

南海西北部海洋热浪特征

王凌飞¹, 谭泓², 冀卫东², 陈海军³, 石云瑛^{4*}

(1. 中国人民解放军92248部队, 河南 许昌 461000; 2. 金风科技股份有限公司, 北京 100176; 3. 辽宁省自然资源事务服务中心, 辽宁 沈阳 1100332; 4. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 基于欧洲中心再分析数据, 分析了南海西北部海洋热浪的时空特征及对应的10 m风场变化特征。南海西北部海洋热浪强度在空间上主要在海南岛东侧存在3个大值中心, 其高发区域也位于海南岛东侧。南海西北部海洋热浪表现出显著的季节差异, 平均强度春季最强、秋季次之、夏季最弱; 平均持续天数冬季和春季最多、夏季最少; 发生频率秋季最多、春季次之、冬季最少。在海洋热浪期间, 冬季、夏季和秋季的10 m风场主要表现为减弱, 而春季以增强趋势最为显著。

关键词: 海洋热浪; 南海西北部; 年际变化; 风场变化

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)05-0043-09

0 引言

海洋热浪是指海表温度异常偏高并持续数天至数月的气候极端事件^[1]。近年来, 南海作为西太平洋最大的边缘海, 海洋热浪事件频发, 对海洋生态系统、渔业资源和区域气候产生了深远影响^[2-3]。

南海海洋热浪一般在南海北部陆架区域和北部湾最为强烈, 其次为越南东岸, 持续时间一般为7~15天^[4-5]。在季节尺度上, 通常表现为冬半年较强而夏半年较弱。从长期变化来看, 南海海洋热浪的平均强度及爆发频率均呈增强趋势, 同时持续时间也在增加^[6-7]。南海海洋热浪的爆发一般受净热通量驱动, 其次为海洋热平流; 从大尺度角度来看, 南海海洋热浪与厄尔尼诺的关联性非常强^[8-10]。

南海西北部是南海西边界流的上游区域, 该海域的西边界流表现出多时间尺度变化特征, 是南海主流系的强动能区^[11-13]。另一方面, 该海域中尺度涡活跃, 且存在强烈的西边界流与中尺度涡相互作用^[14]。

虽然南海海洋热浪已有很多研究, 但是针对南

海西北部海洋热浪特征的深入分析及其发展过程中的风场变化尚未见报道。因此本文针对南海西北部海洋热浪特征进行分析。

1 数据与方法

1.1 数据

本文所采用的数据来自欧洲数据中心的第五代大气再分析数据集(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis 5, ERA5), 时间为1979—2021年, 空间分辨率为0.25°, 时间分辨率为逐日。ERA5基于多种观测数据(如卫星、地面站、探空仪等)和数值天气预报模型, 通过数据同化技术生成, 已在海洋大气研究中得到广泛应用。数据下载地址为: <https://cds.climate.copernicus.eu/>。本文选取的数据变量为海表温度及海表10 m风速。

1.2 方法

本文的海洋热浪参照Hobday等^[1]的定义。首先定义气候态, 选取至少30年的数据, 气候态定义

收稿日期: 2025-04-01。

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ22-H132)。

作者简介: 王凌飞(1983-), 男, 工程师, 学士, 主要从事航空气象保障工作。E-mail: 18631915575@qq.com

*通信作者: 石云瑛(1984-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋预报及数值模拟工作。E-mail: shiyunying_305@163.com

以该天为中心进行 11 d 滑动平均后的 30 年以上数据的平均值,即:

$$T_m(j) = \sum_{y=y_s}^{y_e} \sum_{d=j-5}^{j+5} \frac{T(y,d)}{11(y_e - y_s + 1)} \quad (1)$$

式中: T_m 为气候态温度; j 为一年中的第 j 天; y 为选取的第 y 年; y_e (y_s) 为结束(开始)的年份。

基于每日气候态数据,计算得到每日温度异常,进而定义海洋热浪,即:当海表温度连续 5 天以上超过其 90% 百分位值时,则定义该时段内发生了海洋热浪。热浪发生期间海表温度异常的平均值定义为海洋热浪的平均强度,从热浪第一天到最后一天的总天数定义为热浪的持续天数。

2 南海西北部海洋热浪的空间分布特征

从全年平均尺度看,南海西北部的海洋热浪在海南岛以东最强(见图 1a),呈现出 3 个大值中心,最大可达 1.3 °C 以上,且从北部向南逐渐减弱;而在远离海南岛后,海洋热浪强度明显减弱,降至 1.0 °C 左右。海洋热浪爆发频率的空间分布和平均强度的分布在一定程度上类似:即靠近海南岛区域发生频率较高,每年可达 2.5~3 次;在远离海南岛后,发生频率减弱至每年 1.5 次左右。

南海西北部受南海季风系统调控,因此该海域的热动力过程均表现出显著的季节循环特征。因

此,本文从季节分布角度分析南海西北部海洋热浪特征(见图 2)。在热浪平均强度方面,春季最强(见图 2b),夏季最弱(见图 2c),且春季的空间分布与全年平均较为相似,在海南岛以东存在明显强值区,冬季和秋季的海洋热浪则在海南岛以南呈现出一个较强的分布区域(见图 2a 和 2d),中心可以达 1.3 °C 左右,夏季的海洋热浪只在北侧出现一个较小的中心。在持续天数方面,冬季和春季较长(见图 2e 和 2f),夏季最短(见图 2g)。海洋热浪持续时间的大值区均远离海南岛,这表明持续天数和热浪平均强度并不一致,海洋热浪爆发强度较大的区域,持续时间较短,而平均强度较弱的区域,持续时间则较长。在发生频率方面,秋季爆发最为频繁(见图 2l),每年基本在 0.5 次以上,其次为春季(见图 2j),冬季最少(见图 2i),每年约为 0.3 次。在空间分布上,靠近海南岛区域的爆发频率较高,远离海南岛则爆发次数减少,但是爆发频率与平均强度的空间分布同样不一致。

3 南海西北部海洋热浪的年际变化特征

众多研究均表明,海洋热浪表现出多尺度变化特征。本文分别针对不同季节,讨论南海西北部海洋热浪的变化特征(见图 3)。海洋热浪以南海西北部区域(109°~114°E, 14°~20°N)的平均海温进行

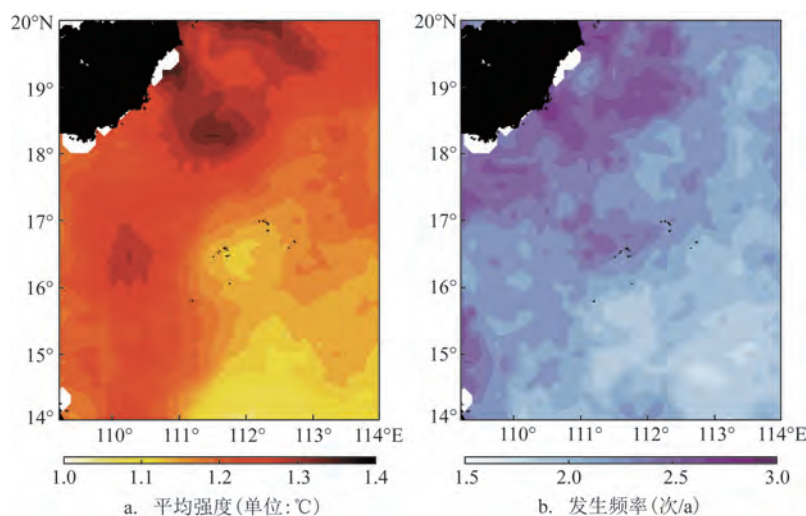


图1 南海西北部海洋热浪年平均统计特征分布

Fig.1 Statistical characteristics of annual mean marine heatwave distributions in the northwestern South China Sea

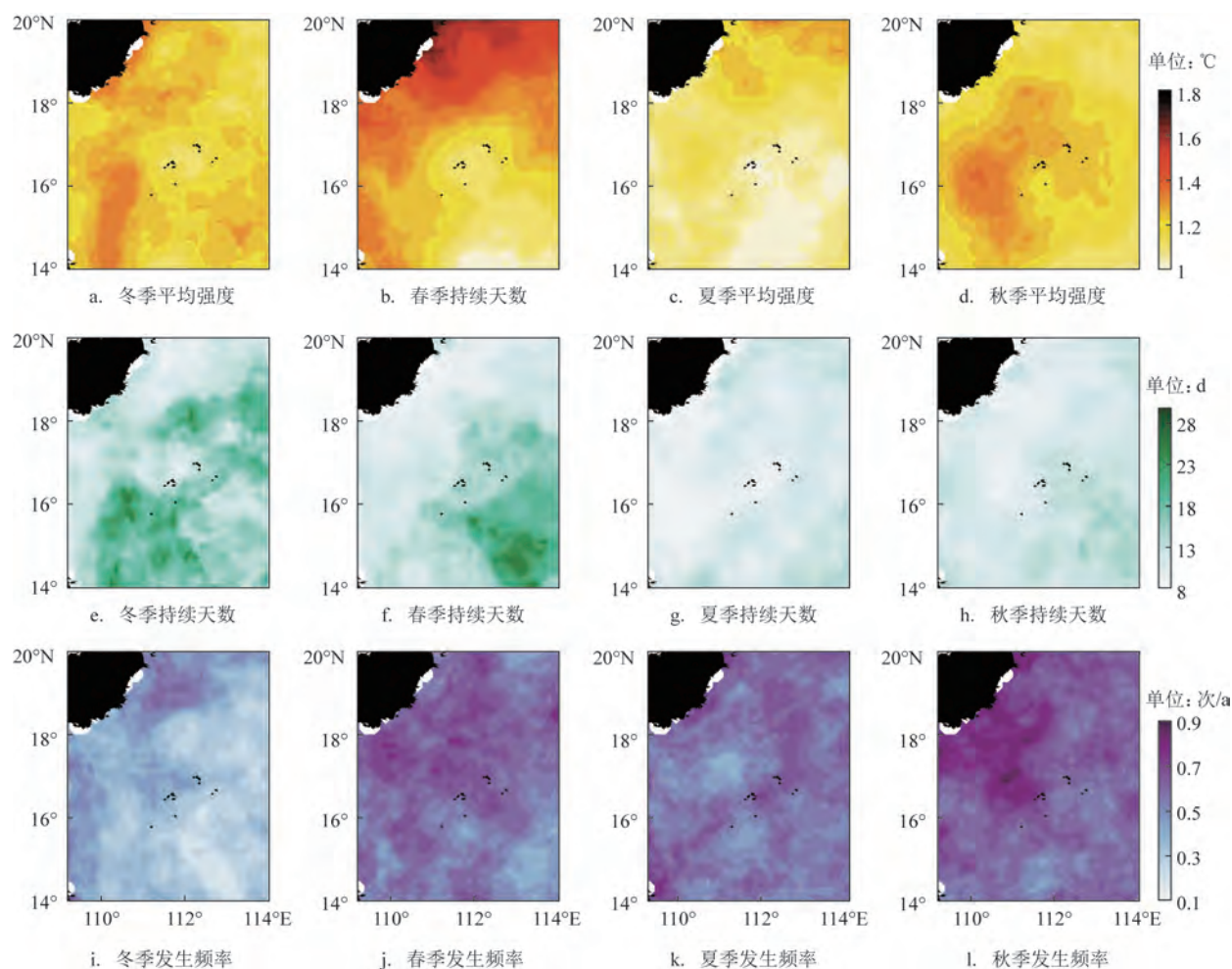


图2 南海西北部海洋热浪季节平均统计特征分布

Fig.2 Seasonal characteristics of marine heatwaves in the northwestern South China Sea

识别与统计。在冬季,海洋热浪在1990年以前只发生过一次,且强度较弱、持续时间较短;2010年之后,发生次数开始增多,强度也有所增加,持续时间也变长,每年约有20~40天为海洋热浪时段。春季海洋热浪在1990年之前同样发生较少,1997年之后则表现出爆发性增长,无论是强度还是持续时间均明显增加,但热浪强度波动较大,既有超过1.5℃的强事件,也有低于1.0℃的弱事件;持续时间上,部分年份可达100天以上,部分年份则仅有十几天。夏季的海洋热浪在1990年前仅发生过一次非常弱的事件,2010—2020年出现较为集中的爆发,但强度均未超过1.5℃。秋季的海洋热浪未表现出明显的时间突变特征,1990年之前也发生过较多次热浪事件,仅1990—2000年期间热浪事件较少,而2000

年曾发生一次持续超过100天的海洋热浪事件。

4 南海西北部海洋热浪的演变特征

为研究南海西北部海洋热浪的发展过程,本文分别针对各季节的海洋热浪事件进行合成,将其整个生命周期归一化为5个阶段,即第0天、第1/4天、第1/2天、第3/4天以及最后一天(见图4)。

南海西北部冬季海洋热浪从海南岛南侧开始发展(见图4a),初始温度异常在1.2℃以内,核心区域的空间尺度约为200 km;发展到第1/4天时,核心位置基本未发生移动,整体温度异常显著增高,尤其开始向海南岛近岸延伸(见图4b);第1/2天时,海洋热浪1.2℃以上的异常范围进一步扩大(见图4c);

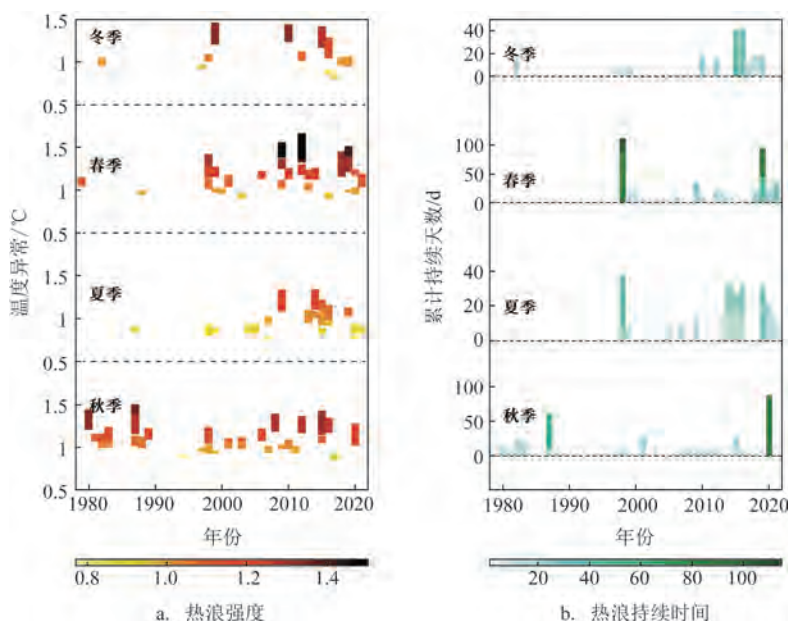


图3 海洋热浪参数的年变化

Fig.3 Interannual variability of marine heatwave properties

从第3/4天以后,南海西北部的海洋热浪开始消退,范围逐渐减小,核心温度异常也开始减弱(见图4d);最后一天,海洋热浪基本消退到初始位置,但是空间范围略大,且表现出两个暖核心(见图4e)。总体而言,冬季海洋热浪从海南岛南侧开始发展,逐渐向北及向东扩展,最后在消亡阶段逐步退回到初始发展位置。

南海西北部春季海洋热浪的发展过程与冬季不同(见图4f—4j),初始位置位于海南岛东侧近岸区域,核心区域的初始强度便达到 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,且 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的区域几乎覆盖整个研究范围;在第1/2天时,海洋热浪达到峰值。在整个发展过程中,春季海洋热浪的核心位置基本未发生变化。

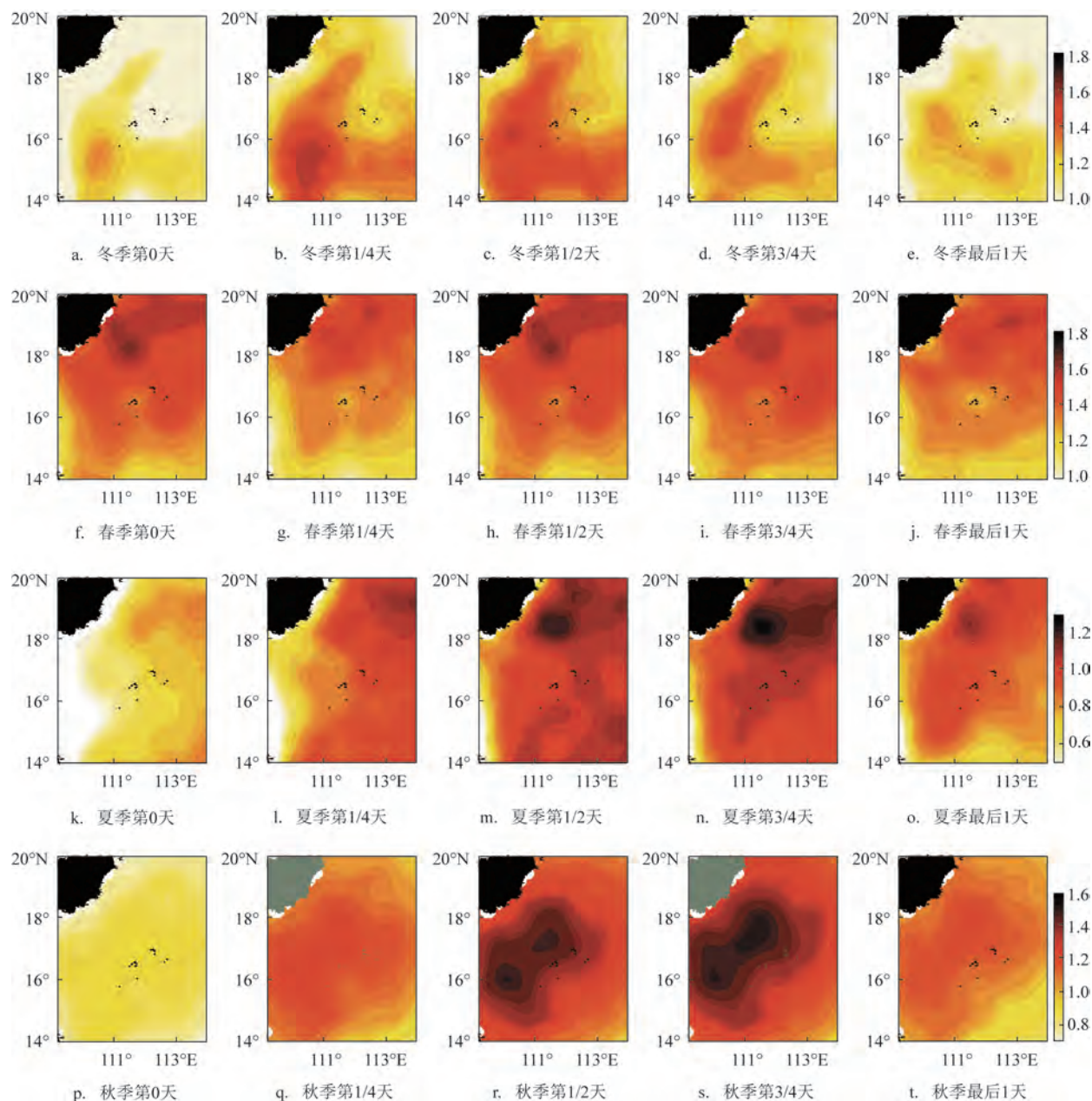
南海西北部夏季的海洋热浪初始核心位置在海南岛以东远海区域(见图4k),随着海洋热浪的发展,其核心区域逐渐向海南岛靠近(见图4k—4n);在第1/2天时抵达海南岛近岸(见图4k),第3/4天时达到峰值(见图4n);消亡时,其核心位置仍位于海南岛近岸(见图4o)。

秋季的海洋热浪在整个发展过程中的形态基本保持一致(见图4p—4t),中心位置在海南岛东南侧,且始终维持双中心特征。初始状态温度较低,基本在 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而在第3/4天时达到峰值,达到 $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

本文进一步分析了南海西北部海洋热浪各季节不同阶段的温度异常变化特征(见图5)。 $\Delta T_n = 0.5(T_{n+1} + T_{n-1})$,其中 n 表示第 n 天, ΔT_n 是第 n 天的温度变化量。在所有季节中,海洋热浪的初始状态均表现出整体增温且增温幅度最强,而在最后一天则表现出整体降温且降温幅度最强。冬季时,海洋热浪增温强值区主要在西侧,并且在第1/2天以后开始整体降温。春季海洋热浪的增温从北侧开始,到第1/2天时,主要在西南侧持续增温,降温则从第3/4天开始。夏季的增温一直维持在海南岛外侧及西南区域,在第3/4天开始表现出降温。秋季的海洋热浪最初在海南岛东南侧快速增温,到第1/2天时,整体维持较弱增温,从第3/4天开始降温。

5 南海西北部海洋热浪与海面风速的关联性分析

本章节主要讨论南海西北部海洋热浪发生过程中海表 10 m 风速的变化情况(见图6)。冬季,整个南海西北部均受冬季季风控制,在海洋热浪发生的初始阶段到第1/4天,冬季风表现出明显减弱(见图6a、6b),且以南风异常占主导。一方面,南风异

图4 海洋热浪发展过程合成分析(单位: $^{\circ}\text{C}$)Fig.4 The evolution of marine heatwaves (unit: $^{\circ}\text{C}$)

常会导致风应力松弛,使潜热减少,进而降低海洋失热;另一方面,南风异常也会减弱西边界流,导致冷平流减弱,从而使海洋增温;从第 1/2 天—第 3/4 天,风场虽仍以减弱为主,但南风异常逐渐转为西风异常(见图 6c、6d),且在第 3/4 天,风场异常开始变弱,到最后 1 天则转变为风场加强(见图 6e),诱发海洋热浪快速衰减。为进一步分析风场和海洋热

浪的关系,本文绘制了海洋热浪与风速异常的相关系数(见图 7a)及两者的演变曲线(见图 8a),从中可以看出,冬季海洋热浪与风速异常表现为负相关,且强关联区域位于东北部。

春季海洋热浪爆发的初始阶段,10 m 风速异常并不显著(见图 6f),仅全区域表现出较弱的风速减弱。在第 1/4 天,海南岛东南侧陆坡区域出现极强

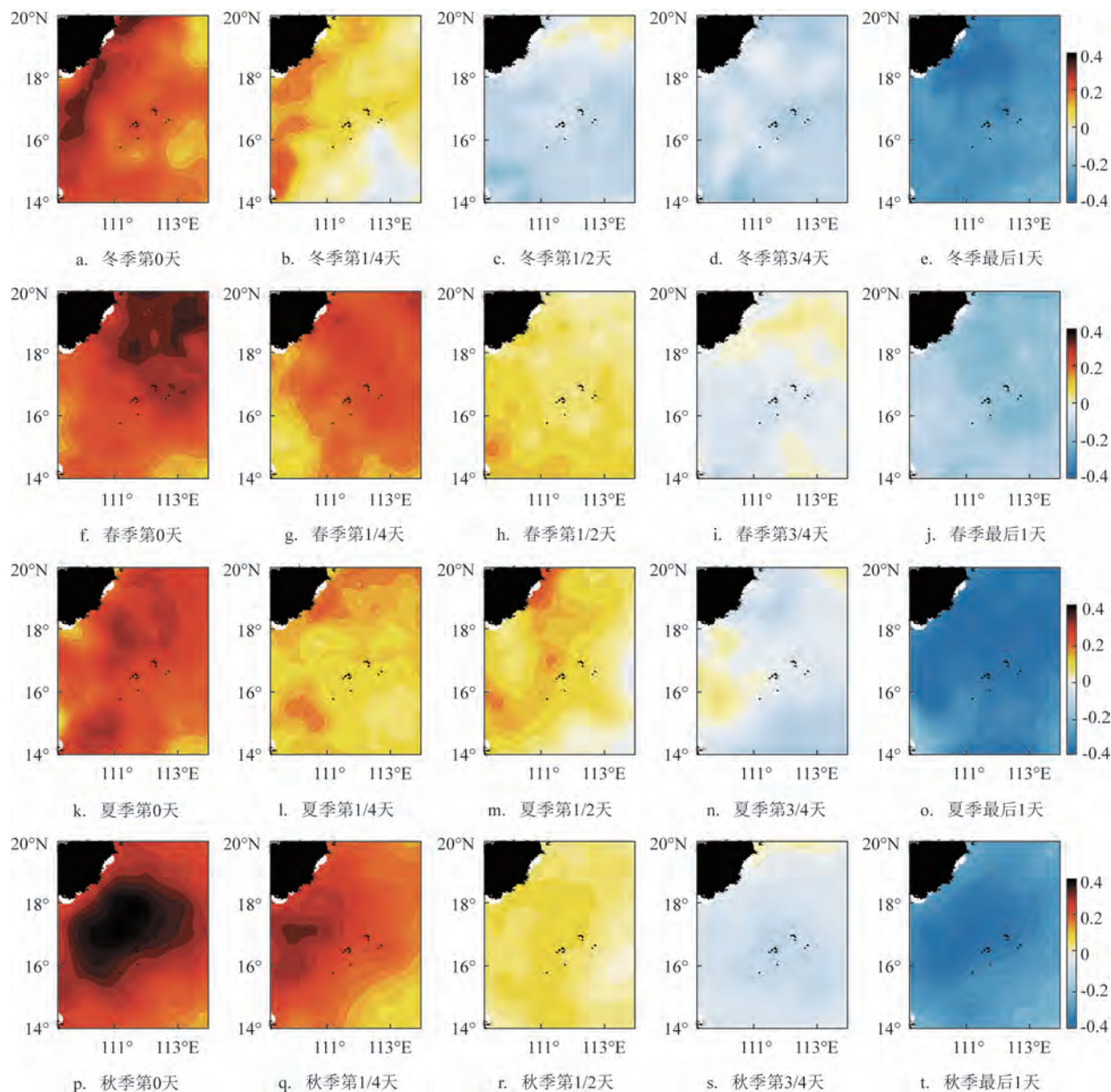


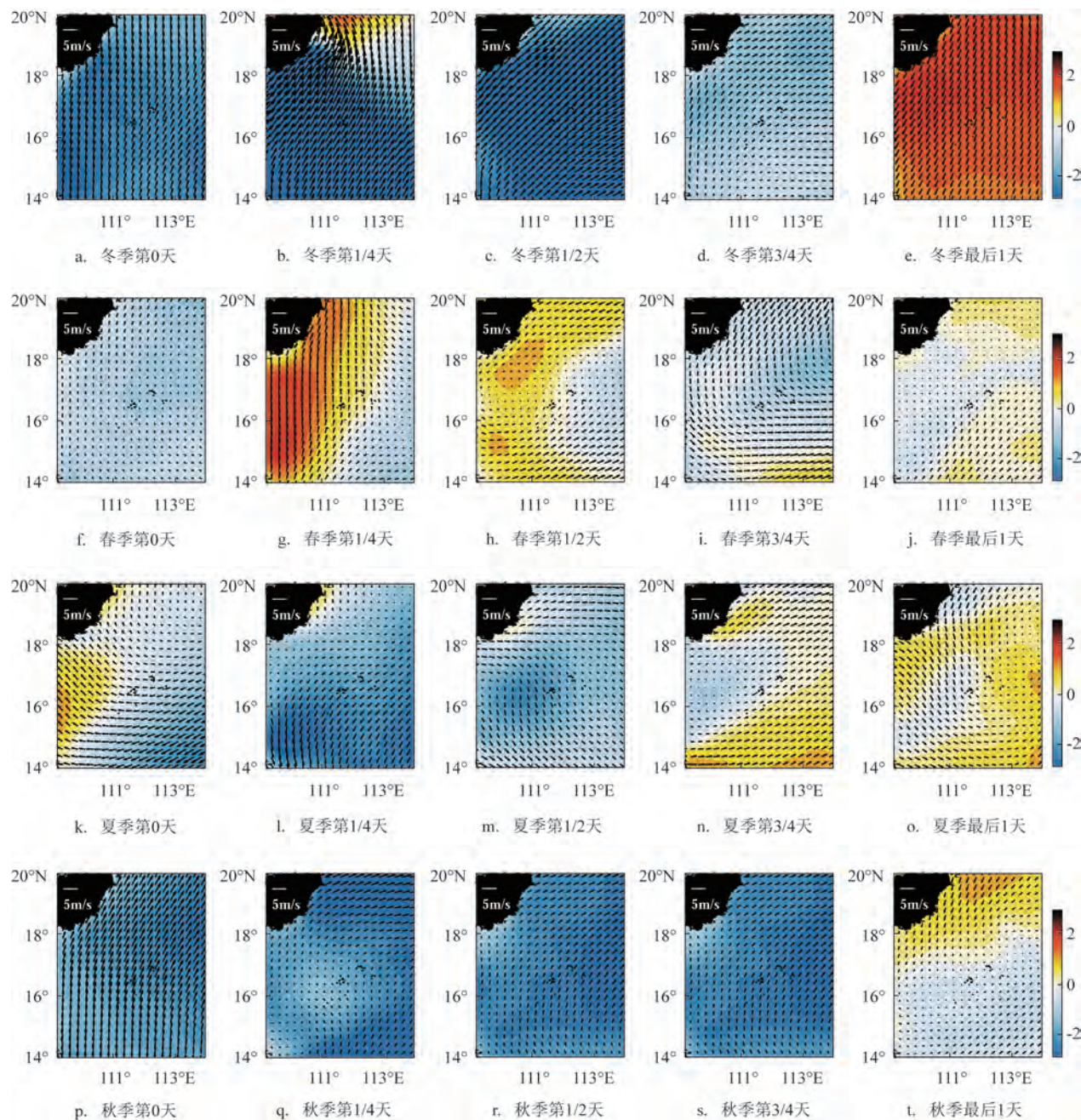
图5 南海西北部区域的温度异常变化(单位: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

Fig.5 The evolution of anomaly of marine heatwaves in the northwestern South China Sea (unit: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$)

的南风异常(见图6g),但到第1/2天,海南岛东侧陆坡北段表现为北风异常,南段仍为南风异常,但是风速异常较前一阶段已明显减弱(见图6h)。在第3/4天,呈现出气旋式风速减弱,北段为北风异常,南段则表现为西风异常(见图6i)。在海洋热浪的最后阶段,10 m风速异常表现不显著(见图6j)。从海洋热浪与风速异常的相关性可以看出(见图7b和8b),春季海洋热浪与风速异常表现为负相关,且两者的

相关性基本覆盖整个研究区域。

夏季海洋热浪前4个阶段的10 m风场异常表现出明显的逆时针旋转特征(见图6k—6n):初始阶段以东风异常为主导的风场减弱,在第1/4天表现为东北风异常,第1/2天则以北风异常为主导,且这3个阶段均以风场减弱为主要特征;而在第3/4天则转为西南风异常主导,且风场开始增强。在最后阶段,10 m风场基本表现为增强,且以北风异常为主



注:填色为速率异常,箭头为风矢量异常,单位:m/s;黑色箭头表示通过了95%置信检验

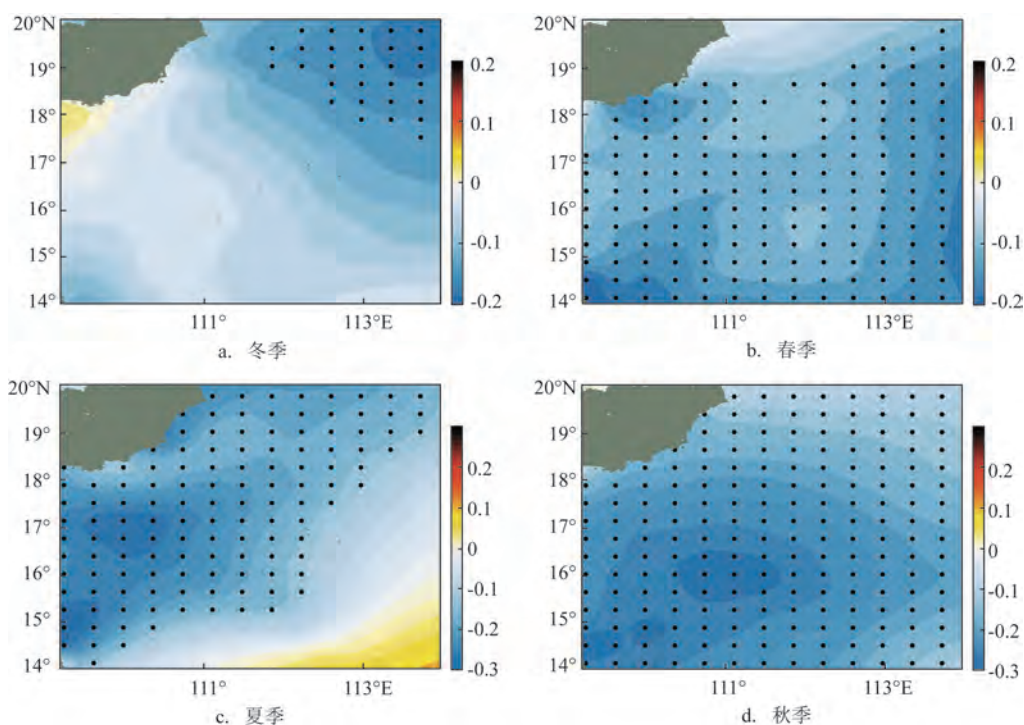
图6 南海西北部区域10 m风速演变(单位:m/s)

Fig.6 The evolution of 10 m wind field in the northwestern South China Sea (unit: m/s)

(见图6o)。夏季海洋热浪与风速异常的强关联区域主要靠近海南岛一侧(见图7c和8c)。

秋季海洋热浪发生的前4个阶段,均表现为风场减弱,且以南风异常为主(见图6p—6s);在热浪发生的初始阶段和第3/4天,10 m风场减弱最为明

显,且全区域均为南风异常。在最后阶段,南海西北部北段表现出北风增强,而南段仍维持较弱的南风减弱(见图6t)。在整个研究区域,海洋热浪强度和风速异常表现为负相关,且在海南岛东南侧存在强相关中心(见图7d、8d)。



注:黑色点表示超过95%置信检验

图7 海洋热浪发生期间风速和海洋热浪强度的相关系数分布

Fig.7 Distribution of correlation coefficient between wind speed and MHW intensity

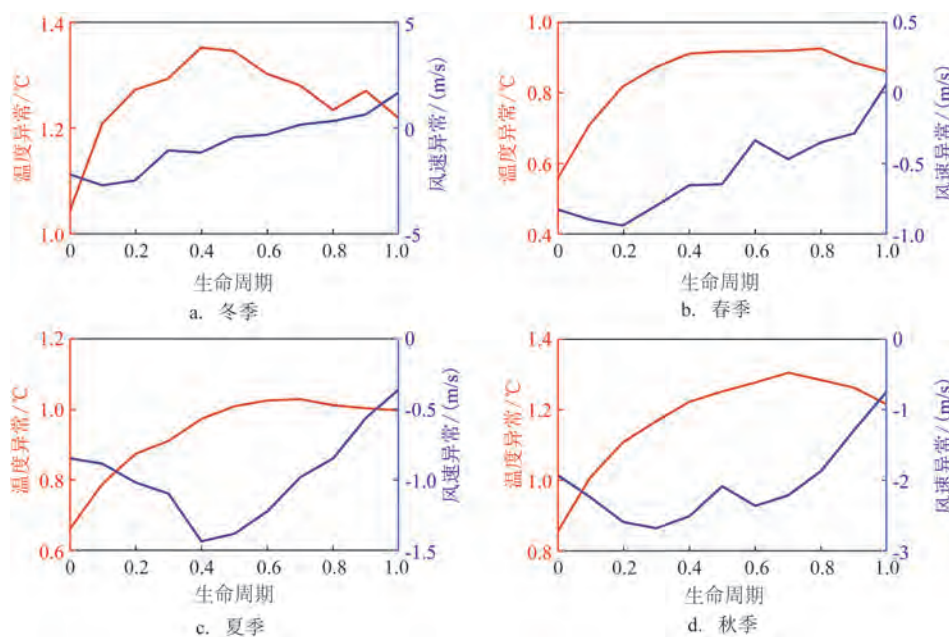


图8 海洋热浪发生期间区域平均海洋热浪强度和风速异常曲线

Fig.8 Time series of averaged wind speed anomaly and MHW intensity

6 结论

本文分析了南海西北部海洋热浪的特征及 10 m

风速的对应特征,主要结论如下:

①南海西北部海洋热浪的平均强度春季最强、秋季次之、夏季最弱;平均持续天数冬季和春季最多、夏季最少;发生频率秋季最多、春季次之、冬季最少。

②在年际变化上,冬季、春季及夏季的海洋热浪变化趋势较为一致,1990年之前发生较少,此后发生频率显著增加;秋季海洋热浪表现出较为稳定的特征。

③在海洋热浪发生期间,冬季10 m风速在前4个阶段主要表现为南风异常导致的风速减弱,最后阶段则转为北风异常为主的风场增强;春季10 m风速主要在第1/4天和1/2天表现出沿陆坡的增强,其他阶段变化不显著;夏季10 m风速的变化主要集中在前3个阶段,且呈现出风向逆时针旋转的特征;秋季10 m风速主要表现为以南风异常为主的减弱。

参考文献

- [1] HOBDAI 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.
- [2] ZHAO Y, CHEN M R, CHUNG T H, et al. The 2022 summer marine heatwaves and coral bleaching in China's Greater Bay Area [J]. *Marine Environmental Research*, 2023, 189: 106044.
- [3] CHEN Y J, SHEN C Y, ZHAO H, et al. The impact of marine heatwaves on surface phytoplankton chlorophyll-a in the South China Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 175099.
- [4] WANG Y X, ZHANG C P, TIAN S, et al. Seasonal cycle of marine heatwaves in the northern South China Sea[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 61(7): 3367-3377.
- [5] WANG Q, ZHANG B, ZENG L L, et al. Properties and drivers of marine heat waves in the northern South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022, 52(5): 917-927.
- [6] YAO Y L, WANG C Z. Variations in summer marine heatwaves in the South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(10): e2021JC017792.
- [7] CHEN X, et al. Projected changes in marine heatwaves over the South China Sea under global warming[J]. *Earth's Future*, 2023, 11(2): e2022EF003045.
- [8] WANG Q, WANG Y X, SUI J P, et al. Effects of weak and strong winter currents on the thermal state of the South China Sea[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(1): 313-325.
- [9] LIU C, WANG G, HU S, WANG F. Atmospheric drivers of the 2015 extreme marine heatwave in the South China Sea[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57(5-6): 1727-1742.
- [10] HU S, LI X, CAI W, et al. Oceanic eddy-induced marine heatwaves in the South China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2020, 50(10): 2923-2941.
- [11] SHU Y Q, XUE H J, WANG D X, et al. Observed evidence of the anomalous South China Sea western boundary current during the summers of 2010 and 2011[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(2): 1145-1159.
- [12] ZU T T, XUE H J, WANG D X, et al. Interannual variation of the South China Sea circulation during winter: intensified in the southern basin[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(3-4): 1917-1933.
- [13] WANG Q, ZENG L L, CHEN J, et al. Phase shift of the winter South China Sea western boundary current over the past two decades and its drivers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(10): e2023GL103145.
- [14] CHEN G X, HOU Y J, CHU X Q. Mesoscale eddies in the South China Sea: mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C6): C06018.

Characteristics of marine heatwaves in the northwestern South China Sea

WANG Lingfei¹, TAN Hong², JI Weidong², CHEN Haijun³, SHI Yunying^{4*}

(1. 92248 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Xuchang 461000, China; 2. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. Liaoning Provincial Natural Resources Affairs Service Center, Shenyang 110033, China; 4. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: This study, based on the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis data, investigates the spatiotemporal characteristics of marine heatwaves in the northwestern South China Sea, as well as the corresponding changes in the 10-meter wind speed. The intensity of marine heatwaves is spatially characterized by three major high-value centers east of Hainan Island. Marine heatwaves in the northwestern South China Sea exhibit significant seasonal differences, with the strongest mean intensity in spring, followed by autumn, and the weakest intensity in summer. Mean duration is the longest in winter and spring, and the shortest in summer. The occurrence frequency is the highest in autumn, followed by spring, and the lowest in winter. During marine heatwaves, the 10-meter wind speed decreases in winter, summer, and autumn, while it increases in spring.

Key words: marine heatwaves, Xisha waters, interannual variability, wind field changes