

文章编号: 1674-2184(2022)01-0117-10

西藏雪崩灾害及其应对措施研究

除 多^{1,2}

(1. 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850000; 2. 西藏高原大气环境研究重点实验室, 拉萨 850000)

摘要: 西藏是我国雪崩灾害多发和频发区, 几乎每年都有雪崩致人伤亡的报道, 而且在全球气候变暖背景下, 雪崩灾害有逐年增加的趋势。念青唐古拉山及其东延部分和喜马拉雅山脉南坡是西藏雪崩发生频次最高的两个区域, 高原内陆降水少, 雪崩发育受到抑制, 仅在高寒积雪山区和冰川作用区才有常年雪崩存在。西藏常年雪崩易发区面积非常有限, 仅占高原总面积的 1.6%。西藏雪崩主要发生在冬春两季, 冬季雪崩易发区占全区面积的 2.9%, 春季上升至 3.3%。雪崩是西藏高寒山区道路安全威胁最大的自然灾害之一, 其中对川藏公路安久拉山至古乡段和中尼公路拉龙拉山至友谊桥段影响最大。由于灾害防治工程技术的发展及其在关键区域的应用, 雪崩对道路交通安全的威胁大为降低。然而, 以登山和休闲旅游为主的人类活动在高寒冰雪带的开展日益活跃, 雪崩灾害造成的人员伤亡和经济损失呈逐年递增趋势。因此, 除了对川藏公路和铁路段等关键区域继续加强工程防治之外, 在重点区域雪崩灾害详查和区划的基础上, 提升监测预警和预报服务水平是西藏今后雪崩防灾减灾工作的重点。

关键词: 雪崩灾害; 易发区; 应对措施; 西藏

中图分类号: P426.63⁺6

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2022.01.017

引言

雪崩是指因积雪过多, 山体难以承受其重力而发生的坍塌, 是危害性极大的自然灾害之一。雪崩、滑坡、山洪、泥石流和崩塌构成了山区主要自然灾害类型^[1]。雪崩因受低温条件的限制往往发生在人烟稀少的高山高海拔地区, 所以过去常常被人类忽视。随着人类活动在高寒积雪山区的逐渐增多和全球气候变暖, 雪崩对人类生命财产和生产生活造成的影响正在逐渐扩大, 灾害发生的频率也在逐渐增多。1970 年 5 月 31 日, 秘鲁安第斯山最高峰瓦斯卡兰山因地震诱发的巨大雪崩造成 2 万人死亡, 是迄今为止世界上伤亡最惨重的一次雪崩灾害^[2]。1991 年 1 月 3 日, 我国云南梅里雪山发生雪崩事件, 17 名中日登山队员全部遇难。2014 年 4 月 18 日和 10 月 14 日先后在尼泊尔珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)南坡和安纳普尔纳峰附近发生的雪崩分别造成 16 人和 43 人死亡。2015 年 4 月 25 日, 8.1 级尼泊尔地震波造成珠峰山体晃动, 引发致命雪崩, 造成 23 人丧生。喜马拉雅山西段每年因雪崩死亡的人数达 40 人^[3]。美国每年因雪崩致死的平均人数超过了地震和泥石流^[4]。我国近年来仅天山地区每年因雪崩造成的死亡人数就达 10 人^[5]。

据推测, 全球每年都要发生数万起雪崩^[6]。

西藏是我国雪崩灾害多发和频发地区, 基本上每年都有雪崩致人伤亡的报道, 且雪崩灾害有逐年增加的趋势。1996 年 3 月 24 日波密县然乌雪崩造成 64 人遇难; 2011 年 3 月 24 日波密县嘎隆拉山发生雪崩, 造成 10 余人失踪; 2013 年 2 月 6 日阿里札达县萨让乡因雪崩造成 6 人死亡; 2013 年 10 月 16 日喀则定日县山区发生雪崩, 造成 4 人遇难; 根据调查记录数据, 2015~2019 年西藏共发生冰崩雪崩灾害 110 起, 造成 25 人死亡^[7]; 2021 年 4 月 3 日波密县八盖乡发生雪崩, 途径这一地区的所有人因及时撤离未造成伤亡。2016 年 7 月 17 日阿里日土县阿汝错湖区的 53 号冰川暴发了冰崩, 造成当地 9 名牧民遇难, 这是西藏首次记录到的冰崩灾害。同年 9 月 21 日, 同一冰川群的 50 号冰川再次发生冰崩。如此大规模的冰川崩塌事件连续发生在一直以来冰川活动较为稳定的西藏西北部地区极其罕见^[8]。该冰崩事件在国内外引起了很大反响。国内外许多知名科学家纷纷研究此次冰崩发生的原因^[9]。冰崩发生后, 冰崩体的后期融化使其下游湖美玛错水位上涨迅速, 2016~2019 年湖泊水位升高 3 m, 冰体融化对湖泊扩张的贡献率达到 23%^[10]。雪崩是积雪山区经常发生的一种自然现象, 时常

收稿日期: 2021-09-16

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010312, 2019QZKK0603); 科技部国家科技基础资源调查专项(2017FY100501); 国家自然科学基金项目(41561017)

作者简介: 除多, 正研级高级工程师, 主要从事高原卫星遥感应用研究。E-mail: chu_d22@hotmail.com

造成严重的灾害。雪崩灾害具有季节性、突发性、潜在性、重复性和区域性等特点,往往给人类社会带来严重影响。为了减轻和解决雪崩灾害的影响,我国科研工作者从 20 世纪 60 年代开始围绕着我国雪崩的分布、分类、形成机理以及防治工程等开展了大量卓有成效的研究工作^[1]。1964 年,中国科学院地理研究所冰川冻土室首次对西藏古乡地区雪崩进行了专门观测研究。1967 年,中国科学院兰州冰川冻土研究所与多家单位联合组建了新疆雪灾考察防治工作队,对天山公路积雪及其灾害进行了全面考察与研究,并在天山西部巩乃斯河中游海拔 1776 m 处建立了中国第一个积雪雪崩研究站—中国科学院天山积雪与雪崩研究站,开展雪崩观测研究已有 50 多年的历史。20 世纪 70~80 年代,我国多家单位先后对喀喇昆仑山和横断山区的雪崩、冰川泥石流、山洪以及天山公路和川藏公路沿线雪害和雪崩进行了考察,并建立了半定位观测研究站。作为我国雪崩研究的先驱,王彦龙对我国山区积雪和雪崩进行了广泛深入的考察研究,初步摸清了我国雪崩类型、危害范围、分布规律及雪崩的区域特征,系统地总结了上世纪 60~80 年代我国山区积雪、雪崩及其灾害治理方面开展的试验观测和科学考察的研究成果^[1]。谢自楚等^[11]系统总结了跨国天山地区的积雪资源和雪崩观测研究成果。胡汝曩^[12]对我国天山地区的积雪和雪灾防治进行了系统研究。但是,21 世纪以后,我国雪崩研究相比其他冰冻圈要素和灾害研究存在明显滞后,研究人力物力投入明显不足,监测预警服务体系有待完善,灾害防治工作和科研成果已远不能满足当前山区道路交通安全、旅游休闲和登山探险等方面的需求。

西藏东南部雪崩分布广泛,数量众多,成灾率高,雪崩挟带大量泥砂石块淤埋公路,堵塞交通,给当地经济发展带来严重危害。为有效减轻和解决雪崩对川藏公路道路通行安全的影响,从 1960 年代开始,我国科技工作者对藏东南雪崩开展了大量的研究工作。20 世纪 70~80 年代中国科学院兰州冰川冻土研究所等单位先后对横断山脉和川藏公路沿线雪害和雪崩进行了观测和考察研究。邓养鑫^[13]对藏东南古乡地区雪崩的分布、类型、活动状况、形成条件及其在高山自然地理过程中的作用进行了考察研究。王彦龙^[1]通过长期的实地调查和研究指出西藏境内影响较大的雪崩为湿雪雪崩。杨逸畴^[14]对雪崩在内的川藏公路通麦段主要山地灾害类型及其成因和防治途径进行了研究,提出了在山地灾害详查和区划的基础上,建立监测预警系统及重点区域工程防治为主的思路。

近十年来,西藏的雪崩研究主要在川藏公路沿线的雪崩灾害防治和对川藏铁路的潜在影响方面开展了一些工作,且多侧重于灾害和危险性评价。赵鑫等^[15]

通过历史资料分析和实地考察,结合谷歌地球遥感影像,对川藏公路开通以来安久拉山至古乡段所发生的雪崩灾害进行统计,揭示了研究区雪崩的分布规律。陈祥方等^[16]通过制定雪崩灾害指标体系,应用层次分析法和模糊综合评价法建立了川藏公路安久拉山至古乡段雪崩灾害危险性分区模型。李靖等^[17]应用层次分析法和 GIS 技术绘制了川藏公路帕隆藏布流域雪崩危险性分区图,在此基础上对川藏铁路通过该流域的线路方案选择和通过形式提出了具体建议。高传东等^[18]以帕隆藏布流域为例,探讨了基于 GIS 技术的灾害多发区线路方案优选策略。杨天军^[19]通过研究川藏公路雪崩形成机制,借鉴国内外灾害预警技术,提出了基于红外和振动的雪崩监测预警系统,并在扎墨公路和 318 国道 K3912 路段进行了应用示范。马东涛等^[20]对中尼公路沿线吹雪、积雪和雪崩雪灾的分布和形成机制进行分析,并提出了各类雪灾的防治对策。尼泊尔“4.25”地震后,针对中尼公路聂拉木至友谊桥段损毁严重等问题,刘昭等^[21]将防雪棚洞和明洞两种治理雪崩灾害的方法应用到该路段雪崩灾害治理,在工程中取得了良好的实际应用效果。

近二十年来,随着卫星遥感技术的不断发展,获取遥感数据的能力得到了空前提升。局地到全球的逐日卫星遥感观测已成为现实,云计算使得海量遥感数据处理成为可能^[22],卫星对地观测手段发生了翻天覆地的变化,并在全球自然灾害与生态环境监测和研究中得到了广泛应用。由于卫星对地观测技术的发展,通过卫星遥感能够对地面积雪进行逐日或逐日多时次的观测,高分辨率的数字高程模型以及衍生的坡度和坡向等基础地理信息数据已广泛应用于对地观测和研究的各个领域,在冰冻圈其他要素的观测和反演领域也得到了应用。但是到目前为止,这些数据在雪崩及其灾害的空间分布特征等研究领域存在应用不足。

本文在概述国内外和西藏的雪崩灾害研究历史、现状及存在不足的基础上,通过综合参阅前人的研究成果,分析西藏高原整体和重点区域的雪崩灾害空间分布特点及主要影响因子,利用西藏高原积雪空间分布和坡度数据对西藏雪崩易发区进行制图和评价,提出了西藏雪崩灾害监测预警系统的建立及防治途径。研究工作目的是深入揭示西藏山区雪崩和雪崩灾害的空间分布特征和时间演变趋势,进一步提高对西藏雪崩灾害的认识,为了解和防治西藏雪崩灾害及建立健全监测预警系统提供科学的决策依据。

1 西藏雪崩灾害

1.1 整体概况

作为青藏高原的主体,西藏位于青藏高原西南部,

北起昆仑山、唐古拉山,南至冈底斯山、念青唐古拉山为广阔的藏北高原,往南则是以雅鲁藏布江干支流为主的藏南谷地,最南以近东西向的喜马拉雅山为界。唐古拉山和念青唐古拉山往东延伸发生由近东西向南北向的转折,形成藏东南近于南北向排列的横断山脉。在这些平行的山脉之间分别挟持着怒江、澜沧江和金沙江。

藏东南地区由于受到印度洋暖湿气流的影响,冬春季节降雪丰富,加之该地区山高坡陡,每年春季冰雪消融期经常发生雪崩,常给交通、基础设施建设、农牧业生产以及人民生命财产造成严重的危害^[23]。在藏东南念青唐古拉山系东段以及与喜马拉雅山东段之间雪线上下冰雪崩作用盛行^[1]。雅鲁藏布江大拐弯处附近巨大的雪崩可将雪崩雪搬运到海拔 2400 m 的亚热带谷地,局部地区出现由雪崩形成的再生冰川^[24]。

除了藏东南之外,西藏南部的喜马拉雅山脉南坡由于地形抬升作用降雪多,地形陡峭,非常有利于雪崩的发生。喜马拉雅山南坡中尼公路聂拉木至友谊桥段冬春季节经常发生雪崩和风雪流,给交通运输和人民生命财产带来极大危害。此外,吉隆、普兰、扎达和定日等地的喜马拉雅山南坡地段也时常发生雪崩,造成人员伤亡。而位于尼泊尔和印度境内的喜马拉雅山脉地处气流的迎风坡,冬春降雪强度大,加之地形陡峭、海拔高,所以无论从雪崩规模、灾害损失程度和人员伤亡均远大于我国境内的喜马拉雅山脉南坡。而高原内部地形起伏平缓、气候干燥、降水量少,雪崩发育受到抑制,仅在海拔 5000 m 以上的积雪山区和冰川作用区才有常年雪崩存在^[1,25]。

根据西藏雪崩调查数据,2015~2019 年西藏共发生了雪崩(含冰崩)灾害 110 起,造成 25 人死亡^[7]。这些雪崩灾害在空间上集中分布在三个区域,分别是念青唐古拉高山区(47 起)、喜马拉雅山区东部(27 起)和喜马拉雅山中段南坡定日至聂拉木沿线(20 起)。三大区域的雪崩灾害占灾害发生总数的 85.5%。从区域分布来看,昌都和林芝雪崩灾害发生频次最高,记录的雪崩灾害分别是 39 次和 37 次,其次是日喀则 16 次,而拉萨无雪崩记录,阿里仅 1 次。从县域分布来看,日喀则聂拉木县、林芝墨脱县和波密县雪崩发生次数最高,分别为 22 次、20 次和 13 次,全区雪崩灾害占比依次是 20.0%、18.2% 和 11.8%。

西藏全区 110 起雪崩灾害中,65 起有具体的发生时间。从这 65 次灾害发生的时间特征来看,主要集中在春季和冬季,除 6~10 月外其他月份均有雪崩灾害发生,从 12 月开始发生频次逐月增加,3 月达到最高 31 次,占全年总次数的 47.7%。从变化趋势来看,西藏雪崩存在逐年增多的趋势。2016 年之前,雪崩发生次数较少,均少于 10 次;2017 年开始连续三年雪

崩灾害发生次数超过 10 次,2017~2019 年共计发生 52 次,占雪崩发生总次数的 80.0%。

虽然高原内陆因降水和地形条件的限制,季节性雪崩很少发生,但是在全球气候变暖影响下,近年来冰崩灾害时有发生。2016 年 7 月 17 日,西藏阿里地区日土县东汝乡阿汝错湖区的 53 号冰川暴发了冰崩灾害,造成 9 名牧民遇难,数百头牲畜被埋,大量草场被毁。这是西藏首次记录到的冰崩灾害。9 月 21 日,附近的 50 号冰川再次发生崩塌。如此大规模的冰崩一年内两次发生在冰川活动较为稳定的西藏高原西北部同一冰川群内实属罕见^[8]。

1.2 重点区域雪崩灾害

1.2.1 川藏公路安久拉山至古乡段雪崩

川藏公路安久拉山至古乡段是川藏公路重要组成部分,该路段地处藏东南雅鲁藏布江大拐弯附近,路线沿深山峻岭、高山峡谷。由于特定的地质地貌和水文气象环境,使得该公路沿线山地灾害极为活跃,不仅具有山地灾害类型齐全、分布密度大、爆发频次高的特点,而且活动规模之大、危害之高、影响范围之广,为国内所罕见^[13]。雪崩是其中的灾害之一。受印度洋暖湿气流的影响,该区域降水十分充沛,海拔 5000 m 以上山顶均发育了宽广的雪山和我国罕见的海洋型冰川。雪线上线下的冰雪崩作用强烈^[1]。雪崩雪占藏东南古乡冰川补给量的 54%,占冰川储水量的 6.4%,是我国最大的雪崩作用区^[13]。

古乡的雪崩主要发生于春夏两季。此时因为气温突然升高,积雪随即迅速融化,融雪水渗入雪层内,一方面破坏了雪粒间的粘结力而使雪层疏松易动,另一方面水渗入底层并沿着山坡流动,使雪层与地表之间形成了一个由水所构成的滑润层,从而引起雪层破裂与滑动并形成雪崩^[13]。这种现象尤以晴天的中午出现最多。古乡地区地形十分陡峭,加之大部分山坡基岩裸露,粗糙度降低,有利于积雪的滑落而形成雪崩。古乡地区雪崩发生之频繁实属罕见,非冰川区的雪崩多数每年发生一次,少数每年发生数次,而多数冰川区的雪崩大多是终年发生^[13]。

1.2.2 喜马拉雅山脉南坡雪崩

喜马拉雅山脉南坡由于受其南部暖湿气流的影响和地形抬升作用,降水丰沛,加之地形陡峭,非常有利于雪崩的形成和发生。中尼公路位于喜马拉雅山脉南坡的聂拉木县境内,该公路在冬春季节经常发生雪崩和风雪流。中尼公路雪崩地段主要位于拉龙拉山至友谊桥之间的波曲河谷^[25]。该段地形整体上由北向南倾斜,气温由南向北逐渐降低,而水汽由南向北推进,并随着海拔的升高而减少。北面高耸入云的喜马拉雅山成为水汽向北推进的巨大屏障,使气流在其陡峭的南坡严重受阻,从而形成气旋降水和山地降

水^[20, 26]。樟木至聂拉木是南部水汽进入高原的通道和冷热气流的交汇处,降水量极为丰富,为中尼公路雪崩和风雪流的形成提供了丰富的物质基础,使其成为我国雪崩和风雪流的严重危害区之一。

2015年4月25日尼泊尔发生8.1级地震后,该路段受损严重,诱发了大量滑坡、泥石流、崩塌,同时受山地环境的影响,公路沿线在降雪季节存在积雪和雪崩等灾害危险,道路安全隐患严重。为此,针对该路段雪害情况和特殊的地形地貌特征,提出了防雪棚洞和防雪明洞两种永久治理雪崩灾害的方法,并在工程中得到了实际应用^[21]。除了中尼公路之外,位于喜马拉雅山南坡的定日、吉隆、普兰和扎达等地的积雪山区也容易发生雪崩灾害。例如,1973年2月28日发生在吉隆沟麦拉扎青山雪崩造成了37名边防官兵的伤亡。

1.2.3 喜马拉雅山中段雪崩

位于喜马拉雅山中段南坡的尼泊尔高山区极易发生雪崩灾害,但是过去很少被关注。几乎每年都有因各种雪崩灾害事件发生造成的人员伤亡和财产损失的报道。根据文献记录统计,1952~2020年尼泊尔共计发生了60多起雪崩事件,造成了363多人伤亡^[27]。几乎所有的尼泊尔高海拔山区易发生雪崩,其中雪崩事件数量和死亡人数在珠峰南坡的昆布地区最高^[28]。近年来,雪崩和伤亡人数在尼泊尔其他地区也在增加,主要原因是高海拔地区人类活动的日益增加以及现代发达的信息通讯使得更多的雪崩事件得以记录和报道。

2014年4月18日,珠峰南坡海拔大约5800m的大本营附近发生了珠峰南坡历史上最为严重的一次雪崩灾害,造成16人伤亡,多数为夏尔巴登山向导,被称为“4·18”珠峰雪崩事件^[28]。2015年4月25日,8.1级尼泊尔地震触发了珠峰山体晃动,引发珠峰南坡一系列致命雪崩次生灾害,造成至少23人伤亡和61人受伤。

2014年10月14日,一场多年不遇的暴风雪突袭南亚地区,导致喜马拉雅山脉南坡的安纳普尔纳峰附近和木斯塘一带发生多起雪崩事故,造成43人死亡,百余人失踪,这是喜马拉雅山最严重的一次登山灾难。2020年1月17日,安纳普尔纳峰徒步路线上发生雪崩,造成至少7名游客在此次雪崩中遇难。1995年11月9~10日,强风暴袭击了尼泊尔喜马拉雅山区,导致在全国不同地区引发雪崩灾害,结果在Pangkha村庄24人遇难,尼泊尔东部干城章嘉峰的雪崩导致7人丧生^[27]。这一暴风雪是近50a来秋季在喜马拉雅山区发生的最强风暴事件,最终导致48人受伤。

以上是在喜马拉雅山中段南坡尼泊尔境内发生的有报道的几起最大暴风雪和雪崩灾害事件。喜马拉雅山南坡位于西南季风迎风坡,降雪量大,积雪和

冰川分布广泛,在喜马拉雅高山陡峻地形条件下,极易造成雪崩。此外,该区域纬度较低,春季阳坡气温上升快,使山坡积雪稳定性变差,容易造成雪崩。地处印度洋板块和亚欧板块交界处,多地震,也是这里诱发雪崩的重要因素之一。

1.2.4 喜马拉雅山西段雪崩

位于喜马拉雅山脉南麓西段的高海拔地区冰雪灾害严重,下游地区人口稠密,水利资源开发集中^[29]。在冬季鼎盛时期,喜马拉雅山西段积雪面积大约为72000 km²,其中有2100个雪崩易发点,影响区域内的各种主干道路。这些积雪区域的道路冬季因雪崩灾害处于瘫痪状态^[30]。

喜马拉雅山西段最早的雪崩事件记录可以追溯到1838年,当时位于印度西北部喜马偕尔邦拉胡尔地区的一个村庄完全被雪崩吞噬,造成60人和3000多头牛的死亡。1979年3月发生在喜马偕尔邦和查谟-克什米尔两个邦的雪崩夺走了300多人和几百头牛的生命。1986年11月,强暴风雪天气造成了上百人伤亡及大量财产损失。1988年3月,前所未有的降雪在查谟-克什米尔地区造成巨大雪崩灾害,致200多人伤亡。根据过去30多年收集的资料表明,西喜马拉雅山地区因雪崩平均每年造成30~40人死亡以及大量财产损失,而实际数字可能要比这个高很多倍,因为很多事件没有被报道^[31]。

根据媒体报道,2021年2月7日印度北部北阿坎德邦查莫里雪崩造成水坝损毁,发生洪水,造成70多人死亡,134人失踪。但是国际山地中心(ICIMOD)和中国科学院空天信息创新研究院等国际多家科研机构对此次洪水的起因、过程、影响及背景从不同角度进行了分析,结果表明此次山洪是上游山体岩崩引起的,冰湖溃决、雪崩和气候变化不是直接原因^[31]。该区域附近,2013年6月发生了山洪,泥浆和岩石摧毁了房屋和基础设施,约有6000人死亡,被称为“喜马拉雅海啸”。2021年4月23日,印度北部北阿肯德邦的尼蒂河谷发生雪崩,造成至少10人死亡,38人失踪。

气候变暖正在影响高山地区的冰冻圈,更多和更大的物质坡移过程的发生概率正在增加,将对灾害风险、人类福祉及陆地生态系统产生重大影响^[32-33]。研究表明,在西喜马拉雅山地区近几十年观测的气候变暖伴随着雪崩出现频次的增加^[34]。科学家利用树木年轮技术重建了喜马拉雅山南坡雪崩发生时间和运动距离的现有最长时间序列数据(150 a),并通用线性自回归滑动平均模型建立了气候变暖和观测的雪崩事件增加之间的联系。结果表明,冬季和早春的气温上升有利于积雪增湿和湿雪雪崩的形成,最近几十年雪崩发生的次数和运动距离都在增加,与同期的气候变暖关系密切^[34]。

可见,近年来由于受到全球气候变暖的影响,山区雪崩呈增加的趋势,冰川崩塌事件也时有发生。但是山区地质灾害除了雪崩和冰崩之外,还有滑坡、山洪、泥石流、冰湖溃决、崩塌和岩崩等。所以,山区地质灾害一旦发生后,其首要的任务是应急救援,其后是对产生原因进行深入分析研究,尤其是通过对比灾害事发前后的高分辨率卫星遥感影像,对其灾害性质和触发原因做出初步结论,并在条件可行的情况下,结合实地调查对灾害性质和产生原因做出最终结论,而非在缺少事实根据的情况下对发生灾害的类型、性质和主要触发因子做出主观判读。准确认知灾害性质和触发机制对于今后更好地避免或防治类似灾害具有重要的现实借鉴意义。

2 西藏雪崩易发区

2.1 西藏积雪

积雪是西藏高原生态环境的重要组成部分和宝贵的水资源,积雪变化又对区域气候产生重要影响,同时大量积雪在外营力作用下触发的雪崩是西藏山区的主要自然灾害之一。多项研究^[35-36]表明,西藏高原积雪的空间分布极不均匀,念青唐古拉山及其东延的横断山脉、喜马拉雅山及昆仑山和唐古拉山积雪丰富且覆盖率高,而藏南谷地和藏北羌塘高原中西部积雪覆盖率低(图1)。海拔越高积雪覆盖率越高,积雪持续时间越长,年内变化越稳定;海拔2 km以下积雪覆盖率不足4%,海拔6 km以上覆盖率达75%。如图2所示,西藏多年平均积雪覆盖率为16.3%,其中

春季和冬季积雪覆盖率相当,均为22%,夏季最小(5.3%),秋季介于中间(16.2%)。春季青藏高原降雪日数最多,占全年的45%,平均积雪深度最大,雪深较大的台站基本分布在高原西南边缘和南部^[37]。

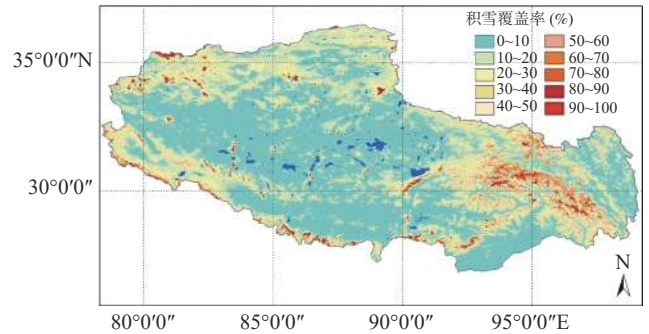


图1 西藏年平均积雪覆盖率空间分布

2.2 西藏雪崩易发区

积雪和一定范围的坡度是雪崩形成和发生的必要条件。当山坡上的积雪达到一定深度时,雪层的下滑力大于抗衡力,山坡上的积雪突然崩塌形成雪崩。积雪山区能否发生雪崩,山体坡度起着关键作用。根据空间分辨率为90 m的SRTM西藏数字高程模型DEM,生成了相同空间尺度的坡度数据。对其计算表明,西藏绝大多数地区地形坡度<30°,占总面积的88.6%,坡度30°~50°的面积占整个高原面积的11.2%,而坡度>50°的面积仅占整个高原面积的0.2%。

据相关统计资料,最易发生雪崩的坡度为35°~45°,25°以下接近积雪的稳定坡度,不易发生雪崩,而

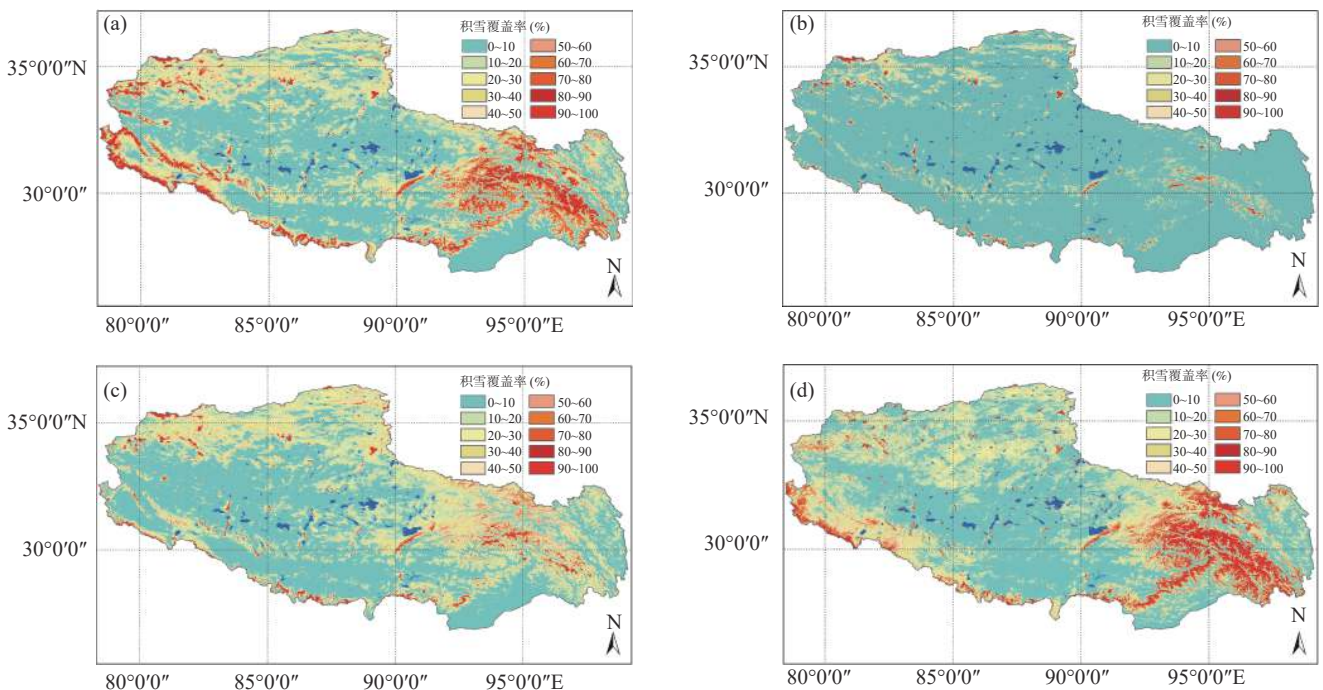


图2 西藏不同季节平均积雪覆盖率空间分布 (a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季)

>50°的山坡,积雪不易保存,往往随降随崩,难以形成雪崩^[38]。在瑞士和加拿大 809 起雪崩事件中的大量坡度数据分析显示,绝大部分雪崩发生在坡度 30°~50°范围之内,其中,坡度在 39°左右时,雪崩频数比例几乎占全部雪崩数的 40% 以上^[39]。大约 90% 的雪崩发生在坡度 30°~45°,而 98% 的雪崩出现在坡度 25°~50°。川藏公路两旁绝大多数雪崩出现在坡度 20°~50°,其中 30°~45°为最佳雪崩出现坡度范围,坡度>50°后,山坡上的积雪很难聚积,不易发生雪崩^[40]。喜马拉雅山脉雪崩发生的坡度一般>30°^[20]。我国西北和西南山区大多数雪崩发生在坡度 30°~45°,而坡度<15°的山坡上很少有发生雪崩;当山体坡度>60°时,降雪难以在山坡上积累,也就不会造成雪崩^[1]。

根据上述研究结论,结合西藏地形地貌和积雪的空间分布特点,选取山体坡度 30°~50°、基于 2001~2014 年 MOD10A2 V5 的积雪覆盖率 $\geq 60\%$ 和海拔高度>3000 m 作为西藏常年雪崩易发区的标准,最终绘制生成的西藏常年雪崩易发区空间分布(图 3)。如图所示,西藏常年雪崩易发区主要分布在东南部念青唐古拉山及其东延的横断山脉,其次分布在西南和东部喜马拉雅山区,在高原内陆仅在在有冰川和常年积雪分布的高山地形陡峭区域才有可能发生雪崩。西藏常年雪崩易发区面积非常有限,仅占整个高原面积的 1.6%。由于受到降雪和温度条件的限制,西藏雪崩季节性很强,主要发生在冬春两季。冬季雪崩发生的标准与常年雪崩易发区标准一致,即坡度 30°~50°、积雪覆盖率 $\geq 60\%$ 和海拔高度>3000 m。由此标准生成的冬季高原雪崩易发区见图 4,在念青唐古拉山及南部喜马拉雅山分布最集中,高原内陆分布极为有限,仅在在有冰川和常年积雪分布的高山区较多,其空间分布与常年雪崩易发区分布基本一致,只是其空间分布范围比常年雪崩易发区有明显扩大,占高原总面积的 2.9%。

春季高原平均降雪量和降雪日数最多,平均雪深也在四季中最大,雪深较大的台站基本分布在高原西南边缘和南部^[41-42]。但是,春季高原气温开始回升,地面积雪的时间短,消融快,为此春季高原雪崩易发区的积雪覆盖率标准设定为>50%,坡度和高程与冬季和常年易发区标准一致。图 5 给出了根据该标准绘制的西藏春季雪崩易发区空间分布。可以看出,西藏春季雪崩易发区空间分布与冬季基本类似,但其空间分布范围要比冬季明显扩大,占总面积的 3.3%,总体空间分布位置相比冬季明显偏北。

3 雪崩灾害调查与监测预警

3.1 雪崩灾害调查

雪崩灾害调查是详细掌握和获取雪崩灾害性质、特点、孕灾环境、触发因子和危害程度等信息的有效

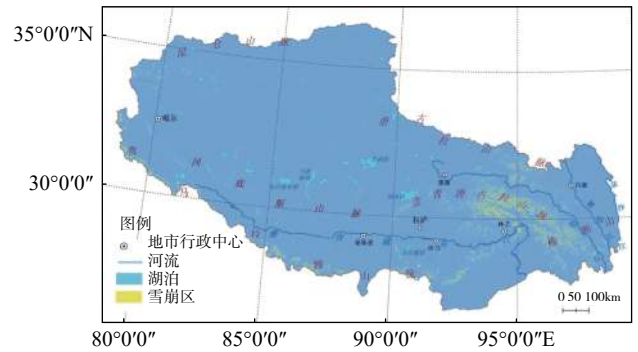


图 3 西藏常年雪崩易发区空间分布

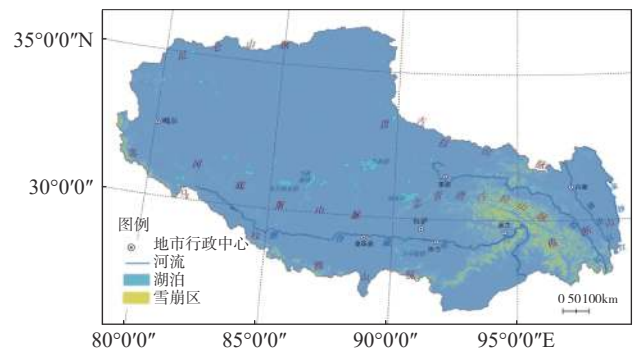


图 4 同图 3, 但为冬季

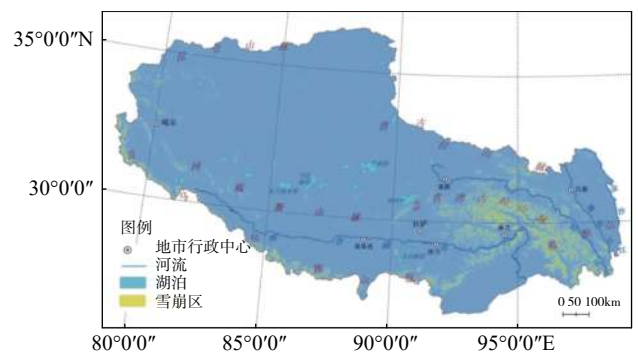


图 5 同图 3, 但为春季

途径,也是灾害预防和管理的基础性工作,对防灾减灾、预测预警和灾害治理具有重要意义。雪崩灾害调查方法分地面调查和遥感调查两种途径,也可以称为接触式和非接触式调查方法。雪崩灾害的地面调查方法主要是指传统的野外实地考察,是一种全面获取某一具体雪崩灾害信息最为有效的途径^[43]。但是由于雪崩灾害大多发生在冬春严寒季节,发生地点基本属于高寒山区,加上山区地形地貌十分复杂,以及天气、交通、工作条件等方面的限制,在多数条件下雪崩的现场实地调查工作难以开展,使得通过野外实地考察难以掌握雪崩灾害的全面信息。但是,野外灾害调查仍然是详细了解雪崩灾害程度、触发因子、孕灾环境状况等不可或缺的途径。

随着遥感探测和计算机技术的发展,遥感数据的

获取能力、空间分辨率和计算机数据处理能力得到了空前的发展,并在局地到全球自然灾害与生态环境监测中得到了广泛应用。雪崩灾害的地面调查存在巨大风险,很多条件下人类无法或无法及时开展高寒山区和复杂地形区域的灾后实地调查,使得遥感技术已成为高寒山区雪崩灾害调查的重要手段。通过对比雪崩灾害发生前后的卫星或无人机遥感影像数据可以确定灾害发生的地点、范围以及大致的损失程度等。由此可以初步制定救灾减灾的方案,还可以对灾害发生区域进行连续的遥感监测,实时掌握灾害发生区域的动态变化特点,为防灾减灾提供更进一步的相关信息。遥感监测的优势是可以实现大范围灾害区域的宏观调查。然而,目前遥感雪崩灾害调查往往只能对大型雪崩灾害进行简单的遥感识别与定性分析,缺乏对雪崩灾害的孕灾环境、规模、危害程度等详细的定量化的分析,还需由地面实地调查来弥补和验证。

3.2 雪崩监测及预警预报

雪崩监测和预警预报是通过对比雪崩形成原因的综合分析和对关键指标的监测,及时准确地向人们预报出雪崩发生的时间、地点及其规模,以避免因雪崩造成人员伤亡和财产损失^[19]。

3.2.1 雪崩监测

目前,雪崩监测方式主要有地面站点观测和遥感监测两种。地面站点观测是通过容易发生雪崩的地区建立一个或者多个雪崩观测站进行监测。观测要素包括常规气象要素,如降水、降雪量、气温、湿度、风速、风向、天气现象等,以及积雪要素的观测,包括雪深、雪层温度、雪密度、新降雪状况等,其中新雪的降雪量及降雪强度都是导致雪崩的重要因素。通过这些观测要素资料的长期积累,建立监测地区雪崩的发生与天气系统及监测要素之间的关系,结合积雪层变化信息进行雪崩的预报。

雪崩的遥感监测包括地基和空基两种方法。雪崩是山区积雪条件不稳定的一种指示信息。了解雪崩活动的过去和当前状况是雪崩预报的关键。近年来,科技的进步发展了多种雪崩监测系统。地基遥感由于不受能见度等条件的限制能够对雪崩进行连续自动监测,所以在雪崩业务监测中得到了广泛应用。目前有三种地基遥感雪崩监测技术,即亚声速探测器、雷达探测器及地震探测器。其中,雷达和亚声速探测系统已应用于雪崩监测业务之中。雷达探测系统能够监测到较小的雪崩。在监测的雪崩达到一定大小情况下,亚声速监测系统不局限于一定的雪崩路径。Mayer等^[44]评估了安装在瑞士阿尔卑斯山区三个不同地点的四个业务运行的亚声波雪崩监测系统的性能,结果表明监测正确率随着雪崩的大小而增加,随

距离而降低,且随雪崩类型而变化。干雪雪崩总体上相比湿雪雪崩和混合类型雪崩能够更好地被监测到。大的雪崩(大致300 m宽和1000 m长)在3 km范围内可以很好地监测到,正确率达到90%,空报率估计在13%~30%。杨天军^[19]在川藏公路安装的红外和振动雪崩监测系统属于地基遥感雪崩监测系统。

积雪是雪崩的物质来源,一定的山体坡度是山区雪崩发生的地形条件。山地地形是长期不变的,所以积雪的监测成为雪崩监测的关键。常规的积雪监测主要依靠气象观测站。虽然地面观测积雪精度和可靠性较高,但由于其空间分布有限,加上时间上的不连续性,无法实现大范围积雪覆盖的实时监测。卫星遥感积雪具有监测范围广、观测周期短,对积雪灾害响应快速等特点,尤其是在地域辽阔、地形复杂和雪害频发的地区,遥感技术已成为目前积雪监测最为有效的手段,而且在大范围积雪监测中发挥着不可替代的作用^[45-48]。雪崩大多出现在很冷季节和高海拔山区,只有卫星遥感才能监测这些复杂地形山区的地面积雪覆盖状况。根据卫星遥感监测的积雪覆盖状况及其动态变化,结合地面积雪和气象要素的观测数据以及当地天气预报可以实现局部到区域雪崩灾害的监测预警预报。目前,国际上基于卫星遥感的雪崩监测预警系统大多还处于研究阶段,到正式的业务运行还有许多的工作要开展,还没有正式常规业务应用的成功案例。但是,在详细的山地雪崩灾害调查基础上,对不同类型的雪崩灾害进行区划,建立积雪和气象要素的地面观测系统,结合卫星遥感手段,建立区域雪崩灾害监测预警服务系统是可行的,同时重点灾害区域主要采取各种工程措施从根本上消除灾害发生的隐患。此外,基于卫星遥感的积雪覆盖状况及其季节变化特点,结合山地地形地貌、下垫面覆盖特征和气象要素可以实现局地到区域乃至全球的雪崩灾害区划和易发区的制图及雪崩危险性评价等,可为区域雪崩灾害防治和道路规划设计提供基础图件和关键数据。

3.2.2 雪崩预警预报

雪崩预报是在对山坡积雪稳定性、积雪深度、雪层结构,以及地形、坡度、下垫面特征、天气气候条件等与雪崩发生、运动有关的因素综合分析和模式模拟后,及时向人们通报雪崩发生可能的时间、地点及其规模,从而保证人们提前安排好生产和生活。针对雪崩区的交通干线及时发出雪崩危险信号,防止盲目通行,从而避免不必要的伤亡事故^[11,19]。

目前国际上对雪崩的预报研究较多,多是依据气象因子和积雪内部结构监测结果进行预测,常用方法有直接成因法、气候和气象法、雪层因子法等,重点是对雪崩发生前的信息采集处理和分析,并告知公众雪崩发生的可能性^[1,49]。雪崩警报则重点监测雪崩发

生和运动时刻产生的振动、声响等特征并实时发出警报,在雪崩威胁来临前为公众撤离提供时间保障,但目前国际上已投入使用的警报系统鲜有报道。

雪崩是发生在积雪山区的一种多成因和多要素的自然综合现象,每一次雪崩发生的内部原因和外界条件都复杂多样、千差万别。所以,到目前为止,还没有哪一种模式能够用来预报不同地区和不同类型的雪崩。雪崩模式研发和应用还处于发展阶段。雪崩预报像地震和天气预报一样,是一项复杂的工程,必须在对不同地区的地形、气候和地表特征以及对不同类型积雪物理力学性质和运动规律综合分析研究的基础上,结合当今较为成熟的数值预报模式,逐渐建立起比较成熟的能够在大多数山区应用的雪崩预报模式。

雪崩灾害防治方面,目前国际上普遍采用工程措施治理雪崩。常用的雪崩防治工程包括稳雪、阻雪、导雪、植树和人工激发等措施^[49]。一般而言,在雪崩发生区可采用阻雪和稳雪措施,运动区采取缓冲雪崩运动措施,堆积区内则采用导雪或阻挡雪崩的措施。对道路危害严重,而且雪崩频发区域可采用防雪走廊、棚洞和隧道等工程措施。

4 结论与建议

雪崩是西藏高寒山区的主要自然灾害之一,时常带来严重的生命财产损失。但是,目前对西藏雪崩灾害方面的研究工作极为有限,监测和预警预报服务远不能满足当前登山探险、休闲旅游和道路交通安全方面的需求。本研究目的是弥补这一方面的不足,提高对西藏雪崩和雪崩灾害的认识,为深入了解和防治西藏雪崩灾害及监测预警服务系统的建立提供科学的决策依据,得出的主要结论与建议如下:

(1) 西藏东南部念青唐古拉山东延部分和喜马拉雅山脉南坡是西藏雪崩发生频次最高的两个区域,高原内陆仅在高海拔的积雪山区和冰川作用区才有常年雪崩存在。雪崩是西藏山区道路交通安全威胁最大的自然灾害之一,其中川藏公路安久拉山至古乡段和中尼公路拉龙拉山至友谊桥段是西藏受雪崩灾害影响最大的两个路段。

(2) 西藏高原周边山峰林立,而高原内陆广大区域地势相对平缓,绝大多数地形坡度 $<30^\circ$,占高原总面积的 88.6%,坡度 $30^\circ\sim 50^\circ$ 的面积占高原总面积的 11.2%,而坡度 $>50^\circ$ 的仅占高原总面积的 0.2%。

(3) 西藏雪崩主要发生在冬春两季,冬季雪崩易发区占全区面积的 2.9%,春季则占 3.3%,而常年雪崩易发区仅占高原总面积的 1.6%。季节性雪崩大多发生在冬春强降雪之后,尤其是特大暴雪和连续强降雪之后在念青唐古拉山东延部分和喜马拉雅山南麓等

地山区极易发生雪崩,所以提高强降雪的预报服务水平是预防雪崩灾害的重要途径。

(4) 在川藏公路和铁路段等关键区域继续实施工程防治措施之外,在重点区域雪崩灾害详查和区划的基础上,加强地面和遥感监测预警体系的建设以及相关的科学研究。

(5) 喜马拉雅山区许多特大雪崩灾害是地震引发的次生灾害。因此,在平时的雪崩监测预警预报中,除了要关注与雪崩产生物质直接相关的降雪之外,山区地震是触发雪崩灾害的重要因素之一,这一方面应引起高度警惕。

(6) 以登山和高山旅游探险者为重点人群,加大防灾减灾科普教育工作力度,提高公众对冰雪灾害的防范意识。

参考文献

- [1] 王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992
- [2] 沈永平, 王国亚, 魏文寿, 等. 冰雪灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 53-75
- [3] Ganju A, Dimri A P. Prevention and mitigation of avalanche disasters in western Himalayan region[J]. *Natural Hazards*, 2004, 31: 357-371
- [4] Voight B. Snow-Avalanche Hazards and Mitigations in the United States[M]. The National Academies Press, Washington D C, 1990: 84
- [5] 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
- [6] 仇家琪. 雪崩学[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005
- [7] 西藏自治区气象局, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 西藏自治区冰雪灾害防治规划[R]. 2020
- [8] Tian L D, Yao T D, Gao Y, *et al.* Two glaciers collapse in western Tibet[J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(237): 194-197
- [9] Kääb A, Leinss S, Gilbert A, *et al.* Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(2): 114-120
- [10] Lei Y B, Yao T D, Tian L D, *et al.* Response of downstream lakes to Aru glacier collapses on the western Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15: 199-214
- [11] 谢自楚, 谢维尔斯基. 天山积雪与雪崩[M]. 长沙: 湖南师范大学出版社, 1996: 6
- [12] 胡汝骥. 中国积雪与灾害防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 8
- [13] 邓养鑫. 西藏古乡地区的雪崩及其在高山自然地理过程中的作用[J]. *地理学报*, 1980, 35(3): 242-250
- [14] 杨逸畴. 川藏公路通麦天险段山地灾害及其防治[J]. *山地研究*, 1997, 15(4): 288-292
- [15] 赵鑫, 程尊兰, 李亚军, 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
- [16] 陈祥方, 赵鑫, 程尊兰, 等. 川藏公路安久拉山口至古乡段雪崩灾害分区研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2018, (2): 61-64
- [17] 李靖, 邓桃, 潘前, 等. 基于GIS和层次分析法的雪崩灾害危险性评估及线路工程减灾对策研究——以帕隆藏布流域为例[J]. *四川建筑*, 2019, 39(2): 59-61

- [18] 高传东, 崔鹏, 韦方强, 等. 基于GIS 的山区道路灾害多发区段线路方案优选--以迫隆藏布流域为例[J]. 铁路航测, 2003, 29(4): 19 - 22
- [19] 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
- [20] 马东涛, 崔鹏, 王忠华. 中尼公路雪害及防灾对策[J]. 山地学报, 2002, 20(1): 59 - 63
- [21] 刘昭, 赵初晔, 张秀平. 寒区公路雪崩灾害处置技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S): 1205 - 1207
- [22] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, *et al.* Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18 - 27
- [23] 王培清, 徐国涛, 何强. 西藏藏东南地区典型地质灾害成因及防治技术浅析[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2013, 28(1): 17 - 20
- [24] 施雅风, 杨宗辉, 谢自楚. 西藏古乡地区的冰川泥石流[J]. 科学通报, 1964, 9(6): 542 - 544
- [25] 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 110-114
- [26] 王彦龙, 黄茂恒. 我国危害较大的湿雪雪崩[J]. 冰川冻土, 1986, 8(1): 52-60
- [27] Thakuri S, Chauhan R, Baskota P. Glacial hazards and avalanches in high mountains of Nepal Himalaya[J]. *Journal of Tourism and Himalayan Adventures*, 2020, 2: 87 - 104
- [28] McClung D M. Avalanche character and fatalities in the high mountains of Asia[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 114 - 118
- [29] Nie Y, Pritchard H D, Liu Q, *et al.* Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2021, 2: 91-106
- [30] Gusain H S, Chand D, Thakur N K, *et al.* Snow avalanche climatology of Indian western Himalaya[C]. *Proceedings of International Symposium on Snow and Avalanches*, 2009: 85-93
- [31] Arun B S, Jakob S, Santosh N, *et al.* Understanding the Chamoli flood: Cause, process, impacts, and context of rapid infrastructure development[M]. ICIMOD, 2021
- [32] Castebrunet H, Eckert N, Giraud G, *et al.* Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: The French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods[J]. *Cryosphere*, 2014, 8: 1673 - 1697
- [33] Eckert N, Baya H, Deschatres M. Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: Application to 61 winters of data in France[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(12): 3157 - 3180
- [34] Ballesteros-Cánovas J A, Trappmann D, Madrigal-González J, *et al.* Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas [C]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018: 3410-3415
- [35] 除多, 达珍, 拉巴卓玛. 西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(5): 635 - 645
- [36] 除多. 2000-2014年西藏高原积雪覆盖时空变化[J]. *高原山地气象研究*, 2016, 36(1): 27-37
- [37] 除多. 青藏高原积雪图集[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 7
- [38] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 风雪流及其防治方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1978: 41-48
- [39] 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
- [40] 魏玉光, 杨浩, 韩学雷. 青藏高原铁路沿线雪崩危险度评价方法[J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(4): 40 - 42
- [41] 除多, 洛桑曲珍, 杨志刚, 等. 1981-2010年青藏高原降雪日数时空变化特征[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 292 - 305
- [42] 除多, 洛桑曲珍, 林志强, 等. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. *气象*, 2018, 44(2): 233 - 243
- [43] 陈楚江, 余绍淮, 王丽园, 等. 雪崩灾害的遥感量化分析与工程选线[J]. *山地学报*, 2009, 27(1): 63 - 69
- [44] Mayer S, Herwijnen A, Olivieri G, *et al.* Evaluating the performance of an operational infrasound avalanche detection system at three locations in the Swiss Alps during two winter seasons[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 173: 102962
- [45] Rutger D, Steven M, De J. Monitoring snow cover dynamics in Northern Fennoscandia with SPOT VEGETATION images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(15): 2933 - 2949
- [46] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, *et al.* MODIS snow-cover products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 181 - 194
- [47] Che T, Li X. Retrieval of snow depth in China by passive microwave remote sensing data and its accuracy assessment[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(5): 301 - 306
- [48] Liang T, Zhang X, Xie H, *et al.* Toward improved daily snow cover mapping with advanced combination of MODIS and AMSR-E measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3750 - 3761
- [49] 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

Study on Avalanche Hazards and Response Measures in Tibet Area

CHU Duo^{1,2}

(1. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China;

2. Tibet Key Laboratory of Plateau Atmosphere and Environment Research, Lhasa 850000, China)

Abstract: Snow avalanche is one of frequently occurred natural hazards in Tibet area and there are reports about fatalities caused by snow avalanche almost every year and this trend is increasing under global climate warming. There are two regions with the highest frequency of snow avalanches in Tibet. One is Nyainqentanglha mountains and its southeastern extension and another is the southern slope of the Himalayas. The development of snow avalanche is restrained due to less precipitation and it only exists in alpine snow-covered mountains and glaciation area in the plateau interior of Tibet. The area of perennial avalanche prone region in Tibet is very limited, accounting for only 1.6% of the total area of the plateau. Snow avalanche in Tibet mainly occurs in winter and spring. Avalanche prone areas in winter account for 2.9% of the total area of Tibet, and this rate increases to 3.3% in spring. Snow avalanche is one of the most dangerous natural hazards to the road safety in Tibet, in which Anjula-Guxiang section of Sichuan-Tibet highway in the eastern Tibet and Lalongla-Friendship Bridge section of Sino-Nepal highway in the southern Himalayas are two roads that most severely impacted by snow avalanche. Due to technology advancing of hazard prevention and control engineering and its implementation in key road sections in mountainous Tibet, the threat from snow avalanche to road traffic safety has been greatly reduced over last 20 years. However, with the increase of human activities such as mountaineering and leisure tourism in alpine snow-covered mountains, the casualties and economic losses caused by snow avalanche hazard are increasing year by year. Therefore, in addition to the continuous implementation of engineering prevention and control measures in key regions such as Sichuan-Tibet highway and railway sections, enhancing the service level of monitoring, early warning and forecasting is an important way to prevent and mitigate snow avalanche hazards in Tibet based on detailed investigation and division of avalanche hazard in key snow avalanche impacted areas.

Key words: Avalanche hazard, Prone area, Response measures, Tibet