

基于增长模繁殖法的集合预报初始扰动饱和和分析

于永锋¹ 张立凤^{1, 2}

¹ 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 基于增长模繁殖(BGM)法构造集合预报初始扰动时, 繁殖循环中扰动的发展和饱和情况是其关键技术之一。已有的一些研究基本上是以扰动增长率接近某一数值作为繁殖结束的标志。作者认为, 初始扰动的饱和不仅仅是扰动增长率的饱和, 即繁殖模大小方面的饱和, 扰动形态(即误差分布)上的饱和也应当是一个必须考虑的因子。利用 T63L9 全球谱模式分析了繁殖循环中增长模(扰动)的发展和饱和情况, 通过分析扰动大小及形态两方面随繁殖时间的演变, 得到以下主要结论: 扰动增长模在繁殖 3~4 天后可呈现明显的饱和特征; 不同变量扰动增长模的饱和时间有所差别, 同一变量在不同等压面上饱和时间亦不同步; 不同的初始模大小也会对扰动饱和过程产生影响。

关键词 增长模繁殖 初始扰动 饱和 集合预报

文章编号 1006-9895(2005)06-0955-10 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

A Study of Initial Perturbation Saturation in Ensemble Prediction Based on the “Breeding of Growing Modes” Method

YU Yong-Feng¹ and ZHANG Li-Feng^{1, 2}

¹ *Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

² *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The National Centers for Environmental Prediction (NCEP) has used the “breeding of growing modes” (BGM) method to create initial perturbations for ensemble forecast since 1992. The breeding method simulates how fast-growing errors are “bred” in the analysis cycle. When a breeding cycle starts, an arbitrary initial perturbation field is added upon the control analysis. After a period of breeding, the saturated status of perturbation, in a sense, is regarded as the estimate of the fast-growing modes in the realistic analysis error.

A global spectral model T63L9 is used to investigate the development and saturation of the growing modes (perturbation) in the breeding cycle. This paper not only analyses the saturation of growth rate of perturbation, but also present a notion about the saturation of form of perturbation field (error distribution). In addition, this paper gives a method to measure the saturation of error distribution.

The experiments have been designed to view the evolution of bred modes in both the norm and the form of perturbation fields. The results show that the breeding of growing modes has a clear saturation character in both the norm and the form after 3-4 days of breeding. The perturbations (growing modes) of different variables can have different saturated times. Even to the same variable, different levels can also have some differences. For example, it seems harder to reach the saturation in low levels. Besides, some effects on breeding process are taken by different

收稿日期 2004-07-19, 2004-11-22 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418300, 中国科学院大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室开放课题

作者简介 于永锋, 男, 1979 年出生, 硕士, 目前主要从事集合预报研究。E-mail: yongfeng201@sina.com

size of the initial modes, and appropriate size may bring a shorter breeding length.

Key words breeding of growing modes (BGM), initial perturbation, saturation, ensemble prediction.

1 引言

经典的集合预报是进行初值集合^[1], 集合预报的理论和试验均表明: 如何产生更有意义的初始扰动场对集合预报的效果是至关重要的。20 世纪 90 年代, 基于快速增长模(fastest growing mode)的思想^[2, 3], 形成了两种最具代表性的方法: 奇异矢量法(SVs)^[4, 5]和增长模繁殖法(BGM)^[3, 6]。增长模繁殖法在效果并不逊于奇异矢量法的前提下, 以其独特的构思、明确的动力学意义以及相对低廉的计算代价受到越来越多的关注^[7]。

用 BGM 方法求取集合预报的初始扰动是模仿分析循环中的误差(即扰动)增长过程, 将一个任意的随机扰动叠加在分析场上, 通过模式的循环积分使其得到“繁殖”。经过若干个繁殖循环以后, 初始扰动中的衰减分量大部分已经消耗殆尽, 而主要留下(快速)增长分量, 扰动的增长率也会逐渐稳定在某个值, 或者说扰动达到了“饱和”。因此, 我们可将扰动在某种意义上达到的饱和态作为对实际分析误差快速增长模的一个估计, 并由此产生集合预报的初始扰动。具体繁殖步骤可参考文献^[3, 6]。

从 BGM 方法的基本思想可知: 繁殖循环中增长模的增长和饱和情况是 BGM 方法的关键技术之一。扰动何时达到饱和, 或者繁殖过程何时结束, 这与扰动饱和和测度的定义有关。NCEP 的试验结果^[3, 6]表明, 初始扰动经过 3~4 天的繁殖即可达到饱和, 他们对“饱和”的定义是扰动增长率达到 1.5 d^{-1} , 因为这一增长率接近实际短期预报误差的增长。但是, BGM 方法求取初始扰动是通过数值预报模式积分来实现的, 扰动达到饱和的时间(即繁殖长度)和饱和增长率因模式而异, Mitchell 等^[8]的试验就表明好模式中的扰动增长会更快一些。所以, 在利用 BGM 方法制作集合预报时必须针对集合预报所用模式, 对繁殖循环中扰动饱和的情况进行分析, 以便确定繁殖循环时间, 求取最佳的集合预报初始扰动。

另外, 初始扰动的饱和不仅仅是扰动增长率

的饱和, 即扰动形态上的饱和, 而且扰动形态上也必须达到饱和。换言之, 扰动的饱和应该包含大小和分布两方面的饱和, 且繁殖的目的更应该是使初始扰动达到一种“形状”, 即误差分布上的饱和。关于误差分布的饱和的研究工作还很少, 是一个很值得研究的问题。

本文针对所用模式首先对扰动增长率的饱和情况作了分析, 然后定义了形态饱和的测度, 对形态饱和的情况进行了考察, 这些研究是制作集合预报的基础工作, 也是集合预报中的关键技术。为简单起见, 在繁殖过程中对增长模不作任何调整(不妨称为“自由繁殖”)。

2 模式选取和试验设计

本文所用模式为解放军理工大学气象学院开发的全球中期数值预报谱模式 T63L9, 关于模式的详细介绍和性能参见文献^[9, 10]。试验所用资料为 NCEP 1998 年 1、4、7、10 月每月 1~10 日的逐 6 小时格点资料。

初始模的选取是实施增长模繁殖循环的第一步。所谓初始模, 是指未经繁殖的增长模, 即繁殖循环开始时迭加在分析场上的随机扰动, 注意这里的初始模有别于集合预报的初始扰动(繁殖结束时得到的快速增长模)。为反映初始场中的随机误差, 参照文献^[11]的做法, 选该模式 24 小时预报的均方根误差乘随机数, 该随机数服从 $[-1, 1]$ 区间上的均匀分布。即繁殖循环的初始模由下式确定:

$$P(z) = \omega R E(z), \quad (1)$$

其中, $P(z)$ 是繁殖循环初始模(初始扰动场), 各层等压面取不同扰动场; ω 是用来控制初始模大小的调整系数; $R = (r_i)_N$ 是 $[-1, 1]$ 上均匀分布的随机数, N 为全球格点数; $E(z)$ 为 24 小时控制预报的各层均方根误差。繁殖循环周期取为 6 小时, 从 1998 年 1、4、7、10 月的每月 1 日 00 时开始繁殖, 繁殖总长度为 40 个循环(10 天)。每步循环结束时用受扰预报结果减去同步进行的控制预报结果依次得到 40 个扰动场。

3 扰动饱和的测度

当繁殖循环开始时, 一个任意的随机扰动被叠加在分析场上, 经过一段时间的繁殖获得集合预报的初始扰动。而繁殖过程何时结束依赖于扰动的饱和情况。对于扰动的饱和含义应考虑两个方面: 一是扰动大小的饱和, 二是扰动分布形态的饱和。

3.1 扰动大小饱和的测度

关于扰动大小饱和的测度, 一般是考察扰动增长率的大小, 扰动增长率定义为

$$r_t = \frac{E(p_t)}{E(p_{t-1})}, \quad (2)$$

其中, $E(p_t)$ 代表第 t 个循环结束以后的扰动增长模大小。需要注意的是, 当要对增长模进行调整时, p_{t-1} 是调整以后的增长模。扰动的增长率表征了扰动增长的快慢, 对于最终的集合预报有贡献的扰动应是那些快速增长的扰动, 随着繁殖的进行, 初始模中的不增长或者衰减分量会被逐渐滤除, 而主要留下快速增长的扰动分量, 而增长率也会迅速增大并趋于稳定。当增长模稳定增长时, 可以认为增长模的繁殖达到了饱和, 此时的增长率为饱和增长率。饱和增长率越大, 说明繁殖得到的扰动增长模越好, 因为从理论上讲, 这样的扰动成功地抓住了初始误差中的快速增长模^[3, 6]。

3.2 扰动形态(误差分布)饱和的测度

目前, 对误差饱和的研究基本上都是用误差增长率^[3, 6, 12, 13]来衡量, 而对误差分布的饱和情况尚无定量分析。实际上扰动的分布形态代表了初始误差的分布形态, 对于初值集合预报来讲, 这是一个更重要的测度指标。考查扰动形态的饱和就是考查繁殖循环的每步循环前后两个扰动场的相似程度。判断两个物理量场相似程度的最简便的方法就是求这两个场之间的相似系数, 所以, 对于繁殖循环中扰动形态饱和的测度可计算以下两个量。

(1) 符号指数^[14](sign index):

$$s_{ij} = \frac{n^+ - n^-}{n^+ + n^-}, \quad (3)$$

其中, n^+ 为两样本对应格点距符号相同的数目, n^- 为相反的格点数目。 s_{ij} 可以描述两样本的概貌相似。

(2) Pearson 相关系数:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^N (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}}, \quad (4)$$

相关系数是可以描述两样本之间的相似程度的参量。

增长模的繁殖是一个多循环的繁殖过程, 扰动场将随着繁殖时间逐渐趋于饱和状态。当某步繁殖后得到的扰动场与该步繁殖之前的扰动场非常相似时, 说明扰动增长模的形态已趋于饱和, 繁殖循环可以终止。

4 试验结果分析

这里仅给出 7 月 1 日 00 时作为初始场的繁殖试验结果, 其他个例有类似结论, 不再给出图表。分析的变量为全球 200 hPa、500 hPa、850 hPa 位势高度扰动场、纬向风扰动场以及 500 hPa、850 hPa 相对湿度扰动场。调整系数取为常数, 计算中 $\omega=0.2$ 。

4.1 位势高度扰动场的饱和情况

图 1 给出了 3 个等压面上增长模和增长率随繁殖时间的变化, 其中, 增长模大小计算的是扰动均方根(RMS)意义上的振幅大小。从图 1a 中可以看出, 初始模在经过将近一天的繁殖之后开始稳定增长, 第 2 天以后其增长基本上是线性的, 这说明初始扰动进入繁殖循环后, 其大小是随时间增长的, 且增长率也是随时间增大的。但增长率不是无限增大, 到达某一时间后, 增长率接近于一个常数(图 1b)。仔细分析增长率在繁殖循环中的变化, 可以发现其增长率的发展大致可分为三个阶段: 从繁殖开始到第 3 天左右为第一段, 扰动增长率先有一个短暂的快速增长, 在 1~2 天时达到极大值, 之后开始下降; 第 3~6 天为第二段, 增长率趋于平稳(500 hPa 接近 1.06/6 h), 可认为已达饱和增长率; 到第 6~7 天为第三段, 增长率有一个比较明显的下降, 但第 7~10 天的增长率仍比较平稳(各层接近 1.04/6 h)。这一饱和增长率与 NCEP 相比偏小, 这一方面与模式有关, 另一方面也可能与繁殖过程中没有对扰动增长模进行调整有关。

图 2 是增长模繁殖过程中 3 个等压面上全球位

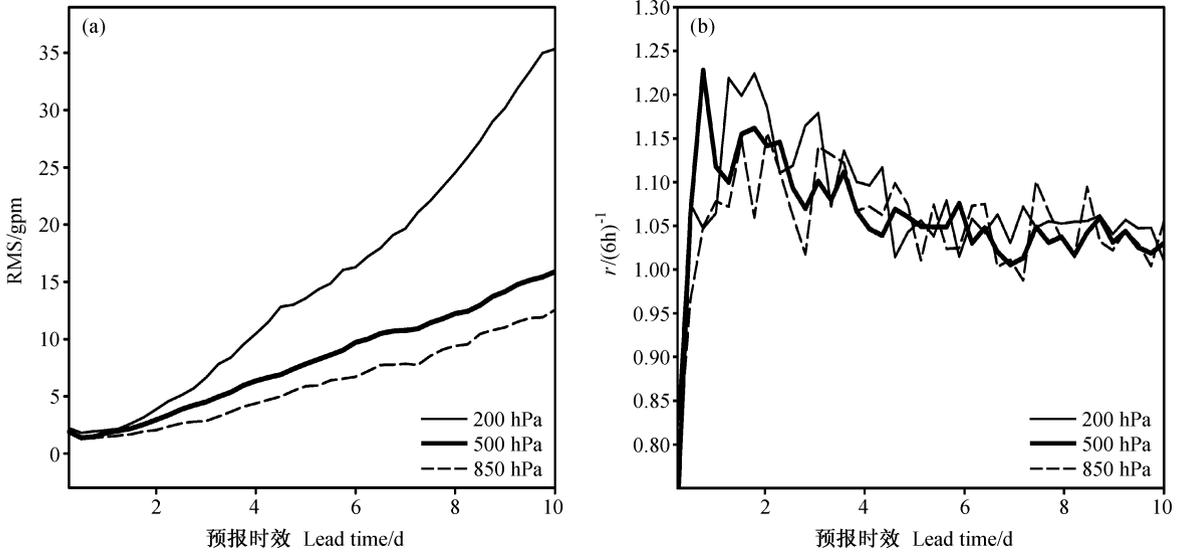


图1 位势高度扰动增长模大小(a)及增长率(b)随繁殖时间的变化

Fig. 1 The time evolution of (a) the norm of bred growing modes [the RMS (root mean square) amplitude] and (b) the growth rate (r) for the geopotential height perturbations

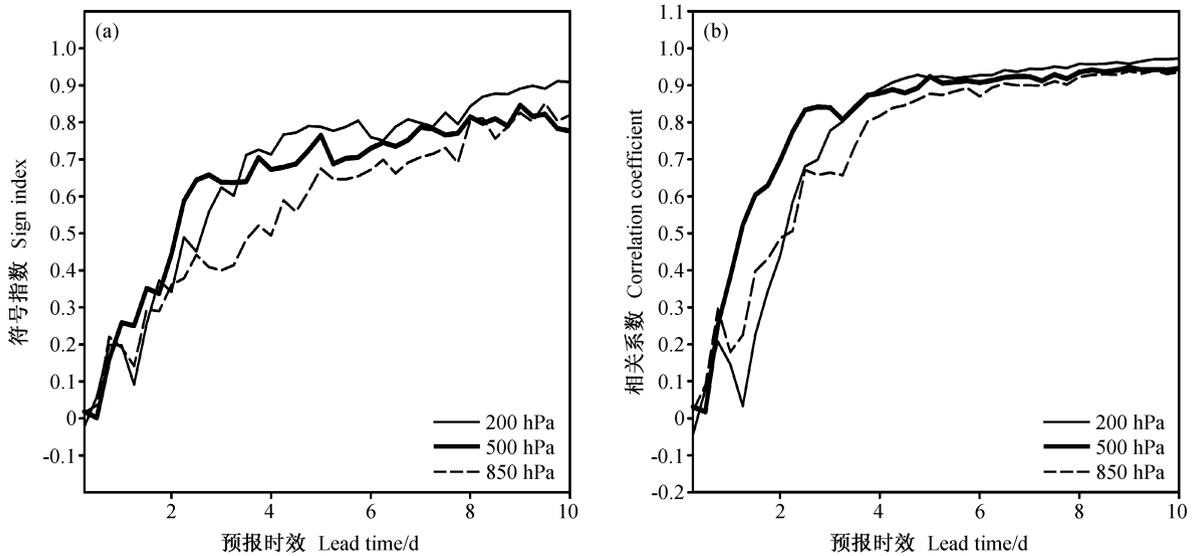


图2 繁殖过程中位势高度场扰动的形态饱和情况:(a)符号指数;(b)相关系数

Fig. 2 As in Fig. 1 except for the time evolution of the form (error distribution) of bred growing modes: (a) The sign index; (b) the correlation coefficient

势高度扰动场的形态饱和情况。如果以繁殖循环前后扰动的符号指数达到 0.6, 相关系数达到 0.8 作为扰动形态饱和的标准, 那么从图 2 可以看到这一时间在中高层为 3 天左右, 低层相对要长一些, 大概需要 4 天, 这可能是低层大气更强的斜压性所致。低层大气的强斜压不稳定不但使扰动大小增长的更快^[6], 也可能使其形状更不易趋于“稳定”。

4.2 纬向风场扰动的饱和情况

纬向风场扰动的发展与位势高度场有类似结论, 但是, 总体来看繁殖开始以后的“调整”期以及增长率达到峰值的时间要比位势高度场少半天左右, 但趋于平稳的时间仍需要 3~4 天。图 3 给出的是纬向风场扰动增长模大小及增长率随繁殖时间的变化。

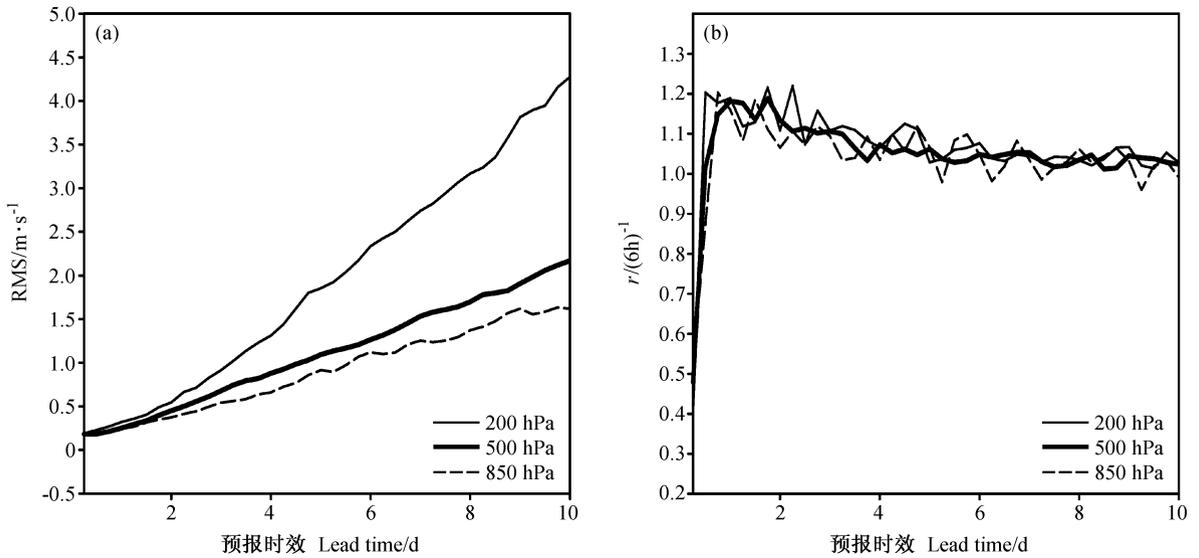


图 3 纬向风场扰动增长模大小(a)及增长率(b)随繁殖时间的变化

Fig. 3 As in Fig. 1 except for the zonal wind perturbations

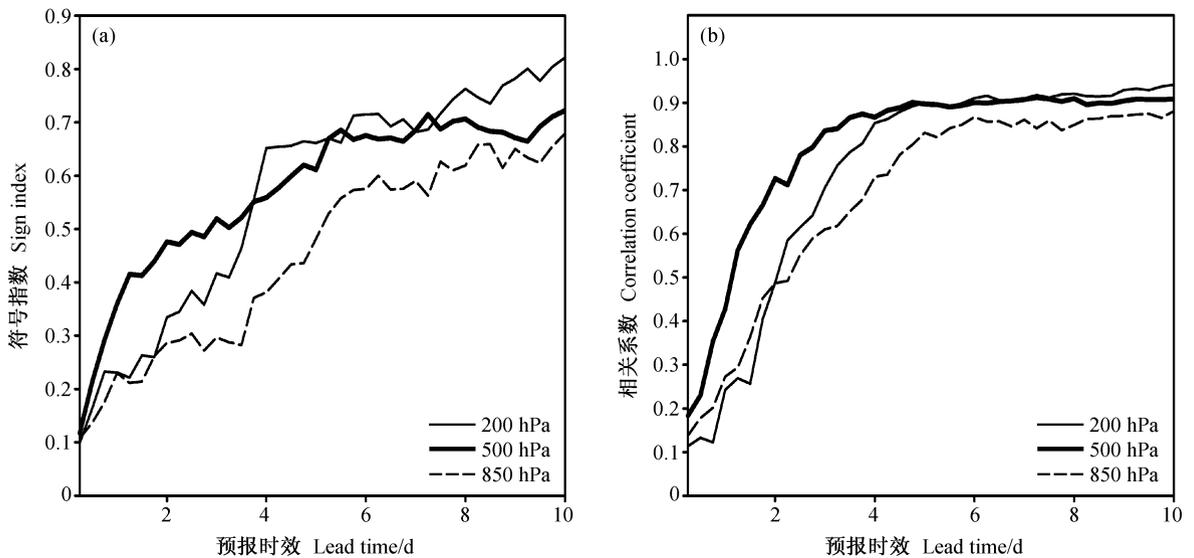


图 4 繁殖过程中纬向风场扰动的形态饱和情况：(a)符号指数；(b)相关系数

Fig. 4 As in Fig. 2 except for the zonal wind perturbations

分析描述形态饱和情况的符号指数和相关系数(图 4),可见在中高层纬向风场扰动的饱和期大概是 3~4 天,低层则需要 4 天以上,这说明风场扰动的快速增长模更不容易找出,特别是低层。

4.3 相对湿度扰动场的饱和情况

图 5 给出的是相对湿度扰动增长模大小及增长率随繁殖时间的变化,从图中可以看出,相对湿度扰动增长模的增长过程不如其他变量场表现稳定,随时间变化形式与前面三个扰动场有着明显不同,

从 10 天的繁殖结果看相对湿度扰动增长模在第 8 天以后随时间增长的幅度减小,这反映了增长模存在着增长上限(中层为 15%~20%,低层为 10%~15%)。这从增长率的变化曲线(图 5b)也能看出,虽然增长率随繁殖时间存在着波动,但 4 天以后平均增长率明显趋向于 1.0。从扰动场的形态饱和情况(图 6)看,相对湿度场的形态变化在第 3 天以后仍表现有“饱和”的特征,但值得注意的是:此时的相关系数大约为 0.6,符号指数大约为 0.5。这说

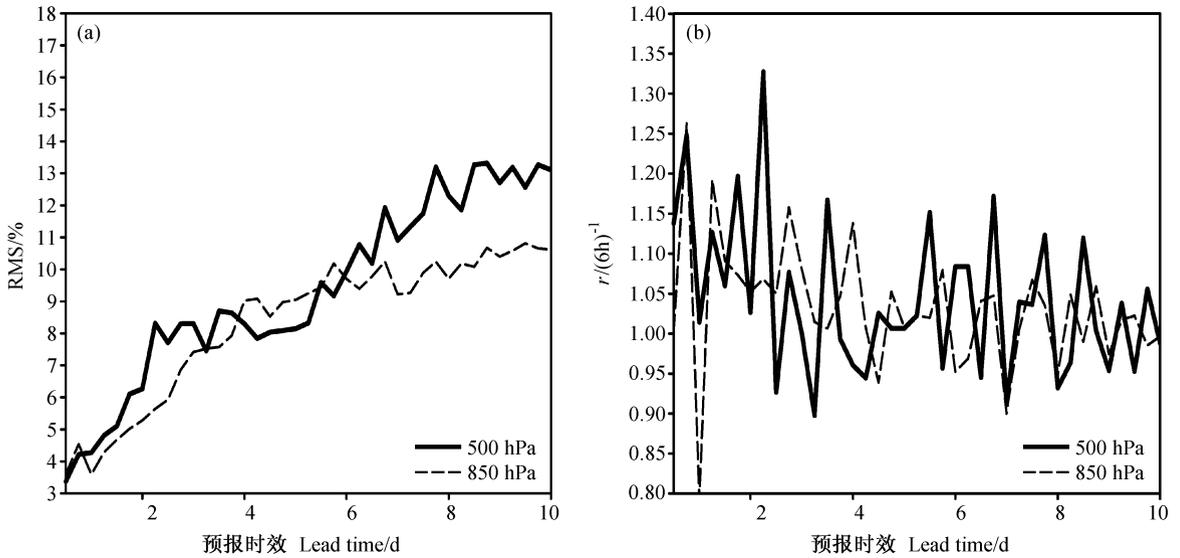


图5 相对湿度扰动增长模大小(a)及增长率(b)随繁殖时间的变化

Fig. 5 As in Fig. 1 except for the relative humidity perturbation

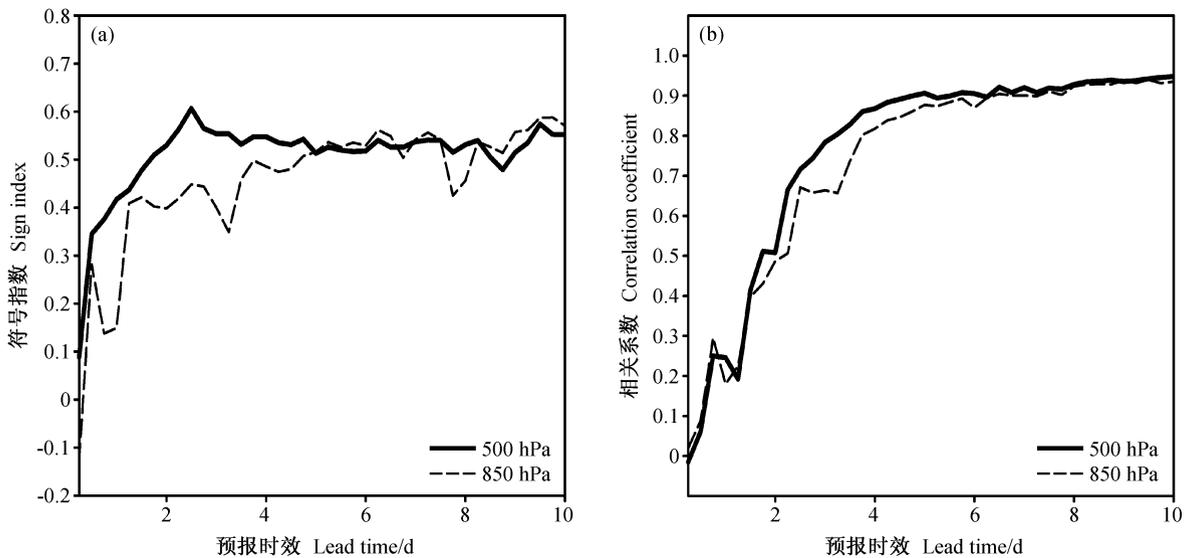


图6 繁殖过程中相对湿度场扰动的形态饱和情况:(a)符号指数;(b)相关系数

Fig. 6 As in Fig. 2 except for the relative humidity perturbations

明对相对湿度场,增长模通过繁殖也能快速增长达到“饱和”,但对于饱和的判别标准要低于其他两个物理量。也就是说,对不同的物理量其扰动饱和的判别标准可以是不同的。

5 初始模大小对饱和时间的影响

关于初始模大小对误差饱和的影响, Barker 等^[13]作了一些研究,但是偏重于资料同化领域,在集合预报的分析误差的尺度上讨论得非常粗略,本

文将在分析误差的尺度上作更细致的分析。

前面的试验都是取调整系数 $\omega=0.2$, 本文选取不同的 ω 值分别重新进行以上试验过程,并对试验结果作了比较。需要说明的是,由于 $P(z)/E(z)=\omega \cdot R$, 而 R 是 $[-1, 1]$ 上均匀分布的随机数,其均值为 0, 均差和标准差都在 0.5 左右。如果取 $\omega=0.2$, 那么相当于繁殖扰动的初始大小取为 24 小时预报均方根误差的 10% 左右。

若将一任意的小扰动 P 叠加到分析场 A 上,

那么得到的受扰分析场为

$$A_P = A + P.$$

根据小扰动理论, 应该有

$$\epsilon = P/A \ll 1,$$

否则, 扰动取得太大很可能使初始场偏离真实初始场太远, 而且还有可能影响模式计算的稳定性。参考 T63L9 模式的 24 小时预报精度, 本节的试验作如下设计: 对位势高度场和风场扰动分别取 $\omega = 0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 2.0$; 而对相对湿度场, 因其预报误差较大, 为使各扰动的 ϵ 值尽量一致, 相应的取 $\omega = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0$ 。

图 7 给出了取不同大小的初始模时, 500 hPa

位势高度场扰动大小(图 7a)及形态(图 7b)的繁殖曲线[为了清晰, 图中只给出了初始模为 24 小时预报误差 10%($\omega = 0.2$)、50%($\omega = 1.0$)和 100%($\omega = 2.0$)所对应的曲线, 以下同]。从图 7a 可以看出, 初始模越大, 繁殖开始后的调整期越长, 增长率增长到 1 的时间越长, 且在繁殖的初始阶段伴有较大幅度的振荡。但约 5 天以后初始模大小的影响逐渐消失, 增长率趋于一致, 且这些特点在各个等压面上都得到一致的体现(图略)。因此, 若仅从扰动增长模大小的发展情况考虑, 扰动初始模不宜取太大, 否则会延长繁殖时间, 初始模最好不超过模式 24 小时预报误差的 50%。从 850 hPa 风场扰动的

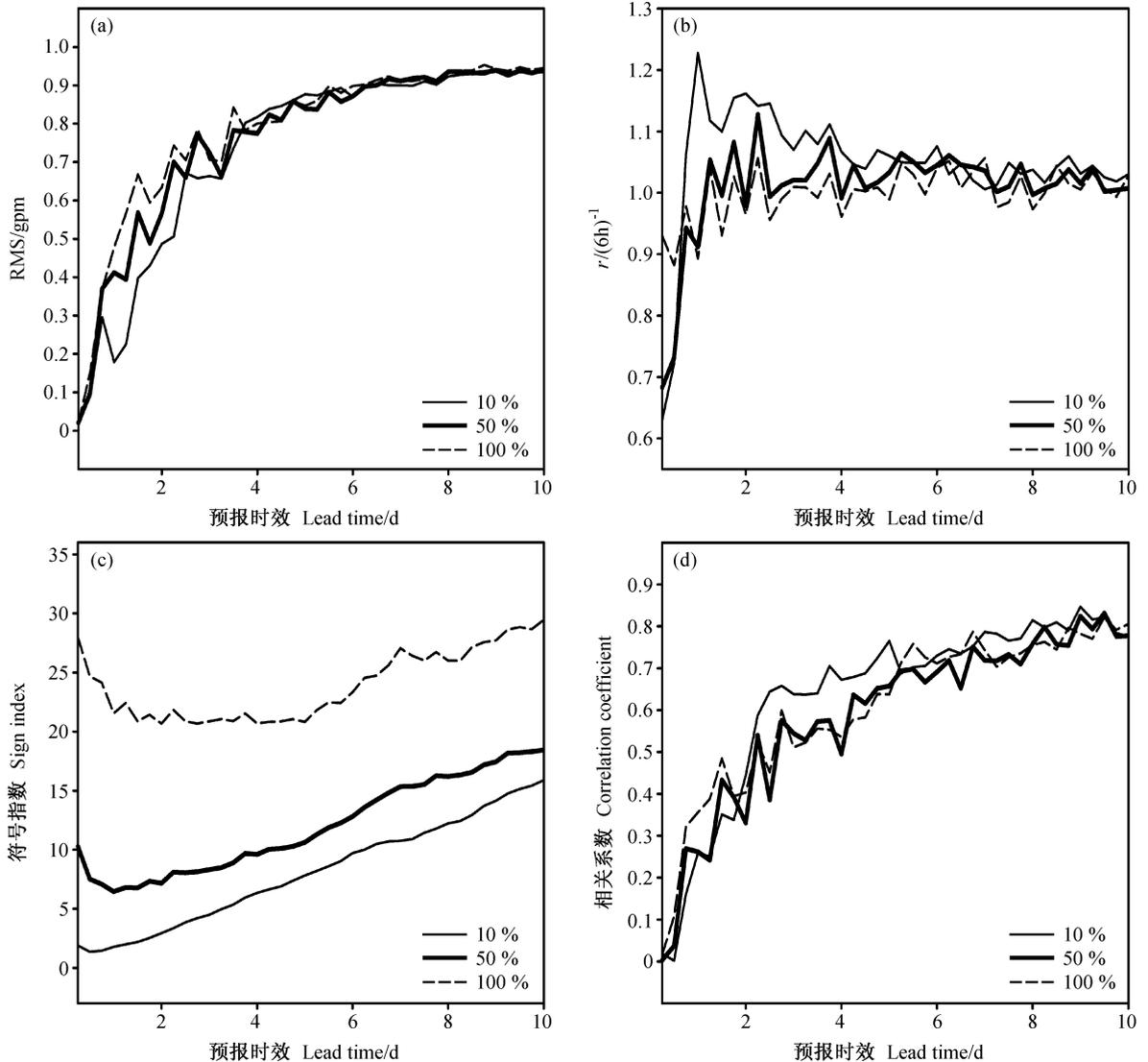


图 7 不同大小初始模 500 hPa 位势高度场增长模的繁殖: (a、b) 扰动大小随时间的演变; (c、d) 扰动形态随时间的演变
Fig. 7 The time evolution of (a, b) the norm and (c, d) the form of bred growing modes for the 500-hPa geopotential height perturbations (further details can be seen in Fig. 1 and Fig. 2)

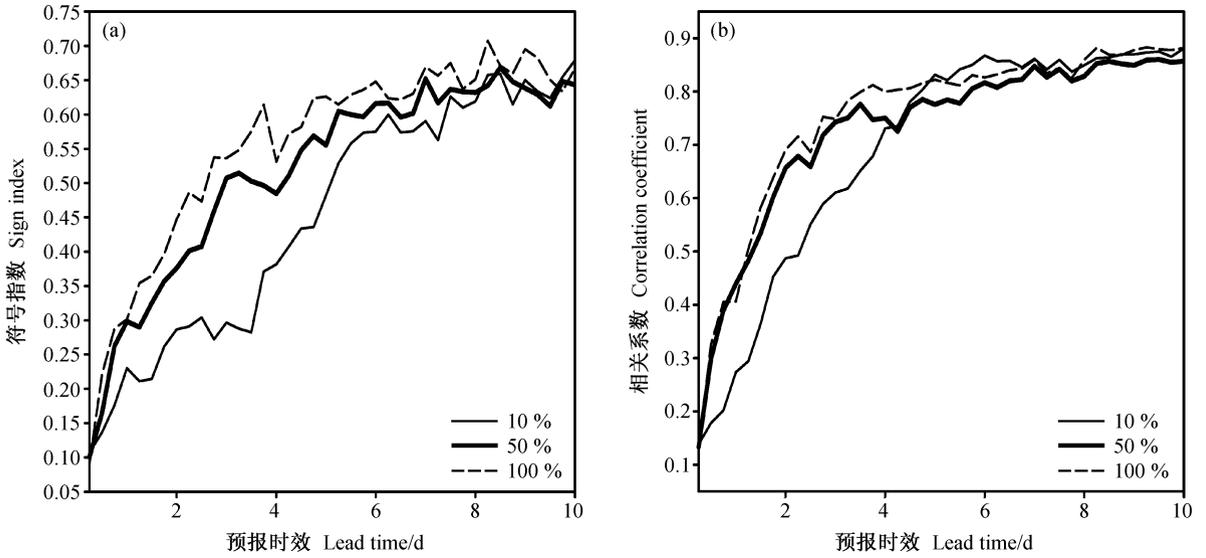


图 8 850 hPa 纬向风场扰动形态的繁殖

Fig. 8 As in Fig. 7b except for the 850-hPa zonal wind perturbation

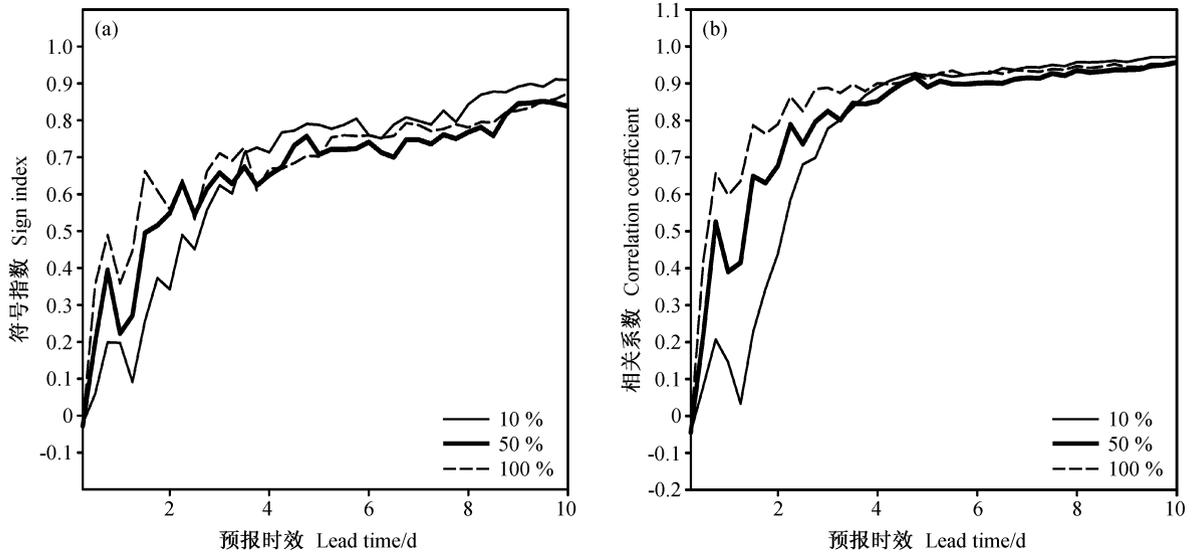


图 9 200 hPa 位势高度场扰动形态的繁殖

Fig. 9 As in Fig. 7b except for the 200-hPa level

繁殖也可得出类似结论(图略)。

从扰动形态上考虑, 500 hPa 位势高度场扰动的繁殖受初始模大小的影响似乎不是很大, 而 850 hPa 风场扰动受初始模大小的影响比较明显(参见图 8), 初始模越大(当然这里只限于 $\omega \leq 0.2$), 越容易达到饱和。为了检验这个结果的普适性, 对其他等压面上的扰动形态发展也做了分析和比较, 结果显示: 位势高度场扰动形态的饱和在中低层各个等压面上受初始模大小影响均不是很大, 而在

300 hPa 以上, 受初始模大小的影响明显(图 9)。而风场无论是低层还是高层都受初始模大小的影响, 但总的来看, 除了 10% 以及个别个例的 30% 对应的曲线, 其他曲线的差别并不明显(见图 10)。因此, 仅从形态饱和方面考虑, 初始模大小只要取不低于 24 小时预报误差的 30% 即可。实际上如果繁殖时间足够长, 那么初始模大小的影响就可以降到可忽略的程度, 但初始模大小取得适当可以缩短繁殖循环的时间。

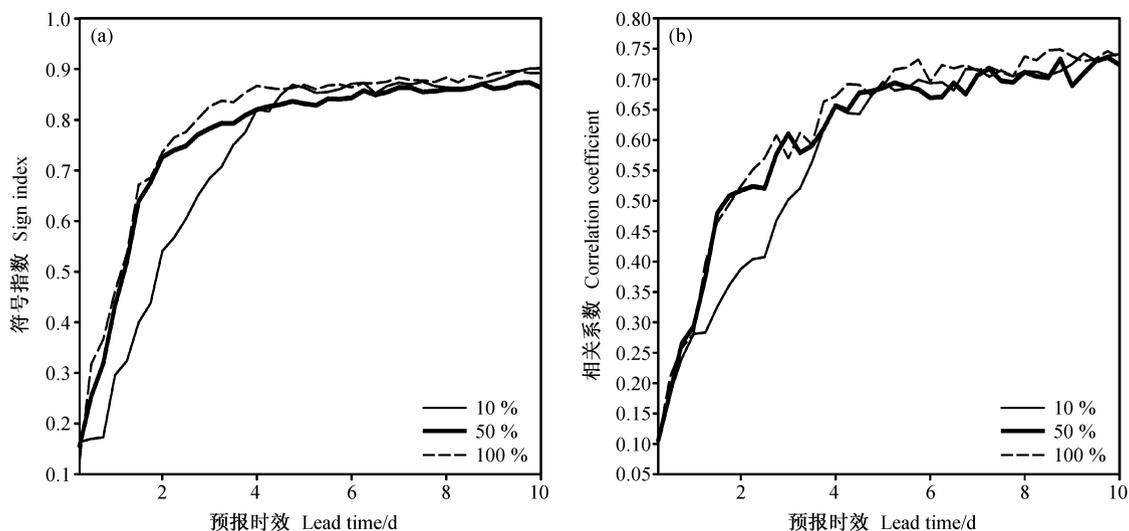


图 10 300 hPa 纬向风场扰动形态的繁殖

Fig. 10 As in Fig. 8 except for the 300-hPa level

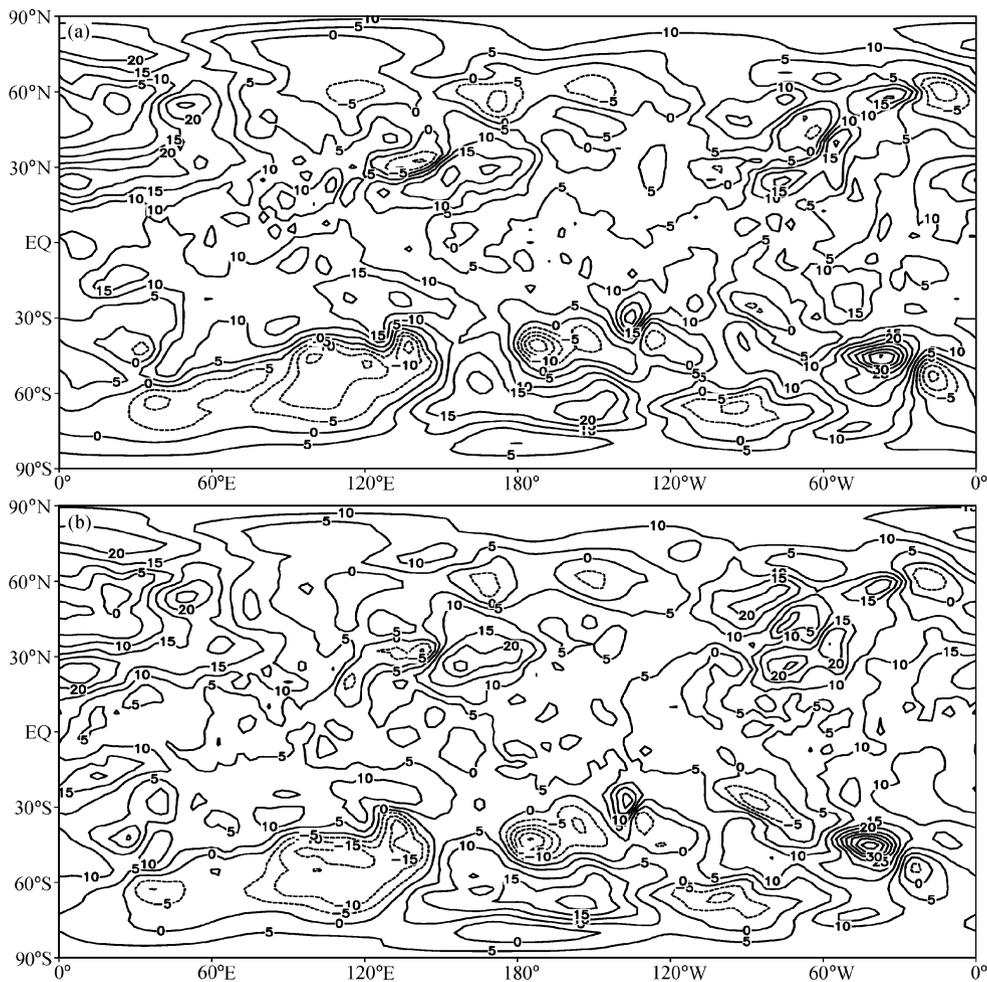


图 11 500 hPa 位势高度扰动场形势图(单位: gpm): (a)第 3.5 天; (b)第 4 天

Fig. 11 The 500-hPa geopotential height perturbation (units: gpm) fields for 3.5 d (a) and 4 d (b) after the beginning of breeding process

综合分析,若从增长率趋于平稳以及形态相似系数达到饱和这两方面考虑,对于 T63L9 全球谱模式,扰动需要 3~4 天的繁殖时间才能达到饱和。图 11 给出了繁殖到第 3.5 天和第 4 天的 500 hPa 位势高度扰动场,其中位势高度场和风场扰动取 $\omega=1.0$,相对湿度场取 $\omega=0.5$ 。比较两张图可见,500 hPa 位势高度扰动场分布在第 3.5 天和第 4 天是非常相似的。

6 结 论

本文利用 T63L9 中期数值预报谱模式,研究了基于增长模繁殖法的集合预报初始扰动饱和情况,得到的主要结论如下:

(1) 用增长模繁殖法生成集合预报的初始扰动时,增长模必须从两个方面达到饱和,一是增长模大小的饱和;二是增长模分布的饱和。

(2) 不同变量扰动增长模的饱和时间有所差别,位势高度场比风场的饱和要容易一些,而相对湿度场则呈现出一种低级别的饱和状态。

(3) 同一变量在不同等压面上饱和过程也存在差别,饱和时间亦不同步,在形态饱和方面低层更不容易达到饱和。

(4) 不同的初始模大小也会扰动饱和过程产生影响。如果繁殖时间足够长,则初始模大小的影响就可以降到可忽略的程度,选取合适的初始模大小能在一定程度上缩短繁殖时间。

(5) 从增长率趋于平稳以及形态相似系数达到饱和这两方面考虑,对于 T63L9 全球谱模式,扰动需要 3~4 天的繁殖时间可达到饱和要求。

在本文的试验方案中,一旦用于繁殖的初始扰动确定,在整个的繁殖过程中就不再对其大小进行调整,而是自然发展。但对于初值集合预报来讲,初始扰动应代表初始误差,所以用于集合预报的初始扰动应该与模式初始资料误差的大小和分布相当,为使其在繁殖过程中更快地接近于初始误差,扰动在繁殖过程中应当适时进行调整。从本文的试验结果也可看到,扰动增长率及形态的发展与输入扰动的大小是有关的,及时对增长模进行调整可能会使所繁殖的扰动更快达到集合预报所需扰动的要求,并且也可能对繁殖过程产生某些影响。我们正在更深入地进行这方面的工作。

参考文献 (References)

- [1] Leith C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**: 409~418
- [2] Palmer T N, Molteni F, Mureau R, et al. Ensemble prediction. *ECMWF Research Department Tech. Memo.*, 1992, **188**, 45pp
- [3] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**: 2317~2330
- [4] Buizza R, Palmer T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**: 1434~1456
- [5] Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 73~119
- [6] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**(6): 3297~3319
- [7] 杜钧. 集合预报的现状和前景. *应用气象学报*, 2002, **13**(1): 16~28
Du Jun. Present situation and prospects of ensemble numerical prediction. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13**(1): 16~28
- [8] Mitchell H L, Houtekamer P L, Pellerin G. Ensemble size, balance and model-error representation in an ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**(12): 2791~2808
- [9] 付顺旗, 张立凤, 张铭. 谱模式 T63L9 正规模初始化方案及试验. *大气科学*, 2001, **25**(5): 661~675
Fu Shunqi, Zhang Lifeng, Zhang Ming. A nonlinear normal mode initialization scheme and experiments of the spectral model T63L9. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(5), 661~675
- [10] 甘少华, 张立凤, 张铭. 异模式嵌套及中期降水数值预报的试验. *大气科学*, 2001, **25**(3): 411~419
Gan Shaohua, Zhang Lifeng, Zhang Ming. Nesting of two different models and numerical experiments of mid-range precipitation forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(3): 411~419
- [11] 关吉平, 黄泓, 张立凤. 集合预报中初始扰动生成方法的探讨. *解放军理工大学学报*, 2003, **4**(2): 87~90
Guan Jiping, Huang Hong, Zhang Lifeng. Methods of producing initial perturbations in ensembling forecast. *Journal of PLA University of Science and Technology* (in Chinese), 2003, **4**(2): 87~90
- [12] Wei M Z, Frederiksen J S. Error growth and dynamical vectors during southern Hemisphere blocking. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, **11**: 99~118
- [13] Barker D. The 'error-breeding' system. <http://www.mmm.ucar.edu/individual/barker/>
- [14] 曹鸿兴. 局地天气预报的数据分析方法. 北京: 气象出版社, 1983. 332pp
Cao Hongxing. Data analysis methods of local weather forecast. Beijing: China Meteorological Press, 1983. 332pp

