章丽娜,林鹏飞,熊喆,等. 2011. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响 [J]. 大气科学, 35 (3): 560-570. Zhang Lina, Lin Pengfei, Xiong Zhe, et al. 2011. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 560-570.

热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响

章丽娜1 林鹏飞2 熊喆3 吴洪1

1中国气象局培训中心,北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029 3 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候一环境重点实验室,北京 100029

摘 要 本文基于实时的热带大气季节内振荡 (MJO) 指数和中国台站降水资料,研究了 MJO 对中国华南前汛期 (4~6月)降水的影响。结果表明,随着 MJO 的活跃中心从印度洋进入西太平洋,华南地区的降水由偏多转为偏少。最显著的降水正负异常分别位于第4位相和第7位相,其区域平均的最大正负异常值相对于气候平均值的变化约为17%和11%。与降水异常相对应,大尺度背景场,如西北太平洋副热带高压、水汽和垂直速度也发生了季节内变化。当 MJO 的活跃中心位于印度洋 (第4位相),副高加强西伸,华南地区的水汽增加,上升运动亦加强,降水偏多。当 MJO 的活跃中心位于西太平洋 (第7位相),副高减弱东撤,华南地区的水汽减少,上升运动亦减弱,降水偏少。

关键词 热带大气季节内振荡 前汛期 降水 华南 实时热带大气季节内振荡指数 文章编号 1006-9895 (2011) 03-0560-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Impact of the Madden-Julian Oscillation on Pre-flood Season Precipitation in South China

ZHANG Lina¹, LIN Pengfei², XIONG Zhe³, and WU Hong¹

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Key Laboratory of Regional Climate – Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Impact of the Madden-Julian Oscillation (MJO) on pre-flood season precipitation in South China is investigated based on a real-time MJO index and observed daily rainfall from gauge stations. It is shown that the rainfall patterns change from enhanced to suppressed in South China at intraseasonal timescales as the MJO moves from the Indian Ocean to the western Pacific. The most significant positive and negative anomalies are found in phase 4 and phase 7, respectively. The maximum positive and negative anomalies of regional mean rainfall are 17% and 11% relative to the climatological regional mean, respectively. Such different rainfall regimes are associated with the corresponding changes in large-scale background fields such as the western Pacific subtropical high (WPSH), moisture,

收稿日期 2010-07-19, 2011-01-12 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950903、2009CB421100,中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模 拟国家重点实验室自由探索,国家自然科学基金资助项目 40906012,国家高技术研究发展计划项目 2010AA012303

作者简介 章丽娜,女,博士,高级工程师,主要从事低频振荡等方面的研究和预报员培训。E-mail: zhangln@cma.gov.cn

and vertical motion. In phase 4, when the MJO is mainly over the Indian Ocean, the WPSH shifts farther westward, the moisture and upward motion in South China are increased, such environment is in favor of rainfall enhancement. In contrast, in phase 7, when the MJO enters the western Pacific, the WPSH retreats eastward, the moisture and upward motion in South China are decreased, such environment is in favor of rainfall suppression. **Key words** Madden-Julian Oscillation (MJO), pre-flood season, precipitation, South China, Real-time Multivariate

MJO (RMM) index

1 引言

热带大气季节内振荡 (MJO) 是大尺度环流与 热带对流相耦合的振荡,具有 $30 \sim 90$ 天的季节内 时间尺度,是热带大气活动在 $7 \sim 90$ 天时间尺度的 最强振荡信号 (Madden and Julian, 1971, 1994; 李崇银等, 2003; Zhang, 2005)。许多研究证实, MJO 能够影响近乎全球不同区域的降水,如北美 (Lorenz and Hartmann, 2006)、南美 (Carvalho et al., 2004)、非洲 (Pohl et al., 2007)、西南亚 (Barlow et al., 2005)、澳大利亚 (Wheeler and Hendon, 2004)、东亚 (Jeong et al., 2008; Zhang et al., 2009) 等。

降水的季节内预报是世界上各个国家共同面临 的难题 (Donald et al., 2006)。MJO 的时间尺度正 好介于月、季之间,且其本身具有较长的可预报性 (约2~4周),许多国家的科学家试图利用 MJO 与 降水的关系,提高当地降水的季节内预报能力 (Waliser et al., 2003)。若采用传统的滤波方法无 法实时监测 MJO, 也就无法根据 MJO 的情况进行 季节内预测。随着实时 MJO 指数(Wheeler and Hendon, 2004, 简称 WH04) 的提出, MJO 的实时 监测成为现实,通过定量分析 MJO 与降水的关系, 便可以实现利用 MJO 进行季节内预测。正因为 WH04 指数的实时性,近年来利用该指数研究 MJO 与降水关系的工作已越来越多 (如 Donald et al., 2006; Jeong et al., 2008; Zhang et al., 2009; Wheeler et al., 2009), 同时, 也有多个国家已经根 据该指数反映的 MJO 情况进行降水的季节内预 测。我国在业务上也已将实时 MJO 指数作为降水 季节内预报的主要工具之一。但是, 深入研究 MJO 与中国降水关系的工作还非常少,尤其是我国 的夏季降水呈现出3次明显的北跳,因此有必要研 究中国特定区域、特定时间段 MJO 与降水的关系。

华南位于我国低纬地区,受东亚季风影响,降

水丰沛,且雨季汛期最长,降水主要集中在4~9 月。其中,4~6月为华南前汛期,是大范围洪涝灾 害发生的主要时段。引发大范围洪涝的主要原因是 持续性的暴雨,其特点是时间长、强度大。如2006 年5月20日至6月16日,我国华南地区特别是广 东、福建持续了近一个月的暴雨天气,受灾严重。

为了预测华南前汛期降水,许多学者已经对多 种影响因子进行了研究, 如西北太平洋副热带高 压、海温、极涡、青藏高原雪盖、南极海冰、水汽输 送等(梁建茵,1994;徐海明,1997;谢炯光, 1997; 吴恒强等, 1998; 蔡学湛, 2001; 陈长胜等, 2004)。这些研究主要集中在季节和年际变化尺度。 就季节内尺度而言, 过去的研究表明, 华南前汛期 降水具有低频 (季节内) 振荡的特征, 并且与热带 低频振荡的影响有关(杨广基,1992; 史学丽和丁 一汇,2000;林爱兰等,2008;鲍名,2008)。但是 以前的工作主要分析热带西太平洋或南海的低频振 荡对前汛期降水的影响,较少提及热带 MJO 的作 用。因此, 深入研究 MJO 对华南前汛期降水的影 响,不仅能够加深对华南前汛期季节内降水的理 解,而且可为我国华南前汛期季节内降水预测提供 一定的科学依据。

2 资料和方法介绍

2.1 资料

1984~2004年4~6月的华南降水量取自中国 752个地面气象观测站及自动站的日降水资料。在 本文中,华南指福建、广东、广西和海南4省,其 中福建只取26°N以南地区,去除缺测较多的站点 和西沙站,共有62站(图1a)。

表征热带 MJO 对流(降水)的向外长波辐射 (Outgoing Long-wave Radiation,简称 OLR)选用 NOAA OLR 日资料。水平风场、位势高度、垂直 速度等来自 NCEP 再分析资料(简称 NCEP2)的 日平均资料。



图 1 华南地区 (a) 62 站分布和 (b) 1984~2004 年 4~6 月气候平均的前汛期降水分布 (阴影:降水量大于 7 mm/d) Fig. 1 (a) Locations of 62 gauge stations and (b) averaged daily rainfall in South China during Apr-Jun of 1984-2004 (only those greater than 7 mm/day are shaded)

本文采用由 WH04 定义的实时多变量 MJO 指数(简称 RMM 指数)。该指数能反映 MJO 的基本特征。它是对 15°S~15°N 平均的 OLR 和 200 hPa、850 hPa 纬向风做多变量 EOF 后,将逐日数据映射到第一、第二模态上得到的映射系数,分别记作 RMM1 和 RMM2,它们总是成对出现,称为 RMM 指数。根据 RMM1 和 RMM2,可将 MJO 沿赤道的东传分为 8 个位相,分别对应了热带对流(降水)中心的不同位置[见 Wheeler and Hendon (2004)的图 7]。8 个位相组成了一个 MJO 循环,即从西印度洋开始向东传播,最后在中东太平洋上消亡。平均而言,每个位相维持 6 天左右。

2.2 方法

MJO 在不同年份、不同事件中的强度有所不同。根据 RMM 指数的振幅和传播特征,可将MJO 分为强和弱两类。当 RMM1² + RMM2² > 1 并且持续 6 天以上定义为强 MJO。在 MJO 开始(结束)的前(后)几天,降水也可能受到 MJO 影响,因此在强 MJO 事件的前后几天,当满足 RMM1² + RMM2² > 0.9 时也认为属于强 MJO 事件。这里取0.9 是因为它表示 RMM 指数的平均强度(Pohl and Matthews, 2007)。强 MJO 包含了 8 个位相。强 MJO 事件之外,均定义为弱 MJO 事件,表示MJO 较弱或者不活跃。下面提到的 MJO 的 8 个位相。

本文主要采用合成分析的方法。具体做法是: 根据 1984~2004 年 4~6 月各个位相的 RMM 指数 所对应的日期,把同一位相的降水、风场、位势高 度、水汽通量及其散度和垂直速度等变量分别合 成,从而得到这些变量分别在 8 个位相的合成值。 文中的日异常值是指日平均值减去气候日平均后的 值。对于弱 MJO,则根据所有处于弱 MJO 状态的 日期,对相应变量进行合成。

合成后进行显著性检验。水平风场、位势高度 和水汽通量的概率分布接近正态分布,因此可直接 采用 t 检验,评估合成的异常值是否显著不同于 零。由于降水的概率分布往往不服从正态分布,因 此不能直接做 t 检验,而需在求降水日异常之前, 先对日平均降水进行变换,使其近似遵从正态分 布。考虑到台站的不均匀性,t 检验后还需进行场 检验,具体方法可见 Zhang et al. (2009)。

3 MJO 的演变特征

为了研究 MJO 对华南前汛期降水的影响,首 先有必要考察 MJO 的传播特征和相应的环流变 化。根据 RMM 指数将不同位相的 OLR 分别合 成,可见最显著的 MJO 特征是东传,其次是北传 (图 2)。第1 位相,非洲和热带西印度洋的 MJO 对 流中心开始活跃。第2、3 位相,活跃中心东移至 热带印度洋(图 2b、c)。第4~7 位相,活跃中心逐 渐离开印度洋,越过海洋大陆,进入热带西太平洋 (图 2d-g)。其中在第6、7 位相,西北太平洋上的 MJO 对流中心加强同时向北移动(图 2f,g),最为 明显的是第7 位相,对流中心从 5°N 北跳至 15°N。 第8 位相,西太平洋的对流减弱,活跃中心东移至 东太平洋,开始新的 MJO 周期。

综合 8 个位相的传播图像,可以看到印度洋和 西太平洋的对流中心在季节内尺度上存在相反空间 结构的偶极子特征。当 MJO 的活跃中心位于印度 洋时,西太平洋对流减弱,而当 MJO 活跃中心移







至西太平洋后,印度洋对流明显减弱。对流变化的 同时,大尺度水平流场也相应发生了改变。由于 850 hPa 流场的变化和水汽通量是一致的,这里就 不再赘述,详细的论述可见第5.2节的水汽输送部 分。

4 MJO 对前汛期降水的影响

华南绝大部分地区的前汛期平均降水量大于 6 mm (图 1b),其中单站平均降水量高于区域平均 降水量的有 28 站,这些站点主要集中在广西和广 东南部沿海地区,以及广东西北部。

在 MJO 的 8 个位相, 华南前汛期的降水呈现 出不同的变化特征。其中位相 4 有最大正异常 1.2 mm/d, 位相7有最大负异常0.77 mm/d, 分 别约占区域平均降水的 17%和 11%, 其它位相的 降水异常值均小于区域平均降水的 5% (图 3)。降 水增加或减少的特征与华南地区降水的空间变化有 关,具体表现为降水偏多的站点多寡(图略)。第4 位相,出现正异常(>0.5 mm/d)降水的站点远远 多于负异常 (<-0.5 mm/d) 降水的站点 (比例为 43:4), 华南区域平均的降水异常偏多, 而第7位 相,出现正异常降水的站点远少于负异常的站点 (比例为7:41),区域平均的降水异常偏少。即在 MJO的第4和第7位相,华南大范围表现出比较一 致的降水变化特征(正异常或负异常)。其它位相, 正负异常降水的站点数接近,区域平均的降水异常 接近于零。

与区域平均降水的变化特征相对应,在 MJO 的不同位相,降水异常的空间分布差异明显(图 4)。第1位相,降水负异常主要集中在北部地区, 东南部沿海以正异常为主。第2位相,降水负异常



图 3 在 MJO 的 8 个位相华南区域平均的降水异常(单位: mm/d)

Fig. 3 Composite regional mean rainfall anomalies in South China for 8 MJO phases

逐渐东扩,广西沿海的正异常加强,并且北扩。第 3 位相,正异常继续北扩,负异常区域缩小。第4 位相,除了北部部分地区,大部分出现正异常,最 大值中心在广西东南部。第5 位相,降水负异常又 逐渐南扩增强,正异常迅速缩小,大值中心只位于 广东珠江口。第6 位相,降水负异常继续东扩加 强,正异常东移至福建和广东交界处。第7 位相, 大部分出现降水负异常,大值中心出现在广西沿 海。第8 位相,降水负异常区迅速缩小,正异常区 扩大。MJO活跃中心向东移动过程中,第4 和第7 位相的降水正异常和负异常最为显著,通过了 90% 信度的场检验。

比较强、弱 MJO 对应的降水特征后可以发现, 弱 MJO 对降水影响的强度和范围均明显小于强 MJO,它引起的降水异常基本上都小于 1 mm/d。 因此,以下只讨论强 MJO 对华南前汛期降水的影 响。同时又由于降水变化最显著的是位相 4 和位相 7,我们着重对这 2 个位相加以分析。

5 MJO 各个位相大尺度背景场的变化

华南前汛期降水与水汽和上升运动密切相关。 气候平均而言,华南前汛期的降水丰沛,但同时降 水存在明显的季节内变化,即在 MJO 的前 4 个位 相降水趋于偏多,后 4 个位相降水趋于偏少,这种 变化与大尺度背景场的异常有关。下面通过西北太 平洋副热带高压(简称副高)、水汽、垂直速度等的 季节内变化特征来寻找与降水季节内变化有关、尤 其是与第 4、第 7 位相降水显著变化相关的因子。

5.1 西北太平洋副热带高压的变化

虽然,850 hPa 和 500 hPa 的位势高度都可以 用来表征副高,但为了便于与低层的水汽输送相联 系,本文选择 850 hPa 进行分析。在前汛期,平均 副高脊线位置在 20°N 左右,148 dagpm 线穿过中 国东部大陆,150 dagpm 线经过台湾和南海(图 略)。当 148 dagpm 线和 150 dagpm 线位置偏西 时,表示副高西伸,反之,当它们偏东时,表示副 高东撤。

下面考察副高随 MJO 的变化特征 (图 5)。第 1 位相,副高略偏西,西北太平洋为位势高度正异 常。从第 2 位相开始,西北太平洋的位势高度正异 常加强,副高逐渐西伸。到了第 3 位相,150 dagpm No. 3 ZHANG Lina et al. Impact of the Madden-Julian Oscillation on Pre-flood Season Precipitation in South China 565



图 4 (a-h) 强 MJO 位相 1~8 及 (i) 弱 MJO 的华南异常降水分布 (单位: mm/d)。实心圆、空心圆:通过 95%、90%信度检验的站点; 右下角数字:通过两种信度检验的站点数 (当通过 90%信度检验的站点数大于临界值 9 时表示该位相通过场检验)和每个位相的总天数。 Fig. 4 Composites of rainfall anomalies for (a-h) Phases 1-8 of strong MJO and (i) weak MJO. Solid and hollow circles denote the stations which pass Student's *t* test at 95% and 90% confidence levels, respectively, and the station numbers passing the test and days in each phase are given at the bottom right corner. In each phase, when the station number at 90% confidence level is larger than the critical value 9, the phase passes the field significance test

线西扩到华南沿海,位势高度正异常最为显著,且 为东北一西南走向(图 5c)。第4 位相,副高的位 置和强度接近气候平均态。从第5位相开始, 148 dagpm 线和150 dagpm 线逐渐东退,150 dagpm 大 气 科 学 Chinese Journal of Atmospheric Sciences 35 卷 Vol. 35



图 5 合成的 850 hPa 位势高度(实线,单位: dagpm)及其异常(阴影): (a-h) 位相 1~8 Fig. 5 Composites of 850-hPa geopotential height (solid lines, units: dagpm) and its anomalies (shaded areas) in (a-h) Phases 1-8

线在菲律宾以东出现东突,季风槽的增强(图 5e-g),相应的副高东撤,南海和西北太平洋出现 位势高度负异常,至第7位相负异常达到最强。第 8位相,季风槽消失,副高的位置和强度又接近气 候平均态。 上述分析表明,在 MJO 的影响下,副高也发 生变化。当 MJO 的活跃中心位于印度洋时,副高 西伸,西北太平洋位势高度升高。当 MJO 的活跃 中心东传、北移到副热带西北太平洋后,季风槽逐 渐增强,西北太平洋位势高度降低。这种变化将会 导致副高西北侧水汽输送的变化。

5.2 水汽通量及其散度的变化

气候平均而言, 前汛期进入华南地区的水汽来 源有三个(图略):孟加拉湾的西南气流、南海的西 南(或偏南)气流和副高西(西北)侧的西南气流, 三支水汽在华南辐合,使得华南地区水汽丰沛。

第5.1节提到随着 MJO 的活跃中心从印度洋 移至西太平洋, 副高由西伸转为东撤, 西北太平洋 经历了从正变高到负变高的转变。相应的,向华南 输送的水汽也由强变弱(图 6)。第1位相,正变高 和反气旋式风场异常的主体在西北太平洋, 西端伸 至南海,因此与之对应的强水汽输送位置偏南,南 海北部出现异常的西南偏西水汽输送,华南有弱的 水汽辐合。从第2到第3位相,正变高和反气旋异 常主体逐渐增强,位于 30°N 附近,呈东北一西南 走向,华南的偏南风异常水汽输送在第3位相达到 最强,但是水汽辐合偏北。第4位相,西北太平洋 正变高和偏南水汽输送迅速减弱,但是华南仍有较 强的水汽辐合。接着在第5~7位相,随着 MJO 的 活跃中心移到副热带西太平洋,西北太平洋的位势 高度逐渐降低并伴有气旋式异常,其西北侧的东北 风或东风异常水汽输送强,这便减弱了进入中国地 区的偏南水汽输送,华南大部分地区出现水汽辐 散。第8位相,随着副高的形态接近气候态,异常 的水汽输送也迅速减弱。

5.3 垂直运动的变化

在季节内尺度上,随着 MJO 活跃中心从印度 洋到西太平洋的移动, 华南地区的上升运动经历了 由强变弱的变化(图7)。大体上,华南上升运动增 强时,对应了降水增加,而上升运动减弱时,对应 降水减少。从第1位相到第4位相,南海的下沉运 动逐渐减弱,而华南地区的上升运动逐渐增强。其 中, 第3位相, 300~400 hPa 的垂直速度最大, 但 是低层还是弱的下沉运动。到了第4位相,华南上 空整层出现了上升运动。从第5位相开始到7位 相,南海的上升运动加强,华南的上升运动逐渐减 弱, 第7位相华南下沉运动最强, 最强中心在300~ 400 hPa,该位相恰好对应了降水最弱。第8位相, 华南的上升运动又开始增强,而南海的下沉运动也 开始增强。

综合 5.2 节和 5.3 节,与 MJO 活跃中心移动 相对应, 华南的水汽和垂直运动都发生了季节内变 化。降水异常最显著出现在位相4和位相7,可能 与这两个物理量场,尤其是它们低层的特征相关。 第3位相,虽然华南的西南水汽输送和上升运动最 强,但该位相华南的水汽辐合较弱,甚至出现辐 散,并且第3位相强的垂直上升运动出现在500 hPa 以上, 低层是下沉运动, 低层的水汽和上升条 件都不利于降水增多。第4位相虽然水汽输送弱, 但是在华南地区存在大范围的水汽辐合。同时在第 4位相整层上升,有利于低层水汽的向上输送。上 述原因可能造成最大降水异常出现在第4位相而不 是第3位相。第7位相,华南地区低层水汽辐散 强、并伴有较强的下沉运动,可能造成了该位相降 水异常偏少。

6 结论和讨论

本文基于中国 21 年 (1984~2004 年) 的台站 降水资料、利用 WH04 定义的 MJO 指数, 研究了 MJO对华南前汛期(4~6月)降水的影响。结果 表明,在季节内尺度上,MJO对华南前汛期的降水 有显著影响。当 MJO 的活跃中心位于印度洋时, 华南降水增加,最大正异常可达 1.2 mm/d,约占 区域平均降水量的17%。而当 MJO 的活跃中心从 印度洋移至太平洋后, 华南降水减少, 最大负异常 为 0.77 mm/d,约占区域平均降水量的 11%。

降水的季节内变化与大尺度背景场的季节内变 化紧密相关。通过考察 MJO 活跃中心东移时相应 的副高、华南地区的水汽和垂直运动的变化后发 现,当 MJO 活跃中心位于印度洋时,副高加强西 伸,西北太平洋位势高度升高,中国东南部出现异 常南风,从热带向华南地区输送的水汽增加,同时 华南地区的上升运动也加强,这种形势有利于华南 前汛期降水增强。当 MJO 活跃中心东移至西太平 洋时,副高减弱东撤,西北太平洋位势高度降低, 中国东南部出现异常东风或东北风,华南地区的偏 南水汽输送减少,同时上升运动亦减弱,这种形势 不利于华南前汛期降水增强。即 MJO 活跃中心分 别位于印度洋和西太平洋时,副高的纬向位置、华 南地区的水汽和垂直速度基本呈相反结构。最大正 (负)降水异常对应了华南强的低层水汽辐合(辐 散)和上升(下沉)运动。

本文主要分析了 MJO 各个位相华南前汛期降 水的季节内变化特征,并且考察了与降水变化相对



图 6 合成的水汽通量异常 (矢量)、水汽通量散度异常 (彩色阴影,单位: 10^{-5} kg·m⁻²·s⁻¹) 以及 850 hPa 位势高度异常 [实、虚线:大 于、小于 0,单位: gpm (只给出超过 90%的信度检验的部分)]: (a - h) 位相 1~8。红色矢量:水汽通量超过 90%的信度检验 Fig. 6 Composites anomalies of moisture flux (arrow), moisture flux divergence (shading, units: 10^{-5} kg·m⁻²·s⁻¹), and 850-hPa geopotential height anomalies (units: gpm; only those that are significantly different from zero at the 90% confidence level are shown) in (a h) Phases 1 - 8. Red arrows indicate moisture flux passing *t* test at the 90% confidence level; solid (dashed) lines represent geopotential height anomalies which are greater (less) than zero

章丽娜等:热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响

No. 3 ZHANG Lina et al. Impact of the Madden-Julian Oscillation on Pre-flood Season Precipitation in South China 569



图 7 105°E~120°E平均的合成垂直速度异常(单位: 0.005 Pa/s)经向一高度剖面图: (a-h)位相1~8。阴影:上升运动;等值线间隔: 0.005 hPa/s

Fig. 7 Latitude – height cross sections of composite vertical velocity anomalies (0.005 Pa/s) averaged from 105°E to 120°E in (a – h) Phases 1–8. Shaded area indicates upward motion, and contour interval is 0.005 hPa/s

应的大尺度背景场,但是还没有分析 MJO 如何引起上述大尺度背景场的变化,尤其是当 MJO 的活跃中心分别在印度洋和太平洋时对大尺度背景量场可能存在不同的影响机制(Zhang, 2009),需要进一步研究。

参考文献 (References)

鲍名. 2008. 两次华南持续性暴雨过程中热带西太平洋对流异常作 用的比较 [J]. 热带气象学报, 24 (1): 27 - 36. Bao Ming. 2008. Comparison of the effects of anomalous convective activities in the tropical western Pacific on two persistent heavy rain events in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (1): 27-36.

- 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: 3579-3594.
- 蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的 影响 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 358 - 367. Cai Xuezhan. 2001. The influence of abnormal snow cover over Qinghai - Xizang Plateau and East Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (3): 358 - 367.

Carvalho L M V, Jones C, Liebmann B. 2004. The South Atlantic

convergence zone: Intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall [J]. J. Climate, 17: 88-108.

- 陈长胜,林开平,王盘兴. 2004. 华南前汛期降水异常与水汽输送 的关系 [J]. 南京气象学院学报, 27 (6): 721-727. Chen Changsheng, Lin Kaiping, Wang Panxing. 2004. Relation between preflood season precipitation anomalies in South China and water vapor transportation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (6): 721-727.
- Donald A, Meinke H, Power B, et al. 2006. Near-global impact of the Madden-Julian oscillation on rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L09704, doi: 10.1029/2005GL025155.
- 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: 788-801.
- 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 Sciences (in Chinese), 27(4):518-535.
- 梁建茵. 1994. 6 月西太平洋副高脊线的年际变化及其对华南降水 的影响 [J]. 热带气象学报, 10 (3): 274-279. Liang Jianyin. 1994. The interannual variations of the subtropic high ridge position over western Pacific in June and its influence on precipitation in South of China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 10 (3): 274-279.
- 林爱兰,梁建茵,谷德军. 2008. 热带大气季节内振荡对东亚季风 区的影响及不同时间尺度变化研究进展 [J]. 热带气象学报,24 (1):11-19. Lin Ailan, Liang Jianyin, Gu Dejun. 2008. Review of impacts of tropical atmospheric intraseasonal oscillation on East Asia monsoon and multiple time scales variation of tropical atmospheric intraseasonal oscillation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese). 24 (1): 11-19.
- Lorenz D J, Hartmann D L. 2006. The effect of the MJO on the North American monsoon [J]. J. Climate, 19: 333-343.
- 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.
- Madden R A, Julian P R. 1994. Observations of the 40 50-day tropical oscillation: A review [J]. Mon. Wea. Rev., 112: 814 837.
- 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.

- Pohl B, Richard Y, Fauchereau N. 2007. Influence of the Madden Julian oscillation on Southern African summer rainfall [J]. J. Climate, 20: 4227 – 4242.
- 史学丽,丁一汇. 2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与 夏季风活动的研究 [J]. 气象学报,58(6):666-678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58(6):666-678.
- Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. 2003. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84: 33-50.
- 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: 1917 – 1932.
- 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: 1482-1498.
- 吴恒强,张爱华,蒋伯仁,等. 1998. 华南前汛期降水与南极海冰变 化的关系 [J]. 南京气象学院学报,21 (2): 266 - 273. Wu Hengqiang, Zhang Aihua, Jiang Boren, et al. 1998. Relationship between the variation of Antarctic sea ice and the pre-flood season rainfall in southern China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 21 (2): 266 - 273.
- 谢炯光. 1997. 广东省前汛期降水分布趋势的分析与预测 [J]. 应 用气象学报,8(4):452-459. Xie Jiongguang. 1997. Analysis and forecast of precipitation distribution trend prior to flood season in Guangdong Province [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese),8(4):452-459.
- 徐海明. 1997. 华南夏季降水与全球海温的关系 [J]. 南京气象学 院学报, 20 (3): 392-399. Xu Haiming. 1997. Relationship between South China summer precipitation and global SST [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 20 (3): 392-399.
- 杨广基. 1992. 中国东部降水和风场的低频振荡特征 [J]. 大气科 学, 16 (1): 103-110. Yang Guangji. 1992. The characteristics of low frequency oscillation about rainfall and wind distribution over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 16 (1): 103-110.
- Zhang C. 2005. Madden-Julian Oscillation [J]. Rev. Geophys., 43: RG2003, doi: 10.1029/2004RG000158.
- 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