为是冰震的一重要类型之一<sup>[85]</sup>,通过采用地震学的监测方法可以获得高时间分辨率的信号数据,有利于进一步探究冰崩发育及产生的机理。但目前在青藏高原地区采用地震仪监测冰崩事件的研究还属于起步阶段。

陈宇乔<sup>[86]</sup>通过地震仪对老虎沟 12 号冰川进行监测,发现了两种冰震周期信号,其中短周期信号被认为是冰川表面冰裂隙破裂产生。左洪等<sup>[85]</sup>在阿汝冰川附近布设多个短周期地震台站,发现夏季冰震事件震级明显比冬季大,可能受冰川表面与内部的温差影响。

西藏地区海拔高,地势险峻,遥感技术是该地区目前主要的监测方式,尤其是高分辨率影像,有利于研究人员提取冰崩灾害的相关特征情况,评估灾害的危险性以及灾后重建等。但是遥感技术也存在其局限性,一方面依赖于卫星的回归周期以及卫星搭载的传感器精度(分辨率),无法对冰川动态进行实时监测,另一方面受青藏高原地区独特的气候影响,在雨热季冰崩频发期云雾较多,造成光学遥感影像的噪音较多,不利于分析,雷达遥感虽对云雾有一定的穿透作用,且对地形变化相对敏感,有利于冰川裂缝、冰川塌陷等变形特征的提取,

但其存在三维形变数据获取难、信号低相干、大气延迟等问题;地震仪通过对冰崩产生的信号进行分析,能够由此反映冰川的内部活动、冰裂隙的发育以及冰崩的能量情况,有利于冰崩产生机理的研究,但冰崩发生位置通常较为偏远,安装布设设备难度大,限制该监测方式的应用。

## 5 问题与展望

冰崩是在全球气候变暖背景下产生的新型灾害,目前对冰崩灾害还没有准确的定义,相关的研究方法有限,其类型的划分也没有统一的标准,以致各个国家或者研究团队在研究冰崩灾害的过程中没有统一的标准,同时对冰崩的产生机理还不明确,相关研究资料还不够丰富,加之冰崩大多发生在偏远地区,网络信号弱甚至没有信号,人员进入困难,不利于冰崩现场数据的获取与传输,进而影响对冰崩灾害的危险评估、监测预警甚至工程治理等研究工作的开展。因此,亟需开展相关室内外试验,完善冰崩灾害的研究体系。

### 5.1 冰崩机理、机制研究

对冰崩发生机理的研究是进一步开展冰崩灾害监测预警的基础。通过模拟实验,分析冰崩产生过程中的力、声、水热等变化过程,阐述冰崩产生过程中不同因素包括海拔、坡度、辐射强度、温度、降雨等对其物理性质的影响作用,结合野外监测数据对比分析,进一步揭示冰崩灾害的成灾机理。

### 5.2 冰崩灾害的识别与监测

冰崩灾害大多发生于高寒高海拔的无人区,通常呈链式灾害给下游的民众带来危害,这类灾害通常具有与分布范围广,高速远程且危害大,实地勘测难度大等特点,因此对这类灾害的早期识别尤为重要。目前西藏地区冰崩灾害的主要监测方式为遥感技术,地震仪监测也还处在起步阶段,对灾害本身的实时监测、监测手段的多样化还比较缺乏,发展次声阵列监测、全站仪-地震监测系统-GPS 站网-近距离摄影测量联合监测技术等多种监测方式<sup>[87-93]</sup>,为进一步探究冰崩灾害的发育演化机制提供数据支撑,以遥感技术为主的大范围监测与早期识别——多种监测方式联合的实时精准监测的模式会是未来冰崩监测的发展趋势。

### 5.3 冰崩次生灾害的链式监测预警

冰崩常导致泥石流、滑坡等链生灾害的发生,加强冰崩次生灾害的监测预警,建立冰崩灾害监测预警预报平台,以减少对下游群众的威胁。因此,根据冰崩灾害类型以及其威胁范围布设相应的链式监测设备,通过在

有条件的冰川附近布设监测设备,在对应的威胁区域布设滑坡、泥石流等监测设备,实现冰崩灾害从源头到终点的全方位链式监测;同时建立冰崩灾害监测预警预报平台,逐步实现灾害监测、预警、预警信息发布、群众转移一体化。

**致谢** 感谢各评审专家的宝贵意见以及中国地震台网中心国家地震科学数据中心(<http://data.earthquake.cn>),中国气象数据网国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)以及全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>)提供的数据支撑!

#### 参考文献(References):

- [1] 胡文涛,姚檀栋,余武生,等.高亚洲地区冰崩灾害的研究进展[J].冰川冻土,2018,40(6):1141-1152. [HU Wentao, YAO Tandong, YU Wusheng, et al. Advances in the study of glacier avalanches in High Asia [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1141-1152. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 裴丽鑫.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),2019. [PEI Lixin. The preliminary study of characteristics and types of ice avalanche disaster in the Tibetan Plateau [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 童立强,裴丽鑫,涂杰楠,等.冰崩灾害的界定与类型划分——以青藏高原地区为例[J].国土资源遥感,2020,32(2):11-18. [TONG Liqiang, PEI Lixin, TU Jienan, et al. A preliminary study of definition and classification of ice avalanche in the Tibetan Plateau region [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(2): 11-18. (in Chinese with English abstract)]
- [4] SALZMANN N, KÄÄB A, HUGGEL C, et al. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS-modelling [J]. Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography, 2004, 58(2): 74-84.
- [5] FAILLETTAZ J, FUNK M, SORNETTE D. Instabilities on Alpine temperate glaciers: New insights arising from the numerical modelling of Allalingsletscher (Valais, Switzerland) [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(9): 2977-2991.
- [6] COLLINS D N. Hydrometeorological conditions, mass balance and runoff from alpine glaciers [M] //Glaciology and Quaternary Geology. Dordrecht: Springer Netherlands, 1989: 235-260.
- [7] DOKUKIN M D, BEKKIEV M Y, KALOV K M, et al. Monitoring of ice avalanche using aerospace and ground information [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 913(5): 052040.
- [8] 王世金, 效存德.全球冰冻圈灾害高风险区:影响与态势[J].科学通报,2019,64(9):890-900. [WANG Shijin, XIAO Cunde. Global cryospheric disaster at high risk areas: impacts and trend [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(9): 890-900. (in Chinese with English abstract)]
- [9] SCHNEIDER D, KAITNA R, DIETRICH W E, et al. Frictional behavior of granular gravel-ice mixtures in vertically rotating drum experiments and implications for rock-ice avalanches [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 69(1): 70-90.
- [10] GOODSSELL B, ANDERSON B, LAWSON W J, et al. Outburst flooding at Franz Josef glacier, south Westland, Newzealand [J]. Newzealand Journal of Geology and Geophysics, 2005, 48(1): 95-104.
- [11] 张俊才,周保,曹小岩,等.阿尼玛卿山冰崩链生灾害基本特征分析[J].人民黄河,2019,41(11):17-21. [ZHANG Juncui, ZHOU Bao, CAO Xiaoyan, et al. Analysis of basic characteristics of glacial collapse chain hazards in animaqing mountain [J]. Yellow River, 2019, 41(11): 17-21. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 殷跃平,李滨,张田田,等.印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):1-8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨凯奇,宋一顺,冯雅雯.62人遇难142人失踪,印度北部冰川断裂带来警醒[EB/OL].2021-02-21. [YANG Kaiqi, SONG Yishun, FENG Yawen. 62 people were killed and 142 missing, alerted by the rupture of glaciers in northern India [EB/OL]. 2021-02-21. (in Chinese)]
- [14] STUART-SMITH R F, ROE G H, LI S, et al. Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat [J]. Nature Geoscience, 2021, 14(2): 85-90.
- [15] ZHENG G X, ALLEN S K, BAO A M, et al. Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(5): 411-417.
- [16] 黄田进.青藏高原冰川厚度与湖泊水位的时空变化研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2017. [HUANG Tianjin. Spatial-temporal changes of glacier thickness and lake level on the Qinghai-Tibetan Plateau [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy Sciences), 2017. (in Chinese with English abstract)]

- [17] RÖTHLISBERGER H. Ice avalanches [J]. *Journal of Glaciology*, 1977, 19(81): 669 – 671.
- [18] MARGRETH S, FUNK M. Hazard mapping for ice and combined snow/ice avalanches—two case studies from the Swiss and Italian Alps [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 30(1/2/3): 159 – 173.
- [19] 吕儒仁, 李德基. 西藏工布江达县唐不朗沟的冰湖溃决泥石流流 [J]. *冰川冻土*, 1986, 8(1): 61 – 71. [LYU Ruren, LI Deji. Debris flow induced by ice lake burst in the tangbulang gully, Gongbujiangda, Xizang (Tibet) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 8(1): 61 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏冰湖溃决主要特征 [J]. *灾害学*, 2008, 23(1): 55 – 60. [LIU Jingjing, CHENG Zunlan, LI Yong, et al. Characteristics of glacier-lake breaks in Tibet [J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(1): 55 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势 [J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 954 – 959. [CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, DANG Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in southeastern Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 954 – 959. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1377 – 1390. [YAO Xiaojun, LIU Shiyin, SUN Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1377 – 1390. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 吴积善, 张信宝, 汪阳春. 川西北高原山地灾害垂直地带性 [J]. *山地学报*, 2006, 24(2): 161 – 166. [WU Jishan, ZHANG Xinbao, WANG Yangchun. The vertical zonality of mountain hazards on the north-western plateau in Sichuan [J]. *Journal of Mountain Science*, 2006, 24(2): 161 – 166. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 钟敦伦, 谢洪, 韦方强, 等. 论山地灾害链 [J]. *山地学报*, 2013, 31(3): 314 – 326. [ZHONG Dunlun, XIE Hong, WEI Fangqiang, et al. Discussion on mountain hazards chain [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(3): 314 – 326. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 秦大河. 冰冻圈科学辞典 [Z]. 北京: 气象出版社, 2014. [QIN Dahe. Glossary of cryosphere science [Z]. Beijing: China Meteorological Press, 2014. (in Chinese)]
- [26] 王世金, 温家洪. 冰冻圈灾害特征、影响及其学科发展展望 [J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 523 – 530. [WANG Shijin, WEN Jiahong. Characteristics, influence of cryosphere disaster and prospect of discipline development [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 523 – 530. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 舒有锋. 西藏喜马拉雅山地区冰碛湖溃决危险性评价及其演进数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2011. [SHU Youfeng. Hazard assessment of moraine-dammed lake outbursts in the Himalayas, Tibet and the propagating numerical simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 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*, 2018, 26(6): 1552 – 1561. [TONG Liqiang, TU Jienan, PEI Lixin, et al. Preliminary discussion of the frequently debris flow events in sedongpu basin at gyalaperi peak, Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1552 – 1561. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1355 – 1370. [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang(II): Hazards effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1355 – 1370. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 刘淑珍, 李辉霞, 鄢燕, 柴宗新, 杜少平. 西藏自治区洛扎县冰湖溃决危险度评价 [J]. *山地学报*, 2003, 21(增刊1): 128 – 132. [LIU Shuzhen, LI Huixia, YAN Yan, et al. Assessment of bursting hazards of the ice lakes in Luozha County, Tibet [J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21(Sup 1): 128 – 132. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 刘秧. 西藏终碛堤冰湖溃决冰川、温度条件的初步研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [LIU Yang. Preliminary study on the glacial and temperature conditions of terminal moraine dam glacier lake outburst in Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 李军, 褚宏亮, 李滨, 等. 基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(3): 42 – 50. [LI Jun, CHU Hongliang, LI Bin, et al. Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 42 – 50. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 蒋忠信, 崔鹏, 蒋良淮. 冰碛湖漫溢型溃决临界水文条件 [J]. *铁道工程学报*, 2004, 21(4): 21 – 26. [JIANG Zhongxin, CUI Peng, JIANG Liangwei. Critical hydrologic condition for overflow burst of moraine lake [J]. *Journal of*

- [Railway Engineering Society](#), 2004, 21(4): 21–26. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 34 ] 程尊兰, 田金昌, 张正波, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流形成的气候因素与发展趋势 [ J ]. [地学前缘](#), 2009, 16(6): 207–214. [ CHENG Zunlan, TIAN Jinchang, ZHANG Zhengbo, et al. Debris flow induced by glacial-lake break in Southeast Tibet [ J ]. [Earth Science Frontiers](#), 2009, 16(6): 207–214. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 35 ] 刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述 [ J ]. [冰川冻土](#), 2019, 41(6): 1335–1347. [ LIU Jiankang, ZHANG Jiajia, GAO Bo, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China [ J ]. [Journal of Glaciology and Geocryology](#), 2019, 41(6): 1335–1347. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 36 ] 李鸿璜, 蔡祥兴. 中国冰川泥石流的一些特征 [ J ]. [水土保持通报](#), 1989, 9(6): 1–9. [ LI Honglian, CAI Xiangxing. The glacial debris flow of China [ J ]. [Bulletin of Soil and Water Conservation](#), 1989, 9(6): 1–9. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 37 ] 徐道明. 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征 [ J ]. [冰川冻土](#), 1987, 9(1): 23–34. [ XU Daoming. Characteristics of debris flow caused by outburst of glacial lakes on the Boqu River in Xizang, China [ J ]. [Journal of Glaciology and Geocryology](#), 1987, 9(1): 23–34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 38 ] YAMADA T. Glacier lakes and outburst floods in the Nepal Himalayas [ C ]. [Snow and Glacier Hydrology](#). IAHS Publication, 1993.
- [ 39 ] 贾洋, 崔鹏. 西藏冰湖溃决灾害事件极端气候特征 [ J ]. [气候变化研究进展](#), 2020, 16(4): 395–404. [ JIA Yang, CUI Peng. The extreme climate background for glacial lakes outburst flood events in Tibet [ J ]. [Climate Change Research](#), 2020, 16(4): 395–404. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 40 ] 唐得胜, 杨永红, 常鸣. 藏东南地区冰湖溃决泥石流灾害链成因分析及防治措施 [ J ]. [水电能源科学](#), 2013, 31(12): 174–178. [ TANG Desheng, YANG Yonghong, CHANG Ming. Cause analysis and preventive measures of debris flow disaster-chain due to glacial lake outburst in southeastern Tibet [ J ]. [Water Resources and Power](#), 2013, 31(12): 174–178. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 41 ] 李俊, 陈宁生, 刘美, 等. 2000年易贡乡扎木弄沟滑坡型泥石流主控因素分析 [ J ]. [南水北调与水利科技](#), 2018, 16(6): 187–193. [ LI Jun, CHEN Ningsheng, LIU Mei, et al. Analysis of main factors for landslide-triggered debris flow in Zhamunong gully on April 9th, 2000 [ J ]. [South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology](#), 2018, 16(6): 187–193. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 42 ] 刘春玲, 童立强, 祁生文, 等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析 [ J ]. [国土资源遥感](#), 2016, 28(3): 110–115. [ LIU Chunling, TONG Liqiang, QI Shengwen, et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas [ J ]. [Remote Sensing for Land & Resources](#), 2016, 28(3): 110–115. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 43 ] 莫艳合, 许冲, 刘灿. 西藏错那县“2007-08-10”特大泥石流灾害成因及防治对策 [ J ]. [防灾科技学院学报](#), 2008, 10(3): 43–46. [ MO Yanhe, XU Chong, LIU Can. The causes and prevention countermeasures of 2007-08-10 large-scale debris flow hazard in Cuona County, Tibet [ J ]. [Journal of Institute of Disaster-Prevention Science and Technology](#), 2008, 10(3): 43–46. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 44 ] 刘晶晶, 唐川, 程尊兰, 等. 气温对西藏冰湖溃决事件的影响 [ J ]. [吉林大学学报\(地球科学版\)](#), 2011, 41(4): 1121–1129. [ LIU Jingjing, TANG Chuan, CHENG Zunlan, et al. Impact of temperature on glacier-lake outbursts in Tibet [ J ]. [Journal of Jilin University \(Earth Science Edition\)](#), 2011, 41(4): 1121–1129. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 45 ] KÄÄB A, LEINSS S, GILBERT A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability [ J ]. [Nature Geoscience](#), 2018, 11(2): 114–120.
- [ 46 ] 王欣, 刘时银, 丁永建. 中国喜马拉雅山冰碛湖溃决灾害评价方法与应用研究 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2016. [ WANG Xin, LIU Shiyin, DING Yongjian. Study on evaluation method and application of moraine lake burst disaster in Himalayas of China [ M ]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese) ]
- [ 47 ] 王欣, 刘琼欢, 蒋亮虹, 等. 基于SAR影像的喜马拉雅山珠穆朗玛峰地区冰川运动速度特征及其影响因素分析 [ J ]. [冰川冻土](#), 2015, 37(3): 570–579. [ WANG Xin, LIU Qionghuan, JIANG Lianghong, et al. Characteristics and influence factors of glacier surface flow velocity in the Everest region, the Himalayas derived from ALOS/PALSAR images [ J ]. [Journal of Glaciology and Geocryology](#), 2015, 37(3): 570–579. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 48 ] 李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形因子的关系探究 [ J ]. [冰川冻土](#), 2019, 41(5): 1026–1035. [ LI Linfeng, LI Kaiming. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River Basin [ J ]. [Journal of Glaciology and Geocryology](#), 2019, 41(5): 1026–1035. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 49 ] ABDULLAH T, ROMSHOO S A, RASHID I. The satellite observed glacier mass changes over the Upper Indus Basin during 2000-2012 [ J ]. [Scientific Reports](#), 2020, 10(1): 14285.

- [50] 杨针娘. 中国冰川水资源 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. [YANG Zhenniang. Glacier water resources in China [M]. Lanzhou: Gansu Science & Technology Press, 1991. (in Chinese)]
- [51] 冀琴, 刘睿, 杨太保. 1990—2015年喜马拉雅山冰川变化的遥感监测 [J]. 地理研究, 2020, 39(10): 2403—2414. [JI Qin, LIU Rui, YANG Taibao. Glacier variations in the Himalayas during 1990-2015 [J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2403—2414. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 刘时银, 蒲健辰, 邓晓峰. 中国冰川图鉴 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2014. [LIU Shiyin, PU Jianchen, DENG Xiaofeng. Glaciers and glacial landscapes in China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2014. (in Chinese)]
- [53] KOTLYAKOV V M, ROTOTAEVA O V, NOSENKO G A. The September 2002 kolka glacier catastrophe in north Ossetia, Russian federation: Evidence and analysis [J]. Mountain Research and Development, 2004, 24(1): 78—83.
- [54] HAEBERLI W, HUGGEL C, KÄÄB A, et al. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: An extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus [J]. Journal of Glaciology, 2004, 50(171): 533—546.
- [55] 杜军, 路红亚, 建军. 1961—2010年西藏极端气温事件的时空变化 [J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1269—1280. [DU Jun, LU Hongya, JIAN Jun. Variations of extreme air temperature events over Tibet from 1961 to 2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1269—1280. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 374—381. [DUAN Anmin, XIAO Zhixiang, WU Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979-2014 [J]. Climate Change Research, 2016, 12(5): 374—381. (in Chinese with English abstract)]
- [57] GAO J, YAO T D, MASSON-DELMOTTE V, et al. Collapsing glaciers threaten Asia's water supplies [J]. Nature, 2019, 565(7737): 19—21.
- [58] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(5): 517—522. [PU Jianchen, YAO Tandong, WANG Ninglian, et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai-Tibetan Plateau during the past century [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(5): 517—522. (in Chinese with English abstract)]
- [59] 刘建康, 程尊兰, 郭芬芬, 等. 藏东南典型冰湖溃决危险性分析 [J]. 灾害学, 2011, 26(2): 45—49. [LIU Jiankang, CHENG Zunlan, GUO Fenfen, et al. Analysis on risk of glacier-lake outburst in southeastern Tibet [J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(2): 45—49. (in Chinese with English abstract)]
- [60] 张宁宁, 何元庆, 和献中, 等. 玉龙雪山冰川崩塌成因分析 [J]. 山地学报, 2007, 25(4): 412—418. [ZHANG Ningning, HE Yuanqing, HE Xianzhong, et al. The analysis of icefall at Mt. Yulong [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(4): 412—418. (in Chinese with English abstract)]
- [61] SHEN Y P. A giant avalanche on K2 mount, Karakorum [J]. GeoJournal, 1991, 25(2): 249—254.
- [62] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158—165. [SUN Meiping, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 158—165. (in Chinese with English abstract)]
- [63] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状 [J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3—16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3—16. (in Chinese with English abstract)]
- [64] 崔鹏, 陈容, 向灵芝, 等. 气候变暖背景下青藏高原山地灾害及其风险分析 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 103—109. [CUI Peng, CHEN Rong, XIANG Lingzhi, et al. Risk analysis of mountain hazards in Tibetan Plateau under global warming [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(2): 103—109. (in Chinese with English abstract)]
- [65] 崔鹏, 贾洋, 苏凤环, 等. 青藏高原自然灾害发育现状与未来关注的科学问题 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 985—992. [CUI Peng, JIA Yang, SU Fenghuan, et al. Natural hazards in Tibetan Plateau and key issue for feature research [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(9): 985—992. (in Chinese with English abstract)]
- [66] 崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 621—628. [CUI Peng, MA Dongtao, CHEN Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(6): 621—628. (in Chinese with English abstract)]
- [67] 朱颖彦, 杨志全, Steve ZOU, 等. 中巴喀喇昆仑公路冰川灾害 [J]. 公路交通科技, 2014, 31(11): 51—59. [ZHU Yingyan, YANG Zhiquan, ZOU S, et al. Glacier geo-hazards along China- Pakistan international karakoram highway [J].

- Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(11): 51–59. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 68 ] 刘传正. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江堰塞湖 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 7. [ LIU Chuansheng. Landslide-debris flow in Sedongpu gully of the Yarlung Zangbo River blocks the dammed lake [ J ]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 69 ] 刘传正, 吕杰堂, 童立强, 等. 雅鲁藏布江色东普沟崩滑-碎屑流堵江堰塞湖灾害初步研究 [ J ]. 中国地质, 2019, 46(2): 219–234. [ LIU Chuansheng, LYU Jietang, TONG Liqiang, et al. Research on glacial/rock fall-landslide-debris flows in Sedongpu Basin along Yarlung Zangbo River in Tibet [ J ]. Geology in China, 2019, 46(2): 219–234. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 70 ] 赵永辉. 中国西藏雅鲁藏布江色东普沟滑坡-堵江堰塞湖事件研究 [ J ]. 河北地质大学学报, 2020, 43(3): 31–37. [ ZHAO Yonghui. Study on the barrier lake event for landslide-river blocking of sedongpu valley on Yarlung Zangbo River in Tibet of China [ J ]. Journal of Hebei GEO University, 2020, 43(3): 31–37. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 71 ] JIA H C, CHEN F, PAN D H. Disaster chain analysis of avalanche and landslide and the river blocking dam of the Yarlung Zangbo River in Milin County of Tibet on 17 and 29 October 2018 [ J ]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4707.
- [ 72 ] 万佳威, 褚宏亮, 李滨, 等. 西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 51–60. [ WAN Jiawei, CHU Hongliang, LI Bin, et al. Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 51–60. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 73 ] 周路旭, 刘建康, 李元灵, 等. 川藏交通廊道龙利空泽错冰碛湖溃决危险性评价 [ J ]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(6): 32–39. [ ZHOU Luxu, LIU Jiankang, LI Yuanling, et al. Outburst risk assessment of longlikongze moraine lake in Sichuan-Tibet traffic corridor [ J ]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(6): 32–39. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 74 ] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 西藏林芝地区泥石流类型及形成条件分析 [ J ]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 193–197. [ HU Guisheng, CHEN Ningsheng, DENG Mingfeng, et al. Classification and initiation conditions of debris flows in Linzhi area, Tibet [ J ]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(2): 193–197. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 75 ] 吕儒仁, 李德基. 西藏波密冬茹弄巴的冰雪融水泥石流 [ J ]. 冰川冻土, 1989, 11(2): 148–160. [ LYU Ruren, LI Deji. Ice-snow-melt water debris flows in the dongru longba (gully) Bomi County, Xizang (Tibet) [ J ]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(2): 148–160. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 76 ] 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 地质灾害链 [ J ]. 地学前缘, 2007, 14(6): 11–23. [ HAN Jinliang, WU Shuren, WANG Huabin. Preliminary study on geological hazard chains [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(6): 11–23. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 77 ] 张田田, 殷跃平, 李滨, 等. 西藏波密茶隆隆巴曲高位地质灾害类型及发育特征 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 9–16. [ ZHANG Tiantian, YIN Yueping, LI Bin, et al. Types and development characteristics of high geological disasters in Chalonglongbaqu gully, Bomi, Tibet [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 9–16. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 78 ] 邹子南, 王运生, 辛聪聪, 等. 雅鲁藏布大峡谷高位岩质崩塌影响因素分析 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(1): 20–29. [ ZOU Zinan, WANG Yunsheng, XIN Congcong, et al. Analysis on the factors influencing the high level rock avalanches in the Yarlung Zangbo Grand Canyon [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 20–29. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 79 ] 张晓宇, 杜世回, 孟祥连, 等. 茶隆隆巴曲山地灾害特征及冰崩碎屑流致灾风险研究 [ J ]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 435–444. [ ZHANG Xiaoyu, DU Shihui, MENG Xianglian, et al. Railway disaster risk due to mountain disasters at Chalong-Longbaqu gully [ J ]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(2): 435–444. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 80 ] 汤明高, 王李娜, 刘昕昕, 等. 青藏高原冰崩隐患发育分布规律及危险性 [ J/OL ]. 地球科学, 2021: 1–15. (2021-07-05). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20210702.1803.006.html>. [ TANG Minggao, WANG Lina, LIU Xinxin, et al. Distribution and risk of ice avalanche hazards in Tibetan Plateau [ J/OL ]. *Earth Science*, 2021: 1–15. (2021-07-05). (in Chinese with English abstract) ]
- [ 81 ] 李壮, 李滨, 高杨, 等. 雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 33–41. [ LI Zhuang, LI Bin, GAO Yang, et al. Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(3): 33–41.

- (in Chinese with English abstract) ]
- [ 82 ] 刘勇, 史正涛. 基于时序InSAR的雅鲁藏布江色东普流域冰崩碎屑流运动区地面变形研究 [ J ]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 63–70. [ LIU Yong, SHI Zhengtao. Study on the surface deformation of ice avalanche debris flow movement area in sedongpu basin of Yarlung Zangbo River based on time series InSAR [ J ]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2021, 41(6): 63–70. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 83 ] 董继红, 杨成生, 张本浩, 等. 基于SAR偏移量跟踪技术的加拉巴垒峰典型冰川位移监测 [ J ]. 甘肃科学学报, 2021, 33(2): 1–7. [ DONG Jihong, YANG Chengsheng, ZHANG Benhao, et al. Typical glacier displacement monitoring of guala peri based on SAR offset tracking technology [ J ]. Journal of Gansu Sciences, 2021, 33(2): 1–7. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 84 ] 雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用 [ J ]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178–183. [ LEI Tianjie, LI Changchun, HE Xiaoying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue [ J ]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178–183. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 85 ] 左洪, 裴顺平, 何建坤, 等. 冰川地震学研究进展 [ J ]. 地球与行星物理论评, 2021, 52(3): 280–290. [ ZUO Hong, PEI Shunping, HE Jiankun, et al. Research progress of the glacier seismology [ J ]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2021, 52(3): 280–290. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 86 ] 陈宇乔. 大陆型山谷冰川冰震的规律和影响因素——以老虎沟12号冰川为例 [ J ]. 海洋学研究, 2018, 36(3): 50–56. [ CHEN Yuqiao. Rule and affecting factors of seismic events in valley glacier with continental features: A case study on Laohugou Glacier No. 12 [ J ]. Journal of Marine Sciences, 2018, 36(3): 50–56. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 87 ] MURAYAMA T, KANAO M, YAMAMOTO M Y, et al. Infrasound signals and their source location inferred from array deployment in the lützow-holm bay region, east Antarctica: January-June 2015 [ J ]. International Journal of Geosciences, 2017, 8(2): 181–188.
- [ 88 ] ASMING V E, BARANOV S V, VINOGRADOV A N, et al. Using an infrasonic method to monitor the destruction of glaciers in Arctic conditions [ J ]. Acoustical Physics, 2016, 62(5): 583–592.
- [ 89 ] MAYER S, VAN HERWIJNEN A, ULIVIERI G, et al. Evaluating the performance of an operational infrasound avalanche detection system at three locations in the Swiss Alps during two winter seasons [ J ]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 102962.
- [ 90 ] THÜRING T, SCHOCH M, VAN HERWIJNEN A, et al. Robust snow avalanche detection using supervised machine learning with infrasonic sensor arrays [ J ]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 111: 60–66.
- [ 91 ] MARGRETH S, FAILLETTAZ J, FUNK M, et al. Safety concept for hazards caused by ice avalanches from the Whympfer hanging glacier in the Mont Blanc Massif [ J ]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 69(2/3): 194–201.
- [ 92 ] HUMLUM O, HANSEN B U, NIELSEN N, et al. Meteorological Observations in 2001 at the Arctic Station, Qeqertarsuaq (69°15'N), Central West Greenland/Measuring calving in Icefall Lake, SE Greenland, using a “Diver” pressure transducer with a built-in datalogger [ J ]. Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography, 2002, 102(1): 103–109.
- [ 93 ] VINOGRADOV Y A, ASMING V E, BARANOV S V, et al. Seismic and infrasonic monitoring of glacier destruction: a pilot experiment on Svalbard [ J ]. Seismic Instruments, 2015, 51(1): 1–7.