

基于扩展复数自回归模型的长江下游降水准 2 a 振荡年际预测研究

杨秋明*

南京气象科技创新研究院,江苏南京 210041

* 联系人, E-mail:yqm0305@263.net

2024-07-25 收稿, 2025-02-11 接受

国家自然科学基金项目(41175082)

摘要 利用 1979—2008 年逐月长江下游降水量的准 2 a 分量 (tropospheric biennial oscillation, TBO) 和全球 50 hPa 低频经、纬向风主成分的准 2 a 分量 (quasi-biennial oscillation, QBO), 构建了长江下游地区降水准 2 a 分量的年际预测的时变扩展复数自回归模型 (extended complex autoregressive model, ECAR)。对于 12 a (2009—2020 年) 的长江下游地区逐月降水 TBO 低频分量, 进行独立的实时年际预报试验。结果表明, 对于准 2 a 时间尺度的长江下游低频降水, 这种复数预测模型的预测时效可达 15 mon 左右, 能提前 1 a 以上预报, 为夏季长江下游地区的洪涝过程提供十分重要的预测背景信息, 预报能力优于经典自回归模型 (autoregressive model, AR)。这种数据驱动的简化的时变 ECAR 预测方法基于长江下游降水和全球平流层环流主要模态准 2 a 分量在频率空间中的协同演化新规律, 较好地描述了气候系统中低频变化的多样性, 使预测的不确定性减弱, 显著提高了预测的稳定性, 并延长了对流层 TBO 的预测时效。

关键词

准 2 a 振荡;
50 hPa 风场;
月降水量;
长江下游;
ECAR 模型;
年际预测

大气环流和气候要素年际变化中存在极显著的准 2 a 周期振荡 (quasi-biennial oscillation, QBO), 国内外学者在以往研究中发现了全球范围内平流层纬向风、对流层大气环流及大气活动中心的准 2 a 变化特征和机制 (Reed et al., 1961; Belmont and Dartt, 1968; 李崇银和龙振夏, 1992; Baldwin et al., 2001; 陈文等, 2004)。在众多研究中, 通常认为全球热带平流层纬向风的 QBO 信号是由热带混合 Rossby 和 Kelvin 波通过波流相互作用驱动 (通过波流相互作用)。但也有一些研究表明 QBO 信号并不能用这 2 种波完全解释, 还存在其他类型的波 (如重力波) 的作用 (Baldwin et al., 2001)。此外, 对流层中季风区准 2 a 振荡 (tropospheric biennial oscillation, TBO) 分量的发生主要是海-陆-气相互作用的结果, 同时与平流层 QBO 也有一定联系 (李崇银和龙振夏, 1997; Meehl, 1997; Chang and Li, 2000; Chang et al., 2000; 黄荣辉等, 2006; Ding,

2007; 李崇银等, 2010; 刘芸芸等, 2013), 其中热带海洋与大气的贡献较为显著, 欧亚中高纬度雪盖的贡献也很重要 (杨秋明, 1997)。亚洲冬夏季风环流的这种 TBO 与厄尔尼诺-南方涛动 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 的准 2 a 振荡分量同样有关 (Yasunari, 1991; Shen and Lau, 1995; Tomita and Yasunari, 1996; Chang et al., 2000); 另外, 定常行星波的活动还可以使平流层的 QBO 影响到对流层 (黄荣辉等, 2018), 导致东亚冬夏季风强度的变化 (李崇银和龙振夏, 1992, 1997), 进而可能影响 TBO 的产生。但是通过主振荡型 (principal oscillation pattern, POP; Hasselmann, 1988) 分析发现, 在准 2 a 时间尺度上, 平流层风、赤道海平面纬向风和赤道海温资料中的 QBO 和 SO (Southern Oscillation) 是两种互相独立变化的信号 (Xu, 1992)。因此, 关于导致对流层 TBO 发生的动力学机制复杂多样, 同时可能有多种不同的平流层 QBO 影响对流层天气气候的

引用格式: 杨秋明, 2025. 基于扩展复数自回归模型的长江下游降水准 2 a 振荡年际预测研究 [J]. 大气科学学报, 48(6): 976-989.

Yang Q M, 2025. Interannual prediction of the quasi-biennial component of rainfall over the lower reaches of Yangtze River valley using an extended complex autoregressive model [J]. Trans Atmos Sci, 48(6): 976-989. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240725001. (in Chinese).

路径和机理。近 30 多年来,已有很多研究指出我国夏季降水存在着较显著的准 2 a 周期振荡(黄嘉佑,1988;廖荃荪和王永光,1998;杨秋明,2006;张璟等,2014),特别是位于东亚副热带季风区的长江下游地区降水呈现极显著的 TBO。在较显著的大气环流准 2 a 周期变化的一定位相中有利于产生强降水的天气尺度系统的频繁活动,如长江下游强降水频数的准 2 a 变化(杨秋明,2009)和大气季节内振荡(*intraseasonal oscillation, ISO*)的增强,例如平流层 QBO(谢义炳等,1963)对热带大气 30~60 d 振荡的影响(Zhang and Zhang, 2018),形成有利于强降水天气系统生成和发展的动力、热力以及水汽条件,是导致影响区域(如长江下游地区)夏季持续性暴雨和洪涝过程重要原因之一。由于平流层-对流层相互作用(黄荣辉等,2018),这些东亚季风区环流和降水 TBO 与平流层 QBO 也有密切联系(李崇银和龙振夏,1992, 1997; 廖荃荪和王永光, 1998)。平流层大气环流的 QBO 信号可以向下传播到对流层(Baldwin et al., 2003),并影响对流层的天气和气候。因此,这些较长时间尺度平流层大气环流异常的下传信号也是提高对流层大气环流(例如东亚夏季风区环流)10~30 d 延伸期天气预报或 15~60 d 次季节以及季度和年际气候预测水平(徐邦琪等,2020,2024; 黄小猛等,2024; 王会军等,2024; 伍继业等,2024)的一个潜在预报因子。

全球准 2 a 振荡涉及中低纬度系统的相互作用、南北半球系统的相互作用、对流层和平流层环流的相互作用等(Baldwin et al., 2001),同时存在显著的年际和年代际变化。因此,准 2 a 振荡具有多空间尺度相互作用的复杂性。目前气候数值模式已对平流层热带 QBO 进行历史回报试验,表明预报时效可达 12 mon 左右(Scaife et al., 2014)。但大多数气候数值模式尚不能较好描述平流层 QBO 和对流层 TBO 之间的相互作用,因而不能自发地模拟出其他 QBO。另外,诸如中断事件异常现象(Osprey et al., 2016)的出现,为 QBO 的预测带来了新的挑战。所以,不同类型的 QBO 的精确模拟仍需要进一步研究。一方面,通过研究重力波参数化方案、调整模式空间分辨率和模式顶高度变化、低耗散对改进 QBO 的模拟的影响(Barton et al., 2019),才能逐步改善实时 QBO 的预测精度。另一方面,由于气候系统具有部分无法拆分还原、多种时间尺度的分量之间的相互作用不稳定性(王会军,1997)、难以无限逼近等复杂特征,所以 QBO 各种特性(如周期和

振幅等)的长期变化趋势和突变机制尚未形成统一的结论。此外,观测数据处理和数值模式参数化方案不确定性来源和各种耦合过程等也有待深入研究。因此,建立更精确的能够全面刻画全球从对流层到平流层的主要准 2 a 振荡模态活动与变异的具有普适性的动力学模型仍相当困难。由于气候数值预测的数据处理技术和数学、物理基础理论尚不完善,全球 QBO 和 TBO 较长时效的季节到年际变化的动力预测误差较大,尤其是对流层 TBO 的预测存在很大的不确定性,所以目前气候数值模式的性能和预报时效仍然不能满足年际气候预测的需求。然而,近 20 多年来气象多平台探测技术的飞速发展,各种历史数据和实时观测数据及再分析数据迅速增加,这些具有高度数据相关性的多种观测资料,包含了复杂的自然变化信息及其相关的时间变化。随着数据分析技术的发展,使用数据的能力已有较显著突破,数据中的更多的 QBO 和 TBO 变化规律将被更好地揭示和应用。可以间接地从这些大量数据中提取实时 QBO 信号进行分析、建模,实现有关各种 QBO 模态变化和相互作用特性的模拟和预报。因此,针对全球 QBO 和 TBO 活动的多样性,剖析准 2 a 时间尺度的对流层和平流层 QBO 的影响地区(如长江下游地区)降水 TBO 变化的不同类型的协同作用,选择不同的准 2 a 振荡型有关的主分量作为因子,构建数据驱动的简化的模型进行气候预测,是显著提高准 2 a 振荡分量年际预测精度的主要途径之一。这种数据驱动的气候预测方法可以提取较多的 QBO 实时变化信息改进年际预报精度,对于提高平流层 QBO 或对流层 TBO 影响地区(如其峰值位相夏季长江下游地区)持续暴雨洪涝气候预报准确率十分重要。由于东亚季风系统年际振荡复杂多变,目前关于长江下游地区降水 TBO 分量的预测研究仍然很少。本文从较长序列(1979—2020 年)的历史资料中,提取准 2 a 时间尺度的全球 50 hPa 环流 QBO 和长江下游月降水 TBO 分量,基于这些平流层 QBO 和对流层 TBO 分量之间的不同协同作用,由数据驱动构建扩展复数自回归模型(*extended complex autoregressive model, ECAR*)(杨秋明, 2014,2016; Yang, 2018),对 2009—2020 年长江下游降水 TBO 分量进行独立年际气候预测试验,并研究这种对流层 TBO 的可预报性。

1 数据和方法

长江下游地区逐月降水量资料采用长江下游地

区($118.0^{\circ}\sim122.5^{\circ}\text{E}$, $30.5^{\circ}\sim32.0^{\circ}\text{N}$; 图 1a) 25 站平均值, 全球逐月风场选用 NCEP/NCAR 再分析资料 (NCEP/NCAR Reanalysis 1), 分辨率为 $2.5^{\circ}\times2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996), 资料时间是 1979 年 1 月—2020 年 12 月 (共 42 a)。由于全球 50 hPa 风场的准 2 a 变化最显著 (陈文等, 2004), 本文主要采用全球逐月 50 hPa 纬向和经向风场分析全球平流层各种 QBO 型变化。首先, 用非整数波功率谱分析研究长江下游逐月降水原始序列的准 2 a 周期变化特征; 其次, 实时奇异谱分析 (real-time singular spectrum analysis, RSSA), 即实时 SSA 滤波 (Yang, 2018; 杨秋明, 2021), 得到降水准 2 a 分量实时序列 (长江下游降水 TBO 实时指数)。这种 RSSA 在实时 TBO 信号提取时, 用 T-EOF (temporal empirical orthogonal functions, 时间变化型经验正交函数) 预测的数据 (Lee, 2002), 延长序列右端长度得到延拓序列, 投影到对应于准 2 a 变化的奇异谱分析 (singular spectrum analysis, SSA) 的 T-EOF, 得到低频重构分量 (Vautard et al., 1992)。滤波时, 仅使用初始时间 t_0 以前的数据, 经典 SSA 滤波的边界效应显著减弱, 提高了边界附近的滤波值精度, 较准确地提取序列中准 2 a 振荡位相和振幅变化信息, 十分适合于实时气候预测。RSSA 滤波提取的准 2 a 变化信号更接近观测数据中真实的 QBO 或 TBO 的信号, 随机干扰得到了有效的衰减, 序列的自相关性明显增强, 有利于提高可预报性。另外, 在相关显著性检验中, 采用有效自由度 (Chen, 1982) 进行显著性检验 (考虑滤波序列持续性的影响)。由主成分分析 (principal component analysis, PCA) 得到的全球 50 hPa 纬向和经向风场准 2 a 时间尺度的主要空间模态的时间系数, 并用 RSSA 得到对应于纬向和经向风场各种空间模态主要的准 2 a 振荡信号的分量序列。将上述观测的长江下游降水 TBO 分量序列和全球 50 hPa 逐月纬向和经向风 QBO 主分量, 构建扩展复数自回归模型 (ECAR) (杨秋明, 2014; Yang, 2018) 进行独立预测试验, 预测长江下游降水 TBO 分量年际变化。这种 ECAR 是低频分量预测模型 (low frequency component forecasting, LFCF) 的优化 (杨秋明, 2016), 它是数据变换后得到的复数据集中一组各自独立的复数自回归模型。长江下游地区降水 TBO 分量的独立预报试验时间是 2009 年 1 月—2020 年 12 月。

2 1979—2020 年长江下游地区降水准 2 a 振荡 (TBO) 的变化

对 1979 年 1 月—2020 年 12 月长江下游逐月降水序列做非整数波功率谱分析, 发现存在极显著的准 2 a 振荡周期 (即 25 mon 的周期), 另一个是 1.3 a 左右振荡周期 (图 1b)。因此, 近 40 年来, 在长江下游降水年际变化中, 准 2 a 周期 (TBO) 占主导地位, 是影响长江下游旱涝变化重要因子之一。为了实时监测长江下游地区降水准 2 a 分量的变化, 通过 RSSA 构建了一个长江下游降水 TBO 实时指数。图 2a 是基于 1979 年 1 月—1998 年 12 月数据经 SSA 提取的前 2 个 T-EOF, 它对应显著的准 2 a 周期变化, 其中 T-EOF1 (实线) 和 T-EOF2 (虚线) 的方差贡献分别是 13.1% 和 13.0%。将 1999 年 1 月—2020 年 12 月长江下游降水量投影到 T-EOF1 和 T-EOF2 得到前两个重构分量 R_{c1} (用 R_{c1} 表示) 和 R_{c2} (用 R_{c2} 表示), 这 2 个分量相加得到长江下游降水准 2 a 分量 $R_{c1}+R_{c2}$, 定义为长江下游降水 TBO 的实时指数 I_{TBO} : $I_{\text{TBO}}=R_{c1}+R_{c2}$ (图 2b 中蓝色实线)。由于用经过 T-EOF 延拓序列投影得到的 SSA 低频重构分量 (Yang, 2018) I_{TBO} 能较精确反映实时 TBO 分量变化信息。这个 TBO 分量方差占年际变化分量 (月降水序列的 12~120 mon 滤波序列) 方差的 22.4%, 是长江下游降水年际变化中最主要的振荡之一。图 2c 进一步给出 1979—2020 年 6—8 月长江下游降水 TBO 分量 I_{TBO} 和 6—8 月降水量的变化, 它们之间的相关系数是 0.44 (通过 0.05 信度的显著性检验, 考虑序列持续性的影响), 表明 TBO 分量与夏季降水存在极显著的正相关。当 I_{TBO} 正值显著增加时 (峰值位相), 有利于长江下游夏季发生洪涝。

图 2b 显示了 1999—2020 年 I_{TBO} 和长江下游逐月降水变化。可以发现, 近 22 年来大部分时段 I_{TBO} 的准 2 a 周期长度稳定变化, 但强度表现为显著的不规则演变, 峰值位相对应的夏季月份长江下游降水明显偏多, 发生较显著的洪涝灾害。由图 2c 发现, 1999—2003 年 TBO 强度逐步减弱, 2004—2008 年夏季降水 TBO 几乎消失, 而 2009—2020 年呈较显著的增强趋势, 特别是 2017 年以来增强明显, 2020 年为近 20 年的最强, 达到近 20 年的 TBO 平均分量的最大值 (对应于长江下游夏季特大洪涝)。值得注意的是 2015—2016 年平流层 QBO 的位相中断 (Osprey et al., 2016) 时, 降水 TBO 位相也发生中

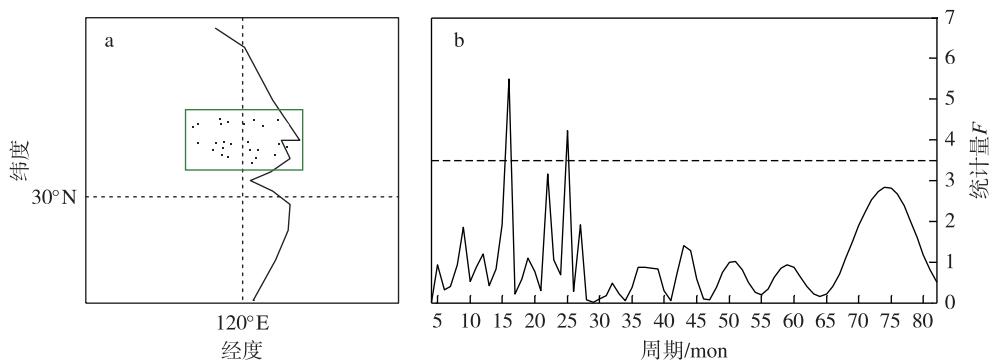


图 1 1979—2020 年长江下游地区(a; 矩形区域表示长江下游区域)月降水量非整数波功率谱分析(b; 水平虚线代表信度为 0.05 的显著性水平检验线)

Fig.1 (b) Non-integer spectrum power spectral analysis of monthly precipitation in (a) the lower reaches of the Yangtze River valley (LYRV) during 1979—2020. The 0.05 significance level is indicated by the horizontal dashed line

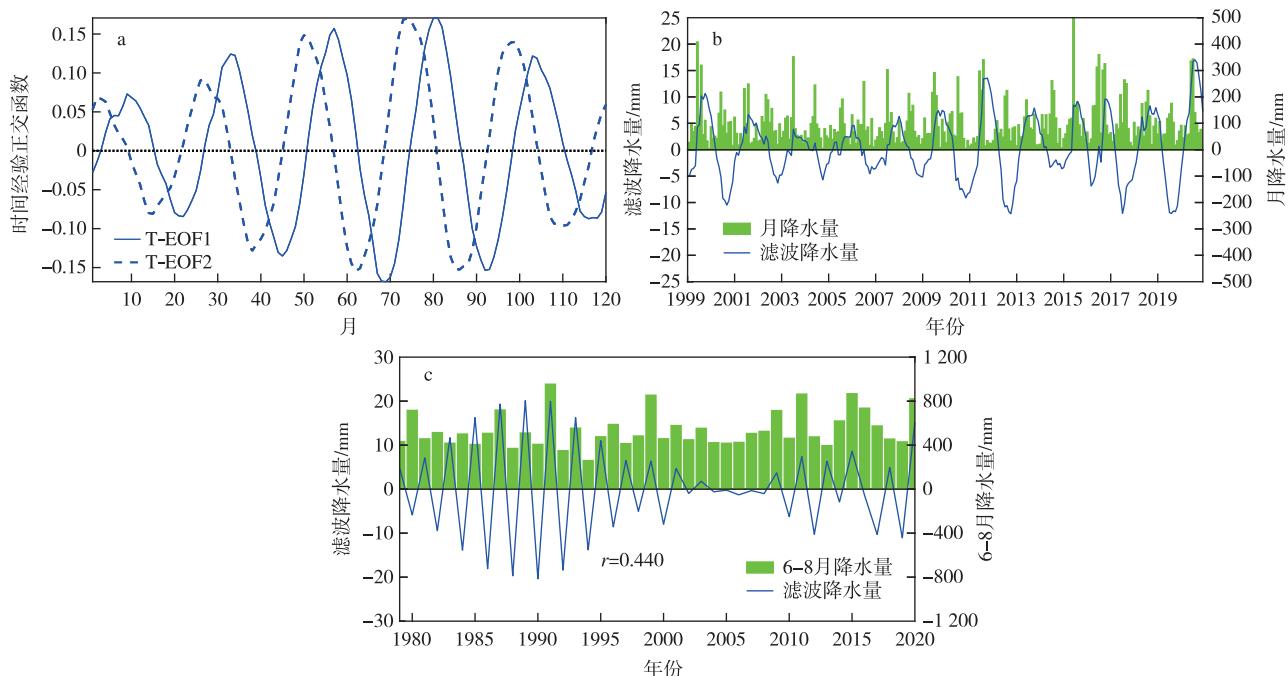


图 2 长江下游地区月降水量 TBO 年际变化: (a) 1979—1998 年长江下游地区月降水量 T-EOF1(实线)和 T-EOF2(虚线); (b) 1999—2020 年长江下游地区月降水量实时 TBO 分量(I_{TBO} ; 图中柱状表示长江下游地区逐月降水变化; 单位: mm); (c) 1979—2020 年夏季 6—8 月长江下游地区降水 TBO 分量和降水量变化(实线表示 6—8 月平均降水 TBO 分量; 柱状表示长江下游地区 6—8 月降水量; 单位: mm; r 是降水 TBO 分量和降水量之间的相关系数)

Fig.2 Interannual variations of monthly precipitation in the LYRV: (a) T-EOF 1 (solid line) and T-EOF 2 (dashed line) derived from the SSA of monthly precipitation in the LYRV during 1979—1998; (b) the tropospheric quasi-biennial oscillation (TBO) component of rainfall (the reconstructed component from modes 1 and 2; $R_{C1}+R_{C2}$) during 1999—2020 (I_{TBO} ; the bar chart represents monthly precipitation variations in the LYRV; units: mm); (c) interannual variations of the TBO component (solid line) and monthly precipitation (bar chart) for June—August in the LYRV during 1979—2020 (units: mm; r denotes the correlation coefficient between the TBO component and monthly precipitation)

断, 表现为 2015 年出现多雨后, 2016 年夏季长江下游降水 TBO 分量迅速减弱, 降水并没有出现明显偏少趋势, 反而降水量出现正常偏多, 并且 2017 年夏季降水继续正常偏多。这种准 2 a 尺度振荡的中

断, 使得 1999—2015 期间的单年夏季长江下游低频多雨趋势变成 2018—2020 年期间的双年夏季低频多雨趋势。这个振荡特性的突变与 2015—2016 年超强 El Niño 发展过程有一定联系 (Barton and

McCormack, 2017), 反映了平流层 QBO 与 ENSO 之间的相互作用对长江下游降水 TBO 的部分影响。2015—2016 年期间, 活跃的赤道波动通过波流相互作用和来自北半球的强烈 Rossby 波向赤道传播并发生波破碎, 减速平流层底层的西风, 并实现了西风到东风的转换。通过平流层和对流层相互作用, 在一定的条件下, 影响 TBO 的位相转换, 导致东亚太洋地区环流 TBO 的中断。更多的中低纬度、海气和平流层与对流层相互作用过程机制仍然未知, 需要从多个角度进一步研究。

3 长江下游地区降水 TBO 与全球平流层 QBO 的联系

图 3a 给出了 1979 年 1 月—2008 年 12 月逐月长江下游地区 20—30 mon 低频降水 (I_{TBO}) 与全球 50 hPa 低频风场的相关矢量的空间分布 (阴影区表示纬向风通过信度为 0.05 的显著性检验)。考虑波序列持续性的影响, 计算准 2 a 时间尺度的长江

下游降水和全球各格点 50 hPa 纬向风和经向风相关得到各格点有效自由度, 将这些有效自由度的平均值 90 mon 作为显著性检验的有效自由度。所以, 当相关系数大于 0.21 时, 通过了信度为 0.05 的显著性检验。从图 3a 可以看出纬向风显著相关区域主要在两半球热带外地区, 表现为南半球高纬度和中纬度地区反相关的南极涛动 (Antarctic Oscillation, AAO) 的相关分布型和北半球副热带地区和中高纬度地区反相关的空间分布型, 其对应的南半球中高纬度地区和北半球热带外地区是方差贡献较大的区域 (图 3b)。虽然全球热带地区是 QBO 方差贡献最大区域, 但相关相对较弱 (图 3a), 它表明了赤道平流层纬向风的 QBO 对长江下游降水 TBO 的直接影响有限。此外, 从全球 50 hPa 低频经向风场的相关矢量空间分布发现, 南半球中高纬地区还存在南半球绕极传播的纬向波列结构 (图 3a), 其中波列对应的南非附近, 南印度洋中纬度地区和澳大利亚西南部洋面以及东南太平洋和南大西洋中纬度地区也是

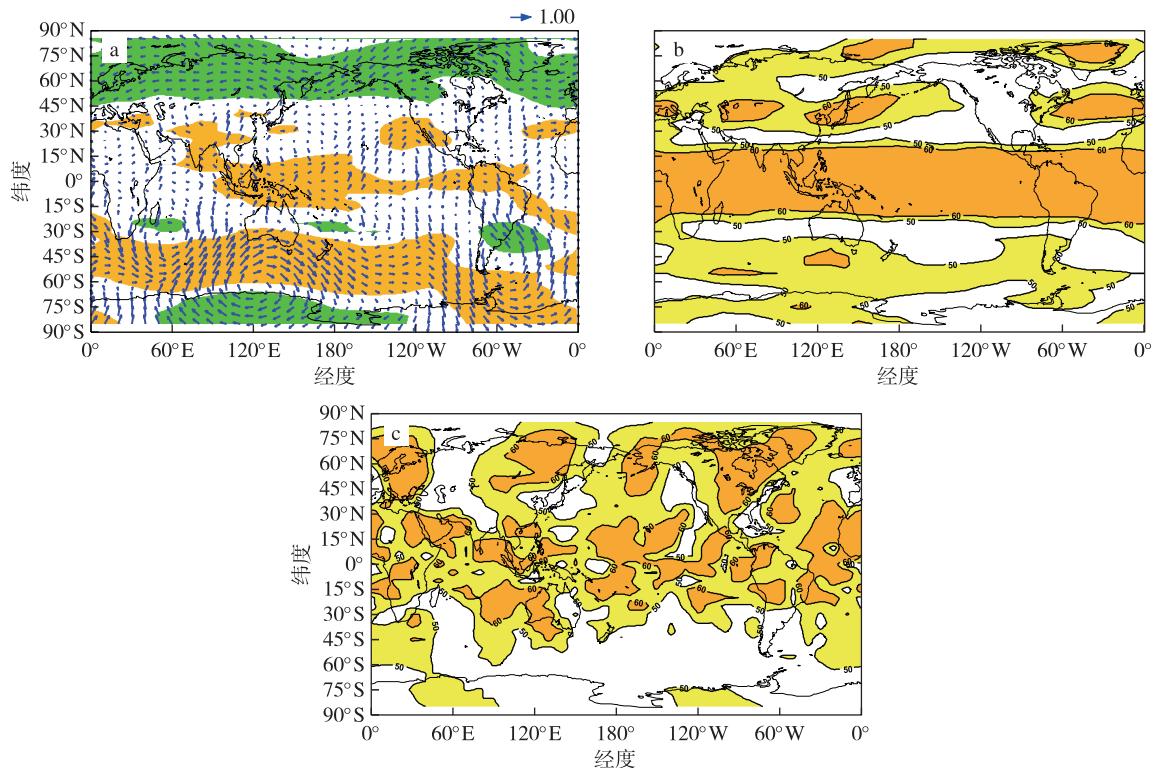


图 3 1979—2008 年长江下游地区月降水准 2 a 低频分量全球 50 hPa 低频风场的相关分布 (a) 和全球 50 hPa 纬向 (b) 和经向 (c) 风距平滤波序列 (时间尺度为 20~30 mon) 与原始序列年际变化标准差比值的空间分布 (a 中阴影区域表示纬向风通过 0.05 信度的显著性检验; b 和 c 中数值 $\times 100$, 其中 ≥ 50 的区域用阴影区表示)

Fig.3 Correlation between monthly precipitation over the LYRV and global wind anomalies at 50 hPa: (a) the 20—30-month time scale during 1979—2008, where areas with 95% significance for zonal wind are shaded; spatial distributions of the ratio of variance for the 20—30-month signal to total interannual variability for (b) zonal and (c) meridional wind anomalies (values are multiplied by 100; areas with values ≥ 50 are shaded)

方差贡献较大的区域(图 3c)。这表明平流层 AAO 和北半球中高纬度地区纬向风的 QBO 分量和南半球中高纬度经向风 QBO 分量的波列对长江下游地区降水 TBO 影响显著大于热带平流层纬向风 QBO 的影响。

进一步对 1979—2008 年期间的 20~30 mon 时间尺度的全球 50 hPa 低频纬向风场进行 PCA, 得到 5 个主要低频纬向风空间模态(用 Butterworth 滤波得到全球 50 hPa 准 2 a 低频纬向风场), 其解释方差分别是 32.0%、17.1%、12.4%、9.5% 和 7.8%。上述 5 个模态对应的主成分 PC(时间系数)与长江下游地区降水准 2 a 分量的相关系数分别是 -0.11、0.63、-0.48、-0.12 和 0.49, 其中与第 2、3、5 模态对应的 3 个 PC 之间相关通过了 0.05 信度的显著性水平检验, 相关最为显著的是第 2 模态(相关系数为 0.63, 通过 0.02 信度的显著性水平检验)。另外, 用 PCA 得到前 5 个主要低频经向风空间模态的解释方差分别是 19.9%、16.3%、12.5%、9.9% 和 6.8%, 它们对应的主成分 PC 与长江下游地区降水准 2 a 分量的相关系数分别是 0.27、-0.32、0.79、-0.15 和 0.34, 其中与第 1、2、3、5 模态对应的 4 个 PC 之间相关通过了 0.05 信度的显著性水平检验, 其中第 3 模态相关最大, 相关系数是 0.79, 通过了 0.01 信度的显著性水平检验。因此, 第 2、3、5 纬向风模态和第 1、2、3、5 经向风模态是与长江下游降水 QBO 分量密切相关的 7 个 50 hPa 环流 QBO 型。此外, 为了研究这些主要低频模态的时间稳定性, 对 1979—2006 年和 1979—2004 年逐月全球 50 hPa 纬向低频风场分别进行 PCA, 得到前 5 个空间模态。用不同样本长度得到的特征向量(空间分布)间的夹角余弦绝对值 $|R_c|$, 分析空间分布型的时间稳定性(杨秋明, 1993)(PCA 中反向的特征向量对应于符号相反的时间系数, 对应于 $R_c = -1$, 并且它们具有相似的物理意义, 可能代表了同一物理过程的不同阶段或不同方向, 是同一类特征向量, 因此用 R_c 的绝对值度量两个特征向量相似程度的度量)。结果表明, 它们与以上 1979—2008 年(30 a)得到的前 3 个空间模态的 $|R_c|$ 均大于 0.85(表略), 表明仅低频纬向风的第 1、2、3 空间模态的时间稳定性较好, 第 4、5 空间模态呈现较显著的时间不稳定。因此, 第 5 纬向风 QBO 模态与长江下游降水 TBO 的联系存在一定的不确定性。通过类似的分析, 低频经向风的前 5 个空间模态均具有很好的时间稳定性(表略)。以上分析表明, 全球 50 hPa 第 2、3 纬向风和

第 1、2、3、5 经向风模态是稳定影响长江下游降水 TBO 的 6 个重要因子。图 4a、b 给出了第 1 和 2 纬向风模态的空间分布(全球 50 hPa 准 2 a 低频纬向风场距平对标准化主成分的回归), 其中第 1 模态主要表现为全球热带地区大范围的显著正值分布带, 热带外地区正负值分布区域较小, 即热带平流层纬向风 QBO 的特征(图 4a), 但对长江下游降水 TBO 影响较弱; 而第 2 模态则显示出极显著的 AAO 的分布特征(图 4b), 对长江下游降水 TBO 变化的作用最显著。第 3 模态呈现北半球中高纬地区和副热带地区反向变化的空间型(图略), 对长江下游降水 TBO 变化的影响也较明显。图 4c、4d 给出了第 2、3 经向风模态的空间分布, 其中第 2 经向风模态表现为南北半球中高纬度各存在一支东西向传播的波列, 而第 3 经向风模态仅存在南半球中高纬度传播的一支显著波列, 这个南半球经向风波列对长江下游降水 TBO 变化的作用最显著。这些波列与平流层大气内部动力过程有关, 其物理机制有待深入研究。同时, 第 1 和 5 经向风模态分别呈现其他 2 种不同的热带外地区沿纬向正负相间分布结构(图略), 对长江下游降水 TBO 变化也有一定的影响。所以, 这 6 个准 2 a 时间尺度的全球 50 hPa 纬向风和经向风 QBO 型, 是驱动夏季长江下游持续暴雨和洪涝过程的一系列重要的年际尺度的平流层低频系统。它们可以通过多种方式影响长江下游地区降水 TBO 和夏季极端降水过程以及旱涝过程, 是夏季长江下游地区旱涝季节和年际预测的可预报性重要来源之一。

4 预测试验

基于 42 a(1979—2020 年)长江下游逐月降水和上述 6 个全球 50 hPa 纬向和经向风模态对应的 QBO 分量, 构建 ECAR 模型预测长江下游降水 TBO 分量(I_{TBO})。本文用 1979 年 1 月—2008 年 12 月的月平均资料(360 mon), 提取长江下游地区逐月降水和全球 50 hPa 纬向风场的第 2、3 主成分和经向风场的第 1、2、3、5 主成分的准 2 a 分量, 构建 ECAR 模型(杨秋明, 2014, 2016, 2021)对 2009—2020 年(144 mon)的长江下游地区逐月准 2 a 时间尺度降水分量进行独立预报试验。将实时的逐月全球 50 hPa 纬向风第 2、3 主成分和经向风第 1、2、3、5 主成分(投影到由 1979—2008 年数据计算的对应的低频空间模态)和长江下游降水分别经 RSSA 后, 得到各分量重建得到对应的 20~30 mon 振荡信号的

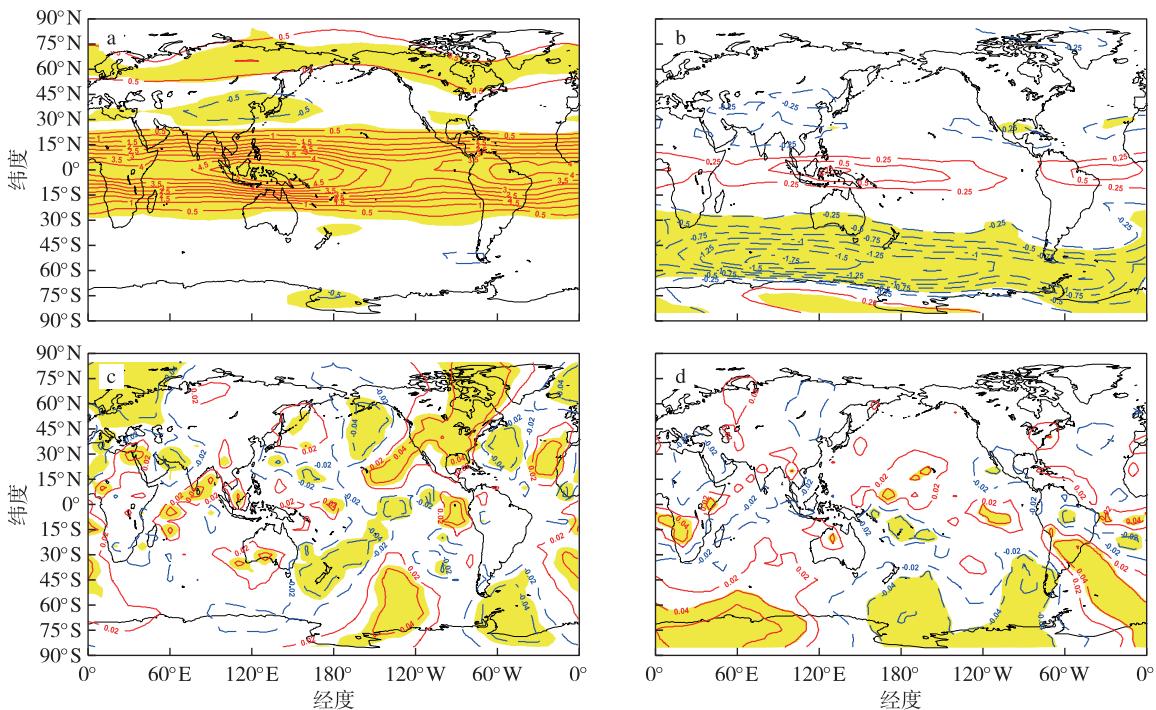


图 4 1979—2008 年全球 50 hPa 准 2 a 低频风场距平对标准化主成分的回归系数的空间分布(a 和 b 分别对应纬向风的 PC1(单位:m/s;间隔:0.5 m/s) 和 PC2(单位:m/s;间隔:0.25 m/s), c 和 d 分别对应经向风的 PC2 和 PC3(单位:m/s;间隔:0.02 m/s); 阴影表示通过 95% 置信度的显著性检验)

Fig.4 Regressions of global wind anomalies at 50 hPa onto standardized principal components during 1979—2008, corresponding to (a) PC1 of zonal wind (units: m/s; interval: 0.5 m/s), (b) PC2 of zonal wind (units: m/s; interval: 0.25 m/s), and (c) PC2 and (d) PC3 of meridional wind (units: m/s; interval: 0.02 m/s). Areas significant at the 95% level are shaded

标准化 50 hPa 纬向风主要分量序列 U_2, U_3 和经向风主要分量序列 V_1, V_2, V_3, V_5 (各自对应的 T-EOF 用 1979 年 1 月—2008 年 12 月的月平均资料计算) 和长江下游降水分量序列 r_{lcj} (标准化 I_{TBO}) 作为预测试验的基本数据, 构建扩展资料矩阵 (\mathbf{F}) :

$$\mathbf{F} = (f_{i,l}) = (U_2, U_3, V_1, V_2, V_3, V_5, r_{\text{lcj}}) \quad (1)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, M$ (M 是资料序列长度, $M = 504$ mon); $l = 1, 2, \dots, L+1, L = 6$ (L 是与长江下游降水 TBO 分量显著相关的 50 hPa 低频风主成分个数)。用一维 Fourier 变换, 对式(1)的矩阵 \mathbf{F} 的第 i 行 $(f_{i,1}, f_{i,2}, \dots, f_{i,L+1})$ 进行变换, $i = 1, 2, \dots, M$, 得到第 i 行的复向量 $(\tilde{f}_{i,1}, \tilde{f}_{i,2}, \dots, \tilde{f}_{i,L+1})$, 因此得到 $L+1$ 个复数时间序列 $\tilde{f}_{i,l} = a_{i,l} + b_{i,l}i$ 。这 $L+1$ 个复数序列构成扩展复数矩阵 ($\tilde{\mathbf{F}}$, extended complex matrix, ECM) :

$$\tilde{\mathbf{F}} = (\tilde{f}_{i,l}) \quad (2)$$

其中: $l = 1, 2, \dots, L+1$ 。分别建立式(2)中逐个分量 $\tilde{f}_{i,l}$ 的 p 阶复自回归模型 (complex autoregressive model, CAR) :

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

式(3)由 $L+1$ 个变量协同频率对应的独立变化的单变量复数自回归模型组成, 称为扩展复数自回归模型 (ECAR), 其中 B_k , $k = 0, 1, \dots, p$ ($p = 1, 2, \dots$) 用复数最小二乘法计算。用式(3)递推, 得到 $M+1$ 时刻的每一个复分量预报值 $\hat{f}_{M+1,l} = \hat{a}_{M+1,l} + \hat{b}_{M+1,l}i$, $l = 1, 2, \dots, L+1$, 即预测的 $M+1$ 时刻的复向量 $(\hat{f}_{M+1,1}, \hat{f}_{M+1,2}, \dots, \hat{f}_{M+1,L+1})$ 。这个预测的复向量经过一维 Fourier 逆变换, 可以得到原来空间预测向量 $(\hat{f}_{M+1,1}, \hat{f}_{M+1,2}, \dots, \hat{f}_{M+1,L+1})$, 它的每一分量分别对应 \mathbf{F} 中各个低频分量 $M+1$ 时刻的预报值 \hat{f}_{M+1,l_1} , $l_1 = 1, 2, \dots, L+1$ 。式(3)继续递推 K 步后, 得到第 K 月的预报值 \hat{f}_{M+K,l_1} , 其中 $\text{Re}(\hat{f}_{M+K,l_1}) = \hat{r}_{\text{lcj}}(M+K)$ 是长江下游月降水标准化 TBO 分量的预报值, 从而得到长江下游月降水 TBO 分量的预报值 (I_{TBO})。文中用限定记忆法建立时变 ECAR 模型预测 2009 年 1 月—2020 年 12 月长江下游地区准 2 a 降水分量

的年际变化(采用 RSSA 滤波可以提取自相关性较强、精度更高的准 2 a 分量, 预测模型仅用到预测初始时间以前的信息)。在这些独立样本预测中, 子序列长度 M_0 保持不变, 建立随时间变化的 ECAR 滑动地进行预测试验(初始时间是 2008 年 12 月—2020 年 11 月, 预报未来 30 个月 TBO 分量), 其中复自回归模型的阶数 $p=2$, 预报时间 $K=30$ mon, 子序列长度 $M_0=240$ mon。上述建模方案能适应各个对流层和平流层的主要准 2 a 分量之间的联系随年代的变化(即相关系数的年代际变化), 有利于提高 ECAR 预测模型的稳定性并延长预报时效。

图 5a 中实线给出了用观测的全球月平均 50 hPa 纬向风的第 2、3 低频主成分和经向风的第 1、2、3、5 低频主成分(QBO 分量)和长江下游地区月降水的 TBO 分量构造的扩展实数据阵, 通过 Fourier 变换得到扩展复数据阵(ECM), 构建的时变 ECAR 模型作的 2009 年 1 月—2020 年 12 月(144 mon)长江下游地区降水 TBO 分量的未来 30 mon 预报与观测的相关系数(初始时间是 2008 年 12 月—2020 年 11 月)。从图中可以看出, 未来 15 mon 以内, 预报和观测的低频分量之间相关系数大于 0.5(通过 0.05 信度的显著性检验, 考虑序列持续性的影响)。因此, 长江下游降水 TBO 分量的预报时效可达 15 mon。另外, 降水 TBO 分量预报的均方根预测误差(root mean square error, RMSE)也在 15 mon 左右增大到 1 倍 σ (σ : 长江下游降水 TBO 分量的标准差)以上(图 5b 中实线)。这表明时变 ECAR 可以很好地提前 1 a 以上预测与夏季长江下游暴雨洪涝有密切联系的长江下游地区降水 TBO 分量年际背景变化信号。

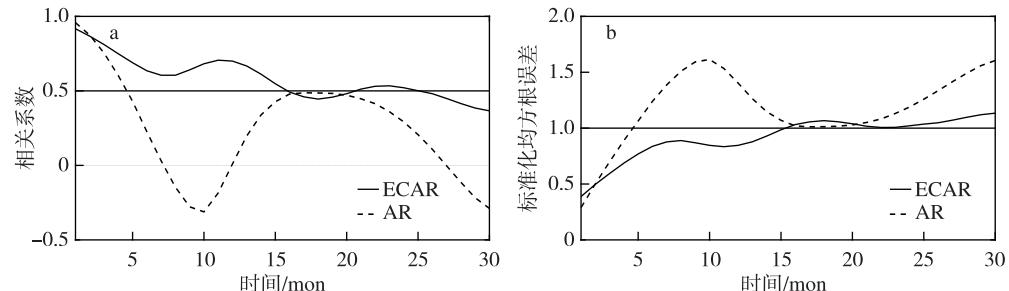


图 5 2009—2020 年长江下游月降水准 2 a 低频分量 1~30 mon 预报与观测(实线: ECAR 模型; 虚线: AR 模型)的相关系数(a)和标准化均方根误差(b)(水平实线分别表示置信度为 95% 的显著性水平(a)和 1 个标准差(b))

Fig.5 (a) Correlation coefficients between observed and forecasted values (1–30-month lead time) and (b) root-mean-square error (RMSE) for the TBO component of monthly precipitation over the LYRV during 2009–2020. Solid line: ECAR model; dashed line: AR model. The horizontal solid line indicates the 95% significance level in (a) and one standard deviation in (b)

另外, 只用观测的单一的长江下游降水 TBO 分量, 建立经典的自回归模型 (autoregressive model, AR) 进行滑动的独立样本预测试验(子序列长度 $M_0=240$ mon)结果表明, 预报时效仅 5 mon(图 5a、5b 中虚线), 即 5 mon 以后的相关预报技巧小于 0.5, 均方根预测误差大于 1 倍 σ 。它表明在准 2 a 时间尺度上, 上述 6 种平流层环流 QBO 型与长江下游降水 TBO 分量之间的协同作用较显著, 经典 AR 模型(仅考虑长江下游降水 TBO 分量单独变化信息)由于缺乏这种协同作用的信息导致预测稳定性明显减小, 预报时效显著缩短。

图 6 进一步给出了 2010—2020 年期间长江下游逐月降水 TBO 分量的提前 5 mon(图 6a)、10 mon(图 6b) 和 15 mon(图 6c) 预报(虚线)和观测的实时 TBO 分量(实线)的变化曲线, 其中相关预报技巧分别达到 0.71、0.68 和 0.55(2010 年 4 月—2020 年 12 月的 129 次预报, 初始时间分别是 2009 年 1 月, ……, 2019 年 5 月), 均通过 0.05 信度的显著性检验(考虑序列持续性的影响)。从图 6a 中可以看出, ECAR 模型不仅能很好提前 5 mon 预测 2009—2015 年期间的单年夏季长江下游低频多雨趋势对应的 TBO 分量正位相和 2016—2020 年期间的双年夏季低频多雨趋势对应的正位相, 以及 2009—2014 年期间双年和 2017 年长江下游降水减少趋势、2019 年长江下游少雨对应 TBO 分量负位相, 而且 2015 以来 TBO 强度的显著增强也能较好预测。值得注意的是, 2015 和 2016 年 QBO 分量位相中断期间还能预报连续两年出现正位相, 但出现的时间比实况滞后 2~3 mon, 反映了 QBO 位相的突变引起了 ECAR 模型一定程度的不稳定。对于

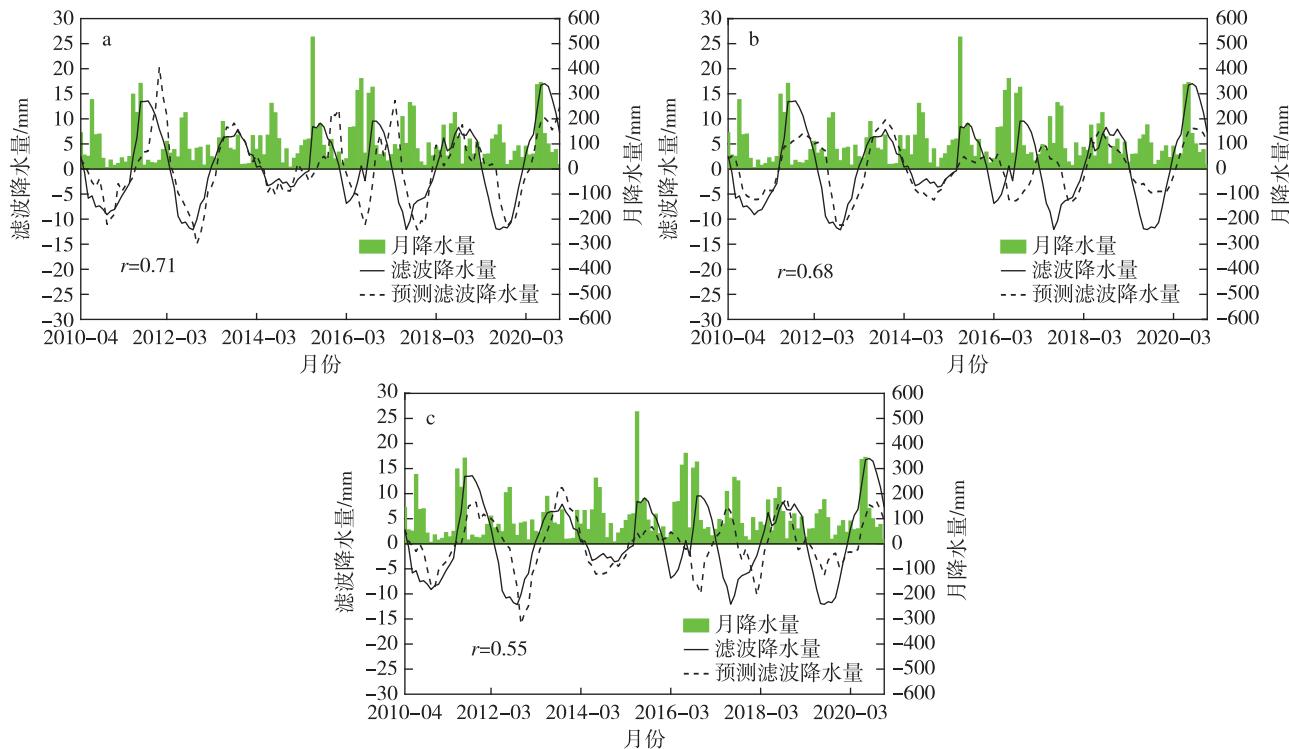


图 6 2010—2020 年长江下游地区月降水准 2 a 分量 ECAR 模型的 5 月 (a)、10 月 (b) 和 15 月 (c) 预报(实、虚线分别表示实况、预报)

Fig.6 Forecasts of the ECAR model for the TBO component of monthly precipitation over the LYRV at lead times of (a) 5 months, (b) 10 months, and (c) 15 months. The solid line represents observations, while the dashed line represents forecasts

更长的预报时效(大于 6 mon),在 TBO 稳定的两个时段 2009—2014 年和 2017—2020 年期间,ECAR 模型可以较精确提前 10 mon(图 6b)和 15 mon(图 6c)预测降水 TBO 的位相变化以及强度的随时间的不均匀变化,但相关预报技巧随预报时效的延长逐步下降到 0.55 左右。然而,在 2015 和 2016 年降水 TBO 分量位相中断期间,这两个预报时效 TBO 的预报误差较大,预报的 TBO 强度明显偏弱,表明 ECAR 模型在 QBO 或 TBO 周期不稳定时误差增加较快,预报时效明显缩短到半年左右(5~6 mon)。另外,ECAR 模型在 2017—2020 年(TBO 周期稳定期间)能提前 5 mon 精确地预报近 4 a 长江下游降水 TBO 分量位相变化和振幅的非线性增长(图 2b、6a),尤其是能提前 10~15 mon 预测 2020 年夏季长江下游地区特大洪涝期间降水 TBO 振幅显著增长及正位相的演变(刘芸芸和丁一汇,2020;图 6b、6c)。这时对应的平流层 50 hPa 环流 AAO 和南半球中高纬度经向风波列准 2 a 分量也显著增强(图略)。它表明这种 ECAR 模型较好地反映了 2020 年平流层 50 hPa 环流不同 QBO 型和长江下游降水 TBO 的协同变化信息,为长江下游地区 2020 年夏

季洪涝季度预测和年际预测提供了十分重要的年际分量背景变化信息。

以上较长时期的独立预报试验表明,基于 RSSA 滤波提取的长江下游降水 TBO 和平流层 50 hPa 环流主要 QBO 分量构建的 ECAR 模型,能有效提前 1 a 以上预测长江下游降水 TBO 分量。这种数据驱动的一系列模型预测的长江下游降水 TBO 分量在两个 QBO 周期稳定时期(2009—2014 和 2017—2020 年)每一次正负位相转换和峰值位相以及振幅与实况基本一致。仅 2015—2016 年 QBO 位相中断时期 ECAR 模型在较长时效预测中出现一些不稳定,误差增加较快,预报时效明显缩短到半年左右(5~6 mon),但是仍能较好预测未来 2 季的变化,为长江下游夏季洪涝季节预报提供重要预报信息。因此,基于平流层 50 hPa 环流多种 QBO 分量与长江下游降水 TBO 分量协同作用的 ECAR 模型显示出较高的年际预测水平,可以实时应用于长江下游洪涝年际和季节预测,较显著地改进旱涝气候预测精度。

在人工智能 (artificial intelligence, AI) 模型中期预测中,通过挖掘数据中的预期和非预期的物理

或其他规律,构建复杂的非线性模型输入和输出的映射关系,基于实时初始原始数据,在预测计算速度和准确性等方面表现出较大的潜力(Bi et al., 2023; Chen K et al., 2023; Chen L et al., 2023)。但是这些基于原始数据驱动的 AI 气象大模型用于气候预测,其精细逼真的复杂非线性模型描述会使长期预报缺乏针对性,强弱信号尺度分离不清晰,在较长预报时效(20 d 以上)的递推中迭代预报累积误差增长迅速,容易产生不稳定,不利于预报时效的进一步延长。文中通过 RSSA 精确地提取各种不同强度的主要低频信号,构造合适的扩展数据集,用 Fourier 变换,得到扩展复数数据集,反映不同类型的变量协同频率的振幅和位相变化,更好地共同塑造变量变化的新格局。通过这种变量间的协同尺度分析,研究多变量间的相互作用波及其时间变化。从而提取隐藏在扩展复数据中的更多的关于长江下游降水 TBO 和平流层 QBO 的变化信息,将多样化为归一,更好地整合数据的力量,复杂变为简单,构建可预报性较大的复数据驱动的 TBO 的一组单变量时变线性 ECAR 预测模型。由 ECAR 预测系统未来状态的频谱,并通过 Fourier 逆变换,将每个预测时间的多个预测值返回原来空间,得到各个低频分量的预测值。这组时变线性复数自回归模型同时能适应各低频分量之间联系的年代际变化,可以稳定延长 TBO 的预报时效。这种方法有利于从根本上摆脱数值模式或 AI 模型预测时效的可预报性的束缚,实现 TBO 较长时效的年际气候预测的能力。

5 结论与讨论

基于 1979—2020 年逐月资料,通过奇异谱分析(SSA),分析长江下游地区降水准 2 a 分量(TBO)时间变化特征,并通过 PCA 和 RSSA 提取的全球 50 hPa 月平均纬向和经向风主要模态的准 2 a 低频分量(QBO),建立扩展复数自回归模型(ECAR),进行长江下游地区降水 TBO 分量年际预测研究,得到以下主要结论:

1) 1979—2020 年期间长江下游月降水量存在显著的 25 mon 的准 2 a 变化周期(TBO),由 RSSA 构建了一个长江下游降水 TBO 指数 I_{TBO} ,能较精确地显示长江下游降水 TBO 位相和振幅的年际变化。这个实指数较好地表示 1999—2015 年期间的单(双)年夏季长江下游低频多(少)雨和 2018—2020 年期间的双(单)年夏季低频多(少)雨趋势的长江下游降水 TBO 正(负)位相的变化。2015—2016 年

TBO 发生位相中断,导致 2015 年夏季长江下游多雨后的 2016 年夏季并没有出现少雨趋势,而且 2017 年夏季降水继续正常偏多。长江下游降水 TBO 与平流层 50 hPa 风场主要模态的 QBO 分量有密切的联系,其中平流层纬向风的 AAO 和南半球中高纬度经向风波列的 QBO 的作用最为显著,而与热带平流层纬向风的 QBO 的相关相对较弱。

2) 基于 1979—2008 年逐月 50 hPa 纬向和经向风及长江下游降水数据,构建 ECAR 模型能较好预测 2009—2020 年期间长江下游未来 15 mon 的降水 TBO 变化,可以提前 1 a 以上为长江下游地区夏季洪涝过程预报提供十分重要的预测背景信息。但是,直接用长江下游地区准 2 a 分量构建的经典 AR 模型的预报时效仅 5 mon 左右。因此,构建的复数自回归模型(包含频率空间中更多准 2 a 变化信息)的预报技巧显著高于原始实空间准 2 a 分量自回归模型。

3) 2009 年以来,长江下游降水 TBO 分量呈较显著的增强趋势。2020 年夏季长江下游地区特大洪涝发生在长江下游降水非线性增强的 TBO 中的多雨位相,与平流层 50 hPa 环流 AAO 和南半球中高纬度经向风的经向波列准 2 a 分量显著增强密切相关。ECAR 模型较好地提前 10~15 mon 预测 2020 年准 2 a 降水分量正位相持续增强发展到 2020 年 6—8 月达到峰值位相的年际变化过程,为 2020 年夏季长江下游地区特大洪涝气候预报提供了重要的年际低频背景变化信号。

大量观测资料呈现多种复杂的数据相关性,包含了丰富多样的自然变化信息。本文对 42 a(1979—2020 年)逐月观测数据进行分解和变换,提取准 2 a 时间尺度的长江下游地区月降水和全球 50 hPa 低频风场变化主要模态,并用 RSSA 提取自相关性较强的对流层 TBO 和平流层 QBO 分量。通过 Fourier 变换,将长江下游降水 TBO 及其有密切联系的平流层主要准 2 a 分量生成复低频分量,得到扩展复数矩阵,从多变量协同性视角,可以发现传统方法难以识别的协同模式,较好地共同塑造变量变化的新格局。并将这些分量视为大气 QBO 分量多种协同变化过程的一系列数据解,反演出随时间变化的一组独立变化的单变量复数线性模型 ECAR。这个简化的线性 ECAR 模型的可预报性显著增大,可以明显延长预报时效。这些数据驱动的年际气候预测方法不预设各种物理条件,不受经典气候数值模式或 AI 模型预测时效的可预报性限制。

这种通过数据-数据变换-知识-简化模式驱动的研究方法,能更好地反映不同类型的平流层热带内外QBO与长江下游降水TBO之间的协同作用过程,显著提升对流层TBO的年际预报能力。同时结合

降水年代际变化趋势和次季节变化预测(杨秋明,2016;Yang,2018),可以全面提高夏季长江下游地区持续强降水和洪涝气候预测水平。

参考文献(References)

- Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al., 2001. The quasi-biennial oscillation [J]. *Rev Geophys*, 39(2): 179-229. DOI: 10.1029/1999RG000073.
- Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al., 2003. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts [J]. *Science*, 301(5633): 636-640. DOI: 10.1126/science.1087143.
- Barton C A, McCormack J P, 2017. Origin of the 2016 QBO disruption and its relationship to extreme El Niño events [J]. *Geophys Res Lett*, 44(21): 11150-11157. DOI: 10.1002/2017GL075576.
- Barton C A, McCormack J P, Eckermann S D, et al., 2019. Optimization of gravity wave source parameters for improved seasonal prediction of the quasi-biennial oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 76(9): 2941-2962. DOI: 10.1175/jas-d-19-0077.1.
- Belmont A D, Dart D G, 1968. Variation with longitude of the quasi-biennial oscillation [J]. *Mon Wea Rev*, 96(11): 767-777. DOI: 10.1175/1520-0493(1968)096<767:vwlotq>2.0.co;2.
- Bi K F, Xie L X, Zhang H H, et al., 2023. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks [J]. *Nature*, 619(7970): 533-538. DOI: 10.1038/s41586-023-06185-3.
- Chang C P, Li T, 2000. A theory for the tropical tropospheric biennial oscillation [J]. *J Atmos Sci*, 57(14): 2209-2224. DOI: 10.1175/1520-0469(2000)057<2209:atfttt>2.0.co;2.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T, 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: roles of the subtropical ridge [J]. *J Climate*, 13(24): 4310-4325. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<4310:iaivot>2.0.co;2.
- Chen K, Han T, Gong J C, et al., 2023. FengWu: pushing the skillful global medium-range weather forecast beyond 10 days lead [EB/OL]. arXiv: 2304.02948. DOI: arxiv.org/abs/2304.02948.
- Chen L, Zhong X H, Zhang F, et al., 2023. FuXi: a cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast [EB/OL]. arXiv: 2306.12873. DOI: arxiv.org/abs/2306.12873.
- 陈文,杨蕾,黄荣辉,等,2004.热带准两年振荡影响北半球冬季大气环流的诊断分析[J].大气科学,28(2):161-173. Chen W, Yang L, Huang R H, et al., 2004. Diagnostic analysis of the impact of tropical QBO on the general circulation in the Northern Hemisphere winter [J]. *Chin J Atmos Sci*, 28(2): 161-173. (in Chinese).
- Chen W Y, 1982. Fluctuations in Northern Hemisphere 700 mb height field associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon Wea Rev*, 110(7): 808-823. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<808:finhmh>2.0.co;2.
- Ding Y H, 2007. The variability of the Asian summer monsoon [J]. *J Meteor Soc Japan*, 85B: 21-54. DOI: 10.2151/jmsj.85b.21.
- Hasselmann K, 1988. PIPs and POPs: the reduction of complex dynamical systems using principal interaction and oscillation patterns [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 93(D9): 11015-11021. DOI: 10.1029/JD093iD09p11015.
- 黄嘉佑,1988.准两年周期振荡在我国月降水量中的表现[J].大气科学,12(3):267-273. Huang J Y, 1988. Performance of quasi-biennial periodic oscillation in monthly precipitation in China [J]. *Chin J Atmos Sci*, 12(3): 267-273. (in Chinese).
- 黄荣辉,陈际龙,黄刚,等,2006.中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因[J].大气科学,30(4):545-560. Huang R H, Chen J L, Huang G, et al., 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(4): 545-560. (in Chinese).
- 黄荣辉,陈文,魏科,等,2018.平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究:进展与问题[J].大气科学,42(3):463-487. Huang R H, Chen W, Wei K, et al., 2018. Atmospheric dynamics in the stratosphere and its interaction with tropospheric processes: progress and problems [J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(3): 463-487. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17250. (in Chinese).
- 黄小猛,林岩銮,熊巍,等,2024.数值预报AI气象大模型国际发展动态研究[J].大气科学学报,47(1):46-54. Huang X M, Lin Y L, Xiong W, et al., 2024. Research on international developments of AI large meteorological models in numerical forecasting [J]. *Trans Atmos Sci*, 47(1): 46-54. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231201001. (in Chinese).
- 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. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2.
- Lee Y G, 2002. A T-EOF based prediction method [J]. *J Climate*, 15(2): 226-234.
- 李崇银,龙振夏,1992.准两年振荡及其对东亚大气环流和气候的影响[J].大气科学,16(2):167-176. Li C Y, Long Z X, 1992. QBO and its influence on the general atmospheric circulation and the climate in East Asia [J]. *Chin J Atmos Sci*, 16(2): 167-176. (in Chinese).
- 李崇银,龙振夏,1997.西太平洋副高活动与平流层QBO关系的研究[J].大气科学,21(6):670-678. Li C Y, Long Z X, 1997. Study on subtropical high activity over the western Pacific and QBO in the stratosphere [J]. *Chin J Atmos Sci*, 21(6): 670-678. (in Chinese).

- 李崇银,阙志萍,潘静,2010.东亚季风演变与对流层准两年振荡[J].科学通报,55(29):2863-2868. Li C Y, Que Z P, Pan J, 2010. Evolution of East Asian monsoon and quasi-biennial oscillation in troposphere[J]. Chin Sci Bull, 55(29):2863-2868. (in Chinese).
- 廖荃荪,王永光,1998.赤道平流层 QBO 与我国 7 月雨型的关联[J].应用气象学报,9(1):104-108. Liao Q S, Wang Y G, 1998. The relationship between quasi-biennial oscillation (QBO) of equatorial stratosphere and the rainfall belt of July in China[J]. J Appl Meteor Sci, 9(1):104-108. (in Chinese).
- 刘芸芸,丁一汇,高辉,等,2013.西太平洋副热带高压的准两年振荡及其与热带海温和大气环流异常的关系[J].科学通报,58(27):2845-2853. Liu Y Y, Ding Y H, Gao H, et al., 2013. Quasi-biennial oscillation of western Pacific subtropical high and its relationship with tropical SST and atmospheric circulation anomaly[J]. Chin Sci Bull, 58(27):2845-2853. (in Chinese).
- 刘芸芸,丁一汇,2020.2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J].气象,46(11):1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1393-1404. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001. (in Chinese).
- Meehl G A, 1997. The South Asian monsoon and the tropospheric biennial oscillation[J]. J Climate, 10(8):1921-1943. DOI: 10.1175/1520-0442(1997)010<1921:tsamat>2.0.co;2.
- Osprey S M, Butchart N, Knight J R, et al., 2016. An unexpected disruption of the atmospheric quasi-biennial oscillation[J]. Science, 353(6306):1424-1427. DOI: 10.1126/science.aaa4156.
- Reed R J, Campbell W J, Rasmussen L A, et al., 1961. Evidence of a downward-propagating, annual wind reversal in the equatorial stratosphere[J]. J Geophys Res, 66(3):813-818. DOI: 10.1029/JZ066i003p00813.
- Scaife A A, Athanassiadou M, Andrews M, et al., 2014. Predictability of the quasi-biennial oscillation and its northern winter teleconnection on seasonal to decadal timescales[J]. Geophys Res Lett, 41(5):1752-1758. DOI: 10.1002/2013GL059160.
- Shen S, Lau K M, 1995. Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperatures[J]. J Meteor Soc Japan, 73(1):105-124. DOI: 10.2151/jmsj1965.73.1_105.
- Tomita T, Yasunari T, 1996. Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO/monsoon system[J]. J Meteor Soc Japan, 74(4):399-413. DOI: 10.2151/jmsj1965.74.4_399.
- Vautard R, Yiou P, Ghil M, 1992. Singular-spectrum analysis: a toolkit for short, noisy chaotic signals[J]. Phys D Nonlinear Phenom, 58(1/2/3/4):95-126. DOI: 10.1016/0167-2789(92)90103-T.
- 王会军,1997.试论短期气候预测的不确定性[J].气候与环境研究,2(4):12-17. Wang H J, 1997. A preliminary study on the uncertainty of short-term climate prediction[J]. Clim Environ Res, 2(4):12-17. (in Chinese).
- 王会军,戴永久,杨崧,等,2024.气候系统预测:基础创新和集成应用[J].大气科学学报,47(2):161-172. Wang H J, Dai Y J, Yang S, et al., 2024. Climate system prediction: fundamental innovations and integrated applications[J]. Trans Atmos Sci, 47(2):161-172. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240303007. (in Chinese).
- 伍继业,谢欣芮,罗京佳,2024.基于改进版 NUIST CFS1.1 的热带大气季节内信号及其对中国气温降水影响的预测评估[J].大气科学学报,47(2):284-299. Wu J Y, Xie X R, Luo J J, 2024. Prediction of tropical intraseasonal oscillations and their impacts on air temperature and precipitation in China using the upgraded version of NUIST CFS1.1[J]. Trans Atmos Sci, 47(2):284-299. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20231225021. (in Chinese).
- 谢义炳,陈受钩,张一良,等,1963.东南亚基本气流与台风发生的一些事实的统计与分析[J].气象学报,21(2):206-217. Xie Y B, Chen S J, Zhang Y L, et al., 1963. A preliminarily statistic and synoptic study about the basic currents over southeastern Asia and the initiation of typhoons [J]. Acta Meteor Sinica, 21(2):206-217. (in Chinese).
- 徐邦琪,臧钰歆,朱志伟,等,2020.时空投影模型(STPM)的次季节至季节(S2S)预测应用进展[J].大气科学学报,43(1):212-224. Hsu P C, Zang Y X, Zhu Z W, et al., 2020. Subseasonal-to-seasonal (S2S) prediction using the spatial-temporal projection model (STPM)[J]. Trans Atmos Sci, 43(1):212-224. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191028002. (in Chinese).
- 徐邦琪,魏澎,钱伊恬,等,2024.西北太平洋热带气旋频次的延伸期动力-统计预报方法和评估[J].大气科学学报,47(1):65-79. Hsu P C, Wei P, Qian Y T, et al., 2024. A hybrid dynamic-statistical prediction model for tropical cyclone frequency over the western North Pacific and its evaluation[J]. Trans Atmos Sci, 47(1):65-79. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20230922001. (in Chinese).
- Xu J S, 1992. On the relationship between the stratospheric quasi-biennial oscillation and the tropospheric Southern Oscillation[J]. J Atmos Sci, 49(9):725-734. DOI: 10.1175/1520-0469(1992)049<0725:otrbs>2.0.co;2.
- 杨秋明,1993.北半球夏季 500 hPa 候平均高度场的遥相关和环流特征[J].大气科学,17(2):148-154. Yang Q M, 1993. Teleconnections and features of circulation in the pentad mean 500 hPa height field during the Northern Hemisphere summer[J]. Chin J Atmos Sci, 17(2):148-154. (in Chinese).
- 杨秋明,1997.欧亚雪盖准 2 a 振荡对中国降水的影响[J].气候与环境研究,2(1):84-92. Yang Q M, 1997. The effect of biennial oscillation of snow cover in Eurasia on the rainfall in China[J]. Clim Environ Res, 2(1):84-92. (in Chinese).
- 杨秋明,2006.中国降水准 2 a 主振荡模态与全球 500 hPa 环流联系的年代际变化[J].大气科学,30(1):131-145. Yang Q M, 2006. Interdecadal variations of connections between the principal biennial oscillation pattern of rain in China and global 500 hPa circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 30(1):131-145. (in Chinese).

- 杨秋明,2009.全球环流20~30 d振荡与长江下游强降水[J].中国科学D辑:地球科学,39(11):1515-1529. Yang Q M,2009.20—30 days oscillation of global circulation and heavy precipitation in the lower reaches of the Yangtze River[J].Sci China Ser D:Earth Sci,39(11):1515-1529. (in Chinese).
- 杨秋明,2014.2013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[J].物理学报,63(19):463-473. Yang Q M,2014. Extended complex autoregressive model of low-frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze River valley for extended range forecast in 2013[J]. Acta Phys Sinica,63(19):199202. DOI:10.7498/aps.63.199202. (in Chinese).
- 杨秋明,2016.长江下游地区降水50~80 d低频分量的次季节预测研究[J].气象学报,74(4):491-509. Yang Q M,2016. A study on the subseasonal forecast of low frequency rainfall over the lower reaches of Yangtze River valley based on the 50—80 d oscillation[J].Acta Meteor Sinica,74(4):491-509. DOI:10.11676/qxb2016.046. (in Chinese).
- Yang Q M,2018. Predictability and prediction of low-frequency rainfall over the lower reaches of the Yangtze River valley on the time scale of 20 to 30 days[J].J Geophys Res:Atmos,123(1):211-233. DOI:10.1002/2017JD027281.
- 杨秋明,2021.冬季长江下游地区气温低频振荡和低温天气的延伸期预报研究[J].大气科学,45(1):21-36. Yang Q M,2021. Study on low-frequency oscillation of temperature and extension forecast of low-temperature weather in the lower reaches of the Yangtze River in winter[J]. Chin J Atmos Sci,45(1):21-36. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19208. (in Chinese).
- Yasunari T,1991.The monsoon year:a new concept of the climatic year in the tropics[J].Bull Amer Meteor Soc,72(9):1331-1338.
- Zhang C D,Zhang B S,2018.QBO-MJO connection[J].J Geophys Res:Atmos,123(6):2957-2967. DOI:10.1002/2017JD028171.
- 张琼,智协飞,缪锴,等,2014.江淮流域夏季降水的准两年振荡特征及其关联因子分析[J].大气科学学报,37(5):541-547. Zhang J,Zhi X F, Miao K,et al.,2014.Characteristics of the quasi-biennial oscillation of the summer precipitation over Yangtze-Huaihe valley and its correlation factors[J].Trans Atmos Sci,37(5):541-547. DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20121030006. (in Chinese).

· ARTICLE ·

Interannual prediction of the quasi-biennial component of rainfall over the lower reaches of Yangtze River valley using an extended complex autoregressive model

YANG Qiuming

Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041, China

Abstract The tropospheric quasi-biennial oscillation (TBO) is a mode of climate variability with a period of approximately 2—3 years, primarily observed in tropical, subtropical, and mid- to high-latitude regions of Eurasia and the Southern Hemisphere. It manifests as quasi-periodic variations in atmospheric circulation, precipitation, sea surface temperature (SST), and snow cover. In China, a prominent quasi-2-year is evident in summer precipitation, particularly over the lower reaches of the Yangtze River Valley (LYRV), which lies within the East Asian subtropical monsoon region and exhibits pronounced TBO characteristics. Although the TBO is closely associated with large-scale climate modes such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), its core driving mechanisms involve tropospheric dynamics, ocean-atmosphere interactions, and connections with stratospheric circulation. The TBO represents a critical timescale bridging annual cycles and interannual variability (e.g., ENSO). Understanding its evolution is essential for extending seasonal-to-interannual climate prediction lead times (approximately 6—18 months). The TBO is also closely linked to the variability of intraseasonal oscillations (ISO) and to extreme climate events such as monsoon precipitation anomalies, droughts, and heatwaves, thereby providing valuable guidance for agricultural planning, water resource management, and disaster mitigation.

This study develops a data-driven prediction model for interannual variations in the TBO component of rainfall. The quasi-2-year components (TBO) of monthly precipitation in the LYRV and the principal components (quasi-biennial oscillation, QBO) of the 50 hPa stratospheric zonal and meridional winds for 1979—1998 were used to construct a time-varying Extended Complex Autoregressive (ECAR) model for predicting the QBO-relat-

ed component of rainfall in the LYRV. An independent 12-year real-time interannual prediction experiment (1999—2020) was conducted on the quasi-biennial component of monthly precipitation over the LYRV. The results demonstrate that the ECAR model exhibits high predictive skill, maintaining strong forecast accuracy up to a 15-month lead time—significantly outperforming the conventional autoregressive (AR) model. These forecasts provide valuable predictive guidance for anticipating summer flood processes in the LYRV more than a year in advance.

The proposed data-driven prediction method employs real-time singular spectrum analysis (RSSA) to extract the TBO components from the troposphere and QBO components from the stratosphere, both characterized by strong autocorrelation. Through Fourier transformation, these primary quasi-2-year components are converted into complex low-frequency signals in the frequency space, forming an extended complex matrix that captures evolving relationships among atmospheric variables. This new set of variables to better jointly shape a new pattern of variable changes. From the perspective of multivariate synergy, collaborative patterns that are difficult to be identified by traditional methods can be uncovered. A simplified, time-varying ECAR model is then derived to represent the dynamic interactions among these components. The inverse Fourier transform yields the predicted vectors in the original space. This framework effectively reduces data diversity, simplifies complex relationships, and adapts to interdecadal changes in coupling among low-frequency processes, thereby enhancing forecast skill and extending prediction lead times. Unlike traditional physics-based numerical models or AI (artificial intelligence) systems constrained by initial conditions and model complexity, this data-knowledge-simplification approach provides a robust alternative for interannual climate prediction. It captures real-time global QBO signals and the synergistic effects of tropical and extratropical stratospheric QBOs on tropospheric TBO-related precipitation over the lower Yangtze River region, substantially improving interannual predictability of the TBO. When combined with interdecadal trends and sub-seasonal precipitation variability, this approach enhances the predictive capability for summer rainstorms and flood events across the LYRV.

Keywords quasi-biennial oscillation (QBO); 50 hPa wind; monthly precipitation; lower Yangtze River Valley; extended complex autoregressive model (ECAR); interannual prediction

DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240725001

(责任编辑:袁东敏)