

赤道海洋对罕见台风“画眉”的响应

单海霞¹, 管玉平², 王东晓², 黄建平¹

1. 兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 热带海洋环境国家重点实验室(中国科学院南海海洋研究所), 广东 广州 510301

摘要: 利用 GHRSSST L4、QuikSCAT、OAFLUX 以及 SeaWiFS L3 资料分析了近赤道罕见台风“画眉”生成前后海表温度 SST 及其感热通量、潜热通量和叶绿素 a 浓度的变化。在台风“画眉”生成之前, 中南半岛沿岸海表平均温度较其他区域低, 并且在南海盛行东北风, 在台风生成区有一明显的气旋性涡旋存在。南海北部地区潜热通量和感热通量均较大, 而在台风的生成区域仅感热通量较大。台风“画眉”使其路径右侧的区域发生海表温度降低, 相对于其他强度较强的台风降温较小, 海表温度在马来半岛以东洋面以及马六甲海峡降低明显, 降低约 2—2.5。与高纬度的台风类似, 台风“画眉”使中南半岛沿岸以及马来半岛与苏门答腊岛之间的地区叶绿素 a 浓度相对于台风前增大 0.6 mg·m⁻³ 以上。

关键词: 罕见台风“画眉”; 感热; 潜热; 叶绿素 a 浓度; 海洋响应

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2012)01-0028-07

Responses of equatorial ocean to rare typhoon Vamei

SHAN Hai-xia¹, GUAN Yu-ping², WANG Dong-xiao², HUANG Jian-ping¹

1. Key laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology, CAS), Guangzhou 510301, China

Abstract: We use GHRSSST L4, QuikSCAT, OAFLUX and SeaWiFS L3 data sets to analyze the change of sea surface temperature (SST), sensible heat flux, latent heat flux and chlorophyll-a concentration in the equatorial ocean where Typhoon Vamei passed through. Before Typhoon Vamei was generated, there was a significant cyclonic vortex over the equatorial region of the southern South China Sea, the average SST in the coastal region of South China Peninsula was lower than other regions, and northeasterly wind prevailed in this area. The latent heat flux and sensible heat flux were larger in the genesis location of Typhoon Vamei. As usual, the cooling occurred on the right side of the track of Typhoon Vamei. The SST decreased by about 2–2.5. However, compared to higher-latitude typhoons, the cooling was much small in this case. The region where SST decreased significantly was between the east of the Malay Peninsula and the Strait of Malacca. Similar to higher-latitude typhoons, Typhoon Vamei increased chlorophyll-a concentration in the coastal area between Sumatra and the Malay Peninsula by 0.6 mg·m⁻³ or more compared to the pre-typhoon value.

Key words: Typhoon Vamei; sensible heat flux; latent heat flux; chlorophyll-a concentration; oceanic response

理论上讲, 台风产生的必备条件之一是要存在足够的地转偏向力作用。由于科氏效应, 地转偏向力在赤道附近接近于零, 向南北两极增大。所以,

台风应当在“远离”赤道 5 个纬度以上的海面才能形成^[1-4]。然而, 自从 1886 年有台风记录以来, 尽管罕见, 但的确在距赤道 5 度以内的海区有台风生成,

收稿日期: 2010-06-29; 修订日期: 2010-10-28。孙淑杰编辑

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q11-02); 广东省联合基金项目(U0733002)

作者简介: 单海霞, 女(1985—), 山西省晋中市人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与海气相互作用研究。E-mail: karen0009@163.com

通信作者: 管玉平。E-mail: guan@scsio.ac.cn

如 1956 年的台风 Sarah 在 $3^{\circ}18'N$ ^[5]、1970 年的台风 Kate 在 $5^{\circ}N$ 附近^[3]、而 2001 年的台风“画眉”(Vamei) 甚至在 $1^{\circ}30'N$ 形成^[6]。迄今为止, 台风“画眉”是太平洋上观测到的形成纬度最低、距赤道最近的热带气旋。它于 2001 年 12 月 27 日在新加坡附近的海面形成, 联合台风警报中心当日 3 时直接把这个热带扰动升格为热带风暴, 日本气象厅在 6 时把它升格为热带风暴, 并命名为“画眉”。当时美军“Carl Version”号航母舰队正从阿富汗返航, 经过“画眉”的风眼, 并造成了损失。舰队实地记录“画眉”的海面持续风力最大为 $39m \cdot s^{-1}$, 阵风高达 $54m \cdot s^{-1}$, 作为美国海军下属机构的联合台风警报中心即时把“画眉”升格为台风^[7]。

“画眉”的特殊性引起了大气海洋学者对它的研究兴趣, 因为所有的条件都要像台风“画眉”^[6]那样巧合是百年一遇的事。DeMaria 等^[8]的数值研究表明, 与高纬度的热带气旋相比, 低纬度的热带气旋要小, 而且前期的加强也快得多。Chang 等^[6]用 NOGAPS(Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System)、QuikSCAT(Quick Scatterometer)和 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research)三套资料分析的结果认为, 台风“画眉”生成是热带常见的雷雨系统和冬季南海寒潮相互作用的结果; 而且东亚及南海的特殊地形, 使急速南下跨越赤道的强烈寒潮不大可能在其他赤道地区发生。一般情况下, 加里曼丹岛西岸的雷雨扰动虽然拥有热带的高温及水汽的能量, 但因为经常受岛屿地形的摩擦破坏, 加上缺乏地球自转的科氏力, 因而无法发展成台风。台风“画眉”生成前, 正好有个雷雨系统停留在马来半岛及加里曼丹岛之间狭窄的南海最南端海面, 同时有一股持续且强大的寒潮由华南及台湾岛附近南下南海。寒潮的强劲东北风穿越赤道, 在赤道附近从东北风变成西北风, 雷雨扰动系统正好夹在强风转向的地方, 它的北、西、南三边受到气旋式环流的寒潮强风围绕。雷雨系统的水汽凝结以及降雨过程的能量和气旋式环流持续交互作用, 使得原本微弱的雷雨扰动系统像陀螺般旋转最终发展成了台风。Juneng 等^[9-10]用第 5 代中尺度模式(Mesoscale Model 5, MM5)模拟了台风“画眉”的结构与演化, Chambers 等^[11]用 MM5 模拟了台风“画眉”的形成, 而 Liu 等^[12]用能量观点对台风“画眉”的成长进行诊断分析。对于台风“画眉”的研究, 无论是从观测资料还是数值模式角度均有许多研

究^[13-16]。不难看出, 已有对台风“画眉”的研究主要集中在其形成机制上, 而海洋对这个罕见台风是如何响应的, 还未见研究报道。本文旨在研究台风“画眉”形成后, 赤道海区的海表温度、湍流热通量(感热通量和潜热通量)和叶绿素 a 浓度是如何响应的, 以及这些响应与远离赤道台风的行为有何异同。

1 资料简介

本文所用的海温日资料来源于全球高分辨率海表温度(global high-resolution sea surface temperature, GHRST) L4 产品(<http://data.nodc.noaa.gov/ghrst/>), 其分辨率为 25km, 覆盖区域为 $89^{\circ}52'30''S$ — $89^{\circ}52'30''N$, 年限为 1981 年 9 月至今。在综合分析了现所有可用的海温资料的基础上, GHRST 可提供对海温的最佳估计。海表温度卫星数据初级产品由各国联合组成的区域数据集合处理中心(Regional Data Assembly Centres, RDAC)先发布, 然后该产品实时传输给由各国联合组成的全球数据分析中心(Global Data Analysis Centre, GDAC)。RDAC 合并各种卫星数据并结合实测资料进行质量控制, 通过融合技术得到统一为 netCDF 格式的区域海表温度数据产品, 该产品被称为 L2P 数据产品; GDAC 则在 L2P 产品的基础上进行再分析得到无间隙的全球海表温度数据 netCDF 格式产品, 该产品被称为 L4 数据产品。

感热和潜热通量日资料来源于客观分析海气通量(objectively analyzed air-sea fluxes, OAFlux)(<http://oafux.whoi.edu/data.html>), 该再分析资料包括卫星观测、海面浮标、船舶报和大气数值模式的再分析地面气象要素场等在内的多种类型资料。通过变分客观分析^[17]获得了相关气象场的最优估算值, 再由最新的热通量算法 COARE 3.0^[18]计算出湍流热通量, 即潜热通量和感热通量。资料水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 覆盖区域为 $89^{\circ}30'S$ — $89^{\circ}30'N$, 年限为 1958 年 1 月—2006 年 12 月, 与浮标实测值的偏差小于其他几套通量资料(ERA40、NCEP1 和 NCEP2)^[19], 改进了海气界面湍流热通量研究的数据资料。通量为正, 表示海洋释放热量; 通量为负, 表示海洋获得热量。

研究中所用的台风路径资料来自美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC), 该资料包括间隔 6h 的台风中心位置和最大风速。风场资料采用 QuikSCAT 卫星 L3 资料, QuikSCAT 卫星

由美国于 1999 年发射, 它上面所携带的 SeaWinds 微波散射计工作频率为 13.4GHz, 可测量海面后向散射系数。Ku 波段的海面后向散射系数对于海面风矢量的变化较为敏感, 它们之间的联系通常可用地球物理模型(geophysical model function, GMF)描述。通过对海面后向散射系数的测量, 可以反演出海面风矢量。本文采用数据为 QuikSCAT L3 逐日海面(10m) 风 矢 量 数 据 (http://aspera.jpl.nasa.gov/download/pub/ocean_wind/quikscat/L3/), 分为升轨和降轨数据, 空间分辨率为 25km, 风向精度为 20°, 风速精度在不同的风速区间分别为 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3— $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和 10% ($20\text{—}30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。为了与海表温度(sea surface temperature, SST)与感热潜热资料一致, 取每日两次数据的平均值作为该日的平均风场资料。

叶绿素 a 浓度数据是初级生产力计算的必要信息。研究中使用的是美国宇航局(National Aeronautics and Space Agency, NASA)提供的宽视场海洋水色扫描仪(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, SeaWiFS)L3 资料 (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>), 其空间分辨率为 9km, 本文使用的是 8 日平均资料。

为了说明台风的作用, 在比较时采用台风生成前以及无台风生成的 2002 年与台风“画眉”期间(12 月 26 日—次年 1 月 1 日)的平均场进行比较。

2 分析结果

台风“画眉”的最佳路径如图 1 所示。12 月 26 日在新加坡以东洋面形成一个热带低压, 到 27 号迅速增强为 1 类台风, 在新加坡东北约 60km 处的马来半岛南端登陆, 随后“画眉”横穿马六甲海峡, 在 12 月 28 日登陆苏门答腊岛。随后虽然“画眉”降为热带低压, 但并没在陆上消散, 它穿过苏门答腊岛, 于 12 月 29 日进入北印度洋的孟加拉湾, 其后重新发展, 31 日后开始减弱, 最终在 2002 年 1 月 1 日

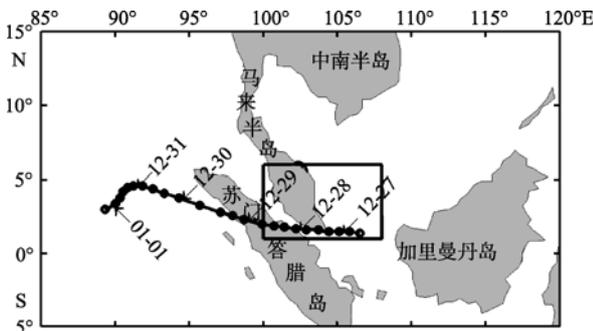


图 1 台风“画眉”路径
Fig. 1 Track of Typhoon Vamei

完全消散。

2.1 台风生成前的平均态

为了研究台风“画眉”的生成和发展过程以及它对 SST、潜热、感热通量的影响, 我们用台风生成前 5 天的平均场来代表台风生成前的平均状态。这里给出了台风“画眉”生成前 5 天的平均 SST、潜热、感热与风场的合成图(图 2)。在中南半岛沿岸海表平均温度较其他区域低, 平均温度低于 26.5°C , 并且在南海盛行东北风(图 2a), 这是因为从 12 月 19 日开始有一次寒潮过程, 有较强冷空气活动, 造成较强的 SST 降低。而在 $5^\circ\text{N}\text{—}5^\circ\text{S}$ 内, SST 普遍大于 28.5°C , 在马来半岛以及苏门答腊岛以东以及加里曼丹岛以西地区有一明显的气旋性涡旋存在。潜热通量(图 2b)在南海北部地区普遍大于 $200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 中国南海北部以及马来半岛以及苏门答腊岛以东洋面

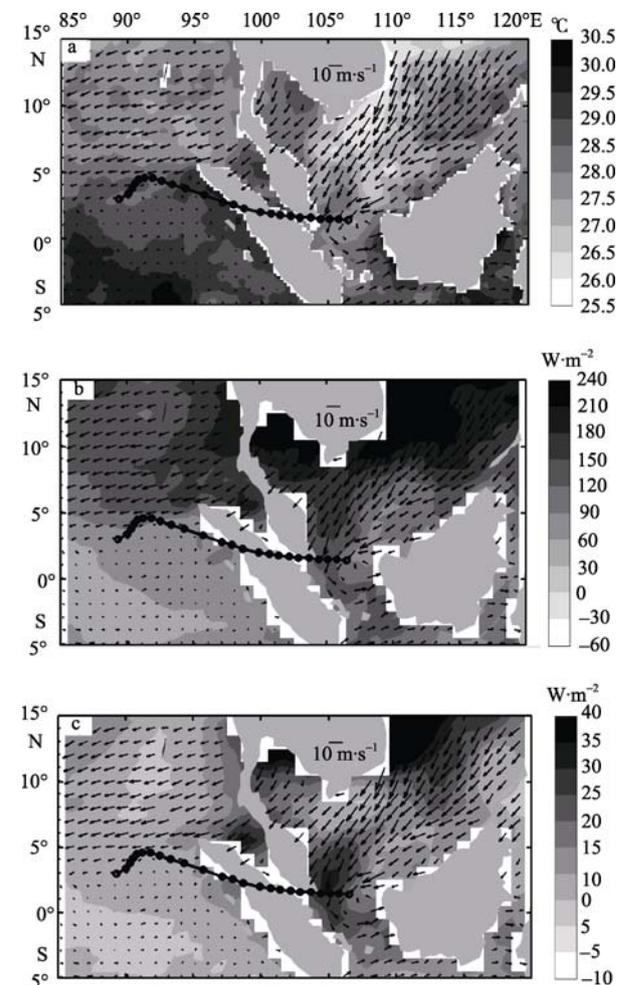


图 2 台风“画眉”生成前 5 天的平均 SST (a)、潜热(b)、感热(c)与风场(箭头)的合成图
图中黑色圆点连线表示台风路径
Fig. 2 Synthesis map of average SST (a), latent heat (b), sensible heat (c) and wind field (arrows) of 5 days before Typhoon Vamei was generated

有较大感热通量(图 2c), 大于 $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

2.2 SST、感热、潜热以及风场的空间与时间分布

图 3 为 12 月 31 日台风“画眉”相对于台风生成前的 SST、潜热和感热通量的差值场与当日平均风场和台风路径的合成图。在台风“画眉”活动期间, 中国南海南部地区一直为低温(图略), 这主要是由于强冷空气活动所造成。SST 下降是海洋对台风过程响应的一个基本特征, 台风“画眉”也不例外, 使其路径右侧的区域发生降温。由图 3a 中可以看到, 在马来半岛以东洋面以及马六甲海峡, SST 降低明显, 但相对于高纬度较强台风来说降温幅度较小, 平均降低约 $2\text{—}2.5$, 而台风“启德”^[20]和“玲玲”^[21]降温分别可达 9 和 11。台风伴随着天气尺度上最强烈的海气相互作用过程, 在这个过程中台风通过夹卷、抽吸等物理过程将冷水带到混合层, 使得海表面温度降低^[22]。

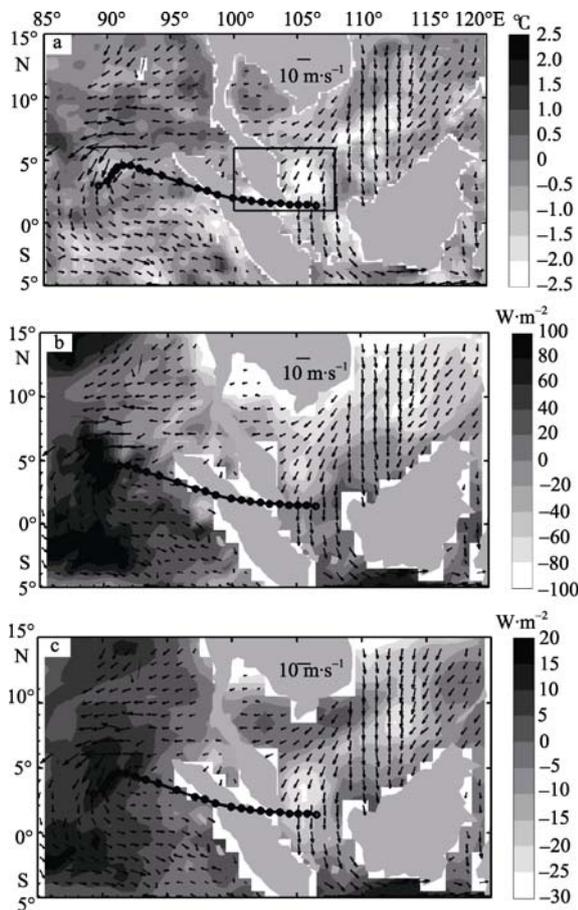


图 3 12 月 31 日 SST (a)、潜热(b)、感热(c)距平场和风场(箭头)的合成分布

图中黑色圆点连线表示台风路径; 图 3a 中黑色方框即图 1 中黑色方框所指的区域

Fig. 3 Synthesis map of SST (a), latent heat (b), sensible heat (c) anomaly fields and wind field (arrows) on 31 December 2001

海洋输送到大气感热通量和潜热通量是台风维持和发展的重要能量来源, 而热量通量又与海气界面温差和海面风速紧密相关。在台风生成和发展的整个过程中, 潜热均为正值, 即海洋加热大气。在台风中心的感热通量最低, 由台风中心向外感热通量逐渐增加, 在台风最大风速区附近达到最高值, 之后又向外逐渐减小。台风路径右侧有较大的感热, 这与台风右侧风应力较大有关。潜热的变化与此相似, 但与感热相比却不够明显(图略)。在较冷的海水上方, 由于大气低层的温度较低, 大气稳定度增加, 高层的动量就较难以下传, 低层风速因此减弱, 从图 3b 和 c 中可以看到, 在 SST 降低区感热与潜热均减小; 而在较暖的海水上方, 大气稳定度变小, 低层风速增加, 感热与潜热有所增加, 这在台风中心附近表现明显。

在南海南部区域($100^{\circ}\text{—}110^{\circ}\text{E}$ 、 $2^{\circ}\text{—}6^{\circ}\text{N}$, 称之为区域 A)台风“画眉”SST、感热、潜热变化比较显著。为了进一步说明台风“画眉”对此区域 SST、感热、潜热的影响, 我们计算了该区域内 SST 相对于台风生成前 5 日以及无台风年对应台风“画眉”生命期间(即 2002 年 12 月 26 日—2003 年 1 月 1 日)平均值的差值场的日平均值和日最小值(即此区域内 SST 降低的最大值, 如图 4)以及感热、潜热相对于台风生成前 5 日以及无台风年对应台风“画眉”生命期间的平均值的变化(图 5)。区域 A 的平均温度一直在降低, 这种降低在 2001 年 12 月 31 日达到最大, 相对于台风生成前降低了大约 2.5 , 最大降温达 2.7 , 此后海表温度开始恢复。相对于无台风年此区域温度的降低更为明显, 且变化趋势大体一致, 12 月 31 日相对于无台风年降低了大约 3.5 , 最大降温达 3.7 。

在区域 A 感热(图 5b)在台风生成后一直在减小, 并且在 12 月 31 日改变最大, 此后略有增加, 但变化已经不大。无论是相对于台风生成前还是无台风年, 感热的变化与 SST 的变化有很好的一致性, 表明此区域感热的变化主要受 SST 的影响, 并且相对于无台风年的变化要大。而潜热(图 5a)呈现周期性振荡特征, 自台风生成后有所减少, 在 12 月 28 日潜热增加 $50\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, 此后又迅速减小, 台风前、台风中和台风后潜热的变化趋势基本一致, 说明台风对于区域 A 的影响并不大。

2.3 叶绿素 a 浓度对台风“画眉”的响应

研究表明, 台风可以促进海洋浮游植物的生长,

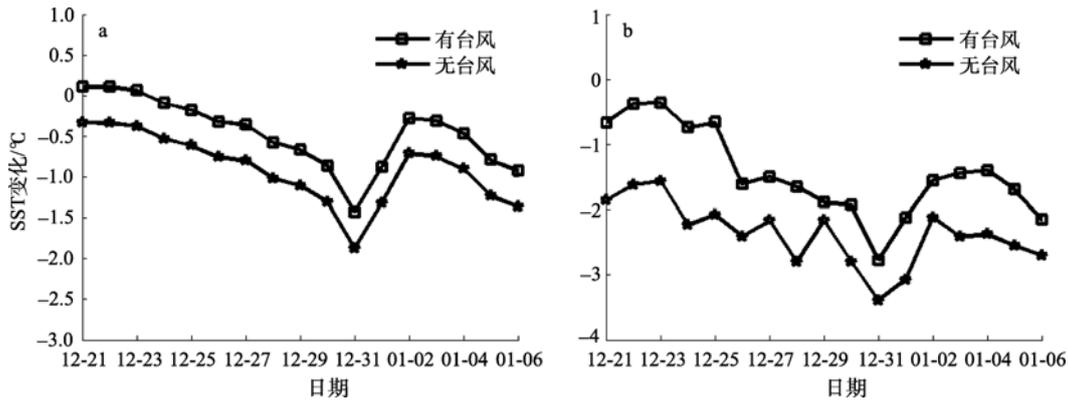


图 4 区域 A 内 SST 相对于台风生成前 5 日以及无台风年对应台风“画眉”生命期间的平均值降低的平均值(a)以及最大值(b)的时间序列

Fig. 4 Time series of average SST change (a) and maximum SST reduction (b) relative to 5-day average SST before typhoon's formation and mean SST corresponding to life cycle of Typhoon Vamei in no typhoon year in Region A

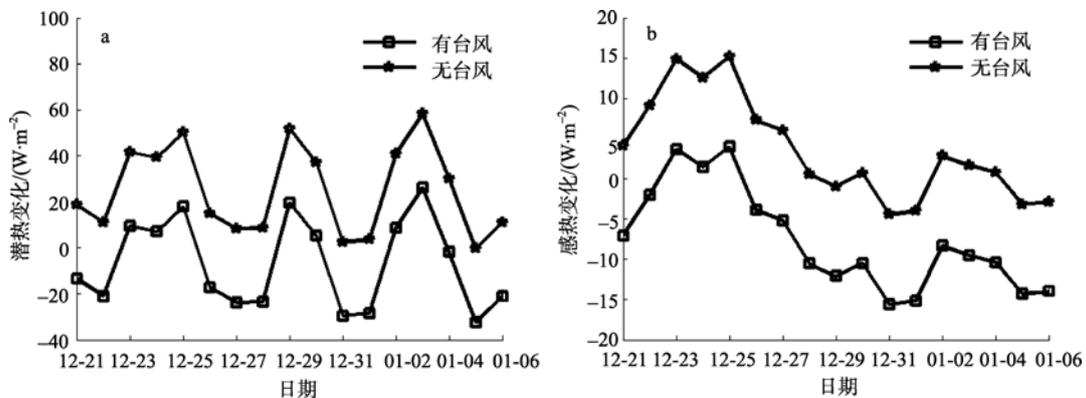


图 5 区域 A 内相对于台风生成前 5 日以及无台风年对应台风“画眉”生命期间的平均值的潜热(a)以及感热(b)变化平均值的时间序列

Fig. 5 Time series of changes in latent heat flux (a) and sensible heat flux (b) relative to 5-day average before typhoon's formation and mean latent and sensible heat flux corresponding to life cycle of Typhoon Vamei in no typhoon year in Region A

从而提高叶绿素 a 浓度及海洋初级生物生产力, 而海洋初级生产力在地球循环系统中扮演着重要的角色。但是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领域的定量分析与研究是目前的主要研究手段。Lin 等^[20]在对 2003 年掠过我国台湾岛以南巴林塘海域的台风“启德”(Kai Tak)的研究中指出, 台风“启德”使海表叶绿素 a 浓度增加了近 30 倍, 单独由此引起的固碳量^[23]是 0.8Mt, 换言之, 使南海每年的固碳量增加 2%—4%。Shi 等^[24]在对 2005 年登陆墨西哥海湾的台风 Katrina 的研究中发现, 由于该次台风在墨西哥海湾停留时间较长, 叶绿素 a 浓度从 $0.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 升到 $1.5\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2001 年 12 月的月平均叶绿素 a 浓度如图 6a 所示。由于基于卫星的叶绿素 a 浓度的反演通道在可见光范围内, 而可见光穿透云雾雨水的的能力有限,

在台风登陆期间受云及雨水的干扰, 因此有数据缺失。分析结果表明, 叶绿素 a 浓度在中南半岛沿岸以及马来半岛与苏门答腊岛之间的地区较大, 在 $0.24\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。图 6 中 b、c、d 分别为台风前、台风后的 8 日平均值以及台风后与台风前的 8 日平均值之差。相对于台风前, 大部分地区叶绿素 a 浓度均有所增大, 在中南半岛沿岸以及马来半岛与苏门答腊岛之间的地区(图 6d 中以黑色方框框出)叶绿素 a 浓度相对于台风前增大 $0.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 这是因为台风所引起海洋水体的垂直混合和上升流可以将海洋深层冷水区中营养盐输送到海表的真光层并引起浮游植物的旺盛生长。

3 小结

在台风“画眉”生成之前, 中南半岛沿岸海表平均温度较其他区域低, 并且在南海盛行东北风, 在

马来半岛以及苏门答腊岛以东以及加里曼丹岛以西地区有一明显的气旋性涡旋存在。感热通量和潜热

通量在南海北部地区均为大值区,而在台风的生成区域有较大的感热通量。

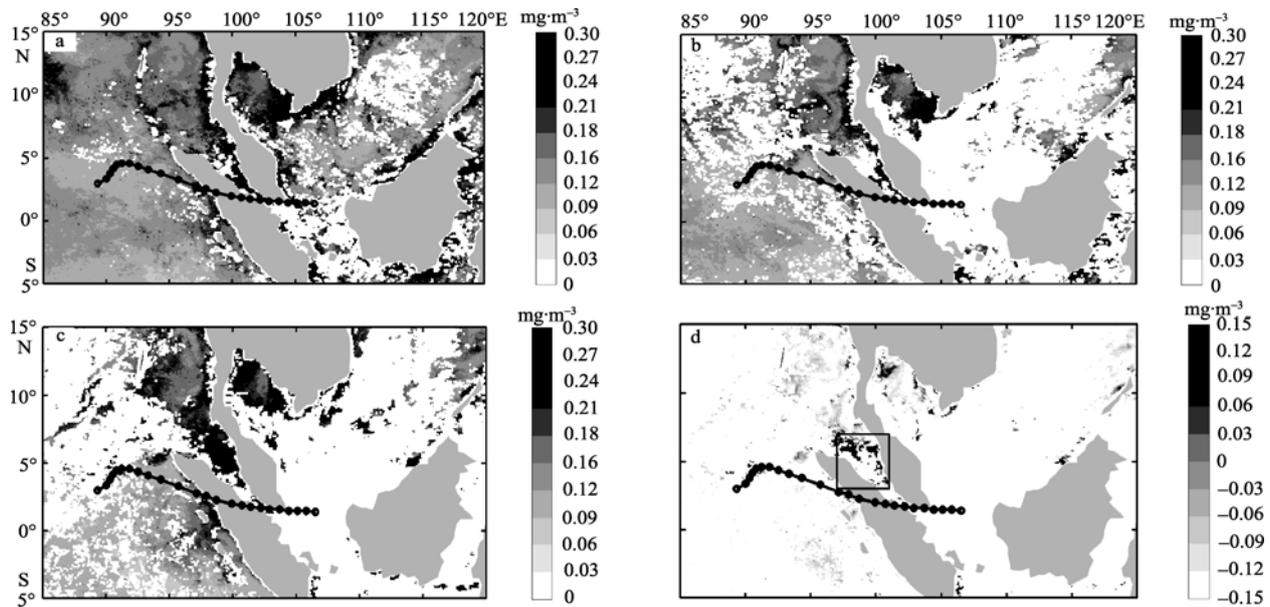


图 6 叶绿素 a 浓度的 2001 年 12 月平均值(a)、台风前的 8 日平均值(b)、台风后的 8 日平均值(c)及台风后与台风前的 8 日平均值之差(d)

图中黑色圆点连线表示台风路径。图 6d 中黑色方框所框为中南半岛沿岸以及马来半岛与苏门答腊岛之间的地区

Fig. 6 Chlorophyll-a concentration of monthly average in December 2001 (a), the 8-day average before the arrival of the typhoon (b) and after the typhoon (c) and the difference of before and after the typhoon (d)

SST 下降是海洋对台风过程响应的一个显著特征。台风“画眉”使其路径右侧的区域发生降温,在马来半岛以东洋面以及马六甲海峡 SST 降低明显,只是与高纬度强度较强台风相比降温较小,降低约 2—2.5 $^{\circ}$ C。在台风中心的感热通量最低,由台风中心向外感热通量逐渐增加,在台风最大风速区附近达到最大值,之后又向外逐渐减小。台风路径右侧有较大的感热,这与台风右侧风应力较大有关。潜热的变化与此相似,但与感热相比却不够明显。在较冷的海水上方由于大气低层的温度较低,大气稳定度增加,高层的动量就较难往下传,低层风速因此

减弱, SST 降低区感热与潜热均减小;而在较暖的海水上方,大气稳定度变小,低层风速增加,感热与潜热有所增加,这在台风中心附近表现明显。

台风能引起海洋水体的垂直混合和上升流形成,并将海洋深层冷水区中的营养盐送到海表的真光层并引起浮游植物的旺盛生长。研究表明,高纬度生成的台风“启德”使海表叶绿素 a 浓度增加了近 30 倍^[15]。与高纬度生成的台风类似,台风“画眉”使中南半岛沿岸以及马来半岛与苏门答腊岛之间地区的叶绿素 a 浓度相对于台风前增大 0.6mg·m⁻³ 以上。

参考文献

- [1] GRAY W. Global view of tropical disturbances and storms[J]. Mon Wea Rev, 1968, 96: 669-700.
- [2] ANTHES R A. Tropical cyclones: their evolution, structure and effects [M]. Boston: American Meteorological Society, 1982: 46-54.
- [3] HOLLIDAY C R, THOMPSON A H. An unusual near-equatorial typhoon[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 2674-2677
- [4] McBRIDE J L. Tropical cyclone formation[M]//ELSBERRY R L. Global perspective on tropical cyclones. Geneva: World Meteorological Organization, 1995: 63-105.
- [5] FORTNER L E. Typhoon Sarah, 1956[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1958, 39: 633-639.
- [6] CHANG C P, LIU C H, KUO H C. Typhoon Vamei: An equatorial tropical cyclone formation[J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(3): 1150. doi:10.1029/2002GL016365.
- [7] JOINT TYPHOON WARNING CENTER. Annual tropical cyclone report[R/OL]. Pearl Harbor: Naval Pacific

- Meteorology and Oceanography Center / Joint Typhoon Warning Center, 2001: 160. <http://www.usno.navy.mil/JTWC/annual-tropical-cyclone-reports>.
- [8] DeMARIA M, PICKLE J D. A simplified system of equations for simulations of tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45(10): 1542-1554.
- [9] TANGANG F T, JUNENG L, REASON C J. MM5 Simulated evolution and structure of typhoon Vamei (2001)[M]// CHEN Y-T. *Advances in geosciences, solid earth, ocean science & atmospheric science*. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2006: 191-207.
- [10] JUNENG L, TANGANG F T, REASON C J C, et al. Simulation of tropical cyclone Vamei (2001) using the PSU/NCAR MM5 model[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2007, 97: 273-290.
- [11] CHAMBERS C R S, LI T. Simulation of formation of a near-equatorial typhoon Vamei (2001)[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2007, 98: 67-80.
- [12] LIU G R, LIU C C, HUANG C S, et al. Diagnosing the growth of equatorial typhoon Vamei (2001) from an energy standpoint[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2010, 21(5): 817-827.
- [13] CHEN FEI, DU YAN, YAN LI, et al. Response of upper ocean currents to typhoons at two ADCP moorings west of the Luzon Strait[J]. *Chin J Oceanol Limnol*, 2010, 28(5): 1002-1011.
- [14] CHEN YING-JUN, XIE QIANG, MENG WEI-GUANG, et al. A numerical study of the influence of sea surface temperatures with different temporal resolutions on Typhoon Dujuan over the South China Sea[J]. *J Trop Meteorol*, 2010, 16(2): 195-200.
- [15] 孙璐, 王东晓, 胡建宇, 等. 南海北部海洋对局地生成热带气旋的响应[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(4): 11-19.
- [16] 张志旭, 齐义泉, 施平, 等. 波致应力对台风天气下南海上层海流的影响分析[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(1): 1-8
- [17] YU L, WELLER R A. Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice free oceans (1981-2005) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88: 527-539.
- [18] FAIRALL C W, HARE J E, GRACHEV A A, et al. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm[J]. *J Climate*, 2003, 16: 571-591.
- [19] YU L, JIN X, WELLER R A. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables[R]//OAFlux Project Technical Report. Woods Hole: Woods Hole Oceanographic Institution, 2008: 64.
- [20] LIN I I, LIU W T, WU C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(13), 1781. doi:10.1029/2003GL017141.
- [21] SHANG S, LI L, SUN F, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L10602, doi:10.1029/2008GL033502.
- [22] SAKAIDA F, KAWAMURA H, TOBA Y. Sea surface cooling caused by typhoons in the Tohoku area in August 1989 [J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 1053-1065.
- [23] 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]. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 (3): 1131. doi:10.1029/2002GL015674
- [24] SHI W, WANG M. Observations of a hurricane Katrina-induced phytoplankton bloom in the gulf of Mexico[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(2): L11607, doi: 10.1029/2007GL029724.