

东中国海海温在增暖停滞期的变化特征及成因分析

张琪¹, 龙景超²

(1. 国家海洋局天津海洋环境监测中心站, 天津市海洋环境监测预报中心, 天津 300457; 2. 广东海洋大学 海洋与气象学院 / 南海海洋气象研究院, 广东 湛江 524088)

摘要: 通过 HadSST3 原始观测数据和 HadISST1 重组数据, 分析了东中国海海温在增暖停滞期 (1998—2014 年) 的变化特征。研究表明: 两组数据的海温变化特征和程度相似。在增暖停滞期, 渤海、黄海和东海海温线性趋势主要表现为负, 降温最多的集中在长江口附近, 约 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。渤海、黄海及东海部分区域的净热通量对海温降低起正作用, 而在东海黑潮区海洋的净热通量对海温降低起负作用, 黑潮入侵的减弱可能是东海海表温度下降的主要原因。在增暖停滞期, 海温变化趋势具有较显著的区域性季节特征。春季海温几乎呈现全海盆的下降趋势, 尤以长江口附近下降最多, 可达 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; 夏季海温下降趋势较春季减弱, 下降最多的地区主要集中在渤海; 秋季渤海海温下降较明显; 冬季海温变化主要在长江口沿岸, 渤海海温的变化并不明显。

关键词: 中国近海; 海表温度; 增暖停滞期; 净热通量; 黑潮

中图分类号: P731.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)01-0078-05

1 引言

海表面温度是研究海面水汽和热量交换的重要物理参数, 表征了海洋热力、动力过程以及海气相互作用的综合结果。我国近海海域临近全球最重要的西边界流区之一的黑潮流域, 携带高温高盐海水的黑潮热平流输送和海气热交换等过程可能会影响我国近海海温的变化。同时, 气温、太阳辐射和季风系统的变化, 也可以通过海气热通量、表面风和海气温差的变化过程, 直接或间接地影响近海海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 的变化。

前人研究了 20 世纪中国近海 SST 在不同时间和区域的增暖情况及成因。Tang 等^[1]研究了 1957—1996 年东海北部海温变化, 指出黑潮流的输运导致了夏季 SST 的增暖, 气候系统的自然变率导致了冬季增暖。冯琳等^[2]发现东中国海 SST 具有显著的长期增温趋势, 海洋热平流的增加有利于 SST 的升

高, 而起负贡献的主要是海面净热通量。Wu 等^[3]的结果显示, 沿全球西边界流的“热斑”现象是由中纬度延伸区流轴的向极移动或加强导致的。张琪^[4]指出年代际时间尺度上中国近海 SST 长期变化趋势主要取决于海洋动力过程带来的热平流效应。Cai 等^[5]发现年代际尺度上海温变化与东亚季风有着很好的相关关系。宋春阳等^[6]分析了 2017 年中国近海 SST 特征, 发现造成渤海、黄海和东海 SST 增高的主要原因是黑潮流速增强导致平流热输送增加。

最新研究指出, 进入 21 世纪后, 尽管温室气体总量还在上升, 但是全球海温出现了增暖停滞的现象。增暖停滞是指 1998 年以来, 在温室气体加速排放的背景下, 气候系统增暖趋势减缓的现象^[7-9]。关于全球增暖停滞的原因, Kosaka 等^[10]根据气候模式数值试验结果指出, 1972—2012 年间赤道东太平洋与全球年平均海温变化之间的相关系数高达 0.97, 当前的增暖停滞是由气候系统的自然变率导致的, 尤其是类似拉尼娜的太平洋年代际变化。Dai 等^[11]

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-07-06。

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41905006); 广东海洋大学博士启动金 (R19018)。

作者简介: 张琪 (1988-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋环境预报工作。E-mail: jlbzq@163.com

通讯作者: 龙景超 (1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事海洋气象研究。E-mail: longjc@gdou.edu.cn

通过经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析指出太平洋年代际变化是造成停滞的主要原因。McGregor等^[12]指出,20世纪90年代伴随着大西洋的迅速增暖,大西洋和太平洋之间的海平面气压呈跷跷板分布,从而导致赤道信风加强,东太平洋海温降低。谭红建等^[13]指出中国近海SST在变暖暂缓期(1998—2014年)存在下降趋势,其变化速率和幅度明显大于其他关键海区。东中国海是全球气候变化的敏感区和脆弱区,该区域的海温年代际变化与太平洋年代际涛动的位相转换一致,因此他认为太平洋十年涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)可能通过东亚季风和黑潮影响东中国海的海温增暖停滞。前面所说的增暖停滞主要是基于全球平均SST的概念,但是不同地区SST的变化趋势并不相同,聚焦区域性增暖停滞的变化特征研究更有意义。本文在前人研究的基础上,研究东中国海SST增暖停滞现象的变化特征及其可能的成因。

2 数据来源和方法

2.1 数据来源

海温观测资料来源于英国气象局哈德利(Hadley)中心的HadISST1月平均数据。HadISST1覆盖了从1870年至今全球的SST和海冰观测数据,包含船测资料和卫星反演资料,空间分辨率达到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$;同时本文也使用了Hadley中心未插值的观测数据HadSST3,覆盖从1850年至今的数据(主要包括船测数据和浮标数据,缺测数据没有进行补充)。

本文采用美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole)的客观分析海气通量(Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes, OAFux)数据集提供的1998—2014年月平均海表感热和潜热通量资料,分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$;海表面辐射资料采用2000—2014年月平均热带测雨任务卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)搭载的云和地球辐射能量探测器(Cloud and Earth Radiant Energy Sensor, CERES)EBAF_Ed4.1资料,观测时间跨度为2000—2018年,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。另外,海表地转流速资料选用法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心(AVISO)提供的月平均卫星高度计反演资料,选

取时段为1998—2014年,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

2.2 数据处理方法

本文使用最小二乘法求海温的线性趋势,原理如下:假设一组数据之间大致呈线性关系,因此,用一条直线表示自变量和因变量的关系。设 $y = a + bx$,这时对于某一点 (x_i, y_i) 带入这个关系式,则可以写成 $y_i^* = a + bx_i$, y_i 和 y_i^* 的差距表示为 $\delta_i = y_i - y_i^* = y_i - a - bx_i$,这一项称之为误差。

在原始数据给定以后, a 、 b 的选取决定了误差项的大小,因此把误差的大小作为衡量 a 、 b 好坏的标志。在确定参数时,最常用的方式就是最小二乘原理,即误差的平方和最小。解出 a 、 b 即可知道直线方程^[14],然后判断序列整体的上升或下降趋势。

3 结果分析

3.1 东中国海海温变化情况

根据两组不同数据SST的变化趋势场(图略),我们发现1998—2014年间两组数据在中国近海的海温变化非常一致。东中国海(渤海、黄海和东海)海温一致下降,降幅最多的地区集中在长江口附近,约为 -1°C ;南海北部主要呈现变冷趋势,程度较弱,而在南海南部海温变化趋势却为正,海温略有上升,但是南海北部和南部海温的整体变化趋势并不明显。

通过上面的分析可以看到,增暖停滞期中国近海变化最大的是东中国海,后面的研究中我们针对东中国海的海温变化做分析。两组数据中东中国海区域平均的SST趋势几乎相同(见图1),1998—2014年共降低 0.6°C 。考虑到两组数据在增暖停滞期海温变化的空间结构相似,后文中我们采用分辨率较高的HadISST1数据进行分析。

基于上面的分析可以看到,增暖停滞期东中国海的海温变化最为明显。从东中国海海表温度的EOF分析可以得出(见图2):第一模态方差贡献率为70.4%,空间模态上为全场一致变化模,时间序列上表现为一致下降。

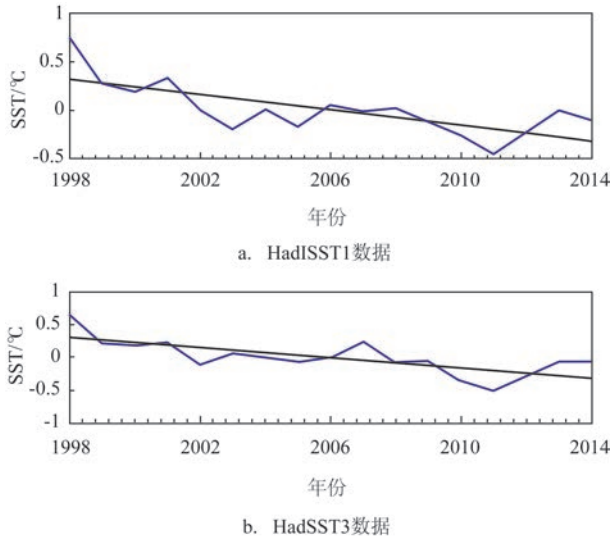
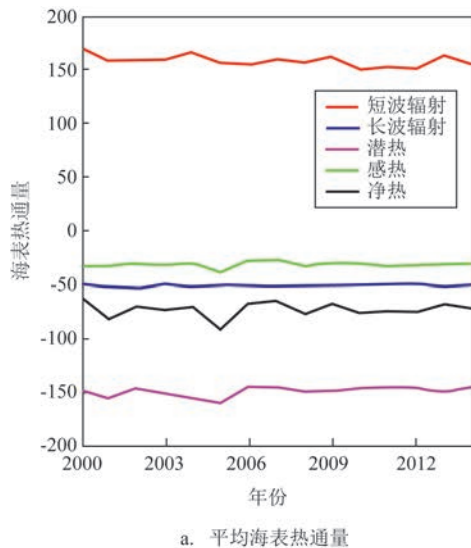


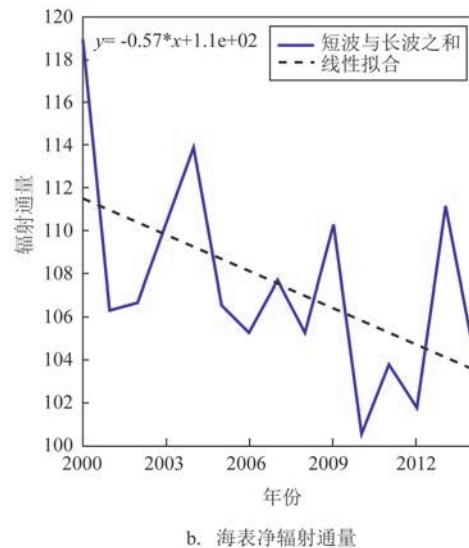
图1 海温异常在东中国海的区域平均和线性趋势



图2 东中国海海表温度EOF分解



a. 平均海表热通量



b. 海表净辐射通量

图3 东中国海区域平均海表热通量年际变化(单位:W/m²)

3.2 东中国海海温变化成因

为了进一步研究增暖停滞期海温的变化成因,根据混合层温度变化方程^[15]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{\text{net}}}{\rho C_p h} - \bar{V} \cdot \nabla T - \frac{w_e (T - T_d)}{h}$$

式中:4项分别表示温度倾向项、表面热力强迫项、平流项和垂直卷夹项。 T 代表混合层温度; Q_{net} 代表净热通量; ∇T 代表水平温度梯度; ρ 代表海水密度; C_p 代表海水比容; T_d 代表混合层底的水温; h 代表混合层深度; \bar{V} 代表水平流速。本文仅从海洋净热通量以及海洋平流过程分析海温变化的原因。

东中国海海温 EOF 第一模态时间序列分别与海表面净短波辐射和长波辐射的回归表明,SST 的降低伴随着向下的净短波辐射的减弱以及净长波辐射的增强,这意味着净短波辐射对海温降低过程起正作用,净长波辐射对海温降低过程起负作用。图3是短波辐射和长波辐射的总和,从图中可以看到,短波辐射的作用大于长波辐射,净辐射呈现下降趋势,这意味着在增暖停滞期,海温下降的过程伴随着海洋获得的净热辐射减少,对海温下降起正作用。

根据上面的分析,我们进一步将东中国海海温 EOF 第一模态时间序列分别与海表面潜热、感热做回归。在增暖停滞期,海洋的感热和潜热释放都在

减小,海洋失热减少有利于海温增加,因此潜热和感热对海温降低起负作用。EOF第一模态时间序列与净热通量的回归关系中,正值表明海洋失热减小,有利于海温上升;负值表明海洋失热增加,有利于海温下降。渤海、黄海及东海的部分区域主要为负值区,净热通量对海温降低的变化起正作用;东海的黑潮区主要为正值,表明海洋的净热通量使海温增加,对海温降低的变化起负作用,海温降低可能主要是海洋平流导致的。黑潮暖流对东中国海的入侵影响着该海域 SST 的变化,对地转流速的回归分析表明,东中国海海温下降期间东海黑潮流速减弱。因此,黑潮入侵的减弱可能是东海 SST 下降的主要原因。在非绝热过程和海洋动力过程的综合作用下,东中国海海温整体呈下降趋势。

4 讨论

张琪^[4]的研究指出,20世纪不同季节的海温上升程度不同,冬季增暖更强,那么在增暖停滞期这段时间,SST在不同季节的变化又有哪些特点呢?根据春、夏、秋、冬4个季节东中国海 SST 的变化趋势可以看到(图略),春季海温几乎呈现全海盆的下降趋势,尤以长江口附近下降最多,降温最多可达 -1.4°C ;夏季海温下降趋势较春季减弱,下降最多的地区主要集中在渤海,长江口沿岸附近也有下降集中区;秋季渤海海温下降较明显;冬季海温变化主要在长江口沿岸,渤海海温的变化并不明显。前人的研究指出,在海温增暖期,中国近海海温的季节性变化特征是冬季最强,夏季最弱,但是通过对东中国海海温的季节性分析可以看到,增暖停滞期海温的季节性变化特点为春季海温下降整体最强,在长江口沿岸存在下降最集中区域;秋季长江口沿岸降温最小;和其他季节不同的是冬季渤海海温增暖期无明显变化趋势。为什么海温在增暖停滞期的季节性变化和增暖期不同呢?为什么长江口附近在停滞期和增暖期都存在海温变化的集中区,是否和气溶胶的排放等有关?这些都将是以后研究的重点。

5 结论

20世纪末开始全球出现增暖停滞现象,本文聚

焦增暖停滞期的区域性变化特征,通过对东中国海海温增暖停滞期的分析,得到如下结果:

(1)本文分别使用 HadISST1 数据和 HadSST3 数据研究东中国海海温在增暖停滞期的变化,结果发现两组数据的海温变化特征和程度相似。在增暖停滞期,渤海、黄海和东海海温线性趋势主要表现为负,降温最多的集中在长江口附近,最多约为 -1°C ,南海整体海温变化趋势并不明显。

(2)在渤海及东海的部分区域净热通量对海温降低的变化起正作用,主要是因为净向下短波辐射较少;而东海黑潮区海洋净热通量对海温降低起负作用,即净热通量的变化不利于海温降低,黑潮入侵的减弱可能是东海 SST 下降的主要原因。

(3)增暖停滞期的海温变化趋势具有较显著的区域性季节特征。春季海温几乎呈现全海盆的下降趋势,尤以长江口附近下降最多,最多可达 -1.4°C ;夏季海温下降趋势较春季减弱,下降最多的地区主要集中在渤海;秋季渤海海温下降较明显,冬季海温变化也主要在长江口沿岸,渤海海温变化并不明显。

参考文献:

- [1] Tang X H, Wang F, Chen Y L, et al. Warming trend in northern East China Sea in recent four decades[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(2): 185-191.
- [2] 冯琳, 林霄沛. 1945~2006年东中国海海表温度的长期变化趋势[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(1): 13-18.
- [3] Wu L X, Cai W J, Zhang L P, et al. Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 161-166, doi: 10.1038/nclimate1353.
- [4] 张琪. 中国近海海表温度的年代际变化及其对全球变暖的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [5] Cai R S, Tan H J, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China seas and its relationship to the east Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales[J]. Journal of Climate, 2017, 30(22): 8987-9005.
- [6] 宋春阳, 姜华, 张守文, 等. 2017年中国近海海表温度特征[J]. 海洋预报, 2019, 36(1): 1-9.
- [7] Smith T M, Peterson T C, Lawrimore J H, et al. New surface temperature analyses for climate monitoring[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(14): L14712.
- [8] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling?[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(8): L08706.

- [9] Medhaug I, Stolpe M B, Fischer E M, et al. Reconciling controversies about the 'global warming hiatus' [J]. *Nature*, 2017, 545 (7652): 41-47.
- [10] Kosaka Y, Xie S P. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling[J]. *Nature*, 2013, 501(7467): 403-407.
- [11] Dai A G, Fyfe J C, Xie S P, et al. Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(6): 555-559.
- [12] McGregor S, Timmermann A, Stuecker M F, et al. Recent walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(10): 888-892.
- [13] 谭红建, 蔡榕硕, 黄荣辉. 中国近海海表温度对气候变暖及暂缓的显著响应[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(6): 500-507.
- [14] 徐萃薇, 孙绳武. 计算方法引论[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] 刘秦玉, 谢尚平, 郑小童. 热带海洋-大气相互作用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 14.

The characteristics and causes of sea surface temperature variations in the warming hiatus period over the eastern China seas

ZHANG Qi¹, LONG Jing-chao²

(1. *Tianjin Marine Environmental Monitoring Central Station, Tianjin Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center, Tianjin 300457 China*; 2. *Guangdong Ocean University, College of ocean and meteorology/ South China Sea institute of marine meteorology, Zhanjiang 524088 China*)

Abstract: In this study, the trends of SST over the eastern China seas in the warming hiatus period (1998—2014) are analyzed using the un-interpolated dataset HadSST3 and the reconstructed dataset HadISST1. The results show that the SST in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea mainly reveals a decreasing trend during the warming hiatus period with the maximum value of about $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ near the Yangtze River estuary. The net heat flux plays a positive role in the decrease of SST in the Bohai Sea, Yellow Sea and part of the East China Sea. However, it plays a negative role in the Kuroshio area of the East China Sea, where the weakening of Kuroshio intrusion may be the main reason for the decrease of SST. The trend of SST variation reveals significant regional and seasonal characteristics during the warming hiatus period. In spring, the SST shows a decreasing trend over almost the whole eastern China seas, especially for the area near Yangtze River estuary where the SST decreases by about -1.4°C . The decreasing trend of SST in summer is weaker than that in spring, and the most decreasing area is mainly in the Bohai Sea. In autumn, the SST in the Bohai Sea decreases significantly. In winter, the SST variation is mainly along the Yangtze River Estuary, while it is not significant in the Bohai Sea and Yellow Sea.

Key words: the coastal China seas; SST; warming hiatus period; net heat flux; Kuroshio