DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0093.

WANG Shijin, DING Yongjian, XIAO Cunde. Integrated impacts of cryosphere change on the economic and social system and its adaptive management strategies[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 863-874. [王世金, 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响及其适应性管理策略[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 863-874.]

冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响 及其适应性管理策略

王世金¹, 丁永建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, 甘肃 兰州 730000;

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

摘 要: 冰冻圈是气候系统影响最直接和最敏感的圈层。在全球变化背景下, 冰冻圈变化与生物圈、岩石圈、水圈、大气圈、人类圈之间的相互作用日趋加剧。特别地, 冰冻圈快速变化对其影响区经济社会系统产生了广泛而深刻的负面影响, 甚至危及人类福祉、经济社会系统的健康、和谐、持续发展。鉴于冰冻圈区位优势及其较为落后的经济水平, 其应对冰冻圈变化的能力极为有限。目前, 适应仍然是冰冻圈应对气候变化的主要途径。冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响分析是适应冰冻圈快速变化的基础, 其适应性管理策略则是减轻冰冻圈快速变化不利影响、降低自然和经济社会系统防御其不利影响脆弱性的最终目标。

关键词: 冰冻圈变化; 综合影响; 适应性管理

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)05-0863-12

0 引言

冰冻圈是地球表层具有一定厚度且连续分布的负温圈层。冰冻圈内的水体一般处于冻结状态。冰冻圈地处高纬高海拔地带, 是全球重要的水源涵养区、生态功能区、水土保持区和防风固沙区, 对于维系全球受冰冻圈影响区的生态-经济社会系统可持续发展具有重要的战略意义。然而, 冰冻圈是全球变化最快速、最显著、最具指示性的圈层, 也是对气候系统影响最直接和最敏感的圈层^[1]。1880-2012年间, 基本可以确定, 全球陆地和海洋近地表平均温度增温 0.85 (0.65~1.06) °C, 2003-2012年平均温度比 1850-1900年平均温度增加约 0.78 °C^[2]。冰冻圈对气候变化反映极为敏感, 随着全球变暖的加剧, 由冰冻圈变化引起的负面影响有逐渐增加的趋势, 导致了一系列重大环境问题的出现,

尤其是在高海拔和冰冻圈直接影响的区域, 给这些区域的生态-社会经济可持续发展带来了严重影响。冰冻圈变化通过景观、水资源、生态系统、灾害风险、重大工程等对社会经济系统产生诸多潜在影响, 以往学者主要利用脆弱性评估方法及其风险视角认识和揭示其不同系统受冰冻圈变化的影响程度^[3-5], 进而提出适应性管理策略, 但缺乏冰冻圈变化对经济社会系统综合影响的集成分析。

全球冰冻圈地区人口分布较少、产业单一, 对全球气候升温贡献极小, 而受全球变化影响极为严重。鉴于冰冻圈劣势的区位条件及其落后的经济水平, 其预防、应对、抵抗冰冻圈变化负面影响的能力非常有限。由此可见, 适应仍然是目前冰冻圈应对气候变化的主要途径^[6-8], 其适应能力的提升不仅可以增加冰冻圈变化适应容量, 而且可消减冰冻圈居民应对气候变化的脆弱性, 并由此可降低冰冻

收稿日期: 2017-02-14; 修订日期: 2018-04-22

基金项目: 国家自然科学基金委重大项目“中国冰冻圈服务功能形成机理与综合区划研究”(41690143); 国家社会科学基金项目“青藏高原多灾种自然灾害综合风险评估及其管理研究”(14BGL137); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项子课题“三极冰冻圈服务与功能”(XDA19070503); 国家重大科学研究计划“冰冻圈变化及其影响研究”(2013CBA01808)资助

作者简介: 王世金(1975-), 男, 甘肃金昌人, 副研究员, 2011年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 从事冰冻圈变化风险评估与管控研究。E-mail: xiaohanjin@126.com.

圈变化所引起的不可避免的经济损失和社会风险。总体而言,准确辨识和分析冰冻圈变化对经济社会系统的影响程度、时空范围,是人类减缓与适应冰冻圈快速变化影响的基础,而适应冰冻圈快速变化对经济社会系统影响战略的提出则是减少冰冻圈快速变化预期不利影响的关键和前提,其冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响分析和适应战略的提出对于冰冻圈影响区经济社会系统可持续发展具有重要的现实指导作用。

1 全球冰冻圈变化

世界范围内几乎所有冰川都在持续萎缩或衰退,这些均被一系列按时间序列的冰川长度、面积、体积和物质平衡监测变化数据所揭示(非常高信度)。例如,格林兰冰盖、南极冰盖物质亏损率呈加速态势,平均物质亏损率有可能从1992-2001年期间的 $30(-37 \sim 97) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [海平面当量, $0.08(-0.10 \sim 0.27) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$]和 $34(-6 \sim 74) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [海平面当量, $0.09(-0.02 \sim 0.20) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$]分别增加到了2002-2011年间的 $147(72 \sim 221) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [$0.40(0.20 \sim 0.61) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$]和 $215(157 \sim 274) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [$0.59(0.43 \sim 0.76) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$]。除两大冰盖边缘冰川外,世界上所有冰川物质亏损总量很有可能于1971-2009年期间达 $(226 \pm 135) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [海平面当量, $(0.62 \pm 0.37) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$],1993-2009年期间达 $(275 \pm 135) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [$(0.76 \pm 0.37) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$],2005-2009年期间达 $(301 \pm 135) \text{ Gt} \cdot \text{a}^{-1}$ [$(0.83 \pm 0.37) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$]。在全球变暖背景下,各区冻土总体上呈现出温度上升,活动层厚度增加,冻土退化的趋势。尽管全球冻土增温区域差异显著,但冻土温度自20世纪80年代以来一直在增加(高信度)。其中,温度较高的冻土区增温一般均低于温度较低的冻土区的增温(高信度)。1975-2005年期间,冻土的显著退化已发生在欧洲和俄罗斯北部区域(中等信度),例如,在俄罗斯的西伯利亚西北部地区,1974-2007年地表温度都呈现增加趋势,在寒冷的冻土区增加了 2°C ,而在温暖的冻土区仅增加了 1°C 。全球98%的积雪位于北半球,最大覆盖面积达 $45.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。1967-2012年,北半球年平均积雪范围减少趋势显著,最大变化 -53% (很有可能, $-40\% \sim -66\%$)发生在6月^[9]。

中国是中低纬度地区冰冻圈最发育的国家。大量研究结果表明,过去几十年中国冰冻圈普遍具有

萎缩的趋势,且近十多年来加速萎缩迹象也愈加明显。第二次冰川编目显示,中国共有冰川48 571条,总面积约 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$,总体呈现萎缩态势,面积缩小了18%左右,每年平均面积缩小 243.7 km^2 ^[10]。过去几十年来,中国以青藏高原为主体的多年冻土温度普遍上升,具体表现为多年冻土面积缩小,下界上升,多年冻土厚度减薄,冻结时间缩短,最大季节融化深度加深,融区扩大,多年岛状冻土消失^[11-13]。中国积雪面积达 $9 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中稳定积雪区约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,零星分布在西部高山冰川积累区。在1958/1959-2007/2008年的近50 a来,春、秋季中国积雪日数和最大积雪深度在整体上呈现缓慢减少的趋势,冬季积雪日数和最大积雪深度呈现增加的趋势^[14]。

2 冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响

冰冻圈变化对社会经济系统具有显著的正面效应和负面影响,正面效应主要来自于冰冻圈为人类社会提供了巨大的服务功能,负面影响则主要来自于冰冻圈变化对经济社会系统产生的诸类风险,本研究主要集中在冰冻圈变化对经济社会的负面影响。越来越多证据表明,与整个20世纪缓慢的暖化趋势相比,全球暖化强度和持续性从20世纪70年代开始越来越显著,其影响范围和程度在不断增加,特别是,由此引起的气象、冰冻圈、地质等自然灾害无论是频率、强度还是损失情况都有增加趋势^[15-17]。在全球变化背景下,冰冻圈的这种快速变化,对寒区经济社会系统也产生了广泛而深刻的负面影响,主要体现在对冰雪旅游业系统、寒区畜牧业系统、干旱区绿洲农业系统、冰冻圈灾害承灾区系统、寒区重大工程、海岸和海岛国家安全、极地栖息地系统等的综合影响。

2.1 冰雪旅游业系统

冰冻圈各要素是重要的自然景观和生态系统内在的组成部分。同样,也是高山带迷人的地质景观和非同寻常的景观或吸引物之一^[18]。然而,冰冻圈快速变化却强烈地影响着世界范围内寒区的景观类型多样性,其冰雪旅游也被认为是应对气候变化最为脆弱的产业。按目前冰冻圈的快速变化趋势,未来冰冻圈景观质量和美感将明显下降,一些乃至消失,进而会波及以冰冻圈要素为主要吸引物的旅游目的地游客数量和经济效益的锐减。例如,在美国冰川国家公园,100年前150个冰川目前退缩非常严重,其中,115条冰川已消失殆尽,假如全球

持续变暖, 仅存的 35 条冰川预计也将在未来 30 年内消失^[26]。1991 - 2006 年间, 世界最高的滑雪胜地——玻利维亚查卡塔亚冰川(Chacaltaya)退缩了 80%^[19]。2009 年, 该冰川已完全消失, 失去了夏季滑雪功能。冰冻圈快速变化不仅使冰川景观可进入性难度增加、冰雪景观消失严重, 而且迫使一些冰川景区改变攀冰或冰上徒步线路, 导致冰上体验旅游项目受阻, 低海拔冰川滑雪场消失或被迫移至更高海拔。据估计, 因低海拔积雪的消失, 奥地利将丧失 10% 的冬季旅游总收入。2000 年, 瑞士所有滑雪道人工造雪面积仅为 10%, 2010 年已增至 36%, 而奥地利现已占到了 62%, 意大利阿尔卑斯山 100% 滑雪道则全部由人工造雪维持^[20]。冰雪资源不仅是重要的自然景观, 而且在特定区域形成它独有的文化属性。冰冻圈的快速变化不仅影响着脆弱的冰雪自然景观及其生态环境, 而且也影响着高山区的文化结构。在青藏高原藏区许多景观特征诸如雪峰都被赋予了精神价值和文化内涵, 且都被认为是不同神灵和精神的物质表现, 并且形成了山地居民对其的特有理解和崇拜。因为敬畏雪峰神山, 当地居民形成了“天人合一”的环保意识。冰雪文化景观的快速消融对当地居民精神世界产生了严重影响^[19]。当然, 冰雪景观的快速消融及其对山地文化价值的影响研究则有助于激励普通公众建立其环境保护意识, 以支持减缓气候变化的决策^[21]。

2.2 寒区畜牧业系统

冰冻圈变化对寒区畜牧业的影响是通过冻土退化波及草地或湿地生态系统退化而造成的。冻土退化对畜牧业影响有正反两个方面, 但主要还是不利影响, 且主要影响蒙古、中国青藏高原乃至东北地区冰冻圈草地生态系统, 进而波及其草地畜牧业可持续发展。冻土是寒区生态环境的主要依托, 它通过保持土壤水分维系着寒区生态平衡, 若冻土一旦退化, 其区域寒带植物生存环境将受到影响, 极有可能波及寒区生态系统结构及其稳定性。多年冻土区土壤活动层特殊的水热交换是维持高寒生态系统稳定的关键所在, 冻土及其孕育的高寒沼泽湿地和高寒草甸生态系统具有显著的水源涵养功能, 是稳定江河源区水循环与河川径流的重要因素^[22]。与北极苔原地区(生态系统生物量显著增加, 但生物多样性却在减少)^[23-25]比较, 青藏高原畜牧业受冻土退化的负面影响更为突出。畜牧业是青藏高原的主要生产活动, 占高原土地面积一半以上的是草地资源, 草地资源是维持高原畜牧业生产的物质基

础。然而, 过去 30 年来, 青藏高原多年冻土退化严重, 冻土的生态意义不仅在于维持区域气候稳定, 更重要的是它的隔水作用, 为地表植被生长保留充足的水分。一旦冻土退化, 形成较好的排水条件, 土壤水分下渗, 导致表土干燥, 并使土壤结构、组分发生变化, 植被因缺少充足水分而生长欠佳甚至死亡^[26]。同时, 受气温上升、干旱和强盛风力影响, 青藏高原冻融侵蚀、风蚀严重, 土地沙化加剧, 进而反过来影响草地生态系统。青藏高原高寒生态系统退化具体表现在高寒草甸覆盖度和生产力的下降, 高寒草原沙化面积增大。截至 2009 年底, 全国冻融荒漠化土地面积达 $36.35 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。高寒草地退化和冻融侵蚀沙化直接影响着寒区草地生物量和生产力, 进而降低草场载畜能力, 最终波及寒区畜牧业的发展^[27]。另外, 青藏高原冰川快速融化也加剧了高原湖面的扩张, 进而掩埋大片草场, 致使当地牲畜冬瘦、春死情况加剧, 并迫使牧民搬迁, 严重影响牧区畜牧业发展。

2.3 干旱区绿洲系统

冰冻圈水源涵养、水量补给(水资源作用)、流域调节等水文功能显著。随着气候变率受自然和人类活动变化的共同影响以及冰雪的加速消融, 区域水资源安全将受到很大的威胁^[28]。特别是, 极大地威胁着干旱区绿洲农业系统。美国、加拿大西部, 以及中亚和安第斯山干旱区经济可持续发展则高度依赖于冰冻圈水资源, 冰冻圈变化对这些干旱缺水地区绿洲系统稳定性、粮食安全、生态屏障的影响尤为突出。绿洲是干旱区人类生存最重要的环境依托, 面积只占干旱区总面积的 4% ~ 5%, 但却集中了干旱区 90% 以上的人口、耕地和 95% 以上的社会财富。其中, 中亚内陆干旱区主要受西风环流影响, 温带荒漠分布于此, 降水稀少, 植被覆盖率低, 是全球气候变化影响最敏感的地区之一^[29]。冰冻圈作为“中亚水塔”是该区河流的重要补给源, 对河川径流具有天然调节作用, 其高山冰雪融水不仅为下游冲积扇坡面上树木、草地提供了生态水源, 而且是当地绿洲农业和居民生活赖以生存和发展的重要水源, 更是该地区独特的绿洲发展的重要经济命脉^[30]。例如, 中国西北干旱区新疆维吾尔自治区稳定积雪面积达 $56.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高山流域产流占地表径流的 80% 以上, 其中冰川和积雪融水径流占总径流中的比例可达 45% 以上^[31]。“高山冰川积雪—山前绿洲—尾间湖泊”构成了干旱区典型的流域绿洲生态系统。冰雪变化直接波及山前绿洲及其下

游生态系统及其环境。20 世纪 80 年代以来,中亚内陆干旱区冰川消融退缩加剧,冰川数量和冰储量均呈减少趋势,进而导致补给河流的冰川融水径流增加,初期将有利于该区域绿洲农业的发展,而后期冰川融水对河流的补给作用将随之减小^[32]。甚至一些地区,随着冰川的持续退缩乃至消失,以冰川融水补给为主的河流将有面临逐渐干涸的风险。有研究显示,乌鲁木齐河源 1 号冰川径流量高出同等条件下非冰川区径流量的 61%,其中,92%是因冰川退缩和减薄补给^[33]。

冰川及其融水对于中亚干旱区水资源具有举足轻重的作用。以中国塔里木河流域为例,流域各支流出山径流总量中冰川径流为 $133.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占流域出山径流总量的 38.5%,其它大部分支流的冰川融水补给比例均在 30%~80%。河西内陆河流域 1961-2006 年平均冰川物质平衡为 $-49.50 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,从东段石羊河流域到西段疏勒河、党河流域,物质平衡由强烈的负平衡向微弱的负平衡状态过渡。整个河西内陆河流域 1961-2006 年平均冰川融水径流量为 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,冰川融水补给比重为 14.10%^[34-35]。中亚干旱区农业灌溉用水占据了全部水耗的 90% 以上,伴随着西部大开发的深入和中哈吉跨国“丝绸之路经济带”的建设,该区工业化、城镇化步伐必将加快,区域人口及其经济规模将不断增大,其水资源需求量将随之增加,绿洲农业用水与其它产业用水矛盾将会进一步激化,必将对绿洲系统水资源安全与粮食安全构成潜在威胁。若气温持续变暖,中亚内陆河流域冰川将大量消失,冰川融水势必持续减少甚至枯竭,对河流调节功能减弱或基本消失,从而波及干旱区绿洲系统^[36]。

2.4 冰冻圈灾害承灾区系统

冰冻圈的快速变化对人类社会最主要的影响便是冰冻圈灾害的频发。20 世纪 70 年代开始,全球暖化强度和持续性越来越显著,其影响范围和程度在不断增加,气候灾害无论是频率、范围、强度还是灾损都呈增加趋势^[2]。冰冻圈对气候变化极为敏感,冰冻圈的快速变化由此诱发了各类冰冻圈灾害的频繁发生,使冰冻圈影响区经济社会系统遭到了巨大破坏并潜伏多种威胁。因冰冻圈影响区的地方财政薄弱,抵御灾害能力有限,其灾害已成为经济社会系统健康持续发展面临的重要问题。冰冻圈灾害涉及到的主要灾种包括雪崩/冰崩/岩崩、冰湖溃决、冰雪洪水、冰凌灾害、牧区雪灾、冰冻雨雪、

风吹雪、冰雹、霜冻、冻融等。全球范围内,阿尔卑斯山区、喀喇昆仑山、安第斯山脉、加拿大落基山脉、天山和喜马拉雅山在内的许多高山区往往是冰冻圈灾害的频发区和重灾区。

例如,南美洲安第斯山地区有记录冰川灾害中,冰湖溃决灾害就占其总数的 70%。自 1941 年以来,秘鲁布拉卡山区已发生冰湖溃决灾害 30 多起,夺去了接近 30 000 人的生命^[37]。自 1952 年以来,天山吉尔吉斯斯坦有超过 70 次的冰湖溃决灾难案例发生,对下游造成了巨大的经济损失^[38]。在过去 50 年里,美国雪崩死亡人数呈现稳定性增长趋势,仅 2004-2005 年冬天,就有 28 人死于雪崩事件^[39]。2012 年 4 月 8 日,巴基斯坦北部锡亚琴冰川地区遭遇近 20 年来最大的一次雪崩,139 人全部遇难^[40]。特别地,2012-2016 年,阿富汗东北部巴达赫尚省遭遇多起雪崩,导致至少 350 人死亡。2012 年 2 月,欧亚大陆遭遇极寒和大雪袭击仍在持续,极端天气已致逾 300 人死亡。

中国冰冻圈灾害主要发生在天山、喜马拉雅山、念青唐古拉东段、喀喇昆仑山、青藏高原、黄河宁蒙山东段、西部牧区。其中,20 世纪 30 年代至 2013 年,中国西藏自治区有记录的冰湖溃决灾害呈增加趋势,截至 2013 年 8 月,西藏自治区累计发生冰湖溃决灾害超过 40 次,累计死亡 715 人,冲毁大小桥梁 88 座,毁路超过 185 km^[41]。1951-2002 年,西藏自治区发生 119 次雪灾,雪灾致死 325 余人,死亡牲畜超过 1 090 万只。2000-2008 年,青海省每年因雪灾牲畜死亡数量介于 88~151 万头。青藏高原藏北及三江源地区由此成为全国三大雪灾高发中心之一^[42]。截至 2001 年,10 年间青藏公路大多路段路面下多年冻土层厚度在减薄,若气温持续上升,青藏、新藏、川藏、滇藏等道路冻融病害将更加严重。由于冰冻雨雪灾害常发生在中国中东部经济发达地区,对其农业、林业、交通、输电、通讯及航空危害极大。2008 年初,低温雨雪冰冻极端天气袭击中国南方大部分地区,波及 14 省区,其冰冻灾害因灾死亡人数达到 129 人,直接经济损失 1 516.5 亿元^[43]。

2.5 寒区重大工程

温度上升、冰雪消融、多年冻土退化显著影响着寒区的重大工程及其关键的基础设施。寒区重大工程主要指受冰冻圈变化显著影响的各类建(构)筑物工程,包括冻土区铁路、公路(路基、隧道、桥梁、涵洞)、输油(气)管道工程、输变电工程、光缆

工程、水利工程、房建工程等。其中,作为重大工程构筑物基础的地质载体,冻土对重大工程影响更为明显。因冻土的特殊组构及温度敏感性,会产生许多特殊自然现象,如冻胀、融沉、冻拔、冻裂、冰锥、冻融分选、融冻泥流等,对工程建筑有极大影响,其中,冻胀和融沉现象是影响重大工程结构物稳定性和使用寿命的两个主要问题。气候变暖使多年冻土退化、季节融化深度加大,寒区各类构筑物均广泛发生着冻胀和融沉灾害,冻土灾害具有显著的季节性、广泛性、频发性和反复性以及潜在性^[44]。北半球气候变化正在导致多年冻土强烈退化和升温,地下冰融化,使北半球多年冻土区各种构筑物处于冻融灾害的高风险区,因而得到了各国普遍关注^[45]。

例如,1978-1983年间,为稳定冻土沉降、修复桥涵、恢复纵坡和更新轨枕等,加拿大吉勒姆(Gillam)至丘吉尔(Churchill)间线路修复重建工作花费高达3 000余万美元^[46]。基于各种气候变化模式的北半球多年冻土区潜在灾害风险评估结果显示,美国阿拉斯加 Trans-Alaska、俄罗斯西伯利亚 Nadym-Pur-Taz,加拿大西北地 Norman Wells 输油(气)管道工程等基本位于潜在冻融灾害高风险区^[47]。其中,加拿大西北地区 Norman Wells 输油管道先后6次因为冻融滑坡问题导致管道弯曲变形,并使管道发生褶皱,为管道管理带来极大风险。

中国黑龙江省漠河-大庆油气管道2011年投入运营以来,先后确定了65个强冻胀和冰锥易发区域,32个融沉区域^[48]。近年来,青藏公路破坏率逐年增大,维护整治愈来愈频繁,整治维护费用高达30亿元。尽管青藏铁路提出了“冷却路基”筑路技术^[49],但由于气候变化和宽幅面沥青路面热效应作用,青藏高速公路仍无法移植应用“冷却路基”技术,亟待研究适应气候变化修筑技术。未来100年内,若气温持续上升,冻土退化将加剧,青藏公路等道路危害将会更加严重。当然,冰湖溃决、冰川消融洪水、冰川泥石流、风吹雪、雪崩、海冰范围变化等均会威胁到重大工程及其运营的安全性。

2.6 海岸带及低洼岛国安全

冰冻圈是影响全球海平面变化的主要因素之一。海平面上升已经成为全球性重大环境问题,引起全球科学家和各国政府的高度关注。冰冻圈快速变化形成的海平面上升已成为海岸及低洼岛国最大

的威胁。近百年验潮站资料显示,全球平均海平面上升速率为 $1 \sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,而卫星测高、GRACE 卫星重力和浮标数据(2005-2013年)则显示,总海平面变化、海水质量变化和比容海平面变化的趋势分别为 $(2.60 \pm 0.20) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $(1.70 \pm 0.20) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $(0.70 \pm 0.20) \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,质量引起的海平面变化约占总变化趋势的三分之二^[50]。

最新研究表明,2003年以来,冰冻圈融化的水量可能超过海水热膨胀而成为海平面上升的最主要贡献者,其中山地冰川和冰帽的贡献排在第一位^[51-53]。另外,还有研究显示^[54],预计到2030年,2.5亿人面临海平面上升的压力,并迫使或刺激人口迁移。海平面升高优先波及和影响海岸和低洼岛国宜居的生存环境。伴随着海平面的上升,涌浪漫顶和冲刷则可能越来越频繁,海岛和海岸淡水透镜体将受破坏,进而波及居民生活和生产用水。

2005年,普卡普卡环礁库克群岛(Pukapuka Atoll Cook Islands)的风暴潮便导致淡水透镜体变苦,之后11个月才恢复至人类使用标准^[55]。同时,海平面上升还可能造成风暴潮上岸,影响沿海地区耕地种植、水产养殖及其居民生活,而洪涝灾害将可能加重,海水入侵,城市建设费用剧增等都有可能发生^[56]。现在大多数居所、基础设施和产业发展都位于小岛海岸边缘低地,致使人口、基础设施集聚和工农业、旅游和其它产业活动密集,暴露性显著增大,淡水资源需求压力显著增加。这些沿海低洼地区处于海平面上升及其次生灾害影响的高风险区,其旅游业、淡水资源、渔业和农业资源、人类聚居区、金融业、文化遗产已受到或即将受到严重的负面影响^[57-58]。

2001年,太平洋岛国图瓦卢(Tuvalu)领导人发表声明,因对抗海平面上升的努力告以失败,将举国迁至新西兰,图瓦卢将成为第一个因海平面上升而举国迁移的国家^[59]。2002年开始,图瓦卢开始向近邻新西兰移民,截至2007年,移民数达5 000人。另外,太平洋岛国基里巴斯因海平面上涨,面临被淹没危险,迫不得已时可能考虑举国搬迁。海平面上升将对海岸和岛国国家所有部门产生巨大负面影响。而且,马尔代夫、基里巴斯、图瓦卢、托克劳群岛、安圭拉、瑙鲁、西萨摩亚、特克斯和凯科斯群岛等岛国各类资源贫乏、经济落后,应对海平面上升的适应能力极为有限。特别地,联合国大会第58/213号决议审查通过《小岛屿发展中国家可持续发展行动纲领》,旨在降低小岛屿发展中国家

由于灾害应对和恢复能力有限而存在的脆弱性。

2.7 极地栖息地系统

冰冻圈为寒区定居和迁徙种群提供生境服务,也包括为人类提供居所。例如,冰冻圈为陆地、海洋生物提供了丰富的异质性生存空间和多样化的庇护场所,其中,北极、南极及其亚北极地区大范围冰冻圈还为大量生物及人类提供了栖息地。同时,冰冻圈也是一些特有珍稀或濒临灭绝的野生生物的种源保存地。例如,海冰为各类与冰相关生物提供一个极端和可变的生境和栖息地,海冰所支撑的生物群落(如微生物、藻类、原生动物、小型后生动物、虫类和甲壳动物到北极雪鹅、燕鸥、象牙鸥、小海雀、南极磷虾、企鹅、海豹、海象、海狮、海狗、北极狼、北极狐、北极雪鹿、北极熊、北极鳕鱼、鲸类等)在极地生态系统中起着至关重要的作用。海冰内部和冰底生长的冰藻则是海冰区生物的重要食物来源,更是冰下海底生物群落的重要食物链。然而,海冰范围的持续减少正在破坏北极的生态系统,并且可能意味着比此前认为的更多的物种将因此灭绝。研究显示,当海冰在春天早早融化时,大多数海鸟和大型浮游动物的丰度会降低。国际自然保护联盟(IUCN)报告指出,北极熊在未来35年减少超过30%的可能性高达70%^[60-63]。

高度依赖冰冻圈及其环境的两极及其亚北极地区受影响极为严重,该区主要面临的最紧迫问题栖息地变小、道路受阻、生物多样性减少、食物来源减少、文化结构受损。栖息地的消失和破碎是生物多样性消失的最主要原因。在两极地区,生物多样性非常重要,其生物多样性是两极地区人民物质生活和精神生活的一个重要部分。栖息地的消失直接导致物种的迅速消亡,而栖息地的破碎化则导致栖息地内部环境条件的改变,使物种缺乏足够大的栖息和运动迁徙空间,并有利于外来物种的侵入。一些靠海冰生存的动物,因海冰减少可能面临濒危的危险。例如,对于北极动物来说,海冰的消失代表着一种新的严重障碍,尤其是它们在岛屿之间的移动将受到阻碍。皮尔里驯鹿会在连接这些岛屿的冰面上穿行,以寻找食物和住所、交配并抚养幼崽。海冰的消失则会影响它们的繁育能力和多样性^[64]。同时,由于海冰减少,以前道路融化,进而波及两极地区交通网络。例如,格陵兰岛西部迪斯科岛上的猎人正在放弃传统的狗拉雪橇,而改用小船和摩托艇。伴随着气候变化,两极及亚北极地区海洋和陆地生态-经济社会系统都处于危险之中,不仅危

害其生物多样性,对原著民文化生活结构也产生深远影响。诸如,爱斯基摩人、雅库特人、涅涅茨人等原著村落主要靠捕猎海豹、鲸、海象和鱼类等为生。然而,冰川融化,海平面上升,海冰减少,原著居民很难捕到海豹。受冰冻圈强烈变化的影响,一些极区社区已从与他们传统和文化认同相联系的历史家园迁移,其原著部落正受日益消失的潜在威胁。爱斯基摩人自己知道,他们并未破坏环境,而是来自工业国的污染正威胁着他们的生活方式。

3 适应性管理战略

3.1 指导思想

随着人类开发自然活动的不断加剧与升温,以气候变化和土地利用变化为代表的全球变化日益凸显,生态与环境问题大量涌现,国际科学界开始讨论和研究人类社会应如何预防、减缓、响应和适应全球变化并采取相应对策,其适应性已成为全球变化科学研究和可持续发展研究的核心概念和重点领域^[2,65-66]。冰冻圈变化影响的适应性管理主要是指为应对冰冻圈变化现状或未来在自然和经济社会系统的影响而采取的管理措施、政策或战略,基本原则为“以人为本”和“统筹区际和代际公平”,其主要目的在于减轻冰冻圈快速变化的不利影响、降低自然和经济社会系统防御其不利影响的脆弱性,以实现冰冻圈生态经济社会系统的健康、持续发展。冰冻圈变化适应性战略可为全球行动或为区域行动或为个人行为,其重点在于提升经济社会系统对冰冻圈变化风险的管控能力和预估能力。

3.2 适应性管理战略

3.2.1 冰冻圈变化观(监)测战略

冰冻圈变化长期观(监)测战略的实施是冰冻圈对经济社会系统影响分析与可持续发展的基础。冰冻圈不同要素变化对经济社会系统不同部门影响各异、程度不等。同时,冰冻圈不同要素对气候变化的响应在过程和时间上存在差异,其影响亦存在较大的不确定性,只有通过全球不同类型、不同规模冰冻圈变化规律进行系统研究,才能全面揭示冰冻圈系统对气候的响应过程和机理,模拟预测其未来变化态势,进而深入了解冰冻圈变化对经济社会系统负面影响的程度。准确掌握冰川、冻土、积雪、海冰的时空分布及其变化特征,是理解认识冰冻圈变化对经济社会系统综合影响的关键,也有助于提高冰冻圈变化预测水平、冰冻圈水资源管理、冰雪旅游资源利用、冰冻圈灾害风险管控能力。冰

冻圈快速变化的现状和未来影响及其影响程度的判别,乃至早期预警体系的建立,均需对不同冰冻圈要素变化长时间序列和空间尺度上的长期观(监测),以及对冰冻圈影响区人口、经济社会活动的动态跟踪调查。鉴于冰冻圈环境恶劣、区位不便,其变化观(监测)难度较大,其冰冻圈变化观(监测)还需进一步完善大尺度、立体、动态、连续的多源卫星遥感监测体系,同时还需要与冰冻圈主要要素地面观(监测)及其动态变化模拟研究相结合。

3.2.2 冰冻圈水资源优化配置战略

全球干旱区生态和社会景观格局往往由冰冻圈水资源时空分布决定,冰冻圈水量时空分布决定了下游,特别是下游绿洲生态-社会经济系统的空间配置和功能分区。因此,亟需对全球干旱区冰冻圈水资源进行优化配置,旨在促使下游生态-经济社会系统水资源利用效率最大化。鉴于冰冻圈对径流显著的“调丰补枯”作用,水资源优化配置需从不同时空尺度进行优化配置。在空间上,包括上、中、下游不同梯度的水资源空间配置,以及根据冰冻圈水资源禀赋与不同产业需水情况在不同区域尺度上的水资源跨流域优化配置。在时间上,包括根据冰冻圈“调丰补枯”年内特征进行优化配置,以及根据冰冻圈水资源年际变化特征进行优化配置。冰冻圈水资源优化配置的关键是将“水资源与生态-经济社会系统”看成一个整体,综合集成研究冰冻圈水资源与生态-经济社会系统的互动关系,其互动关系研究包括两方面内容,一是通过相关冰冻圈流域水文模型进行评估和模拟不同时空尺度冰冻圈水资源变化情况,以揭示其水资源演变规律,二是系统分析当前和未来区域土地类型变化、社会经济发展情况,以及生产、生活用水和生态耗水的强度和规模,以合理预估未来水资源在不同产业体系需求量和利用效率。通过区域水资源供需平衡和用水效率的统筹分析,提出以维持区域生态-社会经济系统可持续发展的水资源合理优化配置的阈值(配额),结合对未来冰冻圈变化的认识,调整现有产业结构和相应的用水结构体系,进而发展“量水而行”的经济体系,以减轻未来冰冻圈变化对生态-经济社会系统可持续发展的影响程度。

3.2.3 冰冻圈生态保护与生态工程战略

全球冰冻圈生态安全屏障作用显著,对人类服务功能价值巨大。然而,因气候变化,冰冻圈快速消退,其生态安全屏障及其服务功能受到不同程度的威胁^[67]。因此,亟需加强全球冰冻圈国家生态

保护战略的实施及其生态工程的建设,其目的在于使冰冻圈生态系统能更好地服务于寒区各国经济社会可持续发展。针对冰冻圈快速变化对生态系统、经济社会系统的综合影响,各国正积极采取各类措施以应对冰冻圈变化带来的不利影响。例如,针对冰冻圈冰川、冻土、积雪各要素重要的水源涵养和水土保持服务功能,中国相继在青藏高原三江源和新疆维吾尔自治区天山等地建立了生态保护区,启动了西藏自治区生态屏障保护、新疆维吾尔自治区塔里木河综合治理工程、青海省“三江源”生态与水源保护工程和甘肃省祁连山生态保护工程等。中国冰冻圈生态保护工程的实施,有效地保护和恢复了冰冻圈生态环境,提高水源涵养服务功能,极大地改善冰冻圈影响区的农牧民生产生活条件,为建成中国生态安全屏障做出了巨大贡献。尽管全球冰冻圈地区产业单一,但却拥有极为丰富的气候、植被、鱼类、水资源、旅游、民族历史等文化与自然资源。因此,这些国家或地区亟需围绕这些资源和产业,以冰冻圈各要素自身特点及其变化影响为基础,积极调整产业结构,优化产业布局,大力发展与冰冻圈资源环境承载力相适应的现代畜牧业、肉禽产业、渔业、乳制品产业、医药产业、草产业、森工产业、冰雪旅游,以及水利、光伏、风能、地热等清洁能源在内的生态产业体系。在生态产业发展过程中,要全面限制有损于寒区生态服务功能破坏的产业扩张,发展与当地资源环境承载力相适应的生态产业,从源头上杜绝环境破坏,通过加强生态保育,以增强冰冻圈不同区域的服务功能。

3.2.4 生态补偿与国家安全财政转移战略

人类的生存与发展高度依赖于冰冻圈提供的洁净水资源、适宜的气候环境、多样的旅游产品、深厚的文化结构,以及舒适的栖息地等服务。冰冻圈为人类提供了水资源、旅游产品及其他产品,促进了大气循环、生物地球化学循环与水文循环,维持景观和物种多样性。然而,由于气候变化,致使冰冻圈快速消融,并对其服务功能造成重大影响。经济社会系统对冰冻圈快速变化的响应高度依赖于它对经济社会系统影响的程度和损害(包括损失),以及减缓和适应这种负面影响的成本。然而,冰冻圈及其受影响严重国家或地区产业单一,人类活动较小,对全球变暖贡献极小,但受全球变暖及其冰冻圈快速变化影响却巨大。同时,冰冻圈气候恶劣、生态环境脆弱、经济容量和人口承载力极为有限,仅靠冰冻圈低收入国家或地区乃至受影响严重海岸

国家和海岛自身财力很难适应目前冰冻圈快速变化给经济社会系统带来的负面影响。因此,建立环境保护、生态重建与补偿的财政支持体制是提高冰冻圈服务功能,提升冰冻圈环境变化适应能力的重要举措之一。其中,财政转移包括国内转移或国与国之间转移。联合国及其各冰冻圈隶属国家或地区应该根据各国或地区受冰冻圈变化影响程度给予不同区域不同幅度的财政转移力度。同时,亟需加强对小岛及海岸低洼国家或地区地国际财政转移以及人力与技术援助。

3.2.5 冰冻圈灾害风险全过程管控战略

全球暖化强度和持续性越来越显著,其影响范围和程度在不断增加,气候灾害和冰冻圈灾害无论是频率、范围、强度还是灾害损失都呈增加趋势^[41-43,68],其中,冰冻圈灾害分布地域广、灾损大,呈频发、群发、多发和并发趋势,其灾害影响已成为冰冻圈经济社会可持续发展面临的重要问题。冰冻圈灾害乃自然与社会环境共同作用之结果,其致灾体自然风险较难克服,但承灾区风险管控能力的提升则可以减小或规避其灾害之自然风险。因此,亟需将风险全过程管控理念应用于冰冻圈多灾种综合风险评估与管理研究,以增强冰冻圈多灾种预警预报和防灾减灾能力。

与风险共存,始终做到居安思危、防患于未然,实施灾害风险全过程控制与预防是各类灾害风险管控的基本点和出发点。鉴于此,各国政府需围绕“以人为本”、“预防为主、避让与治理相结合”、“源头”控制向“全过程”管理转变、“突出重点、分步实施、逐步推进”理念为指导思想,通过非工程措施与工程措施相结合、政府主导与公众参与的有机结合,利用“灾害风险预防、风险转移、风险承担、风险规避”方法,逐步建立和完善集“灾害预警预报、风险处置、防灾减灾、群测群防、应急救援和灾后恢复重建”于一体的冰冻圈灾害综合风险管控体系。同时,深入分析冰冻圈灾害成因机理,强化防灾减灾基础知识的社区宣传和普及,让承灾区居民知晓冰冻圈灾害险情和灾情信息,增强其防灾、避灾、减灾意识和自我保护能力,提高冰冻圈承灾区综合防灾减灾能力,以最大限度地减小或规避潜在冰冻圈灾害灾损。

3.2.6 冰冻圈重大工程安全保障提升战略

冰冻圈变化对重大工程具有显著影响,其影响不同,防治技术各异。冰川、积雪、海(河、湖)冰等主要以冰冻圈事件(如雪崩、冰崩、冻融、冰川跃

动、冰湖溃决、冰雪洪水、凌汛等)方式影响重大工程的建设、安全运营和服役性,其保障机制贵在冰冻圈灾害防范与排险方面。冻土作为工程构筑物的特殊地基土,冻融作用和冻土热-力学稳定性变化均会直接影响着工程稳定性,其保障机制贵在工程技术标准的提升和冻土热力稳定性变化的防治方面^[69]。

针对冰冻圈灾害对重大工程影响,其防治技术主要根据不同的冰冻圈灾害类型和工程类型,提出相对应的工程防治技术,并监测、模拟和预测这些防治技术对实际工程的防护效果。与冰冻圈灾害有关的重大工程设计主要考虑50年和100年设防标准和原则,如冰冻圈区的公路、铁路、输油管道、电讯等基础设施均需考虑冰川洪水、冻融变化、海冰变化、暴风雪、雪崩等冰冻圈事件的影响。针对冰冻圈重大工程自身安全问题,其防治技术主要是解决冻土冻胀与融沉变化对重大影响的问题,其工程设计要系统研究不同工程构筑物类型、施工原则和特殊技术措施和施工方法。防治冻胀破坏的安全保障技术一般针对季节冻土区的工程,工程技术措施通常以防排隔“水”和减小冻深为主,最大限度地减小冻胀和冻融翻浆破坏。防治融化下沉破坏的安全保障技术一般主要针对多年冻土区,路基工程、桥梁、隧道工程、桩基础工程等均需要考虑应冻土融化而产生的融化下沉问题。例如,青藏铁路冻土工程提出了冷却路基、降低多年冻土的设计思路和动态设计原则^[49],提出了调控热的传导、对流和辐射的冷却路基技术,给出了相应的冷却路基技术的设计参数,从根本上解决了高温高含冰量冻土路基稳定性的核心技术问题。对于冰冻圈变化对北极及其海岸重大工程的影响研究,目前还不够清晰,亟需加强冰/冻土-水-结构物的相互作用、抗冰结构物的结构措施和材料性能、海冰物理和力学等方面的综合研究^[70]。

3.2.7 环境保护与综合治理宣教战略

人类活动温室气体排放是全球变暖乃至冰冻圈快速变化的主要驱动因素。人类活动主要是指人为温室气体排放,包括化石燃料燃烧和毁林等土地利用变化。工业化以来温室气体浓度的增加主要是由使用化石燃料排放和土地利用排放造成。1750-2011年,人为CO₂累积排放量为555 GtC。其中,化石燃料燃烧和水泥生产释放375 GtC,毁林和其他土地利用变化释放180 GtC。1750年以来人为CO₂累积排放量的一半左右来自于近40年的排放,

且 78% 的排放增长来自化石燃料燃烧和工业过程^[71]。化石燃料燃烧和毁林活动幅度及其对全球变暖乃至冰冻圈快速变化贡献与全球工业和农林牧副渔产业结构的合理性与否息息相关, 同时与全球人类的消费结构紧密相连。全球环保宣传教育的普及和落实对于减缓全球变化及其冰冻圈变化具有举足轻重的作用。国家环保总局与教育部联合对公众环境意识的调查显示, 公众环保知识越多, 环境意识越强, 环境道德水平越高, 对生态环境事业的参与程度就越高。加强生态环境保护道德教育, 提高全民环境道德意识是全球生态文明建设的一项十分紧迫的任务。

因此, 需要从建设全国生态文明发展大局出发, 把生态环境保护放在突出位置, 加强冰冻圈服务功能、生态屏障功能的科普与环境保护道德教育, 提高全球民众对冰冻圈和生态环境变化的认识和关注, 敦促各国各级政府部门和社会公众给予世界各国生态环境保护更多的认同与参与。最终, 使各国政府、企业、民众参与到生态管理、清洁生产和绿色消费的全球生态文明建设进程之中。

4 结论与展望

冰冻圈对经济社会系统的综合影响分析旨在提高公众对冰冻圈服务及价值的认知水平, 增强公众对冰冻圈资源的科学利用、环境保护及综合治理意识。气候变化对全球自然生态系统和社会经济系统产生深刻的影响, 甚至制约全人类的可持续发展, 为遏制逐渐失控的全球变暖趋势, 减缓行动刻不容缓^[72]。冰冻圈变化与人类生存关系极为密切, 当前亟需定量确定冰冻圈变化对世界各国经济社会的影响程度, 并由此制定适应冰冻圈变化影响的国家战略。当然, 冰冻圈的快速变化通过气候系统产生作用, 冰冻圈及其气候变化对经济社会系统的影响往往交织在一起, 且相互作用、相互影响, 其减缓、适应冰冻圈快速变化影响不仅依赖于冰冻圈经济社会系统的响应, 更重要的需要气候变化影响的全球、区域尺度适应得以实现。IPCC 第五次评估报告显示^[73], 经济和人口增长是驱动温室气体排放的主要因素。1970 年以来的 CO₂ 累积排放约占总历史累积排放的一半, 最近 10 年是排放量增加最多的 10 年。在全球尺度上, 控制温室气体排放是减缓气候变化乃至冰冻圈快速变化的关键性适应战略, 具体措施如优化产业结构和能源结构、大力发展可再生能源、节能降耗、提高能源效率、增加森

林草地碳汇、发展低碳产品、提倡绿色消费等。因此, 全球全社会共同行动、共同参与和共同决策是实现减缓气候变化和冰冻圈变化的关键所在。

参考文献 (References):

- [1] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Introduction to cryosphere science[M]. Beijing: Science Press, 2018. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [2] IPCC. Climate change 2013; the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Changnon S A. Present and future economic impacts of climate extremes in the United States[J]. Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 2003, 5(3/4):47-50.
- [4] Visser H, Bouwman A, Petersen A, et al. Statistical study of weather-related disasters; Past, present and future[M]. Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012.
- [5] Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, et al. 21st century climate change in the European Alps: a review[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 1138-1151.
- [6] Kane S M, Shogren J F. Linking adaptation and mitigation in climate change policy[J]. Climatic Change, 2000, 45(1): 75-102.
- [7] Smit B, Pilifosova O. Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity[M]//McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 877-912.
- [8] Grothmann T, Patt A. Adaptive capacity and human cognition: The process of individual adaptation to climate change[J]. Global Environmental Change, 2005, (15): 199-213.
- [9] Vaughan D G, Comiso J C, Allison I, et al. Observations: cryosphere[M]//Stocker T F, Qin Dahe, Plattner G K, et al. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(1): 3-16. [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.]
- [11] Wu Tonghua, Li Shuxun, Cheng Guodong, et al. Using ground penetrating radar to detect permafrost degradation in the northern limit of permafrost on the Tibetan Plateau[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 41: 211-219.
- [12] Liu Guangyue, Zhao Lin, Xie Changwei, et al. Variation characteristics and impact factors of the depth of zero annual amplitude of ground temperature in permafrost regions on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1189-1200. [刘广岳, 赵林, 谢昌卫, 等. 青藏高原多年冻土区地温年变化深度的变化规律及影响因素[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1189-1200]
- [13] Zhao Lin, Marchenko S S, Sharkhuu N, et al. Regional changes of permafrost in Central Asia[C]//Proceedings of 9th International Conference on Permafrost, 2008 Fairbanks, Alaska, US.

- 2008; 2061–2076.
- [14] Wang Chunxue, Li Dongliang. Spatial-temporal variations of snow cover days and the maximum depth of snow cover in China during recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 248–252. [王春学, 李栋梁. 中国近 50 年积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 248–252.]
- [15] Kintisch E, Kerr R A. Global warming, hotter than ever[J]. *Science*, 2007, 318(5858): 1846–1847.
- [16] Hallegatte S, Przulski V, Vogt-Schilb A. Building world narratives for climate change impact, adaptation and vulnerability analyses[J]. *Nature Climate Change*, 2011, 1(3): 151–155.
- [17] Rheinberger C. Learning from the past: statistical performance measures for avalanche warning services[J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 1519–1533.
- [18] Frey H, Haeberli W, Linsbauer A, et al. Multi level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2010, 10: 339–352.
- [19] Wang Shijin, Jiao Shitai. Mountain glacier tourism and climate change: impacts and adaptation[M]//Mihalić T, Gartner W C. *Tourism and developments-issues and challenges*. Nova Science Publishers, Inc., 2013: 93–119.
- [20] Rixen C, Telch M, Lardelli C, et al. Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential[J]. *Mountain Research and Development*, 2010, 31(3): 229–236.
- [21] Wang Shijin, Cao Weihong. Climate change perspectives in an Alpine area, Southwest China: a case analysis of local residents' views[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 53: 211–219.
- [22] Orlove B, Wiegandt E, Luckman B H. The place of glaciers in natural and cultural landscapes[M]//Orlove B E, Wiegandt E, Luckman B H. *Darkening peaks: glacier retreat, science and society*. Berkeley: University of California Press, 2008: 7–25.
- [23] Kaplan J O, New M. Arctic climate change with a 2 °C global warming: timing, climate patterns and vegetation change[J]. *Climatic Change*, 2006, 79(3/4): 213–241.
- [24] Ims R A, Ehrlich D. Arctic Biodiversity Assessment, Terrestrial Ecosystems[M]. Iceland: Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), 2012.
- [25] Tape K, Sturm M, Racine C. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 686–702.
- [26] Wang Genxu, Li Yuanshou, Wang Yibo. Land surface process and environmental change in the river sources of Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2010. [王根绪, 李元寿, 王一博. 青藏高原河源区地表过程与环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [27] State Forestry Bureau. Bulletin of degradation and desertification state in China[R]. State Forestry Bureau, 2011. [国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况公报[R]. 国家林业局, 2011.]
- [28] Radic V, Hock R. Glaciers in the Earth's hydrological cycle: assessments of glacier mass and runoff changes on global and regional scales[J]. *Surveys in Geophysics*, 2014, 35, 813–837.
- [29] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. *Science*, 2007, 316: 847–851.
- [30] Aerts R, Cornelissen J H C, Dorrepaal E. Plant Performance in a warmer world: general responses of plants from cold, northern biomes and the importance of winter and spring events[J]. *Plant Ecology*, 2006, 182: 65–77.
- [31] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects[J]. *Journal of glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513–527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513–527.]
- [32] Hock R, Jansson P, Braun L N. Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming [J]. *Global Change and Mountain Regions*, 2005, (23): 243–252.
- [33] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Fengjing, et al. Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climatic change[J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 1–7.
- [34] Hu Ruji, Jiang Fengchun, Wang Yajun. Assessment on the glacial water resources in Xinjiang, China [J]. *Arid Zone Research*, 2003, 20(3): 187–188. [胡汝驥, 姜逢清, 王亚俊. 新疆雪冰水资源的环境评估[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(3): 187–188.]
- [35] Gao Xing, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi inland river basin[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 344–346. [高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 344–346.]
- [36] Whiteman C A. *Cold region hazards and risks*[M]. New York: John Wiley and Sons Publishing, 2011.
- [37] Carey M P. *People and glaciers in the peruvian andes; a history of climate change and natural disasters, 1941–1980*[D]. California: Dissertation in History in the Office of Graduate Studies of the University of California, 2005.
- [38] Janský B, Šobr M, Engel Z. Outburst flood hazard: case studies from the Tien-Shan Mountains, Kyrgyzstan [J]. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, 40(4): 358–364.
- [39] Silvertown N A, McIntosh S E, Kim S, et al. Avalanche safety practices in Utah[J]. *Wilderness and Environmental Medicine*, 2007, 18: 264–270.
- [40] Wang Shijin, Ren Jiawen. A review of the progresses of avalanche hazards research [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1529–1536. [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.]
- [41] Wang Shijin, Qin Dahe, Xiao Cunde. Moraine-dammed lake distribution and outburst flood risk in the Chinese Himalaya [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(225): 115–126.
- [42] Wang Shijin, Wei Yanqiang, Fang Miao. Integrated risk assessment of snow disaster in the Three Rivers Source Region, China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 22(2): 108–116. [王世金, 魏彦强, 方苗. 青海省三江源牧区雪灾综合风险评估与管理[J]. *草业学报*, 2014, 22(2): 108–116.]
- [43] Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China. Ministry of Civil Affairs informed the recent snow and ice disaster and relief work [EB/OL]. (2008-02-25) [2016-10-12]. <http://www.mca.gov.cn/article/zwgk/mzyw/200802/20080200011960.shtml>. [民政部. 民政部通报近期低温雨雪冰冻灾情和救灾工作情况[EB/OL]. (2008-02-25) [2016-10-12]. <http://www.mca.gov.cn/article/zwgk/mzyw/200802/20080200011960.shtml>.]
- [44] Wu Qingbai. Progress and major achievements of permafrost engineering in China[M]//Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, CAS. *50 years of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Sciences in China*. Bei-

- jing: Science Press, 2009. [吴青柏. 中国冻土工程的进展和主要成就[M]//中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 中国寒区旱区环境与工程 50 年. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [45] Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Subsidence risk from thawing permafrost[J]. *Nature*, 2001, 410: 889–890.
- [46] Xue Xingong, Bao Liming, Zhou Xiaowen. Report on the Canadian permafrost railway[J]. *Science and Technology Exchange*, 2002, 32(1): 1–7. [薛新功, 包黎明, 周孝文. 加拿大冻土铁路考察报告[J]. *科技交流*, 2002, 32(1): 1–7.]
- [47] Nelson F E, Anisimov O A, Shiklomanov N I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions[J]. *Natural Hazards*, 2002, 26: 203–225.
- [48] Wang Yongping, Jin Huijun, Li Guoyu, et al. Secondary geohazards along the operating Mohe – Jagdaqi section of China-Russia Crude Oil Pipeline in permafrost regions: a case study on a seasonal frost mound at the Site MDX364[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 731–739. [王永平, 金会军, 李国玉, 等. 漠河 – 加格达奇段多年冻土区中俄原油管道运营以来的次生地质灾害研究——以 MDX364 处的季节性冻胀丘为例[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 731–739.]
- [49] Cheng Guodong. A roadbed cooling approach for the construction of Qinghai-Tibet Railway[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2005, 42: 169–176.
- [50] Feng Wei, Zhong Min, Xu Houze. Global sea level changes estimated from satellite altimetry, satellite gravimetry and Argo data during 2005–2013[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(2): 471–477. [冯伟, 钟敏, 许厚泽. 联合卫星测高、卫星重力和海洋浮标资料研究年的全球海平面变化[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(2): 471–477.]
- [51] Cazenave A, Lombard A, Llovel W. Present-day sea level rise: a synthesis[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340(11): 761–770.
- [52] Cazenave A, Dominh K, Guinehut S, et al. Sea level budget over 2003–2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo[J]. *Glob Planet Change*, 2009, 65: 83–88.
- [53] IPCC. Workshop Report of the Intergovernmental Panel on climate change workshop on sea level rise and ice sheet instabilities [M]. Bern: University of Bern, 2010.
- [54] DARA and Climate Vulnerable Forum. Climate vulnerability monitor: a guide to the cold calculus of a hot planet[R]. Fundación DARA Internacional, 2012.
- [55] Terry J P, Falkland A C. Responses of atoll freshwater lenses to storm-surge overwash in the Northern Cook Islands[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(3): 749–759.
- [56] Zheng Xianxin, Wu Qiang, Ying Yufei, et al. Impact s of relative sea level rising and strategies of control of land subsidence in coastal region of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2001, 17(6): 51–55. [郑铣鑫, 武强, 应玉飞, 等. 中国沿海地区相对海平面上升的影响及地面沉降防治策略[J]. *科技通报*, 2001, 17(6): 51–55.]
- [57] Emmanuel K, Spence B. Climate change implications for water resource management in Caribbean tourism[J]. *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*, 2009, 1(3): 252–268.
- [58] Cashman A, Nurse L, Charlery J. Climate change in the Caribbean: the water management implications[J]. *Journal of Environment and Development*, 2010, 19(1): 42–67.
- [59] Walsh K J E, McInnes K L, McBride J L. Climate change impacts on tropical cyclones and extreme sea levels in the South Pacific: a regional assessment[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80: 149–164.
- [60] Liu Zhongmin, Zhang Demin. Ocean domain unconventional safety intimidate and the present international connection influence[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2004(4): 60–64.
- [61] ACIA. Impacts of a warming arctic: Arctic climate impact assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [62] UNEP. Global outlook for ice and snow[M]. Arendal, Norway: UNEP/GRID-Arendal, 2007: 48–49.
- [63] Renner M, Salo S, Eisner L B, et al. Timing of ice retreat alters seabird abundances and distributions in the southeast Bering Sea [J]. *Biology letters*, 2016, 12(9): 20160276.
- [64] Poulin M, Daugbjerg N, Gradinger R, et al. The pan-Arctic biodiversity of marine pelagic and sea-ice unicellular eukaryotes: a first-attempt assessment [J]. *Marine Biodiversity*, 2011, 41(1): 13–28.
- [65] Chen Yiyu. Some opinions for carrying out regional adaptation of global change research [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 495–499. [陈宜瑜. 对开展全球变化区域适应研究的几点看法[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 495–499.]
- [66] Convertino M, Foran C M, Keisler J M, et al. Enhanced adaptive management: integrating decision analysis, scenario analysis and environmental modeling for the everglades [M]. London, UK: Macmillan Publishers Limited, 2013.
- [67] Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3–12. [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3–12.]
- [68] Walter L F. Climate change and disaster risk management [M]. Springer, 2013.
- [69] Wu Qingbai, Niu Fujun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 115–130. [吴青柏, 牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性 [J]. *科学通报*, 2013, 58(2): 115–130.]
- [70] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Cryosphere science development strategy [M]. Beijing: Science Press, 2018. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学发展战略 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [71] Qin Dahe, Zhou Botao. Climate change and environmental protection [J]. *Impact of Science on Society*, 2014, 4(2): 17–22. [秦大河, 周波涛. 气候变化与环境保护 [J]. *科学与社会*, 2014, 4(2): 17–22.]
- [72] Qin Dahe. Climate change science and sustainable development [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874–882. [秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 874–882.]
- [73] IPCC. Climate Change 2014: impacts, adaptations and vulnerability. Fifth Assessment Report of Working Group II [M]. UK: University Press, 2014.

Integrated impacts of cryosphere change on the economic and social system and its adaptive management strategies

WANG Shijin¹, DING Yongjian¹, XIAO Cunde²

(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)

Abstract: The cryosphere is the most direct and most sensitive spheres in climate system. In the context of global change, the interaction cryospheric changes with biosphere, lithosphere, hydrosphere, atmosphere and anthroposphere increasingly intensified. Especially, the rapid cryosphere changes had also a wide-ranging and profound negative impact on economic and social systems, and even endangered human well-being, and the healthy, harmonious and sustainable development of economic and social systems. Taking into account the geographical disadvantage of cryosphere and its relatively backward economic level, its ability to cope with or resist cryosphere changes is extremely limited. Currently, the adaptation is still the main way to tackle climate change impacts on cryosphere. The analysis of integrated impacts of cryosphere on economic and social system is the basis to adapt to the rapid change of cryosphere, and its adaptive management strategy is the ultimate goal to mitigate the adverse effects of rapid cryosphere changes and reduce the vulnerability for defending the adverse effects from natural, economic and social system

Key words: cryosphere change; integrated impacts; adaptive management

(本文编辑: 周成林)