

琼东上升流区海表温度对台风过境的响应

谢玲玲^{1,2}, 何超凤^{1,2}, 李明明^{1,2*}, 田晶晶³, 经志友⁴

(1. 广东海洋大学, 广东 湛江 524088; 2. 广东省近海海洋变化与灾害预警重点实验室, 广东 湛江 524088;

3. 海南三亚国家级珊瑚礁自然保护区管理处, 海南 三亚 572000;

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

摘要:对 1982—2015 年间过境琼东上升流区的台风及其引起的海表温度(SST)变化进行统计分析,并探究 SST 变化的影响因素和热量输送机制。结果显示,与开阔大洋显著不同,琼东上升流区 SST 变化存在降温、基本不变和升温三种类型。在 42 例台风中,3 种类型分别为 19 例、20 例和 3 例。平均升温(2.1 °C)大于平均降温(-1.5 °C)。SST 变化与台风参量相关性分析显示,与台风过境时长相比,台风强度和台风入射角度对 SST 变化幅度影响更大。台风在外海引起的非线性海面孤立波向近岸的热输送可能是 SST 升温的重要机制,观测的 SST 上升与台风入射角度的关系与理论结果吻合。台风过境琼东上升流区引起的 SST 变化特征取决于台风局地热输送和外海热输送的相对大小。

关键词:台风; 琼东上升流; 海表温度; 台风入射角度; 海面孤立波

中图分类号: P72

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)01-0008-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.01.002

沿岸上升流是陆架海环流的重要组成部分,对物质输送起重要作用。上升流将底层和次表层水带至表层并向外海辐散,从而对海区的生态系统、渔业生产和气候特征产生直接影响^[1-5]。在中、低纬海区,台风作为海-气相互作用的剧烈过程,经常与沿岸上升流区不期而遇^[6]。台风引发沿岸上升流强度、范围及温盐结构等变化^[7-9],不仅直接影响局地海区的物质输送和生态系统,对全球碳循环和气候变化也有重要贡献^[10-11]。

海洋对台风响应的最显著特征就是海表温度(SST)的变化^[12]。在开阔大洋,台风引起海表降温,通常范围为-6~-1 °C(负号表示降温),而且台风路径右侧的降温幅度大于左侧^[13-16]。Lin 等^[17]和 Shang 等^[18]发现台风“Kai-Tak”和“Ling-Ling”在南海引起的最大降温甚至可达到-9 和-11 °C。在近海浅水区,受岸线、地形以及边界流等因素影响,台风引起的 SST 变化与开阔大洋有所不同^[7,19-21]。这表现在海温异常最大值可能出现在台风路径左侧^[22],以及台风过后出现海表升温的现象^[23]。在沿岸上升流区,Rao 等^[24]数值模拟了台风对孟加拉湾 SST 的影响,结果显示在沿岸上升流存在的情况下,垂直入射台风在近岸引起的降温明显偏弱,降温幅度仅为离岸海域降温幅度的一半。而在南海北部沿岸上升流区,李立和许金殿^[25]注意到台风过境大亚湾上升流区后,上层和下层海温均有上升。Pan 等^[8]分析了 3 个台风对粤东沿岸上升流水平流场的影响,发现上升流流场和温盐响应因台风强度和入射路径不同而各异。

琼东上升流发生在海南岛以东沿岸海域,是南海北部陆架季节性上升流的强中心之一^[26],通常发生在 4—9 月^[27],而该时段恰为台风多发季节。西北太平洋和南海生成的台风在副高的引导下向西或西北移动,部分台风过境琼东上升流区,二者必然发生相互作用。Su 等^[28]基于 2007 年和 2008 年的断面温盐资料,对比分析了台风对琼东上升流层结的影响,得出了台风使得上升流减弱的结论。许金电等^[29]研究发现,2006

收稿日期: 2016-04-08

资助项目:国家自然科学基金项目——热带气旋对琼东上升流动力过程和物质输送的影响机制研究(41476009);热带海洋环境国家重点实验室开放课题——琼东陆架海湍流混合季节变化研究(LTO1404)

作者简介:谢玲玲(1983-),女,山东莱芜人,副教授,博士,主要从事物理海洋学研究.E-mail:llingxie@163.com

* **通讯作者:**李明明(1984-),女,山东泰安人,讲师,博士,主要从事物理海洋学研究.E-mail:mingming.li@vip.126.com

(王 燕 编辑)

年台风“Jelawat”过后,海南岛东北部的海底温度升高。前人的这些研究成果给出了台风个例的影响,关于台风引起的琼东上升流区 SST 变化的统计规律和机制值得进一步研究。针对这个问题,本研究利用 1982—2015 年的卫星观测资料对近 34 a 过境琼东上升流区的台风及其引起的海表温度(SST)变化进行统计分析,分析 SST 变化和台风要素的关系,并对 SST 变化的动力机制进行初步探讨,以期为进一步探究沿岸上升流对台风过程的响应提供参考。

1 数据和方法

1.1 卫星数据

本文所用 2015 年以前的台风数据取自中国气象局热带气旋资料中心(网站 http://tcdata.typhoon.gov.cn/zljjsjj_zlhq.html),其中包括台风强度、台风中心位置、气压和 2 min 平均近中心最大风速,数据间隔为 6 h,时间跨度为 1949—2014 年。2015 年的台风数据取自 Joint Typhoon Warning Center(JTWC)的西太平洋台风数据,下载网址为 http://weather.unisys.com/hurricane/w_pacific/2015/index.php。按 GB/T 19201—2006《热带气旋等级》国家标准^[30],热带气旋强度分为热带低压(TD)、热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)和超强台风(Super TY)六个级别。本文所用“台风”是对全部级别热带气旋的统称。部分台风在过境研究区域时,风速低于热带低压风速 10.8 m/s,我们将其强度级别定义为弱热带低压(WTD)。

研究中使用的截至 2012 年的 SST 数据为 AVHRR pathfinder Version5.2 数据,由 National Oceanography Data Center (NODC)网站 <http://data.nodc.noaa.gov/pathfinder/Version5.2/> 下载。数据的空间分辨率为 4 km,时间分辨率为 12 h,时间跨度为 1982—2012 年(数据截止)。后续年份的 SST 数据由 Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST)的再分析产品补充,下载网站为 <http://opendap.jpl.nasa.gov/opendap/OceanTemperature/ghrsst/data/L4/GLOB/UKMO/OSTIA/>,数据的空间分辨率为 6 km,时间分辨率为 1 d,数据跨度自 2006 年至今,本研究选用 2013—2015 年。两种数据产品对 SST 的定义和产生方法不同,因而自然存在不大的系统偏差,该偏差对本研究的结果不产生实际性影响。

气候态月平均 SST 和风场分别来自 Asia-Pacific Data-Research Center (APDRC)和 National Climatic Data Center(NCDC),National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA),空间分辨率为 0.25°。

1.2 研究区域

南海北部 4—9 月气候态月平均 SST 和风场分布见图 1。可以看到,4 月南海北部陆架盛行东风,SST 低于 27 °C。5 月风场转向为东南偏南风,大部分海区 SST 升高。到 8 月风场为西南偏南风,离岸海区温度达到 29 °C 以上。9 月开始,风场转为东北风,外海 SST 开始下降。在外海随着夏季太阳辐射升高而升温时,海南岛东部沿岸的 SST 却始终比同纬度深海区温度低 1~2 °C。尤其是在 7 月,外海温度升至 29.5 °C,而琼东沿岸温度低于 28 °C。这就是琼东上升流区,其中心位置大约在 (115°30' E, 18°30' ~ 20°00' N) 以西近岸^[27]。前人多认为由夏季西南季风的离岸 Ekman 输送引起冷水涌升^[31]。本研究选择 18°12' ~ 20°00' N 沿岸 100 km 宽的条带状海域为研究区,如图 1 中红色实线圈定所示。

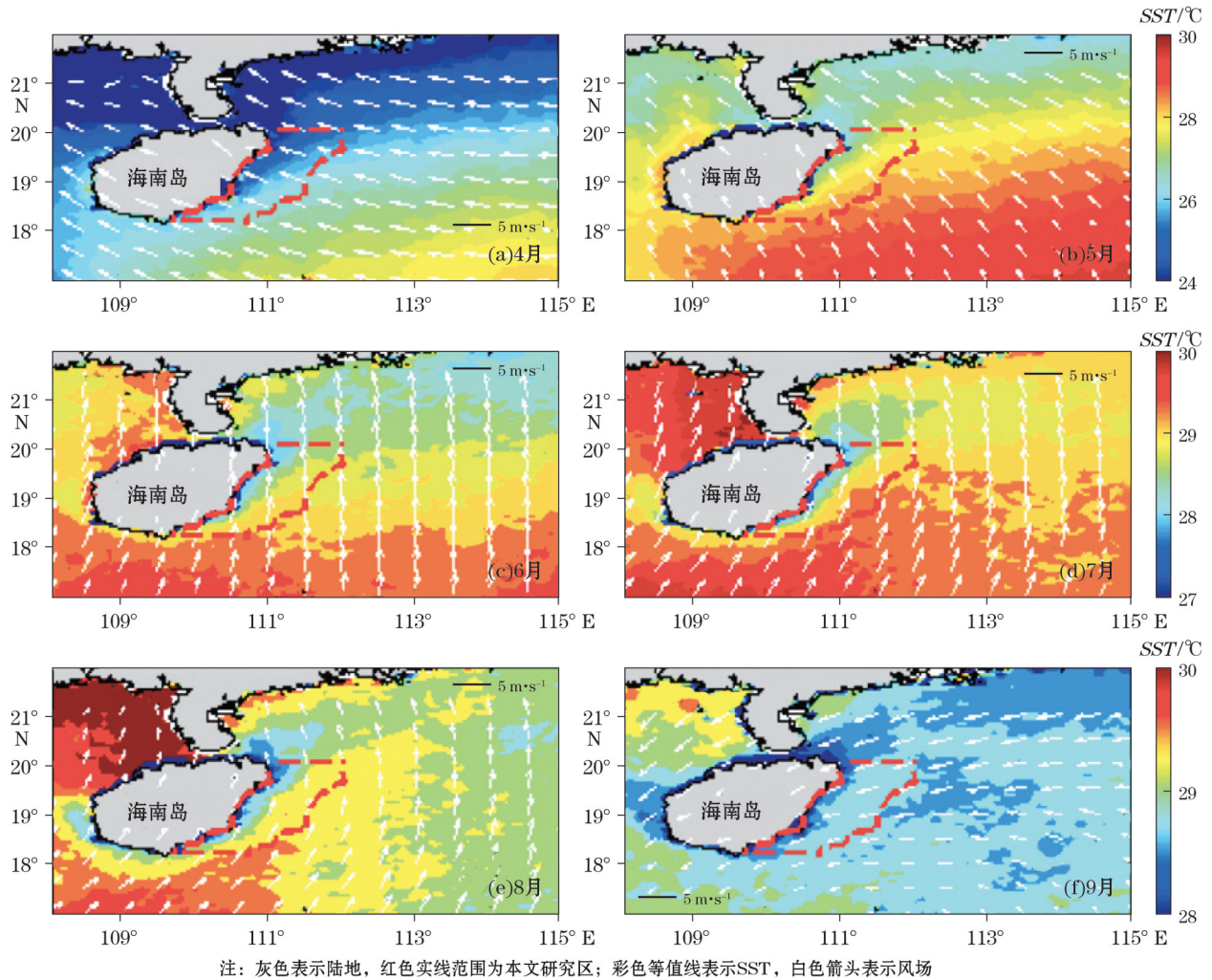


图1 南海北部4—9月气候态月平均的海表温度和风场分布

Fig.1 Climatological monthly mean sea surface temperature and wind vectors from April to September in the northern South China Sea

1.3 台风引起的 SST 变化

本研究定义台风中心到达研究上升流区的时间为到达时间 t_{begin} , 台风中心离开上升流区的时间为离开时间 t_{end} , 二者之差定义为台风在上升流区的过境时长 $\Delta t = t_{\text{end}} - t_{\text{begin}}$ 。前人的研究显示海洋对台风影响的记忆时长大约是一周^[9,32], 因此, 本文选取了台风过境前后 7 d 的平均海温作为分析基础资料。同时, 由于原始 SST 资料因云覆盖等原因存在空缺点, 7 d 平均使得研究区域的数据覆盖率得到了有效提高。定义台风到达时间前 7 d 内研究区的平均 SST 为台风前海表温度 SST_{pre} , 台风入境直到离境后 7 d 内研究区的平均 SST 为台风后海表温度 SST_{post} , 二者之差定义为台风过境琼东上升区引起的海表温度变化 ΔSST , 即

$$\Delta SST = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^N [SST_{\text{post}}(x_i, y_j) - SST_{\text{pre}}(x_i, y_j)], \quad (1)$$

式中, x_i 和 y_j 代表纬度和经度; N 为研究区域数据网格点的个数。

2 SST 对台风过境响应的统计分析

2.1 台风数量和路径

图 2 示出 1982—2015 年间过境琼东上升流区台风数量随年份和月份的分布直方图。在 34 a 间,共有 42 例台风过境研究区,年平均 1.2 例。其中 17 a 过境台风数为 1,11 a 过境台风数为 2。1989 年过境台风数最多,为 3 例,1987,1997,1999,2004 和 2012 年五个年份没有台风过境。从月分布来看,台风过境高峰期 6—8 月,亦即琼东上升流强盛期,共有 36 例,占过境台风总数的 86%,其中 7 月份最多,达到 18 例,占总数的 43%。在琼东上升流萌发的 4—5 月和逐渐消亡的 9 月,过境台风数量为 1~2 个。从台风级别来看,强热带风暴(STS)数量最多为 12 例,热带低压(TD)和台风(TY)次之,各有 10 例和 9 例,三类占台风总数的 74%。强热带风暴主要发生在 6—8 月,峰值出现在 7 月。最大级别的超强台风(Super TY)2014-07 出现 1 例。

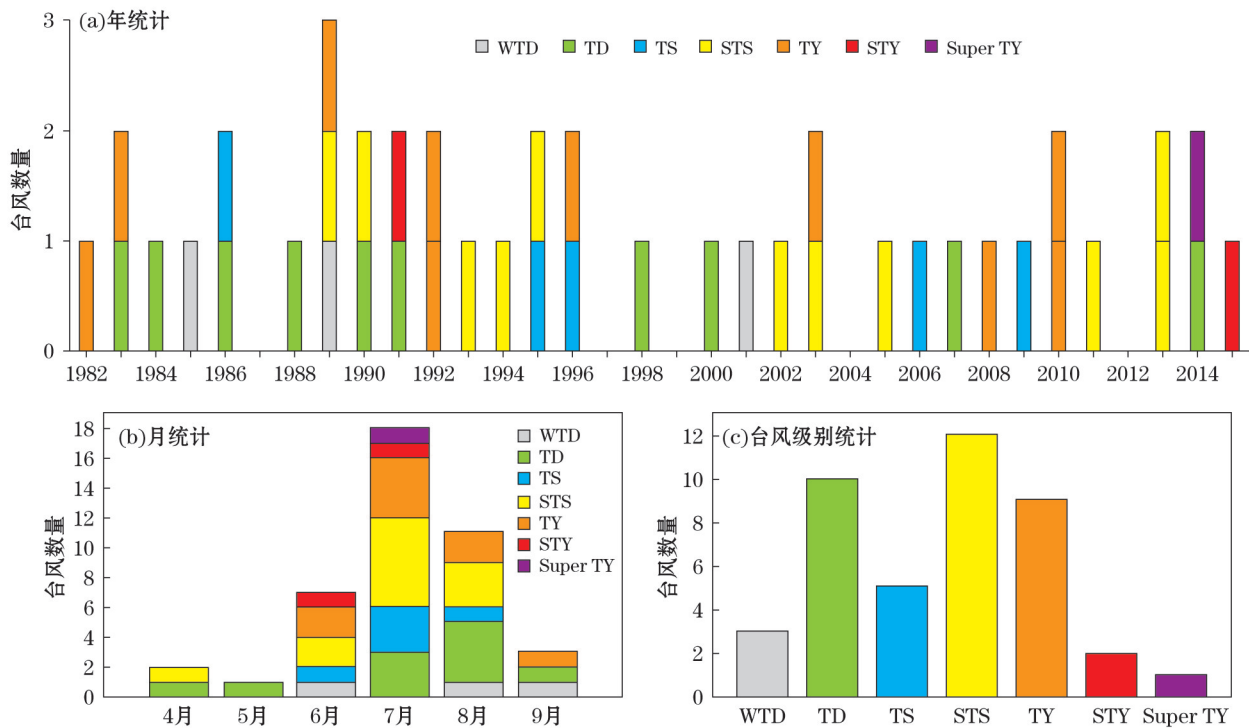


图 2 1982—2015 年 4—9 月过境琼东上升流区的台风数量统计

Fig.2 Statistics of number of typhoons passing over the upwelling zone east of Hainan Island during April to September of 1982 to 2011

图 3a~图 3f 示出 1982—2015 年间 4—9 月琼东上升流区的过境台风路径。由图可见,过境台风在西太平洋和南海海盆形成,二者分别为 24 例和 18 例。从月份来看,太平洋台风 7 月比例最高,南海土台风 8 月比例最高。台风移动方向以西北向为主,少数台风以西北偏北或与岸线近似平行的北向进入研究区。本研究定义台风进入研究区时台风路径与岸线走向之间的夹角为台风入射角,即台风路径平行于岸线走向向北为 0°,垂直于岸线走向向西为 90°。由图 3g 可知,25 例台风的入射角为 70°~90°,其中 17 例台风入射角为 80°~90°,几近垂直于岸线走向。入射角在 40°以下的台风为 2 例。

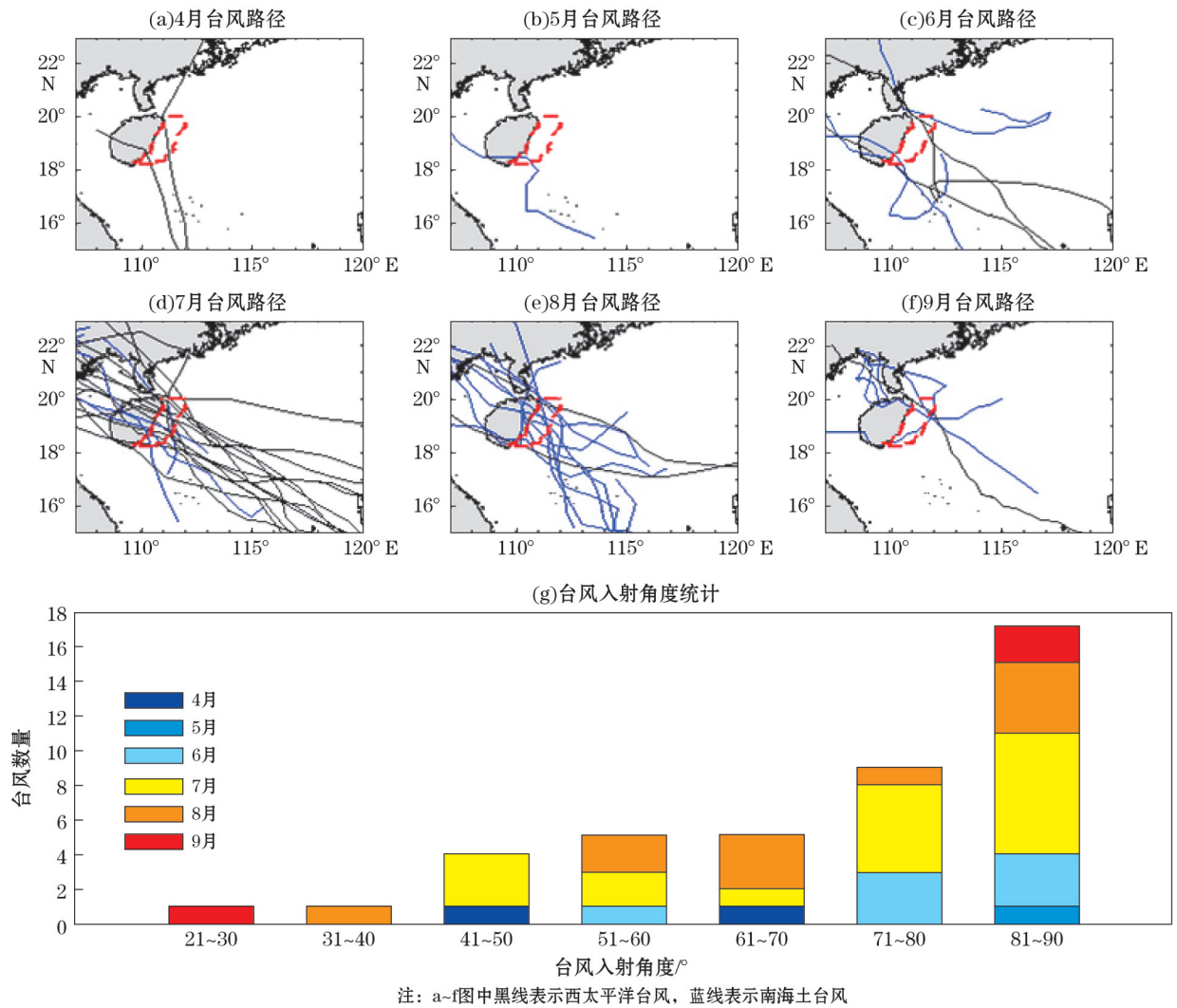


图3 1982—2015年间4—9月过境琼东上升流区的台风路径和入射角

Fig.3 Tracks and incidence angles of typhoons passing over the upwelling zone east of Hainan Island during April to September of 1982 to 2015

2.2 SST 变化

1982—2015年间42例台风过境琼东上升流区引起的SST变化见图4a。从图中可见,大多数台风过境引起琼东上升流区SST下降,其中1991年第二例台风(级别STY)引起的降温幅度最大, Δ SST达 $-2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;1985,1989和2001年三个年份SST出现升温,其中1985年的台风(级别WTD)引起的升温幅度最大, Δ SST达 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最大升温幅度大于最大降温幅度。这与开阔大洋中普遍存在的降温现象显著不同。

根据 Δ SST的幅度,我们将42例台风引起的SST变化分为3种类型:降温(Δ SST $<-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、无显著变化($-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\leq\Delta$ SST $\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)和升温(Δ SST $>0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)。图4b示出3种SST变化类型的统计结果。由图可见,降温类型共19例,占台风总数的45%, Δ SST集中 $-2\sim-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均 Δ SST为 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;无显著变化类型共20例,占台风总数的48%,其中 Δ SST偏正的个数大于偏负的个数,平均 Δ SST为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;升温类型共3例,占台风总数的7%, Δ SST为 $1.2\sim 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均 Δ SST为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均升温幅度大于降温幅度。

从月分布看,升温类型发生在6—9月,其中最大升温发生在6月。最大降温发生7月,其次为6月和8月。SST基本不变的情况主要发生在7月和8月,其中8月比例最高,超过50%。

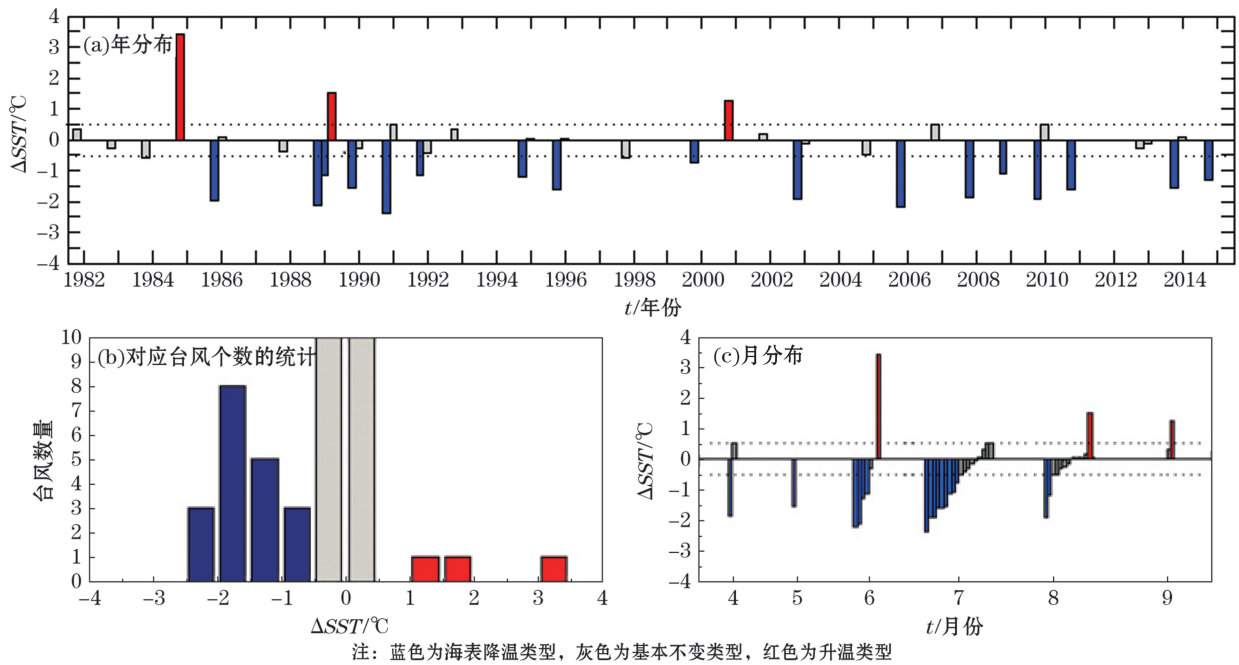


图 4 1981—2015 年间 42 例台风引起的琼东上升流区 ΔSST

Fig.4 SST change (ΔSST) induced by the 42 typhoons passing over the upwelling zone east of Hainan Island from 1982 to 2015

3 SST 变化与台风要素的统计关系

通常认为,在开阔海区台风强度和移动速度是影响 SST 降温的重要因素,强度较大或者移动较慢的台风引起的 SST 降温幅度较大^[33-36]。当台风移速较慢时,台风强度和移动速度同时影响降温,而快速移动的台风,降温幅度主要由台风强度控制^[35]。最新研究指出,台风入射角度和台风路径对近海 SST 变化也有重要作用^[8,37]。本研究区为琼东上升流区,在这一特定边界条件下,SST 变化与这些台风要素的关系,本节将分 3 种情况讨论,即升温类型、基本不变类型和降温类型。

图 5 示出台风过境后海表升温类型的 ΔSST 与台风最大风速、过境时长和入射角度之间的关系散点图。由图可见,3 例升温类型均发生在低风速(10 m/s)、台风强度为弱热带低压(WTD)时。台风过境时长在 5~9 h 之间,最大升温对应时长为 6 h。升温时 SST 变化与入射角度有明显相关性,升温幅度随入射角增加而增加,两者函数关系详见第 4 节。

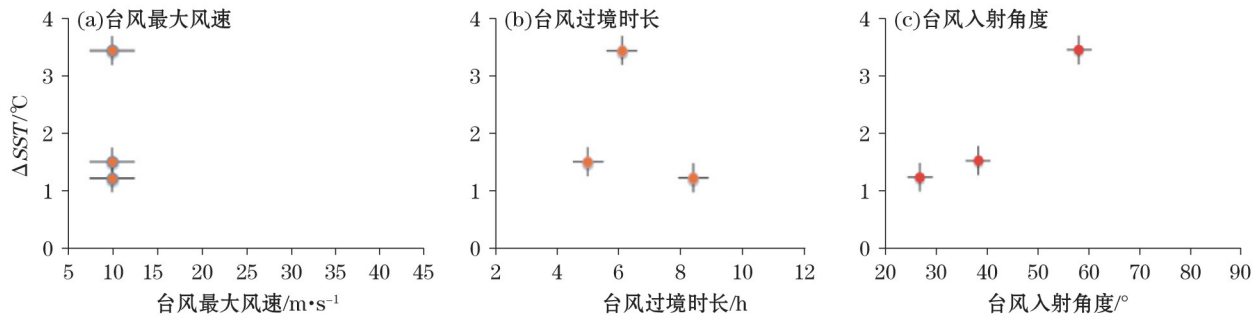


图 5 升温类型 ΔSST 与台风要素的关系

Fig.5 SST change vs.typhoon parameters in the case of increased SST

图 6 示出台风过境后海表温度基本不变类型的 ΔSST 与台风要素的关系散点图。由图可见,此类型在台风最大风速 $12 \sim 35 \text{ m/s}$, 过境时长 $2 \sim 12 \text{ h}$ 范围内均可发生, SST 变化对台风强度和过境时长不敏感。用线性函数拟合它们之间的关系, 得出斜率分别为 $3 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 和 $5.5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{h}$, 回归统计 R^2 仅有 10^{-3} 量级。统计显示, 此类型均发生在入射角 50° 以上, 且与入射角有微弱关系, 二者线性斜率为 $9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ$, R^2 为 0.11。

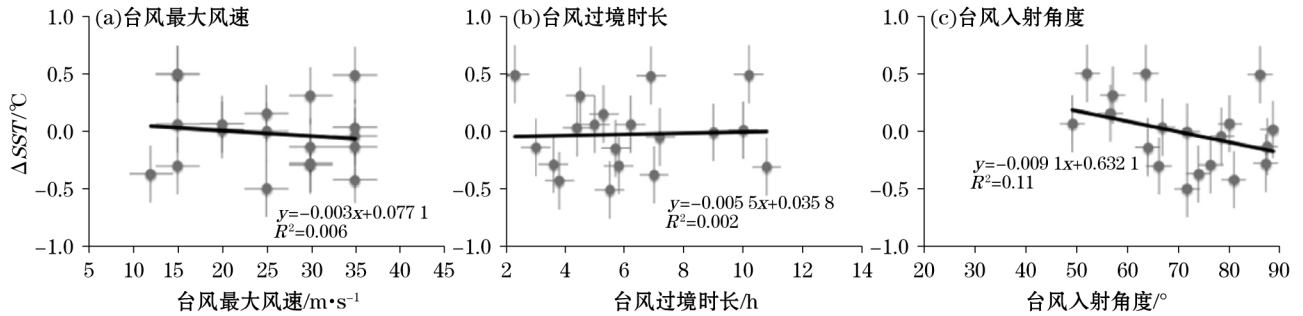


图 6 海表温度基本不变类型 ΔSST 与台风要素的关系

Fig.6 SST change vs.typhoon parameters in case of very slightly changed SST

图 7 示出台风过境后海表降温类型的 ΔSST 与台风要素的关系散点图。由图可见,此类型中降温幅度大体随着台风风速而增大,最大降温 $-2.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 发生在最大风速为 45 m/s 时,二者线性变化斜率为 $0.03 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, R^2 为 0.29。与台风过境时长的关系显示,降温多发生于过境时长小于 8 h , 其中时长小于 6 h 的有 12 例, 占降温类型总数的 71%。而降温幅度对过境时长不敏感,二者线性关系斜率仅为 $7 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{h}$, R^2 为 10^{-3} 量级。考虑对台风入射角的响应,降温类型均发生在入射角大于 50° 时,其中入射角度大于 70° 的有 14 例,占降温类型总数的 74%。降温幅度随入射角的增大有增大趋势,二者线性拟合斜率为 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ$, R^2 为 0.12。

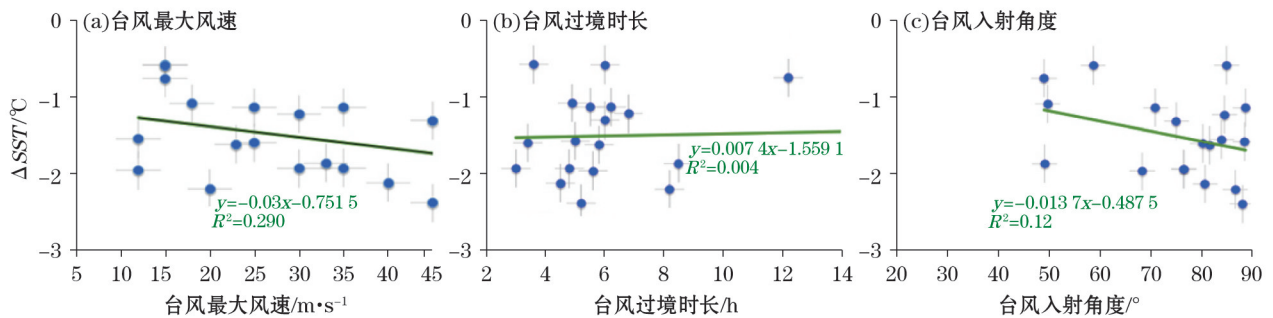


图 7 降温类型 ΔSST 与台风要素的关系

Fig.7 SST change vs.typhoon parameters in the case of decreased SST

以上分析可见,台风最大风速、过境时长和入射角度三个台风要素中,台风最大风速和入射角度对 SST 变化幅度的影响较大。其中,升温类型中入射角度是主要因素,降温类型中最大风速为主要因素,而 SST 基本不变类型对 3 个要素均不敏感。需要指出的是,尽管 SST 变化幅度对某个台风要素敏感,升温或降温类型的发生还依赖于其他台风要素。比如,升温类型均发生在低风速下,降温类型多发生在过境时长小于 6 h 等。

为进一步探究多种台风要素的共同作用,本文分析了 SST 变化的二维分布,如图 8 所示。升温类型发生在低风速 ($< 11 \text{ m/s}$)、低入射角 ($30^\circ \sim 60^\circ$) 和中等过境时长 ($5 \sim 8 \text{ h}$); 不变类型主要发生在中高风速 ($15 \sim 35 \text{ m/s}$)、中入射角 ($60^\circ \sim 75^\circ$) 和长过境时长 ($> 7 \text{ h}$) 时; 降温类型主要发生在高风速 ($> 25 \text{ m/s}$)、大入射角 ($80^\circ \sim 90^\circ$) 和短过境时长 ($< 7 \text{ h}$) 时。在大入射角时,降温幅度随着风速增大和时长增加有增大趋势。

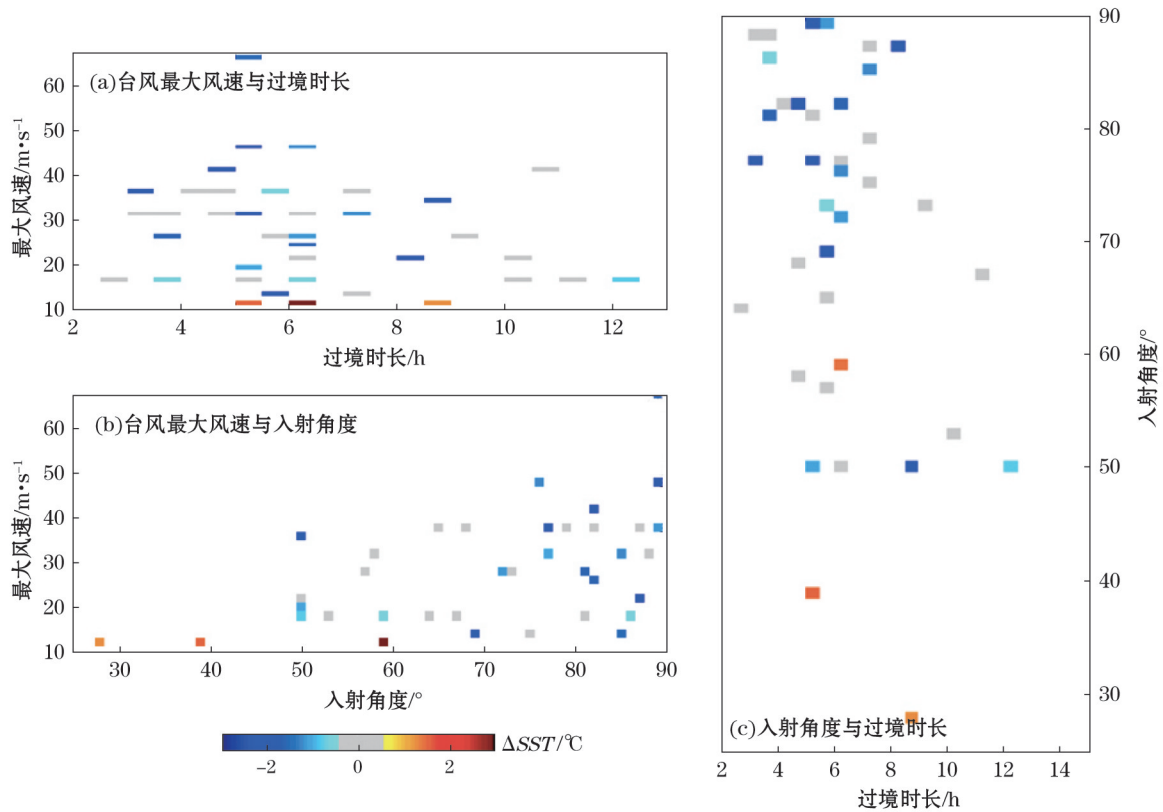


图 8 ΔSST 随台风要素的二维分布

Fig.8 2-D distribution of SST variation with typhoon parameters

进一步分析台风强度和过境时长对琼东上升流区 SST 的影响,我们将台风按照这两种因素进行分类。台风在上升流区过境时间 > 7 h 定义为长台风, ≤ 7 h 定义为短台风;台风中心最大风速 > 25 m/s 定义为强台风, ≤ 25 m/s 定义为弱台风。据此,过境上升流区的台风可划分为 4 种类型:长强台风、长弱台风、短强台风和短弱台风。

表 1 给出了 4 种类型台风引起的 ΔSST 的统计结果。可以看到,1982—2015 年间过境琼东上升流区的短强台风最多,有 16 例;短弱台风次之,有 15 例;长强台风最少,有 3 例。4 种类型台风引起的 SST 降温和升温情况各不相同。其中长强台风引起的降温幅度最大,达到 -1.87 °C;短强台风次之,降温为 -1.70 °C。这两个类型中无个例引起升温。短弱台风引起的 SST 升温幅度最大,平均幅度为 2.45 °C,高于平均降温幅度。4 种类型平均 SST 变化均为负值,说明了总体降温高于升温。就平均 SST 变化的绝对值而言,4 种类型引起的平均 SST 变化幅度均在 1 °C 左右,其中短弱台风的 SST 变化幅度最大,为 1.01 °C,长弱台风的 SST 变化最小,为 0.82 °C。

表 1 4 种不同类型台风过境前后琼东上升流区 SST 变化

Table 1 SST change for four types of typhoon passing over the upwelling zone east of Hainan Island

台风类型	台风总数	基本不变台风数	降温台风个数	升温台风个数	平均降温 /°C	平均升温 /°C	ΔSST /°C	ΔSST 绝对值 /°C
长强台风	3	2	1	0	-1.87	0	-0.53	0.94
长弱台风	8	4	3	1	-1.50	1.23	-0.38	0.82
短强台风	16	8	8	0	-1.70	0	-0.87	0.98
短弱台风	15	7	6	2	-1.22	2.45	-0.25	1.01

4 SST 变化机制分析

根据海洋热力学原理,台风过境引起的 SST 变化取决于研究区由台风过境引起的净热量变化。台风作为一种剧烈的局地扰动源,在向海洋输入动量过程中引发强烈垂向对流和湍流混合,这通常认为是海表降温的主要机制^[38-40]。台风强度越大、移动速度越慢,垂向泵吸和混合作用越强,因而降温也越大。把台风引起的垂向对流和混合作用所造成的上层海洋热量损失记为 Q_{vm} ,则 Q_{vm} 恒为负。可是,2.2节统计结果揭示,在 42 例过境琼东上升流区台风中,19 例引起 SST 下降,20 例 SST 无显著变化,还有 3 例出现了 SST 上升。这说明除 Q_{vm} 外,还有其他机制使得台风给研究海区带来正的热输送。

Pan 等^[8]在研究粤东上升流对台风的响应时,指出台风路径和上升流区的相对位置不同,会造成上升流响应不同。在上升流水平尺度比台风小很多情况下,当台风位于上升流区以南时,台风的气旋型风场改变了有利于沿岸上升流的西南向风场,风驱 Ekman 平流效应使得上层海洋为向岸流,从而抑制海水涌升。而当台风处在上升流区以北时,风驱动 Ekman 平流效应使得上层海洋为离岸流,从而增强上升流。上升流的加强或减弱,直接导致 SST 的下降或升高。这种局地台风风场和岸线作用下引发的 Ekman 平流输送,为上升流区 SST 变化提供了一种与开阔海区不同的机制。本研究把这种机制下台风引起的热量输送记为 Q_{Ea} ,其可正、可负,取决于台风路径和上升流区的相对位置。然而,本研究观测的 3 例海表升温台风,其中心路径分别在研究上升流区的南部($18^{\circ}48'N$ 以南)、中部($19^{\circ}00' \sim 19^{\circ}12'N$)和北部($19^{\circ}18'N$ 以北)转南。这说明台风风场局地 Ekman 输送 Q_{Ea} 只是 SST 变化的机制之一,似不能完全解释上述 3 例升温观测。

Zheng 等^[37]最新研究指出,台风在远离海岸的深海区会强迫海面产生高水位的孤立子,并沿着陆架向岸传播。由于非线性作用,向岸传播的孤立子波携带外海水体向近岸输送,从而为近海带来净热输送。本研究定义台风在外海引起的非线性孤立水体向岸输送为非局地非线性平流热输送,记为 Q_{ra} 。在沿岸上升流区,台风非线性孤立波携带水体相比上升流区为高温水,因而 Q_{ra} 恒大于 0。许金电等^[29]对海面高度和海温所做的同步观测表明,台风使得琼东海平面上升,海温随之升高,这为外海高温水体向岸输送提供了佐证。

Zheng 等^[37]的动力分析结果表明,台风引起的孤立子到达近岸时振幅大小(直接决定 Q_{ra} 大小)与台风入射夹角有关,其函数关系为

$$\beta_d \cong \alpha_1 \sin^{\frac{1}{2}} \theta \exp\left(-\frac{\alpha_2}{\sin \theta}\right), \quad (2)$$

式中, β_d 代表振幅大小; θ 为入射角度; α_1 和 α_2 是与陆架宽度、湍黏性系数及孤立波传播速度有关的参量,详细定义见 Zheng 等^[37]。我们将观测 3 例 SST 上升超过 $1^{\circ}C$ 的 SST 变化按 $5^{\circ}C$ 进行归一化处理,再探究其与台风入射角度的关系。图 9 显示归一化后 ΔSST 随入射角度(三角)的变化与 Zheng 等^[37]的理论结果(曲线)很吻合,相关系数达到 0.96。这说明,台风外海非线性孤立波热量输送 Q_{ra} 是琼东上升流区 SST 增温的重要机制。当然,这一重要机制尚待更多观测数据再证实。

综上,在不考虑台风过境时的热辐射变化,台风在琼东上升流区引起的热量变化可分为两大项:一是非局地热输送 Q_r ,由台风

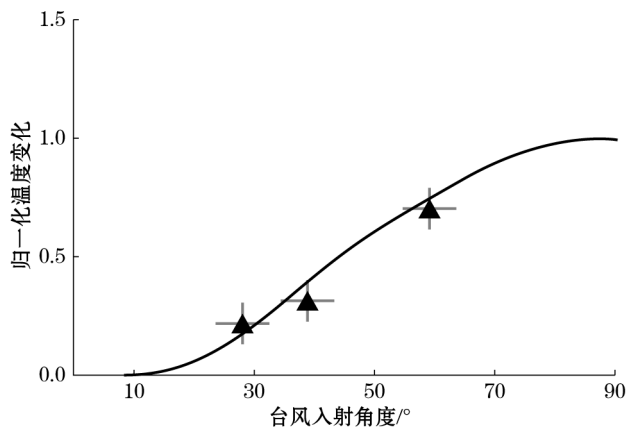


图 9 海面升温型 SST 变化与台风入射角度的关系

Fig.9 SST change vs.incidence angle of typhoon for the case of increased SST

在外海引起的非线性孤立水体向岸输送引起, $Q_r = Q_{ra}$, 恒为正; 二是台风动量在局地引起的热输送, 记为 Q_1 , 包括垂向对流和混合过程引起的热量变化 Q_{vm} 和台风风场近岸 Ekman 输送 Q_{Ea} , Q_{vm} 恒为负, Q_{Ea} 可正可负, $Q_1 = Q_{vm} + Q_{Ea}$, 可正、可负。于是, 台风引起的净热量为

$$Q_{net} = Q_r + Q_1, \quad (3)$$

其结果则会出现 3 种情况:

$$Q_{net} \begin{cases} > 0 & \text{若 } Q_1 > 0 \text{ 或 } Q_r > Q_1 \\ = 0 & \text{若 } Q_1 < 0 \text{ 且 } Q_r = -Q_1 \\ < 0 & \text{若 } Q_1 < 0 \text{ 且 } Q_r < -Q_1 \end{cases} \quad (4)$$

本文对 42 例台风过境琼东上升流区 SST 响应的统计显示, 升温、基本不变和降温三种情况出现的概率分别是 7%, 48% 和 45%。如前文所述, Q_r 和 Q_1 与台风强度、移动速度、入射角度以及相对上升流区的位置等多种因素相关。这些台风要素的不同配置, 使得 Q_r 和 Q_1 相对大小不同, 由此导致 SST 变化特征不同。

6 结 论

本文通过对 1982—2015 年间过境琼东上升流区的台风及其引起的 SST 变化的统计分析, 探究沿岸上升流区 SST 对台风过境的响应规律, 发现与开阔大洋不同, 研究区 SST 变化有降温、基本不变和升温三种变化类型, 对其发生机制进行了初步探讨。主要结论如下:

1) 1982—2015 年间, 共有 42 例台风过境琼东上升流, 其中约 90% 的台风过境发生在上升流强盛期 6—8 月份, 50% 的台风为热带低压和强热带风暴, 56% 的台风入射角度大于 70° 。

2) 与开阔大洋显著不同, 42 例台风过境琼东上升流区 SST 变化出现降温 ($\Delta SST < -0.5^\circ\text{C}$)、基本不变 ($|\Delta SST| \leq 0.5^\circ\text{C}$) 和升温 ($\Delta SST > 0.5^\circ\text{C}$) 三种类型, 出现概率分别为 45%, 48% 和 7%。

3) 相比于台风过境时长, 台风强度和台风入射角度对 SST 变化幅度影响较大。升温类型发生在低风速时 ($< 11 \text{ m/s}$), 升温幅度随台风入射角度增大而增大。降温主要发生高入射角时 ($70^\circ \sim 90^\circ$), 降温幅度随台风最大风速增大呈增大趋势。基本不变类型对台风要素不敏感。

4) 本研究发现台风在外海引起的非线性孤立波的向岸热输送可能是引起 SST 显著升温的重要机制, 观测结果与理论结果吻合, 相关系数为 0.96。进一步分析表明, 台风过境琼东上升流区引起净热通量取决于局地垂向对流和混合的热损失、局地 Ekman 水平热输送/损失以及外海非线性孤立波热输送之和, 三者相对大小决定了 SST 变化。关于 3 种 SST 变化具体发生的条件和机制还有待进一步探讨。

参考文献 (References):

- [1] PAULY D, CHRISTENSEN V. Primary production required to sustain global fisheries[J]. Nature, 1995, 374(6537): 255-257.
- [2] TANG D L, KAWAMURA H, GUAN L. Long-time observation of annual variation of Taiwan Strait upwelling in summer season[J]. Advance in Space Research, 2004, 33(3): 307-312.
- [3] HONG H S, CHAI F, ZHANG C Y, et al. An overview of physical and biogeochemical processes and ecosystem dynamics in the Taiwan Strait[J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(6): S3-S12.
- [4] LACHKAR Z, GRUBER N. Response of biological production and air-sea CO_2 fluxes to upwelling intensification in the California and Canary Current Systems[J]. Journal of Marine Systems, 2013(109-110): 149-160.
- [5] LORENZO E D. Climate science: The future of coastal ocean upwelling[J]. Nature, 2015, 518(7539): 310-311.
- [6] D'ASARO E, BLACK P, CENTURIONI L, et al. Typhoon-ocean interaction in the western North Pacific: Part 1[J]. Journal of Oceanography, 2011, 24(4): 24-31.
- [7] ZHANG S W, XIE L L, HOU Y J, et al. Tropical storm-induced turbulent mixing and chlorophyll-a enhancement in the continental shelf southeast of Hainan Island[J]. Journal of Marine Systems, 2014, 129(2): 405-414.
- [8] PAN A J, GUO X G, XU J D, et al. Response of Guangdong coastal upwelling to the summertime typhoons of 2006[J]. Science China:

- Earth Sciences, 2012, 55(3): 495-506.
- [9] CHANG Y, LIAO H T, LEE M A, et al. Multisatellite observation on upwelling after the passage of Typhoon Hai-Tang in the southern East China Sea[J]. Geophysical Research Letter, 2008, 35(3): 154-175.
- [10] ANDERSON R F, ALI S, BRADTMILLER L I, et al. Wind-driven upwelling in the southern ocean and the deglacial rise in atmospheric CO₂[J]. Science, 2009, 323(5920): 1443-1448.
- [11] DAI M H, CAO Z M, GUO X H, et al. Why are some marginal seas sources of atmospheric CO₂[J]. Geophysical Research Letter, 2013, 40: 2154-2158.
- [12] CHEN D K, LEI X T, WANG W, et al. Upper ocean response and feed back mechanisms to typhoon[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1077-1086. 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1077-1086.
- [13] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11(2): 153-175.
- [14] BENDER M A, GINIS I, KURIHARA Y. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D12): 23245-23263.
- [15] DICKEY T, FRYE D, MCNEIL J, et al. Upper-ocean temperature response to Hurricane Felix as measured by the Bermuda testbed mooring[J]. Monthly Weather Review, 1998, 126(5): 1195-1201.
- [16] WANG X D, HAN G L, QI Y Q, et al. Impact of barrier layer on typhoon-induced sea surface cooling[J]. Dynamic of Atmospheres & Oceans, 2011, 52(3): 367-385.
- [17] 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 Letter, 2003, 30(13): 51-1-51-4.
- [18] SHANG S L, LI L, SUN F Q, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001[J]. Geophysical Research Letter, 2008, 35(10): 156-167.
- [19] SMITH N P. Response of Florida Atlantic shelf waters to Hurricane David[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(C3): 2007-2016.
- [20] BINGHAM F M. Physical response of the coastal ocean to Hurricane Isabel near landfall[J]. Ocean Science, 2007, 3(1): 159-171.
- [21] MAHAPATRA D K, RAO A D, BABU S V, et al. Influence of coast line on upper ocean's response to the tropical cyclone[J]. Geophysical Research Letter, 2007, 34(17), L17603, doi: 10.1029/2007GL030410.
- [22] LAI Q Z, MA L M, HUANG W, et al. The ocean response to Typhoon Morakot (2009) in the western North Pacific boundary zone[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(3): 65-77. 赖巧珍, 马雷鸣, 黄伟, 等. 台湾岛附近海洋对 0908 号台风“莫拉克”的响应特征[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 65-77.
- [23] LIAN X H, GE L L. Analysis of impacts of typhoons on sea surface temperature of coastal region of Jiangsu Province[J]. Journal of Aquaculture, 2014, 35(10): 37-42. 梁晓红, 葛黎丽. 台风对江苏近海海表温度的影响分析与探讨[J]. 水产养殖, 2014, 35(10): 37-42.
- [24] RAO A D, BABU S V, DUBE S K. Impact of a tropical cyclone on coastal upwelling process[J]. Natural Hazards, 2004, 31(2): 415-435.
- [25] LI L, XU J D. Notes on response of coastal waters to typhoon passage-response of Daya Bay hydrological conditions to Typhoons No. 8708 and No. 8710[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1994, 13(3): 213-218. 李立, 许金殿. 近海对台风的响应标记: I. 大亚湾海况对 8708 和 8710 号台风的综合响应[J]. 台湾海峡, 1994, 13(3): 213-218.
- [26] WU R S, LI L. Review of upwelling in the South China Sea[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(2): 269-277. 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 269-277.
- [27] XIE L L, ZHANG S W, ZHAO H. Overview of studies on Qiongdong upwelling[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(4): 35-41. 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 琼东上升流研究概述[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 35-41.
- [28] SU J, WANG J, POHLMANN T, et al. The influence of meteorological variation on the upwelling system off eastern Hainan during summer 2007-2008[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(6): 717-730.
- [29] XU J D, CAI S Z, XUAN L L, et al. Study on coastal upwelling in eastern Hainan Island and western Guangdong in summer 2006[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(4): 11-18. 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 2006 年夏季琼东、粤西沿岸上升流研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 11-18.
- [30] 热带气旋等级: GB/T 19201-2006[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2006.
- [31] JING Z Y, QI Y Q, HUA Z L, et al. Numerical study on summer upwelling system in the northern continental shelf of the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(2): 467-478.
- [32] LIU Z H, XU J P, ZHU B K, et al. The upper ocean response to tropical cyclones in the northwestern Pacific during 2001-2004 by Argo data[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(1): 123-131. 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): 123-131.
- [33] XU W L. The impact of typhoon on sea surface temperature[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. 徐文玲. 台风对海表温度的影

- 响[D].青岛:中国海洋大学,2007.
- [34] DARE R A,MCBRIDE J L.Sea surface temperature response to tropical cyclones[J].Monthly Weather Review,2011,139: 3798-3808.
- [35] LIANG P,GUAN S D,ZHAO W,et al.Influence of tropical cyclones parameters on the sea surface temperature cooling[J].Journal of Ocean University of China (Natural Science),2014,44(8): 11-17.梁朋,管守德,赵玮,等.热带气旋各个要素对于海表面降温的影响[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014,44(8): 11-17.
- [36] SUN L,WANG D X,HU J Y,et al.Responses of upper layer of the northern South China Sea to two locally-generated tropical cyclones [J].Journal of Tropical Oceanography,2008,27(4): 10-18.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): 10-18.
- [37] ZHENG Q A,ZHU B,LI J,et al.Growth and dissipation of typhoon forced solitary continental shelf waves in the northern South China Sea[J].Climate Dynamics,2014,45(3): 853-865.
- [38] LEI F M,JIANG Y W.Mechanism of the ocean water cooling caused by Typhoon Sinlaku in 2008[J].Journal of Xiamen University (Natural Science),2012,51(5): 903-910.雷发美,江毓武.2008年台风森拉克引起上层海水降温的机制[J].厦门大学学报(自然科学版),2012,51(5): 903-910.
- [39] PRICE J F,SANFORD T B,FORRISTALL G Z.Forced stage response to a moving hurricane[J].Journal of Physical Oceanography,1994,24(2): 233-260.
- [40] ZHANG Y W,TIAN J W.Enhanced turbulent mixing induced by strong wind on the South China Sea shelf[J].Ocean Dynamics,2014,64(6): 781-796.

Response of Sea Surface Temperature to Typhoon Passages Over the Upwelling Zone East of Hainan Island

XIE Ling-ling^{1,2}, HE Chao-feng^{1,2}, LI Ming-ming^{1,2}, TIAN Jing-jing³, JING Zhi-you⁴

(1.Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2.Guangdong Key Laboratory of Coastal Ocean Variability and Disaster Prediction, Zhanjiang 524088, China;

3.Administration of Hainan Sanya Coral-Reef National Nature Reserve, Sanya 572000, China;

4.Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea China Institute of Oceanography,

Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China)

Abstract: This study analyzes the statistical features of typhoons passages over the upwelling zone east of Hainan Island and the induced variation of sea surface temperature (SST) from 1982 to 2015. The results indicate that the SST change in the studied area can be divided into three categories: increased SST, very slightly changed SST, and decreased SST. These are quite different from the case in the open ocean, in which only the decreased SST occurs. Of the total 42 typhoons passing the studied area, the numbers of those three categories are 19, 20 and 3, respectively. The averaged SST increase is 2.1 °C, which is larger in magnitude than the averaged decrease of -1.5 °C. Comparing to the duration of typhoon passing over the upwelling zone, the intensity and incidence angle of the typhoon have stronger effects on the variation of SST. We are convinced that the nonlinear soliton excited by typhoon in the open ocean transports net heat as its propagating towards the coastal area, thus increases the SST in the upwelling zone. The relationship between the observed SST variation and the incidence angle of typhoon track compares well with the theoretical predictions. In summary, the SST variation depends on the sum of local heat transport and that advected from the open ocean by the nonlinear solitons excited by typhoon processes.

Key words: typhoon; upwelling east of Hainan Island; SST; incidence angle of typhoon; soliton wave at sea surface

Received: April 8, 2016