

上海梅汛期候降水异常的低频信号及延伸期预报

梁萍¹ 杨子凡² 谢潇³ 钱琦雯⁴ 常越⁵

(1 上海市气候中心, 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030; 2 清华大学地球系统科学系, 北京 100084; 3 上海海洋中心气象台, 上海 200030; 4 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044; 5 广东省气象局, 广州 510080)

摘要 提高汛期降水过程的延伸期预报能力是目前天气预报和气候预测发展的重要方向。本文以上海梅汛期降水为例, 利用非传统滤波方法提取多变量季节内分量, 分析了梅汛期季节内候降水异常及其相联系的延伸期关键低频信号, 进一步综合多变量低频信号建立了梅汛期候降水异常延伸期预报方法, 并开展了多年的回报和试报检验。结果表明: ①梅汛期候降水异常季节内分量具有显著的 40~60 d 低频振荡周期, 与降水异常实况具有显著的正相关和较高的符号一致率; ②梅汛期季节内候降水异常与超前 10~35 d 的热带及中高纬低频信号有关, 主要包括: 热带 MJO(Madden Julian Oscillation)自阿拉伯海的向东传播、西太平洋副热带高压季节内活动的西北向传播、PNA(Pacific-North American)遥相关型的季节内位相转换以及东北亚冷空气的持续性异常影响; ③综合上述多变量低频信号建立了延伸期候降水异常预报模型, 对提前 10~35 d 的延伸期候降水异常的季节内分量具有预报技巧, 也能较好地预报实际的候降水异常趋势。

关键词 延伸期预报; 梅汛期; 低频信号; 低频振荡

中图分类号: P456.3 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190444 **文献标识码:** A

引言

低频振荡通常指时间尺度大于 7~10 d 但小于 90 d 的准周期变化。以 MJO (Madden Julian Oscillation)^[1-2] 为代表的大气季节内振荡, 是目前发现的全球最强的低频信号。作为热带对流的显著特征, MJO 是全球天气和气候系统的重要强迫因子, 已成为目前开展延伸期预测的重要途径^[3-4]。除 MJO 外, 热带外大气也普遍存在 10~30 d 或 30~60 d 低频振荡现象^[4-7]。诸多关于夏季风降水的研究^[8-16]表明, 东亚夏季风降水异常是低、中、高纬大气季节内振荡共同作用的结果。

作为夏季风推进到长江中下游—淮河一带的典型降水阶段, 梅汛期降水具有显著的季节内振荡特征, 且与来自热带及中高纬的大气低频活动有关联^[3-4, 17-18]。其中, 与 MJO 密切联系的热带低频对流活动对梅汛期降水异常的影响尤为重要, 该信号

也已应用于梅汛期降水预测^[16, 19]。另一方面, 中高纬冷空气低频活动的向南输送, 为梅汛期降水提供了有利的冷空气条件^[17]。同时, 与梅汛期降水低频活动直接联系的中纬度大气低频振荡也可对其降水的演变产生影响^[20-21]。因此, 在实时的延伸期预报中, 有必要综合不同纬度带的关键低频信号建立预报方法。已有研究^[22]综合不同纬度带的低频信号建立了不同气候区划的夏季延伸期预报方法, 并取得了较好的效果。同时, 低频天气图^[23-24]、月动力延伸^[25]、环流相似^[26]等方法也已应用于我国各地区的延伸期预报业务, 在服务中取得了良好效果。对长江中下游而言, 夏季的不同阶段(如初夏的梅汛期和盛夏的台汛期)存在明显不同的低频影响系统^[27], 有必要区分不同阶段进行延伸期预报方法研究和应用。近年来长江梅雨期强降水频发^[28], 针对梅汛期降水异常有哪些延伸期前兆信号? 如果有, 它们有何物理意义? 基于它们如何构建预报模型开展延伸期预报? 为了回

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划(2017YFC1502301)、国家自然科学基金项目(41775047、41790471)资助

作者简介: 梁萍, 女, 1980 年生, 正研级高工, 主要从事次季节-季节预测研究及季风气候研究, Email: liangping1107@163.com

收稿日期: 2019 年 10 月 13 日; 定稿日期: 2020 年 1 月 10 日

答上述问题,本文以上海梅汛期降水为例,采用非传统滤波方法,通过考察梅汛期季节内降水异常相联系的热带及中高纬影响因子,建立梅汛期候降水异常的延伸期预报模型,以期为东亚副热带地区的梅雨及强降水过程延伸期预报提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用资料包括:①上海地区 11 个常规气象观测站逐日降水资料,来源于上海市气象局;②美国国家环境预报中心(NCEP)和美国能源部(DOE)的全球逐日 850 hPa 和 200 hPa 的风场(U850, V850, U200 和 V200)及位势高度场(H850 和 H500)再分析格点资料^[29],其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;③美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球逐日向外长波辐射资料(OLR)^[30],其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

1.2 方法

本文采用文献^[31]提出的非滤波方法提取季节内信号。主要步骤如下:①计算候平均,进而去除天气尺度的高频(周期小于 5 d)信号;②计算逐候多年气候态,并进行 90 d 低频滤波;③计算相对于气候态的逐候距平场;④去除前 35 d 平均值。经过步骤(1~4),所得各变量场主要表现出 10~90 d 的季节内信号。该滤波方法可以克服两端效应问题,因而便于实时业务应用。关于预报模型的建立,本文通过超前滞后相关分析,寻找在不同的超前时效内,影响上海梅汛期季节内候降水异常的关键因子,进一步采用多元回归方法建立预报模型,开展上海逐候降水量异常延伸期预报试验。其中,预报因子的选

取考虑到 3 个方面:①与降水具有显著的相关关系;②显著相关区域具有较大的空间范围;③各预报因子的空间范围基本不重叠。本文建模的时间为 2001—2010 年 6—7 月,即每年第 31—42 候,共 120 候。为检验预报效果,本文还对 2011—2013 年(共 36 候)的梅汛期候降水异常进行了回报检验。此外,本文应用到的方法还包括 Markov 功率谱^[32]分析、常规的相关及显著性 T 检验。

2 梅汛期季节内降水异常特征

以 2001—2010 年上海地区梅汛期候平均降水量为基准,计算逐候降水量异常及其季节内分量(图 1a)。进一步分析发现,梅汛期逐候降水异常的标准差为 5.4 mm,滤波得到的季节内分量(标准差为 5.0 mm)对实际的逐候降水异常有重要贡献。此外,候平均降水距平与其季节内分量的相关系数达到 0.93(置信度超过 95%),符号一致率高达 90.8%。由此表明,二者有很强的相关性,降水演变季节内信号可较好地表征候平均降水异常实况,因此,可通过预报季节内候降水异常这一途径来实现上海梅汛期候降水异常的延伸期预报。由图 1b 给出的功率谱分析结果表明,利用非传统方法滤波后,上海地区候平均降水季节内分量的显著频率约为 0.08~0.12 周期/候,即周期约为 40~60 d,表现出显著的季节内振荡,也验证了本文所用的非传统滤波方法的可靠性。进一步由梅汛期候平均降水异常季节内分量的自相关系数演变(图 2)可见,季节内候平均降水异常在超前 20~35 d 之间存在显著的自相关性,可作为提前 20~35 d 的延伸期候降水异常的一个预报信号。

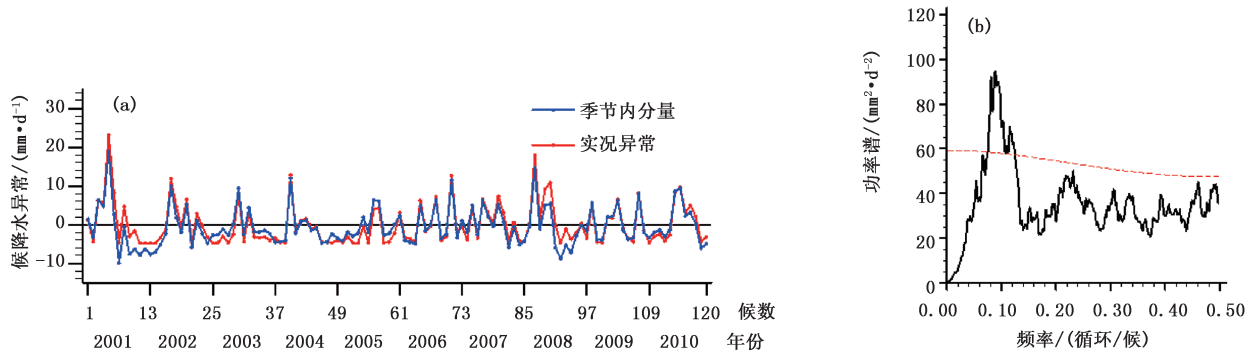


图 1 2001—2010 年上海梅汛期逐候降水异常(a)和季节内分量的功率谱(b)

(图 a 中横坐标为 2001—2010 年 6—7 月共 120 候,图 b 中红色线表示显著性水平为 0.05 的红噪声标准谱)

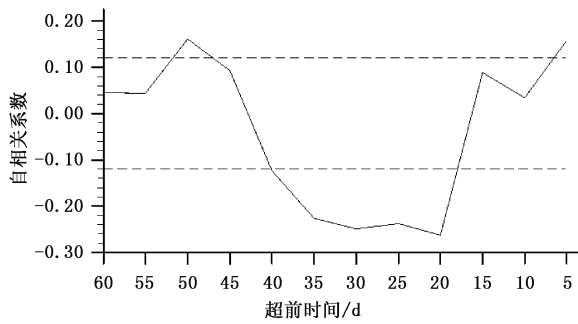


图 2 上海梅汛期候平均降水异常季节内分量的自相关系数 (横坐标为超前天数;虚线为通过 0.05 显著性水平的相关系数)

3 梅汛期季节内候降水异常的低频信号特征

除梅雨区本身的季节内振荡外,不同纬度带的大气季节内活动是否存在与梅汛期降水异常相联系的前期信号?图 3 给出超前于梅汛期季节内候降水

异常偏多候(超过多年平均一倍标准差)10~35 d 的季节内大气环流演变。由图 3 可见,具有持续显著异常的环流区域集中在低纬地区,且随着超前时间的演变,显著信号存在周期性变化。在超前 25~35 d,对流层中层(500 hPa)赤道附近特别是热带印太地区位势高度表现为显著的正距平。同时,太平洋北部的阿留申群岛附近则持续出现显著的位势高度负距平。上述太平洋区域的南北偶极子异常分布与太平洋-北美遥相关型(PNA)^[33-34]正位相的环流异常一致。在超前 10~20 d,热带太平洋地区转为持续显著的位势高度负距平,而北太平洋的位势高度异常则转变为持续正距平,对应 PNA 负位相状态。由此表明,梅汛期降水季节内异常与 PNA 遥相关正负位相的季节内转换^[35-36]有密切相关。进一步从对流层低层(850 hPa)风场异常的逐候演变可看出,东南亚地区在超前 35 d 表现为显著的西风距平,

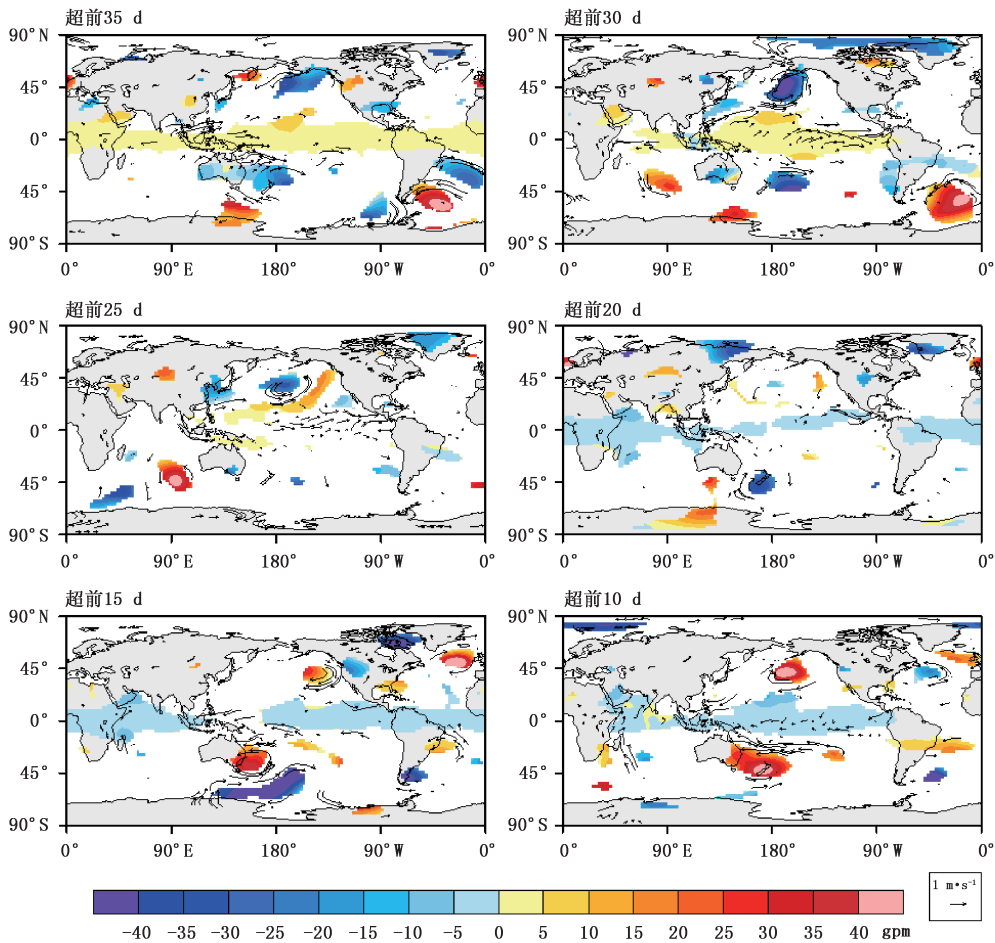


图 3 超前降水异常偏多候 10~35 d 的 500 hPa 位势高度距平(填色)及 850 hPa 风场(矢量) (图中只画出通过 90%置信度 T 检验的区域)

而在超前 10 d 左右赤道太平洋地区表现为显著的东风距平,与上述 PNA 型正负位相转换相联系的位势高度异常相一致。已有研究表明,ENSO(El Nino/Southern Oscillation)^[37]可调制 PNA 的发生概率^[38],MJO 也可通过激发副热带罗斯贝波进而影响 PNA^[39]。考虑到 ENSO 和 MJO 均对东亚延伸期预报技巧有重要影响^[40],故梅汛期季节内候降水异常与 PNA 的联系可能与 ENSO 缓变海洋影响及热带 MJO 有关。此外,上述纬向风异常的位相转换反映出梅汛期季节内候降水异常与热带季风季节内变化的联系,即超前 25~35 d 南海—西太平洋夏季风偏强,不利于后期上海降水偏多,当超前 15 d 开始南海—西太平洋夏季风转为偏弱时,有利于后期上海降水偏多。上述热带夏季风与上海梅汛期降水所反映出的副热带季风异常呈现反相关,这与 Zhu 等^[41]及张庆云、陶诗言^[42]的研究一致。

与上述类似的,影响梅汛期降水异常的对流活

动(用向外长波辐射表征)显著信号位于低纬度地区。如图 4 所示,超前 25~35 d 显著信号主要表现为赤道太平洋区域的正距平异常,而超前 10~20 d 的显著信号主要表现为印度附近的负距平异常。值得注意的是,从超前 25 d 起,阿拉伯海附近的向外长波辐射负距平(对流正异常)信号开始向东传播,直到超前 10 d 传播至菲律宾海洋性大陆附近,增强该地区的对流活动,进而造成高层偏西风(中低层偏东风,图略)异常,有利于水汽由西太平洋副热带高压西南侧向北输送,为上海梅汛期降水提供充足的水汽条件。由于 MJO 是热带对流活动最主要的季节内振荡信号,上述与梅汛期降水相联系的对流异常传播过程反映了热带 MJO 东传对梅汛期降水的影响。与此相对应的是,在对流层高层(200 hPa),除赤道太平洋区域风场有显著异常外,赤道印度洋区域上空的风场也呈现出与梅汛期季节内候降水异常的显著关联性,随着超前时间的临近,赤道印度洋

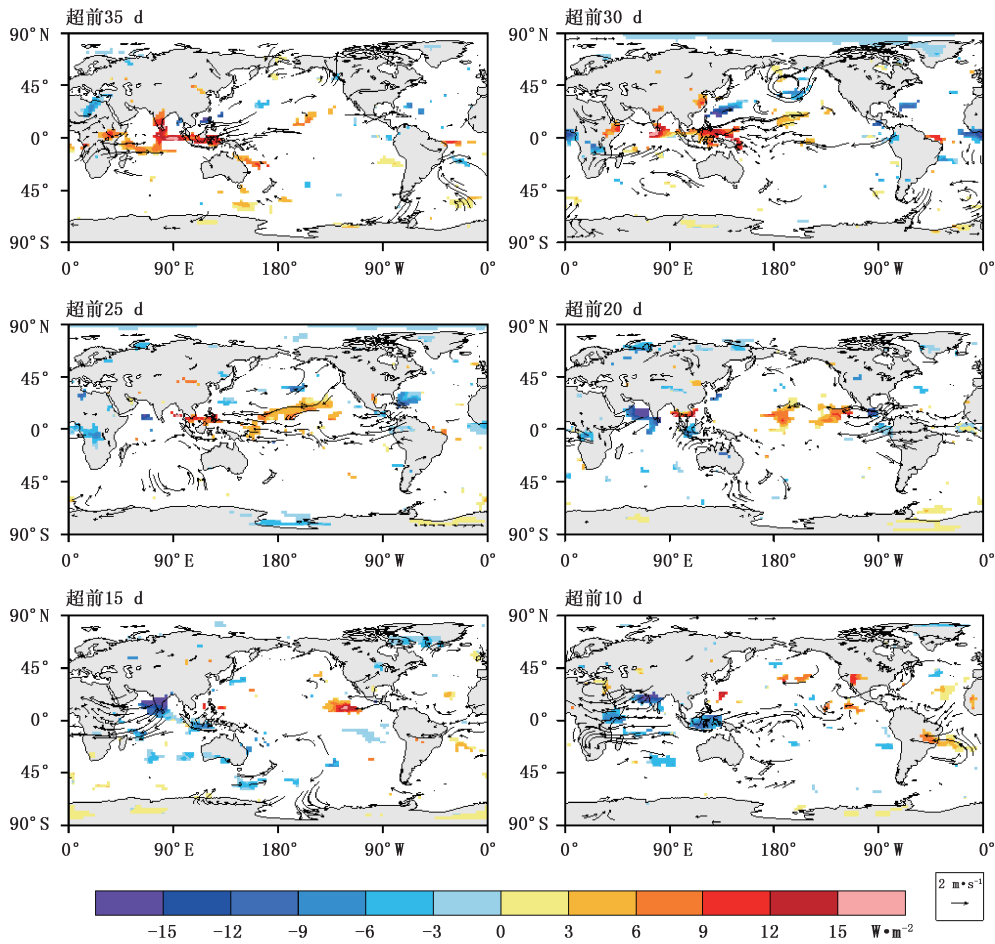


图 4 超前降水异常偏多候 10~35 d 的向外长波辐射(OLR)距平(填色)和 200 hPa 风场(矢量)
(图中只画出通过 90%置信度 T 检验的区域)

高层风场由显著的西风距平(超前 25~35 d)演变为东风距平(超前 10~20 d)。图 4 给出的热带对流活动异常演变与图 3 反映的热带大尺度环流是相一致的。500 hPa 热带印太地区位势高度从超前 25~35 d 的正距平演变到超前 10~20 d 的负距平(图 3),表现出印太地区热带辐合带由减弱(超前 25~35 d)到增强(超前 10~20 d)的季节内转变,可通过影响对流活动进一步对西太平洋副高产生影响。即:超前 25~35 d,热带辐合带减弱,菲律宾附近对流活动减弱,有利于局地哈德莱环流减弱,进而导致西太平洋副高减弱东退;超前 10~20 d,情况则相反,有利于西太平洋副高加强西伸,其西南侧水汽输送也有利于梅汛期降水。

除上述热带对流低频活动的东传影响外,西太平

洋大气低频活动的西北向传播对梅汛期降水也有显著影响。从 500 hPa 位势高度场与梅汛期季节内候降水异常的相关系数分布演变(图 5)可见,自超前 35 d 开始,热带中西太平洋位势高度正相关区逐渐向西北向传播,到超前 10~15 d 时,相关区位于西北太平洋。由此表明,太平洋副热带高压季节内活动的西北向传播对梅汛期候降水异常有显著影响。此外,梅汛期候降水异常还与超前 10~20 d 西北太平洋上空位势高度异常存在显著相关。西北太平洋上空位势高度场的持续性异常与东亚槽的位置异常相联系。故上述显著相关一定程度反映了梅汛期降水与东亚冷空气活动的关联。这与何金海等^[43]指出的东北冷涡气候效应对梅雨降水的影响一致。

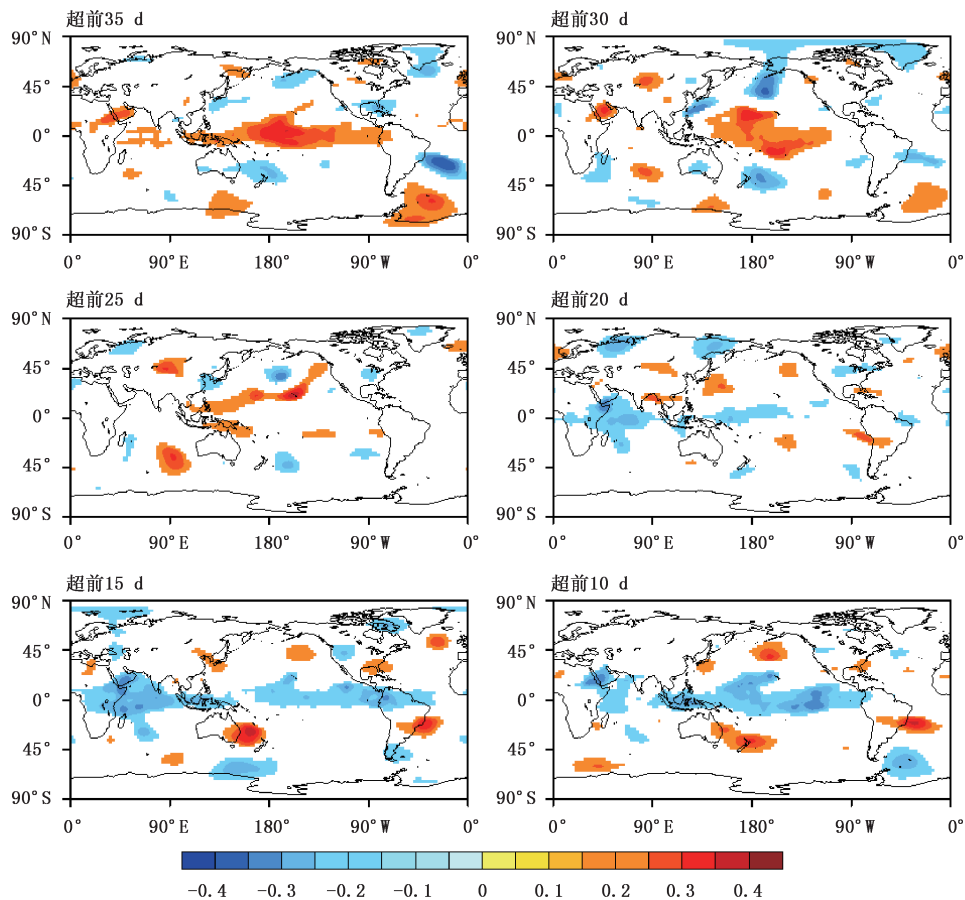


图 5 梅汛期候降水异常与超前 10~35 d 的全球 500 hPa 位势高度的相关分布 (图中只画出相关通过 90%置信度 T 检验的区域,暖/冷色阴影代表显著正/负相关)

4 梅汛期季节内候降水延伸期预报模型

基于上节中梅汛期季节内候降水异常特征以及超前不同时间的前期大气信号分析,进一步选取 850 hPa 和 200 hPa 纬向风(U850 和 U200)、850 hPa 和 500 hPa 位势高度场(H850 和 H500)、向外长波辐射(OLR),以及季节内候降水异常(Rain)共 6 个变量作为预报因子,建立多元回归模型,对上海梅汛期季节内候降水进行预报。需要指出的是,由于不同超前时效的大气信号有所区别,故在建模中选取的预报因子关键区也存在差异。通过各变量与季节内降水的超前相关,并根据 1.2 节所述的预报因子选择原则,选出不同超前时效的关键预报因子(表 1)。在建模过程中,将 2001—2010 年上海梅汛期(共计 120 候)中前 90 候用于回归模型的训练和建立,后 30 候则用于模型的验证。

表 1 上海地区梅汛期候降水 10~35 d 延伸期
预报模型的预报因子

超前时效/d	预测因子
35	U850 (30°S~10°N, 120°~160°W)
	U200 (20°S~0°, 30°~80°E)
	OLR (5°S~5°N, 80°~130°E)
	Rain
30	U850 (10°S~20°N, 160°~70°W)
	U200 (20°S~0°, 30°~100°E)
	OLR (10°S~10°N, 120°~150°E)
	Rain
25	H850 (20°S~10°N, 150°~80°W)
	OLR (10°N~30°N, 180°~130°W)
	Rain
20	H850 (20°S~10°N, 130°~70°W)
	H500 (20°~40°N, 135°~160°E)
	OLR (10°~20°N, 60°~75°E)
	Rain
15	H850 (20°S~20°N, 40°~90°E)
	H500 (25°~45°N, 110°~150°E)
	OLR (5°~20°N, 60°~90°E)
10	U850 (30°S~5°N, 150°E~90°W)
	H850 (30°S~40°N, 40°~90°E)
	OLR (15°~25°N, 60°~80°E)

多元回归模型拟合及回报检验结果如图 6 所

示。由图可见,延伸期尺度(未来 10~35 d)上,回报结果与实况的相关系数均在 0.40 以上,均通过了显著性水平为 0.05 的显著性检验。由此表明,采用季节内多变量因子建立的回归模型对上海梅汛期季节内候降水异常具有较好的延伸期回报效果。由于图 6 给出的是 30 个候的季节内候降水异常的回报结果,回报对象主要集中在 2008—2010 年。考虑到回报效果可能受 ENSO 年际变化影响^[39],进一步选取 ENSO 中性状态下的 2011—2013 年梅汛期降水进行了试报。ENSO 状态的判定参考来源于: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php。由图 7 给出的试报结果可见,该模型的延伸期(超前 20 d 除外)预报与实况降水的相关系数可达到 90% 的置信度,即模型对候降水异常季节内分量具有延伸期预报技巧。此外,2011—2013 年期间,该预报模型的预报结果与候降水异常实况的相关系数均在 0.29 以上,显著性水平均达到了 0.01,且符号一致率均为 60% 以上(图 8)。由此表明,除对延伸期候降水异常季节内分量有预报技巧外,该模型也能较好地预报实际的候降水异常趋势及其演变情况。

Yamaura 等^[44]的研究表明,北半球夏季热带季节内振荡存在年代际变化,这与亚洲季风区季节平均海温的年代际变化导致的沃克环流异常的年代际变化背景相联系。在建模过程中,为避免年代际变化可能造成的预报对象与预报因子关系的不稳定问题,本文参考了 Hsu 等(2015)的办法,利用前 10 年左右的预报因子建模训练和回报,对 2011—2013 年进行试报检验。此外,本文还应用 2006—2015 年的样本进行建模分析,并对最近的 2016—2018 年进行了试报检验。结果(图略)表明,应用本方法对延伸期(未来 10~25 d)候降水异常的季节内分量仍具有预报技巧。由此进一步证明,本建模方法对候降水异常的延伸期预报具有较好的稳定性。

5 结论

本文以上海梅汛期降水为例,在考察梅汛期季节内候降水异常相联系的关键低频信号的基础上,综合多变量低频信号,建立了梅汛期候降水异常延伸期预报方法,并进行了多年的回报和试报检验。

(1)利用非传统滤波方法提取的梅汛期候降水异常季节内分量具有显著的 40~60 d 低频振荡周

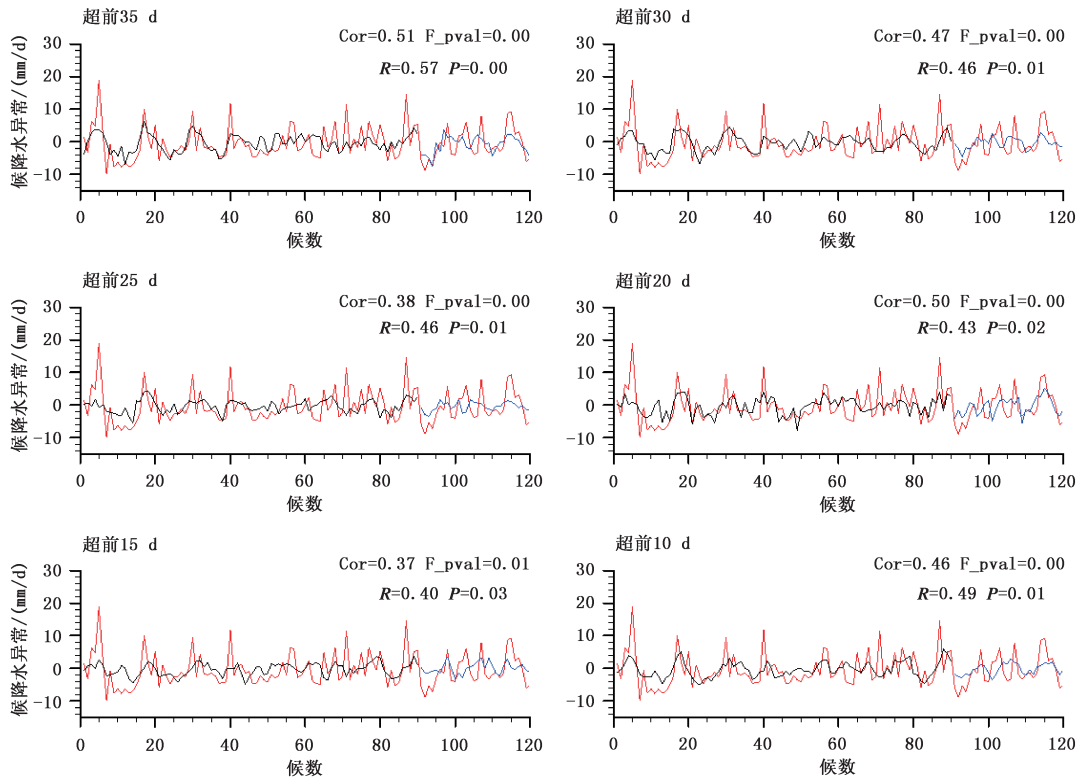


图 6 2001—2010 年上海梅汛期季节内候降水延伸期预报模型的模拟和回报
 (红色/黑色/蓝色曲线为实况/模拟/回报, Cor 表示模拟结果与实况的相关系数, F_value 表示回归模型的 F 值, R 表示回报结果与实况的相关系数, P 表示该相关系数的显著性水平)

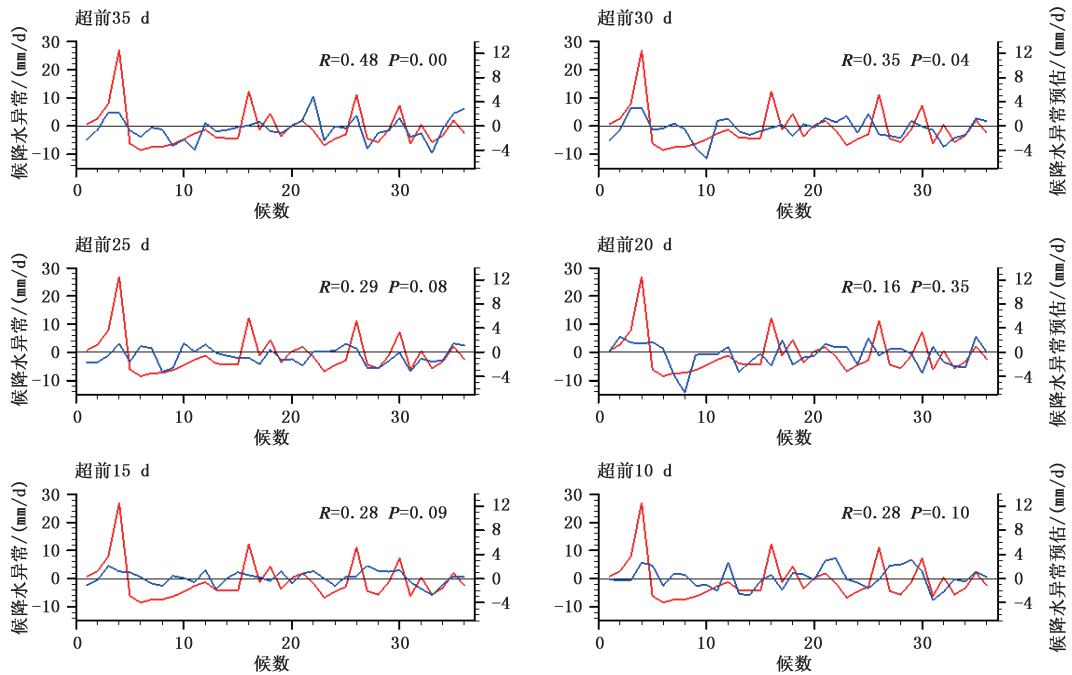


图 7 同图 6, 但为 2011—2013 年梅汛期候平均季内降水异常回报
 (红色//蓝色曲线为实况/回报)

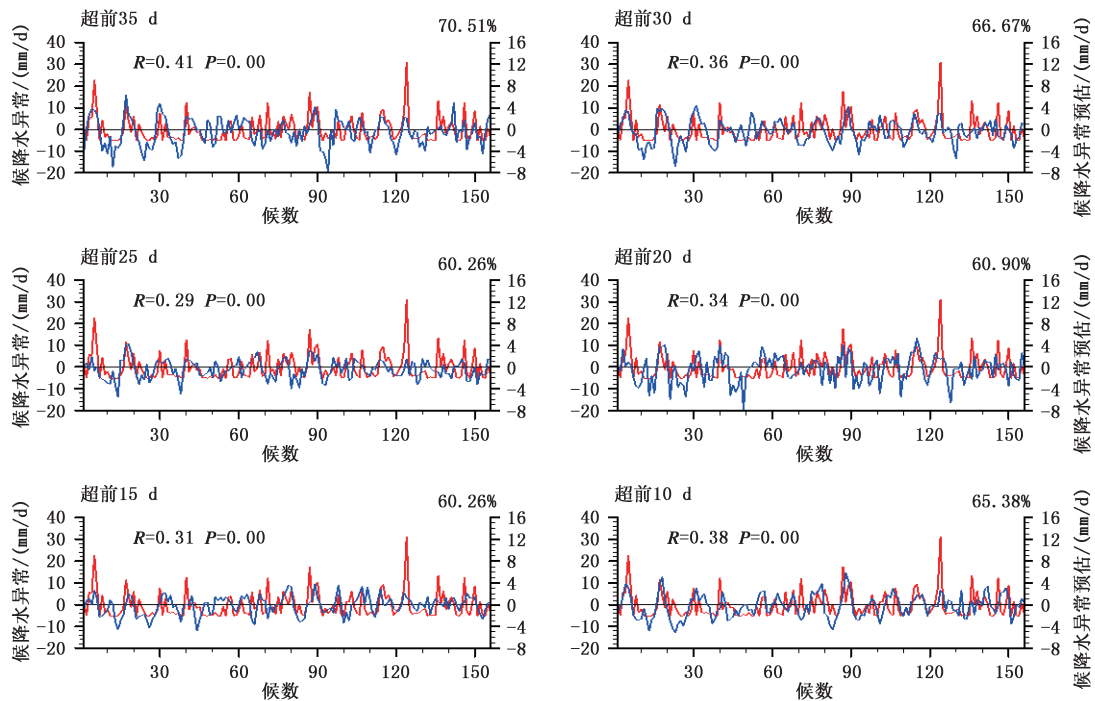


图8 2011—2013年上海梅汛期候降水异常(红色曲线)及预报结果(蓝色曲线)

(R 表示预报结果与候平均降水距平的相关系数,

P 表示该相关系数的显著性水平, 右上百分数表示符号一致率)

期,与观测的候降水异常有显著正相关和符号一致性。

(2)影响上海梅汛期候降水季节内异常的低频信号包括:热带MJO自阿拉伯海的向东传播、太平洋副热带高压季节内活动的西北向传播、PNA位相的季节内转换以及东北亚持续的异常冷空气影响。总体上,上述低频信号超前梅汛期候降水季节内异常10~35 d。

(3)基于多变量低频信号,建立了超前10~35 d的候降水异常延伸期统计回归模型。模型对延伸期(未来10~35 d)候降水异常的季节内分量具有预报技巧,也能较好地预报实际的候降水异常趋势及其演变情况。

本文的研究进一步表明,季节内振荡是开展延伸期预报的可行途径。通过构建季节内分量的延伸期预报模型,可实现梅汛期候降水异常的延伸期预报。上海梅汛期季节内候降水异常与来自热带及中高纬度的低频信号相联系,这与副热带天气气候异常受到低—中—高纬海气系统相互作用的影响是一致的。因此,在副热带地区的延伸期预报的建模中,需要考虑不同纬度带的综合影响。而且,在不同的

提前预报时效,关键低频信号有所区别。需要指出的是,如何改进模型对极端强降水的延伸期预报能力,值得今后进一步研究。此外,基于低频信号和动力模式相结合的动力统计方法也将是今后业务试验和应用的一个重要方向。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 丁一汇,梁萍. 基于MJO的延伸预报[J]. 气象, 2010, 36(7): 111-122.
- [4] 梁萍,丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验[J]. 大气科学, 2012, 36(1): 102-116.
- [5] Krishnamurti I N, Subrahmanyam D. The 30-50 day mode at 850mb during MONEX[J]. J Atmos Sci, 1982, 39: 2088-2095.
- [6] 李崇银. 大气中的季节内振荡[J]. 大气科学, 1990, 14(1): 32-45.
- [7] 杨双艳,武炳义,周顺武,等. 大气季节内振荡研究进展[J]. 气象科技, 2012, 40(6): 938-948.
- [8] 何金海,陈丽臻. 南半球中纬度准40天振荡及其与北半球夏季季风的关系[J]. 大气科学学报, 1989(1): 11-18.

- [9] 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(6):730-736.
- [10] Chen Longxun, Zhu Congwen, Wang Wen, et al. Analysis of characteristics of 30-60 day low frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(4): 623-638.
- [11] 陶诗言, 卫捷. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系[J]. 气象, 2007, 33(3):10-18.
- [12] 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(增刊1):86-93.
- [13] Zhang L, Wang B Z, Zeng Q C. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in Southeast China [J]. Journal of Climate, 2009, 22(2): 201-216.
- [14] 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.
- [15] 陈官军, 魏凤英. 基于低频振荡特征的夏季江淮持续性降水延伸期预报方法[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 633-644.
- [16] 梁萍, 丁一汇. 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, 2013, 32(5):1329-1338.
- [17] 梁萍, 丁一汇. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 418-435.
- [18] 魏晓雯, 梁萍, 何金海, 等. 大范围持续性强降水过程与30~60 d低频降水的联系及其预报指数[J]. 热带气象学报, 2015, 31(1),63-70.
- [19] 马悦, 梁萍, 李文钊, 等. 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, 2018,44(12):1593-1603.
- [20] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报[J]. 高原气象, 2010, 29(5):1142-1147.
- [21] 何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展[J]. 气象科技进展, 2013(1):11-17.
- [22] Zhu Z, Li T. The statistical extended-range (10-30-day) forecast of summer rainfall anomalies over the entire China [J]. Clim Dyn, 2017, 48(1): 209-224.
- [23] 孙国武, 信飞, 陈伯民, 等. 低频天气图预报方法[J]. 高原气象, 2008(增刊1):64-68.
- [24] 李忠燕, 孙昭萱, 张娇艳, 等. 低频图在贵州汛期延伸期强降水预测中的应用[J]. 气象科技, 2018, 46(5):999-1003.
- [25] 王娜, 方建刚. 月动力延伸预报产品在陕西月降水预测中的释用[J]. 气象科技, 2009,37(5):520-522.
- [26] 唐红玉, 李永华, 何慧根, 等. 前期环流相似法在重庆延伸期天气过程预报中的应用[J]. 气象科技, 2017,45(1):71-77.
- [27] 魏晓雯, 梁萍, 何金海, 等. 汛期强降水过程与月内低频降水的联系及其可能机制[J]. 高原气象, 2015, 34(3), 722-731.
- [28] 梁萍, 陈丽娟, 丁一汇, 等. 长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性研究[J]. 气象学报, 2018,76(3):379-393.
- [29] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [R]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437-471.
- [30] Liebmann B, Smith C A. Description of a complete (Interpolated) outgoing longwave radiation dataset [R]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 1275-1277.
- [31] Hsu P C, Li T, You L, et al. A spatial-temporal projection model for 10-30 day rainfall forecast in south China [J]. Climate Dynamics, 2015, 44(5-6): 1227-1244.
- [32] Cusick T W, Flahive M E. The markoff and lag range spectra [J]. Mathematical Surveys & Monographs. 1989, 30: 97.
- [33] Horel J D, Wallace J M. Planetary scale atmospheric phenomenon associated with the Southern Oscillation [J]. Mon Wea Rev, 1981, 109: 813-829.
- [34] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784-812.
- [35] Feldstein S B. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns [J]. J Climate, 2000, 13: 4430-4440.
- [36] Cash B A, Lee S. Observed nonmodal growth of the Pacific? North American teleconnection pattern [J]. J Climate, 2001, 14: 1017-1028.
- [37] Bjerknes J A. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific [J]. Monthly Weather Review, 1969, 18: 820-829.
- [38] Straus D M, Shukla J. Does ENSO Force the PNA? [J]. Journal of Climate, 2002, 15(15): 2340-2358.
- [39] Mori M, Watanabe M. The growth and triggering mechanisms of the PNA: A MJO-PNA coherence [J]. J Meteorol Soc Jpn, 2008, 86: 213-236.
- [40] Liang P, Lin H. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system [J]. Climate Dynamics, 2018, 50(3-4):1007-1022.
- [41] Zhu Q G, He J H, Wang P X. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1986, 3(4):466-477.
- [42] 张庆云, 陶诗言. 夏季东亚热带和副热带季风与中国东部汛期降水[J]. 应用气象学报, 1998,9(增刊1):17-23.
- [43] 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报, 2006,51(23): 2803-2809.
- [44] Yamaura T, Kajikawa Y. Decadal change in the boreal summer intraseasonal oscillation [J]. Climate Dynamics, 2017, 48 (9):1-12.

Low Frequency Signals of Pentad Rainfall Anomaly during Meiyu Season and Its Extended-Range Forecast in Shanghai

LIANG Ping¹ YANG Zifan² XIE Xiao³ QIAN Qiwen⁴ CHANG Yue⁵

(1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030; 2 Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084;

3 Shanghai Marine Meteorological Centre, Shanghai 200030; 4 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 5 Guangdong Meteorological Service, Guangzhou 510080)

Abstract: Improving the capability of extended-range forecast of precipitation during the Meiyu season has become an important research area for operational developments of both weather forecast and climate prediction. By taking the Meiyu season in Shanghai as an example, this paper analyzes the characteristics of intra-seasonal pentad anomalies of Meiyu precipitation and its associating key low-frequency signals on the extended-range scale through investigating multi-variable intra-seasonal components extracted by non-traditional filtering. An extended-range forecast model of pentad precipitation anomalies during the Meiyu season is further established by integrating the multi-variable low-frequency signals, and the performances of the forecast model are evaluated by the hindcasts and forecast experiments. Results show that: (1) The intra-seasonal component of pentad precipitation anomaly during the Meiyu season has significant features of 40 to 60 day low-frequency oscillation, which also has an significant positive correlation and high sign consistency rate with the observed precipitation anomaly. (2) The intra-seasonal pentad anomaly of Meiyu precipitation is related to the low frequency signals from both tropics and the middle-high latitudes, such as the eastward propagation of tropical MJO from the Arabian sea, the northwestward propagation of the western Pacific subtropical high, the intra-seasonal phase conversion of PNA (Pacific-North American) teleconnection and the persistent anomaly influences of cold air activities in Northeast Asia. (3) The extended-range forecast model of the pentad precipitation anomalies by integrating the above multi-variable low-frequency signals is statistically skillful to forecast the intra-seasonal component of pentad precipitation anomalies with a leading time of 10 to 35 days. It also shows outstanding capability in predicting the trend of the observed pentad precipitation anomaly.

Keywords: extended range forecast; Meiyu season; low frequency signal; low frequency oscillation