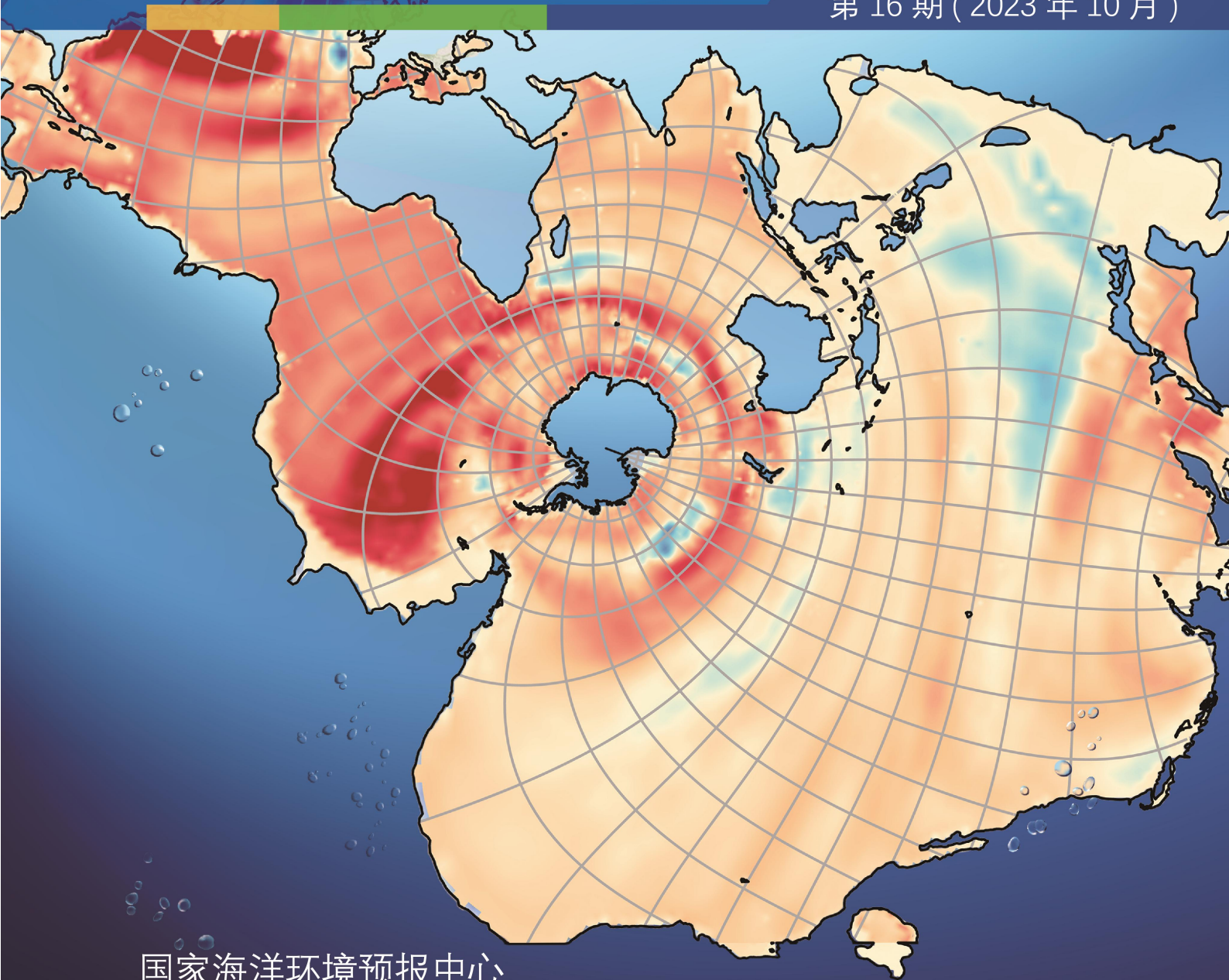


全球海温和热含量监测

Global Ocean Temperature and Heat Content Monitoring

第 16 期 (2023 年 10 月)

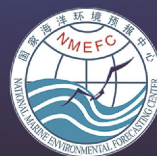


国家海洋环境预报中心

National Marine Environmental Forecasting Center

中国科学院大气物理研究所

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences



内容提要

海洋热含量是全球气候变化的核心指标,本报告基于自主研发的全球海洋温度数据集,对2023年9月全球和关键区域上层海洋温度、热含量变化进行监测,发现:

- **全球海洋热含量:**上层700米热含量较气候态(1991-2020年平均)偏高144 ZJ (ZJ: 泽塔焦耳; $1 \text{ ZJ} = 10^{21}$ 焦耳),较去年同期(2022年9月)偏高3 ZJ;上层2000米热含量较气候态偏高208 ZJ,较去年同期偏高1 ZJ (10 ZJ的能量相当于100倍2020年全球全年发电量)。
- **各大洋热含量:**上层2000米热含量相较于气候态,大西洋热含量增长最多,偏高93 ZJ,比去年同期偏高9 ZJ,太平洋次之,南大洋第三,印度洋热含量增长量最少;相较于去年同期,2023年9月上层2000米热含量在大西洋显著增加。
- **海洋温度:**全球海洋0~2000米平均温度较气候态偏高 0.079°C ,其中热带西太平洋、日本外海区域的0~2000米平均温度比气候态偏高达 0.40°C 。海水升温在近表层更为剧烈,全球海表平均温度较气候态偏高 0.518°C ,为有现代记录以来的第二高值。
- **对海洋的影响:**升温的热膨胀效应导致全球平均海平面较气候态上升了13.46毫米;海洋升温易于导致更多海洋热浪、缺氧等极端气候事件。

正文

海洋储存了全球变暖 90% 以上的能量盈余, 使得海洋热含量增加, 海洋热含量是气候变化的一个核心指标。相对于地表、海表和大气中的指标, 海洋热含量, 特别是上层 2000 米热含量, 受到厄尔尼诺等气候系统自然变率的影响较小, 其变化是判断气候变化的一个稳健的指针。从长期趋势来看, 全球海洋热含量上升态势持续。自 1955 年以来, 全球上层 2000 米热含量呈现出加速增长态势 (图 1)。2023 年 9 月, 全球上层 2000 米的热含量比去年 9 月增加约 1 ZJ, 比气候态高 208 ZJ; 上层 700 米的热含量比去年 9 月增加 3 ZJ, 比气候态增加了 144 ZJ。海洋热含量持续上升说明海洋持续累积热量, 1 ZJ 的热量相当于 10 倍的 2020 年全球全年发电量。

从季节尺度来看, 1955 年以来的全球海洋热含量的净增长量约为 500 ZJ, 已经远超过其季节变化幅度 (图 1 中框图)。全球海洋热含量存在显著的季节循环, 热含量在每年的 3~4 月份达到峰值, 8~9 月份达到谷值, 上层 2000 米热含量的季节变化幅度平均为 56 ZJ (图 1 中框图)。

海水温度升高是热含量增加的主要原因, 全球海水温度也持续上升。全球海洋 0~2000 米平均温度较气候态偏高 0.079 °C, 其中热带西太平洋、日本外海区域的 0~2000 米平均温度比平均态偏高 0.40 °C 以上。

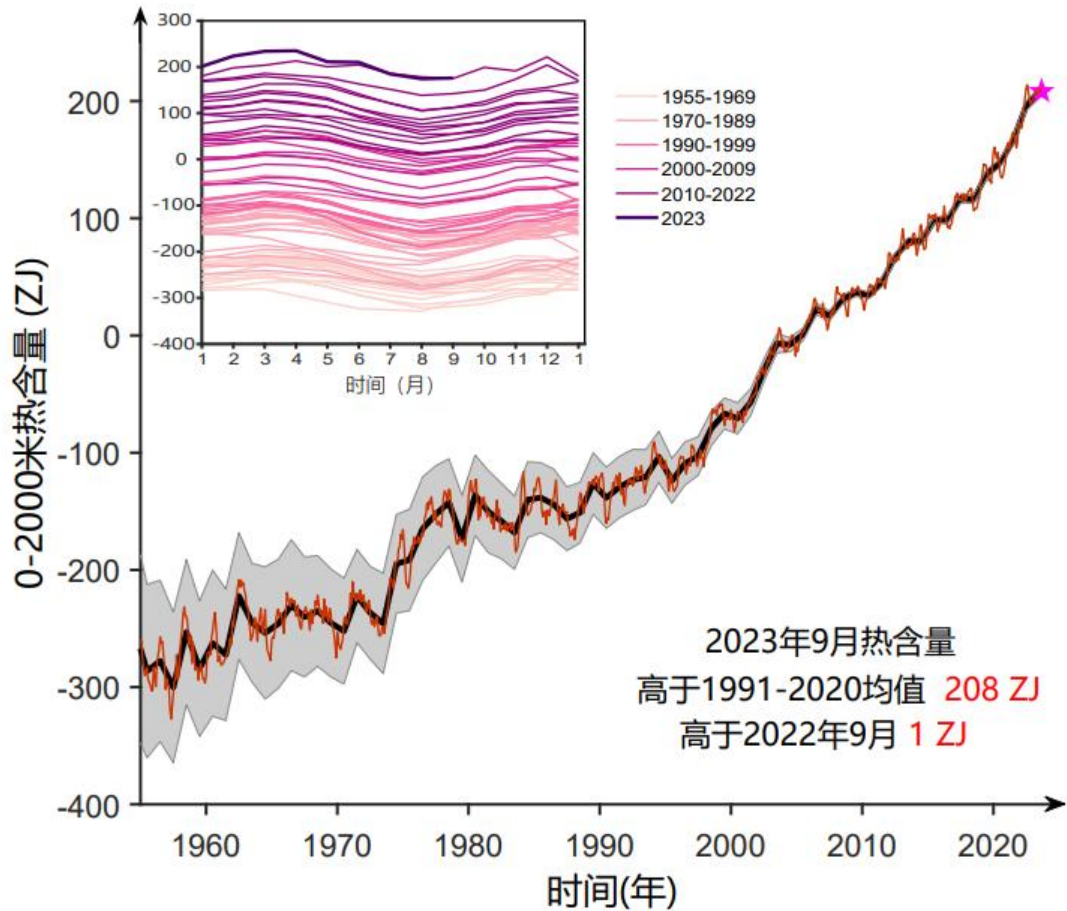


图 1. 1955.1~2023.9 全球海洋上层 2000 米热含量时间序列（黑色实线）和季节循环（左上彩色实线），灰色阴影代表 95%的置信区间。基准态均为 1991-2020 年平均。

海水升温在近表层更为剧烈，全球海表平均温度较气候态偏高 0.518 °C（图 2），是有现代观测记录以来的最高值。表层温度受到自然变率（厄尔尼诺-南方涛动：ENSO）影响波动较为剧烈，2023 年 9 月，由于厄尔尼诺事件的发展，全球海表平均温度较去年同期偏高 0.313 °C。

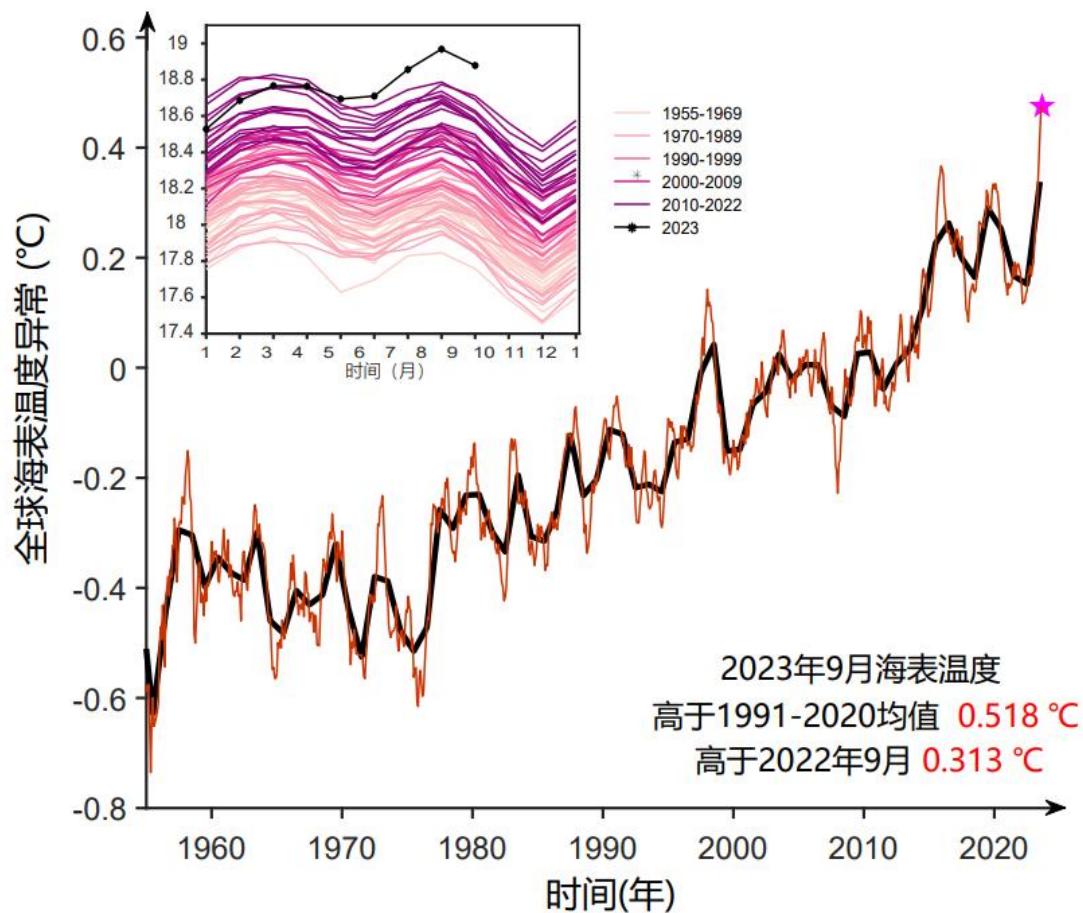


图 2. 1955.1~2023.9 全球海洋表层（1 米）温度时间序列（黑色实线）和季节循环（左上彩色实线），灰色阴影代表 95% 的置信区间。基准态均为 1991-2020 年平均。

从空间格局来看，2023 年 9 月全球大部分海域热含量相对于气候态偏高。赤道东太平洋剧烈增暖，反映出“厄尔尼诺”的状态（图 3 上）。上层 2000 米的海洋热含量增加在西北太平洋区域、西南太平洋（新西兰岛周围海域）、北大西洋、南大西洋最为显著，最大上升幅度为每平方米 $\sim 3.5 \times 10^9$ 焦耳（图 3 下）。

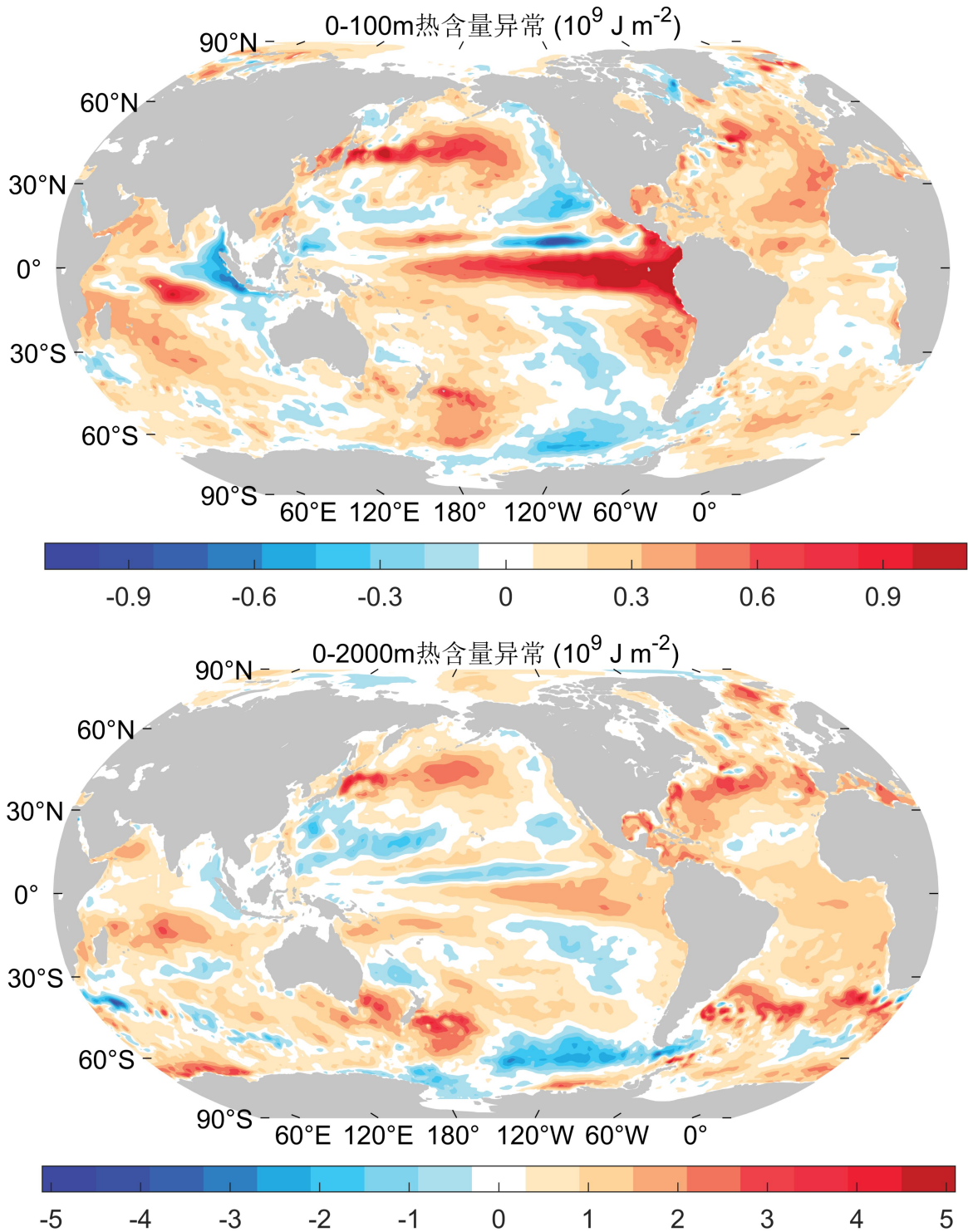


图 3. 2023 年 9 月海洋 0-100 米、0-2000 米热含量距平空间分布，基准态为 1991-2020 年平均。（ 10^9 焦耳/平方米）。

与去年同期相比，海温和热含量异常显示出明显的“厄尔尼诺”形态的空间分布。2023 年 9 月上层 100 米热含量在赤道中东太平洋

剧烈增高（图 4 上），可能是“厄尔尼诺”事件的信号。上层 2000 米热含量相对于去年 9 月（图 4 下），赤道中东太平洋、日本外海区域、南印度洋以及热带大西洋显示出增暖特征，而中纬度的太平洋、西太平洋、东印度洋和南大洋部分海域有显著的变冷特征，最大变冷幅度为每平方米 $\sim 2.8 \times 10^9$ 焦耳。

海洋变暖对人类和生态系统存在广泛影响。海洋变暖有利于极端天气和气候事件的发生，如台风、飓风、海洋热浪等强度增强，威胁生命财产安全；此外，海洋变暖贡献了三分之一的全球海平面上升，沿海和低洼地区面临着越来越严重的海平面上升相关风险，例如咸潮入侵、土地侵蚀等。海洋温度和层结变化影响海洋碳吸收，随着海洋变暖和层结加剧，海洋碳吸收效率下降，导致更多人类排放的 CO_2 留在大气中，加剧全球变暖。同时，更强的海洋层结会抑制海洋垂向溶解氧输送，导致海洋内部的氧含量进一步减少，威胁海洋生物的生存。

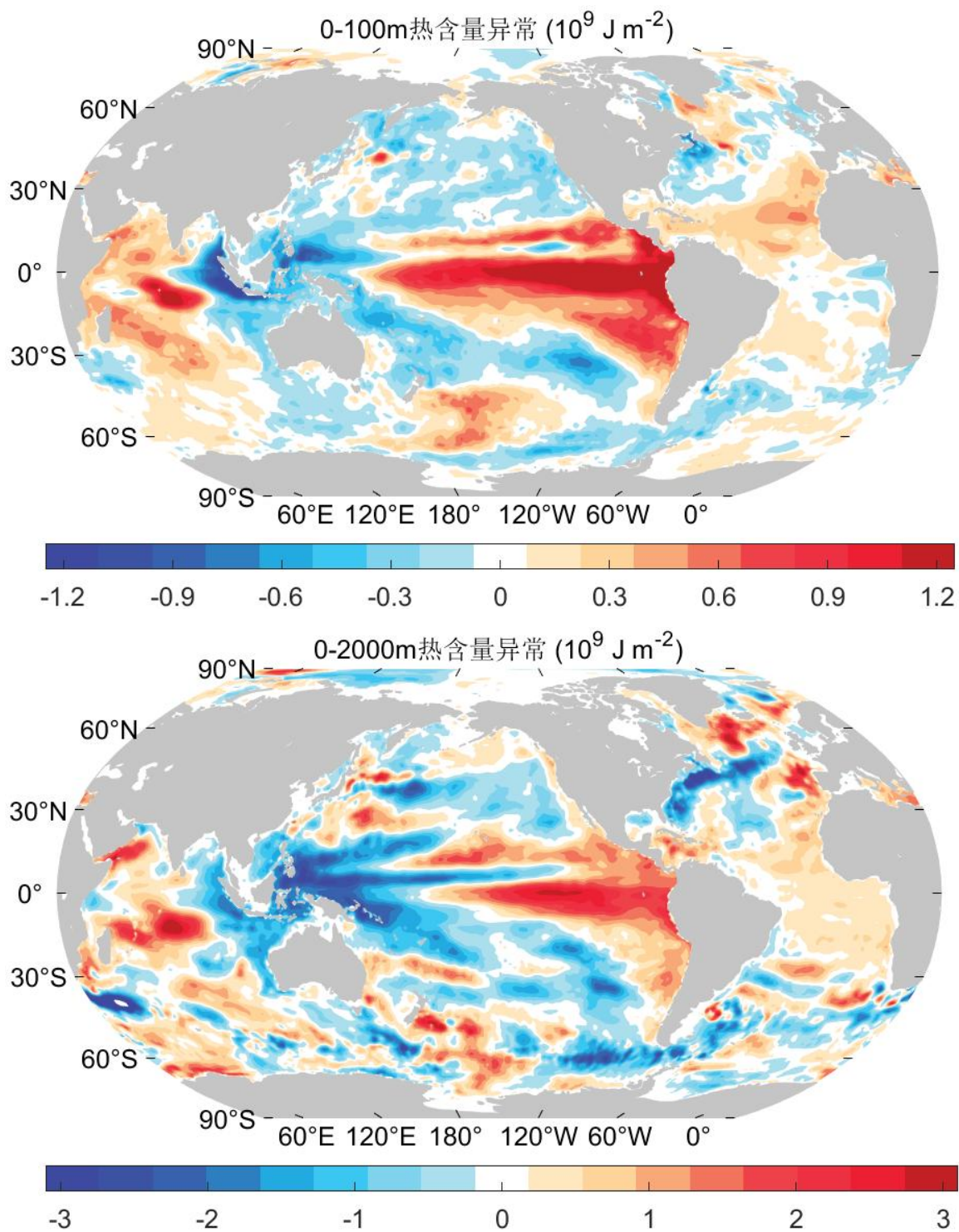


图 4. 2023 年 9 月海洋 0-100 米、0-2000 米热含量与去年同期差异（即 2022 年 9 月）的空间分布。单位： 10^9 J m^{-2} (10^9 焦耳/平方米)。

附录一、相关定义和数据源

资料来源：中国科学院大气物理研究所（全球海洋温度、热含量）：

<http://www.ocean.iap.ac.cn/> 1955~至今全球海洋温度、盐度、层结格点观测数据，水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ，垂向 0~2000 米覆盖（41 层），时间分辨率为月平均。

海洋热含量：是指一定体积海水的热能的变化，其由水体温度、密度和比热容三者乘积的体积积分计算。

距平：本报告中的距平是指月平均原始值减去气候月平均值的差值。

附录二、数据集构建方法简介

海洋原始观测数据来源于全球海洋观测数据集（WOD）和国际海洋温盐廓线数据计划（GTSP），包括 Argo、抛弃式探温仪（XBT）、温盐深探仪（CTD）、浮标（mooring）等多种仪器的观测数据。本报告基于海洋温度现场观测数据，进行数据质量控制、偏差订正以及格点化，构建温度格点分析数据，进而计算热含量。针对数据质量控制，使用中科院大气所和海洋所等研发的海洋温盐自动化数据质量控制系统，去除错误的的数据。该系统包含 13 个检查模块，分别是基础信息检查、深度递增检查、范围检查、冰点检查、局地最大深度检查、仪器类型检查、常值检查、尖峰检查、梯度检查、局地气候态检查、局地梯度气候态检查和特定仪器类型检查（Cheng et al. 2021）。对于数据偏差，分别订正了海洋抛弃式探温仪（XBT）、机械式探温仪（MBT）中的系统性偏差（Cheng et al. 2017, 2022），这两类观测仪

器是 1955-2000 年最主要的海洋次表层温度观测手段。

对原始数据进行质量控制和偏差订正后，利用格点化方法将数据插值为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 水平分辨率的格点化数据集。该格点化方法采用基于动态样本的集合最优插值方法 (Cheng and Zhu 2014)，核心是利用第五次国际耦合模式比较计划的多模式历史模拟数据来提供背景误差协方差场，同时将更大范围的观测数据纳入重构，使得在观测非常稀疏的海域也可以用远距离观测进行约束，避免了传统方法“无数据，无信号”的系统性偏差。此外，该方案能够考虑海洋多尺度变率的流依赖的特性，对海洋参数的空间变率有较高的重构精度。

附录三、区域海洋温度和热含量分析

3.1 全球海洋热含量变化

1955 年 1 月~2023 年 9 月，全球上层 700 米、2000 米海洋热含量 (OHC) 变化如图 4 和图 5 所示。过去 68 年间，全球海洋持续增暖，上层 2000 米海洋热含量呈显著增加趋势，增加速率为 $74 \text{ ZJ}/10\text{a}$ ($1 \text{ ZJ} = 10^{21}$ 焦耳)。海洋变暖在 20 世纪 90 年代后显著加速，1991~2022 年，全球上层 2000 米海洋热含量增加速率为 $108 \text{ ZJ}/10\text{a}$ (图 4)，是 1955~1990 年增暖速率的 2.6 倍。

2023 年 9 月，全球上层 700 米热含量较 1991-2020 年的平均态偏高 144 ZJ，比 2022 年 9 月偏高 3 ZJ (图 4)。上层 2000 米热含量较 1991-2020 年的平均态偏高 208 ZJ，比 2022 年 9 月偏高 1 ZJ (图 5)。

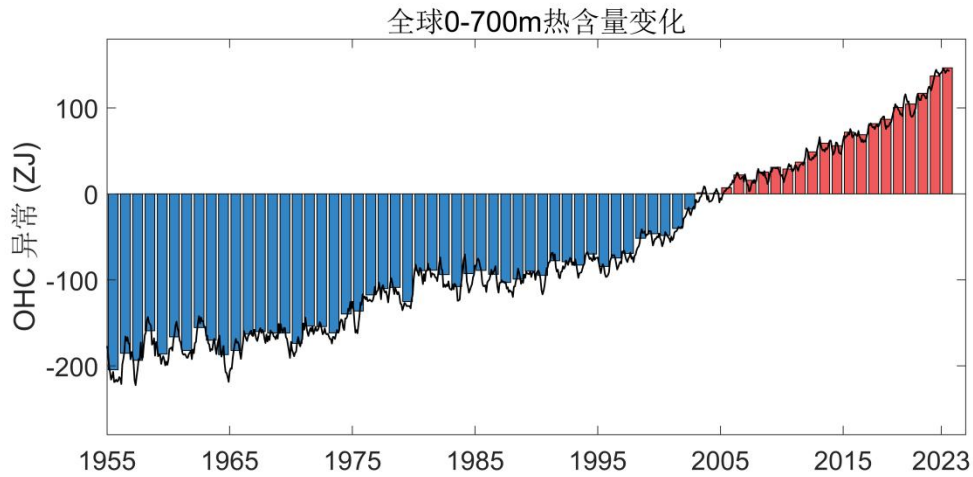


图 4. 1955.1~2023.9 全球海洋上层 700 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

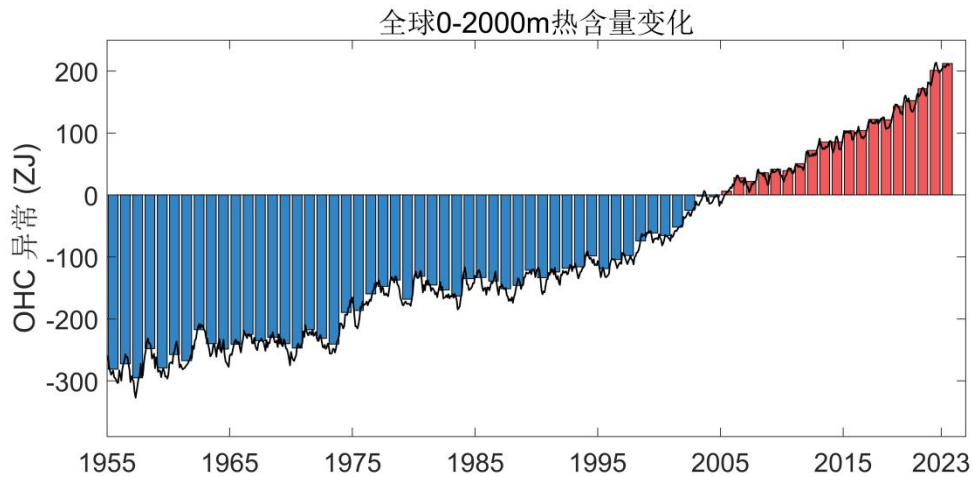


图 5. 1955.1~2023.9 全球海洋上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

3.2 主要海盆和关键区域的海洋热含量变化

1955 年 1 月~2023 年 9 月，全球主要海盆热含量都呈现显著的增加趋势。2023 年 9 月，太平洋（图 6）上层 2000 米热含量处于历史第 21 位，较 1991-2020 年的平均态偏高 73 ZJ，比 2022 年 9 月偏低 14 ZJ。大西洋（图 8）上层 2000 米热含量处于历史第 1 高位，较 1991-2020 年的平均态偏高 93 ZJ，比 2022 年 9 月偏高 9 ZJ。印度洋

(图 7) 上层 2000 米热含量处于历史第 5 高位, 较 1991-2020 年的平均态偏高 38 ZJ, 比 2022 年 9 月偏高 5 ZJ。南大洋 (图 9) 上层 2000 米热含量处于历史第 17 高位, 较 1991-2020 年的平均态偏高 53 ZJ, 比 2022 年 9 月偏低 8 ZJ。西北太平洋 (图 10) 上层 2000 米热含量显示出显著的年际尺度变率, 主要受到 ENSO 的影响。2023 年 9 月, 该区域热含量处于历史第 222 高位, 较 1991-2020 年的平均态偏高 2 ZJ, 比 2022 年 9 月偏低 24 ZJ。

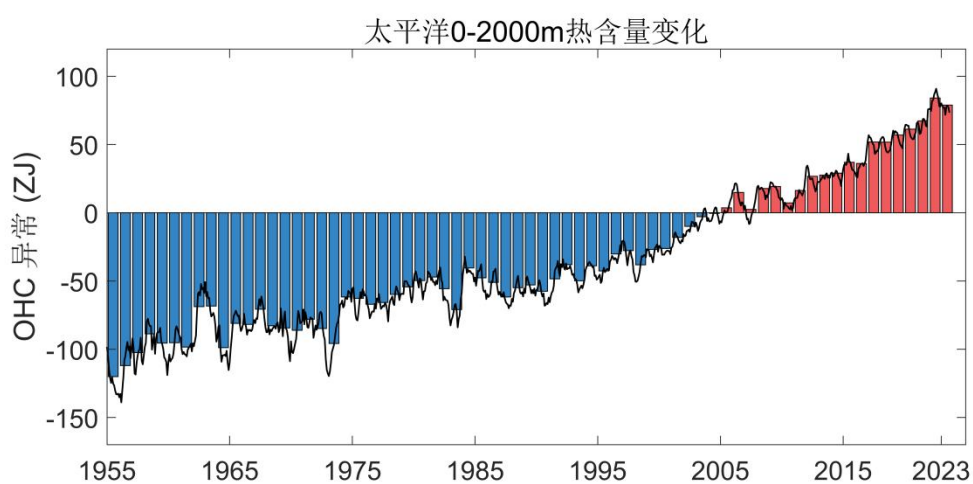


图 6. 1955.1~2023.9 太平洋 (35°S 以北的区域) 上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列, 黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

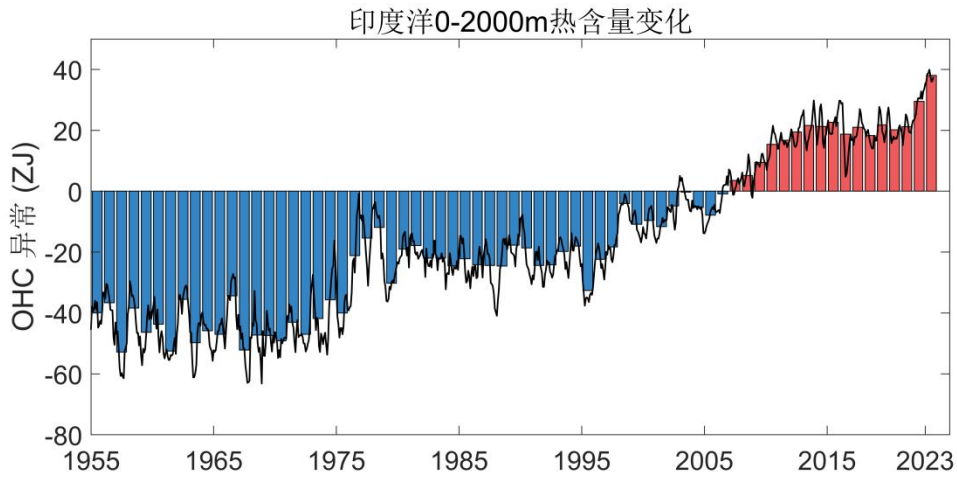


图 7. 1955.1~2023.9 印度洋（35°S 以北的区域）上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

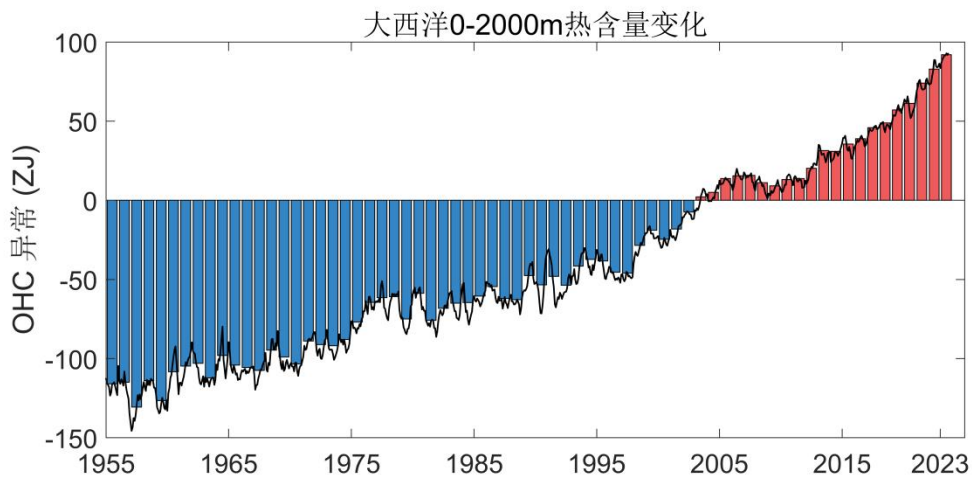


图 8. 1955.1~2023.9 大西洋（35°S 以北包括北冰洋的区域）上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

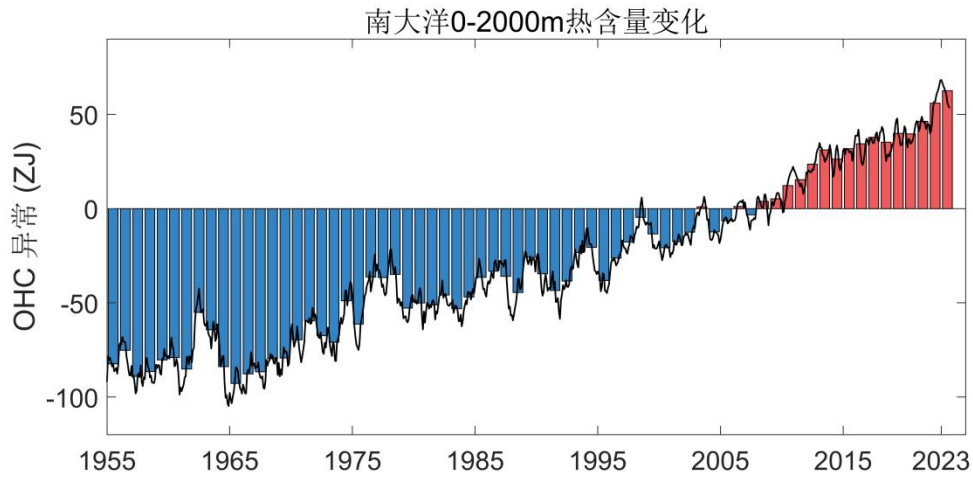


图 9. 1955.1~2023.9 南大洋（南纬 35°度以南的区域）上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

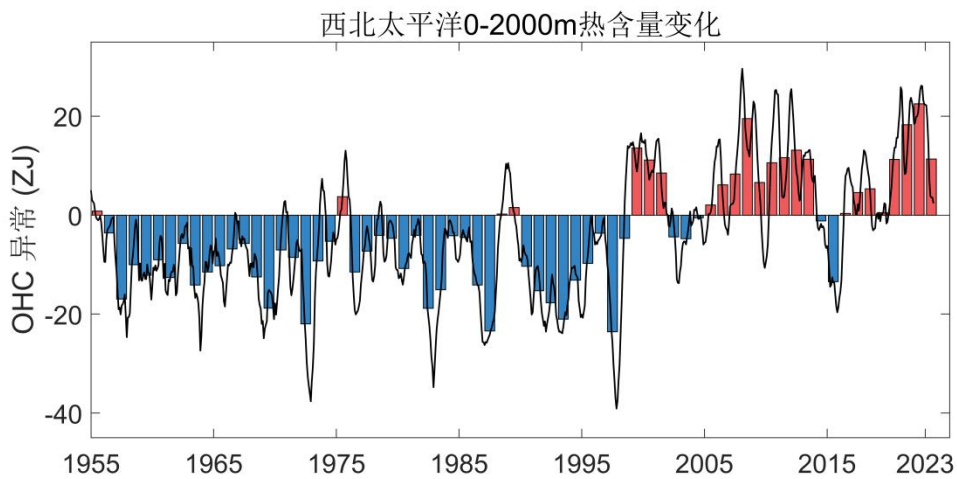


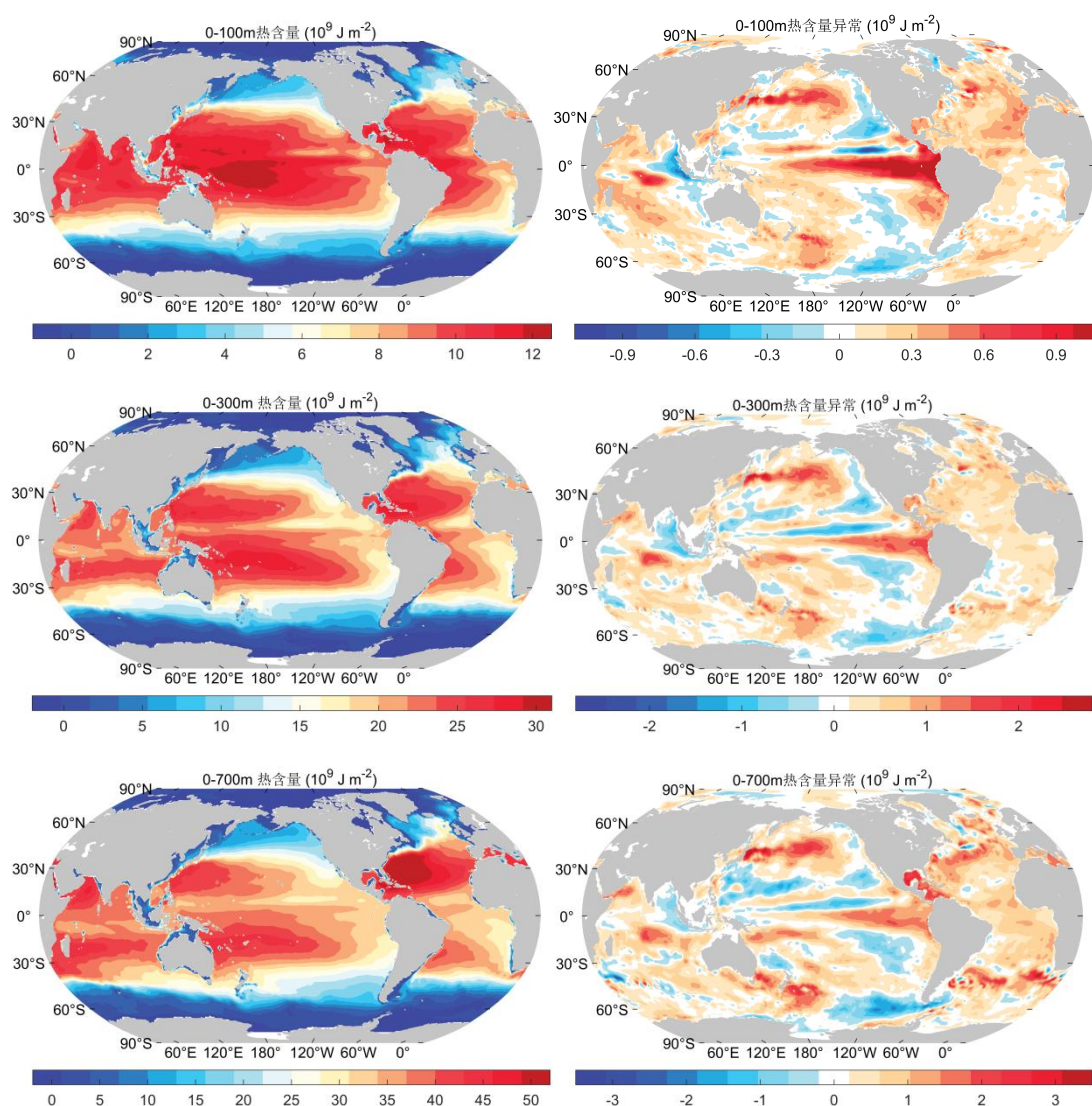
图 10. 1955.1~2023.9 西北太平洋（10°S-42°N，100~160°E）上层 2000 米热含量时间序列。柱图为年平均时间序列，黑色线为月平均时间序列。时间序列基准态为 1991-2020 年。

3.3 全球海洋热含量月平均图集

相对于气候平均态，2023 年 9 月，全球上层 100 米热含量体现出类似“厄尔尼诺”形态的空间分布：赤道外太平洋、西印度洋以及南太平洋等区域的热含量较低 ($< -0.4 \times 10^9$ 焦耳/平方米)；而赤道中

东太平洋、北部太平洋、大西洋、西印度洋热含量偏高（部分海区 $>0.9 \times 10^9$ 焦耳/平方米）(图 11)。而对于 0-300 米、0-700 米和 0-2000 米热含量，热含量偏高海区较 0-100 米显著增加（图 11），这是由于气候系统内部变率（ENSO 等）对深层热含量的影响较小，而全球变暖导致的热含量增加起主导作用。

相对于去年同期，太平洋东次表层 100-300 米显示出强烈的变暖态势、西太平洋强烈变冷，显示出赤道温跃层在东西方向变得更为平缓了（图 12）。同时热带大西洋、南印度洋和南大洋部分海区变暖明显，部分海区 0-700 米和 0-2000 米热含量超过 2.6×10^9 焦耳/平方米。



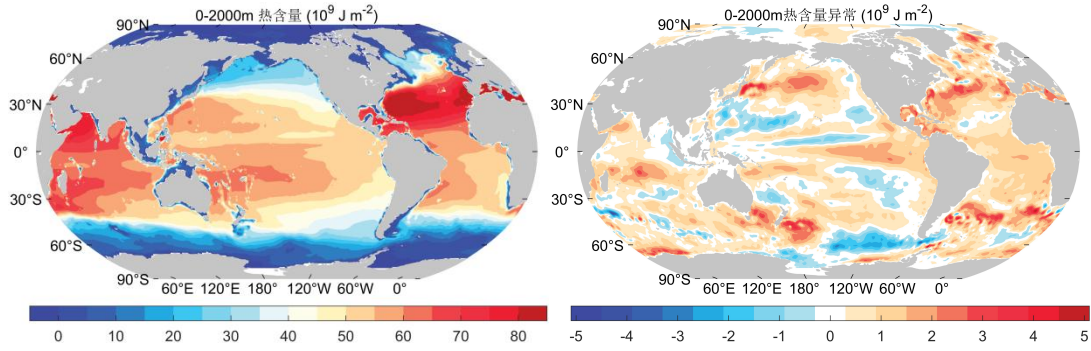


图 11. (左侧) 2023 年 9 月海洋上层 0-100 米、0-300 米、0-700 米、0-2000 米热含量空间分布。(右侧) 2023 年 9 月 0-100 米、0-300 米、0-700 米、0-2000 米热含量距平空间分布, 基准态为 1991-2020 年。单位: 10^9 J m^{-2} (10^9 焦耳/平方米)。

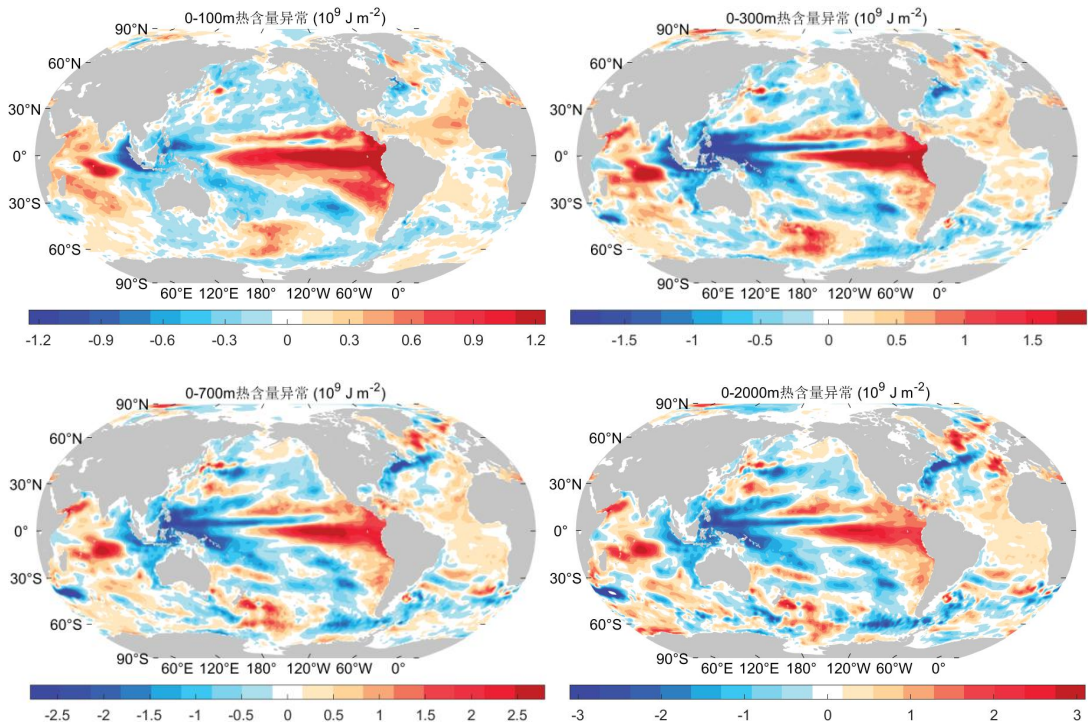


图 12. 相对于去年 9 月, 2023 年 9 月 0-100 米、0-300 米、0-700 米、0-2000 米热含量异常。单位: 10^9 J m^{-2} (10^9 焦耳/平方米)。

3.4 全球海洋温度月平均图集

海水温度的空间形态和热含量非常一致 (图 13、14), 这是因为温度变化是热含量变化的主要原因。2023 年 9 月, 0-100 和 0-300 米

海水平均温度在中东太平洋、北太平洋等海区超过气候态 2 度以上，显示出强烈的海水变暖信号（图 13）。

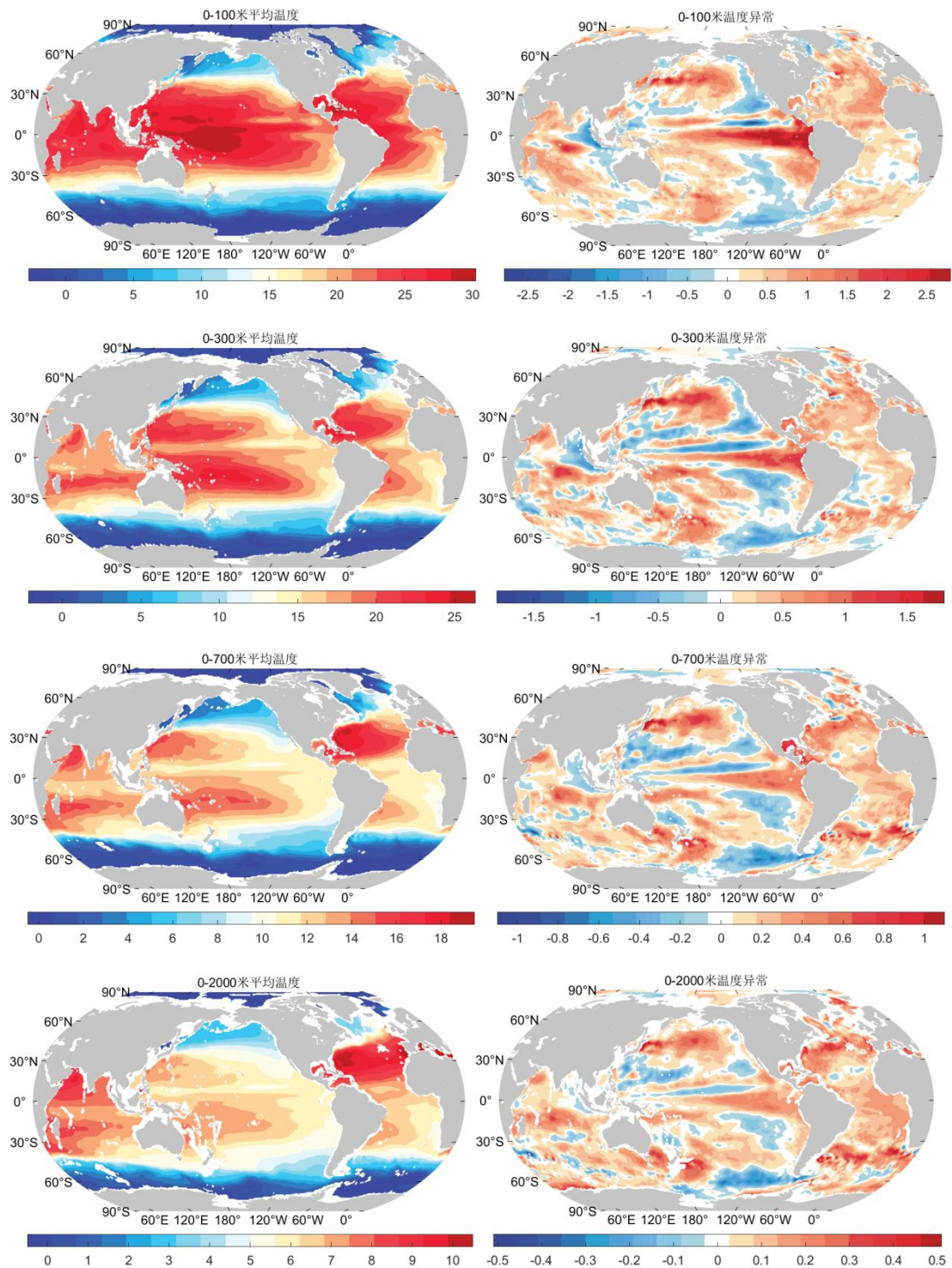


图 13. (左侧) 2023 年 9 月海洋上层 0-100 米、0-300 米、0-700 米、0-2000 米平均温度空间分布。(右侧) 2023 年 9 月 0-100 米、0-300 米、0-700 米、0-2000 米平均温度距平空间分布，基准态为 1991-2020 年平均。单位：摄氏度。

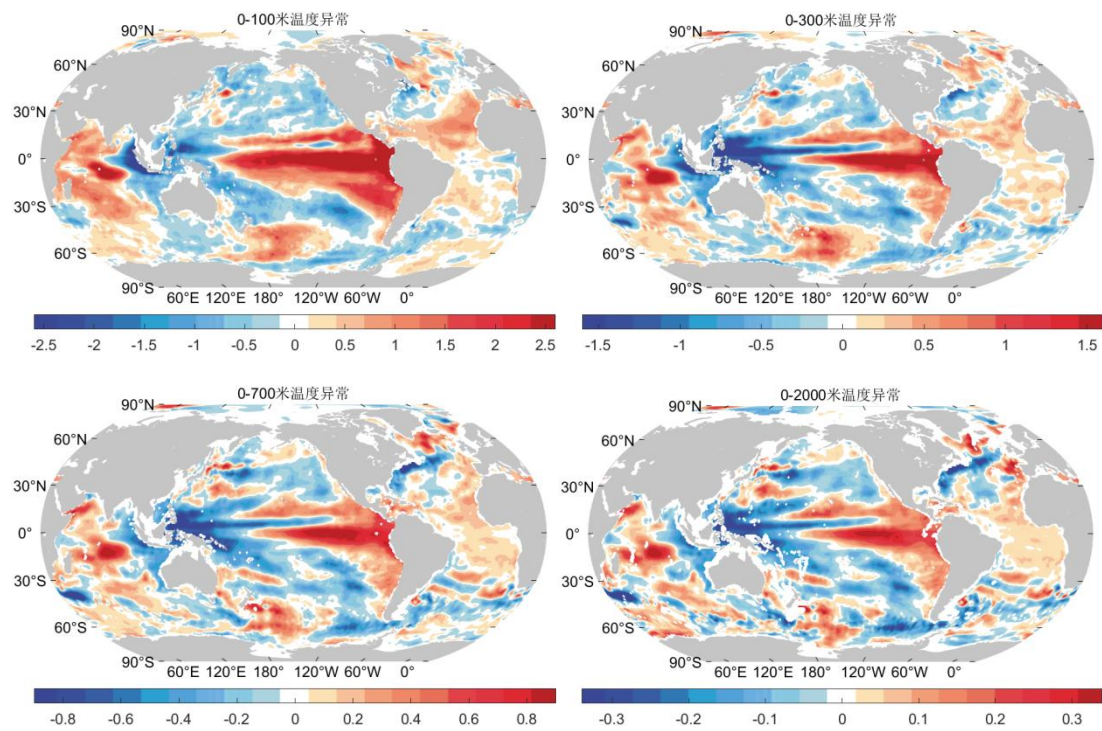
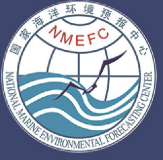


图 14. 相对于去年9月的2023年9月0-100米、0-300米、0-700米、0-2000米平均温度异常。单位：摄氏度。



国家海洋环境预报中心

<http://www.nmefc.cn/hyqh>

联系人：冯立成

电话：(010) 62105752

Email: fenglich@nmefc.cn

中国科学院大气物理研究所

<http://www.ocean.iap.ac.cn/>

联系人：成里京、潘玉莹

电话：(010) 82995123

Email: chenglij@mail.iap.ac.cn