

胥执强,赵正波,李博渊,等.2024年1月喀纳斯景区雪崩事件气象成因分析[J].陕西气象,2025(5):56-62.

文章编号:1006-4354(2025)05-0056-07

2024年1月喀纳斯景区雪崩事件气象成因分析

胥执强¹,赵正波²,李博渊²,荆海亮³

(1. 新疆维吾尔自治区气象服务中心,乌鲁木齐 830002;

2. 新疆阿勒泰地区气象局,新疆阿勒泰 836500;

3. 新疆维吾尔自治区人工影响天气中心,乌鲁木齐 830002)

摘要:利用喀纳斯景区(简称景区)区域自动站、高分辨率遥感、ERA5再分析资料,运用统计方法对2024年1月9—11日发生的雪崩事件气象成因进行初步分析。结果表明:此次雪崩强度逐日增强,具有由点到线,由线到面的特点。从气象条件看,前冬降雪量偏多积雪偏厚,雪崩前及期间暖区强降雪导致新增降雪量多,累计积雪深度厚,局地达200 cm;入冬至雪崩期间700 hPa平均风场为 ≥ 4 级的偏西风,从而形成风吹雪,使积雪在S232线两侧的坡面大量堆积,尤其是50~60 km路段。12月中旬中期至下旬后期和持续性暖区强降雪期间的2次气温快速回升,使得雪层不稳定性逐渐增强,且达极限,引发雪崩。S232线森林覆盖明显少于 $\times 852$ 沿线和700 hPa的风有利于积雪在S232沿线坡面堆积是省道S232线雪崩的长度、高度强于禾木 $\times 852$ 线的主要原因。当景区新增降雪量达30~50 mm,且新增积雪深度达30~50 cm,易发自然雪崩;当新增积雪接近100 cm时,易发大规模雪崩。关注S232线42~59 km路段风吹雪对雪崩的影响,尤其是53~59 km路段。 $\times 852$ 线23 km附近的坡度 $> 45^\circ$,与雪崩发生的有利坡度有些差异。

关键词:喀纳斯景区;雪崩事件;气象成因

中图分类号:P954

文献标识码:A

雪崩是指因积雪过多,山体难以承受其重力而发生的坍塌。由于灾害发生时具有突发性、潜在性、难预测性等特点,严重影响了山区居民、进山游客的生命财产安全,以及交通网络、基础设施、农林牧、冰雪旅游业的可持续发展,使山区经济社会系统受到巨大破坏并带来多种威胁,因此,是危险性极大的自然灾害之一^[1]。随着社会经济的发展 and 工程建设增多,以及登山、科考、旅游活动等范围不断增大,人类活动受到雪崩危害的风险增大^[2]。据统计,1950年以来,奥地利每年平均约30人死于雪崩,美国科罗拉多州雪崩事件中有65%的人因雪崩窒息而死^[3-4];在美国,过去50年里雪崩死亡人数不断增长,仅2004—2005年冬

天,就有28人死于雪崩灾害^[5];1991年1月3日,中国云南省梅里雪山雪崩事件,17名中日登山队员全部遇难^[6];2009—2019年亚洲高山区雪崩灾害造成1 580人遇难^[7]。近年来,中国雪都(阿勒泰地区)冰雪旅游活跃,冬季到喀纳斯景区旅游滑雪的人数剧增。因此,研究景区雪崩事件机理及其气象条件对雪崩的影响可为雪崩预测预警提供参考依据。

郝建盛等^[7]研究认为多数雪崩灾害事件是由强降雪、温度剧增、地震、风等自然因素诱发,其中强降雪诱发的雪崩灾害最多,其次为春季快速升温诱发的雪崩。汶林科等^[8]在研究了雪崩的形成机理后发现,雪崩的形成与地形、气象因子关系密

收稿日期:2024-03-18

作者简介:胥执强(1980—),男,汉族,四川蓬溪人,硕士,高工,主要从事气象服务及相关研究。

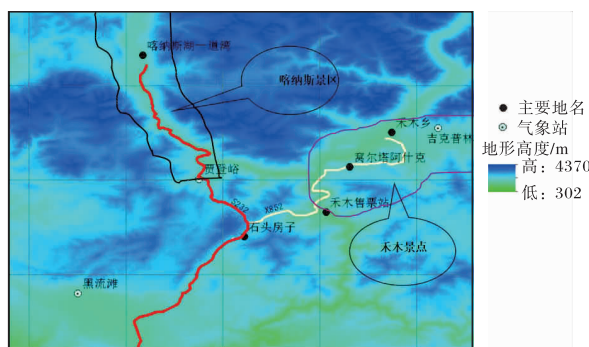
基金项目:自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(2025KFKT016);第三次新疆综合科学考察(2022xjkk0802);新疆气象局引导性项目(YD2022016)

切,雪崩形成区的坡度大多在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。秦启勇等^[9]、杨金明等^[10]将中国天山雪崩区划为 5 个危险区,并对雪崩的时空特征进行了分析,地形和气象条件是典型的孕灾环境;积雪量、风力、气温是诱发雪崩的主要因素。杨天军^[11]通过对雪崩形成机制的研究,借鉴国内外灾害预警技术,提出了创新的雪崩监测预警系统工作原理和实施方案;重点介绍基于红外和振动等参数的雪崩监测预警系统,以及系统的应用和示范。郝建盛等^[12]在梳理中国 1960 年以来主要雪崩研究进展基础上,结合世界各地雪崩研究成果,总结了雪崩的影响因素、雪崩的形成、雪崩监测预警,指出研究对象复杂,相关积雪雪崩实验条件苛刻,野外观测难度大,雪崩形成机理等研究依然任重道远,雪崩的监测预警手段等技术也难以满足目前雪崩防灾减灾需要。由此可见,对雪崩气候特征和影响因子的研究较多,但针对喀纳斯景区的雪崩研究鲜见。本文从影响喀纳斯景区雪崩的气象因子出发,对 2024 年 1 月 9—11 日发生在景区的雪崩事件气象成因进行初步的分析,为雪崩预测预警提供参考依据。

1 研究区概况

喀纳斯景区位于阿勒泰地区布尔津县最北部的禾木乡,阿尔泰山脉腹地,地势由北向南逐渐降低,河谷切割大,地形起伏悬殊。喀纳斯景区海拔高度在 1 064~3 147 m 之间(图 1),喀纳斯河和著名的喀纳斯湖一起形成了一条狭长的低洼谷地,谷地东西两侧多为深切中山分布区。省道 S232 线(喀纳斯湖一道弯—贾登峪—黑流滩一线,下同)是进出喀纳斯景区的重要通道,长度为 74 km,基本呈南北走向,沿线地形起伏大,为山岭重丘区。禾木景点是喀纳斯景区的重要部分,位于喀纳斯河与禾木河交汇处的山间断陷盆地中,海拔 1 124~2 300 m,盆地周围山体宽厚,顶部呈浑圆状,地形复杂,禾木河自东北向西南贯穿其间(图 1)。禾木×852 线自禾木村至禾木岔路口在铁勒沙汗与 S232 线汇合,呈西南—东北向(图 1),长约 50 km,是联通禾木景点和喀纳斯景区的重要交通线路。文中涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地

图服务系统下载的审图号为 GS(2016)1552 的中国地图制作,底图无修改。



红色线为省道S232,淡黄色线为禾木道路×852。

图1 喀纳斯景区 30 m 高分辨率地形和部分自动气象站分布及主要地名

喀纳斯景区年降水量约 600~1 000 mm,冬季漫长,降雪丰富。海拔 1 400 m 以上,8 月下旬开始降雪;海拔 3 000 m 以上,8 月初开始降雪,直到翌年 5 月下旬或 6 月初,降雪期长达 9 个月。景区纬度较高,冬季位于蒙古高压西南部,850 hPa 及以下盛行的偏东气流常与中亚槽前西南气流在景区形成暖性切变辐合。特殊的地形和气候背景,使得景区冬季多暖区暴雪,具有降雪时间长、影响范围广、强度强、积雪深度厚以及降雪期间气温回升等特点^[13-15]。

景区特殊的地形、地理位置以及冬季气候背景,使得通往景区道路 S232 和×852 沿线成为冬季雪灾,尤其是雪崩灾害的重灾区。

2 资料和方法

所用气象观测资料为 2023 年 10 月 1 日—2024 年 1 月 20 日布尔津县禾木乡的区域自动站观测资料,具体包括:贾登峪、黑流滩站的逐日平均气温、降水量,以及吉克普林站的气温、积雪深度数据。数据来源于新疆维吾尔自治区气象信息中心,经过严格数据质量控制。30 m 高分辨率高程和植被覆盖遥感资料来自国家基础地理信息中心网站;ERA5 全球再分析高空风场资料,时空分辨率分别为 1 h 和 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。运用统计方法对发生在 2024 年 1 月 9—11 日喀纳斯景区的雪崩事件成因进行初步分析。

降雪量级采用新疆地方标准《降水量级别》

DB 65/ T3273-2011^[16]的规定进行划分,时间用北京时 20 时一次日 20 时。风力等级为蒲氏风力,风向按 8 个方位。

3 雪崩事件概况

2024 年 1 月上旬至中旬初,阿尔泰山区受持续性强降雪影响,降雪量大,积雪深度厚,导致通往喀纳斯景区的省道 S232 线和禾木×852 线多处发生雪崩,阻断了景区通往布尔津县城和各区域间的交通。由表 1 可知,9 日共发生 5 处^[12]雪崩,发生在×852 线 24~46 km 的共 4 处,集中在 44~46 km(3 处),长度在 5~50 m,高度在 1~3 m。最长雪崩发生在 24.4 km 路段,长度为 50 m;最高雪崩发生在×852 线 46.3 km 路段,高度达 3 m。10 日白天共发生雪崩 13 处,×852 线 23~46 km 路段发生 9 处,其中 23~30 km 路段

5 处,44~46 km 路段 4 处;长度在 5~100 m,高度在 1~3 m。最强雪崩发生在 28.1 km 路段,长度 100 m,高度 3 m。S232 线 17、27 km 路段发生雪崩 4 处,长度 3~40 m,高度在 1.5~3 m。最强雪崩发生 17.5 km 路段,长度 40 m,高度约 3 m。10 日夜间至 11 日 13 时,景区共发生雪崩 10 处,S232 线集中发生在 42~59 km(6 处),较强雪崩发生在 53~59 km 路段,长度达 2 000~2 500 m,高度达 4 m;×852 线发生 4 处雪崩,强度较弱。11 日白天(13 时之后)禾木×852 线禾木村—禾木岔路口、S232 线喀纳斯—贾登峪—黑流滩几乎全线发生雪崩,强度强,范围广,其中,S232 线喀纳斯—贾登峪最强,最大长度 6 000 m,最高处达 7~8 m。

表 1 2024 年 1 月 9—11 日喀纳斯景区禾木×852 线和省道 S232 线雪崩点情况统计

时间	×852 线			S232 线		
	雪崩点	长度/m	高度/m	雪崩点	长度/m	高度/m
9 日 白天	46 km300 m	30	3.0	27 km400 m	20	2.0
	45 km600 m	15	1.5			
	24 km400 m	50	2.0			
	44 km500 m	5	1.0			
9 日夜间 —10 日 白天	24 km400 m	50	2.0	17 km500 m	40	3.0
	30 km	50	1.5	17 km850 m	3	1.5
	44 km500 m	5	1.0	27 km400 m	20	2.0
	46 km300 m	30	3.0	27 km400 m	20	2.0
	45 km600 m	15	1.5			
	28 km100 m	100	3.0			
	23 km	10	2.0			
	45 km600 m	15	1.5			
10 日夜间 —11 日 13 时	24 km100 m	25	2.0			
	22 km	5	1.0	17 km	200	4.0
	22 km500 m	7	1.0	28 km	400	2.0
	24 km600 m	30	0.5	42 km600 m	100	1.5
	25 km800 m	60	0.7	47 km500 m~48 km200 m	700	2.0
11 日 13 时后				53 km~55 km500 m	2 500	4.0
				57 km~59 km	2 000	4.0
11 日 13 时后	几乎全线发生雪崩			几乎全线发生雪崩		

注:11 日白天 S232 线和×852 线几乎全线发生雪崩,无法统计具体发生点。

由此可见,此次雪崩具有由点到线,由线到面的特点。省道 S232 线雪崩的长度和高度强于禾木×852 线。S232 线主要集中在 17 km、27~28 km(贾登峪站以西路段)、42~59 km 路段,53~59 km 路段强度较强(石头房子附近);×852 线主要集中 22~30 km(窝尔塔阿什克至禾木售票站)、44~46 km 路段(岔路口至禾木售票站中间附近),强度相对较弱。

4 雪崩事件成因分析

4.1 地形对雪崩的影响

地形是雪崩发生中唯一恒定不变的参数,包括下垫面坡度、地形切割深度及地面植被等^[2]。研究表明,绝大多数雪崩形成区域地形坡度在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[8]。省道 S232 线和禾木×852 线两侧地形坡度大部分为 $30^{\circ}\sim 78^{\circ}$ (图 2)。分析图 1 和图 2 可知,此次雪崩主要为坡面型、沟槽型、沟槽-坡面型,分别占 68%、12%、20%。进一步分析可知,除×852 线 23 km 附近的雪崩发生在坡度大于 45° 的坡面中,强度较弱,其余雪崩点均满足雪崩易形成的坡度范围。由此可见,地形坡度是诱发雪崩的主要因素,尽管绝大部分雪崩发生在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 坡地上,但仍有个别区域发生在超过 45° 的坡地上。分析景区森林覆盖情况可知(图略),S232 线 17 km 附近、×852 线 22~30 km 和 44~46 km 路段具有相对较多的森林覆盖,因此这些区域的雪崩强度相对较弱。S232 线 27~28 km 及 42~59 km 路段几乎没有森林覆盖,该路段雪崩发生频次多、强度较强。因此,此次雪崩 S232

沿线强于×852 沿线与森林覆盖有关^[17-18]。

4.2 气象条件对雪崩的影响

降雪所形成的积雪深度对雪崩的发生至关重要,风吹雪会使积雪重新分配并影响雪层的稳定性,加剧雪崩的发生,气温的高低也会影响雪层的稳定性。通过分析 2023 年 10 月 1 日—2024 年 1 月 20 日的降雪、气温的变化及 ERA5 700 hPa 风场,分析气象条件对雪崩发生的影响。

4.2.1 降雪对雪崩的影响 降雪累积所形成的积雪厚度是雪崩发生最重要的影响因子,并与其危险性紧密相连。由乌鲁木齐卫星站提供的 2024 年 1 月 6 日遥感积雪分布图(图略)可知,入冬至雪崩爆发前(2024 年 1 月 5 日),阿勒泰地区积雪总量达 229.5 亿 m^3 ,前冬(2023 年 11—12 月)降水较历年同期偏多 4 成左右。喀纳斯景区积雪厚度在 50~70 cm,主要是由 5 场暖区大雪、大暴雪天气造成。图 3 为景区雪崩前后布尔津县禾木乡典型代表站贾登峪和黑流滩区域自动站降水量和气温演变图。入冬至雪崩爆发前雪崩区域降雪量为 188.9~190.8 mm。2024 年 1 月 6—12 日阿勒泰地区又出现持续性暖区强降雪,喀纳斯景区 6—9 日新增降雪量 36.6~47.8 mm,此后的暴雪过程新增降雪量 64.1~75.5 mm,从而为雪崩的发生提供了足够的积雪厚度^[8]。吉克普林站 6—9 日新增积雪深度 50 cm,暴雪过程新增积雪深度 87 cm(图 4),累计积雪深度达 175 cm。据调查北部山区部分区域新增积雪 80~102 cm,局地累计雪深超 200 cm,累计积雪深度厚,有利于雪崩的形成。

综上所述,景区雪崩初日(1 月 9 日)新增降雪量和积雪深度均达到了国外自然雪崩临界点,即 3 d 内新增累计雪量 30~50 mm^[19-20],该日先后爆发 5 处雪崩;大规模雪崩日(1 月 11 日)新增积雪厚度接近或超过国外极端雪崩临界点,即新增积雪厚度 $\geq 100\text{ cm}$ ^[19-20]。可见,2024 年 1 月 6—11 日的持续性强降雪,降雪量大,新增积雪厚是触发 9—11 日雪崩的直接原因。

4.2.2 风对雪崩的影响 风能够增加积雪负荷,进而对雪崩产生重要影响,被认为是新增积雪之外对雪崩起最主要作用的贡献因子^[21]。风吹雪

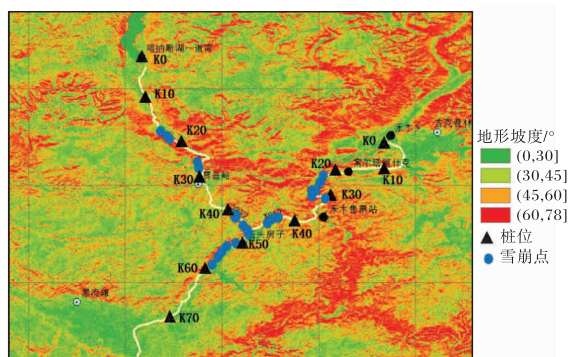


图2 2024年1月9—11日13时喀纳斯景区地形坡度、雪崩灾害点分布

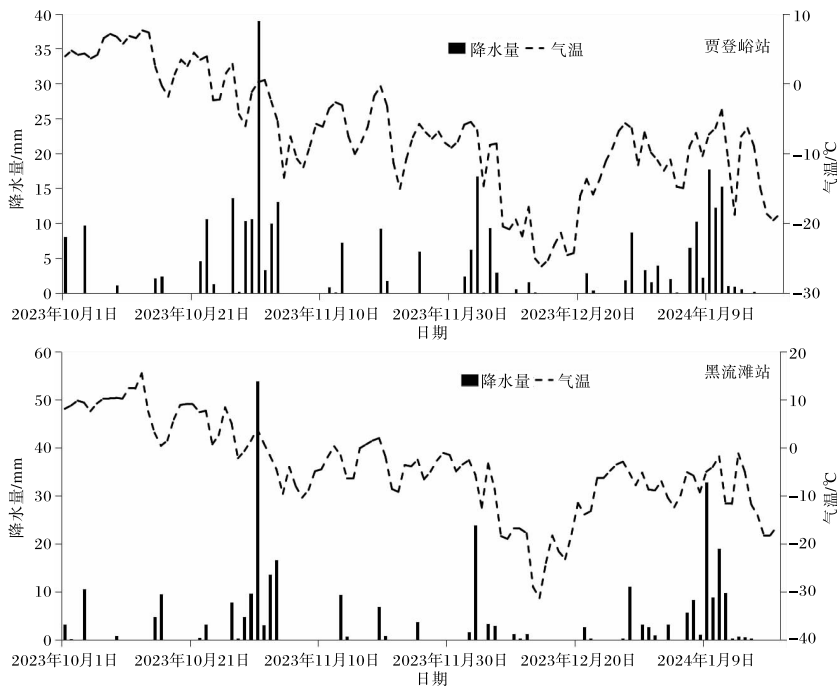


图3 2023年10月—2024年1月雪崩前后禾木乡区域站逐日气温、降水量演变

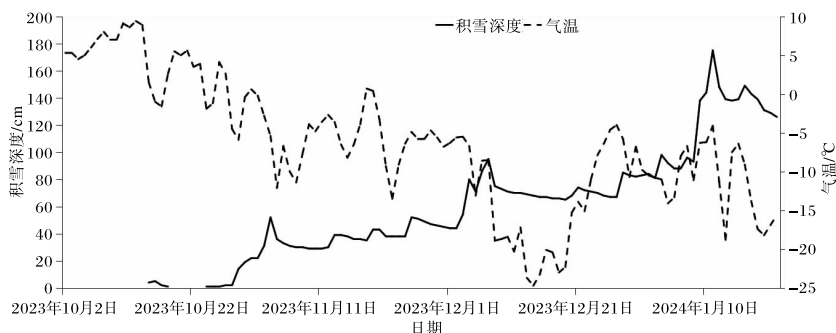


图4 2023年10月—2024年1月雪崩前后吉克普林站逐日气温、积雪深度演变

通过对积雪再分配来影响雪崩,积雪在迎风坡侵蚀,在背风坡沉降,而风速的变化使风吹雪形成的雪层在密度和硬度上都呈现很大的变化,也使雪层中的应力在局地聚集,从而增加雪层的不稳定性^[8]。de Quervain^[22]指出风吹雪相对于自然沉降的积雪更加破碎,因而风吹雪形成的雪层更容易发生雪崩。

景区 S232 沿线、×852 线 40 km 至岔路口两侧山脉较高,最高山脊约 3 000 m 左右,而区域站的高度均在此高度以下,所测风向和风速会受局地地形的影响。因此,利用 ERA5 每日逐小时风场资料,计算 700 hPa 高度上从 2023 年 10 月 24 日(入冬)至 2024 年 1 月 12 日平均风场(图 5)来

分析风对雪崩的可能影响。根据预报经验可知,≥4 级(风速 5.5~7.9 m/s)的风力可形成一定强度的风吹雪天气。分析图 5 可知,山区以偏西风为主,S232 沿线贾登峪(30 km)、岔路口两侧、石头房子及以南至 70 km 为 4 级的偏西风,风速由北向南逐步增加。偏西风使上述路段西侧的山坡位于背风坡,有利于积雪的堆积,尤其是岔路口至 S232 线 50 km 至 70 km 路段,风速相对较大,风吹雪使积雪在道路西侧的坡面上大量堆积(图 6),为雪崩的爆发提供了积雪条件。×852 线大部分为东西走向,风速大部分在 4 级以下,受风吹雪影响较小。这也是 S232 沿线雪崩长度和高度强于×852 沿线的原因之一。

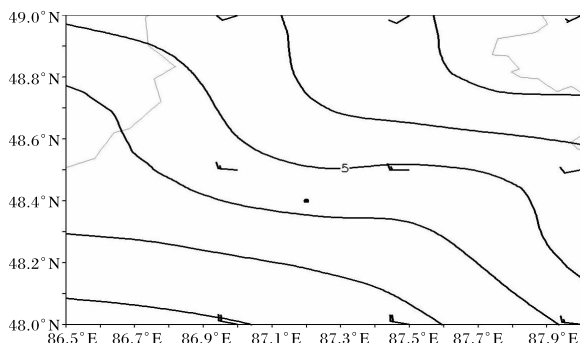


图5 2023-10-24—2024-01-12 700 hPa 平均风场
(黑线为等风速线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;黑点为石头房子站)

4.2.3 气温对雪崩的影响 气温对雪崩的形成具有重要作用,暴雪后或者暴雪过程的升温主要影响表面的雪层,而位于下部的软弱层未受到影响,使得雪层不稳定性增强^[2,8]。景区在 2023 年 10 月 24 日前气温(图 3、图 4)高于 0°C ,即该日入冬,12 月 14—27 日气温迅速回升,升幅达 $20.5\sim 28.4^{\circ}\text{C}$;2024 年 1 月上旬暖区暴雪期间气温波动上升,并维持。雪崩期间气温仍在升高,11 日贾登峪站气温升至 -3.8°C ,黑流滩站则升至 -1.8°C 。气温快速回升引起雪层不稳定。可见



图6 2024-01-16 S232 线 53、56 km 路段风吹雪坡面的东部
(a 手机拍摄;b 无人机拍摄)

2023 年入冬至雪崩前,景区发生 2 次明显的升温过程,且升温幅度大,气温维持在较高水平,从而使雪层的不稳定性增强,引发雪崩。

5 结论与讨论

(1)此次雪崩事件 9—11 日强度逐日增强,具有由点到线,由线到面的特点;省道 S232 线雪崩的长度和高度均强于禾木 $\times$ 852 线;S232 线主要集中在 17 km、27~28 km(贾登峪站以西路段),42~59 km 路段,53~59 km 路段强度较强(石头房子附近); $\times$ 852 线主要集中在 22~30 km(窝尔塔阿什克至禾木售票站)、44~46 km 路段(岔路口至禾木售票站中间附近)强度相对较弱。

(2)此次雪崩事件主要为坡面型,占 68%,沟槽型和沟槽-坡面型较少; $\times$ 852 线 23 km 坡度 $> 45^{\circ}$,较有利雪崩发生的坡度 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 偏大。

(3)触发此次雪崩事件的主要气候原因:首先是 2023 年入冬至 2024 年 1 月初降雪量偏多、积雪偏厚,1 月 6—11 日暖区强降雪期间,新增降雪

量多,新增积雪深度深,累积积雪深度厚,局地达 200 cm。其次是 700 hPa 平均风场上为 ≥ 4 级的偏西风,导致的风吹雪使积雪在 S232 道路西部、西南部堆积,尤其 50 km 至 60 km 路段。第三是 12 月中旬中期至下旬后期和持续性暖区强降雪期间,2 次气温快速回升,使得雪层不稳定性逐渐增强。

(4)此次雪崩事件 S232 沿线雪崩的长度和高度都强于 $\times$ 852 的主要原因:首先 S232 沿线森林覆盖明显少于 $\times$ 852 沿线,尤其是 S232 线 27~28 km、42~59 km 沿线几乎没有森林覆盖;其次 700 hPa 风更有利于积雪在 S232 沿线的坡面堆积。

(5)9—10 日雪崩,新增降雪量和积雪深度均达到国外自然雪崩的临界点,11 日大规模雪崩,新增积雪深度接近国外极端雪崩临界点。因此,当景区新增降雪量达 30~50 mm,且新增积雪深度达 30~50 cm,应高度重视景区雪崩易发区域,做好防范措施;当新增积雪接近 100 cm 时,该区

域应做好防范大规模雪崩的应对工作。

(6)雪崩灾害后救援黄金时间仅 30 min,因此,做好雪崩的预测预警工作非常重要。后期将结合历史雪崩事件分析雪崩发生的基本规律,归纳防范规则,构建预测预警体系,发布雪崩预测预警信息,防患于未然,减少不必要的损失。

参考文献:

- [1] 秦大河,效存德,丁永建,等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. 应用气象学报, 2006,17(6):649-656.
- [2] 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.
- [3] HOLLER P. Avalanche hazards and mitigation in Austria;a review[J]. Natural Hazards,2007,43(1): 81-101.
- [4] SHEETS A,WANG D,LOGAN S,et al. Causes of death among av-alance fatalities in Colorado;a 21-year review[J]. Wilderness & Environmental Medicine,2018,29(3):325-329.
- [5] SILVERTON N A, MCINTOSH S E, KIM H S. Avalanche safety practices in Utah[J]. Wilderness and Environmental Medicine, 2007, 18(4): 264-270.
- [6] 段仕美,刘时银,朱钰,等. 梅里雪山 1991 年和 2019 年雪崩事件重建及影响因素分析[J]. 冰川冻土,2022,44(3):771-783.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 杨金明,张旭,毛炜峰,等. 中国天山雪崩灾害调查分析[J]. 自然灾害学报,2022,31(1):188-197.
- [11] 杨天军. 川藏公路南线(西藏境)雪崩灾害监测预警技术研究[J]. 中国科技论文,2018,13(8):921-925.
- [12] 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.
- [13] 庄晓翠,崔彩霞,李博渊,等. 新疆北部雪灾成因及预报技术研究[M]. 北京,气象出版社,2018: 108-111.
- [14] 庄晓翠,崔彩霞,李博渊,等. 新疆北部暖区强降雪中尺度环境与落区分析[J]. 高原气象,2016,35(1):129-142.
- [15] 张林梅,李博渊,庄晓翠,等. 新疆北部 2 次罕见暖区暴雪过程对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2021, 15(2):1-9.
- [16] 降水量级别:DB65/T3273—2011[S].
- [17] GUBLER H, RYCHETNIK J. Effects of forests near the timberline on avalanche formation [C]// BERGMANN H. Proceedings of the symposium on snow, hydrology and forests in High Alpine Areas (Vienna, 1991). Wallingford: IAHS Press, 1991: 19-37.
- [18] SCHNEEBELI M, MEYER - GRASS M. Avalanche starting zones below the timber line structure of forest[G]//Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, 1992: 176-181.
- [19] FOEHN P, STOFFEL M, BARTELT P. Formation and forecasting of large (catastrophic) new snow avalanches[G]// STEVENS J R. Snow Avalanche Programs. Victoria:International Snow Science Workshop Canada Inc., BC Ministry of Transportation,2002:141-148.
- [20] SCHAEER M. Avalanche activity during major avalanche events:a case study for hydroelectric reservoirs[G]//SIVARDIERE F. Les apports de la recherche scientifique a la securite neige, glace et avalanche, Actes de Colloque, Chamonix, France, Grenoble, France,1995:133-138.
- [21] MCCLUNG D M, SCHWEIZER J. Skier triggering, snow temperatures and the stability index for dry slab avalanche initiation[J]. Journal Glaciology, 1999, 45(150): 190-200.
- [22] DE QUERVAIN M R. Problems of avalanche research[G]//Symposium at Davos 1965: Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches. IAHS Publication,1966,69:1-8.
- [23] 陶亦为,张芳华,于碧馨,等. 2024 年 1 月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析[J]. 暴雨灾害,2024,43(4):407-418.