https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.140

# 藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征

黄 海[1,2],龚 诚[1,3]

1. 中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都 611734
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心,四川成都 611734
3. 中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

**摘 要:** 冰雪型地质灾害链是藏东南地区重大工程建设中的重要风险源,分析灾害链的演化规律可为重大灾害隐患识别和风险研判提供支撑.以直白沟为对象,通过野外调查、遥感解译和灾害监测,研究了孕灾背景的演化和1950年以来的6次灾害链事件的活动特征.结果表明:直白沟冰雪型地质灾害链是由冰川活动和高位岩崩驱动的,演进模式分为相变驱动物性变化成链和多要素级联效应成链两类,灾害链的活跃程度受地震作用显著控制.孕灾条件中的冰川和冰碛物的时空演化控制了灾害链的活动特征,地震和冰川消退驱动链首灾害由冰川跃动向高位岩体转换,物源增多和冰水相变作用增加了灾害链的演进长度和规模.现状直白沟内的则隆弄冰川退缩严重,由冰川跃动启动灾害链可能性减小,而由地震及冻融循环诱发的高位岩崩启动灾害链的可能性显著增强.

**关键词:** 灾害链;演进过程;冰川跃动;冰岩崩;泥石流;环境地质学.

**中图分类号:** P694 **文章编号:** 1000-2383(2024)10-3784-15 **收稿日期:** 2022-10-16

# Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE Tibetan Plateau

Huang Hai[1,2], Gong Cheng[1,3]

1. *Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu* 611734, *China*
2. *Technology Innovation Center or Risk Prevention and Mitigation Engineering of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu* 611734, *China*
3. *Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

**Abstract:** The glacier and snow-related geohazard chain pose a significant threat to the economic activities in the Southeast Tibetan Plateau. Analyzing the evolution law of disaster can provide support for the risk prevention and mitigation, and also for the early identification of disaster. Based on field survey, remote sensing interpretation, and hazard monitoring, in this paper it aims to analyze the evolution of disaster formation conditions and the activity characteristics of six geohazard chain events since the 1950. The results show that the geohazard chain in Zhibai Gully was driven by glacier activity and rock collapse. The evolution models of geohazard chain are summarized into two types: physical property change chain induced by ice water phase transformation, and geological cascade chain induced by coupling of multi factors. It is found that the disaster activity is significantly controlled by the earthquake, and the disaster characteristics is correlated with the temporal-spatial evolution of the formation conditions. Under the influence of the earthquake and deglacialtion, the initiation of disaster chain is transformed from glacier active to rock collapse. The

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目(No. DD20221741);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(No. 2019QZKK0902).

**作者简介:** 黄海(1984-),男,高级工程师,研究方向青藏高原地质灾害链成灾机制.E-mail: huangh@mail.cgs.gov.cn

**引用格式:** 黄海,龚诚,2024.藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征.地球科学,49(10):3784-3798.

**Citation:** Huang Hai, Gong Cheng, 2024. Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE Tibetan Plateau. *Earth Science*, 49(10): 3784-3798.

increasing of soil material sources and the effect of ice water phase transformation both enhance the evolution length and scale of disaster. For the present, the Zelongnong glacier is retreating seriously, decreasing the possibility of a geohazard triggered by a glacier. Corresponding the ice/rock avalanche becomes the key to the geohazard chain.

**Key words:** geohazard chain; evolution progress; glacier surge; ice-rock avalanche; debris flow; environmental geology.

## 0　引言

全球气候变化趋势下,青藏高原的持续升温是最为显著的响应结果之一(Al,2013),其所导致的冰川退缩、冰湖溃决以及冰(雪)—岩崩等触发的冰雪型地质灾害链是该区域面临的重大地质安全风险(Yao *et al.*, 2012;Lu *et al.*, 2019;崔鹏等,2019;邬光剑等,2019).在气温升高和地震活动双重驱动下,直白沟所在的藏东南地区已然成为了全球多场复合条件下诱发地质灾害链的高发区(Yao *et al.*, 2019),多次暴发特大灾害事件,如1902年和2000年易贡滑坡堵江灾害链(Shang *et al.*, 2003; Delaney *et al.*, 2015)、1953年古乡沟冰崩泥石流堵江灾害链(Shi *et al.*, 1964)、1988年光谢错冰湖溃决洪水灾害链(Cui *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2013)、2007年天摩沟冰—岩崩泥石流灾害链(Wei *et al.*, 2018)、2017年色东普冰崩碎屑流灾害链(Li *et al.*, 2022)、2021年的查莫利冰岩崩灾害链(Shugar *et al.*, 2021)等.随着探测手段和研究方法的不断进步,近年来学界在青藏高原的冰雪型地质灾害链的研究方面不断取得新进展,主要包括灾害链触发机制(Zhuang *et al.*, 2020)、发育类型(崔鹏等,2014;申艳军等,2022)、演进特征(An *et al.*, 2022)、风险防控(Zou *et al.*, 2020)等方面,这些研究结果查明了冰雪型地质灾害时空分布规律和气候变化对冰川活动的影响规律,重点剖析了典型灾害链事件的成因与过程,初步揭示了冰雪对地质灾害动力过程影响机制,提出了流域性风险的防控体系.前人的研究工作大大提升了大家对冰雪型地质灾害链的认识和风险防范水平.但同时,现有地质灾害链的研究多为灾害事件剖析,缺少从长时域尺度对单沟的孕灾背景演化和灾变特征进行分析,给研判冰雪型地质灾害链的发生和发展趋势带来不确定性,制约了人类工程活动的全生命周期风险防控.

本文以直白沟1950年以来6次灾害链事件为数据样本,利用长时域多源多期遥感影像分析、地面调查和灾害监测等多种手段,查明以冰川和冰碛物为代表的孕灾条件的时空变化,结合历史上灾害链事件分析,探索孕灾条件的变化对灾害链演进过程的影响,为预测研究区未来在气候变化和地震耦合驱动下的冰雪型地质灾害链的发展趋势提供借鉴.

## 1　研究区背景

直白沟发育于南迦巴瓦峰西侧,是雅鲁藏布江大拐弯地区典型的冰雪型地质灾害链高易发区(李滨等,2020),历史上多次暴发链式灾害链,摧毁沟口村庄和交通设施(张文敬,1983;刘宇平等,2006).流域汇水面积57.5 km$^2$,最高海拔为南迦巴瓦峰的7 782 m,最低海拔为2 830 m,沟道长11.5 km,沟床平均纵比降为263.7‰.受冰川作用,流域水流通道变动频繁,灾害链的物质输移通道和致灾范围多变.基于崔鹏和郭剑(2021)提出的沟谷型地质灾害链的发展过程,沟域可以划分为启动形成区、输移铲刮区和堆积致灾区(图1).流域地处喜马拉雅山东构造结核心区域,出露岩性主要为片麻岩,区内发育两条活动断层,地表表生过程受新构造运动和地震活动影响严重(董汉文等,2018;Ma *et al.*,2022),如1950年墨脱地震和2017年米林地震均严重破坏了流域内地质体稳定性,触发了大量冰崩、岩崩和滑坡等不良地质现象(尹凤·玲等,2018;Zhao *et al.*, 2019).受印度洋季风雅鲁藏布江水汽通道的影响,沟内降雨量在空间上呈现明显地带性分布,而在时间上呈现显著的季节性分布(杨逸畴等,1987).

作为冰雪型地质灾害链的重要孕灾体,发育于直白沟上游的则隆弄冰川是藏东南地区典型的跃动型冰川,其跃动期冰川运动速度可达1.5 km/d(张文敬,1985).1950年和1968年两次发生冰川跃动,形成高速流动的冰岩碎屑流或泥石流,堵塞雅鲁藏布江并形成溃决洪水灾害链(张文敬,1983).根据2022年调查,则隆弄冰川面积为7.83 km$^2$,主冰川长度为5.9 km(图2),冰川下部冰舌段表面纵比降为210‰～220‰,北侧支冰川长度3.7 km.近40年来,冰川面积和长度均受气候变化影响略有消退,消退比例约10%(吴坤鹏等,2020).

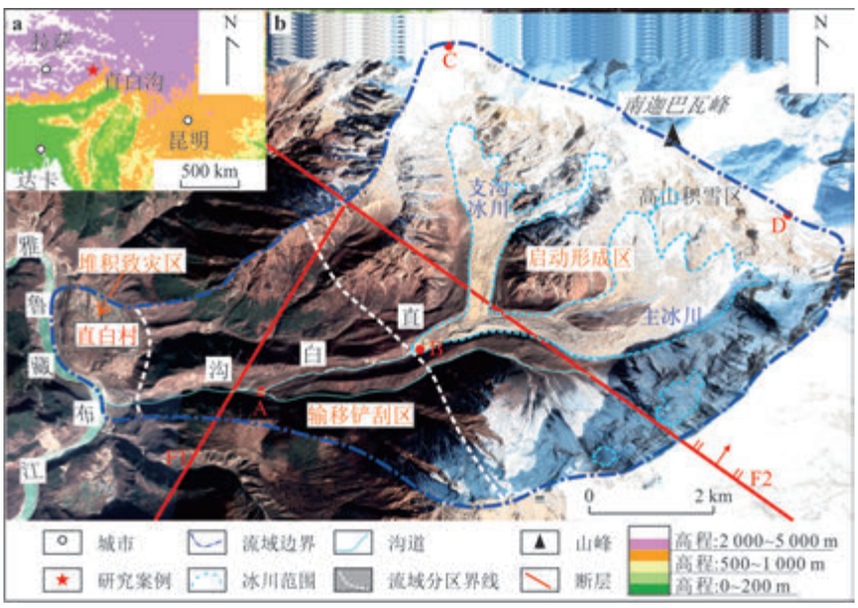


图 1 直白沟孕灾背景图

Fig 1 Sketch map of the formation condition of geohazard in Zhibai Gully

a. 区位图;b. 地质背景;F1 . 性质不明断层;F2 . 正断层

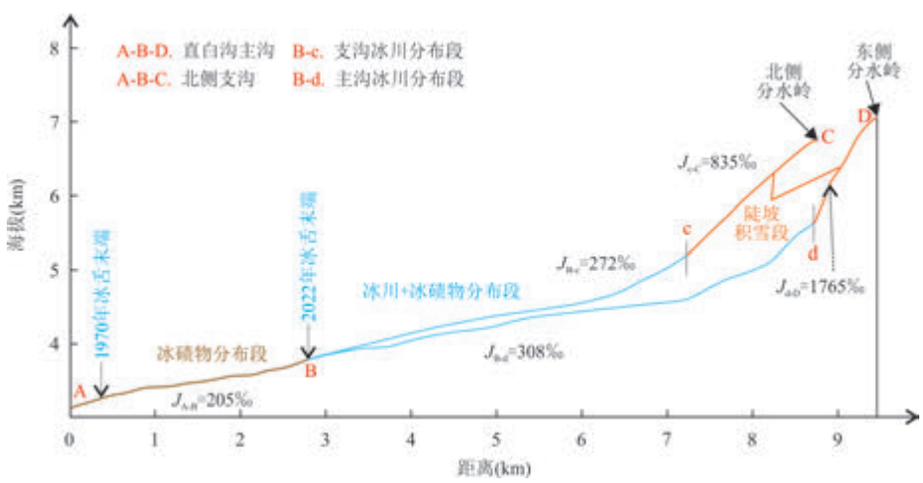


图 2 直白沟则隆弄冰川赋存条件

Fig.2 Characteristic of Zelongnong glacier in Zhibai Gully

## 2 方法与数据

### 2.1 研究方法

**2.1.1 遥感解译** 以冰川表层碎裂形态、沟谷侵蚀痕迹、斜坡植被变化、巨块石堆积特征作为遥感解译标志,针对沟道形态强变区、冰川分布区、斜坡区以及水系交汇区开展影像对比分析,结合微地貌形变特征,反演灾害运动范围、物质组成以及动力特点,进而重构灾害链演进过程,遥感解译方法如图 3.

**2.1.2 松散物源定量估算** 直白沟灾害链的成灾主体为泥石流和碎屑流,因此松散物源对灾害链的演进过程和活动规模具有重要调节作用.直白沟斜坡物源主要有 3 类,一是冰川退缩形成的冰碛物源,主要分布于沟道两侧冰碛垄岸坡;二是沟谷两岸斜坡形成的崩塌滑坡物源,主要分布于冰川上部高位裸露基岩区;三是少量重力侵蚀作用或冰雪崩运动在沟床中汇聚而来的松散物源.为了进一步分析直白沟松散物源总储量,本文借鉴乔建平等(2012)提出的物源计算模式,如公式(1),估算了直白沟内的冰碛物源和崩滑物源.

$$V = S \times H , \tag{1}$$

式中:$S$ 为遥感解译所得物源面积其中冰碛物物源

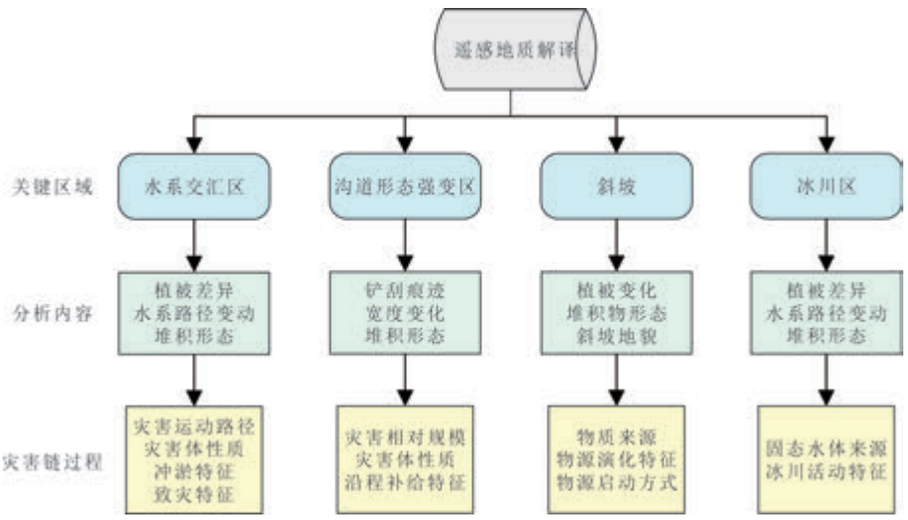


图3　利用光学遥感影像反演灾害链过程的方法

Fig.3　Identification of geohazard chain process retrieved from remote sensing images

**表1　直白沟孕灾背景分析数据源统计**

Table 1　Statistics of data source of geohazard formation conditions in Zhibai Gully

| 序号 | 时间 | 数据源 | 影像数据分辨率 | 数据类型 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1961年11月4日 | Keyhole | 约3 m | 光学遥感影像 |
| 2 | 1969年12月5日 | Keyhole | 约3 m | |
| 3 | 1970年12月5日 | Keyhole | 约30 m | |
| 4 | 1976年3月17日 | Keyhole | 约30 m | |
| 5 | 1982年12月5日 | Keyhole | 约0.5 m | |
| 6 | 2003年1月3日 | Google earth | 0.3 m | |
| 7 | 2013年12月8日 | Google earth | 0.3 m | |
| 8 | 2014年10月25日 | Google earth | 0.3 m | |
| 9 | 2017年12月4日 | Google earth | 0.3 m | |
| 10 | 2016年8月 | Planet | 3 m | |
| 11 | 2017年10月 | Planet | 3 m | |
| 12 | 2017年12月 | Planet | 3 m | |
| 13 | 2019年9月 | Planet | 3 m | |
| 14 | 2020年10月 | Planet | 3 m | |
| 15 | 2021年8月 | Planet | 3 m | |
| 16 | 2022年9月 | Planet | 3 m | |
| 17 | 2019年 | 相机、无人机测绘 | — | 野外调查资料 |
| 18 | 2020年 | 相机、无人机测绘 | — | |

面积仅统计冰川末端以下游段;$H$为根据现场调查和遥感解译确定物源厚度,其中冰碛物厚度以沿沟道的侵蚀深度进行计算,崩滑物源厚度值则利用正射影像对比分析所得源区厚度进行估算.

**2.1.3　冰川长度测算**　直白沟冰川主要赋存于山谷中,部分积雪区的基岩较缓平台也零星发育.本文冰川面积通过遥感影像测量面积进行估算,面积统计包括山谷冰川和积雪区的零星发育的冰川,高陡斜坡区积雪和裸露基岩不作为冰川面积统计.冰川长度则只统计山谷中的冰川长度,具体为冰舌末端至冰川与基岩斜坡交接处的长度,冰舌末端位置根据遥感影像解译确定.

## 2.2　研究数据

**2.2.1　孕灾背景数据**　本研究所采用的历史遥感数据来源于Keyhole卫星、Planet卫星以及Google earth影像,2017年以来的地质灾害事件数据则来自于野外调查,研究数据来源及特征如表1.

**2.2.2　灾害历史数据**　基于文献梳理、野外调查和遥感解译的综合分析发现,直白沟自1950年以来共发育6次冰雪型地质灾害链,如表2.张文敬(1985)通过调查访问发现,则隆弄冰川分别于1950年和1968年两次发生跃动,形成冰川跃动－冰岩碎屑流－堵江灾害链,灾害对沟口村庄和道路产生毁灭性破坏,并且堵断雅鲁藏布江形成溃决洪水;2020年9月10日,受2017年米林地震影响,直白沟再次暴发高位冰岩崩启动泥石流灾害链,损毁沟口桥梁一座(李军等,2021),堵塞主河行洪断面50%,如图4.沟内高寒山区岩体和冰川分别于2014年和2017年两次发生冰岩崩,形成碎屑流,并堆积于沟道及斜坡宽缓地段(图5).

**表 2 直白沟地质灾害链事件统计**

Table 2 Statistics of geohazard chain events in Zhibai Gully

| 事件编号 | 暴发时间 | 降水条件 | 危害情况 | 数据来源 |
|---|---|---|---|---|
| GC1 | 1950年8月15日 | 无降雨 | 夷平直白村,百余人死亡 | 张文敬(1985) |
| GC2 | 1950年8月15日 | 无降雨 | 堵塞主河,形成溃决洪水 | |
| GC3 | 1968年(藏历七月) | 无降雨 | 堵塞主河,形成溃决洪水 | |
| GC4 | 2014年 | 未知 | 未冲出沟口 | 遥感解译 |
| GC5 | 2017年 | 未知 | 未冲出沟口 | |
| GC6 | 2020年9月10日 | 无降雨 | 冲毁桥梁,挤占主河 | 野外调查 |

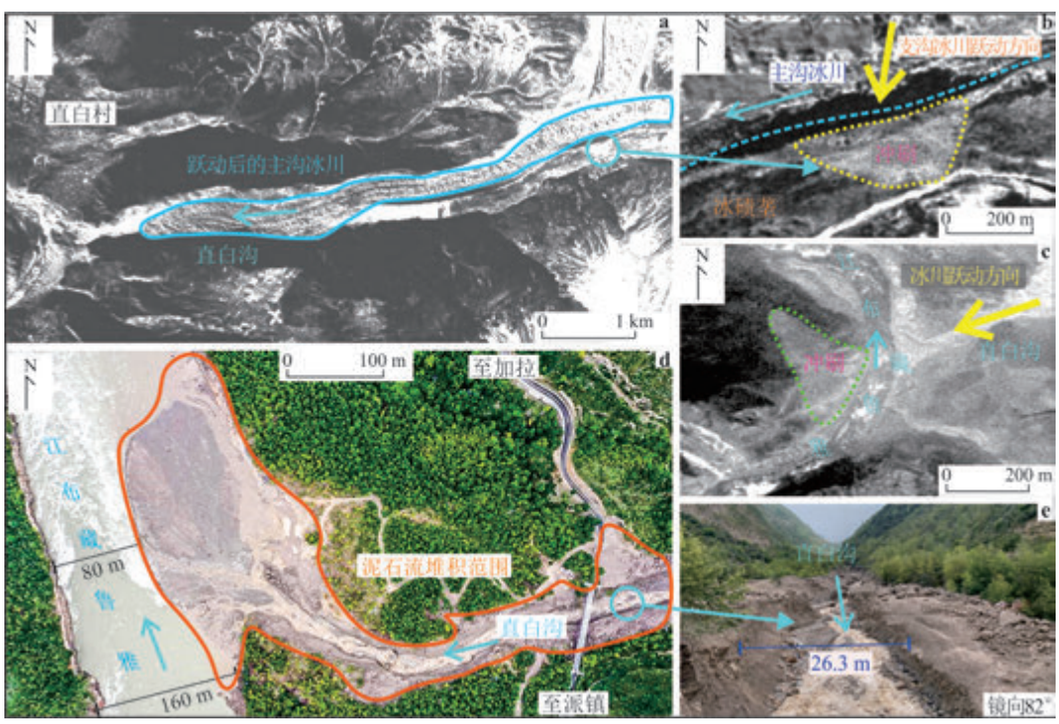


图 4 直白沟冲出沟口的历次灾害链调查

Fig.4 Investigation of hazard chain with damming-river in Zhibai Gully

a.GC3灾害链运动范围;b.GC1灾害链支沟冰川越过主沟冰川产生的堆积;c.GC2灾害链在主河对岸岸坡产生的冲击痕迹;d.GC6灾害链在沟口致灾特征;e.GC6灾害链后沟道特征

## 3 结果分析

### 3.1 灾害链演进过程反演

基于灾害前后植被变化、地形差异以及文献记载灾害现象,重构了直白沟的6次灾害链的演进过程,如图6所示.

**3.1.1 灾害链活动特征** GC1、GC2和GC3三次灾害链事件均是冰川跃动启动.GC1发生于1950年8月15日,在墨脱M8.5地震作用下,北侧支沟冰川产生大规模跃动,形成冰岩碎屑流快速向下游运动,在主冰川和冰碛垄阻塞作用下,冰岩碎屑流龙头冲起损毁对岸植被并形成巨块石堆积(图4b),后部冰岩混合体不断往前快速运动并挤压抬高,翻越支冰川右侧冰碛垄并在冲沟内形成冰岩碎屑流,沿沟道不断铲刮启动沟道松散物源(图4a中显示北侧支沟上游强烈冲刷痕迹),在冰水相变作用下随血流转换成泥石流,灾害运动至沟口后直接淤埋直白村居民区,造成百余人死亡,运动路径如图6中的GC1所示.GC2与GC1为同日发生,但其灾害主体、运动路径和致灾方式均显著不同.GC2为则隆弄冰川主冰川在地震作用下产生跃动,沿途冰川解体并裹挟沟道内松散土体形成冰岩碎屑流,冲出沟口后堵塞主河,次日堰塞体整体溃决形成洪水.GC3发生于1968年,灾害过程与GC2类似,由主冰川发生跃动

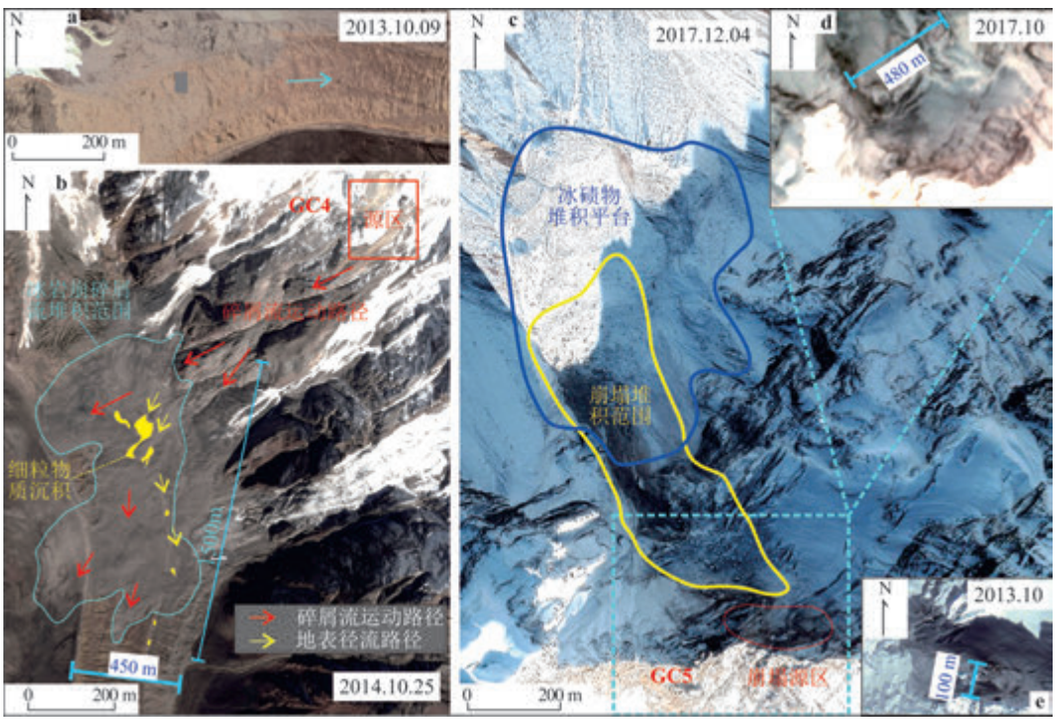


图 5　GC4 和 GC5 灾害链活动特征

Fig. 5　The development characteristics of GC4 and GC5

a. GC4 发生前的冰川表面;b. GC4 发生后的冰川表面;c. GC5 发生后的斜坡地表;d. GC5 发生后的崩塌源区岩体;e. GC5 发生前的崩塌源区岩体

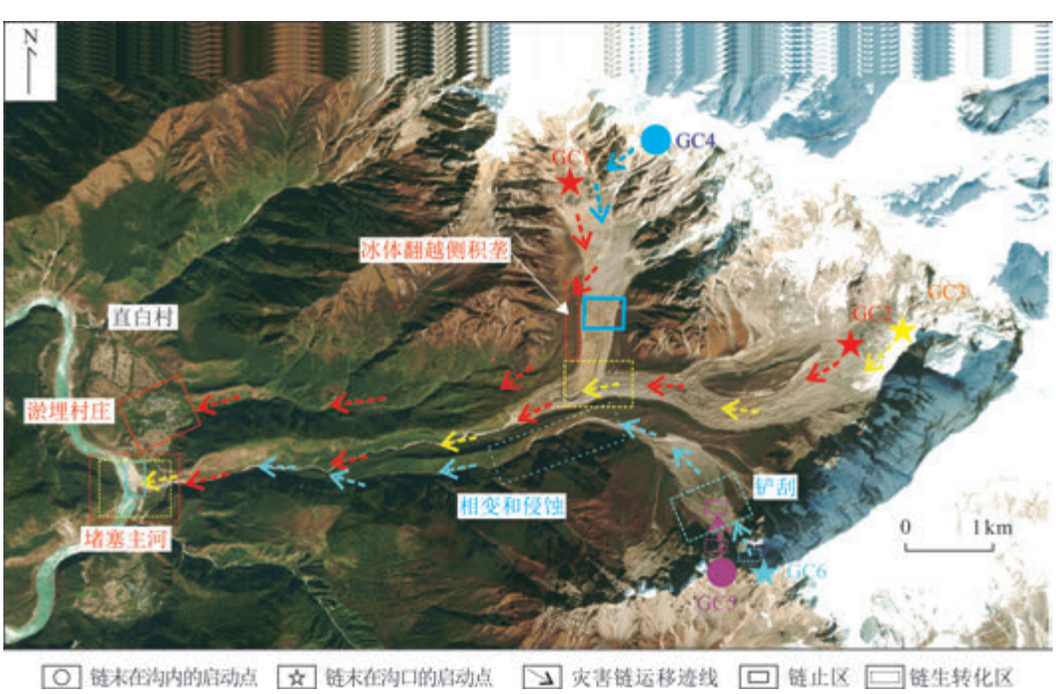


图 6　直白沟 6 次灾害链事件演进过程

Fig.6　The evolution process of those six geohazard chain events in Zhibai Gully

启动灾害链,形成冰岩碎屑流损毁沟口道路并堵塞主河,次日溃决形成洪水.

GC4、GC5 和 GC6 三次灾害链事件则是由高位岩崩启动.GC4 发生于 2014 年(具体日期未知),北侧支沟左岸发育高位冰－岩崩,在沟槽内快速运动形成冰岩碎屑流,沿程铲刮岸坡表面松散物质和积

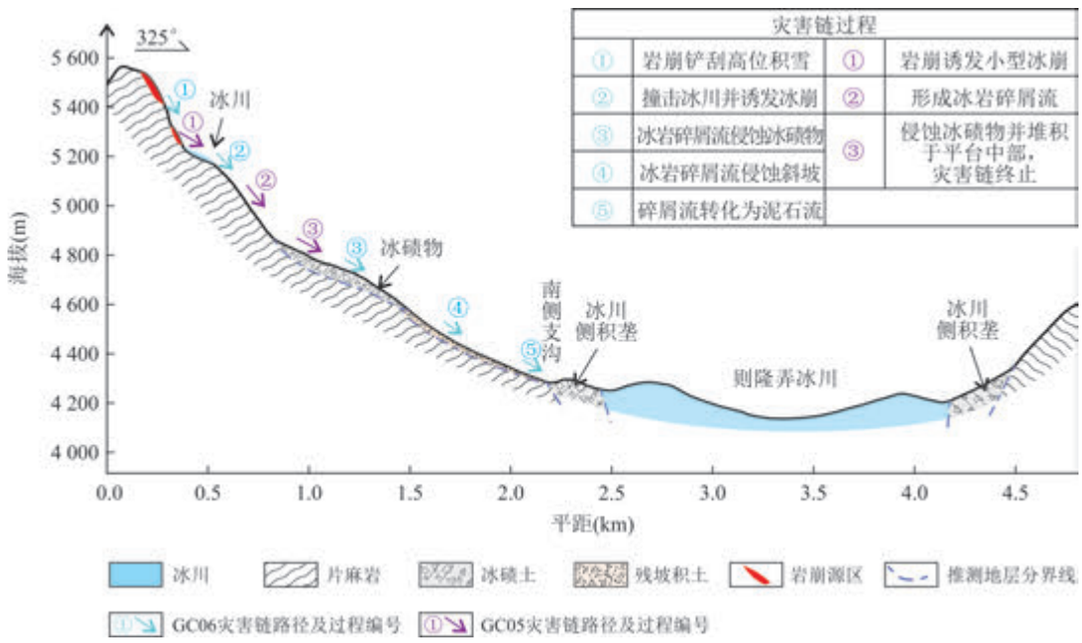


图 7 南侧支沟发育的 GC5 和 GC6 演进过程剖面图

Fig.7 The profile map of the evolution process of GC5 and GC6

雪(图 4d),高速运动的冰岩碎屑流越过支沟冰川表面,翻过高 8～15 m 的西侧侧碛垄,大量巨块石堆积于侧碛平台.碎屑流在冰川表面扩散运动,形成舌状堆积形态(长 1 500 m,宽 450 m,面积约 0.65 $km^2$).冰岩碎屑流对冰川整体未产生强烈影响,仅重塑了表碛形态,说明冰岩碎屑流浮于冰川表面运动,侵蚀铲刮效应较弱.GC5 发生于 2017 年 11 月 18 日,受米林地震影响,直白沟南侧支沟源头诱发同震高位崩塌(图 5c),崩塌长 110 m,宽 50 m,厚 3～5 m,方量估算为 $1.5\times10^4$ $m^3$.崩塌解体后,形成碎屑流在冰川表面和冰碛物堆积平台运动,少量细粒物质在冰雪相变形成的径流作用下侵蚀斜坡冲沟,输移至沟道内,但未形成大规模灾害.GC6 发生于 2020 年 9 月 3 日,灾害链启动点与 GC5 处于同一斜坡.高位岩体在冻融循环等作用下解体形成崩塌,崩塌长 150 m,宽 90 m,厚 5～8 m,估算方量为 $7.5\times10^4$ $m^3$,距离下部缓坡冰川相对高差 400 m.岩崩撞击并铲刮下部冰川和冰碛平台,形成冰岩崩碎屑流进入南侧支沟(图 7),受狭窄陡峻的沟道约束向下游输移,并在往下游输移过程中产生冰水相变,最终转变成泥石流灾害,造成沟口桥梁损毁,堵塞雅鲁藏布江(图 3c).对比这 3 次事件发现,宽缓的地形对于链生过程具有显著的消减调控作用.

**3.1.2 链式演进阶段和模式** 根据灾害链演进阶段的时空间定位,将组成链式演进的各单体灾害划分为 3 类:链首灾害、链中灾害和链末灾害(表 3).链首灾害是灾害链的启动源,其规模是控制灾害链成链的先决条件,如 GC5 和 GC6 的差异,规模较大的 GC6 经过两次链式转化而形成灾害链.链中灾害则是灾害链的物质输移过程,在链式转化过程中的的灾害体与外界存在能量和物质的交换,灾害规模在转化中产生放大或消减效应,如 GC1 和 GC6 在沟道运动过程沿途铲刮斜坡松散物源,不断补给增大灾害规模,导致冲出泥石流规模远超链首灾害,这为大家研发基于断链技术的风险防控体系提供新的思路(刘文方等,2006).

基于 1950 年以来的 6 次事件分析可知,直白沟冰雪型灾害链是典型的沟谷型地质灾害链,驱动因子包括冰川(GC1、GC2 和 GC3)和岩体(GC4、GC5 和 GC6)两种类型,链式演进阶段包括:冰/岩失稳－碎屑流、碎屑流－泥石流和碎屑流/泥石流－堵江洪水.

第 1 个链式演进是冰川跃动或冰岩崩启动形成碎屑流,是链首灾害向链中灾害的第 1 次链生.GC1、GC2 和 GC3 三次事件均是冰川跃动形成碎屑流,其碎屑流中冰含量远超岩土体,具有冰体尺寸大、运动速度快、冲出距离远的特点.GC1 是碎裂冰体堆积后在势能作用下产生溜滑而启动的,因此碎屑流中冰体体积相对较小,初始速度较慢,但在北侧支沟大于 300‰ 的纵比降加速作用下,逐步形成

**表3　直白沟灾害链的时空间分区特征**

Table 3　The temporal-spatial zoning characteristics of disaster chain in Zhibai Gully

| 编号 | 链首灾害 | 第1链生区 | 链中灾害Ⅰ | 第2链生区 | 链中灾害Ⅱ | 第3链生区 | 链末灾害 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GC1 | 冰川跃动 | 主冰川交汇口 | 冰岩碎屑流 | 冲沟中部 | — | — | 泥石流 |
| GC2 | 冰川跃动 | 冰舌末端下游沟道 | 冰岩碎屑流 | — | — | 交汇口 | 溃决洪水 |
| GC3 | 冰川跃动 | 冰舌末端下游沟道 | 冰岩碎屑流 | — | — | 交汇口 | 溃决洪水 |
| GC4 | 冰岩崩 | 冰崩所在斜坡坡脚 | — | — | — | — | 碎屑流 |
| GC5 | 冰岩崩 | 崩塌下部冰碛平台 | — | — | — | — | 碎屑流 |
| GC6 | 冰岩崩 | 崩塌下部斜坡 | 碎屑流 | 南侧支沟沟道 | 泥石流 | 交汇口 | 堵江 |

快速运动冰岩碎屑流.GC2和GC3均为主冰川跃动沿着主沟沟道快速运动.由于冰川呈现整体运动,虽然在运动中断裂而解体成块,沿途铲刮沟道中的松散物源,但具有较高初始运动速度的冰岩碎屑流整体结构较好,冰体块体巨大,在运动距离4～5 km的情况下,冰体还未产生足够的相变来改变流体性质就已经冲入主河.GC4、GC5和GC6则是由冰岩崩启动形成碎屑流,动力来自于高位岩崩,岩土体含量较高,冰体含量相对较低,具有冰体块体较小、运动速度极快、冲出距离与岩崩规模和势能密切相关.在冰岩碎屑流堆积区,发育有地表径流形成的细颗粒物质沉积层(图5b).这些沉积主要分布于堆积体后部,并向下游逐步减少,由此判断冰体融化产生的径流滞后于碎屑流运动,其原因是冰岩碎屑流在运动过程中出现了颗粒分选,形成岩体运动在下而冰体在上的现象.

第2个链式演进是冰岩碎屑流在沟道运动过程中转化为泥石流,主要发生在GC1和GC6两次灾害链事件中.本质上,碎屑流向泥石流转化是灾害体的物理性质变化,进而导致两者在动力参数、堆积特征和致灾方式上产生差异.对比于碎屑流,泥石流的强流动性导致其具有更广的致灾范围.不同于具有“水土条件时频差异”特征的“滑坡－碎屑流－泥石流”的链生模式(崔鹏和郭剑,2021),冰雪型地质灾害链中的“碎屑流－泥石流”的链生模式是通过灾害体自身的物理性质变化完成链式转化,其内生水源补给作用加快了水土耦合过程,灾害链的转化受到冰岩碎屑流运动距离的影响,因此冰雪型灾害链中的碎屑流－泥石流的链生演进的概率可以通过冰岩崩规模和沟道地形条件进行预测.

第3个链式演进为灾害体堵塞主河并形成溃决洪水.溃决洪水影响范围广泛,如同样发育于青藏高原的白格滑坡(张新华等,2020)、易贡滑坡(Delaney *et al.*, 2015)、色东普(Chen *et al.*, 2020)冰崩碎屑流等事件,溃决洪水灾害链沿河流影响长度分别为488 km、500 km和460 km.直白沟冰川跃动形成堵江堰塞体中冰体含量大,更容易溃决(Chen *et al.*, 2022),GC2和GC3两次堵河均仅持续了1 d即整体溃决(溃后未残留堰塞湖,图4c),明显快于色东普冰崩碎屑流3天的堵江时间(为部分溃决模式,溃决后堰塞湖一直存在)(Hu *et al.*, 2019).GC6灾害链中的泥石流形成的堵江类型为半堵形式,主要表现为壅高水位,挤占河道,未形成溃决洪水.

基于以上3个阶段的演进过程,直白沟冰雪型灾害链的链生模式可归纳为两种,其一为冰水相变驱动灾害体性质发生变化成链,发生在链式演进的第2个阶段中碎屑流向泥石流灾害的转化;其二为多要素级联效应成链,发生在第1阶段的冰/岩失稳－碎屑流和第3阶段的碎屑流/泥石流－堵江洪水的链式演进过程中.

### 3.2　孕灾地质条件演化

**3.2.1　沟道微地貌条件**　对于沟谷型地质灾害链,沟道地貌是链式转化的关键控制因素之一(崔鹏和郭剑,2021).直白沟的微地貌变化受冰川作用影响显著,水系通道的变化与冰川的进退作用密切相关.从固体物质输移通道来看,直白沟有3段沟道对于灾害链生过程具有重要意义,如图7中的Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区域.区域Ⅰ是南侧支沟与主沟交汇口,在冰川跃动期,该区常被冰川覆盖(图8a),南侧支沟的水流通过冰下渗流的方式输移至主河,支沟内的固体物质也被阻拦于交汇口,无法参与主沟的灾害活动,当冰舌退缩至交汇口上游后,支沟的灾害可进入主沟对沟口造成危害,如2020年的泥石流事件(图8b).区域Ⅱ是主冰川和支沟冰川交汇口,常态下沟道冰体主要受主冰川运动影响(图8e),支沟冰川受主冰川阻塞,向下游的运动通道被阻,因此跃动时将通过北侧冲沟输移物质,如1950年的GC1.经过多次跃动后,近40年来直白沟的主冰川活动性明显

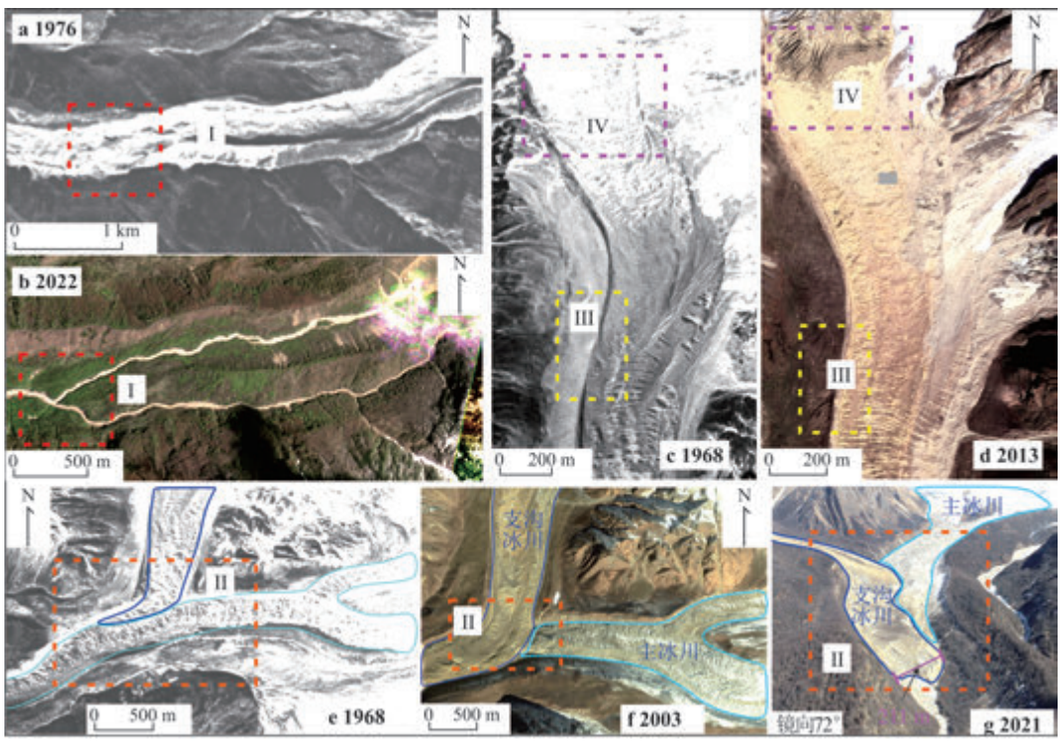


图 8 典型沟道微地貌变化

Fig.8 Variation characteristics of typical channel microgeomorphology

减弱,区域Ⅱ的地貌主要由支沟冰川塑造(图 8f).区域Ⅲ为支沟冰川西侧,地形受冰川和斜坡的演化影响明显,1950—1960 年代冰川厚度较厚,两侧的冰碛垄顶面与冰川顶面的高差较小,图 8c 中可明显看出区内冰面高度与侧积垄高度基本一致,冰川表面的冰岩碎屑流可通畅地进入北侧支沟,因此 1950 年代的上游冰川活动可以轻易翻越冰碛垄进入北侧冲沟运动.随着冰川消退冰层减薄,冰川与侧碛垄高差加大,因此 2014 年冰岩崩碎屑流仅在该区域内在碎屑流前缘冲起运动而形成少量堆积(图 8d).

**3.2.2 灾害链固体物源条件** 直白沟地质灾害链孕灾背景中的固态物质包括冰川、松散土体和岩体,其中冰川和松散土体均是快速变化的孕灾因子,主要赋存于沟道和斜坡上,对链生过程影响显著.在 6 次灾害链历史事件中,笔者发现了冰川和松散物源对灾害链规模的放大效应.在 GC6 灾害链的演进过程中,斜坡物源对灾害链规模的补给放大效应明显,尤其是以侵蚀作用为主的第一转化区和次链灾害演进区.相似地,在 1961 年的影像上也明显可看到 GC1 灾害链演进过程中在沟道弯道处的斜坡植被破坏迹象.

冰碛物是直白沟储量最大的松散土体物质,储量受冰川变化密切相关,随着冰川退缩,冰碛物储量不断增多,已成为灾害链重要孕灾地质体.当冰川跃动前进,冰体将冰碛物坡脚覆盖反压,不仅增强其稳定性,还阻塞了冰碛物进入沟道的输移通道,因此在两次冰川跃动影响期内,其冰碛物储量均呈波动变化.

2017 年米林地震作用影响下,直白沟的斜坡失稳明显增多(图 9),物源类型包括崩塌、滑坡、坡面侵蚀和沟道岸坡堆积等类型,斜坡松散物源总量估算为 $75.0\times10^4$ m$^3$,米林地震新增物源估算总量 $45.0\times10^4$ m$^3$,此外高山区的基岩在冻融循环和地震作用下也可能零星形成崩塌滑坡等,这些高位物源的活动极不利于斜坡上的冰碛物堆积体(冯玉涛等,2006),为灾害启动提供新的补给(如 GC5).

冰川全面参与直白沟的灾害链过程,既是直接启动因子之一,同时也作为链生过程中的重要调控地质体,其对灾害链的规模、动力过程具有重要影响.直白沟主冰川从 1950 年的 7.4 km 退化至现在的 5.9 km,退化速率总体上呈现慢—快—慢的趋势,如图 9.1990 年前,尽管冰川多次发生跃动,但冰川长度变化总体缓慢,主冰川末端高程变化小于 10 m,期间两次跃动甚至将冰川推进至直白沟出山口,但此时堆积沟道中的冰体已经成为孕灾固体物质中的冰碛物和冰块.1990—2015 年间冰川长度变化极

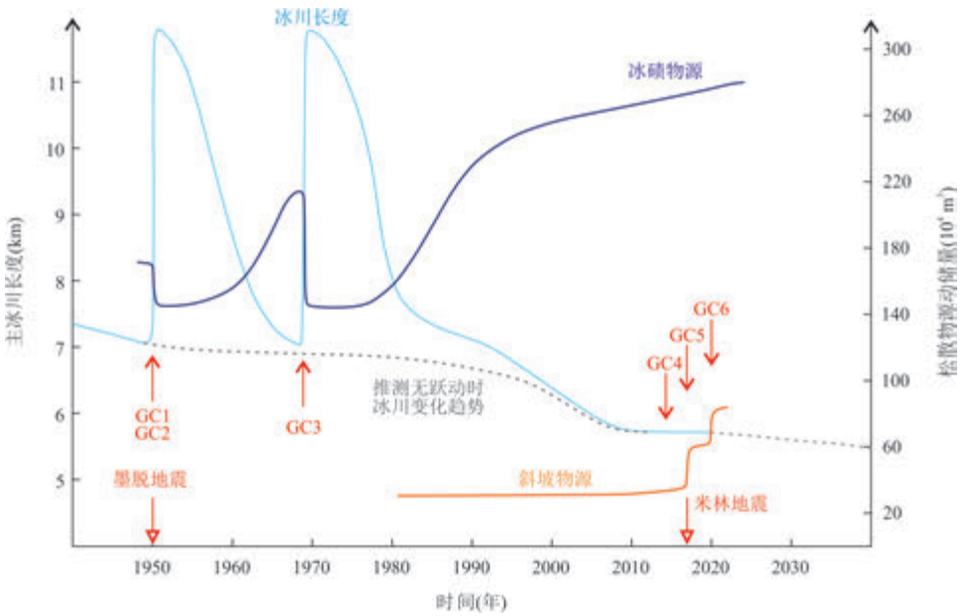


图 9　孕灾背景演化和灾害链活动相关性

Fig.9　Correlation between formation conditions evolution and activities for disaster chain

为快速,与青藏高原升温加剧密切关联.现状冰川退缩至较平缓的山谷,冰舌前缘沟道纵比降小于150‰,因此冰川退化由长度减短为主转化为厚度变薄为主.

### 3.3　孕灾条件对灾害链发展的影响

在空间和时间尺度上,直白沟 6 次灾害链事件与孕灾背景的变化之间都有明显的关联性.流域内的冰雪型灾害链的差异性发育是受气候变化和地震双重驱动作用的结果,如图 10.

**3.3.1　链首灾害类型转化的驱动力**　受地震影响,沟域内岩体失稳数量与规模不断增大,松散物源增多,导致灾害链的触发点在空间密度上和类型上均呈现增多趋势(李军等,2021).直白沟的岩体失稳主要分布于海拔 5 000 m 以上的极高山区,距离斜坡底部相对高差达 800 m 以上,具有极高势能.1950 年以来的 3 次岩崩事件发生的时间与地震活动和冰川消退程度具有高度契合性,明显受地震和冻融循环的双重影响,表现在随着气候变暖,流域内的 0 ℃等温线海拔不断升高,高山区的冻融循环作用加剧,大幅加快岩体中裂隙的扩张速度(杨更社等,2018;汤明高等,2022a, 2022b);地震作用诱发的大量震裂山体(崔圣华等,2019)叠加冻融循环作用后,极不利于岩体稳定,为物源的形成提供有利条件.

受气候变暖作用,则隆弄冰川退缩加剧,冰川厚度、整体性及坡度均大大减小,尤其主冰川,经历两次大规模跃动后,冰川活动性明显减弱(图 7e, 7f).同时当前冰舌末端退缩至沟道平缓段,地形开阔,冰川自身稳定性增强.随着未来冰川进一步退缩,冰川长度比高位冰岩崩碎屑流堆积距离短时,未来可能又将增大岩崩启动形成灾害链的可能性.

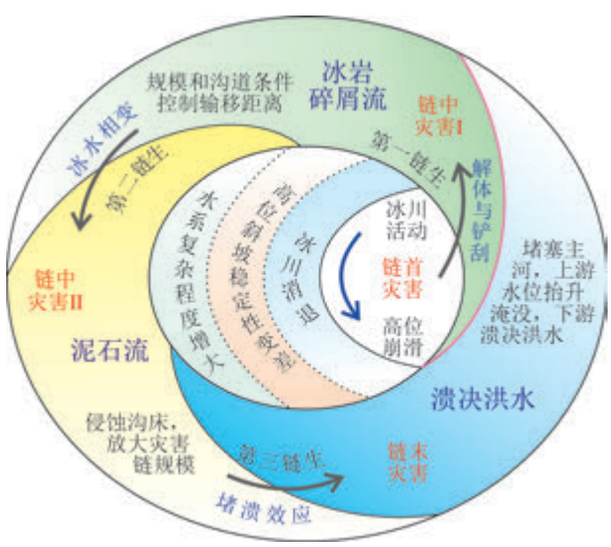


图 10　直白沟灾害链的驱动与演化机制

Fig. 10　Driving and evolutionary mechanism of disaster chain in Zhibai Gully

冰川活动导致流域水系复杂度增大,物质输移通道增多.随着冰川周期性活动,流域支沟水系汇入方式不断改变,如南侧支沟汇入口受冰川进退影响(图 8a, 8b);而在北侧支沟受冰川消退影响,侧积垄与冰川表面相对高差逐步增大,由冰川跃动产生

灾害的运动通道将进一步受到约束,为灾害链提供有利的输移通道,岩体失稳形成的碎屑流的搬运速度、规模和距离都有所增加.

**3.3.2 链式演进过程调控要素** 冰水相变作用控制链生过程能量转化.冰川作为固态水体参与灾害运动中,其不仅具有固体物质特性,在相变作用下,还提供大量水源,是直白沟泥石流灾害中的重要水源,可以将冰川看作碎屑流向泥石流转化的驱动因子,因此冰川参与程度控制灾害体的性质变化.如2014年的GC4,产生岩崩的斜坡坡度达75°~80°,斜坡上部平台发育小规模冰川,冰岩崩主要以岩土体为主,因此在形成冰-岩碎屑流后,运动距离较短,出现冰水相变作用有限,未出现流体性质转化.

沟道地貌条件是影响碎屑流向泥石流转化中的冰水相变作用的重要因素,沟道顺直且陡峻,则含冰灾害体运动距离较长,相变时间长,更有利于灾害体性质转化,对链生作用具有明显促进作用;而当沟道宽缓,链生作用的可能性明显减少.因此在直白沟,发育于宽缓沟道区域的首链灾害成链的可能性远小于支沟区域,或者宽缓沟道区域的首链灾害若要成链则需要更大的规模和更高的势能.

松散物源储量对灾害链规模具有放大效应,物源通过补给碎屑流或泥石流的运动,放大灾害规模,并调节堆积物中冰体含量,进而影响末链灾害的堵河和溃决特征.

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

**4.1.1 直白沟孕灾条件的演化对灾害链发展的影响** 从表观尺度上,青藏高原冰冻圈的孕灾地质体当前是快速变化的,尤其是斜坡岩土体赋存状态、沟谷微地貌条件和以冰雪相关的水动力条件.从中等时域尺度统计看,地震活动所表征的地球内动力对于灾害的触发具有更显著的影响,而气候变化所代表的外动力条件变化则在链生环节调控着链式演进中的能量链和物质链.基于直白沟孕灾背景现状,可以预测未来直白沟的山谷冰川长度消退将减缓,厚度消融将增强,这将一定程度提高冰川整体稳定性.而温度逐步升高,气候波动影响区的海拔高度将进一步提升,加剧高位冰川和岩土体的冻融循环作用,高位岩崩和冰崩将会逐步增多,李军等(2021)通过INSAR解译分析的结果也明显揭示了该趋势.因此未来直白沟需密切关注冰川以上的岩体和高位冰川的稳定性,这些高位地质体可能是特大灾害链的启动源.

**4.1.2 冰雪型地质灾害链对地球内外动力的响应是不同步的** 由直白沟灾害链事件发生时间、地震时间以及冰川随时间的变化对比分析可知(图9),灾害链的活跃期与地震同步,且具有明显震后长期演化效应,这与地震通过直接破坏孕灾体的稳定性而诱发灾害的作用机制相关.相比较于地震效应,气候变化对于灾害链的触发影响在直白沟流域并不显著.实际上,除了冰湖溃决、冰崩等灾害,目前关于气候变化影响地质灾害的活动性趋势的判断还没有长时域尺度的数据支持,藏东南地区若干次重大灾害链事件的触发均无明显证据证实其与气候变化直接相关,如古乡沟泥石流、色东普冰崩均是由地震活动触发的,而易贡滑坡的触发也并未明确其与气候变化的具体关系.从直白沟的灾害链孕灾背景上看,气候变化导致的冰川消退作用反而减弱了灾害链发生的可能性.因此不同类型的冰雪型地质灾害链对气候变化响应可能出现巨大分化,其影响趋势和机制也存在诸多模糊之处.这种定性统计的规律还需要对藏东南地区更多样本进行验证,也是未来区域地质灾害发育规律研究的重要方向.

**4.1.3 冰水相变作用对冰雪型灾害链演进的作用** 通过对比直白沟灾害链和新磨村滑坡(Fan *et al.*, 2017)、白格滑坡(赵程等,2020)、水城滑坡(Ma *et al.*, 2020)、三溪村滑坡(冯文凯等,2016)等灾害链事件,发现冰雪型地质灾害链区别于其他沟谷型灾害链最重要的现象是链生过程中的冰水相变作用,这导致了冰雪型灾害链的物质转化和能量转化均更加复杂.在冰雪型地质灾害链的各链生过程中,冰川的不同参与程度,直接影响灾害链的演进,如冰川跃动启动的灾害链,其链末灾害均位于主河交汇口,而冰岩崩诱发的灾害链是否进入主河致灾则受冰水相变影响显著.冰水相变对链生机制和动力转换过程的作用在宏观上有两个个方面:一是冰水相变作用对灾害体性质转化具有显著促进作用,增强了物质转化率和能量转化率;二是冰水相变作用对堵江溃决风险更是作用显著,冰体的快速消融将破坏堰塞体自身结构,降低稳定性,更易产生整体溃决风险,如GC1和GC2两次灾害链均是堵塞主河后于次日整体溃决.因次,在调查和描述冰雪型灾害链时,定量描述各孕灾背景的时空演化差异是分析灾害链演进的基础.

## 5　结论

受地震和气候变化双重驱动作用,直白沟流域的孕灾背景条件分别以冰川活动、岩体失稳、松散物质沿沟道搬运和水系演化等方式快速演化,冰雪型地质灾害链已经成为区内重大工程建设的关键风险源.本文通过深入分析1950年以来发育的6次冰雪型地质灾害链的发生与演进,取得以下结论:

(1)灾害链在时间尺度上的活动趋势具有明显波动性规律,地震是活动高峰(波峰)的主要驱动力,而波谷则主要由气候变化间接影响驱动.灾害事件与地震活动在时间上是同步的,规模则与地震对本区影响程度(或烈度)相关.灾害链对气候变化的响应具有明显滞后性.

(2)通过重构6次灾害链演进过程,提出了以"链首灾害、链中灾害和链末灾害"和"第N链生"来描述直白沟冰雪型灾害链演进的方法,并将灾害链演进模式概化为冰/岩失稳—碎屑流、冰岩碎屑流—泥石流、和泥石流/碎屑流—堵江溃决3种类型,为统一描述冰雪型地质灾害链和建立数据库提供框架支持.

(3)近70年来,直白沟的松散物源受两次地震影响呈现波浪形增多的趋势,冰川总体呈现快—慢—快的减少趋势,沟道水系则受冰川作用不断重塑.孕灾背景的变化对灾害链发生与发展具有明显控制作用,驱使灾害链的发展呈现冰川跃动减少、冰岩崩增多和泥石流增多的变化.

(4)受冰水相变作用,冰雪型灾害链与非冰雪型灾害链在演进特征和模式上具有显著差异.冰雪型灾害链演进的时间更连续,灾害体物理性质转化更突出,链生环数更多.因此在冰雪型地质灾害链的风险防控上,应聚焦关注冰雪等孕灾体的演化及参与灾害过程,尤其在早期识别、监测预警以及工程治理上.

## References


Al, L.A.E., 2013.Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge. https://doi. org/10.1017/CBO9781107415324.004

An, B. S., Wang, W. C., Yang, W., et al., 2022. Process, Mechanisms, and Early Warning of Glacier Collapse-Induced River Blocking Disasters in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon, Southeastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 816: 151652. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151652

Chen, C., Li, H. Y., Chen, J. K., et al., 2022. Overtopping and Flood Routing Process of Landslide Dams Consisted of Ice-Soil Mixtures: A Preliminary Study. *Journal of Hydrology*, 604: 127252. https://doi. org/10.1016/j.jhydrol.2021.127252

Chen, C., Zhang, L. M., Xiao, T., et al., 2020. Barrier Lake Bursting and Flood Routing in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon in October 2018.*Journal of Hydrology*, 583: 124603. https://doi. org/10.1016/j. jhydrol.2020.124603

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., Dang, C., Cheng, Z. L., et al., 2010. Debris Flows Resulting from Glacial-Lake Outburst Floods in Tibet, China. *Physical Geography*, 31(6): 508—527. https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.6.508

Cui, P., Guo, J., 2021. Evolution Models, Risk Prevention and Control Countermeasures of the Valley Disaster Chain. *Advanced Engineering Sciences*, 53(3): 5—18(in Chinese with English abstract).

Cui, P., Guo, X.J., Jiang, T.H., et al., 2019. Disaster Effect Induced by Asian Water Tower Change and Mitigation Strategies. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1313—1321(in Chinese with English abstract).

Cui, S.H., Pei, X.J., Huang, R.Q., 2019. An Initiation Model of DGB Landslide: Non-Coordinated Deformation Inducing Rock Damage in Sliding Zone during Strong Seismic Shaking. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38(2): 237—253(in Chinese with English abstract).

Delaney, K. B., Evans, S. G., 2015. The 2000 Yigong Landslide (Tibetan Plateau), Rockslide-Dammed Lake and Outburst Flood: Review, Remote Sensing Analysis, and Process Modelling.*Geomorphology*, 246: 377—393. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.020

Dong, H.W., Xu, Z.Q., Cao, H., et al., 2018. Comparison of Eastern and Western Boundary Faults of Eastern Himalayan Syntaxis, and Its Tectonic Evolution. *Earth Science*, 43(4): 933—951(in Chinese with English abstract).

Fan, X. M., Xu, Q., Scaringi, G., et al., 2017. Failure Mechanism and Kinematics of the Deadly June 24th

2017 Xinmo Landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, 14(6): 2129－2146. https://doi. org/10.1007/s10346-017-0907-7

Feng, W.K., Hu, Y.P., Xie, J.Z., et al., 2016. Disaster Mechanism and Stability Analysis of Shattered Bedding Slopes Triggered by Rainfall—A Case Study of Sanxicun Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(11): 2197－2207(in Chinese with English abstract).

Feng, Y.T., Xiao, S.X., Hou, X.L., et al., 2006. Study on Slope Stability Based on Rockfall Impetus Actions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25 (S1): 2682－2686(in Chinese with English abstract).

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

Li, B., Gao, Y., Wan, J.W., et al., 2020. The Chain of the Major Geological Disasters and Related Strategies in the Yalu-Zangbu River Canyon Region. *Hydropower and Pumped Storage*, 6(2): 11－14, 35(in Chinese with English abstract).

Li, J., Chu, H.L., Li, B., et al., 2021. Analysis of Development Characteristics of High-Elevation Chain Geological Hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet Based on High Resolution Image and InSAR Interpretation. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32 (3): 42－50(in Chinese with English abstract).

Li, W. L., Zhao, B., Xu, Q., et al., 2022. More Frequent Glacier-Rock Avalanches in Sedongpu Gully are Blocking the Yarlung Zangbo River in Eastern Tibet. *Landslides*, 19(3): 589－601. https://doi. org/10.1007/s10346-021-01798-z

Liu, J. J., Cheng, Z. L., Li, Y., 2013. Glacier Lake Outburst Floods of the Guangxieco Lake in 1988 in Tibet, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1(5): 4605－4634.

Liu, W.F., Xiao, S.X., Sui, Y.C., et al., 2006. Analysis of Natural Disaster Chain and Chain-Cutting Disaster Mitigation Mode. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, (s1): 2675－2681 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. P., Montgomery, D.R., Hallet, B., et al., 2006. Quaternary Glacier Blocking Events at the Entrance of Yarlung Zangbo Great Canyon, Southeast Tibet. *Quaternary Sciences*, (S1): 52－62 (in Chinese with English abstract).

Lu, C. F., Cai, C. X., 2019. Challenges and Countermeasures for Construction Safety during the Sichuan-Tibet Railway Project. *Engineering*, 5(5): 833－838. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.06.007

Ma, S. Y., Xu, C., Xu, X. W., et al., 2020. Characteristics and Causes of the Landslide on July 23, 2019 in Shuicheng, Guizhou Province, China. *Landslides*, 17 (6): 1441－1452. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01374-x

Ma, Y.M., Ruan, W.M., Niu, C., et al., 2022. Movement History of the Microcontinents from the Tibetan Plateau Based on Paleomagnetic Results with Sufficient Sampling Units. *Journal of Earth Science*, 33(5): 1072－1080. https://doi.org/10.1007/s12583-022-1721-2

Qiao, J.P., Huang, D., Yang, Z.J., et al., 2012. Statistical Method on Dynamic Reserve of Debris Flow's Source Materials in Meizoseismal Area of Wenchuan Earthquake Region. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 23(2): 1－6(in Chinese with English abstract).

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

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).

Shi, Y. F., Yang, Z.H., Xie, Z. C., et al., 1964. The Glacial Debris Flow in Guxiang, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 6:542－544(in Chinese).

Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., et al., 2021. A Massive Rock and Ice Avalanche Caused the 2021 Disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373(6552): 300－306. https://doi.org/10.1126/science.abh4455

Tang, M.G., Xu, Q., Deng, W.F., et al., 2022a. Degradation Law of Mechanical Properties of Typical Rock in Sichuan-Tibet Traffic Corridor under Freeze-Thaw and Unloading Conditions. *Earth Science*, 47(6): 1917－1931(in Chinese with English abstract).

Tang, M.G., Wang, L.N., Liu, X.X., et al., 2022b. Distribution and Risk of Ice Avalanche Hazards in Tibetan Plateau. *Earth Science*, 47(12): 4647－4662(in Chinese with English abstract).

Wei, R. Q., Zeng, Q. L., Davies, T., et al., 2018. Geohazard 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

Wu, G.J., Yao, T.D., Wang, W.C., et al., 2019. Glacial Hazards on Tibetan Plateau and Surrounding Alpines. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1285－1292(in Chinese with English abstract).

Wu, K.P., Liu, S.Y., Guo, W.Q., 2020. Glacier Variation and Its Response to Climate Change in the Mount Namjagbarwa from 1980 to 2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 42(4): 1115－1125(in Chinese with English abstract).

Wu, G.J., Yao, T.D., Wang, W.C., et al., 2019.Glacial Hazards on Tibetan Plateau and Surrounding Alpines. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 34(11):1285－1292(in Chinese with English abstract).

Yang, G.S., Shen, Y.J., Jia, H.L., et al., 2018. Research Progress and Tendency in Characteristics of Multi-Scale Damage Mechanics of Rock under Freezing-Thawing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(3): 545－563(in Chinese with English abstract).

Yang, Y.C., Gao, D.Y., Li, B.S., 1987. A Preliminary Study of Water Vapor Channels in the Lower Yarlung Tsangpo River Valley. *Science China Earth Science*, (8): 97－106 (in Chinese).

Yao, T.D., Thompson, L., Yang, W., et al., 2012. Different Glacier Status with Atmospheric Circulations in Tibetan Plateau and Surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663－667. https://doi.org/10.1038/nclimate1580

Yao, T.D., Xue, Y.K., Chen, D.L., et al., 2019. Recent Third Pole's Rapid Warming Accompanies Cryospheric Melt and Water Cycle Intensification and Interactions between Monsoon and Environment: Multidisciplinary Approach with Observations, Modeling, and Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(3): 423－444. https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0057.1

Yin, F.L., Han, L.B., Jiang, C.S., et al., 2018. Interaction between the 2017 M6.9 Mainling Earthquake and the 1950 M8.6 Zayu Earthquake and Their Impacts on Surrounding Major Active Faults. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(8): 3185－3197(in Chinese with English abstract).

Zhang, W.J., 1983. A Surging Glacier in the Nanjiabawa Peak Area, Himalayas. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 5(4): 75－76(in Chinese with English abstract).

Zhang, W.J., 1985. Some Features of the Surge Glacier in the Mt.namjagbarwa. *Journal of Mountain Research*, 3(4): 234－238(in Chinese with English abstract).

Zhang, X.H., Xue, R.Y., Wang, M., et al., 2020. Field Investigation and Analysis on Flood Disasters Due to Baige Landslide Dam Break in Jinsha River. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 89－100(in Chinese with English abstract).

Zhao, B., Li, W.L., Wang, Y.S., et al., 2019. Landslides Triggered by the Ms 6.9 Nyingchi Earthquake, China (18 November 2017): Analysis of the Spatial Distribution and Occurrence Factors. *Landslides*, 16(4): 765－776. https://doi.org/10.1007/s10346-019-01146-2

Zhao, C., Fan, X.M., Yang, F., et al., 2020. Movement of Baige Landslide in Jinsha River and Prediction of Potential Unstable Rock Mass. *Science Technology and Engineering*, 20(10): 3860－3867(in Chinese with English abstract).

Zhuang, Y., Yin, Y.P., Xing, A.G., et al., 2020. Combined Numerical Investigation of the Yigong Rock Slide-Debris Avalanche and Subsequent Dam-Break Flood Propagation in Tibet, China.*Landslides*, 17(9): 2217－2229. https://doi.org/10.1007/s10346-020-01449-9

Zou, Q., Cui, P., Jiang, H., et al., 2020. Analysis of Regional River Blocking by Debris Flows in Response to Climate Change.*Science of the Total Environment*, 741:140262. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140262

## 中文参考文献

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, 郭剑, 2021. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. 工程科学与技术, 53(3): 5－18.

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

崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 2019. 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带非协调变形与岩体动力致损. 岩石力学与工程学报, 38(2): 237－253.

董汉文, 许志琴, 曹汇, 等, 2018. 东喜马拉雅构造结东、西边界断裂对比及其构造演化过程. 地球科学, 43(4): 933－951.

冯文凯, 胡云鹏, 谢吉尊, 等, 2016. 顺层震裂斜坡降雨触发灾变机制及稳定性分析: 以三溪村滑坡为例. 岩石力学与工程学报, 35(11): 2197－2207.

冯玉涛, 肖盛燮, 侯晓丽, 等, 2006. 基于岩崩动力作用下的斜坡稳定性研究. 岩石力学与工程学报, 25(增刊 1): 2682－2686.

李滨, 高杨, 万佳威, 等, 2020. 雅鲁藏布江大峡谷地区特大

地质灾害链发育现状及对策. 水电与抽水蓄能, 6(2): 11－14, 35.

李军, 褚宏亮, 李滨, 等, 2021. 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. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 42－50.

刘文方, 肖盛燮, 隋严春, 等, 2006. 自然灾害链及其断链减灾模式分析. 岩石力学与工程学报, (s1):2675－2681.

刘宇平, D. R. Montgomery, B. Hallet, 等, 2006. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件. 第四纪研究, (s1):52－62.

乔建平, 黄栋, 杨宗佶, 等, 2012. 汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论. 中国地质灾害与防治学报, 23(2): 1－6.

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, 许强, 邓文锋, 等, 2022a. 冻融及加卸荷条件下川藏交通廊道典型岩石力学特性的劣化规律. 地球科学, 47(6): 1917－1931.

汤明高, 王李娜, 刘昕昕, 等, 2022b. 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.

邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等, 2019. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. 中国科学院院刊, 34(11): 1285－1292.

吴坤鹏, 刘时银, 郭万钦, 2020.1980—2015年南迦巴瓦峰地区冰川变化及其对气候变化的响应. 冰川冻土, 42(4): 1115－1125.

杨更社, 申艳军, 贾海梁, 等, 2018. 冻融环境下岩体损伤力学特性多尺度研究及进展. 岩石力学与工程学报, 37(3): 545－563.

杨逸畴, 高登义, 李渤生, 1987. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探. 中国科学:地球科学, (8):97－106.

尹凤玲, 韩立波, 蒋长胜, 等, 2018.2017年米林6.9级地震与1950年察隅8.6级地震的关系及两次地震对周边活动断层的影响. 地球物理学报, 61(8): 3185－3197.

张文敬, 1983. 南迦巴瓦峰的跃动冰川. 冰川冻土, 5(4): 75－76.

张文敬, 1985. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征. 山地研究, 3(4): 234－238.

张新华, 薛睿瑛, 王明, 等, 2020. 金沙江白格滑坡堰塞坝溃决洪水灾害调查与致灾浅析. 工程科学与技术, 52(5): 89－100.

赵程, 范宣梅, 杨帆, 等, 2020. 金沙江白格滑坡运动过程分析及潜在不稳定岩体预测. 科学技术与工程, 20(10): 3860－3867.