

王融融 胡海波 杨修群. NCEP/CFSR 再分析耦合资料中 MJO 对 ENSO 的影响研究. 气象科学, 2020, 40(2): 143-156.

WANG Rongrong, HU Haibo, YANG Xiuqun. The influences of MJO on the ENSO based on the NCEP/CFSR reanalysis coupling data. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(2): 143-156.

NCEP/CFSR 再分析耦合资料中 MJO 对 ENSO 的影响研究

王融融¹ 胡海波^{1,2} 杨修群¹

(1 中国气象局-南京大学气候预测研究联合实验室/大气科学学院 南京大学 南京 210093;

2 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预警与评估协同创新中心 南京信息工程大学 南京 210044)

摘要 基于 1979—2008 年 NCEP/CFSR 再分析耦合数据集,研究了冬季 MJO 对 ENSO 事件的影响。结果表明,在年际时间尺度以及长期的年代际时间尺度上,热带印度洋 MJO 活动的强弱性都可以影响热带中东太平洋 ENSO 事件的发生和发展。在年际时间尺度上,ENSO 发生前期征兆的赤道中东太平洋的西风爆发事件(Westerly Wind Burst, WWB),作为 MJO 影响 ENSO 的主要途径,存在着显著的次季节时间尺度的变化。相对于气候平均的赤道太平洋西部暖池区上升而东部下沉的 Walker 环流, MJO 正位相东传后的西风异常,减弱了低层东风和赤道东太平洋海水上翻。这一上升海流的减弱导致了中东赤道太平洋的海温升高,从而有利于 ENSO 暖海温事件的发生。而在年代际时间尺度上, MJO 范围和强度在 1998 年前后出现了明显的转变,1998 年之前 MJO 的东移范围更东,强度更强,从而导致了西太平洋西风爆发区的次季节西风异常事件更加显著,在 Bjeknes 正反馈机制下对应了年代际时间尺度下的强尼诺事件出现,1998 年之后则与之相反。冬季 MJO 对 ENSO 影响的这一年代际特征主要体现在晚冬季节,而在早冬伴随着印度洋的增暖, MJO 强度一直在逐年增加。

关键词 MJO 对 ENSO 的强迫; 年际时间尺度; 大气途径; 西风爆发; 年代际突变

分类号: P461.2 **doi:** 10.3969/2018jms.0092 **文献标识码:** A

The influences of MJO on the ENSO based on the NCEP/CFSR reanalysis coupling data

WANG Rongrong HU Haibo YANG Xiuqun

(1 China Meteorological Administration-Collaborative Laboratory of Climate Prediction Research

/ School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract Based on the NCEP/CFSR reanalysis coupling data, the influences of MJO on the ENSO are investigated. The results show that intensities of MJO in the tropical Indian Ocean can affect the occurrence and development of the ENSO on the interannual and interdecadal time scales. Further analyses show that the Westerly Wind Burst (WWB) over the equatorial central eastern Pacific, as the earlier stage signal of ENSO and the main way for MJO to influence ENSO, has significant sub-seasonal

收稿日期(Received): 2018-09-29; 修改稿日期(Revised): 2018-11-13

基金项目: 国家重大基础研究计划(2018YFC1505900; 2016YFA0600303); 国家自然科学基金资助项目(41675064; 41621005; 41330420; 41675067; 41875086); 江苏省科技厅面上项目(SBK2015020577); 公益性(气象)行业专项(GYHY20150611); 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室与省协同创新中心开放课题(KLME201902); 中央高校业务费(020714380043)

通信作者(Corresponding author): 胡海波(HU Haibo). huhaibo@nju.edu.cn

variations on the interannual time scale. Compared with the Walker circulation with the warm pool area over the equatorial western Pacific with climatological mean condition rising and the eastern Pacific sinking, the abnormal westerly after the positive phase of MJO moves eastward weakens the easterly at the low level and results in the upwelling sea water in the equatorial eastern Pacific. The weakening of the upwelling leads to rising sea surface temperature of the equatorial central eastern Pacific, which creating a favorable condition for the occurrence of ENSO. However, there was an obvious change on the ranges and strength of MJO around 1998 on the interdecadal time scale. The stronger MJO moved further eastward before 1998, causing more significant and frequent WWB events in the western Pacific, which corresponds to the strong ENSO under the Bjekness positive feedback mechanism on the interdecadal time scale. The situation after 1998 is the opposite. The influences of MJO on the ENSO in winter are more obvious in late winters on the interdecadal time scale. However, in the early winters, MJO intensifies increasingly with the Indian Ocean warming.

Key words impact of MJO on the ENSO; inter-annual time scale; atmospheric pathways; WWB; inter-decadal change

引言

热带海气系统中存在着显著的海洋与上空大气间相互影响的典型事件。这些相互影响事件中包含着年际时间尺度上的赤道太平洋海气系统中的 ENSO^[1-3] 现象,以及 10~90 d 时间尺度上的存在于整个热带海气系统中的热带大气中季节内振荡事件 (Madden-Julian Oscillation, MJO)^[4-5]。其中 ENSO 现象反映了热带地区的大尺度海气相互作用特征,是全球气候系统中年际变率最重要的源地^[6-40],对全球各个地区从长时间的气候异常和到短时天气过程都有着显著影响,而 MJO 对于短期气候预报的重要性也被越来越多的研究所证实^[11-13]。

热带印度洋和热带太平洋是联通度最高的两个热带大洋。LI, et al^[14] 指出在表层和次表层都存在印—太海洋海温的联合模态,为热带印—太海洋联系密切提供了新的证据。热带海气系统中, ENSO 现象对热带印度洋的强迫以及受热带印度洋的影响一直是海气领域的研究热点。其中 HONG, et al^[15] 提出热带印度洋对于 El Niño 的衰亡具有热量储存和再次释放的贡献。MJO 与 ENSO 作为热带洋盆内两种活跃的海气相互作用产物虽然具有不同的时空特征,但也存在相互影响。

已有的大量工作尝试从海洋内部过程或大气内部过程阐明 MJO 与 ENSO 联系的物理机制。其中 Klein, et al^[16] 提出“大气桥”概念,认为在 ENSO 期间热带印度洋—太平洋上空产生异常 Walker 环流,影响了热带印—太海域的海平面气压场,通过云量和蒸发量的变化影响 MJO 的形成和传播。吴

国雄等^[17] 指出赤道印度洋和东太平洋海表温度年际变化之间的显著相关是由赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空 Walker 环流之间齿轮式耦合造成的。从 ENSO 对 MJO 强迫影响的角度,李崇银等^[18] 指出 El Niño 引发的海温异常与大气中已有的季节内振荡相结合,使 MJO 垂直方向斜压性减弱,对 MJO 有削弱作用。除了以上 ENSO 对 MJO 的影响,已有研究指出 MJO 对 ENSO 也存在强迫可能。Lau, et al^[19] 通过分析观测数据发现赤道中西太平洋地区 MJO 增强可以作为 ENSO 事件的前期征兆。Fedorov^[20] 进一步分析高分辨率的数值试验结果,指出 MJO 对 ENSO 形成发展起重要作用的具体作用途径:通过异常积云对流活动引发对流层低层风场异常,进而强迫西太平洋的暖海水向中东部海区输送,有利于激发 ENSO 的发展。另有一些研究通过典型的 El Niño 年来进行个例分析,尝试寻找 MJO 与 ENSO 事件间的联系机制。在 1997—1998 年爆发了 1900s 以来最强的一次 El Niño 事件,伴随着 1999 年的强 La Niña,成为重要研究事件之一^[21]。McPhaden^[22] 发现其可能与 1996 年末和 1997 年初爆发的强烈的西风事件 (Westerly Wind Bursts, WWB) 相关。采用 SSM/I 卫星观测的高分辨率风场数据,发现这些 WWB 事件多在 MJO 的活跃相位发生。针对此次 El Niño 事件,李崇银等^[23] 分析后指出,1997 年 El Niño 事件可能与大气季节内振荡在印尼上空被激发增强和东传有关。以上研究强调了 MJO 可能通过影响西太平洋上空低层大气的风场而对 El Niño 事件存在激发作用,但具体的影响途径还有待明确。相反, PENG, et al^[24] 基

于 Zebiak-Cane 模型,发现模型对 MJO 不确定性的敏感性低于对初始场的敏感性, Slingo, et al^[25] 也得到了类似的结论。以上研究强调了年际时间尺度上 MJO 事件对于 ENSO 的影响较弱。

在长期时间尺度上,龚道溢等^[26] 指出在 1958—1998 年这 40 a 期间,强 ENSO 增加十分突出,其中 1997—1998 年的强 El Niño 事件达到了 130 多年来的峰值。黄勇等^[27] 指出,1998—1999 年后 El Niño 事件强度也在变低,而 MJO 的强度变化也存在相似时间变化特征。赵威等^[28] 发现相比 1979—1997 年、1998—2010 年期间 MJO 的周期缩短,持续日数减少,并且部分活跃位相低频风场出现东风异常和活跃面积收缩。那么,在长期变化时间尺度上这两者之间是否存在联系呢?

从前人的研究可以看出 MJO 与 ENSO 存在相互影响,但其中 MJO 对 ENSO 影响的具体机制还不明确。若采用长期同化海气数据,能否在年际时间尺度上,给出 MJO 与 ENSO 事件的统计特征,特别是能否找到它们之间的联系? 1998 年作为显著的超强 El Niño 年,是否带来了两者显著的突变趋势的影响? 在长期的年代际时间尺度上和年际变化时间尺度上, MJO 是否对 ENSO 都存在影响? 若存在,其具体的影响机制如何? 本文利用 CFSR 再分析耦合资料从大气内部过程进行分析,并对 MJO 影响 ENSO 的可能途径进行讨论,以期对短期气候预测提供一定的理论支持。

1 资料和方法

采用美国国家环境预报中心(NCEP)发布的气候预测再分析(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR)数据,包括逐日的水平及垂直风场(u, v, w), 温度场(T),降水率场(Precipitation Rate, P),空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间范围从 1979 年 1 月—2010 年 12 月;美国国家大气研究中心/美国国家海洋和大气管理局(NCAR/NOAA)的逐日向长波辐射(Outgoing Long Wave Radiation, OLR)资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;美国国家环境预报中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的 NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis(R-2)数据,包括水平风场(u, w),空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;Hadley Center 的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)月平均资料,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。综合考虑各资料覆盖的时间和 MJO 事件以及 ENSO 事件发生的季节性特征,本文的分析时段确定为 1979—2008 年冬季。文中冬季

均定义为当年 12 月—次年 2 月。

MJO 活动可以用多个与对流相关的物理量表征。采用 Wheeler, et al^[29] 提出的联合 EOF 分析(Multivariable Empirical Orthogonal Function, mv-EOF)的方法能较好的描述 MJO 的活动特征。EOF 分析主要用于研究某一气象要素场主导模态的时空变化特征,而 mv-EOF 可以提取复杂要素协同变化的固有特征。本文从逐日资料中减去气候平均态,以去除年循环,然后提取季节内尺度扰动量构建矩阵进行联合 EOF 分析,包括 850 hPa 水平风场(u'), 200 hPa 水平风场(v'), 降水率(P)等物理量,撇号代表 20~100 d 的滤波量。表征 MJO 活动强弱的 MJO 指数是在上述分解所得前两个主成分时间序列的基础上计算得到,即 RMM 指数。当 RMM 指数 ≥ 1 时,即认定该 MJO 事件为强 MJO 事件,如果 RMM 指数 < 1 时,即为弱 MJO 事件。

为了得到气象要素场低频尺度的信号,使用了陈雄等^[30]的方法,对 1979—2008 年冬季逐日要素场进行天气尺度(1~7 d)的滑动平均,距平标准化之后进行季节内尺度的 Lanczos 带通滤波^[31],从而得到季节内尺度的扰动信号。

年代际尺度的分析中,用曼—肯德尔(Mann-Kendall, MK)方法检测 1979—2008 年 MJO 指数以及 Niño 主分量(PC1)的变化趋势以及突变点,得到 1998 年为两个指数共同的年代际突变点。此外,本文还用到了功率谱分析、合成分析、回归分析、相关分析等常规气象分析方法。

2 NCEP/CFSR 再分析耦合资料中 ENSO 与 MJO 的变化特征分析

为了客观地描述 ENSO 事件,使用常规数据集 NOAA/COBE, HadIsst 对 CFSR 再分析数据进行评估,图 1a、b 为 HadIsst 数据集下的前两个模态,基本呈现与 CFSR 数据集一致的赤道中东太平洋异常增暖的第一模态以及赤道中部太平洋地区以及东部太平洋地区反相变化的第二模态。存在差异的是:第一模态和第二模态对应的方差贡献百分率分别为 55.3% 和 10.3%,其中第一模态的方差贡献相较 CFSR 数据高 10% 左右,El Niño 事件更加显著;图 1c、d 分别为 NCEP/COBE 下进行 EOF 分析的结果,方差贡献率分别为 53.3% 和 9.9%,与 HadIsst 数据集类似;图 1g、h 分别为常规数据集以及 CFSR 再分析数据集前两个主分量的时间序列,可以看到 CFSR 与常规数据集下所得结果总体走势相似,但

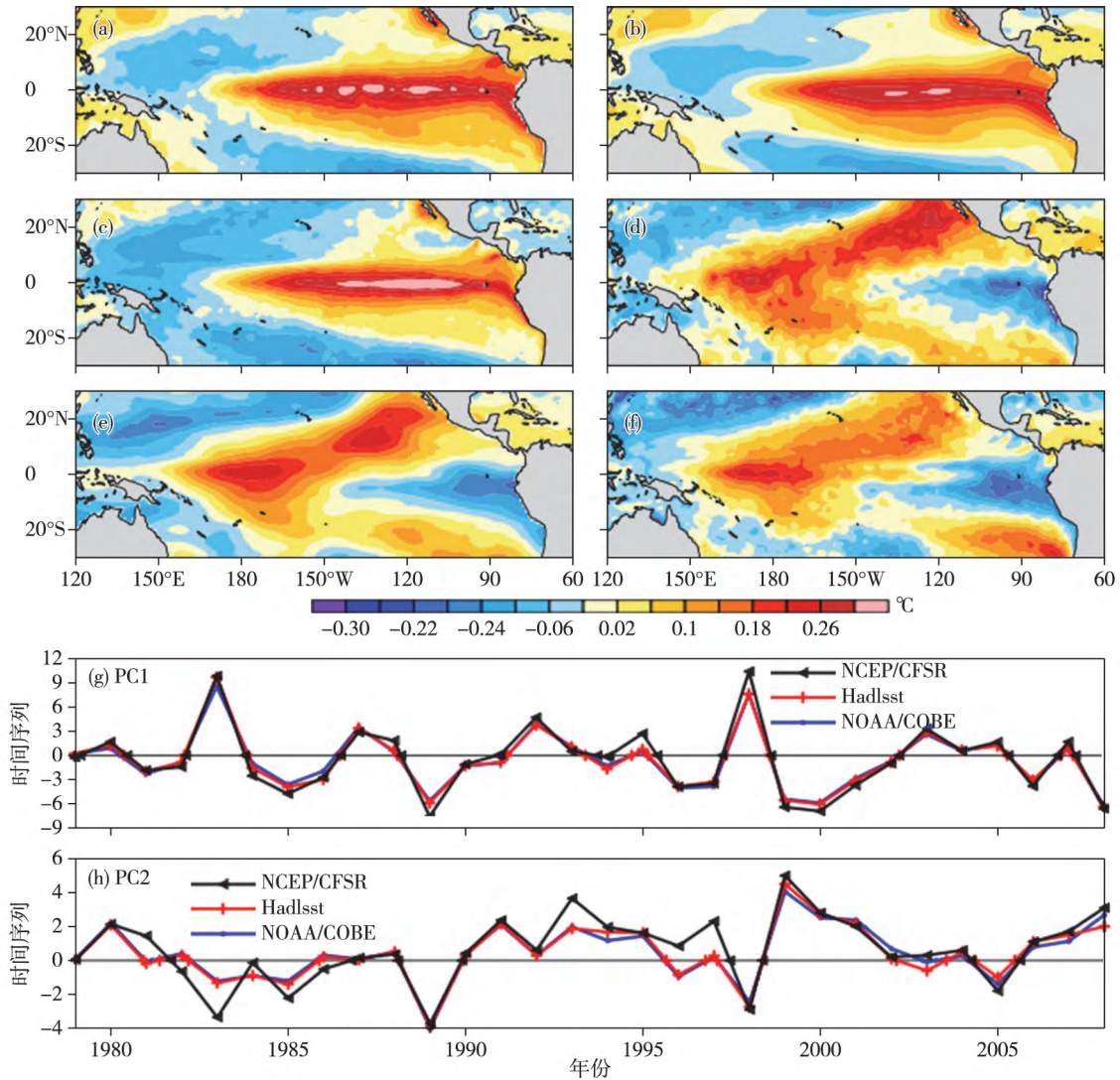


图1 不同数据集下1979—2008年冬季(12、1、2月)热带太平洋(30°S~30°N, 120°E~60°W)海表面温度距平 EOF 前两个模态的空间分布(阴影,单位: °C) 以及时间序列: (a、b) HadIsst 数据集观测资料 EOF1、EOF2 空间模态; (c、d) NOAA/COBE 数据集观测资料 EOF1、EOF2 空间模态; (e、f) NCEP/CFSR 数据集再分析资料 EOF1、EOF2 空间模态; (g、h) 3 个数据集的 PC1 以及 PC2 对比
 Fig.1 The first two EOF patterns and PCs of the tropical Pacific (30°S—30°N, 120°E—60°W) SSTA based on different data sets in winter days (December, January and February) for the period of 1979—2008 (shade, unit: °C): (a, b) the first two EOF patterns based on HadIsst data set; (c, d) the first two EOF patterns based on NOAA/COBE data set; (e, f) the first two EOF patterns based on NCEP/CFSR dataset; (g, h) PC1 and PC2 based on the three datasets

是在细节上存在偏差: CFSR 数据 EOF 分解的 PC1 对 1985、1995、1998、2000 年都存在高估, PC2 在 1992—1998 年期间存在整体高估。由此可见, 虽然 CFSR 再分析耦合数据集中 ENSO 现象不及常规数据集显著, 对个别年份存在高估, 但是从空间模态的基本形态以及时间序列总体趋势来看与实况具有较好的一致性, 可信度较高, 可以认为 CFSR 数据集能较好描述 ENSO 的基本空间特征以及时间变化。

为了揭示 ENSO 现象的基本特征, 对 CFSR 数据集下 1979—2008 年冬季 (30°S~30°N, 120°E~60°W) 区域内 SST 进行 EOF 分解, 第一和第二模态

(图 1e、f) 对应的方差贡献分别为 43.5% 和 11.4%, 第一模态空间型主要表现为在赤道中东太平洋地区 (10°S~10°N, 180°~70°W) 的异常变化, 该变化占据中东太平洋整个低纬度海盆区域, 海面西侧、南、北侧的温度降低, 这一模态对应传统 ENSO 型。图 1g 中黑色实线为对应的时间序列, 可见第一模态的 PC 在典型 ENSO 年均为较大值, 有显著的年际变化特征: 1979—1982 年、1990—1992 年、1996—1998 年、2000—2003 年、2006 年后为赤道中东太平洋海温正异常显著发生的时期, 其中 1998—1999 年的主分量达到峰值。第二模态的空间型表现为在赤道中部太平洋地区以及东部太平洋地区反相变

化的配置: 东赤道太平洋表现为较小范围的冷海温异常 ($80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$) , 而其西侧赤道太平洋区域则表现为暖海温异常并在赤道外东北、东南向延伸。这一空间异常型的结构满足中太平洋 ENSO 型, 对应时间序列如图 1h 所示, 限于文章篇幅, 本文重点分析第一模态。

区别于年际尺度, 在赤道太平洋地区产生发展并衰退的 ENSO 事件, MJO 事件是一种次季节到季节尺度, 并且有显著空间传播特征的海气耦合系统。大量研究表明 MJO 对 ENSO 存在一定强迫, 那么在 CFSR 耦合数据集下 MJO 有怎样的空间传播形态以及变化特征呢?

mv_EOF 分析方法能够同时考虑多变量的协同关系, 可较好反映 MJO 的活动特征。MJO 的本质是

对流云团的东传, 降水率可以描述对流的发展或者抑制, 高层纬向风速 (U_{200}) 可以描述该高度上大气活动的辐合辐散情况, 低层纬向风速 (U_{850}) 描述低层大气配置情况。故选取冬季赤道区域 ($15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$) 的高低层东西向风场 (U_{200}, U_{850}) , 表征对流活动的降水率 (P) 来描述 MJO 的基本表现以及时间变化特征 (图 2)。类似地, 使用了常规数据集 NCEP/DOE (U_{200}, U_{850}) 以及 NOAA/OLR 进行验证。由图 2c、d 可知, 第一模态方差贡献百分比为 13.5% , 其中降水率 (黑色实线) 存在一对正负异常中心, 呈现出东印度洋和西太平洋的反相变化的降水特点, 降水中心与风场配置较好, 总体呈现低层风场辐合, 高层辐散。第二模态方差贡献为 8.8% , 降水率正距平区东跳至印度尼西亚群岛附近, 且正

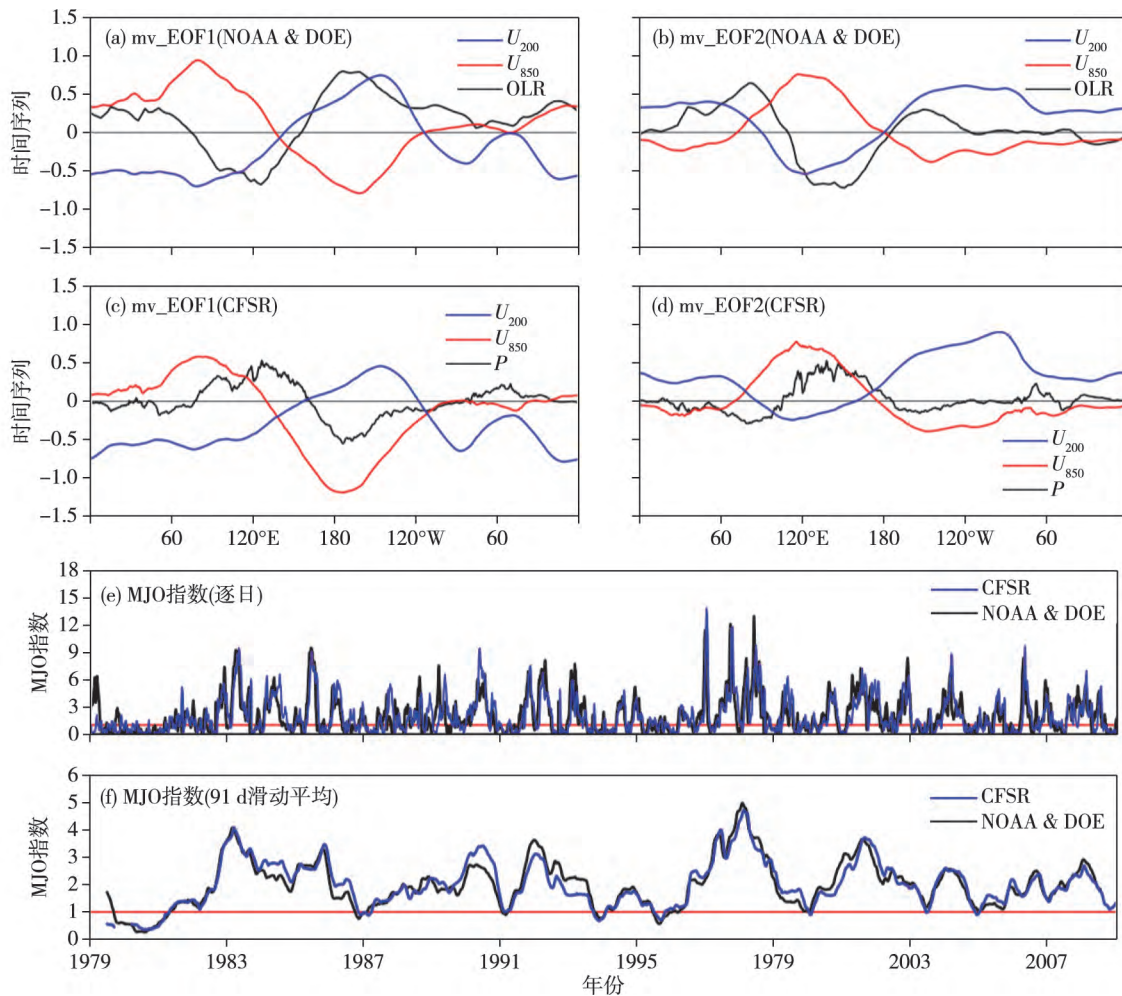


图 2 不同数据集下 1979—2008 年冬季 (12、1、2 月) 赤道地区 ($15^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$) 逐日 U_{850}, U_{200} 降水率联合经验正交分解的前两个模态的空间分布: (a、b) NOAA-OLR、NCEP/DOE- U_{850}, U_{200} 数据集下 mv_EOF 第一空间模态和第二空间模态; (c、d) NCEP/CFSR 数据集下 mv_EOF 第一空间模态和第二空间模态; (e) NCEP/CFSR、NOAA/OLR、NCEP/DOE 数据集下逐日 MJO 指数 (未滤波); (f) NCEP/CFSR、NOAA/OLR、NCEP/DOE 数据集下 MJO 指数 (91 d 滑动平均)

Fig.2 The first two mv_EOF (U_{200}, U_{850} , precipitation rate) patterns and MJO index of the tropical based on different datasets in winter days (December, January and February) for the period of 1979—2008: (a, b) the first two mv_EOF patterns based on NOAA-OLR, NCEP/DOE- U_{850}, U_{200} data sets; (c, d) the first two mv_EOF patterns based on NCEP/CFSR dataset; (e) MJO index based on NCEP/CFSR, NOAA/OLR, NCEP/DOE data-sets (no filter); (f) MJO index with 91-days averaged based on NCEP/CFSR, NOAA/OLR, NCEP/DOE dataset (91-days run avg.)

距平幅度有所减弱,负距平范围收缩,低层风速减弱。基于 NCEP/CFSR_NOAA/OLR 数据的联合 EOF 结果中 OLR 负距平区域表征对流活动中心,其基本特征以及东传模态与 CFSR 数据集类似。使用上述 mv_EOF 分析所得 RMM 指数作为 MJO 指数,用于描述冬季赤道地区 MJO 强度的时间变化特征,图 2e 是逐日 MJO 指数的时间序列,且相关系数为 0.64,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,除了在个别异常强年存在明显偏差外,整体走势较为一致。进一步计算了 91 d 滑动平均下的 MJO 指数,两者相关系数达到 0.93,通过了 $\alpha=0.001$ 的显著性检验,可见该数据集清晰地反映出 MJO 活动存在显著的年际变化以及年代际变化。年际尺度上,MJO 指数都在 1997—1999 年达到峰值;年代际尺度上,总体呈现先波动上升后下降直至趋于平稳的变化特征。

作为不同时间尺度的海气相互作用系统,MJO 与 ENSO 相互作用的途径是什么?陈雄等^[30]通过合成 MJO 强弱年的低层风场发现强年印度洋到西太平洋地区有显著西风距平,弱年则以东风为主。基于此,本文将从 WWB 事件进行研究。

Penland et al^[32] 研究发现(140°~160°E)是可作为 El Niño 发生前期征兆的 WWB 关键区域,并且定义了相应的西风爆发事件指数(Westerly Wind Burst Index,WWBI):利用 U_{850} 风场的西风分量得到逐日数据,选取近赤道区域(5°S~5°N)的平均,计算每日(140°~160°E)的对流层低层西风平均值。为了说明 WWB 也与 MJO 相关,对所得序列进行功率谱分析(图 3),20~80 d 振荡周期范围基本全部通过 $\alpha=0.1$ 的信度检验,通过 $\alpha=0.5$ 信度检验的周期中心如图 3 中红线所示:分别为 30 d、50 d、75 d 左右。分析表明 WWBI 确实存在显著的与 MJO 时间尺度一致的季节内振荡。

为了得到 MJO、WWB、ENSO 事件在统计上的

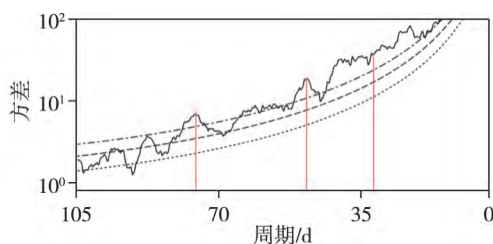


图 3 1979—2008 年冬季逐日 850 hPa 西风平均值(5°S~5°N, 140°~160°E 区域平均)功率谱分析(虚线从上到下依次为 $\alpha=0.5$ 、 0.1 、 0.5 t-test 信度检验线)

Fig.3 Power spectrum analysis of daily westerly wind at 850 hPa isobaric surface in winter days for the period of 1979—2008(5°S~5°N, 140°~160°E area average) (Dotted lines represent 95%, 90%, and 5% reliability t-test lines from top to bottom)

相互影响关系以及作用时间差异,计算得到 CFSR 数据集下的 Niño3 指数,即赤道东太平洋(5°S~5°N, 150°~90°W)区域海表面平均温度,首先对 1979—2008 年冬季逐日 Niño3、MJO 指数进行 20~90 d 的带通滤波,以滤去天气尺度以及年际尺度的变化信号(图 4a),可见 MJO 指数以及 Niño3 指数在同期的相关性不明显,故进一步进行超前滞后交叉相关分析(图 4b)。其中滞后天数代表 WWB 超前 Niño3 的天数(红线)以及 MJO 超前 WWB 的天数(蓝线),可见 WWBI 与 Niño3 在次季节尺度上存在明显的相互作用:WWB 超前 5 d 左右与 Niño3 负相关,超前 15 d 左右与其正相关,其中正相关更为显著;蓝色实线为 MJO 指数与 WWBI 超前滞后相关分析的结果,可见 MJO 指数超前 WWBI 15 d 左右与其有显著负相关,MJO 指数超前 Niño3 30 d 左右存在显著正相关且更明显。这不仅说明 MJO 活动与 WWB 密切相关且随着 MJO 相位的反向有相关性的正负变化,还表明 MJO 信号传播到赤道西太平洋西风关键区内对 WWB 事件产生强迫的时间在 15 d 左右;而 WWB 与 Niño3 也有显著相关关系,在 MJO 正相位期间,以 Niño3 表征的赤道东部太平洋海温滞后 WWB 的信号 30 d 左右产生显著的同相变化的信号;在 MJO 负相位期间,对 WWB 的响应时间

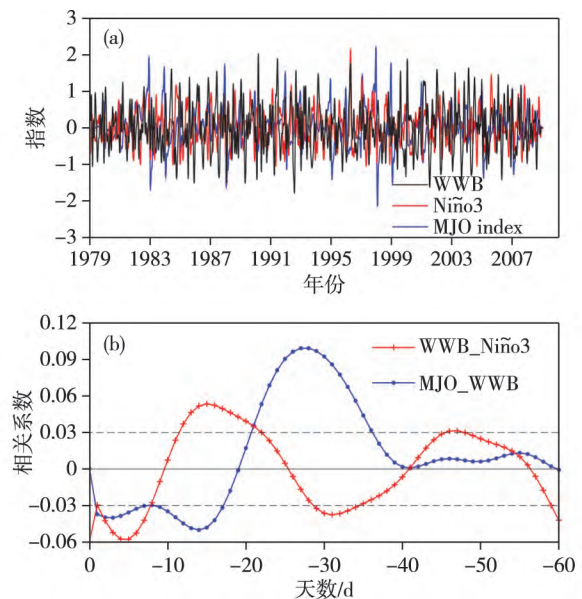


图 4 (a) 1979—2008 年 20~90 d 滤波逐日 WWBI、Niño3 指数、MJO 指数的时间序列;(b) WWB、Niño3 以及 MJO 指数的交叉超前滞后相关分析,滞后天数代表 WWB 超前 Niño3 的天数(红线)以及 MJO 超前 WWB 的天数(蓝线);

Fig.4 (a) Filtering results for daily WWBI, Niño3 index and MJO index from 20—90 days for the period of 1979—2008; (b) the correlation analysis of the WWB, Niño3 and MJO index; the lagging days represent the days of WWB leading Niño3 (red line) and MJO leading WWB (blue line)

缩短为 15 d 左右。从图中可以得到东传的 MJO 通过影响赤道西太平洋的 WWB 事件进而对 El Niño 事件存在一定强迫作用。

综上所述, NCEP/CFSR 再分析耦合数据集对 1979—2008 年冬季期间 ENSO 的气候态特征和年际变率, 以及 MJO 的气候态分布和次季节时间尺度内的变化都有较好的描述能力, 通过对该数据下 WWBI 的功率谱分析以及交叉相关分析发现(140°~160°E) 的赤道地区的 WWBI 具有显著的次季节时间尺度变化, 且这一变化与印度洋内的 MJO 事件间存在明显的滞后相关。WWB 事件作为中东太平洋 ENSO 事件产生的触发机制之一, 对于 ENSO 的产生和演变具有重要作用。那么, 是否可以将 WWB 事件理解为 MJO 在次季节时间尺度对 ENSO 影响的直接大气途径呢? 这种次季节影响在年际和年代际时间尺度上又具有怎样的特征呢?

3 年际尺度下 MJO 事件对 ENSO 事件的影响

MJO 活动与 ENSO 存在显著的年际变化。为了研究 MJO 对 ENSO 的影响及途径, 有必要从年际尺度下分析 MJO 强活动年以及弱活动年 MJO 的传播特征和相应的大气环流变化。选取 MJO 指数大于 1 的冬季日进行一个 MJO 完整周期的合成, 称为 MJO 的强活动年, 对应地, MJO 指数小于 1 的合成结果称为 MJO 弱年。

图 5 是通过筛选逐日 MJO 指数进行强、弱活动年合成的 850 hPa 的 MJO 传播过程相位分布, 可见, 强弱年最显著的 MJO 共同传播特征是纬向一波的东移。第一相位, 热带西印度洋存在显著的降水率正异常, 与之配合的 850 hPa 风场为气旋式环流异常, 表明 MJO 活动在此处开始活跃, 即 MJO 正相位

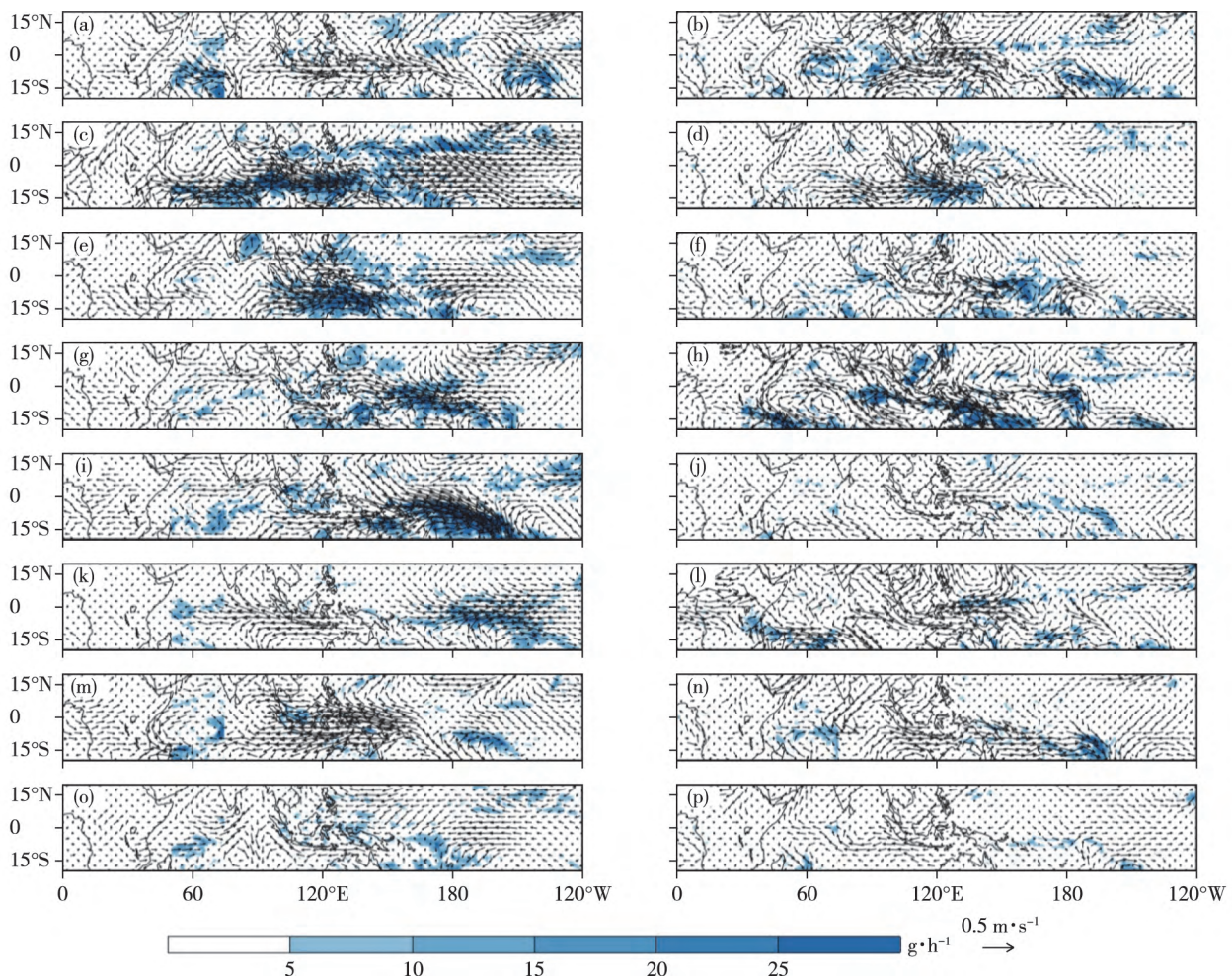


图 5 MJO 强弱年下相位的合成分析: (a , c , e , g , i , k , m , o) 强年的第 1~8 相位; (b , d , f , h , j , l , n , p) 弱年的第 1~8 相位 (着色区域通过 t-test 信度检验) (阴影单位: $g \cdot h^{-1}$; 黑色箭头单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.5 Synthesis analysis of the phase of MJO under strong and weak years: (a , c , e , g , i , k , m , o) phase 1 to phase 8 during strong years; (b , d , f , h , j , l , n , p) phase 1 to phase 8 during weak years (the contoured area passed the significance of t-test) (shade unit: $g \cdot h^{-1}$; black arrow unit: $m \cdot s^{-1}$)

开始传递。第2~5相位,降水率正异常离开热带印度洋,越过海洋大陆,进入热带西太平洋,上空异常的反气旋环流逐渐东传,随着MJO活动的增强,西太平洋上空逐渐被正涡度环流占据,强度增加。第6~7相位,西太平洋的对流中心迅速减弱,反气旋环流减弱,MJO对流活跃中心东移至东太平洋,开始新的MJO周期。在MJO活动强年,位于西太平洋的降水率大值中心能扩展到南北 15° 左右,而在MJO弱年,虽然上述大值中心仍然存在,但其扩展的范围小于MJO活动强年,约为强年的一半;MJO活动强年的风场配置效果更佳,且风速更大;在MJO强年的传播过程中,热带印度洋与热带太平洋的对流活动中心存在相反空间结构的偶极子结构,即热带印度洋对流活动增强,热带太平洋上的对流活动减弱,反之亦然,弱年不明显。以上分析均表明冬季西太平洋地区MJO活动存在显著的年际变化特征。

MJO在活动强弱年的传播范围有什么差异呢?是否与西风关键区存在一定联系?由($15^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$)平均的低频动能(图6)清楚表明:强、弱年以黄—红色区域代表的低频动能大值区域都以东传为主,有少量很弱的西传波动。强年的12月MJO活动中心从印尼地区的海洋性大陆东传至热带西

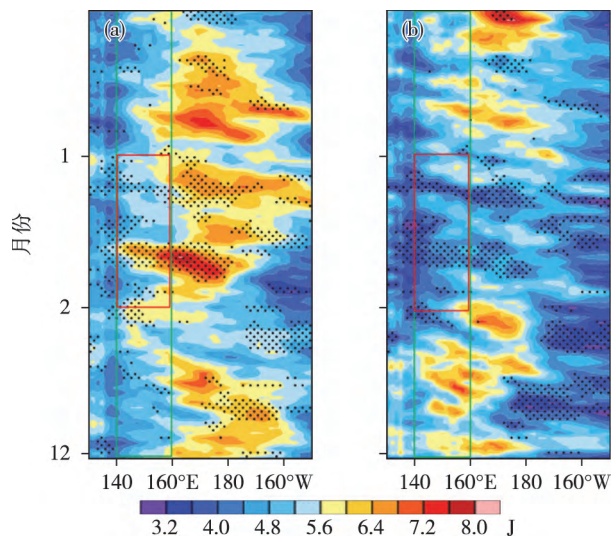


图6 MJO强弱年下低频动能范围的合成分析:(a)强年;(b)弱年。打点区域为通过 $\alpha=0.1$ t -test 信度检验(单位:J);绿色细线框为WWB关键区($140^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$);红色粗线框为1月期间西风爆发区域低频动能

Fig.6 Synthesis analysis of the low-frequency kinetic energy range of the strong and weak years of MJO: (a) strong years; (b) weak years, and the striking area passed the 90% significance of t -test (unit: J); the thin green line frame represents the area related to WWB ($140^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$); red thick line frame represents the area related to WWB during January

太平洋,12月中旬左右存在西撤,MJO活动中心在 140°E 左右,1月MJO动能中心达到最大值,代表了MJO的活跃相位,且从 140°E 持续东传至 170°E 左右,2月低频动能东传减弱,强度减弱,MJO活动进入衰退期。在弱年,12月低频动能有东传,从 140°E 传递到 160°E 左右,在正异常的东侧存在显著的负异常,在1月基本没有低频动能的大值中心,出现了显著的负距平,2月期间MJO活动由弱转强,但是东传基本停滞。结合WWB关键区域($140^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$),可见在强年的低频动能大值区域基本传递到了该区域,MJO的活跃相位亦处在西风关键区内,这与上文图5所得到的结果一致。在活动弱年,关键区则出现了明显的传播中断,1月中基本没有大值中心,并且在关键区的差异通过了 $\alpha=0.1$ 的显著性检验,可见在季节内MJO事件的范围是否能持续影响到WWB区以及关键区内的MJO活跃程度是建立与El Niño事件联系的重点。

MJO是热带大气的重要系统,其活动变化与全球大气环流变化密切相关。从MJO活动强弱年合成的垂直风场(图7)可看到对流层中低层基本反向:在强年,中低层($850 \sim 500\text{hPa}$)以西风为主;印度洋区域存在平直西风,传递到西太平洋,在 140°E 左右为上升运动, ($180^{\circ} \sim 135^{\circ}\text{W}$)范围存在反气旋环流,即在 180° 左右气流上升, 135°W 左右气流下降,中东太平洋低层上空出现显著西风异常,可能引起西太平洋的暖海水向中东部海区输送,有利于激发ENSO的发展;在弱年,对流层中低层主要是异常偏强的东风。其环流形势基本与强年相反:($135^{\circ}\text{W}, 180^{\circ}$)附近分别为Walker环流的上升支和下沉支,在($120^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$)的中东太平洋海区为东风,西部暖池海水聚集,促进了La Niña事件的发展。值得注意的是,在WWB事件关键区($140^{\circ} \sim 160^{\circ}\text{E}$)中亦呈现出显著的强年的西风异常。可见MJO与大气环流的异常密切相关:具体机制可能是通过影响季节内低频动能的传播范围以及强度,对西风产生影响,进而建立与赤道中东太平洋的联系。

MJO活动范围虽然主要位于日界线以西的西太平洋以及东印度洋,但它与全球大气环流以及季节内振荡(Intra-seasonal Oscillation, ISO)密切相关,其活动的显著增强或减弱必然对全球天气气候异常产生重要作用。对强、弱MJO活动期间(强MJO: MJO指数 ≥ 1)逐日热带太平洋海温合成分析,可见在活跃期(图8a),呈现出明显的赤道中东太平洋海温升高的模态,这与ENSO事件的一般模态

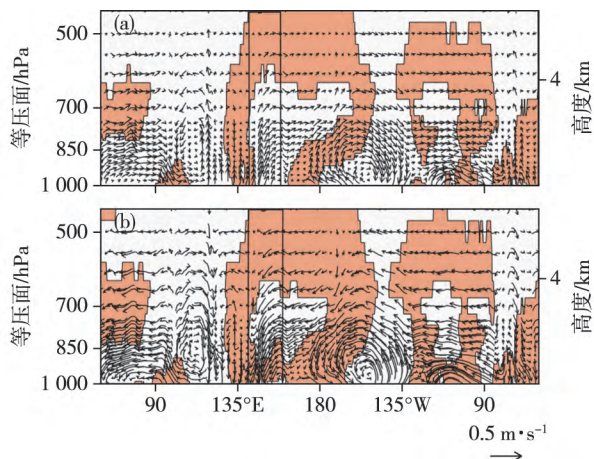


图7 MJO 强弱年下季节平均的垂直环流的合成分析: (a) 强年; (b) 弱年(橙色阴影区域为通过 $\alpha=0.1$ t -test 信度检验; 黑色线框为 WWB 关键区($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$))

Fig.7 Synthesis analysis of the vertical circulation during the strong and weak years of MJO: (a) strong years; (b) weak years (the orange shadow region is tested by 90% significance of t -test; black line frame represents the area related to WWB ($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$))

类似;在非活跃期,赤道中东太平洋海盆区域出现温度负距平,西部暖池为正距平,这样的空间模态可以对应 La Niña 事件。在赤道中东太平洋出现了显著的成片点状区域,表示通过 $\alpha=0.1$ 的信度检验,可以看出:强 MJO 事件下的次年太平洋海温有利于 ENSO 的发生,弱事件则相反。

基于低频动能对 MJO 的传播范围以及活跃程度进行合成,发现强 MJO 指数年表征 MJO 活动的低频动能可以持续传播到西风关键区($140\sim 160^{\circ}\text{W}$) 而弱 MJO 年低频动能的东传范围则偏西。此外,在 MJO 强弱年中,大气的纬向—垂向环流具有显著差异。在 MJO 强(弱)年,大气中低层的西风爆发关键区内出现了显著的年均西风(东风)异常,并对应了赤道中东太平洋 El Niño(La Niña) 型的暖(冷)海温异常出现。可见,强年的 MJO 事件从影响范围东扩以及自身强度增强两方面促进了低频动能向 WWB 关键区内的传递,进而对 ENSO 的演变过程产生影响。

4 年代际尺度下 MJO 事件对 ENSO 的影响

Mann-Kendall (M-K) 检验法是一种可以判断气候序列中是否存在气候突变的非参数检验方法,其优势是不需要样本遵从一定的分布。用 M-K 法检测 1979—2008 年年均 MJO 指数以及赤道太平洋海温主分量的变化趋势和突变点(图 9a、b)。根据 UF

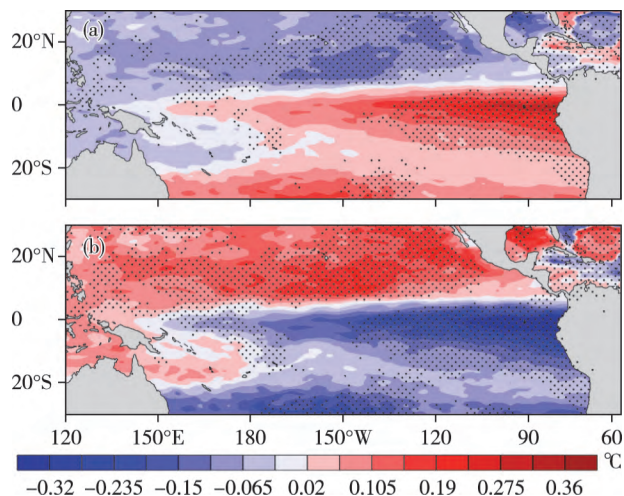


图8 MJO 强弱日下赤道太平洋海温距平的合成分析: (a) 强 MJO 日; (b) 弱 MJO 日(打点区域为通过 $\alpha=0.01$ t -test 信度检验(单位: $^{\circ}\text{C}$))

Fig.8 Synthetic analysis of the equatorial Pacific SSTA during the strong and weak days of MJO: (a) strong MJO days; (b) weak MJO days(dotted area is tested by 99% significance of t -test (unit: $^{\circ}\text{C}$))

与 UB 交点的位置,确定了 1998 年前后是 MJO 指数以及 PC1 的突变点,在此基础上,对 1998 年前后两时间序列进行趋势回归分析(图 9c、d),得到 1979—1998 年呈现上升,而 1998—2008 年,总体 MJO 活动以及尼诺的活动明显减弱。

湿静力能量^[33](Moist Static Energy, MSE) 可用于研究 MJO 东传的范围,是类似相当位温的热力学变量,由于它在绝热上升和下降过程中近似守恒,近年来常用于研究 MJO,并取得了较好效果。WANG, et al^[34] 指出,使用垂直整体空气柱的 MSE 值可以描述 MJO 传播的物理特征。定义式为:

$$m = c_p T + gz + L_v q \quad (1)$$

其中: T 表示温度; z 为位势高度; q 是比湿; 其他为常数(c_p 为比热; g 为重力加速度; L_v 为水汽潜热)。

垂直空气柱 MSE 具体计算公式如下:

$$\langle \partial_t m \rangle = - \langle \omega \partial_p m \rangle - \langle \partial_t \nabla m \rangle + Q_t + Q_r \quad (2)$$

其中: p 表示等压面; V 为水平风速; w 为压力速度(垂直速度); Q_t 代表地表潜热通量和感热通量总和; Q_r 代表短波辐射加热率和长波辐射加热率的总合。

对该式从地面到 100 hPa 进行垂直积分,得到空气柱的整体 MSE。

图 10 给出了 1998 年前后赤道区域的逐日 MSE 与次季节尺度标准差最大点的相关系数分布。可以看到在 1979—1998 年间,标准差最大点位于 90°E

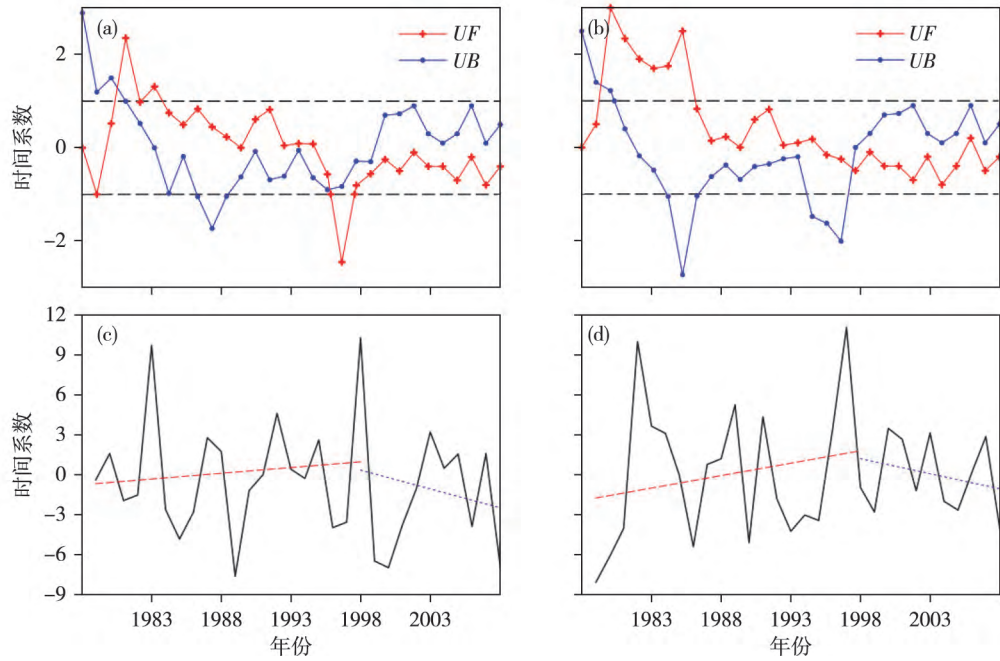


图9 (a) NCEP/CFSR 1979—2008 年冬季(12、1、2 月) 热带太平洋地区(30°S~30°N, 120°E~60°W) 海表面温度距平 EOF 第一模态 PC1 的 M-K 检验; (b) NCEP/CFSR 1979—2008 年逐年年均 MJO 指数的 M-K 检验; (c) 热带太平洋地区海表面温度距平 EOF 第一模态 PC1 的时间序列以及趋势变化; (d) 逐年年均 MJO 指数的时间序列以及趋势变化

Fig.9 (a) M-K test of the PC1 of the tropical Pacific (30°S—30°N, 120°E—60°W) SSTA based on NCEP/CFSR data sets in winter days for the period of 1979—2008; (b) M-K test of annual MJO index based on NCEP/CFSR data sets for the period of 1979—2008; (c) the PC1 and trend of the tropical Pacific SSTA; (d) the MJO index and trend of it

附近,与 MSE 标准差变化最大值点的相关系数大于 0.4 的相关区域扩展到 180°E 左右,且在 WWB 关键区域有大值中心,大值中心东南侧存在负相关区域,中心位于赤道以南的西太平洋区域,体现出 MJO 气候平均态下东印度洋—海洋性大陆区域的对流活跃以及西太平洋地区的抑制模态; 1999—2008 年最大值点位于 100°E 附近,显著正相关区域范围在 120°E 以东,WWB 区域为负相关,相关系数大于 0.4 的区域基本位于 120°E 以西,大值中心范围较窄。因此 1998 年前 MJO 活动范围的东扩以及 1998 年后的异常收缩可能是在年代际尺度上影响 ENSO 事件的重要原因。

为了进一步揭示年代际尺度上 MJO 对 ENSO 的影响机制,探究 WWB 在长期尺度上与 ENSO 与 MJO 的关系是否具有类似的物理机制,绘制了季节内西风填色图(图 11),其中红线框为 WWB 关键区域。由图可见,由降水率大值表征的对流中心的最东端,随着逐年时间变化呈现出明显的东移和西退(红色实线): 1981—1985 年,对流中心的最东端基本在 160°E 以西; 1986—1987 年,第一次突进至 170°E 左右; 1990—1995 年,基本稳定在 180°E 附近;到 1998 年,甚至达到 180°E 以东的位置; 1998 年之后出现了明显的西退。类似地,在 1979—1984

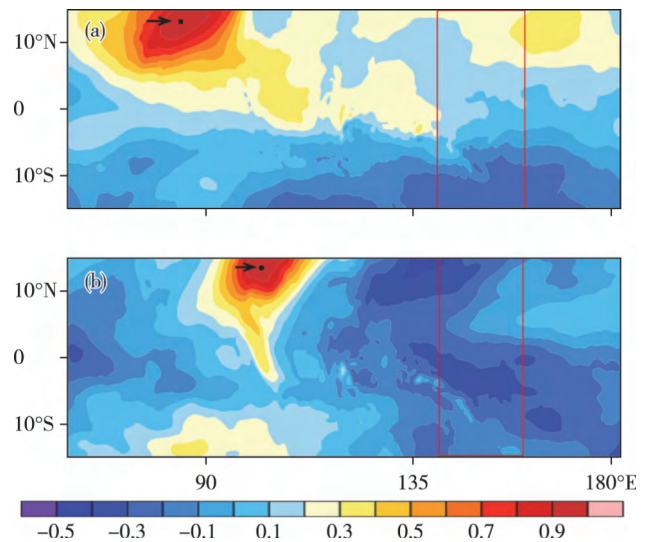


图 10 (15°N~15°S, 70°E~180°) 范围内与 MSE 标准差最大值点的相关系数分布: (a) 1979—1988 年; (b) 1999—2008 年; 箭头指向黑点为标准差最大值所在位置,红色线框为 WWB(140°~160°E)

Fig.10 The correlation coefficient between the points of the region (15°S—15°N, 70°E—180°) and maximum value of MSE standard deviation for the period of (a) 1979—1998; (b) 1999—2008; the black point represent where the maximum value of MSE standard deviation, the red line frame represents the area related to WWB (140°—160°E)

年,西风异常没有达到选定阈值,西风事件不显著发生; 1984—1987 年,在 WWB 出现了较大范围的西

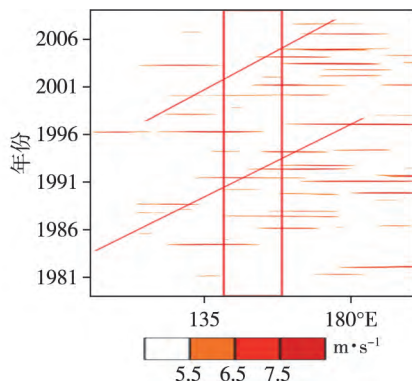


图 11 1979—2008 年冬季 850 hPa 西风填图($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 范围内区域平均; 红色线框为西风爆发关键区 ($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.11 The west wind at 850 hPa in winter days for the period of 1979—2008 of ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) area averaged; red lines box is WWB areas ($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

风异常,之后可见西风异常区域向东推进;1998 年左右西风异常也存在着显著西退。由此可见,1998 年是西风西退的重要转折点,这与前文研究所得的 1998 年为 MJO 事件,ENSO 事件的趋势转折点一致,可见在长期尺度上 WWB 也是联系 MJO 事件以及 ENSO 事件的主要机制。

图 12 为 1979—2008 年冬季不同月份 Niño3 指数以及 MJO 指数的逐年变化趋势。Niño3 的年均指数与 EOF 分解所得 PC1 相似,12 月以及次年 1、2 月的 Niño3 的整体走势类似:1979—1982 年、1990—1992 年、1996—1998 年、2000—2003 年、2006 年后为赤道中东太平洋海温正异常明显发生的时段,其中 1998—1999 年的冬季年均值达到峰值,对应 1998—1999 年的超强 El Niño 事件(图 12a)。考察图中三条线之间的相对位置关系可见:1998 年之前 2 月的 Niño3 指数总体大于 1、2 月,1998 年之后 2 月与 12、1 月的相对大小关系发生明显变化。由于 ENSO 是年际尺度上的海气相互作用系统,在季节内的差异可能不明显,但是 1998 年之后 2 月的海温升高贡献减少可能与其强迫因子的减弱存在关系。图 12b 为 MJO 指数的逐年变化情况,由于 MJO 变率是季节内尺度的,12、1、2 月的 MJO 活动情况有较大差异:12 月 MJO 指数相对另两个月份变率较大:1979—1981 年由负距平转化为正距平,1982—1984 年指数减少,再次向负异常转化。并且, MJO 指数在 1984—1990 年上升,1990—1995 年下降,1995 年之后呈现波动上升;1 月总体呈现上升趋势,在 1993 年左右发生了从负距平转化为正距平;2 月情况与 1 月基本相反,总体呈现下降趋势且在 1995 年左右由正异常转化为负异常。结合图 12a、b 可见,1998 年

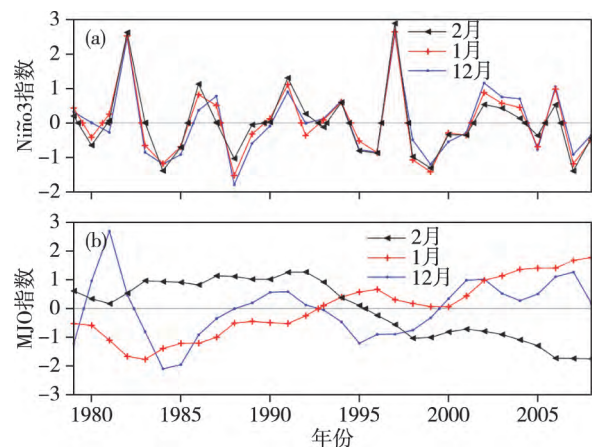


图 12 冬季不同月份 Niño3 指数以及 MJO 指数逐年演变:
(a) Niño3 指数; (b) MJO 指数

Fig.12 The Niño3 and the MJO index in different winter months:
(a) Niño3 index; (b) MJO index

为 2 月 MJO 指数, Niño3 指数与 12、1 月的大小关系发生变化的转折年。

综合年际尺度以及年代际尺度,合成分析 1998 年前后冬季的 MJO 强事件(图 13),纬向一波的东移特征依然清晰可见,并且热带印度洋与热带太平洋的对流活动中心存在相反空间结构的偶极子结构,即热带印度洋对流活动增强,热带太平洋上的对流活动减弱,反之亦然。1979—1998 年间:第 1 相位,热带西印度洋直到印尼地区的广阔海洋大陆区域存在显著的降水率大值中心,上空的 850 hPa 风场辐合旺盛,为气旋式环流异常;第 2~5 相位,降水率正距平区域有所收缩,逐渐东传直到离开热带印度洋,中心越过海洋大陆,进入热带西太平洋,上空异常的反气旋环流同样逐渐东传,随着 MJO 活动的增强,西太平洋上空逐渐被正涡度环流占据,强度不断增加;第 6~7 相位,西太平洋的对流中心迅速减弱,反气旋环流减弱, MJO 对流活跃中心东移至东太平洋,开始新的 MJO 周期。在 1999—2008 年间所合成的 MJO 活动强年虽然也存在纬向一波东传的基本模态,但是波的结构不如 1979—1998 年规则,且在强年位于西太平洋的降水率大值中心能扩展到南北 15° 左右,而在 1999—2008 年间,虽然上述大值中心仍然存在,但其扩展的范围小于 1979—1998 年间 MJO 活动强年,约为其强度的一半;与风场的配置效果较差。

综上,年代际时间尺度上,通过 M-K 趋势突变检验,发现了 1998 年同时是 ENSO 事件和 MJO 事件的转折点。这样的长期变化特征在晚冬更明显,1998 年之前 MJO 的东传范围以及强度均要大于 1998 年之后,在 Bjeknes 正反馈机制下对应了年代

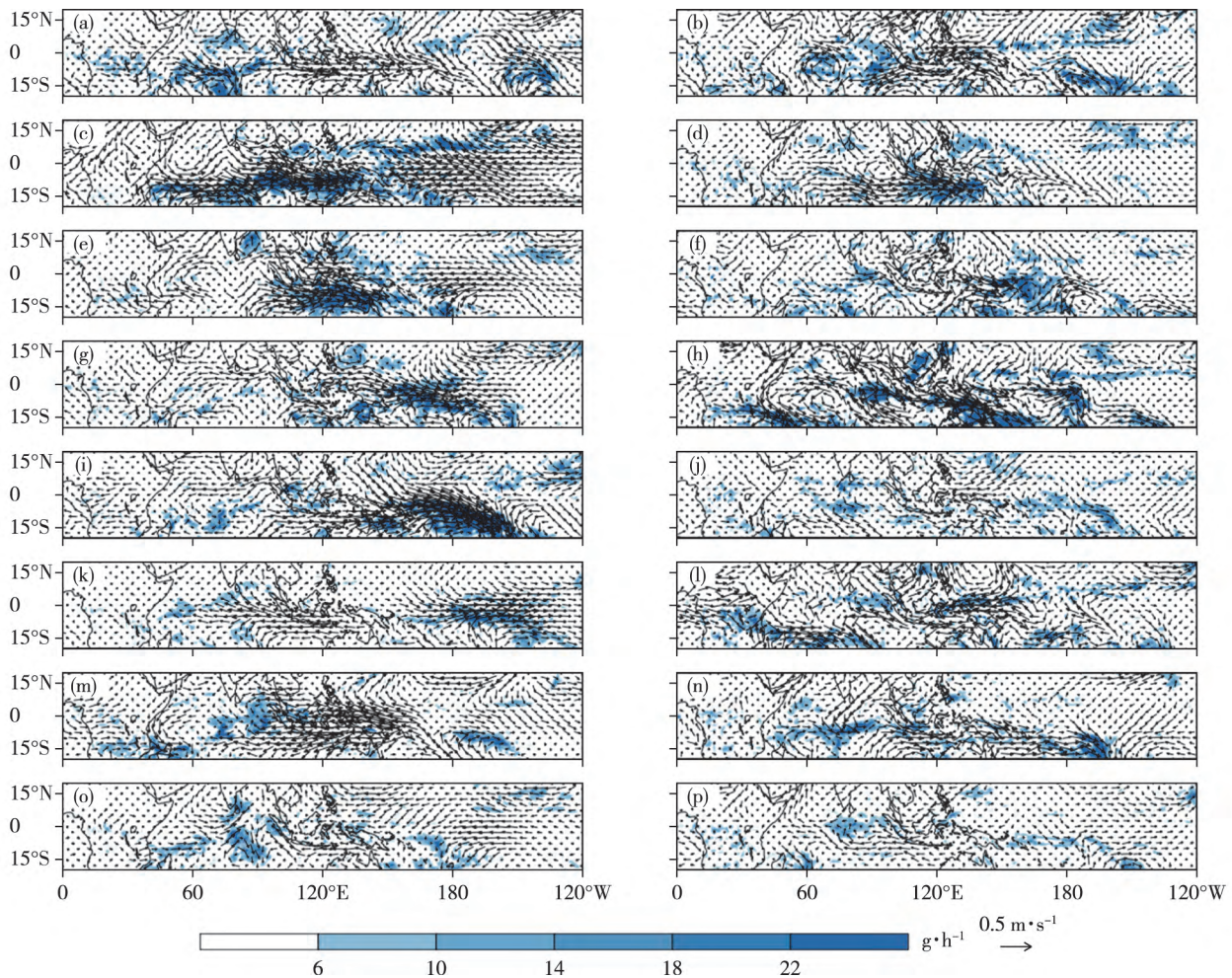


图 13 1998 年前后冬季 MJO 强年下相位的合成分析: (a、c、e、g、i、k、m、o) 1998 年前强年; (b、d、f、h、j、l、n、p) 1998 年后强年; 着色区域通过 $\alpha=0.15$ t -test 信度检验 (阴影单位: $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$; 黑色箭头单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.13 Synthesis analysis of the phases under strong years of MJO for the period of 1979—1998 and 1999—2008 during the winter days; (a, c, e, g, i, k, m, o) strong years for the period of 1979—1998; (b, d, f, h, j, l, n, p) strong years for the period of 1999—2008; the contoured area passed the 85% significance of t -test (shadow unit: $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$; black arrow unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

际时间尺度下的 El Niño 事件出现。相应地, El Niño 事件强度在 1998 年后也减弱。而在早冬季节, 研究结果表明伴随着印度洋的增暖, MJO 强度则表现为逐年增加。可见, 年际和年代际时间尺度上存在“大气通道”, 由 MJO 的东移增强次季节时间尺度的太平洋西风爆发事件及年均后的平均西风异常, 并进而对赤道中东太平洋 El Niño 事件产生影响。

5 结论

本文基于 NCEP/CFSR 数据集分析了 1979—2008 年冬季 MJO 事件与 ENSO 事件的基本特征及其在年际和年代际时间尺度的联系。特别是以太平洋西风爆发事件作为纽带讨论了两时间尺度下 MJO 对 ENSO 的影响机制。得到如下主要结论:

(1) NCEP/CFSR 作为一套较高分辨率的大

气—海洋耦合再分析数据集, 对 1979—2008 年冬季期间 ENSO 的气候态特征和年际变率, 以及 MJO 的气候态分布和次季节时间尺度内的变化都有较好的描述能力, 通过对该数据下 WWBI 的功率谱分析以及交叉相关分析发现 ($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 的赤道地区的 WWBI 具有显著的次季节时间尺度变化, 且这一变化与印度洋内的 MJO 事件间存在明显的滞后相关。WWB 事件作为中东太平洋 ENSO 事件产生的触发机制之一, 对于 ENSO 的产生和演变具有重要作用。

(2) 年际时间尺度上, 强 MJO 指数年表征 MJO 活动的低频动能可以持续传播到 WWB ($140^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{W}$), 而弱 MJO 年低频动能的东传范围则偏西。此外, 在 MJO 强弱年中, 大气的纬向—垂向环流具有显著差异。在 MJO 强 (弱) 年, 大气中低层的 WWB 内出现了显著的年均西风 (东风) 异常, 并对

应了赤道中东太平洋 El Niño(La Niña) 型的暖(冷)海温异常出现。可见, 强年的 MJO 事件从影响范围东扩以及自身强度增强两方面促进了低频动能向 WWB 内的传递, 进而对 ENSO 的演变过程产生影响。

(3) 长期年代际时间尺度上, 晚冬 MJO 指数与 ENSO 指数在 1979—2008 年间都在 1998 年前后存在显著的年代际突变。其中, MJO 的强度以及东传的范围在 1998 年之前均要大于 1998 年之后。相应地, El Niño 事件强度在 1998 年后也减弱。而在早冬季节, 结果表明伴随着印度洋的增暖, MJO 强度则表现为逐年增加。可见, 年际和年代际时间尺度上存在“大气桥”, 由 MJO 的东移增强次季节时间尺度的 WWB 事件及年均后的平均西风异常, 并进而对赤道中东太平洋 El Niño 事件产生影响。

(4) 热带太平洋和印度洋上空除了可以通过“大气桥”相联系, 两个热带洋盆间还通过表层的由太平洋流向印度洋的印尼贯穿流^[35](Indonesian Throughflow, ITF) 以及 ITF 次表层反向海流进行海水交换。完善 MJO 与 ENSO 间海洋通道的影响机制将是下一步的工作重点。

参 考 文 献

- [1] Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 1966, 18(4): 820-829.
- [2] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, 110(5): 354-384.
- [3] 黄兴春, 江静. ENSO 事件对东亚副热带西风急流影响的诊断分析. *气象科学*, 2008, 28(1): 15-20.
HUANG Xingchun, JIANG Jing. The diagnostic analysis of the impact of ENSO events on East Asia subtropical westerly jet. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2008, 28(1): 15-20.
- [4] Madden R A, Julian P R. Observations of the 40—50 day tropical oscillation—a review. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, 122(5): 814-837.
- [5] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, 28(5): 702-708.
- [6] Rasmusson E M, Carpenter T H. The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over India and Sri Lanka. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, 111(3): 517-528.
- [7] 李崇银. El Niño 事件与中国东部气温异常. *热带气象*, 1989, 5(3): 210-219.
LI Chongyin. El Niño event and the temperature anomalies in eastern China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1989, 5(3): 210-219.
- [8] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响. *大气科学*, 1995, 19(2): 200-208.
LIU Yongqiang, DING Yihui. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1995, 19(2): 200-208.
- [9] 李琳, 李崇银, 谭言科. ENSO 年冬季北半球平流层大气环流异常特征分析. *气象科学*, 2008, 28(4): 355-362.
LI Lin, LI Chongyin, TAN Yanke. Anomalous characteristics of the stratospheric circulation in ENSO winter. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2008, 28(4): 355-362.
- [10] 赵亮, 邹力, 王恩华. 与 ENSO 有关和无关年江、淮旱涝可能成因研究. *气象科学*, 2007, 27(6): 618-625.
ZHAO Liang, ZOU Li, WANG Enhua. Study on causes of drought and flood over the Huaihe and mid-lower Yangtze valleys during the summers with and without ENSO. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2007, 27(6): 618-625.
- [11] 杨艳娟, 管兆勇, 朱保林. IOD 对北半球夏季季节内振荡强度的可能影响. *南京气象学院学报*, 2007, 30(2): 224-230.
YANG Yanjuan, GUAN Zhaoyong, ZHU Baolin. Possible influences of the Indian Ocean Dipole on the intensity of intraseasonal oscillation in boreal summer. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, 30(2): 224-230.
- [12] 姚菊香, 王盘兴, 李丽平. 季节内振荡研究中两种数字滤波器的性能对比. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 248-253.
YAO Juxiang, WANG Panxing, LI Liping. Performance contrast between two filters in Madden-Julian Oscillations analysis. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, 28(2): 248-253.
- [13] 蒋国荣, 刘庭杰, 何金海. 热带季节内振荡研究新进展. *南京气象学院学报*, 2005, 28(2): 281-288.
JIANG Guorong, LIU Tingjie, HE Jinhai. New progresses in research on tropical intraseasonal oscillations. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2005, 28(2): 281-288.
- [14] LI Xin, LI Chongyin. The tropical Pacific-Indian Ocean associated mode simulated by LICOM2.0. *Adv. Atmos. Sci.*, 2017, 34(12): 1426-1436.
- [15] HONG Xiaoyuan, HU Haibo, YANG Xiuqun, et al. Influences of Indian Ocean interannual variability on different stages of El Niño: a FOAM1.5 model approach. *Sci. China Earth Sci.*, 2014, 57(11): 2616-2627.
- [16] Klein S A, Soden B J, Lau N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, 1999, 12(4): 917-932.
- [17] 吴国雄, 孟文. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析. *大气科学*, 1998, 22(4): 470-480.
WU Guoxiong, MENG Wen. Gearing between the indo-monsoon circulation and the pacific-walker circulation and the ENSO Part I: data analyses. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, 22(4): 470-480.
- [18] 李崇银, 周亚萍. 热带大气季节内振荡和 ENSO 的相互关系.

- 地球物理学报, 1994, 37(1): 17-26.
- LI Chongyin, ZHOU Yaping. Relationship between intraseasonal oscillation in the tropical atmosphere and ENSO. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1994, 37(1): 17-26.
- [19] Lau K M, Chan P H. The 40—50 day oscillation and the El Niño/Southern Oscillation: a new perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1986, 67(5): 533-534.
- [20] Fedorov A V. The response of the coupled tropical ocean-atmosphere to westerly wind bursts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2002, 128(579): 1-23.
- [21] YU Lisan, Michele M. Evidence of an extratropical atmospheric influence during the onset of the 1997—98 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(18): 3537-3540.
- [22] McPhaden M J. Genesis and evolution of the 1997—98 El Niño. *Science*, 1999, 283(5404): 950-954.
- [23] 李崇银, 穆明权. 东亚冬季风—暖池状况—ENSO 循环的关系. *科学通报*, 2000, 45(7): 678-685.
- LI Chongyin, MU Mingquan. Relationship between East Asian winter monsoon, warm pool situation and ENSO cycle. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(16): 1448.
- [24] PENG Yuehua, DUAN Wansuo, XIANG Jie. Effect of stochastic MJO forcing on ENSO predictability. *Adv. Atmos. Sci.*, 2011, 28(6): 1279-1290.
- [25] Slingo J M, Rowell D P, Sperber K R, et al. On the predictability of the interannual behaviour of the Madden-Julian Oscillation and its relationship with El Niño. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1999, 125(554): 583-609.
- [26] 龚道溢, 王绍武. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. *科学通报*, 1999, 44(3): 315-320.
- GONG Daoyi, WANG Shaowu. Impacts of ENSO on rainfall of global land and China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(9): 852-857.
- [27] 黄勇, 李崇银, 王颖, 等. 近百年西北太平洋热带气旋频数变化特征及其与 ENSO 的关系. *海洋预报*, 2008, 25(1): 80-87.
- HUANG Yong, LI Chongyin, WANG Ying, et al. Study on the variation characteristics of annual frequency for tropical cyclones in western North Pacific during the last hundred years and relationship with ENSO. *Marine Forecasts* (in Chinese), 2008, 25(1): 80-87.
- [28] 赵威, 赵海坤, 韦志刚, 等. MJO 与西北太平洋热带气旋活动的关系及其年代际变化. *热带气象学报*, 2015, 31(2): 237-246.
- ZHAO Wei, ZHAO Haikun, WEI Zhigang, et al. The modulation and decadal change of Madden-Julian Oscillation on tropical cyclones in the western North Pacific Ocean. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2015, 31(2): 237-246.
- [29] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real-time multivariate MJO index: development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, 132(8): 1917-1932.
- [30] 陈雄, 李崇银, 谭言科, 等. 冬季热带西太平洋 MJO 活动强弱年的环境场特征. *热带气象学报*, 2015, 31(1): 1-10.
- CHEN Xiong, LI Chongyin, TAN Yanke, et al. The environmental characteristics of strong/weak MJO activity over the tropical western Pacific winter. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2015, 31(1): 1-10.
- [31] Duchon C E. Lanczos filtering in one and two dimensions. *J. Meteor.*, 1979, 18(8): 1016-1022.
- [32] Penland C, Sardeshmukh P D. The optimal growth of tropical sea surface temperature anomalies. *J. Climate*, 1995, 8(8): 1999-2024.
- [33] Maloney E D. The moist static energy budget of a composite tropical intraseasonal oscillation in a climate model. *J. Climate*, 2009, 22(3): 711-729.
- [34] WANG Lu, LI T. Fundamental causes of propagating and nonpropagating MJOs in MJOTF/GASS models. *J. Climate*, 2017, 30(10): 3743-3769.
- [35] Hirst A C, Godfrey J S. The role of Indonesian through flow in a global ocean GCM. *J. Phys. Oceanogr.*, 1993, 23(6): 1057-1086.