

中沙群岛海域春夏交季温盐分布特征

王勇智¹, 鞠霞^{1,2,3,4*}, 杜军¹, 刘长建¹, 王德武⁵, 周润生⁵, 薛文静⁶

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 自然资源部海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

3. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;

5. 自然资源部南海调查技术中心, 广东 广州 510500;

6. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 中沙群岛主要由中沙大环礁和黄岩岛组成, 其温盐分布对于本区渔业生产、航海保障和水下通讯等具有重要意义。尤其是春夏之交的季节转换时期, 该海域水温和盐度及其相应的跃层特性存在显著的季节变化, 掌握其季节变化特征具有重要现实意义。本文基于 2019 年 5 月(南海春夏季风转换期)中沙大环礁、黄岩岛和 2020 年 6 月(夏季风爆发期)中沙大环礁海域大面站调查数据分析, 发现中沙大环礁海域水温和盐度分布特征在夏季风爆发前后具有显著的差异性, 2 个航次的温跃层分布也呈现出较大不同, 2019 年 5 月黄岩岛海域温盐中上层分布与中沙大环礁相似, 但底层有所差异, 跃层深度也较大。2020 年 6 月中沙大环礁内水体升温较快, 各层水温均高于 2019 年 5 月, 其中以底层水体升温最为显著; 2019 年 5 月中沙大环礁内水温水平梯度较大, 且随着水深加大水平梯度也越大, 2020 年 6 日水平温度梯度逐渐减小。2 个航次的盐度分布与水温分布较为相似。结合调查时段的海表热通量变化和卫星高度计资料分析认为, 2019 年 5 月中沙大环礁西南部海洋吸热高于东北部, 故表层水温西南高东北低; 2020 年 6 月至 7 月环礁西南部海洋吸热低于东北部, 故表层水温西南低东北高。由于中尺度涡的作用, 中沙大环礁区域局部产生低温高盐或高温低盐水, 并导致 2020 年 6 月中沙大环礁大部分海域的温跃层加深。

关键词: 中沙大环礁; 温度; 温跃层; 中尺度涡

中图分类号: P731.11; P731.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0408-15

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210810001

引用格式: 王勇智, 鞠霞, 杜军, 等. 中沙群岛海域春夏交季温盐分布特征[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 408-422.

WANG Y Z, JU X, DU J, et al. Characteristics of the temperature and salinity distribution in adjacent sea areas of Zhongsha Islands during spring-summer transition period[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 408-422.

中沙群岛位于南海中央海盆西北边缘, 主要由中沙大环礁和黄岩岛组成, 北起神狐暗沙, 南止波状暗沙, 东至黄岩岛, 中央为中沙大环礁, 地理位置为(113°02'~118°45'E, 13°57'~19°33'N), 为南海诸岛中的四大群岛之一。中沙群岛海域面积为 60 多万 km², 只有黄岩岛环礁的礁缘部分露出海面。受季风变化、冷空气、南海高压、副热带高压、辐合带及热带气旋环流等多种环境因素的综合影响, 中沙群岛海域成为揭示南海海洋水动力及其对其他环境因素响应变化的理想选区^[1]。但相较于西沙群岛和南沙群岛, 中沙群岛水文要素基础资料极其匮乏, 不仅制约了对该海域的认识和研究, 而且不利于对我国海洋权益、油气资源和国土安全维护。

南海的水体温度和盐度分布相较于大洋水团具有显著的边缘海特征。南海中部表层水体温度终年维持在 26~29℃ 之间, 与南海中部水团混合后, 盐度一般低于 34^[2]。夏季, 南海西北部温度略高^[3], 南部表层温

收稿日期: 2021-08-10

资助项目: 国家科技基础资源调查专项课题——中沙群岛及邻近海域海洋水动力环境调查(2018FY100102); 国家重点研发计划项目——跨平台地球系统模式示范(2020YFA0607903)

作者简介: 王勇智(1980—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事近海物质输运和海洋调查方面研究. E-mail: wangyongzhi@fio.org.cn

* 通信作者: 鞠霞(1983—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事中国近海海洋动力学方面研究. E-mail: juxia@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

度基本在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 水体垂向层结稳定^[4]。南海上层水体温盐分布变化主要受太阳辐射、潮汐内波和季风变化影响^[5-8], 次表层以下水体则是受到周边邻近水团混合的影响^[5-6], 周边邻近水团多来自于吕宋海峡以东的太平洋^[2], 该区域水团最明显的特征为高盐, 最大值一般出现在 150 m 层, 温度大约为 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。受季风变化的影响, 南海水团的温度和盐度分布表现出明显的季节差异^[9]。冬、夏季季风转换期间, 南海上层水团的变化往往导致垂向盐度层结异常, 即在底层出现极低盐度^[10], 南海南部盐度垂向层结也类似^[11]。南海中北部中尺度涡十分活跃^[12-14], 且受地形约束的作用, 易从吕宋冷涡边缘脱落后发展成小气旋^[15], 对南海温盐垂向结构具有较大的影响^[13-14]。

尽管在以往的研究中, 对南海的温盐分布有较好的研究成果, 但在中沙大环礁海域, 水温、盐度的现场直接观测数据十分匮乏, 已有的研究多借助间接的手段来推测该海域海洋温盐的时空分布, 尤其是垂向分布特征数据少, 少数的宝贵调查资料覆盖面积小, 针对春夏季之交季节转换时期中沙大环礁海域温盐分布特征的研究更是缺乏。基于此, 本研究采用 2019 年 5 月(南海春夏季风转换期)在中沙大环礁、黄岩岛和 2020 年 6 月(夏季风爆发期)在中沙大环礁海域开展的大面站温盐数据, 拟阐明中沙群岛海域上层海洋热力学特征, 为中沙群岛物理海洋学研究提供基础资料。

1 数 据

在国家科技基础资源调查专项的支持下, 自然资源部第一海洋研究所分别在 2019 年 5 月 11 日至 5 月 29 日和 2020 年 6 月 20 日至 7 月 6 日, 利用“粤霞渔指 1020”船在中沙群岛海域开展了 CTD(Conductivity Temperature Depth, 温盐深探测仪)大面站观测。其中, 2019 年 5 月航次布设了 47 个站位(含中沙大环礁邻近海域 41 个测站和黄岩岛邻近海域 6 个测站), 2020 年 6 月航次布设了 34 个站位(均位于中沙大环礁邻近海域), 观测站位见图 1。

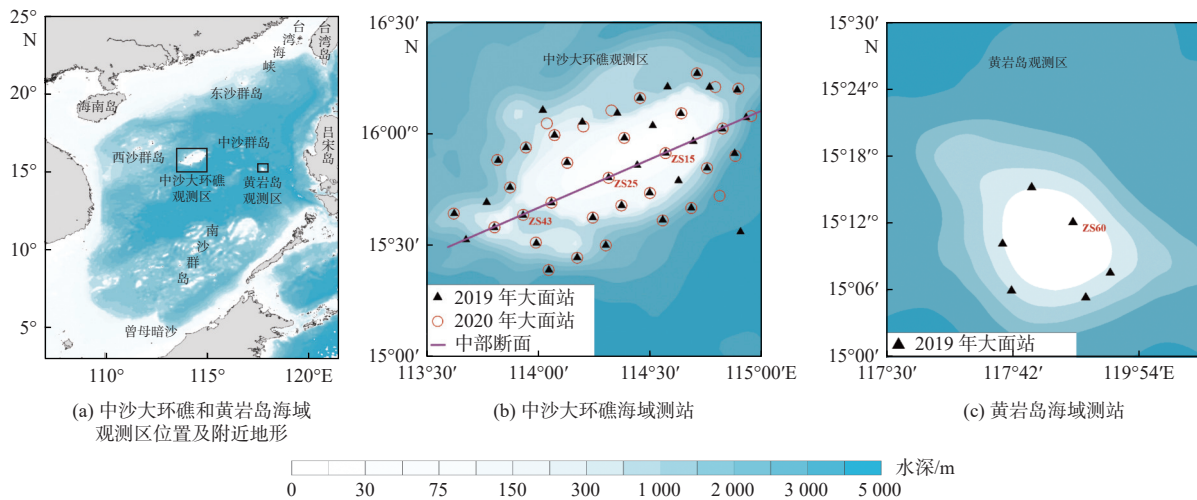


图 1 2019 年 5 月和 2020 年 6 月中沙大环礁和黄岩岛海域附近地形和大面站观测站位分布

Fig. 1 Topography and survey stations near the Zhongsha Atoll and Huangyan Island

大面站观测获取的海水温度和盐度数据用于 2 个航次的温度和盐度分布特征分析及相关对比分析。海水温度和盐度观测设备为美国海鸟公司生产的 SBE 17Plus V2 型 CTD。各层的温度和盐度采用 CTD 下降时的数据, 选取了 2 m 层(表层)、 10 m 层、 30 m 层、 50 m 层、 75 m 层和底层的数据, 经压力漂移订正、电导率订正和数据处理等质量控制, 获得各站温度和盐度。

2 个航次期间随船观测的海面风速和风向数据用于判断调查期中沙群岛海域季风变化。观测全程采用船舶气象仪进行气象观测, 获取了调查期间风速和风向数据。风速和风向每 3 s 观测一次, 将整点时刻前 10 min 的平均风速和风向作为该时刻的风速和风向值。本文还收集了观测期间美国国家环境预报中心的气

候预报系统产品 National Center for Environmental Prediction Climate Forecast System Version 2(NCEP-CFSv2)的风场空间分布数据,时间分辨率为1 h,本文处理成1 d平均数据进行绘图。数据的下载网址 <https://rda.ucar.edu/datasets/ds094.1/index.html#!access>。

涡旋数据来源于法国国家空间研究中心(Centre National D'Etudes Spatiale, CNES)提供的 AVISO (Archiving Validation and Interpolation of Satellite Oceanographic data)涡旋追踪产品 Mesoscale Eddy Trajectories Atlas Product META3.0EXP NRT(<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-mesoscale-eddy-trajectory-product.html>),该产品从多任务高度计观测数据集提取涡旋信息,提供逐日的全球涡旋位置、类型、速度、半径和相关元数据。本文收集了观测期间的涡旋数据用以分析温跃层变化的原因。

海表热通量数据来源于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)最新发布的 ERA5 第五代全球气候再分析数据集(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels>)。该数据集可提供高时空分辨率的温度和辐射等海洋气象数据,本文使用的数据时间分辨率为1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,对2019年5月和2020年6月观测期间的海表热通量数据进行平均,用于分析2个航次海表温度分布存在差异的原因。

2 季风和中沙大环礁温盐特征

2.1 季风特征

南海海域为季风控制影响海域,一般5月是春季和夏季季风转换期,6月为夏季风爆发期。春季和夏季季风转换期间的特征为南海区风速波动小,风速高值区位于南海北部,约为 $3.5 \sim 5.0 \text{ m/s}$,除北部湾以东风为主外,南海大部分海域为东北风。南海夏季风爆发后,南海低层风场从东北风转向为稳定的来自热带的西南风,南海大部分海域以西南风为主,风速高值区位于中南半岛附近海域^[4,9]。由2次观测期间海表风场时间序列图(图2和图3)可见,中沙大环礁在2019年5月11日南海北部海域风场多为北风,而在2020年6月21日南海北部海域已基本为南风覆盖,且在2019年5月的平均风速小于2020年6月。因此,2019年5月调查时段基本属于南海区春季风和夏季风转换期,2020年6月调查时期则为夏季风爆发期。

通过现场实测风场也可看出,2019年5月观测期间大环礁海域风向由东北风和偏东风(春季风)转为西南或南风(夏季风),风力基本在4级风以下(图4),具有春、夏季季风转换期间的特征。2020年6月观测期间,中沙群岛海域主要受西南风影响,风力较2019年5月航次有所增强,达到4级及以上,6月23日和30日风力达到6~7级(图5),具有夏季风爆发期的特征。因此,2个航次获取的温度和盐度数据可分别代表中沙群岛海域春、夏季风转换期间和夏季风刚爆发后的温盐特征。

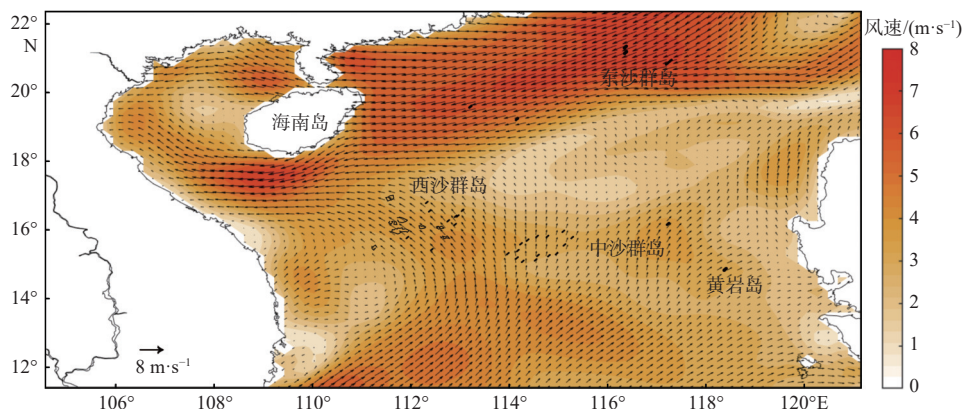


图2 基于CSFv2数据的2019年5月11日南海北部海域日均风场分布

Fig. 2 Daily averaged wind fields in northern South China Sea on May 11, 2019 from CSFv2 data

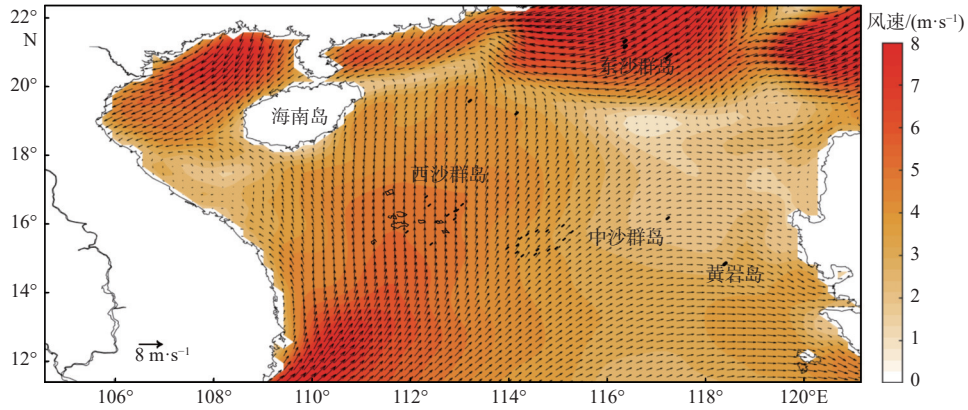


图 3 基于 CSFv2 数据的 2020 年 6 月 21 日南海北部海域日均风场分布

Fig. 3 Daily averaged wind fields in northern South China Sea on June 21, 2020 from CSFv2 data

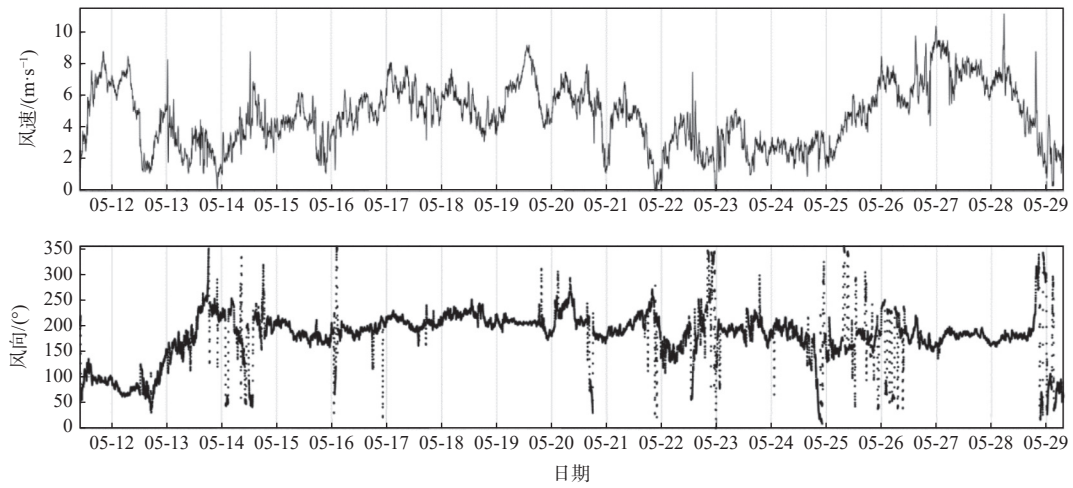


图 4 2019 年 5 月航次调查期间现场观测风速和风向时间序列分布

Fig. 4 Time series of observed wind speed and direction during the survey in May, 2019

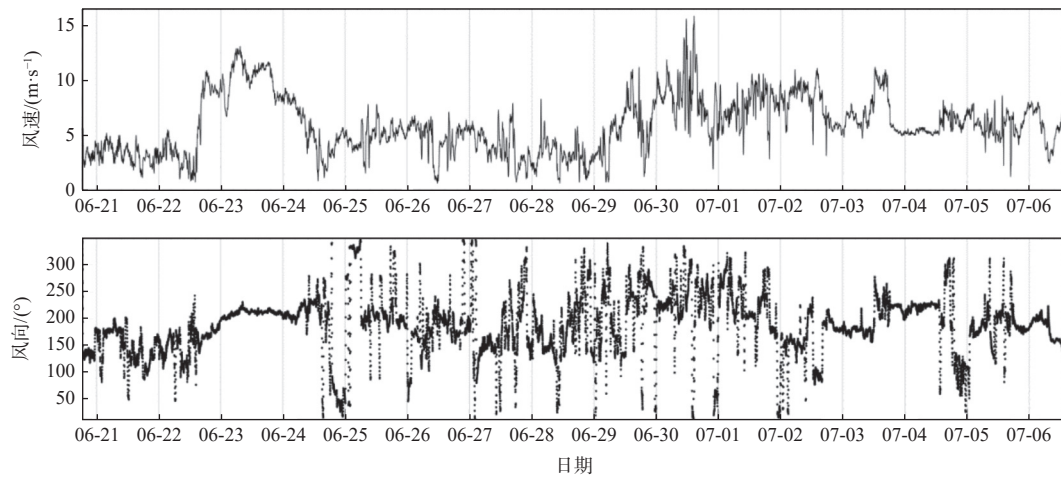
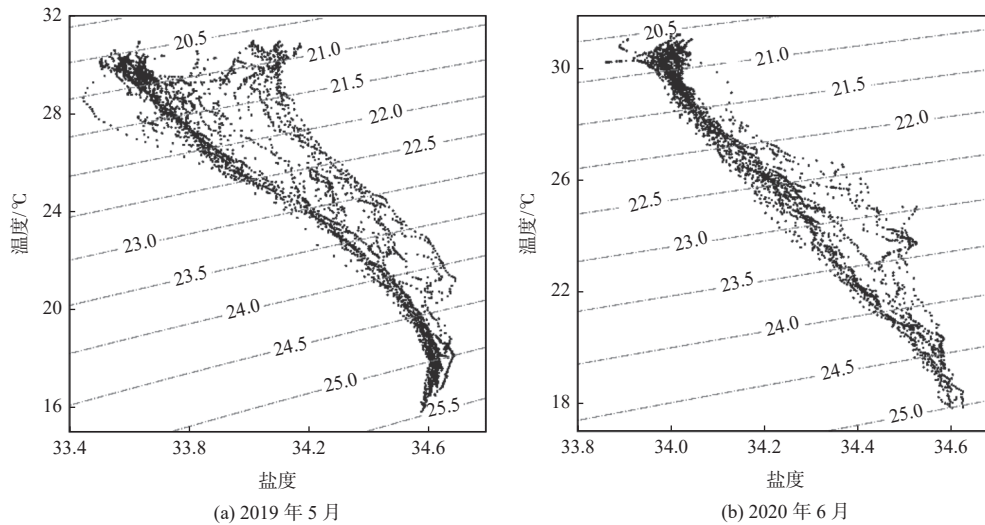


图 5 2020 年 6 月航次调查期间现场观测风速和风向时间序列分布

Fig. 5 Time series of observed wind speed and direction during the survey in June, 2020

2.2 2019 年春季和夏季季风转换期中沙大环礁和黄岩岛海域温、盐分布特征

由 2019 年 5 月和 2020 年 6 月航次的温盐点聚图(图 6)可见, 2019 年航次各站位间温盐性质变化较大, 2020 年 6 月航次的温盐分布则相对均一。因此, 2019 年 5 月中沙大环礁和黄岩岛海域春、夏季风转化期间的温盐分布与 2020 年 6 月夏季风爆发后中沙大环礁海域的温盐分布存在一定的差异。



注: 图中等值线为位势密度偏差, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

图 6 2019 年 5 月中沙大环礁和黄岩岛海域以及 2020 年 6 月中沙大环礁海域水温 and 盐度大面站数据温盐点聚图

Fig. 6 The T-S diagrams in the Zhongsha Atoll and Huangyan Island in May, 2019 and in the Zhongsha Atoll in June, 2020

中沙大环礁海域表层和 10 m 层海水温度场呈西南高、东北低的分布特征, 由中沙大环礁向东南至黄岩岛海域水温递增, 黄岩岛邻近海域和中沙大环礁西部水温均略高于其他海域。中沙大环礁和黄岩岛邻近海域表层水温超过或等于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 m 层中沙大环礁大部海域水体温度低于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (约 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$), 而黄岩岛海域仍高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。总体来看, 中沙大环礁和黄岩岛邻近海域表层和 10 m 层温度水平分布差异较小, 温度最高值和最低值相差未超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然而, 中沙大环礁海域 30 m 层温度分布与表层相反, 表层水温高、低值区位置发生变化, 呈西南温度低、东南和东北温度高的特征。30 m 层中沙大环礁西南海域不仅温度低值区等温线分布相对密集, 而且高、低值差异较大, 可达到 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。黄岩岛邻近海域 30 m 层温度较 10 m 层有所下降, 但大部分海域仍高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。中沙大环礁 50 m 层温度分布与 30 m 层较为相似, 但低值区面积较 30 m 层有所增大, 等温线分布较为均匀, 水平温度差异可达 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。黄岩岛邻近海域 50 m 层的温度也略有下降, 分布特征与 30 m 层类似。中沙大环礁海域 75 m 层温度场分布也与表层相反, 呈现西南部低、其他区域高的特征, 且低值区随深度增加范围显著增大。中沙大环礁海域底层温度中心高, 环礁边缘深水区温度低, 高、低值最大差异可达近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但黄岩岛邻近海域底层温度明显高于中沙大环礁海域, 其最高温度也不超过 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, 东西两侧温度相对低。根据调查船的同步气象观测结果可知, 调查期间南海正处于春、夏季过渡时期, 中沙大环礁温度分布主要受表层海水季风、太阳辐射等因素影响^[1], 环礁表层与底层温度水平分布差异较大, 底层水温的变化明显受海水深浅的影响, 环礁边缘水深大的区域温度低, 环礁内浅水区则温度较高, 导致环礁中心区域垂向温度差异小, 环礁边缘垂向温度差异较大(图 7 和图 8)。

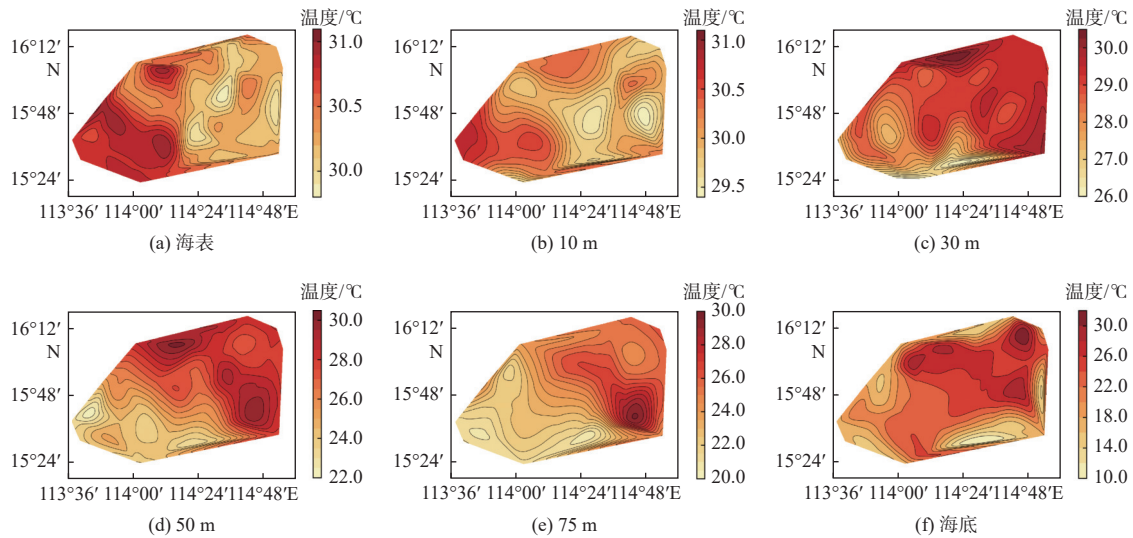


图 7 2019 年 5 月中沙大环礁海域水温水平分布

Fig. 7 Horizontal temperature distribution around the Zhongsha Atoll in May, 2019

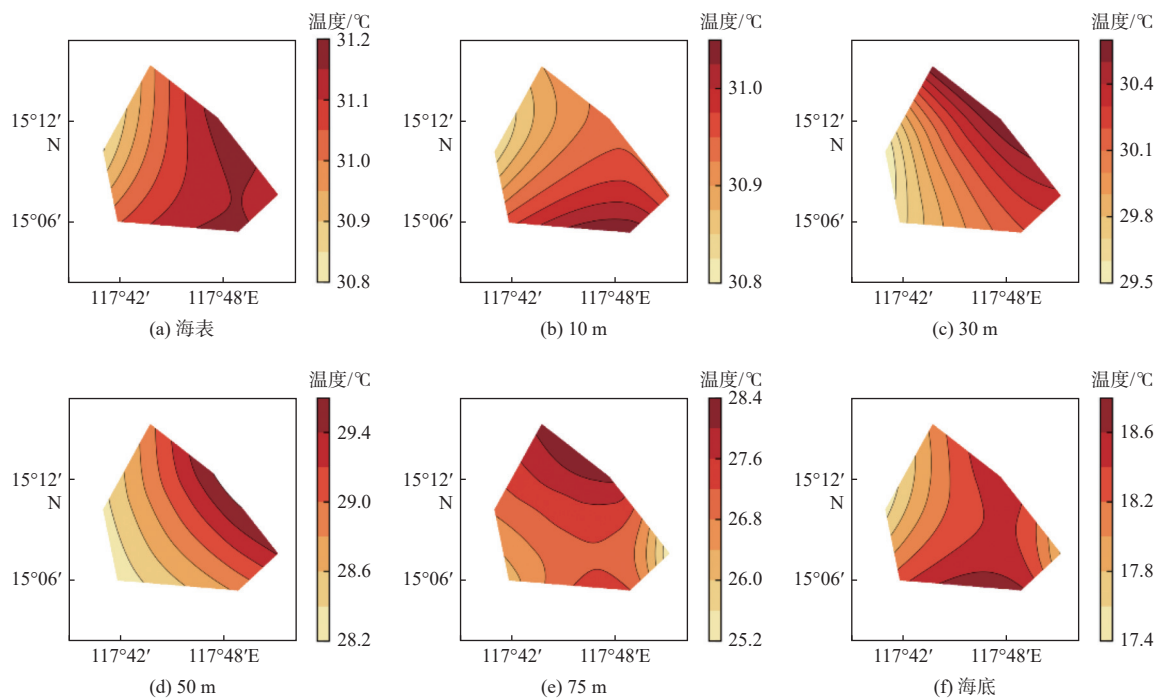


图 8 2019 年 5 月黄岩岛海域水温水平分布

Fig. 8 Horizontal temperature distribution around the Huangyan Island in May, 2019

盐度各层分布情况与表层温度场类似, 呈现自西南向东北递减的总体趋势; 但与温度分布不同的是, 在黄岩岛邻近海域附近并未出现高盐中心, 反而表现为低盐区, 且随深度增加盐度水平结构变化不大。底层盐度同样受地形影响, 由中沙大环礁中心和黄岩岛向周围海域方向逐渐增大(图 9 和图 10)。

为进一步分析中沙大环礁海域温、盐的垂向分布特征, 在中沙大环礁海域观测区中部选取了一条 SW—NE 走向的中部断面(图 1b 中的中部断面), 断面的温度分布显示在中沙大环礁西南部海域存在低温水体上涌现象, 而在环礁东北部则存在下沉现象。经与 2019 年 5 月观测期间的涡旋分布对比(图 11), 发现中

沙大环礁西南侧海域出现气旋涡, 北侧偏西出现反气旋涡(观测期间一直存在), 与温、盐剖面一致。因此, 中尺度涡可能是导致该区域出现中层温度西南低、东北高, 盐度西南高、东北低的主要原因, 中尺度涡诱发了在中沙大环礁西南部海域形成低温高盐水(图 12)。

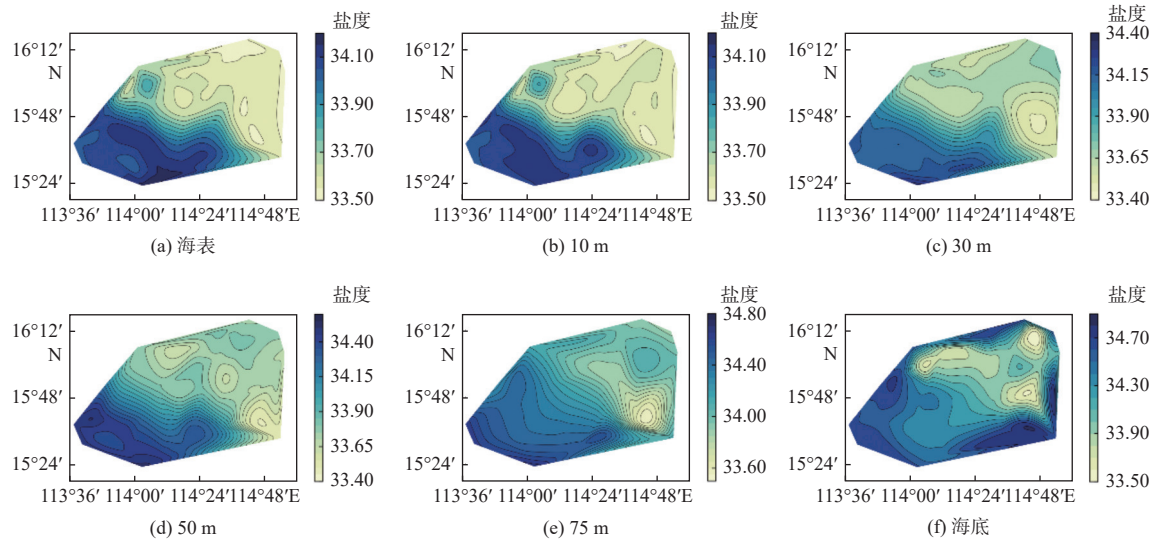


图 9 2019 年 5 月中沙大环礁海域盐度水平分布

Fig. 9 Horizontal salinity distribution around the Zhongsha Atoll in May, 2019

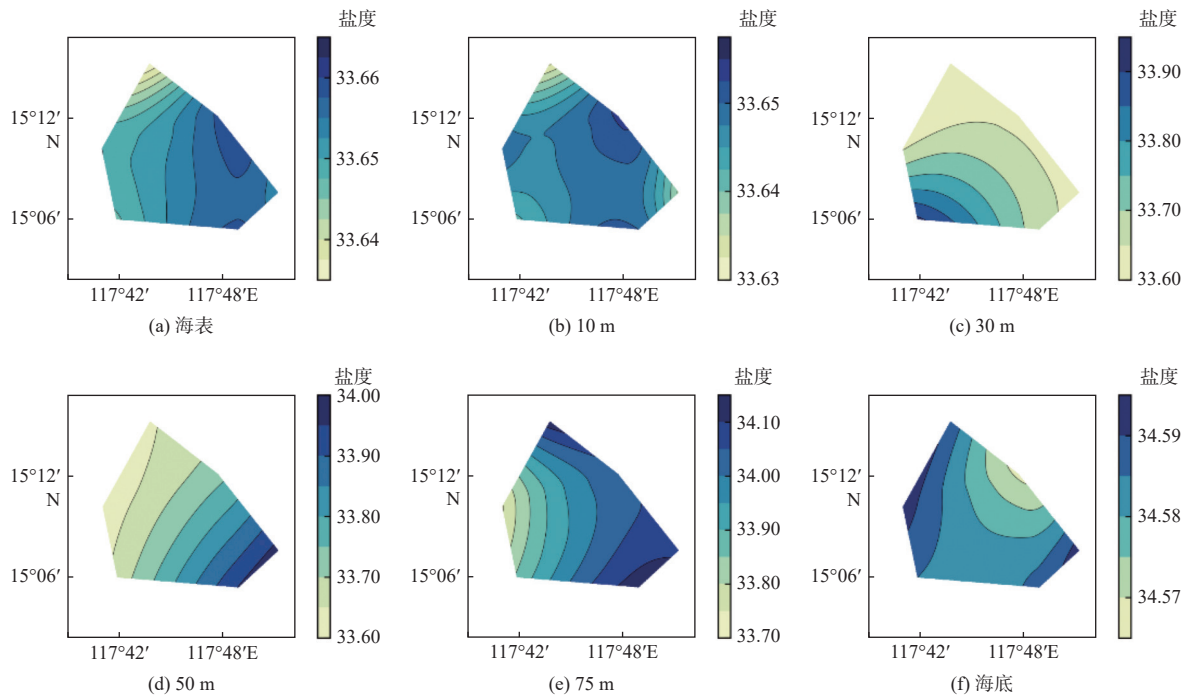
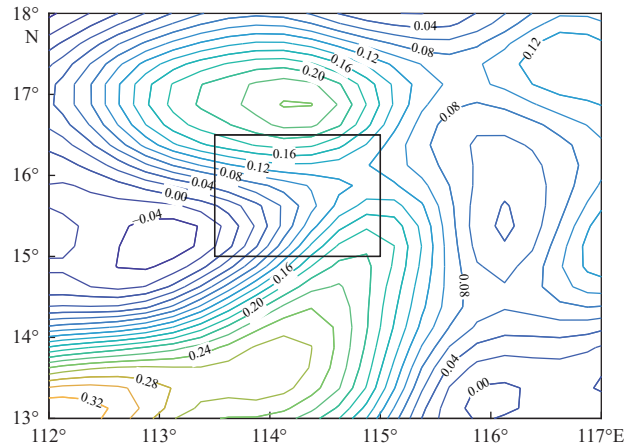


图 10 2019 年 5 月黄岩岛海域盐度水平分布

Fig. 10 Horizontal salinity distribution around the Huangyan Island in May, 2019

在中部断面上选取 3 个代表性站位(ZS15、ZS43 和 ZS25 站), 在黄岩岛附近海域选取 1 个代表性站位(ZS60 站)(图 1), 分析观测期间上述站位的温跃层分布特征。由于 2019 年 5 月调查期间正值春夏交替, 海面风场逐渐转为西南风, 太阳辐射逐渐增强, 表层海水逐渐增温, 但由于该时期西南风较弱, 搅拌作用不

强, 环礁中央水深浅的海域, 温盐垂直梯度较小, 跃层深度一般为 30~70 m(温、盐跃层深度基本一致, 本文以水温梯度 $\geq 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 为标准判断温跃层的特征值); 水深相对深的环礁边缘海域, 受风力搅拌影响小, 但西南部 ZS15 站附近海域受气旋涡影响较明显, 跃层深度较浅, 约为 50 m, 东北部 ZS25 站附近受反气旋涡影响, 跃层深度较深, 约为 60~80 m(图 13)。黄岩岛附近海域跃层深度差异较大, 深度一般为 45~120 m, 其中 ZS60 站位跃层深度约为 120 m(图 14)。



注: 黑色方框为中沙大环礁观测区。

图 11 2019 年 5 月中沙大环礁邻近海域海面高度异常(m)

Fig. 11 Distribution of sea level anomaly (m) in May, 2019 (The black rectangle is the Zhongsha Atoll sea area)

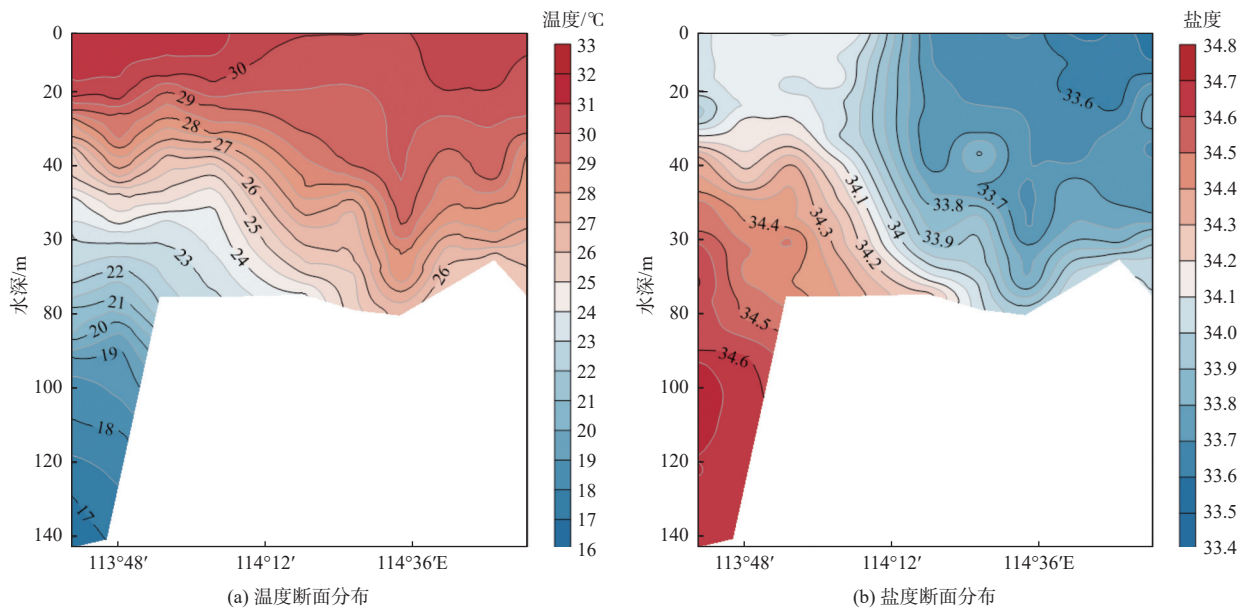


图 12 2019 年 5 月跨中沙大环礁海域中部断面温、盐剖面分布

Fig. 12 Vertical distribution of temperature and salinity across the sections at the Zhongsha Atoll in May, 2019

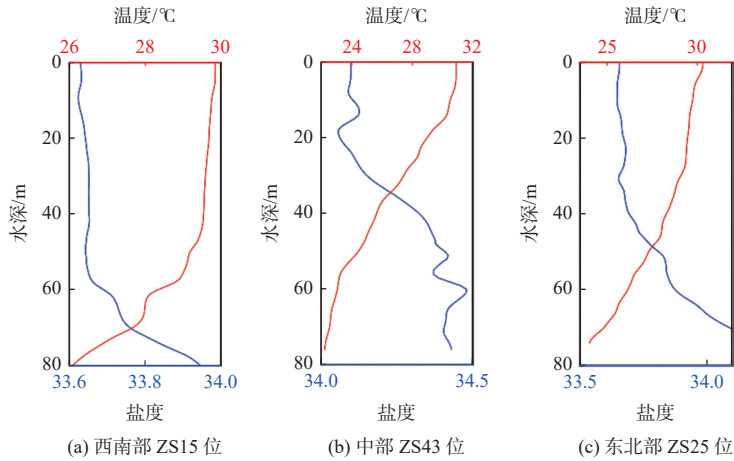


图 13 2019 年 5 月中沙大环礁海域典型站位
温盐垂直剖面分布

Fig. 13 Vertical profiles of temperature and
salinity at stations near the Zhongsha
Atoll in May

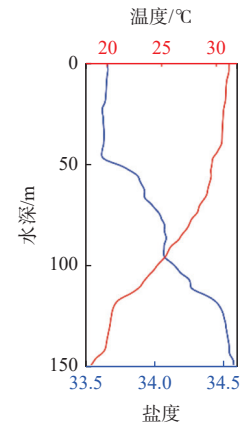


图 14 2019 年 5 月黄岩岛海域典型站
位 (ZS60 站) 温盐垂直剖面分布

Fig. 14 Vertical profiles of temperature and
salinity at station ZS60 near the Huangyan
Island in May, 2019

2.3 2020 年夏季风爆发期中沙大环礁海域温盐分布特征

中沙大环礁海域表层和 10 m 层温度场分布呈现西南低、东北高的趋势，表层和 10 m 层温度均超过 30 °C，表层温度存在 2 个高值区，分别位于大环礁东北和北偏西海域，温度均超过 31 °C，温度低值区基本位于大环礁西南海域，约为 30.2 °C，在环礁北部也存在 1 个较小的温度低值区 (图 15)。中沙大环礁海域表层等温线分布不均匀，越靠近温度极值处等值线的分布越密集。30 m 层温度分布呈现出中部和北部高 (均大于 30 °C)、西南部低的特征，与 10 m 层相比温度高值区逐渐向中部扩大，等温线呈环状分布的特征开始逐渐显现。50 m 层温度分布与 30 m 层差异较大，2 个温度低值区分别位于大环礁西部和南部海域，2 个温度高值区位于西北和东北海域，最高温和最低温的差异较 30 m 层明显增大，达到 3.5 °C。至 75 m 层温度场变化较大，低值区随深度增加逐渐从西南到东北扩大，高值区位于大环礁东北海域，影响面积大幅缩小。底层温度分布受地形因素影响较明显，水深大的环礁边缘区域温度低，环礁内温度相对高。

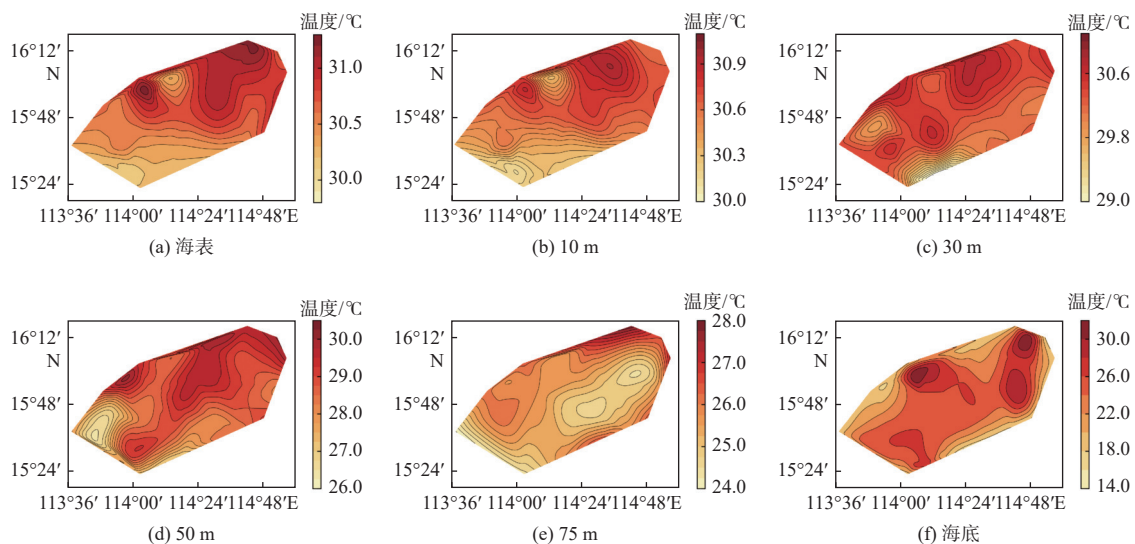


图 15 2020 年 6 月中沙大环礁海域温度水平分布

Fig. 15 Horizontal temperature distribution in June, 2020

中沙大环礁海域表层和 10 m 层盐度分布相似(图 16), 均在(114°36'E, 15°54'N)处存在一个低值中心。30 m 和 50 m 层盐度场与温度场变化相反, 低值区随深度增加逐渐从东北至西南扩大, 盐度等值线多呈环状分布。75 m 层盐度高值区随深度增加逐渐从西南至东北扩大, 盐度等值线分布较为均匀。底层盐度分布与温度分布同样受地形因素影响, 水深较浅处盐度低, 较深处盐度相对高。

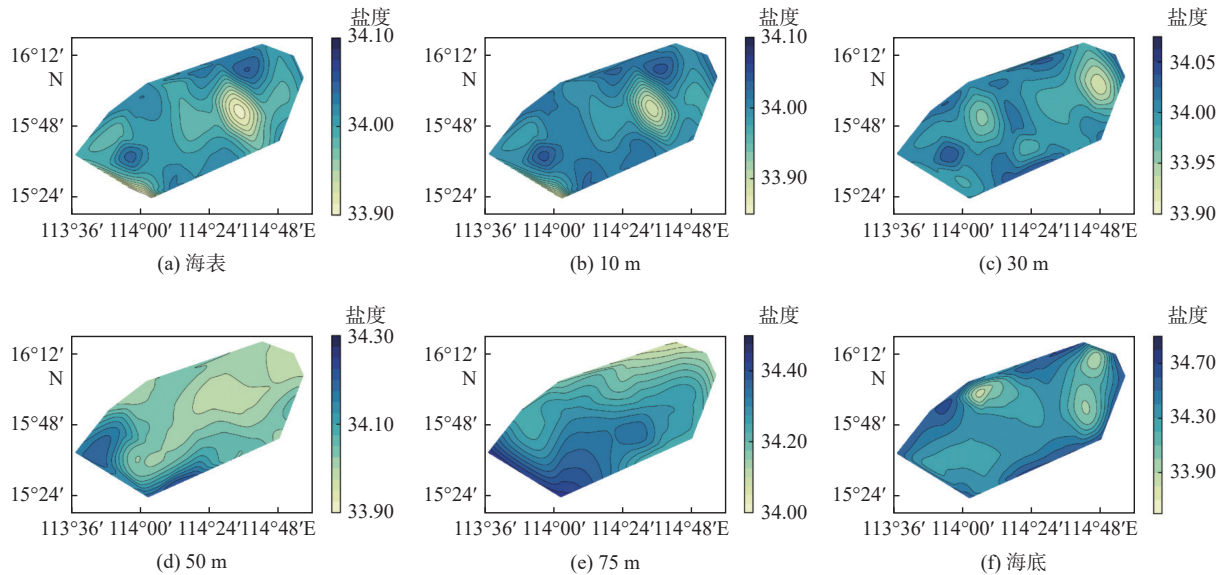


图 16 2020 年 6 月中沙大环礁海域盐度水平分布

Fig. 16 Horizontal salinity distribution in June, 2020

2020 年 6 月航次中沙大环礁海域北部温度明显高于南部, 分别在(114°00'E, 15°54'N)处和(114°30'E, 16°06'N)处附近存在 2 个高值中心。底层海水温度主要受地形因素影响, 环礁中部浅水区温度相对高, 环礁边缘深水区温度低。由跨中沙大环礁的 SW—NE 向中部断面温、盐剖面分布可见(图 17), 在环礁西南和东北部海域, 30 m 层等温线均有小幅度的下沉现象, 30 m 以深除东北部环礁边缘外, 等温线和等盐线均较

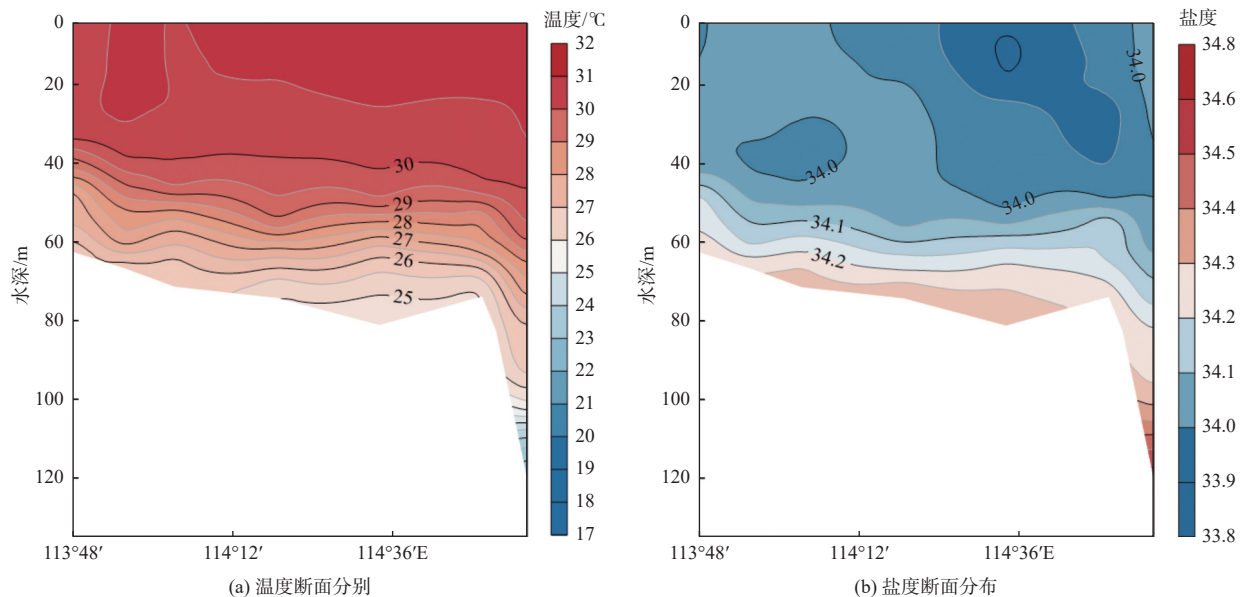
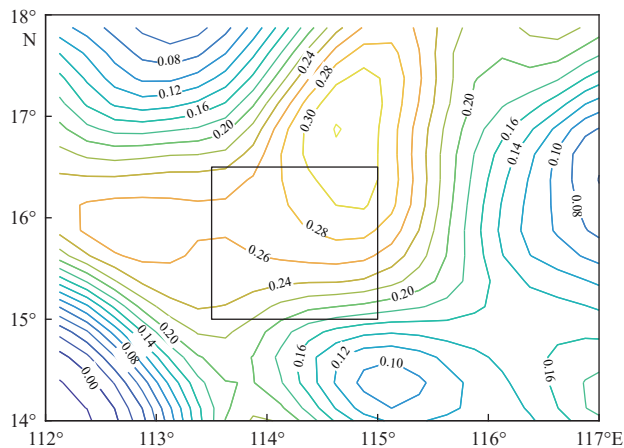


图 17 2020 年 6 月跨中沙大环礁的中部断面温盐分布

Fig. 17 Vertical distribution of temperature and salinity across the sections at the Zhongsha Atoll in June, 2020

为平直,故温度与盐度跃层并无明显的异常现象,但在(114°30'E, 15°45'N), 20 m 以浅处附近存在一个高温低盐中心。经与观测同期的涡旋分布(图 18)对比发现,中沙大环礁海域中北部偏东出现反气旋涡(除 6 月 30 日外),南部偏东出现气旋涡(观测期间一直存在),与上层温、盐平面分布一致。因此,中尺度涡可能是导致该区域出现上层温度西南低、东北高,盐度西南高、东北低特征的主要原因,即在中沙大环礁东北部海域形成高温低盐水。调查时段为南海夏季,太阳辐射逐渐增强,表层海水温度较高,中沙大环礁内由于水深较浅,温度垂直梯度较小。相比于 2019 年 5 月航次,环礁西南部 ZS15 站附近由于气旋涡消失,环礁西南部海域跃层深度增加至 50 m 左右;中部 ZS43 站附近海域由于反气旋涡出现,该海域跃层深度增加至 60 m;东北部 ZS25 站附近海域跃层深度基本不变,约 55 m(图 19)。



注:黑色方框为中沙大环礁观测区。

图 18 2020 年 6 月中沙大环礁邻近海域海面高度异常(m)分布

Fig. 18 Distribution of sea level anomaly (m) near the Zhongsha Atoll in June, 2020

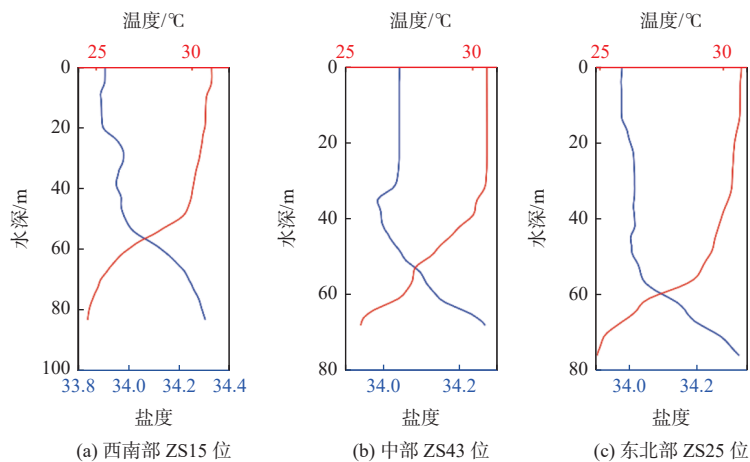


图 19 2020 年 6 月中沙大环礁海域典型站位温盐垂直剖面分布

Fig. 19 Typical vertical profiles of temperature and salinity at the stations near the Zhongsha Atoll in June, 2020

3 季风爆发前后中沙大环礁海域温盐分布差异

在国家科中沙群岛海域 2 个航次水温水平和垂向分布均存在较大差异,但由于 2020 年 6 月航次没有在

黄岩岛附近设置调查站位,故仅对中沙大环礁海域 2019 年 5 月和 2020 年 6 月航次调查数据开展对比分析。2019 年 5 月中沙大环礁温度从表层至底层各层温度水平分布特征差异较大,但 2020 年 6 月大环礁从表层至底层各层温度水平分布较为相似,说明太阳辐射和风应力对大环礁海域温度变化具有较大的控制作用,同时大环礁各层温度对太阳辐射和风应力作用的响应也存在差异。2019 年 5 月中沙大环礁海域表层和 10 m 层温度分布特征为西南高、东北低,而 2020 年 6 月则相反,呈现出西南低、东北高的分布特征,表明夏季风爆发后中沙大环礁东北部海域升温较快,其表层温度最高值也较 2019 年 5 月高出 0.2 °C。2019 年 5 月中沙大环礁海域 10 m 层温度大部分低于 30 °C,而 2020 年 6 月则都超过 30 °C,表明夏季风爆发后,环礁内浅水区升温较快。2019 年 5 月中沙大环礁海域 30 m 层温度分布与表层相反,温度高、低值差异大,差值达到 4.5 °C。但 2020 年 6 月 30 m 层温度分布与表层相似,高、低值的差异很小,小于 1.5 °C,只是在环礁西南部温度略低,其他区域温度基本高于 30 °C,浅水区垂向混合较好。而 2019 年 5 月环礁内 30 m 层温度基本低于 30 °C。2019 年 5 月和 2020 年 6 月中沙大环礁海域 50 m 层温度分布趋势较为一致,但 2019 年温度差异要明显大于 2020 年,且温度最低值可达 22.5 °C,大部分环礁海域温度均小于 30 °C,2019 年 5 月 50 m 层温度最高值达到 30.2 °C,高于 2020 年 6 月大环礁海域 50 m 层最高温度(30 °C)。2019 年 5 月和 2020 年 6 月 75 m 层温度均低于 30 °C,温度较低区域占据了环礁大部分海域,但 2020 年 6 月温度最高值要低于 2019 年 5 月,温度高值区的位置也不同,2019 年 5 月温度高值区位于环礁东南,而 2020 年 6 月温度高值区位于环礁东北边缘。2019 年 5 月 75 m 层温度高、低值差异进一步加大,达到 9 °C,而 2020 年 6 月 75 m 层温度高、低值差异与 50 m 层基本相同,约为 3 °C。2019 年 5 月和 2020 年 6 月大环礁底层温度分布趋势基本相同,但 2019 年 5 月大环礁边缘低温区温度更低,可达到 10 °C(位于环礁南部),而 2020 年 6 月则超过 18 °C。因此,2019 年 5 月底层温度水平梯度(约 21 °C)远高于 2020 年 6 月底层温度梯度(约 12 °C)。

通过观测期间平均海表净热通量平面分布(图 20)可发现:2019 年 5 月环礁西南部海洋吸热高于东北部,故导致表层温度西南高、东北低;2020 年 6 至 7 月正好相反,环礁西南部海洋吸热低于东北部,故导致表层温度西南低、东北高,与温度平面分布一致。2019 年 5 月和 2020 年 6 月航次观测结果均表明中沙大环礁海域局部产生了低温高盐或高温低盐水,而中尺度涡是导致其形成的主要原因:2020 年 6 月,由于西南部气旋涡的消失和中部反气旋涡的出现,导致西南部和中部温跃层深度增加。

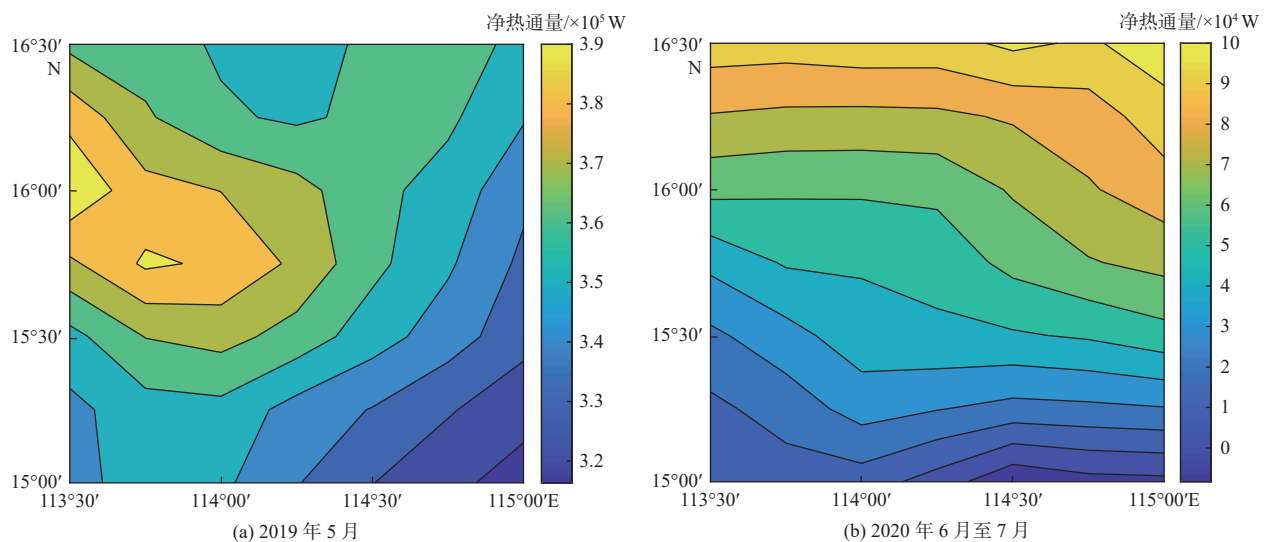


图 20 2019 年 5 月和 2020 年 6 月观测期间平均海表净热通量分布

Fig. 20 Distribution of monthly mean sea surface net heat flux in May, 2019 and June, 2020

由于以往对中沙群岛及邻近海域小尺度的温盐调查很少,多是从南海春夏季风转换期间大尺度范围的温盐变化角度开展调查或者研究^[2,5-8,14-15]。从南海大尺度范围的历史研究成果来看,中沙大环礁海域基本被

南海局地水团控制,受黑潮水和其他流系的影响较小。夏季风爆发前后,中沙大环礁海域的表层和次表层水温盐结构响应较快,均发生了明显变化,与南海上层水在夏季风爆发后的整体变化特征趋向一致,然而由于中沙大环礁内水深差异大,其响应方式和强弱存在较明显的差异,环礁内浅水区响应速度快,50 m以深水域的响应显著滞后,表明南海夏季风对中沙大环礁海域的上层温盐结构具有重要的影响。此外,受中尺度涡旋影响的中沙大环礁局部海域存在低温高盐或高温低盐水体,并在大环礁区产生垂向上流速切变,进一步加剧了温跃层深度增加,与夏季南海季风爆发后的温盐场调整趋势基本一致。

4 结 论

本文选取了2019年5月(春、夏季风转换期)中沙大环礁、黄岩岛海域和2020年6月(夏季风爆发期)中沙大环礁附近海域2个航次的CTD调查数据及同步的风速风向调查数据等,分析了中沙大环礁和黄岩岛邻近海域的季风特征以及水体温度、盐度水平和垂向分布特征,对比了夏季风爆发前后中沙大环礁海域温、盐分布和温跃层深度的差异性,探究了中沙大环礁局部海域温、盐分布对中尺度涡旋的响应,得出以下主要结论。

1)春、夏季风转换期间和夏季风爆发后,中沙大环礁海域的温度分布呈现出了较大的差异性。由于海表热通量分布的改变,表层温度由2019年5月的西南高东北低,变化为2020年6月的西南低东北高。2019年5月中沙大环礁各层温度整体略低于2020年6月,随着水深的增加其差距越大,其各层的水平温度梯度均要大于2020年6月,表明春夏季风转换期间环礁内海域升温并不均匀。黄岩岛附近海域表层温度与中沙大环礁海域差异较小,但底层温度明显高于中沙大环礁海域。

2)夏季风爆发后,中沙大环礁海域的表层和次表层水温盐响应较快,与南海上层水在夏季风爆发后的整体变化特征趋向一致,但由于环礁内水深分布差异大,其响应方式和强弱存在明显差异,环礁内浅水区响应速度快,50 m以深水域的响应显著滞后,表明南海夏季风对中沙大环礁海域的上层温盐结构具有重要的影响。

3)太阳辐射和中尺度涡对中沙大环礁温盐水平和垂向分布具有较大影响作用。在中尺度涡的作用下,中沙大环礁温度垂向分布出现等温线上涌或下沉,导致中沙大环礁区域局部产生低温高盐水或高温低盐水,其生消变化亦使得2020年6月大部分区域温跃层深度相比于2019年5月有所增加。

参考文献(References):

- [1] 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 L, GAO H F. Analyses on temperature and salinity distributions in ZhongSha Islands waters during spring to summer monsoon Transition[J]. Geological Research of South China Sea, 2012, 1: 49-56.
- [2] 李凤岐,苏育嵩.海洋水团分析[M].青岛:青岛海洋大学出版社,1999,377-378. LI F Q, SU Y G. Ocean water mass analysis[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1999, 377-378.
- [3] 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):25-40. WEI X, GAO H F. Temperature and salinity structures of the central-eastern South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(8): 25-40.
- [4] 毛庆文,王卫强,齐义泉.夏季季风转换期间南沙群岛海域的温盐分布特征[J].热带海洋学报,2005,24(1):28-36. MAO Q W, WANG W Q, QI Y Q. Analyses on temperature and salinity distributions in Nansha Islands waters during spring to summer monsoon transition[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(1): 28-36.
- [5] 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 D X, CHEN J, CHEN R Y, 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.
- [6] 刘洋.南海次表层、中层水团结构及其运动学特征的研究[D].中国海洋大学,2010. LIU Y. Study on the structures and the kinetics characteristics for the subsurface and intermediate water masses in the South China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

- [7] 黄企洲. 南沙群岛海区温、盐的分布和变化[C]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛海区物理海洋学研究论文集. 北京: 海洋出版社, 1995: 39-61. HUANG Q Z. T/S distribution and variation in Nansha Islands area[C]// Nansha Comprehensive Scientific Investigation team of Chinese Academy of Sciences. Collection of papers on Physical Oceanography in Nansha Islands area. Beijing: China Ocean Press. 1995: 39-61.
- [8] 刘长建, 杜岩, 张庆荣. 南海次表层和中间水团年平均和季节变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(1): 55-64. LIU C J, DU Y, ZHANG Q R. Seasonal variation of subsurface and intermediate water masses in the South China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(1): 55-64.
- [9] 蔡树群, 苏纪兰, 甘子钧. 南海上层环流对季风转变的响应[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(3): 52-60. CAI S Q, SU J L, GAN Z J. Response of South China Sea upper circulation to monsoon transition[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(3): 52-60.
- [10] 徐褐祯. 南海中部的温、盐、密度分布及水团特征[C]//中国科学院南海海洋研究所. 南海海区综合调查研究报告. 北京: 海洋出版社, 1982: 119-128. XU X Z. Distributions of water temperature, salt and density water mass characteristics in the central South China Sea[C]//South China Sea Institute of Oceanology, CAS. Report of comprehensive investigation and research in the South China Sea. Beijing: China Ocean Press. 1982: 119-128.
- [11] 方文东, 黄企洲, 邱章. 春夏季风转换期南海南部的异常表层水[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(1): 77-81. FANG W D, HUANG Q Z, QIU Z. Anomalous sea surface water in Southern South China Sea during spring to summer monsoon transition[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(1): 77-81.
- [12] 李立, 吴日升, 郭小钢. 南海的季节环流——Topex/Position卫星测高应用研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 13-25. LI L, WU R S, GUO X G. Seasonal circulation in the South China Sea—a TOPEX/POSEIDON satellite altimetry study[J]. *Haiyang Xuebao*, 2000, 22(6): 13-25.
- [13] HU J Y, KARAMURA H, HONG H H. A review on the currents in the South China Sea: Seasonal circulation, South China Sea Warm Current and Kuroshio intrusion[J]. *Journal of Oceanography*, 2000, 56(6): 607-624.
- [14] 王桂华, 苏纪兰, 齐义泉. 南海中尺度涡研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 882-886. WANG G H, SU J L, QI Y Q. Advances in studying mesoscale eddies in South China Sea[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(8): 882-886.
- [15] 田永青, 黄洪辉, 巩秀玉. 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): 1-6. TIAN Y Q, HUANG H H, GONG X Y. 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): 1-6.

Characteristics of the Temperature and Salinity Distribution in Adjacent Sea Areas of Zhongsha Islands During Spring-Summer Transition Period

WANG Yong-zhi¹, JU Xia^{1,2,3,4}, DU Jun¹, LIU Chang-jian¹, WANG De-wu⁵, ZHOU Run-sheng⁵, XUE Wen-jing⁶

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;*

3. *Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China;*

4. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;*

5. *South China Sea Marine Engineering Surveying Center, SOA, Guangzhou 510500, China;*

6. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)*

Abstract: The Zhongsha Islands mainly consist of the Zhongsha Atoll and Huangyan Island, particularly its adjacent sea water temperature and salinity, are of great significance for fisheries production, navigation security and underwater telecommunication. In the transitional period from spring to summer, significant seasonal variation in water temperature and salinity and corresponding thermocline structure can be observed in the region. Based on the CTD survey in the adjacent waters of the Zhongsha Atoll and Huangyan Island in May 2019 and June 2020, the water temperature and salinity distribution and difference are analyzed separately for the spring to summer monsoon transition in 2019 and post summer monsoon onset in 2020. Thermocline change is also analyzed with sea surface heat flux and satellite altimetry data. The results show that the water temperature in the Zhongsha Atoll rises rapidly after the onset of summer monsoon in 2020, and the temperature of each layer is higher than that during spring and summer monsoon transition period in 2019. The bottom temperature rises most significantly. The distribution of water temperature and salinity in the middle and upper layers near the Huangyan Island is similar to that near the Zhongsha Atoll in May 2019, but the those in bottom layer are different, and the depth of thermocline is also deeper. The bottom temperature rises most significantly in 2020 due to the onset of summer monsoon. The thermocline depth in 2020 is shallower than that in 2019. The horizontal temperature gradient near the Zhongsha Atoll is larger in 2019, which increases with water depth, but decreases gradually after the onset of summer monsoon in 2020. The horizontal distribution of salinity near the Zhongsha Islands in 2019 and 2020 is similar to that of temperature. The distribution of sea surface heat flux shows that the ocean heat absorption in the southwest of the atoll in May 2019 is higher than that in the northeast, thus the surface temperature is higher in the southwest and lower in the northeast. From June to July 2020, the ocean heat absorption in the southwest of the atoll is lower than that in the northeast, thus the surface temperature is lower in the southwest and higher in the northeast, consistent with the observations. In addition, the satellite altimetry data during the survey period shows that, due to the effect of mesoscale eddy, low temperature and high salinity or high temperature and low salinity waters are generated locally near the Zhongsha Atoll, resulting in the deepening of thermocline in most areas of near the Zhongsha Atoll in June 2020.

Key words: Zhongsha Atoll; water temperature; thermocline; mesoscale eddy

Received: August 10, 2021