

严欣, 据建华. 2016. 夏季 MJO 持续异常的主要特征分析 [J]. 大气科学, 40 (5): 1048–1058. Yan Xin, Ju Jianhua, 2016. Analysis of the major characteristics of persistent MJO anomalies in the summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 1048–1058, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15248.

夏季 MJO 持续异常的主要特征分析

严欣¹ 据建华²

¹ 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650000

² 云南省气象局, 昆明 650000

摘 要 在 MJO 传播过程中, 其活动中心并不总是规律地沿赤道东传。本文通过资料分析发现, 夏季 MJO 的活动中心会出现东传停滞的情况, 表现为 MJO 在赤道太平洋持续异常活跃或者在印度洋持续异常活跃两种形式。为更好描述 MJO 这种东传不明显的异常特征, 本文定义了一个描述 MJO 持续异常的指数, 并据此对夏季 MJO 持续异常的主要特征进行分析。通过小波分析的方法, 发现夏季 MJO 持续异常时其振荡周期会出现缩短或变弱。通过对 MJO 持续异常状况下的大气环流进行合成对比分析后发现, 夏季 MJO 的持续异常会对热带大气环流造成显著的影响。具体表现为: MJO 夏季在赤道太平洋 (印度洋) 持续活跃的时候, 赤道沃克环流减弱 (增强), 西太平洋哈得来环流增强 (减弱), 西太平洋副高位置偏北 (偏南), 赤道太平洋 (印度洋) 高层辐散且对流活跃。

关键词 MJO 持续异常 大气环流 季节内振荡

文章编号 1006-9895(2016)05-1048-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15248

Analysis of the Major Characteristics of Persistent MJO Anomalies in the Summer

YAN Xin¹ and JU Jianhua²

¹ Resource Environment and Geosciences Collage, Yunnan University, Kunming 650000

² Yunnan Provincial Metrological Bureau, Kunming 650000

Abstract During the eastward propagation of the MJO, its action centers are not always regularly distributed along the equator. Observational data analysis in the present study reveals that stagnant centers of the MJO action exist during the summer when the eastward propagation of the MJO becomes weak. The stagnant centers of the MJO action are present as two persistent and anomalously active centers in the equatorial Pacific and the equatorial Indian Ocean, respectively. To better investigate the anomalous characteristics associated with the inconspicuous eastward propagation of the MJO, an index is defined in this study to describe the persistent anomaly of the MJO with a focus on analysis of major characteristics of the persistent MJO anomaly. Based on results of Morlet wave analysis, it is found that the oscillation period becomes short when the persistent anomaly of the MJO occurs in the summer. A synthetic and comparative study of the atmospheric circulation under the persistent anomaly of summer MJO condition suggests that the persistent anomaly of the MJO can significantly affect tropical atmospheric circulation. Specifically, the Walker circulation in the equatorial region weakens (intensifies) in response to anomalies of summertime MJO activities in the equatorial Pacific

收稿日期 2015-08-13; 网络预出版日期 2016-01-21

作者简介 严欣, 女, 1986 年出生, 博士研究生, 主要从事季节内振荡研究。E-mail: krcat@qq.com

通讯作者 据建华, 男, 教授, 主要从事亚洲季风与气候变化研究。E-mail: jujh@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375059, 国家公益性行业 (气象) 专项 GYHY201306022

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41375059), National Public Welfare (Meteorological) Special Project of China (Grant GYHY201306022)

(Indian Ocean), while the Hadley Circulation intensifies (weakens) in the western Pacific. Meanwhile, the West Pacific subtropical high shifts northward (southward), while convection is active in the equatorial Pacific (Indian Ocean), corresponding to upper-level divergence.

Keywords MJO, Persistent anomaly, General circulation, Intraseasonal oscillations

1 引言

MJO (Madden-Julian Oscillation) 自 20 世纪 70 年代初被发现以来, 一直是学者们研究的热点问题 (Madden and Julian, 1971, 1972)。从 80 年代至今, MJO 的时空尺度、结构和传播特征都有较多深入的研究。关于 MJO 产生的动力学机制, 有积云—对流反馈机制 (李崇银, 1985; Lau and Peng, 1987; 王继勇和刘式适, 1996; 查晶和罗德海, 2011)、蒸发—风反馈机制 (李桂龙和刘式适, 1993)、外强迫激发机制 (Li and Xiao, 1992) 及海气耦合机制 (Lau and Shen, 1988; Li and Liao, 1996) 等理论。

对 MJO 这种赤道的大气季节内震荡现象的描述需要借助指数的定义。Wheeler and Hendon (2004) 在对大气向外长波辐射 OLR (outgoing longwave radiation)、U200 (200 hPa 纬向风场) 和 U850 (850 hPa 纬向风场) 这三个物理量进行扩展经验正交方法 (EEOF) 分解之后发现, MJO 两个最显著的活动中心位于印度洋 (EOF1) 和太平洋西部 (EOF2), 在此基础上定义出多变量实时 MJO 指数 RMM (Wheeler and Hendon, 2004)。此指数为现在最常用的 MJO 指数。而近年纽约州立大学的 Ventrice et al. (2013) 已经对 RMM 指数做出改进, 使用 U200、U850 以及 200 hPa 速度势 (VP200) 进行 EOF 分解, 把 RMM 指数里 OLR 用 VP200 替代了。另一个常用的 MJO 指数为 NOAA (美国海洋与大气管理局) 下属的气候预测中心 (CPC, Climate Prediction Center) 所定义的 10 个 MJO 指数 (Xue et al., 2002)。该指数是使用 VP200 进行 EEOF 分析后, 将数据在 EEOF 第一模态的十个空间场上进行投影得到。这两种指数各有侧重, RMM 指数更侧重表现 MJO 在赤道传播的过程, 对其活动中心具体位置只有大概指示作用; 而 CPC 的 MJO 指数则侧重表现在赤道十个关键经度上 MJO 的强弱变化情况, 在表征具体位置 MJO 活跃情况方面更有优势。

对 MJO 的振荡活动规律的研究表明, MJO 主要是沿赤道向东传播的, 但有时也有准静止或向西传播的情况出现 (Huang, 1994; 李崇银, 1995)。

MJO 活动有强的年际变化, 在一段时间的较强活动之后, 也会出现长时间的弱震荡或消失 (Hendon et al., 1999; Zhang, 2005)。这些研究主要侧重于 MJO 活动强度的变化, 而对 MJO 活动中心出现的位置没有重视。而许多对 MJO 活动年际变率的研究主要针对 MJO 冬季的活动变化 (程胜和李崇银, 2006), 将其与 ENSO 循环的发生、太平洋海温的变化相联系 (龙振夏和李崇银, 2001), 对夏季 MJO 的异常活动则没有更进一步研究。众所周知, MJO 是热带重要的大气系统, 其夏季活动的异常会对其他天气气候系统产生重要影响 (Knutson and Weickmann, 1987; Rui and Wang, 1990; Hendon et al., 1999; 陈光华和黄荣辉, 2009; 潘静等, 2010; Jia and Liang, 2013), 特别是对夏季风的活动、季风区降雨多寡产生重要影响 (Maloney and Hartmann, 2000; Higgins and Shi, 2001; 李汀等, 2012; Li et al., 2012; Bai et al., 2013)。因而对夏季 MJO 活动中心在特定区域持续异常的特征的定义和分析, 能够作为后续研究 MJO 异常造成其他气象系统异常的基础, 有重要意义。

2 资料和方法

本文所使用的气象要素场资料有: (1) NCEP 提供的第二套再分析逐日资料 (Kanamitsu et al., 2002), 包括风场 (u , v , w), 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。(2) NCEP 提供的对外长波辐射 (OLR) 逐日资料, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。两套资料的时间均从 1979 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日。

使用的 MJO 指数 (I_{MJO}) 资料有: (1) 澳大利亚天气和气候研究中心开发的 RMM 指数 (Wheeler and Hendon, 2004)。此指数通过将 OLR、850 hPa 和 200 hPa 风场投影到 EEOF 分解的前两个模态, 得到 RMM1 和 RMM2 两个时间序列。将 RMM1 和 RMM2 在极坐标下的投影, 即能近似得到 MJO 活跃中心在赤道的传播路径以及强度。(2) NOAA (美国海洋与大气管理局) 下属的气候预测中心 (CPC) 所定义的 10 个 MJO 指数 (Xue et al., 2002)。此指数通过使用了 200 hPa 速度势资料进行 EEOF

(扩展经验正交方法)分析,由其中的第一模态中 10 个空间/时间场,定义出了 10 个 MJO 指数($I_{\text{MJO}1}$, $I_{\text{MJO}2}$, ..., $I_{\text{MJO}10}$),对应 10 个 MJO 对流活动中心的位置(80°E、100°E、120°E、140°E、160°E、120°W、40°W、10°W、20°W 和 70°W)。因而 CPC 的 10 个 MJO 指数,分别代表 MJO 的活动在热带印度洋、海洋性次大陆、热带太平洋到热带大西洋等不同地区的活跃和抑制状态。这两套 MJO 指数中 RMM 指数为日资料, MJO 指数为侯资料,时间均从 1979 年 1 月至 2013 年 12 月。由于我们观察到 MJO 在出现持续异常特征时周期发生了改变,因此使用 Morlet 小波功率谱分析对特例年的 MJO 指数进行了分析,确定其显著周期范围。之后我们对选取的典型年 MJO 指数进行了统计合成,以分析持续异常特征;并同时合成分析了相关环流场,进一步探讨在 MJO 持续异常情况下,对大气环流以及其他气象要素造成的影响。

3 夏季 MJO 持续异常

3.1 MJO 持续异常个例

在对 MJO 监测的持续关注中,我们发现夏季的 MJO 传播有几种典型形式。

正常情况下, MJO 显著活跃中心是沿赤道向东传播的,如 1979 年夏季。在 MJO 指数(图 1a)上可以清楚看到,蓝色色标所表示的 MJO 活跃中心自 6 月从赤道非洲向东传播,6 月中旬在印度洋活跃,7 月上旬传播至西太平洋活跃,7 月中下旬回到赤道非洲大陆,再次经历一次更强的 MJO 东传后,在 8 月末重新回到非洲大陆。在整个夏季的东传过程中, MJO 活动中心传播路径清晰,并且 MJO 强度偏强。RMM 指数(图 2a)上反映的信息与前述基本一致: 1979 年 MJO 中心 6 月从 1 位相开始东传,经历两次东传循环后,于 7 月中旬和 8 月底两次回到 1 位相。除 7 月下旬出现短暂强度小于 1 情况之外,整个 6~8 月 MJO 强度都偏强。

并非所有年份 MJO 的东传都如此稳定和清楚。在某些年份,夏季 MJO 会出现在太平洋持续异常活跃(如 1982 年夏季)或者在印度洋持续异常活跃(如 2010 年夏季)的两种特殊情况。如 1982 年(图 1b), 6、7、8 月 MJO 的活跃中心长期在赤道西太平洋上空停滞维持。其间最显著的异常持续出现在 6 月下旬至整个 7 月,在太平洋 MJO 持续活跃的同期印度洋 MJO 处于抑制状态。在 RMM 指数图(图 2b)上

同样可见。1982 年 6~7 月 MJO 中心位置基本一直处于代表太平洋的 5、6、7 位相,传播路径并不清晰。7 月末 MJO 强度减弱,8 月初 MJO 活动中心短暂出现在代表印度洋的 2、3 位相,然后并向东传播。整个 1982 年夏季 MJO 强度不强,其中心位置多数时间出现在太平洋附近。而 2010 年 6~8 月(图 1c) MJO 的活动则一直持续在非洲大陆到印度洋区域,强度中心主要位于 70°E~80°E 赤道印度洋附近,与此相对应 MJO 在太平洋为抑制状态。在 RMM 的 MJO 强度中心图(图 2c)上同样可以看到,虽然 8 月有一次较弱东传,但整个夏季 MJO 活动中心基本位于 1~3 位相。这两种异常情况下, MJO 东传活动不明显,轨迹较为模糊。我们将夏季 MJO 东传明显停滞的现象称之为夏季 MJO 的持续异常现象。

3.2 MJO 持续异常的周期特征

MJO 通常具有显著的 30~60 天周期(Madden and Julian, 1971, 1972, 1994; Zhang, 2005)。在 MJO 显著活跃东传的 1979 年的夏季,从图 1 和图 2 我们可以大概推得其振荡周期约为一个半月。而值得注意的是,在 MJO 出现持续异常活动的 1982 年和 2010 年,其东传特征不明显, MJO 的振荡周期似乎出现了改变。为进一步确认这种情况,我们用 1979 年、1982 年和 2010 年 CPC 的 MJO 指数分别进行小波分析,最终取指数 $I_{\text{MJO}4}$ 的周期分析结果如图 3 所示。其余指数的小波分析结果,以及 RMM1、RMM2 指数的小波分析结果也都与之基本一致,因此不再赘述。

1979 年是 MJO 活动较正常、向东传播较为规律的年份(图 3a)。最显著周期出现在 32~64 天这个区间,最强周期信号出现在 6 月份,8 月稍有减弱趋势。1982 年(图 3b) MJO 的活动中心在太平洋出现了异常停滞。6 月初, MJO 的显著周期在 16~32 天及 32~64 天范围都有出现。16~32 天周期持续到 6 月末,而 32~64 天周期在 6 月中旬之后就完全消失不显著了。可见 1982 年夏季 MJO 的周期活动都不太显著。2010 年(图 3c) MJO 的活动中心在印度洋出现了异常停滞。6~7 月小波周期在 16~32 天、32~64 天范围均有分布,7 月末 32~64 天周期消失,16~32 天周期加强,并一直持续到 9 月末。由图可见,2010 年 16~32 天周期比 32~64 天的周期更加显著。

由以上分析发现, MJO 在东传异常停滞的情况下,可能会出现周期缩短的现象。原本的 30~60

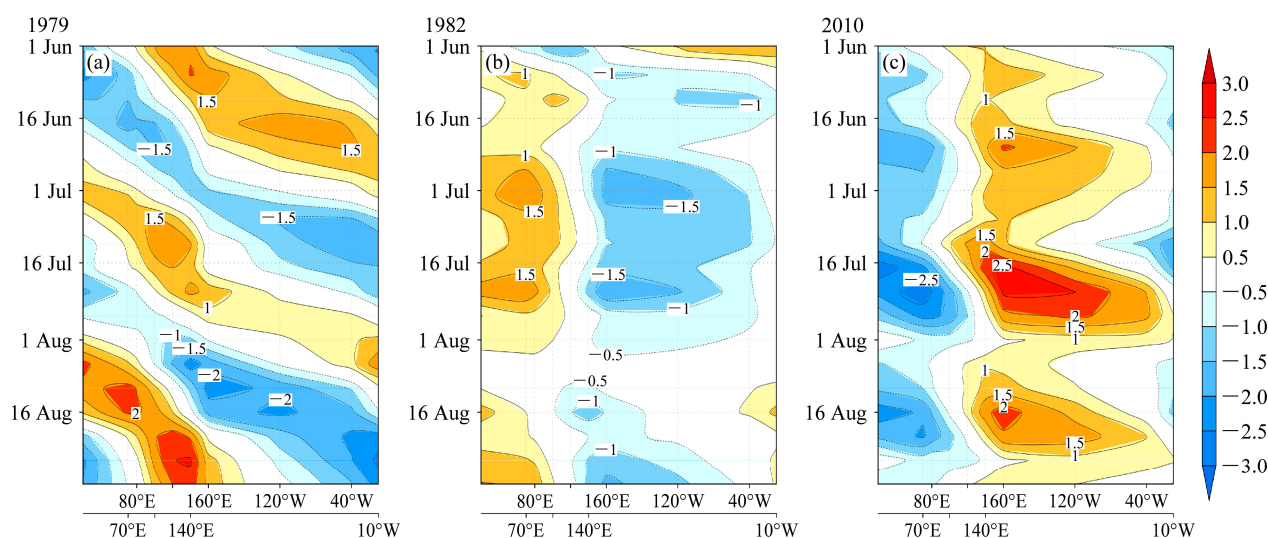


图 1 夏季 (6~8 月) CPC 所定义的 MJO 指数: (a) 1979 年; (b) 1982 年; (c) 2010 年

Fig. 1 The MJO indices defined by CPC (Climate Prediction Center) in the summer (JJA: Jun, Jul, and Aug): (a) 1979; (b) 1982; (c) 2010

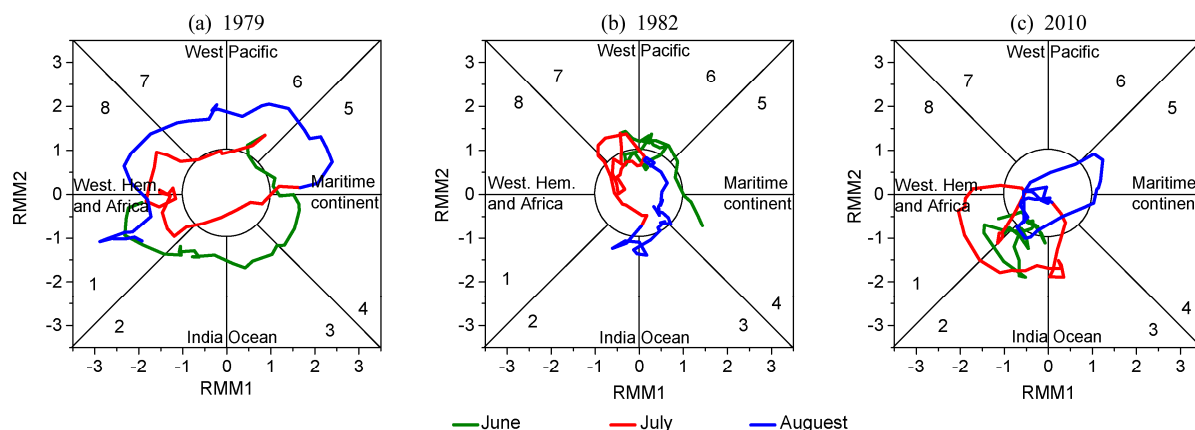


图 2 夏季 (6~8 月) 的 RMM 指数: (a) 1979 年; (b) 1982 年; (c) 2010 年

Fig. 2 RMM (Real-Time Multivariate MJO) indices (constituted by the RMM1 and RMM2) in the summer (JJA): (a) 1979; (b) 1982; (c) 2010

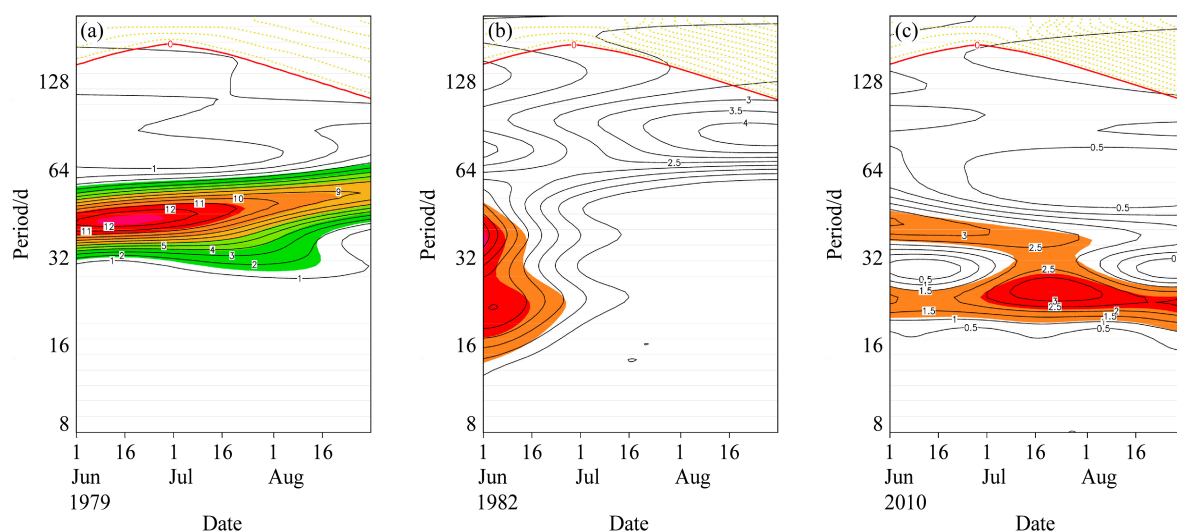


图 3 夏季 (6~8 月) I_{MJO4} 的 Morlet 小波功率谱分析: (a) 1979 年 (b) 1982 年 (c) 2010 年。图中红线为小波影响锥

Fig. 3 The Morlet wavelet power spectra of I_{MJO4} in the summer (JJA): (a) 1979; (b) 1982; (c) 2010. The red lines represent wavelet influence cone

天周期变弱, 并且出现更短 15~30 天周期。另外可能会出现强度较弱、周期消失的情况。

4 夏季 MJO 持续异常指数

4.1 MJO 持续异常指数定义

由上述分析可知, 夏季的 MJO 除了沿赤道正常向东传播的情况之外, 也会出现活动中心东传减弱而在印度洋或太平洋异常停滞的情况。因此, 我们定义出表示夏季 MJO 持续异常的指数 I_{IP} , 以描述夏季 MJO 的持续异常。如公式 (1) 所示, 夏季 MJO 的持续异常指数 I_{IP} 由 CPC 的 I_{MJO} 计算得来。由 I_{MJO} 定义可知, I_{MJO10} 和 I_{MJO1} 位于 70°E 和 80°E , 他们之和可以代表 MJO 在印度洋的活跃程度。 I_{MJO5} 和 I_{MJO6} 位于 160°E 和 120°W , 他们之和可以代表 MJO 在太平洋的活跃程度。将 MJO 在印度洋和太平洋的活跃程度相减, 并对 6~8 月做平均, 即能得到当年的 MJO 持续异常指数 I_{IP} :

$$I_{IP} = \frac{1}{3} \sum_{i=6}^8 [(I_{MJO10} + I_{MJO1}) - (I_{MJO5} + I_{MJO6})]_i, \quad (1)$$

其中, $i=6, 7, 8$ 表示 6 月, 7 月, 8 月。CPC 的 I_{MJO} 的负值表示 MJO 的活跃位相, 正值表示 MJO 的抑制位相。因此可知在由 CPC 指数计算得出的 I_{IP} 中表现的夏季 MJO 特征可能有三种: (1) 若 I_{IP} 的值为负, 则夏季 MJO 在印度洋的活跃程度 (由 I_{MJO10} 和 I_{MJO1} 表示) 大于 MJO 在太平洋的活跃程度 (由 I_{MJO5} 和 I_{MJO6} 表示), 且当 I_{IP} 绝对值大时, 当年夏季 MJO 在印度洋异常活跃的情形显著; (2) 若 I_{IP} 的值为正, 则夏季 MJO 在太平洋的活跃程度 (由 I_{MJO5} 和 I_{MJO6} 表示) 大于 MJO 在印度洋的活跃程度 (由 I_{MJO10} 和 I_{MJO1} 表示), 且当 I_{IP} 绝对值大时, 当年夏季 MJO 在太平洋异常活跃的情形显著; (3) 若 I_{IP} 的值接近 0, 表明当年夏季 MJO 自西向东正常传播, 没有停滞的情况, 或者是夏季 MJO 强度很弱, 在全球基本都不活跃。

用计算出的指数做 1979~2012 年的 I_{IP} 逐年演变图 (图 4), 从中挑选出 I_{IP} 大于 1 的前 8 个年份作为高值典型年, 即 6~8 月 MJO 在太平洋活跃年份 (包括 1982、1986、1987、1990、1991、1997、2002 和 2009 年), 并挑选出 I_{IP} 小于 -1 的前 8 个年份作为低值典型年, 即 6~8 月 MJO 在印度洋活跃年份 (包括 1988、1995、1996、1998、1999、2007、2008 和 2010 年) 进一步进行合成分析。

4.2 MJO 持续异常的指数特征

前文对 MJO 在夏季可能出现的持续异常现象

进行了举例和指数定义。但这种现象的具体表现究竟如何呢? 为突出 I_{IP} 高值年和 I_{IP} 低值年的特征, 我们用 I_{IP} 高值典型年与低值典型年的 CPC 的 MJO 指数做出差值合成图 (图 5)。从图中可以发现:

(1) 从时间分布上看, 我们所定义的指数能够较清楚地反映夏季 6~8 月 MJO 持续异常停滞的特征。事实上全年中 5~10 月都存在不同程度的 MJO 持续异常现象。5 月份已经开始出现 MJO 活动中心停滞的情况并且 MJO 强度偏弱; 8 月停滞的 MJO 活动中心强度为全年最强; 秋、冬季 MJO 持续异常现象减弱, 且活动中心发生东移。

(2) 从空间分布上看, 与指数所选取的两个关键区范围 ($70^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$ 和 $160^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{W}$) 有较好对应, MJO 持续异常振荡特征主要位于 $20^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ 的东非—印度洋区域和 $160^{\circ}\text{E} \sim 40^{\circ}\text{W}$ 的太平洋—美洲区域, 其最显著经度为正差值中心 $70^{\circ}\text{E} \sim 80^{\circ}\text{E}$ 和负差值中心 $160^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{W}$ 。MJO 强度在两个关键区是反向变化的: 当 MJO 活动中心在印度洋停滞, 即 MJO 在印度洋持续活跃时, 太平洋 MJO 的强度持续偏弱; 而当 MJO 活动中心在太平洋停滞, 即 MJO 在太平洋持续活跃时, 印度洋 MJO 的强度持续偏弱。

我们的夏季持续异常指数 I_{IP} 是用 CPC 的 MJO 指数来计算的, 但其实 MJO 夏季异常停滞的情况在 RMM 指数上亦有显著表现。统计 I_{IP} 典型年 6~8 月 RMM 指数在各不同位相的平均天数后结果如表 1 所示, 高值年与低值年 RMM 指数的位相平均天数有显著差异。进一步比较可知, 在 MJO 位于印度洋活跃的 2、3 位相里, 高值年 (平均 17.4 天) 的平均天数仅约为低值年 (平均 36.9 天) 的一半; 而在 MJO 位于海洋性大陆—太平洋活跃的 5、6、7 位相里, 高值年 (平均 42.3 天) 的平均天数为低值年 (平均 17.5 天) 的大约 2 倍。两者差异显著。

表 1 I_{IP} 高值年及低值年 6~8 月逐位相的平均天数统计
Table 1 The average number of days in the summer (JJA) of high and low I_{IP} years by phase statistics

位相	高值年的平均天数	低值年的平均天数
1	10.75	20.75
2	9.25	25.125
3	8.125	11.75
4	11	9.125
5	12.125	6.625
6	16.25	6.375
7	14	4.5
8	10.5	7.75

MJO 的 RMM 指数与 I_{MJO} 虽然用两种不同的方式描述 MJO 的活动, 但都能反映出 MJO 在太平洋或者印度洋持续异常的情况。

5 夏季 MJO 持续异常的环流特征

MJO 在夏季的持续异常现象与大气环流的其他变化密切相关。下面用合成分析的方法比较 MJO 在太平洋持续异常活跃与 MJO 在印度洋持续异常

活跃情况下大气环流的差异。

MJO 在太平洋持续异常活跃的 I_{IP} 高值年, 夏季低层 850 hPa (图 6a) 赤道及热带低纬地区从新加坡 100°E 一直到太平洋东部 120°W 均为显著异常西风, 东亚和西太平洋中纬度地区为异常偏北气流控制; 高层 200 hPa (图 7a) 赤道太平洋区域为异常东风, 副热带西风急流异常加强, 高空太平洋副热带中部地区为距平反气旋性环流。结合赤道地区上空垂直距平环流 (图 8a) 上看, $100^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 为显著异常下沉气流, 赤道地区东太平洋为显著异常上升气流。因此在赤道上空形成反沃克环流的异常形势, 可知, MJO 在太平洋持续异常活跃时, 太平洋赤道地区低层西风减弱, 高层东风减弱, 整个沃克环流减弱。而在 I_{IP} 低值年夏季, MJO 中心在印度洋持续异常活跃。从异常风场合成图中可以看到, 赤道太平洋低层 850 hPa 为异常东风 (图 6b), 东亚和西太平洋中纬度地区为异常偏南气流控制; 高层赤道太平洋地区 200 hPa 为异常西风 (图 7b), 副热带西风急流异常减弱, 高空太平洋副热带中部地区为距平气旋性环流。赤道地区上空垂直距平环流 (图 8b) 上赤道中东太平洋有显著的异常下沉气

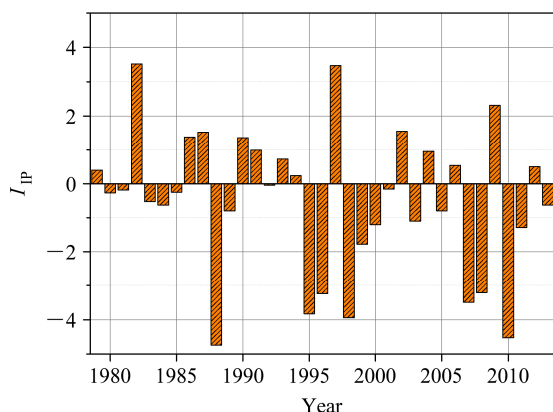


图 4 1979~2013 年的夏季 MJO 持续异常指数 I_{IP} 逐年序列

Fig.4 Time series I_{IP} (the index of persistent MJO anomalies in the summer) during the period of 1979–2013

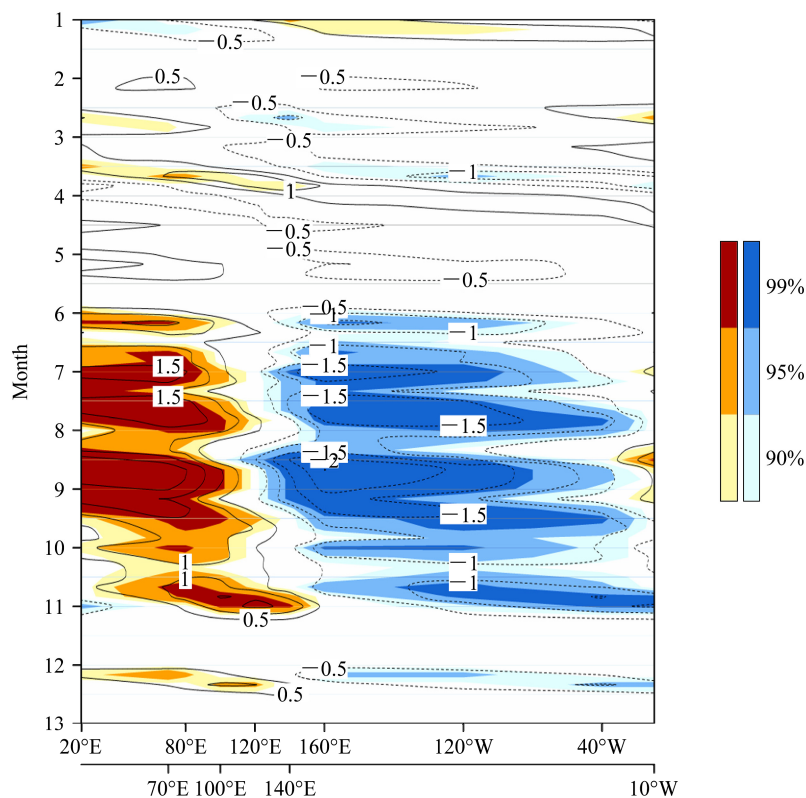


图 5 I_{IP} 高值年和低值年合成的 I_{MJO} 差值。由浅至深不同颜色的阴影分别表示通过 90%、95% 和 99% 的信度检验

Fig. 5 Synthesis of I_{MJO} difference between high and low I_{IP} years. The shaded areas from light to dark indicate statistically significant correlation above 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

流, 显著的异常上升气流位于 120°E 以西的海洋性大陆和印度洋地区, 形成异常沃克环流的形势。因而, MJO 在印度洋持续异常活跃时, 太平洋赤道地区低层东风更强, 高层西风也更强, 实际风场中的沃克环流被加强了。

同时, 在 I_{IP} 高值年, 低层 850 hPa (图 6a) 异常的越赤道气流南风出现在 $90^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$, 以及异常的越赤道气流北风出现在 $120^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$, 太平洋信风减弱。 $90^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 的高层 200 hPa (图 7a) 则有越赤道气流北风出现。在 I_{IP} 低值年, 低层 850 hPa (图 6b) 异常的越赤道气流北风出现在 $90^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$, 以及异常的越赤道气流南风出现在 $120^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$, 太平洋信风加强。

在 I_{IP} 高值年夏季纬向沃克环流的减弱的同时, 从 $140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 平均的垂直经向环流图 (图 9a) 上

看: (1) 热带西太平洋 10°N 附近为异常上升气流, 高空一支向北, 于 30°N 附近下沉, 低层有异常北风流向赤道, 形成闭合的环流, 可见西太平洋的哈得来环流在 I_{IP} 高值年是加强的。(2) 其次, 随着夏季整个赤道辐合带北移, 气流在 10°N 异常上升后, 另一支在高空向南, 越过赤道后下沉, 并在低层出现南风异常越过赤道回到 10°N 。(3) 哈得来环流在西太平洋 $25^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 显著下沉的气流, 对夏季西太平洋副高也会造成影响。相对应地在 500 hPa 环流距平场高值年合成图 (图 10a) 上, 异常的位势高度正值区位置对应着通过信度检验的异常反气旋环流。反之, 在 I_{IP} 低值年沃克环流增强的同时, 热带西太平洋 10°N 附近为异常下沉气流 (图 9b)。这支异常下沉气流在 850 hPa 低层向北流至 30°N 处上升, 在 200 hPa 高层流回赤道。形成的异常经向环流与哈得来环流是反向

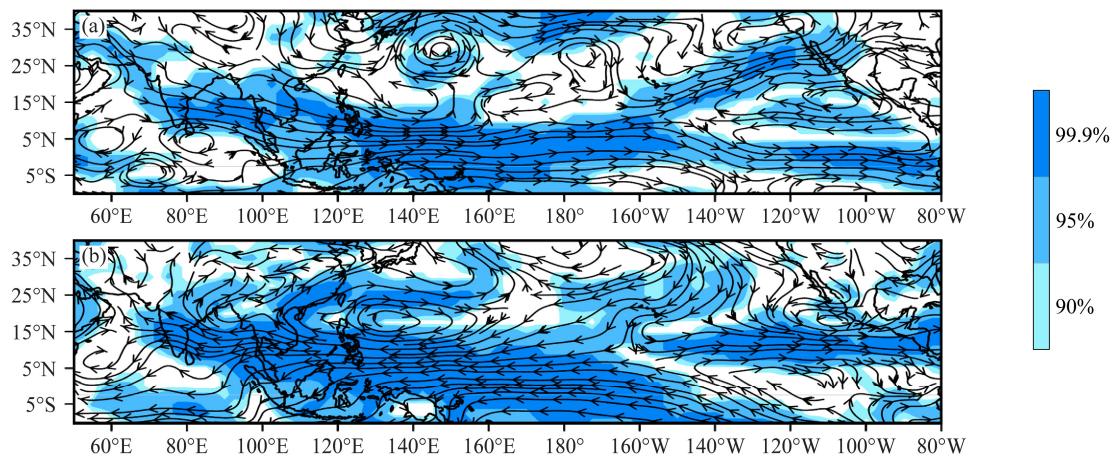


图 6 I_{IP} (a) 高值年和 (b) 低值年夏季 (6~8 月) 850 hPa 水平环流距平合成 (单位: m s^{-1})。由浅至深不同颜色的阴影分别表示通过 90%、95% 和 99.9% 的信度检验, 下同

Fig.6 Composite horizontal winds anomalies (units: m s^{-1}) at 850 hPa during JJA: (a) High I_{IP} years; (b) low I_{IP} years. The shaded areas from light to dark indicate statistically significant correlation above 90%, 95%, and 99.9% confidence levels, respectively, the same below

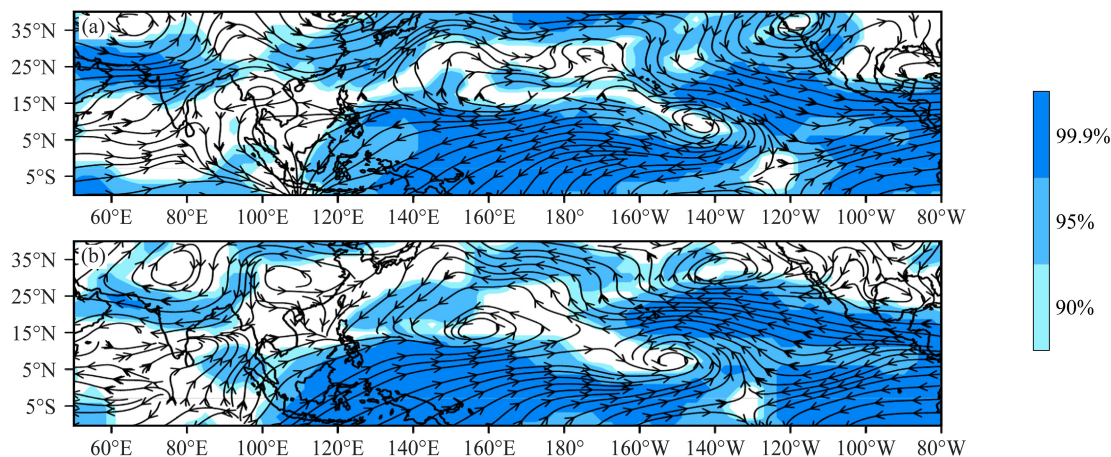


图 7 同图 6, 但为 200 hPa 水平环流距平合成

Fig.7 As in Fig. 6, but for 200 hPa

的, 即西太平洋的哈得来环流在低值年减弱。同时, 哈得来环流位于西太平洋 30°N 的下沉气流的减弱, 会导致西太平洋副高位置偏南。与此相对应, 500 hPa 环流场上 (图 10b), 西太平洋到南海北部区域有显著距平反气旋气流, 可见 I_{IP} 低值年夏季副热带高压

位置更偏西南。

大气长波辐射 (OLR) 能够表明热带地区对流形势的变化, 而 200 hPa 速度势 (VP200) 所代表的高层辐散场可以反映出热带地区大气环流的变化。在 I_{IP} 高/低值年异常哈德莱环流和沃克环流表

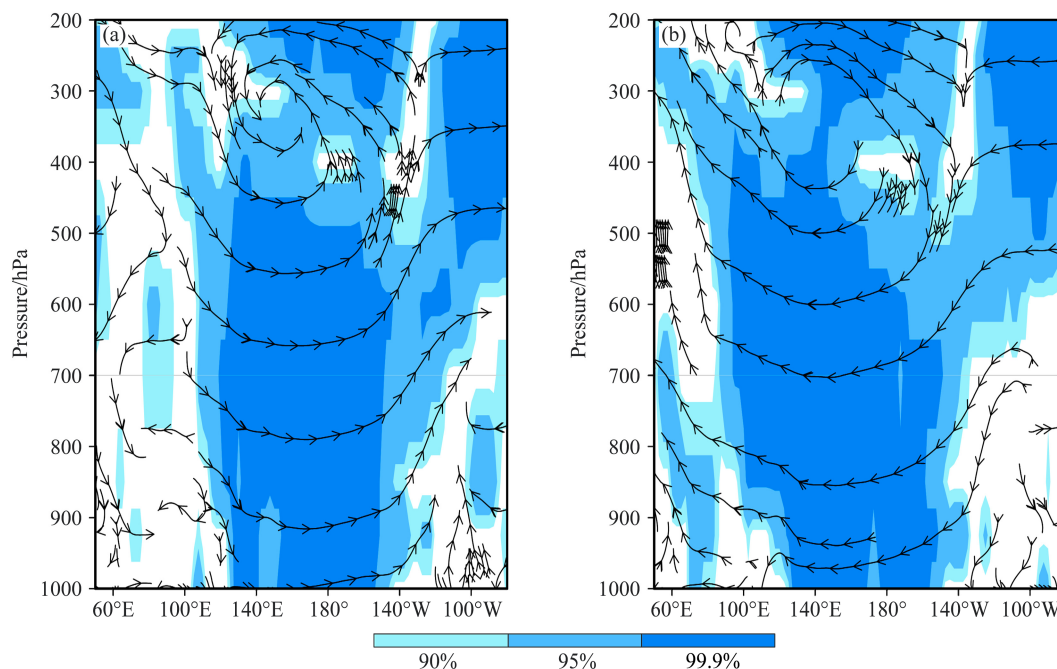


图 8 I_{IP} (a) 高值年和 (b) 低值年夏季 (6~8 月) $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 范围内的垂直—纬向环流距平合成 (单位: m s^{-1} , 为了便于分析, 垂直速度已被放大 100 倍)
Fig. 8 Vertical-zonal cross sections of composite winds anomalies (units: m s^{-1}) over $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ during JJA: (a) High I_{IP} years; (b) low I_{IP} years. The vertical velocity has been magnified 100 times

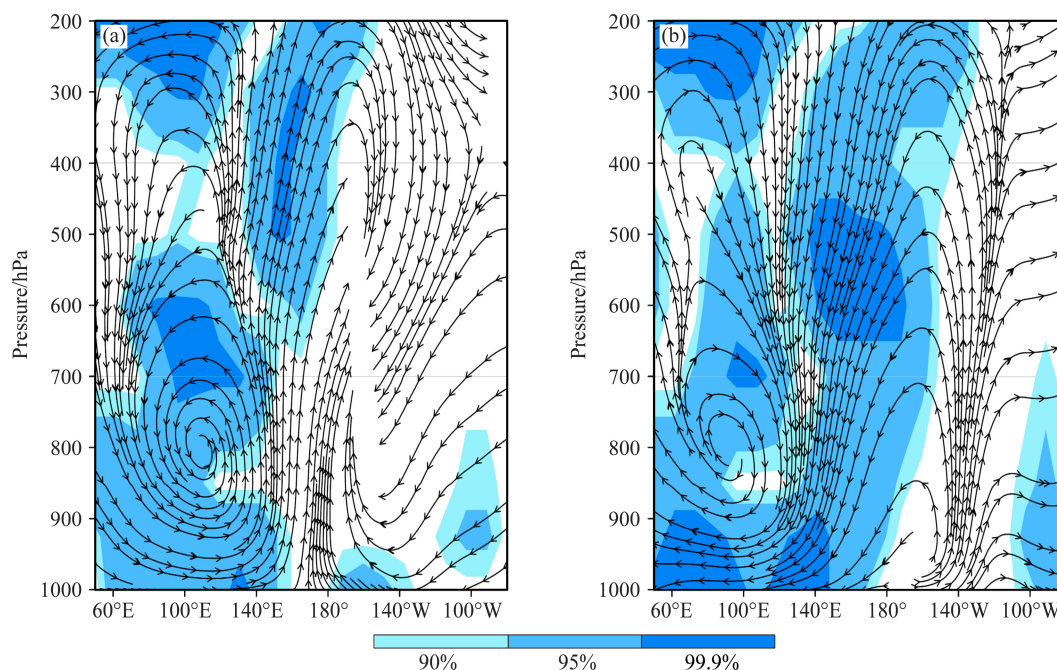


图 9 同图 8, 但为 $140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 范围内的垂直—经向环流距平合成
Fig. 9 As in Fig. 8, but for vertical-meridional cross sections averaged $140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$

现出显著差异的情况下, OLR 和 VP200 的距平场也与之对应。在 I_{IP} 高值年, OLR (图 11a) 的负异常显著区域出现在赤道太平洋, 显著正异常区域为海洋性大陆以及赤道印度洋地区, 这表明高值年对

流的异常活跃区位于赤道太平洋。而与之相对应地, VP200 (图 12a) 在太平洋为强的负距平, 为高层辐散区, 同时印度洋—海洋性大陆为正距平, 为高层辐合区。 I_{IP} 高值年 OLR 和 VP200 的异常与

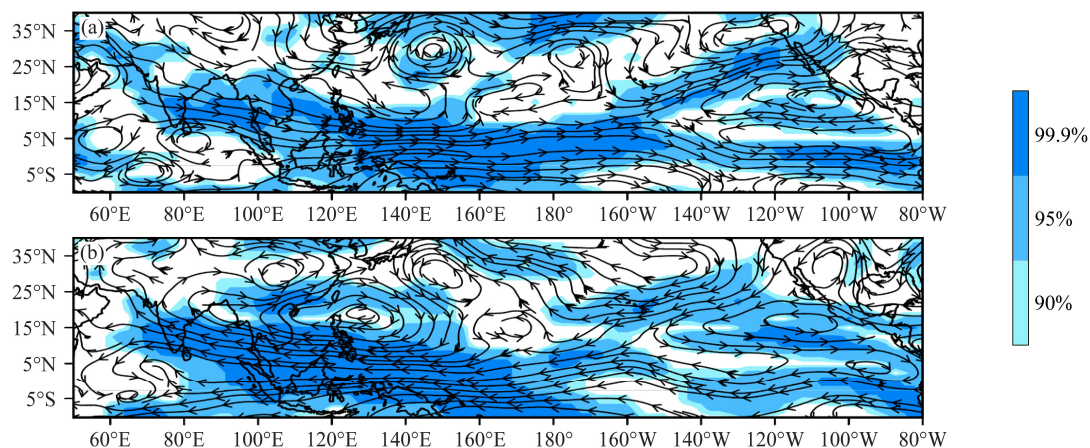


图 10 同图 6, 但为 500 hPa 水平环流距平合成

Fig. 10 As in Fig. 6, but for 500 hPa

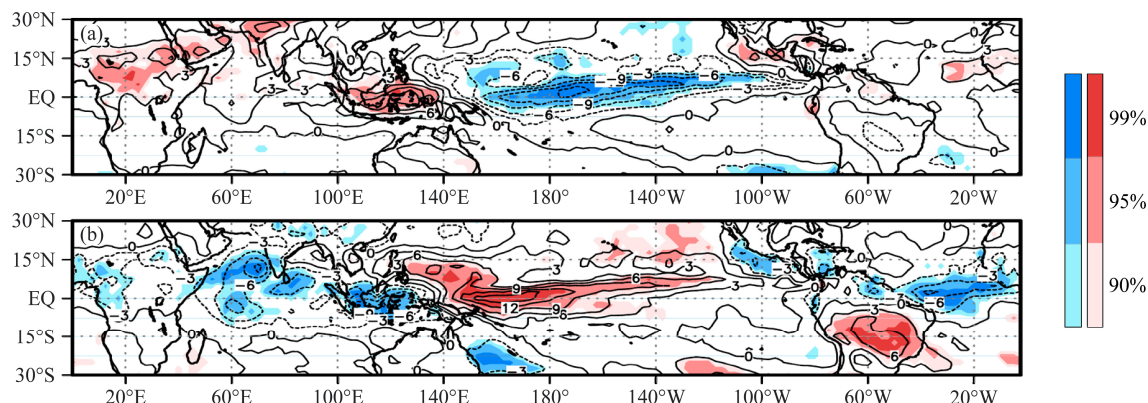


图 11 I_{IP} (a) 高值年和 (b) 低值年夏季 (6~8 月) 向外长波辐射 (OLR) 距平合成 (等值线, 单位: W m^{-2})。由浅至深不同颜色的阴影分别表示通过 90%、95% 和 99% 的信度检验, 红 (蓝) 色为正 (负) 距平区

Fig. 11 Composite OLR anomalies (units: W m^{-2}) in JJA: (a) High I_{IP} years; (b) low I_{IP} years. Red (blue) shadings represent positive (negative) anomalies, the shaded areas from light to dark indicate statistically significant correlation above 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

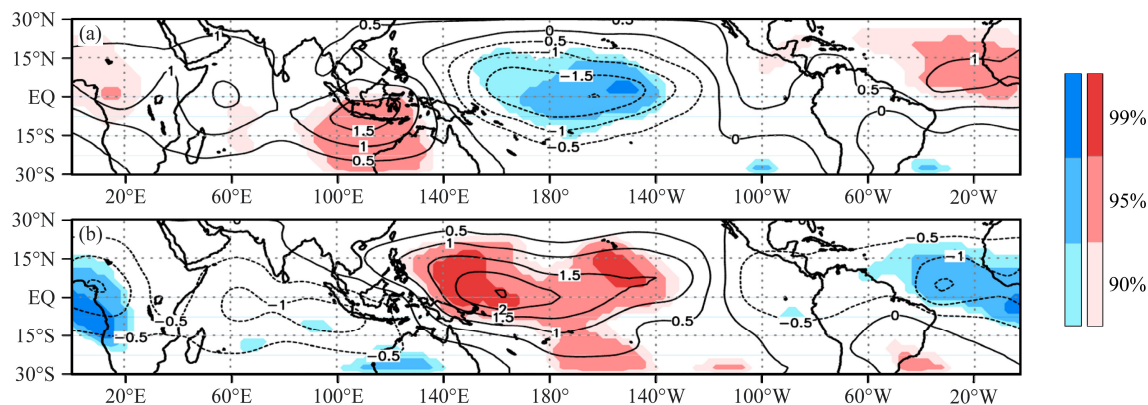


图 12 同图 11, 但为速度势距平合成 (单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)

Fig. 12 As in Fig. 11, but for velocity potential anomaly (units: $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)

MJO 在太平洋持续异常活跃是相对应的。反之在 I_{IP} 低值年, OLR 的负异常显著区域(图 11b)为热带印度洋以及海洋性大陆, 对流的异常活跃区位于此处。同时整个太平洋 OLR 都为异常正值, 高值中心位于西太平洋暖池区域。与此相对应, 低值年 VP200 距平合成图中(图 12b), 印度洋出现强的负距平, 为高层辐散区, 太平洋出现强的正距平, 为高层辐合区。可知 I_{IP} 低值年 OLR 及 VP200 的异常活跃形式与 MJO 在印度洋的持续异常活跃相对应。

由以上分析可知, MJO 的持续异常情况下整个大气环流都会发生改变。 I_{IP} 高值年 MJO 在太平洋持续异常, 沃克环流减弱, 西太平洋哈得来环流增强, 西太平洋副高位置偏北。太平洋为对流活跃区域, 高层辐散。 I_{IP} 指数低值年 MJO 在印度洋持续异常, 沃克环流增强, 西太平洋哈得来环流减弱, 西太平洋副高位置偏西南。印度洋为对流活跃区域, 高层辐散。

6 结论和讨论

通常 MJO 有 30~60 天周期, 并沿赤道向东传播。但我们发现夏季 MJO 具有非常显著的持续异常特征, 即在赤道太平洋持续活跃或在赤道印度洋持续活跃。在这两种情况下, MJO 的东传停滞, 活跃中心持续出现在太平洋或印度洋。持续异常情况下的 MJO 振荡周期也出现变化, 表现为周期缩短或变弱。我们由此定义出 I_{IP} 来描述 6~8 月 MJO 在印度洋或者太平洋的这种异常活跃情况。然后发现: 当 MJO 在印度洋持续活跃的时候太平洋的 MJO 活动则是持续偏弱; 而 MJO 在太平洋活跃的时候印度洋的 MJO 活动则持续偏弱。

MJO 的持续异常会造成大气环流的显著改变。太平洋 MJO 持续异常活跃时低纬沃克环流减弱, 西太平洋哈德来环流增强, 西太平洋副高位置偏北。与此相配合, OLR 的活跃区和 200 hPa 速度势辐散区位于赤道西太平洋 $160^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ 区域, 热带海洋性大陆以及整个赤道印度洋为对流抑制区。赤道印度洋 MJO 持续异常活跃时大气环流情况相反。

由夏季 MJO 在印度洋或者太平洋的持续异常状况将会影响大气环流等要素的改变, 导致了两种不同的环流形势出现。其中哈得来环流的强度以及西太平洋副高的位置可能会造成东亚夏季风强

弱、大陆季风区降雨多寡的不同, 而沃克环流强弱导致的太平洋洋流变化可能会对秋冬 ENSO 的形成造成影响, 这是我们下一步将要讨论的问题。

致谢 感谢两位审稿专家和《大气科学》编辑对本文提出的宝贵意见和建议!

参考文献 (References)

- Bai X X, Li C Y, Tan Y K, et al. 2013. The impacts of Madden-Julian oscillation on spring rainfall in East China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 19 (3): 214–222.
- 查晶, 罗德海. 2011. 层云加热对热带大气季节内振荡的影响 [J]. *大气科学*, 35 (4): 657–666.
- Cha Jing, Luo Dehai. 2011. The impact of the stratiform heating on Madden-Julian oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 657–666, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.06.
- 陈光华, 黄荣辉. 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制 [J]. *大气科学*, 33 (2): 205–214.
- Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific and the physical mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 205–214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.01.
- 程胜, 李崇银. 2006. 北半球冬半年平流层大气低频振荡特征的研究 [J]. *大气科学*, 30 (4): 660–670.
- Cheng Sheng, Li Chongyin. 2006. The features of the wintertime stratospheric atmospheric low-frequency oscillation in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (4): 660–670, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.11.
- Hendon H H, Zhang C D, Glick J D. 1999. Interannual variation of the Madden-Julian oscillation during austral summer [J]. *J. Climate*, 12 (8): 2538–2550, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2538:IVOTMJ>2.0.CO;2.
- Higgins R, Shi W. 2001. Intercomparison of the principal modes of interannual and intraseasonal variability of the North American monsoon system [J]. *J. Climate*, 14 (3): 403–417, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<0403:IOTPMO>2.0.CO;2.
- Huang R H. 1994. Interactions between the 30–60 day oscillation, the walker circulation and the convective activities in the tropical western Pacific and their relations to the interannual oscillation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 11 (3): 367–384, doi:10.1007/BF02658156.
- Jia X L, Liang X Y. 2013. Possible impacts of Madden-Julian oscillation on the severe rain-snow weather in China during November 2009 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 19 (3): 233–241.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (11): 1631–1643, doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Knutson T R, Weickmann K M. 1987. 30–60 day atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (7): 1407–1436, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1407:DAOCLC>2.0.CO;2.
- Lau K M, Peng L. 1987. Origin of low-frequency (intraseasonal) oscillations in the tropical atmosphere. Part I: Basic theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 950–972,

- doi:10.1175/1520-0469(1987)044<0950:OOLFOI>2.0.CO;2.
- Lau K M, Shen S. 1988. On the dynamics of intraseasonal oscillations and ENSO [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45 (12): 1781–1797, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<1781:OTDIO>2.0.CO;2.
- 李崇银. 1985. 南亚夏季风槽脊和热带气旋的活动与移动性 CISK 波 [J]. *中国科学 (B 辑)*, (7): 668–675. Li Chongyin. 1985. Actions of summer monsoon troughs (ridges) and tropical cyclones over south Asia and the moving CISK mode [J]. *Science in China (Series B)*, 28 (11): 1197–1206, doi:10.1360/yb1985-28-11-1197.
- 李崇银. 1995. 热带大气季节内振荡的几个基本问题 [J]. *热带气象学报*, 11 (3): 276–288. Li Chongyin. 1995. Some fundamental problems of intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 11 (3): 276–288.
- Li C Y, Xiao Z N. 1992. The 30–60 day oscillations in the global atmosphere excited by warming in the equatorial eastern Pacific [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 37 (6): 484–489.
- Li C Y, Liao Q H. 1996. Behaviour of coupled modes in a simple nonlinear air–sea interaction model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 13 (2): 183–195, doi:10.1007/BF02656861.
- 李桂龙, 刘式适. 1993. Wave-CISK、蒸发–风反馈和低频振荡 [J]. *大气科学*, 17 (4): 403–414. Li Guilong, Liu Shikuo. 1993. Wave-CISK, Evaporation–wind feedback and low frequency oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 17 (4): 403–414, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.04.03.
- 李汀, 严欣, 琚建华. 2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响 [J]. *大气科学*, 36 (6): 1101–1111. Li Ting, Yan Xin, Ju Jianhua. 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (6): 1101–1111, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11152.
- Li T, Ju J H, Gan W W. 2012. The relationship of the preceding winter MJO activities and the summer precipitation in Yangtze–Huaihe River basin of China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 18 (1): 32–44, doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2012.01.004.
- 龙振夏, 李崇银. 2001. 热带低层大气 30~60 天低频动能的年际变化与 ENSO 循环 [J]. *大气科学*, 25 (6): 798–808. Long Zhenxia, Li Chongyin. 2001. Interannual variability of 30–60 day low-frequency kinetic energy in the lower tropical atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (6): 798–808, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.06.07.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28 (5): 702–708, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period [J]. *J. Atmos. Sci.*, 29 (6): 1109–1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- Madden R A, Julian P R. 1994. Observations of the 40–50 day tropical oscillation—A review [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (5): 814–837, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0814:OOTDIO>2.0.CO;2.
- Maloney E D, Hartmann D L. 2000. Modulation of eastern North Pacific hurricanes by the Madden-Julian oscillation [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1451–1460, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1451:MOENPH>2.0.CO;2.
- 潘静, 李崇银, 宋洁. 2010. 热带大气季节内振荡对西北太平洋台风的调制作用 [J]. *大气科学*, 34(6): 1059–1070. Pan Jing, Li Chongyin, Song Jie. 2010. The modulation of Madden-Julian oscillation on typhoons in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 1059–1070, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.03.
- Rui H L, Wang B. 1990. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (3): 357–379, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<0357:DCADSO>2.0.CO;2.
- Ventrone M J, Wheeler M C, Hendon H H, et al. 2013. A modified multivariate Madden-Julian oscillation index using velocity potential [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (12): 4197–4210, doi:10.1175/MWR-D-12-00327.1.
- 王继勇, 刘式适. 1996. Wave-CISK 和低纬大气低频振荡 [J]. *大气科学*, 20 (5): 584–592. Wang Jiyong, Liu Shikuo. 1996. Wave-CISK and low-frequency oscillation in the tropical atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (5): 584–592, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.09.
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (8): 1917–1932, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1917:AARMMI>2.0.CO;2.
- Xue Y, Higgins W, Kousky V. 2002. Influences of the Madden-Julian oscillation on temperature and precipitation in North America during ENSO-neutral and weak ENSO winters [C]//A Workshop on Prospects for Improved Forecasts of Weather and Short-Term Climate Variability on Subseasonal (2 week to 2 month) Time Scales. NASA/Goddard Space Flight Center, April 16–18, 2002.
- Zhang C D. 2005. Madden-Julian oscillation [J]. *Rev. Geophys.*, 43(2): RG2003, doi:10.1029/2004RG000158.