

超强台风“威马逊”对南海西北海域海洋环境的影响*

李薛^{1,2}, 付东洋¹, 张莹¹, 刘大召¹, 丁又专¹, 王文芳¹, 栾虹^{1,2}, 蒋城飞^{1,2}

1. 广东海洋大学海洋遥感与信息技术实验室, 广东 湛江 524088;

2. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088

摘要: 2014 年第 9 号超强台风“威马逊”(1409)过境南海并穿越琼州海峡进入北部湾, 给海南、广东和广西造成了严重损失, 并对南海西北海域海洋动力与生态环境产生了重要的影响。文章利用卫星遥感水色水温及风场数据, 分析了台风前后海表温度、悬浮泥沙浓度、叶绿素浓度、初级生产力及上升流分布特征与变化。研究结果表明: 超强台风“威马逊”诱发了强烈的混合夹卷和上升流, 并加强了季节性上升流; 海表温度最大降幅近 2℃, 相对台风路径呈显著的“右偏性”, 而台风引起的强降水却具强烈的“左偏性”; 台风后悬浮泥沙浓度平均升高 51.4%, 叶绿素浓度增幅达 28%, 且最大浓度有 3d 的延迟, 初级生产力增加 34%; 上层水体混合加剧, 混合层深度平均增长近 10.4m。

关键词: 台风; “威马逊”(1409); 卫星遥感; 海表温度; 叶绿素浓度

中图分类号: P732.31; P732.6; P762 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2016)06-0019-10

The impacts of super typhoon Rammasun on the environment of the northwestern South China Sea

LI Xue^{1,2}, FU Dongyang¹, ZHANG Ying¹, LIU Dazhao¹, DING Youzhuang¹,
WANG Wenfang¹, LUAN Hong^{1,2}, JIANG Chengfei^{1,2}

1. Ocean Remote Sensing and Information Technology Laboratory, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

2. Ocean and Meteorological Institute, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Super Typhoon Rammasun (1409) in 2014 crossed the South China Sea and the Qiongzhou Strait, and then entered the Beibu Gulf. It caused great losses in Hainan, Guangdong and Guangxi, and had a great impact on the northern South China Sea. We analyzed distribution features and changes of sea surface temperature (SST), chlorophyll concentration, primary productivity, suspended sediment concentration, and upwelling before and after the typhoon, using the satellite remote sensing data of ocean color, SST and wind fields of the same period. We found that Super Typhoon Rammasun induced strong entrainment and upwelling, and strengthened the seasonal upwelling. The maximum cooling near 2℃ had a clear “right-hand-side intensification,” while the heavy rainfall had significant “left-hand-side intensification” with respect to the typhoon track. After the typhoon, the average concentration of suspended sediment increased 51.4%, and then the chlorophyll concentration increased 28% with its maximum delayed by 3 d and the primary productivity increased by 34%. The upper layer mixing intensified with average mixed layer depth increase of nearly 10.4 m.

收稿日期: 2015-12-28; 修订日期: 2016-05-09. 殷波编辑

基金项目: 国家海洋公益专项(201305019); 广东省自然科学基金(2014A030313603); 广东省科技计划项目(2013B030200002); 广东海洋大学创新强校项目(GDOU2014050226); 广东省攀登计划项目(pdjh2015b0249)

作者简介: 李薛(1991—), 男, 江苏省徐州市人, 硕士, 主要从事海洋遥感及应用研究。E-mail: xueshizimu1991@163.com

通信作者: 付东洋(1969—), 男, 四川省阆中市人, 教授, 主要从事海洋遥感及应用研究。E-mail: fdy163@163.com

*感谢李晓惠给予的帮助。

Received date: 2015-12-28; **Revised date:** 2016-05-09. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Marine Important Charity Special Foundation of China (201305019); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2014A030313603); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2013B030200002); Innovation and Strong School Project of Guangdong Ocean University (GDOU2014050226); Climbing Project of Guangdong Province (pdjh2015b0249)

Corresponding author: FU Dongyang. E-mail: fdy163@163.com

Key words: typhoon Rammasun (1409); satellite remote sensing; sea surface temperature; Chlorophyll-*a* concentration

全球变暖、厄尔尼诺加剧了台风、风暴潮等自然灾害发生的频率和强度,尤其使得超强台风频发。对人类生产生活造成危害较大的是登陆台风(Wang et al, 2012; 张翰 等, 2012)。南海作为中国海岸线最长,面积最大的边缘海,除了受到西太平洋产生的热带气旋或台风的影响,也是热带气旋或台风的发源地,平均每年过境南海的热带气旋或台风多达 10.3 个(Ren et al, 2002; Wang et al, 2007)。海洋环境对台风的响应是台风研究的一个热点, Ko 等(2014)利用卫星数据、现场观测以及数值模拟研究了超强台风“鲛鱼”对南海的影响; Yu 等(2014)利用卫星资料以及长期观测数据研究了台风对于南海单位捕捞努力渔获量的影响; 赵辉等(2013)利用叶绿素(Chl-*a*)浓度和海表温度(SST)的卫星遥感资料以及实测数据研究热带风暴“天鹰”对于南海西部叶绿素浓度的影响; 付东洋(2009)利用叶绿素、温度、悬浮泥沙(SSC)等卫星数

据详细研究了研究台风对西北太平洋海域水色水温环境的影响。本文对台风“威马逊”前后叶绿素浓度、海表温度、悬浮泥沙浓度以及初级生产力分布特征进行分析,并结合南海西北部海域降水、风场、混合层深度等资料探讨台风引起海洋环境变化的可能机制。

1 研究区域与数据处理方法

1.1 研究区域以及台风“威马逊”资料

图 1 为台风“威马逊”经过南海西北海域的路径及研究区域划分。在南海西北海域,“威马逊”增强至台风等级以上(表 1),最大瞬时风速超过 $74\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,最低海平面气压 899.2hPa ,超强台风量级维持时间长达 17h(郑艳 等, 2014)。将南海西北部海域(17°N — 23°N , 105°E — 114°E)根据研究需要分割为 19 块区(注:将 8 和 12 区块左侧海域分别并入 8 和 12 区中),如图 1 所示。

表 1 台风“威马逊”详细参数(时间、经纬度、最大风速等)

Tab. 1 Detailed parameters of typhoon Ramasun (time, longitude and latitude, maximum wind speed, etc.)

时间(月/日/时)	经度	纬度	中心最低气压/hPa	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	台风等级
07/15/18	$121^{\circ}54'00''\text{E}$	$14^{\circ}00'00''\text{N}$	940	50	强台风
07/16/00	$120^{\circ}24'00''\text{E}$	$14^{\circ}18'00''\text{N}$	960	40	台风
07/16/06	$119^{\circ}05'60''\text{E}$	$15^{\circ}05'60''\text{N}$	975	33	台风
07/16/12	$117^{\circ}47'60''\text{E}$	$15^{\circ}30'00''\text{N}$	970	35	台风
07/16/18	$116^{\circ}42'00''\text{E}$	$16^{\circ}00'00''\text{N}$	965	38	台风
07/17/00	$115^{\circ}47'60''\text{E}$	$16^{\circ}23'60''\text{N}$	960	40	台风
07/17/06	$115^{\circ}00'00''\text{E}$	$16^{\circ}48'00''\text{N}$	950	45	强台风
07/17/12	$114^{\circ}17'60''\text{E}$	$17^{\circ}30'00''\text{N}$	930	50	强台风
07/17/18	$113^{\circ}24'00''\text{E}$	$18^{\circ}30'00''\text{N}$	920	58	超强台风
07/18/00	$112^{\circ}17'60''\text{E}$	$19^{\circ}06'00''\text{N}$	900	65	超强台风
07/18/06	$111^{\circ}17'60''\text{E}$	$19^{\circ}53'60''\text{N}$	888	72	超强台风
07/18/12	$110^{\circ}17'60''\text{E}$	$20^{\circ}18'00''\text{N}$	910	60	超强台风
07/18/18	$109^{\circ}24'00''\text{E}$	$21^{\circ}00'00''\text{N}$	935	52	超强台风
07/19/00	$108^{\circ}17'60''\text{E}$	$21^{\circ}42'00''\text{N}$	945	48	强台风
07/19/06	$107^{\circ}17'60''\text{E}$	$22^{\circ}06'00''\text{N}$	970	33	台风

1.2 数据来源

本文台风数据来自于中国气象局热带气旋资料中心(上海台风研究所) (<http://tcdata.typhoon.gov.cn>),数据为每 6h 记录一次台风最大风速、台风中心气压值以及台风中心位置; 叶绿素浓度数据来自于 GlobColour 叶绿素融合产品,空间分辨率为 4km,时间分辨率为 1d (<http://hermes.acri.fr>); 海表温度数据来自于美国海洋和大气管理局国家气候数据中心(NCDC)(<http://gis.ncdc.noaa.gov>),空间分辨率为 4km,时间分辨率为 1d; 海洋悬浮泥沙数据来自广东海洋大学海洋遥感信息技术实验室所提供的中分

分辨率影像光谱仪(MODIS)卫星 3A 资料,空间分辨率为 1.1km,时间分辨率为 1d; 降雨数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的热带降雨观测计划(TRMM)的降水数据,空间分辨率为 0.25° ,时间分辨率为 3h,每天 8 个数据集记录当天的降水信息(<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov>); 初级生产力数据来自美国国家航空航天局(NASA)的海洋水色(oceancolor)网站的初级生产力垂向归纳模型(vertically generalized production model, VGPM)数据,空间分辨率为 9km,时间分辨率为 8d (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>); 剖面以及混合层深度数据来源于迈阿密大学数值模

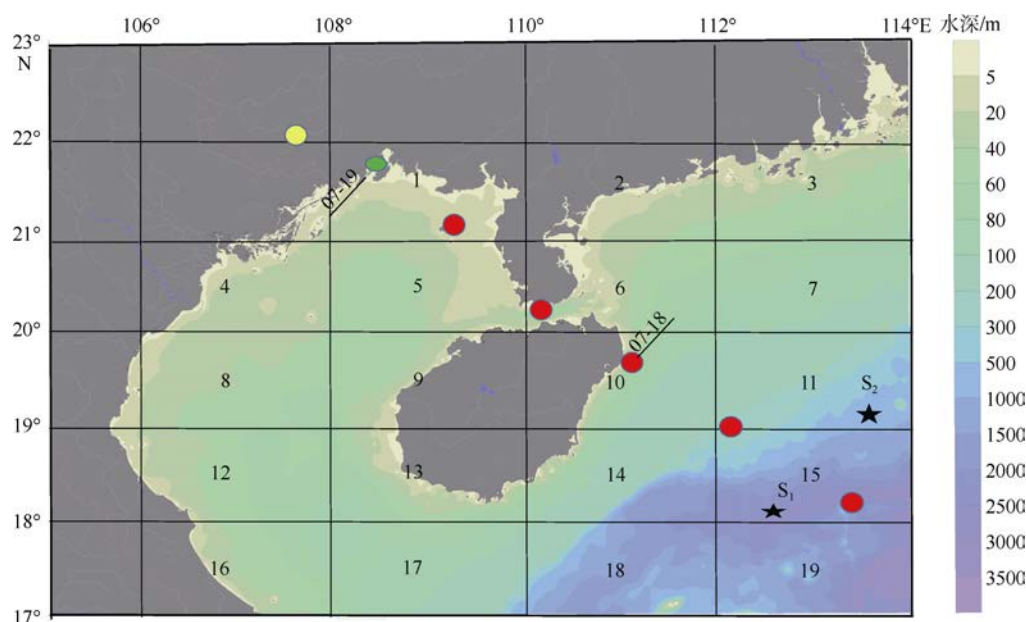


图 1 台风“威马逊”路径以及研究区块划分

黄色: 台风; 绿色: 强台风; 红色: 超强台风。S₁ (112°36'00"E, 18°12'00"N)和 S₂ (113°42'00"E, 19°6'00"N)为提取的剖面数据点

Fig. 1 The track and the study area of typhoon Rammasun (yellow: typhoon; blue: strong typhoon; red: super typhoon)

式团队(University of Miami modeling group)和美国海军研究实验室(Naval Research Lab)合作的混合坐标大洋环流模式(HYCOM)同化产品, 空间分辨率为 1/12°, 时间分辨率为 1d (<http://hycom.org>)。

1.3 数据处理方法

由于台风期间以及阴雨多云等较多影响因素导致卫星获取数据较多缺测, 因此此次研究将台风经过前 15d (2014 年 7 月 1 日—2014 年 7 月 15 日)、台风经过和经过后 15d (2014 年 7 月 16 日—2014 年 7 月 30 日)的遥感数据(包括 Chl-*a*、SST、SSC)

进行融合(图 2、图 3、图 4); 将初级生产力数据进行 8d 的数据融合(图 5); 将降水速率和混合层深度的数据分别进行 5d 和 4d 的数据融合(图 6、图 7)。相关计算和作图在 MTALAB、Surfer、GrADS、ODV、SPSS、Excel 中完成。融合均值算法如式(1):

$$\text{Mean} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Value}(i)}{N} \quad (1)$$

式中: Mean 为研究区内某点的平均值; Value 为研究区内某点的遥感数据值; N 为某点存在有效值的天数(若某天该点数据缺失则忽略不统计)。

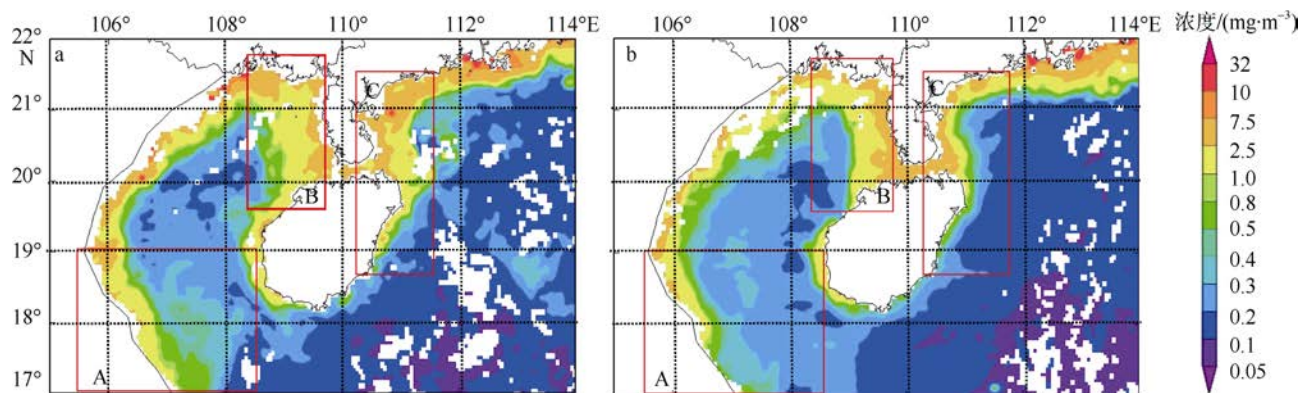


图 2 台风经过前(7 月 1 日—15 日, a)、台风经过和经过后(7 月 16 日—30 日, b)南海西北部叶绿素质量浓度 15d 平均分布图

红框区为叶绿素增长明显区域

Fig. 2 Distributions of 15-d average chl-*a* in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 1–15, 2014; during and after typhoon (b) during July 16–30, 2014

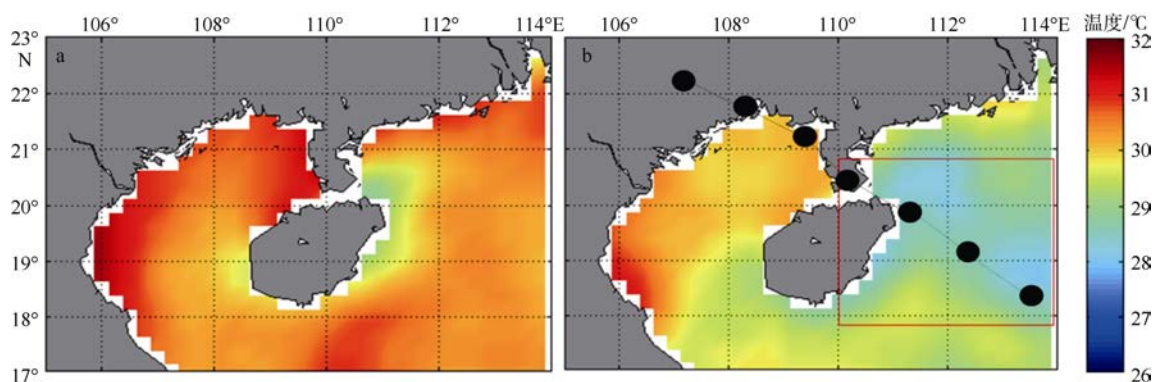


图3 台风经过前(7月1日—15日, a)、台风经过和经过后(7月16日—30日, b)南海西北部海域海表温度15d平均分布
黑线以及黑点是台风路径; 红框区为海表温度降温明显区域

Fig. 3 Distributions of 15-d average SST in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 1–15, 2014; during and after typhoon (b) during July 16–30, 2014

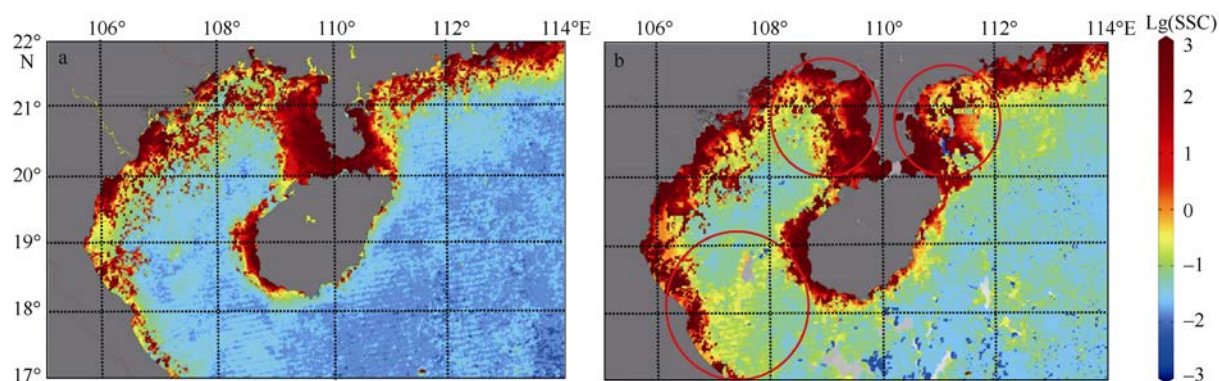


图4 台风经过前(7月1日—15日, a)、台风经过和经过后(7月16日—30日, b)南海西北部海域悬浮泥沙15d平均分布
此图是将原始数据进行了对数化处理。红圈内为悬浮泥沙增长明显区域

Fig. 4 Distributions of 15-d average SSC in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 1–15, 2014; during and after typhoon (b) during July 16–30, 2014

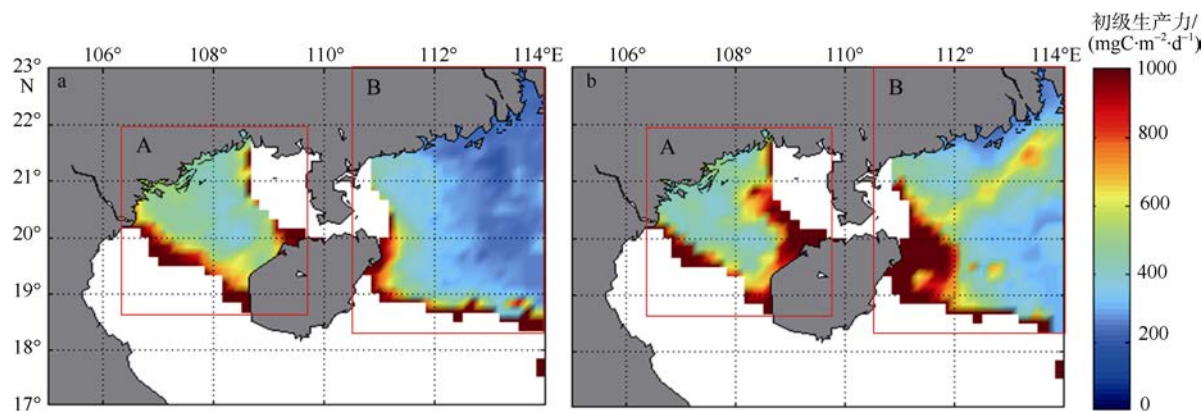


图5 台风经过前和台风经过(7月12日—20日, a)、台风经过后(7月21日—29日, b)南海西北部海域初级生产力8d平均分布
红框区为初级生产力增长明显区域

Fig. 5 Distributions of 8-d average NPP in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 12–20, 2014; after typhoon (b) during July 21–29, 2014

2 结果

2.1 南海西北海域台风后叶绿素浓度显著升高

台风后南海西北海域叶绿素浓度有明显的增高, 尤其是在 a、b、c 三个区域最为显著(图 2, 黄色和

绿色区域扩大)。在整个南海西北部区域, 台风经过后叶绿素质量浓度由 $0.66\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 升高至 $0.84\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 增幅达到 28%; 7 月 22 日叶绿素浓度达到最大 $2.21\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大增幅达 3.34 倍(图 8)。台风经过后南海西北海域大多数区块(除 3、17、18 外)叶绿素

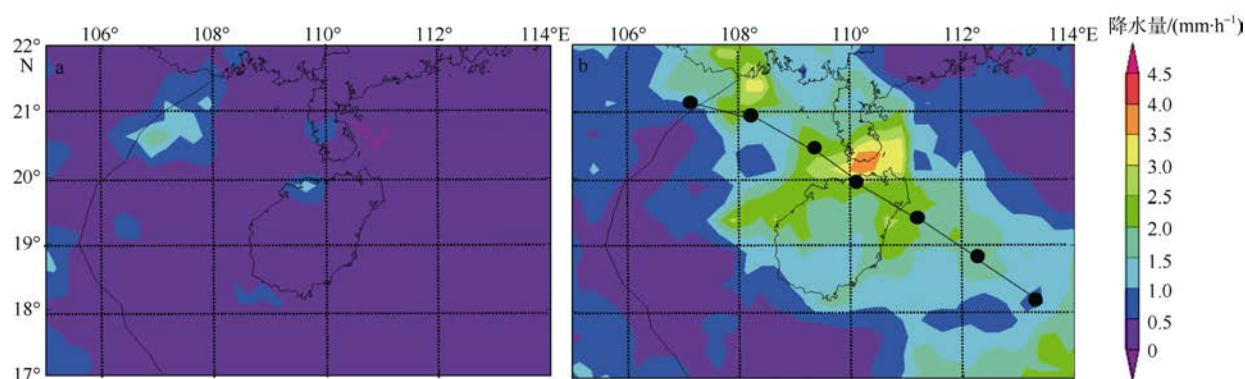


图 6 台风经过前(7 月 11 日—15 日, a)、台风经过和经过后(7 月 16 日—20 日, b)南海西北部海域降水率的 5d 平均分布
图 b 中黑线和黑点是台风路径

Fig. 6 Distributions of 5-d average precipitation rate in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 11–15, 2014; during and after typhoon (b) during July 16–20, 2014

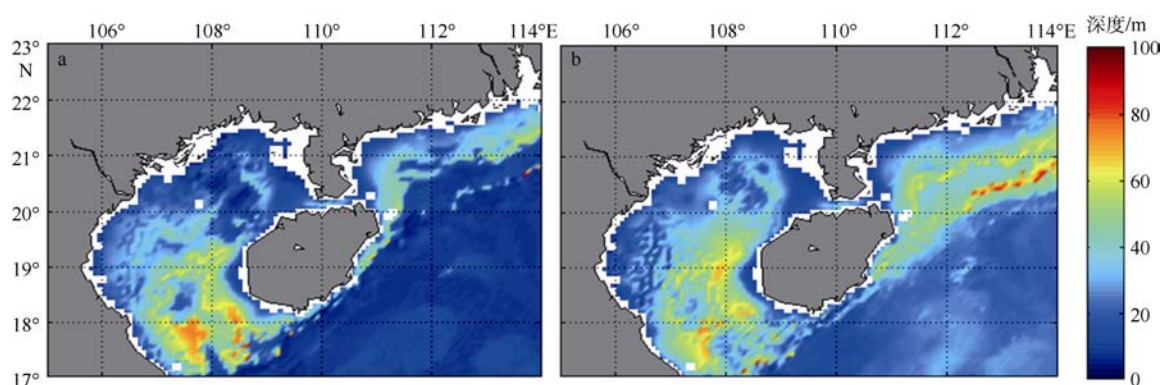


图 7 台风经过前(7 月 12 日—15 日, a)、台风经过和经过后(7 月 16 日—19 日, b)南海西北部海域混合层深度 4d 平均分布
Fig. 7 Distributions of 4-d average MLD in the northwest South China Sea: before typhoon (a) during July 12–15, 2014; during and after typhoon (b) during July 16–19, 2014

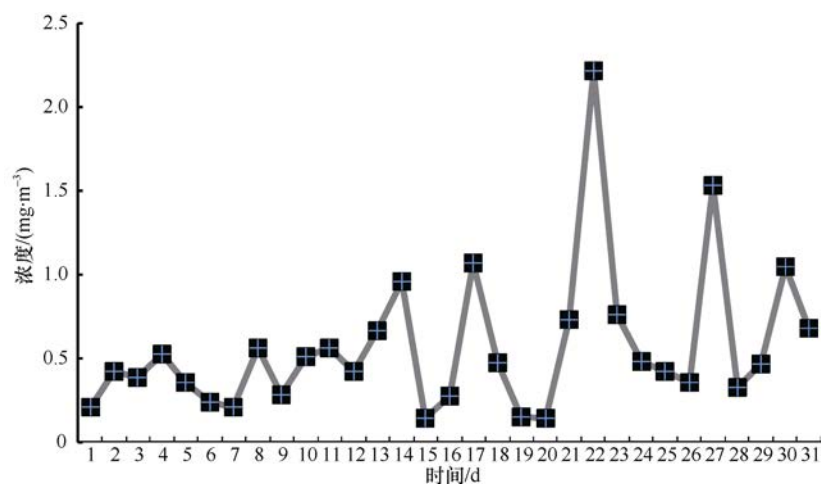


图 8 2014 年 7 月南海西北部海域叶绿素质量浓度的日变化

Fig. 8 Diurnal variation of chl-a in the northwest South China Sea in July, 2014

浓度都有普遍的增加(图 9), 其中区块 2、6、9、10、15、16 的叶绿素浓度均有近 80% 的增幅。

2.2 南海西北部海域台风后海表温度降低, 呈明显的右偏性

台风经过区海表面温度有着明显的降低, 尤其是海南岛右侧海区(图 3 红框内)。台风经过南海西

北部后, 研究区域海表温度平均从 29.99°C 降至 29.09°C , 有 0.9°C 的降幅。进入 7 月份南海海表温度维持在 30.5°C 左右, 台风“威马逊”生成开始影响南海, 南海西北部海表温度从 12 号开始逐渐降低, 台风在 20 号登陆广西并逐渐减弱消失时, 海表温度降至最低, 之后逐渐升温。7 月份南海西北部海域平均海

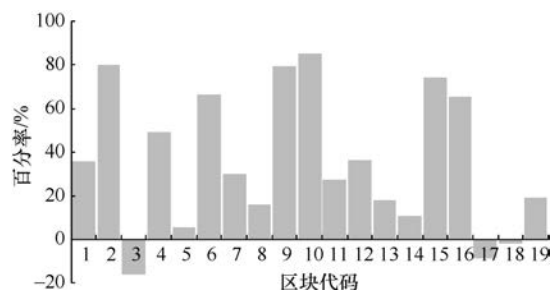


图 9 台风经过南海西北部海域各研究区叶绿素质量浓度增幅

Fig. 9 Chl-*a* growth rate of each study area in the northwest South China Sea before and after the typhoon

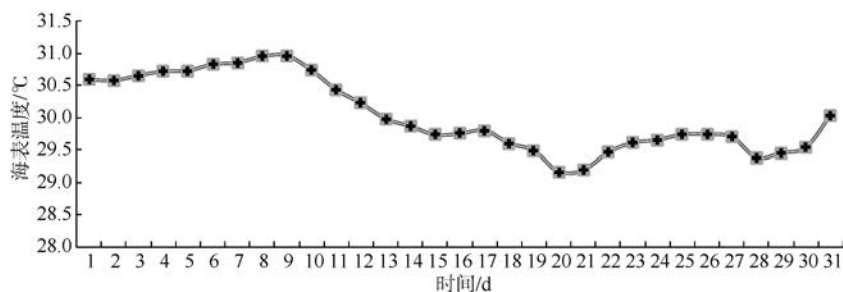


图 10 2014 年 7 月南海西北部海表温度日变化

Fig. 10 Diurnal variation of SST in the northwest South China Sea in July 2014

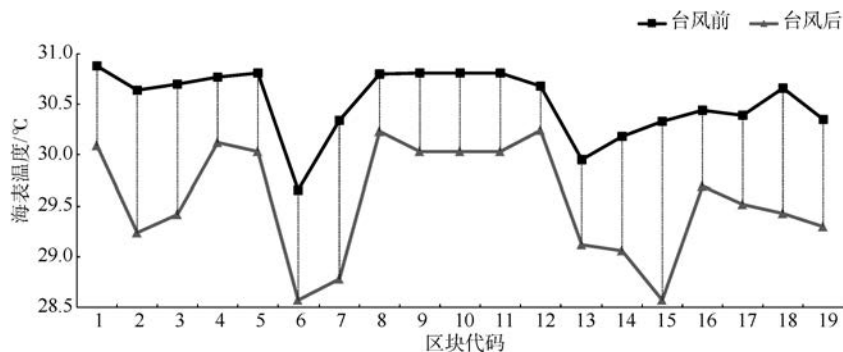


图 11 台风前后南海西北部各分区海表温度变化

Fig. 11 SST change of each study area in the northwest South China Sea before and after the typhoon

2.3 南海西北海域台风后悬浮泥沙明显增多

台风经过南海西北海域使得悬浮泥沙浓度显著的增加(图 4), 尤其红圈内位置最为显著。整个研究区域悬浮泥沙浓度从台风前 $3.40\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到台风后的 $5.15\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 增加近 51.40%。各研究区域悬浮泥沙浓度在台风经过后全部都有增多(图 12)现象, 其中 6、9、10、12、13、16 区块都有超过 100% 的增加幅度; 靠近海南岛的 9、10 区块悬浮泥沙浓度增幅最为明显, 分别从台风前的 $2.86\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.67\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $7.68\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.73\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别增幅 168.40% 和 312.33%。

2.4 南海西北海域台风后初级生产力提高

由于初级生产力数据缺失严重, 特将研究区域

表温度最高达 30.97°C , 最低平均温度出现在台风后的 20 号约 29.16°C , 降幅为 0.81°C (图 10)。在台风过后, 所有区域海表温度均有不同幅度的降低(图 11), 其中区块 2、3、6、7、14、15、18、19 海域海表温度均有超过 1°C 降低, 而 7 和 15 区块分别有 1.56°C 和 1.76°C 的降低。且台风引起的海表温度降低呈现明显的“右偏性”, 即台风路径右侧降温比左侧降温多(图 3b 红框), 台风路径右侧(6、7、11 区块)平均降温 1.22°C , 台风路径左侧(10、14、15 区块)平均降温 1.13°C , 右侧降温大于左侧。

分为 A 和 B 两个区域(图 5), 但可以看出台风经过后, 南海西北部初级生产力明显增加, A 区初级生产力从台风期间的 $698.67\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 升高到台风经过后的 $793.60\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; B 区初级生产力从台风期间的 $626.09\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 升高到台风经过后的 $728.82\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; A 和 B 区分别有着 13.57% 和 16.41% 的增高。尤其是海南岛右侧的 10 号区块初级生产力升高最为明显, 从台风期间的 $565.93\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 升高到台风后的 $755.83\text{mgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 初级生产力台风前后平均增幅达 34%。

2.5 南海西北海域台风引发强降水, 呈显著“左偏性”

台风经过研究区前, 整个研究区从 7 月 11 日—15 日台风经过前的平均降水率都很低(图 6a), 几乎无

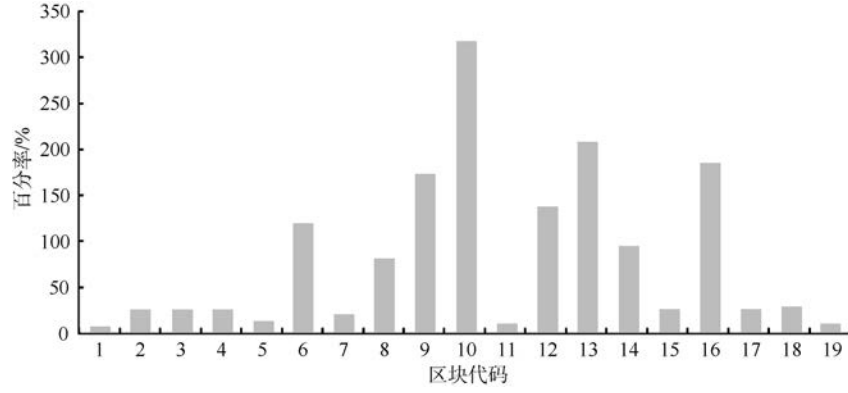


图 12 台风前后南海西北部海域各研究区 SSC 增幅

Fig. 12 SSC growth rate of each study area in the northwest South China Sea before and after the typhoon

雨; 从 7 月 16 日台风进入南海至 19 日登陆广东湛江并再次登陆广西直至消失, 台风给整个研究海域带来丰富的降水, 最大降水可达 $4.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (图 6b), 由台风路径和降水分布明显发现, 台风“威马逊”带来的降水呈现极强的“左偏性”, 即台风路径的左侧降水量明显大于右侧。根据陈见等(2014)、刘蕾等(2015)、郑艳等(2014)的研究发现, 孟加拉湾存在一个稳定深厚的季风槽, 有 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风低空急流源源不断地向南海西北部输送水汽; 且印缅季风槽强, 形成西南风急流, 水汽输送强盛, 在季风区平均维持了 $25\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心。西南水汽输送有助于台风雨带中强对流活动, 使强降雨加强, 造成台风暴雨区左偏。7 月 18 日随着副热带高压西伸, 其南侧的偏东暖湿气流加强, 导致“威马逊”北侧偏东风低空急流建立。18 日 17 时左右台风“威马逊”进入琼州海峡, 低空西南急流与偏东风急流汇合形成水汽辐合, 高空强抽吸作用维持, 导致琼州海峡强降水发生。琼州海峡地形低矮以及海峡通道短, 使“威马逊”快速通过时摩擦消耗损失小, 从而使得“威马逊”在登陆期间直至消亡一直是左侧降水大于右侧。

3 分析与讨论

3.1 台风引起的埃克曼抽吸作用

通常台风经过, 强大的涡旋剪切力会引起海洋强烈的埃克曼抽吸, 从而使得海洋上升流加速抬升(付东洋, 2009; Sun et al, 2015), 将下层的营养物质和冷水输送到表层, 引起海洋初级生产力的改变, 从而改变海洋的生态环境(Fu et al, 2014)。本研究上升流计算方程来自于(Stewart, 2002):

埃克曼抽吸速度计算公式为:

$$V_E = \frac{\left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y}\right)}{\rho_0 f} \quad (1)$$

式中: V_E 表示埃克曼抽吸速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); τ_x 和 τ_y 分别表示纬向和经向风应力(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$; x : 纬向方向, y : 经向方向); ρ_0 表示海水密度, 取值 $1030\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; f 表示科氏力参数, 取值 $2\omega\sin\phi$ 。

风应力计算公式为:

$$(\tau_x, \tau_y) = \rho_a C_d (u\sqrt{u^2 + v^2}, v\sqrt{u^2 + v^2}) \quad (2)$$

式中: ρ_a 表示空气密度, 取值 $1.26\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_d 表示风应力拖曳系数, 取值 1.29×10^{-3} ; u 和 v 表示风速(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

超强台风“威马逊”7 月 18 日经过南海西北部强大的涡旋剪切力改变了研究区的风场, 引起了南海西北部海域强烈的埃克曼抽吸(图 13), 由于强台风的影响(在高海况下, 卫星反演风场数据值比实际值偏小, 而实际中心风速达 $60\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上), 台风中心区域风场卫星数据全部缺失, 但从周围风场分布来看, 中心产生巨大的风场涡旋, 从图 13a 和图 13b 的对比来看, 研究区前后的上升流速度有着明显增强, 台风经过前上升流速 $< 3\times 10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而在 18 日上升流流速最大达 $2.1\times 10^{-4}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但由于数据缺失, 中心风场区的上升流流速未能直接表达, 因而相应的上升流结果较其他学者研究数值偏低, 根据前期学者的研究经验(付东洋, 2009), 强台风引起的上升流可达 $1\times 10^{-3}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级。

3.2 SST 下降与“右偏性”的机制

很多研究发现, 台风发展和维持需要持续充足的水汽和能量, 同时强大的涡旋剪切力会扰动海洋和大气, 并将经过海域海表层以及大气中的热量携带走, 并使埃克曼抽吸加强, 增强上升流流速, 带来充沛的降水, 调节当前气候, 促使台风影响海域海表温度降低(Fu et al, 2008、2016; 付东洋 等, 2009)。

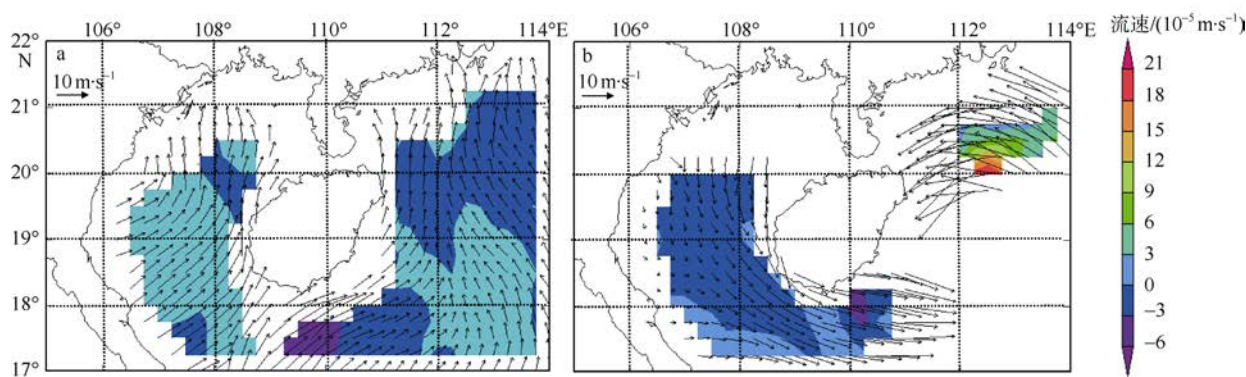


图 13 台风经过区风速(箭头)和上升流流速(填色)变化

a. 台风经过前(2014 年 7 月 11 日); b. 台风经过(2014 年 7 月 18 日)

Fig. 13 Wind vectors and upwelling during the typhoon passage: before typhoon (a) July 11, 2014; after typhoon (b) July 18, 2014

台风经过会使得海水垂直混合加剧, 改变温跃层深度, 使混合层厚度变深, 同时使得下层冷水与上层温水混合加强, 水温降低且混合层水温变得均匀(付东洋, 2009; Sun et al, 2015)。图 7 是台风经过前和经过时 4d 整个南海西北部的混合层深度平均分布, 可以看出台风经过时海水扰动加剧, 南海西北部平均混合层深度从 19.7m 加深至 30.1m; S_1 和 S_2 点(图 1)的盐度和温度剖面数据(图 14)发现: 7 月 18 日台风经过, 海域海水混合加强, 温度和盐度发生改变, 混合层厚度加深至 40~60m; 混合层水温从 7 月 12 日的最高温 32°C 降至 28°C , 骤降 4°C ; 由图

6 看出台风过境期间为研究区域带来了丰富的降水, 降水率几乎从 0 增加至 $4.0\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 因此, 台风所带来的低温降水也是诱发海水温度降低的一个原因。降水使得 S_1 点处海域混合层盐度平均降低 0.21‰ , 但台风后 22 日盐度却有明显的升高; 而 S_2 点处海域台风前盐度低于台风期间和台风后的盐度, 这也反映出台风左侧降水强度大且对台风左侧海域影响大过右侧海域(图 14)。同时也会给沿岸大陆带来降水, 使得陆地径流量显著增加, 使得河口冲淡水大量涌入周边海域, 为周边海域海温降低做出一些贡献(从图 1 可以看出研究区沿岸河流分布密集)。根

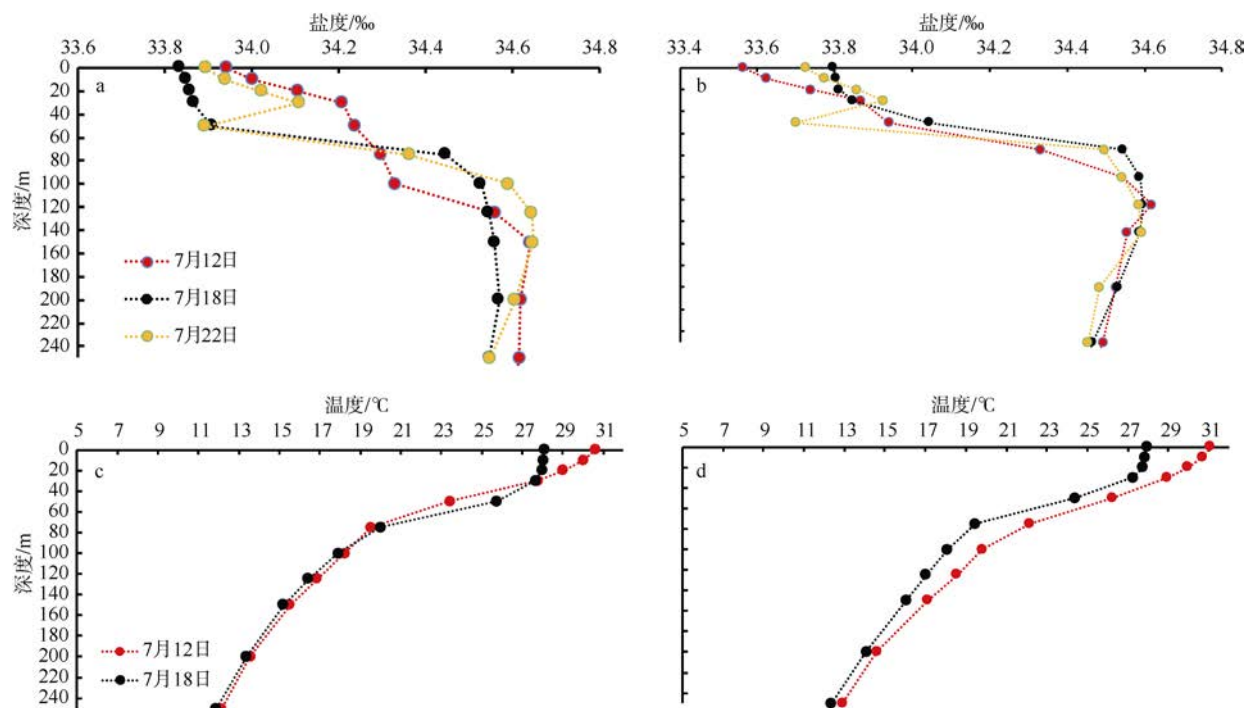


图 14 S_1 和 S_2 点的盐度和温度剖面图

a. S_1 点盐度剖面; b. S_2 点盐度剖面; c. S_1 点温度剖面; d. S_2 点温度剖面

Fig. 14 S_1 and S_2 (Fig. 1) cross-sectional view of salinity and temperature. (a) S_1 cross-sectional view of salinity; (b) S_2 cross-sectional view of salinity; (c) S_1 cross-sectional view of temperature; (d) S_2 cross-sectional view of temperature

据学者大量研究发现台风会诱使海洋上升流加强, 从而将底层低温水运送抬升至表层和次表层, 也是导致海水降温的重要影响因素(Zheng, 2007; 付东洋 等, 2009; Sun et al, 2015; Fu et al, 2016)。

2014年7月, 研究区海表温度维持在 30°C 以上, 为台风“威马逊”的发展和加强提供了条件(郑艳 等, 2014)。从15d的卫星数据融合结果来看, 台风前后研究区海表平均温度有接近 1°C 的降温, 台风路径右侧的降温明显强于左侧, 根据杨晓霞等(2010)对92个台风统计分析表明, 这可能由于冷涡位于路径右侧, 在大风夹卷和冷涡的作用下, 台风引起的降温出现在路径右侧。从图14看出台风路径的左(S_1)右(S_2)侧海域在台风经过前和经过时海表温度有几乎一致的变化, 盐度却在台风后都有明显的升高, 而台风引起的强降水明显呈现“左偏性”, 这与右侧降温幅度大不符, 说明台风诱发的海域强混合和上升流对研究区降温的贡献明显比强降水大, 这与Prasad 等(2007)通过数值模拟研究飓风对墨西哥湾降温作用分析的结果一致。

3.3 Chl-*a* 与初级生产力增长机制

很多学者研究发现, 浮游植物的生长受到营养物质、光照以及温度的影响(Tang et al, 2006); 台风能够引起强烈的混合夹卷和上升流形成, 将深层含有营养物质的冷水带入上层, 引起叶绿素浓度及初级生产力提高, 而叶绿素含量最大值出现会有3~12d延迟(付东洋 等, 2009); 沿岸海域由于受到人类的影响较大, 内陆河流富营养化程度高, 台风带来的强降水使得陆地径流量加大, 同时强降水具有降尘净化作用, 将可吸入颗粒物(PM)中的营养元素带至地表径流, 汇同河流将富营养化的冲淡水大量携带至沿海海域, 这也加剧了水华的爆发, 从而促使海洋初级生产力的增长(Fu et al, 2014、2016)。

根据上面的分析可以看出: 台风过后南海西北部浮游植物和初级生产力都有普遍的提高, 且叶绿素含量最大值出现在台风后第3天, 与之前的研究一致(付东洋 等, 2009)。其中图2中的A、B和C区域在台风后叶绿素浓度增长最为显著; 由于初级生产力数据缺失严重(图5), 文中只分析了海南岛东部海域初级生产力明显增加的原因:

1) 陆源、地表径流以及冲淡水的影响。近年来北部湾、广东沿岸海域以及越南沿岸海洋经济发展不断提高, 海洋开发利用不合理现象突出, 污染问

题严重, 加之大陆生活和农业用水的排放, 导致大陆沿岸富营养化严重, 从图2a可以看出台风前大陆沿岸的叶绿素浓度已然较高; 台风“威马逊”过境给整个南海西北部以及部分大陆带来强降水, 对空气有较强的降尘净化作用, 将可吸入颗粒物(PM)带入地表径流; 同时研究区沿岸河流分布密集(图1), 强降水加大河流冲淡水及沿岸径流量, 大量的悬浮液泥沙(图3)及营养盐被携带进入大陆近岸海域, 为此次叶绿素浓度增长做出贡献。

2) 台风诱发海水的混合夹卷作用。从图7、8和14可以看出台风加强了海水的混合夹卷作用, 混合层深度加深, 将富含营养盐的冷水与上层海水混合, 使得真光层营养盐含量增加, 促进了各海域叶绿素浓度的增长以及海南岛东部初级生产力的提高。

3) 季节性上升流以及台风对其的加强作用。根据柴扉等(2001)的研究, 在南海西北部存在很多著名的上升流, 广东沿岸上升流、海南岛东部沿岸上升流以及越南东部沿岸上升流, 而广东沿岸上升流有可以分为粤西上升流区和粤东上升流区; 而由于受到夏季风的影响7—9月南海西北部上升流都有所加强。图2中A、B和C区域分别受到越南东部沿岸上升流、粤西上升流以及粤东上升流的影响。台风“威马逊”加强了南海西北海域上升流, 促进近海底层泥沙的再悬浮, 有利于SSC及营养盐的增加, 从而使叶绿素浓度增长以及初级生产力的提高。

4 结论

本文通过台风“威马逊”同时期的卫星遥感数据, 详细分析了台风前后南海西北海域叶绿素浓度、海温、悬浮泥沙以及初级生产力的变化, 同时对其变化机理做了详细的分析, 研究结论如下:

1) 台风过境后, 南海西北海域叶绿素浓度增幅达到28%, 其最大值有3d的延迟, 初级生产力增加34%且在海南岛东部海域增长最为显著。台风引起海水混合和上升流等海洋动力机制的加强作用以及大陆径流的影响是南海西北海域台风后生态效应显著的主要原因。

2) 台风过境给南海西北海域带来强降水且降水具有明显地“左偏性”, 同时海表温度普遍降低且台风右侧海域降低更为显著, 海表降温却具有“右偏性”, 这可能是由于此次台风引起的海水强混合与上升流对SST降低的贡献大于强降水所致。

参考文献 References

- 北京: 海洋出版社: 117–127. CHAI FEI, XUE HUIJIE, SHI MAOCHONG, 2001. Formation and distribution of upwelling and downwelling in the South China Sea[C]//XUE HUIJIE, CHAI FEI, XU JIANPING, China oceanography corpus 13. Beijing: China Ocean Press: 117–127 (in Chinese).
- 陈见, 孙红梅, 高安宁, 等, 2014. 超强台风“威马逊”与“达维”进入北部湾强度变化对比分析[J]. 暴雨灾害, 33(4): 392–400. CHEN JIAN, SUN HONGMEI, GAO ANNING, et al, 2014. Comparative analysis of intensity changes between super typhoons Rammasun (1409) and Damrey (0518) during the period of entering the Beibu Gulf[J]. Torrential Rain and Disasters, 33(4): 392–400 (in Chinese).
- 付东洋, 2009. 基于卫星遥感研究台风对西北太平洋海域水温环境的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院: 1–107. FU DONGYANG, 2009. The study of water color and temperature environments in the Northwest Pacific Ocean by typhoon based on satellite remote sensing data[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences: 1–107 (in Chinese).
- 付东洋, 丁又专, 刘大召, 等, 2009. 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, 28(2): 15–21. FU DONGYANG, DING YOUZHUAN, LIU DAZHAO, et al, 2009. Delayed effect of typhoon on marine chlorophyll-*a* concentration[J]. Journal of Tropical Oceanography, 28(2): 15–21 (in Chinese).
- 刘蕾, 陈茂钦, 李煜, 等, 2015. 超强台风“威马逊”近海急剧加强特征及诊断分析[J]. 气象科技, 43(6): 1149–1156. LIU LEI, CHEN MAOQIN, LI YU, et al, 2015. Features and diagnostic analysis of rapid intensity change of super typhoon Rammasun over China offshore waters[J]. Meteorological Science and Technology, 43(6): 1149–1156 (in Chinese).
- 杨晓霞, 唐丹玲, 2010. 台风引起南海海面降温的位置变化特征[J]. 热带海洋学报, 29(4): 26–31. YANG XIAOXIA, TANG DANLING, 2010. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 29(4): 26–31 (in Chinese).
- 张翰, 管玉平, 2012. 登陆我国大陆热带气旋的纬度分布特征[J]. 物理学报, 61(16): 169203. ZHANG HAN, GUAN YUPING, 2012. Latitudinal distribution of landing tropical cyclones over mainland China[J]. Acta Physica Sinica, 61(16): 169203 (in Chinese).
- 赵辉, 张书文, 侯一筠, 等, 2013. 热带风暴“天鹰”对南海西部浮游植物叶绿素浓度的影响[J]. 热带海洋学报, 32(5): 99–106. ZHAO HUI, ZHANG SHUWEN, HOU YIJUN, et al, 2013. Influence of tropical storm Washi on phytoplankton chlorophyll-*a* in the western South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 32(5): 99–106 (in Chinese).
- 郑艳, 蔡亲波, 程守长, 等, 2014. 超强台风“威马逊”(1409)强度和降水特征及其近海急剧加强原因[J]. 暴雨灾害, 33(4): 333–341. ZHENG YAN, CAI QINBO, CHENG SHOUCHANG, et al, 2014. Characteristics on intensity and precipitation of super typhoon Rammasun (1409) and reason why it rapidly intensified offshore[J]. Torrential Rain and Disasters, 33(4): 333–341(in Chinese).
- FU DONGYANG, PAN DELU, DING YINGZHUAN, et al, 2008. Statistic study of effect of the sea surface temperature caused by typhoon based on remote sensing[C]. Noumea, New Caledonia: Asia-Pacific remote sensing. International society for optics and photonics: 715312-715312-11.
- FU DONGYANG, PAN DEILU, WANG DIFENG, et al, 2014. The analysis of phytoplankton blooms off the Yangtze River Estuary in the spring of 2007[J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 17(3): 221–232.
- FU DONGYANG, LUAN HONG, PAN DELU, et al, 2016. Impact of two typhoons on the marine environment in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 34(4): 871–884.
- KO D S, CHAO S Y, WU C C, et al, 2014. Impacts of typhoon megi (2010) on the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 119(7): 4474–4489.
- PRASAD T G, HOGAN P J, 2007. Upper-ocean response to Hurricane Ivan in a 1/25° nested Gulf of Mexico HYCOM[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C4): C04013.
- REN FUMIN, GLEASON B, EASTERLING D, 2002. Typhoon impacts on China's precipitation during 1957–1996[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19(5): 943–952.
- STEWART R H, 2002. Response of the upper ocean to winds[M]// STEWART R H. Introduction to physical oceanography. Florida: University of Florida press: 148.
- SUN JINGRU, OEY L Y, CHANG R, et al, 2015. Ocean response to typhoon Nuri (2008) in western Pacific and South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 65(5): 735–749.
- TANG DANLING, DI BAOPING, WEI GUIFENG, et al, 2006. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. Hydrobiologia, 568(1): 245–253.
- WANG GUIHUA, SU JILAN, DING YIHUI, et al, 2007. Tropical cyclone genesis over the South China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 68(3/4): 318–326.
- WANG SHANSHAN, GUAN YUPING, GUAN TINGZHAO, et al, 2012. Oscillation in frequency of tropical cyclones passing Taiwan and Hainan Islands and the relationship with summer monsoon[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 30(6): 966–973.
- YU JIE, TANG DANLING, CHEN GUOBAO, et al, 2014. The positive effects of typhoons on the fish CPUE in the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 84: 1–12.
- ZHENG GUANGMING, TANG DANLING, 2007. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff[J]. Marine Ecology Progress Series, 333: 61–74.