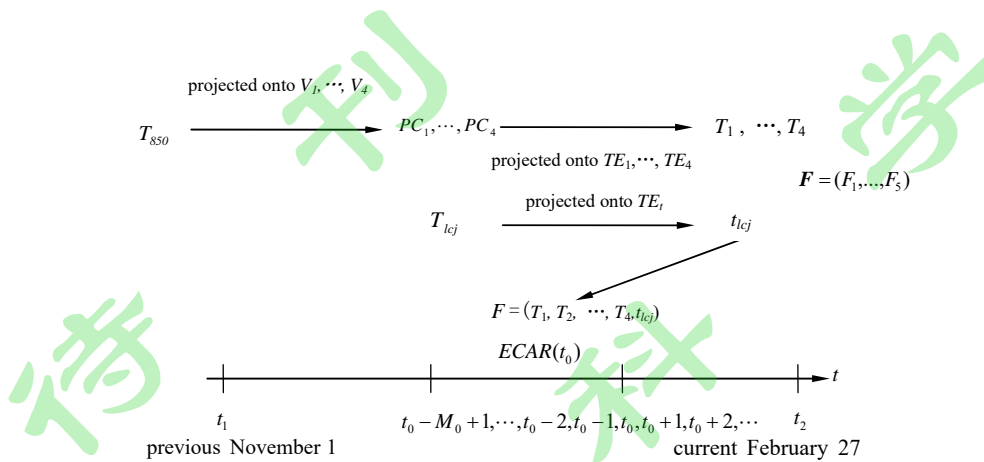


316 25~40 d 温度分量的季节内变化。这些独立预测用限定记忆法,保持子序列 M_0 不变, 建立时
 317 变系数的 ECAR 滑动进行独立样本预测试验(初始时间是 2001/2002~2017/2018 年每年 11 月
 318 1 日至次年 2 月 27 日,预报未来 30 d), 其中复自回归模型的阶数 $p=2$, 预报时间 $K=30$ d, 子
 319 序列长度 $M_0 = 365$ d。上述建模方案有利于适应各个低频分量之间的联系随时间的改变(主要
 320 是低频相关的年际变化, 图 4a 和 4b), 还能适当地反映气候系统分量之间时滞相关的一些非
 321 预期的时间变化, 提高预测模型的稳定性。

322 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
 323 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
 324 逐日高频扰动); 然后将这 4 个观测的 PC $(t_{850i,j_1}), j_1 = 1,2,\dots,L$ ($L=4$) 和同期的逐日长江
 325 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
 326 的逐日 PC1,PC2,...,PC4 和长江下游地区气温的 25~40 d 重构分量 $T_1, T_2, \dots, T_4, t_{l_{cj}}$ (由
 327 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
 328 料阵 ${}_M \mathbf{F}_{L+1} = (f_{i,l}) = (T_1, T_2, \dots, T_L, t_{l_{cj}})$ ($L=4$)。 ${}_M \mathbf{F}_{L+1}$ 的 $L+1$ 个时间序列经过一维 Fourier 变
 329 换后,得到 $L+1$ 个复时间序列 $\tilde{f}_{i,l} = a_{i,l} + b_{i,l}I$, 构成扩展复数矩阵(Extended complex matrix,
 330 ECM) ${}_M \tilde{\mathbf{F}}_{L+1} = (\tilde{f}_{i,l}), l = 1,2,\dots,L+1$; 对每一分量 $\tilde{f}_{i,l}$ 建立 p 阶复自回归模型
 331 (CAR) $\tilde{f}_{i+1,l} = B_0 + \sum_{k=1}^p B_k \tilde{f}_{i-k+1,l}$ [即扩展复数自回归模型(Extended complex autoregressive
 332 model), ECAR], 用复数最小二乘法得到参数的估计 $B_k, k = 0,1,\dots,p$ ($p=1,2,\dots$) 和 $M+1$ 时
 333 刻的预报值 $\hat{f}_{M+1,l} = \hat{a}_{M+1,l} + \hat{b}_{M+1,l}I$, 通过一维 Fourier 逆变换得到各个低频分量的预报值
 334 \hat{f}_{M+1,j_2} 。进一步递推 K 步,可得到第 K 天的预报值 $\hat{f}_{M+K,j_2}, j_2 = 1,2,\dots,L+1$, 其中
 335 $\text{Re}(\hat{f}_{M+K,L+1}) = \hat{t}_{l_{cj}}(M+K)$ 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
 336 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
 337 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
 338 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
 339 图 6。在每次预报中使用的 25~40 d 重构分量 $T_1, T_2, \dots, T_4, t_{l_{cj}}$ 的实时 SSA 滤波中,采用基于
 340 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

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



344

图 6 时变 ECAR 预测模式构建示意图

345

346 T_{850} : 实时东亚 850 hPa 温度;

347

T_1, \dots, T_4 : 实时东亚 850 hPa 温度低频主成分;

348

t_{lcj} : 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, \dots, 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 V_1, \dots, V_4 的 T-EOFs

350

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

351

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

352

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

353

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

354

355

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

356

M_0 : Length of the subsequence;

357

TE_1, \dots, 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, \dots, V_4 during the period ranging from January 1, 1979 to December 31, 2000 on the time scale of 25—40 days;

358

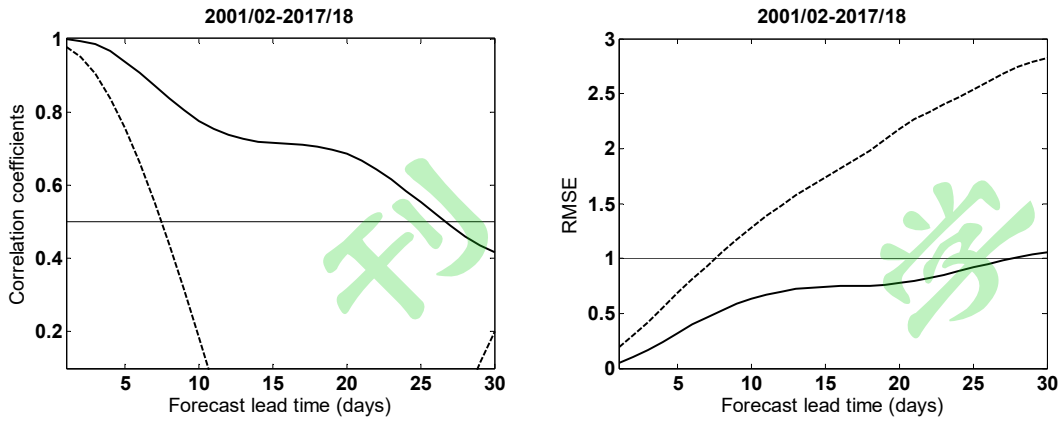
359

360

TE_i : 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.

361

362



(a)

(b)

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 1σ (σ :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—February 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 1σ (σ : standard deviation) (b), respectively.

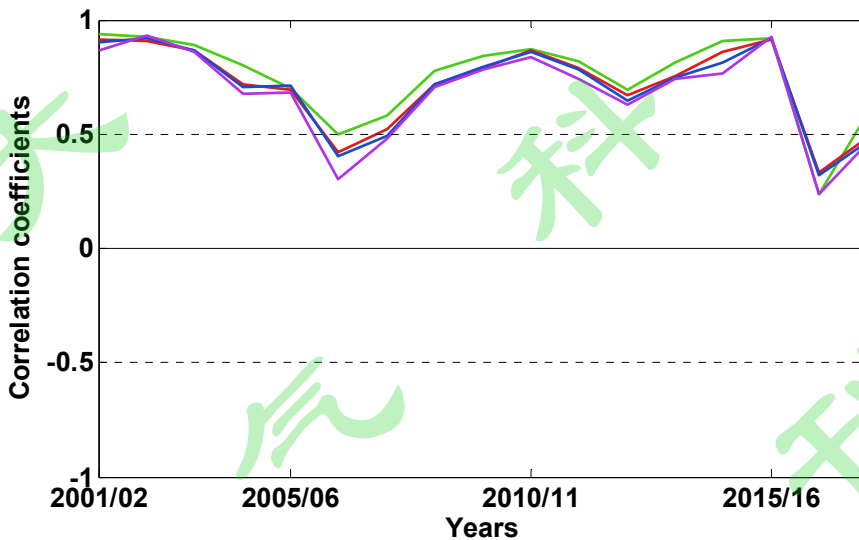


图 8 2001/2002~2017/2018 年 12~2 月长江下游温度低频分量预报技巧的际变化

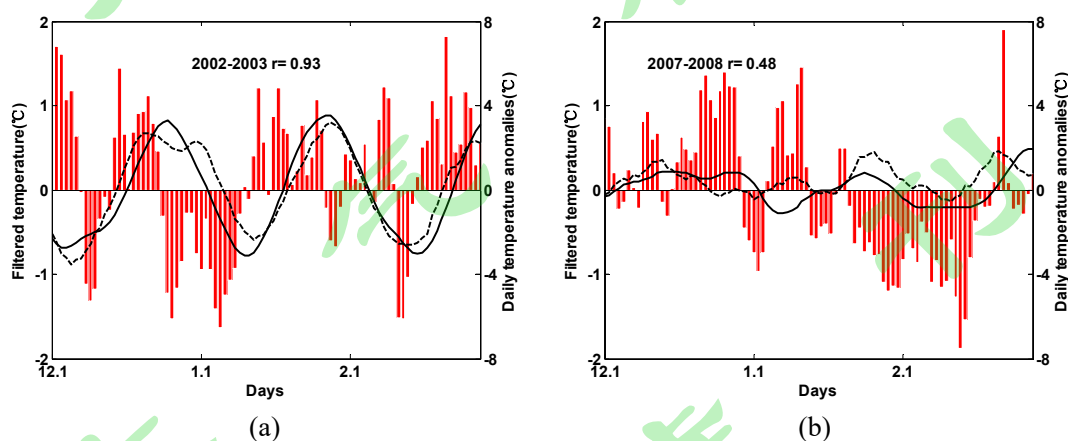
绿、红、蓝、紫线分别表示 11,14,17 和 20 d 预报, 水平虚线表示达到 95%的显著性水平

Fig.8 Interannual variations of forecast skills of low-frequency temperature component over the LYRV in December—February during the period of 2001/2002—2017/2018

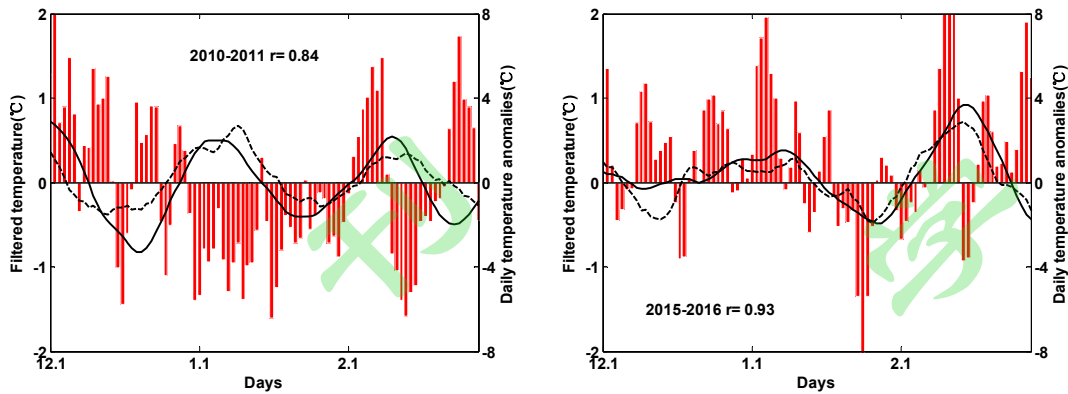
The lead times are 11 days (green line), 14 days (red line), 17 days (blue line) and 20 days (purple line), respectively. The horizontal dashed line in the figure represents the significance level of 95%.

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

384 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
385 (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
386 江下游地区温度低频分量的未来 30 d 预报与观测的相关系数(初始时间是每年 11 月 1 日到次
387 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
388 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
389 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
390 26~27d 左右增大到 1.0σ (σ : 低频分量的标准差) 以上(图 7b)。这表明时变 ECAR 可以很好
391 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
392 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
393 20 d 预报技巧(分别对应于绿、红、蓝和紫色实线)的际变化, 表明了大部分年份 ECAR 的
394 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
395 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
396 别在 14d 和 11 d 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
397 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)
398 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
399 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
400 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
401 态的协同作用。



402
403



(c)

(d)

图9 12~2月长江下游地区25~40d温度低频分量的ECAR模型的20d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:°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20d预报(虚线)和观测的低频分量(实线)的变化曲线,其中25~40d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28d),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25~40d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,

433 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
434 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
435 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
436 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
437 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
438 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
439 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
440 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
441 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
442 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
443 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
444 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
445 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
446 地区冬季低温冰冻时段的变化。

447 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
448 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
449 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
450 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
451 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
452 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
453 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
454 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
455 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
456 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
457 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
458 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
459 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
460 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
461 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
462 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

463 荡等)的预测,进一步综合次季节、年际和年代际变化信息构建实时简化气候预测模型,更好
464 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。

465

466 6 结论和讨论

467 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
468 江下游地区气温主要季节内变化周期与 12~2 月低温日数的联系及其与东亚主要的 850hPa
469 温度模态变化的关系,采用从观测数据中提取的季节内时间尺度长江下游冬季气温和东亚地
470 区 850hPa 温度主要低频分量,建立时变扩展复数自回归模型(ECAR),即 LFCF2.0,进行长江下
471 游地区冬季低频温度分量延伸期预测研究,得到以下结论:

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
474 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
478 下游地区极端低温天气的主要低频系统。

479 (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
480 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
481 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,
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
483 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;
484 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 7 d 左右。
485 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
486 量自回归模型。

487 (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
488 较长(大于 20d)。但在 25~40 d 振荡较弱的年份(2006/2007 和 2016/2017 年)预报技巧显著减
489 小,这时振荡周期较短的 10~20d 振荡或较长的 50~70d 振荡可能起主导作用,可以选择相应的
490 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 30d 的变化,估计长江下游
491 地区冬季持续低温时段。

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

493 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
494 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
495 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
496 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
497 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
498 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
499 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
500 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
501 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
502 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
503 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。

504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522

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 with intra-seasonal oscillations on the lower extended range prediction skill during 2015 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 extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: D05109, doi:10.1029/2005jd006290.

531

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.

533

Chen N, Majda A J, Giannakis D. 2014. Giannakis. Predicting the cloud patterns of the Madden–Julian Oscillation through a low-order nonlinear stochastic model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41:5612–5619.

536

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.*, 143:2148–2169.

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 indexes based on intra-seasonal oscillation over southern China [J]. *Acta Meteor. Sin.*(in 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——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 extended range numerical weather prediction strategy facing the atmosphere chaos[J]. *Scientia*

546

Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(5):569–573.

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.

548

2010. Extended range forecast based on MJO [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese),

549

2010, 36(7):111–122.

550

Ghil M, Kingtse M. 1991. Intra-seasonal oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern 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,
556 Zheng Zhihai, Zhou Xuwen, Yu Changwen, Che Shaojing, Gu Guangqin, Zhou Ga. 2019.
557 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*,
561 3(1):11-17. He Jinhai, Liang Ping, Sun Guowu. 2013. Consideration on extended-range
562 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
565 extended-range forecast system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, doi:10.1175/MWR-D-17-0317.1.

566 Krishnamurthy V. 2018. Predictability of CFSv2 in the tropical Indo-Pacific region, at daily and
567 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.

571 Lavaysse C, Naumann G, Alfieri L. , Salamon P, Vogt, J. 2019. Predictability of the European heat
572 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
580 Oscillation using empirical mode decomposition and statistical forecasting with a VARMA
581 model[J]. *J. Climate*, 21:5318–5335.

582 Lee S S, Wang Bin, Waliser D E, et al. 2015. Predictability and prediction skill of the boreal

583 summer intraseasonal oscillation in the Intraseasonal Variability Hindcast Experiment [J].
584 *Climate Dyn.*,45: 2123–2135.

585 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.

587 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.

589 Mo K C. 2001. Adaptive filtering and prediction of intraseasonal oscillations [J]. *Mon. Wea. Rev.*,
590 129: 802–817.

591 Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area [J]. *Mon.*
592 *Wea. Rev.*, 107: 994–1013.

593 Neena J M, Lee J Y, Waliser D E, et al. 2014. Predictability of the Madden–Julian Oscillation in
594 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
597 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.

600 Sahai A K, Borah N, Chattopadhyay R, et al. 2017. A bias-correction and downscaling technique
601 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
604 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
607 Hemisphereextra-tropics[J].*Climate Dyn.*,<https://doi.org/10.1007/s00382-019-04827-9>.

608 Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*,
609 79: 61–78.

610 Vitart F, Molteni F. 2010.Simulation of the Madden-Julian oscillation and its teleconnections in
611 the ECMWF forecast system[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136: 842–855.

612 Wang L, Ting Mingfang, Chapman David, et al. 2016. Prediction of northern summer low-

613 frequency circulation using a high-order vector auto-regressive model [J]. *Climate Dyn.*, 46:
614 693–709.

615 Xia Z Y, Chen H B, Xu L S et al. 2015. Extended range (10–30 days) heavy rain forecasting
616 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
619 statistic and synoptic study about the basic currents over southeastern Asia and the initiation
620 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
623 pentad mean 500 hPa height field during the northern hemisphere summer[J]. *Chinese Journal*
624 *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.
626 Yang Qiuming. 2009. The 20–30-day oscillation of the global circulation and heavy
627 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
631 of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over the
632 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*
634 *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
636 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*
638 *报*, 63,doi: 10.7498/aps.63.199202. Yang Qiuming. 2014b. Extended complex autoregressive
639 model of low frequency rainfalls over the lower reaches of Yangtze river valley for
640 extended-range forecast in 2013[J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 63,
641 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.

643 Yang Qiuming. 2015. Prospects and progresses in the research of the methods for 10-30 days
644 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):
646 491–509. Yang Qiuming. 2016. A study on the subseasonal forecast of low frequency rainfall
647 over the lower reaches of Yangtze River Valley based on the 50-80 d oscillation [J]. *Acta*
648 *Meteorologica Sinica(in Chinese)*, 74(4): 491–509.

649 Yang, Qiuming. 2018a. Predictability and prediction of low frequency rainfall over the lower
650 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
654 frequency temperature and high temperature weather over the lower reaches of Yangtze river
655 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
659 its association with the Eurasian teleconnection pattern [J]. *Chinese Journal of Atmospheric*
660 *Sciences (in Chinese)*, 38 (1): 121–132.

661 Yang Shuangyan, Zhu Zhiwei, Cui Jing, Yang Ying. 2019. Regulation of the intraseasonal
662 oscillation over mid-to-high latitude Eurasia on winter surface air temperature over China [J].
663 *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 86:63–72.

664 Zeng Q C. 1983. The evolution of a Rossby-wave packet in a three dimensional baroclinic
665 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*
667 *象学报*,30(4):416–430. Zhang Daquan, Zheng Zhihai, Chen Lijuan, Zhang Peiqun.
668 2019.Advances on the predictability and prediction methods of 10-30 d extended range
669 forecast[J].*Journal of Applied Meteorological 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*
671 *报*, 61(19): 199203. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012.
672 Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments

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