

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0075

HAO Jiansheng, LI Lanhai. Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):762-770. [郝建盛, 李兰海. 雪崩灾害防治研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):762-770.]

## 雪崩灾害防治研究进展及展望

郝建盛<sup>1</sup>, 李兰海<sup>2,3,4,5</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院伊犁河流域生态系统研究站, 新疆 新源 835800; 4. 新疆干旱区水循环与水利利用重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 雪崩是冰冻圈内主要的自然灾害之一, 严重威胁高寒山区内的交通廊道、能源输送和通信干线、矿区、牧区、旅游区等安全并造成基础设施毁坏和人畜死伤, 阻碍山区社会经济的可持续发展。随着气候变化和人类活动不断向高寒山区扩展, 暴露在雪崩危险之下的人口及基础设施日趋增多, 雪崩的风险显著增强。为保障山区的社会经济可持续发展, 对雪崩灾害防治管理需求不断增加。在梳理我国1960年以来主要雪崩研究进展基础上, 结合世界各地雪崩研究成果, 总结了雪崩的影响因素和区域规律、雪崩的形成与运动机理、雪崩监测预警、雪崩风险评估和雪崩工程防治等方面的进展和亟须研究的前沿问题以及科学难点。同时本文论述了气候变化对雪崩活动的影响, 以及人类活动与雪崩活动之间的相互影响, 展望了未来雪崩防灾减灾的需求并提出对策, 推动雪崩防灾减灾研究。

**关键词:** 雪崩研究; 气候变化; 雪崩灾害; 雪崩防治和管理

**中图分类号:** P426.63\*6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-0762-09

### 0 引言

雪崩与滑坡、泥石流和冰崩类似, 是一种由重力驱动的地表流。雪崩是塑造山地地形地貌和影响山地生态系统的原动力之一<sup>[1-2]</sup>。而对活动于积雪覆盖山区的人类而言, 雪崩是威胁人类活动的一种常见的自然灾害。雪崩具有潜在性、突发性、难以预测性、破坏力巨大等特点, 经常造成山区基础设施破坏和人畜死伤, 从而阻碍山区社会和经济的可持续发展<sup>[1,3-5]</sup>。世界上雪崩灾害的最早记录可以追溯到公元前327年亚历山大大帝远征军在穿越兴都库什山时, 雪崩袭击战马和士兵导致远征军蒙受重大损失<sup>[6]</sup>。直至今日, 人类在山地活动依然受雪崩严重侵扰, 2009—2019年仅在亚洲高山区雪崩直接致死的人数就超过1 500人<sup>[7]</sup>。中国地域宽广, 雪崩分布南北跨越25个纬距, 东西横贯50个经距<sup>[3]</sup>。雪崩活跃于我国天山、喜马拉雅山、祁连山、横断

山、念唐古拉山等, 对我国的交通和能源输送干线、矿区、牧区、旅游区、边防军事区都造成过严重伤害(表1)。雪崩不仅导致交通干线瘫痪和季节性关闭, 而且能够破坏油气管道和电力干线, 导致能源断供。因此如何对雪崩进行有效的防治成为高寒山区自然灾害治理的重点之一, 也是山地发展中迫切需要解决的问题。

为了防治雪崩灾害, 我国曾多次开展对西藏、四川、甘肃、云南和新疆地区的雪灾害重点区域调查和研究, 尤其在天山公路建设和第一次青藏高原科学考察等国家重大需求项目的研究过程中, 我国的雪崩研究得到长足的发展<sup>[3]</sup>。其中谢自楚和王彦龙等在中国青藏高原和天山对雪崩的形成和防治等开展了先驱和原创性研究, 并就雪崩的影响因素进行系统的论述<sup>[1,3]</sup>。为了减缓雪崩对人们生命安全威胁和社会经济发展的阻碍, 瑞士、美国等都设

收稿日期: 2021-09-03; 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(42101080); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0906); 四川省科技计划项目(2021YFH0009)资助

作者简介: 郝建盛, 助理研究员, 主要从事积雪物理和雪崩灾害防治研究. E-mail: haojs@igsnr.ac.cn

通信作者: 李兰海, 研究员, 主要从事积雪生态水文及灾害研究. E-mail: lilh@ms.xjb.ac.cn

表1 中国境内不同承灾体的典型雪崩灾害事件

Table 1 Typical avalanche disaster events of different disaster bearing bodies in China

承灾体	位置	山系	时间	损失状况	致灾模式
交通干线:G218天山段	新疆伊犁新源县	天山	2010-12-22	2人死亡,数千辆车被困于山区	强降雪诱发的雪崩袭击过往车辆并切断道路
牧区:尼勒克冬牧场	新疆伊犁尼勒克县	天山	2010-02-21—26	4人死亡,数千牲畜死亡,108户460名牧民及2万头牲畜被困	降雪和温度剧增诱发的雪崩袭击牧场和居民点
滑雪区-阿勒泰市将军山滑雪场	新疆阿勒泰市	阿尔泰山	2011-03-21	1人死亡	滑雪触发的雪崩冲击和掩埋滑雪者和游客
旅游区-乌鲁木齐南山风景区	新疆乌鲁木齐县萨尔达坂乡	天山	2019-04-8	10人受伤被困	温度剧增诱发的雪崩填埋山路
边防军事区-西藏哨所营区	西藏吉隆县宗嘎镇	喜马拉雅山	1973-02-26	37名边防官兵牺牲,营房被毁	强降雪诱发的雪崩冲击驻防部队营房
油气管线:西气东输二线	新疆伊犁果子沟	天山	2008-03-13	16人死亡,8人受伤,天然气管断供	强风诱发的雪崩冲毁施工营地和掩埋施工隧道
矿区:甘肃锦矿	甘肃省肃北县黑刺沟	祁连山	2012-06-07	10人死亡,12人受伤	强降雪诱发的雪崩冲击矿区营房

有专门的雪崩研究机构。经历过去 60 年世界各雪崩研究机构的理论研究和工程实践,在雪崩的影响因素和区域规律、雪崩的形成与运动机理、雪崩监测预警、雪崩风险评估和雪崩工程防治等取得显著的进展。

1 雪崩的影响因素和区域规律

雪崩的发生是在一定的地形和天气等条件的组合下山坡积雪被活化和失稳引起的,该过程受气候、地形、积雪特征等多种因素影响<sup>[8-12]</sup>。目前将影响雪崩活动的影响因素概括为三类:第一类为不随时间显著变化的影响因素,如山坡坡度、山坡地表特征等;第二类为导致积雪稳定性变化的外界自然条件,如降雪、降雨、地震、风等;第三类是积雪本身的物理特征,如积雪密度、雪层剪切强度、积雪湿度、积雪硬度、雪粒径等。各类因素对雪崩的形成和运动的影响已经被人们逐步认识和深入了解<sup>[8-12]</sup>。

不同气候和积雪物理特征条件下雪崩活动特点呈现显著差异<sup>[13-14]</sup>。为了积雪雪崩研究和雪崩预警防治项目的需求,“雪气候”的概念被广泛用于描述区域积雪特性并为雪崩发生条件提供背景<sup>[13-14]</sup>。雪气候被分为三种类型:海洋性雪气候,过渡性雪气候和大陆性雪气候<sup>[13-14]</sup>。海洋性雪气候具有相对较暖的温度、多云的天空、持续的大雪等特点,导致积雪密度高,雪层温度梯度低,雪晶体变质发育慢,难以形成持续的脆弱层<sup>[13,15-16]</sup>。青藏高原东南部山区(南和东喜马拉雅山,念唐古拉山东段,横断山和

易贡藏布山等)<sup>[3]</sup>,美国内华达山脉<sup>[13]</sup>,加拿大海岸山脉<sup>[15]</sup>以及日本海沿海山脉<sup>[16]</sup>均属于海洋性雪气候。该雪气候区域雪崩大多发生在暴风雪之后,因此海洋性雪气候雪崩监测预警主要依靠天气观测来评估暴风雪雪崩的可能性和严重性<sup>[14]</sup>。大陆性雪气候具有相对低的气温,较少的降雪,高温度梯度的雪场,导致积雪密度和含水率相对低,积雪发育快并且易形成持久脆弱层<sup>[14,17]</sup>。大陆性雪气候积雪相对于海洋性雪气候积雪力学强度低,雪层结构松散,雪粒之间的链接弱,所以相对于海洋性雪气候区,大陆性雪气候区雪崩易被触发,并且发生规模和破坏力总体上相对较小<sup>[7,13]</sup>。典型的大陆性雪气候区域有天山山脉,昆仑山、阿尔金山、祁连山和阿尔泰山<sup>[1,3-4]</sup>,北美洛基山脉<sup>[14]</sup>和西喜马拉雅山脉<sup>[18]</sup>。过渡性雪气候的特点是降雪量大,温度低于海洋性雪气候而高于大陆性雪气候,持久脆弱层会持续一周或一个月左右<sup>[13-14]</sup>。具有过渡性积雪气候的山脉包括青藏高原东北部山区(巴颜喀拉山,唐古拉山东段等)<sup>[3]</sup>,加拿大的哥伦比亚山脉<sup>[15]</sup>和欧洲阿尔卑斯山的大部分地区<sup>[19-20]</sup>。

2 雪崩的形成与运动机制

雪崩的形成源于山坡积雪易断裂雪层在内外动力耦合作用下的破坏。不同地形、天气、雪场条件下易断裂雪层的内外动力耦合方式和易断裂雪层剪切压缩破坏过程呈现不同,造成雪崩形成机制和释放方式显著差异<sup>[21-24]</sup>。根据不同的研究和雪崩防治工程需要,基于雪崩的诱发因素、雪崩规模、雪

崩发生地形、雪崩形态等形成多种分类系统逐渐被发展<sup>[10,17,25]</sup>。随着学术交流 and 雪崩防治实践的需求,目前常用的雪崩分类系统根据雪崩形态特征和积雪物理特征展开分类,这两种雪崩分类系统简单并且便于雪崩的研究从而广泛被学者应用。根据雪崩发生时山坡积雪断裂面,雪崩一般被分类为全层雪崩和表层雪崩<sup>[10,17,26]</sup>。根据雪崩始发区积雪含水率,雪崩分为干雪崩和湿雪崩<sup>[8,19]</sup>。兼顾积雪滑动面位置与积雪含水率,雪崩被划分为全层干雪崩、全层湿雪崩、表层干雪崩和表层湿雪崩四种类型用于野外记录和研究认识<sup>[17,27]</sup>。

由于干雪的密度、湿度、剪切强度等物理特征稳定,目前通过野外观测结合室内实验对干雪崩的

形成机制具有较为系统的认识<sup>[22-23,28-30]</sup>。表层干雪崩的形成可概括为如下5个阶段:雪层剪切压缩断裂—雪层初始裂隙形成—裂隙横向扩展—裂隙贯穿和断裂雪块形成—断裂雪块下滑<sup>[30]</sup>(图1)。湿雪崩主要多发在气温相对较高的时期,它的形成多由于气温升高造成雪表面融雪水渗流,导致易断层积雪含水率增大引起底部积雪的剪切强度减弱,导致易断层抗剪强度变弱引起的<sup>[21]</sup>。由于积雪处于高含水率状态,积雪的各项物理特征都不稳定并且各个物理特征关系呈现非线性<sup>[31-32]</sup>,导致其野外难以观测和相关实验非常复杂,所以关于湿雪力学特性研究比较匮乏,造成对湿雪崩形成机制的认识相对停滞。

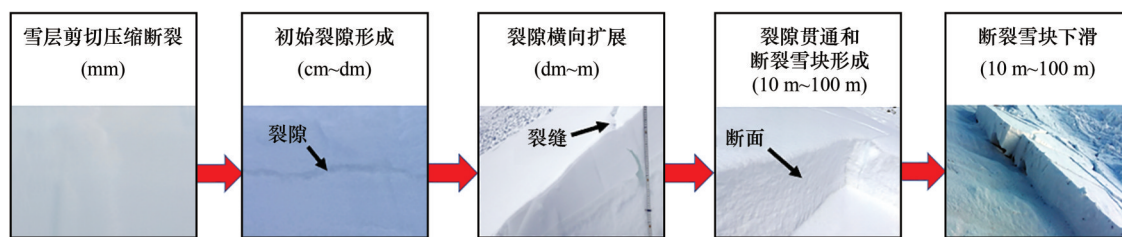


图1 表层干雪崩形成的过程

Fig. 1 Formation process of surface-layer dry avalanche

不同积雪、土壤和天气环境下,雪层断裂破坏的机制呈现明显差异导致不同类型雪崩的形成机制呈现不同<sup>[10,17,21]</sup>。不同内外动力耦合作用下雪层断裂破坏模式的不同导致破坏后的山坡积雪释放过程也呈现差异。基于野外观测,多数雪崩从形成到释放包含诱发雪层剪切压缩破坏、裂隙扩展、断裂积雪差异性滑动、积雪加速滑动、积雪滞留和停滞滑动等多个过程<sup>[33-34]</sup>。通过室内实验和数值模拟对雪层破坏后雪场应力重分布、裂隙扩展、断裂积雪差异性滑动、积雪加速滑动、积雪滞留和停滞滑动等过程已有大量研究<sup>[30,33-34]</sup>。然而由于自然中驱动雪层断裂的外动力源多样化,以及不同雪气候和环境情景下诱发雪层破坏的内外动力耦合机制差异显著<sup>[13-14]</sup>,造成多种诱发因素诱发不同条件雪场雪层破坏的诱发机制难以系统阐明,这阻碍了基于雪崩动力学构建雪崩预警模型的发展。系统认知不同雪气候下雪层破坏的诱发机制,然后结合雪崩的形成和运动机理将能构建不同雪气候下完整的雪崩动力学体系,为雪崩预警模型构建奠定基础,这也是未来雪崩预警和防治工作中迫切需要开展研究的内容。

### 3 雪崩监测预警

雪崩预警是特定时间和空间内,在诱发情景和特定触发条件下给出山坡积雪稳定性的预报<sup>[35]</sup>。目前雪崩预警主要有两种方式:第一种是依据经验统计模型确定区域雪崩的降雪量、气温变化等诱发条件预警雪崩<sup>[36-39]</sup>;另一种为通过观测或模拟获取积雪物理特性结合雪崩形成机理计算山坡积雪的稳定性从而预警雪崩<sup>[40-44]</sup>。自然界多数雪崩是由于降雪诱发形成,对于由降雪诱发雪崩而言,降雪量是雪崩预警最有效的参数。Atwater<sup>[45]</sup>统计认为在北美地区当降雪时降水量超过25 mm将很有可能诱发雪崩。Perla<sup>[38]</sup>统计认为在美国犹他州由于降雪导致新雪厚度超过30 cm同时降水强度超过 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,雪崩极有可能发生,而在科罗拉多州地区新雪厚度超过30 cm同时降水强度超过 $1.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,雪崩可能被诱发。在中国天山巩乃斯河谷区域,降雪诱发的雪崩中有75%发生在降雪量超过20 mm之后<sup>[4]</sup>。雪层抗剪强度模量对温度的变化最为敏感,并且气温剧增造成融雪下渗改变雪场的稳定性,所以温度条件被应用于预警气温剧增诱发的湿雪崩<sup>[19,46]</sup>。Romig等<sup>[39]</sup>基于温度参数构建



雪崩预警模型对雪崩预警,预警模型整体的准确率达到75%,但对雪崩日的虚假误报达到80%。由于不同区域的积雪特性具有明显的差异,不同区域诱发因素对雪崩形成的影响也显著不同。依赖于诱发因素和积雪条件的雪崩预警模型具有显著的时空局限性,并且缺乏资料地区很难获得诱发雪崩条件参数。

雪崩的形成起源于易断雪层的剪切压缩破坏,因此通过获取易断雪层的抗剪强度与所受剪切应力的比值评估山坡积雪稳定性被应用于预警雪崩<sup>[42-44]</sup>。目前许多研究通过实时观测山坡积雪物理特性评估积雪稳定性从而预警区域雪崩,并取得显著的成效<sup>[41-44]</sup>。通过实时观测积雪力学参数预警雪崩相对可靠,但由于实际观测中需要在雪崩易发点或其附近进行实时观测,较高的雪崩风险导致该种雪崩预警操作很难实现,并且对于雪崩预警人员的专业素养要求高。为了克服在雪崩风险区实时监测积雪稳定性的危险,许多积雪模型被发展以达到通过模型模拟获取实时的积雪物理特征参数,计算山坡积雪稳定性。目前积雪模型有CROCUS模型<sup>[47]</sup>和SNOWPACK模型<sup>[48-50]</sup>等,其中SNOWPACK模型应用较为广泛。积雪模型的核心是获取积雪物理特征参数,而无法直接获取雪崩动力学参数和山坡积雪滑动面位置等。目前基于积雪模型获取积雪物理参数判断山坡积雪稳定性的方法仅考虑雪层剪切压缩破坏,未考虑雪崩运动等其他物理过程,因此使用该类方法预警具有明显的时空局限性。因此,基于包含诱发雪层剪切压缩破坏、裂隙扩展和裂隙贯穿等多过程雪崩形成和运动机制的雪崩预警模型需要逐步建立和发展,并且雪崩形成和运动机制亟须进一步明晰。

#### 4 雪崩风险评估

雪崩风险评估是雪崩风险管理的基础,是雪崩防治、土地利用规划和道路选线等工程设计必不可少的环节。对雪崩风险系统分析和评估编制雪崩风险图集将有助于高寒山区交通规划管理、土地资源利用和矿山建设规划,是高寒山区资源开发和区域发展的基本科学依据。针对不同的保护目标,一般通过点-线-面三个层次评估雪崩风险服务于防灾减灾和基础设施建设。点层面的雪崩风险评估主要针对山区民居点、重点路段、矿山、营地和野外滑雪场等,一般通过计算个体雪崩的最大抛程、发

生频率等来评估雪崩危险并叠加受威胁目标的暴露度和敏感度来实现雪崩风险评估<sup>[51]</sup>。线层面的雪崩风险评估主要针对交通廊道、油气管线等,通过计算沿线雪崩的规模和频率来评估雪崩危险,结合对受威胁目标的影响实现雪崩风险评估<sup>[52-53]</sup>。区域层面的雪崩风险评估主要针对农牧场区等,通过计算区域雪崩的分布和规模来评估雪崩危险,并结合对受威胁目标的影响实现雪崩风险评估,从而帮助合理规划区域<sup>[54]</sup>。在雪崩风险评估中,雪崩造成的损失通常直接用货币单位来量化。损失价值等于将物体恢复到灾难发生前的状态所需的财务成本。雪崩不但直接对基础道路、油气电管网等承灾体造成损害,而且雪崩能够长时间切断道路、电、油气管网等造成严重的间接损失,甚至比雪崩造成的直接损失更加严重。间接损失往往在雪崩评估损害时被忽略,所以在雪崩风险评估中如何量化雪崩造成的间接损失值得在未来研究中深入探讨。

雪崩的危险评估是雪崩风险评估的基础和核心(图2)。目前常用以下五种方式评估雪崩的危险。第一种为雪崩活动历史资料分析法,这种方法基于雪崩的报告、目击者陈述和过去雪崩事件的编年史统计分析。该方法能确定雪崩事件频率,还可以提供有关雪崩的诱发因素、活动范围、规模和损害情况,然而历史资料通常是不完整的或者空白,而且在表述上往往是主观的。第二种为地形和林地环境形态法,该种方法是基于雪崩发生时形成的固定地形和地貌以及对树木造成的损伤来反演雪崩的频率和规模。目前基于树木年轮的变化反演

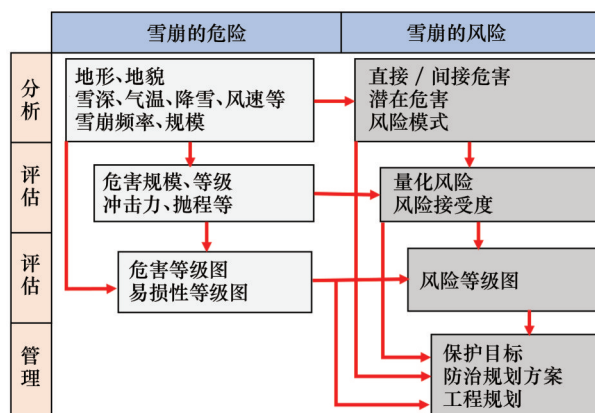


图2 以风险管理为基础的雪崩危险和风险分析、评估和概念介绍模型图

Fig. 2 Diagram of the model of analysis, assessment and conceptual presentation of avalanche hazards and risks as a basis for risk management

雪崩发生频率,从而构建雪崩时序来揭示雪崩对气候变化的响应已被广泛研究<sup>[55]</sup>。第三种为野外观测和统计法,该方法首先通过野外对雪崩的特征进行详细勘测,然后进行统计分析获得雪崩危险度<sup>[56-57]</sup>。该方法相对比较严谨和可靠,但是观测人员在野外观测具有高的雪崩风险。中国科学院天山积雪与雪崩研究站对天山巩乃斯河谷开展了系统的雪崩特性调查,并比较不同类型的雪崩危险<sup>[27]</sup>。第四种为数值模拟法,该方法基于大量雪崩模型模拟提供关于特定情况下雪崩发生的概率和规模。该方法多用于在确定情况下雪崩危险评估<sup>[54]</sup>。第五种为专家打分法,该方法是基于雪崩专家通过经验对雪崩危险的评估<sup>[58]</sup>,通常用于验证或反驳其他方法的结果。

## 5 雪崩工程防治

为了减少雪崩风险,人类不断摸索对雪崩的防治,雪崩的预警和工程防治技术也随之不断发展。目前国内外通过不断的工程实践和探索,形成了稳(稳雪格栅、稳雪墙、稳雪土阶等)、防雪崩走廊(导雪堤、渡雪槽等)、缓(消能土锥、消能坑、破雪堤等)和挡雪坝等四类雪崩工程防治类型<sup>[3,20,59]</sup>,相关的研究成果在天山公路、滇藏公路和川藏公路等广泛使用并取得良好成效<sup>[3,59]</sup>。另外随着隧道的技术快速发展,许多雪崩危险区得到有效规避从而极大降低道路雪崩危害。然而,在高寒区越岭隧道的发展中也出现亟需雪崩防治问题,如我国独库公路哈希勒根隧道口、派墨公路多雄拉隧道口、乌兹别克斯坦安芭铁路隧道<sup>[60]</sup>等都有报道雪崩回填和冲击隧道口;吉尔吉斯斯坦高克阿尔特山公路隧道由于洞口明洞无法抵抗高速度、大体积的雪崩出现灾害事故等。同时,随着山区社会经济快速发展,高起点、高标准、高质量的道路等基础工程对雪崩防治的效果和标准不断提高。因此,目前不仅局限于研究防护工程对雪崩形成和运动过程的影响,也逐渐重视雪崩对受灾体防护结构的作用,即综合考虑雪崩与受灾体防护结构之间的相互作用机理,进而设计高效安全的雪崩防护体系。然而由于雪崩运动机理和成灾致灾机制等关键科学问题未明晰,雪崩运动速度、雪崩流高度、雪崩堆积体体积、雪崩抛程、雪崩冲击力等与工程防护设计的关键雪崩动力学参数难以精确获取,限制高效的雪崩防护体系的构建和设计。

## 6 雪崩研究展望

### 6.1 气候变化对雪崩活动的影响和思考

雪崩的活动受积雪特性、降雪和温度变化的直接影响,因此气候变化背景下积雪、气温和降雪的变化将对山区雪崩时空活动产生显著影响<sup>[5,61-63]</sup>。明确气候变化下区域雪崩活动的变化并提出不同增温情景下应对雪崩灾害的策略,将有助于道路选线规划、能源输送管道和旅游区等的规划和防护,从而减少雪崩灾害的威胁,支持灾害风险综合防控需求。不同雪气候条件下雪崩的活动特征和影响因素具有显著差异<sup>[13-14]</sup>,所以不同气候条件下雪崩的活动对气候变化的响应也呈现不同。1946—2010年处于过渡性雪气候区的法国阿尔卑斯山干雪崩发生频率显著减少,湿雪崩增加<sup>[65]</sup>。1774—2013年法国阿尔卑斯山的低海拔雪崩区(海拔600~1 200 m)的雪崩期缩短,雪崩数量显著减少<sup>[64]</sup>。过渡性雪气候的西喜马拉雅山的中高海拔雪崩发生频率随着气候变暖呈现显著增加趋势<sup>[5]</sup>。驻扎在喀喇昆仑山锡亚琴和拉达克东部地区的印度陆军14军参谋长2019年报告,近年来冰/雪崩数量增加了20%~30%,军队需要改变在山地驻扎部队的标准操作程序,并增强对雪崩袭击的防备和治理(<https://www.tribuneindia.com/news/archive/nation/global-warming-army-s-new-foe-269523>)。基于以上报道总结发现,气候变暖背景下海洋性和过渡性雪气候低海拔雪崩区雪崩数量逐渐减少,中高海拔山区雪崩的频率和雪崩易发点呈增加趋势,且湿雪崩逐渐盛行。然而,目前对于显著高于全球同期平均增温速率的大陆性雪气候的天山等山区的气候变化下雪崩频率、规模和类型的变化认知有限。大陆性雪气候区域积雪具有密度低、含水率低、雪层温度梯度高,深霜发育快且持续时间长的特点,区域积雪物理特征对气候变暖极其敏感并被观测到气候变暖背景下其呈现显著变化<sup>[66-67]</sup>。从理论上讲,该区域雪崩对气候变化的响应应该非常剧烈,但目前鲜有报道。

目前基于树轮反演和雪崩活动观测数据分析对气候变化下雪崩的频率和类型变化特征<sup>[5,63,68]</sup>,但是研究中由于缺少雪崩活动对气候变化响应机制的阐明,以至于对未来气候变化背景下雪崩活动趋势难以定量评估。雪崩活动对气候变化响应机制的明晰主要受困于目前缺乏气候变化对积雪物理特性的变化调控机制的阐明。目前基于遥感和气



象站点观测,关于气候变化背景下雪深、气温和降雪等已展开系统研究,并有了明确的认识<sup>[69-71]</sup>,但由于缺乏对山区雪场温度梯度、积雪密度和积雪含水率等长期系统的观测和模拟,以至于对这些积雪物理特性的变化尚不明确,区域积雪的温度梯度和积雪密度等积雪物理特性变化对雪崩发生频率、规模和类型的具体影响如何也难以阐明。

## 6.2 未来雪崩防灾减灾的需求和对策

随着人类社会的发展和资源的开发利用,交通网络、旅游区、农牧区和矿区不断向山区拓展,暴露在雪崩风险之下的基础设施和人口日趋增多。此外,气候变暖也导致全球部分中高山区雪崩呈现更加剧烈的活动,雪崩的风险逐渐增强<sup>[5,64]</sup>。而目前雪崩的预警手段和对雪崩灾后救援措施相对缺乏,因此未来雪崩灾害事件将持续增加。尤其在我国新疆和西藏等西部地区,随着社会经济的腾飞和西部地区矿产能源的开发、高山旅游区的发展和扩大、交通道路等基础建设增加和大量风、光、水电站的部署,暴露在雪崩风险之下的人类活动和基础设施逐渐增加。目前,我国关于雪崩灾害监测点少,无资料区域范围大,本底调查工作的深度和广度不足,导致系统的雪崩风险评估难以开展;青藏高原和天山等区域复杂艰险环境条件下内外动力耦合启动下的雪崩灾害灾变与致灾机理复杂,然而雪崩研究基础薄弱,难以满足雪崩防灾减灾的需求。因此,我国应该逐步加强积雪雪崩的监测,系统开展雪崩灾害风险调查,查清灾害本底,建立雪崩灾害数据库;聚焦重要交通廊道和重大工程安全,开展精细化的雪崩风险评估;发展天-空-地立体雪崩监测预警技术,研发雪崩灾害信息感知、风险评估、风险调控、应急处置的关键技术,形成系统的雪崩灾害防控和应急技术体系。

## 7 结论

雪崩是威胁高寒山区人类活动主要自然灾害之一,尤其在季节性积雪山区雪崩灾害频发。在气候变化的背景下,全球部分山区的雪崩的风险逐渐增加,雪崩对人类活动的威胁也不断加重。如何对雪崩进行有效的防治成为保障高寒山区的社会经济可持续发展重要主题之一。近六十年来国内外围绕雪崩的影响因素和区域规律、雪崩的形成与运动机理、雪崩监测预警、雪崩风险评估和雪崩工程防治等开展了广泛的研究。但由于研究对象复杂,

相关积雪雪崩实验条件苛刻,野外观测难度大,雪崩形成机理和运动过程的研究依然任重道远,雪崩的监测预警手段、雪崩工程防治和雪崩灾后救援技术也难以满足目前雪崩防灾减灾需要。未来需继续增加野外积雪和雪崩的野外观测,开展积雪变质发育和雪崩动力学物理实验,揭示雪崩形成和运动机理,构建完整的雪崩动力学体系,研发、集成雪崩防治的新技术,从而推动雪崩防灾减灾能力的提升。

谨以此文,纪念中国雪崩研究的先驱者谢自楚先生!

## 参考文献(References):

- [1] Xie Zichu, Severskiy I V. Snow and avalanche in Tianshan Mountains [M]. Changsha: Hunan Normal University Press, 1996. [谢自楚, 谢维尔斯基. 天山积雪与雪崩[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996.]
- [2] Bebi P, Kulakowski D, Rixen C. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems: state of research and implications for management[J]. Forest ecology and Management, 2009, 257(9): 1883-1892.
- [3] Wang Yanlong. Avalanche research in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1992. [王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 中国海洋出版社, 1992.]
- [4] Hao J S, Huang F R, Liu Y, et al. Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains [J]. Journal of Mountains Science, 2018, 15(7): 1397-1411.
- [5] Ballesteros-Cánovas J A, Trappmann D, Madrigal-González J, et al. Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(13): 3410-3415.
- [6] Ganju A, Dimri A P. Prevention and mitigation of avalanche disasters in western Himalayan region [J]. Natural Hazards, 2004, 31(2): 357-371.
- [7] Hao Jiansheng, Huang Farong, Feng Ting, et al. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics of snow avalanche disaster and its triggering factors in the High Mountain Asia [J]. Mountain Research, 2021, 39(2): 304-312. [郝建盛, 黄法融, 冯挺, 等. 亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析[J]. 山地学报, 2021, 39(2): 304-312.]
- [8] Schweizer J, Bruce Jamieson J, Schneebeli M. Snow avalanche formation [J]. Reviews of Geophysics, 2003, 41(4): 1-25.
- [9] Laute K, Beylich A A. Morphometric and meteorological controls on recent snow avalanche distribution and activity at hill-slopes in steep mountain valleys in western Norway [J]. Geomorphology, 2014, 218: 16-34.
- [10] Schweizer J, Bartelt P, van Herwijnen A. Snow avalanches [M]// Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Elsevier, 2021: 377-416.
- [11] Pérez-Guillén C, Tapia M, Furdada G, et al. Evaluation of a snow avalanche possibly triggered by a local earthquake at Vallée de la Sionne, Switzerland [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 108: 149-162.
- [12] Wang Shijin, Ren Jiawen. A review of the progresses of ava-

- lanche hazards research[J], *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1529-1536. [王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1529-1536.]
- [13] Mock C J, Birkeland K W. Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(10): 2367-2392.
- [14] Shandro B, Haegeli P. Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(4): 1141-1158.
- [15] Haegeli P, McClung D M. Expanding the snow-climate classification with avalanche-relevant information: initial description of avalanche winter regimes for southwestern Canada[J]. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(181): 266-276.
- [16] Ikeda S, Wakabayashi R, Izumi K, et al. Study of snow climate in the Japanese Alps: comparison to snow climate in North America [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59(2/3): 119-125.
- [17] Hao J, Zhang Z, Li L. Timing and identification of potential snow avalanche types: a case study of the central Tianshan Mountains[J]. *Landslides*, 2021, 18(10): 1-12.
- [18] Sharma S, Ganju A. Complexities of avalanche forecasting in Western Himalaya: an overview[J]. *Cold regions science and technology*, 2000, 31(2): 95-102.
- [19] Baggi S, Schweizer J. Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland) [J]. *Natural Hazards*, 2009, 50(1): 97-108.
- [20] Rudolf-Miklau F, Sauer Moser S, Mears A I. The technical avalanche protection handbook [M]. Berlin: Ernst and Sohn, 2015.
- [21] Ancey C, Bain V. Dynamics of glide avalanches and snow gliding[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 745-784.
- [22] Chiaia B M, Cornetti P, Frigo B. Triggering of dry snow slab avalanches: stress versus fracture mechanical approach[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53(2): 170-178.
- [23] Fyffe B, Zaiser M. Interplay of basal shear fracture and slab rupture in slab avalanche release[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 49(1): 26-38.
- [24] Gaume J, Chambon G, Herwijnen A, et al. Stress concentrations in weak snowpack layers and conditions for slab avalanche release [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8363-8369.
- [25] De Quervain M R, De Crecy L, LaChapelle E R, et al. Avalanche classification [J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1973, 18(4): 391-402.
- [26] Clarke J, McClung D. Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, British Columbia, Canada [J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(151): 539-546.
- [27] Hao J S, Richard M J E, Liu Y, et al. Characteristics and hazards of different snow avalanche types in a continental snow climate region in the Central Tianshan Mountains [J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(4): 317-331.
- [28] Heierli J, Gumbsch P, Zaiser M. Anticrack nucleation as triggering mechanism for snow slab avalanches [J]. *Science*, 2008, 321(5886): 240-243.
- [29] Gaume J, Gast T, Teran J, et al. Dynamic anticrack propagation in snow. *Nature communications*, 2018, 9(1): 1-10.
- [30] Schweizer J. On recent advances in avalanche research [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 144: 1-5.
- [31] Mitterer C, Hirashima H, Schweizer J. Wet-snow instabilities: comparison of measured and modelled liquid water content and snow stratigraphy [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58): 201-208.
- [32] Techel F, Pielmeier C. Point observations of liquid water content in wet snow-investigating methodical, spatial and temporal aspects[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(2): 405-418.
- [33] Borstad C P, McClung D M. Numerical modeling of tensile fracture initiation and propagation in snow slabs using nonlocal damage mechanics[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 69(2): 145-155.
- [34] Gaume J, Herwijnen A, Chambon G, et al. Snow fracture in relation to slab avalanche release: critical state for the onset of crack propagation[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(1): 217-228.
- [35] McClung D M. The elements of applied avalanche forecasting, Part I: The human issues[J]. *Natural Hazards*, 2002, 26(2): 111-129.
- [36] Gauthier F, Germain D, Hétu B. Logistic models as a forecasting tool for snow avalanches in a cold maritime climate: northern Gaspésie, Québec, Canada [J]. *Natural Hazards*, 2017, 89(1): 201-232.
- [37] Hendrikx J, Murphy M, Onslow T. Classification trees as a tool for operational avalanche forecasting on the Seward Highway, Alaska [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 97: 113-120.
- [38] Perla R I. On contributory factors in avalanche hazard evaluation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1970, 7(4): 414-419.
- [39] Romig J M. March wet avalanche prediction at Bridger Bowl ski area, Montana [D]. Montana State University-Bozeman, College of Letters and Science, 2004.
- [40] Conway H, Wilbour C. Evolution of snow slope stability during storms[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 30(1): 67-77.
- [41] Gauthier D, Brown C, Jamieson B. Modeling strength and stability in storm snow for slab avalanche forecasting[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(2): 107-118.
- [42] Jamieson B, Zeidler A, Brown C. Explanation and limitations of study plot stability indices for forecasting dry snow slab avalanches in surrounding terrain [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 50(1): 23-34.
- [43] Jamieson J B, Johnston C D. Rutschblock precision, technique variations and limitations[J]. *Journal of Glaciology*, 1993, 39(133): 666-674.
- [44] Jamieson J B, Johnston C D. Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, 18(1): 268-273.
- [45] Atwater M M. Snow avalanches [J]. *Scientific American*, 1954, 190(1): 26-31.
- [46] Peitzsch E H, Hendrikx J, Fagre D B, et al. Examining spring wet slab and glide avalanche occurrence along the Going-to-the-Sun Road corridor, Glacier National Park, Montana, USA[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 78: 73-81.
- [47] Brun E, David P, Sudul M, et al. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting[J]. *Journal of Glaciology*, 1992, 38(128): 13-22.
- [48] Bartelt P, Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35(3): 123-145.
- [49] Lehning M, Fierz C, Brown B, et al. Modeling snow instability with the snow-cover model SNOWPACK[J]. *Annals of Glaciology*, 2004, 38(1): 331-338.
- [50] Bellaire S, van Herwijnen A, Mitterer C, et al. On forecasting

- wet-snow avalanche activity using simulated snow cover data [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 144: 28-38.
- [51] Valero C V, Wever N, Bühler Y, et al. Modelling wet snow avalanche runout to assess road safety at a high-altitude mine in the central Andes [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(11): 2303.
- [52] Judson A. On the potential use of index paths for avalanche assessment [J]. *Journal of Glaciology*, 1983, 29(101): 178-184.
- [53] Wastl M, Stötter J, Kleindienst H. Avalanche risk assessment for mountain roads; a case study from Iceland [J]. *Natural Hazards*, 2011, 56(2): 465-480.
- [54] Cappabianca F, Barbolini M, Natale L. Snow avalanche risk assessment and mapping: a new method based on a combination of statistical analysis, avalanche dynamics simulation and empirically-based vulnerability relations integrated in a GIS platform [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(3): 193-205.
- [55] Laxton S C, Smith D J. Dendrochronological reconstruction of snow avalanche activity in the Lahul Himalaya, Northern India [J]. *Natural Hazards*, 2009, 49(3): 459-467.
- [56] Schweizer J, Mitterer C, Reuter B, et al. Avalanche danger level characteristics from field observations of snow instability [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(7): 3293-3315.
- [57] Liu Y, Chen X, Qiu Y, et al. Mapping snow avalanche debris by object-based classification in mountainous regions from Sentinel-1 images and causative indices [J]. *Catena*, 2021, 206: 105559.
- [58] Schweizer J, Föhn P. Avalanche forecasting: an expert system approach [J]. *Journal of Glaciology*, 1996, 42(141): 318-332.
- [59] Liu Daxiang, Cheng Zunlan, Zhao Xin, et al. Research and application situation of avalanche prevention and control engineering [J]. *Mountain Research*, 2013, 31(4): 425-433. [刘大翔, 程尊兰, 赵鑫, 等. 雪崩防治工程研究与应用现状 [J]. *山地学报*, 2013, 31(4): 425-433.]
- [60] Wang Hua. Study of prevention measures of avalanche at tunnel entrance [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(4): 642-650. [王华. 隧道洞口雪崩防治方案探讨 [J]. *隧道建设*, 2019, 39(4): 642-650.]
- [61] Laternser M, Schneebeli M. Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland [J]. *Natural Hazards*, 2002, 27(3): 201-230.
- [62] Castebrunet H, Eckert N, Giraud G, et al. Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020—2050 and 2070—2100 periods [J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(5): 1673-1697.
- [63] Giacona F, Eckert N, Corona C, et al. Upslope migration of snow avalanches in a warming climate [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(44): e2107306118.
- [64] Lavigne A, Eckert N, Bel L, et al. Adding expert contributions to the spatiotemporal modelling of avalanche activity under different climatic influences [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 2015, 64(4): 651-671.
- [65] Eckert N, Keylock C J, Castebrunet H, et al. Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 59(213): 93-114.
- [66] Li Q, Yang T, Zhang F, et al. Snow depth reconstruction over last century: Trend and distribution in the Tianshan Mountains, China [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 173: 73-82.
- [67] Wu S, Zhang X, Du J, et al. The vertical influence of temperature and precipitation on snow cover variability in the Central Tianshan Mountains, Northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(12): 1686-1697.
- [68] Valt M, Paola C. Climate change in Italian Alps: analysis of snow precipitation, snow durations and avalanche activity [C]// *International Snow Science Workshop*, 2013: 1247-1250.
- [69] Yang T, Li Q, Ahmad S, et al. Changes in Snow Phenology from 1979 to 2016 over the Tianshan Mountains, Central Asia [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5): 499.
- [70] Pulliainen J, Luojus K, Derksen C, et al. Patterns and trends of Northern Hemisphere snow mass from 1980 to 2018 [J]. *Nature*, 2020, 581(7808): 294-298.
- [71] Liu Yijing, Sun Yanhua, Zhong Xinyue, et al. Changes of snow cover in the Third Pole and the Arctic [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 140-156. [刘一静, 孙燕华, 钟歆玥, 等. 从第三极到北极: 积雪变化研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 140-156.]



## Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control

HAO Jiansheng<sup>1</sup>, LI Lanhai<sup>2,3,4,5</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Ili Station for Watershed Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Xinyuan 835800, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Key Laboratory of Water Cycle and Utilization in Arid Zone, Urumqi 830011, China; 5. Research Center for Ecology and Environment in Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** Snow avalanches are a major natural hazard in the cryosphere. It seriously threatens transportation corridors, energy transmission and communication lines, mining and touristic areas in the cold mountainous regions and often causes the destruction of infrastructure and human casualties, hindering the sustainable development of society and economy in mountainous areas. Under climate change and the expansion of human activities to alpine mountains, more population and infrastructure will expose to the risk of avalanches. In order to ensure the sustainable development in mountainous areas, the demand for the prevention and management of avalanche disasters is increasing. Based on the review of the main avalanche research progress in China since 1960 and the avalanche research results all over the world, this paper summarized the progress on the influencing factors and regional distribution of avalanche activities, avalanche formation and movement mechanism, avalanche monitoring and early warning, avalanche risk assessment and engineering prevention, as well as the frontier problems and scientific difficulties that need to be studied. In addition, the impact of climate change on avalanche activities and the interaction between human activities and avalanche activities are discussed. By looking forward to the future needs of avalanche disaster prevention and reduction, including the countermeasures, the research on avalanche in China is promoted.

**Key words:** avalanche research; climate change; avalanche disasters; avalanche prevention and management

(责任编辑: 王世金)