

丛帅, 刘时桥, 辛姿仪, 等. 台风“巴蓬”对南海上层海洋水文特征与生态环境的影响[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(10): 79-86.

CONG Shuai, LIU Shiqiao, XIN Ziyi, et al. The impact of typhoon "Phanfone" on hydrological characteristics and ecological environment of the upper ocean in the South China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(10): 79-86.

台风“巴蓬”对南海上层海洋水文特征与生态环境的影响

丛帅¹, 刘时桥^{2*}, 辛姿仪³, 蔡砥柱², 张经纬², 许丞², 李兴锐², 刘亮²

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 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 中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100)

摘要: 研究台风过境影响下海洋生态环境的变化是系统认识强天气过程下海洋响应问题的重要内容, 对于防灾减灾、远洋运输等具有积极的意义。基于混合坐标海洋环流模式 (Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM) 数据, 结合 Aqua 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 传感器数据, 研究了慢速移动的台风“巴蓬”(1929 号) 过境对南海海表温度、叶绿素浓度以及水体垂向温盐结构和流场特征的影响。结果显示, 台风“巴蓬”过境期间, 波高由 3 m 增加至 9 m, 海表流速由 0.3 m/s 增加至 0.7 m/s, 台风周围最大流速甚至超过 1.8 m/s; 台风过境后, 海表温度由原 25.8 °C 下降至 24.9 °C。在台风影响下, 水体垂向混合增加, 混合层深度增加近 15 m, 从 23 m 到 38 m。混合层内上部温度降低、盐度略微增加, 下部温度升高、盐度降低; 上层水体流速增加, 方向偏转近 90°, 流速变化幅度由表及底逐渐减小。台风过境后 3 天内, 由于温度降低、光照减弱, 并且垂向混合增强补充的营养盐仍未被浮游植物充分利用, 因此, 叶绿素浓度并未快速升高, 而是呈现短期内浓度微增的现象。

关键词: 台风“巴蓬”; 南海; 水文特征; 流场结构; 叶绿素变化

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.174

0 引言

自然灾害是全球变化背景下人类面临的一项重大问题, 其中, 热带风暴、强热带风暴以及台风等气象灾害是全球影响最严重的自然灾害事件, 一直以来都是国际热点问题之一^[1-3]。WEBSTER 等^[4]通过分析近 35 年间热带气旋的强度、数量和持续天数, 发现在全球变暖背景下, 4~5 级以上的强热带气旋发生的概率明显增加, 其中, 太平洋地区和印度洋地区增加尤为明显, 由此热带风暴和台风对海洋的危害和影响得到进一步重点关注。据统计,

中国每年受台风登陆所造成的海岸防护工程、近岸养殖区的损坏以及沿海城市建筑的破坏, 直接经济损失就高达 7 亿元以上^[5]。台风对海洋的影响可以概括为 2 个方面: ①台风事件带来的狂风恶浪给海洋工程建设、航海、渔业和海上军事活动等带来巨大威胁^[6-8]; ②台风过程也会引起海表温度变化、改变海水层化混合状态、促进浮游植物的生长进而提高海洋初级生产力^[9-13]。因此, 研究海洋水体结构及温度特征对台风事件的响应过程, 探讨台风造成的海洋初级生产力变化对于系统认识台风影响下的海洋环境演化具有重要的科学意义。

作为一种强烈的事件性天气, 台风对区域和全球海气相互作用具有重要影响^[9]。海洋对台风过程的响应主要受台风导致的混合、对流以及表面热通量控制, 且具有空间不对称性, 在北(南)半球台风路径右(左)侧更强^[9,14-15]。台风通过动能的传输, 在海洋中形成了近惯性流, 增强了海表波浪^[5,16]。同时, 台风影响下海洋混合层深度增加, 降低海表温

收稿日期: 2021-06-22

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20191027)

作者简介: 丛帅(1994—), 男, 博士, 主要从事海洋沉积动力学方面的研究工作. E-mail: congshuai2737@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者: 刘时桥(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质方面的研究工作. E-mail: 823810405@qq.com

度的同时使得次表层温度升高(“艾克曼泵”效应)^[10-11,14]。台风所引起的上层海洋热响应可能有助于全球海洋热吸收和输送,对过去和未来潜在的气候变化具有不可忽视的作用^[17-18]。除此以外,台风过程形成的“艾克曼泵”还会将营养盐(氮、磷、钾等)从海洋深层输送到表层,促进表层浮游植物的光合作用,引起初级生产力的提升,对整个海洋的生态过程具有重要影响^[13,19]。

南海是中国近海中面积最大、深度最深的海区,在中国的经济、资源、国家安全、地缘政治等方面都扮演着重要的地位和作用。与此同时,南海也是季风盛行、台风活跃的区域^[20],台风过境期间形成的巨大能量对南海的海洋动力过程与生态环境变化均产生了重要影响。前人针对南海海洋环境对台风响应的研究主要通过实测资料分析、遥感资料解译和数值计算等方法,推算了台风过程中风能输入、白帽耗散作用等风浪过程以及海表温度与生产力变化^[21-25]。研究发现,台风所引起的南海上层海洋环流异常可达 80 cm/s,导致海表温度短时间内降低近 3℃,且降温过程在空间分布上具有不对称性^[24-25]。但前人的研究往往多聚焦于水体表层,缺乏对水体垂向结构的深入探讨。尤其是在强天气事件概率逐渐增加的背景下,研究台风影响下南海海洋水文特征以及初级生产力的变化,对系统认识全球变化背景下南海海洋环境演化尤为重要。

鉴于台风等极端海洋环境下现场观测资料的匮乏,本文结合 MODIS 卫星遥感观测资料与 HYCOM 海洋环流模式结果,分析了 2019 年第 29 号台风“巴蓬”过境期间对南海海洋环境的影响过程,研究了台风前后海表温度、水体垂向特征、流场结构以及初级生产力的变化,探讨了台风“巴蓬”对南海上层海洋水文特征与初级生产力的影响,借此提高对南海上层海洋物理环境对台风响应的认识。

1 研究区域概况

南海位于太平洋西部低纬度地区(其跨度大约为 99°—121°E, 0°—23°N),是世界上最大的半封闭边缘海,面积约 3.5×10⁶ km²,平均水深逾 1 800 m,最深可达 5 420 m^[26]。南海岛屿众多,海底地形复杂多样,既有宽广的大陆架,又有险峻的大陆坡和广阔的深海盆地。其北部通过吕宋海峡及台湾海峡与西北太平洋及中国东海相接;南部通过卡里马塔海峡及民都洛海峡参与印尼贯穿流的演变。南

海地处东亚季风区,受季风转换影响显著,冬季强劲东北季风驱动了南海气旋式环流结构;而在夏季随着季风转向,南海环流也转换成以反气旋式环流为主^[27]。除了季风的影响,台风同样是影响南海海洋环境的重要驱动因子,每年对南海及其周边沿海地区产生重要影响的台风约 10 余次^[28]。2019 年因台风风暴潮对中国造成直接经济损失 116.38 亿元,位列所有灾害影响之首^[29]。2019 年共有 10 次台风直接影响中国南海地区,其中台风“巴蓬”(1929 号)自东向西经过中沙群岛附近海域横穿南海。

台风“巴蓬”于 12 月 22 日在西北太平洋上生成,至 24 日 17 时风力升级为台风,快速向西移动,当日傍晚在菲律宾萨马岛东南部沿海登陆,登陆时中心最大风力 12 级。26 日凌晨进入中国南海后,其移速突然降低为 10 km/h,并转向西北方向移动,缓慢向中沙群岛附近靠近;至 27 日 18 时台风中心位置位于 116.4°E、14.9°N,最大风速为 33 m/s,中心气压为 975 hPa(图 1)。此后,风力逐渐降低为强热带风暴,并于 12 月 28 日 14 时消失。

2 资料与方法

台风风场数据来源于 NCEP-CFSR(Climat Forecast System Reanalysis)再分析数据^[30],结合联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)所提供的台风最佳路径资料,研究了台风期间的风场特征与变化。

台风过境前后水体温盐结构及流场变化数据均来自 HYCOM 海洋环流模式结果(<https://www.hycom.org/>)。HYCOM 采用混合坐标,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,使得模拟结果更为可靠,能够合理地再现水体垂向结构及流速分布,近年来被广泛应用于中国东部陆架海、南海乃至赤道太平洋环流的研究中^[31-34]。海区波浪数据选自欧洲哥白尼海洋环境监测系统(CMEMS)GLOBAL_REANALYSIS_WAV 的再分析数据(<https://marine.copernicus.eu/>)。此外,根据 HYCOM 提供的温盐数据同时计算了台风过境前后海表温度变化(ΔSST)及水体垂向密度梯度($\nabla\rho$):

$$\Delta SST = SST_{\text{post}} - SST_{\text{pre}} \quad (1)$$

$$\nabla\rho = \frac{\partial\rho}{\partial h} \quad (2)$$

式中: SST_{pre} 和 SST_{post} 分别代表台风过境前后的海

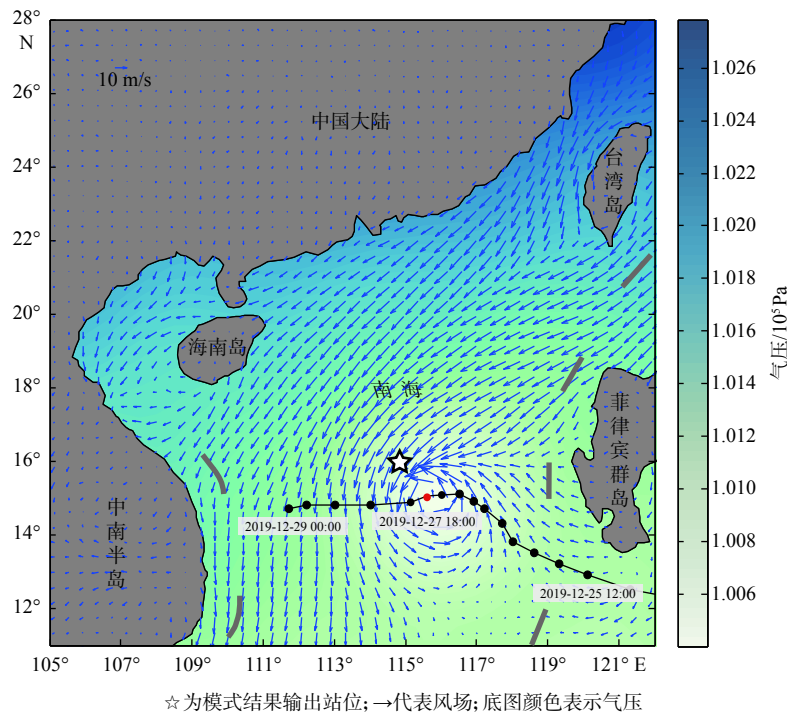


图 1 台风“巴蓬”路径及其过境期间 (2019 年 12 月 27 日 18 时) 海表风场和气压分布图

Fig.1 Track of typhoon "Phanfone" in 2019 with the wind field and air pressure at 18:00 December 27, 2019

表温度(°C), 在这里选取 12 月 23 日和 28 日的进行计算;

ρ 为海水密度, kg/m^3 ;

h 为水深, m 。

台风过境前后的海表叶绿素数据来自中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 资料, MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上观测地球的传感器之一, 最大空间分辨率可达 250 m, 扫描宽度 2330 km。本文采用的海表叶绿素数据是美国 NASA Ocean Color 网站 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 提供的 Aqua-MODIS Chl-a 逐日数据, 空间分辨率为 4 km, 数据级别为 3 级标准产品。

致右侧剪切不稳定效应和混合要明显强于左侧, 造成了台风期间海洋动力过程的空间不对称性, 而这种空间差异在南半球则恰好相反^[14-15,25]。受台风影响, 区域风速大小迅速增加, 最大风速可达 18 m/s; 同时, 风场方向变化剧烈, 自东北方向转至东南方向。如此强烈的风场变化在海面产生了剧烈扰动, 台风期间, 区域有效波高增至 9 m, 远远高于台风前正常冬季风作用下的有效波高。28 日台风过境后, 区域风场在短暂的东南风控制后恢复至台风前的东北季风控制, 而有效波高在降至 5 m 后仍维持了近 2 天, 这与以往的研究结果相似, 显示了台风影

3 结果与讨论

3.1 台风“巴蓬”过境前后海表流场结构变化

台风“巴蓬”过境前, 区域背景风场为稳定的东北季风, 平均风速约 7.8 m/s, 海面有效波高介于 1.5~5 m(图 2)。12 月 26 日开始, 台风“巴蓬”进入中国南海, 并向西北行进。台风剧烈的涡旋运动产生了强烈的海面风应力, 且这种风应力不同于冬季风, 其本身处于一种不稳定、方向迅速转变的过程。在北半球, 台风路径右侧的局地风旋转方向与近惯性流速旋转方向一致, 由此产生的共振效应导

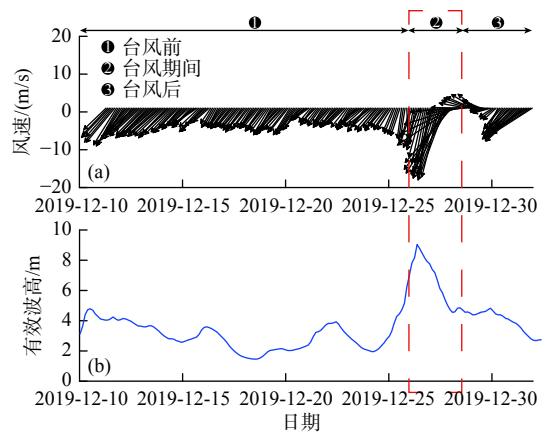


图 2 台风“巴蓬”过境前后区域风场及有效波高变化

Fig.2 The change of regional wind field and significant wave height before and after typhoon "Phanfone"

响下海洋环境由快速突变到缓慢恢复的过程^[15]。

台风期间强风诱发的“艾克曼”效应改变了原有的上层海洋环流结构,由此诱发的三维环流又会对局地的海洋动力过程特别是遍布海洋之中的涡旋等中尺度过程产生重要影响^[24,35]。台风前,南海表层流场主要受控于冬季风及中尺度涡(图3a)。在冬季风的影响下,南海表层流场整体向西南流动,仅在南部存在部分北向流。除台湾岛西南处的中尺度涡以外,台风前南海表层平均流速0.3 m/s。12月27日,受台风影响整个南海西南向流增加,表层流速大小相比台风前增加了近一倍,平均流速近0.7 m/s(图3b)。同时,台风过境时可以激发新的气旋型海

洋中尺度涡,从而对海洋环流系统产生进一步的影响^[36]。台风“巴蓬”过境期间,海洋表层形成了一个气旋式涡旋,直径范围甚至要大于台湾岛西南部的中尺度涡,海水自台风中心向四周辐散,周围最大海表流速可达1.8 m/s。12月30日,台风过境以后,海表流场恢复至台风前的状况,海表平均流速0.28 m/s(图3c)。对比台风过境前、中、后的海表流场可以看出,台风对区域海洋动力过程影响显著(图3),特别是对上层水体作用最为明显,其控制机制可简单划分为台风构型(平移速度、大小和强度)及环境构型(科里奥利频率和海洋层化)2个因素^[37]。

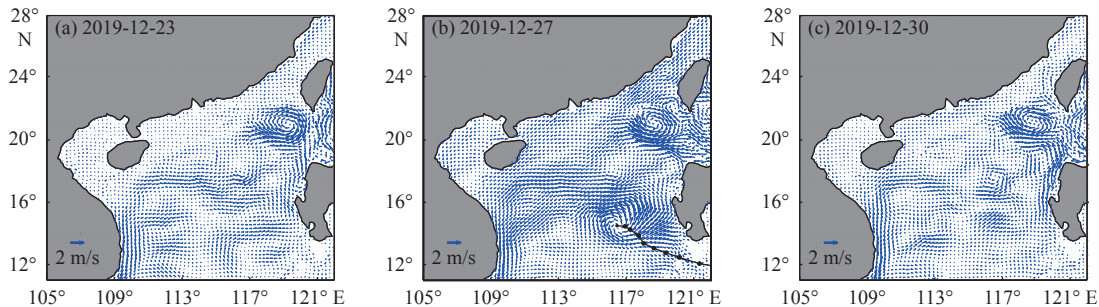


图3 台风“巴蓬”过境前(a)、中(b)、后(c)海表流场变化

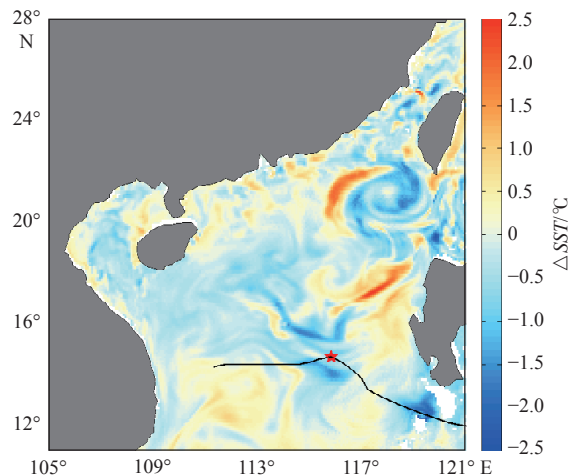
Fig.3 Changes of sea surface current before (a), during (b), and after (c) the passage of typhoon "Phanfone"

3.2 台风“巴蓬”影响下海表温度与水体结构变化

台风过境期间,强烈风应力及其激发的近惯性流会在表层产生剪切不稳定效应,引起混合层和温跃层顶层的混合,进而导致海表温度(SST)的降低,台风引起的海表降温幅度可达1~10℃^[38-39]。通过台风“巴蓬”过境前后的SST变化可以看出,在台风所产生的强风天气下,南海表层整体呈现出降温的过程,大部分区域温度降低约0.5℃(图4)。特别是台风路径周围,海表温度降低更加明显,在台风中心SST降低了近1.5℃。与其他诸多台风类似,“巴蓬”过境期间SST降温存在一定的不对称性,台风路径右侧降温幅度高于左侧,这和台风右侧近惯性流速明显增强有关。北半球台风路径右侧局地风的旋转方向与近惯性流速的旋转方向一致,进而导致两者产生共振效应,近惯性流速不断增强^[35]。台风“巴蓬”移动速度约为2.7 m/s,属于慢速移动台风,前人研究表明,慢速移动过程中引起了剧烈的垂向混合和较强的“艾克曼泵”速率,导致SST不断降低^[22]。同时,台风“巴蓬”发生在12月份,相比于发生在夏季的台风,降温幅度较小,如台风“启

德”(0004号)发生在7月份,引起的降温幅度高达9℃^[40],较低的初始温度导致台风“巴蓬”的降温效应相较夏季台风有一定弱化。

台风过程还可以通过风应力引起的垂向混合影响到次表层、混合层甚至跃层。海洋上层的垂向温度变化主要受控于台风引起的夹卷混合作用^[41]。



黑线代表台风“巴蓬”的路径,☆代表12月27日台风中心位置

图4 台风影响下的海表温度变化(ΔSST)

Fig.4 Changes in sea surface temperature (ΔSST) under the influence of typhoon

水体垂向混合的增强不仅降低了 SST, 同时也使得次表层温度有一定幅度增加^[42]。通过计算台风前后海洋上层水体的密度变化, 其上边界基本对应着混合层的深度, 可以看出, 受台风“巴蓬”所造成的强烈混合作用, 水体混合层深度在台风过境期间迅速增大(图 5)。对比台风前后水体垂向温盐及流速剖面可以发现, 台风对海洋上层水体影响强烈, 表现为垂向混合增强, 温跃层下移 10 m, 盐跃层下移 30 m(图 6)。跃层上部温度降低、盐度略有增加,

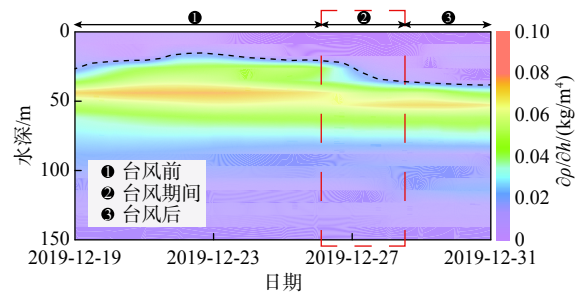


图 5 台风前后水体混合层深度变化
Fig.5 Changes in mixed layer depth (MLD) before and after the typhoon

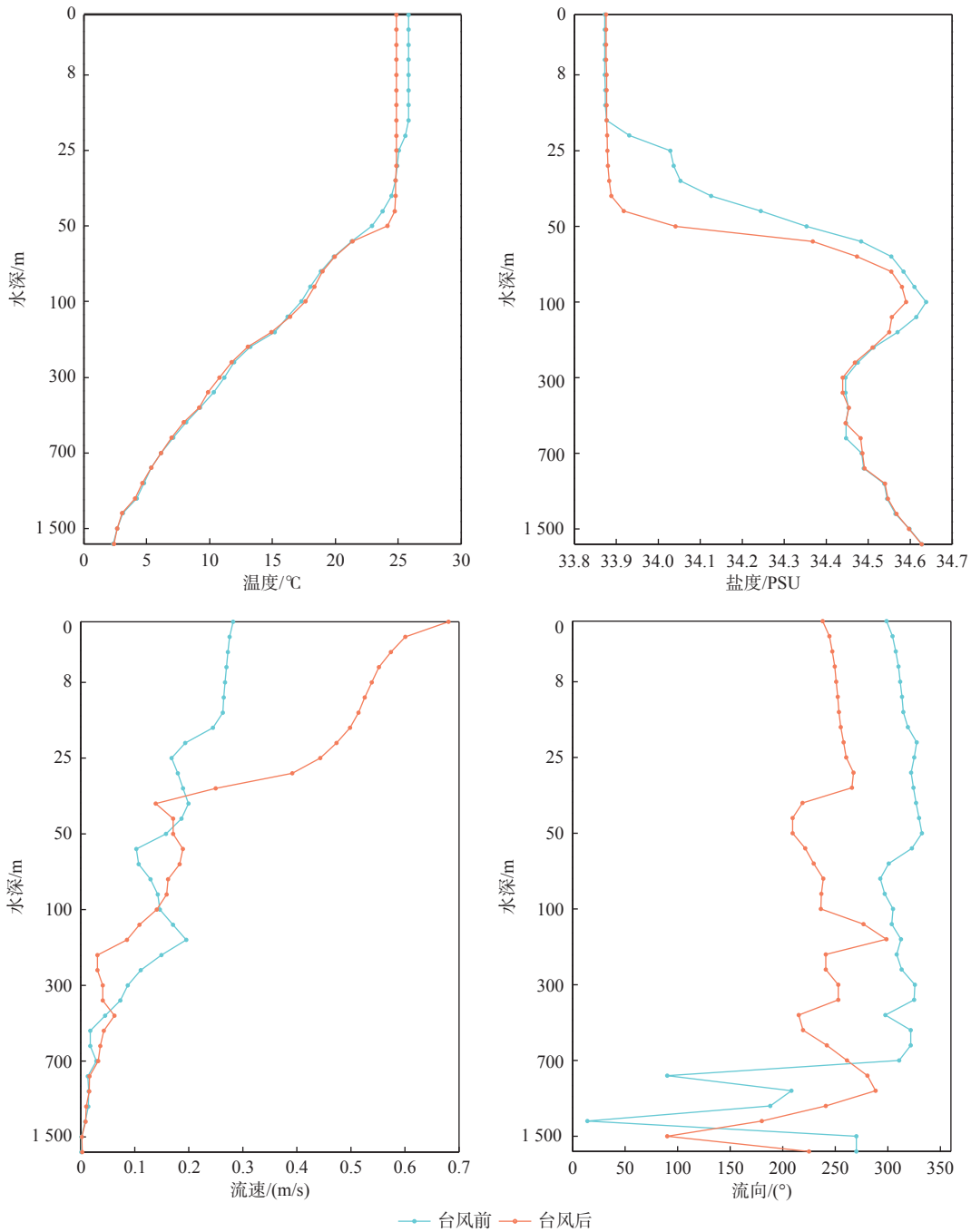


图 6 台风“巴蓬”过境前后水体温盐及流速剖面变化

Fig.6 Changes in temperature, salinity, and velocity profile before and after typhoon "Phanfone"

跃层下部温度升高,盐度降低。台风对于海洋流场的影响是直接且深厚的,前人对台风“维尼”(9711号)的研究表明,台风过境时引起表面气旋式流场结构的产生,影响深度可以达到100 m^[43]。台风“巴蓬”过境前后的对比结果显示了这一特征,台风后表层流速由台风前的0.3 m/s增加至约0.7 m/s,增加了1倍以上。流速垂向差距增大;流场方向偏转了近90°,由NW向转为SW向。流速变化幅度由表及底逐渐降低,底层由于流速大小接近于0,所以其方向变化可以忽略。台风过境后3天内,海洋动力过程并未立即恢复,台风所造成的海水混合在短期内仍然得以保持(图2b、图5)。

3.3 台风“巴蓬”对海表叶绿素浓度的影响

台风天气不仅会改变上层海水的物理性质及动力过程,同时还会对海洋生态环境产生影响。选取台风“巴蓬”过境前后最近1期的MODIS遥感影像,提取了海表叶绿素分布(图7)。冬季,南海较高的海水温度仍然适宜浮游植物的生长,海表叶绿素含量仍维持在一个较高的水平^[44]。台风前南海中部的海表叶绿素呈条带状分布,叶绿素含量最高

约0.8 mg/m³(图7a);而在台风过境后,海表叶绿素含量整体略有增加但并不明显,区域叶绿素含量最高值为1.1 mg/m³(图7b)。这主要是由于南海表层水体全年处于氮限制的环境下,较浅的混合层对营养盐的补充效果相对于浅水区域的底层补充来说相对有限;同时,台风过境期间的混合强化过程稀释了浮游植物的浓度,减弱了混合层内的光照,反而降低了浮游植物的光合效率^[45]。台风期间云覆盖的增加同样会导致海水中光照强度的减小,抑制了浮游植物的生长。台风过境前后的短短3天时间里,混合层补充的营养盐也并未来得及被浮游植物充分利用。因此,台风过境前后25日和28日的MODIS遥感数据对比显示,短时间内台风过境不仅为浮游植物的生长提供了必需的营养物质,其所造成的水体环境变化又会抑制浮游植物的快速生长,反而降低了海洋初级生产力水平,导致台风过境后初期海表叶绿素含量增加并不明显。台风“巴蓬”过境之后长达1个月的时间由于云覆盖难以获得有效MODIS数据,但基于前人的研究结果推断,台风过境1周后,南海表层叶绿素浓度开始迅速增加,初级生产力显著提高,带来了额外的固碳^[22]。

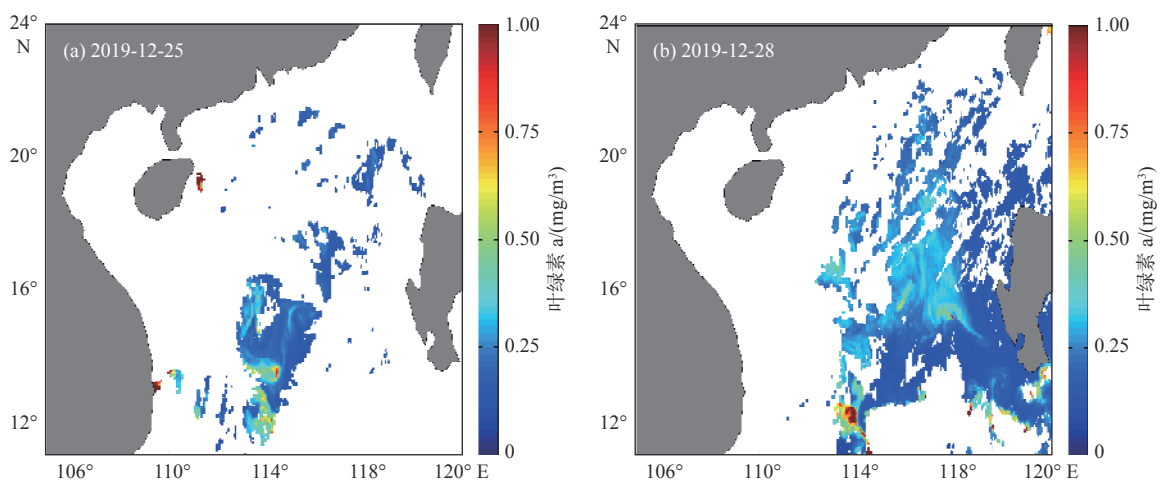


图7 台风前后海表叶绿素含量变化

Fig.7 Changes of chlorophyll-a on sea surface before and after typhoon

4 结论

(1)受台风“巴蓬”的影响,南海区域水文环境在短期内显著变化。台风期间风速增加,最大风速可达18 m/s,风向变化剧烈。在强烈风应力作用下,海表有效波高增至9 m,最大流速为1.8 m/s。台风过境期间在南海表层激发形成了新的气旋型涡旋。

(2)台风期间海气相互作用的增加致使海表温

度降低,台风中心温度变化超过1℃,SST降温存在一定的不对称性,台风路径右侧降温幅度高于左侧。台风所造成的强烈混合增加了水体混合层的深度,混合层深度由台风前的约23 m增加至近40 m。

(3)台风通过改变水体的温度、混合程度以及太阳光照,为表层水体提供营养盐的同时限制了浮游植物的快速生长,造成短期内海表叶绿素含量的微增,进而影响着海洋的生态环境。

参考文献:

- [1] KNUTSON T R, TULEYA R E. Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3477-3495.
- [2] KNUTSON R T, MCBRIDE L J, CHAN J, et al. Tropical cyclones and climate change [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3): 157-163.
- [3] PEDUZZI P, CHATENOUX B, DAO H, et al. Global trends in tropical cyclone risk [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- [4] WEBSTER P J, HOLLAND G J, CURRY J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [5] 杨春成, 戴明瑞, 高志华, 等. 一种台风浪的数值预报方法 [J]. *海洋学报(中文版)*, 1996, 18(1): 1-12.
- [6] 梁必骥, 梁经萍, 温之平. 中国台风灾害及其影响的研究 [J]. *自然灾害学报*, 1995, 4(1): 84-91.
- [7] KEIM B, MULLER R, STONE G. Spatiotemporal patterns and return periods of tropical storm and hurricane strikes from Texas to Maine [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20: 3498-3509.
- [8] LI X H, HAN G Q, YANG J S, et al. Using satellite altimetry to calibrate the simulation of Typhoon Seth storm surge off Southeast China [J]. *Remote Sensing*, 2018, 657(10): 1-15.
- [9] ZHANG H, HE H L, ZHANG W Z, et al. Upper ocean response to tropical cyclones: a review [J]. *Geoscience Letters*, 2021, 8(1): 1-12.
- [10] 杨晓霞, 唐丹玲. 台风引起南海海表降温的位置变化特征 [J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 26-31.
- [11] GLENN S, MILES T, SEROKA G, et al. Stratified coastal ocean interactions with tropical cyclones [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10887.
- [12] BABIN S M, CARTON J A, DICKEY T D, et al. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C03043): 1-21.
- [13] LV H B, MA X, WANG Y T, et al. Impacts of the unique land-fall Typhoons Damrey on chlorophyll-*a* in the Yellow Sea off Jiangsu Province, China [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 39: 101394.
- [14] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(2): 153-175.
- [15] ZANG Z C, XUE G Z, BAO S W, et al. Numerical study of sediment dynamics during hurricane Gustav [J]. *Ocean Modelling*, 2018, 126: 29-42.
- [16] XU J X, HUANG Y D, CHEN Z W, et al. Horizontal variations of typhoon-forced near-inertial oscillations in the South China Sea simulated by a numerical model [J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 180: 24-34.
- [17] EMANUEL K. Contribution of tropical cyclones to meridional heat transport by the oceans [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106: 14771-14781.
- [18] SRIVER R, GOES M, MANN M, et al. Climate response to tropical cyclone-induced ocean mixing in an earth system model of intermediate complexity [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010: 115.
- [19] 王冠琳, 李大伟, 徐腾飞, 等. 上层海洋对台风“凯萨娜”(2009)的响应特征 [J]. *海洋科学*, 2019, 43(9): 1-11.
- [20] 李崇银, 张利平. 南海夏季风活动及其影响 [J]. *大气科学*, 1999, 23(3): 257-266.
- [21] ZHOU L M, WANG A F, GUO P F. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under typhoon wind forcing [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2008, 20(6): 776-783.
- [22] 叶海军, 唐丹玲, 潘刚. 强台风鲶鱼对中国南海浮游植物及渔业资源的影响 [J]. *生态科学*, 2014, 33(4): 567-663.
- [23] 梁书秀, 孙昭晨, 尹洪强, 等. 基于SWAN模式的南海台风浪推算的影响因素分析 [J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(1): 19-27.
- [24] 王银霞, 隋俊鹏, 曾纪胜, 等. 台风影响南海上层环流的统计分析研究 [J]. *海洋预报*, 2020, 37(4): 15-20.
- [25] 管守德, 侯一筠. 西北太平洋超强台风 Tembin (2012) 引起的海表面降温和强混合研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(6): 1301-1309.
- [26] 杨海军, 刘秦玉. 南海海洋环流研究综述 [J]. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 364-368.
- [27] GAN J, LI H, CURCHISTER E, et al. Modeling South China Sea circulation: response to seasonal forcing regimes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C6): C06034.
- [28] WU L G, WANG B, GENG S Q. Growing typhoon influence on east Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: 1-4.
- [29] 中华人民共和国自然资源部. 2019年中国海洋灾害公报 [EB/R]. [2021-06-20]. <https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/gbgw/zghyzhgb/>.
- [30] MATTHEW S. The NCEP climate forecast system reanalysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, 91(8): 1015-1057.
- [31] 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.
- [32] 白志鹏, 高松, 王海棠. HYCOM模式对东海黑潮的气候态模拟 [J]. *海洋通报*, 2010, 29(2): 121-129.
- [33] 周立佳, 董慧超. 夏季风爆发期南海西边界急流的变化特征研究 [J]. *海洋技术*, 2012, 31(4): 40-44.
- [34] ZANG Z C, XUE G Z, BI N S, et al. Seasonal and intra-seasonal variations of suspended-sediment distribution in the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 148: 116-129.
- [35] 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1077-1086.
- [36] SUN L, YANG Y J, XIAN T, et al. Strong enhancement of chlorophyll a concentration by a weak typhoon [J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2010, 404: 39-50.
- [37] ZHANG H, LIU X H, WU R H, et al. Sea surface current response patterns to tropical cyclones [J]. *Journal of Marine Sys-*

- tems, 2020, 208: 103345.
- [38] SANFORD T, PRICE J, GIRTON J, et al. Highly resolved observations and simulations of the ocean response to a hurricane[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13604.
- [39] CHIANG T, WU C, OEY L. Typhoon Kai-Tak: an ocean's perfect storm[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(1): 221-233.
- [40] LIN I, LIU W T, WU C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1-4.
- [41] HUANG P, SANFORD T, IMBERGER J. Heat and turbulent kinetic energy budgets for surface layer cooling induced by the passage of Hurricane Frances (2004) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C12): C12023.
- [42] CHEN S, CAMPBELL T, JIN H, et al. Effect of two-way air-sea coupling in high and low wind speed regimes[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(9): 3579-3602.
- [43] 黄立文, 邓健. 黄、东海海洋对于台风过程的响应[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(3): 246-252.
- [44] 赵辉, 齐义泉, 王晓东, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 45-52.
- [45] 王晓琦, 邢小罡, 王金平, 等. 基于遥感数据分析南海叶绿素与颗粒物的季节变化与相互关系[J]. *海洋学报*, 2015, 37(10): 26-38.

The impact of typhoon "Phanfone" on hydrological characteristics and ecological environment of the upper ocean in the South China Sea

CONG Shuai¹, LIU Shiqiao^{2*}, XIN Ziyi³, CAI Dizhu², ZHANG Jingwei², XU Cheng², LI Xingrui², LIU Liang²

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Technique, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2 Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570100, China;

3 College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) data and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor data, we studied the impact of typhoon Phanfone on local surface temperature, chlorophyll-*a* concentration, vertical thermohaline structure, and ocean current in the South China Sea. Results show that in the typhoon event, wave height increased to 9 m and the velocity of surface current increased from 0.3 to 0.7 m/s, and reached the maximum of 1.8 m/s. After the typhoon passage, the sea surface temperature (SST) decreased from 25.8 °C to 24.9 °C. The mixed layer depth increased by 15 m from 23 m to 38 m. In the upper part of the mixed layer, temperature decreased and the salinity slightly increased, while in the lower part, the opposite. The flow velocity of vertical layer increased with the direction deflection of nearly 90°, and the variation range of the flow velocity decreased gradually from the surface to the bottom. The chlorophyll-*a* concentration did not increase timely after the typhoon passage. As temperature and light were decreased during the typhoon, nutrients added by enhanced vertical mixing were not fully utilized by phytoplankton, resulting in a slightly increase in chlorophyll-*a* concentration three days after the passage of the typhoon Phanfone.

Key words: typhoon "Phanfone"; South China Sea; hydrological characteristic; ocean current; chlorophyll-*a* variation