

引用格式: 强小文, 杨治纬, 程秋连, 李雅群, 刘杰. 新疆阿勒泰喀纳斯山区道路雪崩灾害特征及致灾机制[J]. 山地学报, 2025, 43(3): 453-468.
QIANG Xiaowen, YANG Zhiwei, CHENG Qiulian, LI Yaqun, LIU Jie. Characteristics and triggering mechanisms of avalanche disasters along mountainous roadways in the Kanas Region, Altay Prefecture, Xinjiang, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(3): 453-468.

新疆阿勒泰喀纳斯山区道路雪崩灾害特征及致灾机制

强小文^{1,2}, 杨治纬², 程秋连², 李雅群^{1,2}, 刘杰^{1,2*}

(1. 新疆大学 建筑工程学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司 新疆高寒高海拔山区交通基础设施安全与健康重点实验室, 乌鲁木齐 830006)

摘要: 随着冰雪经济的发展与交通设施向山区延伸, 雪崩对中国高寒山区道路安全构成日益严峻的威胁。2024年1月, 新疆阿勒泰喀纳斯山区连续遭遇强降雪, 引发多次大规模雪崩, 造成3人死亡, 逾4800人受困, 道路中断总长约150 km。为深入揭示该区域雪崩灾害的分布特征与致灾机制, 本研究以喀纳斯山区道路为研究对象, 综合运用无人机遥感影像解译、野外调查与RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) 数值模拟等方法, 对216处雪崩事件系统分析, 并结合S232省道K17处大型雪崩数值模拟, 深入探究雪崩空间分布特征及其致灾机制。结果表明: (1) 雪崩分布特征。研究区雪崩灾害在坡向 $112.5^{\circ} \sim <157.5^{\circ}$ 及 $202.5^{\circ} \sim <247.5^{\circ}$ 的半阳坡区域和 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 坡度区段呈现显著聚集特征, 分布密度分别达到52%和87.5%。(2) 雪崩动力学参数。S232 K17处雪崩峰值速度为29.44 m/s (约106 km/h), 最大冲击力为260.9 kPa, 冲击道路时, 速度衰减至20 m/s, 仍产生126 kPa动态压力 (等效 12.8 t/m^2), 堆积高度达4.8 m, 形成约 $180 \text{ m} \times 260 \text{ m}$ 的堆积扇, 造成道路持续中断。模拟堆积高度与实测值之间误差为0.2 m, 表明RAMMS模型结果与实地观测高度一致, 具备较高模拟精度和区域适用性。(3) 雪崩形成机制。地形控制、强降雪输入、低温和强风等多重因素耦合下导致雪崩发生。强降雪增加积雪负荷, 温度波动抑制雪层稳固转化, 强风导致积雪再分配, 并在沟槽与漏斗型地形的低压区形成高厚度积雪堆积 (积雪高度可达自然积雪高度的2~4倍), 从而诱发雪崩。本研究首次实现对喀纳斯山区道路雪崩事件的科学解译与动力学定量评估, 为区域雪崩风险识别、道路防灾布设与应急响应提供科学支撑, 亦为高寒山区雪崩模拟与管理提供参考范式。

关键词: 雪崩; 灾害特征; 致灾机制; 山区道路; RAMMS 模拟; 喀纳斯; 新疆

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

雪崩在全球高山极寒区广泛发生, 具有突发性强、破坏性大、影响范围广的特点, 对山区交通网络、工程设施安全及居民生命财产安全构成持续性威胁^[1-5]。全球变暖背景下, 极端天气频发驱动积雪相变加速与雪崩活动增强, 致灾机制呈现多尺度复

杂化趋势^[6-9]。

中国雪崩高发区主要分布于青藏高原、天山山脉和阿尔泰山脉^[1,10-11]。国内雪崩研究主要集中在西藏东南部 (林芝-昌都构造带) 及天山区域^[12-15], 研究内容包括地形地貌、气候气象条件对雪崩触发与运动

收稿日期 (Received date): 2025-03-26; 改回日期 (Accepted date): 2025-06-16

基金项目 (Foundation item): 交通行业重点科技项目 (2022-ZD6-090); 新疆交通运输厅交通运输行业科技项目 (2022-ZD-006); 新疆交投集团2021年度“揭榜挂帅”科技项目 (ZKXFWCG2022060004); 新疆交通设计院科技研发项目 (KY2022041101)。[Key Technology Research and Development Program of Ministry of Transport of China (2022-ZD6-090); Science and Technology Project for Transportation Industry of Xinjiang Transportation Department (2022-ZD-006); Xinjiang Jiaotou Group's 2021 Annual Open-Tender R&D Project (ZKXFWCG2022060004); Xinjiang Transportation Design Institute Science and Technology R&D Project (KY2022041101)]

作者简介 (Biography): 强小文 (1996-), 男, 四川南充人, 硕士研究生, 主要研究方向: 公路雪崩灾害防治。[QIANG Xiaowen (1996-), male, born in Nanchong, Sichuan Province, M. Sc. candidate, research on cryospheric hazard mitigation in transportation corridors] E-mail: jiangxiaowen@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 刘杰 (1986-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 公路冰雪灾害防治。[LIU Jie (1986-), male, Ph. D., professor of engineering, research on cryospheric hazard mitigation in transportation corridors] E-mail: hfutliujie@163.com

过程的影响,并已经积累了一定程度的认知^[16-19]:地形特征通过影响雪层稳定性阈值、运动路径选择及能量耗散模式,成为决定雪崩灾害效应的关键环境因子;而气候要素则通过调控降雪强度、温度波动及风速变化,间接驱动雪崩时空分布格局的演变。雪崩的演化及灾害效应受多重驱动因素控制,涉及不同空间尺度和复杂的动力过程,并显著受到区域环境条件的制约^[20-22]。

随着中国冰雪经济的快速发展,山区的雪崩灾害防治需求日益增加^[23]。在新疆阿勒泰喀纳斯山区,受季风气候与大陆性气候交汇影响,雪崩灾害频发,雪崩活动呈现独特的季节性规律与空间分异特征。该区域道路雪崩灾害已对区域交通动脉(如S232省道)造成持续性威胁,但当前研究仍存在三大空白:其一,缺乏基于多源数据融合的雪崩时空分布特征定量解析;其二,尚未建立适用于复杂地形条件下的雪崩动力学模型;其三,未系统揭示气候-地形-人类活动耦合作用下的雪崩致灾链式机制。随着冰雪旅游产业快速发展,喀纳斯山区雪崩灾害风险防控需求已从传统的被动应急转向主动预警与工

程防治并重,但现有研究体系难以支撑区域性防灾减灾决策需求。

本研究以阿尔泰山喀纳斯山区道路雪崩为对象,整合无人机遥感与地面调查、定点监测,针对2024年1月极端降雪事件,构建雪崩动力学数据表,运用GIS空间分析技术建立高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),数值反演雪崩触发关键因子及其相互作用网络,揭示雪崩灾害空间分异规律及其环境驱动机制。研究成果揭示了喀纳斯山区道路雪崩活动的空间分异性规律及其地形-气候耦合作用机制,可为研究区雪崩风险防控体系构建提供定量化地形阈值参数,也为同类山区雪崩灾害防控提供了可复制的技术框架。

1 研究区域地理背景

1.1 地理位置与区域概况

研究区位于新疆阿勒泰地区布尔津县与哈巴河县北部(图1),地理位置为 $48^{\circ}23' \sim 49^{\circ}11'N$ 、 $86^{\circ}45' \sim 88^{\circ}11'E$,海拔范围为400~2950 m,平均海

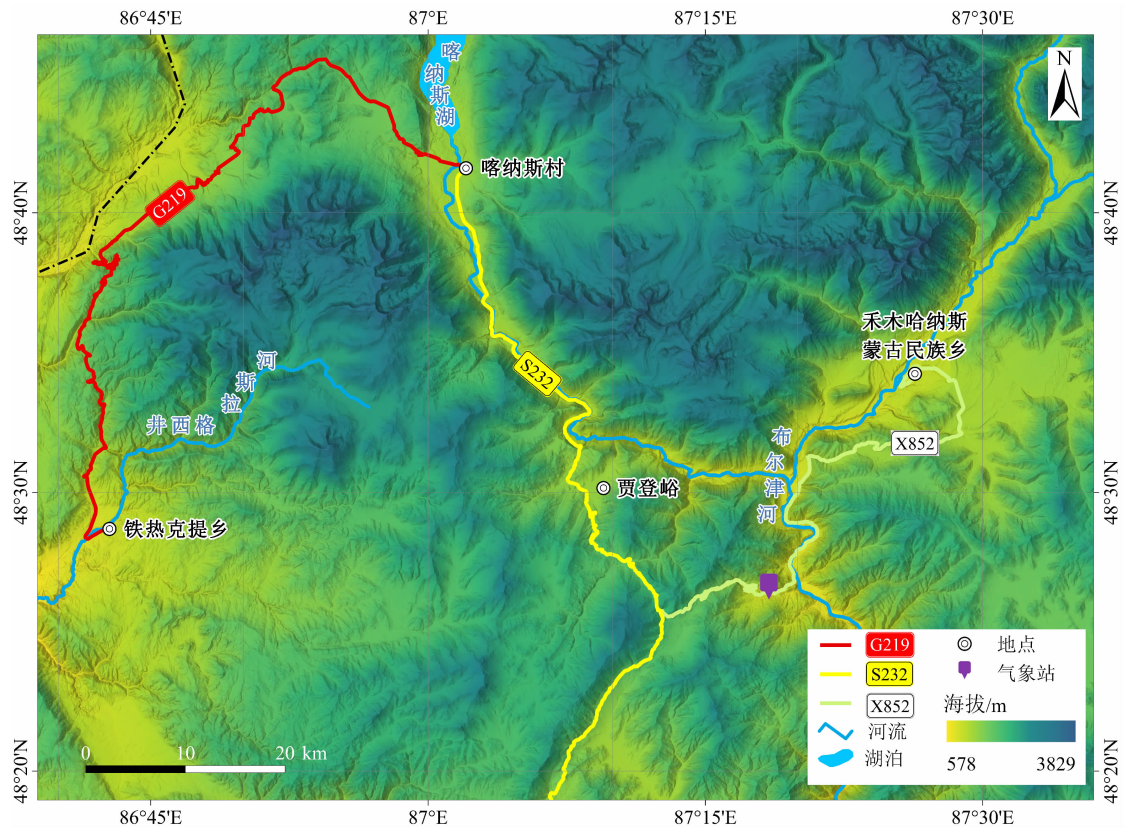


图1 喀纳斯山区概况

Fig. 1 Overview of the Kanas mountain region, China

(审图号:GS(2024)0650号)

拔1375 m。研究范围选取喀纳斯山区雪崩频发的省道 S232(K0 ~ K72)段、国道 G219(K91 ~ K160)和 X852(K0 ~ K50)段,全线共 191 km,其地形复杂,冬季降雪量大,雪崩活动频繁。

阿尔泰山脉受多次构造运动,地层受构造挤压隆起、地槽沉降,形成了北西向的褶皱山系。研究区地形包括山地、河谷及缓斜坡地,平均坡度为 $24^{\circ} \sim 48^{\circ}$,为雪崩发育提供了有利的地形条件^[24-26]。植被类型丰富多样,包括山地草原、草甸、灌丛、针阔混合林,植被垂直分带规律明显^[27],山地林木和灌丛能够有效减少风对积雪的搬运,对雪崩的形成具有一定的抑制作用,并在雪崩运动过程中发挥阻滞与耗能效应,从而减缓雪崩的破坏力^[28-30]。然而,在积雪的长期积累达到临界阈值时,这些植被结构可导致积雪的集中释放,进而引发更大规模、更具破坏性的雪崩灾害。

1.2 气象条件

喀纳斯山区位于阿尔泰山脉中段,属于温带大陆性寒冷气候,冷季持续 6~8 个月,暖季短暂,年气温差达 $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$,并受西伯利亚高压带来的冷空气与中亚低压带来的湿润空气共同影响,导致区域降雪频繁。研究区年均降水量约为 1065 mm,其中 80% 以上集中在冬季,以降雪形式出现^[1,31],积雪深度随海拔升高增加。区域年均气温约为 -4°C ,冬季最低气温可达 -40°C 以下,显著的低温条件为积雪的长期保存提供了有利环境。研究区是中国积雪季节最长的地区之一,年平均积雪日数达 170 d 以上^[1,11],为雪崩的发育提供了有利物质条件。

2 数据及方法

2.1 调查方法

结合雪崩灾害应急调查工作,2023—2025 年对喀纳斯山区道路开展了分阶段的系统性雪崩灾害调查。调查共分为三个阶段:第一阶段(1—2 月)对应冬季雪崩高发期,重点监测高频次雪崩事件及其影响;第二阶段(3—4 月)涵盖积雪消融期,关注积雪稳定性演变及消融过程对坡面稳定性的影响;第三阶段(9 月)处于积雪前期,主要评估积雪初始累积条件及潜在雪崩风险。本研究的雪崩分析与模拟均基于 2024 年冬春季调查数据,

并辅以 2023 年和 2025 年的资料用于背景研判与后验验证。

通过多时段野外综合应用无人机航测与地面观测,系统获取了以下多源数据:(1)基于无人机获取的高分辨率遥感影像(拍摄时间为 2024 年 1 月 18 日,分辨率 0.1 m)解译雪崩灾害的空间分布特征及其形态参数(包括规模、运动路径与堆积范围),重点记录典型雪崩的断裂深度、堆积区雪墙形态及路径内树木损毁特征(图 2a~c);(2)整合三维地形点云数据与航拍影像,基于 GIS 空间分析方法提取雪崩形成区的主要地形因子,包括坡度、坡向和沟谷形态等地貌特征参数。其中,坡度与坡向的计算以典型雪崩释放区为分析单元,通过对 DEM 数据进行裁剪提取形成区范围后,进行栅格化处理与统计分析,获取该区域的平均地形特征,用于识别雪崩触发条件与空间分布关系;(3)基于积雪剖面观测的剖面结构特征及其物理力学参数,其中积雪密度通过 Snow Fork 雪特性分析仪原位测定(图 2d),同步获取温度梯度与硬度指数空间变异规律。

2.2 数据采集

气象数据源自布设于喀纳斯景区(海拔 1100 m, $48^{\circ}44'07''\text{N}$, $87^{\circ}31'52''\text{E}$)Campbell Scientific CR3000 型全自动气象站(Automatic Meteorological Station, AWS)(具体位置如图 1 所示),用于监测雪崩触发的关键气象条件。所有气象数据以 30 min 为间隔进行记录,并通过 GSM 网络每日远程传输至数据中心。对研究区道路进行野外踏勘,采用激光测距仪(TruPulse 200,量程 $1000\text{ m} \pm 20\text{ cm}$)测量雪崩通道的运动距离、高差、释放坡度等;使用无人机(DJI 经纬 M300 RTK、DJI Mavic 3E)航拍公路两侧地形;同时布置参考控制点,采用 RTK 技术测量像控点,校正航测数据高程误差。航拍影像经 Agisoft Metashape Professional 软件处理,生成稠密点云与三维网格模型,并导出分辨率为 1 m 的 DEM。利用 Global Mapper 与 ArcGIS Pro 对 DEM 进行栅格化处理、空洞填补与边界裁剪,以优化地形数据质量并提升其在雪崩模拟与地形因子提取中的应用效果。

2.3 RAMMS 数值模拟

采用 RAMMS(Rapid Mass Movement Simulation)(版本 1.8.27)雪崩动力学模型对省道 S232 K17 + 650 处雪崩事件进行数值模拟分析。RAMMS 数值模拟软件以 Voellmy-Salm 模式作为理论基础^[32-34],



图2 喀纳斯山区雪崩灾害野外勘探调查:(a)雪崩断裂深度;(b)堆积体高度;(c)雪崩损毁树木;(d)雪特性分析
Fig.2 Field investigation in the Kanas region: (a) avalanche fracture depth; (b) deposit height;
(c) avalanche-damaged trees; (d) snow characteristics survey

利用三维坐标系搭配流动深度 $H(x, y, t)$ 及平均速度 $U(x, y, t)$ 作为计算值,其质量守恒方程式如下:

$$\partial_t H + \partial_x (HU_x) + \partial_y (HU_y) = Q(x, y, t) \quad (1)$$

式中, $Q(x, y, t)$ 为质量来源,若 $Q > 0$ 为积雪夹带率,若 $Q < 0$ 为积雪沉积率。各分量深度平均动量守恒为:

$$\begin{aligned} \partial_t (HU_x) + \partial_x (\alpha_x HU_x^2 + g_z k \frac{H^2}{2}) + \partial_y (HU_x U_y) \\ = S_{gx} - S_{fx} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \partial_t (HU_y) + \partial_x (HU_x U_y) + \partial_y (\alpha_y HU_y^2 + g_z k \frac{H^2}{2}) \\ = S_{gy} - S_{fy} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, α_x 、 α_y 为 DEM 的形状因子; k 为主动与被动土压力系数之比; S_{gx} 、 S_{gy} 为驱动 x 和 y 方向的重力加速度; S_{fx} 、 S_{fy} 为摩擦力。

DEM 数据用于提取地形信息,确保地形特征对模型的精确表征。在 RAMMS 模型中,雪崩形成区范围基于实地调查和无人机遥感影像划定。参考

RAMMS 使用手册建议,并结合研究区实际情况调整后,滑动摩擦系数 μ 与紊流摩擦系数 ξ 分别设定为 0.225 和 2000,具体参数设置见表 1。通过雪崩动力学模型模拟,输出雪崩流速、动压、堆积范围等空间分布信息,并重点分析了雪崩到达道路时的冲

表 1 RAMMS 模型参数值

Tab. 1 RAMMS model parameter values

参数类别	参数名称	符号	值	单位
地形	DEM		1	m
形成区	断裂深度		0.42	m
	积雪密度	ρ	280	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	释放体积		97 209	m^3
摩擦模型	滑动摩擦系数	μ	0.225	—
	紊流摩擦系数	ξ	2000	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
	内聚力	N_0	50	Pa
模拟	步长		2	s
	最大计算时间		300	s
	输出间隔		5	s

击力与堆积特征。

3 灾情分析

3.1 雪崩类型及灾害影响

地形特征是影响雪崩形成的重要因素之一,根据雪崩运动路径和地形特征可将雪崩分类为沟槽型(图 3a)和坡面型雪崩(图 3b)两种类型。根据 2023—2025 年现场实地调查统计,研究区道路沿线雪崩以坡面型雪崩为主,占总数的 68%,多分布于植被稀疏的裸坡区域。沟槽型雪崩则相对较少,但一旦发生,其流动路径较长,动能大、破坏性更强。本文综合分析雪崩发生时的气象条件与雪层含水率,可进一步划分为干雪型与湿雪型两类(图 3c、3d)。干雪雪崩指积雪内部几乎不含液态水、以滑动脆性破坏为主的雪崩过程;而湿雪雪崩则表现为雪层中液态水含量显著升高,滑移与塑性破坏过程共存,通常与气温升高或降雨密切相关。湿雪雪崩的堆积体常表现出特征性地貌,如雪球和条带状冲刷痕,可作为判别其类型的重要辅助标志。

基于 2023—2024 年实地调查,研究区内干雪雪

崩占比为 68%,主要集中于 1—2 月,呈现出明显的季节性特征;湿雪雪崩占比为 32%,集中发生于 3 月。此外,多个区域在不同时段先后发生干湿雪崩。这反映了不同类型雪崩的时序演化规律。

2024 年 1 月,新疆喀纳斯地区连续强降雪引发多起雪崩灾害。现场调查研究区雪崩最大运动距离达 2.2 km,并在运动过程中裹挟倒木(最大直径 98 cm)(图 4a)、岩屑及沿途土壤,形成高密度碎屑流,显著增强其冲击破坏势能。调查显示,喀纳斯山区公路沿线共有约 150 km 路段存在雪崩风险,其中约 40 km(占 27%)路段在 2024 年发生的雪崩事件中完全中断(图 4b),对交通造成显著影响。其中,S232 K17~K28 段尤为典型,2024 年 1 月 12 日—2 月 6 日全程中断通行,累计中断时长达 25 d,为该时段受雪崩影响最为严重的路段。雪崩冲击导致公路沿线防护设施发生剪切破坏(图 4c),部分车辆被困于雪崩堆积体中(图 4d),给救援与道路保通工作带来了极大困难。雪崩波及周边居民区,造成交通中断和物资供应困难,显著影响区域通行能力与运输安全。此外,雪崩对冰雪旅游产业造成冲击,引发直接经济损失。

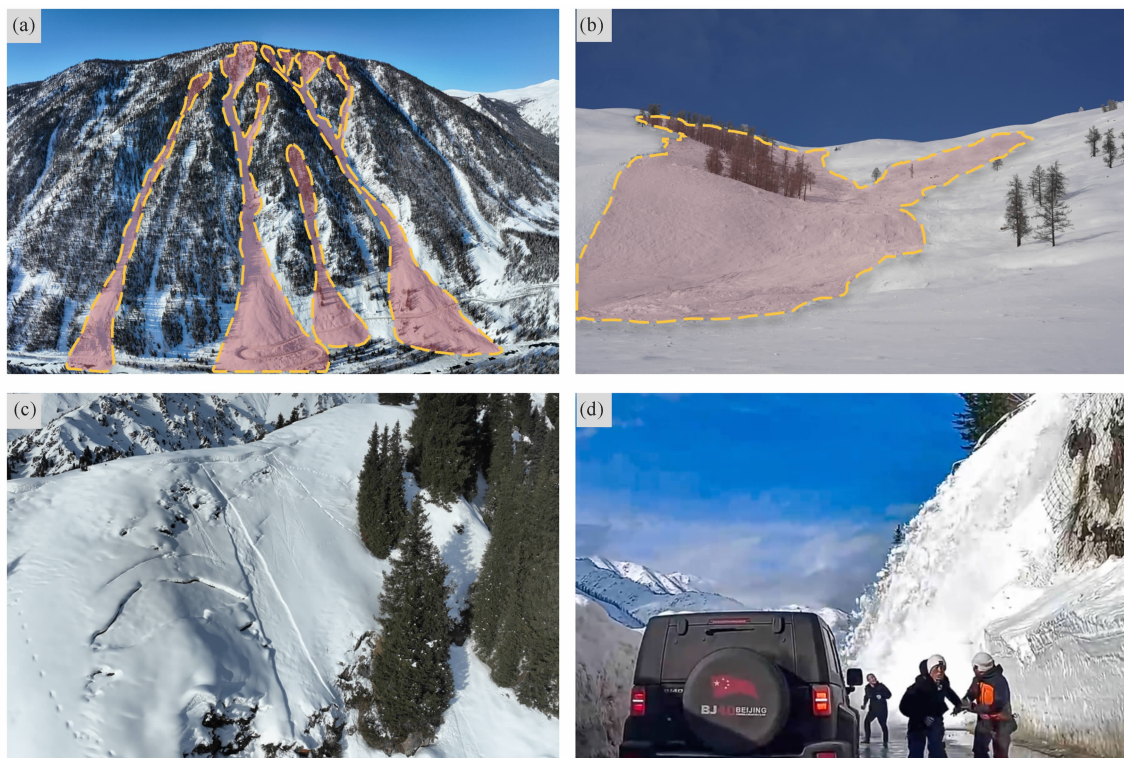


图 3 雪崩类型:(a)沟槽型雪崩;(b)坡面型雪崩;(c)干雪崩;(d)湿雪崩

Fig. 3 Avalanche types: (a) gully avalanche; (b) slope avalanche; (c) dry-snow avalanche; (d) wet-snow avalanche



图4 雪崩灾害影响典型案例:(a)雪崩裹挟树木;(b)雪崩堵塞公路;(c)损坏公路构筑物;(d)雪崩掩埋车辆

Fig.4 Typical cases affected by avalanche disasters;

(a) avalanche entraining trees; (b) avalanche blocking the roadway; (c) damage to road structures; (d) avalanche burying vehicles

3.2 雪崩空间分布特征

本研究依据雪崩对道路等关键区域的影响迹象,将在公路附近识别出明确雪崩痕迹的情形定义为一次雪崩事件。通过无人机低空遥感影像的目视解译与野外踏勘验证,共识别雪崩事件 216 处(图 5)。在省道 S232 沿线记录到坡面型雪崩 56 处、沟槽型雪崩 32 处,事件主要集中在 K10 ~ K20、K20 ~ K30、K50 ~ K60 三个区段(表 2),该区段雪崩数量占省道 S232 雪崩总数的 88.8%,分布密度为 2.43 处/km;国道 G219 沿线记录到坡面型雪崩 48 起、沟槽型雪崩 6 起,雪崩事件主要集中在 K131 ~ K141、K141 ~ K151、K151 ~ K160 三个区段,该区段雪崩数量占国道 G219 线雪崩总数的 83.3%,分布密度为 2.25 处/km;县道 X852 沿线记录到坡面型雪崩 42 起、沟槽型雪崩 32 起。雪崩事件全部集中在 K20 ~ K30、K30 ~ K40 和 K40 ~ K50 三个区段,分布密度为 2.47 处/km。

雪崩的分布规律与地形条件密切相关。坡度是雪崩形成的直接动力来源,对雪崩启动的可能性起决定性作用;在坡度较小的区域,由于重力分量不

表 2 喀纳斯山区道路雪崩分布

Tab.2 Spatial distribution of road avalanches in the Kanas mountain area

道路	区间	雪崩数量		雪崩总数	分布密度/(处/km)
		沟槽型	坡面型		
S232	K0 ~ K10	0	0	88	2.43
	K10 ~ K20	13	5		
	K20 ~ K30	16	9		
	K30 ~ K40	0	1		
	K40 ~ K50	0	7		
	K50 ~ K60	2	24		
G219	K60 ~ K72	1	0	54	5.25
	K91 ~ K101	0	0		
	K101 ~ K121	0	0		
	K121 ~ K131	0	1		
	K131 ~ K141	0	8		
X852	K141 ~ K151	3	25	74	2.47
	K151 ~ K160	3	14		
	K0 ~ K10	0	0		
	K10 ~ K20	0	0		
X852	K20 ~ K30	13	20	74	2.47
	K30 ~ K40	9	12		
	K40 ~ K50	10	10		

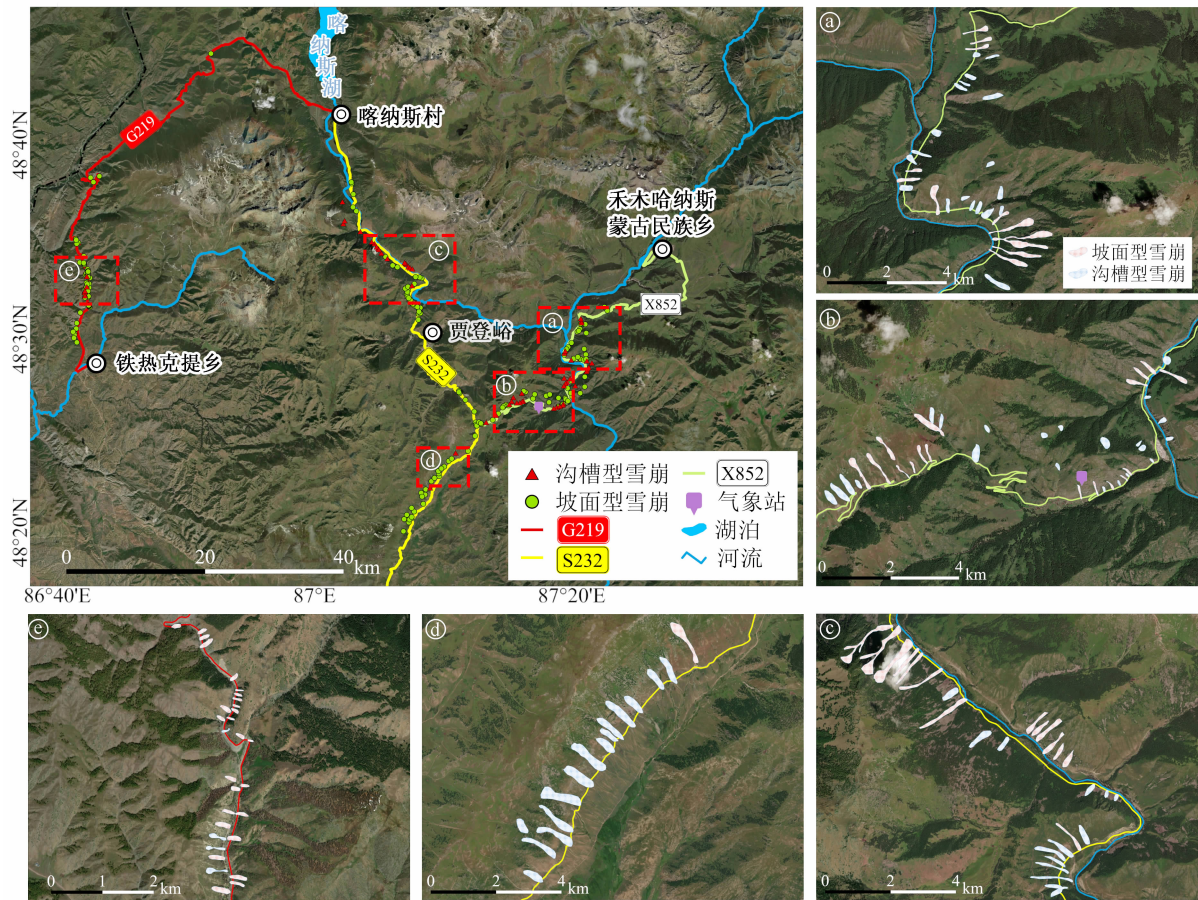


图5 喀纳斯山区道路雪崩分布

Fig. 5 Distribution of road avalanches in the Kanas mountain area

足,积雪层难以达到启动所需的剪切力,从而保持稳定;而在坡度较大的区域,积雪难以长时间停留,在降雪后迅速滑落或触发小规模雪崩。对216处雪崩事件所在区域的坡度进行统计分析,并以 10° 为间隔划分(图6a)。结果显示,雪崩主要释放坡度集中在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 范围内,占有雪崩事件的87.5%,表明该坡度区间为研究区域内雪崩高风险区。该坡度区间既具备足够的重力驱动力,又能积累足够深度的雪层,使其成为雪崩高频发生的坡度敏感范围。

对雪崩形成区的海拔进行统计分析,并以200 m为间隔划分(图6b)。结果表明,雪崩主要释放海拔集中在1300 m~1800 m范围内,占有雪崩事件的64%。高海拔区域的雪崩形成受多种环境因素的共同影响,包括低温条件、季节性降雪的累积效应以及强风场作用,这些因素协同作用,使得雪崩物质基础更加丰富。同时,高海拔雪崩形成区与公路之间存在较大高差,增强了雪崩的重力势能,显著

延长其运动路径。研究区内最长雪崩运动路径可达2200 m,图6c中彩球大小对应不同路径长度。随着海拔升高,风速显著增加,风将积雪搬运至背风坡,并在山脊线上形成雪檐,当雪檐厚度超过稳定性阈值,或受到外部扰动(如降雪、温度变化或额外载荷)时,易发生断裂崩塌,进而触发雪崩。此外,高海拔区域的沟槽地形与漏斗型坡面因收缩效应形成相对低压区,该区域的涡流效应削弱了局部风速,使空气中的雪颗粒在此沉降,从而为沟槽型雪崩的触发提供了必要的积雪条件。

坡向是影响雪崩分布及发生的重要地形因素之一,坡向的差异直接决定了雪崩的分布特征及触发机制^[35-36]。本研究在坡向分类上,参考北半球日照主导方向,将坡向划分为阳坡、半阳坡、阴坡与半阴坡四类(表3),用于识别雪崩在不同日照暴露条件下的分布规律。统计分析结果显示:雪崩主要分布在半阳坡范围,雪崩数量达113处,占总雪崩数的52%;半阳坡受太阳辐射主导影响,昼夜温差可达 15°C ,频繁发生

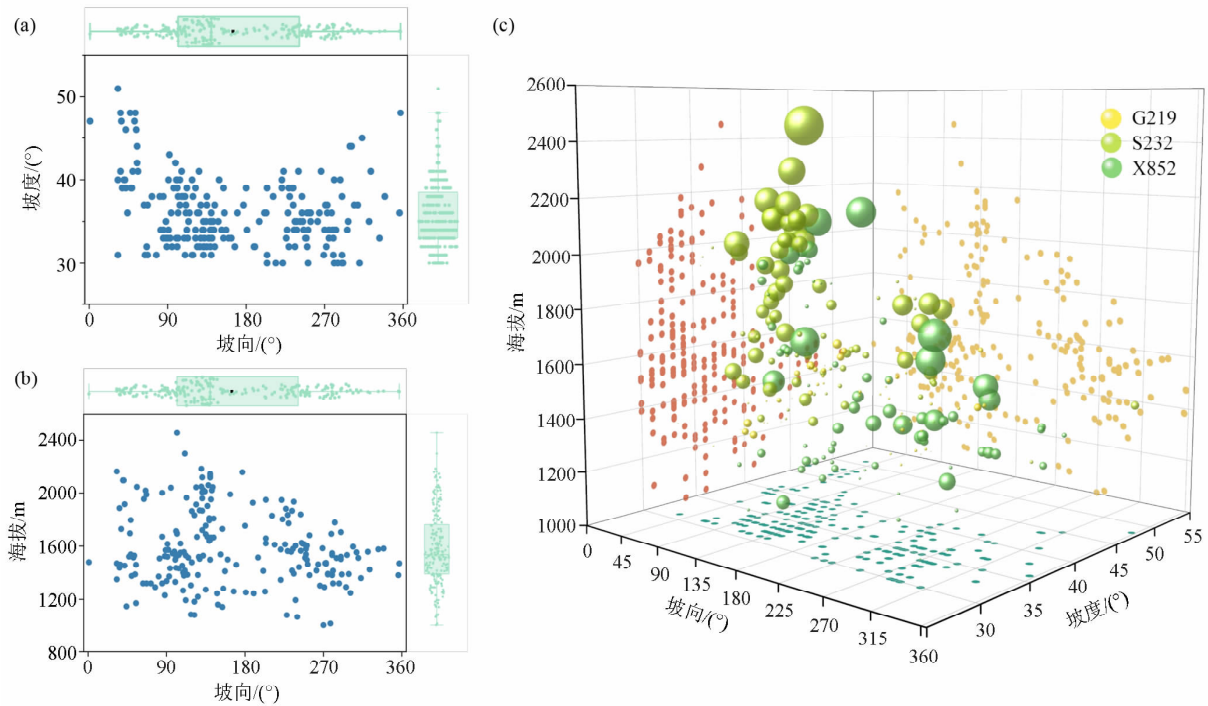


图 6 雪崩点地形因子分析及分布规律:

(a) 雪崩事件坡向-坡度分布特征; (b) 雪崩事件坡向-海拔分布特征; (c) 雪崩地形参数三维空间分异与运动距离关联特征

Fig. 6 Analysis of topographic factors at avalanche points and their distribution patterns;

(a) distribution of avalanche events by slope aspect and slope; (b) distribution of avalanche events by slope aspect and elevation;

(c) 3D spatial differentiation of avalanche terrain parameters and their correlation with runout distances

表 3 坡向与雪崩数量统计

Tab. 3 Slope orientation and avalanche frequency statistics

坡向类型	角度范围/(°)	雪崩数目	所占比例/%
阳坡	157.5 ~ <202.5	11	5
半阳坡	112.5 ~ <157.5	113	52
	202.5 ~ <247.5		
阴坡	0 ~ <22.5	4	2
	337.5 ~ <360.0		
半阴坡	67.5 ~ <112.5	88	41
	247.5 ~ <292.5		
	22.5 ~ <67.5		
	292.5 ~ <337.5		

积雪融-冻循环,易形成软弱层,显著增加雪崩概率。此外,阳坡植被覆盖低,森林冠层遮挡有限,积雪更易受辐射加热,加剧融冻过程,进一步降低雪层稳定性。相比之下,阴坡因辐射通量较低,积雪温度梯度较为稳定,雪层硬度和黏聚力维持在较高水平,从而降低了雪崩的发生概率。然而,在长期低温环境下,阴坡季节性积雪深度可达阳坡的 2~3 倍,同时阴坡植被

覆盖度更高,能够有效减少风蚀和雪崩启动风险,但在强降雪事件或风积作用的叠加影响下,积雪荷载可能超过坡面稳定性阈值,从而引发规模更大的雪崩。

3.3 S232 K17 雪崩数值模拟及成因分析

为进一步分析典型雪崩事件的运动过程及其对交通设施的影响,本研究选取省道 S232 K17 + 650 路段作为 RAMMS 模拟点。该区域于 2024 年 1 月 11 日发生严重雪崩事件,造成工程车辆被掩埋并导致 3 人死亡,灾害影响显著。雪崩运动路径完整,破坏痕迹清晰,具备开展数值模拟与实测对比验证的良好基础。

雪崩释放于东北坡向坡面(海拔 2164 m),沿着 1400 m 天然沟槽滑行。雪崩经过 U 型沟槽将势能转化为动能,同时携带沿途积雪、林木及岩块,然后以巨大的压力、速度冲击公路(海拔 1303 m),摧毁公路沿线构筑物,最终雪崩制动于河道(海拔 1264 m)内。基于现场观测,此次雪崩掩埋公路 1000 m,平均堆积高度 3.8 m,最大堆积高度 5.0 m(图 7a),导致一台正在作业的除雪机械冲离公路约

100 m(图 7b)。

根据 2024 年 1 月 13 日的现场测量与无人机航拍影像分析(图 7c),雪崩由山顶多条支沟汇集形成,雪崩源区位于山脊,具有典型的上宽下窄漏斗状地貌。基于周边相似地形的雪崩形成区积雪特性:雪板断裂深度平均为 42 cm(图 7d),平均密度为 280 kg/m^3 。根据无人机遥感影像与 GIS 空间分析,雪崩形成区的平均坡度为 37° ,总面积约为 $231\,449 \text{ m}^2$,体积为 $97\,209 \text{ m}^3$,释放质量 $27\,218 \text{ t}$ 。雪崩过程经 RAMMS 模拟计算显示(表 4),整个运动过程持续约 176 s,雪崩沿流通区瞬时最大流速达到 29.44 m/s (约 106 km/h)(图 8a),峰值冲击力为 260 kPa (图 8b)。雪崩在冲击公路时,速度降至约 19.65 m/s (约 72 km/h),仍产生 126 kPa 动态压力(等效 12.8 t/m^2),对道路上的车辆和人员构成严重威胁。最终,雪崩在公路与河道交会处形成了长

度约 180 m、最大宽度约 260 m 的堆积扇,模拟结果与现场调查数据高度吻合,堆积范围误差约 4 m,道路最大堆积高度达 4.8 m(图 8c),误差约为 0.2 m 。为验证模型模拟精度,将模拟结果与无人机航拍影像及现场观测数据进行对比,结果显示模拟的流动路径、堆积范围与实际雪崩路径、堆积高度吻合。

根据 AWS 记录数据(图 9),2024 年 1 月 6 日至 13 日研究区连续多日大规模降雪,使禾木气象站区域积雪累计增厚至 800 mm。第一次降雪事件从 1 月 6 日中午持续到 1 月 7 日中午,导致地面积雪深度增加 220 mm。降雪过后气温骤降 10°C ,引发融冻循环过程,激烈的温差变化促使雪表层迅速重结晶,形成脆弱的板状结构,并加剧积雪内部的温差梯度,诱发积雪层内发育深霜层^[37-39]。第二次降雪事件自 1 月 8 日下午至 9 日凌晨,地面积雪深度增加 100 mm,伴随 18 h 内平均 7.5 m/s 的和风吹积,进



图 7 S232 K17 雪崩现场调查影像:

(a) 堆积体高度; (b) 事故工程车辆; (c) S232 K17 雪崩无人机航拍影像; (d) 雪崩断裂深度

Fig. 7 Field investigation photos of avalanche at S232 K17;

(a) deposit height; (b) damaged construction vehicle; (c) UAV aerial image of the S232 K17 avalanche; (d) fracture depth

表4 雪崩路径不同区域的地形特征与数值模拟结果

Tab.4 Topographic characteristics and numerical simulation results of different avalanche path zones

区域	平均坡度/(°)	海拔/m	时间/s	最大速度/(m/s)	最大压力/kPa	速度变化/(m/s)	压力变化/kPa
形成区	37	1953 ~ 2164	0 ~ 34	18.54	115	0 ~ 19	0 ~ 115
流通区	43	1364 ~ 1953	35 ~ 91	29.44	260	15 ~ 29	99 ~ 260
堆积区	25	1264 ~ 1364	92 ~ 176	22.57	140	0 ~ 22	0 ~ 140
公路	28	1303	112	19.65	126		

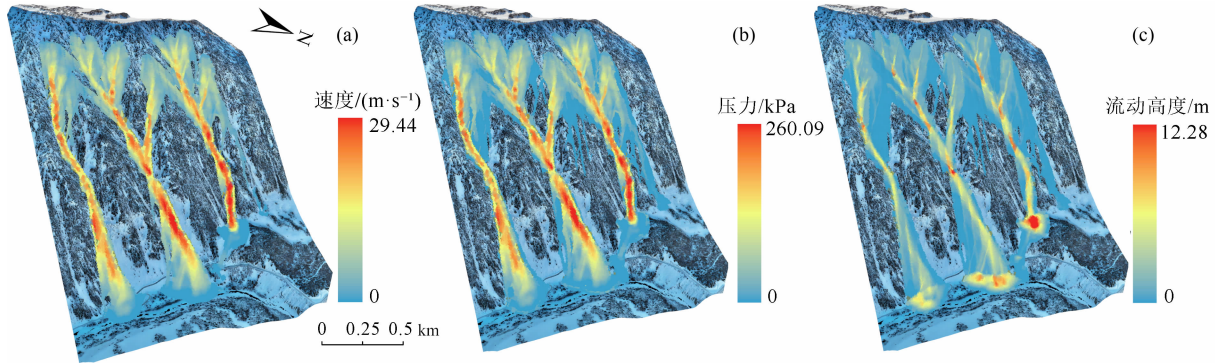
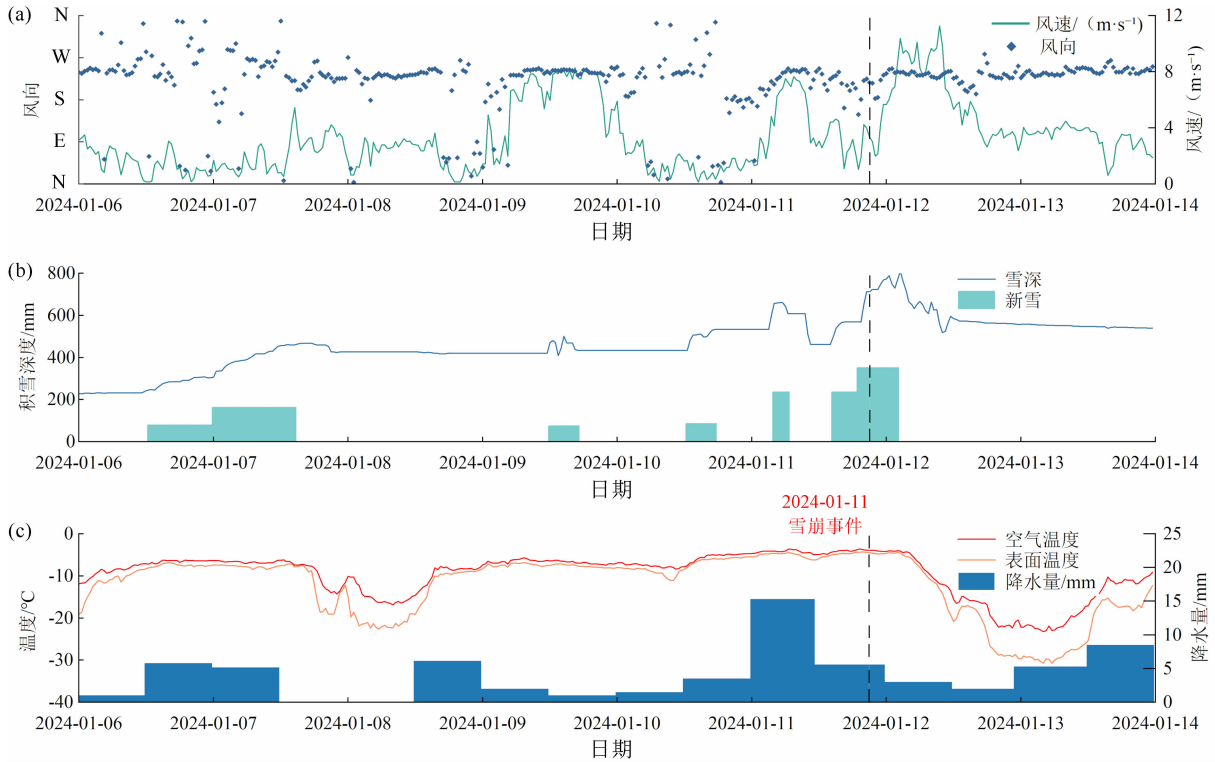


图8 运动过程数值模拟结果:(a) 雪崩流动压力;(c) 雪崩流动速度;(c) 雪崩流动高度

Fig.8 Numerical simulation results of avalanche dynamics;

(a) avalanche flow pressure; (b) avalanche flow velocity; (c) avalanche flow depth



说明:虚线为雪崩发生日。

图9 喀纳斯雪崩1月6日至1月13日气象数据

Fig.9 Meteorological data during avalanche occurrence at Kanas from January 6 to January 13

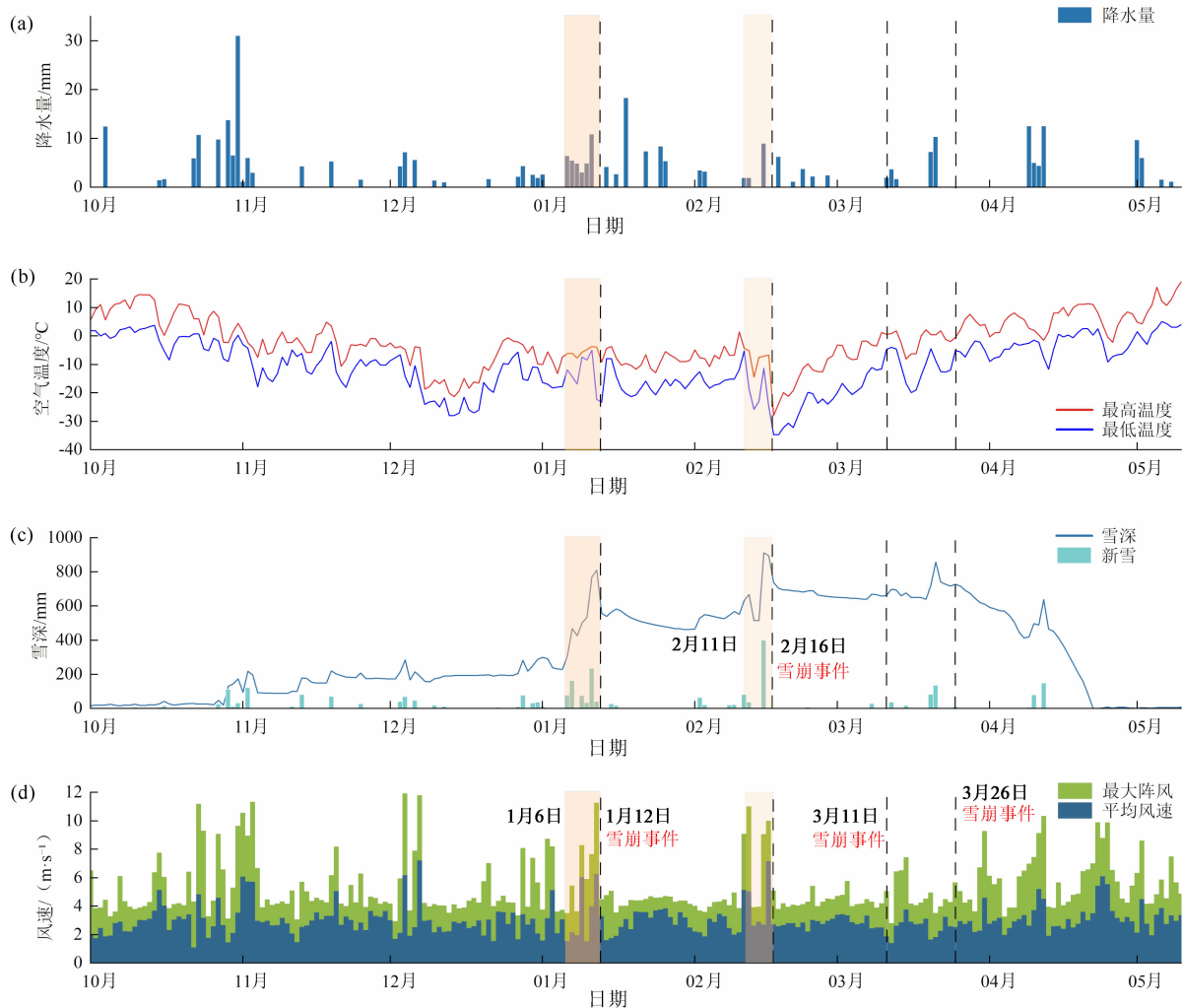
一步加剧表层积雪,提升积雪深度。第三次降雪事件自1月10日下午至11日中午,地面积雪深度增加400 mm,增强的叠加效应显著改变积雪结构,雪崩风险显著增加。综上分析,省道S232 K17处雪崩是多次强降雪、温差变化及强风等因素叠加作用的结果,最终导致板状雪崩的发生。

4 结果与讨论

4.1 雪崩事件与气象要素关系

喀纳斯山区积雪期呈现显著的年际周期性特征,其雪季起始于10月下旬,积雪消融期始于次年4月上旬,每年1—3月的积雪深度最大,该时段物质积累与力学失稳的耦合效应是雪崩孕育的主控因

子。根据气象数据(图10),每年1—3月的积雪量达到峰值,表明该时段物质积累与力学失稳的耦合效应是雪崩孕育的主控因子。山区雪崩受多种气象因素影响,如降雪强度、气温变化、风速等。不同季节的雪崩类型和发生频率也存在明显的差异,例如:冬季以干雪崩为主,而春季则因积雪融化常导致湿雪雪崩^[40-41]。根据2023年10月—2024年5月气象数据分析,研究区经历多轮降雪过程,雪崩灾害呈现明显的时间分布规律。1月至2月期间,雪崩事件主要发生在降雪过程中,持续降雪导致积雪深度迅速增加,同时在降雪间歇期,晴冷天气常导致积雪表层迅速冷却,进而在上下层之间形成较高的温度梯度($>10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$)。现场实测显示,近地表积雪温度接近 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,而表层温度可降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,在垂



说明:虚线为雪崩发生日;橙色区域为雪崩发生前极端气象要素。

图10 2023年10月—2024年5月喀纳斯禾木景区气象站气象要素动态变化

Fig. 10 Dynamic changes of meteorological elements at meteorological stations in the Kanas Hemu scenic area from October 2023 to May 2024

直 20 cm 的积雪层内,最大可形成约 5 °C 的温差,促使软弱层生成,为后续雪崩的触发提供了潜在条件。此外,极端气象事件(如强降雪与强风作用的叠加)不仅加速了积雪的重分布过程,还显著提高了雪崩的发生频率和规模^[42]。3 月的两次雪崩事件表明,气温升高可能是湿雪雪崩的重要诱因之一。以 3 月 11 日事件为例,持续升温使日最高气温超过 0 °C,导致积雪融化并产生液态水渗入雪层,在降低剪切强度的同时削弱层间结构稳定性,最终引发湿雪雪崩。3 月 23 日降雪后,连续两日平均气温显著下降,致使新旧雪层在低温条件下结合不牢,易于在界面形成潜在软弱层。至 3 月 26 日,气温明显回升,积雪中液态水含量迅速增加,导致雪层黏结性下降、结构失稳,最终引发雪崩事件。这一过程揭示了典型的湿雪雪崩形成过程与气象条件之间的响应关系。降雪后的短期降温削弱雪层界面结合强度,随后快速升温引发雪层融化和水分重分布,加剧整体稳定性下降。此类“降雪—降温—升温”的交替过程在区域内多起湿雪雪崩事件中反复出现,提示其可能

为研究区湿雪雪崩发生的关键气象诱发机制之一。

尽管气象观测数据为雪崩孕育过程的分析提供了重要支撑,但仍存在一定的局限性。本研究主要依托海拔 1100 m 的 AWS 开展雪季气象特征分析,虽具备长期连续记录优势,但相较于雪崩发生区域(海拔约 1500 ~ 2200 m),在降雪强度、风速变化和微气候条件上可能存在差异,影响对局地雪崩触发机制的精确判定。此外,由于山区雪崩受降雪、气温、风场和辐射等多因素非线性耦合影响,现有气象站数据难以完全捕捉局部突变过程,可能造成某些事件的触发条件识别不够充分。因此,后续研究需结合高海拔多点气象观测与雪层原位监测,提高雪崩风险识别的时空精度。

4.2 雪崩触发条件多因素耦合分析

雪崩的触发源于积雪层内部物理性质和结构的不均匀性,这种不均匀性易造成局部失稳,在外部扰动作用下,局部破坏扩展为整体滑移,从而引发雪崩^[17,43]。雪崩的发生往往不是单一因素,而是雪层结构、气象条件、地形特征及外部扰动等多因素共同

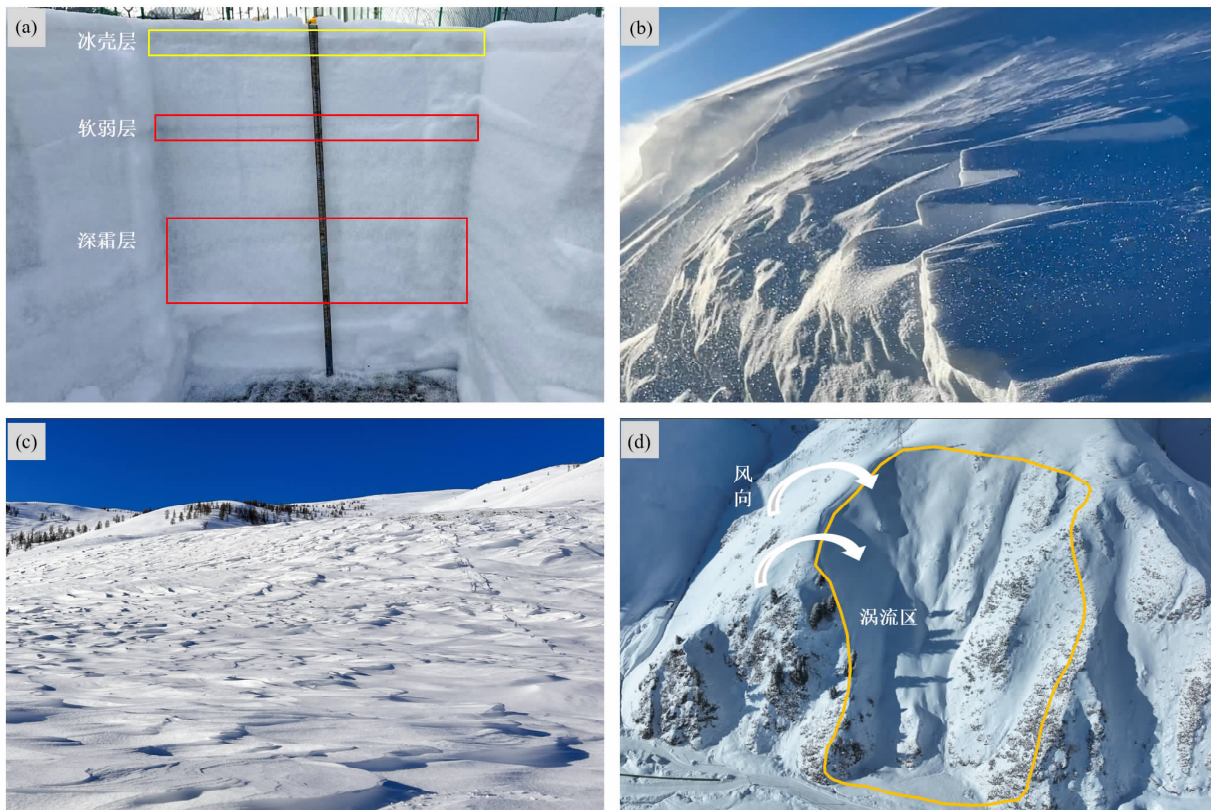


图 11 雪崩触发机制及关键影响因素: (a)雪层剖面;(b)风吹雪;(c)雪垄;(d)地形涡流区

Fig. 11 Avalanche triggering mechanisms and key influencing factors:

(a) snow layer profile; (b) blowing snow; (c) sastrugi; (d) terrain vortex zone

作用的结果^[14,44]。图 11a 展示了典型形成区的积雪剖面结构。受昼夜温差波动及融化-再冻结过程影响,表层形成致密的冰壳层^[39],其下部为温度梯度变化引起的重结晶作用所生成的软弱层,具有明显的结构分层特征。短时强降雪与显著垂直温差共同作用,容易诱发雪层内部的晶体重构,形成由面状雪晶或霜层组成的低强度层位。此类冰壳层-弱层-深霜层结构易导致应力集中,软弱层与上覆硬壳之间常构成潜在滑动层,构成典型的“持续弱层问题”。风是雪崩触发的重要外力因素,当风速达到 7 m/s 时,雪粒被吹起并在风中以滚动、跳跃或悬浮的形式移动^[45-47](图 11b),在沉积过程中风对雪粒施加压力,使其排列更加紧密,积雪层的密度和硬度逐渐增加,形成有规律排列的垄状雪坎(图 11c)。同时,风将雪迁移至背风坡、凹地或沟槽等汇雪区域^[48-50],导致积雪在山坡上的重新分布(图 11d),使得这些区域的积雪深度增加 2~4 倍,进而提高雪崩发生的风险。调查发现,2024 年 1 月多次强降雪与强风事件后,背风坡区域成为雪崩高发区,如省道 S232 K17+600、国道 G219 K147+700 等区域。

5 结论

(1)新疆阿勒泰喀纳斯山区道路暴雪事件后共统计约 216 处雪崩,雪崩呈现明显的群发性特征,主要集中在分布于省道 S232 段(K10~K30 与 K50~K60)区间,分布密度为 2.43 处/km;国道 G219 段(K131~K160)区间,分布密度 2.25 处/km;县道 X852 段(K20~K50)区间,分布密度为 2.47 处/km。

(2)喀纳斯地区雪崩分布特征具有显著的规律性。雪崩事件主要集中于冬季积雪深度快速增长的阶段(1 月至 2 月)以及气温升高至接近 0℃的阶段(3 月);雪崩主要分布于阳坡区域(坡向 90°~270°),占调查雪崩事件总数的 65.74%;雪崩释放坡度范围集中于 30°~40°,占调查雪崩事件总数的 87.5%。积雪条件、气象变化与地形特征共同作用,是研究区雪崩时空分布的关键驱动因子。

(3)基于 RAMMS 数值模拟对省道 S232 K17 处雪崩运动过程数值模拟的分析结果表明,该雪崩的运动时间总计 176 s,最大运动速度达到 29.44 m/s(约 106 km/h),最大冲击力为 260.9 kPa,最大堆积高度为 12.28 m。雪崩在冲击公路时,速度衰减至

20 m/s(约 72 km/h),能产生 126 kPa 动态压力(等效 12.8 t/m²)。雪崩导致公路被掩埋约 1000 m,道路上堆积高度为 4.8 m。雪崩停止后,堆积区最长度约 180 m、最宽约 260 m,最大堆积高度达到 10.59 m,与实际测量雪崩堆积特征基本一致。

(4)2024 年 1 月,研究区的雪崩受地形条件、降雪、气温梯度和强风等多因素共同影响。其中,强降雪显著增加了积雪负荷,低温环境抑制了雪层的稳固转化,而强风则促使积雪的再分配,在背风坡形成深厚的积雪堆积区。沟槽型地形与漏斗型坡面因处于相对低压涡流区,积雪高度可达自然沉积高度的 2~4 倍,为雪崩的触发提供了充足的物质基础。

参考文献(References)

- [1] 胡汝骥. 中国积雪与雪灾防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 11-25. [HU Ruji. Snow accumulation and snow disaster prevention in China [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013: 11-25]
- [2] SCHWEIZER J, BARTELT P, VAN HERWIJNEN A. Snow avalanches [M]// HAEBERLI W, et al. Snow and ice-related hazards, risks, and disasters. Amsterdam: Elsevier, 2021: 395-436.
- [3] ECKERT N, CORONA C, GIACONA F, et al. Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2024, 5(5): 369-389. DOI: 10.1038/s43017-024-00540-2
- [4] 王世金, 温家洪. 冰冻圈灾害特征、影响及其学科发展展望 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 523-530. [WANG Shijin, WEN Jiahong. Characteristics, influence of cryosphere disaster and prospect of discipline development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(4): 523-530] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200301002
- [5] GIACONA F, ECKERT N, CORONA C, et al. Upslope migration of snow avalanches in a warming climate [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(44): e2107306118. DOI: 10.1073/pnas.2107306118
- [6] HARVEY L D D. Global warming [M]. New York: Routledge, 2018: 85-96.
- [7] 崔鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145-152. [CUI Peng. Progress and prospects in research on mountain hazards in China [J]. Progress in Geography, 2014, 33(2): 145-152] DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.02.001
- [8] BALLESTEROS-CÁNOVAS J A, TRAPPMANN D, MADRIGAL-GONZÁLEZ J, et al. Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas [J]. Proceedings of the National

- Academy of Sciences, 2018, **115**(13): 3410 – 3415. DOI: 10.1073/pnas.1716913115
- [9] MAYER S, HENDRICK M, MICHEL A, et al. Impact of climate change on snow avalanche activity in the Swiss Alps [J]. *The Cryosphere*, 2024, **18**(11): 5495 – 5517. DOI: 10.5194/tc – 18 – 5495 – 2024
- [10] 王中隆. 中国积雪、风吹雪和雪崩研究[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(3): 273 – 278. [WANG Zhonglong. Researches on snow cover, snow-drifts and avalanches in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10**(3): 273 – 278] DOI: 10.7522/j.issn.1000 – 0240.1988.0036
- [11] 谢自楚, И В 谢维尔斯基, 张志忠. 天山积雪与雪崩[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996: 68 – 75. [XIE Zichu, SEVERSKY И В, ZHANG Zhizhong. Snow and avalanche in Tianshan Mountains [M]. Changsha: Hunan Normal University Press, 1996: 68 – 75]
- [12] 仇家琪. 雪崩学[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005: 42 – 49. [QIU Jiaqi. Avalanche [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2005: 42 – 49]
- [13] 胡汝骥. 中国天山山区的积雪、雪害及其防治研究[J]. 新疆地理, 1978, **1**(1): 84 – 98. [HU Ruji. Research on snow accumulation, snow damage and its prevention and control in the Tianshan Mountains of China [J]. *Xinjiang Geography*, 1978, **1**(1): 84 – 98] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65 – 1103/x.1978.01.007
- [14] 王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 52 – 85. [WANG Yanlong. Avalanche research in China [M]. Beijing: Ocean Press, 1992: 52 – 85]
- [15] 郝建盛, 黄法融, 冯挺, 等. 亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析[J]. 山地学报, 2021, **39**(2): 304 – 312. [HAO Jiansheng, HUANG Farong, FENG Ting, et al. Analysis of spatio-temporal distribution characteristics of snow avalanche disaster and its triggering factors in the High Mountain Asia [J]. *Mountain Research*, 2021, **39**(2): 304 – 312] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000596
- [16] SCHWEIZER J, BRUCE JAMIESON J, SCHNEEBELI M. Snow avalanche formation [J]. *Reviews of Geophysics*, 2003, **41**(4): 1 – 25. DOI: 10.1029/2002RG000123
- [17] MCCLUNG D, SCHAEERER P A. The avalanche handbook [M]. The Mountaineers Books, 2006: 115 – 131.
- [18] 汶林科, 向灵芝, 蔡毅, 等. 雪崩的形成机理研究[J]. 山地学报, 2016, **34**(1): 1 – 11. [WEN Linke, XIANG Lingzhi, CAI Yi, et al. Research on the formation mechanism of avalanche [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(1): 1 – 11] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000094
- [19] 张天意, 刘杰, 杨治纬, 等. 基于空-地协同调查的西天山阿尔先沟雪崩过程数值模拟[J]. 干旱区研究, 2023, **40**(11): 1729 – 1743. [ZHANG Tianyi, LIU Jie, YANG Zhiwei, et al. Numerical simulation of avalanche process in Aexiangou, West Tianshan Mountains, based on air-ground cooperative investigation [J]. *Arid Zone Research*, 2023, **40**(11): 1729 – 1743] DOI: 10.13866/j.azr.2023.11.03
- [20] 郝建盛, 李兰海. 雪崩灾害防治研究进展及展望[J]. 冰川冻土, 2022, **44**(3): 762 – 770. [HAO Jiansheng, LI Lanhai. Research progress and prospect of snow avalanche disaster prevention and control [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, **44**(3): 762 – 770] DOI: 10.7522/j.issn.1000 – 0240.2022.0075
- [21] LIU Jie, SUN Xiliang, GUO Qiang, et al. Snow avalanche susceptibility mapping of transportation corridors based on coupled certainty factor and Geodetector models [J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(9): 1096. DOI: 10.3390/atmos15091096
- [22] KERN H, ECKERT N, JOMELLI V, et al. Brief communication: Weak control of snow avalanche deposit volumes by avalanche path morphology [J]. *The Cryosphere*, 2021, **15**(10): 4845 – 4852. DOI: 10.5194/tc – 15 – 4845 – 2021
- [23] 王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述[J]. 地理科学进展, 2012, **31**(11): 1529 – 1536. [WANG Shijin, REN Jiawen. A review of the progresses of avalanche hazards research [J]. *Progress in Geography*, 2012, **31**(11): 1529 – 1536] DOI: 10.11820/dlkxjz.2012.11.014
- [24] 秦启勇, 李雪梅, 郝建盛, 等. 中国天山雪崩危险区划及其时空动态[J]. 自然灾害学报, 2023, **32**(2): 117 – 124. [QIN Qiyong, LI Xuemei, HAO Jiansheng, et al. Zoning of avalanche hazard and its spatial and temporal patterns in the Tianshan Mountains of China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, **32**(2): 117 – 124] DOI: 10.13577/j.jnd.2023.0213
- [25] 文洪, 王栋, 王生仁, 等. 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[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(2): 404 – 415. [WEN Hong, WANG Dong, WANG Shengren, et al. Key predisposing factors and susceptibility mapping of snow avalanche in Parlung-Tsangpo catchment, southeast Tibetan plateau [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, **29**(2): 404 – 415] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021 – 0121
- [26] 赵鑫, 程尊兰, 杨天军, 等. 川藏公路安久拉山至古乡段雪崩分布规律[J]. 山地学报, 2015, **33**(4): 480 – 487. [ZHAO Xin, CHENG Zunlan, YANG Tianjun, et al. Avalanche distribution analysis in Anjoula mountain to Guxiang section of Sichuan-Tibet highway [J]. *Mountain Research*, 2015, **33**(4): 480 – 487] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000060
- [27] 陈艳锋, 尹林克, 曹秋梅, 等. 新疆阿勒泰两河源自然保护区植被信息提取与分析[J]. 干旱区地理, 2016, **39**(4): 843 – 850. [CHEN Yanfeng, YIN Linke, CAO Qiumei, et al. Vegetation information extraction and analysis of Xinjiang Altay Two-River Source Nature Reserve [J]. *Arid Land Geography*, 2016, **39**(4): 843 – 850] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65 – 1103/x.2016.04.020
- [28] BARTELT P, STÖCKLI V. The influence of tree and branch

- fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow [J]. *Annals of Glaciology*, 2001, **32**: 209 – 216. DOI: 10.3189/172756401781819544
- [29] BEBI P, KULAKOWSKI D, RIXEN C. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems: State of research and implications for management [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **257**(9): 1883 – 1892. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.01.050
- [30] VÉDRINE L, LI Xingyue, GAUME J. Detrainment and braking of snow avalanches interacting with forests [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, **22**(3): 1015 – 1028. DOI: 10.5194/nhess-22-1015-2022
- [31] 胡汝骥, 姜逢清. 中国天山雪崩与治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 84 – 91. [HU Ruji, JIANG Fengqing. *Avalanches and control in Tianshan Mountains of China* [M]. Beijing: China Communications Press, 1990: 84 – 91]
- [32] CHRISTEN M, KOWALSKI J, BARTELT P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, **63**(1 – 2): 1 – 14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005
- [33] BARTELT P, SALM B, GRUBER U. Calculating dense-snow avalanche runout using a voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining [J]. *Journal of Glaciology*, 1999, **45**(150): 242 – 254. DOI: 10.3189/S002214300000174X
- [34] SALM B. Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches [J]. *Annals of Glaciology*, 1993, **18**: 221 – 226. DOI: 10.1017/S0260305500011551
- [35] BUTLER D R, WALSH S J. Lithologic, structural, and topographic influences on snow - avalanche path location, Eastern Glacier National Park, Montana [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1990, **80**(3): 362 – 378. DOI: 10.1111/j.1467-8306.1990.tb00302.x
- [36] HAO Jiansheng, ZHANG Zhengtao, LI Lanhai. Timing and identification of potential snow avalanche types: A case study of the central Tianshan Mountains [J]. *Landslides*, 2021, **18**: 3845 – 3856. DOI: 10.1007/s10346-021-01766-7
- [37] COLBECK S C. The layered character of snow covers [J]. *Reviews of Geophysics*, 1991, **29**(1): 81 – 96. DOI: 10.1029/90rg02351
- [38] POMEROY J W, BRUN E. Physical properties of snow [J]. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-covered Ecosystems*, 2001, **45**: 118. DOI: 10.1007/978-90-481-2642-2_422
- [39] JAMIESON B. Formation of refrozen snowpack layers and their role in slab avalanche release [J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, **44**(2): 1 – 15. DOI: 10.1029/2005rg000176
- [40] BAGGI S, SCHWEIZER J. Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland) [J]. *Natural Hazards*, 2009, **50**: 97 – 108. DOI: 10.1007/s11069-008-9322-7
- [41] FOUINAT L, SABATIER P, DAVID F, et al. Wet avalanches: Long-term evolution in the Western Alps under climate and human forcing [J]. *Climate of the Past*, 2018, **14**(9): 1299 – 1313. DOI: 10.5194/cp-14-1299-2018
- [42] NIELD J M, WIGGS G F S, BADDOCK M C, et al. Coupling leeside grainfall to avalanche characteristics in aeolian dune dynamics [J]. *Geology*, 2017, **45**(3): 271 – 274. DOI: 10.1130/G38800.1
- [43] HEIERLI J, GUMBSCH P, ZAISER M. Anticrack nucleation as triggering mechanism for snow slab avalanches [J]. *Science*, 2008, **321**(5886): 240 – 243. DOI: 10.1126/science.1153948
- [44] 程秋连, 刘杰, 杨治纬, 等. 独库高速阿尔先沟段雪崩空间分布及因子探测[J]. *干旱区研究*, 2024, **41**(2): 220 – 229. [CHENG Qiulian, LIU Jie, YANG Zhiwei, et al. Spatial distribution and factor analysis of avalanche in the Aexiangou section of the Duku expressway [J]. *Arid Zone Research*, 2024, **41**(2): 220 – 229] DOI: 10.13866/j.azr.2024.02.05
- [45] DADIC R, MOTT R, LEHNING M, et al. Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, **115**: F01012. DOI: 10.1029/2009JF001261
- [46] 王凤龙, 刘杰, 杨治纬, 等. 八车道高速公路风吹雪积雪分布特征及路堤高度相关性研究[J]. *自然灾害学报*, 2024, **33**(5): 73 – 83. [WANG Fenglong, LIU Jie, YANG Zhiwei, et al. Study on the distribution characteristics of wind-blown snow on an eight-lane expressway and the correlation of embankment heights [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, **33**(5): 73 – 83] DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0507
- [47] 石煜, 宋玲, 王斌, 等. 山区高速公路不同深度路堑的积雪堆积规律[J]. *自然灾害学报*, 2024, **33**(4): 221 – 233. [SHI Yu, SONG Ling, WANG Bin, et al. Snow accumulation law of cutting at different depths of mountainous expressways [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2024, **33**(4): 221 – 233] DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0420
- [48] QUÉNO L, MOTT R, MORIN P, et al. Snow redistribution in an intermediate-complexity snow hydrology modelling framework [J]. *EGU sphere*, 2023, **2023**: 1 – 32. DOI: 10.5194/egusphere-2023-2071
- [49] LIU Jie, ZHANG Tianyi, HU Changtao, et al. A study on avalanche-triggering factors and activity characteristics in Aexiangou, West Tianshan Mountains, China [J]. *Atmosphere*, 2023, **14**(9): 1439. DOI: 10.3390/atmos14091439
- [50] GAUME J, PUZBIN A M. Mechanisms of slab avalanche release and impact in the Dyatlov Pass incident in 1959 [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**(1): 10. DOI: 10.1038/s43247-020-00081-8

Characteristics and Triggering Mechanisms of Avalanche Disasters along Mountainous Roadways in the Kanas Region, Altay Prefecture, Xinjiang, China

QIANG Xiaowen^{1,2}, YANG Zhiwei², CHENG Qiulian², LI Yaqun^{1,2}, LIU Jie^{1,2*}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Xinjiang Key Laboratory for Safety and Health of Transportation Infrastructure in Alpine and High-Altitude Mountainous Areas, Xinjiang Transport Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830006, China)

Abstract: With the rapid development of ice-snow tourism economies and the extension of transportation infrastructure into mountainous regions, avalanche has posed an increasingly severe threat to road safety in China's mountainous regions. In January 2024, consecutive heavy snowfall along mountainous roadways in the Kanas region of Altay Prefecture, Xinjiang, China triggered multiple large-scale avalanches, resulting in 3 fatalities, over 4800 individuals stranded, and approximately 150 km of roads blocked.

In this study, it integrated UAV remote sensing interpretation, field surveys, and RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) to conduct a systematic analysis of 216 avalanche events along roadway corridors in the Kanas region, with particular focus on dynamic inversion of a major avalanche occurred at chainage K17 of Provincial Highway S232 for seeking the knowledge of the characteristics and triggering mechanisms of the avalanches. It got several findings as listed as below.

(1) Avalanches along roadways in Kanas were predominantly concentrated on semi-sunny slopes aspect range: $112.5^{\circ} \sim < 157.5^{\circ}$ and $202.5^{\circ} \sim < 247.5^{\circ}$ and slopes with gradients of $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$, with distribution densities reaching 52% and 87.5% respectively.

(2) Retrieved by numerical inversion, the avalanche at S232 K17 reached a peak velocity of 29.44 m/s (approximately 106 km/h) and a maximum impact force of 260.9 kPa. Upon striking the highway, its velocity attenuated to 20 m/s while still generating a dynamic pressure of 126 kPa (equivalent to 12.8 t/m^2). The snow accumulation reached a height of 4.8 m, forming a deposition fan of approximately $180 \text{ m} \times 260 \text{ m}$, resulting in prolonged road closure. The simulated avalanche deposition height differed from the field measurement by only 0.2 m, indicating a high level of agreement between the RAMMS model output and on-site observations, thus demonstrating robust simulation accuracy and regional applicability.

(3) Avalanches were triggered by the coupling of multiple factors, including topographic control, intense snowfall, low temperatures, and strong winds. Intense snowfall increased snow load, temperature fluctuations inhibited the stabilization of snow layers, and strong winds redistributed snow, leading to the accumulation of thick snow deposits (2–4 times the natural deposition height) in low-pressure zones of trench and funnel-shaped terrain, thereby inducing avalanches.

This study represents the first scientific interpretation and quantitative dynamic assessment of avalanche events along the Kanas road, providing critical support for regional avalanche risk identification, road disaster prevention layout, and emergency response. It also serves as a reference paradigm for avalanche simulation and management in alpine mountainous regions.

Key words: avalanche; disaster characteristics; triggering mechanism; roadway corridor; RAMMS simulation; Kanas; Xinjiang

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)