

引用格式: 郝建盛, 黄法融, 冯挺, 李兰海. 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, LI Lanhai. 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.

亚洲高山区雪崩灾害时空分布特点及其诱发因素分析

郝建盛^{1,2,3,5}, 黄法融^{1,2,3,4}, 冯挺^{1,2,3,5}, 李兰海^{1,2,3,4,5*}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院伊犁河流域生态系统研究站, 新疆 新源 835800; 3. 新疆干旱区水循环与水利利用重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

4. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 雪崩灾害严重威胁亚洲高山区社会经济发展, 掌握亚洲高山区雪崩灾害的时空分布特点及其影响因素对雪崩灾害防治具有重要的理论及现实意义。本研究采用文献分析、数据整理等方式, 收集了 2009—2019 年间亚洲高山区的雪崩灾害数据, 基于雪崩灾害活跃指数定量分析不同时空雪崩的活跃度, 阐明亚洲高山区雪崩灾害的时空分布特点及其影响因素。结果展示: (1) 10 月到次年 4 月为亚洲高山区雪崩灾害危险期, 2 月下旬和 3 月为雪崩的危险性和活跃度的高峰期。(2) 由于积雪特性和气候的差异, 不同山区的雪崩活跃度和受灾程度呈现显著差异。64% 的雪崩灾害事件发生在帕米尔高原和克什米尔地区为中心的天山、西喜马拉雅山、兴都库什山区, 该区域的雪崩造成的伤亡人数占总伤亡人数的 78%。(3) 多数雪崩灾害事件是由自然因素(强降雪、温度剧增、雨夹雪、地震和风等)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。本研究可为评估在气候变化下亚洲高山区雪崩灾害未来发展趋势和应对防治策略的研究提供数据支持。

关键词: 雪崩; 亚洲高山区; 雪崩灾害活跃指数; 积雪特点; 气候

中图分类号: P954

文献标志码: C

喜马拉雅山以西, 涵盖昆仑山、喀喇昆仑山、兴都库什山、天山等山脉的亚洲高山区, 是“丝绸之路经济带”的核心区域^[1-2]。区域内冰/雪崩灾害频繁发生^[3-5], 经常造成交通阻断、水电基础设施损毁和油气输送管道瘫痪等^[6-8], 严重影响区域社会和经济的发展。阿富汗境内 2015 年 2 月连续发生的大规模雪崩造成至少 300 人死亡, 2017 年 2 月 2—6 日的大规模雪崩造成超过 200 人死亡^[7-8]。2020 年 1 月 14 日, 克什米尔地区的雪崩造成超过 100 多人死亡失踪^[9]。亚洲高山区雪崩

灾害的防治对丝绸之路经济带沿线国家的可持续发展具有重要现实意义。

雪崩的孕育和释放受气候、地形、积雪特征等多种因素影响^[10-13]。雪崩的释放形态多样, 不同类型雪崩的形成机制差异明显^[14-16]。雪崩形成的条件和类型因积雪雪层结构、土壤温湿度变化和区域天气条件的不同而异^[17-18]。在一定的地形和积雪条件下, 强降雪、温度剧增、地震、强风和人类活动(如滑雪、登山、军事活动和采矿等)常常诱发雪崩^[7, 17, 19]。研究表明, 西喜马拉雅山区域大

收稿日期(Received date): 2020-04-05; 改回日期(Accepted date): 2021-03-25

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金-新疆联合基金(U1703241); 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2017D01B52)。[National Natural Science Foundation - Xinjiang Joint Fund (U1703241); Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2017D01B52)]

作者简介(Biography): 郝建盛(1991-), 男, 甘肃白银人, 博士, 研究方向: 积雪物理和雪崩灾害防治。[HAO Jiansheng (1991-), male, born in Baiyin, Gansu province, Ph. D., research on physical mechanism of snow and Prevention and control of avalanche disaster] E-mail: haojiansheng14@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 李兰海(1964-), 男, 江西信丰人, 研究员、博士生导师。研究方向: 积雪生态水文及灾害研究。[LI Lanhai (1964-), male, born in Xinfeng, Jiangxi province, professor, research on ecological hydrology and disaster of snow] E-mail: lilh@ms.xjb.ac.cn

约 60% 的雪崩由强降雪诱发^[6]; 中国天山西部 49% 的雪崩是由强降雪诱发, 27% 的雪崩是由春季温度剧烈升高诱发引起, 24% 的雪崩分别是由地震和风以及其他因素诱发形成^[7]。在不同气候和积雪特性区域, 雪崩风险在空间和时间上差异明显^[16, 20]。西风环流、南亚季风和东亚季风与高海拔气候共同作用造成亚洲高山区不同区域的气候和积雪特性存在显著差异^[2, 21-22], 导致亚洲高山区雪崩风险在空间和时间存在明显差异。

随着交通、采矿等社会经济和资源开发利用活动不断向山区拓展, 暴露在雪崩风险之下的人口日趋增多。同时, 气候变暖也导致中高海拔山区雪崩活动频率增加^[23]。面对气候变化下雪崩活动增强态势, 人们对雪崩灾害的防治需求不断增加。明确亚洲高山区雪崩时空分布特点和影响因素是区域雪崩灾害防治的必要条件, 也是掌握气候变化背景下区域雪崩灾害发展趋势的先决条件。本研究基于 2009—2019 年亚洲高山区内雪崩灾害数据并结合区域积雪气候特点, 以山系为单元通过分析亚洲高山区境内不同山系的雪崩灾害特征和致灾原因, 揭示境内雪崩灾害的时空分

布特点及其影响因素, 为气候变化下亚洲高山区雪崩灾害未来发展趋势和防治策略的研究提供支持。

1 研究区介绍

亚洲高山区涵盖山脉众多(表 1), 世界上海拔超过 7000 m 的所有高峰分布于此区域^[24]。亚洲高山区西部主要受西风环流的影响, 西南部受南亚季风的影响, 东部和东南部主要受到东亚季风的影响(图 1)^[21, 25]。区内高寒、高海拔的山脉阻挡携带丰富水汽的季风和环流, 从而形成丰富的降雪并造成许多山区被冰雪覆盖^[22, 26-28]。由于西风环流、南亚季风和东亚季风带来的水汽受到山地地形的阻挡, 部分水汽难以深入亚洲大陆内陆。以南亚—东亚季风与西风环流的交界线为界线^[21, 25], 该线北部广大区域里多为空气湿度相对较低, 降水相对较少的大陆性气候, 分布着密度低、含水率较低的干寒型积雪; 而该线南部区域多为空气湿度和降水相对较高的海洋性气候, 分布着密度大、含水率较高温暖型积雪^[27-29]。

表 1 亚洲高山区主要的山脉和简称
Tab. 1 Abbreviations and locations of the mountains in the High Mountain Asia

山脉名称	简称	所在国家和地区	范围(经度, 纬度)	主峰(海拔/m)
兴都库什山脉	HK	阿富汗, 巴基斯坦	71° ~ 65°, 31° ~ 37°	蒂里奇米尔峰(7690)
天山山脉	TS	中国、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦	64° ~ 95°, 38° ~ 46°	托木尔峰(7443)
喀喇昆仑山脉	KA	巴基斯坦、中国、塔吉克斯坦、印度、克什米尔地区	72° ~ 77°, 35° ~ 37°	乔戈里峰(8611)
喜马拉雅山脉	HY	尼泊尔、印度、中国、不丹、巴基斯坦	75° ~ 96°, 26° ~ 35°	珠穆朗玛峰(8844)
厄尔布尔士山脉	EL	伊朗	47° ~ 56°, 35° ~ 39°	达马万德山(5671)
横断山脉	HD	中国	97° ~ 103°, 22° ~ 33°	贡嘎山(7556)
扎格罗斯山脉	ZA	伊朗	44° ~ 57°, 27° ~ 36°	大阿勒山(5165)
祁连山脉	QL	中国	93° ~ 104°, 33° ~ 39°	团结峰(5808)
阿尔泰山脉	AL	中国、俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦	82° ~ 103°, 44° ~ 51°	友谊峰(4374)
昆仑山脉	KL	中国	75° ~ 100°, 35° ~ 40°	公格尔峰(7649)
阿尔金山脉	AT	中国	83° ~ 91°, 37° ~ 40°	苏拉木塔格(6295)
苏莱曼山脉	SM	巴基斯坦、伊朗	61° ~ 71°, 25° ~ 35°	塔克特伊峰(3374)
巴颜喀拉山脉	BY	中国	90° ~ 103°, 32° ~ 35°	果洛峰(5369)
冈底斯山脉	GD	中国	77° ~ 91°, 29° ~ 33°	罗波峰(7095)
唐古拉山	TG	中国	73° ~ 100°, 29° ~ 33°	各拉丹冬(6621)

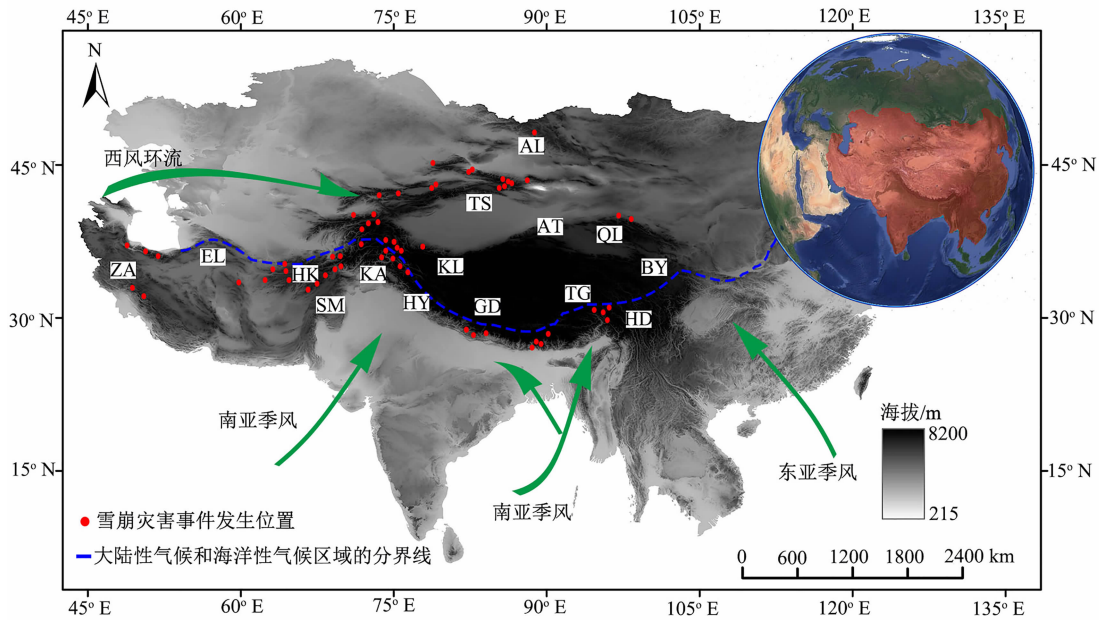


图 1 研究区的概况图和雪崩灾害事件发生位置 (审图号:GS(2016)2938)

Fig. 1 Overview map of the study area and locations of avalanche disaster events (Map No. GS(2016)2938)

2 研究数据和方法

通过已有文献^[8,30-32]、新闻媒体报道^[9,33-34]、实地考察等途径收集了 2009—2019 年研究区内雪崩灾害数据。收集的雪崩灾害资料详细描述了雪崩灾害的发生时间、位置、损失状况等(表 2)。雪崩灾害导致的经济和社会损失难以定量估计,本研究仅以雪崩事件中伤亡人数评估雪崩灾害严重程度。以亚洲高山区内 15 个山脉为单元(表 1),统计 2009—2019 年各山脉雪崩灾害数量、雪崩灾害发生时间和雪崩致死人数。为了定量描述雪崩灾害随时间分布特征,雪崩灾害活跃指数被定义并被应用于定量描述区域内特定时间段雪崩灾害的发生频次。雪崩灾害活跃指数越高,雪崩灾害发生频率越高。雪崩灾害活跃指数计算如下:

$$AAI_{ij} = \frac{NA_{ij} - \min\{NA_{ij}\}}{\max\{NA_{ij}\} - \min\{NA_{ij}\}} \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)

式中, AAI_{ij} 为在第 i 个山脉区域内第 j 时间段内的雪崩灾害活跃指数,本研究以半个月作为一个时间段。雪崩发生期内共有 m 时间段, NA_{ij} 为在第 i 个山脉区域内第 j 时间段内雪崩灾害发生数量。对于整个研究区域而言,第 j 时间段内雪崩灾害活跃指数

AAI_j 计算如下:

$$AAI_j = \sum_{i=1}^m AAI_{ij} \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$)

雪崩灾害由强降雪、温度剧增、地震和雨夹雪等诱发引起^[7, 17-18]。本研究根据雪崩的诱发因素将雪崩分为降雪诱发型、温度剧增诱发型、地震诱发型、降雨夹雪诱发型和其他诱发性型雪崩。最后根据雪崩灾害事件报告中与雪崩发生直接相关的自然因素和人类活动,甄别出雪崩的诱发因素,对相同诱发因素诱发的雪崩进行聚类统计,分析雪崩灾害主要诱发因素。

3 结果与分析

3.1 雪崩灾害的空间分布特征

2009—2019 年亚洲高山区雪崩灾害事件分布在北纬 28°以北的亚洲大多数国家,包括中国、阿富汗、哈萨克斯坦、巴基斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、尼泊尔、不丹、印度、伊朗。年平均雪崩造成的伤亡人数约为 158 人(图 2)。26.8% 的雪崩灾害事件发生在天山,其次是喀喇昆仑山(17.8%)、兴都库什山(16.1%)和喜马拉雅山(14.3%)。天山地区的雪崩灾害发生频次最高,但该山区雪崩致死人数

表 2 2009—2019 亚洲高山区的各国境内重大雪崩伤亡事件

Tab. 2 Major avalanche disaster events in each country within the High Mountain Asia from 2009 to 2019

所在国家和地区	发生日期	受灾情况	所在山脉	诱发因素
阿富汗/加兹尼等省	2017.2.2—2017.2.5	119 人死亡,80 多人受伤,大量房屋损毁	兴都库什山	强降雪
阿富汗/潘杰希尔、努尔斯坦、巴米扬等省	2015.2.24—2015.2.27	310 人死亡,多省交通瘫痪	兴都库什山	强降雪
中国/甘肃省肃北县黑刺沟锦矿区	2012.6.5	10 名矿工死亡,12 人受伤	祁连山	雨夹雪
中国/西藏林芝	2011.3.24—2011.3.25	100 多人被困,10 人失踪,川藏公路瘫痪	横断山	雨夹雪
中国/新疆伊犁	2010.12.22	250 辆车被困,560 人滞留,2 死 1 重伤,造成 G217 和 G218 交通瘫痪	天山	强降雪
巴基斯坦/巴控克什米尔	2012.4.7	124 名军人和 11 名居民死亡	喀喇昆仑山	气温剧增
巴基斯坦/吉德拉尔	2017.2.5	20 余人死亡	兴都库什山	强降雪
哈萨克斯坦/江布尔州	2017.2.18	23 名军人伤亡	天山	强降雪
吉尔吉斯斯坦/比什凯克	2017.3.15—2017.3.18	3 死 4 伤,首都比什凯克到奥什的交通瘫痪	天山	气温剧增
塔吉克斯坦	2014.4.2	3 人死亡,13 辆货车被埋,首都杜尚别到苦盏公路瘫痪	天山	气温剧增
印度/印控克什米尔	2010.2.8	44 人死亡,包括 17 名军人	喀喇昆仑山	剧烈强震
印度/印控克什米尔	2019.3.15—2019.4.3	20 多名印度军人失踪和死亡	喀喇昆仑山	强降雪和剧烈强震
尼泊尔/珠穆朗玛峰南部	2015.4.25	20 人死亡,60 余人重伤,1000 人被困	喜马拉雅山	地震
伊朗/吉兰省	2014.3.30	32 人受伤,1.4 万人被困	厄尔布尔士山	温度剧增

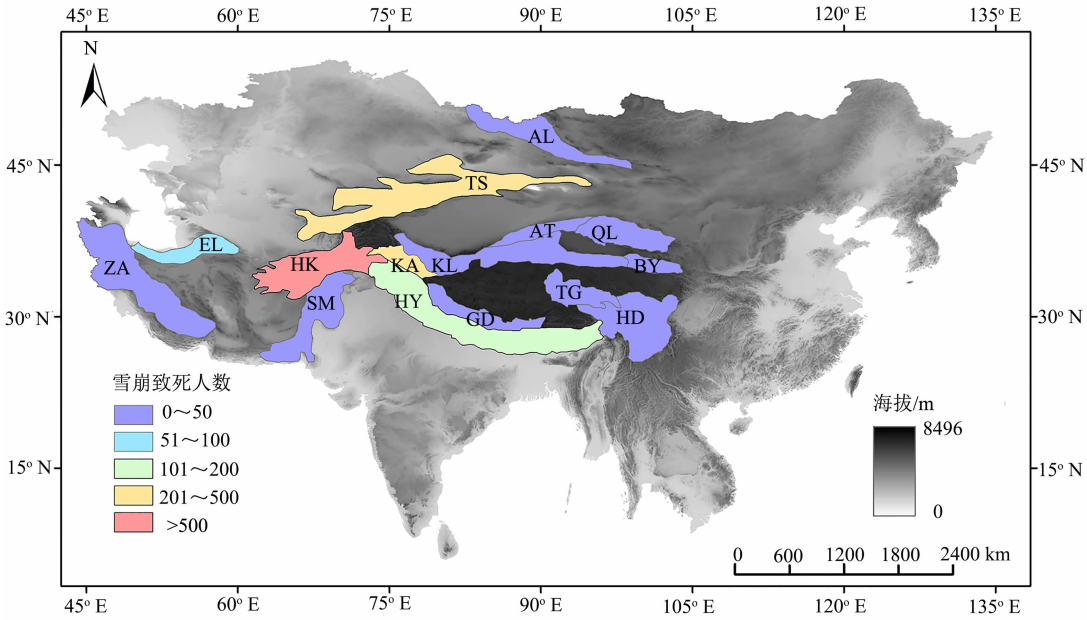


图 2 各个山区发生的雪崩致死人数

Fig.2 Death toll of avalanche disasters events in each mountain area

却少于兴都库什、喀喇昆仑、喜马拉雅山和厄尔布士山。图 2 展示在亚洲高山区的核心地带,即以帕米尔高原和克什米尔地区为中心的周边山区(天山、兴都库什山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山)雪崩灾害最为严重。该区域雪崩灾害事件占总量的 64%,雪崩致死人数占总死亡人数的 78%,年平均伤亡人数约为 120 人。2009—2019 有三次死伤人数超过 100 人的特大雪崩灾害事件发生在以帕米尔高原为中心的喜马拉雅山、兴都库什山、喀喇昆仑山和天山区域。图 2 展示在由天山、祁连山、喀喇昆仑山、昆仑山和青藏高原内部等组成的亚洲高山区大陆性气候区共发生 19 起雪崩灾害事件,造成 266 人死亡,由喜马拉雅山、兴都库什山、横断山和扎格罗斯山等组成的海洋性气候区共发生 37 起雪崩灾害事件,造成 1315 人死亡。相比而言,海洋性气候区的每次雪崩灾害事件平均死亡人数是大陆性气候区的 2.5 倍,海洋性气候区的受灾程度要严重于大陆性气候区。

3.2 雪崩灾害的时间分布特征

雪崩灾害事件发生在每年的 10 月初到 4 月底。雪崩灾害发生期内雪崩灾害活跃程度呈现高一低一高一低特征的双峰波状(图 3)。第一波雪崩灾害发生在 10 月上半月到 12 月下旬,占整个雪崩灾害数量的 17.8%。第二波雪崩灾害发生在 1 月下半月到 4 月下半月,占整个雪崩灾害数量的 82.2%。2 月和 3 月期间是雪崩灾害发生最为频繁的时期,该期间总计伤亡 1250 人,占总伤亡人数的 79.1%(图 4)。

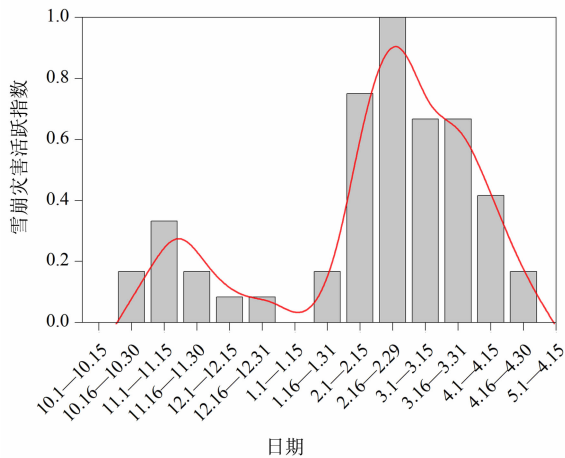


图 3 雪崩灾害活跃指数随时间的分布

Fig. 3 Temporal distribution of avalanche disaster activity index

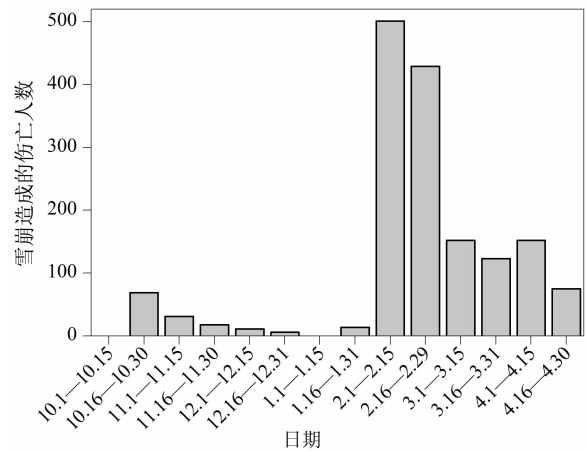


图 4 雪崩造成的死亡人数随时间的分布

Fig. 4 Temporal distribution of death toll from avalanche disaster events

3.3 雪崩的诱发因素

亚洲高山区内多数雪崩灾害事件是由自然因素诱发形成,其中强降雪诱发的雪崩灾害最多,其次是温度剧增、雨夹雪、地震和强风等(图 5)。41.1% 的雪崩灾害事件是由强降雪引起,其分布于整个雪崩灾害发生期间。25% 的雪崩灾害事件归因于气温剧增,它主要发生在 2 月下旬以后。地震诱发的雪崩灾害事件在雪崩灾害事件中相对减少,但地震诱发的雪崩灾害具有巨大的破坏性。包括人类活动诱发的雪崩灾害占到总雪崩灾害数量的 23.2%,军事活动和挖矿等活动中的爆炸产生的气浪、声波和强震以及飞机投掷、爬山、滑雪都能直接诱发雪崩。虽然人类活动诱发的雪崩灾害事件少于自然因素诱发的雪崩灾害,但人类诱发的雪崩直接危害人类活动且难以预防。

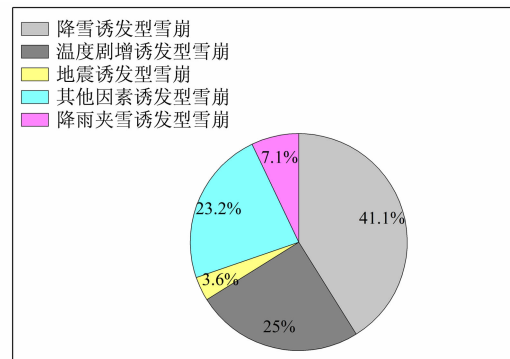


图 5 不同因素诱发的雪崩灾害的比例

Fig. 5 Proportion of avalanche disaster events triggered by different factors

4 讨论

4.1 气候和积雪特性对雪崩灾害空间分布的影响

研究结果展示海洋性气候区的受灾程度严重于大陆性气候区。大陆性气候区由于气温相对低,降水相对少导致该区分布具有密度低、含水率低和高雪场温度梯度特征的干寒型积雪^[27, 29, 35]。高雪场温度梯度导致深霜发育显著,由此干寒型积雪由力学强度低的深霜构成的脆弱层存在持久^[27, 29, 35]。脆弱层的存在是表层雪崩发生的必要条件^[10]。表层雪崩是指脆弱层以上的积雪以脆弱层作为断裂滑动面下滑^[10]。因此,在大陆性气候区表层雪崩频发。海洋性气候区由于空气湿度相对较大、降雪相对丰富导致该区分布密度高、含水率高、雪场温度梯度低的温暖型积雪^[27, 29]。低的雪场温度梯度难以形成脆弱层或脆弱层持续时间短^[12, 28]。海洋性气候区多发生因底部积雪剪切破坏而造成山坡积雪沿地表下滑的全层雪崩。全层雪崩发生时裹挟的积雪体积要高于表层雪崩,海洋性气候区温暖型积雪的密度和含水率要高于大陆性气候区干寒型积雪,因此海洋性气候区雪崩的规模和重量要高于大陆性气候区。此外,大陆性气候干寒型积雪相对于海洋性气候温暖型积雪力学强度低,雪层结构松散,雪粒之间的链接弱,所以大陆性气候区雪崩极易被触发^[7, 13, 29],因此在大陆性气候区很难累积成大规模雪崩,导致其破坏力弱于海洋性气候区雪崩。综上所述,海洋性气候区雪崩规模和破坏力都要高于大陆性气候区,这导致海洋性气候的受灾程度要高于大陆性气候区。

4.2 气候和积雪特性对雪崩发生时间特征的影响

亚洲高山区雪崩灾害主要发生在10月到次年4月,雪崩灾害活跃程度随时间推移呈现高一低一高一低特征的双峰波状分布(图3),其中在2月下旬雪崩灾害最为活跃。10—11月地表热量导致近地表的积雪融化产生的自由水,进而造成积雪和地表面之间摩擦系数相对较小,山坡积雪稳定性相对较低以至于积雪易沿着斜坡整体滑落^[17-18, 36]。但该时期积雪量少,雪崩发生的规模和破坏力弱,所以雪崩造成的伤亡相对较小(图4)。在北半球12月和1月上半月随着气温的逐渐下降,地表温度也呈现显著下降。低温导致底部积雪与地表冻结而胶结

在一起,导致山坡积雪较为稳定,因此该时期雪崩的活跃度也逐渐下降(图3)。从1月开始大陆性气候区的雪晶体经过前期的不断发育,造成雪场持久性脆弱层出现^[37],雪场结构松散。随着雪深增加和持久性脆弱层存在,大陆性气候山坡积雪的稳定性下降,致使雪崩发生频率开始逐渐增加,并在2月底和3月初雪崩发生频率达到顶峰。海洋性气候区随着雪深不断增加,底部雪层的负载不断增加导致山坡积雪稳定性下降。其中2月底和3月初雪深最深^[38],雪崩发生频率也最高,并且这时的雪崩发生时携带大量的积雪,具有较强的破坏力,造成雪崩灾害事件和雪崩致死人数达到顶峰(图4)。4月以后,随着积雪消融雪,亚洲高山区整体雪深持续减少,雪崩的发生频率和破坏力也呈现下降,雪崩灾害事件和雪崩致死人数也逐渐减少。综上所述,由于积雪、地表土壤温湿度以及天气随时间的演变和交互作用,亚洲高山区10月到次年4月期间雪崩灾害活跃度随时间呈现高一低一高一低的态势分布。2月和3月上旬山区雪深最深,雪崩最为活跃,并且雪崩发生时携带的积雪量较大,会产生较大的破坏力,雪崩灾害事件和雪崩致死人数最多。

5 结论

(1)亚洲高山区雪崩灾害分布在北纬28°以北的亚洲高山区,其中地处亚洲高山区核心区的西喜马拉雅山、兴都库什山、天山、喀喇昆仑山区域雪崩灾害事件最为严重,占亚洲高山区雪崩灾害事件总量的64%。由于气候和积雪特性的影响造成由兴都库什山、横断山和扎格罗斯山等组成的亚洲高山区的海洋性气候区域的受灾程度要严重于由天山、祁连山、喀喇昆仑山、昆仑山等组成的亚洲高山区的大陆性气候区域。

(2)亚洲高山区雪崩灾害事件发生在每年的10月初到次年4月底,集中出现在2月下旬和3月份。由于积雪、地表土壤温湿度以及天气随时间的演变和交互作用,造成雪崩灾害的活跃度呈现高一低一高一低特征的双峰波状分布。雪崩灾害由多种自然因素(强降雪、温度剧增、雨夹雪、地震和风等)和人类活动(滑雪、登山、采矿和军事活动)诱发引起,其中41.1%的雪崩灾害事件是由强降雪引起。

随着社会经济的发展,人类活动不断向山区拓

展,暴露在雪崩风险之下的人口日趋增多;气候变暖导致中高海拔山区雪崩活动和频率增加,雪崩的风险管理和防治需要更加深入的研究,以减少雪崩灾害损失。未来工作将立足于历史雪崩灾害事件数据为原始资料,基于各区域的积雪特征、地形地貌条件和气候特征等定量化评估亚洲高山区各区域雪崩风险,并结合实际人口、经济发展等提出详尽的雪崩灾害应对策略,从而达到降低雪崩风险的目的。

参考文献 (References)

- [1] 陈发虎, 安成邦, 董广辉, 等. 丝绸之路与泛第三极地区人类活动、环境变化和丝路文明兴衰[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(9): 967 – 975. [CHEN Fahu, AN Chengbang, DONG Guanghui, et al. Human activities, environmental changes, and rise and decline of Silk Road civilization in Pan – Third Pole region [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(9): 967 – 975] DOI: 10.16418/j.issn.1000 – 3045.2017.09.006
- [2] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(9): 12 – 19. [YAO Tandong, CHEN Fahu, CUI Peng, et al. From Tibetan plateau to Third Pole and Pan – Third Pole [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(9): 12 – 19] DOI: 10.16418/j.issn.1000 – 3045.2017.09.001
- [3] NADIM F, KJEKSTAD O, PEDUZZI P, et al. Global landslide and avalanche hotspots [J]. Landslides, 2006, **3**(2): 159 – 173. DOI: 10.1007/s10346 – 006 – 0036 – 1
- [4] QIU Jiaqi, HU Ruji. The Avalanches of December 1966 in western Tianshan, China [J]. Journal of Glaciology, 1980, **26**(94): 512 – 514. DOI: 10.3189/S0022143000011047
- [5] 王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势[J]. 科学通报, 2019, **64**(9): 891 – 901. [WANG Shijin, XIAO Cunde. Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, **64**(9): 891 – 901] DOI: 10.1360/N972018 – 01124
- [6] GANJU A, DIMRI A P. Prevention and mitigation of avalanche disasters in western Himalayan region [J]. Nature Hazards, 2004, **31**(2): 357 – 371. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000023357.37850.aa
- [7] HAO Jiansheng, HUANG Farong, LIU Yang, et al. Avalanche activity and characteristics of its triggering factors in the western Tianshan Mountains, China [J]. Journal of Mountain Science, 2018, **15**(7): 1397 – 1411. DOI: 10.1007/s11629 – 018 – 4941 – 2
- [8] CHABOT D, KABA A. Avalanche forecasting in the central Asian countries of Afghanistan, Pakistan and Tajikistan [G]// International Snow Science Workshop, Proceedings of International Snow Science Workshop, Colorado: International Snow Science, 2016: 480 – 483.
- [9] Xinhua Net. 76 killed, 53 injured as avalanches hit Pakistan-controlled Kashmir [EB/OL]. (2020 – 01 – 17) [2021 – 04 – 05]. http://www.xinhuanet.com/english/2020 – 01/17/c_138712307.htm.
- [10] SCHWEIZER J, JAMIESON J B, SCHNEEBELI M. Snow avalanche formation [J]. Reviews of Geophysics, 2003, **41**(4): 1016. DOI: 10.1029/2002RG000123
- [11] VALERO C V, WEVER N, CHRISTEN M, et al. Modeling the influence of snow cover temperature and water content on wet-snow avalanche runout [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018(18): 869 – 887. DOI: 10.5194/nhess – 18 – 869 – 2018
- [12] GUY Z M, BIRKELAND K W. Relating complex terrain to potential avalanche trigger locations [J]. Cold Regions Science and Technology, 2013(86): 1 – 13. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.10.008
- [13] SHANDRO B, HAEGELI P. Characterizing the nature and variability of avalanche hazard in western Canada [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018, **18**(4): 1141 – 1158. DOI: 10.5194/nhess – 2018 – 2
- [14] VAN HERWIJNEN A, JAMIESON B. Snowpack properties associated with fracture initiation and propagation resulting in skier-triggered dry snow slab avalanches [J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, **50**(1 – 3): 13 – 22. DOI: 10.1016/j.coldregions.2007.02.004
- [15] ANCEY C, BAIN V. Dynamics of glide avalanches and snow gliding [J]. Reviews of Geophysics, 2015, **53**(3): 745 – 784. DOI: 10.1002/2015RG000491
- [16] STATHAM G, HAEGELI P, GREENE E, et al. A conceptual model of avalanche hazard [J]. Nature Hazards, 2018, **90**(2): 663 – 691. DOI: 10.1007/s11069 – 017 – 3070 – 5
- [17] CEAGLIO E, MITTERER C, MAGGIONI M, et al. The role of soil volumetric liquid water content during snow gliding processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, **136**: 17 – 29. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.01.007
- [18] VALERO C V, WEVER N, BÜHLER Y, et al. Modelling wet snow avalanche runout to assess road safety at a high-altitude mine in the central Andes [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, **16**: 2303 – 2323. DOI: 10.5194/nhess – 16 – 2303 – 2016
- [19] KARGEL J S, LEONARD G J, SHUGAR D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake [J]. Science, 2016, **351**(6269): aac8353.
- [20] KÖHLER A, FISCHER J T, SCANDROGLIO R, et al. Cold-to-warm flow regime transition in snow avalanches [J]. The Cryosphere, 2018, **12**(12): 3759 – 3774. DOI: 10.5194/tc – 12 – 3759 – 2018
- [21] 孙继敏, 刘卫国, 柳中晖, 等. 青藏高原隆升与新特提斯海退对亚洲中纬度阶段性气候干旱的影响[J]. 中国科学院院

- 刊, 2017, **32**(9): 951–958. [SUN Jimin, LIU Weiguo, LIU Zhonghui, et al. Effects of the uplift of the Tibetan Plateau and retreat of Neotethys Ocean on the stepwise aridification of mid-latitude Asian interior [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(9): 951–958] DOI: 10.16418/j.issn.1000–3045.2017.09.004
- [22] 王晓茹, 唐志光, 王建, 等. 基于 MODIS 积雪产品的高亚洲融雪末期雪线高度遥感监测[J]. 地理学报, 2020, **75**(3): 470–484. [WANG Xiaoru, TANG Zhiguang, WANG Jian, et al. Monitoring of snowline altitude at the end of melting season in high mountain Asia based on MODIS snow cover products [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(3): 470–484] DOI: 10.11821/dlxb202003003
- [23] 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
- [24] YAO Tandong, THOMPSON L G, MOSBRUGGER V, et al. Third pole environment (TPE) [J]. Environmental Development, 2012 (3): 52–64. DOI: 10.1016/j.envdev.2012.04.002
- [25] 刘玉芝, 吴楚樵, 贾瑞, 等. 大气环流对中亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, **48**(9): 1141–1152. [LIU Yuzhi, WU Chuqiao, JIA Rui, et al. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi–arid region of central and east Asia [J]. Science China Earth Sciences, 2018, **48**(9): 1141–1152] DOI: 10.1007/s11430–017–9202–1
- [26] FIORE JR J V, GRODY N C. Classification of snow cover and precipitation using SSM/I measurements: Case studies [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, **13**(17): 3349–3361. DOI: 10.1080/01431169208904123
- [27] WEI Wenshou, QIN Dahe, LIU Mingzhe. Properties and structure of the seasonal snow cover in the continental regions of China [J]. Annals of Glaciology, 2001, **32**: 93–96. DOI: 10.3189/172756401781819328
- [28] KOTTEK M, GRIESER J, BECK C. World map of the Köppen–Geiger climate classification updated [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2006, **15**(3): 259–263. DOI: 10.1127/0941–2948/2006/0130
- [29] MOCK C J, BIRKELAND K W. Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, **81**(10): 2367–2392.
- [30] MEER M S, MISHRA A K. Observational study of a severe snowfall avalanche over a state in north India in November 2019 using GIS [J]. Journal of Earth System Science, 2020, **129**(1): 230. DOI: 10.1007/s12040–020–01506–w
- [31] ANCEY C. Snow avalanches [M]. Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science. New York: Oxford University Press USA, 2016: 2–5. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.17
- [32] RAFIQ M, MISHRA A K. A study of heavy snowfall in Kashmir, India in January 2017 [J]. Weather, 2018, **73**(1): 15–17. DOI: 10.1002/wea.3065
- [33] 中国政府网. 甘肃肃北县黑刺沟铋矿探矿点发生雪崩 10 人遇难[EB/OL]. (2020–01–17) [2021–04–05]. http://www.gov.cn/jrzq/2012–06/07/content_2155945.htm.
- [34] Greaterkashmir Net. Avalanche aftermath: 50 villagers sheltered in classroom [EB/OL]. (2015–03–14) [2021–04–05]. <https://www.greaterkashmir.com/news/more/news/avalanche–aftermath–50–villagers–sheltered–in–classroom>.
- [35] 胡汝骥, 马维林, 魏文寿, 等. 我国天山降雪与季节性雪崩的基本物理特征[J]. 干旱区地理, 1985, **8**(1): 57–61. [HU Ruji, MA Weilin, WEI Wenshou, et al. The basic physical characteristics of snowfall and seasonal avalanche in Tianshan mountain [J]. Arid Land Geography, 1985, **8**(1): 57–61] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65–1103/x.1985.01.011
- [36] MITTERER C, SCHWEIZER J. Analysis of the snow-atmosphere energy balance during wet-snow instabilities and implications for avalanche prediction [J]. The Cryosphere, 2013, **7**(1): 205–216. DOI: 10.5194/tc–7–205–2013
- [37] MA Weilin, HU Ruji. Relationship between the development of depth hoar and avalanche release in the Tian Shan mountains, China [J]. Journal of Glaciology, 1990, **36**(122): 37–40. DOI: 10.3189/S0022143000005529
- [38] BUTT M J. Characteristics of snow cover in the Hindukush, Karakoram and Himalaya region using Landsat satellite data [J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(24): 3689–3698. DOI: 10.1002/hyp.8375

Analysis of Spatio-Temporal Distribution Characteristics of Snow Avalanche Disaster and Its Triggering Factors in the High Mountain Asia

HAO Jiansheng^{1,2,3}, HUANG Farong^{1,2,3,5}, FENG Ting^{1,2,3,5}, LI Lanhai^{1,2,3,4,5*}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Ili Station for Watershed Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Xinyuan 835800, Xinjiang China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Water Cycle and Utilization in Arid Zone, Urumqi 830011, China;

4. Research Center for Ecology and Environment in Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Avalanche disaster is a serious threat to the social and economic development in the High Mountain Asia. Evaluating the spatial and temporal distribution of avalanche disaster in the region and its influencing factors can help in understanding the patterns of occurrence of avalanche disaster under climate change and providing important theoretical and practical support for avalanche disaster prevention. The avalanche disaster dataset collected from literature in the High Mountain Asia from 2009 to 2019. The degree of avalanche activity was analyzed quantitatively based on avalanche disaster activity index to better understand the spatio-temporal distribution characteristics of avalanche disaster and its influencing factors in this study. The results show that the avalanche events actively occurred during the period from October to following April, with a peak in late February and March. There were significant differences in the degree of avalanche activity and hazard levels in each sub-region of the High Mountain Asia due to different characteristics of snowpack and climate. 64% of these avalanches occurred in the K-H-T-K region (Karakorum, Hindukush, Tianshan Mountains and west Himalayas) centered on the Pamir and Kashmir, where avalanches account for 68% of the total casualties. Most of the avalanche disasters in the study area were induced by natural factors (heavy snowfall, temperature rise, earthquake and strong wind, etc.) and human activities (skiing, mountaineering, mining and military activities). Heavy snowfall triggered the most avalanches, followed by rapid rise in temperature in spring. The findings help in assessing the risk of avalanche, and proposing potential adaptation strategies in the High Mountain Asia under climate change.

Key words: snow avalanche; the High Mountain Asia; the degree of avalanche activity; characteristics of snowpack; climate