

# 2024冰冻圈状况报告

## 冰雪损失——全球性损害



我们无法与冰的熔点谈判。

2024年11月

[www.iccinet.org/statecryo24](http://www.iccinet.org/statecryo24)



# 2024冰冻圈状况报告

## 冰雪损失——全球性损害

我们无法与冰的熔点谈判。

2024年11月

[www.iccinet.org/statecryo24](http://www.iccinet.org/statecryo24)

International Cryosphere  
Climate Initiative  
国际冰冻圈气候倡议组织

© 2024 国际冰冻圈气候倡议组织

联系方式: [info@iccinet.org](mailto:info@iccinet.org)

Twitter/X: [@iccinet](https://twitter.com/iccinet)

[www.iccinet.org](http://www.iccinet.org)

2024冰冻圈状况报告: 冰雪损失——全球性损害

我们无法与冰的熔点谈判。

封面照片: 尼泊尔的 Ngozumpa 冰川——喜马拉雅山脉中最长的冰川, 现已被碎石覆盖, 冰崖和湖泊遍布, 这一变化源于迅速的气温升高和冰川融化。照片拍摄于 2017 年 11 月。(图片来源: James Kirkham, ICCI 和 AMI 首席科学顾问)

# 目录

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 科学审稿人 .....                                                                      | iv |
| 中文翻译 .....                                                                       | v  |
| 概要                                                                               |    |
| 三种不同排放情景下冰冻圈消融对全球的损害 .....                                                       | vi |
| 2024年重要研究新认知 .....                                                               | x  |
| 第一章 保护冰冻圈刻不容缓:减排至关重要                                                             |    |
| 极低排放仍能避免极端损失和损害,但行动机会窗口稍纵即逝 .....                                                | 1  |
| 第二章 冰盖和海平面上升                                                                     |    |
| 当前气候政策可能触发长期的海平面上升与全球范围的<br>大规模海岸线消失 .....                                       | 6  |
| 第三章 山地冰川与积雪                                                                      |    |
| 温升 $1.5^{\circ}\text{C}$ 的调整对防止未来几十年不断加剧的损失和损害至关重要 ..                            | 18 |
| 第四章 多年冻土                                                                         |    |
| 全球升温超过 $1.5^{\circ}\text{C}$ 将加剧冻土消融,增加其缓解难度,<br>造成更多的全球和区域性灾害及损失 .....          | 28 |
| 第五章 海冰                                                                           |    |
| 全球气温升高超过 $1.5^{\circ}\text{C}$ 阈值将引发一系列全球反馈效应,<br>进一步加剧气候适应的需求,并增加损失和损害负担。 ..... | 37 |
| 第六章 极地海洋酸化、变暖和淡化                                                                 |    |
| 我们无法与海洋酸化讨价还价:亟需策略调整 .....                                                       | 47 |



# 科学审稿人

## 第一章 保护冰冻圈刻不容缓：减排至关重要

Julie Brigham-Grette, University of Massachusetts Amherst  
Andrea Dutton, University of Wisconsin-Madison  
Matthew Gidden, IIASA  
Bill Hare, IPCC AR4, Climate Analytics  
Joeri Rogelj, IPCC CLA AR5, SR1.5 and AR6, Imperial College London  
Martin Siegert, University of Exeter  
Michiel Schaeffer, GAI, IPCC AR5  
Drew Shindell, IPCC CLA SR1.5, Duke University

## 第二章 冰盖和海平面上升

Richard B. Alley, Pennsylvania State University, IPCC AR2, AR3, AR4  
Jonathan Bamber, University of Bristol, IPCC AR6 WG1, AR5 Review Editor, AR4 Review Editor  
Julie Brigham-Grette, University of Massachusetts-Amherst  
Robert DeConto, University of Massachusetts-Amherst, IPCC SROCC  
Andrea Dutton, University of Wisconsin-Madison, IPCC SROCC  
Carlota Escutia, Spanish High Council for Scientific Research and University of Granada  
Carl-Friedrich Schleussner, IIASA  
Martin Siegert, University of Exeter  
Michael Schaeffer, IPCC AR5 LA, Global Center on Adaptation, IPCC AR5  
Chris Stokes, Durham University

## 第三章 山地冰川与积雪

Carolina Adler, Mountain Research Initiative, IPCC AR6 WGII and SROCC  
Guðfinna Aðalgeirsdóttir, University of Iceland, IPCC AR6  
Matthias Huss, ETH-Zurich, WSL  
Regine Hock, University of Oslo, Norway, University of Alaska Fairbanks, IPCC AR4, SROCC coordinating Lead Author, AR6  
Miriam Jackson, ICIMOD/Norwegian Water Authority, IPCC AR6  
Georg Kaser, University of Innsbruck, IPCC AR4, AR5, SROCC and AR6  
Michael Lehning, EPFL, IPCC SROCC  
Ben Marzeion, University of Bremen, IPCC AR5, SROCC, AR5 and AR6 WG1  
Fabien Maussion, University of Bristol  
Ben Orlove, Columbia University, IPCC SROCC, AR6 WGII  
David Rounce, Carnegie Mellon University  
Lilian Schuster, Universität Innsbruck  
Heidi Sevestre, University of Svalbard  
Heidi Steltzer, IPCC SROCC  
Philippus Wester, IPCC AR6 WGII

## 第四章 多年冻土

Benjamin W. Abbott, Brigham Young University  
Julia Boike, Alfred Wegener Institute (AWI)  
Sarah Chadburn, University of Exeter  
Gustaf Hugelius, Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University  
Susan Natali, Woodwell Climate Research Center  
Paul Overduin, AWI  
Vladimir Romanovsky, University of Alaska-Fairbanks  
Christina Schädel, Woodwell Climate Research Center  
Ted Schuur, IPCC LA SROCC, Northern Arizona University  
Merritt Turetsky, University of Colorado

## 第五章 海冰

Jennifer Francis, Woodwell Climate Research Center  
Alexandra Jahn, University of Colorado Boulder  
Ronald Kwok, Polar Science Center, Applied Physics Laboratory, University of Washington  
Robbie Mallett, UiT - The Arctic University of Norway  
Walt Meier, National Snow and Ice Data Center  
Dirk Notz, IPCC AR6, University of Hamburg, Germany  
Julienne Stroeve, IPCC SROCC, University of Manitoba/NSIDC

## 第六章 极地海洋酸化、变暖和淡化

Nina Bednaršek, National Institute of Biology, Slovenia  
Richard Bellerby, East China Normal University/Norwegian Institute for Water Research  
Elise S. Droste, Alfred Wegener Institute (AWI) Helmholtz Centre for Polar and Marine Research  
Sam Dupont, University of Gothenburg  
Helen S. Findlay, Plymouth Marine Laboratory  
Humberto E. González, University Austral of Chile/Fondap IDEAL  
Sian F. Henley, University of Edinburgh  
Peter Thor, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)  
Paul Wassmann, UiT – The Arctic University of Norway (Emeritus)

## 章节编辑(ICCI)

James Kirkham (Ice Sheets and Sea-level Rise)  
Susana Hancock (Mountain Glaciers and Snow)  
Isobel Rowell (Polar Oceans)  
Amy Imdieke (Permafrost)  
Pam Pearson (Sea Ice)

## 致谢

衷心感谢审稿人付出的大量时间和宝贵贡献，深表感谢。

特别感谢Tyler Kemp-Benedict在图表制作、设计和排版方面的辛勤付出。

最终内容由ICCI负责。

# 中文翻译

**审核:**

康世昌, 中国科学院西北生态环境资源研究院

**概要**

李明月, 中国科学院青藏高原研究所

张强弓, 中国科学院青藏高原研究所

**编校:** 张梦竹, ICCI

**2024重要研究更新**

李明月, 中国科学院青藏高原研究所

张强弓, 中国科学院青藏高原研究所

**编校:** 张梦竹, ICCI

**第一章 保护冰冻圈刻不容缓: 减排至关重要**

李明月, 中国科学院青藏高原研究所

张梦竹, ICCI

**编校:**

张强弓, 中国科学院青藏高原研究所

张梦竹, ICCI

**第二章 冰盖和海平面上升**

安璐, 同济大学

陶华, 中国科学院西北生态环境资源研究院

王显威, 上海交通大学

赵晨, 塔斯马尼亚大学

**编校:**

陶华, 中国科学院西北生态环境资源研究院

张梦竹, ICCI

**第三章 山地冰川与积雪**

张玉兰, 中国科学院西北生态环境资源研究院

方功焕, 中国科学院新疆生态与地理研究所

吴坤鹏, 云南大学

**编校:**

张强弓, 中国科学院青藏高原研究所

陶华, 中国科学院西北生态环境资源研究院

张梦竹, ICCI

**第四章 多年冻土**

杨晓帆, 北京师范大学

纪泳丞, 东北林业大学

张泽, 东北林业大学

翟金榜, 东北林业大学

李向龙, 东北林业大学

**编校:**

杨晓帆, 北京师范大学

纪泳丞, 东北林业大学

张泽, 东北林业大学

张梦竹, ICCI

**第五章 海冰**

杨清华, 中山大学/南方海洋科学与工程广东省实验室 (珠海)

闵超, 南方海洋科学与工程广东省实验室 (珠海)

**编校:**

陶华, 中国科学院西北生态环境资源研究院

张梦竹, ICCI

**第六章 极地海洋酸化、变暖和淡化**

张召儒, 上海交通大学

叶苏文, 上海交通大学

王艳琳, 上海交通大学

吕柯伟, 厦门大学

张经纬, 塔斯马尼亚大学

张梦竹, ICCI

**编校:** 张梦竹, ICCI



# 概要

## 三种不同排放情景下冰冻圈消融对全球的损害

以下章节详细描述了冰冻圈融化对全球生态系统、社会和经济的影响，基于下面三种温度和排放情景：

- 各国兑现气候承诺（国家自主贡献，即NDCs），在此条件下气温将超过巴黎协定2°C；
- 维持当前高碳排放并持续到本世纪末，在此条件下气温将上升3至3.5°C；
- 即刻迅速修正排放路径，回归巴黎协定1.5°C温升目标

### 当前NDCs

（到 2100 年升温 2.3°C，CO<sub>2</sub>峰值约 500ppm）

当前的国家自主贡献（NDCs）无法有效遏制全球温升显著超过1.5°C的风险，许多政府将关键的减排行动推迟至2040年、2050年甚至更远的未来。尽管短期内，这种做法可能被视为经济上有利，例如降低当前的能源成本，但化石燃料转型的延缓将不可避免地导致冰冻圈在未来几十年至数百年间遭受广泛而深远的损失与损害。同时，即便技术上仍具备适应的可能性，相关需求的规模和成本也将显著增加，带来更为沉重的经济负担。

**冰盖与海平面上升：**大量新的研究考虑了冰盖动力学、地球古气候记录以及对近期冰盖活动的观测，发现格陵兰和南极洲部分地区的冰盖临界温度远低于2.2°C。科学家认为，即使温升仅超过1.5°C也足以导致格陵兰和西南极洲的大部分冰融化，以及东南极洲部分脆弱区域的冰盖消失。这一过程将引发不可逆的海平面上升，未来几个世纪内可能超过10m，即便气温随后下降也无法扭转。这种长期且不可阻挡的海平面上升速度将为沿海地区带来重大的长期持续性挑战，并导致关键基础设施（约75%的500万人口以上的城市位于海拔10m以下）、农业用地、以及依赖这些高风险地区的人群生计的大范围损失和破坏。

**山地冰川和积雪：**即使全球气温上升仅为2°C，也将导致本世纪内损失和损害加剧，远超许多山区和下游社区的适应能力极限。几乎所有热带和中纬度区的冰川将突破关键阈值，最终完全消失，尤其是亚洲高山地区冰川将损失约50%的冰量。现今已经出现的诸如冰湖溃决、洪水和山体滑坡等灾难性灾害事件，将变得更加频繁和严重。亚洲的风险尤为突出，因为溃决洪水可能在几乎没有预警的情况下，在短短几小时内冲毁基础设施和城镇。此外，在温暖的夏季生长季节，由于积雪和冰川融水减少，水循环将发生严重且可能是永久性的改变，进而影响粮食、能源和水资源安全。

**极地海洋：**当前的NDCs未能及时采取足够的减排措施，导致大气中的CO<sub>2</sub>水平接近500ppm，远高于极地海洋科学家几十年前确定的450ppm这一临界水平。这将带来极端的环境压力，影响海洋中的壳体生长动物以及食物链中的重要物种，如磷虾、鳕鱼、鲑鱼、龙虾和帝王蟹。这些极地生态系统所承受的压力将导致极地商业和自给性渔业出现损失和破坏。由大气CO<sub>2</sub>峰值水平所造成的这种腐蚀性海洋环境将是不可逆的，持续时间长达数万年。每年夏季数月海水变暖且缺乏海冰的情况，再加上海洋热浪，会导致更多损

失。脆弱的极地海洋物种无法及时适应此类变化。如果不紧急改善当前的国家自主贡献, 由于两极冰盖融水的侵入而导致洋流紊乱的可能性将越来越大。

**多年冻土:**当前温度水平下, 多年冻土融化所带来的温室气体排放将增加全球应对气候变化的减缓、适应以及损失和损害的负担。这不仅体现在基础设施受损的局部影响, 还因冻土融化导致的全球碳预算减少而带来深远影响。这是因为一旦冻土开始融化, 就会开始释放CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>。这些排放一旦开始就不可逆转, 而且在一两个世纪内都不会停止, 这意味着温室气体排放国后续需要通过相当规模的碳吸收来抵消这些排放。如果当前的NDCs没有大幅改进, 每年冻土的总排放量(以CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>形式)可能会达到整个欧盟的排放规模(以 2019 年为基准计算, 到 2100 年约为 2000 亿吨), 到 2300 年约为这一数字的两倍。由于北极变暖速度比是地球其它地区的 2~4 倍, 北方高纬度冻土区平均温度预计将上升 4~8°C。同时, 更极端的高温事件可能导致“突发解冻”过程, 比如海岸线或山坡坍塌、热熔湖泊形成。这些过程将导致更多、更深层的冻土暴露在冻融环境中, 其排放量可能远超当前预测。

**海冰:**两极海冰损失所引发的全球反馈效应会增加全球各地的适应负担以及损失与损害负担。北极地区, 每年可能有长达四个月(7月至10月)几乎完全无海冰覆盖。反射率较低的开阔水域会从极地 24 小时日照条件下吸收更多热量, 将导致北极进一步升温。北极变暖会加速沿海冻土融化, 向大气中释放更多碳, 并加剧海岸侵蚀; 加快格陵兰冰盖的融化, 导致海平面上升; 同时对中纬度地区的天气模式产生不可预测且可能极端的影响。在当前1.2°C的增温水平下, 按照现有趋势, 在 2.3°C 路径, 南极夏季海冰几乎完全消失似乎不可避免。失去海冰的支撑作用将加速冰架崩塌, 进一步加速南极冰盖的融化并导致海平面上升。此外, 由于海洋会长时间储存热量, 即便未来大气温度下降, 南极海冰的恢复也可能需要数十年。尽管一些经济分析人士认为北极海冰的减少可能为区域经济带来发展潜力, 但几乎可以肯定的是, 极端程度的损失和破坏以及日益增加的适应需求大大超越任何暂时的经济收益, 即使是北极国家本身也是如此。



来源: 美国空军, 照片由Mark C. Olsen中士拍摄/发布/Alamy

2012年飓风桑迪导致的曼哈顿下城洪水。2021年的一项研究发现, 桑迪造成的81亿美元损失中, 8.1亿美元是由于人为全球变暖引起的海平面上升所导致的。

## 当前CO<sub>2</sub>水平持续上升

(到 2100 年温升达 3~3.5°C, CO<sub>2</sub>约 650ppm)

如果大气中的CO<sub>2</sub>继续以当前的速度增长(尽管有当前的减排承诺,但这种增长并未停止),到本世纪末,全球温度预计将至少上升 3°C。在这种升温水平下,冰冻圈变化带来的损失和破坏将是极其严重的,远远超出许多社区和国家的适应极限。

**冰盖与海平面上升:**当气温升高超过 3°C后,格陵兰冰盖和西南极地区的冰损失将急剧加速,同时东南极部分地区也将经历大规模冰融。IPCC 指出,到 22 世纪初,海平面上升可能突破3m;到2200年有可能达到5m,到2300年则可能高达15m。尽管这些变化似乎发生在遥远的未来,但它们的不可避免性将在未来几十年内因决策而确定。当前的行动将决定气温是否会突破这些关键门槛,从而导致这一大规模的沿海破坏。

**冰川和积雪:**气候快速变暖将导致冰川和积雪的快速减少,进而带来的灾难性、连锁性的影响。到本世纪中叶,一些脆弱的山区和下游社区将因季节性缺水或无法恢复的毁灭性洪水灾害而陷入无法生存的境地。随着时间推移,亚洲高山区和阿拉斯加地区的一些规模较大的冰川也将难以存续。积雪将变得不稳定,在更高海拔地区、更频繁的降雪将由降雨取代。目前肥沃的农业地区,如塔里木河和科罗拉多河流域可能不再能够支持重要的农业活动。在许多高海拔生态系统中,冰冻圈变暖造成的山区生物多样性损失将达到极致。

**极地海洋:**如果大气中CO<sub>2</sub>持续以当前的速度累积,到本世纪末,CO<sub>2</sub>水平将至少达到600ppm,全球平均气温将超过3°C,此后还会继续升高。北极和南大洋将遭受严重的海洋酸化,在如此高的CO<sub>2</sub>浓度下,一些

近极海域,尤其是巴伦支海、北海和波罗的海等,也将出现与极地相当的酸化水平。腐蚀性环境将持续数万年(需3万至7万年才能恢复到现在的pH水平),这种情况几乎会导致极地物种的大规模灭绝,特别是海洋变暖和海洋中积蓄热量的长期效应共同作用下时。同时,极端的CO<sub>2</sub>水平引发的海洋极度暖化还将对当前的全球洋流系统产生严重影响,包括可能极大地干扰大西洋和南极的环流系统,后果难以预测。生态系统和人类社会将面临极端且不可逆转的损失和破坏,其影响将持续深远。

**多年冻土:**如果当前的快速变暖和冻土融化趋势持续下去,想要实现“冻土国家”和人类活动的净零排放将几乎不可能实现,因为冻土将迅速消耗掉大部分剩余碳预算,使升温保持在1.5°C以内的目标几乎无法达成。在如此高的温度下,大部分北极多年冻土和几乎所有山地多年冻土都将融化,到本世纪末产生的年度碳排放量非常巨大,将大大加速全球变暖。全球排放增加导致的损失和破坏将不断加剧,同时泛北极地区的基础设施也将面临更大的损坏风险,诸如山坡塌陷等灾难性事件也会增多,使多年冻土地区的经济负担加重,在许多地区远远超出适应极限。

**海冰:**如果大气中的CO<sub>2</sub>浓度以当前速度继续增加(尽管已有各类承诺,但浓度并未下降),到本世纪末,全球升温将至少达到3°C。在如此高温下,北冰洋每年将近180天无冰覆盖,导致北极区域变暖加剧、冻土进一步退化、格陵兰冰盖融化加剧以及极端天气事件频发。虽然南极海冰减少的程度尚不确定,但可能会与北极相当。由此带来的局部和全球损失及破坏将极为严重,远远超出人类的适应能力。



# 符合升温1.5°C的排放路径

(CO<sub>2</sub> 峰值约 430ppm)

只有通过这一路径,才能将冰冻圈的损失减缓到可控范围,使沿海和山地区域能够实现适应,从而显著减少损失与损害。

**冰盖与海平面上升:**在这一情景下,气温在2100年前达到1.6°C的峰值后逐渐下降至约1.4°C,海平面上升的速度将趋于稳定。但这需要紧急采取行动,包括大幅收紧减排承诺,并在2030年前将化石燃料排放量减少40%。然而最新科学研究表明,即便是1.5°C的升温目标可能也不足以保护南北两极冰盖,最佳情景下可能只是减缓海平面上升速度,但依然保持上升趋势。如果全球温度在1.5°C维持过长时间(数十年至数百年),格陵兰、西南极,甚至东南极的冰盖可能会发生大规模融化,从而锁定几千年的显著海平面上升。这种现象在地质历史时期曾发生过,当时由于地球轨道的缓慢变化,全球温度达到1.5°C,导致海平面比现在高出6至9m。

**冰川与积雪:**有效的减排行动能够帮助部分中纬度地区保留至少15~35%的冰川冰量,包括斯堪的纳维亚、阿尔卑斯山和冰岛;在高加索山脉、新西兰及安第斯山脉的许多地区,最多可保留50%的现存冰量。在亚洲高山地区,冰川损失将显著减少,预计可保留约三分之二的冰川冰量。但周边社区必须在未来几十年为重大适应工作做好准备,包括积极应对极端雨雪事件引发的灾难性洪灾。然而,对于大多数社区而言,这些变化不会超过其适应极限,并且冰川融化速度将在本世纪中叶减缓,并在2100年左右趋于稳定。积雪也将趋于稳定,但其分布海拔比目前更高。某些冰川甚至可能在2200年代初显现出极其缓慢的再生迹象,或将成为全球走向净零碳排放复原路径的最早征兆之一。

**极地海洋:**如果采取即刻且有力的减缓措施,将全球升温控制在接近《巴黎协定》1.5°C目标的范围内,大气中CO<sub>2</sub>浓度可稳定在450 ppm以下。最理想情况下,CO<sub>2</sub>峰值将降至430 ppm,这将有效将腐蚀性

压力的影响限制在北极和南大洋部分区域的季节性损害范围内。目前已有迹象表明,我们正接近这一门槛:2024年,毛伊岛观测到两次CO<sub>2</sub>浓度达到428 ppm。尽管如此,部分损失仍不可避免,例如,海洋热浪与极端酸化的复合性破坏事件在当前的1.2°C升温情景下已经导致了一些种群崩溃。同时,主要洋流的流速减缓也有了初步迹象。预计在1.5°C温升下,这些现象会更加严重。然而,按照非常低的排放路径,到2100年全球温度可能下降至1.4°C以下,大气中的CO<sub>2</sub>浓度也将呈下降趋势。

**多年冻土:**温升保持在1.5°C以下仍会导致大量冻土融化及相关温室气体排放,但鉴于北极的温度将“仅”比现在平均高出3~4°C,排放规模会小得多。这意味着抵消冻土排放所需的额外减排量会少得多,从而将损失与损害降到最低,并减少适应需求。与未大力改进当前国家自主贡献(2.2°C)情况下的影响相比,如果全球平均温度保持在1.5°C以下,“冻土覆盖的国家与地区”——俄罗斯、加拿大和阿拉斯加,以及青藏高原和其他山区的基础设施破坏也会少得多。虽然冻土的年排放量仍需后来抵消,但与当前国家自主贡献情景下相比,到2100年的总排放量预计减少30%(约120~1500亿吨)。

**海冰:**研究一致表明,即使全球气温升高限制在1.5°C,北极海冰在部分夏季仍会几乎完全融化,但不是每年都会发生,且持续时间较短(几天到几周)。减少无冰状况的频率将极大地减少北极地区和全球的影响及反馈,减轻适应负担。然而,北极原住民和沿海社区仍可能面临部分损失和破坏。尽管对南极周边的海冰损失的预测还不够明确,但2023–2024年的创纪录的低冰量表明,其夏季海冰完全消失的阈值可能比北极更低。在“极低”排放路径下(SSP1~1.6,峰值为1.6°C),到2100年,随着全球气温下降至1.4°C以下,南北两极的海冰可能实现一定程度的恢复。

# 2024年重要研究新认知

2024年冰冻圈关键的发展和研究发现,详情请见以下章节。

## 冰冻圈阈值和临界点

由于冰冻圈对气温响应敏感,任何超出《巴黎协定》1.5°C升温限制的情况都极具风险,1.5°C这一阈值被突破的时间越长、峰值温度越高,极地冰盖、许多陆地冰川以及大西洋经向翻转环流(AMOC)越过临界点的风险就越大[1]。

多年冻土融化会随着温度的逐渐升高而加剧,不会出现突如其来的“临界点”,多年冻土融化情况没有“安全边际”,而且温度升高会使局部破坏和全球反馈效应恶化[2]。

极地海洋酸化同样没有明确的临界点,但是会持续数千年,随着大气中CO<sub>2</sub>浓度的上升而恶化,现今已经对壳类生物造成了明显损害[3]。

## 冰盖和冰川消融导致的海平面上升

- 在过去 30 年里,全球海平面上升速度已经翻倍。如果这种趋势持续下去,海平面上升速度将在2025年增至6.5mm每年,超过可行的适应极限[4,5]。
- 一项涵盖 16 个主要冰盖模型的研究强调若当前高排放持续,南极冰盖融化可能引发海平面急剧上升风险,到 2300 年海平面可能上升 6.9m。40% 的模型预测,在高排放情况下,西南极冰盖将在 2300 年崩溃[6]。
- 一项新模拟表明,思韦茨(Thwaites)和史密斯(Smith)冰川不可阻挡的物质损失趋势已成定局,尽管较低的温度会减缓海平面上升,但由于西南极冰架融化导致的海平面长期上升的临界点已被超越[7]。另一项研究表明,即使长时间维持在当前1.2°C的温升水平,也足以引发这些地区未来不可逆转的冰量损失[8]。
- 环绕南极的冰架可能比之前认为的更容易崩塌。这些冰架有助于稳定南极大陆冰盖,因此一旦冰架消失,可能导致冰盖加速融化进而导致海平面上升[9~13]。
- 潮汐泵送机制可能导致南极冰盖许多区域的融化速度失控,并有可能使一些南极冰川区域的海平面上升加倍[14,15]。
- 目前,格陵兰冰盖平均每小时损失 3000 万吨冰[16],这是造成海平面上升的最大因素。
- 沉积物岩芯样记录显示,格陵兰岛中心现在被 3km 厚的冰层覆盖,在过去一百万年里曾出现一次无冰状况,尽管二氧化碳水平从未超过 320ppm。当前格陵兰岛的二氧化碳含量已超过 420ppm,这使得格陵兰岛完全处于危险区域[17,18]。

## 海冰损失

- 只有保持1.5°C温控目标的低排放情景,才能维持北极一些多年海冰。若全球温升2°C,北极地区将出现长达三个月的无海冰状态,进而导致北极及全球进一步升温[19]。
- 南极海冰覆盖面积连续第三个夏季降至 200 万km<sup>2</sup>以下,目前在南极周边所有区域都观测到了低海冰覆盖率的情况[20,21]。
- 由于海拔减少,1980–1988 年至 2016–2023 年间,北极海冰的反射率和全球冷却效应降低了 17~22%。同期,南极海冰带来的冷却效应降低了 9~14%[22]。
- 如果持续当前的高排放,世界现存的 19 个北极熊种群中,至少有 3 个位于加拿大哈得逊湾周边的种群,将在未来几十年内因海冰消失而灭绝[23]。
- 在持续的高排放情景下,海冰范围不断缩小,这将使阿拉斯加北极地区的海岸线面临更严重的洪水、风暴潮和海岸侵蚀灾害[24]。

多年冻土融化

- 首次全面估算包括CO<sub>2</sub>、NH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O在内的多年冻土融化的温室气体排放量,发现北极 - 北方多年冻土区升温导致其已成为温室气体的净排放源[25]。如果气温继续升高,这些地区排放量将持续增加[26]。
- 持续高排放将在 2080 年之前引发北极大陆架海底多年冻土迅速且不可逆转的融化,到 2300 年,所有厚度不足 100m 的沿海多年冻土都将消失,部分原因是海冰损失加剧导致的。只有低排放才能维持北极大片海底多年冻土在未来一千年内的冻结状态[27]。

极地海洋

- 2024 年,大气中的CO<sub>2</sub>浓度多次达到 428ppm[28], 预计今年平均浓度将接近 424ppm[29], 两极海洋不可逆转的酸化现象将因此加剧。自 1990 年代以来,南极周围南大洋水域的酸化一直在加剧,甚至影响到南极海洋保护区内的水域[3,30]。
- 由于冰盖和海冰融化以及海水变暖,重要的大西洋经向翻转环流 (AMOC) 可能即将崩溃。一旦达到崩溃点,大西洋经向翻转环流很可能在数千年内无法恢复[31]。
- 大西洋经向翻转环流崩溃将产生深远且剧烈的影响,包括北欧每十年快速降温3°C以上,且没有切实可行的适应办法[32~35]。鉴于这种崩溃的证据不断增加,一个由 40 位著名海洋和气候科学家组成的小组警告各国领导人迫切需要减少碳排放[36]。
- 与此类似且鲜为人知,由于冰盖融水进入南大洋,环绕南极洲的南极绕极流 (ACC) 似乎也在减缓,这不仅可能使南极绕极流减速,还可能影响全球海洋环流[37]。
- 由于早期变暖引起的环流变化,即使二氧化碳净排放为零,南大洋可能仍会持续变暖,这更加凸显了尽快抑制碳排放的必要性[38]。
- 迄今为止,海洋变暖正逐渐取代气温升高,成为导致北极海冰大量减少的最重要的原因;而且即使气温下降,海洋变暖的影响仍将持续,这可能会减缓海冰的恢复速度[39]。
- 北极海域的变暖速度比其他海域更快,在持续高排放和变暖的情况下,海洋热浪的数量和持续时间将进一步增加,对北极渔业和生态系统造成损害[40]。

山地冰川和积雪

- 2023 年全球出现了创纪录的冰川融化现象[41]。瑞典出现了 80 年观测记录以来冰川融化最快速度[42], 2024 年亚洲的冰川融化也呈现创纪录的趋势[43]。
- 极低的降雪量加上极高的夏季气温可能是导致这些地区2024 年出现大量冰川损失的原因,兴都库什 - 喜马拉雅地区出现了创纪录的低降雪量,这使得南亚供水问题日益受到关注[43]。
- 2024 年,委内瑞拉失去了该国最后一条冰川 —— 洪堡冰川,该国和斯洛文尼亚成为现代最先失去冰川的两个国家。颇具反讽意味的是,印度尼西亚的查亚峰(又名“永恒冰川”)作为亚洲最后一座热带冰川,很可能在未来两年内步其后尘。
- 目前,安第斯山脉的 5500 座冰川已经失去了 25% 的冰川覆盖,而且安第斯山脉热带冰川的融化速度比全球平均速度快十倍[44,45]。
- 目前有 1000 万人面临着因冰川湖溃决洪水而引发的灾难性洪水灾害风险,特别是在阿拉斯加、亚洲高山区和冰岛[46]。
- 即使没有进一步变暖,到 2050 年,至少三分之一的欧洲阿尔卑斯山冰川将会消失;但如果当前的高排放情景持续下去,到2050年可能会有三分之二的冰川消失[47]。倘若不按照与 1.5°C 温控目标相符的方式减排,这些冰川在 2050 年后的存续将面临极大风险。



## 参考文献

- Möller, T., et al. (2024). Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nature Communications*, v. 15, no. 1, 6192, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49863-0>.
- Nitzbon, J., et al. (2024). No respite from permafrost-thaw impacts in the absence of a global tipping point. *Nature Climate Change*, v. 14, no. 6, 573–585, <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02011-4>.
- Mazloff, M.R., et al. (2023). Southern Ocean Acidification Revealed by Biogeochemical-Argo Floats. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 128, no. 5, e2022JC019530, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022JC019530>.
- Hamlington, B.D., et al. (2024). The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 601, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>.
- Saintilan, N., et al. (2023). Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5°C. *Nature*, v. 621, no. 7977, 112–119, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06448-z>.
- Seroussi, H., et al. (2024). Evolution of the Antarctic Ice Sheet Over the Next Three Centuries From an ISMIP6 Model Ensemble. *Earth's Future*, v. 12, no. 9, e2024EF004561, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024EF004561>.
- Bett, D.T., et al. (2024). Coupled ice–ocean interactions during future retreat of West Antarctic ice streams in the Amundsen Sea sector. *The Cryosphere*, v. 18, no. 6, 2653–2675, <https://doi.org/10.5194/tc-18-2653-2024>.
- Reese, R., et al. (2023). The stability of present-day Antarctic grounding lines – Part 2: Onset of irreversible retreat of Amundsen Sea glaciers under current climate on centennial timescales cannot be excluded. *The Cryosphere*, v. 17, no. 9, 3761–3783, <https://doi.org/10.5194/tc-17-3761-2023>.
- Si, Y., et al. (2024). Antarctic Slope Undercurrent and onshore heat transport driven by ice shelf melting. *Science Advances*, v. 10, no. 16, ead10601, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.ad10601>.
- Pelle, T., et al. (2023). Subglacial discharge accelerates future retreat of Denman and Scott Glaciers, East Antarctica. *Science Advances*, v. 9, no. 43, eadi9014, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.ad19014>.
- Pelle, T., et al. (2024). Subglacial Discharge Accelerates Dynamic Retreat of Aurora Subglacial Basin Outlet Glaciers, East Antarctica, Over the 21st Century. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 129, no. 7, e2023JF007513, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023JF007513>.
- Miles, B.W.J. and R.G. Bingham (2024). Progressive unanchoring of Antarctic ice shelves since 1973. *Nature*, v. 626, no. 8000, 785–791, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07049-0>.
- Naughten, K.A., P.R. Holland, and J. De Rydt (2023). Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x>.
- Bradley, A.T. and I.J. Hewitt (2024). Tipping point in ice-sheet grounding-zone melting due to ocean water intrusion. *Nature Geoscience*, v. 17, no. 7, 631–637, <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01465-7>.
- Robel, A.A., E. Wilson, and H. Seroussi (2022). Layered seawater intrusion and melt under grounded ice. *The Cryosphere*, v. 16, no. 2, 451–469, <https://doi.org/10.5194/tc-16-451-2022>.
- Greene, C.A., et al. (2024). Ubiquitous acceleration in Greenland Ice Sheet calving from 1985 to 2022. *Nature*, v. 625, no. 7995, 523–528, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06863-2>.
- Bierman, P.R., et al. (2024). Plant, insect, and fungi fossils under the center of Greenland's ice sheet are evidence of ice-free times. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 121, no. 33, e2407465121, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2407465121>.
- Christ, A.J., et al. (2023). Deglaciation of northwestern Greenland during Marine Isotope Stage 11. *Science*, v. 381, no. 6655, 330–335, <https://doi.org/doi:10.1126/science.ad4248>.
- Jahn, A., M.M. Holland, and J.E. Kay (2024). Projections of an ice-free Arctic Ocean. *Nature Reviews Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00515-9>.
- NSIDC (2024). Antarctic sea ice extent hits a third low in a row. <https://nsidc.org/sea-ice-today/analyses/antarctic-sea-ice-extent-hits-third-low-row>.
- Hobbs, W., et al. (2024). Observational Evidence for a Regime Shift in Summer Antarctic Sea Ice. *Journal of Climate*, v. 37, no. 7, 2263–2275, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0479.1>.
- Duspayev, A., M.G. Flanner, and A. Riihelä (2024). Earth's Sea Ice Radiative Effect From 1980 to 2023. *Geophysical Research Letters*, v. 51, no. 14, e2024GL109608, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024GL109608>.
- Stroeve, J., et al. (2024). Ice-free period too long for Southern and Western Hudson Bay polar bear populations if global warming exceeds 1.6 to 2.6°C. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 296, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01430-7>.
- Henke, M., et al. (2024). Increasing coastal exposure to extreme wave events in the Alaskan Arctic as the open water season expands. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 165, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01323-9>.
- Ramage, J., et al. (2024). The Net GHG Balance and Budget of the Permafrost Region (2000–2020) From Ecosystem Flux Upscaling. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 38, no. 4, e2023GB007953, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023GB007953>.
- See, C.R., et al. (2024). Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems. *Nature Climate Change*, v. 14, no. 8, 853–862, <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02057-4>.
- Creel, R.C., et al. (2024). Glacial isostatic adjustment reduces past and future Arctic subsea permafrost. *Nature Communications*, v. 15, no. 1, 3232, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45906-8>.
- NOAA Global Monitoring Laboratory (2024). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. <https://doi.org/https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.
- UK Met Office (2024). Mauna Loa carbon dioxide forecast for 2024. <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/forecasts/co2-forecast>.
- Nissen, C., et al. (2024). Severe 21st-century ocean acidification in Antarctic Marine Protected Areas. *Nature Communications*, v. 15, no. 1, 259, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44438-x>.
- Curtis, P.E. and A.V. Fedorov (2024). Collapse and slow recovery of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) under abrupt greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, v. 62, no. 7, 5949–5970, <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07185-3>.
- van Westen, R.M., M. Kliphuis, and H.A. Dijkstra (2024). Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances*, v. 10, no. 6, eadk1189, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.adk1189>.
- Ditlevsen, P. and S. Ditlevsen (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications*, v. 14, no. 1, 4254, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.

34. Bryden, H., et al. (2024). Comparing observed and modelled components of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26°N. *Ocean Sci.*, v. 20, no. 2, 589–599, <https://doi.org/10.5194/os-20-589-2024>.

35. Chapman, R., et al. (2024). Quantifying risk of a noise-induced AMOC collapse from northern and tropical Atlantic Ocean variability. *arXiv preprint arXiv:2405.10929*.

36. Open Letter by Climate Scientists to the Nordic Council of Ministers by 44 leading experts on ocean circulation.

37. Sohail, T., et al. (2024). Future decline of Antarctic Circumpolar Current due to polar ocean freshening. *Authorea Preprint*, <https://doi.org/10.22541/essoar.170294047.79411138/v3>.

38. Chamberlain, M.A., T. Ziehn, and R.M. Law (2024). The Southern Ocean as the climate's freight train – driving ongoing global warming under zero-emission scenarios with ACCESS-ESM1.5. *Biogeosciences*, v. 21, no. 12, 3053–3073, <https://doi.org/10.5194/bg-21-3053-2024>.

39. Oldenburg, D., et al. (2024). The Respective Roles of Ocean Heat Transport and Surface Heat Fluxes in Driving Arctic Ocean Warming and Sea Ice Decline. *Journal of Climate*, v. 37, no. 4, 1431–1448, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0399.1>.

40. Richaud, B., et al. (2024). Drivers of Marine Heatwaves in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 129, no. 2, e2023JC020324, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023JC020324>.

41. Zemp, M., et al., (eds.), (2023). WGMS: Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, publication based on database version: <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2023-09>.

42. Forsberg, L. (2024). Rekordstor minskning av svenska glaciärer. *Forskning.se*. <https://www.forskning.se/2024/10/04/rekordstor-minskning-av-svenska-glaciarer>.

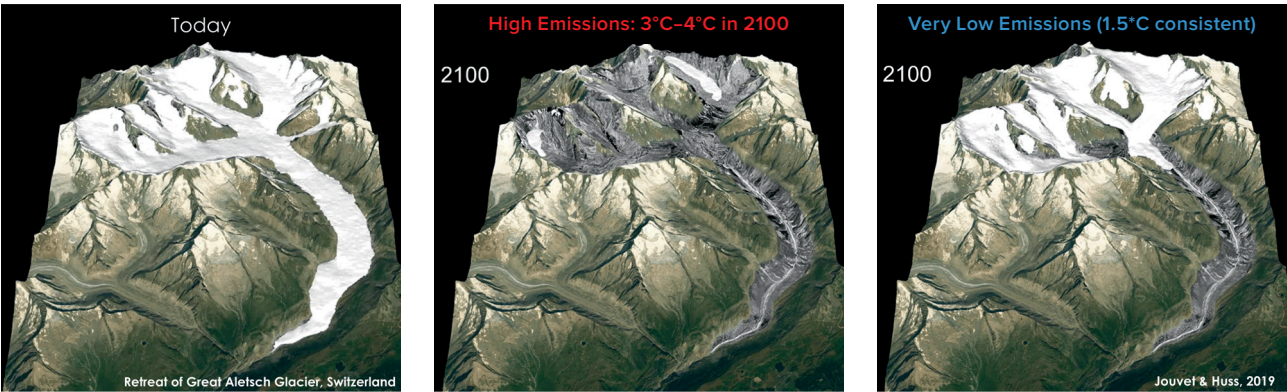
43. Saikia, A. and C. Seldon (2024). Record low snowfall sounds alarm for water security in the Hindu Kush Himalaya. *ICIMOD*, <https://blog.icimod.org/cryosphere-water/cryosphere-water-record-low-snowfall-sounds-alarm-for-water-security-in-the-hindu-kush-himalaya>.

44. Gorin, A.L., et al. (2024). Recent tropical Andean glacier retreat is unprecedented in the Holocene. *Science*, v. 385, no. 6708, 517–521, <https://doi.org/doi:10.1126/science.adg7546>.

45. Carrivick, J.L., et al. (2024). Accelerating Glacier Area Loss Across the Andes Since the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, v. 51, no. 13, e2024GL109154, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024GL109154>.

46. Zhang, G., et al. (2024). Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 5, no. 6, 447–462, <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>.

47. Cook, S.J., et al. (2023). Committed Ice Loss in the European Alps Until 2050 Using a Deep-Learning-Aided 3D Ice-Flow Model With Data Assimilation. *Geophysical Research Letters*, v. 50, no. 23, e2023GL105029, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023GL105029>.



NDC的选择决定阿莱奇冰川的未来

尽管即使在低排放情景下，系统中已经积累的热量仍会导致大量冰川冰层消失，但到2100年，不同NDC带来的差异将变得显而易见，尤其对季节性下游水源供应和1.5°C一致路径下的韧性方面会产生积极影响。

图片提供: MATTHIAS HUSS





# 保护冰冻圈刻不容缓： 减排至关重要

极低排放仍能避免极端损失和损害，  
但行动机会窗口稍纵即逝

## 摘要

本报告中温度、CO<sub>2</sub>和排放水平的定义

**当前国家自主贡献 (NDCs): 同2024年报告, 预计至2100年全球升温2.3°C**

气候行动追踪联盟 (CAT<sup>1</sup>) 最新的评估表明, 基于当前的实施政策和措施, 预计到2100年全球升温2.7°C (2.2~3.4°C); 若基于2030年的国家自主贡献 (NDCs) 且不包括长期“净零”排放目标, 全球升温2.5°C (2.0~3.5°C); 若包含长期“净零”排放目标 (例如, 中国承诺于2060年前实现碳中和), 温升可降至2.1°C。此外, CAT联盟还提出了一个“乐观情景”: 假设所有已宣布的承诺和目标完全实现, 即使这些承诺尚未被纳入当前NDCs或政策中, 到2100年温升将可能控制在1.8°C (1.5~2.3°C) 范围内。在2024年《冰冻圈状况报告》中, “当前NDCs”指仅考虑2030年NDCs及包含“净零”目标的平均值, 即2.3°C。

**符合升温1.5°C的排放路径**

在最新的《第六次评估报告》(AR6) 中, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 概述了一系列符合巴黎协议1.5°C下限的社会经济排放路径。其中最具雄心的路径为SSP1-RCP1.9, 要求到2030年大幅减少约50%的排放量。按照该路径, 全球气温预计将在本世纪达到升温1.6°C的峰值, 但由于大气中碳的去除以及“净零”排放的实现, 到

2100年温升速率将下降至1.4°C。值得注意的是, CAT的“乐观情景”中也将1.5°C作为其预估下限。同时, 2024年的重新评估采用了IPCC的方法, 允许50%的概率将温升控制在1.5°C, 结果碳预算从2020年初的500Gt缩减至2024年初的200Gt。<sup>2</sup> 这意味着, 要实现巴黎协议的下限目标, 尽管实际上仍可行 (根据国际能源署 (IEA) 最新的《净零排放路线图》<sup>3</sup> 更新, 甚至在经济上是有利的), 但如果没有迅速调整, 尤其是主要碳排放国不积极行动, 实现该目标的机会窗口正在逐渐关闭。

**当前CO<sub>2</sub>水平持续上升: 在2024年报告中预测2100年升温为3~3.5°C**

尽管一些迹象表明碳排放的增长速度正在放缓, 并可能在本十年内达到峰值,<sup>2</sup> 但大气中二氧化碳浓度仍在持续增长。同比前年, 2024年年均增幅甚至已经加快, 这很可能是由于今年海洋变暖, 吸收的碳减少, 但也有迹象表明来自石油和天然气行业以及多年冻土中的甲烷排放量正在增加。<sup>4</sup> 如果维持目前每年2.5~3.3ppm的上升速度, CO<sub>2</sub>浓度可能在2100年左右达到600~670ppm, 导致气温较工业化前升高3~3.5°C。这种情况至少在1500年里未曾出现过。

1 <https://climateactiontracker.org/about/the-consortium/>

2 <https://essd.copernicus.org/articles/16/2625/2024/>

3 <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach/executive-summary>

4 <https://www.globalcarbonproject.org/methanebudget/24/publications.htm>

## 背景

冰冻圈在地球历史上曾对温度和温室气体浓度的缓慢变化作出响应。这些变化主要由地球围绕太阳轨道的小幅改变引发，通常历时数万年，导致温度逐渐升高，并引发冰盖、冰川、海冰以及冻土等冰冻圈元素的融化和消失。此外，地球自转轴方向的变化也会影响冰冻圈的响应。当地球的某一极更直接地面对太阳时，融化会更多地发生在格陵兰或南极，但不会同时影响两极。

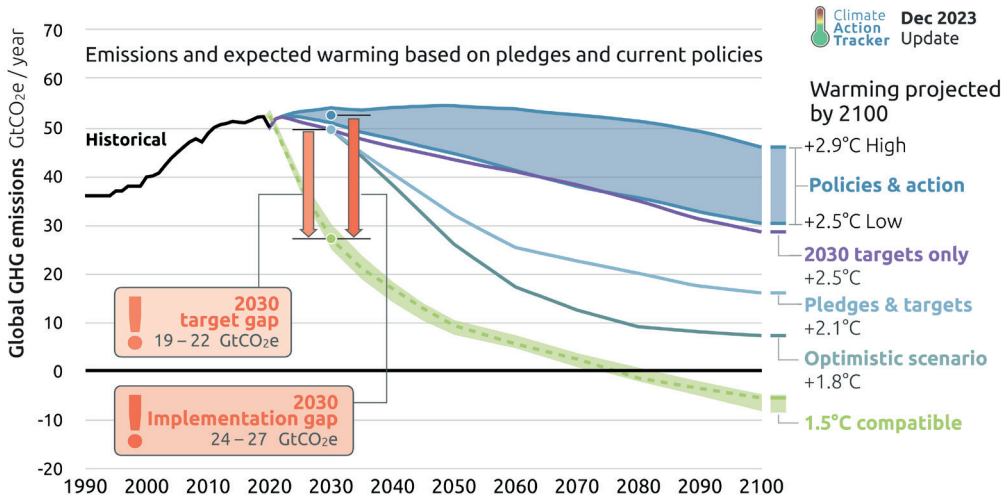
研究地球气候特征的古气候学家通过研究岩石和古代海岸线所记录的地质情况，来追溯数百万年来温度、二氧化碳浓度、海平面上升和冰盖历史之间的相互作用。通过冰芯中捕获的微小气泡或古代湖泊的沉积物岩芯，也可以追溯几万甚至几十万年前的温度和二氧化碳浓度变化。这些多样化的证据共同呈现了冰冻圈在过去如何以极其缓慢的方式对温度的上升作出反应——这一过程往往需要数百至数千年。

然而，与今天由于人类排放温室气体引发的变暖速度相比，过去的这些变化显得格外缓慢。在冰河时期，二氧化碳浓度约为 180 ppm，而在温暖的间冰期（包括过去 10,000 年）则约为 280 ppm。2024 年二氧化碳峰值浓度达到 428ppm，创下了人类历史上的最高记录，远超300万年以来任何时期的记录。截至 2023 年，CO<sub>2</sub>浓度较工业化前水平高出 50%。

最令人担忧的是，大气中CO<sub>2</sub>浓度仍以每年约 2.5ppm的速度持续上升，2023年升高了3.36ppm。根据联合国环境规划署(UNEP)于2024年10月发布的《排放差距报告》，2023年全球温室气体排放量创下新高，比 2022 年增加了 1.3%。而在过去的十年中，IPCC已经明确指出，每年需要减少约7%的排放量，才能保证实现1.5°C目标的可能性。UNEP的排放差距报告还指出，按照目前趋势，在全球排放量约占 80%的二十国集团(G20)中，有一个国家有望实现其 2030 年的国家自主贡献(NDC)减排目标。这种情况与《巴黎协定》所要求的减排措施形成鲜明对比。按照协定，二氧化碳浓度应在 2025 年前达到峰值并趋于稳定，尤其是在符合 1.5°C 温控目标的情景中。

由于各国和各行业持续不间断地排放二氧化碳及其他温室气体，使得地球的冰冻圈成为危险区。当前全球气温较工业化前升高了1.2°C，已引发一系列冰冻圈的严重损失，包括北极和南极海冰急剧减少、全球冰川大范围消融、格陵兰和南极冰盖加速消失、多年冻土广泛融化以及极地海洋酸化加剧。在升温1.2°C的情况下，冰冻圈的这些变化在全球范围内引发了一系列影响，包括：洪水和滑坡风险增加、雪水资源减少、海平面上升加速、多年冻土融化导致的基础设施损坏及温室气体释放、以及极地有壳生物的季节性破坏。此外，还可能引发极端天气事件和海洋洋流紊乱。

图 1-1. 2100年全球升温预测



来源：气候行动追踪全球更新，2023年12月

| 表格. IPCC AR6排放路径 |                    |                     |                         |
|------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|
| 排放路径             | 主要情景               | 预测至2100年的温度中值       | 2100年CO <sub>2</sub> 含量 |
| 非常低              | SSP1~1.9           | 1.4°C (短暂超过 1.5° 后) | 440                     |
| 低                | SSP1~2.6 (≈RCP2.6) | 1.8°C (之后降低)        | 450                     |
| 中等               | SSP2~4.5 (≈RCP4.5) | 2.7°C (之后上升)        | 650                     |
| 高                | SSP3~7.0           | 3.6°C (之后上升)        | 800                     |
| 非常高              | SSP5~8.5 (≈RCP8.5) | 4.4°C (之后上升)        | 1000+                   |

当前的冰冻圈变化几乎无法在人类时间尺度内逆转,并且随着每一小部分全球气温的升高和大气中二氧化碳浓度的增加而进一步恶化。由于冰冻圈响应敏感,即使温度未达到 2°C,这些变化也可能因冰冻圈的物理响应带来灾难性的后果。

然而,这并不是一个既定的结果。多个研究和报告,例如IPCC在2018年发布的《全球升温 1.5°C 特别报告》(SR1.5)和2023 年 3 月发布的第六次综合评估报告(AR6),更新了目前的研究结果,并概述了更多路径(见下表)。其他专家组织,特别是[国际能源署\(IEA\)](#)、[气候分析组织](#)以及[联合国秘书长古特雷斯](#)发起的[倡议](#),均阐述了如何实现 1.5°C 的目标。2024 年UNEP的《排放差距报告》总结指出,尽管现行政策与《巴黎协定》目标之间存在巨大差距,但直至 2030

和2035 年,仍有足够的技术潜力,通过减排来弥合与 1.5°C 目标之间的差距,且每吨CO<sub>2</sub>当量的减排成本低于 200 美元。

然而,所有这些符合 1.5°C 标准的解决方案都需要在未来几年内大幅削减化石燃料的排放量,从而使二氧化碳排放量在 2030 年前达到峰值。

将全球升温控制在 1.5°C以下或非常接近这一水平的情景在理论、技术和经济层面仍然是可行的,甚至对人类和生态系统都有利,尤其是因为其中许多要素能极大地改善人类健康状况。早期排放减少主要集中在交通和电力领域。具体来说,必须逐步淘汰并绝不能再扩大使用多数化石燃料,特别是煤炭的使用,石油和天然气的使用量也需减少。非经合组织国家(OECD)尤其需要获得支持,以实现碳中和发

## 低排放情景对冰冻圈的影响

### SSP1~1.9 (非常低排放情景,峰值温度 1.6°C,并在2100年降至1.4°C)的要求:

- 1) 通过逐步减少化石燃料的使用,到2023年,全球温室气体排放量需比2019年水平减少至少 42%,到2035年减少 57%;
- 2) 到2050年实现碳中和(CO<sub>2</sub>净零排放)
- 3) 此后实现净负排放(碳回收)

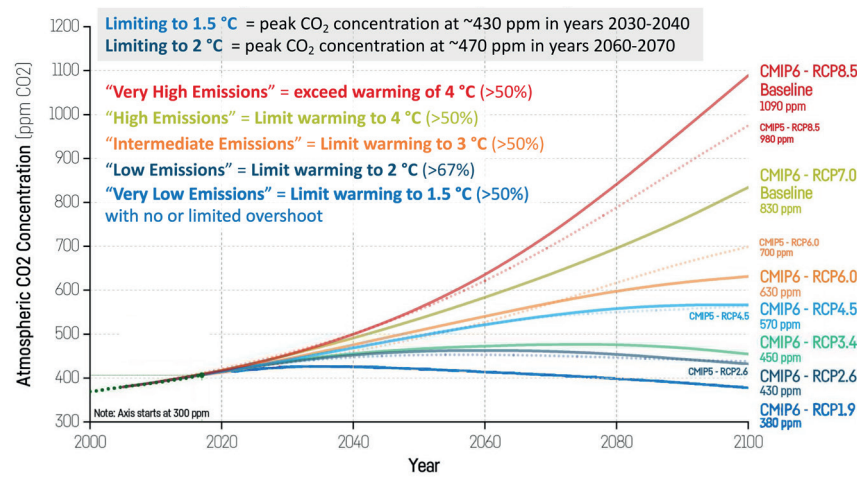
如果采取这些在技术和经济上仍然可行的减排措施,冰冻圈将在2040年至2080年间逐步趋于稳定。来自多年冻土的二氧化碳和甲烷缓慢排放将在1至2个世纪后停止。积雪覆盖将趋于稳定,但水平低于当前状况。冰川的快速消融将持续几十

年,但到2100年速度将减缓;部分冰川仍会消失,而另一些可能开始重新增长。北极海冰将在夏季接近完全消失的边缘略微稳定。腐蚀性海水对带壳生物的威胁将主要局限于极地和近极地地区,并持续数千年。冰盖损失和海平面上升将因海洋变暖继续数百年甚至上千年,但全球海平面上升预计不会超过3米,并需要数个世纪才能达到这一水平。

相比之下,其他排放路径——即使是峰值温度达到1.8°C的“低排放”情景——都将导致冰冻圈更严重的长期损失和破坏,并在未来几个世纪乃至千年内持续加剧。



图1-2. 对于冰冻圈, 峰值温度和二氧化碳浓度至关重要: 超标是不可接受的



数据来源: IIASA SSP 数据库 V2 (2018年发布); NOAA ESRL Mauna Loa 二氧化碳年均数据; IIASA RCP 数据库; LIVEMAGICC

展。2050 年之后, 通过改变农业实践或采用机械碳移除技术实现“负排放”将有助于更快速地降低大气中的二氧化碳水平, 预计全球温度将在本世纪末开始下降。随着温度下降, 一些益处(如极端天气的轻微减少)可能会尽早显现。

因此, 问题并不在于全球领导人没有实现1.5°C目标的方案, 而是他们和全人类必须下决心采取行动实施方案。一项2024年最新的研究表明, 剩余的碳预算已从2020年的约500Gt缩减至约200Gt。因此, 采取行动以最大限度减少与冰冻圈相关的全球性损失与损害的机会之窗已经非常有限。事实上, IPCC提出的一些极低排放路径已不再可能实现, 唯有朝着1.5°C目标进行有力和紧急的全面修正, 即按照剩余的“极低”排放路径行动, 才能在可适应的范围内减缓并最终阻止对冰冻圈的影响。

正如本报告各章节所述, 每上升 0.1°C 都至关重要。基于冰的熔点这一简单的物理事实, 冰冻圈各个部分在未来均会对我们今天所做的决策做出相应反馈。

这些变化几乎无法在人类时间尺度内逆转, 并且随着气温每升高一小部分以及大气中二氧化碳浓度的增加, 这些变化将会加剧。

### 科学审稿人

- Julie Brigham-Grette, University of Massachusetts Amherst
- Andrea Dutton, University of Wisconsin-Madison
- Matthew Gidden, IIASA
- Bill Hare, IPCC AR4, Climate Analytics
- Joeri Rogelj, IPCC CLA AR5, SR1.5 and AR6, Imperial College London
- Martin Siebert, University of Exeter
- Michiel Schaeffer, GAI, IPCC AR5
- Drew Shindell, IPCC CLA SR1.5, Duke University

## 文献与延伸阅读

- Briner, J., Cuzzzone, J., Badgeley, J., Young, N., Steig, E., Morlighem, M.,...Nowicki, S. (2020). Rate of mass loss from the Greenland Ice Sheet will exceed Holocene values this century. *Nature*, 70–74.
- P. Bierman et al. (2024). Plant, insect, and fungi fossils under the center of Greenland's ice sheet are evidence of ice-free times. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2407465121>
- Climate Action Tracker. Global Update, December 2023. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>
- DeConto, R., Pollard, D., Alley, R., Velicogna, I., Gasson, E., Gomez, N.,...Dutton Andrea. (2021). The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*, 83–89.
- Dutton, A., Carlson, A., Long, A., Milne, G., Clark, P., DeConto, R.,...Raymon, M. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*.
- P.M. Forster et al. (2024). Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 2625–2658, <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>.
- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., et al., 2018, A low energy demand scenario for meeting the 1.5 degrees C target and sustainable development goals without negative emission technologies, *Nature Energy*, Vol:3, ISSN:2058-7546, Pages:515–527
- Höhne, N., den Elzen, M., Rogelj, J., et al., 2020, Emissions: world has four times the work or one-third of the time., *Nature*, Vol:579, ISSN:0028-0836, Pages:25–28
- Hoepner, A.G.F., Rogelj, J., 2021, Emissions estimations should embed a precautionary principle, *Nature Climate Change*, Vol:11, ISSN:1758-678X, Pages:638–640
- IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.Shukla,A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C.Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield(eds.)].
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Lamboll, R.D., Nicholls, Z.R.J., Smith, C.J. et al. Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nat. Clim. Chang.* (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>
- Mengel, M., Nauels, A., Rogelj, J., et al., 2018, Committed sea-level rise under the Paris Agreement and the legacy of delayed mitigation action, *Nature Communications*, Vol:9, ISSN:2041-1723
- Noël, B., Kampenhout, L. van, Lenaerts, J. T. M., Berg, W. J. van de, & Broeke, M. R. van den. (2021). A 21st Century Warming Threshold for Sustained Greenland Ice Sheet Mass Loss. *Geophysical Research Letters*, 48(5). <https://doi.org/10.1029/2020gl090471>
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., et al., 2018, Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 degrees C, *Nature Climate Change*, Vol:8, ISSN:1758-678X, Pages:325–+
- Rogelj, J., Geden, O., Cowie, A., et al., 2021, Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix, *Nature*, Vol:591, ISSN: 0028-0836, Pages:365–368
- United Nations Environment Programme, 2024. *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>.

# 冰盖和海平面上升

## 当前气候政策可能触发长期的海平面上升与全球范围的大规模海岸线消失

**当前的国家自主贡献(预测至2100年全球气温上升2.3°C)：**现行的国家自主贡献已经不足以防止全球升温显著超越1.5°C。许多政府已将实质性的减排行动推迟到2040年、2050年或更远的未来，尽管目前看来，缓慢的化石燃料转型似乎可以降低能源成本，但它却会给未来带来更广泛的损失和破坏，在技术上可能实现的情况下，适应气候变化的需求会大幅增加，适应成本也会更高。综合冰川动力学模拟、古气候反演以及近期冰盖观测的最新研究成果表明，格陵兰冰盖和南极部分区域的冰盖稳定性阈值远低于2.2°C。许多冰盖研究者认为，升温超越1.5°C已经足以融化格陵兰和西南极的大部分冰盖，并可能影响到东南极的敏感区域，即使后期气温有所下降，未来几百年间全球海平面仍将保持超过10米、不可逆的上升趋势。这种长期且不可逆的海平面上升将给所有沿海地区带来持久性挑战。全球约75%的特大城市（人口超过500万）位于海拔10米以下的区域，这些地区的关键基础设施、农业用地和在这些高风险区域生活的人类的生计都将受到广泛损失和严重破坏。

**坚持贯彻1.5°C温控路径：**只有坚持贯彻1.5°C温控目标才能够将海平面上升的速度控制在沿海社区可适应的范围内，从而最大程度减少损失和破坏。至2100年，海平面上升速率趋于稳定，气温虽然将在中期达到1.6°C的峰值，但后期会逐渐回落至1.4°C左右。不过，实现这一目标需要迫切采取紧急气候行动，包括紧缩减排承诺，到2030年化石燃料排放需要减少40%。然而，最新科学研究表明，即使将升温控制在1.5°C，可能也不足以保护两大冰盖系统的稳定性，最好的情况也只是让海平面上升速率减缓。如果全球维持在1.5°C较长时间（数十年到数百年），格陵兰冰盖、西南极冰盖甚至东南极冰盖的融化可能会在未来几千年里导致持续显著的海平面上升。这一情况在地质历史上曾发生过，当时地球由于轨道变化而导致温度升高1.5°C，全球海平面曾比现在的海平面高出6~9米。

**二氧化碳水平持续上升(预测至2100年全球气温上升3~3.5°C)：**已有的减排承诺未能有效减缓目前大气中的二氧化碳浓度上升速率。如果大气中的二氧化碳浓度持续以当前速率增加，预估本世纪末全球气温将至少升高3°C。在这种温升水平下，两大冰盖融化造成的损失和破坏将极为严重，远超许多沿海社区的适应极限。这一判断基于：温升超过3°C时，格陵兰冰盖和西南极冰盖急剧消融。随着东南极部分区域出现大规模的冰损失，IPCC的评估将无法排除这样的场景：到2100年初海平面上升可能超过3米，到2200年可能超过5米，到2300年可能达到15米。看似遥远，但未来几十年的决策可能导致全球气温突破关键性临界点，从而不可避免地引发沿海区域遭受大规模破坏。



## 2024年最新认识

- 过去 30 年间,全球海平面的升高速率翻了一倍。从 1993 年到 2024 年,全球海平面升高超过 11 厘米,且呈现加速趋势:从 1993 年的 2.1 毫米/年增加到 2023 年的 4.5 毫米/年。如果按这种趋势继续发展,到 2030 年上升速率将增加到 5.0 毫米/年,2040 年将增加到 5.8 毫米/年,2050 年将增加到 6.5 毫米/年,这将为全球沿海地区的适应性措施带来广泛挑战[1]。
- 对生活在南极洲附近海域的章鱼进行 DNA 遗传分析,我们获得了重要的古气候证据:在上一次间冰期,全球平均气温仅比工业化前高约 1°C,但西南极冰盖 (WAIS) 就曾经发生完全崩塌,导致当时的全球海平面比现今高出 3 米多[2]。
- 卫星数据显示,潮汐作用将海水抽吸到思韦茨冰川 (西南极) 下方的冰腔内,影响范围最远可达到 12 公里,引发了剧烈的冰川底部融化[3]。如果海洋温度升高,这种“潮汐泵送机制”可能会导致南极冰盖许多区域底部出现失控性融化[4]。这个饱受关注的新发现的重要性体现在:可能使南极冰盖融化对全球海平面上升贡献增大一倍[5];尚未被目前用于预测全球海平面上升的模型所表征,包括 IPCC2022 年评估报告中所采用的模型;这意味着未来南极冰盖消融导致的海平面上升可能被严重低估[3,4]。
- 一个基于西南极阿蒙森海地区新的冰川-海洋耦合模型显示,即使不考虑进一步的冰底融化,思韦茨冰川和史密斯冰川的部分冰损失已经进入不可逆转阶段。这意味着该区域已越过临界点,西南极冰盖的冰损失将长期导致全球海平面上升[6]。这与最新的南极冰盖稳定性分析结果一致,稳定性分析表明,即使目前全球平均气温维持在比工业化前升高 +1.2°C 的水平,也足以在未来引发南极冰盖不可逆转的退缩,这种现象被称为“承诺性临界点转换”[7]。
- 对 16 个主要冰盖模型的比较研究表明,如果全球继续保持高排放路径,2100 年后南极冰川损失率极有可能显著加速。模型模拟结果显示,在高排放情景下,到 2100 年,仅南极冰盖消融可能导致海平面上升 28 厘米,如果其外围冰架崩塌,到 2200 年海平面上升可达 1.7 米,到 2300 年可达 6.9 米。40% 的模型预测西南极冰盖将在 2300 年前发生崩塌[8]。
- 最新的模型研究显示,在高排放情景下,东南极冰盖底部淡水输送驱动的海洋环流将加剧东南极部分冰盖边缘冰川的融化,这一机制估算东南极冰盖到 2100 年对海平面上升的贡献将比其他未考虑该过程的模型高出约 30%。这种“缺失”机制意味着部分东南极冰川将提前 25 年退缩,此前的预测可能低估了近期南极冰盖对海平面上升的贡献[9,10]。
- 在南极洲周围的漂浮冰架上还发现了一个新的淡水驱动的反馈回路:冰架融化导致更强的海洋潜流将更多的暖水抽吸到冰架底部,进一步加剧了冰架的融化<sup>11</sup>。冰架锚定点 (冰架与海床接触的地方) 能够阻滞冰体向海洋流动,但最新分析显示,自 2000 年以来,40% 的南极冰架锚定点面积出现萎缩[12]。冰架融化的加剧,尤其是当融化导致冰架完全崩塌时,西南极冰盖可能会进一步失稳。
- 一个采用最新冰盖模型预测未来海平面上升的研究显示,快速减排可能会通过地壳均衡回弹效应减缓南极洲冰层进一步流失。研究表明,在低排放情景下,这种地壳抬升可能会使南极冰盖在 2100 年后对海平面上升的长期贡献降低多达 40%。但是在高排放情景下这种效应将失效,因为地壳抬升速率无法抵消较高升温水平下的冰流失速率[13]。

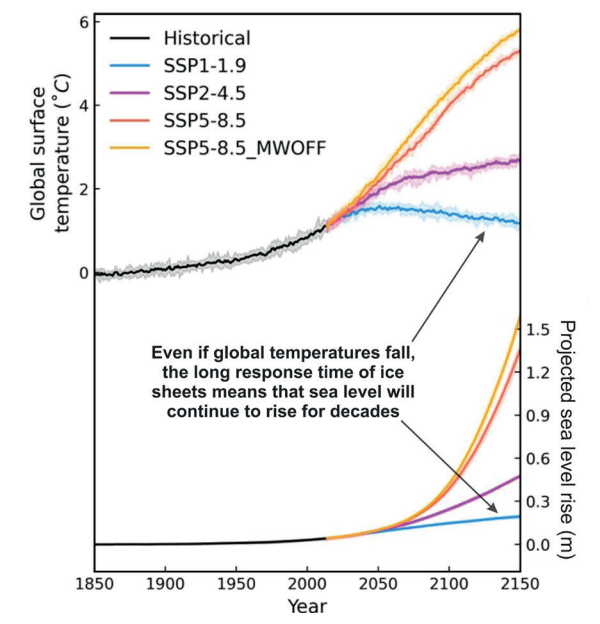
请见下页

## 背景

格陵兰和南极两大冰盖的冰储量足以导致全球海平面上升65米。随着气温和升温速率的增长,冰盖不可逆融化的风险也随之增加,每升高0.1°C都会显著提升该风险[18]。地球的气候记录清楚表明,即便升温超出工业化前1°C以上,也曾由于西南极冰盖(WAIS2)[2]、格陵兰冰盖[19,20]的大规模融化而导致地球海岸线改变。升温达1.5°C时,东南极的部分地区也可能受到影响[21]。虽然这些变化在过去的几千年中发生得较为缓慢,但也曾因冰盖崩塌导致海平面急速上升(每世纪上升约3.5~4米),这被称为“融水脉冲”。最后一次融水脉冲发生在大约14,500年前,当时南极洲的脆弱敏感区和曾覆盖北美和斯堪的纳维亚的冰盖崩塌,导致全球海平面在约350年间上升了12~18米[22,23]。

过去几十年中人类导致的全球升温速率远快于地球历史上已有的记录。地球过去的气候变化主要由轨道周期的缓慢变化驱动,而过去50年中二氧化碳浓度的上升速率是末次冰期结束时的200倍。这意味着未来冰盖损失和海平面上升(SLR)的速率可能会进一步加快,甚至超过过去几十年已观察到的加速趋势,且可能比过去13万年来的任何时期都更快[24]。

图2-1. 不同排放路径下预计到2150年的海平面上升



即使在“低排放”情景下(全球温度在1.8°C达到峰值后开始下降,紫色线, SSP2),海平面上升依然会加速。只有在2030年前达到峰值的“极低”化石燃料排放情景(蓝色线,峰值温度1.6°C, SSP1)才能减缓并稳定海平面上升,保护许多沿海社区,并为其他社区提供适应的时间。

来源: PARK等(2023)

## 2024年最新认识 (继上页)

- 最新观测显示格陵兰冰盖每小时损失约3000万吨冰[14]。自1978年以来,格陵兰北部的冰架已经损失了总体积的35%,其中三个冰架已完全崩塌[15]。
- 最新模型研究显示,格陵兰冰盖加速融化将导致欧洲在未来几十年内变得更加炎热和干燥。这是因为从格陵兰岛涌入北大西洋的融水会影响极地喷射气流,快速融冰期会引发夏季天气持续数年异常炎热、干燥。该模型预测,2023年观测到的快速冰流失可能会导致2024年和2025年欧洲南部出现高温热浪[16]。
- 冰芯钻探记录证实,在过去100万年间,在大气中二氧化碳浓度远低于目前水平的时期,格陵兰冰盖中心区域也曾出现过无冰现象。当时气候变暖(轻微的轨道变化)的影响远没有如今高浓度二氧化碳的致暖作用剧烈,仍然造成大量的冰流失,这也表明格陵兰冰盖对气候变暖的敏感性可能比此前认为的高[17]。
- 即使到2300年长期气温通过超调途径恢复到1.5°C,目前的气候政策仍不足以防止临界点被跨越。最新研究表明,突破1.5°C临界点的时间越长、大气峰值温度越高,西南极和格陵兰冰盖、大西洋经向翻转环流(AMOC)和亚马逊雨林跨越临界点的风险就越大[18]。

最新的冰盖研究,特别是冰盖与周围变暖海洋的相互作用,表明冰盖崩塌和海平面快速上升的可能性不容忽视[4,25~29],特别是在峰值升温超过1.5°C的情况下。尤其是对于西南极冰盖(WAIS),一些研究显示其最终崩塌的临界值可能已经在温度超出工业化前约0.8°C时达到[30~32]。虽然一旦超过临界值后冰盖的损失不可避免,但如果温升保持在1.5°C以下并尽快回落到更低水平,我们就可以延缓冰盖损失的发生,让沿海社区有更多时间适应海平面的上升。

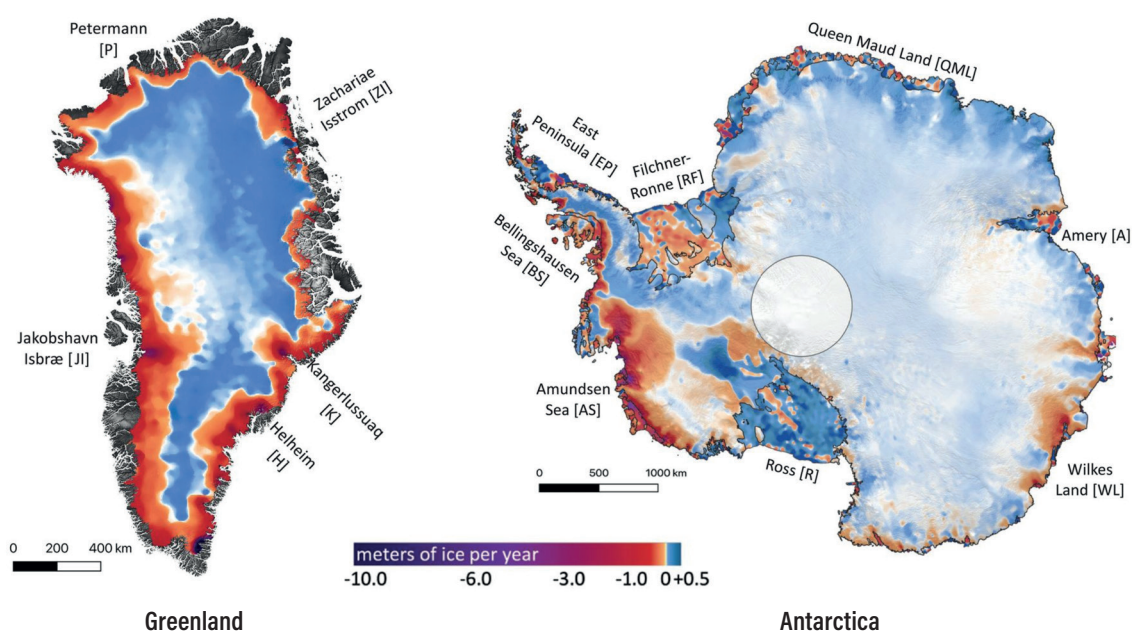
研究者有强烈的共识:冰盖大规模融化风险随着全球气温峰值和变暖速率的上升而增加[18]。巨大的格陵兰冰盖和南极冰盖由压实的雪构成,最古老的部分可追溯到一百多万年前[33,34]。在平衡状态下,冰山崩解和冰架底部消融所带来的冰量损失与降雪带来的冰量增加是平衡的。现在的观测结果证实,格陵兰、西南极冰盖以及南极半岛的平衡已经被打破,体积大十倍的东南极冰盖部分区域也可能已失衡。从1992年到2022年,地球上的两大冰盖一共损失了7560亿吨冰[35]。格陵兰冰盖每小时损失约3000万吨冰[14],如果这种冰损失加速的趋势持续下去,未来十年的冰损失量将超出IPCC[36]预测的上限[35]。

地球冰盖中“陆地冰”总质量的所有变化都直接影响全球海平面。在冰期,冰盖显著扩张,海平面比现在低约130米。而在暖期,随着冰盖冰量损失,海平面随之上升,且有明确证据表明因北美的劳伦泰德冰盖的快速崩塌直接导致出现“融水脉冲”。

南极浮冰架也在冰量损失中扮演着重要角色。因为它们通过坐落在孤立基岩高地上的“锚定点”向快速流动的陆地冰提供“支撑”作用,并在冰体滑动时产生摩擦力来阻碍上游陆地冰的流动。冰架的变薄和解体会减弱这种支撑作用,从而加速陆地冰体流入海洋[38]。1997年至2021年间,南极冰架净损失36,701±1,465平方公里,几乎相当于几内亚比绍的国土面积[39]。自2000年以来,40%南极锚定点的面积减小[12]。过去几十年来,由于南大洋底部温暖洋流侵入冰架底部冰腔[40~42],导致南极冰架减薄加速。由于暖流入侵导致的支撑作用减弱,占南极冰损失的很大比例[43,44],并可能在未来显著推动海平面上升[32,38,39,45]。

格陵兰岛和南极洲的部分地区存在一个融化临界点,一旦超过这个临界点,冰盖将不可避免地迅速发生不可逆转的融化[2,29,46~48]。在地球历史上,

图2-2. 目前的冰川融化区域 – 格陵兰与南极



与1990年代初期相比,格陵兰的冰川融化速度已增加至5倍,南极洲则增长了25%。

来源:SMITH等(2020)

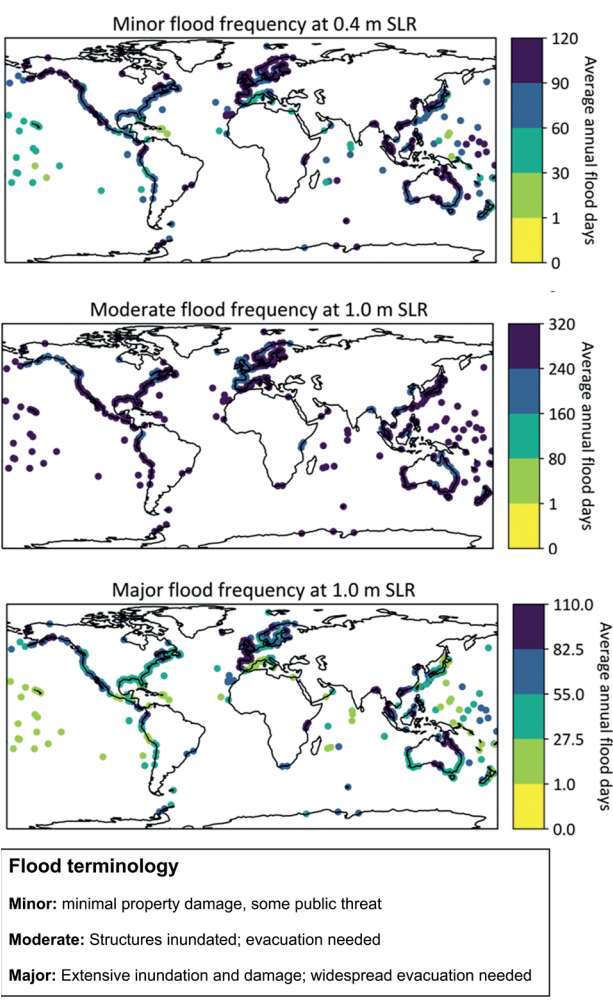


几个临界点出现在比工业化前温度高1~2℃的温度区间内：西南极冰盖(WAIS)和南极半岛大约在温度(升高)1℃时出现临界点(全部融化将引起约5米的海平面上升)；而格陵兰岛的临界点则出现在温度(升高)1.5~2℃之间(全部融化将引发约7米的海平面上升)[2,49]。需要注意的是，过去临界点附近的变化是由地球轨道的缓慢变化所驱动的，与今天因人类活动排放温室气体引起的快速变暖不同。一些最先进的海洋和冰盖模型表明，由于目前的化石燃料排放导致的海洋变暖(包括未来的未知程度的变暖)，西南极冰架的大规模融化(包括对维持冰盖稳定至关重要的

地区的冰架融化)已经变得不可避免。这意味着，即使在极低的排放情景下，保护大部分西南极冰盖(全部融化将导致海平面上升3.5米)的机会可能已经错失[6,7,32]。冰盖物质损失可能被减缓，但是无法被完全阻止。此外，东南极部分地区尤其是巨大的威尔克斯和极光盆地(全部融化将导致海平面上升8米)，其临界点可能在2℃左右或略高[21,50,51]。威尔克斯高地被称为东南极冰盖的“薄弱腹部”[52]，在过去三十年中一直处于质量亏损状态[21]，尤其是在2000年到2010年间，损失速度比1990年到2000年间增加了十倍[53]，这一变化主要是由海洋显著升温驱动的[54]。

由于这些临界点的存在，当地球历史时期温度较工业化升高2℃时，海平面曾比目前海平面高出12~20 m。约300万年前上新世时期，大气中二氧化碳浓度与现今相当，温度稳定在比工业化前高2~3℃水平，海平面可能比目前高20米以上。这表明格陵兰冰盖、西南极冰盖(WAIS)以及东南极冰盖(EAIS)部分地区消融对海平面上升均有贡献[49,55~57]。如此大规模的海

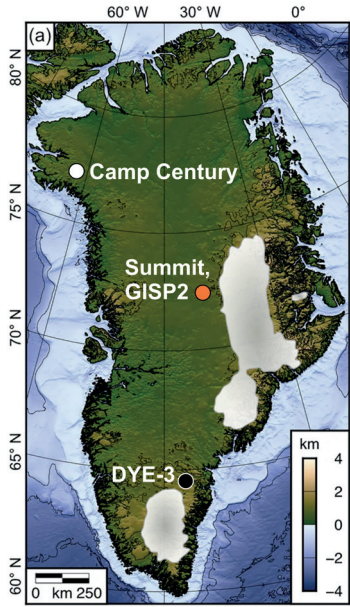
图2-3. 海岸洪水增加



0.4米和1米海平面上升对全球海岸地区洪水频率的影响。即便是较低程度的海平面上升，也会显著增加造成破坏和危险的海岸洪水发生频率。

来源：HAGUE等(2023)

图2-4. 格陵兰冰盖无冰的新发现



冰钻记录现已证实，在过去100万年内，格陵兰冰盖的中心曾一度没有冰层覆盖，尽管当时的二氧化碳浓度远低于现在。这一显著的冰层消失表明，格陵兰冰盖可能对相对较低的变暖水平非常敏感，即使当时的变暖原因远不如今天的高二氧化碳浓度那样极端。

来源：基于BIERMAN等(2024)；PAXMAN等(2024)



平面上升对今天的沿海地区将是灾难性的,然而,目前的全球变暖趋势可能会导致比过去引发这些海平面上升的温度峰值更高的水平。

格陵兰冰盖对大气温度升高的呈现线性响应模式(即反应更易预测)。格陵兰冰盖在某些区域厚度超过3000米,其内部海拔也超过3000米。当冰盖的高度因表面融化和冰流进入海洋而降低时,它将在全年中有更长时间暴露于冰点以上的气温环境中,最终导致大部分冰盖发生不可逆转的损失[58~62]。2021年8月,格陵兰最高点的气象站——萨米特站,首次记录到降雨事件,并持续数日。自1991年以来,格陵兰冰盖降雨量增加了33%,且极端降水事件更加频繁发生[63]。这些降水通过冰盖内延伸数百米深的微裂隙网络快速渗入冰盖,将温暖的表面水输送到冰盖内部,导致冰体内部升温,从而使冰盖内部融化[64]。现在格陵兰西北部冰下采集的古土壤证据表明,在过去二氧化碳浓度仅为280 ppm并持续3万年的时期,冰盖曾向内陆退缩至少200公里。最近的类似研究表明,即便是格陵兰的中央萨米特地区,在过去100万年内也曾出现过无冰状态[65],这意味着当过去二氧化碳浓度远低于当前水平的情况下,格陵兰冰盖至少90%的冰体就已融化——更不用说当前人类正迅速接近更高的二氧化碳浓度水平。这一发现与早期通过湖泊沉积物记录的北极变暖证据相吻合,突显了北极系统的脆弱性[66,67]。

西南极冰盖(以及东南极冰盖的大部分地区)情况大不相同:它的大部分冰并不是真正位于陆地上,而是位于被极深的(海平面以下超过2.5公里)、广阔的海洋盆地分隔的群岛之上[68~70]。它大部分冰体都位于一个向中心倾斜的冰底基岩上。当温暖海水融化

政策制定者今天所做的决定将影响未来海平面上升的速度,并在未来几个世纪内引发与此相关的安全和发展风险。

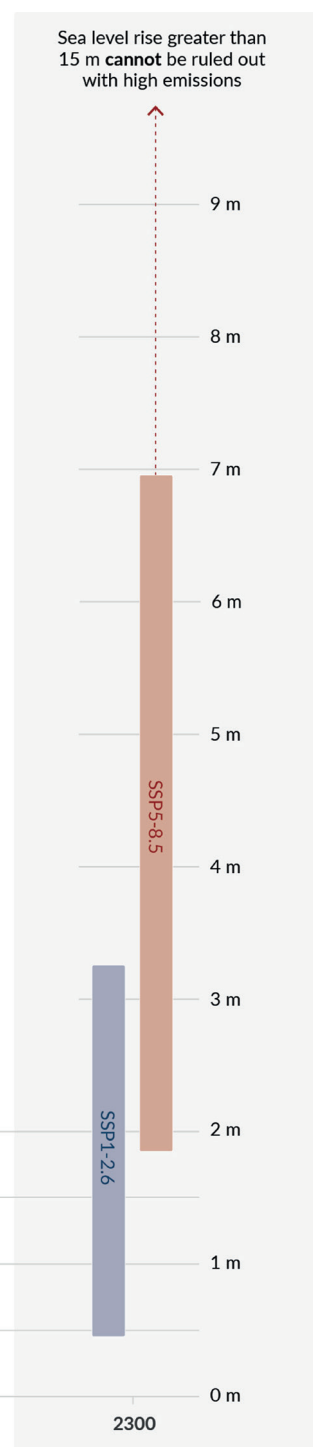
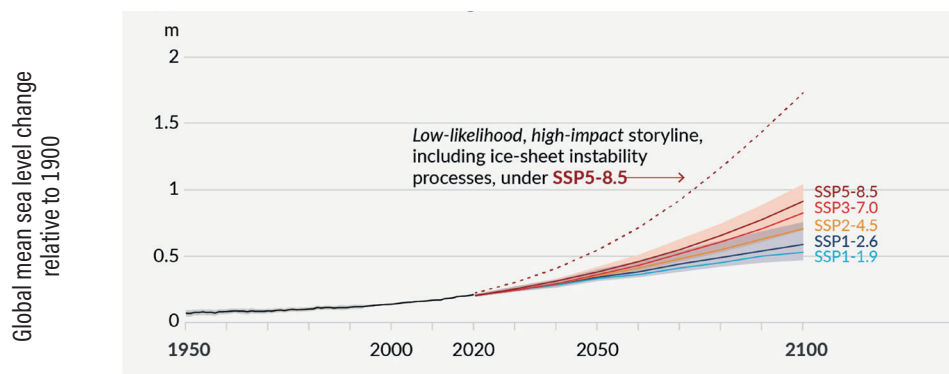


图2-5. 不同排放情景下未来海平面上升的预测

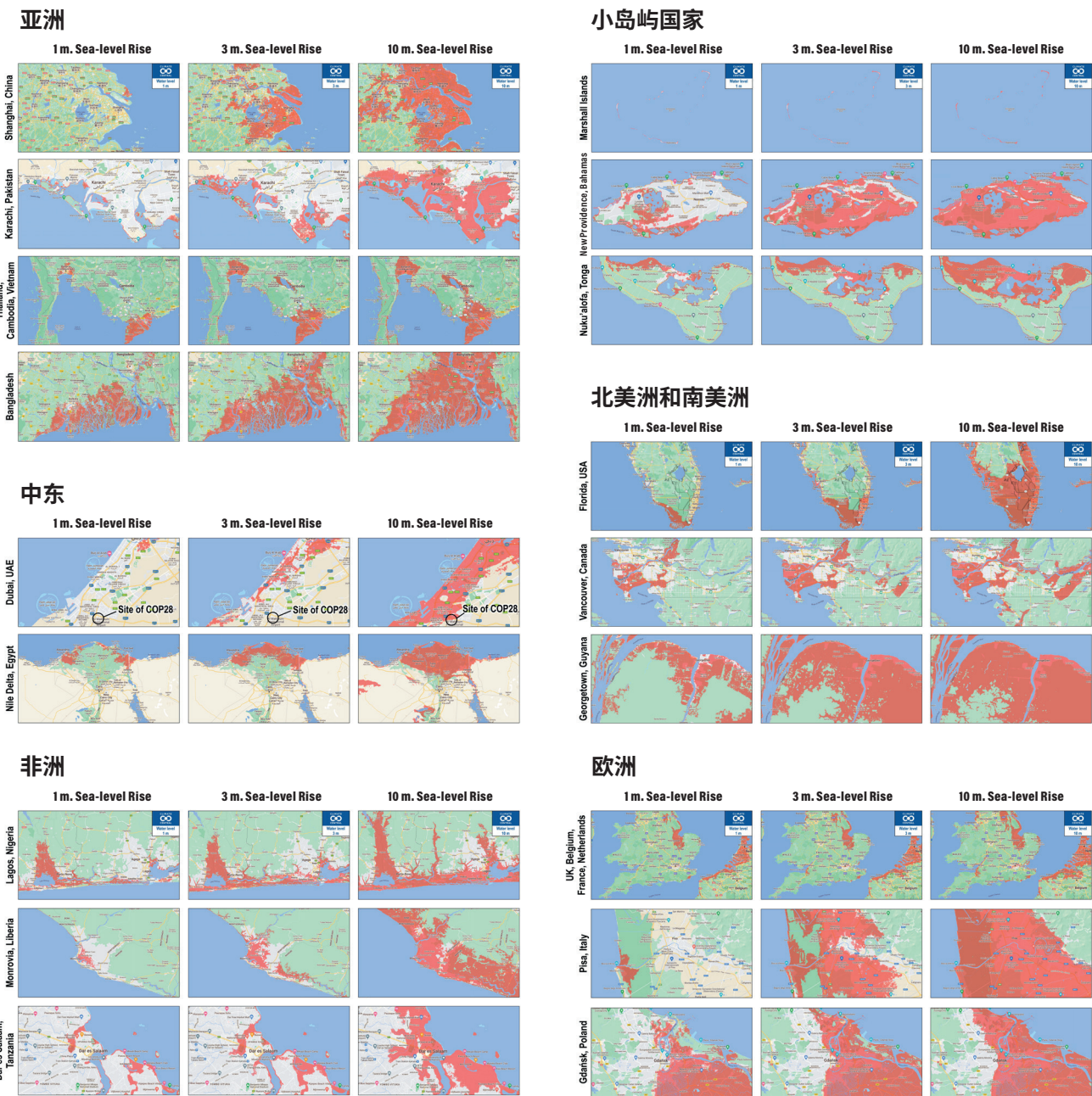


在高排放情景下,受格陵兰和南极冰川融化反馈效应的影响,到2300年海平面可能会迅速上升最多15米,这一情况不能被排除。

来源:IPCC AR6

图2-6. 冰盖与海平面上升：我们的选择，子孙的未来

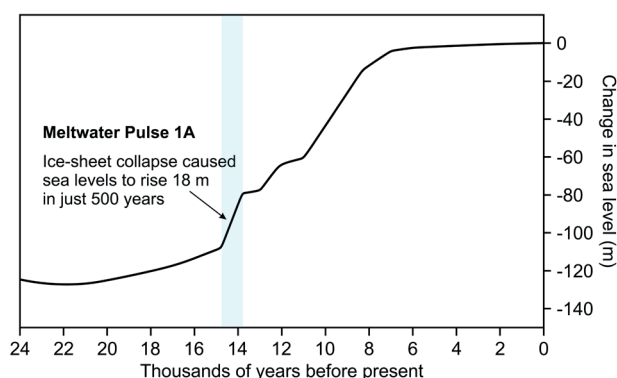
| 1米海平面上升                                             | 3米海平面上升                                      | 未显示: 6米海平面上升       | 10米海平面上升         |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------|------------------|
| 目前已成为长期不可避免的趋势(预计在2100年中期发生),但如果维持当前排放,可能会在2070年就发生 | 预计在1000到2000年内将变得不可避免;但若维持当前排放,可能会在21世纪初就发生。 | 预计在22世纪初发生,维持当前排放。 | 预计到2300年,维持当前排放。 |



由于人类持续的高排放,地球已经注定将面临至少1米的海平面上升,甚至可能达到2~3米。然而,我们仍有机会决定这些海平面上升的速度。如果全球气温上升超过1.5°C,我们将进入一个危险区,届时南极和格林兰冰盖的部分冰层丧失可能变得不可避免,这将导致海平面上升数米,并且这种变化在几百到几千年内无法停止。通过这些地图,我们可以看到当前面临的选择,以及如果今天的高排放继续下去,而不是在这一关键十年内达到峰值并开始下降,海平面上升可能带来的毁灭性影响。最终的决策权掌握在我们手中。

来源:CLIMATE CENTRAL。欲查看其他城市/地区的数据,请访问:<https://coastal.climatecentral.org/map/>

图2-7. 14,500年前的急剧海平面上升 (融水脉冲1A)



在大约350年的时间内,海平面上升了18米(每个世纪上升3.5至4米)。这一海平面快速上升主要是由于覆盖加拿大和美国的劳伦泰冰盖的融化,说明冰盖的崩溃可以发生得非常迅速。

西南极冰盖与海洋接触的边缘时,冰盖会向这些越来越深的海洋盆地退缩。这使得冰盖底部越来越多的部分暴露在升温的海水中,迫使冰盖加速融化,最终导致冰盖逐渐失稳。这些过程可能导致冰盖在短短几个世纪内迅速消融,并导致海平面上升[8,27,28,71]。自上次IPCC评估以来,最近已发现了几个可能进一步加速冰盖融化的重要反馈机制[3,4,9~11]。

事实上,思韦茨冰川(通常被称为“末日冰川”)过去曾经历过快速的退缩,冰川以每年超过2.1公里的速率退缩——是2011年至2019年间观察到的最快速率的两倍[48]。预计在不久的将来,当冰川移出其目前所处的海底稳定高点时,冰川的移动速度将会更快[3,48]。东南极部分地区也存在类似的情况,通过过去几十年的科学研究,这些情况得到了更为详尽的记录[72~74]。最新研究还表明,尽管东南极冰盖一度被认为相对稳定,但这一巨大冰盖的大部分区域与脆弱的西南极地区具有相似特征,如果气温上升超过1.8°C,可能会对海平面上升产生显著影响[21,75]。

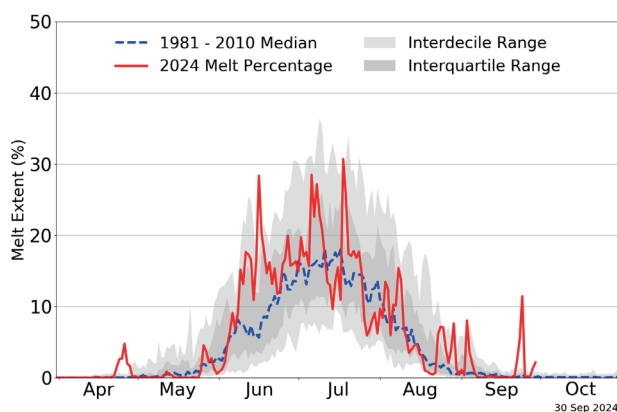
除了导致海平面上升,冰盖还会对全球产生其他影响。它们影响着高纬度地区和全球范围内的大气和海洋环流,从而影响地球上的热量传递。地球冰盖高度和范围的变化,加上冰盖融化产生的新的冷水和淡水汇入海洋,会导致极地附近和低纬度地区的天气模式发生变化[16]。另外,这些环流系统还影响着海洋生态系统中的营养物质供给。最近研究表明,到2050年,

来自南极的融水排放量增加可能会使南极翻转环流的强度减弱超过40%,并可能导致环流系统崩溃[76]。由此产生的次表层变暖将在西南极形成放大反馈,在已经很容易出现不可逆转退缩的地区,进一步加剧该地区冰架融化和海平面上升[76,77]。

科学家和政策制定者面临的主要问题是:(1)海平面上升的速度有多快?(2)海平面会上升到多高?(3)在何时这些未来更高的海平面将变得无法逆转?总体来说,科学家们一致认为每0.1°C的温度变化都很重要[18,71];持续更长时间的高温,将导致更快的冰体融化和更快的海平面上升速率。如果按目前的排放水平继续下去,预计到2100年,气温将比工业化前的水平高出3~4°C,到2150年,仅南极地区的融冰贡献就可能导致海平面上升速度达到每年5厘米[28]。

对于政策制定者和沿海区域来说,一个关键的信息是,一旦由于温度升高而加速了冰盖融化,即使温度稳定或者通过所谓的净零排放和/或二氧化碳去除(CDR)使温度降低,这一过程在数千年内依旧无法停止或者逆转。冰芯和海平面记录清楚表明,形成一个冰盖需要数万年,但缩小一个冰盖需要的时间却少两个数量级(快100倍)。直到温度远低于工业化前水平,海平面才会从这些新的高位下降,冰盖才会开始缓慢地重新生长[78]。因此,超过《巴黎协定》的最低温控下限将使地球冰盖造成永久性损失和破坏,其广泛影响在人类时间尺度上是不可逆的。

图2-8. 2024年格陵兰冰盖表面融化范围

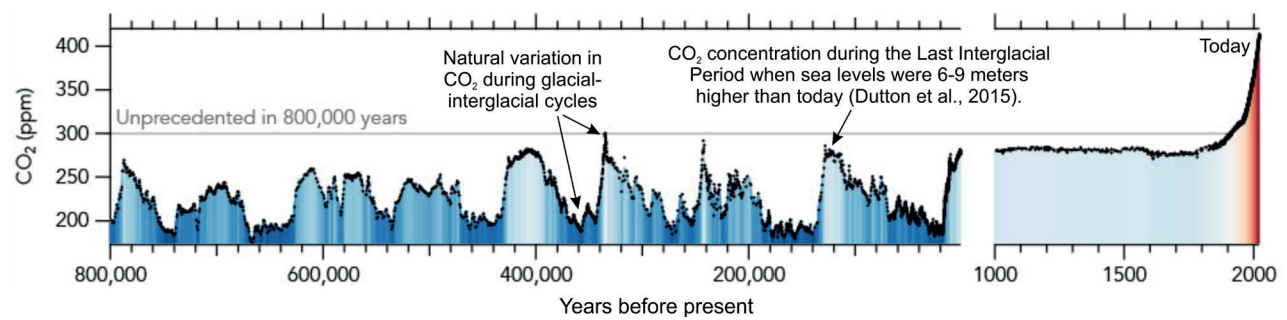


该图展示了2024年格陵兰冰盖表面发生融化的比例。

来源: NSIDC



图2-9. 过去80万年的大气CO<sub>2</sub>浓度



即使在过去的“温暖”时期,CO<sub>2</sub>浓度也从未超过300ppm;然而到2024年,CO<sub>2</sub>浓度已经达到了428ppm,并且全年平均可能会超过423ppm。

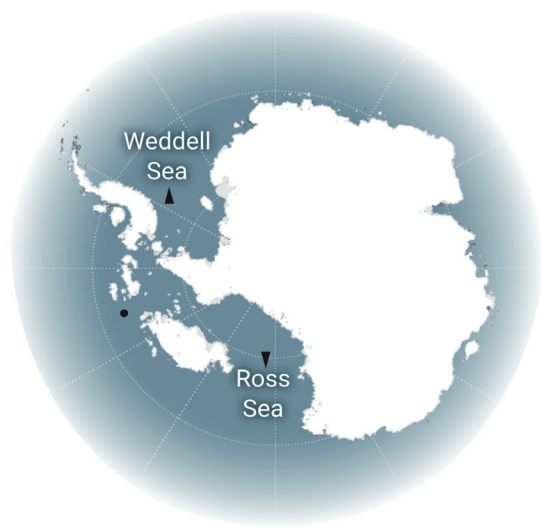
来源:英国南极考察局,冰芯数据。

尽管未来冰川融化速率存在不确定性,已知格陵兰冰盖当前的冰损失速率是20年前的5倍[35],而南极冰盖对海平面上升的贡献比30年前增加了6倍[31,79~82]。越来越多的冰盖研究专家认为,防止海平面上升达到危险水平和速率的“警戒线”不是2°C甚至不是1.5°C,而是比工业化前高1°C[83~85];值得注意的是,目前的温度已经比工业化前高1.2°C[86]。因此,支持极低排放的一个关键点是,将温升控制在1.5°C以内将使我们能够更快地回到1°C水平,从而大幅减缓冰

盖损失尤其是西南极冰盖崩塌对全球的影响[87]。这将稳定减缓大量长期的、不可逆转的海平面上升的风险。这将有助于为地势低的国家和地区争取更多时间来通过可持续发展去适应变化,尽管从长远来看,难以避免一定程度进行海岸线管控性撤退。

人类没有备选方案。当今政策制定者关于未来温室气体排放的决策,将决定未来全球海平面上升的速度,以及未来数百年乃至上千年安全与发展所面临风险等级。如果各国关心人口迁徙和社会变革,就必须正视海平面上升影响的现实。为了将温升控制在1.5°C以内,到2030年二氧化碳排放量必须至少减半,并在本世纪中叶降至零。否则,世界领导人实际上是在做出一个抹除许多海岸线,迫使数亿人流离失所的决定——而这一过程可能比我们想象的来得更快。

图2-10. 地球过去气温升高1°C到2°C时的南极景象



这是地球气温比工业化前高出1至2°C时,南极的样貌——大约发生在130,000年前的上一个间冰期。

来源:LAU 等,2023

## 科学审稿人

Richard B. Alley, Pennsylvania State University, IPCC AR2, AR3, AR4

Jonathan Bamber, University of Bristol, IPCC AR6 WG1, AR5 Review Editor, AR4 Review Editor

Julie Brigham-Grette, University of Massachusetts-Amherst

Robert DeConto, University of Massachusetts-Amherst, IPCC SROCC

Andrea Dutton, University of Wisconsin-Madison, IPCC SROCC

Carlota Escutia, Spanish High Council for Scientific Research and University of Granada

Carl-Friedrich Schleussner, IIASA

Martin Siegert, University of Exeter

Michael Schaeffer, IPCC AR5 LA, Global Center on Adaptation, IPCC AR5

Chris Stokes, Durham University

## 文献与延伸阅读

- Hamlington, B.D., et al. (2024). The rate of global sea level rise doubled during the past three decades. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 601, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01761-5>.
- Lau, S.C.Y., et al. (2023). Genomic evidence for West Antarctic Ice Sheet collapse during the Last Interglacial. *Science*, v. 382, no. 6677, 1384–1389, <https://doi.org/doi:10.1126/science.ade0664>.
- Rignot, E., et al. (2024). Widespread seawater intrusions beneath the grounded ice of Thwaites Glacier, West Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 121, no. 22, e2404766121, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2404766121>.
- Bradley, A.T. and I.J. Hewitt (2024). Tipping point in ice-sheet grounding-zone melting due to ocean water intrusion. *Nature Geoscience*, v. 17, no. 7, 631–637, <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01465-7>.
- Robel, A.A., E. Wilson, and H. Seroussi (2022). Layered seawater intrusion and melt under grounded ice. *The Cryosphere*, v. 16, no. 2, 451–469, <https://doi.org/10.5194/tc-16-451-2022>.
- Bett, D.T., et al. (2024). Coupled ice–ocean interactions during future retreat of West Antarctic ice streams in the Amundsen Sea sector. *The Cryosphere*, v. 18, no. 6, 2653–2675, <https://doi.org/10.5194/tc-18-2653-2024>.
- Reese, R., et al. (2023). The stability of present-day Antarctic grounding lines – Part 2: Onset of irreversible retreat of Amundsen Sea glaciers under current climate on centennial timescales cannot be excluded. *The Cryosphere*, v. 17, no. 9, 3761–3783, <https://doi.org/10.5194/tc-17-3761-2023>.
- Seroussi, H., et al. (2024). Evolution of the Antarctic Ice Sheet Over the Next Three Centuries From an ISMIP6 Model Ensemble. *Earth's Future*, v. 12, no. 9, e2024EF004561, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024EF004561>.
- Pelle, T., et al. (2023). Subglacial discharge accelerates future retreat of Denman and Scott Glaciers, East Antarctica. *Science Advances*, v. 9, no. 43, eadi9014, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.adi9014>.
- Pelle, T., et al. (2024). Subglacial Discharge Accelerates Dynamic Retreat of Aurora Subglacial Basin Outlet Glaciers, East Antarctica, Over the 21st Century. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 129, no. 7, e2023JF007513, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023JF007513>.
- Si, Y., et al. (2024). Antarctic Slope Undercurrent and onshore heat transport driven by ice shelf melting. *Science Advances*, v. 10, no. 16, ead10601, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.adl0601>.
- Miles, B.W.J. and R.G. Bingham (2024). Progressive unanchoring of Antarctic ice shelves since 1973. *Nature*, v. 626, no. 8000, 785–791, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07049-0>.
- Gomez, N., et al. (2024). The influence of realistic 3D mantle viscosity on Antarctica's contribution to future global sea levels. *Science Advances*, v. 10, no. 31, eadn1470, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.adn1470>.
- Greene, C.A., et al. (2024). Ubiquitous acceleration in Greenland Ice Sheet calving from 1985 to 2022. *Nature*, v. 625, no. 7995, 523–528, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06863-2>.
- Millan, R., et al. (2023). Rapid disintegration and weakening of ice shelves in North Greenland. *Nature Communications*, v. 14, no. 1, 6914, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42198-2>.
- Oltmanns, M., et al. (2024). European summer weather linked to North Atlantic freshwater anomalies in preceding years. *Weather Clim. Dynam.*, v. 5, no. 1, 109–132, <https://doi.org/10.5194/wcd-5-109-2024>.
- Bierman, P.R., et al. (2024). Plant, insect, and fungi fossils under the center of Greenland's ice sheet are evidence of ice-free times. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 121, no. 33, e2407465121, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2407465121>.
- Möller, T., et al. (2024). Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nature Communications*, v. 15, no. 1, 6192, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49863-0>.
- Aschwanden, A., et al. (2019). Contribution of the Greenland Ice Sheet to sea level over the next millennium. *Science Advances*, v. 5, no. 6, eaav9396, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav9396>.
- Hofer, S., et al. (2020). Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6. *Nature Communications*, v. 11, no. 1, 6289, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20011-8>.
- Stokes, C.R., et al. (2022). Response of the East Antarctic Ice Sheet to past and future climate change. *Nature*, v. 608, no. 7922, 275–286, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04946-0>.
- Fairbanks, R.G. (1989). A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, v. 342, no. 6250, 637–642, <https://doi.org/10.1038/342637a0>.
- Lin, Y., et al. (2021). A reconciled solution of Meltwater Pulse 1A sources using sea-level fingerprinting. *Nature Communications*, v. 12, no. 1, 2015, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21990-y>.
- Slater, T., A.E. Hogg, and R. Mottram (2020). Ice-sheet losses track high-end sea-level rise projections. *Nature Climate Change*, v. 10, no. 10, 879–881, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0893-y>.
- Crawford, A.J., et al. (2021). Marine ice-cliff instability modeling shows mixed-mode ice-cliff failure and yields calving rate parameterization. *Nature Communications*, v. 12, no. 1, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23070-7>.

26. Bamber, J.L., et al. (2019). Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, no. 23, 11195–11200, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1817205116>.
27. Siebert, M., et al. (2020). Twenty-first century sea-level rise could exceed IPCC projections for strong-warming futures. *One Earth*, v. 3, no. 6, 691–703.
28. DeConto, R.M., et al. (2021). The Paris Climate Agreement and future sea-level rise from Antarctica. *Nature*, v. 593, no. 7857, 83–89, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03427-0>.
29. DeConto, R.M. and D. Pollard (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, v. 531, no. 7596, 591–597, <https://doi.org/10.1038/nature17145>.
30. Joughin, I., B.E. Smith, and B. Medley (2014). Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier basin, West Antarctica. *Science*, v. 344, no. 6185, 735–738, <https://doi.org/10.1126/science.1249055>.
31. Rignot, E., et al. (2014). Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, v. 41, no. 10, 3502–3509, <https://doi.org/10.1002/2014gl060140>.
32. Naughten, K.A., P.R. Holland, and J. De Rydt (2023). Unavoidable future increase in West Antarctic ice-shelf melting over the twenty-first century. *Nature Climate Change*, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01818-x>.
33. Augustin, L., et al. (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, v. 429, no. 6992, 623–628, <https://doi.org/10.1038/nature02599>.
34. Lüthi, D., et al. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, v. 453, no. 7193, 379–382, <https://doi.org/10.1038/nature06949>.
35. Ootosaka, I.N., et al. (2023). Mass balance of the Greenland and Antarctic ice sheets from 1992 to 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, v. 15, no. 4, 1597–1616, <https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023>.
36. Fox-Kemper, B., et al. (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1211–1362, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
37. Gregoire, L.J., A.J. Payne, and P.J. Valdes (2012). Deglacial rapid sea level rises caused by ice-sheet saddle collapses. *Nature*, v. 487, no. 7406, 219–222, <https://doi.org/10.1038/nature11257>.
38. Reese, R., et al. (2018). The far reach of ice-shelf thinning in Antarctica. *Nature Climate Change*, v. 8, no. 1, 53–57, <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0020-x>.
39. Greene, C.A., et al. (2022). Antarctic calving loss rivals ice-shelf thinning. *Nature*, v. 609, no. 7929, 948–953, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05037-w>.
40. Paolo, F.S., H.A. Fricker, and L. Padman (2015). Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, v. 348, no. 6232, 327–331, <https://doi.org/doi:10.1126/science.aaa0940>.
41. Pritchard, H.D., et al. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, v. 484, no. 7395, 502–505, <https://doi.org/10.1038/nature10968>.
42. Etourneau, J., et al. (2019). Ocean temperature impact on ice shelf extent in the eastern Antarctic Peninsula. *Nature Communications*, v. 10, no. 1, 304, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08195-6>.
43. Gudmundsson, G.H., et al. (2019). Instantaneous Antarctic ice sheet mass loss driven by thinning ice shelves. *Geophysical Research Letters*, v. 46, no. 23, 13903–13909, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL085027>.
44. Smith, J.A., et al. (2017). Sub-ice-shelf sediments record history of twentieth-century retreat of Pine Island Glacier. *Nature*, v. 541, no. 7635, 77–80, <https://doi.org/10.1038/nature20136>.
45. Banwell, A.F., et al. (2021). The 32-year record-high surface melt in 2019/2020 on the northern George VI Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *The Cryosphere*, v. 15, no. 2, 909–925, <https://doi.org/10.5194/tc-15-909-2021>.
46. Mouginot, J., et al. (2015). Fast retreat of Zachariæ Isstrøm, northeast Greenland. *Science*, v. 350, no. 6266, 1357–1361, <https://doi.org/doi:10.1126/science.aac7111>.
47. Rosier, S.H.R., et al. (2021). The tipping points and early warning indicators for Pine Island Glacier, West Antarctica. *The Cryosphere*, v. 15, no. 3, 1501–1516, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1501-2021>.
48. Graham, A.G.C., et al. (2022). Rapid retreat of Thwaites Glacier in the pre-satellite era. *Nature Geoscience*, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01019-9>.
49. Dutton, A., et al. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*, v. 349, no. 6244, aaa4019, <https://doi.org/doi:10.1126/science.aaa4019>.
50. Armstrong McKay, D.I., et al. (2022). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, v. 377, no. 6611, eabn7950, <https://doi.org/doi:10.1126/science.abn7950>.
51. Wilson, D.J., et al. (2018). Ice loss from the East Antarctic Ice Sheet during late Pleistocene interglacials. *Nature*, v. 561, no. 7723, 383–386, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0501-8>.
52. Pelle, T., M. Morlighem, and F.S. McCormack (2020). Aurora Basin, the Weak Underbelly of East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, v. 47, no. 9, e2019GL086821, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL086821>.
53. Wang, L., J.L. Davis, and I.M. Howat (2021). Complex Patterns of Antarctic Ice Sheet Mass Change Resolved by Time-Dependent Rate Modeling of GRACE and GRACE Follow-On Observations. *Geophysical Research Letters*, v. 48, no. 1, e2020GL090961, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL090961>.
54. Herraiz-Borreguero, L. and A.C. Naveira Garabato (2022). Poleward shift of Circumpolar Deep Water threatens the East Antarctic Ice Sheet. *Nature Climate Change*, v. 12, no. 8, 728–734, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01424-3>.
55. Naish, T., et al. (2009). Obliquity-paced Pliocene West Antarctic ice sheet oscillations. *Nature*, v. 458, no. 7236, 322–328, <https://doi.org/10.1038/nature07867>.
56. Dumitru, O.A., et al. (2019). Constraints on global mean sea level during Pliocene warmth. *Nature*, v. 574, no. 7777, 233–236, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1543-2>.
57. Grant, G.R., et al. (2019). The amplitude and origin of sea-level variability during the Pliocene epoch. *Nature*, v. 574, no. 7777, 237–241, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1619-z>.
58. Applegate, P.J., et al. (2015). Increasing temperature forcing reduces the Greenland Ice Sheet's response time scale. *Climate Dynamics*, v. 45, no. 7, 2001–2011, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2451-7>.
59. Goelzer, H., et al. (2020). The future sea-level contribution of the Greenland ice sheet: a multi-model ensemble study of ISMIP6. *The Cryosphere*, v. 14, no. 9, 3071–3096, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3071-2020>.
60. Khan, S.A., et al. (2020). Centennial response of Greenland's three largest outlet glaciers. *Nature Communications*, v. 11, no. 1, 5718, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19580-5>.



61. Briner, J.P., et al. (2020). Rate of mass loss from the Greenland Ice Sheet will exceed Holocene values this century. *Nature*, v. 586, no. 7827, 70–74, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2742-6>.
62. Boers, N. and M. Rypdal (2021). Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 118, no. 21, e2024192118, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2024192118>.
63. Box, J.E., et al. (2023). Greenland ice sheet rainfall climatology, extremes and atmospheric river rapids. *Meteorological Applications*, v. 30, no. 4, e2134, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/met.2134>.
64. Chandler, D.M. and A. Hubbard (2023). Widespread partial-depth hydrofractures in ice sheets driven by supraglacial streams. *Nature Geoscience*, v. 16, no. 7, 605–611, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01208-0>.
65. Christ, A.J., et al. (2023). Deglaciation of northwestern Greenland during Marine Isotope Stage 11. *Science*, v. 381, no. 6655, 330–335, <https://doi.org/doi:10.1126/science.ade4248>.
66. Brigham-Grette, J., et al. (2013). Pliocene Warmth, Polar Amplification, and Stepped Pleistocene Cooling Recorded in NE Arctic Russia. *Science*, v. 340, no. 6139, 1421–1427, <https://doi.org/doi:10.1126/science.1233137>.
67. Melles, M., et al. (2012). 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytyn, NE Russia. *Science*, v. 337, no. 6092, 315–320, <https://doi.org/doi:10.1126/science.1222135>.
68. Alley, R.B., et al. (2015). Oceanic Forcing of Ice-Sheet Retreat: West Antarctica and More. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 43, no. 1, 207–231, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105344>.
69. Feldmann, J. and A. Levermann (2015). Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, no. 46, 14191–14196, <https://doi.org/10.1073/pnas.1512482112>.
70. Morlighem, M., et al. (2017). BedMachine v3: Complete Bed Topography and Ocean Bathymetry Mapping of Greenland From Multibeam Echo Sounding Combined With Mass Conservation. *Geophys Res Lett*, v. 44, no. 21, 11051–11061, <https://doi.org/10.1002/2017GL074954>.
71. IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1–34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
72. Morlighem, M., et al. (2019). Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet. *Nature Geoscience*, v. 13, no. 2, 132–137, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0510-8>.
73. Frémand, A.C., et al. (2023). Antarctic Bedmap data: Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) sharing of 60 years of ice bed, surface, and thickness data. *Earth Syst. Sci. Data*, v. 15, no. 7, 2695–2710, <https://doi.org/10.5194/essd-15-2695-2023>.
74. Fretwell, P., et al. (2013). Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, v. 7, no. 1, 375–393, <https://doi.org/10.5194/tc-7-375-2013>.
75. Picton, H.J., et al. (2022). Extensive and anomalous grounding line retreat at Vanderford Glacier, Vincennes Bay, Wilkes Land, East Antarctica. *The Cryosphere Discuss.*, v. 2022, 1–40, <https://doi.org/10.5194/tc-2022-217>.
76. Li, Q., et al. (2023). Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater. *Nature*, v. 615, no. 7954, 841–847, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05762-w>.
77. Zhou, S., et al. (2023). Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 7, 701–709, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01695-4>.
78. Garbe, J., et al. (2020). The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature*, v. 585, no. 7826, 538–544, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2727-5>.
79. Siegert, M.J., et al. (2023). Antarctic extreme events. *Frontiers in Environmental Science*, v. 11, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1229283>.
80. Rignot, E., et al. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 116, no. 4, 1095–1103, <https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116>.
81. Naughten, K.A., et al. (2022). Simulated Twentieth-Century Ocean Warming in the Amundsen Sea, West Antarctica. *Geophysical Research Letters*, v. 49, no. 5, e2021GL094566, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL094566>.
82. Selley, H.L., et al. (2021). Widespread increase in dynamic imbalance in the Getz region of Antarctica from 1994 to 2018. *Nature Communications*, v. 12, no. 1, 1133, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21321-1>.
83. Breyer, C., et al. (2023). Proposing a 1.0° C climate target for a safer future. *PLOS Climate*, v. 2, no. 6, e0000234.
84. Pattyn, F., et al. (2018). The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5°C global warming. *Nature Climate Change*, v. 8, no. 12, 1053–1061, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0305-8>.
85. Noël, B., et al. (2021). A 21st Century Warming Threshold for Sustained Greenland Ice Sheet Mass Loss. *Geophysical Research Letters*, v. 48, no. 5, e2020GL090471, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL090471>.
86. Forster, P.M., et al. (2024). Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth Syst. Sci. Data*, v. 16, no. 6, 2625–2658, <https://doi.org/10.5194/essd-16-2625-2024>.
87. Winkelmann, R., et al. (2015). Combustion of available fossil fuel resources sufficient to eliminate the Antarctic Ice Sheet. *Science Advances*, v. 1, no. 8, e1500589, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.1500589>.

# 山地冰川与积雪

## 温升1.5°C的调整对防止未来几十年不断加剧的损失和损害至关重要

**当前的国家自主贡献(预测至 2100 年,全球气温上升 2.3°C) :** 即使21世纪全球温升控制在2°C内,也将导致冰川质量损失和坍塌持续加剧,远超出许多山区和下游社区的适应能力。几乎所有热带和中纬度冰川将跨越消融临界点,并最终完全消失。尤其在极为重要的亚洲高山区,将损失约50%的冰储量。已报道的灾害性事件,如冰湖溃决和山体滑坡等,其发生频率和规模也将进一步增强。灾害风险在亚洲地区尤为突出,溃决洪水几乎难以进行有效预警,使其可能在短时间内摧毁基础设施和城镇。夏季生长季的积雪和融冰径流减少,将对水循环过程带来严重甚至可能是永久性的改变,进而影响粮食、能源和水资源安全。

**坚持贯彻 1.5°C 温控路径:** 限制全球温升1.5°C目标,是保护部分中纬度地区,包括斯堪的纳维亚、阿尔卑斯山和冰岛,至少15~35%冰川冰储量的唯一机会,也可保护高加索山脉、新西兰及安第斯山脉大部分地区约50%的现存冰储量。在此温升目标下,亚洲高山区冰川质量损失将显著减少,约可保留现存冰量的三分之二。但周边社区仍需在未来几十年为重大适应工作做好准备,包括积极应对极端雨雪事件引发的灾难性洪水灾害。然而,对于大多数社区而言,这些变化不会超过其适应能力,冰川融化速度将在本世纪中叶减缓,并在2100年左右趋于稳定。积雪也将趋于稳定,但其分布海拔比目前更高。某些冰川甚至可能在2200年代初显现出极其缓慢的再生迹象,或将成为全球走向净零碳排放复原路径的最早征兆之一。

**二氧化碳水平持续上升(预测至 2100 年 全球气温上升 3~3.5°C) :** 气候快速变暖将带来灾难性级联影响,导致冰川和积雪质量严重损失,部分脆弱的山地和下游社区可能在本世纪中叶即因季节性水源丧失或毁灭性洪水灾害而面临难以生存的困境。随着时间推移,亚洲高山区和阿拉斯加地区的一些规模较大的冰川也将难以存续。积雪将变得不稳定,在更高海拔、更频繁的降雪将由降雨取代。塔里木河和科罗拉多河流域等当前肥沃的农业区可能将无法继续支撑大量的农业活动。由于冰冻圈变暖,高山生态系统的生物多样性受损,尤其是许多高海拔地区将遭受极端破坏。

## 背景

冰川和积雪作为饮用水和灌溉水的来源,对附近社区和下游地区具有不同的重要性。有些地区的冰川融水对河流径流的贡献比例较小,但在干季、热浪和干旱期间的重要性则大大增加[15~17]。在另一些地区,如热带安第斯山脉、印度河和亚洲高山区的塔里木河流

域,冰川对季节性水资源的贡献比例较大;然而,在干旱的塔里木和咸海流域,冰川融水对夏季的水源供给几乎达到100%[18]。

虽然冰川快速融化暂时增加了水资源的供给,但随着冰川的持续退缩,季节性水资源的供给将开始减少(即径流峰值或径流拐点过后融水贡献减少)。这可能会使某些经济活动,甚至可持续的人类生活难以维

## 2024年最新认识

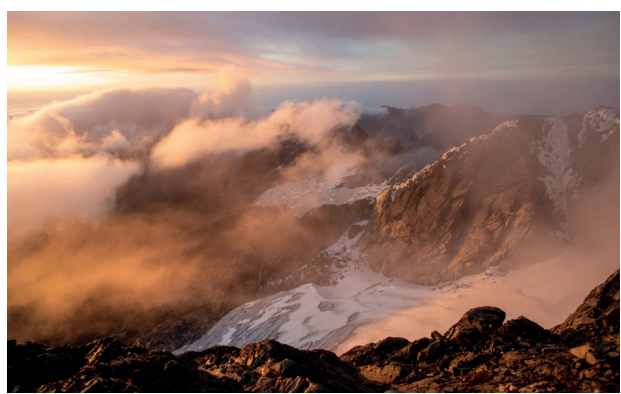
- 根据世界冰川监测服务(WGMS)的数据,2023年全球冰川质量损失创下历史新高[1]。截止2024年观测数据显示,一些地区的冰川损失再创新高,其中瑞典冰川消融量达到1980年以来的最高值[2]。目前,亚洲地区的冰川也呈现出创纪录的损失趋势[3]。极低的降雪量与极高的夏季气温可能是导致2024年上述地区冰川大量消融的主要原因。
- 委内瑞拉成为继斯洛文尼亚之后第二个失去全部冰川的国家。2024年春季,委内瑞拉洪堡冰川(Humboldt Glacier)因冰体规模缩小,无法在自身压力下继续流动,最终停滞,面积约为0.01平方公里[4]。
- 安第斯山脉热带地区当前的冰川规模比过去11700多年来的任何时期都要小。2024年,安第斯山脉热带地区成为第一个被证实比上一个冰河时代结束以来任何时期的冰川分布规模都小的地区[5]。
- 2024年数据显示,安第斯山脉5,500条冰川自小冰期以来面积减少25%,这些热带冰川的消融速率约为全球平均的10倍[6]。
- 2010–2020年间,朱诺冰原(Juneau Ice Field)冰川消融速率约为1980年代的5倍,这一趋势导致冰川质量持续亏损,并影响数百年的海平面上升[7]。
- 目前,上千万人面临冰湖溃决导致的洪涝灾害风险,特别是在阿拉斯加、亚洲高山区和冰岛等冰湖广泛分布的地区。如果温室气体减排力度不够,到本世纪末亚洲高山区冰湖溃决事件的发生频率预计将增加三倍[8]。
- 在高排放情景下,珠穆朗玛峰东绒布冰川预计到2100年将损失约三分之二的冰量。东绒布冰川不仅是亚洲“水塔”的标志性组成部分,还具有重要的登山和文化价值[9]。
- 最新观测结果表明,在斯瓦尔巴、格陵兰、冰岛和阿拉斯加的冰川融水中发现了高浓度的甲烷,其中部分源于多年冻土的融化。这一发现证实山地冰川是甲烷的一个重要来源,并强调将多年冻土融化纳入国家自主贡献目标(NDCs)的重要性[10]。
- 2023–2024年北半球冬季,兴都库什-喜马拉雅地区的降雪量创下历史最低水平,引发人们对依赖融雪径流的河流及水资源安全问题的担忧[3]。
- 即使在不进一步升温的情景下,阿尔卑斯山冰川到2050年也将损失至少三分之一的冰量。在当前的变暖路径下,2050年的全球冰川储量可能会损失三分之二[11]。如未实现《巴黎协定》1.5°C温升目标,奥地利西部地区的冰川将消失殆尽[12]。
- 最新研究显示,喜马拉雅东段冰川退缩与气候变化直接相关,并导致冰川的不稳定性,从而引发级联灾害[13]。
- 2024年7月最新研究发现,秘鲁安第斯山的冰川融水波动与全球生物多样性变化直接相关。这表明冰川退缩将对全球山地水生生物多样性产生重要影响[14]。



系。事实上，除了高纬度极地地区和喜马拉雅地区外，大多数冰川覆盖流域的冰川径流已经历径流峰值[19, 20]。因此，我们必须立即采取适应措施，为未来做好准备，并同时推进减缓气候变化的行动，尽可能将保护冰川作为首要任务。此外，近期在秘鲁安第斯山脉[21]和瑞士阿尔卑斯山[22]的研究显示，冰川还对土著居民和当地社区具有深厚的文化和精神意义。

许多靠近赤道的冰川，如安第斯山北部、东非和印度尼西亚，即使在当前的温升1.2°C情景下也将消融殆尽[23]。这些冰川大多自小冰期结束后就开始退缩，而全球变暖极大加速了它们的融化。在没有人为变暖的情景下，其中一些分布在安第斯山脉北部的部分冰川，可在数百甚至数千年的时间里提供可靠的季节性水源。然而，上述冰川可能在2050年消亡，这将对秘鲁北部、玻利维亚和智利北部的农村人口产生影响，同时也会影响拉巴斯等主要城市[24]。

目前，低纬度和中纬度的冰川以及除了极地区域外的其他地区的冰川也正在经历严重的物质损失，例如欧洲阿尔卑斯山脉、安第斯山脉南部和巴塔哥尼亚、冰岛、斯堪的纳维亚、北美洛矶山脉和阿拉斯加的大部分地区、新西兰、高加索山脉和亚洲高山区等地区的冰川。在高排放情景下，这些地区的小冰川和低纬度的冰川将在2100年几乎全部消失[25,26]。在其他地区，如喜马拉雅山脉可能面临高达80%的冰量损失[18]。然而，在极低排放情景下，喜马拉雅地区约有40%的冰量得以保留[18]。在极低的排放情景下且在2050年



图片来源: John Wendle

乌干达鲁文佐里山脉的斯坦利冰川。即使在非常低排放的情景下，预计鲁文佐里山脉到本世纪中叶时将不再有冰川。

实现基本碳中和的情况下，少数地区的预测显示，在2100年至2300年之间冰川将开始缓慢增长[27]。

在其他排放情景下，中纬度地区的冰川几乎将完全消失。在高排放情景下，到2100年全球平均气温上升将超过4°C，除了极地区和极高海拔的山脉外，大规模的季节性积雪也将变得罕见[23]。最近的研究证实，即使是之前被认为不太可能发生灾害的高海拔冰川地区也已经变得脆弱，能够引发灾难性和级联洪水，这进一步强调了温室气体减排的必要性[28]。

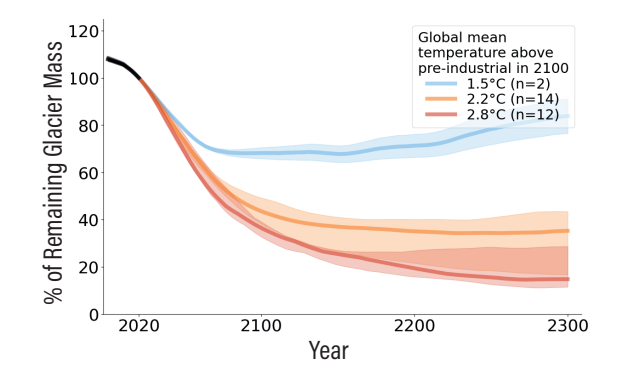
在高排放情景下，到本世纪末，高海拔和高纬度地区的冰川冰量将仅能保留35~75%[29]。然而，如果我们遵循极低的排放路径，亚洲高山区重要的季节性水资源（即冰川和积雪）将保持稳定状态，并在净零排放路径下，几个世纪后将开始恢复。然而，若将温升控



图片来源: Praful Rao of Save the Hills

2023年10月，由于锡金洪水导致的兰坡 (Rangpo) 洪水，Teesla III大坝被冰川湖洪水 (GLOF) 冲毁；2024年8月16日，来自田波冰川 (Thyanbo Glacier) 的冰川湖洪水 (GLOF) 冲毁了尼泊尔的塔梅村 (Thame Village)。

图3-1. 高山亚洲的冰川



高山亚洲包括世界上最高的山脉，尽管这些极高海拔的冰川为至少20亿人提供季节性水源，但即使是这些冰川，在全球气温上升3°C的情况下，也将失去大部分冰层。

来源: SCHUSTER 等人 (2024)

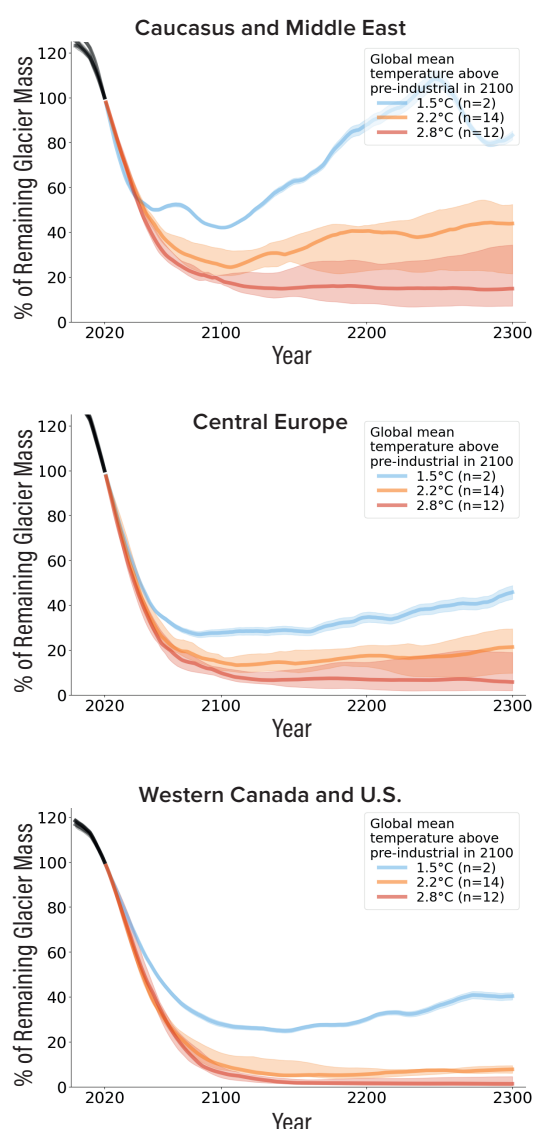
制在1.5°C, 中亚和安第斯山脉南部的冰川也能保留两倍于高排放情景下的冰量[26]。在最高升温超过2°C的高排放情景下, 高海拔和高纬度地区的冰川将持续亏损。在非常高的排放水平下, 随着二氧化碳浓度逐年增加, 冰川物质损失将更加迅速[29]。

冰川质量通常在冬季通过降雪而积累, 在夏季通过消融而损失。全球变暖意味着在海拔较高的地区, 可转化为冰的降雪减少, 而低海拔区的冰川消融加速, 年尺度的冰川消融量显著超过冰川积累量, 因此

温升将导致冰川质量持续损失。当冰川从末端到顶部均发生冰川质量亏损时, 就会达到不可逆的冰川退缩临界点, 此时冰川的消亡已成定局。在2022年和2023年夏季[30,31], 欧洲阿尔卑斯山脉的大多数冰川都经历了这一过程, 仅在两个融化季节, 瑞士冰川的总体积就损失了10%[31,32]。

冰川可能在几十年甚至一个世纪内退缩甚至完全消失。美国冰川国家公园在1910年建立时, 拥有约150条冰川; 目前, 仅有不到30条冰川保留下来, 而且

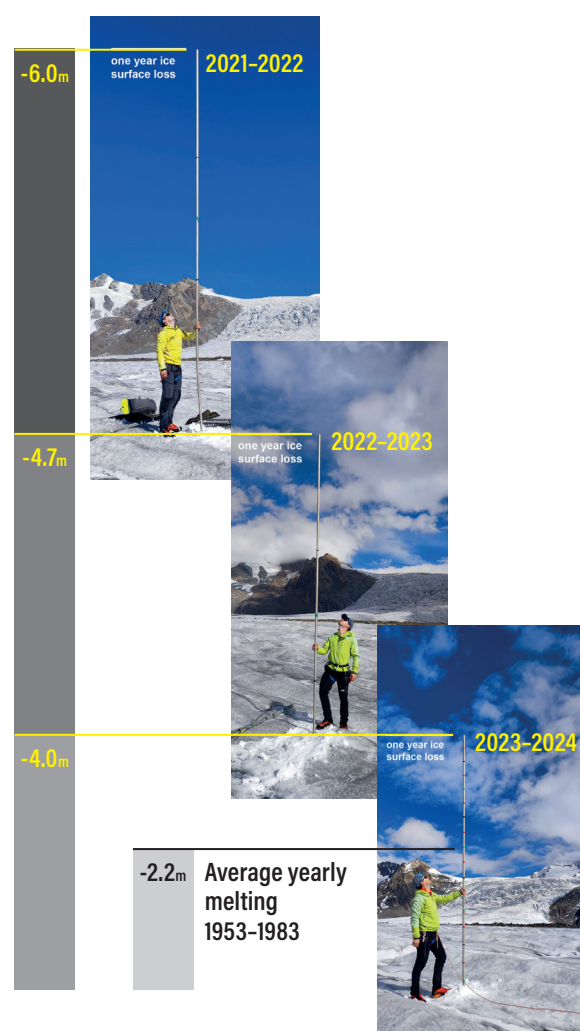
图3-2. 中纬度冰川



在1.5°C的情景下, 模型显示高加索山脉、阿尔卑斯山脉和北美西部的冰川不仅能够保留更多的冰, 还可能在2300年之前出现一定程度的冰川再生。

来源: SCHUSTER等人 (2023)

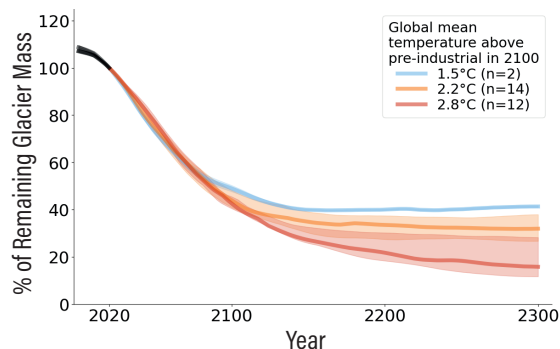
图 3-3. 三个冰损记录年份



图中显示了瑞士大阿莱奇冰川(欧洲最大冰川)在2022年、2023年和2024年创纪录融化年份期间, 从位于冰川上方约2800米的Konkordia广场处测得的冰川冰损高度, 与1950至1980年间的年均冰损相比。

照片来源: MATTHIAS HUSS。

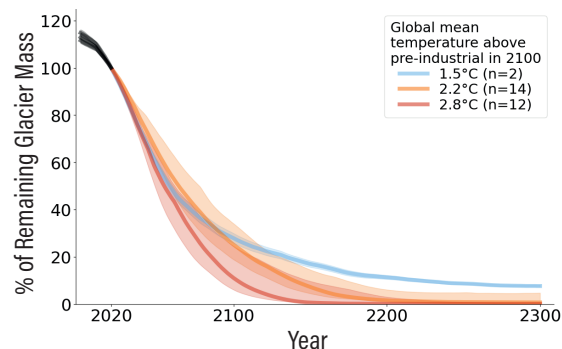
图3-4. 阿拉斯加冰川



像阿拉斯加这样的巨大冰川类似冰盖：最初融化缓慢，但随着时间推移，融化速度加快，且这种过程会持续数百年。

来源：SCHUSTER等 (2024)

图3-5. 斯堪的纳维亚冰川



斯堪的纳维亚的冰川融化速度加快：瑞典在2024年失去的冰量超过了过去80年中的任何一次。然而，在低排放情景下，部分冰川遗迹将得以保存。

来源：SCHUSTER等 (2024)

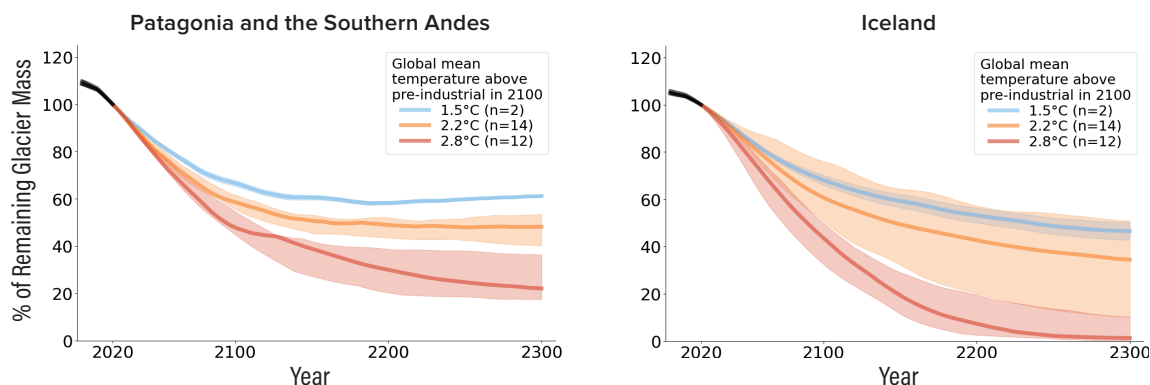
仅剩的冰川面积已缩小约三分之二。若继续维持当前的高排放情景，到2100年，全球世界遗产地中的半数冰川可能会不复存在[33]。从1901年到2018年，除南极洲以外的冰川消融导致全球海平面上升近7厘米[33]。尽管这种融化速度很快，但冰川的恢复却非常缓慢，尤其是在气温高于工业化前水平的条件下。最近一项研究表明，要使山地冰川恢复至20世纪中叶甚至目前的规模，可能需要几个世纪的时间；在某些地区，即使大气中的二氧化碳浓度降低导致气温下降，这一过程也可能需要数千年[35,36]。

因此，从人类时间尺度(Human-timescale)来看，当前冰川消亡实际上是对山地景观的一种永久性

改变。极低排放路径是确保在冰川快速退缩过程中尽可能减少冰量损失的关键。冰川提供的生态系统服务正面临损失和灭绝的风险，低排放路径对于维持这些服务至关重要，并且可减少山地冰川消融带来的冰湖溃决等严重灾害的风险[39~42]。

**为了尽可能保留更多的冰川  
冰雪及其生态系统服务，  
减少灾难性事件，2025年国家  
自主贡献 (NDCs) 必须承诺实  
现可信的 1.5°C 目标。**

图3-6. 高纬度冰川

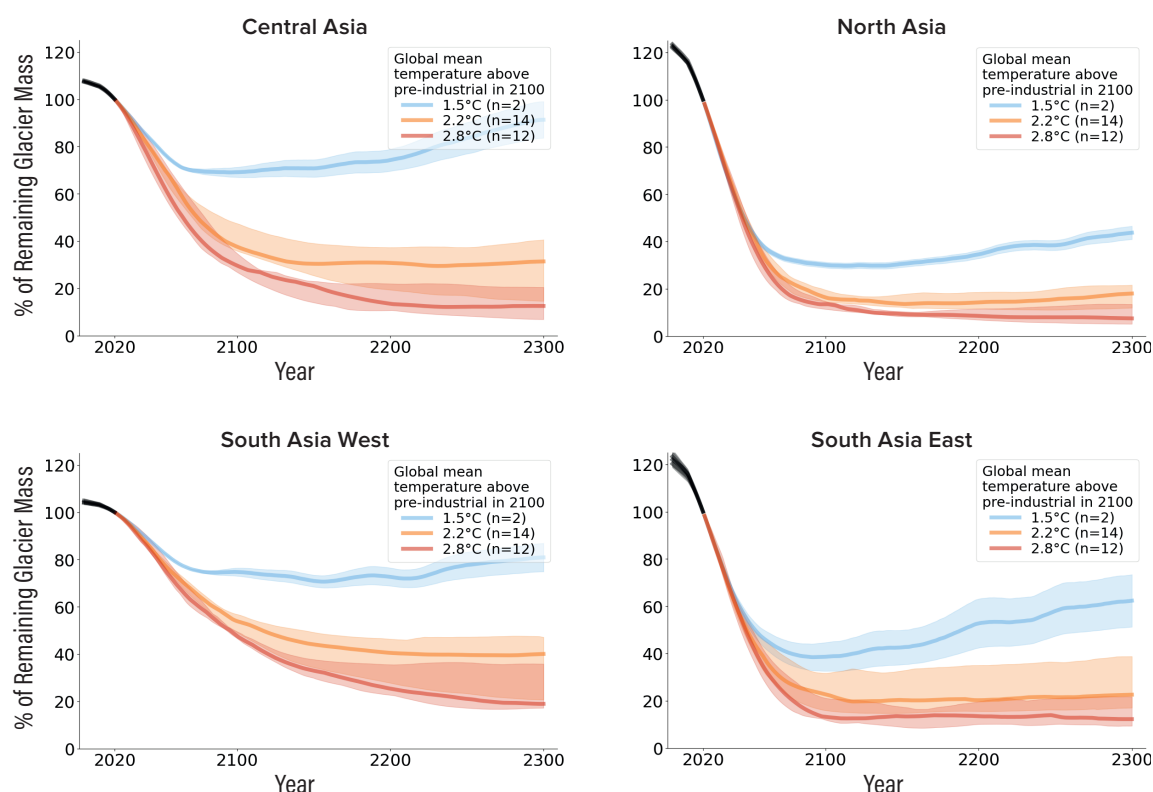


巴塔哥尼亚和冰岛的冰川对排放变化特别敏感。在+2°C的情景下，模型预测冰川融化速度将放缓，预计到2300年时能保存约50%的现有冰量；而在+3°C的情况下，冰川损失将显著增加。

来源：SCHUSTER等 (2024)



图3-7. 亚洲冰川



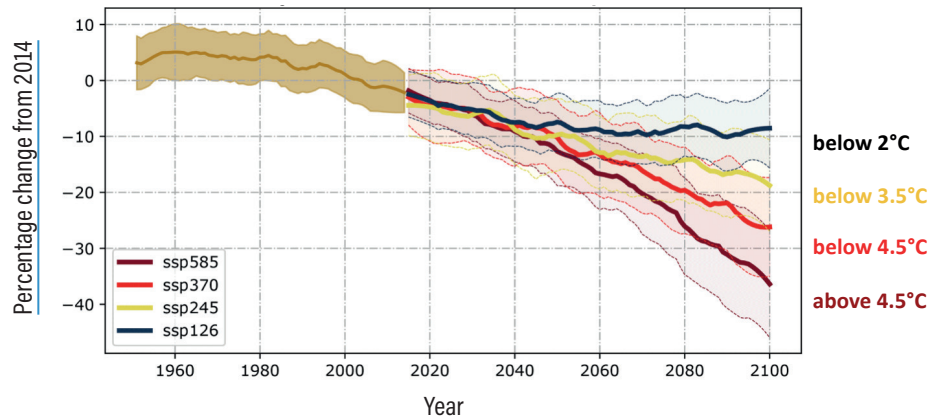
中亚、北亚和南亚的冰川在全球升温达到3°C时几乎失去所有冰雪,而在1.5°C一致路径下,人类的努力仅能促使冰川有所恢复。

来源: SCHUSTER等 (2024)

除了冰川,山区还以积雪的形式储存水资源。事实上,许多山区和低海拔地区的季节性淡水依赖于年降雪量。且在许多地区,融雪的重要性超过了冰川融水。然而,降雪在许多山区已变得不稳定,极端的雪旱与暴雪或湿雪交替出现,增加了雪崩和洪水发生风险[43],正如2023年美国加利福尼亚州的冬季[44]和2023–2024年兴都库什-喜马拉雅地区的冬季所发生的情况[3]。在许多山区,雪的下降趋势似乎与冰川相似:随着气温在更高海拔上升至冰点以上,原本应为降雪的降水现在越来越多地以降雨的形式出现,且往往以极端降雨的危险形式出现[34]。在低海拔和低纬度地区,降雪将变得更少甚至完全消失,冬季也将缩短[45,46]。季节性积雪无法形成,导致积雪本身和地下蓄水层中储存的水量减少。在许多山区已经监测到积雪范围和持续时间的减少[47,48]。积雪的持续减少将对农业[49]、水电和旅游等多个行业产生负面影响[50],并带来全球性的影响,也对下游人口的水资源供应构成威胁[29, 51]。

由于积雪融水会穿越草原和沙漠,并最终流向人口稠密且农业耕作频繁的沿海地区,使得山区积雪成为维持山区以外生态系统和人类水资源的关键。例如,洛杉矶、德里和马拉喀什等城市的人们在很大程度上依赖于积雪融水。在美国西部地区,气温的上升导致了年积雪量的普遍减少,水资源短缺问题日益严重[52]。在北极和山区,人类福祉以及许多物种的生存都依赖于季节性积雪。对于以驯鹿为生的北极原住民来说,非季节性的降雨增多,导致雪上形成厚厚的冰层,使得驯鹿难以觅食,导致越来越多的动物因饥饿而死亡[53]。积雪覆盖面积的减少对依赖积雪资源的旅游业产生了负面影响,尤其是对美国、日本和欧洲影响较大[54]。山区积雪的缺乏还增加了野火发生的风险,以及在野火过后可能出现的泥石流等自然灾害的风险。在一些地区,冰川融化和积雪融化已经对淡水资源的可用性造成了影响,导致与水资源相关的紧张局势和/或冲突的增加[35]。

图3-8. 北半球雪层减少趋势



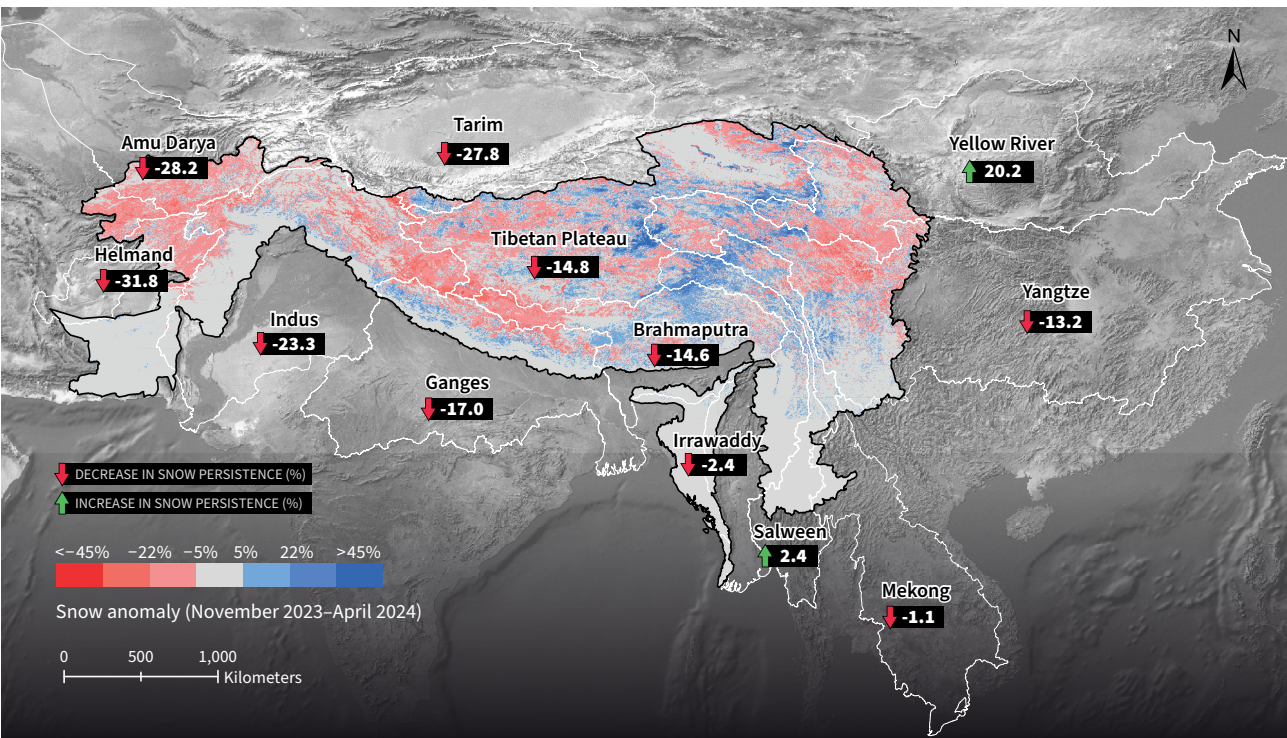
在高排放情景下,预计到2100年北半球的雪覆盖面积将减少接近50%。

来源:MUDRYK 等, 2020

加强气候承诺将对依赖冰川融水作为饮用水、水电和灌溉水源的地区带来显著的效益,如安第斯和中亚地区。更加坚定的气候承诺也将极大地惠及依赖冰川和季节性积雪融水进行发电、农业活动以及雪地旅

游业收入的经济体,比如欧洲的阿尔卑斯山区和北美的西部地区[55]。即使升温仅1.5°C,赤道和中纬度地区的小型冰川也注定完全消失,采取低排放措施还可为当地社区提供更多时间来适应气候变化。

图3-9. 亚洲重要河流流域的积雪减少情况



2023年11月至2024年4月期间的积雪覆盖异常,与2003年至2023年的平均水平进行对比。

来源:ICIMOD





照片: Vastam / Alamy Stock Photo

阿塞拜疆沙赫达山的景观。过去7年间,阿塞拜疆的冰川融化了18%,但在非常低的排放情景下,最多一半的冰川损失是可以被遏制的。

全球气温每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,都将会对山地冰冻圈的冰量损失产生重要影响[26, 56]。最新研究显示,人们对《巴黎协定》气候过冲(即指允许升温暂时超过巴黎协定规定的 $1.5^{\circ}\text{C}$ )后气温下降的可控性过度自信,只有快速且大幅减排才是限制气候变化的有效手段[57]。由于持续升温,山地和下游社区必须积极应对至少持续到本世纪中叶的冰量急剧损失带来的影响。然而,在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温升目标的限制下,强有力的气候行动将决定此后未来的走向。为尽可能多地维持冰川、积雪及其所提供的生态系统服务,并尽量减少本世纪下半叶的灾难性事件发生,2025年国家自主贡献(NDC)必须承诺实现可信的 $1.5^{\circ}\text{C}$ 温升目标[58]。这需要至少在2030年将人为温室气体排放至少降低40%,并在2030–2040年期间作出更强有力的承诺和行动。这些最大限度减少气候过冲的低排放路径,是决定重要冰川走向迅速破坏消亡还是迈向冰川保护的关键。

### 科学审稿人

Carolina Adler, Mountain Research Initiative, IPCC AR6 WGII and SROCC

Guðfinna Aðalgeirsdóttir, University of Iceland, IPCC AR6

Matthias Huss, ETH-Zurich, WSL

Regine Hock, University of Oslo, Norway, University of Alaska Fairbanks, IPCC AR4, SROCC coordinating Lead Author, AR6

Miriam Jackson, ICIMOD/Norwegian Water Authority, IPCC AR6

Georg Kaser, University of Innsbruck, IPCC AR4, AR5, SROCC and AR6

Michael Lehning, EPFL, IPCC SROCC

Ben Marzeion, University of Bremen, IPCC AR5, SROCC, AR5 and AR6 WGI

Fabien Maussion, University of Bristol

Ben Orlove, Columbia University, IPCC SROCC, AR6 WGII

David Rounce, Carnegie Mellon University

Lilian Schuster, Universität Innsbruck

Heidi Sevestre, University of Svalbard

Heidi Steltzer, IPCC SROCC

Philippus Wester, IPCC AR6 WGII



## 文献与延伸阅读

1. Zemp, M., et al., (eds.) (2023). WGMS: Global Glacier Change Bulletin No. 5 (2020–2021). ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, publication based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2023-09.
2. Forsberg, L. (2024). Rekordstor minskning av svenska glaciärer. Forskning.se. <https://www.forskning.se/2024/10/04/rekordstor-minskning-av-svenska-glaciarer>.
3. Saikia, A. and C. Seldon (2024). Record low snowfall sounds alarm for water security in the Hindu Kush Himalaya. ICIMOD, <https://blog.icimod.org/cryosphere-water/cryosphere-water-record-low-snowfall-sounds-alarm-for-water-security-in-the-hindu-kush-himalaya>.
4. Hansen, K. (2024). Humboldt Glacier's demise. NASA Earth Observatory, <https://earthobservatory.nasa.gov/images/152893/humboldt-glaciers-demise>.
5. Gorin, A. L. (2024). Recent tropical Andean glacier retreat is unprecedented in the Holocene. *Science*, v. 385, no. 6708, 517–521, <https://doi.org/doi:10.1126/science.adg7546>.
6. Carrivick, J. L., et al. (2024). Accelerating glacier area loss across the Andes since the Little Ice Age. *AGU Journals: Geophysical Research Letters*, v. 51, <https://doi.org/10.1029/2024GL109154>.
7. Davies, B., et al. (2024). Accelerating glacier volume loss on Juneau Icefield driven by hypsometry and melt-accelerating feedbacks. *Nature Communications*, v. 15, no. 5099, <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49269-y>.
8. Zhang, G., et al. (2024). Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 5, 447–462, <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w>.
9. Zhang, T. (2024). Projections of peak water timing from the East Rongbuk Glacier, Mt. Everest, using a higher-order ice flow model. *AGU Journals: Earth's Future*, <https://doi.org/10.1029/2024EF004545>.
10. Konya, K., et al. (2024). CH<sub>4</sub> emissions from runoff water of Alaskan mountain glaciers. *Nature Scientific Reports*, v. 4, no. 10558, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56608-y>.
11. Cook, S. J., et al., (2023). Committed Ice Loss in the European Alps Until 2050 Using a Deep-Learning-Aided 3D Ice-Flow Model with Data Assimilation. *AGU Journals: Geophysical Research Letters*, v. 50, <https://doi.org/10.1029/2023GL105029>.
12. Hartl, L. et al (2024, preprint). Recent observations and glacier modeling point towards near complete glacier loss in western Austria (Ötztal and Stubai mountain range) if 1.5°C is not met. <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2024/egusphere-2024-3146/egusphere-2024-3146.pdf>.
13. Li, Y., et al., (2024). Glacier Retreat in Eastern Himalaya Drives Catastrophic Glacier Hazard Chain. *AGU Journals: Geophysical Research Letters*, v. 51, <https://doi.org/10.1029/2024GL108202>.
14. Palacios-Robles, E., et al., (2024). Declining glacier cover drives changes in aquatic macroinvertebrate biodiversity in the Cordillera Blanca, Perú. *Global Change Biology*, v. 30, <https://doi.org/10.1111/gcb.17355>.
15. Chandel, V.S. and S. Ghosh (2021). Components of Himalayan river flows in a changing climate. *Water Resources Research*, v. 57, no. 2, e2020WR027589, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020WR027589>.
16. Pritchard, H.D. (2019). Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, v. 569, no. 7758, 649–654, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1240-1>.
17. Ultee, L., S. Coats, and J. Mackay (2022). Glacial runoff buffers droughts through the 21st century. *Earth Syst. Dynam.*, v. 13, no. 2, 935–959, <https://doi.org/10.5194/esd-13-935-2022>.
18. ICIMOD (2023). Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook. (P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal, & J. F. Steiner [Eds.]). ICIMOD, <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1028>.
19. Hock, R., et al. (2019). GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, v. 65, no. 251, 453–467, <https://doi.org/10.1017/jog.2019.22>.
20. Huss, M. and R. Hock (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, v. 8, no. 2, 135–140, <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>.
21. Paerregaard, K., (2023). Andean Meltdown: A climate ethnography of water, power, and culture in Peru, Berkeley and London: University of California Press.
22. Kosanic, A., et al. (2023). Importance of Cultural Ecosystem Services for Cultural Identity and Wellbeing in the Lower Engadine, Switzerland. *Land*, v. 12, no. 12, 2156, <https://doi.org/10.3390/land12122156>.
23. Marzeion, B., et al. (2020). Partitioning the uncertainty of ensemble projections of global glacier mass change. *Earth's Future*, v. 8, no. 7, e2019EF001470, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019EF001470>.
24. Kinouchi, T., et al. (2019). Water security in high mountain cities of the Andes under a growing population and climate change: A case study of La Paz and El Alto, Bolivia. *Water Security*, v. 6, 100025, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasec.2019.100025>.
25. Li, Y., et al., (2024). Glacier retreat in Eastern Himalaya drives catastrophic glacier hazard chain. *AGU Journals: Geophysical Research Letters*, v. 51, <https://doi.org/10.1029/2024GL108202>.
26. Rounce, D.R., et al. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, v. 379, no. 6627, 78–83, <https://doi.org/doi:10.1126/science.abo1324>.
27. Marzeion, B., et al. (2012). Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, v. 6, no. 6, 1295–1322, <https://doi.org/10.5194/tc-6-1295-2012>.
28. Veh, G., et al. (2023). Less extreme and earlier outbursts of ice-dammed lakes since 1900. *Nature*, v. 614, no. 7949, 701–707, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05642-9>.
29. Marty, C., et al. (2017). How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, v. 11, no. 1, 517–529, <https://doi.org/10.5194/tc-11-517-2017>.
30. Voordendag, A., et al. (2023). Brief communication: The Glacier Loss Day as an indicator of a record-breaking negative glacier mass balance in 2022. *The Cryosphere*, v. 17, no. 8, 3661–3665, <https://doi.org/10.5194/tc-17-3661-2023>.
31. Swiss Academy of Sciences (2023). Two catastrophic years obliterate 10% of Swiss glacier volume. <https://scnat.ch/en/id/Cpd5S>.
32. Cremona, A., et al. (2023). European heat waves 2022: contribution to extreme glacier melt in Switzerland inferred from automated ablation readings. *The Cryosphere*, v. 17, no. 5, 1895–1912, <https://doi.org/10.5194/tc-17-1895-2023>.
33. UNESCO (2022). World Heritage Glaciers: Sentinels of climate change. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000578916>.
34. Fox-Kemper, B., et al. (2022). Ocean, cryosphere and sea level change. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, et al. (eds., 2022), Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.

35. Adler, C., et al. (2022). Mountains. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755, 2273–2318, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.022>.
36. Schuster, L. et al. (2024). Irreversible glacier change and trough water for centuries after overshooting 1.5°C. *Nature Portfolio*, preprint, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5045894/v1>.
37. Bosson, J.B., et al. (2023). Future emergence of new ecosystems caused by glacial retreat. *Nature*, v. 620, no. 7974, 562–569, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06302-2>.
38. Wilkes, M.A., et al. (2023). Glacier retreat reorganizes river habitats leaving refugia for Alpine invertebrate biodiversity poorly protected. *Nature Ecology & Evolution*, v. 7, no. 6, 841–851, <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02061-5>.
39. Shugar, D.H., et al. (2021). A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, v. 373, no. 6552, 300–306, <https://doi.org/doi:10.1126/science.abh4455>.
40. Stuart-Smith, R.F., et al. (2021). Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat. *Nature Geoscience*, v. 14, no. 2, 85–90, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00686-4>.
41. Taylor, C., et al. (2023). Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, v. 14, no. 1, 487, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x>.
42. Zheng, G., et al. (2021). Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation. *Nature Climate Change*, v. 11, no. 5, 411–417, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01028-3>.
43. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
44. Patterson, M. (2023). One of 2023's most extreme heatwaves is happening in the middle of winter. *The Conversation*, <https://doi.org/theconversation.com/one-of-2023s-most-extreme-heatwaves-is-happening-in-the-middle-of-winter-211062>.
45. Schmucki, E., et al. (2015). Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs. *International Journal of Climatology*, v. 35, no. 11, 3262–3273, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.4205>.
46. Wieder, W.R., et al. (2022). Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 119, no. 30, e2202393119, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.2202393119>.
47. Carrer, M., et al. (2023). Recent waning snowpack in the Alps is unprecedented in the last six centuries. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 2, 155–160, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01575-3>.
48. Hale, K.E., et al. (2023). Recent decreases in snow water storage in western North America. *Communications Earth & Environment*, v. 4, no. 1, 170, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00751-3>.
49. Qin, Y., et al. (2022). Snowmelt risk telecouplings for irrigated agriculture. *Nature Climate Change*, v. 12, no. 11, 1007–1015, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01509-z>.
50. François, H., et al. (2023). Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 9, 935–942, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01759-5>.
51. Beniston, M. and M. Stoffel (2014). Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources. *Science of the Total Environment*, v. 493, 1129–1137, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.122>.
52. Douville, H., et al. (2021). Water cycle changes. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1055–1210, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>.
53. Vikhamar-Schuler, D., et al. (2013). Use of a multilayer snow model to assess grazing conditions for reindeer. *Annals of Glaciology*, v. 54, no. 62, 214–226. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A306>.
54. François, H., et al. (2023). Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 9, 935–942, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01759-5>.
55. Li, D., et al. (2022). High Mountain Asia hydropower systems threatened by climate-driven landscape instability. *Nature Geoscience*, v. 15, no. 7, 520–530, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00953-y>.
56. Compagno, L., et al. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. *Communications Earth & Environment*, v. 3, no. 1, 191, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8>.
57. Schleussner, C.-F., et al. (2024). Overconfidence in climate overshoot. *Nature*, v. 634, 366–373. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08020-9>.
58. IPCC (2023). Summary for policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1–34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.

# 多年冻土

全球升温超过 1.5°C 将加剧冻土消融, 增加其缓解难度, 造成更多的全球和区域性灾害及损失

**当前NDCs (预测至 2100 年, 全球气温上升 2.3°C):** 在当前的温度条件下, 多年冻土融化不仅会因基础设施损坏而在当地增加减缓、适应和损失与损害的负担, 还会通过减少剩余的碳预算, 对全球产生影响。具体而言, 一旦多年冻土解冻, 将会引发长达一至两个世纪之久、且不可逆转的温室气体排放, 主要包括二氧化碳和甲烷。因此, 为了应对这一严峻挑战, 未来数代人必须采取与当前主要温室气体排放国排放量相匹配的减排行动, 以有效削减大气中的碳含量, 从而抵消当前新增的温室气体排放。如果当前的NDCs未能得到显著改善, 依据2019年的数据预测, 多年冻土每年释放的温室气体总量(包括二氧化碳和甲烷)[\*] 或与整个欧盟当前的排放量持平, 预计至2100年将达到大约200亿吨的规模; 而到了2300年, 这一排放量极有可能实现成倍增长。由于北极地区变暖的速度是全球平均水平的2至4倍, 预计高纬度多年冻土区域的平均温度将上升4至8°C, 同时该区域或将遭遇更加频繁且极端的热浪事件。这些极端气候现象将加速冻土的“快速解冻”过程, 暴露出更多、更深层的多年冻土, 造成海岸线或山坡的崩塌以及新湖泊的形成等现象。这意味着实际温室气体排放量可能会超出当前的预测值。

**坚持贯彻 1.5°C 温控路径:** 即使全球气温保持在1.5°C以下, 冻土解冻和相关排放仍会显著增加, 但这种增加将大大减少, 因为北极的平均温度“仅”比当前高出3~4°C。这意味着为了抵消冻土排放所需的额外减缓措施将会大幅减少, 从而降低损失与损害的程度, 并减少适应的需求。如果全球平均温度维持在1.5°C以下, 与当前NDCs(目标为2.2°C)没有显著改善的情况相比, 冻土所在地区(如俄罗斯、加拿大、阿拉斯加, 以及青藏高原等山区)的基础设施损坏也会大大减少。尽管如此, 年冻土排放仍需要未来几代人进行抵消, 但相比于当前NDCs的情景, 预计到2100年排放量将减少约30%(约120~150Gt)。

**二氧化碳水平持续上升(预测至 2100 年 全球气温上升 3~3.5°C):** 如果当前的快速变暖和多年冻土解冻趋势继续下去, 实现“冻土国家”及人类活动的净零排放几乎将变得不可能, 因为冻土会迅速消耗掉剩余的碳预算, 导致全球气温难以保持在1.5°C以内。在这样的高温背景下, 北极大部分多年冻土以及几乎所有山地多年冻土都将不可避免地融化。据预测, 至本世纪末, 这一过程的年碳排放量将达到当前中国年排放量的规模, 这无疑会极大地加速全球变暖。全球排放增加所带来的损失与损害, 以及北极地区的基础设施损坏和山坡崩塌等灾难性事件将大幅增加, 这将给冻土地区的社区带来更大的经济负担, 很多地方将超出适应能力的范围。

\* 冻土排放的二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>eq)涵盖了冻土中二氧化碳和甲烷的排放, 但为了方便起见, 在本文中通常将其统称为“碳排放”。



## 2024年最新认识

- 首份全面评估二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放的温室气体预算报告揭示了一个重要事实：在2000至2020年，北极及周边多年冻土区变为重要的温室气体排放源，显著加剧了全球变暖进程，其主要原因是火灾多发、冻土加速融化及内陆水域和湿地排放增加，导致该地区固碳能力大幅下降，由碳汇转为碳源。尤其，甲烷作为一种高效的温室气体，是该地区净增暖效应的主要推手。甲烷一旦释放到大气中，将在未来数十年内持续地对全球气温产生深远且长期的影响[1]。
- 随着夏季冻土融化加剧，北极多年冻土在秋季和初冬会释放大量二氧化碳和甲烷，其释放量已超出北极地区植物的自然固碳能力。换句话说，北极圈地区的多年冻土区域已成为大气中的碳源，若气温持续上升，这一趋势将逐渐加剧[2]。
- 北极地区存在多种加速多年冻土融化和冰层消融的因素。最新的苔原生态系统研究报告指出，如果未来空气温度平均上升1.4°C，土壤温度上升0.4°C，那么呼吸作用将会增强30%，是之前预测的四倍。这些变化将加快北极苔原从碳汇转变为碳源的过程，进而加剧气候变化的影响[3]。
- 在全球范围内，多年冻土会对每一个小幅度的升温过程作出反馈，而并非仅在达到某个特定的温度阈值或临界点时才变得不稳定。这意味着没有所谓的“安全范围”来防止多年冻土的融化。气温的上升不仅会加剧当地的影响，还会增强全球的反馈效应[4]。
- 多年冻土的融化与水文变化息息相关。在本世纪，气温上升和冻土解冻会促使北极水循环发生大幅变化，进而改变高纬度地区的自然景观和生态系统。在高排放情景下，预计到2100年，北极的地表径流可能会增加25%，地下径流增长可能达到30%，而北极南部地区可能会日趋干旱。北极水循环的改变不仅会影响北极的海冰和生物多样性，还可能通过改变海洋淡水存量及大西洋主要洋流，对全球气候产生深远影响[5]。
- 在河流生态系统，水温上升与地面解冻导致北极河岸变得不稳定，水位上涨加剧了多年冻土区的河岸侵蚀。河水传递的热量加速了冻土和沉积物的融化，进一步推动了侵蚀进程。冰含量较高的河岸原本具有较好的抗侵蚀能力，但随着气温的不断攀升，这种保护河岸免受侵蚀的作用正在逐渐减弱。因此，当河流开始侵蚀洪泛区时，沿岸的建筑、道路以及电力线路将面临极大的威胁[6]。
- 海岸带多年冻土的融化降低了北冰洋吸收二氧化碳的能力。据预测，到2100年，这种吸收能力可能减少14%。这意味着，沿海侵蚀可能使大气中二氧化碳年均增加，相当于2021年整个欧洲汽车排放的10%。这一结果对北极海洋作为碳汇的关键作用提出了严重警告。更令人担忧的是，上述提到的侵蚀现象将带来更为严重的后果：随着全球变暖每升高1°C，大气中的二氧化碳含量可能因此增加110万至220万吨[7]。
- 在高山地区，小型山地冰川融水会携带高浓度甲烷气体流入河流。随着冰川退缩，原本冰封的甲烷被释放到大气中。格陵兰、斯瓦尔巴群岛和冰岛等地的冰川，也都有类似的甲烷释放记录。而最新的阿拉斯加观察表明，退缩的小型山地冰川也对全球甲烷排放做出了贡献[8]。

请见下页

**根据当前的国家自主贡献(NDCs)目标，冻土排放将加重减缓、适应以及基础设施损坏所带来的损失与损害的压力，同时通过缩减碳预算对全球产生影响。**

## 背景

多年冻土是指连续冻结两年以上的土壤。多年冻土覆盖了北半球22%的陆地, 并含有大量古老的有机碳[11]。观测证实, 多年冻土正在迅速升温, 部分融化的碳以二氧化碳和甲烷的形式释放到大气中。根据地球变暖的程度预测, 多年冻土融化产生的温室气体与一个国家的温室气体排放量相当。当今, 气温比工业化前升高了1.2°C, 每年多年冻土的温室气体排放量大约与日本相同, 而日本目前是温室气体排放量前20名的国家[12]。

多年冻土横跨北极苔原和北方森林, 特别是在西伯利亚地区。同时, 在全球的高山地区也有多年冻土的分布。对气候影响最大的是近地表的多年冻土(即地表以下几米), 但多年冻土有时会延伸到超过一千米的深度[13,14,15]。

多年冻土是土壤、岩石、冰和有机物的冻结混合物, 其碳含量约为目前地球大气中碳量的三倍。除北极地区外, 多年冻土还分布在青藏高原和北极沿海海

### 2024年最新认识 (继上页)

- 在干旱区, 多年冻土内存在一种未冻结的“融区”层, 此层会大量释放甲烷气体, 其排放量接近北方湿地排放量的三倍。尤其, 融区在冬季释放的甲烷量相较于夏季更为突出, 可促成一种正反馈循环效应, 致使北极地区温度显著升高, 加剧多年冻土的融化态势[9]。
- 若持续保持高排放水平, 北极沿海地区海底的多年冻土预计将在2080年前后出现加速且不可逆转的融化态势。研究表明, 至2300年, 所有厚度小于100米的沿海多年冻土将完全消失。高排放水平将导致北极全年无冰现象的发生, 并触发放大效应, 使海底多年冻土超越临界阈值, 陷入失控的融化局面。然而, 要想确保北极海底区域多年冻土冻结千年, 唯有实现低排放情景下的碳排放目标, 即, 二氧化碳排放量需在2075年或之前达到净零排放[10]。

图4-1. 1.1°C时的多年冻土排放



即使温度不再上升, 到2100年, 每年承诺的多年冻土排放量也将达到约0.5Gt/年, 接近日本目前的年排放量。

数据来源: IPCC SR15, GASSER等(2018), TURETSKY等(2019)

底区域[11,16,17]。在数千年间, 低温状态的多年冻土使这种有机物免于分解。

多年冻土也分布在沿海的浅层海床, 特别是东西伯利亚附近的海域, 这些区域在上一个冰河时代结束时并未被海水覆盖, 但随着气温上升而被淹没。在过去的10~15,000年中, 海底多年冻土其被上方的海水“预加热”, 因此海底多年冻土正在迅速融化, 与此同时在浅海沿岸水域也已经监测到了较高的甲烷浓度[18]。尽管海底冻土当前和未来对碳排放的具体贡献仍不确定, 但其潜在影响可能非常大。关于释放的总碳量的估计差异较大, 范围从170~740 Gt, 其中在高排放情景下, 预计到2100年可能释放14~110 Gt碳, 而到2300年, 随着北极海洋继续在大气温度超过4°C后多世纪尺度的变暖, 释放量可能达到45 -590 Gt [18]。

现在, 北极和高山地区的升温速度是全球平均水平的2~4倍[19], 这使得这些含碳的古老多年冻土极易融化; 在开始融化之后, 土壤微生物会在接下来的多年中逐渐分解并释放出多年冻土中存储的碳[20]。

大部分释放的碳以二氧化碳形式出现。然而, 多年冻土也存在于湖泊、湿地和泥炭地之下, 当它在这样的湿润条件下融化时, 一部分碳会以甲烷的形式进入大气。虽然甲烷在大气中的存在时间不如二氧化碳长, 但在其生命周期内, 甲烷影响气候的变暖作用要比二氧化碳大得多: 在100年内约是二氧化碳的30倍, 在20年内接近100倍, 从而导致全球变暖更快、更强烈[21]。有证据表明, 多年冻土区湿地和泥炭地中的甲烷排放已经开始增加[1]。

一些预测表明, 如果温度超过3~4°C, 到本世纪末, 来自北美亚北极湿地的甲烷排放可能会增加三倍, 但如果采取低排放情景, 这些排放量可能会减少近一半[22]。然而, 如果全球平均气温升高超过2°C, 到2060年代, 北欧和西伯利亚西部75%以上的多年冻土

泥炭地地区将变得过于温暖和潮湿,使得该地区无法维持多年冻土的稳定性。即使在低排放情景下,统计模型也没有预测到挪威、瑞典、芬兰和俄罗斯部分地区的泥炭地多年冻土会恢复到适合维持的条件,这表明这些多年冻土泥炭地已经接近或已经超过了临界温度点[23]。

模型预测,随着温度的上升,近地表多年冻土覆盖的面积将大幅度减少[17]。估计在过去五十年中,近地表多年冻土的范围已经减少了约7%[24],而在全球平均气温增加1.2°C的情况下,我们不得不承认已经失去约25%的近地表多年冻土。科学家预计,即使全球升温保持在1.5°C内,到2100年,近地表多年冻土面积将损失40%。如果温度超过4°C,到2100年,超过70%的前工业化近地表多年冻土将会融化[25]。

除了多年冻土融化对全球气候产生影响之外,多年冻土融化还能带来一些地表灾害——如地面坍塌、开口湖、侵蚀加剧和洪水,这些灾害在过去几十年里严重影响了北极和高山地区的人类活动、土地利用和经济发展。多年冻土的融化导致北极土地的流失,威胁着当地文化和居民的生存,并且会破坏道路、管道和房屋等基础设施,因为多年冻土融化使得地表产生不均匀沉降[26]。根据北极监测和评估计划(AMAP)的最新气候数据,超过66%的北极居民点位于多年冻土区。到2100年时,阿拉斯加地区因多年冻土的融化引发的公共基础设施的累计维护成本增加约55亿美

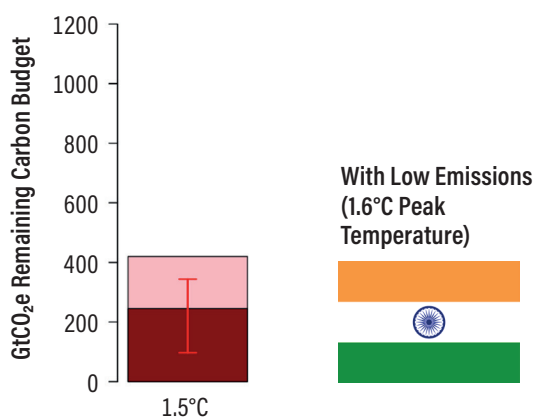
元[27]。现在,阿拉斯加的部分多年冻土全年均处于融化状态。在高排放情况下,阿拉斯加四分之三的多

年冻土可能会在未来十年达到永久融化状态,到2100年,融化层的深度可能达到10米或更深[28]。

沿海和河流的多年冻土侵蚀已经迫使阿拉斯加的一些社区重新安置房屋乃至整个社区。俄罗斯(60%的土地面积位于多年冻土上)面临着最严峻的挑战,最新的研究估计,如果按照当前的升温趋势,到2050年时基础设施破坏引起的损失将达到数百亿美元[29]。

在过去几十年中,青藏高原的升温速度是全球平均水平两倍,这增加了多年冻土融化、下沉和塌陷的风险。如果将升温限制在1.5°C以内而不是2°C,到本世纪末,这将使青藏高原因多年冻土融化引发的基础设施损坏成本减少13.2亿美元[30]。即使在“适度”排放的情景下,到2100年,青藏高原近三分之二的多年冻土区域也将成为“高风险”区域[31]。

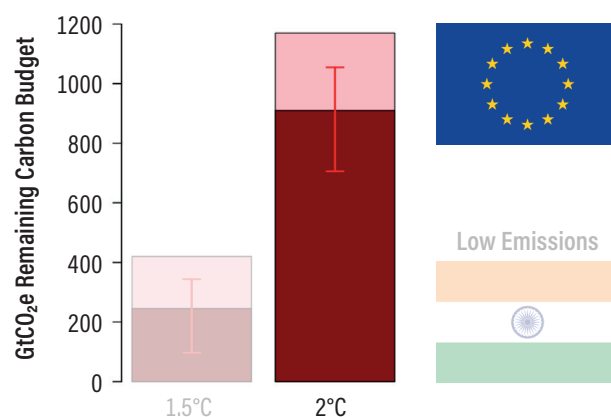
图4-2. 冻土排放对我们在1.5°C目标下碳预算的影响...



到2100年,冻土排放的年排放量大约相当于印度当前的年排放量,约为2.5Gt/年,总排放量大约为150~200GtCO<sub>2</sub>e。

数据来源:IPCC SR15, Gasser等(2018), Turetsky等(2019)

图4-3. ...但在2°C下会减少/限制更多的碳预算



到2100年,预计的多年冻土年排放量将达到欧盟目前年排放量的规模,约为3~4Gt/年,总量大约为220~300GtCO<sub>2</sub>e

数据来源:IPCC SR15, GASSER等(2018), TURETSKY等(2019)





来源：美国国家公园管理局

2004年，阿拉斯加诺阿塔克国家保护区在一个异常温暖的夏季发生了300米的崩塌，导致更多的多年冻土暴露并迅速融化。

在夏季，随着极端降雨事件的不断增多，多年冻土的融化深度增长率也将可能迅速超过30%。在全球不断增长的碳排放背景下，北极地区的降水量预计到2100年将增加60%，且由于气温升高的影响，该地区越来越多的降水形式将由降雪转为降雨[34]。此外，气候变暖在缩短冬季积雪覆盖时间的同时也增加了降雪量。这种只持续很短时间的厚积雪会加速多年冻土的融化速度。事实证明，在过去的短短几十年的时间里，其可能导致多年冻土的退化率及相关碳排放量增长四倍[35]。

由于气候变得更加温暖干燥，北极地区的野火数量不断增多，这也导致了火灾发生后多年冻土的融化速度不断加快，融化深度不断增加[36]。在高纬度地区，即大部分多年冻土带存在的地区，野火燃烧造成的大部分碳排放来自于土壤的燃烧，而非地表生物质的燃烧。与其他突发的冻土融化情况产生的碳排放一致，这些与火灾有关的碳排放，无论是直接燃烧，还是火灾对多年冻土的影响，通常都被排除在全球范围内的碳计算模型之外[37,38]。

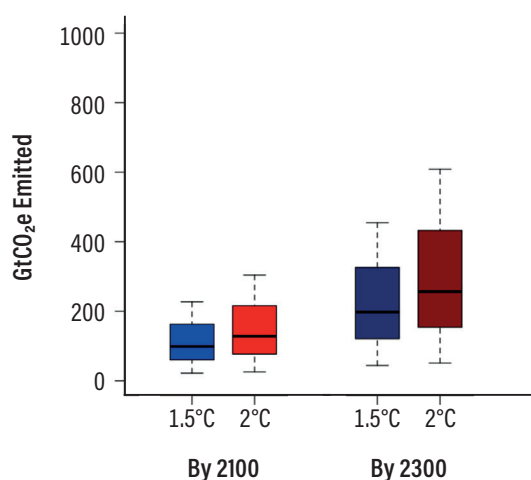
由于北极海域的逐渐变暖且更多的暴风雨发生，在受到风 and 海浪的额外侵蚀作用下，沿海地区的多年冻土特别容易受到突然融化的影响。随着沿海多

年冻土层的融化，阿拉斯加、加拿大和俄罗斯沿岸以及整个北极地区数千公里的土地会受到更大的侵蚀[39,40,41,42]。全球范围的气温上升甚至加速了格陵兰岛多年冻土的融化，沿海的社区越来越容易受到不可预测的山体滑坡和崩塌的影响[43]。

临近海岸线的海底多年冻土层有时会与深海海底的甲烷水合物（甲烷沉积物）存在一定的混淆。这些水合物代表了甲烷排放的另一个潜在来源，其中最脆弱的区域位于东西伯利亚大陆架斜坡约300~400米深的地方。有一种存在争议的说法是，这些水合物可能促进了距今大约8500万年前或更早的地球快速变暖事件。在东西伯利亚大陆架海域和亚马尔半岛的天坑中观测到的一些大范围甲烷释放事件，都被认为是由甲烷水合物坍塌造成的。

因此，可能存在大量的反馈循环，使多年冻土碳排放的增量及增速超过目前的估计。伴随着积雪、冰川和海冰逐渐消失，北极的变暖速度已经是地球其他地区的2~4倍[19]。裸露的深色地面和海水吸收了更多的热量，进一步加速了北极变暖从而加剧了多年冻土的融化和损失。全球年平均气温每升高2°C，北极地区的年平均气温就会升高4~8°C，这包含了更长、更强烈的火灾季节，以及越来越多的热浪（有时连续数周温

图4-4. 排放持续几个世纪:1.5°C与2°C情景对比



改编自GASSER等(2018)

度超过20°C),从而导致更大的多年冻土损失,最终形成一个持续的反馈循环。

目前的全球气候模型中还没有考虑这些突然的融化过程,这些过程中所释放的冻结碳在以前被认为在几个世纪内都不会融化[26,41,44]。但随着北极变暖发生,这些快速融化事件的数量有所增加,如果地球变暖1.5°C或更高,可能会使多年冻土的碳排放量增加多达40%。

距今大约300万年前的一个暖季,在类似于高碳排放条件的气候条件下,当时存在的多年冻土层(几乎与今天的多年冻土层一样大)中有90%以上消失了。接近地表的多年冻土只在西伯利亚东部高地、加拿大高北极群岛以及格陵兰岛最北端的少数地区保留下来[45]。

从人类的时间尺度来看,多年冻土融化过程产生的碳排放一旦触发,带来的影响往往是永久性的,因为重新形成新的多年冻土层需要花费数百年至数千年的时间[46]。虽然在已经融化的多年冻土上生长新植被可能会吸收一部分融化释放的碳排放,但在全球变暖的背景下,这种程度的吸收能力与多年冻土的碳排放量相比,实在是相形见绌。

因此,多年冻土融化会在全球范围内对健康、基础设施、生态系统以及广泛的社会经济变量都产生一系列连锁反应[47,48]。然而,最大的全球性风险来自于额外的碳排放,这将减少各国可用的碳排放预算,

而这些预算原本是用于防止气温上升超过1.5°C、2°C或更高[49,50]。

尽管如此,如果将温度尽可能控制在1.5°C的水平,未来多年冻土碳排放的规模仍在人类的可控范围内。虽然“多年冻土国家”未来的碳排放量范围很大,但几乎可以肯定,其碳排放量规模与大型工业国家相当[20,51],并且将随着温度每上升0.1°C而增加:

- 如果我们将升高温度限制在1.5°C,到2100年,多年冻土每年的碳排放量将与今天印度的年排放量大致相当(2.5亿吨/年),总计约为150亿吨二氧化碳当量。
- 如果我们将升高温度限制在2°C,到2100年,多年冻土每年的碳排放量将与欧洲经济合作与发展组织(OECD)的年排放量相当(3~4亿吨/年),总计约为200亿吨二氧化碳当量。
- 假设到2100年气温升高超过3~4°C,将可能导致多年冻土额外释放多达400亿吨二氧化碳当量的碳,这相当于到2100年全球碳预算每年额外增加一个美国或中国的碳排放量(目前为5~10亿吨/年)[25,37,41,51,52,53]。

对地球剩余碳预算的计算必须考虑到一些人类间接活动造成的多年冻土融化所产生的碳排放,从而才能准确确定排放期限以及如何达到“碳中和”;这个时间期限考虑不仅仅是到2100年,而是未来很长一段时间[50,51,54]。今天的决策者如果推迟二氧化碳减排量



由于多年冻土融化,阿拉斯加努纳皮丘克的建筑物正在下沉。多年冻土是覆盖在北极苔原和北方森林下方的冻结土层,已经存在了数千年。随着冻土的融化,地面出现大规模的塌陷,新的湖泊形成并排干,海岸线也在当前气温下发生崩塌。

图片来源:SUE NATALI / 伍德威尔气候研究中心



的行动,那么将需要未来子孙后代通过负排放的方案(二氧化碳消除)来抵消多年冻土的碳排放影响,哪怕在所有人类排放停止并且气温稳定之后,依然如此[47]。

目前没有地方性或地区性的方法可以确保冻土保持冻结状态并将其碳储存在土壤中。唯一的解决办法是尽可能保持冻土处于现有的冻结状态,从而将全球气温升高控制在1.5°C以内。这样可以显著减少未来一到两个世纪因冻土融化而释放的额外碳量,从而减轻未来几代人承担的负排放压力。

### 科学审稿人

Benjamin W. Abbott, Brigham Young University

Julia Boike, Alfred Wegener Institute (AWI)

Sarah Chadburn, University of Exeter

Gustaf Hugelius, Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University

Susan Natali, Woodwell Climate Research Center

Paul Overduin, AWI

Vladimir Romanovsky, University of Alaska-Fairbanks

Christina Schädel, Woodwell Climate Research Center

Ted Schuur, IPCC LA SROCC, Northern Arizona University

Merritt Turetsky, University of Colorado

### 文献与延伸阅读

1. Ramage, J., Kuhn, M., Virkkala, A.M., Voigt, C., Marushchak, M.E., Bastos, A.,...Hugelius, G. (2024). The net GHG balance and budget of the permafrost region (2000–2020) from ecosystem flux upscaling. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol 38, Issue 4. <https://doi.org/10.1029/2023GB007953>
2. See, C.R., Virkkala, A.M., Natali, S.M., Rogers, B.M., Mauritz, M., Biasi, C.,...Schuur, E.A.G. (2024). Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems. *Nature Climate Change*, 14, 853–862. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02057-4>
3. Maes, S.L., Dietrich, J., Midolo, G., Schwieger, S., Kumm, M., Vandvik, V.,...Dorrepaa, E. (2024). Environmental drivers of increased ecosystem respiration in a warming tundra. *Nature* 629, 105–113. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07274-7>
4. Nitzbon, J., Schneider von Deimling, T., Aliyeva, M., Chadburn, S.E., Grosse, G.,...Langer, M. (2024). No respite from permafrost-thaw impacts in the absence of a global tipping point. *Nature Climate Change*, 14, 573–585. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02011-4>
5. Rawlins, M.A. & Karmalkar, A.V. (2024). Regime shifts in Arctic terrestrial hydrology manifested from impacts of climate warming. *The Cryosphere*, 18, 1033–1052. <https://doi.org/10.5194/tc-18-1033-2024>
6. Douglas, M.M., Miller, K.L., Schmeer, M.N., & Lamb, M.P. (2023). Ablation-limited erosion rates of permafrost riverbanks. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol 128, Issue 8. <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>
7. Nielsen, D.M., Chegini, F., Maerz, J., Brune, S., Mathis, M., Dobrynin, M.,...Ilyina, T. (2024). Reduced Arctic Ocean CO<sub>2</sub> uptake due to coastal permafrost erosion. *Nature Climate Change*, 14, 968–975. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02074-3>
8. Konya, K., Sueyoshi, T., Iwahana, G., Morishita, T., Uetake, J., & Wakita, M. (2024). CH<sub>4</sub> emissions from runoff water of Alaskan mountain glaciers. *Scientific Reports*, 14, 10558. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56608-y>
9. Walter Anthony, K.M., Anthony, P., Hasson, N., Edgar, C., Eliani-Russak, E., Bergman, O.,...Nitzbon, J. (2024). Upland Yedoma taliks are an unpredicted source of atmospheric methane. *Nature Communications*, 15, 6056. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50346-5>
10. Creel, R.C., Miesner, F., Wilkenskjeld, S., Austermann, J., & Overduin, P.P. (2024). Glacial isostatic adjustment reduces past and future Arctic subsea permafrost. *Nature Communications*, 15, 3232. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45906-8>
11. Strauss, J., Abbott, B., Hugelius, G., Schuur, E., Treat, C., Fuchs, M.,...Biasi, C. (2021) Permafrost: Importance of permafrost as major carbon stock. In: FAO and ITPS. Recarbonizing global soils – A technical manual of recommended management practices. Volume -2 – Hot spots and bright spots of soil organic carbon. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb6378en>
12. Schuur, T. J. Richter-Menge, M. L. Druckenmiller, and M. Jeffries, Eds. (2019). Permafrost and the Global Carbon Cycle. Arctic Report Card. <https://arctic.noaa.gov/report-card/report-card-2019/>
13. IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
14. Lawrence, D., Slater, A., & Swenson, S. (2012). Simulation of present-day and future permafrost and seasonally frozen ground conditions in CCSM4. *Journal of Climate*, 2207–2225. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00334.1>
15. Romanovsky, V., Isaksen, K., Anisimov, O., & Dрозdov, D. (2017). Changing permafrost and its impacts. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA), Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 65–102. <https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>
16. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J., Schuur, E., Ping, C.-L.,...Kuhry, P. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
17. Schuur, E., McGuire, A., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J., Hayes, D.,...Vonk, J. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
18. Sayedi, S., Abbott, B., Thornton, B., Frederick, J., Vonk, J., Overduin, P.,...Demidov, N. (2020). Subsea permafrost carbon stocks and climate change sensitivity estimated by expert assessment. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc29>
19. Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K.,...Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
20. Schuur, E., Hicks Pries, C., Mauritz, M., Pegoraro, E., Rodenhizer, H., See, C., & Ebert, C. (2023). Ecosystem and soil respiration radiocarbon detects old carbon release as a fingerprint of warming and permafrost destabilization with climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol 38, Issue 2261. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0201>



21. Froitzheim, N., Majka, J., & Zastrozhnov, D. (2021). Methane release from carbonate rock formations in the Siberian permafrost area during and after the 2020 heat wave. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 32, e2107632118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2107632118>
22. Bansal, S., van der Burg, M.P., Fern, R.R., Jones, J.W., Lo, R., McKenna, O.P.,...Gleason, R.A. (2023). Large increases in methane emissions expected from North America's largest wetland complex. *Science Advances* Vol 9, Issue 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ade1112>
23. Fewster, R., Morris, P., Ivanovic, R., Swindles, G., Peregon, A., & Smith, C. (2022). Imminent loss of climate space for permafrost peatlands in Europe and Western Siberia. *Nature Climate Change*, 373–379. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01296-7>
24. Li, H., Väiliranta, M., Mäki, M., Kohl, L., Sannel, A., Pumpanen, J.,...Bianchi, F. (2020). Overlooked organic vapor emissions from thawing Arctic permafrost. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb62d>
25. Chadburn, S., Burke, E., Cox, P., Friedlingstein, H., & Westermann, S. (2017). An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 340–344. <https://doi.org/10.1038/nclimate3262>
26. Schneider von Deimling, T., Lee, H., Ingeman-Nielsen, T., Westermann, S., Romanovsky, V., Lamoureux, S.,...Langer, M. (2021). Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales. *The Cryosphere*, 2451–2471. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2451-2021>
27. AMAP, 2021. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 16 pp. <https://www.amap.no/documents/download/6759/inline>
28. Farquharson, L., Romanovsky, V., Kholodov, A., & Nicolsky, D. (2022). Sub-aerial talik formation observed across the discontinuous permafrost zone of Alaska. *Nature Geoscience*, 475–481. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00952-z>
29. Hjort, J., Streletskiy, D., Doré, G., Wu, Q., Bjella K., & Luoto, M. (2022). Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nat Rev Earth Environ* 3, 24–38. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8>
30. ICIMOD (2023). Water, ice, society, and ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An outlook. (P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal, & J. F. Steiner [Eds.]). ICIMOD. <https://doi.org/10.53055/ICIMOD.1028>
31. Ran, Y., Cheng, G., Dong, Y., Hjort, J., Lovcraft, A.L., Kang, S.,...Li, X. (2022). Permafrost degradation increases risk and large future costs of infrastructure on the Third Pole. *Commun Earth Environ* 3, 238. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00568-6>
32. Schuur, E., Abbott, B., Bowden, W., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.,...Zimov, S. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change*, 359–74. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
33. Lara, M., Chen, Y., & Jones, B. (2021). Recent warming reverses forty-year decline in catastrophic lake drainage and hastens gradual lake drainage across northern Alaska. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.18739/A2BV79W8S>
34. Magnússon, R., Hamm, A., Karsanaev, S., Limpens, J., Kleijn, D., Frampton, A.,...Heijmans, M. (2022). Extremely wet summer events enhance permafrost thaw for multiple years in Siberian tundra. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29248-x>
35. Pedron, S.A., Jespersen, R.G., Xu, X., Khazindar, Y., Welker, J.M., & Czimczik, C.I. (2023). More snow accelerates legacy carbon emissions from Arctic permafrost. *AGU Advances* 4, 4. <https://doi.org/10.1029/2023AV000942>
36. McCarty, J., Smith, T., & Turetsky, M. (2020). Arctic fires re-emerging. *Nature Geoscience*. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00645-5>
37. Natali, S., Holdren, J., Rogers, B., Treharne, R., Duffy, P., Pomerance, R., & MacDonald, E. (2021). Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 21, e2100163118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2100163118>
38. Treharne, R., Rogers, B.M., Gasser, T., MacDonald, E., & Natali, S. (2022). Identifying barriers to estimating carbon release from interacting feedbacks in a warming Arctic. *Front. Clim.* 3:716464. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.716464>
39. Irrgang, A.M., Bendixen, M., Farquharson, L.M., Baranskaya, A.V., Erikson, L.H., Gibbs, A.E.,...Jones, B.M. (2022). Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. *Nat Rev Earth Environ* 3, 39–54. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1>
40. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirrmeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S.,...Boike, J. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences*, 3469–3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
41. Turetsky, M., Abbot, B., Jones, M., Anthony, K., Olefeldt, D., Schuur, E.,...McGuire, A. (2020). Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 138–143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
42. Turetsky, M., Abbott, B., Jones, M., Anthony, K., Olefeldt, D., Schuur, E.,...Sannel, A. (2019). Permafrost collapse is accelerating carbon release. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01313-4>
43. Svennevig, K., Hermanns, R., Keiding, M., Binder, D., Citterio, M., Dahl-Jensen, T.,...Voss, P. (2022). A large frozen debris avalanche entraining warming permafrost ground—the June 2021 Assapaat landslide, West Greenland. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01922-7>
44. Schädel, C., Rogers, B.M., Lawrence, D.M., Koven, C.D., Brovkin, V., Burke, E.J.,...Natali, S.M. (2024). Earth system models must include permafrost carbon processes. *Nature Climate Change*, 14, 114–116. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01909-9>
45. Guo, D., Wang, H., Romanovsky, V.E., Haywood, A.M., Pepin, N., Salzmann, U.,...Kamae, Y. (2023). Highly restricted near-surface permafrost extent during the mid-Pliocene warm period. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 120, 36, e2301954120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2301954120>
46. de Vrese, P., & Brovkin, V. (2021). Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5>
47. Bauer, N., Keller, D.P., Garbe, J., Karstens, K., Piontek, F., von Bloh, W.,...Winkelmann, R. (2023). Exploring risks and benefits of overshooting a 1.5°C carbon budget over space and time. *Environmental Research Letters*, 18 054015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/accd83>
48. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
49. Comyn-Platt, E., Hayman, G., Huntingford, C., Chadburn, S., Burke, E., Harper, A.,...Sitch, S. (2018). Carbon budgets for 1.5 and 2°C targets lowered by natural wetland and permafrost feedbacks. *Nature Geoscience*, 11, pages 568–573. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0174-9>

50. Gasser, T., Kechiar, M., Ciais, P., Burke, E., Kleinen, T., Zhu, D.,...Obersteiner, M. (2018). Path-dependent reductions in CO<sub>2</sub> emission budgets caused by permafrost carbon release. *Nature Geoscience*, 830–835. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0227-0>
51. Rößger, N., Sachs, T., Wille, C., Boike, J., & Kutzbach, L. (2022). Seasonal increase of methane emissions linked to warming in Siberian tundra. *Nature Climate Change*, 12, 1031–1036. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01512-4>
52. Hugelius, G., Loisel, J., Chadburn, S., Jackson, R., Jones, M., MacDonald, G.,...Yu, Z. (2020). Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117, 34, 20438–20446. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>
53. Keuper, F., Wild, B., Kumm, M., Beer, C., Blume-Werry, G., Fontaine, S., Gavazov, K., Gentsch, N., Guggenberger, G., Hugelius, G. and Jalava, M. (2020) Carbon loss from northern circumpolar permafrost soils amplified by rhizosphere priming. *Nature Geoscience*, pp.1–6. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0607-0>
54. Abbott, B., Brown, M., Carey, J., Ernakovich, J., Frederick, J., Guo, L., Hugelius, G.,...Zolkos, S. (2022). We must stop fossil fuel emissions to protect permafrost ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*. <https://www.doi.org/10.3389/fenvs.2022.889428>
55. Biller-Celander, N., Shakun, J., McGee, D., Wong, C., Reyes, A., Hardt, B.,...Lauriol, B. (2021). Increasing Pleistocene permafrost persistence and carbon cycle conundrums inferred from Canadian speleothems. *Science Advances*. <http://doi.org/10.1126/sciadv.abe5799>
56. Chen, Y., Lara, M., Jones, B., Frost, G., & Hu, F. (2021). Thermokarst acceleration in Arctic tundra driven by climate change and fire disturbance. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.011>
57. Cheng, F., Garzzone, C., Li, X., Salzmann, U., Schwarz, F., Haywood, A.,...Tripathi, A. (2022) Alpine permafrost could account for a quarter of thawed carbon based on Plio-Pleistocene paleoclimate analogue. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29011-2>
58. Douglas, T., Hiemstra, C., Anderson, J., Barbato, R., Bjella, K., Deeb, E., &...Wagner, A. (2021). Recent degradation of interior Alaska permafrost mapped with ground surveys, geophysics, deep drilling, and repeat airborne lidar. *The Cryosphere*. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3555-2021>
59. IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.Shukla,A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C.Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield(eds.)]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
60. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. <https://doi:10.1017/9781009157896>
61. Juhls, B., Antonova, S., Angelopoulos, M., Bobrov, N., Grigoriev, M., Langer, M.,...Overduin, P. (2021). Serpentine (floating) ice Cchannels and their interaction with riverbed permafrost in the Lena River Delta, Russia. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.689941>
62. Kleber, G.E., Hodson, A.J., Magerl, L., Mannerfelt, E.S., Bradbury, H.J., Zhu, Y.,...Turchyn, A.V. (2023). Groundwater springs formed during glacial retreat are a large source of methane in the high Arctic. *Nature Geoscience*, 16, 597–604. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01210-6>
63. Koven, C., Lawrence, D., & Riley, W. (2015). Permafrost carbon–climate feedback is sensitive to deep soil carbon decomposability but not deep soil nitrogen dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 12, 3752–3757. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415123112>
64. Lapham, L., Dallimore, S., Magen, C., Henderson, L., Leanne C., P., Gonsior, M.,...Orcutt, B. (2020). Microbial greenhouse gas dynamics associated with warming coastal permafrost, Western Canadian Arctic. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.582103>
65. MacDougall, A., Avis, C., & Weaver, A. (2012). Significant contribution to climate warming from the permafrost carbon feedback. *Nature Geoscience*, 719–721. <https://doi.org/10.1038/ngeo1573>
66. McGuire, A., Lawrence, D., Koven, C., Klein, J., Burke, E., Chen, G.,...Zhuang, Q. (2018). Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 15 3882–3887. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>
67. Obu, J. (2021). How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? *Journal of Geophysical Research Earth Surface*. <https://doi.org/10.1029/2021JF006123>
68. Schädel, C., Bader, M.-F., Schuur, E., Biasi, C., Bracho, R., Čapek, P.,...Wickland, K. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change*, 950–953. <https://doi.org/10.1038/nclimate3054>
69. Schaefer, K., Elshorbany, Y., Jafarov, E., Schuster, P., Striegl, R., Wickland, K., & Sunderland, E. (2020). Potential impacts of mercury released from thawing permafrost. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18398-5>
70. Schaefer, K., Lantuit, H., Romanovsky, V., Schuur, E., & Witt, R. (2014). The impact of the permafrost carbon feedback on global climate. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/085003>
71. Schaefer, K., Lantuit, H., Romanovsky, V. E., and Schuur, E.A.G. (2012). Policy Implementations of Warming Permafrost, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, pp. 30. <https://www.unep.org/resources/report/policy-implications-warming-permafrost>
72. Schuur, E., Abbott, B., Commane, R., Ernakovich, J., Euskirchen, E., Hugelius, G.,...Turetsky, M. (2022). Permafrost and climate change: carbon cycle feedbacks from the warming Arctic. *Annual Review of Environment and Resources* 47, 343–371. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-011847>
73. Wu, M.-H., Chen, S.-Y., Chen, J.-W., & Wang, Y.-F. (2021). Reduced microbial stability in the active layer is associated with carbon loss under alpine permafrost degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 25, e2025321118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2025321118>
74. Wu, M.-H., Chen, S.-Y., Chen, J.-W., Xue, K., Chen, S.-L., Wang, X.-M.,...Wang, Y.-F. (2021). Reduced microbial stability in the active layer is associated with carbon loss under alpine permafrost degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 25, e20253211. <https://doi.org/10.1073/pnas.2025321118>
75. Zhuang, Q., Melillo, J., Sarofim, M., Kicklighter, D., McGuire, A., Felzer, B.,...Hu, S. (2006). CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> exchanges between land ecosystems and the atmosphere in northern high latitudes over the 21st century. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2006GL026972>

# 海冰

全球气温升高超过1.5°C阈值将引发一系列全球反馈效应，进一步加剧气候适应的需求，并增加损失和损害负担。

**当前的国家自主贡献(预测至 2100 年,全球气温上升 2.3°C):**两极海冰的融化将引发全球反馈效应,加剧全球适应需求及损失与损害负担。北冰洋每年可能有长达四个月(7月至10月)的时间几乎无海冰覆盖(指海冰范围小于一百万平方公里)。低反照率的开阔水域将在极昼条件下吸收更多的太阳辐射。北极变暖还将加速沿海多年冻土的融化,释放更多碳(主要以二氧化碳和甲烷等温室气体为主)进入大气并加剧海岸侵蚀;加速格陵兰冰盖融化,导致海平面上升;对中纬度天气系统产生不可预测且可能较为剧烈的影响。在南极,考虑到当前1.2°C的全球变暖趋势,预计当温升达到2.3°C时,每年夏季南极海冰几乎完全消失的情景是可预见的。海冰消融将削弱其对冰架的支撑作用,加速冰架崩塌,进一步加剧南极冰盖融化,引发海平面上升。此外,海水变暖意味着,即使大气温度回落,海冰的恢复也可能需要数十年,尤其是在南极地区,此结果归因于海洋能够长时间蓄积热量。尽管一些经济分析师认为北极海冰的减少可能带来更大的区域经济潜力,但即便对北极国家而言,极端的损失与损害及增加的适应需求几乎必然会远远超过这些短暂的经济收益。

**坚持贯彻 1.5°C 温控路径:**研究表明,即使全球气温仅升高1.5°C,北极夏季海冰仍可能在某些年份几乎完全融化,但并非每年如此,且“无冰”状态持续的时间较短,仅为几天到几周。降低“无冰”状态发生的频率将显著减轻其对北极及全球范围内的影响和反馈效应,从而减少适应负担。然而,部分影响仍将不可避免地带来损失与损害,尤其对北极原住民和沿海社区影响尤为显著。尽管南极海冰衰减的预估存在更大不确定性,但2023-2024年创纪录的低海冰覆盖情况表明,引发南极夏季海冰完全消融的增温阈值可能比北极更低。在“极低”排放情景下(SSP1~1.6,气温峰值达到1.6°C),到2100年全球气温增温有望回落至1.4°C以下,有利于两极海冰的部分恢复。

**二氧化碳水平持续上升(预测至 2100 年 全球气温上升 3~3.5°C):**如果大气中的二氧化碳浓度以当前速度继续增加(尽管已有减排承诺,但目前增长并未放缓),到本世纪末,全球气温将至少升高3°C。在这一高温情景下,北冰洋每年将有近180天处于“无冰”状态,导致北极增暖加剧、多年冻土退化加速、格陵兰冰盖融化增强以及极端天气事件频发。虽然南极海冰减少的具体幅度存在较大不确定性,但其下降趋势可能会与北极相当。无论是在局地还是全球范围内,最终造成极其严重的损失和破坏,远远超出适应能力的上限。



## 背景

### 北极海冰

北极海冰被称为“地球的冰箱”，是全球温度的重要调节器。这片覆盖海冰的广大海域，面积接近美国国土面积的2倍，在长达六个月的极昼夏季将大部分太阳辐射反射回太空，从而对地球起到冷却作用。与具有高反照率的海冰和积雪相比，较暗的开阔水域会吸收更多太阳辐射，进一步加剧北极及全球变暖。北极海冰在过去至少12.5万年间几乎一直在发挥这种冷却效应。然而，最新研究发现，由于夏季海冰覆盖范围的减少，自1980年以来这一冷却效应已降低约20%[6]。

自1979年有可靠的卫星观测记录以来，北极夏季存留的海冰范围至少减少了40%[9,10]。基于船舶和

极地探险者的目击记录估计，自1900年以来，海冰范围减少约60%，且大部分都发生在1980年后[11]。此外，北冰洋海冰已逐渐由较薄且移动速度更快的季节性海冰主导，这些海冰通常无法在夏季存留[12]。这与过去覆盖范围广、厚度较大且粗糙的多年冰形成鲜明对比，随着北极夏季“无冰”出现，多年冰可能会完全消失[12~15]。自20世纪70年代以来，北极海冰的总体积已减少近四分之三，体积的下降速度和幅度远超其面积变化。

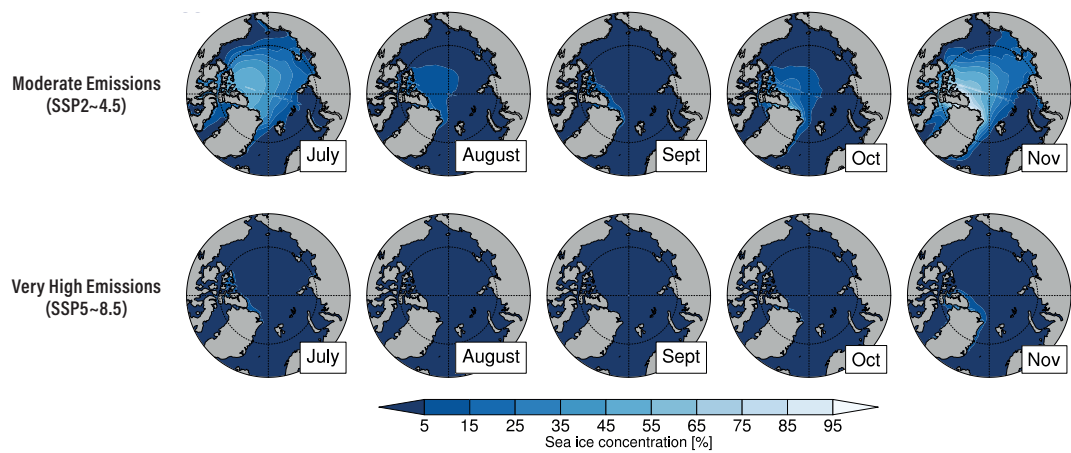
夏季海冰的急剧减少显著加剧了“北极放大效应”，即北半球高纬度地区的升温速度远超全球平均水平[12,16,17]。这一变化还带来了广泛的气候、生态和经济影响，包括北极原住民赖以生存的稳定海冰平台减少，威胁其传统的狩猎、捕鱼和出行方式。此外，

## 2024年最新认识

- 只有在与1.5°C目标相一致的最低排放情景下，北极海冰才有可能在全年保持部分存在。若全球气温升高2°C，北冰洋将出现长达3个月的“无冰”状态；当升温达到2.5°C及以上时，“无冰”期将延长至四个月；在3.5°C或更高的增温情景下，这一状态将持续6个月；而在极高排放情景下（4~5°C及以上），“无冰”期可能延长至8个月。即使短暂超过《巴黎协定》设定的1.5°C升温阈值，北极夏季仍可能在未来数十年内偶尔出现“无冰”期，但如果升温超标程度较小，并通过负排放措施降低大气中的二氧化碳浓度，这些“无冰”状态或将完全消失。只要温度维持或回落至1.5°C及以下，即使有短暂超标，“无冰”状态仍可“作为例外，而非新常态”[1]。
- 2024年2月，南极海冰覆盖范围连续第三个夏季降至200万平方公里以下，这是自20世纪80年代有卫星观测记录以来从未突破的阈值。这些愈加频繁且持久的极端事件，表明南极海冰可能已经发生“状态转变”，进入了一个全新的阶段[2]。此外，南极海冰的极端低值持续存在，在季节交替间也未能恢复，且南极周边各区域均观测到海冰覆盖率偏低的现象[3]。
- 2023年，南极海冰覆盖范围创下历史最低纪录。若无人为气候变化的影响，这类事件原本仅会每2000年发生一次。该类事件的发生表明，人类排放很可能正在影响南极海冰近期的生消发展。按照当前的排放和变暖趋势，至少未来二十年内，南极海冰或难以恢复在这些极端事件中损失的冰量。相比之下，1.5°C的排放路径有望在本世纪末逐步减缓极端海冰损失，并有助于稳定相邻的冰架，从而减缓冰盖的融化速度[4]。
- 南极洲的海岸线被海冰环绕，这些海冰为大陆周围的冰架和大型冰川提供了重要的保护屏障。然而，海冰消失可能会使这一屏障消退，使沿岸地区更易受到强烈的海浪冲击。在南极半岛，保护拉森B海岸线超过十年的海冰（这里指固定冰）在2022年1月因异常高温、海冰范围的创纪录低值以及强烈海浪的共同作用发生脱离。该区域的冰川随之出现变薄和退缩，冰山崩解速度显著加快[5]。

请见下页

图5-1. 在中等与极高温下，北极海冰几乎全年消失



在中等排放情景下(气温峰值达到2.7℃)，北极将在大部分夏秋季节失去冰层。然而，如果继续维持目前的排放水平，北冰洋将进入全年无冰状态，这将带来不可预测的全球反馈效应和后果，包括多年冻土融化导致的碳排放加剧以及格陵兰冰盖的融化。

来源：由Alexandra Jahn修改自Jahn等(2024)。

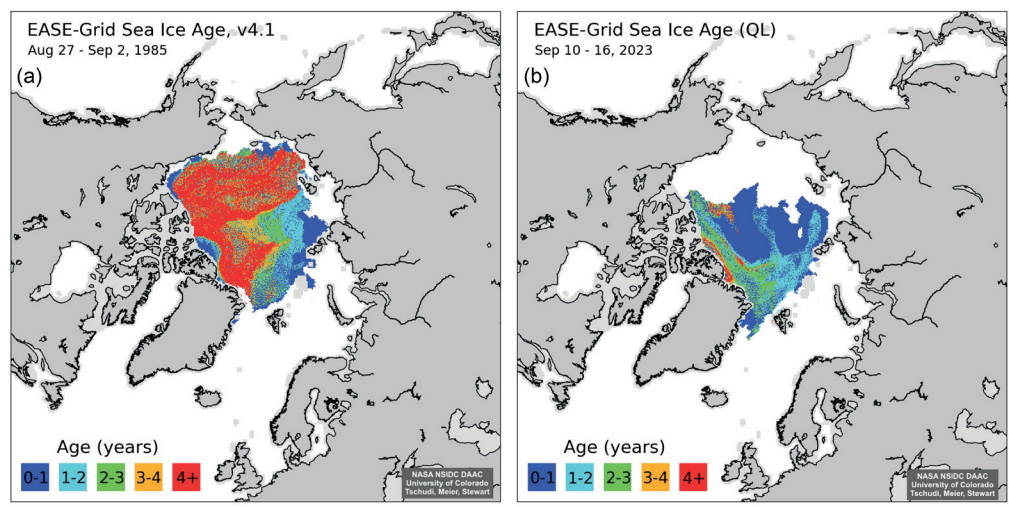
## 2024年最新认识 (继上页)

- 即使海冰减少时也可能存在具有反射作用的云层，因此海冰通过反射阳光产生的冷却效应一直存在不确定性。结合1980年代至今的卫星观测数据和高性能计算技术发现，这种冷却效应随着海冰减少而减弱，这一情况不仅发生在北极，也出现在近期海冰大量减少的南极。1980–1988年间和2016–2023年间相比，因海冰反照率下降，北极海冰冷却效应减少了17%至22%。在同一时期，尽管南极海冰范围在2016年之前保持了几十年的相对稳定，冷却效应也减少了9%至14%。海冰范围和反照率的下降可能是导致极地加速变暖的原因之一（北极变暖速度是全球平均速度的3至4倍，南极则为全球平均值的2倍），这也可能导致反馈效应远远超出当前全球气候模式的预测[6]。
- 哈德逊湾的北极熊种群包含全球仅存的19个种群中的3个（约有4,000只个体）。若温室气体排放持续导致海冰减少，这一种群将在未来数十年内面临局地灭绝风险。其生存挑战不仅源于海冰范围的减

少，也与海冰厚度下降有关——冰层必须足够厚才能承载北极熊捕猎时的体重。一旦温升超过2℃，哈德逊湾的3个北极熊种群将难以获得持续而稳固的厚冰来维持其生存。如果不紧急减少化石燃料排放，类似的情况或将成为现实：2024年春季，受异常高温和强风影响，哈德逊湾海冰提前破裂，5月海冰覆盖范围创下自1979年有卫星记录以来的最低值[7]。

- 海冰范围的减少以及开阔水域时间的延长，使阿拉斯加北极沿岸面临更高的自然灾害风险，包括风暴潮、洪水和海岸侵蚀等。如果温室气体排放保持当前水平，到2070年，楚科奇海和波弗特海的海冰减少将导致阿拉斯加沿岸在12月至次年2月期间频繁受到巨浪袭击，甚至可能延续至春季。同时，冬季风暴将愈发猛烈，进一步加剧当地居民面临的风险。然而，通过实施符合1.5℃升温目标的减排措施，可以最大限度地减少海冰的损失，从而避免北极社区遭受“潜在灾难性”的后果[8]。

图5-2. 厚重多年生北极海冰的消失



曾经的厚重多年生海冰(红色区域)几乎已经消失。左图:1983年,右图:2023年。

来源:美国国家冰雪数据中心

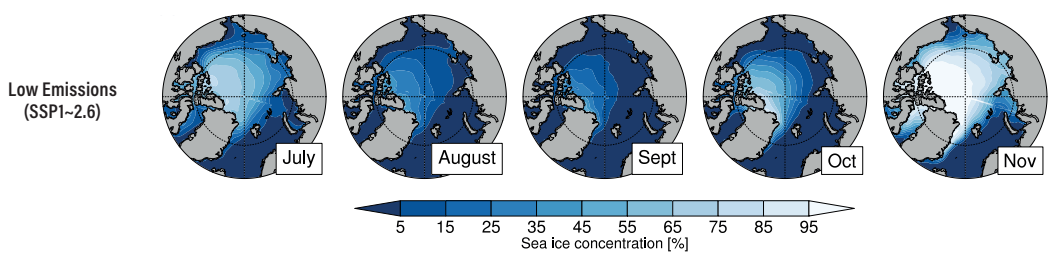
夏季海冰的减少还可能影响中纬度地区的天气系统。例如,近年来的异常冷暖、干湿天气状况可能与北极急流的显著波动有关[18~23]。

持续的海冰减少对北冰洋生态系统构成严重威胁。许多海洋生物在长期进化过程中适应了全年大部分时间都被冰层覆盖的环境,而随着首次夏季“无冰”的来临,这些关键物种的种群数量预计将大幅缩减,只有在少数持续存在冰层的小范围区域内才能得以幸存[12,24]。食物链顶端的海象和北极熊等大型捕食者依赖海冰作为活动平台,未来也将面临生存挑战[7]。即使在低排放情景下,2050年前仍然可能出现至少

一次夏季“无冰”[10,14,15,25,26],这将对整个北极食物链及更广泛的生态系统产生深远影响。

夏季北极海冰范围常被视为气候变化的指示器,尤其是每年9月最小海冰范围备受关注。然而,自20世纪80年代以来,北极海冰的厚度和范围在全年各月份均呈现下降趋势。海冰科学界普遍认为,北极海冰覆盖情况已经发生了根本性变化,跨越了临界点,进入了新的状态[12,13,27,28]。北极增温效应削弱了海冰在冬季的恢复能力[29],导致较薄、较年轻的海冰取代了过去环绕北极点并最终流入北大西洋的多年冰[12,30,31]。这些脆弱的年轻冰更易受风力作用移向

图5-3. 全球升温1.8°C后,北极夏季几乎无海冰

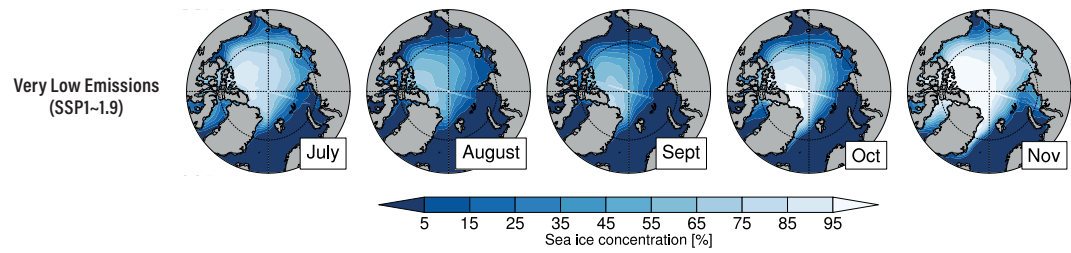


即使是在大多数政策制定者认为的“低”排放情景(SSP2~2.6)下,全球气温升高至1.8°C,北极大部分夏季将没有海冰覆盖,这将引发区域和全球层面的影响,包括生态系统扰动,甚至可能带来比今天更为极端的气候模式。这也强调了即便是“最小”的温度超标,保持接近1.5°C温控目标的至关重要性。

来源:由Alexandra Jahn根据Jahn等(2024)修改。



图5-4. 在1.5°C排放情景下全年保留更多北极海冰



在极低排放情景 (SSP1~1.9) 下,大多数年份北极海冰仍可部分保留。

来源:由Alexandra Jahn基于Jahn等人 (2024) 研究修改。

大西洋,在较暖的海水中加速融化;因此,与二十年前相比,海冰如今在北冰洋停留的时间缩短了约三分之一[13]。

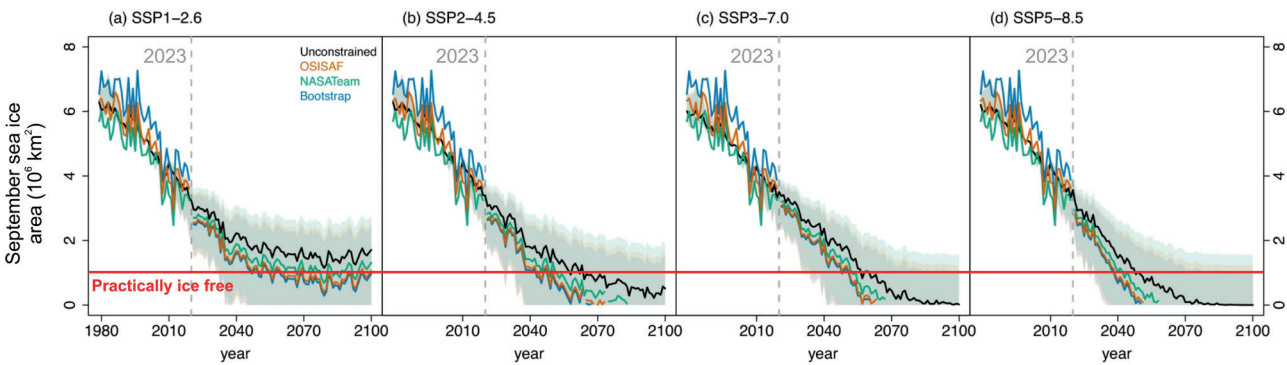
这一曾经存在的“冰生态系统”如今几乎完全消失。目前北极超过四分之三的海冰为当年冰,每年夏季大部分都会融化,而“较老”的多年冰平均仅能存留1至3年[12]。北极变暖减缓了秋冬季海冰融化后的再生速度,尤其缩短了喀拉海和拉普捷夫海的海冰生成天数,这些海域因冬季生成大量海冰,被称为“北极冰工厂”[29]。此外,大气河的频率增加,这些狭窄且温暖的空气流侵入北极中心区域,进一步减缓了夏季融冰后脆弱冰层的重新冻结[32]。

尽管目前在较高温度下已经观察到北极海冰的这一根本性变化,但首次夏季“无冰”将成为标志性

事件。这一现象可能是北极自8000年前末次冰期结束、气温急剧上升以来从未经历过的,甚至可能追溯至12.5万年前的温暖间冰期(伊密安期)[33]。目前全球气温几乎已接近伊密安期的水平,当时由于北冰洋的季节性开放和变暖,格陵兰冰盖可能部分融化,全球海平面较当前高出5至10米(16至32英尺)[34,35]。地球气候正沿着这一轨迹演变,如今人类活动排放的大气二氧化碳浓度已超过过去至少300万年内的任何水平。

与气候变化的诸多影响类似,过去三十年间北极海冰的减少并非逐渐发生,而是通过一系列突发性减少事件实现的;这些海冰范围的急剧减少事件通常由风和较高气温的共同驱动,并形成了新的海冰范围基线[9,36~39]。夏季海冰几乎完全消失(定义为北冰洋

图5-5. 只有“极低”排放能保持北极夏季海冰



通过先进的建模方法更新了不同排放情景下的9月北极海冰面积预测。仅在极低排放情景 (SSP1) 下,海冰面积才会恢复到不完全无冰的状态。

来源:KIM 等 (2023)

海冰覆盖面积降至15%以下,即约100万平方公里)的情况可能会在某次突发事件中出现,但在随后的几年内可能不会再度发生。最终,北极夏季“无冰”现象将愈加频繁,若全球温度继续上升并超过约1.7°C的临界点,“无冰”状态将逐渐成为每年夏季的常态,甚至延续至春季和秋季[4,25,40,41]。

首次北极夏季“无冰”的出现时间仍存在较大不确定性,但科学界普遍认为这已不可避免。即使在“极低”排放情景下,2050年前至少出现一次夏季“无冰”的可能性也较高[10,12,15,41]。在“极低”或“低”排放情景中,夏季海冰范围可能趋于稳定,尽管偶尔会出现“无冰”年份,但总体上仍能维持在“无冰”阈值之上。随着全球气温下降到1.5°C以下,海冰量可能会增加,并缓慢恢复,但由于北冰洋温度仍偏高,多年冰的重新形成预计将耗时数十年[36]。

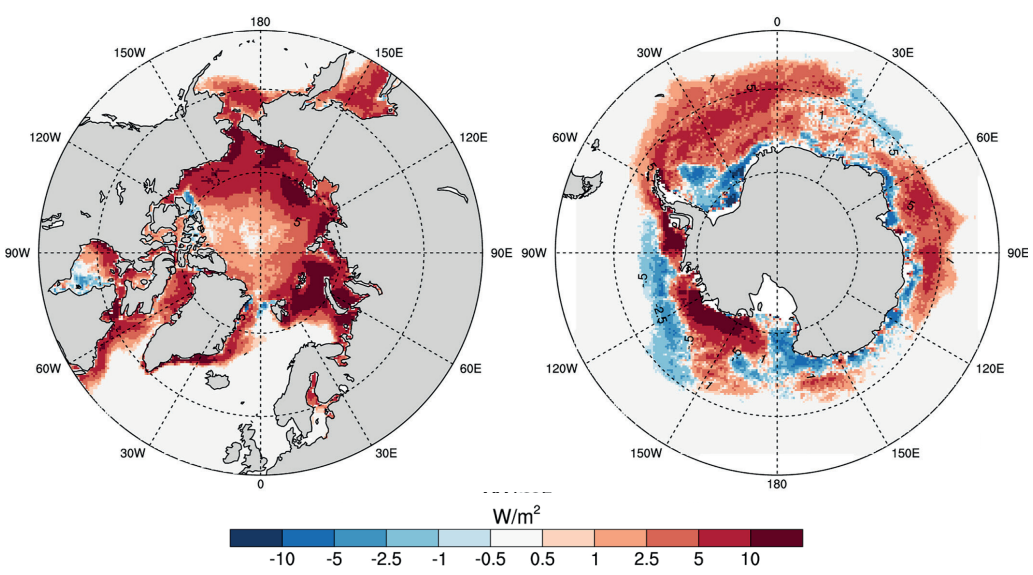
相比之下,若继续当前的高排放路径,北极最早可能在2030年代首次出现夏季“无冰”[25]。即便在中等排放情景下,当全球平均气温上升约1.7°C时,大部分夏季也将出现“无冰”状态。随着排放量和温度的升高,“无冰”状态的持续时间将逐步延长[26,40~42],最终在全球温升达到2°C时,这一状态可能从7月持

续到10月[1,26,43]。北极放大效应的影响将带来广泛而深远的影响,包括加速格陵兰冰盖的融化和海平面上升、依赖海冰生存的物种数量锐减、多年冻土解冻导致更多温室气体释放,甚至对基础设施造成破坏[12,40]。

北极夏季海冰完全消失的全球影响还将包括加速的全球变暖及其连锁反应。由于开阔水域可吸收更多太阳辐射,预计北极秋冬季节气温将显著上升,并对北半球大气系统产生影响[18,20~23,44~47]。异常天气模式可能表现为更频繁的极端事件,例如干旱、热浪、寒潮和暴风雨,包括美国西南部持续多年的极端干旱,2021年6月北美西北部、2022年和2023年欧洲大部分地区的极端热浪[22];2018年夏季斯堪的纳维亚因干旱引发大规模野火和农业损失,以及2021年2月美国中部的极端寒潮[19,48]。此外,多年冻土加速解冻以及格陵兰和北极冰川的融化将释放更多温室气体,进一步加快海平面上升速度。

最后,尽管一些北极国家及其他政府声称北极夏季“无冰”将带来短期经济收益,但这些主张需与全球性影响进行权衡。全球温度相较于工业化前上升2°C将导致北极夏季“无冰”状态的出现,从而使北极资源

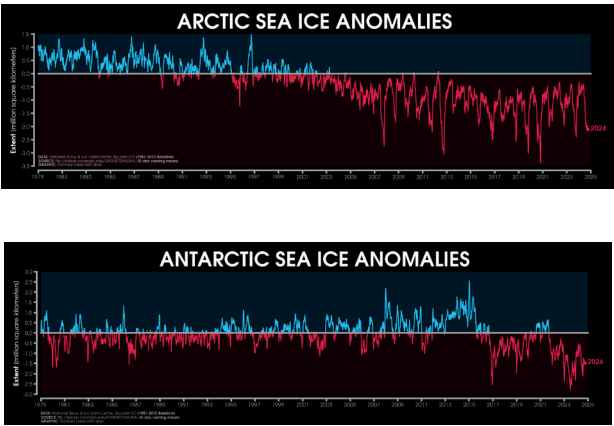
图5-6. 由于变暖导致的海冰反照率(反射能力)损失



2024年的研究显示,由于二氧化碳排放,海冰的减少已显著降低了北极和南极海冰的反射能力,导致两极的辐射强迫(升温)增强,因为更多的太阳辐射被开放水域吸收。

来源:DUSPAYEV 等, 2024

图5-7. 海冰变化



海冰范围的异常变化,相较于1981至2010年期间的平均值。

来源:ZACH LABE。链接:<https://zacklabe.com/arctic-sea-ice-extentconcentration/> 和 <https://zacklabe.com/antarctic-sea-ice-extentconcentration/>

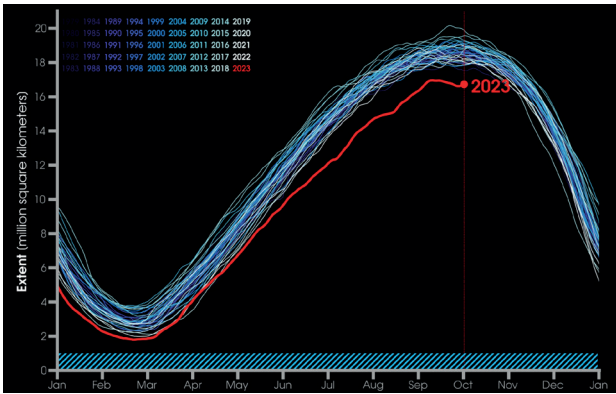
的开发成为可能。然而,这也将加剧本报告提到的其他风险和社会动荡,包括长期范围内6至20米的海平面上升、海洋酸化对渔业的冲击、以及更强风暴和沿海多年冻土融化引发的严重的沿海灾害,尤其是对俄罗斯北极沿海地区的影响更为显著[18,19,23,40,49]。这些深远的负面影响几乎必然会超越北极夏季“无冰”所带来的任何短暂经济收益。

在现代人类历史中,北冰洋从未经历过“无冰”状态。气候变化政府间专门委员会(IPCC)已明确指出[50],由于人类活动排放二氧化碳,未来至少一次北极夏季“无冰”已不可避免,这一发现标志着冰冻圈崩溃的第一个“临界点”已被突破。如果不采取措施限制排放,将全球增温控制在1.5°C以内,这一崩溃过程将迅速加剧。

### 南极海冰

尽管过去几十年南极海冰范围保持稳定,甚至略有增加,但最新观测显示,自2016年起,南极海冰范围急剧减少,其变化幅度甚至超过北极,且该变化在短短数年内发生,而非数十年[51]。这种剧烈的减少在2022年和2023年夏季尤为显著,南极海冰范围首次降至200万平方公里以下[52],并在2023年2月21日创下179万平方公里的最低纪录。这一异常低的海冰范围趋势延续至2023年南半球冬季,在通常逐渐恢复海冰范围

图5-8. 1979年以来的南极海冰范围



2023年2月,南极夏季海冰范围达到了历史最低点;而2023年9月的“最大海冰范围”比之前的纪录低了100万平方千米。到2024年,海冰尚未恢复,但略高于2023年水平。

数据来源:美国国家冰雪数据中心/科罗拉多大学博尔德分校,图表设计:Z. LABE。

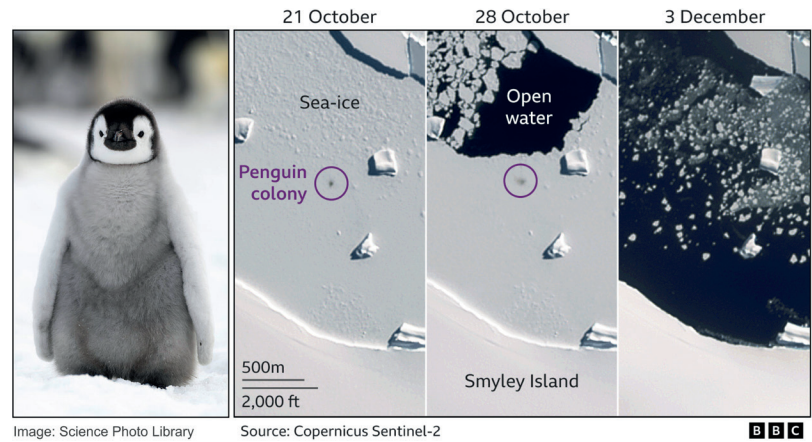
的阶段也未能显著回升。到2023年7月,海冰范围比1981–2010年平均值减少了277万平方公里,相当于损失了阿根廷国土面积大小的冰区。2023年9月10日的当年最大海冰面积比此前纪录低了100万平方公里,较1981–2010年平均值低逾150万平方公里[53]。这一低海冰范围一直持续到2024年,2024年2月的最低值仅略高于2022年,使2022、2023、2024年成为有卫星记录以来的三个最小值年份。尽管秋季海冰一度快速增长,但自6月起增长再次显著放缓,甚至一度出现海冰范围几乎无增的短暂现象,最终2024年最大范围位列历史第二低,仅次于2023年。

南极海冰的这种异常变化在有记录以来尚属首次,表明南极海冰可能已经因人类化石燃料排放导致海洋变暖而进入新的缩减阶段[2,54]。

近年来,南极海冰范围减少对冰盖稳定性、海洋环流及生态系统产生了类似北极变化的负面影响。南极海冰的持续减少将使冰架暴露于强烈的海浪冲击之下,可能引发冰架的快速崩解[5,55]。冰架的减弱或崩塌会导致“洪水闸门”打开,因为冰架在阻止陆地冰流入海洋方面起着关键作用,其崩塌将显著加速海平面上升[56]。此外,南极部分区域周边海冰减少预计将改变海洋环流,将更温暖的水体输送至主冰盖附近,加速南极冰川的消融[57]。



图5-9. 企鹅栖息地崩溃



由于南极海冰提前融化，斯迈利岛的帝企鹅栖息地在2022年显著消失；随着气温上升，预计此类事件将变得更加频繁，威胁到多个企鹅物种的生存。

来源：J. AMOS

南极海冰在南极底层水的形成中起着关键作用。南极底层水是全球密度最大的水体，驱动着全球海洋的“输送带”，将碳和热量输送至深海，在那里储存数百年乃至数千年。过去三十年中，威德尔海的海冰范围减少了40%，导致该区域的南极底层水产量下降了近三分之一[58]。因此，南极海冰的减少可能削弱南大洋从大气中吸收二氧化碳的能力，从而加速全球气温上升。南极海冰范围的显著减少也对帝企鹅种群产生了灾难性影响，因为它们依赖于每年4月至12月之间稳定的海冰平台进行繁殖。2022年春季，南极海冰范围偏低，导致帝企鹅在部分区域出现了有记录以来最高的繁殖失败率，多达80%的企鹅幼崽未能成活[59]。

数十年来，南极海冰似乎未受到全球变暖的显著影响，总体变化幅度仅为1%~2%，而同期北极海冰则急剧减少了40%~60%。然而，南极海冰对全球变暖的“免疫性”可能正在失效。考虑到南极冰盖的稳定性和全球海平面上升的长期影响，南极海冰减少所带来的后果最终可能与广为人知的北极海冰损失相当，甚至可能更为严峻。

**海冰消失带来的任何短期经济增长几乎肯定会被极端的损失、破坏以及日益增加的适应需求所大幅超过。**

**科学审稿人**

- Jennifer Francis, Woodwell Climate Research Center
- Alexandra Jahn, University of Colorado Boulder
- Ronald Kwok, Polar Science Center, Applied Physics Laboratory, University of Washington
- Robbie Mallett, UiT - The Arctic University of Norway
- Walt Meier, National Snow and Ice Data Center
- Dirk Notz, IPCC AR6, University of Hamburg, Germany
- Julienne Stroeve, IPCC SROCC, University of Manitoba/ NSIDC

## 文献与延伸阅读

- Jahn, A., M.M. Holland, and J.E. Kay (2024). Projections of an ice-free Arctic Ocean. *Nature Reviews Earth & Environment*, <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00515-9>.
- Purich, A. and E.W. Doddridge (2023). Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state. *Communications Earth & Environment*, v. 4, no. 1, 314, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>.
- Hobbs, W., et al. (2024). Observational Evidence for a Regime Shift in Summer Antarctic Sea Ice. *Journal of Climate*, v. 37, no. 7, 2263–2275, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0479.1>.
- Diamond, R., et al. (2024). CMIP6 Models Rarely Simulate Antarctic Winter Sea-Ice Anomalies as Large as Observed in 2023. *Geophysical Research Letters*, v. 51, no. 10, e2024GL109265, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024GL109265>.
- Ochwat, N.E., et al. (2024). Triggers of the 2022 Larsen B multi-year landfast sea ice breakout and initial glacier response. *The Cryosphere*, v. 18, no. 4, 1709–1731, <https://doi.org/10.5194/tc-18-1709-2024>.
- Duspayev, A., M.G. Flanner, and A. Riihelä (2024). Earth's Sea Ice Radiative Effect From 1980 to 2023. *Geophysical Research Letters*, v. 51, no. 14, e2024GL109608, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2024GL109608>.
- Stroeve, J., et al. (2024). Ice-free period too long for Southern and Western Hudson Bay polar bear populations if global warming exceeds 1.6 to 2.6°C. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 296, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01430-7>.
- Henke, M., et al. (2024). Increasing coastal exposure to extreme wave events in the Alaskan Arctic as the open water season expands. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 165, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01323-9>.
- Ding, Q., et al. (2017). Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nature Climate Change*, v. 7, no. 4, 289–295, <https://doi.org/10.1038/nclimate3241>.
- Overland, J.E. and M. Wang (2013). When will the summer Arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters*, v. 40, no. 10, 2097–2101, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/grl.50316>.
- Walsh, J.E., et al. (2017). A database for depicting Arctic sea ice variations back to 1850. *Geographical Review*, v. 107, no. 1, 89–107, <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12195.x>.
- Stroeve, J. and D. Notz (2018). Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*, v. 13, no. 10, 103001.
- Sumata, H., et al. (2023). Regime shift in Arctic Ocean sea ice thickness. *Nature*, v. 615, no. 7952, 443–449, <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05686-x>.
- Niederrenk, A.L. and D. Notz (2018). Arctic Sea Ice in a 1.5°C Warmer World. *Geophysical Research Letters*, v. 45, no. 4, 1963–1971, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017GL076159>.
- Docquier, D. and T. Koenigk (2021). Observation-based selection of climate models projects Arctic ice-free summers around 2035. *Communications Earth & Environment*, v. 2, no. 1, 144, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00214-7>.
- Haine, T.W.N. and T. Martin (2017). The Arctic-Subarctic sea ice system is entering a seasonal regime: Implications for future Arctic amplification. *Scientific Reports*, v. 7, no. 1, 4618, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04573-0>.
- Rantanen, M., et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, v. 3, no. 1, 168, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>.
- Bailey, H., et al. (2021). Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. *Nature Geoscience*, v. 14, no. 5, 283–288, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00719-y>.
- Cohen, J., et al. (2021). Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States. *Science*, v. 373, no. 6559, 1116–1121, <https://doi.org/doi:10.1126/science.abi9167>.
- Cvijanovic, I., et al. (2017). Future loss of Arctic sea-ice cover could drive a substantial decrease in California's rainfall. *Nature Communications*, v. 8, no. 1, 1947, <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01907-4>.
- Francis, J.A. and S.J. Vavrus (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, v. 39, no. 6, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2012GL051000>.
- Sun, J., et al. (2022). Influence and prediction value of Arctic sea ice for spring Eurasian extreme heat events. *Communications Earth & Environment*, v. 3, no. 1, 172, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00503-9>.
- Tang, Q., X. Zhang, and J.A. Francis (2014). Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere. *Nature Climate Change*, v. 4, no. 1, 45–50, <https://doi.org/10.1038/nclimate2065>.
- Schweiger, A.J., et al. (2021). Accelerated sea ice loss in the Wandel Sea points to a change in the Arctic's Last Ice Area. *Communications Earth & Environment*, v. 2, no. 1, 122, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00197-5>.
- Kim, Y.-H., et al. (2023). Observationally-constrained projections of an ice-free Arctic even under a low emission scenario. *Nature Communications*, v. 14, no. 1, 3139, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38511-8>.
- Notz, D. and J. Stroeve (2018). The Trajectory Towards a Seasonally Ice-Free Arctic Ocean. *Current Climate Change Reports*, v. 4, no. 4, 407–416, <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0113-2>.
- Årthun, M., et al. (2021). The Seasonal and Regional Transition to an Ice-Free Arctic. *Geophysical Research Letters*, v. 48, no. 1, e2020GL090825, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL090825>.
- Overpeck, J.T., et al. (2005). Arctic system on trajectory to new, seasonally ice-free state. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 86, no. 34, 309–313, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2005EO340001>.
- Cornish, S.B., et al. (2022). Rise and fall of sea ice production in the Arctic Ocean's ice factories. *Nature Communications*, v. 13, no. 1, 7800, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34785-6>.
- Kacimi, S. and R. Kwok (2022). Arctic Snow Depth, Ice Thickness, and Volume From ICESat-2 and CryoSat-2: 2018–2021. *Geophysical Research Letters*, v. 49, no. 5, e2021GL097448, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL097448>.
- Kwok, R. (2018). Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018). *Environmental Research Letters*, v. 13, no. 10, 105005.
- Zhang, P., et al. (2023). More frequent atmospheric rivers slow the seasonal recovery of Arctic sea ice. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 3, 266–273, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01599-3>.
- Vermassen, F., et al. (2023). A seasonally ice-free Arctic Ocean during the Last Interglacial. *Nature Geoscience*, v. 16, no. 8, 723–729, <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01227-x>.
- Barnett, R.L., et al. (2023). Constraining the contribution of the Antarctic Ice Sheet to Last Interglacial sea level. *Science Advances*, v. 9, no. 27, eadf0198, <https://doi.org/doi:10.1126/sciadv.adf0198>.

35. Dutton, A., et al. (2015). Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods. *Science*, v. 349, no. 6244, aaa4019, <https://doi.org/doi:10.1126/science.aaa4019>.
36. Bathiany, S., et al. (2016). On the Potential for Abrupt Arctic Winter Sea Ice Loss. *Journal of Climate*, v. 29, no. 7, 2703–2719, <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0466.1>.
37. Burgard, C. and D. Notz (2017). Drivers of Arctic Ocean warming in CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, v. 44, no. 9, 4263–4271, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GL072342>.
38. Liu, Z., et al. (2021). Acceleration of western Arctic sea ice loss linked to the Pacific North American pattern. *Nature Communications*, v. 12, no. 1, 1519, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21830-z>.
39. Mallett, R.D.C., et al. (2021). Record winter winds in 2020/21 drove exceptional Arctic sea ice transport. *Communications Earth & Environment*, v. 2, no. 1, 149, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00221-8>.
40. Crawford, A., et al. (2021). Arctic open-water periods are projected to lengthen dramatically by 2100. *Communications Earth & Environment*, v. 2, no. 1, 109, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00183-x>.
41. Notz, D. and J. Stroeve (2016). Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO<sub>2</sub> emission. *Science*, v. 354, no. 6313, 747–750, <https://doi.org/doi:10.1126/science.aag2345>.
42. Stroeve, J.C., et al. (2012). Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophysical Research Letters*, v. 39, no. 16, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2012GL052676>.
43. Jahn, A. (2018). Reduced probability of ice-free summers for 1.5°C compared to 2°C warming. *Nature Climate Change*, v. 8, no. 5, 409–413, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0127-8>.
44. Cohen, J., et al. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, v. 7, no. 9, 627–637, <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>.
45. Vavrus, S.J. (2018). The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Weather and Climate. *Current Climate Change Reports*, v. 4, no. 3, 238–249, <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0105-2>.
46. Zhang, R. and J.A. Screen (2021). Diverse Eurasian Winter Temperature Responses to Barents-Kara Sea Ice Anomalies of Different Magnitudes and Seasonality. *Geophysical Research Letters*, v. 48, no. 13, e2021GL092726, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL092726>.
47. Zou, Y., et al. (2021). Increasing large wildfires over the western United States linked to diminishing sea ice in the Arctic. *Nature Communications*, v. 12, no. 1, 6048, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26232-9>.
48. Cohen, J., J.A. Francis, and K. Pfeiffer (2024). Anomalous Arctic warming linked with severe winter weather in Northern Hemisphere continents. *Communications Earth & Environment*, v. 5, no. 1, 557, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01720-0>.
49. Stranne, C., et al. (2021). The climate sensitivity of northern Greenland fjords is amplified through sea-ice damming. *Communications Earth & Environment*, v. 2, no. 1, 70, <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00140-8>.
50. IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1–34, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
51. Parkinson, C.L. (2019). A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, no. 29, 14414–14423, <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.1906556116>.
52. Turner, J., et al. (2022). Record Low Antarctic Sea Ice Cover in February 2022. *Geophysical Research Letters*, v. 49, no. 12, e2022GL098904, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022GL098904>.
53. Gilbert, E. and C. Holmes (2024). 2023's Antarctic sea ice extent is the lowest on record. *Weather*, v. 79, no. 2, 46–51, <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wea.4518>.
54. Raphael, M.N. and M.S. Handcock (2022). A new record minimum for Antarctic sea ice. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 3, no. 4, 215–216, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00281-0>.
55. Christie, F.D.W., et al. (2022). Antarctic ice-shelf advance driven by anomalous atmospheric and sea-ice circulation. *Nature Geoscience*, v. 15, no. 5, 356–362, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00938-x>.
56. Fürst, J.J., et al. (2016). The safety band of Antarctic ice shelves. *Nature Climate Change*, v. 6, 479–482, <https://doi.org/10.1038/nclimate2912>.
57. Gómez-Valdivia, F., et al. (2023). Projected West Antarctic Ocean Warming Caused by an Expansion of the Ross Gyre. *Geophysical Research Letters*, v. 50, no. 6, e2023GL102978, <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023GL102978>.
58. Zhou, S., et al. (2023). Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes. *Nature Climate Change*, v. 13, no. 7, 701–709, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01695-4>.
59. Fretwell, P.T., A. Boutet, and N. Ratcliffe (2023). Record low 2022 Antarctic sea ice led to catastrophic breeding failure of emperor penguins. *Communications Earth & Environment*, v. 4, no. 1, 273, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00927-x>.



# 极地海洋酸化、变暖和淡化

## 我们无法与海洋酸化讨价还价：亟需策略调整

**当前的国家自主贡献(预测至 2100 年,全球气温上升 2.3°C)：**当前的NDCs情景因未能及时实施足够的减排措施,预计将导致大气中CO<sub>2</sub>浓度接近500ppm,远高于数十年前极地海洋科学家提出的关键450ppm上限。这种极端的环境压力将影响海洋壳类动物以及食物链中的重要物种,如磷虾、鳕鱼、鲑鱼、龙虾和帝王蟹等。这些极地生态系统的退化将直接威胁依赖它们的商业和自给性渔业。由大气CO<sub>2</sub>峰值造成的腐蚀性海洋环境几乎不可逆,可能持续数万年。此外,海洋热浪带来的海水变暖以及夏季持续数月缺乏保护性海冰的情况将导致进一步的生态破坏。极地易受影响的海洋物种难以在有限的时间内适应如此巨大的环境变化。同时,如果不立即改善当前的NDCs,南北极冰盖融水的入侵也将极有可能扰乱海洋环流。

**坚持贯彻 1.5°C 温控路径：**立即采取减排行动将温升控制在《巴黎协定》设定的1.5°C目标下,可将大气CO<sub>2</sub>浓度有效控制在450ppm以下;最积极的减排行动可将CO<sub>2</sub>峰值降至430ppm。在这种情景下,北冰洋和南大洋受到海水腐蚀性影响的区域范围较小,并且多为季节性损害;目前已有证据表明在这些区域中存在贝类钙化受损及重要生理过程改变的现象。我们已接近430ppm这一阈值:2024年茂纳罗亚观测站两次监测到CO<sub>2</sub>浓度达到428ppm。即便在1.5°C情景下,一些破坏性事情仍将发生。海洋热浪与极端酸化的破坏性复合事件在当前的1.2°C升温下已导致物种数量骤减;且有越来越多的证据表明主要洋流的流速有所减缓。随着温升达到1.5°C,状况将进一步恶化。然而,在极低排放路径下,大气中的CO<sub>2</sub>浓度将呈下降趋势,预计到2100年升温将降至1.4°C以下。

**二氧化碳水平持续上升(预测至 2100 年全球气温上升 3~3.5°C)：**若CO<sub>2</sub>继续以当前速度积累,到本世纪末大气中的CO<sub>2</sub>浓度将至少达到600ppm,全球平均气温将上升超过3°C并且随后持续升温。北冰洋和南大洋将发生破坏性严重酸化。该CO<sub>2</sub>浓度下,部分近极海域,尤其是巴伦支海、北海和波罗的海,将达到与极地相近的酸化临界水平。腐蚀性环境预计将持续数万年(恢复至当前pH水平将需30,000至70,000年)。此情景几乎必然导致极地物种的大规模灭绝,尤其是当海水变暖和海洋热量的长期储存效应叠加时。高CO<sub>2</sub>浓度引发的极端变暖也将对现有的全球海洋环流系统产生严重影响,对大西洋和南极环流系统造成难以预测的干扰。生态系统及人类社会将面临极端且不可逆转的损失与破坏。

## 2024年最新认识

- 2024年，大气CO<sub>2</sub>浓度多次达到428ppm[1]，今年的平均浓度预计接近424ppm [2]。截至2024年7月，全球月均地表温度持续高于工业化前水平1.5°C [3]，2023年12月达到峰值的厄尔尼诺事件加剧了此高温现象 [4]。
- 当前的大西洋经向翻转环流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) 可能正走向崩溃，或将对气候产生广泛且剧烈的影响，例如北欧地区每十年急剧降温超过3°C，而对于此尚无现实可行的适应措施。崩溃的确切时间尚不确定，但先前的研究表明AMOC崩溃可能发生在2025年至2090年之间 [5,6]。
- 尽管关于AMOC崩溃的可能性尚无共识，但对其未来将减弱的看法广泛一致：CMIP6模拟预测，到2090–2100年其强度将下降28%至67%，导致大西洋热输送减少30% [7]。目前的模型低估了AMOC的变率，而变率越大则意味着崩溃的可能性更高 [8]。AMOC的潜在稳定机制，例如西南极冰盖的融化速度快于格陵兰冰盖的补偿效应[9]以及南大洋风驱上升流[10]，仍需进一步研究。一旦崩溃发生，AMOC可能在数千年内无法恢复 [11]。
- 南极绕极流 (Antarctic Circumpolar Current, ACC) 预计到2050年将因冰盖融化和南大洋淡水输入而减弱20% [12]。减弱的ACC能够影响全球海洋环流。
- 如果没有气候变化的影响，2000年至2019年的全球海洋平均碳吸收量将高出13%，而1958年至2019年的趋势将高出27%。海洋变暖正在削弱海洋吸收CO<sub>2</sub>的能力，风的变化加剧了这一影响，特别是在副极地南大洋和两极海区，凸显了这些区域在稳定大气CO<sub>2</sub>浓度中的关键作用 [13]。
- 由于海冰覆盖，南大洋吸收CO<sub>2</sub>的能力一直被低估，尤其是自2010年以来，其吸收能力被低估了29%。如果南大洋的海冰完全消失，该地区的碳汇每年将减少0.14 PgC[14]。在高排放情景下，吸收CO<sub>2</sub>的主要区域可能进一步向南极周边海域转移，这一变化主要由海冰融化、海洋层化增强以及随之而来的碳垂向梯度减弱的驱动[15]。
- 南大洋的海水酸化现象正在显著发生，自20世纪90年代以来，上层海洋的pH值每十年下降达到0.02 [16]。pH值变化在很多地区都有发生，且由于海洋环流的空间形态，各地区的变化幅度也有所不同 [16]。酸化正在影响南极海洋保护区内的水域，预计到2100年，上层200米的pH值下降将达到0.36，且混合使得整个水柱内出现严重的酸化 [17]。
- 研究发现，由于海水变暖和酸化，栖息在沉积物中的无脊椎动物的行为发生变化，进而影响整个生态系统中的养分循环。因此，物种行为的变化可能充当即将发生的生态转变的早期预警信号 [18]。
- 在北冰洋，海岸侵蚀减少了海洋对CO<sub>2</sub>的吸收。陆地有机物的降解和海冰的融化共同作用将加速北冰洋的酸化 [19]。
- 观测数据和基于模型的研究一致表明，全球海洋在过去62年间的变暖速率为 $0.43 \pm 0.08 \text{ W m}^{-2}$ ，并且以每十年增加 $0.15 \pm 0.04 \text{ W m}^{-2}$ 的速率显著加速，其中高纬度海域被确定为增温热点[20]。
- 平流层臭氧消耗和大气CO<sub>2</sub>浓度持续上升加剧了南大洋变暖。来自大气的热量增加，冰盖和冰架融化以及海冰减少带来的淡水输入增多，预计都将持续加剧。这些效应与南大洋西风带极向增强共同作用下，将加强热量向亚南极水域的北向输送 [21]。

请见下页

## 背景

CO<sub>2</sub>浓度的增加不仅会导致气候变化,也会加速全球海洋的酸化。海洋在全球气候系统中发挥着重要作用:通过吸收二氧化碳,海洋在一定程度上减缓了全球变暖的速度,尽管人类活动导致了碳排放量的急剧增加。然而,海洋的碳吸收伴随一定代价:CO<sub>2</sub>溶于海水中生成碳酸,从本质上改变了海水的化学性质。这一现象被称为海洋酸化。当前的海洋酸化速度比过去三亿年间的任何时期都要迅速[29]。

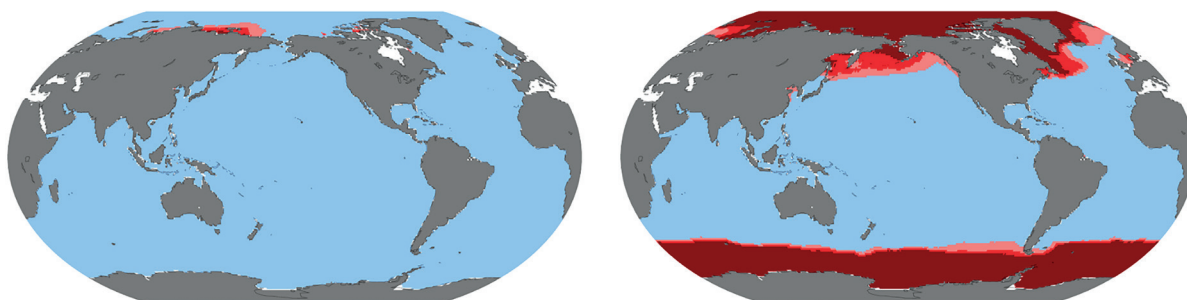
北冰洋和南大洋储存了全球海洋中大部分的溶解二氧化碳,主要原因是更冷且更淡的海水可以容纳更多的碳,这些碳随后被输运至深海中,从而使得表层海水能吸收更多的二氧化碳。迄今为止,极地海水的碳吸收量占全球海洋碳吸收量的50%以上[30],使得北冰洋和南大洋成为重要的碳汇,有助于减缓全球变暖。然而,对“碳汇”的贡献也给极地海洋环境带来了影响,因为它导致极地成为全球海洋酸化速率最快的海域。

海洋酸化使得造壳类动物在繁殖、构建和维持骨骼结构方面变得更加困难。对于所有生活在海水中的生物来说,海洋酸化还增加了它们维持细胞和组织内pH的能量消耗[31]。因此,海洋酸化对海洋腹足类、翼足类、海胆、蛤蜊和螃蟹等关键物种造成了严重威胁[32,33]。一些极地生物已经适应了百万年来稳定的pH环境,当长期处于这种稳定环境时,它们对海水化学性质的任何细微变化都极为敏感,因此极地海域更

## 2024年最新认识 (继上页)

- 一项模型研究指出,在CO<sub>2</sub>净排放量达到零之后,南大洋仍可能因初始变暖导致的环流变化而继续变暖[22]。
- 在北半球,由于表层热量增加,北极海洋热浪的持续时间和发生频率预计将增加,使其成为从大气向海洋次表层和低纬度区域传递热量的通道,这一过程因海水盐度降低而增强[23]。
- 在20世纪和21世纪初,北极海冰的减少主要归因于大气热量传输;但随着时间的推移,海洋变暖逐渐成为最重要的因素[24]。预测显示,北极可能最早在2020至2030年代期间出现无冰状态,并且不论排放情况如何,2050年之前这一状态均有可能成为现实[25]。随着北极海冰的消融,海洋涡旋活动预计将显著增强,特别是在气温上升4°C的情景下,其活动量将增至三倍,这将改变热量、碳、氧、以及营养盐的输送,对区域气候和生态系统产生深远影响[26]。
- 自2016年以来,南极海冰范围的急剧缩减与南大洋变暖紧密相关。2023年夏季和冬季的海冰范围均创下历史最低纪录,并且这一下降趋势在2024年仍在持续[27][28]。

图6-1. 低排放(左)与极高排放(右)下的酸化情况



这张图展示了在1.5°C (RCP2.6, 左图) 与3~4°C (RCP8.5, 右图) 气候情景下,到2100年海洋酸化水平的差异。红色区域表示“未饱和的文石条件”,即海洋酸化的一个标志,表明带壳生物在建造或维持外壳时会遇到困难,这可能导致这些物种的数量下降,进而影响鱼类食物来源,并导致生物多样性丧失,最终简化食物链。

图片来源:IPCC SROCC (2019)。



图6-2. 酸化对壳体的损害



浮游软体动物是极地海洋食物链中的关键物种，酸化已经对其造成了明显的影响。上图：健康的浮游软体动物。下图：受到腐蚀性水域影响的浮游软体动物壳体损害。

来源：上图：N. BEDNARSEK；下图：NIEMI等（2020）

为快速且剧烈的酸化将会对它们产生强烈且迅速的影响[34,35]。这些生物为适应环境变化所做的行为调整也会通过食物网产生一系列的生态影响[18]。目前已观察到了这类影响[36,37,38]，且随着海洋酸化的加剧影响只会进一步恶化。海洋食物链底端产生的不利影响将逐渐向顶端传递，最终危害到鲸类和人类等高营养级生物。

目前，人类尚无切实可行的方法来逆转海洋酸化。减缓甚至最终停止酸化进程的唯一途径是迅速减少二氧化碳排放，并在未来进行二氧化碳移除（Carbon Dioxide Removal; CDR）。如果碳排放持续上升，这种偏酸性的海洋环境将会持续数万年。这是因为海洋中缓冲酸度（即降低酸性）的过程非常缓慢，几乎是在地质时间尺度上进行的。尽管二氧化碳只在大气中存在800~1000年左右的时间，但是其在海洋中的过程要缓慢得多。在陆地岩石通过风化作用进入海洋后，大约需要3至7万年才能使海洋酸化及其影

响恢复至工业化前的水平[29]。海洋酸化的这一超长持续时间意味着，如果将“太阳辐射管理”作为缓解气候变化的主要手段，而非致力于减少大气二氧化碳含量，将会对全球海洋，尤其是极地海洋的健康构成严重威胁。

2008年，国家科学院联盟IAP(Inter-academy Panel)的科学家指出，当大气二氧化碳浓度达到450ppm时，全球温度将升高1.5°C，该浓度被视为全球海洋严重酸化的重要阈值[39]。这意味着全球酸化水平将再增加30%，而极地海洋的酸化程度将更为严重。即便在当前的减排承诺下，二氧化碳浓度也会超过500 ppm，对应全球气温将升高约2.3°C。届时，极地海洋的酸化程度至少会是目前水平的两倍。

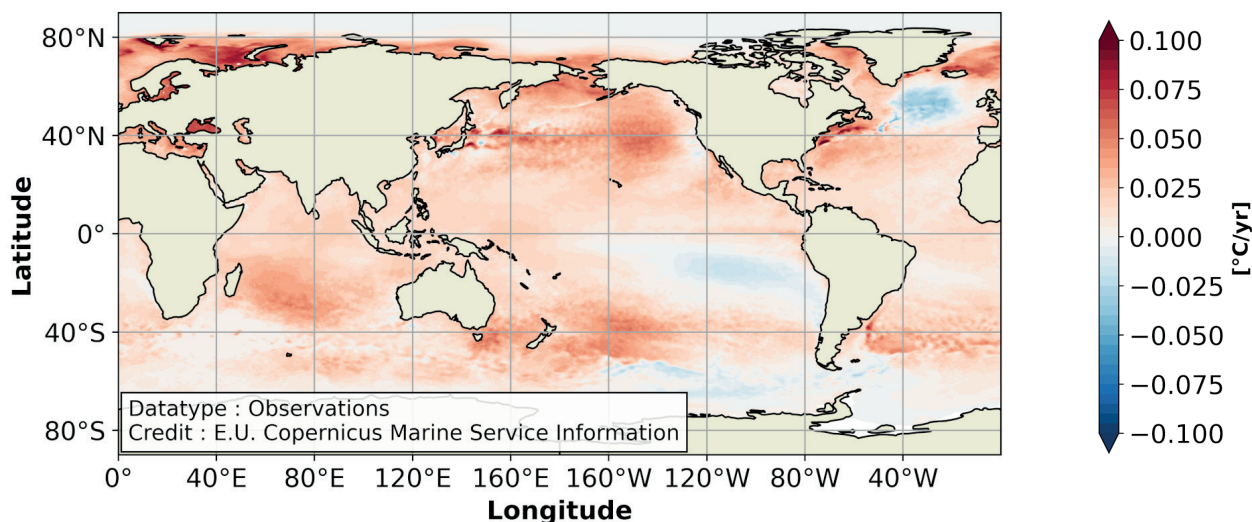
当大气二氧化碳浓度超过500ppm时，预计南北极海洋中会出现大范围的腐蚀性水体。北冰洋尤为敏感，目前北冰洋中已存在持续性的大面积腐蚀性水体，其区域面积自上世纪90年代以来持续扩张。实际上，由于局地环境条件的差异，部分极地海域的酸化水平已超出阈值，并且十多年来已经观测到生物出现壳类损伤和造壳能力减弱的现象[40]。自二十世纪90年代以来，南大洋的pH值每十年约下降0.02，使得一些脆弱物种的造壳能力在1998至2014年间下降了约4%[16,38]。翼足类生物（俗称“海蝶”的微型海螺）对扩张的腐蚀性水体十分敏感，在阿拉斯加湾、白令海、波弗特海以及南大洋的部分海域均发现了它们的壳类损伤现象[36]。翼足类在极地食物网中极其重要，是幼年鲑鱼、北极鳕鱼、红点鲑等经济鱼类的重要食物来源。

全球海洋的酸碱度在过去的几百万年里保持着相对稳定。当前的酸化速率在过去至少3亿年间从未有过，即便过去海洋也曾经历过剧烈的变化，包括高酸化速率等，导致了大规模的生物灭绝[41]。虽然极地和全球海洋在过去都曾经历过变化，但这些变化发展得较为缓慢。因此，如今的海洋酸化具有更大的威胁，其速率远超许多现存物种的适应、进化和生存能力所能承受的范围。

在海洋快速酸化的背景下，极地物种还承受着来自其他气候变化影响的巨大压力。

多重压力的复合效应在北极地区尤为明显。除酸化加剧之外，北极地区的变暖也异常迅速。自1982年以来，由于海冰消融（导致更多太阳辐射被海水吸收）

图6-3. 海面温度变化趋势(1993–2021)



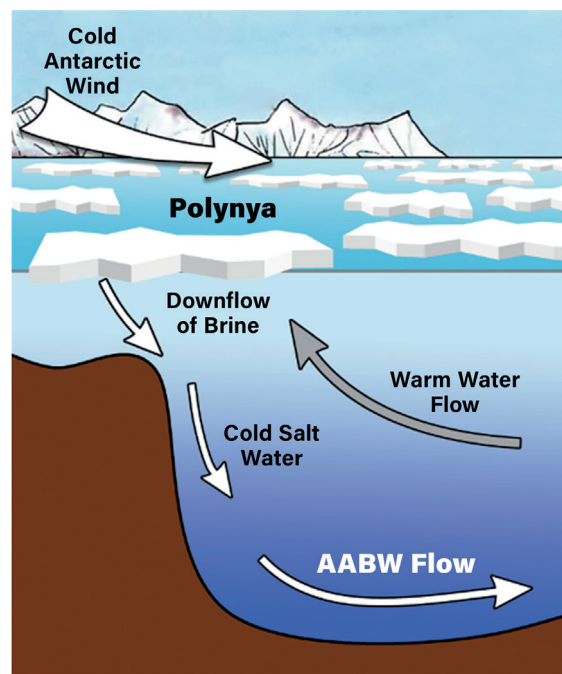
过去二十年,近极地区的水域,如巴伦支海,温度显著上升。唯一的例外是格陵兰岛南部的寒冷“蓝色斑块”,这部分是因为格陵兰冰盖释放的冷淡水流入。需要注意的是,高纬度地区的白色区域并非表示没有变暖,而是因为该时段数据不完整。

来源:欧盟科波尼库斯海洋服务信息

以及低纬度暖水输入,北极夏季的表层海温已升高约2°C。目前的全球气温比工业化前升高了1.2°C,北极海冰的覆盖范围和厚度全年都在减少。目前的气候变暖还导致曾覆盖北冰洋大部分海域的多年厚冰几乎完全消失[42]。这种厚达数米并可持续7~10年的厚冰被视为极地海洋的“珊瑚礁”,为许多极地物种(包括与冰相关的藻类)提供栖息地和食物来源。即使在低排放情景下,全球变暖仍可能达到1.5至1.7°C,随着所有多年冰的消失,依赖这些厚冰生存的物种也可能消失。

南大洋,特别是南极半岛西部区域,也经历了显著的变暖,且这一趋势已逐步扩展至整个南极洲周边海域。2023年南半球夏季,南极海冰面积达到历史最低值,几乎所有海冰在南极半岛西部区域消失。2024年南极海冰面积仍处于低值,至此低海冰面积已持续了三年。气候变暖、海冰减退以及海冰融化带来的海水变淡等趋势与持续的海洋酸化相结合,给南极海洋生态系统带来了前所未有的压力。智利科学家发现,自1981年以来的多个年代,南极半岛以北海域、阿蒙森-别林斯高晋海、罗斯海和戴维斯海的海洋热浪发生频率均呈现增加的趋势[43]。南大洋变暖现象似乎对全球海洋热含量的增加具有越来越重要的贡献。

图6-4. 南极底水(AABW)的形成



南极底水的形成被认为是推动全球海洋环流的关键过程,然而,南极水域的变暖和淡化正在威胁这一过程。南极底水主要在“多尼亚”区域(被冰层环绕的开阔水域)形成,这些水域每年冬季都会出现南极海冰的形成。

来源:MOROZOV等(2021)



极地海洋的变暖导致极端高温事件更加频繁，海温超出了极地物种的耐受极限，使其难以迁徙至更适宜的生存区域。变暖的海水还促使其他物种向极地迁移，加剧了对食物资源的竞争[40,6]。在某些情况下，尤其是发生极端海洋热浪的区域，极地物种明显经历了致命的海温。过去十年间，白令海域多次出现可能由海洋热浪导致的大量海鸟和灰鲸死亡事件。海冰减少也导致与冰相关的藻类和动物数量的减少。海洋污染进一步增加了极地物种的生存压力[44]。气候变化引发的多重压力对极地海洋生态系统的潜在影响给商业和自给性渔业带来了风险、也对区域经济、文化以及全球鱼类和贝类供应造成了影响[36,45]。

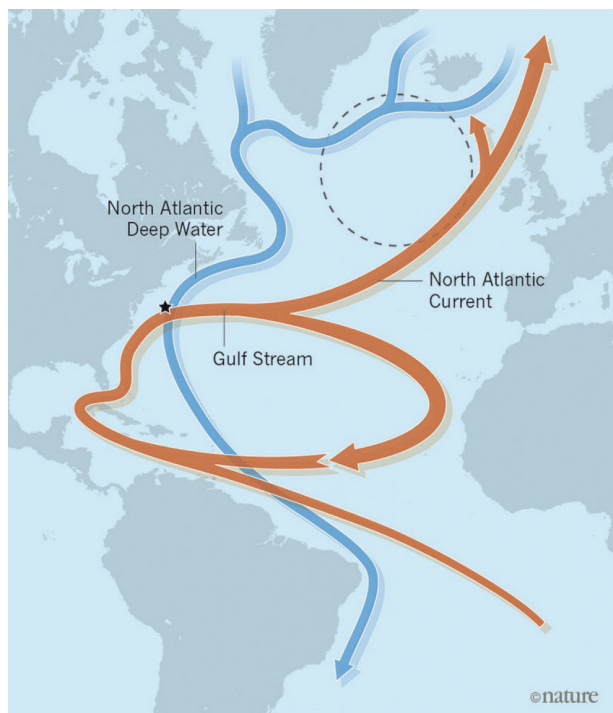
随着冰川、冰盖径流以及河流入海量（主要在北极海域）的增加，极地表层水体中的淡水输入增多，对全球海洋环流产生了影响。更冷且更淡的表层海水像盖子一样覆盖在更深、更暖、更咸的海水之上，抑制了海水垂向输送过程。这种状况可能会减弱海洋环流的强度，尤其是将热带海区暖水输送至北大西洋的大西洋经向翻转环流（Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC）。AMOC是北大西洋环流系统的发动机，进而驱动了全球大洋环流的运转，影响全球营养盐的再分布。

科学界日益形成了目前AMOC正在减缓的共识并对其表示担忧，AMOC的减缓速度可能比预期更快。AMOC的崩溃将导致全球范围内迅速且灾难性的气候变化，尤其对北欧地区产生重大影响。2024年10月，40位气候学家联名致信北欧部长理事会，敦促加快减排行动以降低AMOC崩溃的风险[46]。

海洋表层的“淡水盖”也会隔绝海洋表层与深层之间的物质交换，从而阻碍深层营养盐输送到大多数物种生存的表层海洋[47,48]，也阻碍了深层海水的碳封存以及热量从表层到深层的输送。海水变淡本身也会对生物的生理功能产生负面影响，并影响物种的迁移[49,50]。

南极绕极流（Antarctic Circumpolar Current; ACC）是世界上最强劲的洋流。预计到2050年，由于南极冰川融化引起的海水变淡，ACC流速最大可减弱20%，这将对海洋环流和气候产生广泛的影响[12]。全球海洋环流、碳封存和营养盐分布的另一个主要驱动力是在南极边缘海每年产冰过程中生成的南极底层水（Antarctic Bottom

图6-5. 全球海洋洋流



海洋中大规模的洋流运动，包括热量和养分的传递，主要由南北极海洋的状况驱动。

来源：MAROTZKE (2012)

Water, AABW)[51]。IPCC评估指出，随着气候变暖，由于南极冰盖融水的增加和海冰的减少导致海洋的淡水输入量增加，AABW的产量将会减少。威德尔海底层水贡献了将近一半的AABW，其体积自1992年以来已减少了30%，这可能与海冰生成量的减少有关。AABW产量的进一步减少及其导致的营养盐、热量和碳循环的变化将很大程度上取决于未来的碳排放量[52]。

**科学家们普遍认为大西洋经圈翻转环流 (AMOC) 正在放缓，并对其减缓速度可能超出预期感到日益担忧。**



极地海域拥有世界上最丰富的渔业资源和多样化的海洋生态系统。在全球升温幅度达到2°C或更高时, 每年数月的海冰融化、多年冰完全消失、海水升温、酸化和海水变淡的共同作用将对极地海洋生态系统及依赖于此的渔业和水产养殖业带来根本性改变。升温2°C以上的影响几乎不可逆, 除非选择最低碳排放路径。将全球升温幅度控制在1.5°C以内可显著减少对极地海洋生态系统和渔业这些严重而不可逆的影响, 尽管一些损失已不可避免。

要使极地海洋所受的影响仍能得到控制, 需在2030年之前将二氧化碳排放量减少50%, 这需要对全球脱碳目标的高度雄心和承诺; 至2050年达到几乎零排放, 之后实现负排放(从大气中清除碳)。

两极海洋的酸化、升温 and 变淡已接近关键临界点。这些变化极有可能只是未来更严重情况的前兆, 除非人为二氧化碳排放量开始大幅度下降。

## 科学审稿人

Nina Bednaršek, National Institute of Biology, Slovenia

Richard Bellerby, East China Normal University/Norwegian Institute for Water Research

Elise S. Droste, Alfred Wegener Institute (AWI) Helmholtz Centre for Polar and Marine Research

Sam Dupont, University of Gothenburg

Helen S. Findlay, Plymouth Marine Laboratory

Humberto E. González, University Austral of Chile/Fondap IDEAL

Sian F. Henley, University of Edinburgh

Peter Thor, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)

Paul Wassmann, UiT – The Arctic University of Norway (Emeritus)

## 文献与延伸阅读

1. NOAA Global Monitoring Laboratory, Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>, [Accessed October 2024]
2. UK Met Office, Mauna Loa carbon dioxide forecast for 2024, <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/forecasts/co2-forecast>, [Accessed October 2024]
3. Copernicus Climate Change Service, Surface air temperature for August 2024, [https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-august-2024#:~:text=Data%20source%3A%20ERA5-,Credit%3A%20Copernicus%20Climate%20Change%20Service%2FECMWF,2023%20\(0.66%C2%B0C\)](https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-august-2024#:~:text=Data%20source%3A%20ERA5-,Credit%3A%20Copernicus%20Climate%20Change%20Service%2FECMWF,2023%20(0.66%C2%B0C)), [Accessed October 2024]
4. Dunstone, N.J. et al. (2024) Will 2024 be the first year that global temperature exceeds 1.5°C?, *Atmospheric Science Letters*, p. e1254. <https://doi.org/10.1002/asl.1254>
5. van Westen, R.M., Kliphuis, M. and Dijkstra, H.A. (2024) Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course, *Science Advances*, 10(6), p. 1189. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>
6. Ditlevsen, P., Ditlevsen, S. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nat Commun* 14, 4254 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>
7. Bryden, H. et al. (2024) Comparing observed and modelled components of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26°N, *Ocean Science*, 20(2), pp. 589–599, <https://doi.org/10.5194/os-20-589-2024>
8. Chapman, R. et al. (2024) Quantifying risk of a noise-induced AMOC collapse from northern and tropical Atlantic Ocean variability. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.10929>
9. Sinet, S. et al. (2024) AMOC stability amid tipping ice sheets: the crucial role of rate and noise, *Earth System Dynamics*, 15(4), pp. 859–873, <https://doi.org/10.5194/esd-15-859-2024>
10. Baker, J. et al. (2024) Wind-driven upwelling sustains weakened Atlantic overturning under climate extremes, <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4319650/v1>
11. Curtis, P.E. and Fedorov, A.V. (2024) Collapse and slow recovery of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) under abrupt greenhouse gas forcing, *Climate Dynamics* [Preprint], <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07185-3>
12. Sohail, T. et al. (2024) Future decline of Antarctic Circumpolar Current due to polar ocean freshening, <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/essoar.170294047.79411138?commit=9ee0c2d817dfbfb369f21e3b8c7f3f8cfda9bda4> [Accessed: 6 August 2024]
13. Bunsen, F., Nissen, C. and Hauck, J. (2024) The Impact of Recent Climate Change on the Global Ocean Carbon Sink, *Geophysical Research Letters*, 51(4), p. e2023GL107030. <https://doi.org/10.1029/2023GL107030>
14. Zhong, G. et al. (2024) The Southern Ocean carbon sink has been overestimated in the past three decades, *Communications Earth & Environment*, 5(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01566-6>
15. Mongwe, P. et al. (2024) Projected poleward migration of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> sink region under high emissions, *Communications Earth & Environment*, 5(1), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01382-y>
16. Mazloff et al. (2023) Southern Ocean Acidification Revealed by Biogeochemical-Argo Floats, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(5), 10.1029/2022JC019530
17. Nissen, C. et al. (2024) Severe 21st-century ocean acidification in Antarctic Marine Protected Areas, *Nature Communications*, 15(1), p. 259, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44438-x>
18. Williams, T.J. et al. (2024) Ocean warming and acidification adjust inter- and intra-specific variability in the functional trait expression of polar invertebrates, *Scientific Reports*, 14(1), p. 14985. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65808-5>
19. Nielsen et al. (2024) Reduced Arctic Ocean CO<sub>2</sub> uptake due to coastal permafrost erosion, *Nature Climate Change*, 14, 968–975, <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02074-3>
20. Storto, A. and Yang, C. (2024) Acceleration of the ocean warming from 1961 to 2022 unveiled by large-ensemble reanalyses, *Nature Communications*, 15(1), p. 545. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44749-7>
21. Cai, W. et al. (2023) Southern Ocean warming and its climatic impacts, *Science Bulletin*, 68(9), pp. 946–960. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.03.049>
22. Chamberlain, M.A., Ziehn, T. and Law, R.M. (2024) The Southern Ocean as the climate's freight train – driving ongoing global warming under zero-emission scenarios with ACCESS-ESM1.5, *Biogeosciences*, 21(12), pp. 3053–3073. <https://doi.org/10.5194/bg-21-3053-2024>

23. Richaud, B. et al. (2024) Drivers of Marine Heatwaves in the Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129(2) <https://doi.org/10.1029/2023JC020324>
24. Oldenburg, D. et al. (2024) The Respective Roles of Ocean Heat Transport and Surface Heat Fluxes in Driving Arctic Ocean Warming and Sea Ice Decline, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0399.1>
25. Jahn, A., Holland, M.M. and Kay, J.E. (2024) Projections of an ice-free Arctic Ocean, *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(3), pp. 164–176, <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00515-9>
26. Li, X. et al. (2024) Eddy activity in the Arctic Ocean projected to surge in a warming world, *Nature Climate Change*, 14(2), pp. 156–162, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01908-w>
27. Purich, A. and Doddridge E. W. (2023) Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state, 4(314), <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00961-9>
28. Jena et al. (2024) Evolution of Antarctic Sea Ice Ahead of the Record Low Annual Maximum Extent in September 2023, *Geophysical Research Letters*, 51, <https://doi.org/10.1029/2023GL107561>
29. Hönisch, B., Ridgwell, A., Schmidt, D., Thomas, E., Gibbs, S., Sluijs, A.,...& Williams, B. (2012). The Geological Record of Ocean Acidification, *Science* 335, 1058. <https://doi.org/10.1126/science.1208277>
30. Caldeira, K., & Duffy, P. B. (2000). The role of the Southern Ocean in uptake and storage of anthropogenic carbon dioxide. *Science*, 287(5453), 620–622. doi: DOI 10.1126/science.287.5453.620
31. Pörtner, H.O., M. Langenbuch, B. Michaelidis, Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO<sub>2</sub> on marine animals: from Earth history to global change, *J. Geophys. Res. C Ocean* 110 (2005) 1e15, <https://doi.org/10.1029/2004JC002561>.
32. Figuerola B, Hancock AM, Bax N, Cummings VJ, Downey R, Griffiths HJ, Smith J and Stark JS (2021) A Review and Meta-Analysis of Potential Impacts of Ocean Acidification on Marine Calcifiers From the Southern Ocean. *Front. Mar. Sci.* 8:584445. doi: 10.3389/fmars.2021.584445
33. Kroeker, K., Kordas, R., Crim, R., Hendriks, I., Ramajo, L., Singh, G.,...& Gattuso, J.-P. (2013). Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology*, 19, 1884–1896, <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
34. Lewis, C.N., Brown, K.A., Edwards, L.A., Cooper G., Findlay, H.S., 2013. Sensitivity to ocean acidification parallels natural pCO<sub>2</sub> gradients experienced by Arctic copepods under winter sea ice. *PNAS*, E4960–E4967, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1315162110](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1315162110)
35. Vargas, C., Lagos, N., Lardies, M., Duarte, C., Manríquez, P., Aguilera, V.,...& Dupont, S. (2017) Species-specific responses to ocean acidification should account for local adaptation and adaptive plasticity. *Nature Ecology and Evolution*, 1:84. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28812677>
36. Bednaršek, N., Pelletier, G., Ahmed, A., A. Feely, R. (2020). Chemical Exposure Due to Anthropogenic Ocean Acidification Increases Risks for Estuarine Calcifiers in the Salish Sea: Biogeochemical Model Scenarios. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00580>
37. Bednaršek, N., Kerry-Ann, N., Feely, R., Claudine, H., Katsunori, K., Albert, H.,...& Darren, P. (2021). Integrated Assessment of Ocean Acidification Risks to Pteropods in the Northern High Latitudes: Regional Comparison of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.671497>
38. Freeman, N.M. & Lovenduski, N.S. (2015), Decreased calcification in the Southern Ocean over the satellite record, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 1834–1840. <https://doi.org/10.1002/2014GL062769>.
39. McNeil, B.I. & Matear, R.J. (2008). Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2008;105(48):18860–18864. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806318105>
40. AMAP, 2018. AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. vi+187pp
41. Pelejero, C., Calvo, E., Hoegh-Guldberg, O. (2010). Paleo-perspectives on ocean acidification. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.02.002>
42. Notz, D. & SIMIP Community (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086749. <https://doi.org/10.1029/2019GL086749>
43. Piñones, A., Aziares-Aguayo, N., Amador-Véliz, P., Mercado-Peña, O., González-Reyes, A., Valdivia, N., Garcés-Vargas J., Garrido I., Pardo L. M., & Höfer J. (2024). Local and remote atmosphere-ocean coupling during extreme warming events impacting subsurface ocean temperature in an Antarctic embayment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 129, e2023JC020735. <https://doi.org/10.1029/2023JC020735>
44. Manno, C., Peck, V.L., Corsi, I., & Bergami, E. (2022). Under pressure: Nanoplastics as a further stressor for sub-Antarctic pteropods already tackling ocean acidification. *Marine Pollution Bulletin*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113176>
45. Wilson, T., Cooley, S., Tai, T.C., Cheung, W., & Tyedmers, P. (2020) Potential socioeconomic impacts from ocean acidification and climate change effects on Atlantic Canadian fisheries. *PLoS ONE* 15(1): e0226544. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226544>
46. Open Letter by Climate Scientists to the Nordic Council of Ministers, [https://en.vedur.is/media/ads\\_in\\_header/AMOC-letter\\_Final.pdf](https://en.vedur.is/media/ads_in_header/AMOC-letter_Final.pdf)
47. Farmer, J., Sigman, D., Granger, J., Underwood, O., Fripiat, F., Cronin, T.,...& Haug, G. (2021). Arctic Ocean stratification set by sea level and freshwater inputs since the last ice age. *Nat. Geosci.* 14, 684–689. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00789-y>
48. Pan, X.-L., Li, B.F. & Watanabe, Y.W. (2022). Intense ocean freshening from melting glacier around the Antarctica during early twenty-first century. *Sci Rep* 12, 383. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04231-6>
49. Dvoretzky VG, Dvoretzky AG (2009) Spatial variations in reproductive characteristics of the small copepod *Oithona similis* in the Barents Sea. *Mar Ecol Prog Ser* 386:133–146. <https://doi.org/10.3354/meps08085>
50. Dickinson, G.H., Ivanina, A. V., Matoo, O. B., Pörtner, H. O., Lannig, G., Bock, C., Benias, E., Sokolova, I. M. Interactive effects of salinity and elevated CO<sub>2</sub> levels on juvenile eastern oysters, *Crassostrea virginica*. *J Exp Biol* 1 January 2012; 215 (1): 29–43. doi: <https://doi.org/10.1242/jeb.061481>
51. The SO-CHIC consortium et al. 2023 Southern ocean carbon and heat impact on climate. *Phil. Trans. R. Soc. A* 381: 20220056. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0056>
52. Zhou, S., Meijers, A.J.S., Meredith, M.P. et al. Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes. *Nat. Clim. Chang.* 13, 701–709 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01695-4>
53. Baker, J. A., Bell, M. J., Jackson, L. C., Renshaw, R., Vallis, G. K., Watson, A. J., & Wood, R. A. (2023). Overturning pathways control AMOC weakening in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103381. <https://doi.org/10.1029/2023GL103381>
54. Bednaršek, N., Feely, R., Reum, J., Peterson, B., Menkel, J., Alin, S., & Hales, B. (2014). *Limacina helicina* shell dissolution as an indicator of declining habitat suitability owing to ocean acidification in the California Current Ecosystem. *Proc. R. Soc. B* 281: 20140123. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0123>

55. Cantoni, C., Hopwood, M., Clarke, J., Chiggiato, J., Achterberg, E., & Cozzi, S. (2020). Glacial Drivers of Marine Biogeochemistry Indicate a Future Shift to More Corrosive Conditions in an Arctic Fjord. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2020JG005633>
56. Chambault, P., Kovacs, K., Lydersen, C., Shpak, O., Teilmann, J., Albertsen, C., & Heide-Jørgensen, M. (2022). Future seasonal changes in habitat for Arctic whales during predicted ocean warming. *Science Advances*, 8, 29. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn2422>
57. Cummings, V. et al. "Ocean Acidification at High Latitudes: Potential Effects on Functioning of the Antarctic Bivalve *Laternula Elliptica*." Ed. Jack Anthony Gilbert. *PLoS ONE* 6.1 (2011): e16069. PMC. Web. 22 Nov. 2015.
58. Cyronak, T., Schulz, K. G. and Jokiel, P. L. (2016) "The Omega myth: what really drives lower calcification rates in an acidifying ocean Tyler," *ICES Journal of Marine Science*, 73(3), pp. 558–562. doi: 10.1093/icesjms/fsv075.
59. Dunmall, K., McNicholl, D., Zimmerman, C., Gilk-Baumer, S., Burril, S., & von Biela, V. (2022). First juvenile chum salmon confirms successful reproduction for Pacific salmon in the North American Arctic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 79(5): 703–707. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2022-0006>
60. Dupont, S. & Pörtner, H. (2013). Get ready for ocean acidification, *Nature*, 498, 429. <https://doi.org/10.1038/498429a>
61. Dupont, S., Havenhand, J., Thorndyke, W., Peck, L., & Thorndyke, M. (2008). Near-future level of CO<sub>2</sub>-driven acidification radically affects larval survival and development on the brittle star *Ophiothrix fragilis*. 373: 285–294, 2008 *Marine Ecology Progress Series*. <https://doi.org/10.3354/meps07800>.
62. Frölicher, T. L., Sarmiento, J.L., Paynter, D.J., Dunne, J.P., Krasting, J.P., & Winton, M. (2015). Dominance of the Southern Ocean in anthropogenic carbon and heat uptake in CMIP5 models. *J. Climate*. 28, 862–886, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00117.1>
63. Gattuso, J.-P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W.W.L., Howes, E.L., Joos, F.,... & Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions scenarios. *Science*, 349, <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>.
64. Gattuso, J.-P., Magnan, A., Bopp, L., Cheung, W., Duarte, C., Hinkel, J.,... & Rau, G. (2018). Ocean Solutions to Address Climate Change and Its Effects on Marine Ecosystems. *Front. Mar. Sci.* 5:337. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>
65. Green, H.L., Findlay, H.S., Shutler, J.D., Land, P.E. & Bellerby, R.G.J. (2021) Satellite Observations Are Needed to Understand Ocean Acidification and Multi-Stressor Impacts on Fish Stocks in a Changing Arctic Ocean. *Front. Mar. Sci.* 8:635797. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.635797>
66. Gruber, N., Bakker, D.C.E., DeVries, T. Et al. Trends and variability in the ocean carbon sink. *Nat Rev Earth Environ* 4, 119–134 (2023). <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00381-x>
67. Harris, P.T., Westerveld, L., Zhao, Q., Costello, M.J., 2023. Rising snow line: Ocean acidification and the submergence of seafloor geomorphic features beneath a rising carbonate compensation depth. *Marine Geology*, 463, 107121, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107121>
68. Hauri, C., Pagès, R., McDonnell, A., Stuecker, M., Danielson, S., Hedstrom, K.,... & Doney, S. (2021). Modulation of ocean acidification by decadal climate variability in the Gulf of Alaska. *Commun Earth Environ* 2, 191. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00254-z>
69. IPCC, 2014: 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 [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
70. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
71. IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R.Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield(eds.)].
72. IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
73. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
74. Jacobs, S. S. (2004) "Bottom water production and its links with the thermohaline circulation," *Antarctic Science*, 16(4), pp. 427–437. doi: 10.1017/S095410200400224X.
75. Kikuchi, T., Nishino, S., Fujiwara, A., Onodera, J., Yamamoto-Kawai, M., Mizobata, K., Fukamachi, Y., & Watanabe, E. (2021). Status and trends of Arctic Ocean environmental change and its impacts on marine biogeochemistry: Findings from the ArCS project. *Polar Science*, 27: 100639. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100639>
76. Li, G., Cheng, L., Zhu, J. Trenberth, K., Mann, M., & Abraham, J. (2020). Increasing ocean stratification over the past half-century. *Nat. Clim. Chang.* 10, 1116–1123. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00918-2>
77. Lin, Y., Moreno, C., Marchetti, A. Ducklow, H., Schofield, O., Delage, E.,... & Cassa, N. (2021). Decline in plankton diversity and carbon flux with reduced sea ice extent along the Western Antarctic Peninsula. *Nat Commun* 12, 4948. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25235-w>
78. Mann, P.J., Strauss, J., Palmtag, J. Dowdy, K., Ogneva, O., Fuchs, M.,... & Juhls, B. (2022). Degrading permafrost river catchments and their impact on Arctic Ocean nearshore processes. *Ambio* 51, 439–455. <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01666-z>



79. Mathis, J.T., Cross, J.N., Evans, W., & Doney, S.C. (2015). Ocean acidification in the surface waters of the Pacific-Arctic boundary regions. *Oceanography* 28(2):122-135, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.36>
80. McGovern, E., Schilder, J., Artioli, Y., Birchenough, S., Dupont, S., Findlay, H., Skjelvan, I., Skogen, M.D., Álvarez, M., Büsher, J.V., Chierici, M., Aagaard Christensen, J.P., Diaz, P.L., Grage, A., Gregor, L., Humphreys, M., Järnegren, J., Knockaert, M., Krakau, M., Nogueira, M., Ólafsdóttir, S.R., von Schuckmann, K., Carreiro-Silva, M., Stiasny, M., Walsham, P., Widdicombe, S., Gehlen, M., Chau, T.T.T., Chevallier, F., Savoye, N., Clark, J., Galli, G., Hordoir, R. and Moffat, C. 2022. Ocean Acidification. In: OSPAR, 2023: The 2023 Quality Status Report for the North-East Atlantic. OSPAR Commission, London. <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/qsr-2023/other-assessments/ocean-acidification>
81. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2022. A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26278>
82. Niemi, A. et al. (2021) "Biological Impact of ocean acidification in the Canadian Arctic: Widespread severe pteropod shell dissolution in Amundsen Gulf," *Frontiers in Marine Science*, 8 (March), pp. 1-16. doi: 10.3389/fmars.2021.600184.
83. Nissen, C. et al. (2022) "Abruptly attenuated carbon sequestration with Weddell Sea dense waters by 2100," *Nature Communications*, 13(1). doi: 10.1038/s41467-022-30671-3.
84. Orr, J. C. et al. (2005) "Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms," *Nature*, 437(7059), pp. 681-686. doi: 10.1038/nature04095.
85. Orr, J.C., Kwiatkowski, L., & Pörtner, H.-O. (2022). Arctic Ocean annual high in pCO<sub>2</sub> could shift from winter to summer. *Nature*, 610, 94-100. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05205-y>
86. Orsi, A. H., Johnson, G. C. and Bullister, J. L. (1999) "Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water," *Progress in Oceanography*, 43(1), pp. 55-109. doi: 10.1016/S0079-6611(99)00004-
87. Penn, J. & Deutsch, C. (2022). Avoiding ocean mass extinction from climate warming. *Science*, 376, 6592, 524-526. <https://doi.org/10.1126/science.abe9039>
88. Qi, D., Ouyang, Z., Chen, L., Wu, Y., Lei, R., Chen, B.,...& Cai, W.-J. (2022). Climate change drives rapid decadal acidification in the Arctic Ocean from 1994 to 2020. *Science*, 377, 1544-1550. <https://doi.org/10.1126/science.abo0383>
89. Ridgwell, A. & Schmidt, D. (2010). Past constraints on the vulnerability of marine calcifiers to massive carbon dioxide release. *Nature Geosci* 3, 196-200. <https://doi.org/10.1038/ngeo755>
90. Riebesell, U. & Gattuso, J.P. (2015). Lessons learned from ocean acidification research. *Nature Climate Change*, 5, 12-14. <https://doi.org/10.1038/nclimate2456>
91. Sasse, T.P., McNeil, B.I., Matear, R.J., & Lenton, A. (2015) Quantifying the influence of CO<sub>2</sub> seasonality on future aragonite undersaturation onset. *Biogeosciences*, 12: 6017-6031. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6017-2015>
92. Steiner, N., Bowman, J., Campbell, K., Chierici, M., Eronen-Rasimus, E., Falardeau, M.,...& Wongpan, P. (2021). Climate change impacts on sea-ice ecosystems and associated ecosystem services. *Elementa: Science of the Anthropocene*; 9 (1): 00007. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00007>
93. Stroeve, J. and Notz, D. (2018) "Changing state of Arctic sea ice across all seasons," *Environmental Research Letters*, 13(103001), pp. 1-23. doi: 10.1088/1748-9326/aade56.
94. Terhaar, J. et al. (2020) "Evaluation of data-based estimates of anthropogenic carbon in the Arctic Ocean," *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(6). doi: 10.1029/2020JC016124.
95. Terhaar, J., Torres, O., Bourgeois, T., & Kwiatkowski, L. (2021). Arctic Ocean acidification over the 21st century co-driven by anthropogenic carbon increases and freshening in the CMIP6 model ensemble, *Biogeosciences*, 18, 2221-2240. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2221-2021>
96. Thyrring, J., MacLeod, C., Marshall, K., Kennedy, J., Tremblay, R., & Harley, C. (2022). Ocean acidification increases susceptibility to sub-zero air temperatures in ecosystem engineers (*Mytilus* sp.): a limit to poleward range shifts. *BioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.06.30.498370>
97. Vargas, C.A., Cuevas, L.A., Broitman, B.R. et al. Upper environmental pCO<sub>2</sub> drives sensitivity to ocean acidification in marine invertebrates. *Nat. Clim. Chang.* 12, 200-207 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01269-2>
98. Vehmaa, A. & Reinikainen, M. (2018). Ocean Acidification in the Baltic Sea. *Air Pollution and Climate Series 40* ISBN: 978-91-984717-2-4
99. Wittmann, A.C. & Pörtner, H.O. (2013). Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change*, 3, 995-1001. <https://doi.org/10.1038/nclimate1982>
100. Zachos, J. C., Röhl, U., Schellenberg, S. A., ..., Rapid Acidification of the Ocean During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Science* 308, 1611-1615 (2005).DOI:10.1126/science.1109004





国际冰冻圈气候倡议组织

International Cryosphere  
Climate Initiative  
[www.iccinet.org](http://www.iccinet.org)