

马悦,梁萍,李文铠,等,2018.时空投影法在上海地区梅汛期降水延伸期预报中的应用[J].气象,44(12):1593-1603.

时空投影法在上海地区梅汛期降水 延伸期预报中的应用*

马悦¹ 梁萍¹ 李文铠² 何金海²

1 上海市气候中心,上海 200030

2 南京信息工程大学,南京 210044

提 要: 本文基于 2001—2010 年上海市 11 个基本气象站的逐日降水量和澳大利亚气象局的逐日大气低频振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)指数(包括 RMM1 和 RMM2)资料,选取 MJO 指数作为预报因子,上海地区梅汛期降水量作为预报对象,建立了基于时空投影法(spatial-temporal projection model, STPM)的上海地区梅汛期降水延伸期预报模型。利用该模型对近 6 年(2011—2016 年)的梅汛期降水进行回报试验,其预报技巧评估结果表明:该模型对未来 10~25 d 的降水具有较好预报效果,可较准确地预报出梅汛期 3/4 左右的降水量级和降水发生时段。其中,预报时效为 10~20 d 的预报技巧较高,而提前 21~25 d 的预报技巧略有下降。总体而言,基于 MJO 活动的 STPM 预报模型在上海地区梅汛期延伸期降水预报中具有较好的参考价值。

关键词: 梅汛期降水,大气低频振荡,延伸期预报,时空投影法

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.12.009

Application of Spatial-Temporal Projection Model for Extended-Range Forecast During Meiyu Season in Shanghai

MA Yue¹ LIANG Ping¹ LI Wenkai² HE Jinhai²

1 Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Recently, an extended-range (10—30 days) forecast method, namely the spatial-temporal projection model (STPM) has been applied in predicting the low-frequency precipitation in tropics and shows comparable skills. Based on the daily precipitation data from 11 weather stations in Shanghai, and the daily MJO index (RMM1 and RMM2) provided by Australian Meteorological Bureau during 2011—2010, the STPM model for the extended-range forecast of precipitation during Meiyu season in Shanghai was constructed. Depending on the relationship between the quasi-period MJO activities and the precipitation, the coupled patterns between temporal varying real-time multivariate MJO (RMM) index and regional low-frequency precipitation during Meiyu season is derived based on the singular value decomposition (SVD). Therefore, using the MJO index as predictor and projecting it onto the spatial-temporal coupled patterns, the forecast of regional low-frequency precipitation is obtained. The STPM model is then used in the precipitation prediction during 2011—2016. The evaluation demonstrates that the prediction of the STPM model achieves a useful skill at a lead time of 25 days. Three quarters of precipitation occurrences and

* 国家重点研发专项(2017YFC1502301)、国家自然科学基金项目(41775047)、上海市气象局研究型业务专项(YJ201604)、上海市气象局青年启航计划和国家气象科技创新工程共同资助

2017 年 5 月 22 日收稿; 2018 年 6 月 3 日收修定稿

第一作者:马悦,主要从事区域气候变化研究. Email:mayue630@126.com

通信作者:梁萍,主要从事季风气候和延伸期预报研究. Email:liangping1107@163.com

intensity during Meiyu season can usually be predicted. Among them, the STPM model attains a higher skill in the prediction of 10–20 d lead time. Generally, the STPM model provides a useful method in the extended-range forecast during Meiyu season in Shanghai.

Key words: rainfall during Meiyu season, MJO, extend-range forecast, spatial-temporal projection model (STPM)

引 言

延伸期预报(10~30 d)是天气预报(10 d 以内)和短期气候预测(30 d 以上)之间的预报缝隙,是目前尚需解决的难题之一,对于气象防灾减灾和保障经济社会发展具有重要意义。总体而言,目前延伸期预报的基本方法主要有动力模式和统计方法两类。近年来,尽管动力模式的预报能力有显著提升,预报时效可达 7~10 d,但 10 d 以上的预报误差仍然增长较快,预报技巧达不到延伸期要求且改进缓慢(Danforth et al, 2007; 丑纪范等, 2010; 何金海等, 2013)。在这样的现实情况下,经验和统计预报仍然是目前提高延伸期预报水平的重要途径。

自 20 世纪 70 年代初 Madden and Julian (1971)发现热带大气低频振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)以来,国内外学者发现 10~30 d、30~60 d 等的低频振荡现象在大气中普遍存在,且在天气、气候的演变中扮演重要角色(Yasunari, 1979; Krishnamurti, 1985; 李崇银, 1990)。大量研究结果表明,大气低频振荡与中国东部的夏季风降水密切相关(何金海, 1988; Chen et al, 2001; 陆尔和丁一汇, 1996; 李桂龙和李崇银, 1999; 朱乾根和徐国强, 2000; 毛江玉和吴国雄, 2005; 张耀华等, 2012; 肖莺等, 2017)。因此,大气低频振荡凭借其季节内时间尺度的准周期性特点以及对天气、气候演变的重要影响,被普遍认为是联系天气预报和季节预测的桥梁,能填补天气预报和季节预测之间的延伸期预报缝隙(梁萍和丁一汇, 2012a)。

基于大气低频振荡信号的演变特征,国外学者在 MJO 的监测、预测以及基于统计模型的延伸期降水趋势预报等方面进行了一些探索(Lo and Hendon, 2000; Wheeler and Hendon, 2004; Jones et al, 2004),并取得了较好的效果。在国内,丁一汇和梁萍(2010)从大气低频振荡与中纬度相互作用的角度阐述了利用 MJO 的传播特征来制作延伸期预报的理论依据,并以江淮梅雨为例探讨了热带 MJO 不

同位相对夏季降水延伸期预报的指示意义。通过基于 MJO 的统计模型和经验动力学模型的梅雨区降水延伸期预报的试验,梁萍和丁一汇(2012b; 2013)进一步证实了大气低频振荡对梅雨区降水的延伸期预报具有重要的应用价值,利用大气低频振荡特性开展该地区的超前 30 d 的降水延伸期预报是可行的。孙国武等(2008)提出通过提取大气中的低频信号制作的低频天气图对强降水进行延伸期预报,并首先在上海地区实际预报业务中得到了应用(孙国武等, 2011; 信飞等, 2014; 2016),之后陆续推广至全国(蒋薇等, 2011; 陈青等, 2014; 马浩等, 2016)。

最近, Hsu et al (2015)提出了一种新的延伸期预报方法——基于时空投影法(spatial-temporal projection model, STPM)的延伸期预报模型,并对我国华南及热带地区的低频降水进行了延伸期预报(Hsu et al, 2016; Zhu et al, 2015)。Li et al (2016)利用基于 MJO 活动的 STPM 延伸期降水预报模型展开了华南前汛期低频降水的预报试验,并取得了较好的效果。截止目前,基于 STPM 的降水延伸期预报模型主要应用于热带地区。相比华南降水而言,副热带地区的夏季降水特别是梅汛期降水的影响因素更为复杂,不仅受到热带地区强迫因子(如: MJO、热带 SST)的影响,同时受到中高纬环流的影响,且后者对其影响较华南地区更大(吴仁广和陈烈庭, 1994; 姚秀萍和于玉斌, 2005; 梁萍等, 2007b; 梁萍和丁一汇, 2012b; 李勇, 2016)。基于 MJO 活动的 STPM 延伸期预报模型能否适用于副热带地区的降水延伸期预报? 这需要进一步的试验。鉴于此,本文以上海作为副热带的代表区域,根据 MJO 活动的准周期性及其与降水的关系,开展基于 MJO 活动的 STPM 降水延伸期预报模型在该区域的探索与试验。与已有的 STPM 预报研究主要将降水低频分量作为预报对象不同的是,本文将实际降水量作为预报值,通过建立能适用于上海地区的 STPM 延伸期降水预报模型,尝试为该区域未来 10~30 d 的降水延伸期预报提供新方法,满足实际业务需求。

1 资料与方法

所用资料包括:(1)上海地区 11 个基本气象站(徐汇、浦东、闵行、宝山、嘉定、青浦、松江、金山、惠南、奉贤和崇明)2001—2016 年的逐日降水量资料;(2)澳大利亚气象局的逐日多变量 MJO 指数(real-time multivariate MJO index, 包括 RMM1 和 RMM2 指数)资料,下载自 <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealtme.txt>, 时间长度为 2001—2016 年。该 MJO 指数基于美国 NCEP/NCAR(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)逐日再分析资料中的向外长波辐射、850 hPa、200 hPa 纬向风场(Kalnay et al, 1996), 采用 Wheeler and Hendon(2004)提出的多变量经验正交函数(empirical orthogonal functions, EOFs)方法计算获得。上海地区常年 6 月中旬入梅, 7 月上旬出梅。考虑到 STPM 模型会降低首尾两端的提前预报时效, 本文适当扩大了梅汛期的范围, 涉及的梅汛期泛指为每年第 28 候至 46 候(5 月 16 日至 8 月 18 日), 共计 19 候。

本文的预报对象是上海地区梅汛期降水量, 首先将上述上海地区 11 个基本站的资料进行站点平均, 获得上海地区站点平均的逐日降水量序列。再建立 STPM 模型时需提取降水低频信号。为克服传统 Butterworth 带通滤波在实时预报中易丢失首尾两端信号的局限性, 本文采用 Hsu et al(2015)提出的非传统滤波方法提取降水低频信号。该方法的优点是可以实时提取降水低频振荡信号, 并已在热带地区的低频降水预报试验中得到了应用(Hsu et al, 2016; Zhu et al, 2015; Li et al, 2016)。通过非传统滤波方法提取 10~60 d 降水低频信号的具体步骤为:(1)将站点平均的逐日降水量处理为逐候平均资料, 以去除小于 10 d 的高频天气扰动信号;(2)将步骤(1)得到的序列减去经过 Lanczos 滤波器 90 d 低通滤波的低频气候态, 以去除年循环气候态;(3)将步骤(2)得到的序列减去其 30 d 滑动平均值, 以去除大于 60 d 的低频信号。经过上述 3 个步骤, 从而得到保留 10~60 d 低频信号的逐候降水资料。本文采用 MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)作为

MJO 活动的监测指数(Wheeler and Hendon, 2004), 同样对上述逐日 MJO 指数资料处理为逐候平均资料, 以去除小于 10 d 的高频天气扰动。以下均采用经过处理后的资料。

在评估延伸期预报模型的预报技巧时, 从模型降水预报值与观测值之间的时间相关系数(temporal correlation coefficient, TCC)、降水预报等级和发生时段的准确率这两个方面进行评判。由于模型中对降水进行了低频滤波处理, 故低频降水分量存在高度的自相关性。在对 TCC 进行显著性检验时, 样本的有效自由度(effective degrees of freedom, EDoF)通常要比实际样本量(N)小得多。本研究参考 Davis(1936)和 Chen(1982)提出的方法估算:

$$EDoF = N / \sum_{i=-\infty}^{\infty} C_{XX}(i)C_{YY}(i) \quad (1)$$

式中, $EDoF$ 为样本有效自由度, N 为实际样本量, C_{XX} 和 C_{YY} 分别为降水预报值和观测值的自相关系数。

2 时空投影法(STPM)模型在上海地区的应用

2.1 上海地区梅汛期降水与前期 MJO 活动的关系

热带外地区的大气环流及天气变化对 MJO 的响应通常需要一定的时间, 在建立基于 MJO 活动的上海地区梅汛期降水延伸期预报的 STPM 模型之前, 需探寻上海地区梅汛期降水与前期 MJO 演变的关系。图 1 给出了 2001—2010 年上海地区梅汛期 10~60 d 降水低频分量与前期(超前 0~12 候)MJO 指数(RMM1 和 RMM2)的相关系数演变(样本量 $N=19$ 候 \times 10 年)。上海地区降水低频分量与 MJO 指数相关系数近似呈周期为 10~12 候的三角函数变化, 当 RMM1 超前降水低频分量 0~1 候(5~6 候)时, 两者呈显著正(负)相关; 当 RMM2 超前降水低频分量 7~8 候(3~4 候)时, 两者呈显著正(负)相关。从相关系数的演变来看, RMM1 与降水低频分量相关系数的峰(谷)值较 RMM2 与降水低频分量相关系数的峰(谷)值滞后约 2 候, 这恰好与 Wheeler and Hendon(2004)指出的 RMM1 和 RMM2 之间存在 RMM1 滞后 RMM2 约 9 d(约 1/4 周期)的关系相符。

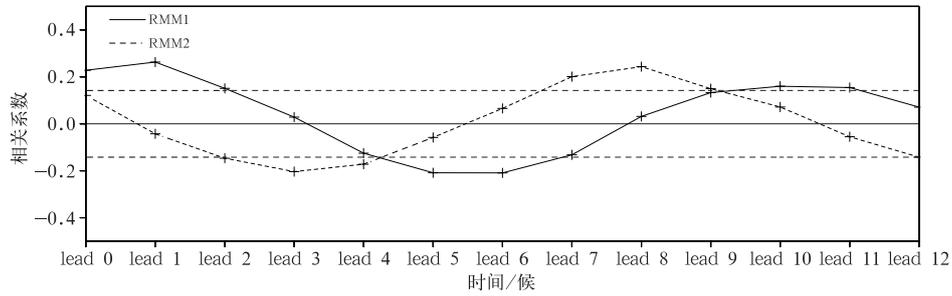


图 1 2001—2010 年上海地区梅汛期 10~60 d 降水低频分量与前期 (超前 0~12 候)MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)相关系数演变 (虚线表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验)

Fig.1 Lead-lag correlation coefficients between 10-60 d low-frequency rainfall in Shanghai during Meiyu season and the MJO index (RMM1 and RMM2) at different time leads (0-12 pentad leads) during 2001-2010 (Dashed lines mean having passed $\alpha=0.05$ significance level test confidence level)

2.2 STPM 模型的建立过程

2.2.1 STPM 模型的训练流程

利用上述上海地区梅汛期降水与前期 MJO 指数的关系,参考 Hsu et al(2015)提出的 STPM 模型,建立针对上海地区降水延伸期预报的 STPM 模型。该 STPM 模型的建立过程主要分为模型训练流程(图 2 实线框所示)和模型预报流程(图 2 虚线框所示)2 个部分。其中,模型训练流程具体步骤为:(1)将逐日 MJO 指数进行逐候平均,同时提取上海地区降水的 10~60 d 逐候降水低频分量,并对上述资料进行标准化处理。(2)基于上海地区梅汛期低频降水与前期 MJO 指数的关系,将预发报时刻 t 过去 1~5 候的标准化逐候 MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)作为预报因子,构造预报因子场 $\mathbf{X}(t, 2 \times 5)$;将预发报时刻 t 未来 2~6 候(10~30 d)的标准化上海地区梅汛期逐候降水低频分量作为预报对象,构造预报对象场 $\mathbf{Y}(t, 5)$ 。(3)将 2001—2010 年作为模型训练期,则训练期预发报时刻 $t=1 \sim 190$ (19 候 \times 10 年),通过奇异值分解(singular value decomposition, SVD; 魏凤英, 2007)的方法寻找预报因子场 \mathbf{X} 与预报对象场 \mathbf{Y} 之间的时空耦合关系。

模型训练流程中预报因子场 \mathbf{X} 与预报对象场 \mathbf{Y} 的 SVD 耦合结果表明, SVD 耦合的第 1 模态和第 2 模态的方差贡献率分别为 54.1% 和 45.2%, 累计方差贡献率达到了 99.3%, 基本涵盖了 SVD 左、右场

的信息。SVD 前 2 个耦合模态对应的左、右奇异特征向量场($\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k$)如图 3 所示,其中图 3a 为 SVD 左场(预报因子场)对应的奇异特征向量场,以 MJO 位相图的形式反映出预发报时刻 t 过去 1~5 候的热带 MJO 东传活动;图 3b 则为 SVD 右场(预报对象场)对应的奇异特征向量场,反映了预发报时刻 t 未来 2~6 候(10~30 d)的上海地区降水低频分量的时间演变特征。结合图 3a 和 3b 来看,对于预发报时刻 t 而言,当前期($t-5$ 候~ $t-1$ 候)的 MJO 对流活动从印度洋和海洋性大陆向东传播到西太平洋和西非时,未来 10~30 d($t+2$ 候~ $t+6$ 候)的上海地区降水量呈增加趋势。反映到 MJO 和降水的对应关系上,即当 MJO 对流中心从西非移动到印度洋和海洋性大陆时,上海地区同期降水量呈增加趋势。Zhang et al(2009)在 MJO 对我国东南部地区夏季降水的影响研究中指出, MJO 对流中心位于印度洋时通过 Rossby 波能量东传可造成中国东南部地区夏季降水的正异常。丁一汇和梁萍(2010)的研究也得到了当 MJO 对流活跃于印度洋东部和海洋大陆西部时,上海地区降水概率和平均降水量最多的类似结论。因此,本文通过 SVD 提取的 MJO 与上海地区降水的关系与已有研究是一致的。

2.2.2 STPM 模型的预报流程

基于上述模型训练流程中得到的预报因子场 \mathbf{X} 与预报对象场 \mathbf{Y} 的时空耦合关系,利用该模型进行预报的主要预报流程(图 2 虚线框)为:(1)对于某一给定的发报时刻 t_0 而言,利用图 3 模型训练时得到

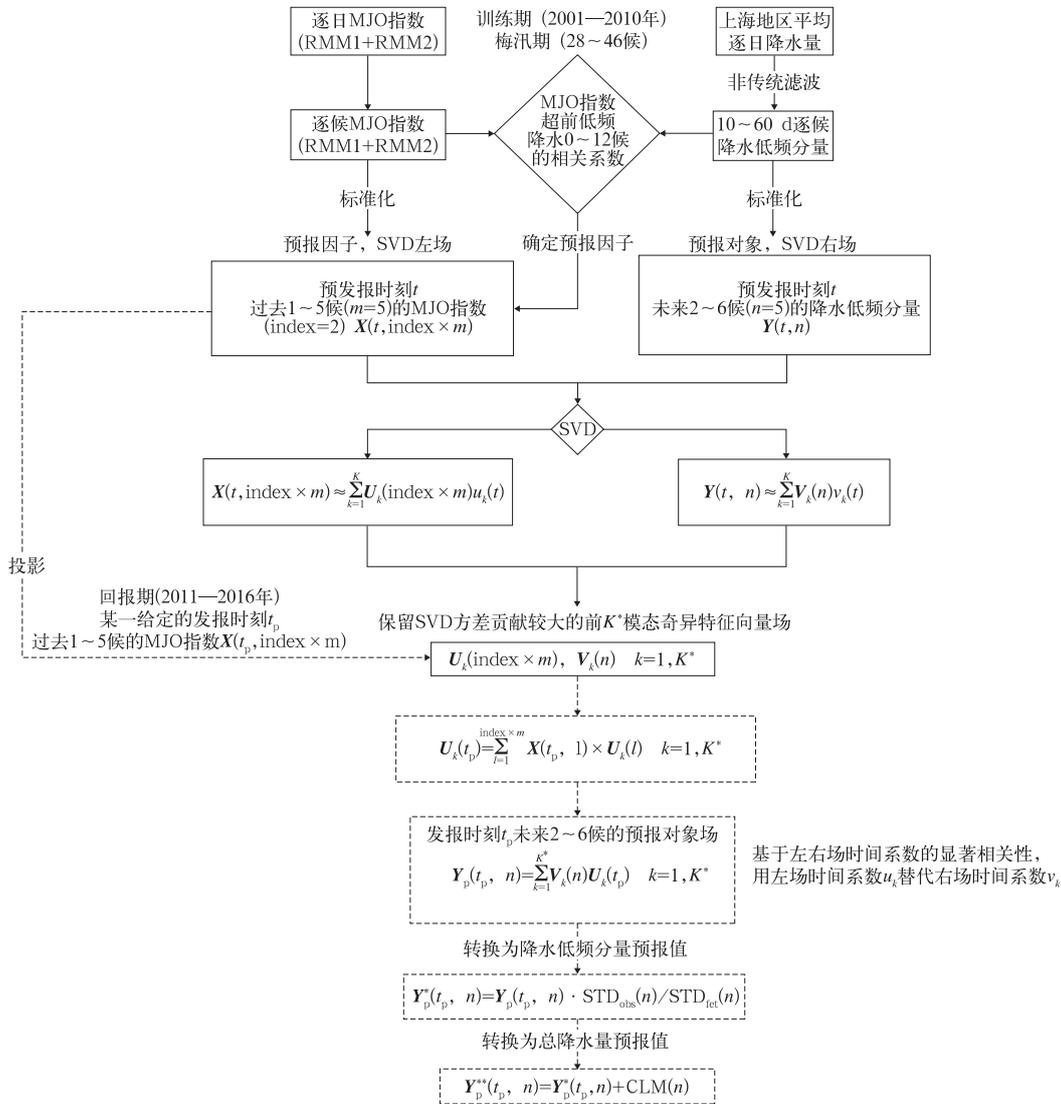


图 2 基于 MJO 活动的时空投影法(STPM)降水延伸期预报模型的建立流程
 (实线框/虚线框为模型训练/预报流程)[t/t_p 为训练期(回报期)预发报时刻,
 $t=1\sim 190$ (19 候 $\times 10$ 年), $t_p=1\sim 114$ (19 候 $\times 6$ 年); K 为
 SVD 耦合模态总数, K^* 为模型保留的 SVD 耦合模态数]

Fig. 2 Major steps of STPM rainfall extended-range forecast model based on MJO activities
 [Train procedure (forecast procedure) is denoted by solid (dashed) rectangles and arrows;
 t/t_p indicates the forecast time in the train procedure ($t=1-190$)
 /forecast procedure ($t_p=1-114$); K is the total number of SVD modes;
 K^* is the number of SVD modes used]

的 SVD 左奇异特征向量场 $U_x(2 \times 5)$, 将发报时刻 t_p 过去 1~5 候的 MJO 指数序列 $X(t_p, 2 \times 5)$ 投影到 U_k , 即得到 U_k 对应的时间系数序列 $u_k(t_p)$ 。(2) 由于 SVD 耦合得到的左、右场时间系数序列之间具有高相关性(通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验), 通过用左场时间系数 u_k 替代右场时间系数 v_k , 并结合右奇异特征向量场 $V_k(5)$, 得到发报时刻 t_p 未来 2

~6 候的预报对象场 $Y(t_p, 5)$ 。(3) 鉴于模型得到的预报对象场 Y 为标准化的结果, 在实际业务预报中, 通过将估计的预报对象场 Y 乘以放大系数(训练期降水观测值标准差 STD_{obs} 与训练期预报值标准差 STD_{fct} 的比值), 即为上海地区降水低频分量预报值 Y_p^* :

$$Y_p^*(t_p, 5) = Y_p(t_p, 5) \cdot STD_{obs}(5) / STD_{fct}(5) \quad (2)$$

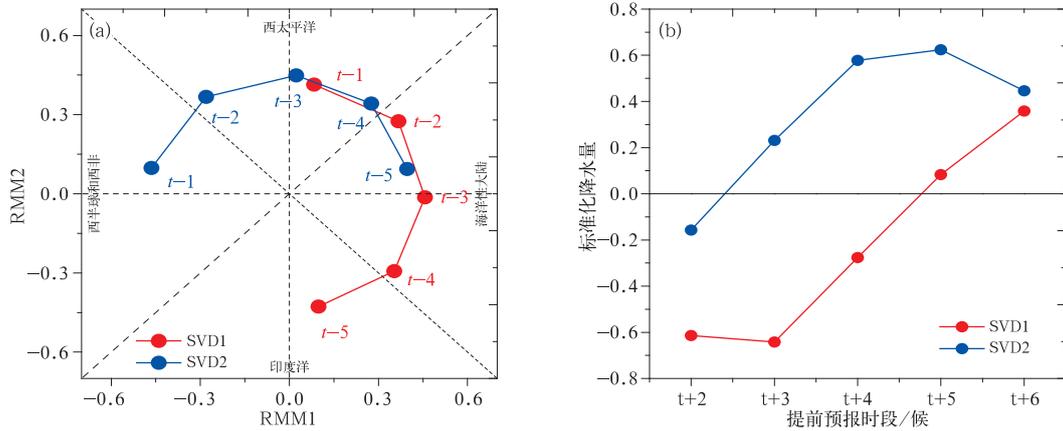


图 3 MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)与上海地区降水低频分量的 SVD 前 2 模态的左奇异特征向量场(a)和右奇异特征向量场(b)
 [t 为发报时刻, t-(+)n(n=1~6) 表示较 t 时刻提前(落后)n 候]

Fig. 3 The left (a) and right (b) characteristic vector fields in the first two SVD modes of MJO index (RMM1 and RMM2) and low-frequency rainfall

[t is the forecast time and t-(+)n (n=1-6) denotes the n pentad ahead (behind) the forecast time]

为便于与实况观测降水量对比,将上述得到的降水低频分量预报值 Y_p^* 再与降水气候态 CLM 相加,得到上海地区总降水量预报结果 Y_p^{**} :

$$Y_p^{**}(t_p, 5) = Y_p^*(t_p, 5) + CLM(5) \quad (3)$$

2.2.3 STPM 模型的交叉检验

在使用上述 STPM 模型进行实际预报之前,通过对该 STPM 模型进行交叉检验和预报因子的敏感性试验,检验该模型的有效性。交叉检验的具体步骤为:(1)在原 10 年训练期(2001—2010 年)中依次挑选 9 年作为新训练期,并按照图 2 的方法依次建立新的 STPM 预报模型;(2)运用步骤(1)中新 9 年训练期的 STPM 预报模型,预报剩下 1 年的梅汛期降水低频分量;(3)重复步骤(1)和(2),直到原 10 年训练期内所有年份的降水低频分量均被挑选作为预报对象,则共进行了 190 次(19 候×10 年)交叉检验。同时,为验证 RMM1 和 RMM2 作为预报因子的有效性,参照 Li et al(2016)提出的方法,通过建立单个 MJO 指数(RMM1 或 RMM2)作为预报因子的 STPM 模型并对其进行上述交叉检验,对 STPM 模型的预报因子进行敏感性试验。基于上述交叉检验的结果,图 4 给出了交叉检验中降水预报值和观测值的 TCCs 随预报时效的变化。从 TCCs 来看,无论是运用单个 MJO 指数(RMM1 或 RMM2)还是同时运用两个 MJO 指数(RMM1 和 RMM2)建立模型,得到的 STPM 模型的交叉检验

TCCs 均通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。当仅使用单个 RMM1 或 RMM2 指数作为预报因子时,STPM 模型的预报技巧变化较不稳定,随预报时效

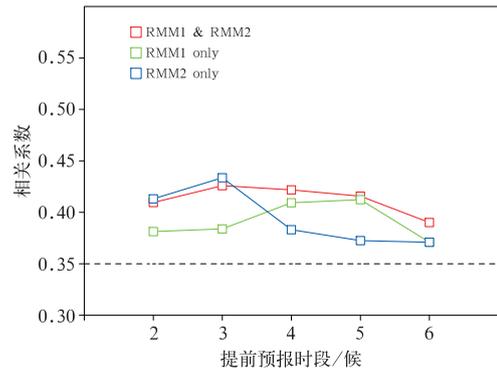


图 4 运用两个 MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)同时作为预报因子和单个 MJO 指数(RMM1 或 RMM2)作为预报因子的 STPM 预报模型在训练期(2001—2010 年)内的交叉检验 TCCs 随预报时效的变化

(虚线表示通过 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验)

Fig. 4 The TCCs as a function of forecast lead time for the cross validation of STPM forecast model by using the two MJO indexes (both the RMM1 and RMM2) and single MJO index (only RMM1 or RMM2) as the predictor in the train period of 2001—2010

(Dashed line means having passed $\alpha=0.01$ significance level test)

差异较大;当 RMM1 和 RMM2 指数同时作为预报因子时,预报技巧随预报时效的变化最为稳定。

3 STPM 模型的预报技巧评估

根据上述基于 MJO 活动的 STPM 降水延伸期预报模型,对上海地区 2011—2016 年梅汛期的降水进行独立回报试验[共进行了 114 次(19 候×6 年)回报],评估 STPM 预报模型的预报技巧。图 5 给出了上海地区 STPM 模型降水低频分量回报值与观测值在梅汛期的演变特征。总体而言,该 STPM 预报模型能够基本把握住上海地区梅汛期低频降水的季节内变化,但预报效果也存在年际差异。梅汛期低频降水回报值的正负位相转换基本反映出了 2011、2013、2015 年的实际入、出梅日时间。但也存在有些年份出梅后降水预报效果不理想的情况,在 2012 和 2014 年的 7 月下半月,降水回报值甚至与观测相反。进一步分析 MJO 强度和冷空气活动(图略)发现,对于 2012 年 7 月下半月回报效果差的情况,尽管发报时刻的前期 MJO 活动持续偏强,但 7 月下半月冷空气较弱,难以与南方暖湿气流在江

淮地区交汇并产生降水,这导致了该年 7 月下半月回报值与观测值几乎相反的结果。2014 年的情况则与 2012 年相反,7 月下半月冷空气活跃,有利于冷空气南下与南方暖湿气流相遇形成降水,这与发报时刻前期 MJO 偏弱不利于降水的回报结果相反。由此表明,冷空气活动对 STPM 模型的降水预报效果有一定的调制作用。有关 MJO 强度与冷空气的配置关系对 STPM 模型降水预报效果的影响,我们将在后文做进一步的系统分析。

上述给出了 STPM 模型回报的 2011—2016 年降水低频分量在梅汛期的逐候演变特征,那么该 STPM 模型的总体预报技巧如何? 图 6a 进一步给出 STPM 模型对 2011—2016 年梅汛期降水低频分量的回报值与观测值的 TCCs。为便于评估该模型的预报技巧,采用 Mittermaier(2008)提出的持续性预报作为评估参考,即用发报时刻过去 1~5 候的上海地区降水低频分量观测值代替 MJO 指数作为 STPM 模型的预报因子,预报降水低频分量在未来 2~6 候的变化。图 6a 中也给出了该持续性预报的 TCCs。从 TCCs 随预报时效的变化来看,STPM 模型的预报技巧明显高于持续性预报,且对未来

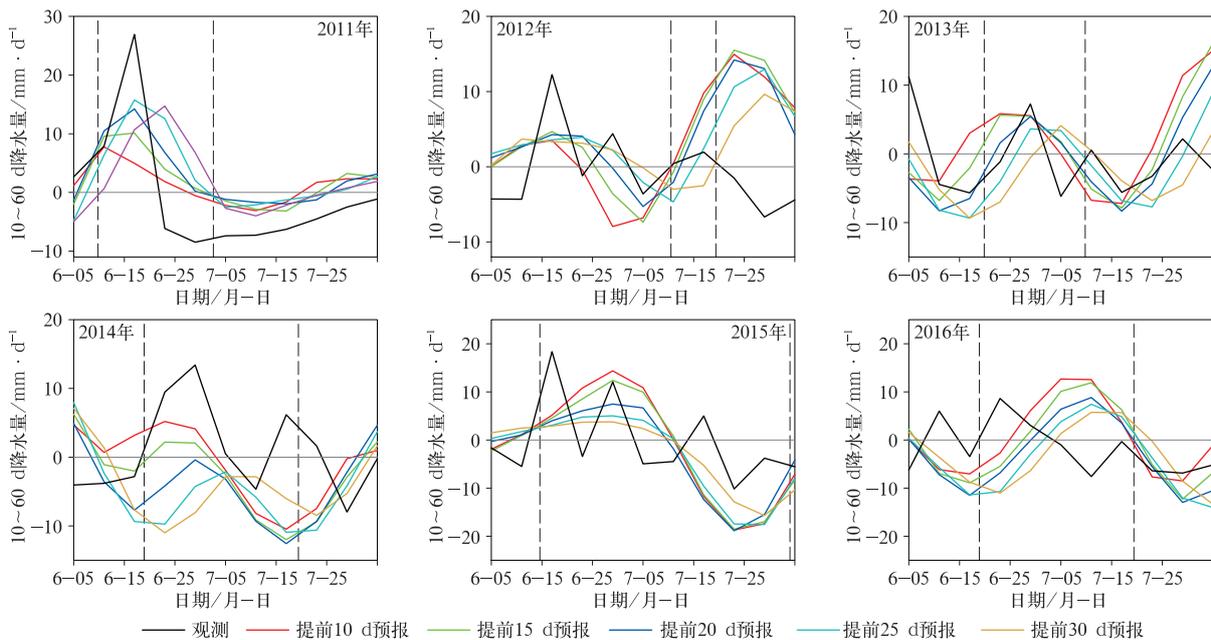


图 5 STPM 预报模型对 2011—2016 年梅汛期上海地区 10~60 d 降水低频分量回报值与观测值的逐候演变

(竖虚线为江淮梅雨各年入、出梅日期,勘定标准来自《梅雨监测业务规定》(气预函[2014]28 号)

Fig. 5 Time series of the predicted low-frequency rainfall by using STPM forecast model and observed low-frequency rainfall during the Meiyu season of 2011—2016 (Vertical dashed lines denote the starting and ending dates of Jianghuai Meiyu)

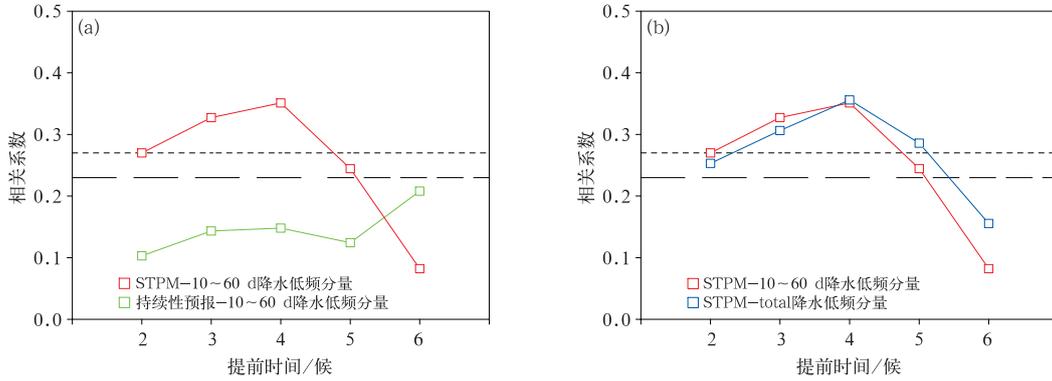


图 6 STPM 预报模型、持续性预报的低频降水分量的回报值与观测值的 TCCs 随预报时效的变化(a);STPM 预报模型的低频降水量、总降水量的回报值与观测值的 TCCs 随预报时效的变化(b)
(短/长虚线表示通过 $\alpha=0.05/0.1$ 显著性水平检验)

Fig. 6 The TCCs between the predicted and the observed low-frequency rainfall in the STPM forecast model and the persistence forecast model as a function of forecast lead times (a); the TCCs between the predicted and the observed low-frequency and total rainfall in the STPM forecast model as a function of forecast lead times (b)

(The short/long dashed lines mean mark having passed $\alpha=0.05/0.1$ significance level test)

2~4 候(10~20 d)的降水预报表现出较高的技巧, TCC 通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验;在对未来第 5~6 候(21~30 d)的降水预报中, TCC 出现下降, 但对未来第 5 候(21~25 d)的降水预报也通过了 $\alpha=0.1$ 显著性水平检验。与基于 MJO 指数的 STPM 模型在华南前汛期的降水预报试验(Li et al, 2016)相比, 该 STPM 模型对上海梅汛期降水的最长有效预报时效(25 d)较华南前汛期降水(30 d)略短, 这可能与热带地区强迫因子信号对副热带地区的影响稍弱有关(吴仁广和陈烈庭, 1994; 姚秀萍和于玉斌, 2005; 梁萍等, 2007b; 梁萍和丁一汇, 2012b)。

在实际业务应用中, 对总降水量的预报可能更具参考价值。按照图 2 所示的流程和式(3), 计算了总降水量回报值和观测值的 TCCs。图 6b 对比了 STPM 模型对 2011—2016 年梅汛期降水低频分量、总降水量的回报值与对应观测值的 TCCs。从 TCCs 来看, 总降水量与降水低频分量回报值的 TCCs 随预报时效的变化基本一致, 两者差异不大。通过上述 TCCs 的对比可知, 利用该 STPM 模型对总降水量具有一定的预报效果, 其预报技巧的变化与对降水低频分量的预报技巧相比差异不大, 这与东亚梅雨降水存在显著的低频振荡特征一致(梁萍和丁一汇, 2012a)。

为进一步了解总降水量预报值与实况观测的相符程度, 通过计算 2011—2016 年梅汛期 STPM 模型的回报与观测总降水量的标准化距平, 并按照世界气象组织(WMO)推荐的气候异常度指标(WMO, 1988), 将降水量分为偏少、正常和偏多 3 个等级, 分别对应降水量标准化距平 $C < -0.43$ 、 $-0.43 \leq C \leq 0.43$ 和 $C > 0.43$ 。结合该等级划分标准, 并依据以下给出的评估指标, 统计回报总降水量与观测相符的准确率: (1) 预报总降水量等级与观测相符、且预报降水发生时段与观测一致; (2) 预报总降水量等级与观测相符、但预报降水发生时段与观测相差 1 候(5 d); 满足以上 2 种情况之一的均认为预报正确。在上述评估指标设定时, 允许预报降水发生时段出现 5 d 以内的偏差。这主要是考虑到延伸期预报不可能像天气预报评分那样做到精确到时间完全一致, 在预报的降水强度要求和实况一致的情况下, 当预报时段和实际降水时段存在较小偏差时也认定为预报正确, 即预报时效与预报精度相匹配(何金海等, 2013; 梁萍和丁一汇, 2013)。

基于上述评估指标, 表 1 给出了回报总降水量的准确率。总体上, 该 STPM 模型的降水预报准确率达到 66.7%~78.8%; 其中, 回报降水量等级与观测相符、且降水发生时段与观测一致的共占 36.4%~45.5%; 回报降水量等级与观测相符、但降

水发生时段与观测相差 1 候的占 27.3%~33.3%。在对未来 10~25 d(2~5 候)的降水预报正确率相对较高,超过 25 d(6 候)的预报准确率有所下降。综上所述,基于 MJO 活动的 STPM 降水延伸期预

报模型对上海地区未来 10~25 d 的降水有较高的预报技巧,可以较为准确预报出约 3/4 的降水量级和发生时段,是上海地区降水延伸期预报的重要参考依据。

表 1 时空投影法(STPM)预报模型的回报总降水量准确率随预报时效的变化

Table 1 Accuracies distribution of the predicted total rainfall in the STPM forecast model as a function of forecast lead times

预报时效	2 候	3 候	4 候	5 候	6 候
准确率(总计)/%	68.2	74.2	78.8	74.2	66.7
降水量等级与观测相符且发生时段一致占比/%	40.9	42.4	45.5	42.4	36.4
降水量等级与观测相符但发生时段相差 1 候占比/%	27.3	31.8	33.3	31.8	30.3

总体而言,STPM 降水延伸期预报模型对上海地区未来 10~25 d 的降水有较高的预报技巧,但预报效果仍存在年际差异。为在实际业务中合理采用该预报模型的结果,进一步结合 MJO 强度与冷空气活动,系统分析预报效果存在差异的原因。基于 2011—2016 年梅汛期 STPM 模型预报技巧相对较高的未来 15~25 d 降水回报结果(回报样本共 198 个),分别挑选出 50 个预报效果理想、47 个预报效果不理想的回报样本,对比与上述两类回报样本相联系的前期 MJO 和冷空气强度配置关系。关于上述两类回报样本的选取标准,主要采用降水回报与观测值异常趋势一致且两者的标准化距平绝对值 $C < 1$ 确定为回报效果理想的样本,而降水回报与观测值异常趋势一致且 $C > 2$ 确定为回报效果不理想

的样本。回报效果理想和不理想的样本数各占总样本数的 25%左右。图 7 给出了降水回报效果理想和降水回报效果不理想时的前期 MJO 强度与冷空气活动的散点分布。其中,参考 Wheeler and Hendon(2004),采用 $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2}$ 确定 MJO 强度, $\sqrt{RMM1^2 + RMM2^2} > 1$ 表示强 MJO,否则为弱 MJO,用起报时刻前 1~5 候平均的 MJO 强度表示前期 MJO 强度;选取 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}N$ 、 $105^{\circ} \sim 115^{\circ}E$ 区域作为冷空气影响的关键区(梁萍等,2007a),基于 NCEP/NCAR 逐日再分析资料(Kalnay et al, 1996),用预报时刻前 1 候的关键区 700 hPa 经向风速描述冷空气影响。对于 STPM 模型预报效果理想的情况(图 7a),前期 MJO 和冷空气强度的散点

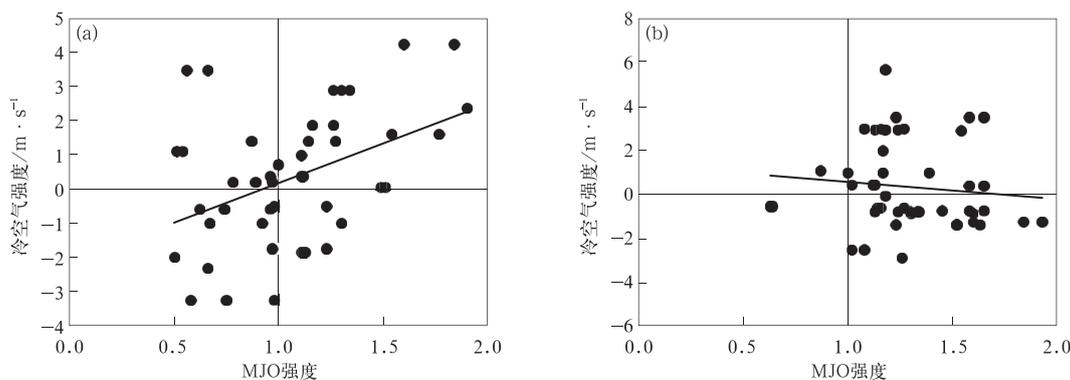


图 7 MJO 强度与冷空气强度的散点分布

(a)降水预报效果理想,(b)降水预报效果不理想

[用关键区($35^{\circ} \sim 40^{\circ}N$ 、 $105^{\circ} \sim 115^{\circ}E$)700 hPa 经向风速乘以-1 表示]

Fig. 7 Scatter distributions of MJO amplitude and cold air activity

(a) good performances of STPM model in rainfall prediction,

(b) poor performances of STPM model in rainfall prediction

[indicated by averaged meridional wind speed multiplied by -1 at 700 hPa over the key area ($35^{\circ} \sim 40^{\circ}N$, $105^{\circ} \sim 115^{\circ}E$)]

多数分布于第一、三象限,两者的相关系数达到了 0.46,表明当前期 MJO 与冷空气强度呈同位相配置时,即 MJO 偏强(弱)且冷空气影响偏强(弱)时,STPM 模型的预报效果理想。对于 STPM 模型预报效果不理想的情况(图 7b),冷空气和 MJO 强度的配置与图 7a 相反,两者呈负相关(相关系数 -0.16),且反位相配置的比例达到了约 60%。此外,对回报效果较理想的样本(样本数为 $198-50-47=101$ 个)而言,其前期 MJO 强度和冷空气强度的配置与图 7a 类似,差别在于两者之间的正相关关系(相关系数 0.14)较回报效果理想的情况弱一些。因此,在实际业务应用中,需关注 STPM 模型发报时刻前期 MJO 强度与临近预报时刻关键区冷空气活动的配置关系,当前期 MJO 偏强(弱)且冷空气也偏强(弱)时,STPM 模型对梅汛期降水的预报效果更好,预报结果的参考价值更大。

4 结论与讨论

上海地区梅汛期降水具有明显的低频振荡特征,基于大气低频振荡(MJO)特性预报该地区的低频降水具有可行性。近年来,一种新的延伸期预报方法——时空投影法(STPM)在热带地区陆续开展了延伸期降水预报试验(Hsu et al, 2015; Zhu et al, 2015; Li et al, 2016),并取得了较好效果。本文选取上海作为副热带的代表区域,基于 MJO 活动与上海地区降水的关系,探究 STPM 在该区域延伸期降水预报中的应用,以期为该区域延伸期预报提供一个新思路。

在建立针对上海地区梅汛期降水延伸期预报的 STPM 预报模型时,采用非传统滤波方法提取上海地区 10~60 d 的降水低频信号;使用 Wheeler and Hendon(2004)提出的 RMM 指数(包括 RMM1 和 RMM2)作为 MJO 活动的监测指数。基于 MJO 活动的准周期性及其与上海地区梅汛期低频降水的关系,将发报时刻过去 1~5 候的逐候 MJO 指数(包括 RMM1 和 RMM2)作为预报因子,将发报时刻未来 2~6 候(10~30 d)的降水低频分量作为预报对象,利用 2001—2010 年梅汛期的资料,通过 SVD 方法建立预报因子与预报对象之间的时空耦合关系;在预报时,通过将发报时刻过去 1~5 候的预报因子信息投影至该时空耦合关系中,得到未来 10~30 d 的降水低频分量预报值。进一步考虑到实际业务需

要,结合降水气候态值将降水低频分量预报值转换为总降水量的预报结果。

利用该 STPM 预报模型对 2011—2016 年上海地区梅汛期降水进行独立回报试验,并对预报技巧进行评估,其结果表明:该模型对上海地区未来 10~25 d 的降水具有较好的预报效果,可以较为准确预报出约 3/4 的降水量等级和降水发生时段,基本能把握上海地区梅汛期降水的季节内变化。其中,该模型对未来 2~4 候(10~20 d)的降水有较高的预报技巧,降水回报值与观测值的 TCC 通过了 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验;对未来第 5 至第 6 候(25~30 d)的预报技巧有所下降,但未来第 5 候的降水回报值与观测值的 TCC 仍通过了 $\alpha=0.1$ 显著性水平检验。综上所述,基于 MJO 活动的 STPM 降水延伸期预报模型可作为上海地区降水延伸期预报的参考依据。

需要指出的是,本文所涉及的基于 MJO 活动的 STPM 模型延伸期预报方法还处于初步阶段,方法本身及研究对象均存在一定的局限性。该模型在不同年份的预报效果存在差异,冷空气活动对 STPM 模型的降水预报效果有一定的调制作用。在 STPM 模型的业务应用中,需关注发报时刻前期 MJO 强度与临近预报时刻冷空气活动的配置情况,若前期 MJO 偏强(弱)且冷空气也偏强(弱)时,STPM 模型的预报效果更好,预报结果的参考价值更大;当 MJO 强度和冷空气强度呈反位相配置时,STPM 模型的预报效果不佳。上海地区梅汛期降水的影响因子较多,在 STPM 模型预报因子的选取中,除 MJO 指数外,也可引入其他有物理意义的预报因子,如将热带 SST、中高纬环流指数等作为预报因子,以提高 STPM 预报模型的稳定性,这在未来还有待于进一步探讨。

参考文献

- 陈青,廖玉芳,杨书运,等,2014. 低频天气图方法在湖南省雨季强降水过程预报中的应用[J]. 气象,40(2):223-228.
- 丑纪范,郑志海,孙树鹏,2010. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌[J]. 气象科学,30(5):569-573.
- 丁一汇,梁萍,2010. 基于 MJO 的延伸预报[J]. 气象,36(7):111-122.
- 何金海,1988. 亚洲季风区纬圈剖面内准 40 天周期振荡的环流结构及其演变[J]. 热带气象学报,(2):22-31.
- 何金海,梁萍,孙国武,2013. 延伸期预报的思考及其应用研究进展[J]. 气象科技进展,3(1):11-17.
- 蒋薇,孙国武,陈伯民,等,2011. 江苏省汛期强降水过程的延伸期预

- 报试验[J]. 气象科学, 31(s1):24-30.
- 李崇银, 1990. 大气中的季节内振荡[J]. 大气科学, 14(1):32-45.
- 李勇. 2016. 2011 年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探[J]. 气象, 42(9):1114-1123.
- 李桂龙, 李崇银, 1999. 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, 23(1):39-50.
- 梁萍, 汤绪, 何金海, 等, 2007a. 用水汽输送表征的东亚副热带夏季风指数研究[J]. 热带气象学报, 23(5):467-473.
- 梁萍, 汤绪, 柯晓新, 等, 2007b. 中国梅雨影响因子的研究综述[J]. 气象科学, 27(4):464-471.
- 梁萍, 丁一汇, 2012a. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征[J]. 气象学报, 70(3):418-435.
- 梁萍, 丁一汇, 2012b. 基于季节内振荡的延伸预报试验[J]. 大气科学, 36(1):102-116.
- 梁萍, 丁一汇, 2013. 强降水过程气候态季节内振荡及其在延伸期预报中的应用[J]. 高原气象, 32(5):1329-1338.
- 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.
- 马浩, 李正泉, 雷媛, 等, 2016. 热带气旋影响下浙江省强降水过程延伸期预报研究[J]. 气象科学, 36(3):374-381.
- 毛江玉, 吴国雄, 2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J]. 气象学报, 63(5):762-770.
- 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[J]. 高原气象, 30(3):594-599.
- 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(S1):64-68.
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社:156-157.
- 吴仁广, 陈烈庭, 1994. 长江中下游地区梅雨期降水与全球 500 hPa 环流的关系[J]. 大气科学, 18(6):691-700.
- 肖莺, 任永建, 杜良敏, 2017. 湖北省夏季不同阶段强降水及其大气低频特征[J]. 气象, 43(1):77-83.
- 信飞, 陈伯民, 穆海振, 等, 2016. 上海地区汛期暴雨的延伸期预测方法及应用[J]. 气象, 42(11):1372-1378.
- 信飞, 李德琳, 王超, 等, 2014. 利用经验正交函数绘制低频天气图的研究[J]. 气象, 40(8):940-947.
- 姚秀萍, 于玉斌, 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. 大气科学, 29(6):973-985.
- 张耀华, 周兵, 张耀存, 2012. 2010 年南方持续暴雨期大气环流异常及其低频特征研究[J]. 气象, 38(11):1367-1377.
- 朱乾根, 徐国强, 2000. 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, 20(3):239-248.
- Chen W Y, 1982. Fluctuations in Northern Hemisphere 700mb Height Field Associated with the Southern Oscillation[J]. Mon Wea Rev, 110(7):808-823.
- Chen L X, Zhu C W, Wang W, et al, 2001. Analysis of the characteristics of 30-60 day low-frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX[J]. Adv Atmos Sci, 18(4):623-638.
- Danforth C M, Kalnay E, Miyoshi T, 2007. Estimating and correcting global weather model error[J]. Mon Wea Rev, 135(2):281-299.
- Davis R E, 1936. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. J Phys Oceanogr, 6(3):249-266.
- Hsu P C, Lee J, Ha K, 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China[J]. Int J Climatol, 36(3):1403-1412.
- Hsu P C, Li T, You L, et al, 2015. A spatial-temporal projection model for 10-30 day rainfall forecast in South China[J]. Climate Dyn, 44(5-6):1227-1244.
- 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(11):2078-2095.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-471.
- Krishnamurti T N, 1985. Summer Monsoon Experiment - a review[J]. Mon Wea Rev, 113(9):1590-1626.
- Li W, Hsu P C, He J, et al, 2016. Extended-range forecast of spring rainfall in southern China based on the Madden-Julian Oscillation[J]. Meteor Atmos Phys, 128(3):331-345.
- Lo F, Hendon H H, 2000. Empirical extended-range prediction of the Madden-Julian oscillation[J]. Mon Wea Rev, 128(7):2528-2543.
- 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.
- Mittermaier M P, 2008. The Potential Impact of Using Persistence as a Reference Forecast on Perceived Forecast Skill[J]. Wea Forecasting, 23(5):1022-1031.
- Wheeler M C, Hendon H H, 2004. An all-season real-time multivariate MJO index; Development of an index for monitoring and prediction[J]. Mon Wea Rev, 132(8):1917-1932.
- WMO, 1988. WMO 49-1-1988 General meteorological standards and recommended practices. Volume I. World Meteorological Organisation No 49, Geneva.
- Yasunari T, 1979. Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon[J]. J Met Soc Japan, 57(3):227-242.
- Zhang L, Wang B Z, Zeng Q C, 2009. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in Southeast China[J]. J Climate, 22(2):201-216.
- Zhu Z, Li T, Hsu P C, et al, 2015. A spatial-temporal projection model for extended-range forecast in the tropics[J]. Climate Dyn, 45(3-4):1085-1098.