

孟加拉湾夏季季节内振荡的湿静力能分析

李奎平^{1,2}, 王海员^{1,2}, 杨 洋^{1,2}, 于卫东³, 李俐俐^{1,2}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237;

3. 中山大学 大气科学学院, 广东 珠海 519082)

摘 要: 夏季期间大气季节内振荡(ISO)活跃于孟加拉湾区域, 并存在显著的向北传播。采用 1979—2016 年 ERA-Interim 大气再分析资料, 通过对典型 ISO 事件进行位相合成, 揭示了夏季期间孟加拉湾湿静力能季节内变化的演变特征和控制机理。结果表明, ISO 大气对流在向北传播期间伴随着显著的湿静力能累积(充电)和释放(放电)过程。其中, 水汽主导的湿静力能水平平流是充电和放电的关键控制因素。水汽水平平流在对流层中高层和对流层低层的变异机理存在一定差异, 在中高层主要取决于 ISO 扰动纬向风对低频水汽的纬向输送, 在低层则主要取决于低频经向风对 ISO 扰动水汽的经向输送。

关键词: 孟加拉湾; 季节内振荡; 湿静力能

中图分类号: P435

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)01-0051-09

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.006

引用格式: LI K P, WANG H Y, YANG Y, et al. Budget analysis of moist static energy in summertime intra-seasonal oscillations over the Bay of Bengal[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 51-59. 李奎平, 王海员, 杨洋, 等. 孟加拉湾夏季季节内振荡的湿静力能分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 51-59.

大气季节内振荡(intra-seasonal oscillation, ISO)是热带地区的一类行星尺度(纬向 1~3 波)对流扰动系统, 它具有明显的季节特性^[1-2]。冬季时, ISO 事件主要活跃于赤道区域, 在印度洋和西太平洋暖池区表现出显著的向东传播。夏季时, ISO 事件的向东传播特征减弱, 而在南亚季风区存在显著的向北传播。ISO 事件是衔接天气尺度和季节尺度的关键桥梁, 它对热带气旋、季风系统、印度洋赤道急流、印度洋偶极子和 ENSO 事件等都具有重要影响^[3-7]。

ISO 事件包含了复杂的热力和动力过程, 在很大程度上表现为一种水汽驱动模态^[8-9]。同时, 海表湍流热通量和大气辐射通量的反馈机制也是 ISO 事件产生与维持的关键过程^[10-11]。考虑到这些因素都是大气湿静力能(Moist Static Energy, MSE)的控制项, 开展 MSE 诊断研究成为揭示 ISO 事件内在机理的重要手段。已有一些研究开展了 ISO 事件向东传播阶段的 MSE 分析^[12-14], 发现 MSE 的季节内变化是 ISO 事件对流演化的重要前提, 它在对流活动之前不断累积(充电), 并在对流活动后期逐渐释放(放电)。对各 MSE 控制项的诊断表明, MSE 异常基本上与辐射和湍流加热存在同时正相关, 与垂向平流存在反相关, 而水平平流则在东侧领先于 MSE 异常, 成为引导 ISO 向东传播的重要条件。

以上研究大多关注了冬季 ISO 事件沿赤道的向东传播过程。实际上, 夏季 ISO 事件具有更加复杂的传播特征, 它除了沿赤道向东传播, 还在亚洲季风区存在东北方向传播以及独立的北向传播^[15]。ISO 湿/干位

收稿日期: 2018-06-26

资助项目: 国家重点研发计划项目——10~30 天极端天气过程可预报性及预报理论与方法研究(2018YFC1505800); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——印度洋年际异常对孟加拉湾夏季季风爆发的影响(2016Q05)和东星北青年学者项目——全球变暖背景下印度洋海气相互作用与季节内振荡的联系(2017S02); 全球变化与海气相互作用专项——太平洋-印度洋与亚洲季风的相互影响(GASI-IPOVAI-03)

作者简介: 李奎平(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大气低频振荡方面研究. E-mail: likp@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

相在亚洲季风区的交替向北传播正是夏季风活跃/中断的重要诱因^[16]。已有研究指出^[17],夏季期间 ISO 事件的向北传播阶段也存在 MSE 的充电和放电过程,并且强调了水汽水平平流的重要作用,但是并没有明确控制水汽水平平流的关键物理过程。本文选取孟加拉湾这一典型代表区域,利用大气再分析资料,通过进行 MSE 和水汽诊断分析,定量探讨夏季 ISO 事件向北传播阶段 MSE 演变特征及关键物理控制过程。

1 资料和方法

1.1 资料

本文用到的资料包括:

1) 美国海洋大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的大气顶对外长波辐射通量(Outgoing Longwave Radiation, OLR)^[18],水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间分辨率为 1 d,时间跨度为 1979—2016 年。OLR 是用于表征大气对流的参量,OLR 越低表示对流越强。

2) 欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA-Interim 大气再分析资料^[19],包括 200~1 000 hPa(共 23 层)的三维风速、气温、比湿和位势高度,大气顶和海表的长波与短波辐射通量,海表感热与潜热通量。资料水平分辨率 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$,时间分辨率为 1 d,时间跨度为 1979—2016 年。

1.2 方法

大气 MSE 的表达式为 $m = Lq + c_p T + gz$,式中, m 表示 MSE; L 为潜热常数,取 $2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$; q 为大气比湿; c_p 为定压比热,取 $1\,004 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; T 为气温; g 为重力加速度; z 为高度。大气柱垂向积分的 MSE 变化表示为^[20]

$$\left\langle \frac{\partial m}{\partial t} \right\rangle = -\langle \mathbf{V} \cdot \nabla m \rangle - \langle w \frac{\partial m}{\partial p} \rangle + Q_T + Q_s, \quad (1)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示 200~1 000 hPa 的质量积分; $\mathbf{V}$ 为水平速度; w 为垂直速度; p 为压力; Q_T 为湍流热通量,即海表感热与潜热之和; Q_s 为辐射热通量,即大气吸收的长波和短波辐射之和; $-\langle \mathbf{V} \cdot \nabla m \rangle$ 称为水平平流项; $-\langle w \frac{\partial m}{\partial p} \rangle$ 称为垂向平流项。

为定量揭示控制水汽水平平流的关键物理过程,采用时间滤波将原始物理量 A 进行如下形式分解: $A = A_l + A_m + A_s$ 。其中 A_l 为低频变率,通过 70 d 低通滤波获取,用以表征季风背景; A_s 为高频变率,通过 20 d 高通滤波获取,主要包括天气尺度过程和准双周振荡等; A_m 为季节内变化,通过将原始值减掉高频和低频变率后获取,代表了周期 20~70 d 的 ISO 信号。据此,水汽水平平流项表达为 3 种尺度过程的相互作用:

$$-\mathbf{V} \cdot \nabla q = -(\mathbf{V}_l + \mathbf{V}_m + \mathbf{V}_s) \cdot \nabla(q_l + q_m + q_s). \quad (2)$$

本研究关注孟加拉湾夏季(5—9 月)的 ISO 事件,通过选取典型 ISO 事件进行合成分析,揭示 MSE 的演变特征与机理。考虑到每次 ISO 事件的周期存在差异,采用了按照位相进行合成的方法。首先将孟加拉湾中部($85^\circ \sim 95^\circ \text{E}$, $5^\circ \sim 15^\circ \text{N}$) OLR 进行 20~70 d 带通滤波,然后将 5—9 月的时间序列进行标准化处理构建了 ISO 参考指数。当参考指数低于 -1 时表示强事件发

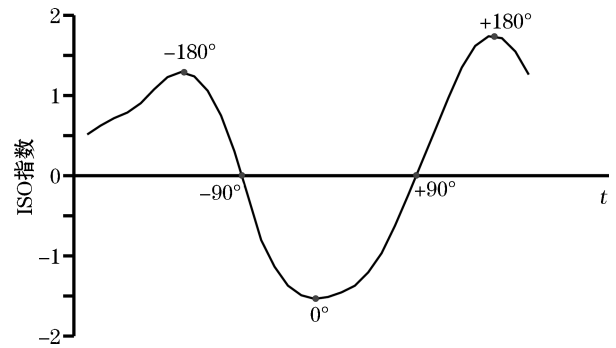


图 1 依据参考指数定义的 ISO 位相示意图

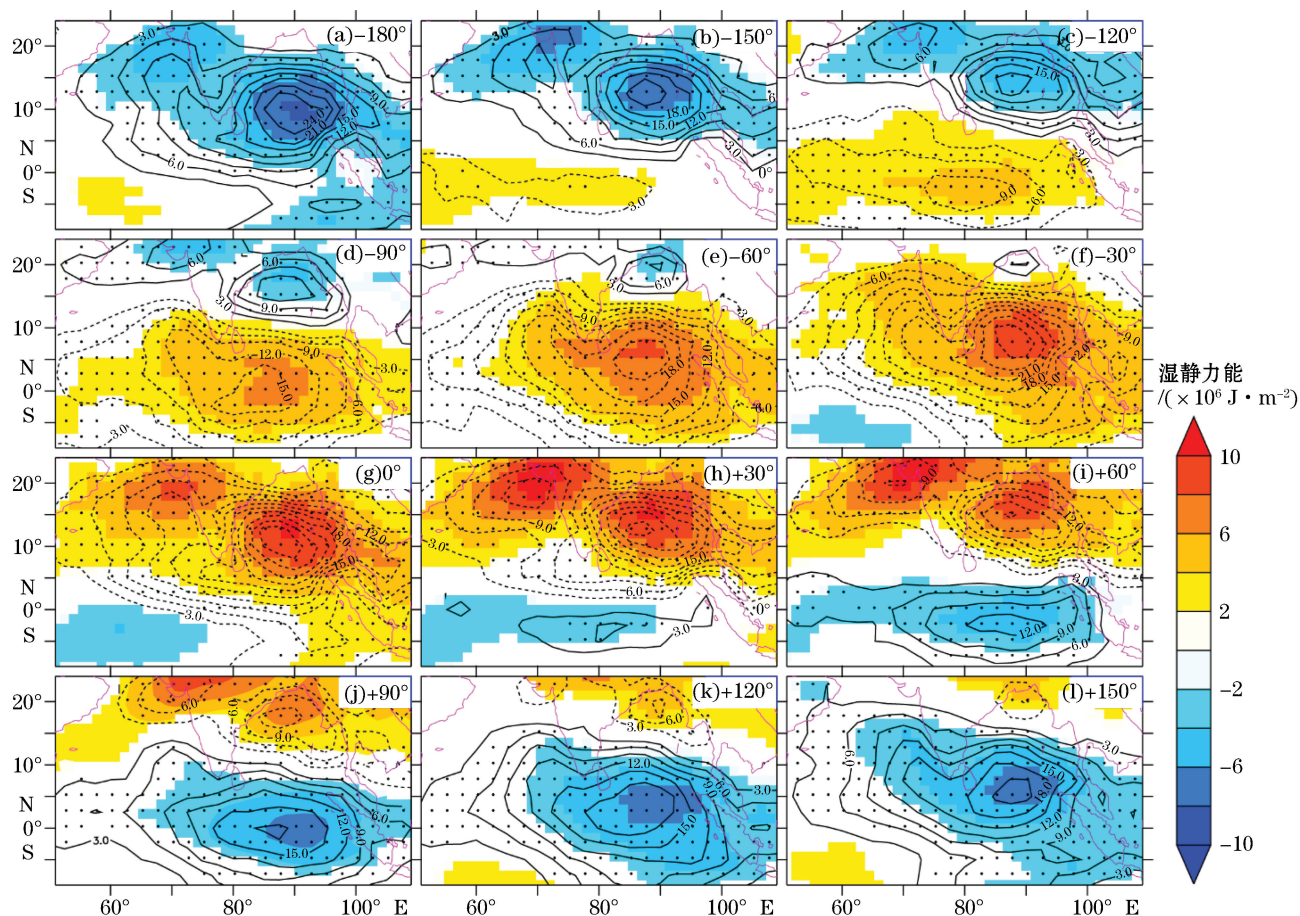
Fig.1 Definition of ISO phases based on ISO index

生,选定该事件作为分析样本,共计 104 个。针对选定的 ISO 事件,以 ISO 参考指数达到极小值时为 0° ,紧邻的前后两个极大值分别定义为 -180° 和 $+180^\circ$,指数跨越零点的时刻分别定义为 -90° 和 $+90^\circ$ (图 1),其他每 10° 间隔的位相通过内部插值获得。统计显示,104 个 ISO 事件的平均周期为 38 d,因此每 10° 间隔大致代表 1 d。最后,将其它物理量进行 20~70 d 带通滤波得到其季节内变化信号,并参照上述定义的 ISO 位相对 104 个典型事件进行合成。

2 结果与分析

2.1 湿静力能的季节内变化

首先揭示夏季时 MSE 的季节内变化特征。图 2 为 OLR 表征的 ISO 对流和 MSE 异常的位相-空间演化,仅填充了 MSE 异常超过 99% 显著性水平 (t -检验) 的区域,并以星号表示了 OLR 异常超过 99% 显著性水平的区域。



注:等值线表示 OLR 异常 ($W \cdot m^{-2}$), 填充表示 MSE 异常

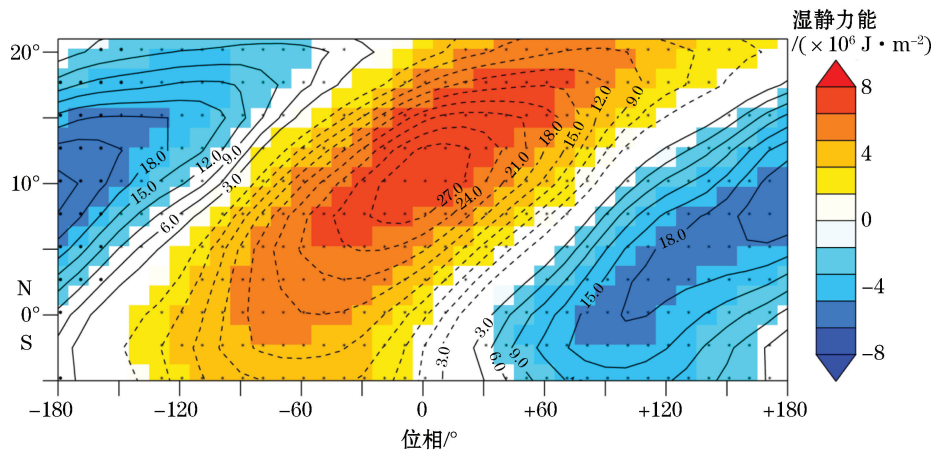
图 2 孟加拉湾夏季 ISO 事件的周期演化

Fig.2 Lifecycle of summertime ISO events in the Bay of Bengal

由图 2 可见, -180° 位相, 孟加拉湾被强烈的对流抑制过程控制, MSE 呈现显著负异常。进入 -150° 位相, 在赤道西印度洋出现大面积 MSE 正异常, ISO 对流开始形成。随后, MSE 正异常中心与 ISO 对流中心都不断向东移动并逐渐增强, 而孟加拉湾的 MSE 负异常和 ISO 对流抑制过程则逐渐消退。 -30° 位相,

MSE 正异常中心与 ISO 对流中心到达赤道东印度洋,随后开始向北转向进入孟加拉湾;与此同时,赤道西印度洋开始出现 MSE 负异常。 0° 位相,孟加拉湾 MSE 正异常与 ISO 对流达到最强,此后二者在向北移动过程中逐渐减弱。赤道附近的 MSE 负异常逐渐增强,在 $+30^{\circ}$ 位相出现了 ISO 对流抑制过程。此后,MSE 负异常和 ISO 对流抑制过程基本上重复上述时空演变特征。总体来看,MSE 异常与 ISO 对流信号在空间和时间上都体现出较为一致的演变特征,即 ISO 对流区域(对流抑制区域)伴随着 MSE 正(负)异常,并且二者在时间上也呈现出比较同步的增强和减弱。

夏季 ISO 事件在孟加拉湾主要表现为向北传播,图 3 为孟加拉湾($85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$)OLR 异常和 MSE 异常的经向-位相演化,仅填充了 MSE 异常超过 99%显著性水平(t -检验)的区域,并以星号表示了 OLR 异常超过 99%显著性水平的区域。图 3 清晰显示了 ISO 在孟加拉湾的向北传播阶段伴随的 MSE 累积和释放过程。在前期的对流抑制位相,MSE 呈现显著负异常;伴随着 MSE 的不断累积,ISO 对流逐渐增强,并且都存在显著的向北传播特征; 0° 位相时,MSE 异常和 ISO 对流都达到极大值;随后,MSE 逐渐释放,ISO 对流也不断减弱并被对流抑制过程取代。在 ISO 事件周期演变中,OLR 的变化幅度接近 $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,MSE 的振幅大致在 $16 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在北移过程中,ISO 活跃中心大致位于 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$,以下我们将针对此孟加拉湾中部区域($85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$, $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$)开展 MSE 诊断分析。



注:等值线表示 OLR 异常($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),填充表示 MSE 异常

图 3 孟加拉湾断面 OLR 和 MSE 的经向-位相演化

Fig.3 Meridional-phase evolution of OLR and moist static energy along the Bay of Bengal

2.2 湿静力能诊断分析

以上观测事实表明,ISO 事件中 MSE 的累积(释放)是大气对流发展(衰减)的重要条件。MSE 的变化受到平流输送、湍流加热和辐射加热等多种物理过程的影响,那么是何种过程主导了 ISO 北传阶段 MSE 的季节内变化? 我们依据式(1)对 MSE 的各控制项进行了分析(图 4)。从 MSE 时间变率($\partial m / \partial t$)来看,它在 -180° 位相时转为正值,表示 MSE 开始累积(充电),从 OLR 反映的大气对流来看,它也开始逐渐增强; $\partial m / \partial t$ 在 -90° 位相时达到最大,表示此时的 MSE 累积速率最快;随后 $\partial m / \partial t$ 逐渐减小,并在 0° 位相时转为负值,表示 MSE 充电结束,大气对流达到了最强;此后, $\partial m / \partial t$ 保持负值,MSE 逐渐释放(放电),大气对流也逐渐减弱; $\partial m / \partial t$ 在 $+90^{\circ}$ 位相时达到最小,表示此时的 MSE 释放速率最快; $+180^{\circ}$ 位相时, $\partial m / \partial t$ 开始趋近零点,MSE 基本结束放电过程,大气对流达到最弱。从 MSE 各控制项来看,水平平流项($-\langle \mathbf{V} \cdot \nabla m \rangle$)的演化领先于 $\partial m / \partial t$,它早在 -180° 位相时已体现出显著的充电效应,并维持高值至 -90° 附近,随后它快速降低并在 -40° 转为负值,开始导致 MSE 放电。辐射热通量(Q_s)和湍流热通量(Q_T)的演化显著滞后于 $\partial m / \partial t$,它们分别在 -80° 和 -60° 位相转为正值,呈现充电效应,并在 0° 位相附近达到极大值;而在 MSE 的

初期放电阶段($0 \sim +90^\circ$),它们依然保持着充电效果。垂向平流项($-\langle w \cdot \partial m / \partial p \rangle$)基本上与辐射/湍流热通量呈现反相关,但是它对 MSE 变化的贡献相对较小。在 MSE 季节内演变中,水平平流项、垂向平流项、湍流热通量和辐射热通量的振幅分别为 60, 11, 31 和 38 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,这 4 个分项之和(黑色虚线)与 $\partial m / \partial t$ 在时间演化和量值方面都具有较好的一致性,说明了式(1)在本研究中具备适应性。

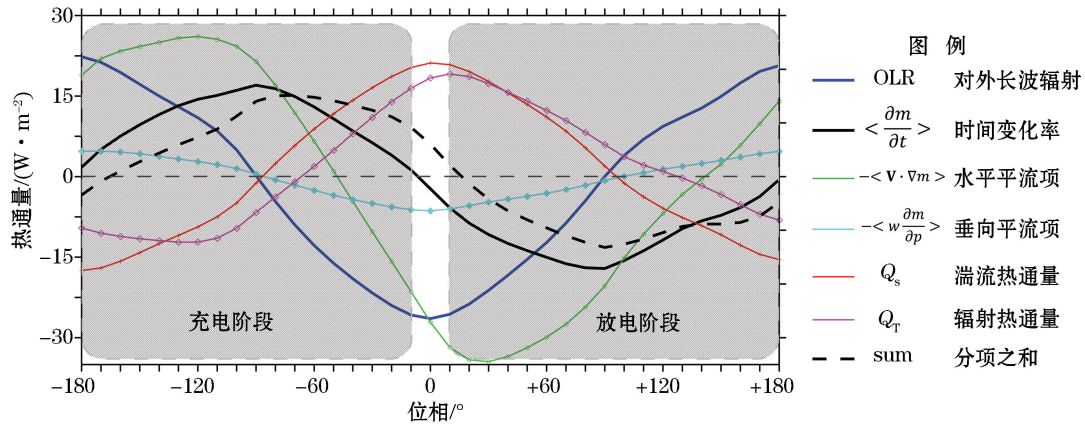


图 4 孟加拉湾中部 MSE 控制项的位相演化

Fig.4 Phase evolution of moist static energy budget terms in the central Bay of Bengal

为清晰对比 ISO 事件中 MSE 累积和释放的控制机理,我们将 $-180^\circ \sim -10^\circ$ 和 $+10^\circ \sim +180^\circ$ 分别定义为充电阶段和放电阶段,并计算各 MSE 控制项在这两个阶段的贡献大小(图 5)。比较发现,在 MSE 充电阶段,仅有水平平流项体现为显著的正贡献,垂向平流项的贡献接近为零,湍流热通量和辐射热通量则体现为负贡献。类似地,在 MSE 放电阶段,水平平流项也具有最大贡献,垂向平流项作用较小,湍流热通量和辐射热通量表现为反作用。以上结果说明在孟加拉湾夏季 ISO 事件中, MSE 的充电和放电过程是由水平平流项所主导。事实上, MSE 的变化是由水汽、气温和位势 3 个要素共同决定的,很多研究指出水汽的变化占据主导地位^[12-14, 21],从表 1 给出的各组成要素对 MSE 水平平流的贡献比例可以看出,夏季 MSE 季节内变化同样是由水汽所决定,这与之前的研究相一致^[17]。

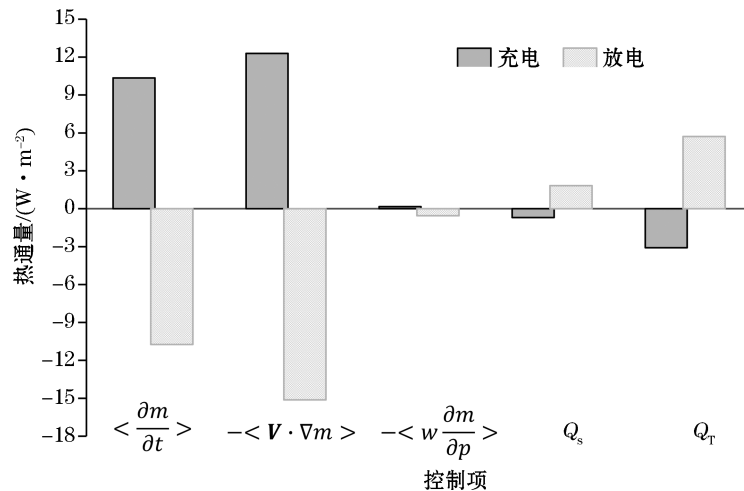


图 5 孟加拉湾中部 MSE 各控制项在充电阶段和放电阶段的对比

Fig.5 Comparisons of moist static energy budget terms between recharge and discharge phases in the central Bay of Bengal

表 1 充电和放电阶段各组成要素对 MSE 水平平流的贡献

Table 1 Percentage contributions of moisture, air temperature and geopotential to horizontal moist static energy advection term in recharge and discharge phases

阶段	$-\langle V \cdot \nabla m \rangle / (W \cdot m^{-2})$	$-\langle V \cdot \nabla Lq \rangle / (W \cdot m^{-2})$	$-\langle V \cdot \nabla c_p T \rangle / (W \cdot m^{-2})$	$-\langle V \cdot \nabla gz \rangle / (W \cdot m^{-2})$
充电	12.29	15.24(124%)	-2.72(-22%)	-0.23(-2%)
放电	-15.12	-18.40(122%)	3.09(-20%)	0.19(-1%)

大气垂向积分的结果表明水汽水平平流($-V \cdot \nabla q$)是孟加拉湾夏季 ISO 事件中 MSE 充电和放电的关键控制因素,那么各气压高度上的物理控制过程是否一致? 我们进一步分析了水汽水平平流及其 2 个分量的高度-位相演化(图 6),可以看出它们都在 MSE 的充电(放电)阶段呈现显著的正(负)异常,并且水平平流项在对流层中高层(400~600 hPa)和底层(700~900 hPa)存在 2 个显著变化中心。通过对比纬向平流($-u\partial q/\partial x$)和经向平流($-v\partial q/\partial y$)两个分量的垂向分布,可以看出对流层中高层的水汽变化中心主要是由纬向平流所致,低层的水汽变化中心则主要由经向平流贡献。

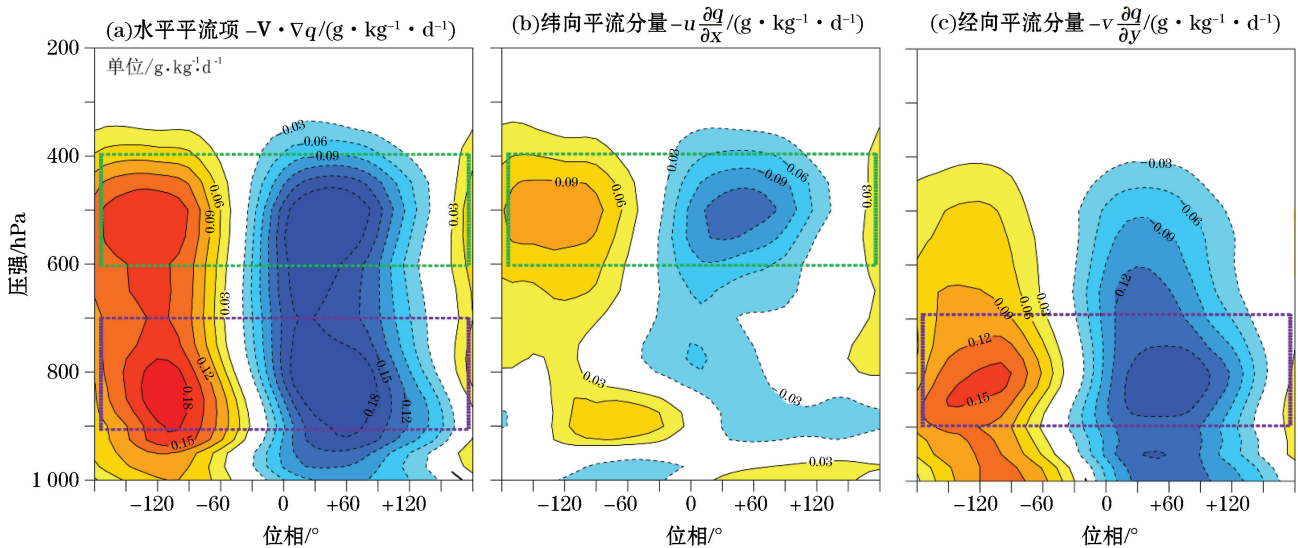


图 6 孟加拉湾中部水汽水平平流的垂向-位相演化

Fig.6 Vertical-phase evolution of horizontal moisture advection in the central Bay of Bengal

水汽水平平流在对流层低层和中高层存在显著差异,为了明确水汽平流效应的潜在物理控制过程,我们采用时间滤波将比湿、纬向风和经向风分解为低频变率、季节内变率和高频变率,并按照式(2)计算了中高层(400~600 hPa)纬向平流和低层(700~900 hPa)经向平流的各控制项,它们在 MSE 充电和放电阶段的对比如图 7 所示。在对流层中高层(图 7a),水汽纬向平流在 MSE 充电和放电阶段的显著差异主要取决于纬向风季节内变化与低频水汽纬向梯度的作用项($-u_m \partial q_1 / \partial x$);在对流层低层(图 7b),水汽经向平流在 MSE 充电和放电阶段的显著差异则主要来源于低频经向风与水汽季节内变率经向梯度的作用项($-v_1 \partial q_m / \partial y$)。

针对对流层中高层和低层的两个关键水汽平流控制项,图 8 用于阐述它们的潜在物理机制。其中图 8a~8c 分别为 400~600 hPa 的低频水汽分布($q_l, g \cdot kg^{-1}$)、充电阶段和放电阶段的纬向风季节内异常($u_m, m \cdot s^{-1}$),图 8d~8f 分别为 700~900 hPa 的低频经向风($v_1, m \cdot s^{-1}$)、充电阶段和放电阶段的水汽季节内异常($q_m, g \cdot kg^{-1}$)。夏季时孟加拉湾水汽呈现西低东高的分布($\partial q_1 / \partial x > 0$,图 8a),水汽纬向平流在 MSE 充电和放电阶段显著对比是由纬向风异常的反号所致。在 MSE 充电阶段,对流抑制过程导致孟加拉

湾被东风异常控制 ($u_m < 0$, 图 8b), 它对低频水汽的输送作用使孟加拉湾水汽不断增强; 在 MSE 放电阶段, 活跃对流导致孟加拉湾被西风异常控制 ($u_m > 0$, 图 8c), 它对低频水汽的输送作用则会使孟加拉湾水汽不断减少。与水汽纬向平流类似, 水汽经向平流在 MSE 充电和放电阶段的显著对比是由于水汽季节内异常的经向梯度反号所致。夏季时孟加拉湾低层被南风控制 ($v_l > 0$, 图 8d), 在 MSE 充电阶段, 孟加拉湾南部(北部)为水汽正(负)异常, 呈现南高北低的水汽分布 ($\partial q_m / \partial y < 0$, 图 8e), 它与低频背景风场的相互作用使得孟加拉湾水汽不断增强; 而 MSE 放电阶段水汽异常的南北分布恰好相反 ($\partial q_m / \partial y > 0$, 图 8f), 其与低频背景风场的相互作用使得孟加拉湾水汽不断减少。上述 2 项水汽平流控制过程最终显著调制了 MSE 的充电和放电, 影响了 ISO 事件的生命演化过程。

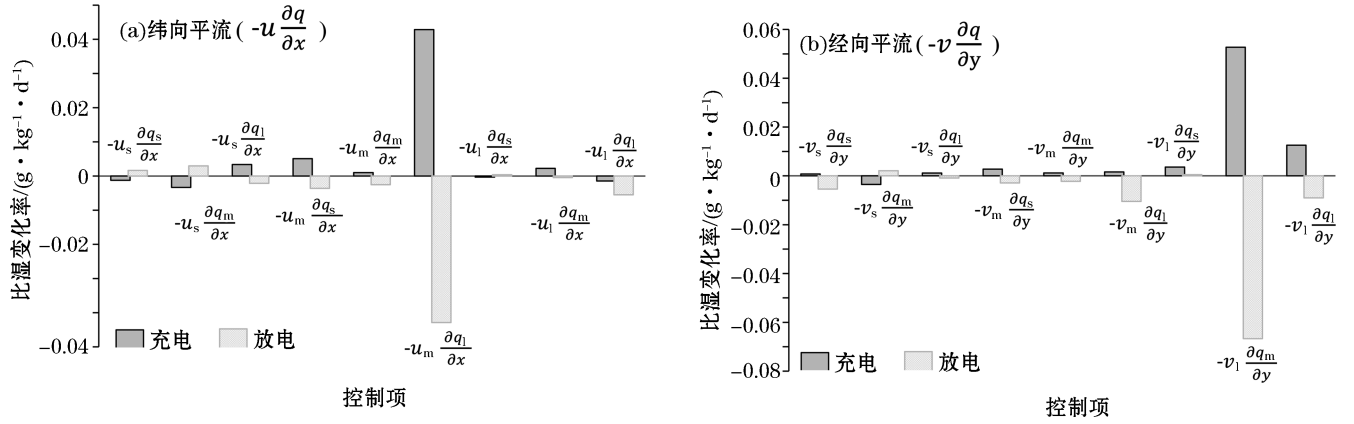


图 7 孟加拉湾中部水汽纬向平流和经向平流各控制项在充电和放电阶段的对比

Fig.7 Comparisons of zonal and meridional moisture advection terms between recharge and discharge phases in the central Bay of Bengal

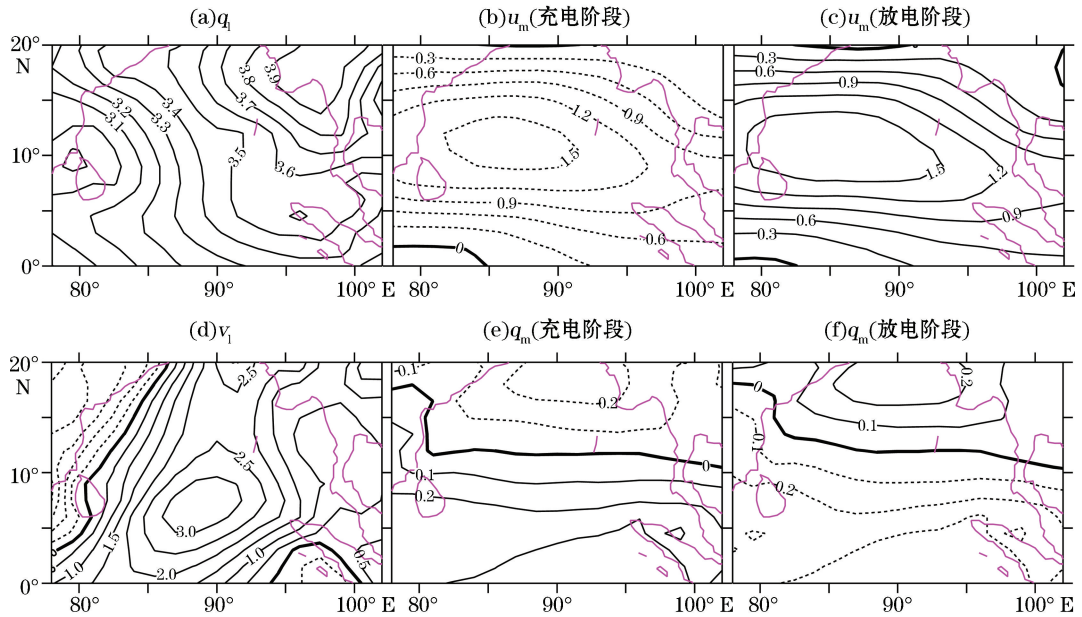


图 8 纬向平流和经向平流关键控制要素的分布

Fig.8 Distribution of critical variables that dominate the zonal and meridional moisture advection

3 结 语

夏季期间 ISO 事件活跃于孟加拉湾,并存在显著的向北传播。本文采用 1979—2016 年 ERA-Interim 大气再分析资料,通过对典型 ISO 事件进行位相合成,分析了夏季孟加拉湾 MSE 季节内变化的演变特征和控制机理。结论如下:1)ISO 事件在孟加拉湾的向北传播与 MSE 的演化密切联系,ISO 对流的增强(减弱)伴随着 MSE 的显著充(放)电过程;2)孟加拉湾 MSE 在充电阶段和放电阶段的显著对比主要是由水平平流项所控制,其中水汽要素占据主导地位;3)水汽水平平流在对流层中高层和低层的控制机理存在显著不同。中高层主要是由纬向平流过程所致,取决于 ISO 扰动纬向风对低频水汽的输送;低层主要源自经向平流过程,取决于低频经向风对 ISO 扰动水汽的输送。

除孟加拉湾外,夏季 ISO 事件在阿拉伯海和中国南海也存在显著的向北传播,当前结果在其他 2 个海区的适应性需要进一步的研究予以确认。本文强调了不同高度背景风场和水汽分布对 MSE 季节内演化的重要调控作用,这对理解当前模式中的 ISO 模拟偏差具有重要指示意义,即提高模式对季风背景的模拟能力或是缩小 ISO 模拟偏差的重要前提。值得说明的是,水汽水平平流的演化显著领先于 ISO 对流中心(图 6),这是诱导 ISO 对流向北传播的关键因素,Jiang 等^[22]强调了对流层低层水汽平流过程的重要性,这里我们同时指出了中高层水汽平流的贡献及其不同的物理控制过程,从而增进了对 ISO 北传机制的理解。

参考文献(References):

- [1] MADDEN R A, JULIAN P R. Observations of the 40-50-day tropical oscillation: a review[J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(5): 814-837.
- [2] ZHANG C. Seasonality in the Madden-Julian Oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(17): 3169-3180.
- [3] LIEBMANN B, HENDON H H, GLICK J D. The relationship between tropical cyclones of the Western Pacific and Indian Oceans and the Madden-Julian Oscillation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1994, 72(8): 3948-3970.
- [4] LI K, YU W, LI T, et al. Structures and mechanisms of the first-branch northward-propagating intraseasonal oscillation over the tropical Indian Ocean[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(7-8): 1707-1720.
- [5] HAN G Q, LIU L, DUAN Y L, et al. Anomalous behavior of spring Wyrтки Jet in equatorial Indian Ocean during 2013[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 189-199. 韩国庆, 刘琳, 段永亮, 等. 2013 年春季 Wyrтки 急流变异及成因分析[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 189-199.
- [6] RAO S A, YAMAGATA T. Abrupt termination of Indian Ocean dipole events in response to intraseasonal disturbances[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L19306, DOI: 10.1029/2004GL020842.
- [7] HENDON H H, WHEELER M C, ZHANG C. Seasonal dependence of the MJO-ENSO relationship[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(3): 531-543.
- [8] RAYMOND D J, FUCHS Z. Moisture modes and the Madden-Julian Oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(11): 3031-3046.
- [9] SOBEL A, MALONEY E D. Moisture modes and the eastward propagation of the MJO[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 70(1): 187-192.
- [10] EMANUEL K A. An air-sea interaction model of intraseasonal oscillations in the tropics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44(16): 2324-2340.
- [11] RAYMOND D J. A new model of the Madden-Julian Oscillation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 58(18): 2807-2819.
- [12] MALONEY E D. The moist static energy budget of a composite tropical intraseasonal oscillation in a climate model[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(22): 711-729.
- [13] SOBEL A, WANG S, KIM D. Moist static energy budget of the MJO during DYNAMO[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(11): 4276-4291.
- [14] KIM D, KUG J S, SOBEL A H. Propagating versus non-propagating Madden-Julian Oscillation events[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(1): 111-125.
- [15] WANG B, RUI H. Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975-1985[J]. *Meteorology & Atmos-*

- pheric Physics, 1990, 44(1-4): 43-61.
- [16] YASUNARI T. A quasi-stationary appearance of 30-40 day period in the cloudiness fluctuations during the summer monsoon over India [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1980, 58(3): 225-229.
- [17] PILLAI P A, SAHAI A K. Moisture dynamics of the northward and eastward propagating boreal summer intraseasonal oscillations: possible role of tropical Indo-west Pacific SST and circulation[J]. Climate Dynamics, 2016, 47(3-4): 1335-1350.
- [18] LIEBMANN B, SMITH C A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 1275-1277.
- [19] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137: 553-597.
- [20] NEELIN J D, HELD I M. Modeling tropical convergence based on the moist static energy budget[J]. Monthly Weather Review, 1987, 115(1): 3-12.
- [21] WANG L, LI T, CHEN L, et al. Modulation of the MJO intensity over the equatorial western Pacific by two types of El Niño[J]. Climate Dynamics, 2018, 51(1-2): 687-700.
- [22] JIANG X A, LI T, WANG B. Structures and mechanisms of the northward propagating boreal summer intraseasonal oscillation[J]. Journal of Climate, 2004, 17(5): 1022-1039.

Budget Analysis of Moist Static Energy in Summertime Intra-seasonal Oscillations Over the Bay of Bengal

LI Kui-ping^{1,2}, WANG Hai-yuan^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, YU Wei-dong³, LI Li-li^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;*

3. *School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)*

Abstract: The northward-propagating intra-seasonal oscillations (ISOs) activate in the Bay of Bengal (BoB) during boreal summer. In this study, the intra-seasonal evolutions and controlling mechanisms of moist static energy (MSE) in the BoB are diagnosed based on ERA-Interim reanalysis data in 1979—2016. The ISO phase-dependent composite indicates that strong MSE recharge and discharge occurs during the ISO northward propagation in the BoB. A budget analysis of MSE further reveals that the recharge and discharge are primarily controlled by the moisture term associated with horizontal advection. In addition, it is noted that different physical processes dominate the horizontal moisture advection between the mid-upper and the lower troposphere. At mid-upper level, the horizontal moisture advection mainly depends on the transport of low-frequency moisture by intra-seasonal zonal wind. While at lower level, the horizontal moisture advection is mainly due to the transport of intra-seasonal moisture by low-frequency meridional wind.

Key words: the Bay of Bengal; intra-seasonal oscillation; moist static energy

Received: June 26, 2018