

DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2019.139

苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15 (4): 395-404

Su B, Gao X J, Xiao C D. Interpretation of IPCC SR1.5 on cryosphere change and its impacts [J]. Climate Change Research, 2019, 15 (4): 395-404

IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读

苏勃¹, 高学杰², 效存德¹

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 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029

摘要: 在气候系统五大圈层中, 冰冻圈对气候变化高度敏感, 近几十年来气候变暖已引起全球冰川、冻土、积雪和海冰等冰冻圈要素加速退缩, 进而对区域水资源、生态环境、社会经济发展和人类福祉产生了深远影响。2018年10月, IPCC在韩国仁川公布了《全球1.5℃增暖特别报告》(SR1.5)。报告较系统地呈现了关于全球1.5℃温升目标的基本科学认知, 并探讨了可持续发展及消除贫困目标下加强全球响应的路径。在冰冻圈相关内容方面, 报告呈现了有关全球1.5℃和2℃温升下冰冻圈(主要是海冰和多年冻土)变化及其对大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和人类圈影响的一些亮点结论, 还关注了全球1.5℃和2℃温升下冰冻圈相关的气候变化热点(区)和地球系统临界因素。报告指出, 随着温度不断升高, 冰冻圈及其相关要素和热点(区)面临的危险将不断增加, 但将全球温升控制在1.5℃而不是2℃或更高时的危险将大大降低。

关键词: 全球1.5℃增暖; 冰冻圈; 影响; 可持续发展

引言

随着全球气候系统持续变暖及其对社会—生态系统带来的风险不断增大, 减缓和适应气候变化已成为人类可持续发展面临的必然选择。2015年《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)近200个缔约方在法国巴黎一致通过《巴黎协定》, 承诺各方将以“国家自主贡献”的方式, 把全球平均温升较工业化前水平控制在2℃内, 并努力争取把温升控制在1.5℃内。为满足社会各界对全球

1.5℃和2℃温升的科学认知需求, 2016年4月IPCC接受UNFCCC邀请, 开始准备《全球1.5℃增暖特别报告》(简称SR1.5)。2018年10月, IPCC第48次全会在韩国仁川正式审议通过了报告决策者摘要并接受了全文^[1]。报告对科学、技术和社会经济方面的最新相关文献进行评估, 较系统地呈现了关于1.5℃温升的基本科学认知, 并探讨了可持续发展及消除贫困目标下加强全球响应的路径。特别地, 报告比较了将全球温升控制在不同阈值(1.5℃、2℃或更高)时给自然和

收稿日期: 2019-06-13; 修回日期: 2019-06-25

资助项目: 国家自然科学基金委重大项目(41690145); 国家自然科学基金面上项目(41671058); 北京师范大学引进人才项目(12807-312232101)

作者简介: 苏勃, 男, 博士研究生, geosubor@mail.bnu.edu.cn; 效存德(通信作者), 男, 教授, cdxiao@bnu.edu.cn

社会系统带来的影响的差异,包括极端气温、干旱、强降水、冰冻圈、淡水、海平面、海岸带和低洼地区、大洋温度和环流、生态系统、食物安全、城市、人体健康、主要经济部门和居民生计等方面^[1]。

在气候系统五大圈层中,气候变化对冰冻圈(包括冰川、冻土、积雪和海冰等)的影响首当其冲。过去几十年来,冰冻圈各要素加速退缩,对区域水资源、生态系统、社会经济系统(如农业、水电、旅游等)和人类福祉产生严重影响^[1]。那么,在全球1.5℃和2℃或更高温升下,冰冻圈各要素将如何变化?进而对区域社会-生态系统产生怎样影响?系统探讨这些问题既可给社会各界提供全面的有关冰冻圈变化和温控目标的科学认知,也有利于冰冻圈影响区选择适宜的可持续发展路径。鉴于此,本文主要对SR1.5冰冻圈变化及其影响相关亮点结论予以解读,并对相关研究进展

进行探讨。

1 全球1.5℃和2℃温升下的冰冻圈变化

冰冻圈是指地球表层具有一定厚度的负温圈层,其内部水体一般处于冻结状态^[2]。冰冻圈既是气候系统的组成部分,也是气候的产物,未来区域气温和降水等气象要素组合将共同决定冰冻圈变化。根据SR1.5:工业革命以来,人为引起的全球气候变暖已达到0.87℃,如果按当前增暖速率,预估在2030—2052年将达到1.5℃(高信度^①);温升1.5℃意味着全球几乎所有地区平均气温相比工业化前大幅增加(图1,高信度),而且在2℃升温下几乎所有陆地气温将继续增高(高信度);相比海洋,陆地升温幅度更大,北半球高纬度地区升温最大(高信度);未来温升下,预估北半球高纬度地区降水量也会增加(图1,高信

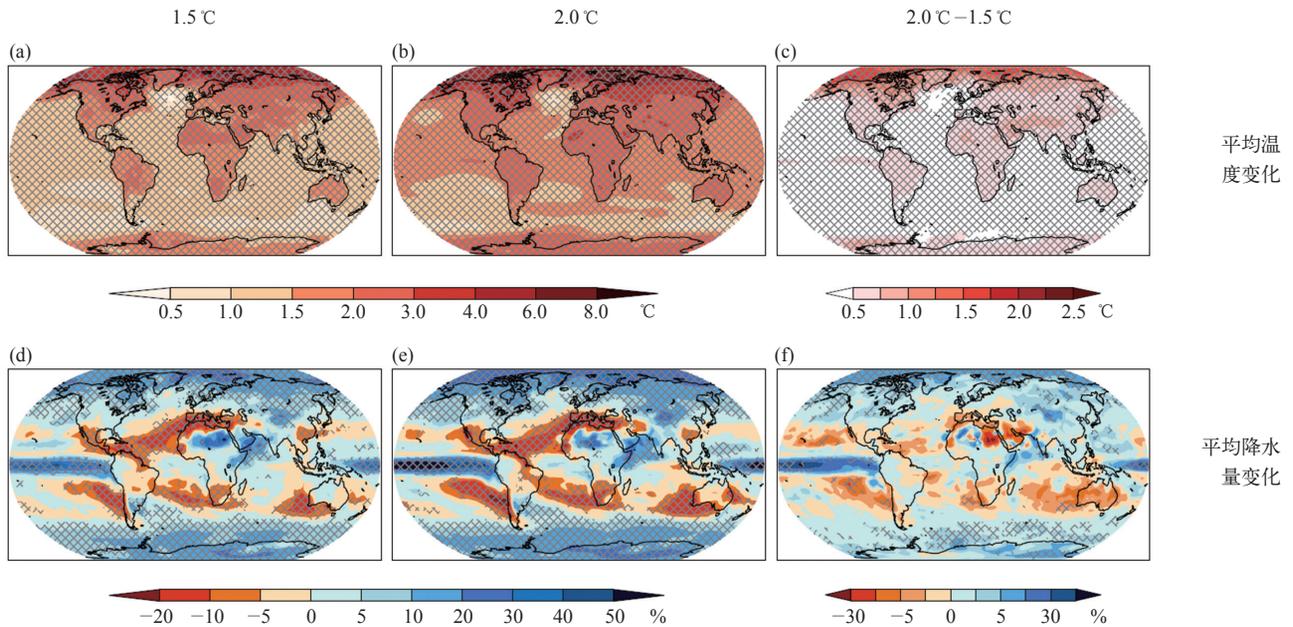


图1 全球1.5℃和2℃温升下全球平均温度和降水量变化(相对于1861—1880年)^[1]

Fig. 1 Projected changes in mean temperature and mean precipitation at 1.5℃ and 2℃ of global warming compared to the pre-industrial period (1861–1880), and the difference between 1.5℃ and 2℃ of global warming^[1]

①根据IPCC对不确定性的刻画方法,SR1.5沿用第五次评估报告使用“很低”“低”“中等”“高”和“很高”等5个修饰词定性表达主要结论的可信水平。信度高低取决于已有证据(如机理理解、理论、数据、模型、专家判断)的类型、数量、质量、内部相容性和一致程度。

度), 而且相比 1.5℃, 2℃ 温升下降水增加更甚(中等信度); 随着温升增加, 大部分地区热极端事件增加, 冷极端事件减少(高信度), 一些地区发生强降雨、干旱和降水不足的可能性增加(中等信度)。总体而言, 冰冻圈分布的极地和高山地区在全球 1.5℃ 或更高温升下将大幅增暖, 极端冷事件发生频率减少, 极端热事件和强降水事件则更加频繁, 从而严重威胁到区域冰冻圈、生态系统和人类福祉的可持续性。

SR1.5 对冰冻圈的海冰和多年冻土要素给予较多关注, 但对积雪、冰川和河、湖冰以及大气冰冻圈要素的评估较少。

1.1 海冰

过去几十年来北极夏季海冰快速消融, 1997—2014 年北极 9 月份海冰范围每年平均减少 $1.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约是 1979—1996 年的 4 倍; 海冰厚度也大幅减少, 1975—2012 年北极中心地区冰厚减少了 65%。大多数耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)气候模式对北极海冰范围和厚度的模拟相比观测值偏低, 利用多模式集合平均可能大大低估了全球变暖造成的海冰损失。为避免这一误差, SR1.5 利用观测值进行偏差校正, 模拟表明 1.5℃ 增暖情景下北冰洋大多数年份夏季有海冰覆盖, 但在 2℃ 时北冰洋夏季无冰的概率将大幅提高(中等信度); 无冰概率在 1.5℃ 情景下为 100 年一遇, 但在 2℃ 时变成 10 年一遇(中等信度)(表 1)。在冬季, 无论 1.5℃ 还是 2℃ 情景, 北冰洋都只有很少海冰亏损。另外, 中途的气温超调(或超冲, Overshoot)对北极海冰覆盖度不会有长期影响(高信度), 因为海冰内部变率大, 可在年代际时间尺度再生(高信度)。

南极海冰变化表现出明显的区域差异, 例如南极半岛附近的海冰范围大幅下降, 但阿蒙森海的海冰范围增加, 整体来看, 南大洋海冰范围长期呈缓慢增长趋势, 但从 2016 年 9 月开始范围减小。大多数模型对南极海冰模拟信度很低, 目前鲜有研究对 1.5℃ 情景下南极海冰变化开展预估。

1.2 多年冻土

在气候变化背景下, 北极和高山地区多年冻土持续变暖、退化, 地下冰亏损。研究表明全球温升 2℃ 时全球多年冻土面积可能减少 40%, 但如果将全球温升控制在 1.5℃ 内, 可在 21 世纪阻止 150 万~250 万 km^2 的多年冻土融化。

2 全球 1.5℃ 和 2℃ 温升下冰冻圈变化的影响

冰冻圈在不同时空尺度与大气圈、水圈、岩石圈、生物圈以及人类圈相互联系、相互作用。随着全球变暖, 与冰冻圈相关的物质输移和能量调节等过程发生剧烈变化, 对其他圈层产生深远影响。

2.1 冰冻圈变化对大气圈的影响

冰冻圈退缩对大气圈的影响主要包括: (1) 冰川(含冰盖)、海冰和积雪等变化改变区域和全球反照率及能量平衡; (2) 多年冻土退化导致碳释放, 进而加速气候变暖^[2]; (3) 冰冻圈融水注入海洋使高纬地区海水变暖、变淡进而导致温盐环流减缓。这些影响最终导致区域和全球气候发生变化^[2-4]。

高纬度地区(冷季)是增暖最强烈的地区(高信度), 在全球温升 1.5℃ 时增温可达到 4.5℃ (表 1); 随着全球平均温度升高, 高纬度(包括阿拉斯加、加拿大西部、格陵兰岛和冰岛等)和高山地区(例如青藏高原)也成为强降雨事件增加最多的区域(中等信度), 这与冰冻圈对大气圈的水热调节密不可分。随着多年冻土退化, 有机碳已不断释放至大气且不可恢复, 成为气候的“定时炸弹”。SR1.5 预估表明将全球温升控制在 1.5℃ 而不是 2℃, 可减少多年冻土中 100 Gt CO_2 的释放。大西洋经向翻转环流(AMOC)在 21 世纪很可能持续减弱, 但截至目前还没有研究关注不同温升对减弱幅度影响的差异。

2.2 冰冻圈变化对水圈的影响

冰冻圈变化对水圈的影响主要发生在全球和

表 1 冰冻圈及其相关要素对不同温升的响应
Table 1 The changes in cryosphere and its related elements under 1.5 °C and 2 °C of global warming

圈层	类型	1.5 °C 温升情景	2 °C 温升情景	信度
冰冻圈	北极夏季海冰	无冰概率 100 年一遇	无冰概率 10 年一遇	中
	多年冻土	1.5 °C 情景比 2 °C 挽救 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$	温升 2 °C 时冻土面积减少 40%	中
大气圈	气温 *	高纬度地区 (冷季) 是增暖最强烈的地区, 1.5 °C 情景下增温 4.5 °C		高
	极端降水事件 *	随着全球平均温度升高, 高纬度和高山地区强降雨事件增加幅度最大		中
	多年冻土碳释放	1.5 °C 情景比 2 °C 减少 100 Gt CO ₂ 碳释放		中
	大洋环流 *	AMOC 在 21 世纪减弱, 而且在超过 2 °C 时大幅减弱		很可能
水圈	全球平均海平面上升幅度 * (相对 1986—2005 年)	上升 0.26 ~ 0.77 m	上升 0.30 ~ 0.93 m	中
	沿海洪水淹没面积 *	$5.62 \times 10^5 \sim 5.75 \times 10^5 \text{ km}^2$	$5.90 \times 10^5 \sim 6.13 \times 10^5 \text{ km}^2$	中/高
	全球径流量 *	显著增加的区域扩大	显著增加的区域继续扩大	中
生物圈	陆地生态系统 *	昆虫减少 6%, 植物减少 8%, 脊椎动物减少 4%; 7% 的生态系统发生演替	昆虫减少 18%, 植物减少 16%, 脊椎动物减少 8%; 13% 的生态系统发生演替	中
	海洋生态系统 *	对北冰洋和西南极半岛的浮游植物、鱼类和海洋哺乳动物等产生多重影响, 高纬度生物多样性可能增加		高
	欧亚大陆北部生态系统 *	生长季增加约 3 ~ 12 d	生长季增加约 6 ~ 16 d	中
	海洋和海岸带生态系统 *	随着温度增加风险不断增大		高
岩石圈	土壤侵蚀和物质输移量 *	从 1.5 °C 情景到 2 °C 情景预估变化不大		低
人类圈	沿海洪水的人口暴露度 * (不考虑设防, 瞬时态)	1.28 亿 ~ 1.43 亿	1.41 亿 ~ 1.51 亿	中/高
	沿海洪水的人口暴露度 * (基于 1995 年设防水平, 平均态)	0.02 亿 / 年 ~ 0.28 亿 / 年	0.15 亿 ~ 0.53 亿 / 年	中/高
	全球水资源短缺人口 * (2000 年基准)	增加 4%	增加 8%	中
	全球河流洪水 * (1976—2005 年人口基准)	人口暴露度增加 100%	人口暴露度增加 170%	中
	水力发电 *	欧洲北欧、东欧和西欧潜力增加, 波罗的海和斯堪的纳维亚地区潜力下降		—
	冰雪旅游	随着温度增加风险不断增大		极高

注: * 表示冰冻圈仅为影响因素之一, “—” 表示 SR1.5 没有给出信度。

区域两个空间尺度。在全球尺度, 冰冻圈 (包括山地冰川和极地冰盖) 退缩是海平面上升的主要贡献因素, 进而改变全球水循环过程, 包括大洋

输送带和洋流强度等^[4]。在区域尺度, 冰冻圈变化深刻影响着流域水文过程。随着全球变暖, (1) 冰川融水量在一定时期内增加, 但在十年到百年

尺度上越过“拐点”后将持续下降; (2) 积雪融水以不断减小的速率呈现下降趋势^[5]; (3) 冰冻圈年内开始消融时间普遍提前, 消融期增加, 积累期缩短; (4) 冰冻圈极端水文事件(洪涝和干旱)发生频率也不断增加^[6]。

21 世纪全球海平面很可能持续上升(高信度); 相对 1986—2005 年, 预计全球温升 1.5℃ 时全球平均海平面上升(GMSLR) 范围约为 0.26 ~ 0.77 m; 相对 2℃, 将全球温升控制在 1.5℃ 时, 21 世纪末 GMSLR 预计减少约 0.1 m (0.04 ~ 0.16 m) (中等信度)。报告提及 Marzeion 等^[7] 基于 RCP2.6 情景对不同温升情景下山地冰川对海平面上升的贡献进行了研究。结果表明: 如果将全球温升控制在 1.5℃, 到 2100 年全球海平面相比现在将增加 54 ~ 97 mm, 但若温升 2℃, 将增加 63 ~ 112 mm。报告也提及 Fürst 等^[8] 利用区域气候模式驱动的冰流模型对格陵兰冰盖的海平面效应进行了预估, 结果表明在 RCP2.6 情景下格陵兰冰盖对海平面的贡献相对 2000 年将增加 24 ~ 60 mm, 但该研究没有对不同温升下的海平面贡献差异进行评估。南极冰盖对海平面上升包括正负两个反馈过程: 一方面, 固态冰退缩增加海洋水量; 另一方面, 大气中水汽容纳能力增加从而增加降雪。总体而言, 格陵兰和南极冰盖是影响海平面变化的不稳定因素, 很可能在几百年或几千年的时间尺度上导致海平面上升多米, 这种不稳定性也有可能在全球温升 1.5℃ 至 2℃ 左右时触发。

SR1.5 从全球、区域和流域 3 个尺度对全球 1.5℃ 和 2℃ 温升情景下径流和洪水变化进行了评估。全球尺度预估表明将温升控制在 1.5℃ 而不是 2℃ 时年平均径流发生变化(增加或减少)的范围更小。在区域尺度, 未来径流量变化与降水量变化基本一致。相比当前气候状态, 未来温升 1.5℃ 时全球径流显著增加的区域将会扩大, 一些区域洪灾发生的频率也将增加。而且相比 1.5℃, 2℃ 温升情景下径流显著增加的区域和暴露于洪水的范围还会继续扩大(中等信度)。然而, SR1.5 对 1.5℃ 和 2℃ 温升下冰冻圈变化对水文水资源的影

响评估较少, 仅在一些流域径流量变化进行了归因分析, 例如报告提到 Marx 等^[9] 分析了不同温升(1.5℃、2℃ 和 3℃) 对欧洲水文低流量的影响, 结果表明高山地区低流量增加幅度最大, 从 1.5℃ 的 22% 增加到 2℃ 的 30%, 这主要与较多的积雪融化有关。

2.3 冰冻圈变化对生物圈的影响

冰冻圈变化对生物圈(生态系统)的影响主要包括: (1) 陆地冰冻圈变化通过改变土壤水、热和养分循环, 进而影响区域生态系统演替及其物候变化; (2) 冰冻圈变化通过改变海洋温度、盐度、酸度、环流扰动以及动植物栖息地等影响海洋生态系统^[2,4]。

随着温度升高、冰冻圈退缩, 陆地生态系统发生演替的概率增加、物候提前, 并对生态系统功能造成影响。但相比全球温升 2℃, 1.5℃ 情景下局地物种演替、灭绝和物候提前以及生态系统功能丧失的风险要小得多(高信度)。高纬度地区和高海拔地区由于年平均和冷季温升大于其他地区, 所以生态系统受到影响也最大。在北极冰冻圈区, 随着温度快速升高以及多年冻土退化, 苔原地区木本植物将不断繁盛, 预计全球温升 1.5℃ 时植物生长季增加约 3 ~ 12 d, 而当温升 2℃ 时将增加 6 ~ 16 d (中等信度)。一项模型模拟研究也表明将温升控制在 1.5℃ 而不是 2℃ 时可避免北极、青藏高原和喜马拉雅地区生态系统发生较大幅度演替。

随着极地温度、光照、营养水平增加, 海冰退缩, 居住在漂浮海冰下面的大型藻类、浮游植物和微藻类等正在发生变化, 海洋生物也正以 40 km/a 的速度向高纬度移动, 导致高纬度生物多样性可能增加。加上海平面上升、海岸侵蚀, 多年冻土加速融化以及其他原因, 最终对全球海洋生态系统结构和功能、生物多样性以及食物网造成影响。全球温升 1.5℃ 和 2℃ 将对北冰洋和西南极半岛的浮游植物、鱼类和海洋哺乳动物等产生多重影响。

海温增加和冰冻圈退缩也通过改变海洋环流、

热量和营养物循环进而对海洋生态系统产生影响,例如海洋上升流减缓已对渔业产生影响,这与冰冻圈消融造成的大量淡水注入密不可分。冰冻圈退缩引起的海平面上升和盐度变化也对海岸带生态系统变化造成影响。

2.4 冰冻圈变化对岩石圈的影响

冰冻圈对岩石圈(或陆地表层)的影响表现在地表侵蚀和抑制地表侵蚀(即地表保护)两个方面:一方面,雪蚀、冰川侵蚀和冻融侵蚀显著改变着陆地表层^[2,4];另一方面,冰冻圈或冻结地表或覆盖在地表岩层之上,形成保护地表免受风、水等外力侵蚀的屏障。尤其在高纬度沿海地区,冻土维持着地表的稳定,海冰抑制了海浪对海岸的冲刷^[10]。但随着冰冻圈退缩,冰冻圈地表侵蚀和抑制地表侵蚀的能力发生显著变化。例如,高山地区冰冻圈作用形成的松散堆积物、冰湖等通过形成冰川泥石流、溃决洪水等能够快速、高强度侵蚀地表;再如,当前冻土融化和海冰退缩等多重影响正在造成北极海岸的大面积后退。

SR1.5提及了冰雪消融对泥沙输移的影响以及海冰和冻土退缩对海岸带的影响,但未做具体评估。一些研究认为从1.5℃到2℃情景下各因素引起的全球土壤侵蚀和物质输移量相似,但被评估为低信度。

2.5 冰冻圈变化对人类圈的影响

冰冻圈与人类社会(人类圈)息息相关,其对人类圈影响主要基于冰冻圈自身功能及其与其他圈层相互作用形成,包括致利与致灾两个方面:一方面,冰冻圈给人类社会带来众多惠益,即冰冻圈服务,包括供给、调节、文化、承载和支持服务五大类型^[11-12];另一方面,冰冻圈也给人类社会带来很多负面影响,即冰冻圈灾害,如冰川水文变化引发的干旱和洪涝,还有冰湖溃决、冰川泥石流以及冰川跃动等^[13]。随着全球变暖和冰冻圈加速退缩,冰冻圈服务整体将不断减弱乃至丧失,冰冻圈灾害也多以频发的极端事件加剧

呈现^[12]。

SR1.5评估结果表明,将全球温升控制在1.5℃时,区域气温变化速率、频率和幅度较低,对社会系统造成的影响较小,这种较小的变化也有利于提高社会系统的适应能力。但当温升达到2℃时,对社会系统危害以及其自身暴露度和脆弱性将大大增加,尤其小岛国家和经济上处于劣势的群体将处在高风险状态。SR1.5涉及的冰冻圈对人类圈的影响主要包括水资源供给(包括极端水文事件,即水资源短缺和洪水)、水力发电、粮食生产、旅游业、能源和交通以及海平面上升给沿海低地、城市、岛屿和三角洲地区人口、水资源、基础设施和资产带来的风险等(表1)。但总体而言,全球1.5℃和2℃温升下冰冻圈本身变化对人类圈的影响没有得到较多关注。

3 全球1.5℃和2℃温升下的冰冻圈相关风险热点(区)和临界因素

3.1 全球1.5℃和2℃温升下的冰冻圈相关风险热点(区)

综合区域温升和社会-生态系统响应,SR1.5识别了10个气候变化风险的热点(区)(hotspots),包括北极海冰、北极陆地、高山地区、东南亚、南欧和地中海、西非和撒哈拉地区、南非、热带和岛屿地区以及Fynbos群系等。这些风险热点(区)中6个为冰冻圈及其影响区(表2),它们在不同温升情景下的风险与冰冻圈功能减弱密切相关。

北极地区是全球变暖的重要热点区,随着区域气温快速上升和冰冻圈尤其海冰和多年冻土大幅退缩,尽管北极渔业将可能获益,但大量动植物的栖息地将面临严峻风险。冰冻圈广泛发育的高山地区被誉为“水塔”,也是大量物种的栖息地,但是高山生态系统在气温快速变暖下非常脆弱。由于冰冻圈退缩和海洋热膨胀,沿海低地和岛屿地区深受海平面上升的威胁。其中,东南亚地区和其他岛屿地区人口集中,经济相对落后,加上洪水等其他极端气象水文事件频发,也成为当前

表 2 不同温升下的冰冻圈相关风险热点 (区)^[1]
Table 2 Emergence and intensity of cryosphere-related hotspots under different degrees of global warming^[1]

热点 (区)	温升 ≤ 1.5℃	温升 1.5 ~ 2℃	温升 2 ~ 3℃
北极海冰	北极夏季海冰可能维持; 北极熊、鲸鱼、海豹和海鸟等生物的栖息地丧失; 北极渔业获益	北极夏季无冰概率为 50% 或更高; 北极熊、鲸鱼、海豹和海鸟等生物的重要栖息地丧失; 北极渔业获益	北极夏季很可能无冰存在; 北极熊、鲸鱼、海豹和海鸟等生物的重要栖息地损失
北极陆地	最低温度上升 2 ~ 3 倍 (达 4.5℃) (高信度); 苔原地区的生物群落发生变化, 多年冻土可能退化	最低温度上升高达 8℃ (高信度); 苔原地区大量树木和灌木侵入; 多年冻土退化面积更大但有限	区域温度急剧上升很可能导致多年冻土崩溃 (低信度); 苔原可能被针叶林替代 (低信度)
高山地区	生物群落可能发生剧烈变化	生物群落可能发生更剧烈变化	高山栖息地可能遭受严重损失
东南亚地区	海平面上升相关的洪水风险增加; 作物显著减产的风险可避免	海平面上升相关的洪水风险增加 (中等信度); 人均作物产量减少 1/3 (中等信度)	海平面上升相关洪水风险大幅增加; 强降水和极端水文事件导致作物产量大幅减少
南欧和地中海地区	极端干旱概率增加 (中等信度); 径流减少约 9% (4.5% ~ 15.5%) (中等信度); 缺水风险较低 (中等信度)	极端干旱概率稳步增加 (中等信度); 径流减少约 17% (8% ~ 28%) (中等信度); 较高的缺水风险 (中等信度)	更大的极端干旱概率稳步增加; 降水和径流大幅下降 (中等信度); 极高的缺水风险 (中等信度)
岛屿地区	相比 2℃, 到 2150 年减少发展中地区 6 万人口暴露, 沿海洪水风险减少 20% ~ 80%, 淡水压力减少 25%, 避免 70% ~ 90% 的珊瑚礁丧失	发展中地区数万人因洪水淹没流离失所; 沿海洪水风险高; 大多数珊瑚礁丧失	沿海洪水、淡水压力和珊瑚礁丧失等对发展中地区产生深远广泛影响

气候变化风险的热点区。SR1.5 也把南欧和地中海地区列为热点区, 这一地区未来将主要面临水资源短缺风险, 这可能与冰冻圈水资源补给功能减弱也有关。

3.2 全球 1.5℃ 和 2℃ 温升下的冰冻圈相关临界要素

随着气候变暖, 地球系统中有诸多要素一旦发生稳态变化, 就难以恢复到原有状态, 即临界要素 (tipping point)。SR1.5 关注了温升 1.5℃ 和 2℃ 情景下 10 个临界要素的变化风险, 包括北

极海冰、苔原、多年冻土、亚洲季风、西非季风和萨赫勒地区、雨林、北方针叶林、热浪与人体健康、关键农作物系统和热带亚热带牧业系统, 这些临界要素中也有 6 个与冰冻圈相关 (表 3)。

北极海冰和多年冻土作为重要的冰冻圈要素, 对变暖异常敏感, 当全球温升超过 2℃ 时, 北极夏季无冰概率和多年冻土解冻范围将大大增加。海冰退缩后在适宜的气候条件下尚可再生, 但多年冻土在全球温升达到 3℃ 时有可能彻底崩溃 (collapse)、不可恢复, 而且大量的有机碳排放给全球气候系统造成致命性灾难。苔原和北方

表3 不同温升目标下的冰冻圈相关临界要素^[1]
Table 3 Cryosphere-related tipping points under different global temperature goals^[1]

临界要素	温升≤1.5℃	温升1.5~2℃	温升达到3℃
北极海冰	北极夏季海冰可能维持；适宜气候条件下海冰变化可恢复	北极夏季无冰概率为50%或更高；适宜气候条件下海冰变化可恢复	北极夏季很可能无冰存在；适宜气候条件下海冰变化可恢复
苔原	0℃以下的生长日数减少；树盖不会突然增加	0℃以下的生长日数进一步减少；树盖不会突然增加	系统可能发生突变（低信度）
多年冻土	减少17%~44%；碳释放后不可恢复	减少28%~53%；碳释放后不可恢复	系统可能崩溃（低信度）
亚洲季风	预计发生变化（低信度）	预计发生变化（低信度）	季风降水强度可能增加
北方针叶林	南边界死亡率增加（中等信度）	南边界死亡率进一步增加（中等信度）	可能在3~4℃的临界点显著枯萎（低信度）
玉米产量	全球减产约10%	产量比1.5℃减少大约15%	一些区域大幅下降乃至丧失（低信度）

针叶林生长的高纬度地区变暖幅度显著高于全球平均水平，加上多年冻土快速融化，当全球温升超过2℃达到3℃时该生态系统将可能发生突变。亚洲季风也是冰冻圈相关的重要临界因素，其发生变化的一个重要因素是亚洲大陆积雪变化引起的反照率变化改变温度梯度，进而影响气压梯度和季风强度，预计全球温升超过2℃后达到3℃时季风降水强度可能增加。冰冻圈水资源供给功能衰退也对农作物系统产生影响，是未来农作物系统（玉米等）发生稳态转换的重要因素，这一临界温度预计也在温升2~3℃。

总体而言，随着温度不断升高，冰冻圈相关风险热点(区)和临界要素面临的危机将不断增强，而将全球温升控制在1.5℃而不是2℃或更高时的风险将大大降低。

4 结语

本文对IPCC最新公布的SR1.5中涉及冰冻

圈的内容进行了解读，包括全球1.5℃和2℃温升下的冰冻圈变化（主要是海冰和多年冻土）及其对其他圈层（大气圈、水圈、生物圈、岩石圈和人类圈）的影响以及冰冻圈相关风险热点（区）和临界因素等，以期为国内读者呈现有关冰冻圈变化及其影响的最新科学认知。

然而，SR1.5总体上未对冰冻圈自身变化及其影响部分给予深入关注，这可能因为：一是截至目前关于1.5℃和2℃温升下的冰冻圈变化及其影响研究还很有限，文献不多；二是IPCC计划于2019年10月发布《气候变化下的海洋与冰冻圈特别报告》(SROCC)，冰冻圈变化及其影响的评估内容将更多地在此报告中体现。由于可用文献内容较少，所以本文的解读也是初步的。未来有必要继续加强各种气候情景下冰冻圈变化及其相关影响和适应研究，尤其与1.5℃和2℃温升目标以及地球系统临界要素相结合，进而探寻加强冰冻圈影响区可持续发展和恢复力的路径。■

参考文献

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5 °C [M]. UK: Cambridge University Press, 2018
- [2] 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, 2017. Qin D H, Yao T D, Ding Y J, *et al.* An introduction to cryosphere science [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2017 (in Chinese)
- [3] Schuur E A G, McGuire A D, Schadel C *et al.* Climate change and the permafrost carbon feedback [J]. *Nature*, 2015, 520: 171-179
- [4] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [5] Krasting J P, Broccoli A J, Dixon K W, *et al.* Future changes in Northern Hemisphere snowfall [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26 (20): 7813-7828
- [6] Huss M, Bookhagen B, Huggel C, *et al.* Toward mountains without permanent snow and ice [J]. *Earth's Future*, 2017, 5: 418-435
- [7] Marzeion B, Kaser G, Maussion F, *et al.* Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 305-308
- [8] Fürst J J, Goelzer H, Huybrechts P. Ice-dynamic projects of the Greenland ice sheet in response to atmospheric and oceanic warming [J]. *The Cryosphere*, 2015, 9 (3): 1039-1062
- [9] Marx A, Kumar R, Thober S, *et al.* Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22 (2): 1017-1032
- [10] Lantuit H, Pollard W H. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, southern Beaufort Sea, Yukon territory, Canada [J]. *Geomorphology*, 2008, 95: 84-102
- [11] Xiao C D, Wang S J, Qin D H. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015 (6): 181-187
- [12] 效存德, 苏勃, 王小明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险 [J]. *科学通报*, 2019. DOI: 10.1360/N972018-01314. Xiao C D, Su B, Wang X M, *et al.* Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019. DOI: 10.1360/N972018-01314 (in Chinese)
- [13] 王世金, 效存德. 全球冰冻圈灾害高风险区: 影响与态势 [J]. *科学通报*, 2019, 64. DOI: 10.1360/N972018-01124. Wang S J, Xiao C D. Global cryospheric disaster at high risk areas: impacts and trend [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64. DOI: 10.1360/N972018-01124 (in Chinese)

Interpretation of IPCC SR1.5 on cryosphere change and its impacts

SU Bo¹, GAO Xue-Jie², XIAO Cun-De¹

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: The cryosphere is highly sensitive to climate change among the five major spheres of climate system. Past decades, with the anthropogenic climate warming, has seen an accelerated retreat of the global cryosphere (including mountain glacier, frozen soil, snow cover and sea ice, etc.), which has also seriously affected global climate system and regional water resources, eco-environment, socio-economic development and human well-being. The IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR1.5) was issued in October 2018, it systematically presented basic scientific understanding of 1.5 °C global warming above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways in the context of sustainable development and poverty eradication. In the cryosphere and related aspects, SR1.5 mainly projected some cryospheric changes (mainly sea ice, permafrost) and their impacts on the atmosphere, hydrosphere, biosphere, lithosphere and anthroposphere at a global average warming of 1.5 °C and higher levels of warming. It also focused on many climate change hotspots and tipping points under different global temperature goals, most of which are related to the cryosphere. As the temperature continues to rise, the risks to the cryosphere and its associated hotspots and tipping points will continue to increase. Limiting global warming to 1.5 °C compared to 2 °C or higher level is projected to lower the risks. However, frankly, SR1.5 has not given deep attention to the change and its impacts. In the future, it is necessary to deepen the research on the changes of the cryosphere and its related impacts and adaptation under different climatic scenarios, especially with the global 1.5 °C and 2 °C temperature goals and tipping points, thereby to explore a more sustainable and resilient pathway in the cryosphere affected regions.

Keywords: Global warming of 1.5 °C; Cryosphere; Impacts; Sustainable development