

洪星园, 傅云飞, 洗桃, 等. 2014. 热带海表风速与海表温度日变化关系分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 437–451, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13026. Hong Xingyuan, Fu Yunfei, Xian Tao, et al. 2014. Relationships between sea surface wind speed and the diurnal variation of sea surface temperature over the tropical ocean [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 437–451.

## 热带海表风速与海表温度日变化关系分析

洪星园<sup>1,2</sup> 傅云飞<sup>1,2,3</sup> 洗桃<sup>1,2</sup> 王雨<sup>1,2</sup> 杨元建<sup>1,2,3</sup> 衡志炜<sup>1,2</sup>

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院大气探测与气候环境实验室, 合肥 230026

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031

3 安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

**摘要** 利用热带测雨卫星 (TRMM) 搭载的微波成像仪 (TMI) 探测结果, 在像元分辨率上同步反演的 10 年海表温度 (SST) 和海表风速 (SSW) 资料, 研究了热带地区非降水条件下 SSW 变化对 SST 日变化的影响。结果表明热带地区 SST 日变化显著, SST 日最小值多出现在早晨 03:00 (当地时间, 下同) 至 06:00, 日最大值多出现在午后 17:00 至 19:00, SST 日绝对振幅为 1.9~3.4 °C, 日相对振幅为 5%~7%。SSW 变化对 SST 日最小值和日最大值的出现时间及 SST 日振幅均有明显的影响, 且均呈现出区域性差异。热带地区 SST 日绝对振幅随 SSW 增大而减小, 当 SSW 增加至 9 m/s 之后, SST 日绝对振幅变化不再明显; 二者符合特定的正弦函数关系。在风速小的情况下, 暖池区域平均 SST 日绝对振幅异常减小了 0.16 °C; 在风速大的情况下, 秘鲁沿岸区域平均 SST 日绝对振幅异常增大了 0.17 °C, 且 SST 随时间变化波动较大。上述研究结果为下一步研究海表感热和潜热日变化打下了基础。

**关键词** 海表风速 海表温度 日变化 热带海洋

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0437-15

中图分类号 P47

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13026

## Relationships between Sea Surface Wind Speed and the Diurnal Variation of Sea Surface Temperature over the Tropical Ocean

HONG Xingyuan<sup>1,2</sup>, FU Yunfei<sup>1,2,3</sup>, XIAN Tao<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, YANG Yuanjian<sup>1,2,3</sup>,  
and HENG Zhiwei<sup>1,2</sup>

1 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

2 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

3 Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031

**Abstract** Based on sea surface temperature (SST) and sea surface wind speed (SSW) data retrieval from the tropical rainfall measuring mission (TRMM) microwave imager (TMI) from 1998 to 2007, the authors investigated the features of diurnal variation of SST under the influence of SSW in the tropics under non-precipitation conditions. The retrieved SST and SSW data were matched at TMI resolution within the TMI orbit swath. The results suggest a notable diurnal variation of SST over the topical ocean. The minimum value of the diurnal cycle of SST appears during 0300 LST to 0600 LST and

收稿日期 2013-01-30 收到, 2013-05-13 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB428601, 国家自然科学基金重点项目 41230419、面上项目 41075041

作者简介 洪星园, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星遥感应用研究。E-mail: hongxy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者 傅云飞, 教授, 主要从事卫星遥感资料的分析处理、反演及其在天气和气候方面的应用研究。E-mail: fyf@ustc.edu.cn

the maximum occurred during 1700 LST to 1900 LST. The diurnal absolute amplitude of SST is about 1.9–3.4 °C, and the relative amplitude is about 5%–7%. The effect of SSW on the diurnal SST amplitude is significant and shows the regional characteristics, just as it influences the time of the minimum/maximum value. The diurnal SST amplitude decreases with an increase of the SSW, but it changes only slightly with increasing SSW when the SSW is greater than 9 m/s. Statistical analysis shows a significant sinusoidal correlation between the diurnal SST amplitude and SSW. In particular, reduced SSW leads to a decrease of 0.16 °C in the diurnal SST amplitude in the western equatorial Pacific, whereas enhanced SSW leads to an increase of 0.17 °C in the diurnal SST amplitude over the coastal area of Peru. The above results provide a basis for further research on diurnal variations of latent and sensible heat fluxes.

**Keywords** Sea surface wind speed, Sea surface temperature, Diurnal variation, Tropical ocean

## 1 引言

海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 是指示海气相互作用和全球气候系统状态变化的一个重要物理参数。一方面, 大气状态的变化会改变 SST, 进一步影响到海洋内部状态; 另一方面, 细微的 SST 变化也会对大气系统产生一定程度的影响。因此, 不同时空尺度的 SST 变化及其气候效应受到了国内外学者的广泛关注 (黄荣辉等, 1996; 傅云飞和黄荣辉, 1997; 陈永利等, 2000; 毛江玉等, 2000; 李崇银和咸鹏, 2003; Hu and Kawamura, 2004; Lu and Dong, 2005; Sun et al., 2005; 莫嘉琪等, 2006; 周波涛和王会军, 2006; 陈海英等, 2007; Price et al., 2008; Wang and Zhao, 2008; 邓伟涛等, 2009; Chen et al., 2010; 杨元建等, 2010, 2012; 应明和万日金, 2011; 赵巧莲等, 2011)。SST 日变化作为海气系统中最基本的变化模态之一, 也受到学者们的重视 (Yang and Slingo, 2001; Ward, 2006)。研究表明 SST 日变化不仅会对海气通量交换、区域天气状况和大气环境产生影响, 甚至还可以影响到长时间尺度的大气过程, 这些在热带和副热带地区尤为突出 (Li et al., 2001; Clayson and Chen, 2002; Slingo et al., 2003; Cui and Li, 2012)。数值模拟试验中 SST 日变化的影响也不容忽视 (Bernie et al., 2005)。最近的研究表明, 在使用卫星遥感反演其它大气参数时, 同样也需要慎重考虑 SST 日变化的作用, 因为 SST 日变化会改变大气的辐射背景, 而辐射背景的变化会影响到其他参数的反演 (Embrey et al., 2012)。

近年来, SST 日变化的相关研究主要集中在热带和副热带地区, 研究表明在上述地区的 SST 日变化较为显著, 并且存在明显的区域特征 (Sakaida et al., 2000; Kawai and Kawamura, 2005; Pimentel et

al., 2008)。大量的观测研究和模拟结果表明, 在热带和副热带大部分海域 SST 日最小值主要出现在 04:00 (当地时间, 下同) 至 07:00, 日最大值主要出现在 13:00 至 16:00 (Price et al., 1986; Kennedy et al., 2007; Gille, 2012)。而臧楠 (2005) 通过分析季风前后南海 SST 日变化特征, 指出季风爆发前 SST 表现出规则的日变化形式, 即 SST 日最小值出现在 07:00 至 09:00, 最大值出现在 15:00 至 18:00; 季风爆发后, SST 日变化曲线十分不规则。此外, 一些研究发现 SST 日振幅一般在 0.1~3.5 °C; 在晴空海表风速 (Sea Surface Wind speed, SSW) 很小的理想环境下, 个别海域的 SST 日振幅甚至超过 6 °C。SST 日振幅会随纬度和季节变化, 且因观测的海水深度和观测时间不同而存在差异 (Weitlich, 2005; Shenoi et al., 2009; Marullo et al., 2010)。林鹏飞等 (2012) 利用数值模式模拟了东太平洋冷舌区 SST 的日变化特征, 指出该区域 SST 日变化主要受太阳辐射和垂直混合的影响, SST 日振幅为 0.3~0.4 °C。研究发现在西太平洋沿岸和南海海域 SST 日振幅可达 1.5 °C 以上, 且受风速影响显著 (Tanahashi et al., 2003; 滕伟成, 2011)。在日本东京湾及沿岸海域也可以观察到明显 SST 日变化, 这些海域 SST 日振幅易受到黑潮的影响, SST 日振幅最大可达 5.5 °C (Sakaida et al., 2000; Oda and Kanda, 2009)。研究表明 SST 日变化的主要原因是太阳辐射, 原理上讲白天的强太阳辐射使得海洋上层吸收了大量热量, SST 升高; 而到夜间, 失去了太阳辐射加热的海洋向大气释放热量, SST 降低。在此基础上, SST 日变化还会受到 SSW、云、降水和海洋内部的动力过程以及生物过程的影响, 因此 SST 日变化表现形式和区域特征等变得更加复杂 (Kahru et al., 1993; Clayson and Weitlich, 2007)。研究表明, SSW 对 SST 日变化的影响极为显著; 极大的 SSW 甚至会导致 SST 日变化现象消失

(Webster et al., 1996; Gentemann et al., 2003; Li, 2011)。

综上所述, 国内外学者已对 SST 日变化及其影响因素进行了较为深入的探讨, 并得到了很多有意义的成果。但是, 由于在广阔的洋面, 同步的 SST 和 SSW 资料甚少, 上述研究结果还有待新的观测资料来证实。因此, SST 日变化与 SSW 变化的关系也亟待重新认识。鉴于此, 本文以全球热带地区为研究区域, 利用热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, 简称 TRMM) 搭载的微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, 简称 TMI) 探测结果, 依据王雨等 (2011) 提出的反演算法, 在 TMI 探测像元上同步反演计算得到的 SST 和 SSW 资料, 分析了 1998~2007 年热带地区非降水条件下 SST 日变化特征, 并探讨了其与 SSW 变化的关系。

## 2 资料与方法

TRMM 是由美国国家宇航局 (National Aeronautical and Space Administration) 和日本国家空间发展署 (National Space Development Agency) 于 1997 年 11 月 28 日联合发射的热带测雨卫星。该卫星搭载了测量热带和副热带地区降雨的测雨雷达, 同时搭载了微波成像仪 TMI 及其他仪器。TRMM 卫星属于非太阳同步卫星, 轨道高度约为 350 km(2001 年 8 月 7 日升轨后改为 402.5 km), 重量为 3620 kg, 轨道倾角约为 35°, 飞行速度为 7.3 km/s, 运行周期为 91.3 min, 每天在 38°S~38°N 间的探测范围内约运行 15.7 轨 (Kummerow et al., 1998)。TMI 是一个多通道/双极化被动微波辐射仪, 扫描宽度为 758.5 km(2001 年 8 月 7 日升轨后改为 878 km), 天顶角约为 52.8°, 以锥形模式进行扫描, 因此视场为椭圆形。TMI 有 5 个中心频率, 分别为 10.65、19.35、21.3、37.0、85.5 GHz 的观测频段, 各频段的水平分辨率均不相同。除 21.3 GHz 的频段只有垂直线性极化通道外, 其他的 4 个频段均为双线性极化通道。

本文用到的 SST 和 SSW 资料是基于 TMI 标准亮温资料 (TMI 1B11), 使用一种适用于非降水条件下的物理反演与统计反演相结合的反演算法, 计算得到的数据产品。其中 SSW 为海表 10 m 高处的风速。该反演算法以辐射传输模式为基础, 选择了 5 个分别反应水汽、云水、云温、SST 和 SSW 的微

波通道, 从而有效避开其它环境参数的影响, 通过一系列的数值模拟计算, 最后得到了 SST、SSW 等 5 个参数的反演算式。反演的 SST、SSW 等其他参数均与实测资料进行了对比和验证, 所得结果表明反演结果具有很高的准确性 (Wang et al., 2009; 王雨等, 2011)。该微波反演算法能有效地克服红外反演 SST 和 SSW 易受云等大气要素干扰的问题。

本文研究范围为热带地区 ( $22^{\circ}\text{S} \sim 22^{\circ}\text{N}$ ,  $0 \sim 360^{\circ}$ ), 时间长度为 10 年 (1998 年 1 月 1 日至 2007 年 12 月 31 日)。为了便于统计和作图, 我们对 10 年逐日逐轨道的 TMI SST 和 TMI SSW 资料进行格点化处理, 得到  $1^{\circ}$  (纬度)  $\times 1^{\circ}$  (经度) 格点内的 SST 及其同步的 SSW 数值、相应探测时次 (已转化为地方时间) 等信息; 在此基础上, 统计各探测时次的 SST 和 SSW 气候平均态, 从而得到逐小时的 SST 和 SSW 资料。需要指出的是微波反演方法易受到海面粗糙度的影响, 当 SSW ( $U$ ) 大于 12 m/s 时, SST 反演结果存在不确定性, 故本文的研究仅针对  $U$  在 0~12 m/s 的海况。此外, 分析时将 TMI 探测的各像元时间换算为地方时间, 并将一天 24 h 分为 24 个时段。为了便于描述, 将一天 24 h 内 SST 的最大值定义为 SST 日最大值 ( $T_{\max}$ ), 最小值定义为 SST 日最小值 ( $T_{\min}$ )。SST 日绝对振幅 ( $\Delta T$ ) 指示了一天内 SST 变化的幅度, 其定义为日最大值和日最小值之间的差异, 即

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min}. \quad (1)$$

相对日变化振幅是一种以百分比表示的标准化振幅, 可以减小日变化振幅中气候差异的影响 (毛江玉和吴国雄, 2012)。因此, 本文将 SST 相对日变化振幅定义为 SST 日最大值与日平均值之差, 即

$$\Delta T_R = (T_{\max} - T_{\text{mean}}) / T_{\text{mean}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中,  $\Delta T_R$  表示 SST 日相对振幅,  $T_{\text{mean}}$  表示 SST 日均值。

同时, 我们基于反演所得的 SSW 资料, 还计算了风应力绝对值, 计算公式如下:

$$\tau = \rho_a C_D(U)^2, \quad (3)$$

其中,  $\rho_a$  表示空气密度  $\rho_a = 1.26 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_D$  是拖拽系数  $C_D = (0.73 + 0.069U) \times 10^{-3}$  (Garratt, 1977)。

此外, 本文使用的海表净热通量资料是由美国伍兹霍尔海洋研究所提供的 OAFLUX 逐月资料, 时间长度为 1998 年 1 月至 2007 年 12 月, 水平分辨率为  $1^{\circ}$  (纬度)  $\times 1^{\circ}$  (经度)。混合层深度资料是由美国国家海洋资料中心 (NOAA NODC) 提供

的 1~12 月的气候月平均资料, 水平分辨率为  $0.5^{\circ}$  (纬度)  $\times 0.5^{\circ}$  (经度)。

为了更加清晰直观地分析非降水条件下热带地区 SSW 与 SST 日变化的关系, 我们首先统计了热带地区 10 年 SSW 的概率密度分布(图 1)。由图 1 可知, 当  $U$  为 7.4 m/s 时, 概率密度基本达到峰值。在  $\pm 0.5\sigma$  ( $\sigma$  代表标准差) 范围 ( $5.7 \sim 9.1$  m/s) 的  $U$  所占比例达到整体的 64.8%。因此, 我们将热带地区 SSW 划分为 3 个区间:  $0 \text{ m/s} \leq \text{SSW} < 5.7 \text{ m/s}$  (U1)、 $5.7 \text{ m/s} \leq \text{SSW} < 9.1 \text{ m/s}$  (U2)、 $9.1 \text{ m/s} \leq \text{SSW} \leq 12.1 \text{ m/s}$  (U3), 其中 U2 代表热带地区 SSW 的基本状况, U1 和 U3 则分别代表小 SSW 和大 SSW

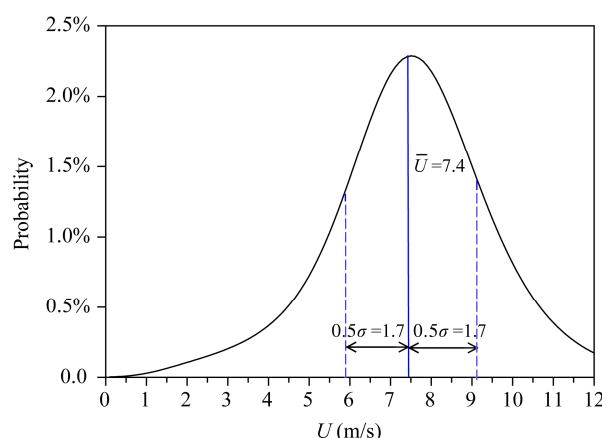


图 1 1998~2007 年热带地区 SSW 概率密度分布

Fig. 1 Distributions of SSW (Sea Surface Wind speed) in the tropic from 1998 to 2007

的情况。以下将研究这 3 种 SSW 情况下的 SST 日变化特征。

在进行具体的统计分析之前, 我们首先给出了上述 3 个 SSW 范围内的 TMI 10 年探测的样本分布(图 2)。由图 2 可知, 在 U2 范围内, 热带大部分地区格点内的样本数均在  $10^5$  以上, 只有西太平洋和印度洋暖池区域格点内的样本数相对较低, 但数量也有  $4 \times 10^4 \sim 10^5$ ; 在 U1 和 U3 范围内, 格点样本数约在  $4 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$ 。上述众多的样本数表明本文研究结果是基于大样本背景的分析, 因此研究结果具有统计学上的可靠性。

### 3 结果

#### 3.1 SSW 与 SST 平均态

在进行热带地区 SST 日变化分析之前, 对该地区 SST 水平空间分布特征了解是很有必要的。图 3 给出了 1998~2007 年热带地区 3 种 SSW 情况下 SST 均值分布。从图 3 中可见, 虽然不同 SSW 范围内的 SST 均值分布存在差异, 但是均能从这些分布上看到热带地区 SST 的基本水平分布特点: 随着纬度的升高 SST 呈现递减趋势; 在经向上 SST 分布也存在很大的差异, SST 高值区 ( $>28.0^{\circ}\text{C}$ ) 主要出现在赤道印度洋和西太平洋, 约在  $60^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ ; 此外, 冷(暖)海流对 SST 分布的影响也可以观察到, 如在秘鲁寒流和安哥拉寒流经过的区域

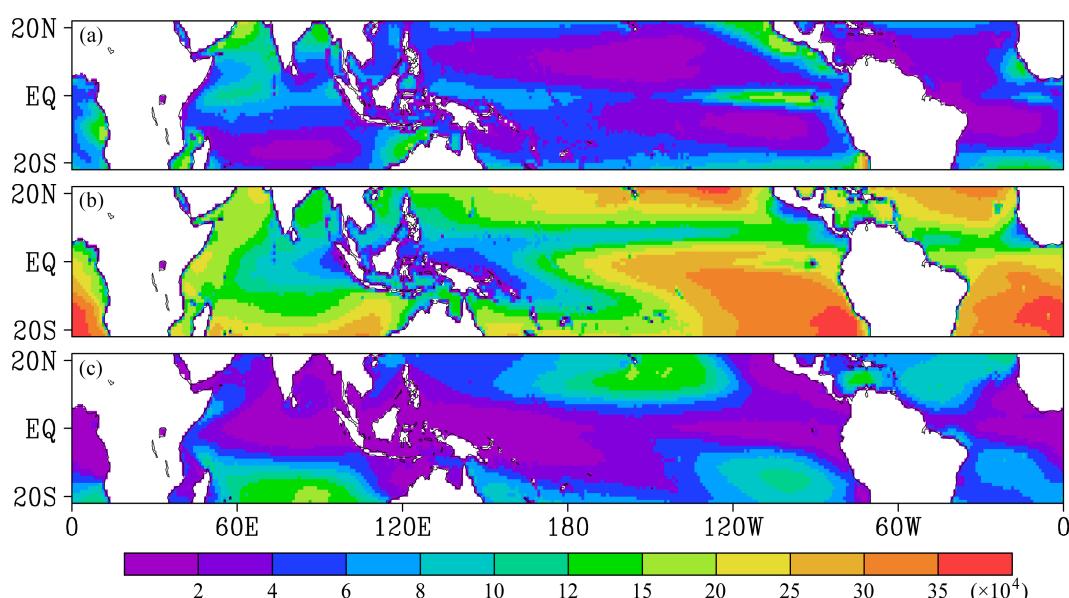


图 2 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内样本数分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 2 Distributions of SST pixels in each grid in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

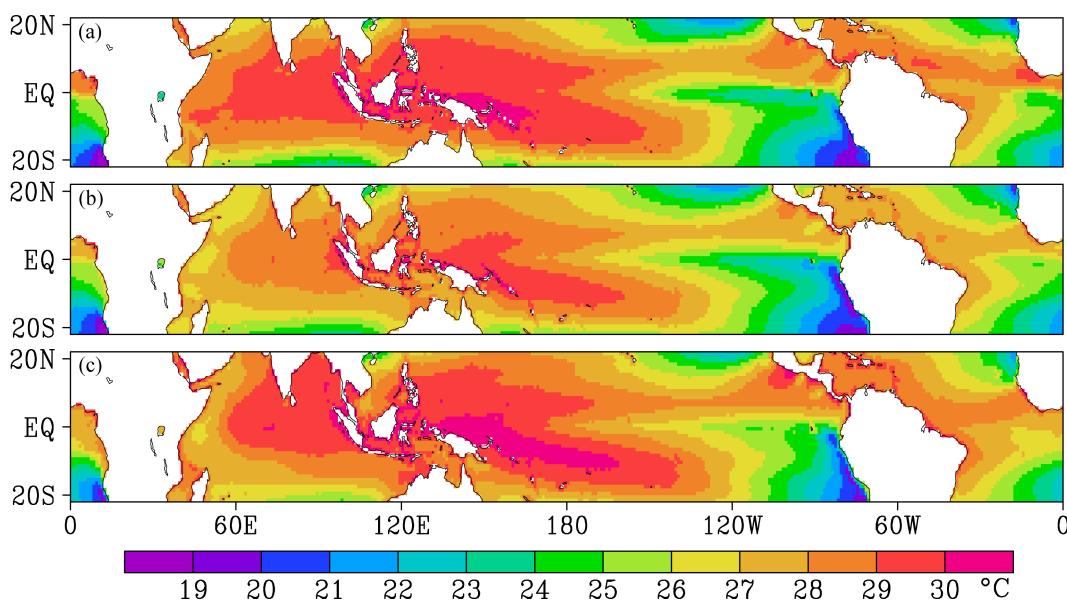


图 3 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内 SST 均值分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 3 Distributions of the main SST in each grid in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

存在 SST 低值区, 赤道东太平洋 5°S~5°N 存在明显的冷舌区 (Gentemann et al., 2004)。图 3 也初步表现出了热带地区 SSW 变化对 SST 分布产生的一定程度影响, 如在风速小的情况下 (图 3a), 印度洋和西太平洋 15°S~15°N 之间存在更大范围的暖水区, 赤道东太平洋北部沿岸海域和大西洋海域 SST 明显增大了 2 °C 左右;而在风速大的情况下(图 3c), 印度洋和西太平洋海域暖水区面积也有所扩大, 同时在东太平洋的冷舌面积则减小, 秘鲁寒流和本格拉寒流区域冷水面积也明显减小。

为具体了解热带地区平均 SST 与 SSW 之间关系, 我们将 0~12 m/s SSW 细化为 12 段, 得到了热带地区 SST 均值与 SSW 的散点图和相应拟合曲线 (如图 4 所示)。由图 4 可看出, 拟合曲线基本表征了平均 SST 和 SSW 之间的变化关系, 二者相关系数可达 0.98, 且通过置信度 99.9% 的检验。SST ( $T$ ) 与 SSW ( $U$ ) 之间的关系可表达为下式:

$$T = 26.57 + 1.69 \left[ \sin \left( \frac{2\pi U}{21.21} + 4.29 \right) \right]^2. \quad (4)$$

图 4 表明在 0~7 m/s 风速的范围内, SST 均值随着风速均值的增大而减小; 当风速均值增加至 7 m/s 之后, SST 均值随着风速均值增大而增大。由此可见 SSW 对 SST 具有非线性的作用。

### 3.2 SSW 与 SST 日变化分布

图 5 和图 6 所示为热带地区不同 SSW 范围内 SST 日最大值和日最小值出现时间分布。从图 5 中

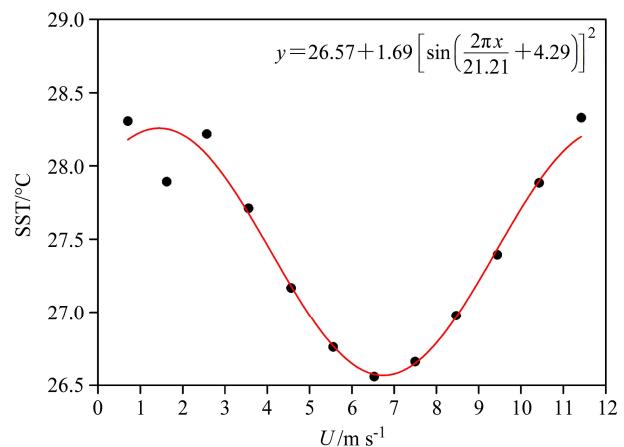


图 4 热带地区平均 SST 与 SSW 均值的散点图和拟合曲线

Fig. 4 Scattering plots of the mean SST against SSW in the tropic overlapped with the fitted curve

可看到, SST 日最大值多集中在 17:00 至 19:00 出现, 并且 SSW 变化对 SST 日最大值出现时间存在明显影响。在 U1 情况下 (如图 5a), 大部分区域的 SST 日最大值出现时间均明显提前, 多集中在 15:00 至 19:00; 在 U2 情况下 (如图 5b), SST 日最大值出现时间较为集中, 均在午后的 17:00 至 19:00; 在 U3 情况下 (如图 5c), SST 日最大值仍主要在 17:00 至 19:00 出现, 但在印度洋、太平洋和大西洋东部沿岸海域日最大值出现时间则有所提前, 特别是在赤道南太平洋东部秘鲁沿岸海域和南大西洋东部的大部分沿岸海域, SST 日最大值出现时间主要集

中在 11:00 至 14:00。由图 6 可以看出, 在不同 SSW 范围内 SST 日最小值出现时间均十分集中, 大部分区域都在 03:00 至 06:00, 但水平分布上仍存在些许差异, 如: 在 U1 情况下(如图 6a), SST 日最小值出现时间分布显得相对杂乱, 小部分区域存在略微的提前或滞后; 在 U3 情况下(如图 6c), 阿拉伯海、孟加拉湾、太平洋东部沿岸和大西洋东部沿岸海域 SST 日最小值出现时间均提前至 01:00 至 03:00。

为细致了解不同 SSW 范围内 SST 日最大值和日最小值出现时间的分布特点, 我们分别给出了二

者相应的 SST 概率密度分布(图 7)。如图 7a 所示, 在 U1 情况下, 93.9% 格点的 SST 日最大值出现在 15:00 至 19:00, 但概率密度分布较宽(13:00 至 19:00); 在 U2 情况下, 共有 97.14% 的格点 SST 日最大值出现时间集中在 17:00 至 19:00, 19:00 达到概率密度分布峰值(57.06%)。这个结果和在整个 SSW 范围内(U4, 0~12 m/s)计算得到的概率密度分布基本重合, 这再次表明 U2 下的状态可代表热带地区基本状况。在 U3 情况下, SST 日最大值出现时间在 17:00 至 19:00 之间的格点占 70.81%,

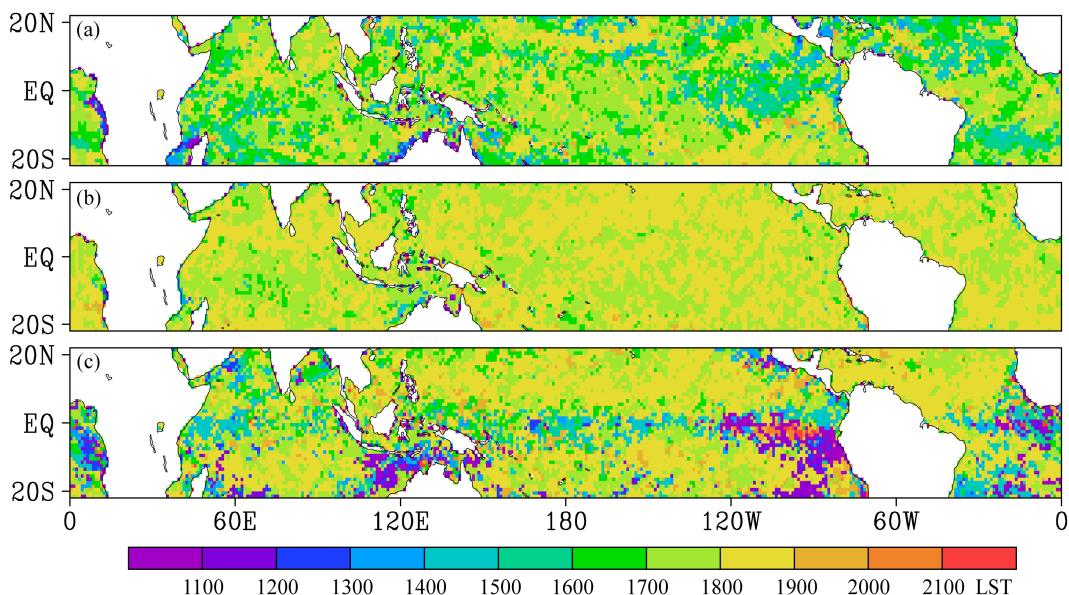


图 5 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内 SST 日最大值出现时间分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 5 Appearance time of the maximum values of SST in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

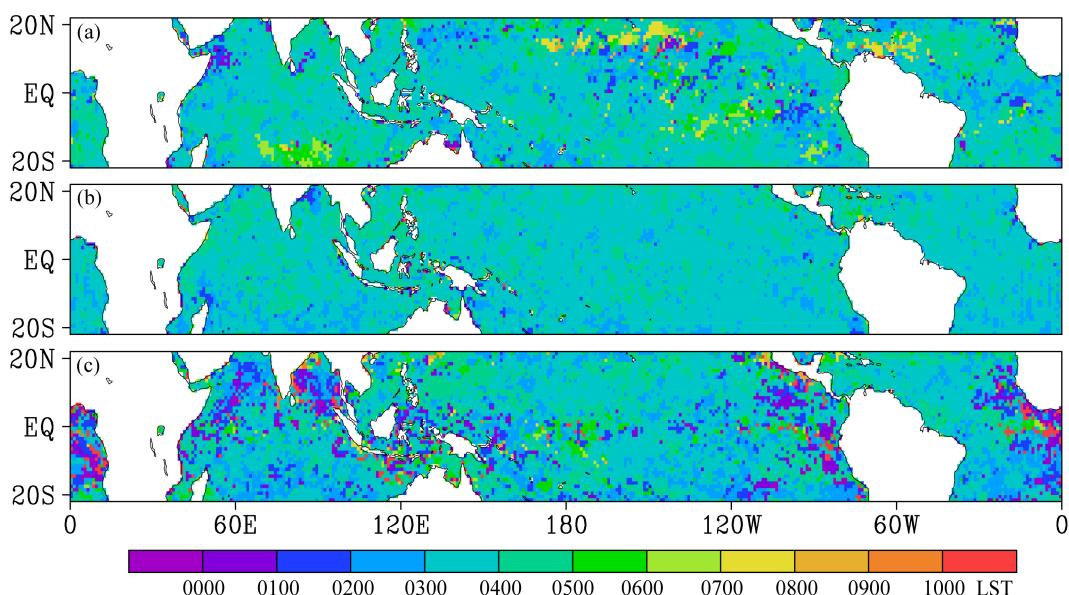
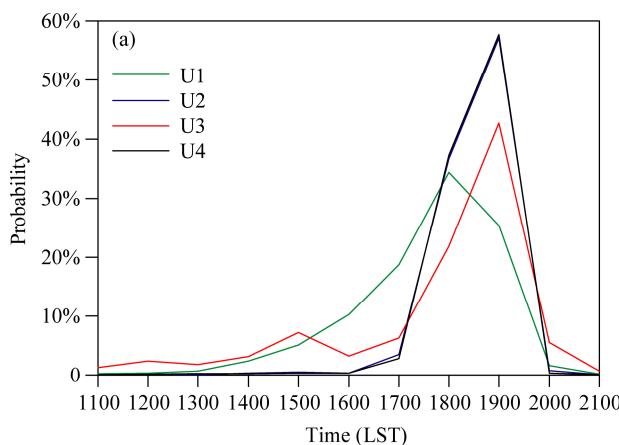


图 6 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内 SST 日最小值出现时间分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 6 Appearance time of the minimum values of SST in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

概率密度曲线表现出双峰形式, SST 日最大值出现时间的第一峰值出现在 15:00 (为 7.12%), 其第二个峰值仍出现在 19:00 (为 42.67%)。从图 7b 可明显看出, 在不同 SSW 范围内日 SST 最小值出现时间概率密度均集中在 03:00 至 06:00, 但分布离散程度上存在差异: 在 U2 情况下, 有 97.95% 的格点 SST 日最小值出现在 03:00 至 06:00, SST 日最小值出现时间概率密度在 04:00 达到峰值 (68.78%); 与 U2 相比, 在 U1 和 U3 情况下, SST 日最小值出现时间概率密度分布表现的较为离散, 特别是在 U3 范围内。通过以上分析, 可以明显看出 SSW 的变化会对 SST 日最大值、日最小值出现时间产生影响, 且在不同的区域表现出一定的差别。



### 3.3 SSW 与 SST 日变化振幅

为了解 SSW 变化对 SST 日变化影响的程度, 图 8 给出了热带地区不同风速范围内 SST 日绝对振幅分布情况。总体上看, 大部分海域呈现出 SST 日绝对振幅随着 SSW 增大而减小的特点。图 8a 表明, 在 U1 情况下, 大部分海域 SST 日绝对振幅基本在 2.8 °C 以上, 特别是在南印度洋海域、太平洋中部和东部海域以及大西洋海域的 SST 日绝对振幅甚至达到 3.8 °C。在 U2 情况下 (如图 8b), SST 日绝对振幅一般在 2.4~2.8 °C, 在 5°S~5°N 以外的印度洋、赤道以北的中东太平洋和北大西洋海域均达到 2.6 °C 以上。但在一些沿岸海域 SST 日绝对振幅相对较低, 例如东南亚大陆沿岸、东太平洋沿岸

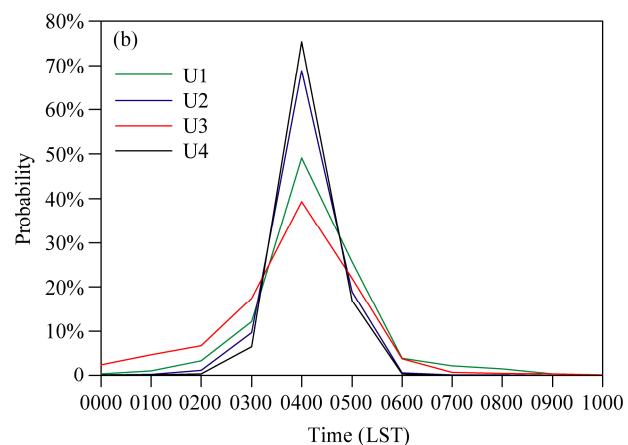


图 7 热带地区不同 SSW 范围内 SST (a) 日最大值和 (b) 日最小值出现时间的概率密度分布

Fig. 7 Distributions of the appearance time of the (a) maximum and (b) minimum values of SST in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007

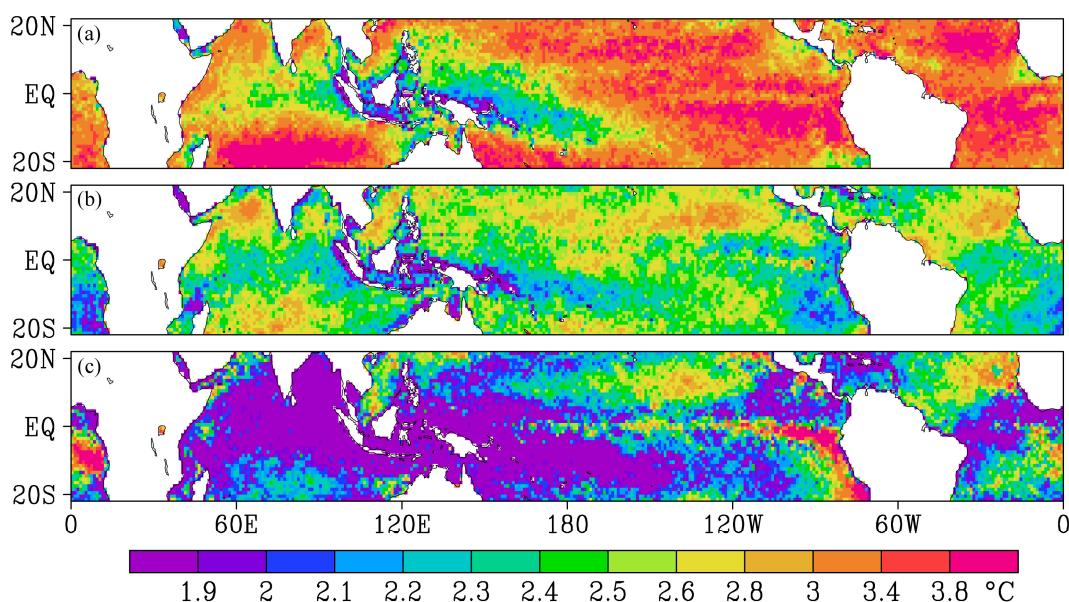


图 8 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内 SST 日绝对振幅分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 8 Diurnal SST absolute amplitude in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

和大西洋东部安哥拉沿岸等。在 U3 情况下(如图 8c), 大部分海域 SST 日变化绝对振幅为 1.9~2.2 °C, 在中太平洋北部、赤道东太平洋以南和大西洋的部分海域 SST 日绝对振幅则仍保持相对较大的值(大于 2.5 °C)。特别是在赤道东太平洋冷舌区、秘鲁沿岸海域及安哥拉沿岸海域, 可明显看到 SST 日变化绝对振幅甚至比 U2 下的情况大。图 8 充分揭示 SSW 变化会影响 SST 日绝对振幅大小的事实, 但是其影响的程度大小具有明显的区域差异。

基于上述工作, 我们进一步逐格点计算了其他两个 SSW 范围内(U1 和 U3) SST 日绝对振幅与 U2 情况下 SST 日绝对振幅间的差值(图 9)。图 9a 清晰显示了在风速小的情况下, 91.4% 的区域 SST

日绝对振幅都显示出明显的正偏差, 特别是在南印度洋、赤道东太平洋及以南的海域可达到 2 °C 以上; 但是在西太平洋暖池和东南亚大陆沿岸海域 SST 日绝对振幅出现了较小的负偏差。在风速大的情况下, 约有 84.1% 的格点 SST 日绝对振幅差值显示为负值, 说明大部分区域 SST 日绝对振幅均有所减小(如图 9b)。同时从图 9b 中还可以看到, 在赤道东太平洋及以南的秘鲁沿岸海域、大西洋东部安哥拉沿岸海域的 SST 日绝对振幅存在显著的正偏差(约为 1~3 °C)。由此可见, 在不同的海域 SSW 变化对 SST 日绝对振幅的影响存在差别。

图 10 给出了热带地区不同 SSW 范围内 SST 日相对振幅空间分布, 其形态基本与 SST 日绝对振幅相一致。总的来看, 绝大部分海域 SST 日相对振幅

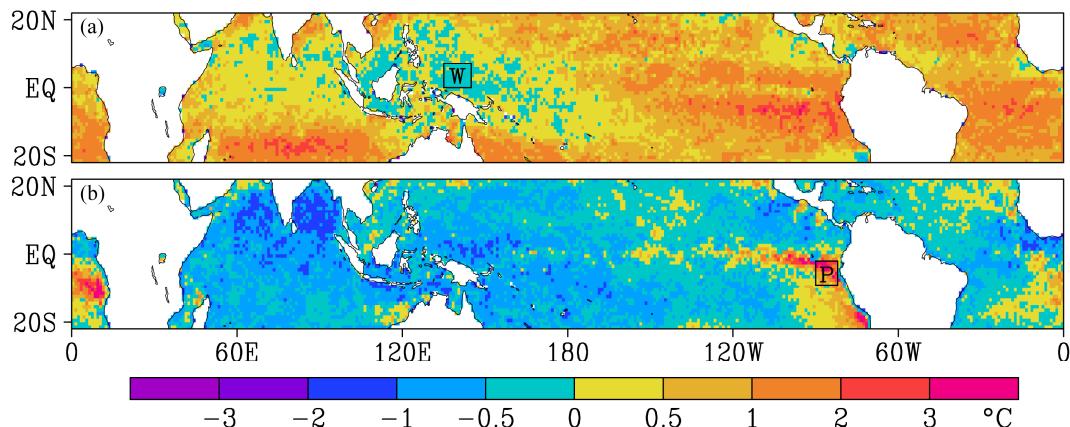


图 9 1998~2007 年热带地区(a) U1 和 U2、(b) U3 和 U2 范围内 SST 日绝对振幅间差异分布

Fig. 9 Diurnal SST absolute amplitude differences between (a) U1 and U2, (b) U3 and U2 in the tropic from 1998 to 2007

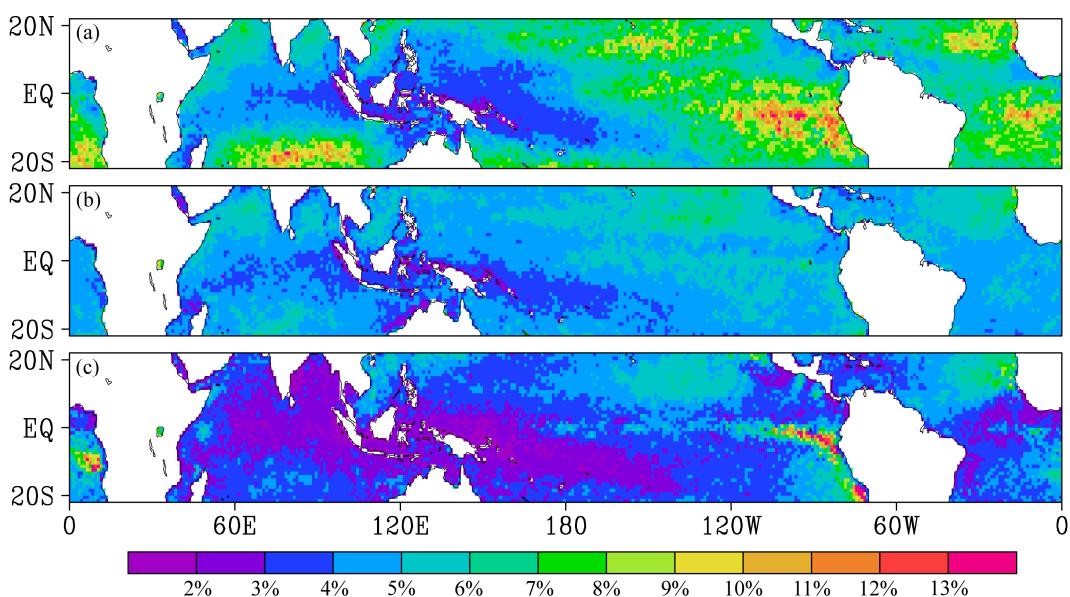


图 10 1998~2007 年热带地区不同 SSW 范围内 SST 日相对振幅分布: (a) U1; (b) U2; (c) U3

Fig. 10 Diurnal SST relative amplitude in the tropic under different SSW ranges from 1998 to 2007: (a) U1; (b) U2; (c) U3

随着 SSW 增大而减小, 这从另一方面再次佐证了极大风速下 SST 的日振幅变化会减弱甚至消失。图 10a 表明, 在 U1 情况下, 大部分海域 SST 日相对振幅基本在 7%以上, 这对于 SST 的日变化现象来说已是相当显著的。并且在南印度洋、东太平洋以及大西洋海域 SST 日相对振幅甚至达到 12%。在 U2 情况下(如图 10b), SST 日相对振幅基本维持在 5%~7%, 在 5°S~5°N 以外的印度洋、东太平洋和北大西洋海域均可达到 7%。但是, 在东南亚大陆沿岸海域和西南太平洋部分海域 SST 日相对振幅则较低。在 U3 情况下(如图 10c), SST 日相对振幅区域性特征显著。其中, 印度洋、西太平洋和赤道大西洋海域 SST 日相对振幅较小, 基本在 3%~4%。而在 5°S~5°N 以外的大西洋、赤道以北的东太平洋 SST 日相对振幅相对较高(大于 6%), 特别是在赤道东太平洋冷舌区、秘鲁沿岸海域及安哥拉沿岸海域, 可观察到 SST 日变化相对振幅甚至超过 10%, 明显比 U2 情况下要大。

接下来, 我们进一步统计得到了热带地区平均 SST 日绝对振幅与 SSW 均值的散点图(仍将 0~12 m/s SSW 细化为 12 段)。从图 11 中可看出, SSW 在 0~9 m/s 的范围内, SST 日绝对振幅随着 SSW 均值的增大而减小; 当 SSW 均值增大至 9 m/s 之后, SST 日绝对振幅随 SSW 均值的变化不再明显, 这和前人的结论相一致(Kawai and Kawamura, 2002; Jeffery et al., 2008)。此外, 图 11 中拟合得到曲线基本表征了 SST 日绝对振幅与 SSW 的关系, 可表示为如下函数关系式:

$$\Delta T = 4.06 + 1.85 \sin\left(\frac{2\pi\bar{U}}{28.79} + 2.52\right), \quad (5)$$

其中,  $\Delta T$  为 SST 日绝对振幅均值(单位: °C),  $\bar{U}$  为海表风速均值(单位: m/s), 拟合中各项参数均通过 99.0% 置信度检验, 二者相关系数可达 0.997, 这表明 SST 日绝对振幅与 SSW 存在很好的正弦函数关系。

### 3.4 典型区域 SST 日变化

上述结果表明, 热带地区不同 SSW 范围内的 SST 日变化特征呈现出明显差异, 这在极值出现时间和 SST 日振幅方面均有所表现, 并且受当地大气状况和海洋上层内部环境的影响表现出明显的区域特征(Stuart-Menteth et al., 2003; Bellenger and Duvel, 2009; Filipiak et al., 2010)。热带地区大部分海域 SST 日绝对振幅都随 SSW 的增大而减小,

各海域减小的幅度显示出一定差异。但是, 在西太平洋暖池区域和东太平洋秘鲁沿岸区域 SST 日绝对振幅随 SSW 改变呈现出特殊的变化趋势。例如, 在风速小的情况下, 西太平洋暖池等区域 SST 日绝对振幅出现异常减小; 而在风速大的情况下, 东太平洋秘鲁沿岸区域 SST 日绝对振幅出现异常增大。

为更加具体的认识上述两个区域 SST 日变化受 SSW 影响所呈现出的独特变化, 我们选取两个典型区域[如图 9 中 W 区( $0^{\circ}\sim 7^{\circ}\text{N}$ ,  $135^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$ ) 和 P 区( $9^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{W}\sim 82^{\circ}\text{W}$ )]进行分析。图 12 给出了不同 SSW 范围内 W 区和 P 区的区域平均 SST 日变化曲线。由图可看出, 在 U2 情况下, W 区和 P 区 SST 日变化形式较为相似: SST 日最小值均出现在 04:00, 日最大值均出现 19:00; 两区域 SST 日绝对振幅间差异不大, W 区为  $2.45^{\circ}\text{C}$ , P 区为  $2.12^{\circ}\text{C}$ ; SST 日相对振幅间差异也不大。相比 U2, 在 U1 情况下两区域 SST 均有所增大, 日变化极值出现时间基本保持不变; W 区 SST 日绝对振幅减小了  $0.16^{\circ}\text{C}$ , 日相对振幅减小了 0.7%; P 区 SST 日绝对振幅增大了  $1.55^{\circ}\text{C}$ , 日相对振幅增大了 4.2%。在 U3 情况下, 两个区域 SST 日变化形式存在明显差异: W 区 SST 日变化曲线变得平缓, 与 U2 相比 SST 仍有所增大, SST 日绝对振幅减小了  $1.0^{\circ}\text{C}$ , 日相对振幅减小了 2.1%; 而 P 区 SST 日变化曲线波动明显变得剧烈且不规则, SST 日最小值出现在 4 时, 日最大值出现在 08:00, 并且与 U2 相比 SST 日绝对振幅增大  $0.17^{\circ}\text{C}$ , 日相对振幅减小了 3.5% (见表 1)。

表 1 W 区和 P 区区域平均 SST 日变化统计值

Table 1 Statistical values of the regional averaged diurnal variation of SST for regions W and P

风速范围	研究区域	最小值出现时间	最大值出现时间	最小值 /°C	最大值 /°C	绝对振幅 /°C	相对振幅 /%	日平均值 /°C
U1	W	04:00	18:00	28.60	30.89	2.29	3.6%	29.83
U1	P	04:00	19:00	21.33	24.99	3.67	9.1%	22.91
U2	W	04:00	19:00	27.87	30.32	2.45	4.3%	29.06
U2	P	04:00	19:00	20.62	22.74	2.12	4.9%	21.69
U3	W	05:00	17:00	29.07	30.52	1.45	2.2%	29.87
U3	P	03:00	08:00	20.62	22.74	2.29	1.4%	22.43

由上述可见, 西太平洋暖池区域和东太平洋秘鲁沿岸区域不同 SSW 范围内呈现出特殊的 SST 日变化特征。进一步分析发现在风速小的情况下, 暖池区域 SST 日最大值仅略微增大了  $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ (如图 13a)。这可能是由于该区域 SST 常年维持高值且

混合层相对较深，在白天一定范围内（ $0\sim9.1\text{ m/s}$ ）的风速变化并不能对 SST 日变化产生显著影响，太阳辐射加热作用仍占主导地位。在风速小的情况下，暖池区域 SST 日最小值显著增大了  $0.7\sim0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ （如图 13c）。这是由于到了夜间，太阳辐射为 0，SSW 的混合冷却作用相对变的显著，SSW 增大会导致表层热量被迅速输送到更深层（Price et al., 1978; Clayson and Weitlich, 2005; Kawai and Wada, 2007）。从而就出现了暖池区域在风速小的情况下 SST 日绝对振幅出现异常减小的情况（图 13e）。秘鲁沿岸区域在风速大的情况下 SST 日绝对振幅出现异常增大（图 13f），这主要是 SST 日最小值出现了显著减小导致的（如图 13d）。因为，在夜间大的 SSW 会导致秘鲁寒流上升增强，底部更多冷的海水向上翻升至表层，同时伴随着剧烈的混合冷却作

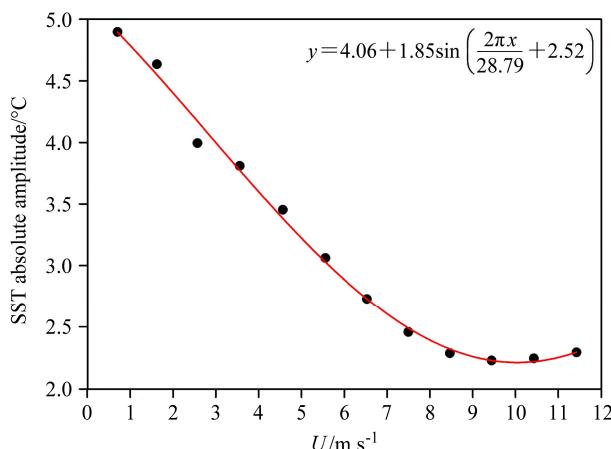


图 11 热带地区 SST 日绝对振幅与 SSW 均值的散点图和拟合曲线  
Fig. 11 Scattering plots of the diurnal SST absolute amplitude against SSW in the tropic overlapped with the fitted curve

用，使得 SST 日最小值显著减小，甚至会下降  $0.5\sim1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

前人研究指出 SST 的变化是一维热平衡的结果，SST 主要受海表净热通量、海洋水平和垂直平流、扩散等影响（Price et al., 1986）。一般来说，引起局地 SST 变化的原因主要包括海表净热通量、水平平流、垂直混合等（梁卫等, 2009; 刘珊, 2011）。据此，为探寻西太平洋暖池区域和东太平洋秘鲁沿岸海域的 SST 日变化随 SSW 改变呈现出特殊变化的原因，我们就两个特殊区域中影响 SST 变化的物理过程中的相关物理量做进一步分析。图 14a 和 14b 给出的是两个典型区域净热通量均值分布。在 W 区海表净热通量维持在  $40\sim55\text{ W/m}^2$ ，而在 P 区海表净热通量维持在  $100\sim160\text{ W/m}^2$ ，远大于 W 区。可见，在秘鲁沿岸海域海表净热通量对 SST 变化中的贡献作用要大于西太平洋暖池区域。图 14c 和 14d 为两个典型区域风应力绝对值平均分布。由图可知，W 区的风应力绝对值为  $0.04\sim0.06\text{ N/m}^2$ ，比 P 区的风应力绝对值小 ( $0.06\sim0.09\text{ N/m}^2$ )。秘鲁沿岸海域盛行东南信风，导致相应出现显著的水平平流，大量表层海水向西偏离，进而引起了上升流的出现，这对该区的 SST 变化有着显著影响。图 14e 和图 14f 给出了两个典型区域混合层深度均值分布情况。我们很明显地发现 W 区的混合层深度为  $40\sim55\text{ m}$ ，较 P 区 ( $15\sim35\text{ m}$ ) 要大。因此，在西太平洋暖池区域混合层深度对 SST 变化中的贡献作用要大于秘鲁沿岸海域，而且秘鲁沿岸海域较浅的混合层也使得净热通量变化对该区 SST 的影响更加显著。综上所述，在西太平洋暖池区域和秘鲁寒流

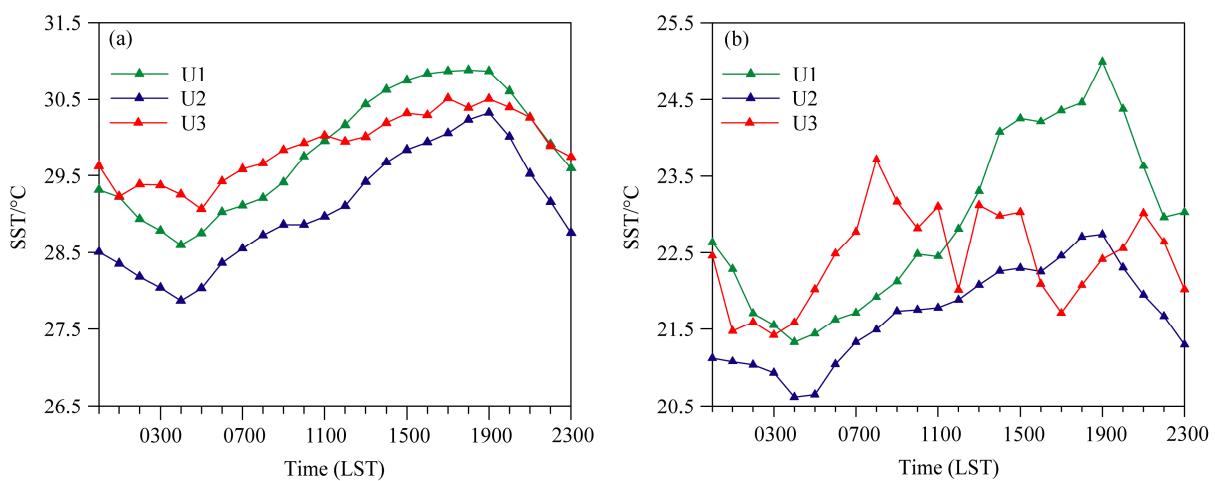


图 12 两个典型区域不同 SSW 范围内的 SST 日变化：(a) W 区；(b) P 区  
Fig. 12 Diurnal variation of SST for regions (a) W and (b) P under different SSW ranges

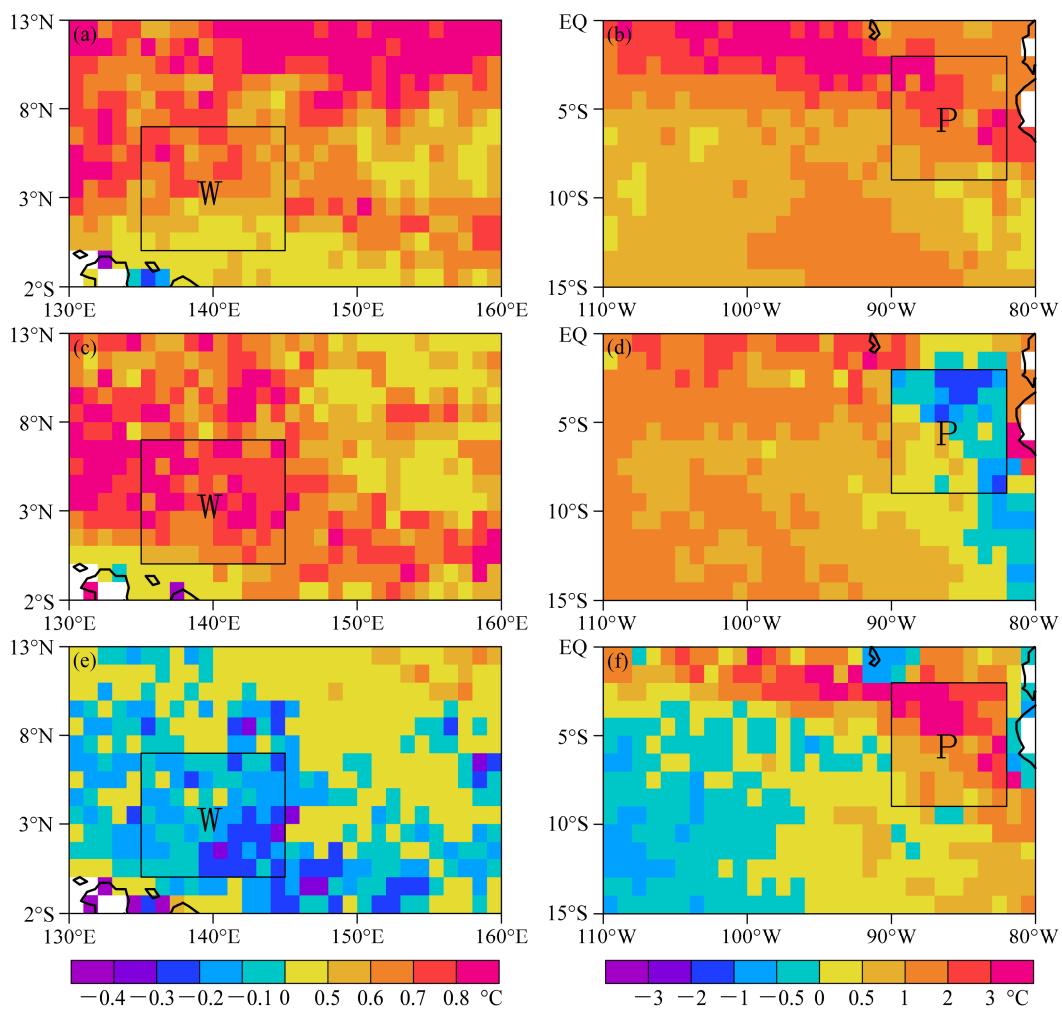


图 13 两个典型区域 W 区 (左列) 和 P 区 (右列) 不同 SSW 范围内 (a, b) SST 日最大值、(c, d) SST 日最小值和 (e, f) 日绝对振幅差异分布: (a, c, e) U1 和 U2 范围内各变量之差 ( $U_1 - U_2$ ); (b, d, f) U2 和 U3 范围内各变量之差 ( $U_3 - U_2$ )

Fig. 13 (a, b) The minimum SST value, (c, d) the maximum SST value, and (e, f) the absolute amplitude of SST differences between (a, c, e)  $U_1$  and  $U_2$ , (b, d, f)  $U_2$  and  $U_3$  for regions W (left column) and P (right column)

区域影响 SST 变化的主要物理过程存在明显差异。一般情况下, 在西太平洋暖池区域净热通量变化和垂直混合作用对该区 SST 的变化贡献较大(孙即霖等, 1993)。而在东太平洋秘鲁寒流区域净热通量变化和水平平流则对该区 SST 的变化贡献较大, 并且该区域净热通量的贡献作用要远大于西太平洋暖池区域情况。如上所述, 正是因为不同的大气海洋环境背景才造就了风速对 SST 的日变化影响程度不一, 并呈现区域性差异。

## 4 结论与讨论

热带地区 SST 日变化在海气系统中扮演的角色尤为重要的, 因而日益受到国内外学者的关注。由于受探测技术所限, 以往研究多集中在小范围的海

域, 对整个热带区域 SST 日变化具体特征在观测事实上缺乏系统的认识。本文基于反演所得的 SST 及同步的 SSW 资料, 系统深入地研究了非降水条件下的热带地区 SSW 变化对 SST 日变化的影响。主要结论如下:

热带地区不同 SSW 情况下 SST 日变化极值出现时间存在明显差异。总的来看, SST 日最小值出现时间主要集中在 03:00 至 06:00, 日最大值出现时间主要集中在 17:00 至 19:00。在风速小的情况下 ( $0 \sim 5.7 \text{ m/s}$ ), SST 日最小值出现时间分布较为离散, 在 02:00 至 07:00; 日最大值出现时间有所提前, 主要集中在 15:00 至 19:00。在风速增大的情况下 ( $9.1 \sim 12 \text{ m/s}$ ), SST 日最小值出现时间和最大值出现时间均表现出显著的区域性。SST 日最小值出现时间集中在 01:00 至 06:00, 日最大值出现时间仍主

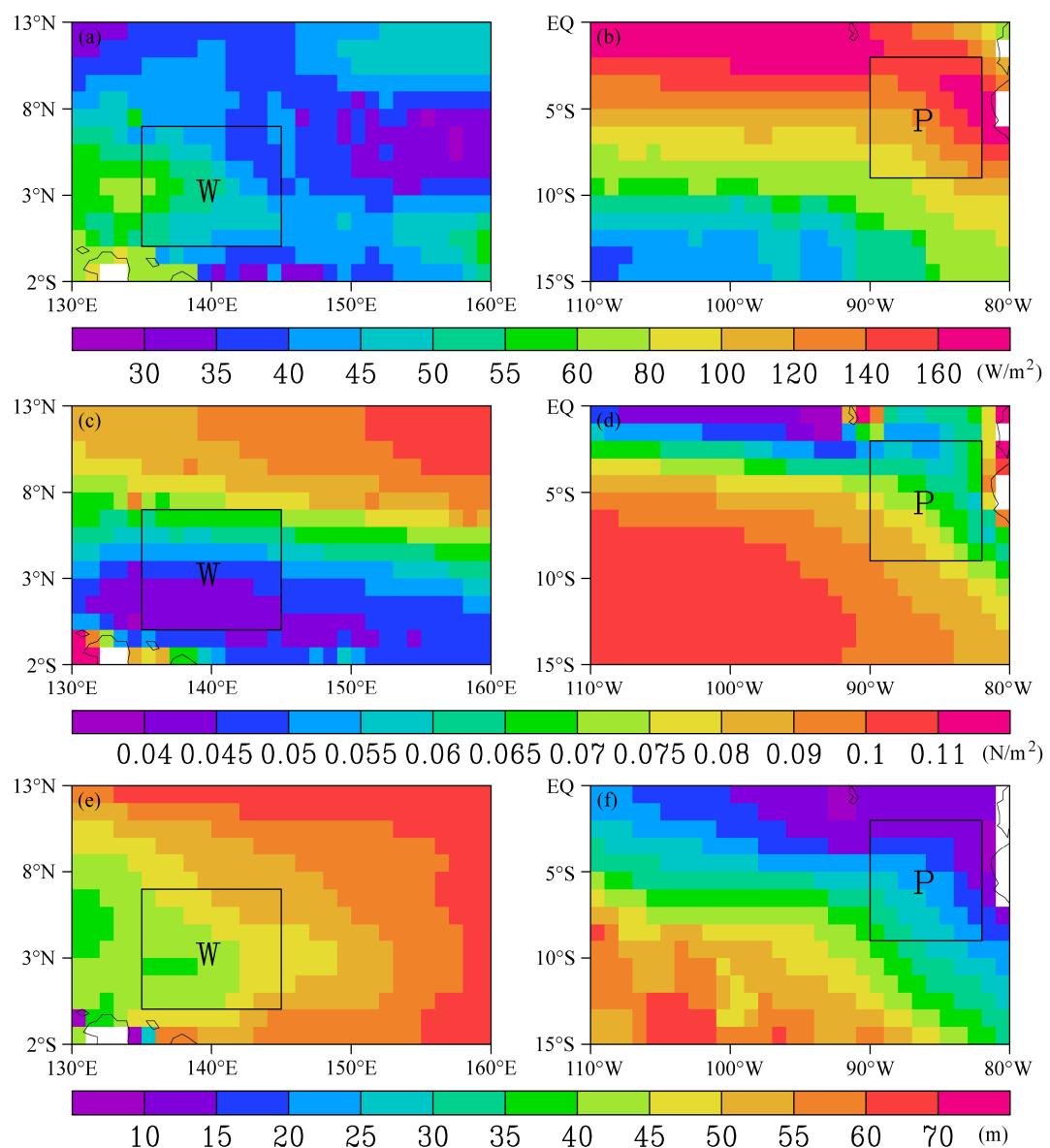


图 14 1998~2007 年两个典型区域 W 区 (左列) 和 P 区 (右列) (a, b) 净热通量、(c, d) 风应力绝对值和 (e, f) 混合层深度均值分布

Fig. 14 Distributions of (a, b) surface net heat flux, (c, d) absolute value of wind stress, and (e, f) mixed layer depth in each grid for regions W (left column) and P (right column) from 1998 to 2007

要集中在 17:00 至 19:00。从概率密度分布可看出, SSW 变化对 SST 日最大值出现时间影响更为显著。热带地区 SST 日绝对振幅主要集中在 1.9~3.4 °C, 其空间分布特征的区域性差异明显。总的来看, SST 日绝对振幅基本随 SSW 增大而减小, 当 SSW 增大至 9 m/s 之后, SST 日绝对振幅随 SSW 的变化不再明显; 拟合结果表明二者符合特定的正弦函数关系。SST 日相对振幅基本在 5%~7%, 这表明热带地区 SST 的日变化现象已是相当显著; 其分布特征基本与日绝对振幅相一致, 并且更加清晰地突显了 SSW 对 SST 日振幅的影响。值得一提的是, 在西

太平洋暖池区域和东太平洋秘鲁寒流区域的 SST 日绝对振幅随 SSW 改变表现出特殊变化特征, 这主要是两个海域的 SST 除了受 SSW 变化影响, 还受到了各自不同的大气—海洋背景场的调制作用。

基于对热带地区不同 SSW 范围内 SST 日变化的具体分析, 揭示了热带地区 SST 日变化基本特征, 结果表明该地区 SST 日变化特征显著, 并且与 SSW 密切相关。这些工作为下一步研究海表感热和潜热日变化打下了基础。需要指出的是, 本文所讨论的 SSW 与 SST 日变化特征关系仅限于非降水条件下, 并且在实际的海气相互作用过程中, 影响 SST

日变化的因素也是繁多而复杂。因而, 在今后我们需要就这些工作做更加深入地探究, 以便进一步全面地理解 SST 日变化过程及其机制。

## 参考文献 (References)

- Bellenger H, Duvel J P. 2009. An analysis of tropical ocean diurnal warm layers [J]. *J. Climate*, 22 (13): 3629–3646.
- Bernie D J, Woolnough S J, Slingo J M. 2005. Modeling diurnal and intraseasonal variability of the ocean mixed layer [J]. *J. Climate*, 18: 1190–1202.
- 陈海英, 方国洪, 乔方利, 等. 2007. 南海海面温度与 Niño/DMI 指数年际变异的相关性分析 [J]. *海洋科学进展*, 25 (1): 20–27. Chen Haiying, Fang Guohong, Qiao fangli, et al. 2007. Correlation analysis of interannual variabilities in SST in SCS and Niño/DMI indices[J]. *Advances in Marine Science (in Chinese)*, 25 (1): 20–27.
- Chen Y J, Xie Q, Meng W G. 2010. A numerical study of the influence of sea surface temperatures with different temporal resolutions on typhoon Dujuan over the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 16 (2): 195–200.
- 陈永利, 白学志, 赵永平. 2000. 南海夏季风爆发与热带海洋海温和大气环流异常变化关系的研究 [J]. *气候与环境研究*, 5 (4): 388–399.
- Chen Yongli, Bai Xuezhi, Zhao Yongping. 2000. A study on the relationships between the onset of the South China Sea summer monsoon and the anomalies of tropical ocean and atmospheric circulations [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (4): 388–399.
- Clayson C A, Chen A D. 2002. Sensitivity of a coupled single-column model in the tropics to treatment of the interfacial parameterizations [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1805–1831.
- Clayson C A, Weitlich D. 2005. Diurnal warming in the tropical Pacific and its interannual variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (21): L21604.1–L21604.4.
- Clayson C A, Weitlich D. 2007. Variability of tropical diurnal sea surface temperature [J]. *J. Climate*, 20 (2): 334–352.
- Cui X P, Li X F. 2012. Effects of sea surface temperature and its diurnal variation on diurnal variation of rainfall: A partitioning analysis based on surface rainfall budget [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 18 (1): 89–97.
- 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 835–846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 835–846.
- Embry O, Merchant C J, Filipiak M J. 2012. A reprocessing for climate of sea surface temperature from the along-track scanning radiometers: Basis in radiative transfer [J]. *Remote Sens. Environ.*, 116: 32–46.
- Filipiak M J, Merchant C J, Kettle H, et al. 2010. A statistical model for sea surface diurnal warming driven by numerical weather prediction fluxes and winds [J]. *Ocean Science Discussions*, 7 (4): 1497–1532.
- 傅云飞, 黄荣辉. 1997. 东亚西风异常活动对热带西太平洋西风爆发及 ENSO 发生的作用 [J]. *大气科学*, 21 (4): 485–492. Fu Yunfei, Huang Ronghui. 1997. Impacts of westerly anomalies over East Asia on westerly burst over the western tropical and the occurrence of ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 21 (4): 485–492.
- Garratt J R. 1977. Review of drag coefficients over oceans and continents [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 105 (7): 915–929.
- Gentemann C L, Donlon C J, Stuart-Menteth A, et al. 2003. Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (3), doi: 10.1029/2002GL016291.
- Gentemann C L, Wentz F J, Mears C A, et al. 2004. In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (C4): 021.1–021.9.
- Gille S T. 2012. Diurnal variability of upper ocean temperatures from microwave satellite measurements and Argo profiles [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (C11): C11027.1–C11027.16.
- Hu J Y, Kawamura H. 2004. Detection of cyclonic eddy generated by looping tropical cyclone in the northern South China Sea: A case study [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 23 (2): 213–224.
- 黄荣辉, 傅云飞, 袁晓云. 1996. 亚洲季风与 ENSO 循环的相互作用 [J]. *气候与环境研究*, 1 (1): 38–54. Huang Ronghui, Fu Yunfei, Zhan Xiaoyun. 1996. Asian monsoon and ENSO cycle interaction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1 (1): 38–54.
- Jeffery C D, Robinson I S, Woolf D K, et al. 2008. The response to phase-dependent wind stress and cloud fraction of the diurnal cycle of SST and air-sea CO<sub>2</sub> exchange [J]. *Ocean Modelling*, 23 (1–2): 33–48.
- Kahru M, Leppanen J M, Rud O. 1993. Cyanobacterial blooms cause heating of the sea surface [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 101: 1–7.
- Kawai Y, Kawamura H. 2002. Evaluation of the diurnal warming of sea surface temperature using satellite-derived marine meteorological data [J]. *Journal of Oceanography*, 58 (6): 805–814.
- Kawai Y, Kawamura H. 2005. Spatial and temporal variations of model-derived diurnal amplitude of sea surface temperature in the western Pacific Ocean [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (C8): C08012.1–C08012.14.
- Kawai Y, Wada A. 2007. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review [J]. *Journal of Oceanography*, 63 (5): 721–744.
- Kennedy J J, Brohan P, Tett S F B. 2007. A global climatology of the diurnal variations in sea-surface temperature and implications for MSU temperature trends [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (5): L05712.1–L05712.5.
- Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. 1998. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15 (3): 809–817.
- 李崇银, 咸鹏. 2003. 北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候的异常 [J]. *气候与环境研究*, 8 (3): 258–273. Li Chongyin, Xian Peng. 2003. Interdecadal variation of SST in the North Pacific and the anomalies of atmospheric circulation and climate [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (3): 258–273.
- Li J. 2011. SST Diurnal variability in the climate forecast system and its influence on low frequency variability [D]. Ph. D. dissertation, George Mason University, 137pp.
- Li W, Yu R C, Liu H L, et al. 2001. Impacts of diurnal cycle of SST on the

- intraseasonal variation of surface heat flux over the western Pacific warm pool [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (5): 793–806.
- 梁卫, 温之平, 李秀珍, 等. 2009. 南海夏季风爆发前后南海海温之演变特征 [J]. *热带气象学报*, 25 (S1): 85–91. Liang Wei, Wen Zhiping, Li Xiuzheng. 2009. An analysis of SST variation during South China Sea monsoon onset period in South China Sea [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 25 (S1): 85–91.
- 林鹏飞, 刘海龙, 章丽娜, 等. 2012. 东太平洋冷舌区海表面温度日变化特征的模拟研究 [J]. *大气科学*, 36 (2): 259–270. Lin Pengfei, Liu Hailong, Zhang Li'na, et al. 2012. The simulation study of the features of diurnal variation of sea surface temperature in the Eastern Pacific cold tongue [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (2): 259–270.
- 刘珊. 2011. 北太平洋上层海洋热收支研究 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Liu Shan. 2011. Study on the heat budget in the North Pacific [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Science.
- Lu R Y, Dong B W. 2005. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997–1998 [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D16): D16102.1–D16102.11.
- 毛江玉, 吴国雄. 2012. 基于 TRMM 卫星资料揭示的亚洲季风区夏季降水日变化 [J]. *中国科学地球*, 42 (4): 564–576. Mao Jiangyu, Wu Guoxiong. 2012. Diurnal variations of summer precipitation over the Asian monsoon region as revealed by TRMM satellite data [J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (4): 554–566.
- 毛江玉, 谢安, 宋焱云, 等. 2000. 海温及其变化对南海夏季风爆发的影响 [J]. *气象学报*, 58 (5): 556–569. Mao Jiangyu, Xie An, Song Yanyun, et al. 2000. Impact of sea surface temperature and its varions on the onset of summer monsoon over South China Sea [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (5): 556–569.
- Marullo S, Santoleri R, Banzon V, et al. 2010. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (C5): C05011.1–C05011.18.
- 莫嘉琪, 林一骅, 王辉. 2006. 副热带圈和赤道太平洋海表温度年代际变更的海—气振子模型的研究 [J]. *地球物理学报*, 49 (6): 1899–1902.
- Mo Jiaqi, Lin Yihua, Wang Hui. 2006. Study for the sea-air oscillator model of decadal variations in subtropical cells and the sea surface temperature (SST) of equatorial pacific [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49 (6): 1899–1902.
- Oda R, Kanda M. 2009. Observed sea surface temperature of Tokyo Bay and its Impact on urban air temperature [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48 (10): 2054–2068.
- Pimentel S, Haines K, Nichols N K. 2008. Modeling the diurnal variability of sea surface temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (C11): C11004.1–C11004.11
- Price J F, Mooers C N K, Van Leer C L. 1978. Observation and simulation of storm-induced mixed-layer deepening [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 8(4): 582–599.
- Price J F, Weller R A, Pinkel R. 1986. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing [J]. *J. Geophys. Res.*, 91 (C7): 8411–8427.
- Price J F, Morzel J, Niiler P P. 2008. Warming of SST in the cool wake of a moving hurricane [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (C7): C07010.1–C07010.19.
- Sakaida F, Kudoh J, Kawamura H. 2000. A-HIGHERS-The system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the western North Pacific using the AVHRR/NOAA [J]. *Journal of Oceanography*, 56 (6): 707–716.
- Shenoi S S C, Nasnodkar N, Rajesh G, et al. 2009. On the diurnal ranges of sea surface temperature (SST) in the north Indian Ocean [J]. *Journal of Earth System Science*, 118 (5): 483–496.
- Slingo J, Inness P, Neale R, et al. 2003. Scale interactions on diurnal to seasonal timescales and their relevance to model systematic errors [J]. *Annals of Geophysics*, 46 (1): 139–155.
- Stuart-Menteth A C, Robinson I S, Challenor P G. 2003. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (C5): 24.1–24.12.
- 孙即霖, 吴德星, 徐天真. 1993. TOGA-COARE IOP 海—气通量和 SST 季节内变化的分析 [J]. *青岛海洋大学学报*, (S2): 63–78. Sun Jilin, Wu Dexing, Xu Tianzhen. 1993. Analysis of intraseasonal variations of SST and air-sea fluxes during TOGA-COARE IOP [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao (in Chinese)*, (S2): 63–78.
- Sun Q, Song J B, Guan C L. 2005. Simulation of the ocean surface mixed layer under the wave breaking [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 24 (3): 9–15.
- Tanahashi S, Kawamura H, Takahashi T, et al. 2003. Diurnal variations of sea surface temperature over the wide-ranging ocean using VISSR on board GMS [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (C7): 3216.
- 滕伟成. 2011. 卫星海表温度日变化校正研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 60pp. Teng Weicheng. 2011. Study on diurnal variation correction of satellite sea surface temperature [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 60pp.
- Wang D X, Zhao H. 2008. Estimation of phytoplankton responses to hurricane Gonu over the Arabian Sea based on ocean color data [J]. *Sensors*, 8 (8): 4878–4893.
- Wang Y, Fu Y F, Liu G S, et al. 2009. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D21): 304.1–304.12.
- 王雨, 傅云飞, 刘奇, 等. 2011. 一种基于 TMI 观测结果的海表温度反演算法 [J]. *气象学报*, 69 (1): 149–160. Wang Yu, Fu Yunfei, Liu Qi, et al. 2011. An algorithm for sea surface temperature retrieval based on TMI measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 149–160.
- Ward B. 2006. Near-surface ocean temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (C2): C02004.1–C02004.18.
- Webster P J, Clayson C A, Curry C A. 1996. Clouds, radiation, and the diurnal cycle of sea surface temperature in the tropical Western Pacific [J]. *J. Climate*, 9 (8): 1712–1730.
- Weitlich D. 2005. Seasonal and interannual variability of tropical diurnal warming of sea surface temperatures [D]. M. S. thesis, Florida State University, 82pp.
- Yang G Y, Slingo J. 2001. The diurnal cycle in the tropics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (4): 784–801.
- 杨元建, 傅云飞, 孙亮, 等. 2010. 基于多卫星和 Argo 浮标观测海洋上层对台风婷婷的响应 [J]. *中国科学技术大学学报*, 40 (1): 1–7. Yang Yuanjian, Fu Yunfei, Sun Liang, et al. 2010. Response of the upper ocean to Typhoon Tingting based on multi-satellite and Argo float observations [J]. *Journal of Chinese University of Science and Technology*, 40 (1): 1–7.

- Yuanjian, Fu Yunfei, Sun Liang, et al. 2010. Responses of the upper ocean to typhoon Tingting observed from multiplatform satellites and Argo float [J]. Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese), 40 (1): 1–7.
- 杨元建, 洗桃, 孙亮, 等. 2012. 连续台风对海表温度和海表高度的影响 [J]. 海洋学报, 34 (1): 71–78. Yang Yuanjian, Xian Tao, Sun Liang, et al. 2012. Impacts of sequential typhoons on sea surface temperature and sea surface height in September 2008 [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 34 (1): 71–78.
- 应明, 万日金. 2011. 影响我国的热带气旋年频数预测 [J]. 应用气象学报, 22 (1): 66–76. Ying Ming, Wan Rijin. 2011. The annual frequency prediction of tropical cyclones affecting China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (1): 66–76.
- 臧楠. 2005. 南海 SST 日变化特征及夏季风爆发对 SST 日变化的影响 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 65pp. Zang Nan. 2012. Diurnal cycle of SST in South China Sea and the effect of summer monsoon onset [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 65pp.
- 赵巧莲, 李崇银, 谭言科. 2011. 亚太地区冬季海平面气压异常的偶极型结构及其与海温的关系 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 551–564. Zhao Qiaolian, Li Chongyin, Tan Yanke. 2011. The dipole mode of Asia-Pacific sea level pressure Anomalies in winter and its relation to SST [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (5): 551–564.
- 周波涛, 王会军. 2006. Hadley 环流的年际和年代际变化特征及其与热带海温的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (5): 1271–1278. Zhou Botao, Wang Huijun. 2006. Interannual and interdecadal variations of the Hadley circulation and its connection with tropical sea surface temperature [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (5): 1271–1278.