

杨秋明.长江下游夏季低频温度和高温天气的延伸期预报研究[J].地球科学进展,2018,33(4):385-395.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.04.0385.[Yang Qiuming. A study of the extended-range forecast for the low frequency temperature and high temperature weather over the lower reaches of Yangtze River Valley in summer[J]. Advances in Earth Science 2018, 33(4): 385-395. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.04.0385.]

# 长江下游夏季低频温度和高温天气的 延伸期预报研究\*

杨秋明

(江苏省气象科学研究所 江苏 南京 210009)

**摘 要:**用 1979—2011 年逐日长江下游气温资料研究长江下游夏季高温日数与温度低频振荡的联系和变化特征。结果表明,长江下游夏季逐日气温主要有 15~25, 30~60 和 60~70 d 的周期振荡,其中长江下游气温的 30~60 d 振荡强度年际变化和 7~8 月高温日数之间有显著的正相关。采用 1979—2000 年逐日长江下游气温 30~60 d 低频分量和东亚 850 hPa 低频温度主成分,构建了长江下游温度低频分量的延伸期预测的扩展复数自回归模型(ECAR)。对 2001—2011 年 5~8 月长江下游温度低频分量进行独立的实时延伸期逐日预报试验结果表明,这种数据驱动的预测模型对 30~60 d 时间尺度的长江下游低频温度分量的预测时效可达 23 d 左右,对于提前 20~25 d 预报长江下游地区夏季持续高温过程很有帮助,预报能力明显优于自回归模型(AR)。

**关 键 词:**长江下游低频温度;夏季;高温天气;ECAR 预报模型;实时延伸期预报

中图分类号:P456.9 文献标志码:A 文章编号:1001-8166(2018)04-0385-11

## 1 引 言

长江下游地区(30.5°~32.0°N, 118.0°~122.5°E)是我国东部沿海和沿江产业密集带的交汇部,发达城市多,人口稠密,夏季受东亚季风区各种环流(主要是西太平洋副高等)多时间尺度变化的影响,大部分城市经常出现持续性或间断性的异常高温酷暑天气,对能源、经济和人们的正常生活带来严重影响。因此,分析该区域夏季温度低频变化特征,研究该区域高温事件的 10~30 d 延伸期预报,对于决策部门做出合理安排,有效降低灾害性事件带来的损失,开展防灾减灾工作具有重要的现实意义,同时为推进现代天气气候业务向无缝隙、精准

化、智慧型方向发展提供有力支撑。

由于夏季东亚季风区各环流系统(如西太平洋副热带高压等)之间相互作用、互为反馈,并且共处于非线性系统之中,其大尺度低频环流型和温度型异常活动常常导致长江下游地区出现洪涝和干旱高温灾害。每年东亚季风环流的季节性转换都有不同特点,每次变异都有各自的机制,这些季风系统主要成员(如副热带高压)的形态突变与异常进退是一个极其复杂的过程,难以精确建立能够刻画季风系统主要成员活动与变异的“普适性”的动力学解析模型,从而难以精确预测较长时效的 10~30 d 延伸期的系统行为。本质上难以对其直接控制,只能间接地对宏观现象(如不同时间尺度的大尺度低频流

\* 收稿日期:2017-05-17;修回日期:2018-02-28.

\* 基金项目:国家自然科学基金项目“SCGT 与夏季东亚 ISO 相互作用研究及其在长江下游强降水延伸期预报中的应用”(编号:41175082);江苏省气象科研基金面上项目“夏季长江下游地区低频降水和温度实时延伸期预报方法研究”(编号:KM201805)资助。

作者简介:杨秋明(1963-)男,江苏常州人,研究员,主要从事天气气候预测研究.E-mail: yqm0305@263.net

型的变化等) 进行计算、解析、建模实现知识的合成和预测。而大量观测数据可以近似代表全局, 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。因此, 充分利用长序列气象数据资源, 进一步识别有效关键数据, 由数据驱动构建各种更好地描述大气低频信息的简化的预测模型进行延伸期预测, 是有效提高低频分量的延伸期预报精度的重要途径之一。另外, 注重有质量的信息片段, 并不断更新关键数据, 深入研究抑制滤波边界效应的综合数据分析方法, 可以明显减小初始时间滤波值的误差, 精确地识别实时低频变化信号, 进一步延长实时预报时效。

10~30 d 延伸期预报是近 20 多年来的国际大气科学研究的难点<sup>[1]</sup>, 很多气象专家从不同的角度对延伸期预报方法进行了研究<sup>[2~21]</sup>, 主要有集合数值模式<sup>[15]</sup>、动力—统计<sup>[16~19, 21]</sup>、统计<sup>[9~14]</sup>和大数据<sup>[24]</sup>等方法, 其中使用集合数值模式<sup>[22]</sup>或数据驱动的简化随机动力模式<sup>[5, 6]</sup>, 热带大气 MJO<sup>[22]</sup>的预测时效已延长到 25~30 d, 北半球夏季热带季节内振荡 (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSI-SO)<sup>[23]</sup>的预测技巧达到 25 d 左右。关于夏季长江下游延伸期预报方法, 目前国内外大量的研究主要集中于各种时间尺度(10~20, 20~30, 30~50 和 50~80 d 等)的季节内振荡 (Intraseasonal Oscillation, ISO) 的低频降水和强降水(暴雨)过程预测, 采用动力、统计和大数据等多种方法<sup>[24]</sup>, 取得了很多有重要意义的成果, 预报时效达到 30 d 左右, 对于 20~30 d 振荡显著年份, 已延长到 50 d 左右<sup>[25]</sup>。但是, 对于长江下游夏季温度低频变化和持续高温特征分析和延伸期预报较少, 尚未采用长序列数据详细分析高温天气和低频变化特征的联系及其延伸期预测研究。本文将用长序列(1979 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日)研究季节内时间尺度的长江下游气温低频振荡和 7~8 月高温日数的关系, 分析东亚 850 hPa 温度的低频主成分和长江下游地区气温主要低频分量之间的联系和时间变化特征; 并由动态数据来驱动复杂低频变化过程与系统的构建, 建立低频分量预测模型 LFCF2.0<sup>[24]</sup>, 即扩展复数自回归模型 (Extended Complex Autoregressive model, ECAR)<sup>[26, 27]</sup>, 对 2001—2011 年 5~8 月逐日长江下游地区气温主要低频分量进行实时的独立延伸期预测试验, 同时还讨论了可预报性的年际变化。

## 2 数据和方法

东亚地区 850 hPa 温度场选用 NCEP/NCAR 逐

日再分析资料(2.5°×2.5°格点), 逐日气温采用长江下游地区(图 1a, 绿色矩形区域: 30.5°~32.0°N, 118.0°~122.5°E) 中 25 个站平均值, 以上资料时间是 1979 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日(12 053 d), 低频温度的独立预报试验时间是 2001—2011 年每年 5 月 1 日至 8 月 31 日。首先, 对每年 5~8 月长江下游逐日气温进行非整数波功率谱分析, 研究主要季节内周期振荡, 分析不同时间尺度的温度 ISO 与 7~8 月长江下游地区高温日数(25 个站日最高温度均大于 35 °C 的日数)之间的联系, 并分析东亚 850 hPa 温度场主要模态的时空变化及其与长江下游主要温度低频分量的关系。然后, 用奇异谱分析 (Singular Spectrum Analysis, SSA)<sup>[28]</sup>, 对长江下游逐日气温原始序列和由主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 得到的东亚 850 hPa 温度场 (15°~60°N, 90°E~180°) 主要空间模态的时间系数进行低通滤波, 重建对应于主要季节内振荡信号的分量序列, 得到观测的长江下游温度低频分量序列和东亚 850 hPa 逐日温度场低频主成分, 构建扩展复数自回归模型 (ECAR)<sup>[26, 27]</sup>进行延伸期独立预测试验, 预测温度低频分量季节内变化 (ECAR, 即低频分量预测模型 LFCF2.0<sup>[24]</sup>)。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。另外, 在实时 SSA 滤波(对应于低频重建分量)中, 采用基于 T-EOF 预测的延拓方法<sup>[27]</sup>显著抑制滤波边界效应。这种全面反映原始序列信息的改进的 SSA 滤波可以得到更精确的边界附近的 10~25 d 的滤波值, 十分适合于实时延伸期业务预报。此外, 在相关系数检验中还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 夏季长江下游地区气温季节内振荡与 7~8 月高温日数的关系

为了精确分析 5~8 月长江下游逐日温度的低频振荡变化特征, 对 1979—2011 年逐年 5 月 1 日至 8 月 31 日的逐日温度序列做非整数波功率谱分析, 并将每年各个周期(非整数)上的功率谱对应回归方程统计量 F 值以各周期作横坐标, 时间(年)为纵坐标, 做二维 F 值的时间—周期图(图 1b, 当  $F > 3.50$  时, 其显著性是 0.05)。从图 1b 可见, 能通过 0.05 显著性水平检验的主要周期为 15~25, 30~60 和 60~70 d。30~60 d 振荡除在 20 世纪 80 年代初期和中期表现不显著外, 其余时间均显著存在; 15

~25 d 的周期振荡主要明显存在于 1984 年以后; 30 ~60 d 周期, 主要出现在 1986 年以后, 特别是 1991 年以来明显加强, 大多能通过 0.05 显著性水平检验; 而 60~70 d 周期, 1984—1991 年振荡不明显, 其余年份均较显著。因此, 5~8 月长江下游逐日温度主要表现为 15~25, 30~60 和 60~70 d 的周期振荡, 且存在明显的年际变化。此外, 10 d 左右的高频振荡很弱。以上分析出的长江下游逐日温度多时间尺度振荡的变化, 是夏季持续高温产生的基本条

件之一, 揭示其关键周期的作用和机制对于长江下游地区高温过程的延伸期预测非常重要。

图 1c 是 1979—2011 年盛夏 7~8 月长江下游地区高温日数( 25 个站每站日最高温度均大于 35 ℃) 的变化, 其中 1988 年和 2010 年最多 ( 7 d ), 而且 1979—1982 年, 1984—1987 年, 1989 年, 1991 年, 1993 年, 1996 年, 1997 年和 1999 年无区域高温日数。图 1d 是高温日数与 2, 3, …, 71 d 温度振荡强度( 对应周期( 非整数) 上的功率谱对应的回归方程

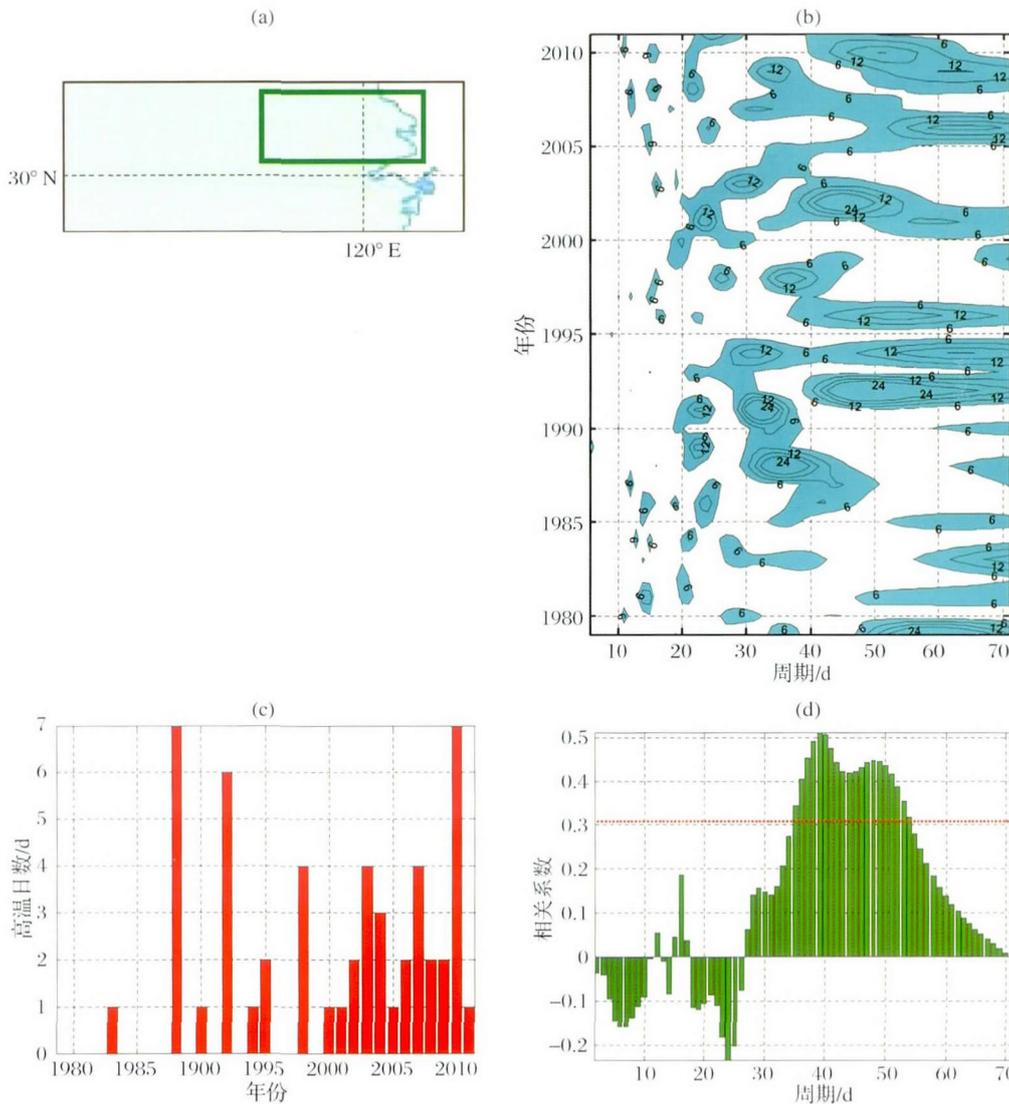


图 1 夏季长江下游低频温度和高温变化

Fig.1 Variations of low frequency temperature and high temperature over the LYRV

( a ) 长江下游地区; ( b ) 1979—2011 年长江下游地区 5~8 月逐日气温主要周期的年际变化, 阴影区表示通过 0.05 显著性水平检验; ( c ) 1979—2011 年 7~8 月高温日数的年际变化; ( d ) 不同周期 ISO 之间的相关性, 直方图表示 7~8 月高温日数与 2, 3, …, 71 d 振荡强度的相关, 红色水平虚线表示通过 0.05 显著性检验

( a ) The lower reaches of the Yangtze River valley ( LYRV , green rectangle ); ( b ) Interannual variations of the periods for the daily temperature over the LYRV in May–August during the period of 1979–2011 , shaded values are significant at 95% confidence level; ( c ) The number of days with daily highest temperature over 35 ℃ in July–August during the period from 1979 to 2011; ( d ) Correlations between the the number of days with daily highest temperature and oscillations from 2 to 71 days , and the significant level of 95% is represented by horizontal red dashed line

统计量  $F$  值) 的相关。从图 1 可以发现,长江下游地区高温日数与温度的 30~60 d 振荡存在显著的稳定正相关,当这种 45 d 左右的振荡增强时,盛夏 7~8 月长江下游地区持续高温日数偏多。这种 30~60 d 的温度振荡型可预报性较大,而且其周期明显长于夏季长江下游强降水过程显著相关的 28 d 降水 ISO 的周期<sup>[29]</sup>,表明影响长江下游高温变化的 ISO 与影响强降水的 ISO 变化特性有显著差异。此外,对于 10~25 d 时间尺度,长江下游地区高温日数与温度振荡强度的相关不显著,因而 15~25 d 振荡与长江下游地区持续高温日数相关复杂或不确定,但长江下游强降水与 18 d 周期的 ISO 存在较强的正相关<sup>[29]</sup>,它表明长江下游盛夏高温和夏季强降水与 10~20 d 的 ISO 相互作用的机制有显著差异。由于 30~60 d 温度低频振荡与长江下游高温日数关系最密切,对 10~30 d 时间尺度的延伸期高温天气预报具有更好的指示意义。所以,本文主要针对 30~60 d 时间尺度,构建长江下游地区低频温度分量的预测模型并提高其预测精度,为 7~8 月长江下游地区持续高温延伸期预测提供主要预报信号。

#### 4 长江下游低频温度与东亚 850 hPa 低频温度模态的联系

东亚季风区各环流系统之间相互作用、互为反馈,形成大尺度环流型和温度型异常活动(主要是反气旋和西风带高压脊等),导致长江下游地区极端降水<sup>[30]</sup>和温度事件的形成和异常发展,尤其是与

夏季西太平洋副热带高压复杂变化对应的低层大气大尺度温度型的多时间尺度低频变化,是引起盛夏长江下游持续高温天气的主要原因之一。图 2a 给出了长序列(1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日)逐日长江下游地区 30~60 d 低频温度与东亚 850 hPa 低频温度场的相关空间分布图,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 0.15 时,其显著性为 0.05)。图 2a 中显示出显著的欧亚中纬度地区经过长江下游地区向西太平洋热带地区传播的波列结构,类似于环流的 EUP 低频波列,最显著的强正相关区域在长江下游附近(显著性是 0.001),同时东亚大陆中纬度和副热带西太平洋地区是负相关区(这些地区也是方差贡献大值区,图 2b),反映了东亚中高纬度和副热带西太平洋低频系统对长江下游温度低频变化的作用,它的影响过程具有多样性,其机制需要进一步研究。为了分析 30~60 d 时间尺度的东亚 850 hPa 低频温度场的时空变化特征,图 3 给出了东亚 850 hPa 30~60 d 低频温度场前 7 个主要空间模态(资料时间是 1979—2000 年,序列长度是 8 036 d,由 Butterworth 滤波得到东亚 850 hPa 30~60 d 低频温度场),解释方差分别是 14.9%、14.2%、8.9%、7.6%、7.1%、5.8% 和 5.0%。第 1~7 模态表现为 7 种不同的纬向(第 3、6 模态,图 3c 和 3f)和经向(第 1、2、4、5、7 模态;图 3a、3b、3d、3e、3g)传播的东亚 850 hPa 低频温度波列,它们与东亚季风各种环流低频波列异常传播和相互反馈和作用关系密

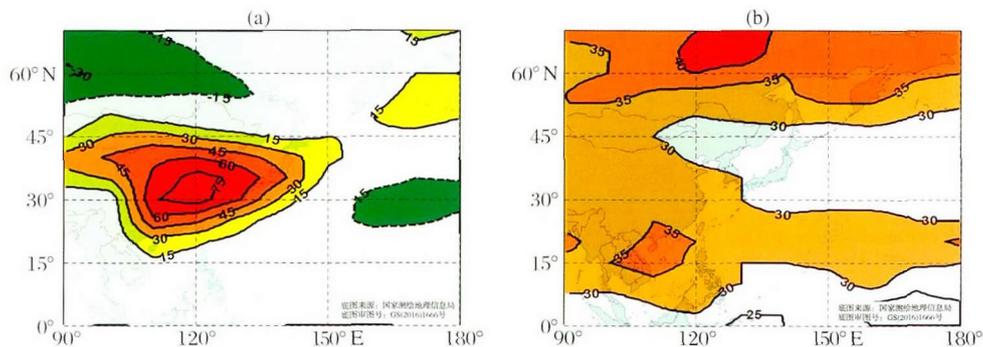


图 2 长江下游和东亚 850 hPa 低频温度变化

Fig.2 Low frequency variations of temperature in the LYRV and Eastern Asian 850 hPa temperature

(a) 1979—2011 年长江下游地区 30~60 d 低频温度与东亚 850 hPa 低频温度场的相关分布; (b) 东亚 850 hPa 低频温度场距平 30~60 d 滤波序列与原序列季节内标准差比值的空间分布; (a) 中相关系数已乘以 100, 阴影表示通过 0.05 的显著性检验的区域;

(b) 中数值已乘以 100, 单位: %, 阴影区表示  $\geq 30$  的区域

(a) Correlation between the daily temperature over LYRV and Eastern Asian 850 hPa temperature anomaly on the time scale of the 30~60-day during the period from 1979 to 2011, in which values are multiplied by 100 and the significant levels of 95% are represented by shaded areas; (b) Spatial distribution of ratio of the variance for the 30~60-day signal to the total seasonal variability, whose values (unit: %) are multiplied by

100 and the contours greater than or equal to 30 are shaded. Values are multiplied by 100

切,可以通过相关区域云—辐射反馈和不同的低频温度平流过程对影响区域表面气温的变化。这 7 个东亚 850 hPa 温度场低频主成分(PC)与长江下游温度低频分量的相关系数分别是 0.40, 0.42, 0.27, 0.17, -0.06, -0.15 和 -0.12,除了与 PC5 相关略低外,其余 6 个 PC 对应相关均达 0.10 的显著性(考虑序列持续性的影响,当相关系数为 0.11 和 0.09 时,其显著性可达 0.05 和 0.10),其中与第 2 模态(图 3b)的正相关最为显著,显著性为 0.001。这表明长江下游 30~60 d 温度 ISO 与东亚季风区 850 hPa 温度模态存在较显著的相互作用,反映了在大气加热异常下,与东亚季风环流有关的各种温度低频波列传播中通过云—辐射反馈和温度平流过程影响对长江下游地区温度低频变化的高温过程的不同影响。这些低频温度模态是东亚地区热带内外各种季风环流系统相互作用反馈的结果,导致了西太平洋副热带高压复杂低频变化和夏季长江下游地区低频温度和持续高温变化的多样性。其中第 1 模态表现为从欧亚中高纬向热带西太平洋传播的低频波列传播(图 3a),类似于长江下游温度与东亚 850 hPa 温度的低频相关的低频波列(图 2a),反映了欧亚中高纬地区和热带太平洋地区环流的相互作用,与长江下游低频温度变化的正相关很显著(相关系数为 0.40,显著性达 0.01),是影响长江下游温度低频变化的最重要的低频系统之一。这 7 种东亚 850 hPa 温度 ISO 型可以通过不同的方式直接或间接影响长江下游地区 30~60 d 温度低频分量变化和盛夏高温干旱过程的形成,是长江下游地区温度延伸期预测的可预报性主要来源之一。

## 5 预测试验

本文用 1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日的资料(8 036 d),得到东亚 850 hPa 30~60 d 低频温度场的前 7 个低频主成分和长江下游地区逐日低频温度,建立 ECAR<sup>[26,27]</sup>对 2001—2011 年每年 5 月 1 日至 8 月 31 日(1 353 d)的长江下游地区逐日低频温度进行历史回报试验。文中将实时的东亚 850 hPa 温度场低频主成分和逐日长江下游温度分别经 SSA 后,由各自对应 T-EOF 各分量重建得到对应的 30~60 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—2011 年 5~8 月长江下游地区 30~60 d 温度分量的季节内变化。这些独立预测用限定记忆法,保持子序列  $M_0$  不变,构建时变系数的 ECAR 滑动进行独立样本预测试验

(回报时间是 2001—2011 年每年 5 月 1 日至 8 月 31 日,预报未来 30 d,共 1 353 次预报),其中复数自回归模型的阶数  $p=2$ ,预报时间  $K=30$  d,子序列长度  $M_0=250$  d。这种建模方案有利于适应复空间中各个低频分量之间的联系随时间的改变,更好地反映气候系统分量之间时滞相关的一些非预期的时间变化。

在独立预测试验中,将 2001—2011 年逐日观测的东亚 850 hPa 温度场投影到前 7 个低频空间分布型(图 3a~g,由 1979—2000 年的逐日资料计算)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气温投影到各自经 SSA 后的对应于 30~60 d 振荡的 T-EOF 上,得到 2001—2011 年的逐日 PC1, PC2, …, PC7 和长江下游逐日气温的 30~60 d 重构分量  $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,7}, t_{i,j}$ (PC1, …, PC7 和长江下游温度各自的 T-EOF 由 1979—2000 年的逐日资料计算),构建扩展资料阵  ${}_M F_{L+1} = (t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,7}, t_{i,j})$ ( $L7$ )。对  ${}_M F_{L+1}$  的  $L+1$  个时间序列进行一维 Fourier 变换,得到  $L+1$  个复时间序列  $\tilde{f}_{i,j} = a_{i,j} + b_{i,j}I$ ,构成扩展复数矩阵(Extended Complex Matrix, ECM)  ${}_M \tilde{F}_{L+1} = (\tilde{f}_{i,j})$   $i=1, 2, \dots, L+1$ ;对每一分量  $\tilde{f}_{i,j}$  建立  $p$  阶复数自回归模型(CAR)  $\tilde{f}_{i+1,j} = B_0 + \sum_{k=1}^p B_k \tilde{f}_{i-k+1,j}$ (即 ECAR),用复数最小二乘法得到参数的估计  $B_k$ ,  $k=0, 1, \dots, p$ ,其中  $p=1, 2, \dots$ ;以及  $M+1$  时刻的预报值  $\hat{f}_{M+1,j} = \hat{a}_{M+1,j} + \hat{b}_{M+1,j}I$ ,通过一维 Fourier 逆变换得到各个低频分量的预报值  $\hat{f}_{M+1,j_2}$ 。进一步递推  $K$  步,可得到第  $K$  天的预报值  $\hat{f}_{M+K,j_2}$   $j_1=1, 2, \dots, L, j_2=1, 2, \dots, L+1$ ,其中  $\text{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1}) = \hat{t}_{i,j}(M+K)$  是低频温度分量的预报值。取子序列  $M_0$  不变,构建这种简化的  $p$  阶时变 ECAR 滑动进行 2001—2011 年每年 5 月 1 日至 8 月 31 日(共 1 353 d)长江下游低频温度的延伸期独立预报试验。在每次预报时,30~60 d 重构分量  $t_{i,1}, t_{i,2}, \dots, t_{i,7}, t_{i,j}$  的 SSA 滤波中,采用基于 T-EOF 预测的延拓方法<sup>[27]</sup>抑制滤波边界效应(只使用初始时间  $t_0$  以前的数据)。

图 4a 给出了用观测的东亚 850 hPa 温度场的低频主成分 PC1~PC7 和长江下游地区 30~60 d 温度低频分量构成的扩展实数据阵,通过 Fourier 变换构造扩展复数矩阵(Extended Complex Matrix, ECM),

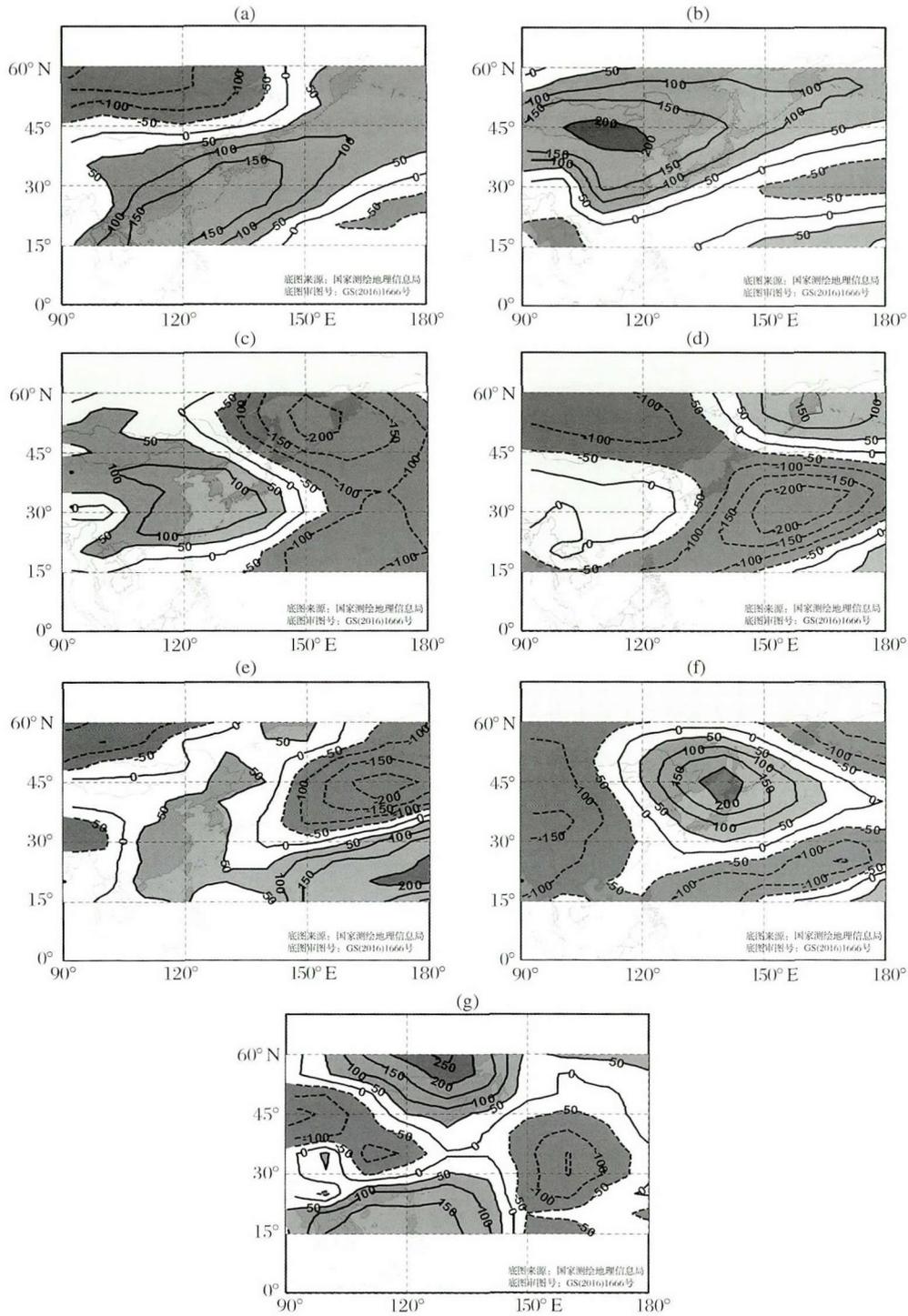


图 3 1979—2000 年东亚 850 hPa 30~60 d 低频温度场的主要空间模式

Fig.3 Principal spatial modes of the Eastern Asian 850 hPa 30~60 day low frequency temperature field from 1979 to 2000

(a) ~ (g) 对应于第 1~7 模式, 图中数值已乘以 1 000, 虚线表示负值

(a) ~ (g) Corresponds to mode 1~7, the values in the figure has been multiplied by 1 000, the dashed lines represent negative values

建立时变 ECAR 模型做的 2001—2011 年每年 5~8 月逐日长江下游地区温度低频分量的 1~30 d 预报与观测的相关系数(共 1 353 d 次预报)。从图 4 可

以看出, 长江下游地区温度低频分量的预报时效达 23 d (观测和预报的低频分量之间相关系数大于 0.5, 其显著性是 0.02, 考虑序列持续性的影响)。这

表明时变 ECAR 能有效预测与夏季东亚 850 hPa 温度场 30~60 d 振荡传播有关的长江下游地区低频温度分量未来 20~25 d 的变化。图 4b 给出了 11, 14, 17 和 20 d 预报技巧(对应于绿、红、蓝和紫色实线)逐年的变化,表明了大部分年份 ECAR 的预报技巧在未来 20 d 预报时效内均呈现显著的正相关(预报技巧大于 0.50),仅 2006 年 11 d 以后的预报技巧出现明显降低。此外,用观测的长江下游地区温度低

频分量直接建立经典自回归模型(Autoregressive model, AR)滑动进行独立样本预测试验(子序列长度  $M_0 = 250$  d),预报时效只有 7 d 左右(图 4a 中虚线),即大约一周以后的预报技巧明显下降,表明 AR 模型只反映了长江下游低频温度分量自身的变化信息(预测的稳定性减小),不能反映多种东亚低频温度模态的共同作用。

图 5 进一步给出 2003 年、2004 年、2006 年和

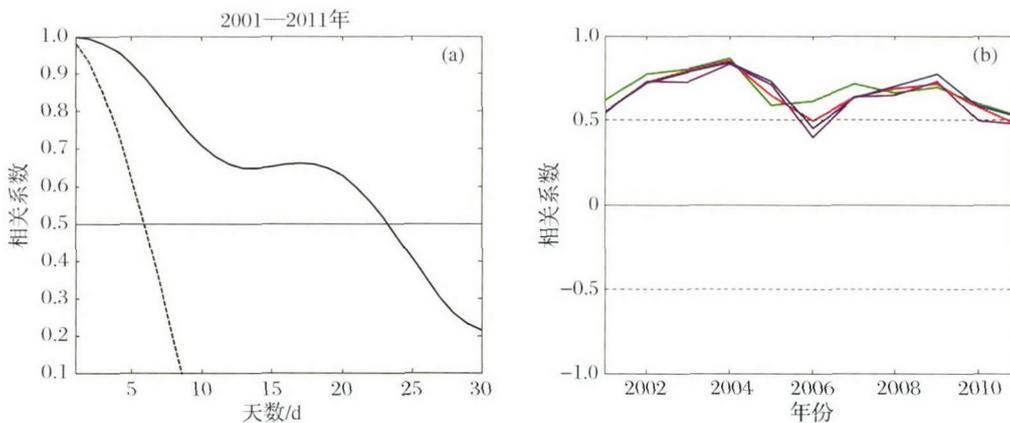


图 4 2001—2011 年 5~8 月长江下游温度低频分量预报技巧

Fig.4 Forecast skills of low-frequency temperature component over LYRV in May–August during the period of 2001–2011

(a) 1~30 d 预报与观测的相关系数 实线 ECAR 模型 虚线: AR 模型, 水平实线表示达到 95% 的显著性水平; (b) 年际变化, 绿、红、蓝、紫线分别表示 11, 14, 17 和 20 d 预报, 水平虚线表示达到 95% 的显著性水平

(a) Correlation coefficients between the observation and the 1~30-day forecast of low frequency temperature component, solid line: ECAR model; Dashed line: AR model; The horizontal solid line in the figure represents the significance level of 95%; (b) Interannual variations of forecast skills, the lead times are 11 days (green line), 14 days (red line), 17 days (blue line) and 20 days (purple line), respectively. The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95%

2009 年的长江下游逐日低频温度分量 20 d 预报(虚线)和观测的低频分量(实线)的变化曲线,其中 30~60 d 振荡较强的 2003 年(图 5a), 2004 年(图 5b)和 2009 年(图 5d)的相关系数分别达到 0.72, 0.83 和 0.73 (123 次预报, 初始时间分别是 4 月 11 日, 4 月 12 日, ..., 8 月 11 日), 其显著为 0.02。从图 5 可以看出, 与上述年份中 7~8 月的 2~3 个主要长江下游持续高温集中期对应的显著的低频温度正位相变化和干旱少雨期均能较准确地预测, 尤其是与 2004 年 5 月中旬到 8 月上旬的 3 次持续正温度距平(图 5b, 其中 7~8 月伴随 2 次持续高温过程)对应的低频温度分量正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, 预测的峰值也与实况十分接近。此外, 2009 年 8 月中旬后期到 8 月下旬前期的持续高温(连续正温度距平过程)也能提前 20 d 左右预报(图 5d)。但 7 月下旬的负温度过程位相明显滞后, 温度振幅预报偏小。

此外, 2006 年的 20 d 预报技巧明显降低, 相关系数只有 0.40(图 5c), 主要原因是这一年夏季 30~60 d 振荡处于减弱时段, ECAR 预测模型出现一些不稳定。以上大量独立预报试验表明, ECAR 能有效描述这 11 年中的大部分年份(夏季 30~60 d 振荡显著年份)观测数据中温度主要低频分量之间多种时滞变化, 从而能较精确地预测这些低频变化。因此, 这种 LFCF2.0(时变复系数, ECAR)通过数据驱动的 SSA, 从时间序列的动力重构出发, 滤去了序列中的高频噪声和非周期的弱信号, 可以较好地识别长江下游气温和东亚温度主要低频模态的非均匀时间变化分量; 并通过基于 T-EOF 的序列延拓显著减弱滤波的边界效应, 从而使实时分量的重建序列分别成为单一的稳定的信号序列, 显著增强了可预报性。然后构造复数空间中的虚拟数据扩展有效数据规模, 基于实虚数据之间的可能联系和低频分量协同演化新规律, 由数据驱动构建能更好地描述大气低

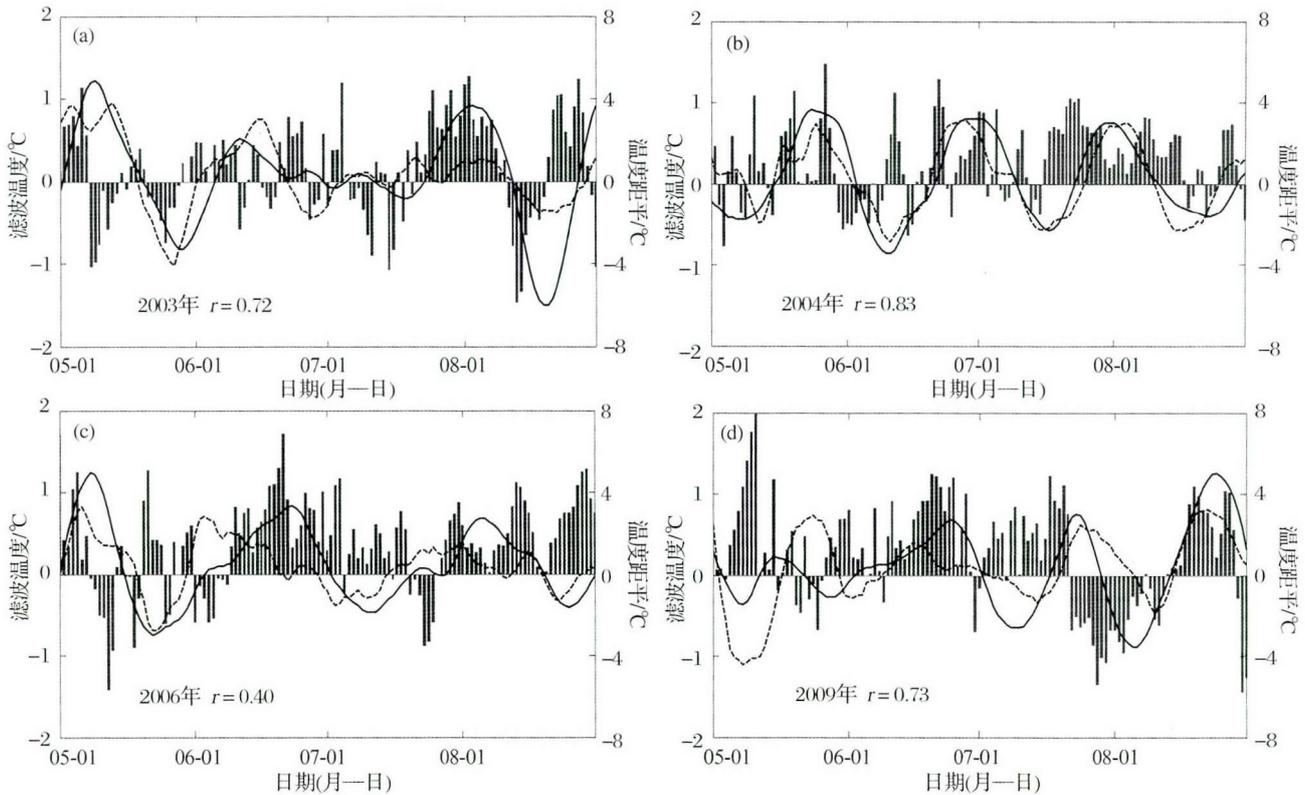


图 5 5~8 月长江下游地区 30~60 d 温度低频分量的 ECAR 模型的 20 d 预报

Fig.5 The forecast of ECAR model at a lead time of 20 days from May to August

(a) (b) (c) 和 (d) 分别是 2003 年、2004 年、2006 年和 2009 年 图中实(虚)线分别表示实况(预报),直方图表示长江下游地区逐日气温距平变化(单位:  $^{\circ}\text{C}$ );  $r$  是预测和实况之间的相关系数, 预报的初始时间分别是 4 月 11 日,  $\dots$ , 8 月 11 日

(a) 2003, (b) 2004, (c) 2006 and (d) 2009 over the LYRV. Solid (dashed) line represents the observation (the forecast) of low-frequency temperature, the histogram represents the daily temperature anomalies over LYRV, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ;  $r$  is the correlation coefficient between the forecast and the observation; The initial date of forecast is April 11,  $\dots$ , August 11

频分量相互作用的简化的复数自回归延伸期预测模型,可以较好地提前 20 d 以上预测长江下游地区夏季高温干旱少雨时段的变化。

此外,这些大量历史数据的独立预报试验还表明,夏季长江下游地区温度 30~60 d 振荡低频分量的 ECAR 模型的延伸期预报技巧的年际变化不大,大部分年份 20 d 左右预报技巧在 0.5 左右(图 4b),仅 2006 年略低,但仍达到 0.4(图 5c),可以为长江下游地区夏季高温干旱过程的实时延伸期预测提供稳定的预报信息。它体现了 LFCF2.0(时变系数 ECAR)可以很好地描述在大气加热异常作用下(如海温、雪盖和土壤湿度等)东亚地区各种季风低频环流相联系的温度空间模态变化,以及通过云—辐射反馈和低频温度平流过程对长江下游地区夏季表面气温低频变化和持续高温期形成的影响过程,但这些 ISO 型强度的变化机制仍需深入分析研究。

## 6 结论和讨论

本文用 1979—2011 年逐日长序列资料,研究长江下游地区温度主要季节内变化周期与 7~8 月高温日数的联系及其与东亚 850 hPa 温度模态变化的关系。基于大量观测资料中提取的季节内时间尺度长江下游夏季气温和东亚 850 hPa 温度主要低频分量,构建扩展复数自回归模型(ECAR),即 LFCF2.0,进行夏季长江下游低频温度分量延伸期预测研究,得到如下结论:

长江下游地区夏季逐日气温主要有 15~25, 30~60 和 60~70 d 的周期振荡,其中长江下游气温的 30~60 d 振荡强度年际变化和 7~8 月高温日数之间有显著的正相关。这种 30~60 d 振荡与东亚 850 hPa 温度主要分布型变化密切相关,其中与第 2 模态的正相关最为显著。它反映了夏季东亚地区大气

加热异常激发的东亚地区各种低频环流和温度空间模态变化通过云—辐射反馈和低频温度平流过程对长江下游地区夏季表面气温低频变化的影响。另外, 15~25 d 振荡与 7~8 月高温日数之间相关不显著。

基于东亚 850 hPa 温度场 30~60 d 低频主要模态, 在复空间上建立的时变 ECAR 预报模型(LF-CF2.0) 可以有效预测 2001—2011 年 5~8 月长江下游逐日温度 30~60 d 低频分量未来 23 d 的变化, 能与温度 ISO 变化对应的长江下游持续高温事件的预报时效延长到 20~25 d, 可以为长江下游地区夏季持续高温(干旱)过程的实时延伸期预测提供稳定的预报信号; 而用长江下游地区温度低频分量直接建立经典 AR 模型的预报时效只有 7 d 左右。

经典的 SSA 重构的低频分量序列右边界附近(10~25 d) 误差较大, 与其他常用滤波方法(如 Butterworth 滤波, 小波分析, EEMD 等) 一样, 右边界附近 10~25 d 滤波值误差明显, 会导致未来 10 d 以上的实时预测结果不可靠, 不能用于实时 10~30 d 延伸期预测。但本文用经 T-EOF 延拓序列(扩展序列, 右端用 T-EOF 预测数据(虚拟数据)适当延长序列长度) 投影得到的 SSA 低频重构分量, 显著提高边界附近滤波值精度(只使用初始时间  $t_0$  以前的数据), 因而这种全面反映原始序列信息的改进的 SSA 滤波方法十分适合于实时延伸期预测。

本文对长序列观测资料进行分解、变换, 得到描述长江下游地区夏季气温低频变化和东亚 850 hPa 温度低频变化主要模态, 将这些主要分量视为多样化的气候动态数据变化过程的一系列数据解, 反演出可预报性较大的简化数据模型 ECAR, 显著减小了计算误差, 延长预报时效。这种数据驱动的气候预测方法表现为大量多种类型的数据分解、变换、逼近历史数据和实时数据中的变化规律, 并用于解析、预测和评估的各方面的集合。同时用 T-EOF 预测数据(虚拟数据)适当延长右边界序列进行 SSA 滤波, 可以较好地抑制滤波边界效应得到稳定的实时 ISO 信号, 较精确识别复杂气候系统自然变化中的很丰富同时很严谨的结构, 体现了数据处理、简化模型的构建、解析、预测、评估和信息实时更新的一体化。这些方法减少人们处理数据时带入的主观假设的影响, 它不预设物理条件, 可以不受数值预报时效的可预报性限制。它基于扩展的复数空间, 构建低频分量预测的解空间, 从观测和虚拟数据中提取更多隐藏在数据规律里的有价值的低频信

息, 优化数据分析方法。这种数据驱动 ISO 系统构建的预测方法完全依靠数据间的多种时滞相关性(实数和复数空间)及其时间变化来阐述, 通过不同角度评估不同的低频分量对于极端天气事件时间变化的相对重要性, 可以建立预测稳定性更好的数据模型, 提高实时延伸期预报精度。

#### 参考文献(References):

- [1] Hoskins B. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139: 573-584.
- [2] Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. The think about 10-30 days extended range numerical weather prediction strategy facing the atmosphere chaos [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(5): 569-573. [丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10-30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌 [J]. *气象科学*, 2010, 30(5): 569-573.]
- [3] Ding Yihui, Liang Ping. Extended range forecast based on MJO [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 111-122. [丁一汇, 梁萍. 基于 MJO 的延伸预报 [J]. *气象*, 2010, 36(7): 111-122.]
- [4] He Jinhai, Liang Ping, Sun Guowu. Consideration on extended-range forecast and its application study [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2013, 3(1): 11-17. [何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展 [J]. *气象科技进展*, 2013, 3(1): 11-17.]
- [5] Kondrashov D, Chekroun M D, Robertson A W, et al. Low-order stochastic model and “past-noise forecasting” of the Madden-Julian Oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(19): 5 305-5 310.
- [6] Chen N, Majda A J, Giannakis D. Predicting the cloud patterns of the Madden-Julian Oscillation through a low-order nonlinear stochastic model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(15): 5 612-5 619.
- [7] Chen N, Majda A J. Predicting the Real-Time Multivariate Madden-Julian Oscillation Index through a Low-Order Nonlinear Stochastic Model [J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 2 148-2 169.
- [8] Wang L, Ting Mingfang, Chapman David, et al. Prediction of northern summer low-frequency circulation using a high-order vector auto-regressive model [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46: 693-709. DOI: 10.1007/s00382-015-2607-0.
- [9] Zhu Z, Li T. The statistical extended-range (10-30-day) forecast of summer rainfall anomalies over the entire China [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 48(1/2): 209-224.
- [10] Zhu Z, Li T. Statistical extended-range forecast of winter surface air temperature and extremely cold days over China [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(704): 1 528-1 538. DOI: 10.1002/qj.3023.
- [11] Zhu Z, Li T. Extended-range forecasting of Chinese summer surface air temperature and heat waves [J]. *Climate Dynamics*,

- 2018, 50( 516) : 2 007-2 021.
- [12] Xia Z Y , Chen H B , Xu L S , *et al.* Extended range ( 10~30 days) heavy rain forecasting study based on a nonlinear cross-prediction error model [J]. *Advances in Atmospheric Science* , 2015 , 32( 12) : 1 583-1 591.
- [13] Sze' kely E , Giannakis D , Majda A J. Extraction and predictability of coherent intraseasonal signals in infrared brightness temperature data [J]. *Climate Dynamics* 2016 , 46 ( 5) : 1 473-1 502.
- [14] Sabeerali C T , Ajayamohan R S , Giannakis D , *et al.* Extraction and prediction of indices for monsoon intraseasonal oscillations: An approach based on nonlinear Laplacian spectral analysis [J]. *Climate Dynamics* 2017 49( 9/10) : 3 031-3 050.
- [15] Zheng Zhihai , Feng Guolin , Huang Jianping , *et al.* Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. *Acta Physica Sinica* , 2012 , 61( 19) , 199-203. [郑志海, 封国林, 黄建平, 等. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验 [J]. *物理学报* , 2012 , 61( 19) : 199-203.]
- [16] Yu H , Huang J , Li W , *et al.* Development of the analogue-dynamical method for error correction of numerical forecasts [J]. *Journal of Meteorological Research* , 2014 , 28 ( 5) : 934-947. DOI: 10.1007/s13351-014-4077-4.
- [17] Yu H , Huang J , Chou J. Improvement of medium-range forecasts using the analogue-dynamical method [J]. *Monthly Weather Review* , 2014 , 142( 4) : 1 570-1 587.
- [18] Hu S , Qiu C , Zhang L , *et al.* An approach to estimating and extrapolating model error based on inverse problem methods: Towards accurate numerical weather prediction [J]. *Chinese Physics B* , 2014 , 23( 8) . DOI: 10.1088/1674-1056/23/8/089201.
- [19] Huang Qican , Hu Shujuan , Qiu Chunyu , *et al.* Numerical model error estimation by derivative-free optimization method [J]. *Acta Physica Sinica* , 2014 , 63( 14) : 149203. [黄启灿, 胡淑娟, 邱春雨, 等. 基于无导数优化方法的数值模式误差估计 [J]. *物理学报* , 2014 , 63( 14) : 149203.]
- [20] Wang Xujia , Zheng Zhihai , Feng Guolin , *et al.* The role of boundary and initial conditions for extended range forecast [J]. *Acta Meteorologica Sinica* 2017 , 75( 1) : 111-122. [汪栩加, 郑志海, 封国林, 等. 延伸期预报中的大气初值与海温边值相对作用 [J]. *气象学报* 2017 , 75( 1) : 111-122.]
- [21] Chen Guanjun , Wei Fengying , Yao Wenqing , *et al.* Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* , 2017 , 75( 3) : 400-414. [陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数延伸期预报试验 [J]. *气象学报* , 2017 , 75( 3) : 400-414.]
- [22] Neena J M , Lee J Y , Waliser D E , *et al.* Predictability of the Madden-Julian Oscillation in the intraseasonal variability hindcast experiment ( ISVHE) [J]. *Journal of Climate* , 2014 , 27: 4 531-4 543.
- [23] Lee S S , Wang Bin , Waliser D E , *et al.* Predictability and prediction skill of the boreal summer intraseasonal oscillation in the Intraseasonal Variability Hindcast Experiment [J]. *Climate Dynamics* , 2015 , 45( 7/8) : 2 123-2 135.
- [24] Yang Qiuming. Prospects and progresses in the research of the methods for 10-30 days extended-range weather forecast [J]. *Advances Earth Science* , 2015 , 30( 9) : 970-984. [杨秋明. 10-30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望 [J]. *地球科学进展* , 2015 , 30( 9) : 970-984.]
- [25] Yang Qiuming. 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 day oscillation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* , 2014 , 72( 3) : 494-507. [杨秋明. 基于 20-30d 振荡的长江下游地区夏季低频降水延伸期预报方法研究 [J]. *气象学报* , 2014 , 72( 3) : 494-507.]
- [26] Yang Qiuming. Extended complex autoregressive model of low frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze River Valley for extended-range forecast in 2013 [J]. *Acta Physica Sinica* , 2014 , 63( 19) : 199202. DOI: 10.7498/aps.63.199202. [杨秋明. 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* , 2014 , 63( 19) : 199202. DOI: 10.7498/aps.63.199202.]
- [27] Yang Qiuming. Predictability and prediction of low frequency rainfall over the lower reaches of the Yangtze River valley on the time scale of 20~30 days [J]. *Journal of Geophysical Research* , 2018 , 123: 211-233. DOI: 10.1002/2017JD027281.
- [28] Mo K C. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations [J]. *Monthly Weather Review* , 2001 , 129: 802-817.
- [29] Yang Qiuming. The 20-30-day oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley [J]. *Science in China ( Series D)* , 2009 , 52( 10) : 1 485-1 501. [杨秋明. 全球环流 20-30 d 振荡与长江下游强降水 [J]. *中国科学: D 辑* 2009 , 39( 11) : 1 515-1 529.]
- [30] Yang Qiuming , Song Juan , Li Yi , *et al.* Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over the Yangtze River Valley [J]. *Advance in Earth Science* , 2012 , 27( 8) : 876-884. [杨秋明, 宋娟, 李熠, 等. 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 [J]. *地球科学进展* 2012 , 27( 8) : 876-884.]

## A Study of the Extended-range Forecast for the Low Frequency Temperature and High Temperature Weather over the Lower Reaches of Yangtze River Valley in Summer\*

Yang Qiuming

( Jiangsu Meteorological Institute , Nanjing 210009 , China )

**Abstract:** Based on the observational data , the variations of Intraseasonal Oscillation ( ISO ) of the daily temperatures and its relationships to the high temperature in summer over the lower reaches of the Yangtze River Valley ( LYRV ) were studied for the period of 1979–2011. It is found that the daily temperatures over LYRV in May–August was mainly of periodic oscillations of 15~25 , 30~60 and 60~70 days , and the interannual variation of the intensity of its 30~60-day oscillation had a strongly positive correlation with the number of days with daily highest temperature over 35 °C in July–August. Low frequency components of daily temperature in the LYRV , and the principal components of the Eastern Asian 850 hPa low frequency temperature , over a time period ranging from 1979 to 2000 , were used to establish the Extended Complex Autoregressive model ( ECAR ) on an extended-range forecast of the 30~60-day low frequency temperature over the LYRV. A 11-year independent real-time extended-range forecast was conducted on the extended-range forecast of low frequency component of the temperature over the LYRV in May–August , for the period ranging from 2001 to 2011. These experimental results show that this ECAR model , which is based on a data-driven model , has a good forecast skill at the lead time of approximately 23 days , with a forecast ability superior to the traditional autoregressive ( AR ) model. Hence , the development and variation of the leading 30~60-day modes for the Eastern Asian 850 hPa low frequency temperatures and temporal evolutions of their relationships to low frequency components of the temperature over the LYRV in summer are very helpful in predicting the persistent high temperature over the LYRV at a 20 to 25 days lead.

**Key words:** Low frequency temperature over the lower reaches of Yangtze River Valley; Summer; High temperature weather; Forecasting model of ECAR; Real-time extended-range weather forecast.

---

\* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China “Study on interaction between SCGT and ISO over East Asia in summer and its application to extended-range prediction of heavy precipitation over the lower reaches of Yangtze River valley” ( No. 41175082 ) ; The Scientific Research Foundation of Jiangsu Meteorological Bureau “Study on the real-time extended-range forecast method of low-frequency rainfall and temperature over the lower reaches of Yangtze River Valley in summer”( No.KM201805 ) .

**First author:** Yang Qiuming( 1963- ) , male , Changzhou City , Jiangsu Province , Professor. Research areas include weather and climate prediction. **E-mail:** yqm0305@263.net