全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势

王世金¹, 效存德^{2*}

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

* 联系人, E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

2018-11-13 收稿, 2018-12-16 修回, 2018-12-17 接受, 2019-02-26 网络版发表

中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA19070503)和国家杰出青年科学基金(41425003)资助

摘要 20世纪70年代以来, 全球增温显著, 冰冻圈快速变化事件发生频率在增加, 由此引发和即将引发的冰冻圈灾害危害巨大. 冰冻圈不同灾种成灾机理、承灾体及其孕灾环境各异, 灾害分布具有明显的空间分异特征. 基于已有研究成果, 较系统地阐述了冰冻圈灾害成灾机理, 梳理了冰冻圈灾害类型、时间尺度、空间分异及其类型区划. 在此基础上, 揭示了全球冰冻圈灾害高风险区的综合影响及其态势. 冰冻圈变化-冰冻圈灾害风险-冰冻圈风险管控链条关系紧密, 亟需加强冰冻圈变化对社会经济系统的综合风险分析、评估和理解, 以期针对性地调整未来冰冻圈灾害高风险区经济社会活动轨迹, 有差别地制定冰冻圈灾害高风险区防灾减灾规划, 以降低冰冻圈灾害风险和提

关键词 冰冻圈灾害, 高风险区, 陆地冰冻圈, 海洋冰冻圈, 大气冰冻圈

冰冻圈是地球表层具有一定厚度且连续分布的负温圈层, 冰冻圈内水体一般处于冻结状态^[1]. 自20世纪50年代以来, 全球冰冻圈区域升温速率明显高于其他区域, 冰冻圈加速消融已成事实^[2], 冰冻圈的快速变化进而加速了冰冻圈事件的发生概率, 且直接影响灾害发生的程度与影响范围. 过去20年以来, 格陵兰冰盖和南极冰盖的冰量一直在损失, 而全球最长观测资料37条参照冰川变化结果显示, 1980~1989年的10年, 冰川平均损失221 mm, 而2010~2014年的最近5年冰川平均损失达836 mm, 冰川融化时间呈加速状态^[3]. 冰川的加速消融增加了冰川的不稳定性, 进而增加了冰川相关灾害发生的概率. 自20世纪70年代以来, 北极大多数地区多年冻土显著退化. 多年冻土对气候变化的敏感性介于 $0.8 \times 10^6 \sim 2.3 \times 10^6$ km²/℃, 这也意味着全球温度上升1℃对应着近地表多年冻土减少面积约等于蒙古国或甚至约等于格陵兰面积^[4]. 冻土的退化不仅涉及冻土工

程稳定性及其安全运营, 同时还与海岸冻融侵蚀息息相关. 20世纪20年代中期至21世纪初, 欧亚大陆和北极积雪范围呈减少趋势, 尤其在20世纪80年代积雪范围减少的趋势最为显著. 美国国家航空航天局(NASA)国家雪冰数据中心(NSIDC)监测数据显示, 2017年9月13日北极海冰覆盖范围达到年度最小值, 覆盖范围为464万平方千米, 这是自1979年有卫星记录以来的第八低值(National Snow & Ice Data Center, <https://nsidc.org>). 海冰和积雪范围的持续减少增加了高度依赖积雪、海冰环境的生态系统及其雪上、冰上生物栖息地丧失的风险. 冰冻圈内部及其与其他圈层相互作用, 其变化具有复合性、复杂性和综合性, 变化产生的影响涉及自然、社会、经济等诸多方面和领域. 冰冻圈灾害的发生与气候系统、经济社会系统存在密切的关联性, 需加深气候变化、经济社会发展与冰冻圈灾害之间的科学认识, 量化预测发生频率, 估算灾损和评估风险.

引用格式: 王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势. 科学通报, 2019, 64: 891–901

Wang S J, Xiao C D. Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 891–901, doi: [10.1360/N972018-01124](https://doi.org/10.1360/N972018-01124)

在当前气候变暖和经济快速发展背景下,冰冻圈变化加速,冰冻圈变化影响区承灾体暴露要素在增加.因冰冻圈区防灾减灾能力较弱,冰冻圈快速变化无疑会诱发诸类冰冻圈灾害的频繁发生^[5],并严重影响着冰冻圈承灾区居民生命和财产安全,以及寒区交通运输、基础设施、农牧业、冰雪旅游发展乃至国防安全.全球范围内,许多高山区、环北极海岸区、低洼地区和小岛国往往是冰冻圈灾害影响的高危区.诸如冰/雪崩、冰川跃动、海冰、冰山、河/湖冰、冻融、暴风雪、霜冻、低温雨雪冰冻、冰雹等冰冻圈灾害相比地震、海啸、台风、洪水灾害,发生频率相对较低,但因公众、学者、当地社区关注度较低,常造成不可预料的灾害损失.纵观国内外冰冻圈灾害研究对象及其方法,多以单灾种综合分析为主,且多集中于雪崩、暴风雪、冰湖溃决灾害的分析,对于冻土灾害、海冰灾害及其他低频灾害较少涉及.特别地,缺乏对全球冰冻圈灾害的总体认识及其综合影响与态势的系统分析^[6].本研究系统梳理了冰冻圈灾害类型、成灾机理,进一步分析冰冻圈不同灾种成因及其影响的空间分异特征,旨在为未来冰冻圈高风险区经济社会活动调整和防灾减灾规划制定提供一定的参考.

1 冰冻圈灾害成灾机理

冰冻圈灾害是冰冻圈变化对人类和人类赖以生存环境造成破坏性的事件,其灾害的形成不仅要有冰冻圈环境变化作为诱因,而且还要有人、财产、资源、环境、基础设施等作为承受灾害的客体的存在.冰冻圈灾害由物理过程、事件规模和发生概率组成,其中,灾害危险程度主要由时间、规模和发生概率决定^[7],而发生概率通常以灾害事件频率和重现期表征^[8].冰冻圈灾害是冰冻圈致灾事件、孕灾环境、承灾体及其经济社会系统脆弱性(防灾减灾能力)综合作用的结果.换言之,当冰冻圈致灾事件作用于人类社会系统并造成影响时,称这类事件为冰冻圈灾害;当它不作用于人类社会时则为冰冻圈事件.

自然灾害是自然与经济社会系统综合作用的产物,其自然变率主要由气候变化所致,而自然灾害风险与气候变化则反过来影响经济社会过程.致灾事件是危险性事件发生概率和强度的综合,致灾事件变异强度越大,发生灾变的可能性或频度就越大、越高.其中,冰冻圈事件是冰冻圈平衡态失衡的结果,如冰崩、雪崩、冰川跃动、冰湖溃决、冻融滑塌等,其平衡态失

衡阈值与阈限是判别冰冻圈事件发生的关键预警指标.孕灾环境指冰冻圈灾害形成的环境要素及其变化特征,包括气象气候、地形、地貌、生态植被、海拔、河流分布等自然环境与人口、经济、社会系统因素,这些因素的差异导致冰冻圈不同灾种形成的孕灾环境的不同.对于在同等强度的冰冻圈灾害情况下,孕灾环境敏感性越高,灾害发生的概率、所造成损失就越大.如果说冰冻圈事件是冰冻圈灾害发生的主体,那么承灾体暴露要素则是冰冻圈灾害发生的客体.灾损大小取决于承灾体的暴露度和脆弱性.暴露度是指承灾体受到致灾事件不利影响资产数量,脆弱性是承灾体易于受到某种致灾事件损害的特性.如果承灾体是一个社区或社会系统,脆弱性也包括该系统的防灾减灾能力大小.脆弱性越大,冰冻圈灾害风险越大.冰冻圈灾害灾损大小有时由致灾事件规模等级起决定作用,有时则由暴露度或脆弱性起决定作用,有时则由孕灾环境起决定作用.其中,暴露性和脆弱性受经济社会、地理、环境、人口、文化、体制等综合影响,具有动态性和时空差异性(图1).

2 冰冻圈灾害类型

冰冻圈灾害类型划分主要由冰冻圈类型及其致灾事件两方面决定.按致灾事件所属冰冻圈类型,可分为陆地冰冻圈灾害、海洋冰冻圈灾害和大气冰冻圈灾害.按冰冻圈灾害触发因子划分,可分为冰/雪崩、冰川跃动、冰湖溃决、冰川洪水/泥石流、冻融、冰凌/凌汛、风吹雪、暴风雪、冰川-积雪洪水、霜冻、雨雪冰冻、冰雹、冰山灾害、海冰灾害、海岸冻融侵蚀、海平面上升等灾种.陆地冰冻圈灾害包括冰/雪崩、冰湖溃决、冰川洪水/泥石流、冻融、积雪洪水、风吹雪、牧区雪灾、冰凌等突发性灾害,以及冰川退缩和水资源短缺等缓发性灾害;海洋冰冻圈灾害包括冰山、海冰、海岸冻融侵蚀、海平面上升等灾害;大气冰冻圈灾害包括暴风雪、雨雪冰冻、冰雹、霜冻等灾害(表1).

冰冻圈发育时空尺度不一,孕灾环境各异,因而冰冻圈不同类型灾害的发生、影响也存在一定时空规模和尺度.一些灾种发生具有瞬时性,一些则具有年代际或更长时间尺度的长期性.一些灾种发生可能是非常局地的,一些则具有沟域、流域、区域乃至更大尺度特征(图2).其中,雪/冰崩具有瞬时和局地性,且多发生在山区.冰川泥石流、冰湖溃决、冰川跃动灾害发生

图1 (网络版彩色)冰冻圈灾害风险构成。据IPCC(2013)改绘

Figure 1 (Color online) Composition of cryospheric disaster risk. Revised according to IPCC (2013)

在小时尺度, 空间尺度在沟域尺度。霜冻灾害、冰山灾害发生时间在日尺度, 但空间上却发生在区域规模尺度。暴风雪、低温雨雪冰冻灾害发生时间在日或月尺度, 空间以大区域规模尺度居多。海岸冻融侵蚀灾害发生时间尺度为季节、年际或年代际, 空间尺度为环北极海岸带。由冰冻圈引发的海平面上升, 其灾害影响的时间尺度在年代际乃至更长时间尺度, 而空间上无疑是全球尺度。冰冻圈灾害类型不同, 其成灾环境、范围各异, 其承灾体范围与类型各异, 暴露要素空间分布不同, 其危害程度和方式也不同。随着对冰冻圈灾害成灾机理认识的深入和防灾减灾技术的革新, 冰冻圈灾害影响区、承灾体也将随之发生变化。同一承灾体, 不同灾种, 其灾损程度及灾后恢复存在明显差异。

3 冰冻圈灾害空间分布

全球冰冻圈灾害空间分布广泛, 类型多样, 且多发生在中低纬高海拔山区和高纬地区, 对人类经济社会影响显著。因冰冻圈区域区位交通不便, 经济较为落后, 防灾救灾能力有限, 使得全球高纬地区和中低纬高山带冰冻圈灾害正日益威胁着当地居民的人身和财产安全。陆地冰冻圈灾害主要集中在北半球环北极国家、中低纬度山地国家; 海洋冰冻圈灾害主要集中在沿海国家和低洼岛国; 大气冰冻圈灾害主要集中在中高纬度国家^[9]。

冰崩灾害多发生在北半球中高纬度高山区, 而冰川跃动灾害主要发生在中亚喀喇昆仑山和帕米尔高原、天山、北欧斯瓦尔巴德群岛、俄罗斯新地岛、冰岛、格陵兰岛、北美地区阿拉斯加和育空地区以及加

拿大北极地区和南美安第斯山等地^[10,11]。蒙古国、高加索、格鲁吉亚, 以及中国阿勒泰地区、锡林郭勒盟、三江源地区是牧区雪灾的频发区和重灾区^[12,13], 且常伴随风吹雪灾害。冰雪洪水在全球中高纬地区和高山地区广泛分布, 俄罗斯高加索、中亚、欧洲阿尔卑斯山、北美西海岸山脉、喜马拉雅山、喀喇昆仑山等地最为普遍。其中, 冰川、融雪洪水主要发生在中亚干旱区。近30年来, 中亚冰雪洪水发生频率明显增大, 近期冰雪洪水灾害发生频率和影响程度呈加大趋势。冰湖溃决洪水/泥石流灾害主要发生在兴都库什-喜马拉雅山、加拿大西南海岸山脉、南美安第斯山区、天山、念青唐古拉山。在喜马拉雅山常发生冰湖溃决洪水/泥石流跨境灾害。全球范围内, 该区域是冰湖溃决灾害频发区和重灾区。冻融灾害主要发生在环北极国家、青藏高原、中国东北等多年冻土区, 常危及路网、电讯、输油/气管线、机场、居民点等基础设施建设^[14]。在较长时间尺度, 美国、加拿大西部及其中亚、南美洲安第斯山, 以及祁连山北坡河西走廊、天山北坡等干旱区绿洲、农业系统发展还将受冰冻圈水资源短缺的潜在影响。冰山灾害主要集中在南极沿岸海域、格陵兰周边区域、加拿大东北部。海冰灾害则主要集中在环北极国家沿岸和近海地带, 以及中国环渤海区域^[15]。海岸冻融侵蚀主要发生在俄罗斯西北沿岸的卡宁诺斯半岛-亚马尔半岛-泰拉尔半岛、新西伯利亚群岛沿岸、东西伯利亚海西南海岸地带、美国阿拉斯加北部沿岸、加拿大育空地区北部沿岸地带。暴风雪灾害则主要发生在美国东北部、加拿大西南部、西伯利亚、中国东北、阿尔泰地区、欧洲和日本, 常危

表1 冰冻圈灾害类型、主要影响区及其分灾种特征^{a)}

Table 1 Main types of cryospheric disasters and their major affected areas and characteristics

冰冻圈灾害类型	触发因子类型	致灾事件	主要影响区	主要承灾体	时间尺度(分钟至百年)
陆地冰冻圈灾害	冰崩	大规模冰体滑动或降落	阿尔卑斯山、高加索、喜马拉雅山	居民、基础设施	分钟
	冰川跃动	冰川底碛变形及其与冰下水文过程相互作用形成的冰川快速移动	挪威斯瓦尔巴群岛、俄罗斯新地岛、冰岛和阿拉斯加、喀喇昆仑山、帕米尔	居民、草场、基础设施	分钟
	冰湖溃决	冰崩、持续降水、管涌等引起的溃坝(冰碛坝)洪水	喜马拉雅山中东段、加拿大西南海岸山脉、南美洲秘鲁-智利安第斯山	居民、公路桥梁、基础设施、耕地、下游居民	小时
	冰川洪水/泥石流	冰川融化所形成洪水(或伴随强降雨、火山喷发而形成)	喀喇昆仑山、天山、念青唐古拉山中东段	道路、桥梁、电站、基础设施	小时
	冻融灾害	强烈的冻融作用	环北极、青藏高原、中国东北	路网、管网、线网等基础设施, 建筑	年
	雪崩	大规模积雪(块体)滑动或降落	阿尔卑斯山、喜马拉雅山、落基山、斯堪的纳维亚山	高山旅游者、基础设施	分钟
	风吹雪	积雪区局地大风引起的天气事件	中国天山、阿尔泰山、东北地区	道路、运输	天
	积雪洪水	积雪融化所形成的春汛	中亚干旱区、秘鲁安第斯山	耕地、下游居民	天
	牧区雪灾	较大范围积雪, 较长积雪日数, 且牲畜饲料不足所导致的死亡事件	中国阿勒泰地区、锡林郭勒盟、三江源、蒙古国、高加索牧区	农牧业和城市	天
	冰凌/凌汛	冰凌堵塞河道, 壅高上游水位; 解冻时, 下游水位上升, 形成凌汛	北欧、加拿大北部、中国黄河宁夏段及黑龙江、松花江、嫩江中上游等	水利水电、航运	月
海洋冰冻圈灾害	水资源短缺	冰川水资源供给不足引发的水危机	美国、加拿大西部干旱区以及中亚和安第斯山干旱区	干旱区绿洲、农业系统	10年
	冰山	冰山移动	环南极近岸海域、格陵兰周边、加拿大埃尔斯米尔岛海岸	海上钻井平台、近海居民、设施等	天
	海冰灾害	海冰生消作用、浮冰移动	环北极航线区域、中国环渤海区域	港口、港湾设施、钻井平台、航行安全, 近海岸水产养殖	月
	海岸冻融侵蚀	冻融作用引起的海岸崩塌	环北极沿海沿岸地带	土地、海岸景观、建筑及其基础设施	月
大气冰冻圈灾害	海平面上升	冰川消融导致的海平面上升	低洼地区、小岛国、全球近海岸地区	国土安全、基础设施、农业、旅游业、渔业和水产养殖等	百年
	暴风雪(含冰暴)	短期极端降雪事件	欧洲多国、美国东北部、加拿大西南部、日本大多数区域、中国东北及阿尔泰山地区、俄罗斯西伯利亚	交通、运输、房屋	天
	雨雪冰冻	雨雪冰冻天气在承灾体上的结冰现象	中国中东部、美国东北部、高纬度国家	房屋建筑、交通、电力和通讯线路、农作物、林果业	天
	冰雹	中小冰粒(冰雹胚胎)与过冷水滴相遇后的快速而密集降落	肯尼亚、阿根廷、俄罗斯、美国-加拿大西部、欧洲西海岸以及高原高山区	农作物、林果业、瓜蔬菜业	分钟
大气冰冻圈灾害	霜冻	秋冬季节气温骤降, 水汽在物体上直接凝华	中高纬度地区	农作物、瓜蔬菜业	天

a) 火山-冰川泥流、地震-冰崩灾害、冻融-岩崩灾害、冰雪泥石流-堰塞湖(堵江)灾害、冰崩-滑坡-堵江等一些低频和次生冰冻圈灾害从略

图2 冰冻圈灾害时空规模尺度。黑点、三角形和菱形分别代表陆地冰冻圈灾害、大气冰冻圈灾害、海洋冰冻圈灾害;点线代表灾害持续时间跨度
Figure 2 Temporal and spatial scale of Cryosphere disasters. Black dots, triangles and diamonds represent continental, aerial and marine cryosphere disasters, respectively; dotted line represents the duration of the disaster

及航空、交通网络。雨雪冰冻灾害则主要发生在中国南方地区和云贵高原。中低纬度海域及其海上丝绸之路沿线岛国或沿岸则主要受冰冻圈影响下的海平面上升的威胁。海平面上升将与风暴潮相叠加形成海岸洪水,导致海岸侵蚀,影响海岸带的地下水、生态系统和生态系统服务,并直接和间接地影响社会经济系统。例如,人口、资产、基础设施、农业、旅游业、渔业和水产养殖,影响社会福祉。“一带一路”是冰冻圈灾害的多发区,其中北线中蒙俄经济走廊主要受冻土灾害的影响,而中西亚、中巴经济走廊和新亚欧大陆桥则受雪崩、冰崩、冰雪洪水等冰冻圈多灾种影响(图3)，“海上丝绸之路”诸多小岛国、海岸带受海平面上升的危害很大。

4 冰冻圈灾害的影响与态势

全球冰冻圈灾害频发区与气候变暖显著区、天气气候极端事件频现区在空间上具有较好的对应关系,在季节上也具有一定的耦合性。冰冻圈各类灾害在不同区域交织发生,在空间分布上呈灾害带、灾害区分布,其区域分异特征明显。其中,暴露在冰冻圈快速变化影响区的地区无疑是冰冻圈灾害发生的高风险区,其潜在影响巨大,需高度重视。

4.1 陆地冰冻圈灾害

全球和区域变暖导致冰冻圈相态转变加速、变强,如冰川融化加速、冻土冻胀-热融滑塌频发、积雪融

水提前和加剧,进而导致陆地冰冻圈灾害趋频趋强。陆地冰冻圈灾害中,雪/冰崩突发性强、发生历时短暂、预警难度大,而牧区雪灾风险则主要由极端天气气候事件频次、强度以及防灾减灾能力决定。兴都库什、珠峰地区、阿尔卑斯山、落基山一带是雪崩频发区和重灾区。在欧洲和北美,雪崩在2000~2001年至2009~2010年的10年期间夺去了大约1900人的生命,这些雪崩灾害中部分是因滑雪或其他娱乐活动而导致灾害发生。2010, 2012, 2016年,兴都库什阿富汗地区及其巴基斯坦克什米尔相继发生3次大型雪崩灾害,导致419人罹难^[16]。2017年,瑞士阿尔卑斯山共发生250余次雪崩事件,雪崩导致26人罹难。研究表明,冬季和初春温暖气温有利于形成湿润雪,进而导致湿雪崩发生频率增加,很有可能对人类活动增强地区,尤其是亚高山陡坡地区产生重大影响^[17]。牧区雪灾则主要集中在蒙古国、青藏高原、格鲁吉亚等地。2004年,蒙古国850万牲畜因雪灾死亡。2009~2017年期间,蒙古国又有1093万余头牲畜死于雪灾^[18]。在过去60多年(1951~2015年)间,记录的青藏高原雪灾事件238起,累计死亡牲畜多达1200万只^[12,13]。随着全球变暖,欧亚大陆和北极地区积雪也在发生显著改变,近几十年来上述地区多年平均(最大)积雪深度总体呈增加趋势。其中,欧亚大陆北部、俄罗斯平原东部和俄罗斯北极地区雪深明显增加^[19]。

冰川灾害(冰崩、冰川跃动、冰川洪水、冰湖溃决灾害)多发生在帕米尔、高加索、阿尔卑斯山、落基

图 3 已有观测和记录的全球冰冻圈灾害点空间分布
Figure 3 Spatial distribution of global observed and recorded cryospheric disaster sites

山、喜马拉雅山、念青唐古拉山、中亚天山、秘鲁-智利安第斯山一带。2002年,俄罗斯高加索奥塞梯北部科卡(Kolka)冰川发生大规模的冰/岩崩泥石流灾害,致130名村民罹难。2015~2016年,中国东帕米尔高原克拉牙依拉克冰川、青藏高原阿里阿汝错湖区、青藏高原阿尼玛卿山西坡青龙沟相继发生冰川跃动灾害,均对当地人身安全、财产带来一定损失。冰湖溃决洪水/泥石流灾害是冰湖坝体突然溃决大量水体突然释放且衍生洪水/泥石流的事件,它是世界范围内普遍存在的冰冻圈灾害。已有研究显示,全球已有记录冰湖溃决事件达1348次,冰湖溃决灾害至少导致冰岛7人死亡,欧洲阿尔卑斯山393人死亡,南美洲5745人死亡,中亚6300人死亡,中国715人死亡。其中,秘鲁、尼泊尔和印度冰湖溃决灾害受损相对更为严重^[20]。近30年来,中亚冰湖溃决洪水和冰雪洪水发生频率明显增大,对于干旱区农业、居民财产和经济社会发展带来了巨大危害。据不完全统计,仅在天山中国阿克苏河灌区受冰湖溃决、冰雪洪水威胁的农田近达30万亩^[21]。可以预见,在持续增温以及地震频发背景下,以上这些区域形成冰湖溃决灾害的可能性亦然很大,这些冰川流域沟谷将成为冰川灾害的热点地区,各方面应给予高度关注和重视^[22]。

冻土退化是由于地下冰发生融化,通过冻融作用,导致地表变形,对工程构筑物的稳定性产生显著影响的过程^[23]。20世纪70年代以来,北极大多数地区多年冻土在变暖,多年冻土层温度升温在 $0.50\sim 2.00^{\circ}\text{C}$ 之间^[4,24]。在RCP8.5(Representative Concentration Pathways)情景下,到21世纪末,仅东西伯利亚山地西部的多年冻土得以保留。在全球 2°C 升温情景下,俄罗斯多年冻土活动层厚度将平均增加 $0.48\sim 0.52\text{ m}$,多年冻土消融导致的地面沉降量平均为 $5.0\sim 16\text{ cm}$ ^[25],未来极有可能影响北京-莫斯科高铁、亚马尔半岛油气管道的维护问题。冻土变化将加剧人类活动对其变化产生负面影响的应对成本^[24,26]。自20世纪70年代以来,因冻土退化,导致俄罗斯楚科奇自治区(Chukotka AO),萨哈共和国(Rapublic of Sakha),泰梅尔自治区(Taymyr AO),亚马尔-涅涅茨自治区(Yamalo-Nenets AO),涅涅茨自治区(Nenets AO)5个区域地基支撑基础设施能力下降^[27]。1981~2010年期间,青藏高原活动层厚度变化量为 $-1.54\sim 2.24\text{ m}$,变化率为 $-5.90\sim 10.13\text{ cm a}^{-1}$ ^[28]。在高含冰量地段,多年冻土退化乃至消失,将会极大地引起路基下沉破坏、桥基失稳。相对1986~2005年,整个北

半球近地表多年冻土(多年冻土)面积到2080~2099年将可能减少 $37\%\pm 11\%$ (RCP2.6), $51\%\pm 13\%$ (RCP4.5), $58\%\pm 13\%$ (RCP6.0)和 $81\%\pm 12\%$ (RCP8.5)^[2]。其中,俄罗斯多年冻土面积到21世纪末将减小 $32\%\pm 11\%$ (RCP2.6), $49\%\pm 13\%$ (RCP4.5), $55\%\pm 14\%$ (RCP6.0)和 $76\%\pm 12\%$ (RCP8.5)^[25]。多年冻土快速退化,意味着多年冻土区各类工程建筑防灾减灾费用将增加。

4.2 海洋冰冻圈灾害

海冰冻结消融作用影响到环北极近海岸财产和海上设施、海上活动和航运安全,如航道阻塞、船只及航行安全风险增大、海上钻井平台等设施 and 海岸工程损坏、港口码头封冻、近海水产养殖受损、近海居民海上活动受限等^[29]。气候变化对海冰灾害的形成至关重要。海冰灾害形成的首要条件是局部海域甚至大范围的严重冰封,而冰封形成的关键是长时间持续存在低温。同时,大量降雪可促使水温迅速降低并增加凝结核,使海水迅速结冰,促使海冰厚度增加。海冰的快速形成和增加,会影响港口、航运和海上钻井平台的安全。相反,夏季海冰厚度的快速减薄和范围的加速萎缩,有利的是航运时间的增多和航道数量的增加,延长了北冰洋洋面无冰期,给航道通航时间、线路及其安全性带了机遇,不利的是将极大地影响北极地区动物栖息地的改变。

随着北极地区显著升温,北极海冰的快速减少,导致北极冷储降低,北极气候放大效应加剧,进而促使冰冻圈各要素产生一系列连锁性效应,各类灾害强度与频率不断增强^[30,31]。同时,北极海冰减少,还导致北极海冰边缘区域食物链网络或生物栖息地遭到破坏,进而波及种群繁衍。例如,北极熊对海冰条件的变化非常敏感,由于海冰范围与厚度的持续减少,北极熊赖以生存和捕猎的场所不断缩小,如加拿大西哈德逊河湾地区的北极熊的数量不断减少,并且其繁殖成功率呈现出下降趋势^[32],若海冰持续消融,未来可能会有近2/3北极熊濒临灭绝^[33]。海岸冻融侵蚀是指近海岸地区波浪的动能作用与多年冻土的消融等造成的极地海岸的侵蚀与破坏。高分辨卫星遥感已经能够监测到极地海岸侵蚀的快速变化^[34]。由于地处高纬度地区,气温较低,北极地区海岸带多为多年冻土或季节性冻土,并且约65%海岸带由颗粒状的松散物质构成,其中大部分是含冰量很高的沉积低地,对于波浪运动、风暴潮及气候变化等更为敏感。研究显示,环北极地区每年因海岸

侵蚀而损失的土地面积约为 51 km^2 ^[35]。由于环北极地区的大量人口与经济活动均聚集于沿海区域,气温与冻土温度的升高、海冰退缩及海岸侵蚀速率的加剧等都可能对北冰洋海域活动,以及北极沿海地区人口聚居地、生产生活及其工程建设造成极其不利的影响,亟需提前预估海洋冰冻圈事件发生概率,以指导未来海洋乃至海岸的防灾减灾工作。

主要由冰冻圈和海洋热膨胀引起的海平面上升最大影响区毫无疑问是世界小岛屿、沿海城市、三角洲和其他低洼的沿海地区。海平面极小的上升可能会显著增加沿海洪水的频率和强度。海平面上升 0.5 m 将使许多沿海地区的海岸洪水频率增加100倍甚至1000倍。因未来海平面上升,海岸系统和低洼地区将越来越多地遭受沿海洪灾和海岸侵蚀等不利影响。19世纪中叶以来,海平面上升速率比过去两千年来平均速率要高(高信度)。1901~2010年期间,全球平均海平面上升了 $0.19\text{ [}0.17\sim0.21\text{] m}$ ^[2]。已有研究表明,预计未来10%左右的海岸城市(136座城市影响最为严重)平均高水位变化将超过海平面上升的10%左右^[36]。目前,超过3亿人居住在低海拔沿海地区,每年遭受数百亿美元的损失^[37]。粗略估计,大约1.30%的全球人口暴露在百年一遇的洪水范围^[38]。随着海平面上升,其损害风险可能会显著增加,若不采取有效适应措施,到21世纪末,其潜在损害可能达到全球国内生产总值的10%^[37,39]。同时,海平面上升还导致海浪运动强度的增加。例如,因海平面上升,致使阿拉斯加和西伯利亚海岸带的侵蚀逐渐增加,并以每年数米的速度后退^[40,41]。

4.3 大气冰冻圈灾害

气候变暖背景下大气环流异常频繁出现,导致大气冰冻圈灾害在特定区域变得更加频发。其中,暴风雪灾害、雨雪冰冻灾害、雹灾和霜冻灾害,是大气冰冻圈常见的灾种。暴风雪发生时,常常风雪交加、气温陡降、能见度极差,城市道路积雪堆积,导致通行缓慢或中断、高速公路关闭、机场航班延误或取消。2010~2017年,暴风雪多次横扫欧洲,许多国家遭遇罕见暴风雪袭击,导致这些国家交通堵塞、航班取消、电力供应中断,严重影响民众生活。仅2017年冬天,欧洲多国因暴风雪致22人死伤。2014~2015年,美国经历了历史上最为严峻的暴风雪灾害。2015年2月美国东北部暴风雪灾害导致东北部6个州已经进入紧急状态,全美6000万人受到影响,仅26~28日约7000个航班被取消。1982~1994年

期间,美国平均每年发生16次冰暴灾害,其频率远高于暴风雪。1998年,加拿大安大略省和魁北克便经历了历史上最严重的极端低温和冰暴灾害,冰暴使电站、电网瘫痪,其损失超过54亿美元(灾后恢复成本)。

雨雪冰冻天气的发生常以低温、高湿、风速小为主要特征,灾害的发生也可以由多次连续降雨/雪天气过程累积造成,其受灾范围更为广泛,受灾更为严重。2008年,中国低温雨雪冰冻灾害造成全国19个省、市、自治区和新疆生产建设兵团发生不同程度的灾害。此次灾害,因灾死亡107人,直接经济损失达1111亿元^[42]。2016年1月20~25日,中国南方再一次发生低温雨雪冰冻灾害且刷新我国下雪最南的记录(南宁、广州遭遇雨夹雪天气)。两次冰冻雨雪过程均发生在交通、电力、煤炭等物资运输的重要通道和人口密集区,过程强度之大,影响范围之广,均属于历史同期同类灾害之最。1961年以来,中国极端低温事件频次呈减少趋势,全国性冰冻、霜冻、寒潮日数持续下降,大气冰冻圈灾害灾损总体在减少,但中国东北地区北部、新疆、青藏高原东部平均强降雪量和强降雪日数均呈明显增加趋势,以及区域性、阶段性低温冰冻雨雪事件时有发生。

随着全球变暖,气候极端事件发生频率急剧增加,欧亚大陆和北极地区积雪也在发生显著改变。1966~2011年期间,欧亚大陆逐年春季3月份降雪量显著增加,这也增加了春季雪灾发生的可能性。欧亚大陆极端降雪阈值在东部沿海地区、前苏联西部地区和青藏高原地区较大^[43]。随着全球平均温度上升,日和季节尺度上,大部分陆地区域的极端暖事件将增多,极端冷事件将减少。到21世纪末,模式预估的北半球春季积雪范围的平均值在RCP2.6情景下将减少7%,在RCP8.5情景下将减少25%(中等信度)^[2]。在RCP4.5和RCP8.5情境下,到21世纪中叶,中国日最低气温最低值分别比1986~2005年升高 1.7 和 2.2°C ,霜冻日数分别减少13和16 d,冰冻日数分别减少10和12 d^[44]。尽管低温事件呈减小趋势,但依然不容忽视阶段性低温雨雪冰冻事件的重大影响。

5 总结与展望

全球变暖正加剧冰冻圈灾害强度与频率,冰冻圈主要灾种受气候和非气候驱动因子共同作用或影响,各灾种之间相互关联但亦有区别。因冰冻圈区地方财政薄弱,抵御灾害能力极为有限,其灾害已成为“一带

一路”沿线国家乃至其他区域经济社会系统健康持续发展面临的重要问题。总体而言,冰冻圈灾害研究对于实现全球可持续发展具有重要的理论与实践价值,其研究成果可为冰冻圈灾害承灾区防灾减灾规划及灾害风险管理提供参考依据。

冰冻圈变化-冰冻圈灾害风险-冰冻圈风险管理链条关系紧密、作用机理极为复杂,亟需加强冰冻圈变化对社会经济系统的综合风险分析、评估和理解,以期针对性地调整和布局承灾区经济社会活动,制定降低冰冻圈灾害风险防范举措,提高人类社会的可持续发展能力。鉴于此,未来亟需加强以下几方面的研究:

(1) 结合遥感和地面观测手段,提升雪崩、冰崩、冰川跃动、冰湖溃决等突发性灾害的监测和预警水平,提出快速判别突发事件发生的预警指示因子及其因子变化阈值或阈限。同时,加大揭示大范围冻融、雨雪冰

冻、暴风雪、海冰灾害形成的气候背景,以及预估其影响范围,提出此类冰冻圈灾害的防控措施。

(2) 从系统论角度加深理解孕灾环境、致灾事件、承灾区共同组成的冰冻圈灾害系统结构,审视和考虑冰冻圈灾害的复杂性和系统性,重点研究冰冻圈灾害链的形成及其演化机制。

(3) 辨识冰冻圈不同灾种对不同区域的影响范围、影响程度,依据冰冻圈多灾种时空分布规律,根据冰冻圈不同灾种灾损、关联性及相对重要性,建立冰冻圈多灾种综合风险评估体系,制定单灾种乃至多灾种综合风险区划,绘制相应的风险地图。

(4) 利用多灾种风险分析与管理方法和典型案例,系统分析不同灾种风险管理方案,研发冰冻圈多灾种灾害综合风险管理体系,以增强冰冻圈多灾种预警预报和防灾减灾能力。

致谢 本文图3经由自然资源部审查,审图号为GS(2019)140号。

参考文献

- Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. Introduction to Cryosphere Science (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2018]
- IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. In: Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013
- Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5°C on Asia's glaciers. *Nature*, 2017, 549: 257–260
- Shiklomanov N, Streletskiy D, Nelson F. Northern hemisphere component of the Global Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) Program. In: Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. Russia: Salekhard Press, 2012. 377–382
- Harris C. Climate change, mountain permafrost degradation and geotechnical hazard. In: Huber U M, Bugmann H K M, Reasoner M A, eds. Global Change and Mountain Regions: An Overview of Current Knowledge, Advances in Global Change Research. Netherlands: Springer Publisher, 2005. 215–224
- Haeblerli W, Whiteman C, Shroder J F. Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam: Elsevier, 2015
- Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Can Geotech J*, 1994, 31: 261–272
- Zimmerman M, Mani P, Romang H. Magnitude-frequency aspects of alpine debris flows. *Eclogae Geol Helv*, 1997, 90: 415–420
- Xiao C D, Wen J H. Classification and geographical distribution of cryosphere. In: Qin D H, Yao T D, Ding Y J, eds. Introduction to Cryosphere Science (Revised Edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018. 25–60 [效存德, 温家洪. 冰冻圈的分类和地理分布. 见: 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 编. 冰冻圈科学概论(修订版). 北京: 科学出版社, 2018. 25–60]
- Mukherjee K, Bolch T, Goerlich F, et al. Surge-type glaciers in the Tien Shan (Central Asia). *Arctic Antarctic Alpine Res*, 2017, 49: 147–171
- RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory-A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space. Digital Media, Colorado, USA. 2017
- Wei Y, Wang S, Fang Y, et al. Integrated assessment on the vulnerability of animal husbandry to snow disasters under climate change in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Glob Planet Change*, 2017, 157: 139–152
- Wang S J, Zhou L Y, Wei Y Q. Integrated risk assessment of snow disaster (SD) over the Qinghai-Tibetan Plateau (QTP). *Geomat Nat Haz Risk*, 2019, doi: 10.1080/19475705.2018.1543211
- Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions. *Nat Hazards*, 2002, 26: 203–225
- Kubat I, Babaei M H, Sayed M. Quantifying ice pressure conditions and predicting the risk of ship besetting. In: 10th International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice 2012. Alberta: National Research Council Canada, 2012. 106–113

- 16 Wang S J, Ren J W. Review of avalanche disaster research at home and abroad (in Chinese). *Progr Geogr*, 2012, 31: 1529–1536 [王世金, 任贾文. 国内外雪崩灾害研究综述. *地理科学进展*, 2012, 31: 1529–1536]
- 17 Ballesteros-Cánovas J A, Trappmann D, Madrigal-González J, et al. Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 201716913
- 18 Fernández-Giménez M E, Batkhisig B, Batbuyan B. Cross-boundary and cross-level dynamics increase vulnerability to severe winter disasters (dzud) in Mongolia. *Glob Environ Change*, 2012, 22: 836–851
- 19 Callaghan T V, Johansson M, Brown R D, et al. The changing face of Arctic snow cover: A synthesis of observed and projected changes. *AMBIO*, 2011, 40: 17–31
- 20 Carrivick J L, Tweed F S. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Glob Planet Change*, 2016, 144: 1–16
- 21 Shen Y P, Wang G Y, Ding Y J, et al. Evolution of the metzbach iceberg and glacier flood disaster in the Aksu River Basin in the Tianshan Mountains in the past 100 years (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2009, 31: 993–1000 [沈永平, 王国亚, 丁永建, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害. *冰川冻土*, 2009, 31: 993–1000]
- 22 Wang S, Zhou L. Glacial lake outburst flood disasters and integrated risk management in China. *Int J Disaster Risk Sci*, 2017, 8: 493–497
- 23 Wu Q B, Niu F J. Changes of permafrost and engineering stability in the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 13: 10–15 [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性. *科学通报*, 2013, 13: 10–15]
- 24 Romanovsky V E, Smith S L, Christiansen H H. Permafrost thermal state in the polar Northern hemisphere during the international polar year 2007–2009: A synthesis. *Permafrost Periglac Process*, 2007, 21: 106–116
- 25 Streletskiy D, Anisimov O, Vasiliev A. Permafrost degradation. In: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Amsterdam: Elsevier, 2015. 303–344
- 26 Guo D, Wang H. CMIP5 permafrost degradation projection: A comparison among different regions. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121: 4499–4517
- 27 Streletskiy D A, Shiklomanov N I, Hatleberg E. Infrastructure and a changing climate in the Russian Arctic: A geographic impact assessment. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost*, Salekhard, Russia, 2012. 407–412
- 28 Xu X M, Wu Q B, Zhang Z Q. Response of the thickness of permafrost active layer on climate change in the Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2017, 39: 1–8 [徐晓明, 吴青柏, 张中琼. 青藏高原多年冻土活动层厚度对气候变化的响应. *冰川冻土*, 2017, 39: 1–8]
- 29 Shroder J F, Ellis J T, Sherman D J. *Coastal and Marine Hazards, Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier, 2015
- 30 Wu B, Zhang R, Wang B, et al. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 666–678
- 31 Wu B, Su J, D'Arrigo R. Patterns of Asian winter climate variability and links to Arctic sea ice. *J Clim*, 2015, 28: 6841–6858
- 32 Regehr E V, Lunn N J, Amstrup S C, et al. Effects of earlier sea ice breakup on survival and population size of polar bears in western Hudson Bay. *J Wildlife Manage*, 2007, 71: 2673–2683
- 33 Durner G M, Douglas D C, Nielson R M, et al. Predicting 21st-century polar bear habitat distribution from global climate models. *Ecol Monogr*, 2009, 79: 25–58
- 34 Jones G P, Russ G R, Sale P F, et al. Theme section on “larval connectivity, resilience and the future of coral reefs”. *Coral Reefs*, 2009, 28: 303–305
- 35 Lantuit H, Overduin P P, Couture N, et al. The Arctic Coastal Dynamics database: A new classification scheme and statistics on Arctic permafrost coastlines. *Estuaries Coasts*, 2012, 35: 383–400
- 36 Pickering M D, Horsburgh K J, Blundell J R, et al. The impact of future sea-level rise on the global tides. *Cont Shelf Res*, 2017, 142: 50–68
- 37 Wahl T, Haigh I D, Nicholls R J, et al. Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis. *Nat Commun*, 2017, 8: 16075
- 38 Muis S, Verlaan M, Winsemius H C, et al. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nat Commun*, 2016, 7: 11969
- 39 Moore J C, Gladstone R, Zwinger T, et al. Geoengineer polar glaciers to slow sea-level rise. *Nature*, 2018, 555: 303–305
- 40 Solomon S, Garcia R R, Ravishankara A R. On the role of iodine in ozone depletion. *J Geophys Res*, 1994, 99: 20491–20499
- 41 Serreze M C, Walsh J E, Chapin III F S, et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim Change*, 2000, 46: 159–207
- 42 Mao S J, Li D L. Comprehensive evaluation of low temperature rain and snow freezing in Southern China based on meteorological elements (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 14–26 [毛淑君, 李栋梁. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估. *冰川冻土*, 2015, 37: 14–26]
- 43 Zhong X, Zhang T, Zheng L, et al. Spatiotemporal variability of snow depth across the Eurasian continent from 1966 to 2012. *Cryosphere*, 2016, 12: 227–245
- 44 Qin D H. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters (Defined Edition) (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告(精华版). 北京: 科学出版社, 2015]

Summary for “全球冰冻圈灾害高风险区：影响与态势”

Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend

Shijin Wang¹ & Cunde Xiao^{2*}

¹ State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

² State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

* Corresponding author, E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

The cryosphere is the part of the earth's surface where the temperature is always below freezing. Since the 1970s, the frequency of rapid cryospheric change events has been increasing along with the significant rise of global temperature. This has or will lead to a series of cryospheric disasters with extreme damage. Disaster-formation mechanism, disaster-receptors, and environmental reactions to different types of disasters in the cryosphere have different spatial distribution patterns. The cryosphere can be divided into three major categories: Continental cryosphere, marine cryosphere, and aerial cryosphere. These depend mainly on its geographical distribution, dynamics, and thermodynamic conditions. Based on the results of past research, the present study systematically expounds the formation mechanism classification, spatial and temporal scales, and spatial differentiation of cryospheric disasters and reveals the comprehensive impact of global cryospheric disasters at high-risk areas and their trend. The results show the following. (1) Continental cryospheric disasters (e.g., avalanches, glacial lake outburst floods, freezing and thawing disasters, and glacier/snow flood/debris flow) are concentrated mainly in the Qinghai-Tibet Plateau, Siberia, Peruvian Andes, and northern North America and have already caused considerable risk to personal safety and damage to infrastructure. (2) Marine cryospheric disasters (sea ice disasters, coastal freeze-thaw erosion, and rises in sea level) occur mainly along coastal areas of the Arctic and the low-lying areas and island countries of the world. These disasters mainly affect navigation safety and ports, coastal/offshore facilities, and homeland security. (3) Aerial cryospheric disasters, especially snowstorms and rain and snow freezing disasters take place in the northeastern United States, Europe, East Asia, and China, mainly affecting transportation, aviation, and agriculture. Although the frequency of the cryospheric disaster is low, the scope and impact are very large. Cryospheric change, risk of cryospheric disaster, and the management thereof are closely related. It is urgently necessary to strengthen the understanding and assessment of the cryosphere change and its impact on the socio-economic system and integrated risk analysis. Specifically, we must adjust economic and social activities in areas at high risk of global cryospheric disasters and develop strategies for prevention and mitigation of cryospheric disasters and so reduce risk and improve resilience and sustainability.

cryospheric disaster, high-risk area, continental cryosphere, marine cryosphere, aerial cryosphere

doi: [10.1360/N972018-01124](https://doi.org/10.1360/N972018-01124)