

气候变化背景下舟山沿岸上升流区夏季水动力演变机制

刘建时¹, 林 军^{1,2,3}, 钟 威¹, 徐泽宇¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋牧场工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 200137)

摘要: 全球变暖会对舟山沿岸上升流的驱动机制产生深远影响, 继而作用于海域内的生态环境及渔业资源发生的变迁。使用三维海洋数值模型FVCOM, 模拟研究了热通量、风场等气候环境因子变化下舟山沿岸上升流区夏季水动力及环境因子的分布特征。通过引入跃变检验方法来评估全球变暖对过去三十多年来舟山及其邻近海域的夏季海表温度的影响, 发现在2016年前后发生了明显的跃变, 跃变后海表温度相对于跃变前升高了约1℃; 热通量分析结果显示: 春季云量减小短波辐射增加, 导致的海水热含量增加是夏季海水升温的重要原因; 风速的时空变化表明舟山海域7月风速在近几十年有减弱的趋势。通过构建气候环境因子变化的敏感性数值模型实验探究了舟山沿岸上升流水动力的演变机制, 结果表明: 海气热通量增加导致的表层海水吸热及平流热运输增加引起的海水层化加强会使得底层海水不易抬升; 夏季风应力的减弱削弱了长江冲淡水低盐水舌的离岸扩展, 导致上升流区上层海水的层化减弱, 从而加强中下层海水向岸爬升, 增加沿岸上升流的强度。

关键词: 上升流; 气候变化; 变化机制; 数值模拟; 舟山海域

中图分类号: P 731.2 **文献标志码:** A

上升流是海洋中普遍存在的一种深层水向上的运动形式, 通常由表层海水辐散所形成。上升流将海洋中富含营养物质的深层水输送至真光层, 促进周边海域初级生产力的发展^[1]。在夏季, 舟山群岛及其周边海域存在明显的上升流现象, 丰富的营养物质会吸引鱼类前来产卵、索饵, 从而形成了我国最著名的渔场之一——舟山渔场^[2]。

舟山上升流的研究始于20世纪60年代, 毛汉礼等^[3]最早注意到我国东海沿岸存在异常的冷水抬升现象。后续的实地观测, 卫星遥感以及数值模型的研究结果证实了舟山海域夏季一直存在上升流, 且上升流的形成机制不同于通常由Ekman效应引起的风生上升流^[4-6]。由于舟山海域临近长江口且岛屿众多, 海底地形复杂, 海域内上升流的形成受多因素共同控制或影响, 包括风场、黑潮、台湾暖流、地形和长江径流等因素(图1)^[7-10]。

当前, 全球变暖作为气候变化的主要特征已

经成为全人类共同面临的难题之一。全球变暖不仅影响大气条件, 还会对海洋的水动力环境和生态环境产生深远影响^[11]。研究表明, 在全球变暖的影响下, 加州西海岸^[12]和索马里沿岸^[13]的上升流有增强的趋势。以往对舟山上升流的研究^[14-15]主要集中在其产生机制上, 或者用风生上升流指数评估其强度。然而, 在温升背景下, 对舟山上升流的变化趋势及其演变机制的研究却有限。舟山渔场作为我国重要的渔业捕捞区, 水动力条件的改变将会对渔场内的生态环境和渔业资源产生影响。本研究首先采用统计学方法对舟山上升流区近几十年海表温度的变化进行分析, 将其划分为温度跃变前后两个时期。然后, 通过建立高分辨率的数值模型, 模拟舟山上升流对气候因素变化的响应机制, 为进一步研究海域生态环境的可能变化奠定基础, 以期未来制定舟山渔场捕捞与渔业资源保护政策提供参考。

收稿日期: 2023-07-05 修回日期: 2023-09-21

基金项目: 上海市科学技术委员会地方院校能力建设项目(23010502500)

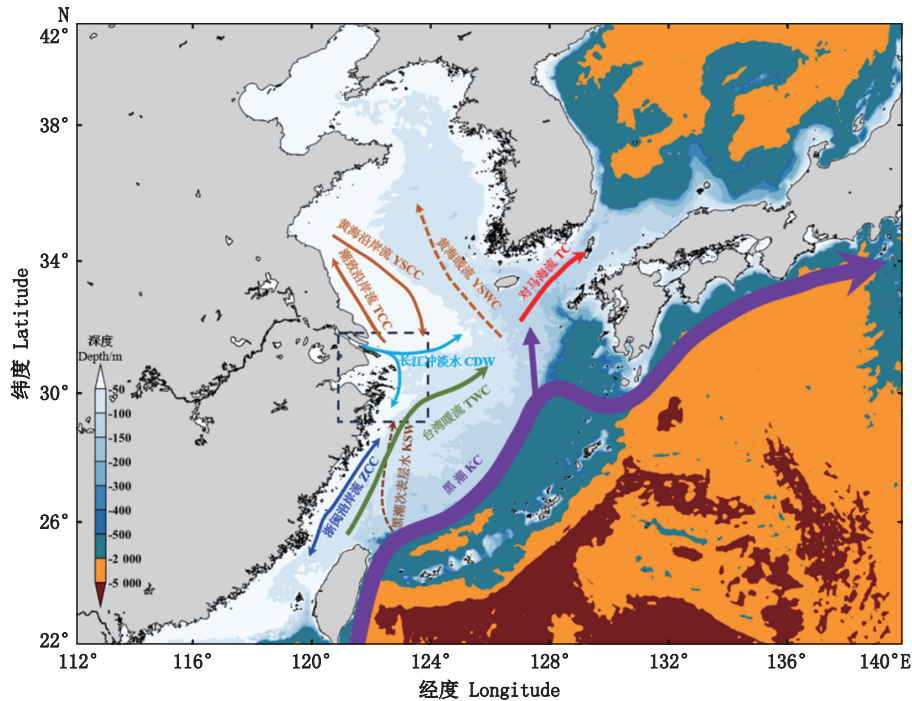
作者简介: 刘建时(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为物理海洋学。E-mail: 845285591@qq.com

通信作者: 林 军, E-mail: jlin@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>



箭头表示东海主要流系;黑色虚线框表示舟山海域,经纬度范围为 $29^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $121^{\circ}\text{E}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 。黑潮(KC)、对马海流(TC)、黄海暖流(YSWC)、黄海沿岸流(YSCC)、潮致沿岸流(TCC)、长江冲淡水(CDW)、浙闽沿岸流(ZCC)、黑潮次表层水(KSW)、台湾暖流(TWC)。The arrow indicates the main current system in the East China Sea; the black dashed box indicates the Zhoushan waters with the latitude and longitude range of $29^{\circ}\text{N}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $121^{\circ}\text{E}\sim 124^{\circ}\text{E}$. Kuroshio Current (KC), Tsushima Current (TC), Yellow Sea Warm Current (YSWC), Yellow Sea Coastal Current (YSCC), Tidal Coastal Current (TCC), Changjiang Diluted Water (CDW), Zhe-min Coastal Water (ZCC), Kuroshio Subsurface Water (KSW), Taiwan Warm Current (TWC).

图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

1 材料与方法

1.1 跃变检验的统计学方法

本文利用 t 算法对海表温度进行了跃变检验,原理是通过预先设置一个置信区间,然后通过预设时间长度(L)和休伯权重参数(Huber weight parameters, H)计算出稳态变化指数(Regime shift index, RSI), $\text{RSI}>0$ 时表明最终结果是显著可靠的^[16-17]。由于本文在较长的时间尺度上分析海表温度的变化,因此置信度设为0.1,预设时间长度设为10年,权重参数设为1^[18]。该方法已经在黄海、东海、长江口海域的海表温度、营养盐质量浓度长时间序列的跃变分析中得到应用^[19-22]。对1990—2022年的舟山海域夏季海表温度进行跃变检验,海表温度数据来源于欧洲中期天气预报中心(European center for medium-range weather forecasts, ECMWF),结果显示在2016年的时候出现了明显的跃变现象,跃变指数RSI为1.06。根据上述分析的结果,将1990—2015年定义为跃变前的阶段,其夏季的平均温度

为 $(25.84\pm 0.49)^{\circ}\text{C}$;将2016—2022年定义为跃变后的阶段,其夏季的平均温度为 $(26.84\pm 0.34)^{\circ}\text{C}$,两个阶段的温差在 1°C 左右(图2)。之前的研究也表明中国近海在20世纪80年代和90年代以来升温速率高于全球变暖的水平^[23],升温的幅度能达到 $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[24]。

我们知道近30年来舟山海域夏季的海表温度总体呈上升趋势,但是这种升温现象是否仅发生在夏季呢?如图3所示,对跃变前后两个时期的海表温度进行逐月分析,可以发现月均海表温度在跃变前后呈现出相似的变化规律,3月起海表温度逐渐上升,10月后海表温度开始下降。从温差的逐月变化可以看出,两个时期的温差从3月开始逐渐增大,并在8月达到了峰值;而在降温阶段,两个时期的温差基本维持在 0.5°C 左右。由此可得,全球变暖对海表温度的影响主要集中在春夏季增温阶段,而在秋冬季降温阶段,跃变前后海表温度的差异并不明显,但是升温背后的机制及可能对上升流区产生的影响还需要进一步地分析。

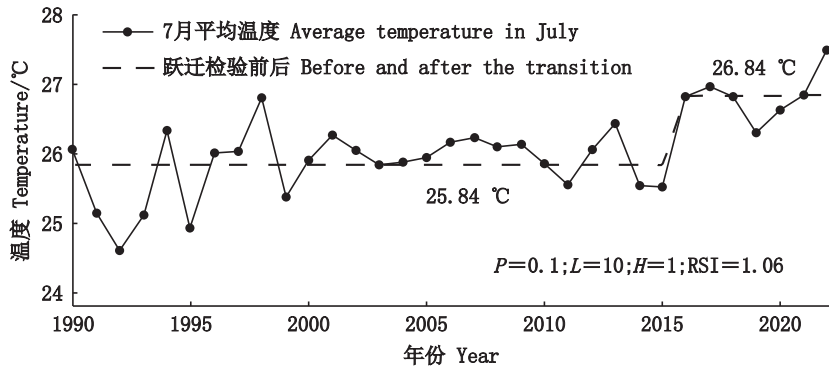


图2 舟山海域7月海表温度的跃变检验图

Fig. 2 Test chart of sea surface temperature transition in Zhoushan waters in July

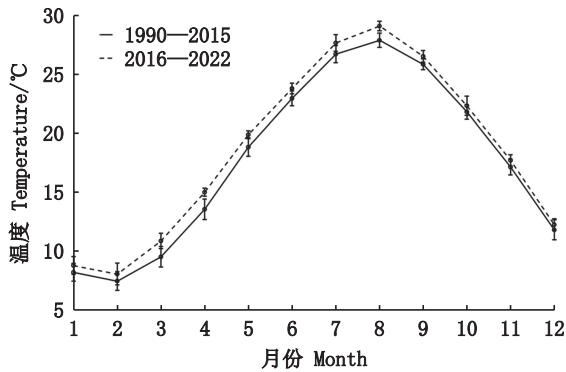


图3 舟山海域海温跃变前后的月平均海表温度

Fig. 3 Monthly mean sea surface temperature before and after the sea surface temperature transition in the Zhoushan waters

1.2 数值模拟方法

1.2.1 数值模型简介

本文使用了三维海洋数值模式 (Finite volume community ocean model, FVCOM)^[25]。模型主要由海水连续方程、动量方程、温度方程、盐度方程以及密度方程构成,并通过 Mellor-

Yamada 2.5 湍流模型使其在物理和数学上闭合^[26]。水平面上模型使用了非结构的三角形网格,这种网格具有对岸线拟合较好,易于局部加密的优点,广泛地被应用于河口近岸地区的数值模拟中^[27-28]。

1.2.2 模型计算区域

模型在参考 GE 等^[29]的东海大区域网格的基础上,对黑潮主轴和舟山海域进行了适当的加密,提高了模型的精度。其中,黑潮主轴附近的网格分辨率约为 6 km,舟山及长江口海域在 0.3~1.0 km (图 4)。模型垂向上采用 s 坐标与 sigma 坐标混合分层的方法^[30],水深小于 80 m 的区域被平均分为 41 个 sigma 层;水深大于 80 m 的区域采用了 s 坐标分层,在表底层各分出了 5 层 2 m 的薄层,这种分层方法弥补了由于水深过深导致垂向分辨率不足的问题。模型使用了 ETOPO1 提供的水深数据,长江口及近海区域采用了海图水深。为了保证计算的稳定性,模型最大水深被设定为 1 000 m^[31]。

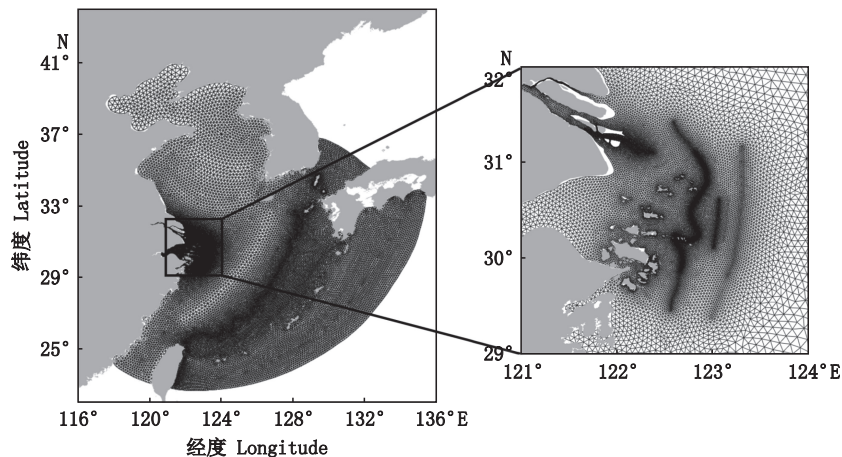


图4 数值模型的计算区域及网格设置

Fig. 4 Calculation area and grid setting of the model

2 模型的设置与验证

2.1 模型设置

验证模型的计算时间为2018年和2022年的3月至12月,模型主要考虑了对舟山海域水动力条件影响较大的长江和钱塘江径流。模型采用了潮位驱动边界,主要考虑了M2等8个东海主要分潮的作用。初始场及开边界场的温盐数据均来自HYCOM再分析数据集。由于HYCOM的数据不包含天文分量,因此在外海开边界处将HYCOM的分量与天文潮汐的数据进行叠加。天气强迫场(长波辐射、短波辐射、潜热通量、感热通量、海表10 m风场)的数据来源于ECMWF,时间分辨率为1 h。

2.2 模型验证

在模型构建成功的基础上需要对结果的可靠性进行验证,本文主要验证了反映海域水动力条件的潮位、潮流以及海水温度,并引入了模型技术得分^[32]、相关系数、均方根误差等3种误差计算方法。

均方根误差(Root mean square error, R):

$$R = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\chi_{\text{mod}} - \chi_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

相关系数(Correlation coefficient, C):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (\chi_{\text{mod}} - \bar{\chi}_{\text{mod}})(\chi_{\text{obs}} - \bar{\chi}_{\text{obs}})}{\left[\sum_{i=1}^N (\chi_{\text{mod}} - \bar{\chi}_{\text{mod}})^2 \sum_{i=1}^N (\chi_{\text{obs}} - \bar{\chi}_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2}} \quad (2)$$

技能评估参数(Skill score, S):

$$S = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |\chi_{\text{mod}} - \chi_{\text{obs}}|^2}{\sum_{i=1}^N (|\chi_{\text{mod}} - \bar{\chi}_{\text{mod}}| + |\chi_{\text{obs}} - \bar{\chi}_{\text{obs}}|)^2} \quad (3)$$

式中: N 为样本数量; χ_{mod} 为模型输出值; χ_{obs} 为实测值或潮汐表值。技能评估参数与相关系数越接近1表示模型的模拟结果越好,而均方根误差越接近0表示数据间的误差越小。实测采样站点的位置如图5所示,主要包括潮位、潮流和温度测量站点。

2.2.1 潮位与潮流的验证

提取4个潮位站的数据与模型输出的水位数据进行图形对比和误差分析。潮位站的观测时间范围为2018年的7月10日0时至8月1日0时,观测时间间隔为每小时一次。根据图像对比的结果,可以看出4个站点的潮位和相位与实测值接近,模型能够准确地模拟舟山海域的潮汐变化特征(图6)。3种误差分析指标的结果说明了模型评估水位变化的能力优良,能较好地模拟舟山及其邻近海域的水位变化情况(表1)。

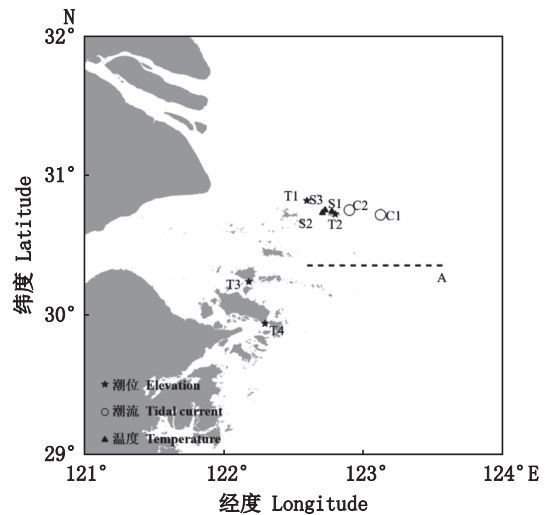


图5 实测数据观测站点图
Fig. 5 Site map of measured data observation

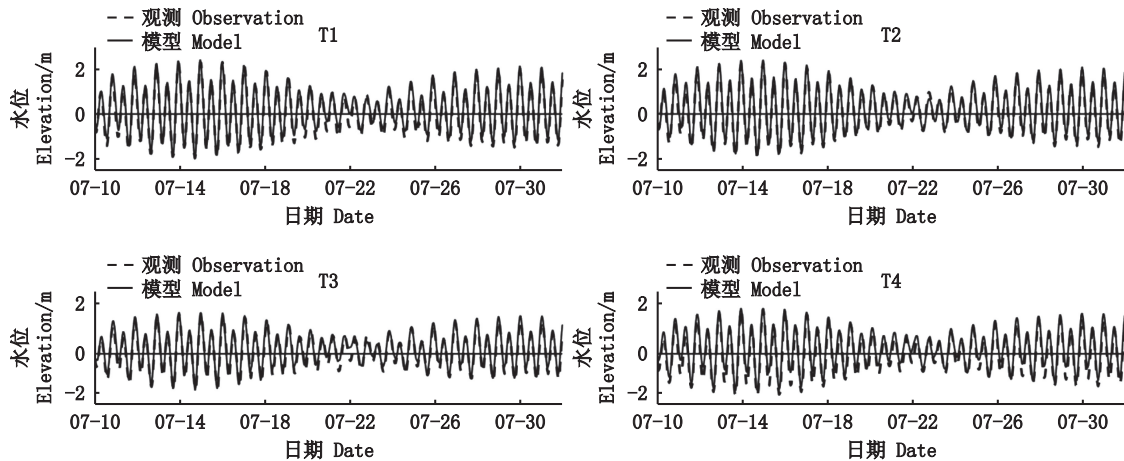


图6 潮位对比的时间序列图
Fig. 6 Time series diagram of tide elevation comparison

表1 水位验证的统计学指标
Tab. 1 Statistical index of elevation verification

站点 Sites	R	C	S
T1	0.21	0.99	0.99
T2	0.18	0.99	0.99
T3	0.21	0.98	0.99
T4	0.33	0.98	0.98

为了进一步评估模型在潮流模拟方面的准确性,我们分别对海礁附近的C1站点及嵎山外侧的C2站点进行了观测。C1站点的观测时间为

2022年11月24日的11时至11月25日的12时,C2站点的观测时间为2018年11月9日的19时至2018年11月10日的21时。两次观测的时间均超过24.5 h(一个潮周期的时间),所用的仪器为 Nortek Signature 500k 系列的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)。验证结果如图7所示,模型计算得到的流速流向与仪器观测值的变化趋势基本一致。均方根误差、相关系数与模型技术得分的结果也说明了模型对舟山及其邻近海域水动力条件的模拟较为准确(表2)。

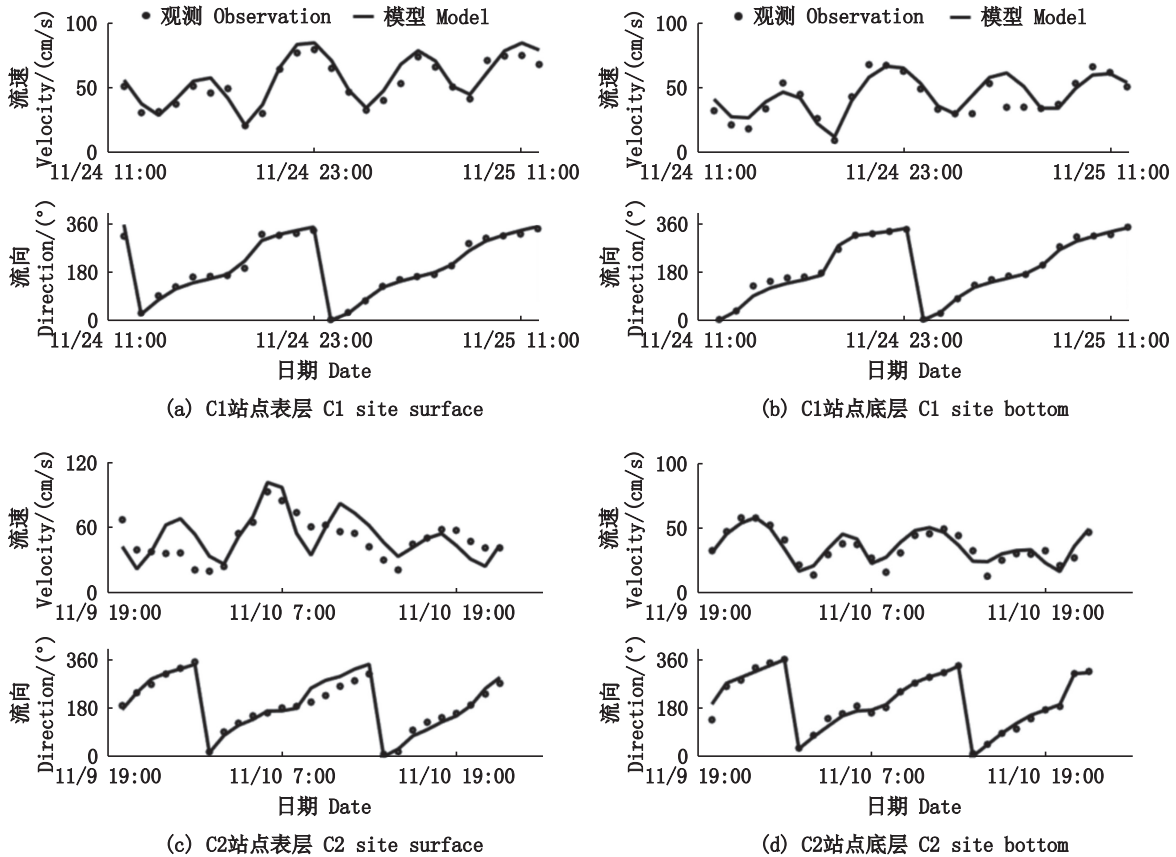


图7 C1、C2站点的流速流向序列验证

Fig. 7 Verification of flow velocity and direction of the station

表2 潮流验证的统计学指标
Tab. 2 Statistical Index of tide flow verification

站点 Sites	水层 Water layer	流速分量 Velocity component	R	C	S
C1	表层	流速	6.61	0.95	0.96
		流向	14.81	0.99	0.99
	底层	流速	8.14	0.87	0.95
		流向	12.02	0.98	0.99
C2	表层	流速	16.82	0.62	0.79
		流向	22.94	0.98	0.98
	底层	流速	5.85	0.88	0.93
		流向	15.01	0.98	0.99

2.2.2 温度验证

本节首先将模型输出的2018年7月的月平均海表温度与业务化海温及海冰分析数据(Operational sea surface temperature and sea ice analysis, OSTIA)提供的月平均数据进行对比。结果表明了模型能够模拟出夏季近岸的高温以

及舟山群岛及长江口海域附近的低温现象。垂向上将 OSTIA 模拟的 2018 年 7 月的表层温度以及实测站点(S1, S2, S3 站点 2022 年 8 月和 9 月的实测数据)全水层的温度与模型计算的结果相验证(图 8), 误差结果分析表明模型能较为准确地模拟舟山海域的温度场分布特征。

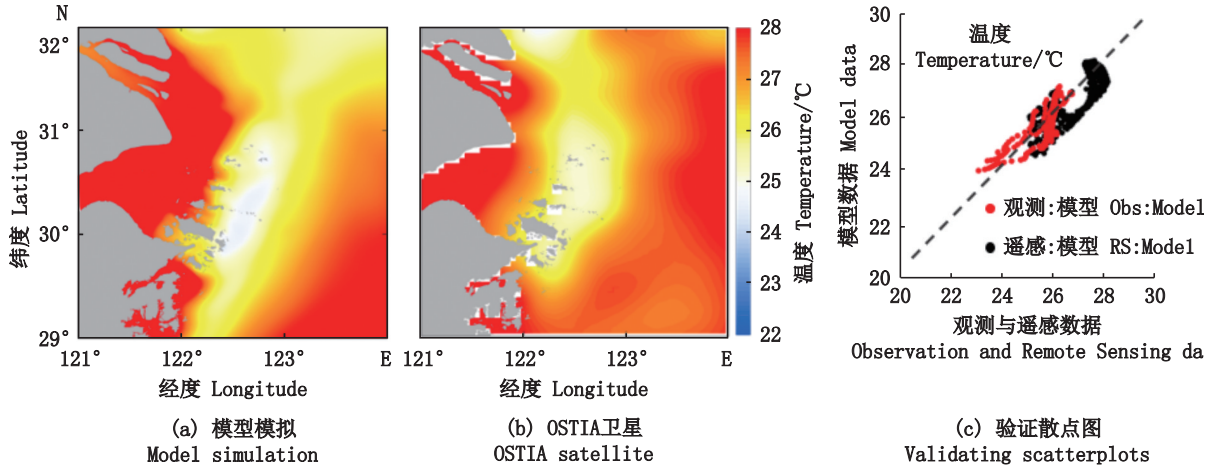


图 8 舟山海域温度验证对比图
Fig. 8 Scatter plot of temperature comparison verification in Zhoushan waters

3 结果与讨论

3.1 温升背景下海气热通量与风应力的时空变化特征

受全球变暖的影响,气象环境因子的改变可能会直接影响到舟山上流流的形成或者强度的变化,从而对舟山渔场的生态环境和渔业资源产生影响。为了研究舟山上流流在温升背景下的演变规律和机制,需要合理构建考虑这些气候环境因子变化特征的数值模型。

对舟山海域温度跃变前后两个阶段进行热通量和总云量(数据来源于 ECMWF)的对比分析。温度跃变前春季和夏季的总云量分别为

0.616±0.019 和 0.710±0.017, 温度跃变后春季和夏季的总云量分别为 0.540±0.015 和 0.664±0.010(数据值为平均值±标准差)。从结果可见,春季云量减少导致短波辐射增加,进而使海水能够吸收更多的热量;同时长波辐射和潜热通量的减少使海水能够存储更多热量(图 9a);尽管夏季云量减少使得短波辐射增加,但是长波辐射的增加以及海水温度升高释放的潜热通量增加使得夏季海水的储热能力弱于春季(图 9b)。这说明春季海气热通量的增加是舟山海域升温的原因之一,而温度跃变后春季海水热含量的增加为夏季海水高温现象提供了较高的初始值,加之夏季短波辐射增加导致了持续的吸热。

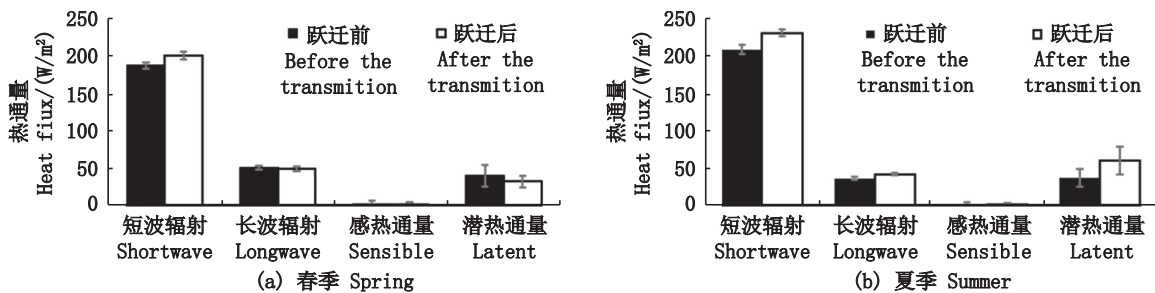
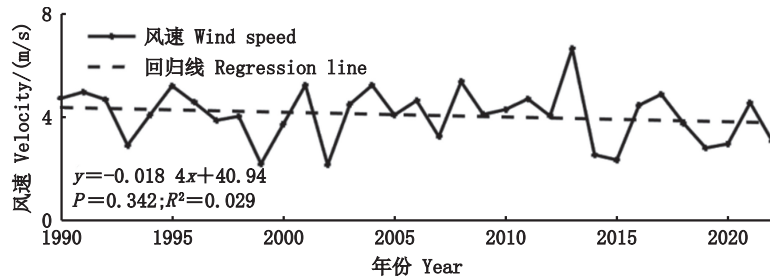


图 9 温度跃变前后舟山海域各项热通量的值
Fig. 9 Values of various heat fluxes in Zhoushan waters before and after the temperature jump

我国东海海域常年受东亚季风的影响,夏季风不仅能调节海域内的气候条件,还能促进沿岸上升流的形成。本文利用高分辨率的ECMWF的海表10 m风场数据,采用线性拟合(Linear fitting)方法,分析了1990年至今7月舟山海域风速的时空变化,以期为后续提高模型模拟的准确度奠定基础。通过拟合得到的一次函数的斜率为

-0.018, $P>0.05$,表明近三十年来舟山海域的风力呈微弱的减弱趋势(图10a)。对于本文使用的模型而言,风场数据采用了跃变前后典型代表年份的实际风速作为模型的风场强迫条件。通过风场的分布特征图可知,东海7月盛行南风(图10b,图10c),跃变后舟山沿岸上升流区域的风速较跃变前减少了约0.5 m/s(图10d)。



(a) 舟山海域7月平均风速变化
Change of average wind speed in Zhoushan waters in July

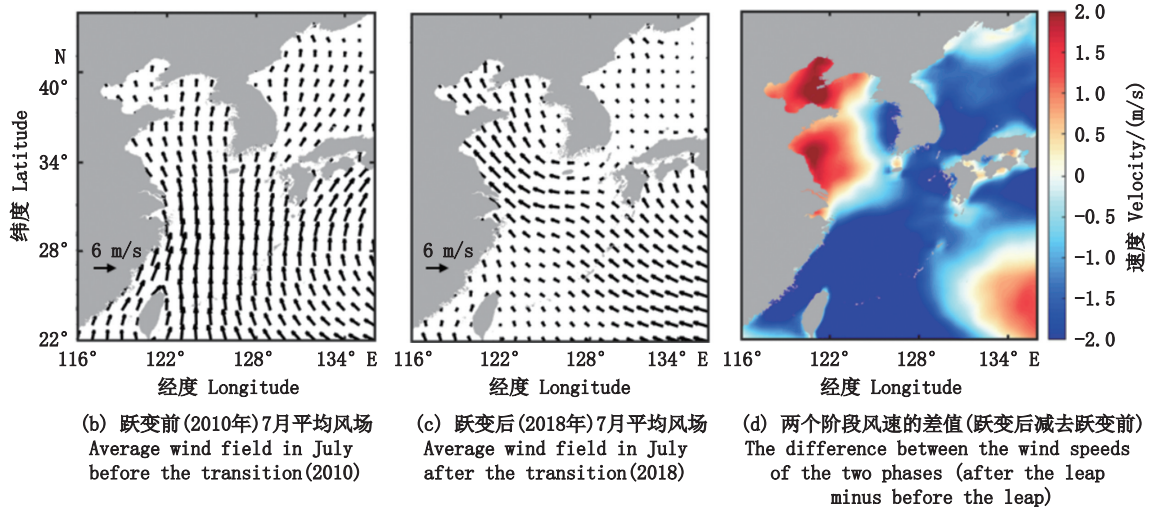


图10 7月舟山海域海表10 m风场分析

Fig. 10 The analysis of the 10 m wind field at the sea surface in the Zhoushan waters in July

3.2 气候因素变化对舟山上升流的响应

基于气候因素的时空变化特征,本文设计了4组对比实验。由于东海海域夏季升温机制复杂,平流热输送^[33]以及太阳辐射的增强^[34]都是导致海水升温的重要因素。为了提高模型模拟温升背景的准确度,控制实验采用了跃变后典型代表年份(2018年)的输入条件,而3组敏感性实验则使用了跃变前典型代表年份(2010年)的数据,具体设置如表3所示。

水体稳定性是反应上升流区水动力条件的重要因素,本文采用了浮力振荡频率量化水体的层结程度。浮力振荡频率^[35]的公式为

$$N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; z 为海水的深度; ρ 为海水的密度。一般来说,7月是舟山上升流现象较为明显的时候,此时气候因素的变化对上升流水动力情况的改变也就更为明显和复杂,所以接下来主要讨论7月舟山上升流区水动力条件的基本分布特征。

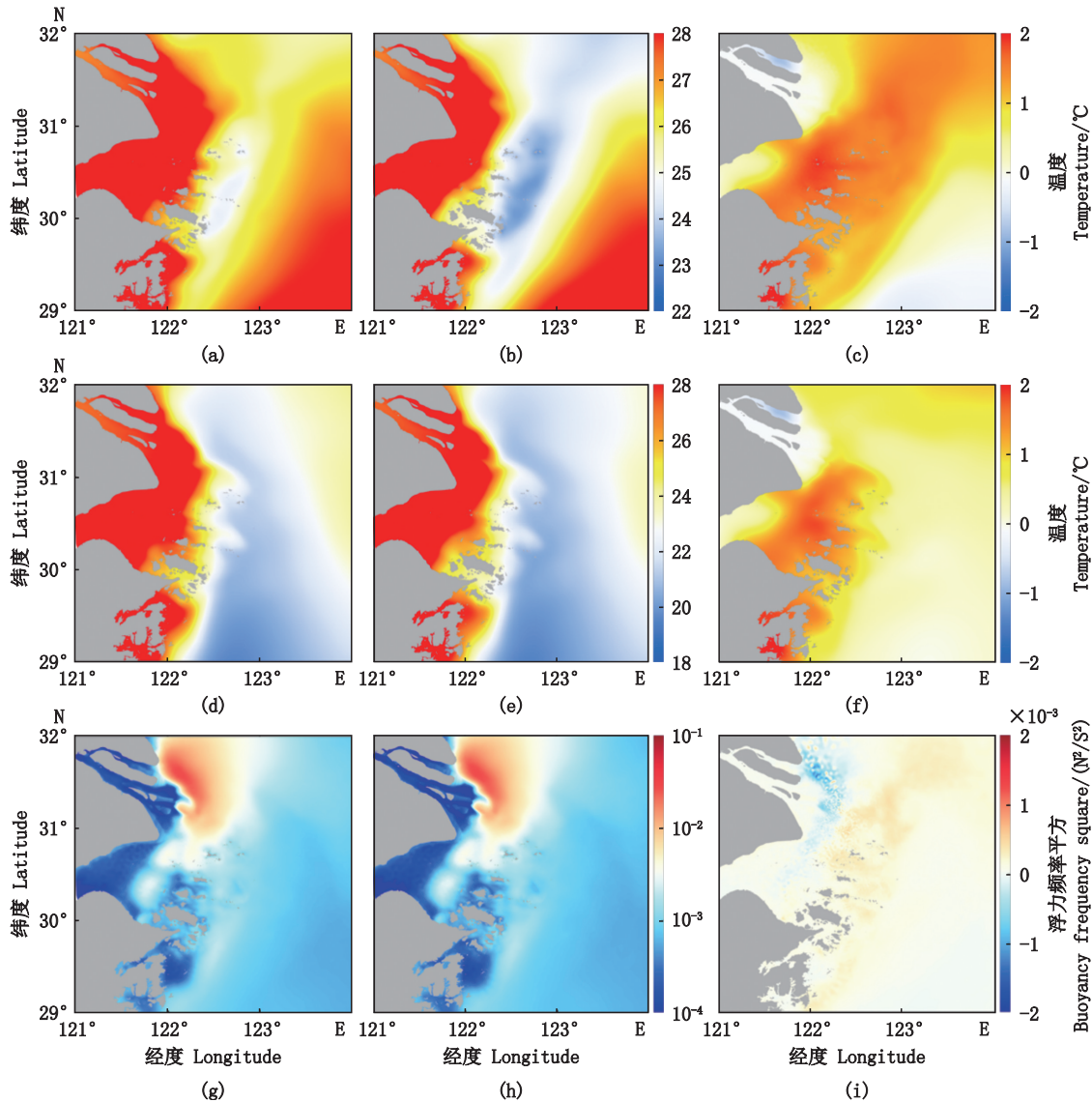
3.2.1 海气热通量及开边界温度变化的影响

从海表温度变化的角度来看,海气热通量的增加并不会明显改变海表温度的空间分布特征,舟山群岛附近仍然存在一个海表温度低值区(图11a,图11b);但是海气热通量的增加会使舟山海域的海表温度整体上升约1℃(图

11c)。从底层温度的变化角度来看,海气热通量增加后,较浅海域接收的热量更容易传递到下层海水,因此近岸的海底温度增加幅度高于远海(图 11d~图 11f)。以最大垂向浮力频率平方表示海水的层结程度,可以观察到除了长江口附近的一些海域外,海气热通量的增加会导致海域内浮力频率增大,层结程度增强(图 11g~图 11i)。

表 3 数值实验设置
Tab. 3 Numerical experimental setup

算例 Case	海气热通量 Air-sea heat flux	海表 10 m 风场 Sea surface 10 m wind field	开边界温度 Boundary temperature
Case1	跃变后	跃变后	跃变后
Case2	跃变前	跃变后	跃变后
Case3	跃变后	跃变后	跃变前
Case4	跃变后	跃变前	跃变后



(a), (d), (g). Case1 的海表温度,海底温度及最大浮力频率平方;(b), (e), (h). Case2 的海表温度,海底温度及最大浮力频率平方;(c), (f), (i). 海表温度,海底温度及最大浮力频率平方的差值(Case1 减去 Case2)。

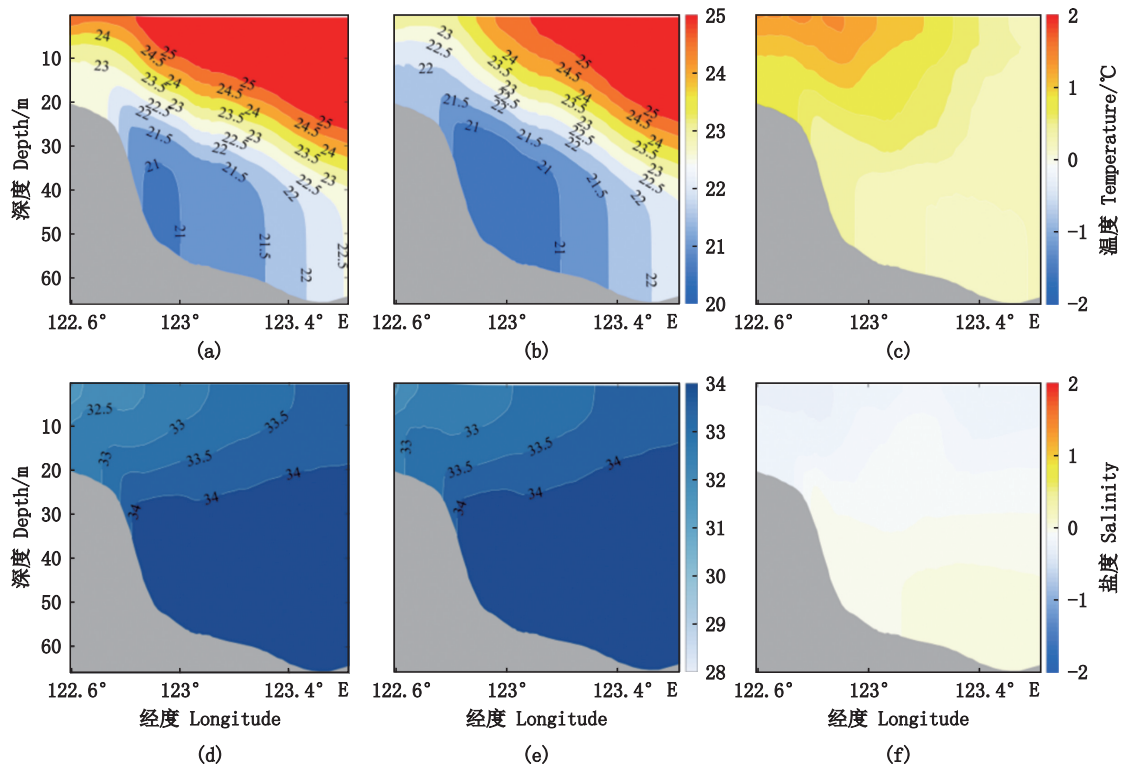
(a), (d), (g). Surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared of Case1; (b), (e), (h). Surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared of Case2; (c), (f), (i). Difference of surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared(Case1 minus Case2).

图 11 热通量变化敏感实验及控制实验下 7 月舟山海域的海表温度,海底温度,最大浮力频率平方的水平分布及比较
Fig. 11 Horizontal distribution and comparison of sea surface temperature, sea floor temperature and maximum buoyancy frequency squared in Zhoushan waters in July under heat flux change and control experiment

进一步以舟山渔场典型断面 A(30.35°N) 为例,分析热通量增加前后温盐垂向结构的变化。断面海水温度在热通量增加后上升,中上层海水升温的幅度高于底层海水,且等温线的上翘程度减缓(图 12a~图 12c)。盐度断面图的特征显示,热通量增加后,外海高盐水向近岸入侵的能力减弱,但是盐度整体变化不大(图 12d~图 12f)。总之,温盐断面的结果可以解释热通量增加不会影响上升流的形成,但在一定程度上会抑制上升流的抬升。如果想进一步量化舟山渔场上升流强度的变化程度还需要从断面的垂向流速和浮力频率的分布特征等方面开展研究。

A 断面的垂向流速垂直剖面图显示,海气热

通量增加并不会影响上升流的形成,上升流中心位置仍位于 122.8°E 附近(图 13 中黑色虚线位置,水深约 40 m,位于上升流形成的主要深度范围内)^[36],最大流速接近于 10^{-4} m/s。尽管热通量增加后,上升流形成的范围基本没有明显变化,但是上升流的速度减小,这表明海气热通量的增加会削弱舟山沿岸上升流的强度(图 13a~图 13c)。浮力频率的垂向分布特征显示,海气热通量增加后,断面的浮力频率增大,上下层海水的垂向混合能力减弱(图 13d~图 13f)。综上所述,温、盐、流、浮力频率的结果表明,海气热通量的增加会加强上升流区海水的垂向层化,不利于上下层海水的交换,从而削弱上升流的强度。



(a), (d). Case 1 的温度及盐度; (b), (e). Case 2 的温度及盐度; (c), (f). Case 1 减去 Case 2 的温度及盐度差值。

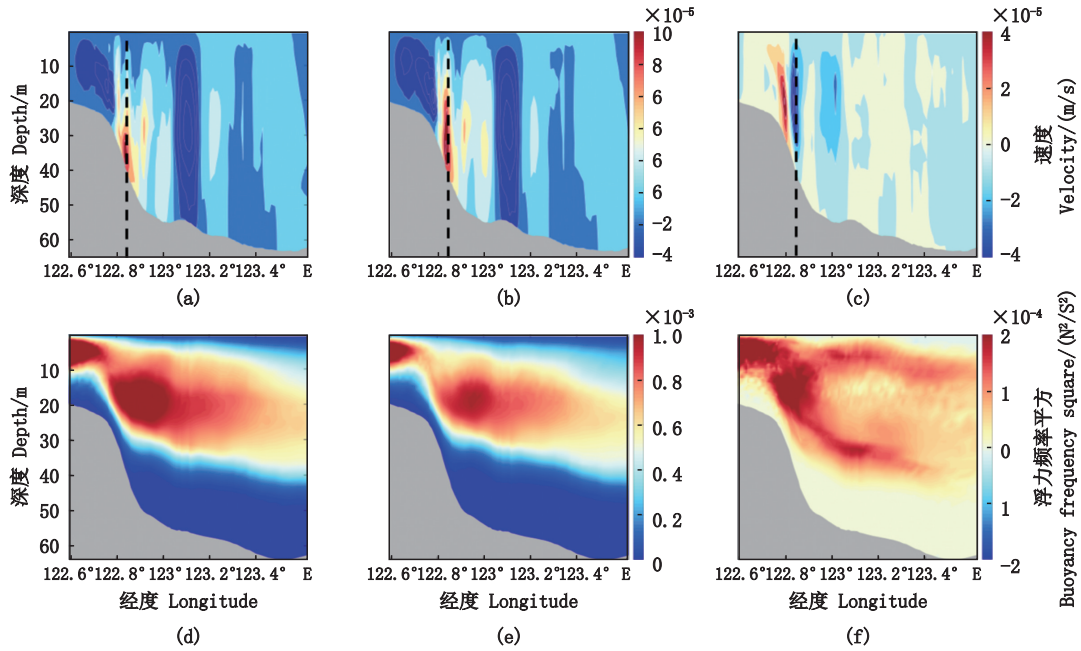
(a), (d). Temperature and salinity of Case 1; (b), (e). Temperature and salinity of Case 2; (c), (f). Temperature and salinity difference of Case 1 minus Case 2.

图 12 热通量变化敏感实验及控制实验下 A 断面温盐的垂向分布及比较

Fig. 12 Vertical distribution and comparison of temperature and salt in section A under heat flux change sensitive experiment and control experiment

相比于海气热通量变化的结果,在开边界温度增加后可以观测到舟山海域的海表温度及海底温度均增加了约 0~1 °C(图 14a,图 14b),且离岸方向增加得更为明显。浮力频率的变化表明了开边界温度的增加会使得舟山上升流区海水的层化程度加强(图 14c)。从垂向断面分析,结果表明在开边界温度增加后,断面温度上升,且

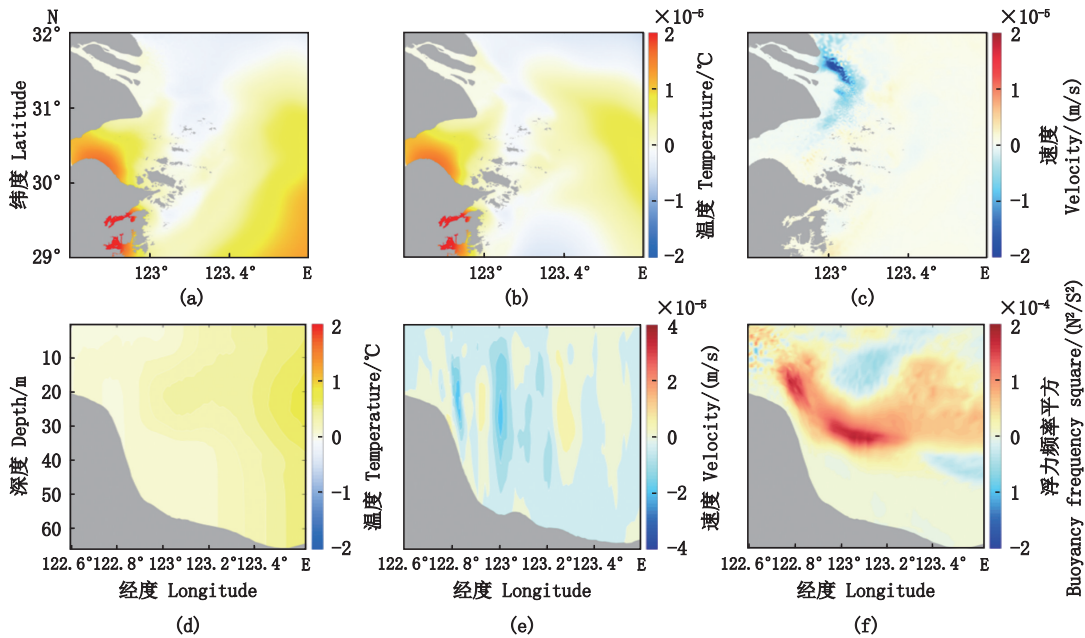
越往离岸方向扩展温度上升的幅度越大(图 14d)。上升流区的垂向流速减小以及浮力频率的增加表明,开边界温度增加会使得上升流区海水层化加强从而削弱上升流的强度(图 14e,图 14f)。总之,海气热通量和开边界温度的增加均会导致舟山海域的海水温度上升并削弱舟山沿岸上升流的强度。



黑色虚线表示上升流形成的中心位置(40 m水深附近);(a),(d). Case1的垂向流速及浮力频率平方;(b),(e). Case 2的垂向流速及浮力频率平方;(c),(f). Case1减去 Case 2的垂向流速及浮力频率平方差值。
The black dashed line indicates the center of the upwelling formation (near 40 m water depth); (a), (d). Vertical flow velocity and buoyancy frequency squared of Case1; (b), (e). Vertical flow velocity and buoyancy frequency squared of Case 2; (c), (f). Vertical flow velocity and buoyancy frequency squared difference of Case1 minus Case 2.

图 13 热通量变化敏感实验及控制实验下断面 A 垂向流速与浮力频率平方的垂向分布及比较

Fig. 13 Vertical distribution and comparison of the squared buoyancy frequency of the vertical flow velocity of section A under the heat flux change sensitive experiment and control experiment



(a)-(f). 两个实验的差值(Case1减去 Case3);(a). 海表温度;(b). 海底温度;(c). 浮力频率的平方;(d). 海水温度(断面 A);(e). 垂向流速(断面 A);(f). 浮力频率的平方(断面 A)。

(a)-(f). The difference of the two cases (Case1 minus Case3); (a). Sea surface temperature; (b). Sea bottom temperature; (c). Buoyancy frequency squared; (d). Sea temperature(section A); (e). Vertical flow velocity(section A); (f). Buoyancy frequency squared(section A).

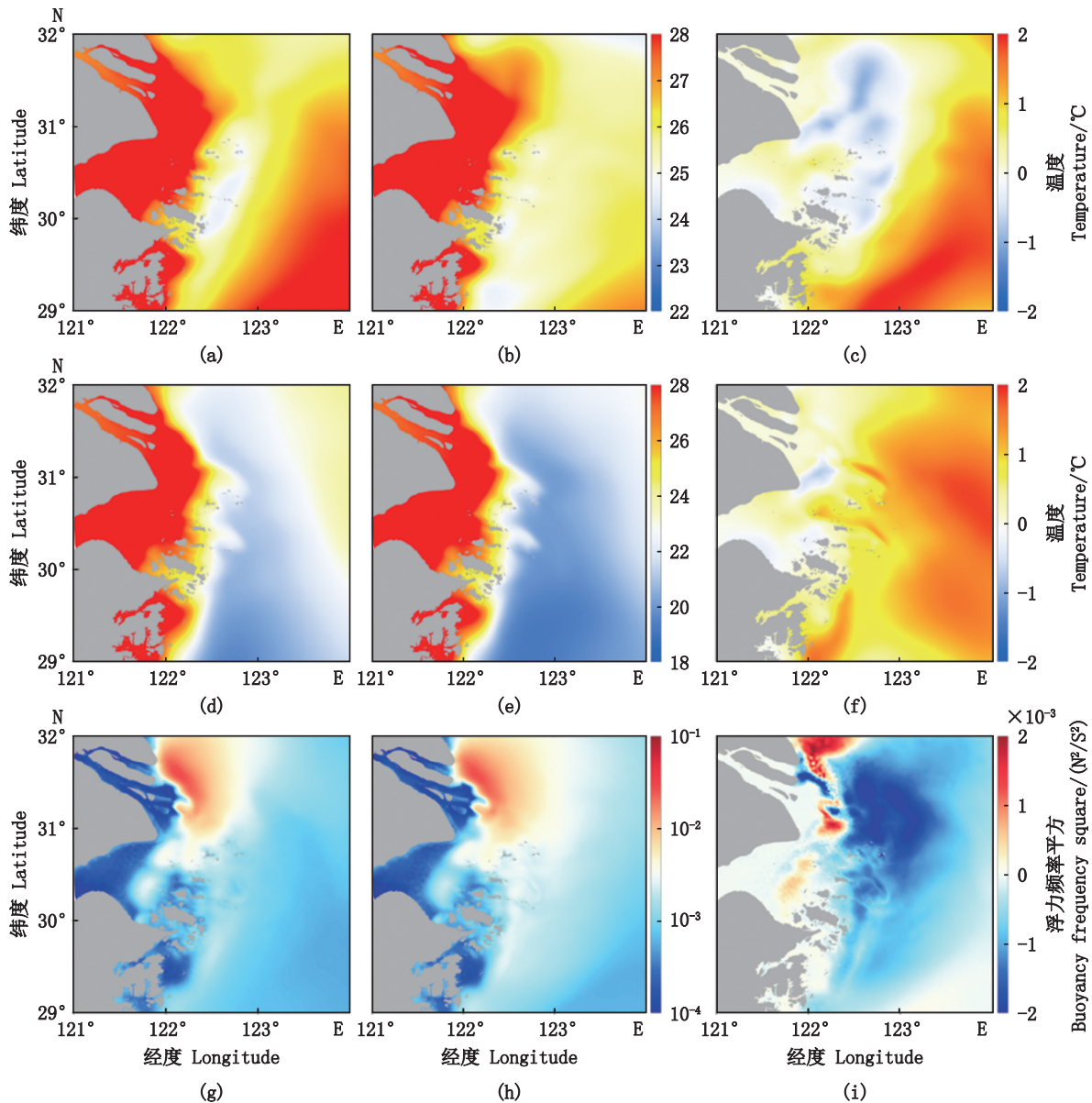
图 14 开边界温度变化敏感实验及控制实验下 7 月舟山海域的海表温度,海底温度,最大浮力频率平方差值的水平分布特征的比较及断面 A 垂向分布特征的比较

Fig. 14 Comparison of horizontal distribution characteristics of sea surface temperature, seafloor temperature, maximum buoyancy frequency squared and vertical distribution difference characteristics of section A in Zhoushan waters under open boundary temperature change sensitive experiment and control experiment in July

3.2.2 风应力变化的影响

在舟山海域海表温度的空间分布特征中,可以观察到风应力减小后,海水表面的混合作用减弱。这使得上升流区的海表温度降低,非上升流区的海表温度升高,因而上升流区与非上升流区的温差减小至约 1°C (图15a~图15c)。通过海底温度变化水平分布特征图,我们可以观察到风应力减小后,舟山沿岸上升流区和离岸

海域的海底温度上升了约 1°C (图15d~图15f)。从浮力频率变化的角度来分析,风应力的改变没有影响到研究区域浮力频率的水平分布特征,仍然是长江口处的浮力频率最大,沿岸上升流区的浮力频率小于外海(图15g,图15h)。然而,我们可以发现风应力的减小会使上升流区的浮力频率减小,海水的垂向层化作用被减弱(图15i)。



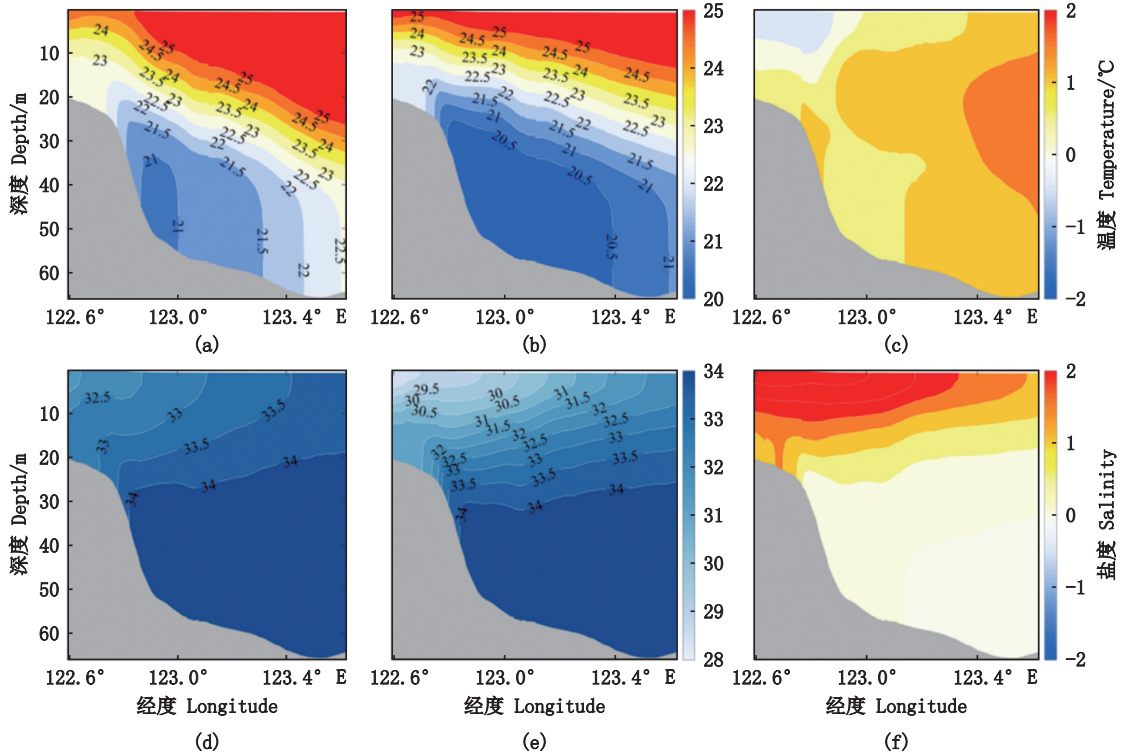
(a), (d), (g). Case1的海表温度,海底温度及最大浮力频率平方; (b), (e), (h). Case 4的海表温度,海底温度及最大浮力频率平方; (c), (f), (i). 海表温度,海底温度及最大浮力频率平方的差值(Case1减去Case 4)。

(a), (d), (g). Surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared of Case1; (b), (e), (h). Surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared of Case 4; (c), (f), (i). Difference of surface temperature, bottom temperature, and maximum buoyancy frequency squared(Case1 minus Case 4).

图15 风应力变化敏感实验及控制实验下7月舟山海域的海表温度,海底温度,最大浮力频率平方的水平分布及比较
Fig. 15 Horizontal distribution and comparison of sea surface temperature, sea floor temperature and maximum buoyancy frequency squared in Zhoushan waters in July under wind stress sensitivity and control experiment

从舟山渔场典型断面 A 的温度剖面分布图可见,风应力的减小导致中下层海水温度升高,且越往离岸方向延展,温度上升幅度越大;且等温线的上翘程度明显比控制实验更为剧烈(图 16a~图 16c)。从图 16d~图 16f 可以观察到,风应

力减小后,等盐线的抬升比控制实验明显,并且长江低盐水舌向外海扩展的能力被减弱。温盐断面结果显示,风应力的减小增强了中下层海水沿海底斜坡的爬升能力。



(a), (d). Case 1 的温度及盐度; (b), (e). Case 4 的温度及盐度; (c), (f). Case1 减去 Case 4 的温度及盐度差值。
 (a), (d). Temperature and salinity of Case 1; (b), (e). Temperature and salinity of Case 4; (c), (f). Temperature and salinity difference of Case1 minus Case 4.

图 16 风应力变化敏感实验及控制实验下 A 断面温盐的垂向分布及比较

Fig. 16 Vertical distribution and comparison of temperature and salt in section A under wind stress change sensitive experiment and control experiment

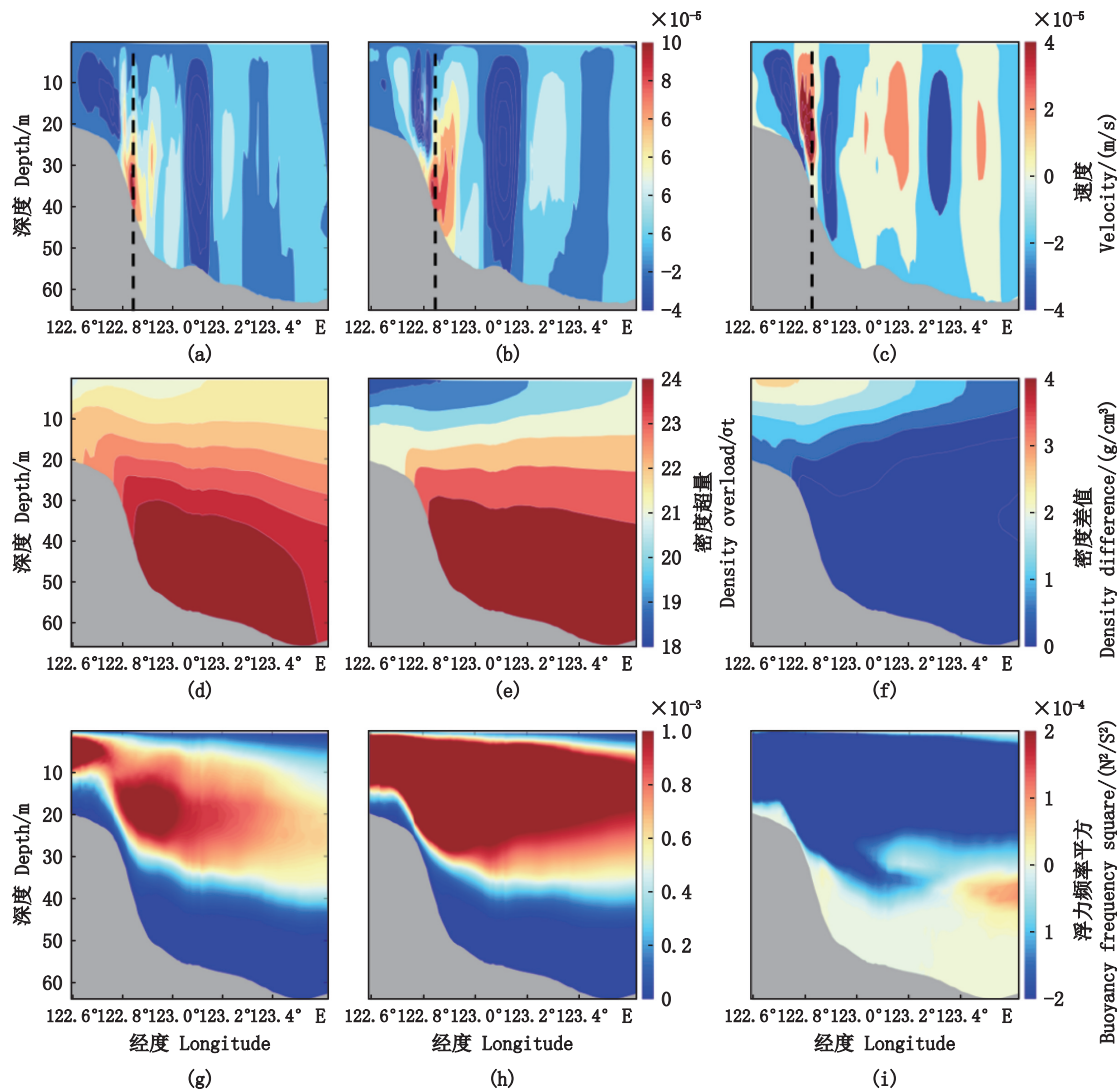
断面 A 垂向流速的结果表明了,在风应力减小后,虽然离岸一侧垂向流速略有减小,但上升流区整体的垂向流速呈上升趋势,上升流形成的范围增大(图 17a~图 17c)。密度的分布特征显示,风应力减小后,断面中上层海水的层化作用减弱,使得断面内中下层的海水更容易向上抬升(图 17d~图 17f)。浮力频率的分布特征也证明了风应力减小后,断面内中上层海水的浮力频率减小,层化程度减弱(图 17g~图 17i)。上述温、盐、流、密度、浮力频率的断面结果均表明海表风速的减小会增强海水上下层之间的交换能力,进而增强上升流的强度。主要影响机制来源于减小后的风应力使得长江径流的离岸扩展被抑制,削弱了上升流区上层的密度层化作用,使得上升流区的中下层海水更容易向上抬升。以往的研

究^[37]结果也表明了舟山沿岸上升流区的夏季风可以作用到较深的层次,增强海水的离岸输运,从而抑制了台湾暖流沿斜坡的爬升,并对舟山沿岸上升流的强度产生影响。

4 结论

以上分析表明,全球变暖背景下海气热通量、平流热输运和海表风速的变化会影响舟山上升流区的水动力环境,结论如下:

(1)舟山群岛及其邻近海域夏季的海表温度在近三十年来呈逐渐增加的趋势。在 2016 年之后,海表温度发生了明显的向暖跃变,导致海表温度相较于跃变前提高了约 1℃。春季海水热含量的增加是舟山海域夏季海水升温的重要因素。



黑色虚线表示上升流形成的中心位置(40 m 水深附近); (a), (d), (g). Case1 的垂向流速, 密度及浮力频率平方; (b), (e), (h). Case 4 的垂向流速, 密度及浮力频率平方; (c), (f), (i). Case1 减去 Case 4 的垂向流速, 密度及浮力频率平方差值。
The black dashed line indicates the center of the upwelling formation (near 40 m water depth); (a), (d), (g). Vertical flow velocity, density and buoyancy frequency squared of Case1; (b), (e), (h). Vertical flow velocity, density and buoyancy frequency squared of Case 4; (c), (f), (i). Vertical flow velocity, density and buoyancy frequency squared difference of Case1 minus Case 4.

图 17 风应力变化敏感实验及控制实验下 A 断面垂向流速, 密度与浮力频率平方的垂向分布及比较

Fig. 17 Vertical distribution of vertical flow velocity, density and buoyancy frequency squared in section A under wind stress change sensitive experiment and control experiment and comparison

(2) 拟合分析的结果显示, 自 20 世纪 90 年代初起, 东海夏季盛行的季风呈减弱趋势。

(3) 数值实验的结果表明了海气热通量和平流热运输的增加会增强夏季舟山沿岸上升流区的海水层结能力, 从而削弱上升流的强度; 风应力减小导致长江低盐水舌扩展受阻, 减弱了中上层海水的密度层化, 进而增强了中下层海水向上抬升的能力, 促进了舟山沿岸上升流强度的增加。

综上所述, 近三十年来, 海气热通量及开边界温度的增加和海表风应力的减小都对舟山沿

岸上升流区的水动力条件产生了影响。已有研究^[38]表明, 受太平洋年代尺度振荡(PDO)与北大西洋多年代尺度振荡(AMO)的影响, 东亚夏季风存在 30~40 年的周期振荡, 并且 20 世纪 80 年代末以来明显减弱^[39]。然而, 在未来的情景下, 东海夏季风预计在 2040 年之后全面增强^[40]。近年来, 舟山群岛及其邻近海域海洋热浪^[41]、赤潮^[42]等生态灾害频发, 海域水动力条件的变化是导致这类海洋灾害发生的原因之一。因此, 本研究的结论为进一步建立水动力条件与生态环境效应之间的关系提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269-277.
WU R S, LI L. Summarization of study on upwelling system in the South China Sea [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(2): 269-277.
- [2] 曹欣中. 浙江近海沿岸上升流与渔场的关系[J]. 海洋湖沼通报, 1985, 7(1): 25-28.
CAO X Z. On the relationship of the upwelling with fishery off Zhejiang [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1985, 7(1): 25-28.
- [3] 毛汉礼, 任允武, 孙国栋. 南黄海和东海北部(28°-37°N)夏季的水文特征以及海水类型的初步分析[J]. 海洋科学集刊, 1965(1): 23-77.
MAO H L, REN Y W, SUN G D. Preliminary analysis of hydrological characteristics and seawater types in the Southern Yellow Sea and the northern East China Sea (28°-37°N) in summer [J]. Marine Science Collection, 1965(1): 23-77.
- [4] 胡明娜, 赵朝方. 舟山及邻近海域上升流长周期的遥感观测与分析[J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37(s1): 235-240.
HU M N, ZHAO C F. Long-time observation of upwelling in the Zhoushan islands and adjacent seas during the summer season [J]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(s1): 235-240.
- [5] 罗义勇. 东海沿岸上升流的数值计算[J]. 海洋湖沼通报, 1998, 20(3): 1-6.
LUO Y Y. Numerical modelling of upwelling in coastal areas of the East China Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998, 20(3): 1-6.
- [6] 潘玉萍, 沙文钰. 夏季闽浙沿岸上升流的数值研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(3): 1-11.
PAN Y P, SHA W Y. Numerical study on the summer coastal upwelling off Fujian and Zhejiang [J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(3): 1-11.
- [7] 颜廷壮. 浙江和琼东沿岸上升流的成因分析[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 12-18.
YAN T Z. Genetic analysis of upwelling along the east coast of Zhejiang and Qiongdong [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(3): 12-18.
- [8] 经志友, 齐义泉, 华祖林. 闽浙沿岸上升流及其季节变化的数值研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 464-470.
JING Z Y, Qi Y Q, HUA Z L. Numerical study on upwelling and its seasonal variation along Fujian and Zhejiang coast [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(4): 464-470.
- [9] YANG D Z, YIN B S, SUN J C, et al. Numerical study on the origins and the forcing mechanism of the phosphate in upwelling areas off the coast of Zhejiang province, China in summer [J]. Journal of Marine Systems, 2013, 123-124: 1-18.
- [10] HU J Y, WANG X H. Progress on upwelling studies in the China seas [J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54(3): 653-673.
- [11] ARELLANO B, RIVAS D. Coastal upwelling will intensify along the Baja California coast under climate change by mid-21st century: insights from a GCM-nested physical-NPZD coupled numerical ocean model [J]. Journal of Marine Systems, 2019, 199: 103207.
- [12] CASABELLA N, LORENZO M N, TABOADA J J. Trends of the Galician upwelling in the context of climate change [J]. Journal of Sea Research, 2014, 93: 23-27.
- [13] DECASTRO M, SOUSA M C, SANTOS F, et al. How will Somali coastal upwelling evolve under future warming scenarios? [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 30137.
- [14] 沈萌, 缪明芳, 王舒瑜, 等. 2018年夏季舟山海域上升流特征及形成机制分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(S1): 18-23.
SHEN M, MIAO M F, WANG S Y, et al. Analysis of upwelling characteristics and formation mechanism in the Zhoushan coastal region in the summer of 2018 [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(S1): 18-23.
- [15] 杨树刚, 毛新燕, 江文胜. 夏季浙江沿岸上升流的年际变化研究[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(2): 1-8.
YANG S G, MAO X Y, JIANG W S. Interannual variation of coastal upwelling in summer in Zhejiang, China [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(2): 1-8.
- [16] RODIONOV S N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(9): L09204.
- [17] RODIONOV S N. Use of prewhitening in climate regime shift detection [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(12): L12707.
- [18] 罗晓凡, 魏皓, 袁承仪. 利用卫星资料分析黄海海表温度的年际与年代际变化[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(10): 19-25.
LUO X F, WEI H, YUAN C Y. Inter-annual and decadal variations of sea surface temperature in the Yellow Sea by satellite data [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(10): 19-25.
- [19] MA S Y, LIU Y, LI J C, et al. Climate-induced long-term variations in ecosystem structure and atmosphere-ocean-ecosystem processes in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Progress in Oceanography, 2019, 175: 183-197.
- [20] BAO B, REN G Y. Climatological characteristics and long-term change of SST over the marginal seas of China [J]. Continental Shelf Research, 2014, 77: 96-106.
- [21] WANG Y N, XU H, LI M T. Long-term changes in

- phytoplankton communities in China's Yangtze Estuary driven by altered riverine fluxes and rising sea surface temperature[J]. *Geomorphology*, 2021, 376: 107566.
- [22] MA S Y, TIAN Y J, FU C H, et al. Climate-induced nonlinearity in pelagic communities and non-stationary relationships with physical drivers in the Kuroshio ecosystem[J]. *Fish and Fisheries*, 2021, 22(1): 1-17.
- [23] 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.
- TAN H J, CAI R S, HUANG R H. Enhanced responses of sea surface temperature over offshore China to global warming and hiatus[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(6): 500-507.
- [24] CAI R S, TAN H J, QI Q H. Impacts of and adaptation to inter-decadal marine climate change in coastal China seas [J]. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(11): 3770-3780.
- [25] CHEN C S, LIU H D, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [26] 施沈阳, 葛建忠, 陈建忠, 等. 基于FVCOM的物理——生物地球化学耦合模型构建与应用[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3): 55-67.
- SHI S Y, GE J Z, CHEN J Z, et al. The development and application of a physical-biogeochemical coupling model based on FVCOM [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2020, 38(3): 55-67.
- [27] 吕赫, 张少峰, 宋德海, 等. 围填海累积效应对钦州湾水动力环境的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(4): 823-833.
- LYU H, ZHANG S S, SONG D H, et al. The cumulative effect of land reclamation on hydrodynamics in Qinzhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(4): 823-833.
- [28] LAI Z G, MA R H, GAO G Y, et al. Impact of multichannel river network on the plume dynamics in the Pearl River estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(8): 5766-5789.
- [29] GE J Z, DING P X, CHENC S, et al. An integrated East China sea-Changjiang estuary model system with aim at resolving multi-scale regional-shelf-estuarine dynamics [J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(8): 881-900.
- [30] 沈淇, 朱建荣, 端义宏, 等. S坐标下西北太平洋环流和海温数值模拟[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 20-28.
- SHEN Q, ZHU J R, DUAN Y H, et al. Numerical simulation of ocean circulation and temperature in the Northwest Pacific using a vertical S-coordinate model [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(6): 20-28.
- [31] CHENC S, XUEP F, DINGP X, et al. Physical mechanisms for the offshore detachment of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113 (C2) : C02002.
- [32] COFFEY M E, WORKMAN S R, TARABA J L, et al. Statistical procedures for evaluating daily and monthly hydrologic model predictions [J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(1): 59-68.
- [33] TANGX 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.
- [34] GAOG D, MARIN M, FENGM, et al. Drivers of marine heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in three consecutive summers during 2016—2018 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(8) : e2020JC016518.
- [35] BRUNT D. The period of simple vertical oscillations in the atmosphere [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1927, 53(221): 30-32.
- [36] 罗义勇, 俞光耀. 风和台湾暖流引起东海沿岸上升流数值计算[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(4): 25-536-542.
- LUO Y Y, YU G Y. Numerical studies of wind and TWC driven upwelling in coastal areas of the East China Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(4) : 536-542.
- [37] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2010.
- LYU X G. A numerical study on the mechanisms of the upwelling in the Yellow Sea and East China Sea [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [38] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. *大气科学*, 2018, 42(3): 533-558.
- DING Y H, SI D, LIU Y J, et al. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 533-558.
- [39] 蔡榕硕, 陈际龙, 谭红建. 全球变暖背景下中国近海表层海温变异及其与东亚季风的关系[J]. *气候与环境研究*, 2011, 16(1): 94-104.
- CAI R S, CHEN J L, TAN H J. Variations of the sea surface temperature in the offshore area of China and their relationship with the East Asian monsoon under the global warming [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2011, 16(1): 94-104.
- [40] 孙颖, 丁一汇. 未来百年东亚夏季降水和季风预测的研究[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1487-1504.

- SUN Y, DING Y H. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(2): 284-300.
- [41] 齐庆华, 蔡榕硕. 中国近海海表温度变化的极端特性及其气候特征研究[J]. *海洋学报*, 2019, 41(7): 36-51.
- QIQ H, CAI R S. Analysis on climate characteristics of sea surface temperature extremes in coastal China seas [J]. *HaiyangXuebao*, 2019, 41(7): 36-51.
- [42] 赵艳民, 秦延文, 张雷, 等. 基于GIS的近30年长江口及其邻近海域赤潮时空分布特征研究[J]. *海洋科学*, 2021, 45(12): 39-46.
- ZHAO Y M, QIN Y W, ZHANG L, et al. Temporal and spatial distribution of red tides in the Changjiang estuary and in adjacent waters from 1989 to 2019 [J]. *Marine Sciences*, 2021, 45(12): 39-46.

Summer hydrodynamics evolution mechanism in upwelling zone along Zhoushan coast under climate change

LIU Jianshi¹, LIN Jun^{1,2,3}, ZHONG Wei¹, XU Zeyu¹

(1. *College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Engineering Technology Research Center of Marine Ranching, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 3. *Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, Shanghai 200137, China*)

Abstract: Global warming is expected to have a profound impact on the driving mechanism of the Zhoushan coastal upwelling, and then affect the changes in the ecological environment and fishery resources in the sea. Using the three-dimensional numerical ocean model FVCOM, we simulated and studied the distribution characteristics of summer hydrodynamics and environmental factors in the upwelling zone of Zhoushan coast under the changes of heat flux, wind field and other climatic and environmental factors. The effect of global warming on the summer sea surface temperature in Zhoushan and its neighboring waters over the past three decades was assessed by introducing a transition test, and it was found that a significant leapfrog occurred around 2016, and the sea surface temperature increased by about 1 °C after the transition compared with that before the transition; the results of heat flux analysis showed that the increase of seawater heat content due to the decrease of cloudiness and the increase of short-wave radiation in spring was an important reason for the warming of seawater in summer; the spatial and temporal variations of wind speed show that the wind speed in Zhoushan sea area in July had a tendency to weaken in recent decades. The results show that the enhanced stratification of seawater caused by the increased heat absorption of surface seawater and increased advective heat transport caused by the increased heat flux of sea air makes the bottom seawater difficult to uplift; the reduced wind stress in summer weakens the offshore expansion of the low-salinity tongue of the Changjiang Diluted Water, resulting in a weakening of the stratification of seawater upper layer in the upwelling zone, thereby strengthening the ascent of the middle and lower layers of seawater towards the shore and increasing the intensity of coastal upwelling.

Key words: upwelling; climate change; change mechanism; numerical simulation; Zhoushan sea area