

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 Sciences (in Chinese), 36 (1): 102–116.

基于季节内振荡的延伸预报试验

梁萍¹ 丁一汇²

1 上海市气候中心, 上海 200030

2 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 2~4 周的延伸预报是近年来国际上天气和气候业务预报发展的一个重要方向。本文以江淮梅雨区降水为例, 在利用集合经验模态分解 (EEMD) 及多变量 EOF 方法获取梅雨区降水及其影响系统低频信号的基础上, 采用最优子集回归方法、经验波传播 (EWP) 方法及全球海气耦合模式产品, 对梅雨季节内演变的延伸期预报方法进行了预报和试验, 以期建立延伸期预报业务提供科学依据。试验结果表明: (1) 大气季节内振荡对梅雨区降水的延伸预报具有重要的应用价值, 可能是联系天气过程和异常的重要系统。(2) 通过 EEMD 方法提取前期降水演变及影响因子的季节内振荡信号, 采用最优子集回归统计学方法对梅雨区逐候降水量演变进行超前 30 天预报是有可能的。(3) EWP 经验动力方法对热带 ITCZ 活跃异常的未来 40 天东传可能具有较好的预报效果, 还可能较好地预报出延伸期的梅雨区风场距平演变, 具有一定应用价值。(4) 全球海气耦合动力模式输出产品在延伸期环流形势趋势预报及 20 天左右的 MJO 指数预报方面有一定的参考价值。

关键词 延伸预报 季节内振荡 梅雨 Madden-Julian 振荡

文章编号 1006-9895 (2012) 01-0102-15

中图分类号 P456

文献标识码 A

Extended Range Forecast Experiment Based on Intraseasonal Oscillation

LIANG Ping¹ and DING Yihui²

1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

2 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract 2–4 weeks extended range forecast (ERF) has become an important research area for operational developments of both weather forecast and climate prediction in the last decades. In order to provide scientific clues to establish ERF, by taking Meiyu over the Yangtze–Huaihe basin as an example, based on intraseasonal oscillation (ISO) signals of rainfall, key influential systems and strong signals of tropical MJO extracted by Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) and multi-variable EOF, optimal subset regression (OSR) statistical method, empirical wave propagation (EWP) dynamical method, and global ocean–atmosphere coupled model output are respectively employed to explore ERF of rainfall variation over the Meiyu region. Experimental results suggest that (1) the ISO may be an important system contacting weather processes and weather anomaly, which can be potential signals of the extended range forecast for pentad rainfall over the Meiyu region. (2) LFO (Low Frequency Oscillation) predictors extracted from rainfall in the Meiyu region during earlier period by EEMD can be used to forecast pentad rainfall amount in the Meiyu region about 30 days in advance by the OSR statistical method. (3) For the EWP method in dynamical sense, it can well forecast the eastward propagation of the tropical ITCZ 40 days in advance. At the

收稿日期 2010-12-08, 2011-06-10 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006020-04-01, 国家自然科学基金资助项目 40875056, 41075068

作者简介 梁萍, 女, 1980 年出生, 博士, 主要从事季风气候、延伸预报等研究。E-mail: liangping1107@163.com

same time, the EWP method has potential ability of forecasting wind anomaly over the Meiyu region. (4) The global ocean - atmosphere coupled model output is a worthwhile reference for the ERF of atmospheric circulation and MJO index 20 days in advance.

Key words extended range forecast, intraseasonal oscillation, Meiyu, Madden-Julian oscillation

1 引言

自 Madden and Julian (1971, 1972) 于 20 世纪 70 年代初发现热带 Madden-Julian 振荡 (简称 MJO) 后, Krishnamurti (1985) 和李崇银 (1990) 的研究发现, 大气中普遍存在 10~30 天、30~60 天低频振荡现象。一般而言, 季节内低频振荡指时间尺度大于 7~10 天但小于 90 天的准周期变化。以 MJO 为代表的季节内振荡活动, 其低频变化方差对大气变化总方差的贡献超过天气尺度扰动方差的贡献, 是目前发现的全球最强的低频信号。

Yasunari (1980) 在 1979 年第一次把向东传播的热带低频振荡同印度季风的活跃和中断联系起来, 使 MJO 研究得到极大推动。20 世纪 80 年代以来, 我国学者就季节内振荡对天气气候事件的影响开展了诸多研究。何金海和陈丽臻 (1988) 就基于季节内振荡的夏季风降水预报进行了探索; 而诸多研究分别针对南方夏季异常降水 (陆尔和丁一汇, 1996; Chen et al., 2001; 陶诗言和卫捷, 2007; 梁萍等, 2008; Zhang et al., 2009; 赵亮和丁一汇, 2009; Jia et al., 2010) 和台风活动 (祝从文等, 2004; 陈光华和黄荣辉, 2009; 潘静等, 2010) 的大气季节内振荡条件进行了分析; 结果表明, 低、中、高纬大气季节内振荡对东亚夏季风的活动和降水及台风等天气气候事件异常产生影响。

MJO 季节内振荡具有重要的应用价值, 主要表现为: (1) MJO 是热带对流的显著特征, 且热带对流是全球天气和气候系统的强迫因子, 而中高纬大气季节内振荡也通过波能能量的传播对亚洲季风活动和降水产生影响; (2) MJO 具有准周期性, 故 MJO 活动有可能提前 15~20 天左右的可预报性; (3) MJO 季节内振荡的时间尺度介于月、季之间, 而延伸期预报的时间尺度约为 10~30 天, 二者在时间尺度上相匹配。鉴于 MJO 季节内振荡的上述三个特点, 国内外普遍认为 MJO 季节内振荡可作为联系数值天气预报和季节预报的桥梁, 填补中期预报与短期气候预测之间的延伸期预报时段缝隙。

近 10 年来, 澳大利亚、美国等国外学者关于热带 MJO 活动的监测和延伸预报应用研究相当活跃, 如 Wheeler and Hendon (2004)、Maharaj and Wheeler (2005)、Jones et al. (2004) 和 Seo et al. (2009) 利用 MJO 开展了 2 周到 2 个月的预报研究和试验, 并取得了较好效果。由此表明, 根据 MJO 特性提取大气低频信号, 并由此来制作延伸预报的方法, 具有较好的应用前景。印度 (Xavier and Goswami, 2007)、韩国也分别采用相似统计和动力模式集合方法进行了延伸期预报研究。我国目前处于延伸期预报的研究和准业务试运行阶段, 关于延伸期预报方法值得进一步研究和试验 (陈丽娟等, 2005; 孙国武等, 2008)。此外, 提高持续性异常极端事件的延伸期 (10~30 天) 预报能力, 是我国气象部门目前面临的重大服务需求, 而基于 MJO 振荡的延伸预报是解决该问题的途径之一 (丁一汇和梁萍, 2010)。

作为东亚夏季风季节内活动的典型降水阶段, 江淮梅雨与季节内振荡密切相联。基于 MJO 振荡的梅雨区延伸预报研究, 一方面有助于更深入理解梅雨区降水的季节内振荡及其与 MJO 的关系, 另一方面对建立延伸期预报业务、满足服务需求具有重要意义。丁一汇和梁萍 (2010) 的研究指出, 季节内低频分量对江淮地区夏季降水的季节内演变有重要贡献, 且具有较长时间尺度的可预报性, 基于低频分量的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。为此, 本文以江淮梅雨区降水为例, 根据梅雨区降水及其影响系统的低频信号, 通过建立统计模型、经验动力模型以及气候模式动力预报等手段, 对梅雨区降水的延伸预报方法进行探索和试验。最后的讨论中还给出梅雨区降水延伸期预报的综合流程图, 以期开展基于季节内振荡的延伸预报业务提供思路和参考。

2 资料和方法

本文采用的资料包括: (1) 1979~2007 年逐候 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 降

水资料；(2) 1979~2007 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料，包括风场、高度场、温度场、比湿场、地面气压场；(3) 1979~2007 年 NOAA 逐日 OLR (outgoing long-wave radiation) 资料；(4) 国家气候中心全球海气耦合模式 1987~2006 年的集合预报产品资料。

本文主要采用 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition, 集合经验模态分解) 方法获取江淮梅雨区降水及其影响系统的季节内低频信号。EEMD (Wu and Huang, 2005, 2009) 方法是在 EMD (Empirical Mode Decomposition, 经验模态分解) 的基础上发展的处理时间序列的最新方法。其主要原理如下：首先在原始时间序列上加入一组随机白噪音，并对加入白噪音的时间序列进行 EMD，进一步对得到的本征函数进行集合平均，通过希尔伯特 (Hilbert) 变换得到不同时间尺度的本征函数模态随时间变化的瞬时频率和振幅，最终得到振幅—频率—时间的三维谱分布。EEMD 方法既可获取具有真正物理意义的多时间尺度信号，又可避免 EMD 方法的模态混合缺陷，是目前处理非线性、非平稳时间序列的较好方法。此外，关于热带 MJO 信号，本文还利用多变量 EOF 方法 (Wheeler and Hendon, 2004) 计算热带 MJO 指数 RMM1、RMM2 (近赤道 MJO 空间结构的前两个主模态 EOF1 和 EOF2 对应的主成分)，由此进一步得到热带 MJO 活动的位相、强度。多变量 EOF 计算 MJO 指数的方法可应用于各季节，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。

本文的延伸预报方法包括：(1) 采用最优子集回归 (OSR) (Furnival and Wilson, 1974; 曹鸿兴等, 1989) 方法建立延伸预报的统计模型；(2) 采用经验波传播 EWP (Empirical Wave Propagation) (Qin and van den Dool, 1996) 方法建立延伸预报的经验动力模型；(3) 采用国家气候中心全球海气耦合模式 (丁一汇等, 2004; 李清泉等, 2004) 输出产品评估动力模式方法的延伸预报性能。其中，经验波传播方法主要基于谐波展开并利用大气波动的传播特征，对不同季节、不同变量场进行预报。研究表明 (Cai and van den Dool, 1991; Qin and van den Dool, 1996)，经验波传播方法较持续性预报的预报技巧更高，更具优越性。关于国家气候中心全

球海气耦合模式已有详细说明 (丁一汇等, 2004; 李清泉等, 2004)，此处不赘述。

3 基于梅雨区降水季节内振荡信号的延伸预报试验

本节利用统计方法对梅雨区逐候降水量进行延伸预报试验。首先，对 1979~2007 年江淮梅雨区夏半年 (4~9 月) 逐候降水量进行 EEMD 分析，获得其双周、季节内、季节变化分量 (分别对应 EEMD1-3 模态)。计算表明，1979~2007 年上述分量对实际降水量变化方差的贡献率平均为 81.5%，即可解释约 8 成的逐候降水量变化。气候平均 (图略) 而言，10 天以上的季节内振荡与季节变化分量在 6 月中旬~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。而且，江淮地区降水季节内低频变化的峰、谷值位相与实际降水演变较为一致。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，且对实际降水量演变的延伸预报可能具有一定的指示意义。丁一汇和梁萍 (2010) 的研究表明，随着变化周期的增大，持续性 (可预报性) 也更为明显，达到或超过延伸期的范围。因此，选取延伸期之前江淮梅雨区降水变化的 EEMD1-3 分量之合成作为预报因子，采用最优子集回归方法 (Furnival and Wilson, 1974; 曹鸿兴等, 1989) 对 2003~2007 年江淮梅雨区汛期 (6~9 月) 逐候降水量进行提前 1~10 候的延伸预报试验。其中，样本为 1979 年至预报年之前的所有年份，并采用双评分准则 (CSC) 确定最优子集回归作为预报方程。

在利用 EEMD 方法提取梅雨区降水季节内振荡分量的基础上，采用上述最优子集回归方法对汛期 (6~9 月) 逐候降水量进行提前 1~10 候的延伸预报试验。从 2003~2007 年汛期 (6~9 月) 逐候降水量预报与实况的相关 (图 1a) 来看，2003~2006 年汛期降水量的预报与实况的相关都大大超过了置信度为 99% 的信度检验 (相关系数为 0.49)，而 2007 年提前 3~6 候的延伸预报也达到了置信度为 95% 的信度检验 (相关系数为 0.39)。由此表明，采用上述方法对 2003~2007 年预报试验的总体效果较好。尽管 2003~2007 年汛期提前 1~10 候预报试验效果总体都较好，但不同延伸期的预报效果仍存在差异。从 2003~2007 年平均

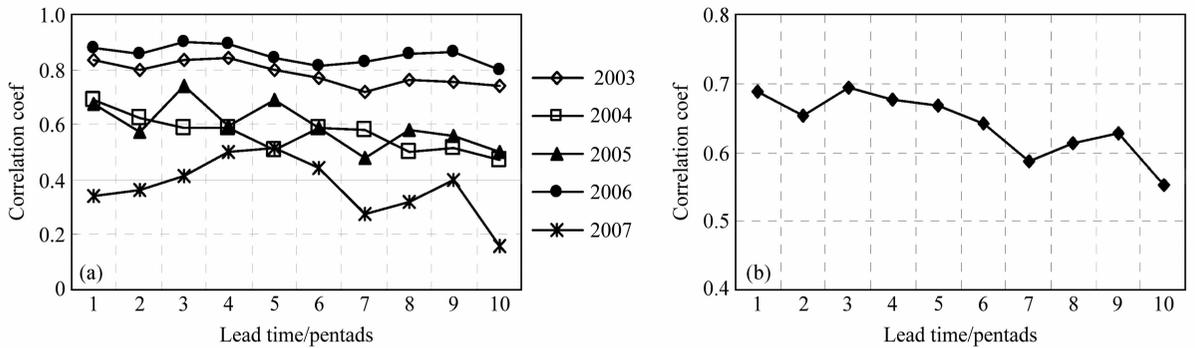


图1 江淮地区 2003~2007 年各年汛期 (6~9 月) 逐候降水量与预报量的相关系数 (a) 及其平均 (b)。横坐标: 提前预报时段 (单位: 候)

Fig. 1 (a) Correlation coefficients between predicted and observed pentad rainfalls during 2003 - 2007 rainy seasons (Jun - Sep) and (b) their average. x-axis: forecast lead time

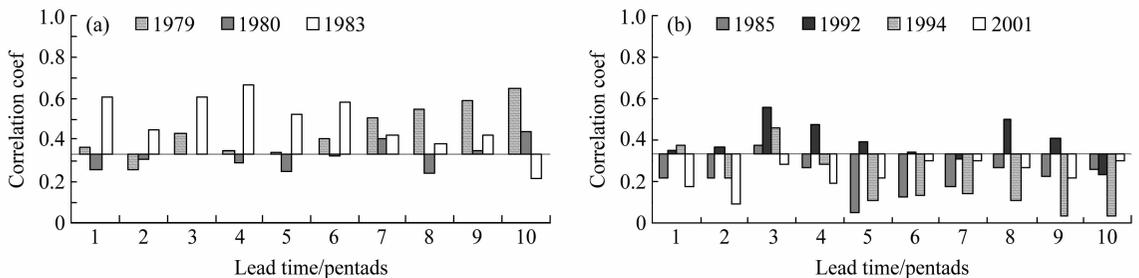


图2 典型 (a) 涝年、(b) 旱年汛期 6~9 月逐候降水量预报与实况的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficients between predicted and observed pentad rainfalls during rainy seasons (Jun - Sep) of typical (a) flood and (b) drought years

(图 1b) 的情况来看, 提前 1~6 候的预报结果与实况的相关系数较提前 7~10 候明显偏大, 前者相关系数平均为 0.67, 后者平均为 0.6。对于提前 1~6 候的预报, 相关系数虽有差异, 但总体处于同一阶段。因此, 就预报时效而言, 提前 6 候 (30 天) 左右的预报基本与时间尺度更短的延伸期预报效果相当。

经计算, 2003~2007 年梅雨区降水量处于正常范围 (距平百分率均介于 -20% 到 20% 之间), 故上述延伸预报试验主要针对降水正常年份。那么, 基于梅雨区降水 EEMD 分析的 OSR 预报方法对旱、涝年的预报效果如何? 以夏半年降水距平百分率 +20%/-20% 作为江淮梅雨区典型涝/旱年的分界线, 从 1979~2007 年挑选出 4 个典型旱年 (1985、1992、1994、2001) 和 3 个典型涝年 (1979、1980、1983) 进行分析。此处挑选出的旱涝年份与已有研究 (王遵娅和丁一汇, 2008) 相一致。从典型旱、涝年汛期逐候降水量的独立样本回报效果来看, 涝 (旱) 年的汛期逐候降水量的预报与实况的

相关 (图 2) 大多超出 (未达到) 0.10 信度检验, 由此表明基于梅雨区降水低频信号的 OSR 方法在涝年的预报准确率高于旱年。这与梁萍和丁一汇 (2011) 关于涝年低频背景强于早年的研究结果是一致的。

进一步对江淮地区汛期降水提前 6 候 (30 天) 的预报结果 (图略) 进行分析。1979~2007 年中预报与实况正相关的比例为 26/29; 相关超过 0.10 信度检验的比例为 16/29, 约为 55%。正相关系数越高, 与实况的一致性越好。例如, 1983、1993、1997 年预报与实况的相关分别为 0.585、0.677、0.676。从该三年 (特别是 1997 年, 如图 3) 的预报与实况的逐候演变来看, 二者的季节内变化一致性程度非常高, 对于延伸期预报而言是较为鼓舞人心的。

上述试验表明: 基于梅雨区降水季节内振荡演变的统计延伸预报方法对 2003~2007 年汛期逐候降水量的延伸预报效果总体较好。因此, 根据梅雨

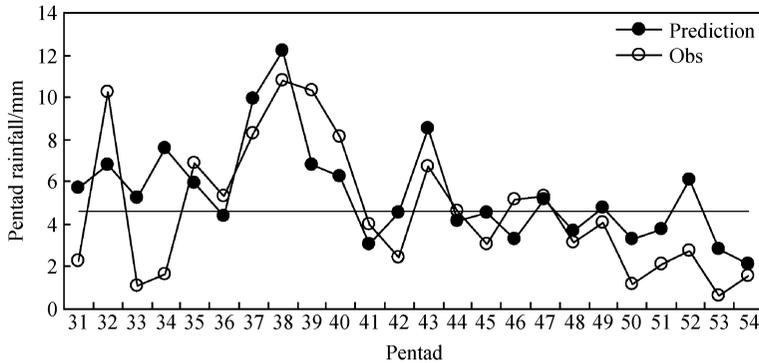


图3 1997年提前6候对汛期6~9月逐候的预报与实况(单位: mm)。水平横线为汛期实况候平均降水量

Fig. 3 Prediction 6 pentads ahead and observation of pentad rainfall during rainy season (Jun-Sep) of 1997. Horizontal line denotes pentad average rainfall for the whole rainy season

区降水量的季节内振荡信号对其汛期逐候降水量进行超前30天的延伸预报是有可能的。另一方面,该方法在涝年汛期延伸期预报的准确率较早年高,这可能与旱涝年降水演变季节内振荡信号的强弱差异有关。

4 基于梅雨区降水影响系统季节内振荡信号的延伸预报试验

4.1 试验方法及方案

江淮梅雨区降水与东亚季风系统的季节内活动密切联系。江淮梅雨区降水与东亚季风系统的季节内活动密切联系。梁萍(2010)的研究分析了梅雨季节内活动的影响系统,并指出热带、中纬度、高纬度不同关键区的低频信号与梅雨区降水季节内振荡均有关联。其中,赤道印度洋和赤道西太平洋对流低频活动是反映热带MJO活动的低频信号;梅雨区南、北侧的经、纬向水汽输送和梅雨区对流的低频活动是江淮梅雨区降水的中纬度低频信号;南海、西北太平洋的低频对流活动可通过遥相关波列影响梅雨区降水;此外,高层纬向风低频活动通过影响西风急流的北跳进一步对梅雨区降水的季节内振荡产生影响。因此,本节从影响江淮梅雨的环流系统出发,采用与第3节类似的最优子集回归方法,选取多个关键影响因子物理量的逐候季节内分量作为预报因子,对梅雨区降水的季节内演变(EEMD1-3分量的合成)进行预报试验。根据对梅雨区季节内演变的关键影响系统分析(梁萍,2010),共设计4组预报试验(试验A-D),分别考察不同纬度带低频信号对梅雨区降水延伸预报的影

响。试验A-D中采用的预报因子如图4所示,即:

试验A:考虑中纬度低频信号,采用5个预报因子:江淮北侧的低频经、纬向水汽输送,江淮地区低频OLR,江淮南侧的低频经、纬向水汽输送;

试验B:考虑热带低频信号,采用2个预报因子:近赤道印度洋、近赤道西太平洋的低频OLR;

试验C:考虑低、中纬度低频信号,采用7个预报因子(包括试验A的5个预报因子和试验B的2个预报因子);

试验D:考虑低、中、高纬度低频信号,采用10个预报因子:试验A的5个预报因子、试验B的2个预报因子、南海、西北太平洋的低频OLR、华北上空200 hPa低频纬向风。

4.2 预报试验效果分析

图5为预报试验A-D对2003~2007年汛期(6~9月)逐候降水季节内演变的预报与实况的相关系数。总体而言,试验A-C提前1候到10候的预报与实际降水季节内演变的相关均可超过临界值为0.145的0.10信度检验,且除提前1候和6候外其它预报时效都可超过临界值为0.24的0.01信度检验;试验D随预报时效的变化其预报与实况的相关呈现不稳定变化,总体效果较试验A-C差。而在A-C试验中,考虑热带印度洋和热带西太平洋低频信号的试验B预报效果最好,提前3候到提前6候的预报与实际降水季节内分量的相关都在0.3以上(大大超过临界值为0.24的0.01信度检验);在同时考虑热带和中纬度低频信号的试验C(共7个因子)中,提前3候到提前6候的预报效果均较试验B差;而只考虑中纬度低频影响因子(试

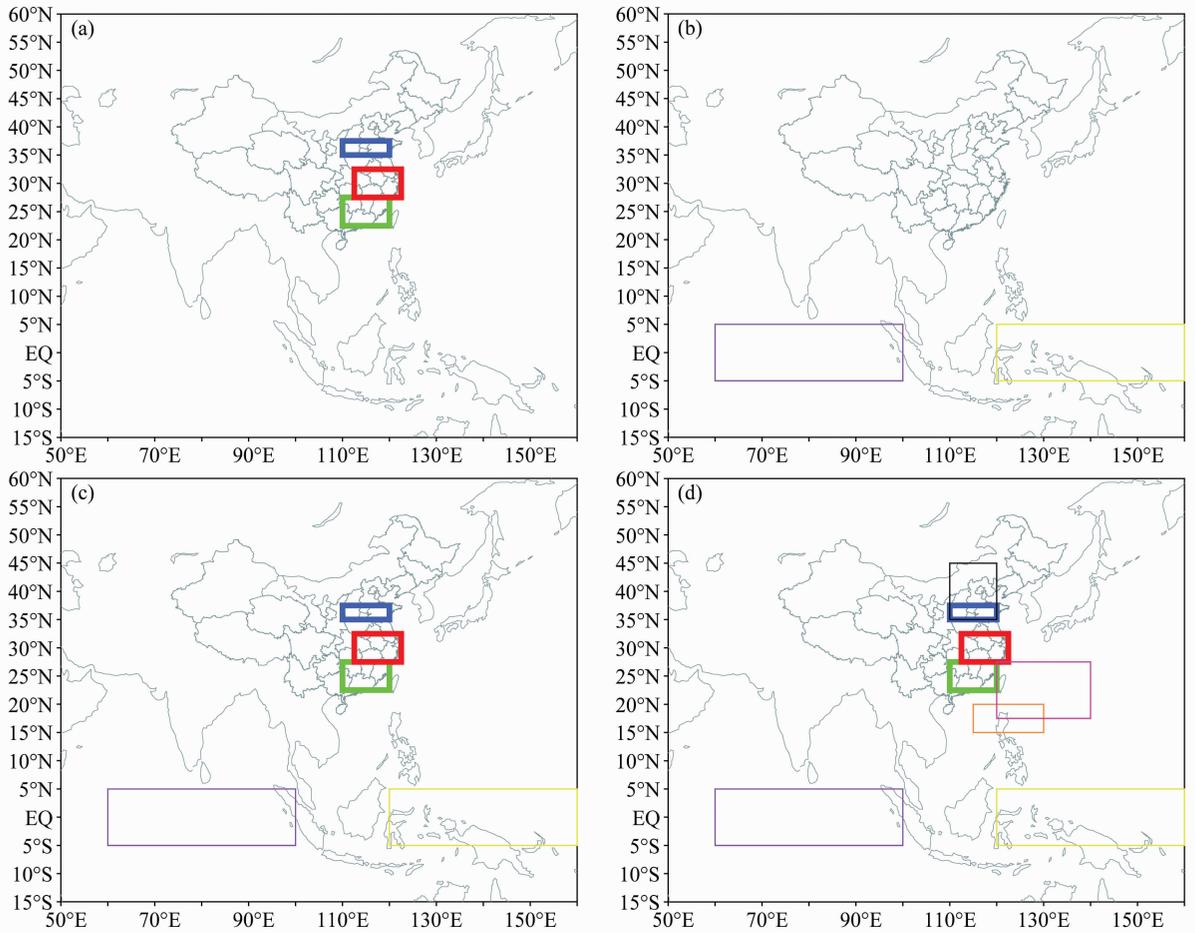


图 4 4 组预报试验中建立预报方程采用的预报因子：(a) 试验 A；(b) 试验 B；(c) 试验 C；(d) 试验 D。蓝色方框：江淮北侧低频经、纬向水汽输送；红色方框：江淮地区低频 OLR；绿色方框：江淮南侧的低频经、纬向水汽输送；紫色方框：近赤道印度低频 OLR；黄色方框：近赤道西太平洋低频 OLR；黑色方框：华北上空 200 hPa 低频纬向风；紫红色方框：西北太平洋低频 OLR；橙色方框：南海低频 OLR

Fig. 4 Forecast predictors of forecast models for four forecast expts; (a) Expt A; (b) Expt B; (c) Expt C; (d) Expt D. Blue box: zonal and meridional components of low-frequency (LF) moisture transport over the north of the Changjiang - Huaihe basin; red box: LF OLR over the Changjiang - Huaihe basin; green box: zonal and meridional components of LF moisture transport over the south of the Changjiang - Huaihe basin; purple box: LF OLR over the equatorial Indian Ocean; yellow box: LF OLR over the equatorial western Pacific; black box: LF zonal wind at 200 hPa over North China; magenta box: LF OLR over the northwestern Pacific; orange box: LF OLR over the South China Sea

验 A) 的预报效果又不如试验 C。

上述试验结果表明，热带低频信号对梅雨区降水季节内振荡演变的预报价值优于中纬度或中高纬度低频信号；在考虑热带低频信号的同时引入中高纬度低频因子可能增加延伸预报的复杂性，进而使预报效果总体不如仅考虑热带低频信号好。从各试验对 2003~2007 年各年的预报情况（图略）来看，预报效果不仅与各试验选取的因子有关，在同一试验中的预报效果也因年而异，这有可能与各年的低频信号明显程度存在差异有关。对于试验 A - D 预报效果均不好的年份，如何改进其延伸预报方法值得进一步研究。

本节与第 3 节均采用 EEMD 方法开展统计延伸预报。将各试验在 2003~2007 年各年的预报情况（图略）及多年平均预报情况与图 1 相比较发现，基于梅雨区降水季节内振荡信号的延伸预报试验结果优于基于梅雨区降水影响系统季节内振荡信号的结果。其原因可能在于：前者综合考虑了梅雨区降水的季节内振荡分量和季节变化分量；后者主要考虑的是梅雨区降水的影响系统季节内振荡信号。由此表明，在开展梅雨区降水量的延伸预报中，将季节内振荡和季节变化分量作为预报因子可能效果更好。这与第 3 节所述的季节内振荡与季节变化分量在梅雨期形成锁相共同对梅雨区降水产生

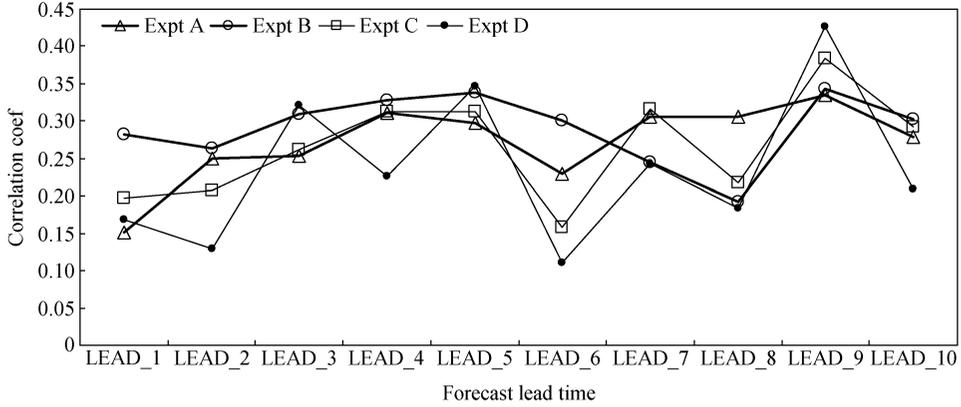


图 5 预报试验 A-D 对 2003~2007 年汛期 (6~9 月) 逐候降水季节内分量的预报与实况的相关系数。横坐标: 提前预报时段, LEAD_1 表示提前 1 候预报 (依此类推)

Fig. 5 Correlation coefficients between prediction and observation of ISO component of pentad rainfall during 2003-2007 rainy seasons (Jun-Sep) for forecast expts A-D. x-axis: forecast lead time, LEAD_1 represents forecast 1 pentad ahead, and the rest may be deduced by analogy

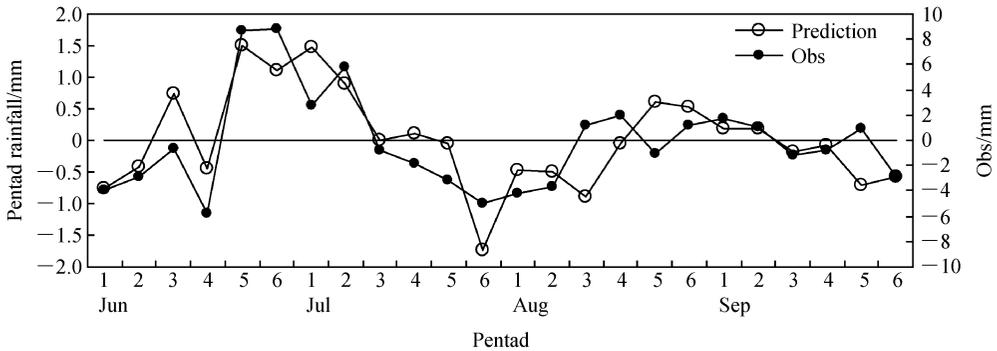


图 6 采用 5 个预报因子的最优子集回归方法对 2003 年汛期 (6~9 月) 逐候降水季节内分量提前 9 候的预报 (空心圆, 左纵轴) 及实况 (实心圆, 右纵轴)

Fig. 6 Nine pentads ahead prediction by the optimal subset regression based on 5 predictors (hollow circle line, left y-axis) and observation (solid circle line, right y-axis) for ISO component of pentad rainfall during 2003 rainy season (Jun-Sep)

作用相一致。

从历年汛期逐候降水季节内分量的预报来看, 延伸期 (提前 20~50 天) 的预报对江淮地区汛期降水的季节内演变有一定的指示意义, 可为江淮梅雨的延伸预报提供线索。以试验 A 的 2003 年为例, 提前 9 候 (图 6) 延伸预报给出 6 月 5 候的江淮梅雨区降水季节内分量较前期出现明显的增加, 一直到 7 月 2 候预报的季节内分量仍处于正值位且振幅较大, 而预报 7 月 3 候的季节内分量迅速减为 0。预报的 6 月 5 候至 7 月 2 候为江淮梅雨区的降水集中期, 与实际江淮梅雨在 6 月 5 候入梅、7 月 3 候出梅 (梁萍等, 2010) 非常吻合。此外, 提前 4 候 (图略) 也可预报出梅雨区 6 月 5 候降水突增。

从季节内演变的预报效果来看, 提前 9 候或 4 候的汛期逐候降水季节内分量预报与实况的总体相关可达 0.749 和 0.725, 远远超过了 0.01 显著性检验 (临界值约为 0.5), 故在实际的延伸预报中可能具有一定的参考价值。

本节的延伸期预报试验表明, 基于影响因子低频信号的梅雨区降水季节内振荡预报, 可为江淮梅雨的人、出梅延伸预报提供线索。其中, 热带低频信号对梅雨区降水季节内振荡演变的预报价值优于中纬度或中高纬度低频信号。此外, 该方法对各年的预报效果因年而异, 预报效果差的年份可能与低频信号影响不明显有关, 需采用其它方法加以改进。

5 基于海气耦合模式产品的江淮梅雨季节内振荡延伸预报试验

国家气候中心业务运行的全球海气耦合模式可提供 5 月 24~31 日起报的汛期 (6~9 月) 逐日降水及环流预报。下面, 考察该模式在梅雨季节 (通常为 6~7 月) 延伸期内对梅雨区降水季节内演变、东亚环流场季节内演变、热带地区季节内振荡 MJO 的预报效果, 以期对数值模式的延伸预报性能有初步了解。司东等 (2009) 关于全球海气耦合模式对江淮梅雨降水预报检验的分析表明, 该模式对不同年份的梅雨降水预报能力各有差异, 其中 2001 年和 1997 年分别为梅雨降水预报能力较好和较差的典型年份。因此, 此处选取 2001 和 1997 年作为代表年份, 进行延伸期预报试验对比分析。

5.1 对江淮梅雨区降水量的延伸期预报分析

表 1 给出 1997 年和 2001 年模式预报江淮地区 6~7 月逐日降水及其季节内分量 (EEMD3-4) 与实况 (采用江淮梅雨区平均的 CMAP 逐候降水量内插而得) 的相关。其中, 1997 年 6~7 月逐日降水的模式预报及其季节内分量 (EEMD3-4 模态) 与观测降水量均为负相关, 表明模式预报的逐日降水季节内振荡分量不能正确地预报实际降水量演变。对于 2001 年, 10~20 天、30~60 天季节内振荡与观测降水量均为正相关, 且其中的 30~60 天季节内振荡分量与观测降水量的相关系数 0.57 通过了置信度为 99% 的信度检验, 表明该年模式预报的梅雨区降水季节内振荡能较好地反映实际降水量演变 (图略)。因此, 在 2001 年, 模式能较好地预报延伸期降水的季节内振荡, 其降水实况的确定性预报效果较好; 而 1997 年的情况则相反。司东等 (2009) 的研究表明, 该模式对梅雨低频分量的预报好于对高频分量的预报。不同年份下模式预报的

表 1 6~7 月逐日降水预报及其 10~20 天、30~60 天季节内分量 (EEMD3、4) 与实况的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between predicted daily rainfall, its 10 - 20 day as well as 30 - 60 day ISO components (EEMD3 - 4) and observations

年份	季节内分量 EEMD3		季节内分量 EEMD4	
	预报与实况	与实况	预报与实况	与实况
1997	-0.422	-0.371	-0.358	
2001	0.401	0.247	0.571	

季节内振荡分量对实际降水量的不同贡献是模式对 1997 年和 2001 年梅雨区降水量演变预报效果差异的可能原因。上述结果仅为个例年份的分析, 有待进一步采用更多年份的试验对上述结果加以验证。

5.2 对东亚环流场季节内演变的延伸期预报性能分析

对于梅雨相关的东亚环流季节内演变, 1997 年和 2001 年的预报效果存在明显差异。无论是夏季还是梅雨季节 (图略), 2001 年 (图 7a) 逐日 850 hPa 纬向风的模式预报和实况的相关恰好沿东亚梅雨区为正的高值带 (通过 99% 的置信度检验), 而 1997 年 (图 7b) 沿东亚梅雨区则为东亚最明显的负相关区。由此可见, 模式能较好地预报 2001 年影响梅雨区低层环流的季节内演变, 但对 1997 年梅雨区影响气流的季节内演变预报效果较差, 这与模式对该 2 年降水季节内变化的预报效果差异是一致的。分析还表明, 模式对入梅前期平均异常环流形势的预报有一定的效果。例如, 在 1997 年和 2001 年, 模式预报 6 月上半月梅雨区南侧为异常气旋环流, 北侧为异常反气旋环流, 梅雨区为异常辐散气流控制, 为入梅的不利形势。上述延伸期梅雨区异常环流趋势与实况较为一致 (图略), 且据此推测的入梅偏晚趋势与实况 1997 年和 2001 年江淮区域梅雨分别于 6 月第 6 候和 6 月第 4 候入梅 (梁萍等, 2010) 一致。由此可见, 尽管模式在不同年份对东亚环流季节内演变的预报效果存在明显差异, 但在梅雨的延伸期环流形势趋势预报方面有一定的参考价值。

5.3 对热带 MJO 的延伸期预报性能分析

模式对 2001 年梅雨区夏季降水季节内演变的预报与实况呈显著的正相关, 而 1997 年的预报效果则相反。二者差异为何如此大? 梁萍 (2010) 的分析表明, 江淮梅雨区的降水与热带季节内振荡 MJO 的不同活动位相密切相关。与气候概率相比, 当 MJO 位于赤道印度洋 (太平洋) 时, 江淮梅雨区降水事件和极端降水事件的概率增大 (减小)。这可能与 MJO 可通过遥相关和局地动力机制来影响中国东南部夏季降水有关 (Zhang et al., 2009)。鉴于热带对流低频活动的重要影响, 除上述对梅雨区有直接影响的副热带环流预报有差异外, 模式对热带地区的预报是否有差异? 下面利用模式预报输出产品计算热带 MJO 指数并绘制位相图, 考察全球

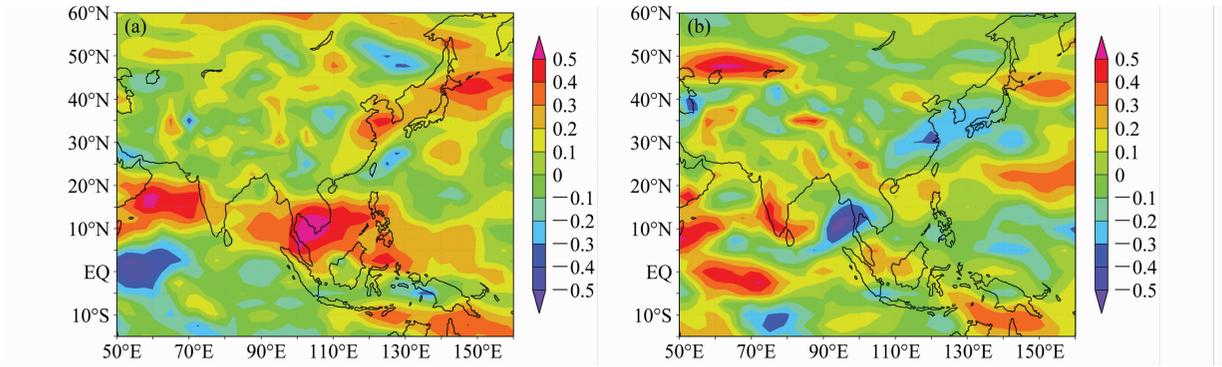


图 7 (a) 2001 年和 (b) 1997 年模式预报的夏季 (6~8 月) 逐日 850 hPa 纬向风与实况的相关场

Fig. 7 Correlation fields between model predicted and observed daily zonal winds at 850 hPa during summer (Jun-Aug) in (a) 2001 and (b) 1997

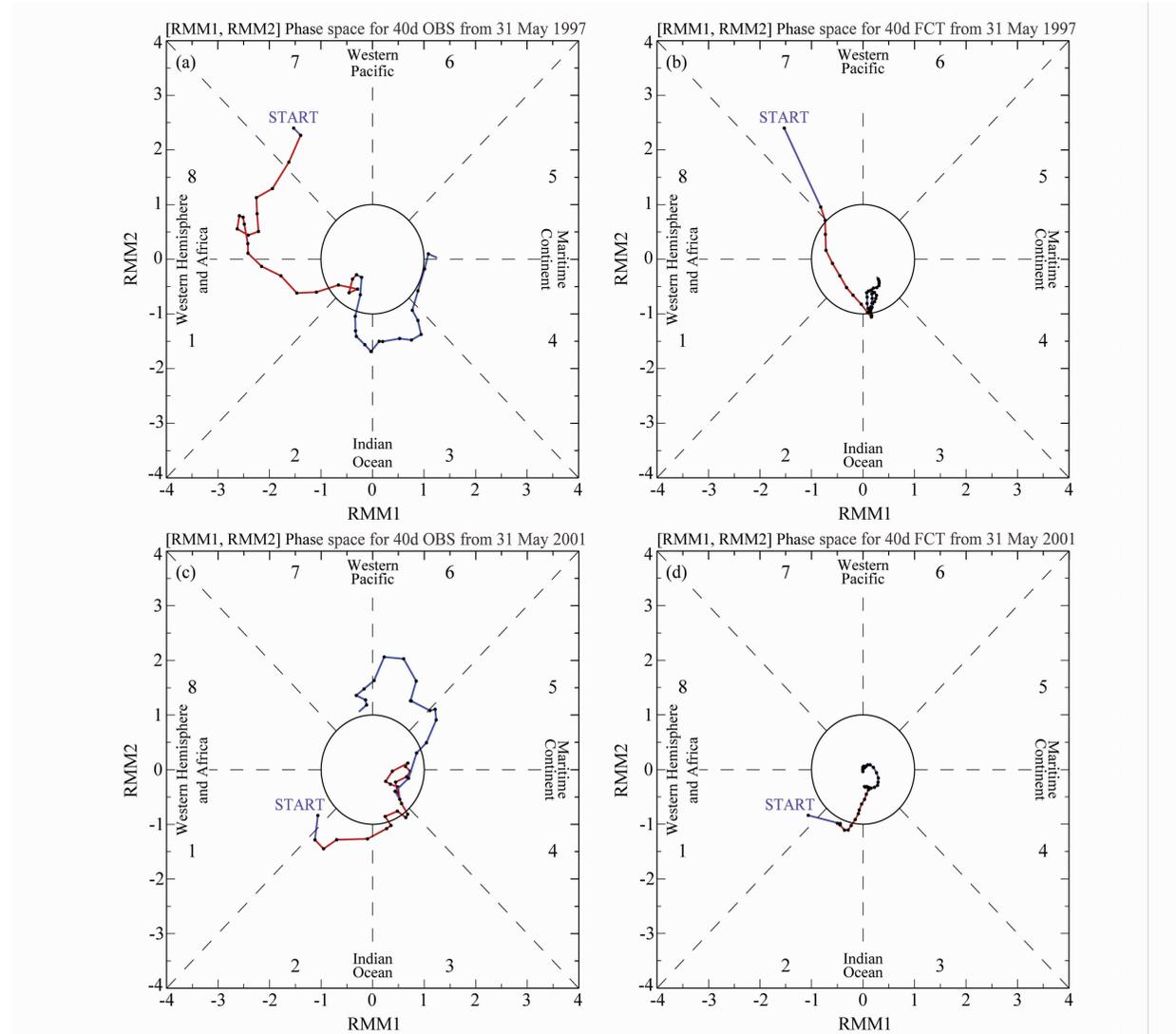


图 8 (a, b) 1997 年和 (c, d) 2001 年 6 月 1 日~7 月 10 日 MJO 位相分布演变图 (START 起始点均为观测计算的 5 月 31 日位相): (a, c) 观测; (b, d) 预报

Fig. 8 MJO phase evolution map (START points are MJO phases of 31 May computed based on observation) from 1 Jun to 10 Jul in (a, b) 1997 and (c, d) 2001: (a, c) Observation; (b, d) prediction

海气耦合模式对热带 MJO 的延伸期预报性能。

图 8 为采用模式对 1997 年和 2001 年 6 月 1 日~7 月 10 日风场的预报和观测值计算绘制的 MJO 位相演变图, 其中标注“START”的起始点均为观测值计算所得的 5 月 31 日位相。对 2001 年而言, 模式预报的前 20 天(6 月 1~20 日) MJO 的位相演变与观测较为一致, 均为 1 位相向 3 位相演变; 而 1997 年模式预报的 MJO 位相演变较观测更快, 观测的 MJO 在前 10 天位于 7、8 位相, 预报的 MJO 则已从 7 位相移至 2 位相。总的来说, 模式预报的 MJO 强度随着预报时间的增长而减弱, 且一般较实况弱(图略)。模式预报的第 21~40 天的 MJO 演变与实况相比相距甚远, 说明该模式对 20 天以后的 MJO 预报价值不及前 20 天。

就 MJO 活动指数预报而言, 模式预报夏季(6~8 月)或梅雨前期(6 月 1~20 日)的逐日 RMM1、RMM2 及强度指数与观测的相关如表 2 所示。从表 2 中可看出, 除 2001 年夏季的 MJO 强度指数预报效果不及 1997 年外, 2001 年入梅前期的 MJO 强度指数和夏季/入梅前期的 RMM1、RMM2 指数的预报效果均好于 1997 年。根据分析, 热带 MJO 可影响长江中下游降水, 这在一定程度上可以解释 2001 年模式预报的江淮区域梅雨降水较 1997 年效果更好。

表 2 模式预报与观测的 MJO 指数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between model predicted and observed MJO indices

	RMM1	RMM2	强度
2001 年 6~8 月的逐日相关	0.71	0.94	0.33
2001 年 6 月 1~20 日的逐日相关	0.85	0.95	0.87
1997 年 6~8 月的逐日相关	0.56	0.72	0.46
1997 年 6 月 1~20 日的逐日相关	0.26	0.76	0.34

上述对比分析结果表明: (1) 在梅雨季节降水预报效果较好的 2001 年, 该模式对梅雨区低层环流季节内演变、热带 MJO 的延伸期预报效果较好, 与梅雨区降水季节内振荡的延伸预报效果好相一致; 而在 1997 年, 该模式对梅雨区风场的季节内演变和热带 MJO 的振幅及位相演变的预报效果均差, 是其对梅雨季节降水预报失败的重要原因。(2) 采用该模式输出的 850 hPa 纬向风、200 hPa 纬向风计算 MJO 指数, 对 20 天以内的延伸期

MJO 预报有一定的应用价值。此外, 该模式在梅雨的延伸期平均环流形势预报方面也有一定的参考价值。

本节在已有研究的基础上选取 2001 年和 1997 年作为典型年份, 分别代表对梅雨降水预报能力较好和较差的年份。预报效果好、差的典型年份分析均表明海气耦合模式对梅雨的延伸期环流形势趋势预报有一定的参考价值, 该结论具有一定的代表性。第 3 节中采用统计预报模型对 2001 年的预报效果不如 1997 年, 这与本节中海气耦合模式预报效果不同, 关于统计预报模型和动力模式对延伸期预报的能力比较值得进一步研究。

6 基于经验波传播的延伸预报试验

目前, 美国 CPC (Climate Prediction Center) 采用经验波传播 (EWP) 方法对 200 hPa 速度势进行 40 天延伸期预报, 并将其应用于热带 MJO 的实时延伸预报业务, 该方法是具有动力学意义的统计方法。根据梁萍和丁一汇 (2011) 的分析, 江淮梅雨区降水与热带 MJO 密切相联, 除 MJO 的活动位相外, 其活动强度的变化亦对梅雨区降水产生影响。因此, 对 MJO 活动的位相、强度的延伸预报, 可为梅雨区降水延伸预报提供参考。本节选取历史上的某日 (2008 年 2 月 12 日, 下称试验日) 作为分析个例, 采用 EWP 方法对 MJO 活动的延伸期预报进行初步探讨和试验。

图 9a 给出试验日起报的未来 40 天 850 hPa 纬向风距平。比较预报与观测 (图 9b) 发现: (1) 如图 9a、b 中虚线箭头所示, EWP 方法预报的热带 ITCZ 活跃区 (位于印度洋的西风距平大值区) 和不活跃区 (位于西一中太平洋的东风距平大值区) 的东传与观测一致。(2) 从试验日起, EWP 方法预报出未来 8、16、24、32、40 天梅雨区的纬向风距平分别为东风、西风、西风、东风、西风距平; 对应观测距平分别为西风、西风、西风、东风、西风距平。换句话说, 除第 8 天外, 未来 16、24、32、40 天梅雨区的纬向风距平预报与观测较为一致。因此, EWP 方法对延伸期二维空间场的预报效果较好, 既可以预报出热带地区 ITCZ 对流活动异常的东传, 又可以较好地预报出梅雨区的风场距平, 具有一定的应用价值。

除 MJO 的活动位相外, 其活动强度的变化亦

对梅雨区降水产生影响。下面考察 EWP 方法对确定 MJO 活动位相、强度的 RMM1、RMM2 指数延伸预报。将试验日预报未来 40 天的 RMM1、RMM2 指数和观测确定的指数（如图 10）相比较发现，EWP 方法对 RMM2 指数的延伸预报效果较好，未来 40 天的预报和观测的相关高达 0.9；而其对 RMM1 指数的提前 1~20 天预报效果好于 21~40 天，前 20 天和后 20 天预报和观测的相关分别为 0.58 和 -0.97。此外，EWP 方法对 MJO 位相演变的总体效果较差（图略），这与该方法对 RMM1 指数的预报效果不好有关。

上述采用 EWP 方法对 MJO 的延伸预报试验结果表明：EWP 方法对热带 ITCZ 活跃异常（即热带 MJO 活动）未来 40 天的东传可能具有较好的预

报效果，还可能较好地预报出梅雨区的风场距平，为梅雨区延伸预报提供一定的参考。EWP 方法对未来 20 天 MJO 活动指数（RMM1、RMM2、强度）的预报效果好于 21~40 天。上述仅为某个例试验得到的结果，有待于更多的预报试验加以验证和改进。

7 结论和讨论

针对江淮梅雨区降水的延伸预报，本文根据梅雨区降水演变季节内振荡信号及其大尺度条件的低频信号，采用统计学模型（最优子集回归）和经验动力学模型（EWP 经验波传播）开展梅雨区降水及其影响因子的延伸期预报试验，并就数值模式（国家气候中心全球海气耦合模式）产品对梅雨区

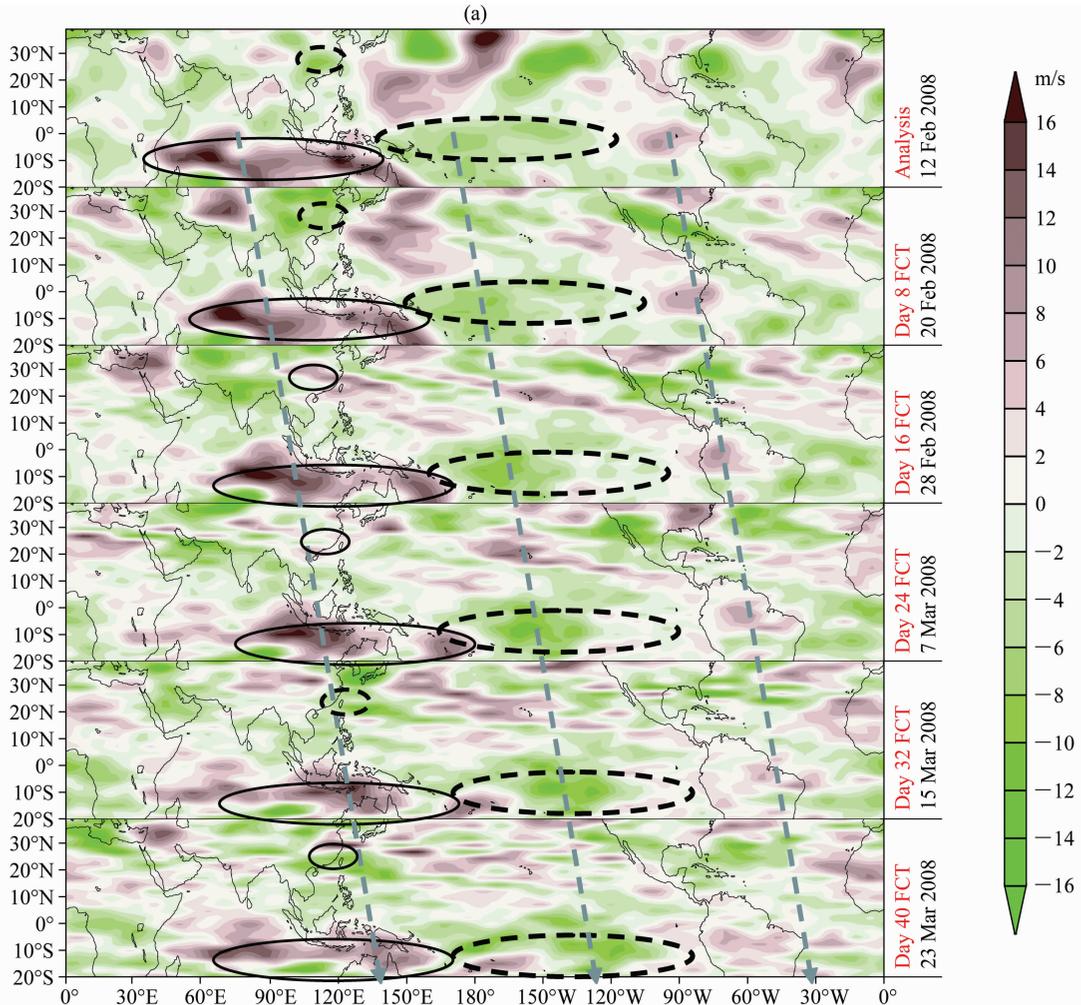


图 9 EWP 试验日及其未来 40 天的 850 hPa 纬向风距平 (a) 预报 (FCT) 和 (b) 观测 (单位: m/s)。实/虚椭圆: 西风/东风距平大值区; 虚线箭头: 传播方向; 小椭圆: 梅雨区

Fig. 9 (a) 40-day prediction (FCT) of zonal wind anomaly at 850 hPa from the EWP experiment day and (b) corresponding observations. Solid (dashed) ellipse: large-value region with westerly (easterly) anomaly; dashed arrow: propagation direction; small ellipse: Meiyu region

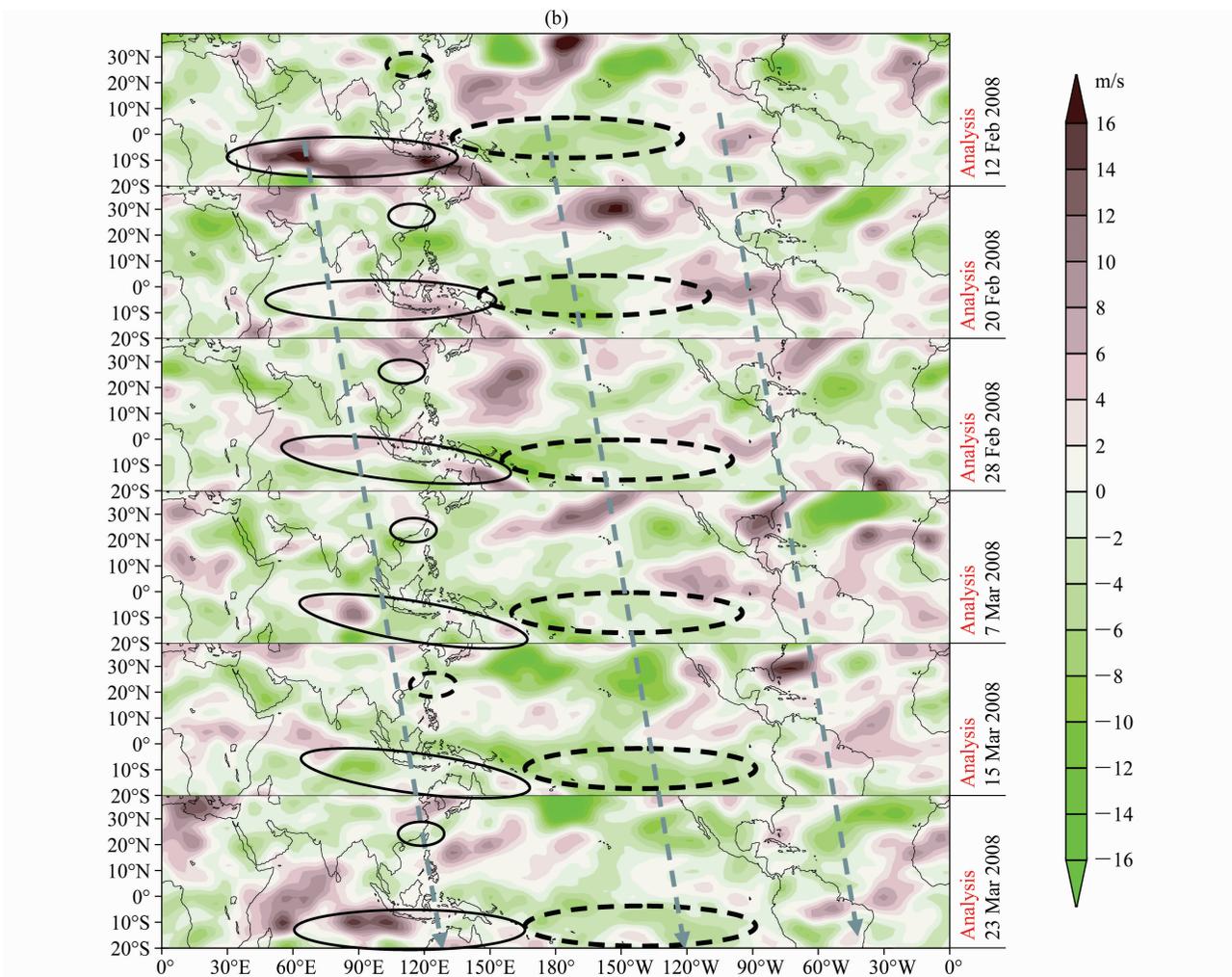


图9 (续)
Fig. 9 (Continued)

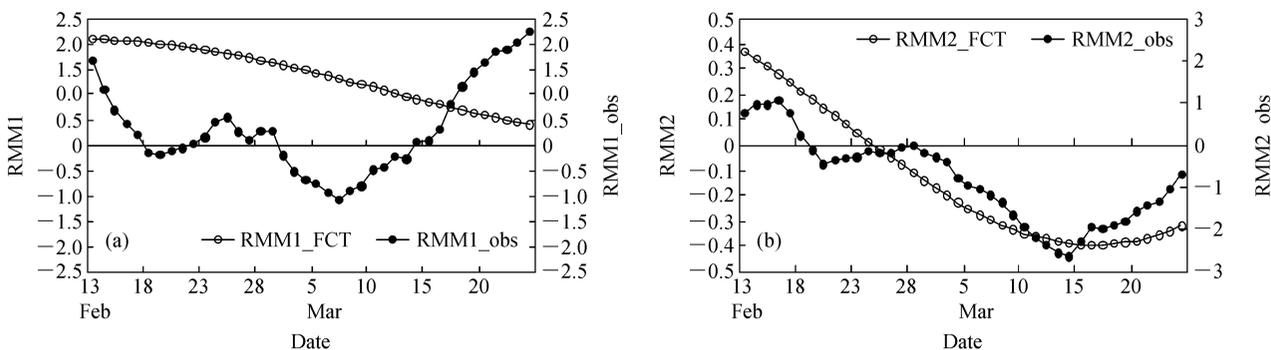


图10 试验日预报未来40天的 (a) RMM1、(b) RMM2 指数。空心/实心圆：EWP 预报/观测
Fig. 10 Future 40-day (a) RMM1 and (b) RMM2 indices predicted on the EWP experiment day

降水、东亚大气环流、热带 MJO 活动的延伸期预报性能进行初步试验。得到以下结论：

(1) 基于梅雨区降水季节内振荡信号建立最优子集回归模型，对 2003~2007 年汛期梅雨区逐候

降水量延伸预报试验的总体效果较好，故梅雨区逐候降水量的超前 30 天预报是有可能的。该方法在涝年汛期延伸期预报的准确率较早年高，这可能与旱涝年降水演变低频信号的强弱差异有关。在量化

不同年份降水演变低频信号强弱的基础上,分析其与延伸期预报准确率的定量关系,值得进一步研究。

(2) 基于影响因子低频信号的梅雨区降水季节内振荡预报试验,可为江淮梅雨的入梅、出梅延伸期预报提供线索;而热带低频信号对梅雨区降水季节内振荡演变的预报价值优于中纬度或中高纬度低频信号。该方法对各年的预报效果因年而异,预报效果不好的年份可能与低频信号的影响不明显有关,需要采用其它预报方法加以改进。

(3) 采用经验波传播(EWP)方法对热带ITCZ异常活动的未来40天东传可能具有较好的预报效果,亦可能较好地预报出梅雨区的风场距平演变,具有一定的应用价值。此外,20天以内的MJO活动指数延伸期预报效果好于未来21~40天的延伸期预报效果。上述结论主要基于个例试验分析而得,有待于更多的试验加以验证。

(4) 全球海气耦合模式在梅雨的延伸期环流形势趋势预报方面有一定的参考价值。在对梅雨季节降水预报效果好的2001年,该模式对梅雨区低层环流季节内演变、热带MJO的延伸期预报效果较好,与梅雨区降水季节内振荡延伸期预报效果较好是一致的;对梅雨季节降水预报效果差的1997年,情况则相反。采用该模式输出的850 hPa纬向风、

200 hPa纬向风计算MJO指数,对20天以内的延伸期MJO预报有一定的应用价值。

预报试验表明,上述统计模型、经验动力模型及数值模式等方法在实时的延伸预报中具有一定的应用和参考价值,是构建实时延伸预报业务的可能途径。为此,基于上述预报试验的分析,给出梅雨区降水延伸期预报的综合流程图(图11)。如图11所示,在实时延伸预报中,在利用实时资料计算分析大气环流和降水等物理量随时间演变的基础上,可分别进行延伸期的统计模型预报、经验动力模型预报及动力模式预报。在统计模型预报中,分别采用EEMD方法、MJO指数方法及滤波方法获取降水、MJO、关键区及环流场演变的低频信号,进一步利用统计模型进行降水量、降水现象及极端事件发生概率的延伸预报。在经验动力模型预报中,可利用EWP经验动力学方法获取MJO及环流场的低频演变及延伸期低频强信号,进一步利用降水现象及极端事件的发生概率与低频强信号的关系开展延伸预报。此外,在动力模式应用中,可采用海气耦合模式预报产品获取延伸期的关键影响区低频演变和MJO强信号,进一步开展降水量、降水现象及极端事件发生概率的延伸预报。最后,对上述不同方法的预报结果进行集成,得到延伸期预报结论。其中,如何对不同模型预报结果集成,有待于进一

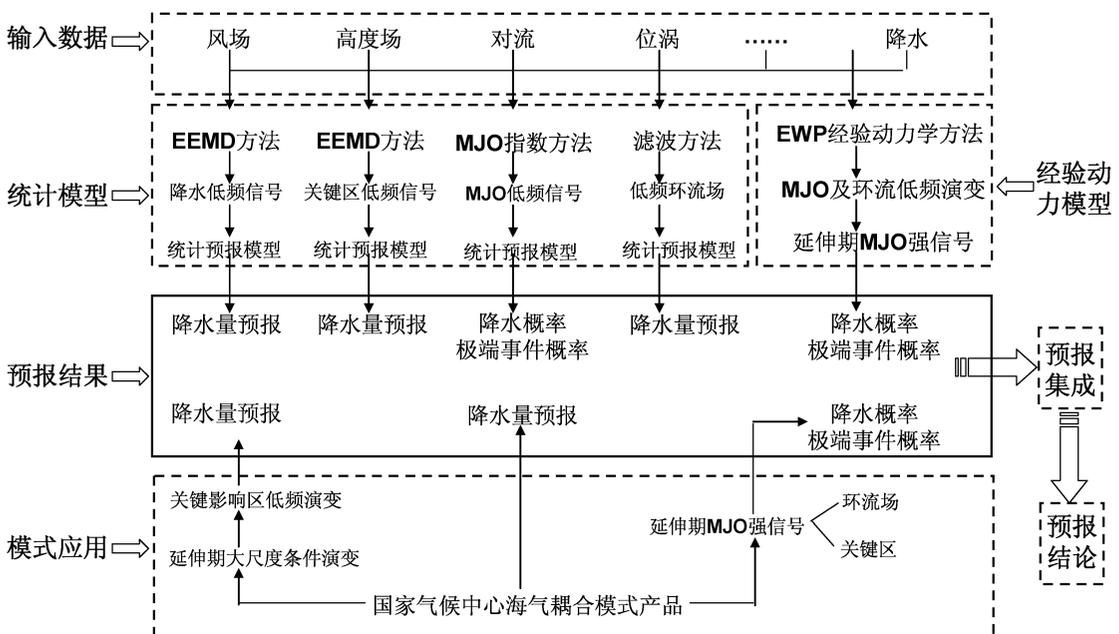


图 11 基于诊断分析和预报试验的梅雨区降水延伸期预报综合流程图

Fig. 11 Comprehensive flow chart for extended range forecast in Meiyu region based on diagnostic analysis and forecast experiments

步研究。此外, 本文仅为梅雨区延伸预报的初步探索性试验, 文中个例试验所得结论有待于更多的预报试验加以验证、改进和集成。

参考文献 (References)

- Cai M, van den Dool H M. 1991. Low-frequency waves and traveling storm tracks. Part I: Barotropic component [J]. *J. Atmos. Sci.*, 48: 1420–1436.
- 曹鸿兴, 魏凤英, 封国林, 等. 1989. 估计模型维度的双评分准则及其应用[J]. *数理统计与应用概率*, 11 (1): 34–40. Cao Hongxing, Wei Fengying, Feng Guolin, et al. 1989. Coupled score criterion of estimation model dimension and its application [J]. *Mathematical Statistics and Application Probability (in Chinese)*, 11 (1): 34–40.
- 陈光华, 黄荣辉. 2009. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制[J]. *大气科学*, 33 (2): 205–214. Chen Guanghua, Huang Ronghui. 2009. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific and the physical mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 205–214.
- 陈丽娟, 陈伯民, 李维京, 等. 2005. T63 模式月动力延伸预报高度场的改进实验[J]. *应用气象学报*, 16 (增刊): 92–96. Chen Lijuan, Chen Bomin, Li Weijing, et al. 2005. Improved experiments for T63 potential heights by monthly dynamic extended-range forecast [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 16 (s): 92–96.
- Chen Longxun, Zhu Congwen, Wang Wen, et al. 2001. Analysis of the characteristics of 30–60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 18: 623–638.
- 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展[J]. *气象学报*, 62 (5): 598–612. Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 598–612.
- 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]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (7): 111–122.
- Furnival G M, Wilson R W M. 1974. Regressions by leaps and bounds [J]. *Technometrics*, 16: 499–511.
- 何金海, 陈丽臻. 1988. 南北半球环流的准 40 天振荡与夏季降水预报的可能途径[J]. *低纬高原天气*, (1): 38–49. He Jinhai, Chen Lizhen. 1988. Quasi-40dy oscillation of south and north hemispheric circulation and possible way of summer monsoon rainfall [J]. *Low-Latitude Plateau Weather (in Chinese)*, (1): 38–49.
- Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Ren Fumin, et al. 2010. Impacts of the Madden-Julian Oscillation on winter rainfall and circulation in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (3): 521–533.
- Jones C, Carvalho L M V, Higgins R W, et al. 2004. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies [J]. *J. Climate*, 17: 2078–2095.
- Krishnamurti T N. 1985. Summer monsoon experiment: A review [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 112: 1590–1626.
- 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 atmosphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 14 (1): 32–45.
- 李清泉, 丁一汇, 张培群. 2004. 一个全球海—气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估[J]. *气象学报*, 62 (6): 740–751. Li Qingquan, Ding Yihui, Zhang Peiqun. 2004. Primary verification and assessment on the extra-seasonally predictive capability of a global atmospheric–oceanic coupled model in raining season [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 740–751.
- 梁萍, 陈隆勋, 何金海. 2008. 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*, 27 (s): 84–91. Liang Ping, Chen Longxun, He Jinhai. 2008. Features of low frequency oscillation for moisture transport during typical drought/flood year over Yangtze–Huaihe basin [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (s): 84–91.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究[J]. *大气科学*, 34 (2): 418–428. Liang Ping, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze–Huaihe basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 418–428.
- 梁萍. 2010. 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/中国气象科学研究院博士论文. Liang Ping. 2010. Intraseasonal oscillation and extended range forecast of China Meiyu [D]. Ph. D. Dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology & Chinese Academy of Meteorological Science.
- 梁萍, 丁一汇. 2011. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征[J]. *气象学报*, 已录用. Liang Ping, Ding Yihui. 2011. Climate features of intraseasonal oscillation of East Asia Meiyu [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, in press.
- 陆尔, 丁一汇. 1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. *气象学报*, 54 (6): 730–736. Lu Er, Ding Yihui. 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang–Huaihe River basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54 (6): 730–736.
- 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.
- 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.
- Maharaj E A, Wheeler M C. 2005. Forecasting an index of the

- Madden-oscillation [J]. *Int. J. Climatol.*, 25: 1611–1618.
- 潘静, 李崇银, 宋洁. 2010. 热带大气季节内振荡对西北太平洋台风的调制作用[J]. *大气科学*, 34 (6): 1059–1070. Pan Jing, Li Chongyin, Song Jie. 2010. The modulation of Madden-Julian Oscillation on typhoons in the northwestern Pacific Ocean [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (6): 1059–1070.
- Qin J, van den Dool H M. 1996. Simple extensions of an NWP model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 277–287.
- Seo K-H, Wang W Q, Gottschalk J, et al. 2009. Evaluation of MJO forecast skill from several statistical and dynamical forecast models [J]. *J. Climate*, 22 (9): 2372–2388.
- 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 2009. 全球海气耦合模式 (BCC-CM1.0) 对江淮梅雨降水预报的检验[J]. *气象学报*, 67 (6): 947–960. Si Dong, Ding Yihui, Liu Yanju. 2009. Evaluation of Meiyu prediction in the Yangtze–Huaihe region by coupled Ocean–Atmosphere General Circulation Model (BCC-CM1.0) [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 947–960.
- 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 2008. 低频天气图预报方法[J]. *高原气象*, 27 (S): 64–68. Sun Guowu, Xin Fei, Chen Bomin, et al. 2008. A prediction method on the low-frequency synoptic weather map [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (S): 64–68.
- 陶诗言, 卫捷. 2007. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. *气象*, 33 (3): 10–17. Tao Shiyang, Wei Jie. 2007. Correlation between monsoon surge and heavy rainfall causing flash-flood in southern China in summer [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (3): 10–17.
- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 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*, 19 (6): 710–715. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid-lower reaches of the Yangtze River in the flood and drought years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (6): 710–715.
- 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.
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Adv. Adapt. Data Anal.*, 1 (1): 1–41.
- Wu Z H, Huang N E. 2005. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [R]. COLA Tech. Rep. No. 193, Center for Ocean–Land–Atmos. Studies, Calverton, Maryland.
- Xavier P K, Goswami B N. 2007. An analog method for real-time forecasting of summer monsoon subseasonal variability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 4149–4160.
- Yasunari T. 1980. A quasi-stationary appearance of 30 to 40 day period in the cloudiness fluctuations during the summer monsoon over India [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58: 225–229.
- Zhang Lina, Wang Bizheng, Zeng Qingcun. 2009. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China [J]. *J. Climate*, 22 (2): 201–216.
- 赵亮, 丁一汇. 2009. 东亚夏季风时期冷空气活动的位涡分析[J]. *大气科学*, 33 (2): 359–374. Zhao Liang, Ding Yihui. 2009. Potential vorticity analysis of cold air activities during the East Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 359–374.
- 祝从文, Nakazawa T, 李建平. 2004. 大气季节内振荡对印度洋—西太平洋地区热带低压/气旋生成的影响[J]. *气象学报*, 62: 42–50. Zhu Congwen, Nakazawa T, Li Jianping. 2004. Modulation of tropical depression/cyclone over the Indian–western Pacific oceans by Madden-Julian Oscillation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62: 42–50.