

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 Yonghua, Xiang Bo, Lu Chuhan, 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.

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

李永华¹ 向波¹ 卢楚翰² 琚建华³ 王娜⁴

¹ 重庆市气候中心, 重庆 401147

² 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

³ 云南省气象局, 昆明 650034

⁴ 南京大学大气科学学院, 南京 210023

摘 要 利用 1979~2013 年 6~8 月的西南地区东部 20 个台站日降水量资料、逐日 MJO (Madden-Julian Oscillation) 指数、全球 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 逐日格点资料以及 NCEP/NCAR 再分析日资料, 采用合成分析和线性回归等方法, 对夏季 MJO 不同位相活动影响西南地区东部夏季降水的原因及其可能机制进行了初步分析。研究表明, MJO 与西南地区东部夏季降水之间存在着显著的关系, 当 MJO 处于第 4 (第 6) 位相时, 由于西太平洋副高位置偏南 (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)。MJO 影响西南地区东部夏季降水的可能原因是: 当 MJO 处于第 4 位相时, 赤道东印度洋地区上空大气释放凝结潜热, 其激发东北向传播的异常波动, 进而影响东亚环流, 使得西南地区东部出现夏季降水偏多的环流形势, 西南地区东部夏季降水增多; 但在第 6 位相时, 西太平洋地区上空对流释放的凝结潜热, 其激发 PJ (太平洋—日本) 型 Rossby 波列, 出现不利于西南地区东部夏季降水的环流形势, 西南地区东部夏季降水偏少。

关键词 MJO 西南地区东部 夏季降水 影响机制

文章编号 1006-9895(2016)02-0437-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1506.15134

Impact of Madden-Julian Oscillation Activities on Precipitation in Summer over the East of Southwest China and Its Possible Mechanism

LI Yonghua¹, XIANG Bo¹, LU Chuhan², JU Jianhua³, and WANG Na⁴

¹ Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

² Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

³ Yunnan Meteorological Bureau, Kunming 650034

⁴ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract Based on the daily precipitation data of 20 stations in eastern Southwest China, real-time multivariate

收稿日期 2015-02-26; 网络预出版日期 2015-07-07

作者简介 李永华, 男, 1972 年出生, 博士、正研级高工, 主要从事气候诊断预测与区域气候变化研究。E-mail: lyhcq@163.com

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201306022, 国家自然科学基金项目 40975058、91337215, 中国气象局预报预测核心业务发展专项 CMAHX20160405, 重庆市自然科学基金计划重点项目 CSTC2008BA0022, 重庆市气象局 2015 年业务技术攻关重点 (团队) 项目 ywgg-201508

Funded by Special Project of the China Meteorological Administration (Grant No. GYHY201306022), National Natural Science Foundation of China (Grants 40975058 and 91337215), Special Fund for Core Operational Development of Forecast and Prediction of the China Meteorological Administration (Grant No. CMAHX20160405), the Sci. & Tech. Climbing Project of Chongqing Municipal (Grant No. CSTC2008BA0022), Key Research Program of Business and Technology of Chongqing Meteorological Service in 2015 (Grant No. ywgg-201508)

Madden-Julian oscillation (MJO) index, Outgoing Longwave Radiation (OLR) grid data, and NCEP/NCAR reanalysis daily data in summer from 1979 to 2013, the relationships between the different MJO phases and the summertime precipitation over the east of Southwest China and its possible mechanism were investigated using composite and linear regression analysis. The results showed that phase 4 of the MJO is propitious to the appearance of circulation that is conducive to more summer rainfall over eastern Southwest China; the vapor transport and convergent upward velocity are strengthened, and the ridge position of the western Pacific subtropical high leans to the south. The opposite was found to be the case for phase 6 of the MJO. The tropical low-frequency convection center moves eastward from the eastern equatorial Indian Ocean to the western Pacific Ocean area while MJO phase 4 moves to phase 6. When the MJO is located over the North Indian Ocean, the energy of waves forced by the MJO-related convective heating can propagate northeastward and affect the circulation pattern, resulting in increased precipitation over eastern Southwest China. But when the MJO enters the western Pacific, the energy of convective heating can stimulate Pacific-Japan-type waves and cause decreased precipitation.

Keywords Madden-Julian oscillation, Eastern Southwest China, Summer rainfall, Mechanism

1 引言

自 Madden and Julian (1971, 1972) 发现 MJO (Madden-Julian Oscillation) 以来, 国内外从上个世纪 80 年代开始对 ISO (Intraseasonal Oscillation) 特别是 MJO 进行了研究 (Anderson and Rosen, 1983; 李崇银, 1990; 李崇银等, 2003, 2013; 何洁琳等, 2013)。已有研究表明, MJO 和短期气候异常有着密切的联系。如 Jeong et al. (2005) 分析了 MJO 对东亚冬季地表温度及冷涌的影响, 发现绝大部分冬季冷涌事件均发生在 MJO 对流中心位于印度洋的时候, 由 MJO 激发的环流异常可能会加强冷涌, 从而造成极端寒冷事件。近些年来, MJO 在延伸期降水预报方面已经开始研究和应用。如丁一汇和梁萍 (2010) 从 MJO 与中纬度相互作用的角度讨论了制作延伸预报的理论依据, 并以江淮梅雨为例探讨了我国延伸预报的可预报性及信号; 梁萍和丁一汇 (2012) 根据梅雨区降水及其影响系统的低频信号 (MJO), 对梅雨区降水的延伸预报方法进行了探索和试验; 贾小龙和梁萧云 (2011) 研究了 2009 年 11 月热带地区一次强的 MJO 过程与我国 11 月东部大范围雨雪天气的可能联系, 认为强 MJO 过程是我国东部大范围雨雪天气的一个重要影响因子; 牛法宝等 (2013) 分析了 MJO 不同活动中心位置对云南冬半年降水过程的影响, 发现利用 MJO 的东传规律可以有效地进行云南冬半年降水的延伸期天气预报。这些研究表明, 利用 MJO 信号进行延伸期降水预报具有重要的意义。

MJO 除了用于延伸期降水预报以外, MJO 位于不同的地理位置, 对区域气候也有重要影响。如 Zhang et al. (2009) 指出, 当 MJO 位于印度洋时,

我国东南降水增加, 而当 MJO 位于西太平洋时, 降水减少; 刘冬晴和杨修群 (2010) 进一步从 MJO 影响中国东部冬季降水的机制方面进行了较好的探讨, 认为热带对流活动通过对东移性赤道热源的 Rossby 波型的响应影响中国东部冬季降水; Hidayat and Kizu (2010) 发现东传 MJO 的位相不同, 将明显影响印尼群岛夏季降水变率; 白旭旭和李崇银等 (2011) 通过位相合成及对比分析, 研究了 MJO 对我国东部春季降水的影响, 指出当 MJO 传播至中东印度洋时, 我国长江中下游地区春季降水为正异常, 当其进一步东传至中南半岛—印尼群岛一带时, 我国华南地区春季降水为正异常, 而在其他活动阶段不利于我国东部的春季降水; 据建华等 (2011) 发现当 MJO 和北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 两者持续异常时会对云南的降水产生影响; 吕俊梅等 (2012) 指出热带大气 MJO 活动的持续性异常是 2009 年夏季至 2010 年春季云南北端干旱事件发生的重要原因之一; Matthews et al. (2013) 发现 MJO 是预报巴布亚新几内亚弗莱河降水和水位的一个显著信号; 李文铠等 (2014) 指出第 2~3 位相和第 6~7 位相分别是影响华南前汛期降水的典型“湿位相”和“干位相”。

西南地区东部夏季降水变率大, 旱涝频繁, 季内往往也会出现旱涝急转的现象, 给该区域经济和人民生活造成影响 (李永华等, 2009a, 2010a, 2011)。由上分析可知, MJO 对我国区域气候有着重要影响, 问题是, 当 MJO 处于不同的位相以及和 MJO 相对应的热带对流活动处于不同的海域时其与西南地区东部的天气气候是否有关系, 如果有关系, MJO 不同的位相通过何种机制影响我国西南地区东部的天气气候, 关于这个问题, 目前研究尚

不多见。因此本文将研究 MJO 的不同位相与西南地区东部夏季（6~8 月）降水的可能联系，并对其影响的可能机制进行初步探讨，这对我国西南地区东部夏季旱涝的短期气候预测，有着十分重要的科学意义和应用价值。

2 资料和方法

参照李永华等（2010a）对西南地区东部的选取范围，选取（27°~32°N，105°~110°E）所包含的矩形区域为西南地区东部，其所包含的区域涵盖了四川东部、重庆、贵州北部以及湖南西部和湖北西部地区。

本文使用的资料包括 1979~2013 年 6~8 月的 NCEP/NCAR 全球逐日的 2.5°×2.5°再分析资料、1979~2013 年美国 NOAA 提供的全球逐日 OLR（Outgoing Longwave Radiation）场（分辨率为 2.5°×2.5°）资料以及西南地区东部 20 个台站（测站见表 1）逐日降水资料。所用的 MJO 指数从 <http://www.bom.gov.au/bmrc/clfor/cfstaf/matw/maproom/RMM/> [2015-02-22] 获得。该指数是由 Wheeler and Hendon（2004）基于 850 hPa 纬向风、200 hPa 纬向风和大气向外长波辐射 3 个变量，利用 EOF 分解方法而建立的逐日独立指数 RMM，RMM 包括 RMM1（RMM 指数序列 1）、RMM2（RMM 指数序列 2）、MJO 振幅和位相。Wheeler and Hendon（2004）和 Wheeler et al.（2009）根据 RMM1 与 RMM2 在复平面上的位置把 MJO 分成 8 个相位，相位的变化代表 MJO 从西印度洋产生，向东传播，最后在中太平洋消失的整个过程。考虑 MJO 的逐日平均强度为 0.9（Pohl and Mathews，2007），因此将 MJO 强度不小于 0.9 的划分为强 MJO，本文仅对强 MJO 进行统计。另外，下文除特别说明外，均采用 1981~2010 年的平均值作为气候平均值。

表 1 西南地区东部 20 个测站
Table 1 Details of 20 observation stations in eastern Southwest China

所属省	所属省	所属省	所属省
站名	站名	站名	站名
（市）	（市）	（市）	（市）
阆中 四川	南充 四川	涪陵 重庆	吉首 湖南
巴中 四川	梁平 重庆	来凤 湖北	遵义 贵州
达州 四川	万州 重庆	樟梓 贵州	湄潭 贵州
奉节 重庆	恩施 湖北	习水 贵州	思南 贵州
遂宁 重庆	沙坪坝 重庆	西阳 重庆	黔西 贵州

参考文献（Yanai et al., 1992；孙颖和丁一汇，

2002）关于大气热源（汇）的计算，计算公式如下：

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \theta + \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \left(\frac{p}{p_0} \right)^k, \quad (1)$$

式中， θ 为位温， $\mathbf{V}$ 为水平风矢量， ω 为 p 坐标垂直速度， $k = R / c_p$ ， R 和 c_p 分别是气体常数和干空气的等压比热， $p_0=1000$ hPa。

在分析计算关键区 OLR 的 30~60 天低频分量序列时，采用 lanczos 带通滤波器（姚菊香等，2005）。

3 MJO 活动对西南地区东部夏季降水的影响

3.1 MJO 不同位相下的降水量及雨日的统计特征分析

为了分析 MJO 不同位相对西南地区东部夏季降水的影响，图 1 给出了 1979~2013 年 6~8 月 MJO 在 1~8 位相出现的累积天数（d）以及西南地区东部 20 站日降水量降水距平百分率。由图可见，1979~2013 年 6~8 月 MJO 第 1 位相出现的天数最多，达到 404 d，其次是第 2、5、6 位相，而第 3、4、7、8 位相出现的天数较少，尤其是第 3 位相仅出现 176 d。从 MJO 不同位相下的各站日平均降水距平百分率分布来看，MJO 1~8 位相下降水距平百分率分布有明显差异。当 MJO 为第 1 位相时，以万州为中心的东北部地区日平均降水距平百分率为负而其余地区为正；第 2 位相下，沙坪坝、习水、遵义等地日平均降水距平百分率为负，其余大部地区为正；第 3 位相下，降水距平百分率中部为负值；第 4 位相下，降水距平百分率全区域为正值；第 5 位相下，降水距平百分率北部为负值南部为正值；第 6 位相下，大部地区为负值，仅沙坪坝、习水、遵义等地日平均降水距平百分率为正；第 7 位相下，东北部及南部日平均降水距平百分率为负，其余地区为正；第 8 位相下，日平均降水距平百分率体现为西北部为负东南部为正。从上面的分析来看，当 MJO 处于第 4 位相，西南地区东部降水量一致偏多，而 MJO 处于第 6 位相时，西南地区东部降水量大部分地区偏少，其他位相下分布不一致，偏多偏少的区域均有。为了进一步分析 MJO 不同位相下西南地区东部整个区域夏季降水的总体情况，计算了 MJO 的 8 个位相区域平均降水距平百分率（图 2）。由图 2 可见，当 MJO 活动中心处于第 4 位相时，西南地区东部夏季日平均降水量偏多 18.4%；而当 MJO 活动中心处于第 6 位相时，

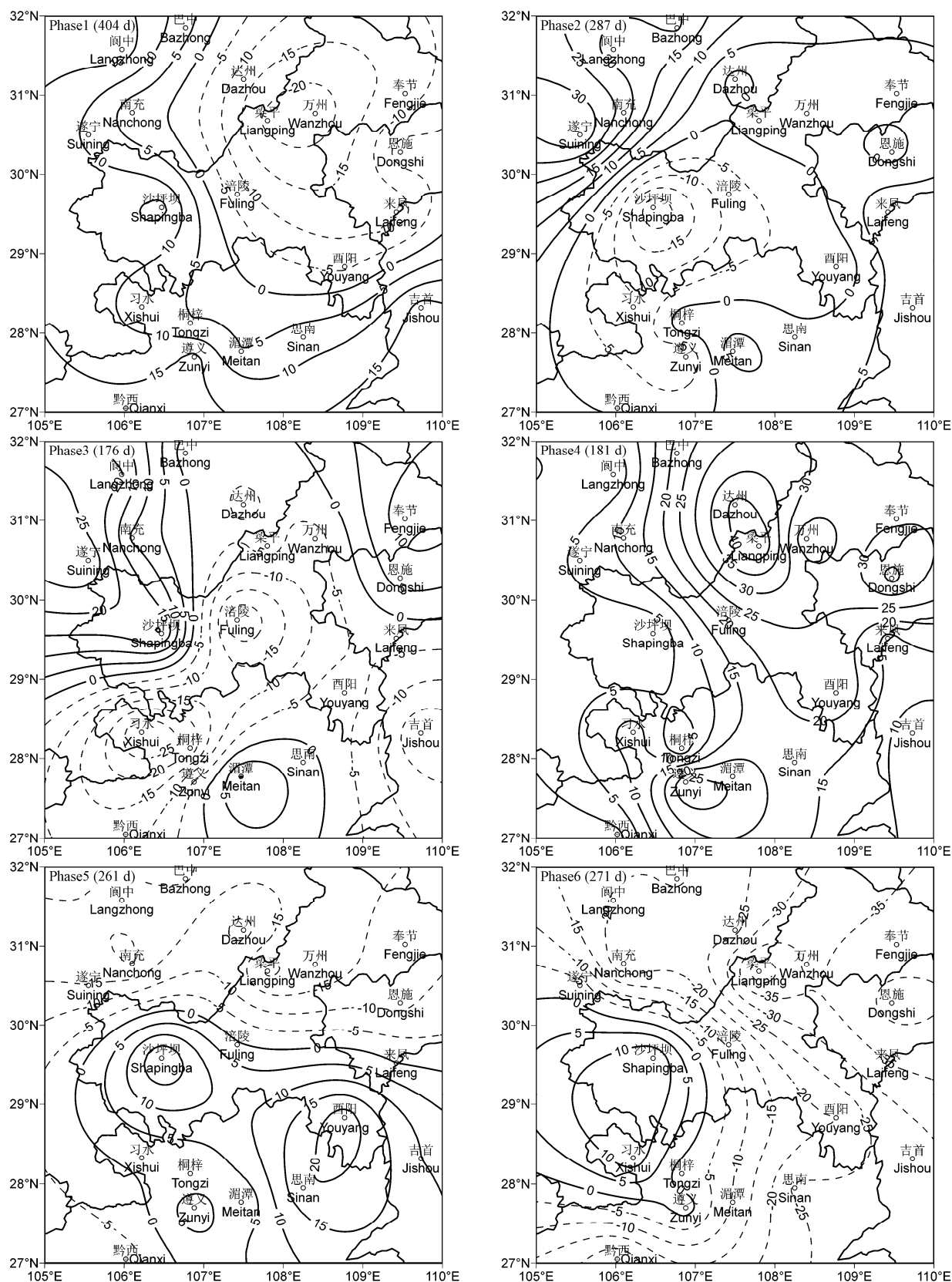


图1 西南地区东部夏季降水距平百分率(单位: %)在MJO 1~8位相的合成。括号内数据为1979~2013年6~8月发生在该位相的降水天数累计值
Fig. 1 Percentage of rainfall anomalies (units: %) in summer during MJO (Madden-Julian Oscillation) phases 1~8, 1979~2013, in eastern Southwest China. The numbers in parentheses are the days of precipitation corresponding to MJO phases from June to August 1979~2013

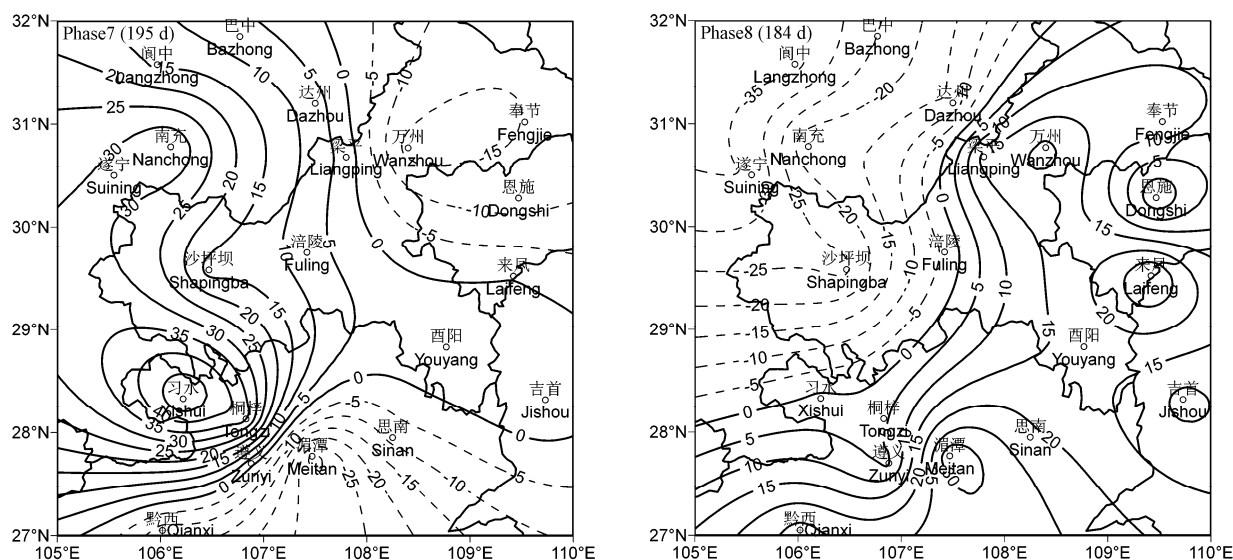


图 1 (续)
Fig. 1 (Continued)

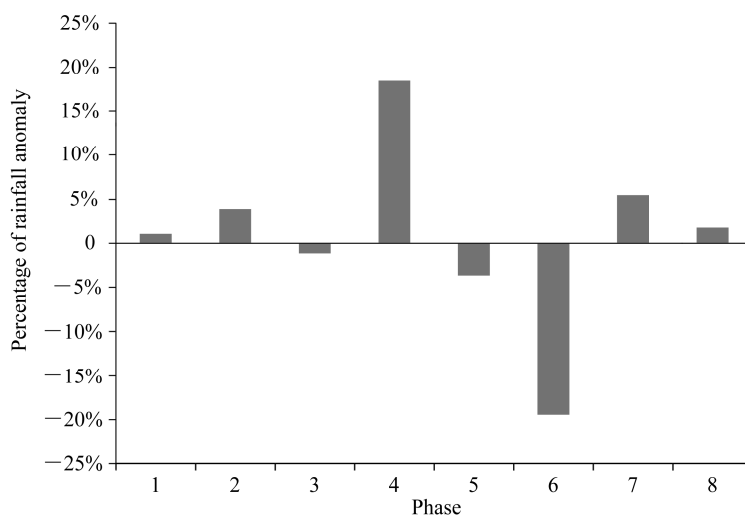


图 2 1979~2013 年西南地区东部夏季区域平均降水距平百分率 (单位: %) 在 MJO 1~8 位相的柱状图
Fig. 2 Histogram of average percentage of rainfall anomaly (units: %) in summer during MJO phases 1–8, 1979–2013, in eastern Southwest China

西南地区东部夏季日平均降水量偏少 19.4%; 当 MJO 活动中心位于第 1、2、7、8 位相时, 西南地区东部夏季日平均降水量略有偏多; 而位于第 3 和第 5 位相时则略有偏少。结合图 1 和图 2 可见, 相对而言, 当 MJO 活动中心处于第 4 位相和第 6 位相时, 西南地区东部夏季降水与之有较显著的关系。

为进一步分析 MJO 处于不同活动中心下西南地区东部夏季降水情况, 计算了 MJO 不同位相下的西南地区东部 20 站出现雨日 (降水量 ≥ 0.1 mm) 的平均概率 (%) 及其与气候平均概率相比的增加概率 (%), 表征在该位相时雨日概率偏多和偏少的程度, 同样计算了中雨以上 (降水量 ≥ 10 mm) 及

大雨以上 (降水量 ≥ 25 mm) 相应的概率 (%) 及相对气候概率的增加值 (%), 结果如表 2。从表 2 可见, 当 MJO 处于第 4 位相时, 有雨 (即有降水)、中雨以上及大雨以上的出现日数的概率均比其他位相大, 且较气候概率的增幅也是各位相中最大的, 说明 MJO 处于该位相时, 有利于西南地区东部夏季出现降水且出现较强降水的可能性也较其他位相大; 而当 MJO 处于第 6 位相时, 有雨、中雨以上及大雨以上的出现概率均比其他位相小, 且较气候概率的减幅是各位相中最大的, 说明 MJO 处于该位相时, 不利于西南地区东部夏季出现降水且出现较强降水的可能性也较其他位相小。这与图 1 和图 2 的分析结果比较一致。

表 2 1979~2013 年, MJO 不同位相下雨日概率(单位: %) 及其较气候概率的变化值(单位: %)

Table 2 Probability (%) and increased (decreased) probability (%) compared with the climatic value of rainfall days in eastern Southwest China, synthesized during phases 1–8 of the MJO, 1979–2013

位相	有雨(降水量 ≥0.1 mm)		中雨以上(降水 量≥10 mm)		大雨以上(降 水量≥25 mm)	
	概率	概率变化	概率	概率变化	概率	概率变化
1	44.36%	−0.98%	15.82%	0.05%	7.08%	0.00%
2	45.80%	0.46%	15.75%	−0.02%	7.23%	0.15%
3	44.60%	−0.74%	15.51%	−0.26%	7.07%	0.00%
4	50.64%	5.30%	17.98%	2.21%	8.65%	1.57%
5	47.72%	2.38%	16.57%	0.80%	6.48%	−0.60%
6	39.60%	−5.74%	13.33%	−2.44%	5.92%	−1.16%
7	47.57%	2.24%	16.12%	0.34%	7.64%	0.57%
8	44.92%	−0.41%	15.87%	0.09%	7.23%	0.16%

由上可见, MJO 处于不同活动中心下西南地区东部夏季降水特征是有差异的, 总体来说, 当 MJO 处于第 4 位相和第 6 位相时, 西南地区东部夏季降水分别具有较明显的偏多和偏少的特征, 因此在作西南地区东部降水量短期气候预测及延伸期降水过程预报时, MJO 活动强度中心的位置在第 4 位相和第 6 位相时可能有一定的指示意义。

3.2 MJO 处于第 4 位相和第 6 位相的环流特征分析

为了分析 MJO 活动对西南地区东部夏季降水的影响, 选取 MJO 位于第 4 位相和第 6 位相时对应的 500 hPa 位势高度距平场进行合成(图 3)。从图 3 可见, 当 MJO 活动中心位于第 4 位相(图 3a)和第 6 位相(图 3b)的环流距平场在东亚和南亚、印度洋和西太平洋地区呈基本相反的分布。当 MJO 位于第 4 位相时, 25°N 以南的南亚—印度洋—中南半岛—西太平洋地区夏季 500 hPa 位势高度为正距平, 在贝加尔湖及其附近地区和鄂霍次克海南部地区也为正距平区, 在我国长江流域(含西南地区东部地区)、西北、华北及东北偏南地区为负距平区, 另外在 55°N 以北为负距平区, 在 40°E~60°E 负距平区甚至伸展到了里海以南地区, 这样的环流形势表明, 西太平洋副热带高压偏南偏东, 在鄂霍次克海及其附近地区有阻塞高压存在, 偏西偏北地区多低值系统活动; 而当 MJO 位于第 6 位相时 500 hPa 环流形势则相反, 体现为夏季西太平洋副高偏北, 偏西偏北地区低值系统不活跃。图 4 表示的是西南地区东部夏季降水量与 500 hPa 环流场的相关分布, 可见, 西南地区东部夏季多雨与 MJO 位于第 4 位相时的环流形势基本一致, 而与 MJO 位于第 6

位相时的环流形势基本相反, 这表明当 MJO 位于第 4 位相时有利于西南地区东部夏季多雨, 而位于第 6 位相时则不利于该区域的降水。

水汽输送是产生降水的重要条件之一。图 5 给出了 1979~2013 年夏季 850 hPa 水汽通量距平及水汽通量散度距平在 MJO 第 4 位相和第 6 位相的合成。由图 5a 可以看到, MJO 活动中心位于第 4 位相时, 西南地区东部为增强的西南—东北向水汽输送, 同时水汽通量散度为负值, 表明该区域为水汽辐合区; 而当 MJO 活动中心位于第 6 位相时(图 5b), 西南地区东部西南—东北向水汽输送减弱, 同时水汽通量散度为正值, 表明该区域为水汽辐散区。李永华等(2009a, 2010b)的研究表明, MJO 活动中心位于第 4 位相时的水汽输送特征有利于西南地区东部夏季降水增加, 而 MJO 活动中心位于第 6 位相时则该区域降水通常偏少。

从 1979~2013 年夏季 105°E~110°E 平均的垂直速度纬度—高度剖面在 MJO 第 4 位相和第 6 位相的合成图(图 6)可见, 当 MJO 活动中心位于第 4 位相时, 从 105°E~110°E 之间的北半球赤道到 34°N 的对流比较旺盛, 在西南地区东部为深厚的上升气流, 而 34°N~40°N 区域对流层中下层则盛行下沉气流(图 6a); 而当 MJO 活动中心位于第 6 位相时, 10°N 以南地区盛行下沉气流, 10°N~27°N 区域中高层则为上升气流, 27°N~34°N 左右区域(包括西南地区东部上空区域)则为深厚的下沉气流, 34°N~40°N 区域中高层则为深厚的上升气流(图 6b)。由此可见, 从垂直速度分布来看, 当 MJO 活动中心位于第 4 位相时利于西南地区东部夏季多雨, 而第 6 位相则相反。

3.3 MJO 处于第 4 位相和第 6 位相影响西南地区东部夏季降水的可能机制

通常 MJO 位于第 4 位相时对流中心位于 90°E 及其附近地区, 即孟加拉湾南部赤道东印度洋地区, 而第 6 位相时 MJO 对流主体位于西太平洋及其附近地区, MJO 从第 4 位相到第 6 位相, 热带对流表现为东传的过程(丁一汇和梁萍, 2010; 李汀等, 2012)。张净雯等(2015)的研究表明, 不同季节赤道东印度洋和西北太平洋对流活动均存在反相变化的关系, 这也表明 MJO 位于第 4 位相和第 6 位相时对流强中心具有显著的相反的变化特征。图 7 表示的 1979~2013 年夏季 OLR 距平场和 850 hPa 矢量风距平场在 MJO 第 4 位相和第 6 位相

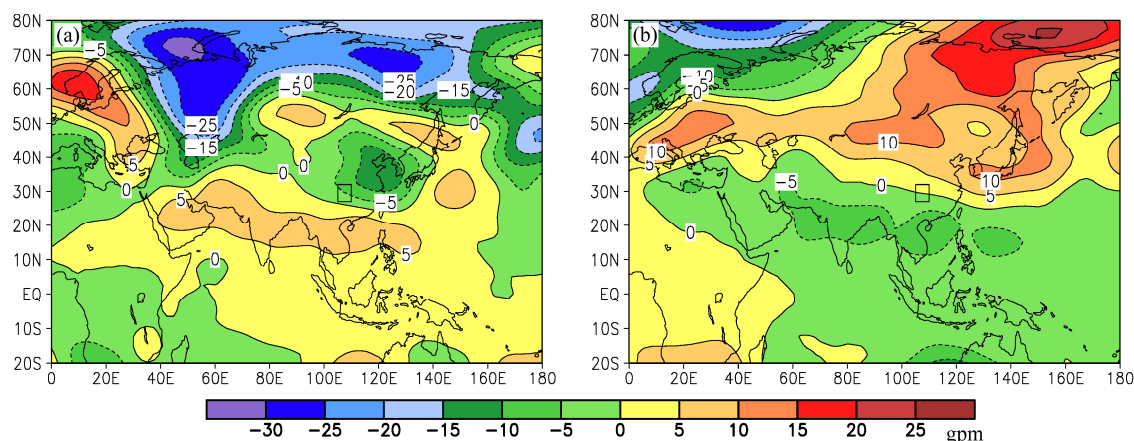


图3 1979~2013年夏季500 hPa位势高度距平(阴影, 单位: gpm)在MJO(a)第4位相和(b)第6位相的合成。图中方框区域为西南地区东部

Fig. 3 Composite of the 500-hPa geopotential height anomaly (color scale; units: gpm) in summer during (a) phase 4 and (b) phase 6 of the MJO, 1979–2013. Rectangular area in figure represents eastern Southwest China

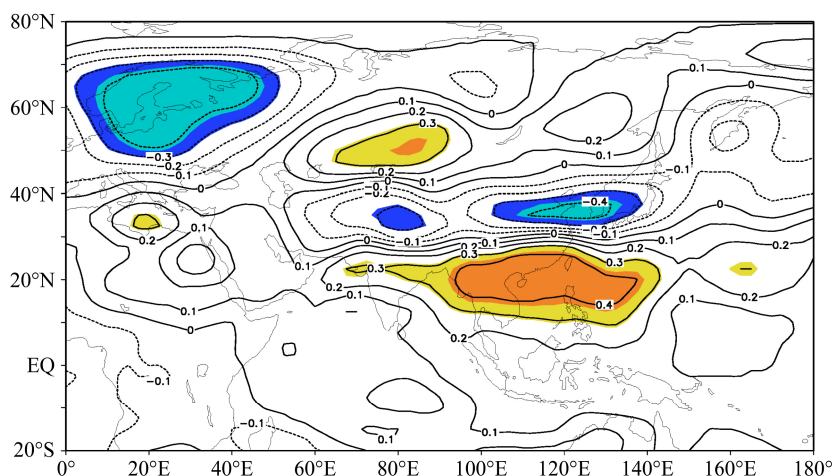


图4 1979~2013年西南地区东部夏季降水量与500 hPa位势高度场的相关关系分布场。填色区通过95%信度检验

Fig. 4 Correlation field between summer rainfall in eastern Southwest China and 500-hPa geopotential height, 1979–2013. The areas above 95% confidence level are shaded

的合成。由图7a可见, MJO活动中心位于第4位相时, 阿拉伯海东部、孟加拉湾南部、赤道印度洋东部及南海南部为OLR负距平区, 表明该区域对流偏强, 西南地区东部也为负距平区, 表明该区域盛行上升气流, 对流活动增强, 同时向西南地区东部的水汽输送增强, 而菲律宾及其附近地区对流偏弱(为OLR正距平区); MJO活动中心位于第6位相时(图7b)恰与第4位相相反, 赤道印度洋为OLR正距平区, 对流偏弱, 西南地区东部也为OLR正距平区, 表明该区域盛行下沉气流, 同时向西南

地区东部的水汽输送偏弱, 而菲律宾及其附近地区为OLR负距平区, 表明该区域对流活动偏强。从作者采用相关分析方法的研究结果(李永华等, 2009b)表明, 孟加拉湾南部及赤道东印度洋地区OLR值偏低(高), 而菲律宾及其附近地区OLR值偏高(偏低), 有利于西南地区东部夏季降水偏多(偏少)。因此, MJO活动中心位于第4位相与第6位相时西南地区东部夏季降水量距平呈现相反的特征, 即第4位相时可能偏多, 而第6位相时可能偏少。

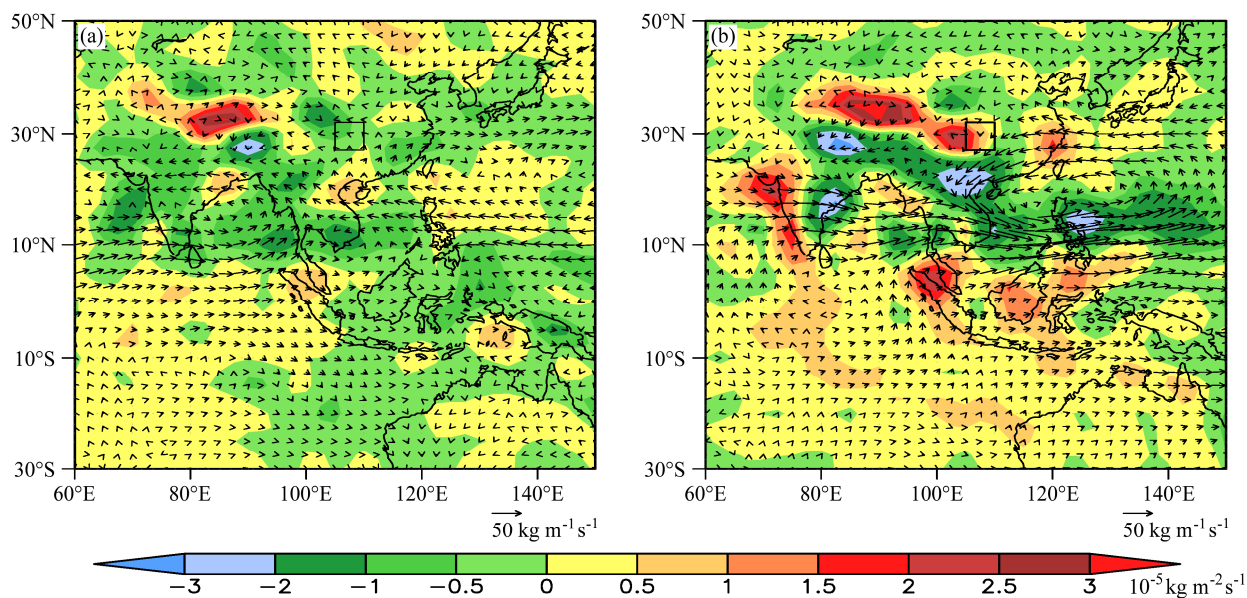


图5 1979~2013年夏季850 hPa水汽通量距平(箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)及水汽通量散度距平(阴影, 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)在MJO (a)第4位相和(b)第6位相的合成。图中方框区域为西南地区东部, 下同

Fig. 5 Composite of water vapor flux anomaly (arrows, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence anomaly (color scale, units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) at 850 hPa, in summer, during (a) phase 4 and (b) phase 6 of the MJO, 1979–2013. Rectangular area in figure represents eastern Southwest China, the same below

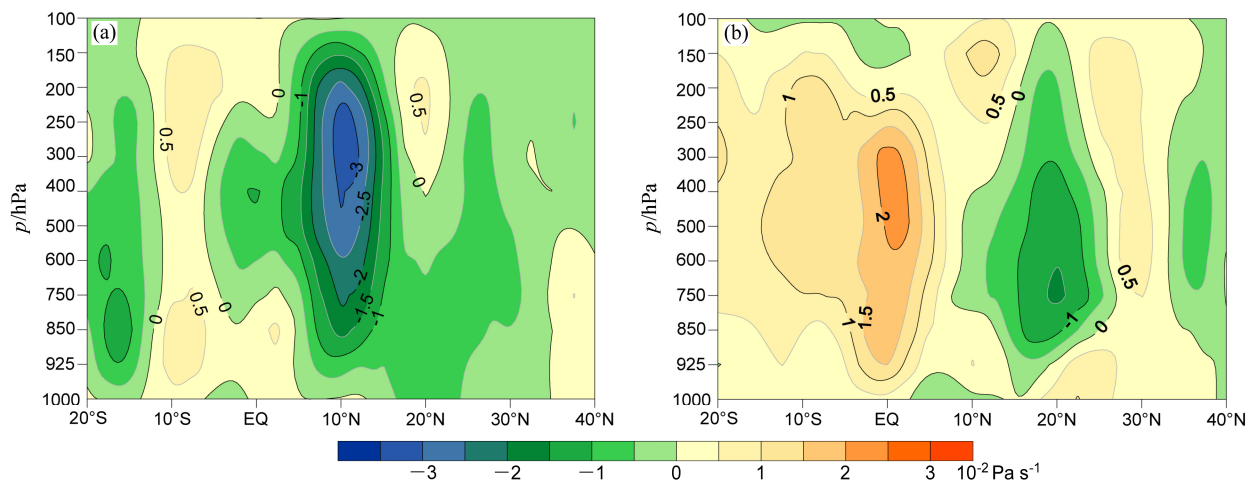


图6 1979~2013年夏季105°E~110°E平均垂直速度距平(阴影, 单位: 10^{-2}Pa s^{-1})的纬度—高度剖面在MJO (a)第4位相和(b)第6位相的合成

Fig. 6 Latitude–altitude cross section of the composite of the vertical velocity anomaly (color scale, units: 10^{-2}Pa s^{-1}) averaged over 105°–110°E, in summer, during (a) phase 4 and (b) phase 6 of the MJO, 1979–2013

图8给出了1979~2013年夏季大气热源 Q_1 距平场在MJO第4位相和第6位相的合成,图8与图7分布大体一致。当MJO活动中心从第4位相(图8a)向第6位相(图8b)移动的时候,大气热源中心也随之东移。在第4位相时异常热源主要位于阿拉伯海、孟加拉湾及南海偏南地区,西太平洋暖池地区整层大气凝结潜热释放较少,在西南地区东部以及江南、华南大部地区大气热源为正值。而在第6位相时大气加热中心东传北跳至西太平洋

地区,西太平洋大部分地区为潜热大值区,两个大值中心分别位于南海及菲律宾以东地区,在西南地区东部大气热源为负值。可见在MJO东传的两个时期,整层大气的凝结潜热释放非常强,但热力状况的分布变化较大,这就使得通过热带对流释放的潜热强迫实现的包括西南地区东部在内的热带外地区大气环流和降水出现差异。

MJO很大程度上表现为低频对流活动及其伴随的热带大气环流扰动的系统性东移(Lau and

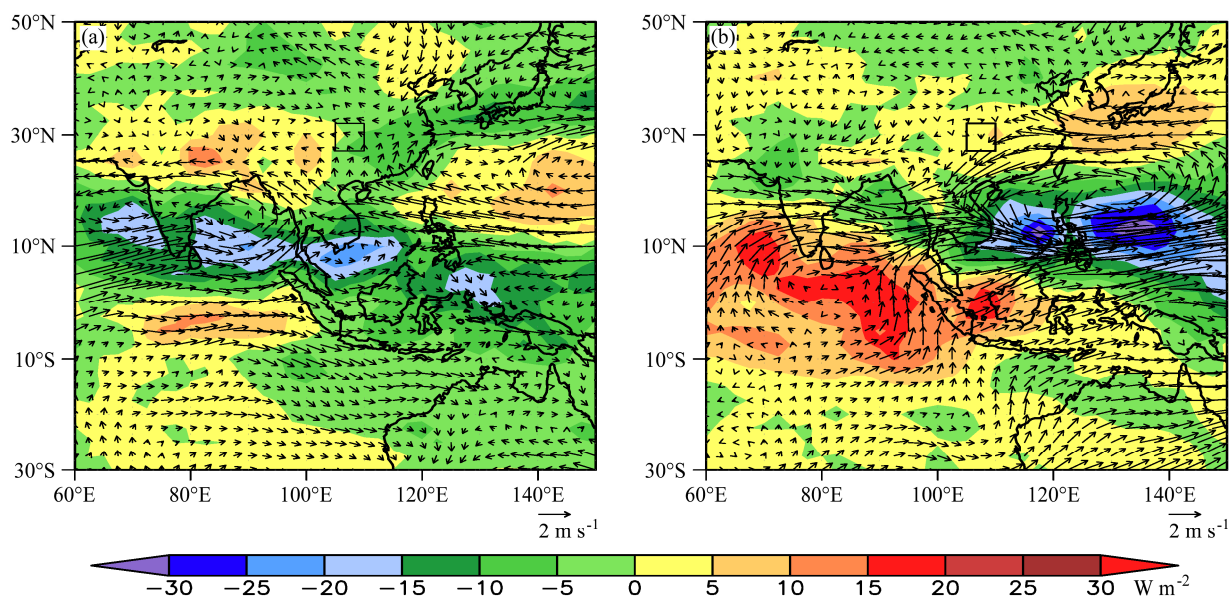


图7 1979~2013年夏季OLR距平场(阴影, 单位: W m^{-2})和850 hPa矢量风距平场(箭头, 单位: m s^{-1}) 在MJO (a) 第4位相和(b) 第6位相的合成

Fig. 7 Composite of OLR anomaly (color scale, units: W m^{-2}) and 850-hPa wind anomaly (vectors, units: m s^{-1}), in summer, during (a) phase 4 and (b) phase 6 of the MJO, 1979–2013

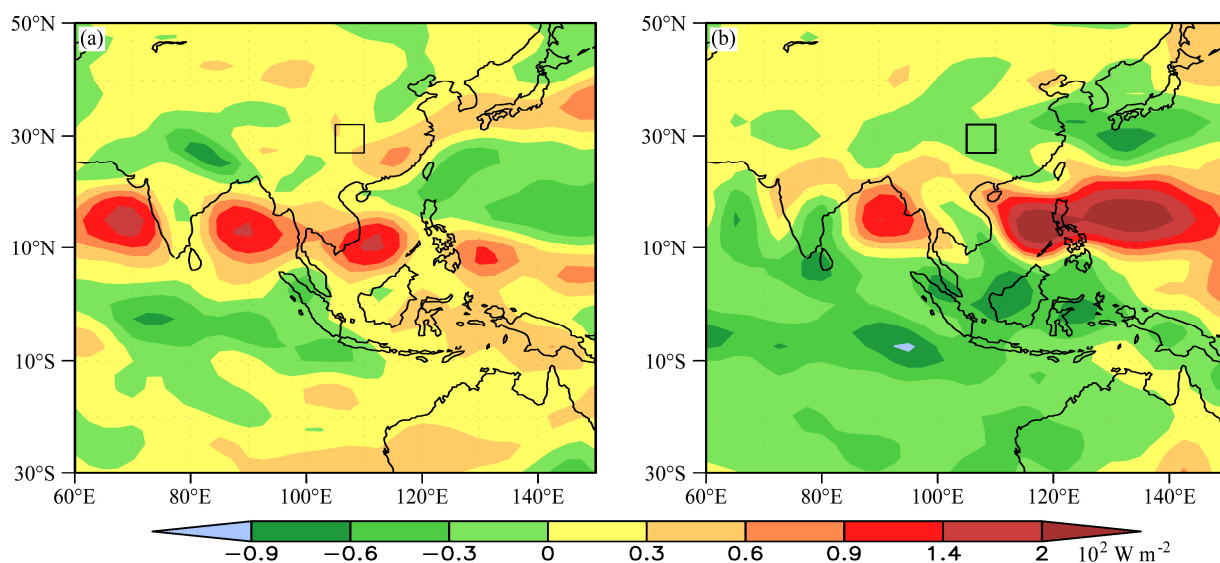


图8 1979~2013年夏季大气热源 Q_1 距平场(阴影, 单位: 10^2 W m^{-2}) 在MJO (a) 第4位相和(b) 第6位相的合成

Fig. 8 Composite of Q_1 anomaly (color scale, units: 10^2 W m^{-2}), in summer, during (a) phase 4 and (b) phase 6 of the MJO, 1979–2013

Lau, 1986)。结合图7和图8可见, 当MJO在第4位相和第6位相时, 夏季对流活动强且差异大的区域分别在赤道东印度洋区($5^\circ \sim 15^\circ \text{N}$, $60^\circ \sim 100^\circ \text{E}$)和西太平洋区($10^\circ \sim 20^\circ \text{N}$, $120^\circ \sim 150^\circ \text{E}$), 分别定义为赤道东印度洋关键区和西太平洋关键区, 对两个关键区OLR的30~60 d低频分量平均值取负值(OLR值越小其表征对流越强)作为其低频对流强度值, 建立1979~2013年序列值, 分别与500 hPa

位势高度场(图9)、850 hPa风场(图10)、 $27^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ 纬向平均垂直环流(图11)作回归分析, 以考察MJO不同位相下的低频对流活动对环流扰动的影响。已有研究表明(李永华等, 2009a)西南地区东部夏季降水的多寡与西太平洋副高的南北位置关系密切, 该区域夏季降水偏少(偏多)时西太平洋副高的脊线大部分年份是偏北(偏南)的。当MJO处于第4位相时, 赤道东印度洋关键区低

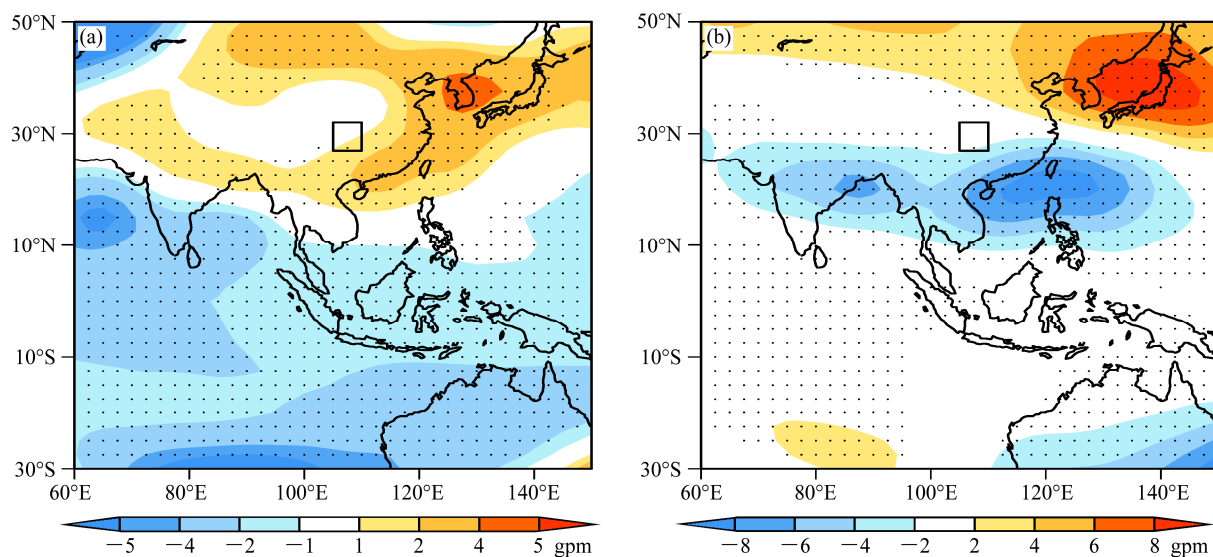


图9 1979~2013年夏季(a)赤道东印度洋关键区及(b)西太平洋关键区对流强度(单位: W m^{-2})与500 hPa位势高度场的回归(单位: gpm)。阴影区表示数值通过了95%的信度检验

Fig. 9 Linear regression correlation between the 500-hPa geopotential height (units: gpm) and convection intensity over (a) the eastern equatorial Indian Ocean and (b) the western Pacific Ocean, in summer, 1979–2013. Shaded areas indicate statistically significant correlation above 95% confidence level, based on the Monte Carlo test

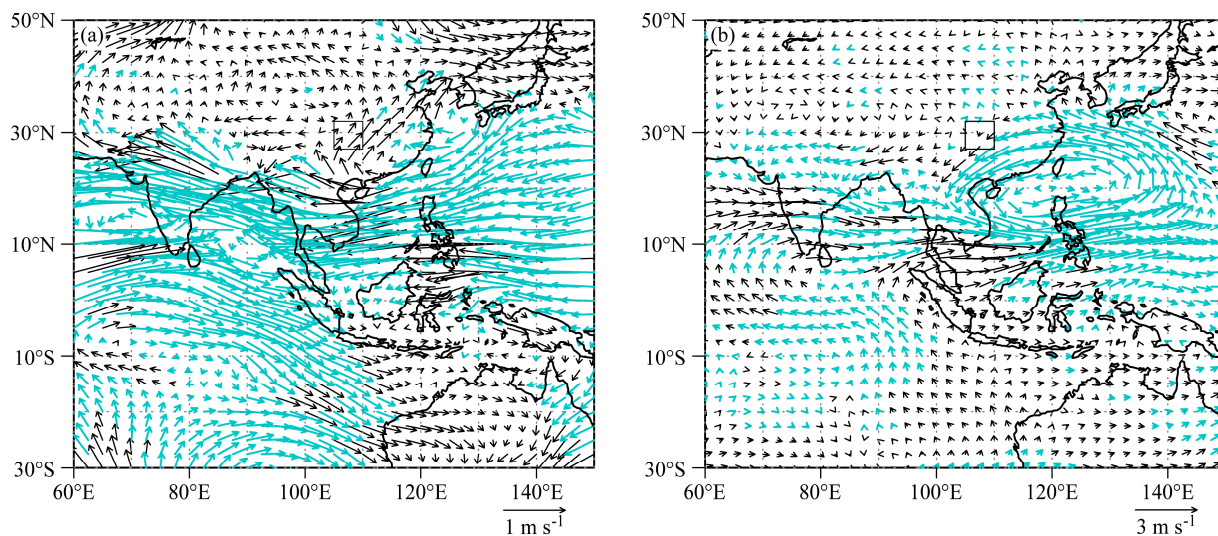


图10 1979~2013年夏季(a)赤道东印度洋关键区及(b)西太平洋关键区对流强度(单位: W m^{-2})与850 hPa风场的回归(单位: m s^{-1})。蓝色箭头表示数值通过了95%的信度检验

Fig. 10 Linear regression correlation between the 850-hPa wind field and convection intensity over (a) the eastern equatorial Indian Ocean and (b) the western Pacific Ocean, in summer, 1979–2013. Blue arrows indicate statistically significant correlation above 95% confidence level, based on the Monte Carlo test

频对流活跃而西太平洋区对流不活跃,西太平洋副高偏强且位置偏南(图9a),低层风场显示在赤道东印度洋关键区靠近对流(热源)中心的西北侧和东南侧有气旋式异常风场,而热源东侧的海洋大陆地区,风场表现为东风异常,在热源的西南侧以及西北太平洋东海地区有反气旋式异常风场,该波列

向东北方向传播,受此影响西南地区东部出现西南风异常(图10a),同时850 hPa以上西南地区东部为深厚的偏西方向的上升气流(图11a),这有利于西南地区东部夏季降水偏多;而当MJO处于第6位相时,赤道东印度洋关键区低频对流相对第4位相时有所减弱,而西太平洋区对流明显活跃,其释

放的潜热有利于激发 PJ (太平洋—日本) 型 Rossby 波列, 也使得 Hadley 环流下沉支偏北, 西太平洋副高偏弱且位置偏北 (黄荣辉和孙凤英, 1994) (图 9b), 低层风场显示菲律宾及其附近地区出现气旋式异常风场, 西南地区东部有东北向异常风 (图 10b), 同时 850 hPa 以上西南地区东部为深厚的偏东向的异常下沉气流 (图 11b), 这不利于西南地区东部夏季降水偏多。根据 Gill 理论 (Gill, 1980; Zhou et al., 2009), 西太平洋区对流活跃可激发南海北部异常气旋从而使西太平洋副高偏北, 因此当 MJO 位于第 6 位相时, 西太平洋副高位置往往偏北。吴

国雄等 (2000) 则利用热力适应理论讨论了赤道东印度洋对流异常影响西太平洋副热带高压异常的物理机制, 他们认为通过第一级热力适应, 东印度洋上的对流强时形成低层气旋式环流, 并在其东侧的偏南气流中产生对流性降水, 然后通过第二级热力适应, 在 500 hPa 上导致西太平洋副热带高压加强西伸南压, 西太平洋副高偏南, 这表明当 MJO 位于第 4 位相时, 西太平洋副高位置往往偏南。根据以上的分析, 夏季 MJO 处于第 4 位相和第 6 位相影响西南地区东部降水的可能机制可以概括为图 12 所示。

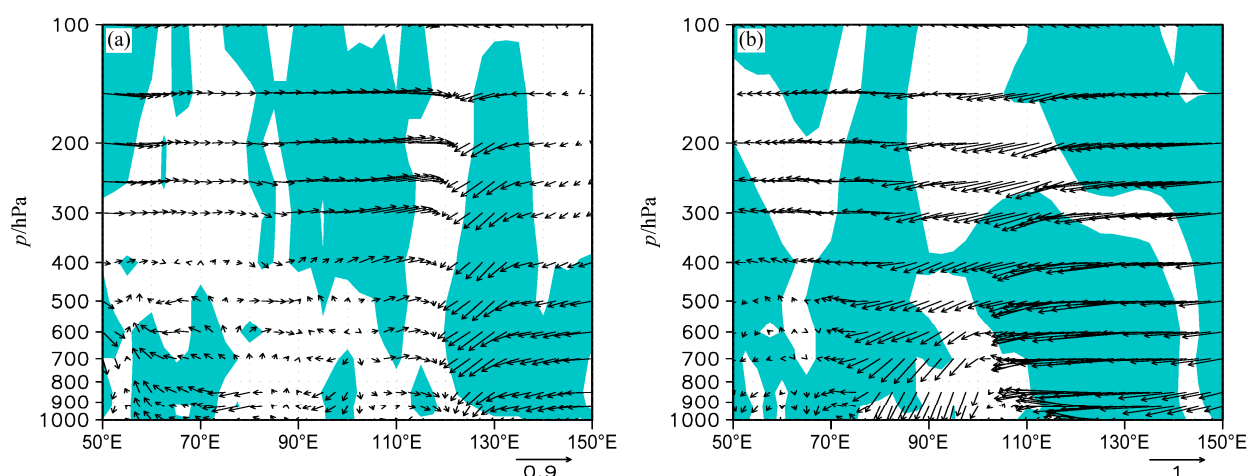


图 11 同图 9, 但为与 27°~32°N 平均垂直环流的回归

Fig. 11 As in Fig. 9, but for vertical circulation averaged over 27°–32°N

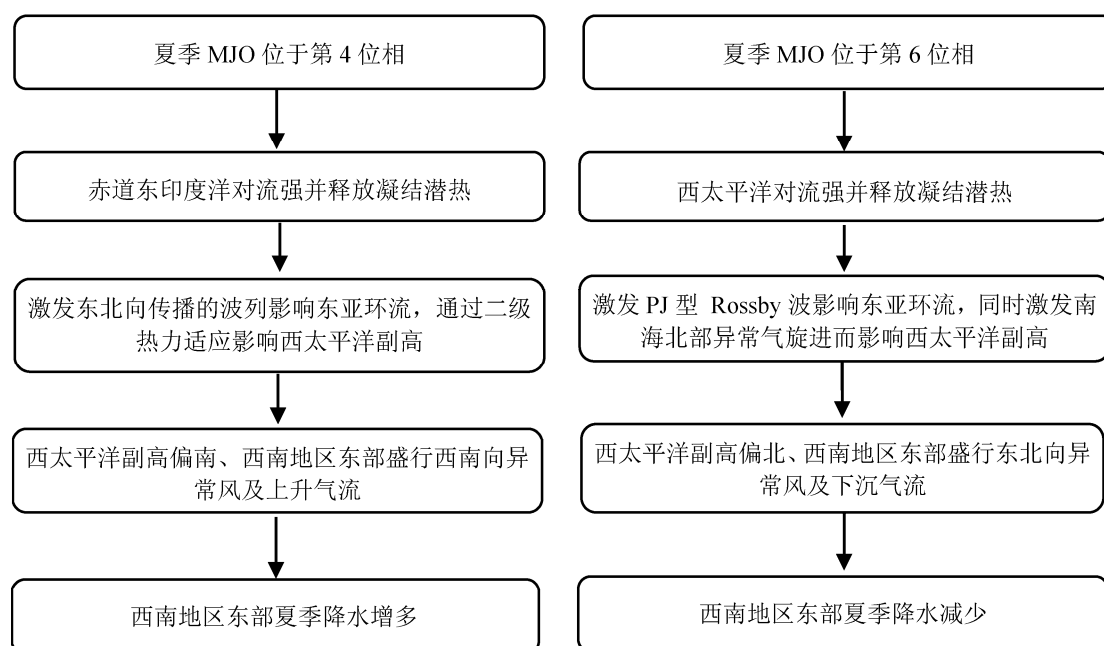


图 12 夏季 MJO 位于第 4 位相和第 6 位相影响西南地区东部夏季降水的概念图

Fig. 12 Schematic diagram of impact of MJO on summer rainfall over eastern Southwest China during phases 4 and 6 of the MJO

4 结论与讨论

本文在分析了夏季 MJO 不同位相与西南地区东部夏季降水的关系基础之上, 然后对其影响的可能物理机制进行了初步的探讨, 得出结论如下:

(1) MJO 位于第 4 (第 6) 位相时对西南地区东部夏季降水影响较显著。当 MJO 处于第 4 (第 6) 位相时, 西南地区东部夏季降水具有较明显的偏多 (偏少) 的特征。而且当 MJO 处于第 4 位相时, 有利于西南地区东部夏季出现降水且出现较强降水的可能性也较其他位相大; 而当 MJO 处于第 6 位相时, 不利于西南地区东部夏季出现降水且出现较强降水的可能性也较其他位相小。

(2) 当 MJO 处于第 4 (第 6) 位相时, 由于西太平洋副高偏南 (偏北)、向西南地区东部的水汽输送增强 (减弱) 且为上升 (下沉) 气流, 因此有利于 (不利于) 西南地区东部夏季降水偏多。

(3) MJO 从第 4 位相到第 6 位相, 热带低频对流中心从赤道东印度洋地区东移到西太平洋地区。在第 4 位相时, 赤道东印度洋地区上空低频对流凝结潜热释放可激发东北向传播的波动影响东亚环流, 同时通过二级热力适应影响西太平洋副高, 出现有利于西南地区东部夏季降水的环流形势, 使得西南地区东部夏季降水增多; 在第 6 位相时, 西太平洋地区上空低频对流凝结潜热有利于激发 PJ 型 Rossby 波影响东亚环流, 同时激发南海北部异常气旋进而影响西太平洋副高, 出现不利于西南地区东部夏季降水的环流形势, 使得西南地区东部夏季降水减少。

本文基于 1979~2013 年的资料, 主要采用了合成分析、线性回归方法对 MJO 与西南地区东部夏季降水的关系进行了初步探讨, 至于利用 MJO 指数来进行业务应用, 还需要更多的天气过程个例来进一步加以验证。

致谢 两位匿名审稿专家和《大气科学》编辑为本文提出了宝贵意见和建议, 特此感谢!

参考文献 (References)

- Anderson J R, Rosen R D. 1983. The latitude-height structure of 40–50 day variations in atmospheric angular momentum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 1584–1591, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1584:TLHSOD>2.0.CO;2.
- 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 Xuxu, Li Chongyin, Tan Yanke, 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.
- 丁一汇, 梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报 [J]. *气象*, 36 (7): 111–122. Ding Yihui, Liang Ping. 2010. Extended range forecast basing on MJO [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 36 (7): 111–122.
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (449): 447–462, doi:10.1002/qj.49710644905.
- 何洁琳, 段安民, 覃卫坚. 2013. 热带大气季节内振荡与西北太平洋热带气旋活动的季节预测: 统计事实研究 [J]. *气候与环境研究*, 18 (1): 101–110. He Jielin, Duan Anmin, Qin Weijian. 2013. Statistics on the modulation of Madden-Julian oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (1): 101–110, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11075.
- Hidayat R, Kizu S. 2010. Influence of the Madden-Julian oscillation on Indonesian rainfall variability in austral summer [J]. *Int. J. Climatol.*, 30: 1816–1825, doi:10.1002/joc.2005.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. *大气科学*, 18 (2): 141–151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 18 (2): 141–151, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.02.
- Jeong J H, Ho C H, Kim B M, et al. 2005. Influence of the Madden-Julian oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D11): D11104, doi:10.1029/2004JD005408.
- 贾小龙, 梁潇云. 2011. 热带 MJO 对 2009 年 11 月我国东部大范围雨雪天气的可能影响 [J]. *热带气象学报*, 27 (5): 639–648. Jia Xiaolong, Liang Xiaoyun. 2011. Possible impacts of the MJO on the severe ice-snow weather in November of 2009 in China [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 27 (5): 639–648.
- 据建华, 吕俊梅, 谢国清, 等. 2011. MJO 和 AO 持续异常对云南干旱的影响研究 [J]. *干旱气象*, 29 (4): 401–406. Ju Jianhua, Lü Junmei, Xie Guoqing, et al. 2011. Studies on the influences of persistent anomalies of MJO and AO on drought appeared in Yunnan [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 29 (4): 401–406.
- Lau N C, Lau K M. 1986. The structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model [J]. *J. Atmos. Sci.* 43: 2023–2047, doi:10.1175/1520-0469(1986)043<2023:TSAPOI>2.0.CO;2.
- 李崇银. 1990. 大气中的季节内振荡 [J]. *大气科学*, 14(1): 32–45. Li Chongyin. 1990. Intraseasonal oscillation in the atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 14 (1): 32–45, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.05.
- 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用 [J]. *大气科学*, 27 (4): 518–535. Li Chongyin, Long Zhenxia, Mu Mingquan. 2003. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 27 (4): 518–535.
- 李崇银, 潘静, 宋洁. 2013. MJO 研究新进展 [J]. *大气科学*, 37 (2):

- 229–252. Li Chongyin, Pan Jing, Song Jie. 2013. Progress on the MJO research in recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 37 (2): 229–252, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12318.
- 李汀, 严欣, 聿建华. 2012. MJO 活动对云南 5 月降水的影响 [J]. 大气科学, 36 (6): 1101–1111. Li Ting, Yan Xin, Ju Jianhua. 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 36 (6): 1101–1111, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11152.
- 李文锐, 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 Wenkai, He Jinhai, Qi Li, 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), 20 (5): 983–989.
- 李永华, 徐海明, 刘德. 2009a. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常 [J]. 气象学报, 67 (1): 122–132. Li Y H, Xu H M, Liu D. 2009a. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67 (1): 122–132, doi:10.11676/qxxb2009.013.
- 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 2009b. 西南地区东部夏季典型旱涝年的 OLR 特征 [J]. 高原气象, 28 (4): 861–869. Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, et al. 2009b. Characteristics of outgoing longwave radiation related to typical flood and drought years over the east of Southwest China in summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (4): 861–869.
- 李永华, 徐海明, 白莹莹, 等. 2010a. 我国西南地区东部夏季降水的时空特征 [J]. 高原气象, 29 (2): 523–530. Li Yonghua, Xu Haiming, Bai Yingying, et al. 2010a. Spatial-temporal characteristics of summer precipitation in the east of Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (2): 523–530.
- 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 2010b. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征 [J]. 气象学报, 68 (6): 932–943. Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, et al. 2010b. Features of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of Southwest China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (6): 932–943, doi:10.11676/qxxb2010.088.
- 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35 (3): 422–434. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 35 (3): 422–434, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.03.04.
- 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 Ping, Ding Yihui. 2012. Extended range forecast experiment based on intraseasonal oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 36 (1): 102–116, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.09.
- 刘冬晴, 杨修群. 2010. 热带低频振荡影响中国东部冬季降水的机理 [J]. 气象科学, 30 (5): 684–693. Liu Dongqing, Yang Xiuqun. 2010. Mechanism responsible for the impact of Madden-Julian oscillation on the wintertime rainfall over eastern China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30 (5): 684–693, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.016.
- 吕俊梅, 聿建华, 任菊章, 等. 2012. 热带大气 MJO 活动异常对 2009~2010 年云南北极干旱的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (4): 599–613. Lü Junmei, Ju Jianhua, Ren Juzhang, et al. 2012. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009–2010 [J]. Science China: Earth Sciences (in Chinese), 55 (1): 98–112, doi:10.1007/s11430-011-4348-1.
- 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: 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: 1109–1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- Matthews A J, Pickup G, Peatman S C, et al. 2013. The effect of the Madden-Julian oscillation on station rainfall and river level in the fly river system, Papua New Guinea [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118: 10926–10935, doi:10.1002/jgrd.50865.
- 牛法宝, 杞明辉, 杨素雨, 等. 2013. MJO 不同活动中心位置对云南冬半年降水过程的影响 [J]. 气象, 39 (9): 1145–1153. Niu Fabao, Qi Minghui, Yang Suyu, et al. 2013. Influence of MJO center position on precipitation process of Yunnan in winter half year [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 39 (9): 1145–1153.
- Pohl B, Matthews A J. 2007. Observed changes in the lifetime and amplitude of the Madden-Julian oscillation associated with interannual ENSO sea surface temperature anomalies [J]. J. Climate, 20: 2659–2674, doi:10.1175/JCLI4230.1.
- 孙颖, 丁一汇. 2002. 青藏高原热源异常对 1999 年东亚夏季风异常活动的影响 [J]. 大气科学, 26 (6): 817–828. Sun Y, Ding Y H. 2002. Influence of anomalous heat sources over the Tibetan Plateau on the anomalous activities of the 1999 East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 26 (6): 817–828, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.06.10.
- 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 [M]. J. Climate, 22 (6): 1482–1498, doi:10.1175/2008JCLI2595.1.
- 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应 [J]. 气象学报, 58 (5): 513–522. Wu Guoxiong, Liu Ping, Liu Yimin, et al. 2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—Two-Stage thermal adaptation in the atmosphere [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (5): 513–522, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.001.
- 姚菊香, 王盘兴, 李丽平. 2005. 季节内振荡研究中两种数字滤波器的性能对比 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 248–253. Yao Juxiang, Wang Panxing, Li Liping. 2005. Performance contrast between two filters in Madden-Julian oscillations analysis [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 248–253, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.02.014.

- Yanai M, Li Chengfeng, Song Zhengshan. 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1B): 319–351.
- 张净雯, 李建平, 李艳杰. 2015. 印度洋—西太平洋对流涛动的季节内特征 [J]. *大气科学*, 39 (2): 221–234. Zhang Jingwen, Li Jianping, Li Yanjie. 2015. Intraseasonal characteristics of the Indo–West Pacific convection oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 39 (2): 221–234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13296.
- Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. 2009. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in Southeast China [J]. *J. Climate*, 22: 201–216, doi:10.1175/2008JCLI1959.1.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 22, 2199–2215, doi:10.1175/2008JCLI2527.1.