

王秋良, 张立凤, 关吉平. 2013. 基于不同海温强迫的月动力延伸集合预报试验 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 517–523, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12162. Wang Qiuliang, Zhang Lifeng, Guan Jiping. 2013. Monthly dynamical extended-range ensemble forecasts with different SST forcing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 517–523.

不同海温强迫的月动力延伸集合预报试验

王秋良^{1,2} 张立凤¹ 关吉平¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 解放军 95356 部队, 耒阳 421851

摘要 利用全球谱模式 T106L19 和增长模繁殖法 (BGM) 建立了月动力延伸集合预报系统, 基于气候海表面温度 (SST) 和预测海表面温度, 设计了三组集合预报试验, 一组为气候 SST 作为模式下边界条件的集合预报试验 (CSST 试验), 另一组为预测 SST 作为模式的下边界条件的集合预报试验 (FSST 试验), 第三组为前两组试验的集合预报结果之和 (AVE30 试验), 对两种海温强迫分别进行了 48 个月的试验, 并对预报结果进行了检验和分析。结果表明: 相对于单一的控制预报, 不管是 CSST 试验还是 FSST 试验, 利用 BGM 方法制作的初值集合预报能显著提高月平均环流的预报技巧, 集合预报对 PNA 区域的预报技巧改进显著, 特别是预测 SST 强迫有正的贡献; 同时考虑初值和边值不确定性影响的集合预报试验 (AVE30 试验), 其全球预报技巧不仅高于控制预报, 也分别高于 FSST 试验和 CSST 试验, 这说明要提高月延伸预报技巧, 必须同时考虑初值和边值的影响; 大气对 SST 强迫的响应在模式积分 10 天开始显著, SST 对第二旬和第三旬的作用直接影响月平均环流的预报效果, 而 SST 对第二旬和第三旬预报的影响不仅与 SST 本身变化有关, 还与初值有关, 不同的初值其作用不同; 集合预报对我国夏季月平均温度分布具有较强预报能力, 采用预报海温强迫的预报结果, 总体上优于气候海温强迫的结果。

关键词 动力延伸预报 集合预报 海温强迫 预测海温

文章编号 1006-9585 (2013) 04-0517-07

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12162

Monthly Dynamical Extended-Range Ensemble Forecasts with Different SST Forcing

WANG Qiuliang^{1,2}, ZHANG Lifeng¹, and GUAN Jiping¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² No.95356 Troops of PLA, Leiyang 421851

Abstract A monthly dynamical extended-range ensemble forecast system is established with a global spectral model (T106L19) and an initial ensemble method of breeding of growing modes (BGM). Forty-eight examples of monthly integrations are performed with this system, and within each example, there are three sets of monthly ensemble forecasting experiments. The first set, named the CSST experiment, is forced by climatic sea surface temperatures (SSTs), and the second set, named the FSST experiment, is forced by predicted SSTs, while the last set, named the AVE30 experiment, is the mean of CSST and FSST. Then, the model results are verified and analyzed. Verifications show that the initial ensemble forecasts, based on BGM, can improve the monthly prediction skill remarkably when compared to a single control run, and it is especially precise for the Pacific and Northern America (PNA) region and the predicted SSTs have a positive contribution to the forecasts skill, particularly. The AVE30 experiment, that takes impacts of both initial

收稿日期 2012-09-23 收到, 2013-06-06 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB411800

作者简介 王秋良, 男, 1983 年出生, 博士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: wangqiuliangyjs@163.com

uncertainties and boundary uncertainties into consideration, has a higher prediction skill than both the CSST and FSST experiments and suggests that we should attach more of an importance to roles of both initial conditions (ICs) and boundary conditions (BCs) to improve the monthly extended-range forecast skill. Meanwhile, analyzing the results indicate that atmospheric responses to SST forcing become significant after the tenth model integration day and the influences of SST forcing on the second and third ten-day period have a direct effect on the prediction skill of the monthly mean circulation. The influences of SST forcing on the second and third ten-day period relate to SSTs variation as well as ICs and the influences differ under different ICs. The monthly ensemble prediction system exhibits a strong capability of forecasting the monthly mean air temperature in China during the summer. The results of FSST forced by predicted SSTs prevail against those of CSST forced by climatic SSTs in general.

Keywords Dynamical extended-range forecast, Ensemble prediction, SST forcing, SST forecast

1 引言

随着社会生产和科学技术的发展，短期气候变化对国民经济和人民生命财产的影响越来越突出，短期气候预测显得越来越重要（王会军等，2010），提高持续异常天气过程、尤其是极端天气过程的预报技巧是目前巨大的科学挑战。10~30天动力延伸期预报介于中期预报和短期气候预测之间，由于延伸期预报超过了经典的逐日预报的可预报时效上限，同时延伸期内外强迫（海表温度、雪盖等）的作用显得重要，所以说10~30天延伸期预报是有相当难度的科学问题，提高延伸期预报技巧是气象科学和业务预报的重点与难点。

国外的动力延伸预报研究开展较早（如 Miyakoda et al., 1986; Murphy, 1989; Tracton et al., 1989; Yamada et al., 1991），我国在这方面也开展了大量的工作（如李维京等，1993；张道民等，1996, 2001；骆美霞等，1997；李维京和陈丽娟，1999；钱永甫和郑琼，2001；骆美霞和张道民，2002；Chen et al., 2003），但目前动力延伸预报的水平仍然比较低。这是由于月动力延伸预报是用中期数值模式，通过延长积分时间得到预报结果，而中期数值预报通常作为大气初值的问题来求解，海洋等下边界条件可取气候值。对于1个月以上的时间尺度的预报，可预报性主要依赖于缓慢改变的边界强迫，月动力延伸期预报的预报时效长于中期时段，外强迫的变化对大气环流演变的作用不能忽视。Mo and Kalnay (1991) 研究发现，月平均环流预报的距平相关系数(ACC)中由海表面温度(SST)产生的预报技巧差异与由初值产生的预报技巧差异相当。Reichler and Roads (2005) 认为当预报时间超过3周时，在热带地区，下边界强迫是可预报性的主要

贡献。骆美霞等（1997）、骆美霞和张道民（2002）进行了实时海温的月动力延伸预报数值试验，认为实时海温对月尺度数值预报的影响是非常复杂的问题，海温异常对延伸预报的影响不仅与海温异常的强度有关，还与大气初值和模式中的物理过程有关。SST作为模式的下边界条件，其不确定性对月动力延伸预报效果具有很大的影响，故延伸期的预报既受初始条件影响也受边界强迫的影响（Mo and Kalnay, 1991; Hall et al., 2001; Reichler and Roads, 2005）。

综上，月动力延伸预报不仅要考虑初值的影响，同时SST等外强迫因子也需要考虑（Mo and Kalnay, 1991; 李维京等，1993；骆美霞等，1997；骆美霞和张道民，2002）。虽然海温变化影响着延伸预报效果，然而由于准确、实时的观测海温难以及时获得，故目前在月动力延伸业务预报中，除NCEP (Saha et al., 2006)、ECMWF (Vitart et al., 2008) 等的业务预报中采用海气耦合外，大部分预报系统中的SST还是以具有季节变化的周平均以及月平均的气候态作为模式的下边界条件。为了解决下边界强迫不确定性对延伸预报的影响，本文首先设计了全球月平均SST的统计预报模型，在预测海温和气候海温的边界条件下，利用增长模繁殖法(BGM)设计了月动力延伸集合预报系统，进行了48个月的试验，并对试验结果进行了分析。

2 模式和集合预报方法

2.1 数值模式

研究使用模式为全球谱模式T106L19，其水平方向采用三角形106波谱截断，垂直方向采用混合坐标分为19层，模式初值为19层涡度、散度、温度、比湿和地面气压自然对数的谱系数，模式每24 h输出一次结果，然后通过谱格转换，得到 1° (纬

度) $\times 1^\circ$ (经度) 的格点数据。模式中的 SST 采用随月变化的气候平均值, 在每年的预报中不变。模式中的主要物理参数化过程包括: 辐射过程、水汽凝结、行星边界层作用、重力波拖曳和蒸发、热量、动量以及水汽湍流输送等(国家气象中心, 1991)。

2.2 集合预报方法

增长模繁殖法(BGM)是在中期集合预报中使用的先进的初值集合预报方法, 该方法通过类似于分析循环的繁殖循环过程来实现(Toth and Kalnay, 1993, 1997)。由于研究使用模式的预报量和初始场都是各物理量的谱系数, 在增长模繁殖循环中, 有物理意义的增长模应是初始模在物理空间增长繁殖得到的, 即在均匀分布的经纬格点上计算得到, 这样必然导致增长模在物理空间和谱空间之间进行多次 Fourier 变换和 Legendre 变换, 不仅增大了计算量, 而且带来了计算误差的积累。关吉平等(2006)首先将该方法应用到 T106L19 全球谱模式中, 并提出和实行了谱空间进行增长模繁殖的技术, 应用该方法的具体步骤参考该文献。

基于上述集合方法和预报模式, 本文设计了月动力延伸集合预报方案为: 利用 BGM 方法得到 7 对初始扰动, 基于加扰初值和非加扰初值 T106L19 模式积分 36 天, 得到 7 对扰动预报和一个控制预报, 组成了 15 个成员的集合预报。

3 气候海温强迫的集合预报结果

3.1 试验设计

不改变 T106L19 模式的下边界条件, 采用气候态 SST 作为海温强迫, 利用 BGM 方法得到不同初值的 15 个成员集合预报, 记为 CSST 试验; 控制试验记为 CON。

试验个例从 2007 年 2 月到 2011 年 2 月, 共 48 个月(由于资料问题, 缺 2008 年 1 月个例)。每个试验均从该月 1 日 12:00(协调世界时, 下同)起报, 积分 36 天。预报结果的检验主要为 500 hPa 位势高度场的距平相关系数(ACC)和均方根误差(RMSE)(后文如无特殊说明将 500 hPa 位势高度场的 ACC 和 RMSE 记为 ACC 和 RMSE), 其中分析场由 T106L19 模式的分析系统得到, 气候态是 40 年 NCEP 资料的月平均场(Kalnay et al., 1996), 分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度), 经双线性插值得到与模式结果相同的网格。

3.2 预报结果分析

表 1 给出了 48 个个例平均的 ACC 和 RMSE 在全球范围、亚洲区域($0\sim 60^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E}\sim 160^\circ\text{E}$)以及东北太平洋区域(PNA)($15^\circ\text{N}\sim 70^\circ\text{N}$, $180^\circ\text{W}\sim 60^\circ\text{W}$)的统计结果。从表中可见, 无论是 ACC 还是 RMSE, 相对于控制试验 CON, 集合预报(CSST)的预报技巧都有明显提高, 这表明集合预报技术在月动力延伸预报中具有很强的优势, 是提高延伸预报技巧的有效途径。表 2 给出了以 ACC 和 RMSE 为指标, 集合预报相对于控制预报的改进率, 可见无论是用哪个标准衡量, 集合预报技巧相对于控制预报都有改进, 以 ACC 为预报技巧指标的改进率在 10%以上, 尤其是在 PNA 区域改进更是明显, 虽然 ACC 技巧低于全球水平, 但改进率都超过 30%, 超过了全球范围 ACC 的改进率。

表 1 全球、亚洲和 PNA 区域的月平均环流预报的 ACC 和 RMSE

Table 1 Statistical mean 500-hPa geopotential height ACC (Anomaly Correlation Coefficient) and RMSE (Root Mean Square Error) of global, Asian, and PNA (Pacific and Northern America) region

	ACC				RMSE (gpm)			
	CON	CSST	FSST	AVE30	CON	CSST	FSST	AVE30
	试验	试验	试验	试验	试验	试验	试验	试验
全球	0.364	0.446	0.441	0.448	55.12	47.90	47.38	47.06
亚洲	0.262	0.277	0.300	0.291	37.13	34.73	35.34	34.53
PNA	0.286	0.376	0.386	0.384	59.62	51.41	49.71	50.08

表 2 不同集合预报试验相对于控制预报的改进率

Table 2 Improvement ratio of statistical mean 500-hPa geopotential height ACC and RMSE of global, Asian, and PNA region compared to control run

	相对于 CON 试验的 ACC			相对于 CON 试验的 RMSE		
	改进率			改进率		
	CSST	FSST	AVE30	CSST	FSST	AVE30
试验	试验	试验	试验	试验	试验	试验
全球	22.5%	21.2%	23.1%	13.1%	14.0%	14.6%
亚洲	5.7%	14.5%	11.1%	6.5%	4.8%	7.0%
PNA	31.5%	35.0%	34.3%	13.8%	16.6%	16.0%

4 预测海温强迫的集合预报结果

4.1 试验设计和海温预测方法

使用预测 SST 强迫是延伸期预报中考虑 SST 不确定影响的一个可行选择(骆美霞和张道民, 2002), 为此设计了预测海温强迫模式的集合预报

试验, 记为 FSST 试验。该试验除了采用预测 SST 代替气候 SST 强迫模式外, 集合预报初始扰动形成方法和集合成员个数与第 3 节相同。同时将 FSST 和 CSST 两组试验再作集合, 形成同时考虑初值和下边界条件不确定性的 30 个成员集合预报, 记为 AVE30 试验。

在 FSST 试验中, 准确的 SST 预测是试验的关键, 韩雪等 (2009) 曾尝试用预测的全球 SST 驱动气候模式, 但其对 SST 的预测技巧不高, 在 Niño3.4 区, 预测海表温度距平 (SSTA) 与观测值的相关系数仅为 0.596。关于海温预报的方法已有很多工作, 有些方法是预测单站的 SST, 有些方法是预测区域的 SST (如张韧, 2000; 张韧等, 2002; 董兆俊等, 2008; 韩雪等, 2009; 吉进喜等, 2010)。

考虑到 SST 是时空函数, 而要预测的是时间变化部分, 所以本文采用经验正交函数 (EOF) 分解和 Kalman 滤波相结合的方法建立了 SST 预报模型 (吉进喜等, 2010)。对该模型本文做了进一步改进, 主要体现在以下两方面: 一是首先对多年的全球 SST 资料 (Reynolds et al., 2002) 进行滤波, 滤掉季节变化信号; 二是应用到全球海洋范围, 可以消除不同区域边界上不连续的问题。

利用改进的 SST 预测模型和 1981 年 12 月至 2011 年 2 月全球月平均 SST 资料进行了预测检验, 预测试验从 2000 年 1 月至 2010 年 2 月连续 122 个月, 如预报 2000 年 1 月 SST, 建模资料为 1981 年 12 月至 1999 年 12 月。图 1 给出了全球平均的预测值和观测值的相关系数, 以及 Niño3.4 区的预测 SSTA 和观测 SSTA, 可见, 122 个月的平均相关系数超过 0.91。预测 Niño3.4 区 SSTA 与观测的符号

一致率为 0.88, 相关系数为 0.93, 达到 0.05 的显著性水平。这说明 SST 预测模型的建立是成功的, 预测结果是可用的。

4.2 结果分析

对比 CSST 试验和 FSST 试验发现 (表 1), 在全球范围内, CSST 试验的 ACC 略高于 FSST 试验, 而 CSST 试验的 RMSE 略高于 FSST 试验 (表 2), 这说明两组集合预报的预报效果相当, 即在预测 SST 或气候 SST 作为模式的边界强迫时, 用同样的初值集合方法制作的月平均环流预报, 其预报技巧相当。但 AVE30 试验 (表 1) 的预报结果却优于原来的两组试验, 更高于控制预报, 相对于 CSST 试验和 FSST 试验, ACC 分别提高了 0.45% 和 1.6%, 而 RMSE 分别降低了 1.8% 和 0.7%。分析其原因可认为, 一是 AVE30 试验的成员多, 二是 AVE30 试验中 30 个成员中不仅考虑了初值的不确定性, 也考虑了边值的不确定性, 而对于月尺度的延伸预报来讲, 初值和边值的不确定性对预报结果都是有影响的。

对于 PNA 区域, 相对于控制试验, 试验 CSST、FSST 和 AVE30 的改进率是最显著的, 这表明初值集合对 PNA 区域延伸期预报影响是非常显著的。对比 CSST 试验和 FSST 试验发现, FSST 试验的 ACC 略高于 CSST 试验, 而 FSST 试验的 RMSE 也略低于 CSST 试验, 总体上反映了采用预测海温的 FSST 试验对 PNA 区域延伸预报的技巧高于采用气候海温的 CSST 试验。

对于亚洲区域, 相对于控制预报, 集合预报的预报技巧都有提高 (表 2), 特别是 FSST 试验的改进率最大, 这说明对延伸预报, 初值的影响是大的,

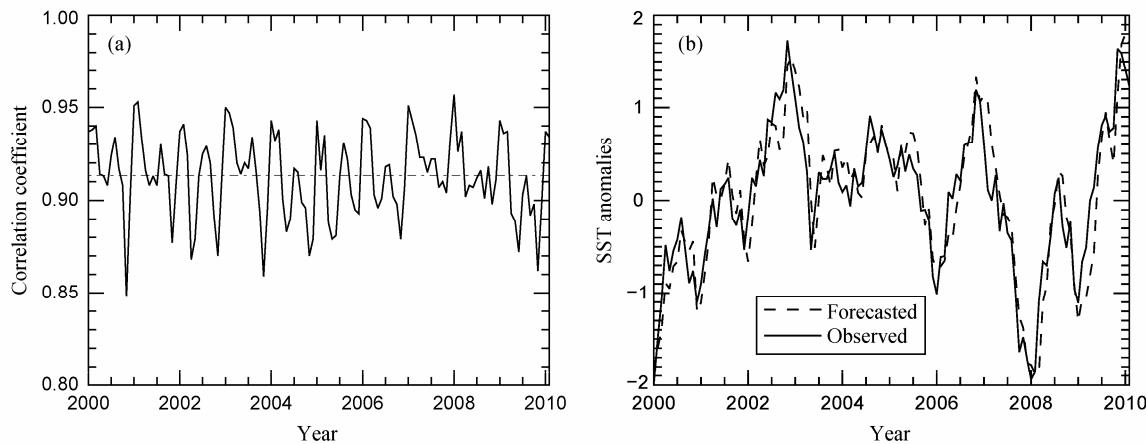


图 1 (a) 预测与观测 SST 场的相关系数和 (b) Niño3.4 区平均 SSTA

Fig. 1 (a) Spatial correlation coefficients between forecasted and observed SST; (b) regionally mean SST anomalies in Niño3.4 region

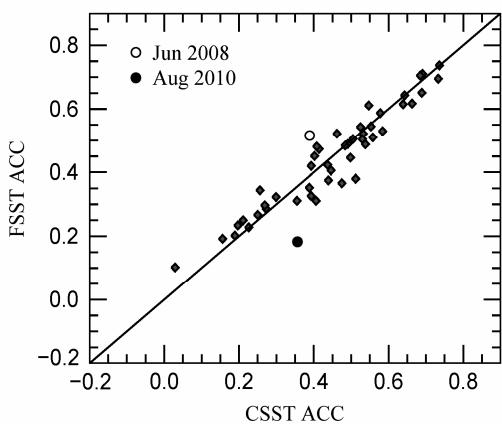


图2 48个个例两组试验的全球ACC比较

Fig. 2 Global 500-hPa geopotential height ACC comparison between CSST (Climatic SST forced) and FSST (Forecast SST forced) experiments within 48 examples

初值集合预报可以提高预报技巧,但边值的影响也不能忽略,预测SST可以明显提高亚洲区域的月平均环流预报技巧。这是由于:亚洲地区位临两个大洋,由于海陆温度差异,亚洲地区成为世界上最显著的季风区,海表温度的描述直接影响到季风的预报,故影响到环流的预报。所以对于我国的月动力延伸预报,更应考虑SST强迫的变化。

5 不同海温强迫的影响

5.1 不同海温强迫与预报技巧

进一步分析发现,虽然CSST试验和FSST试验总体预报水平相当,虽然ACC变化趋势比较一致,但不同个例差异很大(图2)。分析发现,差别最大的两组试验是2008年6月和2010年10月(图2中特别标注)。2008年6月FSST试验的ACC比CSST试验高0.13,FSST试验相对于CSST试验的改进率为32%;而2010年10月FSST试验的ACC却比CSST试验低0.17,FSST试验相对于CSST试验的改进率为-49%。

为揭示两个个例差异的原因,图3给出了两个个例的逐旬预报技巧,由图可见,第一旬,两个试验的ACC非常接近;第二旬差异最显著,这反映了大约在积分10天后大气对SST强迫的响应开始明显,这与骆美霞等(1997)、骆美霞和张道民(2002)用不同模式的研究结果是一致的。对2008年6月个例,在第二旬和第三旬FSST试验都优于CSST试验,所以月平均的结果也是FSST试验预报技巧高;而对2010年10月个例,虽然在第三旬FSST

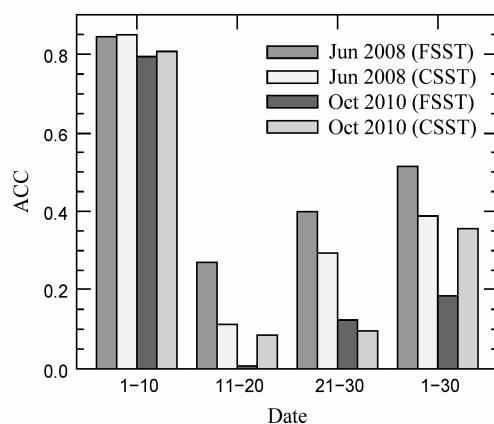


图3 2008年6月和2010年10月预报的旬平均和月平均的全球ACC

Fig. 3 Decade mean and monthly mean global 500-hPa geopotential height ACC comparison between FSST and CSST experiments in Jun 2008 and Oct 2010 examples

试验预报技巧高于CSST试验,但在第二旬却相反,月平均结果也是CSST试验的预报技巧高。比较两个个例的4个试验预报技巧后发现,第二旬的预报技巧对月平均环流的预报有很大影响,要提高月平均环流的预报效果,必须提高10天后的预报技巧,而10天后的预报技巧,不仅依赖于初值和下边界强迫,且边界的强迫还与初值有关,不同的初值边界强迫的作用不同,这是一个值得深入研究的复杂问题。

5.2 不同海温强迫与我国夏季温度预报

为了揭示月动力延伸集合预报对我国夏季温度场的预报能力,对CSST试验与FSST试验的结果进行分析。以我国区域($15^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 135^{\circ}\text{E}$)的850 hPa等压面上的温度场作为分析对象。计算了该区域2007至2010年7月的预报温度的ACC和RMSE,CSST试验的温度ACC分别为0.868、0.866、0.842、0.827,温度RMSE分别为1.52、1.71、1.66、1.80 °C;FSST试验的温度ACC分别为0.872、0.870、0.858、0.842,温度RMSE分别为1.48、1.71、1.57、1.69 °C。从温度ACC来看,两个试验的温度ACC都超过0.8,这表明模式对我国夏季月平均温度的分布形态预报能力较强;对比两组试验可以看出,4个个例FSST试验的温度ACC均高于CSST试验。图4给出的是2009年7月份CSST试验、FSST试验结果和分析场,从分析场(图4c)可以看出高温区分布在我国西北 40°N 附近,我国东北为相对低温区,在 $100^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间出现一条明显的暖舌;CSST试验(图4a)和FSST试验(图4b)预报的高温区、暖舌以及相对低温区的分布与之对应非常好。从温度RMSE来看,两个

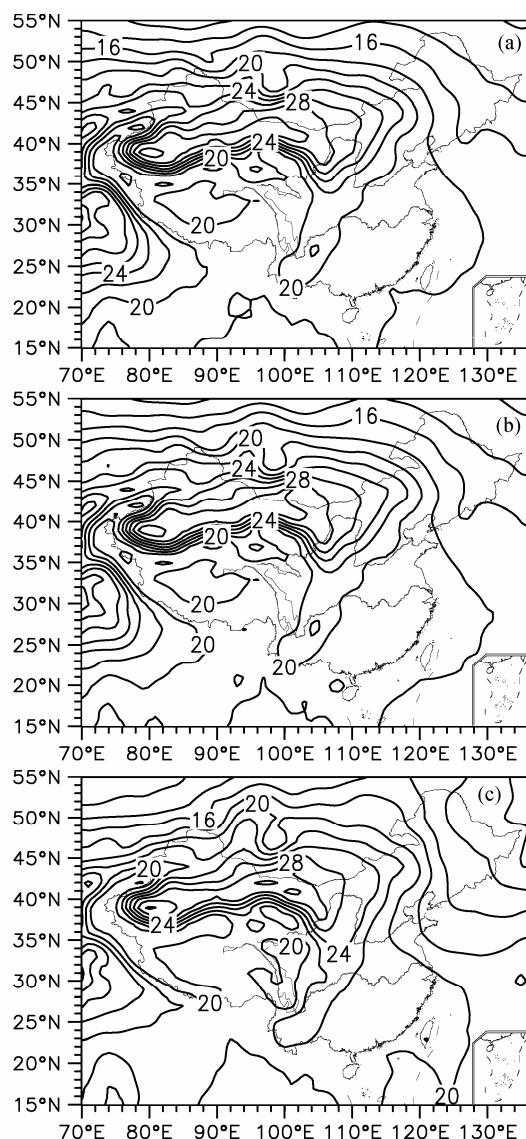


图 4 2009 年 7 月 850 hPa 温度场 (单位: °C): (a) CSST 试验; (b) FSST 试验; (c) 分析场

Fig. 4 Mean air temperature (°C) field at 850 hPa in July 2009: (a) CSST experiment; (b) FSST experiment; (c) T106 analysis

试验有明显的差异,除了 2008 年 CSST 试验和 FSST 试验的 RMSE 相同以外,其余各年都是 FSST 试验的 RMSE 小于 CSST 试验,这表明对温度场的强度预报,FSST 试验的结果更接近分析场。总之不论是采用气候海温还是预测海温强迫大气,延伸集合预报对我国夏季温度场的分布有着很强的预报能力,但采用预测海温强迫时,其结果略有优势。

6 结论

本文利用 T106L19 全球谱模式和 BGM 方法建立了集合预报系统,并将利用 EOF 分解和 Kalman

滤波相结合的方法建立的 SST 预测模型预测的月平均 SST 引入模式,设计了三组集合预报试验:一组为气候 SST 作为模式下边界条件 (CSST 试验),另一组为预测 SST 作为模式的下边界条件 (FSST 试验),第三组为前两组试验的集合预报结果之和 (AVE30 试验)。对三种方案分别进行了 48 个月的试验检验。主要结论有:

(1) 为考虑初值和边值 (海表面温度强迫) 对延伸期预报的影响,本文在建立了海表温度预测模型的基础上,成功的设计和实现了初值集合和边值集合一体化方案。

(2) 同时考虑初值和边值不确定性影响的集合预报试验 (AVE30 试验),其全球预报技巧不仅高于控制预报,也分别高于 FSST 试验和 CSST 试验,这说明要提高月延伸预报技巧,必须同时考虑初值和边值的影响。

(3) 相对于单一的控制预报,不管是气候海温强迫,还是更接近于实测的预测海温强迫,利用 BGM 方法制作的初值集合预报能显著提高月平均环流的预报技巧,集合预报对 PNA 区域的预报技巧改进显著,特别是预测 SST 强迫有正的贡献。

(4) 在预测海温强迫大气时,不同的个例和不同的区域,预报效果不同,SST 变化对亚洲区域延伸预报的影响显著,这说明对于延伸预报,不仅要考虑初值不确定性的影响,还要考虑边值不确定性的影响。

(5) 大气对 SST 强迫的响应在模式积分 10 天开始显著,SST 对第二旬和第三旬的作用直接影响月平均环流的预报效果,而 SST 对第二旬和第三旬预报的影响不仅与 SST 本身变化有关,还与初值有关,不同的初值其作用不同。

(6) 延伸期预报对我国夏季月平均温度分布具有较强预报能力,采用预报海温强迫的预报结果,总体上优于气候海温强迫的预报结果。

以上分析虽然是 48 个个例试验的统计结果,但是是否具有普适性,还有待用更多的个例进行检验。

参考文献 (References)

- Chen B M, Ji L R, Yang P C, et al. 2003. An approach to improving the dynamical extended-range (monthly) prediction [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (7): 696–703.
董兆俊, 滕军, 王骥鹏. 2008. 基于相空间重构与模糊神经网络耦合的海温预测模型 [J]. 热带海洋学报, 27 (4): 73–76. Dong Zhaojun, Teng

- Jun, Wang Jipeng. 2008. Application of phase space reconstruction and ANFIS model in SST forecasting [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 27 (4): 73–76.
- 关吉平, 张立凤, 张铭. 2006. 用 T106L19 全球谱模式制作中期集合预报的试验 [J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 7 (3): 297–301.
- Guan Jiping, Zhang Lifeng, Zhang Ming. 2006. Medium-range ensemble forecast experiments using model T106L19 [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (in Chinese)*, 7 (3): 297–301.
- Hall N M J, Lin H, Derome J. 2001. The extratropical signal generated by a midlatitude SST anomaly. Part II: Influence on seasonal forecasts [J]. *J. Climate*, 14: 2696–2709.
- 韩雪, 魏风英, 董敏, 等. 2009. 统计预报海温场驱动的 CAM3.1 模式预报试验 [J]. *应用气象学报*, 20 (3): 303–311. Han Xue, Wei Fengying, Dong Min, et al. 2009. Forecasting experiments of CAM3.1 model using statistic forecast sst data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (3): 303–311.
- 吉进喜, 张立凤, 郭渊. 2010. Kalman 滤波技术在海表温度预测中的应用 [J]. *海洋预报*, 27 (3): 59–65. Ji Jinxi, Zhang Lifeng, Guo Yuan. 2010. Prediction of sea surface temperature by Kalman filtering [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 27 (3): 59–65.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–470.
- 李维京, 陈丽娟. 1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究[J]. *气象学报*, 57 (3): 338–345. Li Weijing, Chen Lijuan. 1999. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (3): 338–345.
- 李维京, 张小礼, 李小泉, 等. 1993. 海温对月平均环流影响的数值试验 [J]. *应用气象学报*, 4 (增刊): 45–49. Li Weijing, Zhang Xiaoli, Li Xiaoquan, et al. 1993. Numerical experiment of the influence of SST variation on monthly mean circulation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 4 (supl.): 45–49.
- 骆美霞, 张道民. 2002. 实时海温对动力延伸(月)预报影响的数值试验研究 [J]. *应用气象学报*, 13 (6): 727–733. Luo Meixia, Zhang Daomin. 2002. Numerical experiment on effects of real sea surface temperature on dynamic extended (monthly) forecasting [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (6): 727–733.
- 骆美霞, 纪立人, 张道民, 等. 1997. 全球海温距平对月预报影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 21 (5): 552–556. Luo Meixia, Ji Liren, Zhang Daomin, et al. 1997. A numerical experiment of the effect of sea surface temperature anomalies on monthly forecasting[J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 21 (5): 552–556.
- Miyakoda K, Sirutis J, Poshay J. 1986. One-month forecast experiments without anomaly boundary forcing [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114: 2363–2401.
- Mo K C, Kalnay E. 1991. Impact of sea surface temperature anomalies on the skill of monthly forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 2771–2793.
- Murphy J M. 1989. Assessment of the practical utility of extended range ensemble forecasts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116 (491): 89–125.
- 国家气象中心. 1991. 资料同化和中期数值预报[M]. 北京: 气象出版社.
- National Meteorology Center. 1991. Data Assimilation and Medium-Range Numerical Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 钱永甫, 郑琼. 2001. P- σ 全球模式的月尺度动力延伸预报试验 [J]. *大气科学*, 25 (5): 641–649. Qian Yongfu, Zheng Qiong. 2001. Monthly-scale dynamical extended forecast experiments performed with a P- σ global numerical climate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (5): 641–649.
- Reichler T, Roads J O. 2005. Long-range predictability in the tropics. Part I: Monthly averages [J]. *J. Climate*, 18: 619–633.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith Thomas M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15: 1609–1625.
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19: 3483–3517.
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (12): 2317–2330.
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125: 3297–3319.
- Tracton M S, Mo K C, Chen W, et al. 1989. Dynamical extended range forecasting (DERF) at the national meteorological center [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 1604–1635.
- Vitart F, Buizza R, Alonso M B, et al. 2008. The new VAREPS-monthly forecasting system: A first step towards seamless prediction [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134: 1789–1799.
- 王会军, 张颖, 郎咸梅. 2010. 论短期气候预测的对象问题 [J]. *气候与环境研究*, 15 (3): 225–228. Wang Huijun, Zhang Ying, Lang Xianmei. 2010. On the prediction of short-term climate prediction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (3): 225–228.
- Yamada S, Maeda S, Kudo T, et al. 1991. Dynamical one-month forecast experiments with the JMA global prediction model [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 69 (1): 153–159.
- 张道民, 纪立人. 2001. 动力延伸(月)数值天气预报中的信息提取和减小误差试验 [J]. *大气科学*, 25 (6): 778–786. Zhang Daomin, Ji Liren. 2001. A study of information on the extraction to reduce errors in dynamic extended (monthly) numerical weather prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (6): 778–786.
- 张道民, 纪立人, 李金龙. 1996. 月数值天气预报的试验研究[J]. *大气科学*, 20 (4): 429–438. Zhang Daomin, Ji Liren, Li Jinlong. 1996. An experimental study on monthly numerical weather prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 20 (4): 429–438.
- 张韧. 2000. 非线性 BP 网络映射与赤道东太平洋海温预测 [J]. *海洋通报*, 19 (4): 1–7. Zhang Ren. 2000. Non-linear BP neural network mapping and prediction of equatorial east-pacific SST [J]. *Marine Science Bulletin (in Chinese)*, 19 (4): 1–7.
- 张韧, 王继光, 蒋国荣. 2002. 基于小波分解和 ANFIS 模型的赤道东太平洋海温集成预测 [J]. *热带海洋学报*, 21 (3): 77–84. Zhang Ren, Wang Jiguang, Jiang Guorong. 2002. A compositive prediction of Eastern Pacific equatorial SST based on decomposition and ANFIS model [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 21 (3): 77–84.