

2022年和2023年西北太平洋中高纬度地区极端海洋热浪引发浮游植物爆发与碳吸收增强

董立斌, 王文彩*

中国海洋大学海洋与大气科学学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年4月23日; 录用日期: 2026年5月22日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

中高纬度海域的海洋热浪发生频率持续攀升, 对海洋浮游植物动态与碳吸收过程产生显著调控作用, 其影响不仅局限在夏季。本研究聚焦2022~2023年秋季西北太平洋强海洋热浪事件, 系统解析其演化特征及其对叶绿素a浓度与碳吸收通量的影响机制。结果表明, 热浪期间叶绿素a浓度较气候态均值激增5~6倍, 颗粒有机碳浓度同步提升2~3倍, 二者呈现显著协同变化规律。研究进一步揭示, 海洋热浪的持续性特征及其对混合层深度的复合效应是驱动该现象的关键机制: 混合层持续增温过程构建了适宜浮游植物增殖的环境, 进而诱发水华爆发并强化海洋碳吸收能力。

关键词

海洋热浪, 浮游植物爆发, 碳吸收, 西北太平洋

Phytoplankton Bloom and Enhanced Carbon Uptake Induced by Marine Heatwaves in the Mid-High Latitudes of the Northwestern Pacific in 2022 and 2023

Libin Dong, Wencai Wang*

College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: April 23, 2026; accepted: May 22, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

The frequency of prolonged marine heatwaves (MHWs) in mid-to-high latitude oceanic regions has

*通讯作者。

文章引用: 董立斌, 王文彩. 2022年和2023年西北太平洋中高纬度地区极端海洋热浪引发浮游植物爆发与碳吸收增强[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 648-662. DOI: 10.12677/ccr.2026.153070

increased and significantly affected oceanic phytoplankton dynamics and carbon uptake has no longer confined to the summer months. This study investigates the characteristics of strong autumn MHWs in the Northwestern Pacific in 2022 and 2023 and their effects on Chl-a concentration and carbon uptake. The results indicate that Chl-a concentrations were up to 5~6 times higher than the climatological normal during autumn MHWs. While particulate organic carbon (POC) is up to 2~3 times higher than the climatological normal, paralleling the variations in Chl-a concentrations. Our results further indicate that the extended duration of MHWs and their complex effects on the oceanic mixed layer depth (MLD) play a key role in this phenomenon. The prolonged heating of the mixed layer during MHWs creates optimal temperature and nutrients conditions for phytoplankton growth, promoting phytoplankton blooms and enhanced carbon uptake.

Keywords

Marine Heatwaves, Phytoplankton Bloom, Carbon Uptake, Northwestern Pacific

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋热浪(MHWs)是指特定海域海表温度(SST)异常升高的极端事件,持续时间可从数天至数周不等[1]-[4]。其定义为海表温度连续五日超过气候态阈值第90百分位的极端升温现象[5]。在过去的几十年中,海洋热浪已经对海草草甸、海底森林、珊瑚礁等生物栖息地产生了负面影响,这种温度异常波动对海洋生态系统、海洋生物乃至全球气候系统产生深远影响[4][6]-[10]。对比海洋酸化和缺氧等其他海洋生态灾害,海洋热浪具有更强的破坏潜力与更广泛的影响范围[11][12]。

叶绿素 a (Chl-a)浓度是表征浮游植物生物量与海洋初级生产力的关键指标[13]-[17]。研究表明,海洋热浪期间,营养盐富集海域的浮游植物聚集效应显著增强,而贫营养海域则呈现减弱趋势,这表明海洋热浪强化了叶绿素 a 浓度对海表温度的响应机制[18]。然而,这种动态变化对海洋长期碳封存产生负面影响,可能削弱海洋吸收二氧化碳的能力,进而加剧气候变化进程[9][19]。由此可见,海洋热浪对海洋浮游植物动态与碳吸收过程具有显著调控作用。已有研究证实,海洋热浪通常导致高纬度海域叶绿素 a 浓度升高,而低纬度海域则呈下降趋势[20]。在中高纬度地区,叶绿素 a 浓度在温暖季节(尤其是夏季)通常呈现上升态势[21]。该区域叶绿素 a 浓度往往随春季升温快速攀升,夏季达到峰值,秋冬季随温度下降而急剧回落。最新研究证实,持续性海洋热浪事件对叶绿素 a 浓度的激发效应远超短期海温升高[22][23]。对于长持续时间的海洋热浪,季节变化强烈影响叶绿素 a 浓度,此类事件主要发生在夏秋两季[2][20]。然而,早期针对中高纬度海域海洋热浪的研究多聚焦于暖季的夏季事件[24]-[26]。近年来,秋季海洋热浪逐渐受到学界关注[27][28],特别是每年9月至10月发生的热浪事件。例如,Hyoeun 等人研究揭示了中国东海秋季延迟型海洋热浪的生态影响[29]。

浮游植物通过光合作用固定二氧化碳,形成颗粒有机碳(POC)并沉降到深海[30]。海洋热浪通过改变生物泵效率影响碳封存过程,进而对全球变暖产生反馈效应[9][31]-[33]。极端高温可能超过浮游植物的热耐受阈值,抑制光合作用[23][34],减少有机碳产量。若海洋热浪降低海洋净碳吸收能力,将加速大气CO₂累积速率,从而加剧温室效应[30][35][36]。西北太平洋作为全球碳循环的关键调控区域,其碳封存能力同时受自然变率与人类活动影响[31]。前人研究表明,北太平洋生物泵效率与混合层深度(MLD)的 annual 变率存在显著相关性[30]。该区域还受到东亚沙尘及其他类型气溶胶例如黑碳、有机碳气溶胶沉降的影

响, 沙尘以及其他气溶胶的沉降提供补充性铁源等营养盐, 缓解营养盐限制[37][38]。过去十年间, 北太平洋浮游植物群落深受海洋变暖影响[39][40]。与其他海盆相比, 西北太平洋中高纬度海域的海洋热浪具有独特的复合驱动机制, 其叶绿素 a 浓度响应与碳封存机制呈现特异性特征。

气候模式预测显示, 未来海洋热浪将趋于频发与增强, 尤以西北太平洋中高纬度海域的强度与持续时间增幅最为显著[41][42]。基于此, 本研究聚焦西北太平洋中高纬度海域, 探究海洋热浪影响叶绿素 a 浓度与碳封存的作用机制。针对西北太平洋海洋热浪频次与强度持续攀升的现状, 本文着重分析秋季(特别是 9~10 月)海洋热浪对叶绿素 a 浓度与海洋碳吸收的影响机理。本研究旨在为理解中高纬度海域浮游植物与海洋碳汇对不断增强的海洋热浪的响应机制提供新认知, 并为相关研究提供理论支撑。本文结构安排如下: 第二部分阐述数据来源与研究方法, 第三部分呈现结果分析与讨论, 第四部分总结研究结论。

2. 数据与方法

2.1. 卫星遥感数据

本研究所使用的每日海表温度卫星数据源自美国国家海洋与大气管理局最优插值海表温度高分辨率数据集第二版本, 空间分辨率为 0.25° , 时间跨度为 1982 年至 2023 年[43]。叶绿素 a 浓度、颗粒有机碳及光合有效辐射数据源自 Globcolour 数据库, 该数据集为多卫星融合产品的 8 日平均数据, 空间网格分辨率为 4 km, 时间范围为 2003 年至 2023 年。本研究同时采用海洋彩色气候变化倡议项目提供的叶绿素 a 浓度数据, 与 Globcolour 数据集进行比对验证[44]。

2.2. 再分析数据

MERRA-2 是美国国家航空航天局全球建模与同化办公室生产的最新再分析数据产品。MERRA-2 同化系统基于具备天气与气候模拟能力的 GEOS-5 模型构建。GEOS-5 模型可模拟包括沙尘、海盐、硫酸盐、黑碳及有机碳在内的五种气溶胶组分。该数据集提供全球覆盖, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ [45]。本研究采用沙尘干沉降、沙尘湿沉降、黑碳及有机碳数据, 以探究海洋热浪期间的海洋碳沉降与营养盐输入过程。

本研究所用的 10 米风场、风应力数据及海流流场数据源自欧洲中期天气预报中心。所用变量为 2022 年至 2023 年的日平均数据, 水平分辨率为 $1/4^\circ$ 。全球海洋再分析与模拟系统 12v1 产品提供从海表至底层的混合层深度日平均至月平均场数据, 水平分辨率为 $1/12^\circ$ [46]。月平均网格化温度场数据源自 Roemmich-Gilson Argo 气候态数据集, 空间分辨率为 1° , 在 0~2000 米水深范围内包含 58 个垂直层[47]。

2.3. 模式数据

本研究采用 Mercator-Ocean 全球海洋生物地球化学 L4 级产品, 该数据集提供 2003 年至 2023 年表层营养盐(铁、硝酸盐、硅酸盐、磷酸盐)浓度的月平均数据, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (最新访问时间: 2024 年 12 月)。为估算研究区海洋热浪相关的浮游植物碳生物量, 本研究采用净初级生产力数据, 该指标是碳循环的重要表征参数。本文使用的净初级生产力数据产品基于 MODIS 遥感估算的 VGPM 数据, 采用标准垂直广义生产力模型生成[48], 本研究获取了 2003 年至 2023 年 1080×2160 网格分辨率的 8 日平均 VGPM 净初级生产力数据。

2.4. 海洋热浪定义及研究区域

本研究对海洋热浪的定义基于 30 年历史基线期[5], 指海表温度连续五日及以上超过气候态第 90 百分位阈值的异常增温事件。本研究采用的海洋热浪阈值基于 1982 年至 2018 年的气候态周期确定。海洋热浪频率定义为各季节海洋热浪发生次数; 海洋热浪总日数为海洋热浪持续天数之和; 平均海洋热浪

强度指海洋热浪期间的平均海表温度距平值。本研究采用 MATLAB 软件进行海洋热浪事件检测, 相关代码可从 https://github.com/ZijieZhaoMMHW/m_mhw1.0 获取[49]。本研究聚焦于西北太平洋中高纬度海域, 选取 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $140^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$ 范围区域, 分析海洋热浪、叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳的协同变化特征。

3. 结果

3.1. 2022~2023 年海洋热浪事件的统计特征

本节调查并讨论了海洋热浪影响中高纬度西北太平洋叶绿素 a 浓度和碳固存的机制。通过对过去二十年间海洋热浪分析, 筛选出了一次持续时间最长, 强度较强的海洋热浪事件, 主要探讨了秋季海洋热浪(尤其是 9 月和 10 月的热浪)如何影响叶绿素 a 浓度和海洋碳吸收。本节为中高纬度海域浮游植物和海洋碳汇对日益加剧的海洋热浪的反应提供新的见解, 同时为相关研究提供理论支持。

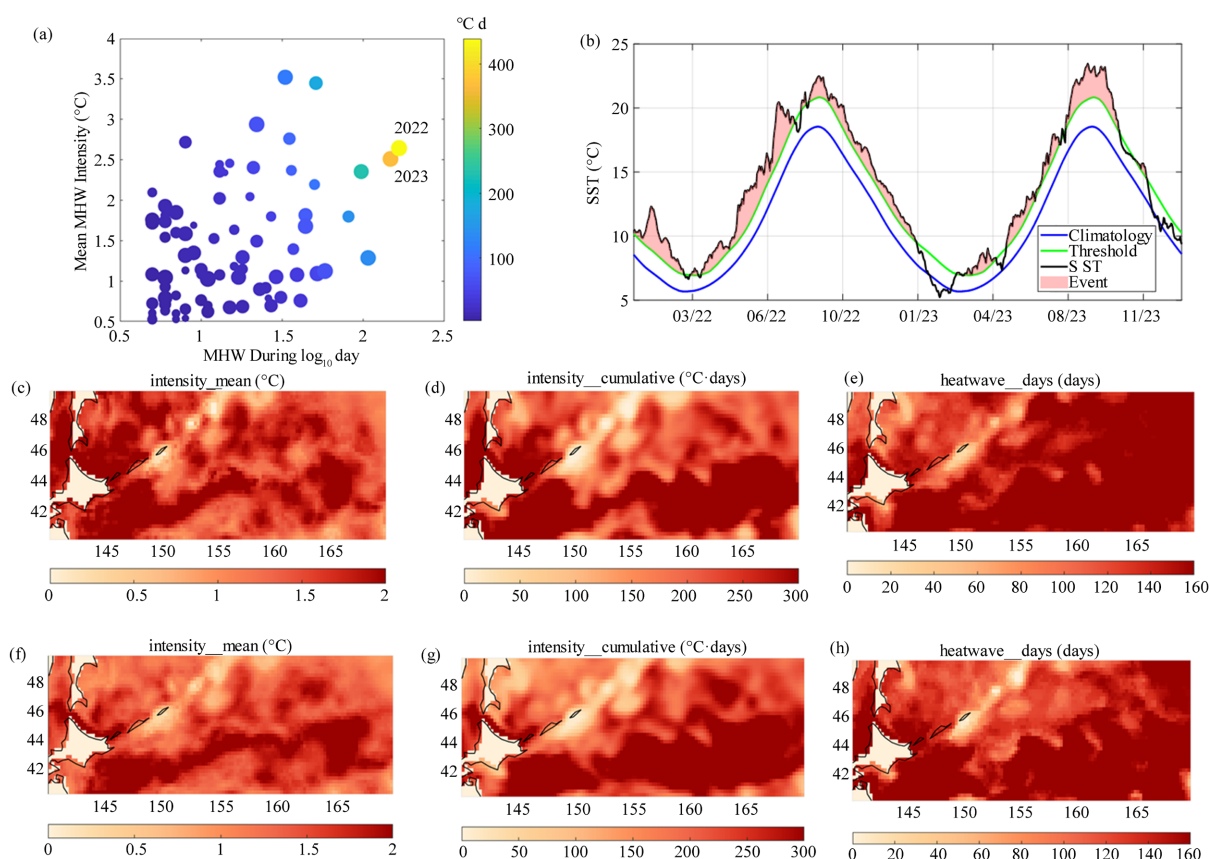


Figure 1. (a) Fitted plots of MHW event duration and mean intensity identified from SST dataset in the study region during 1982~2023. Point colors represent cumulative intensity; (b) Event lines of identified MHWs in 2022 and 2023. Blue, green, and black curves denote the climatological curve, 90th percentile threshold curve, and SST curve. Red shaded areas indicate MHW events. Spatial distribution of MHWs metrics: mean intensity; cumulative intensity and days in 2022 (c)~(e) and 2023 (f)~(h)

图 1. (a) 1982 年至 2023 年间研究区域内从海表温度(SST)数据集中确定的海洋热浪事件持续时间和平均强度的拟合图。点颜色表示累积强度; (b) 2022 年和 2023 年确定的海洋热浪事件线。蓝色、绿色和黑色曲线分别表示气候曲线、90% 阈值曲线和 SST 曲线。红色阴影区域表示海洋热浪事件; 海洋热浪指标的空间分布: 2022 年(c)~(e)和 2023 年(f)~(h)的平均强度、累积强度和天数

利用 1982 年至 2023 年的海表温度数据, 我们生成了拟合图展示了从数据集中识别的海洋热浪事件的持续时间、平均强度和累积强度, 以及这两年中识别的热浪事件线(图 1(a)~(b))。结果表明, 与往年相

比, 2022 年和 2023 年的热浪在持续时间和累积强度上均显著增加, 持续时间超过 200 天。持续时间的延长伴随着平均强度的增加, 导致 2023 年的累积强度超过 $350^{\circ}\text{C}\cdot\text{天}$, 2022 年超过 $400^{\circ}\text{C}\cdot\text{天}$ (图 1(a))。区域热浪事件识别(图 1(b))显示, 2022 年和 2023 年的整体热浪事件持续时间延长。在这两年期间, 热浪强度从春末到初夏逐渐增强, 在秋季达到峰值, 超过热浪阈值, 随后在冬季消退。

图 1(c)~(h)展示了 2022 年和 2023 年主要海洋热浪指标的空间分布。该图显示, 2022 年和 2023 年海洋高温几乎覆盖了整个流域, 且两年的空间分布相似, 均表现出强烈的累积强度和持久的持续时间。从沿海到开阔海域, 海洋高温天数超过 160 天, 且开阔海域的事件与近岸区域相比, 持续时间更长、强度更高、空间覆盖范围更广。因此, 后续分析将重点关注 2022 年和 2023 年的海洋高温事件, 尤其是夏秋季节的事件, 这些事件在累积强度和持续时间上均大幅超过了历史记录。

3.2. 海洋热浪期间叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳变化特征分析

2022 年和 2023 年期间, 尤其是在夏季和秋季, 观察到了长时间的海洋热浪。为了研究夏季和秋季海洋高温事件对海洋浮游植物和碳吸收的影响, 我们对叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳进行了分析。然而, 在 2023 年初和 11 月未发现任何海洋高温事件, 而已有研究表明, 北太平洋浮游植物聚集高峰期主要出现在 7~8 月[50]。因此, 结合秋季海洋高温事件的演替, 秋季被定义为 9 月至 10 月(SO), 而夏季则包括 7 月至 8 月(JA)。

叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳异常的空间分布(图 3(a)、图 3(c))表明, 整个研究区域均观测到了显著的叶绿素 a 和颗粒有机碳正异常。增强的正异常主要集中在三个区域: 日本本土北部的沿海水域、东部沿海地带, 以及值得注意的是, 开阔洋盆地区域, 该区域表现出最高的峰值异常。然而, 由于卫星反演算法以及中高纬度地区卫星遥感中的云层干扰, 叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳数据通常存在数据集差异和空白。先前的研究表明, 与海洋碳循环指数(OC-CCI)数据和现场测量相比, GlobalColor 产品可能存在高估现象, 特别是在沿海地区[51]。因此, 本研究对这两个数据集进行了比较分析, 图 2 展示了 GlobalColor 中的高估趋势, 并评估了其用于科学分析的适用性。我们对 GlobColour 和 OC-CCI 数据集进行了比较分析, 得出了 GlobColour 中叶绿素 a 浓度高估的空间分布以及两个数据集中基于百分位数的过高估计曲线。图 2 的分析显示, GlobColour 的平均和第 75 百分位叶绿素 a 浓度值与 OC-CCI 数据高度一致。然而, 在 2023 年 8 月下旬和 9 月的两个 8 天时段内出现了显著偏差(>50%)。值得注意的是, GlobColour 中第 90 百分位叶绿素 a 浓度比 OC-CCI 高出近 100%, 表明在较高浓度下存在系统性高估。从空间上看, 这些偏差集中在日本本土北部和东部的沿海水域, 平均高估值分别为 $1\sim 1.5\text{ mg/m}^3$ 和 0.5 mg/m^3 , 分别对应于正文中确定的三个峰值异常区域中的两个。因此, 我们对海洋热浪对叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳影响的分析集中在白色边界区域, 该区域峰值异常仍然显著, 而数据高估影响最小(< 0.1 mg/m^3)。同时, 为确保将陆地径流对叶绿素 a 输入的影响以及变暖速率低于开阔洋地区的沿海上升流区域的影响降至最低, 研究区域被精心选择为尽可能远离海岸。因此, 由于沿海上升流和数据集高估的限制, 我们在研究区域内确定了研究区域, 区域在叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳峰值增加的同时, 也出现了海洋热浪峰值, 具体为 $135^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 、 $42^{\circ}\text{N}\sim 47^{\circ}\text{N}$ 。

对 2022 年和 2023 年海洋热浪期间叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳的时间序列分析(图 3(b)、图 3(d))显示, 叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳在夏季和秋季均呈现异常增加, 秋季的上升趋势尤为明显。叶绿素 a 浓度的平均值比气候学正常值高出 5~6 倍, 而颗粒有机碳的平均值则比气候学正常值高出 2~3 倍。2022 年夏季海洋高温事件期间颗粒有机碳的异常增加程度低于 2023 年夏季海洋高温事件期间。这些数据还表明, 颗粒有机碳全年均超过气候学阈值, 其中夏季和秋季的异常最为显著。在秋季, 颗粒有机碳超过气候学阈值的幅度超过两倍。这表明叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳的变化对海洋高温事件表现出相似的响应。

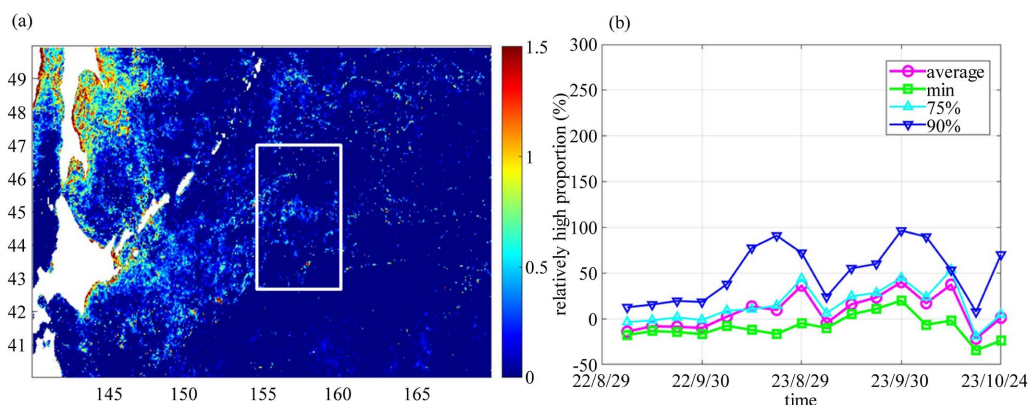


Figure 2. Spatial distribution of (a) Chl-a concentrations differences between GlobColour and OC-CCI (The white rectangle shows the study area); and (b) comparison of different percentiles in autumn 2022 and 2023

图 2. (a) GlobColour 与 OC-CCI 之间叶绿素 a 浓度差异的空间分布(白色矩形表示研究区域); 以及(b) 2022 年秋季与 2023 年秋季不同百分位数的比较

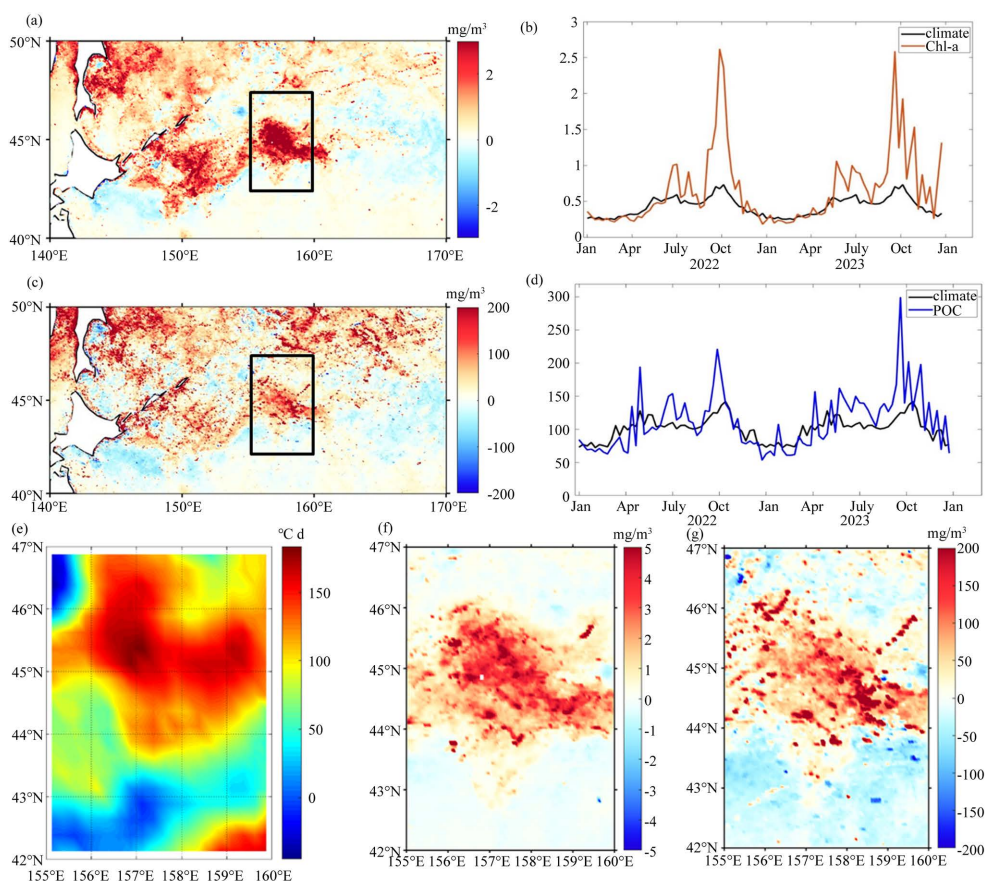


Figure 3. (a) Spatial distribution of Chl-a concentrations and (c) POC anomalies in 2022 and 2023. Time series of (b) Chl-a concentrations and (d) POC (units: mg/m^3). The black curve represents the climatological mean. (e) Spatial distribution of cumulative MHW intensity differences between JA and SO in 2022 and 2023. (f) Spatial distribution of Chl-a concentrations and (g) POC anomalies differences between JA and SO in the study area for 2022 and 2023

图 3. (a) 2022 年和 2023 年叶绿素 a 浓度的空间分布, 以及(c) 颗粒有机碳异常; 时间序列为(b) 叶绿素 a 浓度和(d) 颗粒有机碳(单位: mg/m^3); 黑色曲线代表气候平均值; (e) 2022 年和 2023 年 JA 与 SO 之间累积 MHW 强度差异的空间分布; (f) 2022 年和 2023 年研究区域内 JA 与 SO 之间叶绿素 a 浓度差异的空间分布; 以及(g) 颗粒有机碳异常差异的空间分布

为了凸显秋季海洋热浪的影响, 我们采用了计算季节差异(夏季(SO)减去冬季(JA))的方法, 来分析海洋热浪强度和叶绿素 a 浓度的空间分布模式。图 2(e)显示, 2022 年和 2023 年 SO 和 JA 之间的累积强度差异集中在 45°N 附近, 高值区位于研究区域的中北部。这些高强度中心的峰值高达 150°C 天。秋季和夏季之间叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳异常差异的空间分布(图 3(f)~(g))表明, 秋季显著增加的区域集中在研究区域的中北部, 靠近 45°N, 这与海洋热浪的高累积强度区域相对应。研究区域中部颗粒有机碳达到高峰值, 超过气候学阈值 200 mg/m³ 以上, 这与海洋热浪期间叶绿素 a 浓度的变化一致。因此, 这两年来秋季更强的海洋热浪很可能是叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳同时异常增加的主要原因。随后将分析和讨论该区域内叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳显著增加的原因。这一分析旨在进一步证实海洋热浪的作用, 并阐明其潜在机制。

3.3. 混合层深度对叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳的影响

已有研究表明, 叶绿素 a 浓度受多重因素共同调控, 主要包括: 光照有效性、营养盐供给、温度条件、气溶胶沉降及混合层过程[41] [52]-[54]。前人研究指出, 海洋热浪通常通过影响混合层深度, 进而调控叶绿素 a 浓度的变化[20] [55]-[57]。基于此, 本节将重点围绕混合层深度展开分析。

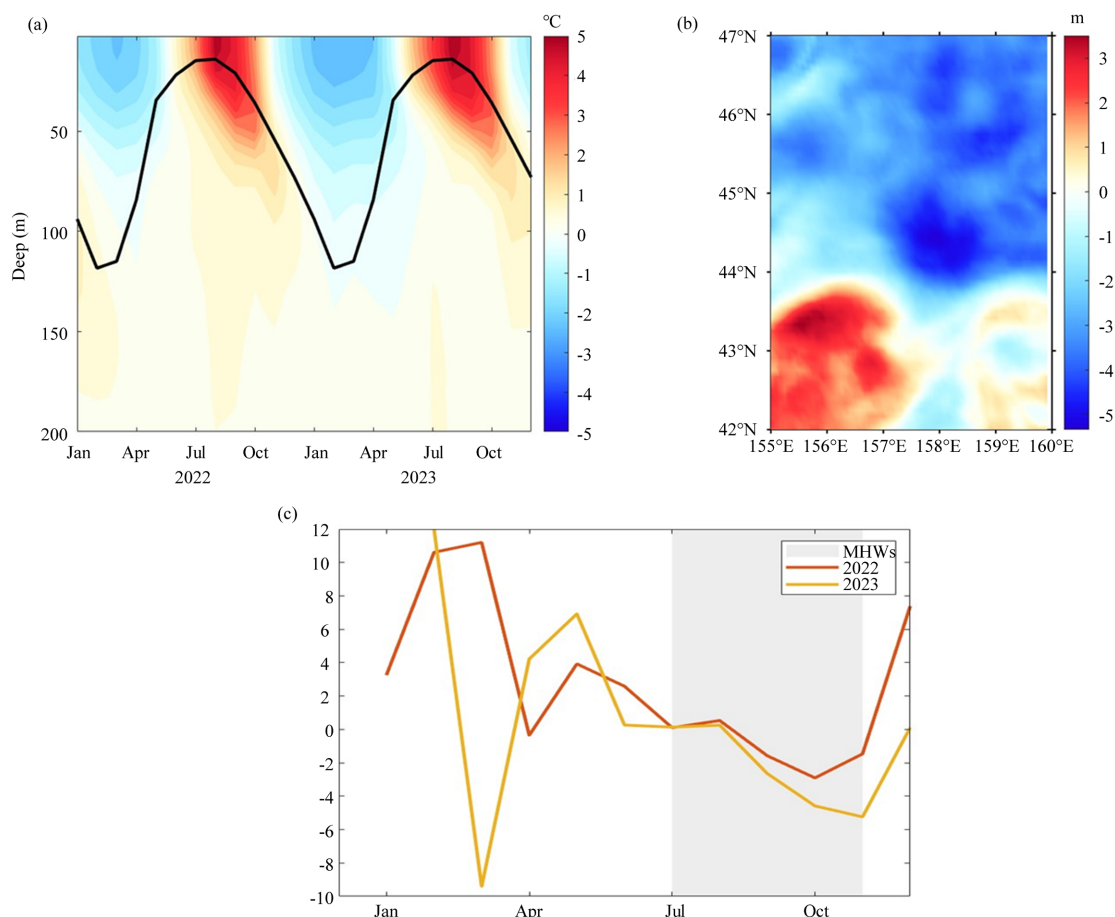


Figure 4. (a) Vertical structure of potential temperature anomalies (units: °C) and climatological MLD (units: m); (b) Spatial distribution of MLD anomalies differences between JA and SO in the study area for 2022 and 2023 (units: m); (c) MLD anomaly curve (units: m) in 2022 and 2023

图 4. (a) 潜在温度异常的垂直结构(单位: 摄氏度)和气候学混合层深度(单位: 米); (b) 2022 年和 2023 年研究区域内 JA 和 SO 混合层深度异常差异的空间分布(单位: 米); (c) 2022 年和 2023 年的混合层深度异常曲线(单位: 米)

为探究海洋热浪影响叶绿素 a 浓度的作用机制, 本研究绘制了 2022~2023 年海洋热浪期间夏季与秋季位温距平的垂直结构、混合层深度异常的空间分布, 以及气候态混合层深度与距平曲线(图 4)。结果表明, 2022~2023 年秋季海洋热浪向混合层底部延伸, 导致混合层下方的富营养水体增温(图 4(a)), 为浮游植物增殖营造了适宜的温度条件。异常空间场分布进一步揭示, 相较于夏季, 研究区中部秋季混合层深度距平呈现更为显著的减弱态势(图 4(b))。这一空间对应关系与前述秋季海洋热浪、叶绿素 a 浓度及颗粒有机碳的正距平格局相吻合, 共同揭示了层结效应对生物地球化学过程的级联影响。更为关键的是, 表层过热海水增强了层结稳定性, 在海洋热浪诱导的层化作用下, 混合层深度的季节性加深进程受到抑制(图 4(c)), 从而延长了浮游植物在混合层内的滞留时间。结合 3.4 节光合有效辐射的分析可知, 光照条件的年际变化较往年并不显著。因此, 这种滞留时间的延长增加了浮游植物的受光时长, 进而提升了光合作用效率。

需要特别指出的是, 秋季叶绿素 a 浓度爆发是持续性海洋热浪的累积效应。极端海洋热浪会强化海水层结, 导致混合层异常变浅, 进而削弱垂直运动, 减少表层营养盐供给, 引发浮游植物生物量下降。这一机制解释了为何尽管夏季具备适宜的温度与光照条件, 浮游植物生长高峰期却未如期出现。进入秋季后, 混合层季节性加深通常会裹挟富含营养盐的次表层水, 促使叶绿素 a 浓度在气候态上呈现温和上升。虽然热浪在一定程度上抵消了这一过程, 但 3.2 节所述的外部营养盐输入(如沙尘沉降)部分缓解了营养盐匮乏状况, 对夏季消耗的营养盐库进行了补充。与此同时, 海洋热浪逐渐向加深的混合层底部渗透, 形成温度适宜的次表层生态位。这种温度调控作用, 叠加海洋热浪诱导的层化对混合层加深的延缓效应, 共同延长了浮游植物在透光层的滞留时间。综上所述, 适宜的海温条件与延长光照时长的协同作用, 共同驱动了秋季浮游植物旺发现象的增强, 打破了夏季生物量峰值的常规认知。

3.4. 其他影响因子对叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳的影响分析

光照可用性通过决定光合作用的光化学过程来影响浮游植物的生长。光合有效辐射是光照对浮游植物光合作用影响的关键指标。通过分析 2022~2023 年夏季和秋季之间的标准杆数时间序列和标准杆数异常的空间分布(图 5(a)~(b)), 我们发现夏季标准杆数异常增加。然而, 秋季的变化相对于气候阈值较小。空间异常场显示, 秋季最大异常变化极小, 且无显著的极值区域。因此, 海洋热浪期间, 光照可用性对叶绿素 a 浓度的影响有限。但在秋季仍保持在季节平均上下浮动, 虽然这些数值低于夏季, 但仍支持浮游植物的生长。同时, 两年期间春季的正太阳辐射异常调节了混合层厚度的变异性, 从而通过对养分可用性和垂直分层的级联效应来调节浮游植物的生长。因此, 尽管秋季光照异常较小, 但浮游植物的生长仍然受混合层动力学的影响。

营养盐的可用性受到气溶胶沉降和海洋混合层深度、变化等因素的影响, 这些因素会影响营养盐的分布。我们绘制了叶绿素 a 浓度异常的时间序列图, 以及沙尘湿沉降(Dust_w)、沙尘干沉降(Dust_d)、有机碳(OC)和黑碳(BC)沉降异常的时间序列图, 并计算了它们之间的相关系数。结果表明, 秋季干沉降和湿沉降的变化很小, 与叶绿素 a 浓度异常呈现弱正相关。相比之下, 秋季有机碳气溶胶和黑碳气溶胶沉降的浓度略有下降, 分别低于 -1 mg/m^3 和 -0.1 mg/m^3 。这些变化较小, 且与叶绿素 a 浓度呈现弱负相关, 这表明总体相关性较差。因此, 气溶胶沉降并非影响该区域叶绿素 a 浓度变化的主要因素。

值得注意的是, 气溶胶沉降变率与叶绿素 a 浓度变化之间的弱相关性, 并不等同于其对叶绿素增殖或碳封存的贡献可忽略不计。图 5 显示, 沙尘干沉降自春末至秋季(尤其是夏季)呈现弱正距平, 由此向海洋环境输入了外源性营养盐, 尤其是溶解态铁。铁作为光合作用的关键元素, 对叶绿素 a 的合成至关重要, 能够促进浮游植物的增殖。研究区属于典型的高营养盐、低叶绿素(HNLC)海区, 尽管硝酸盐、磷酸盐及硅酸盐浓度充沛, 但浮游植物生长受限于铁匮乏[53][58][59]。沙尘气溶胶沉降的正距平为浮游植物

生长提供了必要的营养盐条件, 且 2022~2023 年间溶解态铁持续呈现正距平(见附录), 这为海洋热浪期间浮游植物的旺发创造了关键条件。

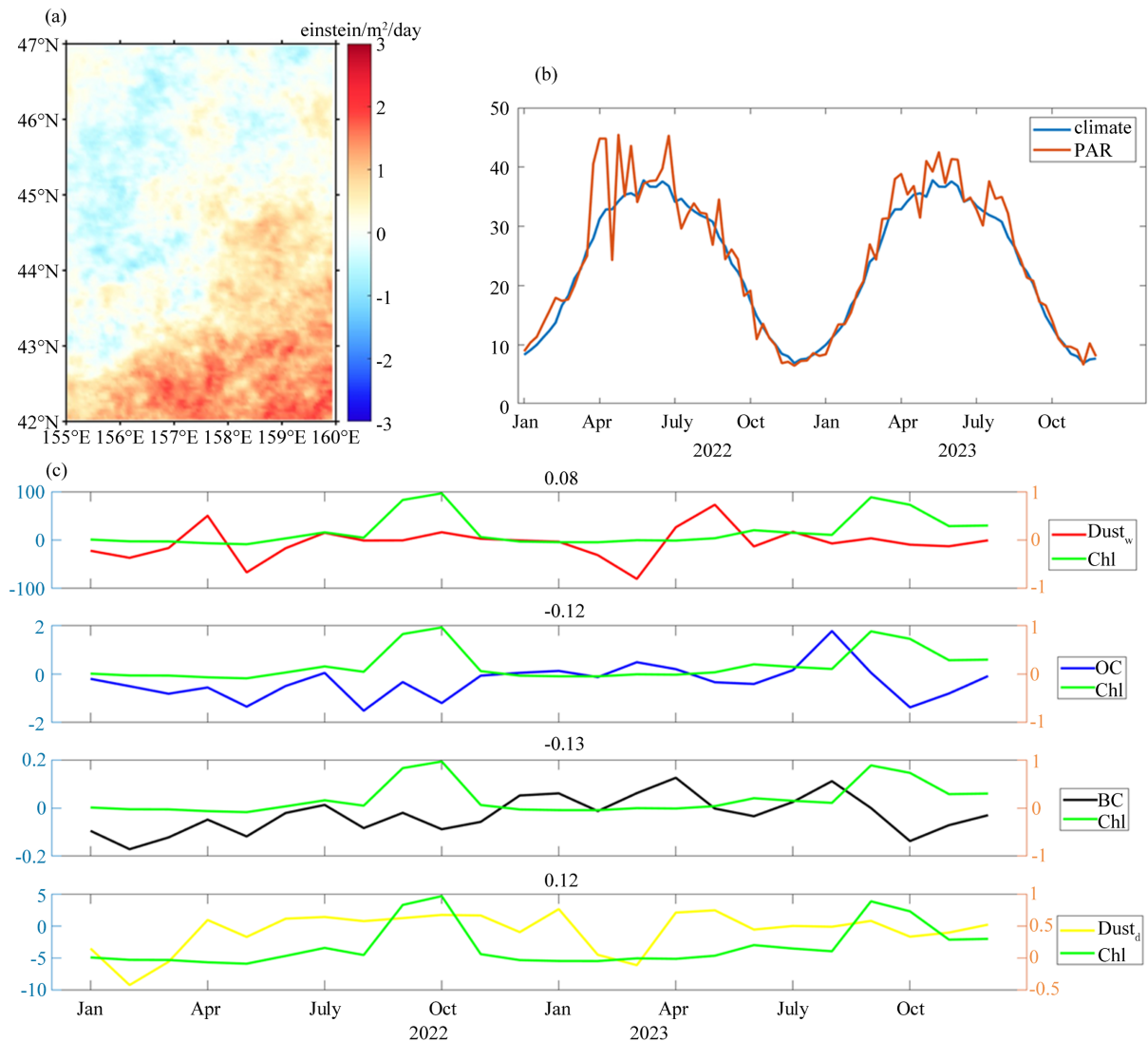


Figure 5. (a) Time series of PAR; (b) Spatial distribution of PAR anomalies between JA and SO (units: einstein/m²/day); (c) Correlation coefficients of Chl-a concentrations anomalies with Dust_d, Dust_w, OC, and BC deposition anomalies, along with their corresponding time series in the study area in 2022 and 2023 (units: mg/m²)

图 5. (a) 光合有效辐射的时间序列; (b) JA 与 SO 期间光合有效辐射异常之差的空间分布(单位: 爱因斯坦/平方米/天); (c) 研究区域 2022 和 2023 年叶绿素 a 浓度异常与沙尘干沉降、沙尘湿沉降、有机碳及黑碳沉降异常的相关系数, 及其对应的时间序列(单位: 毫克/平方米)

此外, 叶绿素 a 浓度受多重因素共同影响, 且各因素的相对重要性存在区域差异。例如, Carranza 等人对南大洋同纬度海域海洋增温与叶绿素 a 浓度关系的研究, 揭示了风场的重要调控作用[60]。鉴于本研究区位于东亚沙尘传输路径的边缘地带, 同时处于黑潮延伸体与北太平洋洋流的交汇区域[61], 我们在附录中对海洋热浪期间的风场与洋流特征进行了补充分析。年际平均及以上水平的辐照度与气溶胶沉降营养盐的弱正距异常相结合, 为研究区秋季叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳的旺发营造了有利条件。研究区南部的反气旋式环流与偏北风共同作用, 可能是该区域叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳呈现弱负距平的原因。

4. 总计与讨论

本研究发现, 2022~2023 年西北太平洋中高纬度海域发生了具有持续时长与高累积强度特征的海洋热浪事件。在这些持续性海洋热浪期间, 研究区秋季叶绿素 a 浓度与颗粒有机碳呈现显著异常高值: 叶绿素 a 浓度较气候态均值高出 5~6 倍, 颗粒有机碳平均高出 2~3 倍, 且颗粒有机碳的变化格局与叶绿素 a 浓度的空间分布高度一致。这一现象主要归因于持续性海洋热浪的累积热效应。在分析了光照有效性与气溶胶沉降的影响后, 研究证实混合层深度的变化是该现象的关键驱动因子。秋季, 强海洋热浪导致增温效应向混合层底部延伸, 同时表层过热海水增强了层结稳定性, 促使更多浮游植物获得适宜的生长条件与充足的光照资源。与此同时, 秋季混合层深度的季节性加深过程与外部营养盐输入共同保障了营养盐供给。在适宜的光照条件下, 上述过程为浮游植物生长构建了最优的温度-营养盐耦合环境, 促进了叶绿素 a 的累积。因此, 秋季叶绿素 a 浓度急剧升高, 远超气候态水平。这一过程进一步推动了颗粒有机碳的累积, 增强了海洋碳吸收能力, 对海洋生态系统与碳循环产生深远影响。

以往关于中高纬度海域海洋热浪对叶绿素 a 影响的研究多局限于夏季[21] [24] [25]。本研究结果表明, 持续性热浪可使浮游植物的生长期延续至秋季, 引发更为显著的水华现象, 且秋季浮游植物水华更可能是持续性海洋热浪的累积效应, 而非短期海洋或大气动力过程的产物。需要指出的是, 已有研究证实持续性海洋热浪能够改变海洋生态结构[23]。随着海洋热浪频次与强度的不断增加, 海洋生态系统可能逐渐适应这些变化, 从而削弱其对碳吸收的增强效应。在全球变暖背景下, 海洋热浪的持续时长与纬度范围持续扩展, 深刻影响着相关海域的海洋生态系统与碳循环过程, 这些变化也可能增加未来气候预测的复杂性。

致 谢

感谢美国国家航空航天局提供的 MODIS 卫星数据分发服务, 以及美国国家环境信息中心(NCEI, NOAA)提供的最优插值海表温度数据。感谢美国国家航空航天局戈达德地球科学数据与信息服务中心分发的 MERRA-2 数据产品。感谢欧洲中期天气预报中心提供的再分析数据。同时感谢海洋生产力网站提供的净初级生产力产品。感谢 MERRA-2 的数据支持。感谢 GlobColour, 本研究使用的 GlobColour 数据经过开发与验证。感谢 ARGO 计划, 这些数据由国际 Argo 计划及其参与的国家计划收集并免费提供。上述宝贵资源为我们的研究提供了重要支撑。

基金项目

本研究受国家自然科学基金(批准号: 42575095)与山东省自然科学基金(批准号: ZR2025MS625)资助。

参考文献

- [1] Chauhan, A., Smith, P.A.H., Rodrigues, F., Christensen, A., St. John, M. and Mariani, P. (2023) Distribution and Impacts of Long-Lasting Marine Heat Waves on Phytoplankton Biomass. *Frontiers in Marine Science*, **10**, Article ID: 1177571. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1177571>
- [2] Pearce, A.F. and Feng, M. (2013) The Rise and Fall of the “Marine Heat Wave” off Western Australia during the Summer of 2010/2011. *Journal of Marine Systems*, **111**, 139-156. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.10.009>
- [3] Oliver, E.C.J., Benthuisen, J.A., Bindoff, N.L., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Mundy, C.N., *et al.* (2017) The Unprecedented 2015/16 Tasman Sea Marine Heatwave. *Nature Communications*, **8**, Article No. 16101. <https://doi.org/10.1038/ncomms16101>
- [4] Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T., Moore, P.J., Smale, D.A., Alexander, L.V., *et al.* (2018) Longer and More Frequent Marine Heatwaves over the Past Century. *Nature Communications*, **9**, Article No. 1324.

- <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>
- [5] Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., *et al.* (2016) A Hierarchical Approach to Defining Marine Heatwaves. *Progress in Oceanography*, **141**, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- [6] Smith, K.E., Burrows, M.T., Hobday, A.J., King, N.G., Moore, P.J., Sen Gupta, A., *et al.* (2023) Biological Impacts of Marine Heatwaves. *Annual Review of Marine Science*, **15**, 119-145. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032122-121437>
- [7] Oliver, E.C.J., Burrows, M.T., Donat, M.G., Sen Gupta, A., Alexander, L.V., Perkins-Kirkpatrick, S.E., *et al.* (2019) Projected Marine Heatwaves in the 21st Century and the Potential for Ecological Impact. *Frontiers in Marine Science*, **6**, Article ID: 734. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00734>
- [8] Holbrook, N.J., Sen Gupta, A., Oliver, E.C.J., Hobday, A.J., Benthuyssen, J.A., Scannell, H.A., *et al.* (2020) Keeping Pace with Marine Heatwaves. *Nature Reviews Earth & Environment*, **1**, 482-493. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0068-4>
- [9] Gao, G., Zhao, X., Jiang, M. and Gao, L. (2021) Impacts of Marine Heatwaves on Algal Structure and Carbon Sequestration in Conjunction with Ocean Warming and Acidification. *Frontiers in Marine Science*, **8**, Article ID: 758651. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.758651>
- [10] Hughes, T.P., Kerry, J.T., Baird, A.H., Connolly, S.R., Dietzel, A., Eakin, C.M., *et al.* (2018) Global Warming Transforms Coral Reef Assemblages. *Nature*, **556**, 492-496. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0041-2>
- [11] Smale, D.A., Wernberg, T., Oliver, E.C.J., Thomsen, M., Harvey, B.P., Straub, S.C., *et al.* (2019) Marine Heatwaves Threaten Global Biodiversity and the Provision of Ecosystem Services. *Nature Climate Change*, **9**, 306-312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
- [12] Shan, E., Zhang, X., Yu, Z., Hou, C., Pang, L., Guo, S., *et al.* (2024) Seawater Warming Rather than Acidification Profoundly Affects Coastal Geochemical Cycling Mediated by Marine Microbiome. *Science of The Total Environment*, **957**, Article 177365. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177365>
- [13] Groom, S., Sathyendranath, S., Ban, Y., Bernard, S., Brewin, R., Brotas, V., *et al.* (2019) Satellite Ocean Colour: Current Status and Future Perspective. *Frontiers in Marine Science*, **6**, Article ID: 485. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00485>
- [14] Arrigo, K.R., Worthen, D., Schnell, A. and Lizotte, M.P. (1998) Primary Production in Southern Ocean Waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **103**, 15587-15600. <https://doi.org/10.1029/98jc00930>
- [15] Kudela, R.M., Cochlan, W.P., Peterson, T.D. and Trick, C.G. (2006) Impacts on Phytoplankton Biomass and Productivity in the Pacific Northwest during the Warm Ocean Conditions of 2005. *Geophysical Research Letters*, **33**, L22S06. <https://doi.org/10.1029/2006gl026772>
- [16] Marra, J., Trees, C.C. and O'Reilly, J.E. (2007) Phytoplankton Pigment Absorption: A Strong Predictor of Primary Productivity in the Surface Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **54**, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.12.001>
- [17] Cloern, J.E., Foster, S.Q. and Kleckner, A.E. (2014) Phytoplankton Primary Production in the World's Estuarine-Coastal Ecosystems. *Biogeosciences*, **11**, 2477-2501. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2477-2014>
- [18] Hayashida, H., Matear, R.J., Strutton, P.G. and Zhang, X. (2020) Insights into Projected Changes in Marine Heatwaves from a High-Resolution Ocean Circulation Model. *Nature Communications*, **11**, Article No. 4352. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18241-x>
- [19] Jiang, K., Wang, Y., Sun, Y. and Lan, J. (2023) The Seasonal Variation of Shallow Meridional Overturning Circulation in the South China Sea and the Related Dynamics. *Ocean Modelling*, **186**, Article 102242. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102242>
- [20] Noh, K.M., Lim, H. and Kug, J. (2022) Global Chlorophyll Responses to Marine Heatwaves in Satellite Ocean Color. *Environmental Research Letters*, **17**, Article 064034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac70ec>
- [21] Le Grix, N., Zscheischler, J., Laufkötter, C., Rousseaux, C.S. and Frölicher, T.L. (2021) Compound High-Temperature and Low-Chlorophyll Extremes in the Ocean over the Satellite Period. *Biogeosciences*, **18**, 2119-2137. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2119-2021>
- [22] Kremer, C.T., Thomas, M.K. and Litchman, E. (2017) Temperature- and Size-Scaling of Phytoplankton Population Growth Rates: Reconciling the Eppley Curve and the Metabolic Theory of Ecology. *Limnology and Oceanography*, **62**, 1658-1670. <https://doi.org/10.1002/lno.10523>
- [23] Thomas, M.K., Kremer, C.T., Klausmeier, C.A. and Litchman, E. (2012) A Global Pattern of Thermal Adaptation in Marine Phytoplankton. *Science*, **338**, 1085-1088. <https://doi.org/10.1126/science.1224836>
- [24] He, W., Zeng, X., Deng, L., Chun Pi, Q.L. and Zhao, J. (2023) Enhanced Impact of Prolonged MHWs on Satellite-Observed Chlorophyll in the South China Sea. *Progress in Oceanography*, **218**, Article 103123.

- <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103123>
- [25] Montie, S., Thomsen, M.S., Rack, W. and Broady, P.A. (2020) Extreme Summer Marine Heatwaves Increase Chlorophyll *a* in the Southern Ocean. *Antarctic Science*, **32**, 508-509. <https://doi.org/10.1017/s0954102020000401>
- [26] Shen, X., Zhan, W., Zhang, Y., He, Q., Bo, Y., Liu, Y., *et al.* (2024) Spatial Heterogeneity and Seasonality of Phytoplankton Responses to Marine Heatwaves in the Northeast Pacific. *Environmental Research Letters*, **20**, Article 014042. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad993d>
- [27] Liang, K., Qiu, Y., Lin, X., Lin, W., Ni, X. and He, Y. (2024) An Increase in Autumn Marine Heatwaves Caused by the Indian Ocean Dipole in the Bay of Bengal. *Journal of Climate*, **37**, 4523-4539. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-23-0541.1>
- [28] Von Schuckmann, K., *et al.* (2025) 9th Edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR9). <https://sp.copernicus.org/articles/6-osr9/>
- [29] Oh, H., Chu, J., Min, Y., Kim, G., Jeong, J., Lee, S., *et al.* (2024) Late-Arriving 2023 Summer Marine Heatwave in the East China Sea and Implications for Global Warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, **7**, Article No. 294. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00846-4>
- [30] Juraneck, L.W., Quay, P.D., Feely, R.A., Lockwood, D., Karl, D.M. and Church, M.J. (2012) Biological Production in the NE Pacific and Its Influence on Air-Sea CO₂ Flux: Evidence from Dissolved Oxygen Isotopes and O₂/Ar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **117**, C05022. <https://doi.org/10.1029/2011jc007450>
- [31] Tsubota, H., Ishizaka, J., Nishimura, A. and Watanabe, Y.W. (1999) Overview of NOPACCS (Northwest Pacific Carbon Cycle Study). *Journal of Oceanography*, **55**, 645-653. <https://doi.org/10.1023/a:1007803826886>
- [32] Bif, M.B., Kellogg, C.T.E., Huang, Y., Anstett, J., Traving, S., Peña, M.A., *et al.* (2025) Marine Heatwaves Modulate Food Webs and Carbon Transport Processes. *Nature Communications*, **16**, Article No. 8535. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63605-w>
- [33] Zhang, M., Cheng, Y., Zhang, H., Huang, C., Wang, G., Zhao, C., *et al.* (2025) Spatiotemporal Variability of Air-Sea CO₂ Fluxes in Response to El Niño-Related Marine Heatwaves in the Tropical Pacific Ocean. *Marine Environmental Research*, **204**, Article 106949. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2025.106949>
- [34] Boyd, P.W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D.A. and Weber, T. (2019) Multi-Faceted Particle Pumps Drive Carbon Sequestration in the Ocean. *Nature*, **568**, 327-335. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2>
- [35] Gruber, N., Clement, D., Carter, B.R., Feely, R.A., van Heuven, S., Hoppema, M., *et al.* (2019) The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007. *Science*, **363**, 1193-1199. <https://doi.org/10.1126/science.aau5153>
- [36] Gomes, D.G.E., Ruzicka, J.J., Crozier, L.G., Huff, D.D., Brodeur, R.D. and Stewart, J.D. (2024) Marine Heatwaves Disrupt Ecosystem Structure and Function via Altered Food Webs and Energy Flux. *Nature Communications*, **15**, Article No. 1988. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46263-2>
- [37] Nishioka, J., Obata, H., Hirawake, T., Kondo, Y., Yamashita, Y., Misumi, K., *et al.* (2021) A Review: Iron and Nutrient Supply in the Subarctic Pacific and Its Impact on Phytoplankton Production. *Journal of Oceanography*, **77**, 561-587. <https://doi.org/10.1007/s10872-021-00606-5>
- [38] Burgay, F., Spolaor, A., Gabrieli, J., Cozzi, G., Turetta, C., Vallelonga, P., *et al.* (2021) Atmospheric Iron Supply and Marine Productivity in the Glacial North Pacific Ocean. *Climate of the Past*, **17**, 491-505. <https://doi.org/10.5194/cp-17-491-2021>
- [39] Arteaga, L.A. and Rousseaux, C.S. (2023) Impact of Pacific Ocean Heatwaves on Phytoplankton Community Composition. *Communications Biology*, **6**, Article No. 263. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-04645-0>
- [40] Liu, K., Nishioka, J., Chen, B., Suzuki, K., Cheung, S., Lu, Y., *et al.* (2023) Role of Nutrients and Temperature in Shaping Distinct Summer Phytoplankton and Microzooplankton Population Dynamics in the Western North Pacific and Bering Sea. *Limnology and Oceanography*, **68**, 649-665. <https://doi.org/10.1002/lno.12300>
- [41] Fernández-González, C., Tarran, G.A., Schuback, N., Woodward, E.M.S., Arístegui, J. and Marañón, E. (2022) Phytoplankton Responses to Changing Temperature and Nutrient Availability Are Consistent across the Tropical and Subtropical Atlantic. *Communications Biology*, **5**, Article No. 1035. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03971-z>
- [42] Yasunaka, S., Ono, T., Nojiri, Y., Whitney, F.A., Wada, C., Murata, A., *et al.* (2016) Long-Term Variability of Surface Nutrient Concentrations in the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, **43**, 3389-3397. <https://doi.org/10.1002/2016gl068097>
- [43] Huang, B., Liu, C., Banzon, V., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B., *et al.* (2021) Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1. *Journal of Climate*, **34**, 2923-2939. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0166.1>
- [44] Sathyendranath, S., Brewin, R., Brockmann, C., Brotas, V., Calton, B., Chuprin, A., *et al.* (2019) An Ocean-Colour Time Series for Use in Climate Studies: The Experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI). *Sensors*, **19**, 4285. <https://doi.org/10.3390/s19194285>

- [45] Global Modeling and Assimilation Office (2015) MERRA-2 tavgM_2d_aer_Nx: 2d, Monthly Mean, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center.
- [46] European Union-Copernicus Marine Service (2018) Global Ocean Physics Reanalysis. Mercator Ocean International.
- [47] Argo (2025) Argo Float Data and Metadata from Global Data Assembly Centre (Argo GDAC). SEANOE.
- [48] Behrenfeld, M.J. and Falkowski, P.G. (1997) Photosynthetic Rates Derived from Satellite-Based Chlorophyll Concentration. *Limnology and Oceanography*, **42**, 1-20. <https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.1.0001>
- [49] Zhao, Z. and Marin, M. (2019) A MATLAB Toolbox to Detect and Analyze Marine Heatwaves. *Journal of Open Source Software*, **4**, Article 1124. <https://doi.org/10.21105/joss.01124>
- [50] Follett, C.L., Dutkiewicz, S., Karl, D.M., Inomura, K. and Follows, M.J. (2018) Seasonal Resource Conditions Favor a Summertime Increase in North Pacific Diatom-Diazotroph Associations. *The ISME Journal*, **12**, 1543-1557. <https://doi.org/10.1038/s41396-017-0012-x>
- [51] Moradi, M. (2021) Evaluation of Merged Multi-Sensor Ocean-Color Chlorophyll Products in the Northern Persian Gulf. *Continental Shelf Research*, **221**, Article 104415. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104415>
- [52] Luo, C., Wang, W., Sheng, L., Zhou, Y., Hu, Z., Qu, W., *et al.* (2020) Influence of Polluted Dust on Chlorophyll-A Concentration and Particulate Organic Carbon in the Subarctic North Pacific Ocean Based on Satellite Observation and the WRF-Chem Simulation. *Atmospheric Research*, **236**, Article 104812. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104812>
- [53] Li, Y., Wang, W., Han, Y., Liu, W., Wang, R., Zhang, R., *et al.* (2024) Impact of COVID-19 Emission Reduction on Dust Aerosols and Marine Chlorophyll—A Concentration. *Science of The Total Environment*, **918**, Article 170493. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170493>
- [54] Guieu, C., Aumont, O., Paytan, A., Bopp, L., Law, C.S., Mahowald, N., *et al.* (2014) The Significance of the Episodic Nature of Atmospheric Deposition to Low Nutrient Low Chlorophyll Regions. *Global Biogeochemical Cycles*, **28**, 1179-1198. <https://doi.org/10.1002/2014gb004852>
- [55] Zhan, W., Zhang, Y., He, Q. and Zhan, H. (2023) Shifting Responses of Phytoplankton to Atmospheric and Oceanic Forcing in a Prolonged Marine Heatwave. *Limnology and Oceanography*, **68**, 1821-1834. <https://doi.org/10.1002/lno.12388>
- [56] Zhan, W., Feng, M., Zhang, Y., Shen, X., Zhan, H. and He, Q. (2024) Reduced and Smaller Phytoplankton during Marine Heatwaves in Eastern Boundary Upwelling Systems. *Communications Earth & Environment*, **5**, Article No. 629. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01805-w>
- [57] Itoh, S., Yasuda, I., Saito, H., Tsuda, A. and Komatsu, K. (2015) Mixed Layer Depth and Chlorophyll A: Profiling Float Observations in the Kuroshio-Oyashio Extension Region. *Journal of Marine Systems*, **151**, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.06.004>
- [58] Wang, W., He, Z., Hai, S., Sheng, L., Han, Y. and Zhou, Y. (2022) Dust Aerosol's Deposition and Its Effects on Chlorophyll-A Concentrations Based on Multi-Sensor Satellite Observations and Model Simulations: A Case Study. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article ID: 875365. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.875365>
- [59] Tagliabue, A., Bowie, A.R., Boyd, P.W., Buck, K.N., Johnson, K.S. and Saito, M.A. (2017) The Integral Role of Iron in Ocean Biogeochemistry. *Nature*, **543**, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature21058>
- [60] Carranza, M.M. and Gille, S.T. (2015) Southern Ocean Wind-Driven Entrainment Enhances Satellite Chlorophyll—A through the Summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**, 304-323. <https://doi.org/10.1002/2014jc010203>
- [61] Silva, E.N.S. and Anderson, B.T. (2023) Northeast Pacific Marine Heatwaves Linked to Kuroshio Extension Variability. *Communications Earth & Environment*, **4**, Article No. 367. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01010-1>

附录

本附录包含两部分文字说明与三幅支撑图。展示了净初级生产力与溶解态铁的分析结果以及 2022~2023 年秋季海洋热浪期间研究区的洋流场、表层风场及风应力旋度的分析结果。图 S1 展示了 2022~2023 年夏季与秋季净初级生产力差值的空间分布。图 S2 展示了 2022~2023 年研究区表层溶解态铁、硝酸盐、磷酸盐及硅酸盐浓度距平的时间序列。图 S3 展示了 2022~2023 年秋季海洋热浪期间研究区 (42°N~47°N, 155°E~160°E) 洋流场、表层风场及风应力旋度距平的空间分布。

我们分析了 2022~2023 年夏季与秋季净初级生产力差值的空间分布(图 S1)。该图显示, 研究区净初级生产力的空间异常格局与叶绿素 a 及颗粒有机碳的异常分布相似, 均集中在区域中部, 且超过 4000 mg/m²/天。对该区域营养盐异常浓度的同步分析表明, 2022~2023 年暖季期间溶解态铁呈现微弱正距平(图 S2), 而硝酸盐、磷酸盐及硅酸盐均呈负距平且呈现下降趋势。这表明, 异常沙尘输入可能促进了溶解态铁的正距平, 从而为海洋热浪驱动的浮游植物旺发创造了有利条件。同期营养盐水平的下降, 与浮游植物爆发性生长导致的营养盐消耗相吻合。

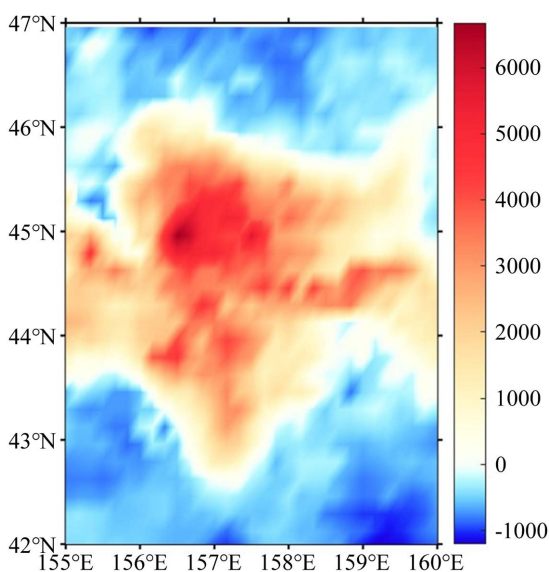


Figure S1. Spatial distributions of NPP differences between JA and SO in 2022 and 2023 (unit: mg/m²/day)

图 S1. 2022 年至 2023 年期间, 研究区域 JA 与 SO 之间净初级生产力差异的空间分布(unit: mg/m²/day)

我们分析了 2022 年和 2023 年秋季海洋热浪期间洋流场、地表风场和风应力旋度异常的空间分布(图 S3)。结果显示, 研究区域南部洋流场存在弱反气旋异常。这种反气旋流会削弱垂直运动, 抑制对浮游植物生长至关重要的营养物质的向上输送, 即使海表温度达到有利于浮游植物的水平。这可能是南部地区叶绿素 a 浓度异常略有下降的原因。此外, 海洋高温事件期间的地表风场呈南北递增趋势, 但总体变化相对较小。整个区域的风速变化通常在 0.5 米/秒以内, 东南部和西北部地区风速变化较大, 而中部地区变化较小。风应力旋度异常范围在 $\pm 0.5 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 之间, 整个区域风应力旋度值普遍较低, 无显著极端值。地表风和洋流均可驱动表层海洋中叶绿素 a 浓度的水平输送。在研究区域的中北部, 风速和流速的异常值通常在 0.5 米/秒以内, 为叶绿素 a 浓度的积累创造了有利条件。相比之下, 在研究区域的南部, 北风和反气旋流场可能导致叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳出现弱负异常。年平均或以上水平的辐照度以及气溶胶沉积营养盐的弱正异常共同为研究区域叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳的秋季爆发提供了有利条件。而该区域南部的反气旋环流和北风可能是叶绿素 a 浓度和颗粒有机碳弱负异常的原因。

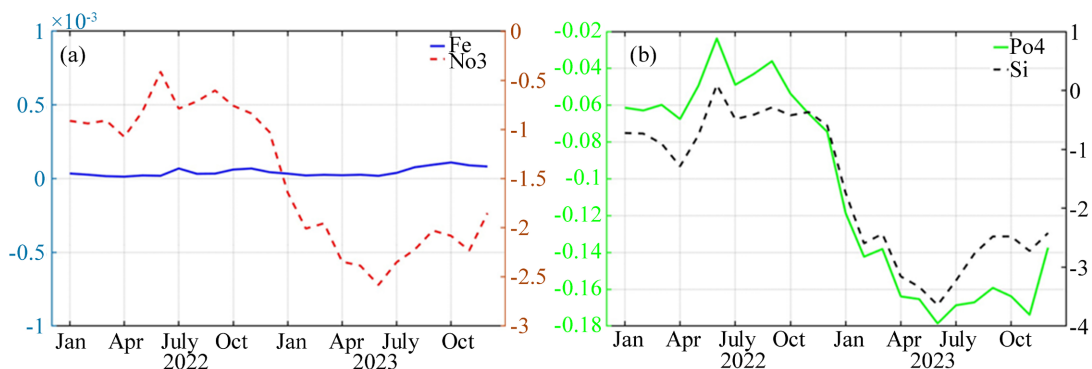


Figure S2. Anomaly time series of surface (a) dissolved iron, nitrate, (b) phosphate, and silicate in the study area during in 2022 and 2023 (unit: mmol/m³)

图 S2. 2022 年至 2023 年期间, 研究区域表层(a) 溶解铁、硝酸盐;(b) 磷酸盐和硅酸盐的异常时间序列(单位: mmol/m³)

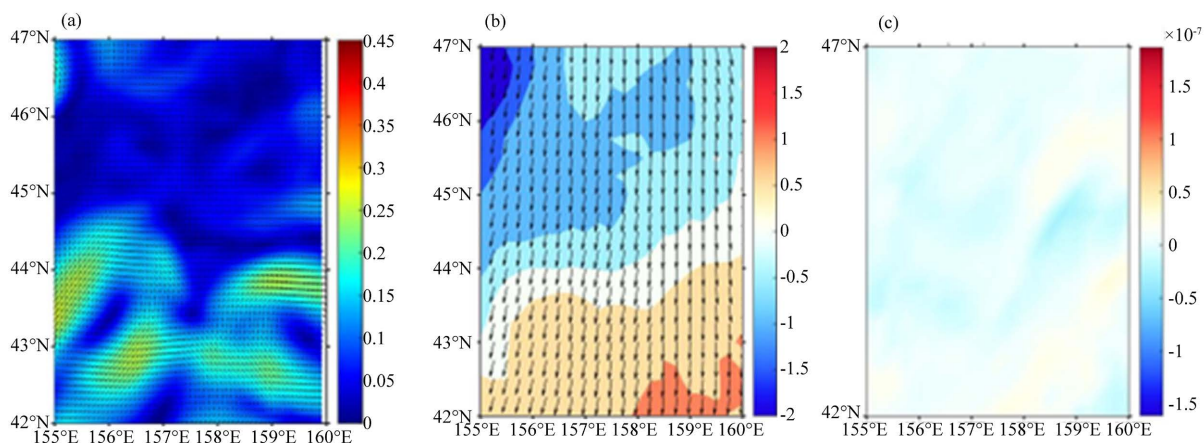


Figure S3. Spatial distributions of (a) ocean current fields, (b) surface wind fields (units: m/s), and (c) wind stress curl anomalies during autumn MHWs in 2022 and 2023

图 S3. 2022 年和 2023 年秋季海洋热浪期间(a) 海流场、(b) 海面风场(单位: 米/秒)以及(c) 风应力旋度异常的空间分布