

# 台风对舟山海域上升流和叶绿素分布的影响

杨伟<sup>1,2</sup>, 黄菊<sup>1,3</sup>, 于潭<sup>1\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;  
3. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 基于 2015 年 7 月和 2016 年 7 月对舟山海域的调查数据, 分析该海域温度、盐度分布状况特征, 探讨了该区域上升流及叶绿素的分布情况, 研究了上升流生成的物理机制. 结果表明: 该海域 2015 年 7 月和 2016 年 7 月上升流所在区域海表温度较周围海域低, 且 2016 年 7 月海水表层与底层温度之差普遍在 4 °C 以上, 海水层化程度较 2015 年同期海域高. 受台风过境的影响, 2015 年 7 月海表温度较低, 且上升流的强度较 2016 年同期强, 台风对上升流具有加强作用. 台风过境区域的海表叶绿素质量浓度有所提高, 且这一变化有时间延迟.

**关键词:** 舟山海域; 台风; 上升流; 叶绿素

**中图分类号:** P 731.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-0479(2020)Sup. 1-0024-08

舟山近海海域位于我国东海大陆架上, 沿岸等深线主要呈南北走向, 分布比较密集, 自西向东水深变化较快<sup>[1]</sup>. 舟山海域是我国重要的海洋渔场, 该海域上升流可以把下层海水中的营养物质带至真光层, 促进浮游植物生长, 为赤潮爆发提供有利条件. 长江口海域处在陆地向海洋过渡的区域, 该区域水文特征复杂多变, 动力机制多样, 受到黄海沿岸流、长江冲淡水及台湾暖流等多种流系的作用, 同时会受到气旋活动的影响. 台风是发生在海洋上的强烈天气现象, 是海气相互作用的直观表现. 台风引起的水体强烈垂直混合对上层海洋与深层海水之间的热量、能量和物质交换有重大影响, 研究其与温度、盐度及叶绿素之间的关系显得尤为重要, 可以为进一步了解该海域生态系统作铺垫, 为夏季该海域赤潮发生机制的研究提供理论依据, 为环境保护提供一定的参考意义.

本研究根据上升流判断依据: 1) 海表温度差异, 2) 层化期 5 m 以下温度分布和等温线上凸情况, 3) T-S 水团分析, 来判断上升流是否存在. 通过 2015 年与 2016 年同期观测数据对比, 来探究台风对上升流和叶绿素分布的影响.

## 1 资料来源与数据说明

### 1.1 研究区域与资料来源

研究资料来自于 2015 年 7 月 13—23 日和 2016 年 7 月 14—24 日期间, 厦门大学、中国海洋大学和浙江海洋大学联合开展的“长江口及邻近海域海洋生物与生态野外实习基地海洋科学野外实践能力提高项目”, 由“浙海科 1 号”执行的 2015 年和 2016 年航次在长江口及舟山邻近海域利用温盐深(CTD)剖面仪测得温度、盐度以及声学多普勒流速剖面仪(ADCP)的流速等数据.

2015 年调查海域位于 30°~31° N, 122°~123° E, 共布设 3 个断面(A、B、C), 共 13 个大面站位与 5 个连续站位(如图 1 所示). 大面站的观测时间是 7 月 13—15 日, 连续站的观测时间是 7 月 17—23 日.

2016 年的调查海域位于 30.6°~31.2° N, 122.5°~123.2° E, 布设 4 个断面(C、D、E、F), 共 16 个大面站位与 5 个连续站位(如图 1 所示). 大面站的观测时间是 7 月 14—15 日, 连续站的观测时间是 7 月 18—24 日.

收稿日期: 2019-04-19 录用日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金海洋科学基地野外实践能力提高项目(J1310037); 国家自然科学基金(41906152); 空间海洋遥感与应用研究重点实验室开放基金(201702002); 中国科学院海洋环境与波动重点实验室开放基金(KLOCW1801)

\* 通信作者: tyu@shou.edu.cn

引文格式: 杨伟, 黄菊, 于潭. 台风对舟山海域上升流和叶绿素分布的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(增刊 1): 24-31.

Citation: YANG W, HUANG J, YU T. Impact of typhoon on upwelling and chlorophyll distribution in the Zhoushan sea area[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2020, 59(Sup. 1): 24-31. (in Chinese)



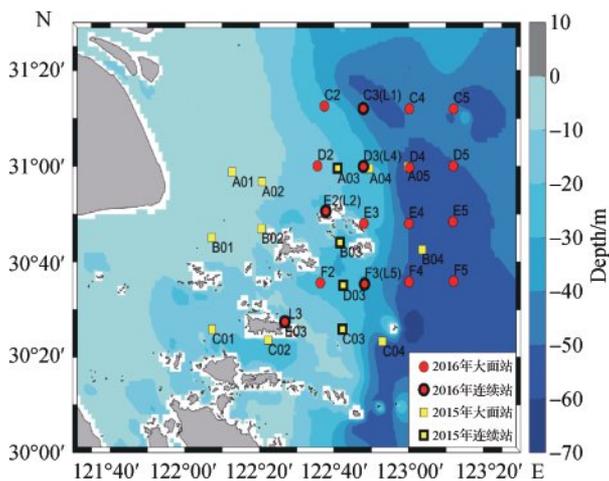


图1 2015年和2016年站位分布

Fig. 1 Distribution of stations for 2015 and 2016

## 1.2 实测与卫星数据的测量精度

大面站观测仪使用 CTD 剖面仪,每个站点观测一次;连续站使用 CTD 剖面仪和 ADCP. CTD 每隔 1 h 下放一次,CTD 剖面仪器型号为 SBE 25plus,工作模式为直读,以 16 Hz 的采样频率记录电导率、温度和盐度等数据. ADCP 单次测量周期为 25 h,数据垂向间隔为 2 m.

断面的地形数据来自于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)收集的各方面资料和经过处理得到的全球地形数据集 1-Minute Gridded Global Relief Data Collection(ETOPO1),空间分辨率为 1',下载网址: <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>.

海表面高度异常数据、海表面高度数据、海表面温度(SST)数据、叶绿素数据来自于哥白尼海洋环境监测服务(Copernicus Marine Environment Monitoring Service),下载网址: <http://marine.copernicus.eu/>. 时间分辨率为 1 d,叶绿素数据的空间分辨率为 4 km×4 km,海表面高度和海表面异常数据的空间分辨率为 0.25°×0.25°,海表面温度数据的空间分辨率为 0.05°×0.05°.

海表面 10 m 处的风速数据和海表气压数据来自欧洲中期天气预报中心(The European Center for Medium-Range Weather Forecasts),数据集为 ERA-Interim(Jan 1979 to present),下载网址: <http://apps.ecmwf.int/datasets/>. 时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°.

以上海表数据的时间范围为 2015 年 7 月 1—31 日,空间范围为 121°~124° E,29°~32° N.

实测叶绿素数据为大面站采集的样品,在实验室进行测定. 2015 年样品采集时间为 7 月 13—15 日,

2016 年采集时间为 7 月 14—15 日,每个站点采集一次.

本研究水文调查数据访问网址: <http://hkywsx.zjhou.edu.cn/>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 上升流分布情况

上升流可以根据海表温度差异判定<sup>[1]</sup>,或者在层化期根据断面温跃层向上倾的程度,结合大面站分布特征来划定<sup>[2]</sup>. 2015 年 7 月 11 日台风“灿鸿”经过马鞍列岛附近海域(如图 2 所示),在台风的强风作用下,热量大量耗散,海水产生强烈垂直混合,并且产生上升流,底层较冷海水到达表层,导致海表温度显著下降<sup>[3]</sup>. 根据 2015 年和 2016 年的实测数据,发现 2016 年同期的海表温度较 2015 年有明显升高(如图 3 所示),其结果符合实际情况.

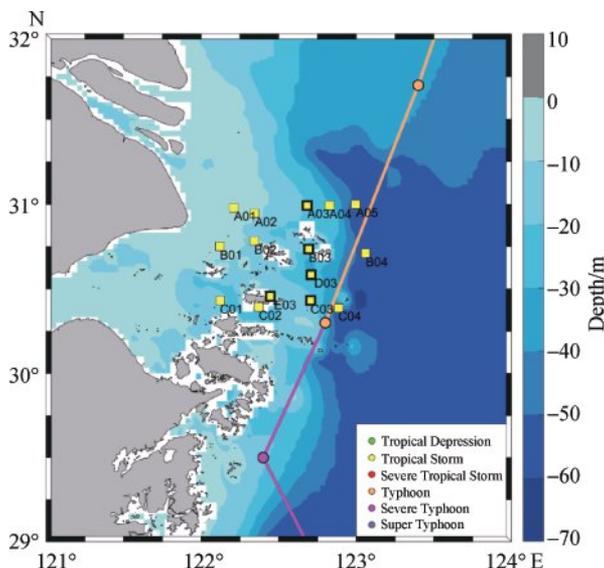


图2 台风“灿鸿”路径与观测站位置

Fig. 2 Typhoon "Chan-hom" track and location of observation stations

2015 年 7 月与 2016 年 7 月调查期间,该海域均存在一个低温区,其表层温度比同纬度的外海表层水温低 1.5 °C 左右. 这与以往研究揭示舟山邻近海域夏季上升流现象一致<sup>[4]</sup>,说明该处存在明显的上升流区.

根据两年 5 m 层的水温分布图(图 4)可以发现: 2015 年观测区的低温区比高温区低 1.5 °C 左右;并且 2015 年所测区域的东北部与 2016 年所测海域的中部重合区域内,低温区域位置基本一致. 根据曹欣中<sup>[2]</sup>

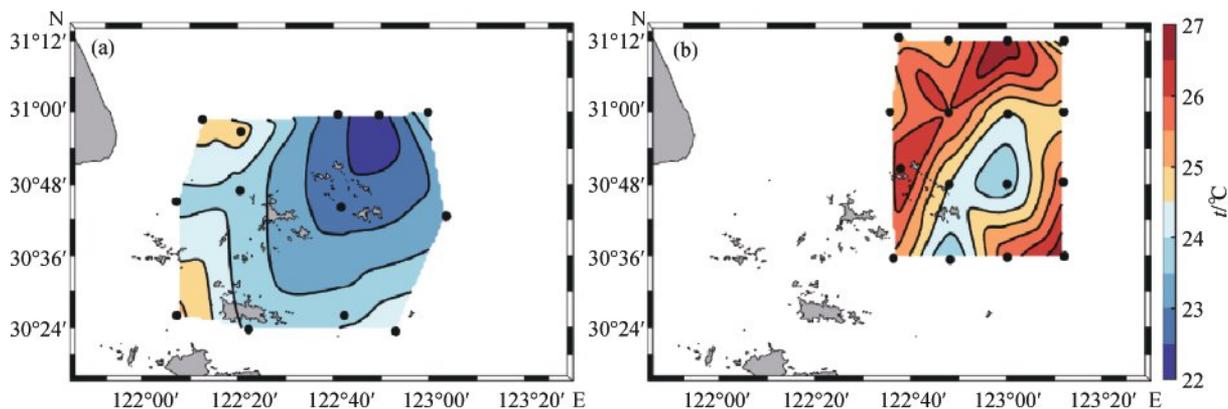


图 3 2015 年(a)和 2016 年(b)表层温度分布

Fig. 3 Surface temperature distribution in 2015 (a) and 2016 (b)

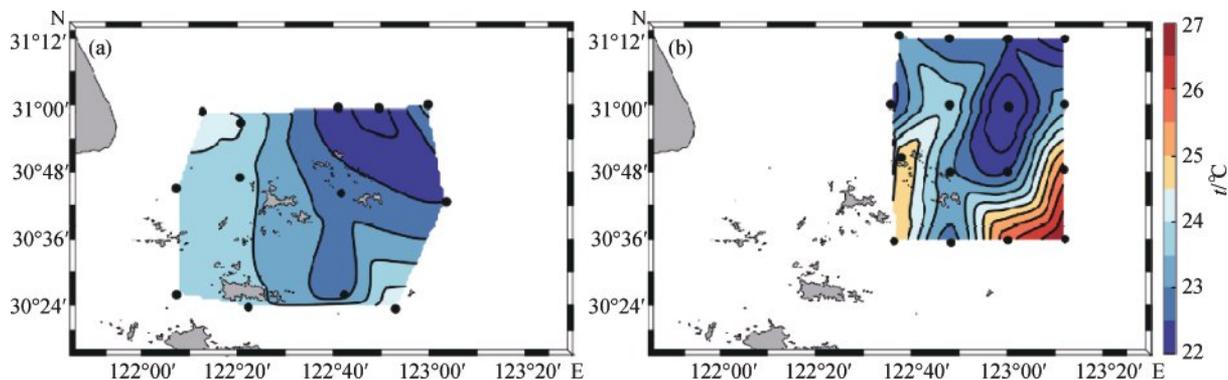


图 4 2015 年(a)和 2016 年(b)5 m 层水温分布

Fig. 4 Water temperature distribution at 5 m layer in 2015 (a) and 2016 (b)

提到的在层化期按照断面温跃层向上倾的程度,可以结合大面分布来划定浙江沿岸上升流区的位置.如图 5 所示,2015 年的 A 断面和 2016 年的 E 断面的温跃层有抬升趋势,通过计算温跃层强度,结合 5 m 层水温分布(图 4),可以判定 E4 与 A04 站点上升流较强.

同时 2015 年同期的断面温度图中温跃层抬升程度明显高于 2016 年. 根据两年对比可得上升流即使在非台风直接过境的情况下也是存在的,考虑到 2015 年该时间段有台风过境,说明 2015 年该期间台风对上升流有加强作用.

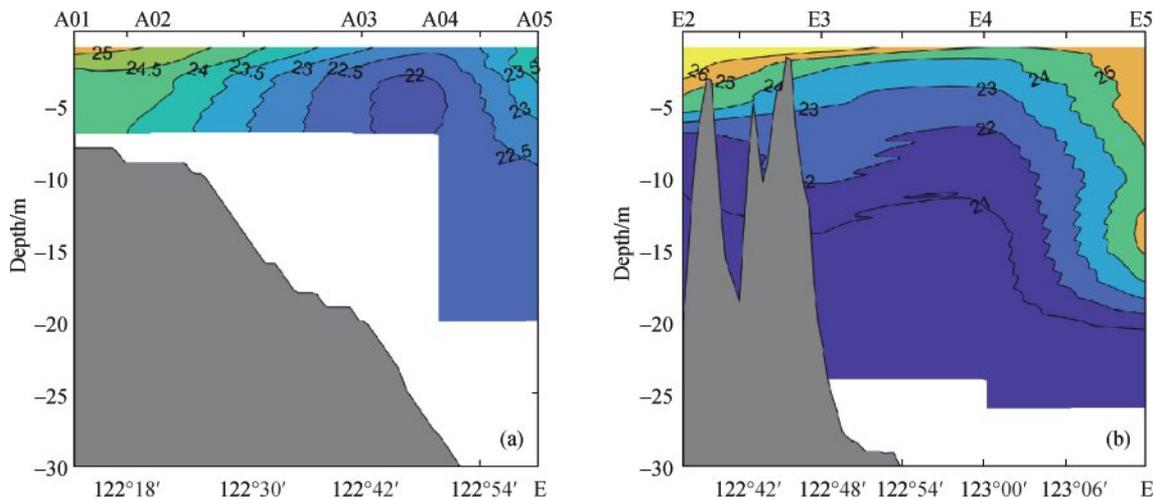


图 5 2015 年 A 断面(a)和 2016 年 E 断面(b)温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at section A in 2015 (a) and section E in 2016 (b)

有学者指出表层和底层海水的温度差也可作为海水层化和混合的判别依据<sup>[5]</sup>:当海表、底温度差 $\Delta t < 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水体视为充分混合; $\Delta t > 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水域为热层化区;而 $\Delta t$ 的值介于二者之间的水域即为温度锋面. 舟山海域浅陆架、多岛屿,底层的涌升水并非经常抵达海面,而在5 m以下<sup>[2]</sup>. 2015年调查区域东部和2016年观测区域的5 m层与底层温度差

分布如图6所示. 2015年研究区域由于台风作用以及靠近近岸区域水深较浅,其温度差小,基本可以认为是混合状态,其中A04站附近处的温度差异仅次于近岸站点所测温度差;2016年观测区域温差较大,层化现象较2015年严重,而与A04站相近的D4、E4站区域也是温度差最小的区域,说明该区域存在上升流.

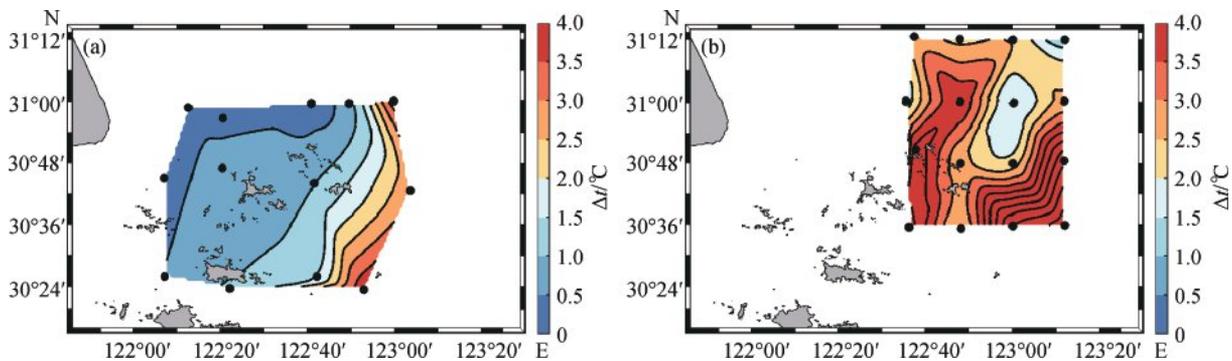


图6 2015年(a)和2016年(b)的5 m层与底层温度差

Fig. 6 Temperature difference between the 5 m layer and the bottom layer in 2015 (a) and 2016 (b)

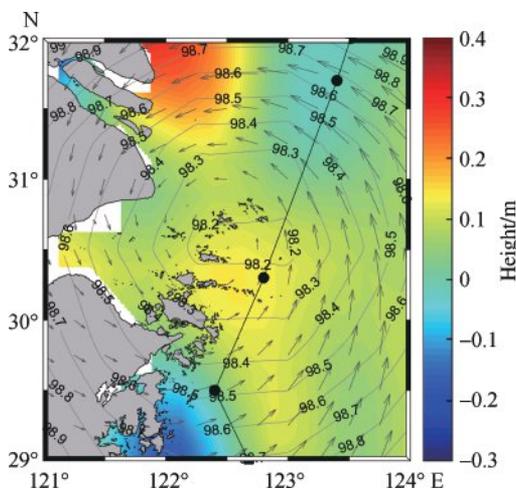
## 2.2 台风过境对舟山邻近海域的影响

台风“灿鸿”于2015年6月30日20:00在西北太平洋海域上生成;7月1日21:00,日本气象厅将其升格为热带风暴,并正式命名;7月11日16:40,“灿鸿”以强台风级别在浙江省舟山市朱家尖登陆,登陆时中心附近最大风力有14级,最大风速45 m/s. 要在台风期间进行现场海上测量非常困难,因此,基于卫星遥感技术进行该区域的定量分析与研究是目前的主要研究手段.

短期海平面的异常偏高或者偏低是由非天文因素(气压、风、降水和径流变化等)引起的海平面短期变化或突然变化. 海平面的突然变化指的是低气压、强台风所引起的增水或称为风暴潮现象<sup>[6]</sup>. 风暴潮的形成和发展也具有明显的时空分布特征. 从总体上看,由登陆或影响我国沿海的热带气旋引起的台风风暴潮,主要影响长江口及其以南沿岸海域<sup>[7]</sup>.

台风引起的增水有两种:1) 相对于台风中心的低气压海域海水的隆起<sup>[8]</sup>. 气压的作用方式一般是台风的低压中心所在区域会对海水有个“抽吸”,使水位升高<sup>[9]</sup>. 潘嵩<sup>[10]</sup>研究了长江口及杭州湾内的台风增水,发现气压每下降1 kPa,增水极值就会升高0.02~0.05 m. 2) 台风的吹刮. 向岸的风使海水向近岸堆积,抬升水位;离岸的风则使水位下降;同时沿岸的风通过地转效应也会对风暴潮水位有一定的影响. 第一种情况下隆起的高度取决于气压降低程度;第二种情况下如果

在近岸浅海区,则壅水现象更为显著<sup>[11]</sup>. 图7为台风过境期间,7月11日的海表气压和海表面高度异常分布,其中黑色的圆点代表的是每6 h的台风“灿鸿”路径. 可见台风右侧风力较大,具有一个不对称的风场. 台风过境当天中心气压约98.2 kPa,舟山上升流区海平面异常升高约12 cm,符合潘嵩<sup>[10]</sup>的研究结果.



图中数值表气压,单位 kPa.

图7 2015年7月11日台风过境海表面高度异常  
Fig. 7 Sea surface height anomaly when the typhoon transited on July 11, 2015

如图8(a)~(c)所示,当台风中心远离该区域后,海表面高度异常仍维持在一个正值,大约7 d后恢复到正常海表高度(图8(d)). 这是由于台风诱发的风暴

潮会以重力长波的形式传播到浅海大陆架或海湾、港口处,当台风中心远离该地区后,仍存在一系列的振动为台风过境后残留的自由波动,这种自由波动持续的时间较长,最长可达 5~7 d,随后振荡逐渐平息,恢复正常.然而,大约在台风过境 9 d 后,该处海表面高度又会有第 2 个高值(如图 8(e)和(f)).王喜年<sup>[12]</sup>认为这第 2 个高水位是台风中心靠近日本海时由北向

南传播的增水边缘波引起的.

海洋对台风响应的最显著特征为 SST 的变化.台风会加强海水的垂向湍流混合,导致最大 Ekman 抽吸深度下探,使得下层的低温海水更有可能到达表层.台风风场是辐散的,在近似圆形风场的作用下,台风中心的海水被迫向风场外输送,同时下层海水在 Ekman 抽吸作用下上升到表层,使 SST 降低.

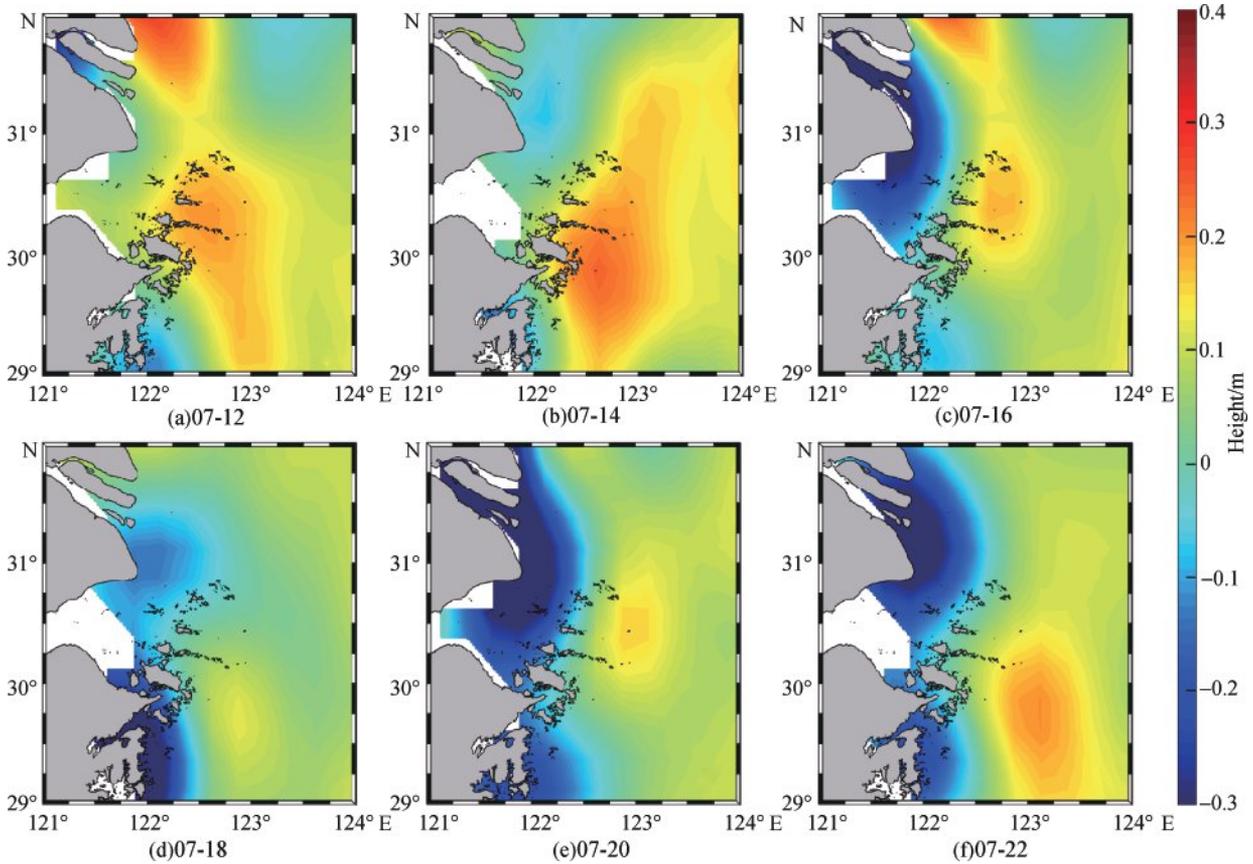


图 8 2015 年 7 月 12—22 日海表面高度异常

Fig. 8 Sea surface height anomaly from July 12 to 22, 2015

2015 年 7 月 12 日的分布图(图 9)显示了台风路径上的一个巨大的冷区,其 SST 为 22.5~23.5 °C,在一周前(7 月 5 日)该处 SST 为 24.0~24.5 °C.在台风过境以后,SST 在舟山海域约改变了 2 °C.赖巧珍等<sup>[13]</sup>的研究指出,在开阔的洋面上台风路径右侧的 SST 响应比路径左侧明显,最大降温出现在路径右侧,一般滞后台风 1~2 d.

### 2.3 台风对叶绿素分布的影响情况

海表叶绿素 a 质量浓度  $\rho(\text{Chl-a})$  是研究海洋水色要素和海洋生态环境的最重要参量,台风不仅能促进海表叶绿素 a 质量浓度的增加,且该增量还具有一定的延迟效应.如图 10 所示,台风过境以后第 4 天,该海区叶绿素 a 质量浓度开始升高,局部区域达到

1 mg/m<sup>3</sup> 以上,并能维持约 7 d.在空间分布上表现出台风路径附近叶绿素 a 质量浓度有明显增加.台风期间常为阴雨天气,海水的垂直混合与波浪破碎降低了海水透明度,浮游植物因缺少阳光而不能充分生长,这在一定程度上限制了叶绿素 a 质量浓度的增长;而营养盐在上升流及海水垂直混合的带动下,从深层冷水区经真光层到海表需要一定的时间和过程,这样就导致了海表叶绿素 a 质量浓度最大增长有时间延迟<sup>[14]</sup>.

为进一步了解 2015 年 7 月与 2016 年 7 月调查海域叶绿素 a 分布的一致性与差异性,实测盐度及叶绿素 a 分布情况如图 11 所示.在河口海域地带,从近岸到外海,盐度呈现逐渐增大的趋势.以盐度 25 作为特

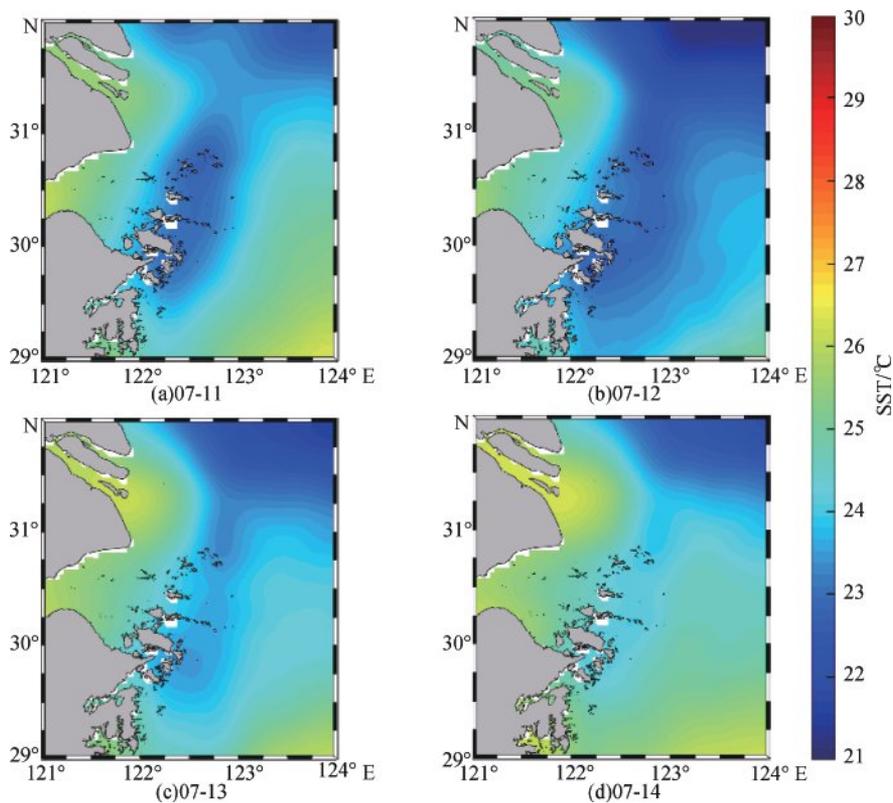


图 9 2015 年 7 月 11—14 日 SST 分布

Fig. 9 SST distribution from July 11 to 14, 2015

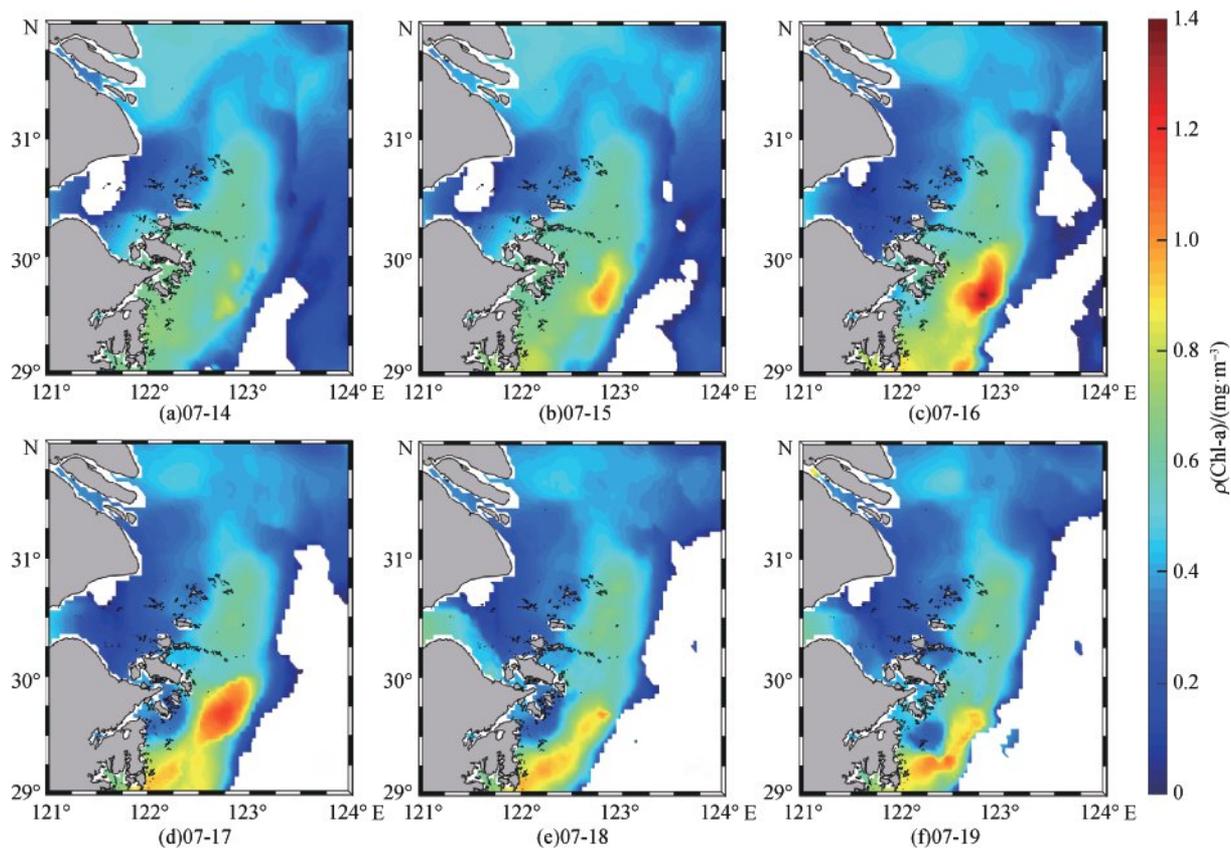
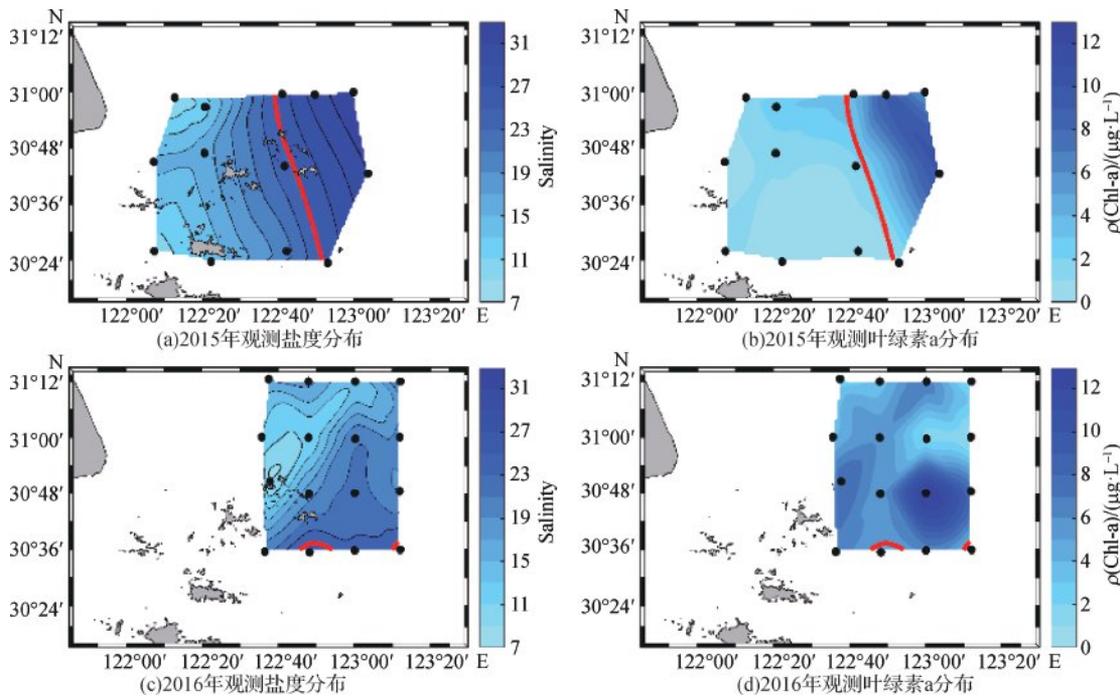


图 10 2015 年 7 月 14—19 日叶绿素 a 分布

Fig. 10 Chlorophyll-a distribution from July 14 to 19, 2015



红色曲线为盐度 25 的等值线.

图 11 舟山海域盐度和叶绿素 a 分布及特征

Fig. 11 Distribution and characteristics of salinity and chlorophyll-a in the Zhoushan sea area

征曲线标示在图 11 中(红色曲线),可以看出叶绿素 a 质量浓度高值部分位于 25 以上等盐度线的区域,同时上文提到在 2015 年所测海域的东北部,以及 2016 年所测海域的 E4 区域,也位于 25 以上等盐度线的区域,说明上升流为该海域提供了丰富的营养盐.

根据高生泉等<sup>[15]</sup>的研究,靠近杭州湾内的海域,悬浮泥沙含量高、潮差大,受水体强烈混合作用,较难发生赤潮;杭州湾内高浓度的营养盐向外海域输出,导致舟山群岛海域富营养化严重,当光照较好,水温适宜的时候,极易发生赤潮. 以此可以推测舟山海域赤潮现象是由营养盐过剩引起.

### 3 结 论

1) 舟山海域上升流的形成与发展受海水层化、潮汐、地形、台湾暖流及风场等多种因素的影响. 本研究主要利用 2015 年 7 月和 2016 年 7 月得到的 CTD 实测数据证实了舟山近海海域夏季存在稳定的上升流,且台风对其有加强作用.

2) 当台风过境时,强风作用导致数百公里半径内海水涌升. 一方面使 SST 降低,另一方面将底层丰富的营养盐带到海洋上层使叶绿素浓度增加,故台风造成海洋初级生产力的增长是不容忽视的.

3) 上升流区羽状锋处存在叶绿素浓度相对高值,底层营养盐涌入表层,能够提供丰富的营养盐,为藻类生长提供有利条件.

**致谢:**感谢上海海洋大学魏永亮、徐鹏老师给予我们的指导与帮助;感谢中国海洋大学张锦辉、徐一旸和厦门大学李伟巍提供的数据支持以及上海海洋大学张家赢的帮助.

### 参考文献:

[1] 何青青,张春玲,高郭平,等. 舟山近海海域夏季上升流时空特征及其与风场的关系 [J]. 上海海洋大学学报,2016, 25(1):142-51.

[2] 曹欣中. 浙江近海上升流季过程的初步研究[J]. 水产学报,1986,10(1):51-69.

[3] 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.

[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(自然科学版),2007,37(增1):235-240.

[5] 刘浩,许文珊. 长江口水域水体结构的季节变化 [J]. 上海海洋大学学报,2013,22(2):260-265.

[6] 王慧,刘克修,范文静,等. 2012 年中国沿海海平面上升显著成因分析[J]. 海洋学报,2014,36(5):8-17.

- [7] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(3): 23-30.
- [8] 江剑, 牛小静. 相似路径台风的增水差异影响因子分析 [C]//第二十七届全国水动力学研讨会. 南京:《水动力学研究与进展》编辑部, 2015.
- [9] 冯兴如. 重点区台风风暴潮数值预报与灾害评估研究 [D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2012.
- [10] 潘嵩. 长江口及杭州湾台风风暴潮增水数值分析 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.
- [11] 卢如秀, 叶锦昭. 珠江河口台风最大增水规律的研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 1982(2): 28-31.
- [12] 王喜年. 关于温带风暴潮 [J]. 海洋预报, 2005(增刊 1): 17-23.
- [13] 赖巧珍, 吴立广, SHIE C L. 0908 号台风“莫拉克”登陆过程中海表温度变化特点及其对“莫拉克”的影响 [J]. 热带气象学报, 2013, 29(2): 221-234.
- [14] 付东洋, 丁又专, 刘大召, 等. 台风对海洋叶绿素 a 浓度影响的延迟效应 [J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 15-21.
- [15] 高生泉, 陈建芳, 金海燕, 等. 杭州湾及邻近水域营养盐的时空分布与富营养化特征 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 36-47.

## Impact of typhoon on the upwelling and chlorophyll distribution in the Zhoushan sea area

YANG Wei<sup>1,2</sup>, HUANG Ju<sup>1,3</sup>, YU Tan<sup>1\*</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Based on the survey data in the Zhoushan sea area in July of 2015 and 2016, the characteristics of temperature and salinity distribution in this area were analyzed, and the distributions of upwelling and chlorophyll in this area were discussed. The results show that the sea surface temperature in the upwelling area in July of 2015 and 2016 was lower than that in the surrounding waters. In July, 2016, the difference between the surface temperature and the bottom temperature was generally above 4 °C. The stratification degree was greater in 2016 than in 2015. Affected by the typhoon transit, the sea surface temperature was lower in July, 2015, and the intensity of the upwelling was greater than in 2016. The typhoon strengthened the upwelling. The chlorophyll mass concentration of the sea surface threased in the typhoon transit area, and the change was delayed.

**Keywords:** Zhoushan sea area; typhoon; upwelling; chlorophyll