

陈兵 黎璐 葛旭阳 等. 热带海水温度多时间尺度变化特征分析. 气象科学 2020 40(4): 475-484.

CHEN Bing, LI Lu, GE Xuyang, et al. Analysis of multi-time-scale variability characteristics of sea water temperature in tropical oceans. Journal of the Meteorological Sciences, 2020 40(4): 475-484.

热带海水温度多时间尺度变化特征分析

陈兵^{1,2} 黎璐² 葛旭阳² 姜有山³ 陈明诚²

(1 江苏省气候中心, 南京 210009; 2 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 3 南京市气象局, 南京 210000)

摘要 利用高时间分辨率热带海洋浮标站点观测资料, 分析热带区域海水温度多时间尺度变化特征, 研究海水温度的日变化、季节变化和季节内变化。结果表明: 热带海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 具有不对称性的日变化特征。SST 日较差与天气状况关系密切。有降水日的 SST 日平均值和幅度均低于无降水日, 其不对称性具有区域性差异。在不同 ENSO 位相年份下的 SST 日平均值和振幅变化具有区域性, 太平洋西部 (Western Pacific, WP) 的平均值和振幅差距较小, 太平洋东部 (Eastern Pacific, EP) 和印度洋 (Indian Ocean, IO) 区域在 El Niño 年的日平均值和振幅均大于 La Niña 年。SST 随季节变化具有区域性特征, WP 区域 SST 的日平均温度和振幅在秋季最大, 冬季最小; 而 EP 和 IO 区域的日平均温度和振幅在春季最大, 夏季最小。且 SST 日变化幅度随季节变化显著, 主要受太阳短波辐射、降水和风速随季节变化的调制。此外, 在季节内振荡时间尺度上, 海水温度在 200 m 深度内随时间呈周期性变化, 海水温度出现最大变率的中心位于 100~150 m 的深度范围内。不同区域由于温跃层深度不同, 最大变率位置也有所差别。对海水温度变化特征分析可以为海—气耦合模式提供观测依据, 以便准确地评估模式对海水温度的模拟效果。

关键词 海表面温度; 日变化; 季节变化; 季节内变率

分类号: P732.6

doi: 10.3969/2019jms.0035

文献标识码: A

Analysis of multi-time-scale variability characteristics of sea water temperature in tropical oceans

CHEN Bing^{1,2} LI Lu² GE Xuyang² JIANG Youshan³ CHEN Mingcheng²

(1 Jiangsu Climatic Center, Nanjing 210009, China;

2 School of Atmospheric Sciences, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3 Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract Based on the high-temporal resolution buoy observations, the multi-time-scale variations of Sea Water Temperature (SWT) in tropical oceans, focusing on the daily, seasonal, and interseasonal changes of sea temperature were investigated. The results indicate that the diurnal cycle of SWT is significant just near the surface. And the diurnal Sea Surface Temperature (SST) variation is asymmetric. Statistical analysis shows that the effects of rain and different ENSO phase on the diurnal SST amplitude are significant and shows the regional characteristics, just as it influences the time of the minimum/maximum value. And the amplitude of the diurnal cycle of the SST tends to be smaller on rainy days than

收稿日期 (Received): 2019-04-04; 修改稿日期 (Revised): 2019-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1502002); 国家自然科学基金面上资助项目 (41575056); 江苏省自然科学基金青年资助项目 (BK20180811)

通信作者 (Corresponding author): 葛旭阳 (GE Xuyang). xuyang@nuist.edu.cn

that in fair days. The diurnal cycle of SST also shows that the salient seasonal variations, such as the daily mean temperature and amplitude of the diurnal cycle of the SST in the WP are the largest in autumn and the smallest in winter, whereas in the EP and IO maximized in spring and minimized in summer, which is mainly related to the modulation of the atmospheric conditions. The intraseasonal variations of SWT in the tropical oceans are most evident between the depths of 100—150 m. The maximum variability is also different in different regions due to the different positions of the thermocline. Overall, these variations of SWT on the diurnal and intraseasonal timescale are fundamental for understanding the possible role of SWT in the lower-frequency variability in the coupled ocean-atmosphere. In particular, the observations and analyses of these variabilities are able to provide observational shreds of evidence for the coupled atmosphere-ocean model so that the simulation of the model on ocean variabilities can be assessed more accurately, and the accuracy of simulation and prediction on MJO can be evaluated.

Key words SST; diurnal cycle; seasonal variation; intraseasonal variability

引言

海水温度(Sea Water Temperature, SWT)是研究全球海气相互作用的一个重要物理参数,特别是海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)与大气要素之间的相互作用,能够对不同时间尺度的大气变化产生影响^[1]。近年来,科学家们开始关注海水温度对热带气旋频数、路径、强度的影响^[2]。同时,许多学者也进一步对 SST 不同时间尺度变化特征及其影响因素进行研究^[3-4]。SST 变化在不同时间尺度上可分为日变化、季节变化、年际变化、年代际变化等。随着观测资料的不断丰富,SST 日变化也越来越受到关注^[5]。Sakaida, et al^[6]指出在热带和副热带地区,SST 日变化尤为显著,且具有区域性。SST 日变化主要由海洋表面的能量收支决定,白天,当海洋表层所吸收的短波辐射能量大于向外放出的长波辐射能量时,SST 升高,峰值一般出现在午后;而当海洋向大气释放的能量大于其吸收的能量时,SST 则降低。此外,SST 日变化还受到海表面风速(Sea Surface Wind, SSW)、云、降水以及海洋内部动力过程的影响,这也使得 SST 日变化在不同区域具有不同的表现形式^[7-8]。总之,SST 日较差随区域、季节变化、海水深度以及观测时间不同而存在差异^[9-11]。在季节变化尺度上,陈烈庭等^[12]对印度洋区域 SST 进行研究,指出在季风影响下,北印度洋 SST 日较差振幅在 1 a 内出现两次极大值和极小值,而南印度洋 SST 日较差振幅则与太阳短波辐射随季节变化较为一致。

季节内振荡在热带海洋也是普遍存在的现象。在季节内时间尺度上,SST 日变化不仅能影响印度洋和西北太平洋季节内振荡(Madden-Julian

Oscillation, MJO)的传播特征,且进一步影响到更长时间尺度的海洋和大气过程^[13-16]。而由 MJO 导致的对流和风场,以及入射的太阳辐射也会使得上层海洋(海表面至海深 300 m 处)的热力结构产生显著的季节内变化^[17]。在此基础上,Krishnamurti, et al^[18]指出,热带西太平洋和印度洋的 SST 和 SSW 都呈现出 30~60 d 的季节内振荡周期。李奎平等^[19]指出海表净热通量和海洋混合层变化的共同作用是导致热带印度洋 SST 产生季节内振荡的主要原因。另有一些学者研究了热带印度洋的温跃层、混合层等特征,海洋温跃层的位置分布以及变化对其内部运动都有着重要影响。同时,上层海水的不对称性加热会使得海水温度产生日变化,进而影响其季节内的变率^[20]。GE, et al^[21]指出模式中 SST 日变化、季节内变化,以及次表层垂直温度梯度的模拟很大程度上受模式的垂直分辨率的影响。同时,CHEN, et al^[22]指出在热带海洋区域,海温对于大气的反馈作用构成了海气相互作用中至关重要的一环,且具有区域性特征。

综上所述,国内外学者对海水温度变化及其影响因素进行了较为深入的探讨。但由于在广阔的洋面,站点资料甚少,很多研究仅针对特定区域甚至特定站点展开,结果是否适用于所有热带海洋区域,还有待进一步证实。基于以上考虑,拟利用高时间分辨率的浮标站点观测资料对热带海洋海水温度多时间尺度变化特征进行研究。

1 资料和方法

本文使用资料来源于 TAO/TRITON (TAO Project Office 2000) 浮标观测计划和“非洲—亚洲—大洋洲季风分析与预测研究浮标观测计划”

(RAMA)提供的逐时海水温度、降水量、3 m 高度总风速数据。由于不同区域浮标的有效数据时间跨度不统一,本文选取具有相同连续较长时间的浮标站点分区域进行分析。由于不同区域间海表面温度及其影响作用具有很大差异^[23],且各区域资料有效时间段并不完全一致,因此将研究区域划分为西北太平洋区域(Western North Pacific, WNP; 5°S~8°N, 137°~156°E),资料时间段为2008—2014年;东太平洋区域(Eastern Pacific, EP; 2°S~2°N, 110°~140°W),资料时间段为1994—1999年;印度洋区域(Indian Ocean, IO; 1.5°~8°S, 80.5°~95°E),资料时间段为2010—2016年。由于东太平洋区域缺少逐小时降水资料,本文使用热带降雨测量计划(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)提供的水平分辨率为0.25°×0.25°的逐3 h降水资料代替。研究区域范围及站点分布如图1所示。

本文在讨论 SST 日变化时,已统一将世界时转化为地方时。采用分析方法包括合成分析、相关分析和 Lanczos 滤波方法等,重点分析 SST 振幅(DSST)的日变化特征和极值时刻等。同时,为了描述 SST 日变化的不对称性,计算了 SST 正负异常极值的绝对值之差(D)以及对 SST 正负异常值个数比($0 < N < 1$)。当 D 值越接近于 0,即非对称性越小,说明极值大小分布更加对称;当 $|N|$ 更接近于 1,说明 SST 日变化更加对称。值得注意的是,不同区域的 SST 日变化均为多年平均。计算 ENSO 不同位相下 SST 日变化时,El Niño 和 La Niña 年的选取通过冬季的 Niño-3 指数进行判定,选取指数大于 1 个标准差的 ENSO 年进行分析。根据这一标准,选取 1982、1986、1991、1994、1997、2002、2009 和 2015 年作为 El Niño 年,1984、1988、1998、1999、2007 和 2010 年为 La Niña 年。先挑选出各个站点的 ENSO 年份,依次以时刻为单位对各站点进行两类 ENSO 年份平均和区域平均。同时,对于不同区域 SST 日变化以及各要素的季节特征,首先将不同区域各站

点的变量以月为单位按时刻进行合成,再将各年相同月份进行合成,最后进行区域平均,得到不同区域 SST 日变化以及其他要素的季节变化特征。

2 海表面温度日变化特征及分析

2.1 海表面温度日变化特征

为表征次表层海水温度日变化特征,图2给出了不同区域 1~40 m 上层海水温度日变化距平值随深度变化的情况。需要指出的是,各区域海表面温度日变化距平值是在去除该区域多年日平均值后获得,即 WP 区域为 2008—2014 年平均,EP 区域为 1994—1999 年平均,IO 区域为 2010—2016 年平均。由图 2 可见,随着深度的增加,海水温度的异常值日变化幅度逐渐减小,仅在 1~10 m 内(海洋表层)存在着较强的垂直梯度,正负异常值差异可达到 0.3 °C 以上。当海深 15~20 m 时,异常值日变化幅度小于 0.05 °C;海深 20~40 m 时,海水温度异常值近乎为 0。这表明海水温度日变化主要来自于海洋表层 10 m 以内的贡献,10 m 以下深度的海水温度日变化并不明显,与 GE et al^[21]的观测结果一致。表层海洋作为大气和海洋系统的交界面,直接受到太阳辐射的影响,因此 SST 日变化最为显著。相较而言,次表层海水温度主要受控于海表面风应力和海洋内部动力过程共同作用,其日变化较小。

图 3 为不同区域 SST 异常值日变化情况。各海域 SST 负距平极值基本出现在 06:00—08:00(地方时,下同),正距平极值则出现在 15:00—16:00。而不同区域 SST 日均值和日较差振幅存在一定差异,WP 区域海表面日均温度最高(29.6 °C),而 EP 区域海表面日均温度最低(25.9 °C),且日较差振幅最大(0.36 °C)。同时,不同区域海表温度日变化均呈现出不对称的正弦式变化特征。3 个海域 SST 正负距平极值分布均具有不对称性,正距平极值大于负距平极值。其中,WP 区域的 SST 正负异常极值绝对值之差最大(0.09 °C),EP 区域最小(0.06 °C),

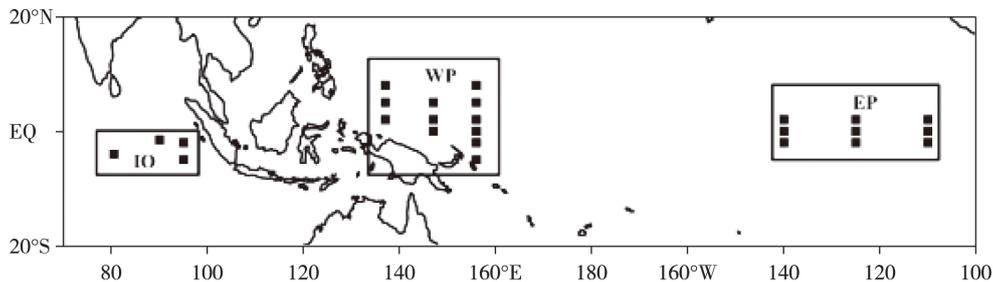


图1 研究区域及浮标站点位置分布
Fig.1 The location of buoys used in this study

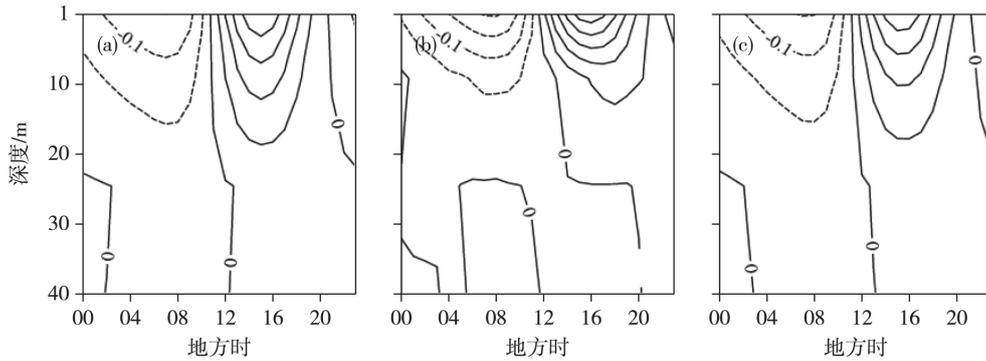


图2 不同区域 1~40 m 海水温度异常值日变化剖面(单位: °C) (等值线间隔为 0.05): (a) WP; (b) EP; (c) IC
 Fig.2 Time-depth cross sections of the diurnal cycle of SWT in different oceans of 1—40 m(unit: °C) (the isoclines interval is 0.05 °C): (a) WP; (b) EP; (c) IO

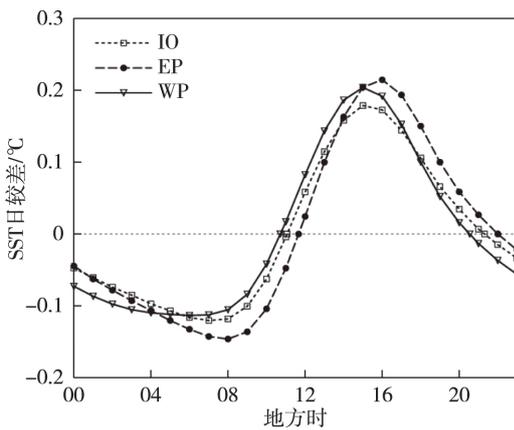


图3 不同区域 SST 异常值日变化演变特征(单位: °C)
 Fig.3 The diurnal cycle of SST in different oceans (unit: °C)

IO 区域介于二者之间。说明 WP 区域的正负异常极值大小分布不对称性最强。同时,不同区域平均后的 SST 正异常值个数均少于负异常值,WP 和 IO 区域 SST 正负异常值个数比为 10:14,EP 区域为 11:13,表明 EP 区域的正负异常极值水平分布更加对称(表 1)。

上述结果表明,热带地区各海域 SST 均具有明显的日变化特征,且在 SST 日平均值、日较差振幅和不对称性等方面均具有显著的区域性变化特征。前人研究工作表明^[21],造成 SST 日变化的主要原因包括:日出之后,在太阳短波辐射作用下海表面吸收的热量逐渐大于散失的热量,SST 升高,且于午后达到最大值;午后到日落太阳短波辐射逐渐减弱,海表面散失的热量大于吸收的热量,SST 逐渐降低;从日落夜间再到次日日出,太阳短波辐射通量为 0,海表热量净流出,SST 持续降低,且于日出前后达到最小值。而 SST 对太阳短波辐射具有滞后效应,正是由于这种不对称性加热过程导致了 SST 日变化同样具有不对称性特征。同时由于不同海区云量

的差异,太阳短波辐射作用的区域性分布不均也会导致 SST 日变化存在区域性差异。

2.2 晴空日和降水日 SST 日变化特征

图 4 为各个区域在不同天气状况下的 SST 异常值日变化情况。在有、无降水情形下,SST 异常值均呈现出明显的日变化特征,且日较差幅度存在显著的差别,这种差异在 WP 和 IO 区域尤为明显。无降水情形下,SST 日较差振幅相比于有降水时高出 0.04~0.15 °C,各海域在降水情况下减小的日较差幅度有一定的差异。同时,EP 和 IO 区域在无降水情形下的 SST 日均值更高,比有降水时高 0.4~0.6 °C,WP 区域无显著差异。总而言之,降水会导致 SST 日较差幅度和日平均值减小。此外,在不同天气状况下各个海域 SST 正负异常极值分布均具有不对称性特征,正距平极值大于负距平极值。这也反映在正负异常值个数比上,如各个海域 SST 正负异常值个数比均具有不对称性,且负异常值个数多

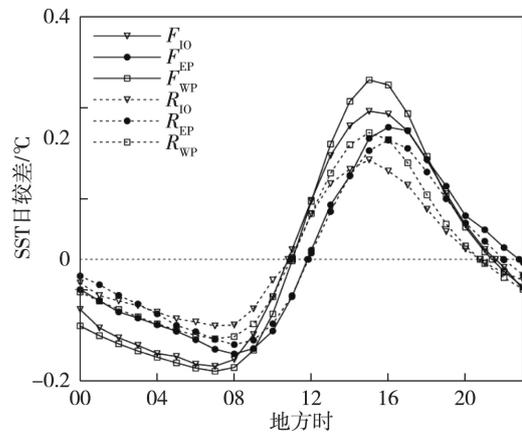


图4 不同区域无降水日和降水日海表温度日变化曲线(单位: °C) (R 和 F 分别表示有、无降水情况)
 Fig.4 Diurnal cycle of SST anomaly (unit: °C) under fair days and rainy days in different oceans (R and F indicate rainy and fair days, respectively)

于正常值。同时,在有降水情形下,WP 和 IO 区域 SST 正负异常极值绝对值之差都小于无降水的情况,EP 区域无显著差异。表面在有降水情况下,WP 和 IO 区域 SST 正负异常极值大小分布趋向对称(表 2)。

SST 日变化不仅受到太阳辐射的影响,而且与风和降水之间的相互作用也有密切关系,这也是造成在有、无降水情形下 SST 日变化产生差异的主要原因。一方面,由于海洋在温度高时会向大气释放出更多的能量,进而引起大气的不稳定,最终引发降水。另一方面,在有降水时海表面会伴随着风对海水的搅拌,这种搅拌作用是海洋表层海水动力混合的一个能量来源^[17],这使得不同深度的海水之间发生混合,下层温度较低的海水上翻,上层温度较高的海水下沉,使得海表面温度降低,且这种搅拌作用在海表面表现得最为显著,因此最终导致 SST 日变化在有、无降水情形下呈现出明显差异;此外,在有降水情况下,海区云量增多,使得海表面吸收的太阳短波辐射减少,抑制海表面温度的升高,最终导致 SST 日较差幅度减小。总之,由于降水的作用使得 SST 日较差幅度减小,但日平均 SST 高时更有利于降水的产生,这很好地体现了 SST 和降水之间的相互作用。

2.3 ENSO 年份 SST 日变化特征

Kawai, et al^[24]指出在同一区域 SST 日变化在不同 ENSO 位相下存在差异。图 5 显示不同区域 El Niño 和 La Niña 年热带海洋 SST 的日变化情况。在不同位相下, SST 都均具有明显的日变化特征,正负距平极值出现时间均具有一致性。El Niño 年 SST 日较差幅度较 La Niña 年更大,这种差异在 EP 和 IO 区域尤为明显($>0.03 \sim 0.04 \text{ } ^\circ\text{C}$)。此外,在不同 ENSO 位相下,各个海域 SST 正负异常极值分布均具有不对称性特征,正距平极值大于负距平极值。除 WP 区域外, EP 和 IO 区域在 El Niño 年的 SST 正负异常极值绝对值之差大于 La Niña 年($>0.01 \sim 0.02 \text{ } ^\circ\text{C}$)。而 WP 区域相反,在 El Niño 年的正负异常极值绝对值之差小于 La Niña 年,但差异较小($<0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$)。且不同 ENSO 位相对 SST 日变化及不对称性的影响效果弱于降水作用的影响。

已有研究指出不同 ENSO 事件中海表面温度的变化特征,如 El Niño 年较高的 SST 使大气边界层更不稳定,将导致地面风速增大以及海气热传递增强,从而使 SST 日变化的时空特征也发生相应变化^[24-25]。这也是导致各个海域 SST 日变化在不同 ENSO 位相下呈现差异的主要原因。

表 1 不同区域平均 SST 日变化统计值

Table 1 Statistical values of the regional averaged diurnal variation of SST for different regions

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	振幅 /°C	日平均 /°C	正负异常值 绝对值之差	正负异常值 个数比
WP	06:00	15:00	29.49	29.80	0.31	29.6	0.09	10:14
EP	08:00	16:00	25.73	26.09	0.36	25.9	0.06	11:13
IO	07:00	15:00	28.83	29.13	0.29	29.0	0.07	10:14

表 2 不同区域晴雨状况平均 SST 日变化统计

Table 2 Statistical values of the regional averaged diurnal variation of SST for different regions under fair and rainy days

晴雨状况	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	振幅 /°C	日平均 /°C	正负异常值 绝对值之差	正负异常值 个数比
雨	WP	07:00	15:00	29.53	29.87	0.34	29.7	0.08	10:14
	EP	08:00	16:00	25.93	26.27	0.33	26.1	0.06	10:14
	IO	07:00	15:00	28.70	28.97	0.27	28.8	0.05	10:14
晴	WP	07:00	15:00	29.48	29.96	0.48	29.7	0.11	10:14
	EP	08:00	16:00	26.51	26.88	0.37	26.7	0.06	11:13
	IO	07:00	15:00	28.95	29.40	0.42	29.2	0.07	11:13

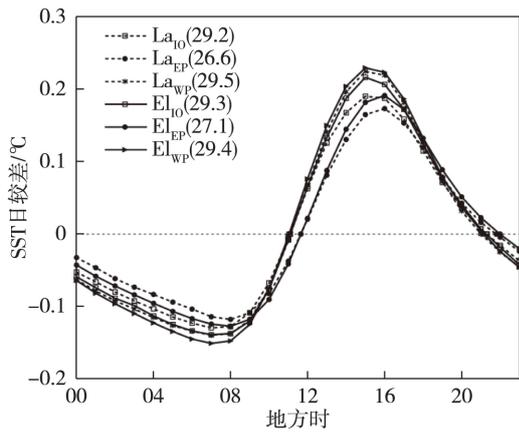


图5 不同区域 El Niño 年和 La Niña 年 SST 异常值日变化 (单位: °C) (El 和 La 分别表示 El Niño 年和 La Niña 年)
 Fig.5 Diurnal cycle of SST anomaly (unit: °C) during El Niño and La Niña years in different oceans (El and La indicate the El Niño and the La Niña years, respectively)

3 海表面温度的季节特征

为了解不同海域 SST 日变化受季节影响的程度,图 6 给出了不同区域 SST 日变化异常值季节性变化情况。总体上看,在 EP 和 IO 区域,冬春季节 SST 日较差振幅更大,且这种差异在 EP 区域更为明显,在春季达 0.5 °C;两个区域日较差振幅最小(0.26 °C 和 0.19 °C)均在夏季。而 WP 区域在秋季时 SST 日较差振幅最大(0.37 °C),在冬季最小(0.27 °C)。这意味着 WP 区域 SST 日变化的季节差异较小,EP 和 IO 区域较大,变化幅度在 0.24 °C 左右。不同区域日变化异常极值出现时间随季节变化均无显著差异。同时,在不同季节下,3 个区域正负异常极值分布均具有不对称特征,正距平极值强于负距平,且不对称性仍存在些许差异,如 EP 和 IO 区域的 SST 异常极值绝对值之差在冬、春季节较大,且在冬季最大;而 WP 区域的异常极值绝对值之差在春、秋季节较大,且在秋季最大。

为更细致了解 SST 日较差振幅(DSST)随季节变化的特点,本文给出了逐月 DSST 变化情况(图 7)。总的来看,EP 和 IO 区域的整体变化趋势较为相似,均于 3 月达到峰值(0.68 °C 和 0.57 °C),分别于 7、8 月达到谷值(0.24 °C 和 0.28 °C),而 WP 区域则有两个峰值,分别在 4 月和 10 月,10 月为最大峰值(0.42 °C),谷值在 2 月(0.28 °C)。

出现这种季节差异的原因与太阳辐射的季节变化、平均风速及降雨的季节变化相关。图 8 给出了日均短波辐射、风速和降水率随月份变化的情况。可见,不同区域 DSST 随月份变化大致趋势与太阳短波辐射变化较一致。3 个区域日均短波辐射随月份变化均呈现双峰型,这是因为浮标站点的太阳短波辐射主要受太阳直射点的季节性南北移动控制,同时也受到季风的季节性转换的调制。由于浮标站点位于热带区域,受太阳辐射高度角的年变化影响,在春、秋季节到达海面的短波辐射最大,因此在春季和秋季达到最大值。同时在冬季季风期间,空气干燥,少降水,天空云量少,到达海面的短波辐射通量会大,而夏季季风期间,空气湿度大,降水多,天空云量多,到达海面的短波辐射通量反而会小,因而在夏季达到极小值。而风速和降水随季节变化则在不同区域呈现差异,主要与不同区域的季风季节性转换以及环流不同有关。图 7、8 表明,由于在季风转换期,风速达到最低,伴随海洋弱的垂直混合,同时此时天气以晴好为主,海区云量较少,使得海表面吸收的太阳短波辐射增多,这个时期各海域的 SST 日变化振幅均大于季风期,平均每年在 3 月或 4 月达到第一次极大值。由于处于热带印度洋—太平洋暖池区,气候平均海温较高,海温变化与积云对流过程紧密相连,SST—云—短波负反馈过程和 SST—海气比湿差—潜热负反馈过程完全成立。因此对于 WP 和 IO 区域,随着 4 月夏季风

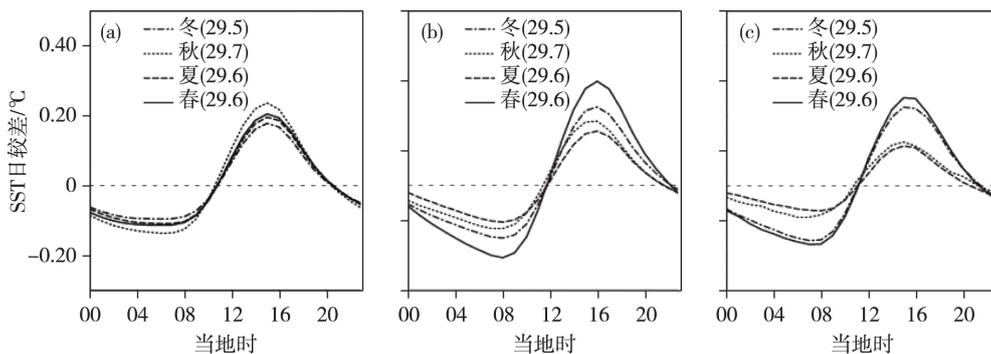


图 6 不同区域 SST 日变化异常值季节曲线(单位: °C)
 Fig.6 Seasonal distribution the diurnal cycle of SST anomaly in different oceans (unit: °C)

的建立,风速逐渐增大,伴随海洋强的垂直混合与降雨天气越来越多,导致海区云量增多,太阳短波辐射日变化幅度降低,最终使得 SST 日变化振幅在 7 月降到极小值。随后,季风开始减弱,海洋的垂直混合变弱,加之太阳直射点南移,到达海面的太阳短波辐射不断增多,WP 区域则达到最大值,IO 区域不断增加。而 EP 区域位于冷舌区,气候平均海温较低(约 22 °C 附近),且处于 Walker 环流下沉支,因此大气中常伴随有层云出现。层云的出现阻碍了太阳短波辐射至海表,因此海温降低,增加了大气稳定度,使得层云结构更加稳定深厚,构成大气—海洋正反馈过程。当外界强迫或海洋内部温度平流过程使得热带 EP 增暖之后,大气逐渐不稳定,层云结构被打破,突破阈值后有积云对流活动出现。之后晴空下短波辐射(热力过程)以及海洋温度平流(动力过程)共同作用使得 EP 海温逐渐增暖。导致在 10 月 SST 日变化振幅在 EP 区域达到第二次极大值(较前期强度较弱),因此 EP 的短波与降水的关系与 WP 会有所不同。

可见,季节差异是因为 SST 日变化主要受太阳

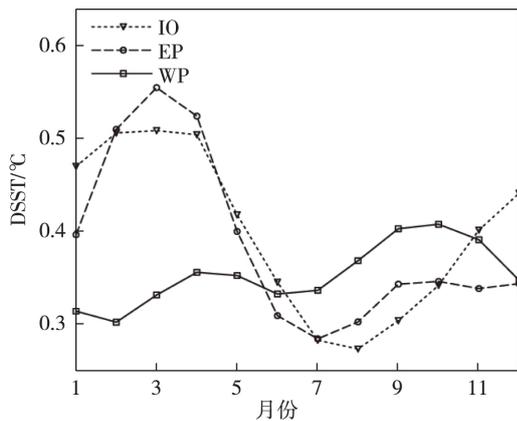


图 7 不同区域 DSST 随月份变化(单位: °C)

Fig.7 Monthly distribution of the DSST in different oceans (unit: °C)

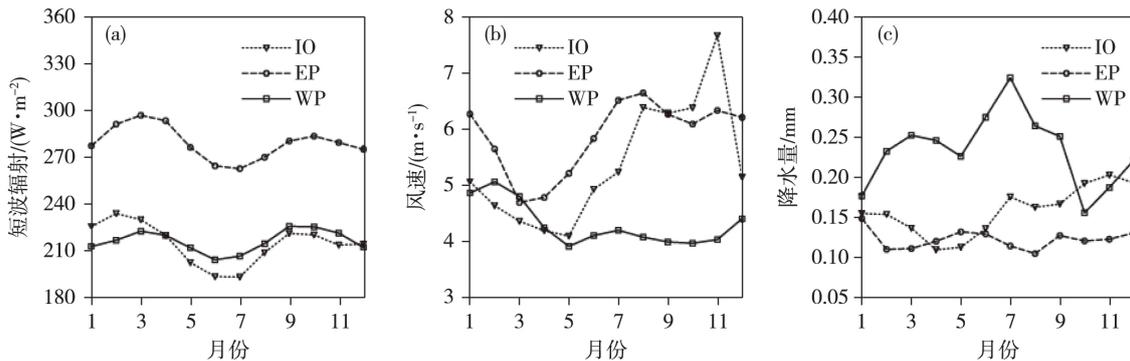


图 8 (a) 日均短波辐射(单位: $W \cdot m^{-2}$)、(b) 风速(单位: $W \cdot m^{-1}$)和(c) 降水量(单位: mm)随月份变化

Fig.8 Monthly distribution of the (a) shortwave radiation(unit: $W \cdot m^{-2}$), (b) total wind speed(unit: $W \cdot m^{-2}$) and (c) precipitation rate(unit: mm) in different oceans

辐射的影响。由于太阳辐射高度角的年变化,太阳短波辐射也呈季节性变化,进而导致 DSST 与太阳短波辐射有相似的变化规律^[12]。同时各个区域大气环境背景不同,较大的风速导致海水混合,降水量与云量相关进而影响短波辐射。这些因素综合影响下, SST 日变化在不同季节呈现出区域性差异。

4 海水温度季节内变化特征观测分析

4.1 不同区域海水温度季节内变化观测分析

热带海洋是大气季节内振荡(MJO)的活跃区域。在 MJO 影响下, SST 呈现出明显的季节内变化特征;而 SST 的不同时间尺度变化也会对 MJO 过程产生反馈。为进一步揭示热带海洋海水温度季节内时间尺度变化规律,采用 Lanczos 滤波方法,对各层次时间序列进行 20~60 d 的带通滤波,提取出低频风量。图 9 给出了不同区域 1~300 m 海水温度低频分量随时间演变情况。整体来看,不同区域海水温度均随时间呈现出周期性变化特征。在 200 m 以上层次海水温度的周期性变化最为明显,海水温度最大变率的中心位于 100~200 m 的深度范围内,这与 ZHANG^[17] 研究结果一致。

图 10 为各层海水温度方差的分布情况。方差越大,说明季节内振荡的强度越大。在 100~150 m 左右,不同区域都存在一个方差极大值即最大变率处。EP 和 IO 区域相对较浅,分别位于 100 m 和 125 m,WP 区域最深位于 150 m。且不同区域最大变率值有所差别,EP 区域最大(0.51),WP 区域最小(0.18)。这与各个区域温跃层的深度以及厚度有关,如 EP 区域的温跃层位置最浅且厚度最薄,所以 SWT 方差最大变率处最浅,方差更大;而 WP 区域的温跃层更深且厚度更厚,SWT 则在最大变率处

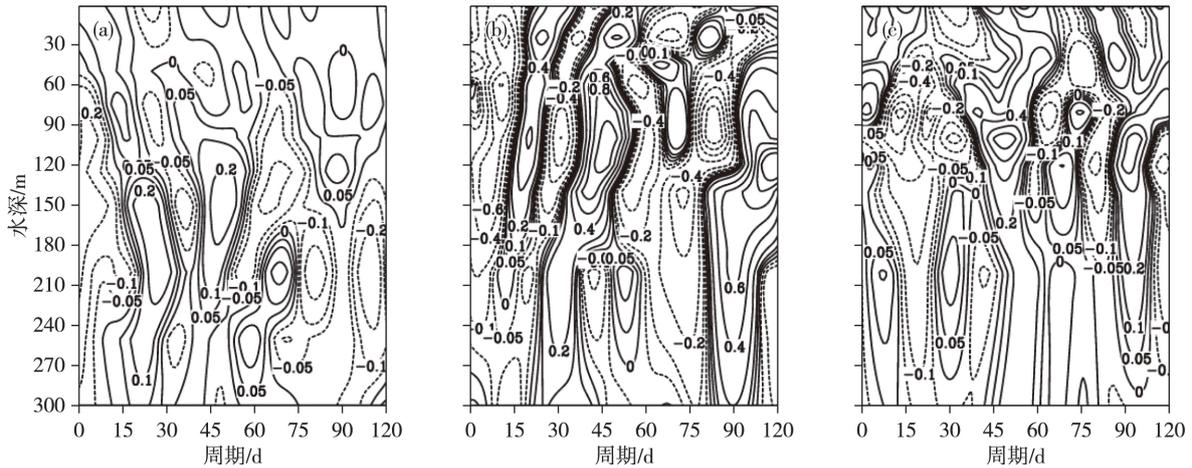


图9 不同区域 1~300 m 季节内时间尺度海水温度演变特征(单位: °C): (a) WP; (b) EP; (c) IO

Fig.9 Time-depth cross sections of the 20—60 d bandpass-filtered SWT (unit: °C) above 300 m depth in different oceans: (a) WP; (b) EP; (c) IO

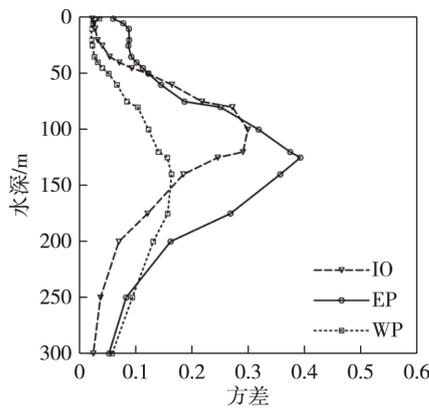


图 10 不同区域 300 m 以上海水温度低频分量方差分布曲线

Fig.10 Vertical distribution of the variance of the 20—60 d bandpass-filtered SWT above 300 m in different oceans

更深,方差更小。对于不同时间尺度,海水温度变化最大振幅出现的位置存在显著的差异,具体体现在最大变率的深度。日变化时间尺度上,海水温度产生最大变率的深度位于海洋表层(10 m 以上);季节内变化的时间尺度上,海水温度产生最大变率的深度位于 100~150 m。说明造成两种现象的物理机制不同,需要进一步研究。

4.2 SST 与大气要素季节内尺度相互作用

为探讨不同区域 SST 与大气要素在低频时间尺度上的相互作用,本文对不同区域 SST 与太阳短波辐射、3 m 总风速和降水率的时间序列先进行日平均和区域平均,再进行 20~60 d 的带通滤波,并分析不同区域 SST 与变量之间的超前滞后相关关系(图 11) 结果表明,在季节内振荡时间尺度上,不同区域 SST 与太阳短波辐射、降水和风关系显著,只是周期和相关性强度有差异。图 11a 为 SST 与太阳短

波辐射相关性,在-10~0 d, SST 与太阳短波辐射的滞后相关为正相关,而在 2~20 d, SST 与太阳短波辐射的超前相关为负相关。当 SST 滞后于太阳短波辐射时,较强的太阳短波辐射会使得 SST 升高,这种作用存在 2~6 d 的滞后;而当 SST 超前于太阳短波辐射时,较高的 SST 将会导致太阳短波辐射的降低,这种最强的抑制作用有 8~12 d 的超前。图 11b 为 SST 与 3 m 高度近地面总风速的相关性,与图 11a 相反,在-10 d 以内, SST 与总风速为负相关,而在 2~20 d 内, SST 与总风速为正相关。当 SST 滞后于总风速时,较强的总风速会导致 SST 的降低,这种最强的抑制作用有 2~6 d 的滞后;当 SST 超前于总风速时,较高的 SST 会激发对流促进总风速的增强,这种最强的促进作用有 10 d 左右的超前。图 11c 为 SST 与降水率的相关性,大致趋势与图 11b 类似。当 SST 滞后于降水率时,在-10 d 以内为负相关,即-10 d 内较大的降水率可能会使 SST 降低,这种最强的抑制作用有 2~6 d 的滞后;当 SST 超前于降水率时,在 1~20 d 为正相关,即 20 d 内较高的 SST 可能会使降水率增加,这种最强的促进作用有 8~10 d 的超前。

Hendon, et al^[26] 指出,海表面的潜热通量、感热通量以及太阳短波辐射通量被认为是海水温度季节内变化的主要驱动力。CHEN, et al^[22] 研究指出,海水温度的变化对大气和气候系统也有重要影响,且具有区域性特征。具体而言,在 WP 和 IO 区域的暖池区,大气对流活动与局地海温息息相关。一方面,强的太阳短波辐射会促进海表温度升高,这种促进作用有 2~5 d 的滞后;而海表面温度的升高会正向反馈到大气,使得大气变为不稳定进而激发对

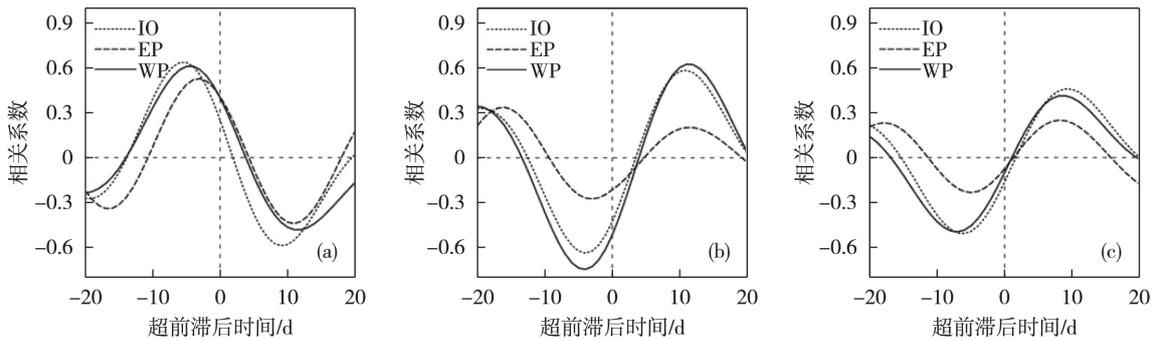


图 11 SST 与大气要素的超前滞后相关: (a) 日均短波辐射(单位: $W \cdot m^{-2}$); (b) 海表总风速(单位: $m \cdot s^{-1}$); (c) 降水率(单位: mm)

Fig.11 The leading-lagged auto-correlation coefficient of SST:

(a) solar shortwave radiation (unit: $W \cdot m^{-2}$); (b) 3 m total wind speed (unit: $m \cdot s^{-1}$); (c) precipitation rate (unit: mm)

流产生,形成对流云。这将导致风的增强和降水的增加,从而导致冷海水上翻和海面蒸发增强,云量增多;更加深厚的云层将阻碍太阳短波辐射入射至海表,在一定程度上不利于海温持续增暖,因而构成热力负反馈过程。另一方面,除了海面风速外,海气比湿差同样是影响潜热释放通量的重要因子。在热带海域,海气比湿差通常正比于局地 SST,因此较暖的 SST(或 DSST)可以增大海洋—大气间比湿差,从而造成较强的海表潜热通量,抑制海温持续增暖。而在 EP 区域,由于位于冷池区,海温偏低,且位于 Walker 环流下沉支,大气中常伴随有层云出现。当外界强迫或海洋内部温度平流过程使得热带 EP 增暖之后,由于大气逐渐不稳定,导致层云结构被打破。在短波辐射(热力过程)和海洋温度平流(动力过程)的共同作用下使得 EP 海温逐渐增暖。这种正、负反馈过程,使得海水温度在没有异常情况影响下,始终维持在较稳定的状态。

5 结论

本文利用高时间分辨率的热带海洋浮标站点资料,研究热带不同区域 SWT 各时间尺度变化特征,主要关注热带海水温度的日变化、季节变化和季节内变化,主要结论如下:

(1) 热带海洋海水温度主要在表层 1~10 m 表现出明显的日变化特征。不同区域 SST 日变化都呈现不对称的正弦式变化特征。各个区域 SST 的极值出现时间较为一致,最小值出现在当地时 06:00—08:00,最大值出现在当地时 15:00—16:00。而不同海域 SST 的日平均温度、振幅和不对称性均存在差异。同时, SST 日较差与天气状况关系密切。有降水时, SST 日平均值和幅度均低于无降水时。此外,在不同 ENSO 位相下的 SST 日平均值和振幅变化具有区域性, WP 区域的平均值和振幅差距较小, EP 和 IO 区

域在 El Niño 年的日平均值和振幅均大于 La Niña 年。

(2) SST 日较差振幅随季节变化具有区域性。WP 区域的日均温度和 DSST 在秋季最大,冬季最小;而 EP 和 IO 区域的日均温度和 DSST 在春季最大,夏季最小。SST 日较差振幅随季节变化显著,这主要受太阳短波辐射、降水和风速呈季节性变化的影响。此外,在该季节内振荡时间尺度上, 1~300 m 深度内海水温度随时间呈周期性变化。在 200 m 以上的层次海水温度的周期性变化最为明显,且海水温度出现最大变率的中心位于 100~150 m 的深度范围内。这是因为不同区域由于温跃层深度不同,最大变率位置也有所差别。

(3) 海表面温度与太阳短波辐射、降水和风均显著相关,且其相互作用具有区域性特征。在 WP、IO 区域强的太阳短波辐射会促进海表面温度升高,这种促进作用有 2~5 d 的滞后,随着海表面温度的升高,会促进对流的产生,进一步导致风的增强和降水的增加,进而导致冷海水上翻和海面蒸发增强,最终使得海表面温度降低。对于 EP 区域而言,是短波辐射(热力过程)和海洋温度平流(动力过程)的共同作用使得其海温逐渐增暖。

综上所述,在不同时间尺度上,海水温度变率的深度存在差异,表明不同时间尺度信号受不同物理机制调制。对热带海水温度不同时间尺度特征的分析,可以为海气耦合模式提供观测依据,以便更准确地评估模式对海水温度变化特征的模拟效果,进而提高对 MJO 模拟和预报的准确性。受限于资料的缺失,未能深入分析不同高度海水温度变化情况,其中具体的物理过程仍有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 徐超,乔云亭. 中国南方春季降水年际变化强度的年代际变

- 及其与海温异常的联系.气象科学,2018,38(3):281-292.
XU Chao, QIAO Yunting. The interdecadal change in the intensity of interannual variation of spring precipitation over southern China and its relationship with the SST anomaly. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2018, 38(3): 281-292.
- [2] 宋攀, 钟中, 齐琳琳, 等. 局地海表温度异常影响热带气旋路径的模拟研究. 气象科学, 2017, 37(6): 735-741.
SONG Pan, ZHONG Zhong, QI Linlin, et al. A numerical study on the influence of abnormal local sea surface temperature on the track of tropical cyclone. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2017, 37(6): 735-741.
- [3] 傅云飞, 黄荣辉. 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. 大气科学, 1997, 21(4): 485-492.
FU Yunfei, HUANG Ronghui. Impacts of westerly anomalies over East Asia on westerly burst over the western tropical and the occurrence of ENSO events. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1997, 21(4): 485-492.
- [4] 毛江玉, 谢安, 宋焱云, 等. 海温及其变化对南海夏季风爆发的影响. 气象学报, 2000, 58(5): 556-569.
MAO Jiangyu, XIE An, SONG Yanyun, et al. Impact of sea surface temperature and its variations on the onset of summer monsoon over South China Sea. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2000, 58(5): 556-569.
- [5] Kawai Y, Wada A. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: a review. J. Oceanogr., 2007, 63(5): 721-744.
- [6] Sakaida F, Kudoh J I, Kawamura H. A-HIGHERS—the system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the western North Pacific using the AVHRR/NOAA. J. Oceanogr., 2000, 56(6): 707-716.
- [7] Kahru M, Leppanen J M, Rud O. Cyanobacterial blooms cause heating of the sea surface. Mar. Ecol. Prog. Ser., 1993, 101(1/2): 1-7.
- [8] Clayson C A, Weitlich D. Variability of tropical diurnal sea surface temperature. J. Climate, 2007, 20(2): 334-352.
- [9] Weitlich D. Seasonal and interannual variability of tropical diurnal warming of sea surface temperatures [D]. Tallahassee: Florida State University, 2005: 82.
- [10] Shenoi S S C, Nasnodkar N, Rajesh G, et al. On the diurnal ranges of Sea Surface Temperature (SST) in the north Indian Ocean. J. Earth Syst. Sci., 2009, 118(5): 483-496.
- [11] Marullo S, Santoleri R, Banzon V, et al. A diurnal-cycle resolving sea surface temperature product for the tropical Atlantic. J. Geophys. Res.: Oceans, 2010, 115(C5): C05011.
- [12] 陈烈庭, 金祖辉, 罗绍华. 印度洋和南海海温变化的特征及其与大气环流的某些联系. 海洋学报, 1985, 7(1): 103-110.
CHEN Lieting, JIN Zuhui, LUO Shaohua. Characteristics of variation of sea surface temperature in the Indian Ocean and South China Sea and its relationship with atmospheric circulation. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 1985, 7(1): 103-110.
- [13] Slingo J, Inness P, Neale R, et al. Scale interactions on diurnal to seasonal timescales and their relevance to model systematic errors. Ann. Geophys., 2003, 46(1): 139-155.
- [14] DAI Aiguo, Trenberth K E. The diurnal cycle and its depiction in the community climate system model. J. Climate, 2004, 17(5): 930-951.
- [15] Masson S, Terray P, Madec G, et al. Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model. Climate Dyn., 2012, 39(3-4): 681-707.
- [16] 秦润天, 朱益民, 陈晓颖, 等. 冬季北太平洋大气低频环流的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温异常的联系. 气象科学, 2018, 38(3): 293-301.
QIN Runtian, ZHU Yimin, CHEN Xiaoying, et al. Interannual and interdecadal variations of atmospheric low-frequency circulation over the North Pacific in winter and its relationship with the atmospheric circulation and SST anomaly. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2018, 38(3): 293-301.
- [17] ZHANG Chidong. Intraseasonal variability of the upper-ocean thermal structure observed at 0° and 165°E. J. Climate, 1997, 10(12): 3077-3092.
- [18] Krishnamurti T N, Oosterhof D K, Mehta A V. Air-sea interaction on the time scale of 30 to 50 days. J. Atmos. Sci., 1988, 45(8): 1304-1322.
- [19] 李奎平, 于卫东, 李俐俐. 冬季热带印度洋季节内振荡的物理结构. 海洋科学进展, 2009, 27(2): 133-139.
LI Kuiping, YU Weidong, LI Lili. Physical structure of Madden-Julian Oscillation in the Tropical Indian Ocean during winter. Advances in Marine Science (in Chinese), 2009, 27(2): 133-139.
- [20] SUI C H, LI Xianyi, Lau K M, et al. Multiscale air-sea interactions during TOGA COARE. Mon. Wea. Rev., 1997, 125(4): 448-462.
- [21] GE Xuyang, WANG Wanqiu, Kumar A, et al. Importance of the vertical resolution in simulating SST diurnal and intraseasonal variability in an oceanic general circulation model. J. Climate, 2017, 30(11): 3963-3978.
- [22] CHEN Mingcheng, LI T, SHEN Xinyong, et al. Relative roles of dynamic and thermodynamic processes in causing evolution asymmetry between El Niño and La Niña. J. Climate, 2016, 29(6): 2201-2220.
- [23] 李笛, 陈海山. 不同区域海温对亚洲夏季副热带西风急流变异主模态的影响. 气象科学, 2017, 37(4): 425-435.
LI Di, CHEN Haishan. Impact of sea surface temperature anomalies in different regions on dominant modes of summer Asian subtropical westerly jet variability. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 2017, 37(4): 425-435.
- [24] Kawai Y, Kawamura H. Spatial and temporal variations of model-derived diurnal amplitude of sea surface temperature in the western Pacific Ocean. J. Geophys. Res.: Oceans, 2005, 110(C8): C08012.
- [25] Cronin M F, Kessler W S. Seasonal and interannual modulation of mixed layer variability at 0°, 110° W. Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Papers, 2002, 49(1): 1-17.
- [26] Hendon H H, Glick J. Intraseasonal air-sea interaction in the tropical Indian and Pacific Oceans. J. Climate, 1997, 10(4): 647-661.