doi:10.11676/qxxb2022.029

夏季印度洋 MJO 活跃时间对中国长江流域降水日数的影响*

雷徐奔　张文君　刘　超
LEI Xuben　ZHANG Wenjun　LIU Chao

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京，210044

Key Laboratory of Meteorological Disaster，Ministry of Education/International Joint Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters，Nanjing University of Information Science & Technology，Nanjing 210044，*China*

2021-12-21 收稿，2022-03-13 改回.

雷徐奔，张文君，刘超. 2022. 夏季印度洋 MJO 活跃时间对中国长江流域降水日数的影响. 气象学报，80(4)：503-514

Lei Xuben，Zhang Wenjun，Liu Chao. 2022. Influence of MJO active days over the Indian Ocean on precipitation days in the reaches of the Yangtze River. ***Acta Meteorologica Sinica*****，80(4):503-514**

Abstract　The influences of active days of the Madden-Julian oscillation (MJO) over the Indian Ocean on summer precipitation days over the middle and lower reaches of the Yangtze River were investigated. Daily precipitation data collected at 753 stations, monthly sea surface temperature (SST) data from the Hadley Centre, daily mean reanalysis data from the National Centers for the Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), and all-season real-time multivariate Madden-Julian Oscillation (RMM) index during 1980—2020 were used. The results show that the active days of MJO over the Indian Ocean have a statistically significant relationship with precipitation days over the middle and lower reaches of the Yangtze River, especially with the heavy precipitation days, since the MJO related circulation anomalies can continuously transport water vapor to eastern China. Further research indicates that the relationship between active days of MJO over the Indian Ocean and the precipitation days over the middle and lower reaches of the Yangtze River has experienced a decadal change with their relationship being significant since the 2000s. The decadal change of this relationship might be attributed to decreased variability in SST in the Indian Ocean. This decreased interannual variability of SST suggests weakened modulation effects on precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River by the tropical Indian Ocean. In contrast, the MJO effects on the precipitation days over the middle and lower reaches of the Yangtze River turn to be significant after the 2000s due to less disturbances from the Indian Ocean SST.

Key words　Madden-Julian oscillation (MJO)，Precipitation days，Interannual variability，Middle and lower reaches of the Yangtze River

摘　要　利用 1980—2020 年中国 753 站逐日降水资料、NCEP/NCAR 大气再分析资料以及哈得来中心的海表温度资料和实时多变量 Madden-Julian 振荡（MJO）指数，研究了 MJO 在印度洋地区（1—3 位相）活跃日数对长江流域夏季降水日数的影响。结果表明两者存在显著的统计联系，在 MJO 活跃日数偏多的年份，MJO 相关的西北太平洋反气旋环流异常有利于向长江中下游地区输送水汽，进而导致长江流域中下游范围内降水日数的增加，且这种影响主要体现在降水等级为大雨（25 mm/d）及以上强度的日数上。进一步研究发现，MJO 在印度洋活跃日数与长江中下游夏季降水日数的关系存在年代际变化，两者显著的联系仅出现在 2000 年之后，之前的时段两者联系则较弱。这种关系的转变可能与印度洋海表温度变率减弱的背景有关，印度洋海洋年际变率

* 资助课题：国家自然科学基金项目（42125501、42088101）。

作者简介：雷徐奔，从事 ENSO 与海气相互作用研究。E-mail：lxb@nuist.edu.cn

通信作者：张文君，从事 ENSO 机理及海陆气相互作用等方面研究。E-mail：zhangwj@nuist.edu.cn

变弱导致其对于长江中下游地区的影响减弱,进而使得 MJO 的调控作用凸显出来。夏季季节平均的印度洋 MJO 活跃日数可以对长江中下游的大雨以上的降水日数产生影响,且两者的关系在大约 2000 年之后变得尤为显著。

关键词 Madden-Julian 振荡(MJO),降水日数,年际变率,长江中下游地区

中图法分类号 P46

1 引 言

中国所在的东亚地区降水具有显著的季节变化,主要受到季风系统的控制。夏季的盛行风携带暖湿气流由海洋吹向大陆,使其成为东亚地区降水量最多的季节。夏季降水往往伴随着极端事件的发生,对农业生产、水利安全、防汛抗洪等带来了严峻挑战。因此,东亚夏季降水相关的问题一直备受关注。

中国南方夏季降水受到多种海洋、大气因子的调控而呈现出明显的多时间尺度变率特征(黄荣辉等, 1999; 张庆云等, 2003)。在年际时间尺度上,热带太平洋及印度洋的海温对东亚夏季降水存在着明显的调制作用。例如:厄尔尼诺可以通过影响次年夏季东亚环流系统进而影响夏季风爆发的时间及强度(陶诗言等, 1998; 龙振夏等, 1999; Kim, et al, 2001),相应增强的西北太平洋反气旋通过向中国输送水汽使得夏季中国东部尤其是长江流域的降水增多(Wang, et al, 2000; 陈文, 2002; Stuecker, et al, 2015; Zhang, et al, 2016; 李海燕等, 2016)。此外,有研究强调了印度洋在 ENSO 影响次年夏季中国降水的重要性(Yang, et al, 2007; Xie, et al, 2009; 杨明珠等, 2007),指出热带印度洋能够通过印度洋“电容器”效应将 ENSO 的影响延续到次年夏季。东亚夏季风除了年际变率外,还存在着周期为 30—60 d 的季节内变化特征(Yasunari, 1979; Lau, et al, 1985, 1988; 王慧等, 2005),其变率的信号主要源于热带大气季节内振荡(MJO, Madden-Julian Oscillation)。MJO 作为热带大气季节内尺度(周期 10—90 d)中最重要的信号来源(Madden, et al, 1971, 1972),其活动特征主要表现为对流中心从热带印度洋向东传播至中太平洋附近。MJO 通过热带地区对流激发的异常环流以及遥相关响应,对全球范围内的天气和气候系统都有重要影响(Jones, et al, 2004; Donald, et al, 2006)。研究表明,MJO 对流活跃时对中国华南地区、西南地区、淮河流域、长江中下游区域的降水均具有重要的影响,当 MJO 对流中心位于印度洋时,中国南方地区降水偏多;而当对流中心位于太平洋时,中国南方地区降水则偏少(Yang, et al, 2003; 白旭旭等, 2011; Jia, et al, 2011; 李汀等, 2012; 李文锴等, 2014)。由于 MJO 在季节内尺度上独特的活动特征,人们提出在实际工作中可以将其作为延伸期预报(10—30 d 的天气预报)中的一个重要的预报因子,用来弥补天气预报和气候预报之间的缝隙(Waliser, et al, 2003; 丁一汇等, 2010)。中国的科研工作者在利用 MJO 进行延伸期预报方面也有大量的研究,相关成果被广泛地应用于实际预报业务中(吴捷等, 2016; Ren, et al, 2017)。

近年来,一些学者发现,由于 MJO 的传播特征表现出明显的复杂性,所以当 MJO 长时间地停滞在某一位相时,其产生的影响可以在季节尺度上呈现,进而造成极端的天气、气候事件。例如,2020 年夏季,长江中下游地区经历了自 1961 年以来最强的梅雨降水,降水量达到了历史同期平均量的 2 倍(Ding, et al, 2021),这场持续了近两个月的强降水引起了社会各界的广泛关注。研究发现,同期 MJO 相关的对流几乎一直维持在热带印度洋地区,相应的实时多变量 MJO(RMM)指数在 1—3 位相活跃天数达到了 59 d,为历史之最。异常维持的 MJO 源源不断地向中国南方地区输送了大量的水汽,从而为 2020 年梅雨季降水提供了必要的水汽条件(Zhang, et al, 2021; Liang, et al, 2021)。除了此次事件,Lü等(2012)发现 2009 年持续性的 MJO 对流使得印度洋向云南的水汽输送异常减少,从而导致 2009—2010 年云南大部分地区发生了罕见的秋、冬、春三季连旱;Hsu 等(2020)研究发现,2018 年夏季 MJO 在西太平洋异常长时间停滞致使中国北方地区出现了持续异常的高温热浪事件。这些极端气候灾害都表明,活跃的 MJO 在特定位相长时间停留引起的持续性环流异常可以在季节平均尺度上产生影响,引起极端的气候灾害发生。

观测资料显示,夏季 MJO 在印度洋地区的停留时间存在明显的年际变化以及长期变化趋势。考虑到 MJO 在特定位相对中国夏季降水的显著影响,当 MJO 对流中心在某位置长期停留时可能会

造成夏季环流的异常维持，进而在季节平均的时间尺度上引发极端的气候灾害。基于此，探究 MJO 在特定位相活跃日数的年际变化对长江中下游地区降水的潜在影响具有非常重要的意义。

2 资料与方法

使用的资料包括：(1)中国国家气象信息中心提供的 753 站逐日降水观测资料；(2)美国国家海洋大气局(NOAA)气候预测中心(CPC)的全球日降水数据(CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation)；(3)美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的全球逐日再分析资料，包括：向外长波辐射(OLR)场、风场、高度场、比湿以及海平面气压场；(4)哈得来中心提供的月平均海表温度资料(HadISST1)；(5)澳大利亚气象局提供的实时多变量 MJO 指数(Real Time Multivariate MJO index，简称 RMM 指数，Wheeler, et al, 2004)。研究时段为 1980—2020 年的夏季(6—8 月)，主要关注区域为长江中下游地区(28°—32°N，105°—120°E)。

本研究主要分析降水日数的年际变率，当某日降水量大于或等于 0.1 mm 时定义该日为一个降水日，并统计了每年夏季的降水日数。MJO 活跃日数及位置的选取主要基于 RMM 指数。将 15°S—15°N 逐日平均的 OLR、850 hPa 和 200 hPa 纬向风 3 个变量去除年循环及年际变率后进行多变量经验正交函数分解(EOF)，第 1、第 2 模态的主成分(PC)时间序列分别被称为 RMM1 和 RMM2 指数，将 $\sqrt{(RMM1^2+RMM2^2)}$ 的值定义为 MJO 的强度，当某日 MJO 强度大于 1 定义为一个 MJO 活跃日，根据 RMM 指数对 MJO 空间位相做划分，将每年夏季 1—3 位相的活跃日数之和定义为该年 MJO 在印度洋的活跃日数，5—7 位相的活跃日数之和为 MJO 在西太平洋的活跃日数。为了去除全球变暖对本分析的可能影响，所有的数据均进行了线性去趋势处理。采用了合成、相关、回归、方差分析等气候统计方法，其中合成、相关和回归统计结果用双侧 t 检验，方差分析用 F 检验。

3 MJO 不同位相对应的大尺度环流及其对中国降水的影响

从夏季 MJO 活动的气候态以及典型位相下环流的合成分布(图 1)可以看到，在印度洋北部和中国南海到菲律宾东部海域存在两个季节内向外长波辐射方差的大值区(图 1a)，表明夏季 MJO 在这两个区域的活动比较活跃。由于夏季气候态的低层西风风场最大值的纬向位置大约在 10°N 左右，因此低频 OLR 场的活跃中心也随之向北偏移(Zhang, et al, 2004; Lu, et al, 2017)。此前的研究(Zhang, et al, 2009; 靳振华等，2013; Bagtasa, 2020)发现，当 MJO 对流中心位于印度洋和西太平洋时，中国南方地区分别对应为湿位相和干位相，而造成这种现象的原因与 MJO 激发出的大气环流有密切的联系。根据 RMM 指数的定义，MJO 在起始位置到印度洋地区对应为第 1—3 位相，而与其对流相反的位相对应 5—7 位相(西太平洋地区)，图 1b、c 给出了相应位相下 OLR 场以及 850 hPa 风场异常的合成。当 MJO 处于 1—3 位相时(图 1b)，在印度洋区域有强烈的对流上升运动，MJO 对流释放的凝结潜热加热大气，在其中心东侧激发异常东风并且有向东北方向传播的罗斯贝波(Gill, 1980)。相应地，在以西北太平洋为中心的大气低层出现了明显的反气旋环流异常，这个反气旋相关的偏南风异常，使得低层水汽由海洋向陆地输送，因此有利于中国南方地区的降水(图 2a)。相反地，当 MJO 处于 5—7 位相，即对流中心位于西太平洋地区时，西北太平洋出现气旋性环流异常，其相关的北风异常，不利于水汽从海洋向陆地输送(图 1c、2b)，从而使得中国南方地区降水偏少。

图 3 给出了夏季 MJO 在印度洋地区和西太平洋地区活跃天数和平均强度异常的时间演变。在去除了长期变化趋势之后可以看出，无论是在印度洋或是太平洋，MJO 的活跃情况均有着非常明显的年际变化。前文提到 MJO 对流位于印度洋时会为中国南方地区提供有利于降水的条件，可以推测当 MJO 活跃于印度洋地区的时间偏长，有利于中国南方地区降水的环流形势也会维持更长时间，从而增加南方降水的可能性，使得降雨的日数也相应地变多。从图 3 也可以看到，在印度洋地区停留时间最大可以相差 30 d 以上，这样的差异可以累积相当量级的降水，从而使得季节平均降水量产生变化。因此，接下来将探究 MJO 活动的年际变化对中国夏季降水日数的可能影响。

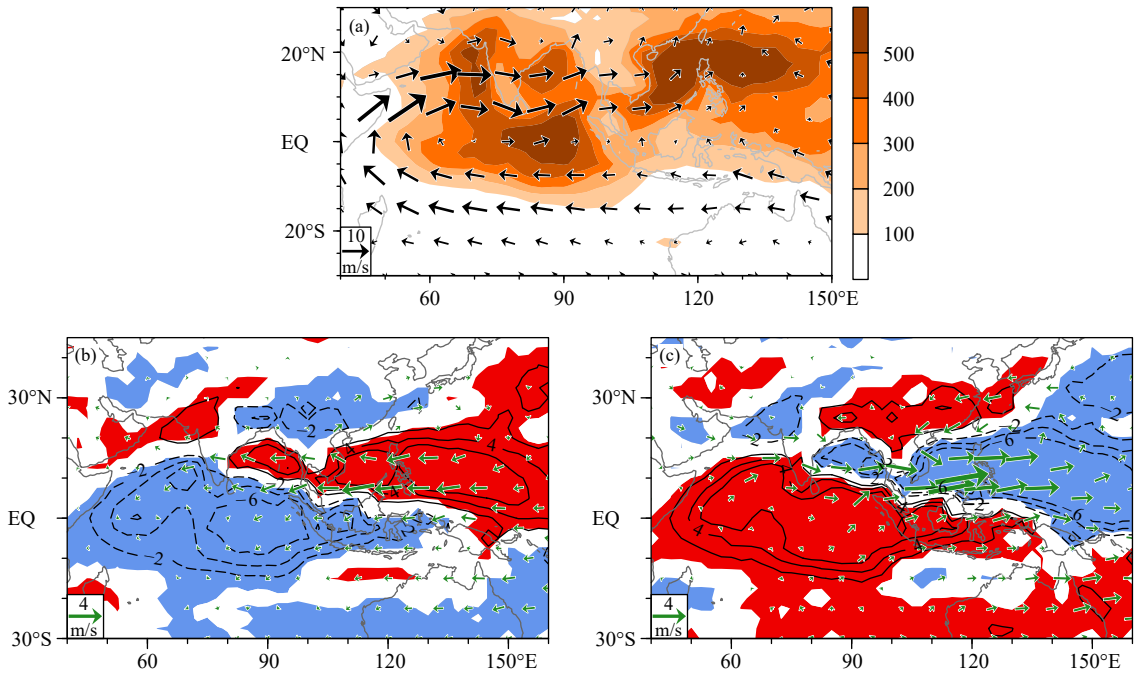


图 1 （a）1980—2020 年夏季平均的 20—90 d 滤波的向外长波辐射方差（色阶，单位：$(W/m^2)^2$）及 850 hPa 水平风场（矢线）分布；1980—2020 年 MJO 处于 1—3 位相（b）和 5—7 位相（c）时的向外长波辐射（等值线，W/m^2）及 850 hPa 风场（矢线，单位：m/s）异常场的合成（红、蓝色阴影分别代表 OLR 场正、负异常通过 90% 信度水平的区域，风场仅给出通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 1 （a）Climatological distributions of 20—90 d filtered OLR variance（shadings，$(W/m^2)^2$）and 850 hPa wind（vectors，m/s）during boreal summer from 1980—2020；Composites of daily OLR（shadings，W/m^2）and 850 hPa wind anomalies during MJO active days during（b）phases 1—3 and（c）phases 5—7（The red and blue shadings represent positive and negotive OLR anomalies exceeding the 90% confidence level，and the wind anomalies are shown only when the zonal or meridional wind anomalies are significant at the 90% confidence level）

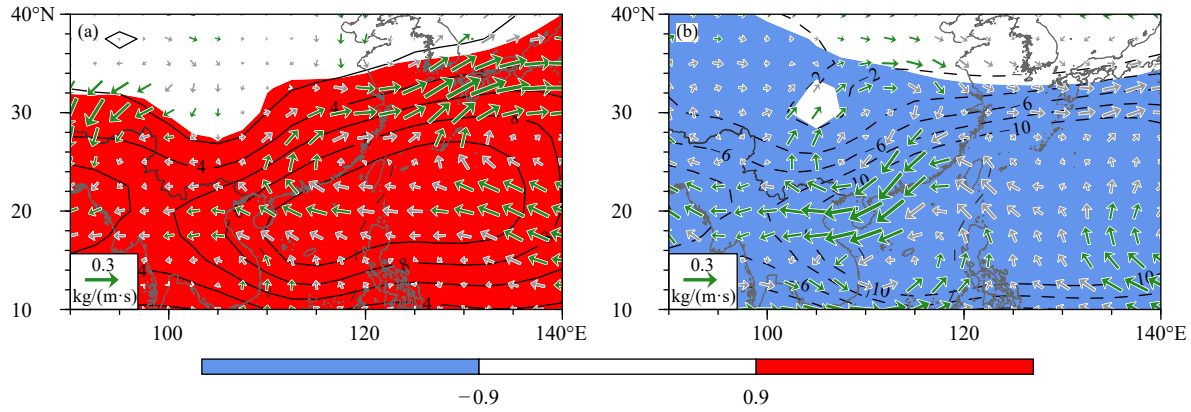


图 2 夏季 MJO 1—3 位相（a）和 5—7 位相（b）合成的 850 hPa 位势高度场（等值线，单位：dagpm）及低层水汽输送（矢线，1000—700 hPa 积分，单位：kg/(m·s)）异常（阴影为高度场通过 90% 信度水平的区域，绿色矢量表示水汽输送通过 90% 信度水平区域）

Fig. 2 Composites of 850 hPa geopotential height（contours，dagpm）and low-level water vapor transport（vectors，kg/(m·s)）anomalies during MJO（a）phases 1—3 and（b）phases 5—7（hadings represent the geopotential height values above the 90% confidence level，and the green vectors represent the zonal or meridional wind above the 90% confidence level）

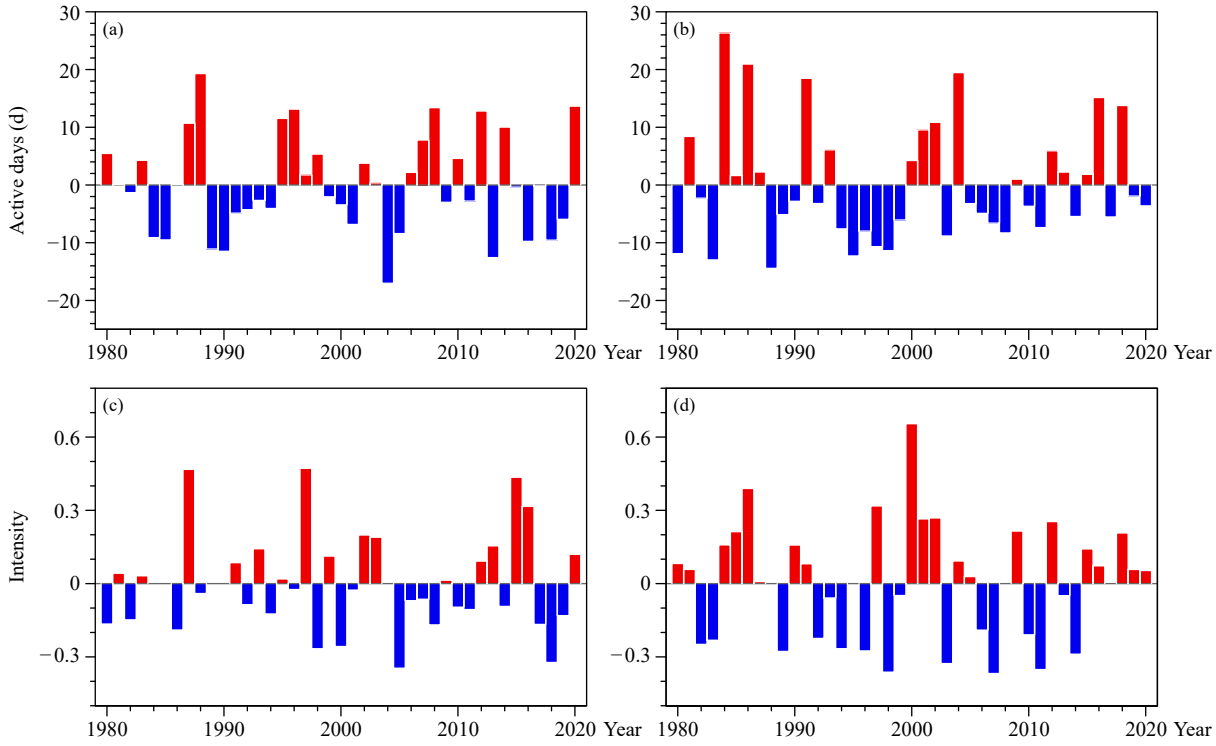


图 3　1980—2020 每年夏季 MJO 在 1—3 位相（a、c）和 5—7 位相（b、d）的停留日数（a、b）和平均强度（c、d）的异常

Fig. 3　Evolution of MJO active day anomalies for（a）phases 1—3 and（b）phases 5—7, and seasonal average of MJO intensity for（c）phases 1—3 and（d）phases 5—7 during the summers of 1980—2020

4　夏季 MJO 在印度洋的活跃日数对中国长江流域降水日数的影响及其年代际变化特征

图 4 给出 MJO 在 1—3 位相活跃日数和平均强度回归的中国南方地区降水日数。为了验证站点资料插值结果的可靠性，也使用 CPC 提供的全球地面降水资料进行了验证，得到的结果与站点插值结果基本一致。从图 4 可以看到，夏季季节平均尺度上 MJO 在印度洋地区的活跃日数与长江中下游地区的降水日数存在显著的正相关关系，说明 MJO 对流在印度洋地区停留时间越长，长江中下游地区降水日数越多；相比之下，MJO 在 1—3 位相的平均强度与中国夏季降水总日数仅仅在西南部分地区有较弱的线性关系，与长江中下游地区的线性关系并不显著。一般而言，当 MJO 达到一定强度后（RMM 指数大于 1 时），MJO 能够调制中国长江中下游的降水，而 MJO 在印度洋累积的活跃时间很长时，夏季降水量就能够一定程度上影响季节平均降水量，因此，MJO 的维持时间对于降雨日数的影响尤为重要。按照降雨的等级进一步将降水日划分为小雨日（日降水量小于或等于 10 mm）、中雨日（日降水量大于 10 mm 且小于 25 mm）、大雨及以上日数（日降水量大于或等于 25 mm）三个等级，并用 MJO 在 1—3 位相的活跃天数分别回归这三个等级的降水日数（图 5）。可以看出，MJO 在 1—3 位相的活跃日数对小雨量级的降水日数几乎没有影响，与中雨量级的降水日数仅在长江中游小部分地区有比较显著的正线性相关关系，而与长江中下游大部分区域大雨以上量级的降水日数有非常显著的正线性相关关系。由此可以推断，当 MJO 本身的对流比较旺盛时，能够向外输送充足的水汽，可以使其影响的降水也达到大雨以上级别，以前也有大量研究（Yang, et al, 2003; Mao, et al, 2010; Hsu, et al, 2015）强调大气季节内振荡与强降水的关系。因此，当夏季 MJO 在印度洋活跃日数很多时，对于长江中下游地区可能会造成持续异常的强降水，引发洪涝等灾害。

为了验证 MJO 维持时间与中国南方降雨日数关系的时间平稳性，进一步给出长江中下游流域（图 4、5 的红色方框内）夏季平均的降水日数、MJO

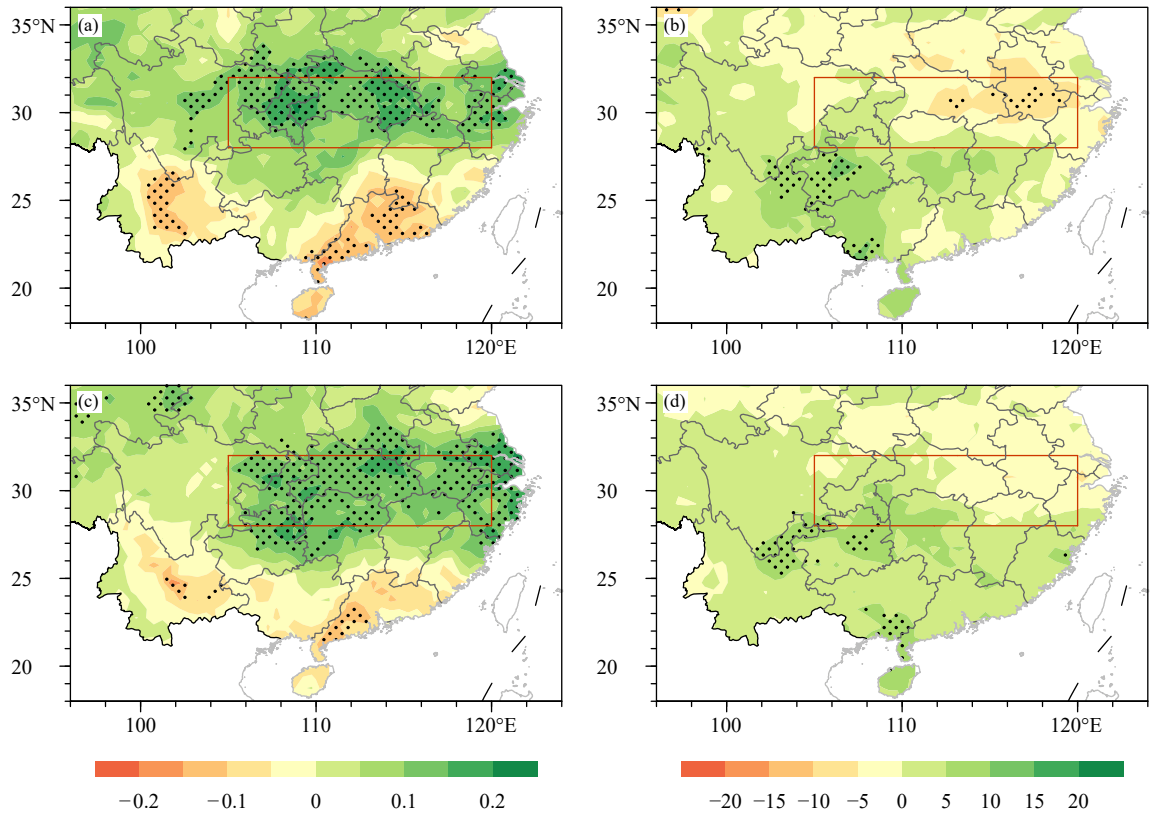


图 4 夏季 MJO 1—3 位相（a）活跃日数和（b）平均强度回归的中国南方地区台站降水日数;（c）、（d）与（a）、（b）类似但为 CPC 格点降水资料（打点部分为通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 4 Precipitation days regressed onto MJO (a) active days and (b) average intensity during phases 1—3 based on station data in southern China; (c), (d) are same as (a), (b) but based on global unified gauge-based analysis of daily precipitation (The black dots represent values above the 90% confidence level)

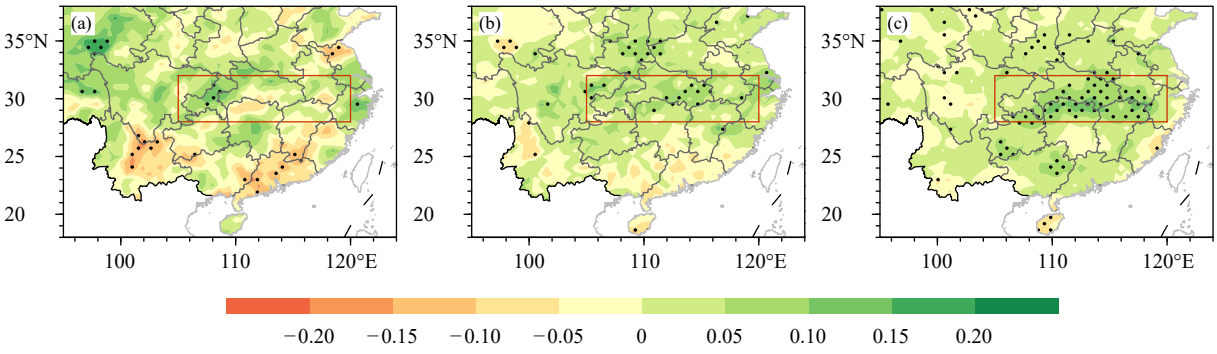


图 5 夏季 MJO 位于 1—3 位相日数回归的不同量级（a. 小雨, b. 中雨, c. 大雨及以上）的降水日数（打点部分为通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 5 Regressions of light precipitation days (a), moderate precipitation days (b), and heavy precipitation days (c) on MJO active days during phases 1—3 in 1980—2000 (The black dots represent values above the 90% confidence level)

1—3 位相活跃日数及 MJO 1—3 位相活跃日数与 10 a 高通滤波的总降水、各个不同量级降水日数之间的 11 a 滑动相关（图 6）。可以看到 MJO 在印度洋地区的活跃日数与长江中下游地区的滑动相关在 2000 年前并不显著，但自 1980 年以来相关关系不断地增强，大约在 2000 年之后两者的联系变得显著，MJO 对长江中下游地区降水日数的影响存在着明显的年代际变化。2000 年后 3 个量级的降水

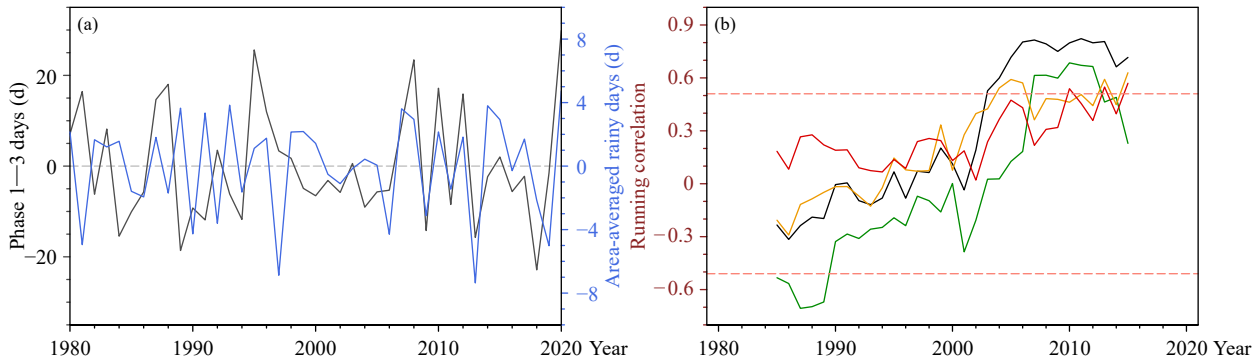


图 6 （a）夏季 MJO 位于 1—3 位相的活跃日数（黑色实线）与长江中下游区域（28°—32°N, 105°—120°E）平均降水日数（蓝色实线）的演变，（b）夏季 MJO 位于 1—3 位相的活跃日数分别与 10 a 高通滤波的长江中下游区域总降水日数（黑线）、小雨日数（绿线）、中雨日数（黄线）、大雨日数（红线）的 11 a 的滑动相关（水平红色虚线为相关系数 90% 信度水平临界线）

Fig. 6 （a）Evolution of MJO active days during phases 1—3 (black solid line) and area-averaged precipitation days (blue solid line) over the middle and lower reaches of the Yangtze River (28°—32°N, 105°—120°E), (b) 11-year running correlation between MJO active days and light (green line), moderate (yellow line), heavy (red line), and total (black line) precipitation days (the red dash line indicates the 90% confidence level)

日数与 MJO 活跃日数的相关都有所增强，对总降水日数相关关系的增强均有影响。MJO 活跃日数与小雨日数的关系在 2010 年前后相关较强，但总体来看并不稳定，在 2000 年后急剧上升，而近年来又急剧下降；相比之下，与大雨和中雨日数的关系没有很大的波动，关系稳步上升。

由于 3 个量级的降水均不能单独主导总降水日数与 MJO 活跃日数关系的改变，故仍以 MJO 印度洋活跃日数与总降水日数的相关关系为基准，两者的关系大约在 2000 年前后由不显著变得显著，由此将研究时段划分为 1980—2000 年和 2001—2020 年两个时期，分别探究 MJO 日数与中国南方降水日数在两个年代的联系及差异的空间分布（图 7），可以看到，在前一个时间段 MJO 印度洋活跃日数与长江中下游地区的降水日数的空间分布上没有明显的信号，但是自 2001 年开始两者的关系呈现显著的正相关。值得一提的是，华南地区的降水日数与 MJO 在印度洋的活跃日数的关系则与长江中下游地区相反，呈显著的负线性相关，这可能与 MJO 相关的大尺度环流结构有关。同时也分析了 MJO 印度洋活跃天数对不同强度等级降雨日数的影响（图 8）。可以看到，1980—2000 年 MJO 在 1—3 位相的活跃日数与长江中下游地区各个不同量级的降水日数的关系均不显著，说明这一时段

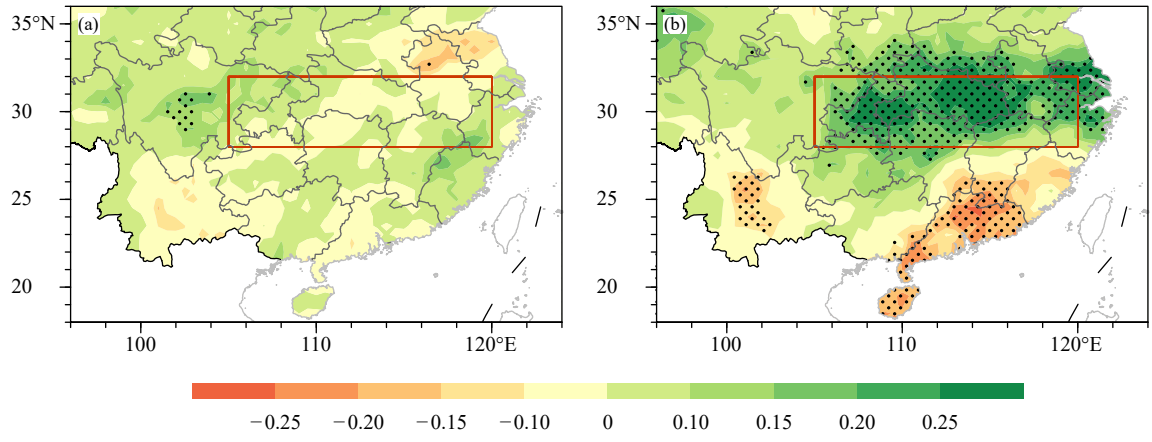


图 7 1980—2000 年（a）和 2001—2020 年（b）夏季 MJO 1—3 位相停留日数回归的中国南方地区降水日数（打点部分为通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 7 Precipitation days regressed onto MJO active days during phases 1—3 for (a) 1980—2000 and (b) 2001—2020 (The black dots represent the values above the 90% confidence level)

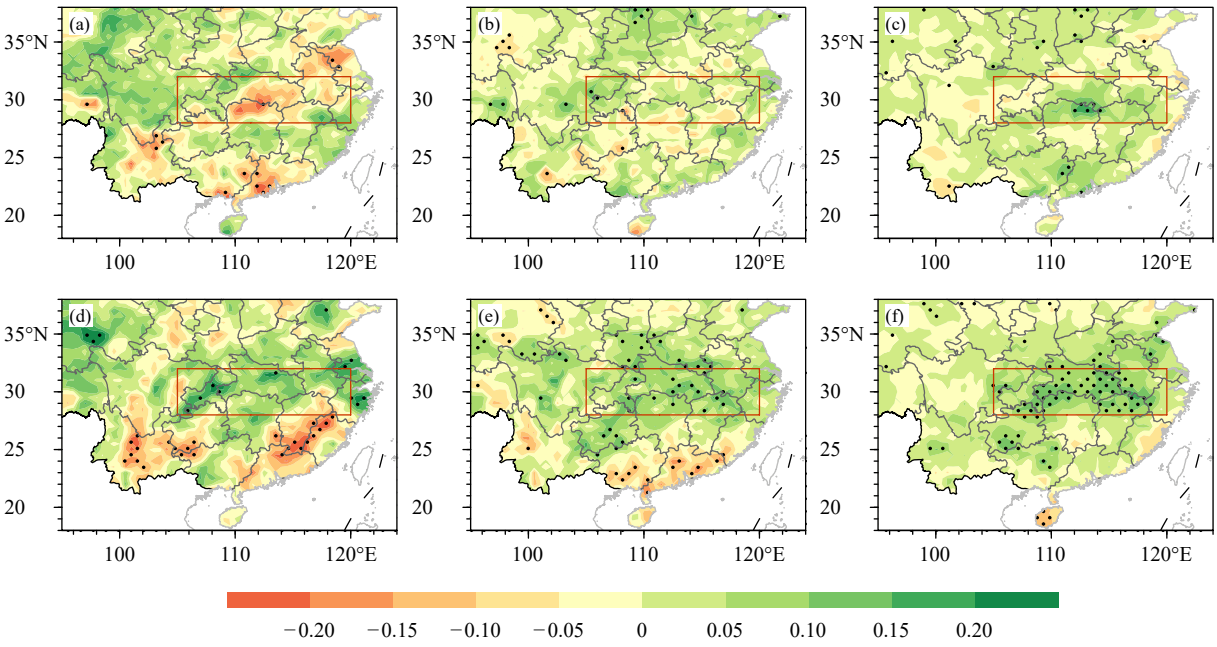


图 8 1980—2000 年（a—c）和 2001—2020 年（d—f）夏季 MJO 1—3 位相停留日数回归的小雨（a、d）、中雨（b、e）和大雨及以上（c、f）日数的空间分布（打点部分为通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 8 Regressions of light precipitation days (a, d), moderate precipitation days (b, e), and heavy precipitation days (c, f) onto MJO active days during phases 1—3 from 1980 to 2000 (a—c) and 2001 to 2020 (d—f) (The black dots represent the values above the 90% confidence level)

MJO 活跃日数的年际变率并不能显著地调制长江中下游地区降水日数的年际变化。但是自 2001 年以来，MJO 活跃日数与长江中游地区中雨量级能够呈现比较好的正线性相关关系，而长江中下游的大部分地区大雨以上的降水日数都对 MJO 1—3 位相的活跃日数有很好的响应，几乎都呈现了显著的正线性相关。此外也能看到在华南地区和云南省部分地区小雨和中雨降水日数与 MJO 在印度洋地区活跃日数呈负相关关系，这可能与夏季季风的推移位置有关。总而言之，MJO 在印度洋活跃日数与中国长江中下游区域降水日数的联系并不是一直都很稳定的，而是存在年代际变化，在 2000 年之后才能够观测到显著的关系，前文中两者显著的正线性相关关系也主要来源于 2000年之后的贡献。

5 MJO 在印度洋的活跃日数和长江中下游地区降水日数年代际变化的可能原因

已有的一些研究工作（Jones, et al, 2006; Yamaura, et al, 2017）指出，MJO 自身的强度可能存在年代际变化，进而可能影响其大气的遥相关型。因此，首先考虑 MJO 本身的变化对两者关系转折的影响。从 1980—2000 年和 2001—2020 年两个时段 MJO 在 1—3 位相 850 hPa 环流场及两者的差异（图 9）可以看到，这两个时段异常的风场和对流的差异主要出现在热带，而在本研究关注的长江中下游区域（图中紫色线区域）并没有明显的差别。这说明两个时段 MJO 本身对流强度变化对长江流域相关的垂直对流以及水汽输送等条件影响不大，不会显著增强长江流域的降水与 MJO 的关系。

考虑到热带海温对中国夏季降水的重要调制作用，进而探讨热带海温状况的变化在两者关系年代际转变中的作用。大量研究证明，同期夏季印度洋海温模态与中国夏季季风降水有很好的对应关系，印度洋的海温不仅可以表征前一年冬季 ENSO 信号的影响，也可能产生独立于 ENSO 的海温异常从而调制中国降水的年际变率。因此，选用印度洋区域（20°S—20°N, 40°—110°E）平均海温对中国南方不同降水等级的日数进行回归（图 10）。有趣的是，印度洋对于长江流域大雨以上降水日数的调制仅仅出现在前一时段，两者的关系在后一时段变得不显著。进一步对印度洋海温变率的活跃度进行分析，给出夏季印度洋海温两个时段变率的方差及

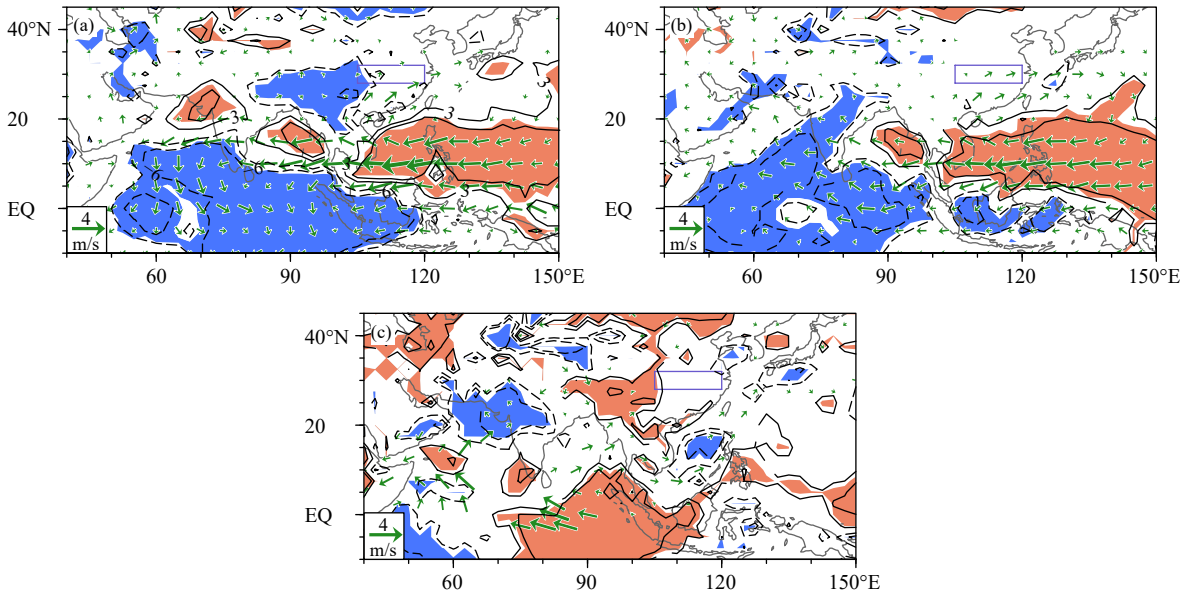


图 9　1980—2000 年（a）和 2001—2020 年（b）两个时段 MJO 位于 1—3 位相时的 OLR 场（等值线，单位：W/m²）和风场（矢线，单位：m/s）异常，以及（c）两个时段的差值场（（b）与（a）之差；阴影为 OLR 场通过 90% 信度水平的区域，风场仅给出通过 90% 信度水平的部分）

Fig. 9　Composites of 850 hPa wind (vectors, m/s) and OLR (contours, W/m²) anmalies in phases 1—3 during 1980—2000 (a) and 2001—2020 (b), and (c) their difference (Shadings represent OLR anomalies above the 90% confidence level, and the wind anomalies are shown only when the zonal or meridional wind anomalies are significant at the 90% confidence level)

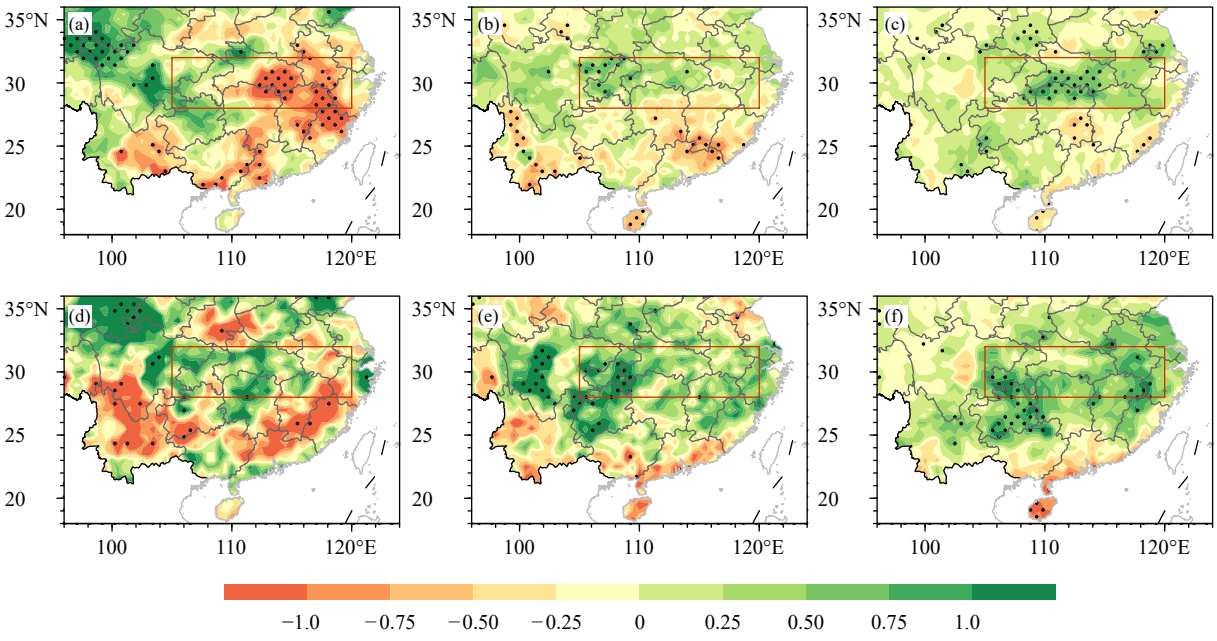


图 10　1980—2000 年（a—c）和 2001—2020 年（d—f）夏季印度洋区域（20°S—20°N，40°—110°E）平均海温回归的小雨（a、d）、中雨（b、e）和大雨及以上（c、f）日数的空间分布（打点部分为通过 90% 信度水平的区域）

Fig. 10　Precipitation days of (a, d) light precipitation days, (b, e) moderate precipitation days, and (c, f) heavy precipitation days regressed onto area-averaged sea surface temperature over the Indian Ocean (20°S—20°N, 40°—110°E) from 1980 to 2000 (a—c) and 2001 to 2020 (d—f) (The black dots represent values above the 90% confidence level)

差异（图 11），可以看到在进入 21 世纪以来，印度洋海域几个海盆中的海温年际方差都有显著的减弱，导致热带印度洋海温信号对中国夏季降水年际变率的影响减弱，即印度洋海温对中国降水年际变率

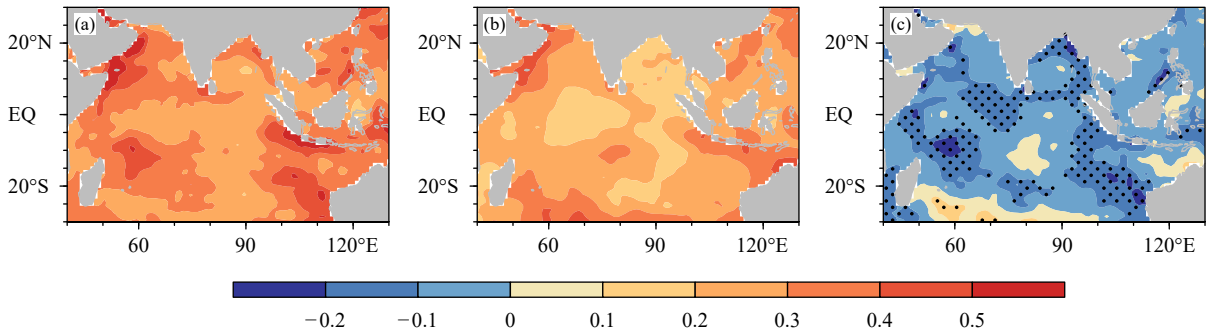


图 11 印度洋地区 1980—2000 年(a)和 2001—2020 年(b)海温标准差(单位:°C),以及(c)两个时段的差值((b)与(a)之差,打点部分为通过 90% 信度水平的区域)

Fig. 11 Standard deviations of sea surface temperature (unit: °C) over the Indian Ocean in (a) 1980—2000, (b) 2001—2020 and (c) their differences (The black dots in (c) represent values above the 90% confidence level)

调制作用在减弱,使得在海洋对于气候的调控作用不断减弱的情况下,MJO 作为热带大气季节内尺度上最稳定信号的作用可以逐渐凸显出来。在这种情况下,MJO 不仅仅可以作为季节内预报的因子,其季节平均的信号也能够对季节性的气候异常产生影响。

6 总结与讨论

本研究讨论了夏季 MJO 在印度洋地区的活跃日数与中国长江中下游区域降水日数的关系,得出的主要结论如下:(1)MJO 在印度洋地区(1—3 位相)活跃的时间与长江中下游地区的降水日数有显著的线性对应关系。MJO 在印度洋活跃的时间越长,长江中下游地区降水日数越多,进一步分析发现,MJO 对于降雨日数的调控仅体现在大雨及以上等级的日数上,对于小到中雨量级的降水日数影响不明显。(2)通过对不同年代的结果进行对比分析,发现印度洋 MJO 活跃日数对于长江流域降水日数的调控在 2000 年之前并不明显,在这一时段海洋的年际变率起主导作用;2001 年以后,MJO 的作用才逐渐凸显出来,取代印度洋海温的年际变率成为影响长江中下游降水日数更重要的因子。

文中主要利用统计的方法探索了夏季 MJO 在印度洋地区维持日数对中国降水日数年际变化的影响,近年来中国对于 MJO 的监测、预报业务也有了较高的技巧(何金海等,2013;任宏利等,2015;Ren, et al, 2018),因此本研究结果对于今后延伸期预报以及短期气候预测都有一定的指示意义。然而,MJO 作为一种大气内部过程占主导的季节内变化,如何预报其季节平均活跃天数并将这种大气的信号应用到实际的业务预测中,仍然需要进一步探究。此外,本研究主要关注 MJO 活跃日数对降水日数年际变率的影响以及年际影响的年代际变化,在全球变暖背景或海温背景发生年代际转变时,MJO 的活动情况及对中国天气和气候影响也会发生改变。因此,MJO 对中国天气、气候影响的作用在长期趋势与年际变化背景下的改变情况也有待进一步研究。另外,基于简单的统计指出,MJO 活跃日数对长江中下游地区降水影响年代际变化可能与印度洋海温年际变率的年代际减弱有关,然而其背后的物理机制仍需进一步深入分析。

参考文献

白旭旭, 李崇银, 谭言科等. 2011. MJO 对我国东部春季降水影响的分析. 热带气象学报, 27(6): 814-822. Bai X X, Li C Y, Tan Y K, et al. 2011. Analysis of the Madden-Julian oscillation impacts on the spring rainfall in East China. J Trop Meteor, 27(6): 814-822 (in Chinese)

陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬夏季风循环的影响. 大气科学, 26(5): 595-610. Chen W. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. Chinese J Atmos Sci, 26(5): 595-610 (in Chinese)

丁一汇, 梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报. 气象, 36(7): 111-122. Ding Y H, Liang P. 2010. Extended range forecast basing on MJO. Meteor Mon, 36(7): 111-122 (in Chinese)

何金海, 梁萍, 孙国武. 2013. 延伸期预报的思考及其应用研究进展. 气象科技进展, 3(1): 11-17. He J H, Liang P, Sun G W. 2013. Consideration on extended-range forecast and its application study. Adv Meteor Sci Technol, 3(1): 11-17 (in Chinese)

黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 18(4): 465-476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. 1999.

The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in north China. Plateau Meteor, 18(4): 465-476 (in Chinese)

靳振华, 管兆勇. 2013. 海洋性大陆区域 OLR 的气候低频振荡及其与中国降水的可能联系. 热带气象学报, 29(5): 705-716. Jin Z H, Guan Z Y. 2013. The climatological low-frequency oscillations in Maritime Continent region and their possible relations with precipitation changes in China. J Trop Meteor, 29(5): 705-716 (in Chinese)

李海燕, 张文君, 何金海. 2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响. 气象学报, 74(3): 322-334 Li H Y, Zhang W J, He J H. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China. Acta Meteor Sinica, 74(3): 322-334. (in Chinese)

李汀, 严欣, 琚建华. 2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响. 大气科学, 36(6): 1101-1111. Li T, Yan X, Ju J H. 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan. Chinese J Atmos Sci, 36(6): 1101-1111 (in Chinese)

李文铠, 何金海, 祁莉等. 2014. MJO 对华南前汛期降水的影响及其可能机制. 热带气象学报, 30(5): 983-989. Li W K, He J H, Qi L, et al. 2014. The influence of the Madden-Julian oscillation on annually first rain season precipitation in South China and its possible mechanism. J Trop Meteor, 30(5): 983-989 (in Chinese)

龙振夏, 李崇银. 1999. ENSO 对其后东亚季风活动影响的 GCM 模拟研究. 气象学报, 57(6): 651-661. Long Z X, Li C Y. 1999. Numerical simulation of the ENSO influences on East-Asian monsoon activities afterwards. Acta Meteor Sinica, 57(6): 651-661 (in Chinese)

任宏利, 吴捷, 赵崇博等. 2015. MJO 预报研究进展. 应用气象学报, 26(6): 658-668. Ren H L, Wu J, Zhao C B, et al. 2015. Progresses of MJO prediction researches and developments. J Appl Meteor Sci, 26(6): 658-668 (in Chinese)

陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气科学, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. Sci Atmos Sinica, 22(4): 399-407 (in Chinese)

王慧, 丁一汇, 何金海. 2005. 西北太平洋夏季风的气候学研究. 气象学报, 63(4): 418-430. Wang H, Ding Y H, He J H. 2005. The climate research of summer monsoon over the western North Pacific. Acta Meteor Sinica, 63(4): 418-430 (in Chinese)

吴捷, 任宏利, 赵崇博等. 2016. 国家气候中心 MJO 监测预测业务产品研发及应用. 应用气象学报, 27(6): 641-653. Wu J, Ren H L, Zhao C B, et al. 2016. Research and application of operational MJO monitoring and prediction products in Beijing Climate Center. J Appl Meteor Sci, 27(6): 641-653 (in Chinese)

杨明珠, 丁一汇, 李维京等. 2007. 印度洋海表温度主模态及其与亚洲夏季季风的关系. 气象学报, 65(4): 527-536. Yang M Z, Ding Y H, Li W J et al. 2007. Leading mode of Indian ocean SST and its impacts on Asian summer monsoon. Acta Meteor Sinica, 65(4): 527-536 (in Chinese)

张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 61(5): 559-568. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. Acta Meteor Sinica, 61(5): 559-568 (in Chinese)

Bagtasa G. 2020. Influence of Madden-Julian oscillation on the intraseasonal variability of summer and winter monsoon rainfall in the Philippines. J Climate, 33(22): 9581-9594

Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. 2021. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies. Adv Atmos Sci, 38(12): 1980-1993

Donald A, Meinke H, Power B, et al. 2006. Near-global impact of the Madden-Julian oscillation on rainfall. Geophys Res Lett, 33(9): L09704

Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. Quart J Roy Meteor Soc, 106(449): 447-462

Hsu P C, Li T, You L J, et al. 2015. A spatial-temporal projection model for 10-30 day rainfall forecast in South China. Climate Dyn, 44(5/6): 1227-1244

Hsu P C, Qian Y T, Liu Y, et al. 2020. Role of abnormally enhanced MJO over the western Pacific in the formation and subseasonal predictability of the record-breaking Northeast Asian heatwave in the summer of 2018. J Climate, 33(8): 3333-3349

Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al. 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China. Adv Atmos Sci, 28(3): 521-533

Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. 2004. Global occurrences of extreme precipitation and the Madden-Julian oscillation: Observations and predictability. J Climate, 17(23): 4575-4589

Jones C, Carvalho L M V. 2006. Changes in the activity of the Madden-Julian oscillation during 1958-2004. J Climate, 19(24): 6353-6370

Kim K M, Lau K M. 2001. Dynamics of monsoon-induced biennial variability in ENSO. Geophys Res Lett, 28(2): 315-318

Lau K M, Chan P H. 1985. Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern winter as inferred from outgoing longwave radiation. Mon Wea Rev, 113(11): 1889-1909

Lau K M, Yang G J, Shen S H. 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. Mon Wea Rev, 116(1): 18-37

Liang P, Hu Z Z, Ding Y H, et al. 2021. The extreme Mei-yu season in 2020: Role of the Madden-Julian oscillation and the cooperative influence of the Pacific and Indian Oceans. Adv Atmos Sci, 38(12): 2040-2054

Lu W, Hsu P C. 2017. Factors controlling the seasonality of the Madden-Julian oscillation. Dyn Atmos Oceans, 78: 106-120

Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al. 2012. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010. Sci China Earth Sci, 55(1): 98-112

Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. J Atmos Sci, 28(5): 702-708

Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in

the tropics with a 40-50 day period. J Atmos Sci, 29(6): 1109-1123

Mao J Y, Sun Z, Wu G X. 2010. 20-50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western north Pacific and South China Sea. Climate Dyn, 34(5): 747-761

Ren H L, Ren P F. 2017. Impact of Madden-Julian oscillation upon winter extreme rainfall in Southern China: Observations and predictability in CFSv2. Atmosphere, 8(10): 192

Ren P F, Ren H L, Fu J X, et al. 2018. Impact of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in Southeastern China and its predictability in CFSv2. J Geophys Res: Atmos, 123(9): 4423-4442

Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. 2015. Combination mode dynamics of the anomalous Northwest Pacific anticyclone. J Climate, 28(3): 1093-1111

Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. 2003. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. Bull Amer Meteor Soc, 84(1): 33-50

Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?. J Climate, 13(9): 1517-1536

Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. Mon Weat Rev, 132(8): 1917-1932

Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño. J Climate, 22(3): 730-747

Yamaura T, Kajikawa Y. 2017. Decadal change in the boreal summer intraseasonal oscillation. Climate Dyn, 48(9-10): 3003-3014

Yang H, Li C Y. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang-Huaihe River Basin. Adv Atmos Sci, 20(4): 540-553

Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. Geophys Res Lett, 34(2): L02708

Yasunari T. 1979. Cloudiness fluctuations associated with the northern hemisphere summer monsoon. J Meteor Soc Japan, 57(3): 227-242

Zhang C D. Dong M 2004. Seasonality in the Madden-Julian oscillation. J Climate, 17(16): 3169-3180

Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. 2009. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in Southeast China. J Climate, 22(2): 201-216

Zhang W J, Jin F F, Stuecker M F, et al. 2016. Unraveling El Niño's impact on the East Asian monsoon and Yangtze river summer flooding. Geophys Res Lett, 43(21): 11375-11382

Zhang W J, Huang Z C, Jiang F, et al. 2021. Exceptionally persistent Madden-Julian oscillation activity contributes to the extreme 2020 East Asian summer monsoon rainfall. Geophys Res Lett, 48(5): e2020GL091588