

王瑞英,周文韬,宁婧,等. 基于低频振荡的西南雨季降水的延伸期预报[J]. 陕西气象,2022(6):34-41.

文章编号:1006-4354(2022)06-0034-08

基于低频振荡的西南雨季降水的延伸期预报

王瑞英¹,周文韬¹,宁婧²,高宇星¹,肖天贵³

(1. 西安市气象局,西安 710016;2. 鄠邑区气象局,陕西鄠邑 710300;

3. 成都信息工程大学大气科学学院,成都 610225)

摘要:采用西南地区站点逐日降水数据和欧洲中心再分析数据,通过滤波、分位相合成等方法,分析了西南地区降水的低频特征及与之相联系的低频环流场演变特征,并采用基于降水自身低频信号和基于降水低频影响因子两种方法建立预报模型进行延伸期预报试验,结果表明:西南地区雨量存在 10~20 d 和 30~60 d 的低频变化;低频降水与低频 OLR 场正、负值区的顺次北移,印度洋北侧 850 hPa 低频纬向风的转变,500 hPa 环流场槽脊的配置以及 200 hPa 低频气旋、反气旋的交替影响有关;基于降水序列自身低频信号的预报模型可以提前半个月左右给出较为准确的预报结果,而基于低频影响因子的预报模型可以提前 20 d 左右给出具有一定参考价值的结论,两个模型对于降水偏多年的预报效果好于降水偏少年。

关键词:西南地区;低频振荡;延伸期预报

中图分类号:P457.6

文献标识码:A

延伸期预报作为天气预报和气候预测之间的预报“缝隙”,对工农业生产、防灾减灾、政府决策等具有重要作用,但同时也是现代天气预报的一个巨大挑战^[1-3],这主要是因为延伸期预报时段内,大气系统的演变不仅受初始误差的影响,还受陆气相互作用、海气相互作用等外界条件的部分影响。卞建春^[4]指出两周以内的预报属于第一类可预报性问题,与初始条件相关;而月尺度以上的气候预测属于第二类可预报性问题,主要与边界条件的影响有关。10~30 d 的延伸期预报正好处于二者之间,一方面初始误差非线性迅速增长^[5-7],另一方面大气开始受外强迫的作用;但超过了逐日预报的理论预报上限,并非意味着天气预报完全不可进行。丑纪范等^[8]、王启光等^[9]指出大气的运动不仅存在天气尺度的混沌分量,还存在更长时间尺度的稳定分量;大气的复杂演变就是混沌分量与稳定分量非线性相互作用的结果,在 10~30 d 的预报范围内,可预报分量是客

观存在的。Zheng 等^[10]在研究中从误差增长角度分离出了不可预报的随机分量和可预报分量,并将可预报分量定义为预报时段内误差增长较慢的部分。

大气低频振荡^[11]与延伸期预报在时间尺度上具有较好的一致性,可作为延伸期预报的可预报分量,被广泛应用于延伸期预报的研究中。魏娜等^[12]基于低频天气图的预报原理,对 2013—2015 年陕西省延伸期强降水过程进行了预报试验,结果表明低频天气图预报效果较好,预报时效为 10~30 d,可以在延伸期预报业务中加以应用。陈官军、魏凤英^[13]研究发现江淮夏季降水具有 20~50 d 的低频振荡特征,选取对江淮地区持续性强降水有显著影响的东亚环流指数作为预报因子,建立了低频降水的延伸期预报模型。章毅之等^[14]利用东亚地区 850 hPa 低频经向风主成分,建立了江南地区低频降水的多变量时滞回归模型,发现利用低频经向风场可以提前 30 d 较为准

收稿日期:2021-12-27

作者简介:王瑞英(1993—),女,陕西宝鸡人,汉族,硕士,助理工程师,主要从事短期气候预测研究。

确地预报出持续性强降水过程。魏晓雯等^[15]分析了大范围持续性强降水的低频振荡特征,根据前期低频信号构造强降水过程预报指数,对长江中下游大范围强降水的延伸期预报具有参考意义。本文将基于西南地区雨季降水的低频振荡划分8个位相,通过位相合成探究与低频降水相联系的低频环流场演变特征,寻找有关的低频关键区和影响因子,最后利用逐步回归方法建立两种预报模型,以期西南地区雨季降水的延伸期预报提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

所用资料为西南四省市(四川省、贵州省、云南省和重庆市)353个站点的逐日降水数据,来源于中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),时间长度为1980年1月1日—2020年12月31日。同时段的大气环流场数据来源于美国国家大气与海洋管理局的再分析数据,包括向外长波辐射及各高度上的水平风、位势高度等,空间分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

1.2 数据处理方法

1.2.1 一阶 Butterworth 带通滤波的三步滤波方案 一阶 Butterworth 带通滤波器可以写作:

$$y_k = a(x_k - x_{k-2}) - b_1 y_{k-1} - b_2 y_{k-2}, \quad k = 3, 4, \dots, n)$$

。公式中 x_k 为输入的时间序列, y_k 为经过滤波后得到的结果序列。式中的初始值 y_1 、 y_2 可选择任意值,但开端误差会逐渐向后传递,影响滤波结果。为了抑制开端误差,常用二步滤波方案,即先取 $y_1 = y_2 = 0$,并对输入序列进行一次正向滤

波,对第一次正向滤波的输出序列再进行一次反向滤波。本文采用陈寅生等^[16]提出的三步滤波法,即先进行一次反向滤波,得到 y_1 、 y_2 值,再利用这两个开端值,对输入的原始序列进行二步滤波,最后再进行一次反向滤波。试验证明三步滤波可以有效的抑制误差传递以及位相漂移,较二步滤波法具有更好的准确性和适用性。

1.2.2 集合经验模态分解方法 集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)^[17-18]是近年来在经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)基础上发展的一种时间序列分析技术,适合于分析非线性、非平稳的时间序列,它可以把一个复杂的一维数据分解为有限个本征模函数(intrinsic mode function, IMF)和一个趋势项,每个 IMF 都反映了原序列不同时间尺度的局部特征。但在信号分解过程中,序列端点处不可避免地会出现数据失真现象,引起模态混合。通常的处理方法是分解后删去序列两端的部分数据,但为了不失去端点处的预报信息,首先利用镜像延拓方法扩展序列,分解后再删去扩展部分,以削减端点失真造成的影响。

2 低频振荡特征

2.1 降水

根据西南地区多年平均候雨量的时间演变(图1a)可以看出,西南地区全年雨量表现为单峰型特征。每年5月中旬降水量的标准化距平开始转为正值,7、8月达到峰值,其中第42候,即7月底降水量最大,直到10月中旬降雨量标准化距平再次降为负值。

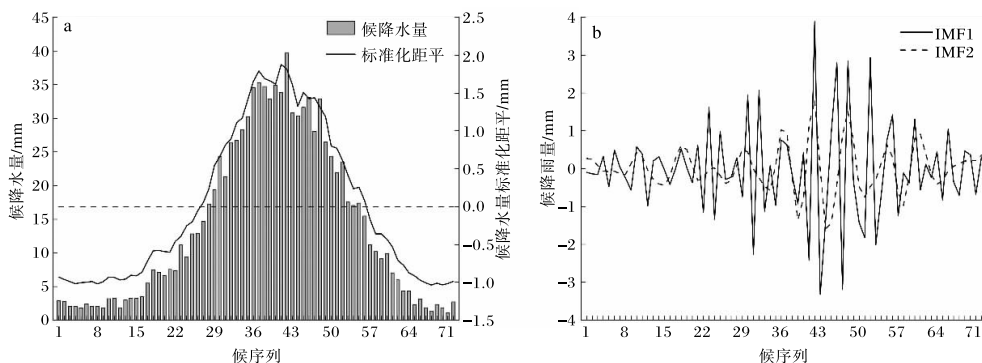


图1 1980—2020年西南地区平均雨量(a)和EEMD分解前两模态(b)的逐候演变

为了探究西南雨季降水的低频振荡特征,利用 EEMD 方法提取降水序列不同时间尺度上的变化分量,得 5 个 IMF 分量和 1 个趋势项,其中 IMF1 代表了 10~20 d 的准双周振荡,方差贡献为 6.8%;IMF2 代表了 30~60 d 的季节内变化,方差贡献为 10.4%。图 1b 给出了降水 EEMD 分解前两模态的逐候演变,对比原降水时间序列可以看出,雨季期间前两个 IMF 的振幅较大,降水峰值时二者达到极大值且同位相叠加,在一定程度上反映了西南地区降水的演变特征;其中 30~60 d 振荡方差贡献更大,对西南雨季降水的影响也更显著,因此将其作为主要研究对象。

鉴于低频振荡对于西南雨季降水的重要作用,进一步对逐日降水序列进行 30~60 d 带通滤波,5—10 月共有 5 个完整的波动,每个波动划分为 8 个位相,3 位相(90°)对应波峰;7 位相(270°)对应波谷;1、5 位相是波动与零线的交点,分别对应 0° 和 180° ;而 2、4、6、8 位相则分别位于 1、3、5、7 位相和下一个 1 位相之间的中点。

2.2 大尺度环流场

根据上述规则划分波动的 8 个位相,利用 Butterworth 带通滤波对大气环流场进行 30~60 d 滤波并分位相进行合成,分析不同位相下大气低频环流特征,寻找与西南雨季降水低频变化相联系的大气低频结构及传播特征。

2.2.1 低频 OLR 场的分布及演变

西南雨季降水低频振荡 8 个位相下低频向外长波辐射(outgoing longwave radiation, OLR)场的演变主要与东亚正、负值区的顺序北移有关(图 2)。第 1 位相,西南大部分地区为低频对流的正值区覆盖,东亚地区正、负值区经向排列。第 2 位相,交替排列的正负值区顺次北移,负值区在西南地区打通,对流增强。第 3 位相,西南地区对流进一步加强,赤道北部的正异常区北移至 20°N 附近,阿拉伯海、印度半岛及孟加拉湾一带完全转为正值控制。随着 OLR 低频波列北移,到第 6 位相,西南大部分地区转为弱的正值控制。第 7 位相,正值在西南地区彻底打通,表现为较强的对流抑制;此时印

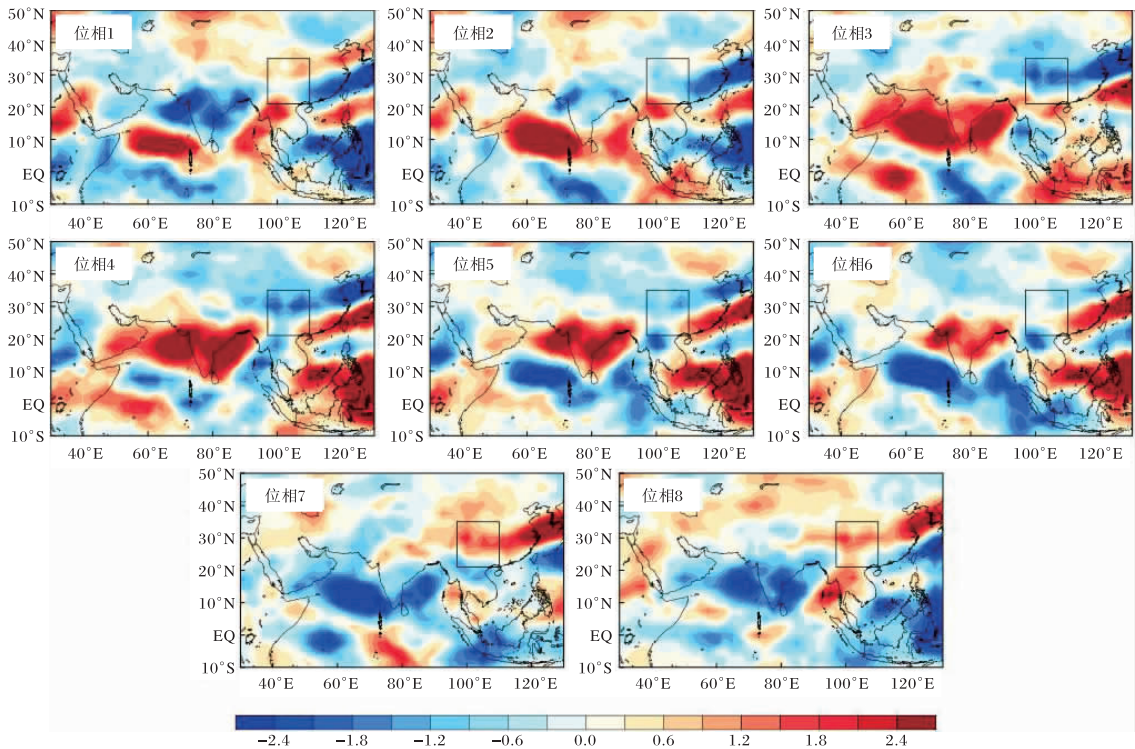


图 2 1980—2020 年 5—10 月低频 OLR 场(单位: W/m^2) 8 个位相下的空间分布
(矩形框代表西南地区所在位置)

度半岛及其附近海域的大范围地区转为负值,而台湾北侧的黄海、朝鲜半岛等地为 OLR 正值。通过分析发现黄海、朝鲜半岛等地 ($28^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$) 及印度半岛 ($10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $75^{\circ}\text{E}\sim 85^{\circ}\text{E}$) 低频 OLR 与西南地区低频 OLR 演变密切相关,前者与西南地区低频 OLR 存在显著的正相关,相关系数为 0.913;后者为负相关,相关系数达到 -0.669 ;均通过了 0.01 的显著性检验。

2.2.2 850 hPa 低频风场的分布及演变 分析 850 hPa 低频风场的演变(图 3)发现:第 3、7 位相低频风场的分布形势都发生了突变;从降水峰值向降水谷值演变的第 4 至 6 位相,阿拉伯海、孟加

拉湾和西太平洋地区为低频反气旋控制,印度洋北侧盛行偏东风,向西南地区的水汽输送停滞;而从降水谷值向降水峰值演变的第 8 位相至下一波动的第 2 位相,原本反气旋控制的几个地区都转为低频气旋控制,印度洋北侧转为偏西气流,加强向西南地区的水汽输送。鉴于印度洋北部东、西风的翻转对降水的重要作用,进一步分析北印度洋 ($10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$) 区域平均低频纬向风与西南地区低频降水间的时滞相关系数,发现低频风场超前降水场 20 d 左右时,相关系数达 0.82(通过了 0.01 的显著性检验),表明北印度洋上的低频纬向风对西南地区降水具有很好的指示意义,可以作为延伸期预报的低频信号。

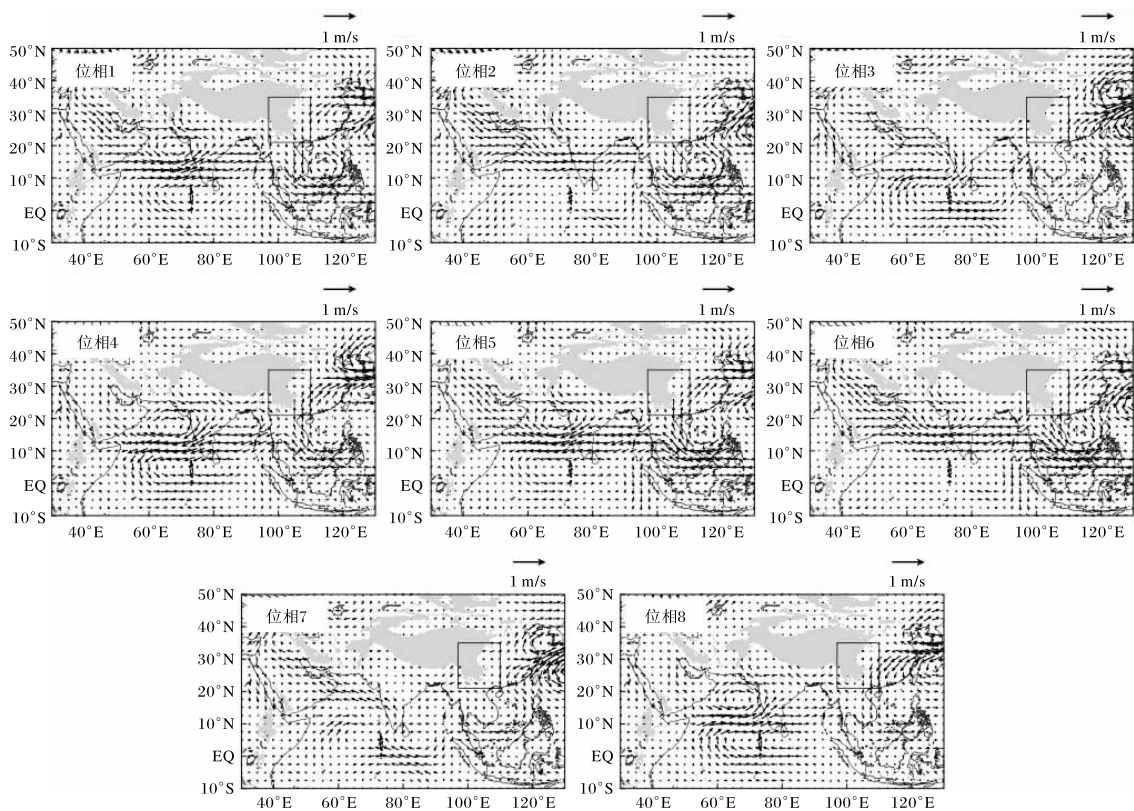


图 3 1980—2020 年 5—10 月 850 hPa 低频风场 8 个位相下的空间分布(矩形框代表西南地区所在位置)

2.2.3 500 hPa 低频位势高度场的分布及演变 500 hPa 低频环流场上(图 4),低纬度地区从第 7 位相到下一波动的第 2 位相,孟加拉湾至阿拉伯海位势高度为负,对应 850 hPa 上的气旋性环流,低层到中层的正压系统有利于西南地区雨季的水汽输送;而第 3 至 6 位相则为正的位势高度控制,

与低层的低频反气旋对应。中高纬度地区,第 1 到 3 位相,亚欧“两槽一脊”的环流形势逐渐形成,原本位于贝加尔湖东侧和巴尔喀什湖附近的两个小正值中心,于第 3 位相在中西伯利亚合并加强,形成阻塞形势,有利于冷空气沿乌山附近槽向我国西南地区输送,对应降水峰值。从第 4 位相开

始,中西伯利亚低频高值区减弱,东、西两个负值区向内收缩,到第7位相亚欧地区“两脊一槽”的环流分布形成,中西伯利亚切断形势发展,不利于高纬度地区冷空气向西南地区的输送,对应降水

谷值。分析表明,乌拉尔山,贝加尔湖,及鄂霍茨克海地区低频位势高度的正负分布与西南地区雨季降水的低频演变密切相关,可以作为降水延伸期预报的低频信号。

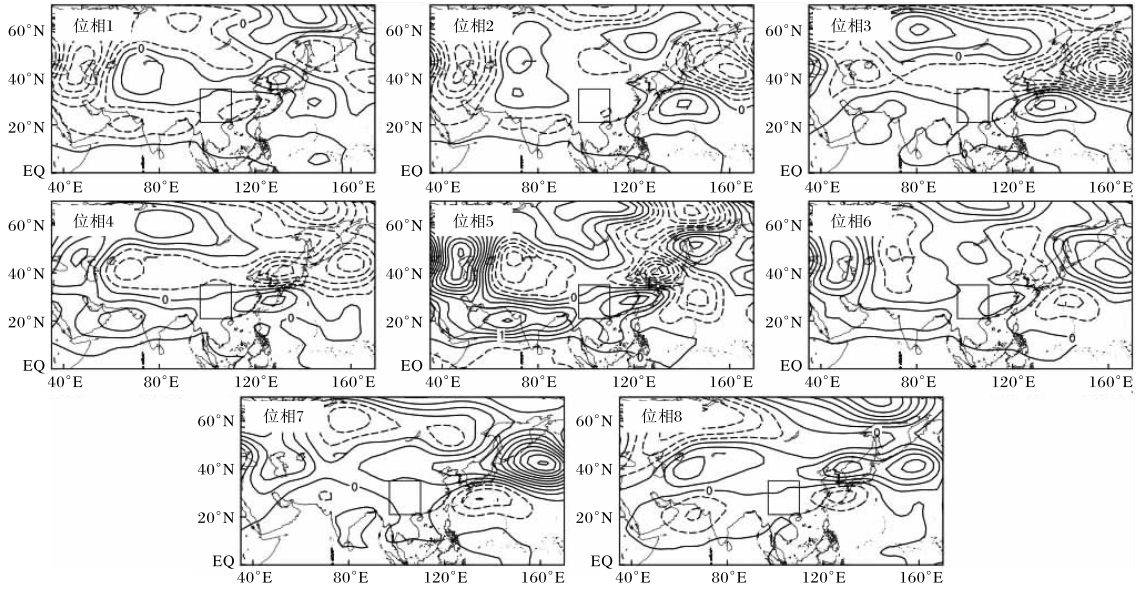


图4 1980—2020年5—10月500 hPa低频位势高度场8个位相下的空间分布
(矩形框代表西南地区所在位置)

2.2.4 200 hPa 低频环流场的分布及演变 200 hPa 上(图5),北半球中低纬度低频气旋和反气旋纬向相间排列。第1位相,西南地区高空受低频气旋影响,气旋东、西两侧分别为低频反气旋,随着

低频波列东移。第3位相,西南地区为低频反气旋控制,提供了高层辐散流场,有利于对流的发展,对应西南地区雨季降水峰值期。第7位相,西南地区又转为低频气旋控制,高层辐合形势不利于

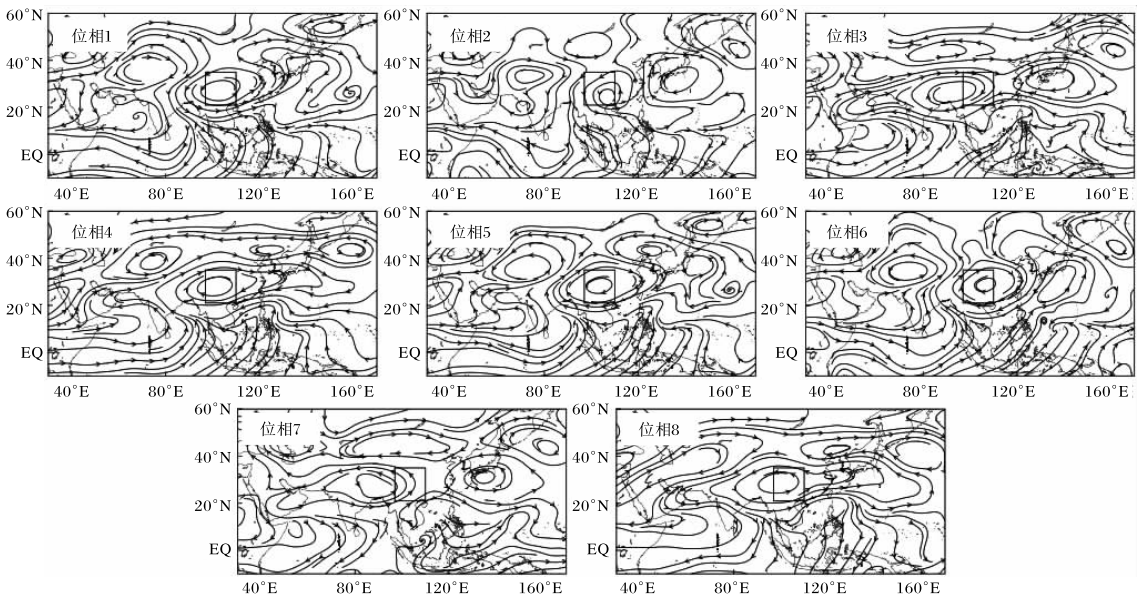


图5 1980—2020年5—10月200 hPa低频环流场8个位相下的空间分布(矩形框代表西南地区所在位置)

对流的发展,对应西南区域雨季降水的谷值。

3 西南雨季降水的延伸期预报试验

3.1 基于降水低频信号的延伸期预报试验

EEMD 作为分析非线性、非平稳信号序列的新方法,可以将时间序列平稳化处理,所分解出的各 IMF 分量均包含了原信号不同时间尺度的局部特征,具有更好的可预报性和更长的预报时效,可作为延伸期预报的可预报分量。因而提取逐候降水前 5 个 IMF 分量作为预报因子,采用逐步回归的方法建立延伸期预报方程,对西南地区 5—10 月逐候降水量的季节内分量进行延伸期预报试验,样本为预报年份之前的所有年。例如对 2012 年第 25 候的降水量进行提前 6 候的预报试验,则预报因子为 1—19 候逐候降水量的 EEMD 分量,样本数为 1980—2011 年共 32 a。

对 2017—2020 年西南地区雨季(第 25~60 候)期间的逐候降水量进行提前 1~10 候的延伸

期预报试验。从预测值与实测值的相关系数(图 6a)可以看出,除 2019 年外其余年份提前 1~3 候的相关系数在 0.5 以上(通过了 0.01 的显著性检验),随着预报时效增长预报值与实况降水的相关系数也逐渐降低,到提前 4 候时已基本降至 0.4 以下,失去参考意义。尽管相关系数并非预报时效的严格单调函数,但整体上基于降水低频信号的延伸期预报模型的预报效果并不十分理想,仅可提前 15 d 左右给出较为准确的预报结论。

为了进一步探究模型对降水异常年的预报效果,选取降水异常偏多年(1999、2001 年)和降水偏少年(2006、2011 年)进行分析(图 6b)。模型对于降水异常年的预报效果同样是在提前 1~3 候时较好,第 4 候预报值与实况值的相关系数迅速下降。另外,两个典型雨季降水异常偏多年的预报效果整体好于降水异常偏少年,这可能与降水偏多年降水的季节内振荡信号更强有关。

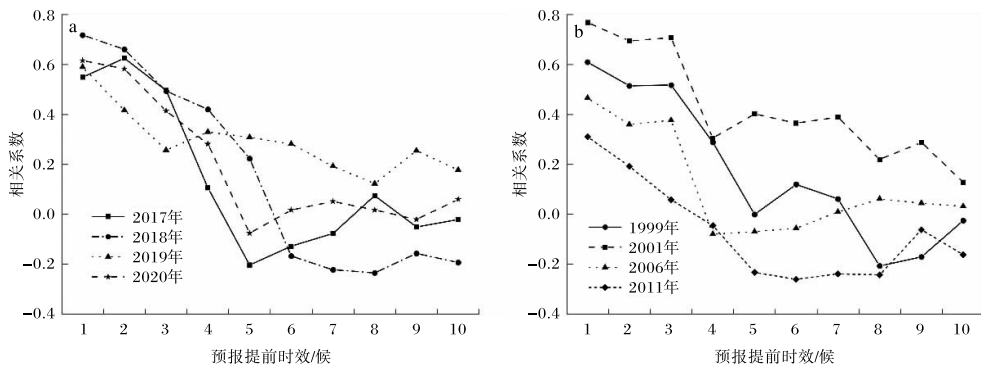


图 6 基于降水低频信号的模型预报值与 2017—2020 年(a)、降水异常年 (b)实际雨量提前 1~10 候的相关系数

3.2 基于降水低频影响因子的延伸期预报试验

西南地区雨季降水量的变化是多种因子共同作用的结果,仅根据降水序列自身的低频演变构建预报模型,具有一定的局限性,因而考虑在预报模型中加入影响西南地区低频降水的环流因子。一方面,有利于寻找出与西南雨季降水相关的监测指标,为延伸期预报提供预报信号;另一方面,使模型具有更好的物理意义。增加作为备选的预报因子数量,通过筛选出最优因子进入方程,在一定程度上提高模型的预报能力。根据前述大气低频流场的演变,选择以下 7 个关键区的物理量序

列作为预报因子(表 1)。

用降水序列本身的季节内振荡分量及表 1 中 7 个关键区低频环流序列作为预报因子,同样对 2017—2020 年雨季(第 25~60 候)进行延伸期预报试验。根据图 7a 可以看出:相较基于降水序列自身低频分量而构建的预报模型,加入了低频影响因子的延伸期预报模型具有更好的预报效果。提前 3 候的相关系数基本在 0.6 以上,预报效果最好的 2019 年提前 1~2 候的相关系数在 0.8 以上,最高可达 0.85;提前 4 候时相关系数仍维持较高水平,除 2020 年外都在 0.5 以上。整体上,

表 1 影响西南雨季降水季节内振荡的关键区与低频要素

关键区	低频要素
黄海、朝鲜半岛等地(28°N~38°N,115°E~130°E)	低频 OLR 场
印度半岛地区(10°N~20°N,75°E~85°E)	低频 OLR 场
北印度洋(10°N~15°N,50°E~90°E)	850 hPa 低频纬向风
乌拉尔山地区(60°N~80°N,40°E~60°E)	500 hPa 低频位势高度场
中西伯利亚地区(50°N~70°N,90°E~110°E)	500 hPa 低频位势高度场
鄂霍次克海地区(35°N~55°N,140°E~170°E)	500 hPa 低频位势高度场
西南地区(21°N~35°N,97°E~110°E)	200 hPa 低频涡度场

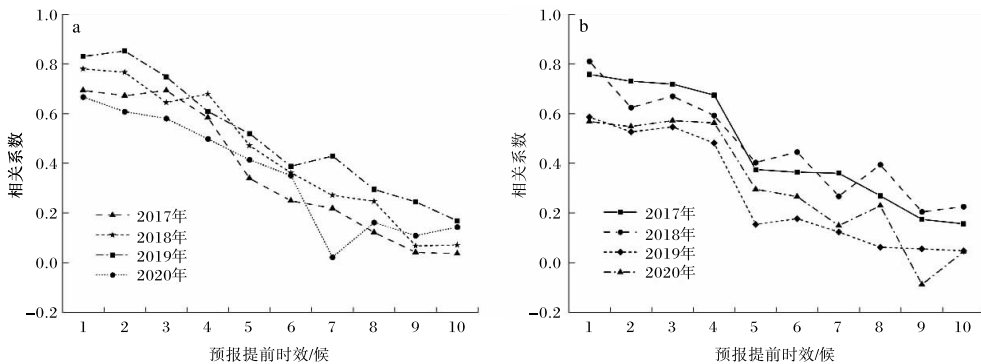


图 7 基于低频影响因子的模型预报值与 2017—2020 年(a)、降水异常年
(b)实际雨量提前 1~10 候的相关系数

可以提前 20 d 左右给出具有一定参考价值的预报结果。

同样对雨季降水异常偏多个例年(1999、2001 年)和偏少个例年(2006、2011 年)进行预报试验(图 7b),可以看出不论是降水异常偏多年还是偏少年,加入低频影响因子的预报模型,预报效果都有较大提高。提前 1~4 候,1999 年和 2001 年的相关系数均在 0.6 以上,而预报效果相对较差的 2006 和 2011 年,前 4 候的相关系数也在 0.4 以上,远高于基于降水序列自身低频分量的预报模型。另外,模型对于降水异常偏多年的预报效果整体好于降水偏少年。

4 结论

利用 Butterworth 带通滤波和分位相合成的方法,分析了西南地区降水低频特征及与之相联系的大尺度低频环流场演变特征,在此基础上采用基于降水自身低频信号和基于降水低频影响因子两种方法建立延伸期预报模型,对西南地区雨季降水的低频振荡进行提前 1~10 候的预报试

验,主要得到以下结论。

(1)西南地区平均雨量表现为单峰型特征,峰值主要位于 7、8 月。通过 EMD 分解,发现西南地区降水量时间演变具有 10~20 d 和 30~60 d 的低频变化特征,是西南地区降水时间演变的重要贡献者。

(2)西南地区降水季节内振荡 8 个位相下,低频 OLR 场的演变主要与东亚地区正、负低频区的相间分布及顺次北移有关。850 hPa 低频风场的演变表现为阿拉伯海、孟加拉湾等地气旋、反气旋的交替变化,环流场发生转变时,印度洋北侧(10°N~15°N)低频纬向风也会发生转变,当西南风水汽输送通道打开时有利于降水发展。500 hPa 上,降水峰值对应阿拉伯海、孟加拉湾一带及西北太平洋地区正的低频位势高度,中高纬度为“两槽一脊”的环流分布;降水谷值的环流形势分布则正好相反。200 hPa 低频流场最突出的特征为低频气旋、反气旋对西南地区的交替影响,低频反气旋为对流提供高层辐散场,高层的低频气旋则抑制

对流发展。

(3)基于降水序列自身低频信号的回归方程可以提前 15 d 左右较为准确地预报出西南地区雨季逐候降水的低频分量。基于低频影响因子的预报模型,预报效果有了较大提高,可以提前 20 d 左右给出具有一定参考意义的预报结论。另外,两个模型对于降水异常偏多年的预报效果均好于降水偏少年,这可能与雨量较多年降水的季节内振荡信号较强有关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨秋明. 10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2015(9): 970-984.
- [3] 康志明,鲍媛媛,周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24.
- [4] 卞建春,杨培才. 关于大气过程可预报性问题的一些讨论[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 315-323.
- [5] 史珍,丁瑞强,李建平. 随机误差对混沌系统可预报性的影响[J]. 大气科学, 2012, 36(3): 458-470.
- [6] 黎爱兵,张立凤,李新东,等. 基于非线性误差信息熵的系统可预报分量分析[J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(2): 245-251.
- [7] 田武文,方建刚,王兰宁. 降水气候噪声和可预报性问题的初步研究[J]. 陕西气象, 2003(4): 6-9.
- [8] 丑纪范,郑志海,孙树鹏. 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, 2010, 30(5): 569-573.
- [9] 王启光,丑纪范,封国林. 数值模式延伸期可预报分量提取及预报技术研究[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(2): 343-354.
- [10] ZHENG Z H, HUANG J P, FENG G L, et al. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(5): 878-889.
- [11] 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.
- [12] 魏娜,肖科丽,胡淑兰,等. 低频天气图在陕西汛期降水预报中的应用[J]. 陕西气象, 2018(3): 15-19.
- [13] 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.
- [14] 章毅之,宋进波,屠菊清,等. 多变量时滞回归模型在江南地区初夏降水低频分量延伸期预报中的应用[J]. 大气科学学报, 2017, 40(6): 833-840.
- [15] 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.
- [16] 陈寅生,欧阳玫君. 一阶 Buterworth 递归式带通滤波器技术改进方案[J]. 气象, 1997, 23(5): 8-12.
- [17] 王兵,胡娅敏,杜尧东,等. 小波分析和 EEMD 方法在广州气温及降水的多尺度分析中的差异分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 769-776.
- [18] 王文,任冉,李耀辉. 基于 EEMD 的黄河中上游夏季降水预报方法的研究[J]. 气象科学, 2014, 34(3): 261-266.