## 西太平洋暖池海洋热浪在 2020-2022 三年拉尼 娜事件爆发背景下的演变特征、爆发机制及其影 、响研究

郑飞<sup>1</sup>张小娟<sup>2\*</sup>曹庭伟<sup>1,3</sup>



1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境研究中心(ICCES),北京 100029 2 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,甘肃 730099 3 中国科学院大学,北京 100049

摘要: 在全球变暖的影响下, 持续增长的海洋热浪事件 (marine heatwaves, MHW)对气候系统和社会经济产生了严重影响,其中西太平洋暖池区域是 MHW 特征显著变化的典型区域。本文基于已建立的 MHW 高分辨率数据、美国国家环 境预报中心(NCEP)提供的大气海洋再分析资料、美国宇航局(NASA)Aqua 卫星和生物地球化学 Argo 浮标提供的叶绿素-a 浓度资料,利用统计分析和奇异 值分解(SVD)等方法,探讨了 2020-2022 年西太平洋暖池 MHW 的演变特征、 爆发机制及其生态影响。结果表明,西太平洋暖池 MHW 的爆发频率和强度等在 近 30 年显著增加,其特征属性的变化与连续 La Niña 事件的爆发密切相关。尤 其在 2020-2022 年连续三年 La Niña 事件背景下,西太平洋暖池区 MHW 爆发频 次达到全球最高,且其覆盖面积、爆发频次、总天数、累积强度均是1982年以 来最显著的。通过对西太平洋暖池区域混合层热收支的分析, 2020-2022 年期间 MHW 爆发主要是净海表热通量中的向下短波辐射项和海洋动力过程中的纬向 平流项共同主导。此外,研究也揭示了在西太平洋暖池区域,MHW 与海洋生态 指标叶绿素-a浓度时空尺度上呈现负相关协同变化的特征,尤其是 2020-2022 年 的 MHW 事件使该区域海洋上层浮游生物量整体呈显著下降趋势。 关键词:海洋热浪 三年拉尼娜 西太平洋暖池 爆发机制 海洋生态影响 文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2311.23325

# Analysis of evolution characteristics, physical mechanism and impacts of marine heatwaves in the Western Pacific Warm Pool under the

## background of triple-year La Niña from 2020 to 2022

Zheng Fei<sup>1</sup>, Zhang Xiaojuan<sup>2\*</sup>, and Cao Tingwei<sup>1, 3</sup>

1 *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029* 

2 Gansu Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Gansu 730099

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Under the influence of global warming, the continuously growing Marine Heatwaves (MHW) has a serious impact on the climate system and the social economy, of which the Western Pacific Warm Pool area is a typical area of MHW characteristic changes. Based on the MHW database, the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) atmospheric and oceanic reanalysis data, the chlorophyll-a concentration data provided by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Aqua satellite and the biogeochemical Argo floats, by using statistical methods such as composite analysis and singular value decomposition (SVD), we explore the evolution characteristics, physical mechanisms and ecological impacts of MHW in the Western Pacific Warm Pool from 2020 to 2022. The results show that MHW properties in the Western Pacific Warm Pool region have increased significantly in the past 30 years and it is closely related to the continuous La Niña events. Under the background of multi-year La Niña events from 2020 to 2022, the frequency of MHW in the Western Pacific Warm Pool reached the highest in the world, and the coverage area, frequency, total days and cumulative intensity of MHW are the most notable since 1982. By using the mixed layer heat budget equation in the Western Pacific Warm Pool region, it is shown that the occurrence of the strongest MHW during the period 2020 to 2022 is mainly dominated by the downward

**收稿日期** 2023-8-20; 网络预出版日期 作者简讯:郑飞,男,1979年5月出生,研究员,主要从事海气相互作用、资料同化与气候预测方面研究, 邮箱 E-mail: zhengfei@mail.iap.ac.cn 通讯作者: 张小娟 邮箱 E-mail: zhangxiaojuan@mail.iap.ac.cn 资助项目: 国家自然科学基金项目(42175045) Funded by: National Natural Science Foundation of China (Grant 42175045) shortwave radiation term in the net flux and the latitudinal advection term in the marine dynamic processes. In addition, we also revealed that the MHW properties and marine ecological indicator chlorophyll-a concentration show a negative correlation on the spatial and temporal scales in the Western Pacific Warm Pool region, especially the MHW events during 2020-2022 caused the significant decline of overall phytoplankton biomass in the upper ocean of the region.

Keywords: Marine Heatwaves, Triple-year La Niña, Western Pacific Warm Pool, Outbreak mechanism, Marine ecological impact













1引言

全球变暖已导致地球气候系统能量失衡,尤其是海洋上层温度的极度升高 (Cheng et al., 2019)。最近在海洋中发现了极端高温现象,即海洋热浪(Marine Heatwave, MHW),其是海表温度(Sea Surface Temperature, SST)的持续偏暖 事件,可持续数天到数月甚至更长时间,范围亦能跨越数千公里的海洋(Pearce et al., 2013; Hobday et al., 2016)。MHW 事件在过去几十年中已经变得更频繁、 更广泛和更强烈(Frölicher et al., 2018; Oliver et al., 2018; Darmaraki et al., 2019; Laufkötter et al., 2020),不断创记录的 MHW 事件已经对海洋生态系统和社会经 济造成了广泛且严重的损害(Garrabou et al., 2009; Oliver et al., 2017; Frölicher et al., 2018; Cheung and Frölicher, 2020; Dalton et al., 2020)。

由于西太平洋暖池(Western Pacific Warm Pool, WPWP)具有全球最高的 SST 而存在强烈的海气相互作用过程,其在局地乃至全球气候系统中至关重要(Yan et al., 1994;柏颖, 2016)。最新研究表明,在过去几十年里,WPWP 区域表层和次 表层的 MHW 爆发频次和持续时间明显增加,且次表层的 MHW 在 La Niña 事件 期间比 El Niño 事件期间较强且更频繁(Hu et al., 2021; Spillman et al., 2021; Holbrook et al., 2022; Zhang et al., 2022)。WPWP 区域持续增加的 MHW 已经对严 重依赖海洋资源来维持经济的沿海国家及其周边地区造成了重大影响(Spillman et al., 2021; Holbrook et al., 2022; Noh et al., 2022; Handeno et al., 2022)。而 WPWP 区域 MHW 主要受与 ENSO 等相关的海洋-大气动力过程的驱动(Holbrook et al., 2019; Huang et al., 2021; Lee et al., 2022; 张小娟等, 2022),但目前对其的演 变特征和爆发机制等的研究还相对较少。此外,考虑到在高能耗温室气体排放情 景下,MHW 频次的最大变化将发生在热带西太平洋和北冰洋(Frölicher et al., 2018; Darmaraki et al., 2021; Qiu et al., 2021),故需要进一步探讨西太平洋暖池 MHW 的演变特征、物理机制及生态影响等。

本文首先分析了 1982-2022 年 WPWP 区 MHW 各属性的时间序列变化、空间分布特征和季节变化,接着重点探讨了在 2020-2022 三年拉尼娜事件爆发背景 下该区域 MHW 的时空演变特征,并利用混合层热收支方程分析了近三年 MHW 的爆发机制,最后探讨了其对海洋表层和次表层浮游生物浓度的影响。

2 资料和方法

#### 2.1 数据说明

本文采用的资料主要包括中国科学院大气物理研究所研发的 MHW 高分辨 率数据产品,大气海洋再分析资料和叶绿素浓度-a,其具体信息可参考表 1。MHW 高分辨率数据产品是基于 1982-2022 年美国国家海洋和大气管理局 (NOAA)的 高分辨率(1/4°)逐日最优插值海表温度(Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature V2, OISST)数据统计的 MHW 日数据。产品在确定阈值时参照了 前人的方法(Hobday et al., 2016),其对 MHW 的定义为:对于每个格点,日平 均 SST 连续至少五天高于 30 年历史基准期(1983-2012)第 90 百分位(阈值) 的时段,定义为一次 MHW 事件。这样每个格点每天都存在一个阈值,其随时空 变化可以更真实地分析 MHW 的变化特征。本文对 MHW 的定义与前人对 MHW 的定义略有不同,主要采用了原始数据中计算出没有任何平滑的更真实的阈值和 气候平均值,因为平滑的气候可以人为地放大 MHW 事件的强度并延长其持续 时间,另外该研究也处理了多一天的闰年 2 月 29 日的 MHW,可以用来准确 分析 MHW 的日变化过程(Zhang et al., 2022)。叶绿素浓度-a 已被用作浮游生物 量的代表(Behrenfeld et al., 2005; Blondeau-Patissier et al., 2014; Hu et al., 2022), 故本文也利用其代表浮游生物量的变化。

Table 1 Datasets used in this study							
数据	空间分辨率	时间尺度	来源	链接			
MHW 数据	0.25° ×0.25°	1982-2022	IAP, CAS	http://www.scidb.cn/e n/s/nqauYn			
净感热/潜热通量	2.5° × 2.5°	2020-2022	NCEP2	https://psl.noaa.gov/d ata/gridded/data.ncep. reanalysis2.html			
向上/向下长波辐 射	$2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	2020-2022	NCEP2	https://psl.noaa.gov/d ata/gridded/data.ncep. reanalysis2.html			
向上/向下短波辐 射	$2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	2020-2022	NCEP2	https://psl.noaa.gov/d ata/gridded/data.ncep. reanalysis2.html			
海洋温度和洋流 数据	$2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$	2020-2022	GODAS	https://www.psl.noaa. gov/data/gridded/data			

# 表1研究所用数据

				.godas.html
表层叶绿素浓度	9km×9km	2020-2022	NASA	https://oceancolor.gsf
-a				c.nasa.gov/
次表层叶绿素浓	3个浮标	2020-2022	BGC-Argo	ftp://ftp.ifremer.fr/ifre
度-a				mer/argo

#### 2.2 MHW 的定义和分析方法

本文基于 MHW 数据,对 WPWP 区域每个格点统计了 MHW 特征属性。包括 MHW 每年的爆发频次、累积强度(MHW 期间每日强度的总和)、最大强度(MHW 期间日强度的最大值)、平均强度(MHW 发生时期平均每天的海温异常)、总天数(每年 MHW 发生的天数)和持续时间(每年 MHW 发生的天数除以爆发频次)。

本文主要利用合成分析的方法对La Niña 与 MHW 各属性的关系进行了分析 (黄嘉佑,2000),并利用奇异值分解(Singular value decomposition,SVD)方 法(魏凤英,1999)来确定 WPWP 区 MHW 的累积强度与叶绿素浓度-a 的时空 相关性,本文选取(20°S-35°N,100-180°E)范围内的 MHW 作为 SVD 右场, 同范围的叶绿素浓度-a 作为 SVD 左场进行了 SVD 分解。

进一步地,为了评估 2020-2022 年 WPWP 区海气热收支和海洋动力过程对 MHW 期间海温变化的贡献,本文使用混合层热收支方程进行了海温异常分析 (Jin et al., 2006; Ren et al., 2013, 2020)。在 WPWP 区域求平均值 (5°S-15°N, 120°E-160°E),线性化的混合层热收支方程可写为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\overline{u}\frac{\partial T}{\partial x} - \overline{v}\frac{\partial T}{\partial y} - \overline{w}\frac{\partial T}{\partial z} - u\frac{\partial \overline{T}}{\partial x} - v\frac{\partial \overline{T}}{\partial y} - w\frac{\partial \overline{T}}{\partial z} - u\frac{\partial \overline{T}}{\partial y} - w\frac{\partial \overline{T}}{\partial z} + \frac{Q_{net}}{\rho c_n H} + R$$
(5.1)

其中 T、u、v、w 分别表示海洋温度、纬向流、经向流和垂直速度,Q<sub>net</sub>为海气 热通量。 $\overline{T}$ 、 $\overline{u}$ 、 $\overline{v}$ 、 $\overline{w}$ 表示气候平均值,T,u、v、w,v,v,w, $Q'_{net}$ 表示偏离平均 值的异常。H 为混合层深度,参考前人研究(Ren & Jin, 2013; Ren & Wang, 2020), 本文将混合层深度设定为常值(80m), $\rho$ =1026 kg/m<sup>3</sup>为海水密度, c<sub>p</sub> =4096 J/(kg·K) 为海水比容。R 表示残余项,包括混合层底部的湍流混合、水平混合、扩散和数 值误差。 净海表热通量 Qnet 分解为:

$$Q_{net} = Q_{sw} + Q_{lw} - Q_{shf} - Q_{lhf} - Q_d$$
(5.2)

其中  $Q_{sw}=d_{sw}-u_{sw}$ 、 $Q_{lw}=d_{lw}-u_{lw}$ 、 $Q_{shf}$ 、 $Q_{lhf}$ 分别为净短波辐射、净长波辐射、净感 热通量和净潜热通量。 $d_{sw}$ 、 $u_{sw}$ 、 $d_{lw}$ 、 $u_{lw}$ 分别为向下/向上短波辐射和向下/向上 长波辐射。 $Q_d=Q_{sw}(0.58e^{-H}-0.42e^{-H}-23})$ 为穿透混合层以下的短波辐射(Shi et al., 2022)。

式(5.1)中的平均上升流平流可以进一步分解为以下近似(An et al 1999; Ren & Jin, 2013):  $-\frac{\partial T}{\partial z} \approx w \frac{T'_{sub}}{H} - \frac{w}{H}$ (5.3)

根据 Jin 等人(2006)的研究,本文将式(5.1)中相同作用的项合并表示为 6 个反馈项:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = MC + ZA + EK + TH + NDH + TD + R$$

$$MC = -\overline{u} \frac{\partial T'}{\partial x} - \overline{v} \frac{\partial T'}{\partial y} - \overline{w} \frac{T'}{H}$$

$$ZA = -u' \frac{\partial \overline{T}}{\partial x}$$

$$EK = -v' \frac{\partial \overline{T}}{\partial y} - w' \frac{\partial \overline{T}}{\partial z}$$

$$(5.4)$$

$$(5.4)$$

$$(5.4)$$

$$(5.4)$$

$$(5.5)$$

$$(5.5)$$

$$(5.6)$$

$$(5.7)$$

$$TH = w \frac{T_{sub}}{H}$$
(5.8)

$$NDH = -u'\frac{\partial T'}{\partial x} - v'\frac{\partial T'}{\partial y} - w'\frac{\partial T'}{\partial z}$$

$$TD = \frac{Q_{net}}{\rho c_n H}$$
(5.9)

其中 MC 是平均环流的影响,ZA 是纬向平流反馈,EK 是 Ekman 抽吸反馈,TH 是温跃层反馈,NDH 是非线性动力加热项,TD 是净热通量项,R 是残余项。

### 3 西太平洋暖池 MHW 变化特征

本节首先分析了 1982-2022 年西太平洋暖池平均日 SST 异常和 MHW 的覆 盖面积。图 1 是统计得到的 1982-2022 年 WPWP 区平均日 SST 异常和 MHW 覆 盖面积的时间序列。自 1982 年卫星观测时期以来,WPWP 经历了显著的表层变 暖,尤其是在 2000 年之后 (图 1a),这可能是人为强迫和内部变率的结果 (Oliver et al., 2018; Laufkötter et al., 2020)。相应地,近年来在 WPWP 区出现了更频繁的、面积更大的 MHW (图 1b)。在过去四十一年,WPWP 的 MHW 覆盖面积 (某一 天的综合面积)呈显著增加趋势,其中 1998 年、2010/2011 年、2013/2014 年、2016/2017 年和 2020-2022 年 MHW 的覆盖面积超过平均覆盖面积的四倍。在这 些 MHW 覆盖面积显著的年份中,除了 2014 年,其他年份都为连续 La Niña 年。而且,最近三年的 SST 正异常和 MHW 覆盖面积都达到了四十一年来的历史最高,这可能与 2020-2022 年三年 La Niña 的发生有关。由上可知,西太平洋暖池 MHW 覆盖面积的变化与全球增暖的趋势和连续 La Niña 的发生密切相关,本次 研究主要讨论连续 La Niña 对西太平洋暖池 MHW 各属性的影响。前人研究表明 全球变暖是强 MHW 越来越频发的重要原因之一 (Oliver et al, 2018; Laufkötter et al., 2020),故对于全球增暖趋势和 La Niña 的年际变率对 MHW 影响的归因分析,可在后续研究中进一步深入探讨。



**图 1:** (a) 1982-2022 年西太平洋暖池(WPWP)(5°S-15°N, 120°E-160°E)平均日海温异常(SSTa)的时间序列,其中红色条表示 SSTa 大于其 1.5 个标准差。(b) WPWP 区 MHW 的 覆盖面积,红色条表示覆盖面积大于 1982-2022 年气候平均值的 4 倍。

**Figure 1.** Time series of daily SST anomalies (SSTa) averaged in the WPWP ( $5^{\circ}S-15^{\circ}N$ ,  $120^{\circ}E-160^{\circ}E$ ) during 1982-2022, where red bars indicate SSTa is greater than its 1.5 standard deviations. (b) the coverage area of Marine Heatwaves (MHW) in the WPWP, where red bars indicate the coverage area is greater than 4 times the climatological mean from 1982 to 2022.

1982-2022 年 WPWP 区域六种 MHW 属性(爆发频次、累积强度、最大强度、平均强度、总天数和持续时间)的空间分布如图 2 所示。WPWP 的 MHW 爆发频次、总天数和持续时间空间分布比较一致,其大值区主要集中在 5°N 以

北(图 2a,图 2e 和图 2f)。此外,WPWP 区 MHW 爆发频次整体偏高,平均每 年发生 5 次左右(图 2a)。MHW 的累积强度存在一个明显的大值区,主要位于 2°N-15°N,125°E-140°E(图 2b)。MHW 的最大强度和平均强度也有一致的空间 分布特征,大部分区域最大强度为 1.65℃ 左右,平均强度为 1.1℃ 左右。总体 而言,WPWP 区年平均 MHW 属性表现出爆发频次高,总天数多,平均强度较 小的特征。



**图 2:** 1982-2022 年西太平洋暖池区 6 种海洋热浪(MHW)属性的年统计特征。(a)-(f) 分别为 MHW 的爆发频次(次数)、累积强度(℃·天)、最大强度(℃)、平均强度(℃)、 总天数(天)和持续时间(天)。

**Figure 2.** Statistical characteristics of six marine heatwaves (MHW) properties in the Western Pacific Warm Pool from 1982 to 2022. (a–f) The annual mean of MHW frequency (counts), cumulative intensity ( $^{\circ}C$ ·days), maximum intensity ( $^{\circ}C$ ), intensity mean( $^{\circ}C$ ), total days (days) and durations (days), respectively.

基于以上分析,WPWP 区域在 2020-2022 年 MHW 覆盖面积达到了 41 年来 最高。为了进一步探究近三年 WPWP 区域 MHW 各属性的异常空间分布特征, 本文分别对 2020-2022 年平均 MHW 的爆发频次、累积强度、最大强度、平均强 度、持续时间和总天数计算了其基于 41 年气候态(1982-2022 年)的异常值(图 3)。如图 3 所示,WPWP 的 MHW 各属性整体都有正异常,MHW 的爆发频次、 累积强度和总天数存在显著的正异常大值区,主要位于 125°E-145°E 海域(图 3a, 图 3b,图 3e)。其中,MHW 爆发频次较往年增加最显著,大部分区域异常值达 到了 6 次(较常年增加了一倍),表明在连续三年 La Niña 事件背景下,WPWP 区的 MHW 爆发频次显著增加(图 3a)。同理,WPWP 大部分区域 MHW 的累积 强度异常值达到了 96°C·天,总天数的异常值更是达到了 74 天(图 3b,图 3e)。 表明连续 La Niña 事件的发生可促使此区域 MHW 变得更加持续和强度增强(图 3b)。对于 MHW 的最大强度和平均强度,其较往年的异常值较小(图 3c,图 3d)。 由图 3f 所示,近三年 MHW 的持续时间在其本身较大的区域有最强的正异常。 综上可意识到,2020-2022 年 WPWP 区 MHW 表现出较往年更频繁和持续,平 均强度增强较小的特征,这可能主要与连续三年的 La Niña 事件爆发相关。此外, 前人研究表明,持续时间的 MHW 的累积强度也会增强,其会对海洋生物造成长 期的持续的毁灭性影响(Holbrook et al., 2022)。



图 3: 2020-2022 年西太平洋暖池区年平均海洋热浪(MHW)属性相对于气候态(1982 - 2022) 的异常。(a) - (f) 分别为 MHW 的爆发频次(次数)、累积强度(℃·天)、最大强度(℃)、 平均强度(℃)、总天数(天)和持续时间(天),打点区表示通过显著性检验(异常值超过一 倍标准差)。

Figure 3. Anomalies of the annual mean marine heatwaves (MHW) in the WPWP from 2020 to 2022 relative to the climatological mean from 1982 to 2022. (a–f) are MHW frequency (counts), cumulative intensity (°C days), maximum intensity (°C), intensity mean(°C), total days (days) and durations (days), respectively, the dotted area indicates passing the significance test (the anomalies exceed the standard deviation).

为了验证 WPWP 区域 MHW 与多年 La Niña 的相关性,本文进一步分析了研究区域 MHW 各属性区域平均的年变化与连续 La Niña 事件的关系。图4 即为

MHW 各属性区域平均的年变化,其中橙色条代表连续两年及以上的 La Niña 事件,蓝色星号为三年连续事件。在过去 41 年里,MHW 的累积强度、爆发频次、总天数和持续时间在统计上显著增加,且各属性值较大的年份与连续 La Niña 事件有较好的对应关系,尤其是在 2020-2022 年这四个属性达到了历史极值(图 4a,图 4d-f)。除此之外,MHW 的累积强度、爆发频次和总天数在 2013/2014、2016/2017 和 2020-2022 年超过了各属性长期平均值长的两倍(图 4a,图 4d-e)。同时,MHW 的最大强度和累积强度与连续三年 La Niña 也有较强的关系,其都在 1998 年达到了历史最高(图 4b,图 4c)。这表明近年来在连续 La Niña 事件的背景下,WPWP 区域爆发了累积强度更强、更频繁的、持续时间更长的、覆盖面积更广的 MHW 事件。



图 4: 1982-2022 年 WPWP 区年平均 MHW 属性的时间序列。(a)-(f)分别为 MHW 的累积强度(℃·天)、最大强度(℃)、平均强度(℃)、爆发频次(次数)、总天数(天)和持续时间(天)。 (a)-(f)中的红色柱状条表示值超过 MHW 各属性整个时间序列平均值的两倍。橙色条代表 连续 La Niña 年,蓝色星号为三年连续事件。

Figure 4. Time series of annual mean marine heatwaves (MHW) properties in the WPWP from 1982 to 2022. (a)-(f) are cumulative intensity, maximum intensity, intensity mean, frequency, total days and durations of MHW, respectively. The red bar in (a)-(f) denote values more than twice the averages of the full-time series, orange bars represent multi-years La Niña, and the blue asterisks are three-years La Niña events.

基于以上结果,本文研究揭示了 WPWP 区域 MHW 的累积强度、爆发频次

和总天数在近几十年显著增加,并且受连续 La Niña 事件的影响更为显著。本文 进一步分析了 WPWP 区域平均月 MHW 累积强度(一个月内 MHW 总的强度)、 爆发频次(一个月内发生 MHW 的次数)和总天数(一个月内 MHW 总日数) 的季节变化。可以看到,1982-2022 年 WPWP 区域月 MHW 累积强度和总天数 存在季节变化,其在 3 月份和 9 月份达到峰值,而爆发频次没有明显的季节变化 (图 5a,图 5c,图 5e)。对于 MHW 累积强度、爆发频次和总天数在连续 La Niña 年(图 4 选择的连续 La Niña 年)合成的季节变化,月 MHW 累积强度和总天数 显著增加,其只在 9 月份达到最大值(图 5b,图 5d)。同理,连续 La Niña 年月 MHW 爆发频次也有所增加,但是没有明显的季节变化(图 5f)。因此,WPWP 区 MHW 累积强度和总天数的季节变化受到连续 La Niña 事件的影响。



**图 5:** WPWP 区 MHW 属性的季节变化。1982 年 1 月至 2022 年 12 月的月 MHW 累积强度 (a)、总天数(c)和爆发频次(e)的合成。(b) 连续 La Niña 年的月 MHW 累积强度(b)、 总天数(d)和爆发频次(f)的合成。蓝色误差棒代表均值的 95%置信区间。

**Figure 5.** Seasonal variations of monthly marine heatwaves (MHW) properties in the WPWP. A composite of monthly MHW cumulative intensity (a), total days (c) and frequency (e) from Jan 1982 to Dec 2022. A composite of monthly MHW cumulative intensity (a), total days (c) and frequency (e) for multi-years La Niña. The blue error bars represent confidence interval of mean (95%).

以上统计分析表明,在连续三年 La Niña 事件的背景下,2020-2022 年 WPWP 区 MHW 的覆盖面积、累积强度、爆发频次和总天数都达到了 41 年以来的最高 值,且 MHW 的累积强度和总天数在 9 月最显著。由图 6a 可以看到,2020-2022 年在连续 La Niña 的背景下,WPWP 区 MHW 事件爆发频次是全球最显著的。且 2020-2022 年 WPWP 区域 MHW 事件在一年中任何季节都有发生,最显著的事件发生在 2020 年的夏季 (图 6b)。



图 6: 2020-2022 年海洋热浪(MHW)爆发频次空间分布(a)和西太平洋暖池(WPWP)区域 平均 MHW 爆发频次的季节变化(b)。(a)中黑色框为 WPWP 区(5°S-15°N, 120°E-160°E),(b) 中黑色线代表 SST,绿色线为 90%阈值,蓝色线为 SST 气候态平均,橙色阴影为统计的 MHW 爆发频次。

Figure 6. The spatial distribution of the frequency of MHW during 2020-2022 (a) and the seasonal variations of the area mean MHW frequency in the WPWP (b). The black frame in the (a) is the WPWP region (5°S-15°N, 120°E-160°E), (b) the black line represents the SST, the green line represents the 90% threshold of SST, the blue line represents the climatic state of SST, and the shade orange represents the statistical MHW frequency.

### 4 2020-2022 年西太平洋暖池 MHW 的驱动机制分析

上文分析表明, 2020-2022 年在连续三年 La Niña 事件背景下, WPWP 区域

MHW 事件的部分属性都达到了历史极值,且爆发频次为全球最显著。前人研究 表明全球变暖是西太暖池区 MHW 频发和变强的重要原因(Sen et al., 2020; 张小 娟等, 2022)。三年 La Niña 是一个年际气候现象,前人研究也强调了其对暖池 MHW 的调制作用(Huang et al., 2021; Lee et al., 2022),因此本文主要关注了这 次超长 La Niña 事件对暖池 MHW 的影响。为了探讨近三年 WPWP 区域 MHW 事件爆发的驱动机制,本小节接下来分析了 WPWP 区域线性化的混合层热收支 方程(式 5.4),用于研究动力过程和热力学过程对 MHW 爆发的贡献。由图 7i 可 看出, 2020-2022 年 MHW 累积强度峰值出现在 2020 年夏季 (7 月-9 月), 因此 本文重点分析 2020 年 7 月-9 月期间上层海洋的温度收支过程。在最强 MHW 事 件发生前期(2020年2月-6月),暖海温异常开始逐步发展以储存热量,其主要 由平均环流项异常、非线性动力加热项异常主导(图 7a,图 7e)。当 MHW 累积 强度达到最强时(2020年7月之后),净海表热通量项异常、纬向平流异常和残 余项异常的贡献变得更突出(图 7b,图 7f,图 7g)。此时海气净热通量异常和纬 向平流异常两个过程共同推动了暖温度异常的变化,而其它海洋动力项对 WPWP 区域的海温正异常贡献不显著。纬向平流项的正异常是与连续三年 La Niña 事件背景下, 东风持续的正异常带来的西太平洋暖池暖水堆积有关。对于 Ekman 抽吸反馈、温跃层反馈,其对 WPWP 区域海温正异常贡献不显著(图7c-e)。 此外,值得注意的是,2020-2022年净海表热通量项的时间序列波动与海温倾向 的序列波动基本一致,纬向平流在 2020 年 6 月之后也一直处于正异常状态(图 7b,图 7f),表明整个时期 WPWP 区域的 MHW 事件的形成主要是由海气净热 通量和纬向平流异常过程所引起的。



**图 7:** 2020-2022 年西太平洋暖池区域(WPWP) 混合层热收支和月 MHW 累积强度。(a)-(g) 分别为平均环流影响(MC)、纬向平流反馈(ZA)、Ekman 抽吸反馈(EK)、温跃层 反馈(TH)、非线性动力加热项(NDH)、净热通量项(Qnet)、和残余项(Res),黑线为混 合层温度异常收支。(h) 各项反馈的占比,(i) WPWP 区月 MHW 累积强度。 **Figure 7.** The mixed layer heat budget and monthly MHW cumulative intensity in the WPWP from 2020 to 2022. (a) - (g) are the effect of mean circulation (MC), zonal advection feedback (ZA), Ekman pumping feedback (EK), thermocline feedback (TH), nonlinear dynamical heating (NDH), net heat flux (Qnet), and residual term (Res), respectively. The black line is mixed-layer temperature anomaly budget. (h) The proportion of seven feedbacks, (i) The cumulative intensity of monthly MHW in the WPWP region.

基于以上的分析可知,净海表热通量在 2020-2022 年 WPWP 区域 MHW 事件的形成和维持中起到了关键作用,因此本文进一步分析了净海表热通量的各项 异常的贡献(式 5.2)。在净海表热通量各项异常中,向下短波辐射和净潜热通量 的异常值波动较大,而向下长波辐射、向上长波辐射、感热通量和向上短波辐射 异常值较小(图 8)。其中,向下短波辐射正异常对上层海洋变暖起主导作用, 其序列波动与海温倾向波动较一致(图 8d)。这可能是由于大气内部变率导致降 水减少,造成云量减少,使得更多的短波辐射加热海洋(Wu et al., 2006; He et al., 2018)。2020-2022 年净向下短波辐射正异常是净海表热通量中使得 MHW 频繁 发生的主要驱动因素。



**图 8:** 2020-2022 年西太平洋暖池区(WPWP)净表层热通量各项异常。(a)-(f)分别为向 下长波辐射、向上长波辐射、净感热通量、向下短波辐射、向上短波辐射和净潜热通量,黑 线为混合层温度异常收支。异常是相对于 1983-2012 年的气候态。

Figure 8. The net surface heat flux anomalies in the WPWP from 2020 to 2022. (a)-(f) are downward long-wave radiation, downward short-wave radiation, upward long-wave radiation, upward short-wave radiation, net sensible heat flux and net latent heat flux, respectively. The

black line is mixed-layer temperature anomaly budget. The anomaly is relative to 1983-2012.

### 5 2020-2022 年西太平洋暖池 MHW 对海洋生态的影响

基于前面的研究分析,可明确在连续 La Niña 事件背景下,2020-2022 年 WPWP 区域 MHW 事件为 1982 年以来最显著,这期间最强 MHW 的发生《2020 年 7 月-9 月)主要由净海表热通量和海洋动力过程共同主导。前人研究表明, MHW 的发生通常会降低浮游植物生物量(Noh et al.,2022; Hamdeno et al., 2022),因此本文同时利用 SVD 方法探讨了 WPWP 区域频繁发生的 MHW 对浮 游生物量的影响。如图 10 所示,2020-2022 年 MHW 累积强度与海洋生态指标 海表面叶绿素-a浓度两者 SVD 分解的第一对模态的空间分布和时间序列。可以 看到,第一对 SVD 模态的方差贡献率为 50%,且对应时间序列的相关系数较高 (0.84)(图 10c)。由图 10 可知,在拉尼娜事件的盛期,WPWP 区域 MHW 事 件累积强度呈现正异常分布,海表面叶绿素-a浓度场主要呈现出负异常分布,二 者为负相关协同变化。例如在 2020 年 5 月-11 月期间,MHW 累积强度增加(如), 而海表面叶绿素-a浓度主要呈现降低趋势(图 10c)。





图 9:2020-2022 年月海洋热浪(MHW)累积强度(a) 左场与叶绿素-a 浓度场(Chl.a)(b) 右场 SVD 分解第一对模态的异性相关系数空间分布和对应时间序列(c),(c) 中黑线为 SVD 分解 第一对模态的 MHW 时间序列,红线为 Chl.a 时间序列,r为两个序列的相关系数,pva为0代表 通过显著性检验。(a) 中的紫色方框为西太平洋暖池区(WPWP)。

Figure 9. The spatial distribution of heterosexual correlation coefficient and corresponding time series of the first SVD modes of MHW (a) left field and Chl.a (b) right field, the black line in (c) is the MHW time series of the first pair of modes decomposed by SVD, the red line is the Chl.a time series, r is the correlation coefficient of the two series, and the pva (pva =0.0) value represents the significance test is passed. The purple box in (a) is the WPWP.

为了进一步探讨 2020-2022 年 WPWP 区域浮游生物量在次表层以及温跃层 的变化,本文选取了包含 2020-2022 年 WPWP 区域叶绿素-a 浓度数据的三个 Argo 浮标,这三个浮标的活动范围为 11°N -14°N, 125°E-158°E,时间范围是 2020 年 8 月到 2022 年 12 月。本文根据这 3 个浮标观测的温跃层叶绿素-a 浓度探讨了 WPWP 区域 MHW 事件对海表层以下浮游生物量的影响。图 11 呈现了研究区表 层至 220 m 温跃层深度浮游生物的三维结构(卫星数据的海表面分布和 3 个浮标 叶绿素-a 浓度剖面的垂直分布)及其在不同深度层的季节变化。由图 11 可以看 出,近表层和混合层的浮游植物生物量较低,其叶绿素-a 浓度基本都小于 0.1mg·m<sup>-3</sup>,尤其是在混合层最浅的时候。浮游生物量主要聚集在混合层下方到 200m 左右的温跃层(0.25mg·m<sup>-3</sup>左右),且具有季节变化,其在每年的 11 月左 右有极值。此外,在频繁的 MHW 事件爆发背景下,近三年研究区域的浮游生物 量在近表层、混合层、混合层以下以及最多层都有显著的减少(图 11d)。2020-2022 年 WPWP 区域浮游生物量整体都呈下降趋势,表明频繁发生的 MHW 事件不利 于暖池区域海洋上层浮游生物的生存和生长。



**图 10:** 研究区域浮游植物的三维结构。(a)研究区域表层叶绿素浓度-a (Chl.a)的时间-纬 度图和浮标 1 Chl a 的时间-深度图,红线代表混合层深度;(b)和(c)同(a)相同,但是 是对于浮标 2 和 3 的 Chl.a 的时间-深度图。(d)研究区域不同层 Chl.a 的垂直平均。本文 浮游植物最多层为 120m-180m 的深度范围,混合层下方为混合层底部至 220 m 的深度范围。 **Figure 11.** The three-dimensional structure of phytoplankton in the study region. (a) Time-latitude plot of surface Chl.a and time-depth plot of Chl.a from float 1 in the study area during 2020–2022. The red line represents the depth of the mixed layer depth. (b) and (c) same as (a) but for time-depth plot of float 2 and 3. (d) Vertical averaged Chl.a at different layers in the study area. Max layer used in this study indicates the depth range from the 120m to 180 m, and below the mixed layer is the depth range from the bottom of mixed layer to 220 m.

6 结论与讨论

本文分析了 1982-2022 年 WPWP 区域 MHW 事件的空间分布特征和季节-年际变化,并重点探讨了 MHW 在 2020-2022 年连续三年 La Niña 事件背景下频 繁爆发的驱动机制与生态影响,得到以下几点结论:

(1) 近几十年来,尤其是在 2000 年之后,WPWP 区域 MHW 事件的覆盖面积、爆发频次、总天数、累积强度等属性均呈现显著增加的趋势。与此同时,在季节-年际尺度上,WPWP 区域 MHW 事件与连续 La Niña 事件的爆发相关,其在 2020-2022 年连续 La Niña 事件背景下 MHW 爆发频次达到全球最高,且 MHW 的覆盖面积、爆发频次、总天数、累积强度达到 41 年来最高。

(2)利用混合层热收支方程探讨了 2020-2022 年 WPWP 区域 MHW 事件的 驱动机制。最强 MHW 事件的发生(2020 年夏)主要是由净海表热通量中向下 短波辐射和海洋动力过程中的纬向平流导致。

(3)揭示 MHW 事件与海洋生态指标叶绿素-a浓度在时空尺度上呈现负相关的协同变化关系,当 MHW 为正异常分布时,海表面叶绿素-a浓度呈现降低趋势,其在 2020年 7-9 月最为典型。进一步利用浮标表层至温跃层叶绿素-a浓度数据分析表明,近表层和混合层的浮游生物量较低,浮游植物生物量主要聚集在海洋混合层下方到 200m 左右的温跃层,且具有季节变化。同时,在本文研究区域,近三年浮游生物量在近表层、混合层、混合层以下都有显著的减少,与频繁发生的 MHW 事件导致暖池区域海洋上层生物量整体呈下降趋势有关。

此外,本文初步利用混合层热收支方程分析了 MHW 期间海温的变化,对于 MHW 事件的天气尺度成因分析需要进一步细化。由于本文所用的海洋温度和洋 流数据是 GODAS 提供的,而 GODAS 的海洋再分析数据是由 NCEP2 提供的动 量通量、热通量等驱动出来的,其与 NCEP2 相匹配,故本文对西太暖池 MHW 的驱动机制分析采用的是分辨率较低的海面通量数据 NCEP2,本研究计划下一 步研究利用其它较高分辨率的海面通量数据(比如 ERA5 等)进一步对比验证 MHW 期间海温的变化。对于遥相关过程,例如 PDO 对 WPWP 区域 MHW 事件 的影响也需要后续深入研究。与此同时,WPWP 区域 MHW 事件跟 ENSO 本身 关系密切,我们是否可以根据 ENSO 预报系统开展暖池区域 MHW 的预测研究 可做进一步尝试。

- An S I, Jin F F, Kang I S. "The Role of zonal advection feedback in phase transition and growth of ENSO in the Cane-Zebiak model."[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1999, 77(6): 1151-1160. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.77.6\_1151.
- Behrenfeld M J, Boss E S, Siegel D A, et al. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space Glob[J]. Biogeochem. Cycles, 2005, 19: 57–14.
- Blondeau-Patissier D, Gower J F R, Dekker A G, et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans Prog[J]. Oceanogr, 2014, 123: 123–44.
- 柏颖. 2016. 西太平洋暖池海温准半年振荡的年际变化及其可能机制研究[D]. 南京信息工程 大学. Bai Ying. 2016. Interannual variation of quasi-semi-annual oscillation of sea surface temperature (SST) in the western Pacific warm pool and its possible mechanism[D]. Nanjing University of Information Science and Technology.
- Cheng L, Abraham J, Hausfather Z, et al. How fast are the oceans warming? [J]. Science, 2019, 363(6423): 128–129. https://doi.org/10.1126/science.aav7619
- Cheung W W L, Frölicher T L. Marine heatwaves exacerbate climate change impacts for fisheries in the northeast Pacific[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 373-30.
- Dalton S J, Carroll A G, Sampayo E, et al. Successive marine heatwaves cause disproportionate coral bleaching during a fast phase transition from El Niño to La Niña[J]. Sci Total Environ, 2020, 715: 136951. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136951. Epub 2020 Jan 28. PMID: 32014776.
- Darmaraki S, Somot S, Sevault F, et al. Future evolution of marine heatwaves in the Mediterranean Sea[J]. Climate Dynamics, 2019, 53: 1371–1392. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z.
- Frölicher T L, Fischer E M, Gruber N. Marine heatwaves under global warming[J]. Nature, 2018, 560(7718): 360-364. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9
- Frölicher T L, Laufkötter C. Emerging risks from marine heat waves[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 650. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03163-6.
- Garrabou J, Coma R, Bensoussan N, et al. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave[J]. Global Change Biology, 2009, 15(5):1090-1103.
- Hamdeno M, Nagy H, Ibrahim O. Mohamed, B. Responses of Satellite Chlorophyll-a to the Extreme Sea Surface Temperatures over the Arabian and Omani Gulf[J]. Remote Sens, 2022, 14: 4653. https://doi.org/10.3390/rs14184653
- He J, Johnson N C, Vecchi G A, et al. Precipitation Sensitivity to Local Variations in Tropical Sea Surface Temperature[J]. J. Climate, 2018, 31: 9225-9238. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0262.1.
- Hobday A J, Alexander L V, Perkins S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. Progress in Oceanography, 2016, 141: 227-238.
- Holbrook N J, Scannell H A, Gupta A S, et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers[J]. Nature Communications, 2019, 10(4618): 1090-1103.
- Holbrook N J, Hernaman V, Koshiba S, et al. Impacts of marine heatwaves on tropical western and central Pacific Island nations and their communities[J]. Global and Planetary Change, 2022, 208: 103680.

- Hu Q, Chen X, He X, et al. Seasonal variability of phytoplankton biomass revealed by satellite and BGC-Argo data in the central tropical Indian Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2022, 127: e2021JC018227. https://doi.org/10.1029/2021JC018227
- Hu S J, Li S H, Zhang Y, et al. Observed strong subsurface marine heatwaves in the tropical western Pacific Ocean [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(10).
- Huang Z, Feng M, Beggs H, et al. High-resolution marine heatwave mapping in Australasian waters using Himawari-8 SST and SSTAARS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 267(6): 112742. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112742.
- 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 第二版. 北京:气象出版社, 2000, 236-262.
- Jin F F, Kim S T, Bejarano L. "A coupled-stability index for ENSO." [J]. Geophysical Research Letters ,2006, 33(23): n. pag.
- Kim J, Na H, Park Y G, et al. Potential predictability of skipjack tuna (Katsuwonus pelamis) catches in the Western Central Pacific[J]. Sci Rep, 2020, 21, 10(1): 3193. doi: 10.1038/s41598-020-59947-8. PMID: 32081958; PMCID: PMC7035267.
- Laufkötter C, Zscheischler J, Frölicher T L. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming[J]. Science, 2020, 369(6511): 1621-1625. https://doi.org/10.1126/science.aba0690.
- Lee S B, Yeh S W, Lee J S, et al. Roles of Atmosphere Thermodynamic and Ocean Dynamic Processes on the Upward Trend of Summer Marine Heatwaves Occurrence in East Asian Marginal Seas[J]. Front. Mar. Sci., 2022, 9: 889500.doi: 10.3389/fmars.2022.889500.
- Noh K M, Lim H G, Kug J S. Global chlorophyll responses to marine heatwaves in satellite ocean color[J]. Environmental Research Letters, 2022, 17: 064034.
- Oliver E C J, Benthuysen J A, Bindoff N L, et al. The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave[J]. Nature communications, 2017, 8: 16101.
- Oliver E C J, Donat M G, Burrows M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1324.
- Pearce A F, Feng M. The rise and fall of the "marine heat wave" off Western Australia during the summer of 2010/2011[J]. Journal of Marine Systems, 2013, 111-112: 139-156.
- Qiu Z, Qiao F, Chan J J, et al. Evaluation and projection of global marine heatwaves based on CMIP6 models[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2021, 194:104998-.
- Ren H L, Wang R. "Distinct Growth Rates of the Two ENSO Types." [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(16): e2020GL088179.
- Ren H, and Jin F. Recharge Oscillator Mechanisms in Two Types of ENSO[J]. J. Climate, 2013, 26: 6506–6523. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00601.1.
- Sen Gupta, A., Thomsen, M., Benthuysen, J.A. et al. Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events[J]. Sci Rep 10, 19359 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-75445-3
- Shi J, Tang C, Liu Q, et al. Role of mixed layer depth in the location and development of the Northeast Pacific warm blobs[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49: e2022GL098849. https://doi.org/10.1029/2022GL098849
- Skinner M P, Brewer T D, Johnstone R, et al. Ciguatera fish poisoning in the Pacific Islands (1998 to 2008)[J]. PLoS Negl Trop Dis, 2011, 5(12): e1416. doi: 10.1371/journal.pntd.0001416. Epub 2011 Dec 13. PMID: 22180797; PMCID: PMC3236724.

Spillman C M, Smith G A, Hobday A J, et al. Onset and Decline Rates of Marine Heatwaves:Global Trends, Seasonal Forecasts and Marine Management[J]. Front. Clim, 2021, 3: 801217. doi: 10.3389/fclim.2021.801217.

魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 269.

- Wu R, Kirtman B P, and Pegion K. Local Air–Sea Relationship in Observations and Model Simulations[J]. J. Climate, 2006, 19: 4914–4932. https://doi.org/10.1175/JCLI3904.1.
- Yan X H, Ho C R, Zheng Q, et al. Temperature and size variabilities of the Western Pacific Warm Pool[J]. Science, 1994, 258:1 643-1645.
- Zhang, X. J., Zheng F, Zhu J, et al. Observed frequent occurrences of marine heatwaves in most ocean regions during the last two decades. Adv. Atmos. Sci., 2022, 39, 1579–1587, http://dx.doi.org/10.1007/s00376-022-1291-3.
- 张小娟,郑飞. 全球海洋热浪的多时间尺度变化特征及气候调控因子分析[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 170-182. ZHANG Xiaojuan, ZHENG Fei. 2022. Analysis of Multi-time Scale Variation Characteristics and Climate Regulation Factors on Global Marine Heatwaves [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 27 (1): 170-182 doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21061

