

极地气候变化年报

STATE OF POLAR CLIMATE

2024



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

(2024)

中国气象科学研究院

CHINESE ACADEMY OF METEOROLOGICAL SCIENCES

2025年3月

《极地气候变化年报（2024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）

于亦宁 卞林根 王 赛 田 彪 朱孔驹

任诗鹤 苏 洁 张文千 张东启 张 雷

林 祥 赵守栋 姜智娜

主编单位：中国气象科学研究院

参编单位：中国海洋大学

国家海洋环境预报中心

摘要

2024 年南极大陆气温较常年略偏高，东 - 西区域差异大、季节差异明显。1979 - 2024 年，南极陆地升温速率为 $0.20^{\circ}\text{C}/10$ 年，略高于全球平均水平；2024 年南极大陆年平均气温为 -31.79°C ，较常年偏高 0.05°C ；毛德皇后地发生持续性暖事件，而威尔克斯地则持续偏冷，其中昭和站冬季气温创历史新高，诺迈伊尔站年气温达历史第三高；内陆冰穹和维多利亚地呈现“夏冷冬暖”的模式，东方站冬季均温偏高 4.34°C ，刷新历史记录。

北极地区持续增温，加拿大北极地区持续极端偏暖。北极增温是同期全球升温速率($0.18^{\circ}\text{C}/10$ 年)的 2.9 倍。2024 年北极地区年均气温为 -6.89°C ，较常年高 0.65°C ；春、夏、秋、冬四个季节的平均气温为 -10.33°C 、 6.51°C 、 -4.99°C 和 -19.37°C ，秋冬异常偏暖；阿拉斯加和加拿大北极地区继续成为大幅偏暖中心区，戴德霍斯站在 8 月 6 日达到 31.7°C ，依努维克站在 8 月 7 日达到 34.8°C 。2024 年 8 月北冰洋整体海表温度较常年偏高，但区域温差悬殊；巴伦支海创历史新高，楚科奇海则创下历史新低。

2024 年南极海冰维持低位，北极海冰持续偏少。2024 年 2 月 20 日，南极海冰范围达到年度最低 $1.97 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，是继 2023 和 2022 后的第三最低记录；年累积和年最大值海冰范围皆略高于 2023 年的最低记录，位居第二小值；特别是 2024 年 11 月的海冰范围创 46 年间该月份的最低纪录。北极海冰范围 2024 年的最小值位列历史第七低值，为 $4.21 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；年累积海冰范围为第六低；2024 年 12 月的海冰范围创 46 年间该月份的最低纪录。

2024 年南极臭氧洞的发展情况相对平稳，北极臭氧总量异常增多。相较于 2019-2023 年南极臭氧洞面积异常偏大且持久的现象有所缓和。9 月 28 日，臭氧洞达到单日最大覆盖面积，约为 $2.2 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，小于 2023 年约

$2.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，最大覆盖面积及开闭合时间更接近 1979—2021 年的平均水平。北极地区则因冬季大尺度行星波上传削弱极涡，导致臭氧异常增多，臭氧柱浓度在 2024 年 3 月创历史新高，达到 477 DU，比 1979—2023 年的平均值高 14.5%。

极地地区大气中温室气体浓度与全球变化趋势一致，均呈稳定的上升趋势。2023 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 416.39 ppm、1870.60 ppb、335.70 ppb 和 11.15 ppt；2023 年北极大气二氧化碳、甲烷、氧化亚氮和六氟化硫的年平均浓度分别为 422.06 ppm、2013.75 ppb、337.03 ppb 和 11.69 ppt，相对于 2022 年，极地地区大气主要温室气体平均浓度均有所升高。

目 录

第一章 温度和气压	1
1.1 气温.....	1
1.1.1 南极.....	1
1.1.2 北极.....	5
1.2 海温.....	8
1.2.1 南大洋.....	8
1.2.2 北冰洋.....	9
1.3 气压.....	11
1.3.1 南极.....	11
1.3.2 北极.....	12
第二章 海冰	15
2.1 海冰范围.....	15
2.1.1 南极.....	15
2.1.2 北极.....	16
2.2 海冰密集度.....	17
2.2.1 南极.....	17
2.2.2 北极.....	18
2.3 海冰融化期.....	19
第三章 大气成分	22
3.1 主要温室气体.....	22
3.1.1 南极.....	22
3.1.2 北极.....	24
3.2 痕量气体.....	26
3.2.1 南极.....	27
3.2.2 北极.....	27
3.3 臭氧总量.....	28
3.2.1 南极臭氧洞.....	28
3.2.2 北极臭氧总量.....	28
附录 I 主要数据来源	30
附录 II 术语	31

第一章 温度和气压

1.1 气温

1.1.1 南极

本节分析使用南极多个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（CMA-RA），其中，长城站和中山站的气温观测数据由中国气象科学研究院提供，其它站点数据来源于英国南极办公室编制的南极环境研究参考数据集（Met-READER）。所有数据均经过严格的质量控制，以确保分析的准确性和可靠性。分析结果显示，2024年南极大陆的年平均气温为 -31.79°C ，较常年平均值略微偏高 0.05°C 。从季节分布来看，在南半球夏季（12月至次年2月）、秋季（3月至5月）、冬季（6月至8月）和春季（9月至11月），南极大陆平均气温分别为 -22.65°C 、 -35.67°C 、 -36.64°C 和 -33.00°C 。值得注意的是，2024年南极大陆在夏季、秋季和春季较常年偏冷，气温分别低 1.04°C 、 0.57°C 和 0.60°C ；而冬季则呈现暖异常，增温幅度达 1.60°C 。

与2023年相似，2024年南极大陆在科茨地和毛德皇后地较往年偏暖，而在威尔克斯地则偏冷（图1.1）。其中，位于毛德皇后地的诺迈伊尔站年平均气温较常年偏高 1.43°C ，为历史第三高（图1.1-27）。此外，毛德皇后地冬季气温也异常偏高，昭和站气温偏高 3.28°C ，创历史最高记录（图1.1-25）。相比之下，威尔克斯地气温在2024年整体偏低，主要归因于秋季气温较常年异常偏低。其中，迪蒙·迪维尔站秋季气温偏低 2.19°C ，达到历史第二低（图1.1-17）。

对于其它地区，虽然年平均气温异常较为微弱，却呈现出较强的季节性变化差异。例如，维多利亚地和南极内陆地区气温表现为“夏冷冬暖”的特征：夏季两地气温较常年偏低，其中玛丽莲站和东方站的夏季气温分别偏低 2.84°C 和 2.72°C ，均创下历史最低夏季记录（图1.1-12和20）；而冬季两地气温偏高，东方站冬季气温偏高 4.34°C ，创历史最高记录，阿蒙森-斯科特站和曼努埃拉站分别偏高 4.39°C 和 2.18°C ，均达到历史第二高（图1.1-20、21和16）。南极半岛年平均气温与常年基本持平，但春季半岛北部气温较常年偏低，其中奥伊金斯站春季气温偏低 1.90°C ，达到历史第三低（图1.1-4）。

1979—2024年期间，全球气温呈现显著的上升趋势，升温速率为 $0.18^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ （图1.2）。在这一背景下，南极地区的变暖趋势主要集中于南极陆地（冰盖），其升温速率略高于全球平均水平，达到 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ （图1.2）。观测数据揭示，南极陆地气温的季节性变化差异显著：在南半球夏季和秋季，气温呈现显著的上升趋势，增温速率分别为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 和 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ （ $p < 0.05$ ）；而在春季和冬季，升温趋势相对较弱，分别为 $0.14^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 和 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ ，且未通过

显著性检验 ($p > 0.1$)。

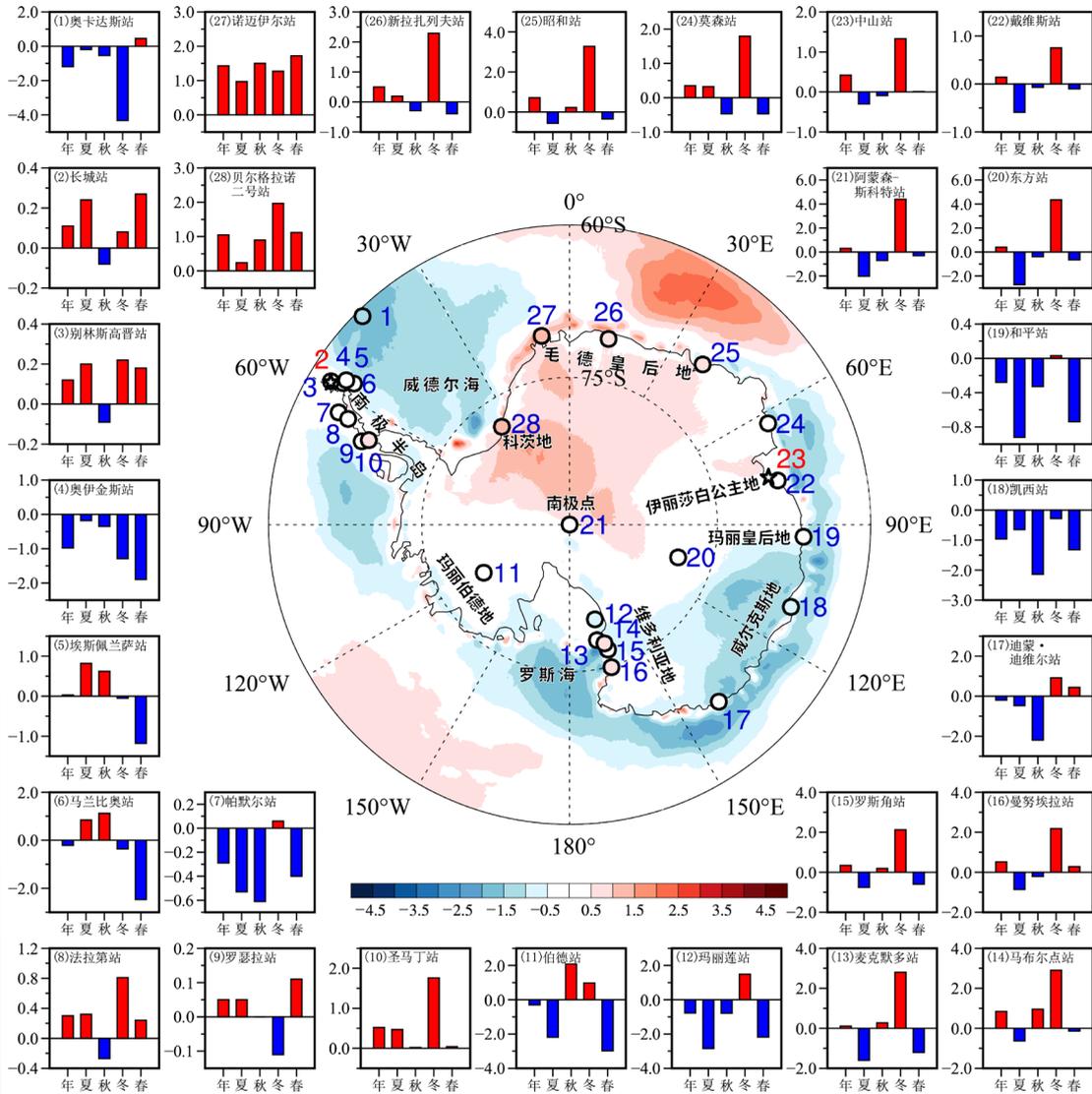


图1.1 2024年南极年平均气温距平空间分布及各站点年平均和季节平均气温距平 (单位: °C)

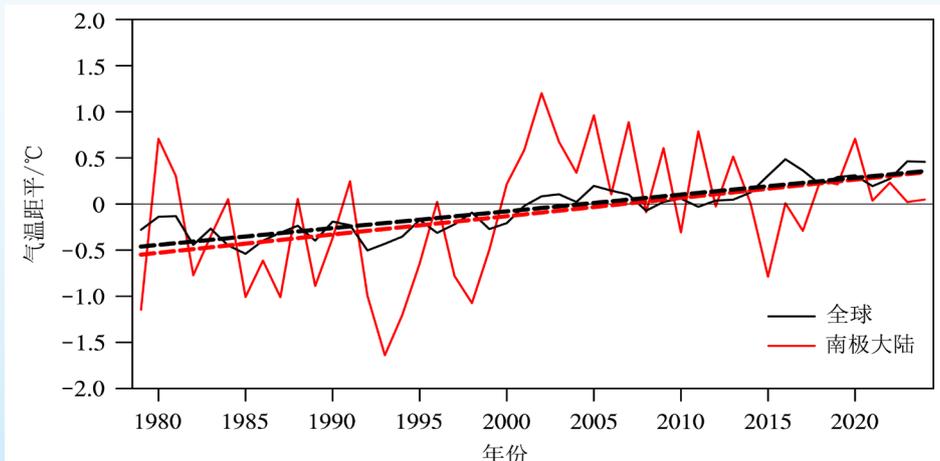


图1.2 1979—2024年南极大陆和全球年平均气温距平时间序列 (实线) 及其趋势 (虚线)

南极大陆整体气温趋势与全球气温变化相当，但部分地区的增温趋势明显高于全球平均水平。其中，南极半岛是全球气温增暖速率最快的地区之一，法拉第站的气温以每10年 0.45°C 的速度升高（1947–2024年，图1.3a红线）。此外，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，但升温速度相对较缓，分别为每10年 0.19°C （1904–2024年，图1.3a黑线）、 0.20°C （1957–2024年，图1.3a蓝线）、 0.25°C （1957–2024年，图1.3b红线）、 0.30°C （1982–2024年，图1.3b蓝线）和 0.19°C （1958–2024年，图1.3b黑线）。相比之下，南极大陆其它地区的年平均气温变化则不明显。

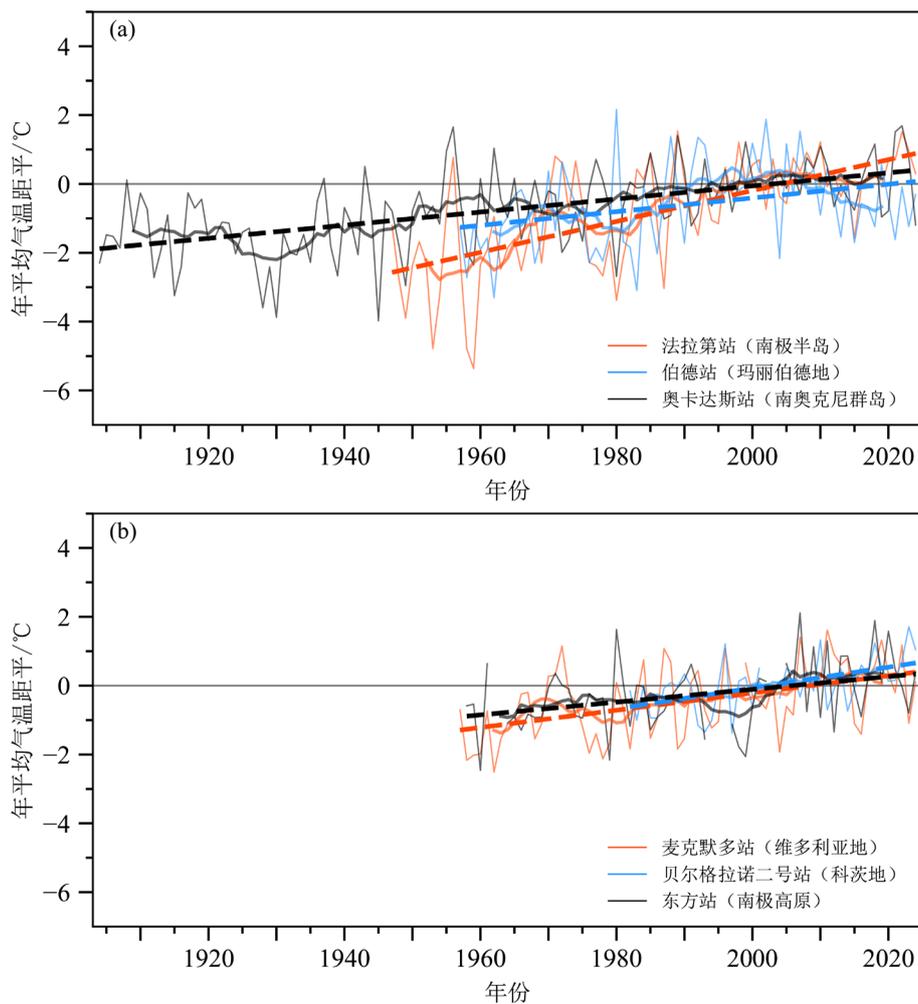


图1.3 西南极(a)和东南极(b)增暖地区各站点年平均气温距平时间序列(细实线),其对应的滑动平均值(粗实线)和趋势(虚线)

极端事件：2024年7-8月南极出现罕见的持续性暖事件，从毛德皇后地开始，8月扩展到整个南极大陆，大部分区域月平均气温高于气候均值5℃以上(图(a)(b))。阿蒙森-斯科特站（南极点）在7-8月间暖异常日数达46日，1957年有记录以来最多。东南极大陆8月6个站气温创新高。

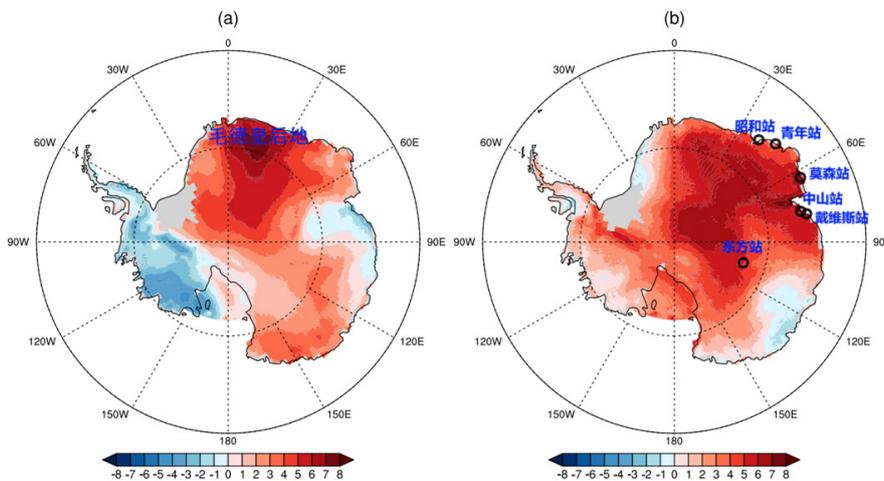


图 (a) 2024年7月南极大陆月平均气温距平; (b) 2024年8月南极大陆月平均气温距平

7月下旬，南极平流层发生爆发性增温，扰乱了极地涡旋，南极内陆的冷空气外泄到沿海，导致莫森站上空出现罕见的“珠母云”，即彩虹状极地平流层云。



图 2024年7月26-29日间南极莫森站上空平流层云
(图片摘自<https://www.antarctica.gov.au/news/2024/rare-iridescent-clouds-appear-over-mawson/>)

1.1.2 北极

本小节基于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，结合CMA-RA再分析数据，对北极地区的气温变化进行了系统分析，所有数据均经过严格的质量控制。结果显示，2024年北极地区年平均气温为 -6.89°C ，较常年偏高 0.65°C 。从季节分布来看，北半球冬季（12月至次年2月）、春季（3-5月）、夏季（6-8月）和秋季（9-11月）的平均气温分别为 -19.37°C 、 -10.33°C 、 6.51°C 和 -4.99°C 。值得注意的是，2024年北极地区在冬季、夏季和秋季均表现出偏暖异常，气温分别较常年偏高 0.51°C 、 0.23°C 和 1.39°C ；而春季则出现冷异常，较常年偏低 0.11°C 。

2024年北极地区增暖最为剧烈的事件发生于加拿大北极地区，增暖幅度超过 2°C （图1.4）。在北极的观测站点中，增温幅度最大站点为加拿大剑桥湾，年平均气温较常年偏高 3.30°C （图1.4-4），创下历史新高。莫里斯·杰塞普角和特罗姆瑟的年平均气温也均为历史最高（图1.4-

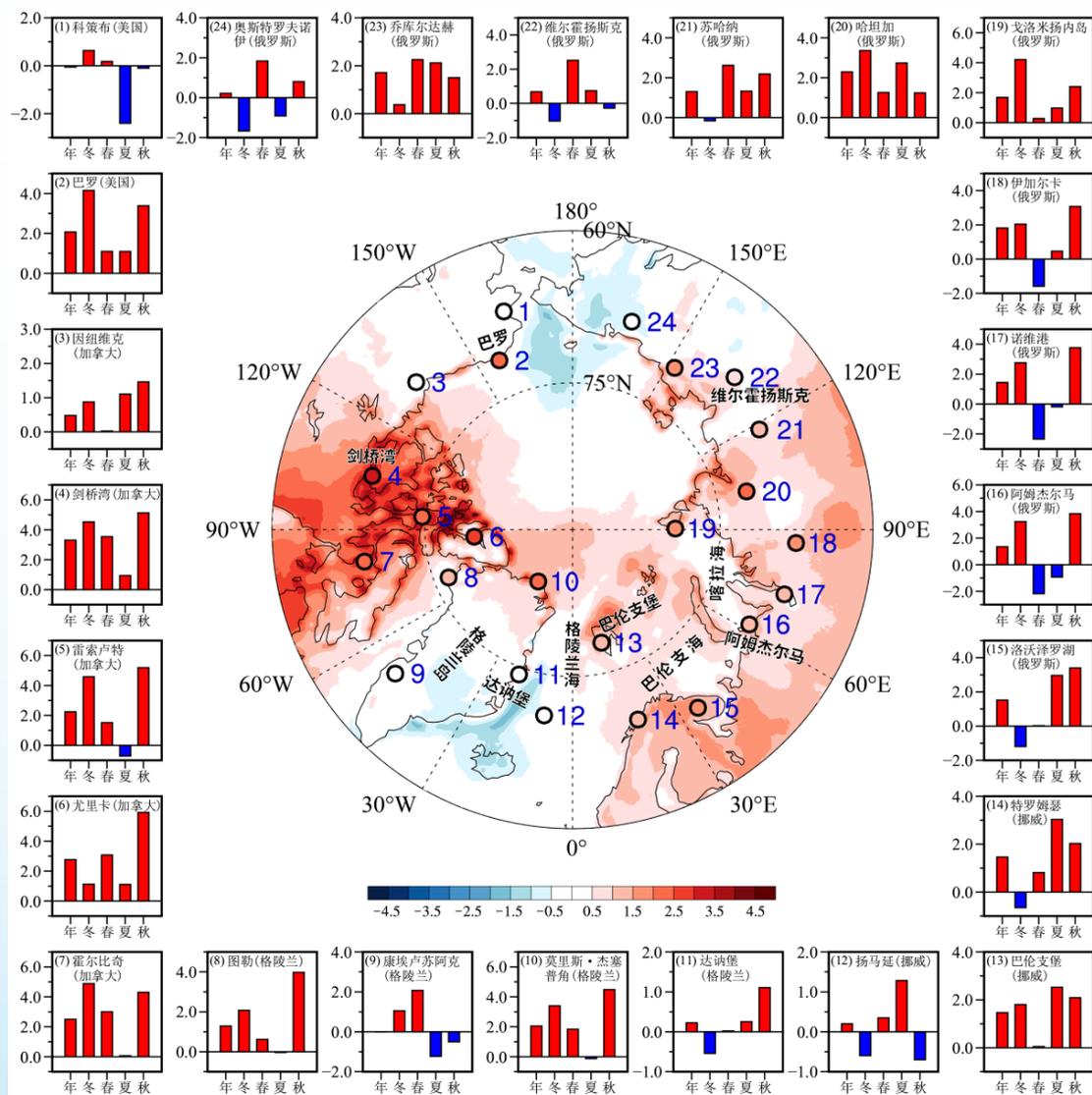


图 1.4 2024年北极年平均气温距平空间分布及各站点年平均和季节平均气温距平 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

10和14)，而雷索卢特和霍尔比奇年平均气温则分别为历史第二高（图1.4-5和7）。所有站点中，仅有美国科策布和格陵兰康埃卢苏阿克偏冷，年平均气温分别较常年偏低 0.05℃和 0.01℃（图1.4-1和9）。

与2023年稍有差异，从季节变化来看，冬季的暖异常主要集中在加拿大北极地区，其中霍尔比奇为全北极冬季增温幅度最大的站，冬季气温较常年偏高4.88℃（图1.4-7）。相较于冬季，春季加拿大北极地区的暖异常有所减弱，剑桥湾为全北极春季增温幅度最强的站，其气温较常年偏高3.54℃，创下历史新高（图1.4-4）。西西伯利亚地区则出现大范围冷异常，其中诺维港为全北极春季降温幅度最大的站，气温较常年偏低2.33℃（图1.4-17）。夏季，北欧地区出现强烈的暖异常，其中巴伦支堡、特罗姆瑟、洛沃泽罗湖和哈坦加四站夏季气温较常年分别偏高2.52℃、3.03℃、2.96℃和2.74℃（图1.4-13、14、15和20），均达到历史最高。秋季，加拿大北极地区和格陵兰北部出现了大范围的强烈暖异常，剑桥湾、雷索卢特、尤里卡、霍尔比奇、图勒和莫里斯·杰塞普角的秋季气温较常年均偏高4℃以上，尤里卡的秋季气温更是偏高5.92℃（图1.4-4、5、6、7、8和10）。除了霍尔比奇外，这些站点的秋季气温均创下历史最高，而霍尔比奇的秋季气温也达到历史第二高。此外，北欧地区和西西伯利亚也出现了强烈的暖异常，其中洛沃泽罗湖和阿姆杰尔马的秋季气温均为历史最高（图1.4-15和16），而诺维港的秋季气温则为历史第二高（图1.4-17）。

在全球变暖背景下，北极地区年平均气温在1979—2024年期间呈现快速上升趋势（图1.5），升温速率达0.52℃/10年，是全球平均升温速率的2.9倍，表明北极对全球变暖具有高度敏感性。此外，北极的显著增暖在不同季节均有所体现，其中秋季和冬季的增温速率尤为突出，分别为0.74℃/10年和0.54℃/10年，而夏季增温幅度相对较小，为0.33℃/10年。

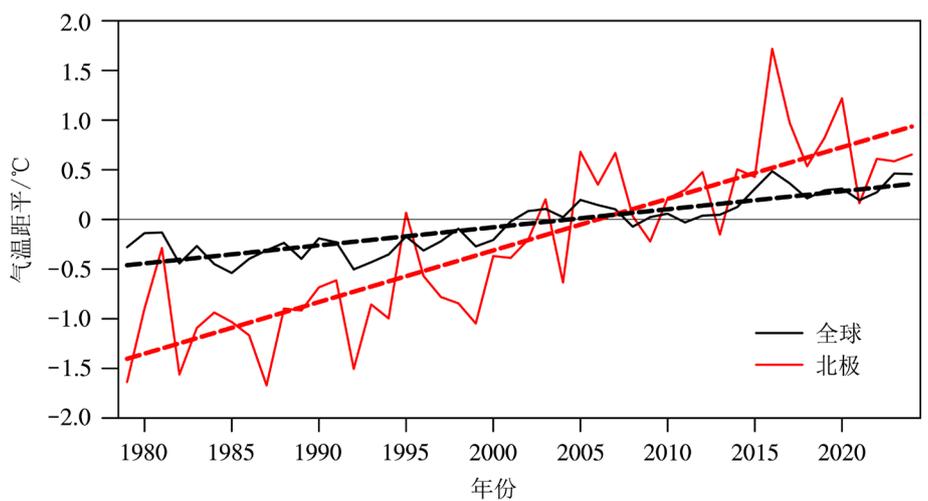


图1.5 1979—2024年北极和全球年平均气温距平时间序列(实线)及其趋势(虚线)

北极地区的快速增暖现象在北冰洋区域表现得尤为显著，而陆地地区的增暖速度虽然相对略缓，但仍显著高于全球平均升温速率。自有观测记录以来，北极地区所有站点均呈现出明显的升温趋势，且自1980年代起，升温速率进一步加快（图1.6）。1981年至2024年间，阿拉斯加的

巴罗站升温速率最快，每10年升高 1.08°C ；位于巴伦支-喀拉海沿岸的巴伦支堡和阿姆杰尔马站升温速率紧随其后，每10年分别升高 0.98°C 和 0.88°C 。相比之下，剑桥湾、维尔霍扬斯克和达纳堡的升温速率稍低，每10年分别升高 0.65°C 、 0.51°C 和 0.44°C 。

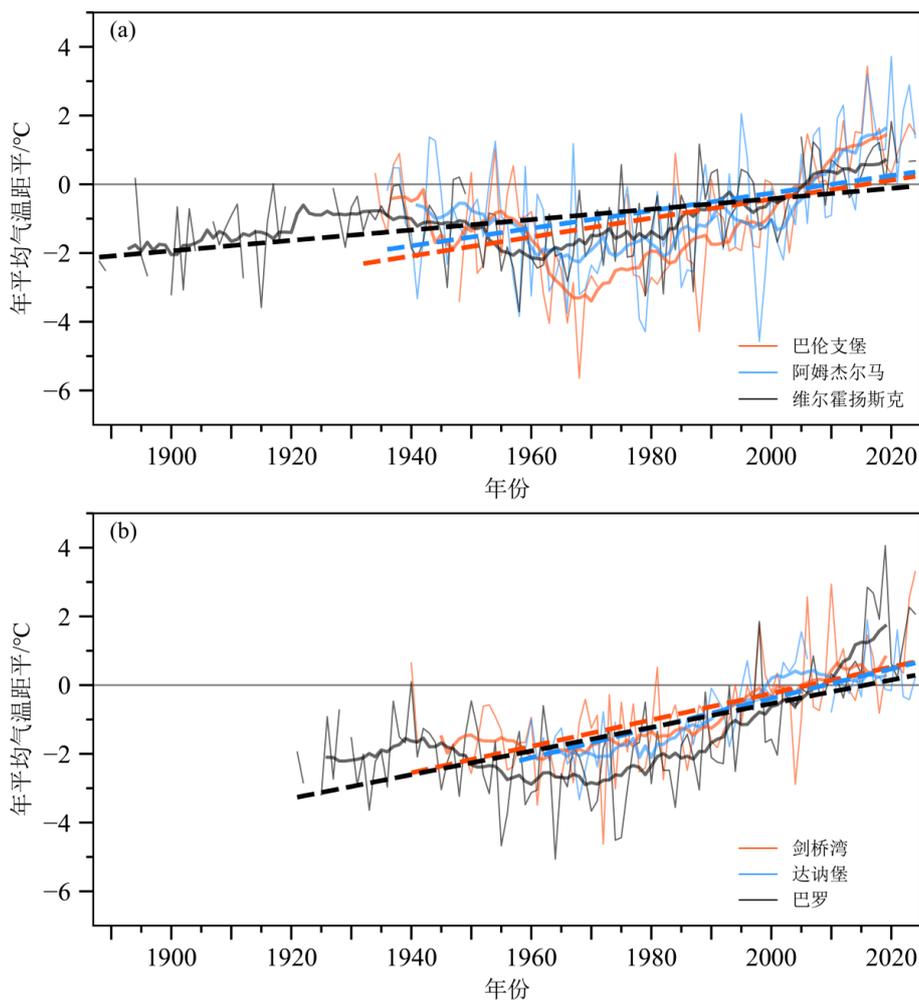


图 1.6 北极欧亚(a)和北美(b)部分增暖地区各站点年平均气温距平时间序列(细实线), 其对应的滑动平均值(粗实线)和趋势(虚线)

极端事件：2024年夏季为有记录以来第3热，阿拉斯加和加拿大北极地区多个站点创日最高气温的新高，如戴德霍斯站在8月6日达到31.7℃和依努维克站在8月7日达到34.8℃。2024年夏季是北极有史以来最湿润的夏季，60°N以北区域的夏季降水创下历史最大纪录。

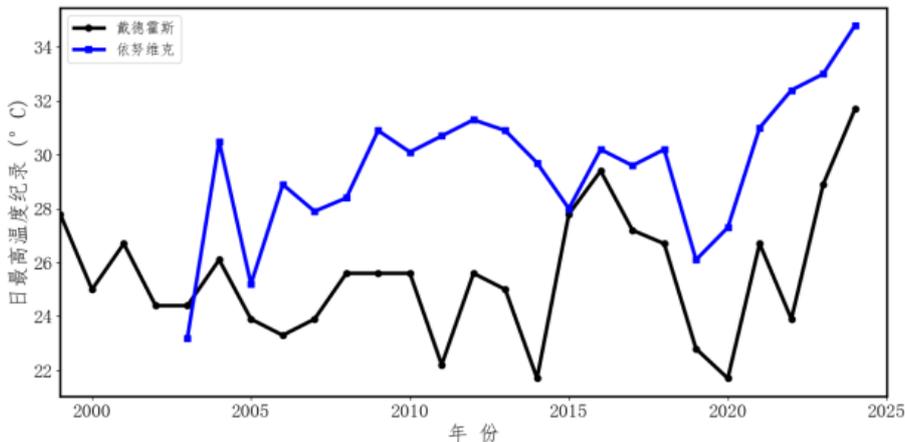


图 1999-2024年间戴德霍斯站和伊努维克站日最高气温纪录的逐年变化

1.2 海温

本节选取英国气象局发布的 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) 全球高分辨率海表温度和海冰覆盖数据集，以 1991 - 2020 年的气候平均值作为基准分析海表温度距平变化。

1.2.1 南大洋

2024年3月，南极大陆沿岸区域的海冰几乎完全消融，仅威德尔海和罗斯海部分海域仍有残留。与常年相比，南大洋海表温度异常主要集中在太平洋扇区：西南太平洋（180°-120°E）和东南太平洋（120°W-60°W）表现为冷异常，而太平洋中部（120°W-180°）则为暖异常，整体呈现显著的偶极子分布。相较于2023年同期，2024年3月太平洋扇区的海表温度异常同样表现为偶极子形态，东部和西部为冷异常，中部为暖异常，且异常强度和范围较常年更为突出。其中，东南太平洋的冷异常向东北延伸至大西洋扇区，而印度洋扇区则整体呈现偏暖趋势。

2024年9月，南大洋海冰覆盖范围扩展至60°S附近。除大西洋西南部外，海冰外缘线附近的海表温度较常年整体表现为暖异常。相较于2023年同期，2024年9月的海表温度分布呈现出与3月相似的偶极子形态：大西洋扇区和西南太平洋为冷异常，而其它区域则为暖异常。

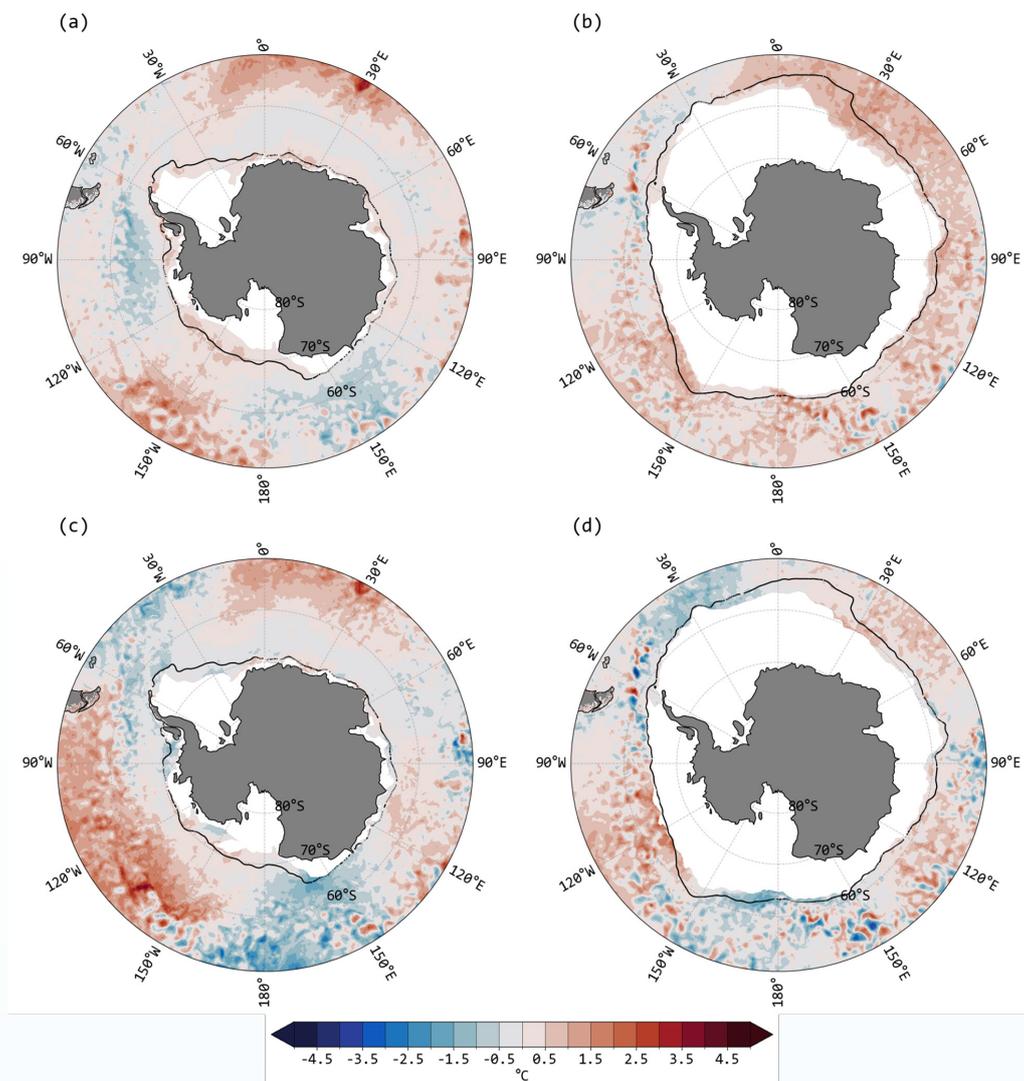


图1.7 2024年3月和9月南大洋海表温度距平分布

(a) 2024年3月南大洋海表温度距平(°C); (b) 2024年9月南大洋海表温度距平(°C); (c) 2024年3月相对于2023年3月的南大洋海表温度异常(°C); (d) 2024年9月相对于2023年9月的南大洋海表温度异常(°C)。

所有图中, 白色区域和黑色实线分别表示对应月份的平均海冰覆盖范围和海冰边缘线气候态平均位置

1.2.2 北冰洋

2024年3月, 海冰覆盖广泛, 仅在北大西洋暖流影响的区域如挪威海、巴伦支海及斯瓦尔巴群岛附近, 存在少量开放水域, 北冰洋海表温度整体较低, 大部分区域接近海水冰结点。相较于常年, 2024年3月北冰洋海表温度整体偏暖。与2023年同期相比, 北冰洋海表温度异常表现出区域性差异: 挪威海为暖异常, 而巴伦支海则主要呈现冷异常。

2024年9月, 北冰洋海表温度较常年整体偏暖, 仅在楚科奇海和格陵兰南部沿岸海域表现为冷异常, 且楚科奇海的冷异常向南延伸至白令海。与2023年同期相比, 2024年9月海表温度整体偏低, 异常分布呈现显著的区域性差异: 暖异常主要集中在拉普捷夫海北部、波弗特海北部和巴

伦支海，冷异常则主要分布于楚科奇海、白令海、波弗特海南部和喀拉海。

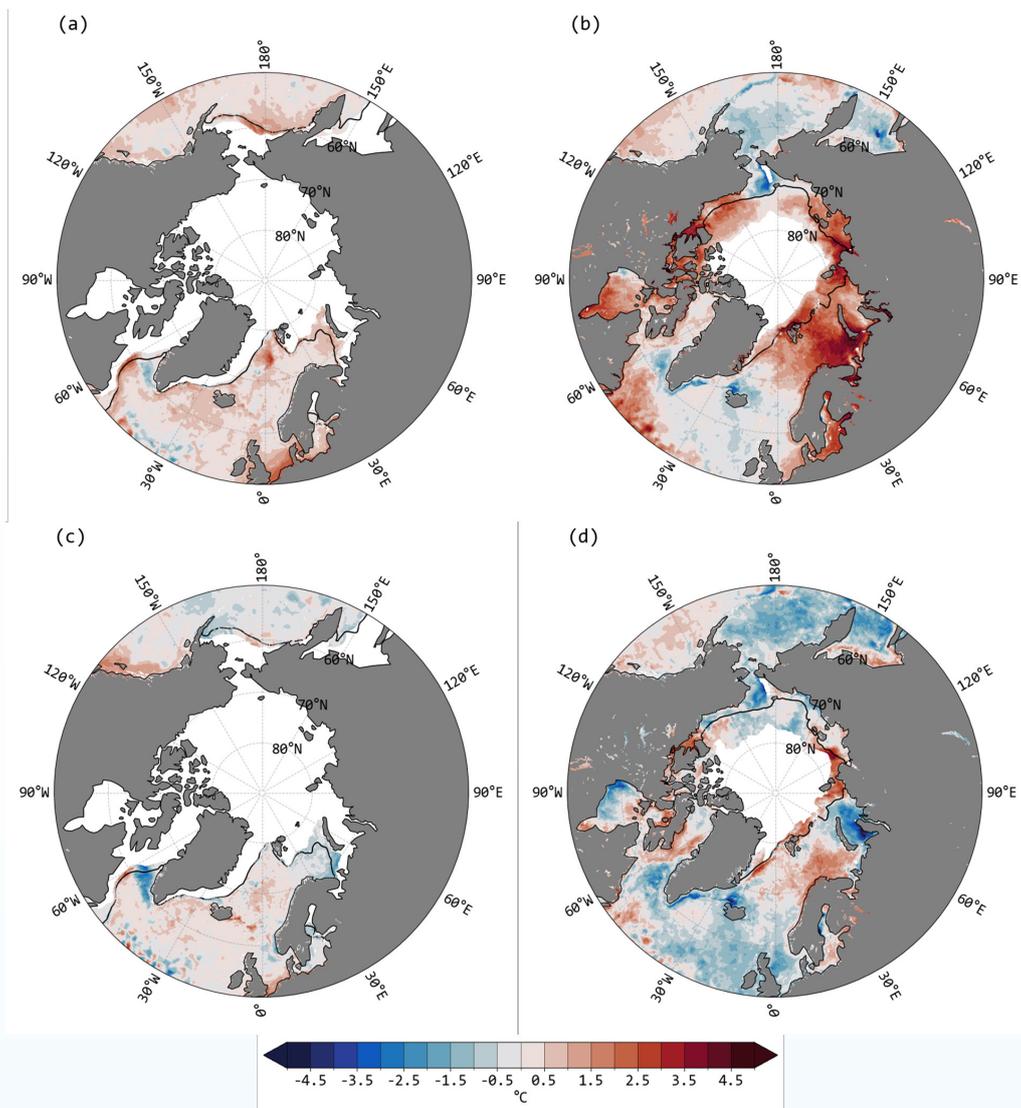


图 1.8 2024年3月和9月北冰洋海表温度距平分布

(a) 2024年3月北冰洋海表温度距平(°C)；(b) 2024年9月北冰洋海表温度距平(°C)；(c) 2024年3月相对于2023年3月的北冰洋海表温度异常(°C)；(d) 2024年9月相对于2023年9月的北冰洋海表温度异常(°C)。

所有图中，白色区域和黑色实线分别表示对应月份的平均海冰覆盖范围和海冰边缘线气候态平均位置

极端事件：2024年8月，北冰洋全区平均海表温度较气候态平均偏高约 0.6°C ，但边缘海间的异常分布差异显著：巴伦支海当月平均海表温度达到历史最高值，较气候态偏高近 3°C ；与此相反，楚科奇海近年持续偏冷，其2024年8月平均海表温度更是创下历史最低纪录，较气候态平均低超 2°C 。

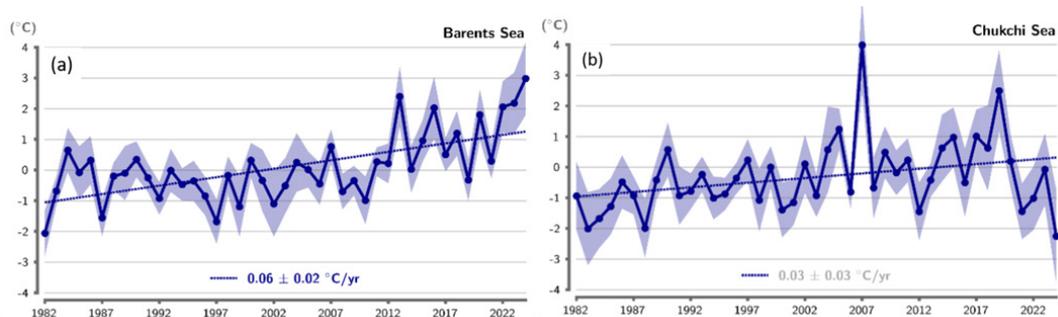


图 1982–2024年期间，每年8月各区域海表温度异常值(单位： $^{\circ}\text{C}$)相对于1991–2020年8月均值的空间平均结果：(a) 巴伦支海，(b) 楚科奇海。虚线表示1982–2024年海表温度异常的线性趋势，图例中的数字注明以 $^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 为单位的趋势值(含95%置信区间；无统计学显著性的趋势以灰色标注)。蓝色阴影区域代表区域平均海表温度异常场的 ± 1 个标准差范围(引自Arctic Report Card 2024)

1.3 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2024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，涛动指数基于CMA-RA再分析数据计算。

1.3.1 南极

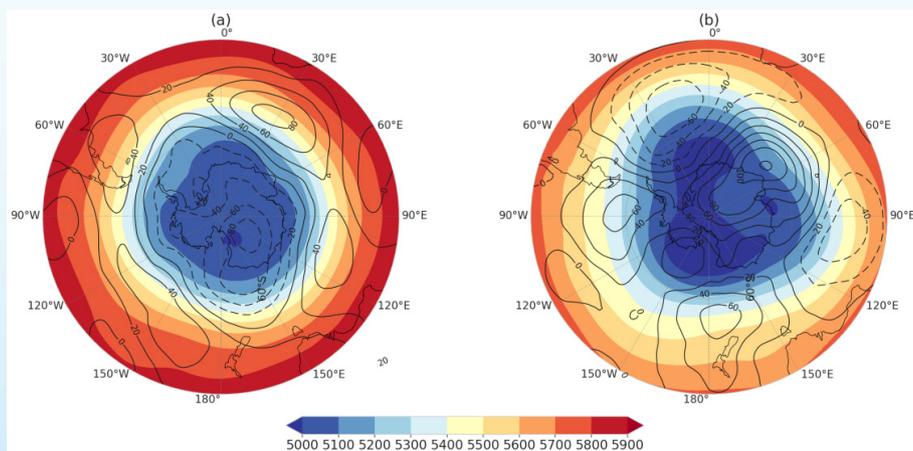


图1.9 2024年南极(a)夏季(12–2月)和(b)冬季(6–8月)的500hPa位势高度场(彩色图)及其距平场(等值线图)

2024年夏季南极大陆上空500hPa位势高度场由负距平主导（图1.9），环南极有多个正距平中心，是典型的南极涛动正位相特征。冬季南极大陆上空500hPa位势高度场由正距平主导，环南极是近似三波形态，其中东南极上空的位势高度场正异常最强，范围最大，延伸占据南极大陆主体区域，威德尔海附近的负异常也偏强，而罗斯冰架附近的位势高度场距平偏弱。

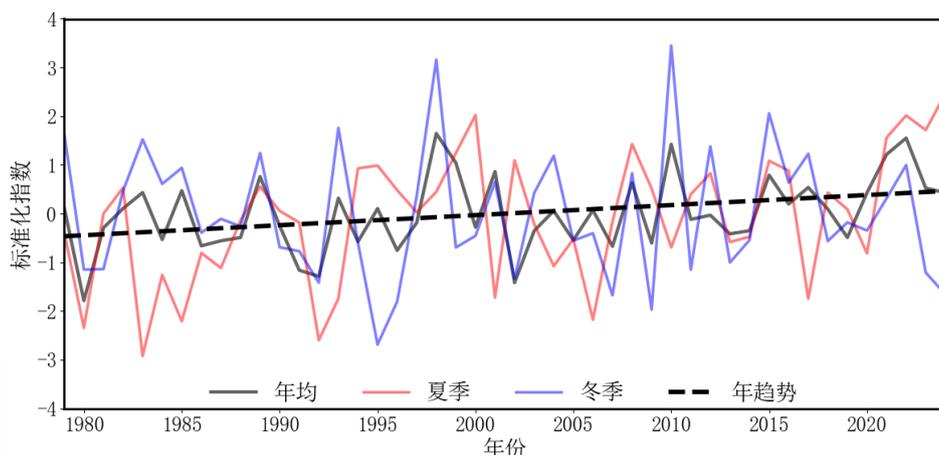


图1.10 1979–2024年南极涛动标准化指数

2023年南极涛动标准化指数在冬季和夏季分别为较强的负值和正值，2024年这种季节对比进一步增强（图1.10）。夏季指数值为2.47，创下1979年以来的新高，冬季指数值为-1.66，是1979年以来第5低值，南极涛动夏季的正位相和冬季的负位相在2024年都进一步增强。

1.3.2 北极

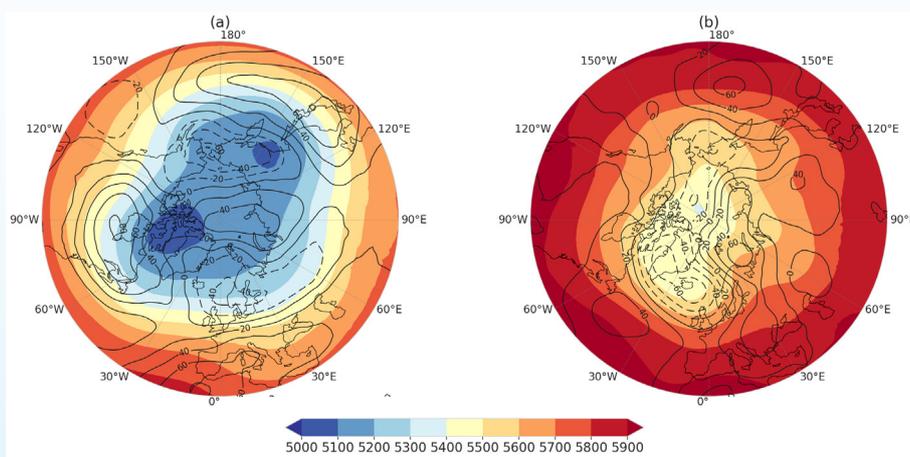


图1.11 2024年北极 (a) 冬季 (12–2月) 和 (b) 夏季 (6–8月) 的500hPa位势高度场(彩色图)及其距平场 (等值线图)

如图1.11所示，2024年北半球冬季，北极上空500hPa高度场自北大西洋至白令海峡沿线有负-正-负三个异常中心，正中心在北极点附近，北极中心低压偏弱。北半球夏季，500hPa位势高度场负异常占据北冰洋多数区域，中心位于冰岛附近，但欧亚大陆一侧为正异常。

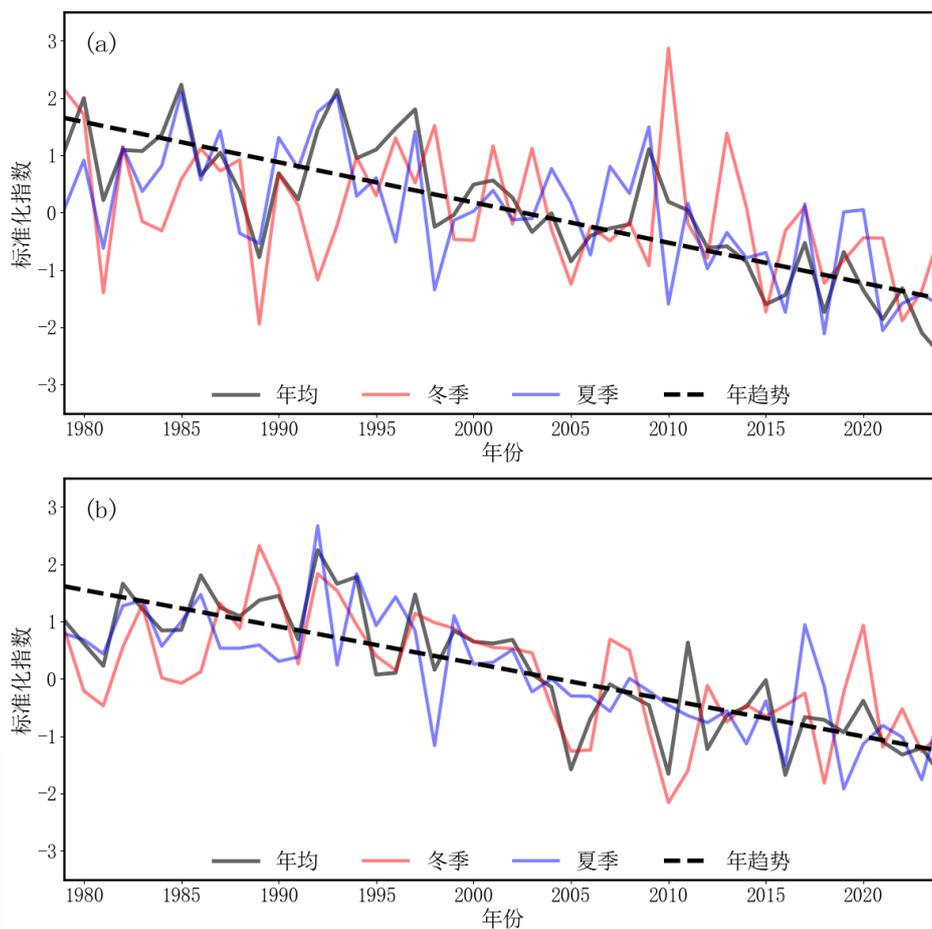


图1.12 1979–2024年间(a)北半球极涡面积标准化指数和(b)北半球极涡强度标准化指数

如图1.12所示，2024年北半球极涡面积标准化指数冬季为-0.292，夏季为-1.640，年均均为-2.487。相对于2023年，冬季明显增大，夏季变化不大，年均指数继2023年前低值-2.096之后，再创新低。2024年北半球极涡强度标准化指数冬季为-0.941，夏季为-0.508，年均均为-1.691。相对于2023年，冬夏季都略有增加，年均指数则比2023年的-1.206减少了0.485，创下1979年以来的新低，但该次新低值与2010年和2016年的两次前低相差不大。值得一提的是，2024年冬夏和年均的极涡面积/强度变化，没有改变1979年以来北半球极涡面积/强度指数的负趋势。

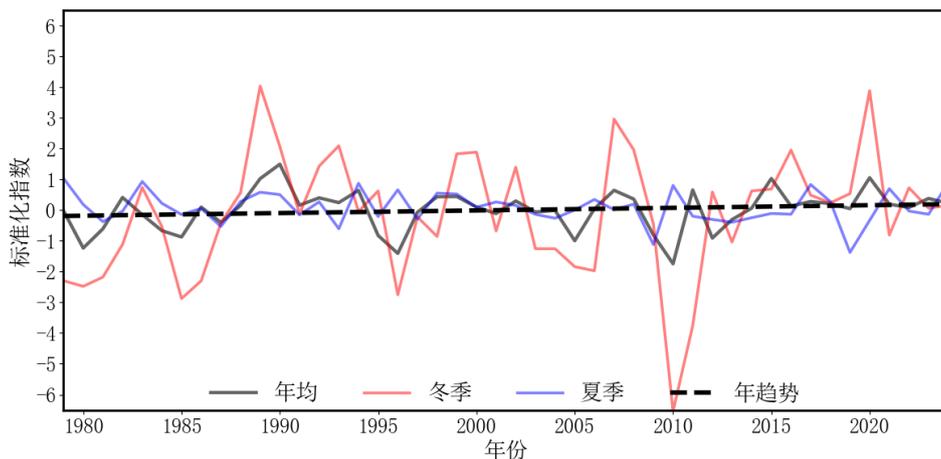


图1.13 1979–2024年北极涛动标准化指数, 数据来自CMA-RA

2024年北极涛动标准化指数（图1.13）冬季为0.15，夏季为0.89，年均均为0.22，其中夏季是偏强的正距平。

第二章 海冰

本章所用资料为美国国家雪冰数据中心（NSIDC）1979 - 2024年的海冰范围产品，气候态定义为1991 - 2020年平均。此外，还用到中山大学提供的基于我国风云系列卫星的海冰密集度产品，以及美国国家航空航天局（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

南极海冰范围呈现明显的季节变化特征（图2.1a）。每年3月至9月前后是南极海冰的结冰期，10月至次年2月为融冰期，全年海冰范围最小值通常出现在2月底至3月初。2024年2月20日南极海冰范围达到年度最低点，总面积为 $1.97 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，仅次于2022年（2月25日， $1.96 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）和2023年（2月21日， $1.77 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）的年度海冰范围最低记录，位于第三低值。2024年南极海冰范围年度最大值（ $17.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）仅次于2023年（ $16.99 \times 10^6 \text{ km}^2$ ），为历史第二低值。总的来看，2024年南极海冰范围异常偏低，年平均海冰范围仅次于2023年，位于第二低值。值得一提的是，11月南极海冰范围（ $14.19 \times 10^6 \text{ km}^2$ ）创46年间该月份的最低记录。从变化趋势来看，南极海冰范围在1979 - 2024年间表现出先缓慢增加后快速减少的变化趋势（图2.1b）。

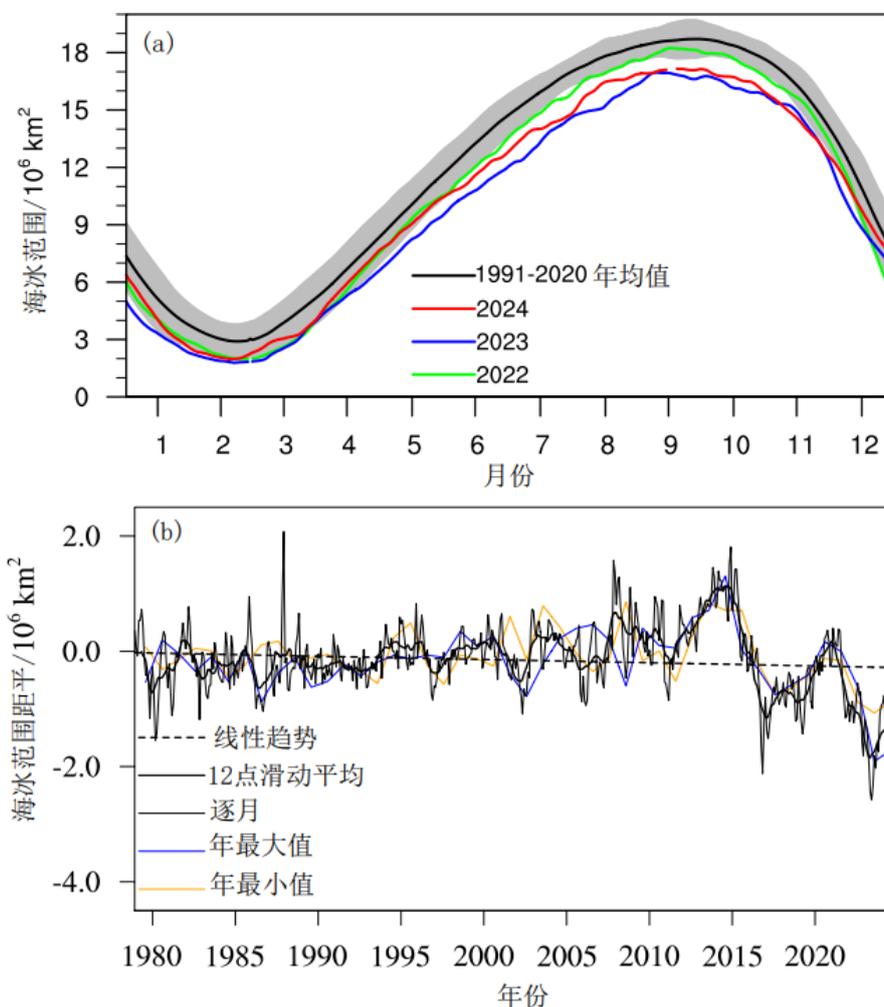


图2.1 (a) 多年平均的逐月南极海冰范围和2倍标准差(灰色阴影), 以及2022年、2023年和2024年逐月南极海冰范围变化; (b) 1979-2024年南极海冰范围最小值(橙色)、最大值(蓝色)距平时间序列, 逐月南极海冰范围距平时间序列(黑细线)及其12个月滑动平均(黑粗实线)和线性趋势(单位: 10^6 km^2)

2.1.2 北极

北极海冰范围同样具有明显的季节变化特征(图2.2a)。每年9月下旬至次年3月是北极海冰的结冰期, 4月至9月中旬为融冰期, 全年海冰范围最小值通常出现在9月中旬。2024年北极海冰范围年度最低记录为 $4.21 \times 10^6 \text{ km}^2$, 与2023年相当, 位于第七低值。值得一提的是, 2024年12月的海冰范围($11.42 \times 10^6 \text{ km}^2$)创46年间该月份的最低记录。从变化趋势来看(图2.2b), 自1979年起, 北极海冰范围整体以 $5.12 \times 10^5 \text{ km}^2/10$ 年的速率减小, 且年最小范围的下降趋势是 $7.81 \times 10^5 \text{ km}^2/10$ 年, 年最大范围的下降趋势是 $3.92 \times 10^5 \text{ km}^2/10$ 年。近年来, 年平均海冰范围的减小趋势有所放缓。

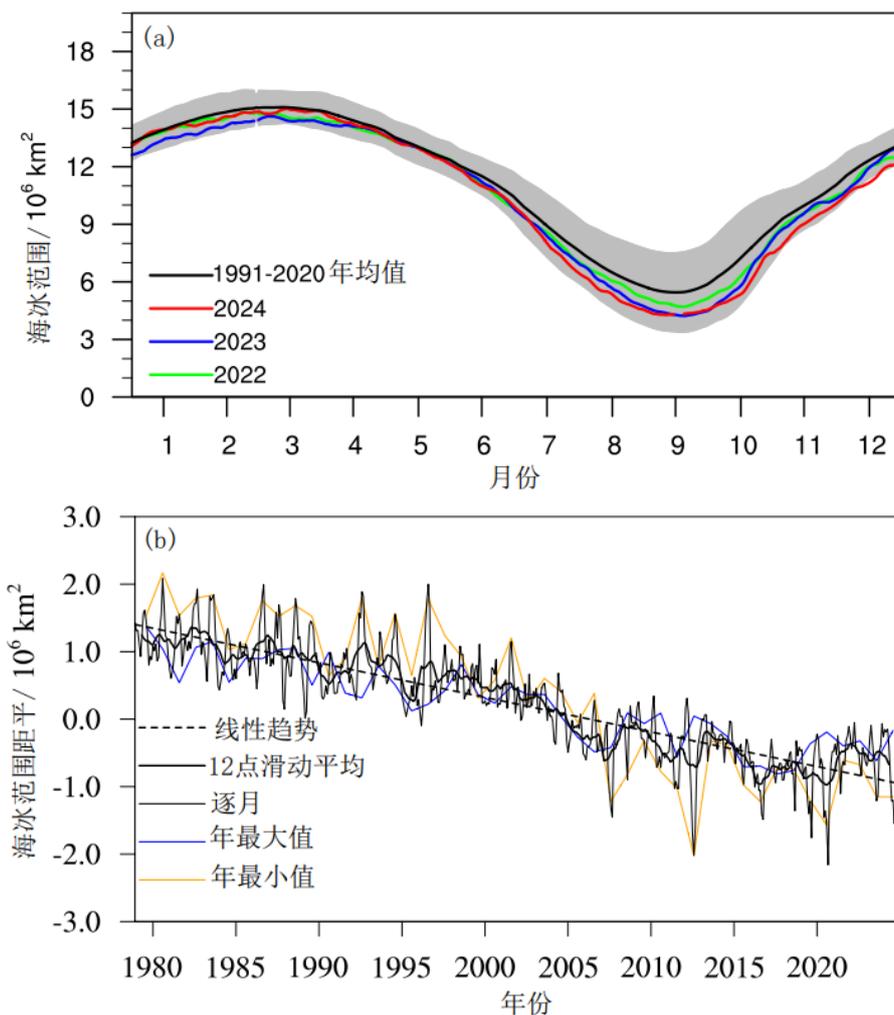


图 2.2 (a) 多年平均的逐月北极海冰范围和2倍标准差 (灰色阴影), 以及2022年、2023年和2024年逐月北极海冰范围变化; (b) 1979-2024年北极海冰范围最小值 (橙色)、最大值 (蓝色) 和逐月北极海冰范围距平时序 (黑细线) 及其12个月滑动平均 (黑粗实线) 和线性趋势 (单位: 10^6 km^2)

2.2 海冰密集度

2.2.1 南极

图2.3为2024年南极海冰密集度在2月和9月的月均值和距平分布。2月南极海冰密集度相比2012-2024年2月平均水平偏低, 海冰主要分布在威德尔海, 阿蒙森海及维多利亚地沿海区域, 即南极多年冰主要分布区。除了威德尔海东侧及维多利亚地沿海海冰密集度较多年平均值偏高, 南极其他海域的海冰密集度均偏低, 尤其是别林斯高晋海明显低于平均水平。

9月南极海冰基本包裹着南极大陆, 海冰密集度减少区域大于增加区域。其中, 别林斯高晋海、威德尔海东侧海冰密集度增加; 威德尔海西侧、罗斯海、阿蒙森海海冰密集度减少。西印度

洋海域海冰密集度明显减少，东印度洋海域、太平洋海域海冰密集度变化较为复杂，并无统一变化趋势。

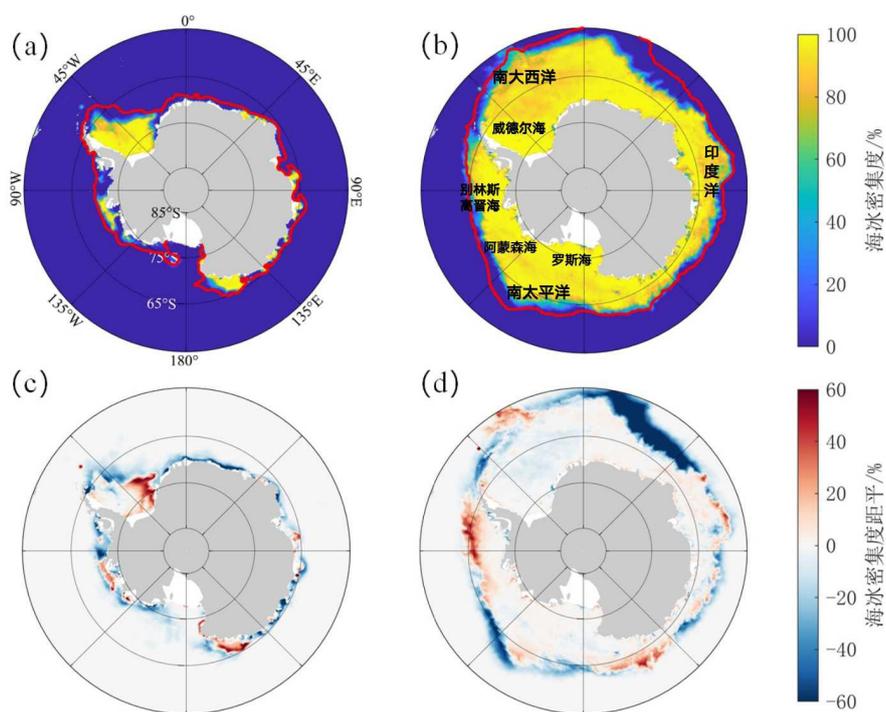


图2.3 基于风云系列气象卫星数据的2024年南极海冰密集度及其距平(单位: %)
 (a) 2024年2月海冰密集度; (b) 2024年9月海冰密集度; (c) 2024年2月海冰密集度距平;
 (d) 2024年9月距平。红色实线表示2012-2024年平均的南极海冰范围

2.2.2 北极

图2.4为2024年3月和9月北极海冰密集度月平均值和距平分布。2024年3月北冰洋中心区的海冰密集度与2012-2024年多年平均状态相近，北冰洋边缘区的海冰密集度有较明显的异常信号。格陵兰海、巴伦支海的海冰边缘区密集度增加，白令海海冰密集度变化较为复杂，北部密集度增加，南部密集度减少。2024年9月海冰密集度减少区域主要包括波弗特海、加拿大群岛、格陵兰海、巴伦支海。海冰密集度增加的区域主要集中于拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海的高纬度区域，其中，楚科奇海弗兰格尔岛东侧海冰密集度明显增加。

2011-2024年平均值晚7.4天。风云3B/3D卫星数据显示，2011-2024年间FO以2.9天/10年的变率推迟（图2.6b）。

1979-2022年北极70°N以北区域海冰融化期呈延长趋势（6.3天/10年），2011-2024年则呈现小幅度的缩短趋势，变化率为0.7天/10年（图2.6c）。主要是由于该时段MO和FO均推迟，而MO的变化率大于FO。

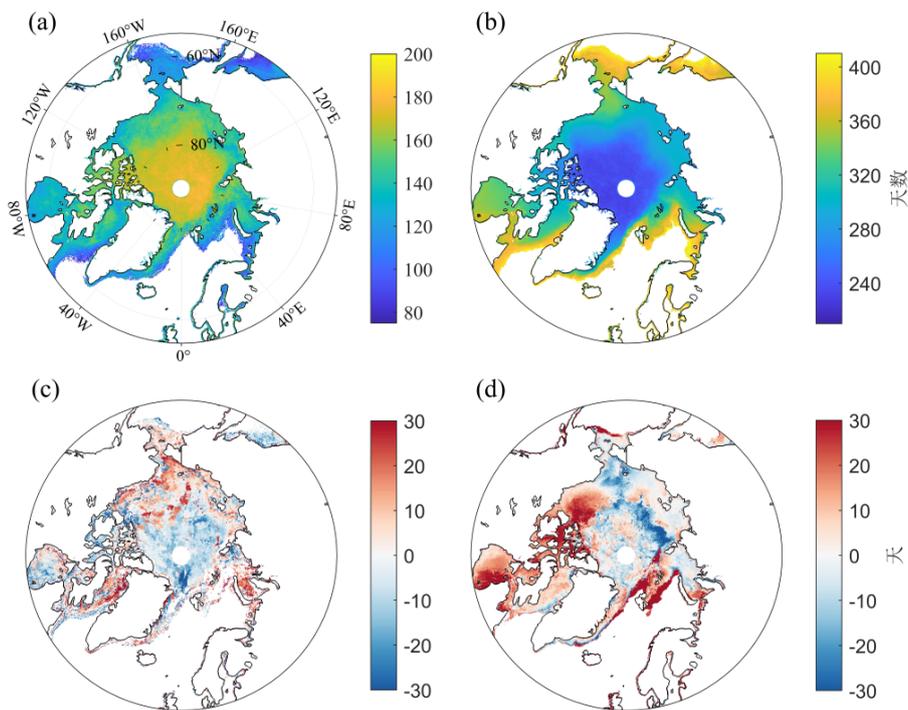


图 2.5 北极海冰表面开始融化时间和开始冻结时间

(a) 2011-2024年平均的北极海冰表面开始融化时间; (b) 2011-2024年平均的北极海冰表面开始冻结时间; (c) 2024年北极海冰表面开始融化时间距平; (d) 2024年北极海冰表面开始冻结时间距平

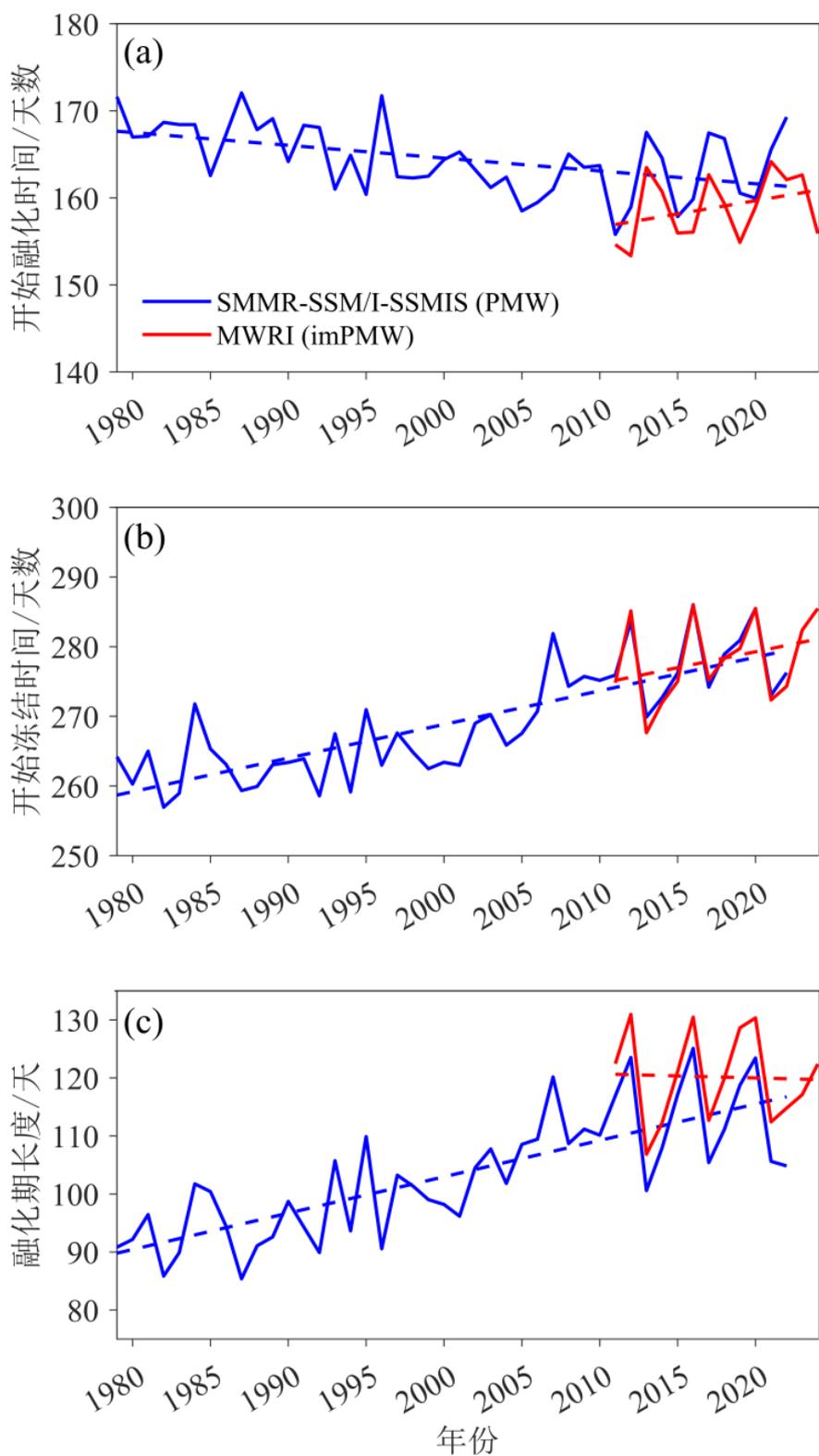


图 2.6 1979–2024年北极海冰表面开始融化时间(a) 开始冻结时间(b) 和融化期长度(c) 在70°N以北海区的区域平均值的时间序列

第三章 大气成分

3.1 主要温室气体

温室气体指大气中自然或人为产生的气体成分，其主要特性是能够吸收并释放地表、大气和云发出的长波辐射，这一特性可导致温室效应的产生。根据《京都议定书》的规定，地球大气中的主要温室气体包括二氧化碳（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。本节采用世界气象组织（WMO）/全球大气观测计划（GAW）的世界温室气体数据中心（WDCGG）的极地站点和我国中山站的监测数据进行分析，其中南极地区共 13 个站，北极地区共 16 个站（图 3.1），时间范围是 1984—2023 年（目前上述温室气体浓度数据仅公布至 2023 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）浓度的变化。

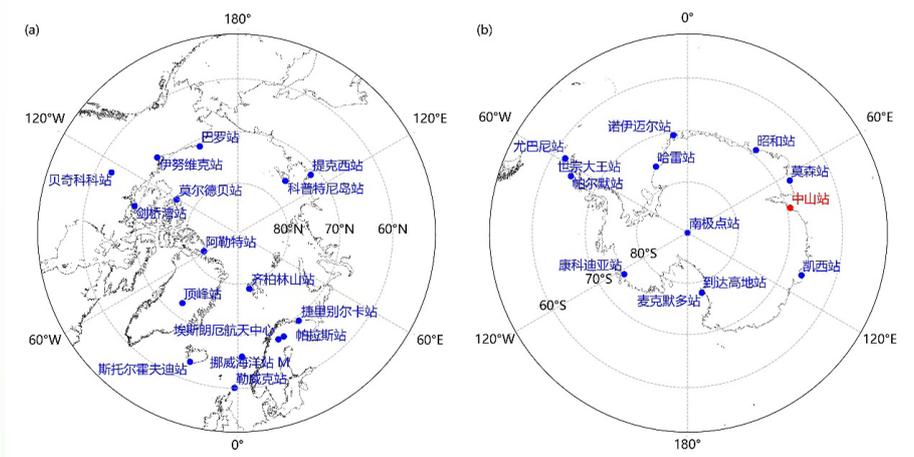


图 3.1 极地主要大气成分观测站位置

3.1.1 南极

(1) 二氧化碳和甲烷

从 1984 年到 2023 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 1.88 ppm/年，总体与全球趋势（1.94 ppm/年）一致（图 3.2a）。2023 年，南极大气中的二氧化碳年平均浓度达到了 416.39 ppm，比全球平均浓度低 3.58 ppm。相比 2022 年，年平均浓度上升了 1.99 ppm。

南极大气中的甲烷浓度也呈稳定上升的趋势，其增长率为 7.31 ppb/年，总体与全球趋势（7.14 ppb/年）一致（图 3.2b）。在 2023 年，南极大气中甲烷年平均浓度达到了 1870.60

ppb，比全球平均值低 63.4 ppb。相比2022年，年平均浓度上升了 12.79 ppb。

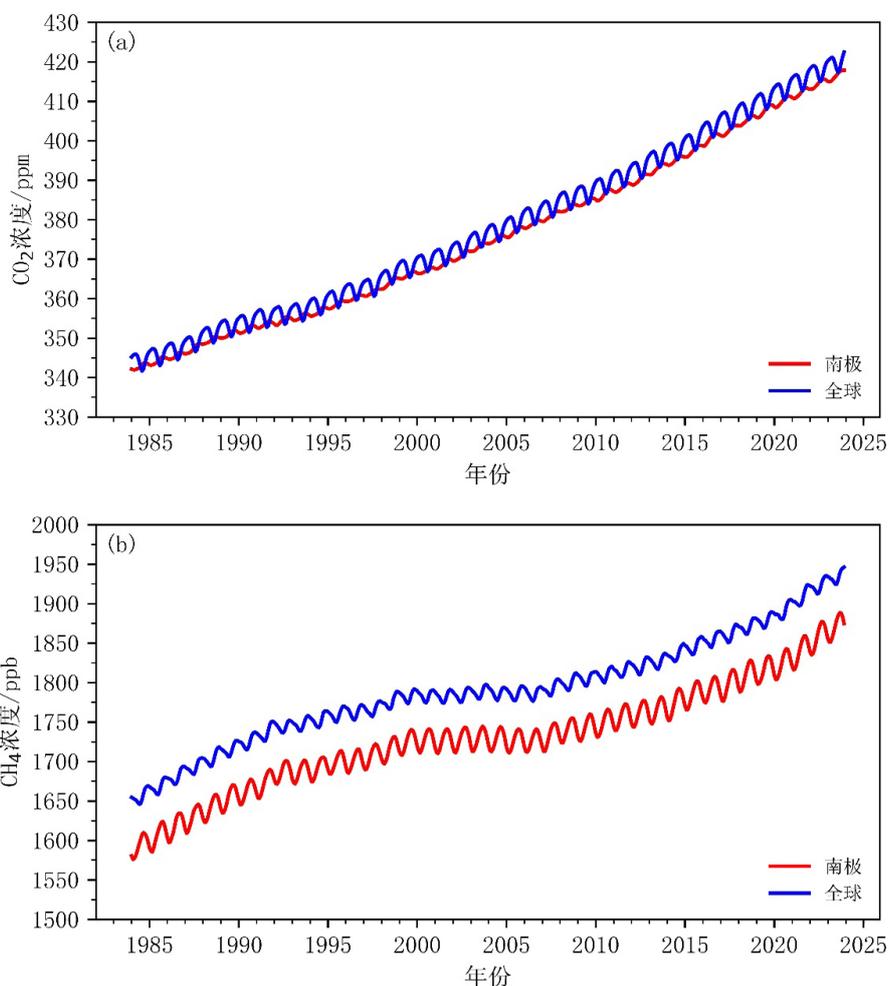


图 3.2 1984—2023年南极与全球 (a) 二氧化碳和 (b) 甲烷月平均浓度变化

目前，南极开展氧化亚氮观测的6个站点的数据显示，氧化亚氮年平均浓度由1997年的 312.09 ppb升高至2023年的335.70 ppb，平均增长率为0.91 ppb/年（图3.3a）。2023年，氧化亚氮年平均浓度较2022年上升了1.20 ppb。中国中山站观察到的氧化亚氮总体趋势与南极地区的平均状况一致。2008至2023年期间，中山站氧化亚氮的平均浓度由320.40 ppb升高至 335.14 ppb，增长率为0.98ppb/年。2023年，中山站氧化亚氮年平均浓度相对于2022年的绝对增量为1.15 ppb，相对增量为0.34%。

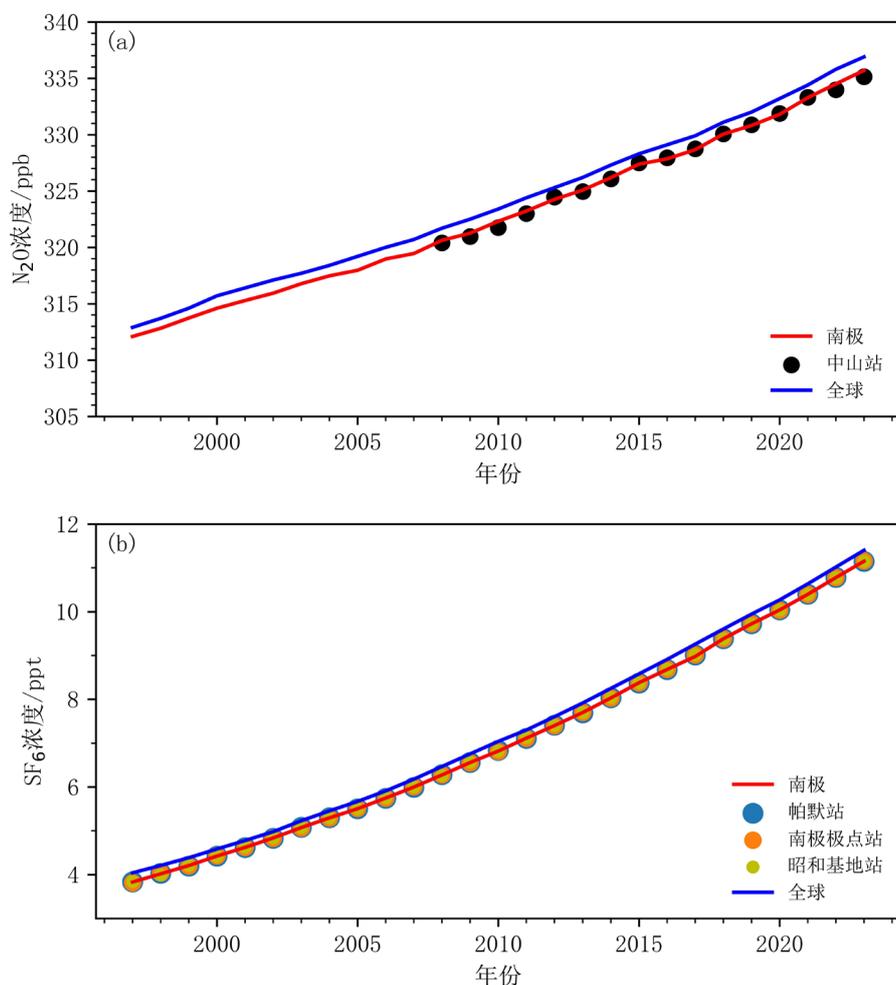


图3.3 1997–2023年南极(a)氧化亚氮和(b)六氟化硫年平均浓度变化

1997–2023年期间，南极地区仅有3个站点开展大气中六氟化硫浓度的观测，年平均浓度均呈显著上升趋势（图3.3b），由1997年的3.83 ppt 升高至2023年的11.15 ppt，增长了约2.9倍，平均增长率为0.28 ppt/年。2023年，南极3站六氟化硫年平均浓度较2022年平均浓度上升0.37 ppt，但比2021–2022年的增长量略低。

3.1.2 北极

(1) 二氧化碳和甲烷

在 1984年到 2023年期间，北极大气中二氧化碳浓度总体趋势与全球平均一致，呈逐年稳定上升的趋势（图 3.4a），平均增长率为 1.95 ppm/年。2023年，北极大气中二氧化碳年平均浓度达到了 422.06 ppm，比全球平均值高2.08 ppm。相比 2022年，年平均浓度上升了 1.93 ppm。

在此期间，北极大气中甲烷浓度同样呈逐年稳定上升的趋势（图 3.4b），平均增长率为 7.5 ppb/年。2023年，北极大气中甲烷年平均浓度达到了 2013.75 ppb，比全球平均值偏高 79.75

ppb。相比2022年上升了 9.95 ppb。

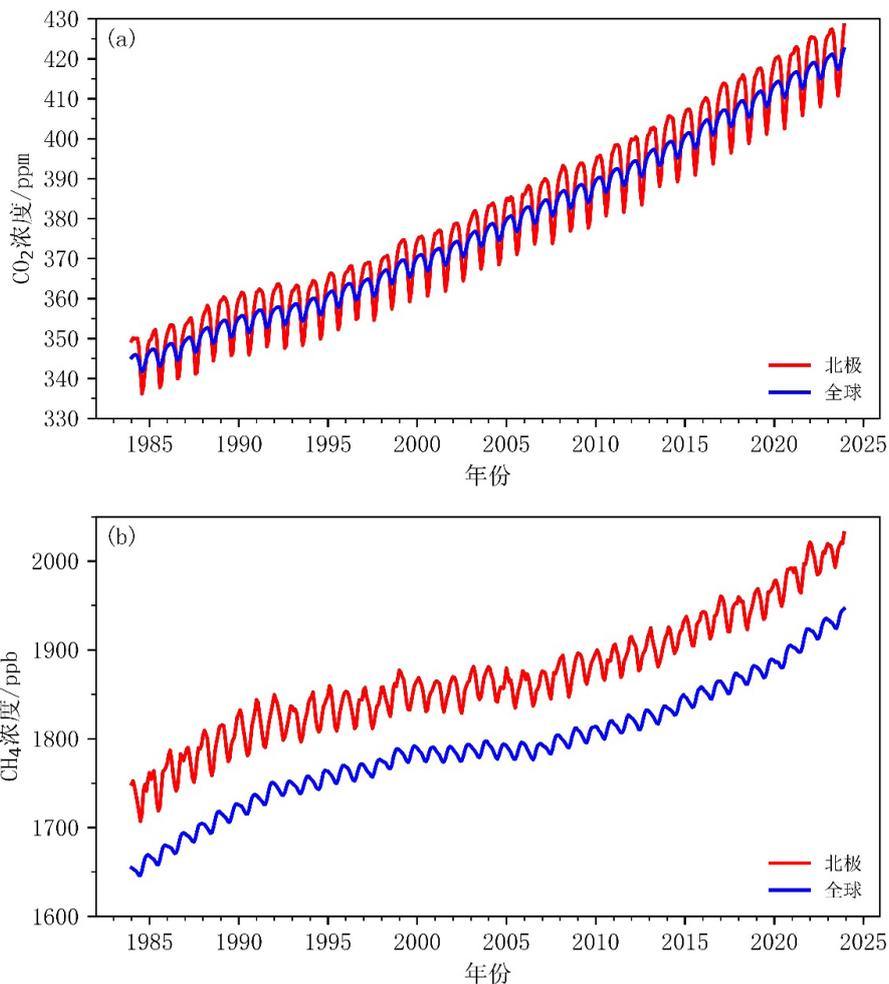


图 3.4 1984—2023年北极与全球(a)二氧化碳浓度变化和(b)甲烷浓度变化

(2) 氧化亚氮和六氟化硫

目前北极地区有6个全球大气本底站开展氧化亚氮观测，这6个站的平均氧化亚氮浓度由1997年的313.31 ppb升高至2023年的337.03 ppb，平均增长率约0.89 ppb/年（图3.5a）。2023年，北极氧化亚氮年平均浓度较2022年上升0.95 ppb。

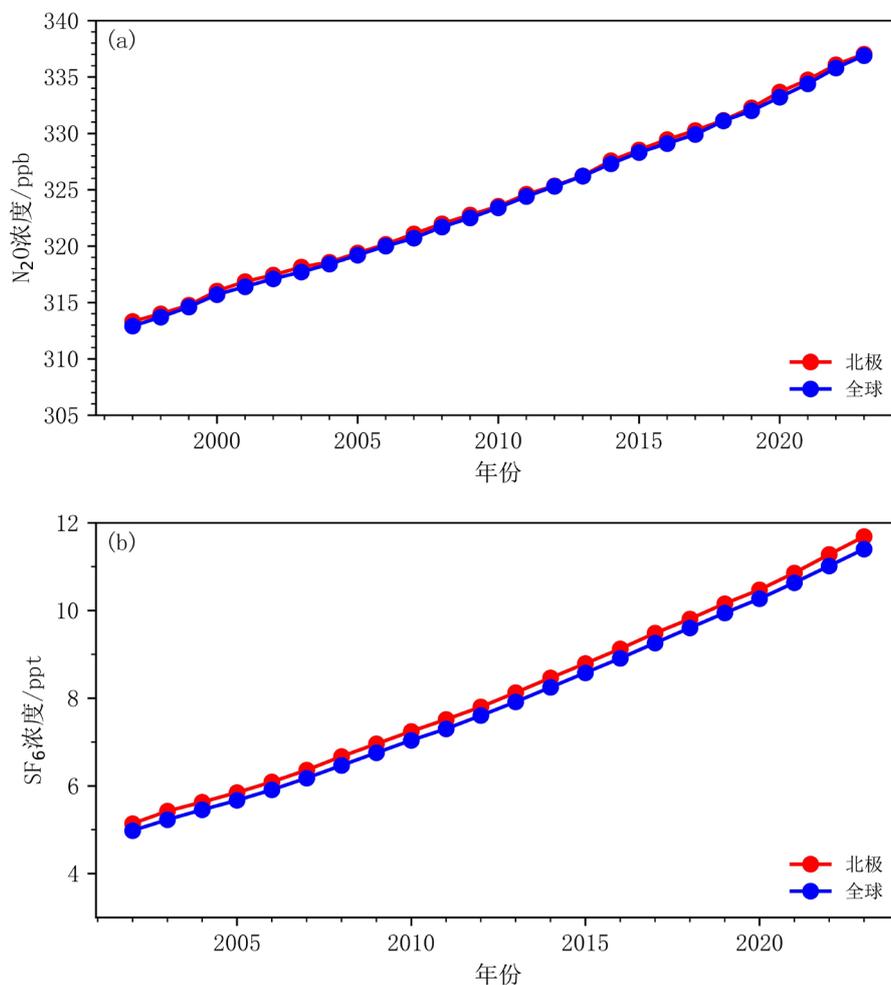


图3.5 北极地区(a)氧化亚氮(1997–2023年)和(b)六氟化硫(2002–2023年)平均浓度变化

根据北极地区开展六氟化硫观测的6个站点数据，六氟化硫年平均浓度由2002年的5.14 ppt 升高至2023年的11.69 ppt，平均增长率约为0.31 ppt/年（图3.5b）。2023年，北极六氟化硫年平均浓度较2022年上升0.41 ppt。

3.2 痕量气体

痕量气体是指在大气中以极低浓度存在的气体成分，通常其浓度低于1 ppm。尽管这些气体在大气中的比例微乎其微，但它们在气候变化、空气污染和大气化学过程中的作用至关重要。常见的痕量气体包括臭氧（ O_3 ）、一氧化碳（CO）及氮氧化物（ NO_x ）等。本节采用世界反应性气体数据中心（WDCRG）中极地站点和我国中山站的地面臭氧监测数据进行分析，其中南极地区共6个站，北极地区共4个站，时间范围是1996–2023年（目前上述地面臭氧浓度数据仅公布到2023年）。本节主要分析地面臭氧浓度的变化。

3.2.1 南极

2023年，南极地面臭氧浓度呈现明显的时空变化特征。内陆站点（南极点站、康科迪亚站）浓度较高，平均浓度达28.06 ppb，沿海站点（中山站、哈雷站、诺伊迈尔站，昭和站）浓度偏低，平均浓度为25.89 ppb。其中，中山站自2018年起地面臭氧浓度明显下降，年均降幅为0.80 ppb/年，2023年平均浓度达21.87 ppb。总体来看，南极地面臭氧浓度未出现显著趋势变化。

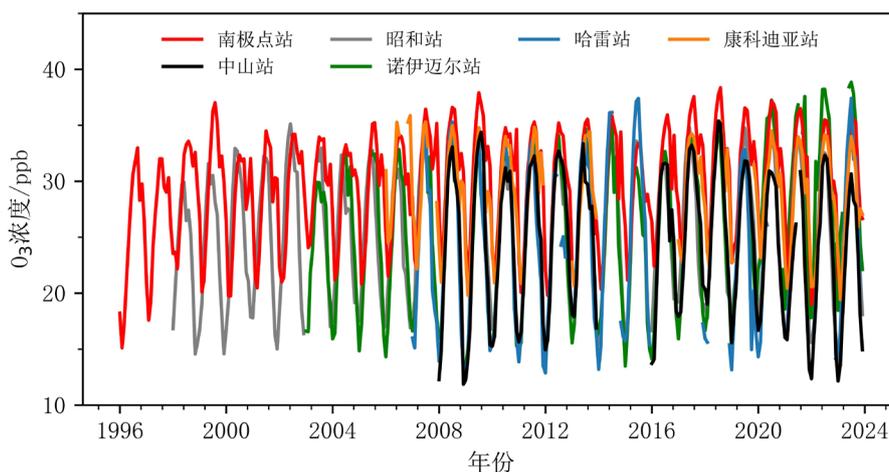


图3.6 1996年至2023年6个南极大气本底站地面臭氧月平均浓度时间序列

3.2.2 北极

北极地区四个站点的地面臭氧平均浓度由2000年的 32.92 ppb升高至2023年的 35.34 ppb，变化幅度约为 0.11 ppb/年。2023年，北极地区的地面臭氧平均浓度较2022年增加1.60 ppb。然而，2000年以来北极不同区域地面臭氧平均浓度呈现较大差异，顶峰站地面臭氧历史平均浓度高达45.22 ppb，而同期巴罗站平均浓度仅为27.42 ppb。

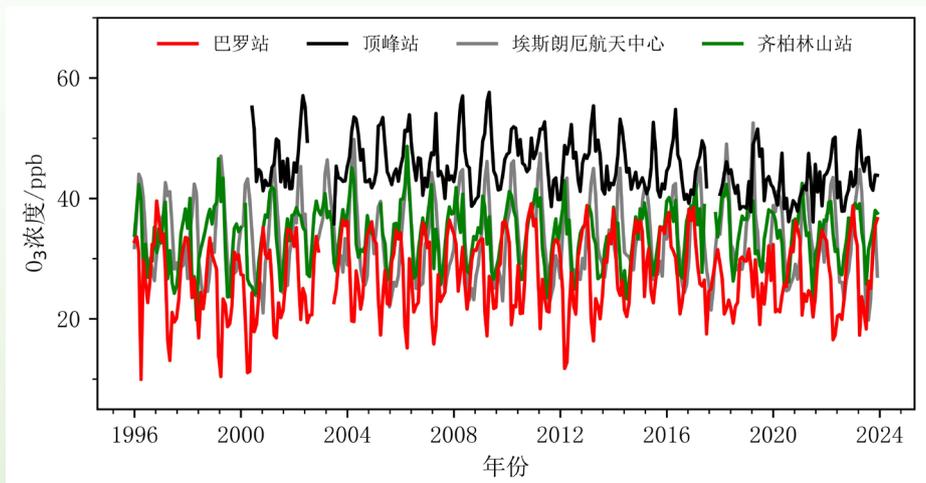


图3.7 1996年至2023年5个北极大气本底站地面臭氧月平均浓度时间序列

3.3 臭氧总量

3.2.1 南极臭氧洞

2024年，南极臭氧洞的发展相对平稳，相较于前四年异常大型且持久的臭氧洞现象有所缓和。本年度臭氧洞于8月底开始成形，较前一年（8月中旬）稍晚。值得注意的是，7月和8月出现的两次罕见平流层爆发性增温事件影响了臭氧洞的发展。随着臭氧消耗的快速生长，臭氧洞在9月上旬迅速扩展至 $1.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，几乎覆盖整个南极洲。9月28日，臭氧洞达到单日最大覆盖面积，约为 $2.2 \times 10^7 \text{ km}^2$ ；该数值小于2023年和2022年的约 $2.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，更接近1979至2021年的平均水平。

与前几年相比，臭氧洞闭合过程也表现得更加稳定。整个10月，臭氧洞呈持续稳步缩小态势。随着极涡的稳定，臭氧洞在11月维持在约 $1.0 \times 10^7 \text{ km}^2$ ，显著低于2023年和2022年的水平。此外，臭氧洞于12月初迅速闭合，几乎与1979年至2021年的平均闭合时间一致，明显早于前几年（自2019年以来，臭氧洞闭合时间通常在12月下半月）。

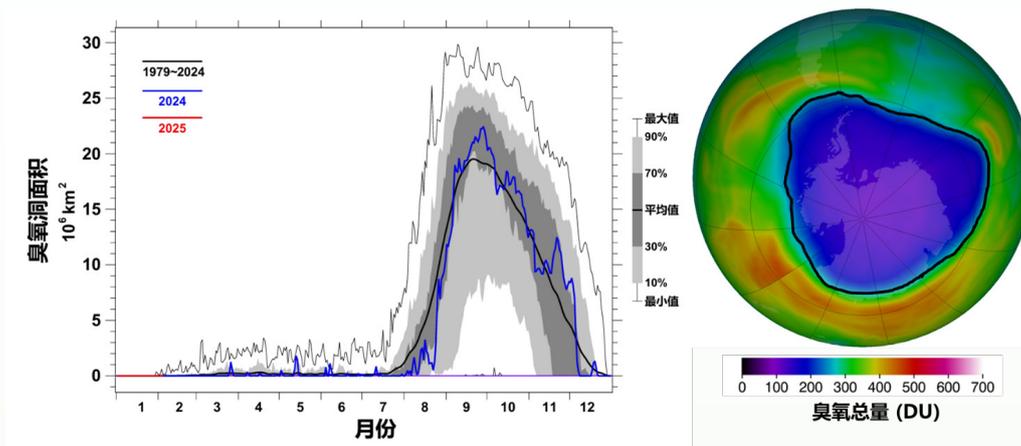


图3.8 (a) 2024年南半球臭氧洞面积变化及其与历史平均对比 (b) 2024年南极臭氧洞单日最大覆盖范围空间分布

3.2.2 北极臭氧总量

2024年3月，北极地区的臭氧柱浓度创1979年至今的最高纪录，达到 477 DU，这一数值比1979—2023年的平均值高14.5%。这一极值的主要原因是，2023-2024年冬季期间一系列大尺度行星波上传削弱了极涡，导致臭氧异常增多，3月份多次刷新单日记录。

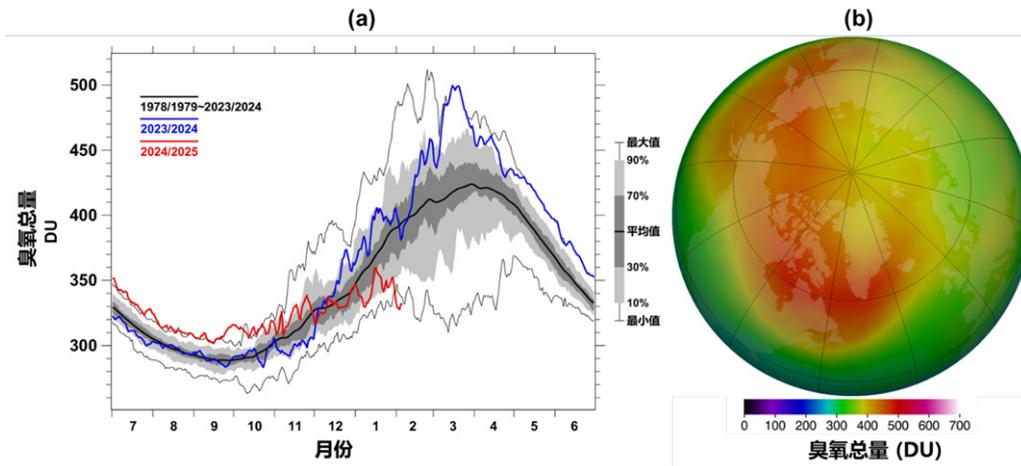


图 3.9 (a) 2024年北极地区臭氧总量平均值及其与历史平均对比, (b) 2024年3月北极臭氧柱浓度空间分布

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-RA)
<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. 全球高分辨率海表温度和海冰覆盖数据集 (OSTIA)
https://data.marine.copernicus.eu/product/SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011/description
8. 美国雪冰数据中心 (NSIDC) 海冰指数数据
<https://nsidc.org/data/nsidc-0051/versions/2>
9. 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>
10. 中山大学基于风云系列卫星的FY-3 MWRI逐日海冰密集度
<http://www.orsc.hellosea.org.cn/#/product-detail?ProductId=1896894818039107586>
11. 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/>
12. 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>
13. 世界温室气体数据中心 (WDCGG) 数据
https://gaw.kishou.go.jp/publications/global_mean_mole_fractions#content1
14. 美国海洋大气管理局 (NOAA) 数据
<https://gml.noaa.gov/ccgg/data/getdata.php?gas=SF6>
15. 世界反应性气体数据中心 (WDCRG) 数据
<https://ebas-data.nilu.no>
16. 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60° 以南的广大区域。

北极：北纬60° 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，再分析资料特指及国家气象信息中心发布的第一代全球大气再分析数据（CMA-RA）。

南大洋：指环绕南极大陆，北边无陆界的独特水域。由南太平洋、南大西洋和南印度洋连同南极大陆周围的威德尔海、罗斯海、阿蒙森海、别林斯高晋海等组成，区域为50°S以南区域。

北冰洋：主体位于北极圈（66.5°N）以北，其核心海域纬度为65°N至90°N。

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，又称南半球环状模，是南半球大气环流的主要特征模态之一。

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，又称北半球环状模，是北半球大气环流的主要特征模态之一。

涛动指数：采用CMA-RA再分析数据，根据环纬圈平均海平面气压的差值计算得到，其中北极涛动指数是35°N和65°N之间的差值，南极涛动指数是40°S和70°S之间的差值。

极涡：极地对流层和平流层的大尺度低压涡旋现象，对极地和南北半球中高纬气候具有重要影响。

北极极涡指数：用于描述和衡量北极极涡特征和变化的指标。

海冰密集度：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 (10^6) 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)。

北极地面臭氧观测站点: 提克西站 (俄罗斯, TIK)、巴罗站 (美国, BRW)、齐柏林山站 (挪威, ZEP)、顶峰站 (丹麦, SUM) 埃斯朗厄航天中心 (瑞典, ESR)。

南极地面臭氧观测站点: 昭和站 (日本, SYO)、哈雷站 (英国, HBA)、康科迪亚站 (新西兰, ARH)、纽迈尔站 (德国, NMY)、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 ODS。

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。臭氧浓度约在20至25公里处达到最高。每年, 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, 是由人为氯化物和溴化物与该地区特定的气象条件共同造成的。这一现象被称之为臭氧洞。

极地气候变化年报

STATE OF POLAR CLIMATE

2024

