

郝立生, LI Tim, 马宁, 等. 2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 44(3): 639–656. HAO Lisheng, LI Tim, MA Ning, et al. 2020. Influence of MJO on Summer Precipitation in North China in 2018 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 639–656. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19217

MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响

郝立生¹ LI Tim² 马宁¹ 梁苏洁¹ 谢均¹

¹ 天津市气候中心, 天津 300074

² 夏威夷大学马诺分校国际太平洋研究中心/大气科学学院, 美国夏威夷火奴鲁鲁 96822

摘 要 本文基于华北夏季降水资料和热带大气季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, 简称 MJO) 指数、NCEP/NCAR (美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心) 再分析环流资料, 采用多种统计方法分析 MJO 与 2018 年华北夏季降水的关系及影响机制。结果表明: (1) MJO 与华北夏季降水有密切的联系。虽然 MJO 不能移到较高纬度直接影响华北夏季降水, 但 MJO 对流区的气旋会在其北侧激发出反气旋环流, 这对“气旋—反气旋对”在缓慢东移过程中, 处于较高纬度的反气旋会直接影响华北夏季降水。即 MJO 会间接影响华北夏季降水, 表现为当夏季 MJO 进入 5、6 位相时, 华北地区夏季会出现明显降水过程, 但降水强弱与 MJO 振幅大小有关。(2) 影响机制方面。在 850 hPa, 伴随 MJO 的“气旋—反气旋对”的东移, 它会造成华北夏季偏南风水汽输送加强 (对应 RMM1) 或东南风水汽输送加强 (对应 RMM2), 从而有利于降水过程发生。在 500 hPa 层, MJO 通过中层扰动向中高纬的传播, 诱导副热带高压移到朝鲜半岛附近并加强, 对西来高空槽形成阻挡作用, 有利于华北地区产生上升运动, 从而有利于华北夏季降水过程发生。(3) 可以用 MJO 制作华北夏季延伸期降水过程预报。

关键词 MJO 华北 夏季降水 影响机制 延伸期预报

文章编号 1006-9895(2020)03-0639-18

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19217

Influence of MJO on Summer Precipitation in North China in 2018

HAO Lisheng¹, LI Tim², MA Ning¹, LIANG Sujie¹, and XIE Jun¹

¹ Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

² International Pacific Research Center (IPRC)/Department of Atmospheric Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, USA

Abstract On the basis of the summer precipitation data from North China, the Madden-Julian Oscillation (MJO) index, and a reanalysis of the circulation data from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research using statistical methods, this study analyzed the relationship between the MJO and summer precipitation in North China in 2018 and its influence mechanism. Results show the following: (1) The MJO is closely related to the summer precipitation in North China. Although the MJO cannot move to a higher latitude and directly affect the summer precipitation in North China, the cyclone in the MJO convective region will trigger an anticyclonic circulation to the north. During the slow eastward movement of the cyclone–anticyclone pair, the anticyclone at a higher latitude will directly affect the summer precipitation in North China; that is, the MJO will indirectly affect the summer precipitation in

收稿日期 2019-09-20; **网络预出版日期** 2019-12-19

作者简介 郝立生, 男, 1966 年出生, 博士/研究员, 主要从事华北旱涝演变机理及预测技术研究。E-mail: hls54515@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41875069、41805058

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41875069, 41805058)

North China. When the MJO is in phases 5 and 6, there will be an obvious precipitation weather process in North China in summer. However, the precipitation intensity is related to the amplitude of the MJO. (2) In terms of the influence mechanism. At 850 hPa, along with the eastward movement of the MJO's cyclone–anticyclone pair, the south wind water vapor transport (corresponding to RMM1) or the southeast wind water vapor transport (corresponding to RMM2) in summer in North China will be enhanced, which is beneficial to the precipitation weather process. At 500 hPa, the propagation of the MJO disturbance to the mid–high latitude will induce the subtropical high to move to the vicinity of the Korean Peninsula and strengthen it so that it will act as a barrier to the westerly trough and be favorable to the ascending motion in North China. Therefore, this is beneficial to the occurrence of summer weather precipitation in North China. (3) The MJO can be used to provide extended-range forecasts for summer precipitation in North China.

Keywords Madden–Julian Oscillation, North China, Summer precipitation, Influence mechanism, Extended-range forecast

1 引言

由于社会对 10~30 d 天气预报（简称：延伸期预报）的迫切需求，使得有关延伸期天气预报技术研究成为国际关注的重要课题之一（Hoskins, 2013）。由于理论上还不很成熟，作好延伸期预报还存在较多困难，是天气、气候“无缝隙预报”中的难点（Newman et al., 2003; 杨秋明, 2015; 章大全等, 2019）。研究表明，大气季节内振荡（Intraseasonal Oscillation，简称 ISO）被认为是连接天气和气候的直接纽带，利用 ISO 来开展延伸期预报应该是可行的（Waliser et al., 1999; Jones et al., 2004a; Webster and Hoyos, 2004; Leroy and Wheeler, 2008; 琚建华等, 2010; Kang and Kim, 2010; Yao et al., 2011; 杨秋明等, 2012; Rodney et al., 2013; Zhang, 2013）。进一步研究发现，整个热带大气乃至全球大气都存在着 30~60 d 的准周期振荡，并被视为大气低频变化的主要特征，将其称之为季节内振荡（ISO），后来一些学者将热带地区大气季节内振荡称之为 MJO（Madden–Julian Oscillation，简称 MJO）。

MJO 是热带地区大气低频变化最显著的信号（Madden and Julian, 1971, 1972, 1994），时间尺度为 30~60 d，主要表现为对流活动从热带西印度洋开始并逐渐向东传播，一个完整的 MJO 周期为 45 d 左右，它具有缓慢东传和北传的特征（Lau and Chan, 1986; Madden and Julian, 1994; Chen and Wang, 2018a, 2018b）。MJO 强度变化特征、传播特征在不同季节会有明显的不同，各个位相的振幅和出现频率的年际变化也不尽相同（Wang et al., 2018; Zheng and Chang, 2019）。由于其对全球天

气和气候的广泛影响，MJO 已成为开展天气预报与气候预测之间无缝隙预报的重要指标（Ferranti et al., 1990; Waliser et al., 2003; 梁萍和丁一汇, 2012; 吕俊梅等, 2012; Zhang, 2013; 林爱兰等, 2016）。

MJO 可以影响全球许多地区的降水，包括亚洲季风区（Lau and Chan, 1986; Sui and Lau, 1992; Lawrence and Webster, 2002; Barlow et al., 2005; Jeong et al., 2008; Li et al., 2012; Jia and Liang, 2013; Bai et al., 2013; 马婷婷等, 2014; 吴捷等, 2018）、澳大利亚季风区（Hendon et al., 1990a, 1990b; Wheeler et al., 2009）、北美（Jones, 2000; Maloney and Hartmann, 2000; Higgins and Shi, 2001; Bond and Vecchi, 2003; Zhao et al., 2019）、南美和非洲等地区（Liebmann et al., 2004; Matthews, 2004）。国内，关于 MJO 对降水的影响及预测技术研究主要集中在我国西南、华南、长江中下游等地区。吴捷等（2018）综合分析认为，MJO 对流位于印度洋（2~3 位相）时，我国南方和长江流域降水偏多；MJO 对流位于西太平洋（6~7 位相）时，我国南方和长江流域降水偏少。对于中国夏季降水，热带中、东印度洋 MJO 指数的持续异常对云南夏季降水有明显的影响（李汀等, 2012）。袁媛等（2017）对比 2016 年和 1998 年夏季降水发现，1998 年 8 月 MJO 主要活跃在印度洋地区，造成 1998 年夏季风在 8 月出现明显减弱，长江流域发生“二度梅”；而 2016 年 8 月 MJO 异常活跃并长时间维持在西太平洋地区，夏季风在 8 月较强，长江流域高温少雨。机制分析（Zhang et al., 2009）表明，当 MJO 主体位于印度洋地区时，MJO 可以通过影响低层西风急流的波导效应向下游影响到中国东南部地区，造成该地区夏季降水偏多；当 MJO 主体位于西太平

洋地区时, 可以造成经向环流的上升支向北偏移, 将导致西北太平洋副高的东撤以及中国东南部地区水汽输送减弱, 我国东南部地区夏季降水减少。李文铠等 (2014) 认为, MJO 活跃 (受抑) 对流可通过激发 Rossby 波影响华南前汛期降水。李永华等 (2016) 认为, 当 MJO 处于第 4 (第 6) 位相时, 由于西太平洋副热带高压位置偏南 (偏北)、向西南地区东部的水汽输送偏多 (偏少), 在异常上升 (下沉) 气流影响下, 西南地区东部夏季降水偏多 (偏少)。数值模拟 (李崇银等, 2013) 表明, MJO 活动不同位相的强对流会在东亚/西北太平洋地区激发产生不同形势的遥响应 (Rossby 波列), 导致在中国不同地区出现有利 (或不利) 降水的环流形势和条件, 这是 MJO 活动影响中国降水的主要机制。

MJO 被认为是开展延伸期预报非常重要的信号 (Jones et al., 2004b; 丁一汇和梁萍, 2010; Zhang, 2013; 李崇银等, 2013, 2016; Li, 2014; 任宏利等, 2015), 已被广泛应用到相关研究和业务建设中。自 Madden and Julian (1971, 1972) 首次提出热带大气中存在的低频振荡以来, 对 MJO 的研究已取得显著进展。Zhang (2013) 综合分析发现, 在全球范围内, 几乎没有任何一种现象像 MJO 这样与天气、气候有着非常密切的联系。任宏利和沈雨琦 (2016) 也认为, 在次季节时间尺度上, MJO 是全球气候变率的首要模态。MJO 不仅对热带天气、气候产生直接影响, 还能够通过传播和激发大气遥相关等方式对热带外地区产生重要影响, 成为目前次季节—季节气候预测最重要的可预报性来源。如果不增进对 MJO 的认识, 不提高对 MJO 的预测能力, 就无法满足社会对天气和气候预测的需要 (Waliser et al., 2003), 更无法满足世界气象组织提出的建立“无缝隙预报”业务发展需要 (Vitart et al., 2017)。

中国东部处于东亚副热带季风区, 旱、涝灾害等极端气候事件时有发生, 尤其夏季降水的变化倍受关注 (齐艳军和张人禾, 2015; 郝立生和侯威, 2018)。Lau et al. (1988) 认为中国东部夏季雨带南北变化与 30~60 d 的大气季节内振荡密切相关 (Wang and Xu, 1997)。在北半球夏季, 东传的 MJO 在赤道东印度洋有显著的向北传播, 因此, 中国东部夏季降水常常受到来自于热带地区向北传播的 MJO 和受到中高纬低频环流的共同影响 (齐

艳军和张人禾, 2015)。由于发展延伸期预报业务的需要, 近些年来关于 MJO 活动对中国夏季降水的影响研究逐渐增多, 归纳起来认为, 在 MJO 活动的前几个位相, 常常对应着中国东南部夏季降水偏多, 而在 MJO 活动的后几个位相, 中国东南部夏季降水则偏少。而且前期大量研究集中在 MJO 对我国西南、华南、长江中下游降水的影响及预测技术方面, 关于 MJO 对华北夏季降水的影响及预测技术研究非常少。2018 年华北夏季降水明显偏多, 出现三次明显降水过程, 平均约 30 d 出现一次, 为何表现出这样的特征, 是不是受某些低频信号影响, 值得探讨。本文选择该年作为样例分析 MJO 与华北降水的关系, 以便认识 MJO 对华北夏季降水的影响机制, 找出普遍性的规律, 为改进延伸期预测技术提供参考依据。

2 资料与方法

本文所用资料: (1) 日降水资料。使用国家气象信息中心提供的 1979~2018 年全国 2400 站逐日降水资料, 均作了 11 天滑动平均处理, 滤掉天气尺度扰动成分。其中, 2018 年华北夏季逐日降水量序列是 95 站 (河北 72 站、北京 14 站、天津 9 站) 平均值。(2) 环流资料。使用美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心 (简称 NCEP/NCAR) 联合制作的再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 从美国国家海洋和大气管理局 (简称 NOAA) 的官方网站 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/index.html> [2019-07-01] 下载。资料水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 选用时段为 2018 年 5~9 月逐日资料, 要素为 850 hPa 层的 u (纬向风)、 v (经向风), 500 hPa 层的 h (位势高度) 等。(3) 向外长波辐射 (Outgoing Longwave Radiation, 简称 OLR) 资料。资料水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 选用时段为 2018 年 5~9 月逐日资料, 从 NOAA 的官方网站 <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/index.html> [2019-07-01] 下载。(4) 热带大气季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, 简称 MJO) 指数资料。采用澳大利亚气象局提供的 RMM 实时多变量 MJO 指数 (All-Season Real-Time Multivariate MJO index), 该指数从澳大利亚气象局官方网站 <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/> [2019-07-01] 下载。该指数由 Wheeler and Hendon (2004) 提出, 利用 15°S – 15°N 范围的 850 hPa 纬向风 (u_{850})、

200 hPa 纬向风 (u_{200}) 及 OLR 三个变量进行多变量经验正交函数 (EOF) 分解, 滤出季节内尺度信号, 提取得到前两个主分量 EOF1、EOF2。将每日的三个要素资料 (OLR、 u_{850} 、 u_{200}) 投影到多变量 EOF1、EOF2 上, 得到表征赤道 MJO 活动 (传播位相和强度) 的时间序列 RMM1 (PC1) 和 RMM2 (PC2)。这两个时间系数的平方和的平方根即为 RMM 指数的振幅, 表示 MJO 的强度, 振幅大于 1 的 MJO 被认为是“活跃 MJO”。此外, 根据 RMM1 与 RMM2 的正负和相对大小可将 MJO 划分为 8 个位相, 1~3 位相时, 对流活动中心位于印度洋, 4~5 位相时, 对流活动中心传播到海洋大陆地区, 6~7 位相时对流中心进入到西太平洋地区, 8 位相时到达中太平洋以后并最终减弱消散。

本文所用主要方法: (1) 相关分析和功率谱分析 (魏凤英, 2007)。(2) Morlet 小波分析 (郝立生和侯威, 2018)。(3) 东亚夏季风指数。因为华北夏季降水与东亚地区季风强度关系密切, 参照 Wang (2001) 的定义, 选择东亚地区华北范围 ($110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$, $30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$) 的 850 hPa 经向风来定义东亚季风指数 EAMI。(4) 欧亚遥相关型指数。根据李崇银 (2000), 选择参照点 (55°N , 20°E)、(55°N , 75°E)、(40°N , 135°E), 令某格点的 500 hPa 附近平均高度值为 $z(x, y, t)$, 计算得到欧亚遥相关型指数 EUPI。(5) 环流异常场重构。知道某单一要素时间变化序列, 可采用线性

回归方法重构前期或后期与之对应的环流异常场, 实践证明该方法是作环流异常分析的有力工具 (Wang et al., 2008; 郝立生和侯威, 2018)。设 x_i 为某要素时间序列, y_i 为要重构的环流场某一点的实际序列值, 则

$$y_i = ax_i + b, \quad (1)$$

式中, b 为重构的环流场常值, a 的空间分布即是重构的环流异常场。为了使重构的环流异常大小与实际场接近, 以便于分析, 回归计算时, 应将 x_i 作标准化处理。

3 MJO 与华北夏季降水的关系

3.1 2018 年夏季降水特征

华北地区 2018 年夏季降水有它的特殊性, 降水量偏多, 低频过程明显。2018 年夏季降水量为 394.2 mm, 比常年 (1981~2010 平均为 342 mm) 偏多 15%, 共有三次明显低频降水过程, 分别出现在 6 月 12~14 日、7 月 12~19 日、8 月 9~11 日, 平均约 30 d 出现一次 (图 1)。为了分析 2018 年夏季降水的低频变化, 对日降水量、东亚夏季风指数、欧亚遥相关型指数、MJO 的 RMM1、RMM2 指数等均作了 11 d 滑动平均处理, 滤掉了天气尺度扰动成分。

图 1 是华北 2018 年夏季逐日降水量与东亚夏季风指数 EAMI、欧亚遥相关型指数 EUPI、MJO 的指数 RMM1、RMM2 的对应变化情况。可以看到, 东亚夏季风指数、欧亚遥相关型指数与华北夏

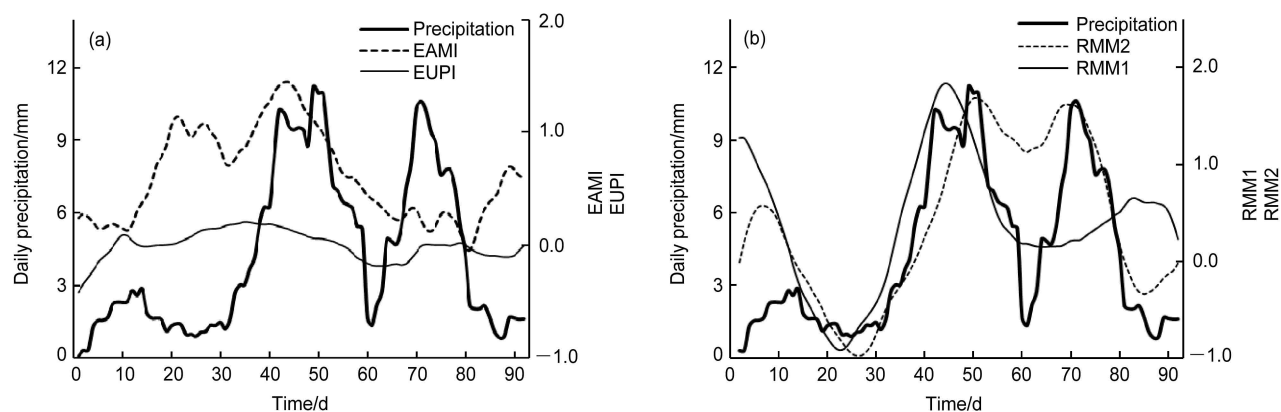


图 1 2018 年夏季 (a) 华北夏季降水量 (粗实线)、东亚夏季风指数 (虚线)、欧亚遥相关型指数 (细实线), (b) 华北夏季降水量 (粗实线)、RMM1 (细实线)、RMM2 (虚线) 逐日变化

Fig. 1 Daily variations of (a) summer precipitation (bold solid line) in North China, East Asian summer monsoon index (EAMI, dashed line), Eurasian teleconnection index (EUPI, thin solid line), and (b) summer precipitation (bold solid line) in North China, RMM1 index (thin solid line), RMM2 index (dashed line) in summer 2018

季降水量变化曲线有一定的对应关系, 但不完全一致; 而 RMM1、RMM2 变化与华北夏季降水量变化曲线有较好的对应关系。相关系数分析表明, 四个指数与华北夏季降水相关性均通过了 95% 信度水平的显著性检验, 见表 1。

图 2 是华北 2018 年夏季逐日降水量功率谱和 Morlet 小波系数分布。功率谱分析可以识别降水序列整体变化的主要周期, 而小波分析可以识别主要周期在不同时间段的表现特征。功率谱分析 (图 2a) 表明, 夏季降水最显著的功率谱在 30 d 附近, 通过了 95% 信度水平的显著性检验, 说明华北 2018 年夏季降水存在显著的 30 d 变化周期。在 Morlet 小波分析图 (图 2b) 上, 正负系数表明降水量偏多和偏少的波动情况, 阴影区通过了 95% 信度水平的显著性检验。可以看出, 华北地区 2018 年夏季降水量明显存在 30 d 左右的周期, 且在 7~8 月表现最为突出。

3.2 2018 年夏季降水影响因子比较

华北夏季降水量受东亚夏季风、中纬度环流 (欧亚遥相关型) 的影响显著, 另外 MJO 可以通

过向东向北的传播影响到向华北的水汽输送而影响我国东部降水 (Chen et al., 2001; 张庆云等, 2003; 齐艳军和张人禾, 2015)。下面进一步对比分析东亚夏季风、欧亚遥相关型、MJO 这些因子与 2018 年夏季降水的关系。

功率谱分析 (图略) 表明, 在 2018 年, 东亚夏季风主要为 20 d 左右的低频周期, 与降水变化周期不太一致; 欧亚遥相关型指数低频周期频谱较宽, 17 d 以上的周期均通过了 95% 信度水平的显著性检验; MJO 指数的 RMM1 存在 35 d 左右的显著周期; RMM2 波谱较宽, 17 d 以上的周期均通过了 95% 信度水平的显著性检验。整体上, 四个指数功率谱与降水对应关系不是很好, 这说明, 华北夏季降水可能是受多个因子共同影响的结果。前面相关分析结果 (见表 1) 也显示, 四个因子与华北 2018 年夏季降水量的相关系数均通过了 95% 信度水平的显著性检验, 说明它们可能是影响当年降水的重要因子。

为了进一步识别东亚夏季风、欧亚遥相关型、MJO 指数的 RMM1 与 RMM2 的低频周期分布情

表 1 华北 2018 年夏季逐日降水量与不同指数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between daily precipitation in North China and different indices in summer 2018

夏季逐日降水量	降水量与不同指数的相关系数			
	东亚夏季风指数(EAMI)	欧亚遥相关型指数(EUPI)	MJO的指数RMM1	MJO的指数RMM2
原始数据序列	0.2444*	0.1352	0.2278*	0.3991*
11天滑动平均序列	0.2399*	0.2559*	0.5138*	0.7645*

*表示通过了95%信度水平的显著性检验。

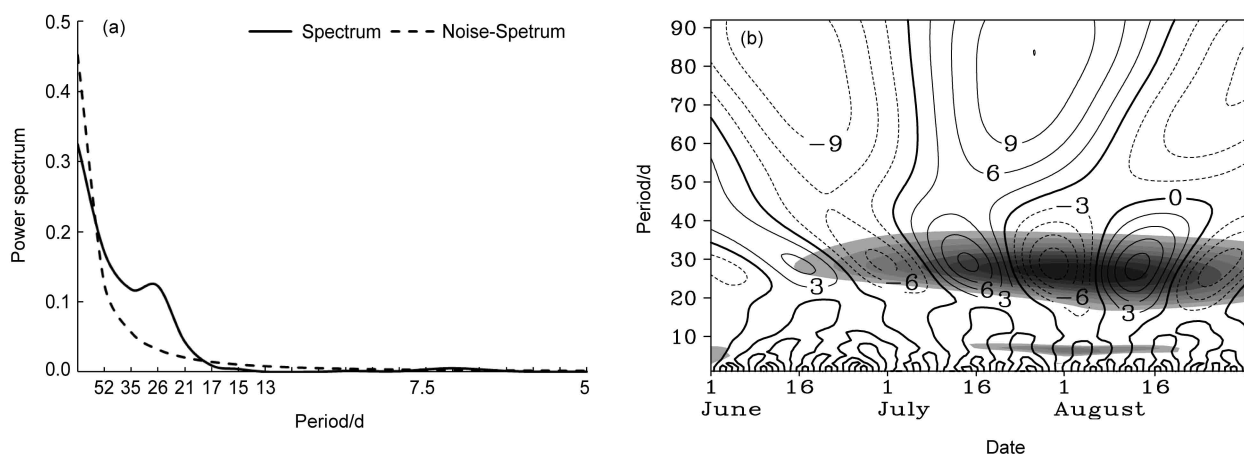


图 2 2018 年夏季华北逐日降水量 (a) 功率谱和 (b) Morlet 小波系数分布。图 b 中的阴影区通过了 95% 信度水平的显著性检验

Fig. 2 (a) Power spectrum and (b) distribution of the Morlet wavelet coefficients for summer precipitation in North China in summer 2018. The shaded areas indicate coefficients exceed the 95% confidence level

况,对四个指数分别作了 Morlet 小波分析(图3)。东亚夏季风,明显存在 25 d、60 d 低频周期,25 d 周期在 6 月至 7 月表现最突出,60 d 周期在 7 月表现最突出。欧亚遥相关型周期性特征表现不明显。RMM1 存在 35 d 左右的显著周期,在 6 月至 7 月表现最为突出。RMM2 存在 22 d、55 d 左右的显著周期,其中 55 d 周期在整个夏季表现都很突出,22 d 周期在 8 月表现突出。

综合以上可以看出,四个因子与 2018 年夏季降水量相关性显著,但与降水变化低频周期不一致,显著影响时段也不一致。所以,可以认为四个因子与华北夏季降水变化是有密切联系的,但如何影响华北夏季降水的机制可能是复杂的。已有研究表明,东亚夏季风主要通过水汽输送异常影响华北夏季降水(郝立生等,2016)。最近胡泊(2019)对欧亚遥相关型如何影响华北夏季降水作深入研究发现:北大西洋上空激发的 Rossby 波在向东传播时会形成欧亚遥相关型(EU),西北太平洋对流活动激发的 Rossby 波在向北传播时形成东亚—太平洋遥相关型(EAP),两种遥相关型在天气尺度上从发

展到衰亡大约可以持续 10~15 d,同时也具有非常显著的气候效应。在 EU 遥相关型形成过程中,向东传播的中高纬度 Rossby 波也会在东亚季风区往下游频散,进而影响到 EAP 遥相关的形成。因此,EAP 和 EU 遥相关型存在一定的相互影响。EU 型遥相关的作用使东北亚夏季降水的异常中心存在“西北—东南”的波列特征,EAP 型遥相关的作用则使夏季降水存在经向三极型或偶极型特征。通过基于 EAP 和 EU 指数对夏季降水和环流异常的二元线性模拟,进一步验证了正是 EAP 和 EU 型的协同作用,共同造成了不同配置下欧亚中纬度地区夏季环流和降水异常的空间模态。当 EU 遥相关为“-+-”波列时,无论是处于发展位相还是衰减位相,都有利于北大西洋上空 Rossby 波向西伯利亚上空传播,并在向下游能量频散时,有利于 EAP 遥相关型位置偏北偏东;当 EU 遥相关为“+ -+”波列时,有利于 Rossby 波向中下游传播,不利于在鄂霍次克海上游地区形成正异常,从而 EAP 遥相关型的位置偏南偏西。而对于 MJO 影响华北夏季降水的机制还缺乏研究。

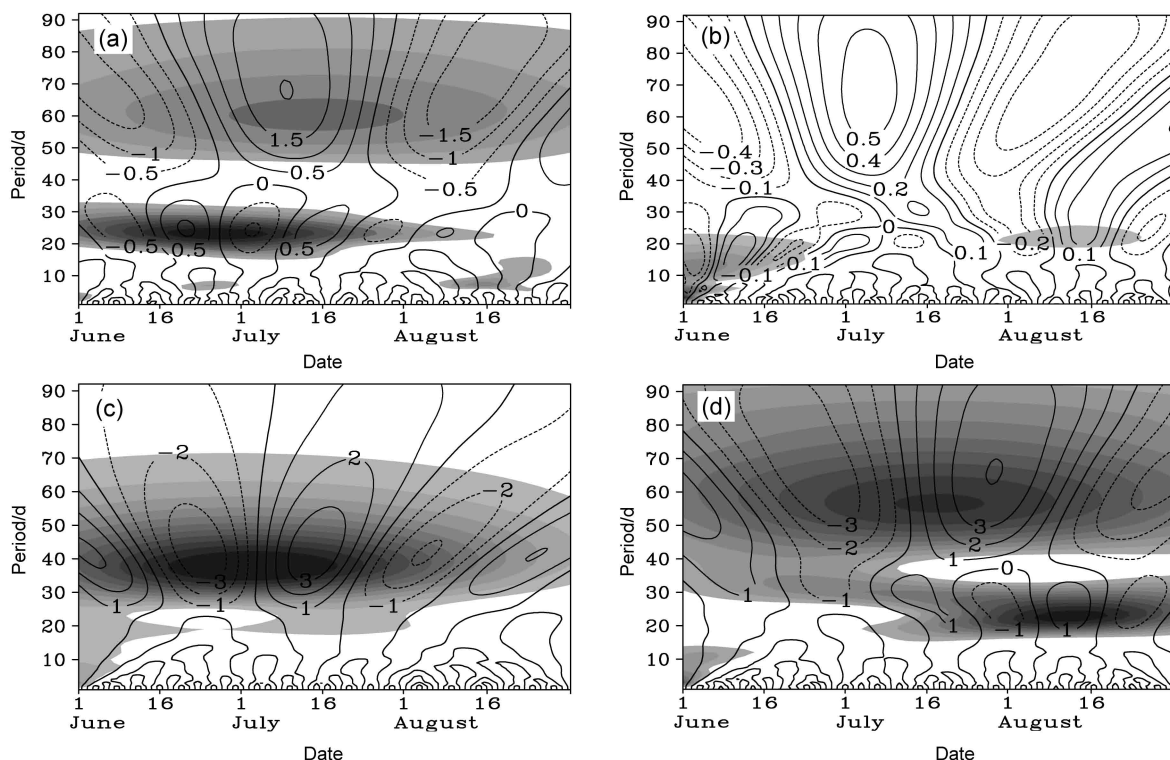


图3 2018年夏季(a)东亚夏季风指数(EAMI)、(b)欧亚遥相关型指数(EUI)、(c)RMM1、(d)RMM2四个指数的Morlet小波系数分布。阴影区通过了95%信度水平的显著性检验

Fig. 3 Distributions of the Morlet wavelet coefficients for (a) East Asian summer monsoon index (EAMI), (b) Eurasian teleconnection index (EUI), (c) RMM1, and (d) RMM2 in summer 2018. The shaded areas indicate coefficients exceed the 95% confidence level

比较功率谱分析、小波分析和相关分析结果可以看出, 在 2018 年, 欧亚遥相关型对华北夏季降水的影响最弱, 东亚夏季风与华北夏季降水联系较为密切, 但 MJO 与华北夏季降水的关系最为密切。从周期变化比较分析结果表明, 在 2018 年夏季降水变化中, MJO 的影响可能是显著的。

3.3 MJO 变化与夏季降水的关系

华北地区 2018 年夏季逐日降水量与东亚夏季风指数、欧亚遥相关型指数、MJO 的指数 RMM1、RMM2 对应逐日变化和周期分析结果表明, 2018 年华北夏季降水变化可能受 MJO 影响比较显著。

图 4 是 2018 年夏季 MJO 与华北降水量逐日变化情况。图 4a 显示, 6 月, MJO 东西向传播规律性不强, 在上旬、下旬振幅较大; 7 月, MJO 有规律地自西向东传播, 且振幅明显逐渐加大; 8 月, MJO 东西向传播规律不明显, 振幅在前期较大, 以后逐渐减小。值得注意的是, MJO 在 2018 年 6 月、8 月东西向传播规律性不是很好, 在 7 月向东传播特征明显。从这里看到, 在 MJO 传播过程中, 其活动中心并不总是很有规律地沿赤道向东传播, 夏季 MJO 的活动中心会出现东传停滞的情况, 而且表现为 MJO 在赤道西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, 夏季 MJO 持续异常时其振荡周期会出现缩短或变弱, 与严欣和琚建华 (2016) 的结论基本一致。在图 4b 上, 华北夏季降水与 MJO 位相和振幅有很好的对应关系,

当 MJO 进入 5、6 位相且振幅较大时, 华北夏季出现明显降水过程。6 月 12~14 日 MJO 位于 5、6 位相, 但由于振幅较小, 虽出现了明显降水, 但强度较弱; 7 月 12~19 日、8 月 9~11 日 MJO 位于 5、6 位相, 且振幅大, 这两次出现了很强的降水。

以往研究 (Zhang et al., 2009; 白旭旭等, 2011, 2012; 李崇银等, 2013; 张礼平和张乐飞, 2013; 马婷婷等, 2014; 李文铠等, 2014; 严欣和琚建华, 2016; 李永华等, 2016; 赵佳玉等, 2016; 袁媛等, 2017) 发现, 无论在春季还是在夏季, 当 MJO 位于印度洋时 (第 2、3 位相), 我国多雨区常常位于长江中下游地区或我国西南、华南等地区, 而当 MJO 位于西太平洋时 (第 6、7 位相), 我国长江中下游地区和我国西南、华南地区有些区域常常少雨, 但没有说明 MJO 与华北夏季降水的关系。从前面的统计结果可以看出, 当 MJO 位于西太平洋 (第 5、6 位相) 且振幅较大时, 华北夏季降水偏多。严欣和琚建华 (2016) 研究得到, 夏季 MJO 在赤道太平洋持续活跃的时候, 赤道沃克环流减弱, 西太平洋哈得来环流增强, 西太平洋副热带高压位置偏北。他们的结论与这里华北夏季降水在 MJO 的 5、6 位相偏多有很好的对应关系。

图 5 是 2018 年夏季 MJO 在 8 个不同位相的 5 d 合成的 OLR 异常场, 即 5 d 平均值减去 1981~2010 年平均场。合成时选择振幅最大且尽

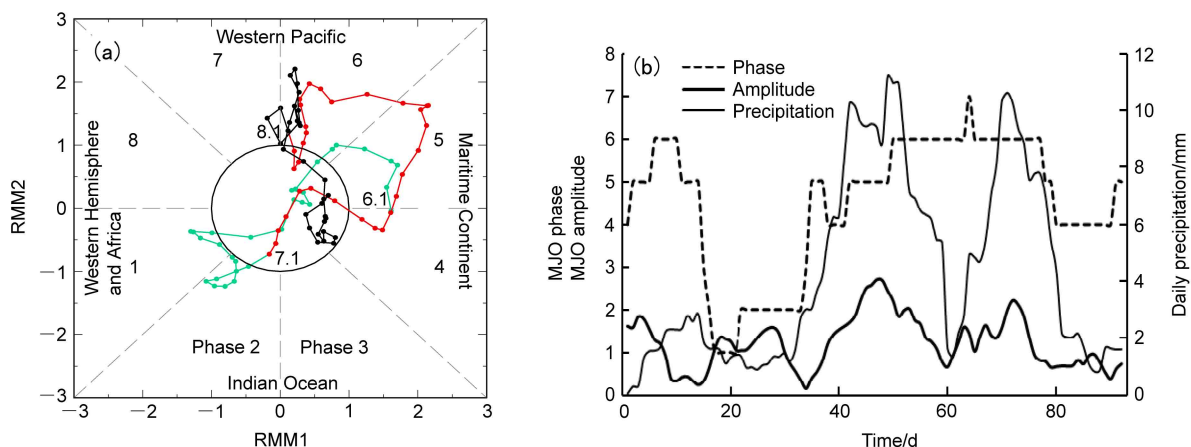


图 4 2018 年夏季 (a) MJO 振幅和位相逐日变化、(b) MJO 的振幅 (粗实线)、位相 (虚线) 与降水量 (细实线) 的逐日变化。图 a 中, 绿、红、黑色线分别代表 6、7、8 月

Fig. 4 (a) Daily variations of the amplitude and phase of MJO (Madden-Julian Oscillation), (b) daily variations of the amplitude (bold solid line), phase (dashed line) of MJO, and precipitation (thin solid line) in North China in summer 2018. The green, red, and black lines represent June, July, and August, respectively

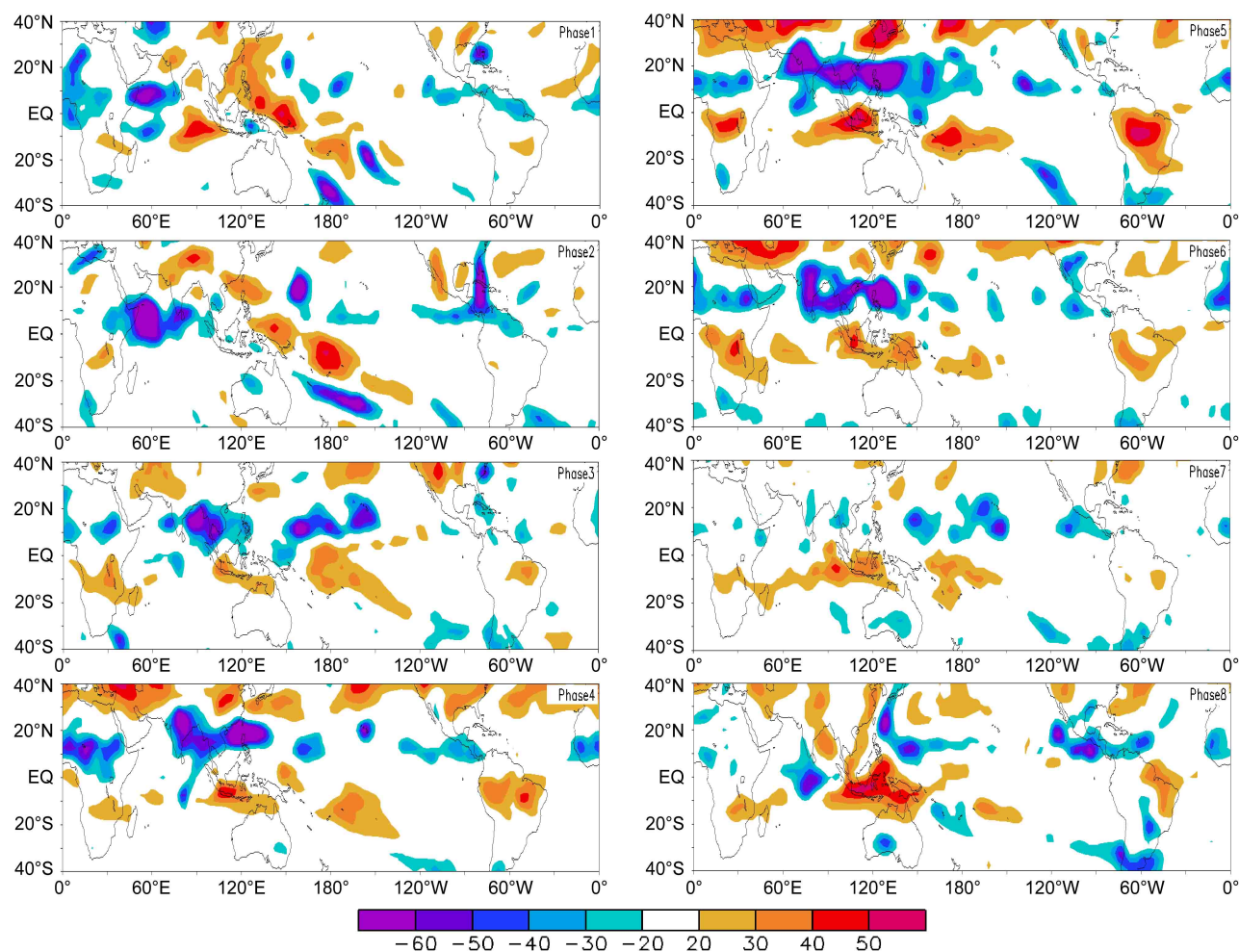


图5 2018年夏季MJO不同位相合成的OLR异常场(单位: W m^{-2})

Fig. 5 Composites of the OLR (outgoing longwave radiation) anomalies (units: W m^{-2}) in each phase of MJO in summer 2018

量连续的5 d资料。当MJO为1位相时,热带强对流中心位于阿拉伯半岛以南热带西印度洋洋面上(10°N , 60°E);当MJO进入2位相时,原来位于热带西印度洋的强对流中心进一步加强,并开始向东扩展到斯里兰卡位置(10°N , 80°E);进入3位相时,强对流中心逐渐东移北移到孟加拉湾地区(15°N , 90°E);进入4位相时,强对流中心进一步向东向北移动,最强中心位于南海北部(20°N , 120°E),另外,孟加拉湾强对流在印度半岛有明显的向西北扩展,覆盖印度半岛大部(25°N , 75°E);进入5位相时,位于印度半岛、孟加拉湾、南海北部的强对流进一步加强,且呈现西北—东南倾斜方向,同时对流区向东扩展到热带西太平洋的塞班岛附近(18°N , 160°E);进入6位相时,强对流位置变化不大,基本还是位于印度半岛、孟加拉湾、南海北部、塞班岛附近,但强度

有所减弱;进入7位相时,强对流区迅速减弱东移,中心位置位于热带西太平洋塞班岛(18°N , 160°E)和热带中太平洋(15°N , 150°W)附近;进入8位相时,强对流区东移到热带东太平洋[(20°N , 120°W), (15°N , 90°W)]。从图上可以看出,对应1~8位相,OLR表现为明显的自西向东传播特征,在印度半岛、中南半岛有北移特征,但最大对流区很难越过北纬 30°N 线。

为了进一步认识夏季降水异常与MJO的关系,将2018年夏季(6~8月)我国东部逐日降水量对2018年夏季逐日MJO指数RMM1、RMM2序列作回归重构,得到与MJO对应的降水异常空间分布(图6)。图上等值线是对应RMM1、RMM2的夏季降水异常百分比。对应RMM1,华北夏季降水为正异常,长江流域基本都为负异常,广东大部分地区为正异常。对应RMM2,华北夏季降水

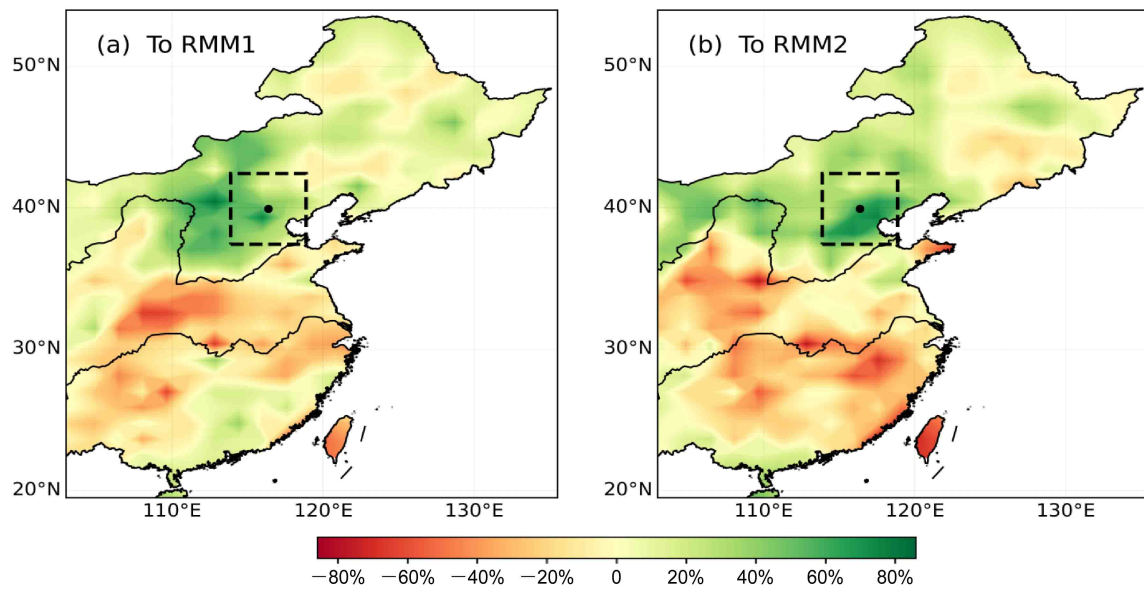


图 6 2018 年夏季与 RMM1、RMM2 回归重构的降水异常空间分布。虚线框区表示华北地区，下同

Fig. 6 Regressed patterns of summer precipitation anomalies onto RMM1 and RMM2 in summer 2018. Dotted frame areas indicate North China, the same below

也为正异常、长江及江南基本为负异常。可以看到，2018 年夏季，当 MJO 的 RMM1 或 RMM2 处于正位相，华北夏季降水明显偏多，两者之间有很好的对应关系。

4 MJO 影响华北夏季降水的机制

强降水过程的发生主要有两个条件，一个是水汽输送条件，另一个是动力上升条件。因为 MJO 变化常常通过 OLR 异常而激发向东向北传播的 Rossby 波 (Zheng and Chang, 2019)，进而影响向华北的水汽输送和动力上升条件。所以，以下重点从水汽输送和动力上升条件变化来分析 MJO 影响华北夏季降水的机制。

4.1 对 850 hPa 风场（水汽条件）的影响

图 7 是 2018 年夏季对应 MJO 不同位相合成的 850 hPa 水平风场异常，即选择对应 MJO 不同位相的 5 d 风场平均值减去多年风场平均值。当 MJO 为 1 位相时，有几个显著特征：西印度洋地区有气旋性环流异常，孟加拉湾为反气旋性环流，华南沿海为反气旋性环流，日本东北海面为气旋性环流异常，类似波列传播；赤道以北印度洋至南海为明显东风异常，华北地区为明显西南风异常。当 MJO 为 2 位相时，西印度洋气旋性异常环流进一步加强。孟加拉湾维持为弱的反气旋性环流，南海北部反气旋性环流加强，库页岛西侧出现强反气

旋性环流异常；赤道以北西印度洋至南海东风异常继续维持，华北地区出现弱的东风异常。当 MJO 为 3 位相时，环流异常较前期变化很大，西印度洋气旋性环流异常开始向东北方向移动，孟加拉湾反气旋性环流消失；赤道以北西印度洋至南海东风异常明显减弱且出现南北波动特征，华北地区出现北风异常。值得注意的是，我国西南地区出现偏北风与偏东风的辐合，有利于降水。当 MJO 为 4 位相时，环流较位相 3 时变化较大，原来的气旋性环流东移到赤道东印度洋，西印度洋转为反气旋性环流，南海北部为气旋性环流，日本东南海上为反气旋性环流，再向东北方向为气旋性环流异常，波列特征非常明显；赤道以北西印度洋至南海反转为西风异常；华北地区出现辐散环流场，不利于降水；华南地区环流有利于降水。当 MJO 为 5 位相时，西印度洋西南风显著增强，气旋性环流中心位于菲律宾附近，朝鲜半岛附近为反气旋性环流；华北地区为显著的南风异常，有利于南风和东南风水汽向华北输送，有利于华北降水。当 MJO 为 6 位相时，环流与位相 5 类似，菲律宾附近的气旋性环流中心北移到台湾岛附近，我国东北为反气旋性环流。华北为东南风异常，有利于东南风水汽向华北输送，有利于华北降水。当 MJO 为 7 位相时，气旋性环流中心东移到西太平洋塞班岛附近；整个环流场异常显著减弱，赤道以北西印度洋至南海反转为东风异

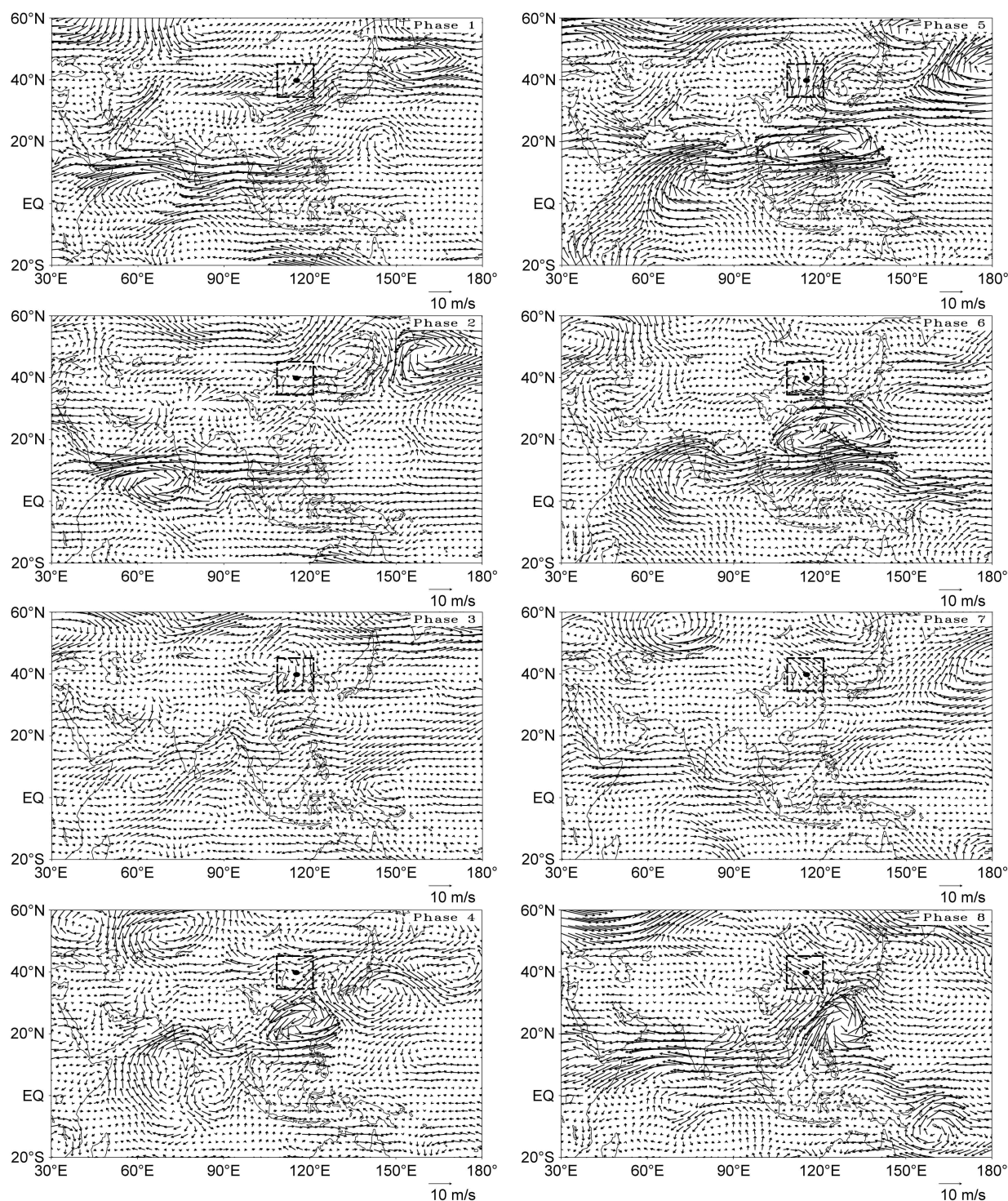


图7 2018年夏季MJO不同位相合成的850 hPa水平风场异常(单位: m s^{-1})

Fig. 7 Composites of horizontal wind anomalies (units: m s^{-1}) at 850 hPa in each phase of MJO in summer 2018

常; 华北转为西北风异常, 呈辐散状, 不利于华北降水。当MJO为8位相时, 整个环流异常较位相7有明显的加强, 台湾以东洋面出现强的气旋性环流异常, 赤道以北西印度洋至南海东风异常明显加

强; 华北仍然为强的西北风异常, 不利于华北降水。

综合起来有几个明显特征: (1) 赤道以北西印度洋至南海纬向风的变化, 1、2位相时为强东

风异常, 3 位相时东风异常减弱, 4 位相时为西风异常, 5、6 位相时为强西风异常, 7 位相时转为弱东风异常, 8 位相时东风异常加强。(2) 印度对流区为强的气旋性环流异常, 往往在其北侧激发出反气旋性环流, 形成“气旋—反气旋对”。伴随着“气旋—反气旋对”的东移, 北部的反气旋会对华北水汽输送造成影响。即在 MJO 的 1~4 位相, 华北地区风场异常风向变化较大, 5、6 位相为明显的南风 and 东南风异常, 7、8 位相为西北风异常。(3) 通常认为的 MJO 很难北移到较高纬度影响到华北地区降水, 主要是指对应 MJO 的对流区及气旋环流很难到达长江以北位置。但是, 由于 MJO 对流区在其北侧激发的反气旋环流却可以直接影响向华北地区水汽输送情况, 进而影响华北夏季降水。

图 8 是对 MJO 指数 RMM1、RMM2 回归重构的 850 hPa 水平风场异常情况。可以看到环流异常很相似, 但也有不同。相似的环流特征是: 热带印度洋为弱的反气旋性环流异常、孟加拉湾为气旋性环流异常、南海北部至东海为气旋性环流异常、朝鲜半岛附近为反气旋性环流异常, 华南地区为东风异常, 赤道以北西印度洋至南海为西风异常。突出的特征是, 南海至西太平洋为强大的气旋性环流, 其北侧为反气旋性环流, 形成“气旋—反气旋对”。不同的是: 对应 RMM1, 华北地区为南风异常; 对应 RMM2, 华北地区为东南风异常。因此, MJO 的两个主要模态对华北夏季降水影响是通过不同的水汽输送方向造成的。

有了水汽条件不一定产生强降水, 还要看是否有动力上升条件。

4.2 对 500 hPa 位势高度场(动力条件)的影响

图 9 是 2018 年夏季 MJO 不同位相的 500 hPa 位势高度场合成图。可以看到, 对应 MJO 的不同位相, 中高纬槽脊、副热带高压都有明显变化, 这里重点关注对华北降水可能带来动力上升条件的副热带高压变化情况。在 MJO 的 1、2 位相, 西风槽偏西偏北, 华北处于中纬较为平直环流控制下, 副高偏弱且位置偏南。在 MJO 的 3、4 位相, 华北处于中纬槽后西北气流控制下, 副高加强但位置偏东。在 MJO 的 5 位相, 明显特征是副热带高压加强, 北移到朝鲜半岛附近位置, 华北处于槽前和副高西北侧, 这种环流形势有利于华北产生上升运动, 有利于华北产生降水。在 MJO 的 6 位相, 中纬度环流与位相 5 时类似, 但副热带高压中心较位相 5 时位置偏东。在 MJO 的 7 位相, 华北处于西风槽后西北气流控制之下, 副高位置偏南, 缺乏动力上升条件, 不利于华北产生降水过程。在 MJO 的 8 位相, 华北同样处于槽后西北气流控制下, 副高位置过于偏东, 缺乏动力上升条件, 同样不利于华北产生降水过程。

图 10 是对 MJO 指数 RMM1、RMM2 回归重构的 500 hPa 位势高度场异常分布情况。可以看到位势高度场异常特征非常相似, 贝加尔湖至我国青海地区方向为负异常, 朝鲜半岛附近为正异常。2018 年夏季, 由于受 MJO 的影响, 贝加尔湖槽进一步加深、副热带高压北移到朝鲜半岛附近并加强, 使得华北地区动力上升条件增强, 从而有利于华北夏季降水过程的发生。在气候平均态上, 夏季, 贝加尔湖至青海地区为槽, 朝鲜半岛附近为副热带高压。因此, 夏季 MJO 可能是通过对贝加尔湖槽和

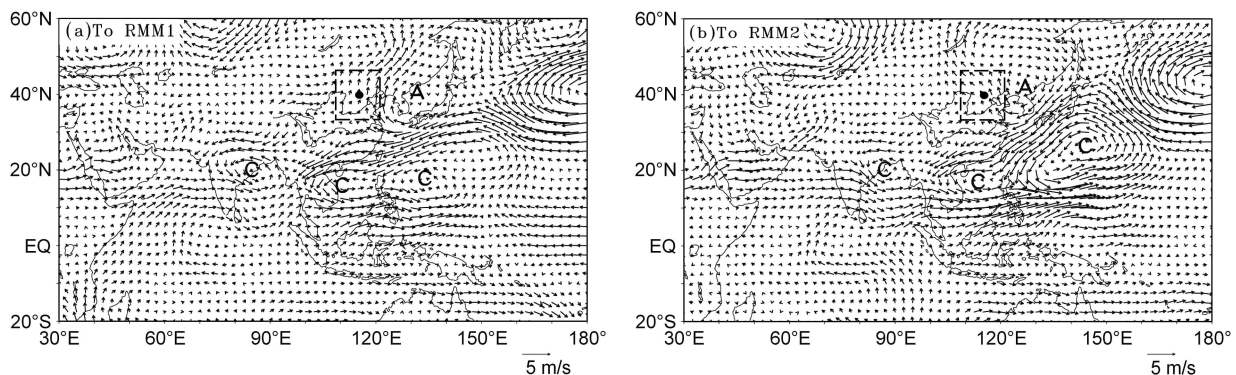


图 8 2018 年夏季与 RMM1、RMM2 回归重构的 850 hPa 水平风场异常 (单位: m s^{-1})

Fig. 8 Regressed patterns of horizontal wind anomalies (units: m s^{-1}) at 850 hPa onto RMM1 and RMM2 in summer 2018

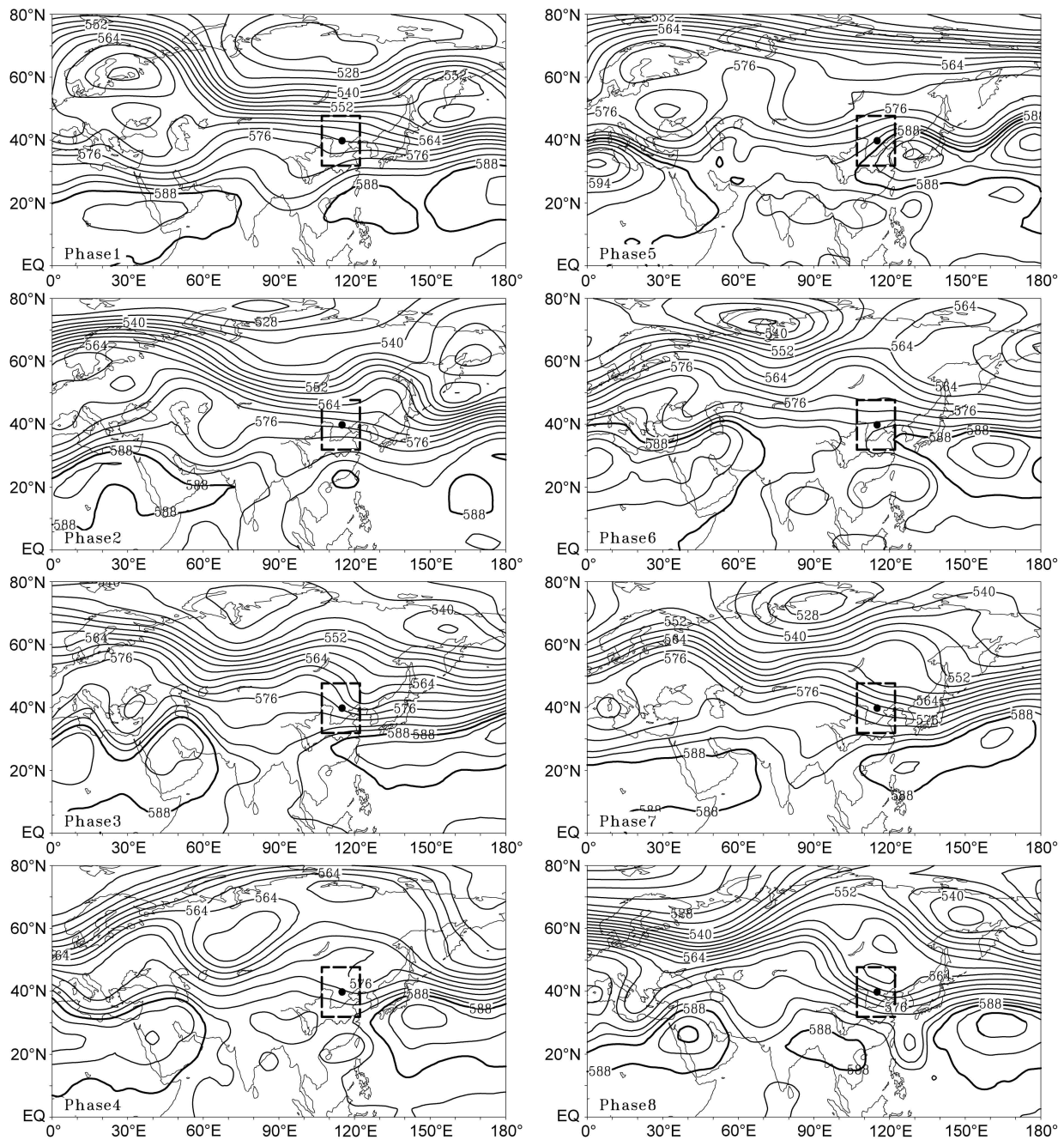


图9 2018年夏季MJO不同位相合成的500 hPa位势高度场(单位: dagpm)

Fig. 9 Composites of 500-hPa geopotential height in each phase of MJO in summer 2018

副热带高压的调整而影响华北夏季降水的。

4.3 对经圈环流(动力条件)的影响

图 11 是 2018 年夏季 MJO 不同位相时沿 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的垂直剖面经圈环流情况, 经向风 v 的单位是 m s^{-1} , 垂直速度 w 的单位是 0.01 Pa s^{-1} 。在 MJO 的 1 位相: 华南为下沉气流, 华北南部下沉、华北北部上升, 长江下游无明显上升或下降气流, 表现为盛行偏南风。在 2 位相: 长江下游

对流层整层为明显上升气流, 华北对流层中下层为下沉气流, 从动力上升条件上, 长江下游可能会多雨、而华北少雨。在 3 位相: 华南对流层整层为明显上升气流, 长江下游为弱的上升气流, 华北对流层整层为下沉气流且有明显偏北风, 从动力上升条件上, 华南地区有利于降水、而华北不利于降水。在 4 位相: 华南对流层整层为很强的上升气流, 长江下游上升或下沉均不明显, 华北对流层整层为下

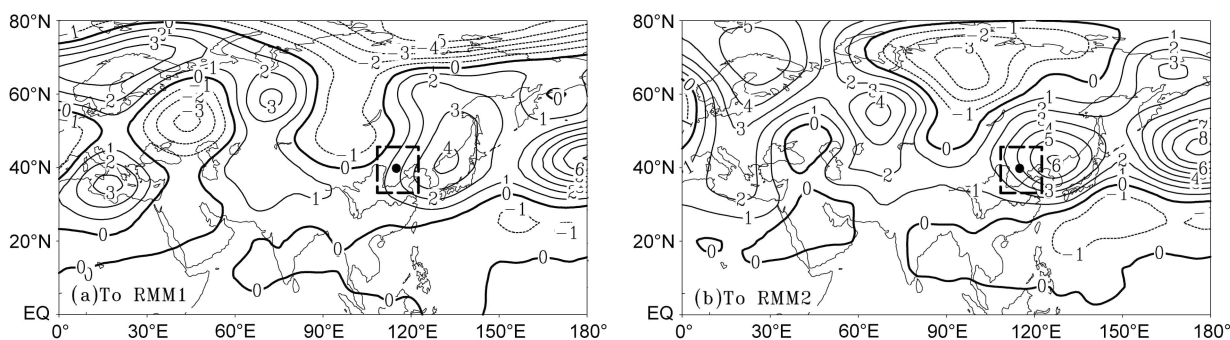


图 10 2018 年夏季与 RMM1、RMM2 回归重构的 500 hPa 位势高度场异常 (单位: dagpm)

Fig. 10 Regressed patterns of 500-hPa geopotential height anomalies (units: dagpm) onto RMM1 and RMM2 in summer 2018

沉气流,从动力上升条件上,华南地区有利于降水、华北地区不利于降水。在 5 位相:华南对流层整层为很强的上升气流,长江下游为弱的下沉气流,华北对流层整层为上升气流,从动力上升条件上,华南地区和华北地区有利于降水、长江下游不利于降水。在 6 位相:华南对流层整层仍为很强的上升气流,长江下游上升或下沉不明显,华北对流层整层为明显上升气流,从动力上升条件上,华南地区和华北地区有利于降水。在 7 位相:华南地区无明显上升或下沉气流,江南对流层整层为明显上升气流,江北和华北对流层整层为明显下沉气流,从动力上升条件上,江南地区有利于降水,华北地区不利于降水。在 8 位相:江北和华北南部对流层整层为下沉气流,华南、江南、华北无明显上升或下沉气流,从动力上升条件上,江北和华北南部地区不利于降水。

因此,在 MJO 的不同位相,华南、江南、江北、长江流域下游、华北等地的上升和下沉动力条件明显不同。在位相 1、2、3、4 时,华北地区基本均为下沉气流,动力上升条件差,不利于降水过程发生。在 5、6 位相,华北出现上升气流,动力条件好,有利于华北降水过程发生。在 7、8 位相,华北又转为下沉气流,动力条件变差,不利于华北降水过程发生。

由前面分析得到, MJO 与华北夏季降水有密切联系。MJO 通过中层扰动向中高纬的传播,诱发在华北地区夏季出现水汽输送异常和动力上升气流异常,从而影响夏季降水。具体在水汽条件方面, 850 hPa 层上, MJO 可以通过对流区气旋性环流及其在北侧激发的反气旋缓慢东移,北侧反气旋环流的西南侧或西侧会造成华北夏季偏南风水汽输送加

强(对应 RMM1)或东南风水汽输送加强(对应 RMM2),从而有利于降水过程发生。在动力上升条件方面, MJO 主要通过 500 hPa 层朝鲜半岛附近副热带高压加强,以及华北上空对流层上升运动加强,从而有利于华北夏季降水过程发生。

5 结论与讨论

MJO 与华北夏季降水有密切的联系。MJO 很难北移到长江以北位置,所以不能直接影响华北夏季降水。但 MJO 对流区的气旋会在其北侧激发反气旋环流,形成“气旋—反气旋对”,在其东移过程中,处于较高纬度的反气旋会直接影响华北夏季降水。即 MJO 会间接影响华北夏季降水,表现为当夏季 MJO 进入 5、6 位相时,华北地区夏季会出现明显降水过程,但降水强弱与 MJO 振幅大小有关。

在影响机制方面,在 850 hPa,伴随 MJO 的“气旋—反气旋对”的东移,反气旋西侧的偏南气流会加强向华北的水汽输送,即是它可以通过 850 hPa 风场异常造成华北夏季偏南风水汽输送加强(对应 RMM1)或东南风水汽输送加强(对应 RMM2),提供了有利的水汽条件,从而有利于降水过程发生。在 500 hPa 层, MJO 通过其扰动向中高纬的传播,诱导副热带高压北移到朝鲜半岛附近并加强,对西来高空槽形成阻挡作用,有利于华北地区产生上升运动,从而有利于华北夏季降水过程发生。

MJO 两个主模态只解释了大气变化方差的 25%,还有 75% 的复杂变化没有包括,用 MJO 预测华北夏季降水也还存在不确定性。另外,利用 MJO 开展华北夏季延伸期预报对数值模式结果依

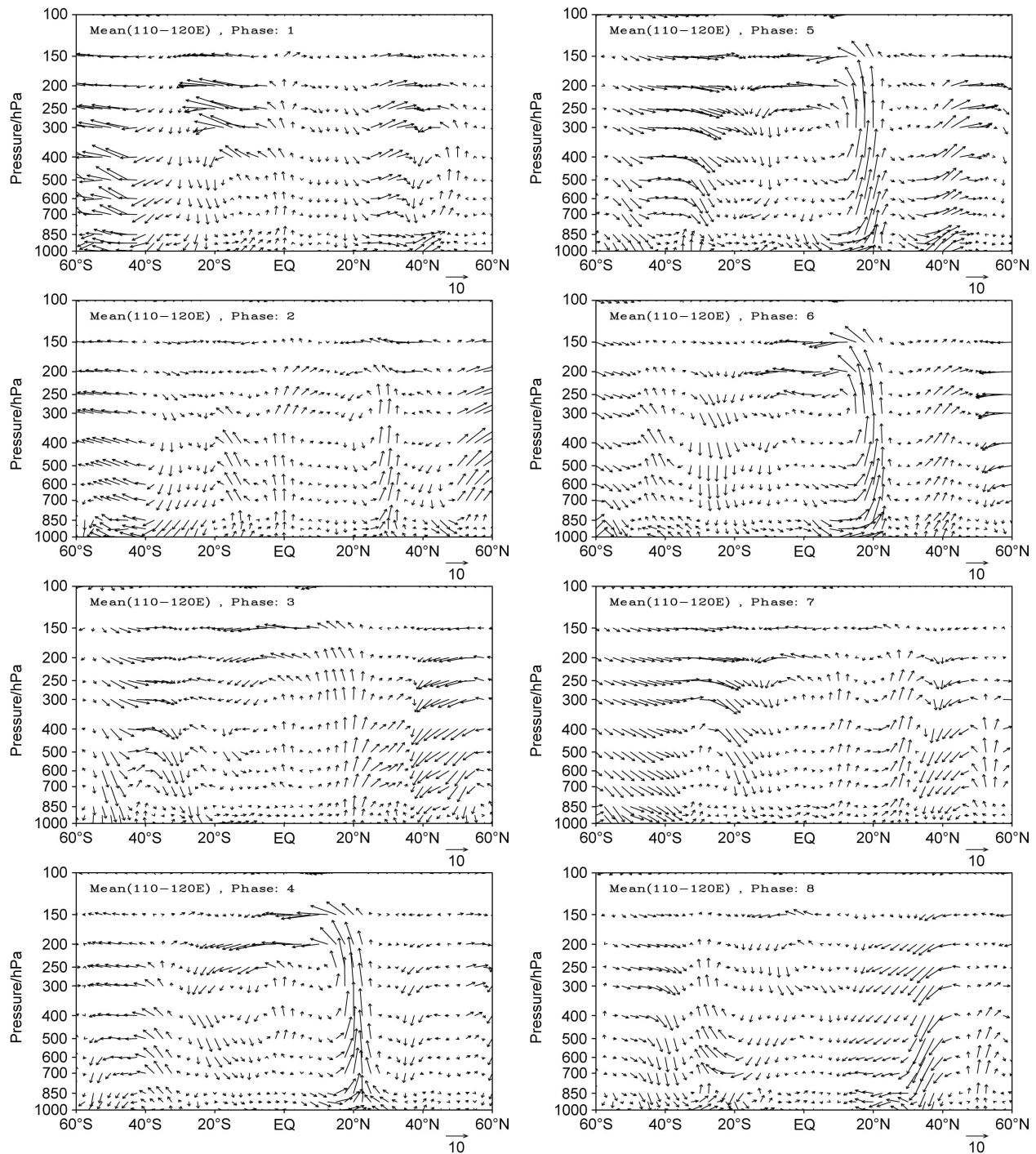


图 11 2018 年夏季 MJO 不同位相合成的沿 110°~120°E 平均的经圈环流分布

Fig. 11 Composites of meridional circulations averaged along 110°–120°E in each phase of MJO in summer 2018

赖性较大, 因此, 需要尽快改进数值模式的精度, 提高对 MJO 的预测能力, 这非常具有挑战性。目前可以采用统计方法或动力—统计方法来制作延伸区降水预测, 随着未来数值模式的改进, 用 MJO 制作华北夏季延伸期降水预测将会取得更好的效果。

这里的结论是基于 2018 年样例分析得到的, 难免存在片面性, 有待作进一步深入系统性研究。

参考文献 (References)

- 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 [J]. 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]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 27(6): 814–822. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.06.004
- 白旭旭, 李崇银, 李琳. 2012. MJO 对中国春季降水影响的数值模拟研究 [J]. *气象学报*, 70(5): 986–1003. Bai X X, Li C Y, Li L. 2012. Numerical simulation study of the Madden-Julian Oscillation influences on spring precipitation in China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(5): 986–1003. doi:10.11676/qxxb2012.083
- 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. doi:10.16555/j.1006-8775.2013.03.002
- Barlow M, Wheeler M, Lyon B, et al. 2005. Modulation of daily precipitation over Southwest Asia by the Madden-Julian Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133(12): 3579–3594. doi:10.1175/MWR3026.1
- Bond N A, Vecchi G A. 2003. The influence of the Madden-Julian Oscillation on precipitation in Oregon and Washington [J]. *Wea. Forecasting*, 18(4): 600–613. doi:10.1175/1520-0434(2003)018<0600:TIOTMO>2.0.CO;2
- Chen G S, Wang B. 2018a. Does the MJO have a westward group velocity? [J]. *J. Climate*, 31(6): 2435–2443. doi:10.1175/JCLI-D-17-0446.1
- Chen G S, Wang B. 2018b. Effects of enhanced front Walker cell on the eastward propagation of the MJO [J]. *J. Climate*, 31(19): 7719–7738. doi:10.1175/JCLI-D-17-0383.1
- Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al. 2001. Analysis of the characteristics of 30–60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(4): 623–638. doi:10.1007/s00376-001-0050-0
- 丁一汇, 梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报 [J]. *气象*, 36(7): 111–122. Ding Y H, Liang P. 2010. Extended range forecast basing on MJO [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 36(7): 111–122. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.07.018
- Ferranti L, Palmer T N, Molteni F, et al. 1990. Tropical-extratropical interaction associated with the 30–60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47(18): 2177–2199. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2177:TEIAWT>2.0.CO;2
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠. 2016. 东亚夏季风变化与华北夏季降水异常的关系 [J]. *高原气象*, 35(5): 1280–1289. Hao L S, Ding Y H, Min J Z. 2016. Relationship between summer monsoon changes in East Asia and abnormal summer rainfall in North China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 35(5): 1280–1289. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00085
- 郝立生, 侯威. 2018. 华北夏季降水变化及预测技术研究 [M]. 北京: 气象出版社, 201pp. Hao L S, Hou W. 2018. Study on Summer Precipitation Change and Prediction Technology in North China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 201pp.
- Hendon H H, Liebmann B. 1990a. A composite study of onset of the Australian summer monsoon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47(18): 2227–2240. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2227:ACSOOO>2.0.CO;2
- Hendon H H, Liebmann B. 1990b. The intraseasonal (30–50 day) oscillation of the Australian summer monsoon [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47(24): 2909–2924. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2909:TIDOOT>2.0.CO;2
- Higgins R W, 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
- Hoskins B. 2013. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139(672): 573–584. doi:10.1002/qj.1991
- 胡泊. 2019. EAP 和 EU 遥相关型的配置对东北亚夏季降水的影响研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 121pp. Hu Po. 2019. Joint effect of EAP and EU teleconnections on the summer precipitation pattern in Northeast Asia [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 121pp.
- Jeong J H, Kim B M, Ho C H, et al. 2008. Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion [J]. *J. Climate*, 21(4): 788–801. doi:10.1175/2007JCLI1801.1
- 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. doi:10.16555/j.1006-8775.2013.03.004
- Jones C. 2000. Occurrence of extreme precipitation events in California and relationships with the Madden-Julian Oscillation [J]. *J. Climate*, 13(20): 3576–3587. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3576:OOEPEI>2.0.CO;2
- Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. 2004a. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies [J]. *J. Climate*, 17(11): 2078–2095. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2078:ASFMOT>2.0.CO;2
- Jones C, Waliser D E, Lau K M, et al. 2004b. The Madden-Julian Oscillation and its impact on Northern Hemisphere weather predictability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132(6): 1462–1471. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1462:TMOA II>2.0.CO;2
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Kang I S, Kim H M. 2010. Assessment of MJO predictability for boreal winter with various statistical and dynamical models [J]. *J. Climate*, 23(9): 2368–2378. doi:10.1175/2010JCLI3288.1
- Lau K M, Chan P H. 1986. Aspects of the 40–50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114(7): 1354–1367. doi:10.1175/1520-0493(1986)114<1354:AOTDOD>2.0.CO;2
- Lau K M, Yang G J, Shen S H. 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116(1): 18–37. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0018:SAICOS>2.0.CO;2
- Lawrence D M, Webster P J. 2002. The boreal summer intraseasonal oscillation: Relationship between northward and eastward movement of convection [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59(9): 1593–1606.

- doi:10.1175/1520-0469(2002)059<1593:TBSIOR>2.0.CO;2
- Leroy A, Wheeler M C. 2008. Statistical prediction of weekly tropical cyclone activity in the Southern Hemisphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(10): 3637–3654. doi:10.1175/2008MWR2426.1
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 515pp.
- Li C Y. 2000. Introduction to Climate Dynamics (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 515pp.
- 李崇银, 潘静, 宋洁. 2013. MJO 研究新进展 [J]. *大气科学*, 37(2): 229–252. Li C Y, Pan J, Song J. 2013. Progress on the MJO research in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 229–252. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12318
- 李崇银, 凌健, 袁媛, 等. 2016. 大气 MJO 研究的几个前沿问题 [J]. *热带气象学报*, 32(6): 797–816. Li C Y, Ling J, Yuan Y, et al. 2016. Frontier issues in current MJO studies [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 32(6): 797–816. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.06.003
- 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
- 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 T, Yan X, Ju J H. 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. 2014. Recent advance in understanding the dynamics of the Madden–Julian Oscillation [J]. *J. Meteor. Res.*, 28(1): 1–33. doi:10.1007/s13351-014-3087-6
- 李文钊, 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 [J]. *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]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 30(5): 983–989. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.05.019
- 李永华, 向波, 卢楚翰, 等. 2016. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制 [J]. *大气科学*, 40(2): 437–450. Li Y H, Xiang B, Lu C H, et al. 2016. Impact of Madden–Julian Oscillation activities on precipitation in summer over the east of Southwest China and its possible mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(2): 437–450. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15134
- 梁萍, 丁一汇. 2012. 基于季节内振荡的延伸预报试验 [J]. *大气科学*, 36(1): 102–116. Liang P, Ding Y H. 2012. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(1): 102–116. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.09
- Liebmann B, Kiladis G N, Vera C S, et al. 2004. Subseasonal variations of rainfall in South America in the vicinity of the low-level jet east of the Andes and comparison to those in the South Atlantic convergence zone [J]. *J. Climate*, 17(19): 3829–3842. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3829:SVORIS>2.0.CO;2
- 林爱兰, 纪忠萍, 谷德军, 等. 2016. 大气季节内振荡在华南降水预报中的应用 [J]. *热带气象学报*, 32(6): 878–889. Lin A L, Ji Z P, Gu D J, et al. 2016. Application of atmospheric intraseasonal oscillation in precipitation forecast over South China [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 32(6): 878–889. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.06.009
- 吕俊梅, 琚建华, 任菊章, 等. 2012. 热带大气 MJO 活动异常对 2009~2010 年云南极端干旱的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 55(1): 98–112. 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 [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 55(1): 98–112. doi:10.1007/s11430-011-4348-1
- 马婷婷, 吴志伟, 江志红, 等. 2014. 4~6 月 MJO 北传与东亚季风爆发的关系 [J]. *热带气象学报*, 30(5): 921–931. Ma T T, Wu Z W, Jiang Z H, et al. 2014. Relationship between the northward propagation of the Madden–Julian Oscillation in April to June and the outbreaks of East Asian monsoon [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 30(5): 921–931. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.05.012
- 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
- Matthews A J, Hoskins B J, Masutani M. 2004. The global response to tropical heating in the Madden–Julian Oscillation during the northern winter [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 130(601): 1991–2011. doi:10.1256/qj.02.123
- Newman M, Sardeshmukh P D, Winkler C R, et al. 2003. A study of subseasonal predictability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131(8): 1715–1732. doi:10.1175/2558.1
- 齐艳军, 张人禾. 2015. 与中国东部天气气候相关的大气季节内振荡研究及业务应用 [J]. *热带气象学报*, 31(4): 566–576. Qi Y J, Zhang R H. 2015. A review of the intraseasonal oscillation associated with rainfall over eastern China and its operational application [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 31(4): 566–576. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.04.014
- 任宏利, 吴捷, 赵崇博, 等. 2015. MJO 预报研究进展 [J]. *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]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 26(6): 658–668. doi:10.11898/1001-7313.20150602
- 任宏利, 沈雨昀. 2016. MJO 对我国天气气候影响的新事实 [J]. *气象*

- 科技进展, 6(3): 97–105. Ren H L, Shen Y Y. 2016. A new look at impacts of MJO on weather and climate in China [J]. *Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese)*, 6(3): 97–105. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.013
- Rodney M, Lin H, Derome J. 2013. Subseasonal prediction of wintertime North American surface air temperature during strong MJO events [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(8): 2897–2909. doi:10.1175/MWR-D-12-00221.1
- Sui C H, Lau K M. 1992. Multiscale phenomena in the tropical atmosphere over the western Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120(3): 407–430. doi:10.1175/1520-0493(1992)120<0407:MPITTA>2.0.CO;2
- Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. 2017. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98(1): 163–173. doi:10.1175/BAMS-D-16-0017.1
- Waliser D E, Jones C, Schemm J K E, et al. 1999. A statistical extended-range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian Oscillation [J]. *J. Climate*, 12(7): 1918–1939. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1918:ASERTF>2.0.CO;2
- Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. 2003. Potential predictability of the Madden-Julian Oscillation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84(1): 33–50. doi:10.1175/BAMS-84-1-33
- Wang B, Xu X H. 1997. Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation [J]. *J. Climate*, 10(5): 1071–1085. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1071:NHMSMA>2.0.CO;2
- Wang B, Yang J, Zhou T J, et al. 2008. Interdecadal changes in the major modes of Asian–Australian monsoon variability: Strengthening relationship with ENSO since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 21(8): 1771–1789. doi:10.1175/2007JCLI1981.1
- Wang B, Lee S S, Waliser D E, et al. 2018. Dynamics-oriented diagnostics for the Madden-Julian Oscillation [J]. *J. Climate*, 31(8): 3117–3135. doi:10.1175/JCLI-D-17-0332.1
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(3): 376–386. doi:10.1007/BF02919316
- Webster P J, Hoyos C. 2004. Prediction of monsoon rainfall and river discharge on 15–30-day time scales [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(11): 1745–1766. doi:10.1175/BAMS-85-11-1745
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei F Y. 2007. Modern Climate Statistical Analysis and Prediction Techniques (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- 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
- Wheeler M C, Hendon H H, Cleland S, et al. 2009. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on Australian rainfall and circulation [J]. *J. Climate*, 22(6): 1482–1498. doi:10.1175/2008JCLI2595.1
- 吴捷, 任宏利, 许小峰, 等. 2018. MJO 对我国降水影响的季节调制和动力—统计降尺度预测 [J]. *气象*, 44(6): 737–751. Wu J, Ren H L, Xu X F, et al. 2018. Seasonal modulation of MJO's impact on precipitation in China and its dynamical–statistical downscaling prediction [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 44(6): 737–751. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.002
- 严欣, 琚建华. 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 X, Ju J H. 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
- 杨秋明, 李熠, 宋娟, 等. 2012. 2002 年夏季东亚地区环流 20~30 d 主振荡型延伸期预报研究 [J]. *气象学报*, 70(5): 1045–1054. Yang Q M, Li Y, Song J, et al. 2012. Study of the extended range forecast of the principal 20–30 day oscillation pattern of the circulation over East Asia in the summer of 2002 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(5): 1045–1054. doi:10.11676/qxxb2012.087
- 杨秋明. 2015. 10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 30(9): 970–984. Yang Q M. 2015. Prospects and progresses in the research of the methods for 10–30 days extended-range weather forecast [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 30(9): 970–984.
- Yao W, Lin H, Derome J. 2011. Submonthly forecasting of winter surface air temperature in North America based on organized tropical convection [J]. *Atmosphere-Ocean*, 49(1): 51–60. doi:10.1080/07055900.2011.556882
- 袁媛, 高辉, 李维京, 等. 2017. 2016 年和 1998 年汛期降水特征及物理机制对比分析 [J]. *气象学报*, 75(1): 19–38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 75(1): 19–38. doi:10.11676/qxxb2017.019
- Zhang C D. 2013. Madden-Julian Oscillation: Bridging weather and climate [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94(12): 1849–1870. doi:10.1175/BAMS-D-12-00026.1
- 章大全, 郑志海, 陈丽娟, 等. 2019. 10~30 d 延伸期可预报性与预报方法研究进展 [J]. *应用气象学报*, 30(4): 416–430. Zhang D Q, Zheng Z H, Chen L J, et al. 2019. Advances on the predictability and prediction methods of 10–30 d extended range forecast [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 30(4): 416–430. doi:10.11898/1001-7313.20190403
- Zhang L N, Wang B Z, Zeng C Q. 2009. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in Southeast China [J]. *J. Climate*, 22(2): 201–216. doi:10.1175/2008JCLI1959.1
- 张礼平, 张乐飞. 2013. 应用 MJO 制作长江流域月降水预测的试验研究 [J]. *气象*, 39(9): 1217–1220. Zhang L P, Zhang L F. 2013. Research on forecasting monthly rainfall over the Yangtze River valley using Madden-Julian Oscillation [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 39(9): 1217–1220. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.019
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27(6): 1018–1030. Zhang Q Y, Tao S Y, Zhang S L. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian

- during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(6): 1018–1030. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.06
- 赵佳玉, 马振峰, 范广洲. 2016. 热带大气季节内振荡对华西秋雨的影响 [J]. *高原气象*, 35(6): 1487–1497. Zhao J Y, Ma Z F, Fan G Z. 2016. Impact of the Madden–Julian Oscillation on autumn rainfall in West China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 35(6): 1487–1497. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00089
- Zhao Z J, Oliver E C J, Ballesterio D, et al. 2019. Influence of the Madden–Julian Oscillation on Costa Rican mid-summer drought timing [J]. *Int. J. Climatol.*, 39(1): 292–301. doi:10.1002/joc.5806
- Zheng C, Chang E K M. 2019. The role of MJO propagation, lifetime, and intensity on modulating the temporal evolution of the MJO extratropical response [J]. *J. Geophys. Res.*, 124(10): 5352–5378. doi:10.1029/2019jd030258
- 据建华, 刘一伶, 李汀, 等. 2010. 预测夏季南海季节内振荡的一种新方法 [J]. *热带气象学报*, 26(5): 521–525. Ju J H, Liu Y L, Li T, et al. 2010. A new method for predicting summer intra-seasonal oscillation over the South China Sea [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 26(5): 521–525. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.05.002