

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

田旭文^{1,2,3}, 姚鑫^{1,2,3*}, 周振凯^{1,2,3}, 陈晓强^{1,2,3}, 宋光耀^{1,2,3}, 朱姝⁴, 李显鑫⁴

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2) 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 3) 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081; 4) 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209

摘要: 随着人类活动和重大基础设施建设向高寒山区扩展, 雪崩灾害风险日益凸显, 生成雪崩危险性地图是一项至关重要的基础性工作。本文以西藏扎墨公路嘎隆拉段为研究区, 结合 GIS 和 RAMMS 数值模拟技术, 构建了基于 DEM 数据识别雪崩潜在释放区并进行大范围危险性评估的框架。本研究设定了基于常规地形参数阈值的“一般情境”与评估潜在最大危险性的“极端情境”进行模拟对比。结果表明, 在两种不同情境下分别识别出 539 个和 526 个潜在释放区。一般情境下, 雪崩影响面积为 43.89 km², 占研究区总面积的 54.58%; 极端情境下, 影响面积扩大至 53.24 km², 占 66.20%。扎墨公路嘎隆拉段在两种情境下分别有 16.7% 和 25.8% 的路段处于高危险等级之中, 最大雪崩冲击压力可达 580 kPa 以上。西藏扎墨公路嘎隆拉段的雪崩危险性可以划分为高、中、低、无四个危险等级, 高危险区为防治工程的优先布局的“靶区”。本研究将 GIS-DEM 参数识别与 RAMMS 大规模数值模拟相结合, 提出了一种可移植的高效雪崩危险性评估框架, 具有在类似数据匮乏的高寒山区推广应用的潜力。

关键词: 雪崩; RAMMS; 数值模拟; 危险性评价; 扎墨公路; 青藏高原

中图分类号: P954 **收稿日期:** 2025-09-17

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

TIAN Xuwen^{1,2,3}, YAO Xin^{1,2,3*}, ZHOU Zhenkai^{1,2,3}, CHEN Xiaoqiang^{1,2,3}, SONG Guangyao^{1,2,3}, ZHU Shu⁴, LI Xianxin⁴

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

3. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing, 100081, China;

4. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing, 102209, China

Abstract: As human activities and major infrastructure construction extend into high-altitude mountainous regions, the risk of snow avalanche disasters is increasingly severe. Generating avalanche hazard maps is a crucial foundational task. This study, focusing on the Galongla Section of the Zhamo Highway in Xizang, developed a framework for identifying potential avalanche release areas and conducting large-scale hazard assessments by integrating GIS and RAMMS numerical simulation technologies based on DEM data. This study defined a "general scenario" based on standard terrain parameter thresholds and an "extreme scenario" in order to assess the potential maximum hazard. The results indicate that under general and extreme scenarios, 539 and 526 potential release areas were identified, respectively. In the general scenario, the avalanche-affected area was 43.89 km², accounting for 54.58% of the total study area; under the extreme scenario, the affected area expanded to 53.24 km², representing 66.20%. Additionally, 16.7% and 25.8% of the highway section in the Galongla area were classified as high hazard level under the two scenarios, with maximum avalanche impact

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (5200-202356393A-2-4-KJ); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230433; DD20251300210); 中国地质科学院地质力学研究所基础研究基金 (DZLXJK202412; DZLXJK202403)

作者简介: 田旭文(1998-), 男, 博士研究生, 主要从事冰雪崩致灾效应研究. E-mail: 20201200455@csuft.edu.cn, ORCID: 0000-0003-1458-1742

***通讯作者:** 姚鑫(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害研究. E-mail: yaoxinphd@163.com, ORCID: 0000-0003-3063-2546

pressures exceeding 580 kPa. The avalanche hazard in the Galongla Section of the Zhamo Highway, Xizang, can be categorized into four hazard level levels: high, medium, low, and none. The high hazard zones are prioritized as target areas for mitigation engineering. This research establishes a portable and efficient avalanche hazard assessment framework by combining GIS-DEM analysis and RAMMS simulation, offering a practical solution for data-deficient high-mountain environments.

Keywords: Snow avalanche; RAMMS; Numerical simulation; Hazard assessment; Zhamo Highway; Qinghai-Xizang Plateau

引言

雪崩是指积雪在重力作用下沿斜坡快速下滑的自然现象, 广泛发生于全球高寒山区(王彦龙, 1986; Laute and Beylich, 2014; 王楷迪等, 2025)。在适宜的地形条件下, 雪崩的流速可达到200 km/h, 产生的压力可达500 kPa (Yariyan et al., 2022)。在如此大的速度和压力作用下, 雪崩能够轻易摧毁森林、道路和基础设施, 并可能引发人员伤亡(沈永平等, 2013; Mayer et al., 2024)。例如, 2011年3月24日, 波密县嘎隆拉山发生雪崩, 造成10余人失踪(Chen et al., 2024); 2023年1月17日, 西藏多雄拉山发生体积超过 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的雪崩, 导致 17 辆汽车被掩埋, 28人遇难(Zhang et al., 2025)。此外, 持续的气候变暖效应加剧了极端降水事件的发生频率和强度, 同时加速了高寒山区冰雪的融化, 进而导致了雪崩事件的显著增加(文洪, 2024; Reuter et al., 2025)。

在雪崩风险管理中, 生成危险性地图是一项至关重要的基础性工作(陈联君, 2021)。1953年瑞士首次发布了阿尔卑斯山的雪崩危险性地图, 为保障居民生命安全、指导基础设施建设以及优化应急响应提供了关键的科学决策依据(Bühler et al., 2018)。早期制图主要依赖经验方法, 专家通过对地形和植被等指示因子的解读来划定危险区域, 虽行之有效但主观性强(Aydin et al., 2014)。随着地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术的发展, 统计方法得以大规模应用(张平等, 2024)。统计方法通过建立历史雪崩事件与地形和气象因子间的数学关系进行预测, 提升了客观性, 但其精度严重依赖历史数据的完备性(黄发明等, 2020)。当前, 基于物理动力学的数值模拟技术已成为前沿手段, 如RAMMS(Christen et al., 2010)、SAMOS(Sampl and Zwinger, 2004)和物质点法等(葛梦林等, 2025)。数值模拟方法通过求解雪崩运动方程可精确模拟其动力学过程, 为工程设计提供量化参数(段仕美等, 2022)。基于大范围数值模拟技术制作的危险地图能够根据雪崩的冲击强度, 精细地划分危险等级, 是缓解雪崩风险的重要手段(Bühler et al., 2022; Ortner et al., 2023)。然而, 我国的雪崩研究还处于起步阶段, 对于数据稀疏的青藏高原地区更是存在研究空白。随着我国重大基础设施建设逐步向青藏高原高寒山区扩展, 雪崩灾害的风险和影响正逐渐增加, 相关问题亟需引起重视(黄海和龚诚, 2024; 田旭文等, 2025)。

为有效减轻雪崩灾害, 首要任务是精准识别潜在雪崩潜在释放区(Potential Release Area, PRA)(Sykes et al., 2022)。基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)识别并评估山体滑坡、泥石流及落石等灾害危险性的技术方法, 其发展已相当成熟(黄发明等, 2022; 袁新霞等, 2025; Woodard and Mirus, 2025)。这些方法普遍依赖地形衍生参数, 其中坡度被公认为是决定不稳定区域分布的核心因子, 而地表粗糙度与曲率等参数也常被纳入考量以提升模型精度(郭飞等, 2024; Thakur et al., 2025)。相关雪崩PRA的识别研究借鉴了上述思路。早在1955年, Voellmy便已指出地形坡度在识别雪崩起始区中的决定性作用(Bühler et al., 2018)。随着技术的演进, 高分辨率DEM的普及是技术发展的关键转折点, 它使得计算地形粗糙度与曲率等复杂地形参数成为可能, 从而显著增强了PRA的识别精度(Bühler et al., 2022; Ortner et al., 2023; 舒晓燕等, 2023)。

西藏扎墨公路嘎隆拉段地质构造活动强烈, 气候条件恶劣, 冬季降雪量大, 导致雪崩灾害频发

(张佳佳等, 2018)。同时, 该地区气象条件严酷, 人烟稀少, 致使雪崩相关研究基础相对薄弱。近年来, 随着川藏铁路和雅鲁藏布江下游水电开发等重大工程相继开工, 扎墨公路运输负荷激增, 对雪崩危险性的评估与精准防控提出了更高要求。因此, 本研究旨在为青藏高原等数据匮乏的高寒山区开发一种高效的雪崩风险评估框架。该方法基于DEM数据识别PRA, 并与雪崩动力学模型RAMMS进行深度集成, 以生成大范围的雪崩危险性地图。为验证该方法的有效性, 本研究利用高精度卫星遥感数据绘制的雪崩边界对模拟结果进行了交叉验证。这一创新性的方法链, 为生成大范围雪崩危险性地图奠定了坚实基础。研究不仅验证了GIS与数值模拟技术在数据匮乏的高寒山区制作雪崩危险地图的适用性, 还为当地雪崩灾害的防治工作明确了重点防控区域。

1 研究区概况

研究区地处喜马拉雅东构造结地区(图1a), 受强烈的构造活动和河流下切侵蚀作用形成了典型的高山深切峡谷地貌(图1b)。扎墨公路嘎隆拉段位于西藏波密县扎木镇, 是波密通往墨脱的必经之路(图1b)。嘎隆拉山谷地面海拔介于2848 m~5673 m, 最大相对高差达2825 m(图1c)。受高海拔和复杂地形影响, 该区域属于典型的高山雪崩易发区, 斜坡坡度普遍位于30°~60°之间。研究区受印度夏季季风和大陆西风影响的过渡地带, 降水呈现出明显的季节性特征, 主要集中在夏季的6月至8月, 占全年降水量的50%以上(张佳佳等, 2018)。年降雨量为697.8 mm, 年平均降雪量为0.84 m, 年平均气温为-0.21 °C。充沛的降水和降雪, 为雪崩的形成提供了丰富的物质来源。雪崩活跃期从12月初延续至次年5月下旬, 以沟槽型雪崩为主, 兼有坡面型雪崩(图1d~g)。由于地形条件限制, 扎墨公路嘎隆拉段不可避免地需经过多个雪崩高发地带。

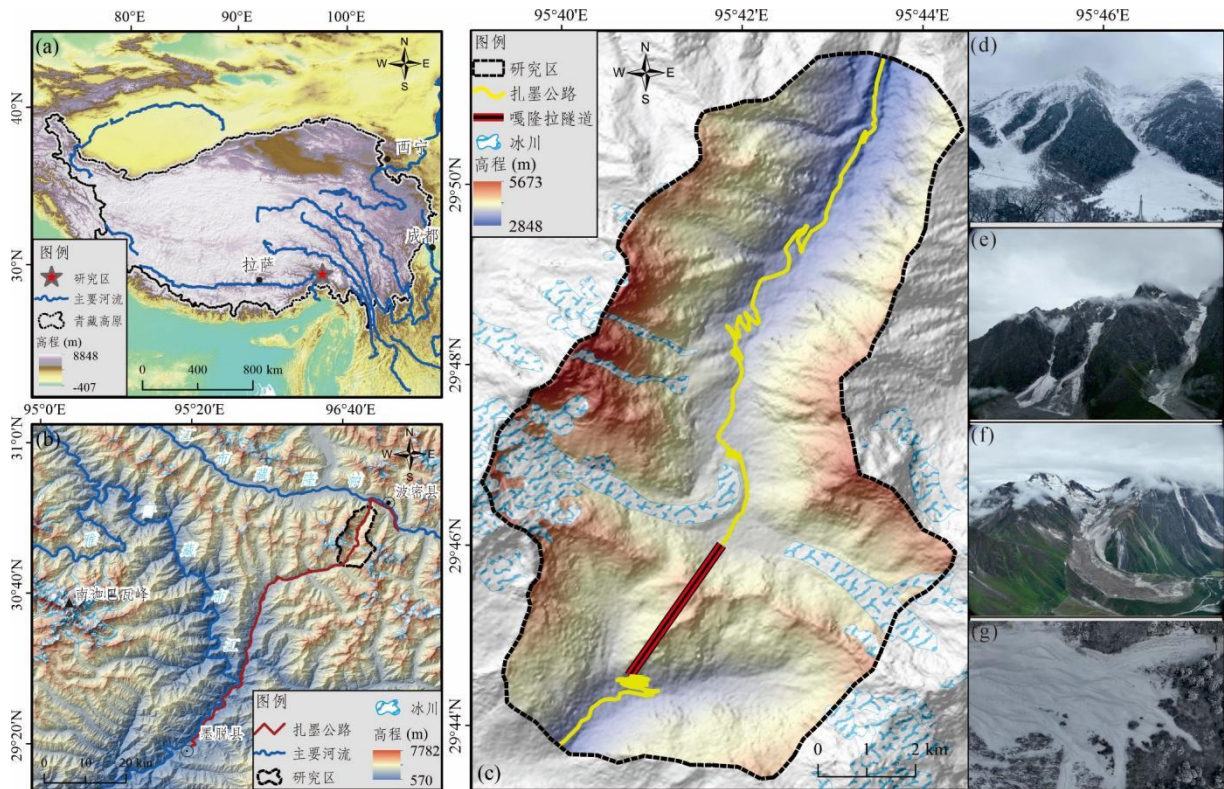


图 1 研究区概况

Fig. 1 General overview of the study area

2 研究方法

本研究通过融合GIS与RAMMS数值模拟技术，构建了一种雪崩PRA识别及其危险性评价的方法。该方法的技术流程主要包括数据预处理、PRA 识别和数值模拟与验证三个主要步骤(图2)。(1)数据预处理：利用DEM数据生成坡度、坡向、地表粗糙度和平面曲率等地形衍生数据，并利用地表覆盖类型数据生成森林的覆盖范围(数据来源于<https://zenodo.org>) (Yang and Huang, 2021)；(2)PRA识别：首先选择合理的地形参数阈值生成一般情境和极端情境下的初始PRA，然后根据坡度、坡向和曲率信息进行栅格融合和影像分割，从而实现PRA的精细化分类；(3)数值模拟与验证：根据经验公式针对每一处PRA计算其雪崩断裂深度，对一般情境和极端情境下识别的PRA分别进行大规模RAMMAS雪崩数值模拟，最终利用遥感影像对计算结果进行验证。

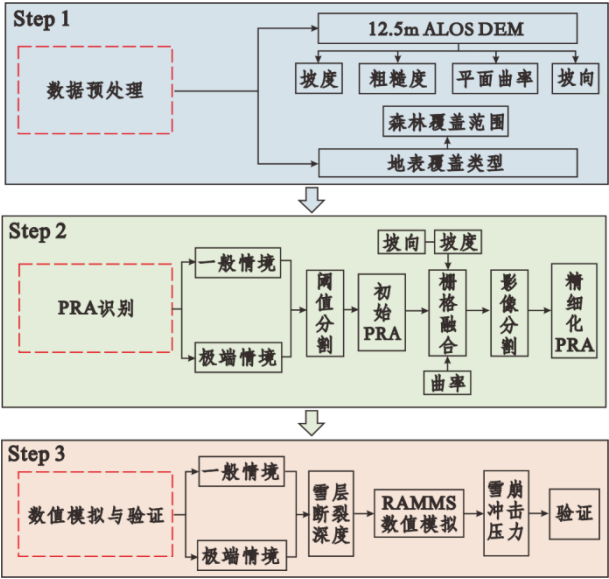


图 2 PRA 识别和危险性制图的流程

Fig. 2 Flowchart of PRA identification and hazard mapping

2.1 数据准备及其处理

DEM 作为雪崩释放区识别和运动过程模拟中的核心输入数据，其分辨率的选择至关重要。过低的 DEM 分辨率会削弱计算结果的精确度，过高则显著延长计算效率。本研究在权衡精度与效率后，选定 12.5 m 分辨率的 ALOS DEM 作为基础输入数据。通过 DEM 数据衍生得到坡度、地形粗糙度、平面曲率和坡向等信息（图 3a-e）。此外，地表覆盖类型数据（图 3f）用以辅助识别雪崩释放区，并在雪崩模拟过程中考虑森林的影响。下面介绍了最重要的参数及其设置。

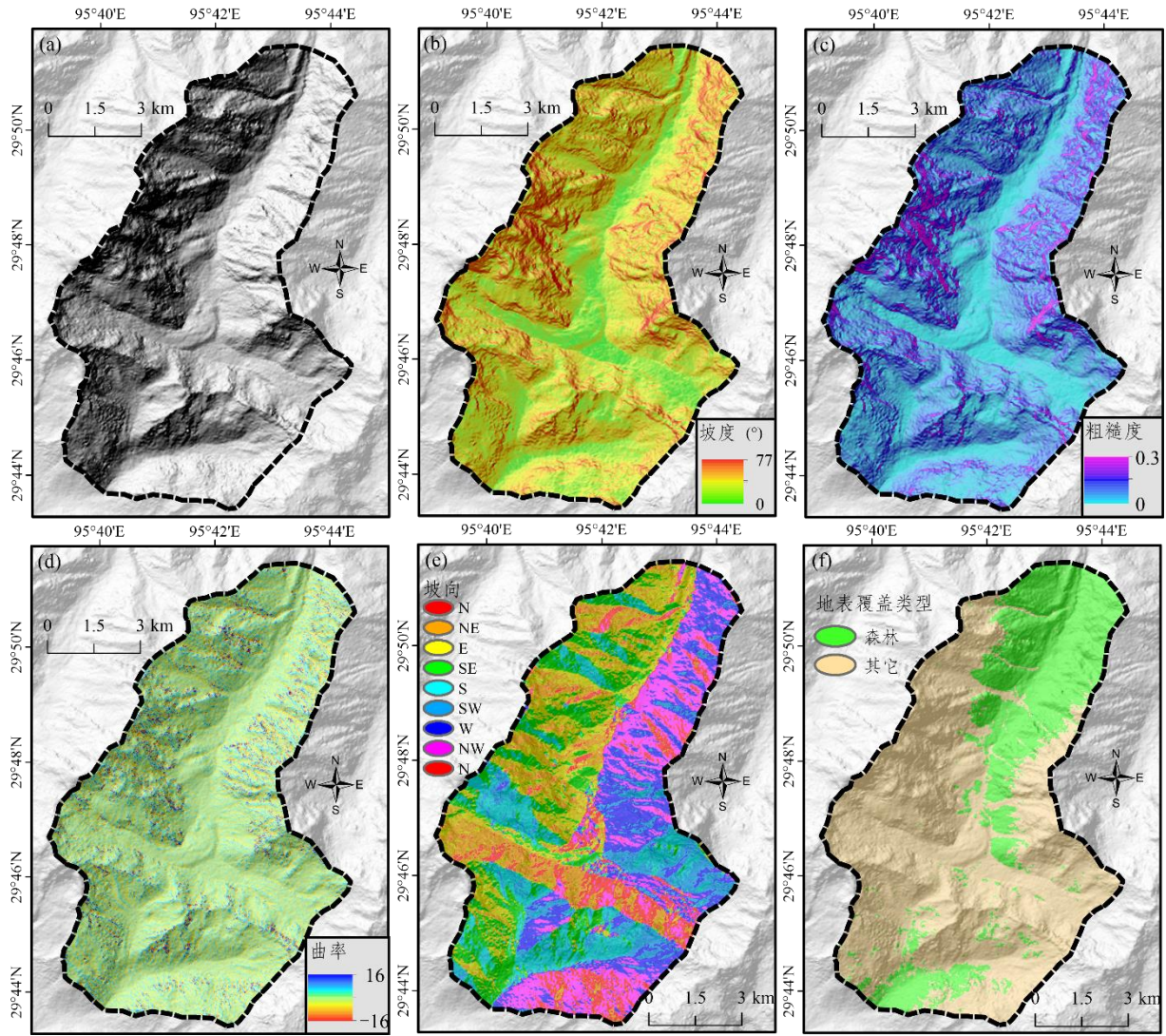


图 3 识别 PRA 的输入数据 (a) 山体阴影; (b) 坡度; (c) 地表粗糙度; (d) 平面曲率; (e) 坡向和 (f) 地表覆盖类型

Fig. 3 Input layers for PRA identification: (a) hillshade; (b) slope; (c) roughness; (d) plan curvature; (e) aspect; (f) land-cover type

坡度作为高程的一阶导数，量化了地形的倾斜程度，其计算依据为相邻单元格间的最大高程差，并以角度单位表示。该参数是判定雪崩启动的关键指标。为抑制因单个像元坡度剧变所引发的图像噪声，我们应用 4×4 单元格平均值滤波器对坡度数据进行平滑处理。此过程有效剔除了孤立的陡峭或平坦像元，从而为生成均质化的地理对象奠定了可靠的数据基础。

地表粗糙度是一种独立于坡度的地表复杂度量指标。诸如山脊与沟壑等崎岖地貌会破坏薄弱雪层的连续性，从而抑制雪崩的启动(Thakur et al., 2025)。粗糙度的计算需预先设定窗口尺寸，本研究采用 4 个像元的窗口。在该窗口内，通过分析所有地表法向量的离散程度来计算粗糙度。将计算结果进行归一化处理，取值范围从 0（地表完全平坦）至 1（法向量全方位发散）。通常，粗糙度的值一般在 0.03 左右，超过 0.2 则表明地形极为崎岖。

曲率作为坡度或坡向的一阶导数，用于判断地表的凸起与凹陷程度。曲率可分为沿最陡下降线的剖面曲率和垂直于该方向的平面曲率。本研究选用平面曲率，旨在识别并排除那些因高度凸起或凹陷从而可能阻碍雪崩释放的区域。雪崩的发生与地形曲率密切相关，通常在平面曲率较小的区域，即地表相对平坦或呈均匀倾斜的坡面，雪崩更易发生(葛梦林等, 2025)。

坡向是高程的一阶导数，它指明了每个像元与其邻域内最大变化率所对应的最陡下坡方向，从而揭示了坡面的朝向。我们将 DEM 中的每个像元归入 8 个方位扇区之一：北、东北、东、东南、南、西南、西及西北。由于坡向的差异通常会影响雪崩的释放方向，因此坡向成为了划分不同潜在雪崩释放区的重要依据。

植被通常被认为是控制雪崩发生和规模的重要条件。植被对雪崩发生和规模的控制的作用主要通过水文和机械作用实现，包括植被冠层对积雪的稳定和阻拦作用(Védrine et al., 2022)。现场调查和相关文献研究表明，研究区的森林茂密，且树木高大，雪崩一般不会对森林区域启动。因此，在识别 PRA 时，利用地表覆盖类型数据排除了森林区域。

2.2 PRA 识别

在识别雪崩释放区时，本研究的首要步骤是识别坡度介于 25°~55°之间的地形。随后，通过剔除高地表粗糙度 (> 0.18)、高平面曲率 (> 0.5) 和森林覆盖的区域，以排除沟壑、山脊、粗糙岩壁和森林等不利于形成连续薄弱层和大规模雪堆的地点(Bühler et al., 2022; Ortner et al., 2023)。此外，面积小于 1000 m²的微小区域也被移除。经过初步筛选，图层被分割并归类为 PRA 与非 PRA 两类。

第二步是对初步识别的雪崩敏感区进行精细化分类，本研究基于坡向、坡度和曲率三个地形因子，将像元聚合为内部同质的地形对象单元。鉴于坡向对积雪特性的主导影响，分割过程中赋予坡向因子的权重为坡度与曲率因子的 3 倍。分割过程在 ArcGIS Pro 平台中完成，通过调整细节水平参数以获取适宜大小的对象单元，最终实现了森林覆盖下 PRA 的精细化分类。

为构建极端情景下的 PRA，通过调整坡度阈值 (20°~60°)，并剔除地表粗糙度 (> 0.20)、平面曲率 (> 1) 和森林覆盖的区域，沿用相同的分割流程生成了极端情景下规模更大、连通性更强的 PRA。

2.3 雪层断裂深度

雪崩的运动规模在很大程度上取决于雪层断裂深度的确定。雪层断裂深度指触发雪崩的积雪临界厚度(h_c)。当斜坡上的积雪厚度达到该临界值时，驱动其下滑的力与抵抗滑动的抗剪力达到极限平衡状态。其中，下滑力 F 源于重力沿斜坡方向的分力，而抗滑力 τ_s 则由垂直于坡面的正应力所决定。临界高度 h_c 可通过以下公式进行量化计算(段仕美等, 2022):

$$F = G \sin \theta \quad (1)$$

$$\tau_s = c + \sigma \tan \varphi = c + G \cos \theta \tan \varphi \quad (2)$$

$$h_c = \frac{c}{\rho(\sin \theta - \cos \theta \tan \varphi)} \quad (3)$$

式(1)~(3)中， F 为下滑力，单位 N； G 为斜坡上积雪体的总重力，单位 N； τ_s 为抗滑力；单位 N； c 为积雪的内聚力，单位 g/cm²； σ 为法向应力，单位 Pa； φ 为积雪的内摩擦角，单位°； ρ 为积雪密度，单位 g/cm³； G 为斜坡上积雪体的总重力，单位 N； θ 为坡角，单位°。

借鉴 Bartelt et al., (2015)通过雪槽实验标定的参数，本研究采用积雪内聚力 c 为 5 g/cm²，内摩擦系数 $\tan \varphi$ 为 0.27，积雪密度 ρ 为 300 g/cm³。将这些参数代入公式 (3) 进行求解，即可得出不同 PRA 的断裂深度。

2.4 RAMMS 雪崩数值模拟

雪崩数值模拟软件 RAMMS 能够高效地重构雪崩在三维地形中的动力学过程，输出包括运动距离、流速、冲击压力和流动高度等关键参数。该软件的核心物理模型之一为 Voellmy-Salm (VS)模型，是当代雪崩动力学模拟的基石。VS 模型将雪崩视为固相与粘性湍流流体相的混合体，其总摩擦阻力由两部分构成：一是代表缓慢流动时起主导作用的干库仑摩擦，二是描述高速运动时占优的粘性-湍流摩擦。其摩擦阻力 S 的计算公式如下(Salm, 1993):

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} \quad (4)$$

$$N = \rho h g \cos(\varphi) \quad (5)$$

其中， S 为摩擦阻力， N 为法向正应力， μ 为干库仑摩擦系数， ξ 为粘性湍流系数， ρ 为雪密度， g 为重力加速度， u 为流速， h 为流深。这两个摩擦系数共同决定了雪崩的流动状态。

为进一步提升模型精度，特别是模拟理想塑性材料的特性，RAMMS 引入了屈服强度的概念。此时，摩擦阻力 S 的计算修正为(Bartelt et al., 2015):

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\xi} + 1 - \mu N_0 - (1 - \mu) N_0 e^{-\frac{N}{N_0}} \quad (6)$$

式(6)中， N_0 代表材料的屈服应力。

摩擦参数 μ (库仑摩擦系数) 与 ξ (湍流摩擦系数) 是决定雪崩运动距离及沉积区范围的核心控制变量。RAMMS 模型提供了两种摩擦参数的设置方案。第一种为固定值模式，即在整个雪崩路径(起始区、运动区及堆积区)采用统一的 μ 和 ξ 值。该模式主要适用于地形特征均一、下垫面性质一致的雪崩模拟。第二种为可变值模式，即允许 μ 和 ξ 值随地形特征变化，从而实现分区设置。研究区雪崩路径的地形特征和下垫面性质差异较大，因此本研究选择可变值模式计算 μ 和 ξ 值。RAMMS 依据地形特征(高程、坡度及曲率)和雪崩重现期，结合 MuXi 自动计算程序，自动反演出与地形条件相匹配的 μ 和 ξ 参数场(图 4)。另外，RAMMS 用户手册建议雪崩重现期的取值为 30 年、100 年或 300 年。通过雪崩现场调查，发现研究区雪崩活动十分频繁，因此雪崩重现期取值为 30 年。

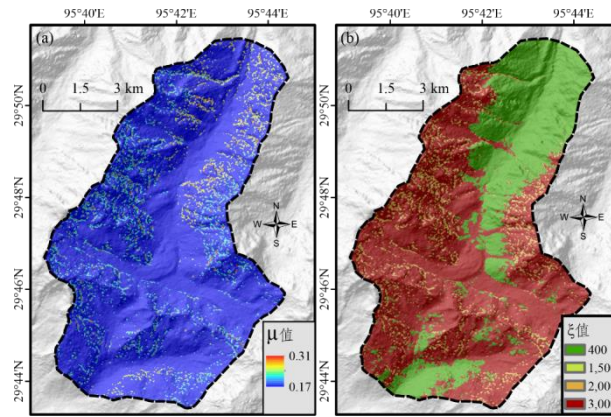


图 4 μ 和 ξ 参数场

Fig. 4 Spatial distribution of parameters μ and ξ

所有模拟均采用 RAMMS 模型在 12.5 m 空间分辨率的 DEM 上进行。设定模拟的时间步长为 1 s，停止阈值设置为总动量的 5%或质心速度降低至 0.1 m/s。当达到这些阈值中的任何一个时，模拟就会

停止。在此设定下，各潜在雪崩释放区被作为独立事件进行顺序模拟，未考虑其间的相互作用。RAMMS 模型模拟雪崩的物理过程及其参数示意，如图 5 所示。

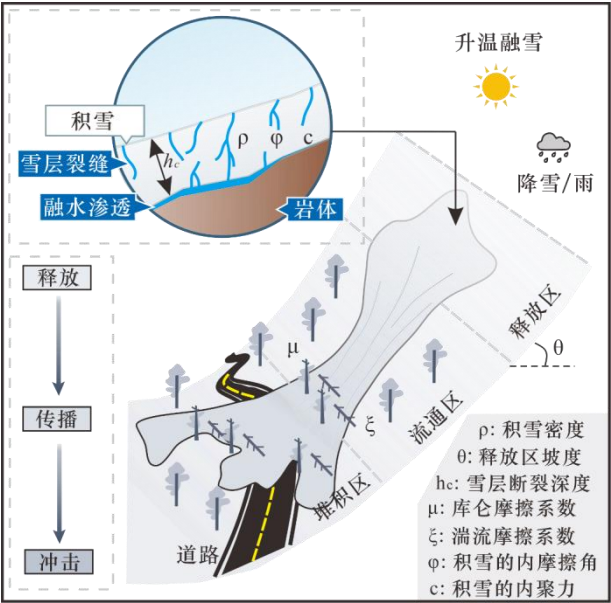


图 5 RAMMS 模型模拟雪崩的物理过程及其参数示意

Fig. 5 Schematic illustration of the physical processes and associated parameters in the RAMMS avalanche simulation model

3 研究结果与分析

3.1 PRA 识别结果

本研究基于坡度、曲率和粗糙度等关键地形因子，分别对一般情境与极端情境下的 PRA 进行了识别与空间分布分析。在一般情景下，识别出 400 个独立的 PRA 多边形，其平均面积为 54824 m²，平均坡度为 34.21° (图 6a)；经过影像分割后，PRA 数量被分割为 539 个独立的 PRA 多边形，其平均面积为 37550 m²，33.73° (图 6b)。在极端情境下，识别出的 PRA 数量为 273 个，其平均面积显著增大至 114847 m²，平均坡度则略降至 34.71° (图 7a)；经过影像分割后，PRA 数量被分割为 526 个，其平均面积显著增大至 58525 m²，平均坡度则略降至 33.25° (图 7b)。极端情境下，虽然识别的 PRA 数量低于一般情境，但是其平均面积明显增大。这是因为极端情况下识别的 PRA 连通性更强，导致 PRA 总体数量减小，但单个的 PRA 面积更大。另外，对比图 6(c)和图 7(c)可以发现，相对于一般情境，极端情境下雪层断裂深度普遍增加，部分区域超过 1.19 m。这是因为极端情境下，PRA 的平均坡度降低，导致根据经验公式计算的雪层断裂深度增加。综合对比两种情境下的 PRA 识别结果可见，极端情境增加了 PRA 的面积和雪层断裂深度。这一结果强调了在不同应用背景下，考虑极端情境下雪崩危险性评估的重要性。

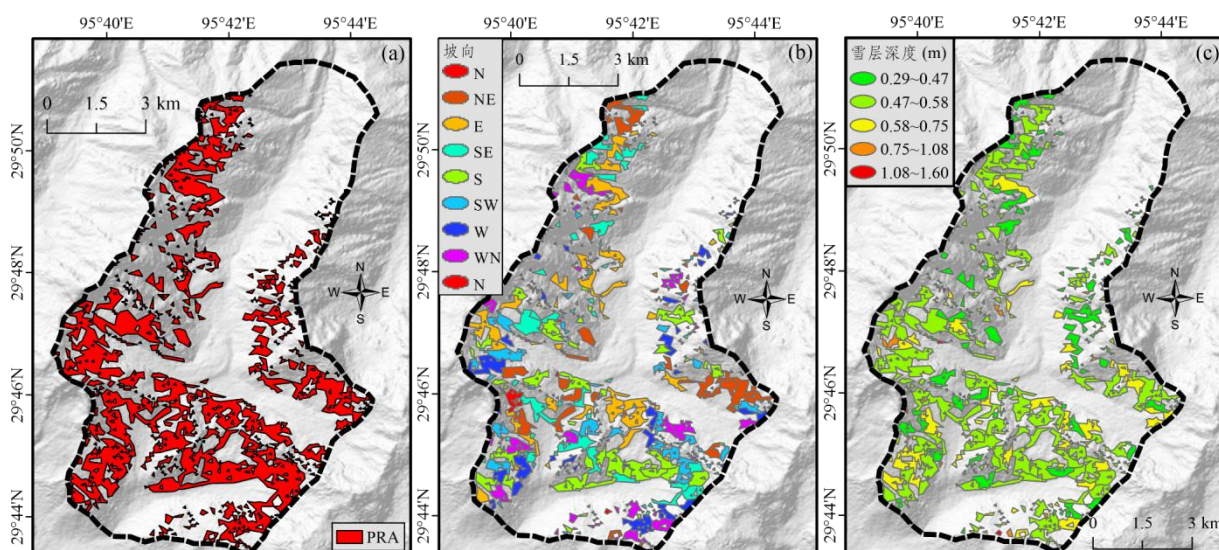


图 6 一般情境下的 PRA 识别结果 (a) PRA 分布 (b) 进一步细分的 PRA (c) PRA 的雪层断裂深度

Fig. 6 PRA identification results under general conditions: (a) PRA distribution; (b) subdivided PRA; (c) slab thickness of PRA

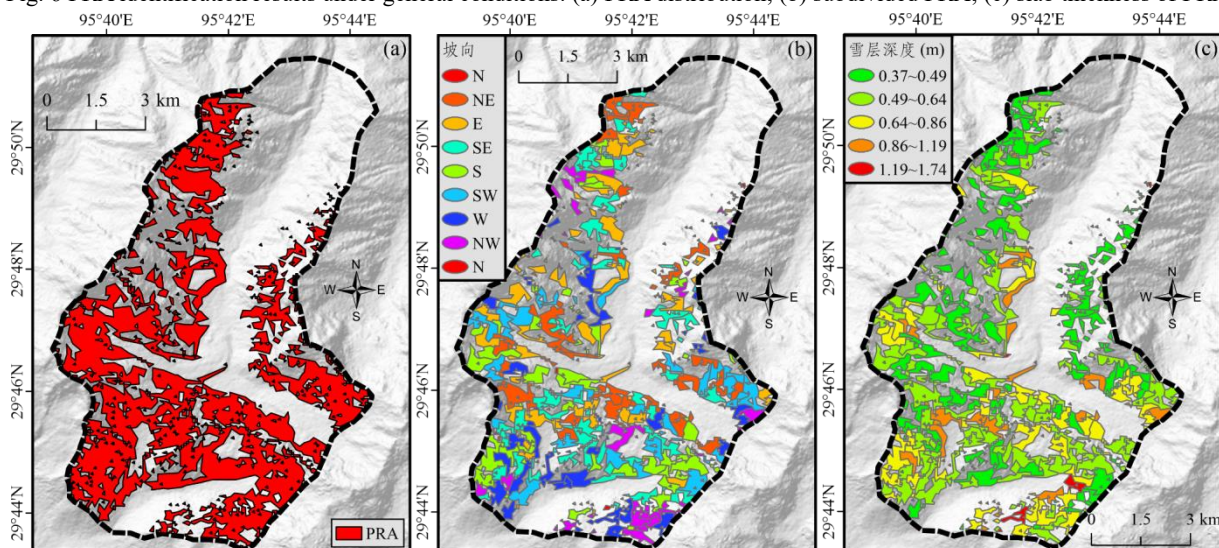


图 7 极端情境下的 PRA 识别结果 (a) PRA 分布 (b) 进一步细分的 PRA (c) PRA 的雪层断裂深度

Fig. 7 PRA identification results under extreme conditions: (a) PRA distribution; (b) subdivided PRA; (c) slab thickness of PRA

3.2 雪崩数值模拟及危险性制图

本研究在一般情境与极端情境下分别进行了 539 次和 526 次模拟，为全面展示研究区的雪崩模拟结果，图 8 对比了两种不同情境下的危险区域分布。由于扎墨公路穿越嘎隆拉雪山区，因此其广阔地域均面临雪崩威胁。即使在一般情景下，研究区内仍有相当比例的区域可能遭受冲击压力超过 500 kPa 的雪崩侵袭。传统的雪崩易发性区划图通常仅能静态地展示雪崩发生的概率，而本研究的大规模动力学模拟结果则进一步量化了不同情境下雪崩的潜在冲击压力，为工程防护结构（如防雪墙和导雪堤）的等级设防提供了至关重要的动力学参数依据。

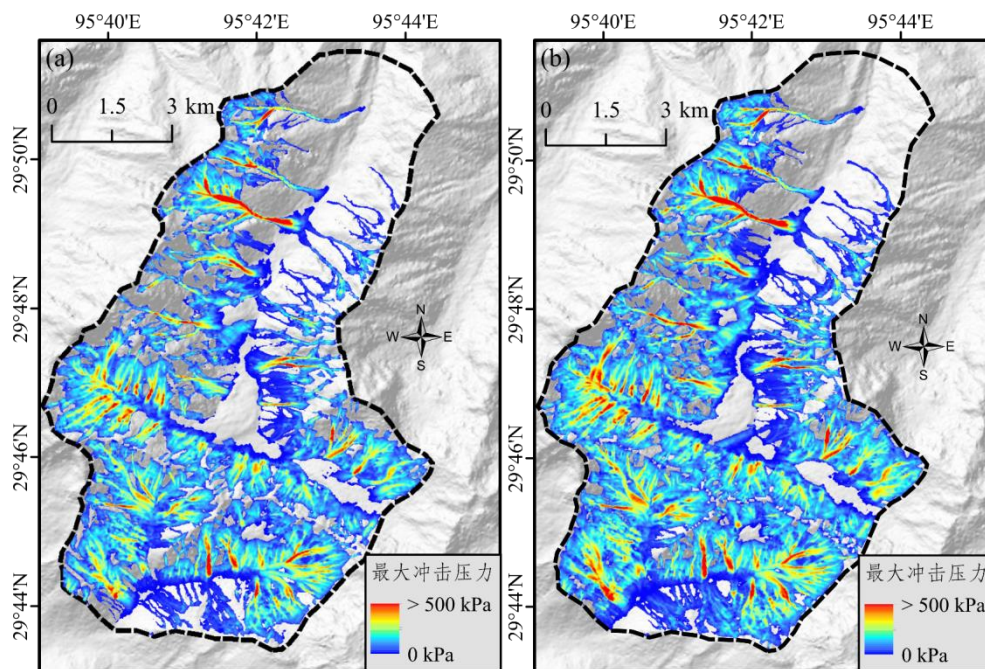


图 8 RAMMS 模拟的最大冲击压力结果 (a) 一般情景和 (b) 极端情景

Fig. 8 Maximum pressure from RAMMS simulations: (a) general-condition scenario (b) extreme-condition scenario

为量化研究区受雪崩影响的面积，表 1 汇总了不同情景下的雪崩影响面积。在一般情境下，研究区内 PRA 的数量为 539 个，总面积为 20.27 km²，占研究区总面积的 25.21%。相应地，雪崩影响面积达到 43.89 km²，占研究区总面积的 54.58%。在极端情境下，尽管 PRA 数量略有减少至 526 个，但其总面积显著增加至 30.70 km²，占比提升至 38.17%；雪崩影响面积也随之扩大至 53.24 km²，占研究区总面积的 66.20%。这一对比表明，极端情境不仅扩大了潜在雪崩释放区的范围，也显著增强了雪崩的扩散能力与影响范围，使得研究区内约三分之二的区域处于雪崩威胁之下。

表 1 研究区不同情景下模拟结果的统计

Table 1 Statistics of simulation results under different scenarios in the study area

情境	PRA 数量	PRA 总面积 (km ²)	PRA 占研究区总面积的 比例 (100%=80.42 km ²)	雪崩影响面积 (km ²)	雪崩影响面积占研究区总面积 的比例 (100%=80.42 km ²)
一般情境	539	20.27	25.21%	43.89	54.58%
极端情境	526	30.70	38.17%	53.24	66.20%

3.3 与遥感卫星监测雪崩边界的验证

对青藏高原地区的雪崩危险图进行有效验证是一项艰巨的挑战，其主要障碍在于缺乏跨越数十年乃至数百年时间尺度、空间上连续且可靠的雪崩发生历史记录。本研究采用了 2022 年 2 月 13 日的 Sentinel-2 卫星遥感影像，并结合多次野外调查结果绘制了研究区雪崩的影响范围，为模拟结果提供了验证基准。尽管光学遥感解译本身存在一定测绘误差，但在缺乏长期系统观测资料的背景下，该方法为数据稀缺的高寒山区提供了当前条件下可行且客观的验证途径。基于此，共绘制出约 43 个独立的雪崩轮廓范围(图 9a)。验证结果显示，根据遥感影像测绘得出的研究区雪崩影响面积为 50.62 km² (图 9a)。在一般情景和极端情境下，模拟计算得到的雪崩影响面积分别为 43.89 km² (图 9b)和 53.24 km²，与遥感测绘结果的相对误差分别为-13.3%和+5.2%。考虑到对遥感影像本身的测绘误差，这一

微小比例很可能部分源于数据误差，而非模型性能的不足。从技术层面看，卫星制图主要勾勒的是沟槽雪崩的轮廓，这与我们模拟输出的冲击压力范围吻合度较高(图 9c)。尽管如此，当前验证主要依赖单一时相的遥感数据，其代表性难免受限于特定的气象与积雪条件。未来仍需积累多时序、多源观测资料，尤其应结合实地调查数据与逐步构建的区域雪崩案例库，以开展更为系统、动态的模型校准与验证，从而进一步提升危险性制图的稳健性。

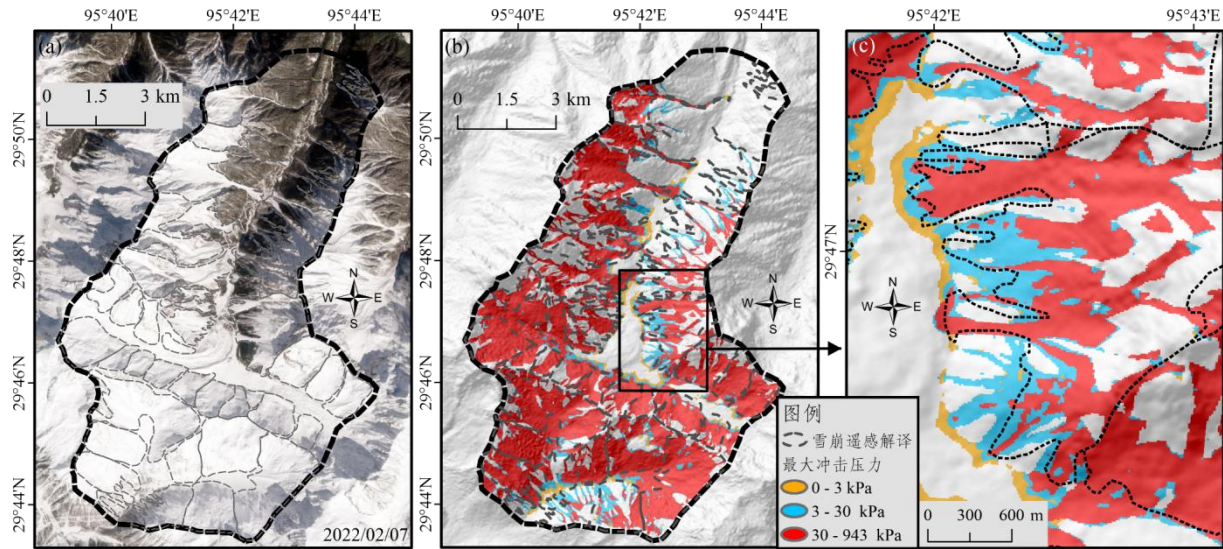


图 9 基于光学卫星数据测绘的雪崩影响范围与模拟结果的对比 (a) Sentinel-2 卫星影像; (b) 一般情景下雪崩遥感测绘结果与数值模拟结果的叠加; (c) 局部放大图

Fig. 9 Comparison between avalanche-affected areas mapped from optical satellite data and simulation outputs: (a) Sentinel-2 image; (b) overlay of remote-sensing mapped and simulated avalanche extents under the general-condition scenario; (c) detailed zoom-in view

3.4 雪崩对扎墨公路的影响

扎墨公路作为连接西藏波密县与墨脱县的重要交通要塞，其嘎隆拉段地处高海拔山区，地形复杂，气候恶劣，常年面临严重的雪崩威胁(张佳佳等, 2018)。根据国际雪冰委员会的相关标准，冲击压力达到 3 kPa，就可能威胁公路上的车辆和行人的安全；冲击压力达到 30 kPa，可能造成公路的堵塞和破坏；冲击压力达到 500 kPa，坡脚将形成数米厚的雪崩堆积体，雪崩可轻易摧毁大型车辆和公路设施(Ortner et al., 2023)。在一般情境下，嘎隆拉段公路受到的雪崩冲击压力主要集中在海拔 3500~4500 m 的高山区域，最大冲击压力可达 539 kPa (图 10a)。在整个研究路段内，62.8%的区间没有受到雪崩的威胁，而 16.7%的路段受到雪崩的显著威胁。在极端情境下，公路受到雪崩的影响面积占比明显增加，最大冲击压力可达 580 kPa (图 10b)。雪崩的影响范围也明显扩大，受到雪崩显著威胁的公路面积占比达到 25.8%，相较于一般情境增加了 9.1%。值得注意的是，相较于公路的东侧山体，西侧山体沟谷地形孕育的雪崩对公路的威胁更大。雪崩运动路径与公路交汇处形成了明显的冲击压力集中区。

基于遥感影像、数值模拟分析和野外调查的综合分析，本研究将扎墨公路嘎隆拉段划分为高危险区、中危险区和低危险区和无危险区四个等级 (图 10c)。高危险区主要分布在公路中段和隧道南侧出口，这些区域坡度陡峻、物源丰富、积雪稳定性差，导致雪崩发生的频率和破坏性较大。中危险区集中在隧道出口北侧，此区间内只有局部区域遭受雪崩冲击。低危险区位于公路北侧，此段基本不受

雪崩的影响。公路的隧道段穿越了嘎隆拉雪山，不直接受到雪崩的冲击影响，故划分为无危险区。高危险区是雪崩防治工程优先布局的“靶区”。对于中低风险区，则可采取成本效益更高的策略，例如加强冬季巡护、建立临时交通管制预案或设置警示标识。这种基于危险性的分级管理模式，能够将有限的资源投入到最需要的地方，实现风险管控效益的最大化。

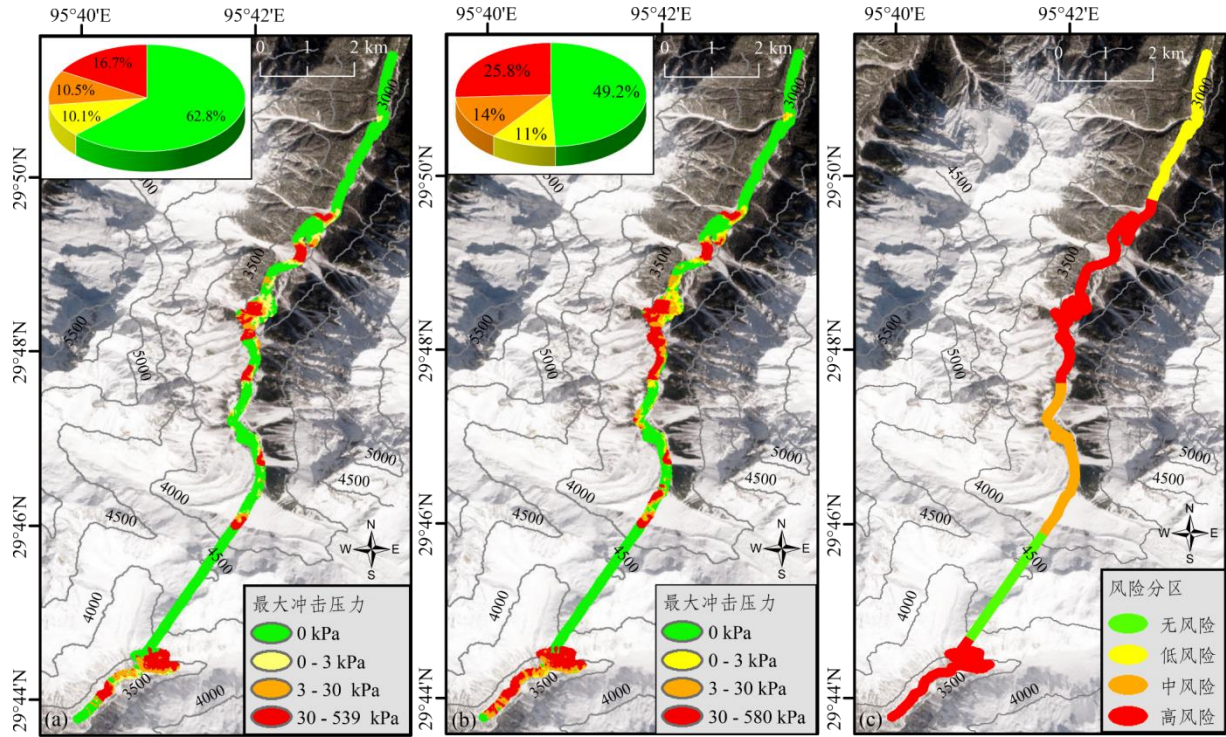


图 10 扎墨公路嘎隆拉段雪崩冲击压力及危险性分区 (a) 一般情境下公路受到的雪崩冲击压力 (b) 极端情境下公路受到的雪崩冲击压力 (c) 雪崩危险性分区 (底图来源于 2022 年 2 月 7 日的 Sentinel-2 卫星影像)

Fig. 10 Avalanche impact pressure and risk zoning along the Galongla section of the Zhamo Highway: (a) avalanche impact pressure on the highway under the general-condition scenario, (b) avalanche impact pressure on the highway under the extreme-condition scenario, (c) avalanche risk zoning (base map from Sentinel-2 image acquired on 7 February 2022)

4 讨论

4.1 优势

本研究提出的基于 DEM 及其衍生参数识别 PRA 和雪崩大规模 RAMMS 模拟生成雪崩危险性地图的方法，不仅为雪崩的危险性评估研究提供了新的思路，更在实践中展现了较大的应用价值。首先，该方法的核心优势在于其对输入数据的简洁要求，即仅需 DEM 数据和森林覆盖信息，这在空间尺度上展现了其可推广性。其次，在分析维度上提供了灵活性。通过调整地形参数阈值可构建一般与极端等多种情境下的评估框架，从而服务于不同的工程应用需求。在一般情境下，该方法通过设置相对保守的参数阈值生成常态化雪崩危险性地图，为土地规划与基础设施选址提供科学依据；在极端情境下，该方法通过调整参数模拟罕见降雪条件以评估和可视化雪崩的潜在最大威胁，为制定应急预案、设计关键防护工程及评估气候变化影响提供决策依据。最后，该方法摆脱了传统灾害制图对大量数据进行处理的依赖，提升了危险性制图的效率和可重复性。这意味着可以快速、客观、一致地生成某地区高质量的危险性地图。这不仅极大地提升了制图效率，更建立了一种标准化、可验证的灾害评估新范式，

为类似数据匮乏的高寒山区雪崩灾害风险管理提供了强大而可靠的分析流程。

4.2 局限性和展望

尽管本研究提出的方法在计算效率和可推广性上具有显著优势，但其结果仍受到多重不确定性的影响。首先，在数据输入层面，不确定性主要源于 DEM 精度。DEM 的分辨率是影响结果可靠性的首要因素。低分辨率 DEM 可能平滑掉关键的地形微特征，导致 PRA 识别不足；反之，高分辨率 DEM 则能更精确地刻画地形，显著提升雪崩危险性地图的精度(张天意等, 2024)。其次，在模型结构层面，不确定性主要来自物理过程的简化与参数敏感性。本研究为提升计算效率，对雪崩动力学的模拟过程进行了简化，未考虑雪崩复杂的侵蚀作用、气浪效应，以及现有防护工程（如防雪墙和导雪堤）的拦截作用。同时，模型中涉及的关键物理参数（如摩擦系数、内聚力等）的取值对模拟结果将产生显著影响。最后，在结果验证层面，不确定性源于验证数据的缺乏和遥感解译的误差。在人迹罕至的青藏高原地区对雪崩危险性图进行有意义的验证非常具有挑战性。由于该地区雪崩研究基础薄弱，暂无相关雪崩历史数据库和官方的危险性地图为本文的计算结果提供交叉验证。此外，基于遥感影像的历史雪崩影响范围解译过程也存在误差，限制了模拟结果的精细验证。

随着数据获取技术的进步和工作的深入开展，本方法的输入数据将迎来质的飞跃。未来，可以利用无人机航测技术对夏季无雪数字地形进行精确建模，这已被证明是获取高精度地形与森林覆盖信息的有效手段（许强等，2019）。分辨率更高的地形数据将显著改善对地形和森林覆盖的三维表征，从而提高识别 PRA 和危险性地图的精度，并精确地揭示雪崩启动区与运动路径的地形控制机制(Sykes et al., 2022)。另外，针对不同的应用背景，考虑不同的雪崩动力学模型进行模拟对于兼顾效率和实用性是十分必要的。例如，考虑雪崩的气浪效应可以为输电线路的架设提供很好的参考(Zhuang et al., 2024)。为此，可以将先进的雪崩动力学模型 RAMMS:EXTENDED 集成到现有的处理链中(Bartelt et al., 2015)。这一升级将使模型能够模拟雪层侵蚀、内部液态水及温度的演化和气浪效应，从而为评估雪崩次生灾害（如气浪冲击）风险提供可能。最后，持续记录和监测青藏高原地区雪崩的历史事件是十分必要的，这不仅是进行更严格的模型验证和不确定性量化的基础，也是揭示该区域雪崩活动规律及其对气候变化响应的关键。

5 结论

随着人类活动和重大基础设施建设向高寒山区扩展，雪崩灾害的风险日益凸显。本文以西藏扎墨公路嘎隆拉段为例，结合GIS和数值模拟技术，构建了基于DEM数据的雪崩危险性评估框架，得到以下主要结论和认识：

(1) 建立了适用于数据匮乏高寒山区的雪崩危险性高效评估方法。基于DEM数据及其衍生参数（坡度、地表粗糙度、平面曲率、坡向），在一般与极端情境下分别识别出539个与526个潜在释放区，并通过数值模拟生成空间连续的雪崩危险性图。

(2) 在一般情境下，数值模拟结果表明雪崩影响面积达到43.89 km²，占研究区总面积的54.58%；极端情境下雪崩的扩散能力与影响范围明显增大，雪崩影响面积扩大至53.24 km²，占研究区总面积的66.20%。

(3) 扎墨公路嘎隆拉段受雪崩威胁显著，在一般与极端情境下，扎墨公路嘎隆拉段分别有16.7%和

25.8%的路段处于高危险等级之中，最大雪崩冲击压力可达580 kPa以上。基于综合分析，本研究将该路段划分为高、中、低、无四个危险性等级，明确了高危险区为防治工程的优先布局“靶区”。

本研究为雪崩危险性评估提供了可推广至类似高寒山区的技术框架，未来可通过获取高精度DEM、融合更先进数值模型（如RAMMS:EXTENDED）及积累历史案例数据，进一步推动方法完善与应用深化。

作者贡献说明

田旭文：概念与设计、写作与编辑、数据收集与处理、方法开发、野外调查与研究；**姚鑫**：项目管理、研究资金获取、野外调查与研究、论文审阅与修订；**周振凯**：数据收集与处理、论文审阅与修订；**陈晓强**：野外调查与研究、数据收集与处理；**宋光耀**：野外调查与研究、数据收集与处理；**朱姝**：野外调查与研究；**李显鑫**：野外调查与研究

参考文献

- Aydin, A., Bühler, Y., Christen, M., et al., 2014. Avalanche Situation in Turkey and Back Calculation of Selected Events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(5): 1145-1154. doi: 10.5194/nhessd-2-581-2014.
- Bartelt, P., Valero, C. V., Feistl, T., et al., 2015. Modelling Cohesion in Snow Avalanche Flow. *Journal of Glaciology*, 61(229): 837-850. doi: 10.3189/2015JoG14J126.
- Bühler, Y., Bebi, P., Christen, M., et al., 2022. Automated Avalanche Hazard Indication Mapping on a Statewide Scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6): 1825-1843. doi: 10.5194/nhess-22-1825-2022.
- 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. doi: 10.5194/nhess-18-3235-2018.
- Chen, L. J., 2021. Avalanche Hazard Assessment Based on Multi-Source Data: A Case Study in Northern Xinjiang. *China University of Geosciences*. (in Chinese with English abstract).
- Chen, N., Li, A., Tian, S., et al., 2024. Characteristics and Causes of a Catastrophic Snow Avalanche that Occurred on January 17, 2023, in Tibet. *Landslides*, 21(3): 661-667. doi: 10.1007/s10346-023-02205-5.
- Christen, M., Bartelt, P., Kowalski, J., 2010. Back Calculation of the In den Arelen Avalanche with RAMMS: Interpretation of Model Results. *Annals of Glaciology*, 51(54): 161-168. doi: 10.3189/172756410791386553.
- Duan, S. M., Liu, S. Y., Zhu, Y., et al., 2022. Reconstructing and Analyzing Avalanche Events of 1991 and 2019 in Meili Snow Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(3): 771-783. (in Chinese with English abstract).
- Ge, M. L., Li, X. Y., Huang, Y., et al., 2025. Influence Mechanism of Local Terrain Features on Snow Avalanche Dynamics. *Scientia Sinica (Technologica)*, 55(06): 1043-1054. (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Lai, P., Huang, F. M., et al., 2024. Literature Review and Research Progress of Landslide Susceptibility Mapping Based on Knowledge Graph. *Earth Science*, 49(05): 1584-1606. (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Chen, J. W., Fan, X. M., et al., 2022. Logistic Regression Fitting of Rainfall-Induced Landslide Occurrence Probability and Continuous Landslide Hazard Prediction Modelling. *Earth Science*, 47(12): 4609-4628. (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Ye, Z., Yao, C., et al., 2020. Uncertainties of Landslide Susceptibility Prediction: Different Attribute Interval Divisions of Environmental Factors and Different Data-Based Models. *Earth Science*, 45(12): 4535-4549. (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Gong, C., 2024. Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE

- Tibetan Plateau. *Earth Science*, 49(10): 3784-3798. (in Chinese with English abstract).
- Laute, K., Beylich, A. A., 2014. Morphometric and Meteorological Controls on Recent Snow Avalanche Distribution and Activity at Hillslopes in Steep Mountain Valleys in Western Norway. *Geomorphology*, 218: 16-34. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.06.006.
- Mayer, S., Hendrick, M., Michel, A., et al., 2024. Impact of Climate Change on Snow Avalanche Activity in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 18(11): 5495-5517. doi: 10.5194/tc-18-5495-2024.
- Ortner, G., Bründl, M., Kropf, C. M., et al., 2023. Large-Scale Risk Assessment on Snow Avalanche Hazard in Alpine Regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6): 2089-2110. doi: 10.5194/nhess-23-2089-2023.
- Reuter, B., Hagenmüller, P., Eckert, N., 2025. Trends in Avalanche Problems in the French Alps between 1958 and 2020. *Cold Regions Science and Technology*, 238: 104555. doi: 10.1016/j.coldregions.2025.104555.
- Salm, B., 1993. Flow, Flow Transition and Runout Distances of Flowing Avalanches. *Annals of Glaciology*, 18: 221-226. doi: 10.1017/S0260305500011551.
- Sampl, P., Zwinger, T., 2004. Avalanche Simulation with SAMOS. *Annals of Glaciology*, 38: 393-398. doi: <https://doi.org/10.3189/172756404781814780>.
- Shen, Y. P., Su, H. C., Wang, G. Y., et al., 2013. The Responses of Glaciers and Snow Cover to Climate Change in Xinjiang (II): Hazards Effects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(6): 1355-1370. (in Chinese with English abstract).
- Shu, X. Y., Wu, X. Y., Wen, H., et al., 2023. Comparison of Snow Avalanche Susceptibility Assessment and Potential Snow Avalanche Release Areas Identification along Yining-Aksu Railway, Xinjiang Tianshan Mountains. *Journal of Engineering Geology*, 31(13): 1200-1212. (in Chinese with English abstract).
- Sykes, J., Haegeli, P., Bühler, Y., 2022. Automated Snow Avalanche Release Area Delineation in Data-Sparse, Remote, and Forested Regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(10): 3247-3270. doi: 10.5194/nhess-2021-330.
- Thakur, K., Kumar, H., Snehamani, 2025. Avalanche Susceptibility Factors, Trends, Techniques, and Practices in Indian Himalaya: A Review. *Earth-Science Reviews*, 269: 105207. doi: 10.1016/j.earscirev.2025.105207.
- Tian, X. W., Wang, Y. B., Zhu, S., et al., 2025. Geological Environment and Main Geological Safety Challenges in the Northern Segment of the Southeast Xizang (Tibet) Power Transmission Corridor. *Journal of Geomechanics*, 31(1): 91-108. (in Chinese with English abstract).
- Védrine, L., Li, X., Gaume, J., 2022. Detrainment and Braking of Snow Avalanches Interacting with Forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3): 1015-1028. doi: 10.5194/nhess-22-1015-2022.
- Wang, K., Li, X., Huang, Y., et al., 2025. Analysis on Density Profile Characteristics of Naturally Deposited Snow and Avalanche Deposition. *Earth Science*, 50(10): 3955-3966. (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. L., 1986. A Wet Snow Avalanche with Heavy Harmfulness in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 01: 52-60+97-98. (in Chinese with English abstract).
- Wen, H., 2024. Spatio-Temporal Evolution Mechanism of Channeled Snow Avalanches in the Parlung Tsangpo Catchment. *Southwest Jiaotong University*. (in Chinese with English abstract).
- Woodard, J. B., Mirus, B. B., 2025. Overcoming the Data Limitations in Landslide Susceptibility Modeling. *Science Advances*, 11(8): eadt1541. doi: 10.1126/sciadv.adt1541.
- Xu, Q., Dong, X. J., Li, W. L., 2019. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract).

- Yang, J., Huang, X., 2021. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13: 3907–3925. doi: 10.5194/essd-13-3907-2021.
- Yariyan, P., Omidvar, E., Karami, M., et al., 2022. Evaluating Novel Hybrid Models Based on GIS for Snow Avalanche Susceptibility Mapping: A Comparative Study. *Cold Regions Science and Technology*, 194: 103453. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103453.
- Yuan, X. X., Guo, C. B., Yan, Y. Q., et al., 2025. Landslide Hazard Assessment in Alpine Gorge Region Based on Slope Units and SBAS-InSAR Surface Deformation Velocity: A Case Study of the Diwu Township Section in the Upper Reaches of Jinsha River. *Earth Science*: 1–20. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Liu, J. K., Gao, B., et al., 2018. Characteristics of Material Sources of Galongqu Glacial Debris Flow and the Influence to Zhamo Road. *Journal of Geomechanics*, 24(01): 106–115. (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).
- Zhang, P.P., Li, B., Gao, H.Y., et al., 2025. Evolutionary Characteristics and Movement Process of the January 2023 Duoxiongla Snow Avalanche, Tibet. *Natural Hazards*, 121(4): 4901-4927. doi: 10.1007/s11069-024-06996-1.
- Zhang, T. Y., Liu, J., Wang, B., et al., 2024. Sensitivity Analysis of Avalanche Simulation Parameters Based on RAMMS-AVALANCHE Model. *Science Technology and Engineering*, 24(8): 3466-3478. (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, Y., Xing, A.G., Bilal, M., et al., 2024. The Effect of Ambient Air Temperature on Meltwater Production and Flow Dynamics in Snow Avalanches. *Landslides*, 21(10): 2389-2398. doi: 10.1007/s10346-024-02303-y.

中文参考文献

- 陈联君. 2021. 基于多源数据的雪崩危险性评价——以北疆地区为例. 中国地质大学.
- 段仕美, 刘时银, 朱钰, 等. 2022. 梅里雪山1991年和2019年雪崩事件重建及影响因素分析. 冰川冻土, 44(3): 771-783.
- 葛梦林, 李星月, 黄雨, 等. 2025. 局部地形特征对雪崩动力行为影响机制研究. 中国科学:技术科学, 55(06): 1043-1054.
- 郭飞, 赖鹏, 黄发明, 等. 2024. 基于知识图谱的滑坡易发性评价文献综述及研究进展. 地球科学, 49(05): 1584-1606.
- 黄发明, 陈佳武, 范宣梅, 等. 2022. 降雨型滑坡时间概率的逻辑回归拟合及连续概率滑坡危险性建模. 地球科学, 47(12): 4609-4628.
- 黄发明, 叶舟, 姚池, 等. 2020. 滑坡易发性预测不确定性: 环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影响. 地球科学, 45(12): 4535-4549.
- 黄海, 龚诚. 2024. 藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征. 地球科学, 49(10): 3784-3798.
- 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 2013. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II):灾害效应. 冰川冻土, 35(6): 1355-1370.
- 舒晓燕, 巫锡勇, 文洪, 等. 2023. 新疆天山伊阿铁路区域雪崩易发性与潜在释放区识别对比研究. 工程地质学报: 31(13): 1200-1212.
- 田旭文, 王彦兵, 朱姝, 等. 2025. 藏东南输电走廊北线区域地质环境与主要地质安全问题. 地质力学学报, 31(1): 91-108.
- 王楷迪, 李星月, 黄雨, 等. 2025. 自然积雪与雪崩堆积体的剖面密度特征分析. 地球科学, 50(10):3955-3966.
- 王彦龙. 1986. 我国危害性较大的湿雪雪崩. 冰川冻土, 01: 52-60+97-98.
- 文洪. 2024. 帕隆藏布流域沟槽型雪崩时空演化机制研究. 西南交通大学.
- 许强,董秀军,李为乐. 2019. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. 武汉大学学报(信息科学版), 44(07):957-966.

袁新霞, 郭长宝, 闫怡秋, 等. 2025. 基于斜坡单元与SBAS-InSAR地表形变速率的高山峡谷区滑坡危险性评价: 以金沙江上游地巫乡段为例. 地球科学, 1-20.

张佳佳, 刘建康, 高波, 等. 2018. 藏东南嘎龙曲冰川泥石流的物源特征及其对扎墨公路的影响. 地质力学学报, 24(01): 106-115.

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.

张天意, 刘杰, 王斌, 等. 2024. 基于RAMMS-AVALANCHE模型的雪崩模拟参数敏感性分析. 科学技术与工程, 24(8): 3466-3478.