



冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险

效存德^{1,2*}, 苏勃¹, 王晓明², 秦大河²

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 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

* 联系人, E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

冰冻圈是指地球表层具有一定厚度的负温圈层, 水体以固态形式存在^[1]. 作为人类赖以生存的自然环境的重要组成部分, 冰冻圈对人类社会(人类圈)产生深远影响^[2,3]. 冰冻圈与人类圈的关系可以从致利与致灾两条线梳理(图1): 一方面, 冰冻圈可为人类社会带来众多惠益(致利效应), 即冰冻圈服务, 如水资源供给服务、气候调节服务和文化服务等^[4]; 另一方面, 冰冻圈也给人类社会带来很多负面影响(致灾效应), 即冰冻圈灾害, 如冰湖溃决、冰川泥石流以及冰川跃动等^[3,5]. 冰冻圈对人类社会的影响与冰冻圈变化过程密切相关. 随着全球变暖和冰冻圈加速退缩, 一些冰冻圈功能和服务已经呈现减弱迹象, 并可能继续加剧, 出现功能衰退和丧失, 冰冻圈致利效应面临严重危机; 同时, 近年来冰冻圈也以频发的极端事件呈现灾害加剧态势^[6].

灾害风险科学具有较为完善的理论框架^[7-9], 也为冰冻圈灾害研究提供了重要思路. 即冰冻圈灾害风险可看作是冰冻圈变化引起的致灾事件与社会-生态系统的暴露度和脆弱性综合作用的结果. 减低风险必须从预测致灾事件并通过政策、技术和管理减小脆弱性和暴露度得以实现. 例如, 海平面上升的一半以上贡献来自于冰冻圈融化, 减小海平面上升造成的风险, 一方面必须准确预测冰冻圈退缩等引起的平均和极端海平面上升幅度, 另一方面需加强防潮堤等以减小脆弱性并通过合理搬迁等途径以降低暴露度.

但就冰冻圈致利方面而言, 以往的研究无论深度还是方法体系都远远不及冰冻圈致灾方面. 2015年中国学者首次提出冰冻圈功能与服务这一新概念^[4], 近年来在国际上产生了广泛影响. 例如, 2018年7月在甘肃敦煌举行的“冰冻圈变化及其全球和区域影响国际研讨会”将冰冻圈服务作为核心主题之一; 将于2019年7月在加拿大蒙特利尔举行的国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)第27届全会已将冰冻圈服务列为分会之一(C14分会); 世界气象组织(WMO)将于2019年召开的国际高山峰会(International High Mountain Summit)上, 拟将冰冻圈服务作为峰会的聚焦点; 2019年IPCC即将出版的《气候变化下的海洋与冰冻圈特别报告(SROCC)》, 也首次将冰冻圈服务纳入评估.



效存德 教授, 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室主任、博士生导师, 主要从事冰冻圈与全球变化研究. 兼任国际冰冻圈科学协会副主席、世界气象组织(WMO)极地与高山观测、研究和服务指导委员会(EC-PHORS)委员、中国冰冻圈科学学会(筹)秘书长、IPCC AR6 第一工作组第九章首席

作者(CLA)等职务. 主持国家重点研发计划、国家杰出青年科学基金、国家重点基础研究发展计划和国家自然科学基金重大项目课题多项.

冰冻圈服务是中国提出冰冻圈科学框架(科学树)的重要组成部分^[3,5]. 我们认为其核心是理清冰冻圈功能与服务的关系, 这需要我们研究冰冻圈过程与各类服务之间的内在联系, 以及各类服务之间的权衡与协同关系^[4]; 同时, 也需要关注冰冻圈功能和服务减弱、衰退甚至趋于衰竭时给人类社会经济带来的风险.

自然气候系统与人类圈的关系问题是当前可持续科学关注的重点之一. 在当前全球变暖和未来进一步加剧变暖、冰冻圈普遍萎缩和全球冰量大幅度减少的背景下, 研究冰冻圈与人类圈关系的目的, 就是通过客观预判冰冻圈灾害和冰冻圈功能及其服务衰退带来的影响和风险, 尽可能找到风险最小化、服务最大和最优化的适应途径(图1). 鉴于此, 本文系统梳理冰冻圈功能与服务, 尤其是冰冻圈服务能力衰退引起的(级联)风险及其与人类福祉之间的关系, 以期科学认识冰冻圈退缩给人类社会带来的影响和风险提供理论依据.

1 冰冻圈功能与服务

冰冻圈功能是冰冻圈服务形成的基础. 冰冻圈功能是冰冻圈自身环境特性和冰冻圈独特的结构和过程综合作用的结果(图2). 水体处于冻结状态是冰冻圈区别于其他圈层或其他环境要素的主要特性^[5]. 冰冻圈过程反映了冰

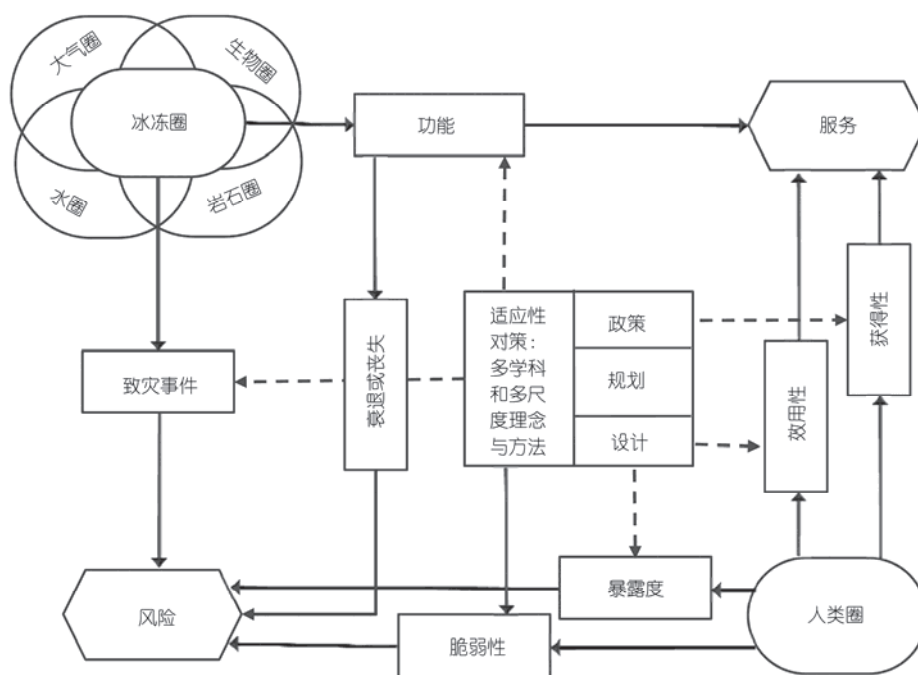


图1 冰冻圈与人类圈关系框架

Figure 1 The relationship diagram between cryosphere and anthroposphere

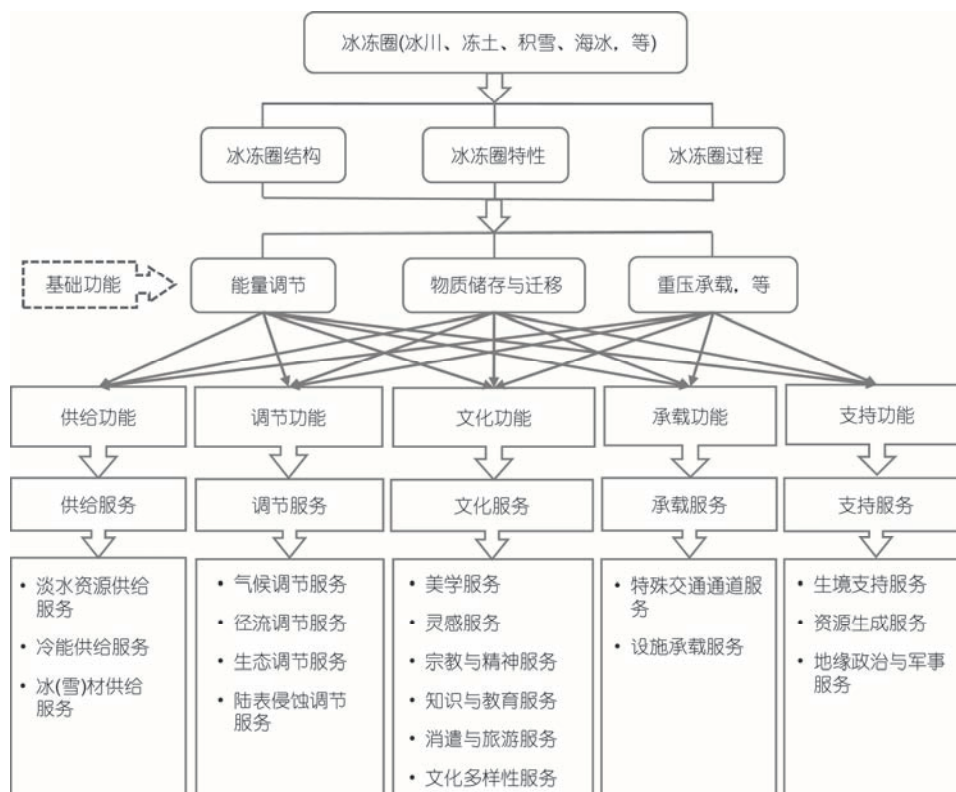


图2 冰冻圈服务的形成过程及其分类体系

Figure 2 The formation processes of cryospheric services and their classification system

冻圈自身变化及其与其他圈层的相互作用^[3]。冰冻圈基础功能表现为能量调节、物质(尤其是水体)储存与迁移、重压承载、天然冷能储存与释放,以及地表侵蚀或固结等内容。这些功能独立存在于自然界中,均为冰冻圈的自然属性。冰冻圈服务指人类从冰冻圈直接或间接获得的各种惠益,关系到人类福祉的众多方面^[4]。从冰冻圈功能到冰冻圈服务不但是研究视角的变化,而且研究对象也从自然界跨越到与人类社会经济的关联方面,这一跨越是当代冰冻圈科学发展的必由之路。具体而言,冰冻圈服务是在冰冻圈功能的基础上,赋予人类的需求和价值取向,即冰冻圈满足人类物质或精神需要并为人类福祉做出的各种贡献,侧重于冰冻圈影响的致利方面。冰冻圈功能与冰冻圈服务之间也不只存在一对一的关系,更多是多对一、甚至一对多的关系。

根据冰冻圈服务的形成过程及其对人类福祉的影响,冰冻圈服务可分为供给服务、调节服务、文化服务、承载服务和支持服务五大类型以及若干亚类。由此,与各服务类型相应的功能基础也可细分为供给功能、调节功能、文化功能、承载功能和支持功能以及若干功能亚类,如图2所示。

冰冻圈供给服务是指冰冻圈本身能够给人类提供的各种产品或服务,可分为淡水资源供给服务、天然冷能供给服务和冰(雪)材供给服务;冰冻圈调节服务是指人类从冰冻圈过程和功能的调节作用中获得的惠益。人类可从冰冻圈气候调节、径流调节、生态调节以及陆表侵蚀调节中获取众多物质或非物质性收益;冰冻圈文化服务指人类能够从冰冻圈中获得的精神满足、发展认知、思考、消遣、美感体验等非物质性收益。可以将冰冻圈文化服务进一步分为美学服务、灵感服务、宗教与精神服务、知识与教育服务、消遣与旅游服务以及文化多样性等子类;冰冻圈承载服务是指在一定时期的陆地或海洋表层的冰冻圈作为天然冷冻固态介质,可为大规模人类迁徙、跨河道(湖泊)行进等特殊活动以及人们所需的物质运输和工程建设提供重力支撑。冰冻圈支持服务指人类从冰冻圈支持或主导的特殊环境中获得的收益。可进一步分为以下三类:一是为寒区生物生长提供独特的生境支持,可进一步为人类带来特殊药材、牧草、水产和种质等生物资源和食物等,即生境支持服务;二是通过为一些资源的生成提供必不可少的环境条件,从而为人类提供风能、天然气水合物等资源,即资源生成服务;三是通过为特定地区人类政治、军事和战争等活动提供天然隐蔽等特殊环境支持,从而给区域人类生存和安全带来一定福祉,即地缘政治和军事服务。

随着冰冻圈变化,冰冻圈功能亦产生强弱盛衰演变,与人类圈交互作用则产生服务能力的增强、减弱甚至衰竭。在当今和未来气候变暖情景下,冰冻圈变化的总体趋势是融化导致的冰冻圈面积、冰量缩小。虽然短期内冰冻圈服务在特定区域有增强的方面,但长期看,主要趋势是服务

的减弱与衰竭,因而是人类需要直面和应对的可持续发展关键问题之一。以下则主要针对冰冻圈萎缩造成的功能和服务衰退与风险,以及风险的级联效应加以阐述。

2 功能及其服务衰退的级联风险

冰冻圈功能与服务变化包括增强、稳定和衰退3个方面。本文选取4个典型的冰冻圈功能及其服务,主要探讨其衰退及由此引发的级联效应(cascading effect),但因为此类效应多为负面,我们倾向于认为是一系列级联风险(cascading risks)。

2.1 水资源供给功能及其服务

地球表面的淡水资源主要以冰冻圈形态储存,因而冰冻圈具有强大的水资源储存功能。但是,只有向人类社会提供供给才产生服务,南极冰盖和格陵兰冰盖虽然水储量巨大,但因为远离人类集中区,可达性极低,所以人类暂不能从中获得收益。随着气候变暖,山地冰冻圈消融加剧,融水可满足更多的用水需求。但是,当冰川产流能力越过其“拐点”时,融水补给将持续下降,直至冰川消失。Randolph 全球冰川编目计划将全球冰川分为19个大区,分别监测各大区内冰川及其融水变化^[10]。Huss 和 Hock^[11]进一步将全球冰雪水资源影响区划分为56个流域,分别研究了过去和未来至2100年冰雪融水的变化。结果发现当前已有近一半的流域过了“拐点”,而尚未出现拐点的流域通常是大冰川覆盖区^[12];对冰川储量和径流预估结果表明:到2100年56个流域冰川总储量将在不同情景下分别减少(43±14)%(RCP2.6), (58±13)%(RCP4.5)和(74±11)%(RCP8.5);相比低排放情景(RCP2.6),大多数流域冰川径流在中、高排放情景(RCP4.5和RCP8.5)下出现拐点较晚,这是因为在中高排放情景下更大幅的变暖能够产生更大的冰川融化速率进而补偿缩小的冰川面积,从而延迟径流减少;在RCP2.6, RCP4.5和RCP8.5下,56个流域冰川径流整体上在拐点处将分别增加26%, 28%和36%。在中等的RCP4.5情景下,对于那些有大冰川分布或冰川覆盖率高的流域,如北美Susitna、南美Santa Cruz和冰岛Jökulsá,冰川径流将在21世纪末才出现拐点;以小冰川作用为主的流域,如加拿大西部、中欧和南美,预估拐点在下一个10年就会出现;而在高亚洲大多数流域,如咸海、印度河、塔里木河、雅鲁藏布江和布拉马普特拉河流域,年冰川径流预计在21世纪中期出现拐点。总之,21世纪冰川融水在亚洲腹地高山区^[13-16]、欧洲中部^[17-19]、南美洲^[14,20-22]和北美洲^[23,24]均将呈减小趋势,其中下降最大的是亚洲腹地和安第斯山地区。中国境内的同类研究表明,祁连山、天山和喜马拉雅山地区的融水径流将率先越过拐点,成为水资源供给功能的快速衰竭区。

在以积雪融水补给的地区,模式预估显示无论何种气

候情景,均出现雪期变短和融雪季提前,因而导致更持久的干旱^[25,26]. 预估未来积雪融水短缺风险主要分布于美国内华达山脉、落基山脉等美国西部山区,欧洲的比利牛斯山、欧亚交界处的爱琴海地区、亚美尼亚高地、黎巴嫩及其争议地区,拖鲁斯山脉,扎格罗斯山脉,亚洲的帕米尔高原,兴都库什、青藏高原、喜马拉雅山等地区以及非洲的大阿特拉斯山^[27].

在全球众多冰冻圈水资源补给区,亚洲和南美安第斯山区拥有广泛的人口和经济体,冰冻圈水资源减少将对当地社会经济带来严重负面影响^[14]. 所以必须直面冰冻圈水资源供给服务下降的未来,采取积极应对措施.

2.2 气候调节功能及其服务

气候调节是冰冻圈调节服务最为显著的方面. 雪和冰具有高反照率、强热辐射和高绝热性能. 雪冰表面对太阳辐射的反照率一是量值大,二是变幅宽. 比如,一般新雪或紧密而干洁的雪面反照率可达86%~95%;而有孔隙和湿雪反照率可降至45%左右,随着雪的老化和污化,可进一步降低至30%左右. 陆地冰川的反照率与雪面相近,海冰表面反照率约在40%~65%. 雪冰的相变潜热很大,固-液之间达 334×10^3 J/kg,固-气之间则高达 2830×10^3 J/kg^[5]. 由于地球表面有大范围的冰雪覆盖,导致地球上每年到达地面的太阳辐射能大约有30%消耗于冰冻圈中,冰雪致冷效应形成重要的气候调节功能. 冰雪的存在改变了气候系统中下垫面的热力学特征,使其下垫面与大气间的辐射和湍流交换具有与其他下垫面极大的不同,形成了其表面独特的能量平衡过程. 从地球长期气候演化历史看,某一时段全球陆地的总冰量是气候系统内部重要的强迫因子,对全球气候的调制作用仅次于轨道因子. 冰冻圈就其面积和冰量而言其主体分布于两极,冰冻圈气候调节作用衰减的一个显著例子是,北极雪冰的减小是导致北极气候变暖放大效应的重要原因之一,另一个显著例子则是北极海冰通过遥相关关系影响到中低纬度的天气气候,即导致中低纬度极端天气气候频发且难以预报预测.

Coumou 等人^[28]认为极地变暖使得中纬度夏季环流减弱,致使持续极端高温的概率增加. Pistone 等人^[29]认为,由于1979~2011年北极夏季海冰减小造成行星反照率降低,相当于增加了 (6.4 ± 0.9) W/m²的辐射强迫,等同于过去30年温室气体强迫的25%. 与此同时,被北冰洋吸收的热量在过去约40年里翻了一倍.

冬季的情况则相反,北极海冰减小增加了中低纬度冬季极端冷事件的频发. 对东亚而言,主要由于喀拉海和巴伦支海海冰的减少,西伯利亚高压增强,乌拉尔山阻塞事件增多,诱导北极冷空气南下至东亚地区. 尤其在北极增暖条件下,东亚的强寒潮事件概率在增大. 我们的研究表明^[30],过去40年是喀拉海/巴伦支海(B-K海)海冰800年以来的最低值,也是抵达中国南方寒潮事件最频发的时期.

例如,2008年中国南方发生了强烈的低温雨雪冰冻灾害,2008/2009和2010/2011冬春之交西伯利亚高压异常,2012年1月超低温造成东亚700人左右死亡,2012年12月低温打破了俄罗斯自1938年以来最冷月份,中国北方则是之前27年来最冷,2016年1月出现抵达中国南方沿海的“超级”寒潮. 分析B-K海冰千年长期变化与历史记录的强寒潮事件,也表明夏季海冰范围变小时期,往往对应抵达中国南方的强寒潮事件较为频发的时期,海冰范围大的时段反而“Boss级”寒潮少. 冬季寒潮的频发越来越多地指向北极变暖,北极冰冻圈变化不仅导致当地气候异常,其溢出效应已经使不同季节半球尺度气候出现“紊乱”.

同样,南极周围的海冰随着冬夏的扩张与收缩,极大地调节着全球尤其是南半球气候.

在青藏高原,对冬季积雪异常影响青藏高原大气温度和陆海经向热量差异进而影响了夏季风的强弱,气候调节功能也非常显著^[31].

长期来看,冰冻圈的减弱更在世纪尺度上加剧全球增暖幅度,失去冰雪其实失去了地球气候的重要调节器,冰冻圈的气候调节服务能力下降是人类面临的重大风险之一.

2.3 水土保持功能及其服务

冰冻圈尤其是冻土具有重要的水土保持(或可称侵蚀调节)功能,然而随着全球变暖,当前冻土地带正在发生大范围热融滑塌,这使得地表破坏和水土流失的风险增大. 这一风险已经在北极沿岸变为现实威胁,随着北极岸冰减少和封冻季节区间变窄,海浪施虐的季节长度变宽,加之海岸冻土融化,大面积的北极海岸崩解到海里,从而导致海岸后退加剧,成为北极水土流失和社区安全的最大威胁^[32]. 在阿拉斯加有178个社区面临海岸侵蚀的风险^[33,34]. 同样在青藏高原,随着区域性变暖,高原多年冻土区热喀斯特地貌发育很普遍,且有扩大趋势^[35].

多年冻土还是地球表层系统中调节碳源汇的重要媒介,具有重要的碳固持功能^[36]. 地球气候在第四纪冰期-间冰期旋回中,气温变化与主要温室气体(CO₂和CH₄等)浓度变化就具有大致同步的特点. 冰期期间温室气体下降与大气中大量碳固定在冻土地带有关,而间冰期时温室气体浓度升高也与冻土地带释放大量的CO₂和CH₄同步. 目前估算,北极冻土中碳储量约2800 Pg,远大于全球大气中的二氧化碳(~760 Pg)和甲烷(~3.5 Pg)储量^[37]. 青藏高原多年冻土区土壤有机碳储量初步查明也达到160 Pg^[38]. 冻土的水土保持功能衰退最大威胁将是大量的碳随着冻土融化而释放至大气,这被称为气候的“定时炸弹”. 当前对全球平均温度升高至多高时冻土碳的释放达到阈值尚存较大疑问,但IPCC AR6最近发布的《全球温升1.5℃特别报告》指出,将全球温升控制在1.5℃而不是2℃的话,可在21世纪防止150万~250万km²的多年冻土解冻,并可减少100 Gt CO₂的释放^[39].

2.4 文化功能及其服务

地球各大洲除了南极洲没有原著民外,其他大洲均有。据统计,全球87个国家分布着约1900个原著民族群,约2700万人^[40]。冰冻圈区居住着独特的原著民,比如,环北极有大约400万因纽特人和闪米人^[41],青藏高原生活着数十万藏族人。这些原著民生活方式和文化形态独特,是世界文化的重要组成部分。人类福祉的一个基本要素是文化带来的精神需要,尤其是本土文化。但是,当地本土文化往往被边缘化,而且对自然资源的依赖大,一旦自然资源发生大的变化,本土文化的价值和传统延续就面临严重挑战^[42]。

随着北极地区冰层开始大面积融化,海豹和北极熊等依赖于海冰捕食的动物数量锐减。这一变化对极大依赖于海豹、驯鹿、北极熊及北冰洋鱼类为食的环北极原住民的生活造成极大影响^[43]。由于海面封冻时间变短,冰层变薄,使狩猎季节缩短,狩猎活动更加危险,极大地影响了猎人的猎捕,改变了原住民以狩猎为主的谋生方式^[44]。此外,北极变暖也改变着原住民的社交方式。多数原著民属于半游牧民族,他们乘坐雪橇往来于不同的定居点,走亲访友,而冰层的变薄与逐渐消失意味着乘坐狗拉雪橇拜访其他定居点的社会活动充满了安全风险,零星浮冰也对坐船旅行带来了危险^[45]。基于这些原因,原住民的定居点正在萎缩,传统交流方式的瓦解导致因纽特文化面临断代的威胁,年轻人已不再能够依赖传统模式养家糊口,陆续离开自己的社区,在新的城市开始全新的生活^[43]。

气候变暖使得原住民传统的经济活动也在悄然发生改变。就资源方面而言,气候变暖会导致北极野生动物在健康、习性、数量和分布上发生改变,对居民的狩猎活动

造成影响^[44,46]。冰雪消融,环境变化过于急躁,在长期自然实践(狩猎等传统经济活动)过程中总结得来的因纽特传统知识可靠性面临挑战,传统文化传承遭受考验^[47]。气候变暖将加速原住民居住地和经济核心区的本土语言文化流失。对于北极地区小城镇乡村居民点而言,气候变暖将在很大程度上影响北极原住民饮食与狩猎习惯,部分原住民可能因此搬离世代居住的土地^[46],当迁移到其他较大居民点时迫于生存,将会采取主动融入当地文化的策略,例如学习当地语言和宗教,这样的过程势必减少土著语言使用频率以及价值,从而造成土著语言流失^[43]。这些独特的局地文化面临的遭遇也必然严重影响到世界文化的多样性。

2.5 功能及其服务衰退或丧失的风险级联

级联风险一直以来被宽泛地认为是“非控制性损失链”,虽未见正式的官方定义,但可认为是因初始诱发因子导致的枝型风险结构^[48,49]。级联风险是一个灾害逐步升级的过程,与风险的暴露度和脆弱性紧密关联,主要需关注社会和基础设施端的管制。在上述冰冻圈功能及其服务衰退或丧失情景下,考虑社会经济适应、治理与管控,将会引发功能损失、服务退化以及社会经济受损等一系列级联式风险(图3)。

(1) 水资源供给功能及其服务。在极大依赖于冰冻圈融水的地区,下游绿洲区粮食安全受到威胁,更进一步会导致水冲突和地区争端的加剧,这类冲突和争端在跨境河流国家间最易发生。

(2) 气候调节功能及其服务。冰冻圈(如北冰洋海冰与北半球积雪)退缩导致极端天气气候异常或频发,危害气候适宜性,进而造成农业与生态系统受损,在极端热浪

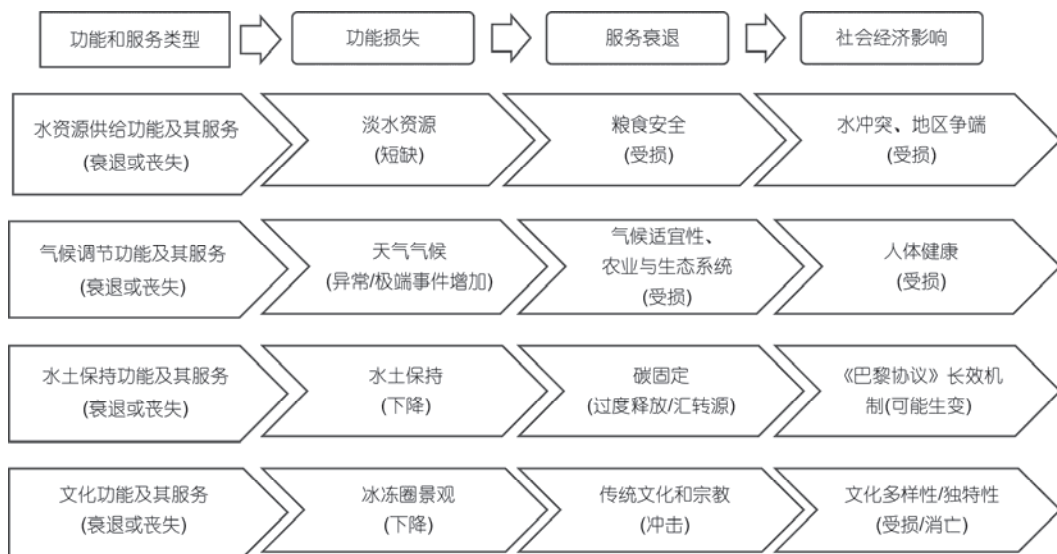


图3 冰冻圈功能及其服务衰退或丧失的风险级联

Figure 3 The cascade on risk result from cryospheric functions and their services shrink or loss

和极端寒冷事件频现下,其又必然影响人体健康。

(3) 水土保持功能及服务. 在多年冻土大面积融化情景下,热融滑塌和热融湖广泛发育,水土保持服务下降并进一步影响固碳作用. 温室气体释放最终可能导致这些地区的碳源汇发生转化. 如果释放速率和总量足够大,会

进一步冲淡人类减排的动力,转移视线,让《巴黎协议》自主减排的意愿发生动摇,从而给国际气候治理带来变数。

(4) 文化功能与服务. 随着冰冻圈景观变化,冰冻圈给极区人们带来的生活安全保障、视角美学、旅游消遣以及灵感等服务潜力下降,进而与冰冻圈密切相关的宗教与

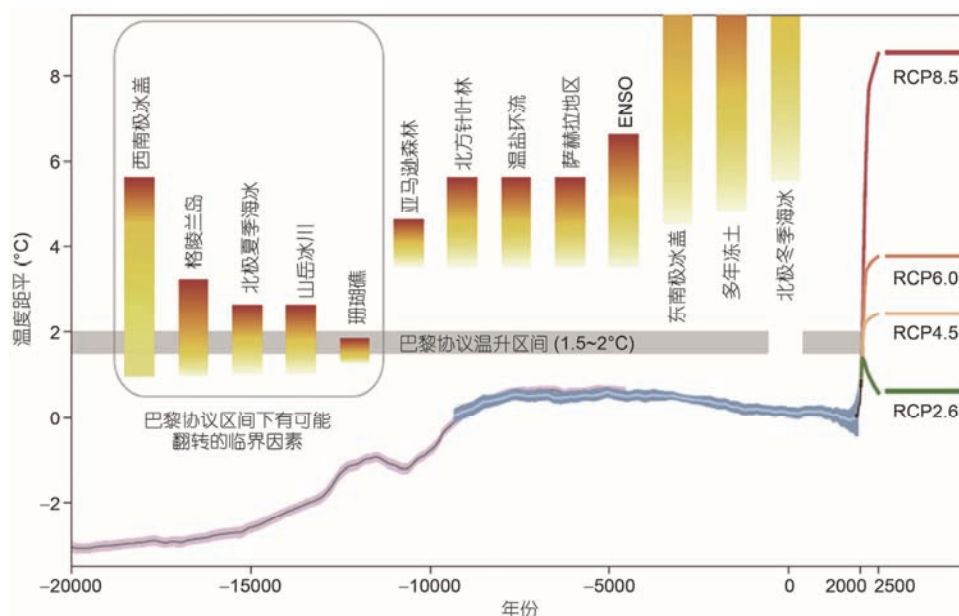


图4 全球变暖下的地球系统临界因素^[55]. 横坐标负值表示公元前

Figure 4 Tipping elements in context of the global warming^[55]. Minus signs indicate B.C. in the Horizontal Coordinates

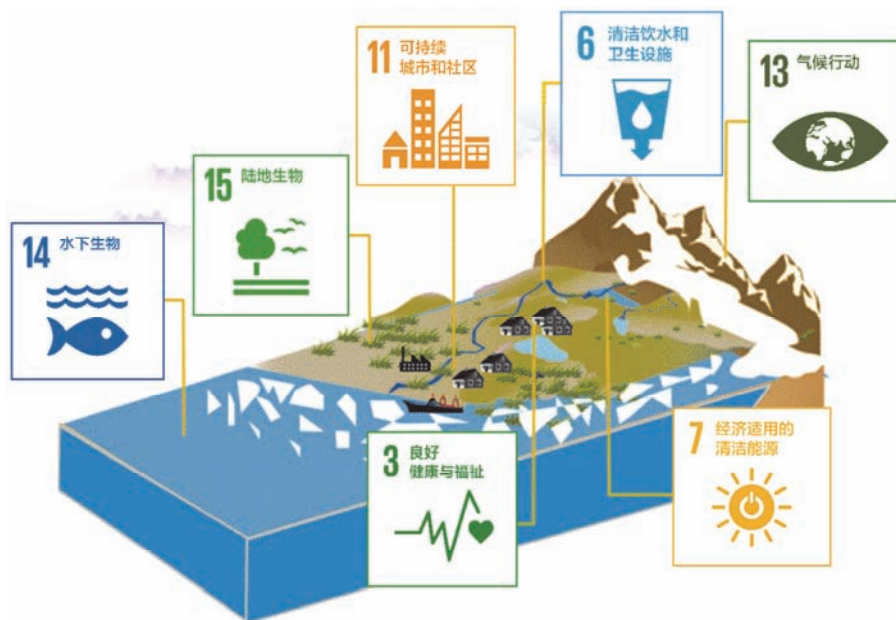


图5 冰冻圈服务与联合国2030可持续发展目标的关系示例

Figure 5 An example on links between cryospheric services and the sustainable development goals (SDGs)

传统文化发生改变,进而又会损害全球的文化多样性。

3 结语

在地球系统中有诸多子系统一旦发生稳态变化,就难以从当前状态回到之前的状态,这类子系统被称为不可逆因素,亦称临界因素。当前,因为变暖而显现的临界因素被越来越清晰地得到认识^[50-55]。如图4所示,在当前辨识的众多临界成员中,其中大多数成员(如山地冰川、北极夏季海冰、格陵兰冰盖、西南极冰盖等)与冰冻圈密切相关,在《巴黎协议》温升区间之上更容易发生逆转。因此,冰冻圈服务的衰退与丧失风险是人类面临的地球子系统逆转后果,我们所分析的上述风险可视为冰冻圈变化对人类福祉带来的“负面清单”,虽然变暖在某些区域上确可以带来益处,但整体而言,弊大于利。

在联合国发布的17个可持续发展目标中^[56]，“气候行动”、“清洁能源”、“清洁饮用水”、“可持续城市与社区”、“陆地生物”和“水下生物”等目标的实现与冰冻圈能否持续维持其供给、调节等功能并提供相应服务密切相关(图5)。要实现联合国2030可持续发展目标,不能不考虑生活在环极地地区、海岸、小岛和低洼地区、高海拔地区及其受其影响的干旱地区人们的可持续发展问题。这些地区往往是受冰冻圈变化影响的高风险区域。除了受海平面影响的沿海发达地带之外,其他地带往往是边缘化和不发达地区,经济落后、对自然资源依赖度强、贫困化突出、文化延续受困、平等问题更突出,因此也是满足17个目标的瓶颈地区和“短板”地区。如何在冰冻圈服务加快丧失和面临丧失的情景下,将全球减缓气候变暖与区域适应并举,尽早谋划受影响地区的可持续发展路径,是人类面临的重大课题。

致谢 感谢国家自然科学基金(41671058, 41690145, 41425003)资助,感谢审稿人提出宝贵意见。

推荐阅读文献

- 1 Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. Glossary of Cryosphere Science (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2014 [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学辞典. 北京: 气象出版社, 2014]
- 2 Ding Y J, Xiao C D. Challenges in the study of cryospheric changes and their impacts (in Chinese). Adv Earth Sci, 2013, 28: 1067–1076 [丁永建, 效存德. 冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论. 地球科学进展, 2013, 28: 1067–1076]
- 3 Qin D H, Ding Y J, Xiao C D, et al. Cryospheric science: Research framework and disciplinary system. Natl Sci Rev, 2018, 5: 255–268
- 4 Xiao C D, Wang S J, Qin D H. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation. Adv Clim Change Res, 2015, (6): 181–187
- 5 Qin D H, Yao T D, Ding Y J, et al. An Introduction to Cryosphere Science (in Chinese). Beijing: China Science Press, 2017 [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017]
- 6 Wang S J, Xiao C D. Global cryospheric disaster at high risk areas: Impacts and trend (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 883–884 [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: 883–884]
- 7 IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2014
- 8 IPCC. Summary for Policymakers. In: Field C B, Barros V, Stocker T F, et al, eds. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2012
- 9 Qin D H, Zhang J Y, Shan C C, et al. National Assessment Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation in China (in Chinese). Beijing: China Science Press, 2015 [秦大河, 张建新, 闪淳昌, 等. 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. 北京: 科学出版社, 2015]
- 10 Pfeffer W T, Arendt A A, Bliss A, et al. The Randolph Glacier Inventory: A globally complete inventory of glaciers. J Glaciol, 2014, 60: 537–552
- 11 Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nat Clim Change, 2018, 8: 135–140
- 12 Bliss A, Hock R, Radic V. Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. J Geophys Res-Earth, 2014, 119: 717–730
- 13 Immerzeel W W, Beek L P H V, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328: 1382–1385
- 14 Carey M, Molden O C, Rasmussen M B, et al. Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies. Ann Am Assoc Geogr, 2017, 107: 350–359
- 15 Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). Nat Clim Change, 2012, 2: 725–731

- 16 Engelhardt M, Leclercq P, Eidhammer T, et al. Meltwater runoff in a changing climate (1951–2009) at Chhota Shigri Glacier, Western Himalaya, Northern India. *Ann Glaciol*, 2017, 58: 47–58
- 17 D'Agata C, Bocchiola D, Soncini A, et al. Recent area and volume loss of Alpine glaciers in the Adda River of Italy and their contribution to hydropower production. *Cold Reg Sci Technol*, 2018, 148: 172–184
- 18 Uhlmann B, Jordan F, Beniston M. Modelling runoff in a Swiss glacierized catchment—Part II: Daily discharge and glacier evolution in the Findelen basin in a progressively warmer climate. *Int J Clim*, 2013, 33: 1301–1307
- 19 Farinotti D, Usselman S, Huss M, et al. Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrol Process*, 2012, 26: 1909–1924
- 20 Bradley R S, Vuille M, Diaz H F, et al. Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 2006, 312: 1755–1756
- 21 Rangecroft S, Harrison S, Anderson K, et al. Climate change and water resources in arid mountains: An example from the Bolivian Andes. *Ambio*, 2013, 42: 852–863
- 22 Ragettli S, Immerzeel W W, Pellicciotti F. Contrasting climate change impact on river flows from high-altitude catchments in the Himalayan and Andes Mountains. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 9222–9227
- 23 Frans C, Istanbuloglu E, Lettenmaier D P, et al. Implications of decadal to century scale glacio-hydrological change for water resources of the Hood River basin, OR, USA. *Hydrol Process*, 2016, 30: 4314–4329
- 24 Moyer A N, Moore R D, Koppes M N. Streamflow response to the rapid retreat of a lake-calving glacier. *Hydrol Process*, 2016, 30: 3650–3665
- 25 Mankin J S, Viviroli D, Singh D, et al. The potential for snow to supply human water demand in the present and future. *Environ Res Lett*, 2015, 10: 1748–9326
- 26 Wanders N, Wada Y, Van Lanen H A J. Global hydrological droughts in the 21st century under a changing hydrological regime. *Earth Syst Dyn*, 2015, 6: 1–15
- 27 Naz B S, Kao S C, Ashfaq M, et al. Regional hydrologic response to climate change in the conterminous United States using high-resolution hydroclimate simulations. *Glob Planet Change*, 2016, 143: 100–117
- 28 Coumou D, Lehmann J, Beckmann J. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Science*, 2015, 348: 324–327
- 29 Pistone K, Eisenman I, Ramanathan V. Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 3322–3326
- 30 Zhang Q, Xiao C, Ding M, et al. Reconstruction of autumn sea ice extent changes since AD1289 in the Barents-Kara Sea, Arctic. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 1279–1291
- 31 Wu T W, Qian Z A. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation. *J Clim*, 2003, 16: 2038–2051
- 32 Lantuit H, Pollard W H. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*, 2008, 95: 84–102
- 33 Bronen R, Chapin F S. Adaptive governance and institutional strategies for climate-induced community relocations in Alaska. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 9320–9325
- 34 AMAP. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Oslo, Norway: Arctic Council Secretariat, 2017
- 35 Niu F J, Luo J, Lin Z J, et al. Thaw-induced slope failures and stability analyses in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Landslides*, 2016, 13: 55–65
- 36 Schuur E A G, McGuire A D, Schadel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 2015, 520: 171–179
- 37 Vonk J E, Sánchez-García L, van Dongen B E, et al. Activation of old carbon by erosion of coastal and subsea permafrost in Arctic Siberia. *Nature*, 2012, 489: 137–140
- 38 Mu C C, Zhang T J, Peng X Q, et al. The organic carbon pool of permafrost regions on the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau. *Cryosph Discuss*, 2014, 8: 5015–5033
- 39 IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5°C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018
- 40 Cisneros M, Andrés M, Pauly D, et al. A global estimate of seafood consumption by coastal indigenous peoples. *PLoS One*, 2016, 11: e0166681
- 41 Heleniak T. Arctic Populations and Migration. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2014
- 42 Cunsolo W A, Harper S L, Ford J D, et al. “From this place and of this place”: Climate change, sense of place, and health in Nunatsiavut, Canada. *Soc Sci Med*, 2012, 75: 538–547
- 43 Council A. Arctic Resilience Report. Stockholm: Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre, 2016
- 44 Willox A C, Stephenson E, Allen J, et al. Examining relationships between climate change and mental health in the Circumpolar North.

Reg Environ Change, 2015, 15: 169–182

- 45 ACIA. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- 46 Durkalec A, Furgal C, Skinner M W, et al. Climate change influences on environment as a determinant of Indigenous health: Relationships to place, sea ice, and health in an Inuit community. *Soc Sci Med*, 2015, 136-137: 17–26
- 47 Eicken H, Kaufman M, Krupnik I, et al. A framework and database for community sea ice observations in a changing Arctic: An Alaskan prototype for multiple users. *Polar Geogr*, 2014, 37: 5–27
- 48 Pescaroli G, Alexander D. Understanding compound, interconnected, interacting, and cascading risks: A holistic framework. *Risk Anal*, 2018, 38: 2245–2257
- 49 Pescaroli G, Alexander D. A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the “toppling dominos” metaphor. *Planet Risk Glob Forum Davos*, 2015, 3: 58–67
- 50 Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth’s climate system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 1786–1793
- 51 Lenton T M. Early warning of climate tipping points. *Nat Clim Change*, 2011, 1: 201–209
- 52 Lenton T M. Earth System models: How well do Earth system models simulate the dynamics of global change? *PAGES News*, 2012, 20: 8
- 53 Schellnhuber H J. Tipping elements in the Earth System. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 20561–20563
- 54 National Search Council. *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*. Washington DC: National Academy Press, 2002
- 55 Schellnhuber H J, Rahmstorf S, Winkelmann R. Why the right climate target was agreed in Paris. *Nat Clim Chang*, 2016, 6: 649–653
- 56 United Nations. *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. United Nations, New York, 2015

Summary for “冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险”

Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services

Cunde Xiao^{1,2*}, Bo Su¹, Xiaoming Wang² & Dahe Qin²¹ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;² State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

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

The cryosphere provides a wide range of benefits to human well-being, directly or indirectly and materially or spiritually. They are defined as cryosphere services, including provisioning, regulating, culture, bearing and supporting services. All cryospheric services are supported by cryospheric functions reflected in their processes, structures and properties. Examples may include energy regulation, mass (especially water) storage and transfer, load support, natural cooling, and protection from surface erosion etc. However, as a result of climate warming and corresponding cryosphere shrinkage, the cryosphere functions and their associated services have been deteriorating and would continue or be eventually lost. These are highlighted by the following aspects.

Firstly, the meltwater provisioned by glaciers starts to decline once their overall mass is reduced to a tipping point, which indicates the time when the accelerated melting glaciers due to climate warming can no longer supplement the declining meltwater due to the reduction in glacier mass. Meanwhile, before reaching the tipping point, the increase in glacier meltwater causes water discharge becoming more extreme, leading to floods, while the reduced meltwater after the tipping point may exacerbate the likelihood of droughts. The deteriorated freshwater provisioning function and service could pose a serious threat to regional social and ecological systems, especially in the High Asia and Andes of South America, where the increasing population highly depends on cryospheric water supply.

Secondly, with the relinquishing cryosphere following warming climate, the cryosphere is gradually losing cooling capacity and incurring reduced albedo, consequently exposing the underlying surface to absorb more and more heat that accelerates the shrinking of the cryosphere. The ocean circulation could be weakened due to increased meltwater of glaciers and sea ices, which increases the volume of freshwater at sea surface and prevent thermohaline circulation at high latitudes. The declining climate regulating function and service of the cryosphere would cause more frequent extreme weather events, such as rapid warming in the Arctic that would significantly weaken polar vortex, affecting mid- and low-latitude circulations that may bring more frequent heat waves in summer and extreme cold events in winter.

Thirdly, the cryosphere would gradually lose its water storage (e.g. melting glaciers) and incur land erosion (e.g. thaw slump) following warming climate. The accelerated retreat of the fast ice along coasts of the Arctic Ocean increases the seasonal exposure of coastlines to the impact of waves. Together with the deterioration of frozen ground, the Arctic coasts would experience accelerated erosion. In permafrost regions, the thaw slumps and thermokarst lakes are also the consequences of increased temperature in the cryosphere. These may eventually cause the release of greenhouse gases and further exacerbate climate warming.

Finally, landscapes in the cryosphere would become more fragmented and even lost. Correspondingly, those associated cultural functions together with the services, such as aesthetic and recreational uses, religious and spiritual activities, would all be impacted. It would not only seriously affect people's needs, but also impact on local communities. In addition, the livelihood and culture of indigenous people, especially in the Arctic, would be afflicted.

The decrease or loss of cryosphere services can also create cascading risks in the eco-socioeconomic systems. It mainly includes: (1) the arid regions relying on cryospheric meltwater resources will face following-on risks such as water conflicts and climate refugees; (2) the subsequent risks in agriculture and public health may increase due to more frequent extreme weather and climate; (3) following on the deterioration of soil and water conservation functions, there would be risks of degrading eco-system and socioeconomic assets. In the case of more lost carbon sinks or even changes to carbon sources, it would more or less affect the implementation of “Paris Agreement”; (4) there are risks of the disappearance of unique cryosphere cultures, further impacting on culture diversity. Therefore, the cascading risks as a result of cryosphere changes should be highly paid attention to.

cryosphere, cryospheric functions, cryospheric services, cascading risks, climate change, sustainable development

doi: 10.1360/N972018-01314