



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

南海中沙群岛海域温盐结构时空变化特征及其控制因素

黄诚, 吴能友, 吴晓, 刘时桥, 张经纬, 许丞, 刘亮, 董新柱, 陈靓

Temporal-spatial variation characteristics and the controlling factors of temperature and salinity structure in Zhongsha Islands sea area of the South China Sea

HUANG Cheng, WU Nengyou, WU Xiao, LIU Shiqiao, ZHANG Jingwei, XU Cheng, LIU Liang, DONG Xinzhuh, and CHEN Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021111301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53

西湖凹陷Y构造花岗岩气藏特征及成藏主控因素

Characteristics of gas reservoir and controlling factors for gas accumulation in the Huangang Formation in Y Structure, Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 174



关注微信公众号，获得更多资讯信息

黄诚, 吴能友, 吴晓, 等. 南海中沙群岛海域温盐结构时空变化特征及其控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 1-14.
HUANG Cheng, WU Nengyou, WU Xiao, et al. Temporal-spatial variation characteristics and the controlling factors of temperature and salinity structure in Zhongsha Islands sea area of the South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 1-14.

南海中沙群岛海域温盐结构时空变化特征及其控制因素

黄诚^{1,2}, 吴能友^{1,3}, 吴晓¹, 刘时桥², 张经纬², 许丞², 刘亮², 董新柱², 陈靓²

1. 中国海洋大学, 青岛 266100

2. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 570100

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266236

摘要: 南海中沙群岛海域夏秋季水团实测温盐深数据统计分析结果表明, 研究区海水表层温度为 30.0~31.2 °C, 最高温度位于中沙海台区域; 表层盐度为 33.6~34.1 PSU, 最高盐度分布在西北部东岛海域附近; 底层温度 1~25 °C, 盐度 34.1~35.2 PSU, 最高盐度分布在工区东南角。总体上, 研究区水团温盐结构表现为表层高温低盐、底层低温高盐的特征, 混合层深度为 20~90 m。研究区表、中、底层水体垂向流速各不相同, 流速为 0.01~0.22 m/s。根据 FVCOM 模型分析了调查区温度、盐度季节性变化特征, 冬季, 研究区南侧的海域海表温度明显高于北侧, 南北温差显著; 夏季, 海表温盐分布受到台风作用较为明显, 海表温度的空间分布趋于均一。数值模拟表明, 研究区流场整体表现为冬夏季强、春秋季节较弱的季节性变化特征。模拟结果显示, 极端天气在短期内对研究区温盐结构产生显著影响, 表现为海表温度降低、混合层深度增加, 水体垂向混合作用增强。

关键词: 温盐结构; FVCOM 数值模型; 混合层; 极端气候; 中沙群岛海域

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021111301

Temporal-spatial variation characteristics and the controlling factors of temperature and salinity structure in Zhongsha Islands sea area of the South China Sea

HUANG Cheng^{1,2}, WU Nengyou^{1,3}, WU Xiao¹, LIU Shiqiao², ZHANG Jingwei², XU Cheng², LIU Liang², DONG Xinzhu², CHEN Liang²

1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570100, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266236, China

Abstract: The statistical analysis results of CTD measured data of water mass in summer and autumn from the sea area of the Zhongsha Islands show that the sea surface temperature of seawater in the study area is between 30.0 and 31.2 °C, and the highest temperature distributed in the platform of the Zhongsha Islands. The sea surface salinity is from 33.6 to 34.1 PSU, and the highest salinity distributed near the Dong Island. The bottom temperature is from 1 to 25 °C, and salinity from 34.1 to 35.2 PSU, the highest salinity distributed in the southeast corner of the study area. In general, the temperature-salinity structure of the study area is characterized by high temperature, low salt in the surface layer and low temperature, high salt in the bottom layer, and the depth of mixed layer is between 20 and 90 m. The vertical velocity of surface, middle and bottom water in the study area is different, and the velocity is between 0.01 and 0.22 m/s. The seasonal variation characteristics of temperature and salinity in the study area were analyzed according to the FVCOM model. In winter, the sea surface temperature in the south of the study area was significantly higher than that in the north, and the temperature difference between the north and south was obvious. In summer, the distribution of sea surface temperature and salinity is obviously affected by typhoon, and the spatial distribution of sea surface temperature tends to be uniform. The numerical simulation results show that the intensity of flow field in the study area is strength in winter and summer, and weak in spring and autumn. The simulation results also show that extreme weather has a significant effect on the temperature and salinity structure in the study area in a short term, which is manifested as the decrease of sea surface temperature, the increase of mixed layer depth, and the enhancement of vertical mixing effect of water body.

Key words: temperature-salinity structure; FVCOM numerical model; mixed layer; extreme climate; Zhongsha Islands sea area

资助项目: 中国地质调查局专项“海南 ZS 群岛海域 1:25 万海洋区域地质调查”(DD20191027)

作者简介: 黄诚(1987—), 男, 在读博士, 工程师, 主要从事海洋地球化学与区域地质调查研究工作, E-mail: hc_learn@126.com

收稿日期: 2021-11-13; 改回日期: 2021-12-29. 张现荣编辑

海水的温度、盐度、深度(简称温盐深)是海洋的基本物理参数^[1]。海水温盐结构不仅决定了营养盐和初级生产力的分布变化,而且能够直接影响水团垂直边界的划定、潜艇活动和水声仪器的使用。南海是东南亚最大的半封闭边缘海,属典型季风区,也是连接亚澳季风以及太平洋与印度洋热量的桥梁^[2],存在显著的局地性海-气相互作用^[3]。南海的温盐深结构相较于大洋具有明显的边缘海特征^[4],太阳辐射和季风对南海环流及温盐结构均具有重要影响^[5]。同时,南海也是受台风影响最显著的海区之一,随着我国海洋强国战略推进,南海海上航运、海洋渔业资源开发、海洋环境保护等活动日益频繁,了解南海海洋温盐深特征显得十分重要^[6]。

研究区位于南海中部中沙群岛海域,以往对中沙群岛海域的研究主要集中于中沙海槽沉积特征^[7-8]、海洋地质与地球物理^[9]、构造体系研究^[10]、表层沉积物分析^[11-13]以及海水地球化学分析等^[14]。在温盐结构方面,也开展了一定程度的研究工作,如南海海表温度的时空分布特征、中沙群岛附近海域部分年份温度、盐度的跃迁特征及水团温盐结构特征^[1, 15-19]。但是对于该区域温盐结构的季节性变化特征、海洋动力过程及其控制因素以及台风等极端天气事件下水体垂向结构变化的研究仍不够充分。在全球气候变化和区域可持续发展背景下,研究南海温盐结构及其控制因素对认识南海环境变化、了解区域动力结构具有重要作用,也为今后在该区域开展进一步工作提供了理论基础。本文依托航次实测数据,开展南海中部中沙群岛海域温盐结构变化特征与控制机制研究,结合现场观测和数值模拟,阐明研究区温盐结构、时空变化特征及其控制因素,同时揭示海洋动力环境对极端海况的响应。

1 区域概况

研究区在大地构造位置上属中沙地块,中沙地块位于南海北部下陆坡-洋盆过渡带,是南海海盆多期扩张作用下伸展裂离形成的微陆块,地球物理探测结果表明,研究区所在海域基底为一减薄的陆壳^[9],该区特殊的地质背景对南海地质构演化具有重要意义^[10]。中沙地块被海盆所环绕,北邻西北次海盆,东南接西南次海盆,西北侧为中沙海槽盆地,西南侧为中沙南海盆(图 1)。研究区中部为中沙海台,是发育于中沙隆起之上,独特的大型碳酸盐岩台地,整体呈 NE 走向,由许多水深 10~20 m 的暗沙和暗礁组成^[20]。中沙地块东、西两侧地形呈

NE 走向,南部地形呈近 EW 走向,且东西两侧坡度比南侧陡。中沙地块斜坡区侵入岩体较发育,在斜坡南侧发育数个高出海底数百米的海山^[21]。研究区总体水深为 10~4 000 m,基本上全部为海域,陆域仅东岛等极小部分区域。

南海及周边陆地岛屿均位于热带温带气候带^[22],调查区气候类型为热带海洋季风气候,每年 5 月下旬至 9 月盛行西南季风,11 月至翌年 4 月中旬盛行东北季风。年平均气温 23~28.3 °C,冬夏、昼夜温差不大^[23]。雨量充沛,年降雨量多在 1 500~2 000 mm,南部>2 500 mm。调查区每年 5—10 月为台风高发季,气候受台风等热带气旋和风暴影响显著。该区域受低纬度热带天气系统副热高压带、热带辐合带、热带低压和热带气旋等多种因素控制^[15],并受中、高纬度天气系统的影响。

2 数据与方法

2.1 现场观测

海口海洋地质调查中心分别通过 2020 年 8 月 15 日—9 月 17 日(06 航次)、9 月 23 日—11 月 1 日(07 航次)、11 月 14—28 日(航次海补)3 个航次,对调查区内 20 个站位进行了温盐深测量(图 1),获取了不同站位、不同深度的温盐信息。测量仪器采用美国 SBE 公司生产的 SBE-911Plus,每个站位做了自海面到海底垂直剖面观测。利用中国海洋大学开发的 SeaBird911Plus 直读式 CTD 处理分析系统对数据进行处理分析,提取 CTD 上升、下降过程的观测数据,并进一步剔除感温时段数据和仪器上下跳跃引起的逆压数据,将温盐数据垂向插值成 1 m 分层,得到调查区各站位温盐剖面结构。同时,在每个站位均按照 σ 分层采集了表、中、底 3 层水体样品,带回实验室进行抽滤分析实验,得到调查区悬浮泥沙浓度数据。此外,通过固定在锚系上不同深度的 ADCP 观测获取了 DDHL01—DDHL04 共 4 个站位水体航次期间垂向流速分布(图 1)。

2019 年第 29 号台风“巴蓬”(PHANFONE)于 12 月 26 日进入南海,27—28 日经过中沙群岛海域。“巴蓬”过境前,12 月 23 日,工区 SST 为 25~27.5 °C,12 月 27 日,“巴蓬”影响下海洋表层快速降温,工区平均 SST 骤降至 23.5 °C。12 月 30 日,台风影响消失,工区 SST 为 26~27 °C,基本恢复台风过境前的水平。作为一种极端天气事件,台风能够在极短时间内对研究区海洋环境产生剧烈的影响,显

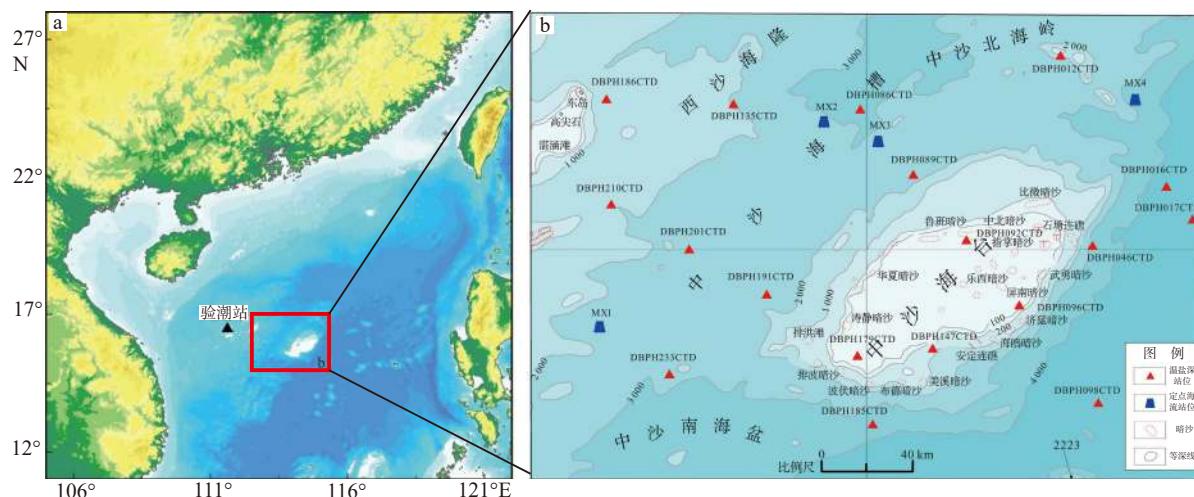


图 1 调查区 CTD 及定点海流站位示意

Fig.1 CTD and currents observation sites within the study area

著改变海水的温盐结构。为了研究不同时间尺度研究区温盐结构变化特征,本研究还通过 FVCOM 模型模拟了台风过境期间中沙群岛海域海水温盐结构的变化。

2.2 数值模型

本次工作采用 FVCOM 模型 (An Unstructured Grid, Finite-Volume Coastal Ocean Model) 构建了包括研究区在内的南海沉积动力模型。FVCOM 模型由美国麻省大学海洋生态动力学模型实验室主导开发^[24], 该模型考虑了多种海气要素(如风场、热通量、蒸发和降水、海冰以及河流淡水的输入等)的作用, 模拟结果可靠, 近年来被广泛用于大洋和区域海洋的研究中^[25]。南海沉积动力模型范围为: 11°~16°N、105°~122°E(图 2), 其构建充分利用了航次调查获取的水深地形资料以及美国地球物理

中心 (NGDC) 发布的 ETOP1 水深数据 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>)。大气强迫数据采用 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的海表风场、温度、大气压、蒸发降水以及太阳长短波辐射等气象数据, 空间分辨率为 0.125°。以往对比研究表明, ECMWF 产品与实测风场具有良好的相关性^[26], 被广泛应用于中低纬度海洋动力过程的研究。

为确保模型的准确性和可靠性, 在研究区进行了网格加密, 并利用验潮站 2020 年 10 月份水位数据与模拟水位进行了对比, 结果表明, 验潮站的潮位随时间的连续变化过程与实测数据基本吻合(图 3)。同时选取了 MX1 定点观测的海流数据与模型结果进行对比验证, 发现模拟的流场结果与实测数据吻合较好, 能较好地再现工区水动力过程(图 4)。

此外, 本次工作还对比了 DBPH147CTD 站位温

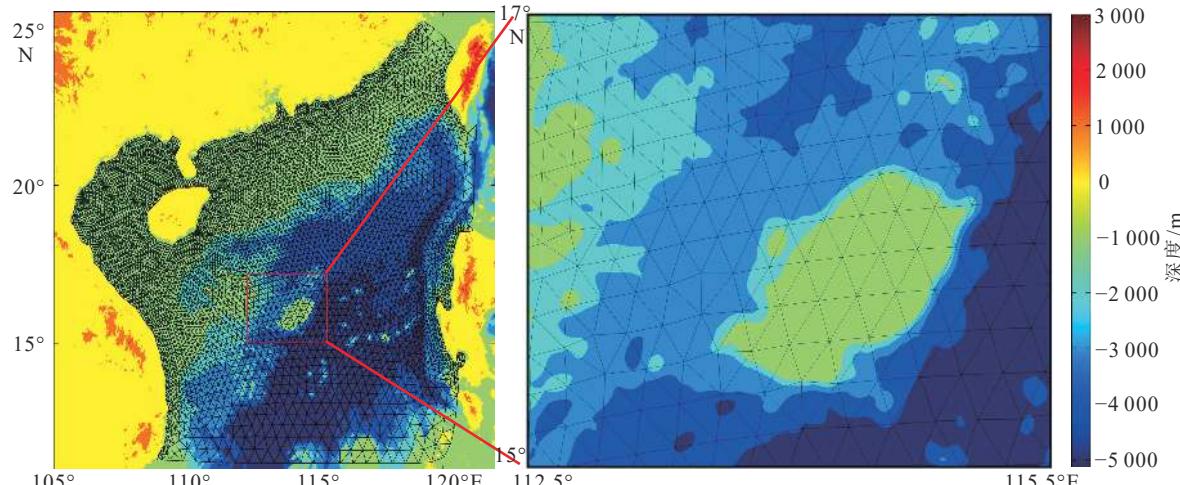


图 2 南海数学模型网格及水深示意图

Fig.2 Model grid and bathymetry in the South China Sea

盐模拟结果与实测结果,总体来说,两者吻合较好。虽然模拟盐度在上层略低于实测盐度,但模型仍能较好地模拟出海水跃层的位置(图 5),因此认为建立的数学模型是可靠的。

3 实测温盐结构及流速结构特征

3.1 海水温盐平面分布特征

本次 CTD 取样时间在夏、秋之交,太阳辐射强烈,表层海水整体温度较高,平均温度为 30.0~

31.2℃,呈 NW、SE 两端高,中间低的特点;最高温度可达 31.2℃,分布于中沙海台东北角。表层海水盐度为 33.6~34.1 PSU,呈 NW 侧高、SE 侧低的分布特点。

底层海水温度低,平均 1~25℃,其中深水区平均温度仅为 1~3℃,但中沙海台由于水深较浅,底层海水总体温度偏高,平均可达 23~25℃。底层海水盐度为 34.1~35.2 PSU,中沙海台区盐度最低,最大值在中沙海台往东南方向,深度急剧变深的区域。由于在研究区西北侧为中沙海槽区,深度整体变化不大,因而盐度也相对均一。总体来看,调查

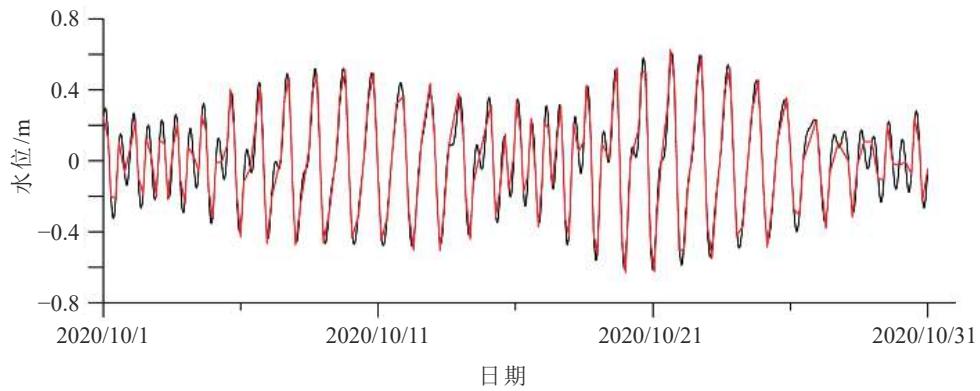


图 3 验潮站水位验证图

验潮站位见图 1a。

Fig.3 Comparison of the water level between model and observation

Tide station is shown in Fig. 1a.

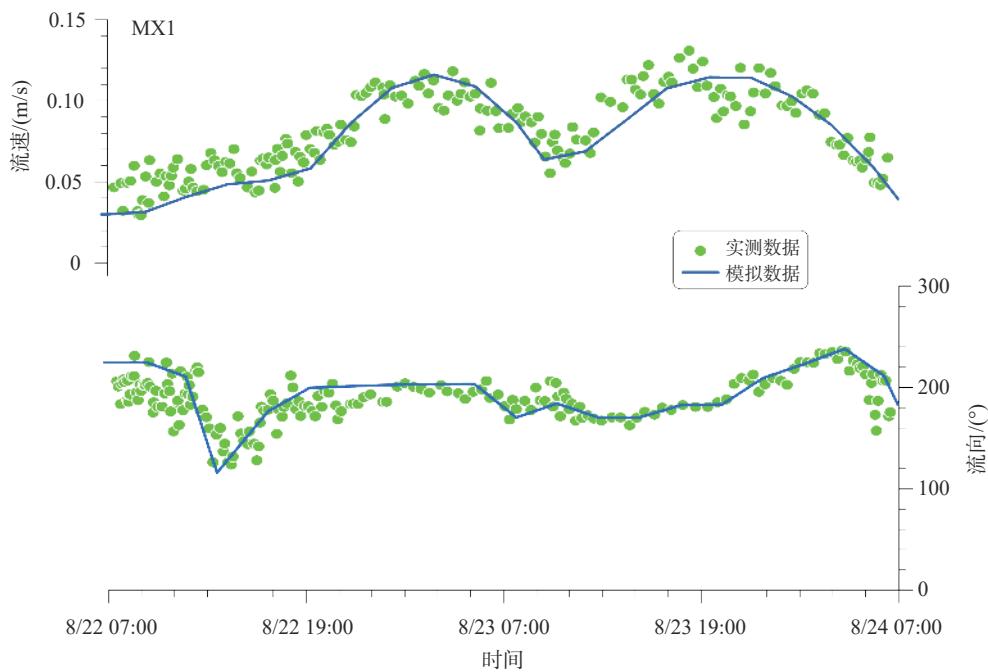


图 4 流速验证结果

Fig.4 Comparison of the current between model and observation

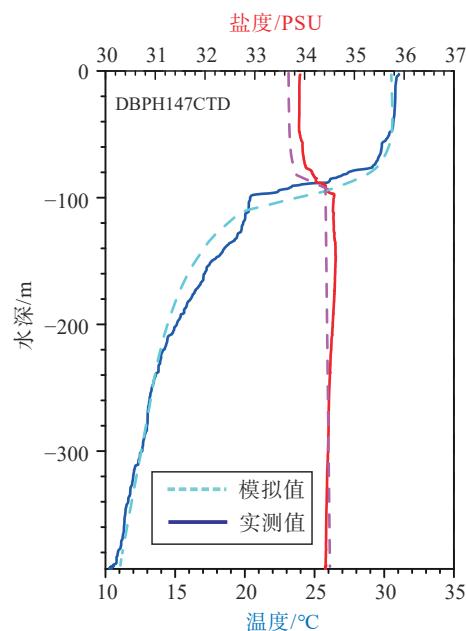


图 5 温盐验证结果

Fig.5 Comparison of the temperature and salinity between observed values and simulated values

区底层温盐分布受海底地形影响明显(图 6)。

3.2 海水温盐垂向分布特征

虽然调查区不同站位之间水深差别较大, 但温度和盐度结构特征在垂向上分布趋势相似(图 7)。调查区温度垂直结构表现为自表至底逐渐降低的趋势, 且在表层存在厚度不等的混合层。海-气通量

变化过程和风浪搅拌作用使海洋表层产生具有一定厚度、水温均一的水层, 该水层即为海洋混合层。混合层厚度是研究海洋上层动力过程、海气相互作用以及生态环境的基本物理量。混合层的深度定义为温度比表层低 0.5 °C 的深度, 其特点为温度垂直变化小, 平均温度接近海表温度^[27]。调查区混合层的深度为 20~90 m, 其中, DBPH186CTD 和 DBPH147CTD 站位混合层深度最深, 约 90 m。混合层之下, 水体温度快速降低, 但当水深>1000 m, 垂向温度逐渐均一, 几乎不再变化。

调查区垂向盐度剖面在不同站位间变化趋势也大体相近, 但变化幅度差别较大(图 7)。水体盐度在混合层较为均一, 由于接受大气降水的影响盐度值要低于底层; 混合层以下盐度逐渐升高, 在约 100 m 出现盐跃层, 盐度达到极大值, 随后盐度值随水深增加开始降低, 并逐渐趋于稳定。但不同站位的盐度极大值有一定的差异, 如 DBPH096CTD 和 DBPH179CTD 站位由于分布于中沙大环礁浅水区, 水深仅有 70 m, 水体混合相对比较均匀, 盐度垂向基本无变化, 表层、底层盐度仅有约 34 PSU; 盐度的极大值也较其他站位要小。这种极大值的差异可能和数据采集不同时间区域降雨量及海流流场变化有关, 南海地区降水季节峰值在秋季, 主要集中在 8—10 月^[28], 这 2 个站位数据采集由 06 航次(8 月 15 日—9 月 17 日)完成, 正好是区域降水峰值期, 对表层盐度影响较大。DBPH098CTD 站位盐度

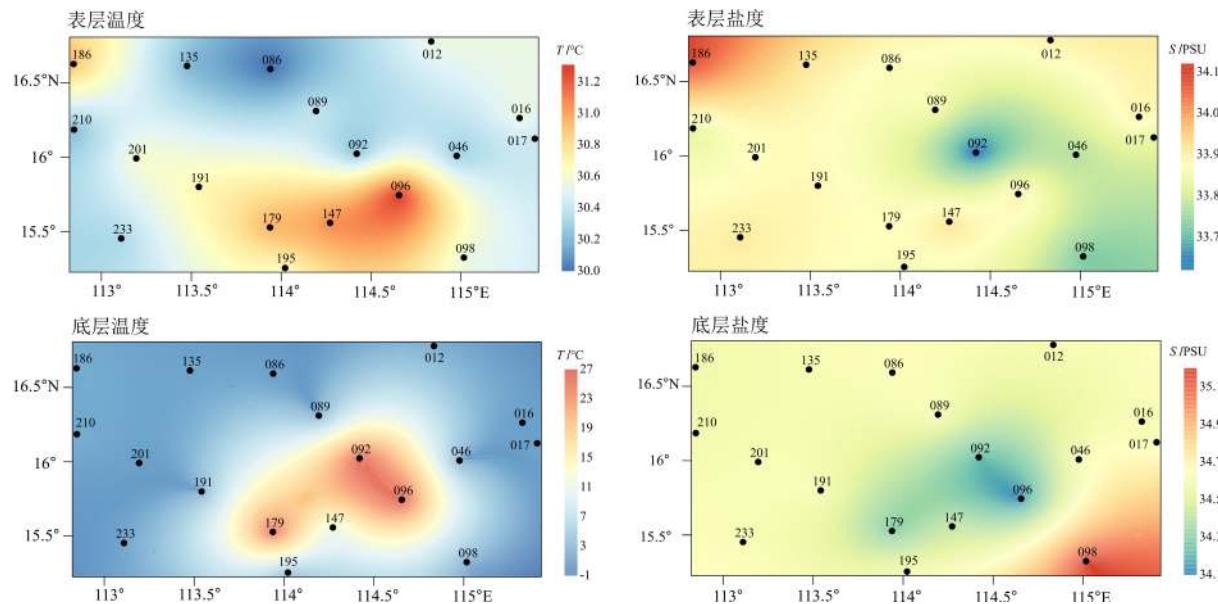


图 6 工区夏季表底层实测温盐分布

数字代表站位名称。

Fig.6 Summer temperature and salinity distribution of the surface/bottom seawater

The numbers refer to the stations.

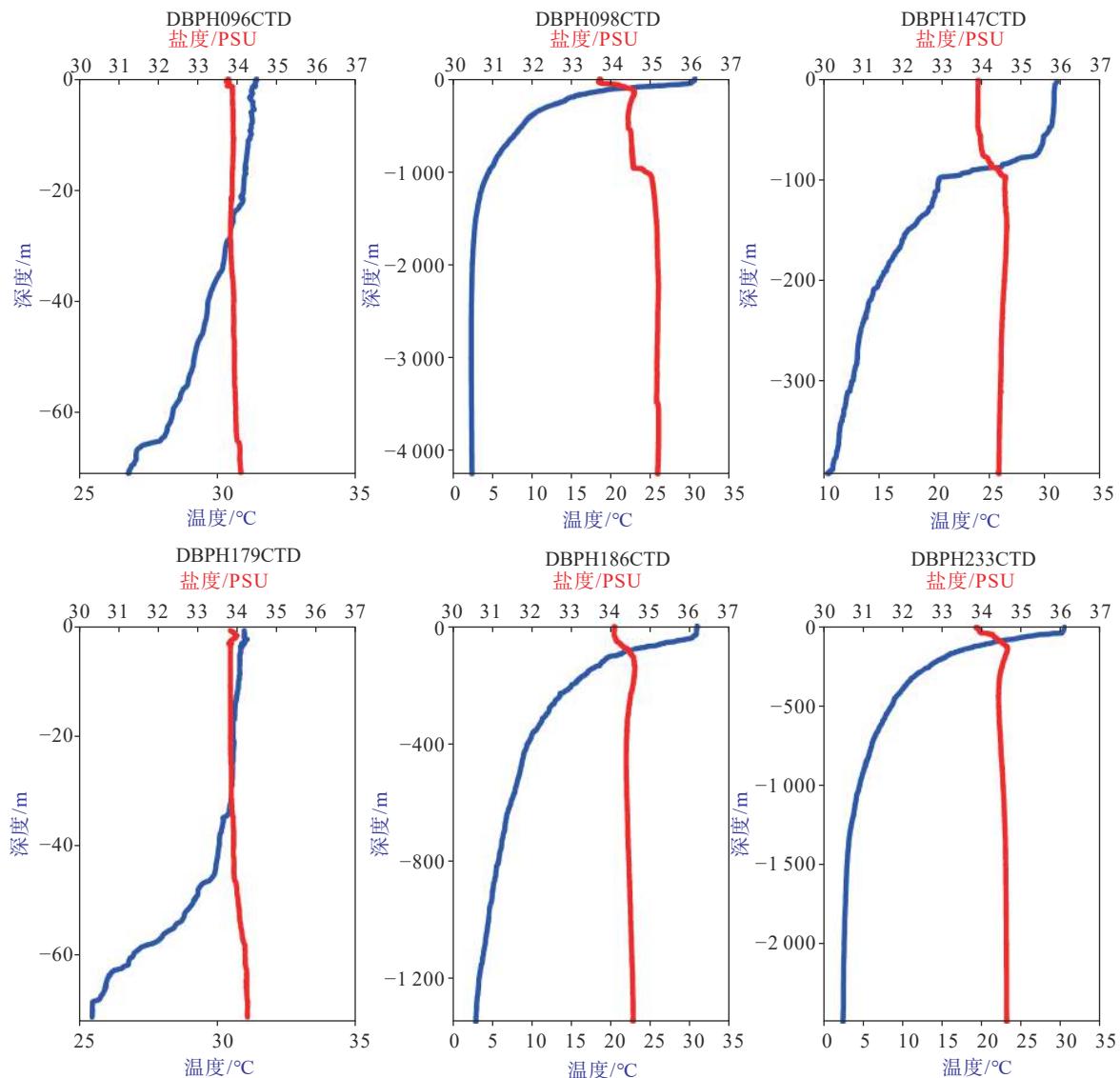


图 7 调查区典型站位温度、盐度变化与水深关系

Fig.7 The relationship of temperature, salinity and water depth of the typical stations

在水深 1 000 m 处出现第 2 次突变, 盐度值由 34.5 PSU 变为 35 PSU, 可能受中层局部环流的影响。

3.3 垂向流速结构

本次调查, 通过固定在锚系上不同深度的 ADCP 观测获取了中沙海槽及其周边海域 MX1—MX4 共 4 个站位水体垂向流速分布特征(图 8)。

中沙海槽西南部(MX1)垂向流速大小自表至底逐渐降低, 方向在表层和中层相一致, 底层相反。表层流速具有明显的周期性波动, 流速在 0.01~0.19 m/s; 在流向向上, 以 SW 向为主, 个别时段流向转为 NW 或 S 向。中层流速变化频率较表层低, 流速范围为 0.01~0.12 m/s; 流向上以 S 向为主。底层流速大小略低于中层流速, 方向以 NE 向为主。

中沙海槽中部(MX2、MX3), MX2 水体表、中层流速变化规律相近且流速高于底层流速。表、中层流速大小为 0.1~0.22 m/s; 底层流速为 0.02~0.16 m/s。表层流向主要为 S 向, 个别时段为 NW 或 NE 向, 存在明显的周期性特征; 中层流向为稳定的 S 向。底层流速方向没有明显的规律性。而同在中沙海槽中部的 MX3 海流却呈现与 MX2 完全相反的规律。MX3 流速自表至底逐渐降低, 水体流向以 N 向流为主, 流向存在周期性变化。推测由于中沙海台地形突起, 水体温盐结构在空间分布上存在差异(图 6), 进而导致局地海洋锋面的形成, 进而形成流速切边锋, 从而造成 MX2、MX3 海流反向。

在中沙北海岭以南(MX4), 垂向流速自中层往下快速降低, 水体流速为 0.01~0.1 m/s, 其中, 表层

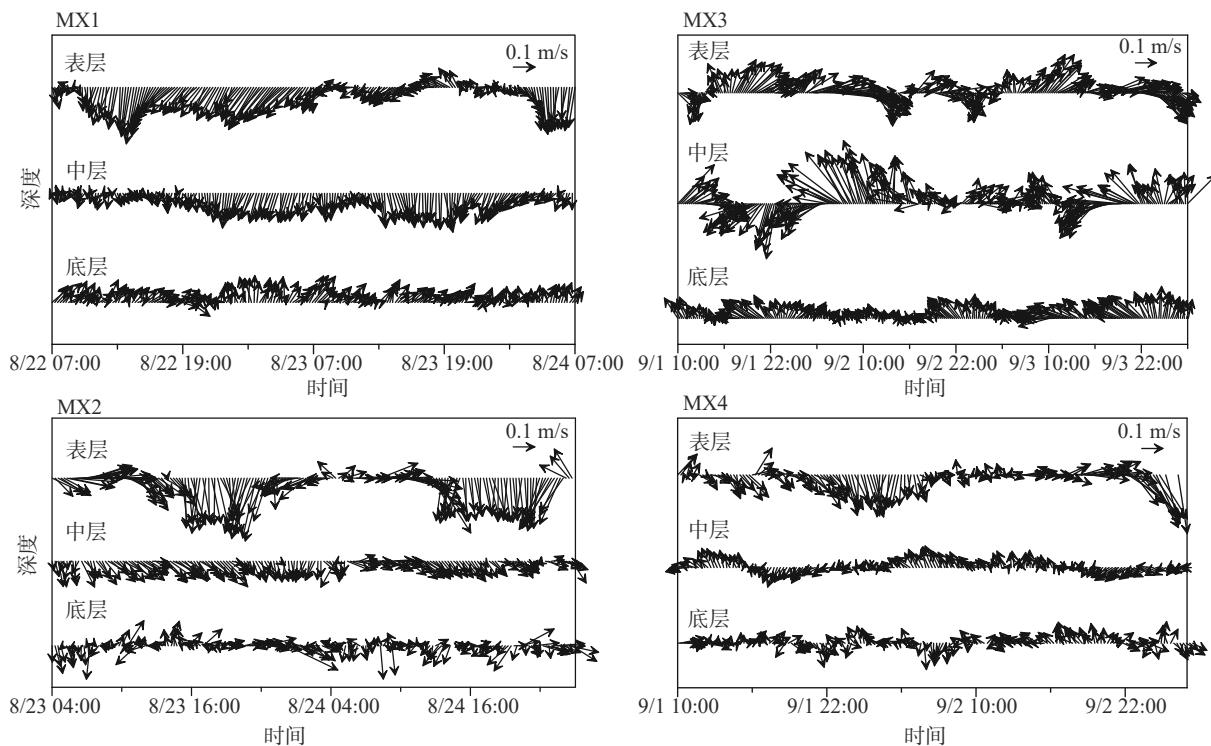


图 8 调查区水体垂向流速大小及方向

Fig.8 Current distribution at surface, middle and bottom layer in the water column

流速在 9 月 2 日 16:00 以后逐渐增大, 最大可至 0.18 m/s。垂向流速方向以 N 向和 S 向为主。

4 温盐结构变化特征的数值模拟

在实测结果的基础上, 利用 FVCOM 模型对调查区温盐结构进行模拟, 并分析其海表和垂向上温盐结构季节变化特征, 从而获得调查区更丰富的温盐结构信息。

4.1 海表温度季节变化

海表温度(Sea Surface Temperature, SST)是描述海洋表层热状况最为重要的参数之一^[29], 表征了海洋热力、动力过程, 是海洋与大气相互作用的综合结果。海-气之间的能量交换是通过海-气界面进行的^[30], SST 的任何微小变化都可能带来海洋内部热能储蓄的重大变化。模拟结果表明, 调查区年平均 SST 为 25~32 °C(图 9), 整体表现为夏季温度高, 冬季温度低, 夏冬季节温度较为稳定, 而在春秋 2 季温度变化较快, 具有明显的季节特征。表层最低气温出现在 1 月份, 为 24.97 °C; 12 月和 2 月次之, 约为 26 °C。2—5 月工区 SST 明显上升, 在 6 月上升至最大值, 为 31.84 °C, 整个区域温度分布均匀。7—9 月略有下降, 但 10 月温度略有回升, 到

11 月温度再次迅速降低。

调查区 SST 在空间分布上也具有较为明显的季节特征, 冬季整体温度较低, 南北温差较大, 南侧温度高, 北侧温度低, 最大温差约为 2~3 °C, 呈 NE—SW 向带状分布。1、2 月份工区海表温差最为明显, 春季海面温度上升速度较快, 南北温差缩小, 带状分布弱化。6 月份海面温度达到最高, 仍能看出微弱的南北差异。到 8、9 月份, 温度较 7 月份有所下降, 南北温差几乎消失, 空间分布较均匀, 平均温度约 28.3 °C。11 月份 SST 明显下降, 南北温差变大。12 月份时, 北侧温度下降明显, 最低温度约为 25 °C, 西南侧温度仍然较高, 约为 25 °C, 南北温差变大, NE—SW 带状分布重新出现。

4.2 海表盐度季节变化

模拟结果显示, 工区盐度全年分布稳定, 具有明显的季节特征。工区表层盐度为 33.75~35 PSU, 底层盐度为 34~35.5 PSU。工区表底层盐度的月季变化相对于温度要小的多。表层盐度在 1 月份最低, 约为 33.8 PSU; 2 月份盐度升高, 平均盐度 34.89 PSU; 3 月份工区盐度降低, 最低盐度约为 34.3 PSU; 4 月份以后盐度逐渐升高, 6 月份达到最大; 7—10 月份工区盐度再次降低; 11、12 月份盐度再次升高, 12 月份达到全年最大盐度, 平均盐度

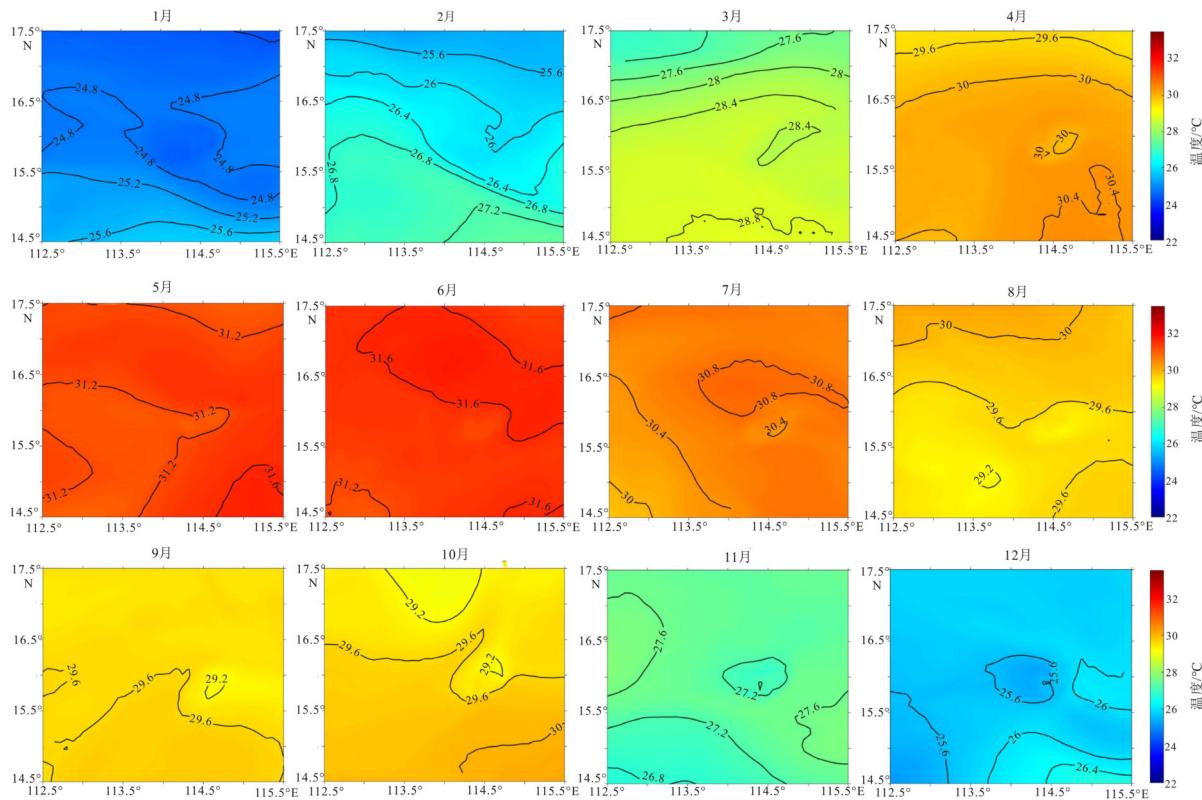


图 9 调查区表层月均温度分布

Fig.9 Monthly distribution of surface temperature in the study area

>35 PSU。空间上,工区表层盐度整体表现为北部低、南部高的特点,其中,1—3月以及9、10月份南北盐度差异最大;而6月和12月份区域盐度均一,变化不明显(图 10)。

4.3 垂向温盐结构变化

根据模型模拟结果提取了工区 DBPH012CTD 和 DBPH016CTD 2个站位的月均垂向温盐分布剖面。分析发现工区温度垂直结构分布全年各季节具有类似的变化趋势。夏季表层温度高,最高温度可达 31°C ;冬季表层温度低,最低温度约 25°C ,春季和秋季温度介于二者之间。垂向上,在 $0\sim 300\text{ m}$ 水深,温度下降速率较快,约为 $0.067^{\circ}\text{C}/\text{m}$, $>300\text{ m}$ 水深,温度下降速率 $0.013^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。总体上,表层温度季节变化明显,底层温度各月份没有明显变化。

以 DBPH012CTD 站位为例,该站位表层温盐的月际变化明显,底层变化相对较小(图 11)。温度整体呈现夏高冬低的特点,表层水温在1月份为全年最低,温度 $<25^{\circ}\text{C}$,2、12月温度次之,3月和11月份温度为 $26\sim 27^{\circ}\text{C}$,其余月份表层温度 $>28^{\circ}\text{C}$ 。自2月开始表层温度逐渐升高,至6月达到最高,表层温度超过 30°C ;7月份以后表层温度逐渐降低。温跃层深度大约为 45 m ,水深 $<50\text{ m}$ 随深度增加温

度逐渐降低。

盐度垂向分布表现为春秋季节盐度要明显低于其他月份。10月份受台风影响区域降水增加,表层盐度最低为 <33.6 PSU。盐跃层深度大约为 50 m ,水深 $50\sim 200\text{ m}$ 之间盐度随深度的增加逐渐增加,至 200 m 处盐度达到极大值 $34.5\sim 34.6$ PSU。 $<200\text{ m}$ 盐度降低,至 500 m 水深约为 34.4 PSU; $<500\text{ m}$ 盐度随深度增加继续增加。底层盐度月均变化不明显,整体表现为表层高温低盐、底层低温高盐的特征(图 12)。底层盐度较表层盐度高,但没有明显的季节性变化特征。

5 讨论

5.1 海洋动力过程的季节性变化对温盐结构的影响

海流能改变全球热量分布,对气候有明显影响^[31]。受大气环流和海流的共同作用,低纬度地区的热量被不断输送到中高纬度地区,使高低纬度之间的温差相对稳定。调查区位于中国南海中部,周边海域开阔,风区较长,流场主要受季风及南海环流体系控制。中沙群岛位于亚洲东南部季风盛行地带,属热带季风气候和赤道气候。对调查区 2019 年风场

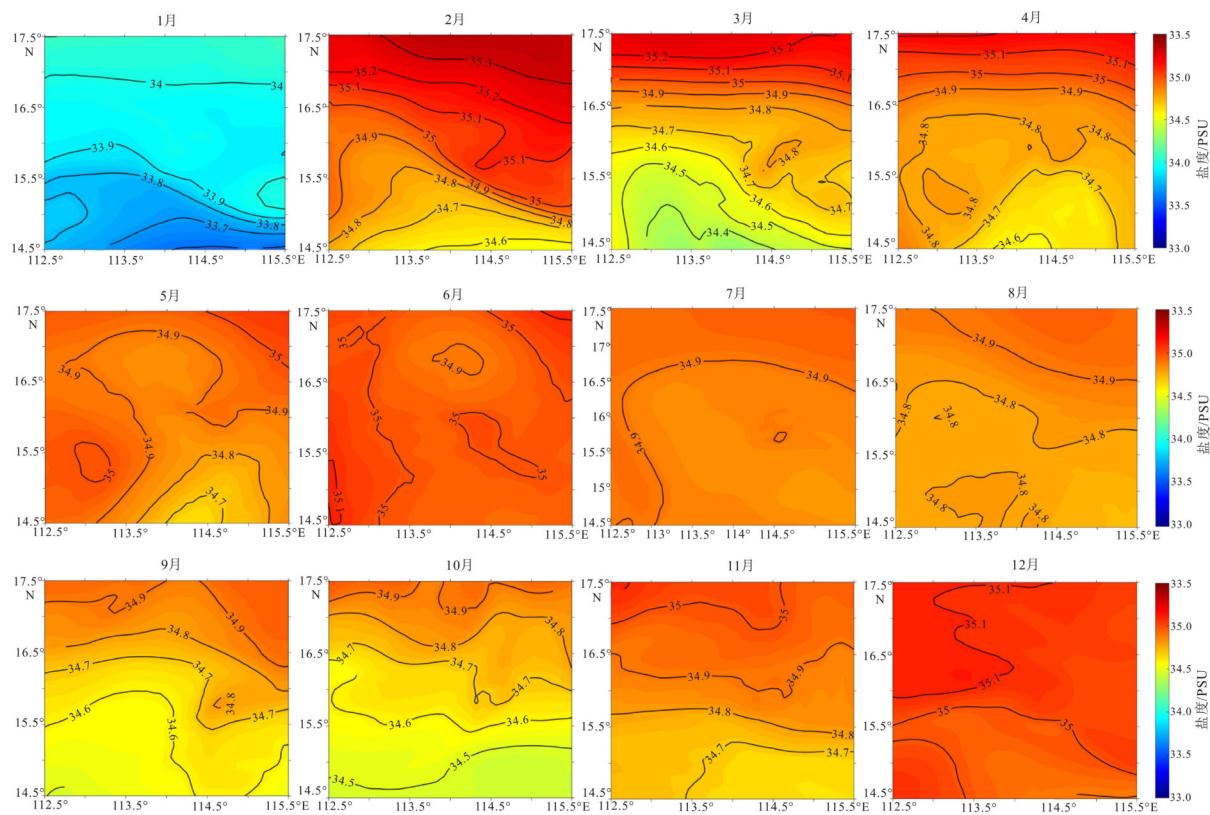


图 10 调查区表层月均盐度分布图

Fig.10 Monthly distribution of surface salinity in the study area

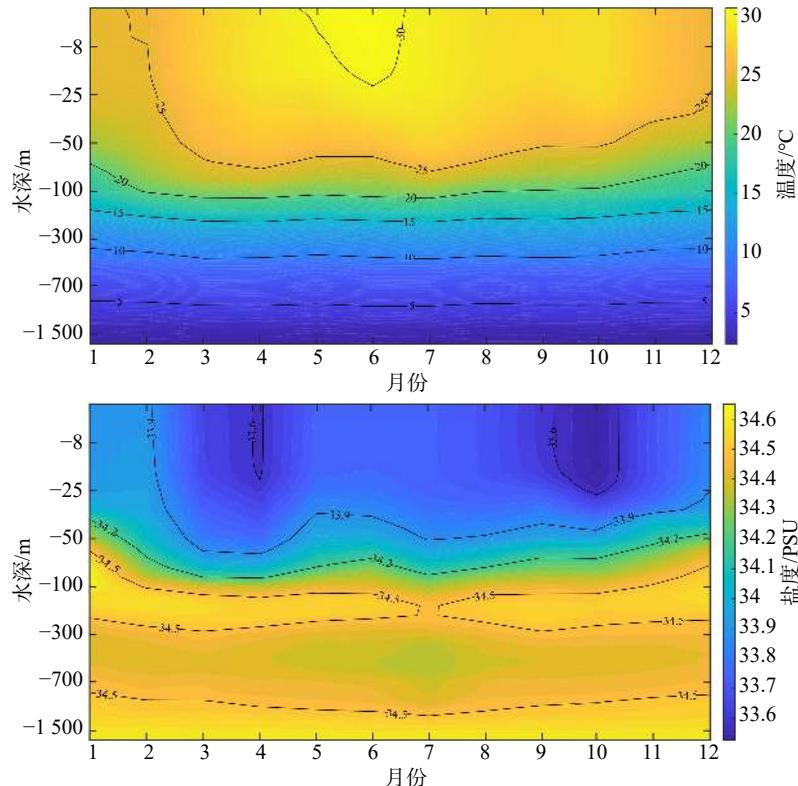


图 11 DBPH012CTD 站位月均垂向温盐分布剖面

Fig.11 Monthly vertical profiles of temperature and salinity at DBPH012CTD site

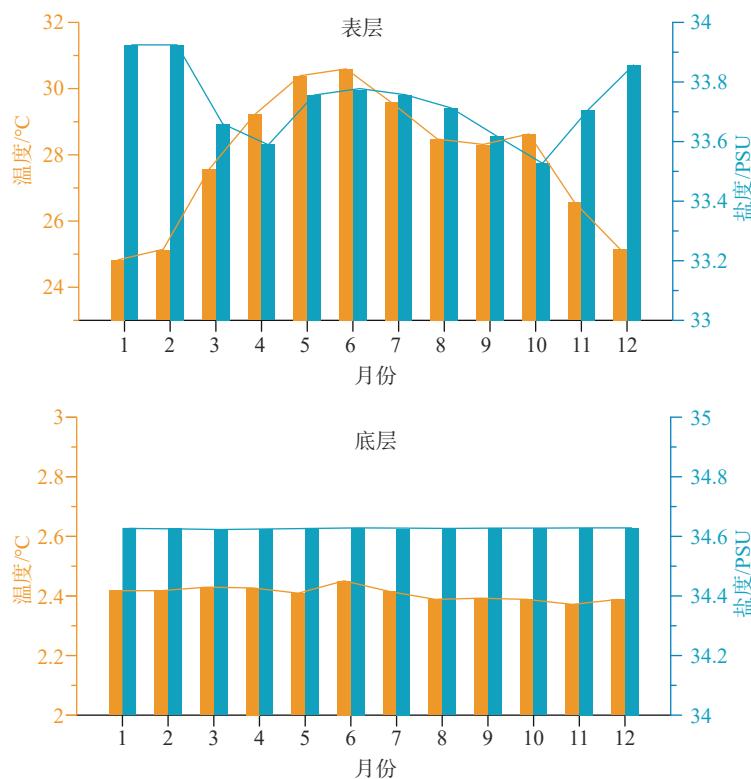


图 12 DBPH012CTD 站位表底层温盐月均变化

Fig.12 Monthly variation of surface/bottom temperature and salinity at DBPH012CTD site

数据的分析表明,春季以东南风为主,风速较小,月均最大风速约为 5 m/s;夏季以西南偏南风为主,受台风影响,最大风速可达 12 m/s;秋季转为冬北风,平均风速约为 8 m/s;冬季以冬北风为主,为全年风速最大的季节,风速最大达到 12 m/s(图 13)。

在季风作用的控制下,区域海表流场具有明显季节性变化。区域整体流向在冬季以西南向流为主,夏季以东北向流为主,春、冬 2 季处于过渡季节。冬季,太阳辐射减少是区域海表温度降低的最主要因素。同时,强烈的东北季风还会增强上层水体的垂向混合,加速海-气间的热交换,进一步使得海水温度下降。在东北季风驱动下,西南向流带来了北部相对低温的水体,导致区域海表温度产生自南向北逐渐降低的趋势。春季,南海季风发生转换,冬季盛行的东北季风开始减弱,夏季风逐渐建立,春季风速达到全年最低。此时海面多为较弱的偏东风,伴随着冬季风的减弱,冬季环流逐渐分裂和转化^[32]。风应力的降低以及太阳辐射的增强使得区域海表温度开始回升,自春季开始南海海域的表层海温开始逐渐上升。南海夏季为西南季风盛行期,南海东南侧暖涡形成,同时受太阳辐射强度的增加区域整体水温升高。夏季河流径流的增加同时导致了沿岸低盐水范围的扩散。秋季与春季相似,随着冬季风逐渐形成,海水温度开始降低。

5.2 台风过程对温盐结构的影响

除了温盐结构的季节性变化以外,短期内的台风事件能产生很强的海面风应力,对上层海洋的热交换、混合过程甚至生态过程有很大作用。剧烈的台风对海洋的影响深度可以超过 1000 m^[33]。台风经过会引起海洋的一系列变化:产生巨浪、向大气输送高达 100 W/m² 的热量、海洋表层快速降温、强盛的表层风生流、风暴潮、混合层加深以及叶绿素浓度升高^[34-35]等。

2019 年的第 29 号台风“巴蓬”(PHANFONE)及 2020 年第 17 号台风“沙德尔”(SAUDEL)对工作区影响均较大。以台风“巴蓬”(PHANFONE)为例,对其影响进行分析讨论。正常情况下,研究区温盐剖面整体表现为表层温度高、盐度低,底层温度低、盐度高(图 14)。表层水体存在一个混合层,混合程度较高,混合层内水体温盐变化不大。混合层之下为温、盐跃层,在此区域水体温盐急剧变化。随水深增加,温度逐渐降低,盐度在 100 m 附近存在极大值区。从获取的剖面来看,在台风“巴蓬”过境期间,强烈的海-气交互作用导致表层海水温度(SST)降低了约 1 °C,盐度变化不大,混合层深度受台风期间强水体扰动影响增加了约 30 m(图 13)。跃层上部温度降低,盐度略有增加,跃层下部温度

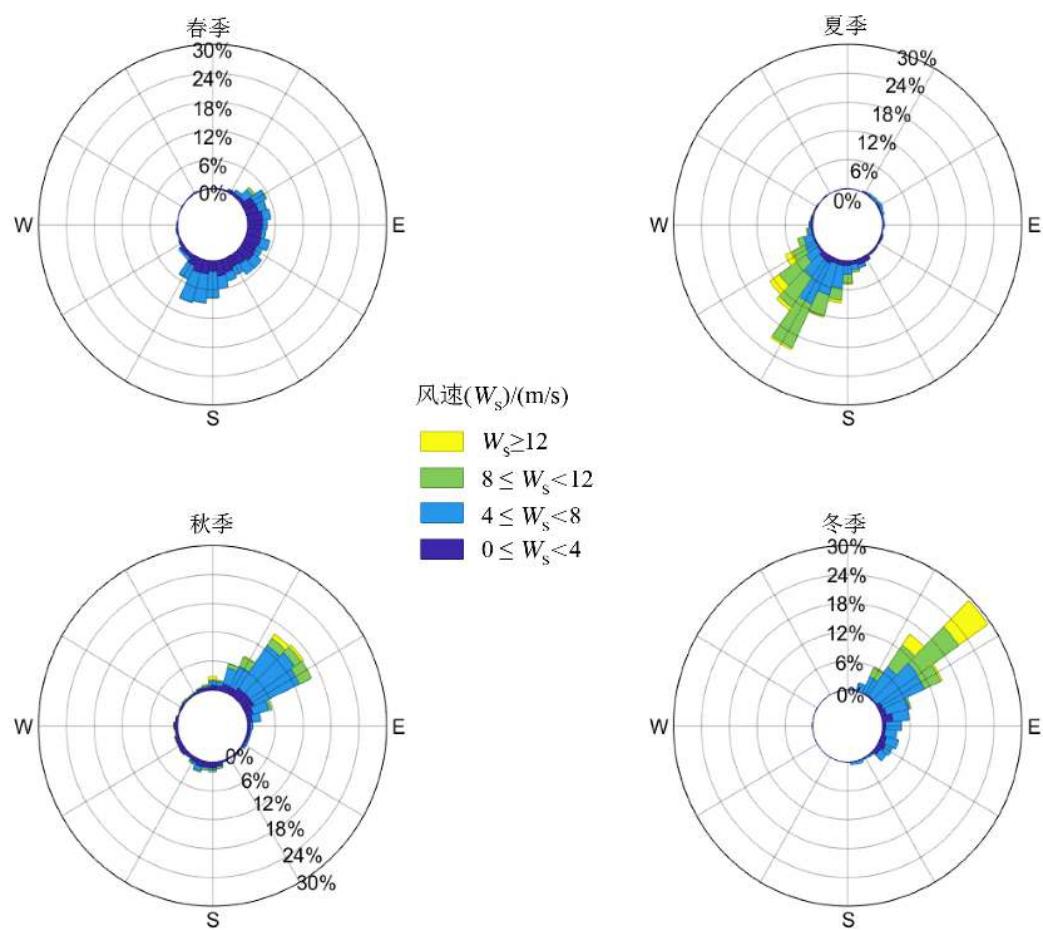


图 13 调查区年内风玫瑰图

数据引自欧洲中期天气预报中心, 2019。

Fig.13 Annual wind rose in the study area

Data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF, 2019.

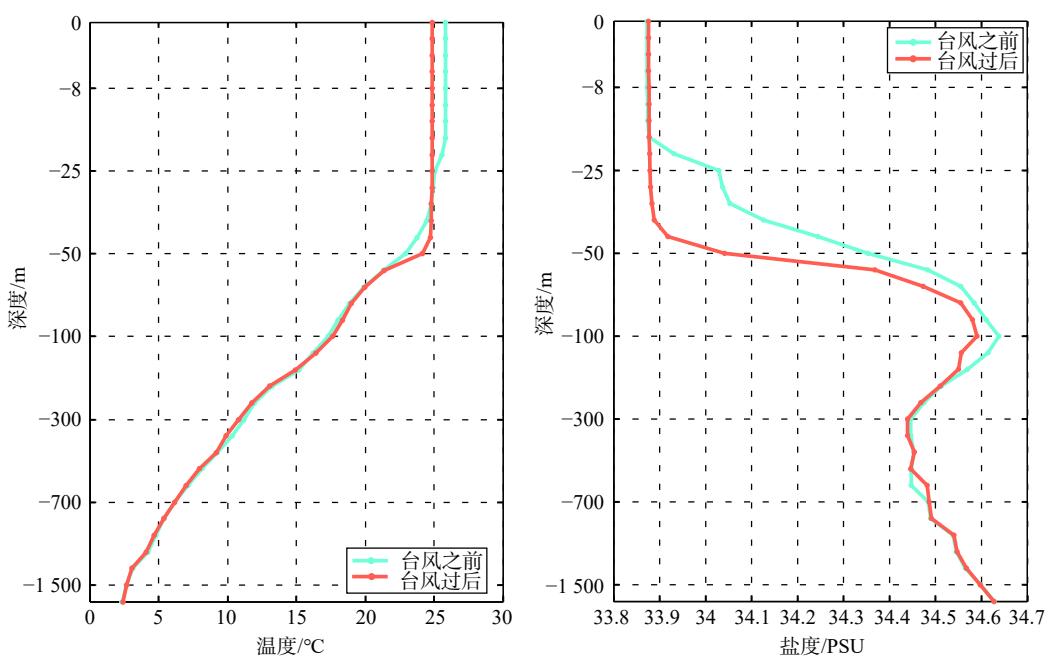


图 14 台风“PHANFONE”过境前后工区水体温盐剖面变化

Fig.14 Vertical temperature and salinity profiles at the study area pre- and post-Typhoon "PHANFONE"

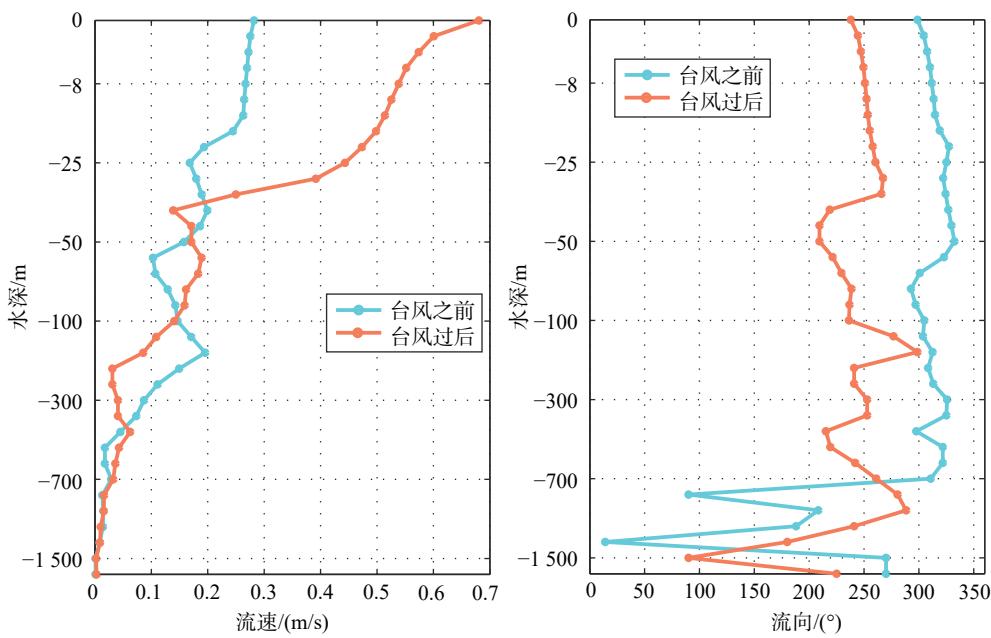


图 15 台风“PHANFONE”过境前后工区水体流速垂向变化

Fig.15 Vertical current profile at the study area pre- and post-Typhoon "PHANFONE"

升高,盐度降低。一般而言,南海季风爆发前后,上层海洋温盐结构均发生较大变化^[36],本研究中台风“巴蓬”过境期间研究区表层盐度变化并不明显,这可能与台风引起的降水调控有关,台风期间的强降水可以抑制海表盐度的升高^[37]。

台风“巴蓬”过境前后,工区水体的垂向流速结构也发生了显著变化(图 15)。台风雨前水体垂向流速大小差距较小,而台风后流速在表底层有较大的差别。受台风强风应力的影响,水体上层流速增加,其中,表层流速增加了 2 倍以上,由 0.3 m/s 增至近 0.7 m/s。垂向上水体流速的差距会引起较为强烈的水体剪切,以往许多研究认为,这种强流速剪切可能是台风期间混合层深度增加的主要因素之一,其影响程度甚至要在海-气相互作用之上^[38]。台风期间垂向上流向同样发生了较为明显的变化,受台风逆时针方向高速旋转风场的影响,流向由近西北向转变为西南向,这是因为台风气旋型风场会在海洋中同样激发一个气旋型涡旋,这种涡旋能够显著改变区域流场,在相对台风中心不同位置形成空间差异性的流场^[39]。

6 结论

(1) 研究区夏秋季表层温度为 30.0~31.2 °C,最高温度位于中沙海台;表层盐度为 33.6~34.1 PSU,最高盐度分布在西北部东岛海域附近。底层温度为 1~25 °C,盐度 34.1~35.2 PSU,最高盐度分布在

工作区东南角。

(2) 研究区夏秋季水团温盐结构总体上表现为表层高温低盐、底层低温高盐的特征,水体表层存在一个混合层,混合程度较高,混合层深度在 20~90 m。

(3) 研究区不同区域表、中、底层水体垂向流速有所差异,总体流速范围为 0.01~0.22 m/s。表、中流速表现出周期性变化规律,底层流速低且未表现出规律性;MX2 和 MX3 同在中沙海槽中部,海流呈现出相反的变化规律可能是由于中沙海台地形凸起,局地形成海洋冷锋面所致。

(4) 数值模拟表明,在冬季,调查区南侧的海域海表温度明显高于北侧,南北温差显著。在夏季,海表温盐分布受到台风作用较为明显,混合作用加强,使得南北带状分布不明显,海表温度的空间分布趋于均一。

(5) 台风对调查区的水文环境有短期的显著影响。在台风“巴蓬”(PHANFONE)影响下,调查区海表温度降低了约 1 °C,混合层深度增加了约 30 m,水体垂向混合作用增强。

参考文献 (References)

- [1] 魏晓,高红芳.南海中部海域夏季水团温盐分布特征[J].海洋地质前沿,2015,31(8): 25-33,40. [WEI Xiao, GAO Hongfang. Temperature and salinity structures of the central-eastern South China Sea [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(8): 25-33,40.]

- [2] Qu T D, Du Y, Meyers G, et al. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32 (24): L24609.
- [3] 高荣珍, 王东晓, 王卫强, 等. 南海上层海洋热结构的年循环与半年循环[J]. *大气科学*, 2003, 27 (3): 345-353. [GAO Rongzhen, WANG Dongxiao, WANG Weiqing, et al. Annual and Semi-Annual cycles of the upper thermal structure in the South China Sea [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27 (3): 345-353.]
- [4] 王东晓, 陈举, 陈荣裕, 等. 2000年8月南海中部与南部海洋温、盐与环流特征[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35 (2): 97-109. [WANG Dongxiao, CHEN Jiu, CHEN Rongyu, et al. Hydrographic and circulation characteristics in middle and southern South China Sea in summer, 2000 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35 (2): 97-109.]
- [5] 刘长建, 杜岩, 张庆荣, 等. 南海次表层和中层水团年平均和季节变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39 (1): 55-64. [LIU Changjian, DU Yan, ZHANG Qingrong, et al. Seasonal variation of subsurface and intermediate water masses in the South China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39 (1): 55-64.]
- [6] 邢彩盈, 朱晶晶, 吴胜安. 南海区域热状况的气候变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35 (6): 13-23. [XING Caiying, ZHU Jingjing, WU Sheng'an. Climatic change characteristics of thermal condition in the South China Sea [J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35 (6): 13-23.]
- [7] 汪斯毓, 王仕胜, 刘艳锐, 等. 中沙海槽盆地构造与沉积作用及其对远端裂陷盆地演化的启示[J/OL]. 地球科学, 2021: 1-15. (2021-06-28). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20210628.1156.010.html> [WANG Siyu, WANG Shisheng, LIU Yanrui, et al. Tectonics and sedimentation of the Zhongsha trough basin: implication to the basin evolution in distal rifting margin [J/OL]. *Earth Science*, 2021: 1-15. (2021-06-28). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20210628.1156.010.html>.]
- [8] 陈俊锦, 刘时桥, 汪斯毓, 等. 中沙海槽重力流沉积发育特征及成因机制[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2022, 61 (1): 39-54. [CHEN Junjin, LIU Shiqiao, WANG Siyu, et al. Characteristics and mechanism of the development of gravity flow deposits in Zhongsha Trough [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2022, 61 (1): 39-54.]
- [9] 黎雨晗, 黄海波, 丘学林, 等. 中沙海域的广角与多道地震探测[J]. *地球物理学报*, 2020, 63 (4): 1523-1537. [LI Yuhan, HUANG Haibo, QIU Xuelin, et al. Wide-angle and multi-channel seismic surveys in Zhongsha waters [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63 (4): 1523-1537.]
- [10] 赵斌, 高红芳, 张衡, 等. 基于深度域地震成像的中沙海槽盆地东北部结构构造研究[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38 (2): 95-102. [ZHAO Bin, GAO Hongfang, ZHANG Heng, et al. Structure study of the northeastern Zhongsha Trough Basin in the South China Sea based on prestack depth migration seismic imaging [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38 (2): 95-102.]
- [11] 郭全树, 石学法, 王昆山. 中沙群岛附近海域沉积物中的轻矿物分区及物质来源[J]. *海洋学报*, 2007, 29 (4): 97-104. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan. Mineral provinces and matter source in surface sediments near the Zhongsha Islands in the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29 (4): 97-104.]
- [12] 郭全树, 王昆山, 石学法. 中沙群岛近海表层沉积物重矿物组合分区及物质来源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28 (1): 17-24. [YAN Quanshu, WANG Kunshan, SHI Xuefa. Provinces and provenance of heavy minerals in surface sediments of the sea area near Zhongsha Islands in South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (1): 17-24.]
- [13] 张江勇, 彭学超, 张玉兰, 等. 南海中沙群岛以北至陆坡表层沉积物碳酸钙含量的分布[J]. *热带地理*, 2011, 31 (2): 125-132. [ZHANG Jiangyong, PENG Xuechao, ZHANG Yulan, et al. Distribution of carbonate content in surface sediment from north of Zhongsha Islands to Northern slope in the South China Sea [J]. *Tropical Geography*, 2011, 31 (2): 125-132.]
- [14] 王璐, 余克服, 王英辉, 等. 南海中沙群岛、西沙群岛珊瑚礁区海水重金属的分布特征[J]. *热带地理*, 2017, 37 (5): 718-727. [WANG Lu, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Distribution characteristic of heavy metals in coral reefs located in the Zhongsha Islands and Xisha Islands of South China Sea [J]. *Tropical Geography*, 2017, 37 (5): 718-727.]
- [15] 黄磊, 高红芳. 夏季季风转换期间中沙群岛附近海域的温盐分布特征[J]. *南海地质研究*, 2012 (1): 49-56. [HUANG Lei, GAO Hongfang. Analyses on temperature and salinity distributions in Zhongsha Islands waters during spring to summer monsoon transition [J]. *Search of Ecological South China Sea*, 2012 (1): 49-56.]
- [16] 田永青, 黄洪辉, 巩秀玉, 等. 2014年春季南海中沙群岛北部海域的低温高盐水及其形成机制[J]. *热带海洋学报*, 2016, 35 (2): 1-9. [TIAN Yongqing, HUANG Honghui, GONG Xiuyu, et al. The formation mechanism of the low temperature and high salinity water mass near the Zhongsha Islands in the South China Sea in March 2014 [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2016, 35 (2): 1-9.]
- [17] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999 [LI Fengqi, SU Yusong. Water Mass Analysis [M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1999.]
- [18] 李娟, 左军成, 李艳芳, 等. 南海海表温度的低频变化及影响因素[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2011, 39 (5): 575-582. [LI Juan, ZUO Juncheng, LI Yanfang, et al. Low-frequency variation and influence factors of sea surface temperature in South China Sea [J]. *Journal of Hohai University:Natural Sciences*, 2011, 39 (5): 575-582.]
- [19] 邱婷, 左军成, 王鼎琦, 等. 南海海表温度气候变异及对局地台风的影响[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35 (1): 32-39. [QIU Ting, ZUO Juncheng, WANG Dingqi, et al. Variation of Climatological Sea Surface Temperature and its effect on local typhoon activities in the South China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35 (1): 32-39.]
- [20] 黄金森. 中沙环礁特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7 (2): 21-24. [HUANG Jinsen. Features of the ZhongSha atoll in the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1987, 7 (2): 21-24.]
- [21] 徐子英, 汪俊, 高红芳, 等. 中沙地块南部断裂发育特征及其成因机制[J]. *中国地质*, 2020, 47 (5): 1438-1446. [XU Ziying, WANG Jun, GAO Hongfang, et al. The characteristics and formation mechanism of the faults in the southern part of the Zhongsha Bank [J]. *Geology in China*, 2020, 47 (5): 1438-1446.]
- [22] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the

- Köppen-Geiger climate classification [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(5): 1633-1644.
- [23] 陈史坚. 南海气温、表层海温分布特点的初步研究[J]. 海洋通报, 1983, 2(4): 9-17. [CHEN Shijian. A preliminary study of the characteristics of the distribution of air and sea surface temperatures in the South China Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 1983, 2(4): 9-17.]
- [24] Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean Model (FVCOM) system [J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [25] GAO S, LV X Q, WANG H T. Sea surface temperature simulation of tropical and north pacific basins using a hybrid coordinate ocean model (HYCOM) [J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 10(1): 1-13.
- [26] WU X, WU H, WANG H J, et al. Novel, repeated surveys reveal new insights on sediment flux through a narrow strait, Bohai, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(10): 6927-6941.
- [27] 王东晓, 杜岩, 施平. 南海上层物理海洋学气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 2002 [WANG Dongxiao, DU Yan, SHI Ping. Climatological Atlas of Physical Oceanography in the Upper Layer of the South China Sea [M]. Beijing: Meteorological Press, 2002.]
- [28] 肖潺, 原伟华, 李建, 等. 南海秋雨气候特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(6): 693-700. [XIAO Chan, YUAN Weihua, LI Jian, et al. Preliminary study of autumn rain in the South China Sea [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(6): 693-700.]
- [29] 徐宾, 宇婧婧, 张雷, 等. 全球海表温度融合研究进展[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(1): 164-170. [XU Bin, YU Jingjing, ZHANG Lei, et al. Research progress of global sea surface temperature fusion [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, 8(1): 164-170.]
- [30] 李根. 海气界面热通量变化趋势及其与SST的关系[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2012: 1-121 [LI Gen. Trend variability in Air-Sea fluxes and their relationship with SST [D]. Doctor Dissertation of University of Science and Technology of China, 2012: 1-121.]
- [31] 秦曾灏. 海洋在气候与气候变化中的地位和作用[J]. 海洋通报, 1991, 10(4): 85-90. [QIN Zenghao. Significance of ocean to global meteorological process and local climatological process [J]. *Marine Science Bulletin*, 1991, 10(4): 85-90.]
- [32] 聂宇华, 詹杰民, 陈植武. 南海表层环流和热结构特征的数值模拟与影响因素分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(2): 134-138. [NIE Yuhua, ZHAN Jiemin, CHEN Zhiwu. Simulation and influence factor analysis of Circulation and thermal structure of the surface layer of the South China Sea [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(2): 134-138.]
- [33] Kwon Y O, Riser S C. The ocean response to the hurricane and tropical storm in North Atlantic during 1997-1999 [R]. Washington DC: University of Washington, 2003.
- [34] 付东洋, 潘德炉, 丁又专, 等. 台风对海洋叶绿素a浓度影响的定量遥感初探[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 46-56. [FU Dongyang, PAN Delu, DING Youzhan, et al. Quantitative study of effects of the sea chlorophyll-a concentration by typhoon based on remote-sensing [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(3): 46-56.]
- [35] Lin I I, Liu W T, Wu C C, et al. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(3): 1131.
- [36] 王凡, 赵永平, 冯志纲, 等. 1998年春夏南海温盐结构及其变化特征 [J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 1-13. [WANG Fan, ZHAO Yongping, FENG Zhigang, et al. Thermohaline structure and variation of the South China Sea in the spring and summer of 1998 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(5): 1-13.]
- [37] Lin Y C, Oey L Y. Rainfall-enhanced blooming in typhoon wakes [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 31310.
- [38] Glenn S M, Miles G N, Seroka G N, et al. Stratified coastal ocean interactions with tropical cyclones [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 10887.
- [39] Cong S, Wu X, Ge J Z, et al. Impact of Typhoon Chan-hom on sediment dynamics and morphological changes on the East China Sea inner shelf [J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106578.