2002 年夏季东亚地区环流 20—30 d 主振荡型延伸期预报研究^{**}

杨秋明 李 熠 宋 娟 黄世成 YANG Qiuming LI Yi SONG Juan HUANG Shicheng

江苏省气象科学研究所,南京,210008 Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210008, China 2011-11-29 收稿,2012-03-26 改回.

Yang Qiuming, Li Yi, Song Juan, Huang Shicheng. 2012. Study of the extended range forecast of the principal 20-30 day oscillation pattern of the circulation over East Asia in the summer of 2002. Acta Meteorologica Sinica, 70(5): 1045-1054

Abstract A series of the principal oscillation pattern (POP) models are set up based on the low-frequency meridional wind of 850 hPa over East Asia for March-September in 2002 on the time scale of the 20 - 30 day, and the independent forecast experiments of POP models are performed for investigating the propagation of the low-frequency oscillation associated with the heavy precipitation process over the lower reaches of the Yangtze River valley in terms of the extended range of the 10 - 30 days. The results show that the skill score of the correlation prediction up to 20 days ahead of time could reach more than 0.50 in the 135 forecast runs, with the corresponding low frequency variations of the positive meridional wind to three severe precipitation events in summer well forecasted. Based on the forecast experiments against the years of distinct 20 - 30 day oscillation, it is shown that this POP model is a useful tool to predict the spatial and temporal evolutions of the low frequency oscillation. Hence, it is important for improving accuracy of forecasting the severe precipitation process over the lower reaches of the Yangtze River valley for future 3 - 4 weeks.

Key words 20 - 30 day oscillation, East Asia, Severe precipitation, The lower reaches of the Yangtze River valley, Extended range forecast

摘 要 用 2002 年 3—9 月逐日东亚地区 850 hPa 经向风场资料建立主振荡预测模型(POP),对影响长江下游地区强降水过 程的主要低频经向风场(20—30 d 时间尺度)的时空变化进行 10—30 d 延伸期独立预报试验。试验结果表明,在夏半年 135 次预测中提前 20 d 预报的相关预报技巧在 0.50 以上,很好地预报了夏季 3 次强降水过程对应的经向风的低频变化过程。对 20—30 d 振荡显著的多年资料预报试验表明,这些预测模型是预报低频环流时空演变的有效工具,对于提高未来 3—4 周长 江下游强降水过程的预报准确率有重要意义。

关键词 20—30 d 振荡, 东亚地区, 强降水, 长江下游地区, 延伸期预报 中图法分类号 P456

1 引 言

10-30 d 延伸期预报介于天气预报和气候预 测这两类问题之间,这使其在科学研究和气象业务 上都很复杂。许多较长生命周期的大气现象,如行 星尺度的北半球热带外对流层高层的绕球遥相关波 (CGT)(Ding, et al, 2005)、南半球中纬度地区的 绕球遥相关波(SCGT)(Yang, 2009)、Madden-Jul-

^{*} 资助课题:国家自然科学基金项目(41175082)。 作者简介:杨秋明,主要从事中期天气和气候预报研究。E-mail:yqm0305@263.net

ian 振荡(MJO)、北极涛动(AO)等,对天气尺度系 统均有明显的影响。已有的研究表明,当这些特定 的大气流型信号明显持续时,对于 10—30 d 延伸期 天气过程往往具有很好的可预报性,并经常会引发 后期的极端天气气候异常事件(如强降水、强升(降) 温过程等)。由于其时间尺度在 10—70 d,因此,可 以采用这些热带和热带外季节内变化信号(ISO)来 作其影响区域的 10—30 d 延伸预报(Waliser, et al, 2003; Jones, et al, 2004; Wheeler, et al, 2004, 2009; Maharaj, et al, 2005; Cassou, 2008; Love, et al, 2008; Agudelo, et al, 2009; Jones, 2009; Yang, et al, 2010; Ajayamohan, et al, 2011; Carvalho, et al, 2011; Krishnamurthy, et al, 2011; Liebmann, et al, 2011; Roff et al, 2011)。

对于长江下游地区(30.5°-32.0°N, 118.0°-122.5°E)夏季强降水过程来说,起主要作用的是 20-30 d 振荡(Yang, 2009)的变化(如南半球中纬 度绕球遥相关波列、热带西太平洋型(TWP)等),它 们与长江下游梅雨中期变化也有一定联系,反映了 南半球中纬度地区和西太平洋地区季节内振荡对夏 季东亚副热带季风的变化均有显著影响;而热带大 气 30-60 d 振荡(MJO)和 10-20 d 振荡仅起部分 作用。可以认为,东亚地区 20—30 d 振荡可作为联 系长江下游地区夏季强降水的逐日数值天气预报和 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的缝隙。中国学者近20年来 对季节内振荡与中国东部降水变化的关系进行了分 析,得到许多有重要意义的结果(杨秋明,1993;韩 荣青等,2006;丁一汇等,2008;Zhang, et al,2009; Mao, et al, 2010; Hei, et al, 2011; 白旭旭等, 2011),并逐步开始基于季节内振荡的延伸期预报方 法研究和试验(杨秋明, 1998, 2008, 2011; 丁一汇 等, 2010;陈官军等,2010; 琚建华等,2010; 朱红蕊 等,2010;孙国武等,2011)。杨秋明(1998)初步用 能客观分离不同低频振荡模态的主振荡型分析 (POP) (Hasselmann, 1988; von Storch, et al, 1990)建立预测模型对 1994 年夏半年西太平洋热带 地区 MJO 形势演变进行预测试验,表明对夏季西 太平洋副热带高压(副高)和东亚雨带 10-30 d 变 化趋势有很好的预示性,同时也讨论了可预报性,并 在 1995—2005 年长江下游地区持续降水过程的业 务中期预报中取得了较好的预报效果。然而,尚未 开始系统研究与长江下游地区夏季强降水过程关系 最密切的东亚地区 20—30 d 时间尺度季节内振荡 时空演变的延伸期预报和可预报性。现有的大部分 研究仅集中在 30—60 d 振荡与持续降水过程和旱 涝的关系及其机制,不同时间尺度季节内振荡(20— 30、30—40、40—50、50—60 和 60—70 d 等)与不同 区域高影响天气相关的差异也不完全清楚。

已有的研究表明,季节内振荡对长江下游地区 强降水过程的作用具有时间尺度上的选择性,仅 20-30 和15-20 d 振荡与强降水过程密切相关,其 中,20-30 d 振荡的作用占主导地位(Yang,2009)。 30-60 d 振荡和这个区域强降水关系不明显,但与 一般降水过程或持续降水过程关系较好。如果季节 内振荡的周期较长(大于 30 d)和变短(小于 15 d), 长江下游强降水发生频率将显著减小。因此,针对 与长江下游地区强降水过程有密切联系的东亚和西 太平洋地区环流 20-30 d 振荡模态,建立动力统计 模型,主要预测 20-30 d 振荡型的 10-30 d 延伸 期形势演变,能为延伸期强降水发生概率预测提供 主要预报信号。本文用主振荡模型对 20-30 d 振 荡活跃的 2002 年(Yang, 2009) 夏季东亚地区 850 hPa 经向风的 20—30 d 低频场未来 30 d 变化进行 了独立预报试验,同时也分析了 20—30 d 振荡较显 著的多年资料的预测结果以及影响 20—30 d 振荡 强度年际变化的可能原因,为夏季长江下游地区强 降水延伸期预报提供一些新思路。

2 预测模型

2.1 资料

东亚地区 850 hPa 经向风场选用 NCEP/ NCAR 逐日再分析风场(Kalnay, et al, 1996)在 0°—45°N, 90°E—180°范围内的 2.5°×2.5°的格点 资料,时间为 1979—2005年;采用一阶 Butterworth 滤波器进行 20—30 d带通滤波,得到 850 hPa 低频经向风场,经标准化处理后构成基本资料 阵V。逐日长江下游地区降水量采用此区域中 25 站平均值,时间为 2002年5月1日—8月31日。 850 hPa 经向风场预测试验的时间是 3月1日—9 月 30 日。海温资料从英国气象局哈得来气候中心的逐月全球海温资料(HadISST)中选取(Rayner, et al, 2006), 计算太平洋范围内格点的 3—5 月平均距 平值作为春季海温资料。

2.2 2002 年 5-8 月东亚地区 850 hPa 经向风 20-30 d振荡的主振荡型分析

图 1a 给出 2002 年 5-8 月长江下游地区逐日 降水的时间演变,6月1日以前以过程性降水为主, 每次过程间隔约7d,6月1日—8月31日是显著的 强降水天气过程,其中,有3次集中强降水过程(6 月20日、7月17日和8月14日),降水过程中最大 日平均(区域)雨量大于 25 mm。可见 5-8 月降水 活跃期与中断期交替变化,这种变化表现为极显著 的季节内振荡。图 1b 是逐日降水时间序列的非整 数波功率谱分析(Schickedanz, et al, 1977)。通过 0.05 信度检验的显著周期(非整数)是 4.0、7.0、 9.0 d 的高频振荡和极显著的 27 d 的低频振荡,其 中,周期小于10d的是高频振荡,与强降水过程关 系不大,而27d周期是与强降水过程密切相关的降 水季节内振荡,这种季节内振荡的强度与长江下游 夏季强降水频数的正相关十分明显(Yang,2009)。 因此,2002年5-8月长江下游地区降水低频振荡 的主周期为20—30 d,有利于长江下游地区暴雨频 繁发生,夏季出现显著洪涝。对同期逐日东亚地区 850 hPa 20-30 d 低频经向风场进行主振荡型分 析,得到一个显著的 20-30 d 低频振荡的主振荡 型(POP1)空间分布的实部 p_r 和虚部 p_i(图 2a、b) 和对应的时间系数实部 $z_{i}(t)$ 和虚部 $z_{i}(t)$ (图 2c), 解释方差是36.5%, 空间波传播周期是27.4 d, 主 振荡型的循环过程是… $\rightarrow p_i \rightarrow p_r \rightarrow - p_i \rightarrow - p_r \rightarrow p_i$ →…。对于 POP1 的实部(图 2a)和虚部 (图 2b), 中纬度地区均表现为东亚副热带地区纬向传播的正 负相间的波列结构,其空间分布相差四分之一位 相。由主振荡分析循环过程可知这种环流的 20-30 d 振荡呈现向东传播的一支波列,类似于夏季东 京一芝加哥"快车"(从日本和中国东北地区向东经 北太平洋到达加拿大西部、大平原北部及美国中西 部地区)或上海一堪萨斯"快车"(从中国长江中下游 地区向东经北太平洋到达美国北部)对应遥相关波 列的东亚—西太平洋部分(Lau, et al, 2002; 丁一 汇等,2008)。从对应的时间系数可发现长江下游地 区强降水集中期(5月下旬初,6月中旬末,7月中旬 和8月中旬中期,图3a-d)均发生在虚部时间系数 的正位相(图 2c),特别是上述6月中旬到8月下旬 的长江下游地区3次集中强降水过程(图 3b、c、d), 这时中国东部 105°E 以东的长江以南地区低频南风 分量显著增强(来自南海地区的低频水汽输送加强, 图 2b)。图4给出的2002年5月1日—8月31日



图 1 (a) 2002 年 5-8 月长江下游地区逐日降水变化(虚线为降水 20-30 d 滤波曲线)、
(b)非整数波功率谱分析 F 统计量(水平虚线表示通过 0.05 显著性检验)

Fig. 1 (a) Time series of the daily precipitation over the lower reaches of the

Yangtze River during May-August 2002, in which the curve of the

20-30 day filtering is represented by dashed line, and

(b) Statistical parameter F for the non-integral power spectral analysis,

in which the significant level of 95% is marked with the horizontal dashed line

长江下游地区 20—30 d 低频降水(图 1a)与 850 hPa 低频经向风场的相关空间分布(样本长度为 123 d) 也表现出纬向传播的波列结构,其中,长江以南地区 和日本南部洋面为显著正和负的相关区,通过 0.05 的显著性检验(相关显著格点的平均有效自由度为 14 d 左右,当相关系数大于 0.50 时,其显著性为 0.05)。所以,对于 850 hPa 经向风低频变化,中国 长江以南地区和副热带西北太平洋地区是影响长江 下游低频降水和强降水过程的关键区(与图 2b 一 致),这些地区低频经向风变化的 10—30 d 延伸期 预测对于预报出长江下游地区强降水发生时段非常 重要。因此,这种东亚副热带地区低层风场的 20— 30 d尺度的低频信号和对应的主振荡型模态的变 化,可为夏季长江下游地区强降水过程的 10—30 d 延伸期预测提供重要的信息。对这种显著的 20— 30 d 振荡的风场演变进行预测,可较准确估计未来 30 d 内长江下游地区强降水发生的时段。



图 2 东亚地区 2002 年 5-8 月 850 hPa 20-30 d 振荡低频经向风场第一主振荡型 (POP1)
(a)实部 p_r (b)虚部 p_i 空间分布和(c)时间系数
(a,b 中虚线表示负值,图中数值已乘 1000,深(浅)阴影表示≥60(≤-60);
c中实(虚)线是实(虚)部时间系数,直方图为长江下游地区逐日降水变化)

Fig. 2 Spatial distribution of the first principal 20 - 30 day oscillation pattern (POP1) for the 850 hPa low-frequency meridional wind anomalies over East Asia in May-August in 2002: (a) real part, and (b) imaginary part as well as (c) the time coefficients and

the daily precipitation over the lower reaches of the Yangtze River

(In (a) and (b), the values are multiplied by 1000 and dark (light) grey

shaded areas represent the regions greater than 60 (less than -60)

In (c), solid (dashed) line represents the real (imaginary) part time coefficient and the bar represents the time series of the daily precipitation over the

lower reaches of the Yangtze River)



图 3 2002 年 5—8 月中国逐日降水空间分布 (a.5月21日, b.6月20日, c.7月17日, d.8月14日; 单位: mm/d) Fig. 3 Spatial distributions of the daily rainfall in China in May-August in 2002 (a. 21 May, b. 20 June, c. 17 July, d. 14 August; unit: mm/d)



3 预测方法及结果

主振荡模态分析是一种介干动力学模式与统计 分析之间的方法,能有效地分离各种时空尺度,揭示 复杂气候系统中主要振荡模态的循环变化,不仅是 一个分析工具,也是预测低频空间波传播的工具(即 对环状链进行振荡状态预报)。而进行实际预报时, 必须考察其独立样本预报精度,以反映实际预报能 力(杨秋明,1998)。由于主振荡型(空间分布,即复 特征向量 $p = p_r \pm i p_i$)与样本序列长度有关,因此, 本文用限定记忆法,保持子序列 No 不变,滑动进行 独立样本预测试验。对振荡传播较显著的初夏和盛 夏 (2002 年 4 月 19 日—8 月 31 日) 共作 135 次预 报,取预报时间 τ =30 d,子序列长度 N₀=50 d。此 外,由于复特征向量 $p = p_r \pm i p_i$ 随样本而变化,所 以,建模的方案反映了低频系统特征的动态演变,即 主振荡模态系数 $z_r(t), z_i(t)$ 在二维 z 平面上的变 化是相对于动态正交基pr和pi的,有利于适应主



要 20—30 d 振荡系统空间结构随时间的改变,在一 定程度上反映 20—30 d 振荡型变化的非线性特征。 图 5 给出了这 135 次独立预报的提前 5、10、15、20、 25 d 的低频经向风场预报与对应的实况低频经向 风场的相关系数的空间分布(图 5),可发现未来 5— 20 d 东亚副热带大部分地区预报效果很好,其显著 性均通过 95%的信度检验,尤其是影响长江下游地 区强降水的关键区(中国大陆 100°E 以东的长江以 南地区和日本以南的西北太平洋地区)20—30 d 低 频经向风的预报具有重要参考价值。对于未来 25 d,相关显著区域明显缩小,除了南海和热带西太平 洋的部分地区外,其他区域基本无参考价值(图 5e)。所以,影响长江下游地区强降水的主振荡模型 的预测时效可达 20 d 左右,可有效预报未来 20 d 东 亚地区低频经向风距平变化的空间分布。

图 6 给出了以 2002 年 5 月 26 日为初始场的



图 5 850 hPa 低频经向风场预报的相关预报技巧时间 变化(a,b,c,d,e.提前 5,10,15,20,25 d 预报;图中相关系数 已乘以 100,阴影区表示通过 0.05 的统计显著性检验) Fig. 5 Temporal correlation between the forecasts and the

Fig. 5 Temporal correlation between the forecasts and the observed filtered meridional winds of 850 hPa at the various forecast leads from 5 to 25 days ((a) - (e)) for boreal summer, in which the values are multiplied by 100 and the significant ones at the 95% confidence level are shaded

850 hPa 20—30 d 低频经向风场的 10 d(6 月 5 日) 预报(图 6b)和实况(图 6a)。可以看出,10 d 预报能 很好地预测出沿东亚副热带地区的东传经向风场波 列,且正-负-正的空间分布也十分一致,即低频南 (北)风的空间分布也与实况比较接近。图 7 给出了 以 2002 年 5 月 26 日为初始场的 850 hPa 20—30 d 低频经向风场的 24 d(6 月 19 日)预报(图 7b)和实 况(图 7a),表明 24 d 预报能较好地预报出影响长江 下游强降水的长江以南地区和副热带西北太平洋地 区低频南风距平(正距平区)的形成和加强(对应于 6 月 20 日的长江下游强降水过程(图 3b)),这种低 频信号符号的变化对于长江下游地区强降水预报具 有很好的预示性。但预报数值偏小,表明主振荡预 测模型对这一时段 20—30 d 振荡强度的非线性增 强不能很好描述和预报,仍需进一步改进。



图 6 2002 年 6 月 5 日东亚地区 850 hPa 低频经向风场实况(a)和 10 d 的主振荡模态预报(b) (预报初始场为 5 月 26 日;实线为南风距平(正值),虚线为北风距平(负值), 图中数值已乘以 10,阴影区表示≥10(≤-10),等值线间隔为 0.5 m/s)

Fig. 6 Prediction of the meridional wind anomaly at 850 hPa from the POP models for the 10th day (5 June) and the corresponding observation with the initial date of 26 May 2002 (a) observations on 5 June 2002, and (b) 10th day prediction; unit: 0.5 m/s; the values are multiplied by 10, and the dark (light) grey shaded areas represent the regions greater than 10 (less than -10)



以上预报试验表明,基于主振荡模态的 20-30 d振荡延伸期预报模型的预报时效可达 20 d 左 右,能为长江下游地区未来20d内强降水的发生提 供重要预报信息。由于目前欧洲中期数值天气预报 (ECMWF)模式的全球环流形势预报时效已达 10 d,因此,在这个基础上,用基于主振荡分析的延伸期 预报模型做季节内振荡的未来 20 d 低频形势预报, 可得到未来 30 d 季节内振荡低频变化的预报,使 10-30 d 延伸期的强降水预报准确率有所提高。 进一步对于较强 20-30 d 振荡的年份(Yang, 2009),分别进行预报试验也得到了类似的结果,预 报时效均大于 20 d, 图 8 给出了这些年份(1979、 1984、1987、1991、1997、1998、1999 和 2005 年)低频 经向风第20天预报和实况相关系数的分布。尽管 预报最好的区域(主要关键区是在中国长江以南地 区和日本以南的洋面上)有一定年际变化(其中, 1984年可预报性较好的区域最大,1999年略小),但 只要东亚地区 20-30 d 振荡较显著维持,本文建 立的动态主振荡分析模型对这些波动结构的变化均 有较好适应能力,主振荡分析预测模型的预测时效 能稳定在 20 d 左右。对于 2011 年 7 月中旬, 主振 荡分析预测模型还提前17 d 成功地预测了与2011 年7月18日长江下游部分地区特大暴雨密切相关 的低频波的传播和关键区南风距平的低频变化(杨 秋明,2011)。此外,通过非整数波功率谱分析还发 现长江下游强降水频数存在准2a变化周期(Yang, 2009),因而与长江下游强降水频数密切相关的 20-30 d 振荡强度也伴随较显著的准 2 a 变化,其 中,太平洋地区海-气相互作用的影响是原因之一。 图 9 为夏季强 20—30 d 振荡年份(1987、1991、1999 和 2002 年)的春季太平洋海温分布特征,表现为西 北太平洋和南太平洋热带地区显著的正海温距平 区,即春季西北太平洋海温偏高有利于后期夏季东 亚地区 20-30 d 振荡的维持,东亚环流的 20-30 d 振荡的可预报性较大。所以,春季太平洋海温变化 也能为夏季长江下游降水 20—30 d 振荡和强降水

延伸期预报提供部分重要预报信号。

对于较弱的 20—30 d 振荡的其他年份,强降水 过程较少,20—30 d 振荡可预报性较低。这时主要 考虑 10—20、30—60 d 振荡的可能影响,用对应的 主振荡延伸期预报模型低频形势变化,可为较大降



水过程的延伸期预报提供一些有用信息。值得注意 的是 2002 年 5—7 月欧亚环流和副高活动变化均未 出现典型的梅雨形势,因此,2002 年长江下游地区 只能做"空梅"来处理。而实际上,无论从雨日, 还是降雨强度,都应该算做丰梅的年份。显然,由



 [3] 8 长江下游降水 20—30 d 振荡显著年份 850 hPa 低频经向风场 20 d 预报的相关预报技巧 (a. 1979, b. 1984, c. 1987, d. 1991, e. 1997, f. 1998, g. 1999, h. 2005年;说明同图 5)
Fig. 8 As in Fig. 5 but at the prediction leads 20 day for the years of 1979, 1984, 1987, 1991, 1997, 1998, 1999 and 2005 of distinct 20 - 30 d ISO of the rainfall over the lower reaches of the Yangtze River in boreal summer



于强 20—30 d 振荡作用,使得副高南北振荡幅度加 大,并没有稳定在 20—26°N,所以不符合通常梅雨 形势,但与 20—30 d 振荡伴随的暴雨过程频繁发 生,造成 2002 年夏季长江下游降水明显偏多,发生 洪涝。因此,长江下游洪涝(暴雨过程)与东亚地区 副热带环流 20—30 d 振荡活动直接相关,与欧亚地 区大尺度平均环流演变和梅雨强弱的关系并非一一 对应。关于影响 20—30 d 振荡强度的其他因子及 其机制,还需深入分析。进一步研究这种 20—30 d 振荡的年际变化原因并预测其强度的年际变化,对 于更准确地预报长江下游地区旱涝气候变化和 10—30 d 延伸期暴雨过程的预报有重要意义,而 且,也能更深入认识强降水天气过程和旱涝气候变 化之间相互作用的机制。

4 结论和讨论

本文用东亚地区 850 hPa 经向风资料,对 20— 30 d 振荡建立主振荡模型,进行了 10—30 d 延伸期 形势变化的预测试验,得到如下结论:

(1)主振荡模型方法对 2002 年 3—9 月夏季东 亚副热带地区低层低频风场 27 d 左右时间尺度的 东亚西太平洋纬向波列东传过程具有较好的预报效 果,预报时效可达 20 d 左右,能较好地预报出影响 长江下游地区强降水的 850 hPa 低频南风距平演 变,具有重要的应用价值。

(2)基于东亚地区夏季 20—30 d 振荡信号时空 演变的预报试验,可为长江下游地区的 10—30 d 延 伸期中降水强度和发生时间的预报提供重要依据。 由于 20—30 d 振荡信号强度存在显著的年际变化 (与太平洋地区海-气相互作用有一定联系),该方 法对各年的预报效果因年而异。对于夏季 20—30 d 振荡较显著的年份(前期春季西北太平洋海温偏 高),主振荡预测模型的预测时效能稳定在 20 d 左 右,可为夏季长江下游强降水预测提供重要信息。 对于弱 20—30 d 振荡年份,需进一步考虑 10—20 和 30—60 d 振荡等季节内振荡型强弱变化的影响。

通过多年预测研究表明,基于环流场的低频演 变的主振荡动力统计模型能较好描述主要低频波的 传播过程,而且,选择适当的子序列长度,滑动进行 动态建模的独立预报也是重要的,可将复杂系统空 间结构变化和周期的长度变化信息反馈到预测模型 中,有利于提高预报精度。因此,这种方法在实时 的延伸预报中具有重要的应用和参考价值,是构建 实时延伸预报业务的主要途径之一。在此基础上, 能进一步利用统计模型进行 10—30 d 延伸期长江 下游地区持续降水过程、强降水过程及暴雨等极端 事件发生概率的预报。

参考文献

- 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. 热带气象学报, 27(6): 814-822
- 陈官军,魏凤英,巩远发. 2010. NCEP/CFS模式对东亚夏季延伸 预报的检验评估.应用气象学报,21(6):659-670
- 丁一汇,刘芸芸. 2008. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. 气象学报,66(5):670-682
- 丁一汇,梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报. 气象, 36(7): 111-122
- 韩荣青,李维京,董敏.2006.北半球副热带-中纬度太平洋大气季 节内振荡的纬向传播与东亚夏季旱涝.气象学报,64(2):149-163
- 琚建华,刘一伶,李汀等.2010.预测夏季南海季节内振荡的一种 新方法.热带气象学报,26(5):521-525
- 孙国武,孔春燕,信飞等.2011.天气关键区大气低频波延伸期预 报方法.高原气象,30(3):594-599
- 杨秋明. 1993. 初夏亚洲季风区环流低频振荡与长江下游持续暴雨. 应用气象学报,4(3):320-326
- 杨秋明. 1998. 西太平洋热带地区环流低频变化的主振荡型预测试 验. 应用气象学报,9(3): 345-351

- 杨秋明. 2008. 10-30 天延伸期天气预报及发展趋势. 中国新技术新 产品,(7):96-97
- 杨秋明. 2011. 2011 年 7 月中旬长江下游地区强降水期间低频环流 延伸期预报试验.科技导报,29(32):60-66
- 朱红蕊, 江志红, 张勤等. 2010. 基于 SSA-AR 方法的 MJO 指数预 报模型试验. 热带气象学报, 26(3): 371-378
- Agudelo P A, Hoyos C D, Webster P J, et al. 2009. Application of a serial extended forecast experiment using the ECMWF model to interpret the predictive skill of tropical intraseasonal variability. Climate Dyn, 32(6): 855-872
- Ajayamohan R S, Annamalai H, Luo J J, et al. 2011. Poleward propagation of boreal summer intraseasonal oscillations in a coupled model: Role of internal processes. Climate Dyn, 37(5-6): 851-867
- Carvalho L M V, Silva A E, Jones C, et al. 2011. Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. Climate Dyn, 36(9-10): 1865-1880
- Cassou C. 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. Nature, 455 (7212): 523-527
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the northern hemisphere summer. J Climate, 18(17): 3483-3505
- Hasselmann K. 1988. PIPs and POPs: The reduction of complex dynamical systems using principal interaction and oscillation patterns. J Geophys Res, 93(D9): 11015-11021
- He J H, Lin H, Wu Z W. 2011. Another look at influences of the Madden-Julian Oscillation on the wintertime East Asian weather. J Geophys Res, 116 (2): D03109, doi: 10. 1029/ 2010JD014787
- Jones C. 2009. A homogeneous stochastic model of the Madden-Julian oscillation. J Climate, 22(12): 3270-3288
- Jones C, Carvalho L M V, Higgins W, et al. 2004. A statistical forecast model of tropical intraseasonal convective anomalies. J Climate, 17(11): 2078-2095
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471
- Krishnamurthy V, Misra V. 2011. Daily atmospheric variability in the South American monsoon system. Climate Dyn, 37(3-4): 803-819
- Lau K M, Weng H Y. 2002. Recurrent teleconnection patterns linking summertime precipitation variability over East Asia and North America. J Meteor Soc Japan, 80(6): 1309-1324
- Liebmann B, Kiladis G N, Allured D, et al. 2011. Mechanisms associated with large daily rainfall events in Northeast Brazil. J

Climate, 24(2): 376-396

- Love B S, Matthews A J, Janacek G J. 2008. Real-time extraction of the Madden-Julian oscillation using empirical mode decomposition and statistical forecasting with a VARMA model. J Climate, 21(20): 5318-5335
- Maharaj E A, Wheeler M C. 2005. Forecasting an index of the Madden-Oscillation. Int J Climatol, 25(12): 1611-1618
- Mao J Y, Sun Z, Wu G X. 2010. 20-50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea. Climate Dyn, 34(5): 747-761
- Rayner N A, Brohan P, Parker D E, et al. 2006. Improved analyses of changes and uncertainties in sea surface temperature measured in situ since the mid-nineteenth century: The HadSST2 dataset. J Climate, 19(3): 446-469
- Roff G, Thompson D W J, Hendon H. 2011. Does increasing model stratospheric resolution improve extended-range forecast skill? Geophys Res Lett, 38: L05809, doi:10.1029/2010GL046515
- Schickedanz P T, Bowen E G. 1977. The computation of climatological power spectra. J Appl Meteor, 16(4): 359-367
- von Storch H, Xu J S. 1990. Principal oscillation pattern analysis of the 30- to 60-day oscillation in the tropical troposphere. Part I: Definition of an index and its prediction. Climate Dyn, 4(3): 175-190
- Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. 2003. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. Bull Amer Meteor Soc, 84 (1): 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. Mon Wea Rev, 132(8): 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 Climate, 22(6): 1482-1498
- Yang J, Wang B, Wang B, et al. 2010. Biweekly and 21-30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the lower reach of the Yangtze River basin. J Climate, 23(5): 1146-1159
- Yang Q M. 2009. The 20 30 day oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River valley. Sci China Ser D-Earth Sci, 52(10): 1485-1501, doi: 10. 1007/s11430-009-0156-2
- Zhang L N, Wang B Z, Zeng Q C. 2009. Impact of the Madden-Julian Oscillation on summer rainfall in southeast China. J Climate, 22(2): 201-216