

基于卫星遥感数据的东海浮游植物对台风响应研究

李雅辰¹, 王胜强¹, 孙德勇¹, 焦红波², 张海龙¹

(1.南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2.国家海洋信息中心, 天津 300171)

摘要: 台风是发生在热带或副热带海洋上的一种强烈气旋性涡旋, 能够对海洋环境产生一定的影响。本文基于中分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) 和地球静止海洋水色成像仪 GOCI (geostationary ocean color imager) 卫星遥感数据, 对 2018 年东海海域台风过境后浮游植物的响应进行研究。研究发现, 2018 年 7 支过境东海的台风影响程度不一, 其中台风“苏力”的影响比较明显, 过境后海表面温度平均降低约 2.53 °C; 叶绿素 *a* 的浓度增加约 1.15 mg/m³。台风影响出现差异的原因是台风能否产生上升流, 该过程主要受风力、移动速度和过境时长等因素影响, 风力越大、移动速度越慢、过境时间越长的台风对过境海域的影响越大, 反之亦然。本研究为理解台风对海洋生态系统的影响及其程度提供了科学参考。

关键词: 台风; 浮游植物; 卫星遥感; MODIS; GOCI

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)04-0519-07

Assessing typhoon impacts on phytoplankton in the East China Sea based on satellite remote sensing data

LI Ya-chen¹, WANG Sheng-qiang¹, SUN De-yong¹,
JIAO Hong-bo², ZHANG Hai-long¹

(1.School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

Abstract: Typhoon is a strong cyclonic vortex that occurs in tropical or subtropical oceans, which will make a certain impact on the marine environment. This study based on satellite remote sensing data such as MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) and GOCI (geostationary ocean color imager), studied the response characteristics of phytoplankton after typhoon transit in the East China Sea in 2018. We found that 7 typhoons transiting the East China Sea in 2018 had various degrees of impact, of which typhoon “Suli” had a significant impact. After transit, sea surface temperature decreased by approximately 2.53 °C; chlorophyll *a* concentration increased by approximately 1.15 mg/m³. The reason for the difference in typhoon impact is whether the typhoon can generate the upwelling. This process is mainly affected by factors such as typhoon wind force, typhoon moving speed and transit time: The greater the wind of the typhoon, the slower the movement speed, and the longer the transit time, the greater the impact it will have on the transit sea area, and vice versa. Overall, this study provides a reference for further studying on the impact of typhoons on marine ecology.

Key words: typhoon; phytoplankton; satellite remote sensing; MODIS; GOCI

收稿日期: 2020-10-09, 修订日期: 2021-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42176181, 42176179, 42106176); 国家对地观测科学数据中心开放基金项目 (NODAOP2020009)

作者简介: 李雅辰 (1999—), 女, 湖南株洲人, 学士, 主要从事海洋遥感方面的研究, E-mail: Dorothy_liyachen@outlook.com

通讯作者: 王胜强 (1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋光学和水色遥感方面的研究, E-mail: shengqiang.wang@nuist.edu.cn

台风是一种会引起“风泵效应”的低压天气系统,能够改变海水的状态和海洋中关键元素的运动、循环,引起海洋生态系统的响应^[1-2]。例如,有的台风过境时能够引起上升流,在上升流的作用下,深层冷水上涌至表层,导致海表面温度(sea surface temperature, SST)降低。同时,深层海水中丰富的营养盐被带到表层,促进了表层海洋浮游植物的生长,使表层叶绿素 *a*(chlorophyll *a*, Chl *a*)浓度升高^[3]。因此,深入探讨台风对浮游植物的影响过程,对于研究台风的海洋生态环境效应具有重要的意义。

针对该问题,研究者们在不同海域已开展过相关研究。叶海军等^[4]分析了慢速移动的强台风“鲛鱼”对中国南海北部海表面温度、海表面叶绿素 *a* 浓度、初级生产力和渔业资源的影响。冀承振等^[5]利用黄海海域的 QF111 浮标资料,观测到台风“灿鸿”经过后黄海 SST 和流速的响应,发现 SST 有明显的下降,且在台风路径右侧形成了低温斑块。刘宇鹏等^[1]研究了南海东北部 Chl *a* 浓度对台风与黑潮共同作用的响应,发现热带气旋“风泵”效应带来的上层海洋扰动能够引起表层浮游植物的显著增长。

现阶段,研究台风对海洋环境的影响主要有海上浮标观测法^[6-9]、遥感观测法^[10-13]、数值模拟

法^[14-17]以及实地观测与数值模拟相结合的方法。其中,卫星遥感观测技术具有范围大、实时/准实时同步、多要素等优势,可以直接获得 SST 以及 Chl *a* 浓度等要素产品^[18],因此常被用于台风影响的相关研究。常见的传感器有 NASA 发射的中分辨率成像光谱仪 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)和一天可提供 8 幅影像的地球静止海洋水色成像仪 GOCI(geo-stationary ocean color imager)。

目前就中国近海而言,对台风过境影响的研究主要集中在南海区域,而东海区域的相关研究相对较少。因此,基于 2018 年东海海域的卫星遥感数据,本文分析了多支台风过境引起的 SST 和 Chl *a* 浓度的变化特征,探究了台风对海洋生态系统的影响过程。

1 材料与方法

1.1 研究区域及过境台风

本文以东海为研究区域,具体范围为 27° N—35°N、118°E—127.8°E,选取 2018 年过境的 7 支台风作为研究对象。按照台风发生的时间顺序分别为:“玛莉亚”“安比”“云雀”“摩羯”“温比亚”“苏力”和“康妮”。7 支台风的主要信息如表 1 所示。

表 1 7 支台风的主要信息
Tab.1 Main information of 7 typhoons

台风名称	平均 风速/m·s ⁻¹	风力/级	强度	过境时间	过境 时长/h	水深/ m	平均中心 气压/hPa	平均移动 速度/km·h ⁻¹
玛莉亚	48.35	14.94	强台风-超强台风	07/10 17:00—07/11 09:00	16	50~100	944.12	30.88
苏力	41.69	13.45	强台风	08/22 08:00—08/23 16:00	32	100~200	956.72	17.45
温比亚	20.34	8.34	热带风暴	08/15 08:00—08/16 22:00	38	50~200	992.26	17.63
康妮	35.25	12.25	台风	10/04 20:00—10/06 05:00	33	50~200	970	33.75
安比	27.43	10.00	强热带风暴	07/21 11:00—07/22 09:00	22	50~200	980.95	26.81
云雀	21.74	8.58	热带风暴	08/01 11:00—08/03 02:00	39	50~200	987.11	16.24
摩羯	22.58	8.96	热带风暴-强热带风暴	08/12 00:00—08/12 23:00	23	50~1000	987.79	30.29

1.2 数据资料获取

本文所需的数据资料包括:台风路径、过境时间、最大风速等台风信息,东海区域的地形数据,以及由卫星遥感反演得出的 Chl *a* 浓度、SST。其中,台风参数数据来自中央气象台台风网

(<http://typhoon.nmc.cn/web.html>)与浙江省水利厅台风网(<http://typhoon.zjwater.gov.cn/default.aspx>);东海的地形数据来自 ETOPO5(<http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>); Chl *a* 浓度的数据来自 GOCI 传感器,从 GOCI 官网(<http://kosc.kiost>

ac.kr/eng/p10/kosc_p11.html) 下载 L1B 数据, 利用传感器内置的 GOCI Data Processing System (GDPS) version 1.3 软件^[19] 的 Generate L2/L3 Data 工具, 将下载的 L1B 数据处理成包含 Chl *a* 浓度的 L2 数据^[20], 空间分辨率为 500 m。SST 数据 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 来自 Aqua MODIS 的 SST (11 μ , daytime) 和 L3 产品的 SST (4 μ , nighttime), 空间分辨率为 4 km。

2 结果与讨论

2.1 台风“苏力”过境对海洋环境影响的定量分析

本研究对比了 7 支台风过境前后 SST 和 Chl *a* 的变化, 并以影响最为明显的台风“苏力”为例, 定量分析了“苏力”过境前后 SST 和 Chl *a* 浓度的日变化以及过境前后的平均差值。由于遥感反演极易受到云层、雾气以及雨水的影响, 导致卫星在可见光和热红外波段观测数据有一定的缺失。本研究选用刘汉杰等^[21] 针对卫星数据的均值融合算法对多张数据资料进行合成处理, 用于融合的 SST 数据选取 MODIS 的 11 μ daytime 产品和 4 μ nighttime 产品, 用于融合的 Chl *a* 浓度数据选取 GOCI 一天内的 8 次观测数据。

台风“苏力”过境研究区域的时间为 2018 年 8 月 22 日 8 点至 8 月 23 日 16 点 (共 32 h), 平均风速为 41.96 m/s, 风力约 13 级, 强度为强台

风。过境时平均中心气压为 956.72 hPa, 平均移动速度为 17.45 km/h。图 1 为台风“苏力”过境前 7 天、过境中 2 天和过境后 7 天 (共 16 天) 的日均 SST 图像, 8 月 15 日至 21 日, 即台风过境前 7 天, 局部降温出现在济州岛以西的黄海海域, 其他海域 SST 变化不明显, 无异常情况。8 月 22 日至 23 日, “苏力”进入研究区域, 因天气原因导致过境区域的数据严重缺失。8 月 24 日 (台风过境后 1 天), 台风经过的济州岛以南区域出现了明显降温, 并且该现象持续了 7 天以上, 8 月 30 日仍然存在。

图 2 为台风“苏力”过境前 7 天、过境中 2 天和过境后 7 天 (共 16 天) 的日均 Chl *a* 浓度变化, 以 50 m 等深线为界, 沿岸 Chl *a* 浓度明显高于外海。8 月 15 日至 21 日, 即台风过境前 7 天, Chl *a* 浓度最高值主要出现在沿岸地区及台风轨迹 (图中黑线) 左边。8 月 22 日至 23 日, “苏力”进入研究区域, 因天气原因导致过境区域的数据缺失。8 月 24 日至 25 日, 台风过境后 1~2 天, Chl *a* 浓度无明显增加。8 月 26 日至 28 日, 台风过境后第 3~5 天, 台风经过的济州岛周围出现一个 Chl *a* 的高浓度水团, 8 月 29 日至 30 日, Chl *a* 的高浓度水团逐渐消散, Chl *a* 的高值重新出现在沿岸地区。

由于海洋对台风的生态响应一般会延后 3~6 天, 动力环境的变化也有一周的记忆时长^[22]。因此, 本研究以台风进入研究区域前、后 7 天平

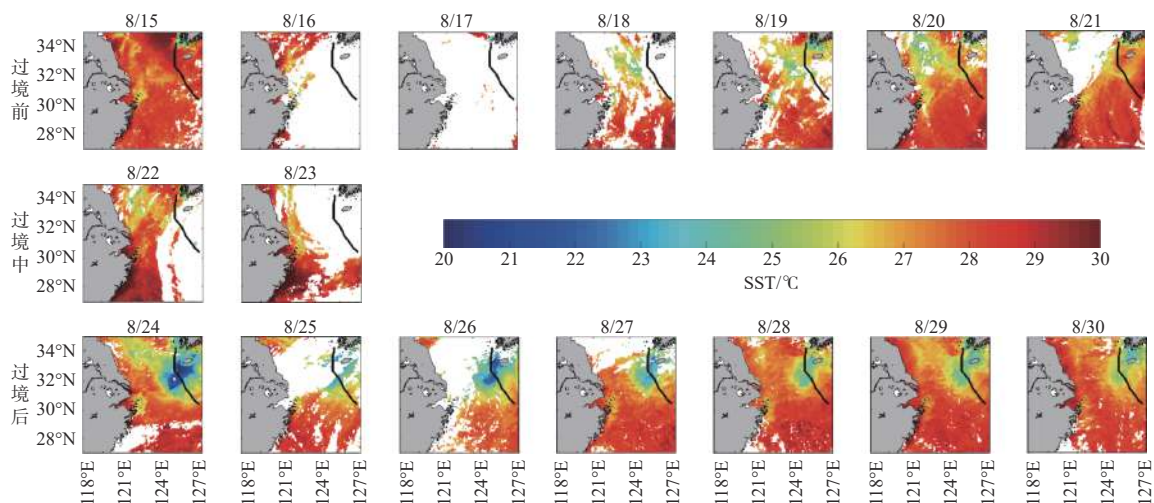


图 1 台风“苏力”过境前后 7 天以及过境中 2 天的 SST 日变化

Fig. 1 Diurnal variation of SST for 7 days before and after the transit period and 2 days during transit of typhoon "Suli"

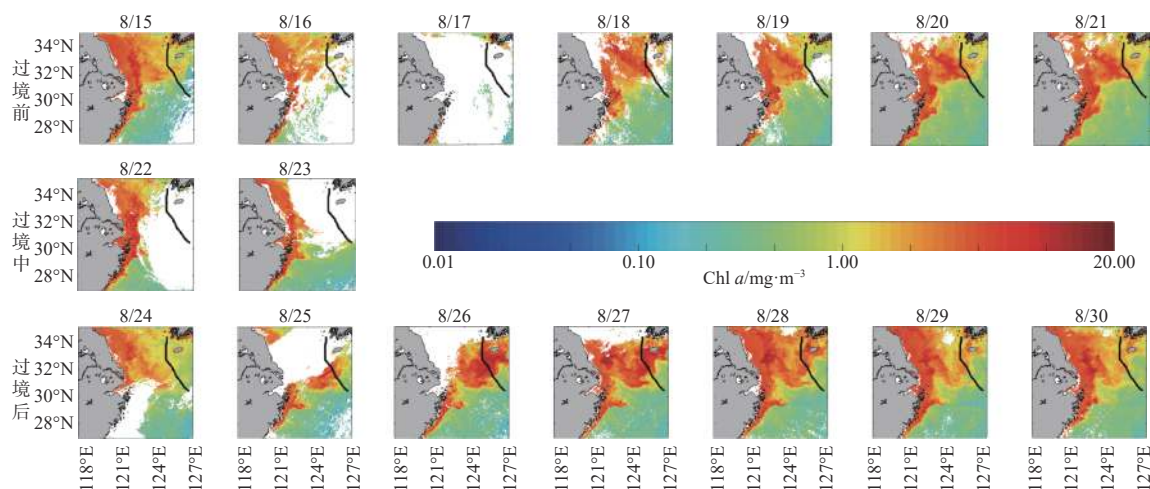


图2 “苏力”过境前后7天以及过境中2天的Chl *a* 日变化

Fig. 2 Diurnal variation of Chl *a* for 7 days before and after the transit period and 2 days during transit of typhoon "Suli"

均值的差值,定量分析了台风过境后东海 SST 和 Chl *a* 浓度的变化。图 3(a) 为“苏力”过境前 7 日平均 SST 与后 7 日平均 SST 的差值图,图 3(b) 为“苏力”过境前 7 日与后 7 日平均 Chl *a* 的差值图。由图 3(a) 可以看到,沿着台风轨迹(黑色圈线)其主要逗留地区(黑色方框)出现了上升流, SST 降低约 5 °C。非台风影响地区 SST 整体变化不大,波动范围在 -1 °C ~ 1 °C。由图 3(b) 可以看到,台风轨迹周围 Chl *a* 的浓度增加了大约 1 mg/m³。非台风影响地区, Chl *a* 浓度整体变化不大,波动范围在 -0.5 ~ 0.5 mg/m³。

本研究还计算了台风“苏力”主要逗留地区(图 3 黑色方框)的 SST 和 Chl *a* 浓度的日平均值(如图 4)。由图 4 可以看出,8 月 17 日至 21 日,即台风过境前, SST 均维持在 26 °C ~ 27 °C; 8 月 23 日,台风过境时, SST 受台风引起的上升流影响,出现明显的下降,达 3 °C 左右。SST 的最低值出现在台风过境后 1 天(8 月 24 日),为 23.09 °C; 台风过境后 SST 缓慢回升,过境 7 天后(8 月 30 日)又恢复到过境前的温度,台风“苏力”的过境使 SST 平均降低 2.53 °C。

由于海洋对台风的生态响应一般会延后, Chl *a* 浓度的变化呈先降低后上升的趋势。台风过境前, Chl *a* 的浓度多保持在 1 ~ 2 mg/m³; 8 月 23 日台风过境时, Chl *a* 的浓度达到最低值,为 0.39 mg/m³。8 月 24 号, Chl *a* 的浓度出现急剧增加,最大值出现在 8 月 26 号,高达 5.90 mg/m³,

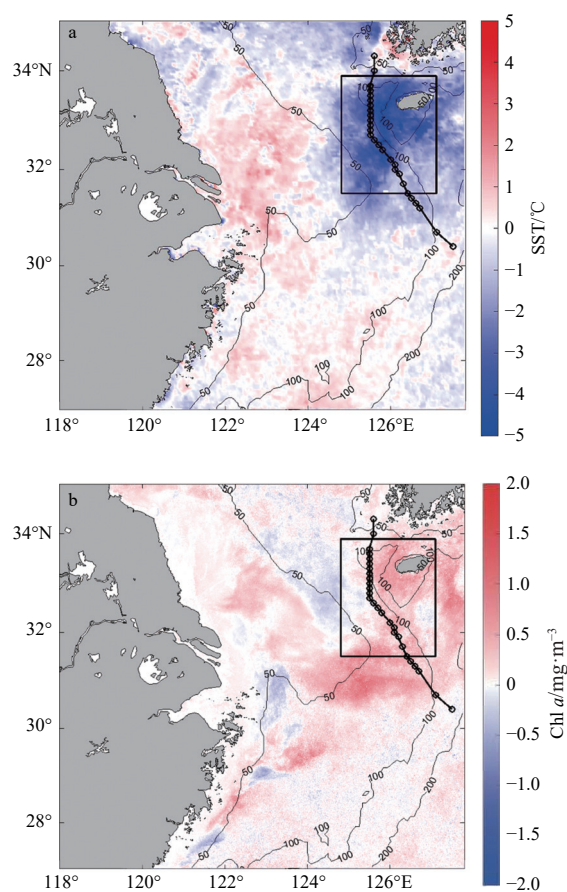


图3 台风“苏力”过境前7日与后7日平均SST/Chl *a* 差值图

Fig. 3 The difference image between average SST/Chl *a* 7 days before and 7 days after typhoon "Suli" transit

比过境前的平均值增高了 4.03 mg/m³。就过境前后 7 天而言,台风“苏力”的过境使 Chl *a* 的

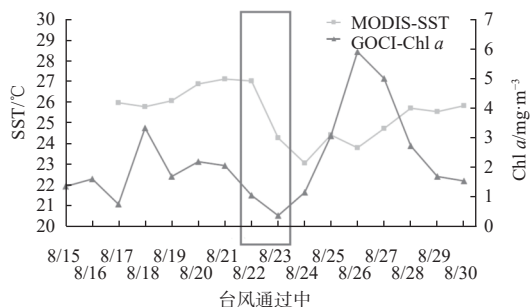


图4 台风“苏力”过境期间日均 SST 与 Chl *a* 变化图

Fig. 4 Daily average SST and Chl *a* changes during the typhoon "Suli" transit

平均浓度增加 1.15 mg/m^3 。

2.2 各台风过境后海洋环境响应特性的对比分析

除了上述影响极其明显的台风“苏力”外,本研究还分析了其他6支台风的过境前后 SST 和 Chl *a* 浓度的变化。图5为6支台风过境前7日与后7日平均 SST 与 Chl *a* 的差值图。由图可见:台风“玛莉亚”过境后(过境路径为:始于台湾省北部,至福建省福州市登陆),台风过境海域 SST 出现了大范围降低,非台风影响地区可能受其他因素影响,出现了显著升温。台湾岛以北海域 Chl *a* 浓度出现了一定的增加。整体来看,台风“玛莉亚”与“苏力”相似,都引起了局部地区的 SST 降低与 Chl *a* 浓度升高,表明台风引起的上升流对浮游植物的生长有显著影响。

台风“温比亚”过境后,台风经过的地区 SST 都有降低,但最低值并没有出现在台风轨迹上,沿 50 m 等深线的 Chl *a* 浓度都有增加,最高值出现在台风轨迹上。虽然“温比亚”过境后出现了 SST 降低与 Chl *a* 升高的变化,但变化的范围过大,难以确定是否为台风的作用。台风“康妮”的影响与“温比亚”相似,只是变化幅度更加微弱。

台风“安比”“云雀”与“摩羯”过境后,均未出现明显的 SST 降低或 Chl *a* 浓度升高的现象,未观察到上升流的出现,故判断该组台风对过境海域可能没有影响。

根据上述分析,可以按影响程度将台风分为3组。影响明显组:“苏力”和“玛莉亚”;

可能影响组:“温比亚”和“康妮”;无影响组:“安比”“云雀”和“摩羯”。

针对台风过境后的影响程度为何会出现上述差异的问题,本文结合台风的特征进行了探究。对各个台风的参数分析(表1)发现,台风影响明显组的“玛莉亚”和“苏力”,平均风速都在 40 m/s 以上,比其他台风大很多,甚至是个别台风的两倍;风力也都在 13~14 级,是所有台风中风力最强的两支。其中,“苏力”比“玛莉亚”影响更明显的原因在于,“苏力”的过境时间更长,有 32 h,且移动速度慢,只有 17.45 km/h ,意味着“苏力”有足够多的时间搅动海水,引起上升流,从而对 SST 和 Chl *a* 浓度造成明显的影响。“玛莉亚”虽然风速和风力都比“苏力”大,是所有台风中最大、最强的,但过境速度快 (30.88 km/h)、过境时长短(16 h),只是在海面快速的掠过,不如“苏力”有足够的时间可以引起海水扰动。

在可能影响组中,虽然“温比亚”的过境时长和平均移动速度都与“苏力”接近,为 38 h 与 17.63 m/s ,但“温比亚”的平均风速只有“苏力”的 1/2,为 20.36 m/s 。同时,“温比亚”的风力是所有台风中最弱的,只有大约 8 级,所以该台风没能引起明显的影响。可能影响组的另一只台风“云雀”虽然平均风速 (35.25 m/s) 与风力(12 级)都与影响明显组相差不大,但移动速度太快,同样没有足够的时间引起海水扰动,故影响不大。

无影响组 3 支台风的平均风速都在 $20 \sim 30 \text{ m/s}$,风力只有 8~10 级,难以引起海水扰动。虽然“云雀”的过境时长为 39 h,是所有台风里时间最长的,但其风力和风速在无影响组中都是最小的,分别为 8 级左右和 21.74 m/s 。

综上所述,台风过境后能否引起上升流,对海水表面的 SST 和 Chl *a* 浓度产生影响,取决于台风过境的风速、过境时长和移动速度等影响因素。具体表现为:风力越大、移动速度越慢、过境时长越长的台风越有充分的动力和时间搅动海水,使下层冷的海水向上涌,形成上升流,卷起深层的营养盐,引起过境海域的生态响应。

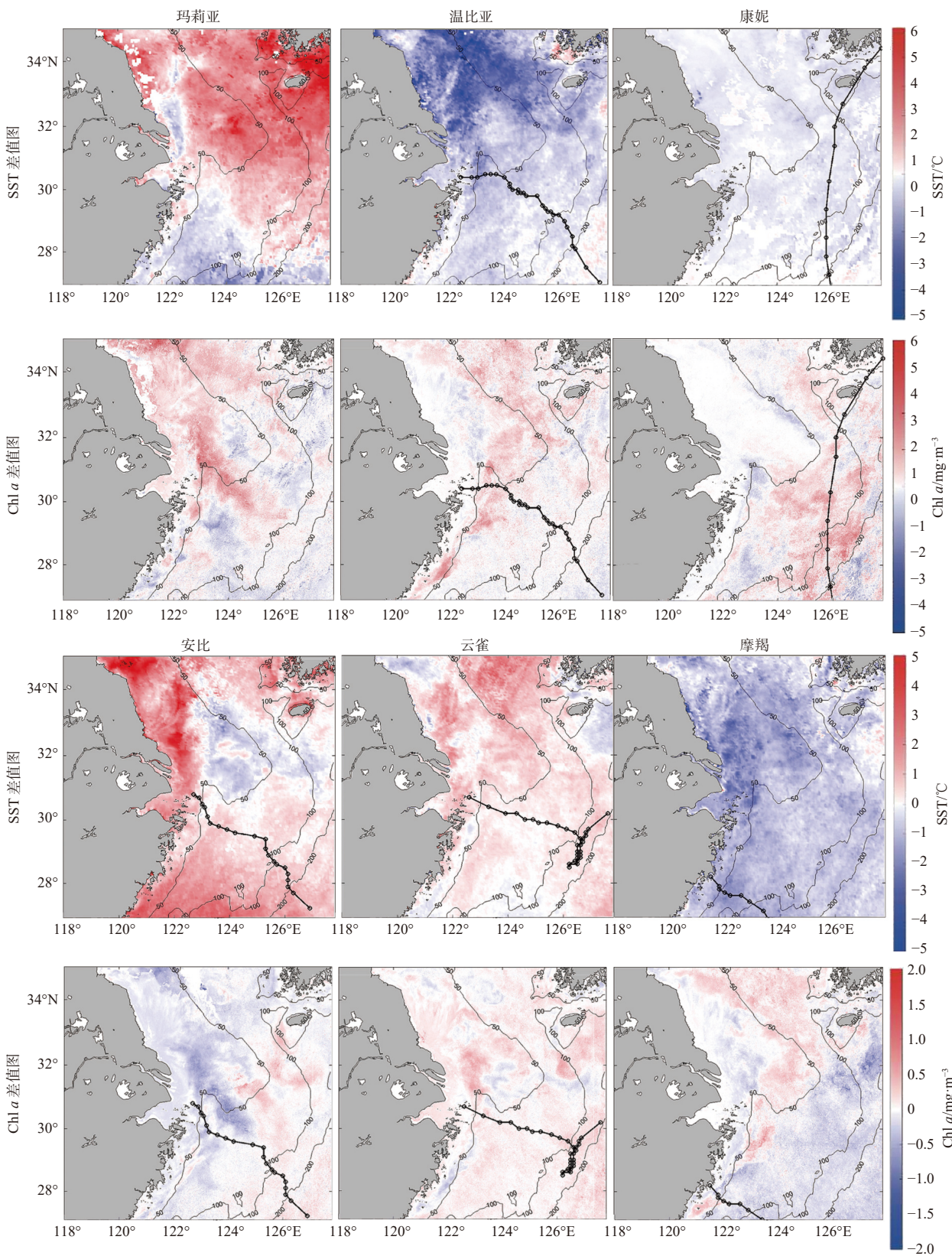


图 5 所有台风过境前 7 日与后 7 日的平均 SST 与 Chl *a* 差值图

Fig. 5 The difference image between average SST/Chl *a* 7 days before and 7 days after typhoons transit

3 结论

(1)2018年过境东海的7支台风中“苏力”“玛莉亚”影响明显,“温比亚”“云雀”影响不大,“安比”“云雀”和“摩羯”可能没有影响。其中,影响明显的“苏力”过境后,SST降低约2.53℃;Chl *a*浓度平均增加1.15 mg/m³。

(2)台风的影响程度主要由风力、移动速度和过境时长等共同决定,风力越大、移动速度越慢、过境时长越长的台风对过境海域的影响越大。台风对海洋初级生产力势必存在影响,具体的影响程度还有待进一步估算。此外,受天气的影响,遥感数据存在一定的缺失,准确量化台风的影响过程较为困难,将来需要更全面的数据观测技术支持该问题的深入研究。

参考文献:

- [1] 刘宇鹏,唐丹玲,梁文钊.南海东北部叶绿素a浓度对台风“风泵”和黑潮共同作用的响应[J].海洋学报,2020,42(7): 16-31.
- [2] FERNANDO D,唐丹玲,徐华兵.孟加拉湾的叶绿素a,海表温度和风速的趋势[J].南京信息工程大学学报,2018,10(3): 334-341.
- [3] 潘珊珊,史洁,高会旺,等.台风对上层海洋初级生产力和营养盐运输的影响[J].中国海洋大学学报,2016,46(6): 120-133.
- [4] 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(04): 657-663.
- [5] 冀承振,葛勇,李健,等.黄海海洋对台风“灿鸿”外围过程响应的观测研究[J].海洋学报,2020,42(1): 46-53.
- [6] LIU Z H, XU J P, SUN C H, et al. An upper ocean response to typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 90-101.
- [7] SHAN H X, GUAN Y P, HUANG J P. Investigating different bio-responses of the upper ocean to Typhoon Haitang using Argo and satellite data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(8): 785-794.
- [8] LIU Z H, XU J P, ZHU B K, et al. The upper ocean response to tropical cyclones in the northwestern Pacific analyzed with Argo data[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, 25(2): 123-131.
- [9] ZHAO H, TANG D L, WANG Y Q. Comparison of phytoplankton blooms triggered by two typhoons with different intensities and translation speeds in the South China Sea[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2008, 365: 57-65.
- [10] 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: Oceans*, 2004, 109(C3): C03043.
- [11] TANG D L, KAWAMURA H, DOAN-NHU H, et al. Remote sensing oceanography of a harmful algal bloom off the coast of southeastern Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C2): C03014.
- [12] WALKER N D, LEBEN R R, BALASUBRAMANIAN S. Hurricane-forced upwelling and chlorophyll a enhancement within cold-core cyclones in the Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): L18610.
- [13] ZHAO H, HAN G Q, ZHANG S W, et al. Two phytoplankton blooms near Luzon Strait generated by lingering Typhoon Parma[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(2): 412-421.
- [14] DIAZ-HERNANDEZ G, MENDEZ F J, MINGUEZ R. Numerical analysis and diagnosis of the hydrodynamic effects produced by hurricane Gordon along the coast of Spain[J]. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(3): 666-683.
- [15] SEO H, XIE S P. Impact of ocean warm layer thickness on the intensity of hurricane Katrina in a regional coupled model[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 122(1/2): 19-32.
- [16] TSAI Y, CHERN C S, WANG J. Numerical study of typhoon-induced ocean thermal content variations on the northern shelf of the South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 42: 64-77.
- [17] WADA A, UEHARA T, ISHIZAKI S. Typhoon-induced sea surface cooling during the 2011 and 2012 typhoon seasons: observational evidence and numerical investigations of the sea surface cooling effect using typhoon simulations[J]. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2014, 1(1): 11.
- [18] 顾行发,陈兴峰,尹球,等.黄海浒苔灾害遥感立体监测[J].光谱学与光谱分析,2011,31(6): 1627-1632.
- [19] RYU J H, HAN H J, CHO S, et al. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS)[J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 223-233.
- [20] WANG M H, AHN J H, JIANG L D, et al. Ocean color products from the Korean Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3835-3849.
- [21] 刘汉杰,付东洋. MODIS 3A遥感图像的均值融合研究与应用[J].信息技术,2010,34(9): 44-46, 48.
- [22] 石雨鑫,谢玲玲,李明明,等.台风“彩虹”对粤西近岸海表温度和叶绿素浓度的影响[J].广东海洋大学学报,2017,37(3): 49-58.