大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

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

杨秋明

Extended-Range Forecast for the Low-Frequency Oscillation of Temperature and Low-Temperature Weather over the Lower Reaches of the Yangtze River in Winter

YANG Qiuming

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19208

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

1996年冬季一次南方低温事件的低频特征分析及诊断

Analysis and Diagnosis of Low-Frequency Characteristics in a Low Temperature Event in Southern China in the Winter of 1996

大气科学. 2020, 44(2): 257 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18190

青藏高原积雪深度对延伸期预报技巧的影响

Influence of the Tibetan Plateau Snow Depth on the Extended-Range Prediction Skill

大气科学. 2019, 43(1): 142 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252

长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异

Differences in Intraseasonal Summer Rainfall Oscillation between the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

大气科学. 2017, 41(6): 1125 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1703.17112

我国冬季极端低温指数的年代际变化特征

Interdecadal Variation Characteristics of Extreme Low Temperature Index in Winter in China

大气科学. 2020, 44(5): 1125 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19242

冬季北大西洋涛动与中国北方极端低温相关性的年代际变化

Interdecadal Variation in the Relationship between North Atlantic Oscillation and Extreme Low Temperature over Northern China in Winter

大气科学. 2018, 42(2): 239 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17101

冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析

Circulation Characteristics of Extreme Cold Events in Northeast China during Wintertime

大气科学. 2018, 42(5): 963 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1710.17119

关注微信公众号，获得更多资讯信息

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 Qiuming. 2021. Extended-Range Forecast for the Low-Frequency Oscillation of Temperature and Low-Temperature Weather over the Lower Reaches of the Yangtze River in Winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 21−36. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19208

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

杨秋明 [1, 2]

1 南京气象科技创新研究院，南京 210009
2 江苏省气象科学研究所，南京 210009

摘　要　用 1979/1980～2017/2018 年冬季逐日长江下游气温资料研究长江下游冬季低温日数与温度低频振荡的联系。结果表明，冬季长江下游逐日气温存在较显著的季节内振荡周期（15～25 d、25～40 d 和 50～70 d 振荡），其中与 12～2 月低温日数关系最密切的是 25～40 d 振荡。基于 2001～2018 年逐日长江下游实时气温的 25～40 d 低频分量和东亚地区 850 hPa 低频温度主成分，建立了冬季长江下游气温低频分量的延伸期预测的时变扩展复数自回归模型（ECAR）。其中，采用基于 T-EOF（temporal empirical orthogonal functions）延拓的实时奇异谱（SSA，singular spectrum analysis）滤波，很好地抑制经典 SSA 滤波的边界效应，得到较稳定的实时低频振荡信号。对 2001/2002～2017/2018 年 12～2 月长江下游温度低频分量进行独立的实时延伸期预报试验的结果表明，这种数据驱动的简化的复数预测模型对 25～40 d 时间尺度的长江下游冬季低频温度的预测时效可达 26 d 左右，预报能力显著优于经典自回归模型（AR），能为提前 3～4 周预报长江下游地区冬季持续低温过程提供有价值的预测背景信息。

关键词　长江下游低频温度　实时奇异谱分析　延伸期预报模型　低温天气　冬季
文章编号　1006-9895(2021)01-0021-16　　**中图分类号**　P456　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19208

Extended-Range Forecast for the Low-Frequency Oscillation of Temperature and Low-Temperature Weather over the Lower Reaches of the Yangtze River in Winter

YANG Qiuming[1, 2]

1 *Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences*, *Nanjing* 210009
2 *Jiangsu Meteorological Institute*, *Nanjing* 210009

Abstract　Basing from observational data, this study analyzed the variations in ISO (intraseasonal oscillation) of the daily temperatures and its relationships to the low temperature in December–February of 1979/1980–2017/2018 over the lower reaches of the Yangtze River (LYR). The daily temperatures over the LYR in December–February are mainly of periodic oscillations of 15–25 d, 25–40 d, and 50–70 d, and the interannual variation in the intensity of its 25–40-day oscillation has a strong positive correlation with the number of low-temperature days in December–February. The real-time low-frequency components of daily temperature in the LYR and the principal components of 850-hPa low-frequency

收稿日期　2019-09-05；**网络预出版日期**　2020-05-22
作者简介　杨秋明，男，1963 年出生，研究员，主要从事天气气候预测研究。E-mail: yqm0305@263.net
资助项目　国家自然科学基金项目 41175082
Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 41175082)

temperature in eastern Asia from 2001 to 2018 were used to establish the time-varying extended complex autoregressive (ECAR) model on an extended-range forecast of the 25–40-day low-frequency temperature over the LYR in winter. Real-time SSA (singular spectrum analysis) filtering with the T-EOF (temporal empirical orthogonal functions) extension can effectively inhibit the end effects of the traditional SSA and enhance the real-time signal of ISO. A 17-year independent real-time extended-range forecast was conducted on the extended-range forecast of the low-frequency component of the temperature over the LYR in December–February of 2001/2002–2017/2018. Experimental results show that the data-driven ECAR model has a good forecast skill at the lead time of approximately 26 days, and its forecast ability is superior to that of the traditional autoregressive model. Hence, the development and variation of the leading 25–40-day modes for the low-frequency temperatures at 850 hPa in eastern Asia and temporal evolutions of their relationships to the low-frequency components of the temperature over the LYR in winter supplied the valuable predicting background to determine the extended-range weather process in the persistent low temperature over the LYR at the 3–4-week leads.

Keywords Low frequency temperature over the lower reaches of Yangtze River, Real-time singular spectrum analysis, Extended-range forecasting model, Low temperature weather, Winter

1 引言

冬季受东亚季风区各种不同时间尺度大尺度低频环流 [主要是欧亚/太平洋型（EUP）低频流型等] 的影响，位于我国东部沿海的长江下游地区（30.5°～32.0°N, 118.0°～122.5°E）的很多城市经常出现异常低温、雨雪和冰冻天气，持续时间长，严重影响经济、交通、电力、通讯和人们的正常生活。因此，详细分析冬季长江下游地区气温低频变化特征，研究该区域低温事件的 10～30 d 延伸期预报，对于决策部门提前组织部署气象灾害防御，真正实现对完整天气事件的决策服务，高效有序应对气象灾害，明显降低雨雪冰冻等极端天气气候事件带来的损失具有很重要的意义。同时也为推进现代天气气候业务的发展提供有力的支撑，较好地适应互联网+、大数据和智能化的科技型现代气象业务发展新格局。

由于冬季东亚季风区大尺度低频环流型和温度型异常频繁活动，容易导致长江下游地区出现雨雪、强寒潮和低温冰冻灾害。每年欧亚中高纬度和低纬度环流的相互作用都有部分相同的特点，但更重要的是气候背景场与大尺度低频扰动之间的各种相互作用机制差异的复杂性 [如对流层中的低频 Rossby 波的传播及高频瞬变涡动的反馈强迫作用（Bueh et al., 2011）、扰动的形态与急流位置之间的配置关系变化（Zeng, 1983）、冬季北半球各阻塞系统对大范围温度异常和极端低温事件的单独和协同影响（李亚飞和任荣彩, 2019）等]，导致这些热带外地区环流系统的突变与低频波列传播的多样性。所以，建立能够精确描述东亚地区冬季风系统主要成员活动与变化的“普适性”的动力学模型比较困难。由于气候数值预测的数学、物理基础理论尚不完善，较长时效的 10～30 d 延伸期变化的动力预测误差较显著，数值模式的预报时效和性能目前仍不能满足延伸期业务的需求。但是，大量气象观测数据包含全局特有的多种宏观信息，我们可以间接地对宏观现象（如不同时间尺度的两半球热带或热带外地区大尺度低频流型的变化等）进行分析、建模和计算，实现有关知识的合成和预测（杨秋明, 2015, 2018）。同时通过改进数据分析方法，可以提高从实时数据中提取这些大尺度低频信号的精度。因此，充分利用长序列气象数据资源，进一步识别各种时间尺度的大气低频信息，更精确地提取实时低频信号，明显减小初始时间滤波值的误差，分析低频信号强度的时间变化，由数据驱动构建各种更好的简化数据模型进行 10～30 d 延伸期预报，是显著延长预报时效的重要途径之一。

10～30 d 延伸期尺度是天气尺度和气候尺度的衔接部分，因此延伸期过程问题既有初值问题也有外强迫问题，这正是延伸期预报方法研究的难点（丑纪范等, 2010; Hoskins, 2013）。不同于天气预报和短期气候预测，延伸期预测能力完全依赖于大气低频变化规律。1990 年以来，国内外很多气象学者从不同的角度对延伸期预报方法进行了大量研究（丁一汇和梁萍, 2010; 何金海等, 2013; Kondrashov et al, 2013; 杨秋明, 2015, 2016, 2018; Zhu and Li, 2017a, 2017b, 2018; Sabeerali et al., 2017; Krishnamurthy, 2018; 章大全等, 2019），主要有集合数值模式（Vitart and Molteni, 2010; 郑志海等, 2012; 韩世茹等, 2019）、动力—统计（陈官军等,

2017; Sahai et al., 2017; Abhilash et al., 2018; Karpechko, 2018; Lavaysse et al., 2019）、统计（Xia et al, 2015; Székely et al., 2016; Wang et al., 2016; Zhu and Li, 2017a, 2017b, 2018; Sabeerali et al., 2017; Stan and Krishnamurthy, 2019）、大数据（杨秋明, 2015）等方法，其中，采用集合数值模式（Neena et al., 2014）或数据驱动的简化随机动力模式（Kondrashov et al., 2013; Chen et al., 2014; Chen and Majda, 2015）预测方法，热带大气 30～60 d 振荡（谢义炳等, 1963）[国外学者称之为 MJO（Madden and Julian, 1971）] 的预测时效已逐步延长到 12～25 d（Neena et al., 2014），ECMWF 模式达到 36 d（Lim et al., 2018），北半球夏季热带季节内振荡（Boreal summer intraseasonal oscillation, BSISO）（Lee et al., 2015）的预测时效也达到了 20～25 d 左右。近年来，采用观测数据中的 30～60 d 低频分量和历史信息，热带对流和强降水、中纬度地区低频环流、热带气旋活动和移动的预报技巧延长到 3～4 周。与夏季区域强降水、高温和冬季低温过程密切联系的中国降水和气温 10～80 d 低频分量的延伸期预报时效已达 5～6 候左右（Zhu and Li, 2017a, 2017b, 2018），但 10～30 d 低频分量的预测时效仍小于 3 候。关于长江下游地区夏季延伸期预报方法，近 10 年来国内外的研究主要集中于多种时间尺度（10～20 d、20～30 d、30～50 d 和 50～80 d 等）的季节内振荡（Intraseasonal Oscillation, ISO）的低频降水和暴雨（强降水）过程预测，采用动力、统计、大数据等多种方法（杨秋明, 2015），取得了很多有意义的成果，低频降水预报时效达到 25～30 d 左右（Yang, 2018），特别是对于 20～30 d 振荡（杨秋明, 2009）较强的年份，已延长到 50 d 左右（杨秋明, 2014a）。另外，与夏季长江下游高温有密切联系的长江下游 30～60 d 低频温度的预报时效达 23 d 左右（杨秋明, 2018）(http://www.lcjrerf30.org [2020-05-20])。但是，用长序列数据详细分析冬季长江下游地区极端低温天气和 ISO 变化的联系和最相关的周期对应的低频振荡的研究仍然不多，用这些关键周期对应的低频分量构建预测模型进行延伸期预测的试验较少。此外，过去的很多延伸期预测方法研究中，采用经典的滤波方法 [如，Butterworth 滤波（Murakami, 1979）、小波分析（Torrence and Compo, 1998）、经验模态分析（Empirical mode decomposition, EMD）（Love et al., 2008）、奇异谱分析（singular spectrum analysis, SSA）（Ghil and Kingtse, 1991; Mo, 2001）等]，其右边界附近 20～50 d 滤波值误差较大，或提取的 ISO 信号明显偏弱。这种较大误差的实时滤波初始值会导致各种基于低频分量的延伸期预测模型的预报不稳定，明显缩短预报时效。因此，采用合适的数据分析和变换方法，抑制经典滤波方法的边界效应，更精确地从实时数据中提取低频信号，是需要研究的另一个主要问题。

本文将基于逐日长序列（1979 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日，14610 d）观测数据，分析各种次季节时间尺度的长江下游气温低频振荡和 12～2 月低温日数的关系，研究长江下游地区气温主要低频分量和东亚 850 hPa 温度的低频主成分之间的联系和时间变化特征，揭示与长江下游地区冬季低温过程最相关频段对应的关键周期；用奇异谱分析（SSA），得到长江下游气温和东亚 850 hPa 温度的主要低频分量；并由动态数据来驱动各种复杂低频变化过程与系统的构建，建立扩展复自回归模型（Extended complex autoregressive model, ECAR）（杨秋明, 2014b; Yang, 2018）[低频分量预测模型 LFCF2.0（杨秋明, 2015）]，对 2001/2002～2017/2018 年 12～2 月逐日长江下游地区的主要温度低频分量进行实时的独立延伸期预测试验。在预测试验中，采用实时 SSA 滤波方法（Yang, 2018）提取低频分量，显著减弱经典 SSA 滤波的边界效应，同时也讨论了冬季长江下游低频温度可预报性的年际变化。

2　数据和方法

长江下游地区（30.5°～32.0°N, 118.0°～122.5°E）逐日气温采用 1979 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日（共 14610 d）期间的 25 站平均值，东亚地区 850 hPa 温度场选用同期 NCEP/NCAR 逐日格点再分析资料（2.5°×2.5°），低频温度分量的独立预报试验时间是 2001/2002～2017/2018 年每年 12 月 1 日至次年 2 月 28 日（共 1530 d）。本文参照 ETCCDMI（Expert team on climate change detection, monitoring and indices）定义极端气候事件指数的方法（Alexander et al., 2006），通过温度百分位法定义极端低温日：对于长江下游地区，每年冬季（前一年 12 月 1 日至当年 2 月 28 日，1979 年至 2018 年共 39 个冬季）逐日的日平均温度距平的

第 10 个百分位的值（按由小到大的排列顺序）的平均作为定义低温日的阈值，将长江下游平均温度低于阈值的日期记为低温日。这样即建立起逐年冬季长江下游地区低温日数时间序列。首先，对每年 12～2 月长江下游逐日气温进行非整数波功率谱分析（Schickedanz and Bowen, 1977），研究主要季节内周期振荡型及其强度的年际变化特征，分析不同时间尺度的温度 ISO 强度与 12～2 月长江下游地区低温日数之间的联系，并研究东亚 850 hPa 低频温度与长江下游主要温度低频分量的关系。然后，对长江下游逐日气温原始观测序列和由主成分分析（Principal Component Analysis, PCA），得到东亚（15°～60°N, 60°～150°E）850 hPa 温度场主要空间模态和时间系数分别应用 SSA 滤波，重建长江下游气温和 850 hPa 温度场各种主要的季节内振荡信号的分量序列。进一步选择这些低频分量中相关性较显著的分量序列组成扩展资料阵，建立扩展复数自回归模型（ECAR）（杨秋明, 2014b; Yang, 2018）进行延伸期独立预测试验，预测温度低频分量次季节变化，并研究预报技巧的年际变化。在预测试验中，选择合适的子序列长度，滑动进行动态建模，适应经过数据变换后得到的复数低频分量之间相关的时间变化，显著提高 ECAR 模型的预测稳定性。另外，本文在实时 ISO 信号提取时，采用基于 T-EOF 延拓的实时 SSA 滤波，显著提高边界附近滤波值精度（实时滤波中只使用初始时间 t_0 以前的数据），可以有效地抑制经典 SSA 滤波的边界效应。这种全面反映原始序列信息的实时 SSA 滤波方法（Yang, 2018）能较准确地提取 ISO 振幅和位相变化信息，十分适合于实时延伸期预测。

3 冬季长江下游地区气温季节内振荡与低温日数的关系

为了详细分析 12～2 月长江下游逐日温度的 ISO 型的年际变化特征，对 1979/1980～2017/2018 年逐年冬季 12 月 1 日至 2 月 28 日（39 个冬季）的逐日温度序列做非整数波功率谱分析，作二维的时间—周期图（图 1a）。从图 1a 可见，能通过 0.01 显著性水平检验的主要周期为 15～25 d、25～40 d、50～70 d。15～25 d 振荡除了 1993/1994 年、2013/2014 年和 2015/2016 年表现不显著外（其中 2013/2014 年显著周期延长到 26 d，2015/2016 年缩短为 13 d），其余时间均显著存在，大多能通过 0.01 显著性水平检验；25～40 d 的周期振荡主要明显存在于 1979/1980～2017/2018 年期间的大部分冬季，但 1994/1995～1995/1996 年、2006/2007～2007/2008 年振荡较弱；而 50～70 d 周期在 1988/1989～1990/1991 年、1994/1995～1995/1996 年和 1999/2000～2001/2002 年期间振荡不明显，其余年份均较显著。因此，12～2 月长江下游逐日温度存在显著的多周期振荡，主要表现为 15～25 d、25～40 d 和 50～70 d 的周期振荡，同时存在明显的年际变化。以上分析出的次季节时间尺度的长江下游冬季逐日气温各种振荡的变化，是冬季持续低温冰冻产生的基本条件之一。揭示其与长江下游地区冬季低温过程最相关频段对应的关键周期，并建立对应时间尺度的低频分量变化的模型进行预测，对于提高长江下游地区冬季低温过程的延伸期预测精度非常重要。

图 1b 是 1979/1980～2017/2018 年冬季 12～2 月长江下游地区低温日数的变化，其中 1983/1984 年、1984/1985 年冬季最多（20 d），1994/1995 年、2006/2007 年和 2016/2017 年冬季无区域低温日数。从图 1c 中可以发现长江下游地区冬季低温日数与周期为 25～40 d 范围内的温度周期振荡强度均呈现一致的正相关，其中最显著的温度振荡周期是 30 d，表现为极显著的正相关，相关系数是 0.418（通过 99% 信度水平的显著性检验）。对于冬季 25～40 d 左右的气温振荡增强的年份，长江下游地区低温日数明显偏多。这种 25～40 d 左右的气温 ISO 型的关键周期略长于夏季长江下游强降水（暴雨）过程显著相关的 28 d 降水 ISO 的周期（杨秋明, 2009），表明与冬季长江下游低温和夏季强降水密切相关的主要 ISO 型变化特性有一定差异。由于冬季长江下游地区低温日数和气温 25～40 d 低频振荡关系密切（对 10 d 以上的低温天气过程预报具有更好的指示意义），本文主要针对 25～40 d 时间尺度，基于上述 39 个冬季的数据，构建预测模型预测冬季长江下游地区低频温度分量，为冬季长江下游地区持续低温冰冻过程的 10～30 d 延伸期报提供重要预报信息。

4 长江下游地区 25 ~ 40 d 低频温度与东亚 850 hPa 低频温度模态的联系

欧亚和太平洋地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

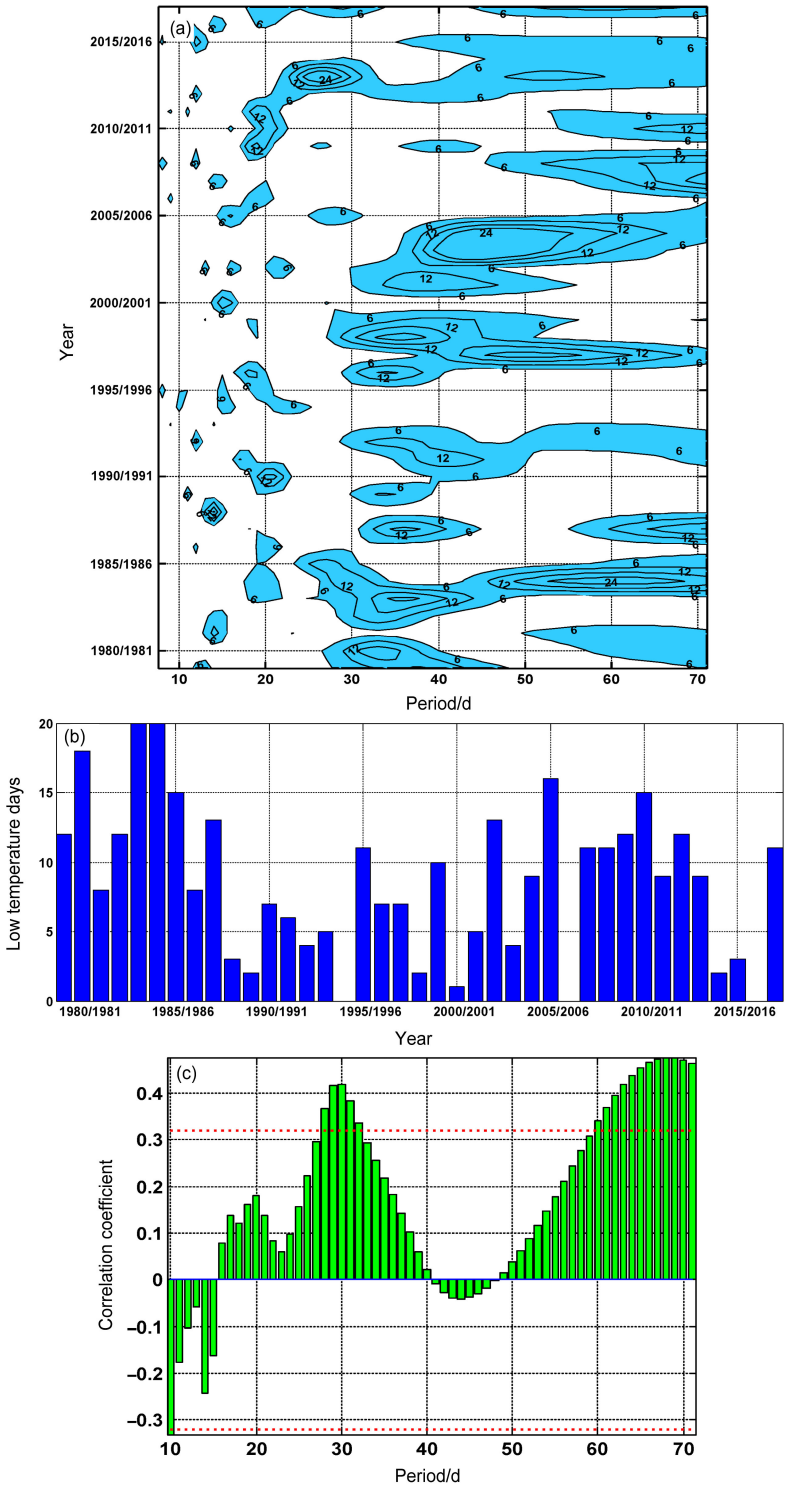

图 1　1979/1980～2017/2018 年长江下游地区 12～2 月（a）逐日气温主要周期的年际变化，（b）低温日数的年际变化以及（c）低温日数与周期为 10 d、11 d、……、71 d 气温振荡强度的相关系数。图 a 中横坐标表示各个周期（对应非整数波功率谱），黑色等值线表示不同周期功率谱对应的回归方程统计量变化，阴影区表示通过 99% 信度水平的显著性检验，图 c 中红色水平虚线表示 95% 信度水平

Fig. 1　(a) Interannual variations of the main periods for the daily temperature, (b) interannual variations of low temperature days, (c) correlation coefficients between low temperature days and oscillation intensity of temperature from 10 to 71 days periods over the lower reaches of the Yangtze River (LYR) in December–February of 1979/1980–2017/2018. In Fig. a, black contours represent the variations of the statistical parameter for the regression equation corresponding to the non-integer period of power spectra (with the individual periods (non-integer) as the *x*-axis), shadings areas indicate periods are significant at the 99% confidence level; In Fig. c, the horizontal red dashed lines represent the 95% confidence level

（主要是西风带阻塞高压、西太平洋副热带高压以及东亚大槽和西伯利亚高压增强等），导致长江下游地区夏季极端降水（杨秋明等, 2012）和冬季极端低温事件的形成和异常发展，特别是各种时间尺度的冬季东亚低层大气大尺度低频温度型（伴随对应的大尺度低频环流型）的变化，是引起长江下游冬季持续低温雨雪和冰冻天气的主要原因之一。图 2a（低频相关图）显示出明显的欧亚中高纬度地区经过长江下游地区向热带西太平洋地区传播的波列结构（相似于环流的 EUP 低频波列），长江下游附近是最显著的正相关区（通过 99% 信度水平的显著性检验），同时较显著的负相关区位于欧亚大陆中纬度和西太平洋副热带地区 [这些波列活动区域（主要是中国东部长江中下游及以南地区）也是方差贡献大值区（图 2b）]，但热带地区不存在显著相关区（即与热带西太平洋地区 25～40 d ISO 的变化的联系不显著）。它反映了冬季西太平洋副热带地区和东亚中高纬度低频系统对长江下游低频温度变化的作用，这种波列的作用也与中高纬度 10～30 d 振荡的波列的作用相似（杨双艳等, 2014; Yang at al., 2019）。为了详细分析东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度场的时空变化特征，经过 PCA 分析，得到 7 个主要低频温度空间模态（由 Butterworth 滤波得到东亚地区 850 hPa 25～40 d 低频温度场，资料时间是 1979～2000 年，序列长度是 8036 d），其解释方差分别是 16.7%、14.6%、8.7%、7.3%、6.2%、4.5% 和 4.2%。进一步对 1979～1997 年（19 年）和 1979～1994 年（16 年）逐日东亚 850 hPa 温度分别进行主成分分析，得到前 7 个空间模态，用不同样本长度得到的特征向量间的夹角余弦绝对值（杨秋明, 1993）考察空间分布型的时间稳定性，发现它们与上述 1979～2000 年（22 年）得到的 7 个空间模态夹角余弦绝对值均大于 0.90（表略），表明这 7 个温度模态具有很好的时间稳定性。这些模态表现为 7 种不同的纬向和经向传播的东亚 850 hPa 低频温度波列（其中图 3a–d 分别给出了东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度场第 1～4 空间模态），它们与东亚季风各种环流低频波列异常传播的关系密切，这些东亚地区大尺度低层温度波列是驱动冬季东亚各区域极端低温天气的主要低频系统。另外，上述 7 个 PC 与长江下游地区气温 25～40 d 低频分量的相关系数分别是−0.18、−0.59、−0.28、−0.17、0.10、−0.03 和 0.14，其中前 4 个 PC 对应相关均通过 95% 信度水平的显著性检验（考虑序列持续性的影响，当相关系数为 0.16 时，其通过 95% 信度水平的显著性检验），其中与第 2 模态的负相关最为显著（相关系数为 −0.59，通过 99% 信度水平的显著性检验）。这 4

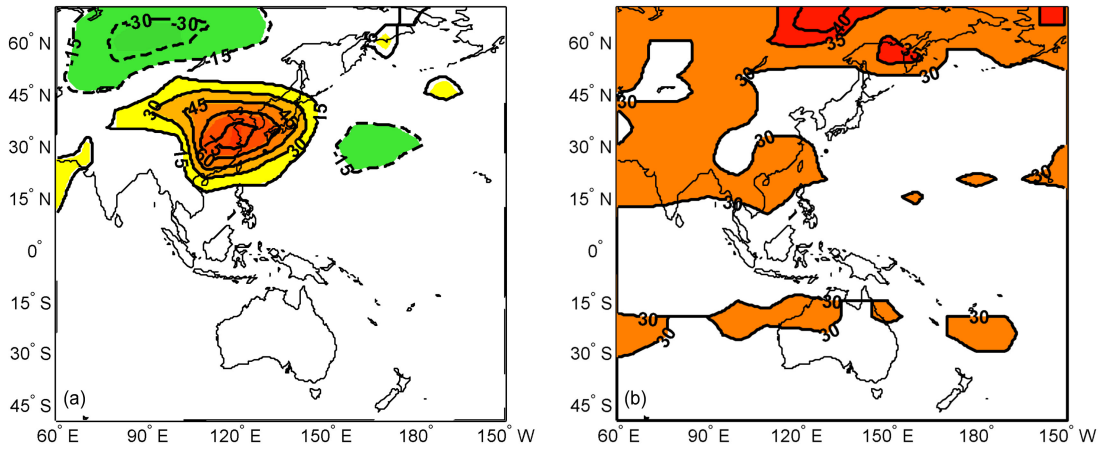

图 2 （a）1979～2018 年长江下游地区 25～40 d 低频气温与东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度的相关系数分布，图中相关系数值是原始值×100 后的结果，阴影表示通过 95% 信度水平显著性检验的区域；（b）850 hPa 低频温度场距平 25～40 d 滤波序列与原始序列季节内方差比值的空间分布，图中数值是原始值×100 后的结果（单位：%），阴影区表示方差比值≥30 的区域

Fig. 2 (a) Correlation coefficients between the low-frequency air temperature over the LYR and 850-hPa low-frequency temperature in eastern Asia on the 25–40-day time scale from 1979 to 2018, in which values are multiplied by 100 and shadings indicate the correlation coefficients above 95% confidence level; (b) spatial distribution of ratio of the variance for the 850-hPa low-frequency temperature anomalies on the 25–40-day time scale to the total seasonal variability, in which values are multiplied by 100 and shadings indicate ratio of the variance greater than or equal to 30

个与长江下游温度低频分量密切相关的 850 hPa 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反馈和作用的结果，导致了欧亚中高纬地区和西太平洋副热带地区低频变化对冬季长江下游地区持续低温影响的复杂性。从图 3a 和 3b 可以发现，第 1、2 模态的空间分布均表现为从欧亚中高纬向热带西太平洋传播的低频波列结构 [类似于与长江下游地区气温与东亚 850 hPa 温度的低频相关的低频波列（图 2a）]，是影响长江下游地区冬季极端低温事件的重要低频系统（通过欧亚中高纬地区和热带太平洋地区环流的相互作用）。而第 3、4 模态呈现东亚中纬度东西向传播的温度波列，主要与中高纬度大气内部动力过程有关。上述 4 种不同的东亚 850 hPa 温度 ISO 型是驱动长江下游地区低温冰冻过程的主要低频系统（其变化具有多样性），也是冬季长江下游地区气温 10～30 d 延伸期预测的可预报性重要来源。

此外，由于气候系统不同时间尺度的各种分量之间的非线性相互作用，长江下游 25～40 d 温度低频分量与这 4 个东亚 850 hPa 温度主要低频分量之间的联系还存在年际变化 [时间不稳定，可能与更长时间尺度（如 60～90 d、90～180 d 和准 2 年等）的低频环流背景变化有关]。图 4a、b 和 c 分别给出了 2001 年 7 月至 2003 年 6 月期间长江下游 25～40 d 温度低频分量与东亚 850 hPa 低频温度 EOF 分析主要模态对应的时间系数 PC1、PC2 和 PC3 之间 365 天滑动相关的时间演变，图中显示出较明显的相关时段不规则的时间变化。与 PC1 的滑动相关表现为 2001 年和 2003 年较稳定的负相关（图 4a），但 2002 年负相关显著减弱；与 PC2 的滑动相关在 2001 年 7～8 月呈现负相关增强，并在 2002～2003 年保持稳定的显著负相关（图 4b）；但与 PC3 的滑动相关在 2003 年 2～6 月显著负相关明显减弱，表现为较明显的相关不稳定（图 4c）。另外，与 PC4 的相关也显示类似的不规则时间变化（图略）。这种相关时间不稳定反映了在大气加热异常作用下（如海温、雪盖和土壤湿度等），东亚地区各种低频温度模态与长江下游低频温度相关存在较显著的年际变化。因此，构建预测模型时，考虑这种相关的时间变化信息是改进建模方案和提高预测精度的一个主要方面。另外，图 5a、b 还给出了长江下游地区 2001～2018 年期间逐日长江下游 25～40 d 低频温度与基于 T-EOF 延拓的 SSA 滤波和无 T-EOF 延拓的 SSA 滤波 25～40 d 低频温度

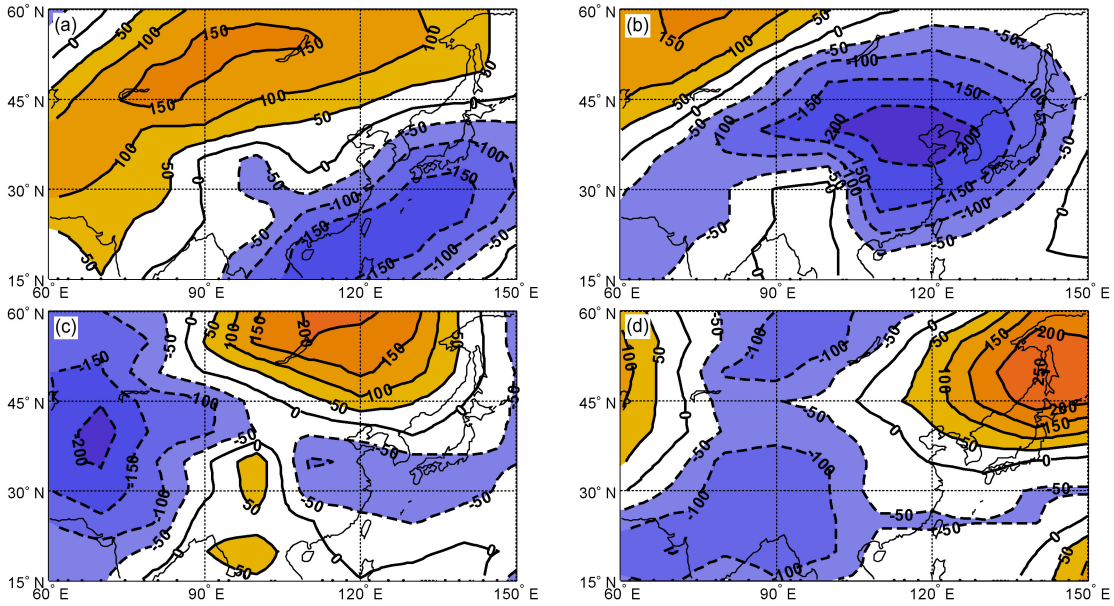

图 3　1979～2000 年东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度场 EOF 分解的（a–d）第 1～4 空间模态，图中数值已乘以 1000，实（虚）线表示正（负）值

Fig. 3　Principal spatial modes of the 850-hPa low-frequency temperature on the 25–40-day time scale in eastern Asia from 1979 to 2000, Figs. a–d correspond to modes 1–4 of EOF (empirical orthogonal functions). Values are multiplied by 1000, and the solid (dashed) lines represent positive (negative) values

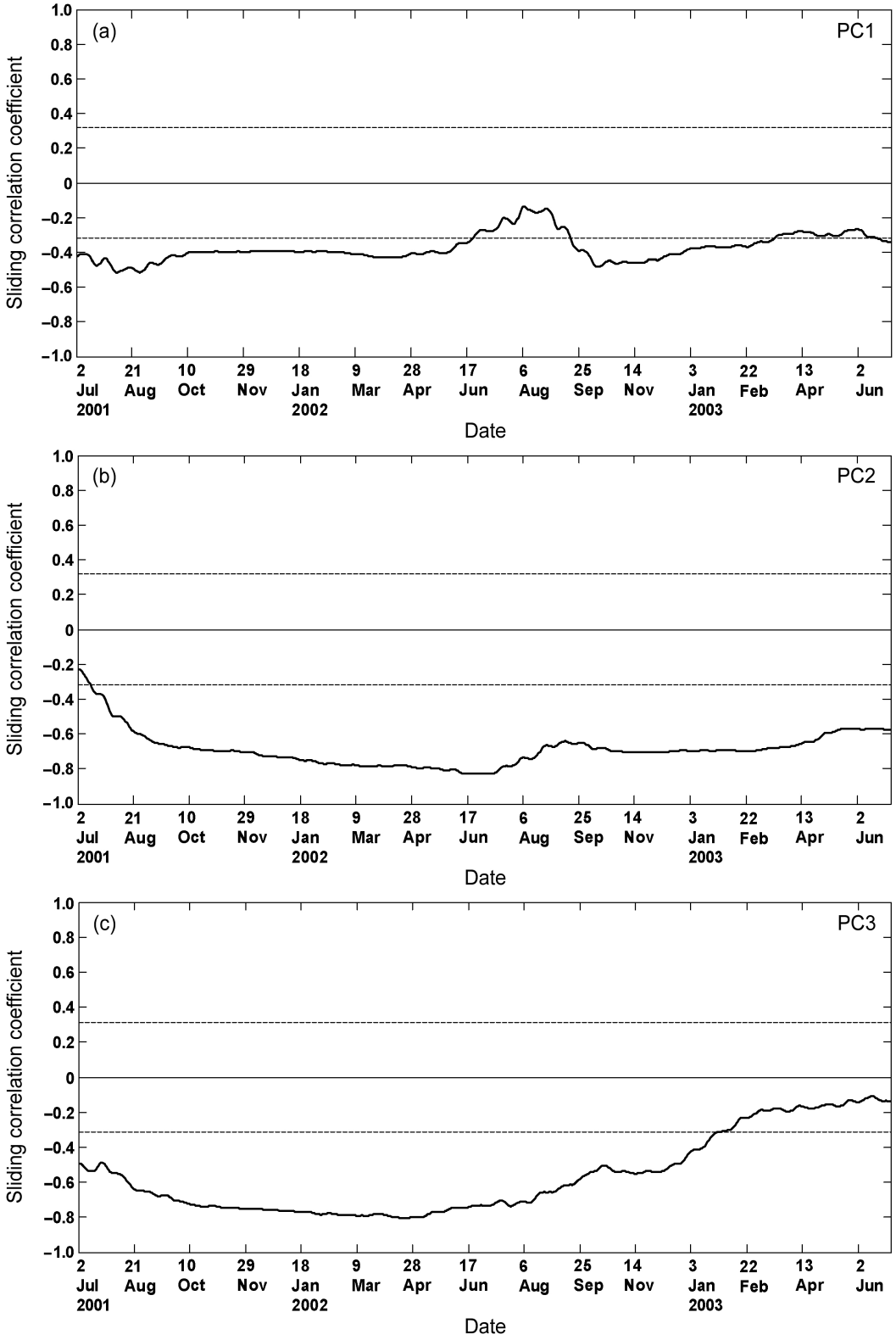

图 4 2001～2003 年长江下游 25～40 d 低频温度与东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度 EOF 分析主要模态对应的时间系数的 365 天滑动相关系数：（a）PC1；（b）PC2；（c）PC3。水平虚线表示 95% 信度水平

Fig. 4 Sliding correlation coefficients between the low-frequency temperature in the LYR and the principal components (PC) of 850-hPa low-frequency temperature in eastern Asia on the 25–40-day time scale with a window length of 365 days during 2001–2003: (a) PC1; (b) PC2; (c) PC3. The horizontal dashed lines represent the 95% confidence level

的实时变化。从图中可以发现，基于 T-EOF 延拓的 SSA 滤波的实时温度低频信号（蓝色实线）变化精度明显优于经典 SSA 滤波（无 T-EOF 延拓）的实时信号 [与真实的 ISO 信号（对长序列的经典 SSA 滤波，红色实线）的相关系数从 0.606（图 5b）提高到 0.721（图 5a）]，得到较高精度的用于低频模型预测的初始滤波值，更客观地反映观测数据中真实的 ISO 强度和位相的实时变化。同时，对于东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度场的前 4 个主成分 PC1～4，用上述实时 SSA 滤波提取这些 850 hPa 温度模态的实时温度低频主成分也得到类似的结果（图略）。因此，基于 T-EOF 延拓的实时 SSA 滤波的低频分量提取，对于准确反映实时低频分量之间的联系，提高预测模型低频分量初值精度和提高模型的预测性能十分重要。

5　预测试验

本文用 22 年（1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日，8036 d）资料，得到长江下游地区逐日低频温度和东亚 850 hPa 25～40 d 低频温度场的前 4 个低频主成分，构建 ECAR 模型对 2001/2002～2017/2018 年每年 12 月 1 日至次年 2 月 28 日（1530 d）的长江下游地区 17 个冬季逐日低频温度进行历史回报试验。在这些回报试验中，用限定

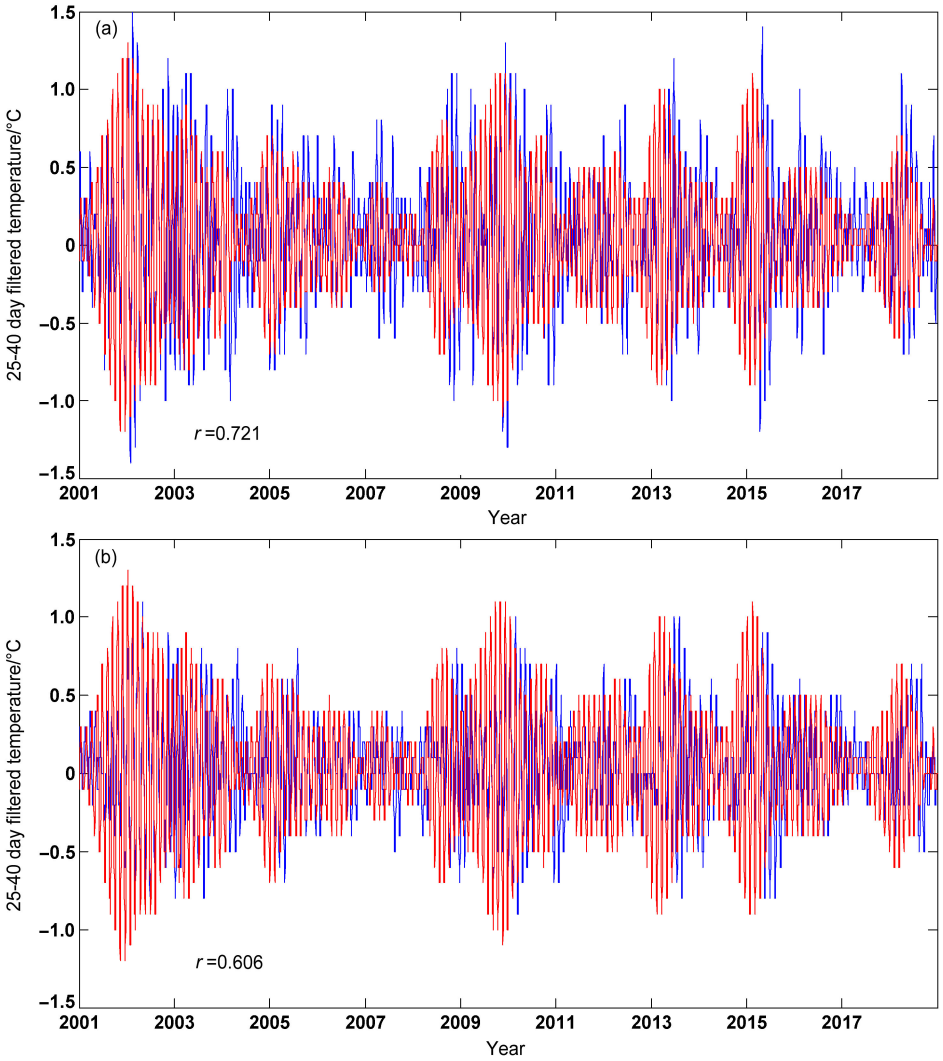

图 5　2001～2018 年长江下游地区逐日 25～40 d 低频温度（对长序列的经典 SSA 滤波，红线）与（a）基于 T-EOF 延拓的 SSA 滤波和（b）无 T-EOF 延拓的 SSA 滤波的实时低频温度（蓝线）的变化。*r* 是它们之间的相关系数

Fig. 5　Time series of the 25–40-day low-frequency temperature [SSA (singular spectrum analysis) filtered, red lines] in the LYR and real low-frequency temperature (blue lines) with the (a) T-EOF (temporal empirical orthogonal functions) extension and (b) without the T-EOF extension from 2001 to 2018. *r* indicates their correlation coefficients

记忆法，建立时变 ECAR 滑动进行独立样本预测试验 [其中子序列长度 M_0=365 d，复自回归模型的阶数 p=2，预报时间 K=30 d（初始时间是 2001/2002～2017/2018 年每年 11 月 1 日至次年 2 月 27 日，预报未来 30 d）]。以上建模方案有利于适应各个低频分量之间的相关随时间的改变（主要是低频相关的年际变化，图 4a、b、c），还能适当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，提高预报模型的稳定性。

在独立预测试验中，首先将 2001～2018 年逐日观测的东亚 850 hPa 温度场投影到前 L 个（$L=4$）25～40 d 低频空间分布型（由 1979～2000 年的逐日数据计算），得到前 L 个主成分的观测值；然后将这 L 个观测的 850 hPa 温度主成分和同期的长江下游逐日气温分别投影到各自经 SSA 后的对应于 25～40 d 振荡的 T-EOF 上（由 1979～2000 年的逐日数据计算 850 hPa 温度主成分和长江下游地区气温各自的 T-EOF），得到 2001～2018 年期间的逐日 850 hPa 温度的 25～40 d 重构分量 $\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_L$ 和长江下游地区气温重构分量 $\boldsymbol{t}_{lcj}$，构建扩展资料矩阵（$\boldsymbol{F}$）：

$$\boldsymbol{F}=(f_{i,l})=\left(\boldsymbol{T}_1,\boldsymbol{T}_2,\cdots,\boldsymbol{T}_L,\boldsymbol{t}_{lcj}\right), \qquad (1)$$

其中，$i=1,2,\cdots,M$（M 是资料序列长度）。对于式（1）中扩展资料矩阵 $\boldsymbol{F}$（L+1 个时间序列组成）的第 i 行（$f_{i,1},f_{i,2},\cdots,f_{i,L+1}$）经过一维 Fourier 变换后，得到复向量（$\tilde{f}_{i,1},\tilde{f}_{i,2},\cdots,\tilde{f}_{i,L+1}$），从而得到 L+1 个复时间序列 $\tilde{f}_{i,l}=a_{i,l}+b_{i,l}I\ (I=\sqrt{-1})$，构成扩展复数矩阵（$\tilde{\boldsymbol{F}}$，Extended complex matrix, ECM）：

$$\tilde{\boldsymbol{F}}=(\tilde{f}_{i,l}), \qquad (2)$$

其中，$l=1,2,\cdots,L+1$。对式（2）中每一分量 $\tilde{f}_{i,l}$ 建立 p 阶复自回归模型（CAR）：

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

[即扩展复数自回归模型（ECAR，Extended complex autoregressive model）]，用复数最小二乘法得到参数的估计 B_k，$k=0,1,\cdots,p$（$p=1,2,\cdots$），用式（3）可得到 M+1 时刻的预报值 $\hat{\tilde{f}}_{M+1,l}=\hat{a}_{M+1,l}+\hat{b}_{M+1,l}I$，对预测的复向量（$\hat{\tilde{f}}_{M+1,1},\hat{\tilde{f}}_{M+1,2},\cdots,\hat{\tilde{f}}_{M+1,L+1}$）通过一维 Fourier 逆变换得到复向量（$\hat{f}_{M+1,1},\hat{f}_{M+1,2},\cdots,\hat{f}_{M+1,L+1}$），分量对应各个低频分量的预报值 $\hat{f}_{M+1,l_1}$，$l_1=1,2,\cdots,L+1$。进一步递推 K 步，可得到第 K 天的预报值 $\hat{f}_{M+K,l_1}$，其中 $\mathrm{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1})=\hat{t}_{lcj}(M+K)$ 是长江下游低频温度分量的预报值。取子序列 M_0=365 d 不变，建立这种简化的 p 阶时变 ECAR 滑动进行 2001/2002～2017/2018 年期间每年 12 月 1 日至次年 2 月 28 日（17 个冬季，共 1530 d）长江下游低频温度的延伸期独立预报试验，预报的初始时间分别是前一年 11 月 1 日至当年 2 月 27 日，预报未来 30 d 长江下游地区低频温度，具体预测方案见图 6。在每次预报中，使用实时 SSA 滤波得到 25～40 d 重构分量 $T_1,T_2,\cdots,T_L,t_{lcj}$[采用基于 T-EOF 预测的延拓方法（Yang, 2018）抑制滤波边界效应]。其中，对实时 SSA 滤波后的分量（图 5a 中蓝色实线，包含一些小于 5 d 的高频噪声）进行最近 5 d（从−4 d、−3 d、−2 d、−1 d 到 0 d）的滑动平均，消除 5 d 以内的高频扰动信号。

图 7a 给出了用限定记忆法（其中子序列长度 M_0=365 d），建立的时变 ECAR 模型计算的 2001/2002～2017/2018 年每年 12～2 月（17 个冬季）长江下游地区逐日气温低频分量的未来 30 d 预报与观测的相关系数（即相关预报技巧）。这些预测的初始时间分别是每年 11 月 1 日到次年 2 月 27 日，17 个冬季共 2023 次预报。从图 7a 中可以看出，冬季长江下游 25～40 d 气温低频分量的预报时效达 26 d（相关预报技巧大于 0.5，通过 95% 信度水平的显著性检验，考虑序列持续性的影响）。另外，低频温度分量预报的均方根误差（Root-mean-square error, RMSE）也在 26～27 d 左右增大到 1.0σ（σ:低频分量的标准差）以上（图 7b）。这表明简化的时变 ECAR 可以较好地预报未来 3～4 周冬季长江下游地区低频温度分量的变化。图 8 是 2001/2002～2017/2018 年期间 12～2 月的 11 d、14 d、17 d 和 20 d 预报技巧的年际变化，表明了大部分年份 ECAR 的预报技巧在未来 20 d 预报时效内呈现显著的正相关（预报技巧大于 0.50），能较好地预测这些 25～40 d 振荡活跃年份冬季长江下游低频温度的变化。仅 2006/2007 年和 2016/2017 年冬季分别在 14 d 和 11 d 以后的预报技巧出现较明显降低，但相关预报技巧仍然达到 0.25 左右，这 2 年冬季是预报技巧偏低的时期。另外，直接用观测的长江下游温度低频分量建立自回归模型（AR）滑动进行独立样本预测试验，预报时效只有 7 d 左右（图 7a、b 中虚线），即预报技巧在 1 周后迅速下降（子序列长度 M_0=365 d）。它表明 AR

模型预测稳定性明显减小，预报时效显著缩短（由于经典的 AR 模型不能体现东亚地区冬季多种低频温度模态的协同作用）。

图 9 进一步给出 2002/2003 年、2007/2008 年、2010/2011 年和 2015/2016 年冬季的长江下游逐日低频温度分量 20 d 预报和观测的逐日变化曲线，其中 25～40 d 振荡较强的 2002/2003 年（图 9a），2010/2011 年（图 9c）和 2015/2016 年（图 9d）的相关预报技巧分别达到 0.93、0.84 和 0.93（每个冬季的 90 次预报，初始时间分别是 11 月 11 日、11 月 12 日、…、2 月 8 日），其显著性水平为 0.01（考虑序列持续性的影响）。从图中可以看出，ECAR 能较准确地预测上述年份中长江下游 12～2 月的 2～3 个主要持续低温集中期对应的显著低频

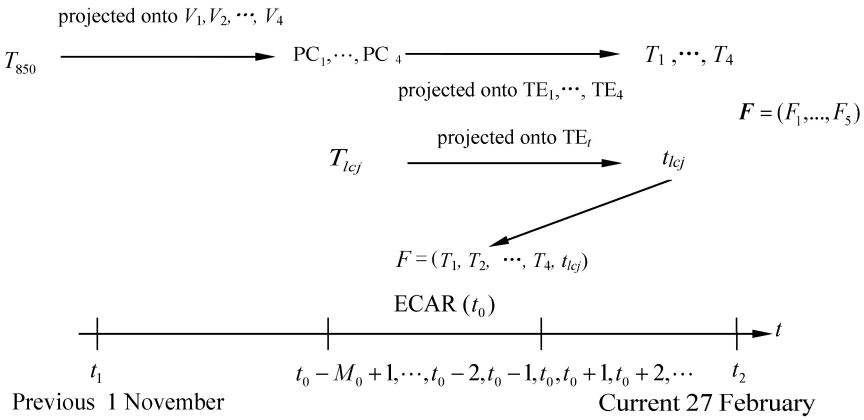

图 6　时变 ECAR 预测模式构建示意图。T_{850}：实时东亚 850 hPa 温度；T_1，T_2，T_3，T_4：实时东亚 850 hPa 温度低频主成分（PC）；t_{lcj}：实时长江下游低频温度；$\boldsymbol{F}$：扩展资料矩阵，t_0：初始时间；M_0：子序列长度；TE_1，TE_2，TE_3，TE_4：1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日 25～40 d 东亚 850 hPa 温度主要模态前 4 个主模态 V_1，V_2，V_3，V_4 的 T-EOFs；TE_t：1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日 25～40 d 长江下游温度的 T-EOFs

Fig. 6　Schematic representation of the time-varying ECAR (Extended complex autoregressive) forecasting model. T_{850}: Real-time 850-hPa temperature in eastern Asia; T_1, T_2, ⋯, T_4: Real-time low-frequency principal components (PC) of the 850-hPa temperature in eastern Asia; t_{lcj}: Real-time low-frequency temperature over the LYR; $\boldsymbol{F}$: Extended data matrix; t_0: Initial time; M_0: Length of the subsequence; TE_1, TE_2, ⋯, TE_4: Respective T-EOFs (temporal empirical orthogonal functions) of the principal components of the 850-hPa temperature in eastern Asia on the 25–40-day time scale for the first fourth modes V_1, V_2, ⋯, V_4 from 1 January 1979 to 31 December 2000; TE_t: T-EOFs of the daily temperature over the LYR on the time scale of 25–40 days from 1 January 1979 to 31 December 2000

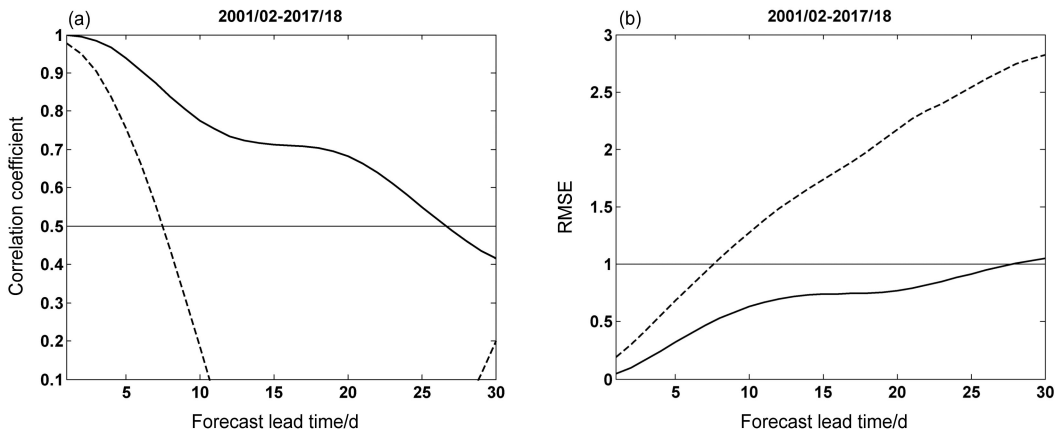

图 7　2001/2002～2017/2018 年 12～2 月长江下游温度低频分量 1～30 d 预报与观测的（a）相关系数、（b）标准化均方根误差。实线：ECAR 模型；虚线：AR 模型。图 a、b 中水平实线分别表示 95% 的信度水平和 1σ（σ表示标准差）

Fig. 7　(a) Correlation coefficients and (b) RMSE (root-mean-square error) between the observation and the 1- to 30-day forecast for the low-frequency temperature component over the LYR in December–February of 2001/2002–2017/2018. Solid line: ECAR model; dashed line: AR model. The horizontal solid lines in Fig. a and Fig. b represent the 95% confidence level and 1 σ (σ indicates standard deviation), respectively

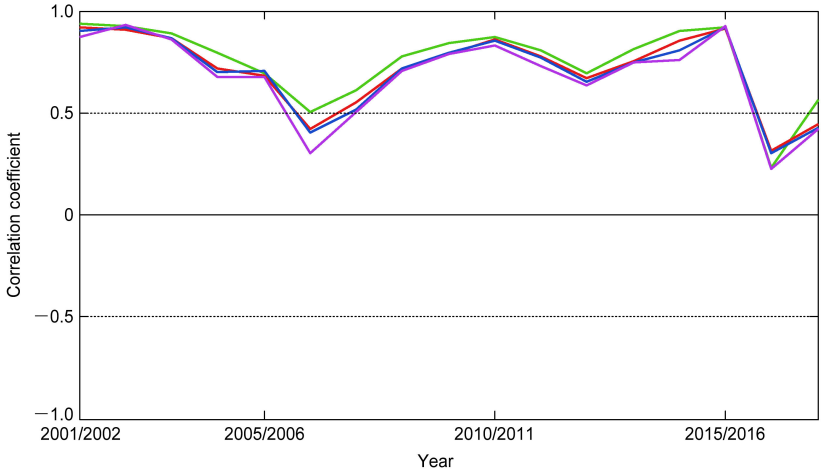

图 8　2001/2002～2017/2018 年 12～2 月长江下游温度低频分量预测和实况之间相关系数的年际变化。绿、红、蓝、紫线分别表示 11 d、14 d、17 d 和 20 d 预报，水平虚线表示 95% 信度水平

Fig. 8　Interannual variations of the correlation coefficient between the forecast and the observation of the low-frequency temperature component over the LYR in December–February during 2001/2002–2017/2018. The lead times are 11 days (green line), 14 days (red line), 17 days (blue line), and 20 days (purple line). The horizontal dashed lines represent the 95% confidence level

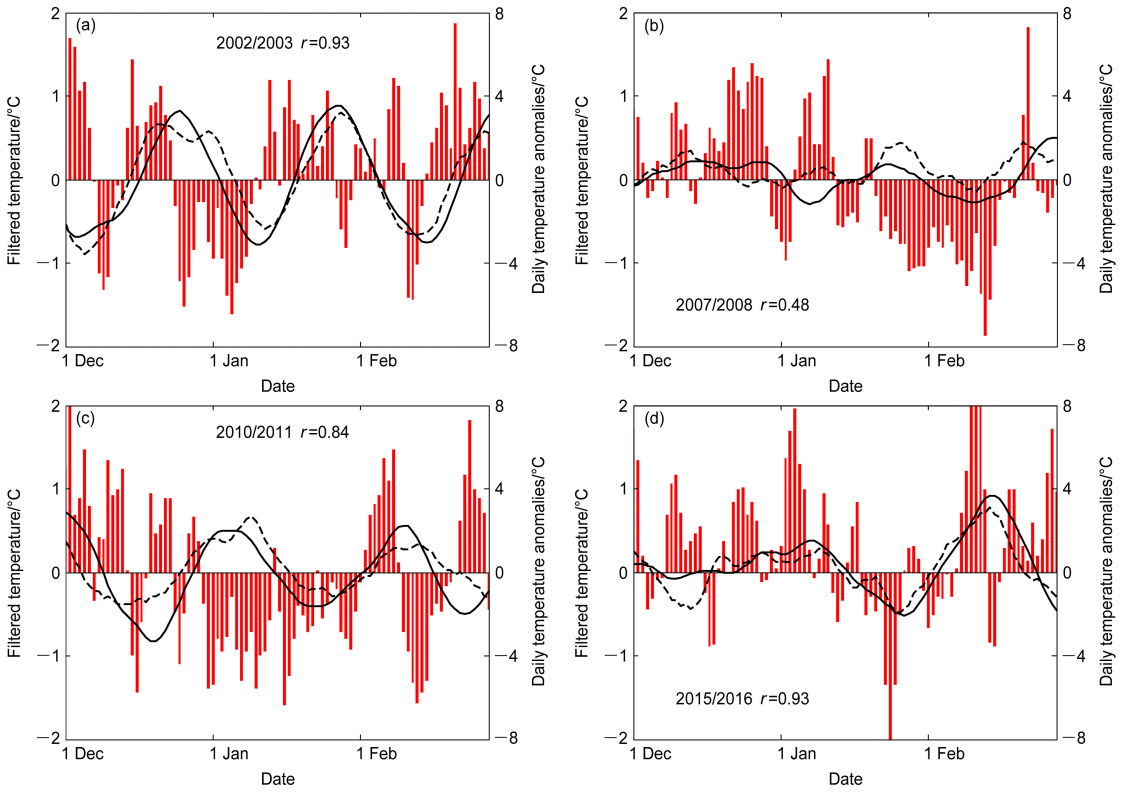

图 9　（a）2002/2003 年、（b）2007/2008 年、（c）2010/2011 年、（d）2015/2016 年 12～2 月长江下游地区 25～40 d 温度低频分量的实况（实线）和 ECAR 模型的 20 d 预报（虚线）。柱状表示逐日气温距平（单位：°C），*r* 是预测和实况之间的相关系数，预报的初始时间分别是 11 月 11 日、11 月 12 日……、2 月 8 日

Fig. 9　Observation (solid lines) and forecast (dashed lines) of the ECAR model at a lead time of 20 days for the low-frequency temperature component over the LYR from December to February of (a) 2002/2003, (b) 2007/2008, (c) 2010/2011, and (d) 2015/2016. The bars represent the daily temperature anomalies (units: °C), *r* is the correlation coefficient between the forecast and the observation, the initial date of forecast is 11 November, 12 November,..., 8 February, respectively

温度负位相变化和低温期，尤其是与 2002 年 12 月下旬和 2003 年 2 月中旬（图 9a）、2011 年 2 月上旬末到中旬（图 9c）和 2016 年 1 月下旬（图 9d）的 4 次负温度距平伴随的持续低温过程对应的低频温度分量位相变化（正的峰值位相转负位相过程，即低频升温向低频降温的位相转换）能较好地预测，其预报的负位相变化与实况基本一致。但是 2008 年 1 月下旬到 2 月中旬前期长江下游较长时间的持续温度负距平（持续 28 d），与更长时间尺度的 70 d 左右的低频振荡有关（图 1a）。ECAR 模型仅预测出与 1 月中旬和 2 月上旬持续负温度距平对应的较弱的 25～40 d 振荡低频正负位相变化（图 9b），需要进一步构建时间尺度是 70 d 左右的低频温度分量预测模型进行预测，才能提高这种由多个周期的低频振荡共同作用产生的长江下游持续 4 周左右的持续低温冰冻过程的预报能力。此外，2016/2017 年的 20 d 预报技巧明显下降（图 8），主要原因是这一年冬季 25～40 d 振荡较弱，月内主要强振荡周期大约在 13 d 左右（图 1a），所以 25～40 d 低频振荡的 ECAR 预测模型出现一些不稳定。类似地，2006/2007 年主要强低频振荡周期是 20 d 左右（图 1a），冬季 25～40 d 振荡不显著，ECAR 模型的预测技巧下降（预报时效小于 14 d，图 8）。以上大量独立预报试验表明，简化的 ECAR 模型能有效描述这 17 个冬季中的大部分冬季（25～40 d 振荡活跃的冬季）主要低频温度分量之间多种时滞相关变化信息，同时也包含一些非预期的相关信息，所以能比较精确地预测这些低频变化。因此，这种数据驱动的 ECAR（LFCF2.0），基于 SSA，从观测的时间序列的动力重构出发，滤去序列中的高频噪声，能精确地提取东亚 850 hPa 温度和长江下游地区气温中的主要低频模态的非均匀的时间变化分量；在实时预报中，由于实时 SSA 滤波明显减弱了经典 SSA 滤波的边界效应，得到的观测数据中真实的 ISO 信号明显增强，从而使得实时分量的重建序列分别成为单一和稳定的具有不同周期的主要低频信号序列，随机干扰得到了有效的衰减，显著增强了可预报性。然后基于主要复数低频分量的协同演化过程（通过数据变换生成复数空间中的虚拟数据，扩展有效数据规模），由数据驱动构建能描述更多大气低频分量相互作用过程的简化复数自回归预测模型（杨秋明，2014b），可以将长江下游地区冬季低温冰冻时段的预报时效延长到 3～4 周。

ECAR 预测方法基于实数据和虚数据之间的协同演化新规律，在一定程度上，突破了物理世界资源有限的约束，可以更有效地描述气候系统中主要低频模态时空变化的多样性（杨秋明, 2014b）。通过适当的数据变换，减少预测的不确定性、将多样化为归一、使复杂变简单。上述基于长序列历史数据的独立预报试验表明，与长江下游冬季低温密切相关的 25～40 d 温度低频分量的时变 ECAR 模型的预报时效可达 26 d 左右，大于与夏季长江下游高温密切相关的 30～60 d 低频温度的 23 d 的预报时效（杨秋明, 2018）。它表明简化的时变 ECAR 模型均能有效预报冬季和夏季不同时间尺度的温度 ISO 分量未来 3～4 周的变化，其中冬季的预报时效更长。ECAR 模型在大于 3 周的预报时效中具有很好的温度低频分量预报稳定性，能为长江下游地区极端温度变化过程的实时延伸期预测提供较可靠的预报信息，但这些不同时间尺度的温度 ISO 型强度的季节和年际变化机制是需要进一步研究的问题。详细揭示缓变下垫面各种外强迫调控大气次季节变化过程的机理，更好地综合考虑热带低纬度和两半球中高纬度的不同低频信息的作用，将是提高东亚冬季风 ISO 预测时间上限的关键。同时基于长江下游地区冬季低温日数与一定周期 ISO 的稳定的关系及其相关的年际变化，进一步改进数据分析方法，更精确地提取实时 ISO 信号，构建时变简化数据模型可以进一步延长冬季 10～30 d 延伸期极端气候事件的预报时效并提高月温度距平气候预测精度。另外，数据驱动的低频信号提取和构建 ECAR 模型方法也可以广泛应用于年际变化分量（如准 2 年振荡，3～4 年振荡等）和年代际变化分量（如 20～30 年振荡等）的预测。进一步综合次季节、年际和年代际变化信息，全方位实时监测不同时间尺度低频信号的变化，对关键数据进行多层次多角度的分析，构建这种实时简化气候预测模型，更好地反映气候系统中多时间尺度的相互作用，可以显著提高气候预测的整体水平。

6　结论和讨论

本文基于 1979～2018 年逐日长序列资料，研究了 39 年冬季（1979/1980～2017/2018 年）长江下游地区气温主要季节内变化周期与 12～2 月低温日数的联系，同时研究主要气温低频分量与东亚主

要的 850 hPa 温度模态变化的关系。采用 SSA，从观测数据中提取东亚地区 850 hPa 温度和长江下游冬季气温和主要低频分量（季节内时间尺度），通过 Fourier 变换生成的复低频分量组成扩展复数据阵,构建时变扩展复数自回归模型（ECAR）（即 LFCF2.0），对冬季长江下游地区低频温度分量进行延伸期预报试验并研究可预报性的年际变化，得到以下结论：

（1）冬季长江下游逐日气温存在较显著的季节内振荡周期（15～25 d、25～40 d 和 50～70d 振荡），其中与 12～2 月低温日数关系最密切的是 25～40d 振荡。这种 25～40 d 振荡与东亚热带外 850 hPa 温度前 4 个主要 25～40 d 低频模态的变化密切相关，其中最相关的是第 2 模态（EUP 波列），但与热带西太平洋地区 ISO 的变化的联系不显著。它反映了冬季欧亚中高纬度地区大气加热异常和大气内部动力过程产生的各种低频模态变化对长江下游地区冬季气温低频变化的影响，这些东亚低层 25～40 d 温度波列是驱动冬季长江下游地区极端低温天气的主要低频系统。

（2）基于 1979～2000 年长江下游地区逐日温度和东亚 850 hPa 温度场 25～40 d 低频主要模态，通过 Fourier 变换，在复空间上构建的时变 ECAR 预报模型（LFCF2.0）能较好地预测 2001/2002～2017/2018 年 12～2 月长江下游逐日气温 25～40 d 低频分量未来 26 d 左右的变化，可以提前 3～4 周左右预测冬季长江下游持续低温事件，能为长江下游地区冬季低温冰冻过程（对应于 25～40 d ISO 变化）的实时延伸期预报提供稳定的预报信号。但是，用经典 AR 模型预测低频温度分量的预报时效仅 7 d 左右，预报时效明显缩短。因此，基于复空间包含更多低频信号构建的复数自回归模型预测技巧显著高于原始实空间低频分量自回归模型。

（3）长江下游地区冬季气温 25～40 d 振荡活跃的年份，其低频分量的 ECAR 模型预报时效较长（大于 25 d）。但在 25～40 d 振荡较弱的年份（2006/2007 年和 2016/2017 年）预报技巧显著减小，这时振荡周期较短的 10～20 d 振荡或较长的 50～70 d 振荡可能起主导作用，可以选择相应的关键区域的温度低频主成分构建对应的 ECAR 模型预测它们未来 30 d 的变化，由预测的低频分量的位相变化估计长江下游地区冬季持续低温时段。

大量气象观测资料具有高度数据相关性和多重数据属性，反映和表征着复杂的自然现象与关系。本文对长序列观测数据进行变换和分解，提取长江下游地区冬季气温低频变化和东亚中高纬度和副热带地区 850 hPa 温度主要低频模态对应的低频主成分，分析这些低频分量之间的联系，并将这些主要低频分量视为气候数据多样化演变过程的主要数据解，通过 Fourier 变换生成的复低频分量，反演出可预报性较大的简化的时变复数据模型 ECAR。这种预报方法显著减小了计算误差，较好地反映主要低频分量之间的相互作用，并延长了预报时效。这些数据驱动的气候预测方法不受数值预报时效的可预报性限制,不预设各种物理条件。同时，基于 T-EOF 延拓的实时 SSA 滤波，可以很好地抑制滤波边界效应得到稳定的实时 ISO 信号。这种实时 SSA 滤波能快速、精准反映观测数据中实时 ISO 信号的位相和强度变化，更全面反映复杂气候系统自然变化信息。进一步优化各种数据分析方法，更好地整合数据的力量，基于实数据和虚数据之间的协同变化过程，可以建立预测稳定性更好的各种简化数据模型，让预报模式从根本上摆脱可预报性的束缚，实现模式的 1～10 d 短中期和 10～30 d 延伸期以及短期气候无缝隙预报的能力。

参考文献（References）

Abhilash S, Mandal R, Dey A, et al. 2018. Role of enhanced synoptic activity and its interaction with intra-seasonal oscillations on the lower extended range prediction skill during 2015 monsoon season [J]. Climate Dyn., 51(9): 3435−3446. doi:10.1007/s00382-018-4089-3

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111(D5): D05109. doi:10.1029/2005jd006290

Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. Atmos. Sci. Lett., 12(3): 273−280. doi:10.1002/asl.333

陈官军, 魏凤英, 姚文清, 等. 2017. 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, 75(3): 400−414. Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing, et al. 2017. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75(3): 400−414. doi:10.11676/qxxb2017.024

Chen N, Majda A J. 2015. Predicting the real-time multivariate Madden-Julian Oscillation index through a low-order nonlinear stochastic model [J]. Mon. Wea. Rev., 143(6): 2148−2169. doi:10.1175/MWR-

D-14-00378.1

Chen N, Majda A J, Giannakis D. 2014. Predicting the cloud patterns of the Madden-Julian Oscillation through a low-order nonlinear stochastic model [J]. Geophys. Res. Lett., 41(15): 5612−5619. doi:10.1002/2014GL060876

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 [J]. 气象科学, 30(5): 569−573. Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. 2010. The think about 10-30 d extended-range numerical weather prediction strategy-facing the atmosphere chaos [J]. Sci. Meteor. Sinica (in Chinese), 30(5): 569−573. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.001

丁一汇, 梁萍. 2010. 基于 MJO 的延伸预报 [J]. 气象, 36(7): 111−122. Ding Yihui, Liang Ping. 2010. Extended range forecast basing on MJO [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(7): 111−122. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.07.018

Ghil M, Kingtse M. 1991. Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part Ⅱ: Southern Hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 48(5): 780−790. doi:10.1175/1520-0469(1991)048<0780:IOITGA>2.0.CO;2

韩世茹, 郑志海, 周须文, 等. 2019. 青藏高原积雪深度对延伸期预报技巧的影响 [J]. 大气科学, 43(1): 142−154. Han Shiru, Zheng Zhihai, Zhou Xuwen, et al. 2019. Influence of the Tibetan Plateau snow depth on the extended-range prediction skill [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1): 142−154. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252

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 [J]. 气象科技进展, 3(1): 11−17. He Jinhai, Liang Ping, Sun Guowu. 2013. Consideration on extended-range forecast and its application study [J]. Adv. Meteor. Sci Technol. (in Chinese), 3(1): 11−17. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.002

Hoskins B. 2013. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: A stimulus for our science [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 139(672): 573−584. doi:10.1002/qj.1991

Karpechko A Y. 2018. Predictability of sudden stratospheric warmings in the ECMWF extended-range forecast system [J]. Mon. Wea. Rev., 146(4): 1063−1075. doi:10.1175/MWR-D-17-0317.1

Krishnamurthy V. 2018. Predictability of CFSv2 in the tropical Indo-Pacific region, at daily and subseasonal time scales [J]. Climate Dyn., 50(11-12): 3931−3948. doi:10.1007/s00382-017-3855-y

Kondrashov D, Chekroun M D, Robertson A W, et al. 2013. Low-order stochastic model and "past-noise forecasting" of the Madden-Julian Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 40(19): 5305−5310. doi:10.1002/grl.50991

Lavaysse C, Naumann G, Alfieri L, et al. 2019. Predictability of the European heat and cold waves [J]. Climate Dyn., 52(3-4): 2481−2495. doi:10.1007/s00382-018-4273-5

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 [J]. Climate Dyn., 45(7-8): 2123−2135. doi:10.1007/s00382-014-2461-5

李亚飞, 任荣彩. 2019. 北半球冬季各阻塞系统对大范围极端温度异常的单独和协同影响 [J]. 大气科学, 43(6): 1313−1328. Li Yafei, Ren Rongcai. 2019. The independent and coordinative influences of the four blocking systems in the Northern Hemisphere winter on the occurrence of widespread extreme cold surface temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1313−1328. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18214

Lim Y, Son S W, Kim D. 2018. MJO prediction skill of the subseasonal-to-seasonal prediction models [J]. J. Climate, 31(10): 4075−4094. doi:10.1175/JCLI-D-17-0545.1

Love B S, Matthews A J, Janacek G J. 2008. Real-time extraction of the Madden-Julian Oscillation using empirical mode decomposition and statistical forecasting with a VARMA model [J]. J. Climate, 21(5): 5318−5335. doi:10.1175/2008JCLI1977.1

Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40−50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 28(5): 702−708. doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2

Mo K C. 2001. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations [J]. Mon. Wea. Rev., 129(4): 802−817. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0802:AFAPOI>2.0.CO;2

Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. Mon. Wea. Rev., 107(8): 994−1013. doi:10.1175/1520-0493(1979)107<0994:LSAODC>2.0.CO;2

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]. J. Climate, 27(12): 4531−4543. doi:10.1175/JCLI-D-13-00624.1

Sabeerali C T, Ajayamohan R S, Giannakis D, et al. 2017. Extraction and prediction of indices for monsoon intraseasonal oscillations: An approach based on nonlinear Laplacian spectral analysis [J]. Climate Dyn., 49(9-10): 3031−3050. doi:10.1007/s00382-016-3491-y

Sahai A K, Borah N, Chattopadhyay R, et al. 2017. A bias-correction and downscaling technique for operational extended range forecasts based on self organizing map [J]. Climate Dyn., 48(7-8): 2437−2451. doi:10.1007/s00382-016-3214-4

Schickedanz P T, Bowen E G. 1977. The computation of climatological power spectra [J]. J. Appl. Meteor., 16(4): 359−367. doi:10.1175/1520-0450(1977)016<0359:TCOCPS>2.0.CO;2

Stan C, Krishnamurthy V. 2019. Intra-seasonal and seasonal variability of the Northern Hemisphere extra-tropics [J]. Climate Dyn., 53(7-8): 4821−4839. doi:10.1007/s00382-019-04827-9

Székely E, Giannakis D, Majda A J. 2016. Extraction and predictability of coherent intraseasonal signals in infrared brightness temperature data [J]. Climate Dyn., 46(5-6): 1473−1502. doi:10.1007/s00382-015-2658-2

Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(1): 61−78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

Vitart F, Molteni F. 2010. Simulation of the Madden-Julian Oscillation and its teleconnections in the ECMWF forecast system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 136(649): 842−855. doi:10.1002/qj.623

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 [J]. Climate Dyn., 46(3-4): 693−709. doi:10.1007/s00382-015-2607-0

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 [J]. Adv. Atmos. Sci., 32(12): 1583−1591. doi:10.1007/s00376-015-4252-2

谢义炳, 陈受钧, 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, 33(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 (in Chinese), 33(2): 206−217. doi:10.11676/qxxb1963.020

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 Qiuming. 1993. Teleconnections and features of circulation in the pentad mean 500 hPa height field during the Northern Hemisphere summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17(2): 148−154. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.02.03

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 Qiuming. 2009. 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: Earth Sciences, 52(10): 1485–1501. doi:10.1007/s11430-009-0156-2

杨秋明, 宋娟, 李熠, 等. 2012. 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, 27(8): 876−884. Yang Qiuming, Song Juan, Li Yi, et al. 2012. Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over Yangtze River valley [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 27(8): 876−884. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2012.08.0876

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 [J]. 气象学报, 72(3): 494−507. Yang Qiuming. 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 day oscillation [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72(3): 494−507. doi:10.11676/qxxb2014.028

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 [J]. 物理学报, 63(19): 199202. Yang Qiuming. 2014b. 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 (in Chinese), 63(19): 199202. doi:10.7498/aps.63.199202

杨秋明. 2015. 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, 30(9): 970−984. Yang Qiuming. 2015. Prospects and progresses in the research of the methods for 10-30 days extended-range weather forecast [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 30(9): 970−984. doi:10.11867/j.issn.10018166.2015.09.0970

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 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(4): 491−509. doi:10.11676/qxxb2016.046

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 20–30 days [J]. J. Geophys. Res., 123(1): 211−233. doi:10.1002/2017JD027281

杨秋明. 2018. 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, 33(4): 385−395. Yang Qiuming. 2018. 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]. Adv. Earth. Sci. (in Chinese), 33(4): 385−395. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2018.04.0385

杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等. 2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与欧亚遥相关型的关系[J]. 大气科学, 38(1): 121−132. Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al. 2014. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(1): 121−132. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12181

Yang S Y, Zhu Z W, Cui J, et al. 2019. Regulation of the intraseasonal oscillation over mid-to-high latitude Eurasia on winter surface air temperature over China [J]. Dyn. Atmos. Oceans, 86: 63−72. doi:10.1016/j.dynatmoce.2019.03.003

Zeng Q C. 1983. The evolution of a Rossby-wave packet in a three-dimensional baroclinic atmosphere [J]. J. Atmos. Sci., 40(1): 73−84. doi:10.1175/1520-0469(1983)040<0073:TEOARW>2.0.CO;2

章大全, 郑志海, 陈丽娟, 等. 2019. 10～30 d 延伸期可预报性与预报方法研究进展 [J]. 应用气象学报, 30(4): 416−430. Zhang Daquan, Zheng Zhihai, Chen Lijuan, et al. 2019. Advances on the predictability and prediction methods of 10–30 d extended range forecast [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 30(4): 416−430. doi:10.11898/1001-7313.20190403

郑志海, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 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, 61(19): 199203. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. Acta Phys. Sinica (in Chinese), 61(19): 199203. doi:10.7498/aps.61.199203

Zhu Z W, Li T. 2017a. The statistical extended-range (10–30–day) forecast of summer rainfall anomalies over the entire China [J]. Climate Dyn., 48(1–2): 209−224. doi:10.1007/s00382-016-3070-2

Zhu Z W, Li T. 2017b. Statistical extended-range forecast of winter surface air temperature and extremely cold days over China [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 143(704): 1528−1538. doi:10.1002/qj.3023

Zhu Z W, Li T. 2018. Extended-range forecasting of Chinese summer surface air temperature and heat waves [J]. Climate Dyn., 50(5–6): 2007−2021. doi:10.1007/s00382-017-3733-7