

# 基于多卫星和 Argo 浮标观测 海洋上层对台风婷婷的响应

杨元建,傅云飞,孙亮,刘鹏,冯沙

(中国科学技术大学地球和空间科学学院,卫星遥感与气候环境实验室,安徽合肥 230026)

**摘要:**利用多卫星平台和 Argo 浮标观测资料,分析研究了 2004 年台风婷婷(Tingting)引起海洋上层温盐结构和叶绿素 a 浓度的时空变化特征. 结果发现,台风婷婷过境时沿着其路径诱发强烈的上升流,混合层内海水混合加剧,冷涡加强,出现了大范围的海表温度降低和叶绿素 a 增加现象. 台风前的冷涡区域,出现大面积的“冷斑”和“藻华带”,且维持时间更长;而在台风前的暖涡区域内,则生物物理响应不明显. 因此,先前的海洋环境对于台风引起的上层生物物理响应具有重要意义.

**关键词:**Argo; 叶绿素 a; 台风婷婷; 海洋遥感

**中图分类号:**P732.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2010.01.001

## Responses of the upper ocean to Typhoon Tingting observed from multiplatform satellites and Argo float

YANG Yuanjian, FU Yunfei, SUN Liang, LIU Peng, FENG Sha

(LARSCE, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The biophysical responses of the upper ocean to Typhoon Tingting in 2004 were analyzed using multiplatform satellites and Argo float data. Along Tingting's passages, multiplatform satellite instruments detected an increase in surface chlorophyll concentration ( $0.08 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) and sea surface cooling ( $4 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in the wake. The wind fields intensified the oceanic cyclonic circulation, sea upwelling, surface cooling, and deepened the mixed layer ( $20 \sim 35 \text{ m}$ ). The mixing and upwelling injected subsurface phytoplankton and nutrients into the surface layer, resulting in two-week-long phytoplankton blooms. The surface cooling and phytoplankton blooms occurred mainly in the pre-existing cyclonic circulation area, but few in the pre-existing anticyclonic circulation area. This work provided convincing evidence that negative sea surface features play important roles in biophysical responses of the upper ocean to typhoons.

**Key words:** Argo; chlorophyll a; Typhoon Tingting; ocean remote sensing

## 0 引言

台风伴随着狂风暴雨、海面巨浪和风暴潮,是一

种严重的灾害性天气系统. 作为天气尺度上影响最大的海气相互作用过程,台风都是形成于热带洋面上,其中以西北太平洋台风产生次数最多,占全球台

收稿日期:2008-10-26;修回日期:2008-12-14

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划(2007CB816004),国家自然科学基金(40705027,40730950,40805007,40805008,40675027)和卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放研究基金(SOED0902)资助.

作者简介:杨元建,男,1985年生,硕士生. 研究方向:卫星遥感、海气相互作用. E-mail: yyj1985@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:孙亮,博士/副教授. E-mail: sunl@ustc.edu.cn

风总数的 30% 以上。台风的形成和发展与海洋上层的温盐结构有着直接联系<sup>[1-4]</sup>, 另一方面也对海洋的上层热能交换、海表高度、混合过程乃至生化过程有显著影响<sup>[5-13]</sup>。近年来, 随着观测手段的增加和观测精度的提高, 国内外学者对台风过境海洋上层生物、物理的响应过程做了大量的研究工作<sup>[14-23]</sup>。研究表明, 台风经过洋面时, 风力加大, 气旋式风应力引起海洋上层强烈混合, 并夹带下层冷水上翻进入混合层。台风后, 海面出现“冷斑”, 同时使海洋混合层温度下降、厚度加深, 垂直混合使得深一层的浮游植物进入海表, 并且伴随着上升流将下层丰富的营养盐等矿物质带到海洋混合层, 为海表上层浮游植物的繁殖提供了有利条件, 从而促进了海洋初级生产力的增加。因此, 在评估全球海洋初级生产力时, 我们不能忽视因台风引起的海洋固碳量<sup>[14-23]</sup>。根据先前国内外学者的研究<sup>[6, 18, 21, 23]</sup>, 海洋上层结构对台风响应过程表现出不同的强弱程度, 归结起来主要受下列因素影响: 台风的强度, 台风的移动速度, 初始的混合层深度, 台风引起的埃克曼抽吸速度以及台风之前存在的水平环流场等。然而, 最近 Zheng 等<sup>[23]</sup>对 2005 年 7 月超级台风海棠过后海洋上层的物理响应研究后表明, 海表温度 (SST) 对海棠的响应并不仅仅依赖于初始的混合层深度, 台风前海表右侧存在负的海表高度 (中尺度冷涡) 对台风过后出现的“冷斑”位置具有更重要的指示意义。

受上述研究启发, 一个自然的问题是: 台风前海表所存在的中尺度涡对于海洋的生物物理响应是否也有着重要的意义? 先前的研究工作大多集中在近海或大陆架海洋上层对台风的响应, 本文选取了西北太平洋开放的外海区域 ( $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ ,  $138^{\circ} \sim 148^{\circ} \text{E}$ ) 作为研究对象, 且此区域包括了典型的海洋沙漠区域。利用多卫星观测资料并结合 Argo 浮标资料, 分析了 2004 年第 11 号台风婷婷 (Tingting) 所经过该海域海洋上层结构对婷婷的响应特征, 并讨论了台风前后的 SST 和叶绿素 a 空间分布和时间变化特征; 同时讨论了海表高度变化在生物物理响应过程中所起的作用, 拟通过上述研究初步揭示海洋上层的生物物理过程受台风影响的规律, 为进一步理解台风和海洋相互作用以及准确估算由台风引起的海洋初级生产力的增长奠定基础。

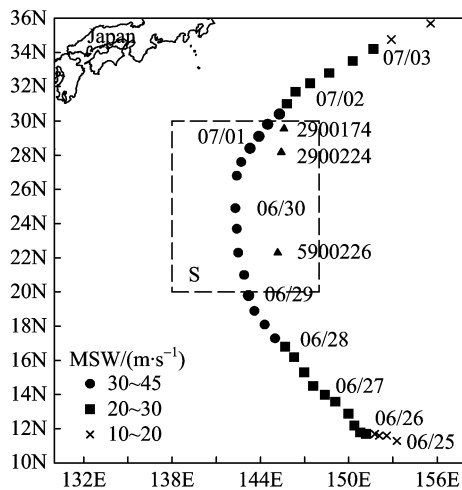
## 1 资料和方法

### 1.1 台风及海域选取

2004 年的 11 号台风婷婷源于 2004 年 6 月 25

日 0 时 (UTC) 在 ( $11^{\circ} \text{N}$ ,  $153^{\circ} \text{E}$ ) 附近洋面生成的热带风暴, 其中心气压和最大风速分别为 996 hPa 和 18 m/s。由上海台风研究所提供的最佳台风路径数据如图 1 所示; 它首先向西北方向移动, 并于 27 日 8 时 (UTC) 加强成为强热带风暴, 其中心气压和最大风速分别为 985 hPa 和 28 m/s; 然后于 29 日 6 时 (UTC) 加强为台风, 其中心气压和最大风速分别为 975 hPa 和 33 m/s, 随后转向正北方向, 其间最大风速达 40 m/s; 随后于 7 月 2 日减弱为强热带风暴, 最后转向东北方向并消亡。

本文在太平洋上选取婷婷强度最强、中心风力最大和影响范围最大的海域 ( $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ ,  $138^{\circ} \sim 148^{\circ} \text{E}$ ) 作为研究海域, 婷婷 6 月 29 日 0 时后进入此海域, 于 7 月 1 日 6 时移出。根据台风历史资料, 自 6 月 20 日 ~ 7 月 14 日期间, 本海域没有其他强热带气旋生成或进入, 因此这一时间段该海域内洋面变化可视为由婷婷引起。



其中 MSW 为台风婷婷中心最大风速 (m/s), 虚线框 S 为本文研究区域, 三角形为台风前 Argo 浮标 2900174 (06/25)、2900224 (06/26) 和 5900226 (06/26) 的位置

图 1 台风婷婷路径

Fig. 1 Positions of Typhoon Tingting's track

### 1.2 卫星观测资料

本文采用的 SST 资料是 TRMM/TMI 和 AMSR-E 融合的逐日格点数据, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。台风的海面风场资料由搭载在 QuickSCAT 卫星上的 SeaWinds 散射计观测得到, 主要为距海表 10 m 高的风场, 该风场资料有逐日的升、降轨两种轨道产品, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。叶绿素 a 浓度资料是 SeaWiFS 及其融合 MODIS 的 Level 3 标准逐日平均格点数据, 空间分

分辨率约为  $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ . 近实时的海表高度异常 (SSHA) 资料由 TOPEX/Poseidon, Jason-1, ERS-1/2 和 ENVISAT 而反演融合得到, 时间分辨率为 3~4 d, 空间分辨率约为  $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ .

### 1.3 Argo 浮标资料

Argo 全球海洋观测网可以获得这一大范围、同步、立体、实时的海洋上层的温盐剖面观测资料<sup>[24-26]</sup>, 提供了次表层的温盐剖面. 图 1 所示研究区域内的 Argo 浮标 2900174、2900224 和 5900226 剖面观测资料都经过实时和延时质量控制<sup>[27]</sup>. 根据刘增宏和许建平<sup>[12]</sup>研究方法, 选取离台风婷婷路径中心位置 200 km 范围内, 并且在气旋经过前后 10 d 内都有观测剖面的 Argo 浮标. 由于 Argo 剖面浮标在 10 d 内漂移的距离 (约 40 km) 不是很大, 可以认为气旋前后观测的水体为同一水体. 混合层深度的计算采用与表层温度差不大于  $1^\circ\text{C}$  的标准, 混合层温度为混合层深度上所有温度观测资料的平均, 混合层盐度亦类似.

### 1.4 方法

在下面的研究中我们需要计算埃克曼抽吸引起的上升流 (*upw*), 根据 Price 等<sup>[6-7]</sup>提出的由风场计算公式为

$$upw = \nabla \times (\tau / \rho f) \quad (1)$$

其中,  $f$  为地转参数;  $\rho$  是海水密度, 为  $1020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\tau$  为风应力, 计算如下

$$\tau = \rho_a C_D |\mathbf{U}| \mathbf{U}, \quad C_D = (0.73 + 0.069U) \times 10^{-3}, \quad (2)$$

$\rho_a$  是空气密度, 为  $1.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $C_D$  是拖曳系数<sup>[28]</sup>;  $\mathbf{U}$  为海表 10 m 高处的风矢量.

## 2 结果和讨论

### 2.1 台风引起的上升流

台风婷婷经过研究区域时, QuikSCAT 在 6 月 29 日和 30 日观测到台风婷婷过境时海表的四个瞬时风场, 其间最大风速达到  $40 \text{ m/s}$  (图 2). 根据式 (1) 和式 (2) 可以计算得到海洋上层距离台风中心数百公里范围内产生的局地上升流, 上升流速度范围为  $0.2 \times 10^{-4} \sim 12 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ , 且在台风中心处的最大上升流速度达到  $12 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  (图 2). 同时可以看到上升流在台风路径右侧的面积远大于其左侧的面积, 是由不对称的风应力造成.

### 2.2 混合层的响应

台风过境同时引起了海水垂直混合<sup>[6]</sup>. 图 3 给出了台风前后 Argo 浮标 2900174、2900224 和 5900226 在 200 m 以上海洋上层观测到的温盐剖面资料. 分析比较研究区域内所有浮标发现, 在台风路径右侧混合层平均温度下降了  $2 \sim 3^\circ\text{C}$ , 混合层深度平均加深了  $20 \sim 35 \text{ m}$ . 这也与刘增宏和许建平<sup>[12]</sup>分析婷婷引起的混合层变化结果一致. 而对于混合层内的盐度只有浮标 2900174 观测结果是增加的, 其他两个浮标所观测到的盐度是减少的. 许东峰等<sup>[11]</sup>指出, 这与台风经过洋面时降雨、蒸发增加、混合层内混合增强以及跃层涌升等 4 个过程之间最终的竞争结果有关.

### 2.3 SST 和叶绿素 a 的响应

由于上涌过程 (图 2) 和混合过程 (图 3) 将下层冷水混合到海表上层, 因此台风过后海表温度 (SST) 大幅度降低<sup>[6]</sup>. 图 4 给出了上述海域在台风前后 SST 的空间分布 (图中空白区为缺测, 以下不

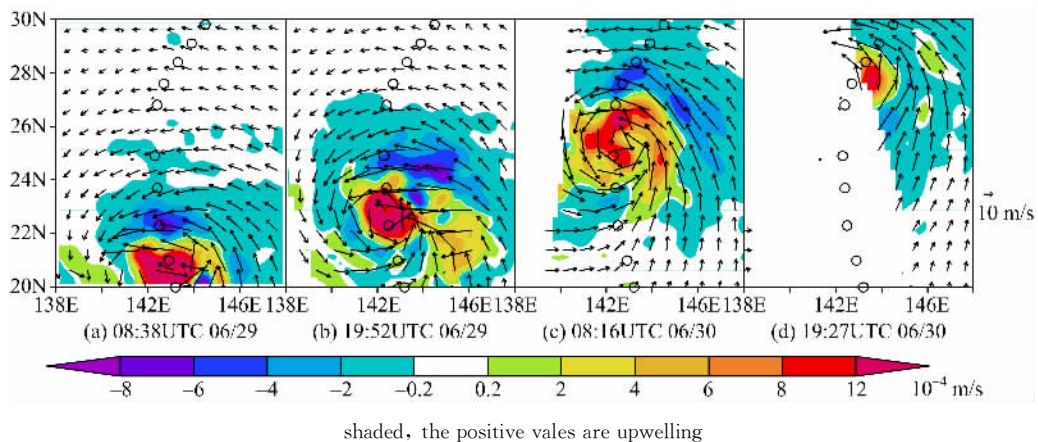


图 2 QuickSCAT 观测到的 6 月 29 日和 30 日研究区域的风场分布 (矢量图), 以及由此计算得到各个时间 (UTC) 台风引起的上升流分布 (填色图)

Fig. 2 QuikSCAT-derived upwelling images associated with Typhoon Tingting

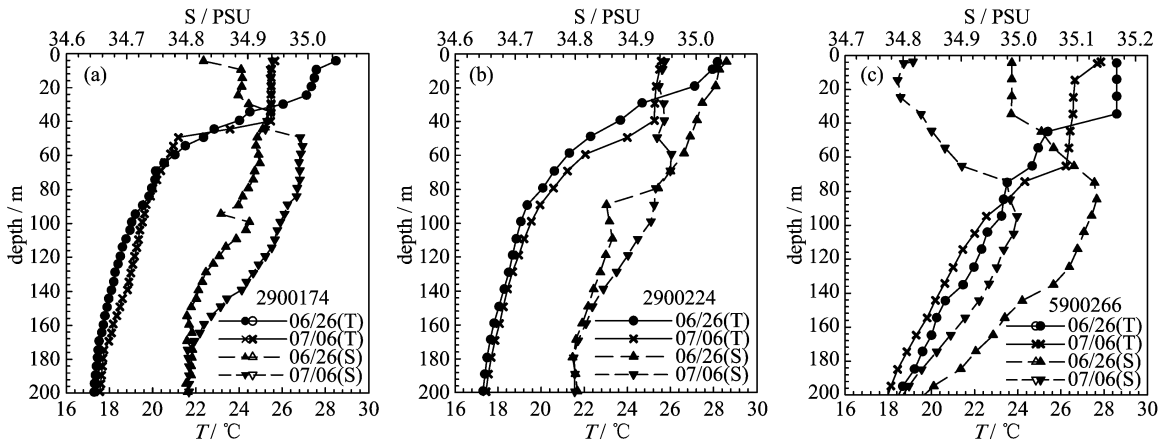
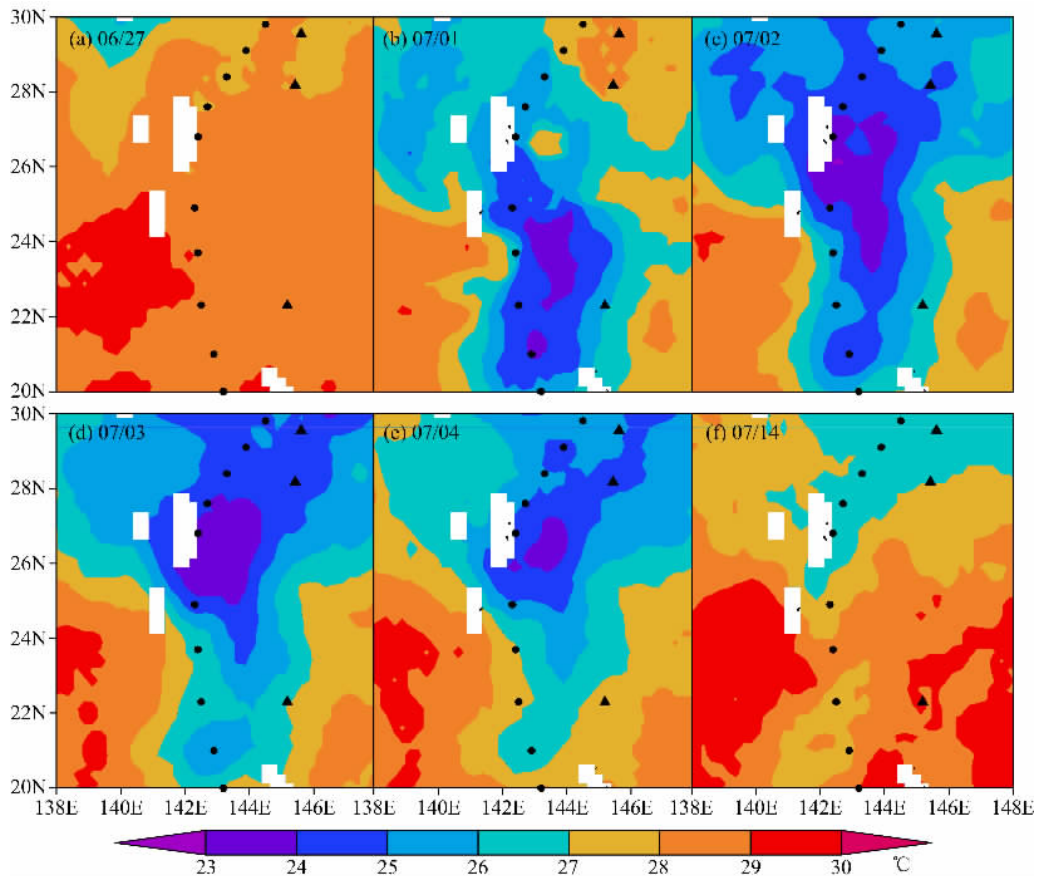


图 3 台风婷婷经过前后 2900174(a)、2900224(b)和 5900266(c)的温度和盐度的垂直分布

Fig. 3 Temperature and Salinity profiles before and after Typhoon Tingting passing at Argo floats 2900174 (a), 2900224 (b) and 5900266 (c)



prior to Tingting on Jun 27 (a), post to Tingting ((b)~(f)), where “06/27” denotes Jun 27, etc.

The white pixels are due to clouds

图 4 研究海域内 SST 的空间分布(单位:°C)

Fig. 4 The sea surface temperature (°C)

再说明):6月27日,台风过境之前,研究海域内的 SST 以 $>28^{\circ}\text{C}$ 为主(图 4(a)).台风过境后在 $142^{\circ}\sim 144^{\circ}\text{E}$ 附近,海表形成一条 SST $<26^{\circ}\text{C}$ 的“冷尾流”(图 4(b)~(f)),位置与图 1 中的台风路径吻

合.特别是在台风右侧( $20^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$ , $143^{\circ}\sim 144^{\circ}\text{E}$ )海域内,出现了明显的冷斑,最低温度约为 $23^{\circ}\text{C}$ ,且冷斑的位置与图 2 中的上升流位置大致相同.以 $25^{\circ}\text{N}$ 为界,区域的南北两部分的 SST 变化有所不同.

以南区域, 台风导致的显著降温区域 ( $\Delta\text{SST} < -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 比较小, 而且主要集中在台风右侧; 台风过后两周, 该区 SST 回暖, 并在台风路径两侧的外围海域 ( $22^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 146^{\circ}\sim 148^{\circ}\text{E}$  和  $22^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}, 138^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 出现了大范围的高温暖水团(图 4(f)). 而在  $25^{\circ}\text{N}$  以北区域, 台风路径两侧直径约 400 km 范围内出现了大面积的降温现象, 最大降幅达  $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (图 4(b)~(e)), 这和南边降温区域主要出现在台风右侧的现象有所不同.

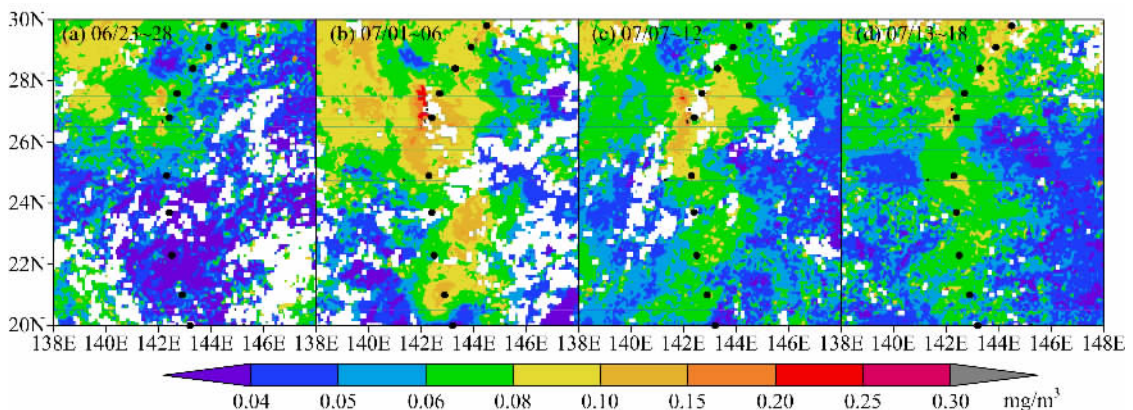
此外, 与 SST 的变化相对应, 上涌和垂直混合也将次表层的浮游植物和营养盐带到海洋表层, 引起了海洋上层叶绿素 a 浓度的变化. 图 5 给出了台风前和台风后的四个时间段内叶绿素 a 平均浓度的分布情况. 对比台风前(图 5(a))、台风后(图 5(b)), 台风过后 6 天内, 上述海域右侧叶绿素 a 浓度出现了明显的增加. 例如台风前 6 天内, 在  $25^{\circ}\text{N}$  以南海域, 典型的海洋沙漠区域叶绿素 a 平均浓度以小于  $0.04\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  为主. 而在台风后叶绿素浓度增加到  $0.06\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, 最高达到  $0.15\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  以上, 且路径右侧区域增加幅度大于左侧. 在  $25^{\circ}\text{N}$  以北海域, 也出现了大范围的叶绿素 a 浓度增加现象 ( $0.08\sim 0.15\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 增幅最大达 3 倍之多. 总的来看, 叶绿素 a 浓度最大增加海域与 SST 最大下降海域范围正好吻合: 即在  $142^{\circ}\sim 144^{\circ}\text{E}$  附近, 形成一条叶绿素 a 的富集带, 即“藻华带” ( $>0.08\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 对比图 2、图 4(c) 和图 5(b), “藻华带”与“冷尾流”以及上升流区域基本吻合, 但不同区域内的“藻华带”维持时间并不相同. 台风路径左侧附近海域 ( $27^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}, 138^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 的“藻华

带”维持时间仅仅一周左右, 而与“冷尾流”对应的“藻华带”维持时间在两周左右, 特别是在  $25^{\circ}\text{N}$  以南的“藻华带”维持时间甚至更长.

图 4 和图 5 都显示  $25^{\circ}\text{N}$  南北具有不同的海表温度和叶绿素响应: 南部海区具有典型的右偏现象, 但在北部海区此现象不明显. 由于台风在此区域的强度基本保持不变(图 1), 一种可能因素是台风在南北的移动速度快慢不同所导致的<sup>[6,18]</sup>. 但根据计算,  $25^{\circ}\text{N}$  以北台风在 6 月 30 日的平均移动速度约为  $6.5\text{ m/s}$ , 属于快速台风, 不会导致如此明显的区别. 而另外一种可能的原因则是台风过境前的海洋环境: 负的海表高度(中尺度冷涡)区域更容易出现“冷斑”现象<sup>[23]</sup>.

## 2.4 海表高度的响应

图 6 给出了台风前后的近实时海表高度异常 (SSHA) 分布. 在  $25^{\circ}\text{N}$  以南, 台风路径左侧为正的海表高度(暖涡), 而右侧主要为负的海表高度(冷涡); 而在  $25^{\circ}\text{N}$  以北, 台风路径两侧是以冷涡为主. 中尺度暖涡和上述 SST 反映的高温水团有着很好的对应, 且叶绿素 a 也相对较低(图 6(a)、图 6(b)、图 4 和图 5). 对比台风前后, 沿着台风路径两侧海表高度有明显降低, 具体表现为暖涡减弱, 冷涡加强. 先前存在的冷涡海域具有弱的层结, 因此台风过境时, 冷涡区域海表以下的冷水更容易被上翻抬升到表层, 容易出现“冷斑”<sup>[23]</sup>; 特别地,  $25^{\circ}\text{N}$  以北的路径两侧的冷涡已经完全汇合在一起(图 6(c)). 由于台风路径左侧 ( $27^{\circ}\sim 29^{\circ}\text{N}, 138^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 的冷涡存在, 导致了婷婷过后其路径左侧附近海域出现一个相对独立的冷中心 (SST  $< 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). 这对 Zheng 等<sup>[23]</sup>的结果也是一个补充: 台风路径左侧的冷涡也



(a) Jun 23~28, 2004, prior to Typhoon Tingting; (b) July 1~6, 2004; (c) July 7~12, 2004; (d) July 13~18, 2004, after the passage of Tingting. The white pixels are due to clouds

图 5 研究海域内叶绿素 a 的空间分布(单位:  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Fig. 5 Chlorophyll a concentrations ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

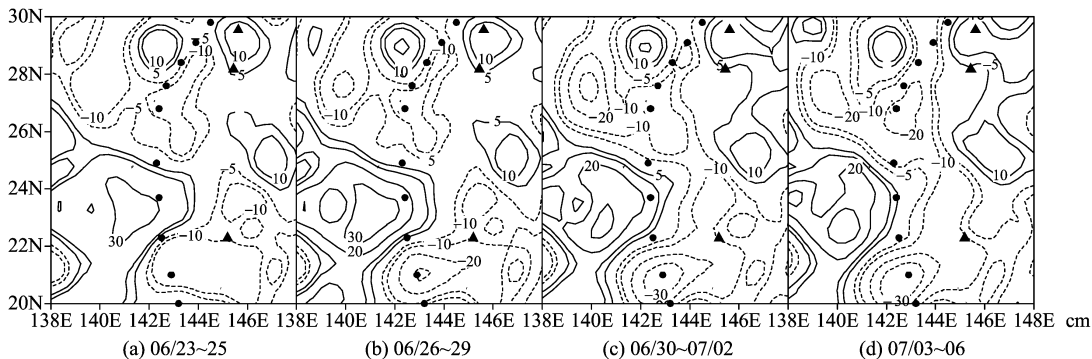


图 6 SSHA 的空间分布(单位: cm),

Fig. 6 SSHA (cm) on Jun 23~25, 2004 (a), Jun 26~29, 2004 (b), Jun 30~July 02, 2004 (c), July 03~06, 2004 (d)

可以导致“冷斑”。

台风左侧的冷涡不仅导致了“冷斑”,也导致持续时间相对短暂的藻华现象(图 5(b)).这是由于台风左侧的冷涡区域缺乏强烈的上升流(图 2),只有单纯的垂直混合将次表层的浮游植物夹卷进入表层,因此台风之后仅仅在 6 天内出现藻华,而不能持续更长时间.而对于台风右侧附近,无论海表背景环境如何都会有大幅降温和藻华现象.当然有冷涡存在时,“冷尾流”和“藻华带”维持的时间会更长,特别是 25°N 以南的区域(图 4、图 5).其原因在于:沿台风路径,不仅有因垂直混合作用所夹卷的次表层浮游植物,更有因为强烈的上升流(图 2)而带入表层的营养盐.夹卷带来的浮游植物和持续补充的营养盐足以维持真光层浮游植物更长时间的生长需要,使得观测到的海表叶绿素 a 分布持续增加.与冷涡区域内的响应相对比,暖涡区域内的生物物理响应不明显.从而可以看出先前的海洋环境对于台风引起的上层生物物理响应具有重要意义。

### 3 结论

本文通过多观测平台对海洋上层生物物理过程对台风婷婷响应做了详尽分析,揭示了 SST 和叶绿素 a 浓度时空变化受台风影响的规律.研究表明,台风过境时,台风路径附近出现短暂强烈的上升流,台风路径左右两侧的冷涡区域均出现大幅的降温现象( $SST < 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).且台风路径右侧的 Argo 温盐显示:混合层的深度加深了 20~35 m,台风路径右侧混合层平均温度下降了 2~3 °C. SST 最大下降了 5 °C,相应的叶绿素 a 最大增幅达 3 倍之多.同时海表高度在台风过后,有着较为明显的下降,结果导致先前的冷涡加强,暖涡减弱.在台风左侧的冷涡区域,虽然缺乏强烈的上升流,但因层结较弱、容易

混合,台风后出现冷中心和短期内的藻华现象(约一周).在台风路径右侧的冷涡区域,不仅有台风的强烈上升流,而且配合弱的层结,所以台风后出现大面积的“冷斑”和“藻华带”,且维持时间更长.与之相比,暖涡区域内的生物物理响应不明显.从而可以看出先前的海洋环境对于台风引起的上层生物物理响应具有重要意义.因此,在估算台风经过某海域引起初级生产力的增长时,要综合考虑台风的强度、台风路径的位置和海洋背景环流场等因素.目前对西北太平洋上层结构对台风响应过程进一步的统计分析研究正在进行之中。

**致谢** 感谢中国海洋大学物理海洋实验室王伟教授对本文的有益建议和帮助.感谢两位审稿专家对本文提出的有益建议.感谢上海台风研究所提供的最佳台风路径数据, NASA GSFC (Goddard Space Flight Center)提供的叶绿素 a 数据, Remote Sensing System 提供的海表温度和海表风场资料,感谢中国 Argo 实时资料中心提供的 Argo 浮标剖面资料,法国卫星高度计归档中心(AVISO)提供了融合的海表高度异常资料。

### 参考文献(References)

- [1] Jiang Jixi. A study of sst effect on typhoon motion[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1996, 12(3): 246-251.  
江吉喜. 海表温度对台风移动的影响[J]. 热带气象学报, 1996, 12(3): 246-251.
- [2] Emanuel K A. Thermodynamic control of hurricane intensity[J]. Nature, 1999, 401: 665-669.
- [3] Shay L K, Goni G J, Black P G. Effects of a warm oceanic feature on Hurricane Opal[J]. Mon Weather Rev, 2000, 128: 1366-1383.
- [4] Lin I I, Wu C C, Emanuel K A. The interaction of super typhoon maemi (2003) with a warm ocean eddy

- [J]. *Mon Weather Rev*, 2005, 133: 2 635-2 649.
- [5] Chen Guanghua, Huang Ronghui. The effect of warm pool thermal states on tropical cyclone in west northwest pacific[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2006, 22(6): 527-532.  
陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋暖池热状态对热带气旋活动的影响[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(6): 527-532.
- [6] Price J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 153-175.
- [7] Price J F, Sanford T B, Forristall G Z. Forced stage response to a moving hurricane[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24: 233-260.
- [8] Subrahmanyam B, Rao K H, Srinivasa R N, et al. Influence of a tropical cyclone on chlorophyll-a concentration in the Arabian Sea[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 2 065, doi:10. 1029/2002GL015892.
- [9] Lin I, Liu W T, Wu C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(13): 1 718, doi:10. 1029/2003GL017141.
- [10] HU Jianyu, KAWAMURA Hiroshi. Detection of cyclonic eddy generated by looping tropical cyclone in the northern South China Sea: a case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(2): 213-224.
- [11] Xu Dongfeng, Liu Zenghong, Xu Xiaohua, et al. The influence of typhoon on the sea surface salinity in the warm pool of the western Pacific [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6): 9-15.  
许东峰, 刘增宏, 徐晓华, 等. 西北太平洋暖池区台风对海表盐度的影响[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 9-15.
- [12] Liu Zenghong, Xu Jianping, Zhu Bokang, et al. Upper ocean response to tropical cyclones in northwestern Pacific during 2001—2004 by Argo data [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(1): 1-8.  
刘增宏, 许建平, 朱伯康, 等. 利用 Argo 资料研究 2001—2004 年期间西北太平洋海洋上层对热带气旋的响应[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(1): 1-8.
- [13] Liu L L, Wang W, Huang R X. The mechanical energy input to the ocean induced by tropical cyclones [J]. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 1 253-1 266.
- [14] Babin S M, Carton J A, Dickey T D, et al. Satellite evidence of hurricane-induced phytoplankton blooms in an oceanic desert [J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: C03043, doi:10. 1029/2003JC001938.
- [15] Davis A, Yan X H. Hurricane forcing on chlorophyll-a concentration off the northeast coast of the U. S. [J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L17304, doi: 10. 1029/2004GL020668.
- [16] Gierach M M, Subrahmanyam B. Biophysical responses of the upper ocean to major Gulf of Mexico hurricanes in 2005 [J]. *J Geophys Res*, 2008, 113: C04029, doi:10. 1029/2007JC004419.
- [17] Shang Shaoling, Li Li, Sun Fengqin, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001, *Geophys Res Letts*, 2008, 113, 35: L10602, doi:10. 1029/2008GL033502.
- [18] 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]. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L18610, doi:10. 1029/2005GL023716.
- [19] Gierach M M, Subrahmanyam B. Satellite data analysis of the upper ocean response to hurricanes Katrina and Rita (2005) in the Gulf of Mexico [J]. *IEEE Geo and Remote Sens Letts*, 2007, 4(1): 132-136.
- [20] Zheng G M, Tang D L. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater run off [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 333: 61-74.
- [21] Zhao Hui, Tang Danling, Wang Yuqing. 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.
- [22] Siswanto E, Ishizaka J, Morimoto A, et al. Ocean physical and biogeochemical responses to the passage of Typhoon Meari in the East China Sea observed from Argo float and multiplatform satellites, *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L15604, doi:10. 1029/2008GL035040.
- [23] Zheng Z W, Ho C R, Kuo N J. The importance of pre-existing oceanic conditions to upper ocean response induced by Super Typhoon Hai-Tang [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L20603, doi:10. 1029/2008GL035524.
- [24] Chen Dake, Xu Jianping, Ma Jirui, et al. Analysis of data quality control process of the ARGO profiling buoy [J]. *Advances In Earth Science*, 2008, 23(1): 1-7.  
陈大可, 许建平, 马继瑞, 等. 全球实时海洋观测网 (Argo) 与上层海洋结构、变异及预测研究 [J]. *地球科学进展*, 2008, 23(1): 1-7.
- [25] 苏纪兰. 如何正确认识 Argo 计划 [J]. *海洋技术*, 2001, 20 (3): 1-2.
- [26] 许建平. 阿尔戈全球海洋观测大探秘 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [27] Tong Mingrong, Liu Zenghong, Sun Chaohui, et al. Argo global observation network and studies of upper ocean structure, variability and predictability [J]. *Ocean Technology*, 2003, 22(4): 79-84.  
童明荣, 刘增宏, 孙朝辉, 等. ARGO 剖面浮标数据质量控制过程剖析 [J]. *海洋技术*, 2003, 22(4): 79-84.
- [28] Garratt J R. Review of drag coefficients over oceans and continents [J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 105: 915-929.