

南海北部海洋对局地生成热带气旋的响应

孙璐^{1,2}, 王东晓¹, 胡建宇^{2,3}, 高荣珍⁴

(1. 热带海洋环境动力学重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301;

2. 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门大学, 福建 厦门 361005;

3. 物理海洋学教育部重点实验室, 中国海洋大学, 山东 青岛 266063; 4. 青岛市气象局, 山东 青岛, 266063)

摘要: 应用 Topex/Poseidon 卫星高度计海面高度距平 (SSHA) 资料以及 TMI 的逐日海表温度数据, 对两个局地生成的热带气旋 (1999 年台风 LEO 和 2000 年台风 WUKONG) 引起的南海北部海洋响应过程进行研究。结果表明, 在热带气旋影响下, 海面高度显著降低, SSHA 平均减少 30cm, 流场上出现气旋型环流, 海表温度显著降低, 降低幅度为 2e 左右, 在其遗迹上出现冷涡; 相对于降温过程, 海表温度的恢复过程非常缓慢; 热带气旋强度突变或移行较缓时易引起海洋的强烈响应, 这种响应的空间和时间尺度都较大, 持续时间至少 1 周, 发生响应的海域范围也很广, 甚至可以跨越 3 个纬度的距离。

关键词: 南海北部; 局地生成热带气旋; 卫星高度计资料; 响应

中图分类号: P732.6

文献标识码: A

文章编号: 100925470(2008)04001009

Responses of upper layer of northern South China Sea to two locally generated tropical cyclones

SUN Lu^{1, 2}, WANG Dongxiao¹, HU Jianyu^{2, 3}, GAO Rongzhen⁴

(1. LED, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China;

2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266063, China;

4. Weather Bureau of Qingdao, Qingdao 266063, China)

Abstract: Responses of upper layer of the northern South China Sea to two locally generated tropical cyclones have been studied by using the data derived from Topex/Poseidon altimeter and SST data from TRMM Microwave Imager (TMI). The two tropical cyclones are typhoon LEO from April 27th to May 2nd in 1999 and typhoon WUKONG from September 5th to September 10th in 2000. The following results are obtained. The sea surface height decreased and a geostrophic current appeared under the influence of the tropical cyclones. SST decreased apparently and there were cold eddies in the wakes of the tropical cyclones. Compared with the process of SST decreasing, it took longer time, about one week, for SST to recover. The sea surface height tended to show an intense response when there were abrupt changes in the intensity of the tropical cyclones or when they moved slowly. These responses appeared to have large spatial and temporal scales.

Key words: northern South China Sea; locally generated tropical cyclone; altimeter data; response

南海是热带气旋活动比较频繁的海域, 作为西北太平洋台风的 3 个主要源地之一, 每年在南海局地生成的热带气旋中有不少发展为热带风暴和台风, 对南海造成显著的影响^[1]。南海局地生成的热

带气旋移行路径通常比较复杂, 且在强度上也存在差异。根据其强度的大小可将其划分为热带低压、热带风暴以及 1) 5 级台风 (分类参照 Saffir-Simpson 标准)。

收稿日期: 20080206; 修订日期: 20080409. 孙淑杰编辑

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40576015, 40576015); 中国海洋大学物理海洋学教育部重点实验室开放课题 (200304)

作者简介: 孙璐 (1983), 女, 山东省东营市人, 硕士研究生, 专业: 物理海洋学。Email: sunlu@scsio.edu.cn

热带气旋系统是海气耦合作用的一个重要形式, 对中、小尺度海洋现象有着重要影响。Price 等^[2]模拟了局地海洋对台风风场的响应, 结果中包含有正压和斜压响应, 正压响应为地转流以及由此建立的海面高度低槽; 斜压响应为混合层内出现的超过 $1\text{ m}\#\text{s}^{-1}$ 的强流, 以及由强烈垂直混合造成的混合层加深和海表温度 (SST) 降低。Simon^[3] 和 Shay 等^[4] 的模型研究结果都显示出台风轨迹上海面的显著响应, Simon^[3] 的结果甚至定量表明这种响应 6 天后才衰退 30%。O. Brien 等^[5] 模拟结果显示在台风轨迹上出现强的气旋型上升流, 且响应的空间尺度也较大。Pudov 等^[6] 和 Brooks^[7] 观测结果也表明台风轨迹上气旋型上升流的存在。大量观测结果已表明, 热带气旋经过时会引起海面气温和水温的显著下降, 且 SST 对热带气旋的响应要滞后于气温^[8]。Black^[9] 的研究结果显示 SST 的响应与热带气旋的移动速度关系密切, 不同强度和移速的热带气旋引起 SST 变化的幅度不尽相同 (1) 6e)。Lin 等^[10,11] 研究缓慢移动的热带气旋, 除了得出 SST 降低的结论外, 还指出缓慢移动的台风能够引起很强的垂直混合, 把底层的营养盐带到上层。Chen 等^[12] 甚至在台湾南部典型下降流区观测到由台风引起营养丰富的黑潮水在陆架区涌升。

目前直接观测热带气旋过程所引起的海面高度变化较为困难, 对热带气旋过程的监测则更为稀缺。卫星测高遥感技术的出现使得对全球海面高度进行长时间、大范围的连续观测成为可能, 其中 Topex/Poseidon (以下简称 T/P) 卫星高度计的数据资料具有较高的测量精度^[13]。南海是被 T/P 卫星测高轨道良好覆盖的区域, 已经有若干学者利用其数据资料研究南海海面高度场^[14] 和南海环流^[15], 都取得了与海上观测手段较一致的结果。Hu 等^[16] 曾利用遥感资料报道过热带气旋打转时导致海面产生气旋型涡的现象。

南海北部冬季为次海盆尺度的气旋式环流, 夏季为弱的气旋型涡, 春季和秋季环流为冬夏两种环流结构的过渡, 春季南海整体为弱的反气旋环流, 秋季南海海盆则被越南沿岸海域中部的气旋型环流占据。南海北部季节性环流的又一重要特征是出现在冬春两季的吕宋冷涡^[17]; 此外, 南海北部陆架、陆坡区还存在沿岸流、陆坡流等复杂流系。冬季, 南海表层水温从北向南逐渐增高; 夏季表层水温与冬季相比显著增高, 低温区出现在中南半岛以东的上升流区。秋季表层水温分布情况和春季类似, 呈北低南高之势, 北部陆架区等温线分布近似

和等深线平行。影响混合层内热含量或温度分布结构特征的主要因子为风应力、海面吸收的净热通量和海面淡水通量, 其中以风应力的作用尤为显著, 如西南季风盛行时垂向混合层的卷入会抵消表层的加热, 有效冷却混合层内温度^[18]。

本文利用同期的 T/P 卫星高度计和遥感 SST 数据, 研究 2 个局地生成的热带气旋 (1999 年台风 LEO 和 2000 年台风 WUKONG) 引起的南海北部海洋响应过程 (其中水深小于 200m 海区的 T/P 数据由于误差较大而没有采用), 结果显示南海对热带气旋的显著响应特征。

1 数据来源

本文所采用的数据是美国 NASA 提供的 Topex/Poseidon 910 版本海面高度距平 (Sea Surface Height Anomaly, 以下简称为 SSHA) 的数据资料。该资料给出的是卫星地面轨迹各采样点各个周期的沿轨观测资料, 时间序列为 1992 年 9 月) 2003 年 1 月, 轨道重复周期为 919156 天, 高度计在卫星运行过程中对星下点连续采样, 采样点的沿轨分辨率为 6km。该资料已对原始测值做过必要的校正, 校正包括潮汐和气压校正等。另外, SST 数据是由 TRMM 提供的 TMI version_4 的 SST 逐日数据。

本文所讨论的海面动力高度是海面高度距平与平均海面重力高度的叠加。利用 World Ocean Atlas (以下简称为 WOA) 2001 所提供的 0125b @ 0125b 的温盐资料, 计算了相对于 1000m 参考面的南海平均重力位势场 (图 1)。在计算过程中, 对水

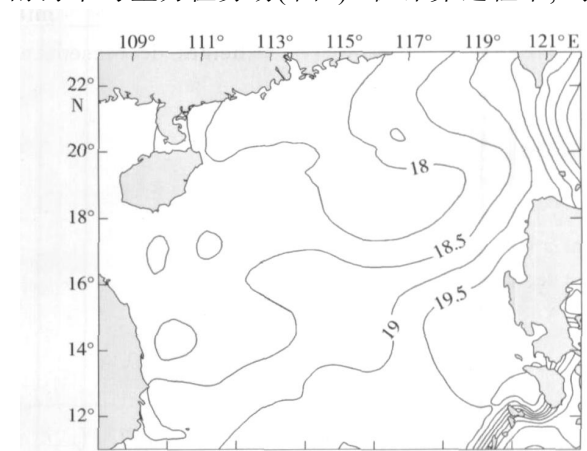


图 1 根据 WOA 2001 温、盐数据资料计算的南海气候态平均重力位势场 (单位: $\text{m}^2\#\text{s}^{-2}$)

Fig 1 Climatological mean geopotential topography of South China Sea derived from temperature and salinity field of WOA 2001 (unit: $\text{m}^2\#\text{s}^{-2}$)

深小于 1 000m 的海域采用通常使用的沿海底积分的方法^[14]。由 T/P 卫星高度计各观测周期在本文所研究海域内的沿轨 SSHA 数据得到海面高度距平场, 乘以重力加速度转化为海面动力距平场后, 与平均重力位势场叠加, 就可以得到研究海区的面动力高度。表层地转流计算采用

$$V = \frac{\Delta D}{\Delta L} \# f \quad (1)$$

其中 ΔD 为经纬度网格点相邻两点海面动力高度差; ΔL 为经纬度网格点相邻两点间的距离; f 为科氏参数。

2 南海对热带气旋的响应

2.1 1999 年台风 LEO 引起的南海响应分析

1999 年 5 号台风 LEO 于 1999 年 4 月 27 日 0 时左右在南海中南部海域(114° 4'E, 14° 3'N)生成, 形成时为热带低压, 朝西北方向行进; 4 月 28 日在海南岛以南海面上空打转, 于 4 月 29 日转而向东北方向行进, 并发展为热带风暴; 此后一直以小于 $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的较缓速度沿东北偏北方向移动, 4 月 30 日 6 时风速高达 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 由 1 级迅速发展为 3 级台风; 5 月 2 日台风 LEO 移至粤东附近海域(路径见图 2)。台风 LEO 历时 6 天, 除生成初期外, 后期移速、移向基本稳定, 强度大, 影响范围较广。

在台风 LEO 活动期间, 从同期的 T/P 卫星高度计观测数据中选取两条轨道数据进行分析, 其中一条为垂直台风路径的 95 轨道(图 2a), 另一条为

平行台风路径的 115 轨道(图 2b)。图 2a 中的黑色实线反映的是第 244 周期第 95 轨道 SSHA 沿轨变化情况, 时间序列为 5 月 7 日 1 时 6) 8 分。可以看到, 与第 243 周期曲线(虚线, 4 月 27 日)和第 245 周期曲线(虚线, 5 月 17 日)相比, 曲线位于 17°N 以北的部分 SSHA 是明显减小的, 海面降低的最大值达 40cm。海面高度变化最明显的海域位于 4 月 30 日 6 时台风眼(114° 8'E, 19°N)附近, 台风 LEO 在 4 月 30 日 0) 6 时这段时间由 1 级台风加强到 3 级, 而此期间它仅移动了约 30km, 即短时间内台风强度变化剧烈、移速缓慢。5 月 7 日台风 LEO 已经移出该处海域 5 天, 但仍然可以从黑色实线的 SSHA 变化上看到海面高度对热带气旋的响应; 同时从第 245 周期曲线(点虚线)与第 243 周期曲线(虚线)基本重合的现象中可以看到, 海面高度在 5 月 17 日前才基本恢复到台风经过前的情形, 说明响应持续的时间尺度较长。图 2b 中的黑色实线反映的是第 244 周期第 115 轨道 SSHA 沿轨变化情况, 时间序列为 5 月 8 日 15 时 51) 53 分, 从中同样可以看到沿着台风路径海面高度降低的情形: 黑色实线与第 243 周期曲线(虚线, 4 月 28 日)和第 245 周期曲线(点虚线, 5 月 18 日)相比 SSHA 明显减小, 海面降低值平均为 30cm 左右。与 95 轨道上 SSHA 变化情况一致, 海面高度变化最明显的海域位于 4 月 30 日 6 时台风眼(114° 8'E, 19°N)附近, 即位于台风强度瞬间变化剧烈、移速缓慢的海域, 说明台风强度剧增、移行较缓时, 易引起海面高度的强烈响应。

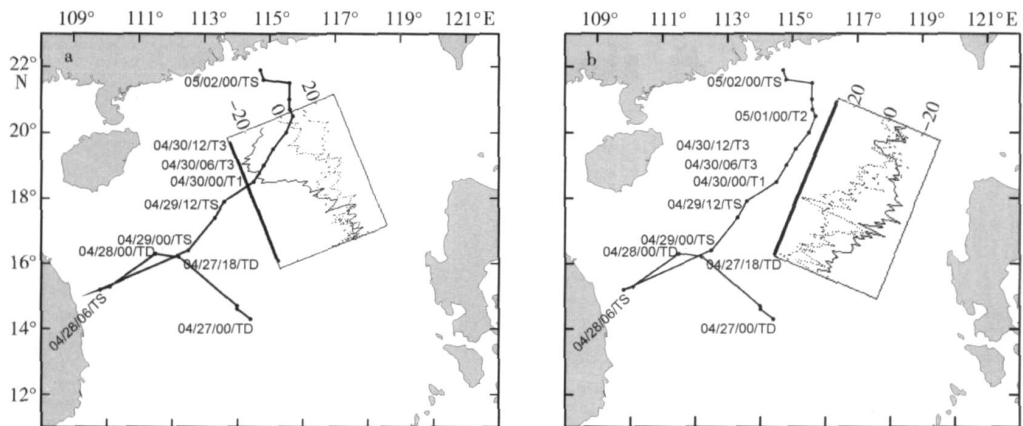


图 2 1999 年台风 LEO 轨迹及 SSHA 沿轨(轨道 95 和 115)变化曲线

a. 95 轨道 SSHA 变化曲线; b. 115 轨道 SSHA 变化曲线; SSHA 的单位为 cm; 黑色实线为第 244 周期 SSHA 变化曲线, 虚线和点虚线分别为第 243 和 245 周期的 SSHA 变化曲线; 图中标注为月/日/时/热带气旋级别

Fig 2 Track of typhoon LEO in 1999 and SSHA variations along tracks 95 (a) and 115 (b)

4 月 28 日以前台风 LEO 在 17°N 以南的南海海域打转, 从第 243 周期(1999 年 4 月 19 日至 28

日)的海面动力高度图(图 3a)上可以看到, 台风打转的这片海域的动力高度较周围海域低, 而在第

244 周期(1999 年 4 月 29 日至 5 月 6 日)的海面动力高度分布(图 3b)上, 这片海域的动力高度较第 243 周期时增加约 $2\text{m}^2 \# \text{s}^{-2}$, 说明海面已经回升。台风 LEO 在 4 月 29 日以后向北移行, 强度都在 2 级台风以上, 移速小于 $8\text{km} \# \text{h}^{-1}$, 台风轨迹上第 244 周期的动力高度比周围海域低(图 3b), 同时其分布表现出中心动力高度低、周围动力高度高的分布特征,

从中心到外围的动力高度梯度达 $6\text{m}^2 \# \text{s}^{-2}$, 以 114°E 、 19°N 为中心, 半径接近 115 个纬度。很明显, 此中心与 4 月 30 日 0) 6 时的台风眼非常接近, 即位于台风强度瞬间变化剧烈、移速缓慢的海域。台风经过前第 243 周期(图 3a)时, 这片海域的动力高度分布还大致均匀, 没有较大的梯度, 到第 244 周期时的变化情况反映出强的 Ekman 抽吸作用。

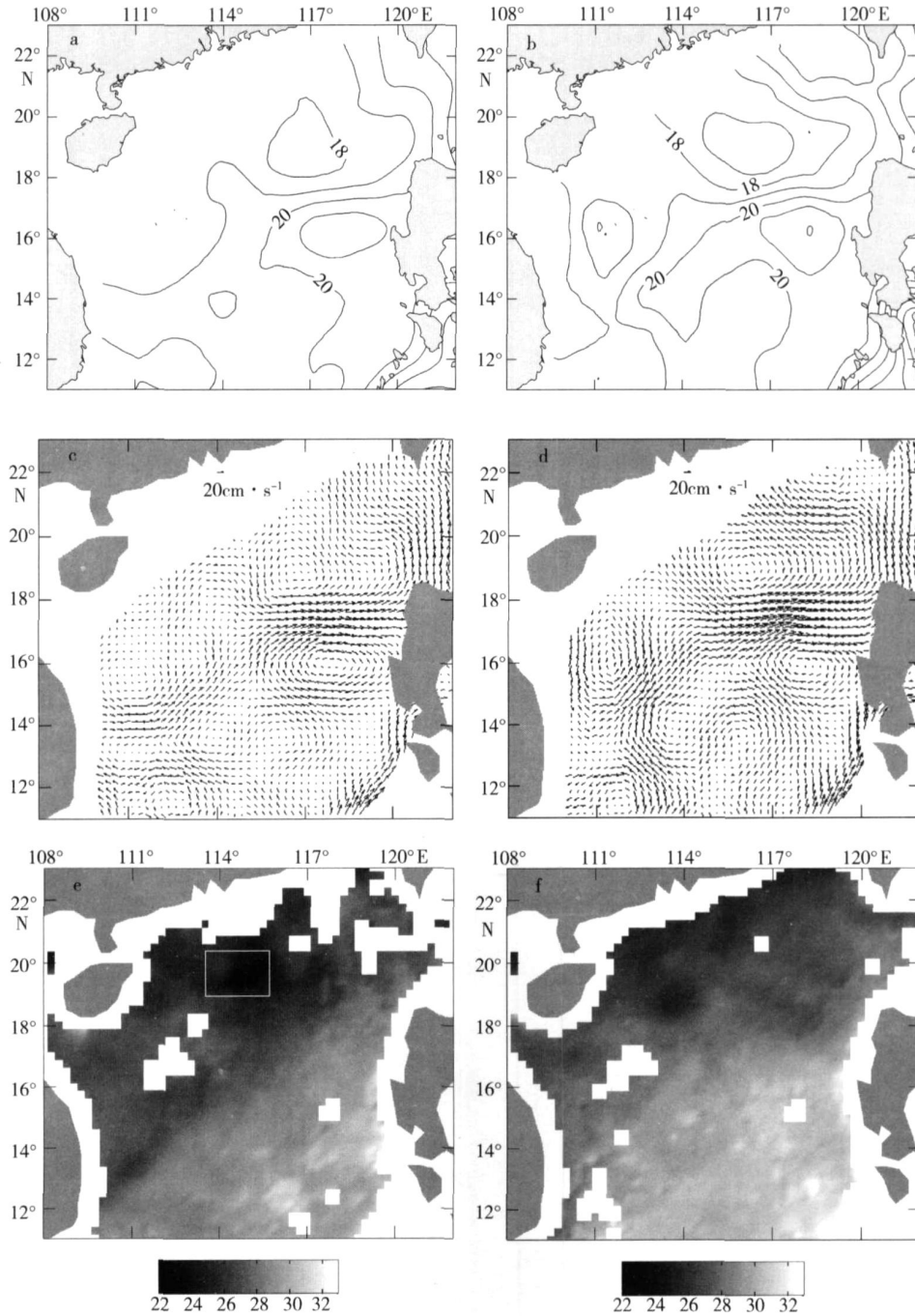


图 3 T/P 卫星高度计第 243 和 244 周期海面动力高度 (单位: $\text{m}^2 \# \text{s}^{-2}$) 和地转流场 (单位: $\text{m} \# \text{s}^{-1}$) 以及逐日海表温度分布(单位: $^\circ\text{C}$)

a. 243 周期海面动力高度场; b. 244 周期海面动力高度场; c. 243 周期地转流场; d. 244 周期地转流场; e. 1999 年 5 月 2 日 SST 分布; f. 1999 年 5 月 12 日 SST 分布; 243 周期对应日期为 1999 年 4 月 19 日至 4 月 28 日, 244 周期对应 1999 年 4 月 29 日至 5 月 6 日

Fig 3 Dynamical topography and geostrophic current field for T/P cycles 243 and 244, and daily SST distribution

根据海面动力高度地形(图 3a 和 3b), 由公式 (1) 计算得到这两个周期的表层地转流场(图 3c 和 3d)。4 月 19 日至 28 日时, 15°N 以北的海区存在西北向的强流, 主流轴与台风轨迹平行, 说明沿台风轨迹上出现强流; 同时流速最大值出现在 16°N 附近海域, 即台风 LEO 打转的海域, 这表明当台风在海域上空打转时, 台风在海洋上空停留时间较长, 对同一片海域影响时间也较长, 从而引起的流场响应也较剧烈。4 月 29 日至 5 月 8 日时, 19°N 附近海域有一气旋型的环流, 中心位置在 115°E、19°N 附近, 与 4 月 30 日 6 时台风眼 (114°E、19°N) 接近。考虑到台风引起海洋响应具有较长的时间尺度, 可以推断这个气旋型环流是由台风 LEO 引起的。这片海域正是台风 LEO 瞬间强度剧增且移行缓慢的海区, 说明台风强度突变会造成流场的显著响应。

在台风 LEO 活动期间, 海表温度分布上也存在着明显的变化, 从这些变化中也反映出南海对台风 LEO 的显著响应。5 月 2 日的 SST 分布图(图 3e) 上明显出现了大片的低温区, 18°N 以北整片海区的温度都在 25°C 以下, 与周围海区相比温度低了 2°C 左右, 而且观察到冷涡的出现, 大致以 115°E、19°N 为中心, 冷涡中心温度低至 23°C 左右, 半径达 11.5 个纬度, 且这个冷涡的中心与 4 月 30 日时的台风中心吻合, 也与气旋型环流的中心吻合。到了 5 月 12 日, SST 分布图(图 3f) 上已经看不到明显的冷涡存在, 海温也基本上恢复到与周围海区大致相同, 说明海温已恢复, 台风影响消失。SST 的显著降温以及在台风尾迹上出现的冷涡, 都是海洋对台风响应的表现。

2.2 2000 年台风 WUKONG 引起的南海响应分析

2000 年 23 号台风 WUKONG 于 9 月 5 日 6 时左右在 116°E、16°N 附近的南海海域形成, 之后朝东北偏东方向移动, 但于 9 月 6 日 0 时左右转向西南偏西方向移动, 且移动速度明显开始减慢, 9 月 6 日 18 时后移动方向基本向西。在行进过程中, 台风中心气压不断降低, 风速不断增大, 9 月 8 日 6 时风速高达 $49\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 发展为 2 级台风, 并于 9 月 10 日在海南岛登陆(路径见图 4)。

9 月 6 日 18 时台风 WUKONG 中心大致位于 116°E、19°N 附近的南海海域, 风速大约为 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 属于热带风暴; 随后 9 月 7 日 0 时台风行进至 115°E、18°N 附近海域, 风速达到 $35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 发展成为 1 级台风。T/P 卫星高度计第 294 周期第 6 轨道 SSHA 沿轨数据的时间序列为 9 月 6 日 21 时 57 分, 此时台风中心距第 6 轨道不到 50km。从图 4a 中可以看到, 第 294 周期的 SSHA 沿轨变化的黑色实线与第 293 周期曲线(虚线, 8 月 27 日)相比, 位于台风中心附近的部分并无明显的变化, 而第 295 周期的这段曲线(点虚线, 9 月 16 日)位于黑色实线和虚线下方, SSHA 的数值比前两个周期小, 说明海面高度是降低的, 尤其是台风轨迹右侧海域海面降低现象更加明显, SSHA 降低平均约 30cm, 其中靠近台风中心偏右侧海域的 SSHA 变化幅度最大达 40cm; 台风轨迹左侧海域降低幅度相对较小, 大约只有 20cm。出现在台风 WUKONG 尾迹上的海面高度降低的现象反映出响应具有较长的时间尺度。

图 4b 中的黑色实线反映的是第 294 周期沿第 26 轨道 SSHA 数据沿轨变化情况, 时间序列为 9

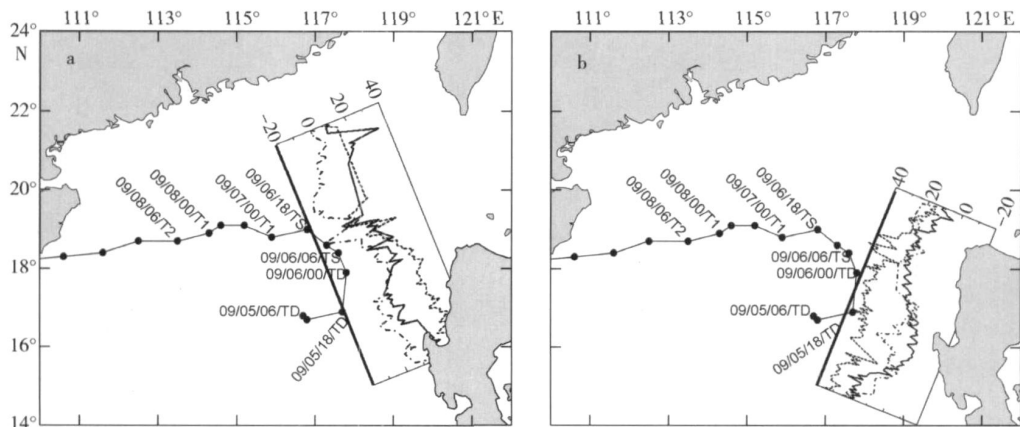


图 4 2000 年台风 WUKONG 轨迹及 SSHA 沿轨(轨道 6 和 26)变化曲线

a. 6 轨道 SSHA 变化曲线; b. 26 轨道 SSHA 变化曲线; SSHA 的单位为 cm; 黑色实线为第 294 周期的 SSHA 变化曲线, 虚线和点虚线分别为第 293 周期和 295 周期的 SSHA 变化曲线; 图中标注为月/日/时/热带气旋级别

Fig 4 Track of typhoon WUKONG in 2000 and SSHA variations along tracks 6 and 26

月6日9时50)52分。黑色实线位于9月6日6)18时台风WUKONG台风眼附近的SSHA沿轨数据与293周期的虚线和295周期的点虚线相比都是最小的,海面高度是降低的,同样是海面高度在台风WUKONG尾迹上的响应。

从图5a第293周期(2000年8月27日至9月6日)的SSHA平面分布图上可以看到,海面大致东南高、西北低,东南部以正距平为主,且距平值基本上在20cm以上;18b)20bN海域存在范围很小的负距平区,其中心大致位于116E、19bN,中心处距平值最小约-10cm,围绕中心呈气旋型的分布特征。第294周期(2000年9月7日至9月16日)的SSHA的分布(图5b)与293周期相比有了明显的不同。由于台风WUKONG轨迹附近海域的距平值都有所减小,使得东南部海域正距平区域范围缩小,甚至出现负距平区,海面明显呈现大面积下降的分布特征;大致以116E、19bN为中心的负距平区到了第294周期范围有很大的增加,半径

已达2个纬度,中心处距平减小至-35cm以下,从中心到四周的SSHA梯度也明显增大,气旋型分布特征更加明显。值得注意的是,这个气旋型涡位于台风WUKONG轨迹右侧,其中心与9月6日18时的台风中心非常接近,可以推断是在台风WUKONG的作用下得以加强的。

由于热带气旋活动当天(9月6日),受云层的覆盖以及大量降水的影响,位于热带气旋中心的海面无法得到SST的数据,但热带气旋引起的SST的变化会反映在热带气旋尾迹上,所以从9月9日的SST分布图上仍然可以明显地观察到由台风引起的海表降温现象。9月9日SST分布(图5c)上明显出现了大片低温区,比周围温度低2e左右,而且观察到冷涡的出现,大致以116E、19bN为中心,半径有115个纬度,这个冷涡的中心与9月6日18时台风眼位置接近,也与气旋型涡的中心吻合,这不但说明台风经过时引起了海表温度的降低,也为气旋型涡的存在提供了证据。从9月20

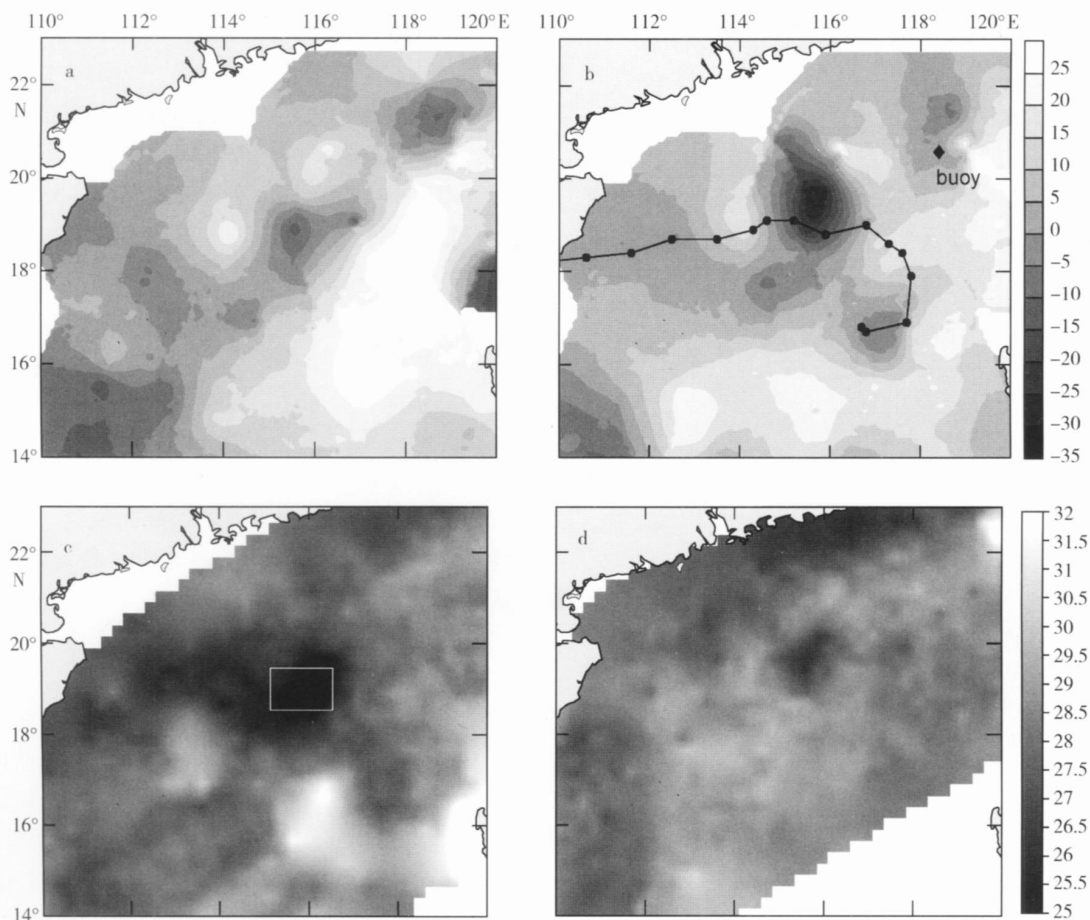


图5 第293和294周期的SSHA(单位: cm)及逐日海表温度(单位: e)分布
 a. 第293周期(2000年8月27日至9月6日)SSHA分布; b. 第294周期(2000年9月7日至9月16日)SSHA分布; c. 2000年9月9日SST分布; d. 2000年9月20日SST分布

Fig 5 SSHA distribution for T/P cycles 293 and 294 and daily SST distribution

日 SST 分布(图 5d)上已经完全看不到冷涡的存在,低温区范围也明显减小,海表温度已基本恢复,南海北部 SST 对台风 WUKONG 的影响消失。

2.1.3 表层流场验证

为了验证遥感资料分析的流场结果,本文利用南海东北部锚定测流站 Long Ranger ADCP 流速观测结果进一步揭示台风活动期间南海北部海面流况。锚定站位于南海东北部(118°24′E, 20°34′N),图 5b 和图 6a 中都给出了其所在位置。2000 年 8 月 14 日由 / 海洋 120 号调查船布设此锚定测流系统,后于 2001 年 3 月 17 日由 / 实验 30 号调查船成功回收。该锚定站上 Long Ranger ADCP 布设在水下 500m 左右,从而获得自 500m 往上每 16m 为一个观测层次的流速资料,观测时间间隔为 15min,本文只用了其表层流场资料。

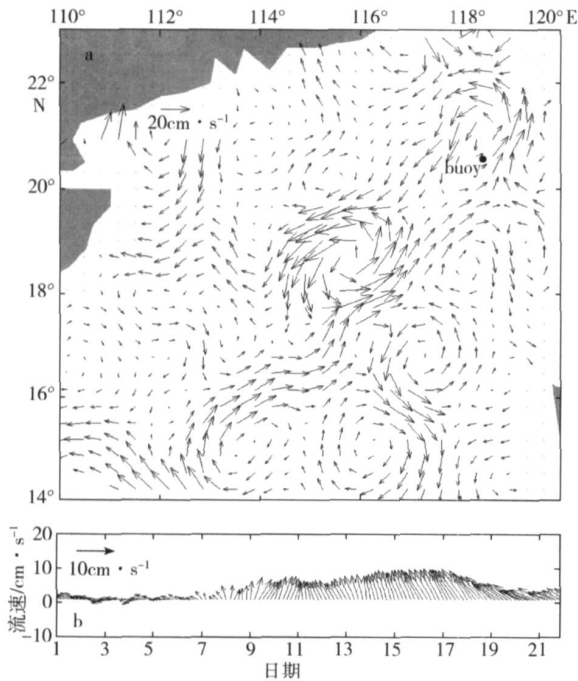


图 6 AVISO 融合的地转流场(a)以及南海东北部锚定测流站上 Long Ranger ADCP 测得表层流矢量的时间序列图(b)

融合的地转流场时间为 2000 年 9 月 6) 12 日; 锚定测流站的位置在图 5b 和图 6a 中都有标出, 时间序列为 2000 年 9 月 1) 21 日

Fig 6 Merged geostrophic current field from AVISO and time series of sea surface velocity from Long Ranger ADCP at mooring station in northeastern South China Sea

AVISO (the French Archiving, Validation, and Interpolation of Satellite Oceanographic Data) 融合的 2000 年 9 月 6 日至 9 月 12 日的地转流场(图 6a)与卫星高度计观测的第 244 周期(2000 年 9 月 7 日至 9 月 16 日)的海面高度场(图 5b)所揭示

的流场信息非常一致,说明此融合的地转流场充分体现出台风活动期间南海北部海面流场的情况。

从锚定站上 Long Ranger ADCP 测得的 2000 年 9 月 1) 21 日表层流矢量时间序列(图 6b)上可以看到,9 月 7 日台风经过后流速大幅增加,流场上出现大致北向的强流,此强流的出现正是南海对台风显著响应的表现;此后,强流一直持续到 9 月 17 日才开始减弱,期间还有轻微增强的趋势,这说明流场响应的恢复相对于响应发生而言需要较长的时间。

同时,融合的地转流场(图 6a)上测站所在位置的流场也是北向的,流速大小约为 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,这与测站上 ADCP 测得的流矢量无论大小还是方向都是一致的。卫星遥感结果与锚定站实测结果的这种良好一致性表明卫星高度计遥感分析结果是可信的。

3 讨论

台风 LEO 和 WUKONG 经过南海时,海面都出现了明显变化:它们经过时其轨迹附近海域的 SSHA 值都有不同程度的减小,海面动力高度是降低的;且发生响应的海域范围很广,甚至可以跨越 3 个纬度的距离。在热带气旋风场的作用下,气旋下方海洋的 Ekman 输运自气旋中心向外,表层海水以辐散流的形式离开中心,使得气旋中心下方海面降低,同时引起局地的环流结构发生变化,对水平输运过程起着重要作用;同时 Ekman 抽吸效应使温跃层的冷水上涌到混合层,引起强烈的湍流混合,造成混合层加深以及海表温度降低。热带低压形成时风速至少为 $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,5 级台风风场的最大风速甚至在 $69\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,这种高风速气旋型风场的作用足已引起大面积的海面变化,热带气旋强度越大,中心气压越低,近中心最大风速越大,从而发生响应的幅度和范围也越大;此外,海面响应的剧烈程度还与热带气旋的移速有关,移动比较缓慢的热带气旋易引起海面的显著响应。

对于 1999 年台风 LEO,气旋型涡出现在台风强度瞬时增强的海区,随着热带气旋增强而增加的海表风应力会产生强的湍流混合,气旋型涡的出现反映的正是海洋对热带气旋的这种负反馈作用。2000 年台风 WUKONG 在南海的移动路径极其复杂,短期内移动方向发生明显改变, Hu 等^[6]曾报道过打转类台风易引起海面产生气旋型涡的现象,对于此个例中转向类台风,由于其转向过程造成台风在海洋上空停留时间较长,对同一片海域影响时间也较长,从而也易于引起流场的强烈响应。值得

注意的是, 每年有很多从西太平洋移入南海的热带气旋, 不少发展为强热带风暴和台风, 其强度都较大, 但未观测到这种强烈的海洋响应, 推测其原因可能是由于这些移入南海的热带气旋移行路径通常并不复杂, 常见为西行, 且移速也较快, 对南海影响的时间还不够长; 同样, 南海局地生成的热带气旋, 当强度不够大或移速太快时, 也不易引起南海的强烈响应。

本文中这两个台风正是典型的具有移动缓慢和强度突变特征的个例。从海洋对这两个台风的显著响应可以看到, 热带气旋强度突变, 如短时间内强度剧烈增加, 或移行路径复杂、移行较缓时, 易于引起海洋的强烈响应。这两个个例中气旋型涡产生的原因略有不同, 但都出现在热带气旋经过后。热带气旋引起海面高度变化的时间尺度与热带气旋系统的时间尺度相比是滞后的, 而且也是缓慢的, 这是由大气和海洋两种流体介质的不同物理性质所决定的。

热带气旋增强过程中, 由于海表风速增加使大洋水气的蒸发速率加快, 导致潜热通量增加, 进一步促进热带气旋的发展; 但同时大洋系统也会产生负反馈, 随着热带气旋增强而增加的海表风应力会使得混合层加深、冷水上涌, 造成海表温度降低。热带气旋经过时引起 SST 的显著变化: 热带气旋经过后明显出现了大片的低温区, SST 降低 $2e$ 左右, 而且在热带气旋的中心附近观察到了冷涡的出现, 这些正是南海对热带气旋显著响应的表现。

图 7 显示了 2 个热带气旋个例中冷涡区 SST 的时间演变过程, 这里的 SST 是冷涡所在海域的 SST 区域平均的结果, 所选海域范围为图 3e 和图 5c 中黑色矩形所标示的范围。当台风 LEO 于 1999 年 4 月 30 号经过时, 海面就开始显著降温 (图 7a); 台风移走后 SST 继续降低, 到 5 月 2 日达最大降幅 ($> 2e$), 在台风尾迹上发展为冷涡; 此后 SST 以相对于降温而言缓慢得多的速度升温, 直至 5 月 25 日才恢复到台风经过前的情形。台风 WUKONG 引起冷涡的演变过程也很相似 (图 7b): 9 月 7 日台风经过时海面显著降温, 9 月 9 日达降温最大降幅 ($> 2e$), 在台风尾迹上发展出冷涡, 9 月 21 日 SST 才得以恢复到台风经过前的情形。可见, 海表温度对台风的响应是显著的, 降温发生得较快, 降幅也较大, 而 SST 的恢复过程却相对缓慢得多, 对于台风 LEO 的情形, SST 甚至需要十几天的时间才得以恢复。

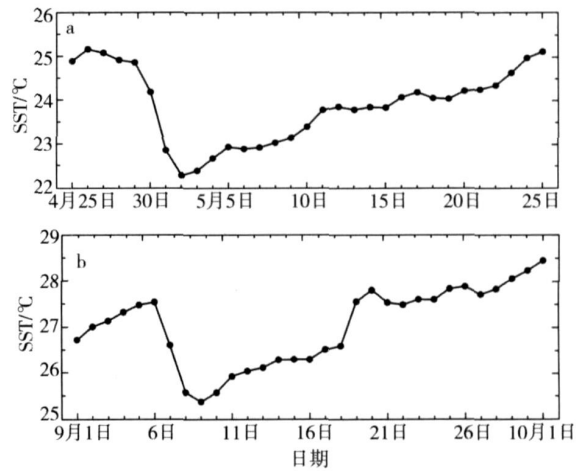


图 7 2 个台风眼区(冷涡)SST 时间序列图

a. 1999 年 4 月 25 日至 5 月 25 日(台风 LEO);

b. 2000 年 9 月 1 日至 10 月 1 日(台风 WUKONG)

Fig 7 Time series of SST of two cold eddies

4 结论

本文研究了 2 个南海局地生成的热带气旋 (1999 年台风 LEO 和 2000 年台风 WUKONG) 引起的南海北部海洋响应过程, 结果如下。

1) 台风 LEO 和 WUKONG 经过南海北部时, 海面都出现了明显变化: 海面高度降低以及流场上出现气旋型环流; 海表显著降温, SST 降低幅度为 $2e$ 左右, 在热带气旋的尾迹上出现冷涡; 降温发生得很快, 恢复过程却相对缓慢得多。

2) 热带气旋强度突变, 如短时间内强度剧烈增加, 或移行路径复杂、移行较缓时, 易于引起海洋的强烈响应。这种响应的时间和空间尺度都较大, 在热带气旋的尾迹上观测到的海面高度和流场的显著变化显示出响应较长的时间尺度, 至少 1 周; 且发生响应的海域范围很广, 甚至可以跨越 3 个纬度的距离。

参考文献:

- [1] 杨彩福, 谭杰, 徐海波. 南海热带气旋路径预报[J]. 海洋预报, 2001, 18(2): 30-38.
- [2] PRICE J F, THOMAS B S, GEORGE Z F. Forced stage response to a moving hurricane[J]. Journal of Physical Oceanography, 1994, 24(2): 233-260.
- [3] SIMON W C. Deep ocean response to hurricanes as revealed by an ocean model with free surface. Part I: Axisymmetric case[J]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15(12): 1847-1858.
- [4] SHAY L K, ELSEBERRY R T. Near-inertial ocean current

- response to hurricane Frederic[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1987, 17(8): 1249-1269.
- [5] O. BRIEN J J, REID R. The nonlinear response of a two layer, baroclinic ocean to a stationary axially symmetric hurricane. Part I: Upwelling induced by momentum transfer[J]. *Journal of Atmosphere*, 1967, 24: 191-207.
- [6] PUDOV V D, VARFOLOMEER A A, FEDOROV K N. Vertical structure of the wake of a typhoon in the upper ocean[J]. *Okeanologiya*, 1978, 18: 142-146.
- [7] BROOKS D A. The wake of Hurricane Allen in the western Gulf of Mexico[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13: 117-129.
- [8] 陈上及. 中国近海季风和热带气旋活动的气候特征及其对南海水文季节结构的影响[J]. *海洋学报*, 1994, 16(1): 1-11.
- [9] BLACK P G. Ocean temperature change induced by tropical cyclones[D]. 1983, Pennsylvania State University, University Park, 278.
- [10] LIN I I, LIU W T, WU C C, et al. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003a, 30(3): 1131-1134.
- [11] LIN I I, LIU W T, WU C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003b, 30(13): 1718-1722.
- [12] CHEN T, LIU C, CHUANG W S, et al. Enhanced buoyancy and hence upwelling of subsurface Kuroshio waters after a typhoon in the southern East China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2003, 42: 65-79.
- [13] FU L, CHRISTENSEN E J, YAMARONE C A J, et al. TOPEX/POSEIDON mission overview[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 24369-24382.
- [14] 李立, 许金电, 靖春生, 等. 南海海面高度动力地形和环流的周年变化))) TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究[J]. *中国科学*, 2002, 32(12): 978-986.
- [15] 李立, 吴日升, 郭小钢. 南海的季节环流))) TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究[J]. *海洋学报*, 2000, (6): 13-26.
- [16] HU J, KAWAMURA H. Detection of cyclonic eddy generated by looping tropical cyclone in the northern South China Sea: a case study[J]. *Oceanologica Acta Sinica*, 2004, 23(2): 213-224.
- [17] YANG H, LIU Q. Forced Rossby wave in the northern South China Sea[J]. *Deep Sea Research*, 2003, 1(50): 917-926.
- [18] QU T. Role of ocean dynamics in determining the mean seasonal cycle of the South China Sea surface temperature[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C4): 6943-6955.