

近40年全球海洋热浪的时空特征和机制

许强^{1,2}, 陈幸荣^{2,3}, 王海燕^{2*}, 刘珊², 何越²

(1. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 基于1982—2021年美国国家海洋和大气管理局日最优插值海表温度资料, 采用最小二乘回归、经验正交函数和相关分析等统计方法, 分析了全球海洋热浪的时空特征和机制。结果表明: 在过去的40年里, 伴随平均海表温度的逐年上升, 海洋热浪的发生频率、平均强度、最大强度、累积强度、持续时间和总天数都呈现上升趋势。基于对海洋热浪强度分类的分析进一步发现, 不同强度类别的年平均海洋热浪日呈非均匀区域性分布特征, 且中等强度的海洋热浪天数最多。历史基准期的选择会影响海洋热浪的气候态和阈值, 是海洋热浪检测的一个重要问题。我们对去倾(全球变暖趋势)后的海洋热浪总天数进行经验正交函数分析发现, 除全球变暖外, 太平洋年代际振荡和厄尔尼诺-南方涛动对海洋热浪的年际特征起着主导作用。

关键词: 海表温度; 海洋热浪; 太平洋年代际振荡; 厄尔尼诺-南方涛动

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0090-12

0 引言

自1970年以来, 全球海洋持续增暖并已吸收气候系统90%以上的过剩热量, 相较1969—1993年, 1993—2017年海洋升温的速度增加了一倍多^[1]。在全球变暖的背景下, 极端天气气候事件频发, 海洋热浪(Marine Heatwaves, MHWs)逐渐受到学术界的广泛关注。MHWs可导致珊瑚白化、海草消亡、物种迁徙、藻华爆发、底栖生物大量死亡、渔场关闭甚至引发经济危机^[2-7]。鉴于MHWs对海洋生态系统、渔业生产、气候变化和社会经济有重要影响^[8], 迫切需要加深对这种现象的认识。

全球海洋中的MHWs强度、发生频率和持续时间呈非均匀分布^[9]。全球MHWs年平均频次为1~3次, 高强度的MHWs主要出现在海表温度(Sea Surface Temperature, SST)变化较大的区域^[10]。全球范围内MHWs的持续时间差异很大, 热带东部太

洋的平均持续时间长达60 d, 热带其他地区多为5~10 d, 东北太平洋和东南太平洋约为30 d, 其余海域为10~15 d^[10]。20世纪MHWs的持续时间更长, 发生频率更高, 且在全球变暖不断加剧的情况下, 这一趋势将加速上升^[10-11]。MHWs指标的线性趋势在不同海域也存在差异, 年频次增加最突出的区域是赤道西太平洋暖池区、西北大西洋和北冰洋东部, 平均每年增加0.3次^[12]。

MHWs的形成机制十分复杂, 在不同海域、不同时间尺度上其主导机制不同, 且具有多尺度相互作用的特点^[13]。前人的研究表明全球平均海温上升主导了MHWs的长期变化趋势^[10], 而全球MHWs的年际变化则受大尺度气候模态的调控^[9]。厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)是全球年际变化的主要模态^[14], 也是太平洋和印度洋热带地区MHWs发生频率的核心因素, 在热带太平洋, 有记录的MHWs中有三分之二与厄尔尼诺事

收稿日期: 2022-10-17。

基金项目: 国家自然科学基金(42192561)。

作者简介: 许强(1998-), 男, 硕士在读, 主要从事海洋热浪研究。E-mail: 22320211151298@stu.xmu.edu.cn

*通信作者: 王海燕(1986-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事中国近海海温模拟预报、海洋热浪特征及机制研究。E-mail: wanghy314@163.com

件有关^[9]。ENSO也可通过大气和海洋遥相关作用,引发东北太平洋、南太平洋中部和东印度洋等地的MHWs^[15-17]。太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)主导了北太平洋SST异常的大小,其海温模态中的东西偶极子结构在正位相和负位相时分别增加了北太平洋东部和西部发生MHWs事件的可能性^[18]。PDO在年代际时间尺度上调节厄尔尼诺事件的频率和强度^[19],从而间接影响MHWs事件的生成与发展。但是,全球MHWs年际变化的主导因子有哪些,其影响范围和影响程度又是怎样的,这些问题仍需要进一步研究和厘清。

本文以MHWs年际变化为研究核心,分析了1982—2021年全球MHWs最新的时空特征和变化趋势,比较了不同气候基准期的影响,并进一步分析了MHWs特征与PDO和ENSO的可能联系。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文使用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)逐日最优插值海表温度(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature V2, OISST V2)高分辨率数据集^[20]检测MHWs事件。该数据集的时间分辨率为1 d,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,研究选用时段为1982年1月1日—2021年12月31日,选用区域为 $65^{\circ}\text{S} \sim 65^{\circ}\text{N}$ 。此外,本文还采用美国NOAA物理科学实验室(Physical Sciences Laboratory, PSL)提供的PDO和Niño 3.4气候指数进行机制分析。

1.2 MHWs的定义与分类

定性来看,MHWs是发生在特定海域内离散、持久、异常增暖的事件;定量来看,MHWs是指海温至少连续5 d超过当地阈值的事件^[21]。具体计算方法是:在30 a的历史气候基准期内,以当天为中心,11 d为窗口选取所有年份的每日温度值,其均值即为气候态,其90%分位数即为当日的阈值,将得到的阈值再进行31 d平滑,由此,可以确定每一次MHWs事件开始和结束的日期,如果中间出现连续小于或等于2 d低于阈值的情况,将被视为一次MHWs事件。

从MHWs的定义可知,历史气候基准期的选择尤其关键,不同的选择可能导致截然不同的结果,目前1983—2012年的气候基准期已在MHWs研究领域被广泛采用^[10, 22-24]。MHWs的本质是海温异常,而“异常”海温是相对“正常”海温来确定的,但是由于全球增暖,“正常”海温也在不断变化,此刻的“异常”海温在未来可能是一个常态。因此,本文还将采用最新的气候基准期(1991—2020年)得到近30年全球MHWs的时空特征和趋势,并与1983—2012年气候基准期结果进行比较。

为衡量MHWs的严重程度,HOBDAY等^[22]提出一种基于强度的MHWs分类方案。该方案根据海温超过当地气候态的程度将MHWs分为4类,定义为:

$$S(t) = \frac{I(t)}{T_{90}(j) - T_m(j)}$$

式中: $I(t)$ 为MHWs强度; $T_{90}(j)$ 为90%分位数阈值; $T_m(j)$ 为气候态。当 $1 < S \leq 2$ 时,归为中等(I类);当 $2 < S \leq 3$ 时,归为强烈(II类);当 $3 < S \leq 4$ 时,归为严重(III类);当 $S > 4$ 时,归为极端(IV类)。

1.3 MHWs的度量指标

基于HOBDAY等^[21]的定义,本文主要考虑以下6个度量MHWs的指标,即平均强度、最大强度、累积强度、持续时间、频次和总天数(见表1)。

表1 海洋热浪指标定义

Tab.1 Definition of marine heatwave metrics

指标	定义	单位
平均强度	某次热浪事件的平均海温异常值	$^{\circ}\text{C}$
最大强度	某次热浪事件的最大海温异常值	$^{\circ}\text{C}$
累积强度	某次热浪事件中日均海温异常总和	$^{\circ}\text{C d}$
持续时间	某次热浪事件开始到结束的天数	d
频次	某段时期内发生热浪事件的次数	次
总天数	某段时期内发生热浪的天数	d

利用OISST V2全球网格化数据,本文计算了研究区域发生的每次MHWs事件的平均强度、最大强度、累积强度和持续时间,并计算相关的年度统计指标,包括频次、年平均强度、年平均最大强度、年平均累积强度、年平均持续时间和总天数。

1.4 分析方法

在线性趋势分析中采用了常规的最小二乘法回归(Ordinary Least Square, OLS)和 t 检验。为提取MHWs的时空变化主要特征,对1982—2021年每一年的热浪总天数移除线性趋势后进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析。在研究MHWs与气候模态之间的关系时使用了相关分析。

2 时空特征分析

2.1 全球MHWs的年平均特征

MHWs在时间上可持续数天或数月,面积可达几平方公里甚至数千平方公里。本文首先选取1983—2012年作为30 a的历史气候基准期,计算了1982—2021年全球表层MHWs的6项年平均指标,结果见图1。

从图1a可以看到,全球平均每年发生1~4次MHWs事件,低值区主要位于赤道中东太平洋,为1~2次,高值区主要位于北大西洋湾流一带,超过3次,北太平洋、西太平洋、西南太平洋、西南大西洋和南印度洋也是MHWs频发区。MHWs的平均强度为0.5~3.5℃(见图1b),低值区主要位于南半球高纬海域,高值区主要分布于赤道中东太平洋、黑潮续流、墨西哥湾流、马尔维纳斯海流和厄加勒斯回流一带。HAYASHIDA等^[25]利用模型和观测数据也发现1982—2018年MHWs平均强度的空间格局特征是在西边界流中更强,除赤道太平洋外,热带和亚热带环流区的MHWs强度较低。MHWs最大强度的空间分布和平均强度类似(见图1c),不同的是数值比平均强度更大,表现的是每次MHWs事件达到峰值时的统计结果,反映了MHWs的危害程度。MHWs累积强度的地区差异较大(见图1d),为0~100℃d,低值区主要位于南半球高纬海域和除中东太平洋以外的热带海域,高值区主要位于赤道

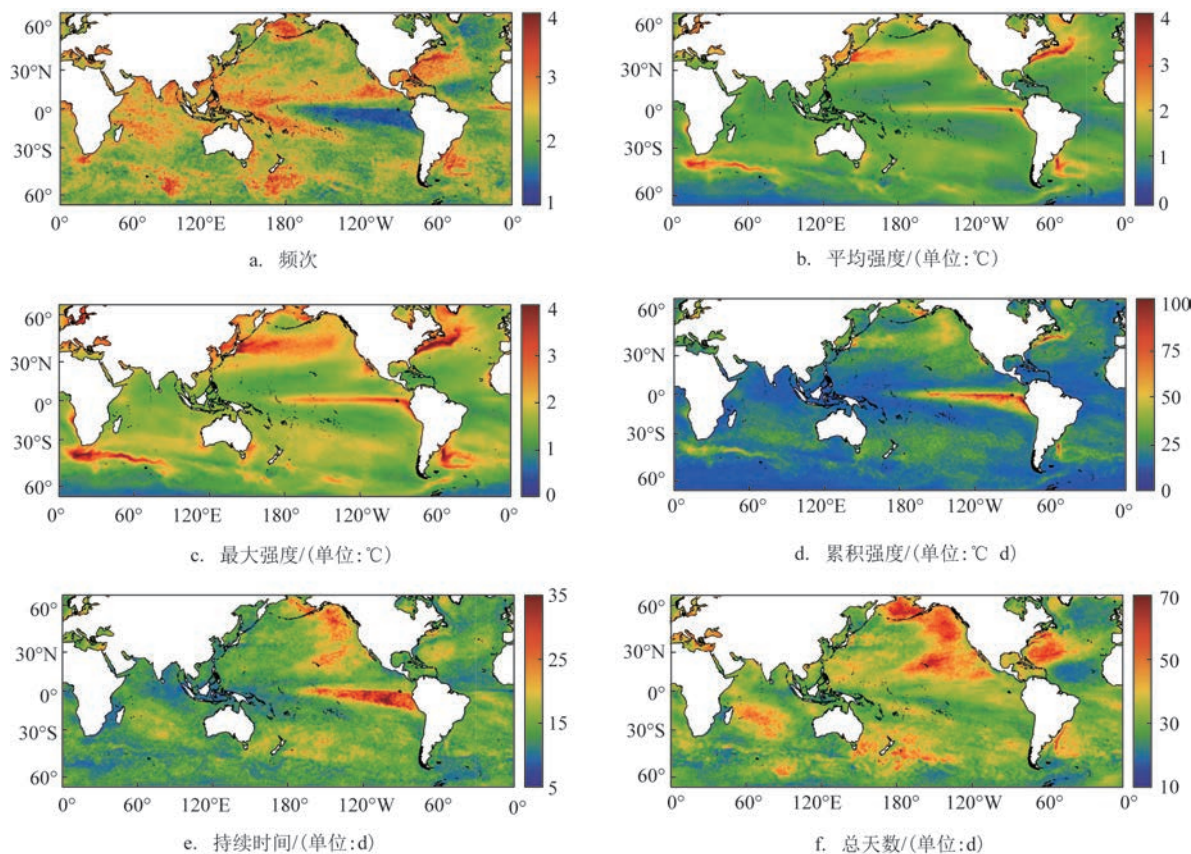


图1 1982—2021年全球年平均海洋热浪指标

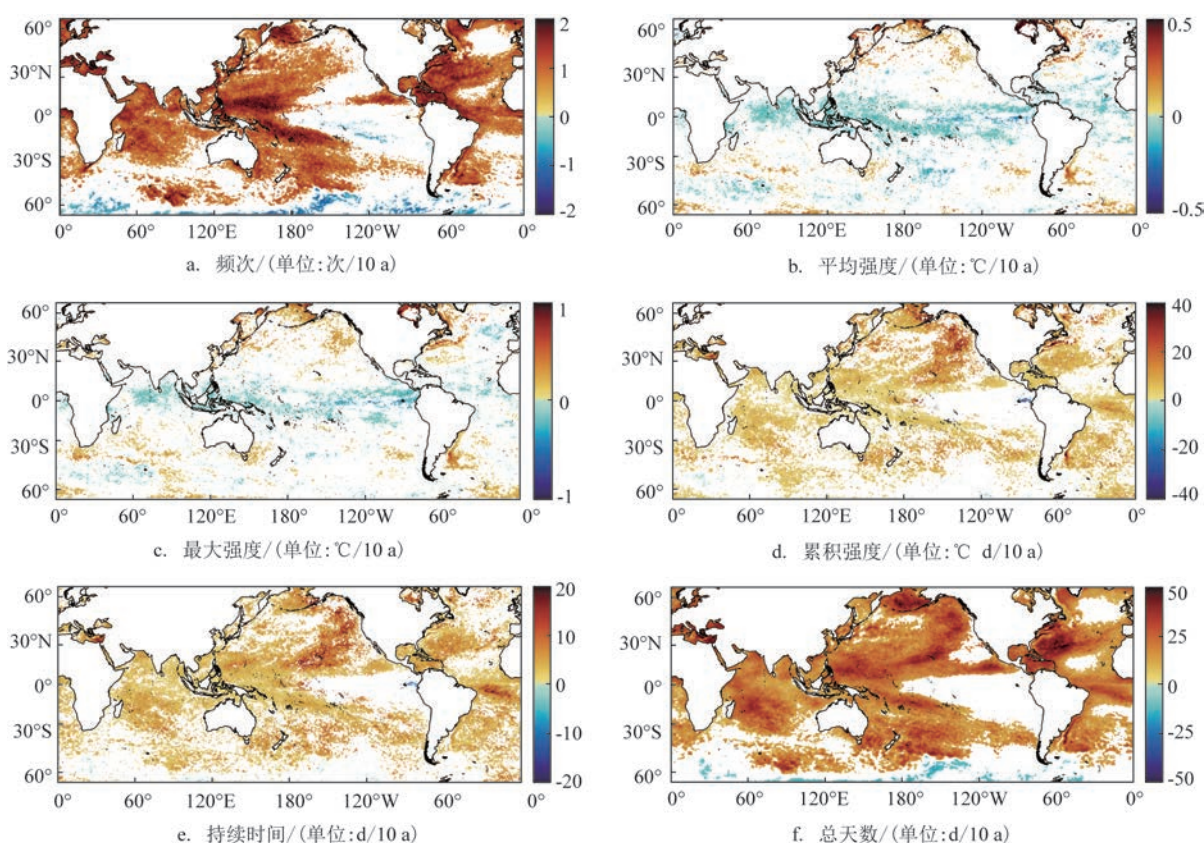
Fig.1 Global annual mean marine heatwave metrics during 1982—2021

中东太平洋海域。MHWs的持续时间为5~35 d(见图1e),高值区主要位于东北太平洋和赤道中东太平洋海域。PLECHA等^[26]计算了1982—2014年MHWs全球年平均统计指标,发现持续时间较长的MHWs事件位于热带太平洋东部,这也是MHWs发生频率较低的区域。MHWs总天数为10~70 d(见图1f),高值区主要分布于东北太平洋和西北大西洋海域。MHWs总天数由持续时间和发生频次的乘积决定,因此总天数越高,代表MHWs事件越持久或越频发。东北太平洋和西北大西洋的MHWs总天数都较高,前者是由持续时间长和发生频次高共同导致,后者则主要由发生频次高所导致。

2.2 MHWs的年际变化趋势

人类活动对海洋的影响不断增加,同时海洋自身的内部变率与外强迫彼此叠加,共同造成了全球MHWs的变化。图2展示的是1982—2021年全球表层MHWs各项年度指标的线性趋势。在过去的

40年里,MHWs发生频次的线性增长趋势为 $-1\sim 2$ 次/10 a($p<0.05$;见图2a),在西太暖池和墨西哥湾流一带增幅最大,而在南半球高纬地区出现下降趋势。SPILLMAN等^[27]发现在1982—2018年间,热带和温带海域大部分地区每年发生的MHWs事件数量的变化率为正(占海洋网格单元的82%),其中西北大西洋、西印度洋、西南大西洋、西热带太平洋和澳大利亚东南海岸外的变化率最大(趋势至少为0.12次/a)。MHWs平均强度的线性趋势为 $-0.5\sim 0.5$ °C/10 a($p<0.05$;见图2b),正增长主要出现在高纬海域,低纬海域主要呈现负增长趋势。MHWs最大强度的线性趋势为 $-1\sim 1$ °C/10 a($p<0.05$;见图2c),其空间分布与平均强度的线性趋势高度相似。MHWs累积强度线性趋势在全球大部分海域都呈现正增长趋势,为 $0\sim 40$ °C d/10 a($p<0.05$;见图2d),东北太平洋海域的增幅最大。MHWs持续时间的线性趋势为 $0\sim 20$ d/10 a($p<0.05$;见图2e),其空间分布与累积强度线性趋势类似。MHWs总天数线性趋



注:空白区域表示未通过95%置信度检验

图2 1982—2021年海洋热浪指标的线性趋势

Fig.2 The linear trend of the marine heatwave metrics during 1982—2021

势的空间差异大,为 $-20\sim 50\text{ d}/10\text{ a}$ ($p<0.05$;见图2f),东北太平洋和墨西哥湾流一带增幅最大,而南半球高纬地区出现下降趋势,其空间分布与频次线性趋势略相似。MHWs事件的频次、累积强度、持续时间和总天数在赤道中东太平洋海域的变化趋势不明显,均未通过95%的显著性检验。总体来看,各项指标在全球大部分海域都呈现正增长趋势。

加权每个网格单元的面积,获得全球平均SST、MHWs的频次、平均强度、最大强度、累积强度、持续时间和总天数的时间序列,再利用最小二乘法进行线性拟合,得到1982—2021年的线性趋势(见图3)。在过去的40年中,全球SST平均每10 a年增加 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$,MHWs的年频次、平均强度、最大强度、累积强度、持续时间、总天数平均每10 a分别增加0.62次、 $0.0044\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.019\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.92\text{ }^{\circ}\text{C d}$ 、 2.71 d 和 15.08 d ,其中线性趋势最大的是总天数,最小的是平均强度。OLIVER等^[10]也计算了1982—2016年全球平均SST、MHWs的频次、平均强度和持续时间的线性趋势,分别为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.45\text{ 次}/10\text{ a}$ 、 $0.085\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $1.3\text{ d}/10\text{ a}$ 。这些结果与本文的计算结果略有不同,主要是因为计算的时间范围不同。

平均SST的改变是全球大约三分之二海域中MHWs总天数增加的主要驱动因素,也是大约三分之一海域MHWs强度变化的主要驱动因素^[28]。从图3可以看出,MHWs的频次、持续时间和总天数的线性趋势大于海表变暖的速度,这表明在过去的40年里,随着全球不断变暖,MHWs事件变得更加频繁、持久,与OLIVER等^[10]的结果一致。但有趣的是,MHWs的平均强度却没有显著变化,其趋势远小于海表变暖的速度。总体来看,MHWs的频次、总天数和SST的变化起伏基本一致,平均强度和最大强度基本一致,累积强度和持续时间基本一致。各项指标都在1982—1983年、1997—1998年和2015—2016年存在一个峰值,正好对应了3次超强El Niño事件^[29]。

2.3 不同强度类别MHWs的时空分布

鉴于不同强度类别的MHWs事件对海洋生态系统的影响不同^[30],本文对4类不同的MHWs进行分析。图4给出了不同类别的MHWs年平均天数的时空分布。1982—2021年,全球I类MHWs年平均天数最多,为 $10\sim 60\text{ d}$ (见图4a);II类MHWs次之,

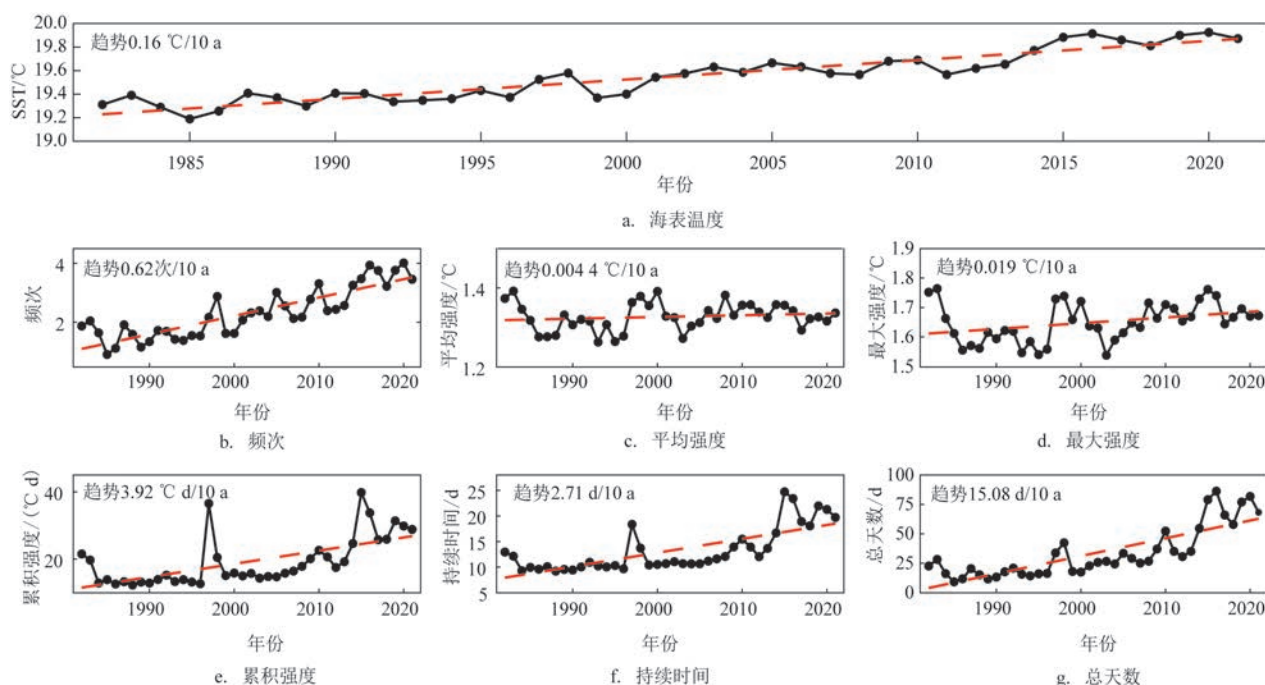


图3 全球平均海表温度和海洋热浪指标的时间序列(黑色实线)和线性趋势(红色虚线)

Fig.3 The time series (black line) and linear trend (red dashed line) of global mean sea surface temperature and marine heatwave metrics

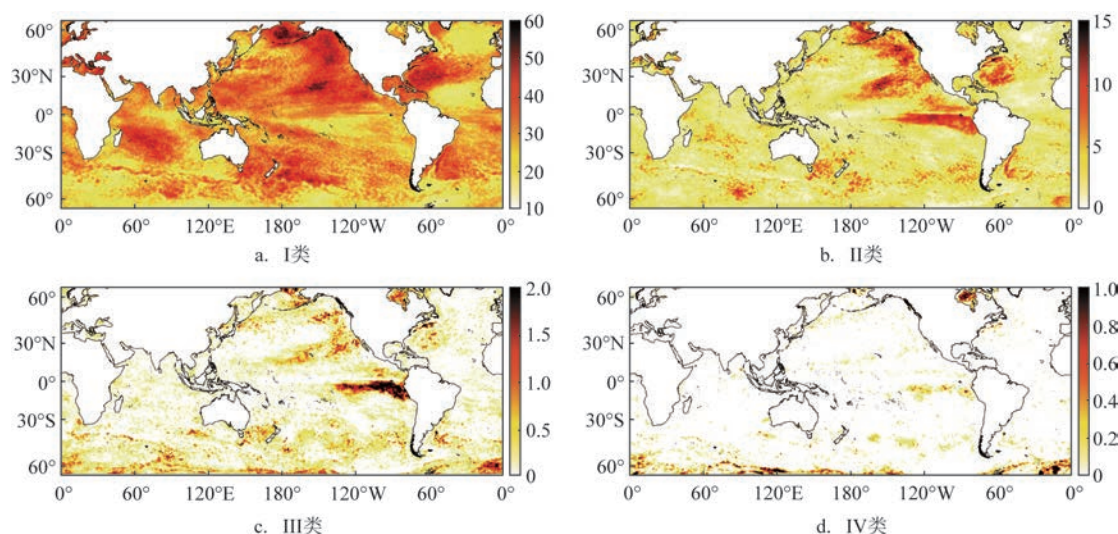


图4 1982—2021年全球4类MHWs年平均天数分布(单位:d)

Fig.4 Spatial distribution of global annual mean total days of four types of marine heatwaves during 1982—2021

为0~15 d(见图4b);Ⅲ类MHWs较少,为0~2 d(见图4c);Ⅳ类MHWs最少,几乎可以忽略不计,为0~1 d(见图4d)。除Ⅳ类MHWs以外,其他3类MHWs年平均天数均存在明显的空间差异。Ⅰ类MHWs在全球海域均有发生,高值区主要集中在东北太平洋和西北大西洋海域;Ⅱ类MHWs在东北太平洋、赤道中东太平洋和西北大西洋海域最多,超过10 d;Ⅲ类MHWs主要集中在赤道中东太平洋海域。

2.4 不同历史气候基准期下的比较

本节选取1991—2020年作为新的30 a历史气候基准期,计算了1982—2021年全球表层MHWs的6项年平均指标。在最新的气候基准期下,MHWs年平均频次和总天数的高值区往南半球高纬海域转移,且在热带太平洋西部和热带太平洋中东部分别出现了总天数的低值区和高值区,其他指标的空间分布则未发生明显变化(图略)。

与1983—2012年的基准期相比,取1991—2020年作为基准期将导致1982—2021年MHWs的6项年平均指标在全球大部分海域降低(见图5a—f)。在全球90%以上的海域,MHWs的频次(见图5a)和总天数(见图5f)均减小,只有南极洲附近海域有所增加。在超过80%的海域中,MHWs的累积强度(见图5d)和持续时间(见图5e)均减小。MHWs平

均强度和最大强度的变化幅度不大,为 $-0.5 \sim 0.5$ °C,在全球60%海域的平均强度(见图5b)和69%海域的最大强度(见图5c)均减小,但是在东北太平洋和西北大西洋海域,两项指标均有增加。

选取1991—2020年作为气候基准期,与1983—2012年原气候基准期相比,大多数海域MHWs的各项指标仍呈现线性增长趋势,但趋势有所减弱,尤其是热浪总天数(见图5g—i),西太平洋、北太平洋和东北大西洋等海域热浪总天数的最高减幅达30 d/10 a。造成以上结果的主要原因是全球变暖,与原1983—2012年基准期相比,通过1991—2020年的基准期计算得到的气候态和90%阈值普遍更高,因此导致MHWs的各项指标偏低。

3 MHWs的年际变化与PDO和ENSO的关系

对1982—2021年的热浪总天数进行EOF展开,得到前两个模态(见图6)。之所以选择MHWs总天数进行EOF分析,是因为该指标是MHWs最简单的表现形式,例如,更多或更长的事件都会导致MHWs天数的增加^[31]。第一模态的空间分布可以解释为受PDO的调控(见图6b),主成分时间序列则反映出与PDO指数类似的年代际变化(见图6a)。第二模态反映了MHWs与ENSO之间的关系,厄尔

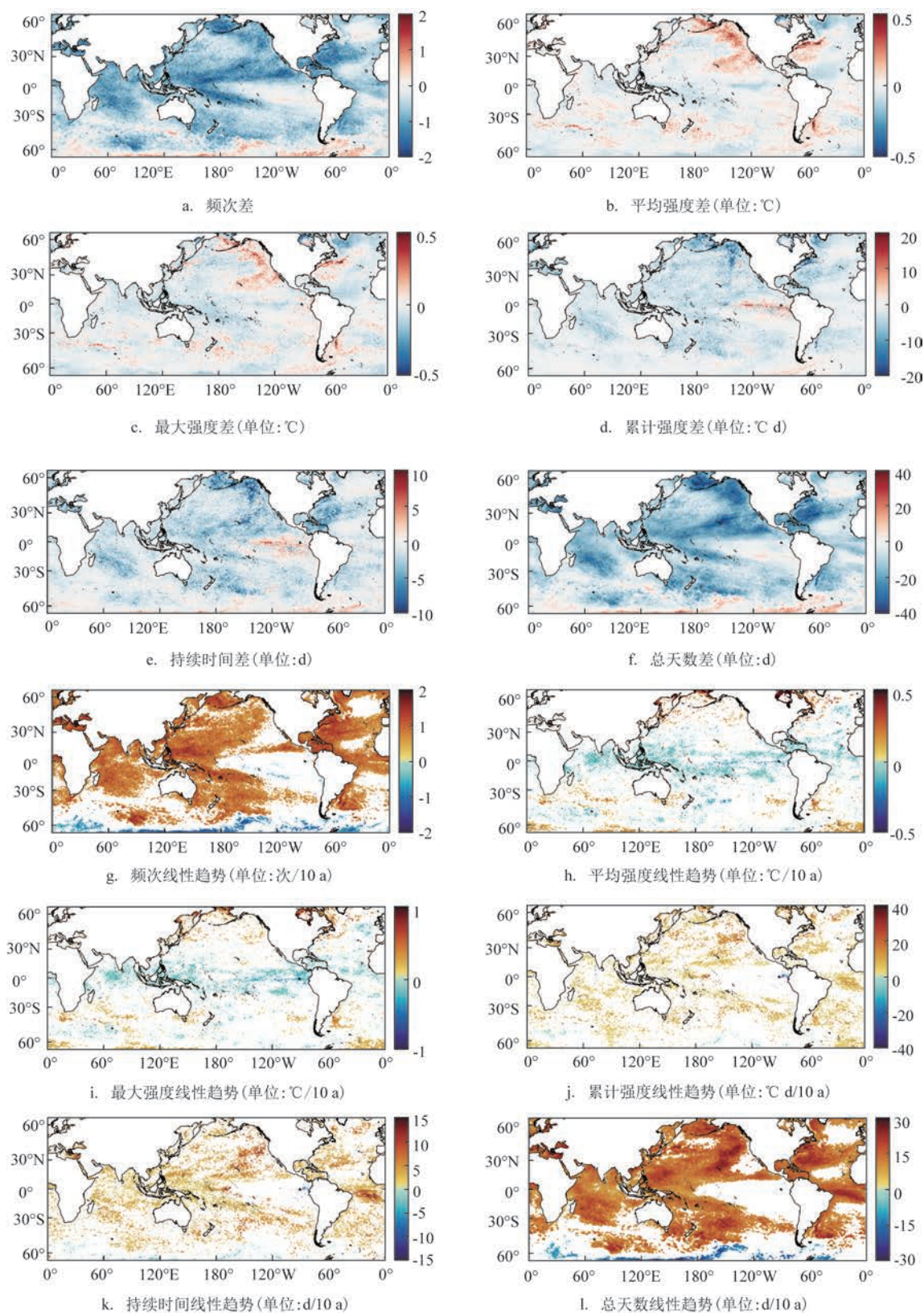


图5 不同气候基准期下海洋热浪指标及其趋势的比较

Fig.5 Comparison of marine heatwave metrics and their linear trends under different baseline climatology

厄尔尼诺现象明显增加了中东太平洋的MHWs事件,在西太平洋和东北太平洋海域则是抑制作用。主成分时间序列反映了相应空间模态随时间的权重变化,第二模态的主成分时间序列在1982—1983年、1997—1998年和2015—2016年都存在一个极大值(见图6c),这3个时期正好也对应了3次超强厄尔尼诺事件。值得注意的是,前两个模态的主成分时间序列在2014—2016年都存在一个异常值,可能是因为这一时期全球SST创下历史新高(见图3a)。2014—2016年,厄尔尼诺现象导致热带太平洋西北部的次表层释放了异常高的热量,从而使得全球平均表面温度跳跃式地上升了 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[32]。ENSO作为最显著的年际信号之一,主导了全球大部分海域MHWs的形成与发展^[3,15,26,33]。EOF分析得到的前两个模态揭示了PDO和ENSO对MHWs总天数的调控,前人的研究也表明,气候模态似乎是增强或抑

制MHWs事件及其可能性的重要因素^[9]。

为进一步讨论PDO和ENSO对MHWs的影响,本文对这两种气候信号和全球年平均MHWs指标进行了相关分析。图7表明PDO直接影响太平洋的MHWs频次和总天数,在西太平洋的一个“V”形区域呈现负相关关系,相关系数最高可达-0.8,在东太平洋则呈现正相关关系($p<0.05$)。PDO通过遥相关作用也会间接影响印度洋和大西洋部分海域的MHWs频次与总天数。MHWs的平均强度、最大强度、累积强度和持续时间与PDO指数的相关性较弱,PDO对这些指标的影响范围也较小。Niño 3.4指数在中东太平洋海域与6项指标都具有较强的正相关关系(见图8),在太平洋以外的海域,其影响却没有PDO显著。除了中东太平洋,MHWs的平均强度、最大强度、累积强度和持续时间与Niño 3.4指数的相关性较弱或不具有相关性。MHWs频次和总

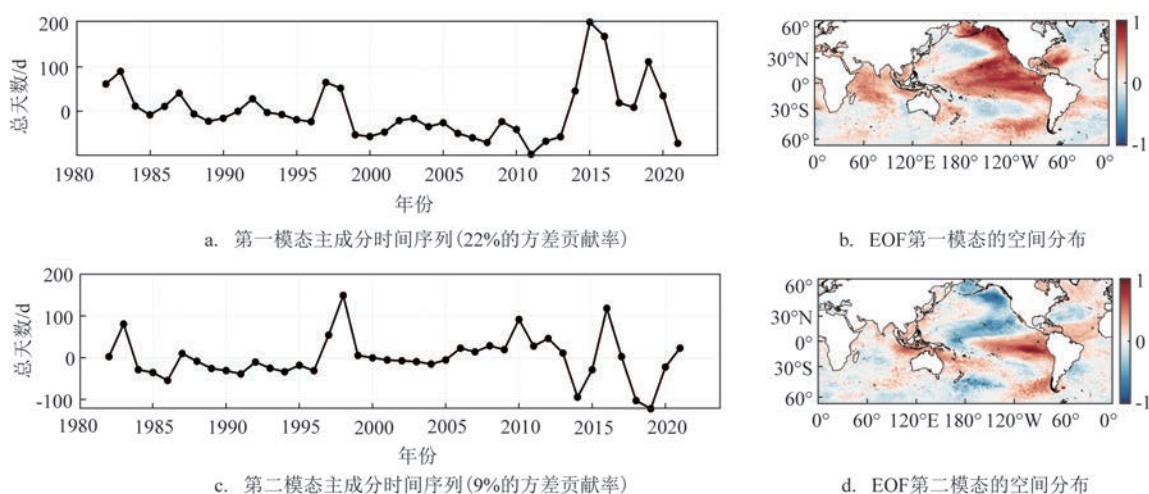
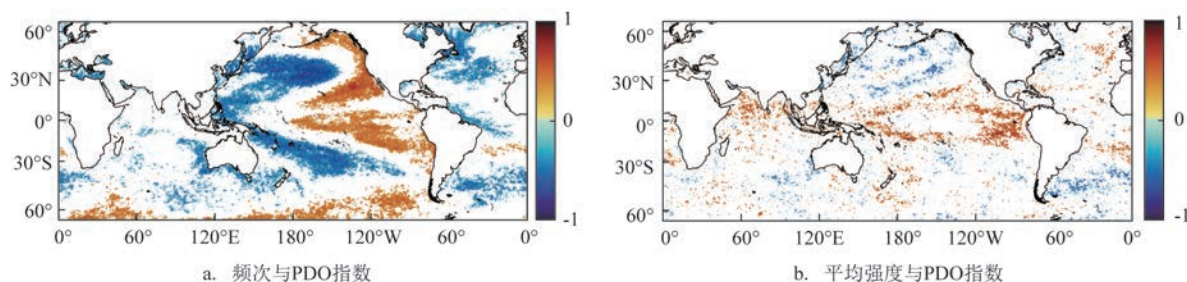


图6 海洋热浪年总天数前两个模态的时间序列和对应的空间分布

Fig.6 Time series and spatial pattern of the leading two modes of total annual marine heatwave days



注:空白区域表示未通过95%置信度检验

图7 1982—2021年PDO指数与海洋热浪指标的相关系数

Fig.7 Distributions of the correlation coefficients between PDO index and the marine heatwave metrics during 1982—2021

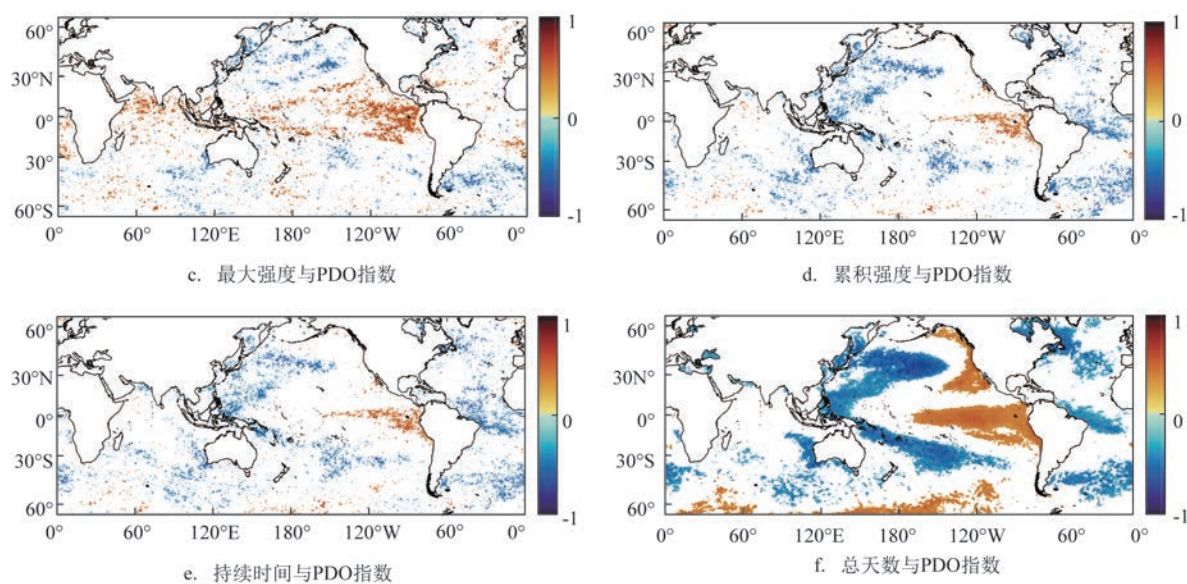
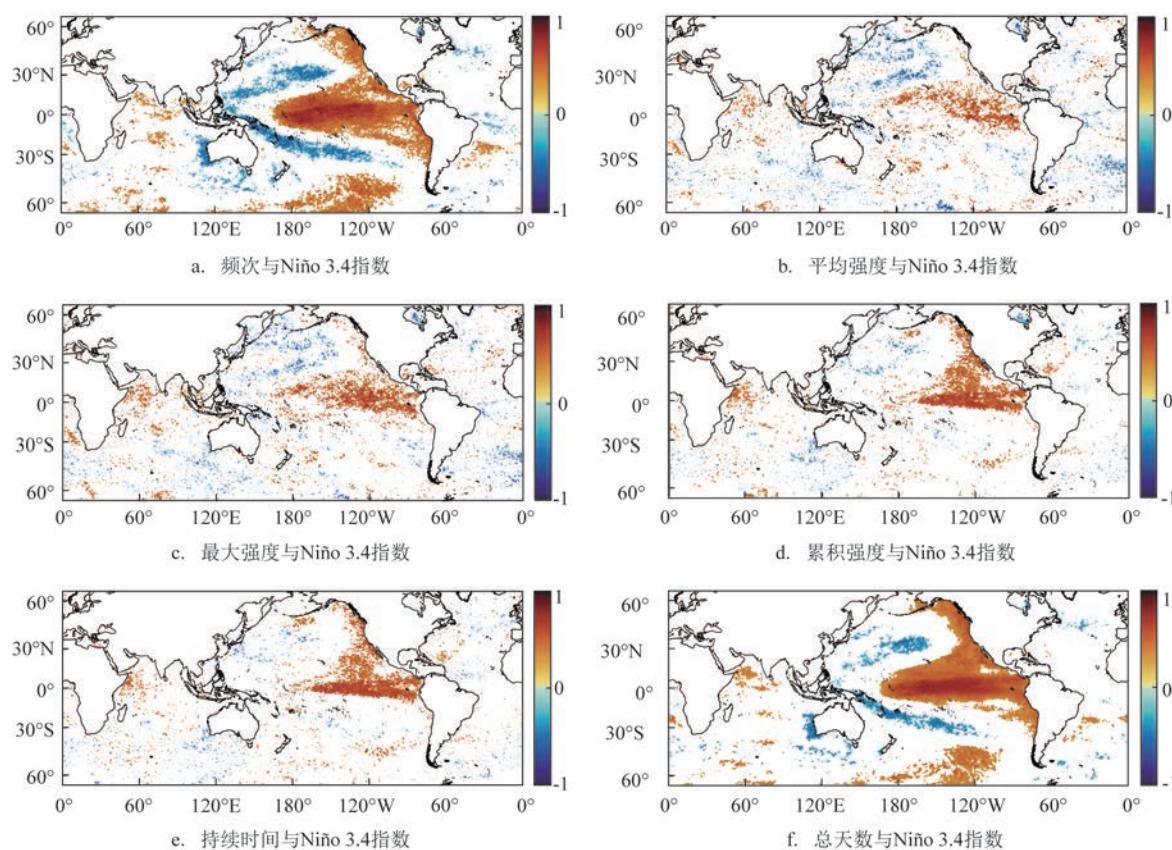


图7 (续)

Fig.7 (Continued)



注:空白区域表示未通过95%置信度检验

图8 1982—2021年Niño 3.4指数与海洋热浪指标的相关系数

Fig.8 Distributions of the correlation coefficients between Niño 3.4 index and the marine heatwave metrics during 1982—2021

天数与 Niño 3.4 指数具有相关关系的海域更广,如南北太平洋的中部以及澳大利亚西侧海域,都具有很强的负相关关系。

4 结论和讨论

本文利用 NOAA OISST 逐日表层海温资料统计了 1982—2021 年全球 MHWs 的时空特征和变化趋势,讨论了 MHWs 可能的驱动机制。主要结论如下:

①全球 MHWs 的频次、平均强度、最大强度、累积强度、持续时间和总天数存在明显的地区差异,其中赤道中东太平洋 MHWs 的发生频率较低,但平均强度、最大强度和持续时间偏强、偏长,因此累积强度也偏强。MHWs 除平均强度、最大强度在低纬海域有下降趋势,全球大部分海域 MHWs 各指标均有线性增长趋势。平均强度的线性趋势远小于全球海表变暖的速度。

②中等、强烈、严重和极端 MHWs 的时空分布是不均匀的,类别越高,年平均天数越少。对比了 1991—2020 年和 1983—2012 年作为基准期的结果,各项指标及其线性趋势普遍减小,这主要与全球变暖、SST 上升有关。

③对 1982—2021 年 MHWs 的年总天数进行 EOF 展开,得到的前两个模态分别体现了 MHWs 在年代际和年际尺度上的驱动因素。第一模态受 PDO 的调控,第二模态反映了与 ENSO 的关系。PDO 和 Niño 3.4 指数与频次和总天数具有最强的相关关系,两种气候模态可通过局地作用和遥相关作用影响全球 MHWs。

迄今为止进行的大多数研究以及本文的全球分析都是基于 SST 来检测和分析 MHWs,对于更深层中的 MHWs 鲜有研究^[34, 35],这也反映出我们对海洋的观测能力不足。对于 PDO 和 ENSO 对 MHWs 影响的认识大多只是建立在统计关系上,但是我们必须认识到其内部机制复杂,中间可能涉及到多个过程,以后还需借助其他分析手段进一步研究。MHWs 已成为海洋生态系统和海洋资源可持续性面临的重大挑战之一,迫切需要在理解其物理机制上取得新进展,如何准确预报及应对这种极端事件也有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Summary for policymakers[M]//Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 3-36.
- [2] CAPUTI N, KANGAS M, DENHAM A, et al. Management adaptation of invertebrate fisheries to an extreme marine heat wave event at a global warming hot spot[J]. Ecology and Evolution, 2016, 6(11): 3583-3593.
- [3] FENG M, MCPHADEN M J, XIE S P, et al. La Niña forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1277.
- [4] WERNBERG T, BENNETT S, BABCOCK R C, et al. Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem[J]. Science, 2016, 353(6295): 169-172.
- [5] CAVOLE L M, DEMKO A M, DINER R E, et al. Biological impacts of the 2013-2015 warm-water anomaly in the Northeast Pacific: winners, losers, and the future[J]. Oceanography, 2016, 29(2): 273-285.
- [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.
- [7] MILLS K E, PERSHING A J, BROWN C J, et al. Fisheries management in a changing climate: lessons from the 2012 ocean heat wave in the Northwest Atlantic[J]. Oceanography, 2013, 26(2): 191-195.
- [8] SMITH K E, BURROWS M T, HOBDAI A J, et al. Socio-economic impacts of marine heatwaves: global issues and opportunities[J]. Science, 2021, 374(6566): eabj3593.
- [9] HOLBROOK N J, SCANNELL H A, SEN GUPTA A, et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2624.
- [10] 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.
- [11] FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. Nature, 2018, 560(7718): 360-364.
- [12] ZHANG X J, ZHENG F, ZHU J, et al. Observed frequent occurrences of marine heatwaves in most ocean regions during the last two decades[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(9): 1579-1587.
- [13] 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 X J, ZHENG F. Analysis of multi-time scale variation

- characteristics and climate regulation factors on global marine heatwaves[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(1): 170-182.
- [14] MCPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H. ENSO as an integrating concept in earth science[J]. *Science*, 2006, 314(5806): 1740-1745.
- [15] DI LORENZO E, MANTUA N. Multi-year persistence of the 2014 / 15 North Pacific marine heatwave[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1042-1047.
- [16] LEE T, HOBBS W R, WILLIS J K, et al. Record warming in the South Pacific and western Antarctica associated with the strong central-Pacific El Niño in 2009-10[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(19): L19704.
- [17] MARSHALL A G, HENDON H H, FENG M, et al. Initiation and amplification of the Ningaloo Niño[J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(9): 2367-2385.
- [18] SCANNELL H A, PERSHING A J, ALEXANDER M A, et al. Frequency of marine heatwaves in the North Atlantic and North Pacific since 1950[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(5): 2069-2076.
- [19] SALINGER J, HOBDAY A J, MATEAR R J, et al. Decadal-scale forecasting of climate drivers for marine applications[J]. *Advances in Marine Biology*, 2016, 74: 1-68.
- [20] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473-5496.
- [21] 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.
- [22] HOBDAY A J, OLIVER E C J, SEN GUPTA A, et al. Categorizing and naming MARINE HEATWAVES[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 162-173.
- [23] SEN GUPTA A, THOMSEN M, BENTHUYSEN J A, et al. Drivers and impacts of the most extreme marine heatwave events [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 19359.
- [24] YAO Y L, WANG J J, YIN J J, et al. Marine heatwaves in China's marginal seas and adjacent offshore waters: past, present, and future[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(3): e2019JC015801.
- [25] HAYASHIDA H, MATEAR R J, STRUTTON P G, et al. Insights into projected changes in marine heatwaves from a high-resolution ocean circulation model[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4352.
- [26] PLECHA S M, SOARES P M M. Global marine heatwave events using the new CMIP6 multi-model ensemble: from shortcomings in present climate to future projections[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(12): 124058.
- [27] 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]. *Frontiers in Climate*, 2021, 3: 801217.
- [28] OLIVER E C J. Mean warming not variability drives marine heatwave trends[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3): 1653-1659.
- [29] WANG B, LUO X, YANG Y M, et al. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(45): 22512-22517.
- [30] WERNBERG T, SMALE D A, TUYA F, et al. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 78-82.
- [31] OLIVER E C J, LAGO V, HOBDAY A J, et al. Marine heatwaves off eastern Tasmania: Trends, interannual variability, and predictability[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 161: 116-130.
- [32] YIN J J, OVERPECK J, PEYSER C, et al. Big jump of record warm global mean surface temperature in 2014 - 2016 related to unusually large oceanic heat releases[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2): 1069-1078.
- [33] ZHANG Y, DU Y, FENG M, et al. Long-lasting marine heatwaves instigated by ocean planetary waves in the tropical Indian Ocean during 2015—2016 and 2019—2020[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(21): e2021GL095350.
- [34] ELZAHABY Y, SCHAEFFER A. Observational insight into the subsurface anomalies of marine heatwaves[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 745.
- [35] 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): 104024.

Spatial-temporal characteristics and controlling factors of global marine heatwaves in the past 40 years

XU Qiang^{1,2}, CHEN Xingrong^{2,3}, WANG Haiyan^{2*}, LIU Shan², HE Yue²

(1. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the National Oceanic and Atmospheric Administration Daily Optimal Interpolated Sea Surface Temperature V2 (OISST V2) data during 1982—2021, we analyze the spatial-temporal characteristics and controlling factors of global marine heatwaves using statistical methods such as least square regression, empirical orthogonal function, and correlation analysis. The results show that the frequency, mean intensity, maximum intensity, cumulative intensity, duration and total days of marine heatwaves have shown an upward trend associated with increasing SST in the past 40 years. Further analysis of marine heatwave intensity shows that the annual mean marine heatwave days categorized by different intensity exhibits uneven regional distribution, with majority concentrating on medium intensity. The select of historical baseline period affects the climatology and threshold of marine heatwaves, which is an important issue in marine heatwave detection. After conducting an Empirical Orthogonal Function analysis to the detrended total days (i.e., global warming trend), it is found that the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation play a dominant role in the interannual variation of marine heatwaves.

Key words: sea surface temperature; marine heatwaves; Pacific Decadal Oscillation; El Niño-Southern Oscillation