

雪崩-冲击气浪潜在启动区识别与致灾强度预测

庄宇^{1,2}, 陈仁朋^{1,2}, 高杨^{3*}, 王彦兵⁴, 朱姝⁴, Perry Bartelt⁵

(1. 湖南大学土木工程学院, 中国 长沙 410082; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 中国 长沙 410082; 3. 中国地质科学院地质力学研究所, 中国 北京, 100081; 4. 国网经济技术研究院有限公司, 中国 北京 102209; 5. 瑞士联邦积雪与雪崩研究所, 瑞士 达沃斯, 7260)

摘要: 随着西部大开发战略推进和国家重大工程的建设运营需求, 雪崩因其超强流动性和巨大危害性成为了高寒山区地质灾害防控的突出问题。准确识别雪崩潜在启动区并开展定量致灾强度预测, 是提升防灾减灾效能的核心需求。本文建立了基于多因子地形与雪层特征约束的雪崩潜在启动区识别方法, 并结合 RAMMS::Extended 深度平均动力学模型, 构建了“启动区识别-动力学模拟-风险区划”的雪崩致灾强度预测技术体系。该启动区识别方法在地形地貌和植被特征分析基础上, 额外融入了雪层断裂效应的尺寸约束, 可实现复杂山体条件下潜在雪崩启动区自动化识别; 动力学模型量化了坡面积雪铲刮裹挟、雪水相变热融减阻与气浪生成传播等关键物理过程, 可高效准确地模拟雪崩运动致灾全过程。以瑞士达沃斯 Braemabuel 与 Salezer 地区雪崩灾害为例开展分析, 识别预测的潜在启动区特征和雪崩致灾范围与实际情况高度吻合, 验证了模型有效性。本文方法区域适应性强, 可迁移至数据匮乏的高山区域, 实现大范围雪崩灾害快速风险评价, 为藏东南等雪崩高发区的灾害预测与风险防控提供理论和技术支撑。

关键词: 雪崩; 潜在启动区识别; 动力学分析; 深度平均模型; 致灾强度预测

中图分类号: P954

收稿日期: 2026-1-30

Automated identification of potential avalanche release areas and quantitative risk assessment of snow avalanche-air blasts

Yu Zhuang^{1,2}, Renpeng Chen^{1,2}, Yang Gao^{3*}, Yanbing Wang⁴, Shu Zhu⁴, Perry Bartelt⁵

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Institute of Geo-Mechanics, Chinese Academy of Geo-Sciences, Beijing, 100081; 4. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing, 102209, China; 5. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, Davos Dorf 7260, Switzerland)

Abstract: Snow avalanches pose a major hazard in high-mountain regions due to their high mobility and destructive potential, yet reliable identification of potential release areas (PRAs) and quantitative risk assessment remain challenging, particularly in data-scarce environments. Here, we present an integrated avalanche risk assessment framework that couples automated PRA identification with the depth-averaged dynamic model RAMMS::Extended. The PRA identification approach is based on multi-factor terrain constraints and explicitly incorporates snow slab fracture scaling, enabling robust delineation of release areas under complex topographic and vegetation conditions. The dynamic model further represents key physical processes governing avalanche motion, including snow entrainment, meltwater-induced friction reduction, and air-blast propagation, allowing efficient simulation of avalanche evolution. The framework is applied to two documented avalanche events in the Braemabuel and Salezer areas near Davos, Switzerland. The identified release areas and simulated runout distances agree well with observations, demonstrating the validity of the proposed approach. Owing to its low data requirements and strong regional transferability, the method is well suited for rapid, large-scale avalanche risk assessment in high-mountain regions.

Key words: Snow avalanche; potential avalanche release identification; dynamic analysis; depth-averaged model; risk assessment

基金项目, 国家重点研发计划项目课题(2025YFF1704202), 国家电网有限公司科技项目(52200025000L-268-XN)

作者简介: 庄宇(1996), 男, 助理教授, 博士。主要从事地质灾害防灾减灾方面的研究。zhuangyu@hnu.edu.cn, <https://orcid.org/0009-0003-9390-9386>

通讯作者: 高杨(1989), 男, 研究员, 博士。主要从事地质灾害防灾减灾方面的研究。737263992@qq.com

0 引言

雪崩是高寒山区最为常见的地质灾害之一，以超高流动性和巨大危害性闻名，一旦发生，极易对交通干线、输电走廊及沿线基础设施造成严重威胁(Schweizer et al., 2003; Eckert et al., 2024)。近年来，受全球气候变化影响，我国藏东南等高海拔地区降雪强度和雪崩灾害发生频率呈上升态势，雪崩已成为制约高寒山区工程建设和安全运营的重要因素(高杨等, 2017; 沈丹祎等, 2026)。

明确雪崩空间分布特征是开展风险评价的基础。国内现有研究多集中于区域尺度的易发性分析，基于坡度、高程、坡向等因子，结合经验权重、机器学习或统计学习方法，对研究区进行易发性分级(文洪等, 2021; 程秋连等, 2024; 张平等, 2024)。这类方法在宏观层面能反映雪崩活动的空间差异性，对区域风险认知具有一定参考价值。然而，其研究对象主要针对易发区域本身，而非具体雪崩事件，分析结果多以连续分布的高易发区形式呈现，难以进一步明确潜在雪崩隐患的实际起动位置和可能规模。

从致灾强度预测和防灾减灾角度看，雪崩的发生具有显著的局部性和离散性特征，其起动往往对应于特定坡段或局部地形单元，而非整片坡面(Bühler et al., 2013; Schweizer et al., 2021)。为满足高寒山区工程防灾的实际需求，关键问题在于准确识别雪崩潜在隐患的具体位置及其空间尺度。传统易发性分析方法难以从大范围易发区中提取具有明确物理意义的雪崩起动单元，限制了其在后续雪崩动力模拟与定量风险评估中的应用。当前，国内针对雪崩潜在启动区(potential avalanche release, PAR)识别的研究和技术方法仍十分欠缺，多通过光学遥感影像和泥石流汇水区目视解译经验，手动勾绘雪崩潜在启动区。少数学者采用瑞士联邦积雪与雪崩研究所(SLF 研究所)提出的雪崩潜在启动区识别方法(Bühler et al., 2013, 2018; 田旭文等, 2026)。然而，现有雪崩潜在启动区识别方法均基于山体地形地貌特征，忽略了雪层断裂特性，导致在相对均匀地形坡度上，常识别出远大于实际情况的雪崩启动区。

此外，仅依赖空间分布特征分析难以支撑雪崩灾害的定量致灾强度预测，有必要进一步引入动力学分析，以明确潜在雪崩触发后可能产生的运动范围与冲击破坏力(Bartelt et al., 2011, 2012)。近年来，物质点法、离散元法等三维数值计算方法逐渐应用于雪崩运动模拟(Gissler et al., 2020; Gaume et al., 2019, 2023; Kyburz et al., 2025)。然而，雪崩特有的

摩擦生热-雪水相变和冲击气浪生成致灾等关键物理过程尚未被纳入雪崩三维数值计算框架中，物理模型缺陷及高计算耗时使得上述方法现阶段难以准确预测雪崩的动力学特征，也因此限制了其在区域尺度雪崩致灾强度预测中的实际应用。相比之下，基于深度平均理论的雪崩动力学模型通过对竖向特征均值化处理，能在保证物理合理性的同时显著提高计算效率，仍是当前雪崩运动模拟的主要技术手段(强小文等, 2025; Issler, 2014; Glaus et al., 2025; Gao et al., 2026)。其中，以 RAMMS::Extended 为代表的深度平均雪崩动力学模型已综合考虑坡面积雪裹挟、雪水相变热融减阻、前缘飞溅、植被阻碍与气浪生成等关键物理过程，在全球雪崩风险评价与工程防灾实践中得到了广泛应用(Christen et al., 2010; Zhuang et al., 2023, 2024a)。

针对当前雪崩风险评价领域存在的不足和技术需求，本文建立了一种基于多因子地形和雪层特征约束的雪崩潜在启动区识别方法，可基于 DEM 数据及雪层信息自动化识别雪崩潜在启动区域。在此基础上，结合 RAMMS::Extended 深度平均动力学模型，实现大范围雪崩致灾强度预测。以瑞士达沃斯(Davos)地区两处典型雪崩灾害为例开展分析，验证模型可靠性。成果将为我国藏东南等地区雪崩及冲击气浪灾害预测与风险防控提供理论与技术支撑。

1 雪崩灾害致灾强度预测技术方法

1.1 雪崩潜在启动区识别方法

(1) 山体地形地貌与植被特征

不同于常规崩滑流地质灾害，雪崩受山体地质结构影响相对较弱，其诱发主要与山体地形地貌和积雪特性相关(Schweizer et al., 2003)。因此，本文将基于高精度数字高程模型(DEM 模型)，提取雪崩诱发相关的地形地貌与植被因子开展分析。

坡度由 DEM 一阶导数计算，反映坡面倾斜度，是雪崩起动的首要控制因子(Schweizer et al., 2008)。现有研究表明，雪崩通常起动的于 30°-50° 坡面。平坦地形坡度低于积雪天然休止角，积雪不易发生滑动；陡峭地形环境下难以聚集足量积雪形成雪崩。为考虑雪崩潜在启动区的连续性，本文构建了强-弱阈值评判体系。将强约束阈值区域直接标记为潜在启动区，与其联通的弱约束阈值区将同样被并入。

曲率由 DEM 二阶导数计算，反映地表凸起与凹陷程度。本文采用平面曲率开展分析，设置曲率

上限阈值, 识别并剔除强凸起地形单元(如山脊等), 将其排除于潜在启动区(Bühler et al., 2013)。

粗糙度用以描述地表起伏程度。现有研究表明, 具有强烈起伏和不规则特征的地表会严重阻碍积雪向下移动和连续断裂面的形成, 而雪层内部连续的断裂面是诱发大规模雪崩(特别是板状雪崩)的重要因素(Denissova et al., 2024)。

乔木植被作为天然拦挡结构, 在锚固的同时, 可有效降低坡面积雪连续性, 因此, 乔木植被茂密区难以形成大规模雪崩。

(2) 雪层断裂约束的尺寸效应

雪崩多沿雪层内部弱层或雪-岩界面发生, 内部裂纹一经出现会迅速沿坡向扩展, 形成贯通滑面。该过程中雪板冠缘拉应力急剧提升, 迅速达到积雪抗拉强度, 前缘压力骤增, 最终导致雪崩发生(McClung, 1981; 2021)。即便在地形条件相对均一的坡面, 雪板亦会在断裂效应控制下形成多处离散雪崩, 而非单一大范围雪崩。因此, 为避免过度高估雪崩潜在启动区面积, 需引入其断裂特性导致的尺寸约束。依据瑞士联邦积雪与雪崩研究所基于大量现场观测与统计分析得到的经验结果, 雪板特征长度 L 和宽度 B 与断裂深度 D 存在以下经验关系(Bartelt and Christen, 2025):

$$L = 1534D^{0.542} \left(\frac{\rho_s}{\rho_i} \right)^{1.942} \quad (1)$$

$$\frac{B}{L} \approx 1-2 \quad (2)$$

式中: ρ_s 为积雪密度, $\rho_i = 917 \text{ kg/m}^3$ 为冰密度, 沟槽型雪崩 $B/L \approx 1$, 坡面型雪崩 $B/L \approx 2$ 。考虑到区域雪崩特性, 将该公式应用于我国藏东南地区雪崩分析时, 需根据雪崩现场数据进行修正。

其中, 断裂深度与雪层厚度相关, 而积雪并非均匀分布于整片山体, 其厚度和密度与高程、坡度等因子紧密关联。本文在坡面积雪分布模拟中, 综合考虑了高程梯度修正、坡度修正及雪层自身沉降修正。

选取基准高程及该高程处对应雪深, 根据区域经验或气象资料确定单位高程雪深变化率, 并进行坡度修正。坡面任意一点雪深经高程和坡度修正后为(Bartelt and Christen, 2025):

$$h = [h_0 + G \cdot (z - z_0)] \cdot \frac{0.291}{\sin(S) - 0.202 \cos(S)} \quad (3)$$

式中: z_0 为基准高程, h_0 为基准雪深, G 为单位高程雪深变化率, 可通过测量同一区域相似地形条件下(坡度、迎/背风坡)不同厚度处雪深数据计算得

到, S 为坡度。

新雪降至坡面后, 在自身重力及风荷载等作用下不断沉降压实。本文采用 Kojima (1967) 沉降模型, 描述雪层密度随时间增长及对应雪深减小的演化过程:

$$\frac{1}{\rho(t)} \frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_c(\rho(t), T)} \quad (4)$$

$$\rho_0 h = \rho(t) h(t) \quad (5)$$

式中: ρ_0 为初始新雪密度, $\rho(t)$ 和 $h(t)$ 为沉降变形作用下不同时刻积雪密度和厚度, σ 为法向应力, η_c 为沉降变形系数, 与雪密度和温度 T 相关。通过模拟不同时段坡面积雪密度和厚度, 结合其断裂特性控制的尺寸效应, 帮助雪崩潜在启动区识别与划分。

(3) 潜在启动区识别与划分

以 DEM 为基础, 结合植被覆盖信息剔除乔木植被发育区域。由于乔木对积雪具有拦截、锚固和消能作用, 不利于雪崩启动, 因此将其作为潜在启动区识别的先验排除条件。在此基础上, 进一步提取坡度、曲率和地形粗糙度等关键地形因子, 并依据相应阈值对地形单元进行筛选。其中, 坡度用于约束雪崩启动所需的基本坡面条件, 曲率用于识别山脊等不利于积雪持续聚集和破坏扩展的部位, 粗糙度用于排除裸露岩壁、强烈起伏地表等难以形成连续雪层的区域。经过上述约束后, 可初步获得满足雪崩孕育地形条件的雪崩易发区域。

考虑到实际雪崩启动区往往并非连续整体, 而是受局部地形结构控制呈现多个相对独立的启动单元, 因此需要对初步识别出的雪崩易发区进行空间分割。基于坡向变化特征与山脊结构识别内部可能的分界线; 当易发区域内部存在明显的坡向突变带, 或发育有对积雪连续性和应力传递具有阻隔作用的山脊、微地形脊线时, 将其视为雪崩启动区的天然切割边界。

上述切割所得单元在部分区域仍可能沿坡向连续展布, 形成与实际雪崩形态不符的条带状区域, 或者在地形条件较为均一的宽阔坡面形成面积过大的启动区。为此, 引入积雪断裂力学表征的尺寸约束条件, 对候选启动单元进行细分。该约束反映了雪层破坏在起裂、扩展与整体贯通过程中所受的几何尺度限制, 可用于抑制不符合实际破坏机制的过长、过宽或超大面积单元, 从而使识别结果更贴近真实雪崩启动区的形态特征与规模分布。

最后, 对细分后的结果进行面积筛选, 剔除零

散分布、面积过小且缺乏实际失稳意义的微小斑块，最终获得雪崩潜在启动区。识别结果既保留了地形控制下雪崩启动的空间异质性，又满足后续动力学模拟的输入需求，可直接用于雪崩运动过程模拟及致灾强度分析。上述潜在启动区识别算法服务于未发生的潜在雪崩预测，而非对历史案例的重构。

1.2 雪崩动力学模型-RAMMS::Extended

采用本团队研发的 RAMMS::Extended 雪崩分析软件开展动力学分析(Christen et al., 2010; Bartelt et al., 2016; Zhuang et al., 2023; 庄宇等, 2025)。该模型基于双层流和深度平均理论，考虑了坡面积雪铲刮裹挟、多源生热-雪水相变、前缘撞击飞溅、植被阻碍和气浪生成等关键物理过程，可同时模拟雪崩和产生冲击气浪的关键动力学参数。

模型中雪崩核心采用质量、动量、波动能量和热能守恒方程组进行表征，冲击气浪采用质量、动量和湍流能量方程组描述。相较于传统深度平均模型，考虑了雪崩颗粒随机弥散运动导致的高度、密度和流态变化，采用修正的 Voellmy-Salm 模型计算雪崩运动阻力 S_ϕ (Zhuang et al., 2025):

$$S_\phi = \mu_\phi (R_\phi, T_\phi, m_\phi) N_\phi + \rho_\phi g \frac{u_\phi^2}{\xi_\phi (\rho_\phi, T_\phi, w_\phi)} \tag{6}$$

雪崩运动阻力由控制运动距离的库仑摩擦项和控制运动速度的湍流摩擦项两部分构成。其中， N_ϕ 为作用于坡面的法向应力， ρ_ϕ ， g 为雪崩流动密度和重力加速度， μ_ϕ 为库仑摩擦系数， ξ_ϕ 为湍流摩擦系数。 μ_ϕ ， ξ_ϕ 均为雪崩波动能量、温度和含水率的函数。即雪崩在运动过程中，其摩擦特性会随自身流动状态和融水产生而自适应变化。

因此，仅需输入对应于积雪物理力学性质的初始参数，可自动化模拟不同地形、不同场景下雪崩及冲击气浪的运动致灾过程，大幅降低模型参数选取的不确定性，提高不同场景下雪崩运动预测结果可靠性。目前，该数值算法已在全球雪崩运动模拟和风险评价中得到了广泛应用。限于文章篇幅，本文不做赘述，模型详细介绍可见 Zhuang et al., (2023, 2024a)。数值模拟采用的主要参数见表 1。

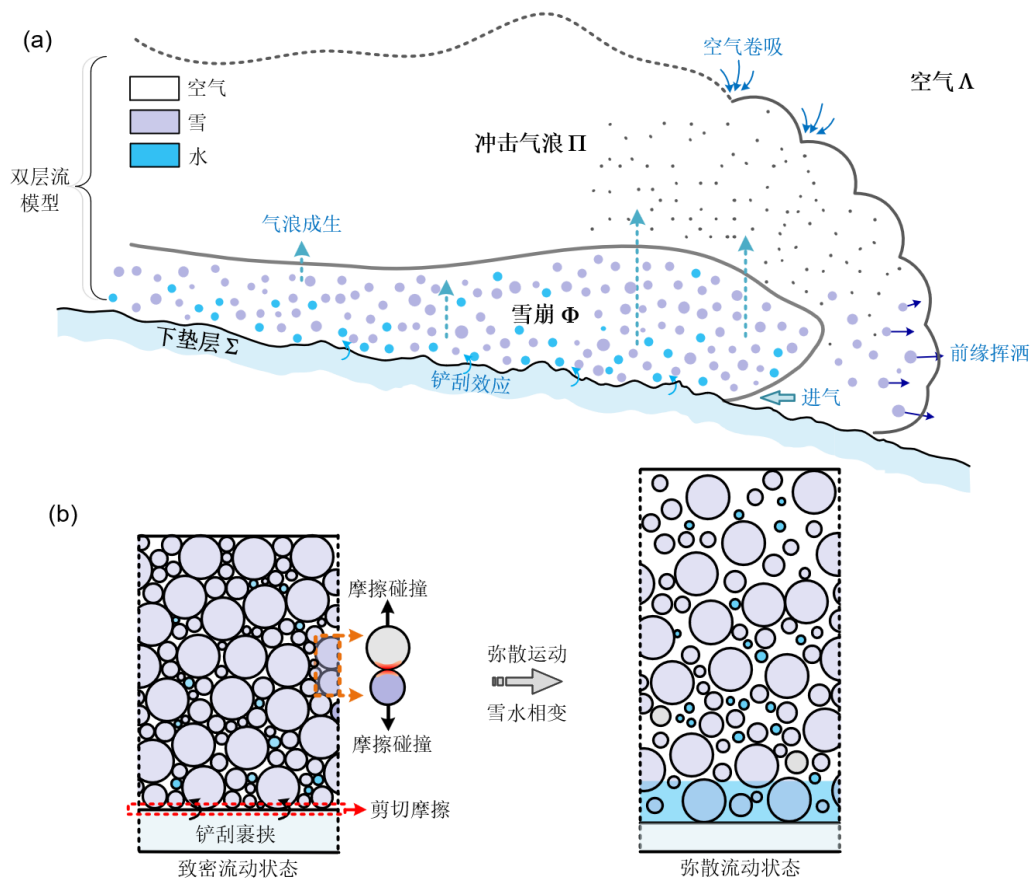


图 1 RAMMS::Extended 雪崩动力学模型示意图

Figure 1. Schematic diagram of the RAMMS::Extended avalanche dynamic model

表 1 雪崩-冲击气浪数值模拟主要参数

Table 1 Main parameters for the avalanche-air blast modeling

参数	数值
Coulomb 摩擦系数	0.42

湍流摩擦系数	1900
含水率	0
冲击气浪阻力系数	4
空气卷吸系数	2

1.3 雪崩案例概况

为验证雪崩潜在启动区识别算法与致灾强度预测结果可靠性，需切实可靠的雪崩数据，包括雪崩启动位置、面积、雪层厚度和堆积范围。尽管我国藏东南地区为雪崩灾害高发区，每年冬季和春季诱发了大量雪崩。该地区雪崩研究刚刚起步，现阶段缺乏详细的现场调查资料。现有研究通过现场调查和遥感解译，分析了雪崩的运动路径与堆积范围，但具有明确源区特征的雪崩灾害仍十分罕见。因此，本文采用瑞士达沃斯地区的 Braemabuel 和 Salezer 两处雪崩灾害为例开展分析。上述雪崩发生后，瑞士联邦积雪与雪崩研究所的研究人员迅速前往现场开展了详细的调查与测量，获取了源区雪层厚度、面积及雪崩堆积范围，可为本文提出模型算法的验证提供宝贵的数据支撑。Braemabuel 和 Salezer 雪崩基本概况如下：

(1) Braemabuel 雪崩

2019 年 1 月 15 日，瑞士达沃斯 Braemabuel 地区发生雪崩灾害(N46°46'51.3", E9°51'24.9")。雪崩源区投影面积 11925 m²，积雪厚度为 1.5 m，厚度梯度约 0.03 m/100 m(海拔每升高 100 m，雪层平均厚度升高 0.03 m)。灾害发生后，2.60×10⁴ m³ 的积雪自海拔 2200 m 处倾泻而下，以干(粉)雪崩的形式远程运动，沿途铲刮裹挟坡面松散积雪，最终穿越河流并掩埋道路，运动距离达 1.1km，堆积体积达 4×10⁴ m³。Braemabuel 雪崩航摄影像如图 2a 所示。

(2) Salezer 雪崩

Salezer 雪崩同样发生于 2019 年 1 月 15 日(N46°49'27.2", E9°50'5.2")。雪崩源区位于海拔 2400 m a.s.l.处，投影面积 4.17×10⁴m²，雪层厚度达 1.5 m。灾害发生后，约 6.380×10⁴ m³ 的积雪离开源区，沿途高速运动并产生了强烈的冲击气浪。雪崩核心停积于山脚并淹没公路，运动距离达 2 km，最终堆积体积达 9.50×10⁴ m³。Salezer 雪崩航摄影像如图 2b 所示。

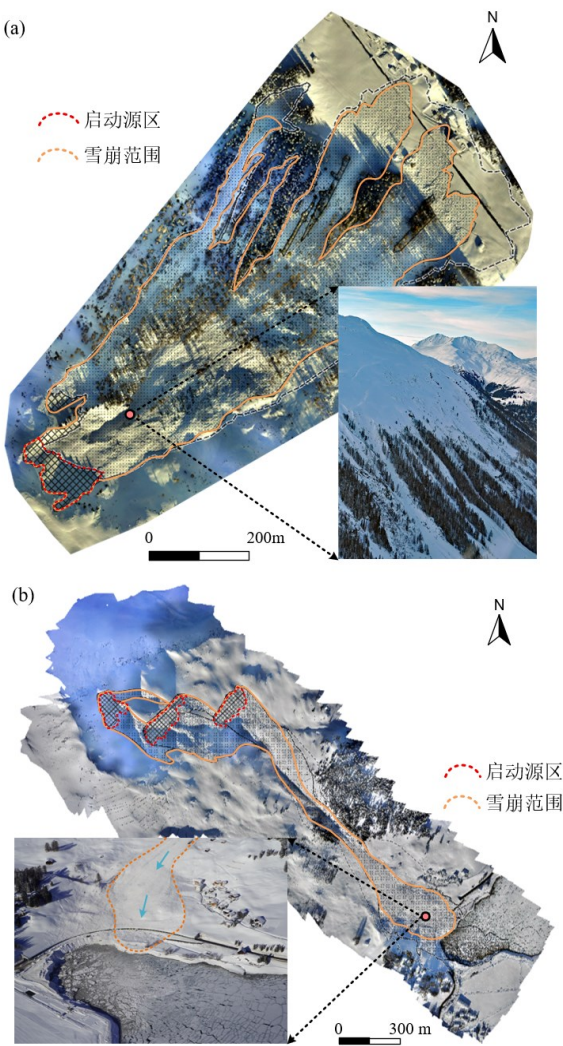


图 2 典型雪崩灾害实例概况
(a) Braemabuel 雪崩；(b) Salezer 雪崩
Figure 2. Overview of snow avalanche events:
(a) the Braemabuel avalanche; (b) the Salezer avalanche.

2 结果分析

2.1 雪崩潜在启动区识别结果

Braemabuel 与 Salezer 研究区的坡度、地表粗糙度及曲率等关键地形因子计算结果如图 3 所示。此外，DEM 分辨率对识别精度有重要影响，现有研究表明，低分辨率 DEM 易平滑关键地形特征，导致潜在启动区识别精度不足；超高分辨率 DEM(<2m)则会引入大量地表噪声，造成地形因子计算数值剧烈波动(Bühler et al., 2013)。综合现有研究成果与雪崩启动区识别需求，5-10 m 分辨率 DEM 为雪崩启动区识别的建议精度范围，该区间可有效规避低精度与超高精度 DEM 的局限性。因此，本文采用 5m 分辨率 DEM 开展分析。

针对 Braemabuel 与 Salezer 两处雪崩研究区，结合当地雪崩研究经验(Bühler et al., 2013)，设定坡

度强约束阈值为 30° - 50° ，弱约束阈值为 25° - 55° ，曲率阈值为 7，粗糙度阈值为 0.05，积雪厚度和密度分布依据现场测量结果及公式 3-5 计算得到。在上述参数体系下，基于多因子地形和雪层特征约束的雪崩潜在启动区识别结果如图 4 所示。Braemabuel 地区共识别雪崩潜在启动区 107 处，平均单区面积 12440 m^2 ，启动区平均坡度为 34.8° ；Salezer 地区共识别雪崩潜在启动区 80 处，平均单区面积 10636 m^2 ，启动区平均坡度为 33.7° 。两处区域雪崩启动区

平均坡度均位于 30° - 50° 的坡度强约束区间内，与雪崩启动的优势地形条件高度契合，表现出良好的物理一致性。

2.2 雪层断裂效应的影响

为进一步分析雪层断裂效应的影响，本文在相同 DEM 精度与地形参数阈值条件下，对比分析了未引入雪层断裂效应约束时的潜在启动区识别结果。

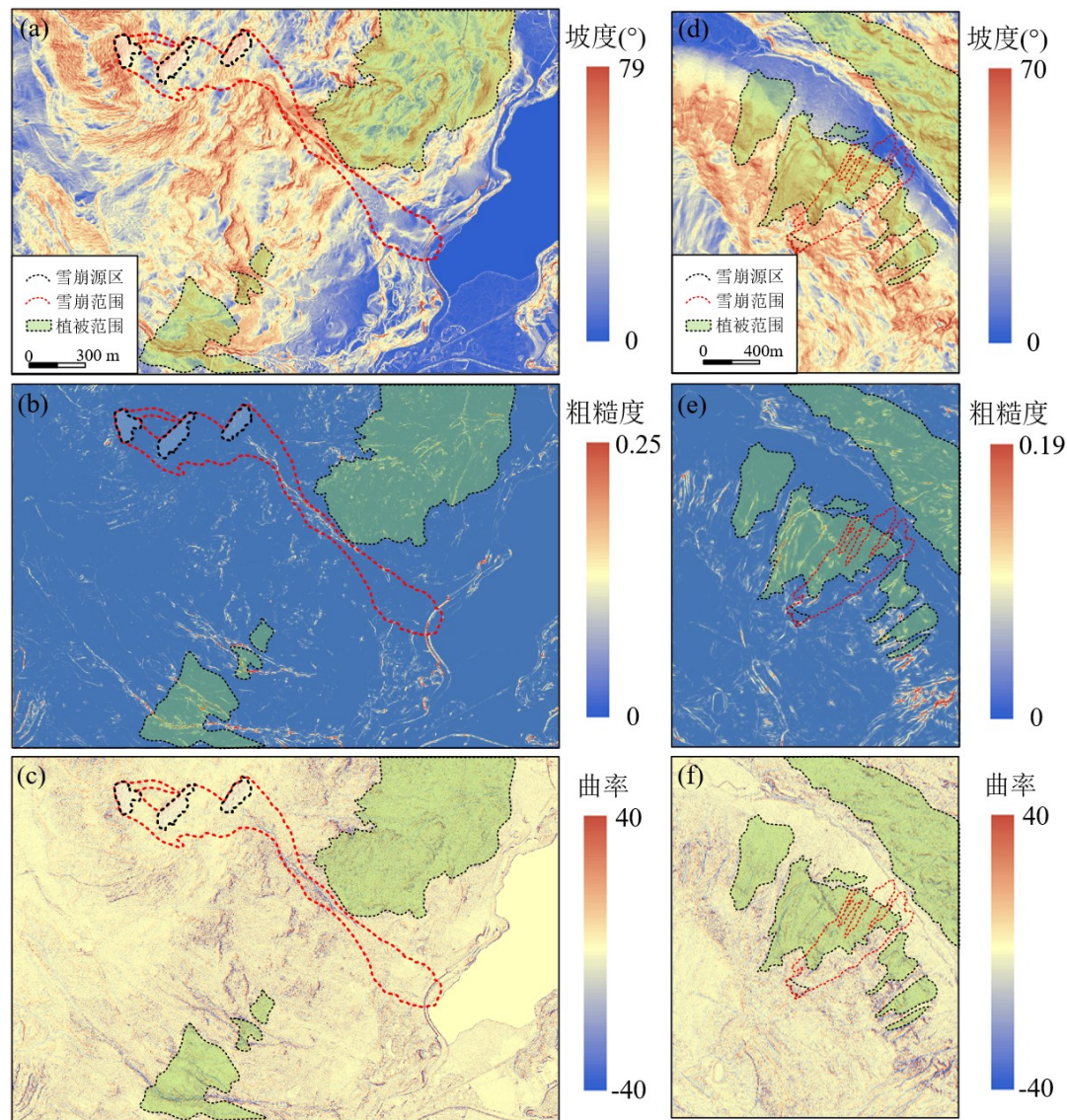


图 3 Braemabuel 与 Salezer 研究区关键地形因子
Figure 3. Key topographic factors of the Braemabuel and Salezer study areas.

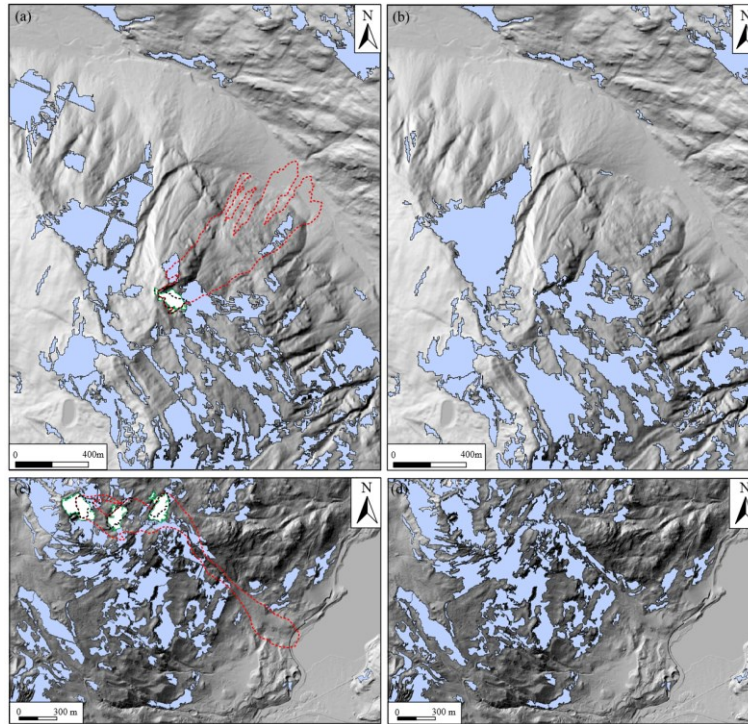


图 4 潜在雪崩启动区识别结果 (a)和(c)考虑雪层断裂影响；(b)和(d)忽略雪层断裂影响

Figure 4. Results of potential snow avalanche release area identification with and without snow slab fracture effects: (a, c) with fracture effects; (b, d) without fracture effects.

对比结果表明，在地形条件相对均一、坡度连续分布且缺乏明显山脊或地形突变结构的区域，若不考虑雪板断裂效应，识别算法倾向于将满足阈值条件的地形单元整体判定为连续雪崩启动区。该现象在 Braemabuel 与 Salezer 两处研究区的相对均质坡面上均有体现，表现为大范围连通、空间尺度明显超出常规雪崩启动区的潜在启动单元(图 4b 和 d)。该结果不符合雪层断裂物理机制，大量观测与实验研究表明，板状雪崩启动过程受雪层内部弱层及雪板断裂特性的强烈控制。雪板自身强度较低，其断裂长度与宽度并非无限扩展，而是受雪层厚度及力学强度等因素共同约束。因此，即便在地形条件高度一致的坡面，实际雪崩启动区也往往呈现为多个尺度受限、相互独立的启动单元，而非整体同步失稳。引入雪板断裂效应后，潜在启动区在均一地形条件下被有效切割为若干具有合理尺度的独立单元，显著抑制了不切实际的大面积连续雪崩启动区的产生，使启动区数量、单区面积及空间分布特征更符合实际雪崩发育规律。

2.3 模型验证

为验证雪崩潜在启动区识别精度及雪崩致灾强度预测结果的可靠性，以启动区面积重叠率和运动距离吻合度为指标，将现场调查确定的实际雪崩特征与识别结果中的最优匹配潜在启动区进行定量对比。此处“最优匹配”是指：对每个实际雪崩启动

区，在模型识别得到的多个候选潜在启动区中，选取与其空间分布最为接近的一个候选区作为匹配对象，并据此开展重叠面积及识别精度评价。针对 Braemabuel 雪崩，模型识别的最优匹配潜在启动区(位置见图 4a)面积为 12005 m²，与实际雪崩启动区的重叠面积达 8375 m²。定义识别面积重叠率 $D = 2 \times \text{重叠面积} / (\text{真实面积} + \text{识别面积})$ ，本案例识别面积重叠率为 70.0%；雪崩运动演化模拟结果表明，该雪崩自高位启动后，在重力作用下势能快速转化为动能，沿坡面加速运动，模拟运动距离达 1.0km，与现场调查的实际运动距离吻合度较高(实际为 1.1km)，致灾范围预测准确率达 90%(图 5a)。

Salezer 雪崩对比结果如图 4c 和 5b 所示，最优匹配潜在启动区面积为 49032 m²，与实际启动区重叠面积为 31436 m²，准确率达 69.3%。对应的运动演化模拟结果表明，雪崩运动距离达 2.1km。尽管流通路径右侧存在少量雪体于沟道外运动，总体运动距离及影响范围与灾害实际情况具有较好一致性。

综上，本文提出的多因子耦合雪崩潜在启动区识别算法及雪崩运动演化动力学模型，可实现高寒山区雪崩潜在启动区的有效识别与致灾范围的定量预测，为区域雪崩风险评价与灾害防控提供可靠的技术支撑与理论依据。

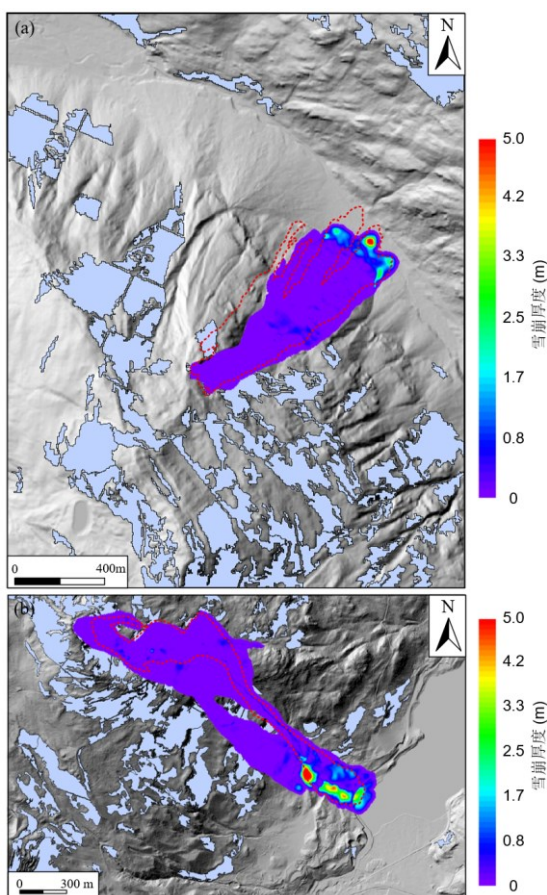


图5 最优匹配潜在启动区场景下雪崩致灾范围预测
Figure 5. Predicted avalanche impact area under the best-matching potential release area scenario.

2.4 雪崩风险区划

根据国际雪崩风险评价相关标准,采用雪崩冲击破坏力开展风险区划。冲击力为0kPa,不受雪崩影响时,为无风险区;冲击力小于3kPa为低风险区,致灾主体为雪崩诱发的冲击气浪,可造成植被破坏、房屋薄弱区域(门、窗等)损坏、威胁道路车辆和人员安全;冲击力3-30kPa为中风险区,可造成房屋及基础设施结构损坏;冲击力超30kPa,此时雪崩已具有较高的破坏性,波及范围为高风险区。

本文以 Braemabuel 研究区为例,对识别的所有雪崩潜在启动区开展批量数值仿真,模拟得到的雪崩冲击压力分布与风险区划如图6所示。计算结果表明:雪崩风险区呈现显著的空间分异特征,高风险区集中于启动区下方的陡坡汇流及沟谷通道,对应于雪崩高速流通区,冲击压力普遍超30kPa,最大冲击压力超300kPa,该冲击力已足以对输电塔等基础设施造成严重破坏。中风险区主要环绕高风险区呈带状分布,位于雪崩流动边缘及缓坡堆积处,冲击压力介于3-30kPa间。该区域雪崩运动速度较缓、破坏力较弱,但仍可对影响范围内的房屋、输电基础设施和道路造成威胁。低风险区主要位于雪

崩堆积前缘,为缓慢流动雪崩和高速冲击气浪影响区。雪崩诱发的冲击气浪是该区域主要致灾体,尽管其冲击力远小于雪崩核心,考虑其超远运动距离和超大影响高度,当研究区存在输电导线、输电塔等高耸结构时,需考虑其可能造成的危害。

3 讨论

3.1 雪崩潜在启动区识别

本文提出了一种基于多因子地形和雪层特征约束的雪崩潜在启动区识别算法,并与RAMMS::Extended雪崩动力学模型结合,实现了大范围潜在雪崩致灾强度预测。相较于国际上现有的雪崩启动区识别算法(Bühler et al., 2013, 2018),该方法额外融入了雪层断裂特性的影响,避免了与实际不符的长条形雪崩和均一地形下异常规模雪崩的出现,使得模型具有更强的物理意义,预测结果更贴合实际。

除物理合理性外,本文方法在实际应用中的便捷性与适用性亦具有明显优势。该雪崩潜在启动区识别算法对输入数据的依赖程度较低,仅需数字高程模型(DEM)和简易积雪信息即可开展预测,不依赖长期雪崩编录资料。这一特点使其在数据匮乏或监测条件受限的高山区域,尤其在大范围工程规划或初步风险筛选阶段,具有良好的可操作性。

适用性方面,各地形地貌因子均以阈值形式引入,包括坡度、曲率、地表粗糙度及植被覆盖等参数。针对不同气候、积雪类型及地形条件,仅需对相关阈值进行合理调整,即可实现方法在不同研究区之间的快速迁移与应用,而无需对算法框架本身进行重构。这种基于阈值调控的设计,使方法在保持物理约束一致性的同时,具备较强的区域适应能力。此外,该方法还可用于不同规模和不同重现期条件下的潜在雪崩启动情景。例如,在代表极端积雪或罕遇工况时可放宽坡度下限或提高允许的启动区尺度,以模拟大规模、低概率雪崩事件;而在代表常遇或中小规模雪崩的情景分析中,则可采用更为严格的地形与尺度约束。通过这种方式,能在不引入额外参数的前提下,构建多种雪崩启动区方案,为不同重现期雪崩的动力学模拟与风险评估提供一致且可控的输入条件。

3.2 雪崩运动模拟中数值模型选择

针对雪崩等长距离运动灾害体,数值计算效率始终是工程防灾关注的重点。上世纪90年代,国内外学者面临着三维数值计算效率无法满足实际工程需求的现实问题, Savarage and Hutter(1989)顺势提

出了深度平均的数值计算思路, 将滑体视作浅水运动(竖向流深远小于沿坡向长度), 可大幅提高计算效率。现如今, 随着计算机算力的发展, 物质点法(MPM)、光滑粒子流(SPH)等三维数值算法开始得到愈发广泛的应用(Gaume et al., 2019, 2023; Jafari Nodoushan et al., 2024)。然而, 三维模型的计算精度在很大程度上依赖于网格分辨率或粒子数量, 在

工程尺度问题中, 受计算成本与时间约束, 模型往往难以充分细化, 其计算结果的稳定性与可靠性仍存在一定限制。即便在当前计算条件显著改善的背景下, 大规模地质灾害的全三维精细化模拟与高计算效率间仍存在难以调和的矛盾。这一矛盾在雪崩运动模拟中尤为突出, 工程实践中往往需要在有限时间内完成大量潜在雪崩的数值计算。

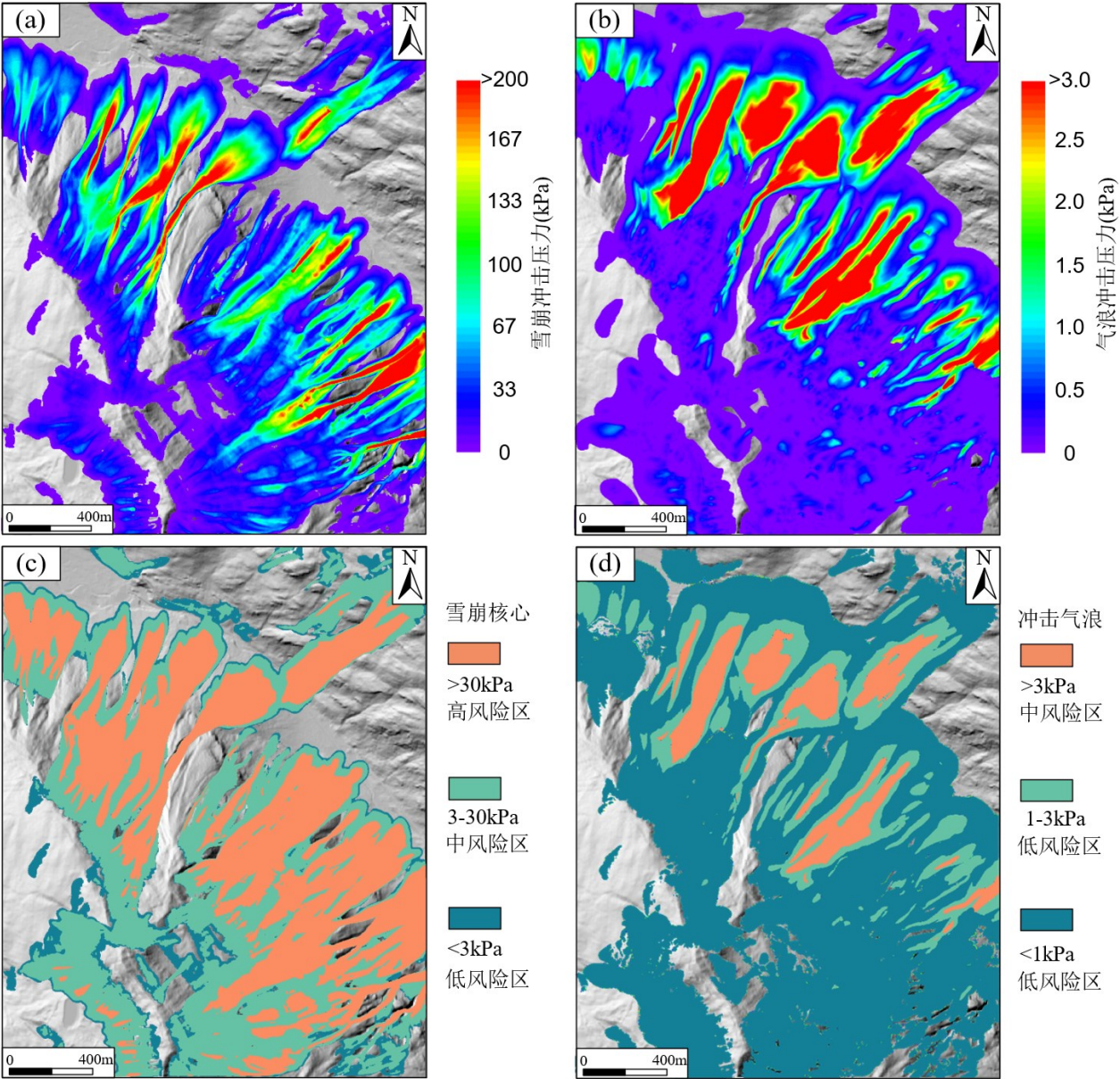


图 6 Braemabuel 研究区雪崩-冲击气浪致灾强度预测
(a)-(b)雪崩核心与冲击气浪压力; (c)-(d)雪崩核心与冲击气浪风险区划

Figure 6. Hazard prediction of the avalanche and generated air blasts at the Braemabuel area.

(a-b) avalanche core and air blast impact pressure; (c-d) avalanche core and air blast risk zoning.

除计算效率外, 模型对关键物理过程的刻画能力同样直接影响计算结果的可信度。针对雪崩而言, 坡面松散积雪是其重要物源, 运动过程中铲刮侵蚀效应带来的体积和质量增量常常数倍于初始启动体积(类似于滚雪球)(Sovilla et al., 2007; Bartelt et al., 2018), 而这一过程又与坡面积雪空间分布密切相

关; 同时, 雪作为一种特殊的物质材料, 其在运动过程中会受热融化, 温度变化与融水产生对雪崩流动性和影响范围有重要影响, 尤其在初始温度接近融点时(如春季湿雪崩)更为显著(Vera Valero et al., 2018; Zhuang et al., 2024b); 此外, 冲击气浪作为雪崩常见的伴生灾害, 广泛存在于干雪崩及干-湿混合

雪崩中,其不仅自身具有极强的冲击破坏力,也会通过质量与动量传递影响雪崩核心的运动特征(Bartelt et al., 2016; Zhuang et al., 2023, 2024a)。上述过程构成了雪崩区别于常规岩土质滑坡的若干关键物理特征,对其流动演化与致灾强度具有重要影响。然而,现有物质点法(MPM)等三维数值方法多侧重于材料本构关系的改进(如 Gaume et al., 2019, 2023),对上述关键物理过程描述存在缺失,三维计算带来的精度增量可能难以弥补其物理缺陷导致的精度不足。

另一方面,部分研究尝试从颗粒尺度出发,描述雪崩颗粒混合物在复杂地形条件下的三维运动过程(Steinkogler et al., 2015; Mead and Cleary, 2015; 高杨等, 2026)。此类方法在分析局部接触行为、颗粒相互作用及细观结构演化方面具有重要研究价值。然而,雪崩运动物质具有极其宽广的粒径尺度分布,从微米毫米级雪屑到米级雪球和雪块,参与运动的颗粒数量无法统计。颗粒的瞬时运动状态对初始条件和边界条件(运动路径)具有高度敏感性,其湍流波动特征更使其整体演化过程具有高度随机性(Sovila et al., 2018)。在此条件下,我们需承认所有的数值计算方法均是对实际灾害体不同程度的简化,对所有颗粒进行完全分辨和逐一追踪在计算上缺乏现实可操作性。正如 Boltzmann 在统计力学中指出,对于此类高度非线性、混沌演化的多体系统,宏观统计意义下的描述是理解其整体动力学行为并实现可预测性的有效途径(Cercignani and Baierlein, 2000; Goldstein, 2001)。雪崩数值模拟的核心目标并非复现单个雪屑、雪球或雪块的运动轨迹,而是在合理简化的前提下,准确刻画其整体运动特征、流动性演化及致灾效应。

基于上述认识,本文在雪崩致灾强度预测这一特定工程任务背景下,采用了一种基于深度平均框架的动力学模型,以兼顾计算效率与工程适用性。在经典深度平均模型基础上,额外补充了竖向运动方程、波动能量守恒和热能守恒方程,并引入双层流理论,实现了对雪崩与冲击气浪的运动演化预测。同时,模型考虑了坡面积雪铲刮裹挟、雪屑融化相变、流态转化、前缘撞击挥洒、植被阻碍效应及气浪生成致灾等过程,可在分钟级计算时间内完成雪崩及其伴生冲击气浪的全过程模拟。以 Braemabuel 雪崩为例,2m 地形精度下单一案例模拟仅需 4min(图 5a);5m 地形精度下,107 处潜在启动区批量计算仅耗时 20min,为雪崩致灾强度预测提供了一种平衡计算效率与物理合理性的建模方案。

3.3 未来展望

本文提出的雪崩潜在启动区识别方法与雪崩动力学模型相结合的技术路线,可推广应用于大范围雪崩潜在隐患的初步风险评价,尤其适用于缺乏长期雪崩编录资料和系统监测数据的高山区域。然而,需客观承认的是,该类分析结果仍存在一定不确定性,其中雪层断裂深度的判定是影响雪崩规模与致灾强度的关键因素之一。

雪层失稳起动力具有突发性和高度不确定性,其破坏位置往往位于雪层内部弱层或雪-岩界面,而非均质雪层内部(Schweizer et al., 2003)。部分研究通过积雪强度估算临界雪厚或起动时的断裂深度(田旭文等, 2026),此类方法在工程实践中较为简便,但通常假设雪层失稳仅受积雪整体强度控制,未考虑弱层的力学特性差异。由于弱层(如深霜层、新老雪层界面等)强度通常远低于覆盖雪层,上述简化假设在实际应用中可能导致断裂深度与雪崩规模的显著偏差。因此,明确雪层结构的时空演化特征,尤其是雪层内部弱层埋深及其强度变化规律,是提升雪崩起动力判识可靠性的关键方向之一。针对雪层结构与稳定性演化问题,以 Snowpack 为代表的雪层结构演化计算模型已在全球范围内得到了广泛应用(Bartelt and Lehning, 2002; Lehning et al., 2002)。然而,雪层物理力学性质的演化与气候条件、地形环境及降雪特征密切相关,具有显著的区域差异性。这些区域特性同时又构成雪层演化模拟的初始与边界条件,使得模型预测结果极大程度依赖于长期且连续可靠的现场监测数据。在监测数据严重缺乏的情况下,雪层演化与断裂深度的精确预测仍面临极大挑战。

需要指出的是,雪崩预测是一个高度复杂、且在国际上公认极具难度的科学问题。在现有技术体系条件下,准确预测单次雪崩的发生时间、具体位置及其规模,仍具有极大的不确定性和现实局限性。基于这一认识,本文并未尝试对单一雪崩事件进行精确预测,而是通过自动化方法在山体尺度上系统识别所有可能的潜在启动区,并结合动力学模拟开展情景化致灾强度预测,从而服务于工程规划和防灾减灾决策。

从工程应用角度看,该启动区自动化识别方法与 RAMMS::Extended 模型的结合,具有良好的实用性与扩展性,可支持批量雪崩的快速模拟与风险评估。随着藏东南等高山地区监测体系的逐步完善,未来在获得长期可靠积雪观测数据的基础上,可进一步发展因地制宜的雪层演化与断裂深度预测模

型，并将其嵌入本文提出的分析框架中(图 7)，逐步降低关键参数的不确定性。同时，模拟得到的雪崩及伴生冲击气浪的动力特征与致灾强度，可进一步与防护工程设计及结构动力响应分析相结合，用于评估输电塔等关键基础设施在雪崩作用下的安全性，为高寒山区雪崩灾害防灾减灾提供技术支撑。

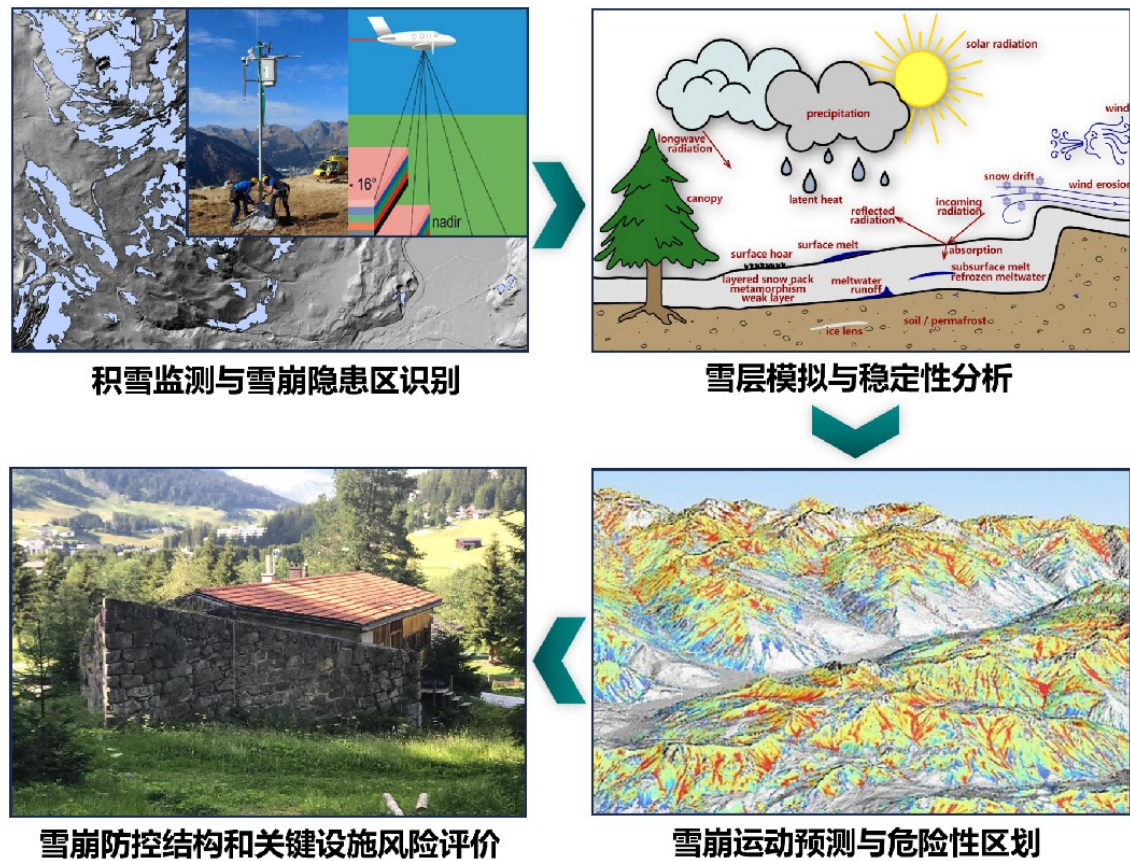


图 7 雪崩识别、预测及防控综合技术路线(部分图片修改自 Bartelt and Lehning, 2002; Bartelt and Christen, 2025)
Figure 7. Integrated technical framework for avalanche hazard identification, prediction, and mitigation

4 结 论

本文针对当前雪崩致灾强度预测中潜在启动区识别方法欠缺、动力学模型物理过程刻画不全面及区域尺度应用受限等问题，建立了基于多因子地形和雪层特征约束的雪崩潜在启动区识别方法，并结合 RAMMS::Extended 深度平均动力学模型，构建了“启动区识别-动力学模拟-风险区划”的完整技术体系，通过瑞士达沃斯地区典型雪崩案例验证了方法的可靠性，主要结论如下：

(1) 提出的多因子耦合雪崩潜在启动区识别方法显著提升了识别精度与物理合理性。通过融入雪层断裂特性的尺寸约束效应，有效避免了均一地形下大面积连续启动区的误判。在 5m 分辨率 DEM 支持下，Braemabuel 和 Salezer 雪崩识别准确率分别达 70.0%和 69.3%。

(2) RAMMS::Extended 深度平均动力学模型在

随着现场监测、灾害调查及历史编目数据的不断积累，可对模型参数和判别阈值进行持续校正与优化，逐步提高评价结果的准确性与区域适用性。随着调查与监测数据的逐步完善，本文方法有望在保持现有技术框架的基础上不断修正和提升，最终更好服务于区域雪崩风险评价与防灾减灾实践。

考虑了雪崩关键物理过程的同时可高效计算雪崩-气浪运动演化过程，为雪崩致灾强度预测提供了一种平衡计算效率与物理合理性的建模方案。基于潜在启动区识别结果，模拟的 Braemabuel 和 Salezer 雪崩致灾范围与实际情况高度吻合。

(3) 通过结合潜在雪崩启动区自动化识别与 RAMMS::Extended 动力学模拟，可同时考虑雪崩核心和产生冲击气浪的致灾效应，实现大范围雪崩灾害风险快速区划。此外，该技术框架具有良好的实用性及区域适应性，可推广应用于藏东南等地区雪崩灾害风险评价，为区域工程规划、防灾减灾决策及基础设施安全防护提供理论与技术支撑。

参考文献：

Bartelt, P., Lehning, M., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3): 123-145.

- Bartelt, P., Meier, L., Buser, O., 2011. Snow avalanche flow-regime transitions induced by mass and random kinetic energy fluxes. *Annals of Glaciology*, 52(58): 159-164.
- Bartelt, P., Bühler, Y., Buser, O., et al., 2012. Modeling mass-dependent flow regime transitions to predict the stopping and depositional behavior of snow avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1).
- Bartelt, P., Buser, O., Valero, C. V., et al., 2016. Configurational energy and the formation of mixed flowing/powder snow and ice avalanches. *Annals of Glaciology*, 57(71): 179-188.
- Bartelt, P., Christen, M., Bühler, Y., et al., 2018. Snow entrainment: Avalanche interaction with an erodible substrate. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop*: 716-720.
- Bartelt, P., Christen, M., 2025. Snow Avalanche Dynamics with RAMMS::Extended. RAMMS AG.
- Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger, J., et al. 2013. Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5): 1321-1335.
- Bühler, Y., von Rickenbach, D., Stoffel, A., et al. 2018. Automated snow avalanche release area delineation—validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(12): 3235-3251.
- Cercignani, C., Baierlein, R., 2000. Ludwig Boltzmann: the man who trusted atoms.
- Cheng, Q. L., Liu, J., Yang, Z. W., et al., 2024. Avalanche susceptibility evaluation of the Kezhayi to Gongnaisi section of the Duku expressway. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(1): 60-71. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- Denissova, N., Nurakynov, S., Petrova, O., et al., 2024. Remote sensing techniques for assessing snow avalanche formation factors and building hazard monitoring systems. *Atmosphere*, 15(11): 1343.
- Eckert, N., Corona, C., Giacona, F., et al., 2024. Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(5): 369-389.
- Gao, Y., Zhuang, Y., Li, B., et al., 2026. Entrainment-driven transition from avalanche to debris flow: Insights from the 2018 Sedongpu event. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 131, e2025JF008750.
- 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: 102847.
- Gaume, J., Blatny, L., Bobillier, G., et al., 2023. Recent advances in modeling snow and avalanches with the material point method and practical implications. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop*.
- Goldstein, S., 2001. Boltzmann's approach to statistical mechanics. In *Chance in physics: Foundations and perspectives*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 39-54.
- Gissler, C., Henne, A., Band, S., et al., 2020. An implicit compressible SPH solver for snow simulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 39(4): 36-1.
- Glaus, J., Wikstrom Jones, K., Bartelt, P., et al., 2025. Simulation of cold-powder snow avalanches considering daily snowpack and weather situations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(7): 2399-2419.
- Issler, D., 2014. Dynamically consistent entrainment laws for depth-averaged avalanche models. *Journal of Fluid Mechanics*, 759: 701-738.
- Jafari Nodoushan, E., Tajnesaie, M., Shakibaeinia, A., 2024. Two-and three-dimensional multiphase mesh-free particle modeling of transitional landslide with μ (I) rheology. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 96(5): 823-850.
- Kojima, K., 1967. Densification of seasonal snow cover. In H. Oura (Ed.), *Physics of Snow and Ice*. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 1(2): 929-952.
- Kyburz, M. L., Sovilla, B., Bühler, Y., et al., 2025. Potential and challenges of depth-resolved three-dimensional MPM simulations: a case study of the 2019 'Salezer'snow avalanche in Davos. *Annals of Glaciology*, 65: e19.
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., et al., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold regions science and technology*, 35(3): 147-167.
- McClung, D. M., 1981. Fracture mechanical models of dry slab avalanche release. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10783-10790.
- McClung, D. M., 2021. Application of dynamic fracture

- mechanics to dry snow slab avalanche release. *International Journal of Fracture*, 227(1): 95-110.
- Mead, S. R., Cleary, P. W., 2015. Validation of DEM prediction for granular avalanches on irregular terrain. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9): 1724-1742.
- Qiang, X. W., Yang, Z. W., Cheng, Q. L., et al., 2025. Characteristics and triggering mechanisms of avalanche disasters along mountainous roadways in the Kanas Region, Altay Prefecture, Xinjiang, China. *Mountain Research*, 43(03): 453-468. (in Chinese with English abstract)
- Savage, S. B., Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of fluid mechanics*, 199: 177-215.
- Schweizer, J., Bruce Jamieson, J., Schneebeli, M., 2003. Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4).
- Schweizer, J., Kronholm, K., Jamieson, J. B., et al., 2008. Review of spatial variability of snowpack properties and its importance for avalanche formation. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3): 253-272.
- Schweizer, J., Bartelt, P., van Herwijnen, A. 2021. Snow avalanches. In *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. Elsevier: 377-416.
- Shen, D. Y., Yang, J., Zhu, Y. S., et al., 2025. Research progress on formation mechanisms and rapid hazard assessment of snow avalanche. *Earth Science*, 1-23. (in Chinese with English abstract)
- Sovilla, B., Margreth, S., Bartelt, P., 2007. On snow entrainment in avalanche dynamics calculations. *Cold Regions Science and Technology*, 47(1-2): 69-79.
- Sovilla, B., McElwaine, J. N., Köhler, A., 2018. The intermittency regions of powder snow avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10): 2525-2545.
- Steinkogler, W., Gaume, J., Löwe, H., et al., 2015. Granulation of snow: From tumbler experiments to discrete element simulations. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(6): 1107-1126.
- Tian, X. W., Yao, X., Zhou, Z. K., et al., 2025. Snow Avalanche Release Area Identification and Hazard Assessment Based on GIS and RAMMS Modeling: A Case Study of the Galongla Section of the Zhamo Highway, Xizang. *Earth Science*, 1-17. (in Chinese with English abstract)
- Vera Valero, C., Wever, N., Christen, M., et al., 2018. Modeling the influence of snow cover temperature and water content on wet-snow avalanche runout. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3): 869-887.
- 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)
- Zhang, P. P., Li, B., Gao, H. Y., et al., 2024. Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River Basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(6): 44-57. (in Chinese with English abstract)
- Zhuang, Y., Piazza, N., Xing, A., et al., 2023. Tree blow-down by snow avalanche air-blasts: Dynamic magnification effects and turbulence. *Geophysical Research Letters*, 50(21): e2023GL105334.
- Zhuang, Y., Dawadi, B., Steiner, J., et al., 2024a. An earthquake-triggered avalanche in Nepal in 2015 was exacerbated by climate variability and snowfall anomalies. *Communications Earth & Environment*, 5(1): 465.
- Zhuang, Y., Xing, A., Bilal, M., et al., 2024b. The effect of ambient air temperature on meltwater production and flow dynamics in snow avalanches. *Landslides*, 21(10): 2389-2398.
- Zhuang, Y., Dash, R. K., Bühler, Y., et al., 2025. Fluidization and snow cover effects in rock-ice-snow avalanches: Lessons from Piz Cengalo, Fluchthorn, and Piz Scerscen events. *Computers and Geotechnics*, 186: 107456.
- Zhuang, Y., Xing, A. G., Chen, R. P., 2025. Insights into formation and dynamics of snow avalanche-air blasts. *Journal of Engineering Geology*, 33(06): 2257-2265. (in Chinese with English abstract)
- Zhuang, Y., Xing, A. G., Chen, R. P., 2026. Insights into the effects of air temperature and snow entrainment on snow avalanche dynamics. *Journal of Engineering Geology*, 1-9. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 高杨, 李滨, 冯振, 等, 2017. 全球气候变化与地质灾害响应分析. *地质力学学报*, 23(01): 65-77.
- Gao, Y., Li, B., Feng, Z., et al., 2017. Analysis of Global Climate Change and Geological Disaster Responses. *Journal of Geomechanics*, 23(01): 65-77 (in Chinese).
- 高杨, 尹浩栋, 陈福振, 等, 2026. 高位远程地质灾害多相态动力学数值模拟研究综述. *中国地质灾害与防治学报*, 37(01): 1-17.
- Gao, Y., Yin, H. D., Chen, F. Z., 2026. A review of numerical simulation research on multi-phase dynamics of high-altitude and long-runout geohazards. *The Chinese*

- Journal of Geological Hazard and Control, 37(01): 1-17 (in Chinese with English abstract).
- 沈丹祎, 杨剑, 朱永生, 等, 2025. 雪崩形成机制及危险性评价方法综述. 地球科学: 1-23.
- Shen, D. Y., Yang, J., Zhu, Y. S., et al., 2025. Research Progress on Formation Mechanisms and Rapid Hazard Assessment of Snow Avalanche. Earth Science: 1-23 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Wen, H., Wang, D., Wang, S. R., 2021. Key Predisposing Factors and Susceptibility Mapping of Snow Avalanche in Parlung-Tsangpo Catchment, Southeast Tibet Plateau. Journal of Engineering geology, 29(2): 404-415 (in Chinese with English abstract).
- 程秋连, 刘杰, 杨治纬, 等, 2024. 独库高速公路克扎依—巩乃斯段雪崩易发性评价. 中国地质灾害与防治学报, 35(1): 60-71.
- Cheng, Q. L., Liu, J., Yang, Z. W., et al., 2024. Avalanche susceptibility evaluation of the Kezhayi to Gongnaisi section of the Duku expressway. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 35(1): 60-71 (in Chinese with English abstract).
- 张平平, 李滨, 高浩源, 等, 2024. 西藏林芝多雄河流域高位雪崩易发性评价. 中国地质灾害与防治学报, 35(6): 44-57.
- Zhang, P. P., Li, B., Gao, H. Y., et al., 2024. Research on high-altitude avalanche susceptibility area zoning based on informativeness modeling in the Duoxiong River Basin, Nyingchi area of Xizang Autonomous Region. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 35(6): 44-57 (in Chinese with English abstract).
- 田旭文, 姚鑫, 周振凯, 等, 2025. 基于 GIS 与 RAMMS 模拟的雪崩释放区识别及危险性评估: 以西藏扎墨公路嘎隆拉段为例. 地球科学, 1-17.
- Tian, X. W., Yao, X., Zhou, Z. K., 2025. Snow Avalanche Release Area Identification and Hazard Assessment Based on GIS and RAMMS Modeling: A Case Study of the Galongla Section of the Zhamo Highway, Xizang. Earth Science, 1-17 (in Chinese with English abstract).
- 强小文, 杨治纬, 程秋连, 等, 2025. 新疆阿勒泰喀纳斯山区道路雪崩灾害特征及致灾机制. 山地学报, 43(03): 453-468.
- Qiang, X. W., Yang, Z. W., Cheng, L. Q., et al., 2025. Characteristics and triggering mechanisms of avalanche disasters along mountainous roadways in the Kanas Region, Altay Prefecture, Xinjiang, China. Mountain Research, 43(03): 453-468 (in Chinese).
- 庄宇, 邢爱国, 陈仁朋, 2025. 雪崩-冲击气浪形成与动力致灾效应研究. 工程地质学报, 33(06): 2257-2265.
- Zhuang, Y., Xing, A. G., Chen, R. P., 2025. Insights into Formation and Dynamics of Snow Avalanche-Air Blasts. Journal of Engineering Geology, 33(06): 2257-2265 (in Chinese with English abstract).
- 庄宇, 邢爱国, 陈仁朋, 2026. 环境温度与雪层铲刮效应影响下雪崩运动致灾研究. 工程地质学报, 1-9.
- Zhuang, Y., Xing, A. G., Chen, R. P., 2026. Insights into the Effects of Air Temperature and Snow Entrainment on Snow Avalanche Dynamics. Journal of Engineering Geology, 1-9 (in Chinese with English abstract).