

全球变暖背景下海洋热浪事件的变化特征分析

夏子涵, 何永利, 季 飞, 王小霞

兰州大学 大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要: 采用基于事件的识别算法, 利用欧洲中期天气预报中心 ERA-Interim 数据集, 对 1979–2018 年的海面温度数据进行识别, 探讨海洋热浪的时空分布特征. 结果表明, 基于事件的识别算法更具优越性, 去除了许多小面积的噪声. 事件算法检测到的海洋热浪事件数为 6 287 次, 平均单次事件发生面积为 $2.17 \times 10^6 \text{ km}^2$. 海洋热浪事件的频率随时间呈明显上升的趋势, 达到 27.35 次/10 a; 持续时间、年事件总面积、平均单次事件面积略有上升, 分别为 0.22 d/10 a、 $1.07 \times 10^8 \text{ km}^2/\text{a}$ 、 $1.94 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$, 海洋热浪的强度在全球变暖背景下并没有显著的变化趋势. 太平洋发生海洋热浪事件的平均年总面积、单次事件面积、频率均最大, 印度洋的增长幅度最大, 大西洋次之. 春、秋季海洋热浪的发生频率与总面积最大, 但夏季的增长幅度最大.

关键词: 海洋热浪; 识别算法; 频率; 面积; 强度

中图分类号: P47 文献标识码: A 文章编号: 0455-2059(2022)04-0560-09

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2022.04.017

Characteristics of the changes in marine heatwaves events under global warming

XIA Zi-han, HE Yong-li, JI Fei, WANG Xiao-xia

Key Laboratory of Semi-arid Climate Changes with the Ministry of Education,
College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: An event-based detection algorithm is used to identify the marine heatwaves (MHWs) during 1979–2018 using the ERA-Interim dataset from the European Centre for Medium-range Weather Forecasts and explore the spatial and temporal distribution characteristics of MHWs. The results showed that the event-based detection algorithm was more effective by removing much of the noise in small areas. The number of detected MHWs was 6 287, and the average area in a single event was $2.17 \times 10^6 \text{ km}^2$. The frequency of MHWs showed a significant increasing trend with 27.35 events/10 a; the duration, annual total area and averaged area of single event increased slightly with 0.22 d/10 a, $1.07 \times 10^8 \text{ km}^2/\text{a}$, and $1.94 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$ respectively. While the intensity of MHWs did not show a significant trend under global warming. The largest average annual total area, single event area and frequency of MHWs occurred in the Pacific Ocean, but the largest increase was observed in the Indian Ocean, followed by the Atlantic Ocean. The frequency and total area of MHWs was high in spring and autumn, but the greatest increase was observed in summer.

Key words: marine heatwave; detection algorithm; frequency; area; intensity

收稿日期: 2021-05-11 修回日期: 2021-07-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41705047); 国家自然科学基金面上项目(41875083)

作者简介: 何永利(1988–), 男, 河北唐山人, 副教授, 博士, e-mail: heyongli@lzu.edu.cn, 研究方向为半干旱气候变化与气候动力学, 通信联系人.

全球变暖背景下,海洋吸收了93%的热量,导致其热容量逐渐增长^[1-2]。全球变暖引起海洋热浪(marine heatwaves, MHWs)的频繁发生^[3],其所带来的经济损失及生态破坏是巨大的^[4-5]。近年来已发生多起MHWs事件,如2003年发生在地中海北部的MHWs事件^[6-7],导致了海洋生物海底栖息地的丧失及群落的大量死亡^[8];2011年发生在西澳大利亚海岸的MHWs事件^[4,9],不仅出现最高异常海洋表面温度(sea surface temperature, SST),还使得鲍鱼大规模死亡;2012年发生在大西洋西北区域^[10]、2013–2015年发生在太平洋东北部^[11]的海面极端暖异常现象也造成了巨大的生态和经济影响,包括珊瑚白化^[12-13]、海藻林的破坏^[14]、重要商业鱼类的死亡^[15-16]、渔业和水产养殖业减产停产^[17]等。鉴于MHWs事件深远且严重的破坏后果^[18-22],准确识别大范围持续发生的MHWs事件并量化其变化趋势,研究其主要发生地、发生季节及其对全球变暖的响应特征成为亟待解决的需求。

HOBDAY等^[23]将MHWs定义为在某一格点长时间序列(≥ 30 a)的温度数据中, SST超出第90%分位数阈值,且持续时间 ≥ 5 d的极端暖异常现象。OLIVER等^[24]依据该定义设计了识别算法,并用美国国家海洋与大气管理局提供的1982–2016年SST数据进行了检测,统计了MHWs相关属性的变化趋势,发现其频率、强度、持续时间均有明显增长。仅对单个格点的长时间温度序列进行识别忽略了洋流具有流动性的特点,即MHWs现象发生时不可能只存在于某个格点上,且发生在单个格点的小范围MHWs现象对生态环境、社会经济的影响也不足以引起关注。单个格点出现异常高的SST现象也可能是由于观测误差或人为因素造成的,在进行MHWs现象识别时,需考虑以上因素的影响。

本研究在现有算法的基础上,借鉴阻塞识别算法,增加了面积限制和重叠比限制两个条件,并将“事件”的观点运用到识别算法中,即将所有空间上具有连续性、持续时间 ≥ 5 d的MHWs现象视为一次事件,提出了改进的基于事件的MHWs识别算法。基于欧洲中期天气预报中心1979–2018年的ERA-Interim温度数据,使用新算法进行MHWs事件的识别,探讨其相关属性的变化趋势;分别考察在不同海洋盆地和不同季节下MHWs事件总面积、平均单次事件面积和频率的变化趋势,以归纳近年来其主要发生地、发生季节及变化情况。

1 数据和方法

数据来源于欧洲中期天气预报中心 ERA-Interim 数据集中的 SST 数据集,用于 MHWs 事件的识别。该数据为覆盖 1979–2018 年的全球数据,时间分辨率 6 h,空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 。利用其所对应的 land-sea-mask 数据集,去除数据中的陆地部分,仅保留海洋部分的温度数据。

目前大多数相关研究采用 OLIVER 等^[24]提出的 MHWs 识别算法,其主要步骤见图 1a。基于事件的算法在该算法基础上,考虑洋流的流动性及噪声等因素进行了改进,主要步骤见图 1b。

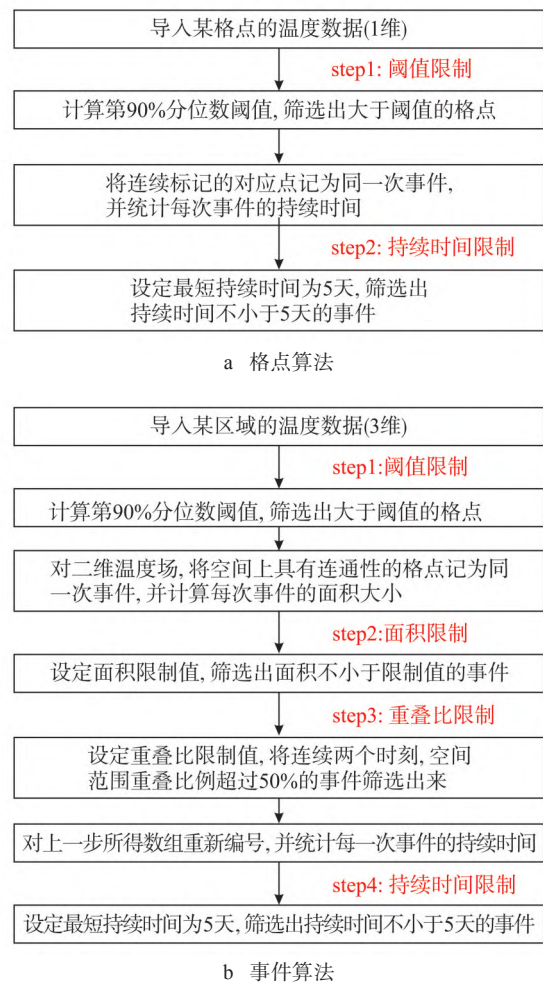


图1 格点算法与事件算法的主要识别步骤
Fig. 1 The detection method in the grid algorithm and event algorithm

阈值的计算方法为: 求解某一儒略日(第 i 天)的阈值时, 选取以该儒略日为中心, 前后 5 d 的窗口区间, 计算窗口内温度数据的第 90% 分位数作为阈值。面积限制的阈值要能够滤去小面积的热浪, 还要尽可能不破坏大范围热浪的时间连续性。

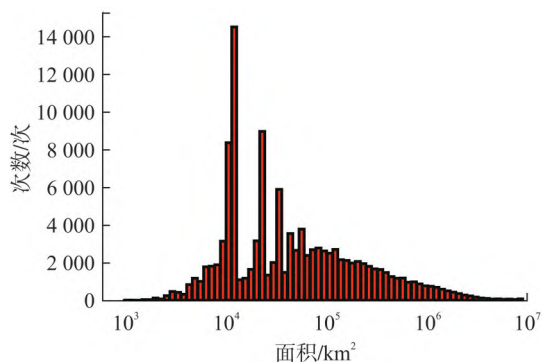


图2 1979–1988年格点算法检测到的MHWs事件面积分布

Fig. 2 The distribution of the area in the MHWs detected by the grid algorithm from 1979 to 1988

基于格点MHWs识别算法,对1979–1988年每天全球MHWs的连通性区域面积进行统计(图2).择优选择能够去除小面积噪声的面积,以 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 为限制值.重叠比限制参考SCHWIERZ等^[25]提出的阻塞识别算法,选取50%作为限制值.

本研究主要考察MHWs的频率、强度、持续时间、面积.MHWs频率是将所有空间上具有连续性、持续时间 $\geq 5 \text{ d}$ 的MHWs现象记为一次完整的事件,该年MHWs的频率即为当年发生的MHWs事件个数.MHWs强度是针对某次MHWs事件发生的所有格点计算其平均的温度距平值,作为该次MHWs事件的强度,并将每年所有MHWs事件强度的平均值作为该年的MHWs平均强度

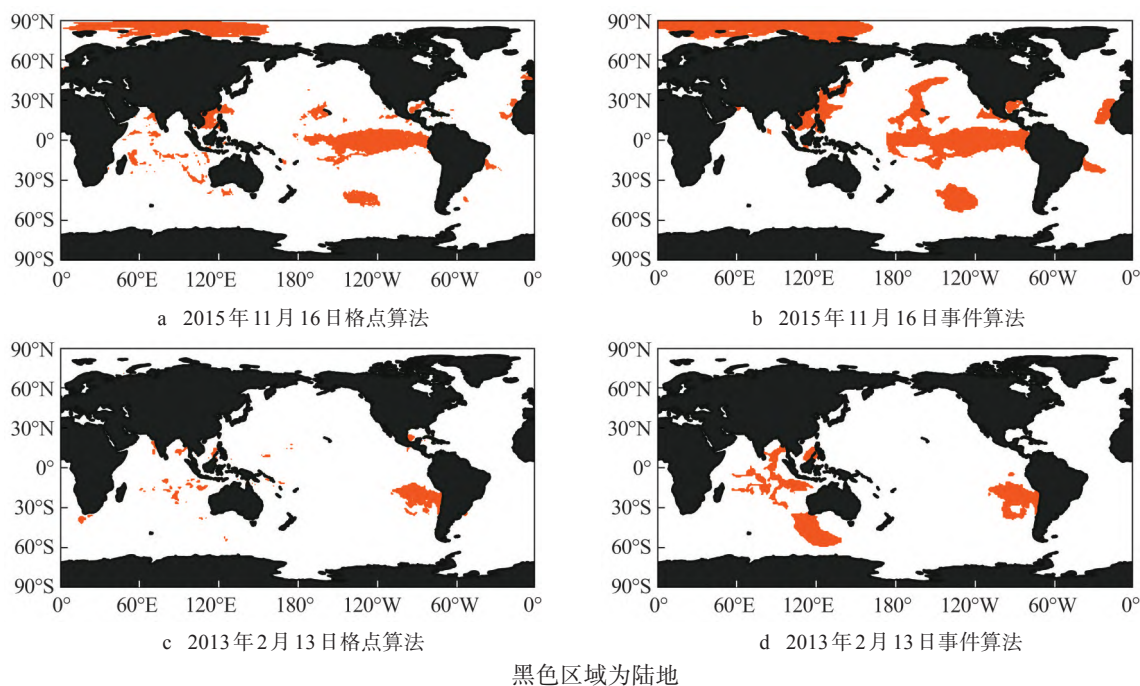
值.MHWs持续时间是统计某次MHWs事件从开始发生到完全结束所经历的时间,作为该次MHWs事件的持续时间,并将每年所有MHWs事件持续时间的平均值作为该年的平均持续时间.MHWs面积是依据某次MHWs事件的持续时间,计算期间内每天MHWs事件的面积,取其平均值作为该次MHWs事件的面积,并将每年所有MHWs事件的总面积作为该年发生MHWs的总面积,每年所有MHWs事件的平均面积作为该年单次MHWs的平均面积.

2 结果分析

2.1 基于事件的MHWs识别算法的检验

利用1979–2018年ERA-interim再分析数据集,使用格点算法和事件算法分别对SST数据进行检测,挑选其中的某两天,对比两种算法的识别效果(图3).在格点算法中印度洋盆地内的许多小面积、不平滑的噪声信号经过事件算法识别后都被去除,仅保留了面积较大的部分.图3a中的部分标记区域经过优化算法识别后面积有所增大,主要是由于考虑MHWs的移动性,对单一格点的持续性条件有所放松.对比图3c、d可见,事件算法在澳大利亚西南海洋处识别出一个MHWs事件,但格点算法却未识别到.

根据两种算法的识别结果,分别统计MHWs事件的总次数和单次MHWs事件的平均持续时



黑色区域为陆地

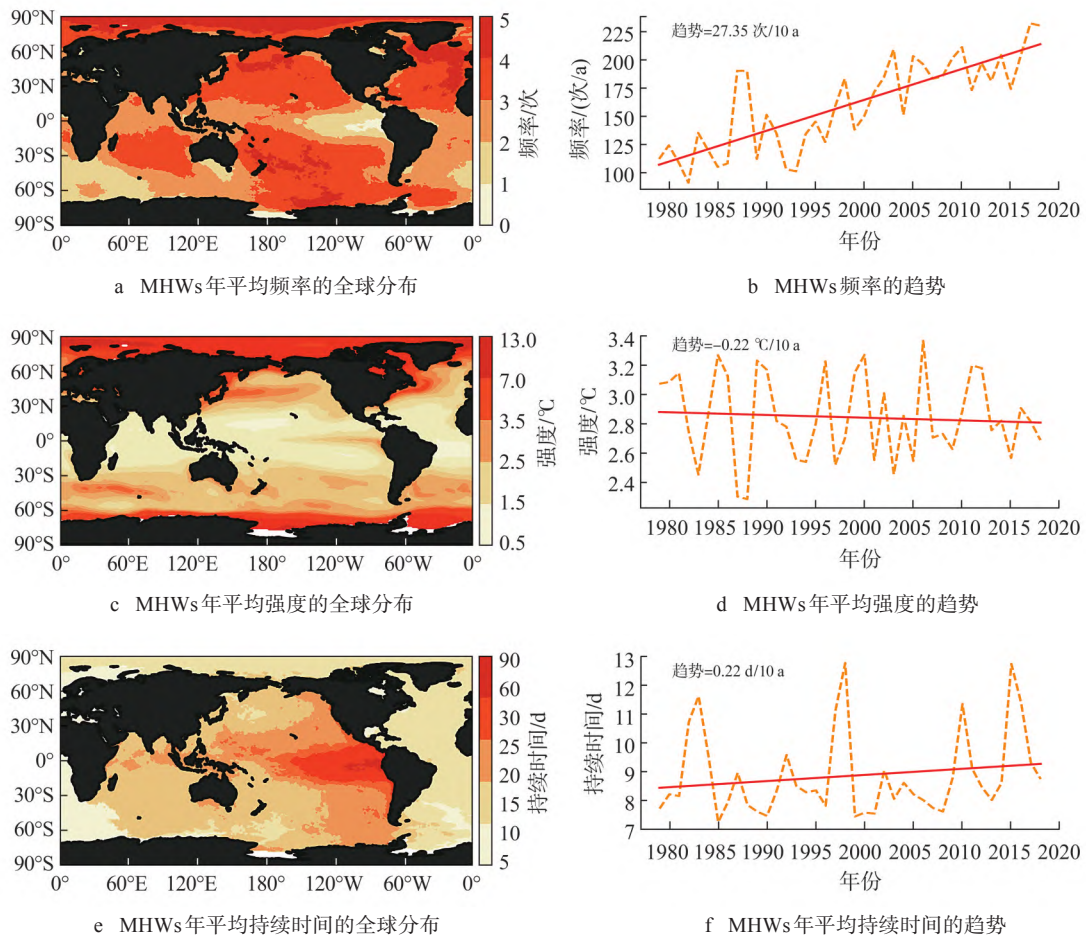
图3 格点算法与事件算法在同一天识别的MHWs

Fig. 3 The MHWs detected by the grid algorithm and the event algorithm on the same day

间、强度、面积. 结果显示, 现有格点算法识别出 1.96×10^6 次 MHWs 事件, 而事件算法识别出的 MHWs 事件数仅为 6 287 次, 约为格点算法的 0.3%. 事件算法较格点算法平均单次 MHWs 事件持续时间也有所增大, 增幅约 1.96 d; 增幅最显著的是平均单次 MHWs 事件的面积, 增加了约 10 倍. 平均单次事件强度值略有减小, 下降了 0.13°C .

2.2 MHWs的属性

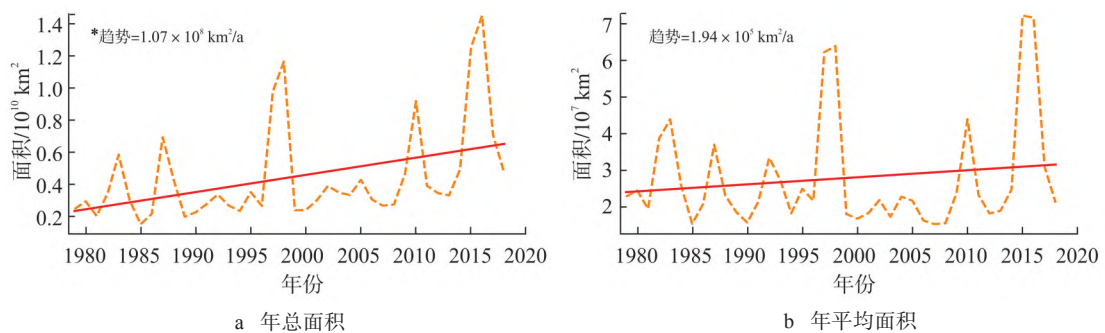
根据事件算法的识别结果, 分析 MHWs 的频率、强度、持续时间的空间分布及变化趋势(图 4). 全球平均每年每个格点发生 MHWs 的频率约为 1~5 次(图 4a). MHWs 发生较频繁的区域有南印度洋、北太平洋、南太平洋、北大西洋、印度洋中心区域和南大洋中心区域, 发生频率均大于 3.5 次/a.



* 代表趋势通过置信度为 95% 的显著性检验

图 4 1979–2018 年 MHWs 事件的频率、强度、持续时间的空间分布及时间趋势

Fig. 4 The spatial distribution and temporal trend of the frequency, intensity, and duration of MHWs from 1979 to 2018



* 代表趋势通过置信度为 95% 的显著性检验

图 5 1979–2018 年全球 MHWs 事件的总面积及单次 MHWs 事件面积的时间序列

Fig. 5 The time series of the total area of global MHWs events and the area of a single MHWs event from 1979 to 2018

东热带太平洋的 MHWs 平均发生频率少于 1.5 次, 与其他热带区域差异明显. 由 1979–2018 年全球每年发生 MHWs 事件次数的统计可见 MHWs 事件的频率呈明显增加趋势(图 4b), 达到 27.35 次/10 a.

MHWs 强度和持续时间的气候态空间分布差异较大. 全球大部分区域的 MHWs 强度值均在 $0.5\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高值区分布于北太平洋、东热带太平洋、北大西洋及南大洋西部区域, 达到 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上(图 4c). 由变化趋势可见, MHWs 强度的年际变率较大, 长期趋势仅略有下降(图 4d), 为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. MHWs 事件持续时间的高值区主要分布于东热带太平洋, 最高可达 90 d, 其余区域主要在 $10\sim 20\text{ d}$ (图 4e), 全球平均 MHWs 持续时间变化趋势为 $0.22\text{ d}/10\text{ a}$ (图 4f). 全球每年发生 MHWs 事件的总

面积和平均单次 MHWs 事件面积的变化趋势显示, 每年发生 MHWs 事件的总面积增长趋势较为明显, 约为 $1.07\times 10^8\text{ km}^2/\text{a}$, 尤其在 2000 年后上升速度更快. 单次 MHWs 事件面积的年际变率较大, 长期变化趋势为 $1.94\times 10^5\text{ km}^2/\text{a}$.

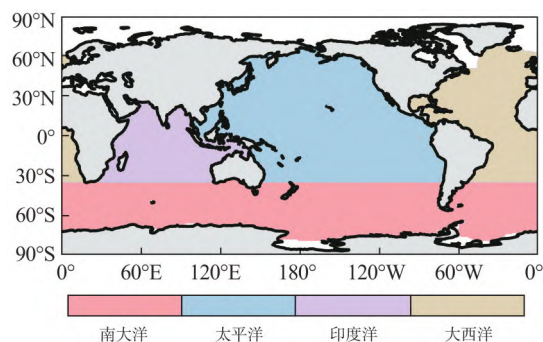


图 6 全球海洋区域划分

Fig. 6 Division of global ocean areas

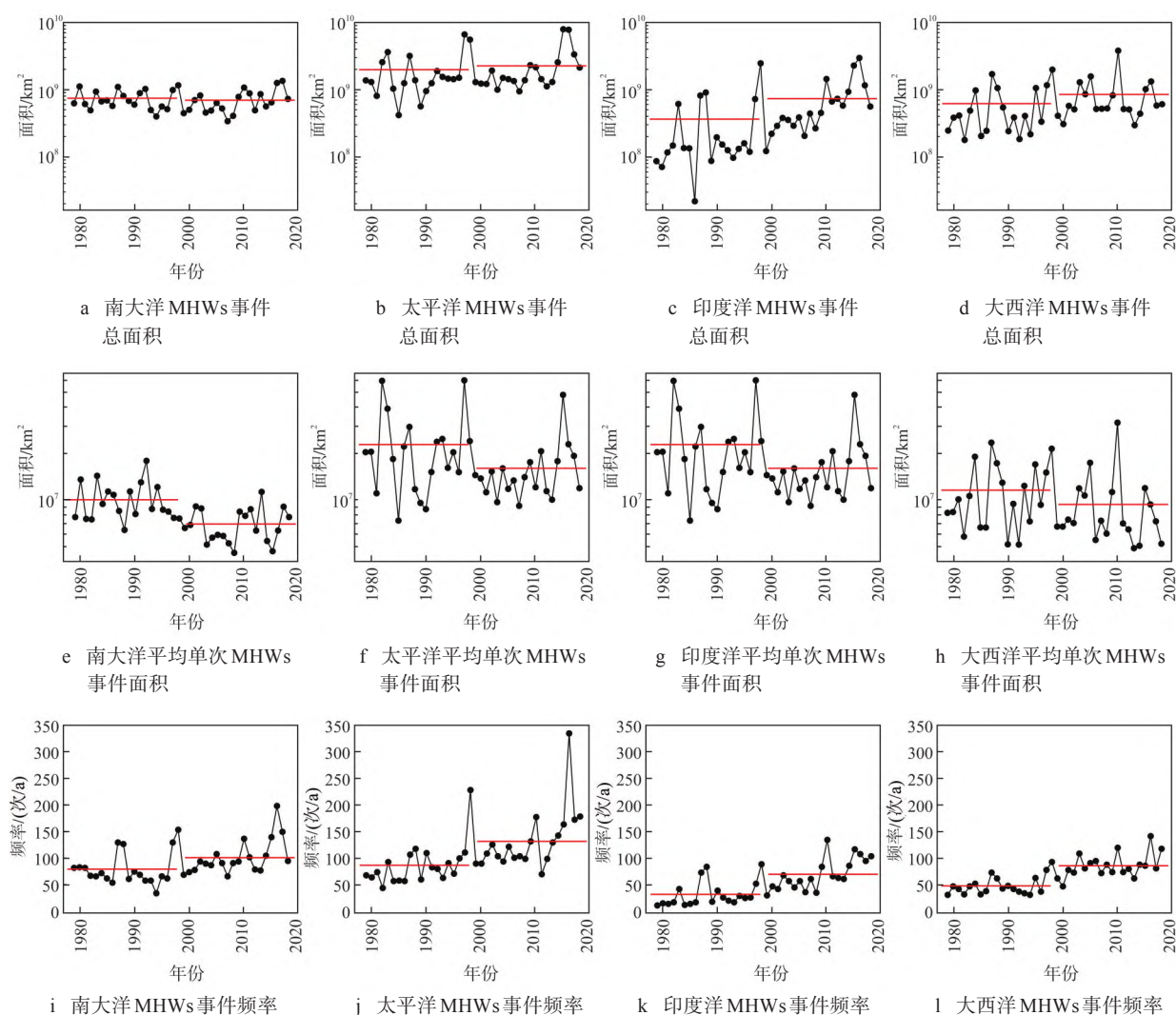


图 7 1979–2018 年四大洋 MHWs 事件年总面积、平均单次事件面积、频率的时间序列

Fig. 7 Time series of the total area, average area, and frequency of MHWs in the four ocean basins from 1979 to 2018

2.3 MHWs的空间变化特征

MHWs事件的频率及总面积在全球变暖背景下显著增大,需进一步研究MHWs的发生面积和频率变化的空间分布特征.将全球海洋区域划分为四个大洋区域(由于北冰洋常年有冰层覆盖,故不予考虑),分别为南大洋、太平洋、印度洋和大

西洋^[26](图6).

图7显示了四大洋每年发生MHWs事件的总面积、平均单次事件面积、发生频率的时间序列.根据以往研究,该研究时期存在明显的年代际气候振荡,因此划分为增温加速时期(1979–1988年)和增温减缓时期(1999–2018年)(表1).

表1 加速增温和增温减缓时期四大洋平均每年发生MHWs事件总面积、单次事件面积、频率
Table 1 The total area, average area and frequency of MHWs in the four ocean basins during global accelerated warming and warming hiatus periods

海洋	1979–1998年			1999–2018年		
	平均每年MHWs 总面积/km ²	平均单次MHWs 面积/km ²	平均每年MHWs 发生频率/(次/a)	平均每年MHWs 总面积/km ²	平均单次MHWs 面积/km ²	平均每年MHWs 发生频率/(次/a)
南大洋	7.47×10 ⁸	1.01×10 ⁷	79	6.99×10 ⁸ (-7%)	6.99×10 ⁶ (-31%)	100(28%)
太平洋	1.98×10 ⁹	2.29×10 ⁷	86	2.26×10 ⁹ (14%)	1.61×10 ⁷ (-30%)	131(53%)
印度洋	3.66×10 ⁸	9.07×10 ⁶	31	7.36×10 ⁸ (101%)	9.34×10 ⁶ (3%)	69(122%)
大西洋	6.21×10 ⁸	1.16×10 ⁷	47	8.50×10 ⁸ (37%)	9.37×10 ⁶ (-19%)	85(81%)

对比两个时期内MHWs属性的变化情况可知,除南大洋,其他三大洋每年发生MHWs事件的总面积均有所上升,而南大洋则略有降低,其中增长最明显的是印度洋,其次是大西洋,太平洋平均每年发生MHWs事件的总面积最大.南大洋、太平洋、大西洋的单次MHWs事件面积均呈下降趋势,仅印度洋略有上升,其中太平洋的单次MHWs事件面积最大,南大洋的单次MHWs事件面积减幅最大,太平洋次之.四大洋MHWs的发生频率均明显上升,其中发生MHWs事件次数最多的是太平洋.印度洋的MHWs发生频率增幅最大,大西洋次之.

2.4 MHWs的季节变化特征

为研究全球变暖背景下MHWs响应的季节特征,分析不同季节MHWs事件总面积、平均单次事件面积、事件频率的气候平均值(图8).由于南、

北半球存在气候差异,因此将北半球的6–8月和南半球的12–2月定义为夏季,将北半球的12–2月和南半球的6–8月定义为冬季.由图8可见,1979–2018年春季发生MHWs的总面积最大,秋季略低于春季,冬季最小.平均单次MHWs事件面积冬季最大,春、夏季相近,仅约为冬季的50%,秋季最小.春、秋季的MHWs事件频率相近,夏季略低,冬季最小.

为考察不同季节MHWs事件的变化趋势,分别统计每年发生MHWs事件的总面积、平均单次事件面积、事件发生频率在增温加速时期和增温减缓时期的变化情况(图9).由图9可见,每年四个季节发生MHWs事件的总面积均有所增长,夏季增幅最大,为33%;秋季略低,为31%;春、冬季变化相近,均为23%左右.平均MHWs单次事件面积除冬季外,其他季节均呈下降趋势,其中春季降幅最大,为12%;夏季略低,为10%,冬季则有所上

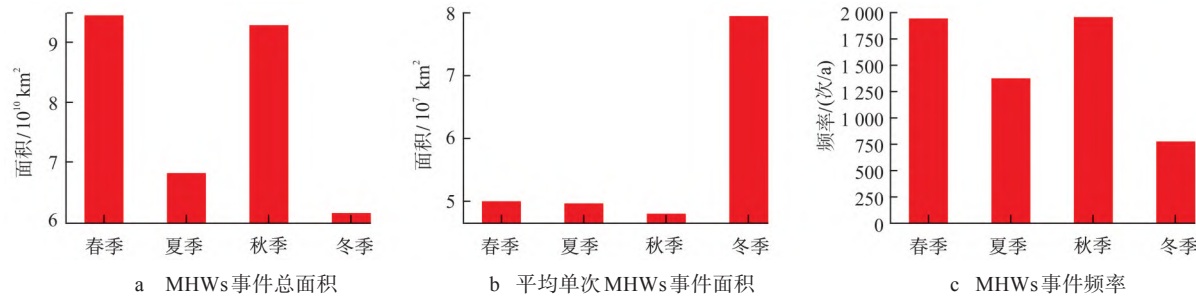


图8 1979–2018年MHWs事件总面积、平均单次事件面积、频率的季节分布
Fig. 8 Seasonal distribution of total area, average area and frequency of MHWs from 1979 to 2018

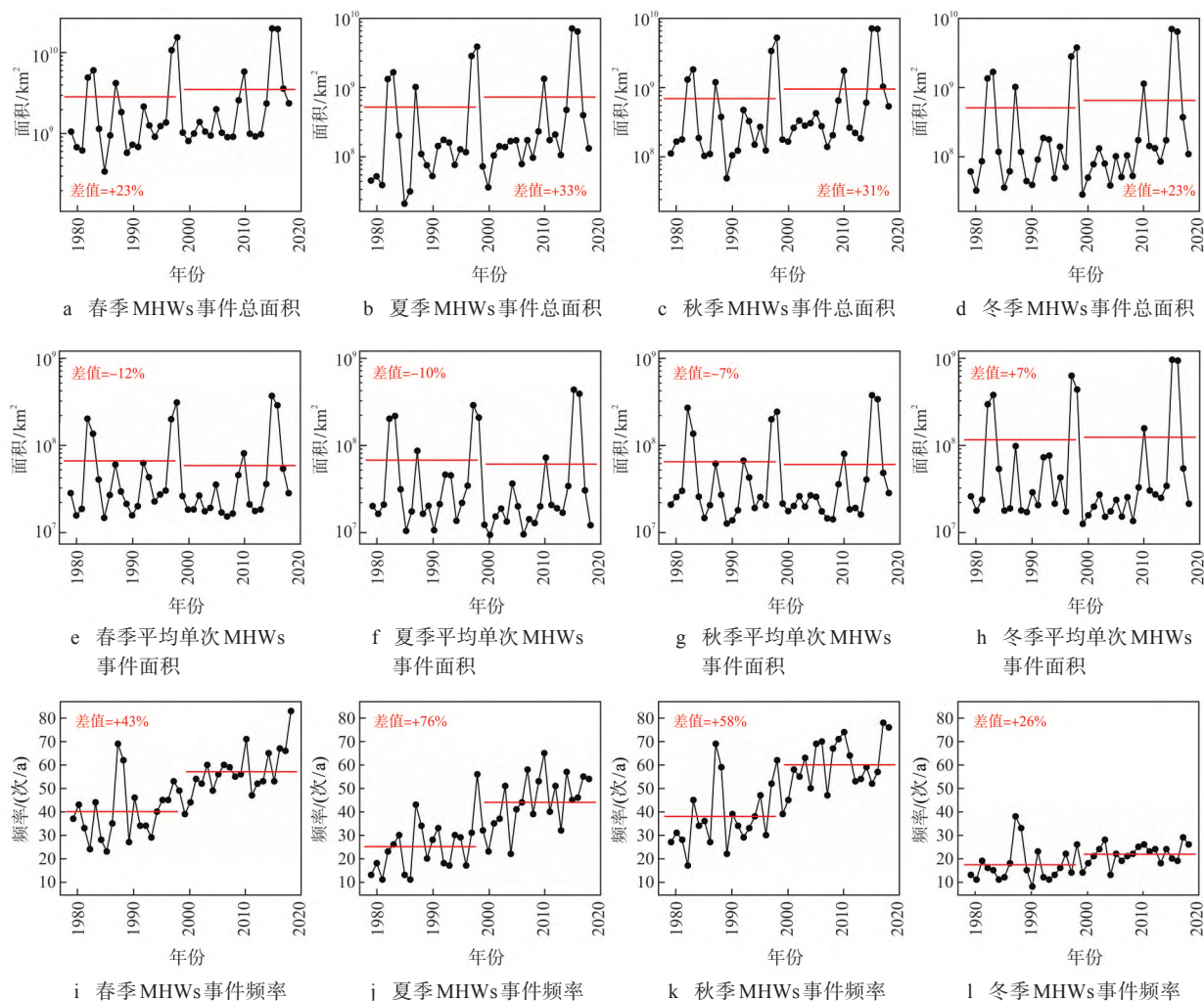


图9 1979–2018年MHWs事件年总面积、平均单次事件面积、频率在四季的时间序列

Fig. 9 Time series of the total area, average area, and frequency of MHWs from 1979 to 2018 in the four seasons

升,增幅为7%。四季发生MHWs事件的频率均有增长,其中夏季增幅达到76%,秋季次之,为58%。冬季的MHWs事件发生频率始终处于较低数值,在20次/a附近波动,变化幅度不大。

3 讨论

3.1 优化算法的识别效果

如图3所示,事件算法在经过动态阈值(滑动窗口为11 d)、面积大小、重叠比、持续时间4个限制条件后,不仅可以捕捉到原有的发生在太平洋中东部的MHWs,而且能够去掉格点算法识别结果中的小面积、不平滑的噪声。原有识别结果中MHWs发生区域经事件算法识别后有所增加,主要是由于两种算法识别角度不同,对MHWs持续时间的不同处理方法引起的。在格点算法中,MHWs现象仅关注了单个格点,虽然某一天的SST大于阈值,但若持续时间<5 d,则该数据点会

被滤除;在事件算法中,MHWs现象是着眼于整个事件,即会对某个极端暖异常现象进行追踪。在经过以上限制后,某单个格点的MHWs事件持续时间虽未达到5 d,但考虑到MHWs的初始形成、发展、移动、结束的演变过程已经超过时间限制,故该格点作为事件的一部分会被保留下来,即事件算法放松了对单个格点上持续时间的限制。图3d中事件算法在澳大利亚西南海岸处识别出一次MHWs事件,而格点算法并未检测到。澳大利亚气象局发布的2013年年度气候报告中指出,澳大利亚全年的SST异常增暖,其中1、2月的月距平海温是有记录以来的最高水平,整个2013年,澳大利亚南部水域持续出现强烈的暖异常现象,证实了这次MHWs事件是真实存在的,表明事件算法相比于格点算法能够更精确地捕捉MHWs事件。本研究提出的算法优化效果良好,经事件算法识别后,所保留MHWs事件的持续时间更长、单次MHWs事

件面积更大. 对于平均MHWs单次事件强度略有下降, 主要是由识别次数的差异引起的. 事件算法的限制条件少, 保留有更多的高强度MHWs事件, 故导致平均MHWs事件强度略高.

3.2 MHWs属性的变化趋势和空间分布

学者利用格点算法发现^[27-28], 半个多世纪以来, MHWs的频率、强度和持续时间均有所增长, 近年来在全球变暖的趋势下, 增长速度加快. 基于事件算法发现, MHWs事件频率和持续时间的增长较为明显, 且频率在1995年后, 持续时间在2000年后增长速率均加快, 与已有研究一致, 但强度的长期变化趋势并不显著, 事件算法只关注大范围发生的MHWs, 格点算法观测到的MHWs强度显著增加可能是由于小范围MHWs强度变化贡献的. 由图4可见, 东太平洋及其中心区域的属性值与周围有明显差异, 该区域是厄尔尼诺-南方涛动的频发地域, 使得此处MHWs事件持续时间较长、强度较大, 相应的MHWs发生频率就低于周围区域.

每年发生MHWs事件的总面积出现显著增长的趋势, 是由单次MHWs事件面积的增加和发生频率增加共同贡献的. 全球变暖背景下, MHWs的影响逐渐增大, 可能主要是由发生MHWs的总面积显著增大贡献的, 而强度的增加趋势并不显著.

3.3 MHWs事件的面积、频率变化与海洋盆地、季节间的关系

在观察到MHWs事件的总面积及频率随时间呈逐年上升以后, 由MHWs发生面积和频率变化的空间分布和季节分布特征可见, MHWs面积变化幅度最大的区域是印度洋, 主要是由于MHWs发生频率增加超过一倍引起的总面积明显增大. 南大洋虽然MHWs事件频率增加了28%, 但总面积却有所减少, 结合该区域MHWs单次事件面积减少达31%, 可以发现总面积减少是小面积MHWs事件的频率增加、大面积MHWs事件显著减少造成的. 太平洋发生MHWs事件的总面积增幅虽不大, 但其基数最大, 比另外三大洋盆地高出一个数量级, 故其MHWs事件总面积的实际增加值仅次于印度洋.

虽然影响较大的MHWs事件均发生在夏季, 但春、秋季发生MHWs的频率最高, 夏季次之. 这主要是因为夏季发生的MHWs持续时间较长, 使得MHWs事件发生的频率降低. 春、夏、秋季的

平均单次MHWs事件面积相近, 所以春、秋季发生MHWs的面积均高于夏季. 通过对四季中三个指标随时间变化趋势的统计, 发现夏季MHWs的增长幅度最大, 可能与近年来全球SST上升加快有关^[29-30]; 冬季的平均单次MHWs事件面积最大, 主要是因为大多发生在冬季的MHWs事件, 均是由秋季开始并一直持续至冬季的厄尔尼诺现象, 故单次MHWs事件的面积超过其他季节.

4 结论

在现有格点算法的基础上提出了优化的基于事件的MHWs识别算法, 并利用该算法对SST数据进行检测识别, 研究了MHWs事件相关属性的变化趋势, 探讨了其面积、频率变化与海洋盆地、季节间的关系.

本研究提出的基于事件的识别算法可以去除格点算法识别到的小面积、不平滑的噪声, 并识别出部分格点算法未能检测到的MHWs事件. 通过事件算法识别到的MHWs事件次数减少, 平均单次MHWs事件面积增大, 体现了该算法良好的识别效果. 经事件算法检测, MHWs事件频率的上升趋势明显, 为27.35次/10 a; MHWs持续时间、年MHWs事件总面积、平均单次MHWs事件面积略有上升, 分别为0.22 d/10 a、 $1.07 \times 10^8 \text{ km}^2/\text{a}$ 和 $1.94 \times 10^5 \text{ km}^2/\text{a}$; MHWs强度的变化趋势不显著.

太平洋盆地发生的MHWs事件平均年总面积、单次MHWs事件面积、发生MHWs事件的频率最大, 印度洋盆地MHWs的增长幅度最大, 大西洋次之. 春、秋季发生MHWs事件的频率与总面积最大, 但夏季MHWs的增长幅度最大.

参考文献

- [1] CHENG L, TRENBERTH K, FASULLO J, et al. Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015[J]. Science Advances, 2017, 3(3): e1601545.
- [2] CHENG L, ABRAHAM J, HAUSFATHER Z, et al. How fast are the oceans warming?[J]. Science, 2019, 363(6243): 128-129.
- [3] 缪予晴, 徐海明, 刘佳伟. 西北太平洋夏季海洋热浪的变化特征及海气关系[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(1): 31-43.
- [4] PEARCE A, LENANTON R, JACKSON G, et al. The "marine heat wave" off Western Australia during the summer of 2010/11[R]. Fisheries Research Report No. 222, 2011.

- [5] 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.
- [6] SPARNOCCHIA S, SCHIANO M E, PICCO P, et al. The anomalous warming of summer 2003 in the surface layer of the Central Ligurian Sea (Western Mediterranean)[J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(2): 443-452.
- [7] OLITA A, SORGENTE R, NATALE S, et al. Effects of the 2003 European heatwave on the Central Mediterranean Sea: surface fluxes and the dynamical response[J]. *Ocean Science*, 2007, 3(2): 273-289.
- [8] 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: 1090-1103.
- [9] PEARCE A F, FENG M. The rise and fall of the 'marine heat wave' off Western Australia during the summer of 2010/11[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 112: 139-156.
- [10] CHEN K, GAWARKIEWICZ G G, LENTZ S J, et al. Diagnosing the warming of the Northeastern US Coastal Ocean in 2012: a linkage between the atmospheric jet stream variability and ocean response[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 2014, 119(1): 218-227.
- [11] BOND N, CRONIN M, FREELAND H, et al. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 3414-3420.
- [12] DONNER S D. An evaluation of the effect of recent temperature variability on the prediction of coral bleaching events[J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(5): 1718-1730.
- [13] HUGHES T P, KERRY J, ALVAREZ-NORIEGA M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 373-377.
- [14] 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.
- [15] 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 Evolution*, 2016, 6(11): 3583-3593.
- [16] OLIVER E C J, BENTHUYSEN J A, BINDOFF N L, et al. The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave[J]. *Nature Communication*, 2017, 29(8): 16101-16113.
- [17] 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: 273-285.
- [18] LOUGH J M. 1997-98: unprecedented thermal stress to coral reefs? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(23): 3901-3904.
- [19] DIAZ-ALMELA E, MARBÀ N, DUARTE C M. Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia Oceanica*) flowering records[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1): 224-235.
- [20] FRÖLICHER T L, FISCHER E M, GRUBER N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 360-364.
- [21] 余荣, 翟盘茂. 海洋和冰冻圈变化有关的极端事件、突变及其影响与风险[J]. *气候变化研究进展*, 2000, 16(2): 194-202.
- [22] 蔡榕硕, 刘克修, 谭红建. 气候变化对中国海洋和海岸带的影响、风险与适应对策[J]. *中国人口·资源与环境*, 2000, 30(9): 1-8.
- [23] HOBDAV A, ALEXANDER L V, PERKINS S E, et al. A hierarchical approach to defining marine heatwaves[J]. *Progress Oceanography*, 2016, 141: 227-238.
- [24] OLIVER E C J, DONAT M G, BURROWS M T, et al. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century[J]. *Nature Communication*, 2018, 9(1): 1324-1336.
- [25] SCHWIERZ C, CROCI-MASPOLI M, DAVIES H C. Perspicacious indicators of atmospheric blocking[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): 6125-6128.
- [26] RODELL M, BEAUDOING H K, L'ECUYER T S, et al. The observed state of the water cycle in the early twenty-first century[J]. *Journal of Climatology*, 2015, 28(21): 8289-8318.
- [27] SOLOMON S, QIN D, MANNING M, et al. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [28] HOLBROOK N J, SCANNELL H A, SEN G, et al. A global assessment of marine heatwaves and their drivers[J]. *Nature Communication*, 2019, 48(10): 2624-2631.
- [29] 蔡榕硕, 陈幸荣. 海洋的变化及其对中国气候的作用[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(9): 9-20.
- [30] ALLEN S K, PLATTNER G K, NAUELS A, et al. Climate change 2013: the physical science basis[C]//An Overview of the Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

(责任编辑: 张 勇)