



卫星遥感全球气候变化监测公报

2023 年



国家卫星气象中心（国家空间天气预警中心） 编制

《卫星遥感全球气候变化监测公报(2023 年)》

编写委员会

顾 问：许健民 王劲松

主 编：咸 迪 覃丹宇 陈 林 方 萌

编写专家：(以姓氏笔画为序)

王素娟 田圣戎 田 林 朱 杰 朱 琳

任素玲 刘晓燕 吴治宏 张倩倩 张婉春

张 淼 郑照军 居为民 高 玲 高 浩

高 洋 曹广真 崔 鹏 翟晓春

前 言

气候变化已成为当今人类社会面临的重大全球性问题，对气候变化进行科学、准确的监测十分必要。与传统的气象观测相比，卫星遥感在气候变化监测中具有重要的应用价值，可实现全球尺度、高时空分辨率、全天候的观测，全面地了解全球的气象要素、大气成分、植被特征、海洋环境、冰雪覆盖等信息。

自 1960 年 4 月 1 日世界上第一颗气象卫星成功发射，迄今全球共发射了近百颗气象卫星，提供了多种气候评估关键参数产品。其中风云气象卫星自上世纪 80 年代以来已发射两代四型共 21 颗，也已积累长时间序列的卫星观测资料和产品。多要素的卫星遥感观测在气候变化研究中的应用将会越来越广泛，更好地支持我国应对气候变化的各项工作。

为及时掌握逐年全球气候特点及其变化情况，中国气象局组织编写了《卫星遥感全球气候变化监测公报（2023 年）》，利用多源遥感数据客观反映了全球的二氧化碳、甲烷、陆地植被和海洋净初级生产力、全球海洋水体颗粒有机碳、南北极海冰、海温、大气温度、降水、射出长波辐射和全球干旱等方面的变化趋势及最新观测信息。

《卫星遥感全球气候变化监测公报（2023 年）》编制得到中国气象局科技与气候变化司和综合观测司的指导和大力支持，国家气象中心、国家气候中心等单位的专家对该年报提出了宝贵意见。

目 录

摘 要	1
第 1 章 全球碳循环	3
1.1 全球主要温室气体	3
1.2 全球植被净初级生产力	5
1.3 全球海洋净初级生产力	9
1.4 全球海洋水体颗粒有机碳	12
第 2 章 极地海冰	15
2.1 北极海冰	15
2.2 南极海冰	17
第 3 章 全球水热平衡	21
3.1 太平洋海温	21
3.2 全球极端冷暖事件	23
3.3 全球陆地累积降水	28
3.4 射出长波辐射	29
3.5 全球干旱	32
附 录	37

摘 要

在全球碳循环方面,2010~2023 年全球主要人为源排放区域(东亚、欧洲和北美洲)的 CO_2 浓度以 2.2 ppm/a 的速率逐年上升,全球 CH_4 浓度以 9.3 ppb/a 的速率逐年上升。2010 年以来,全球植被 NPP 总体呈波动中上升趋势,年增长率约为 $0.37 \text{ g C/m}^2/\text{a}$,2023 年全球陆地生态系统的 NPP 总量约为 54.12 Pg C ,增长趋势较去年减缓。全球海洋 NPP 总量呈先下降(2010~2014 年)后上升(2014~2023 年)趋势,2014 年以来全球海洋 NPP 增长率约为 0.66 Gt C/a ,2023 年全球海洋 NPP 总量约为 43.95 Gt C ,全球海洋上层水体 POC 浓度和真光层 POC 综合含量均值约为 85.42 mg/m^3 和 4745 mg/m^2 。

极地海冰监测显示,2023 年,北极海冰相比 2011~2022 年历史同期面积整体略偏高;而南极海冰面积整体明显偏低,海冰面积维持在最低水平;2023 年南极海冰范围日最小值出现在 2 月 21 日,约为 $2.53 \times 10^6 \text{ km}^2$,是 2011 年风云气象卫星遥感统计以来的最低值。

全球水热平衡监测表明,2023 年赤道中东太平洋海表温度距平由负相位(1~3 月)逐渐转换为正相位(4~12 月),自 5 月起进入厄尔尼诺状态。2023 北半球 850hPa 月平均温度上半年偏低、下半年显著偏高,全年平均偏高。在整体偏暖背景下,全球出现多次异常偏暖和极端高温以及极端寒潮和暴风雪事件。2019~2023 年全球陆地累积降水量平均值呈增加趋势,2023 年全球月降水量最大值比 2022 年月降水量的最大值升高 5.23%。2023 年西太平洋暖池北部地区 OLR 正距平明显,但强度弱于 2022 年。近十年全球干旱年际波

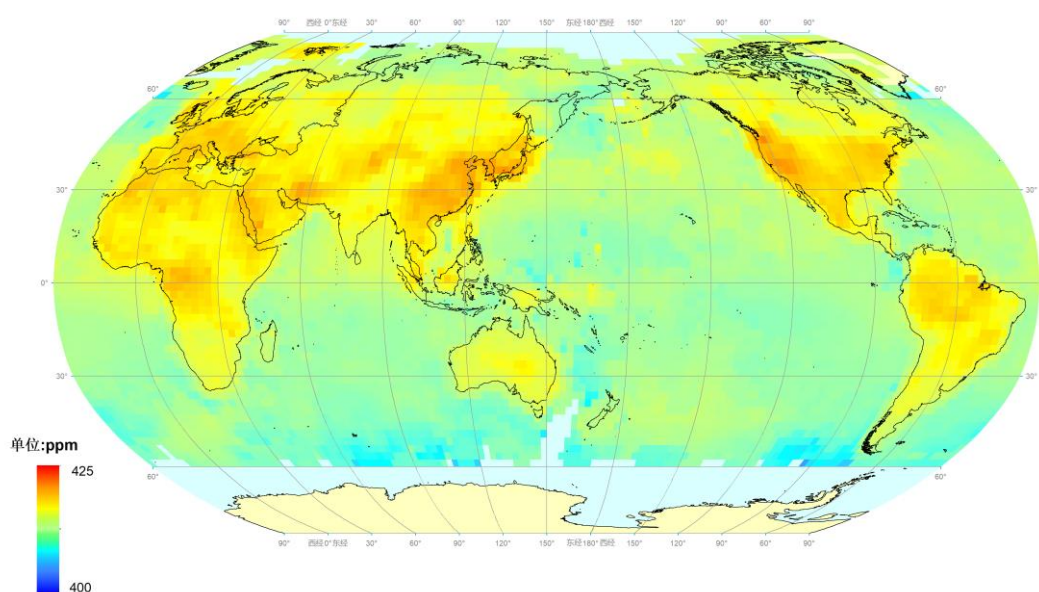
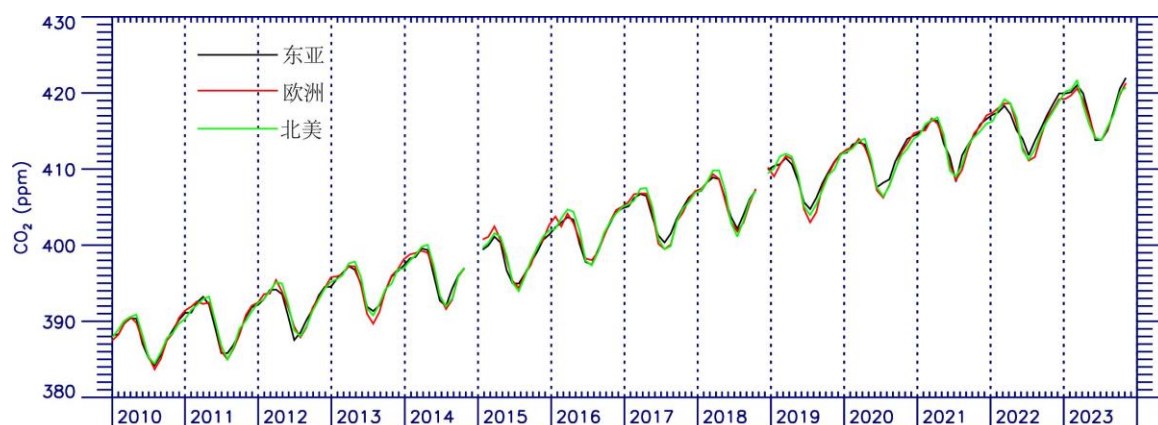
动大，干湿趋势变化呈现明显的空间异质性，49.5%的区域呈现出变干的趋势，总体呈现出南半球显著变干，北半球显著变湿的格局特征。

第1章 全球碳循环

1.1 全球主要温室气体

温室气体指的是大气中能吸收地面的长波辐射，并重新发射辐射的一些气体。水汽、二氧化碳（ CO_2 ）和甲烷（ CH_4 ）等都具有强烈的温室效应。然而，水汽在大气中的停留时间仅约为十天，不会对长期温室效应产生重大影响。而 CH_4 的大气停留时间超过十年， CO_2 的大气停留时间则长达百年，这二者对长期温室效应有深远的影响。

化石燃料的燃烧和水泥生产等工业生产过程是主要的人为 CO_2 排放源，是全球碳排放的最重要的组成部分。此外，森林草原野火事件也是全球碳循环的重要一环。卫星监测显示，2023 年全球陆地区域 CO_2 平均浓度达到 417.5 ± 2.5 ppm，全球 CO_2 高浓度主要分布在工业和经济发达、人口稠密的东亚、欧洲和北美区域。海洋由于拥有强大的固碳能力，其 CO_2 浓度低于陆地区域，为 415.1 ± 2.4 ppm。全球主要人为源碳排放区域中，东亚、欧洲和北美地区 CO_2 浓度高于全球陆地平均水平，分别为 418.4 ppm, 418.0 ppm 和 418.0 ppm(图 1.1)。2010 年以来，由于工业的发展和能源消耗水平的提高，全球主要人为源排放区域（东亚、欧洲和北美洲）的 CO_2 浓度均呈现明显的上升趋势（图 1.2），上升速率为 2.2 ppm/a。

图 1.1 2023 年全球 CO₂ 浓度分布图 1.2 全球主要区域 2010 ~ 2023 年逐月大气 CO₂ 浓度分布 (ppm) (数

据来源, GOSAT, <https://www.gosat.nies.go.jp/en/index.html>)

大气中 CH₄ 的来源主要包括沼泽、湿地等自然源以及化石燃料开采、生产使用和农业活动等人为排放源。卫星监测显示, 2023 年全球陆地区域甲烷(图 1.3)平均浓度达到 1890.9 ± 24.7 ppb, 比 2022 年上升 9.0 ppb。全球陆地区域 CH₄ 的高浓度主要出现在中低纬度植被茂盛和人类活动旺盛的区域。图 1.4 展示了 2010 年以来欧洲-非洲

中北部、东亚-南亚和南美中部-北美洲三个区域的逐月 CH_4 浓度分布。2010 年以来，全球 CH_4 浓度呈现明显的上升趋势，上升幅度约为 9.3 ppb/a。

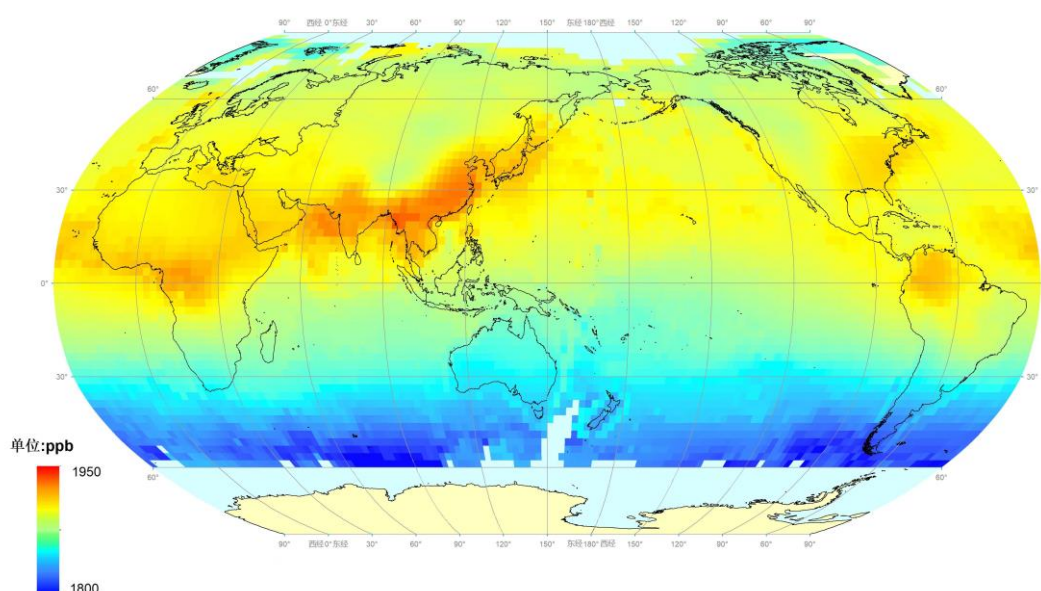


图 1.3 2023 年全球 CH_4 浓度分布



图 1.4 全球主要区域 2010 ~ 2023 年逐月大气 CH_4 浓度分布 (ppb) (数据

来源, GOSAT, <https://www.gosat.nies.go.jp/en/index.html>)

1.2 全球植被净初级生产力

植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是指绿色

植被在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量，是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分，它可以反映植物的生长状况，是生物圈内碳循环的重要分量，在全球生态环境监测和气候变化研究中占有重要的地位。深入了解全球 NPP 的时空变化特征，是理解全球碳收支平衡的基础。

基于卫星遥感驱动的机理性生态模型 BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator)反演得到的 NPP 分析可知，2023 年全球陆地生态系统的 NPP 总量约为 54.12 Pg C (10^{15} 克碳)，其中北半球和南半球的 NPP 分别占全球的 65.60%和 34.40%。受植被类型和气候条件的共同作用，全球陆地生态系统的 NPP 存在较大的时空差异(图 1.5)。从空间分布看，全球陆地生态系统 NPP 整体呈现从低纬向高纬逐渐降低的趋势。在低纬度的热带地区，如赤道附近的亚马孙流域、刚果流域以及东南亚地区分布大量热带雨林，适宜的温度、丰沛的降水、充足的辐射有利于植被的生长，NPP 在 $1300 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以上；中纬度亚热带、温带地区，NPP 在 $600 \sim 1300 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 之间，其中北美洲东南部、欧洲、亚洲东南部以及澳大利亚东部沿海地区受到海陆差异影响，NPP 普遍高于内陆地区；高纬度寒冷地区和其他干旱半干旱区域，主要限制因素为温度和降水，年 NPP 在 $600 \text{ gC/m}^2/\text{a}$ 以下。不同的植被覆盖类型，对全球 NPP 的贡献差异明显。据统计，2010 ~ 2023 年，常绿阔叶林年平均 NPP 占全球年总量的百分比最高，达到 32.43%；其次为农田，占全球 NPP 年总量的 18.27%。

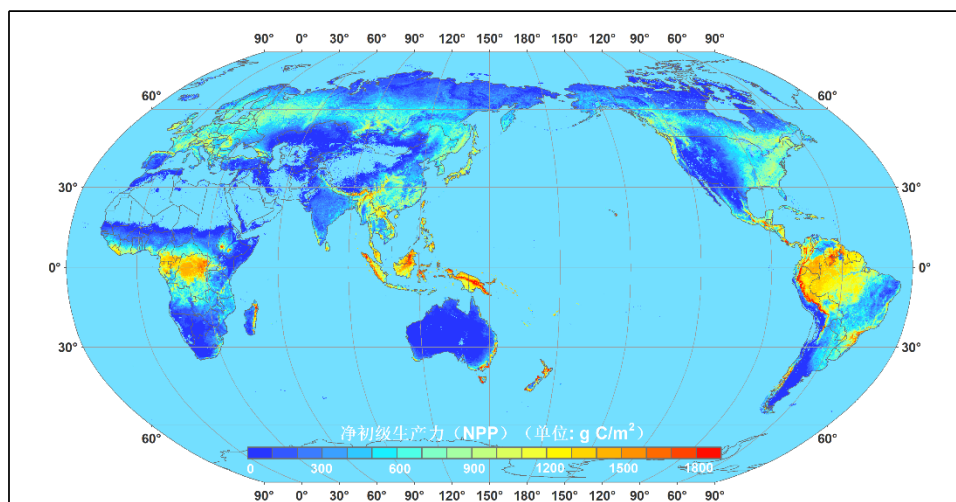


图 1.5 2010 ~ 2023 年平均全球陆地植被净初级生产力 (NPP) 分布

从时间序列的变化看 (图 1.6) , NPP 在 2011 年、2017 年和 2022 年增长较显著 , 而 2012 年、2016 年、2018 年和 2023 年有明显下降。过去 14 年以来 , 全球植被 NPP 总体呈波动中上升趋势 , 年增长率约为 $0.37 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ($R^2=0.87, P<0.01$) , 2023 年增长趋势较去年减缓。与常年同期相比 (图 1.7) , 2023 年 NPP 距平偏低的区域主要出现在北美洲西部和南部、南美洲中北部、亚洲南部、欧洲东部及非洲中部、植被覆盖类型以林地为主 , 其中 2023 年全球常绿阔叶林、常绿针叶林、灌木林 NPP 总量较 2022 年分别减少 4.7%、6.4%和 3.3%。

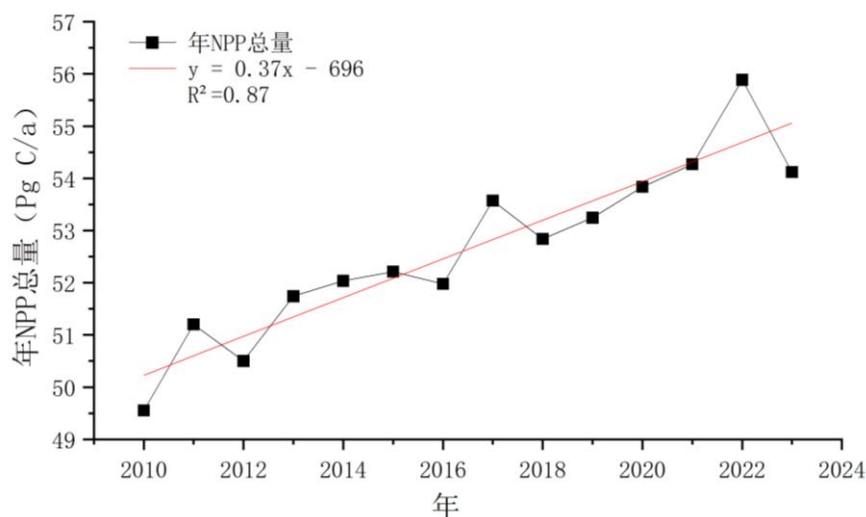


图 1.6 2010 ~ 2023 年全球陆地植被净初级生产力 (NPP) 总量时间变化

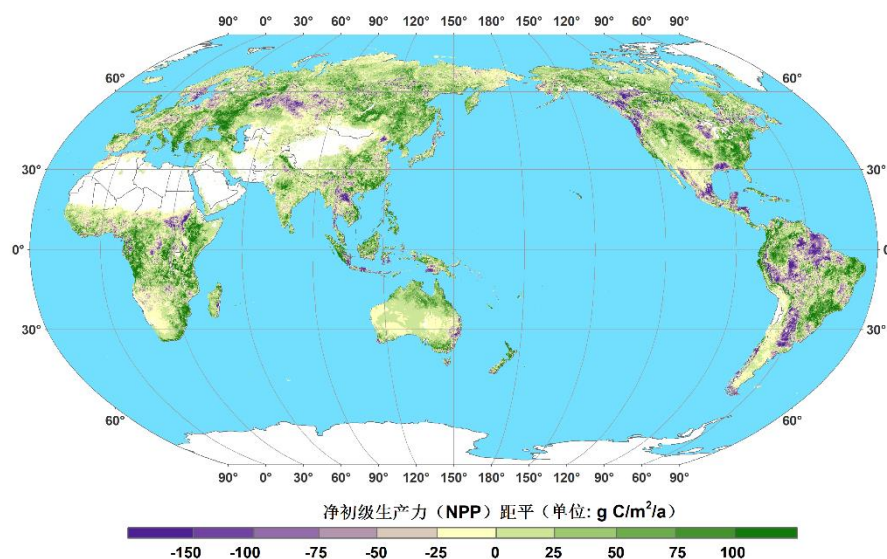


图 1.7 2023 年全球陆地植被 NPP 距平

从全球植被 NPP 的月际变化看，7 月达到峰值，对应植被 NPP 总量为 6.84 Pg C；最小值出现在 2 月，对应植被 NPP 总量为 2.87 Pg C。3 月 ~ 7 月为植被 NPP 的快速上升期，8 月 ~ 10 月为植被 NPP 的快速下降期，11 月 ~ 次年 2 月植被 NPP 总体保持在 3 Pg C 左右（图 1.8）。北半球和南半球 NPP 的月尺度变化呈相反的趋势，总体上北半球 NPP 对全球 NPP 总量贡献更大。

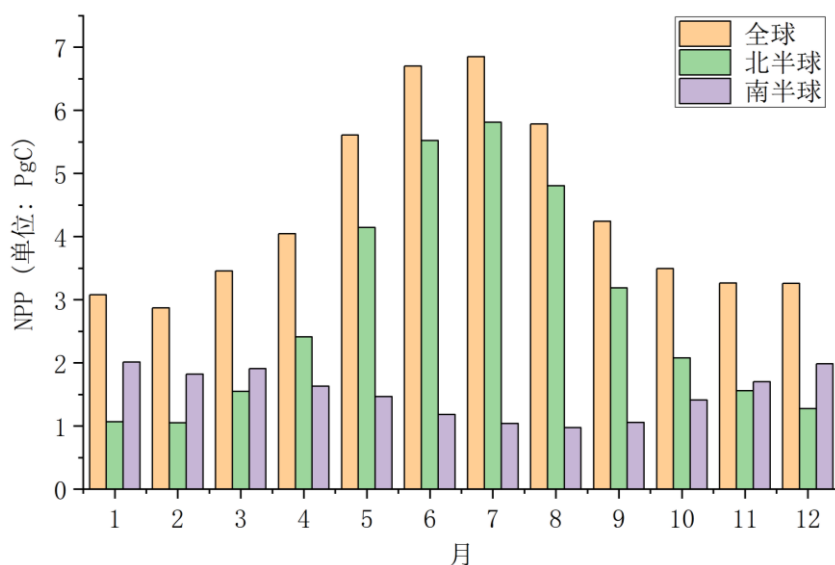


图 1.8 全球陆地植被 NPP 的月际变化

(基于 2010 ~ 2023 年数据统计)

1.3 全球海洋净初级生产力

海洋初级生产力是指浮游植物、底栖植物（包括定生海藻、红树和海草等高等植物）以及自养细菌等生产者通过光合作用制造有机物的能力，也称为海洋原始生产力。一般以每天（或每年）单位面积所固定的有机碳（或能量）来表示。海洋浮游植物初级生产过程影响着海洋碳的收支平衡，反映了浮游植物的固碳速率和潜力。

基于海洋 NPP 反演模型 CbPM(Carbon-based Production Model) 分析可知，2023 年全球海洋 NPP 总量约为 43.95 Gt C，其中北半球和南半球的 NPP 分别占全球海洋的 51.98%和 48.02%。从 2010 ~ 2023 年近 14 年的平均全球海洋净初级生产力(NPP)空间分布看(图 1.9)，不同海域的初级生产力并不相同，其中沿岸海域最高，渐次为近海海域、赤道辐散区与亚极区间过渡海域，亚热带贫营养海域最低。

全球四大洋中，大西洋平均初级生产力最高（ $189.71 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ），印度洋次之（ $162.07 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ），随后为太平洋（ $142.26 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ），北冰洋最低（ $138.13 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ）。

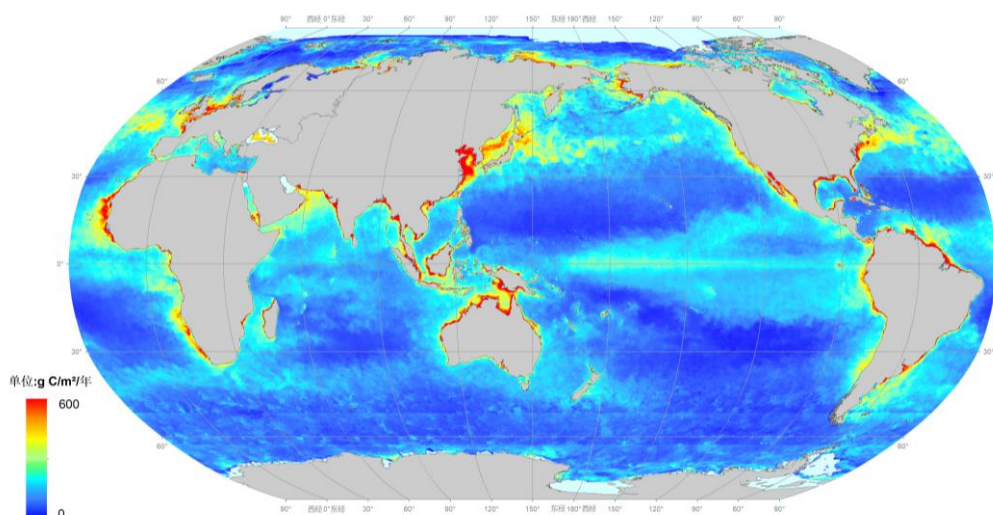


图 1.9 2010 年 ~ 2023 年平均全球海洋净初级生产力（NPP）分布

从时间序列的变化看（图 1.10），过去的 14 年里全球海洋 NPP 总量呈先下降（2010 ~ 2014 年）后上升（2014 ~ 2023 年）趋势，其中 2010 ~ 2014 年的减少率约为 0.97 Gt C/a （ $R^2=0.95, P < 0.01$ ），呈下降趋势的海域面积占全球海洋的 62.62%（图 1.11）；2014 ~ 2023 年以来的增长率约为 0.66 Gt C/a （ $R^2=0.82, P < 0.01$ ），呈上升趋势的海域面积占全球海洋的 68.09%（图 1.12）。2014 ~ 2023 年以来，太平洋海域的赤道辐射区、以及 40°S 以南的大部分海域呈现明显上升趋势。

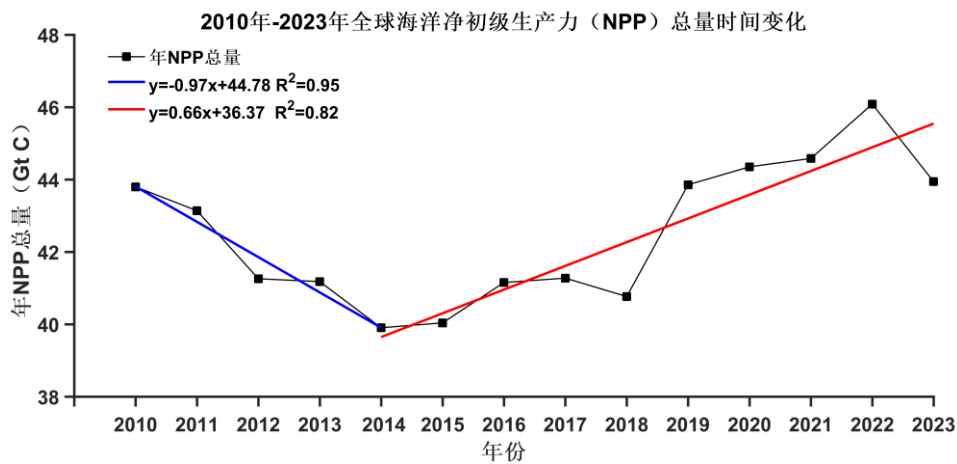


图 1.10 2010 年 ~ 2023 年全球海洋净初级生产力（NPP）总量时间变化

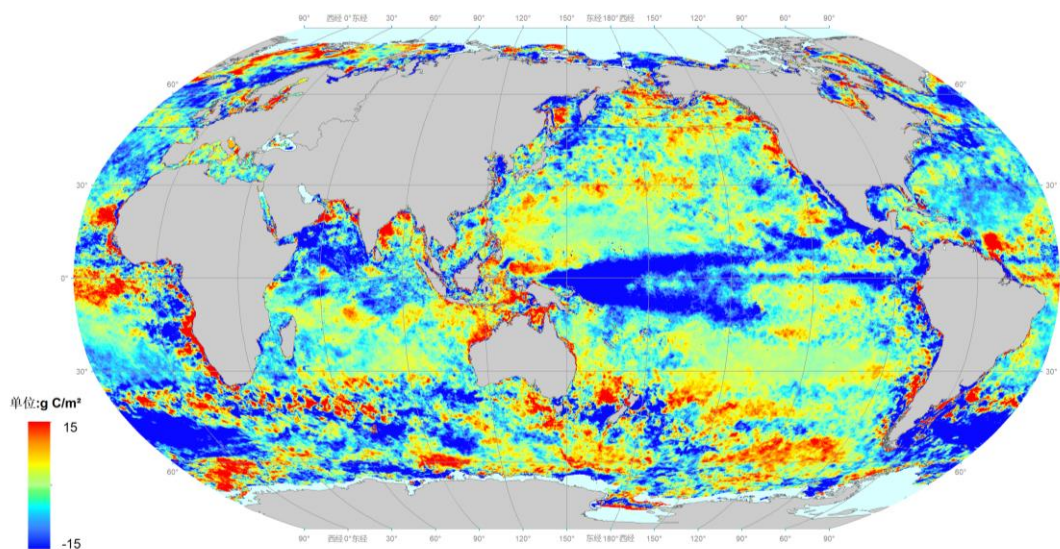


图 1.11 2010 年 ~ 2014 年全球海洋净初级生产力（NPP）变化趋势空间分布图

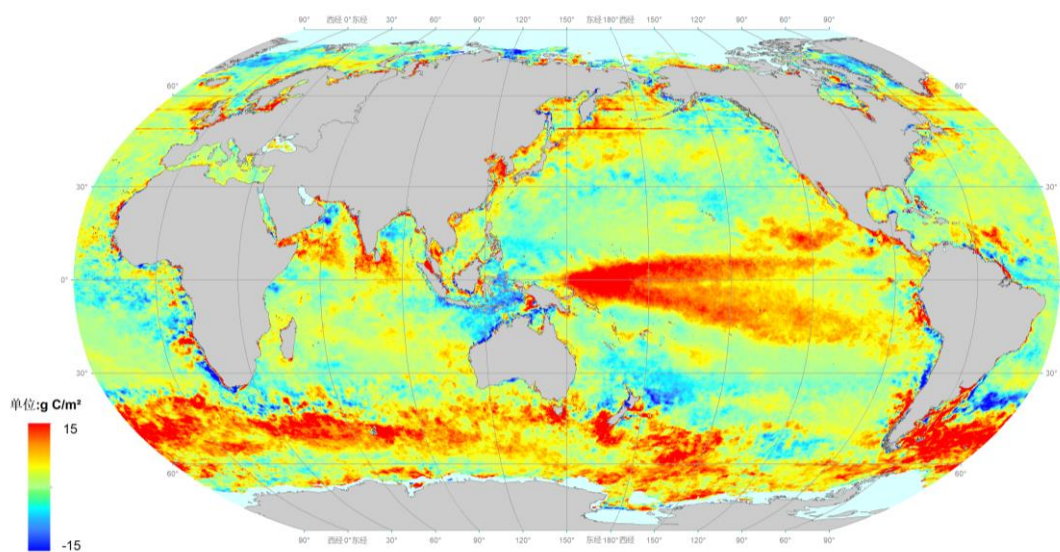


图 1.12 2014 年 ~ 2023 年全球海洋净初级生产力 (NPP) 变化趋势空间分布图

1.4 全球海洋水体颗粒有机碳

研究表明,人类每年向大气排放的 CO_2 约有一半被海洋所吸收,并通过浮游植物的光合作用转化为颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 被沉降固定下来,POC 是海洋生物体代谢、沉积物再悬浮及陆源输入产生的有机颗粒物,包括浮游植物细胞、细菌以及有机碎屑等,是海水中碳固化和迁移输出的主要形式。

2023 年全球海洋上层水体 POC 浓度均值约为 85.42 mg/m^3 , 真光层 POC 综合含量均值约为 4745 mg/m^2 。从空间分布看(图 1.13 ~ 图 1.14), 不同海域的上层水体 POC 浓度与真光层 POC 含量存在显著差异, 热带与亚热带海域 (40°S - 40°N , 180°W - 180°E) 上层水体 POC 浓度与真光层 POC 含量均明显低于其他高纬度与温带海域, 受人类活动与陆源河流 POC 汇入的影响, 沿岸海域的上层水体 POC 浓度与真光层 POC 含量最高, 其次为近岸海域, 远海及大洋海域的 POC 浓度较低。全球四大洋中 (不包含大陆架), 北冰洋的平均上层水体 POC 浓度均值、真光层 POC 含量均值最高 (114.55 mg/m^3 , 5805 mg/m^2), 大西洋次之 (69.68 mg/m^3 , 4126 mg/m^2), 随后为太平洋 (67.59 mg/m^3 , 4040 mg/m^2), 印度洋最低 (59.20 mg/m^3 , 3689 mg/m^2)。从时间变化角度看 (图 1.15), 2010 ~ 2019 年全球尺度范围内, 海洋上层水体 POC 浓度年均值、真光层 POC 含量年均值随时间变化趋势与海洋 NPP 年总量随时间变化趋势基本一致。

然而在 2019~2021 年间，全球海洋上层水体 POC 浓度连续下降，海洋 NPP 总量却连续升高，二者呈现相反的趋势，且 2019~2022 年间全球海洋真光层 POC 含量持续降低，此现象是否由 COVID-19 期间人类活动减少引起还需进一步研究。相比于 2022 年，2023 年全球海洋 NPP 总量和全球海洋上层水体 POC 浓度下降，全球海洋真光层 POC 含量升高，三者的值与 2018~2019 年度相当。

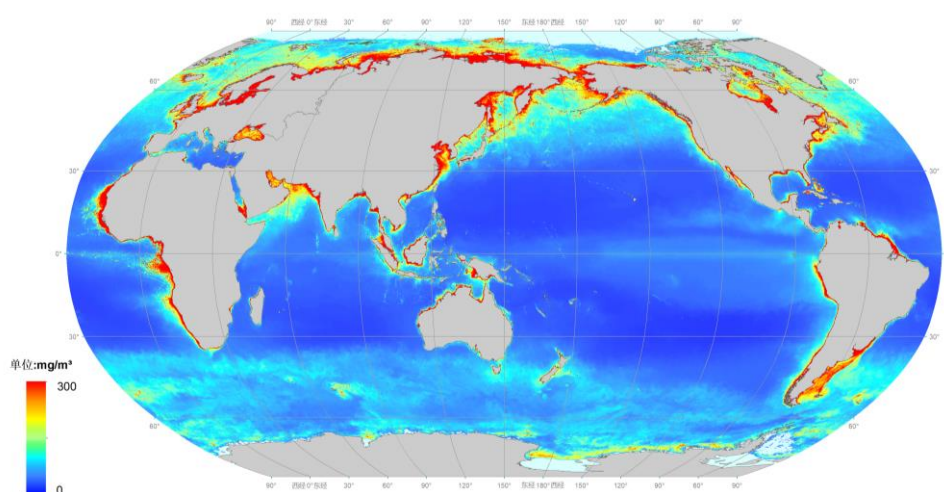


图 1.13 2010 年~2023 年平均全球海洋上层水体颗粒有机碳浓度分布

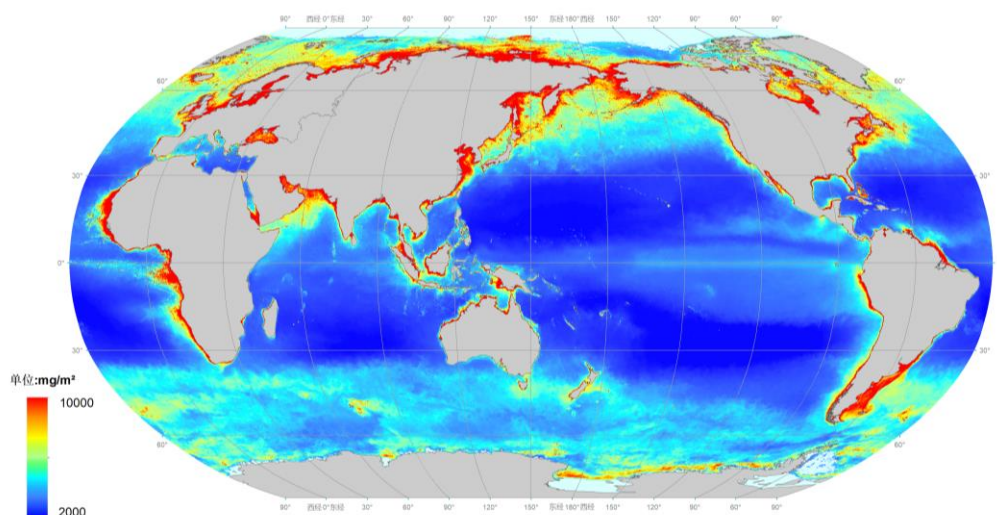


图 1.14 2010 年~2023 年平均全球海洋真光层水体颗粒有机碳综合含量分布

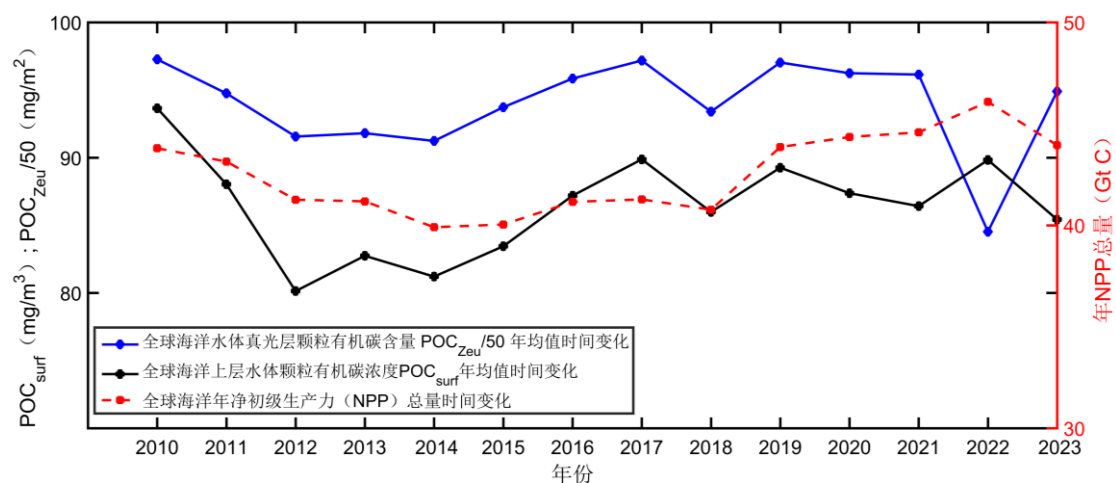


图 1.15 2010 年 ~ 2023 年全球海洋真光层 POC 含量均值、海洋水体上层 POC 浓度以及全球海洋年 NPP 总量时间变化

第2章 极地海冰

在全球变暖背景下,南北极海冰正发生着快速变化。1979~2020年,北极海冰范围每10年下降13.1%,成为气候变暖最具标志性的指示因子之一。与北极相反,过去几十年南极海冰多数时间在增长,但近几年海冰减少速度创下纪录,南极海冰的异常变化特征及其影响正在受到更多关注。

海冰密集度定义为单位面积海面上海冰(包括融池)所占的面积百分比,是海冰冰情分布的重要参数。基于风云三号(FY-3)微波辐射成像仪(Microwave Radiation Imager, MWRI)2011~2023年的海冰密集度产品,进行极地海冰范围变化和时空分布分析。其中,海冰范围定义为海冰密集度大于15%的海冰覆盖面积。

2.1 北极海冰

北极海冰范围具有显著的季节性变化特征(图2.1),海冰最小范围出现在9月,最大范围出现在3月。2023年9月,北极海冰范围为 $4.89 \times 10^6 \text{ km}^2$,较历史同期偏大2.78%,较2022年同期偏小 $0.45 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中日最小值出现在9月18日,海冰范围为 $4.72 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。2023年3月,北极海冰范围为 $14.64 \times 10^6 \text{ km}^2$,较历史同期偏大0.06%,较2022年同期偏小 $0.19 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中日最大值出现在3月4日,海冰范围为 $14.67 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

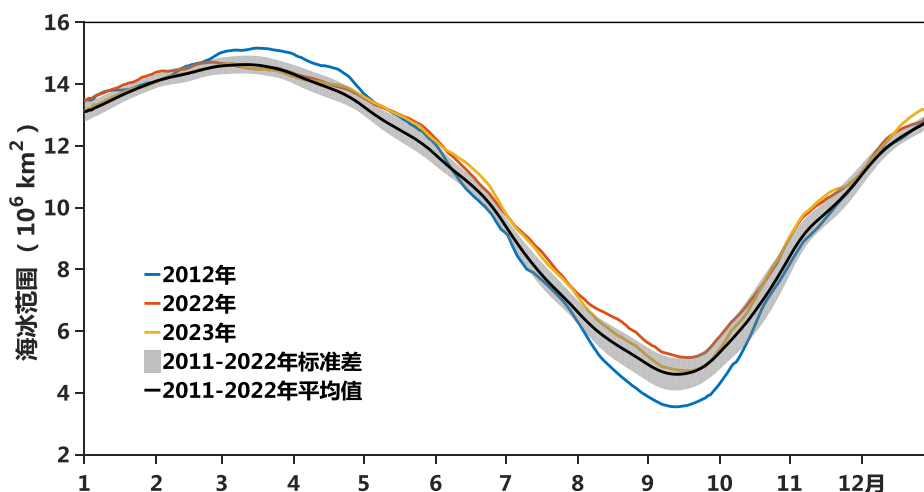


图 2.1 FY-3 MWRI 监测北极海冰范围变化：典型年份（2012，2022，2023）

与多年平均（2011～2022 年）海冰范围变化序列图（单位： 10^6 km^2 ）

3 月和 9 月北极月平均海冰密集度及距平分布显示（图 2.2），2023 年 3 月，格陵兰海、白令海以及鄂霍茨克海的海冰边缘存在正异常外，其他海域的海冰边缘整体处于负异常。2023 年 9 月，包括拉普捷夫海、喀拉海以及巴伦支海在内的海冰密集度存在正异常，而负异常主要发生在常年被冰覆盖的加拿大群岛、波弗特海、楚科奇海、东西伯利亚海。

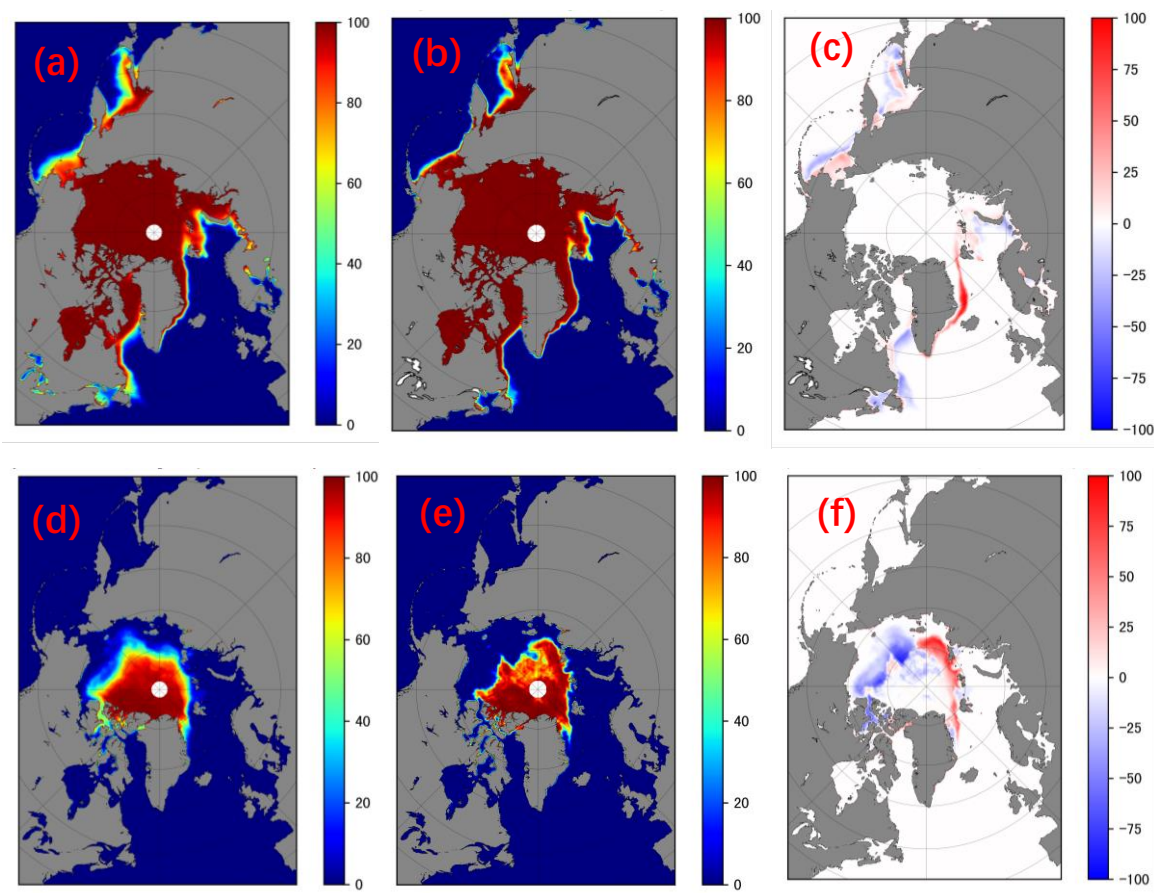


图 2.2 FY-3 MWRI 监测的北极月平均海冰密集度 (a) 2011 ~ 2022 年平均的 3 月海冰密集度 (b) 2023 年 3 月海冰密集度 (c) 2023 年 3 月海冰密集度距平 (d) 2011 ~ 2022 年平均的 9 月海冰密集度 (e) 2023 年 9 月海冰密集度 (f) 2023 年 9 月海冰密集度距平

2.2 南极海冰

南极海冰范围具有显著的季节性变化特征(图 2.3)。2023 年南极海冰范围创下多项新低纪录。2023 年，南极海冰范围的日最小值出现在 2 月 21 日，海冰范围为 $2.53 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，为自 2011 年以来夏季海冰范围最低值，南极海冰范围的日最大值出现在 9 月 11 日，海冰

范围为 $17.37 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，为自 2011 年以来冬季海冰范围最低值。2023 年南极海冰范围全年异常偏低，从 2023 年 4 月开始，在最初接近平均水平后，海冰的季节性扩张尤为缓慢，2023 年 5 ~ 10 月的海冰范围均为自 2011 年以来同期的最低纪录（图 2.3）。

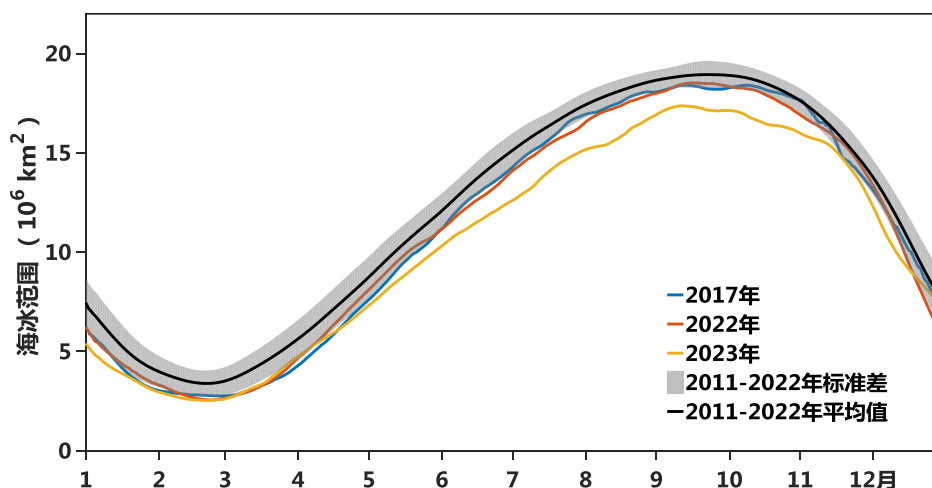


图 2.3 FY-3 MWRI 监测南极海冰范围变化：典型年份（2017，2022，2023）

与多年平均（2011 ~ 2022 年）海冰范围变化序列图（单位： 10^6 km^2 ）

2023 年 2 月南极海冰范围为 $2.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ （图 2.4），较气候态同期偏小 25.24%，创下月尺度同期南极海冰范围新低纪录。2023 年 9 月南极海冰范围为 $17.21 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，较历史同期（2011 ~ 2022 年）偏小 8.78%，创下月尺度同期南极海冰范围新低纪录。从线性拟合的趋势上看，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 $1.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

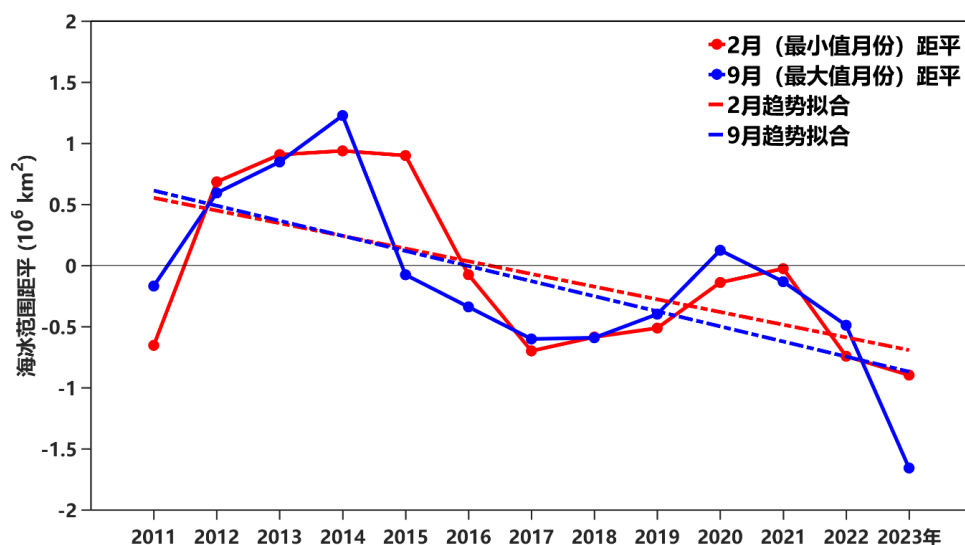


图 2.4 FY-3 MWRI 监测南极海冰范围变化：2011 ~ 2023 年南极海冰范围 2 月和 9 月较多年平均（2012 ~ 2022 年）的距平值（单位： 10^6 km^2 ）

2 月和 9 月南极月平均海冰密集度及距平分布显示（图 2.5），2023 年 2 月，南极海冰主体分布在西北部威德尔海近南极半岛一侧，东南部近南磁极、西部阿蒙森海至西南部罗斯海西北沿岸，海冰带较宽较多，这些是南极多年海冰主要分布区；东北部印度洋至东南部太平洋沿岸，分别有细长和时宽时窄的海冰带；东北部埃默里冰架东南部海湾近岸处几乎没有海冰，南部罗斯海近岸大片区域没有海冰，仅南部外海有漂流的浮冰。2023 年 2 月，除了威德尔海的海冰接近平均水平，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，仅西部南极半岛西北端没有被密实的海冰遮挡，海冰密集度约 40% 左右。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，平均增大了 25% 至 75%；

西南部罗斯海海冰外侧以及南极北侧，海冰密集度大范围减小，平均减小了 25%至 75%；南极东侧的印度洋海域，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。

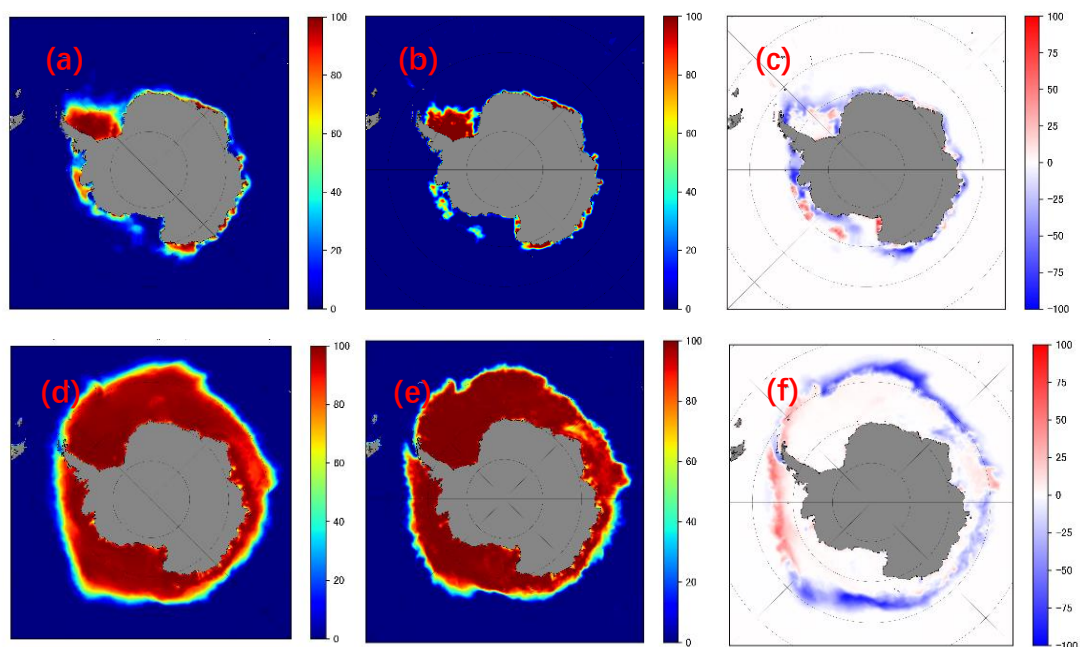


图 2.5 FY-3 MWRI 监测的南极月平均海冰密集度：(a) 2011 ~ 2022 年平均的 2 月海冰密集度 (b) 2023 年 2 月海冰密集度 (c) 2023 年 2 月海冰密集度距平 (d) 2011-2022 年平均的 9 月海冰密集度 (e) 2023 年 9 月海冰密集度 (f) 2023 年 9 月海冰密集度距平

第3章 全球水热平衡

3.1 太平洋海温

厄尔尼诺—南方涛动 (El Nino–Southern Oscillation , ENSO) 是指热带太平洋海表温度与大气环流之间的时间尺度约为 2~7 年的大型海气耦合振荡现象。ENSO 的暖位相(El Nino)和冷位相(La Nina)一般交替发生形成循环振荡。一般而言,当赤道中、东太平洋海域海表温度高于常年平均值 0.5°C 时,进入厄尔尼诺状态,这种状态持续 5~6 个月以上便形成一次厄尔尼诺事件,反之为拉尼娜事件。

基于 FY-3E 海表温度 (Sea Surface Temperature,SST) 产品监测了 2023 年 1 月~2023 年 12 月海洋 ENSO 事件的演变过程。FY-3E 月合成 SST 距平分析显示 (图 3.1) , 2023 年赤道中东太平洋 SST 距平 (气候平均值 : 1991 ~ 2020 年) 月平均 OISST (Optimum Interpolation SST)) 由负相位 (1~3 月) 逐渐转换为正相位 (4~12 月) , 自 2023 年 5 月起进入厄尔尼诺状态。2023 年 FY-3E SST (图 3.1) 和风云三号 G 星 (FY-3G) MWRI (图 3.2) 月合成 SST 距平图均显示,自 2023 年 5 月异常暖 SST 中心从赤道中太平洋向赤道东太平洋扩展 ;6~8 月,异常暖 SST 逐步呈现出典型的暖舌结构 ; 9~12 月,赤道中东太平洋异常暖 SST 进一步发展,部分海域异常暖 SST 超过了 3°C 。

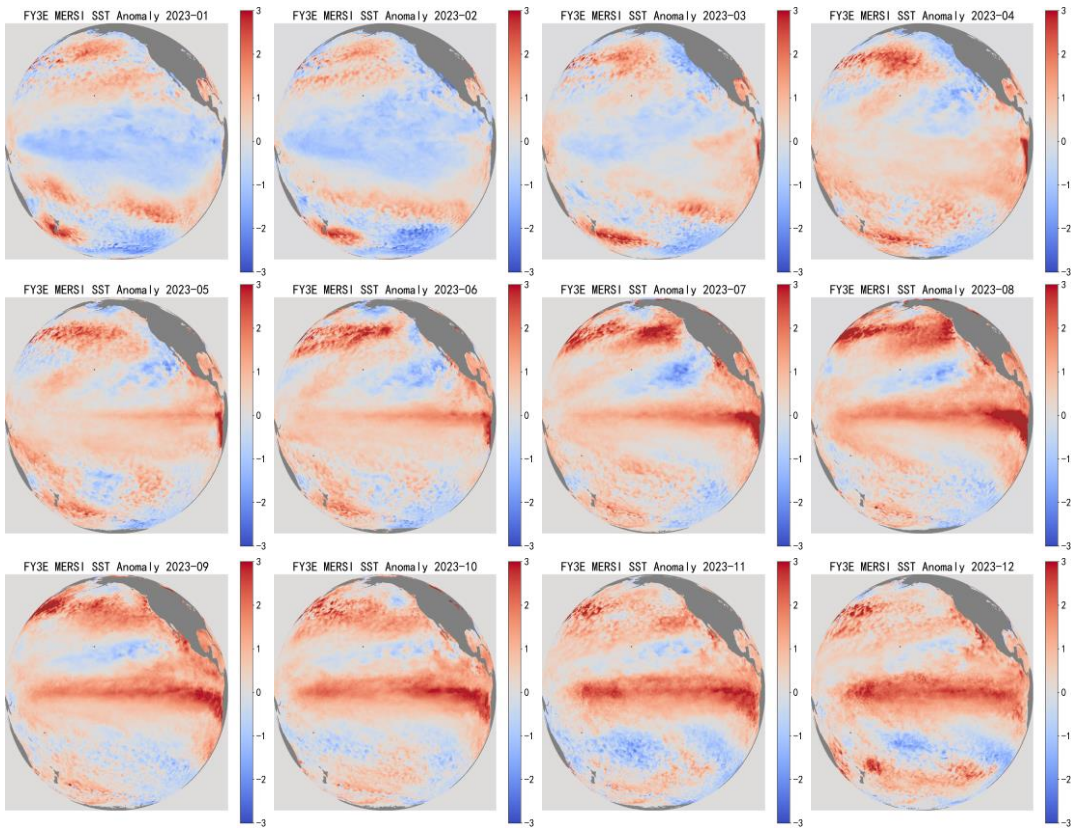


图 3.1 2023 年 FY-3E MERSI-LL 月 SST 距平图 (单位 : $^{\circ}\text{C}$)

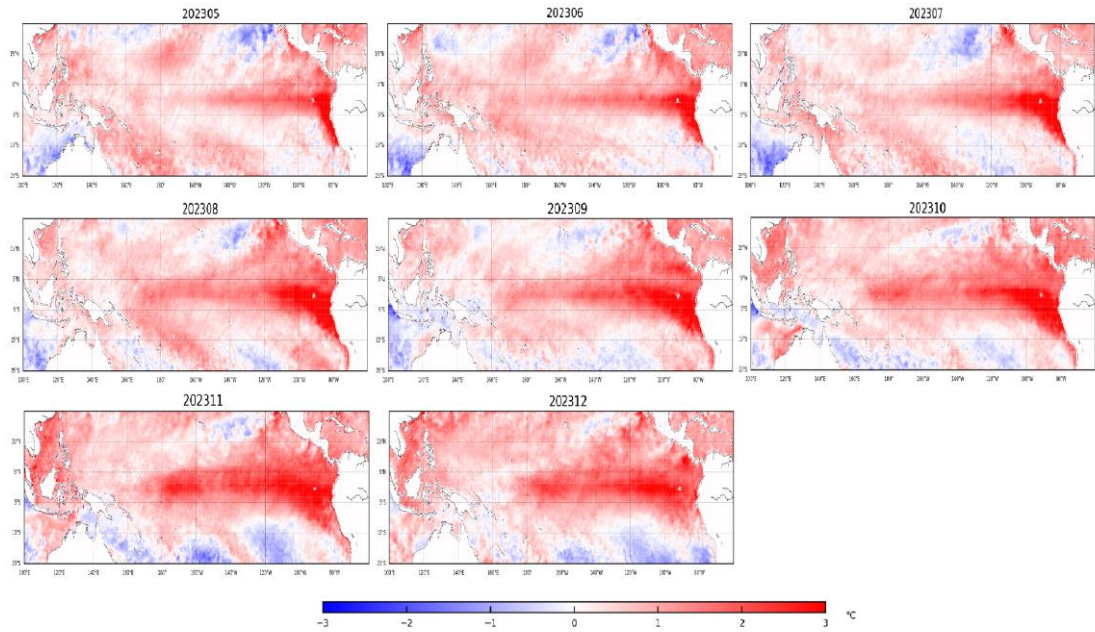


图 3.2 2023 年 5 ~ 12 月 FY-3G MWRI 月 SST 距平图 (单位 : $^{\circ}\text{C}$)

3.2 全球极端冷暖事件

世界气象组织（WMO）整合的气象数据集显示，2023 年全球年均温度成为有纪录以来最高的一年。6~12 月每个月的全球气温均创下了新的月度纪录，7 月和 8 月是有纪录以来最热月份，受此影响，全球多地发生大范围持续高温和干旱。

北极是气候变暖的敏感区，2010~2023 年 1~12 月北极区域（60-90°N;0-360）850hPa 温度时间演变（图 3.3）显示：年平均温度呈现上升趋势（红色线），北极区域年平均 850hPa 温度由 2010 年的低于-5°C 增加至 2023 年的高于-5°C，线性趋势线显示增加 1°C 左右。北极区域 850hPa 温度升高趋势明显的月份包括 6、7、8、9、10 和 11 月。

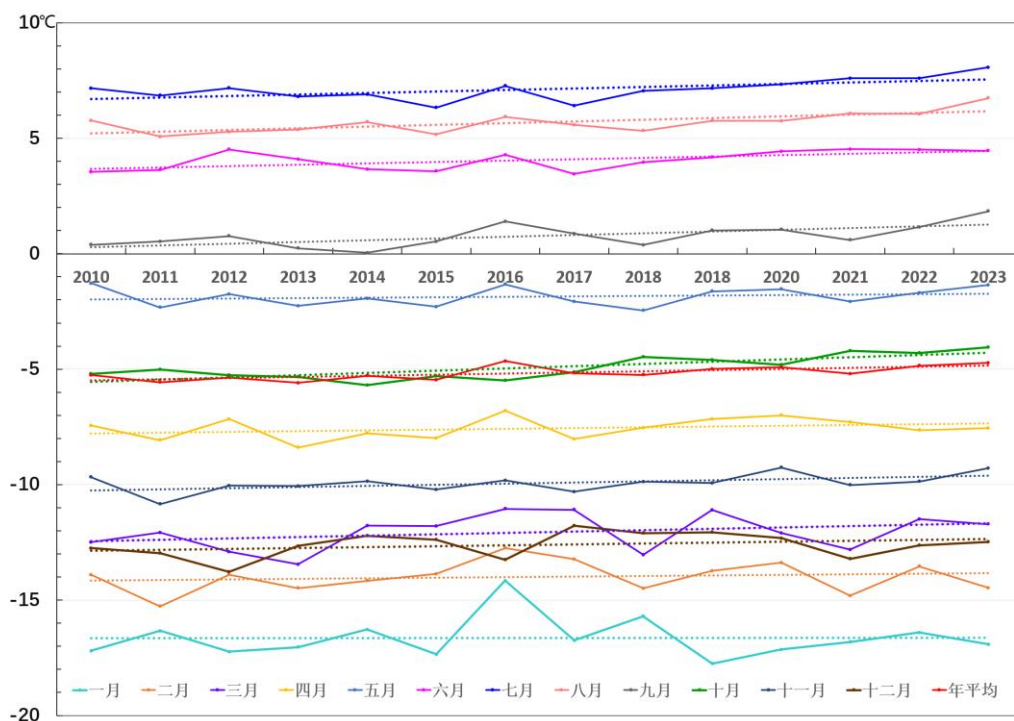


图 3.3 2010~2023 年 1~12 月北极区域 850hPa 温度时间序列(单位 : °C)

2023 年主要异常偏暖和极端高温过程包括：1 月上旬欧洲异常

暖冬，创纪录的冬季高温席卷欧洲；4 月西班牙高温干旱；4~5 月中南半岛高温热浪；6~7 月北半球多地持续高温热浪；7 月中旬~8 月南美洲冬季部分地区出现创纪录异常高温；12 月澳大利亚极端高温等。在气候变暖的背景下，2023 年全球出现多次极端寒潮和雨雪冰冻天气，主要包括：2 月初加拿大和美国创纪录强寒潮；2 月底北美冬季风暴造成美国暴风雪天气；11 月底，受地中海气旋影响，东欧出现暴风雪；12 月中旬，中国、北美同期出现极端雨雪冰冻天气和强降温。

利用 FY-3D 对全球大气温度进行监测，北半球区域平均月平均 850hPa 温度距平显示(图 3.4)：2023 年 1~6 月温度整体偏低，7~12 月整体偏高，显著偏低的月份出现在 4 和 5 月，显著偏高的月份出现在 9、10 和 12 月。

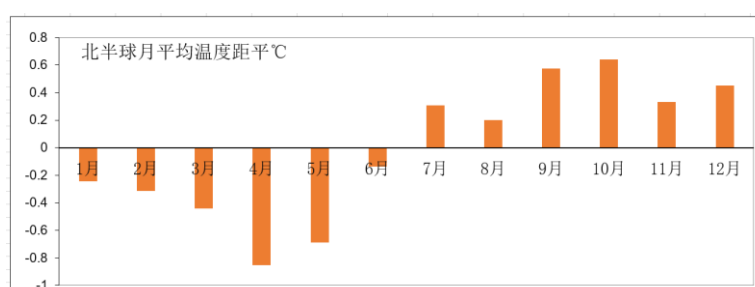
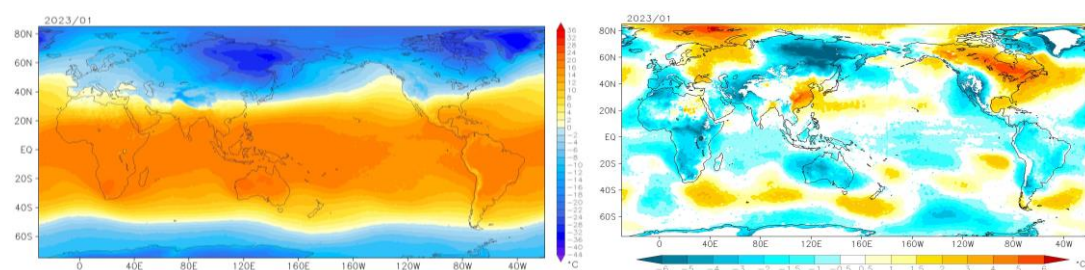
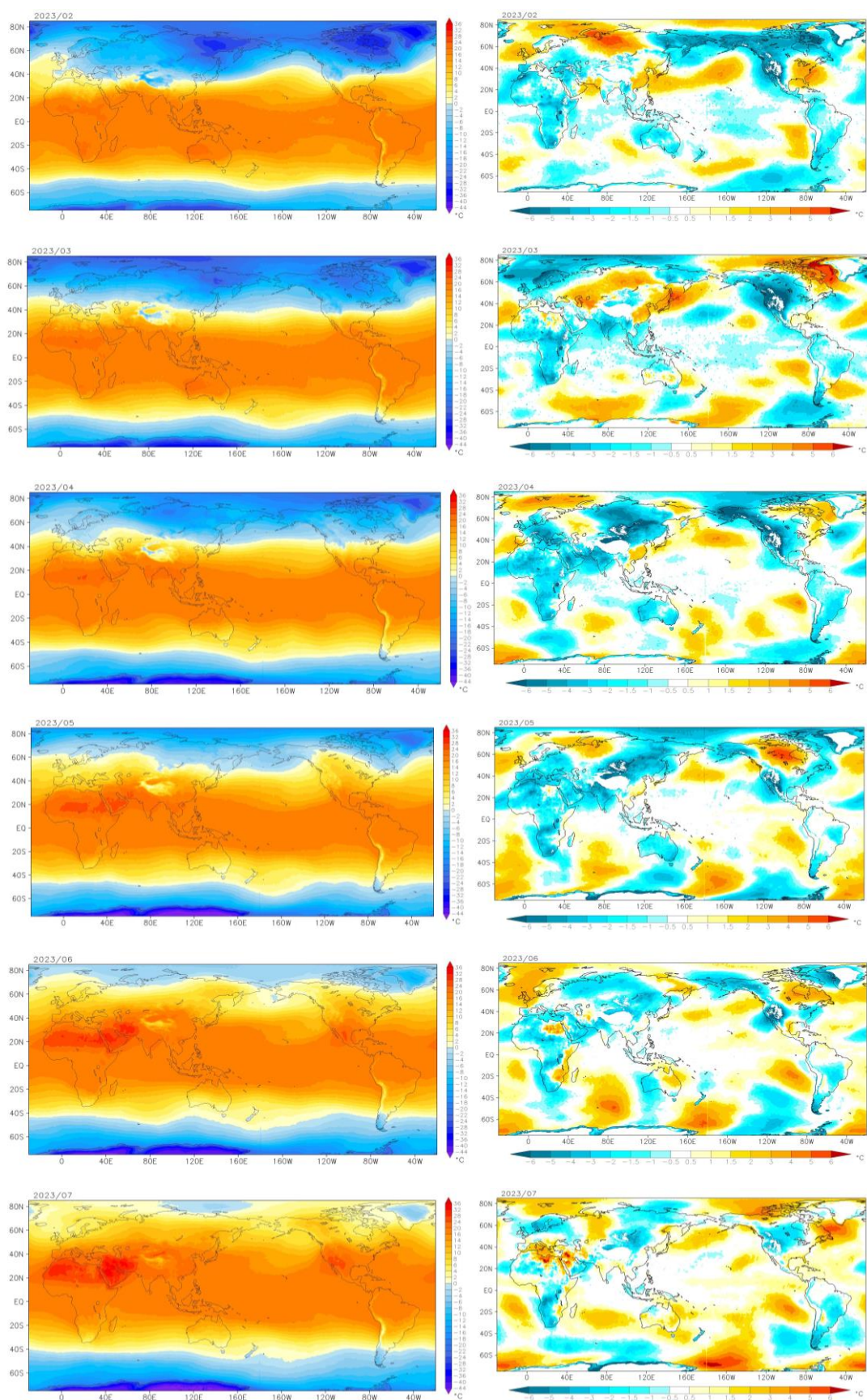


图 3.4 2023 年 1~12 月北半球区域平均 FY-3D 月平均 850hPa 温度距平 (单位：°C，气候平均值：1991~2020 年)

2023 年 1~12 月月平均 850hPa 温度距平图显示 (图 3.5)：1 月北半球偏暖出现在欧洲、北美洲中东部和中国中东部，其中欧洲北部极区温度偏高 6°C 以上，偏冷区域出现在北纬 50 度以北的欧亚大陆东北部，部分地区偏低 5°C 以上；2 月欧亚大陆中西部极区和东

亚持续偏暖 $2-5^{\circ}\text{C}$ ，北美大陆北部和西部月平均温度偏低 5°C 以上，造成美国北部和加拿大频繁出现极端暴风雪天气；3 月西亚、北亚和东亚偏暖，北美大陆北部极区由 2 月偏冷转为偏暖，北美大部中南部持续偏冷；4 月偏暖出现在东亚、东南亚、欧洲北部极区和加拿大东部，偏冷出现在非洲、南欧、亚洲北部和北美中西部等地；5 月北美北部和北欧温度偏高加剧；6 月开始，北半球多地出现极端高温天气，欧洲西部和北部、北美东北部、非洲东北部和东部、澳大利亚东部月平均温度偏高；7~8 月欧亚大陆极区异常偏暖持续发展，最大值达 6°C 以上，850hPa 0°C 等温线北推至 80°N 附近，同时南半球冬季的澳大利亚温度也偏高；9 月北半球整体偏暖状态持续发展，欧洲、北美洲、东亚温度偏高，特别是北极呈现整体偏暖特征；10 月亚洲和北美中北部偏暖 $3-5^{\circ}\text{C}$ ；11 月北半球偏暖主要出现在中亚和北亚、北非，欧洲大部偏冷，此时欧洲出现暴风雪；12 月最显著的特征为 $40-70^{\circ}\text{N}$ 范围内自大西洋-欧洲-亚洲-太平洋的一条冷带，以及北美异常偏暖中心（东北部偏暖 6°C 以上）， 70°N 以北极区整体偏暖，同时中低纬度的欧洲南部、非洲北部、东南亚和东亚月平均温度偏高。





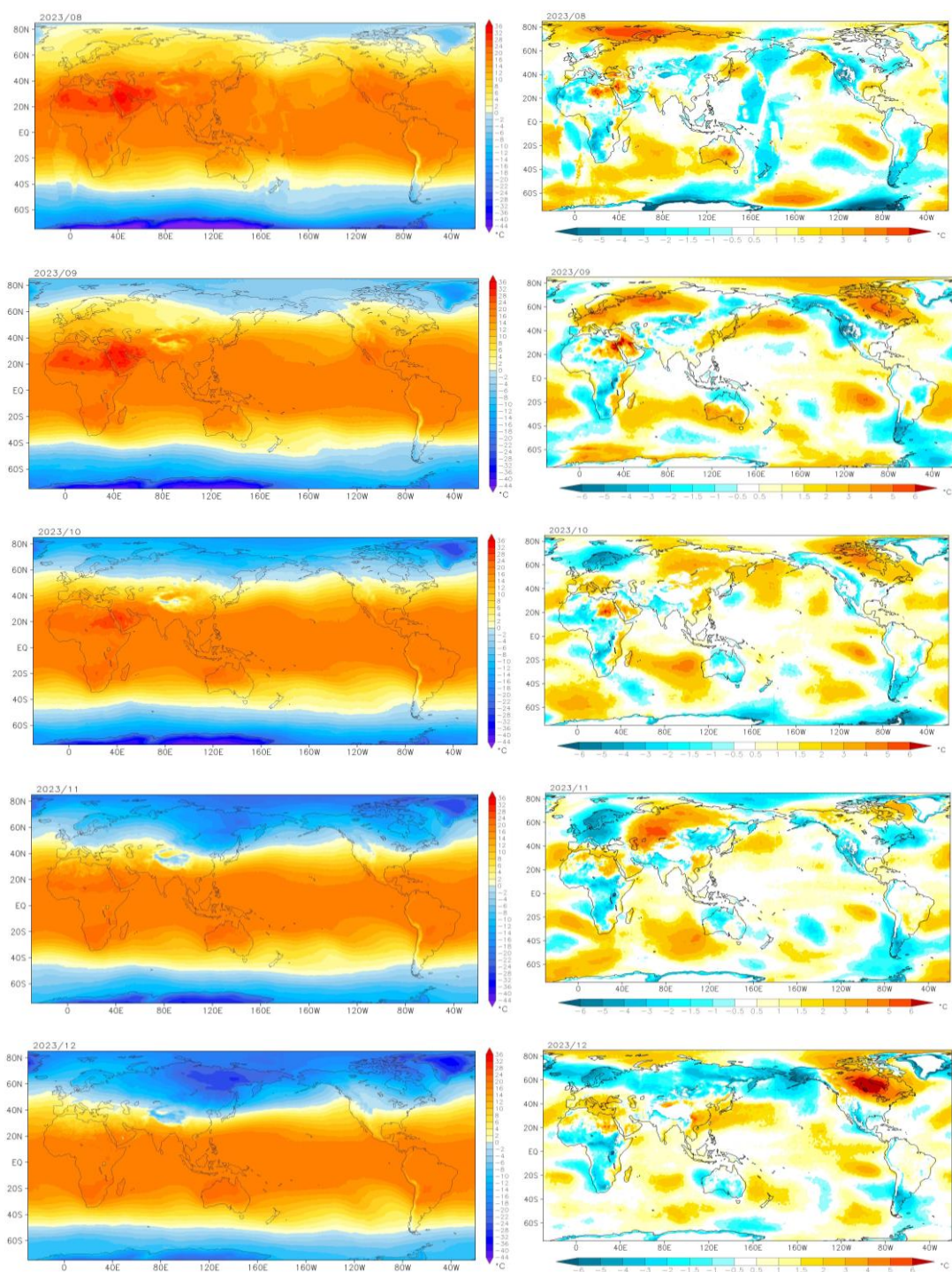


图 3.5 2023 年 1~12 月全球 FY-3D 月平均 850hPa 温度距平 (单位: °C, 气候平均值: 1991~2020 年)

3.3 全球陆地累积降水

全球变暖导致空气中水分含量增加，水循环过程加速，使得降雨的强度更强、范围更广、持续时间更长，形成极端降雨、异常降雨的可能性更大。2023 年全球陆地降水量分布不均，大体上来说，赤道附近西太平洋地区、印度半岛、西非季风降水区和南美洲北部等地区是全球年累积降水量较大的地区。北半球高纬度的大部分地区、非洲北部地区是全球较为干旱的地区（图 3.6）。

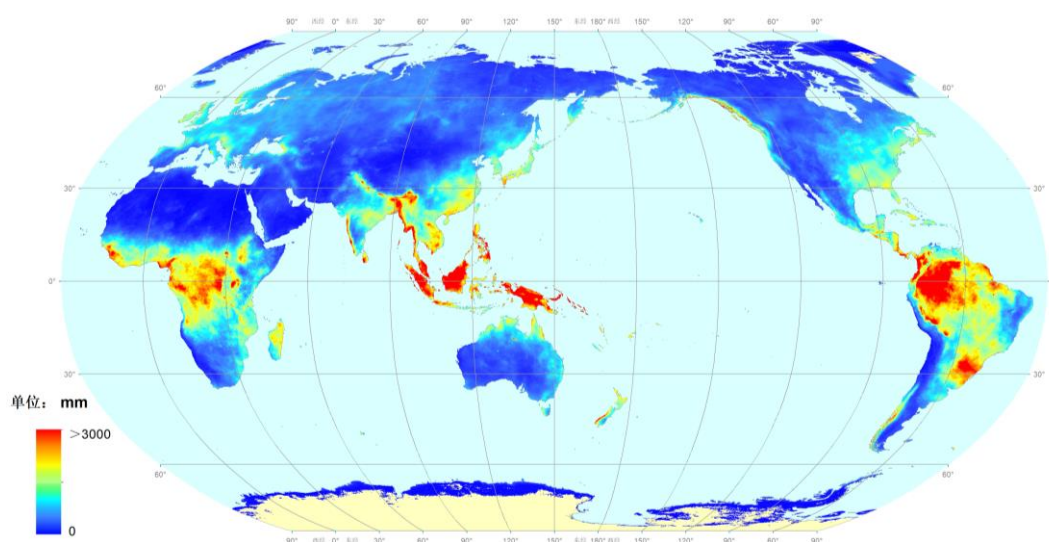


图 3.6 2023 年卫星反演全球陆地降水量图

基于 GPM 卫星反演的降水数据集分析表明，2019 ~ 2023 年全球累积降水量平均值以及最大值，均呈现逐年递增的趋势。2023 年全球陆地月降水量最大值比 2022 年月降水量的最大值多了 5.23%。

全球变暖导致极端、异常天气频发。例如，受副热带高压影响，中东大部分地区大气相对稳定，一直以来都是世界上最干旱的地区之一，降雨稀少。然而，2023 年这片干旱的土地却出现了罕见暴雨。当地时间 1 月 2 日，被沙漠包围的沙特阿拉伯第二大城市吉达突降

暴雨，FY-4A 气象卫星降水估计发现此次对流引发了较强降水，对流中心累积降水量超过 60mm。

3.4 射出长波辐射

大气顶射出长波辐射 (Outgoing Long-wave Radiation , OLR) 是地球大气系统在大气顶向外空辐射出去的热辐射能量密度 , 是地球辐射收支的重要组成部分 , 能反映云顶及下垫面的热辐射变化。区域 (如北极 , 低纬) OLR 长期变化监测可为气候变化趋势分析提供参考。

利用 FY-3 2011 ~ 2023 年 OLR 产品统计北极 (70°N 以北) 和赤道地区 (10°S-10°N) OLR 年均值及距平值 (2011 ~ 2023 年年均 OLR 为基准)。2023 年 , 北极地区 OLR 年平均和距平空间分布图 (图 3.7) 显示 , OLR 的分布与下垫面的类型 (冰雪 , 陆地和海洋) 密切相关。格陵兰岛大陆冰川面积有 183.39 万平方千米 , 其厚度大约 2300 米 , 是北极最冷位置 , 年平均 OLR 值稳定小于 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; 而 30°E 附近的欧洲高纬地区是北极地区温度较高的区域 , 常年年平均 OLR 值大于 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从距平的年际变化来看 , 2023 年格陵兰岛及加拿大西北部呈现正距平 , 而加拿大东北及北冰洋 90-150°E 区域呈现明显负距平。

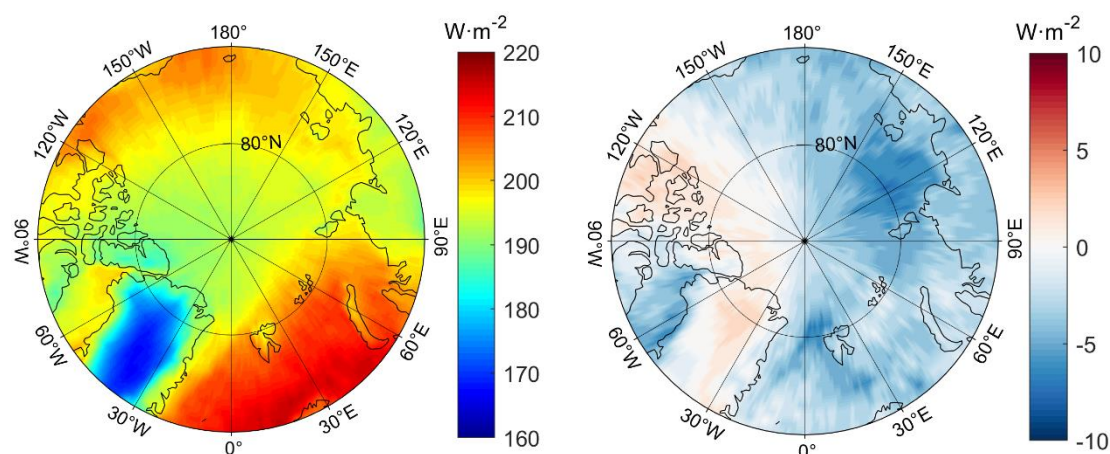
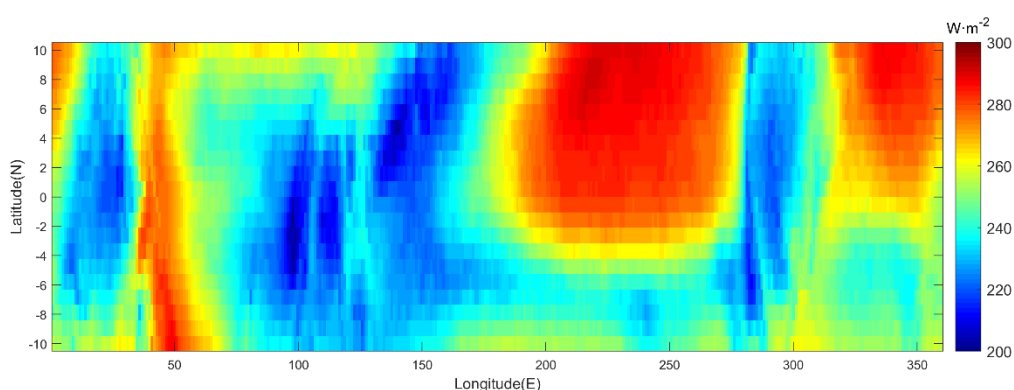


图 3.7 北极地区 2023 年 OLR 均值（左）和距平（右）空间分布

2023 年赤道地区 OLR 年平均和距平空间分布图（图 3.8）显示，太平洋中部和大西洋西岸附近 OLR 偏大，大于 $260\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；而非洲中部，美洲中部及南亚地区，由于海陆结合的地形特征，导致强对流天气频发，OLR 较小，大多数小于 $220\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从 OLR 距平分布来看，2023 年在西太平洋暖池北部地区明显出现正距平，但强度较 2022 年较弱。



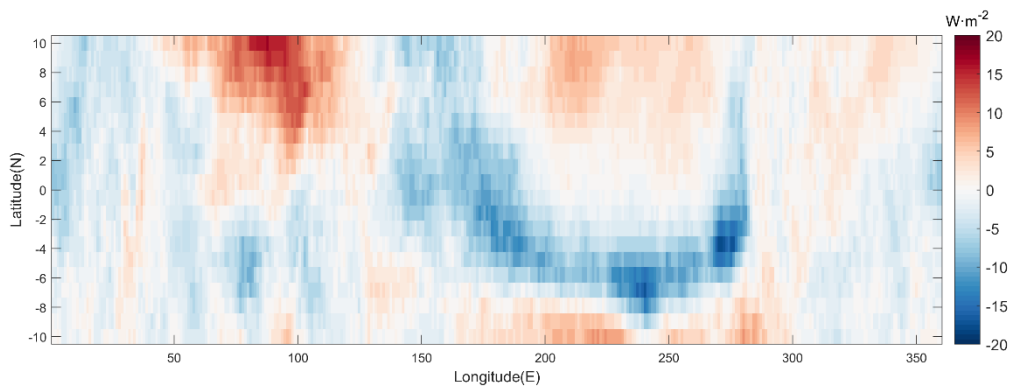


图 3.8 赤道地区 2023 年 OLR 均值 (上) 和距平 (下) 空间分布

2023 年北极地区和赤道地区逐月 OLR 平均值和距平时间序列图显示 (图 3.9、图 3.10) , 北极地区由于极昼极夜交替 , 全年 OLR 均值变化趋势明显 , 最大值出现在 7 月 , 相比而言 , 赤道地区的变化幅度小于 $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。同时 , 2023 年赤道地区 OLR 除 3 月、7 月、8 月和 10 月外均为负距平 , 而北极地区 4 ~ 11 月期间持续负距平 , 但存在波动。

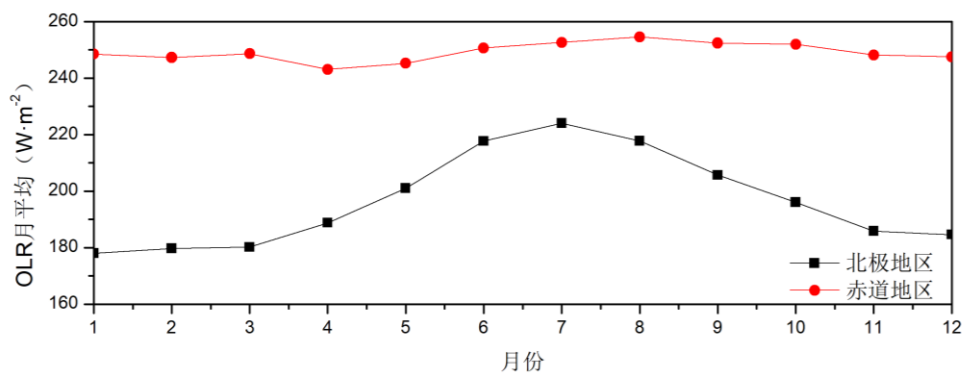


图 3.9 2023 年北极地区和赤道地区逐月 OLR 均值时间序列

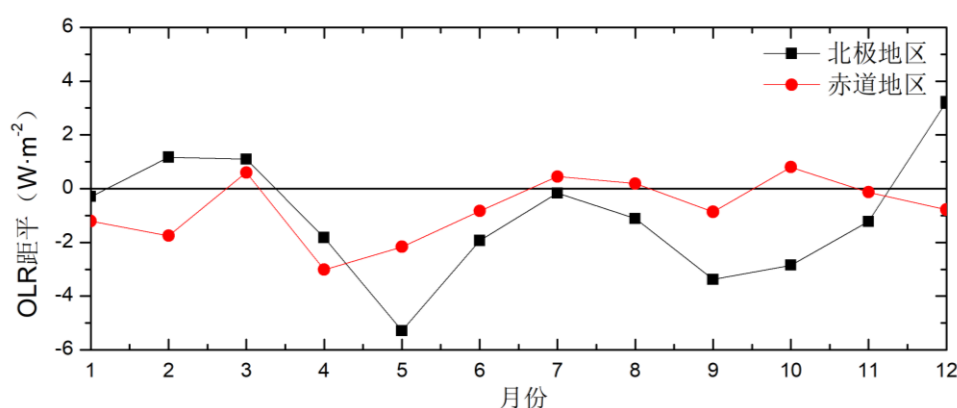


图 3.10 2023 年北极地区和赤道地区逐月 OLR 距平时间序列

3.5 全球干旱

近年来陆地干旱状态和干湿变化受到了越来越多的关注，利用卫星遥感开展干旱监测及变化特征研究是重要的发展趋势。基于 FY-3 MWRI 全球陆地降水、土壤湿度和地表温度数据，经过质量控制，月值合成和订正处理，利用单一变量相同月份的最大值、最小值和当月值，将降水、土壤湿度和地表温度转换归一化的降水状况指数 (Precipitation Condition Index , PCI)、土壤湿度状况指数 (Soil Moisture Condition Index , SMCI) 和地表温度状况指数 (Temperature Condition Index , TCI)。通过单一干旱指数的区域适应性评估，确定了融合系数并生成了微波集成干旱指数 (Microwave Integrated Drought index, MIDI)，MIDI 为无量纲量，数值范围为 0 到 1 之间，数值越低表示越干旱。

(1) 全球干旱空间分布特征

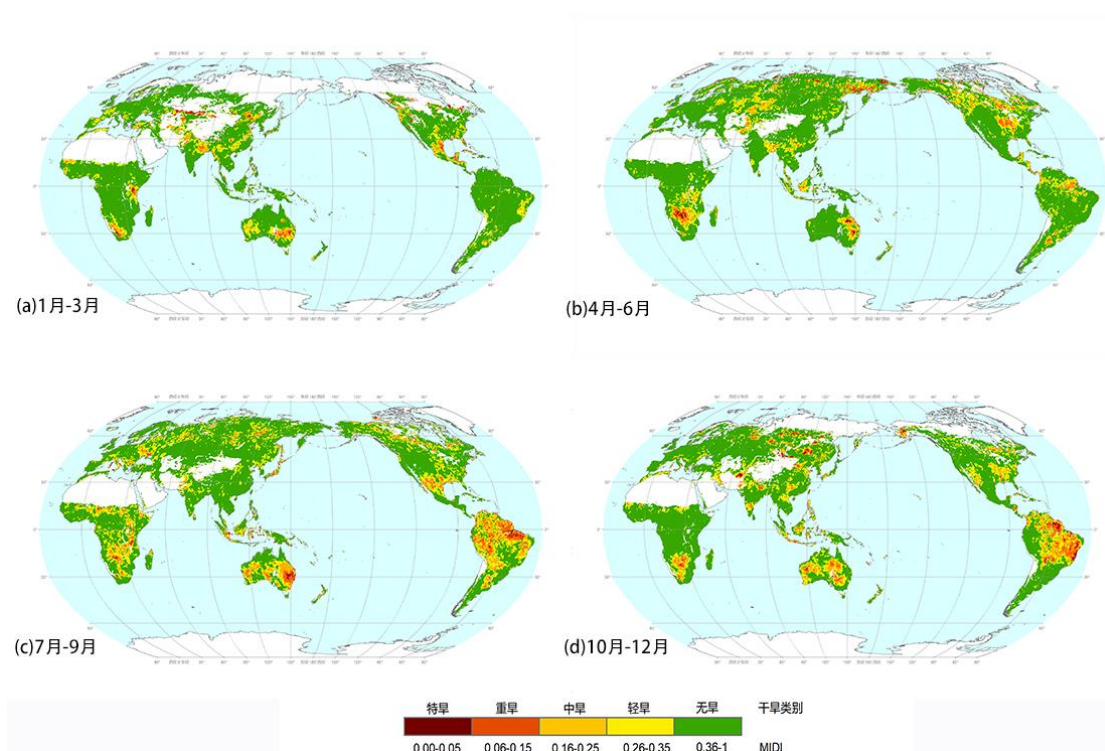


图 3.11 2023 年不同季节干旱空间分布特征

(a-d 分别为 1~3 月 , 4~6 月 , 7~9 月和 10~12 月)

2023 年 1~3 月干旱主要位于北美洲、亚洲、非洲和大洋洲,呈现出分散分布的状态(图 3.11)。其中美国中南部、墨西哥、巴基斯坦、印度和澳大利亚西部地区的多为轻旱或中旱,而坦桑尼亚、肯尼亚、南非、哈萨克斯坦、我国内蒙古东部和澳大利亚东部部分地区达到了重旱。2023 年 4~6 月干旱范围扩大,主要分布于北美洲加拿大南部、美国中部、南美洲巴西东北部、亚洲中部和俄罗斯东部、澳大利亚东北部,需要注意的是本时段干旱中心位于非洲安哥拉、赞比亚、纳米比亚和津巴布韦。2023 年下半年(7~12 月),南半球干旱较为严重,这对处于生长季旺盛时期的植被产生严重的水分胁迫。其中南美洲大部,特别是热带地区的干旱范围广、严重程度高,并且持续发生;非洲南部的干旱尽管严重程度降低,但仍

然受到水分亏缺的持续影响；澳大利亚干旱范围明显扩大，7~9月东部地区的新南威尔士州达到了特旱，10~12月干旱则向西发展。

（2）全球干旱空间趋势特征

2014~2023年干湿趋势变化呈现出明显的空间异质性（图3.12），变干（红色）和变湿（蓝色）的区域相当（49.5%比50.5%）。具有显著性变化的区域约占全球格点的26.5%，以上格点中约41.5%的区域为显著变干，58.5%的区域则变湿。对于干湿变化的区域而言，变干区域主要分布于北美洲中部、南美洲、非洲南部和中亚；变湿区域则主要分布于墨西哥、非洲北部的萨赫勒地区、印度、中国北部、蒙古、东南亚。整体上来看，呈现出了南半球显著变干，而北半球显著变湿的格局，表明自2014年以来，北半球陆地水分状况的变好趋势提高了生态系统的水分可利用性，更好满足了植被生长的水分需求，有利于生态系统固碳。提取了8个典型区域（根据IPCC定义）的逐月MIDI时间序列，并计算了趋势变化（图3.12）。中美洲北部（NCA）和非洲东南部（ESAF）的区域变化不显著；东西伯利亚（ESB）的变湿趋势最明显，趋势为0.019/年，非洲东北部（NEAF）、非洲西部（WAF）、南亚（SAS）变湿强度次之，趋势分别为0.015/a、0.014/a和0.011/a；而南美洲季风区（SAM）和非洲西南部（WSAF）则显著变干，趋势为-0.015/a和-0.009/a。

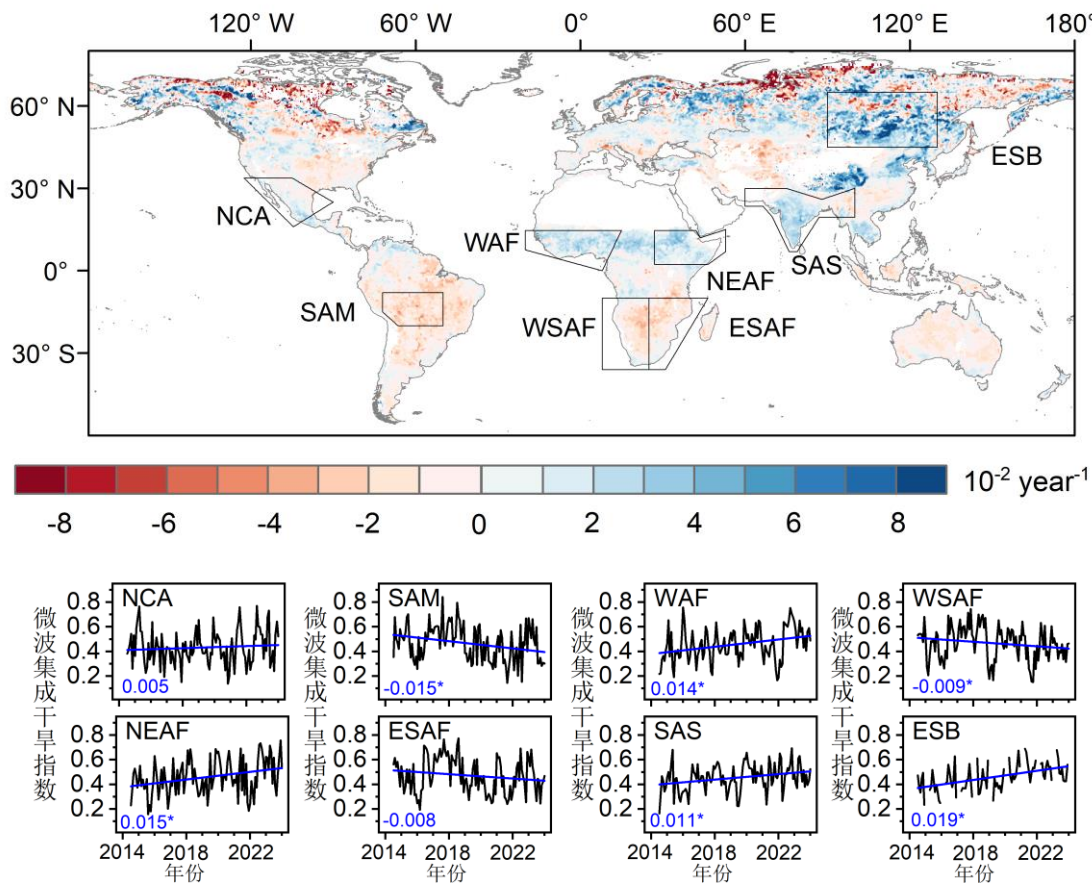


图 3.12 2014~2023 年干湿趋势变化特征（红色为变干、蓝色为变湿），8 个典型区域的长期序列（黑色）和趋势（蓝色；MIDI/a，*表示 $p < 0.05$ ）。

中美洲北部（NCA）、南美洲季风区（SAM）、非洲西部（WAF）、非洲西南部（WSAF）、非洲东北部（NEAF）、非洲东南部（ESAF）、南亚（SAS）、东西伯利亚（ESB）。

（3）全球干旱时间趋势特征

2014~2023 年微波集成干旱指数全球平均值呈现出较大的年际波动（图 3.13），经历了 2019 至 2021 年连续三年的偏干状态后，2022 和 2023 水分可利用性明显得到了恢复。与 2022 年相比，2023 年 MIDI 全年平均值与其接近，1 月、2 月、3 月和 4 月明显偏湿，8 月、9 月、10 月、11 月和 12 月则明显偏干。从趋势上来看，2014~

2023 年全球年平均值呈现出轻微变湿的特征，趋势（不显著）为 0.00184/a。同时不同月份的干旱变化差别明显，1 月、5 月、6 月、7 月和 8 月变干，其中 7 月变干最为明显，趋势为-0.00493/a；2 月、3 月、4 月、9 月、10 月、11 月和 12 月变湿，其中 11 月显著变湿，趋势为 0.00972/a。

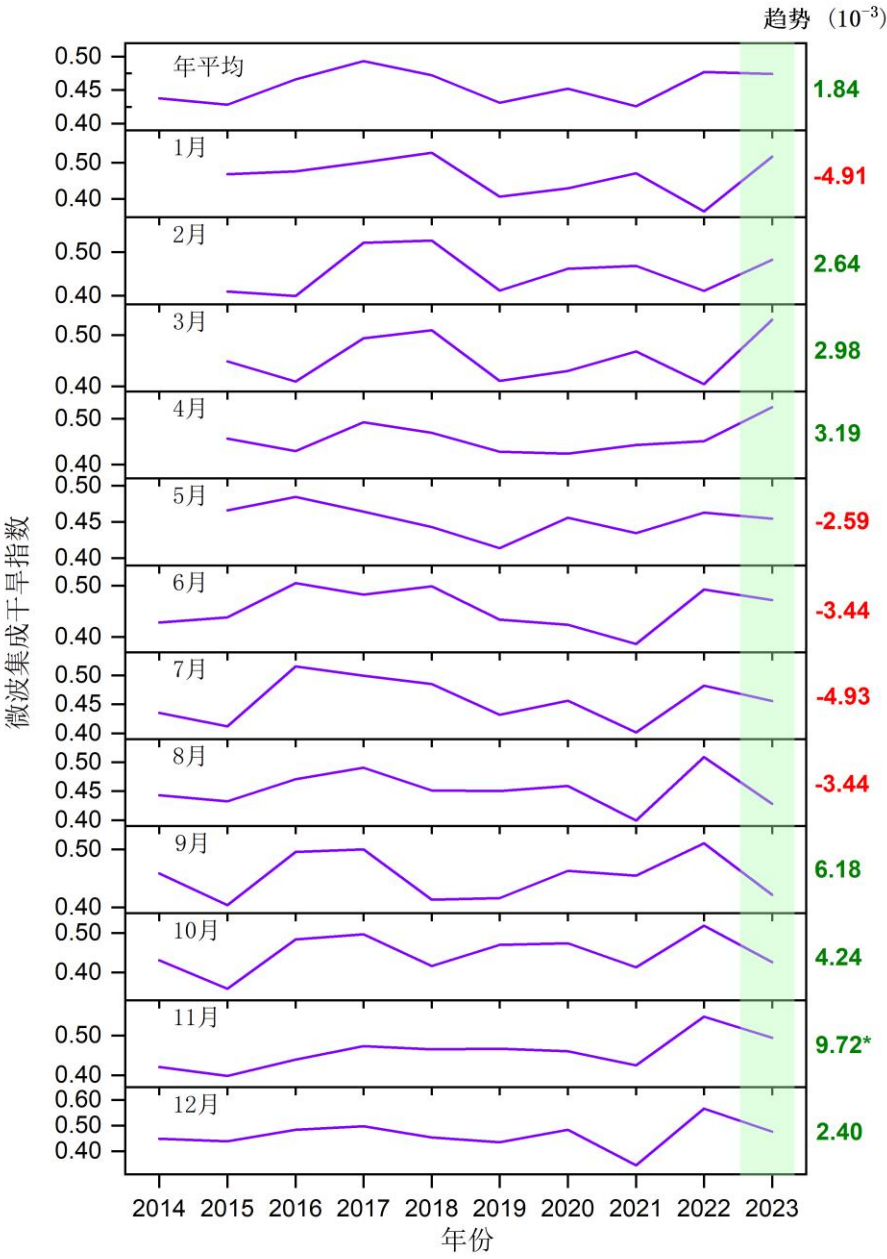


图 3.13 2014 ~ 2023 年全球不同月份干旱年际波动和趋势变化

(黑线为逐月微波集成干旱指数区域平均值, 紫线为线性趋势。图中数字为趋势, MIDI/a , *表示 $p < 0.05$)

附 录

(1) 名词术语

- 1) ppm: 摩尔比浓度 10^{-6} , 即百万分之一
- 2) ppb: 摩尔比浓度 10^{-9} , 即十亿分之一
- 3) 净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) : 是指绿色植被在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量, 是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。
- 4) BEPS (Boreal Ecosystem Productivity Simulator) 模型 : 驱动该模型的叶面积指数(LAI, Leaf Area Index) 数据来源于 GLOBMAP LAI 数据产品, 聚集度指数 CI (Clumping index) 数据来源于 MODIS BRDF 产品计算的归一化“暗点”和“热点”差值指数。
- 5) 海洋碳汇 : 又称“蓝碳”, 是指将海洋作为一个特定载体吸收大气中的二氧化碳, 并将其固化的过程和机制。
- 6) 遥感反射比 : 离水辐亮度与恰好水面之上的向下辐照度之比。
- 7) 真光层 : 海洋中光度足以供浮游植物进行光合作用的深度范围, 大约从海表面至水深 100 ~ 200 m 之间, 这层水体受大气层和阳光的影响, 水温常有明显的季节性变动, 具有基础生产力, 也是各类生物密度最高的水层。
- 8) 恒冻海冰 : 某一像元海冰在某一时间范围内持续存在。
- 9) 海冰范围 : 海冰密集度高于 15% 所在像元的面积总和。
- 10) 海冰面积 : 海冰密集度高于 15% 所在像元的面积与海冰密集度乘积的总和。
- 11) 微波集成干旱指数 (MIDI) : 是指融合基于风云三号卫星微波降水、土壤湿度和地表温度数据生成的包括降水状况指数 (PCI)、土壤湿度状况指数 (SMCI) 和地表温度状况指数 (TCI) 的干旱监测指数。
- 12) 射出长波辐射 (OLR) : 地球大气系统在大气层顶向外空辐射出去的所有波长的热辐射能量密度。
- 13) 厄尔尼诺事件 : 赤道太平洋东部和中部海表温度大范围持续异常变暖的现象。

(2) 数据源

- 1) 中国风云三号极轨气象卫星微波土壤湿度数据集 (2014 ~ 2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>

- 2) 中国风云三号极轨气象卫星微波地表温度数据集 (2014 ~ 2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 3) 中国风云三号极轨气象卫星降水数据集 (2014 ~ 2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 4) 中国风云三号极轨气象卫星海表温度数据集 (2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 5) 中国风云三号极轨气象卫星 OLR 数据集 (2011 ~ 2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 6) 日本 GOSAT 温室气体卫星观测计划 (2010 ~ 2023)
https://data2.gosat.nies.go.jp/index_en.html
- 7) 美国俄勒冈州立大学全球海洋净初级生产力月平均数据资料 (2010 ~ 2023)
http://orca.science.oregonstate.edu/npp_products.php
- 8) 美国国家航空航天局戈达德航天中心颗粒有机碳浓度月平均数据 (2010 ~ 2023)
<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- 9) 全球海洋净初级生产力月平均资料(CbPM) (2010 ~ 2023)
http://orca.science.oregonstate.edu/npp_products.php
- 10) 美国国家航空航天局戈达德航天中心颗粒有机碳 (2010 ~ 2023)
<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>
- 11) 全球卫星降水测量计划 GPM 降水反演数据集 (2019~2023)
https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GPM_L3/
- 12) FY-3D/VASS 850hPa 温度轨道数据 (2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 13) ERA5 再分析月平均数据 (1991~2020)
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>
- 14) 中国风云三号极轨气象卫星海冰密集度数据集 (2011 ~ 2023)
<http://data.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>
- 15) NOAA OISST 海温数据 (1991 ~ 2020)
<ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Projects/Datasets/noaa.oisst.v2.highres>

(3) 参考文献

- 1) Jing M. Chen Weimin Ju , Philippe Ciais , Nicolas Viovy, Ronggao Liu , Yang Liu& Xuehe Lu, 2019. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. NATURE COMMUNICATIONS, 10:4259.

- 2) He, Q., Ju, W., Dai, S., He, W., Song, L., Wang, S., et al. 2021. Drought risk of global terrestrial gross primary productivity over the last 40 years detected by a remote sensing driven process model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Volume 126, Issue 6, article id. e2020JG005944.
- 3) Liu Y, Liu R G, Chen J M. 2012. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981-2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 117(G4):4003.
- 4) Wei, S., Fang, H., Schaaf, C. B., He, L., and J. M. Chen. 2019. Global 500 m clumping index product derived from MODIS BRDF data (2001-2017). *Remote Sensing of Environment*. 232, 111296.
- 5) 周艳莲, 居为民, 柳艺博. 2022. 1981-2019 年全球陆地生态系统碳通量变化特征及其驱动. *大气科学学报*, 45(3):332-344.
- 6) Westberry TK, Silsbe GM, Behrenfeld MJ. 2023. Gross and net primary production in the global ocean: An ocean color remote sensing perspective. *Earth-Science Reviews*, 237:104322.
- 7) Behrenfeld MJ, Boss E, Siegel DA, et al. 2005. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB1006.
- 8) Westberry TK, Behrenfeld MJ, Siegel DA, et al. 2008. Carbon-based primary productivity modeling with vertically resolved photoacclimation, *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2):456-512.
- 9) Siegel DA, Buesseler KO, Doney SC, et al. 2014. Global assessment of ocean carbon export by combining satellite observations and food-web models. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(3):181-196.
- 10) Delu, Pan, L. Qiong, B. Yan. 2014. Review and suggestions for estimating particulate organic carbon and dissolved organic carbon inventories in the ocean using remote sensing data. *海洋学报(英文版)*, 33(1):1-10.
- 11) L. Duforêt-Gaurier, Loisel H, Dessailly D, et al. 2010. Estimates of particulate organic carbon over the euphotic depth from in situ measurements. application to satellite data over the global ocean [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(3): 351-367.
- 12) Zhang Anzhi and Gensuo Jia, 2013: Monitoring meteorological drought in semiarid region using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 134: 12-23.
- 13) Zhang Wanchun, Liu Jian, Zhang Pang, et al., 2022: Evaluation of Fengyun-3B reprocessed

global outgoing longwave radiation dataset: Comparison with CERES OLR datasets.
Journal Of Meteorological Research, 36(3) : 12.