

引用格式: 丁海涛, 陈宁生, 吴铭洋, 张馨月. 西藏高原雪崩灾害的地形约束与地貌分类[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 895-902.

DING Haitao, CHEN Ningsheng, WU Mingyang, ZHANG Xinyue. Geomorphological recognition of avalanches by terrain constraints in Tibetan Plateau, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 895-902.

西藏高原雪崩灾害的地形约束与地貌分类

丁海涛^{1,3}, 陈宁生^{2,3*}, 吴铭洋³, 张馨月⁴

(1. 拉萨青藏高原科学研究中心, 拉萨 850000; 2. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;
3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610213; 4. 西藏大学 工学院, 拉萨 850013)

摘要: 地形地貌是雪崩灾害发育过程中相对稳定的因素, 是雪崩灾害判识的基础。西藏高原地貌形成与演化过程与中国其他高山存在差异性, 导致其雪崩分类与机制不同。本研究基于西藏高原近 10 年来发生的 122 次雪崩灾害的编目数据, 采用遥感分析、现场调查的研究方法, 结合区域地貌演化历史的研究, 系统总结了西藏高原雪崩灾害的时空发育规律。研究发现: (1) 雪崩空间上集中在喜马拉雅和念青唐古拉山区的公路路段, 时间上特别集中于 2—4 月份。(2) 海拔高度、凹槽地貌和流域位置约束着雪崩灾害的规模与成灾位置。雪崩集中形成于海拔 4000~4600 m 的高海拔山区, 不同的凹槽地貌控制着雪崩灾害的发育, 流域的中上游地貌与气候的交织作用促进了雪崩的发育。(3) 结合区域的地貌演化规律, 雪崩灾害可划分为冰斗型雪崩、夷平面型雪崩和沟头凹槽型雪崩, 这一分类系统奠定了今后雪崩灾害判识的基础。本研究对西藏高原的雪崩灾害的认识、判识与减灾具有指导意义。

关键词: 雪崩灾害; 灾害判识; 发育规律; 西藏高原

中图分类号: P642. 22

文献标志码: B

雪崩灾害判识^[1-3]是雪崩灾害研究的基础, 也是防灾减灾工作的重点。地形地貌是雪崩灾害发育过程中相对稳定的因素, 也是雪崩灾害判识的基础^[4], 开展易发育雪崩的地形地貌特征判识、查清雪崩易发育区域的地形约束条件, 有利于提前规划布局, 规避雪崩灾害风险。

国际上雪崩研究始于阿尔卑斯山、安第斯山、洛基山和高加索山等海拔较高的积雪山区, 这些地区历史上发生过诸多雪崩灾害。对此, 学者们系统研究了雪崩的形成条件和机制、分类、判识和预测预警与防治等系统方法^[5-7]。特别地, 针对雪

崩灾害深入制定了应急避灾和应急救援的系统规程^[8]。

中国的雪崩灾害研究首先在新疆天山地区开展。基于雪崩运动路线上的地貌特征, 可以分为沟槽型雪崩和坡面型雪崩; 沟槽型雪崩依据其地貌特征分为冰斗-沟槽型雪崩、雪蚀洼地-沟槽型雪崩和侵蚀冲沟型雪崩^[9]。

由于雪崩所处的地形地貌条件和气候环境的不同, 雪崩的地形和地貌特征差异较大^[10-12]。西藏高原经历过地质历史上的多次隆升与剥蚀, 形成了多级高原夷平面, 是全球少有的中低纬度山区, 西藏高

收稿日期(Received date): 2024-11-08; 改回日期(Accepted date): 2024-12-17

基金项目(Foundation item): 西藏自治区科技计划(XZ202402ZD0001); 国家自然科学基金(42361144880); 国家重点研发计划课题(2023YFC3008301)。[Science and Technology Projects of Xizang Autonomous Region, China (XZ202402ZD0001); National Natural Science Foundation of China (42361144880); National Key Research and Development Program of China (2023YFC3008301)]

作者简介(Biography): 丁海涛(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 山地灾害。[DING Haitao (1977-), male, senior engineer, research on mountain disaster] E-mail: dinghaitao@imde.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 陈宁生(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 山地灾害形成机理与防治。[CHEN Ningsheng (1965-), male, Ph. D., professor, research on mountain disaster formation mechanism and prevention] E-mail: chennsh@yangtzeu.edu.cn; chennsh@imde.ac.cn

原的地貌形成和演化过程与中国新疆天山存在差异性,以地形影响和地貌为基础的雪崩分类也大不相同^[13]。

近年来,西藏高原的雪崩灾害频率呈现出逐年增加的趋势,2023 年 1 月 17 日发生的多雄拉雪崩导致 28 人死亡、2024 年 2 月 6 日发生的布孔拉山段雪崩导致 5 人死亡。针对西藏高原近年来雪崩灾害频繁发生的现状,研究雪崩灾害的地形条件与地貌分类可以对雪崩灾害进行超前判识,最大程度减少雪崩灾害造成的损失。本研究从该地区高原夷平面入手,结合影响雪崩灾害的地形约束条件,探索雪崩灾害的地貌类型分类,对西藏高原雪崩灾害的认识、判识与减灾具有指导意义。

1 西藏高原的雪崩灾害及其时空分布

本研究系统整理和收集了 2015—2024 年西藏高原的 122 次雪崩灾害记录,并对 2023 年多雄拉雪崩灾害和 2024 年布孔拉山雪崩灾害进行了实地考察。

从时间分布来看,2015—2024 年间西藏高原的 122 次雪崩灾害记录中,84 处有准确的时间记录,导

致 62 人死亡或失踪;其中规模最大的为 2023 年 1 月 17 日发生的多雄拉雪崩,造成 28 人死亡;最近的一次雪崩灾害发生在 2024 年 2 月 6 日,位于 219 国道布孔拉山段,造成 5 人死亡。

从空间分布来看,雪崩灾害集中在藏北念青唐古拉高山区、藏南喜马拉雅山区东部,以及喜马拉雅中部的定日到聂拉木沿线三大区域(图 1),占雪崩总次数的 78%。雪崩灾害主要威胁西藏高原的交通路线,其中较为严重的区域包括喜马拉雅山区的林芝、日喀则及昌都,雪崩威胁着 G214、G219、G317、G349、G557、G558 和 G559 七条国道,历史记录显示道路雪崩灾害占总数的 70%。

从年际特征来看(表 1),西藏高原雪崩灾害的时间分布不均,表现出明显的双峰分布特征。2017—2019 年为雪崩高发期,共发生 46 次雪崩灾害;2020 年后雪崩发生次数呈增长趋势,由 2020 年的 3 次增加至 2023 年的 12 次。从月际特征上来看(表 2),除 6 月和 8 月外,其他月份均有雪崩灾害记录,特别集中在 2—4 月,其中 3 月发生次数最多。整体来看,区域雪崩灾害主要集中在春季和冬季,原因是印度洋暖湿气流的影响导致区域高山春、冬季降雪量大、积雪多,从而易诱发雪崩。

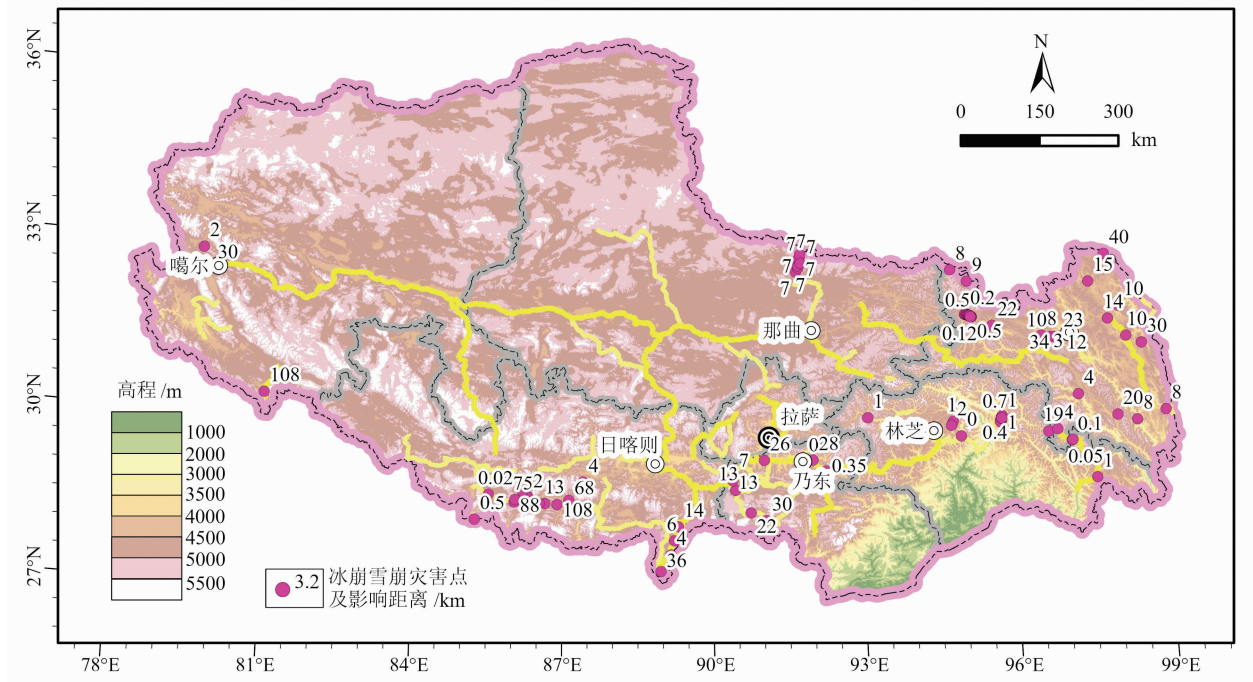


图 1 西藏高原 2015—2024 年雪崩灾害分布图

Fig. 1 Distribution map of avalanche disasters in Tibetan Plateau, China from 2015 to 2024

(审图号:GS(2023)2767)

表 1 西藏高原 2015—2024 年雪崩年际分布特征
Tab. 1 Interannual distribution characteristics of avalanches
in Tibetan Plateau, China from 2015 to 2024

年份	发生次数/次	年份	发生次数/次
2015	3	2020	3
2016	6	2021	3
2017	18	2022	9
2018	11	2023	12
2019	17	2024	2

表 2 西藏高原 2015—2024 年雪崩月际分布特征
Tab. 2 Intermonthly distribution characteristics of avalanches
in Tibetan Plateau, China from 2015 to 2024

月份	发生次数/次	月份	发生次数/次	月份	发生次数/次
1	1	5	7	9	1
2	17	6	0	10	2
3	31	7	3	11	6
4	12	8	0	12	4

2 西藏高原雪崩灾害发育的地形约束

西藏高原的雪崩灾害分布受海拔、沟坡形态及流域区段等地形条件的影响约束尤为显著。不同海拔高度的降水量和气温差异导致积雪厚度等关键指标分布不均;不同的沟坡形态显著影响雪崩灾害的发育程度,其中凹槽地貌的雪崩灾害发育最为显著;由于印度洋暖湿气流的影响,流域上游区段的雪崩灾害发育程度最高。

2.1 雪崩灾害发育的海拔高度约束

对于特定点位的雪崩来说,海拔高度直接影响该位置的气温和降水量,从而对积雪厚度产生显著影响。一方面,随着海拔升高,气温每 100 m 下降约 0.6 ℃,逐日平均气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数逐渐增加,在低温条件下($\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$),积雪更容易累积;另一方面,降水量也随海拔升高而增加,但仅限于最大降水高度以下的区域。西藏高原的年平均降水量随海拔高度每升高 100 m 增加 67.5 mm,海拔较高区域里固体降水比重也会增加,从而导致积雪厚度相应增大。西藏高原雪崩形成区的平均海拔高度约为 4300 m,可见,区域雪崩的形成需要较高的地势,且温度和降

水量需满足孕育雪崩的气候条件。通过统计分析得出了不同海拔范围内的雪崩分布情况(表 3)。从表 3 可以看出,西藏高原雪崩主要分布在海拔 4000 ~ 4600 m 范围内,该海拔高度范围内的雪崩数目占总数的 50%。海拔过低或过高的区域雪崩发生较少,主要原因是气温、降水和地形三方面的综合影响。在海拔低于 3700 m 的区域,由于平均气温较高,逐日平均气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数较少,降雪量较少。在 4500 m 以上的高海拔区域,虽然逐日平均气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数超过 140 d,但越接近角峰刃脊部位,坡度越陡,很多部位的坡度超过 70°,甚至接近垂直,导致降雪难以堆积或堆积较薄,因此较高海拔区域雪崩发生也较少^[14]。不同海拔高度的气温和降水量不同,只有在适宜的海拔范围内,才会孕育大量雪崩^[15]。

表 3 西藏高原 2015—2024 年雪崩灾害海拔与发生次数关系
Tab. 3 Relationship between altitude and frequency of avalanche
disaster in Tibetan Plateau, China from 2015 to 2024

海拔范围/m	发生次数/次	海拔范围/m	发生次数/次
<3400	7	4300 ~ 4600	24
3400 ~ 3700	10	4600 ~ 4900	18
3700 ~ 4000	17	>4900	9
4000 ~ 4300	37		

遥感影像结合无人机航测分析表明,2024 年 2 月 6 日布孔拉山雪崩灾害发生在海拔 4000 ~ 4500 m 范围内,雪崩沟槽位于海拔 3300 ~ 4030 m 范围内,根据表 3 可知,此次雪崩灾害的海拔高度位于易发生雪崩的海拔区间。

2.2 雪崩发育的凹槽地貌约束

不同的沟坡形态对雪崩灾害的发育程度具有显著影响。沟坡形态可分为凹槽地貌、平坡地貌和突出地貌三种类型。根据流域地貌分析(表 4),雪崩主要发育在凹槽地貌区(图 2),其次为平坡地貌区,突出地貌区很少发育雪崩灾害。

2.3 雪崩发育的流域区段约束

西藏高原的雪崩灾害多发育于流域上游区段,这主要是因为该区域的降水主要来源于印度洋暖湿气流,暖湿气流沿河谷上升的过程中,通常会在上游段高海拔河谷区形成更加丰富的降水,为雪崩形成

表 4 青藏高原 2015—2024 年 122 次雪崩地貌统计表

Tab.4 Statistical table of 122 avalanches in
Tibetan Plateau, China from 2015 to 2024

地形地貌	发育灾害数量	占比/%
凹槽地貌	78	63.93
平坡地貌	40	32.79
突出地貌	4	3.28

提供了充足的积雪基础^[16-17]。2023 年墨脱多雄拉雪崩灾害发生在多雄拉河上游的多雄拉隧洞出口; 2024 年察隅布拉孔山雪崩则发生在贡日嘎布曲流域的上游区段。2024 年布孔拉山雪崩发生的区域属于构造侵蚀剥蚀高山地貌,雪线位于海拔高度 3630 m;雪线以上山体冰雪覆盖,坡体基岩裸露,地表起伏较大。雪崩发生区域为三面环山的盆地,是贡日嘎布曲的发源地,天气变化剧烈、局地性显著,偶发极端气象事件。同时,该区域公路沿线海拔落差大、地形陡峭、积雪覆盖面积广,极易发生雪崩(图 3a)。研究团队通过大范围实地踏勘发现,贡日

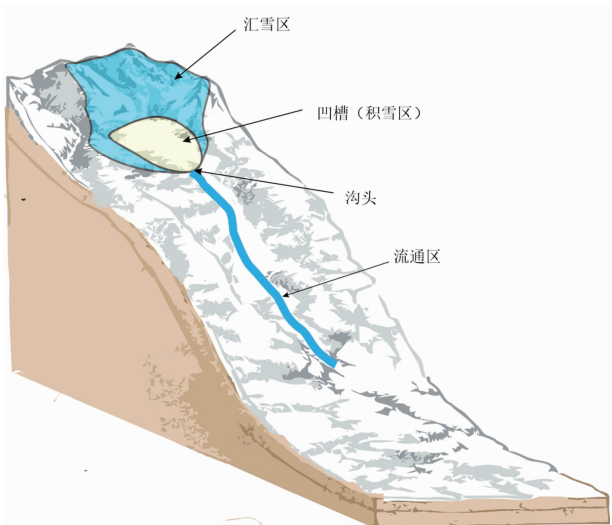


图 2 凹槽积雪区形成的雪崩源区示意图

Fig.2 Schematic diagram of avalanche source area formed
by hollowed snow cover area

嘎布曲上游区段发育有 31 处雪崩灾害,雪崩导致沟口植被严重受损(图 3b),部分雪崩沟槽的出口仅发育 10—20 a 的幼林(图 3c)。这表明该区域多发、频发雪崩灾害,其发育特征受到流域区段的明显约束。

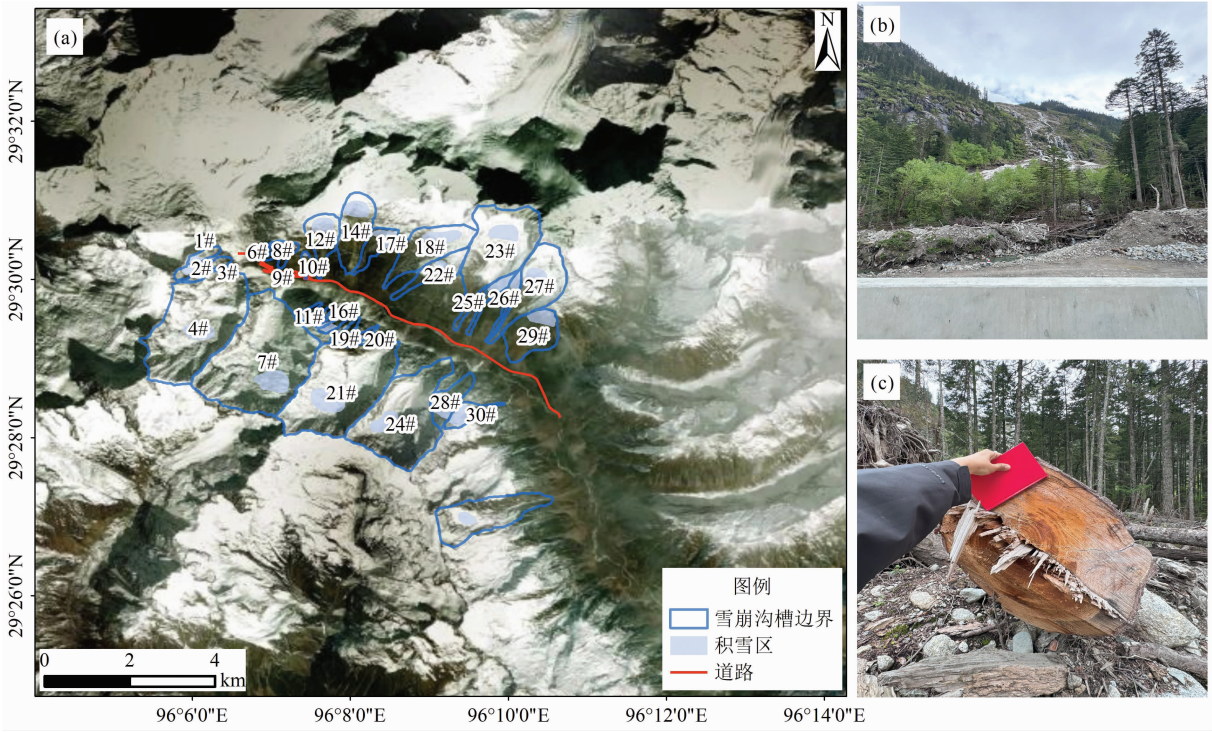


图 3 2024 年 2 月 6 日布孔拉山雪崩灾害所在流域雪崩灾害特征:

- (a) 雪崩灾害集中分布于贡日嘎布曲流域上游区段;(b) 雪崩沟槽沟口发育的幼林;(c) 基于树木年轮定年法确定雪崩发生频率
- Fig.3 Characteristics of avalanche disasters in the Bukongla Mountain basin on February 6, 2024:
- (a) concentrated distribution of avalanche disasters in the upper reaches of the Gongrigabuchu River basin;
- (b) young forests developed at the outlet of avalanche gullies; (c) determination of avalanche frequency using tree-ring dating methods

3 西藏高原雪崩的地貌分类

雪崩类型划分的方法很多,例如依据雪崩的密度或规模大小进行划分^[18]。西藏高原经历了多期次的隆升,形成了独特的夷平面地貌,雪崩在地貌上也表现出不同的类型^[19]。西藏高原的雪崩类型以沟槽雪崩为主,近年来该区域发生的雪崩均沿沟谷运动,具有固定的运动路线和明显的积雪区、运动区(流通区)和堆积区。该区域的雪崩运动速度快,冲击和刨蚀作用大,雪崩沟槽下端的季节性雪崩堆积区多见“旗”状树木与“刀”型灌木丛,堆积区所在的谷底常为“U”字型的冰川侵蚀河谷,两侧山坡陡峭,基岩裸露,少林木。根据上端积雪区的地貌形态特征,研究区域的雪崩可分为冰斗型雪崩、夷平面型雪崩和沟头凹槽型雪崩三种类型(图4)。

高山冰川地貌区存在山顶面、高原面、河谷侵蚀面三类典型夷平面^[20]。山顶面是指区域海拔最高的山脊和山峰构成的最高平面;河谷面是高原河流形成的以“U”形谷为主体的平面,在河谷面和山顶面之间发育有风化剥蚀形成的夷平面即是本区的一类高原面。本区的另一类高原面是由于冰川侵蚀形

成的,以冰斗为典型特征的冰斗夷平面。此外,在高原面和河谷侵蚀面之间发育有大量的冲切沟,这些冲切沟的沟源常形成一系列凹槽地貌,凹槽内一年四季都积聚了大量的积雪。起源于冰斗夷平面、风化剥蚀夷平面和冲切沟沟源凹槽的雪崩可分别称为冰斗型雪崩、夷平面型雪崩和沟头凹槽型雪崩,这三类雪崩因源区位置及高差等特征的差异而展现出不同的特性(表5),如219国道所在的贡日嘎布曲流域上游区段的31个雪崩灾害点中,有冰斗型雪崩6处、沟头凹槽型雪崩8处、夷平面型雪崩17处,对公路危害较大的雪崩类型多为夷平面型雪崩。

由于大部分雪崩灾害发生后,雪崩堆积的痕迹会随着积雪融化逐渐消失,这为后续研究带来了很大困难,因此,雪崩地貌类型的普遍性应用仍需进一步深入和细致的研究。研究团队在西藏高原的其他区域(如念青唐古拉山区的易贡藏布流域)也发现了类似的雪崩地貌类型。此外,研究团队通过统计分析总结了西藏高原雪崩的地形约束条件,在雪崩的地貌类型划分的基础上,明确了在满足这些约束条件并同时存在凹槽地貌的区域,需要格外关注雪崩灾害的潜在威胁。这一研究结果为西藏高原雪崩灾害防治提供了重要的理论支持,同时也需要在未

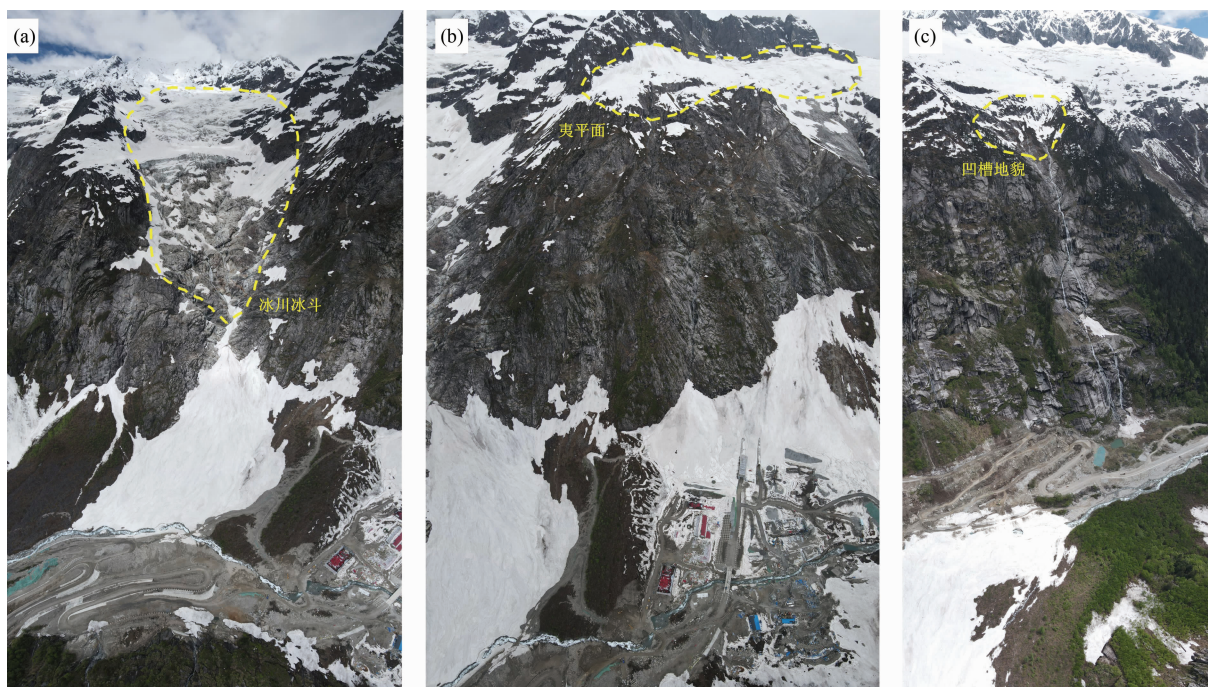


图4 基于地貌分类的研究区雪崩类型:(a)冰斗型雪崩;(b)夷平面型雪崩;(c)沟头凹槽型雪崩

Fig. 4 Avalanche types in the study area based on geomorphological classification:

(a) cirque-type avalanche; (b) planate-type avalanche; (c) gully-head trough-type avalanche

表 5 西藏高原雪崩分类地貌形态与特点
Tab.5 Geomorphological forms and characteristics of avalanche types in Tibetan Plateau, China

雪崩类型	地貌形态	雪崩特点
冰斗型雪崩	沟谷长度多在 1000 m 以上,沟谷曲折,有少许陡坎、跌水,平均坡度 35°左右,一般上游较陡,下游较缓。积雪区海拔较高,位于冰川侵蚀的冰斗区,其海拔高出河谷 1500 m 以上,面积为 2 km ² 左右,槽谷呈 U 形。	雪崩运动线路长,具有明显的积雪区、运动区、堆积区。积雪区位于冰斗发育的凹槽地带,雪崩规模和破坏力大,堆积区雪体多在 1 × 10 ⁴ m ³ 以上。雪崩雪中有土、石块、植物残体或乔木,颜色呈浅黄色。经常危害交通。但仅发生在个别年份特大降雪时,具有周期性特点,与气候密切相关。多为新雪雪崩。
高原夷平面型雪崩	沟谷长度多为 500 ~ 1000 m,沟谷少曲折、陡坎,坡度在 35°以上。源头积雪区为西藏高原夷平面的凹地,与河谷的高差多为 700 ~ 1000 m。面积在 1 km ² 以内,槽谷呈 U 形。	雪崩运动区、堆积区明显。雪崩规模中等,堆积雪体多为数百至上千立方。雪崩雪中有少数土、石块和植物残体,颜色呈浅黄色。经常危害交通。
沟头凹槽型雪崩	沟谷长度多为 300 ~ 500 m,沟谷平直,无陡坎,平均坡度为 35° ~ 45°。积雪区为冲切沟沟头的凹槽,面积不大,多在数百平方米以内。	雪崩规模小,但频繁。堆积区雪体大多数为 200 ~ 500 m ³ ,也有数十立方。积雪区为冲切沟沟头的凹槽区。经常危害交通。雪崩路线最短是其显著的特征。

来的实践中进一步验证和推广应用。

4 结 论

本文对 2015—2024 年间西藏高原发生的 122 处雪崩灾害进行了统计分析,并根据雪崩发生源区的地貌类型对雪崩灾害进行了分类,得出以下结论。

(1)西藏高原雪崩灾害的时空分布不均,空间上主要集中在喜马拉雅山脉和念青唐古拉山区的公路路段,时间上多发生于冬、春季节,尤其是 2—4 月。

(2)海拔高度、地形地貌和流域位置等地形条件对西藏高原的雪崩灾害存在着约束规律,雪崩集中发生于海拔 4000 ~ 4600 m 范围内的高海拔山区,凹槽地貌有利于雪崩灾害的发育,而流域中上游地貌与气象因素的交织作用控制了雪崩的形成与发展。

(3)基于雪崩源区的地貌演化规律,西藏高原的雪崩灾害类型可系统地划分为冰斗型雪崩、夷平面型雪崩和沟头凹槽型雪崩。

参考文献 (References)

[1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 雪崩及其防治 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 56 - 65. [Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Avalanche and its control [M]. Beijing: Science Press, 1979: 56 - 65]

[2] PEREZ-GUILLEN C, TECHEL F, HENDRICK M, et al. Data-driven automated predictions of the avalanche danger level for dry-snow conditions in Switzerland [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2022, 22: 2031 - 2056. DOI: 10.5194/nhess - 22 - 2031 - 2022

[3] 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

[4] 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

[5] SCHWEIZER J, KRONHOLM K, WIESINGER T. Verification of regional snowpack stability and avalanche danger [J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37 (3): 277 - 288. DOI: 10.1016/S0165 - 232X(03)00070 - 3

[6] BARLOW J, FRANKLIN S E. Mapping snow avalanche chutes in the Canadian Rockies using Landsat TM and DEM data [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2008, 34 (6): 516 - 525. DOI: 10.5589/m08 - 072

[7] SCHWEIZER J, MITTERER C, TECHEL F, et al. On the relation between avalanche occurrence and avalanche danger level [J]. The Cryosphere, 2020, 14 (2): 737 - 750. DOI: 10.5194/tc - 14 - 737 - 2020

[8] 刘大翔, 程尊兰, 赵鑫, 等. 雪崩防治工程研究与应用现状 [J]. 山地学报, 2013, 31 (4): 425 - 433. [LIU Daxiang, CHENG Zunlan, ZHAO Xin, et al. Research and application

- situation of avalanche prevention and control engineering [J]. Mountain Research, 2013, **31**(4): 425 – 433] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.04.008
- [9] 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]
- [10] LI Xingyue, SOVILLA B, GRAY J M N T, et al. Transient wave activity in snow avalanches is controlled by entrainment and topography [J]. Communications Earth & Environment, 2024, **5**(1): 77. DOI: 10.1038/s43247-023-01157-x
- [11] BUTLER D R, SAWYER C F. Dendrogeomorphology and high-magnitude snow avalanches: A review and case study [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, **8**(2): 303 – 309. DOI: 10.5194/nhess-8-303-2008
- [12] GAUME J, VAN HERWIJNEN A, CHAMBON G, et al. Snow fracture in relation to slab avalanche release: Critical state for the onset of crack propagation [J]. The Cryosphere, 2017, **11**(1): 217 – 228. DOI: 10.5194/tc-11-217-2017
- [13] 除多. 西藏雪崩灾害及其应对措施研究[J]. 高原山地气象研究, 2022, **42**(1): 117 – 126. [CHU Duo. Study on avalanche hazards and response measures in Tibet area [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, **42**(1): 117 – 126] DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2022.01.017
- [14] 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
- [15] FERGUGLIA O, PALAZZI E, ARNONE E. Elevation dependent change in ERA5 precipitation and its extremes [J]. Climate Dynamics, 2024, **62**(8): 8137 – 8153. DOI: 10.1007/s00382-024-07328-6
- [16] 董文杰, 韦志刚, 范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象, 2001, **20**(4): 402 – 406. [DONG Wenjie, WEI Zhigang, FAN Lijun. Climatic character analyse of snow disasters in east Qinghai-Xizang Plateau livestock farm [J]. Plateau Meteorology, 2001, **20**(4): 402 – 406] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2001.04.009
- [17] 周陆生, 李海红, 汪青春. 青藏高原东部牧区大一暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. 高原气象, 2000, **19**(4): 450 – 458. [ZHOU Lusheng, LI Haihong, WANG Qingchun. The basic characteristics of heavy snowstorm process and snow disaster distribution in eastern pastoral areas of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2000, **19**(4): 450 – 458] DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2000.04.006
- [18] HAFNER E D, TECHEL F, DAUDT R C, et al. Avalanche size estimation and avalanche outline determination by experts: Reliability and implications for practice [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023, **23**(8): 2895 – 2914. DOI: 10.5194/nhess-23-2895-2023
- [19] 熊建国, 李有利, 张培震. 夷平面研究新进展[J]. 地球科学进展, 2020, **35**(4): 378 – 388. [XIONG Jianguo, LI Youli, ZHANG Peizhen. New advances in planation surface research [J]. Advances in Earth Science, 2020, **35**(4): 378 – 388] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.032
- [20] 申艳军, 彭建兵, 陈兴, 等. 高山冰川地貌区垂直分带性与地质灾害空间配置关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, **42**(6): 1336 – 1351. [SHEN Yanjun, PENG Jianbing, CHEN Xing, et al. Relationship between vertical zonality and spatial allocation of geological hazards in alpine glacial geomorphology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, **42**(6): 1336 – 1351] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.0864

Geomorphological Recognition of Avalanches by Terrain Constraints in Tibetan Plateau, China

DING Haitao^{1, 3}, CHEN Ningsheng^{2, 3*}, WU Mingyang³, ZHANG Xinyue⁴

(1. Lhasa Qinghai-Xizang Plateau Scientific Research Center, Lhasa 850000, China;

2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China;

4. School of Engineering, Tibet University, Lhasa 850013, China)

Abstract: Topography is a relatively stable factor in the development process of avalanche disaster and serves as the foundation for identifying such hazards. The geomorphologic formation and evolution of the Tibetan Plateau is

different from that of other plateaus in China, leading to different avalanche classifications and mechanisms.

Based on the cataloged data of 122 avalanche disasters in Tibetan Plateau over the past 10 years, this study systematically summarized the spatial and temporal developmental patterns of avalanche disasters in the Tibetan Plateau by research methods of remote sensing analysis and on-site investigation, combined with the history of regional geomorphic evolution.

(1) Avalanches were spatially concentrated in the highway sections of the Himalayan Mountain and the Nyainqentanglha Mountain regions, and temporally reached their peak especially from February to April.

(2) Elevation, trough landforms, and watershed location, working as elements of terrain constraint, controlled the scale and mechanism of avalanches in avalanche-prone terrain. Avalanches were created in the high-altitude mountainous areas with an elevation of 4000 – 4600 m. Different trough landforms controlled the formation of avalanche hazards, and the intertwined effects of landforms and climate in the middle and upper reaches of the watershed promoted the development of avalanches.

(3) Combined with the geomorphological evolution of the region, the types of avalanche disasters were systematically classified into cirque-type avalanches, planate-type avalanches and gully-head trough-type avalanches, which laid the foundation for the identification of avalanche disasters in the future.

This study is of great significance in guiding the recognition, identification and mitigation of avalanche hazards in Tibet.

Key words: avalanche hazard; hazard identification; development pattern; Tibetan Plateau

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)