

王庆元, 李清泉, 李琰, 等. 1982–2019 年渤、黄海海洋热浪时空变化特征分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 38–49, doi:10.12284/hyxb2021179
Wang Qingyuan, Li Qingquan, Li Yan, et al. Temporal and spatial characteristics of marine heat waves in the Bohai Sea and Yellow Sea during 1982–2019[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(12): 38–49, doi:10.12284/hyxb2021179

1982–2019 年渤、黄海海洋热浪时空变化特征分析

王庆元^{1,2}, 李清泉³, 李琰^{4*}, 刘一玮², 王亚男¹

(1. 天津市海洋气象重点实验室, 天津 300074; 2. 天津市气象台, 天津 300074; 3. 国家气候中心 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081; 4. 深圳大学 生命与海洋科学学院, 广东 深圳 518061)

摘要: 基于 1982–2019 年美国国家海洋和大气管理局最优插值海表温度资料, 运用多种统计方法分析了渤、黄海海洋热浪 (频次、持续时间、强度) 的时空分布特征及与之相关的环流背景。结果表明: (1) 海洋热浪具有一定的区域性差异, 更强、更持久和更多的海洋热浪多集中在渤海和北黄海海区; (2) 近 38 年来, 渤、黄海海洋热浪变化趋势也具有明显的区域性差异, 频次、年平均持续时间、年平均平均强度和最大强度总体呈增多、增强趋势, 但朝鲜半岛沿岸海域没有显著变化, 这与该地区的平均海温变化密切相关; (3) 根据日平均海表面温度将海洋热浪分为中等、强、严重和极端 4 种等级, 结果表明, 除极端海洋热浪外, 其他 3 种不同等级海洋热浪发生频次和增长趋势均存在显著的地理差异, 中等强度海洋热浪在渤、黄海所有区域均频次偏多且有显著的增加趋势, 而强和严重海洋热浪主要集中在我国的渤海海域, 但渤、黄海区域极端海洋热浪几乎没有发生; (4) 就渤、黄海区域平均而言, 38 年间, 共发生 83 次海洋热浪, 平均每年 2.2 次; 海洋热浪具有明显的季节差异, 不同等级强度的海洋热浪的多发季节均在夏季; (5) 合成分析结果表明, 夏季渤、黄海海洋热浪与大气环流密切相关, 当从高层到低层贝加尔湖区域上空表现为大范围的相当正压结构的暖性高压异常时, 盛行的下沉运动和高空西北气流, 带来了晴朗的天气和更多的地面净太阳短波辐射, 有利于渤、黄海海洋热浪的形成和维持。

关键词: 海洋热浪; 发生频次; 持续时间; 强度; 大气环流

中图分类号: P731.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)12-0038-12

1 引言

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 2019 年的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》指出, 自 1993 年以来全球海洋变暖加速, 其升温速度增加超过 1 倍^[1]。在持续升温背景下, 全球大部分海区出现了更频繁、强度更强且持续时间更长的海洋热浪^[2]。海洋热浪 (Marine Heat Wave, MHW) 是指海洋表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 超过一定阈值的海

水高温事件, 最大范围达数千千米, 且可以持续数天至数月^[3]。海洋热浪会导致一系列严重的甚至不可逆的海洋生态灾难^[4]。在过去 20 年里, 海洋生态系统和生态服务都面临着极大的高温热浪的潜在威胁, 如珊瑚白化和死亡^[5], 底栖生物栖息地和大范围海洋植物如海草林的丧失^[6], 海洋物种迁移、地点的变化以及存在潜在灭绝危险^[7]。海洋热浪还会影响渔业捕捞量和养殖业^[8-10]。鉴于海洋热浪的高频发性、高影响性和高致灾性, 其形成机制和变化趋势研究已成为全球变暖

收稿日期: 2020-08-15; 修订日期: 2021-05-11。

基金项目: 天津市科技计划项目 (20JCYBJC00640); 国家自然科学基金 (42176017); 深圳市基础研究资助项目 (JCYJ20200109110220482); 深圳市高等院校稳定支持计划项目 (20200810000724001)。

作者简介: 王庆元 (1978—), 男, 江西省吉安市人, 主要从事区域海洋气象灾害研究。E-mail: wqyx417@163.com

* 通信作者: 李琰, 女, 安徽省宿州市人, 主要从事极端海洋事件和区域海洋气候变化研究。E-mail: liyan_ocean@szu.edu.cn

下区域海洋研究的重点和热点问题之一^[11–12],也是海洋灾害风险评估和防范的关键点。研究表明中国东部海域(包括渤海、黄海和东海)的SST存在显著增暖趋势,其上升速率远超全球平均水平^[13]。渤、黄海是中国东部海域的一部分,也是海洋热浪发生的重灾区之一。在SST显著增暖背景下该海域的海洋热浪频次、持续时间和强度也呈显著上升趋势^[10],强海洋热浪事件也开始频繁出现,造成的经济损失和生态环境负面影响也相对更高。因此,了解渤、黄海海洋热浪的特征显然具有重要的科学和社会价值。

以往针对中国大陆邻近海域和西北太平洋海域的海洋热浪研究已取得了不少成果^[14–16],上述工作推动了区域大尺度范围的海洋热浪变化的研究,为认识极端海洋气候事件的响应特征提供了方法和理论支持。然而,在更小区域尺度上,海洋热浪的变化规律和成因仍需要进一步解读。渤、黄海是典型的内陆型浅海,受大陆气候影响显著,具有独特的气候和地理特征,对该区域海洋热浪的细致分析相对较少。另外,现有研究多关注的是海洋热浪频次、持续时间和强度等的变化,而对其他同等重要的指标特征研究较少。由于不同等级热浪事件对海洋生态环境的影响不同,Hobday等^[17]在2018年针对海洋热浪进行了分级研究,即按日平均SST强度将海洋热浪分成中等、强、严重和极端4个等级,对已识别的热浪事件进行等级划分。但目前对渤、黄海区域不同等级强度海洋热浪的分布特征和变化趋势的研究还很鲜见。此外,海洋热浪具有明显的季节差异特征,但对于其季节差异特征和热浪多发季节的驱动机制还不甚清楚。为此,本文将采用国际上常用的海洋热浪指数定义^[3],基于1982–2019年的高分辨率日平均SST数据,分析渤、黄海海洋热浪的发生频次、持续时间、平均强度和最大强度等关键指标的时空分布特征和变化趋势,分析热浪多发季节的大尺度环流背景,以期全面细致地认识半封闭浅海这一典型区域的海洋热浪的气候特征和时空变化规律,为今后深入探讨热浪发生的驱动机制,为渤、黄海海洋热浪灾害防御工作提供科学支撑。

2 资料和方法

2.1 研究区概况

本文研究区域为渤、黄海(31°40′~41°00′N, 117°35′~126°50′E),位于东亚季风、西北太平洋副热带高压和高压西风带等大尺度大气系统交互控制下,其三面被大陆包围,是一个典型的平均水深在18~44 m的半

封闭浅海(图1),具有独特的自然和生态环境^[18–19]。沿岸众多河川入海、水质肥沃,渤、黄海成为渔业资源优良的产卵场和索饵场,拥有我国多个国家级海洋牧场,素有“鱼、虾类摇篮”之称^[20]。受大陆气候影响显著,盛夏连晴高温和酷暑干旱的天气影响下极易出现高海温,给海洋渔业和生态资源带来严重甚至不可逆影响。

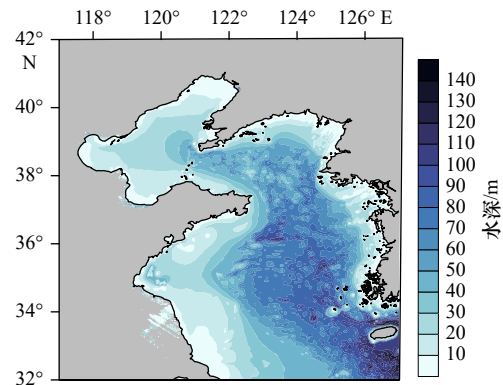


图1 研究区域及水深分布

Fig. 1 Bathymetry of the research region

2.2 资料来源和说明

本研究所用SST数据源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA),下载地址为<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/satellite-data-access-datasets>。利用最优插值法(Optimal Interpolation, OI)处理元数据得到日平均海表温度资料^[21],时段为1982年1月1日至2019年12月31日,空间分辨率为0.25°×0.25°。该产品充分融合了来自探路者卫星的改进型超高分辨率辐射计数据(Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)与浮标数据、船舶数据等现场观测数据。为了对卫星观测数据和现场观测资料间的偏差进行校正,卫星观测数据被分为白天和夜间两类,利用现场观测数据修正白天遥感数据产生的偏差,然后使用最优插值算法计算生成融合产品。基于每种数据类型的信噪比图,合并经偏差校正的昼间和夜间卫星观测海温、船舶和浮标观测海温^[22]。由于资料分辨率高,具有很好的一致性和连续性,因此在海岸带和沿海地区的海洋气候、生态环境和海洋灾害监测预警等方面得到了广泛的应用^[23]。在讨论年平均SST变化速率空间分布时,采用Hadley中心的全球海冰和海表温度逐月格点资料(HadISST)^[24]做了对比验证分析,以确定结论的可靠性。该套数据融合了大量海洋站点观测数据,在1980年后又同化了部分卫星数据,空间分辨率为1°×1°,下载地址为<http://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html>。

本文还采用了美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析资料^[25]中的月平均位势高度场和辐射通量资料,下载地址为 <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,其中高度场共17层,时段为1948年1月至2019年12月,文中的夏季是指6–8月。

2.3 研究方法

2.3.1 基于百分位阈值法的海洋热浪指标

按照Hobday等^[3]的定义,海洋热浪是指在一定海域内发生的一个离散的、持续的、异常的暖水事件。具体来说,离散意味着海洋热浪是一个具有明确开始和结束日期的可识别事件,持续意味着它至少连续5 d日平均SST高于其第90百分位阈值;两个连续事件之间的间隔小于2 d,被视为一个连续事件。本研究采用日平均SST的第90百分位数作为海洋热浪阈值,而不是第95或第99百分位数,是为了能够检测出更多的异常事件。这个是一个重要的考虑因素,因为即使超过第90百分位阈值的异常暖海温仍会对当地生态系统构成威胁^[7]。MHWs有一组用于描述其属性的度量指标^[3],本研究主要考虑以下4个度量指标:热浪发生频次、持续时间、平均强度和最大强度(表1)。

表1 海洋热浪指标定义

Table 1 Definitions of marine heat wave indices

极端指标	英文名称	定义	单位
频次	frequency	每年发生的热浪次数	次数
持续时间	duration	某次热浪过程中日海温距平超过极端高温阈值的总天数	d
平均强度	mean intensity	某次热浪持续期间平均海温距平值	$^{\circ}\text{C}$
最大强度	max intensity	某次热浪持续期间最大海温距平值	$^{\circ}\text{C}$

本研究在分析渤、黄海海域海洋热浪(频次、持续时间、平均强度和最大强度)的空间分布特征和趋势分布特征时,对于某日SST,取同期局地SST从低到高排序后的第90百分位数,这样确定的阈值随时间和空间变化,每一个格点和每一个日期都对应着不同的阈值。MHWs 4个度量指标中,频次即为每个格点发生的海洋热浪的次数;持续时间即为每个格点发生的海洋热浪的持续时间;平均强度即为每个格点发生的海洋热浪,所有超过阈值部分的SST距平的平均值;最大强度即为每个格点发生的海洋热浪,所有超过阈值部分的SST距平的最大值。在分析区域平均的海洋热浪的气候特征和长期趋势时,频次、持续时间、平均强度和最大强度均为该海域SST进行区域

平均后计算得到的数值。

2.3.2 不同强度等级热浪的确定

按照Hobday等^[7]的定义,MHW按日平均SST被分为以下4个强度等级:当至少连续5 d日平均SST高于其第90百分位阈值时记为中等强度海洋热浪(Moderate MHW, category I);当日平均SST与气候平均态的差异超过第90百分位阈值与气候平均态之间差异的2倍,记为强海洋热浪(Strong MHW, category II);当与气候平均态的差异超过3倍,为严重热浪(Severe MHW, category III);当差异是4倍时,则为极端热浪(Extreme MHW, category IV)。

3 结果分析

3.1 气候概况

3.1.1 海洋热浪的频次、持续时间、平均强度和最大强度的空间分布

图2给出近38年(1982–2019年)平均的渤、黄海南年平均热浪频次、持续时间、平均强度和最大强度的空间分布。图中,渤、黄海南年平均海洋热浪频次和持续时间的空间分布形态较为类似。总体而言,高值中心主要出现在渤海(包括辽东湾、莱州湾和渤海湾)和北黄海(34°N 以北)。由图2a可见,渤、黄海海洋热浪平均每年发生2~3次,渤海海洋热浪出现频次较高,平均每年有2.5次以上的海洋热浪过程。由图2b可见,平均每年海洋热浪的持续时间为20~35 d,其中渤海和北黄海海域持续时间较长,在30 d以上。图2c和图2d显示了海洋热浪平均强度和最大强度的空间分布,反映了热浪的炎热程度和危害程度。图中平均每年海洋热浪的平均强度为 $1.5 \sim 2.5^{\circ}\text{C}$,平均每年海洋热浪的最大强度为 $2.0 \sim 3.5^{\circ}\text{C}$,平均强度和最大强度最大的区域均集中在山东半岛以东海域($34^{\circ} \sim 39^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ} \sim 125^{\circ}\text{E}$)。

3.1.2 区域平均海洋热浪的频次、持续时间、平均强度和最大强度

就渤、黄海区域平均而言,1982–2019年该地区共发生83次海洋热浪,平均每年2.2次。图3显示了区域平均的海洋热浪的主要特征。月际尺度上,1982–2019年间,渤、黄海平均每月发生7次海洋热浪,其中夏季(6–8月)发生次数最多,8月一共出现了15次海洋热浪,平均每年夏季出现0.8次热浪过程;秋季中的11月热浪发生次数最少,仅3次(图3a)。区域海洋热浪平均持续时间为11.2 d(83次热浪的平均值,下同),其中46次海洋热浪持续时间在5~10 d,

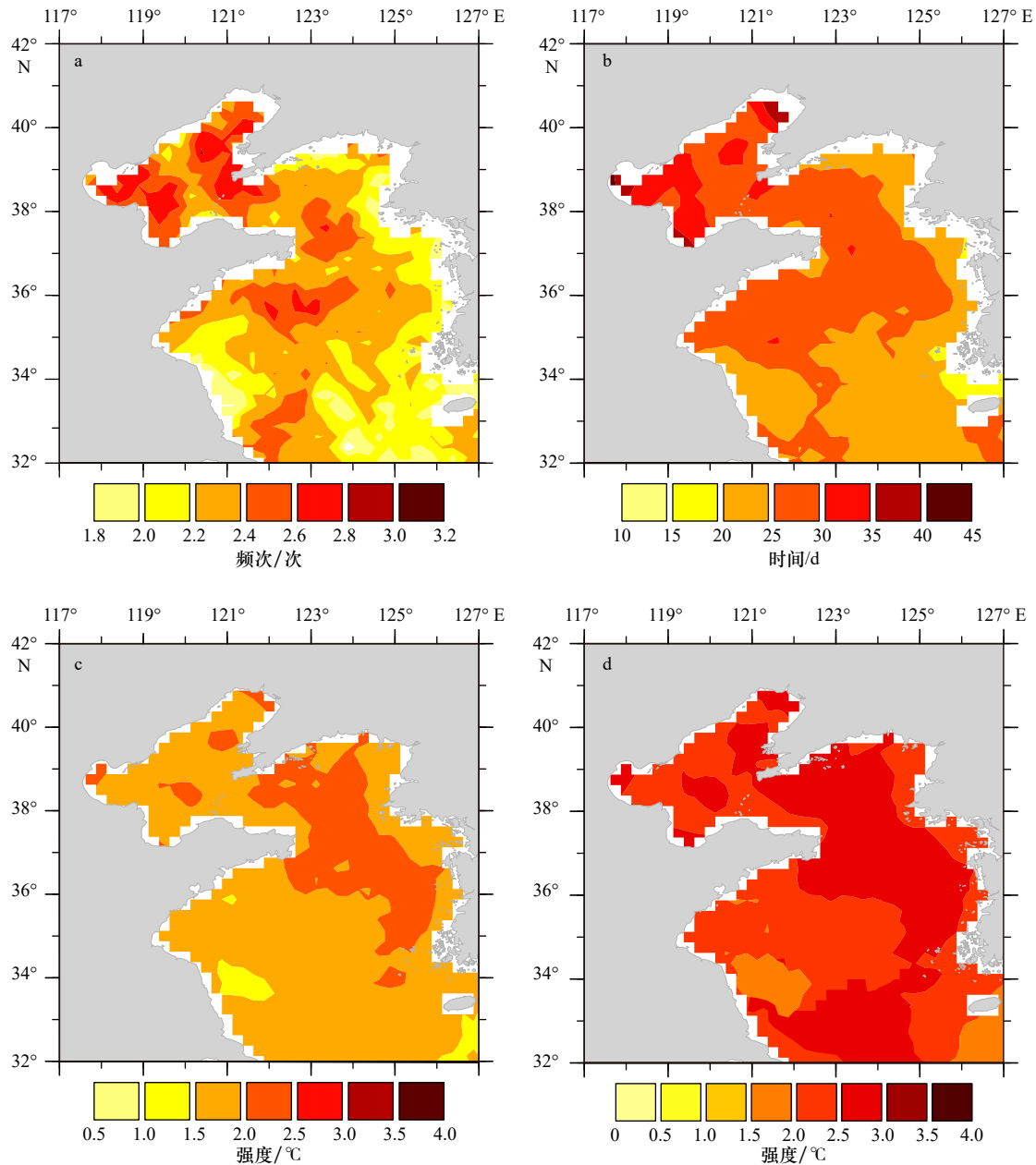


图2 1982–2019年渤和黄海平均海洋热浪频次(a)、持续时间(b)、平均强度(c)和最大强度(d)的空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of mean annual frequency (a), duration (b), mean intensity (c) and the maximum intensity (d) of marine heatwaves in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

占 55%; 持续时间最长达 45 d, 发生在 2017 年 7 月 1 日至 2017 年 8 月 14 日(图 3b); 相比与全球其他海域的海洋热浪过程^[26–27], 渤、黄海区域海洋热浪持续时间相对较短, 没有出现季节尺度以上的超长海洋热浪。平均强度的均值为 2.02°C, 最大平均强度为 3.40°C, 大部分海洋热浪的平均强度在 1.50~3.0°C 间, 占 72.3%。最大强度的均值为 2.53°C, 最大强度的最大值达 5.16°C(发生在 2018 年 8 月 7 日, 当日最大强度已超过 2 个标准差), 大部分海洋热浪的最大强度在 1.50~3.50°C 间, 占 77.1%。

3.1.3 不同等级强度海洋热浪发生情况

过去尽管对海洋热浪问题进行了一系列的研究, 但缺乏对不同等级强度热浪的细致分析和区域间差异的比较。强海洋热浪可对海洋生态系统的结构稳定产生更严重的影响, 甚至导致不可逆转的转变。因此本节对中等、强、严重和极端 4 种不同等级海洋热浪的发生频率的特点进行分析。图 4 给出了不同等级海洋热浪发生频次的空间分布。由图 4 可见, 1982–2019 年, 渤、黄海所有区域中等海洋热浪发生频次最多, 平均在 1 次/a 到 2.2 次/a 之间(图 4a); 强海洋热浪

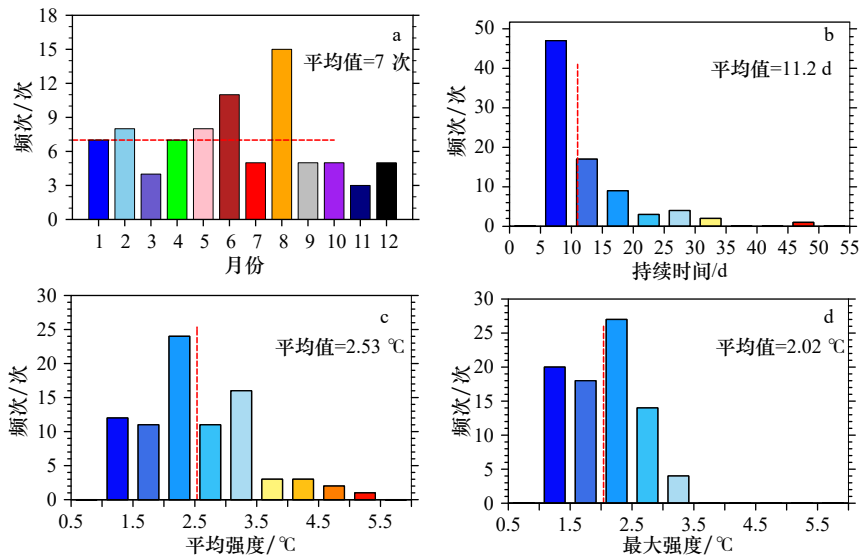


图3 1982–2019年渤、黄海区平均海洋热浪关键指标分布直方图

Fig. 3 Histograms of the four key indicators of marine heat waves in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

发生频次次之,在0.2次/a到1次/a之间(图4b);严重海洋热浪和极端海洋热浪发生频次均偏少,其中极端海洋热浪最少,几乎可以忽略不计(图4c,图4d)。除极端海洋热浪外,其他3种等级海洋热浪发生次数存在显著的地理差异,中等强度海洋热浪在渤、黄海所有区域均有发生且频次偏多,而强和严重等级海洋热浪主要集中在渤海海域。

就渤、黄海区域平均而言,该地区共发生的83次海洋热浪中,主要为中等强度海洋热浪,占81.9%。强海洋热浪占16.8%,仅发生了1次严重海洋热浪,没有极端海洋热浪发生(图5)。从月际尺度上看,不同等级海洋热浪均集中在夏季和夏秋转换月份(6–9月),以8月最为显著,可见夏季是渤、黄海地区不同强度等级海洋热浪频发的季节。

3.2 海洋热浪趋势

3.2.1 海洋热浪频次、持续时间、平均强度和最大强度趋势空间分布

从图6中可见,渤、黄海海洋热浪频次、持续时间、平均强度和最大强度4项指标的年际变化趋势空间分布特征极为相似。在全球变暖的大背景下,渤、黄海大部分地区海洋热浪频次、持续时间、平均强度和最大强度出现了显著性的增多、更长和增强的特征,整体呈现渤海高于黄海,西部高于东部的分布特征,其中朝鲜半岛沿海各指标的变化趋势不明显,没有超过0.05的信度检验,而渤海近岸区域,如渤海湾和莱州湾各指标变化趋势最为明显,海洋热浪发生频次的增加速率超过1.2次/(10a),持续时间增长速率超过10d/(10a),平均强度和最大强度的增强速率分

别超过0.4°C/(10a)和0.6°C/(10a)。

渤、黄海海域海洋热浪变化趋势表现出明显的空间不均一性特征。IPCC《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》指出,不断变化的气候可导致极端气候事件在频率、强度、空间范围、持续时间和发生时间上的变化,并能够导致前所未有的极端气候事件。最新的研究也表明平均海水增暖是导致全球范围海洋热浪频发和增强等的主要原因^[28]。因此,我们给出渤、黄海区域1982–2019年间年平均海表温度变化趋势(图7)。结果表明,两套SST资料都呈现出一致的增暖趋势空间不均一性,即渤、黄海近岸海域增暖显著,而朝鲜半岛沿海增暖趋势不明显,没有超过显著性检验。OISST数据的结果与HadISST的结果基本一致,只是HadISST变化幅度略小。本文的结果与前人的研究基本一致,即MHW频次和强度的增加趋势很可能是平均温度的长期增暖趋势造成的。渤、黄海西部海温均值上升幅度大,海温变率也较大,因此更容易发生高强度、高频次的海洋热浪,海洋热浪变化趋势的分布型也受长期增暖趋势的分布型决定。朝鲜半岛沿海海温增暖不显著的结果与前人发表的结果一致^[14,29]。

3.2.2 不同等级强度海洋热浪变化趋势

由于极端海洋热浪在渤、黄海海域几乎没有发生,图8只给出了1982–2019年渤、黄海海域3种不同强度海洋热浪年发生频次变化趋势的空间分布。从图8可见,近38年渤、黄海海区3种等级海洋热浪均呈上升趋势,但不同区域增长速率显著不同。中等强度海洋热浪在渤、黄海海区的大部分区域增长趋

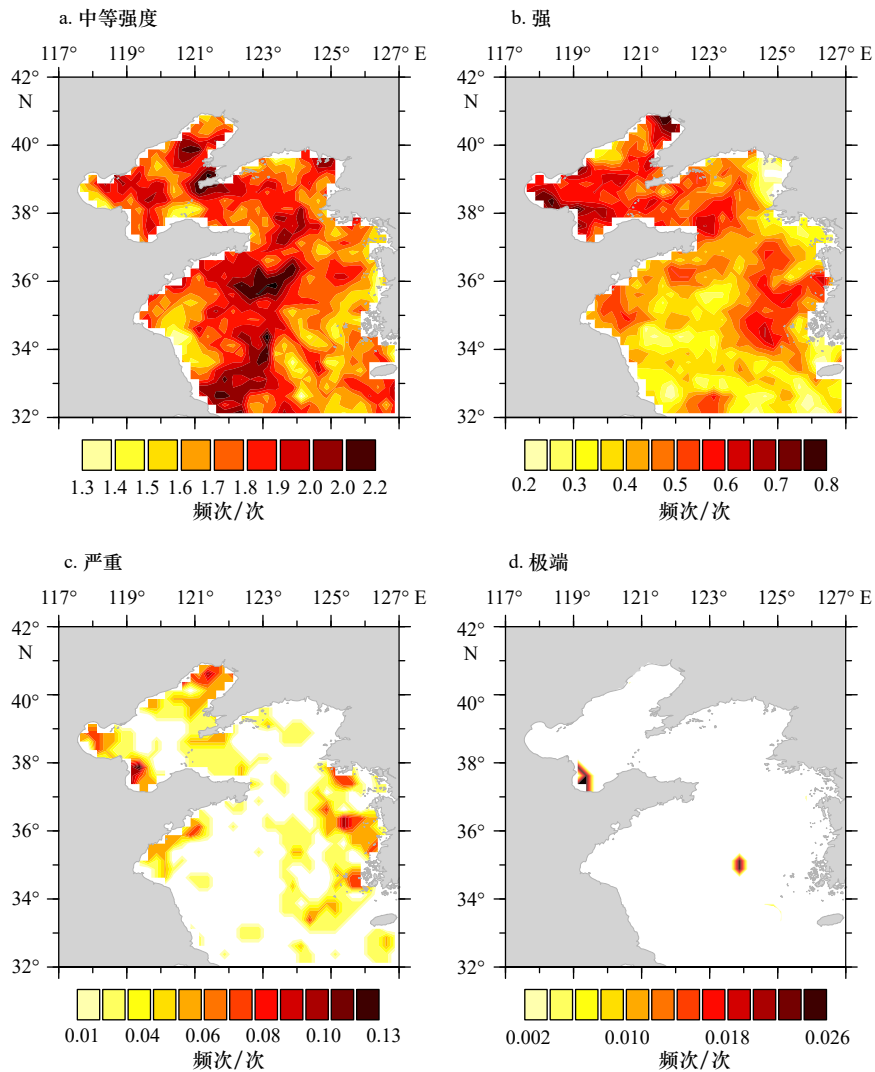


图4 1982-2019年渤、黄海区域4种等级海洋热浪年平均发生频次分布

Fig. 4 Spatial distributions of mean annual frequency of 4 marine heat wave categories in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

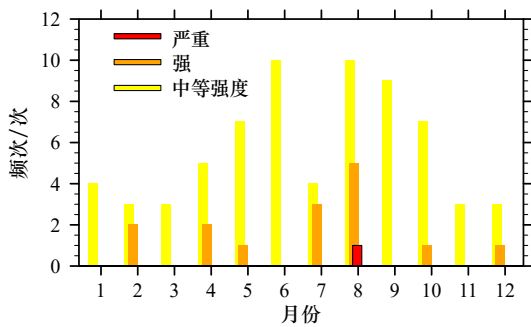


图5 1982-2019年渤、黄海区域3种等级海洋热浪各月发生频次分布

Fig. 5 Monthly occurrence frequency of the three level marine heat waves in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

势显著且通过 95% 显著性检验, 增长趋势最快的区域位于渤、黄海西部; 强和严重海洋热浪过程在渤海海域增长较快, 且通过 95% 的显著性检验, 但在其他区域变化趋势较弱, 没有通过显著性检验。

3.3 大尺度大气环流背景的影响

海表温度变化的影响因子通常包括海气相互作用和海洋动力作用两类, 前者包括非绝热加热 (辐射、感热输送和潜热释放) 和大气环流场变化等, 后者包括海流变化及厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO)、印度洋偶极子 (IOD) 和北太平洋年代际振荡 (PDO) 等海洋内部振荡作用 [19, 30-33]。尽管中国近海海流中东海黑潮的动力过程对海洋热浪的形成和持续有较大的影响 [16], 由于渤、黄海为水深较浅的边缘海, 受大陆气候影响显著, 海洋表面温度与大气环流状况关系最为密切, 同时考虑到海洋热浪多发生在夏季, 因此, 我们利用 NCEP/美国国家大气研究中心 (NCAR) 再分析位势高度场资料重点分析北半球欧亚大陆夏季环流异常特征及其对应的辐射通量场特征。

图 9 给出 1984-1993 年 (海洋热浪低频时期) 和 2001-2010 年 (海洋热浪高频时期) 合成得到的高-中-

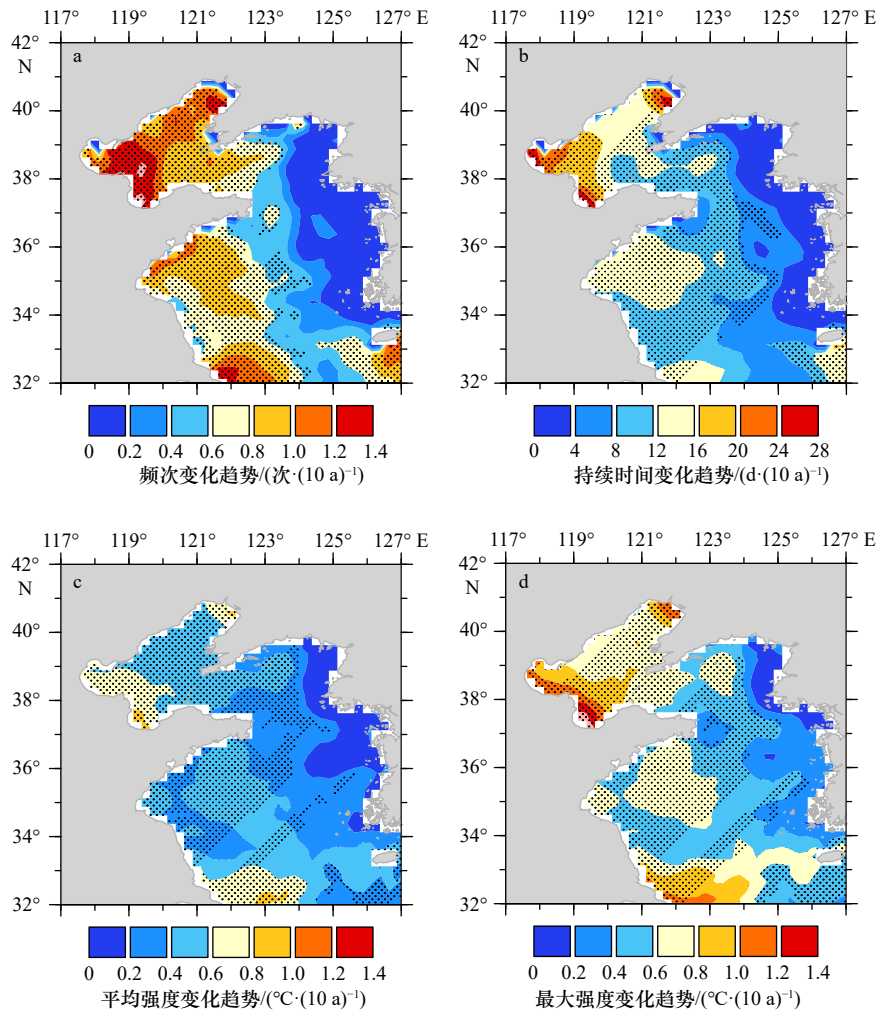


图 6 1982–2019 年渤、黄海海洋热浪发生频次(a)、持续时间(b)、平均强度(c)和最大强度(d)的变化趋势

Fig. 6 Trends of the marine heat wave frequency (a), duration (b), mean intensity (c) and maximum intensity (d) in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

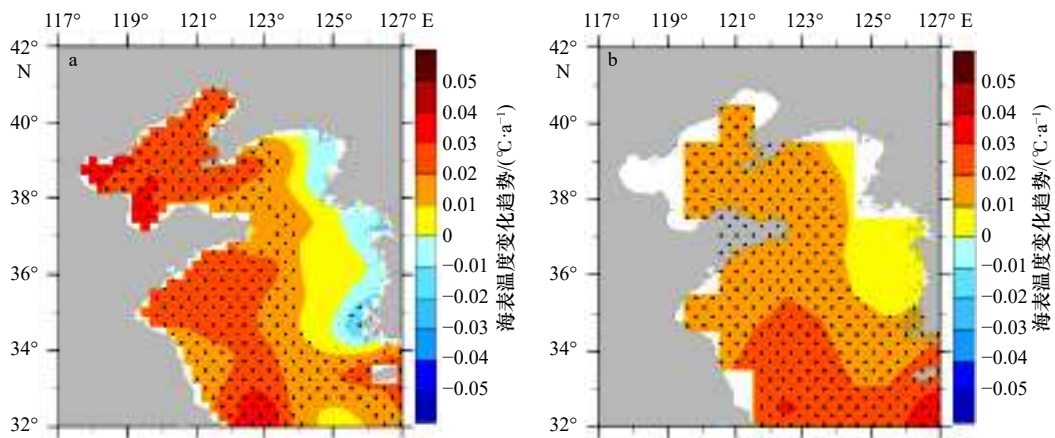


图 7 1982–2019 年渤、黄海年平均海表温度的变化趋势

Fig. 7 Trends of the annual mean sea surface temperature in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

a. OISST 海表温度资料; b. Hadley 中心海表温度资料。黑点代表变化趋势通过 95% 信度检验

a. Sea surface temperature data from OISST; b. sea surface temperature data from Hadley Center in England. The black dots indicate the area where the trends of SST are significant with a 95% confidence level

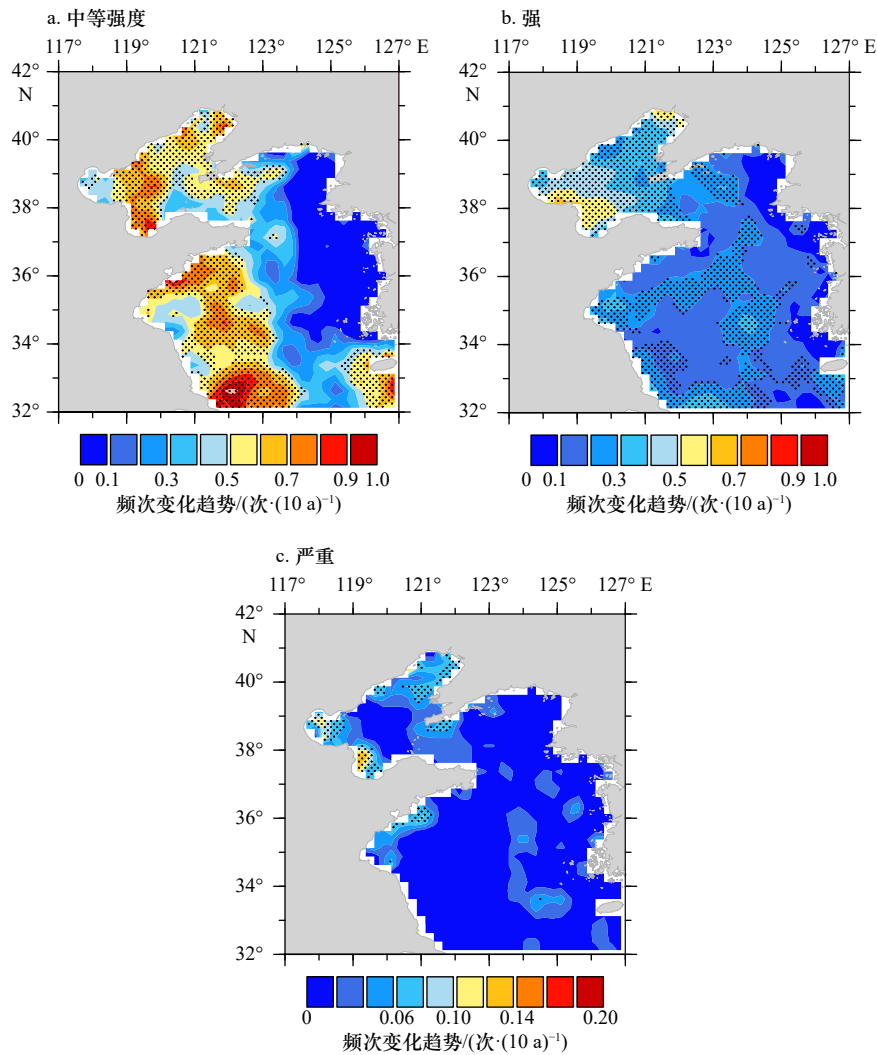


图8 1982–2019年渤、黄海区域3种等级海洋热浪年平均发生频次变化趋势

Fig. 8 Trends of 3 marine heat wave categories frequency in the Bohai Sea and Yellow Sea from 1982 to 2019

低层位势高度场及其距平场, 距平场的计算是相对于1982–2011年气候态进行的。从图9可见, 在早期的低频时段(图9a, 图9c, 图9e), 贝加尔湖区域($40^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)表现为大范围的相当正压结构的低压异常。而在后期的高频时段(图9b, 图9d, 图9e)贝加尔湖区域表现为大范围的相当正压结构的暖性高压距平(500 hPa最大距平中心为16 gpm), 500~1 000 hPa以异常下沉气流为主, 高-中-低层环流配置对渤、黄海海洋热浪非常有利。受这种环流型的影响, 渤、黄海位于加深的东亚大槽之后, 贝加尔湖脊增强之前, 因此盛行下沉运动和高空西北气流, 阻挡了高纬冷空气的南下, 带来了晴朗的天气和更多的地面净太阳短波辐射(图9h), 这些条件有利于该区域海洋热浪的形成。图10给出了1982–2019年夏季500 hPa位势高度场的变化趋势。夏季500 hPa位势高度在贝加尔湖周围表现出明显的增强趋势, 这种趋

势可以看作是对全球增暖的响应, 表明贝加尔湖高压脊在过去几十年中一直在增强, 这也可能是渤、黄海海洋热浪的增长趋势的原因之一。

4 结论和讨论

本文对1982–2019年渤、黄海海域海洋热浪时空分布和变化规律进行了分析, 并在此基础上进一步分析了海洋热浪的多发季节, 分析了夏季渤、黄海海洋热浪发生的大气环流背景。具体结论概括如下:

(1) 渤、黄海海洋热浪的年发生频次、年平均持续时间、年平均平均强度和最大强度存在一定区域性差异, 其中渤海是海洋热浪区高发区域, 其持续时间和最大强度也相对其他区域偏长、偏强。

(2) 近38年来, 渤、黄海海区海洋热浪的年频次、年平均持续时间、年平均平均强度和最大强度总体呈增多、增强趋势, 但也表现出显著的区域差异,

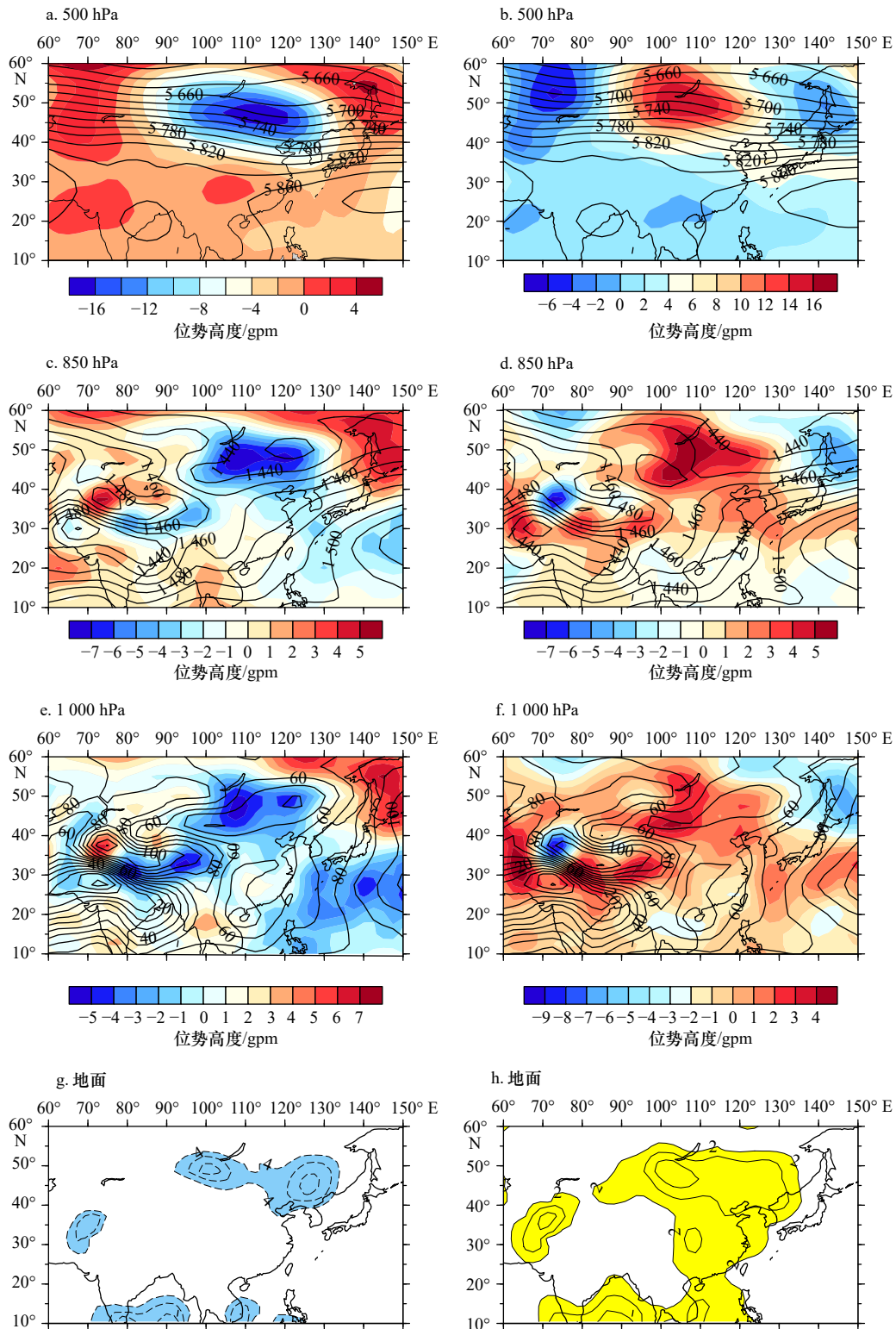


图9 海洋热浪低频时期(1984–1993年)(a, c, e)和海洋热浪高频时期(2001–2010年)(b, d, f)合成得到的高层(500 hPa)–中层(850 hPa)–低层(1 000 hPa)位势高度(等值线, 单位: gpm)和位势高度距平场(阴影, 单位: gpm)及低频时期(g)和高频时期(h)的地面太阳短波辐射通量距平(蓝色阴影为小于 $-2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的区域; 黄色阴影为大于 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的区域; 等值线间隔为 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

Fig. 9 Composite circulation of 500 hPa, 850 hPa, 1 000 hPa geopotential height and anomalies for summer of the years of low-frequency (1984–1993) (a, c, e) and for summer of the years of high-frequency (2001–2010) (b, d, f) (unit: gpm); ground solar shortwave radiation flux anomalies for summer of the years of low-frequency (g) (blue shaded area: lower than $-2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) and high-frequency (h) (yellow shaded area: higher than $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)

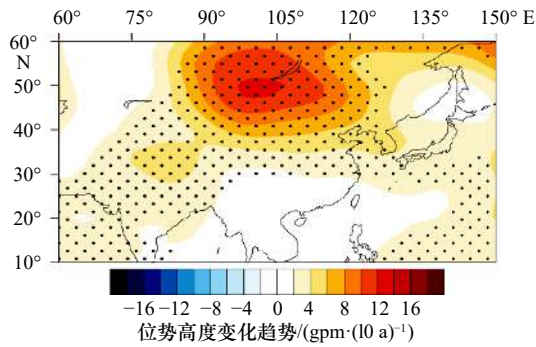


图 10 1982–2019 年夏季 500 hPa 位势高度场的变化趋势

Fig. 10 Spatial Trends of 500 hPa geopotential height in summer from 1982 to 2019

黑点代表变化趋势通过 95% 信度检验

The black dots indicate the area where the trends are significant with a 95% confidence level

即朝鲜半岛沿岸区域没有明显的变化趋势, 没有通过 95% 信度性检验。渤、黄海海洋热浪的线性增加趋势主要与该区域平均海温的上升有关。

(3) 近 38 年来, 渤、黄海区域中等、强和严重等级的海洋热浪发生频次均呈上升趋势但显著上升的区域存在较大差异。中等程度海洋热浪在整个海域都有发生且上升趋势显著, 而强和严重等级的海洋热浪多发生在渤海和黄海西部区域。就渤、黄海区域平均而言, 1982–2019 年共出现 83 次热浪, 热浪频次具有明显的季节差异, 不同等级强度海洋热浪的多发

季节都在夏季。而极端等级海洋热浪在渤、黄海区域几乎没有发生。

(4) 从大气环流特征来看, 夏季该地区海洋热浪的发生与贝加尔湖区域的正位势高度距平场密切相关。当从高层到低层贝加尔湖区域上空表现为大范围的相当正压结构的暖性高压异常时, 盛行的下沉运动和高空西北气流, 阻挡了高纬冷空气的南下, 带来了晴朗的天气和更多的地面净太阳短波辐射, 这些条件有利于渤、黄海海洋热浪的形成。

目前, 全球升温已经对全球气候变化产生严重甚至不可逆的影响, 而在进一步增暖条件下, 一些极端天气事件, 如极端暖事件、强降水、强台风等频次和幅度将会明显增多和加大, 一些百年一遇的极端事件可能会变成五十年一遇甚至一年一遇, 暖水珊瑚、南极冰盖、亚马逊雨林等一些易受威胁的系统将受到很大的冲击^[4]。本文的研究表明进入 21 世纪后渤、黄海海洋热浪发生频率越来越高, 持续时间越来越长, 强度越来越强。因此, 建立全球及区域范围的海洋热浪预警应急体系, 包括建立区域定性概念模型和定量数值模式方法开展海洋热浪季节气候预测; 建立提高天气尺度海洋热浪预报技术; 积极开展海洋热浪的预测和预警的发布; 建立高温热浪的监测、风险评估和区化、对策制定制度; 建立统一指挥系统和相关部门的协同应急预案等一系列工作是十分必要和紧迫的, 也是我们减缓、适应和应对气候变化的重中之重。

参考文献:

- [1] Abram N, Adler C, Bindoff N L, et al. Summary for policymakers. In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate[R]. Geneva: IPCC, 2019.
- [2] Oliver E C J, Lago V, Hobday A J, et al. Marine heatwaves off eastern Tasmania: Trends, inter-annual variability, and predictability[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 161(2): 116–130.
- [3] 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.
- [4] Frölicher T L, Laufkötter C. Emerging risks from marine heat waves[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–4.
- [5] Hughes T P, Kerry J, Álvarez-Noriega M, et al. Global warming and recurrent mass bleaching of corals[J]. *Nature*, 2017, 543(7645): 373–377.
- [6] Wernberg T, Bennett S, Babcock R C, et al. Climate-driven regime shift of a temperate marine ecosystem[J]. *Science*, 2016, 353(6295): 169.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kim J Y, Han I S. Sea surface temperature time lag due to the extreme heat wave of August 2016[J]. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 2017, 23 (6): 677–683.
- [10] Li Yan, Ren Guoyu, Wang Qingyuan, et al. More extreme marine heatwaves in the China seas during the global warming hiatus[J]. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(10): 1–10.
- [11] 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.

- [12] Darmaraki S, Somot S, Sevault F, et al. Future evolution of marine heatwaves in the Mediterranean Sea[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3/4): 1371–1392.
- [13] Wu Lixin, Cai Wenju, Zhang Liping, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2: 161–166.
- [14] Lee S, Park M S, Kwon M, et al. Two major modes of East Asian marine heatwaves[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(7): 074008.
- [15] Yao Yulong, Wang Junjie, Yin Jianjun, 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: e2019JC015801.
- [16] 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.
Miao Yuqing, Xu Haiming, Liu Jiawei. Variations of summer marine heat waves in the Northwest Pacific and associated air-sea interaction[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(1): 31–43.
- [17] Hobday A J, Oliver E C J, Sen Gupta A, et al. Categorizing and naming marine heatwaves[J]. *Oceanography*, 2018, 31(2): 1–13.
- [18] Belkin I M. Rapid warming of large marine ecosystems[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 81(1/4): 207–213.
- [19] Pei Yuhua, Liu Xiaohui, He Hailun. Interpreting the sea surface temperature warming trend in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 8: 1558–1568.
- [20] 孙中之, 高文斌, 孟维东, 等. 黄渤海区张网渔业[J]. *渔业科学进展*, 2012, 33(3): 94–101.
Sun Zhongzhi, Gao Wenbin, Meng Weidong, et al. Stow net fishery in the Yellow Sea and Bohai Sea area[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2012, 33(3): 94–101.
- [21] Banzon V, Smith T M, Chin T M, et al. A long-term record of blended satellite and in situ sea-surface temperature for climate monitoring, modeling and environmental studies[J]. *Earth System Science Data*, 2016, 8(1): 165–176.
- [22] Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(22): 5473–5496.
- [23] Knapp K R, Ansari S, Bain C L, et al. Globally gridded satellite observations for climate studies[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92: 893–907.
- [24] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14): 1063–1082.
- [25] Kalnay E, Kanamitsu R, Kistler W, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(3): 437–471.
- [26] Frolicher T L, Fischer E M, Gruber N. Marine heatwaves under global warming[J]. *Nature*, 2018, 560(7718): 360–364.
- [27] Benthuisen J A, Oliver E C J, Feng M, et al. Extreme marine warming across tropical Australia during austral summer 2015–2016[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(2): 1301–1326.
- [28] Oliver Eric C J. Mean warming not variability drives marine heatwaves trends[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(3/4): 1653–1659.
- [29] Kim S J, Woo S H, Kim B M, et al. Trends in sea surface temperature (SST) change near the Korean peninsula for the past 130 years[J]. *Ocean and Polar Research*, 2016, 33(3): 281–290.
- [30] Benthuisen J A, Feng M, Zhong L, et al. Spatial patterns of warming off Western Australia during the 2011 Ningaloo Niño: Quantifying impacts of remote and local forcing[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 91 (S C): 232–246.
- [31] Bond N A, Cronin M F, Freeland H, et al. Causes and impacts of the 2014 warm anomaly in the NE Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42 (9): 3414–3420.
- [32] 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.
- [33] Cai Rongshuo, Tan Hongjian, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the East Asia monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(22): 8987–9005.
- [34] Wang Shanshan, Yuan Xing, Wu Renguang. Attribution of the persistent spring-summer hot and dry extremes over Northeast China in 2017[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(1): S85–S89.

Temporal and spatial characteristics of marine heat waves in the Bohai Sea and Yellow Sea during 1982–2019

Wang Qingyuan^{1,2}, Li Qingquan³, Li Yan⁴, Liu Yiwei², Wang Ya'nan¹

(1. *Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China*; 2. *Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China*; 3. *Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Centre, Beijing 100081, China*; 4. *College of Life Sciences and Oceanography, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China*)

Abstract: Based on National Oceanic and Atmospheric Administration daily optimum interpolation sea surface temperature (SST) data set from 1982 to 2019, spatial-temporal changes in marine heat wave (MHW) (frequency, duration, intensity) in the Bohai Sea and Yellow Sea and associated circulations were analyzed using various statistical methods. Results show that: (1) there are obvious regional differences in MHW. More frequency, longer duration, more intensity MHWs are all located at the most part of the Bohai Sea and northern Yellow Sea. (2) In recent 38 years, the annual frequency, annual average duration, annual average intensity and maximum intensity of the marine heat waves in the Bohai Sea and Yellow Sea have generally increased and strengthened, together with spatial heterogeneity. The trends at the coast of the Korean Peninsula coastal show insignificant trend. (3) MHWs were classified into four levels by daily SST: moderate, strong, severe and extreme. Result shows that except extreme MHWs, there are significant geographic differences in the frequency and trend of the other three MHW levels. Moderate MHWs are more frequent and have a significant increasing trend in most part of the Bohai Sea and Yellow Sea, while strong and severe marine heat waves are mainly concentrated in the Bohai Sea. However, extreme MHW in this region was hardly occurred. (4) Regional, there were 83 MHWs occurred in the Bohai Sea and Yellow Sea during 1982 to 2019, with an average of 2.2 times per year. The frequencies of MHWs appeared seasonal variation obviously. More MHWs with different levels of intensity occurred in summer. (5) Composite analysis shows that, summer MHWs in the Bohai Sea and Yellow Sea have significant relationship with atmospheric circulation. Barotropic positive geopotential height anomalies centered on Lake Baikal were favorable for anomalous descending air motion in the lower troposphere and west-northerly winds in high troposphere, there should be more clear days and hence more MHWs during the high-solar-radiation summer period.

Key words: marine heat wave; frequency; duration; intensity; atmospheric circulation