

# 国内外雪崩灾害研究综述

王世金,任贾文

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室,兰州 730000)

**摘 要:**伴随着全球气候变暖,冰冻圈雪崩灾害潜在风险逐渐增加,雪崩灾害已受到社会各界的广泛关注。目前,在雪崩形成机制、抛程、动态模拟、风险评价与区划、预防与防治等领域取得了较大进展。雪崩灾害研究正在经历由野外观测到遥感手段与野外观测相结合、由定性半定量到定量、由经验估算到过程模拟、由雪崩机理研究向承灾区适应研究转变的发展过程。然而,以往研究过多集中于气候因子、积雪环境、沟道地形等雪崩形成机制研究与动态模拟,而承灾区承灾体脆弱性、暴露性及其适应性研究却相对较少。只有将雪崩始发区和承灾区作为一个整体进行系统研究,通过早期预警、预测和预报,才能使下游承灾区居民防患于未然,以防止或减小雪崩对承灾区居民和财产带来的损失。

**关 键 词:**雪崩;灾害;综述

## 1 引言

全球变暖背景下冰冻圈自然灾害频发<sup>[1]</sup>。其中,雪崩灾害因其突发性、潜在性、难预测性、运动速度快和冲击力大等特点,已严重影响到山区居民的生命和财产安全,以及交通网络、基础设施、农林牧及冰雪旅游业的可持续发展,使山区经济社会系统遭到了巨大破坏并潜伏多种威胁<sup>[2]</sup>。例如,1970年3月31日,一次地震引爆秘鲁安第斯山最高峰瓦斯卡拉山雪崩和冰崩,致使1.8万人罹难,且使下游永盖市夷为平地,造成历史上最致命的一次冰冻圈灾害<sup>[3]</sup>。1991年1月3日,我国云南省梅里雪山发生雪崩事件,17名中日登山队员全部遇难。1998-1999年冬季,瑞士巨大暴雪引发多起雪崩事件,导致17人死亡<sup>[4]</sup>。在美国,过去50年里雪崩死亡人数呈现稳定性增长趋势,仅2004-2005年冬天,就有28人死于雪崩灾害<sup>[5]</sup>。据统计,世界范围内雪崩平均死亡人数估计为每年250人<sup>[6]</sup>。特别是2010年2月10日,阿富汗北部帕尔万省交通要道萨朗山口发生多次雪崩,致使170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,致使145人死亡;2012年4月8日,巴基斯坦北部锡亚琴冰川地区遭遇近20年来最大的一次雪崩,139人遇难;2012年6月5日,我国祁连山肃北县黑刺沟发

生雪崩灾害,10人罹难。

雪崩灾害作为冰冻圈环境变化的产物,其研究得到了社会各界的广泛关注<sup>[7]</sup>,现已成为冰冻圈变化研究中一个重要领域。20世纪30年代,莫斯科大学曾创立了前苏联第一个雪崩和泥石流研究实验室,并在北极希宾山原和高加索厄尔布鲁士山区建立了雪崩站。瑞士政府也较早启动冰川、雪崩灾害预警计划,并带动冰雪灾害和相关研究进程<sup>[8]</sup>。1996年,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,其模拟结果被用于区域和国家雪崩预报,并提供雪崩孕灾区的积雪信息<sup>[9]</sup>。同样地,我国也是雪崩灾害的多发地区,其研究较早<sup>[10]</sup>。1967年,中科院兰州冰川冻土研究所与多家单位联合组建了新疆雪灾考察防治工作队,对天山公路积雪及其灾害进行了全面考察与研究,并在天山西部巩乃斯河中游海拔1776 m处建立了中国第一个“积雪雪崩研究站”,开展雪崩灾害研究已有40多年历史。20世纪70-80年代以来,我国多家单位先后对喀喇昆仑山和横断山雪崩、冰川泥石流、冰川洪水,以及天山公路和川藏公路沿线雪害和雪崩进行了考察,并建立了半定位观测研究站。总体上,国内外雪崩灾害研究在雪崩特征、形成机理、动态模拟、风险评估、灾害预防与适应等研究方面取得较大进展。

收稿日期:2012-06; 修订日期:2012-08.

基金项目:冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题(SKLCSS-ZZ-2012-03-03);国家自然科学基金项目(41121001,41171053)。

作者简介:王世金(1975-),男,甘肃金昌人,博士后,主要从事冰冻圈变化影响与适应研究。E-mail: xiaohanjin@126.com

## 2 雪崩内涵与类型

雪崩是雪块在陡峭山体发生的一种瞬间崩落事件。雪崩具有以下6种划分方式:①按雪崩发生时期,可分为季节性雪崩和常年雪崩。早期的雪崩一般分为烟尘状雪崩和地表面雪崩,或干雪雪崩、湿雪雪崩、风板雪崩和冰雪崩等。1973年,国际雪冰委员会(ICSI)根据雪崩雪的性质制定了一个雪崩分类系统,该系统认为应该依据雪崩起动带、运动带和堆积带特征进行雪崩分类,该方法对雪崩预报、雪崩危险区划等较为适用。②根据雪崩始发区雪层特征,雪崩一般分为松雪雪崩和雪板雪崩两类<sup>[11]</sup>。松雪雪崩爆发于一个相对有粘性的干湿雪层,起动方式由一点开始,而雪板雪崩是较厚和较硬板块雪层下相对稀疏的松雪层在陡坡上的断裂和崩塌<sup>[12-13]</sup>,其起动方式由一条线开始。雪板雪崩触发因子包括近表面局地载荷的快速增加(如人或爆炸)、载荷的渐进持续增加(如降雪)和雪层特性空间变化(如表面增温)<sup>[14]</sup>。其中,雪板雪崩占雪崩灾难的90%左右,危害性更大。③按雪层含水状态,雪崩又被分为干雪雪崩和湿雪雪崩两类,干雪崩常发生于山顶,而湿雪崩则常发生于中低山<sup>[15]</sup>。④按雪崩运动路径地貌形态特征,可将雪崩分为沟槽雪崩、坡面雪崩、坡面一沟槽雪崩<sup>[16]</sup>。⑤按照雪崩驱动因子,分为天然雪崩和人为雪崩。前者主要威胁居民和基础设施,后者主要威胁高山冰雪旅游者<sup>[17]</sup>。⑥按照雪崩滑动面位置,可将其分为表层雪崩和全层雪崩。另外,雪崩多伴随冰崩、岩崩事件同时发生,远距离灾害风险巨大,以至将危及山区聚居区的人身安全和财产损失。

## 3 雪崩形成机制分析

雪崩形成机制研究对于雪崩预防、防灾救灾体系建立具有重要的现实指导作用。雪崩的形成条件包括地形条件、气候条件、积雪特性和外部因素。

### 3.1 地形条件

地形条件是雪崩形成唯一不变的本质性衡量因子,包括下垫面坡度、粗糙度、地形切割深度等。Schweizer和Jamieson<sup>[14]</sup>曾对瑞士和加拿大809起由滑雪者触发雪崩事件中的大量坡度数据进行分析,结果显示,绝大部分雪崩发生在坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 范围

之内,其中,坡度在 $39^{\circ}$ 左右时,雪崩频数比例几乎占全部雪崩数的40%以上。该研究结果与以往天然雪崩或不同类型雪崩研究一致<sup>[18]</sup>。Maggioni和Gruber<sup>[19]</sup>利用瑞士达沃斯地区雪崩发生数据和GIS技术分析了横坡曲率、纵坡坡度等地形参数对大型雪崩频率的综合性影响,结果显示,较高的凹形横坡曲率结合较高的平均坡度( $>36^{\circ}$ )将导致较高的雪崩频率。Schaefer等<sup>[20]</sup>在小规模雪崩底部积雪斜道实验中分析发现,一旦积雪与板层分离,雪崩流则主要由下层雪层和地面之间的摩擦过程决定。另外,大量数据显示<sup>[21-22]</sup>,雪崩始发区山坡植被密度大小也是积雪稳定性的最重要因素,草地有利于雪崩形成,森林植被则抑制雪崩形成,可以说,密集的森林是保护山区村庄和基础设施不受雪崩危害的最佳和最传统方式。

### 3.2 气候条件

气候条件与雪崩关系紧密,积雪是气候的产物,也是气候的组成部分。Armstrong等<sup>[23]</sup>首次引入雪崩气候一词,并且得到许多研究者的使用<sup>[24]</sup>。Hägeli和McClung<sup>[25]</sup>对加拿大哥伦比亚山雪崩进行调查,发现在依赖于海洋性气候影响的区域,松雪层天然雪崩活动频数占雪崩总量的0~40%。1978-2003年期间,Vincent等<sup>[26]</sup>对法国阿尔卑斯山Valloire峡谷12个雪崩轨迹中576次雪崩事件的发生与气象参数关系进行了调查与分析。结果显示:对于高频率雪崩轨迹,年雪崩活动概率依赖于连续数日( $\geq 3$ 日)的冬季高降雪事件和高于平均气温(平均值, $\pm 1$  S.D.)条件;而对于低频率雪崩轨迹,雪崩活动概率仅依赖于连续数日( $\geq 3$ 日)的冬季高降雪事件。Garcia-Selles等<sup>[27]</sup>则将地中海比利牛斯山主要雪崩活动与大气环流模式相联系,认为雪崩周期与北大西洋涛动(NAO)和西部地中海振荡(WeMO)有关。另外,气温变化还以不同方式影响积雪稳定性<sup>[28-29]</sup>。降雪是灾难性新雪雪崩最强的预测参数,并与其危险性紧密相连。一次暴风雪后新雪积累深度在1 m时被认为极端雪崩发生的临界点,30~50 cm是一般天然雪崩释放的临界点<sup>[30]</sup>。风则增加积雪负荷,进而对雪崩产生重要影响,被认为是新雪之后对雪崩起最主要作用的贡献因子<sup>[28]</sup>。

### 3.3 积雪特性

单独依赖新雪深解释雪崩活动很不充分<sup>[31]</sup>。为此,Conway和Wilbour建立了基于雪深的松雪层

稳定性预测模型<sup>[32]</sup>。Jamieson等<sup>[33]</sup>也证实板状积雪稳定性与干板状雪崩发生具有很大相关性。积雪层结构变化被认为是干雪板雪崩形成的主要驱动因子。假如在老雪或新雪以下不存在松雪层,那么由新雪或风吹雪或任何温度升高造成的载荷对其积雪层稳定性均无任何影响。因此,松雪层的存在是雪崩形成的一个先决条件,但非充分条件。Jamieson和Johnston<sup>[34-35]</sup>对滑雪者触发雪崩事件中松雪层强度进行过广泛测试,并建立了一个积雪稳定性指数。Föhn<sup>[36]</sup>通过总结300个在雪板以下的松雪层特征,发现60%的雪崩发生在松雪层界面,40%发生在松雪层以下60 mm处。同时,新雪密度变化也与雪崩活动增减紧密相连<sup>[37]</sup>。

另外,火山喷发、地震、旅游活动、滚石等外部条件往往也可以打破积雪场松雪层张力和引力平衡,继而激发雪崩事件发生。例如,在欧洲和北美地区大部分雪崩事件中,几乎85%的致命性雪崩事件均由人类触发<sup>[17,38]</sup>。

## 4 雪崩抛程研究

根据地貌地形条件、积雪密度和经验公式计算雪崩最大抛程对于雪崩路径确定和灾害预防具有重要的理论意义。国内外都对雪崩抛程进行了大量研究,包括抛程与落差的统计关系、抛程与雪崩体积的关系、雪崩源区平均坡度及源地面积的关系、最大抛程与落差及运动最小摩擦系数之间的关系、抛程与落差及发生点对抛落终点俯视角的关系等<sup>[39]</sup>。其中,Blagoveshchenskii<sup>[40]</sup>曾根据俄罗斯科拉半岛希宾山(Khibinis)粒雪盆至雪崩停止点垂直距离,确定了雪崩最大抛程经验公式。王彦龙<sup>[41]</sup>对我国西部地区雪崩的实际观测和验证中建立了基于雪崩速度、山体坡度及雪崩加速度的雪崩抛程经验公式,且认为较为适用。一些学者<sup>[42-43]</sup>则对雪崩抛程与雪崩速度、雪崩冲击力相互关系也进行了大量研究与模拟。根据雪崩抛程和崩塌物质体积,雪崩分为5级规模,具体包括:小滑雪( $<10\text{ m}$ 、 $1\sim10\text{ m}^3$ )、小型雪崩( $10\sim10^2\text{ m}$ 、 $10\sim10^2\text{ m}^3$ )、中型雪崩( $10^2\text{ m}$ 、 $10^3\sim10^4\text{ m}^3$ )、大型雪崩( $10^3\text{ m}$ 、 $10^5\sim10^6\text{ m}^3$ )、极大型雪崩事件( $(1\sim5)\times10^3\text{ m}$ 、 $10^6\sim10^9\text{ m}^3$ )<sup>[12]</sup>。瑞士、法国、美国、加拿大均提出了雪崩规模不同的分级标准。

## 5 雪崩动态模拟研究

雪崩动态模拟始于20世纪30年代,其目的在于预测雪崩发生概率和估计雪崩始发区雪深、雪崩冲击力、流速、抛程等<sup>[44-45]</sup>。雪崩与积雪结构及其稳定性息息相关。雪崩动态模拟的前提是要对积雪结构与稳定性进行监测和模拟。积雪稳定性又由雪层张力和应力决定。雪层张力和应力随时间演变,当雪层应力大于强度张力时,雪层稳定性失衡,进而引发雪崩释放。雪层张力和应力变化率已在持久性稳定松雪层进行过模拟<sup>[46]</sup>。Jamieson等<sup>[34]</sup>、Roch<sup>[47]</sup>、Canadian Avalanche Association<sup>[38]</sup>相继提出了积雪稳定性指标的计算模型。

瑞士联邦积雪与雪崩研究所(SLF)<sup>[49]</sup>曾建立用以预测雪崩的一维积雪计算模型SNOWPACK,该模型通过有限元方法有效解决了支配积雪物质、能量和动量守恒的偏微分方程问题,其简化模型曾用于瑞士阿尔卑斯山积雪沉降、分层、密度、雪深、雪层温度、积雪稳定性、积雪消融、雪层表面物质和能量交换等雪崩预测与模拟。该模型也曾用于日本北海道仁世户滑雪场雪崩灾害预警模拟研究,并成功预测了1998、2003年的3起雪崩事件<sup>[50]</sup>。目前,该模型几个模块已直接应用于二维雪层计划HAE-FELI<sup>[51]</sup>。其他雪层模拟还包括法国Safran-Crocus-Mépra模型<sup>[52]</sup>、CRREL模型<sup>[53]</sup>和早期SLF的DAISY模型<sup>[37]</sup>等。另外,1997年,SLF和瑞士联邦理工大学水利、水文和冰川实验室(VAW)<sup>[54]</sup>共同构建了一维雪崩计算模型AVAL-1D,该模型需要事先确定雪崩流向、流体宽度和物质分布,当雪崩演进地形复杂时,模型便存在一定问题。随后,基于沃尔麦流体摩擦模型,SLF和VAW构建了RAMMS二维物质流动模型,该雪崩模型主要输入参数包括雪崩释放体积、雪崩携带量、摩擦系数,适用于粗糙地形条件,现已广泛应用于瑞士雪崩最大抛程和流速模拟。然而,该模型仅适合于雪崩前,对于雪崩过程及其沉积却较难模拟<sup>[55-56]</sup>。

雪崩动态模拟模型可以在给定雪崩释放情境下计算出雪崩抛程,提供雪崩冲击力估算值。在实践中,动态模型大部分被简化,使用含两个摩擦参数的流变模型。摩擦参数的合理值可由已知雪崩历史事件抛程反算获得。对于不同条件参数的设置,则由过去雪崩规模大小、路径海拔、轨迹和雪崩周期决定<sup>[57]</sup>。另外,积雪稳定性变化和雪崩规模大



小模拟将是未来雪崩动态模拟研究的重要方向<sup>[58]</sup>。

6 雪崩灾害风险评价与区划

风险评估与区划是应对和适应雪崩灾害风险增加的必然需求,其区划也被看作是雪崩防护和规避其灾害最谨慎的方式。在阿尔卑斯山区编制山区土地空间利用规划,便优先考虑了该区的雪崩灾害风险评估与区划结果<sup>[59]</sup>。雪崩灾害区划与制图始于 1953 年欧洲阿尔卑斯山 1951/1952 年冬季的灾难性雪崩事件,当时地图已显示雪崩最大抛程及其雪崩周期概念。瑞士和加拿大根据雪崩冲击力(破坏力)与复发周期(频率)对区域雪崩危险性进行评价和区划。在瑞士,红色区域为潜在危险最大地带,复发间隔在 300 年,雪崩冲击力在 30 kPa 及以上,这类区域政府明令禁止一些建筑活动;蓝色区域为危害适中地带,黄色区域和白色区域分别代表危险性较小和无危险地带。加拿大分区颜色与瑞士一致,但标准不一(表 1)。目前,瑞士雪崩危险性分区系统已广泛应用于奥地利、法国、挪威、意大利和美国雪崩灾害分区研究。

Ovens 和 Fitzharris<sup>[60]</sup>从雪崩期车辆、人流量与雪崩发生概率 3 个评价因子,对典型公路雪崩路段进行了危险性评价和灾害等级划分。Blagovec-skiy 等<sup>[61]</sup>根据山地生态特征、地形切割深度及河谷横剖面形态和雪崩重现率等,将天山山系雪崩危险区分为低山草原或半荒漠雪崩危险区、中山森林—草原雪崩危险区、中山草地雪崩危险区、高山冰缘带(石质)雪崩危险区、高山、极高山冰川带雪崩危险区。王彦龙<sup>[41]</sup>则主要强调雪崩区冰川、粒雪、岩屑堆、草地和树木等下垫面状况。一些学者则建立了雪崩风险预测自动模型,该模型可加工处理雪崩区气象、地形条件、积雪深度和雪崩历史次数等输入数据,计算雪崩风险发生概率<sup>[62]</sup>,并能为现有公

众预警系统的精确性提供预测<sup>[63]</sup>。Troshkina 等<sup>[15]</sup>在评价外高加索西部山地的积雪及雪崩状况时,根据雪深、雪崩发生次数、降雪次数和降雪最大强度,将雪崩划分为 7 种类型,并对其进行制图。周石研等<sup>[39]</sup>、齐藤隆等<sup>[64]</sup>、Sovilla 等<sup>[65]</sup>则分别从坡度、植被状况、积雪厚度等评价因子,对雪崩区和典型点位进行了雪崩发生危险度和到达危险度评价。陈楚江等<sup>[66]</sup>则利用多时相高分辨率卫星影像自动提取积雪条件、地形地貌特征、植被垫层、气象条件、地质条件等雪崩成灾与孕灾因子,结合人类活动和雪崩发生频率定性因子,采用层次分析法构建了雪崩灾害风险评估模型。另外,科学合理的雪崩灾害风险评价和分区,还要考虑最大雪崩潜在的易损性程度、复发周期、最大抛程等主要变量<sup>[67]</sup>和雪层稳定性、触发因子可能性、危险斜坡的区域范围、雪崩类型和规模、雪崩物质密度等其他因子。

7 雪崩灾害预防与适应研究

积极的雪崩灾害预防与适应将极大减轻其危害程度,防止雪崩发生,或在雪崩发生时减小其规模,降低破坏力和损失,最大限度地保障承灾区人民的生命和财产安全。雪崩预防重点是对雪崩概率、雪崩最大冲击力和雪崩最大崩塌量的估算,进而建立雪崩早期预警预报体系,以指导山区土地利用和基建工程的合理布局与实施。雪崩防治工程措施包括稳雪工程(如稳雪栏、木桩、稳雪墙)、导雪工程(如防雪走廊、防雪墙和导雪堤)、阻雪工程(如档雪坝、缓阻丘)、缓建工程(如消能楔、消能坑和破雪堤)、化学防雪崩工程、人工控制雪崩工程和植树造林防雪崩工程等<sup>[41]</sup>。

阿尔卑斯山各国雪崩预警服务采用统一的五级雪崩危险级别标准<sup>[68]</sup>,对其预警颜色也进行了标准化,分为绿色、黄色、橘色、红色、红/黑色 5 级<sup>[54]</sup>。

表 1 瑞士和加拿大雪崩灾害分区标准

Tab.1 Zoning and its criterion of avalanches hazard in Switzerland and Canada

分区颜色	瑞士标准	加拿大标准
红色	$I > 30 \text{ kN/m}^2; T < 300 \text{ a}$	$I \geq 30 \text{ kPa}; T < 30 \text{ a}; \text{或 } I \times 1/T > 0.1, T = 30 \sim 300 \text{ a}$
蓝色	$I < 30 \text{ kN/m}^2; T = 30 \sim 300 \text{ a}$	$I \geq 1 \text{ kPa}; \text{或 } I \times T > 0.1 \text{ kPa}, T = 30 \sim 300 \text{ a}$
黄色	$I < 3 \text{ kN/m}^2; T > 30 \text{ a}$	无直接的等值标准
白色	无限制	$I < 1 \text{ kPa}, T > 30 \text{ a}; \text{或 } T > 300 \text{ a}$

注:①  $I$  为雪崩冲击力,  $T$  为复发周期;②  $1\text{kPa}= 1000 \text{ N/m}^2$ 。

在瑞士, Munter<sup>[69]</sup>曾提议通过结合坡度和欧洲 5 级雪崩危险标准用作滑雪场地形选择规则。高山滑雪区坡度超过 25° 或横穿主要滑坡路径的区域一般称为潜在雪崩灾害区, 这类区域禁止游客进入。在滑雪旅游地图中, 斜坡倾角超过 30° 时一般被辅以彩色标注, 超过 40° 则不推荐滑雪娱乐活动。SLF 和 VAW<sup>[76]</sup>曾提出按照雪崩崩塌体积规模制定不同情景的雪崩应急安全预案。当冬季雪崩崩塌体积在  $3 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 且拥有一个稳定雪层, 建议关闭就近道路; 当雪层稳定性较弱时, 则建议疏散就近村落居民和停止一切旅游活动<sup>[56]</sup>。日本于 1989 年开始实施“雪崩对策办法”, 重点为: 扩大受灾体保护对象, 成立多学科多领域的雪崩研究和防灾调查和研究机构, 收集雪崩危险处资料, 对雪崩易发区进行地区灾害等级区划, 建立有效的典型雪崩区警戒避难体系, 收集雪崩灾害险情和灾情信息, 建立雪崩灾害防治对策规划等<sup>[70]</sup>。加拿大土地利用规划和基础设施建设需严格遵照雪崩危险性区划方案进行, 其中, 公路、铁路和滑雪道, 设计的防御雪崩年限为 1 年, 通讯、电力输送线路为 1~10 年, 原油天然气管网、停车场和滑雪索道下部站为 10~50 年, 道路和铁道建筑为 50 年, 居民建筑为 100 年, 饭店、学校和医院为 100~300 年<sup>[71]</sup>。中国科学院新疆地理研究所和新疆交通科学研究院曾将国道 312 线果子沟段和 218 线及 217 线有关路段作为试验基地, 提出了公路雪崩防治试验工程体系, 即在雪崩发生区设置稳雪钢板网、在雪崩运动区设置钢管稳雪栅栏的措施, 在大规模沟槽雪崩路径处, 选择分段落设置干砌片石挡雪坝和消能池, 并配合生物工程治理等综合措施, 取得了较好的防御效果<sup>[72]</sup>。

## 8 结论

以往雪崩灾害研究在雪崩形成机制及其动态模拟方面取得了较大进展, 并在雪崩风险评价与区划、雪崩灾害预防与防治等方面也做了大量工作。然而, 雪崩区气候恶劣、可进入性差, 其实地调研、实时监控难度较大。加之不同区域雪崩特点各异, 雪崩灾害研究具有复杂性, 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, 溃雪崩动力学机制尚不清晰, 而研究这些问题需要应用到力学等相关学科的支持才有可能解决。同时, 雪崩灾害的形成不仅与雪崩成因、积雪环境、沟

道地形等因素有关, 而且与下游承灾区承灾体暴露度、脆弱性及其适应能力紧密相连。雪崩灾害的形成是孕灾环境、致灾因子、承灾体综合作用的结果<sup>[73-74]</sup>。只有将雪崩始发区和承灾区作为一个整体进行系统研究, 通过早期预警、预测和预报, 才能使下游承灾区居民防患于未然, 以防止或减小雪崩对承灾区居民和财产带来的损失。

## 参考文献

- [1] 秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望. 应用气象学报, 2006, 17(6): 649-656.
- [2] Carey M P. People and glaciers in the Peruvian Andes: A history of climate change and natural disasters, 1941-1980 [D]. Oakland: University of California, 2005.
- [3] Plafker G, Erickson G E, Fernandez J. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 1(3): 543-578.
- [4] Salm B. A short and personal history of snow avalanche dynamics. Cold Regions Science and Technology, 2004, 39(2-3): 83-92.
- [5] Silvertown N A, McIntosh S E, Kim H S. Avalanche Safety practices in Utah. Wilderness and Environmental Medicine, 2007, 18(4): 264-270.
- [6] Meister R. Avalanches: Warning, rescue and prevention, Avalanche News, 2002, 62: 37-44.
- [7] Salzmann N K, Käb A, Huggel C, et al. Assessment of the hazard potential of ice avalanches using remote sensing and GIS modeling. Norwegian Journal of Geography, 2004, 58(2): 74-84.
- [8] Huggel C, Haeberli W, Käb A, et al. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1068-1083.
- [9] Lehning M, Bartelt P, Brown B, et al. Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. Cold Regions Science and Technology, 1999, 30(1-3): 145-157.
- [10] Wang Y L, Huang M H. An outline of avalanches in China. Cold Regions Science and Technology, 1986, 13(1): 11-18.
- [11] Reynolds J M. The identification and mitigation of glacier related hazards: Examples from the Cordillera Blanca, Peru//McCall G J H, Laming D J C, Scott S C. Geohazards. London: Chapman & Hall, 1992: 143-157.
- [12] Perla R I. Avalanche release, motion and impact//Colbeck S C. Dynamics of Snow and Ice Masses. New York: Aca-

- demic Press, 1980: 397-462.
- [13] Schweizer J, Jamieson J B, Schneebeli M. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 2002, 41(4): 1016.
- [14] Schweizer J, Jamieson J B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 33(2-3): 207-221.
- [15] Troshkina E, Clazovskaya T, Kondakova N N, et al. Zoning of snowiness and avalanching in the mountains of western Transcaucasia. *Annals of Glaciology*, 2001, 32 (1): 311-313.
- [16] 刘明哲, 魏文寿, 张丽旭, 等. 精河—伊宁铁路沿线雪崩特征初步分析. *干旱区地理*, 1999, 22(4): 29-34.
- [17] Jamieson J B, Geldsetzer T. *Avalanche Accidents in Canada 1984-1996*. Revelstoke: Canadian Avalanche Association, 1996.
- [18] Perla R I. Slab avalanche measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 1977, 14(2): 206-213.
- [19] Maggioni M, Gruber U. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, 37(3): 407-419.
- [20] Schaefer M, Rösger T, Kern M. High-speed video recording of basal shear layers in snow chute flows. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2): 182-189.
- [21] Schneebeli M, Bebi P. Snow and avalanche control//Evans J, Burley J, Youngquist J. *Encyclopedia of Forest Sciences*. Oxford: Elsevier, 2004: 397-402.
- [22] Viglietti D, Letey S, Motta R, et al. Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta valley region (NW-Italy). *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2): 167-173.
- [23] Armstrong R L, Armstrong B R. *Snow and avalanche climates of the Western United States: A comparison of maritime, intermountain and continental conditions*. Davos: IAHS Publication, 1987: 281-294.
- [24] Mock C J, Birkeland K W. Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(10): 2367-2392.
- [25] Hägeli P, McClung D M. *Avalanche characteristics of a transitional snow climate: Columbia Mountains*, British Columbia, Canada. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, 37(3): 255-276.
- [26] Vincent J, Cécile D, Delphine G, et al. Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 47(1-2): 180-192.
- [27] Garcia-Selles C, Pena J C, Marti G, et al. WeMOI and NAOI influence on major avalanche activity in the eastern Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2): 137-145.
- [28] McClung D M, Schweizer J. Skier triggering, snow temperatures and the stability index for dry slab avalanche initiation. *Journal Glaciology*, 1999, 45(150): 190-200.
- [29] Bakermans L, Jamieson B. SWarm: A simple regression model to estimate near-surface snowpack warming for back-country avalanche forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 59(2): 133-142.
- [30] Föhn P, Stoffel M, Bartelt P. Formation and forecasting of large (catastrophic) new snow avalanches//Stevens J R. *Snow Avalanche Programs*. Victoria: International Snow Science Workshop Canada Inc., BC Ministry of Transportation, 2002: 141-148.
- [31] Schaer M. Avalanche activity during major avalanche events: A case study for hydroelectric reservoirs//Sivardiére F. *Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche*, Actes de Colloque, Chamonix, France, 30 mai-3 juin 1995, Grenoble: ANE-NA, 1995: 133-138.
- [32] Conway H, Wilbour C. Evolution of snow slope stability during storms. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 30(1-3): 67-77.
- [33] Jamieson B, Zeidler A, Brown C. Explanation and limitations of study plot stability indices for forecasting dry snow slab avalanches in surrounding terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 50(1-3): 23-34.
- [34] Jamieson J B, Johnston C D. Snowpack factors associated with strength changes of buried surface hoar layers. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 30(1-3): 19-34.
- [35] Jamieson J B, Johnston C D. Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. *Annals of Glaciology*, 2001, 32: 59-69.
- [36] Föhn P M B. The stability index and various triggering mechanisms//Salm B, Gubler H. *Avalanche Formation, Movement and Effects*. Davos: IAHS-AISH Publication, 1987: 195-211.
- [37] Mueller M. Snow stability trends at Wolf Creek Pass, Colorado//Canadian Avalanche Association. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Big Sky, Montana, U.S.A., 1-6 October 2000, Bozeman: Mont. State Univ., 2001: 147-152.

- [38] Schweizer J, Lutschg M. Characteristics of human-triggered avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 2001, 33(2-3): 147-162.
- [39] 周石砦, 谢自楚. 雪崩危险度评价的类型、特征和方法. *自然资源学报*, 2003, 12(2): 13-302.
- [40] Blagovetsenskii V P. Avalanche and its control in the Almatinki river basin. *Arid Land Geography*, 1994, 17(2): 44-53.
- [41] 王彦龙. 中国雪崩研究. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [42] Atwater M M. Snow avalanches. *Scientific American*, 1954, 190(1): 26-31.
- [43] McClung D M. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation by logging. *Annals of Glaciology*, 2001, 32(1): 223-229.
- [44] Barbolini M, Cappabianca F, Savi F. A new method for estimation of avalanche distance exceeded probability. *Surveys in Geophysics*, 2003, 24(5-6): 587-601.
- [45] Keylock C J. An alternative form for the statistical distribution of extreme avalanche run-out distances. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42(3): 185-193.
- [46] Zeidler A, Jamieson B. Refinements of empirical models to forecast the shear strength of persistent weak layers. Part A: layers of faceted crystals. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 44(3): 184-205.
- [47] Roch A. Les variations de la résistance de la neige//International Association of Hydrological Sciences. Proceedings of the International Symposium on Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches, Davos: IAHS Publ. 1966: 86-99.
- [48] Canadian Avalanche Association. Observation Guidelines and Recording Standards for Weather, Snowpack and Avalanches. Revelstoke: Canadian Avalanche Association, 2008.
- [49] Bartelt P, Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I. Numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 2002, 35(3): 123-145.
- [50] Nishimura K, Baba E, Hirashima H, et al. Application of the snow cover model SNOWPACK to snow avalanche warning in Niseko, Japan. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 43(1-2): 62-70.
- [51] Bartelt P, Christen M. A computational procedure for instantaneous temperature dependent snow creep//Hutter K, Wang Y, Beer H. *Advances in Cold Region Thermal Engineering and Sciences: Technological, Environmental and Climatological Impact*. Verlag: Springer, 2000: 367-386.
- [52] Durand Y, Giraud G, Brun E, et al. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(151): 469-484.
- [53] Jordan R. A One-dimensional temperature model for a snow cover: Technical documentation for SNTHERM. 89-Special report. Hanover: USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1991: 91-16.
- [54] SLF. RAMMS 1.3.0 (Rapid Mass Movements)-A modeling system for snow-avalanches in research and practice, USER MANUAL v1.01. Davos: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, 2010: 96.
- [55] Christen M, Kowalski J, Bartelt P. Ramms: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 63(1-2): 1-14.
- [56] Margreth S, Faillietaz J, Funk M, et al. Safety concept for hazards caused by ice avalanches from the Whympfer hanging glacier in the Mont Blanc Massif Stefan. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 69(23): 194-201.
- [57] Gauer P, Kronholm K, Lied K, et al. Can we learn more from the data underlying the statistical  $\alpha$ - $\beta$  model with respect to the dynamical behavior of avalanches? *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(1): 42-54.
- [58] Schweizer J. Applied snow and avalanche research. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 64(2): 69-72.
- [59] Ancey C, Gervasoni C, Meunier M. Computing extreme avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 2004, 39: 161-180.
- [60] Ovens I F, Fitzharris B R. Assessing avalanche-risk levels on walking tracks in fiordland, New Zeland. *Annals of Glaciology*, 1989, 13: 231-236.
- [61] Blagovetsenskii V P, 胡汝骥, 马虹, 等. 大阿尔玛京卡河流域的雪崩与治理. *干旱区地理*, 1994, 17(2): 44-54.
- [62] Keylock C J, McClung D M, MagnuHsson M M. Avalanche risk mapping by simulation. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(150): 303-314.
- [63] Schweizer J, Fohn P M B. Avalanche forecasting: An expert system approach. *Journal of Glaciology*, 1996, 42(141): 318-332.
- [64] 齐藤隆, 小島隆, 松田宏. 北路新干线の雪崩危险度评价. *雪冰*, 2000, 62(1): 29-39.
- [65] Sovilla B, Somavilla F, Tomaselli A. Measurements of mass balance in dense snow avalanche events. *Annals of Glaciology*, 2001, 32(1): 230-236.
- [66] 陈楚江, 余绍淮, 王丽园, 等. 雪崩灾害的遥感量化分析与工程选线. *山地学报*, 2009, 27(1): 63-69.
- [67] Whiteman C A. Cold Region Hazards and Risks. New



York: John Wiley & Sons Inc., 2011: 1-380.

[68] Meiste R. Country-wide avalanche warning in Switzerland//International Snow Science Workshop. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Snowbird, U.S.A., 30 October-3 November 1994. Snowbird, Utah: Int. Snow Sci. Workshop 1994 Organ. Comm., 1995: 58-71.

[69] Munter W. 3x3 Lawinen-Entscheiden in kritischen Situationen. Garmisch Partenkirchen: Agentur Pohl and Schellhammer, 1997.

[70] 藤泽和范, 张玉玲. 雪崩对策的未来展望. 水土保持科技情报, 1999(3): 62-63.

[71] Mears A I. Snow-avalanche hazard analysis for land use planning and engineering. Denver: Colorado Geological Survey, Dept. of Natural Resources, 1992.

[72] 张永华, 刘健, 张永忠. 新疆山区公路雪崩灾害防治试验工程效益分析. 交通标准化, 2010, 214/216(2-3): 195-199.

[73] 尹衍雨, 王静爱, 雷永登, 等. 适应自然灾害的研究方法进展. 地理科学进展. 2012, 31(7): 953-961.

[74] 薛晔, 陈报章, 黄崇福, 等. 多灾种综合风险评估软层次模型. 地理科学进展, 2012, 31(3): 353-360.

## A Review of the Progresses of Avalanche Hazards Research

WANG Shijin, REN Jiawen

(State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** With the global warming, the risk of cryospheric avalanche hazards has been gradually increasing, and receives a great deal of attention from the public. There has been significant progress in avalanche research in the fields such as: (1) mechanism of avalanche formation; (2) avalanche path; (3) dynamic simulation; (4) risk assessment and hazard zoning; (5) forecasting and prevention of avalanche hazards. Avalanche research has gone through the changes: (1) from field survey only to combination of field survey and remote sensing; (2) from qualitative and semi-quantitative to quantitative; (3) from empirical estimation to dynamic simulation; (4) from study of avalanche formation to avalanche risk assessment, adaptation and mitigation in the hazardous areas. However, previous studies put more focus on the mechanism of avalanche formation which involves weather, snowpack structure, terrain, etc., and relatively less focus on the vulnerability, exposure, adaptation measures in the hazardous areas. Only when the avalanche initiation areas and the hazardous areas are taken together under a systematic investigation, through early warning, prediction and forecasting, can the hazardous areas be protected against avalanche disaster and the loss of human life and property in the areas be prevented or minimized.

**Key words:** avalanches; hazards; overview

本文引用格式:

王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1529-1536.