

# 长江下游地区降水 50—80 d 低频分量的次季节预测研究<sup>\*1</sup>

杨秋明

YANG Qiuming

江苏省气象科学研究所,南京,210009

*Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210009, China*

2015-10-27 收稿,2016-04-27 改回.

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. 气象学报, 74(4):491-509

**Yang Qiuming. 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. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4):491-509**

**Abstract** Low-frequency component of daily rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley (LYRV) and the principal components of the global 850 hPa low-frequency zonal wind for the period of 1979–2000 were used to develop the extended complex autoregressive model (ECAR) for subseasonal forecast of the 50–80 d low-frequency rainfall component in the LYRV. This type of climate forecast method, which is based on a data-driven model, can not only reflect the lagged variation information between the principal low-frequency component of global circulation and the low-frequency component of rainfall over the LYRV in a complex space, but also can well describe the variation of the principal component of the climate system in a low dimensional space. A 14 a hindcast was conducted in the recent study for subseasonal forecast of the low-frequency component of rainfall in the LYRV during the period from 2001 to 2014. These experimental results show that this ECAR model has a good skill for the forecast of the 50–80 d low-frequency component of the rainfall in the LYRV at a lead time of approximately 52 d. The ECAR model performs much better than the traditional autoregressive (AR) model, and it performs best in June–August. Hence, the development and variation of the major 50–80 d oscillation of global circulation and the temporal evolution of the relationship between the oscillation and the low-frequency component of rainfall in the LYRV are very helpful for intraseasonal forecast of variations in rainfall in the LYRV at a lead time of 50–60 d, particularly in the summer. The 50–80 d oscillation of circulation associated with the East Asian meridional tripole pattern (EAT) is considered to be the main factor that affects the subseasonal variation of rainfall in the LYRV.

**Key words** 50–80 d oscillation, East Asian meridional tripole pattern, Low frequency rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley, Forecasting model of ECAR, Subseasonal forecast

**摘 要** 用 1979—2000 年逐日长江下游降水的 50—80 d 低频分量和全球 850 hPa 低频纬向风主成分,构建了长江下游降水低频分量的次季节预测的扩展复数自回归模型(ECAR)。这种基于数据驱动建模的气候预测方法,不仅能在复数空间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,而且能更好地描述气候系统的主要分量在低维空间中的变化规律。对 2001—2014 年长江下游降水低频分量进行次季节逐日变化回报试验的结果表明,50—80 d 时间尺度的长江下游低频降水分量的预测时效可达 52 d 左右,预报能力明显优于自回归模型(AR),而且 6—8 月的预报技巧最高。基于全球环流主要 50—80 d 振荡型的发展和变化以及与长江下游低频降水相关的时间演变,对于提前 50—60 d 预报长江下游地区持续多(少)雨过程很有帮助(尤其是夏季),其中,东亚经向三极子型(EAT)是影响长江下游地区季节内降水变化的最主要

\* 资助课题:国家自然科学基金项目(41175082)。

作者简介:杨秋明,主要从事中中期天气预报和气候预报研究。E-mail:yqm0305@263.net.

的环流因子之一。

**关键词** 50—80 d 振荡, 东亚经向三极子型, 长江下游低频降水, ECAR 预报模型, 次季节预测

**中图法分类号** P456

## 1 引言

2 周至 2 个月的次季节预测介于较为完善的常规天气预报和正在发展的季节预测之间的时间尺度范围内。无论从天气-气候尺度的无缝隙预报的专业发展还是从社会需求角度, 次季节-季节 (Sub-seasonal to seasonal, S2S) 气候预测的开展和实施都具有重要的科学意义和广泛的社会应用价值 (Brunet, et al, 2010; Hoskins, 2013)。世界气象组织 (WMO) 的世界天气研究计划 (WWRP) 和世界气候研究计划 (WCRP) 联合天气和气候研究团队, 将次季节-季节预测视为近 5 年的首要任务 (Robertson, et al, 2015), 组织制定了“S2S 预测计划” (<http://s2sprediction.net/>)。这个时间尺度的预测同时受到初始条件和大气外部强迫因子的影响, 需要结合初始气象条件和海洋、大气以及气候的影响因素, 观测资料具有复杂性、综合性、全球性等特点。这些科学大数据反映和表征着复杂的自然现象与关系 (Nelson, 2008; Overpeck, et al, 2011), 并具有高度数据相关性和多重数据属性, 预测过程十分复杂。单一的经典数据分析方法已经不能全面、高效地胜任这些大量数据分析工作, 采用数据分解、变换和综合多种数据分析方法和技术, 从海量数据中提取出部分的有效数据, 可以获得比过去的抽样分析更全面的 10—90 d 低频变化信息。这种小数据带来的极端天气信息和气候变化的警示和洞察, 可以看作是一种新的次季节尺度 (15—60 d) 天气、气候变化信号。

随着对气候系统的认识不断加深, 尤其是对季节内可预报信息源的认识不断深入, 如季节内振荡 (Intraseasonal Oscillation, ISO) (李崇银, 2004)、平流层和对流层环流的相互作用 (Baldwin, et al, 2003) 等, 为次季节预报提供了较好的发展基础。当这些大气流型信号明显持续时, 对于季节内天气过程往往具有很强的可预报性, 并经常会引发后期的相关区域的极端天气气候异常事件 (如连续强降水、持续高温和干旱等)。由于气候系统具有部分无法拆分还原、不确定性较大、难以无限逼近等复杂特

征, 在一定条件下即使在给定当前状态与控制条件的情况下, 理论上系统下一步的状态也无法通过求解而准确地获得, 从而较长时效的系统的行为也就难以被精确地预测。本质上难以对其直接控制, 只能间接地对宏观现象 (如大尺度低频流型的变化等) 进行计算、解析、建模实现知识的合成和预测。气象历史和实时大数据可以代表全局, 揭示出全局特有的宏观信息, 这些综合信息是过去较小规模数据难以挖掘的。通过数据分解、变换, 直接从多变量、超高维、超长序列、高度耦合相关和高度时空属性的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) 的极端天气气候事件关系密切的各种主要低频振荡型, 研究其不同的传播特征和强度的季节和年际变化规律, 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, 可以显著延长次季节尺度低频分量和特定区域中对应的极端天气气候事件预报时效。

次季节尺度 (15—60 d) 的预测目前处于发展初期, 在能够实现对次季节尺度进行较准确的预测之前, 仍有许多科学问题和模式物理过程需要研究和改进。次季节预测中的月内时间尺度的 10—30 d 延伸期预报的研究已成为全球气象研究的热点 (Brunet, et al, 2010), 中外已从多个角度和多种途径研究了延伸期预报的可预报性 (丁一汇等, 2010; 何金海等, 2013; 杨秋明, 2015b), 其中主要有动力模式 (丑纪范等, 2010; 郑志海等, 2012; 郑志海, 2013; Ling, et al, 2014; Liu, et al, 2014; Xia, et al, 2015; Xiang, et al, 2015)、经典统计 (von Storch, et al, 1990; 杨秋明, 1998; Waliser, et al, 1999; Mo, 2001; Wheeler, et al, 2004; Cassou, 2008; 杨秋明等, 2012b; Kondrashov, et al, 2013; Cavanaugh, et al, 2015; Wang, et al, 2016; Zhu, et al, 2015) 和大数据方法 (杨秋明, 2014a, 2014b, 2015a) 3 类。在大气环流模式 (GCM) 建立之后, 尤其是 Miyakoda 等 (1983) 利用大气环流模式对 1977 年 1 月的阻塞形势提前 1 个月进行了再现, 世界上的主要预报中心先后进行了月动力延伸预报 (DERF) 试验 (Tracton, et al, 1989; Palmer, et al,

1990)。随着对延伸期可预报信息源的认识的深入,如 10—90 d 低频信号等,资料同化技术和模式的性能的提高,集合预报技术的广泛应用,均为提高延伸期预报技巧提供了有利条件。因此,世界上主要的数值预报中心对延伸期预报投入了极大的研究热情,并逐步发展了自己的业务或准业务动力延伸期预报系统(Vitart, 2004; Saha, et al, 2006)。在国际上探索利用大气环流模式做月平均预报的同时,20 世纪 70 年代末,巢纪平等(1979)创造性地提出一种距平滤波模式的理论和方法,为 30 d 动力延伸期数值预报开辟了一条新路。史久恩(1991)考虑大气具有确定性和随机性的双重性质,基于大气动力模式,根据蒙特卡洛预报和滞后平均预报的思想,开展了利用动力-统计模式进行月平均环流集合预报的试验。1995 年以后,中国月动力延伸预报研究也全面展开,基于大气环流模式对月平均环流进行了大量试验研究,发展出数字滤波、自记忆原理、四维变分同化集合、非线性时空序列、可预报分量提取法和大气相似性原理与谱模式相结合的月环流预报方法,特别是发展了采用历史资料的动力相似预报的策略和方法以及基于可预报性的集合预报(PBEP)方法,取得了较显著的效果(郑志海,2013),并于 20 世纪 90 年代后期建立了试验性月动力延伸预报业务系统。至 2015 年,中国气象局国家气候中心的第 2 代耦合气候模式的热带地区 MJO 振荡(Madden, et al, 1971)预报时效已达 20 d 左右(任宏利等,2015)。但由于数值预报模式预报受到逐日大气可预报上限(2—3 周)的制约,尽管中外学者进行了大量努力和尝试,基于数值模式的热带外大气环流预报技巧仍然总体偏低,对与中纬度地区大尺度环流相联系的强天气过程及异常事件(如长江流域暴雨过程等)的次季节预测还存在较大难度。

20 世纪 60 年代中期中国就有学者开始利用大气中存在的韵律现象做季节内的降水过程定性预报试验(江苏省无锡县气象服务站,1966),70 年代后期,中国学者更多的研究关注延伸期到季节内时间尺度的天气过程预报。杨鉴初等(1979)提出了用环流演变图预报长期天气过程并与旱涝冷暖结合的思想,这一思想有别于传统的长期天气过程概念和预报思路(主要预报平均态异常)。之后还有学者利用天文因子做 10 d 以上到季节内的天气过程预测试验,如任振球等(1986,1990)用天文因子预测连续性

特大暴雨和华北汛期干热天气过程等。20 世纪 80 年代末和 90 年代初,孙国武等(1988)和章基嘉等(1991)提出了“低频天气图”的概念,并初步用于中期和延伸期天气预报试验研究。90 年代,杨秋明(1990)用含灰参数的非线性微分方程作冷空气活动的 20 d 预测,并用基于数据驱动的同时具有多元统计分析和时间序列分析功能的主振荡型(Principal Oscillation Pattern, POP)模型作西太平洋地区 200 hPa 的 30—50 d 低频纬向风变化的 15 d 预测试验(杨秋明,1998),并于 1995—2005 年应用于江苏省气象台 5 d 以上中期天气预报业务,取得了较好的效果。由于可预报性理论、资料和技术条件的限制,1995—2006 年,中国关于延伸期预报其他方法的试验研究和业务应用很少。与此同时,国际上基于 MJO 的延伸期预报方法和业务应用十分活跃(Waliser, et al, 2003)。2007 年以后,随着气候变化背景下全球持续性异常事件频繁发生,防灾、减灾的巨大需求推动了中国学者对延伸期预报方法的新一轮研究热潮。包括中国国家气候中心、国家气象中心、南京信息工程大学、中国气象科学研究院、上海区域气候中心和兰州干旱气象研究所等在内的诸多科研业务单位分别利用动力模式、低频天气图、低频波、自回归模型及 MJO 等方法开展了 10 d 以上的延伸期预报和 30 d 以上的次季节预报信息研判和针对不同对象的预报产品制作(何金海等,2013; Hsu, et al, 2015; 任宏利等,2015; Zhu, et al, 2015, 2016),并在业务实践中取得了一定的效果,其中基于奇异值分解(SVD)的时空投影方法(STPM)的中国东部降水、MJO 等的延伸预报时效已达 25—30 d。2014 年以来,杨秋明(2014a, 2014b, 2015a, 2015b)通过约简大数据、集合小数据、扩展有效数据集,建立了 3 种简化的时变低频分量预报模型(Low frequency component forecast model, LFCF),即多变量时滞回归模型(Multivariate lagged regressive model, MLR),扩展复数自回归模型(Extended complex autoregressive model, ECAR)和多变量时滞回归/主成分复数自回归模型(Multivariate lagged regressive/ principal component-complex autoregressive model, MLR/PC-CAR),明显延长了预测时效。其中,基于独立回归方程组的 MLR 预报模型称为 LFCF1.0(杨秋明, 2015a);基于复数自回归递推的 ECAR 预报模型称

为 LFCF2.0(杨秋明,2014b);而通过独立回归方程组和复自回归递推时间耦合的 MLR/PC-CAR 预报模型称为 LFCF3.0(杨秋明,2014a)。基于全球大气主要的 20—30 d 振荡型构建各种简化的 LFCF,可以较好地预测未来 40—50 d 长江下游地区降水 20—30 d 低频分量的变化。这些完全由数据驱动低频系统构建的 LFCF 预报方法(杨秋明,2015b),将 10 d 以上的延伸期预报和 30 d 以上的次季节预报理论研究和实践应用实时地联系在一起,建立数据与数据之间的联系和变化,通过数据的动态更新显著改进预报精度。因此,由数据分析新技术产生多种创新性的数据产品,并通过关键数据和模型的集成,构建随时间变化的、简化的大数据预测模型 LFCF1.0—3.0,明显延长了各种季节内振荡的预报时效。

近 10 年来,动力模式对热带季节内振荡的预报技巧有了大幅度的提高,例如 ECMWF 模式的回报试验显示季节内振荡显著年份,北半球夏季热带季节内振荡(BSISO)预报时效延长到 20—25 d(Lee, et al, 2015),MJO 预报技巧已达 25—30 d(Neena, et al, 2014)。但是,对于 31—60 d 的次季节业务预测过程中仍存在很多的科学问题没有得到很好的理解和解决。由于季节内振荡变化的多样性以及天气和气候数值预报模式存在各种不确定性(如非线性随机过程(Palmer, et al, 2014)等),热带地区季节内振荡的 30 d 以上和热带外季节内振荡的 15 d 以上的预报误差仍然较大,经典统计方法和基于数据驱动的大数据方法是 10 d 以上的延伸期以及 30 d 以上的次季节预测(尤其是两半球热带外地区)的比较有效的方法之一(杨秋明,2015b)。这些方法的特点是不预设物理条件,不受数值模式可预报性的限制,其中大数据方法通过数据的不断叠加而增加发现不同低频变化规律或相关关系非预期的时间变化的可能性,可以由多种观测数据增加获取的预测信息的增量来显著改进预测精度。

时间尺度为 10—90 d 的季节内振荡是联系天气与气候的直接纽带,在国际上季节内振荡被认为可以填补天气预报和季节预测之间的“预报缝隙”,可以作为进行次季节预测的重要可预报性来源。大气各种季节内振荡型对中国不同区域的降水过程形成和变化有不同的影响,过去中国已取得了许多有意义的成果。研究表明,中国东部地区洪涝很大程

度上与季节内振荡有关,特别是长江中下游降水与低频振荡及其传播联系密切(杨秋明,2012a),这些研究对于其影响区域 10 d 以上的天气、气候事件预测有重要意义。已有的很多研究主要集中于 10—30 d 延伸期预报方法研究和应用,取得了较好的效果。基于 10—20、20—30 或 30—50 d 振荡,大部分方法对于夏半年长江中下游或华南地区强降水的预报时效可达 25—30 d(丁一汇等,2010;何金海等,2013;Hsu, et al, 2015),而且对于 20—30 d 振荡显著的年份,用 MLR/PC-CAR 模型(杨秋明,2014a),夏季长江下游地区强降水预报时效已延长至 50 d 左右(<http://www.lcjrerf30.org/>)。但对于振荡周期大于 50 d 的低频分量及其更长预报时效(31—60 d)的次季节预测方法和可预报性尚未系统研究。本研究将用长序列(1979 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日)研究月以上时间尺度全球 850 hPa 环流的低频主成分和长江下游地区降水主要低频分量的主要联系和时间变化特征,由动态数据来驱动复杂低频变化过程与系统的构建,建立 LFCF2.0,即扩展复数自回归模型(ECAR)(杨秋明,2014b),对 2001—2014 年逐日长江下游地区降水主要低频分量进行独立次季节预测试验,同时也讨论了可预报性的时间变化。

## 2 资料和方法

850 hPa 纬向风场选用 NCEP/NCAR 逐日再分析全球风场资料( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点)(Kalnay, et al,1996),逐日降水量采用长江下游地区( $30.5^\circ$ — $32.0^\circ\text{N}$ , $118.0^\circ$ — $122.5^\circ\text{E}$ )25 个站平均值,以上资料时段均为 1979 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日,低频降水的历史回报为 2001 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日。首先,对长序列长江下游逐日降水进行非整数波功率谱分析,研究主要季节内周期振荡,分析月以上时间尺度的长江下游降水低频分量与全球 850 hPa 纬向风的低频遥相关空间分布特征,并分析全球主要环流低频模态的时空变化。然后,用奇异谱分析(Singular spectrum analysis, SSA)(Mo,2001),对长江下游逐日降水原始序列和全球纬向风主要模态的时间系数进行低通滤波,重建对应于主要月以上时间尺度次季节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和全球 850 hPa 逐日纬向低频风场低频主成分,构建扩展复

数自回归模型 (ECAR) (杨秋明, 2014b), 进行次季节独立预测试验, 预测降水低频分量季节内变化 (ECAR 即低频分量预测模型 LFCF2.0 (杨秋明, 2015b), 具体方法见附录)。文中选择适当的子序列长度, 滑动进行动态建模, 适应低频分量之间相关的时间变化, 提高模型的预测稳定性。此外, 在相关系数检验中考虑滤波序列持续性的影响, 采用有效

自由度进行显著性检验。

### 3 长江下游地区降水季节内振荡

图 1a 是 1979 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日长江下游地区逐日降水的时间序列 (序列长度为 13149 d) 的非整数波功率谱分析, 表现为显著的多周期季节内振荡过程, 通过 0.05 信度检验的显著周

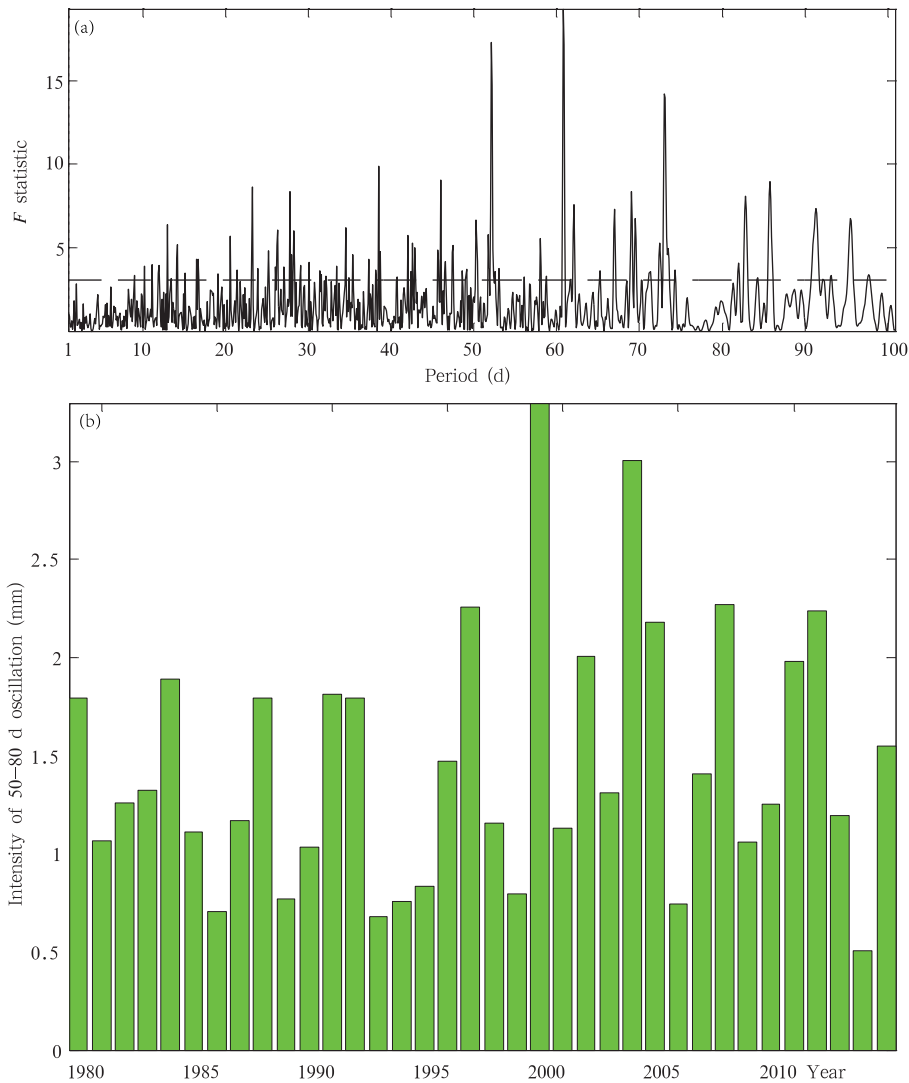


图 1 1979—2014 年长江下游地区逐日降水变化的主要季节内周期 (a, 实线为非整数波功率谱分析  $F$  统计量, 水平虚线表示通过 0.05 显著性检验), 5—8 月长江下游地区 50—80 d 降水振荡强度 (低频分量标准差, 单位: mm) 的年际变化 (b)

Fig. 1 (a) Principal periods of oscillation of daily precipitation over the during the period from 1979 to 2014, in which the statistical parameter  $F$  for the non-integer power spectral analysis is represented by the solid line, and the significance level of 0.05 is represented by the horizontal dashed line; (b) time series of the intensity of the 50 – 80 d oscillation for rainfall (standard deviation of filtered rainfall, unit: mm) over the lower reaches of the Yangtze River Valley in May – August from 1979 to 2014

期(非整数)为7—10 d的高频振荡和10—90 d的低频振荡,其中,13—15、21、23、25—27、35、39、41—43、45—47、51—53、58、61—63、67—69、73、83 和85 d左右的振荡显著,最强的季节内振荡为51—53、61 和73 d 振荡。这种最强的50—80 d 次季节振荡(显著性为0.0010)是引起31—60 d 的次季节时间尺度的长江下游多(少)雨期变化的主要因子。这个季节内主要振荡周期长于全球热带最强的MJO 的变化周期(30—70 d),表明了东亚副热带地区主要季节内振荡型变化的独立性。同时,其活动还存在显著的年际变化(图1b,每年5月1日—8月31

日长江下游地区50—80 d 降水低频分量(Butterworth 滤波)标准差的时间变化),1996、1999、2001、2003、2004、2007、2010 和2011 年振荡偏强,其中振荡最强的为1999 年;而1985、1988、1992、1993、1994、1998、2005 和2013 年振荡偏弱,其中最弱的为2013 年。此外,显著的10—20 和20—30 d 振荡与长江下游地区强降水过程密切相关(杨秋明,2009),较显著的30—50 d 振荡可能与MJO 有一定联系。

图2a 进一步给出了1979—2014 年长江下游地区4—9 月逐日降水主要周期的年际变化(对1979—2014 年逐年4月1日—9月30日的逐日降水序列

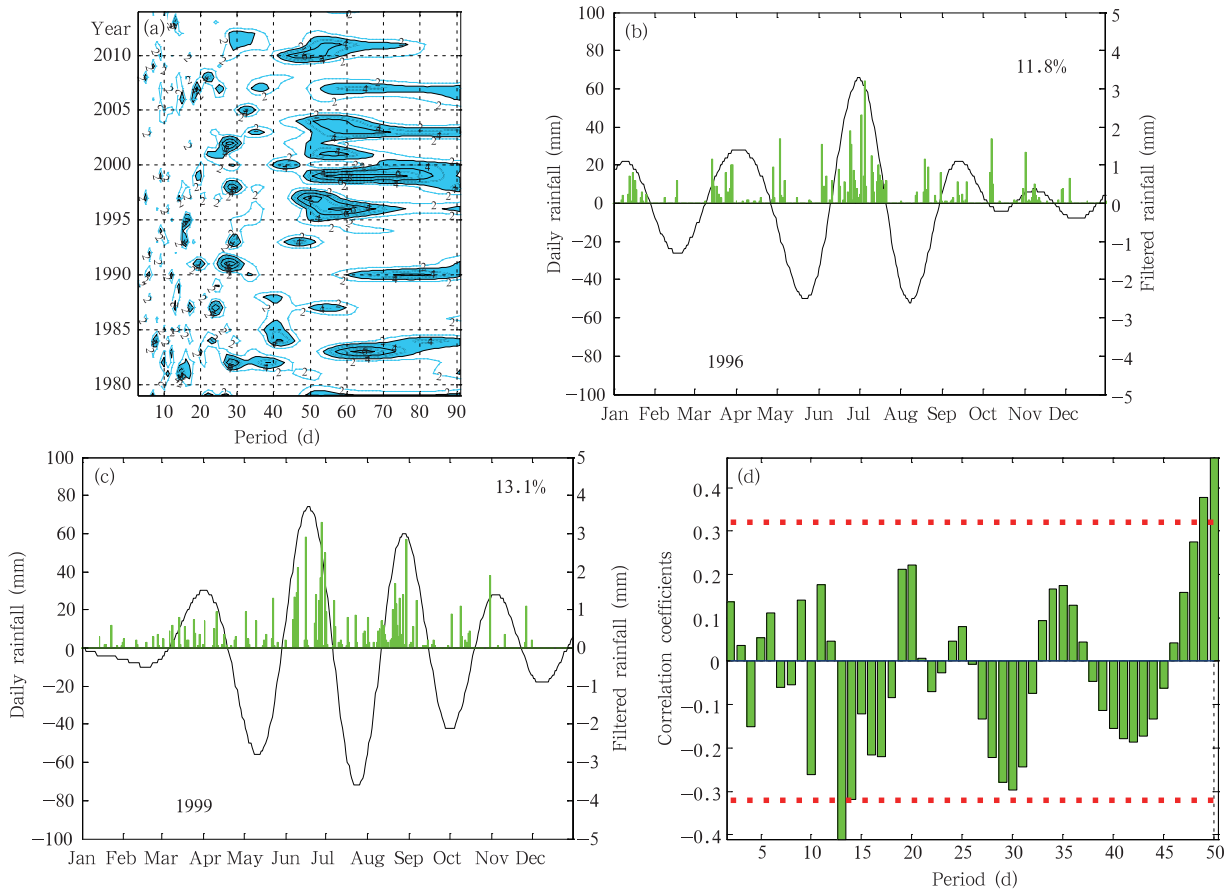


图2 1979—2014 年长江下游4—9 月逐日降水主要周期的年际变化和不同周期季节内振荡之间的相关  
(a. 周期的年际变化,阴影区表示通过0.05 显著性水平检验;b,c. 1996、1999 年长江下游逐日降水(直方图)和50—80 d 滤波降水(实线)的变化,图中百分数为滤波降水的解释方差;d. 50—80 d 季节内振荡平均强度与2、3、…、50 d 振荡强度的相关,水平虚线表示通过0.05 显著性检验)

Fig. 2 Interannual variations of the periods of daily rainfall oscillation and correlations between different ISOs for daily rainfall over the LYRV in April—September during the period of 1979—2014.  
(a) Interannual variations of the periods, shaded values are significant at the 95% confidence level. Daily rainfall (bar) and 50—80 d filtered rainfall (solid lines) over the LYRV are shown for 1996 (b) and 1999 (c). The percentage in each figure indicates the variance explained by the filtered rainfall.  
(d) Correlations between the average intensity of 50—80 d ISO and oscillations from 2 to 50 d, and the significance level of 0.05 is represented by the horizontal dashed line

做非整数波功率谱分析,并将每年各个周期(非整数)上的功率谱对应的回归方程的统计量  $F$  值以各周期作横坐标,时间(年)为纵坐标,作二维  $F$  值的时间-周期图(当  $F > 3.00$  时,其显著性为 0.05),表明了 50—80 d 季节内振荡存在极显著的年际变化,1995—2011 年 50—80 d 季节内振荡明显偏强(与图 1b 一致)。图 2b 和 c 是其中显著的 1996 和 1999 年长江下游逐日降水和 50—80 d 滤波降水的变化,其解释方差分别为 11.8% 和 13.1%,是这两年夏半年长江下游主要降水季节内振荡之一。此外,图 2d 还给出了 50—80 d 季节内振荡平均强度与 2,3,⋯,50 d 振荡强度(逐日降水不同周期的非整数波谱对应的统计量  $F$  值)的相关变化。从图中可以发现,这种长江下游降水 50—80 d 季节内振荡与 13—14 d 振荡和 29—30 d 季节内振荡强度变化存在明显负相关,尤其是 13 d 左右的振荡系数达  $-0.41$  (通过 0.05 显著性水平检验)。当 50—80 d 季节内振荡增强时,31—60 d 次季节时间尺度的长江下游持续多(少)雨期显著,但准 2 周振荡显著减弱,同时也不利于 20—30 d 振荡加强,不利于长江下游强降水频数增大,反之亦然。所以,这种 50—80 d 季节内振荡变化及其与小于 50 d 的振荡的关系(特别是其与准 2 周振荡的强负相关)的分析研究对于长江下游低频降水、持续多(少)雨期和强降水的 31—60 d 次季节预报以及 10—30 d 延伸期预报精度的提高均有重要意义,其中不同周期的季节内振荡的相互作用机制有待深入研究。

#### 4 长江下游地区降水 50—80 d 振荡与全球环流的相关

图 3a 为长序列(1979 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 31 日)逐日长江下游地区 50—80 d 低频降水与全球 850 hPa 低频纬向风场的相关空间分布,其中阴影区表示通过 0.05 的显著性检验(考虑滤波序列持续性的影响,当相关系数大于 0.10 时,其显著性为 0.05)。图中清楚表明,主要相关区域在北半球地区,表现为中国东部地区向西北太平洋地区负-正-负相间沿西北—东南向传播的波列结构,定义为东亚经向三极子型(East Asian meridional tripole pattern, EAT),主要负-正-负作用区域分别在华北地区、中国南部至长江下游和日本南部洋面以及菲律宾以东的西北太平洋地区,其中华北地区和长江

下游地区负-正相关分布与冬季热带外欧亚型遥相关(Wallace, et al, 1981)的东亚地区的分布相似,而长江下游地区和西北太平洋地区的正、负分布与夏季东亚太平洋型(Nitta, 1987; 黄荣辉,1990; 杨秋明,1993)部分类似,反映了东亚中低纬度地区 50—80 d 时间尺度低频环流的相互作用,与 ENSO 和热带印度洋地区海-气系统变化有一定联系,其影响过程具有多样性(Wang, et al, 2000; Xie, et al, 2016);而北极附近的北半球高纬度地区还存在较显著的正相关区(这些地区也是方差贡献大值区(图 3b)),表明北极低频环流变化对长江下游地区 50—80 d 振荡的重要作用。此外,欧亚大陆西部、东北亚、北太平洋中部、副热带西大西洋和北非西部大陆地区各有一个明显的负相关区,但南半球地区显著相关区很小,这与 20—30 d 振荡的遥相关显著不同(杨秋明,2009)。值得注意的是 MJO 的主要活动区域(热带西太平洋和印度洋地区)不存在明显相关区,表明这种与长江下游地区降水 50—80 d 振荡密切相关的东亚经向三极子型变化独立于 MJO,其物理机制有待于进一步的研究。

为了分析 50—80 d 时间尺度的全球主要低频环流的时空变化,图 4 给出了全球低频纬向风前 7 个主要空间模态(时间尺度为 50—80 d,资料为 1979—2000 年,序列长度为 8036 d,由 Butterworth 滤波得到全球 850 hPa 低频纬向风场),解释方差分别为 23.5%、4.3%、4.1%、3.5%、3.0%、2.9% 和 2.5%。第 1 模态呈现全球正、负区域非均匀的分布(图 4a),反映了月以上时间尺度热源与两半球热带外地区和全球热带地区低频环流变化的联系;第 2 模态表现为从南极到北极地区的正、负相间分布的带状波列(图 4b),而第 3 模态主要是反映与 MJO 类似的热带印度洋和太平洋正、负反相分布的空间结构(图 4c),与 MJO 变化有关。第 4 模态主要表现为北半球中高纬度地区的负、正带状分布结构(图 4d),与北极涛动季节内变化相关,对长江下游低频降水也有较大影响(图 3a),但第 5 模态存在从南半球中高纬度经过澳大利亚至中国南海、西太平洋地区至中国南部和长江下游地区的显著波列(图 4e),直接影响长江下游地区低频降水变化;第 6 模态中波列主要在大西洋地区和东南太平洋地区活动,副热带西北太平洋地区还有一个负相关区(图 4f);此外,第 7 模态存在从热带大西洋经过北大西洋中

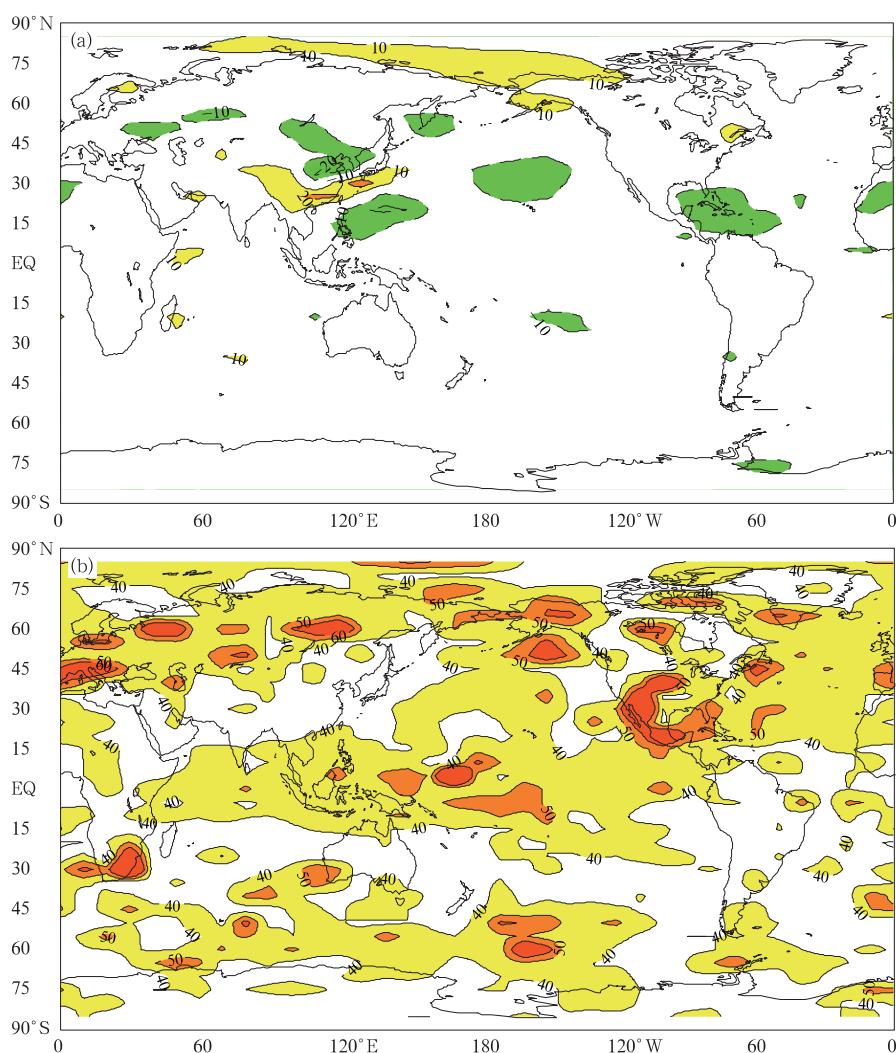


图3 1979—2014年长江下游地区50—80 d低频降水与全球850 hPa低频纬向风场的相关分布  
(a, 相关系数, 数值 $\times 100$ , 阴影表示通过0.05的显著性检验的区域)和  
全球850 hPa纬向风距平50—80 d滤波序列与原始序列季节内标准差比值的空间分布  
(b, 数值 $\times 100$ , 单位: %, 阴影区表示 $\geq 40$ 的区域)

Fig. 3 (a) Correlation between rainfall over the LYRV and global zonal wind anomaly at 850 hPa on the time scale of 50 — 80 d. The values are multiplied by 100 and the values that are at the 95% confidence level are indicated by shaded areas; (b) spatial distribution of the ratio of the variance explained by the 50 — 80 d signal to the total seasonal variance. The values (unit: %) are multiplied by 100 and the contours greater than or equal to 40 are shaded

高纬度地区、北极和欧亚大陆北部和中部至东亚热带的波列(图4g);对长江下游低频降水变化有一定作用。上述波列活动区均处于50—80 d振荡的解释方差大值区(主要是热带太平洋地区和北半球高纬度地区,图3b),其中模态4、5和7中的北半球高纬度地区以及南半球向北半球传播的经向波列的东亚低纬度地区对长江下游地区降水50—80 d振荡

的影响较明显,反映了长序列环流资料中较稳定的遥相关联系。此外,50—80 d长江下游降水低频分量与全球低频纬向风主要模态对应的时间系数PC1, ..., PC7之间200 d滑动相关分析表明,滑动相关系数均具有显著的季节和年际变化(图略),强正、负相关时段具有季节性和不规则的时间变化。因此,上述7个模态中的波列活动区(例如模态5中



南半球向东亚地区经向波列活动区域, 模式 7 中西太平洋热带地区等) 为全球主要低频模态与长江下游地区降水 50—80 d 振荡遥相关的不稳定区, 与东亚季风系统复杂的时变性有关 (Wang, 2002)。所以, 稳定的遥相关区位于北半球地区, 以东亚经向三极子型分布最为显著, 而南半球主要表现为不稳定遥相关。以上分析表明, 这 7 种季节内振荡型可以

通过稳定或不稳定的大气遥相关, 以不同的方式直接或间接影响长江下游地区 50—80 d 降水低频分量变化和持续多雨(干旱)过程的形成, 是长江下游地区次季节预测的可预报性主要来源之一。因此, 文中采用全球范围内方差贡献较大的前 7 个 850 hPa 低频纬向风场主成分 PC1—PC7 建立预测模型。

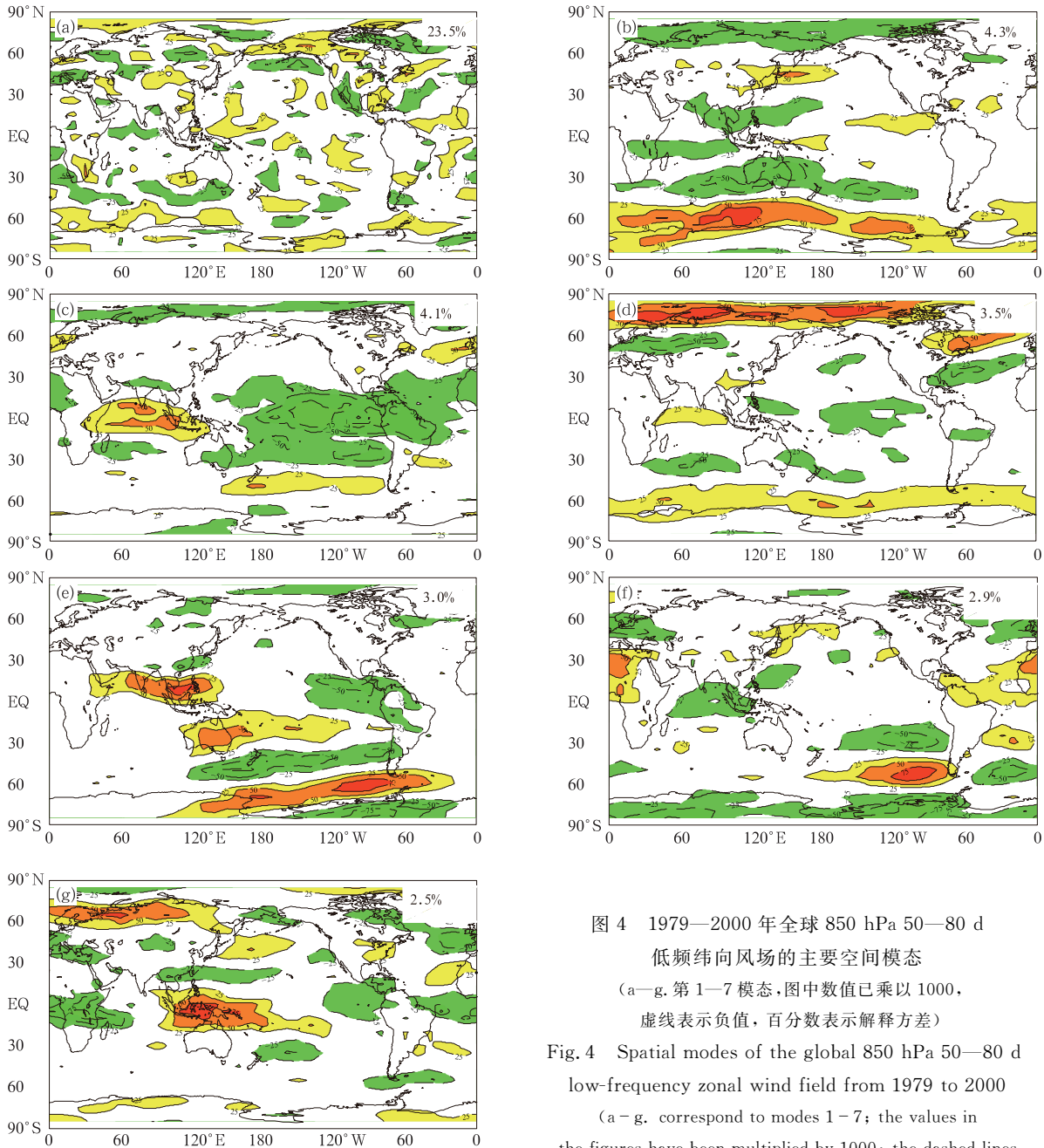


图 4 1979—2000 年全球 850 hPa 50—80 d 低频纬向风场的主要空间模态 (a—g. 第 1—7 模态, 图中数值已乘以 1000, 虚线表示负值, 百分数表示解释方差)

Fig. 4 Spatial modes of the global 850 hPa 50—80 d low-frequency zonal wind field from 1979 to 2000 (a—g. correspond to modes 1—7; the values in the figures have been multiplied by 1000; the dashed lines represent negative values, and the percentage in each figure indicates the variance explained by the corresponding mode)

## 5 预测试验

用1979年1月1日—2000年12月31日的资料(8036 d),得到全球850 hPa 50—80 d低频纬向风场的7个低频主成分和长江下游地区逐日低频降水,建立ECAR模型对2001年1月1日—2014年12月31日(5113 d)的长江下游地区逐日低频降水进行历史回报试验。由于奇异谱分析具有自适应滤波信号的重建功能,对各种主要信号变化的定位准确,能客观识别序列中存在的不同特性的多种振荡信号。所以,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奇异谱分析后,由各自对应的时间变化型经验正交函数(T-EOF),对各分量分别重建得到对应的50—80 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2001—2014年长江下游地区50—80 d降水分量的次季节变化。在每次独立预测试验中,将2001—2014年逐日观测的全球纬向风投影到这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奇异谱分析后的对应于50—80 d振荡的T-EOF上得到PC1, PC2, …, PC7和长江下游逐日降水的50—80 d重构分量 $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,7}, r_{kj}$ , (T-EOF由1979—2000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模型做2001年1月1日—2014年12月31日(5113 d)长江下游低频降水的次季节独立回报试验。这些独立预测用限定记忆法,保持子序列 $N_0$ 不变,构建时变系数的ECAR滑动进行独立样本预测试验(初始时间分别为2000年12月31日,2001年1月1日, …, 2014年12月29日,12月30日,预报未来90 d,共5113次预报),其中复数自回归模型的阶数 $p=3$ ,预报时间 $K=90$  d,子序列长度 $N_0=200$  d。这种建模方案有利于适应复数空间中各个低频分量之间的联系随时间的改变,反映气候系统分量之间相关的时间变化。

图5给出了用观测的全球850 hPa纬向风的低频主成分PC1—PC7和长江下游地区50—80 d降水低频分量构成的扩展实数据阵,通过傅里叶变换构造扩展复数数据阵(ECM),建立时变ECAR模型做的2001—2014年逐日长江下游地区降水低频分量的1—90 d预报与观测的相关系数。从图中可以

看出,长江下游地区降水低频分量的预报时效达52 d(观测和预报的低频分量相关系数大于0.398,其显著性是0.05,考虑序列持续性的影响)。这表明时变ECAR能有效预测与全球环流50—80 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50—60 d的变化。图6a—d为50—80 d振荡显著年份2001、2003、2007、2011年(图1b)的逐日低频降水量30 d预报(虚线)和观测的低频分量(实线)的变化曲线,相关系数分别达到0.61、0.74、0.69、0.70(365次预报,初始时间分别为前一年12月2日,12月3日, …, 当年12月1日)。可以看出,与上述年份中6—9月的2个主要长江下游强降水集中期对应的显著的低频降水正位相变化和干旱少雨期的负位相变化均能较准确地预测,尤其是与2007年7月上旬和9月中旬(图6c)及2011年6月中旬和8月下旬(图6d)的持续暴雨对应的低频降水量位相变化能很好地预测,其预报的正位相变化与实况基本一致,但预测的峰值比实况偏小。

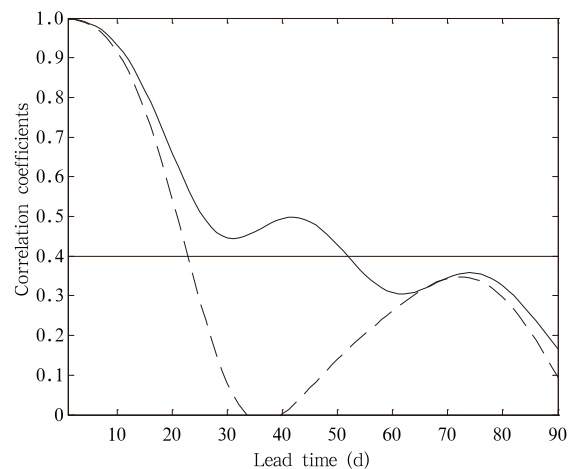


图5 2001—2014年长江下游降水低频分量 $r_{kj}$ 1—90 d预报与观测的相关系数(实线:ECAR模型,虚线:AR(Autoregressive)模型,图中水平实线表示达到95%的显著性水平)

Fig. 5 Correlation coefficients between observations and the 1—90 d forecasts of low-frequency rainfall component  $r_{kj}$  in the lower reaches of the Yangtze River Valley during 2001 to 2014 (Solid line: ECAR model output; dashed line: AR(Autoregressive) model output. The horizontal solid line in the figure represents the confidence level of 95%)

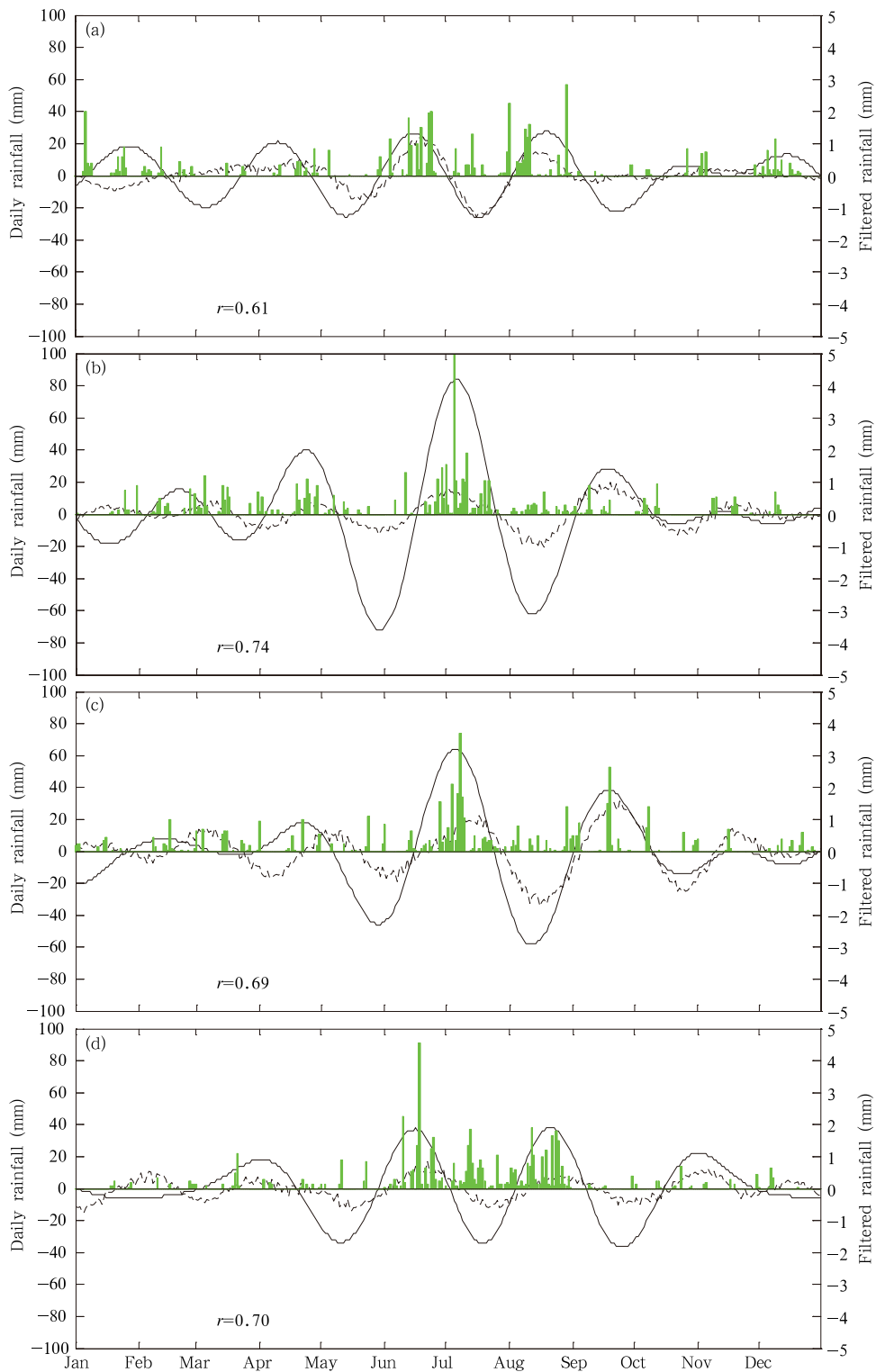


图 6 长江下游地区降水 50—80 d 振荡显著年 2001(a)、2003(b)、2007(c)和 2011 年(d)1—12 月 ECAR 模型的降水低频分量的 30 d 预报(实(虚)线表示实况(预报),直方图表示长江下游地区逐日降水变化,单位:mm. $r$ 为预测与实况的相关系数,预报的初始时间分别是前一年 12 月 2 日, ..., 当年 12 月 1 日)

Fig. 6 The forecast of the ECAR model at a lead time of 30 d from January to December in (a) 2001, (b) 2003, (c) 2007 and (d) 2011, when significant 50—80 d oscillation of rainfall in the LYRV were found (The solid (dashed) line represents the observation (the forecast) of low-frequency rainfall in the LYRV; the histogram represents daily rainfall in the LYRV; unit: mm;  $r$  is the correlation coefficient between the forecast and the observation; the initial date of forecast is previous December 2, ..., current December 1)

前面给出了长江下游地区 50—80 d 低频降水 ECAR 模型的逐日预报技巧,总的看来,表现出很强的预报性能,平均预报时效达到 52 d。为了进一步研究预报与观测相关系数的月际和年际变化,图 7 给出了 2001—2014 年长江下游地区 50—80 d 低频降水 ECAR 模型 70 d 预报技巧的月际变化(每年初始时间分别为 1 月 1 日,2 月 1 日,……,11 月 1 日和 12 月 1 日的 12 次预报与观测的相关系数;例如初始时间为 2010 年 1 月 1 日,预报未来 70 d(即 2010 年 1 月 2 日—3 月 12 日)低频分量变化,预报技巧是这 70 d 预报与实测低频分量的相关系数)。可见预报技巧存在极显著的季节变化,夏季 6—8 月预报技巧最高,大部分年份预报与观测的相关系数大于 0.5(其显著水平为 0.05,考虑序列持续性的影响),其中 6—7 月多数年份的预报与观测的相关系数大于 0.7,显著水平为 0.02;冬半年预报技巧变低,出现明显的不稳定性,且年际变化显著,其中春季的 3 月的可预报性最低(可能与春季东亚海气系统不稳定对季节内振荡的影响有关)。值得注意的是初始时间为 6 月 1 日的 14 次预报中全部呈现正相关(图 8b),有 12 次预报与观测的相关系数大于 0.5(其显著水平为 0.05),仅 2009 和 2013 年较低(小于 0.5),未达 0.05 的显著水平,这 14 a 6—7 月梅雨期低频降水未来 70 d 的预报准确率达 0.857(12/14);图 8a 还进一步给出提前一周的初始时间为 5 月 25 日的 14 次预报,其准确率也达 0.857,只有 2009 和 2013 年为负相关,无预报技巧。因此,这种基于数据驱动的 LFCF2.0(ECAR)能为长江下游地区梅雨期多(少)雨时段实时预报提供有用信息。

上述大量历史数据的独立预报试验表明,长江下游地区降水 50—80 d 振荡低频分量的 ECAR 模型次季节预报技巧存在明显的季节变化和年际变化,特别是夏季 6—8 月预报技巧最高,预报时效可达 70 d 左右,可以为长江下游地区梅雨前、梅雨期和出梅后的盛夏时期持续降水时段和暴雨的次季节预测提供稳定的预报信息。它体现了 LFCF2.0(时变复系数 ECAR)可以很好描述在外强迫(如海温、雪盖和土壤湿度等)作用下全球环流各种主要 50—80 d 振荡型变化对长江下游低频降水分量的显著影响及其季节和年际变化,但这些季节内振荡型强

度的变化特征和机制仍需从不同角度分析研究。

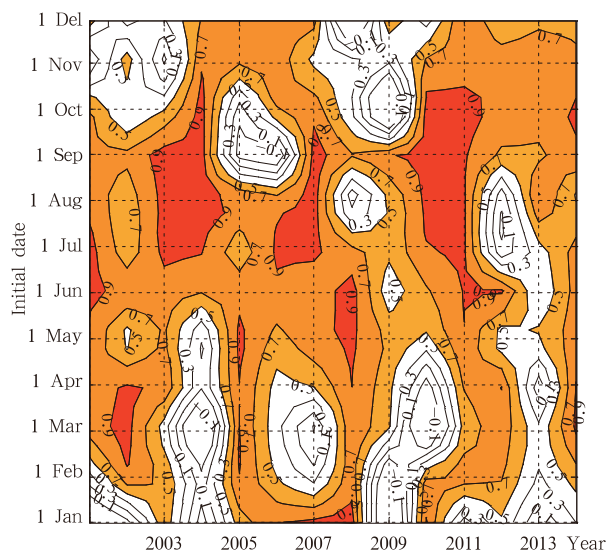


图 7 2001—2014 年长江下游地区 50—80 d 低频降水 ECAR 模型 70 d 预报与观测的相关系数的月际变化(初始时间分别是 1 月 1 日,2 月 1 日,……,11 月 1 日和 12 月 1 日;阴影区表示通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 7 Monthly variation of correlation coefficients between observations and forecasts of the ECAR model in the future 70 d for the 50—80 d low-frequency rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley over the validation period of 2001—2014 (The initial date are 1. 1, 2. 1, …, 11. 1, 12. 1, respectively. Shaded values are significant at the 95% confidence level)

此外,用观测的长江下游地区降水低频分量直接建立时变系数自回归模型(Autoregressive model, AR)滑动进行独立样本预测试验(子序列长度  $N_0 = 200$  d),预报时效只有 22 d(图 5 中虚线),23 d 以后的预报出现显著的不稳定,预报和观测的相关系数在 0.398 以下,所以不能有效做出 31—60 d 的次季节预测。图 9 和 10 分别给出了 2001—2014 年 20、30、40 和 50 d 的 ECAR 和 AR 模型预报和观测的相关系数的逐年变化,表明了大部分年份 ECAR 在未来 50 d 预报时效内均呈现显著的正相关(图 9);而 AR 模型未来 20 d 以后预测出现明显的不稳定,预报技巧年际变化大,有大约 2/3 年份相关不显著或负相关较大,尤其是 40 d 的预报(图 10 兰线)。主要原因是 AR 模型只反映了长江下游低频降水分量自身的变化信息(预测的稳定性很差),对于未来



图 8 2001—2014 年长江下游地区 50—80 d 低频降水 ECAR 模型 70 d 预报与观测的相关系数的年际变化 (a、b. 初始时间 5 月 25 日、6 月 1 日;图中水平虚线表示达到 95% 的显著性水平)

Fig. 8 Interannual variations of correlation coefficients between observations and forecasts of the ECAR model in the future 70 d for the 50—80 d low-frequency rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley over the validation period of 2001—2014. The initial dates are (a) 5.25 and (b) 6.1, respectively. The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95%

3 周以上的 50—80 d 低频分量变化基本没有预报能力,仅能预报 20 d 左右的延伸期变化;而 ECAR 模型通过傅立叶变换,在复数空间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的复杂时滞相关变化新规律,更客观地描述气候系统的主要分量在低维空间中的变化信息,使得次季节预报时效显著延长。值得注意的是,2013 年 ECAR 和 AR 模

型的 30 d 以后的预报技巧迅速减弱变为显著负值(图 9 中红、兰、紫线,图 10 中红、兰、紫线),这是由于 2013 年 50—80 d 振荡信号很弱(图 1b),是 1979 年以来夏季 50—80 d 振荡最弱的年份,ECAR 和 AR 预报容易出现不稳定,预报技巧较低,尤其是 2013 年上半年(图 7)。但 2013 年主要表现为显著的 20—30 和 10—20 d 振荡(它们与 50—80 d 振荡

的负相关明显(图 2d)), ECAR 对于长江下游 20—30 d 低频降水分量(与长江下游暴雨频数变化存在强正相关(杨秋明, 2009))的预报能力很强, 实时预

报时效达到 43 d, 远超过振荡周期长度(杨秋明, 2014b), 也显著长于 AR 的 23 d, 表明 ECAR 对于强季节内振荡变化良好的预报性能。

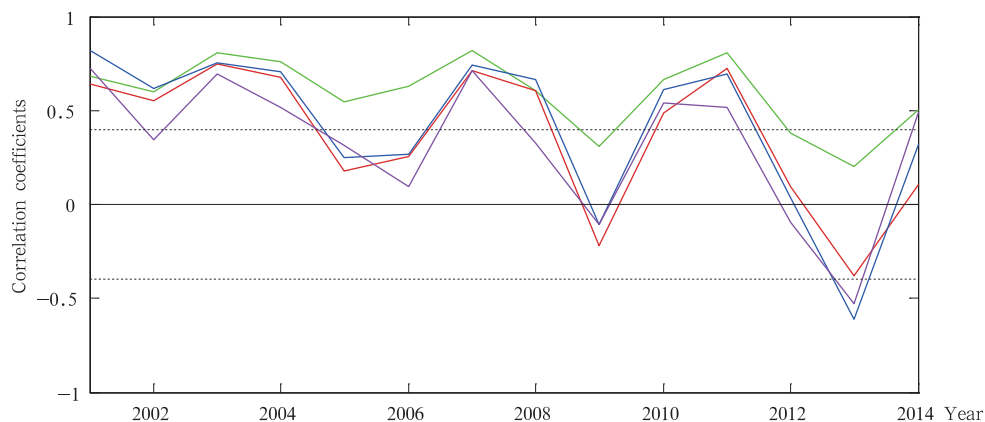


图 9 2001—2014 年长江下游地区 50—80 d 低频降水 ECAR 模型预报与观测的相关系数的年际变化(绿、红、兰、紫线对应预报时效 20、30、40、50 d; 图中水平虚线表示达到 95% 的显著性水平)

Fig. 9 Interannual variations of correlation coefficients between observations and forecasts of the ECAR model for the 50—80 d low-frequency rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley over the validation period of 2001—2014. The lead times are 20 d (green line), 30 d (red line), 40 d (blue line) and 50 d (purple line), respectively. The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95%



图 10 长江下游地区 50—80 d 低频降水 AR 模型预报与观测的相关系数的年际变化, 其他同图 9

Fig. 10 Interannual variation of correlation coefficients between observations and forecasts of the AR model for the 50—80 d low-frequency rainfall in the lower reaches of the Yangtze River Valley. All others are the same as in Fig. 9

本研究主要是在复数空间上基于长江下游地区降水与全球环流主要 50—80 d 时间尺度的低频分量较显著的超前(滞后)相关关系及其时间变化(其中以南北半球主要关键区的低频分量遥相关的时间不稳定为主), 构建近似预报模型, 较好地做出了长

江下游 50—80 d 低频降水分量的 30 d 以上的次季节预测。通过识别有效关键数据及其时间变化, 构造复数空间中的虚拟数据, 扩展有效数据规模, 基于实虚数据的可能联系和协同演化新规律, 由数据驱动构建各种能更好地描述大气低频信息的简化的时

变复数回归模型进行预测,可以有效提高低频分量的次季节预测精度。这种方法在一定程度上突破了物理世界资源有限的约束,实现对气候系统中主要低频模态之间相关的多样性更有效的描述、解析和预测评估,将复杂的多样化变为简单的近似变化,从而减小预测的不确定性。所以,改进动态关键数据识别,形成一个崭新的数字化的数据环境,建立数据之间的主要联系并分析其时间变化,是提高次季节预测精度的最主要途径之一。需要指出的是,对于实时的季节内振荡预报,由于用传统的滤波方法提取季节内振荡特征的过程中会在序列的前后各损失 20 d 左右的资料,明显影响时间序列的预测精度和时效;而文中用数据驱动的奇异谱分析对原始序列做了低通滤波,不但滤去高频噪声,而且也滤去了非周期弱信号。它对主要信号变化定位准确,无传统滤波方法的边界效应,边界附近滤波值精度明显提高,因而十分适合于实时次季节预测,它是文中构建的 ECAR 模型预报时效比传统经典统计方法明显延长的主要原因。因此,实时数据中通过奇异谱分析提取的稳定的低频信号并变换到低频复数空间,构建的时变复系数 ECAR 模型能很好地预测未来 31—60 d 的 50—80 d 降水低频分量强度以及符号(位相转换)的变化,可以为未来 2 个月长江下游地区持续多(少)雨期、准 2 周振荡变化、20—30 d 振荡变化和强降水过程的气候预测提供较多重要信息。

## 6 结论和讨论

用 1979—2014 年逐日长序列资料,研究长江下游地区降水主要季节内变化周期及其与全球环流的联系,基于大量观测资料中提取的月以上时间的降水和环流主要低频分量,构建扩展复数自回归模型(ECAR)即 LFCF2.0,进行长江下游降水低频分量次季节预测研究,得到如下结论:

(1)对 1979—2014 年 36 a 逐日长江下游地区降水资料进行非整数波功率谱分析,发现长江下游地区最显著的季节内振荡周期为 50—80 d,其振荡强度的年际变化与 50 d 以下的低频振荡变化成负相关,其中与准 2 周振荡的负相关最显著。这种 50—80 d 季节内振荡与全球环流的遥相关主要表现为极显著的东亚经向三极子型的空间分布,独立于热带 MJO 的变化,同时北极地区、副热带北太平洋和大西洋地区环流低频变化也有重要作用,但与

南半球低频环流的联系存在时变性,呈现较强的不稳定遥相关。

(2)用长序列(1979 年 1 月 1 日—2000 年 12 月 31 日,8036 d)全球 50—80 d 低频风场资料和长江下游地区逐日降水低频分量,构建扩展复数自回归模型(ECAR),对影响 2001—2014 年长江下游地区持续降水过程的 50—80 d 降水低频分量次季节逐日变化进行回报试验。基于与全球 850 hPa 纬向风低频主要模态,在复数空间上建立的时变 ECAR 预报模型可以有效预测 2001—2014 年长江下游逐日降水 50—80 d 低频分量未来 50—60 d 的变化,能为长江下游未来 15—60 d 中持续多(少)雨期的预测提供显著的预报信号,较好地提前 52 d 预测与持续多雨(干旱)过程对应的低频分量的季节内变化过程,将长江下游持续降水事件的预报时效延长至 50—60 d,而用长江下游地区降水低频分量直接建立时变 AR 模型的预报时效只有 22 d 左右。这表明在复数空间上,分离出比实数空间更多的低频变化信息,构造时变 ECAR 模型能更稳定地描述各种 50—80 d 低频分量的时滞相关及其时间变化,显著提高了预测精度和延长预报时效,预测能力明显高于 AR 模型。

(3)长江下游地区降水 50—80 d 低频分量的时变 ECAR 模型(LFCF2.0)的预报技巧具有明显的季节变化,夏季 6—8 月预报技巧最高,预报时效延长至 70 d,可以为长江下游地区梅雨前、梅雨期和出梅后的盛夏时期持续降水时段和暴雨过程的实时次季节预测提供稳定的预报信号;但冬半年预报技巧减弱,年际变化增大,其中 3 月的预报技巧最低。

大数据分析方法的改进是次季节气候预测方法发展的主要动力。从不同视角对关键数据进行有针对性的归纳和分析,不断从动态数据中获得新信息和知识,构成动态变化的知识体系,可以发现隐藏在大量数据(包括实虚数据集)中的多层次相关过程。即使部分机制不能用确定的物理过程描述,没有被理论推导或因果关系存在不确定性和多样性,也能针对一定时间尺度的低频分量,通过数据的分解、变换和扩展,建立完全由数据驱动的、随时间变化的各种近似简化模型(如 LFCF1.0,2.0 和 3.0 等),得到更精确的数据分析解,显著延长次季节气候预测时效。

## 参考文献

- 巢纪平, 季劲钧, 朱志辉等. 1979. 长期数值天气预报的滤波方法. 中国科学, 9(1): 75-84. Chao J P, Ji J J, Zhu Z H, et al. 1979. Filtering method for the long range numerical weather prediction. Sci China, 9(1): 75-84 (in Chinese)
- 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. 气象科学, 30(5): 569-573. Chou J F, Zheng Z H, Sun S P. 2010. The think about 10 - 30 days extended range numerical weather prediction strategy facing the atmosphere chaos. Scientia Meteor Sinica, 30(5): 569-573 (in Chinese)
- 丁一汇, 梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报. 气象, 36(7): 111-122. Ding Y H, Liang P. 2010. Extended range forecast based on MJO. Meteor Mon, 36(7): 111-122 (in Chinese)
- 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. 气象科技进展, 3(1): 11-17. He J H, Liang P, Sun G W. 2013. Consideration on extended-range forecast and its application study. Adv Meteor Sci Technol, 3(1): 11-17 (in Chinese)
- 黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究. 大气科学, 14(1): 108-117. Huang R H. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism. Scientia Atmos Sinica, 14(1): 108-117 (in Chinese)
- 江苏省无锡县气象服务站. 1966. 以不同长度的前期征兆制作中长期降水预报. 气象学报, 36(1): 54-65. Wuxi Meteorological Station in Jiangsu Province. 1966. Middle and long term rainfall forecast by the important omen for the different length. Acta Meteor Sinica, 36(1): 54-65 (in Chinese)
- 李崇银. 2004. 大气季节内振荡研究的新进展. 自然科学进展, 14(7): 734-741. Li C Y. 2004. Recent progress in atmospheric intraseasonal oscillation research. Progr Nat Sci, 14(7): 734-741 (in Chinese)
- 任宏利, 吴捷, 赵崇博等. 2015. MJO 预报研究进展. 应用气象学报, 26(6): 658-668. Ren H L, Wu J, Zhao C B, et al. 2015. Progresses of MJO prediction researches and developments. J Appl Meteor Sci, 26(6): 658-668 (in Chinese)
- 任振球, 张素琴. 1986. 用天文因子试报连续性特大暴雨长期过程的实况检验//天文气象学术讨论会文集. 北京: 气象出版社, 196-198. Ren Z Q, Zhang S Q. 1986. Verification on the predictive capability of long-term processes for severe rainstorm by astronomical factors//Symposium on Meteorology and Astronomy. Beijing: China Meteorological Press, 196-198 (in Chinese)
- 任振球, 张素琴, 李松勤. 1990. 1989 年华北汛期干热天气过程预测的实况检验. 气象, 16(5): 43-45. Ren Z Q, Zhang S Q, Li S Q. 1990. Verification on the predictive capability of the dry-hot weather processes in North China during flood season in 1989. Meteor Mon, 16(5): 43-45 (in Chinese)
- 史久恩. 1991. 概率统计在气象学中的应用和问题. 应用概率统计, 7(4): 433-443. Shi J E. 1991. The application and problems of probability and statistics to meteorology. Chin J Appl Prob Stat, 1981, 7(4): 433-443 (in Chinese)
- 孙国武, 陈葆德. 1988. 青藏高原上空大气低频波的振荡及其经向传播. 大气科学, 12(3): 250-256. Sun G W, Chen B D. 1988. Oscillation characteristics and meridional propagation of atmospheric low frequency waves over the Qinghai-Xizang Plateau. Scientia Atmos Sinica, 12(3): 250-256 (in Chinese)
- 杨鉴初, 归佩兰. 1979. 关于长期天气过程的划分. 气象, 4(6): 15-18. Yang J C, Gui P L. 1979. On the classification of the long-term weather processes. Meteor Mon, 4(6): 15-18 (in Chinese)
- 杨秋明. 1990. 非线性灰色微分方程  $\frac{dx}{dt} + ax^{\otimes\alpha} = b$  的拟合. 应用数学, 3(3): 60-67. Yang Q M. 1990. The fitting for grey nonlinear differential equation  $\frac{dx}{dt} + ax^{\otimes\alpha} = b$ . Appl Math, 3(3): 60-67 (in Chinese)
- 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. 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. Scientia Atmos Sinica, 17(2): 148-154 (in Chinese)
- 杨秋明. 1998. 西太平洋热带地区环流低频变化的主振荡型预测试验. 应用气象学报, 9(3): 345-351. Yang Q M. 1998. Forecast experiments for low frequency oscillation of tropical circulation in west Pacific using principal oscillation pattern analysis. J Appl Meteor Sci, 1998, 9(3): 345-351 (in Chinese)
- 杨秋明. 2009. 全球环流 20—30 d 振荡与长江下游强降水. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(11): 1515-1529. Yang Q M. 2009. The 20 - 30 d oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley. Sci China Ser D: Earth Sci, 52(10): 1485-1501
- 杨秋明, 宋娟, 李熠等. 2012a. 全球大气季节内振荡对长江流域持续暴雨影响的研究进展. 地球科学进展, 27(8): 876-884. Yang Q M, Song J, Li Y, et al. 2012a. Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over the Yangtze River Valley. Adv Earth Sci, 27(8): 876-884 (in Chinese)
- 杨秋明, 李熠, 宋娟等. 2012b. 2002 年夏季东亚地区环流 20—30 d 主振荡型延伸期预报研究. 气象学报, 70(5): 1045-1054. Yang Q M, Li Y, Song J, et al. 2012b. Extended range forecasts of the principal 20 - 30 day oscillation of the circulation over East Asia during in the summer of 2002. Acta Meteor Sinica, 26(5): 554-565
- 杨秋明. 2014a. 基于 20—30 d 振荡的长江下游地区夏季低频降水延伸期预报方法研究. 气象学报, 72(3): 494-507. Yang Q M. 2014a. Study of the method of the extended-range forecast for the low frequency rainfall over the lower reaches of the Yangtze



- River in summer based on the 20–30 d oscillation. *Acta Meteor Sinica*, 72(3): 494–507 (in Chinese)
- 杨秋明. 2014b. 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. *物理学报*, 63(19): 199202, doi: 10.7498/aps.63.199202. Yang Q M. 2014b. Extended complex autoregressive model of low frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze river valley for extended-range forecast in 2013. *Acta Phys Sinica*, 63(19): 199202, doi: 10.7498/aps.63.199202 (in Chinese)
- 杨秋明. 2015a. 2013 年初夏长江下游降水低频分量延伸期预报的多变量时滞回归模型. *气象*, 41(7): 881–889. Yang Q M. 2015a. Multivariable lagged regressive model of low frequency rains over the lower reaches of Yangtze river valley for extended-range forecast in the early summer of 2013. *Meteor Mon*, 41(7): 881–889 (in Chinese)
- 杨秋明. 2015b. 10—30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望. *地球科学进展*, 30(9): 970–984. Yang Q M. 2015b. Prospects and progresses in the research of the methods for 10–30 days extended-range weather forecast. *Adv Earth Sci*, 30(9): 970–984 (in Chinese)
- 章基嘉, 孙国武, 陈葆德. 1991. 青藏高原大气低频变化的研究. 北京: 气象出版社. Zhang J J, Sun G W, Chen B D. 1991. Study on the Atmospheric Low Frequency Variation over the Qinghai-Xizang Plateau. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 郑志海, 封国林, 黄建平. 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验. *物理学报*, 61(19): 199203. Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments. *Acta Phys Sinica*, 61(19): 199203 (in Chinese)
- 郑志海. 2013. 月动力延伸预报研究进展回顾. *气象科技进展*, 3(1): 25–30. Zheng Z H. 2013. Review of the progress of dynamical extended-range forecasting studies. *Adv Meteor Sci Technol*, 3(1): 25–30 (in Chinese)
- Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. 2003. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. *Science*, 301(5633): 636–640
- Brunet G, Shapiro M, Hoskins B, et al. 2010. Collaboration of the weather and climate communities to advance subseasonal-to-seasonal prediction. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(10): 1397–1406
- Cassou C. 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 455(7212): 523–527
- Cavanaugh N R, Allen T, Subramanian A, et al. 2015. The skill of atmospheric linear inverse models in hindcasting the Madden-Julian Oscillation. *Climate Dyn*, 44(3–4): 897–906, doi: 10.1007/s00382-014-2181-x.
- Hoskins B. 2013. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science. *Quart J Roy Meteor Soc*, 139(672): 573–584
- Hsu P C, Li T, You L J, et al. 2015. A spatial-temporal projection method for 10–30 d forecast of heavy rainfall in Southern China. *Climate Dyn*, 44(5–6): 1227–1244
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437–471
- Kondrashov D, Chekroun M D, Robertson A W, et al. 2013. Low-order stochastic model and “past-noise forecasting” of the Madden-Julian Oscillation. *Geophys Res Lett*, 40(19): 5305–5310
- Lee S S, Wang B, Waliser D E, et al. 2015. Predictability and prediction skill of the boreal summer intraseasonal oscillation in the Intraseasonal Variability Hindcast Experiment. *Climate Dyn*, 45(7): 2123–2135, doi: 10.1007/s00382-014-2461-5
- Ling J, Bauer P, Bechtold P, et al. 2014. Global versus local MJO forecast skill of the ECMWF model during DYNAMO. *Mon Wea Rev*, 142(6): 2228–2247
- Liu X W, Yang S, Li Q P, et al. 2014. Subseasonal forecast skills and biases of global summer monsoons in the NCEP Climate Forecast System version 2. *Climate Dyn*, 42(5–6): 1487–1508
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J Atmos Sci*, 28(5): 702–708
- Miyakoda K, Gordon T, Carerly R, et al. 1983. Simulation of a blocking event in January 1977. *Mon Wea Rev*, 111(4): 846–849
- Mo K C. 2001. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations. *Mon Wea Rev*, 129(4): 802–817
- Neena J M, Lee J Y, Waliser D E, et al. 2014. Predictability of the Madden-Julian Oscillation in the intraseasonal variability hindcast experiment (ISVHE). *J Climate*, 27(12): 4531–4543
- Nelson S. 2008. Big data: The Harvard computers. *Nature*, 455(7209): 36–37
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J Meteor Soc Japan*, 65: 373–390
- Overpeck J T, Meehl G A, Bony S, et al. 2011. Dealing with data: Climate data challenges in the 21st century. *Science*, 331(6018): 700–702
- Palmer T N, Branković, Molteni F, et al. 1990. Extended-range predictions with ECMWF models: Interannual variability in operational model integrations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 116(494): 799–834
- Palmer T N, Düben P, McNamara H. 2014. Stochastic modelling and energy efficient computing for weather and climate prediction. *Philosoph Trans Roy Soc A*, 372(2018): 20140118
- Robertson A W, Kumar A, Peña M, et al. 2015. Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(3): ES49–ES53
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system. *J Climate*, 19(15): 3483–3517

- Tracton M S, Mo K, Chen W, et al. 1989. Dynamical extended range forecasting (DERF) at the National Meteorological Center. *Mon Wea Rev*, 117(7): 1604-1635
- Vitart F. 2004. Monthly forecasting at ECMWF. *Mon Wea Rev*, 132(12): 2761-2779
- von Storch, H, Xu J S. 1990. Principal oscillation pattern analysis of the 30 – to 60 d oscillation in the tropical troposphere. Part I: Definition of an index and its prediction. *Climate Dyn*, 4(3): 175-190
- Waliser D E, Jones C, Schemm J K, et al. 1999. A statistical extended range tropical forecast model based on the slow evolution of the Madden-Julian Oscillation. *J Climate*, 12(7): 1918-1939
- Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. 2003. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(1): 33-50
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon Wea Rev*, 109(4): 784-812
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?. *J Climate*, 13(9): 1517-1536
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations. *Adv Atmos Sci*, 19(1): 1-11
- Wang L, Ting M F, Chapman D, et al. 2016. Prediction of northern summer low-frequency circulation using a high-order vector auto-regressive model. *Climate Dyn*, 46(3-4): 693-709
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon Wea Rev*, 132(8): 1917-1932
- Xia Z Y, Chen H B, Xu L S, et al. 2015. Extended range (10 – 30 days) heavy rain forecasting study based on a nonlinear cross-prediction error model. *Adv Atmos Sci*, 32(12): 1583-1591, doi: 10.1007/s00376-015-4252-2
- Xiang B Q, Zhao M, Jiang X N, et al. 2015. The 3-4-week MJO prediction skill in a GFDL coupled model. *J Climate*, 28(13): 5351-5364
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 33(4): 411-432, doi: 10.1007/s00376-015-5192-6
- Zhu Z W, Li T, Hsu P C, et al. 2015. A spatial-temporal projection model for extended-range forecast in the tropics. *Climate Dyn*, 45(3-4): 1085-1098
- Zhu Z W, Li T. 2016. The statistical extended-range (10 – 30 d) forecast of summer rainfall anomalies over the entire China. *Climate Dyn*, doi: 10.1007/s00382-016-3070-2

**附录: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)

$${}_M\mathbf{S}_N = {}_M\mathbf{T}_L {}_L\mathbf{V}_L {}_N\mathbf{V}_L^T \quad (\text{A1})$$

式中,  ${}_M\mathbf{T}_L, {}_N\mathbf{V}_L$  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。构造扩展资料矩阵  ${}_M\mathbf{F}_{L+1} = (f_{i,j_2}) = (t_{i,j_1} r_{l_{kj}}), j_1 = 1, 2, \dots, L (r_{l_{kj}}$  为长江下游地区低频降水序列),  $j_2 = 1, 2, \dots, L + 1$ 。对  ${}_M\mathbf{F}_{L+1}$  的  $L + 1$  个时间序列进行一维傅里叶变换

$$\tilde{f}_{i,l} = \sum_{j_2=1}^{L+1} \left[ f_{i,j_2} \exp(-I \frac{2\pi}{L+1} (j_2 - 1)(l - 1)) \right] \quad (\text{A2})$$

式中,  $\exp(-I \frac{2\pi}{L+1} (j_2 - 1)(l - 1)) = \cos(\frac{2\pi}{L+1} (j_2 - 1)(l - 1)) - I \sin(\frac{2\pi}{L+1} (j_2 - 1)(l - 1)), I = \sqrt{-1}, i = 1, 2, \dots, M; j_2 = 1, 2, \dots, L + 1; l = 1, 2, \dots, L + 1$ 。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, 这些傅里叶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)

$$\tilde{f}_{i+1,l} = B_0 + \sum_{k=1}^p B_k \tilde{f}_{i-k+1,l} \quad (\text{A3})$$

用复数最小二乘法得到参数的估计  $B_k, k = 0, 1, \dots, p$ , 其中,  $p = 1, 2, \dots$ , 由式(A3)可得到  $M + 1$  时刻的预报值  $\hat{\tilde{f}}_{M+1,l} = \hat{a}_{M+1,l} + \hat{b}_{M+1,l}I$ , 通过一维傅里叶逆变换得到各个低频分量的预报值  $\hat{f}_{M+1,j_2}$ 。用式(A3)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,  $\text{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1}) = \hat{r}_{l_{kj}}(M + K)$  是低频降水分量的预报值。式(A3)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(杨秋明, 2014b), 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。ECAR 通过构造扩展复数矩阵(ECM), 基于实虚数据的可能联系和协同演化新规律, 由数据驱动构建各种更好地描述大气低频信息的简化的复数模型进行预测, 是有效延长低频分量的预报时效的重要途径之一。与经典自回归 AR 模型相比, ECAR 突破了物理世界资源有限的约束, 基于扩展复数据集, 更有效地描述气候系统中主要低频模态之间相关的多样性, 从而显著减少预测的不确定性, 将多样化归一、使复杂变为简单。