

2013年长江下游降水低频分量延伸期预报的扩展复数自回归模型*

杨秋明†

(江苏省气象科学研究所, 南京 210009)

(2014年2月24日收到; 2014年5月22日收到修改稿)

用长江下游降水低频分量和全球850 hPa低频经向风主成分, 建立扩展复数自回归模型(ECAR), 对2013年1—12月长江下游降水低频分量进行延伸期逐日变化预报试验. 结果表明, 20—30 d时间尺度的长江下游低频降水预测时效可达43 d左右, 能较好地预测与暴雨过程对应的低频分量的非线性增长过程, 预报能力明显优于自回归模型(AR). 这种通过构造主要低频序列组成的扩展复数矩阵(ECM)进行复数自回归(CAR)建模的ECAR方法, 也为展现气候系统内部分量之间相互作用的动力学过程提供了崭新的描述. 基于全球环流主要20—30 d振荡型的发展和演变, 对于提前27 d预报长江下游地区2013年10月上旬后期大暴雨过程很有帮助, 其中南半球热带外环流20—30 d振荡是影响2013年夏秋季长江下游地区延伸期强降水变化的一个主要因子.

关键词: 扩展复数自回归模型, 20—30d低频降水, 延伸期预报, 长江下游地区

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.199202

1 引言

延伸期预报是介于天气预报与气候预测之间的10—30 d的预报, 它同时具备短中期天气预报和气候预报的特点, 需要结合初始气象条件和海洋、大气以及气候的影响因素, 预测过程更加复杂.

延伸期时间尺度虽然超过逐日天气预报时效理论上限, 但仍然存在可预报的气象场特征. 延伸期的可预报性与1—3d短期天气预报、3—10d中期天气预报和气候预测的可预报性有着明显的差别, 如何针对延伸期的可预报特征进行有针对性的预报是提高预报技巧的基础^[1,2]. 随着对气候系统的认识不断加深, 尤其是对延伸期可预报信息源的认识不断深入, 如季节内振荡(intraseasonal oscillation, ISO)^[1,3,4]、北大西洋涛动(Northern Atlantic oscillation, NAO)^[5]、平流层和对流层的相互作用^[6]等, 为延伸期预报提供了发展基础. 当这

些特定的大气流型信号明显持续时, 对于10—30d的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相关区域的极端天气异常事件(如强降水、强升(降)温过程等). 直接从多变量、超高维、超长序列、高度耦合相关、高度时空属性的大量观测资料中提取一定时间尺度的与一定区域(如长江流域等)的极端天气时间关系密切的各种主要振荡型, 研究其不同的传播特征和强度的年际变化规律, 由动态数据来驱动复杂低频变化过程与系统的构建, 约简系统复杂度, 建立简化的预测模型, 可以显著延长低频分量和特定区域中对应的极端天气过程预报时效.

近年来, 对延伸期预报的研究已成为全球气象研究的热点也是难点^[2], 需要从多个角度和多种途径研究预报方法和模型以及可预报性. 总体而言, 延伸期天气预报的基本方法主要有动力模式^[7–24]和统计方法两类^[25–35]. 前者有大气环

* 国家自然科学基金项目(批准号: 41175082)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yqm0305@263.net

流模式和集合数值模式^[7-9]和可预报分量提取法^[10-14]以及利用历史资料信息对模式误差的订正方法^[15]等,而且随着资料增加和模型性能的提高,低频变化的预报时效逐步延长到15d左右.此外,通过建立气候网络,采用复杂网络方法^[19-21]研究气候网络的动力学统计特性(如通过关联矩阵分析方法研究时间滞后情况下全球温度场关联性的时空变化规律等),为10—30d延伸期动力学预报方法研究提供了一些重要参考信息^[22-24].由于天气和气候的数值预报模式存在各种不确定性,低频系统的延伸期预报误差仍然明显增长.这些不确定性的来源以及大气混沌本质和复杂的耦合过程正在深入研究之中.后者有基于大气低频信号演变的统计方法,主要包括主振荡型分析(principal oscillation pattern, POP)^[25-28]、奇异值分解(singular value decomposition, SVD)^[29]、奇异谱分析(singular spectrum analysis, SSA)^[30]、相似预报^[31]、回归分析^[33]、时间序列分析^[34]等.1990年以来这些试验研究迅速增加,部分方法已用于实时预测,一般平均预报时效达到20d左右.另外,还有神经网络模型^[36,37]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[38,39]、低频天气图^[40]、大气物理量分解^[41]以及各种方法的综合集成等方法也取得了一定的预报效果.

目前延伸期预报的主要方法之一是建立于ISO的研究成果的基础上的统计方法,而且这些统计模式对ISO的预报能力要比动力模式好.因此,在动力模式进一步得到改进之前,统计模式无疑是一种研究ISO可预报性的更加有效的途径之一.

作为高频天气变化的重要背景,周期为30—60d,20—30d和10—20d左右的ISO是联系天气与气候的直接纽带.所以,在国际上ISO被认为可以填补天气预报和季节预测之间的“预报缝隙”,可以作为进行延伸期(10—30d)预报的重要可预报性来源.近20年来国内在这方面也做了很多工作,取得了重要进展.研究表明,我国东部地区洪涝很大程度上与ISO有关,特别是长江中下游降水与低频振荡及其传播联系密切^[42].已有的还研究表明,不同时间尺度的ISO与长江下游地区强降水强度之间存在着选择性影响关系,仅20—30d ISO强度变化与长江下游强降水存在最显著正相关^[43].显著的20—30d低频降水的正位相或正负位相转换时,发生持续强降水的概率明显增大.所以研究并改进

20—30d降水分量延伸期预报方法和延长预报时效,不仅可以提高未来30d长江下游地区强降水预报精度,同时也有助于提高月时间尺度的降水距平短期气候预测能力.

对于低频降水分量的延伸期预报,目前国内外的大部分统计预测研究主要基于实数域的统计分析方法,如线性回归分析,相似分析等,较少考虑在复数域上低频变量的变化规律,因而丢掉了观测数据蕴含的一些重要的低频变化信息.为了更有效地分析气候场的时空变化特征,国外将实数经验正交函数分析(empirical orthogonal function, EOF)推广到复数域,提出复经验正交函数(complex empirical orthogonal function, CEOF)^[44]、复主振荡型(complex principal oscillation pattern, CPOP)^[45]分析等方法.这些方法通过Hilbert变换得到复数时间序列,构造一个复数矩阵进行分解,较好地识别主要的驻波和行波振荡系统的时空变化,克服了实数EOF不能揭示行波变化的弱点;并将这些复数振荡型用于低频变化预测研究,在一定程度上改进了预测精度.然而在实时的ISO的延伸期预测中,仍以实数域的统计分析方法为主,部分重要的低频变化信息被忽略.因此,在实施延伸期预测研究中,将低频变量序列从实空间转换到Fourier空间复数序列,对应的Fourier系数表征的整个物理场的特征(位相和振幅),分离出比实空间更多的低频信息^[46],建立复数统计模型进行预测,将是提高预报精度和延长预报时效的重要途径之一.本文将用850 hPa环流低频主成分和长江下游地区降水20—30d低频分量(与强降水过程密切相关)^[43],构造扩展复数矩阵,建立复数自回归预测模型(complex autoregressive model, CAR),对2013年长江下游地区降水低频分量进行独立预测试验,同时讨论了可预报性.

2 资 料

850 hPa经向风场选用NCEP/NCAR逐日再分析全球风场资料(2.5°×2.5°格点),逐日降水量采用长江下游地区(30.5°—32.0°N, 118.0°—122.5°E)中25个站平均值(MICAPS逐日站点降水资料),以上资料时间是1979年1月1日—2013年12月31日.用奇异谱分析(SSA)^[30,47],对长江下游逐日降水原始序列进行低通滤

波, 重建对应于20—30 d振荡信号的分量序列, 得到观测的长江下游降水低频分量序列, 低频降水的预测试验的时间是2013年1月1日—12月31日.

3 扩展复数自回归模型 (extended complex autoregressive model, ECAR)

设气象场中 M 个观测样本和格点为 N 的滤波资料阵 ${}_M\mathbf{S}_N = (s_{ij}), i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$. 对 ${}_M\mathbf{S}_N$ 进行主成分分析 (PCA)

$${}_M\mathbf{S}_N = {}_M\mathbf{T}_L {}_N\mathbf{V}_L^T, \quad (1)$$

其中 ${}_M\mathbf{T}_L, {}_N\mathbf{V}_L$ 分别为时间系数和特征向量构成的矩阵, ${}_M\mathbf{T}_L = (t_{i,j_1}), t_{i,j_1}$ 是环流低频主成分, 得到前 L 个主要空间模态和时间变化. 构造扩展资料阵 ${}_M\mathbf{F}_{L+1} = (f_{i,j_2}) = (t_{i,j_1} r_{lcj}), j_1 = 1, 2, \dots, L(r_{lcj}$ 是低频降水序列), $j_2 = 1, 2, \dots, L+1$. 对 ${}_M\mathbf{F}_{L+1}$ 的 $L+1$ 个时间序列进行一维 Fourier 变换

$$\tilde{f}_{i,l} = \sum_{j_2=1}^{L+1} \left[f_{i,j_2} \exp\left(-i \frac{2\pi}{L+1} (j_2-1)(l-1)\right) \right], \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} & \exp\left(-i \frac{2\pi}{L+1} (j_2-1)(l-1)\right) \\ &= \cos\left(\frac{2\pi}{L+1} (j_2-1)(l-1)\right) \\ & \quad - i \sin\left(\frac{2\pi}{L+1} (j_2-1)(l-1)\right), \end{aligned}$$

$i = \sqrt{-1}, i = 1, 2, \dots, M; j_2 = 1, 2, \dots, L+1; l = 1, 2, \dots, L+1$. 因此, 得到 $L+1$ 个复时间序列 $\tilde{f}_{i,l} = a_{i,l} + b_{i,l}I$, 构成扩展复数矩阵 (extended complex matrix, ECM) ${}_M\tilde{\mathbf{F}}_{L+1} = (\tilde{f}_{i,l}), l = 1, 2, \dots, L+1$; 其中每一个复数表示不同的波数, 这些 Fourier 系数表征整个扩展的物理场的主要特征 (位相和振幅). 对每一分量 $\tilde{f}_{i,l}$ 建立 p 阶复自回归模型 (CAR)

$$\tilde{f}_{i+1,l} = B_0 + \sum_{k=1}^p B_k \tilde{f}_{i-k+1,l}. \quad (3)$$

用复数最小二乘法^[46]得到参数的估计 $B_k, k = 0, 1, \dots, p$, 其中 $p = 1, 2, \dots$, 由 (3) 可得到 $M+1$ 时刻的预报值 $\hat{f}_{M+1,l} = \hat{a}_{M+1,l} + \hat{b}_{M+1,l}I$, 通过

一维 Fourier 逆变换得到各个低频分量的预报值 \hat{f}_{M+1,j_2} . 用 (3) 式递推 K 步, 可得到第 K 天的预报值 $\hat{f}_{M+K,j_2}, j_2 = 1, 2, \dots, L+1$, 其中 $\text{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1}) = \hat{r}_{lcj}(M+K)$ 是低频降水分量的预报值. (3) 式称为扩展复数自回归模型 (extended complex autoregressive model, ECAR), 其中参数估计采用复数最小二乘法, 是实数最小二乘法的推广, 能在复平面上描述各个低频变量的时间变化特征, 得到比实空间中更全面的变化信息, 较稳定地揭示观测的低频变量之间相关的时间演变.

4 预测试验

本文采用2012年1月1日—2013年12月31日 (样本长度 $M = 731$) 的长江下游地区逐日低频降水和全球 850 hPa 低频经向风场资料进行预测试验. 由于 SSA 对原始序列中的强弱信号变化定位精确, 没有经典滤波方法的边界效应, 所以非常适合于实时资料分析. 因此, 本文将实时的环流主分量 (PC) 和观测的逐日长江下游降水分别经 SSA 后, 由各自对应 T-EOF 各分量重建得到对应的 20—30 d 振荡信号的分量序列作为预测试验的基本资料, 构建 ECAR 模型预测 2013 年长江下游地区 20—30 d 降水分量的延伸期变化.

图 1 (a) 给出 2013 年 1—12 月长江下游地区逐日降水的时间演变, 表现为 5—10 月的 5 次区域性暴雨过程 (5 月 17 日, 6 月 7—8 日, 6 月 25—26 日, 7 月 5—6 日和 10 月 7—8 日), 降水过程中最大日平均雨量 (区域) 大于 50 mm. 此外, 还有 2 次强降水过程分别出现在 2 月上旬和中旬 (最大日平均雨量 (区域) 大于 25 mm). 另外, 7 月中旬到 9 月下旬, 强降水过程减弱 (大部分显著降水过程的最大日平均雨量在 10—30 mm 之间), 3—4 月和 10 月中旬到 12 月无强降水过程, 以中等降水过程为主 (最大日平均雨量在 5—20 mm 之间). 可见 1—12 月降水活跃期与中断期交替明显, 这种变化表现为极显著的季节内振荡, 且存在明显的季节变化, 2 月和 5—10 月季节内振荡显著. 图 1 (b) 是 2013 年长江地区逐日降水时间序列的非整数波功率谱分析^[48]. 从图中看发现, 通过 0.05 信度检验的显著周期 (非整数) 是 6—8 d, 10 d 的高频振荡和较显著的 10 d, 13 d, 16 d, 21 d 和 25 d 左右的低频振荡, 其中周期小于 10 d 的高频振荡与 13 d 和 16 d 左右的准双周振荡与

强降水频数年际变化关系不大(仅与一般降水过程变化有关),而21 d和25 d周期是与强降水过程密切相关的降水ISO,这种20—30 d ISO的强度与长江下游夏季强降水频数的正相关十分显著^[43].因此,2013年1—12月长江下游地区降水低频振荡中存在较显著的20—30 d振荡(尤其是5—10月),有利于夏半年长江下游地区暴雨过程频繁发生,夏秋季出现显著区域洪涝,特别是10月7—8日出现大暴雨过程,部分站点特大暴雨(日雨量大于250 mm),区域最大日平均雨量达到85 mm左右.下面对2013年1—12月长江下游地区降水20—30 d低频分量进行延伸期预报试验.

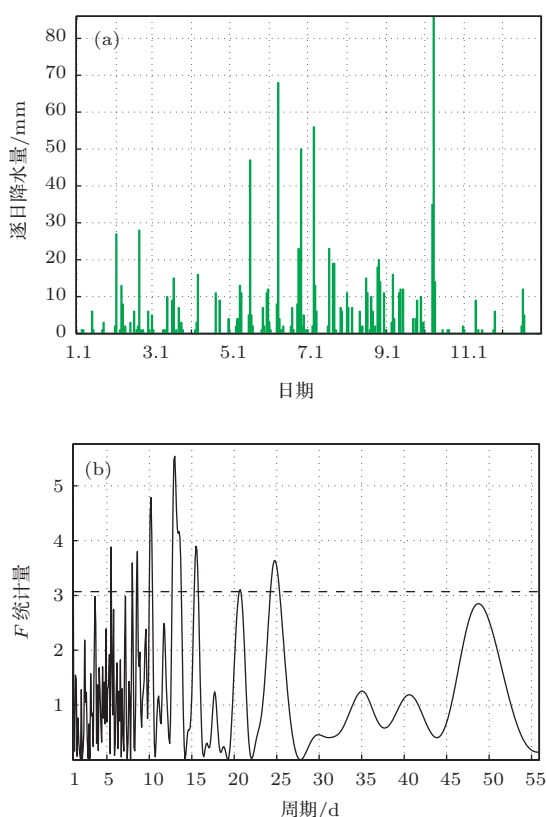


图1 (a)2013年1—12月长江下游地区逐日降水变化;(b)非整数波功率谱分析 F 统计量,图中水平虚线表示通过0.05显著性检验

过去的研究表明,ISO对长江下游地区(30.5° — 32.0° N, 118.0° — 122.5° E)强降水过程的作用具有时间尺度上的选择性^[43],仅20—30 d降水ISO强度与5—8月长江下游强降水频数年际变化存在最显著的正相关,这种强降水频数年际变化还表现为显著的准2年振荡.通过主振荡型分析(POP)^[25,26],发现在20—30 d的时间尺度上,5—8月全球850 hPa环流存在两个20—30 d主振荡型(POP1, POP2):一个是南半球中纬度

地区东移的绕球遥相关型(southern circumglobal teleconnection wave train, SCGT),另一个是西太平洋热带地区南移的季节内振荡型(tropical western Pacific, TWP).这两个POP型与长江下游20—30 d低频降水和强降水过程密切相关,因而是影响东亚副热带地区和南亚热带地区以及南半球中纬度地区强降水过程的最主要的2类ISO型^[43].所以本文采用全球范围内(90° N— 90° S, 0° — 360°)方差贡献较大的前7个850 hPa低频经向风场主成分PC1—PC7建立预测模型.图2给出了这7个主要空间模态(时间尺度是20—30 d,资料时间是1979—2011年,序列长度是12053 d,由Butterworth滤波得到全球850 hPa低频经向风场),解释方差分别是3.79%, 3.60%, 2.92%, 2.73%, 2.50%, 2.48%和2.26%.第1—6模态表现为沿纬向传播的波列结构,其中第1, 2和3, 4以及5, 6模态对应于3类不同的SCGT的传播,1, 2模态对应的波列在南半球副热带和中纬度地区传播(图2(a), (b)),而3, 4模态(图2(c), (d))和5, 6模态(图2(e), (f))对应的波列在南半球中高纬度地区传播,对应的时间系数也有显著的年际变化(图略),反映了南半球热带外SCGT传播方式的多样性.另外,第7模态主要表现为北半球中高纬度地区还存在较显著的绕球遥相关波列(图2(g)),与对流层高层的绕球遥相关型(circumglobal teleconnection, CGT)类似^[49],同时在3, 4模态中,北半球中高纬度地区也存在这种类似CGT的波列,表明CGT的传播也具有多样性.值得注意的是第6模态中存在从中国东部经北太平洋地区向北美到大西洋中纬度地区传播的一支波列(图2(f)),类似于夏季东京—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—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)^[50,51].这个波列变化与长江下游地区强降水过程的发生有直接联系,而其他类似SCGT的波列的传播(第1—5模态)主要影响南半球中纬度地区降水变化,这些20—30 d振荡也表现在半球尺度的涡动动能变化上,即斜压环状模(baroclinic annular mode, BAM),与斜压性和涡动热通量之间的双向反馈有关^[52,53].它们通过大气遥相关,也可以间接影响长江下游地区20—30 d降水低频分量变化和强降水过程的形成,是长江下游地区强降水延伸期预报的可预报性来

源之一。在每次独立预测试验中, 将2012—2013年逐日全球经向风投影到上述7个低频空间分布型得到前7个主成分PC1—PC7的观测值(包含逐日高频扰动), 然后将这7个观测的PC和同期的长江下游逐日降水投影到各自经SSA后的对应于20—30

d振荡的T-EOF上得到PC1, PC2, ..., PC7和长江下游逐日降水的20—30 d重构分量 r_{lcj} (T-EOF由1979—2011年的逐日资料计算) 构建扩展资料阵 $M\mathbf{F}_{L+1}$ ($L = 7$), 建立ECAR模型作2013年1—12月长江下游低频降水变化的延伸期预测。

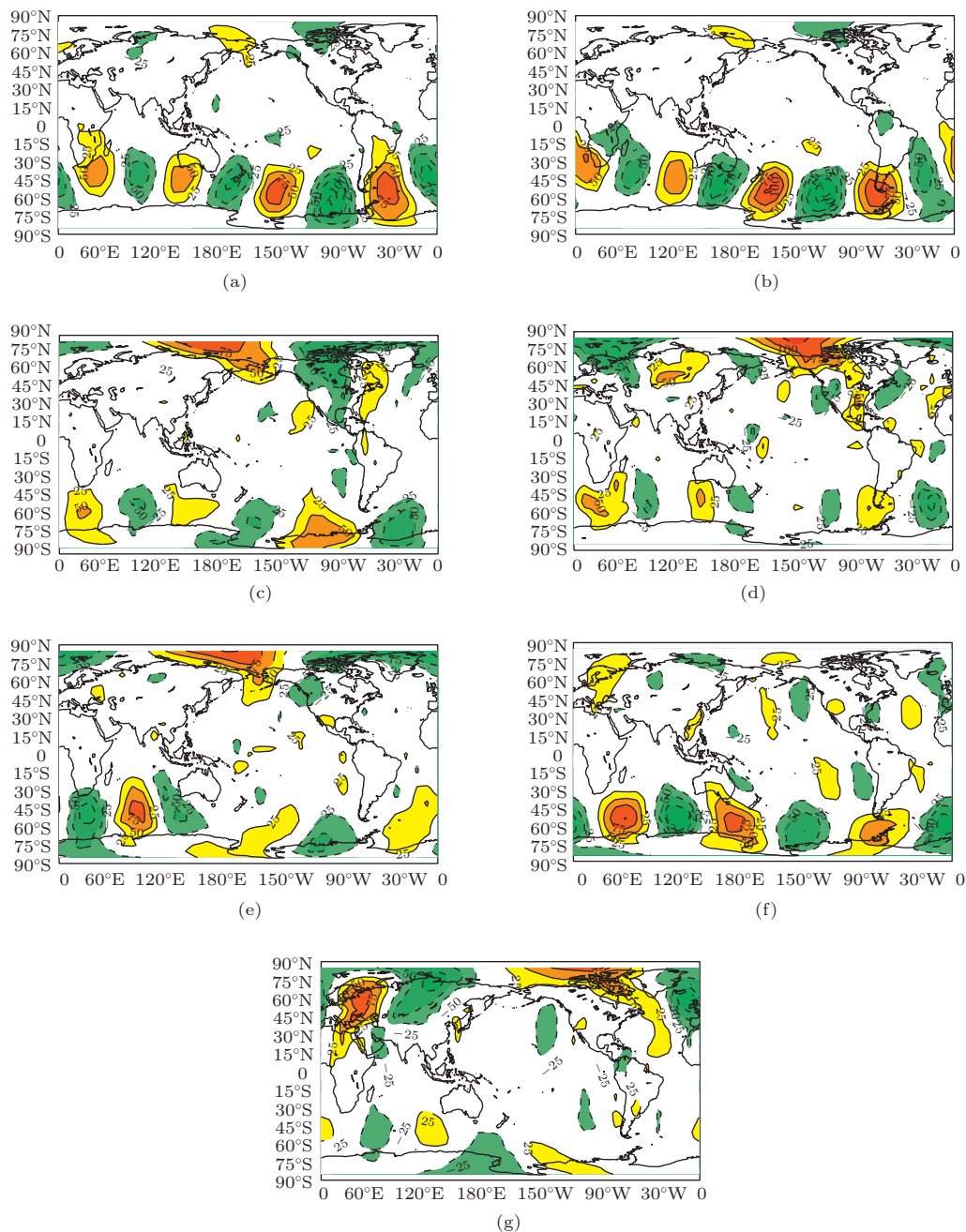


图2 1979—2011年全球850 hPa 20—30 d低频经向风场的主要空间模态 (a)—(g) 对应于第1—7模态 (图中数值已乘以1000, 虚线表示负值)

图3给出了观测的全球850 hPa经向风的低频主成分PC1—PC7和长江下游地区20—30d降水低频分量构成的数据阵建立ECAR模型作的2013年长江下游地区降水低频分量 r_{lcj} 的1—50 d预报的相关预报技巧(365次预测和实况

之间的相关系数)。它用限定记忆法, 保持子序列 N_0 不变, 滑动进行独立样本预测试验(365次预报, 初始时间分别是2012年12月7日, 12月8日, ..., 2013年12月5日, 12月6日, 预报未来50 d), 取复自回归模型的阶数 $p = 3$, 预报时

间 $\tau = 50$ d, 子序列长度 $N_0 = 50$ d(这种建模方案有利于适应主要低频振荡系统空间结构随时间的改变(从1月到12月), 在一定程度上反映各个低频分量之间联系随时间的变化). 从图中可以看出, 长江下游地区降水低频分量的相关预报技巧达 43 d (相关系数大于 0.29, 其显著性是 0.05, 考虑序列持续性的影响). 这表明 ECAR 能有效预测与两半球热带外地区环流 20—30 d 振荡传播有关的低频主分量和东亚副热带低频降水量未来 30—50 d 左右的变化. 图 4(a) 是逐日 15 d 低频降水量预报(虚线)和观测的低频分量(实线)的变化曲线, 预报技巧达到 0.85 (365 次预报, 初始时间分别是 2012 年 12 月 17 日, 12 月 18 日, ..., 2013 年 12 月 15 日, 12 月 16 日), 与上述 2013 年长江下游地区 5 次暴雨(或大暴雨)过程对应的显著的低频降水正位相变化均能较准确地预测, 尤其是与 6 月 7—8 日和 10 月 7—8 日大暴雨对应的低频降水量强非线性增加也能很好地预测. 而 25 d 低频降

水分量预报技巧逐步降低到 0.58(图 4(b), 365 次预报, 初始时间分别是 2012 年 12 月 7 日, 12 月 8 日, ..., 2013 年 12 月 5 日, 12 月 6 日), 但仍能很好预报出与 6 月 7—8 日和 10 月 7—8 日大暴雨对应的低频降水分量的非线性增长, 其预报的正位相变化与实况基本一致.

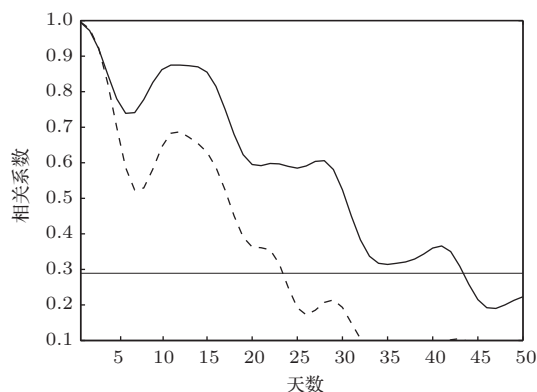


图 3 长江下游降水 20—30 d 低频分量 r_{1c_j} 1—50 d 预报的相关预报技巧(实线: ECAR 模型, 虚线: AR 模型, 图中水平实线表示达到 95% 的显著性水平)

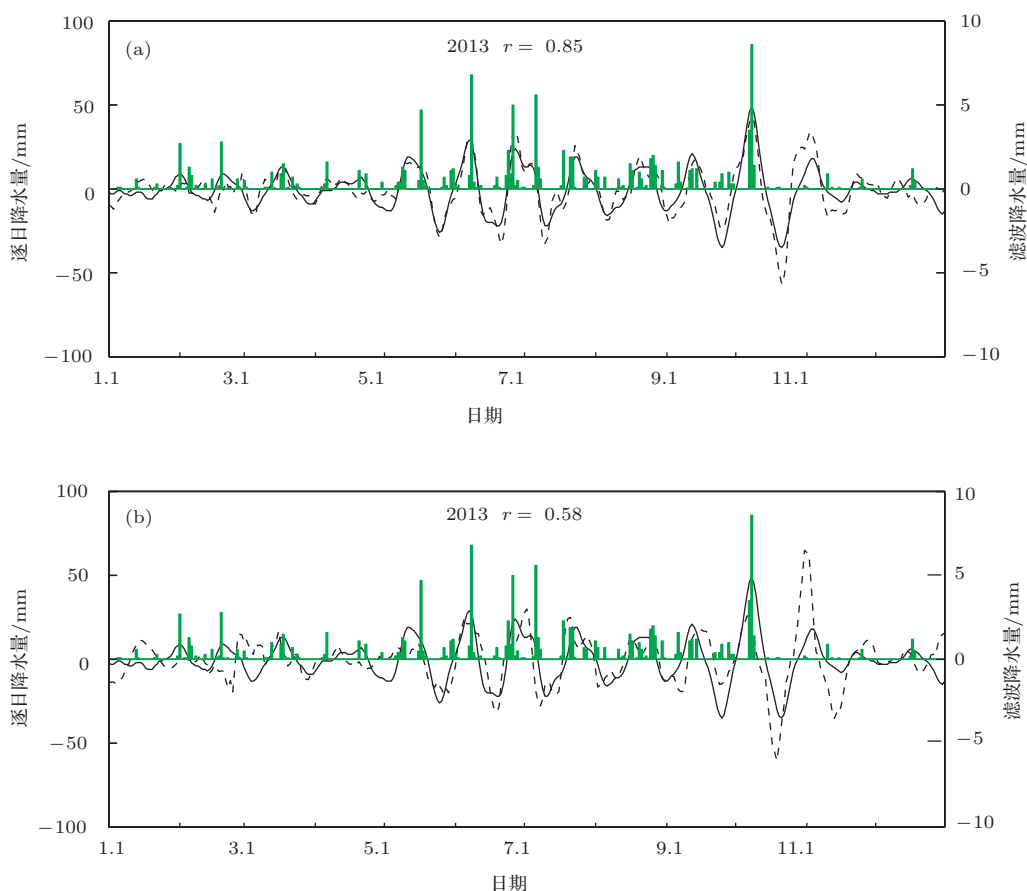


图 4 2013 年 1—12 月长江下游降水 20—30 d 低频分量的 ECAR 模型预报(实(虚)线分别表示实况(预报), 直方图表示长江下游地区逐日降水变化, 单位: mm; r 是预测和实况之间的相关系数) (a) 15 d 预报的初始时间分别是 2012.12.17, ..., 2013.12.16; (b) 25 d 预报(预报的初始时间分别是 2012.12.7, ..., 2013.12.6)

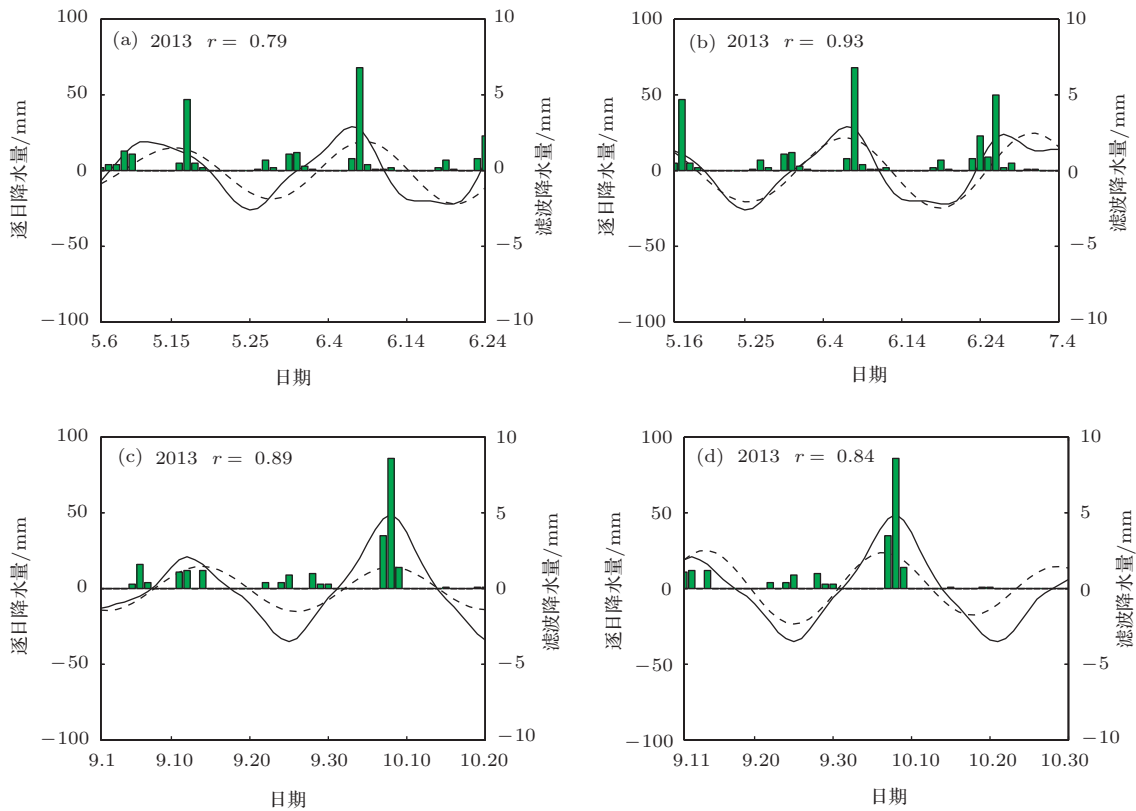


图5 2013年长江下游地区20—30 d低频降水1—50 d预报(虚线)和实况(实线) 初始时间: (a) 5月5日; (b) 5月15日; (c) 8月31日; (d) 9月10日(直方图表示长江下游地区逐日降水变化, 单位: mm, r 是预测和实况之间的相关系数)

另外, 图5(a), (b)和(c), (d)分别给出了2013年初夏和2013年秋季各2次预报结果(初始时间分别是5月5, 15日和8月31日, 9月10日, 图中 r 是预测和实况之间的相关系数, 即预报技巧). 从图5(a), (b)中可以发现, 初夏的这2次预报精度较高, 5月5日提前30—35 d预报出6月上旬后期正位相变化和低频分量非线性增长趋势(图5(a)), 预报技巧是0.79(考虑序列的持续性, 其显著性为0.05), 尤其是5月15日的50 d预报的技巧达到0.93(显著性是0.01), 精确地提前20—25 d预报出与6月7—8日大暴雨对应正位相的峰值状态出现的时间(图5(b)), 它体现了全球环流各种主要20—30 d振荡型的显著影响, 不仅反映了北半球中高纬度地区和北太平洋中纬度地区沿纬向传播的2类波列的不同影响, 而且反映了南半球中纬度地区环流和东亚环流在20—30 d时间尺度上的强相互作用(即南半球中纬度地区环流影响热带印度洋地区海气相互作用, 通过调控越赤道气流来影响东亚夏季降水). 对于秋季的2次预报效果也很好, 初始时间是8月31日和9月10日的预报技巧分别是0.89和0.84(显著性为0.05), 均准确预报10月上旬低频正位相变化, 10月5—8日处于峰值阶段(它反映了副

热带低频系统迅速增强, 有利于形成长江下游强降水过程), 其中后者提前27 d成功预报出与10月7—8日大暴雨(图6(a), (b))对应的低频降水分量强非线性增加(图5(d), 有利于长江下游大暴雨过程的形成), 前者只预报未来50 d低频分量稳定变化(图5(c)). 因此, ECAR模型可以在9月10日提前27 d左右预报出10月7—8日的长江下游地区大暴雨过程对应的低频降水分量强非线性增加. 这表

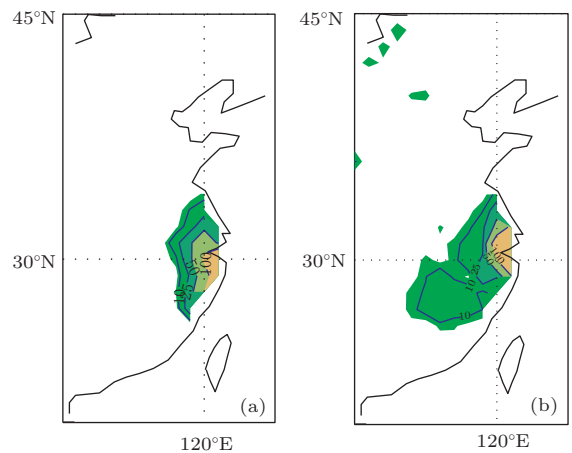


图6 2013年10月中国东部地区逐日降水空间分布 (a)10月7日; (b) 10月8日(单位: mm/d)

明南半球类似SCGT 波列活动对于2013年9—10月长江下游地区强降水形成仍起主导作用,是2013年秋季长江下游地区暴雨10—30 d 延伸期预报的主要可预报性来源之一.

此外,用观测的长江下游地区降水低频分量直接建立自回归模型(autoregressive model, AR)的预报时效只有23 d(图3中虚线),15 d和25 d的预报技巧只有0.63和0.19(图7(a), (b)),均没有预报出10月7—8日特大暴雨对应的低频降水分量的非线性增长,仅提前15 d预报出对应的较显著的正位相变化(图7(a)).对于6月7—8日的大暴雨过程,能提前15 d准确预报出对应的低频分量的非

线性增长,但它的25d预报中这种正位相误差较大,其峰值状态出现时间超前实况5—6 d(图7(b)).因此,在20—30 d时间尺度上,AR模型对于长江下游降水低频分量变化的预报能力明显小于ECAR模型的预报能力.主要原因是AR只反映了长江下游低频降水分量自身的变化信息(预测的稳定性较小),而ECAR模型通过Fourier变换,在复平面上反映全球环流主要低频主分量和长江下游降水低频分量之间的时滞变化信息,更好地描述气候系统的主要分量在低维空间中的变化信息,使得预报时效明显延长.

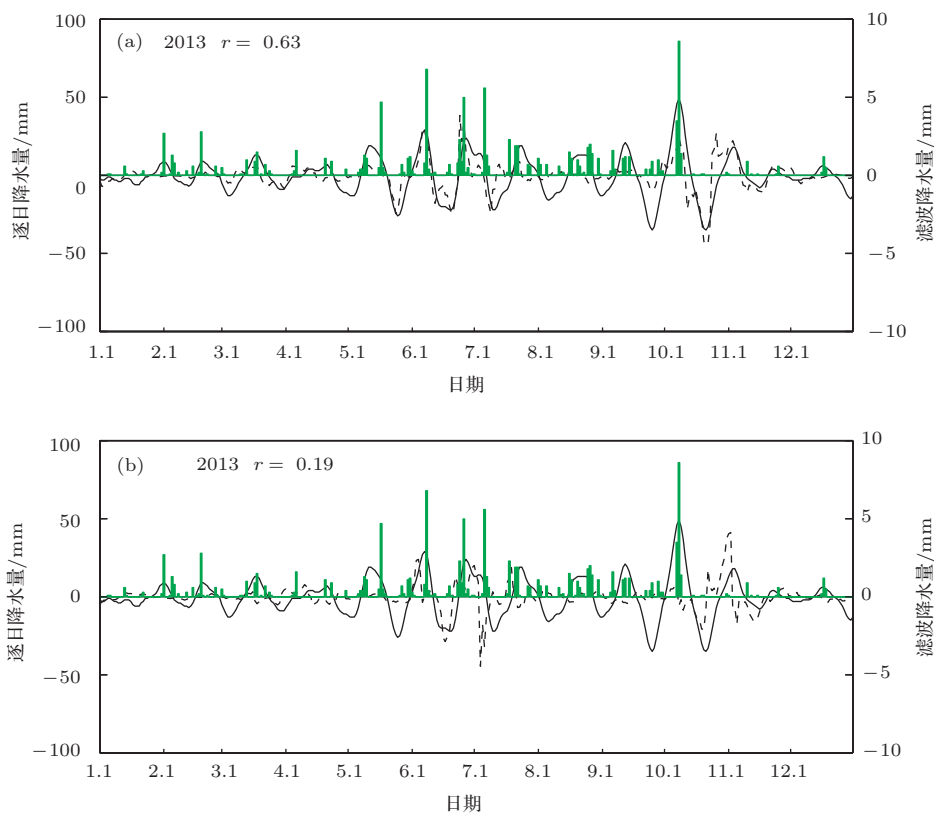


图7 2013年1—12月AR模型的预报(其他同图4)

以上预测试验表明,基于2013年东亚地区20—30 d ISO与全球主要ISO型之间的相互关系,在复空间上针对一种位相上的超前滞后关系,构建ECAR预报模型,能有效预测10—30 d延伸期长江下游地区降水低频分量的变化,同时将预测时效显著延长到43 d左右,很好地体现了低频降水与主要环流低频分量之间的相互联系,能为长江下游地区未来10—30 d强降水过程发生的预报提供重要依据.这种基于扩展低频率序列,通过Fourier变换构造

扩展复数矩阵的ECAR建模方法,也为展现气候系统内部分量之间相互作用的动力学过程提供了一种新的描述,有利于进一步解释气候系统的结构和性质,提高各种主要气候变化模态变化预测的精度和显著延长预报时效.

本文的研究主要是在复空间上基于东亚地区降水和全球环流主要低频分量之间较高的超前(滞后)相关关系(其中南半球地区低频分量的作用更显著),可以较好地作出长江下游低频降水分量的延伸期预报.对于实时ISO预报,由于用传统的滤

波方法提取ISO特征的过程中会在序列的前后各损失10 d左右的资料,明显影响时间序列的预测精度;而本文用SSA对原始序列作了低通滤波,不但滤去高频噪声,而且也滤去了非周期弱信号,从而增强了可预报性.由于SSA具有自适应滤波信号的重建功能,对主要信号变化定位精确,无传统滤波方法的边界效应,因而十分适合于实时延伸期预报,也是本文构建的ECAR模型预报时效明显延长的主要原因.另外,SSA还具有识别随时间不规则变化的振荡信号的能力,所以对降水低频分量的非线性变化也有一定预报能力.因此,通过ECAR模型预测延伸期的20—30 d降水低频分量非线性增大以及符号(位相转换)的变化,可以为未来30—50 d长江下游地区大暴雨发生的时段的预测提供更多重要信息.

5 结论和讨论

本文分析了2013年长江下游地区逐日降水的ISO变化特征,构建扩展复数自回归模型(ECAR),对影响2013年长江下游地区强降水过程的20—30 d降水低频分量进行延伸期逐日变化预测试验,得到如下结论:

1) 2013年长江下游地区降水存在极显著的21 d, 25 d左右和10 d, 13 d, 16 d左右的低频振荡周期,前者(20—30 d ISO)伴随着5—10月5次集中强降水过程(5月17日,6月7—8日,6月25—26日,7月5—6日和10月7—8日),这种显著的20—30 d振荡位相变化是造成强降水(暴雨或大暴雨)过程的主要原因;而后者(10—20 d ISO)的变化,有利于一般降水过程的形成.

2) 基于与两半球热带外地区20—30 d低频波列变化相关的全球850 hPa经向风低频主要模态,在复空间上建立ECAR预报模型可以有效预测2013年长江下游降水20—30 d低频分量延伸期的变化,能为长江下游延伸期强降水过程发生的时段预测提供显著的预报信号,较好地提前25—30 d预测与2013年6月7—8日和2013年10月7—8日2次大暴雨过程对应的低频分量的非线性增长过程,将长江下游强降水事件的预报时效进一步延长到43 d左右;而用长江下游地区降水低频分量直接建立AR模型的预报时效只有23 d左右.它表明在复空间上,分离出比实空间更多的低频变化信息,构造的CAR模型能更稳定地描述低频分量之间的时

滞相关,显著提高预测精度和延长预报时效.这种基于低频序列扩展复数矩阵的ECAR建模方法,也为展现气候系统内部相互作用的动力学过程提供了崭新的描述.

预测20—30 d降水ISO分量非线性增大以及符号的变化,可以估计长江下游大暴雨发生的时段.而这种分量减弱时,在低频变化中形成的强降水过程明显减少,一般以中等降水过程为主.应用SSA识别非规则振荡的变化,基于重构分量建立的ECAR模型对未来25—30 d长江下游降水低频分量的非线性变化也有一定预测能力,可以进一步提高极端降水事件强度和发生时段的预测精度.

参考文献

- [1] Waliser D E, Lau K M, Stern W, Jones C 2003 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **84** 33
- [2] Hoskins B 2013 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **139** 573
- [3] Madden R A, Julian P R 1971 *J. Atmos. Sci.* **28** 702
- [4] Zhang C 2005 *Rev. Geophys.* **43** doi:10.1029/2004RG000158
- [5] Cassou C 2008 *Nature* **455** 523
- [6] Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, Dunkerton T J, Charlton A J, O'Neill A 2003 *Science* **301** 636
- [7] Miyakoda K, Sirutis J, Ploshay J 1986 *Mon. Wea. Rev.* **114** 846
- [8] Vitart F, Molteni F 2010 *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **136** 842
- [9] Fu X, Wang W Q, Lee J Y, Wang B, Vitart F 2013 *J. Clim.* **26** 4186
- [10] Chou J F, Zheng Z H, Sun S P 2010 *Scientia Meteor. Sin.* **30** 569 (in Chinese) [丑纪范, 郑志海, 孙树鹏 2010 气象科学 **30** 569]
- [11] Feng G L, Sun S P, Zhao J H, Zheng Z H 2013 *Sci. China Earth Sciences* **56** 1576
- [12] Wang K, Feng G L, Zeng Y X, Wang X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 129202
- [13] Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, Chou J F 2013 *Sci. China D* **43** 594 (in Chinese) [郑志海, 黄建平, 封国林, 丑纪范 2013 中国科学 **43** 594]
- [14] Wang Q G, Chou J F, Feng G L 2014 *Sci. China Earth Sciences* **44** 343 (in Chinese) [王启光, 丑纪范, 封国林 2014 中国科学地球科学 **44** 343]
- [15] Ren H L, Chou J F 2005 *Acta Meteor. Sin.* **63** 988 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2005 气象学报 **63** 988]
- [16] Zhang Q, Shin C S, van den Dool H M, Ming C M 2013 *Clim. Dyn.* **41** 2231
- [17] Chen B M, Ji L R, Yang P C, Zhang D M, Wang G L 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 513 (in Chinese) [陈伯民, 纪立人, 杨培才, 张道民, 王革丽 2003 科学通报 **48** 513]
- [18] Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, Chou J F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 199203 (in Chinese) [郑志海, 封国林, 黄建平, 丑纪范 2012 物理学报 **61** 199203]

- [19] Tsonis A A, Swanson K L, Roebber P J 2006 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **87** 585
- [20] Tsonis A A, Kyle L S 2008 *J. Clim.* **21** 2990
- [21] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng A X 2011 *Chin. Phys. B* **20** 079201
- [22] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强, 周磊, 支蓉, 封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [23] Zhi R, Feng G L, Gong Z Q, Zhou L 2010 *Acta Meteor. Sin.* **68** 501 (in Chinese) [支蓉, 封国林, 龚志强, 周磊 2010 气象学报 **68** 501]
- [24] Zhi R, Gong Z Q, Wang Q G, Xiong K G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 089202 (in Chinese) [支蓉, 龚志强, 王启光, 熊开国 2011 物理学报 **60** 089202]
- [25] Hasselmann K 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 11015
- [26] von Storch H, Bruns T, Fischer-Bruns I, Hasselmann K 1988 *J. Geophys. Res.* **93** 11022
- [27] von Storch H, J S Xu 1990 *Clim. Dyn.* **4** 175
- [28] Yang Q M 1998 *J. Appl. Meteor. Sci.* **9** 345 (in Chinese) [杨秋明 1998 应用气象学报 **9** 345]
- [29] Waliser D E, Jones C, Schemm J K, Graham N E 1999 *J. Clim.* **12** 1918
- [30] Mo K C 2001 *Mon. Wea. Rev.* **129** 802
- [31] Xavier P K, Goswami B N 2007 *Mon. Wea. Rev.* **135** 4149
- [32] Wheeler M C, Hendon H H 2004 *Mon. Wea. Rev.* **132** 1917
- [33] Jiang X, Waliser D E, Wheeler M C, Jones C, Lee M I, Schubert S D 2008 *Mon. Wea. Rev.* **136** 1940
- [34] Maharaj E A, Wheeler M C 2005 *Int. J. Climatol.* **25** 1611
- [35] He J H, Lin H, Wu Z H 2011 *J. Geophys. Res.* **116** D03109 doi:10.10292010JD014787
- [36] Love B S, Matthews A J 2009 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **135** 1471
- [37] Borah N, Sahai A K, Chattopadhyay R, Joseph S, Abhilash S, Goswami B N 2013 *J. Geophys. Res.* **118** 9022
- [38] Love B S, Matthews A J, Janacek G J 2008 *J. Clim.* **21** 5318
- [39] Liang P, Ding Y H 2012 *Chin. J. Atmos. Sci.* **36** 102 (in Chinese) [梁萍, 丁一汇 2012 大气科学 **36** 102]
- [40] Sun G W, Li Z K, Xin F, He J H 2013 *Chin. J. Atmos. Sci.* **37** 945 (in Chinese) [孙国武, 李震坤, 信飞, 何金海 2013 大气科学 **37** 945]
- [41] Qian W H 2012 *Chin. J. Geophys.* **55** 1439 (in Chinese) [钱维宏 2012 地球物理学报 **55** 1439]
- [42] Yang Q M 2012 *Adv. Earth Sci.* **27** 876 (in Chinese) [杨秋明 2012 地球科学进展 **27** 876]
- [43] Yang Q M 2009 *Sci. China D* **52** 1485
- [44] Barnett T P 1983 *Mon. Wea. Rev.* **111** 756
- [45] Bürger G 1993 *J. Clim.* **6** 1972
- [46] Gu X Q, Kang H W, Cao H X 2006 *Prog. Nat. Sci.* **16** 307
- [47] Yang Q M 2007 *Marine Sci.* **31** 43 (in Chinese) [杨秋明 2007 海洋科学 **31** 43]
- [48] Schickedanz P T, Bowen E G 1977 *J. Appl. Meteorol.* **16** 359
- [49] Ding Q H, Wang B 2005 *J. Clim.* **18** 3482
- [50] Ding Y H, Liu Y Y 2008 *Acta Meteor. Sin.* **66** 670 (in Chinese) [丁一汇, 刘芸芸 2008 气象学报 **66** 670]
- [51] Lau K M, Weng H Y 2002 *J. Meteor. Soc. Japan* **80** 1309
- [52] Thompson D W J, Barnes E A 2014 *Science* **343** 641
- [53] Thompson D W J, Woodworth J D 2014 *J. Atmos. Sci.* **71** 1480

Extended complex autoregressive model of low-frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze river valley for extended range forecast in 2013*

Yang Qiu-Ming[†]

(*Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210009, China*)

(Received 24 February 2014; revised manuscript received 22 May 2014)

Abstract

Low-frequency rainfall over the lower reaches of Yangtze river valley (LYRV) and the principal component of the global 850 hPa meridional wind anomalies are adopted to construct an extended complex autoregressive (ECAR) model, which can be applied to the daily forecasting of the low-frequency rainfall component over LYRV in 2013 for the extended range forecast. Results show that this model for the forecasting of the 20–30-day rainfalls over LYRV has a good predictive skill up to 43 days, which is able to well predict the nonlinear enhancement processes of low-frequency rainfall component associated with heavy rainstorm process. And the correlation skill of the extended range forecast produced from the ECAR model is superior to the autoregressive model (AR) forecast. This method, in which the complex autoregressive (CAR) models are set up via constructing the extended complex matrix (ECM) for the principal low-frequency time series, provides a new description for the emerging dynamic processes of the interactions between components in climate systems. Based on the development and evolution of the principal 20–30-day oscillations of the global circulation, it is help for better forecast the process of heavy rainfall in the early October of 2013 over LYRV for times ahead of about 27 days. In these low-frequency variabilities, the 20–30-day oscillation in extratropics over the Southern Hemisphere is one of the main factors causing the changes of the heavy rainfall over LYRV for the extended range during the summer and fall in 2013.

Keywords: extended complex autoregressive model, low-frequency rains of 20–30 days, extended range forecast, the lower reaches of Yangtze river valley

PACS: 92.60.Wc

DOI: [10.7498/aps.63.199202](https://doi.org/10.7498/aps.63.199202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41175082).

[†] Corresponding author. E-mail: yqm0305@263.net