

雪崩形成机制及危险性评价方法综述

沈丹祎¹, 杨剑¹, 朱永生¹, 吴家耀¹, 杨江涛²

(1. 雅江清洁能源科学技术研究(北京)有限公司, 北京 100038; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 开展雪崩形成机制和临灾危险性评估, 对防灾减灾具有重要意义。本文梳理了雪崩分布区域特征及雪崩类型主要划分方式, 系统阐述了雪崩影响因素及其启动-运动-堆积机理, 详细归纳了积雪稳定性、雪崩抛程和雪崩危险性等级计算方法。在此基础上, 进一步提出雪崩研究仍需要关注以下 5 方面: 1) 构建全球统一的雪崩案例数据库, 为雪崩形成及运动研究提供基础; 2) 开展极端气候条件下积雪力学特性动态演化、不同地形和气候条件共同作用下对积雪性质的影响研究, 厘清雪崩活动的时空演化规律; 3) 建立雪崩启动概率定量分析模型, 开展裂纹扩展机制研究, 提出雪崩启动裂纹扩展表征方法; 4) 研究雪崩运动中侵蚀互馈过程及物质和能量转化规律, 构建雪崩堆积体形态尺寸与影响因素定量关系; 5) 构建考虑动力学机理的雪崩抛程计算方法, 提出雪崩动态风险评估模型, 为雪崩灾害预测及防灾减灾技术研究提供参考依据。

关键词: 雪崩; 类型划分; 影响因素; 运动机制; 危险性评价

中图分类号: P694 收稿日期: 2025-05-30

Research progress on formation mechanisms and rapid hazard assessment of snow avalanche

Shen Danyi¹, Yang Jian¹, Zhu Yongsheng¹, Wu Jiayao¹, Yang Jiangtao²

(1. Yajiang Clean Energy Science and Technology Research (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100038; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092.)

Abstract: Investigation of avalanche formation mechanisms and pre-disaster hazard assessment is critically significant for disaster prevention and mitigation. This study synthesizes the characteristic distribution patterns of avalanches and primary classification methodologies, systematically elaborates on influencing factors and the mechanisms governing avalanche initiation, movement, and deposition. It comprehensively reviews computational approaches for snowpack stability, avalanche runout distance, and hazard level classification. On this basis, five key aspects are identified as requiring focused attention in future research: 1) A globally snow avalanche database is needed to provide a foundational resource for studies of avalanche formation and dynamics. 2) Dynamic evolution of snowpack mechanical properties under extreme climatic conditions and the coupled effects of terrain and climate on snowpack characteristics is needed, thereby elucidating the spatiotemporal patterns of avalanche activity. 3) Quantitative models for avalanche initiation probability, crack propagation mechanisms, and initiation-related fracture growth characterization methods are needed. 4) Examine erosion - deposition feedbacks and mass - energy transfer during avalanche motion, and derive quantitative relationships between deposit morphology and controlling factors are needed. 5) Runout estimation methods based on avalanche dynamics and dynamic risk assessment framework are needed to provide important reference for disaster prediction and mitigation.

Key words: Snow avalanche; Type classification; Influencing factors; Movement mechanism; Risk assessment

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42307196), 中国博士后科学基金特别资助项目(2024T170769), 科技部重点研发计划项目(No. 2024YFF1700303)

作者简介: 沈丹祎(1991—), 女, 高级工程师, 博士, 从事地质灾害防灾减灾研究, E-mail: shendanyi1107@163.com, ORCID: 0009-0000-4360-6406。

雪崩是发生于高寒山区斜坡积雪的一种特殊重力驱动流灾害（图 1）。雪崩在运动过程中通常会裹挟大量的岩屑、土壤、植被或冰碛物，具有潜在性、突发性、难预测性和高速高能运动等特点（Schweizer *et al.*, 2003; Strapazzon *et al.* 2021; Grenier *et al.* 2023; Eckert *et al.*, 2024）。随着全球气候变暖，冰雪融化速率加剧，雪崩灾害日趋增多，严重威胁着人类生命、基础设施和生态系统安全（Podolskiy *et al.*, 2017）。如：1996 年 3 月 24 日，318 国道八宿县然乌镇发生雪崩，造成 56 人死亡；2012 年 3 月 5 日，阿富汗东北部巴达赫尚省谢卡伊地区遭遇连续雪崩，导致 145 人死亡；2023 年 1 月 17 日，派墨公路米林与墨脱交界多雄拉山口发生雪崩，造成 28 人遇难；2025 年 2 月 10 日，日本福岛县发生雪崩，导致 160 人被困（王世金和任贾文, 2012; 汶林科等, 2023）。因此，掌握雪崩形成及发展规律，开展可靠的临灾危险性评估，是防灾救灾减灾亟需解决的关键问题。



图 1 雪崩灾害图 (Eckert *et al.*, 2024)

Fig.1 Snow avalanche hazard map (Eckert *et al.*, 2024)

国内外学者在雪崩触发机制、运动规律、风险评估和监测预警等方面开展了系列研究。如：German (1996)、Schweizer *et al.* (2015) 研究表明雪崩发生受到地形条件（坡角、基底摩擦等）、气候条件（降雪量、气温等）、积雪特性（雪层结构、含水率等）和外部因素（地震）等多因素的共同影响。van Herwijnen 和 Jamieson (2005)、汶林科等 (2016) 提出雪崩形成和运动过程通常包括雪层剪切压缩破坏、裂隙扩展、断裂积雪差异性滑动、积雪加速滑动、积雪滞留等多个阶段。Schirmer 和 Schweizer (2010)、Monti *et al.* (2017)、Chen *et al.* (2025) 采用经验统计模型和数值分析方法对积雪稳定性、雪崩抛程和危险性等级等开展了评价。Bühler *et al.* (2019)、Larsen *et al.* (2020) 研究了不同技术手段在雪崩监测预警中的应用和局限性。

虽然科研工作者对雪崩做了很多研究工作，但我国雪崩研究目前仍处于起步阶段。原因主要是我国雪崩主要发生在西藏和新疆的部分高海拔山区，相关地区大多属于无人区且前期工程建设较少。同时，雪崩灾害具有突发性强、持续时间短，现场数据采集手段、分析技术及室内实验设备有限。近年来，随着西部地区的开发建设，特别是青藏铁路及西南大型水电设施建设，都不可避免地面临着雪崩防治问题，现有的研究成果尚无

法满足大型工程建设安全的需要(Schweizer *et al.*, 2003; 王世金和任贾文, 2012; Acharya *et al.*, 2023)。基于此,本文系统梳理雪崩类型及分布、形成机制和危险性评价方法等方面的研究成果,分析现有研究中的不足,并在此基础上对雪崩灾害后续研究方向和内容进行展望,以期为雪崩防治研究提供参考依据。

1 雪崩分布及类型

1.1 雪崩分布特征

雪崩在全球范围内具有显著的空间分布特征,主要集中在高海拔山区、中纬度地区以及地形复杂的山地环境中(图2)。郝建盛等(2021)通过对2009-2019年亚洲高山区雪崩灾害事件的统计分析,发现亚洲地区26.8%的雪崩事件发生在天山,17.8%发生在喀喇昆仑山、16.1%发生在兴都库什山,14.3%发生在喜马拉雅山。同时,受到西风环流、南亚季风、东亚季风与高海拔气候共同作用,西喜马拉雅山区域大约60%的雪崩和中国天山西部49%的雪崩由强降雪诱发;27%的雪崩由春季温度剧烈升高引起(Hao *et al.*, 2018)。欧洲地区的雪崩灾害主要集中在阿尔卑斯山脉、喀尔巴阡山脉、比利牛斯山脉、斯堪的纳维亚山脉和亚平宁山脉等区域(Eckert *et al.*, 2024)。瑞士联邦积雪与雪崩研究所(SLF)在阿尔卑斯高山区建立了自动气象、积雪监测网络,监测结果用于区域和国家雪崩预报,并提供雪崩孕灾区积雪信息。Laternser和Schneebeli(2002)基于84个瑞士雪崩观测站长达50年的雪崩活动数据分析,发现雪崩是瑞士阿尔卑斯山的一大自然灾害,并在此基础上对比了通过区域雪崩活动指数预测的雪崩分布和实际观测结果的差异。Höller(2007)分析得到阿尔卑斯山北部和南部均有雪崩灾害发生,且受到气候变化和积雪条件影响,该区域在1951-2006年共55年内,每6年会出现一次巨大雪崩周期。美洲地区雪崩灾害主要分布在落基山脉、安第斯山脉和阿拉斯加山脉等地。Williams(1994)建立了美国地区自1967年至今的雪崩数据库,该数据库整合了天气、积雪和雪崩参数等信息。Silverton *et al.*(2007)研究指出,受到气候变暖的影响,美国在过去50年里雪崩死亡人数呈现稳定性增长趋势。

虽然现有研究梳理了雪崩分布,且美国、法国、瑞士等地都建立了雪崩灾害数据库用于记录当地雪崩活动,但仍然存在下问题:(1)目前数据库对雪崩案例记录参数不统一;(2)雪崩监测中冲击力等动力学监测数据较少;(3)不同区域不同诱因雪崩的发生规律、周期特点、运动机制及致灾危险性有待对比研究。

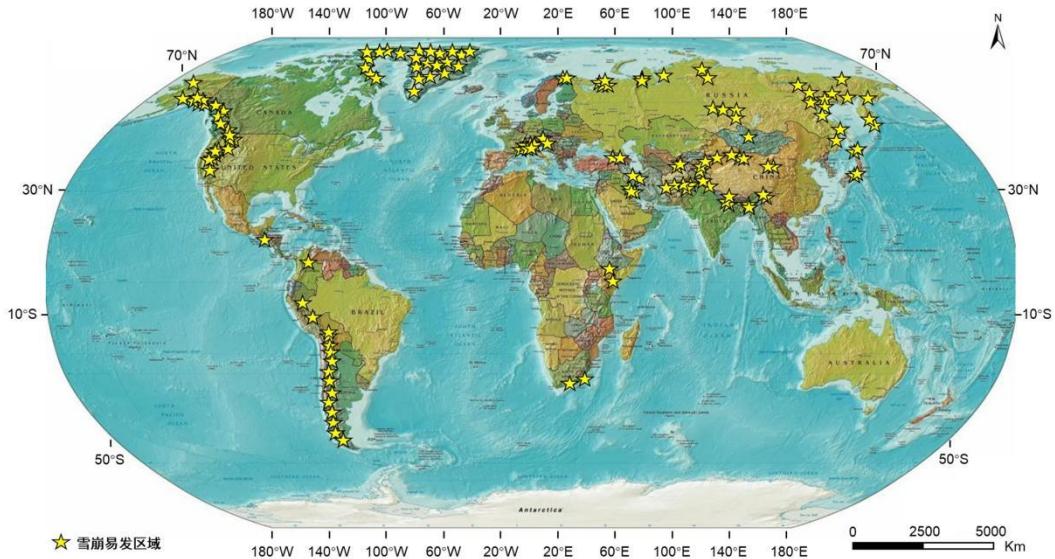


图2 雪崩灾害主要分布区域

Fig. 2 Main distribution areas of snow avalanche disasters

1.2 雪崩类型划分

雪崩通常具有多种不同的尺寸和类型。前国际冰雪委员会（UNESCO, 1981）提出了考虑雪崩形成区、运动区和堆积区的分类（表1）。目前，最常用的分类是基于启动方式区分的松散雪崩和板状雪崩，按积雪中液态水含量区分的干雪崩和湿雪崩，以及按运动路径形式区分的坡面雪崩和沟槽型雪崩（文洪, 2018）。

松散雪崩是指由于积雪过于松散或缺乏内部结构强度，在重力作用下发生流动的现象（图3a）。这类雪崩通常启动于干雪或者湿雪表层某个无粘性位置（体积 $<1\text{m}^2$ ），在逐渐向下的运动过程中夹带额外的雪，并以倒V形向外扩散（Perla, 1980; Daffern, 1992）。一般而言，干雪松散雪崩的危险性相对较小，但当遇到湿雪层时，可能会因为运动过程中雪团体积不断增大而引起严重灾害（Schweizer *et al.*, 2015）。板状雪崩是指粘性积雪夹层中的软弱层在重力作用下失去稳定性，雪层沿着滑动面整体快速下滑的现象（图3b, Heierli *et al.*, 2008）。板状雪崩启动区厚度一般小于1m，其宽厚比一般在 $10\text{-}10^3$ 量级，大部分集中在 10^2 量级（Schweizer *et al.*, 2003）。相比于松散雪崩，板状雪崩因为涉及更多积雪，通常更具危害性，也更难预测。Gaume和Puzrin（2021）基于雪崩模拟实验研究，提出板状雪崩是造成1959年的乌拉山9名登山队员神秘死亡事件的直接原因。

表1 前国际冰雪委员会雪崩分类表（UNESCO, 1981）

Table 1 Former International Commission on Snow and Ice Avalanche Classification (UNESCO, 1981)

区域	判据	特征	分类
形成区	启动方式	始于点	松散雪崩
		始于线	板状雪崩

	失稳方式	积雪层内	表层雪崩
		地表	全层雪崩
	积雪中的液态水	无	干雪崩
		有	湿雪崩
	路径形式	开放的斜坡	无约束雪崩
运动区		沟槽	沟槽型雪崩
	运动形式	雪尘云	粉雪雪崩
		沿地面流动	流雪雪崩
	堆积体表面粗糙度	粗颗粒	粗糙的堆积物
		细颗粒	细粒雪堆积物
堆积区	雪中液态水	无	干雪崩堆积物
		有	湿雪崩堆积物
	堆积体污染情况	无明显污染	干净的雪崩
		岩屑、土壤、树枝	受污染雪崩

注：液态水含量可以通过日本北海道大学低温研究所研制的积雪含水率测量仪测定（仇家琪等，2004）。



图3 两种雪崩类型：(a)松散雪崩 (Schweizer *et al.*, 2015)；(b)板状雪崩 (Heierli *et al.*, 2008)

Fig. 3 Two types of snow avalanches: (a) Loose avalanche (Schweizer *et al.*, 2015); (b) Slab avalanche (Heierli *et al.*, 2008)

Heck *et al.* (2019) 提出干雪崩是指在寒冷气候条件下，由于重力作用或外力触发，积雪以干燥状态整体下滑的现象，大多数的干雪崩都是在暴风雪期间或者之后不久发生。干雪崩发生区的坡度一般在30°-35°，运动速度可以达到50-200km/h，在高速运动下前锋产生粉末云现象。王彦龙（1986a）据1967-1980年天山西部雪崩和1981-1983年川西、滇北、藏东南干雪雪崩的观测，发现连续稳定三天以上最大降雪深度达到30-50cm时，在大于35°的山坡上频繁发生雪崩；达到50-80cm时，在比较平缓的山坡上（25°-30°）普遍发育雪崩；达到80-120cm时，则发生频繁大雪崩，且会一直运动到河谷中或对面山坡上，有时甚至溢出运动路线以外。湿雪崩是指因水流渗入雪层引起雪崩现象，通常发生在温暖天气或降雨后不久（Schweizer *et al.*, 2015）。王彦龙（1986b）研究指出湿

雪崩是我国降雪丰沛山区冬末春初常见的自然灾害，主要发生在青藏高原边缘及其邻近地区，根据雪中的自由水多少、雪在中等压力下状态和积雪温度，可以划分为潮湿雪、中等湿雪和极湿雪。Schweizer和Lütschg（2001）对瑞士阿尔卑斯山雪崩受害者的研究表明，自然释放的雪崩造成人员死亡事件中约有50%是由湿雪崩（板状雪崩或松散雪崩）造成的。

坡面雪崩（无约束雪崩）是指发生在地形开阔、没有明显障碍物或沟槽限制的区域中的雪崩，其主要活动在林线以上人迹罕至的区域。与之相对的沟槽型雪崩则是指雪崩体沿着山谷沟槽运动，具有固定的运动路线，有明显的积雪区、运动区和堆积区（文洪，2018）。沟槽型雪崩常常沿流通沟槽崩落至林线以下，甚至崩落至坡脚、威胁人类生产生活。文洪等（2021）研究发现帕隆藏布流域内G318国道然乌至宗坝段的沟槽型雪崩在每年春季经常崩落至河床形成跨河雪桥，甚至越过河床造成堵路埋车事故。

综上研究表明，雪崩类型划分主要考虑了雪崩发育地形地貌、雪崩物质组成及积雪状态。其中，湿雪崩是降雪丰沛山区冬末春初常见的灾害，其发生规模大、摧毁力强；干雪崩则是由一处雪启动后冲击或推动前方雪运动，使得雪崩体积逐渐增大。坡面雪崩的启动和传播相对较慢但影响范围广，而沟槽型雪崩沿着固定沟道，其运动速度快、冲击能量大。雪崩的分类研究有助于掌握雪崩特点，并针对性地开展雪崩危险性评价及防灾减灾措施。但是，现有研究中仍然存在两方面问题：（1）世界范围内雪崩案例数据库有待完善和共享；（2）雪崩分类需要考虑多因素共同作用，分类标准有待统一。

2 雪崩形成机制

2.1 雪崩影响因素

雪崩的形成受到地形、积雪和气象条件等多种因素的复杂相互作用。Atwater（1954）提出了10个影响雪崩的气象及雪层因素，但没包括地形因素。Schweizer *et al.*（2003）进一步描述了地形、降雪（特别是新雪）、风、温度（包括辐射效应）和积雪五个因素对雪崩的影响，受到了研究人员的广泛认同。

表2 雪崩影响因素表

Table 2 Influence factors of snow avalanche

影响因素	主要作用
地形	雪崩一般发生在30°以上坡面，通常山区地形越陡峻，雪崩的发生和传播越容易。
降雪	新降雪沉降速率影响雪层应力与雪层强度之间平衡，通常降雪强度越高越易引发雪崩。
风	风速改变雪层密度和硬度，促进应力在局地聚集，进而增加雪崩发生可能性。
温度	温度影响雪层物理力学性质，通常温度升高，雪硬度减小、韧性增加、胶结形成速度增加、雪层温度梯度减小。
积雪	软弱层的存在是雪崩发生的必要条件。

地形是雪崩影响因素中唯一一个不随时间变化的因素。干雪雪崩通常发生在坡度大于 30° 的坡面，人为因素引起的雪崩的形成区坡度平均值在 $38.8^{\circ}\pm3.8^{\circ}$ （Schweizer和Jamieson, 2001）。但是，Ammann (2000) 基于1999年阿尔卑斯山几次特大灾难性雪崩研究发现，其形成区的坡度均小于 30° 。Stoffel et al. (1998) 进一步研究指出，除了坡度，坡面粗糙度、曲率、坡向、到山脊的距离和森林覆盖等其他地形参数也是影响雪崩的重要参数。Arons et al. (1998) 研究表明在岩层覆盖的地表，较薄的雪层可以产生较大的温度梯度，进而促进面状雪晶形成，导致雪层稳定性下降。McClung (2001) 基于统计分析提出雪崩形成区大多位于凹型坡内，而凸形坡和鼓丘作为应力集中的地区，一般会促使雪崩的形成。约90%的雪崩发生在植被高度为2m或更低的时候，且随着植被覆盖率的增加，雪崩事件逐渐减少。

降雪是大型灾难性雪崩形成的主要驱动因素，而降雪强度和密度是影响新雪雪崩的关键指标。Evina et al. (2021) 对1958-2018年雪崩活动观测记录研究发现，极端雪崩事件的重复周期和发生概率主要取决于降雪和气象条件。Jomelli et al. (2007) 统计了法国阿尔卑斯山576次雪崩事件与气象要素间关系，发现高频雪崩路径的雪崩事件与冬季连续3天及以上的高强度降雪有关。Schweizer et al. (2009) 研究表明24小时内50cm的新雪是雪崩发生的关键，3天降雪总和可以作为雪崩预报参数。但是，Schaer (1995) 提出即使在有大量新增积雪的情况下，一组雪崩路径发生雪崩的概率也通常小于50%。Mueller (2001) 提出降雪过程中新降雪密度增加（即高密度降雪位于低密度雪层之上）会导致新雪雪崩的暴发概率增加。原因主要是高密度的降雪容易使新雪雪晶之间快速连结，从而导致上层雪体产生的下滑力大于雪层间的强度。

风是新雪后最活跃的影响因素。在高海拔山区，风速高、地表植被覆盖稀少，风运雪现象频发。风运雪使得不同雪层密度和硬度存在差异，雪层中应力在局部聚集，极大地增加雪层的不稳定性。de Quervain (1966) 研究认为风运雪相对于自然沉降的积雪更加破碎，因而更容易发生雪崩。Lehning et al. (2000) 指出风运雪的研究需要重点关注四个方面：陡峻地形的风场、降雪过程中新雪的沉降规律、沉降雪的再分配、侵蚀和堆积区雪层各自的性质变化与发展规律。Gauer (1999) 发现随着风速增大，风运雪通量呈现先增大后下降趋势，风运雪通量值在风速20-25m/s时达到极值；而在相同的风速条件下，背风坡要比平地的积雪多20-30%。

温度是雪崩形成的决定性因素，主要包括温度升高对雪体力学性质影响以及温度升高引起融雪水对雪层稳定性的影响等。汶林科等 (2016) 、Dandabathula et al. (2025) 认为温度升高使得表面雪层沿坡面向下的形变增加，而由于雪热传导性差，下部雪层并未受到明显影响，从而导致雪体稳定性下降。Kinoshita (1960) 利用黑田式硬度计对积雪硬度进行研究，发现当雪温度在 $-9\text{--}0^{\circ}\text{C}$ 范围之内时，温度对积雪硬度影响较小，但积雪干摩擦系数随着雪温度的降低发生线性降低。McClung和Schweizer (1999) 研究发现

气温对积雪硬度、韧性、软弱层强度、蠕变和雪层温度等具有影响，其中雪硬度、韧性和软弱层强度对温度反应具有即时性，而蠕变和雪层温度对温度的反应具有滞后性。富翔（2020）发现雪单轴抗压强度会随着温度的降低逐渐增大，且在低加载速率及高密度下表现得更加明显。Eckert *et al.* (2024) 研究表明温度升高使得美国北部落基山脉和法国阿尔卑斯山的雪崩年发生概率下降，但增加了雪崩平均运动距离，其原因与气温变化对雪的性质影响有关。

积雪是板状雪崩形成的关键因素（Schweizer *et al.*, 2003）。积雪通常包含多个雪层，每一个雪层都与当时降雪、消融、风运雪作用等相对应，因而不同雪层呈现出不同特征。软弱层作为积雪中不稳定层，其性质受到了广泛关注。Schweizer和Lütschg (2001) 和Schweizer和Wiesinger (2001) 基于186次雪崩事件的断裂剖面分析发现，70%的雪崩的软弱层由连续性雪晶构成，软弱层雪的粒径与硬度与周围的其他雪层存在明显差异，并在此基础上提出了雪层五级稳定性分类标准。Jamieson *et al.* (2001) 研究表明，某一雪层的抗剪强度与其上的积雪负荷高度相关。强降雪通常可以快速增加雪层负荷，但无法快速增加雪晶之间连结，这种滞后性导致强降雪事件极易诱发雪层的不稳定性。汶林科等(2016)基于已有研究系统总结了积雪雪晶类型、积雪力学特性与雪崩的关系。

综上所述，雪崩的形成受到地形、气候和积雪等条件的影响，通常坡度越大的山坡越容易发生雪崩，降雪强度越高越易引发雪崩，温度升高降低雪层稳定性，风速改变雪层密度和硬度进而促进雪崩发生，软弱层规模及分布影响雪崩启动概率。但是，各类因素既具有独立的作用，又相互关联，这使得多因素耦合作用下雪崩形成的影响因素仍有待进一步研究，如极端气候条件下积雪力学特性的动态演化过程、不同地形和气候条件共同作用下对积雪性质的影响等。

2.2 雪崩启动-运动-堆积机理

雪崩灾害研究的复杂性，不仅体现在其影响因素的多样性，也表现在雪崩发生内在机理的复杂性。已有的雪崩运动机制研究大多聚焦于板状雪崩的启动-运动-堆积过程 (Höller, 2007; Schweizer *et al.*, 2015)。

雪崩的启动包括软弱层裂纹的产生、扩展及断裂发生。当雪体中软弱层抗剪强度不足以抵抗上部雪层负荷产生的剪切应力，雪层产生裂纹。当裂纹达到一定规模时，会在不需要其他外力的作用下向相邻位置辐射传播，使得雪板后缘、侧缘和前缘裂纹尺寸持续增加。最后，雪板后缘张断裂、侧缘剪切断裂、前缘挤压断裂以及雪板与其下部雪层剪切断裂相继发生，雪崩灾害启动 (Schweizer *et al.*, 2016; Capelli *et al.*, 2018)。van Herwijnen 和 Jamieson (2005) 强调了雪崩软弱层结构坍塌的重要性，以及雪板弹性和强度对雪崩启动的影响。Gaume *et al.* (2014) 指出如果裂纹长度超过临界长度，或者裂纹尖端载荷达到临界，即使板坯的平均应力低于软弱层强度，也会发生裂纹扩展。Johnson *et al.* (2004) 发现在平缓坡度下，裂纹的传播速度大约为 20m/s (±2m/s)。

Kronholm 和 Schweizer (2003) 基于示踪粒子法研究发现雪崩释放的临界裂纹尺寸长度在 20-40cm 之间。Perla 和 Lachapelle (1970) 认为在雪板失去剪切支撑后，雪板后缘的张性断裂首先出现，其次是雪板与下部软弱层的剪切断裂。Gaume *et al.* (2019) 进一步开发了考虑雪特性的关联修正剑桥黏土模型，用物质点法模拟再现了混合破坏模式下的雪破裂和压实硬化，尤其是板块雪崩的雁列式动态裂纹扩展。

雪崩启动后受到地形等影响，雪块在内部相互碰撞以及基底撞击的作用下快速破碎，积雪从层流状态过渡到粉碎状态再过渡到湍流状态，积雪尺寸不断减小，雪崩体积逐渐增加 (图 4, Bozhinskiy & Losyev, 1998)。不同类型雪崩的体积密度存在很大差异。例如，干雪崩运动过程中，沿途受撞击向前抛洒，大量空气被卷吸进雪颗粒空隙中，前缘形成体积密度低于 100kg/m^3 的高度分散的粉末云，悬浮比达到 5-20%；而湿雪崩运动过程中，核心区的体积密度为 $200\text{-}400\text{kg/m}^3$ ，接近颗粒密度 (Gauer *et al.*, 2007, 2008)。受到雪崩运动过程中碰撞和摩擦作用影响，单次雪崩在时空尺度上也会表现为类固、类液和类气态多态并存且相互转化 (Gray & Ancey, 2011)。通常，干雪崩的前缘会因碰撞出现松散悬浮体，而在尾部呈现致密流核心区。Kern *et al.* (2009) 通过测量不同深度处雪崩剪切速率发现，其核心区存在强烈的膨胀运动，体积膨胀程度取决于雪崩体的高度。雪崩在运动过程中通常会侵蚀挟带大量积雪，湿雪崩甚至会带走整个积雪，导致地面暴露 (Jomelli & Bertran, 2001)。Gauer 和 Issler (2004)、Cherepanov 和 Esparragoza (2008) 将雪崩的侵蚀挟带过程分为三类：锋面挟带、基底侵蚀和梯级挟带，提出雪崩的侵蚀挟带会进一步影响雪崩运动，包括改变雪崩整体质量平衡、改变雪体的温度和水分等。Mohamed *et al.* (2004) 在已有研究基础上，将干雪崩视为颗粒流，基于浅水理论建立了侵蚀和沉积模型并引入摩擦定理，分析了雪崩的运动过程和运动距离。Christen *et al.* (2010) 基于流体摩擦 Voellmy 双参数模型建立了二维深度平均算法 RAMMS，该模型是基于计算流体力学的深度平均浅层流模型。Stomakhin *et al.* (2013) 通过弹塑性能量密度函数建立考虑雪硬化的本构模型，该模型认为雪在小变形时是弹性的，当变形达到临界值或阈值时才开始发生塑性变形。Gaume *et al.* (2018) 开发了关联修正剑桥黏土模型，该模型考虑修正的应变软化塑性流动法则，可以模拟雪破裂和压实硬化过程。Dunatunga 和 Kamrin (2015) 雪崩流动视作典型的密集颗粒流，建立了跨流态非局域流变模型，将密集颗粒流表征为对压力敏感的粘弹塑性材料。

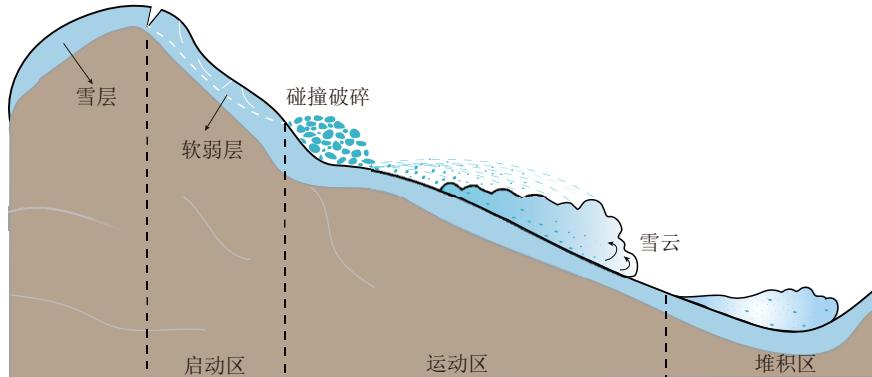


图 4 雪崩运动堆积过程

Fig. 4 Snow avalanche movement and accumulation process

研究雪崩堆积特性对于重建雪崩事件具有重要价值。雪崩堆积模式强烈依赖于三维地形特征（粗糙度、运动区陡峭度、反坡度、地形起伏、沟壑等），通常表现为带侧壁的堤坝式结构、指状结构、雁列剪切断层结构和柱状结构（Bartelt et al., 2012）。其中，堤坝式结构大多形成于湿雪崩，当雪崩外部边界停止运动后，内部雪体继续向前运动，在堆积体中形成沟道状结构（图 5a, 5b）。指状结构常发生在湿雪崩堆积体中，可以弯曲 90° 及以上，类似于堤坝式结构的内部雪体，其陡峭侧壁表明雪体具有非常强的凝聚力（图 5c, 5d）。雁列剪切断层结构中存在水平剪切面和垂直剪切面，雪层底部水平剪切面受到雪崩运动摩擦生热影响，表层融化后重新结冰形成光泽表面，同时受到摩擦作用，雪崩尾部首先停止，前缘被“拉”离尾部，形成雁列型断层结构。柱状结构可以发生在堤坝式结构的末端，也可以发生在陡坡的过渡处，其高度可能超过 20m。Scally 和 Ovens (2005) 基于阿尔卑斯山雪崩堆积体现场调查发现雪崩堆积物颗粒尺寸较大且棱角分明。Markus et al. (2015) 利用无人机进行了雪崩空中调查，根据获取的雪崩碎片正射照片，提取到了雪崩运动特征和堆积信息。Sovilla et al. (2010) 基于 Vallée de la Sionne 雪崩发现，堆积体深度与山坡坡角呈强烈的负相关，即陡坡上的堆积体较浅，缓坡上的堆积体较深。Ligneau et al. (2019) 基于数值分析指出雪材料的粘聚力越大，堆积体的高度越大。在坡度约为 30° 的情况下，无黏性雪崩沉积物厚度约为 0.4m，而有黏性雪崩沉积物厚度可以达到 1.6m。张天意等 (2023) 通过对西天山阿尔先沟雪崩灾害研究发现沟槽-坡面复合型雪崩堆积体形态受坡面影响均形成中间高、四周低的连续性椎状堆积体。

上述研究对雪崩的启动-运动-堆积过程进行了较为详细的分析，但仍然存下以下三方面问题：（1）雪崩活动的时空演化规律尚未完全揭示；（2）雪崩运动过程中的侵蚀互馈效应有待进一步研究；（3）雪崩堆积体形态尺寸与影响因素的定量关系尚未建立。

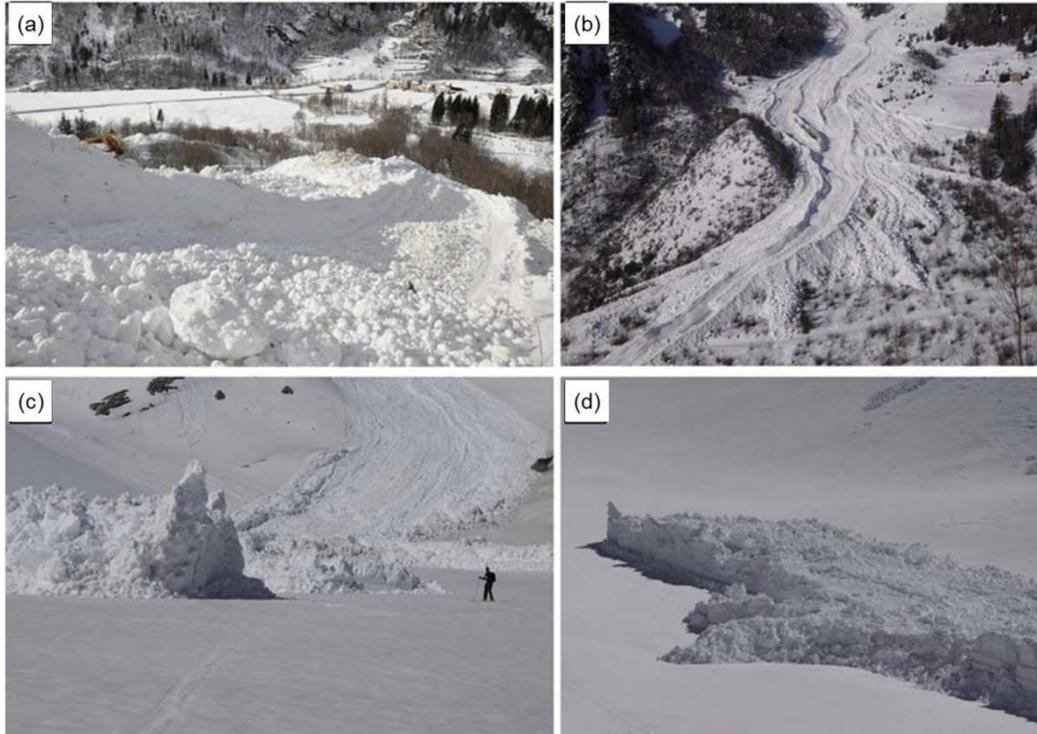


图 5 不同雪崩堆积类型: (a)、(b)堤坝式结构; (c)、(d)指状结构 (Bartelt et al., 2012)

Fig. 5 Different snow avalanche deposit types: (a), (b) dam-like structure; (c), (d) finger-like structure
(Bartelt et al., 2012)

3 雪崩危险性评价

雪崩的危险性评价对于雪崩防灾减灾具有重要价值。雪崩危险性评价主要是通过定性或者定量的方法评价在区域尺度 (1000km^2)、局部尺度 (100km^2) 或单个雪崩路径尺度 (1km^2) 上的积雪稳定性、雪崩抛程、雪崩危险性等级等内容。

3.1 积雪稳定性

LaChapelle (1974) 综合考虑山坡、沟谷雪崩等条件, 将积雪稳定性划分为稳定、过渡性稳定、不稳定和极度不稳定等五个等级 (表 3)。LaChapelle 和 Ferguson (1980) 提出了基于模式识别的聚类分析方法, 将雪层剖面划分为稳定和不稳定的剖面, 准确率为 86%。Schweizer 和 Föhn (1996) 基于数据专家系统, 使用天气和积雪数据作为输入参数, 基于雪崩危险程度、最危险斜坡坡向和高度分析, 输出积雪稳定性评估结果。Jamieson 和 Johnston (1998) 假定积雪为均质材料, 提出了考虑滑雪者产生附加应力对多层积雪影响的雪层稳定性判别指标 (公式 1、2)。Monti *et al.* (2016) 在 Jamieson 和 Johnston (1998) 所提出的 SK 公式基础上, 将 h 替换为 h_e , h_e 为等效深度, 该公式假设不同雪层被具有相同弹性特性的等效层所取代, 进而考虑了多层雪层的特性。

$$\sigma_{\text{剪}} = \frac{\sigma_{\text{自重}}}{\sigma_{\text{自重}} + \Delta\sigma_{\text{剪}}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\text{剪}}$ 和 $\sigma_{\text{自重}}$ 分别为持久型和非持久型晶粒类型的抗剪强度, $\sigma_{\text{自重}}$ 为雪层自重引起的剪切应力, $\Delta\sigma_{\text{剪}}$ 是由滑雪者引起的剪切应力。

$$\frac{d}{dh} = \frac{D}{h} \frac{d}{dh} D \frac{d}{dh} D \frac{d}{dh} D \quad (2)$$

式中, h 为雪层深度, D 是雪层平均密度, θ 为斜坡倾角。

表 3 积雪稳定性指数 (LaChapelle, 1974)

Table 3 Snow Stability Index (LaChapelle, 1974)

积雪稳定性指数	雪崩状况
I. 积雪极度不稳定	可以预期 50% 以上经常崩塌运动区的雪崩会自然发生。其余的所有雪崩会对治理措施有反应, 或者部分发生。
II. 积雪不稳定	10% 经常崩塌运动区的雪崩会自然发生。其余的大部分雪崩会对治理措施有反应, 或者部分发生。
III. 积雪过渡性稳定 A	很少产生自然雪崩。有些雪崩视其发育历史和位置会对治理措施有反应。该指数用在积雪不稳定期之后或者下雪期间。
IV. 积雪过渡性稳定 B	在无小量降水时或者在有小量降水期间, 一些小块地区仍然保留不稳定性或者产生不稳定性。
V. 积雪稳定	不会发生自然雪崩。只有在极端人为条件下才会释放。

Schweizer 和 Wiesinger (2001) 提出了一套考虑雪层剖面硬度、软弱层类型、晶粒类型和尺寸等参数的专家系统, 对积雪稳定性进行判断。Schweizer *et al.* (2003) 进一步提出可以通过雪强度来表征积雪稳定性, 将雪崩问题简化为在时间 t 和地点 X 的雪强度和应力 (法向应力 σ 和剪应力 τ) 之间的平衡问题。

$$S = \frac{\sigma(\theta, \rho, D)}{\tau(\theta, \rho)} \quad (3)$$

式中, 当 S 趋近于 1 时, 雪层出现不稳定。但是该方法并没有考虑雪崩启动过程中裂纹的产生及扩张过程。

Perry 和 Michael (2002) 建立了 SNOWPACK 一维积雪计算模型, 该模型把雪看作是有水、冰和气三类组分的物质, 使用完全隐式拉格朗日高斯-赛德尔有限元方法求解控制微分方程, 进而分析积雪分层、雪深、积雪稳定性、积雪消融等参数。

Jamieson 和 Schweizer (2005) 率先提出了阈值法, 随后 Schweizer 和 Jamieson (2007) 和 Schweizer *et al.* (2008) 对该方法进行了改进。阈值法考虑 3 个界面性能参数 (相邻两层的晶粒尺寸差、硬度差和雪层深度) 和 3 个雪层参数 (晶粒尺寸、硬度和晶粒类型), 当指标总分为 5 分或 6 分时则被认为是潜在不稳定层。Winkler 和 Schweizer (2009) 研究发现阈值法在确定不稳定层的准确率达 86%, 但在确定稳定层的准确率仅为 38%。Schirmer 和 Schweizer (2010) 基于 775 个积雪观测数据, 通过分类树建立积雪参数与积雪稳定性之间的最优联系。

3.2 雪崩抛程

雪崩体一般在地形平缓地段减速、停止并形成堆积区, 或者前进很大距离后进入河谷、甚至爬上对岸山坡。Bozhinsky 和 Losyev (1998) 研究认为雪崩体积越大, 其运动距离越远。Voellmy 基于能量平衡原理提出了一个计算雪崩崩出距离的方程, 其形式如下 (Perla *et al.*, 1980) :

$$D = D_0^2 / [2 D(D_0 D - D D_0) + D_0^2 D / D_0] \quad (4)$$

$$D_0 = [D(D_0 D - D D_0)]^{1/2} \quad (5)$$

式中, V_t 为速度, 按方程 (5) 计算; D_0 为平均堆积深度, 是为了考虑因雪崩碎块堆积而造成的能力损失而引入的。

王彦龙等 (1979) 基于东天山雪崩抛程实测资料, 采用简化图式计算和验证雪崩最大抛程。

$$D = \frac{D_{\text{max}}}{D_{\text{min}}} \quad (6)$$

式中, D_{max} 为雪崩落点与裂点间的高差, D_{min} 为雪崩运动最小摩擦系数。

Lied *et al.* (1980) 通过 206 条雪崩路径的相关参数统计, 得出雪崩抛程的回归方程。

$$D = 0.928 - 7.9 \times 10^{-4} D + 1.4 \times 10^{-2} D'' D + 0.04 \quad (7)$$

式中, D'' 为地形坡面最佳拟合曲线 $y = D D^2 + D D + D$ 的二阶微商, H 为雪崩高度。

谢自楚和谢维尔斯基 (1996) 基于天山地区雪崩, 建立了外伊犁阿拉套和准噶尔阿拉套地区雪崩抛程与雪崩体积, 雪崩抛程系数与雪崩源区平均坡度、雪崩源地面积的相互关系。

$$D D D = 0.244 D D D + 2.96 \text{ 外伊犁阿拉套地区} \quad (8)$$

式中, V 用 10^3m^3 水当量表示。

$$r = 0.015\theta + 0.12 \times 10^{-5}F - 0.11 \text{ 外伊犁阿拉套地区} \quad (9)$$

$$r = 0.014\theta + 0.13 \times 10^{-5}F - 0.13 \text{ 准噶尔阿拉套地区} \quad (10)$$

式中, r 为雪崩抛程系数, θ 为雪崩源区的平均坡度, F 为雪崩源地面积。

Chernouss 和 Fedorenko (2001) 基于 159 次雪崩事件统计分析, 建立了抛程与落差及发生点对抛落终点俯视角的关系。

$$D = D_D - \frac{D}{D_D} D_D \quad (11)$$

式中, 式中 $D_D = OD$, $D_D = DB$, 符号含义如图 6 所示。

Harbitz *et al.* (2001) 基于 206 次雪崩事件统计分析建立了 α - β 模型, 该模型忽略雪崩运动过程中的高程变化产生的动能, 根据雪崩路径上的坡度变化确定雪崩减速的位置, 是目前雪崩抛程预测主要应用的模型。

$$D = 0.96 D - 1.4^\circ + W \quad (12)$$

式中, D 为雪崩抛程的平均倾斜度, D 为雪崩路径在起始点和沿路径曲线 10° 倾斜点之间的平均倾斜度, W 为正态分布 $N(0, D)$ 变量。

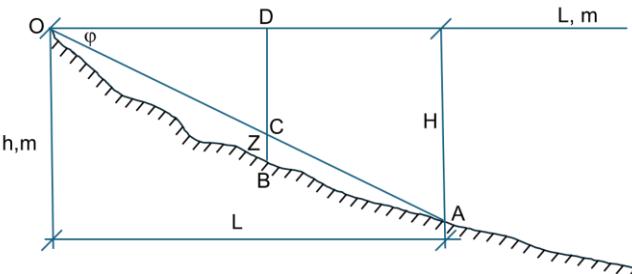


图 6 雪崩抛程示意图 (Chernouss & Fedorenko, 2001)

Fig. 6 Schematic diagram of snow avalanche run distance (Chernouss & Fedorenko, 2001)

段书苏等 (2016) 选择帕隆藏布江然乌-通麦段 36 处典型的沟槽式中等湿雪崩, 建立了雪崩最大高差与雪崩抛程、雪崩形成区面积之间的相关关系。

$$D_{\text{run}} = \frac{D_{\text{max}}}{0.1596 D_{\text{run}}(S) + 0.66454} \quad (13)$$

式中, D_{run} 为滑动的最远距离, S 为滑坡面积。

3.3 雪崩危险性等级

魏玉光等 (2004) 将积雪厚度、植被状况、山坡坡度作为评价因子, 利用模糊归一化方法开展了青藏高原铁路沿线雪崩危险度评价。Hreško 和 Boltiziar (2001) 将各因子按规则进行分类, 使用地图代数计算最终网格层, 根据域值区间将雪崩潜在危险区域划分为低、中、高、很高四类。

$$D = (D + D + D + D) \times D \quad (14)$$

式中, D 为坡度, D 为海拔, D 为坡向, D 为剖面曲率, D 为粗糙度。

Biskupič 和 Barka (2016) 在模型中增加平面曲率因子 F_y , 修正后模型为:

$$D = (D + D + D + D) \times D \times D \quad (15)$$

周石硚和谢自楚 (2003) 在提出“积雪单元”概念基础上, 筛选出积雪厚度、坡度、气候、植被类型与覆盖度四个评估指标, 分别设置分级标准赋分值, 将四个因素结果的乘积设置阈值将区域雪崩危险度划分为三个等级。陈楚江等 (2009) 利用多时相 IKONOS 的立体图像等数据生成高分辨率 DEM 和数字正射影像 DOM, 提取积雪条件 (积雪厚度、雪崩类型、积雪量、积雪面积等)、地形地貌 (地形粗糙度、坡度、坡形等)、植被层 (植被覆盖度、植被高度) 等因子, 结合地质、人类活动、雪崩频度等辅助数据, 进行因子分级赋值, 并利用 AHP 估算因子权重系数, 定量评估雪崩危险性。Athick 等 (2015) 使用了地形 (坡度、坡向、曲率、土地类型) 和气象组合 (气温、相对湿度) 参数, 使用 AHP 和 GIS 技术, 将加权气象参数图叠加到基于加权地形的雪崩危险区图上, 获得 Uri 地区雪崩危险性区划图。Kumar *et al.* (2016) 提出并开发了概率数据驱动的地理空间模糊-频率比率模型, 利用六个雪崩发生因子 (即坡度、坡向、曲率、高程、地形粗糙度和植被覆盖) 和一个参考雪崩清单图来生成雪崩危险性区划图。Kumar *et al.* (2017) 进一步基于地理信息系统 (GIS) 使用海拔、坡度、纵横比、植被密度和土地利用五个 GIS 图层, 引入多准则决策分析-层次分析法模型对怒布拉河谷地区雪崩危险性进行了评价。Gauthier *et al.* (2017) 分析了诱发雪崩的天气模式, 选择累计降雪、日降雨量、风速等参数结合逻辑回归模型计算每天发生雪崩的可能性, 并将模型确定的发生概率 (0-100%) 分为五类雪崩危险等级。Joshi *et al.* (2020) 基于人工神经网络模拟积雪的硬度、剪切强度、温度、密度、厚度和积雪层沉降等参数, 并将模拟得到的积雪参数进一步应用于雪崩危险性评价的人工神经网络模型建立。

上述研究为雪崩的危险性评价提供了参考，但是积雪稳定性、雪崩抛程和雪崩危险性等级等模型的构建大多基于一定区域的案例数据库。因此，在进行雪崩危险性评价时应尽量考虑雪崩所在区域的模型或结合多个模型进行评价结果综合考量。此外，受到雪崩案例数量限制，信息参数往往较少，现有研究仍然存在以下三方面问题：（1）危险性评价模型中关键影响因子的提取有待进一步研究；（2）雪崩抛程计算未考虑雪体运动过程中的动势能转化等因素影响；（3）危险性评价模型的泛化能力及预测精度有待提升。

4 结论与展望

雪崩形成机制及危险性评价方法研究主要是回答雪崩分布和类型、诱发条件及影响因素、雪崩运动堆积过程、雪崩风险影响 4 个问题。已有研究表明，雪崩主要分布在高海拔山区、中纬度地区以及地形复杂的山地环境中，其类型划分通常考虑考虑雪崩形成区、运动区和堆积区特征。雪崩的形成受到地形、降雪、风、温度和积雪等诸多因素的影响。雪崩的启动、运动和堆积过程主要涉及软弱层裂纹的产生、扩展和断裂发生，雪体的运动破碎和侵蚀挟带，以及雪崩堆积。基于历史案例、专家经验和数值分析等方法得到的积雪稳定性、雪崩抛程和危险性等级划分结果为雪崩灾害预测及应急抢险救灾工作提供了指导。但是，受到雪崩灾害突发性强、基础数据获取困难、侵蚀挟带机理未完全明晰等影响，后续研究尚需要重点考虑以下方面：

（1）构建全球统一的雪崩案例数据库并开展雪崩分类标准研究。现有研究虽然初步构建了雪崩案例数据库，但并未统一所收集案例的参数类型。进一步收集和更新雪崩案例，统一雪崩参数收集类型，并在此基础上开展雪崩分类研究，形成统一分类标准，为雪崩形成及运动研究提供基础，为雪崩危险性评价提供代表性输入参数。

（2）开展雪崩影响因素及雪崩活动时空演化规律研究。雪崩形成具有物源、地形和诱因等条件要求，已有研究虽然关注了各因素对雪崩启动的影响，但对于复杂条件下积雪性质及雪崩活动规律仍缺乏系统研究。开展极端气候条件下积雪力学特性动态演化、不同地形和气候条件共同作用下对积雪性质的影响研究，对比不同区域不同诱因雪崩特征，厘清雪崩活动的时空演化规律，是亟待解决的问题。

（3）开展雪崩启动预测及表征方法研究。雪崩的启动受到软弱层及裂纹扩展的影响，已有研究虽然明确了雪崩启动过程涉及裂纹的产生、扩展及断裂发生 3 个阶段，但对于雪崩启动概率、裂纹扩展过程及模式仍有待研究。开展积雪中不同软弱层厚度、埋深和分布位置等条件下雪崩启动模型试验及数值模拟，建立雪崩启动概率定量分析模型，并分析雪崩启动损伤（破裂）和烧结（粘结）过程，开展微观结构模型与断裂力学模型相结合的裂纹扩展机制研究，提出雪崩启动裂纹扩展表征方法，可以为雪崩启动预测提供新思路。

(4) 开展雪块碰撞破碎-侵蚀挟带-滑移堆积过程中物质和能量转化规律研究。雪崩涉及多个动力学过程的转化,已有研究初步划分了不同动力学阶段,但对于各阶段转化影响因素、临界条件及互馈机制尚不明确。在雪崩启动研究基础上,加强雪崩运动过程冲击力等动力学参数监测,构建雪崩运动多物理过程动力学演化模型,研究雪崩运动中侵蚀互馈过程及物质和能量转化规律,提出运动模式转化临界指标,构建雪崩堆积体形态尺寸与影响因素定量关系,可以为雪崩风险评估提供基础。

(5) 开展基于动力学过程的雪崩风险定量评估研究。现有雪崩风险评估虽然考虑了积雪条件、地形地貌和植被层等因子影响,但大多主要是基于经验和判别的定性分析。基于雪崩动力学过程,厘清关键影响因子,构建考虑动力学机理的雪崩抛程计算方法,结合模型和参数的不确定性,研究雪崩影响范围内的生命和经济损失,提出雪崩动态风险评估模型,并强化模型泛化能力及预测精度,可以为雪崩防灾减灾技术研发提供依据。

Reference

- Acharya, A., Steiner, J.F., Walizada, K.M., et al., 2023. Review article: Snow and ice avalanches in high mountain Asia-scientific, local and indigenous knowledge. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23(1): 2569-2592.
- Ammann, W. (Ed.), 2000. Der Lawinenwinter 1999—Ereignis analyse. Swiss Fed. Inst. for Snow and Avalanche Res. SLF, Davos, Switzerland.
- Arons, E.M., Colbeck, S.C., Gray, J., 1998. Depth hoar growth rates near a rocky outcrop[J]. *Journal of Glaciology*, 44(148): 477-484.
- Athick, A.M., Naqvi, H.R., Firdouse, Z., 2015. An assessment and identification of avalanche hazard sites in Uri sector and its surroundings on Himalayan mountain. *Journal of Mountain Science*, 12(6): 1499-1510.
- Atwater, M.M., 1954. Snow avalanches. *Sci. Am.*, 190(1): 26-31.
- Bartelt, P., Glover, J., Feistl, T., et al., 2012. Formation of levees and en-echelon shear planes during snow avalanche run-out. *J. Glaciol.*, 58(211): 980-992.
- Biskupič, M., Barka, I., 2016. Spatial modelling of avalanches by application of GIS on selected slopes of the Western Tatra Mts. and Belianske Tatra Mts., Slovakia. *Geographia Polonica*, 89(1):79-90.
- Bozhinskiy, A.N., Losyev, K.S., 1998. The fundamentals of avalanche science. In: Mitteilungen des Eidg. vol. 55. Instituts fur Schnee-und Lawinenforschung SLF, Davos, Switzerland.
- Bühler, Y., Hafner, E.D., Zweifel, B., et al., 2019. Where are the avalanches? Rapid SPOT6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(12): 3225-3238.
- Capelli, A., Reiweger, I., Schweizer, J., 2018. Acoustic emissions signatures prior to snow failure. *J. Glaciol.*, 64(246): 543-554.

- Chen, G.Q., Hao, J.S., Cui, P., et al., 2025. Application of dendrogeomorphology in snow avalanche hazard assessment: progress and prospects. *Journal of Mountain Science*, 22(1): 1912-1925.
- Chen, C.J., Yu, S.H., Wang, L.Y., et al., The quantitative analysis of snow avalanches with remote sensing and engineering scheme selection. *Journal of mountain science*, 27(1): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- Cherepanov, G.P., Esparragoza, I.E., 2008. A fracture-entrainment model for snow avalanches. *J. Glaciol.*, 54(184): 182-188.
- Chernouss, P.A., Fedorenko, Y., 2001. Application of statistical simulation for avalanche-risk evaluation. *Annals of Glaciology*, 32(1): 182-186.
- Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P., 2010. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2): 1-14.
- Daffern, T., 1992. Avalanche safety for skiers and climbers. Rocky Mountain Books, Calgary.
- Dandabathula, G., Roy, S., Syal, S., et al., 2025. Formation, triggering, and motion factors for the snow avalanche on 30 June 2024 at the kedarnath south face in the Indian Himalayas. *Landslides*, 22(4): 1167-1179.
- De Quervain, M.R., 1966. Problems of avalanche research//Symposium at Davos 1965-Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches. *IAHS Publication*, 69(1): 1-8.
- Duan, S.S., Yao, L.K., Guo, H.Q., 2016. Distance estimation of trench wet snow avalanche based on equivalent friction coefficient. *Progress in Geophysics*, 31(3): 1307-1312. (in Chinese with English abstract)
- Dunatunga, S., Kamrin, K., 2015. Continuum modelling and simulation of granular flows through their many phases. *Journal of Fluid Mechanics*, 779: 483-513.
- Eckert, N., Corona, C., Giacoma, F., et al., 2024. Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(5): 369-389.
- Evina, G., Dkengne, S.P., Eckerta, N., et al., 2021. Extreme avalanche cycles: Return levels and probability distributions depending on snow and meteorological conditions. *Weather and Climate Extremes*, 33(1): 100344.
- Fu, X., 2020. Study on the thermal characteristics and mechanical properties of seasonal snow in Northeast China. Ha'er Bin: Northeast Agricultural University, 35-50. (in Chinese with English abstract)
- Gauer, P., 1999. Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain//A Physically-Based Numerical Model and Related Field Measurements, Mitt. Eidg. Inst. Schnee Lawinenforsch, Swiss Fed. Inst. for Snow and Avalanche Res. SLF, Davos, Switzerland, 58(1): 128.
- Gauer, P., Issler, D., 2004. Possible erosion mechanisms in snow avalanches. *Ann. Glaciol.*, 38(1): 384-392.

- Gauer, P., Issler, D., Lied, K., et al., 2007. On full-scale avalanche measurements at the Ryggfonn test site. Norway. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 49(1): 39-53.
- Gauer, P., Lied, K., Kristensen, K., 2008. On avalanche measurements at the Norwegian full-scale test-site Rygg fonn. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 51(2-3): 138-155.
- Gaume, J., Puzrin, A.M., 2021. Mechanisms of slab avalanche release and impact in the Dyatlov Pass incident in 1959. *Commun Earth Environ.*, 2(1): 1-11.
- Gaume, J., van Herwijnen, A., Gast, T., et al., 2019. Investigating the release and flow of snow avalanches at the slope-scale using a unified model based on the material point method. *Cold Regions Science and Technology*, 168(1): 102847.
- Gaume, J., Schweizer, J., Herwijnen, A., et al., 2014. Evaluation of slope stability with respect to snowpack spatial variability. *J. Geophys. Res.*, 119(9): 1783-1799.
- Gaume, J., Gast, T., Teran, J., et al. 2018. Dynamic anticrack propagation in snow. *Nature communications*, 9(1): 1-10.
- Gauthier, F., Germain, D., Hétu, B., 2017. Logistic models as a forecasting tool for snow avalanches in a cold maritime climate: northern Gaspésie, Québec, Canada. *Natural Hazards*, 89(1):201-232.
- German, R.M., 2011. Sintering theory and practice. John Wiley and Sons Inc. New York, U. S. A.
- Gray, J., Ancey, C., 2011. Multi-component particle-size segregation in shallow granular avalanches. *Journal of Fluid Mechanics*, 678(1): 535-588.
- Grenier, J., Bhiry, N., Decaulne, A., 2023. Meteorological conditions and snow-avalanche occurrence over three snow seasons (2017-2020) in Tasiapik Valley, Umiujaq, Nunavik. *Arct Antarct Alp Res*, 55(1): 2194492.
- Hao, J.S., Huang, F.R., Liu, Y., et al., 2018. Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains, China. *Journal of Mountain Science*, 15 (7): 1397-1411.
- Hao, J.S., Huang, F.R., Feng, T., et al., 2021. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics of snow avalanche disaster and its triggering factors in the high mountain Asia. *Mountain Research*, 39(2): 304-312. (in Chinese with English abstract)
- Harbitz, C., Harbitz, A., Nadim, F., 2001. On probability analysis in snow avalanche hazard zoning. *Annals of Glaciology*, 32(1): 290-298.
- Heierli, J., Gumbesch, P., Zaiser, M., 2008. Anticrack nucleation as triggering mechanism for snow slab avalanches. *Science*, 321(5886): 240-243.
- Heck, M., Hobiger, M., van Herwijnen, A., et al., 2019. Localization of seismic events produced by avalanches using multiple signal classifications. *Geophys. J. Int.*, 216(1): 201-217.
- Höller, P., 2007. Avalanche hazards and mitigation in Austria: a review. *Natural Hazards*, 43: 81-101.
- Hreško, J., Boltziar, M., 2001. Influence of the morpho dynamic processes to landscape structure in the

- high mountains. *Ekologia Bratislava*, 20(Supplement3): 141-148.
- Jamieson, J.B., Geldsetzer, T., Stethem, C., 2001. Forecasting for deep slab avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 33(1): 275-290.
- Jamieson, J.B., Schweizer, J., 2005. Using a checklist to assess manual snow profiles. *Avalanche News*, 72(1): 57-61.
- Jamieson, B., Johnston, C., 1998. Refinements to the stability index for skier-triggered dry-slab avalanches. *Ann. Glaciol.*, 26(1): 296-302.
- Jomelli, V., Delval, C., Grancher, D., et al., 2007. Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1): 180-192.
- Jomelli, V., Bertra, P., 2001. Wet snow avalanche deposits in the French Alps: structure and sedimentology. *Geogr. Ann.*, 83A(1-2): 15-28.
- Joshi, J.C., Kaur, P., Kumar, B., et al., 2020. HIM-STRAT: a neural network-based model for snow cover simulation and avalanche hazard prediction over North-West Himalaya. *Natural Hazards*, 103(1): 1239-1260.
- Johnson, B.C., Jamieson, J.B., Stewart, R.R., 2004. Seismic measurement of fracture speed in a weak snowpack layer. *Cold Regions Science and Technology*, 40(1-2): 41-45.
- Kern, M., Bartelt, P., Sovilla, B., et al., 2009. Measured shear rates in large dry and wet snow avalanches. *J. Glaciol.*, 55(190): 327-338.
- Kinosita, S., 1960. The hardness of snow. *Low Temperature Science. ser a, Physical Sciences*, 19: 119-134.
- Kronholm, K., Schweizer, J., 2003. Snow stability variation on small slopes. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3): 453-465.
- Kumar, S., Srivastava, P.K., Snehmani, 2017. GIS based MCDA-AHP modelling for avalanche susceptibility mapping of Nubra Valley region, Indian Himalaya. *Geocarto International*, 32(11): 1254-1267.
- Kumar, S., Srivastava, P.K., Snehmani Gore, A., et al., 2016. Fuzzy-frequency ratio model for avalanche susceptibility mapping. *International Journal of Digital Earth*, 9(12): 1168-1184.
- LaChapelle, E.R., 1974. Chapter 4: Avalanche Forecasting. Development of methodology for evaluation and prediction of avalanche hazard in the San Juan Mountain area of southern Colorado. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado.
- LaChapelle, E.R., Ferguson, S.A., 1980. Snow-pack structure: stability analysed by pattern-recognition techniques. *J. Glaciol.*, 26(94): 506-511.
- Laternser, M., Schneebeli, M., 2002. Temporal Trend and Spatial Distribution of Avalanche Activity during the Last 50 Years in Switzerland. *Natural Hazards*, 27: 201-230.

- Larsen, H.T., Hendrikx, J., Slåtten, M.S., et al., 2020. Developing nationwide avalanche terrain maps for Norway. *Natural Hazards*, 103(3): 2829-2847.
- Lehning, M., Doorschot, J., Raderschall, N., 2000. Combining snow drift and SNOWPACK models to estimate snow loading in avalanche slopes. Snow Engineering - Recent Advances and Developments//Hjorth - Hansen E. et al. Proceedings of the Fourth International Conference, Trondheim, Norway, Balkema, Brookfield, Vt., 113-122.
- Lied, K., Bakkehøi, S., 1980. Empirical calculations of snow avalanche run out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, 26(94): 165-177.
- Ligneau, C., Sovilla, B., Gaume, J., 2019. Modelling erosion, entrainment and deposition in cohesive granular flows: Application to dense snow avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 219(1): 104103.
- Markus, E., Stian, So., Eirik, M., 2015. Using “Structure-from-Motion” photogrammetry in mapping snow avalanche debris. *Vienna*, 21(1): 171-178.
- McClung, D.M., 2001. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation by logging. *Annals of Glaciology*, 32(1): 223-229.
- McClung, D.M., Schweizer, J., 1999. Skier triggering snow temperatures and the stability index for dry slab avalanche initiation. *Journal of Glaciology*, 45(150): 190-200.
- Mohamed, N., Florence, N.B., Thierry, F., et al., 2004. Dense snow avalanche modeling: flow, erosion, deposition and obstacle effects. *Cold Regions Science and Technology*, 39(2): 193-204.
- Monti, F., Gaume, J., Herwijnen, A.V., et al., 2016. Snow instability evaluation: calculating the skier-induced stress in a multi-layered snowpack. *Natural hazards and earth system sciences*, 16(1): 775-788.
- Mueller, M., 2001. Snow stability trends at Wolf Creek Pass, Colorado//Proceedings of the International Snow Science Workshop, Big Sky, Montana. U. S. A., Montana State University, Bozeman, 147-152.
- Perla, R.I., 1980. Avalanche release, motion, and impact. In: Colbeck, S.C. (Ed.), Dynamics of Snow and Ice Masses. Academic Press, New York.
- Perla, R., Lachapelle, E., 1970. A theory of snow slab failure. *Journal of Geophysics research*, 75: 7619-7626.
- Perry, B., Michael, L., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3): 123-145.
- Podolskiy, E.A., Izumi, K., Suchkov, V.E., et al., 2017. Physical and societal statistics for a century of snow-avalanche hazards on Sakhalin and the Kuril Islands (1910–2010). *J. Glaciol.*, 60(221): 409-430.

- Qiu, J.Q., 2004. Avalanche studies. Wulumuqi: Xinjiang Science and Technology Press, 115-125. (in Chinese)
- Schaer, M., 1995. Avalanche activity during major avalanche events—A case study for hydroelectric reservoirs, in Lesapports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche. Actes de Colloque, Chamonix, France, 30 mai-3juin 1995, edited by F. Sivardi  re, pp. 133-138, ANENA, Grenoble, France.
- Schirmer, M., Schweizer, J., Lehning, M., 2010. Statistical evaluation of local to regional snowpack stability using simulated snow-cover data. *Cold Regions Science & Technology*, 64(2): 110-118.
- Schweizer, J., Jamieson, J.B., Schneebeli, M., 2003. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4): 1-24.
- Schweizer, J., Bartelt, P., van, H.A., 2015. Snow Avalanches in Snow and Ice-related Hazards, Risks and Disasters. Waltham: Academic Press, 395-436.
- Schweizer, J., Jamieson, J.B., 2007. A threshold sum approach to stability evaluation of manual snow profiles. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1/2): 50-59.
- Schweizer, J., Mitterer, C., Stoffel, L., 2009. On forecasting large and infrequent snow avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 59(2-3): 234-241.
- Schweizer, J., Lütschg, M., 2001. Characteristics of human-triggered avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33(23): 147-162.
- Schweizer, J., Jamieson, J.B., 2001. Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 33: 207-221.
- Schweizer, J., Wiesinger, T., 2001. Snow profile interpretation for stability evaluation. *Cold Regions Science and Technology*, 33: 189-188.
- Schweizer, J., Reuter, B., van Herwijnen, A., et al., 2016. Avalanche release 101. In: Greene, (Ed.), Proceedings ISSW 2016. International Snow Science Workshop, Breckenridge CO, U.S.A., 3-7 October, pp. 1-11.
- Schweizer, J., F  hn, P.M.B., 1996. Avalanche forecasting—an expert system approach. *J. Glaciol.*, 42(141): 218-332.
- Schweizer, J., McCammon, I., Jamieson, J.B., 2008. Snowpack observations and fracture concepts for skier-triggering of dry-snow slab avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3): 112-121.
- Scallya, F.A., Owens, I.F., 2005. Depositional processes and particle characteristics on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Geomorphology*, 69(1): 46-56.
- Silverton, N.A., McIntosh, S.E., Kim, H.S., 2007. Avalanche Safety practices in Utah. *Wilderness and Environmental Medicine*, 18(4): 264-270.

- Stoffel, A., Meister, R., Schweizer, J., 1998. Spatial characteristics of avalanche activity in an alpine valley-A GIS approach. *Annals of Glaciology*, 26: 329-336.
- Stomakhin, A., Schroeder, C., Chai, L., et al., 2013. A material point method for snow simulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4): 1-10.
- Strapazzon, G., Schweizer, J., Chiambretti, I., et al., 2021. Effects of climate change on avalanche accidents and survival. *Front Physiol.*, 12(1): 639433.
- UNESCO., 1981. Avalanche Atlas-Illustrated International Avalanche Classification. International Commission for Snow and Ice of the International Association of Hydrological Sciences. UNESCO, Paris, France.
- van Herwijnen, A., Jamieson, B., 2005. High-speed photography of fractures in weak snowpack layers. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 43(1-2): 71-82.
- Wang, S.J., Ren, J.W., 2012. A review of the progresses of avalanche hazards research. *Progress in geography*, 31(11): 1529-1536. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Y.L., 1986a. Dry-snow avalanche in China. *Journal of glaciology and geocryology*, 8(4): 381-387. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Y.L., 1986b. A wet snow avalanche with heavy harmfulness in China. *Journal of glaciology and geocryology*, 8(1): 56-60. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Y.L., Zhang, Z.Z., Xie, Z.C., 1979. Snow avalanche and protection. Beijing: Science press, 25-126. (in Chinese)
- Wei Y.G., Yang, H., Han, X.L., 2004. Method for avalanche risk evaluation along Qingha-i Tibet Plateau Railway. *China safety science journal*, 14(4): 40-42. (in Chinese with English abstract)
- Wen, H., 2018. Spatio-temporal evolution mechanism of channeled snow avalanches in the Parlung Tsangpo catchment. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 118-140. (in Chinese with English abstract)
- Wen, H., Wang, D., Wang, S.R., et al., 2021. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlung-Tsangpo catchment, southeast Tibetan plateau. *Journal of Engineering Geology*, 29(2): 404-415. (in Chinese with English abstract)
- Wen, L.K., Xiang, L.Z., Cai, Y., et al., 2016. Research on the formation mechanism of avalanche. *Mountain research*, 34(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- Wen, L.K., Jia, J., Yao, T.D., 2023. A review of study on snow avalanches monitoring. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(6): 1679-1702. (in Chinese with English abstract)
- Williams, K., 1994. The U.S. Forest Service Westwide Avalanche Network//Proceedings of the International Snow Science Workshop, 30 October–3 November, Snowbird, Utah, 644 pp.
- Winkler, K., Schweizer, J., 2009. Comparison of snow stability tests: extended column test, rutschblock

- test and compression test. *Cold Regions Science and Technology*, 59(2-3): 217-226.
- Xie, Z.C., Иван, В., 1996. Snow and Avalanche in Tianshan. Changsha: Hunan Normal University Press, 101-156. (in Chinese)
- Zhang, T.Y., Liu, J., Yang, Z.W., et al., 2023. Numerical simulation of avalanche process in Aerxiangou, West Tianshan Mountains, based on air-ground cooperative investigation. *Arid zone research*, 40(11): 1729-1743. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, S.Q., Xie, Z.C., 2003. Categories and methods of avalanche hazard evaluation. *Journal of natural disasters*, 12(2): 45-50. (in Chinese with English abstract)

中文参考文献

- 陈楚江, 余绍淮, 王丽园, 等, 2009. 雪崩灾害的遥感量化分析与工程选线. *山地学报*, 27(1): 63-69.
- 段书苏, 姚令侃, 郭海强, 2016. 基于等价摩擦系数的沟槽式湿雪雪崩抛程预测. *地球物理学进展*, 31(3): 1307-1312.
- 郝建盛, 黄法融, 冯挺, 等, 2021. 亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析. *山地学报*, 39(2): 304-312.
- 富翔, 2020. 东北地区季节性积雪热特性及力学性质研究. 哈尔滨: 东北农业大学, 35-50.
- 仇家琪. 2004. 雪崩学. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 115-125.
- 王彦龙, 1986a. 我国的干雪崩. *冰川冻土*, 8(4): 381-387.
- 王彦龙, 1986b. 我国危害性较大的湿雪雪崩. *冰川冻土*, 8(1): 56-60.
- 王彦龙, 张志忠, 谢自楚, 1979. 雪崩及其防治. 北京: 科学出版社.
- 王世金, 任贾文, 2012. 国内外雪崩灾害研究综述. *地理科学进展*, 31(11): 1529-1536.
- 魏玉光, 杨浩, 韩学雷, 2004. 青藏高原铁路沿线雪崩危险度评价方法. *中国安全科学学报*, 14(4): 40-42.
- 文洪, 2018. 帕隆藏布流域沟槽型雪崩时空演化机制研究. 成都: 西南交通大学, 118-140.
- 文洪, 王栋, 王生仁, 等, 2021. 藏东南帕隆藏布流域雪崩关键影响因素与易发性区划研究. *工程地质学报*, 29(2): 404-415.
- 汶林科, 向灵芝, 蔡毅, 等, 2016. 雪崩的形成机理研究. *山地学报*, 34(1): 1-11.
- 汶林科, 贾靖, 姚檀栋, 2023. 雪崩的监测研究综述. *冰川冻土*, 45(6): 1679-1702.
- 谢自楚, 谢维尔斯斯基, 1996. 天山积雪和雪崩. 长沙: 湖南师范大学出版社, 101-156 .
- 张天意, 刘杰 ,杨治纬, 等, 2023. 基于空-地协同调查的西天山阿尔先沟雪崩过程数值模拟. *干旱区研究*, 40(11): 1729-1743.
- 周石硚, 谢自楚, 2003. 雪崩危险度评价的类型、特征和方法. *自然资源学报*, 12(2): 45-50.