

基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验*

郑志海^{1)†} 封国林¹⁾ 黄建平²⁾ 丑纪范²⁾

1) (中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

2) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

(2012年1月12日收到; 2012年3月14日收到修改稿)

集合预报是考虑初始条件和模式不确定性的有效途径. 结合延伸期可预报性特征, 对具有不同特性的可预报分量和随机分量采用不同的集合预报方案和策略, 发展了一种基于延伸期可预报性的集合预报新方法 (PBEP). 该方法以延伸期数值预报模式为平台, 对可预报分量采用多个模式误差订正方案, 从考虑模式不确定性的角度进行集合; 而对随机分量则利用历史资料从气候概率的角度给出集合概率分布, 避免模式误差对随机分量概率分布的影响. 试验结果表明, 相比于国家气候中心的业务动力延伸集合预报系统, 该集合预报方法对全球各区域环流预报技巧均有提高, 对不同空间尺度的波也有不同程度的改进, 显示出潜在的业务应用前景.

关键词: 延伸期预报, 可预报性, 集合预报, 可预报分量

PACS: 92.60.Wc, 92.60.Bh

1 引言

大气系统是一个复杂的非线性系统, 它的不稳定性会使得预报过程中误差不断增长, 即使是初始条件很小的误差或数值模式微小的缺陷, 也不可避免的导致一段时间后预报技巧的丧失^[1-3]. 集合预报是考虑初始条件和模式不确定性的有效途径^[4-6]. 中短期天气集合预报主要对初始条件和数值模式的不确定性进行有代表性的扰动, 获得未来预报的概率分布. 对初始条件主要通过初始扰动方法来考虑, 如目前广泛应用于业务的繁殖法^[7]、奇异向量法^[8]、观测扰动法^[9]等, 此外, 还有很多扰动方法被提出, 如最优初值形成的四维变分同化方法^[10]、条件非线性最优扰动法^[11,12]、基于集合转换技术的初始扰动法^[13]等. 对模式误差的不确定性, 则多通过扰动边界条件、物理参数化过程中对预报对象敏感的参数或者采用不同参数化方案^[14,15], 以及统计后处理的多模式集合和超级集合方法^[16]等. 大量研究和业务应用表明集合预报

能有效提高预报技巧.

目前, 延伸期集合预报主要采用与短期天气预报类似的集合方案, 但延伸期尺度的可预报性特征与天气尺度有很大的不同, 延伸期的预报时效更长, 超过了逐日天气可预报时效的上限 (约 2 周), 逐日天气预报的主要对象 (如 Rossby 波) 在延伸期时间尺度已经变得不可预报, 同时, 其预报时效又太短, 以至于气候系统中一些缓慢变化的外界强迫 (如海温、海冰、土壤湿度、积雪等) 的作用还未完全显现. 大量研究表明, 延伸期仍客观存在可预报的分量, 可预报分量和随机分量的特性不同, 其产生不确定性的来源也不相同, 因此其集合预报方式应该更具有针对性. 最近, 针对大气系统的混沌特性, 已有研究提出了分离延伸期可预报分量和不可预报的随机分量的方法^[17,18]. 具有不同可预报性的分量, 其不确定性的来源也不同, 应采用有针对性的集合预报方案.

在可预报性的基础上, 本文针对具有不同特性的可预报分量和随机分量采用不同的集合预报方案, 发展了一种基于延伸期可预报性的集合预报新

* 国家自然科学基金 (批准号: 41105070, 40930952, 41005041)、国家科技支撑计划 (批准号: 2009BAC51B04) 和公益性行业科研专项 (批准号: GYHY201106016) 共同资助的课题.

† E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

方法. 该方法以延伸期预报模式为平台, 对可确定性预报的可预报分量, 即动力学方程对初始误差不敏感的部分, 可忽略初始误差的影响, 其预报的不确定性主要来自于模式的缺陷, 因此从考虑模式不确定性的角度, 用多个模式误差订正方案在预报过程中订正模式误差, 以此来减小模式对可预报分量的预报误差; 对于不能确定性预报的随机分量, 它对初始条件小的差异非常敏感, 其预报的不确定性不但依赖于初值的不确定, 还与模式误差有关, 因此不再从初值集合和模式集合的角度进行集合预报, 而是从历史资料中从气候概率的角度来给出其概率分布, 避免模式误差的影响. 综合可预报分量和随机分量的集合方式构成基于延伸期可预报性的集合预报方法. 这种方法将可预报性、数值模式、历史资料和集合预报方法有机的联系起来, 具有坚实的理论基础和广阔的应用前景, 并具有良好的可移植性, 可随着数值模式的发展而发展.

2 基于延伸期可预报性的集合预报方法

作为初边值问题的数值天气预报可表示为

$$\varphi_T = M(\varphi_0), \quad (1)$$

式中 M 为非线性的数值模式, φ_0 为初值, φ_T 为数值模式在 T 时刻的预报. 由于准确的初值 φ_0 无法获得, 数值模式 M 又不可避免的存在误差, 使得预报存在不确定性. 理想的集合预报, 希望通过枚举出所有可能的初始状态, 并用完全准确的数值模式来获得 T 时刻后的真实大气的概率分布. 但在实际预报中, 面临两方面的难题, 一是受到计算量的限制, 完全枚举出所有可能的初始状态是不现实的, 因此, 如何生成最具代表性的一系列初始状态成为了研究的重点, 各种扰动生成方法被不断提出和发展; 二是完全准确的模式无法获得, 即使找到一组能代表初始状态概率分布的初始条件, 由于模式误差的存在, 预报出的概率分布也并非实际大气的概率分布, 同时, 大气系统的混沌性质使得该问题更为复杂^[19].

延伸期时间尺度客观存在着可预报分量, 已有研究工作提出了分离延伸期可预报分量和不可预报的随机分量的原理^[15,16], 并给出了在复杂模式中的计算方案, 即采用经验正交函数 (EOF) 方法从历史资料中压缩自由度, 找出支撑吸引子的独立变

量, 结合可预报性的研究方法和理论, 分析压缩自由度后的各个分量随时间的误差增长情况, 将误差增长小于某个阈值的分量定义为可预报分量, 记为 ψ , 余下的为随机分量记为 ϑ , 其中 $\varphi = \psi + \vartheta$. 这样确定出的可预报分量既考虑了实际大气的可预报性, 又结合了数值模式的可预报性, 同时, 分离出的可预报分量会随着预报时效的变化而变化.

可预报分量在预报时效内误差增长相对较慢, 即对初始误差并不敏感, 已有研究已建立可预报分量的数值模式^[17,18]. 可预报分量的预报不确定性主要来自于模式的缺陷, 那么可通过多个误差订正来考虑模式的不确定性. 可预报分量的数值模式一般可表示为: $\psi_T = M_s(\psi_0)$, 其中 $\psi_0 \in R^n$ 为初始时刻 t_0 的近似真实的观测场, $\psi_T \in R^n$ 为 T 时刻可预报分量的预报场, M_s 为针对可预报分量的非线性数值模式. 数值模式 M_s 只是实际大气中可预报分量真实演变过程 (记为 H_s) 的近似, 模式误差 (记为 E) 来源于 M_s 与 H_s 之间的差异, 可表示为

$$E(\psi_0) = H_s(\psi_0) - M_s(\psi_0). \quad (2)$$

相似 - 动力方法能有效订正随流型而变的模式误差^[20-22], 它的基本原理是: 通过将当前的初始场 ψ_0 看成是历史相似上的一个小扰动, $\psi_0 = \tilde{\psi}_i + \psi'_i$, 同时 $\|\psi'_i\| \ll \|\psi_0\|$. 将历史相似参考态 $\tilde{\psi}_i$ 代入 (2) 式, 有

$$E(\tilde{\psi}_i) = H_s(\tilde{\psi}_i) - M_s(\tilde{\psi}_i), \quad (3)$$

其中, $H_s(\tilde{\psi}_i)$ 为第 i 个相似参考态的实际演变, 即观测实况, 这部分是已知的, $M_s(\tilde{\psi}_i)$ 为模式预报, 它可通过数值模式计算获得, 也是已知的. 因此, 可计算出相似参考态的预报误差 $E(\tilde{\psi}_i)$. 由于 ψ_0 与 $\tilde{\psi}_i$ 非常接近, 可以将 $E(\tilde{\psi}_i)$ 在 ψ_0 附近进行一阶 Taylor 展开, 并且当 $\|\psi'_i\|$ 足够小时有

$$E(\tilde{\psi}_i) = E(\psi_0 - \psi'_i) \approx E(\psi_0) - \psi'_i \frac{\partial E}{\partial \psi} \Big|_{\psi=\psi_0}, \quad (4)$$

可从大量的历史资料中寻找找到 k 个非常接近的历史相似, 每个历史相似对应的预报误差 $E(\tilde{\psi}_i)$ 都可以看作是 $E(\psi_0)$ 的可能估计, 因此, 可利用多个历史相似提供的误差信息对模式误差进行参数化估计, 从而减小模式误差, 表征模式的不确定性. 针对模式不确定性的集合预报第 i 个成员的预报可表示为

$$\psi_{Ti} = M_s(\psi_0) + E(\tilde{\psi}_i), \quad (5)$$

其中, $M_s(\psi_0)$ 是可预报分量数值模式在 T 时刻的预报, $E(\tilde{\psi}_i)$ 则是由多个历史相似分别产生不同的模式误差估计, 在预报过程中进行订正, 并由此产生多个不同的预报作为集合成员. 这样产生的集合能够充分反映模式的不确定性, 因为每个成员实际上都来源于对模式误差的估计. 该方法中误差订正间隔为 6 h, 即在初始时刻选取相似参考态, 以相似参考态 6 h 小时的预报误差来订正模式预报 6 h 的误差, 用订正后的预报值重新选取相似, 进而可估计下一个 6 h 的预报误差 (但由于计算量的原因, 考虑到大气状态特征存在一段时间的持续, 因此订正后的 6 h 预报值的相似参考态直接取初值相似参考态 6 h 后的实况值, 并以此为初值, 估计下一个 6 h 的预报误差, 每隔 5 天利用订正后的预报值重新选取相似), 依此循环, 直至预报结束, 实现模式预报过程中的误差订正.

除可预报分量外, 如何利用集合预报来表征随机分量的概率分布也非常重要. 从可预报性的定义而言, 不可预报的随机分量意味着预报提供的概率分布不比气候的概率分布提供更多信息, 因此多初值的集合预报意义不大. 同时, 大气系统中表征时间尺度更长的慢变分量通常可看成是快变分量的外强迫, 这些慢变分量无疑支配和影响快变分量, 尤其是快变分量的统计特征. 那么相似的可预报分量使得随机分量的概率分布呈现出某种更有可能的概率分布, 这无疑又可提供比气候概率分布更多的信息, 犹如相似的海温对大气概率分布的影响. 随机分量的集合可以表示为

$$\vartheta_{Ti} = \tilde{\vartheta}_{Ti}, \quad (6)$$

式中, $\tilde{\vartheta}_{Ti}$ 为第 i 个历史相似在 T 时刻的随机分量.

综和可预报分量和随机分量的集合预报方案, 建立基于延伸期可预报性的集合预报方法, 其第 i 个成员的预报可表示为

$$\varphi_{Ti} = \psi_{Ti} + \vartheta_{Ti} = M_s(\psi_0) + E(\tilde{\psi}_i) + \tilde{\vartheta}_{Ti}, \quad (7)$$

式中, $M_s(\psi_0)$ 是可预报分量数值模式在 T 时刻的预报, $E(\tilde{\psi}_i)$ 则是由多个历史相似分别产生不同的模式误差估计, 由此得到多个不同的预报作为集合成员; $\tilde{\vartheta}_{Ti}$ 为第 i 个历史相似在 T 时刻的随机分量, 综合可预报分量和随机分量的集合预报方案形成基于延伸期可预报性的集合预报新方法. 该方法和目前的集合预报有显著不同, 首先认为可预报分量和随机分量是两种不同特性的分量, 不应笼统地采

用同一种集合预报方式, 应区别对待; 其次, 根据可预报分量的性质, 避开了初始误差的影响, 使得预报分量只需要考虑模式的不确定性, 并且通过多个历史相似来分别估计模式的预报误差能较好的反映单模式误差的分布; 再则, 将相对缓变的可预报分量看成是随机分量的强迫, 利用相似的强迫来给出随机分量可能的概率分布, 而不再是从没有信息的初值集合中提取随机分量的概率分布特征.

3 集合预报的数值试验

结合基于延伸期可预报性的集合预报方法, 对 6—15 天中期延伸期预报进行数值试验, 其试验方案如下:

1) 数值模式和所用的初始场、海温资料等与国家气候中心建立的月动力延伸集合预报系统 (EPS) 一致.

2) 选取相似的资料用 EPS 的初始场谱系数资料, 用模式初始场的谱系数资料, 将各层变量在可预报分量上的投影作为选取相似的变量, 相似判别利用欧式距离计算, 以各分量的解释方差作为权重. 为了保证历史相似与当前初值处于相近的气候背景, 从历史资料中每年选出一个最好的相似, 再从中取出最好的 4 个相似作为参考态.

3) 集合成员取为 40 个, 即用最好的 40 个历史相似来分别估计可预报分量的模式误差, 并将历史相似对应的随机分量与可预报分量相加形成预报, 可预报分量误差订正和随机分量的叠加时间间隔均取为 6 h, 需要注意的是, 不同预报时效的可预报分量和随机分量是变化的.

4) 集合预报结果直接由 40 个集合成员的算术平均求得.

国家气候中心采用 T63L16 模式建立了月动力延伸集合预报系统 (EPS), 其主要是利用滞后平均和奇异向量法产生初始扰动, 为了更有可比性, 并检验其业务应用前景, 本文提出的集合预报方法的性能均和国家气候中心的月动力延伸集合预报系统进行比较. 检验方式主要对集合平均采用确定性检验, 暂未给出集合预报的概率检验. 为了减小计算量且不失一般性, 这里选用 2004—2008 年 1 月 16 日 12 时为初始场的 5 个独立个例进行比较, 主要比较 500 hPa 高度场, 其他层次的高度场与此类似, 不再赘述. 检验针

对全球 (90°N — 90°S , 0°E — 360°E), 北半球热带外地区 (20°N — 90°N , 0°E — 360°E), 南半球热带外地区 (20°S — 90°S , 0°E — 360°E) 和热带地区 (20°N — 20°S , 0°E — 360°E) 4 个区域进行.

图 1 给出了 5 例平均的各区域 500 hPa 高度场逐日预报与实况的距平相关系数 (ACC), 从图中可以看出, 既考虑模式不确定性, 又考虑随机分量概率分布的基于延伸期可预报性的集合预报方法 (PBEP) 在各区域的逐日 ACC 都明显优于 EPS. 以 T63 模式为基础的 EPS, 由于模式的缺陷, 预报技巧较低, 第 6 天的 ACC 已低于 0.4, 即便如此, PBEP 仍能使得第 6 天的 ACC 达到 0.6 的业务可用标准, 显示出良好的性能, 这为该方法在更好的数

值模式上提高预报技巧、延长预报时效提供了信心. EPS 和 PBEP 对北半球热带外地区的预报技巧优于南半球热带外和热带地区, 这和模式的性能有关. 在南半球热带外和热带地区, PBEP 的 ACC 提高更为显著. 从全球的 ACC 评分可以看出, PBEP 预报技巧降低是阶梯性的, 6—8 天下降速率较快, 之后直到 13 天的下降速率明显平缓, 13 天以后技巧下降的速率又明显加快; 北半球热带外地区的下降趋势与之类似; 南半球热带外地区大体特征也有类似变化, 但中间存在波动; 热带地区的下降趋势则呈现了明显的不同, 6—8 天预报技巧快速下降, 之后则变得比较稳定, 仅有小幅波动, 这可能和可预报性有联系, 需要进一步分析研究.

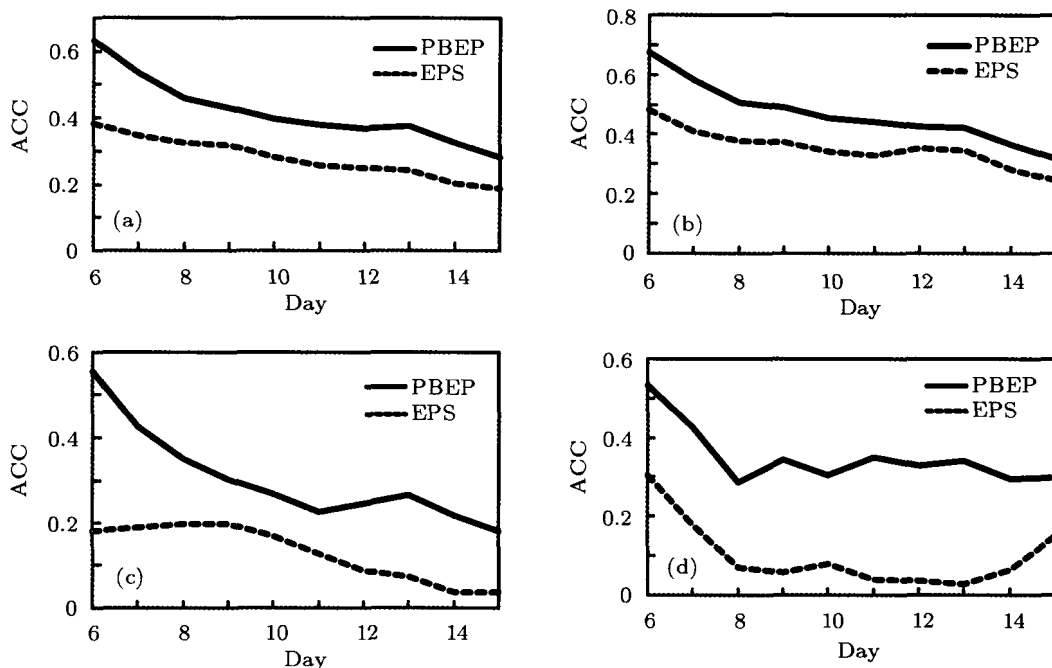


图 1 5 例平均的各区域 500 hPa 高度场逐日预报与实况的 ACC (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带

图 2 给出了 5 例平均的各区域 500 hPa 高度场逐日预报与实况的均方根误差 (RMSE), 可以看出, PBEP 的 RMSE 评分明显小于 EPS, 而且在各个区域都有较明显的改进. 和 ACC 评分类似, 全球和北半球热带外地区 PBEP 误差增长也有 3 个阶段, 6—8 天 RMSE 增长较快, 8—13 天的则增长比较平缓, 13 天又存在一定程度的上升. EPS 在 6 天以后误差增长是缓慢的, 已接近饱和, PBEP 饱和后的预报误差要显著低于 EPS. 综合来看, 不论是 ACC 还是 RMSE, PBEP 都显示出明显的优越性, 而且预报技巧的改进在全球各区域都存在.

为了进一步比较各个时段的预报性能, 图 3 和图 4 给出了各区域 500 hPa 高度场候平均预报与实况的 ACC 和 RMSE 评分情况, 与逐日环流预报类似, PBEP 在各个地区和时段预报技巧都显著高于 EPS, 对全球而言, 第 2 候和第 3 候平均的 ACC 评分分别提高了 0.15 和 0.13, RMSE 减小了 13.52 gpm 和 12.28 gpm; 6—15 天平均的 ACC 评分则提高了 0.12, RMSE 减小了 12.36 gpm. 分区域来看, PBEP 对各个区域的预报技巧均有提高, 其中 6—15 天平均的 ACC 在热带地区提高最多, 达到了 0.28, 南半球热带外地区次之, 为 0.17, 北半球热带外地

区则提高了 0.07; RMSE 则分别是北半球热带外地区减小了 18.50 gpm, 南半球热带外地区和热带

地区都减小了 9.46 gpm. 不论是 ACC 还是 RMSE, 第 2 候的技巧提高都明显高于第 3 候.

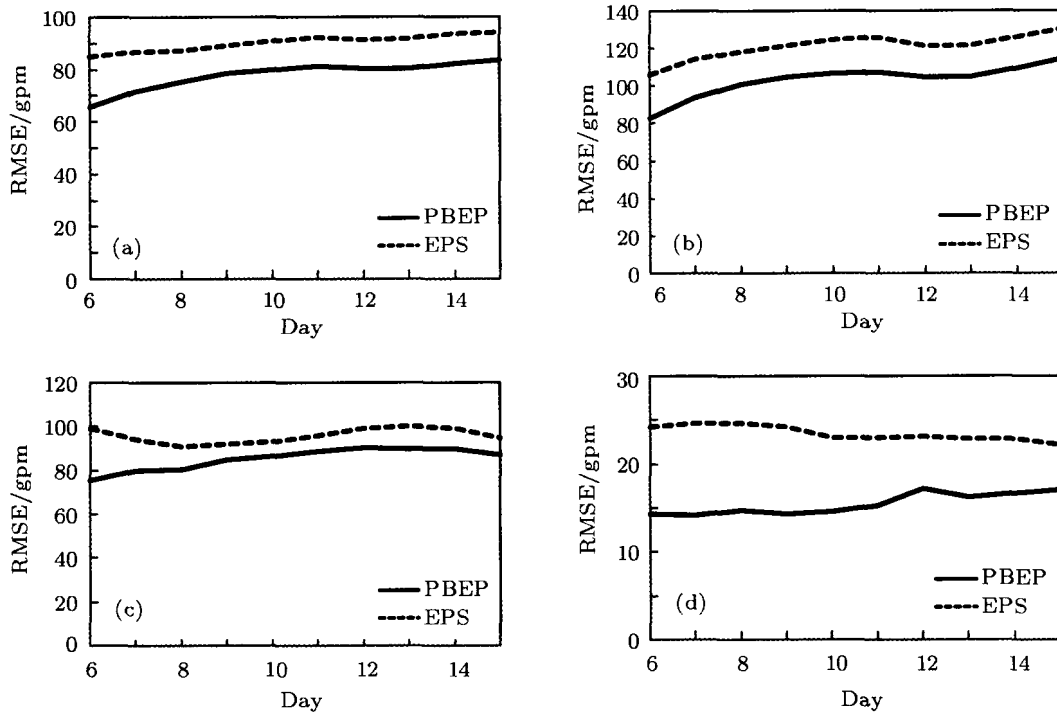


图 2 5 例平均的各区域 500 hPa 高度场逐日预报与实际的 RMSE (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带

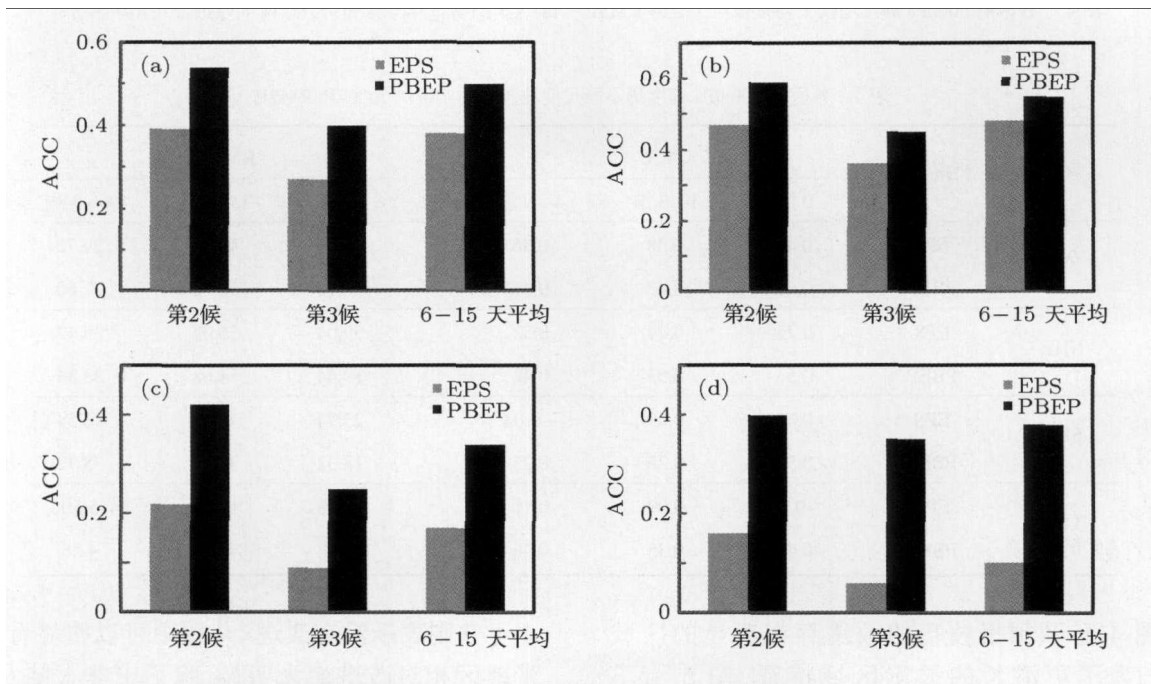


图 3 各区域 500 hPa 高度场候平均预报与实际的 ACC (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带

数值模式对各个尺度的预报技巧存在差异, 为了清楚的展示, 表 1 给出了各区域 500 hPa 高度场不同尺度波预报与实际的 ACC 和 RMSE,

可以看到, 在各个尺度, PBEP 相对于 EPS 都有明显改进. PBEP 相对于 EPS 在 0 波, 1—3 波和 4—9 波 ACC 评分分别提高了 0.20, 0.09 和 0.12, RMSE

分别减小了 17.20 gpm, 3.88 gpm 和 2.08 gpm, 都显示出改进效果最大的是在 0 波, 超长波和天气尺度的波也有改进. 从区域特征上看, 0 波的 ACC 评分提高最明显的是热带, 达到了 0.62, 其次是北半球热带外, 为 0.28, 南半球热带外地区提高最少, 为 0.04, 总的来看, 热带地区在

各个尺度 ACC 评分的提高都是最明显的; 0 波的 RMSE 评分改进最为显著的是北半球热带外, 达到了 29.60 gpm, 其次是热带地区, 为 11.24 gpm, 南半球热带外地区为 5.42 gpm, 超长波和天气尺度的波在各个区域也都有改进, 但改进程度不如 0 波明显.

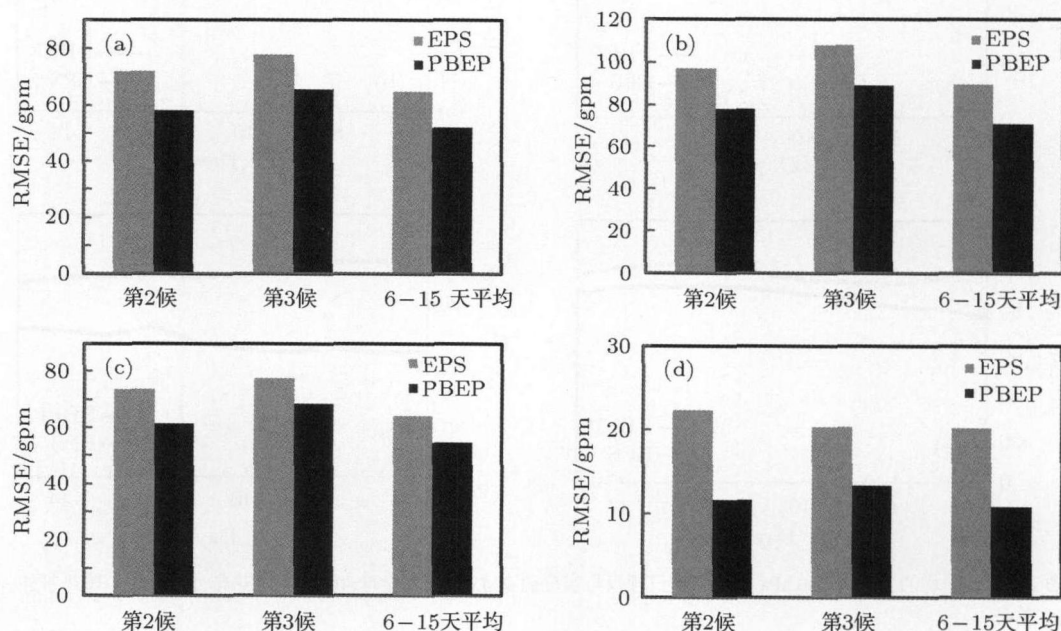


图 4 各区域 500hPa 高度场候平均预报与实况的 RMSE (a) 全球; (b) 北半球热带外; (c) 南半球热带外; (d) 热带

表 1 各区域 500 hPa 高度场不同尺度波预报与实况的 ACC 和 RMSE

区域	预报方案	ACC			RMSE/gpm		
		0 波	1—3 波	4—9 波	0 波	1—3 波	4—9 波
全球	EPS	0.42	0.38	0.36	37.94	42.60	29.72
	PBEP	0.62	0.47	0.47	20.74	38.72	27.60
NHE	EPS	0.25	0.49	0.52	59.04	56.02	35.42
	PBEP	0.53	0.53	0.48	29.44	54.08	33.34
SHE	EPS	0.47	0.09	-0.04	23.74	46.06	36.54
	PBEP	0.51	0.28	0.23	18.32	38.26	33.72
TRO	EPS	-0.15	0.09	0.16	15.48	10.84	5.50
	PBEP	0.47	0.33	0.46	4.24	8.20	4.58

图 4 显示预报技巧的改进存在明显的区域特征, 为了更清楚的显示区域特征, 图 5 给出了 PBEP 相对于 EPS 的 MSSS 评分, MSSS 评分表现了 PBEP 相对于 EPS 的误差减小程度, 它的取值范围为 $[-\infty, 1]$, MSSS 值越大, 表示 PBEP 相对于 EPS 预测的均方根误差越小的程度越大, MSSS

小于 0 则表示没有改进. 从图中可以明显看出, 热带地区相对改进最为明显, 除了中非大陆及附近海域和墨西哥附近较小的地区没有改进外, 其他大部分地区的改进的非常明显, 很多地方的值都大于 0.8. 北半球热带外大部分地区改进也很明显, 但 60°N 带上有几个低值区, 分别位于冰岛附近、

蒙古地区、北太平洋中西部和北美大陆的大部分地区,这几个地区与北半球冬季的大气活动中心有较好的联系^[23],如果有针对性的提高这些地区的预报技巧有待进一步研究.南半球热带外地区的相对改进程度要小一些,且存在明显的区域分布.总体来看,PBEP在全球大部分地区的预报误差都明显小于EPS.

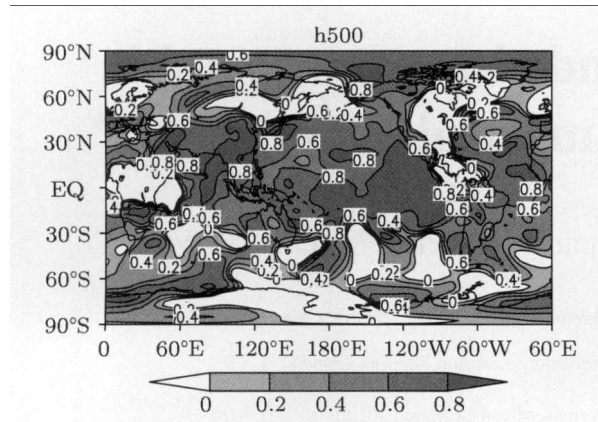


图5 PBEP相对于EPS在500 hPa高度场的MSSS评分

综合而言,本文提出的PBEP在6—15天预报时段内,无论是在距平相关系数上还是在均方根误差上都明显优于EPS.预报技巧提高的区域特征也很明显,热带改进最大,ACC评分在南半球热带外地区改进程度要大于北半球热带外地区,RMSE评分则是北半球热带外地区更为明显.从不同尺度来看,改进最为明显的主要在0波.分析和试验结果表明,PBEP不但具有理论优势,同时还体现在实际预报效果上,为下一步工作奠定了良好的基础和信心.此外,这里只给出了确定性的检验,概率的检验

将在下一步工作中进行,同时,如何从集合成员的预报中提取更多有效的信息也需进一步研究.

4 结论

大气系统的混沌性质使得用集合预报给出未来概率估计成为必然,但对具有不同特性的可预报分量和随机分量,应采用不同的集合方式.基于此,本文研究并提出了基于延伸期可预报性的集合预报方法.该方法对可确定性预报的可预报分量,从考虑模式不确定性的角度来减小其预报误差带来的影响;并认为随机分量预报的信息源并非来源于初值,由于模式误差的存在,由初值集合给出的随机分量的集合预报值得商榷,进而从最有可能气候概率的角度来给出随机分量的概率分布,避免了模式误差对随机分量概率分布的影响.

利用基于延伸期可预报性的集合预报方法,进行了6—15天中期延伸期预报试验,试验结果表明,和目前国家气候中心的业务集合预报系统相比,该方法的确性检验效果在减小预报误差上有明显的优势,显示出良好的性能和发展应用前景.该方法不需对参数化方案进行扰动,而是通过利用不同历史相似提供的误差信息来达到减小模式由于参数化方案、计算方法等与模式相关的不确定性的目的;同时,不再需要产生最优初值的扰动,只需由相似的外强迫信息估计随机分量最大可能的概率分布.这种方法将可预报性、数值模式、历史资料和集合预报方法有机的联系起来,具有坚实的理论基础和广阔的应用前景,并具有良好的可移植性,可随着数值模式的发展而发展.

- [1] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [2] Chou J F 1989 *Adv. Atmos. Sci.* **6** 335
- [3] Chen B H, Li J P, Ding R Q 2006 *Science in China (Series D)* **49** 1111
- [4] Buizza R, Houtekamer, P L, Toth Z, Pellerin G, Wei M, Zhu Y 2005 *Mon. Wea. Rev.* **133** 1076
- [5] Zhu Y 2005 *Adv. Atmos. Sci.* **22** 781
- [6] Feng G L, Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese) [封国林, 董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [7] Toth Z, Kalnay E 1997 *Mon. Wea. Rev.* **125** 3297
- [8] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, Petroliagis T 1996 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **122** 73
- [9] Houtekamer, P L, Lefaiivre L, Derome J, Ritchie H, Mitchell H L 1996 *Mon. Wea. Rev.* **124** 1225
- [10] Gong J D, Li W J, Chou J F 1999 *Chinese Science Bulletin* **44** 1113 (in Chinese) [龚建东, 李维京, 丑纪范 1999 科学通报 **44** 1113]
- [11] Mu M, Jiang Z N 2007 *Chinese Science Bulletin* **52** 1457 (in Chinese) [穆穆, 姜智娜 2007 科学通报 **52** 1457]
- [12] Duan W S, Mu M 2009 *Science in China (Series D)* **52** 884
- [13] Wei M, Toth Z, Wobus R, Zhu Y, Bishop C H, Wang X 2006 *Tellus* **58** 28
- [14] Buizza R, Miller M, Palmer T N 1999 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **125** 2887
- [15] Mu M, Duan W S, Wang Q, Zhang R 2010 *Nonlinear Processes in Geophysics* **17** 211
- [16] Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Zhang Z, Larow T, Bachiochi D, Williford E, Gadgil S, Surendran S 2000 *J. Climate* **13** 4196

- [17] Zheng Z H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [郑志海 2010 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [18] Chou J F, Zheng Z H, Sun S P 2010 *Scientia Meteorologica Sinica* **30** 569 (in Chinese) [丑纪范, 郑志海, 孙树鹏 2010 气象科学 **30** 569]
- [19] Wang P, Dai X G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4961 (in Chinese) [汪萍, 戴新刚 2005 物理学报 **54** 4961]
- [20] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [21] Gao L, Ren H L, Li J P, Chou J F 2006 *Chin. Phys.* **15** 882
- [22] Zheng Z H, Feng G L, Chou J F, Ren H L 2010 *Journal of Applied Meteorological Science* **21** 139 (in Chinese) [郑志海, 封国林, 丑纪范, 任宏利 2010 应用气象学报 **21** 139]
- [23] Shi N, Chen H, Chen Y, 2001 *Journal of Tropical Meteorology* **17** 215 (in Chinese) [施能, 陈辉, 湛芸 2001 热带气象学报 **17** 215]

Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments*

Zheng Zhi-Hai^{1)†} Feng Guo-Lin¹⁾ Huang Jian-Ping²⁾ Chou Ji-Fan²⁾

1) (National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

2) (College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Received 12 January 2012; revised manuscript received 14 March 2012)

Abstract

Ensemble prediction is an effective approach to accounting for uncertainties of initial conditions and model error. By combining the predictability of extended-range, both predictable components and unpredictable random components with different characteristics are treated with different ensemble prediction schemes and strategies. A new predictability-based extended-range ensemble prediction method (PBEP) is proposed. In this method, for predictable component, the uncertainty of model is taken into account through the use of multiple error correction scheme; while the random component probability distribution is obtained from the climate probability distribution of historical data, for the sake of avoiding the influence of model error. Prediction results show that the ensemble prediction method can improve the forecast skill in all regions of the world, and the extents of improvement are different for waves with different spatial scales compared with the operational dynamical extended-range ensemble prediction system of NCC/CMA, exhibiting its potential application perspective to operational extended-range prediction.

Keywords: extended-range forecast, predictability, ensemble prediction, predictable components

PACS: 92.60.Wc, 92.60.Bh

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41105070, 40930952, 41005041), the State Key Program of Science and Technology of China (Grant No. 2009BAC51B04), and the Meteorological Special Project of China (Grant No. GYHY201106016).

† E-mail: zhengzh@cma.gov.cn