1	
2	冬季长江下游地区气温低频振荡和低温天气
3	的延伸期预报研究
4	
5	杨秋明 1.2
6	1 南京气象科技创新研究院, 南京 210009
7	2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009
8	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
9	与温度低频振荡的联系。结果表明,冬季长江下游逐日气温主要有 15~25, 25~40 和 50~70 d
10	的周期振荡,其中长江下游气温的25~40 d 振荡强度年际变化和12~2 月低温日数之间有显著
11	的正相关。基于2001~2018年逐日长江下游气温实时25~40 d低频分量和东亚地区850hPa低
12	频温度主成分,建立了长江下游冬季温度低频分量的延伸期预测的时变扩展复数自回归模型
13	(ECAR)。其中,采用基于 T-EOF 延拓的实时奇异谱(SSA)滤波,较好地抑制经典 SSA 滤波的边
14	界效应,得到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
15	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
16	对 25~40 d 时间尺度的长江下游冬季低频温度分量的预测时效可达 26 d 左右, 预报能力显著
17	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
18	值的预测背景信息。
19	关键词 长江下游低频温度 实时 SSA 延伸期预报模型 低温天气 冬季
20	稿件编号 2019208A
21	文章编号: 中图分类号 P456 文献标识码 A
22	doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19208
23	
24 25	
26	
27	

收稿日期 2019-09-05; 网络预出版日期

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: <u>yangqm@cma.gov.cn</u>, <u>yqm0305@263.net</u>

基金项目 国家自然科学基金项目 41175082

Funded by National Natural Science Foundation of China(Grant 41175082)

A study on the extended-range forecast for the low frequency

oscillation of temperature and low temperature weather over the

lower reaches of Yangtze river valley in winter

YANG Qiuming¹

1 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009, China

2 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 low temperature in December - February over the lower reaches of the Yangtze River valley (LYRV) were studied for the period of 1979/1980—2017/2018. It is found that the daily temperatures over the LYRV in December— February is mainly of periodic oscillations of 15-25, 25-40 and 50-70 days, and the interannual variation of the intensity of its 25-40-day oscillation has a strongly positive correlation with the number of low temperature days in December-February. A real-time 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 2001 to 2018, are used to establish the time-varying extended complex autoregressive model (ECAR) on an extended-range forecast of the 25-40-day low frequency temperature over the LYRV in winter. Using the real-time SSA filtering with the T-EOF extension, it can effectively inhibit the end effects of the traditional SSA and make a better real-time signal of ISO. A 17-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 December-February, for the period ranging from 2001/2002 to 2017/2018. 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 26 days, with a forecast ability superior to the traditional autoregressive (AR) model. Hence, the development and variation of the leading 25-40-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 winter supplied the valuable predicting background in determination of extended-range weather process in the persistent low temperature over the LYRV at the 3—4-week leads.

Key words Low frequency temperature over the lower reaches of Yangtze river valley, Real-time SSA, Extended-range forecasting model, Low temperature weather, Winter

59

60

61

62

63

64

28

29

30

3132

33

34

35

3637

38

39

40 41

42

43

44

45 46

47 48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

1 引言

冬季受东亚季风区各种大尺度低频环流[主要是欧亚/太平洋型(EUP)低频流型等]的多时间尺度变化的影响,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)的大部分城市经常出现持续性的异常低温冰冻天气,对经济、电力生产、旅游和人们的正常生活带来较严重的影响。因此,详细分析长江下游地区冬季温度低频变化特征,研究该区域

低温事件的 10~30 d 延伸期预报,对于决策部门做出较长时间的合理安排,开展防灾减灾工作,
有效降低雨雪冰冻等灾害性事件带来的损失具有非常重要的意义,同时也为推进现代天气气
候业务向智慧型方向发展提供有力支撑,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。

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

由于冬季东亚季风区大尺度低频环流型和温度型异常活动频繁,常常导致长江下游地区 出现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的传播的多样性,所以精确建立能够刻画欧亚地区冬季风系统主要成 员活动与变异的"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(如不同时间尺度的热带外地区大尺度低频流型的变化等)进 行计算、分析、建模,实现有关知识的合成和预报。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预测模型进行延伸 期预测,是有效提高低频分量延伸期预报精度的重要途径之一。

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 10~30 d 延伸期预报研究的难点(Hoskins, 2013; 丑纪范等, 2010)。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; 杨秋明, 2015,2016,2018b; Kondrashov et al, 2013; Zhu and Li, 2016,2017,2018; 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; Abhilash et al., 2018; Sahai et al., 2017; Karpechko, 2018; Lavaysse et al., 2019)、统计(Xia et al, 2015; Szekely et al., 2016; Wang et al.,2016; Zhu and Li, 2016, 2017, 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.,2014,2015), 热带大气 30~60d 振荡(谢义炳等,1963)[MJO(Madden and Julian, 1971)]的预测时效已逐步延长到 12~25 d(Neena et al., 2014),其中 ECMWF 模式达到 36d(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 30~60d 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 10~80d 低频分量的延伸期预报时效已达 5~6 候左 右(Zhu and Li, 2016, 2017, 2018),但 10~30d 低频分量的预测时效仍小于 3 候。关于夏季长江下 游地区延伸期预报方法,目前国内外的研究主要集中于各种时间尺度(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, 2018a), 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 23d 左右(杨秋明,2018b) (http://www.lcjrerf30.org[2020-5-20])。但是, 采用长序列数据详细分析冬季长江下游地区极端 低温天气和低频变化特征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。这种误差较大的实时滤 波初始值会导致未来 10 d 以上的低频分量实时预测结果不可靠,也是导致各种基于低频分量 的延伸期预测模型预报不稳定的原因之一。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重要问题。 本文将基于长序列(1979年1月1日至2018年12月31日)逐日观测数据,分析季节内时 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,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, 2018a)

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

125 [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 126 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 127 滤波方法(Yang, 2018a)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

129

长江下游逐日气温采用长江下游地区(30.5°~32.0°N, 118.0°~122.5°E) 25 站平均值, 130 东亚地区 850hPa 温度场选用 NCEP/NCAR 逐日再分析资料(2.5° ×2.5° 格点), 以上资料时 131 间是 1979 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日(共 14610 d), 低频温度的独立预报试验时间是 132 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 133 134 (Expert team on climate change detection, monitoring and indices)定义极端气候事件指数的方 法(Alexander and Coauthors, 2006),通过温度百分位法定义极端低温日:对于长江下游地区, 135 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 136 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目的阈值,将 137 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 138 139 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 140 and Bowen, 1977), 研究主要季节内周期振荡型及其年际变化,分析不同时间尺度的温度 ISO 与 12~2 月长江下游地区低温日数之间的联系,并研究东亚 850hPa 低频温度与长江下游主要 141 温度低频分量的关系。然后,对长江下游逐日气温原始序列和由主成分分析(Principal 142 143 Component Analysis, PCA)得到的东亚 850hPa 温度场(15°~60°N, 60°~150°E)主要空间模 144 态的时间系数用 SSA 滤波,重建对应于各种主要的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850hPa逐日温度场低频主成分,构建扩展复数自回归模型 145 (ECAR) (杨秋明,2014b;Yang,2018a)进行延伸期独立预测试验,预测温度低频分量季节内变化 146 [ECAR, 即低频分量预测模型 LFCF2.0(杨秋明, 2015)]。文中选择适当的子序列长度,滑动进 147 148 行动态建模,适应复数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,本文在实 时 ISO 信号提取时,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 149 150 延长序列长度]投影得到的 SSA 低频重构分量,明显提高边界附近滤波值精度(实时滤波中只 151 使用初始时间 to 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 152 序列信息的实时 SSA 滤波方法(Yang, 2018a)能较准确地提取 ISO 振幅和位相变化信息,十分 153 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低频振荡变化特征,对1979/1980~2017/2018年逐年冬季12月1日至2月28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值的时间一周期图(图 la,当F>6.0 时,其显著性是0.01)。从图 la可见,能通过0.01显著性水平检验的主要周期为15~25,25~40,50~70 d。15~25d振荡除了1993/1994年、2013/2014和2015/2016年表现不显著外(其中2013/2014年显著周期延长到26d,2015/2016年缩短为13d),其余时间均显著存在,大多能通过0.01显著性水平检验;25~40d的周期振荡主要明显存在于1979/1980~2017/2018期间的大部分冬季,但1994/1995~1995/1996、2006/2007~2007/2008年振荡较弱;而50~70d周期在1988/1989~1990/1991、1994/1995~1995/1996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主要表现为15~25,25~40和50~70d的周期振荡,且存在显著的年际变化。以上分析出的12~2月长江下游逐日温度多时间尺度振荡的变化,是冬季持续低温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,并构建对应时间尺度的低频分量变化的预测模型,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。

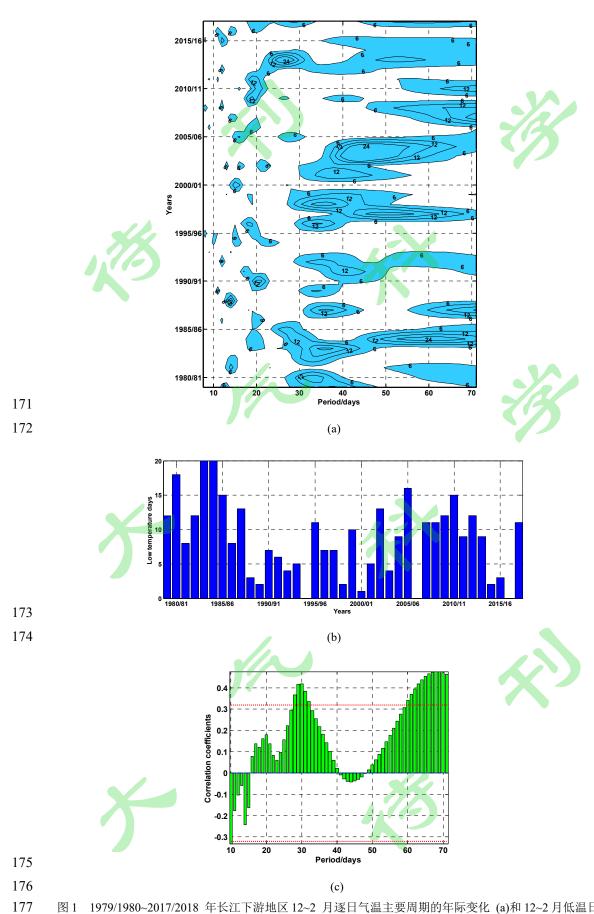


图 1 1979/1980~2017/2018 年长江下游地区 12~2 月逐日气温主要周期的年际变化 (a)和 12~2 月低温日数

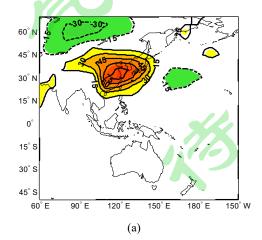
的年际变化(b)以及不同周期 ISO 之间的相关(c)

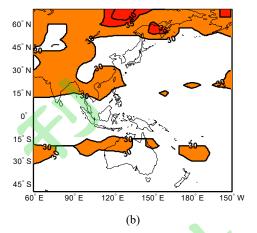
(a)中阴影区表示通过 0.01 显著性水平检验,(c) 中直方图表示 12~2 月低温日数与 10,11,…,71d 振荡强度的相关,红色水平虚线表示通过 0.05 显著性检验

Fig. 1 (a) Interannual variations of the periods for the daily temperature over the lower reaches of the Yangtze River valley (LYRV) in December—February during the period of 1979/1980—2017/2018, shaded values are significant at 99% confidence level; (b) the number of the daily low temperature in December—February during the period form 1979/1980 to 2017/2018; (c) Correlations between the number of days with daily low temperature and oscillations from 10 to 71 days, and the significant level of 95% is represented by horizontal red dashed line

图 1b 是 1979/1980~2017/2018 年期间冬季 12~2 月长江下游地区低温日数的变化,其中 1983/1984、1984/1985 年冬季最多 (20d), 1994/1995、2006/2007 和 2016/2017 年冬季无区域低温日数。图 1c 是低温日数与 10,11,...,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的统计量 F 值]的相关。从图中可以发现长江下游地区冬季低温日数与周期为 25~40d 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(显著性是 0.01)。当这种 25~40d 左右的振荡增强时,冬季 12~2 月长江下游地区低温日数偏多。这种 25~40 d 左右的温度振荡型的关键周期略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(杨秋明, 2009),表明影响冬季长江下游低温变化的 ISO 与影响夏季强降水的 ISO 变化特性有一定差异。由于冬季长江下游地区低温日数和 25~40 d 温度低频振荡关系密切,对 10~30 d 时间尺度的延伸期低温天气过程预报具有更好的指示意义。所以,本文主要针对 25~40 d 时间尺度,建立冬季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 12~2 月长江下游地区持续低温延伸期预测提供重要预报信息。

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





206

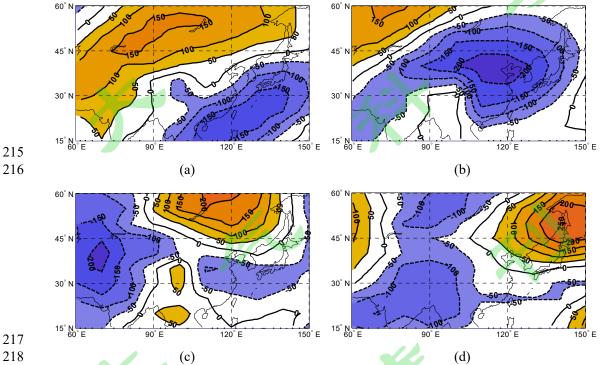
207 208

图 2 (a) 1979~2018 年长江下游地区 25~40d 低频温度与东亚 850hPa 低频温度场的相关分布,图中相关系数 已×100, 阴影表示通过 0.05 的显著性检验的区域; (b)850hPa 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,图中数值已×100,单位:%,阴影区表示≥30 的区域

Fig.2 (a) Correlation between the daily temperature over the LYRV and Eastern Asian 850 hPa temperature anomaly on the time scale of the 25-40-day during the period form 1979 to 2018, 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 25-40-day signal to the total seasonal variability, in which the contours greater than or equal to 30 are shaded. Values are multiplied by 100

213

214



218

1979~2000 年东亚 850hPa 25~40 d 低频温度场第 1~4(a~d)空间分布型,图中数值已乘以 1000,虚线 图 3 表示负值

219 220 221

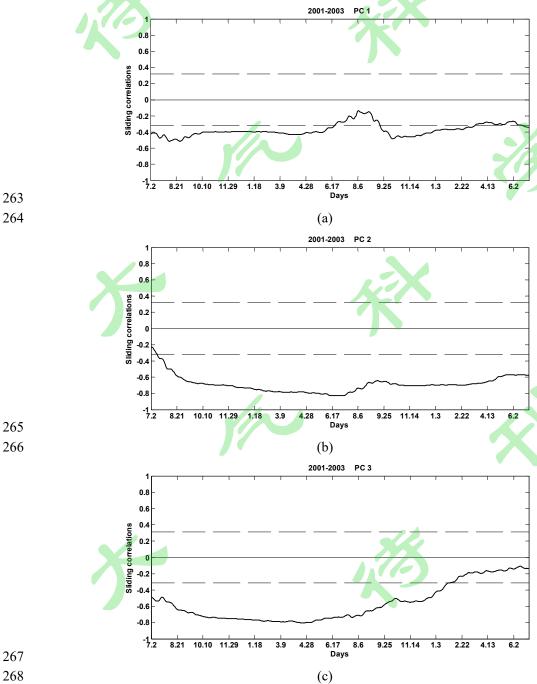
Fig.3 Principal spatial modes of the Eastern Asian 850 hPa 25-40-day low frequency temperature field from 1979 to 2000, in which the (a) \sim (d) correspond to mode 1 \sim 4, the values in the figure has been multiplied by 1000, the dashed lines represent negative values

223 224

225 欧亚和太平洋地区各环流系统之间互为反馈、相互作用、形成大尺度环流型和温度型异 226 常活动(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, 2012)和冬季极端低温事件的形成和异常发展,特别 227 228 是与冬季欧亚中纬度大尺度环流复杂变化对应的低层大气大尺度温度型的各种时间尺度的 低频变化,是引起冬季长江下游持续低温天气的重要原因之一。 图 2a 给出了长序列(1979 年 229 1月1日至2000年12月31日)逐日长江下游地区25~40d低频温度与东亚850hPa低频温度 230 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, 231 当相关系数分别大于 0.16 和 0.21 时,其显著性为 0.05 和 0.01)。图中显示出明显的欧亚中纬 232 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,与环流的 EUP 低频波列相似, 233 最显著的强正相关区域在长江下游附近(显著性是 0.01),同时欧亚大陆中纬度和副热带西太 234 平洋地区是较显著的负相关区[这些波列活动区域地区(主要是中国东部长江中下游及以南 235 236 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地区低频系统对长江下游 温度低频变化的作用,它的影响机制需要进一步研究。为了分析 25~40 d 时间尺度的东亚 850 237 hPa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(资料时间是 238 239 1979~2000 年,序列长度是 8036 d, 由 Butterworth 滤波得到东亚地区 850 hPa 25~40 d 低频温 240 度场), 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850hPa 温度分别进行主成分分析,得到前7个空间 241 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 242 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 243 244 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~3d 分别给出了东亚 850 hPa 25~40 d 低 245 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 246 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, 247 248 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 对应相关均达 0.05 的显著性(考虑序 249 列持续性的影响,当相关系数为0.16时,其显著性可达0.05),其中与第2模态的负相关最为显 250 著(相关系数为-0.59, 显著性达 0.01)。这 4 个与长江下游温度低频分量密切相关的 850hPa 251 252 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,导致了欧亚中高 253 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低频温度和持续低温影响的多 254 样性。对于第1、2模态,其空间分布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 和 3b),类似于长江下游地区温度与东亚 850hPa 温度的低频相关的低频波列(图 2a),体现了欧亚中高纬地区和热带太平洋地区环流的相互作用,是影响长江下游地区冬季温度低频变化的重要的低频系统之一,与中高纬度 10~30d 振荡的波列的作用相似(杨双艳等,2014;Yang at al., 2019)。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。所以,这 4 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 25~40 d 温度低频分量变化和冬季低温冰冻过程的形成,是冬季长江下游地区温度 10~30 d 延伸期预测的可预报性主要来源之一。





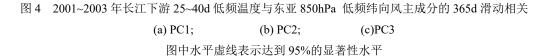
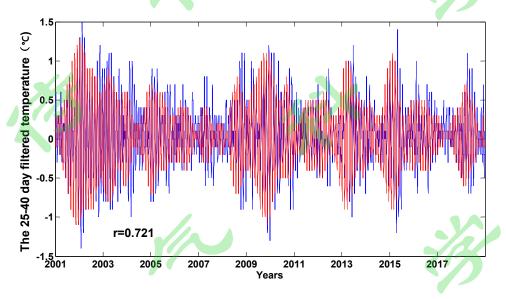


Fig.4 Sliding correlations of the 25—40-day low frequency temperature in the LYRV to the principal components of Eastern Aisan 850 hPa temperature anomalies in 2001—2003 with a window length of 365 days

(a) PC1; (b) PC2; (c)PC3

The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95% in figures.





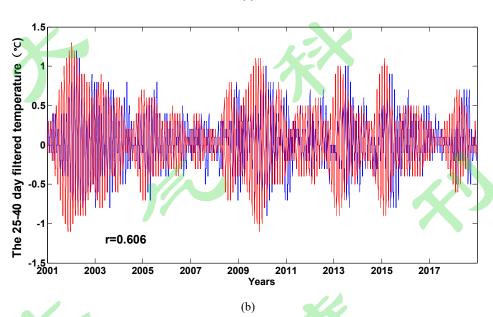


图 5 长江下游地区 2001~2018 年逐日 25~40d 低频温度(对长序列的经典 SSA 滤波,红线)与基于 T-EOF 延拓的 SSA 滤波(a)和无 T-EOF 延拓的 SSA 滤波(b)的实时低频温度(蓝线)的时间变化, r 是它们之间的相关系数 **Fig.5** Time series of the 25—40-day low-frequency temperature (SSA filtered) in the LYRV by using the entire data record available during the period from January 1, 2001 to December 31, 2018(red line) and real-time low-frequency temperature (blue line) with the T-EOF extension (a) and without the T-EOF extension (b), with r as their correlation coefficient

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 25~40d 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 60~90d、90~180d 和准 2 年等)的低频环流背景变化有关1,其中 图 4a、4b 和 4c 分别给出了 2001 年 7月~2003 年 6月期间长江下游 25~40d 温度低频分量与 东亚 850 hPa 温度主要模态对应的时间系数 PC1、PC2 和 PC3 之间 365d 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 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 2001 年负相关增强,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),东亚地区各种季风低频环流相联系的温度模态与长江下游 低频温度相关的年际变化。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 和 5b 还给出了长江下游地区 2001~2018 年期间长江下游 25~40d 低频温度与基于 T-EOF 延拓的 SSA 滤波和无 T-EOF 延拓的 SSA 滤 波的实时 25~40d 低频温度变化。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)], 得到较高精度的预测初始滤波值,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

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

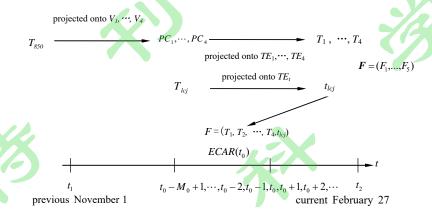
本文用 1979 年 1 月 1 日至 2000 年 12 月 31 日的资料(8036 d),得到长江下游地区逐日低频温度和东亚 850 hPa 25~40 d 低频温度场的前 4 个低频主成分,构建 ECAR 模型对 2001/2002~2017/2018 年每年 12 月 1 日至次年 2 月 28 日(1530 d)的冬季长江下游地区逐日低频温度进行历史回报试验。本文将实时的逐日长江下游温度和东亚 850 hPa 温度主分量(PC)分别经 SSA 后,由各自对应 T-EOF 各分量重建得到对应的 25~40 d 振荡信号的分量序列作为预测试验的基本数据,建立 ECAR 模型预测 2001/2002~2017/2018 年 12~2 月长江下游地区

25~40 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, 建立时 316 变系数的 ECAR 滑动进行独立样本预测试验(初始时间是 2001/2002~2017/2018 年每年 11 月 317 1日至次年2月27日,预报未来30 d), 其中复自回归模型的阶数p=2, 预报时间K=30 d, 子 318 序列长度 $M_0 = 365$ d。上述建模方案有利于适应各个低频分量之间的联系随时间的改变(主要 319 是低频相关的年际变化,图 4a 和 4b),还能适当地反映气候系统分量之间时滞相关的一些非 320 321 预期的时间变化,提高预测模型的稳定性。 在独立预测试验中,首先将 2001~2018 年逐日观测的东亚 850hPa 温度场投影到前 4 个低 322 频空间分布型(由 1979~2000 年的逐日数据计算),得到前 4 个主成分 PC1~PC4 的观测值(包含 323 逐日高频扰动); 然后将这 4 个观测的 PC $((t_{850i,j_1}),j_1=1,2,\cdots,L)$ (L=4) 和同期的逐日长江 324 下游气温投影到各自经 SSA 后的对应于 25~40 d 振荡的 T-EOF 上, 得到 2001~2018 年期间 325 的逐日 PC1,PC2,...,PC4 和长江下游地区气温的 25~40 d 重构分量 $T_1,T_2,...,T_4,t_{lcj}$ (由 326 1979~2000 年的逐日数据计算 PC1,...,PC4 和长江下游地区温度各自的 T-EOF),构建扩展资 327 料阵 $_M F_{L+1} = (f_{i,l}) = (T_1, T_2, \cdots, T_L, t_{lcj})$ (L=4)。 $_M F_{L+1}$ 的 L+1 个时间序列经过一维 Fourier 变 328 换后,得到 L+1 个复时间序列 $\widetilde{f}_{i,l}$ = $a_{i,l}$ + $b_{i,l}$ I ,构成扩展复数矩阵(Extended complex matrix, 329 ECM) $_{_M}\widetilde{F}_{_{L+1}}=(\widetilde{f}_{i,l})$, l=1,2,...,L+1 ; 对 每 一 分 量 $\widetilde{f}_{i,l}$ 建 立 p 阶 复 自 回 归 模 型 330 (CAR) $\widetilde{f}_{i+1,l} = B_0 + \sum_{k=1}^p B_k \widetilde{f}_{i-k+1,l}$ [即扩展复数自回归模型(Extended complex autoregressive 331 model), ECAR], 用复数最小二乘法得到参数的估计 B_k , k=0,1,...,p (p=1,2,...) 和 M+1 时 332 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 Fourier 逆变换得到各个低频分量的预报值 333 \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} , $j_2=1,2,...,L+1$,其中 334 $\operatorname{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1}) = \hat{t}_{lcj}(M+K)$ 是低频温度分量的预报值。取子序列 $M_0 = 365$ d 不变,建立这种 335 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 28 336 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 337 前一年11月1日,···, 当年2月27日,预报未来30d长江下游地区低频温度,具体预测方案见 338 图 6。 在每次预报中使用的 25~40 d 重构分量 $T_1, T_2, ..., T_4, t_{lci}$ 的实时 SSA 滤波中,采用基于 339 T-EOF 预测的延拓方法(Yang, 2018a)抑制滤波边界效应(实时滤波时只使用初始时间 t_0 以前 340

341 的数据)。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 5d 的高频噪声)

342 进行最近 5d(从-4d,-3d,-2d,-1d 到 0d)的滑动平均,消除 5d 以内的高频扰动信号。

343



344345

347

348

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

图 6 时变 ECAR 预测模式构建示意图

T₁, ···, T_{4:} 实时东亚 850 hPa 温度低频主成分;

 t_{lci} : 实时长江下游低频温度; t_0 : 初始时间; M_0 : 子序列长度;

349 *TE*₁, ···, *TE*₄: 1979年1月1日~2000年12月31日25~40 d 东亚 850 hPa 温度主要模态前 4 个主成分 350 *V*₁, ···, *V*₄的 T-EOFs

TE_t: 1979年1月1日~2000年12月31日25~40d长江下游温度的T-EOFs

Fig. 6 Schematic representation of the time-varying ECAR forecasting model.

 T_{850} : Real-time Eastern Asian 850 hPa temperature;

 T_1, \dots, T_4 : Real-time low-frequency principal components of the Eastern Asian 850 hPa temperature;

 t_{lei} : Real-time low-frequency temperature over the LYRV; t_0 : Initial time;

 M_0 : Length of the subsequence;

 TE_1 , ..., TE_4 : The respective T-EOFs of the principal components of the 25—40-day Eastern Asian 850 hPa temperature for the first fourth modes V_1 , ..., V_4 during the period ranging from January 1, 1979 to December 31, 2000 on the time scale of 25—40 days;

 $TE_{t:}$ T-EOFs of the daily temperature over the LYRV during the period from January 1, 1979 to December 31, 2000 on the time scale of 25—40 days.

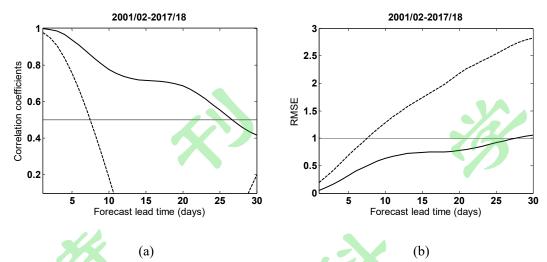


图 7 2001/2002~2017/2018 年 12~2 月长江下游温度低频分量 1~30 d 预报与观测的相关系数(a) 和标准化均方根误差(b)

实线:ECAR 模型,虚线:AR 模型, (a)和(b)中水平实线分别表示达到 95%的显著性水平和 $1\sigma(\sigma:$ 标准差)

Fig.7 Correlation coefficients (a) between the observation and the 1- to 30-day forecast and root-mean-square error (RMSE) (b) for the low frequency temperature component over LYRV in December—Febuary during the period of 2001/2002—2017/2018

Solid line: ECAR model; dashed line: AR model. The horizontal solid line in the figure represents the significance level of 95% (a) and 1 σ (σ : standard deviation) (b), respectively.

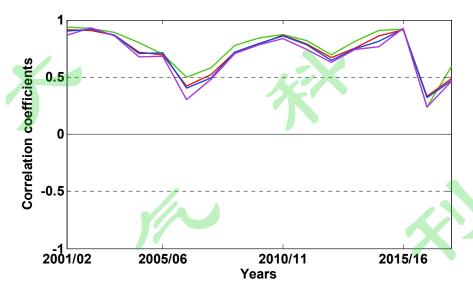


图 8 2001/2002~2017/2018 年 12~2 月长江下游温度低频分量预报技巧的年际变化 绿、红、蓝、紫线分别表示 11,14,17 和 20 d 预报, 水平虚线表示达到 95%的显著性水平

Fig.8 Interannual variations of forecast skills of low-frequency temperature component over the LYRV in December—Febuary during the period of 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), respectively. The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95%.

图 7a 给出了用观测的东亚地区 850hPa 温度场的前 4 个低频主成分(PC1~PC4)和长江下

游地区 25~40 d 温度低频分量构成的扩展实数据阵, 通过 Fourier 变换构造扩展复数据阵 (ECM),构建的时变 ECAR 模型作的 2001/2002~2017/2018 年每年 12~2 月(17 个冬季)逐日长 江下游地区温度低频分量的未来30d预报与观测的相关系数(初始时间是每年11月1日到次 年2月27日,17个冬季共2023次预报)。从图中可以看出,冬季长江下游温度低频分量的预 报时效达 26 d (预报和观测的低频分量之间相关系数大于 0.5,其显著性是 0.05,考虑序列持续 性的影响)。另外,低频温度分量预报的均方根预测误差(Root-mean-square error, RMSE)也在 26~27d 左右增大到 $1.0\sigma(\sigma:$ 低频分量的标准差)以上(图 7b)。这表明时变 ECAR 可以很好 地预测与冬季东亚地区 850hPa 温度场各种 25~40 d 振荡传播有关的长江下游地区低频温度 分量未来 3~4 周左右的变化。 图 8 是 2001/2002~2017/2018 年期间 12~2 月的 11, 14, 17 和 20 d 预报技巧(分别对应于绿、红、蓝和紫色实线)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 和 2016/2017 年冬季分 别在14d和11d以后的预报技巧出现较明显降低,但预报技巧仍然达到0.25左右,这2年冬季 是预报技巧偏低的时期。另外, 用观测的长江下游温度低频分量直接建立自回归模型(AR) 滑动进行独立样本预测试验(子序列长度 $M_0 = 365$ d), 预报时效仅 7 d 左右(图 7a 和 7b 中虚 线), 即大约1周以后的预报技巧显著下降。它表明经典的 AR 模型仅反映了长江下游地区低 频温度分量自身的变化信息(预测稳定性明显减小),不能体现冬季东亚地区多种低频温度模 态的协同作用。

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

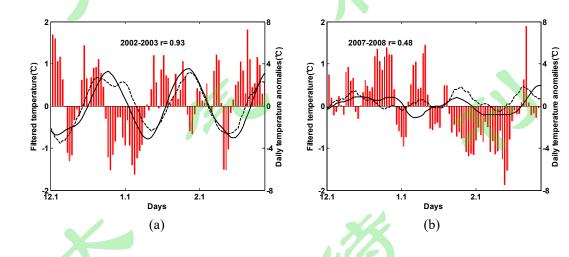
397

398

399

400

401



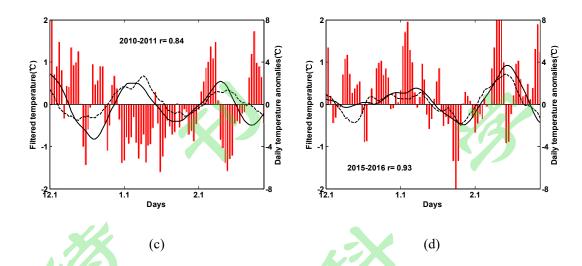


图 9 12~2 月长江下游地区 25~40d 温度低频分量的 ECAR 模型的 20 d 预报 (a)、(b)、(c) 和(d)分别是 2002/2003、2007/2008、2010/2011 和 2015/2016 年,图中实(虚)线表示实况(预报),直方图表示冬季长江下游地区逐日气温距平变化 ,单位: \mathbb{C} ; r 是预测和实况之间的相关系数,预报的初始时间分别是 11 月 11 日,…, 2 月 8 日

Fig.9 The forecast of ECAR model at a lead time of 20 days for the low-frequency temperature component over the LYRV from December to February

(a) 2002/2003, (b) 2007/2008, (c) 2010/2011 and (d) 2015/2016 over the LYRV. Solid (dashed) line represents the observation (the forecast) of low-frequency temperature, the histogram represents the daily temperature anomalies over LYRV in winter, unit: °C; r is the correlation coefficient between the forecast and the observation; the initial date of forecast is November 11,..., February 8

图 9 进一步给出 2002/2003, 2007/2008, 2010/2011 和 2015/2016 年冬季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 25~40 d 振荡较强的 2002/2003 年(图 9a), 2010/2011 年(图 9c)和 2015/2016 年(图 9d)的相关系数分别达到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),其显著性为 0.01(考虑序列持续性的影响)。从图中可以看出,与上述年份中 12~2 月的 2~3个主要长江下游持续低温集中期对应的显著的低频温度负位相变化和低温期均能较准确地预测,尤其是与 2002 年 12 月下旬和 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 70d 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 70d 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 周左右的低温过程的预报能力。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 25~40d 振荡较弱,月内主要强振荡周期大约在 13 d左右(图 1a), 所以 25~40d 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 20d 左右(图 1a), 冬季 25~40d 振荡不显著,ECAR 模型的预测技巧下降(预报时效小于 14d,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(25~40d 振荡活跃的冬季)观测数据生成的复空间中主要低频温度分量之间多种时滞变化的更多信息, 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 LFCF2.0(ECAR),基于 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地区气温和东亚温度主要低频模态的非均匀的时间变化分量;在实时预报中,通过实时 SSA 滤波明显减弱经典SSA 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主要信号序列,显著增强了可预报性。然后通过生成的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各种可能联系和不同低频分量的协同演化过程,由数据驱动构建能地描述更多大气低频分量相互作用过程的简化的复数自回归预测模型,较好地提前 3~4 周左右预测长江下游地区冬季低温冰冻时段的变化。

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的多样性。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, 与冬季长江下游低温密切相关的 25~40 d 温度振荡低频分量的 ECAR 模型的预报时效可达 26d 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 23d 的预报时效(杨秋明,2018b)。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外强迫调控大气次季节瞬变 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的 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10~30d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

465

466

486

量自回归模型。

6 结论和讨论

- 472 (1)冬季长江下游地区逐日气温主要有15~25,25~40 和50~70 d 的周期振荡,其中长江下473 游气温的25~40 d 振荡强度年际变化和12~2 月低温日数之间有显著的正相关。这种25~40 d 振荡与东亚热带外850hPa 温度前4个主要25~40 d 低频模态的变化密切相关,其中与第2模475 态(EUP 波列)的负相关最为显著,但与热带西太平洋地区 ISO 的变化的联系不显著。它反映476 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477 江下游地区冬季表面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。
- 478 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 850hPa 温度场 25~40 d 低频主要模 479 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 480 2001/2002~2017/2018 年 12~2 月长江下游逐日温度 25~40 d 低频分量未来 26d 左右的变化, 481 482 可以将与25~40 d温度低频变化对应的冬季长江下游持续低温事件的预报时效延长到3~4周 左右,能为长江下游地区冬季持续低温(冰冻)过程的实时延伸期预测提供稳定的预报信号; 483 但是,用长江下游地区冬季温度的低频分量直接建立经典AR模型的预报时效仅7d左右。 484 因此,基于复空间包含更多低频信号构建的自回归模型预测技巧显著高于原始实空间低频分 485
- 492 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。本文对长序列观测资料进行分解和变换, 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 850hPa 温度低频变化主要模态.并将这些主要低频分量通过 Fourier 变换生成的复低频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 性较大的随时间变化的简化复数据模型 ECAR, 显著减小了计算误差并延长了预报时效。这 些数据驱动的气候预测方法不预设各种物理条件,不受数值预报时效的可预报性限制。同时 用 T-EOF 预测数据(虚拟数据)适当延长序列的右边界进行 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 能快速、全面、精准反映实时低频信号 的强度和位相变化,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。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 1~10d 短中期和 10~30d 延伸期以及短期气候无缝隙预报的能力。

523	
524	参考文献(References):
525	Abhilash S, Mandal R, Dey A, et al. 2018. Role of enhanced synoptic activity and its interaction
526	with intra-seasonal oscillations on the lower extended range prediction skill during 2015
527	monsoon season [J]. Climate Dyn., doi: 10.1007/s00382-018-4089-3.
528	Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate
529	extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res., 111: D05109,
530	doi:10.1029/2005jd006290.
531	Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low
532	temperature over southern China in January 2008 [J]. Atmos. Sci. Lett., 12 (3): 273-280.
533	Chen N, Majda A J, Giannakis D. 2014. Giannakis. Predicting the cloud patterns of the
534	Madden-Julian Oscillation through a low-order nonlinear stochastic model [J]. Geophys. Res.
535	Lett.,41:5612–5619.
536	Chen N, Majda A J. 2015. Predicting the real-Time multivariate Madden-Julian Oscillation index
537	through a low-order nonlinear stochastic model [J]. Mon. Wea. Rev., 143:2148-2169.
538	陈官军,魏凤英,姚文清,周璇. 2017. 基于低频振荡信号的中国南方冬半年持续性低温指数
539	延伸期预报试验[J]. 气象学报, 75(3): 400-414. Chen Guanjun, Wei Fengying, Yao Wenqing,
540	Zhou Xuan. 2017. Extended range forecast experiments of persistent winter low temperature
541	indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China [J]. Acta Meteor. Sin.(in
542	Chinese), 75(3): 400–414.
543	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一直面混沌[J].气象科学,
544	30(5):569-573. Chou Jifan, Zheng Zhihai, Sun Shupeng. 2010. The think about 10 - 30 days

- 545 extended range numerical weather prediction strategy facing the atmosphere chaos[J]. Scientia
- Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(5):569-573. 546
- 547 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 based on MJO [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 548
- 549 2010,36(7):111–122.
- Ghil M, Kingtse M. 1991.Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern 550
- 551 Hemisphere[J]. J. Atmos. Sci., 48: 780-790.
- 552 Hoskins B. 2013. The potential for skill across the range of the seamless weather-climate

- 553 prediction problem: a stimulus for our science[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 139: 573–584.
- 554 韩世茹,郑志海,周须文,于长文,车少静,顾光芹,卓嘎.2019.青藏高原积雪深度对延伸期预报技
- 555 巧的影响[J].大气科学,43(1):142-154,doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252. Han Shiru,
- Zheng Zhihai, Zhou Xuwen, Yu Changwen, Che Shaojing, Gu Guangqin, Zhou Ga. 2019.
- Influence of the Tibetan Plateau snow depth on the extended-range prediction skill [J].
- 558 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1):142-154,
- 559 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252.
- 560 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]. Advances in Meteorological Science and Technology (in
- 563 Chinese), 3(1):11–17.
- 564 Karpechko A Y. 2018. Predictability of sudden stratospheric warmings in the ECMWF
- extended-range forecast system [J]. Mon. Wea. Rev., 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., 50:3931–3948.
- 568 Kondrashov D, Chekroun M D, Robertson A W, et al. 2013. Low-order stochastic model and
- 569 "past-noise forecasting" of the Madden-Julian Oscillation[J]. Geophys. Res. Lett.,40:
- 570 5305–5310.
- Lavaysse C, Naumann G, Alfieri L., Salamon P, Vogt, J. 2019. Predictability of the European heat
- and cold waves [J]. Climate Dyn.,52:2481–2495.
- 573 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
- 574 气科学, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18214. Li Yafei, Ren Rongcai. 2019.The
- 575 independent and coordinative influences of the four blocking systems in the Northern
- 576 Hemisphere winter on the occurrence of widespread surface extreme cold temperature
- 577 [J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
- 578 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18214.
- 579 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
- 581 model[J]. J. Climate, 21:5318–5335.
- Lee S S, Wang Bin, Waliser D E, et al. 2015. Predictability and prediction skill of the boreal

- summer intraseasonal oscillation in the Intraseasonal Variability Hindcast Experiment [J].
- 584 Climate Dyn.,45: 2123–2135.
- Lim Y, Son S W, Kim D.2018.MJO prediction skill of the subseasonal-to-seasonal prediction
- 586 models [J]. J. Climate, 31:4075–4094.
- Madden R A, Julian P R .1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the
- 588 tropical Pacific [J]. J Atmos Sci 28:702–708.
- Mo K C. 2001. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations [J]. Mon. Wea. Rev.,
- 590 129: 802–817.
- Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. Mon.
- 592 Wea. Rev., 107: 994–1013.
- 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, 27:4531–4543.
- 595 Sabeerali C T, Ajayamohan R S, Giannakis D, Majda A J. 2017. Extraction and prediction of
- 596 indices for monsoon intraseasonal oscillations: An approach based on nonlinear Laplacian
- spectral analysis [J]. Climate Dyn., 49:3031–3050.
- 598 Schickedanz P T, Bowen E G. 1977. The computation of climatological power spectra [J]. J. Appl.
- 599 Meteorol., 16: 359–367.
- 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:
- 602 2437–2451.
- 603 Sze'kely E, Giannakis D, Majda A J. 2016. Extraction and predictability of coherent
- intraseasonal signals in infrared brightness temperature data[J]. Climate Dyn., 46 (5):1
- 605 473–1502.
- 606 Stan C and V Krishnamurthy.2019.Intra-seasonal and seasonal variability of the Northern
- Hemisphereextra-tropics[J].Climate Dyn.,https://doi.org/10.1007/s00382-019-04827-9.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc.,
- 609 79: 61–78.
- 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: 842–855.
- Wang L, Ting Mingfang, Chapman David, et al. 2016. Prediction of northern summer low-

- frequency circulation using a high-order vector auto-regressive model [J]. Climate Dyn., 46:
- 614 693–709.
- 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: 1583–1591.
- 617 谢义炳,陈受钧,张一良,黄寅亮. 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].
- 618 气象学报,33(2):206-217. Xie Y B, Chen S J, Zhang Y L, Huang Y L.1963.A preliminarily
- statistic and synoptic study about the basic currents over southeastern Asia and the initiation
- of typhoon[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),33(2):206-217.
- 621 杨秋明.1993. 北半球夏季 500hPa 候平均高度场的遥相关和环流特征[J]. 大气科
- 622 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(in Chinese),17(2):148-154.
- 625 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, 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
- 628 D), 52(10):1485–1501, doi:10.1007/s11430-009-0156-2.
- 629 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
- 630 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 the
- Yangtze River valley [J]. Adv. Earth. Sci. (in Chinese), 27(8):876–884.
- 633 杨秋明. 2014a. 基于 20-30d 振荡的长江下游地区冬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
- 635 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. Sin.(in Chinese), 72(3): 494–507.
- 637 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
- 损, 63,doi: 10.7498/aps.63.199202. 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 Physica Sinica (in Chinese), 63,
- doi:10.7498/aps.63.199202.
- 642 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.
- 645 杨秋明. 2016. 长江下游地区降水 50-80d 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
- Meteorologica Sinica(in Chinese), 74(4): 491–509.
- Yang, Qiuming. 2018a. 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.,
- 651 123:211–233, doi:10.1002/2017JD027281.
- 652 杨秋明. 2018b.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,
- 653 33(4): 385–395. Yang Qiuming. 2018b. 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.
- 656 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
- 657 关系 [J]. 大气科学, 38 (1): 121–132. Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al.
- 658 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
- 660 Sciences (in Chinese), 38 (1): 121–132.
- Yang Shuangyan, Zhu Zhiwei, Cui Jing, Yang Ying. 2019. Regulation of the intraseasonal
- oscillation over mid-to-high latitude Eurasia on winter surface air temperature over China [J].
- Dynamics of Atmospheres and Oceans, 86:63–72.
- 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.
- 666 章大全,郑志海,陈丽娟,张培群.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, Zhang Peiqun.
- 2019. Advances on the predictability and prediction methods of 10-30 d extended range
- forecast[J]. Journal of Applied Meterological Science, 30(4):416–430.
- 670 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
- Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments

673 [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61(19): 199203. Zhu Z, Li T. 2016. The statistical extended-range (10-30-day) forecast of summer rainfall 674 anomalies over the entire China [J]. Climate Dyn., 48: 209-224. 675 Zhu Z, Li T. 2017. Statistical extended-range forecast of winter surface air temperature and 676 extremely cold days over China [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 143: 1528-1538, doi: 677 10.1002/qj.3023. 678 Zhu Z, Li T. 2018. Extended-range forecasting of Chinese summer surface air temperature and 679 heat waves [J]. Climate Dyn., 50:2007-2021. 680 681