

丁一汇,梁萍. 基于 MJO 的延伸预报[J]. 气象,2010,36(7):111-122.

基于 MJO 的延伸预报^{*}

丁一汇¹ 梁 萍²

1 国家气候中心,北京 100081
2 上海市气候中心,上海 200030

提 要: 近 10 年来,2~4 周的延伸预报成为天气和气候业务预报发展的一个方向。目前比较有效的方法是根据季节内振荡的传播,尤其是 MJO 振荡(30~60 天周期)的传播来制作延伸期预报。国际上一些天气-气候预报中通过数年的业务试验已取得了初步结果。作者首先介绍了 MJO 振荡及季风的季节内振荡(MISO)特征,并从季节内振荡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;进一步对延伸预报的可预报性、预报方法及国内外业务应用进展进行了综述,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;最后阐述了延伸预报的发展趋势。

关键词: 延伸预报, 季节内振荡, MJO, 季风

Extended Range Forecast Basing on MJO

DING Yihui¹ LIANG Ping²

1 National Climate Center, Beijing 100081
2 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

Abstract: In the last decade, the 2—4 week extended range forecast (ERF) has become an important re-search area for operational developments of both weather forecast and climate prediction. Propagation of intraseasonal oscillation especially MJO (30—60 d oscillation) is a fairly effective method to be used for ERF at present. Internationally, preliminary achievements have been made in years of operational experi-mentation on weather-climate forecasting. In this review, the intraseasonal oscillation (ISO) as theory ba-sis for ERF is firstly briefly introduced, including basic characteristics of ISO and interactions between ISO and weather-climate in middle latitudes. Then, developments of predictability, methods and operational application of ERF are reviewed. And signals and relative predictability of ISO for ERF of China are fur-ther explored by taking Meiyu over the Yangtze-Huaihe Basin as an example. Finally, the developing trend of ERF is described by pointing out some problems in dynamical models.

Key words: extended range forecast (ERF), intraseasonal oscillation (ISO), Madden-Julian Oscillation (MJO), monsoon

引 言

近年来,我国经历了诸多大范围的持续性异常极端事件,如 2008 年 1 月南方地区的持续性低温雨

雪冰冻天气、2009 年 2 月长江中下游地区的罕见持续阴雨天气,这些持续性异常极端事件影响范围之广,灾害程度之重,气象要素异常强度之大,持续时间之长均为历史所罕见。提高对持续性异常极端事件的延伸期(10~30 天)预报能力,是我国气象部门

^{*} 国家科技支撑项目“持续性异常信号判识和预报预测技术的集成应用”(2009BAC51B05);上海市气象局面上项目“热带 MJO 与长江中下游夏季降水的关系研究”共同资助
2009 年 12 月 17 日收稿; 2010 年 1 月 11 日收修定稿
第一作者: 丁一汇,主要从事季风动力学、灾害性天气以及气候变化等研究. Email: dingyh@cma.gov.cn

目前面临的重大气象服务需求。

季节内振荡在天气气候的演变中扮演了重要角色,对阶段性、持续性异常/极端事件/高影响事件的发生具有重要作用。Yasunari 在 1979 年指出印度夏季降水与热带低频振荡有关^[1],促进了国际对季节内振荡与天气气候事件的关系研究。除印度降水外,北美夏、冬季降水事件^[2-3]、南美夏季降水^[4]、澳大利亚季风及极端降水^[5-6]都与季节内振荡(尤其与其中的 MJO)存在联系。我国关于季节内振荡与天气、气候的关系研究表明,中国各区域特别是中国东部地区(如长江中下游^[7-10]、长江上游^[11]、江淮地区^[12-15]、东南部地区^[16-17]、华北^[18]、东北^[19]、华南^[20-21])的夏季降水都与大气低频振荡(LFO)有关。在中国的多次持续性大暴雨过程中,低频振荡传播到暴雨区是其发生的重要原因之一,如 1991 和 1998 年江淮持续性大暴雨都有 3 次低频振荡的影响。中国夏季降水不仅与夏季风系统的季节内振荡^[22-25]关系密切外,还与北方冷空气活动的低频振荡有关^[26-27]。此外,西太平洋热带气旋活动^[28]亦与低频振荡有密切关系。

低频振荡主要包括周期为 30~60 天和 10~30 天左右的季节内变率。大多数研究主要集中于 30~60 天季节内变率对降水等天气气候事件的影响。在冬半年,中高纬环流系统^[29]及强寒潮事件^[30]则表现出较明显的 10~20 天左右的季节内振荡。而 10~30 天低频振荡对夏季西太平洋副热带高压及江淮流域^[14]、长江下游^[31]、松嫩流域^[19]降水的持续性和阶段性变化亦具有明显的作用。

上述研究表明,作为高频天气变化的重要背景,季节内振荡/变率是联系天气与气候的直接纽带,可作为开展延伸期预报的主要预报研究。同时,对持续性异常事件的分析和预测也是世界气象组织/世界天气研究计划 THORPEX 国际科学计划中的核心研究目标之一。因此,从季节内振荡角度出发,提高持续性异常事件的延伸期预报技巧既是 21 世纪国际气象学界的重大挑战,又是社会服务领域的重大需求。为此,本文在归纳热带及季风的季节内振荡特征的基础上,对延伸期预报的理论依据、可预报性、预报方法、业务应用的国内外进展进行讨论,并以江淮梅雨为例,探讨了其延伸期预报的可预报性及信号,最后对延伸期预报的发展趋势进行了展望。

1 季节内振荡的特征及与中纬度系统的相互作用

MJO 的基本特征。延伸期预报的时间尺度约为 10~30 天,而季节内低频振荡一般指时间尺度大于 7~10 天但小于 90 天的准周期变化。在 20 世纪 70 年代初, Madden 等^[32-33]首先发现季节内振荡存在于热带地区,并指出热带低频振荡(MJO)向东传播,周期为 40~50 天,具有纬向 1 波的全球尺度特征。如图 1 所示,MJO 以热带地区对流增强/减弱区的向东传播为主要特征。积云对流首先在东印度洋暖水面上形成,10~20 天后积云对流带和低压区域东移至印尼群岛和西一中太平洋。随着积云对流东移至东太平洋冷水面上空时,对流减弱甚至消失。在一定时间之后,东印度洋的对流又重建并向东移动形成新的循环。与热带对流异常相伴随的,近赤

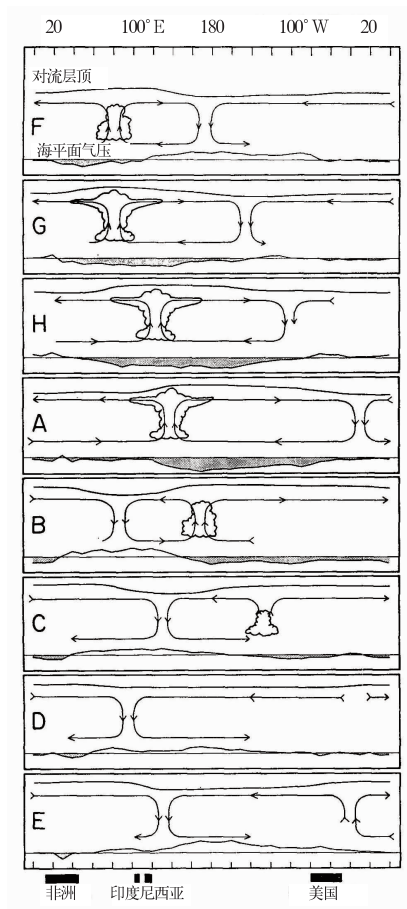


图 1 热带 MJO 活动示意图^[32]

Fig. 1 Sketch map for tropical MJO evolution

道地区(15°N~15°S)纬向风、海平面气压、云量、降水等亦以 30~60 天为主要周期从西向东传播。此外,尽管 MJO 具有全球尺度特征,但在印度及西太平洋季风区表现得更为明显。

季节内振荡的全球性。Yasunari 在 1979 年第一次把向东传播的赤道区域振荡同印度季风的活跃—中断期联系起来^[1],并首次提出印度季风区存在周期为 15 天和 40 天左右的季节内振荡,使得 MJO 的研究得到明显推动。Krishnamurti 等^[34]指出,赤道印度洋区,不断有异常的槽脊缓慢向北移动,其周期约为 40~50 天。Murakami 等^[35]证实这一周期的低频波在夏季风区域(60°~150°E)的存在和向北传播。此后,Anderson^[36]在研究纬向平均西风角动量的向北输送时指出了中纬度 MJO 的存在。Krishnamurti 等^[37]、李崇银等^[38]也发现低频振荡除存在于热带外,还存在于中高纬地区,具有全球性。大气低频遥相关型波列是联系全球大气季节内振荡相互作用的纽带^[39]。

关于季风的季节内振荡。王斌^[40]在总结 Waliser^[41]对季风季节内振荡特征评述的基础上,指

出 MJO 与季风季节内振荡相互作用的基本特征表现为:(1) MJO 最先始于赤道西印度洋(60°~70°E)^[42-44];(2) 向东移动的同时在印度洋地区北传^[1,45-46];(3) 在苏门答腊附近形成一条西北—东南倾斜的季风季节内振荡(MISO)雨带^[47-50],该 MISO 雨带与年循环(即气候的季节内振荡)锁相^[51-53],并进一步北传影响亚洲季风区;(4) 在 MJO 东移和北传的同时,西北太平洋季风的季节内振荡(以 10~20 天为主要模态)向西北传^[54-57],二者相遇时,可以出现锁相现象,引起季风的爆发、中断与活跃^[39,57-58]。此外,季风还有其自身的季节内振荡模态^[59],例如 10~25 天的模态及独立的北传模态^[60-61]。由于季风的季节内振荡与副热带接近,它可影响中纬度季节内振荡^[62]或和中纬度波列相互作用^[63]。

图 2 给出在 MJO 八个空间位相下合成的 200 hPa 流函数异常分布,从图中可看出 MJO 的东传过程。其中,1~8 位相表示 MJO 分别位于西半球/非洲东部、印度洋西部、印度洋西部、海洋大陆西部、海洋大陆东部、西太平洋西部、西太平洋东部、西半

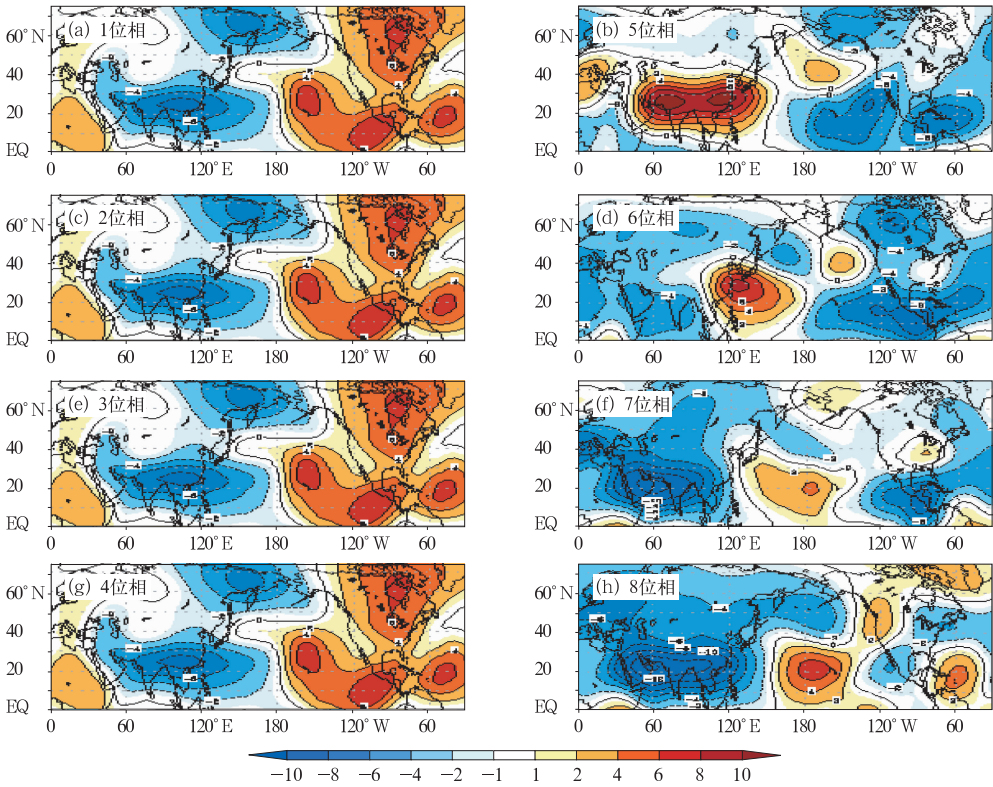


图 2 MJO 不同位相合成的 200 hPa 流函数异常分布(美国 CPC Zhang Qin 提供,2008)
(a)~(h)表示 1~8 位相

Fig. 2 Composite daily 200 hPa stream function anomaly for spatial phases of MJO
(provided by Zhang Qin from CPC/NOAA, 2008), (a)—(h) denoting phase 1—8

球及非洲西部。当 MJO 活跃于热带西印度洋(3 位相)时,在印度洋、西太平洋、西北太平洋、阿留申地区出现异常反气旋、气旋、反气旋、气旋环流的遥相关型;伴随 MJO 的继续东移,异常环流的波列向东北方向传播;当 MJO 东移至西太平洋(7 位相)时,上述地区则形成异常气旋、反气旋、气旋、反气旋环流的遥相关型。在 2~5 位相期间,印度洋上空 200 hPa 的异常反气旋性环流自西向东移动,到 6 位相异常反气旋东移至西太平洋西部,而印度洋上空转为异常气旋控制,此后位于西太平洋上空的异常反气旋继续东移,在 8 位相移至西半球,此后重新进入 1 位相开始新的循环。除热带地区外,副热带及中高纬地区在 MJO 不同位相下亦呈现出异常环流。因此,MJO 不同位相下的异常环流均可对副热带西风急流、西太平洋副热带高压及低层环流等产生影

响,从而影响中高纬的天气气候。

除东移过程外,季风的季节内振荡还存在明显的北传模态。图 3^[64]给出与东亚季风爆发有关的 5 月低频振荡北传过程。从 5 月期间的低频(经 30~60 天滤波)环流及对流分布可看出,5 月初(图 3a)位于印度洋附近的低频气旋性环流及对流活动向东北方向移动,而 5 月上旬末(图 3b)位于热带西太平洋的低频气旋性环流及对流活动向西北方向移动,二者在 5 月中旬中后期(图 3c)相联,对南海地区的对流增强及季风爆发产生作用。在 5 月下旬初(图 3d),整个南海地区为季风槽控制,对流活动明显,而在赤道西太平洋地区则出现低频反气旋性环流。此后,伴随赤道西太平洋的低频反气旋性环流与南海季风槽的低频气旋性环流继续北移(图 3e,3f),对流活动的低频振荡也影响到中纬度地区。

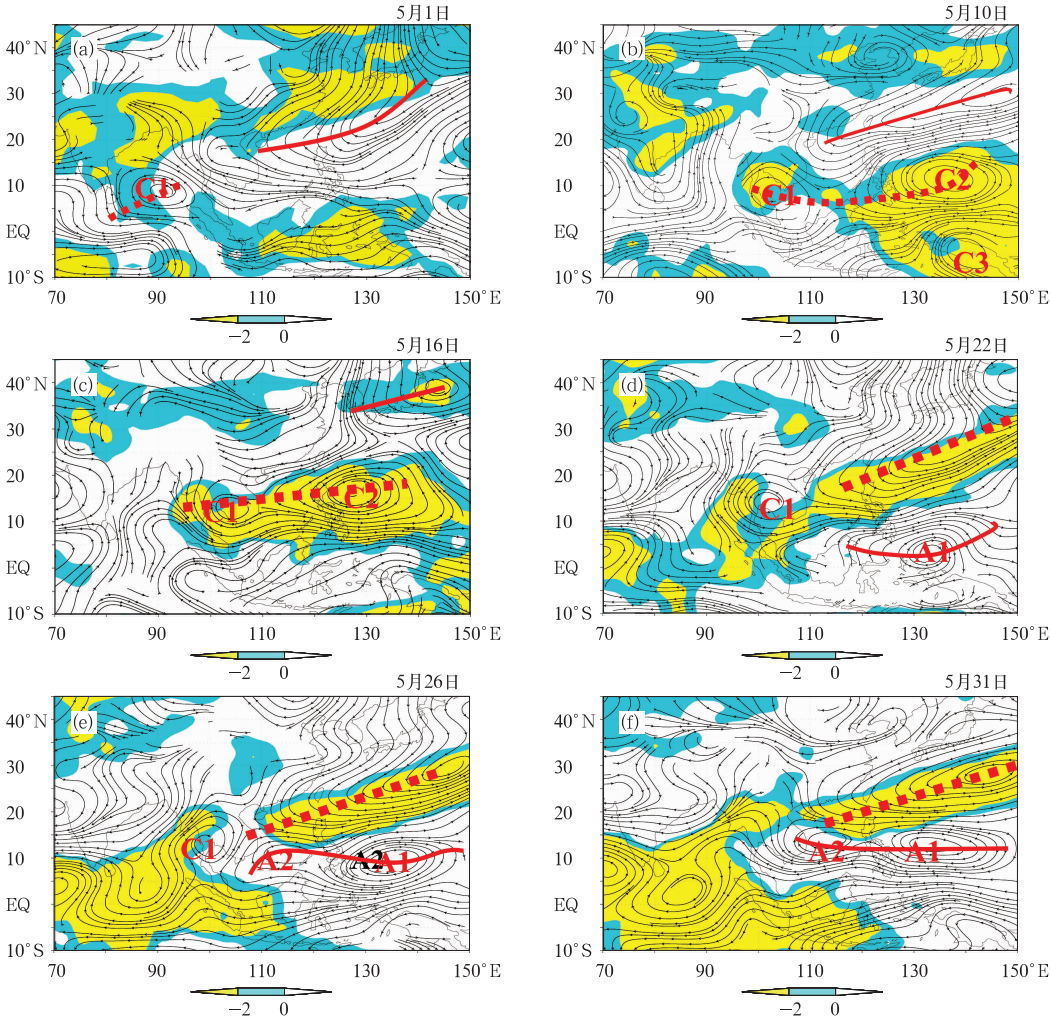


图 3 30~60 天滤波的 850 hPa 环流场(流线)及 OLR (射出长波辐射,阴影; $W \cdot m^{-2}$)分布^[64]

Fig. 3 30—60 d filtered 850 hPa circulation (stream) and OLR (shading area, unit: $W \cdot m^{-2}$)^[64]

图 2—3 说明 30~60 天振荡的向北传播和激发的遥相关型(如图 4)可对中纬度天气气候产生影响。因此,如果能首先预报出 MJO 在热带的传播,然后再通过它的直接北传或产生的遥相关型,从理论上可预报它们对中高纬天气气候的影响。由于它的时间尺度在 30 天左右,故可以采用这种热带信号来作其影响区的延伸预报。

另一方面,当 MJO 向北传播或它激发的遥相关波列向北传播,可以与中高纬的环流系统产生相互作用,从而产生明显的天气过程,而这种天气过程正是延伸期所需预报的。因而通过上述原理不但可以预测 2~4 周天气发生的低频背景,而且可以预测在一次 MJO 东移影响过程中,有几次重要的天气过程可能发生。

此外,MJO 与季风^[1,41,53,65-67]的爆发、活跃、中断均有密切关系,通过 MJO 对亚洲或东亚季风活动程度的影响,也可以预报它们与中纬度天气系统的相互作用。

除热带低频振荡对中纬度天气气候的影响外,Ding 等^[63]还给出了高纬低频振荡对中低纬地区的影响。如图 4^[68]中的 CGT(Climatological global teleconnection,气候全球遥相关)波列(长虚线)所示,在季节内变化尺度上,东北大西洋异常高压向东传至中亚地区后与印度季风相互作用的遥相关型,该遥相关波列可沿西风急流向东传至东亚及西太平洋地区,从而对东亚地区的天气气候产生影响。因此,在开展中纬度延伸预报的过程中,除关注热带低频振荡外,中高纬低频振荡的影响也不能忽视。

2 延伸预报的可预报性

逐日天气预报的能力受地球大气混沌运动和初始误差增长的限制^[69],只能在 1 至 2 周内做出有效的天气预报。另一方面,由于海陆表面异常条件引起的持续性强迫^[70],月和季节平均的天气统计特性具有一定的可预报性。季节内变率介于逐日天气和季节平均气候两者之间,主要受海洋强迫与大气内部动力学的控制^[41,47],因而在一定程度上具有混沌性和不可预报性。

MJO 是大气环流的一个重要部分,其时间尺度介于月、季之间,因而同月、季时间尺度长期天气预报和短期气候预测均有密切关系^[72-73]。由于 MJO 为季节内时间尺度的准周期现象,可作为季节内天气异常的预测信号。最近的许多研究表明,基于 MJO 季节内振荡的预报时效(潜在可预报性)对降水而言可达 15 天,而对高空环流场可以达到 30 天^[74-79]。

除热带地区降水存在以 MJO 为主要特征的季节内振荡外,东亚季风区降水也表现出明显的季节内振荡特征^[80]。其中,作为东亚季风进程中的典型区域,江淮地区夏季降水存在多时间尺度变化特征。最近,我们^[81]采用 1979—2007 年美国 CMAP 逐候格点降水资料经线性内插转为逐日降水资料后,对江淮地区(28. 25°~33. 75°N,111. 25°~121. 25°E)多年平均的 4—9 月逐日降水量进行 EEMD^[82-83](Ensemble Empirical Mode Decomposition,集合经验模态分解)分析,得到江淮地区夏季降水的多时间尺度的演变模态。其中 EEMD 分解出的第 1、2 分量(图略)表示 4 天和一周左右的准周期变化,而第 3、4、5 分量(图 5)分别对应 10~30 天、40~60 天以及季节的变化分量。由此可见,第 3、4 分量表示 10 天以上的季节内振荡。这两种季节内振荡与季节变化(EEMD_5)在 6 月中旬至 7 月上旬形成锁相,共同对通常发生在该时段的江淮梅雨的形成产生作用。进一步对比江淮地区降水低频变化分量(图 6 中粗曲线,EEMD 分解的第 3、4 分量的合成)与降水量的季节内演变(图 6 中细曲线,以相对 4—9 月平均的距平表示)发现,低频变化分量的逐日演变与实际降水演变较为一致,特别是在低频变化的峰、谷值位相。由此表明,低频降水分量对江淮地区夏季降水的季节内演变具有重要影响。低频降水分量的

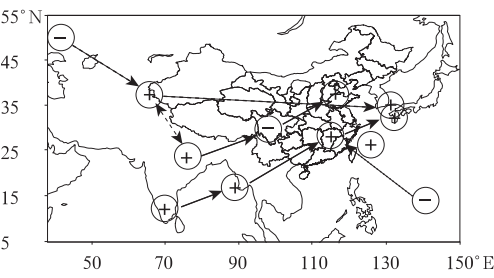


图 4 热带 MJO 东移过程中的遥相关(实线)、西北太平洋季风低频振荡北传(点线)及中高纬西风带遥相关波列(长虚线)示意图^[68]
(圆圈内为“+/-”表示气旋性/反气旋性环流)
Fig. 4 Sketch map for remote correlation of eastward propagation of MJO (solid lines), northward propagation of LFO of Northwest Pacific monsoon (dotted lines) and westerly of mid-high latitudes (dashed lines)^[68]
(“+/-” in circle denotes cyclonic/ anticyclonic circulation)

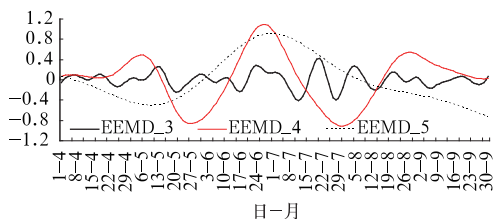


图 5 1979—2007 年平均 4—9 月江淮地区
(28.25°~33.75°N, 111.25°~121.25°E)
逐日降水量 EEMD 分解的第 3(EEMD-3)、
(EEMD-4)、5(EEMD-5)分量演变(单位:mm)

Fig. 5 The third (EEMD-3), fourth
(EEMD-4) and fifth (EEMD-5)

component for 1979—2007 average daily
rainfall over the Yangtze-Huaihe Basin
(28.25°—33.75°N, 111.25°—121.25°E)
derived through EEMD (unit: mm)

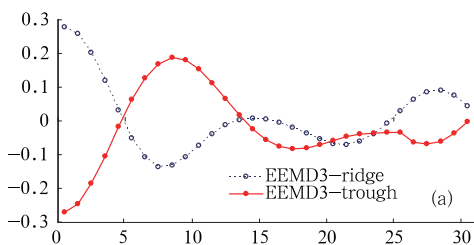


图 7 同图 6, 但为季节内振荡(a. 10~30 天; b. 40~60 天)峰、谷值位相当日及其后 30 天的演变
(实/虚线: 峰/谷值位相; 横坐标: 0 表示出现峰/谷值位相的当日, 1~30 表示此后的 1~30 天; 单位: mm)

Fig. 7 Intraseasonal oscillation (a. 10—30 d; b. 40—60 d) from peak or trough phase till
their succeeding 30 days (solid/dashed line: peak/trough phase; x-axis: 0 denotes
peak/trough day, 1—30 denotes their succeeding 1—30 days; unit: mm)

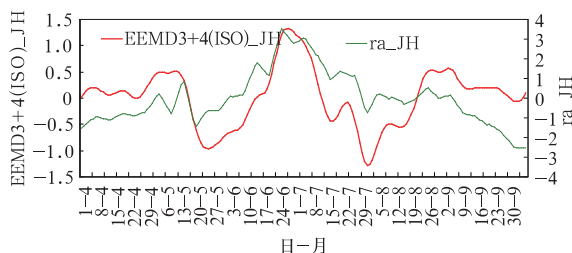
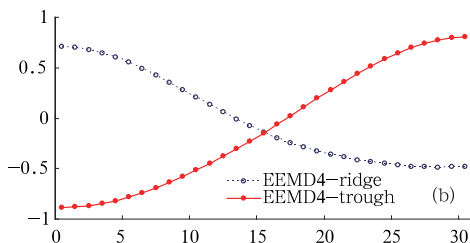


图 6 同图 5, 但为降水低频变化分量(粗线,
左纵轴)及实际降水量季节内演变(细线, 以相对
4—9 月平均的距平表示, 右纵轴)(单位: mm)

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for low-frequency component
(thick line, left y-axis) and intraseasonal evolution of
real rainfall (thin line, noted by anomaly compared with
April—September means, right y-axis) (unit: mm)

延伸预报, 对于实际降水量演变的延伸预报具有一定
的指示意义。进一步对 4—9 月期间低频振荡(10
~30 天和 40~60 天)出现明显峰、谷值降水的当日
及其后 30 天进行合成(见图 7), 发现在季节内振荡



的不同阶段下, 江淮地区降水的可预报性存在差异。
其中, 10~30 天低频降水分量从谷值位相当日起的
18 天之后趋于平稳, (即振荡不明显, 稳定于-0.1
~0.1 之间), 而从峰值位相当日起仅 10 天之后就
趋于平稳(稳定于-0.1~0.1 之间); 40~60 天低
频分量则在峰/谷值降水当日之后的 30 天内都表现
出明显的振荡, 具有较长的持续性和可预报性。

3 延伸预报方法

就延伸期预报方法而言, 主要分统计学模式、动
力学模式两类。目前的数值天气预报模式对 MJO
的深对流缺乏较好的代表性, 对 MJO 的预报技巧
有限, 预报时效仅为 7~10 天^[75, 84-87]。因此, 经验模
式也是研究 MJO 可预报性的较好途径。

迄今为止, 多数基于季节内振荡的延伸期预报

是根据 MJO 的带通滤波信号或主模态方法进行
的^[75, 85], 基于滤波资料或主模态的方法与天气预报
和季节平均气候预报的方法是不一样的。其中,
Waliser 等^[75]采用滤波 OLR 并结合 SVD(奇异值
分解)方法, 对 MJO 进行延伸期预报方法研究, 但
基于滤波的预报方法在实时预报中存在局限性。
Storch 等^[74]、Lo 等^[76]研究了基于未滤波 MJO 指数
的预测方法, 分别采用主振荡型技术、滞后线性回归
模型进行 MJO 的识别和预测, 预报时效约为 15 天。

Wheeler 等^[78]基于热带波动理论采用时空域
上的傅立叶分析进行滤波, 开展 MJO 的监测预报。
在此基础上, Wheeler 等^[6]采用近赤道平均的 850
hPa 纬向风、200 hPa 纬向风及 OLR 的多变量 EOF
(经验正交函数)方法, 分解出描述近赤道 MJO 空
间结构的前两个主模态 EOF1 和 EOF2(如图 8a),
对应的主成分存在显著的季节内振荡特征。在 MJO

的实时监测中,将实时的多变量投影于前两个主模态,由此得到的主成分 RMM1、RMM2 作为 MJO 实时监测与预测的指数。如图 8b 所示,在实时多变量 MJO 指数 RMM1、RMM2 确定的位相分布图上可点出逐天的 MJO 的空间位相演变;MJO 的强度则由 RMM1、RMM2 确定,当 $\sqrt{RMM1^2+RMM2^2}$ 大(小)于 1,即位于位相图中的圆圈外(内)时,为强(弱) MJO;从位相分布图上可看出 MJO 的自西向东移

动及其强度的变化。该多变量 MJO 指数可应用于各季节,且避开了传统上采用时间滤波提取 MJO 信号不能用于实时预测的弊端,是提取 MJO 信号的有效方法。同时,该指数也被用于模式预测产品中监测类 MJO 的变率。需要指出的是,该指数包含某些高频的逐日脉动,这些脉动在诊断和预测 MJO 时应被忽略。

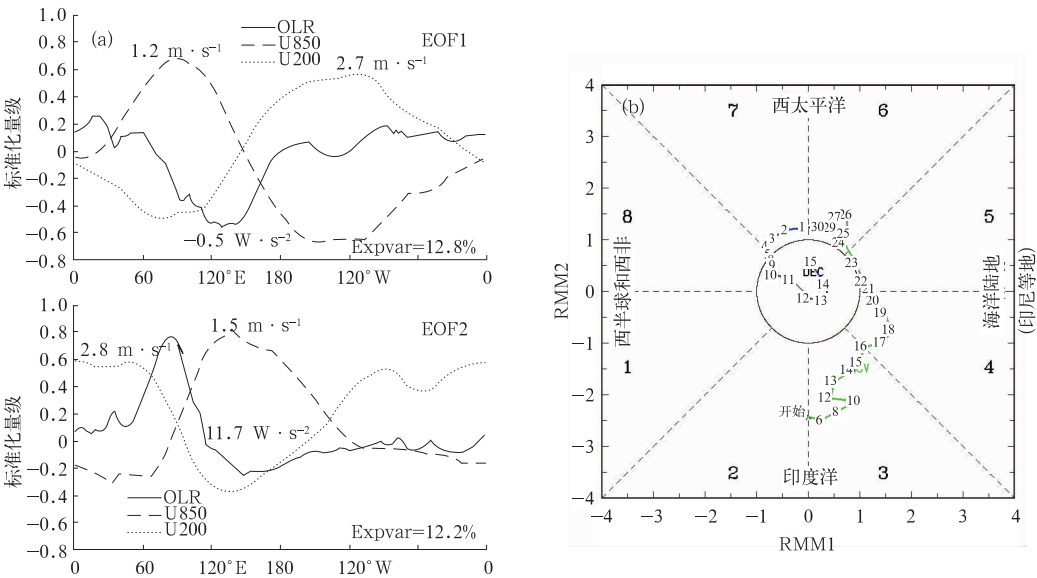


图 8 (a) 由近赤道平均的 OLR、U850、U200 的联合多变量(EOF)获得的前 2 个模态空间结构;

(b) 多变量 MJO 指数 RMM1、RMM2 确定的位相分布演变图^[6](曲线上标注的数字表示日期)

Fig. 8 (a) Spatial structures of EOF 1 and EOF 2 of the combined analysis of equatorial average OLR, U850, U200; (b) (RMM1, RMM2) phase space distribution and evolution derived through multi-variable MJO index^[6] (number labeled on curves denote date)

基于 Wheeler 等^[6]定义的 MJO 指数,Elizabeth 等^[90]及 Jiang 等^[91]分别采用向量自回归模型(VAR)、多变量滞后回归模型对 MJO 进行预测,结果表明:对该模型而言,一级向量自回归模型的延伸预报(15 天)效果最好;与滞后回归模型相比,自回归模型的预报技巧没有明显优势,但自回归模型在预报中使用更为简便。

针对季风季节内振荡,Goswami 等^[92]采用基于降水定义的 ISO 指数研究了印度夏季风活跃—中断过程的可预报性,发现从印度夏季风由活跃状态转为中断状态的可预报性达 20 天,而由中断转为活跃状态的可预报性仅为 10 天,在此基础上进一步提出了印度季风季节内振荡延伸期预报的经验统计模型。

4 延伸预报业务应用

关于实时的延伸预报业务,美国气候预测中心(CPC)建立了 MJO 的监测和预测工具,以监测、评估和预报 MJO 及其影响。除采用经验统计模式(包括自回归模型 ARM^[93]、滞后线性回归 PCL^[93]、经验位相传播 EPP^[94]、组合相似法 ANL^[95])预报热带 MJO 外,还将 Wheeler 等^[6]定义的 MJO 指数用于全球业务中心的动力模式资料上,如 CFS/NCEP^[96](气候预报系统),GFS/NCEP(全球预报系统),GEFS/NECP(全球集合预报系统),进行 MJO 实时业务预报。试验比较表明,GEFS 比 CFS 对 MJO 的预报有更高的技巧。

澳大利亚气象部门将 Wheeler 等^[6]定义的 MJO 指数作为 MJO 实时监测与诊断的工具,并在此基础上主要采用统计模型(向量自回归模型^[90]和多变量滞后回归模型^[91])进行热带 MJO 的实时预测。同时,还将 MJO 指数应用于台风的盛期频数预测。

印度气象部门则采用相似法^[97]对印度地区 OLR 异常进行 20 天左右的延伸期实时业务预报;还根据大尺度环流参数与降水之间的非线性关系,采用非线性相似方法,提高 OLR 异常的预报技巧。

此外,韩国在动力模式预测资料的基础上采用统计方法(多元回归、小波分析、奇异谱分析)和动力方法开展了冬季 30 天延伸期的预报试验,并且把两者结合后,预报的技巧有所提高。

在我国气象部门内,延伸期预报主要分为趋势预报和过程预报两类。国家气象中心从 2002 年起开展了延伸期预报的探索,并于 2005 年开始准业务化延伸期预报业务,主要制作 10~20 天延伸期降水量及其距平百分率、温度及其距平,以及相应旬的主要天气过程预报。国家气候中心则主要基于月动力延伸模式进行了 10~30 天延伸期的集合预报,提供降水量及其距平百分率和温度及其距平预报。近两年来,上海市气候中心、沈阳中心气象台、兰州中心气象台,根据所关心地区较强降水过程与低频环流系统的关系,采用基于时间滤波的低频天气图方法^[98]给出未来 10~30 天较强降水的发生时段,投入于 2008—2009 年的汛期延伸期预报准业务应用。此外,钱维宏等^[89]关于 2008 年初江南冻雨过程的湿大气锋生研究认为,将 7~10 天欧洲数值预报产品和湿大气锋生过程相结合,可将冰冻雨雪过程的预报延长至 10~15 天。

最近,我们^[81]采用上海地区 11 个站逐日降水资料,将 11 站中出现 3 站以上降水现象的情况作为上海地区的雨日,结合 1975—2004 年(1978 年缺测)夏季 MJO 指数逐日资料(来源于 BMRC),从 MJO 角度寻找上海地区夏季降水的延伸期预报信号。图 9 给出夏季 MJO 不同位相合成的上海地区降水出现概率及平均降水量。为方便起见,概率及降水量均以其与气候值的比例表示。从图中可看出,当热带 MJO 位于 3 位相(印度洋东部)、4 位相(海洋大陆西部)时,上海地区出现降水的概率最大(较夏季平均的降水出现概率大 1~2 成),对应的平均降水量也最多(较夏季平均降水量偏多 3~4 成);

而当热带 MJO 位于 6 位相(西太平洋西部)时,上海地区出现降水的概率最小(较夏季平均降水出现概率小近 2 成),对应的平均降水量也最少(较夏季平均降水量偏多 3~4 成)。除夏季降水现象外,热带 MJO 还与上海地区夏季极端强降水事件相关联。图 10 给出 MJO 不同位相下上海地区出现极端强降水事件(降水百分位数 $\leq 10\%$)的概率。由图可见,热带 MJO 位于 3、4 位相和 6 位相时,上海地区出现极端强降水的概率分别达最大(较气候概率大 4~6 成)和最小(较气候概率小 3 成)。由此表明, MJO 的 3、4 位相和 6 位相可作为上海地区夏季降水延伸期预报的热带信号。

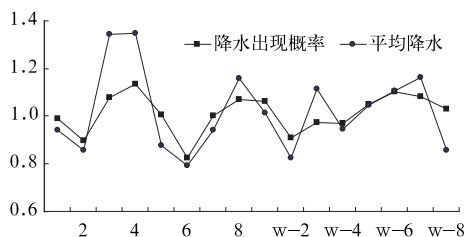


图 9 夏季 6—8 月 MJO 不同位相合成的上海地区降水出现概率及平均降水量与气候值的比例

(横坐标: MJO 的位相, 1~8 (w-1~w-8) 表示强(弱) MJO 的 1~8 位相)

Fig. 9 Composite proportion divided by climatology for occurrence frequency and amount of rainfall over Shanghai during different phases of MJO

(x-axis: phases of MJO, 1~8 (w-1~w-8) denote strong (weak) 1~8 phases)

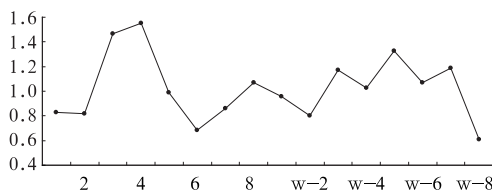


图 10 同图 9, 但为极端降水(降水百分位数 $\leq 10\%$)出现概率

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for probability of extreme rainfall (top ten percentage of rainfall) occurrence

热带 MJO 不同位相不仅与上海夏季降水相关联,还对东亚副热带地区夏季降水产生影响。采用 CMAP 降水资料(来源于 NOAA)考察 1975—2004 年(1978 年缺测)夏季东亚副热带地区在不同 MJO 位相下出现降水事件和极端降水事件的概率。和上

海类似的,与气候概率相比,当 MJO 位于 3、4 位相(6 位相)时,降水事件(包括极端降水事件)的概率在东亚梅雨区(长江—韩日南部地区,图略)为一致性增大(减小)。从 3、4 位相和 6 位相下降水事件和极端降水事件的概率差异(图 11)可明显看出,二者

的差异呈现纬向分布特征,MJO 位于 3、4 位相时东亚梅雨区出现降水/极端降水事件的概率明显增大,而其南北两侧则相反。这种非局地性差异反映出热带 MJO 对东亚副热带夏季降水的影响具有大尺度特征,而并非统计上的偶然性。

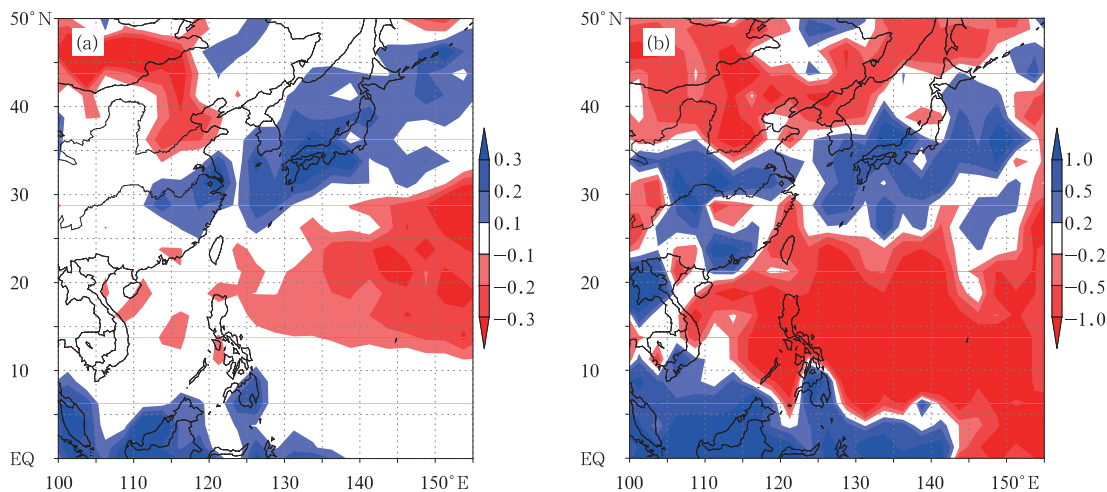


图 11 夏季 6—8 月 MJO 位于 3、4 位相和 6 位相下降水现象(a)和极端降水事件(b)的概率差异
(概率为与气候概率比值)

Fig. 11 Probability differences of rainfall occurrence and extreme rainfall events between phase 3 or 4 and phase 6 of MJO (probability here means that divided by climatology)

上述分析结果表明,热带 MJO 的不同位相可作为江淮地区夏季降水的延伸预报信号。在 2009 年的江淮梅雨延伸预报中,该信号发挥了积极的参考作用。其中,在 5 月 23 日和 6 月 2 日制作梅汛期延伸期预报的实时业务中,美国 NCEP-GFS 分别预报 6 月上旬和 6 月中旬前期 MJO 活跃于西太平洋地区的 6、7 位相(图略),根据夏季 MJO 不同位相与江淮/上海地区降水的关系,给出不利于江淮/上海在 6 月上旬和 6 月中旬前期入梅的信号,这与事实相符,为江淮地区梅汛期的实时延伸预报提供了依据。

5 延伸预报发展趋势展望

作为耦合海气系统中的一个部分,起源于热带 MJO(季节内振荡)可造成全球尺度的大气和海洋变量(如高低层风、云量和降水、海平面气压、SST、洋面蒸发等)的变化,调制全球季风系统(爆发/结束、中断、强度),同时还可影响到中高纬环流。由于 MJO 是季节内尺度变化,因而比高频的天气扰动具有更长的可预报性,是改进东亚地区延伸预

报的重要途径。

尽管目前动力模式对 MJO 的预报时效短于统计模型,但统计方法具有一定的局限性,动力模式则存在很大的改进空间。因此,在改进动力模式(如使用最优初始化,多模式集成)的基础上,进一步采用动力与统计相结合的方法,可成为改进季节内或延伸预报的发展方向。模式试验和比较发现,现有动力模式对季节内振荡(ISO)模拟和预报中主要存在以下问题:(1)最大的问题是模式在赤道印度洋地区的季节内变化很小;(2)虽然模拟出的 ISO 大多数都出现某种形式的北传,但它们经常呈现西南—东北向倾斜而不是观测中的西北—东南向倾斜;(3)模式模拟夏季 ISO 的好坏与冬季 ISO 的模拟明显相关联。而采用积云参数化方案计算热量和水汽的输送分布造成的误差等是造成这些问题的主要原因。鉴于上述问题,正确模拟出 MJO 的多尺度结构是改进动力模式季节内或延伸预报的重要途径。同时,为了提高降水预报和极端事件与高影响天气统计特征的预报,有必要发展高分辨模式。此外,由于 ISO 预报对大气初始条件和海气相互作用很敏感,故采用耦合模式并对耦合系统进行初始化,也可改

进动力模式的季节内或延伸预报。在改进动力模式的基础上,探索多模式集合预报,从而进一步提高 MJO 预报的可能性。

致谢:感谢美国 NOAA/CPC 张勤博士为本文提供图片资料。

参考文献

- [1] Yasunari T. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon[J]. J Meteor Soc Japan, 1979, 57: 227-242.
- [2] Mo K C and Higgins R W. Tropical influences on California precipitation[J]. J Climate, 1998, 11: 412-430.
- [3] Whitaker J S, and Weickmann K M. Subseasonal variations of tropical convection and week-2 prediction of wintertime western North American rainfall[J]. J Climate, 2001, 14: 3279-3288.
- [4] Paegle J N, Byerle L A, Mo K C. Intraseasonal modulation of South American summer precipitation[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(3): 837-850.
- [5] Hendon H H, and Liebmann B. The intraseasonal (30—50 day) oscillation of the Australian summer monsoon[J]. J Atmos Sci, 1990, 47: 2909-2923.
- [6] Wheeler M and Hendon H H. An all-season real-time multi-variate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction[J]. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1917-1932.
- [7] 何金海,陈丽臻.南北半球环流的准 40 天振荡与夏季风降水预报的可能途径[J]. 低纬高原天气, 1988(1): 38-49.
- [8] Chen Longxun, Zhu Congwen, Wang Wen et al. Analysis of the characteristics of 30—60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX[J]. Adv Atmos Sci, 2001 (18): 623-638.
- [9] 张秀丽,郭品文,何金海. 1991 年夏季长江中下游降水和风场的低频振荡特征分析[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(3): 388-394.
- [10] 王遵娅,丁一汇. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 710-715.
- [11] 刘富明,林海. 大气低频振荡与长江上游大范围降雨关系[J]. 四川气象, 1989(9): 1-8.
- [12] 陆尔,丁一汇. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. 气象学报, 1996, 54(6): 730-736.
- [13] 李桂龙,李崇银. 江淮流域夏季旱涝与不同时间尺度大气扰动的关系[J]. 大气科学, 1999, 23(1): 39-50.
- [14] 毛江玉,吴国雄. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 762-770.
- [15] 梁萍,陈隆勋,何金海. 江淮夏季典型旱涝年的水汽输送低频振荡特征[J]. 高原气象, 2008, 27(s), 84-91.
- [16] 朱乾根,徐国强. 1998 年夏季中国南部低频降水特征与南海低频夏季风活动[J]. 气象科学, 2000, 20(3): 239-248.
- [17] Zhang Lina, Wang Bizheng and Zeng Qingcun. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in Southeast China[J]. J Climate, 2009(22): 201-215.
- [18] 徐国强,藏建升,周伟灿. 1998 年京津冀夏季风的低频振荡与降水的特征[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 297-306.
- [19] 孙力,安刚. 1998 年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 342-354.
- [20] 史学丽,丁一汇. 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, 2000, 58(6): 666-678.
- [21] 信飞,肖子牛,李泽椿. 1997 年华南汛期降水异常与大气低频振荡的关系[J]. 气象, 2007, 33(12): 23-30.
- [22] 穆明权,李崇银. 1998 年南海夏季风的爆发与大气季节内振荡的活动[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(4): 375-387.
- [23] 孙颖,丁一汇. 1997 年东亚夏季风异常活动在汛期降水中的作用[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 277-287.
- [24] 丁一汇,李崇银,何金海,等. 南海季风试验与东亚夏季风[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 561-586.
- [25] 鲍媛媛,金荣花,赵瑞霞,等. 2008 年东亚夏季风异常及其对江淮梅雨的影响[J]. 气象, 2009, 35(4): 34-42.
- [26] 赵亮,丁一汇. 东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 359-374.
- [27] 张志刚,金荣花,牛若芸,等. 干冷空气活动对 2008 年梅雨降水的作用[J]. 气象, 2009, 35(4): 25-33.
- [28] 王慧,丁一汇,何金海. 西北太平洋夏季风的变化对台风生成的影响[J]. 气象学报, 2006, 64(3): 345-356.
- [29] 索渺清,丁一汇,王遵娅. 冬半年南支西风 Rossby 波传播及其与南支槽形成的关系[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 731-740.
- [30] 马晓青,丁一汇,徐海明,等. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 380-394.
- [31] 杨秋明. 全球环流 20—30 d 振荡与长江下游强降水[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(11): 1515-1529.
- [32] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. J Atmos Sci, 1971, 28 (5): 702-708.
- [33] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period[J]. J Atmos Sci, 1972, 29 (6): 1109-1123.
- [34] Krishnamurti I N and Subrahmanyam D. The 30—50 day mode at 850 mb during MONEX[J]. J Atmos Sci, 1982, 39: 2088-2095.
- [35] Murakami T, Nakazawa T and He J. On the 40—50 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere summer Part II: Heat and moisture budget[J]. J Meteor Soc Japan, 1984, 62: 469-484.
- [36] Anderson J R, Rosen R D. The latitude-height structure of 40—50 day variation in atmospheric angular momentum[J]. J Atmos Sci, 1983, 40(6): 1584-1591.
- [37] Krishnamurti T N. Summer monsoon experiment: A review[J]. Mon Wea Rev, 1985, 112: 1590-1626.
- [38] 李崇银. 大气中的季节内振荡[J]. 大气科学, 1990, 14 (1): 32-45.

- [39] 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 大气季节内振荡及其重要作用[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 518-533.
- [40] 王斌. 认识和预报亚洲季风气候: 前沿突破点和展望[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 653-669.
- [41] Waliser D E. Intraseasonal variability // Wang B. The Asian Monsoon[M]. New York: Springer/Praxis Publishing Ltd, 2006, 203-259.
- [42] Wang B, Webster P J, Teng H. Antecedents and self induction of the active break Indian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32: L04704.
- [43] Wang B, Webster P, Kikuchi K, et al. Boreal summer quasi-monthly oscillation in the global tropics[J]. Climate Dyn, 2006, 27: 661-675.
- [44] Jiang X, Li T. Reinitiation of the boreal summer intraseasonal oscillation in the tropical Indian Ocean[J]. J Climate, 2005, 18: 3777-3795.
- [45] Yasunari T. A quasi-stationary appearance of 30-40 day period in the cloudiness fluctuations during the summer monsoon over India[J]. J Meteor Soc Japan, 1980, 58: 225-229.
- [46] Sikka D, Gadgil S. On the maximum cloud zone and the ITCZ over Indian longitudes during the southwest monsoon[J]. Mon Wea Rev, 1980, 108: 1840-1853.
- [47] Maloney E D, Hartmann D L. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian Oscillation[J]. J Climate, 1998, 11: 2387-2403.
- [48] Annamalai H, Slingo J. Active/break cycles: Diagnosis of the intraseasonal variability of the Asian summer monsoon[J]. Climate Dyn, 2001, 18: 85-102.
- [49] Kemball-Cook, Wang B. Equatorial waves and air-sea interaction in the boreal summer intraseasonal oscillation[J]. J Climate, 2001, 14: 2923-2942.
- [50] Lawrence D, Webster P. The boreal summer intraseasonal oscillation: Relationship between northward and eastward movement of convection[J]. J Atmos Sci, 2002, 59: 1593-1606.
- [51] Nakazawa T. Seasonal phase lock of intraseasonal variation during the Asian summer monsoon[J]. J Meteor Soc Japan, 1992, 70: 257-273.
- [52] Wang B, Xu X. Northern Hemisphere summer monsoon singularities and climatological intraseasonal oscillation[J]. J Climate, 1997, 10: 1071-1085.
- [53] Lin Ho, Wang B. The time-space structure of the Asian-Pacific summer monsoon: A fast annual cycle view[J]. J Climate, 2002, 15: 2001-2019.
- [54] Lau K M and Chan P H. Aspects of the 40-50-day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing long wave radiation[J]. Mon Wea Rev, 1986, 114: 1354-1367.
- [55] Nitta T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer monsoon[J]. J Meteor Soc Japan, 1987, 65: 373-390.
- [56] Hsu H H, Weng C H. Northwestward propagation of the intraseasonal oscillation during the boreal summer: mechanism and structure[J]. J Climate, 2001, 14: 3834-3850.
- [57] 章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 青藏高原大气低频变化的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 60-67.
- [58] 何金海, Murakami T. 1979 年 6 月东亚和南亚上空的水汽通量[J]. 南京气象学院学报, 1983, 10(2): 159-173.
- [59] Krishnamurthy V, Shukla J. Seasonal persistence and propagation of intraseasonal patterns over the Indian monsoon region[J]. Climate Dyn, 2008, 30: 353-369.
- [60] Wang B, Rui H. Dynamics of the coupled moist Kelvin-Rossby wave on an equatorial beta-plane[J]. J Atmos Sci, 1990, 47: 397-413.
- [61] Hendon H, Wheeler M, Zhang C. Seasonal dependence of the MJO-ENSO relationship[J]. J Climate, 2007, 20: 531-543.
- [62] Kawamura R, Murakami T, Wang B. Tropical and midlatitude 45-day perturbations during the northern summer[J]. J Meteor Soc Japan, 1996, 74: 867-890.
- [63] Ding Q, Wang B. Intraseasonal teleconnection between the Eurasian wave train and Indian summer monsoon[J]. J Climate, 2007, 20: 3751-3767.
- [64] Ding Y H and Liu Y J. Predictability of the South China Sea summer monsoon onset. Symposium on Asian Monsoon: Winter MONEX: A Quarter Century and Beyond. Kuala Lumpur, Malaysia, 4-7 April, 2006.
- [65] Goswami B N. South Asian Monsoon. Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System[M], W K M Lau and D E Waliser, Eds, Springer, 2005: 19-62.
- [66] Hendon H H, and Liebmann B. The intraseasonal (30-50 day) oscillation of the Australian summer monsoon[J]. J Atmos Sci, 1990, 47: 2909-2923.
- [67] Wheeler M and McBride J L. Australian-Indonesian monsoon. Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System[M], W K-M Lau and D E Waliser, Eds, Springer, 2005: 125-174.
- [68] 刘芸芸. 亚洲-太平洋夏季风的遥相关及对中国夏季降水的影响[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. 2009.
- [69] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 1963, 2: 130-141.
- [70] Charney J and Shukla. Predictability of monsoons. // Light-hill J, Pearce R P Eds, Monsoon Dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, U K, 1981: 99-108.
- [71] Palmer T N. Chaos and predictability in forecasting the monsoons[J]. Proc Indian Natl Sci Acad, 1994, 60: 57-66.
- [72] Krishnamurti T N, Subrahmanyam M, Osterhof D K, et al. Predictability of low frequency modes[J]. Meteor Atmos Phys, 1990, 44 (1): 63-83.
- [73] Ferranti L, Palmer T N, Molteni F, et al. Tropical-extratropical interaction associated with the 30-60 day oscillation and its impact on medium and extended range prediction[J]. J

- Atmos Sci, 1990, 47(18): 2177-2199.
- [74] von Storch H, and Xu J. Principal oscillation pattern analysis of the tropical 30—60 day oscillation. Part I: Definition of an index and its prediction[J]. Climate Dynamics, 1990, 4: 175-190.
- [75] Waliser D E, Jones C, Schemm J K, et al. A statistical extended range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian Oscillation[J]. J Climate, 1999, 12, 1918-1939.
- [76] Lo F, and Hendon H H. Empirical extended-range prediction of the Madden-Julian Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 2528-2543.
- [77] Mo K C. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations[J]. Mon Wea Rev, 2001, 129: 802-817.
- [78] Wheeler M and Weickmann K M. Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability[J]. Mon Wea Rev, 2001, 129: 2677-2694.
- [79] Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies[J]. J Climate, 2004, 17: 2078-2095.
- [80] 王遵娅, 丁一汇. 中国雨季的气候学特征[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 1-13.
- [81] 梁萍. 中国梅雨的季节内振荡分析和延伸预报[D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 即将发表.
- [82] Wu Z and Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[M]. COLA Tech Rep No. 193, Center for Ocean-Land-Atmos Studies, Calverton, Maryland, 2005.
- [83] Wu Z, and Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method[J]. Adv Adapt Data Anal, 2009, 1(1): 1-41.
- [84] Hendon H H, Liebmann B and Newman M, et al. Medium-range forecast errors associated with active episodes of the Madden-Julian Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 69-86.
- [85] Jones C, Waliser D E, Schemm J K, et al. Prediction skill of the Madden-Julian oscillation in dynamical extended range forecasts[J]. Climate Dyn, 2000, 16: 273-289.
- [86] Waliser D E. Predictability and forecasting. Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System[M]. Lau W K M and Waliser D E, Eds, Springer, 2005: 389-424.
- [87] Seo K-H, Schemm J-K, and Jones C. Forecast skill of the tropical intraseasonal oscillation in the NCEP GFS dynamical extended range forecasts[J]. Climate Dyn, 2005, 25, 265-284.
- [88] Van den Dool, H M, and Saha S. Frequency dependence in forecast skill[J]. Mon Wea Rev, 1990, 118, 128-137.
- [89] 钱维宏, 符娇兰. 2008 年初江南冻雨过程的湿大气锋生[J]. 中国科学(D 辑): 地球科学, 2009, 39(6): 787-798.
- [90] Elizabeth A Maharaj, and Wheeler. Forecasting an index of the Madden-Oscillation[J]. Int J Climatol, 2005, 25: 1611-1618.
- [91] Jiang Xianan and Duane E Waliser, et al. Assessing the skill of an all-season statistical forecast model for the Madden-Julian Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 2008, 136: 1940-1956.
- [92] Goswami B N and Prince K. Xavier. Potential predictability and extended range prediction of Indian summer monsoon breaks[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(18): doi:10.1029/2003GL017810.
- [93] Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies[J]. J Climate, 2004, 17: 2078-2095.
- [94] Seo K, Wang W, Gottschalk J, et al. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models[J]. J Climate, 2009, 22(9): 2372-2388.
- [95] Peng P, van den Dool, H. Forecast tropical sub-seasonal variability with the constructed analog method. 2006 AGU SM, A41B. 04P. (A G U Fall Meeting 2007, Abstract # A41B-04).
- [96] Saha S, and Coauthors. The NCEP climate forecast system[J]. J Climate, 2006, 19: 3483-3517.
- [97] Xavier P K, Goswami B N. Analog method for realtime forecasting of summer monsoon subseasonal variability[J]. Mon Wea Rev, 2007, 135: 4149-4160.
- [98] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法[J]. 高原气象, 2008(s): 64-68.