

提高月预报业务水平的动力相似集合方法^{*1}

任宏利 张培群 李维京 陈丽娟

REN Hongli ZHANG Peiqun LI Weijing CHEN Lijuan

中国气象局国家气候中心,气候研究开放实验室,北京,100081

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2013-12-17 收稿,2014-03-28 改回.

任宏利,张培群,李维京,陈丽娟. 2014. 提高月预报业务水平的动力相似集合方法. 气象学报, 72(4): 723-730

Ren Hongli, Zhang Peiqun, Li Weijing, Chen Lijuan. 2014. The dynamical-analogue ensemble method for improving operational monthly forecasting. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(4): 723-730

Abstract Focusing on the monthly forecasting problem based on the Atmospheric General Circulation Model (AGCM), a method of the dynamical-analogue ensemble forecasting (DAEF) is proposed to effectively reduce prediction errors and increase prediction skills. This method aims to the intrinsic combination of the dynamical model and statistical-empirical methods, which can establish perturbation members for ensemble forecasting by extracting the historical analogue information of the atmospheric general circulation, parameterizing empirically model errors and generating the multi-time-independent analogue forcing. Applying this new ensemble method to the operational AGCM in Beijing Climate Center (BCC AGCM1), a 10-yr monthly forecasting experiment under a quasi-operational condition shows encouraging results. Compared with the operational ensemble forecasts by the BCC AGCM1, the DAEF method is capable to improve effectively prediction skills of the monthly-mean and daily atmospheric circulation forecasts in which the former almost reaches the standard, available in the BCC operation, through effectively improving predictions of the zonal mean, ultra-long waves and long waves of the circulation. The results also show that prediction errors for the DAEF are significantly reduced and its spread of the ensemble members is reasonably increased, indicating an improvement in the relationship between the prediction errors and the spread. This study suggests a big potential application of the DAEF method in the BCC monthly forecasting operation.

Key words Monthly forecasting, Ensemble method, Dynamical Analogue, Error parameterization

摘要 针对基于大气环流模式的月预报问题,提出了一种能有效减小预报误差并提高预报技巧的动力相似集合预报新方法。该方法着眼于动力模式与统计经验的内在结合,在模式积分过程中通过提取大气环流历史相似性信息,对模式误差进行参数化处理,形成多个时变的相似强迫量来扰动生成预报的集合成员。将这一集合新方法应用到中国国家气候中心业务大气环流模式(BCC AGCM1.0),一组 10 a 准业务环境下回报试验结果显示,相比于业务集合预报,动力相似集合预报方法能有效改进模式对于大气环流的纬向平均、超长波和长波预报,从而有效提高了月平均环流预报技巧(几乎达到业务可用标准)和逐日环流预报技巧,并显著降低了预报误差,合理增加集合离散度,使二者配置关系得以改善,有望在业务预报中应用。

关键词 月预报,集合方法,动力相似,误差参数化

中图法分类号 P435

* 资助课题:公益类行业(气象)科研专项(GYHY201406022)、国家重点基础研究发展计划 973 项目(2010CB950404、2013CB430203)、国家自然科学基金项目(41375062)。

作者简介:任宏利,主要从事气候动力学与短期气候预测研究。E-mail:renhl@cma.gov.cn

1 引言

伴随着数值模式性能和观测资料状况的日益改善,国际上天气预报和短期气候预测水平不断提高。相对于数值天气预报取得的巨大成功、以及季节气候预测的长足发展,介于二者之间的月预报问题一直是学界关注的重点(李维京等,2000)。然而,这一“过渡”时间尺度的预报受到逐日大气可预报上限(大约2—3周)的制约,尽管中外学者进行了大量努力和尝试,但基于数值模式的热带外大气环流预报技巧总体偏低,始终无法形成有效的业务预报能力(王绍武,2001;任宏利等,2007a)。近些年来,随着气候变化背景下全球持续性异常事件频繁发生,防灾减灾的巨大需求推动了中外学者对月预报方法的新一轮研究热潮(郑志海,2013)。例如,欧美主要气象业务中心陆续将月预报的着眼点转向了具有较高可预报性的大气季节内振荡,预报水平稳步提高(Weigel, et al, 2008; Hirschi, et al, 2012; Jia, et al, 2013; Liu, et al, 2013; Vitart, 2014)。这种预报对象的转变能在一定程度上避开月尺度一般性大气环流可预报性偏低的困难,但仍需要从预报方法论创新方面开展深入研究。

当前,数值模式已逐渐成为天气-气候预报的主要工具,但即便如此,围绕如何有效运用数值模式进行预报的策略和方法仍是提高预报水平的重要手段,中外大量研究工作已经开展(任宏利等,2007a; 郑志海,2013),例如,集合预报技术以及模式预报误差订正等已为世人所熟知。事实上,预报策略和方法研究的基本思路就是寻求动力模式和统计经验两种基本方法的结合使用,但对于怎样实现二者有效结合的问题尚需深入研究。中国学者在这方面做出了很多独具特色的研究,开辟了改进数值预报的新途径(顾震潮,1958; 郑庆林等,1973; 丑纪范,1974; 巢纪平等,1979; 黄建平等,1991; 曹鸿兴,1993; Zeng, et al, 1994; Wang, et al, 2000; 陈伯民等,2003; 鲍名等,2004)。近年来,围绕如何将历史资料相似性信息有效运用到复杂模式预报中的科学问题,发展了动力相似预报策略和方法(例如,相似误差订正方法)(任宏利等,2005,2006,2007a, 2007b; Ren, et al, 2009, 2014; 郑志海等,2009),其提升模式预报能力的有效性被大量数值试验证实,正式的业务应用尚不足。本研究将探索基于动力相似预报

策略的月预报方法及其在业务模式上的应用。

多年实践表明,无论数值天气预报还是短期气候预测,集合预报都是提高预报技巧、降低预报误差的强有力工具。然而,在将天气尺度预报中富有成效的集合方法(如奇异向量法等)延伸到用于月预报时,通常会出现初始集合扰动衰减过快、集合预报离散度偏小的问题(Palmer, 2000)。目前,通过随机扰动物理过程、边界条件以及采用多模式等途径构建集合,虽然能在一定程度上改进预报,但也面临着模式中可扰动对象过多、敏感性参数/过程选择的主观性大等问题。为此,本研究将利用现有业务预报模式,通过在模式积分过程中引入历史资料相似性信息,对未知的模式误差进行经验性参数化,以此形成多个“相似强迫量”驱动模式来生成集合扰动成员,发展适用于月预报的新集合方法,并进行准业务环境下的预报检验。

2 基于模式误差参数化的动力相似集合预报方法

数值天气预报问题在数学上一般可以作为偏微分方程初值问题的形式表示为

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = L(\psi) \quad (1)$$

$$\psi(t_0) = \psi_0$$

式中, $\psi(t)$ 为模式预报变量, t 为时间; L 为 ψ 的微分算子,用于表示实际数值模式。 t_0 为初始时刻, ψ_0 代表初值,当 $t > t_0$ 时,可由初值进行数值积分得到 ψ 或者它的泛函数 $P(\psi)$ 。假设实际大气满足的准确模式可表示为

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = L(\psi) + L_e(\psi) \quad (2)$$

式中, L_e 是 ψ 的泛函数,表征了模式过程与真实大气过程的误差,反映了数值模式中未知的总误差项,即模式误差。历史观测资料是满足式(2)的一系列特解 $\hat{\psi}$ 或者它的泛函数。

通常有两种途径可以减小模式误差,一是直接发展模式来削减 $L_e(\psi)$,通过不断的改进,可以得到多个模式算子 $L_1, L_2 \dots$;另一是从反问题角度利用历史资料信息估计和减小模式误差 $L_e(\psi)$,使用某个 L 和不同的历史观测数据,就可得到多个误差算子 $L_{e1}, L_{e2} \dots$,数学上等价于得到了多个模式算子。可见,在线性化意义下(或忽略模式非线性项的假设

下),这两种途径改进模式的效果是一致的。那么,在给定模式条件下如何发展预报策略和方法呢?由于对大气或气候系统的认识还很不够,模式中大量参数和过程仍是未知的,即更多的是需要求解反问题估计未知项,然后再做预报。按照这一思路,可采用经验方式对模式未知总误差项进行参数化估计。本研究发展了一种基于历史相似的模式误差参数化方案(Analogue-based Model Error Parameterization, AMEP),其基本思路来源于动力相似预报策略中运用历史资料相似性信息对模式积分进行过程订正(任宏利,2006)。在式(2)中,模式误差项可以通过历史相似状态提供的已知误差项来估计,从而得到经过订正或“扰动”的新的右端项

$$L_j(\hat{\psi}) = L(\hat{\psi}) + L_e(\tilde{\psi}_j) \quad (3)$$

式中, $\tilde{\psi}_j$ 为特解 $\hat{\psi}$ 的历史相似, j 表示了多个相似。可见 $L_e(\tilde{\psi}_j)$ 为附加在模式预报方程中的相似强迫项。此时,改变相似状态便能得到不同的模式算子。

AMEP 包含 3 个组成部分:(1)相似初值驱动(在历史资料中选取与当前模式状态具有相似边界条件并处于同一季节的相似初值,驱动模式进行历史再预报);(2)采集模式预报误差(采集模式以历史相似为初值进行积分的预报误差);(3)生成相似强迫量(利用预报误差,生成模式积分所需的相似强迫量,并按需要插值到特定间隔的积分时间步上去)。图 1 给出 AMEP 的概念流程,输入的是模式预报变量,输出的是变量的时间强迫项,其中 $t_1 - t_2$ 或 PAU(Period of Analogue Updating)为相似更新周期,IAF(Interval of Analogue Forcing)为相似强迫间隔。

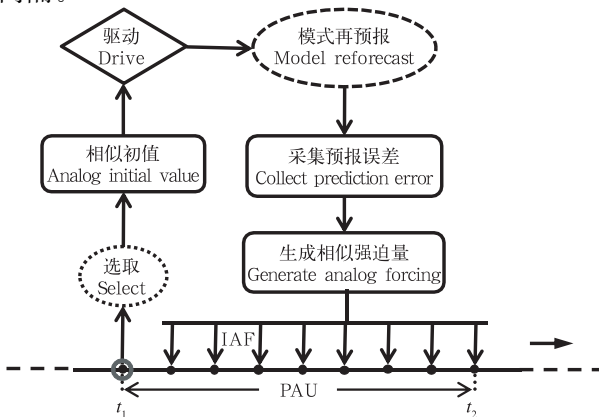


图 1 基于历史相似的模式误差参数化方案概念流程

Fig. 1 Schematic diagram of the analogue-based model error parameterization

由式(3)可见,AMEP 生成的相似强迫量不仅可以通过弥补模式未知部分来减小模式误差项,更重要的是多个历史相似的使用可为模式算子提供一组相似的强迫扰动,由于模式状态在积分过程中会不断地向这些相似强迫适应,有效地模拟了模式行为在状态 ψ 附近的不确定性。在此基础上提出了动力相似集合预报(Dynamical Analogue Ensemble Forecasting, DAEF)方法:针对当前预报初值选取一组历史相似状态,分别以这些相似状态驱动 AMEP 输出多个时变的相似强迫量,进一步对当前模式积分过程进行强迫扰动,由此产生的多个扰动预报作为成员形成集合。考虑到每个成员来源于不同历史相似对模式误差项的一种形式估计,这样构建的集合能在一定程度上充分反映模式的不确定性。此外,也应看到,历史相似强迫如用于以后 IAF 间隔,由于未来基态不同,同样的强迫会产生不同的结果,这是需要注意的问题。

3 预报试验和结果分析

将动力相似集合预报方法运用到中国国家气候中心的业务大气环流模式(BCC_AGCM1.0)(丁一汇等,2002)中,在准业务环境下进行月预报试验,并与中国国家气候中心业务集合预报(李维京等,2005)进行直接比较。试验方案设计:(1)使用全球 500 hPa 高度场计算的场距离作为相似选取指标(任宏利等,2006);(2)选用 4 个最好的历史相似,并与纯动力控制预报一起按照两种误差诊断方案构建动力相似集合预报的 11 个集合预报成员,这里考虑到所用模式为谱模式,相似强迫将由各模式变量以谱系数形式添加到各个预报方程右端,在积分过程中取 6 h 间隔在所有垂直层次上对各模式变量进行强迫,更多技术细节可参阅任宏利(2006);(3)月平均环流预报直接使用 30 d 逐日预报的算术平均,无其他后处理;(4)预报评分采用世界气象组织推荐的距平相关系数(ACC)和均方根误差(RMSE)(Murphy, et al, 1989)。上述预报试验方案与业务集合预报的比较列于表 1 中。

供选相似使用的历史数据集为 1968 年以来的美国 NCEP 逐日再分析资料(Kalnay, et al, 1996)。预报试验检验所展示的是 2003 年 9 月 20 日—2013 年 8 月 20 日共 10 a 120 个预报个例在北半球热带外地区($20^{\circ}-90^{\circ}\text{N}$)的 500 hPa 高度场预报结果的评分情况。

表 1 预报试验方案

Table 1 The schemes for the prediction experiments

试验方案	DAEF 准业务环境回报试验	业务预报(OPRF)
下边界海温种类	初始时刻前期持续性海温	初始时刻前期持续性海温
初始场资料集	中国国家气象中心全球客观分析场	中国国家气象中心全球客观分析场
集合成员	11个动力相似集合预报成员	40个集合成员(LAF,SVD)
起报时间	每月20日12时起报	这里仅选取同期的预报结果
预报时效	未来30 d	未来45 d
检验气候场	中国国家气象中心全球客观分析场	模式气候场

3.1 月平均环流回报检验

图2直接比较了月平均环流(500 hPa 高度场)的DAEF和OPRF集合平均的检验评分结果。散点图直观地展现了DAEF的优势:距平相关系数图上的散点绝大多数位于右下方,而均方根误差图上的散点几乎都位于左上方(仅有5个个例除外),这清楚地表明DAEF具有比OPRF更大的距平相关系数和更小的均方根误差。从考察距平相关系数大于0.5的个例数比例来看,DAEF约有50%,而OPRF仅约30%。由此可见,对于月平均环流预报而言,DAEF相比于OPRF有效提高了预报技巧,减小了预报误差,其中对于误差的削减效果更为凸出一些。

表2首先比较了所有个例平均的预报检验评分。可以看到,基于动力相似集合方法的月平均环流预报效果明显好于业务集合预报。DAEF的距平相关系数达到0.48,这对于准业务环境下的多年平均预报技巧而言并不容易,虽然略低于0.5的业务标准,但相比于OPRF的0.39提高了23%,预报技巧提高明显。对月平均环流的均方根误差而言,DAEF平均比OPRF降低了13.7 gpm。同时,也

较了120个例中DAEF的预报评分高于OPRF的个例数,DAEF对应的距平相关系数有86个高于OPRF,预报技巧提高率为72%,DAEF对应的均方根误差有115个低于OPRF,预报误差降低率是96%。这表明,就所关注的北半球热带外地区而言,11个成员的动力相似集合预报方法显著优于40个成员的业务集合预报。

从表2中还可以看到,冬半年平均的预报技巧明显高于夏半年。这种差距在业务预报中约有0.1,而DAEF中仅为0.04,这说明动力相似集合方法大幅度提高了对夏半年的预报技巧。而且,DAEF在冬半年距平相关系数达到0.5的业务可用标准,显示出令人鼓舞的业务应用前景;即便是在夏半年也有应用潜力,其距平相关系数达到0.46,接近业务可用。相比之下,OPRF在冬半年的预报技巧明显低于DAEF,而夏半年则比DAEF低0.12。对于预报误差,DAEF在冬半年均方根误差比OPRF减小约17 gpm,夏半年减小约10 gpm,误差降低幅度分别为27%和24%。上述结果反映出冬半年的环流预报一般要好于夏半年。

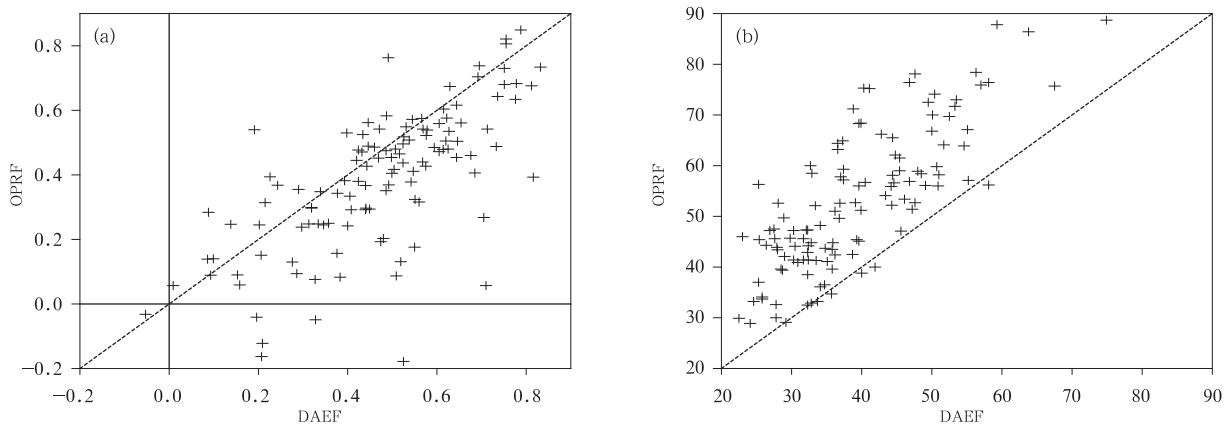


图2 月平均环流预报的距平相关系数(a)和均方根误差(b,单位:gpm)评分散点

Fig. 2 Scatter maps for ACC (a) and RMSE (b, unit: gpm) of the monthly mean circulation predictions between DAEF and OPRF

表2 个例平均的全年、冬半年和夏半年的预报评分

Table 2 The prediction skill scores in terms of the case means for the whole year, wintertime and summertime

预报方案	全年		冬半年(Oct20—Mar20)		夏半年(Apr20—Sep20)	
	距平相关系数	均方根误差(gpm)	距平相关系数	均方根误差(gpm)	距平相关系数	均方根误差(gpm)
OPRF	0.39	52.9	0.44	63.3	0.34	42.5
DAEF	0.48	39.2	0.50	46.2	0.46	32.3
DAEF-OPRF	0.09	-13.7	0.06	-17.1	0.12	-10.2

特别地,针对东亚—西太平洋区域(0°—60°N, 100°E—160°W)的环流进行了检验,对于月平均环流,DAEF的所有个例平均距平相关系数技巧(0.44)与业务集合预报(0.36)相比有明显提高,而其平均均方根误差(28.5 gpm)与业务预报(43.2 gpm)相比有显著降低。

总体而言,动力相似集合方法在降低月平均环

流预报误差和提高预报技巧两方面都展示出不错的能力,特别是在预报误差削减方面更为显著一些,这与动力相似预报策略着眼于减小模式误差的基本思想(任宏利,2006)是一致的。

3.2 逐日环流回报检验

为考察新集合方法对于月内逐日预报的性能,图3a给出了所有个例平均的逐日集合平均预报距

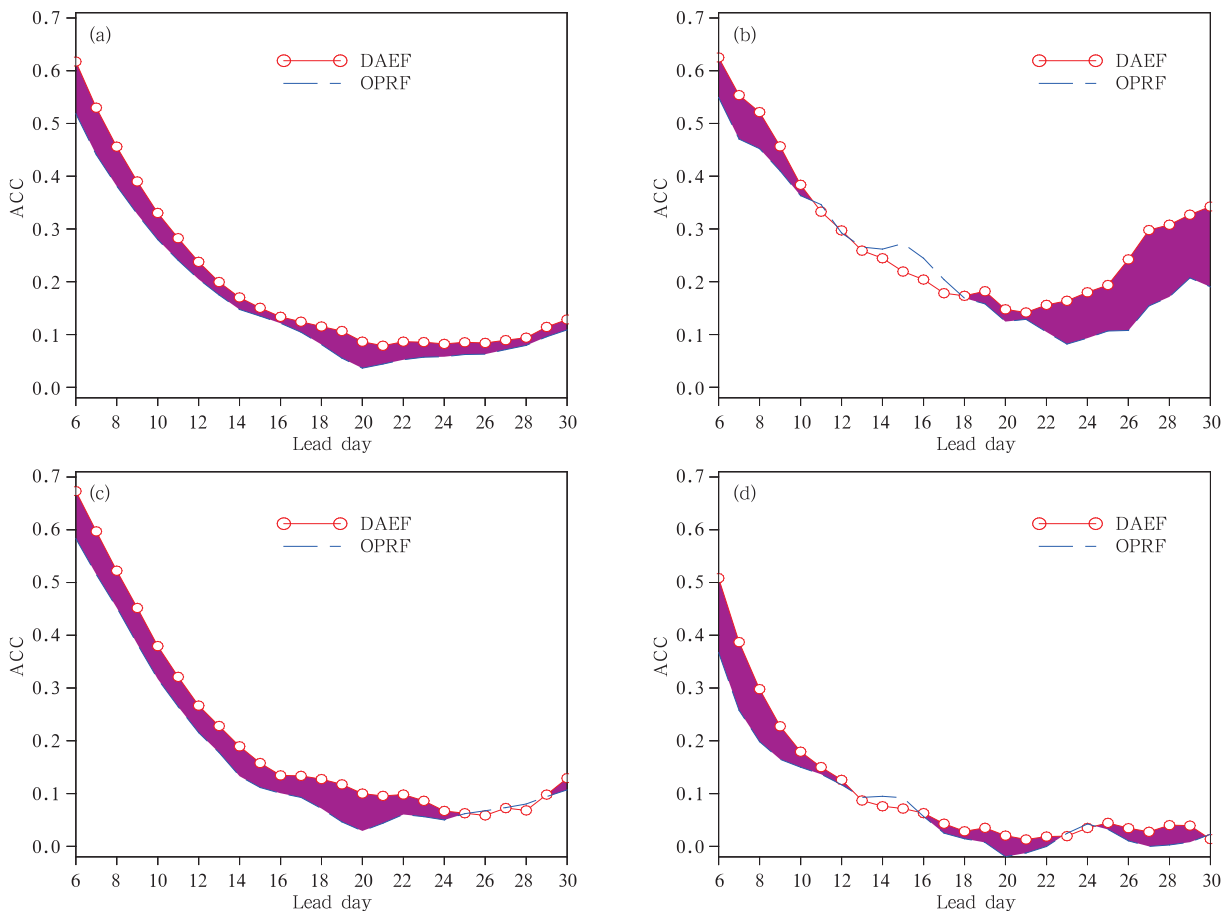


图3 不同尺度波逐日预报与实况的距平相关系数(a—d)和均方根误差(e)对比

(a. 全波, b. 纬向平均(0波), c. 超长波部分(1—3波), d. 天气尺度波部分(4—9波);

紫色阴影表示 DAEF 评分优于 OPRF)

Fig. 3 Comparisons of ACC (a—d) and RMSE (e) between the daily prediction and the observation in terms of the different spatial scales. (a) All waves, (b) zonal mean (wave 0), (c) ultra long wave part (waves 1—3), and (d) synoptic scale wave part (waves 4—9). The purple areas denote that the skill of DAEF is superior to OPRF

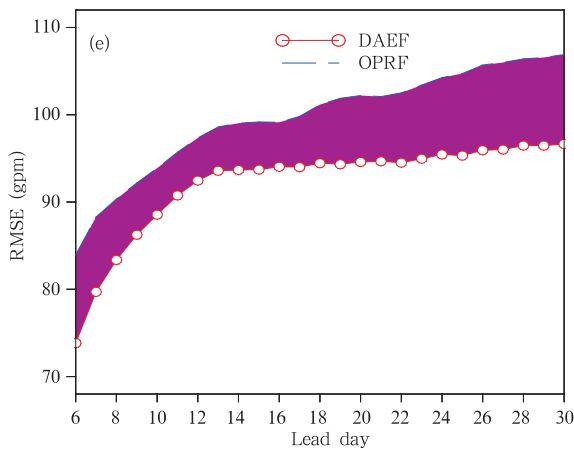


图 3 续

Fig. 3 (Continued)

平相关系数。可以看到,DAEF 相对 OPRF 对距平相关系数评分在 6—30 日均有一定提高,但由于模式自身性能和大气可预报性所限,超过两周的技巧依然较低。图 3e 给出了逐日集合平均预报均方根误差,DAEF 相对于 OPRF 对逐日预报均方根误差的降低非常显著,特别是在两周以后。总体来看,相对于业务集合预报,DAEF 对逐日环流预报技巧有一定程度提高,对预报误差则有显著削减作用。下面进一步通过纬向傅立叶分解针对不同空间尺度逐日预报来考察 DAEF 性能。图 3b—d 分别给出了不同纬向波动的逐日预报距平相关系数。

从图 3 可以看到,DAEF 相对于 OPRF,对于纬向平均部分预报效果的改善主要发生在 10 天之前和 18 天之后,对于超长波部分的改进几乎涵盖了所

有预报时段,而对于长波部分的改进主要集中在预报 12 天之前和 16 天之后。这些结果表明,DAEF 对于月内全波以及各尺度的逐日预报都有不同程度改善,特别是对持续性较好的 0 波和超长波的改进最为明显,这可能与加入相似强迫后大尺度环流能够得到更好的模拟有关,但仍需要深入进行归因研究。

图 4 进一步给出了东亚—西太平洋区域的逐日环流检验评分。可以看到,DAEF 仍能提高预报技巧,大幅削减预报误差。但同时也应看到,这一区域的技术评分要略低于北半球热带外整体的评分,反映出在东亚—西太平洋地区进行月尺度预报的难度很大。

3.3 集合预报性能检验

集合平均的预报误差与集合预报离散度的关系是衡量集合预报系统可靠性的一个重要标准,一个理想集合预报系统的集合平均均方根误差应与集合离散度基本一致(Palmer,2000)。然而,实际中的集合预报系统普遍存在集合离散度偏小的问题,这就增加了对极端事件预报的难度。为此,进一步考察了模式预报系统对于月平均和逐日环流的预报误差及离散度的对应关系(图 5)。可以看到,业务集合预报离散度远小于集合平均均方根误差,相比之下,DAEF 方法的集合平均预报则大幅削减了均方根误差,而且集合离散度相对于业务预报也有了合理的提升,使预报误差和离散度的配置关系得到改善。这表明,DAEF 不但能提高预报技巧、削减预报误差,还可以改进集合预报系统可靠性。

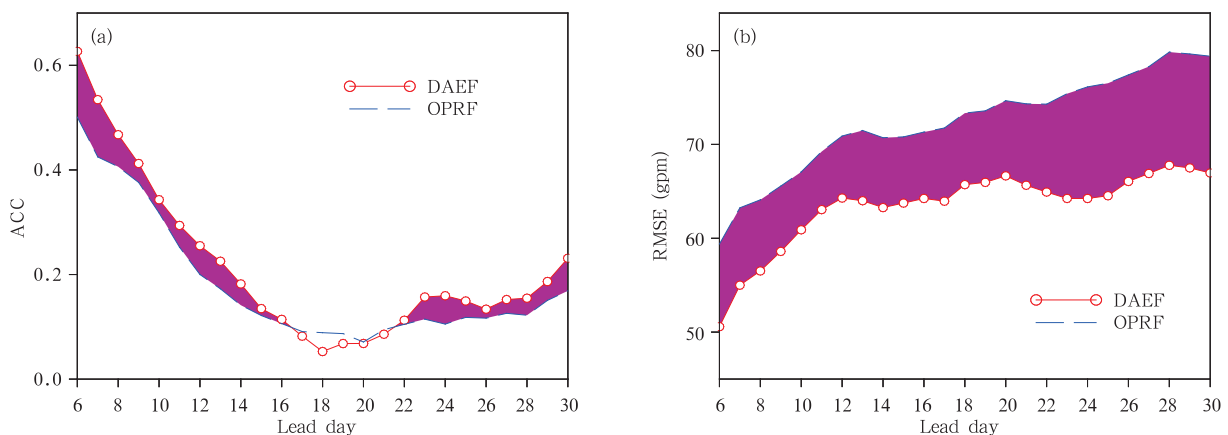


图 4 东亚—西太平洋区域逐日环流预报的距平相关系数(a)和均方根误差(b)

(紫色阴影表示 DAEF 评分优于 OPRF)

Fig. 4 ACC and RMSE of the daily circulation prediction in the East Asian – Western Pacific region,

(The purple area denotes that the skill of DAEF therein is superior to OPRF)

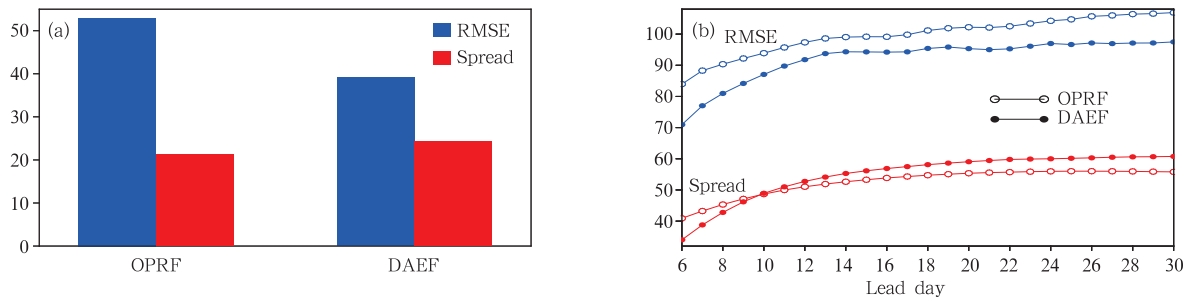


图5 月平均环流(a)和逐日环流(b)对应的集合平均均方根误差与集合离散度(单位:gpm)

Fig. 5 Ensemble mean RMSE and ensemble spread (unit: gpm) of the monthly mean circulation (a) and the daily circulation (b)

4 结论与讨论

针对基于大气环流模式的月预报提出了一种能有效提高预报技巧和减小预报误差的动力相似集合预报新方法。基本思路是发展一个基于历史相似的模式误差参数化方案,利用不同历史相似提供的相似强迫量,对预报模式积分过程分别进行扰动,从而形成预报集成员。该方法通过不同历史相似可以生成不同的模式误差估计,其效果相当于产生多个不同的预报模式,再将这些预报值进行集合,从而实现“虚拟多模式集合”。将这一集合方法应用到业务大气环流模式中,10 a的实时准业务环境预报和回报试验结果显示,相对于业务集合预报,动力相似集合预报能够显著提高月预报技巧(月平均环流预报几乎达到业务可用标准,其中冬半年已业务可用,夏半年预报技巧提升也很明显),大幅度降低预报误差,合理增加集合离散度,这主要归功于该集合新方法对大气环流纬向平均、超长波和长波预报均有显著改进,其所体现的集合理念以及改善预报效果的性能和潜力具有良好的业务应用前景。

对于月尺度所关注的预报对象,其可预报性问题与特定时空尺度可能存在密切联系(李建平等, 2008),模式预报必然受到大气流型变化的显著影响,DAEF也不例外,这与模式预报性能以及受大气可预报性时空变化的影响有关。事实上,预报检验评分结果是对众多在月尺度上可预报个例和大量不可预报个例的总体平均。需要指出的是,本预报试验仅是基于单一方法来考察预报水平相对于业务的提高,若结合采用其他有效的预报信息提取技术,有望进一步提升预报技巧。另外,模式所用的资料可能对于预报结果有很大影响,DAEF试验与实时业

务预报要求(海温和模式)完全一致,但由于历史资料集不得使用NCEP再分析资料,而实时预报初始场使用了中国国家气象中心客观分析资料,这可能引起初值与历史相似的资料不匹配问题。上述诸多问题在接下来工作中仍需要进一步加以研究。

参考文献

- 鲍名, 倪允琪, 丑纪范. 2004. 相似-动力模式的月平均环流预报试验. 科学通报, 49(11): 1112-1115
- 曹鸿兴. 1993. 大气运动的自忆性方程. 中国科学(B辑), 23(1): 104-112
- 巢纪平, 季劲钧, 朱志辉等. 1979. 长期数值天气预报的滤波方法. 中国科学, 22(1): 75-84
- 陈伯民, 纪立人, 杨培才等. 2003. 改善月动力延伸预报水平的一种新途径. 科学通报, 48(5): 513-520
- 丑纪范. 1974. 天气数值预报中使用过去资料的问题. 中国科学, 17(6): 635-644
- 丁一汇, 刘一鸣, 宋永加等. 2002. 我国短期气候动力预测模式系统的研究及试验. 气候与环境研究, 7(2): 236-246
- 顾震潮. 1958. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 29(3): 176-184
- 黄建平, 王绍武. 1991. 相似-动力模式的季节预报试验. 中国科学(B辑), 21(2): 216-224
- 李建平, 丁瑞强. 2008. 短期气候可预报期限的时空分布. 大气科学, 32(4): 975-986
- 李维京, 纪立人. 2000. 月动力延伸预报研究. 北京: 气象出版社, 171pp
- 李维京, 张培群, 李清泉等. 2005. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. 应用气象学报, 16(增刊): 1-11
- 任宏利, 丑纪范. 2005. 统计-动力相结合的相似误差订正法. 气象学报, 63(6): 988-993
- 任宏利. 2006. 动力相似预报的策略和方法[D]. 兰州: 兰州大学, 1-171
- 任宏利, 张培群, 李维京等. 2006. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用. 物理学报, 55(8): 4388-4396
- 任宏利, 丑纪范. 2007a. 数值模式的预报策略和方法研究进展. 地

- 球科学进展, 22(4): 376-385
- 任宏利, 丑纪范. 2007b. 动力相似预报的策略和方法研究. 中国科学(D辑), 37(8): 1101-1109
- 王绍武. 2001. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 306-311
- 郑庆林, 杜行远. 1973. 使用多时刻观测资料的数值天气预报新模式. 中国科学, 16(2): 289-297
- 郑志海, 任宏利, 黄建平. 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验. 物理学报, 58(10): 7359-7367
- 郑志海. 2013. 月动力延伸预报研究进展回顾. 气象科技进展, 3(1): 25-30
- Hirschi M, Spirig C, Weigel A P, et al. 2012. Monthly weather forecasts in a pest forecasting context: Downscaling, recalibration, and skill improvement. *J Appl Meteor Climatol*, 51(9): 1633-1638
- Jia X L, Yang S, Li X, et al. 2013. Prediction of global patterns of dominant quasi-biweekly oscillation by the NCEP Climate Forecast System version 2. *Climate Dyn*, 41(5-6): 1635-1650
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3): 437-471
- Liu X W, Yang S, Kumar A, et al. 2013. Diagnostics of subseasonal prediction biases of the Asian summer monsoon by the NCEP climate forecast system. *Climate Dyn*, 41(5-6): 1453-1474
- Murphy A H, Epstein E S. 1989. Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Mon Wea Rev*, 117(3): 572-581
- Palmer T N. 2000. Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate. *Reports on Progress in Physics*, 63(2): 71-116
- Ren H L, Chou J F, Huang J P, et al. 2009. Theoretical basis and application of an analogue-dynamical model in the Lorenz system. *Adv Atmos Sci*, 26(1): 67-77
- Ren H L, Liu Y, Jin F F, et al. 2014. Application of the analogue-based correction of errors Method in ENSO Prediction. *Ocean Atmos Sci Lett*, 7(2): 157-161
- Vitart F. 2014. Evolution of ECMWF sub-seasonal forecast skill scores. *Quart J Roy Meteor Soc*, doi: 10.1002/qj.2256
- Wang H J, Zhou G Q, Zhao Y. 2000. An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly. *Adv Atmos Sci*, 17(2): 234-240
- Weigel A P, Baggenstos D, Liniger M A, et al. 2008. Probabilistic verification of monthly temperature forecasts. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5162-5182
- Zeng Q C, Zhang B L, Yuan C G, et al. 1994. A note on some methods suitable for verifying and correcting the prediction of climatic anomaly. *Adv Atmos Sci*, 11(2): 121-127