

杨洋, Tim Li, 李奎平, 等. 季节内振荡对热带印度洋 SST 日变化的调制——一维混合层模式的诊断结果[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 34-43, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.05.004

Yang Yang, Tim Li, Li Kuiping, et al. Modulation of Madden-Julian Oscillation on the diurnal cycle of SST in the tropical Indian Ocean——Results from one dimensional mixed layer model[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(5): 34-43, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.05.004

季节内振荡对热带印度洋 SST 日变化的调制

——一维混合层模式的诊断结果

杨洋^{1,2}, Tim Li³, 李奎平^{2*}, 于卫东², 刘延亮²

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋与气候研究中心, 山东 青岛 266061; 3. 美国夏威夷大学 气象系, 美国 夏威夷 火奴鲁鲁 96822)

摘要: 热带印度洋 SST 的日变化幅度受到大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)的调制, 其在 MJO 对流最强(弱)位相达到极小(大)值, 并且在 MJO 对流增强位相显著强于其对流减弱位相。本文利用逐时的再分析海表通量强迫一维海洋混合层模式, 定量地诊断了 MJO 事件中 SST 日变化的差异成因。结果表明, SST 日变化在 MJO 对流最强与最弱位相的显著差异主要是由短波辐射的季节内变化所致(40%), 其次是风应力(38%)和潜热通量(14%), 其他要素的影响较小。而 SST 日变化在 MJO 对流增强与减弱位相所呈现的不对称特征, 主要是由纬向风应力的不对称性所致, 这是 MJO 扰动结构与背景环流相互作用的结果。

关键词: SST 日变化; 季节内振荡; 一维混合层模式

中图分类号: P731.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)05-0034-10

1 引言

季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)^[1]是活跃于热带大气的行星尺度扰动现象, 表现为大气深对流活动及相关扰动环流的周期性交替, 尤以冬半年最为显著。MJO 生成于热带西印度洋, 以沿赤道向东传播为主, 其在印度洋—太平洋暖池区达到最强, 随后逐渐减弱并消失于东太平洋, 其典型周期在 45 d 左右。MJO 是衔接天气尺度变化和低频气候过程的重要桥梁, 对热带气旋、亚澳季风、印度洋偶极子和 ENSO 等都具有重要影响^[2]。

海-气相互作用在 MJO 的生成和发展过程中扮演了重要角色。大量数值模拟研究已经证实了季节内尺度的海气耦合对 MJO 模拟^[3-6]和预报^[7-8]的重要性; 然而, 其中的物理机制迄今还不甚明朗。SST 是海洋与大气相互作用的主要介质, SST 的变化既反映了大气的强迫效应, 又对大气运动存在反馈作用, 明确 MJO 事件中 SST 的控制机制是揭示其中海-气相互作用的重要突破口。

SST 通过多种尺度过程与 MJO 相联系, 其中日变化是一种重要的影响途径^[9]。SST 的日变化是一种非常显著的高频信号^[10], 在晴朗无风的热带海域,

收稿日期: 2014-09-10; 修订日期: 2014-11-05。

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014G03, GY02-2011G22); 国家自然科学基金项目(41005032, 41406034); 国家国际科技合作专项资助—孟加拉湾区域海洋观测与对亚洲季风影响合作研究(2010DFB20210)。

作者简介: 杨洋(1986—), 男, 山东省淄博市人, 博士研究生, 主要从事海-气相互作用方面研究。E-mail: nameddy231@163.com

* 通信作者: 李奎平(1982—), 男, 山东省潍坊市人, 助理研究员, 主要从事物理海洋学方面研究。E-mail: likp@fio.org.cn

其日变化幅度可达 $2\sim 3^{\circ}\text{C}^{[11-13]}$ 。在 MJO 影响下, SST 的日变化存在明显的季节内差异。Sui 等^[14]通过分析西太平洋浮标观测资料发现, SST 日变化幅度在 MJO 对流抑制阶段显著强于其对流活跃阶段。卫星观测资料也显示出与上述结果类似的位相特征^[15]。作为 MJO 的活跃区域, 印度洋的 SST 日变化也受到 MJO 的调制。Mujumdar 等^[16]利用浮标观测资料指出, 孟加拉湾北部的 SST 日变化幅度在 MJO 不同阶段存在明显差异, MJO 对流活动越强(弱)时, SST 的日变化幅度越小(大)。赤道东印度洋的浮标观测资料也反映出与之一致的结果, 并且一维海洋混合层模式可以很好地再现这种位相特征^[17]。

大气通过海表热量通量、动量通量和淡水通量对 SST 的变化产生影响, 这也是 MJO 调制 SST 的必然途径。已有的观测资料显示出 SST 日变化存在显著的季节内差异, 但是, 其中的控制机制尚不明确。那么, MJO 是如何调制 SST 日变化特征的呢? 即以上各要素的相对贡献各有多大呢? 本文在杨洋等^[17]研究的基础上, 利用逐时的再分析海表通量强迫一维海洋混合层模式, 在验证其适用性基础上, 通过敏感性实验定量地诊断 MJO 各位相 SST 日变化特征的差异成因, 为其后揭示 SST 日变化对 MJO 的反馈作用奠定基础。

2 数据与方法

2.1 数据

本文采用的逐时 SST 资料来自 Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction (RAMA)^[18]浮标阵列位于 $1.5^{\circ}\text{S}, 90^{\circ}\text{E}$

的浮标, 时间跨度为 2002 年 1 月 1 日至 2010 年 10 月 15 日。该浮标位于赤道东印度洋, 处于 MJO 的活跃区域, 并且它也是印度洋现有浮标阵列中持续观测时间最长的浮标。为了表征大气深对流过程, 我们采用了 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 提供地逐日的大气对外长波辐射 (Outgoing Longwave Radiation, OLR) 资料。在强迫一维混合层模式时, 本文采用了 National Aeronautics and Space Administration (NASA) 提供的 Modern Era-Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA)^[19]逐时海表通量数据, 水平分辨率为 $(2/3)^{\circ}\times(1/2)^{\circ}$ 。

2.2 方法

通过选取 MJO 事件并按位相合成的方法诊断 MJO 对 SST 的调制过程。以 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}, 85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$ 区域平均的 $20\sim 90\text{d}$ 带通滤波的 OLR 为标志, 当北半球冬半年某次过程的 OLR 正负异常值均超过 1 倍标准差时则选定此 MJO 事件, 据此共选取了 19 个 MJO 事件(表 1)。为体现季节内差异, 每次 MJO 事件选取 5 个代表性时刻: 对流最活跃时 (OLR 极小值) 定义为 0° ; 相邻的前、后两个对流最弱时刻 (OLR 极大值) 分别为 -180° 和 $+180^{\circ}$; 相应的对流的增强和减弱时刻, 即 OLR 异常值接近于 0 时分别为 -90° 和 $+90^{\circ}$ 。为了减小分析误差, 在每个代表性时刻的前后再各取 2 d, 以此 5 d 的平均状态代表相应的位相(见图 1)。需要说明的是, 当两次 MJO 事件连续发生时, 前一 MJO 事件的 180° 位相与后一 MJO 事件的 -180° 位相重合, 故表 1 中的某些 MJO 事件起始时间有所交叉。

表 1 MJO 事件列表

Tab. 1 List of winter MJO

序号	起始时间	序号	起始时间
1	2002. 11. 29—2003. 01. 11	11	2006. 03. 04—2006. 04. 06
2	2003. 01. 07—2003. 02. 13	12	2006. 04. 02—2006. 05. 09
3	2003. 03. 11—2003. 04. 17	13	2006. 12. 12—2007. 01. 05
4	2003. 04. 13—2003. 05. 23	14	2007. 04. 15—2007. 05. 21
5	2003. 11. 21—2003. 12. 30	15	2007. 11. 19—2008. 01. 13
6	2004. 04. 13—2004. 05. 17	16	2008. 04. 01—2008. 05. 06
7	2005. 03. 04—2005. 04. 13	17	2009. 01. 11—2009. 02. 21
8	2005. 04. 09—2005. 05. 23	18	2009. 03. 24—2009. 04. 27
9	2005. 12. 29—2006. 02. 04	19	2009. 12. 11—2010. 01. 17
10	2006. 01. 31—2006. 03. 08		

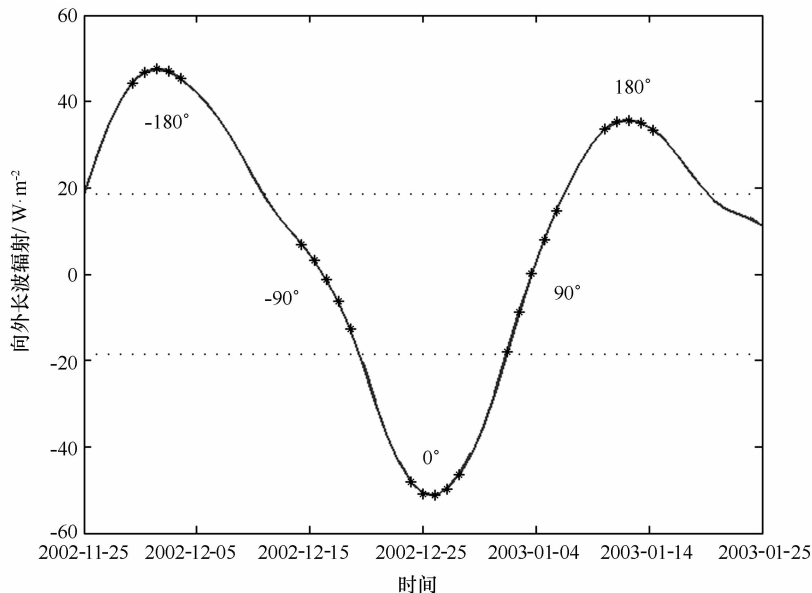


图 1 MJO 位相的定义示意图

Fig. 1 The phase definition of MJO progress depending on the 20 to 90 days filtered OLR

黑色虚线表示 1 倍标准差

Black dotted lines denote the standard deviation of the 20–90 days filtered OLR

为诊断 SST 的控制机制,本文利用了 PWP 一维整体海洋混合层模式^[20],该模式已被广泛地用于热带地区 SST 的日变化和季节内变化的模拟研究^[12, 21]。热通量、动量通量和淡水通量是 PWP 模式的海表强迫项。其中,热通量分为海表短波辐射(SW)、净长波辐射(LW)、潜热通量(LH)和感热通量(SH),动量通量为风应力(WS),淡水通量为蒸发与降水之差(EP)。该模式在动力不稳定模型的基础上,引入了风致混合参数化方案。上层海洋的垂直混合主要有 3 种方式:(1)通过与附近网格的混合使整个混合层满足静力稳定;(2)通过设置整体 Richardson 数(R_b)来控制混合层底的卷入与卷出;(3)通过设置梯度 Richardson 数(R_g)来消除混合层底与下层水体之间巨大的速度梯度。驱动 PWP 混合层模式时,采用了最新的 MERRA 逐时海表通量数据,模拟时间为 2002–2010 年,运行的时间分辨率为 1 h,垂向分

辨率为 0.5 m,模式中的参数主要借鉴前人的研究^[20],临界 R_b 和 R_g 分别取 0.65 和 0.25。

大气通过海表热通量,动量通量和淡水通量来影响 SST,为了体现各强迫通量的季节内差异对 SST 日变化的影响,我们通过下述处理构造了各强迫通量的新序列:

(1)对原始序列 I 进行逐时平均,得到平均态的日变化时间序列 A;

(2)通过对原始序列 I 进行 90 d 低通滤波,剔除其季节内变率,得到低频的背景时间序列 B;

(3)将序列 A 与 B 叠加得到新的时间序列 F,则序列 F 即可认为是仅剔除了季节内变率但仍保留有高频日变化和低频背景变化的新序列。

为了诊断某一特定强迫项的季节内变化对 SST 日变化的影响,设计了 14 组敏感性测验,其方案见表 2。

表 2 实验名称及所用强迫类型

Tab. 2 List of the experiments

序号	实验名称	实验所使用的海表面通量					
		SW	WS	LH	SH	LW	EP
1	CTL run	I	I	I	I	I	I
2	SW run	I	F	F	F	F	F

续表 2

序号	实验名称	实验所使用的海表面通量					
		SW	WS	LH	SH	LW	EP
3	WS run	F	I	F	F	F	F
4	LH run	F	F	I	F	F	F
5	SH run	F	F	F	I	F	F
6	LW run	F	F	F	F	I	F
7	EP run	F	F	F	F	F	I
8	CTL0 run	F	F	F	F	F	F
9	SW0 run	F	I	I	I	I	I
10	WS0 run	I	F	I	I	I	I
11	LH0 run	I	I	F	I	I	I
12	SH0 run	I	I	I	F	I	I
13	LW0 run	I	I	I	I	F	I
14	EP0 run	I	I	I	I	I	F

注:I代表原始序列,F代表剔除了季节内变率的序列。

3 结果

尽管有研究强调了海洋水平温度平流对特定 MJO 事件的重要性^[22],但 Zhang 和 Aderson^[23]的研究表明在水平温度梯度很小的热带区域,水平平流对 SST 的作用可以忽略,PWP 模式可以很好的再现 SST 的季节内变化特征。鉴于本研究涉及的浮标位于东印度洋暖池区,水平温度梯度较小,一维海洋混合层模式在原则上具有可行性。杨洋等^[17]以浮标观测的海表通量来强迫 PWP 混合层模式,已对 PWP 模式在该区域的适用性进行了初步验证。本文采用了 MERRA 再分析的海表强迫通量驱动一维 PWP 模式,其 SST 模拟结果也说明了该模式在本研究中的合理性(见图 2)。

从周期性特征来看(见图 2a,c),SST 日变化的模拟结果和观测结果具有很好的一致性。SST 在 6 时至 8 时达到全天最小值,而在 14 时至 16 时达到全天最大值。而且,一维模式也成功再现了 SST 日变化在 MJO 各个位相的差异,这种差异主要体现在 SST 日变化幅度上,即 SST 日最大值与最小值的差(见图 2b,d)。SST 日变化幅度与 MJO 对流呈直接反位相关关系,即在对流活动最强时(0°),SST 的日变化幅度最小,在对流活动最弱时($\pm 180^\circ$),SST 的日变化幅度最大。在对流的增强(-90°)和减弱阶段($+90^\circ$),SST 的日变化幅度存在明显的不对称性,前者强于后者。

在未考虑水平平流效应的情况下,一维 PWP 模式对 SST 日变化的周期性具有非常好的模拟能力,但对 SST 日变化幅度的模拟存在一定误差。在 MJO 的 5 个位相,其模拟误差分别为 9%、11%、35%、27% 和 1%,这部分误差可能源于水平平流效应,也可能源于再分析海表资料或者系统误差。尽管如此,一维模式较好地抓住了 SST 日变化幅度的季节内差异特征,其诊断结果具有一定的代表性。为揭示 MJO 事件中 SST 日变化幅度的差异原因,我们利用 PWP 模式设计一系列敏感性实验进行诊断,各组实验的介绍见表 2。

3.1 MJO 对流活跃位相与抑制位相的对比分析

Price 等^[20]较为系统的描述了 SST 的日变化过程,并指出海表面短波辐射在白天与夜晚的不对称分布是造成 SST 日变化的主要原因。本文的数值实验也证明,只有保留短波辐射的日变化,SST 的日变化特征才会存在;在保留短波辐射日变化的前提下,本文各组实验模拟的 SST 日变化过程接近一致,即 SST 最大值出现在 14 时到 16 时左右,最小值出现在 6 时到 8 时左右。在 MJO 事件中,SST 日变化的差异主要体现在变化幅度上,也即最大值与最小值之差。在对流活动最弱时,SST 日变化幅度达到最大值;在对流活动最强时,SST 日变化幅度达到最小值,二者相差 0.6°C 左右(见图 2)。那么,其中的控制过程是什么呢?表 2 中的前 7 组敏感性实验即用于分析该问题,实验结果如图 3 所示。

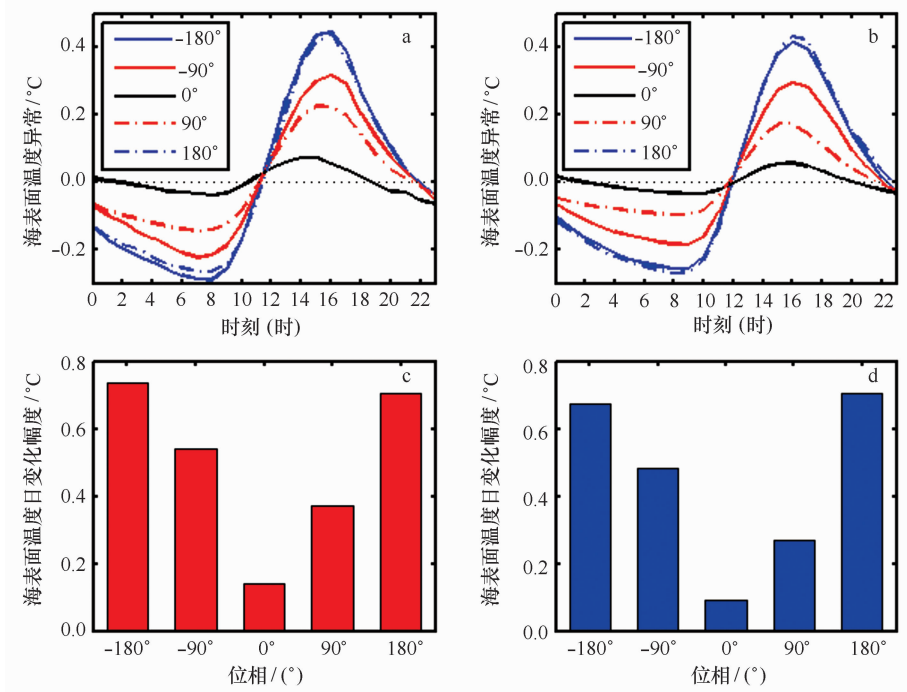


图 2 浮标观测(a,b)和模式模拟(c,d)的MJO各位相的SST日变化特征

Fig. 2 Intro-seasonal variations of diurnal SST derived from buoy observations (a,b) and model results (c,d)

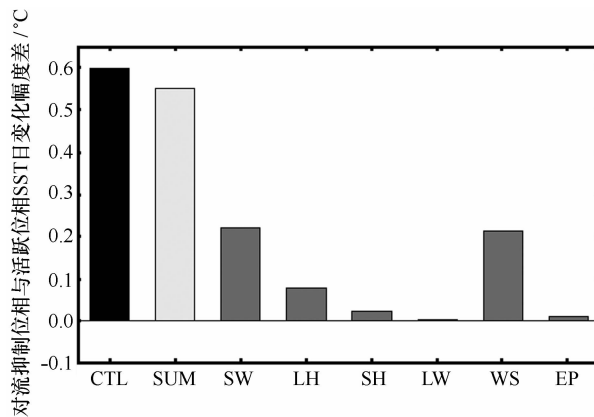


图 3 MJO 对流抑制位相与活跃位相 SST 日变化幅度的差异及各强迫项的贡献

Fig. 3 The difference of diurnal range of SST between suppressed and active phase of MJO calculated from model results

黑柱表示 CTL run 结果,深灰色表示各敏感性实验结果,浅灰色表示 6 组敏感性实验结果总和

Black bar represents the CTL run, dark gray bars represent the sensitive run, and the light gray bar represents the sum of the sensitive run

在 CTL run 中,各强迫项均采用原始序列,PWP 模式再现了 SST 日变化幅度在对流抑制位相与活跃位相的差异,与浮标观测资料相一致。SW run 至 EP run 实验分别体现了单一强迫项的季节内变化对上述差异的贡献大小,而且这 6 组实验的总和(浅灰色柱)与 CTL run 相当,这说明本文设计的实验方案是基本可行的。诊断表明,对于 SST 日变化幅度在 MJO 对流抑制位相与活跃位相存在的显著差异,短波辐射

(SW)的贡献起主要作用,占 40%;其次是风应力(WS),占 38%;第三位是潜热通量(LH),占 14%;而感热通量(SH)、长波辐射(LW)和淡水通量(EP)的作用相对微弱。以下将对 3 个主要因素展开讨论,其他因素不再详述。

短波辐射日变化的季节内差异是调制 SST 日变化幅度的主要因素。由图 4 可以看出,在 MJO 对流抑制位相短波辐射在正午时可达 800 W/m²,而在

对流活跃位相却只有 500 W/m^2 左右,二者的差异在正午时刻可以超过 300 W/m^2 。因此,在正午的 SST 快速升温阶段,对流抑制位相的短波加热效应显著强于对流活跃位相,由此导致了两位相的 SST 日变化幅度的差异。

尽管各热通量均存在一定的日变化,但相对于短波辐射来说,其他通量的日变化幅度非常微弱。潜热通量的日变化幅度在 MJO 各个位相均不足 20 W/m^2 ,且日变化的周期特征不明显,但其日平均值存在显著的季节内差异。潜热释放在对流抑制位

相只有 90 W/m^2 左右,而在对流活跃位相却超过 150 W/m^2 ,它通过与混合层的日变化相互作用来调制 SST 的日变化幅度。在白天的 SST 升温阶段,混合层很浅,较多的净热收入使对流抑制位相的 SST 升温幅度显著强于对流活跃位相;而在夜间的 SST 降温阶段,由于混合层剧烈加深^[17],对流抑制位相的 SST 降温幅度只是稍强于对流活跃位相。这种混合层深度的昼夜不对称,使 MJO 对流抑制位相的 SST 日变化幅度会稍强于其对流活跃位相,但该调制过程的贡献较小,仅占 14% 左右。

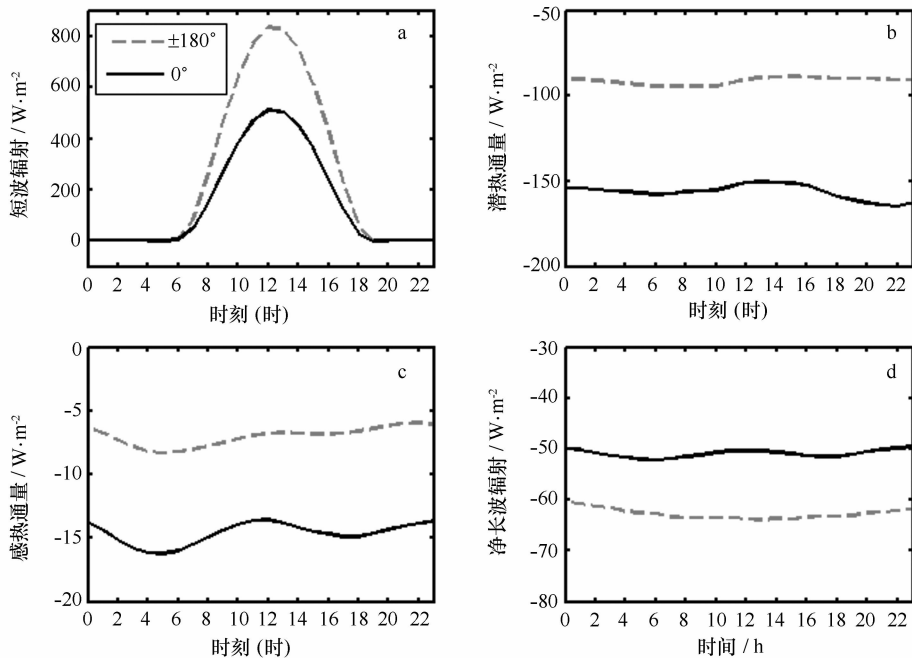


图4 MJO 对流抑制位相($\pm 180^\circ$)和对流活跃位相(0°)各海表面热通量的对比

Fig. 4 The comparison of sea surface heat fluxes between suppressed ($\pm 180^\circ$) and active (0°) phase of MJO

a. 短波辐射, b. 潜热通量, c. 感热通量, d. 净长波辐射

a. Shortwave radiation, b. latent heat flux, c. sensitive heat flux, d. net long wave radiation

在 PWP 模式中,风应力是作为动量通量给定的,它的变化不会影响潜热和感热通量的变化,仅体现了风应力通过动力过程对 SST 的日变化的影响。图 5 给出了风应力在 MJO 对流活跃与抑制位相的合成图,及相应的 WS 实验中混合层内转换层(Transition layer)深度在上述两位相的对比。根据 Price 等^[20]的理论,转换层位于混合层内,更利于表征由风应力引起的混合层底的夹卷效应以及切变流不稳定性,所以我们在此用转换层来表征风应力对海洋上层垂直混合的作用。从图中可以看出,在对流抑制位相,风应力非常小,几乎接近于 0。这种近乎无风的状态致使

海洋的垂直混合非常弱,相应的海面吸收的热量只能限制在很浅的表层(见图 5b),在白天加热最强的中午,海表转换层深度只有 5 m 左右,从而使 SST 迅速的升高。相反,在对流活跃位相,风应力最大可超过 0.08 N/m^2 。强烈的风力会对海洋产生剧烈的搅动,海表的垂直混合强烈,导致转换层加深,即使在白天加热最强的中午,最浅的转换层深度也要超过 20 m。在相同的热力强迫下,热量会被更快的混合到较深的海洋中去,所以在对流活跃位相, SST 的升温并不明显,日变化幅度较小。

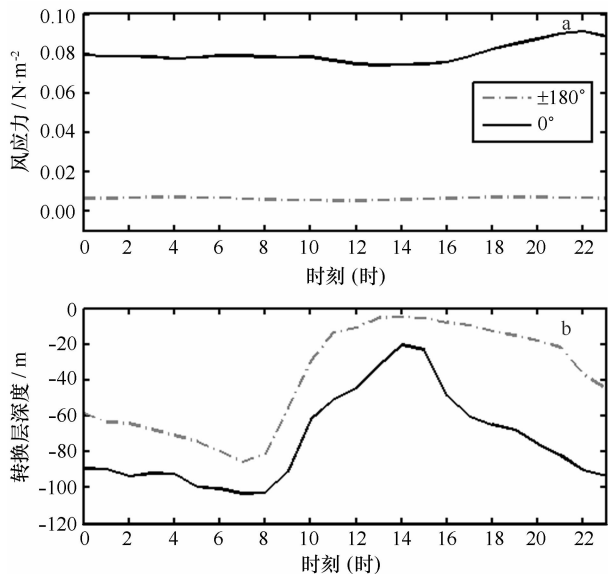


图5 MJO对流抑制位相($\pm 180^\circ$)和对流活跃位相(0°)的海面风应力对比(a)和风应力所致的转换层深度的对比(b)

Fig. 5 The comparison of sea surface wind stress (a) and the transition layer depths (b) between suppressed ($\pm 180^\circ$) and active (0°) phase of MJO

3.2 MJO对流增强位相与减弱位相的对比分析

在MJO事件中,对流的增强与减弱阶段,即在 $\pm 90^\circ$ 位相,SST的日变化幅度存在明显的不对称性(见图2)。从观测来看,在对流增强阶段(-90°),SST的日变化幅度可达到 $0.54^\circ C$;但是在对流减弱阶段(90°),SST日变化幅度只有 $0.36^\circ C$ 。鉴于PWP模式可以再现这种位相差别,因此我们设计了7组敏感性实验,以阐明这种不对称性的原因。

如表2中第8组至第14组实验,其中CTL0实验表示所有海表强迫通量的季节内变率均已被剔除,而SW0至EP0实验表示只有相应的强迫项剔除了季节内变率。如CTL0实验结果所示(见图6b),将所有海表通量的季节内变率剔除以后,SST的日变化幅度在MJO各个位相基本无差别,其季节内变化特征消失。逐项测试表明,唯有剔除风应力的季节内变化时(也即WS0实验),SST日变化幅度在 $\pm 90^\circ$ 位相才接近相等(见图6d),其他实验结果均保留了这种不对称性。这说明海表面风应力在 $\pm 90^\circ$ 位相的差异是造成该位相SST日变化不对称的主要原因。除风应力外,其他海面强迫项在 $\pm 90^\circ$ 位相基本呈现对称分布(图略),对上述两个位相的SST日变化差异基本无贡献。

前人的研究已经指出,纬向风的季节内变化是MJO事件中动量通量扰动的主要原因^[24],经向风的扰动可忽略不计^[25]。从图7给出的海表面风应力在MJO对流增强与减弱位相($\pm 90^\circ$)的日变化曲线可以看出,风应力的纬向分量在两个位相存在较大的差异,而经向分量的离散性并不大,所以纬向风应力的季节内差异是造成 $\pm 90^\circ$ 位相SST日变化幅度产生不对称性的主要原因。通过前文的分析我们知道(2.1),风应力的强弱与SST日变化幅度成负相关性。在 -90° 位相,纬向风应力维持在 $0.015 N/m^2$ 左右,这种弱的风应力无法使海洋上层产生强的垂直混合,海洋混合层相对较浅,从而SST日变化较强。而在 $+90^\circ$ 位相,纬向风应力可以达到 $0.03 N/m^2$ 左右,强烈的风应力会加强海洋的垂直混合,海洋混合层变深,海表吸收的热量更快的与深层的冷水混合,从而减弱SST的日变化强度。因此,在这种不对称风应力的调制下,SST日变化幅度在 $\pm 90^\circ$ 位相产生了差异。

其他海面通量在 $\pm 90^\circ$ 位相基本呈对称分布的情况下,为何纬向风应力在这两个位相具有显著的不对称性?这是MJO空间结构与背景环流共同作用的结果。MJO事件中,深对流位于海面风场的辐合中心之上。受对流辐合的影响,对流西侧会出现西风异常,而东侧则是东风异常,并且西风异常显著强于东风异常。在冬半年,赤道东印度洋受背景西风控制,同时MJO及相应的扰动环流沿赤道自西向东移动。在 -90° 位相,对流位于浮标位置以西,此时浮标点受MJO对流东侧的异常东风控制,它与背景西风相叠加会使纬向风应力减弱;而在 $+90^\circ$ 位相,对流位于浮标位置以东,此时浮标点受MJO对流西侧的异常西风控制,它与背景西风相叠加导致纬向风应力显著加强。由此,MJO事件中纬向风应力的大小在 $\pm 90^\circ$ 位相具有了不对称性。

4 结论

在MJO调制下,热带印度洋SST的日变化幅度呈现显著的季节内差异。在MJO对流活动最强(弱)时,SST的日变化幅度最小(大);并且MJO对流增强阶段的SST日变化幅度显著强于其对流减弱阶段。为揭示MJO事件中上述SST日变化特征的差异成因,我们利用MERRA逐时海表面通量资料强迫PWP一维整体混合层模式定量的进行了诊断分析。

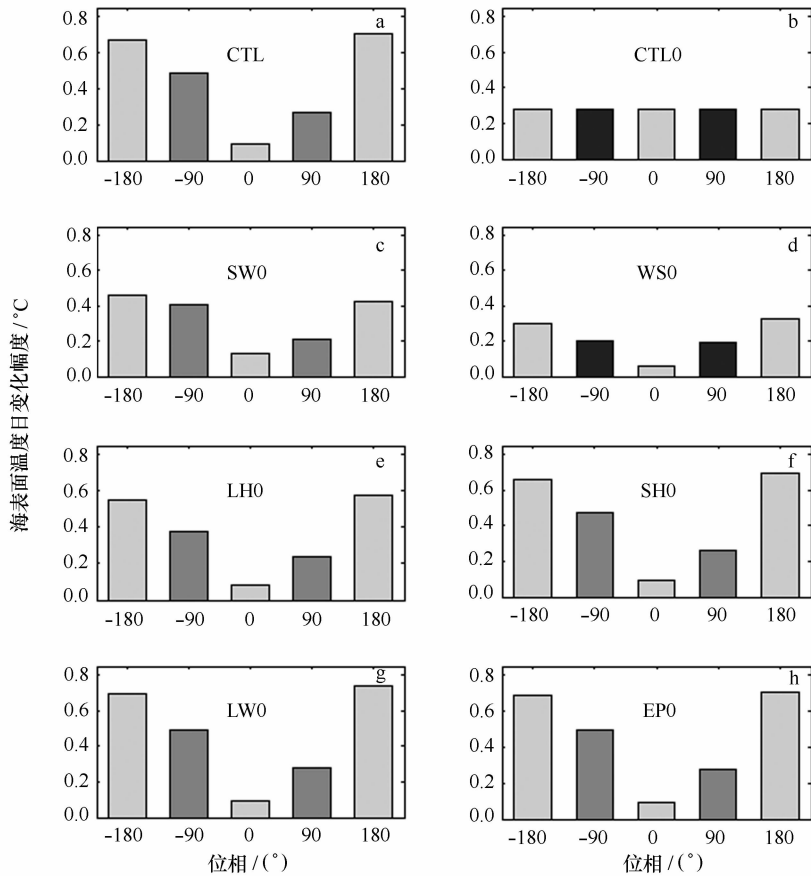


图 6 8 组敏感性实验中 MJO 各位相 SST 日变化幅度的对比

Fig. 6 The comparison of diurnal range of SST in different phase of MJO from 8 sensitive runs listed in Tab. 2

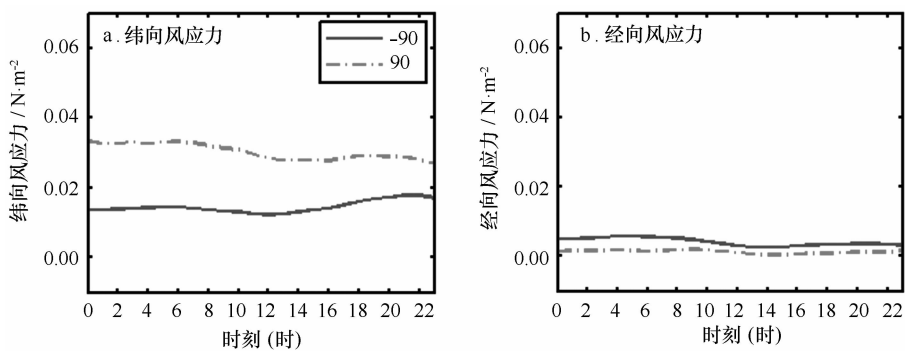


图 7 MJO 对流增强位相(-90°)与对流减弱位相($+90^\circ$)的海面风应力对比

Fig. 7 The comparison of sea surface wind stress between developing (-90°) and decaying ($+90^\circ$) phase of MJO

总体上,PWP 模式可以成功再现 SST 日变化特征的季节内差异。而相应的敏感性实验表明,SST 日变化幅度在 MJO 对流最弱与对流最强时的显著差异主要是由短波辐射造成的,大约占 40%;其次是风应力,占 38%;第三位是潜热通量,占 14%;而感热通

量、净长波辐射和淡水通量的作用相对微弱。SST 日变化幅度在 MJO 对流增强与对流减弱阶段的不对称性,主要是与纬向风应力的不对称有关。纬向风应力在 MJO 对流减弱阶段显著强于其对流增强阶段,由此导致的垂直混合差异是 SST 日变化幅度存在不对

称的诱因。而纬向风应力在上述两个位相的差异是 MJO 空间扰动结构与背景环流相互作用的结果。

在本文设计的多组敏感性实验中,驱动 PWP 模式时,各海表强迫项是独立给定的,而在现实中,多个物理量之间可能存在联系。如风应力的变化既能通过动力效应(垂直混合),又能通过热力效应(潜热和感热通量)对 SST 施加影响。因此本文的数值实验属于理想实验,人为隔离了风应力的动力效果和热力效果,然后给与了单独评估;事实上,目前的数值实验未能针对风应力的影响实现综合评估,更加全面的实

验设计方案有待提出。

本文仅以位于 $1.5^{\circ}\text{S}, 90^{\circ}\text{E}$ 的浮标观测数据为参考,通过引入 PWP 数值模式分析了 SST 日变化特征的季节内差异,结论的代表性存在局限,不排除本文的分析结果在其他区域会有一定的误差。鉴于本文已经验证了 MERRA 逐时海表面通量与 PWP 混合层模式的结合在研究 SST 日变化特征时的可行性,进一步的研究工作可以推广到更多的观测浮标和更广的海域,以获取更具代表性的诊断结果。

参考文献:

- [1] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(5): 702–708.
- [2] Zhang C. Madden-Julian Oscillation: Bridging weather and climate[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(12): 1849–1870.
- [3] Wang B, Xie X. Coupled modes of the warm pool climate system. Part I: The role of air-sea interaction in maintaining Madden-Julian Oscillation [J]. *Journal of Climate*, 1998, 11(8): 2116–2135.
- [4] Inness P M, Slingo J M. Simulation of the Madden-Julian oscillation in a coupled general circulation model. Part I: Comparison with observations and an atmosphere-only GCM[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(3): 345–364.
- [5] Watterson I G, Syktus J. The influence of air-sea interaction on the Madden-Julian Oscillation: The role of the seasonal mean state[J]. *Climate Dynamics*, 2007, 28(7/8): 703–722.
- [6] Yang J, Bao Q, Wang X, et al. The tropical intraseasonal oscillation in SAMIL coupled and uncoupled general circulation models[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29: 529–543.
- [7] Waliser D E. Intraseasonal Variability, in *The Asian Monsoon*[M]. Springer, 2006.
- [8] Woolnough S J, Vitart F, Balmaseda M A. The role of the ocean in the Madden-Julian Oscillation: Implications for MJO prediction[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 117–128.
- [9] Slingo J, Inness P, Neale R, et al. Scale interactions on diurnal to seasonal timescales and their relevance to model systematic errors[J]. *Annals of Geophysics*, 2003, 46(4): 18–35.
- [10] Sverdrup H U, Johnson M W, Fleming R H. *The Oceans: Their Physics, Chemistry, and General Biology*[M]. New York: Prentice-Hall, 1942.
- [11] Webster P J, Clayson C A, Curry J A. Clouds, radiation, and the diurnal cycle of sea surface temperature in the tropical western Pacific[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(8): 1712–1730.
- [12] Kawai Y, Wada A. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review[J]. *Journal of Oceanography*, 2007, 63(5): 721–744.
- [13] Kennedy J J, Brohan P, Tett S F B. A global climatology of the diurnal variations in sea-surface temperature and implications for MSU temperature trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): L05712.
- [14] Sui C H, Li X, Lau K M, et al. Multiscale air-sea interactions during TOGA COARE[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(4): 448–462.
- [15] Kawai Y, Kawamura H. Spatial and temporal variations of model-derived diurnal amplitude of sea surface temperature in the western Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2005, 110(C8).
- [16] Mujumdar M, Salunke K, Rao S A, et al. Diurnal cycle induced amplification of sea surface temperature intraseasonal oscillations over the Bay of Bengal in summer monsoon season[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2011, 8(2): 206–210.
- [17] 杨洋, 于卫东, 孙即霖, 等. 热带印度洋季节内振荡对海表温度日变化的影响[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(3): 351–359.
Yang Yang, Yu Weidong, Sun Jilin, et al. Impact of Madden-Julian oscillation on diurnal variation of sea surface temperature in the tropical Indian Ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(3): 351–359.
- [18] McPhaden M J, Meyers G, Ando K, et al. RAMA: The research moored array for African-Asian-Australian monsoon analysis and prediction[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 2009, 90: 459–480.
- [19] Lucchesi R. File Specification for MERRA products[R]. GMAO Office Note, 2012.
- [20] Price J F, Weller R A, Pinkel R. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 1986, 91(C7): 8411–8427.
- [21] Soloviev A, Lukas R. Observation of large diurnal warming events in the near-surface layer of the western equatorial Pacific warm pool[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1997, 44(6): 1055–1076.

- [22] Ralph E A, Bi K, Niiler P P, et al. A Lagrangian description of the western equatorial Pacific response to the wind burst of December 1992: Heat advection in the warm pool[J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(7): 1706–1721.
- [23] Zhang C, Anderson S P. Sensitivity of intraseasonal perturbations in SST to the structure of the MJO[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(17): 2196–2207.
- [24] Zhang C, McPhaden M J. Intraseasonal surface cooling in the equatorial western Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(13): 2261–2276.
- [25] Zhang C. Atmospheric intraseasonal variability at the surface in the tropical western Pacific Ocean[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53(5): 739–758.

Modulation of Madden-Julian Oscillation on the diurnal cycle of SST in the tropical Indian Ocean ——Results from one dimensional mixed layer model

Yang Yang^{1,2}, Tim Li³, Li Kuiping², Yu Weidong², Liu Yanliang²

(1. *College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Center for Ocean and Climate Research, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China*; 3. *IPRC and Department of Meteorology, University of Hawaii, Honolulu, HI, USA*)

Abstract: Modulated by the Madden-Julian Oscillation (MJO), the diurnal range of sea surface temperature (SST) peaks on the convection suppressed phase and drops to its lowest on the convection active phase. What's more, this kind of diurnal range on the developing phase of MJO is much larger than that on the decaying phase. Using a one-dimensional ocean mixed layer model, forced by the newly developed hourly reanalysis of sea surface fluxes, the cause of the difference of diurnal range of SST during the evolution of MJO is diagnosed quantitatively. It is demonstrated that the intra-seasonal variation of sea surface shortwave radiation is the main reason for the striking difference of diurnal range of SST between suppressed phase and active phase of MJO (40%). The intra-seasonal variation of wind stress (38%) and latent heat flux (14%) are also important. Due to the scale interaction between MJO perturbation and background circulation, the asymmetry of zonal wind stress determines the asymmetry of diurnal range of SST between developing and decaying phase of MJO.

Key words: diurnal range of sea surface temperature (SST); Madden-Julian Oscillation; one dimensional ocean mixed layer model