

极地气候变化年报

STATE OF POLAR CLIMATE

2023



中国气象科学研究院
CHINESE ACADEMY OF METEOROLOGICAL SCIENCES

极地气候变化年报

STATE OF POLAR CLIMATE

(2023)

中国气象科学研究院

CHINESE ACADEMY OF METEOROLOGICAL SCIENCES

2024 年 6 月

《极地气候变化年报（2023 年）》 编写委员会

主 编 丁明虎

副 主 编 王 欣

编写专家（以姓氏笔画为序）

卞林根 王 赛 曲智丰 朱孔驹 苏 洁

张文千 张东启 张 雷 林 祥 赵守栋

姜智娜 翟晓春 魏 婷

主编单位：中国气象科学研究院

参编单位：中国海洋大学

国家卫星气象中心

摘要

南北极是气候变化的敏感区，本年度报告利用多种气候资料分析表明，2023 年南北极地区表现出持续的气候变化放大器效应，极端事件频发，对当地生态和全球天气造成显著影响。

南极地区气温略偏高，呈东 - 西区域差异大、极端冷暖事件并存态势。南极大陆年均气温为 -31.86°C ，较常年略高 0.05°C ；南极半岛和西南极地区年均温持续快速上升，2023 年有 3 站秋季气温创历史第二高、7 站创历史第三高记录；东南极则出现冷异常，维多利亚地、威尔克斯地等区域站点创有观测以来最冷记录。7 月 7 日，南极点气温一日内飙升 40°C ；7 月中旬至 8 月末，南极大部地区连续发生 4 次极端寒潮，13 个站创造最低气温观测记录；11 月，威德尔海 A23a 冰山脱离冰架，面积达 4000 km^2 ，成为世界上最大冰山。

北极地区增温放缓，仍经历了 1979 年以来最暖夏天，整体呈“陆暖海冷”分布。1979 - 2023 年，北极增温是同期全球升温速率 ($0.18^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$) 的 3.4 倍。2023 年北极地区年均气温为 -9.19°C ，较常年高 0.97°C ；春、夏、秋、冬四个季节的平均气温为 -12.74°C 、 4.52°C 、 -7.09°C 和 -21.14°C ，秋冬严重偏暖；环北冰洋大陆地区特别是加拿大北部、巴伦支海 - 喀拉海沿岸，增温幅度达到 2.0°C 以上；加拿大北部异常高温叠加少雨造成严重干旱，导致持续 5 个月的野火；6 月 26 日格陵兰冰盖最高点达到 0.39°C ，造成冰盖大面积融化。

南极海冰继续快速减少，再创消融记录，引起全球关注。2023 年 2 月 21 日，南极海冰范围低至 $1.788 \times 10^6\text{ km}^2$ ，再次刷新 2022 年的历史最低记录；南极海冰在过去一年中持续保持低位，年累积海冰范围远低于历史记录。**北极海冰** 2023 年最大范围为 $14.62 \times 10^6\text{ km}^2$ ，是历史第 5 低值，最小范围

为 $4.23 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，是历史第 6 低值；受春季海洋低温影响，北冰洋海冰开始消融较晚，但夏秋季高温导致冻结也同样推迟。

南极臭氧洞形成提前且生命长久，北极臭氧总量高于历史平均。2023 年南极臭氧洞提前约 10 天形成，9 月 21 日达到单日最大面积 $2.6 \times 10^7 \text{ km}^2$ ；受汤加火山喷发物质输送影响，南极平流层云偏多，使得南极臭氧洞持续到 12 月 20 日关闭。北极极涡偏弱且平流层气温较高，抑制了北极大规模臭氧损耗，使得臭氧总量偏高；2024 年 3 月中旬，北极臭氧总量飙升至近记录的 490 DU。

极地地区大气中温室气体浓度与全球变化趋势相似，均呈稳定的上升趋势。2022 年南极大气中二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和六氟化硫的年平均浓度分别为 414.40 ppm、1857.87 ppb、334.72 ppb 和 10.78 ppt；北极大气二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和六氟化硫的年平均浓度分别为 420.12 ppm、2004.02 ppb、336.08 ppb 和 11.28 ppt，相对于 2021 年，极地地区大气主要温室气体平均浓度均有所升高；其中，南极和北极地区六氟化硫较 2021 年平均浓度分别上升 0.38 ppt 和 0.42 ppt，均为历年最大增幅。

目 录

第一章 气温和气压	1
1.1 气温	1
1.1.1 南极	1
1.1.2 北极	5
1.2 气压	9
1.2.1 南极	9
1.2.2 北极	10
第二章 海冰	12
2.1 海冰范围	12
2.1.1 南极	12
2.1.2 北极	14
2.2 海冰密集度	15
2.2.1 南极	15
2.2.2 北极	16
2.3 海冰融化期	17
第三章 大气成分	20
3.1 主要温室气体	20
3.1.1 南极	20
3.1.2 北极	22
3.2 臭氧总量	24
3.2.1 南极	24
3.2.2 北极	25
附录 I 主要数据来源	26
附录 II 术语	27

第一章 气温和气压

1.1 气温

1.1.1 南极

本节分析使用南极各站点的气温观测数据以及国家气象信息中心发布的第一代全球大气再分析资料（CRA-40），其中长城站和中山站的气温观测数据来自中国气象科学研究院，其他观测数据来自英国南极办公室编制的南极环境研究参考数据集（Met-READER），所有数据均经过质量控制。经过分析，2023年南极大陆的年平均气温为 -31.86°C ，较常年略微偏高 0.05°C 。南半球夏季（12月至次年2月）、秋季（3至5月）、冬季（6至8月）和春季（9至11月）的平均气温分别为 -21.92°C 、 -34.56°C 、 -38.85°C 和 -31.77°C 。2023年南极大陆在冬季和夏季较常年偏冷，温度分布降低 0.06°C 和 0.21°C ，而在春季和秋季呈现出暖异常，增温分别为 0.53°C 和 0.15°C 。

2023年南极地区的偏暖主要发生在威德尔海及周边地区，而偏冷主要发生在罗斯海及周边地区（图1.1）。其中，威德尔海及周边地区的气温异常偏暖，延续了2022年的偏暖情况，或表明该地已进入整体偏暖阶段。夏季时期，暖异常主要位于南极半岛及其周边海域。其中位于南极半岛的长城站和别林斯高晋站气温较常年高出 0.75°C 和 0.74°C （图1.1-2和3），分别达到其历史第二高和第三高。秋季，除南极半岛外，科茨地和毛德皇后地也增温明显。这三个地区中，马兰比奥站、贝尔格拉诺二号站和诺迈伊尔站（图1.1-6、28和27）暖异常最强，较往年分别偏高 3.52°C 、 3.44°C 、 2.66°C 。此外，这三个地区共有3个站的秋季气温达到历史第二高（法拉第站、诺迈伊尔站、贝尔格拉诺二号站，图1.1-8、27和28），并有7个站达到历史第三高（奥卡达斯站、长城站、别林斯高晋站、马兰比奥站、帕默尔站、圣马丁站、新拉扎列夫站，图1.1-1、2、3、6、7、10和26）。冬季，科茨地、毛德皇后地和南极半岛仍依然保持偏暖。昭和站（图1.1-25）冬季气温达到历史第二高（偏高 2.65°C ），贝尔格拉诺二号站（图1.1-28）为历史第三高（偏高 2.41°C ）。而在春季，南极半岛由偏暖转为偏冷，但科茨地和毛德皇后地仍维持偏暖。诺迈伊尔站（图1.1-27）春季气温达到历史第二高（偏高 3.45°C ）。另一方面，罗斯海及周边地区的偏冷主要由冬季冷异常引起，维多利亚地、伊丽莎白公主地和玛丽皇后地为降温最为剧烈的地区。玛丽莲站（图1.1-12）冬季气温为历史最低（偏低 4.61°C ），罗斯角站和中山站（图1.1-15和23）为历史第二低（分别偏低 3.45°C 和 2.59°C ），马布尔点站（图1.1-14）为历史第三低（偏低 -3.67°C ）。

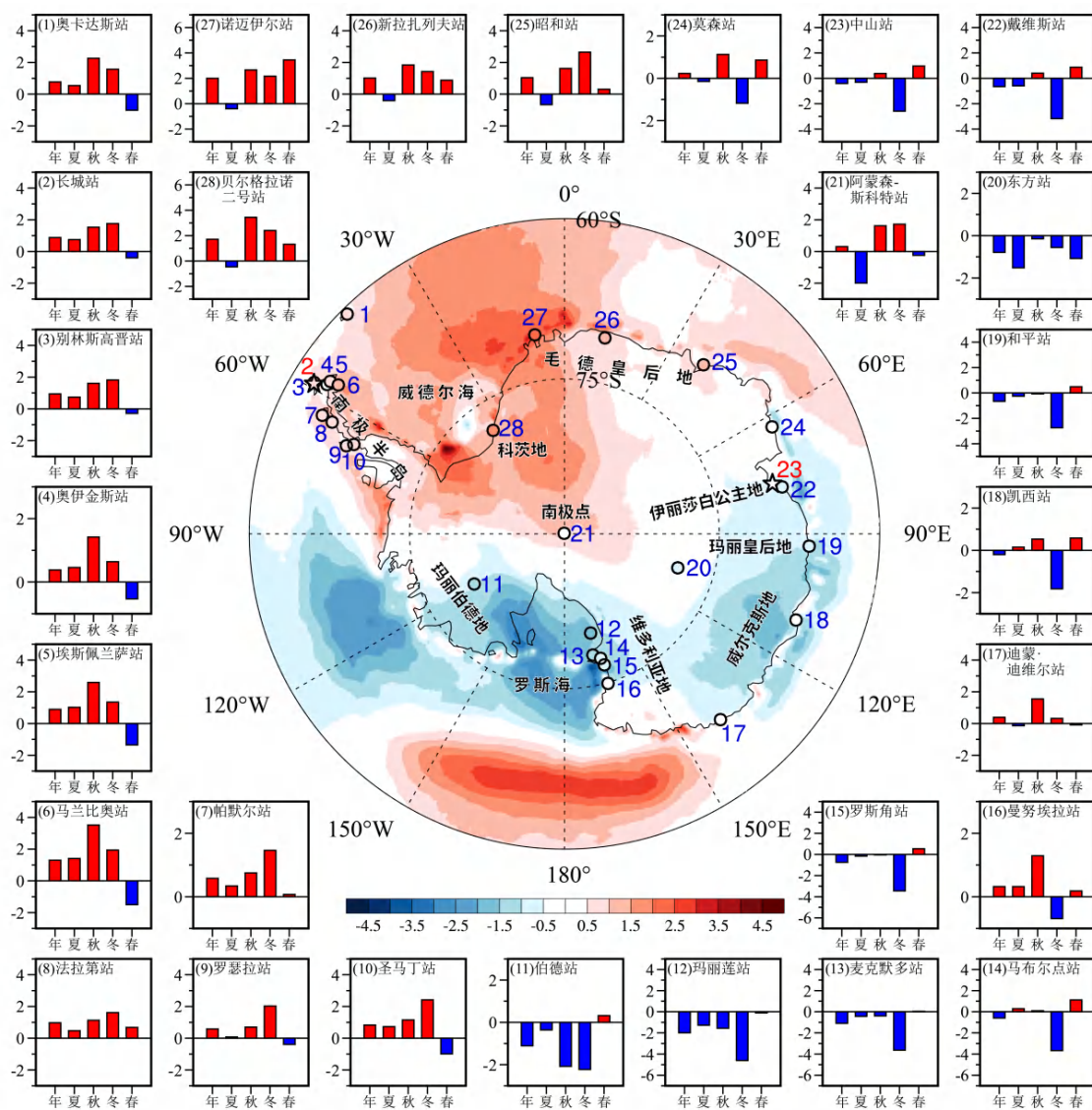


图1.1 2023年南极年平均气温距平空间分布及各站点年平均和季节平均气温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)

全球气温在1979—2023年期间呈现明显的上升趋势,升温速率为 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ (图1.2)。在此背景下,南极地区的变暖趋势主要位于南极陆地,南极陆地气温在此期间升温速率略大于全球气温,温度趋势为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ (图1.2)。此外,在南半球夏季、秋季和春季,南极陆地气温均呈现显著的上升趋势,增温速率分别为 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 、 $0.17^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 和 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{年}$;冬季期间升温趋势仅为 $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{年}$,未通过显著性检验。

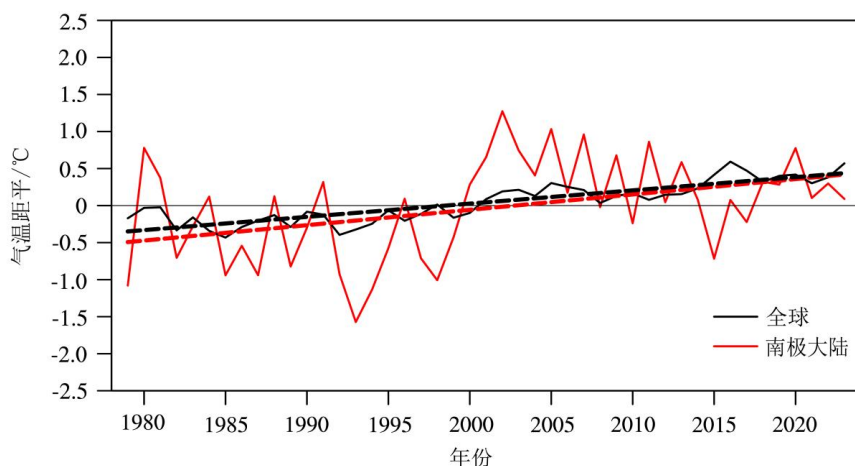


图1.2 1979—2023年南极大陆和全球年平均气温距平时间序列及其趋势（虚线）

南极陆地气温趋势变化呈现出明显的区域性特征。南极半岛是全球气温增暖速率最快的地区之一，该地法拉第站的气温以每10年 0.45°C 的速度升高（1947–2023年，图1.3a红线）。南奥克尼群岛、玛丽伯德地、维多利亚地、科茨地和南极冰穹地区的年平均气温也呈现上升趋势，但

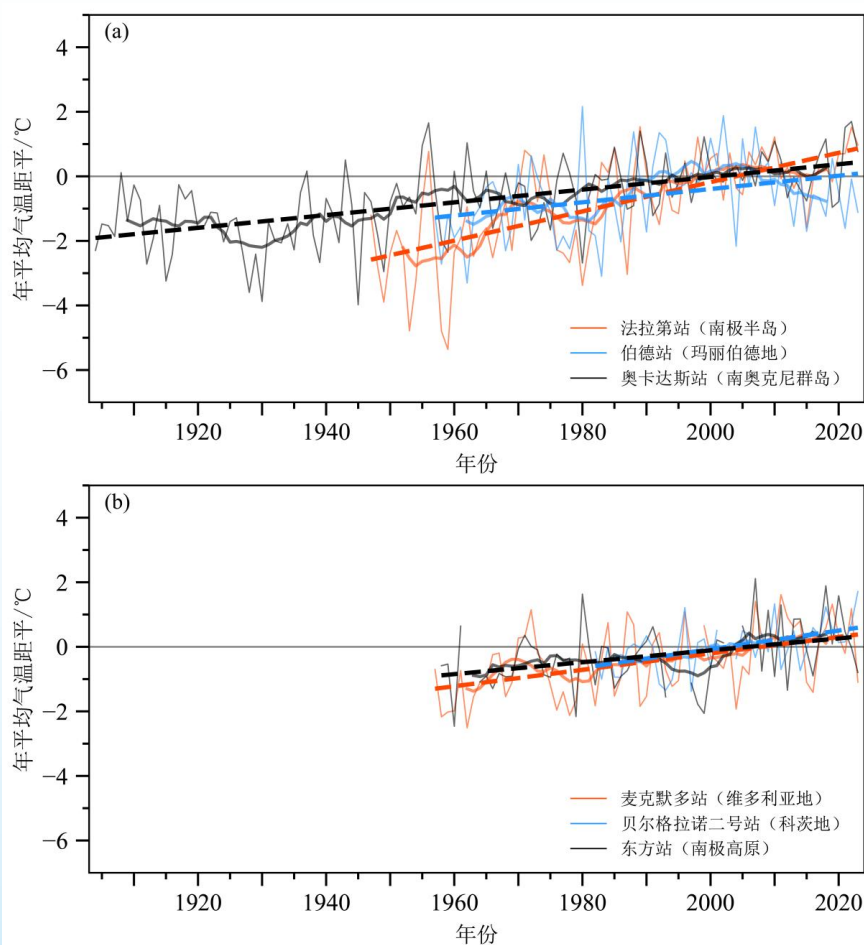
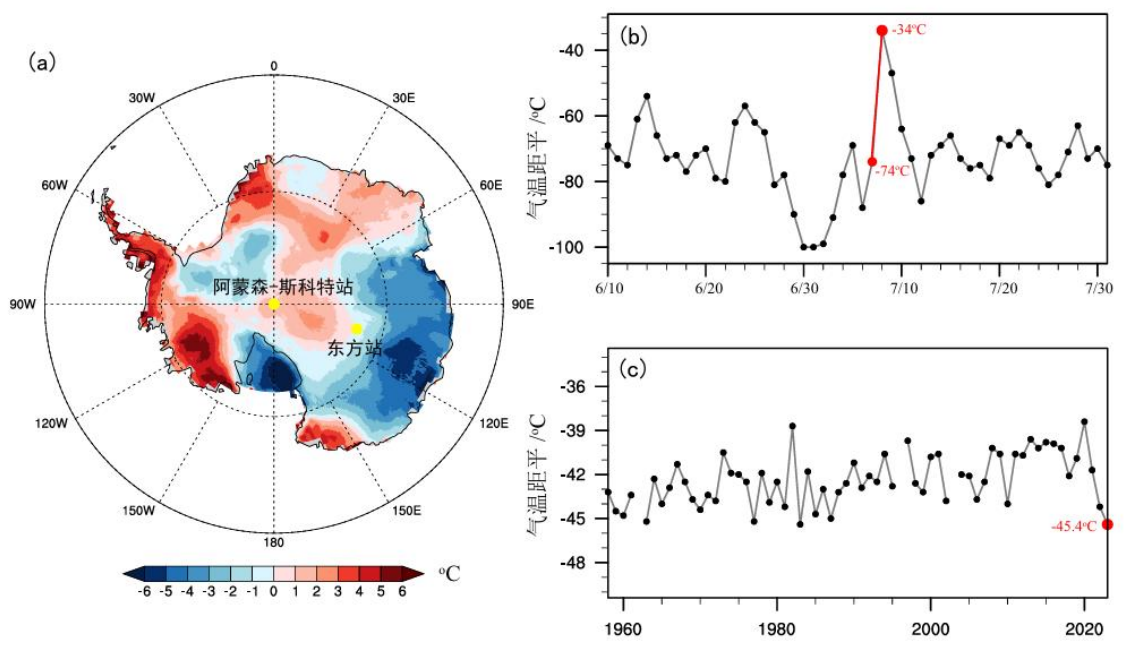


图1.3 西南极(a)和东南极(b)增暖地区各站点年平均气温距平时间序列（细实线）及其滑动平均值（粗实线）和趋势（虚线）

升温速度相对较缓，分别为每10年 0.20°C （1904–2023年，图1.3a黑线）、 0.21°C （1957–2023年，图1.3a蓝线）、 0.26°C （1957–2023年，图1.3b红线）、 0.29°C （1982–2023年，图1.3b蓝线）和 0.18°C （1958–2023年，图1.3b黑线）。而南极大陆其他地区的年平均气温变化则不明显。

极端事件：2023年西南极和东南极先后出现极端暖事件和极端冷事件。在南极洲一年中最冷的7月，南极半岛地区气温异常偏高，位于南极极点附近的阿蒙森-斯科特站观测到明显的极端暖事件，该站气温从7月7日的 -74°C 飙升到7月8日的 -34°C ，一天内升温幅度高达 40°C 。而位于东南极大陆的东方站11月平均气温创1958年有记录以来的历史最低值，达到 -45.4°C 。7月中旬至8月末，从南极洲东部到罗斯冰架、从西南极到南极半岛，南极大部分地区发生了4次极端冷事件，11个站创造最低气温观测记录，造成进出南极航班严重延迟。2023年1月25日A81冰山从布伦特冰架上断裂，新冰山面积约为 1550 km^2 ，厚度约为 150 m 。2023年11月，A23a巨型冰山在威德尔海停留40多年后，首次离开南极水域，向南大西洋移动，冰山面积约 4000 km^2 ，厚度超过 280 m ，成为目前世界上最大的冰山。



(a) 2023年7月南极温度距平（相对于1991–2020年）及站点分布；(b) 2023年6–7月阿蒙森–斯科特站日气温变化；(c) 1958–2023年11月南极东方站月均气温变化

1.1.2 北极

本小节利用来自全球历史气候学网络（GHCN-D）和丹麦气象研究所的格陵兰天气观测数据集，以及CRA-40再分析数据，对北极地区的气温变化进行分析。所有数据均经过质量控制。2023年，北极地区年平均气温为 -9.19°C ，相对于常年偏高 0.97°C 。此外，2023年北极地区四个季节的温度都较常年偏高，其中，秋季（9-11月）增温最强，增温幅度为 1.87°C ，平均气温达到 -7.09°C ；冬季（12月至次年2月）、春季（3-5月）和夏季（6-8月）的平均气温分别为 -21.14°C 、 -12.74°C 和 4.52°C ，相对于常年偏高 1.16°C 、 0.53°C 和 0.68°C 。

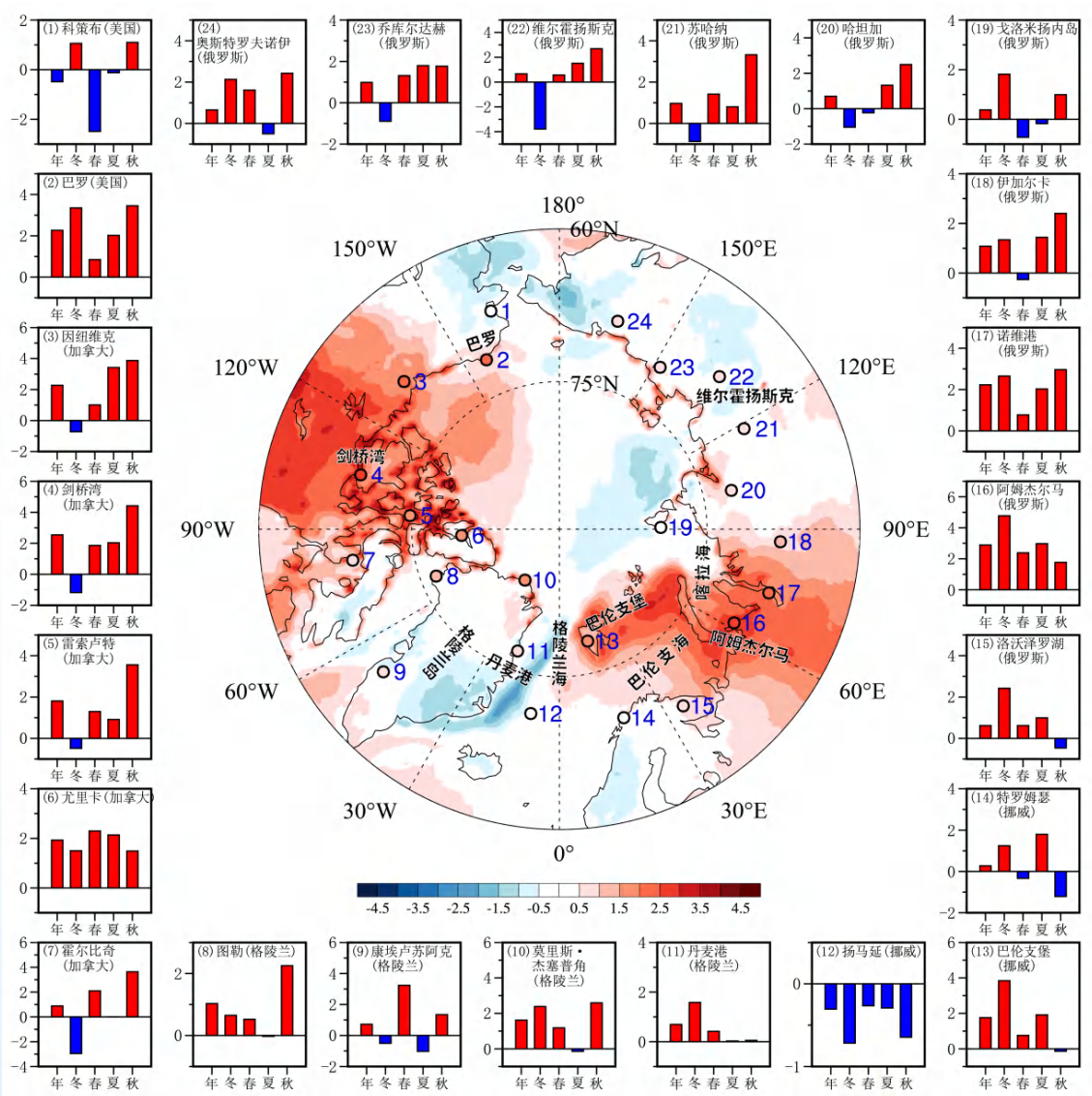


图1.4 2023年北极年平均气温距平空间分布及各站点年平均和季节平均气温距平(单位: $^{\circ}\text{C}$)

2023年北极增暖最为剧烈的地区位于巴伦支-喀拉海沿岸和加拿大北极地区，增暖幅度均达 2°C 以上（图1.4）。位于北极地区的站点中，增温幅度最大站点为位于喀拉海沿岸的阿姆杰尔马（图1.4-16），年平均气温为 -2.4°C ，较常年偏高 2.9°C ，为历史第三高。莫里斯·杰塞普角

(图1.4-10)年平均气温达到历史次高,因纽维克、剑桥湾和巴伦支堡(图1.4-3、4和13)年平均气温为历史第三高。所有站点中只有美国科策布和位于格陵兰海的扬马延(图1.4-1和12)偏冷,年平均气温分别较常年偏低 0.5°C 和 0.3°C 。冬季,偏暖主要发生在巴伦支-喀拉海沿岸,其中阿姆杰尔马(图1.4-16)为全北极冬季增温幅度最大的站,冬季气温较常年偏高 4.8°C 。春季,暖异常主要位于加拿大北极地区,其中霍尔比奇(图1.4-7)夏季气温偏暖 2.1°C ,为历史第三高,而剑桥湾、尤里卡和格陵兰康埃卢苏阿克(图1.4-4、6和9)夏季气温较常年偏高 1.9°C – 3.2°C 。夏季,偏暖主要发生在巴伦支-喀拉海沿岸和加拿大北极地区,其中因纽维克、剑桥湾和巴伦支堡(图1.4-3、4和13)夏季气温为历史最高,阿姆杰尔马和巴罗(图1.4-16和2)夏季气温为历史次高。秋季,除了格陵兰海沿岸站点偏冷外,其余所有站点均偏暖,其中因纽维克和剑桥湾(图1.4-3和14)秋季气温分别为 4.4°C 和 3.9°C ,均为历史最高,而霍尔比奇、雷索卢特和莫里斯·杰塞普角(图1.4-7、5和10)秋季气温为历史次高。

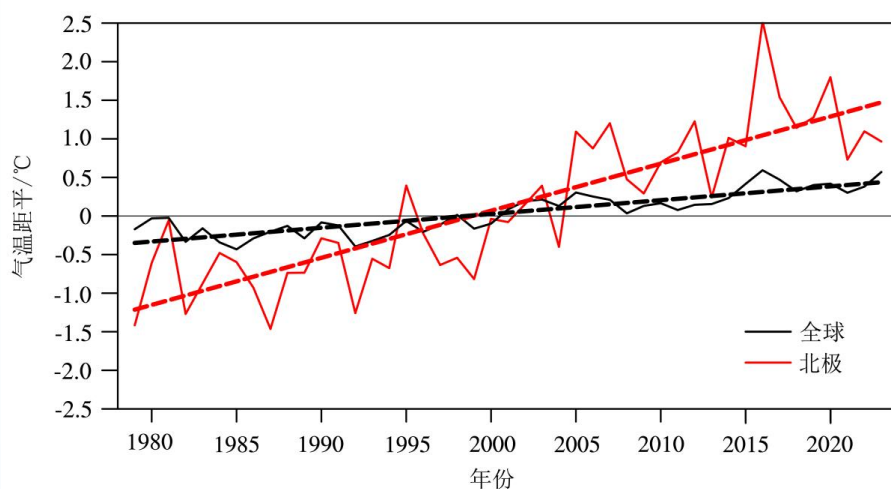


图1.5 1979—2023年北极和全球年平均气温距平时间序列及其趋势(虚线)

在全球变暖背景下,北极地区年平均气温在1979年至2023年期间出现快速上升趋势(见图1.5),升温速率为 $0.61^{\circ}\text{C}/10\text{年}$,是全球升温速率的3.4倍,表明北极对全球变暖具有较强的敏感性。此外,北极的快速增暖在不同季节都可见,其中秋季和冬季的增温速率较高,分别为 $0.87^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 和 $0.67^{\circ}\text{C}/10\text{年}$,而夏季的增温幅度最小,为 $0.33^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 。

北极快速增暖主要发生在北冰洋,而陆地增暖速度相对略慢,但仍远高于全球平均升温速率。有记录以来北极各站均呈现升温趋势,1980年代后升温速率进一步加快(图1.6)。1981–2023年,位于阿拉斯加的巴罗每10年升高 1.07°C ,位于巴伦支-喀拉海沿岸的巴伦支堡和阿姆杰尔马每10年分别升高 1.00°C 和 0.90°C ,而丹麦港、剑桥湾和维尔霍扬斯克升温速度略慢,每10年分别升高 0.61°C 、 0.58°C 和 0.52°C 。

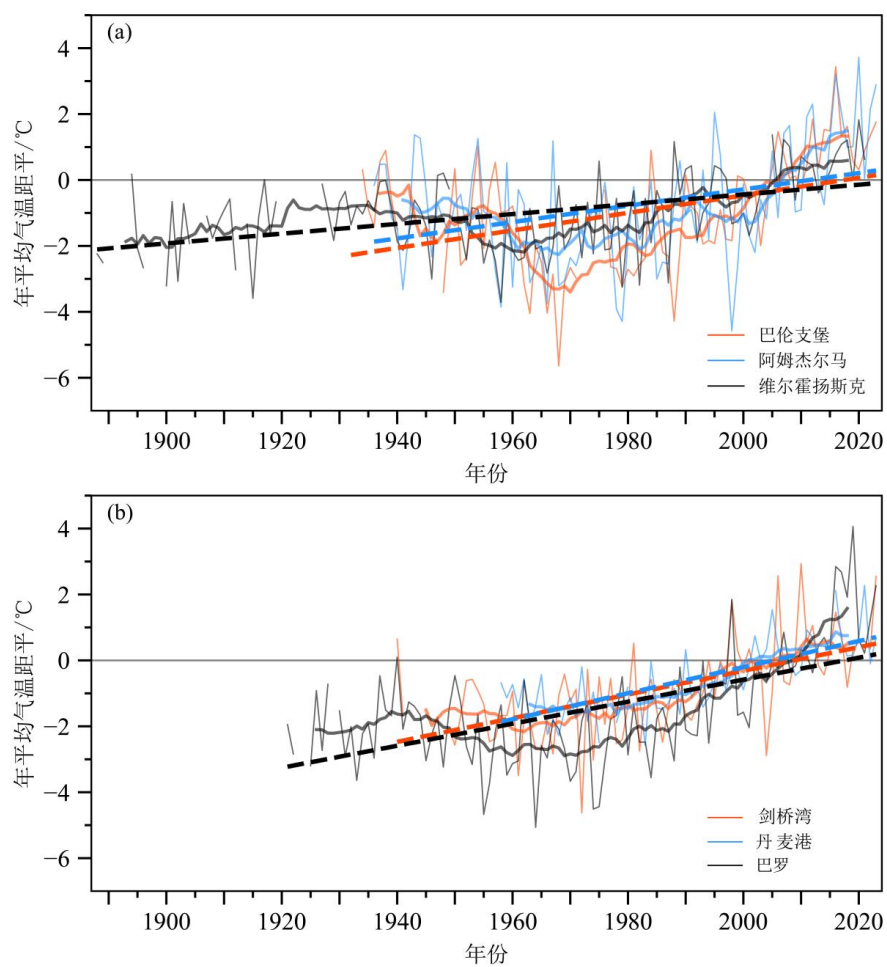
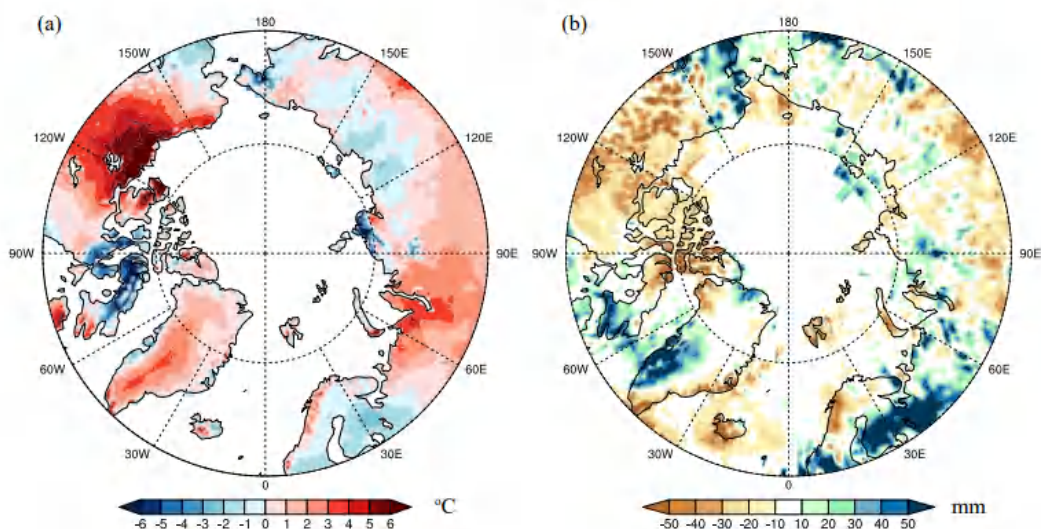


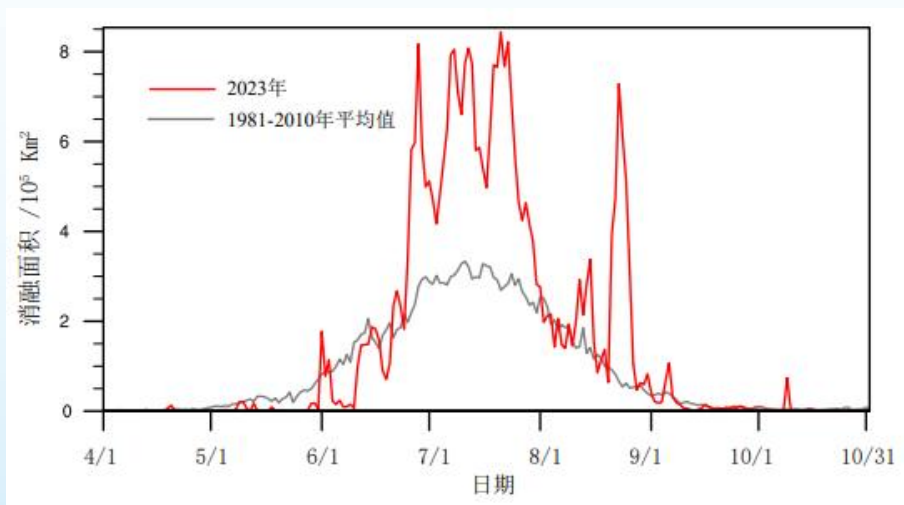
图1.6 北极欧亚(a)和北美(b)部分增暖地区各站点年平均气温距平时间序列及其滑动平均值(粗实线)和趋势(虚线)

极端事件：2023年，6-8月泛北极（60-90°N）地表平均气温9.96℃，是1979年以来最热的夏季。加拿大北部异常高温和少雨造成了严重干旱，并导致2023年夏季加拿大西北部发生破纪录野火，野火持续时间超过5个月，过火面积达416万公顷，是有记录的44年中烧毁面积最大的一次。



2023年7月北极气温和降水异常分布

2023年格陵兰冰盖出现有记录以来最暖的一个夏天，6月26日冰盖最高点气温达到0.39℃。高温造成格陵兰冰盖日累积融化面积在45年的卫星观测记录中位居第2。7月20日，格陵兰冰盖表面 $8.44 \times 10^5 \text{ km}^2$ （67%的表面）发生消融，是本年度单日最大融化面积。



格陵兰冰盖表面消融面积（数据来源于NSIDC）

1.2 气压

极地气压场变化是联系极地和全球气候的关键环节之一。本节分析的极地气压场变化包括2023年南北极气压场的空间异常特征，极涡和大气涛动等重要环流现象。北极极涡指数来自国家气候中心，涛动指数计算使用CRA-40再分析数据。

1.2.1 南极

2023年夏季（12 - 次年2月）和冬季（6 - 8月）的500 hPa位势高度场显示，南极上空受低压系统控制（图1.7）。夏季南极大陆上空呈位势高度负距平，中纬度上空呈正距平。冬季南极大陆上空负距平面积略大于正距平面积，环南极和南大洋上空正负距平交替出现，环流纬向性特征偏强（图1.7）。

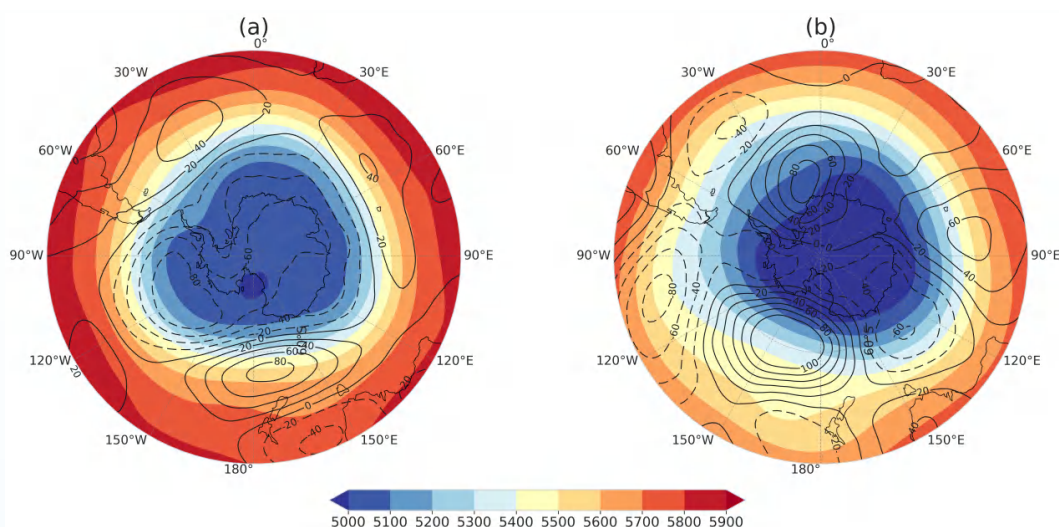


图1.7 2023年南极(a)夏季(12月-2月)和(b)冬季(6月-8月)的500 hPa位势高度场(填色图)及其距平场(等值线图), 单位: 位势米.

1979 - 2023年间南极涛动指数有所增强（0.21/10年），其中夏季增强主导了趋势（0.40/10年），而冬季变化较小。2023年南极涛动指数冬季和夏季的距平分别为-1.25和1.92，与2022年相比，冬季从正距平变成负距平，夏季维持较常年略偏强的正距平，年均从偏强正距平变为温和正距平（图1.8）。

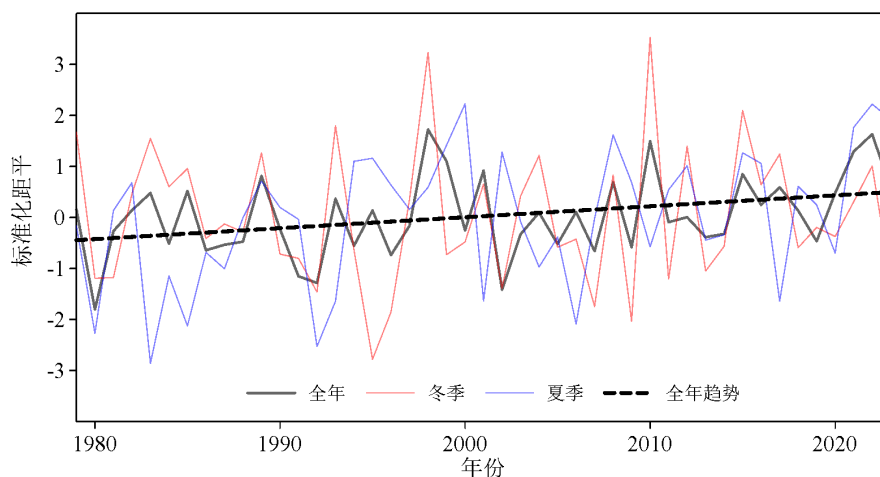


图1.8 1979-2023年南极涛动指数标准化距平

1.2.2 北极

2023年冬季，在500 hPa位势高度场上，北极上空有两个低压中心（图1.9），分别位于东亚大陆北部和北美大陆北部，北极圈附近呈位势高度正距平，北极极涡偏弱；在夏季，高纬度地区以位势高度正距平分布为主。

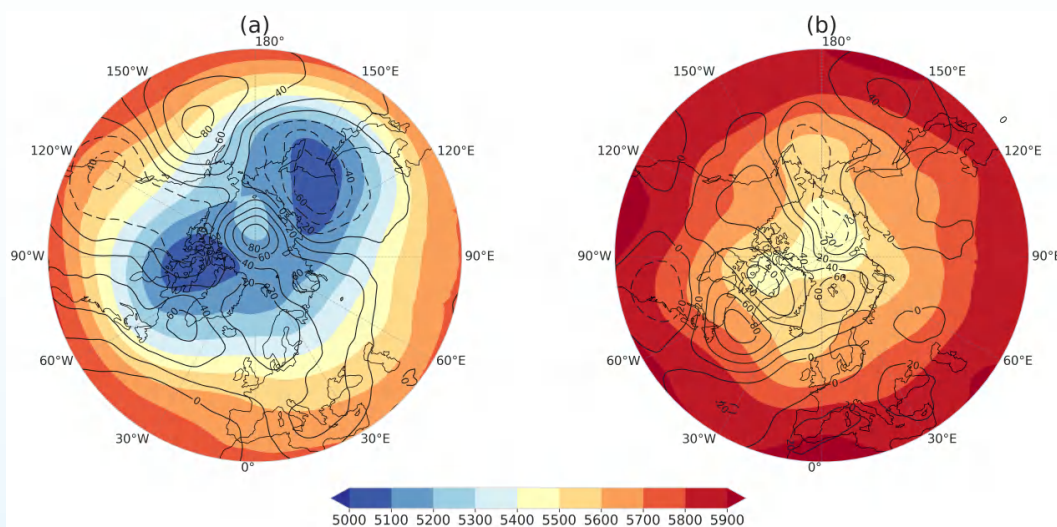


图1.9 2023年北极(a)冬季(12月-2月)和(b)夏季(6月-8月)的500 hPa位势高度场(填色图)及其距平场(等值线图)，单位: 位势米。

如图1.10所示，1979 - 2023年北极极涡面积显著减小（标准化距平年均趋势为 $-0.70/10$ 年），强度显著减弱（标准化距平年均趋势为 $-0.61/10$ 年），2023年北极极涡面积和强度指数在冬季和夏季都呈明显的负距平，表明极涡偏弱。

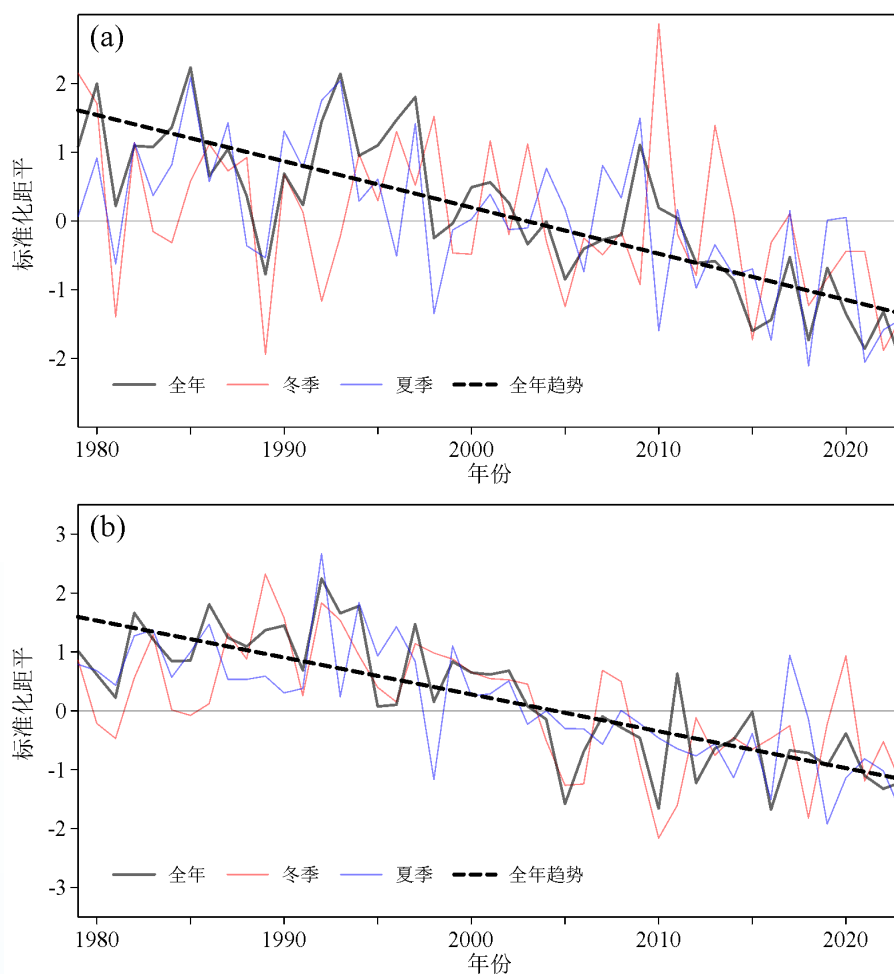


图1.10 1979-2023年北半球极涡面积指数(a)和北半球极涡强度指数(b)的标准化距平

1979 - 2023年间北极涛动指数没有明显趋势，北极涛动指数在2023年冬季和夏季的标准化距平分别是0.205和-0.211（图1.11）。

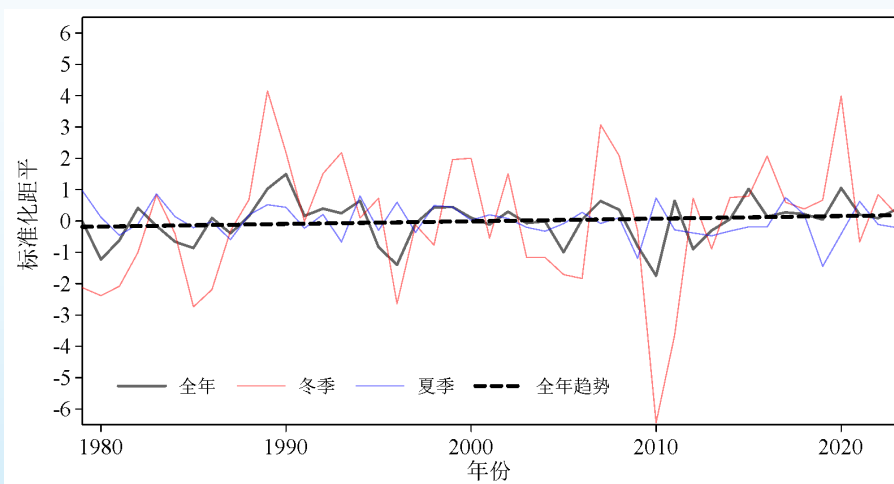


图1.11 1979-2023年北极涛动指数标准化距平

第二章 海冰

本章所用资料为美国国家雪冰数据中心（NSIDC）1979 - 2023年的海冰范围产品，气候态定义为1991 - 2020年平均。此外，还用到我国风云系列卫星海冰密集度产品（2011-2023年），以及美国国家航空和航天局（NASA）和中国海洋大学（OUC）提供的海冰表面开始融化/冻结时间数据集。

2.1 海冰范围

2.1.1 南极

南极海冰范围呈现显著的季节性变化特征。每年4至9月前后是南极海冰的结冰期，10月至次年3月为融冰期，全年海冰最小值通常出现在2月底至3月初。总的来看，2023年南极海冰范围全年严重异常偏低（图2.1），特别是5月后，南极海冰范围持续保持低位，年累积海冰范围远低于历史记录。从最小海冰范围分析，继2017年（3月3日， $2.11 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）和2022年（2月25日， $1.976 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）之后，2023年2月21日再次刷新最低记录，低至 $1.788 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

统计显示，2023年1 - 2月和5 - 10月的海冰范围都是45年间该月份的最低记录；3 - 4月的海冰范围略高于2017年同期，11月海冰范围略高于2016年同期，都是45年间的第二小值；12月海冰范围略高于2016年和2022年同期，是45年间的第三小值。这样极端和持续的海冰偏少，既是南极海冰快速变化的直接信号，也可能引发进一步的海气和生态响应。

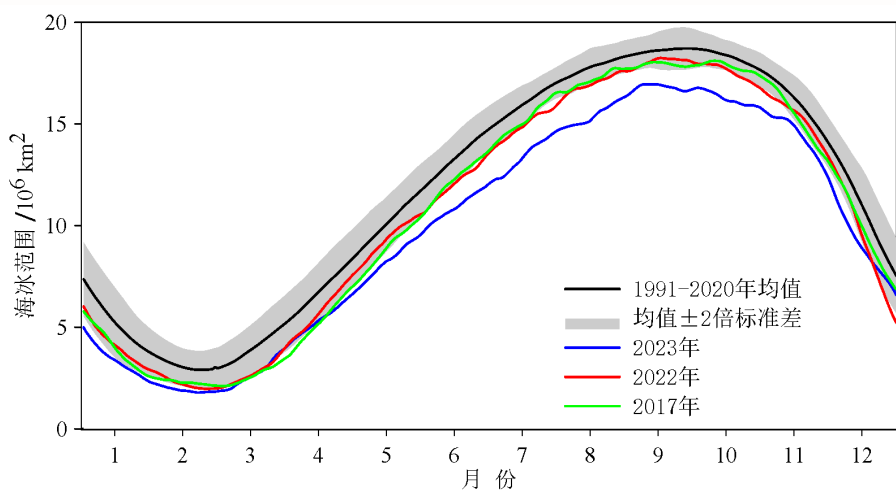


图2.1 多年平均的逐月南极海冰范围，以及2017年、2022年和2023年逐月南极海冰范围变化

从气候变化尺度来看，南极海冰范围在1979 - 2023年间表现出先缓慢增加后减少的变化趋

势，并且后期减少速度更快。近几年南极海冰减少持续创下新低记录，其中年最小值在2022年和2023年连续新低，而年最大值在2023年首次新低（图2.2）。

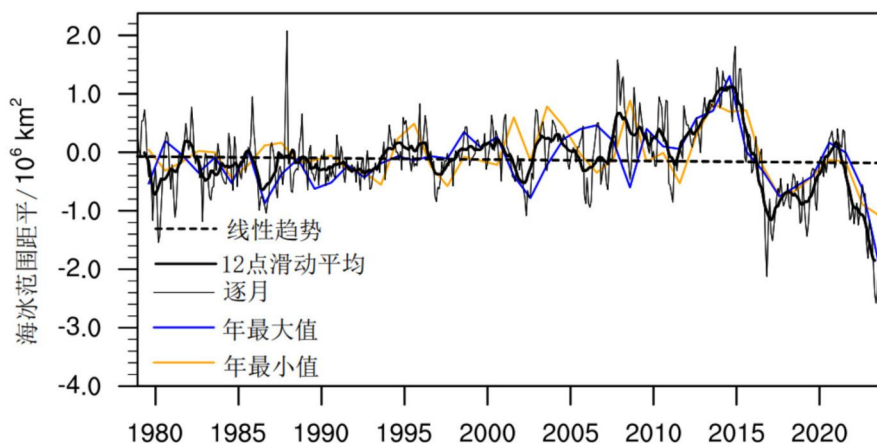


图2.2 1979–2023年南极海冰范围最小值、最大值距平时间序列，逐月南极海冰范围距平时间序列及其12个月滑动平均和线性趋势

以风云卫星数据来计算（图2.3），2023年2月南极海冰范围为 $2.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，较气候态（2011–2023）同期偏小23.63%，创下月尺度同期南极海冰范围新低记录。2023年9月南极海冰范围为 $17.21 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，较气候态同期偏小8.16%，创下月尺度同期南极海冰范围新低记录。从线性趋势上看，2月海冰范围每年平均减少 $1.04 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，9月海冰范围每年平均减少 $1.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

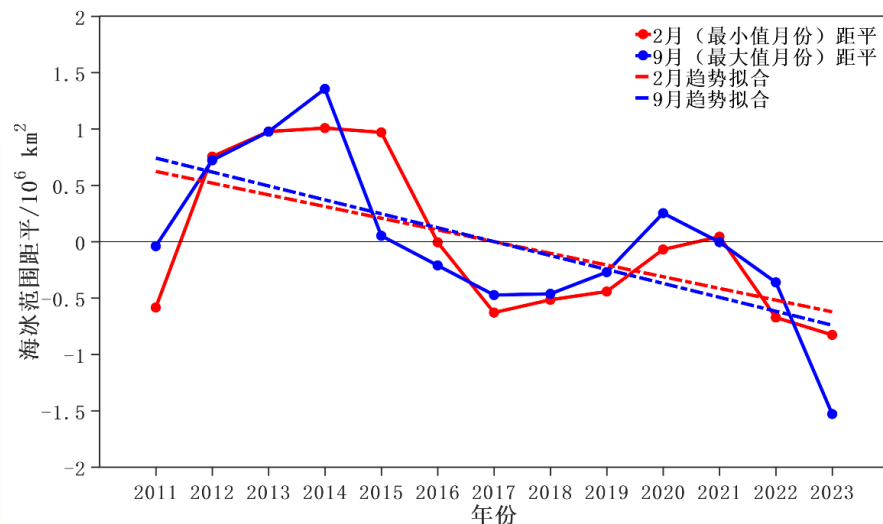


图2.3 我国风云系列气象卫星监测南极海冰范围变化: 2011–2023年南极海冰范围2月和9月较多年平均（2011–2023年）的距平值

极端事件：2023年南极海冰范围创下多项新低记录，首先是2023年2月21日的南极海冰范围 $1.788 \times 10^6 \text{ km}^2$ 创下了南极海冰范围年最小值的新低记录，而2023年2月南极海冰范围 $1.913 \times 10^6 \text{ km}^2$ 创下了月尺度南极海冰范围的新低记录，2023年9月10日南极海冰范围 $16.956 \times 10^6 \text{ km}^2$ 创下了南极海冰范围年最大值的新低记录，而2023年9月南极海冰范围 $16.801 \times 10^6 \text{ km}^2$ 则是过去45年间9月的最小记录。近年来南极海冰消融速度持续加快，已经给南极生态环境带来巨大影响，并有可能进一步影响全球天气气候。

2.1.2 北极

北极海冰范围同样具有显著的季节变化特征（图2.4），夏秋季海冰覆盖率较低，9月达到年最小值；冬春季海冰覆盖率相对较高，3月达到年最大值。2023年的海冰范围最大值位居第五低，为 $14.62 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，较1979年有遥感观测以来历史最大值记录少 $2.01 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，与上年度相比偏低。北极海冰范围的历史最小值发生在2012年9月17日（ $3.39 \times 10^6 \text{ km}^2$ ），2023年的海冰范围最小值排在第六位，为 $4.23 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，与上年度相比同样偏低。

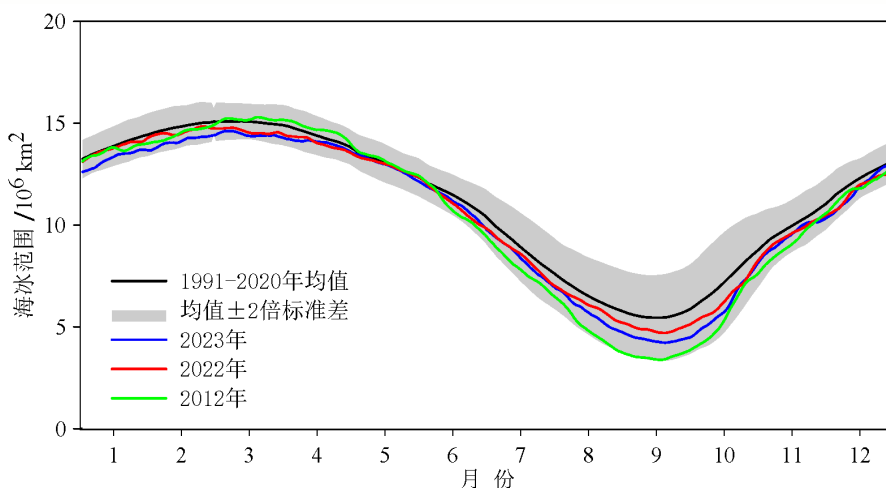


图 2.4 多年平均的逐月北极海冰范围，以及2012年、2022年和2023年逐月北极海冰范围变化

由逐月北极海冰范围距平的时间序列可知（图 2.5），自1979年起，北极海冰范围整体以 $0.046 \times 10^6 \text{ km}^2/10\text{年}$ 的速率减小，年最小范围的下降趋势是 $12.5\%/10\text{年}$ 。近年来，年海冰范围最小值的减小趋势有所放缓。

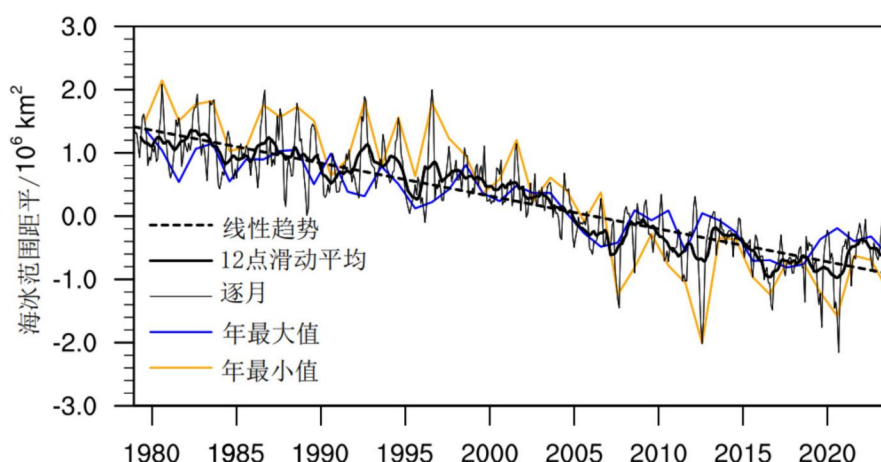


图 2.5 1979–2023 年北极海冰范围最小值、最大值和逐月北极海冰范围距平时间序列及其 12 个月滑动平均和线性趋势

极端事件：2023 年巴伦支海海冰范围在 1 月下旬和 2 月中旬达到了有史以来的极小值。此前的研究认为这与北大西洋海洋热量输送的增加有关，近期研究显示大气河也起到了促进作用。大气河从热带和亚热带带来温暖且潮湿的空气，增加了向下的长波辐射，同时产生降雨，促进冬季海冰的融化。

2.2 海冰密集度

2.2.1 南极

图 2.6 为 2023 年南极海冰密集度在 2 月和 9 月的月均值和距平分布。2 月南极海冰主体分布在威德尔海，阿蒙森海至罗斯海沿岸，海冰带较宽较多，以上均为南极多年海冰主要分布区。除了威德尔海的海冰接近气候态水平，其他海域的海冰存在异常偏低情况。

2023 年 9 月，南极海冰基本包裹着南极大陆。该月南极海冰减少区域大于增加区域，其中，南极别林斯高晋海、阿蒙森海和威德尔海西部，海冰密集度大范围增加；罗斯海海冰密集度大范围减小，最大可达 75%；印度洋海域海冰密集度变化呈现区域差异性，整体增大或减小的变化不大。

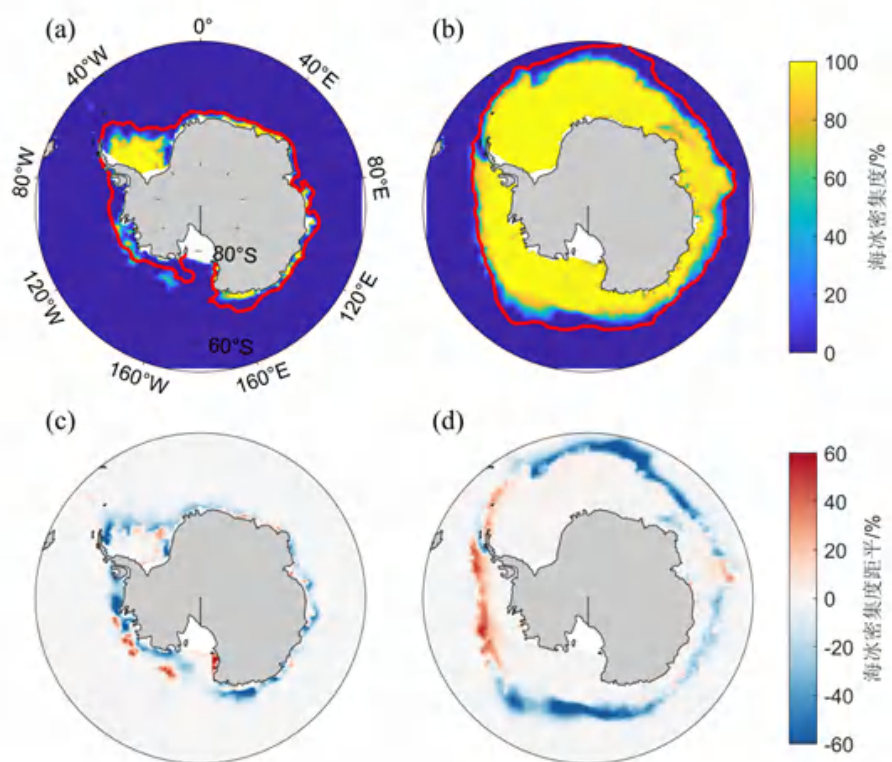


图2.6 我国风云系列气象卫星监测的2023南极海冰密集度及其距平
(a) 2023年2月海冰密集度; (b) 2023年9月海冰密集度; (c) 2023年2月海冰密集度距平;
(d) 2023年9月距平。红色实线表示2011-2023年平均的南极海冰范围

2.2.2 北极

图2.7为2023年北极海冰密集度在3月和9月的月平均值和距平分布。近几十年来，北极海冰不断退缩，但近年海冰密集度递减率有所减缓。相较于2011-2023年平均状况，2023年北极太平洋扇区海冰的冰边缘区持续出现负距平；9月海冰退缩更为明显，主要分布在加拿大群岛、波弗特海、楚科奇海和东西伯利亚海。而在大西洋扇区，3月巴伦支海为负值，格陵兰海为正值；9月冰边缘区海冰密集度体现为明显的正距平，特别是拉普捷夫海。

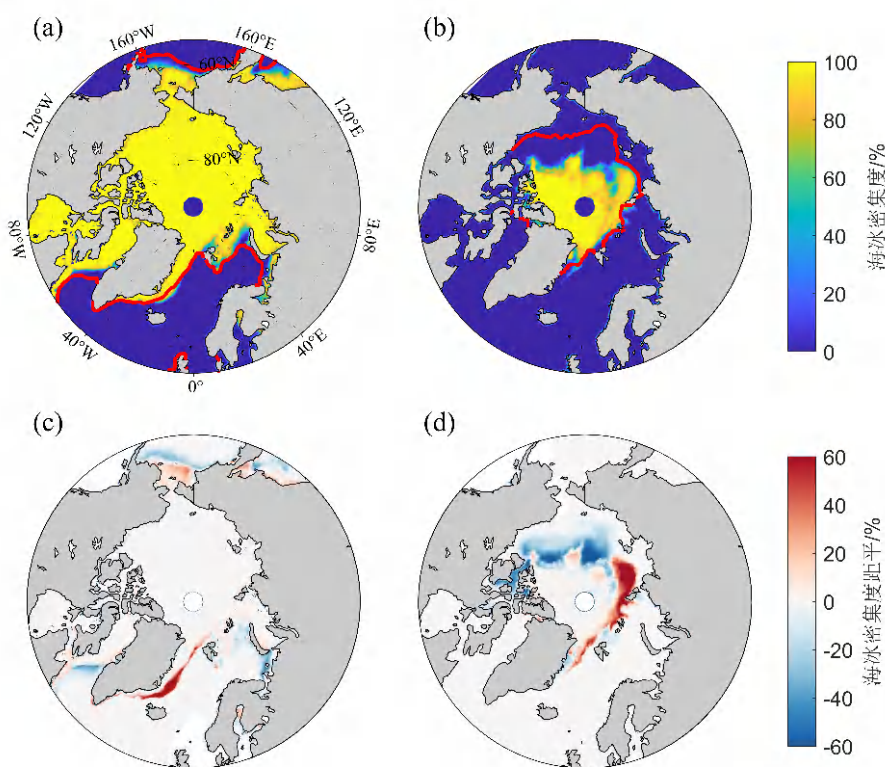


图2.7 我国风云系列气象卫星监测的2023北极海冰密集度及其距平
(a) 2023年3月海冰密集度; (b) 2023年9月海冰密集度; (c) 2023年3月海冰密集度距平;
(d) 2023年9月距平。红色实线表示2011-2023年平均的北极海冰范围

2.3 海冰融化期

海冰的开始融化和开始冻结代表着夏季融化期的起止。当积雪内持续存在自由水时定义为开始融化时间 (MO)；当新冰在开阔水域生长，裸露的或轻度积雪覆盖的冰面重新冻结时定义为开始冻结时间 (FO)。MO与FO之间的时间段即为海冰融化期。

北极海冰表面MO跨度从海冰边缘区域的3月下旬到北极中央区的6月。尽管1979年以来北极海冰MO提前、FO推后、融化期加长,但在风云3B/3D卫星运行期间, MO不再具有提前的趋势。图2.8显示, 相较于2011-2023年平均情况, 2023年大部分海区的MO推迟10-30天, 这与4至8月北冰洋大部区域的气温低于平均水平有着密切关系; 只有在加拿大北部多年冰区, MO仍表现为提前。

近几十年来, 北极海冰的MO年际变化明显, 对于北极70°N以北的海区, 1979 - 2022年MO分布以1.5 天/10年的速度提前。以20世纪90年代为界, 前一时段较后一时段趋势明显 (图2.9)。

¹ 由于NASA提供的融化冻结时间数据集没有更新2023年, 只到2022年。

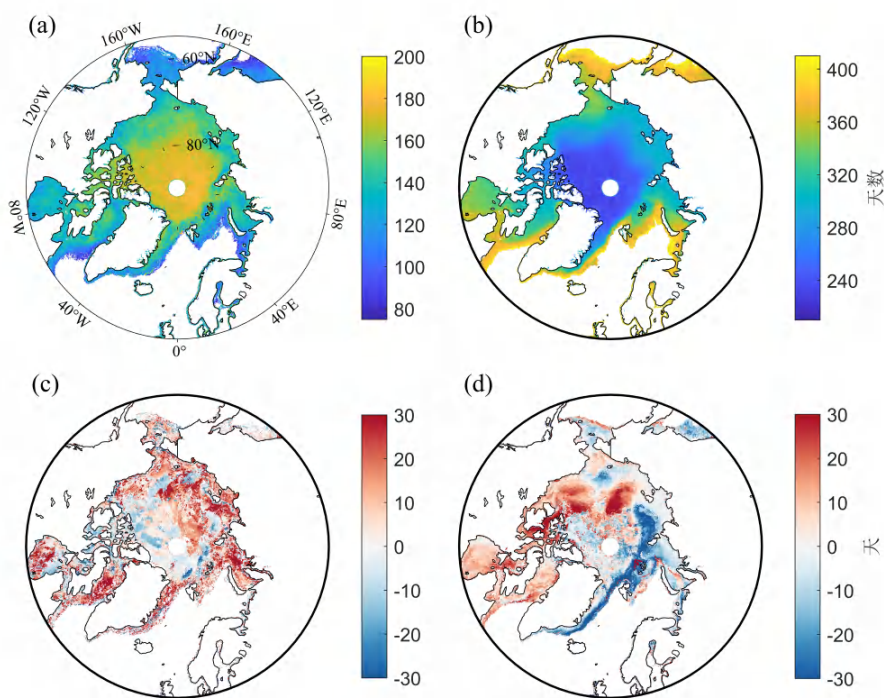


图 2.8 北极海冰表面开始融化时间和开始冻结时间

(a) 2011–2023年平均的北极海冰表面开始融化时间; (b) 2011–2023年平均的北极海冰表面开始冻结时间; (c) 2023年北极海冰表面开始融化时间距平; (d) 2023年北极海冰表面开始冻结时间距平

北极海冰表面FO跨度从北极中央区的8月到海冰边缘区域的次年1月（图2.8）。相较于2011–2023年平均情况，2023年北极大部分海区FO推迟20–30天，FO明显推迟的海域对应着夏季的海冰退缩区域（图2.7d）。

自1979年以来，70°N以北FO一直呈现明显的推迟趋势（图2.9）。在风云3B/3D卫星运行期间，年际变化明显，体现出振荡推迟的趋势。

北极海冰融化期的长度在北极中央区约为60–90天，一年冰区长度跨度较大，主要分布在100–200天以上，在冰边缘区可达到250天以上。1979–2022年期间，70°N以北的融化期长度以6.3天/10年的速率呈现明显的延长趋势（图2.9），秋季的海冰冻结不断推迟主导着北极融化期的显著延长趋势。

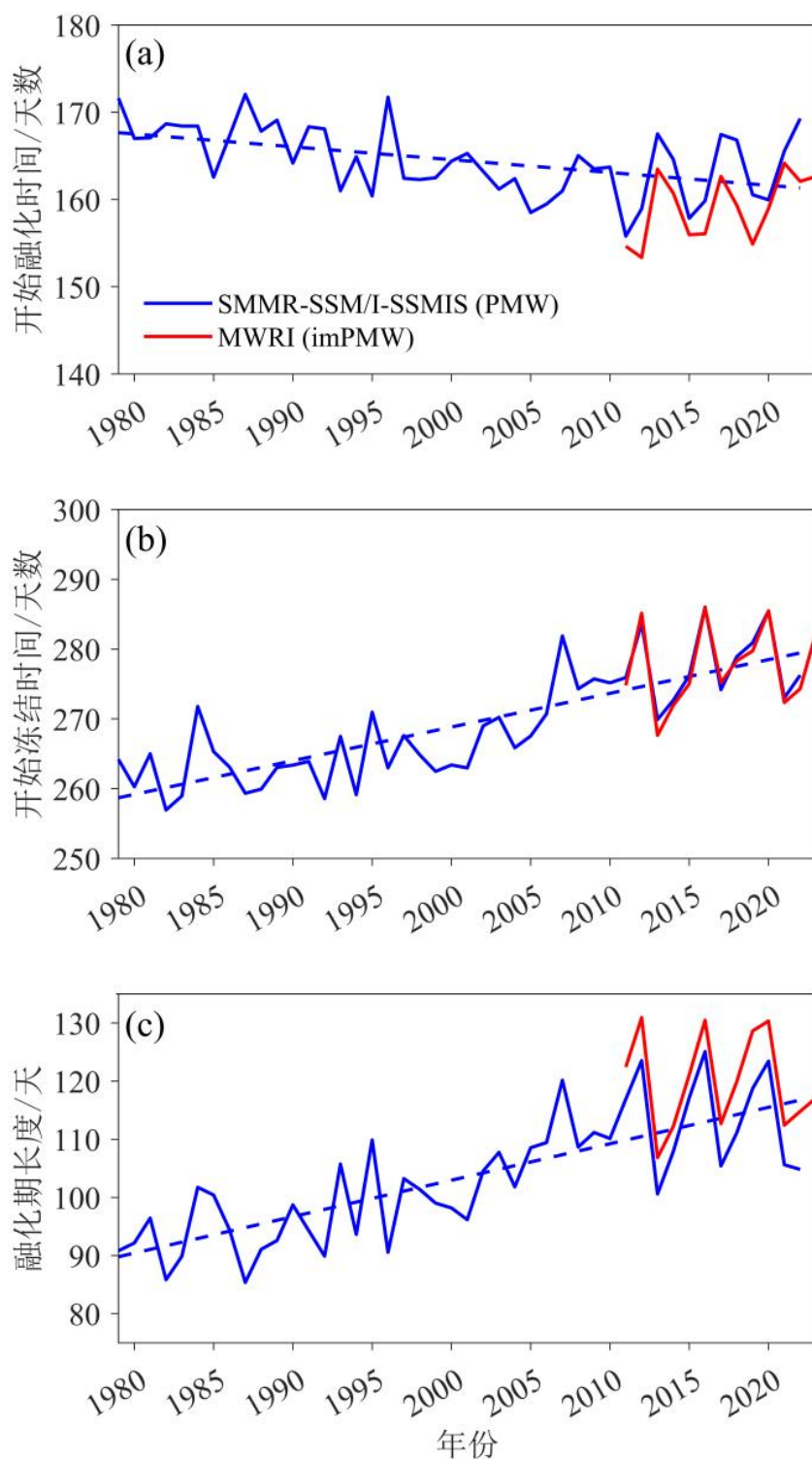


图 2.9 1979–2023 年北极海冰表面开始融化时间 (a) 开始冻结时间 (b) 和融化期长度 (c) 在 70°N 以北海区的区域平均值的时间序列

第三章 大气成分

3.1 主要温室气体

本节采用世界温室气体数据中心（WDCGG）的极地站点和我国中山站监测数据进行分析，其中南极地区共11个站，北极地区共15个站（图 3.1），时间范围是1984 - 2022年（目前上述温室气体浓度仅公布到2022年）。本节主要分析四种主要温室气体（二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、六氟化硫）的变化。

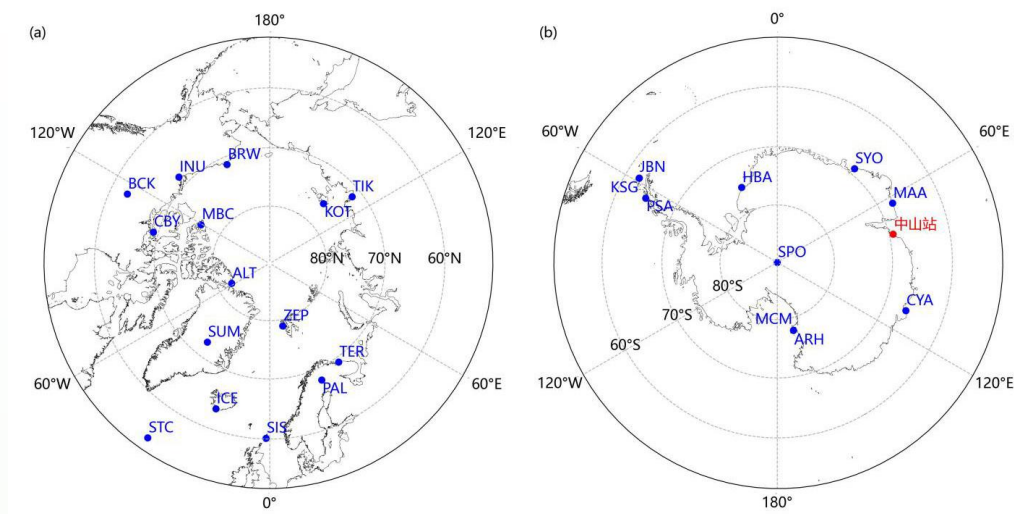


图 3.1 极地主要大气成分观测站位置

3.1.1 南极

（1）二氧化碳和甲烷

从 1984到 2022年，南极大气中的二氧化碳浓度呈逐年稳定上升的趋势，增长率为 1.87 ppm/年，总体与全球趋势一致，平均浓度比全球平均值低 2.48 ppm（图 3.2a）。在 2022 年，南极大气中的二氧化碳年平均浓度达到了 414.40 ppm，相比 2021年，平均浓度上升了 2.38 ppm，其中中山站大气中二氧化碳 2022年平均浓度为 413.84 ppm，较 2021年上升 2.24 ppm。

同样，从 1984到 2022年，南极大气甲烷浓度呈逐年稳定上升的趋势，增长率为 5.42 ppb/年，总体与全球趋势一致，但平均浓度比全球平均值低 61.07 ppb（图 3.2b）。在 2022年，南极大气中甲烷年平均浓度达到了 1857.87 ppb，相比2021年，平均浓度上升了 18.58 ppb，其中中山站大气中的甲烷 2022年平均浓度为1856.96 ppb，较 2021年上升 18.34 ppb。

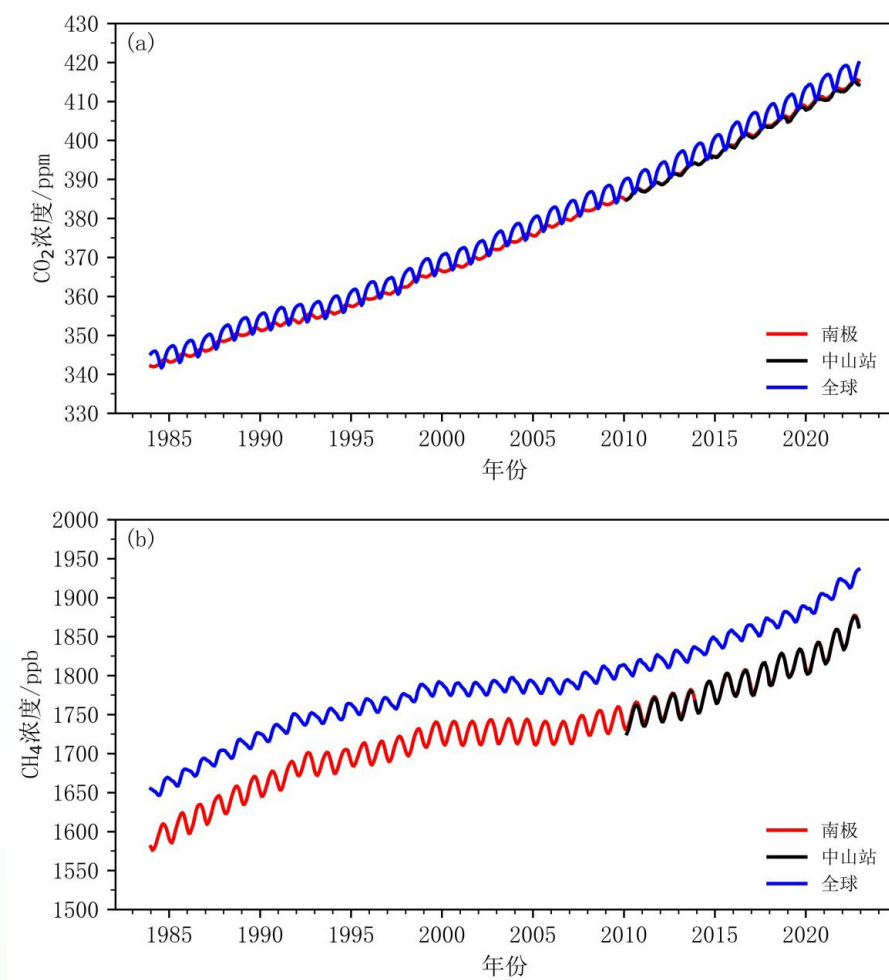


图 3.2 1984–2022 年南极与全球二氧化碳浓度变化 (a) 和甲烷浓度变化 (b)

(2) 氧化亚氮和六氟化硫

目前南极开展氧化亚氮观测的7个站年平均浓度由1997年的312.05 ppb升高至2021年的334.72 ppb, 年增长率为0.40ppb/年–1.54 ppb/年不等, 平均增长率约为0.91ppb/年(图3.3a)。2022年南极地区氧化亚氮年平均浓度较2021年上升1.4 ppb。我国中山站自2008年开始氧化亚氮观测, 总体趋势与南极平均状况一致, 2008–2022年的年平均浓度由320.40 ppb升高至333.99 ppb, 每年升高约0.97ppb。2022年中山站氧化亚氮年平均浓度相对于2021年的绝对增量为0.68 ppb, 相对增量为0.20%。

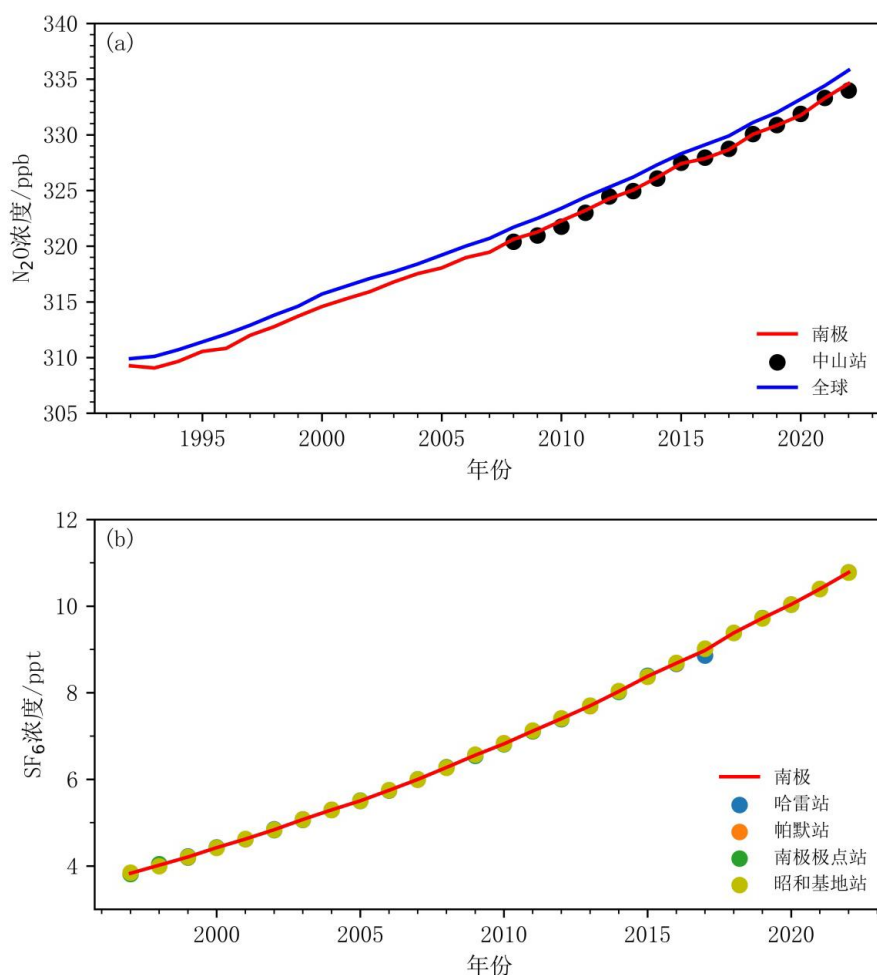


图3.3 南极(a)氧化亚氮(1992-2022年)和(b)六氟化硫(1997-2022年)平均浓度

1997 - 2022年, 南极进行大气中六氟化硫浓度观测的4个站点年平均浓度全部呈显著上升趋势(图3.3b), 年平均浓度由1997年的3.83 ppt升高至2022年的10.78 ppt, 增长了约2.8倍; 年增长率也呈逐年放大趋势, 由0.19 ppt/年增大到0.38 ppt/年, 平均增长率约0.28 ppt/年。2022年南极4站六氟化硫年平均浓度为10.78 ppt, 较2021年平均浓度上升0.38 ppt, 达到历年最大升高幅度。

3.1.2 北极

(1) 二氧化碳和甲烷

从1984年到2022年, 北极大气中二氧化碳浓度呈逐年稳定上升的趋势(图3.4a), 增长率为1.94ppm/a, 总体与全球趋势一致, 但年平均浓度比全球平均值略高1.78ppm。2022年, 北极大气中二氧化碳年平均浓度达到了420.12ppm, 相比2021年, 平均浓度上升了2.36ppm。

同样, 从1984年到2022年, 北极大气中甲烷浓度呈逐年稳定上升的趋势(图3.4b), 增长率为5.35 ppb/年, 总体与全球趋势一致, 但年平均浓度比全球平均值高78.36 ppb。2022年,

北极大气中甲烷年平均浓度达到了2004.02 ppb，相比2021年，平均浓度上升了15.66 ppb。2022年我国瓦里关站CH₄年平均浓度为1979 ± 0.6ppb。

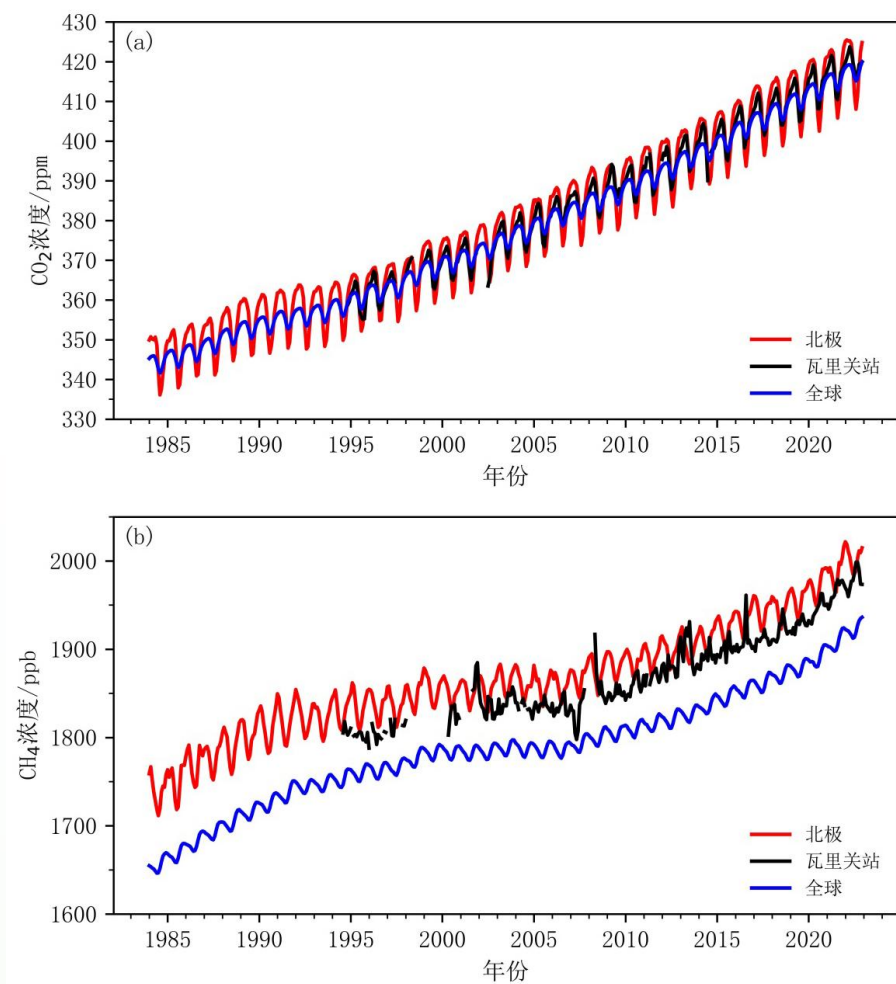


图 3.4 1984-2022年北极与全球二氧化碳浓度变化(a)和甲烷浓度变化(b)

(2) 氧化亚氮和六氟化硫

目前北极地区有8个全球大气本底站开展氧化亚氮观测，这8个站的平均氧化亚氮浓度由1997年的313.31 ppb升高至2022年的336.08 ppb，年增长率为0.43 - 1.40 ppb/年，平均增长率约0.88 ppb/年（图3.5a）。2022年北极氧化亚氮年平均浓度较2021年上升1.34 ppb。

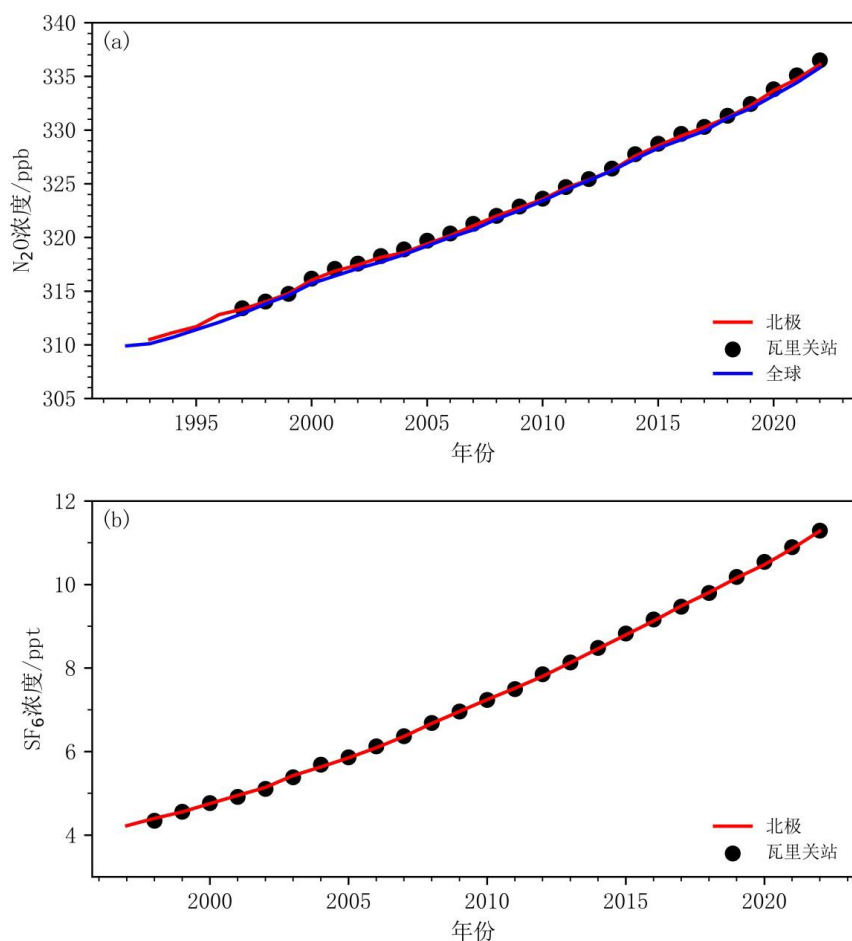


图3.5 北极地区(a)氧化亚氮(1992–2022年)和(b)六氟化硫(1997–2022年)平均浓度

北极地区进行六氟化硫观测的7个站点的平均浓度由1997年的4.22 ppt升高至2022年的11.28 ppt，增长了近2.6倍。年际升高幅度也呈逐年增大的趋势，由0.15 ppt/年增大到0.38 ppt/年，平均增长率约0.28 ppt/年（图3.5b）。2021年北极六氟化硫年平均浓度为11.28 ppt，较2021年平均浓度上升0.42 ppt，是历年升幅最大的一年。2022年我国瓦里关站SF₆年平均浓度为 11.24 ± 0.03 ppt。

3.2 臭氧总量

3.2.1 南极

与大多数年份相比，2023年臭氧洞的形成提前了一到两周且其生命周期异常地长久，8月中旬即开始形成明显的臭氧洞，9月中旬面积达到最大，9月21日达到当年单日最大面积，超过 2.6×10^7 km²（图3.6）。臭氧洞到10月开始缩小并最终接近历史平均水平，但在月末又再次扩大，直到12月初臭氧洞面积减小到相对较小规模，并在12月20日彻底关闭。

尽管国际社会通过《蒙特利尔议定书》及其相关措施，在减少臭氧层损耗物质 (ODSs)的排

放方面取得了重要进展，但南半球臭氧层的异常现象连续四年引起了全球的关注。从短期因子看，部分学者推测去年洪加-汤加火山的喷发，增加了平流层水汽，可能导致更多极地平流层云的形成，进而加速臭氧消耗。从长期因子看，1987年的禁令减缓了ODSs的排放，然而之前排放的ODSs仍旧在大气中存留并可能影响数十年。同时，全球变暖带来的层间交换减少引起的平流层冷却，可能也在一定程度上促进了近年来面积大且持久的臭氧洞形成。

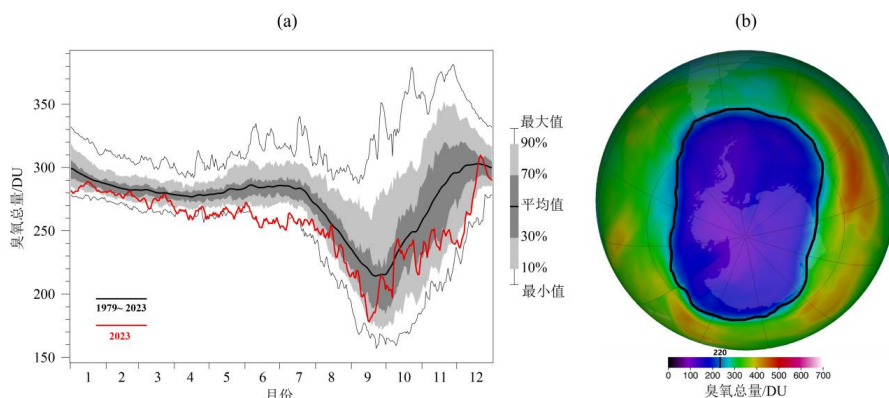


图3.6 (a) 2023年南极臭氧洞面积变化与1979年以来历史平均对比情况；
(b) 2023年9月21日南极臭氧洞空间分布，黑线为220 DU等值线

3.2.2 北极

2023年冬季至2024年春季期间的臭氧总量，平均值不仅显著高于历史平均水平，而且在2024年2月的短暂下降之后经历了一次迅速的上升（图3.7）。至3月中旬，臭氧浓度更是飙升至近乎创纪录的490 DU（Dobson Units）。3月份的北极平均臭氧总量达到了440 DU，这在历史排名中位列第9。春季北极平流层温度较高，3月份50 hPa的平均温度达到了221 K，排在历史第6，这一较高的极涡内温度不利于极地平流层云的形成，从而抑制了本年度大规模臭氧损耗现象的发生。2024年北极的臭氧量变化趋势与2023年相似。

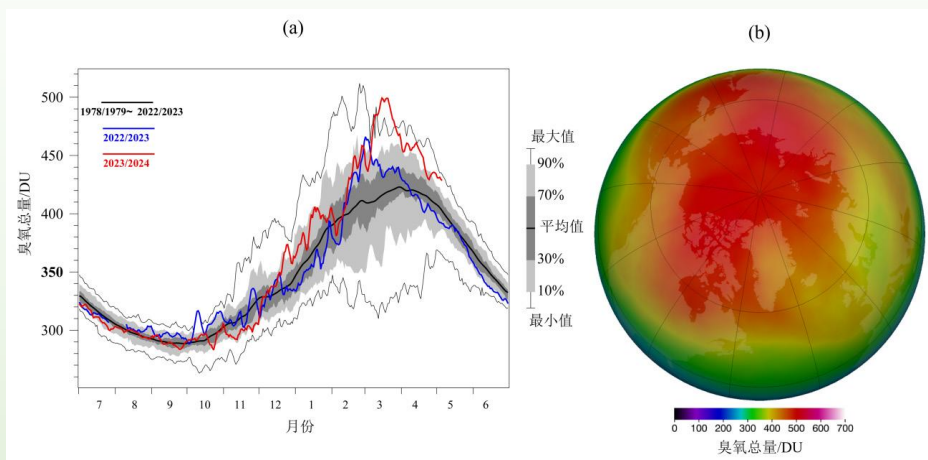


图 3.7 (a) 63°N以北臭氧总量平均值与1979年以来历史平均对比情况；
(b) 2023年3月北极臭氧总量空间分布

附录 I 主要数据来源

1. 国家极地科学数据中心（NAADC）气象观测产品
<https://datacenter.chinare.org.cn/data-center/dindex>
2. 中国第一代全球大气再分析产品(CMA-CR)
<http://idata.cma.idata/web/fact/toTechReport2>
3. 全球历史气候学网络（GHCN-D）逐日气象资料
<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datasets>
4. 全球地面逐日气象资料（GSOD）逐日气象资料
<https://registry.opendata.aws/noaa-gsod>
5. 英国南极局南极环境研究参考数据集
<https://www.bas.ac.uk/project/reader/#data>
6. 丹麦气象研究所格陵兰天气观测数据集
<http://research.dmi.dk/data/>
7. 美国雪冰数据中心（NSIDC）海冰指数数据
<https://nsidc.org/data/nsidc-0051/versions/2>
8. 中国风云三号极轨系列气象卫星微波成像仪（MWRI）数据集
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
9. 美国国家航空和航天局（NASA）基于SMMR-SSM/I-SSMIS系列传感器的PMW算法数据
<https://www.earthdata.nasa.gov/>
10. 中国海洋大学（OUC）基于FY-3B、FY-3D/MWRI数据集
<http://coas.ouc.edu.cn/pogoc/sjgx/list.html>
11. 世界温室气体数据中心（WDCGG）数据
https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions#content1
12. 美国航空航天局臭氧观测数据
<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

附录 II 术语

南极：南纬65° 以南的广大区域。

北极：北纬65° 以北的广大区域。

距平：某一变量与其多年平均值之间的差值，本报告中多年平均指1991 - 2020年。

再分析资料：用先进的、固定的资料同化系统和数值预报模式，将模式预报和历史观测资料融合，从而获取变量丰富、空间覆盖完整、时间均一稳定的长序列历史天气资料。在本报告中，再分析资料特指国家气象信息中心发布的第一代全球大气再分析数据CRA-40。

南极涛动：南极和南半球中纬度之间的气压场跷跷板变化现象，又称南半球环装模。南极涛动指数定义来自海平面气压在两个代表性纬度带40°S和70°S的纬圈平均值之间的差值，气压数据来自CRA-40再分析数据集。

北极涛动：北极和北半球中纬度之间的气压场跷跷板变化现象，又称北半球环装模。北极涛动指数定义来自海平面气压在两个代表性纬度带35°N和65°N的纬圈平均值之间的差值，气压数据来自CRA-40再分析数据集。

极涡：极地对流层和平流层的大尺度低压涡旋现象。

北极极涡指数：来自国家气候中心气候监测业务使用的北半球极涡指数。其中极涡面积指数定义为北半球500hPa高度场，0° -360° 区域内，极涡南界特征等高线以北所包围的面积。极涡强度指数定义为北半球0° -360° 区域内，500hPa等压面与极涡南界特征等高线所在的等高面之间的空气总质量。

海冰密集度：单位面积海区内海冰面积所占百分比。

海冰范围：海冰密集度大于15%的海冰覆盖面积。

海冰表面开始融化时间（MO）：积雪内持续存在自由水，冰雪交界处变得潮湿。

海冰表面开始冻结时间（FO）：新冰在开阔水域生长，裸露的或轻度积雪覆盖的冰面重新冻结。

温室气体：指大气中自然或人为产生的气体成分，能够吸收并释放地表、大气和云发出的长波辐射，该特性可导致温室效应。地球大气中的主要温室气体包括《京都议定书》规定的二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、氧化亚氮（N₂O）以及六氟化硫（SF₆）、氢氟碳化物（HFC）、全氟化碳（PFC）等气体。

ppm：干空气中每百万（10⁶）个气体分子所含的该种气体分子数。

ppb: 干空气中每十亿 (10^9) 个气体分子所含的该种气体分子数。

ppt: 干空气中每万亿 (10^{12}) 个气体分子所含的该种气体分子数。

北极温室气体观测站点: 科普特尼岛站 (俄罗斯, KOT)、提克西站 (俄罗斯, TIK)、阿勒特站 (加拿大, ALT)、莫尔德湾站 (加拿大, MBC)、巴罗站 (美国, BRW)、贝奇科站 (加拿大, BCK)、剑桥湾站 (加拿大, CBY)、伊努维克站 (加拿大, INU)、齐柏林山站 (挪威, ZEP)、顶峰站 (丹麦, SUM)、捷里别尔卡站 (俄罗斯, TER)、帕拉斯站 (芬兰, PAL)、斯托尔霍夫迪站 (冰岛, ICE)、勒威克站 (英国, SIS)、查理号海洋站 (美国, STC)。

南极温室气体观测站点: 世宗大王站 (韩国, KSG)、尤巴尼站 (阿根廷, JBN)、帕默尔站 (美国, PSA)、凯西站 (澳大利亚, CYA)、莫森站 (澳大利亚, MAA)、昭和站 (日本, SYO)、哈雷站 (英国, HBA)、到达高地站 (新西兰, ARH)、麦克默多站 (美国, MCM)、南极极点站 (美国, SPO)、中山站 (中国, ZOS)。

多布森单位 (DU): 测量地球表面上方一个垂直柱内的臭氧总量(总臭氧柱)的一个单位。多布森单位数是以 10^{-5} 米为单位的臭氧厚度, 即: 在压力为1013 hPa、温度为 0°C 时, 如果被压缩在密度均衡的一层内臭氧柱所占据的体积。一个DU单位相当于每平方米有 2.69×10^{20} 个臭氧分子的臭氧柱体积。尽管差异很大, 地球的大气中一个臭氧柱数量典型值为300DU。

臭氧层损耗物质 (ODSs): 工业生产和使用的氯氟碳化合物、哈龙等物质, 当它们被释放到大气并上升到平流层后, 受到紫外线的照射, 分解出 $\text{Cl} \cdot$ 自由基或 $\text{Br} \cdot$ 自由基, 这些自由基很快地与臭氧进行连锁反应, 使臭氧层被破坏。这些破坏大气臭氧层的物质被称为“消耗臭氧层物质”, 英文名称为 Ozone-Depleting Substances, 简称 ODSs。

臭氧层: 平流层存在一个臭氧浓度最高的气层, 称为臭氧层。臭氧层的范围大约从12公里延伸至40公里, 约在20至25公里处达到最高。正常大气中臭氧的柱浓度约为300DU在人为氯化物、溴化物排放与该地区特定的气象条件共同作用下, 在南半球的春季, 南极区域上空的臭氧层都出现非常强的损耗, 当臭氧柱浓度低于220 DU时, 定义为臭氧洞。

极地气候变化年报

STATE OF POLAR CLIMATE

2023

