

2003年汛期淮河流域降水的集合预测试验研究

徐广阔^{1,2} 赵思雄¹ 王业桂³ 杨玉震³

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

3 解放军总参谋部气象水文中心, 北京 100081

摘要 利用并行化全球中期数值预报模式 MPGM, 对 2003 年夏季淮河流域特大降水作了集合预报试验。试验中提出一种繁殖循环初始扰动生成方法, 产生 9 个集合成员的初值场, 利用该初值集合对这次降水过程进行了集合模拟, 然后对集合预报试验的结果同对照试验进行了对比分析, 并对降水期间的物理量场及降水情况的模拟结果进行了分析。结果表明: 集合预报试验的结果优于不加扰动的对照试验的结果, 说明集合预报技术在一定程度上能够减小甚至消除数值预报中的不确定性, 提高数值预报的精度; 集合预报试验较好地模拟出了降水期间的物理量场与天气形势, 并对此次降水情况作了较好的预报, 可以对降水预报提供有益的参考。

关键词 集合预报试验 增长模繁殖法 淮河流域 降水

文章编号 1006-9585 (2007) 04-0481-08 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Experiment of Ensemble Forecast of Heavy Rainfall in the Huaihe River During Rainy Season of 2003

XU Guang-Kuo^{1,2}, ZHAO Si-Xiong¹, WANG Ye-Gui³, and YANG Yu-Zhen³

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039

3 *Center of Hydrometeorology, General Staff of People Liberation Army* 100081

Abstract An ensemble forecast experiment and a control run of the heavy rainfall event in Huaihe River area during June and July 2003 were performed using MPGM model. A method of generating the breeding cycle initial perturbation has been proposed and 9 ensemble numbers of initial data were produced. Then, the results of these two experience have been compared and analyzed. The simulated result of parameter field and precipitation also has been discussed. The results show that ensemble forecast seems to be better than control run, this could imply the technology of ensemble forecast could reduce the uncertainty of numerical prediction and improve the precision of numerical prediction. Meanwhile, the results also show that ensemble prediction is inspiring, it can provided useful reference to the improvement of heavy rainfall prediction.

Key words ensemble prediction, breeding of growing mode, Huaihe River, precipitation

1 引言

暴雨是一类重要的灾害天气系统, 对我国的

经济发展和人民的生命财产构成严重的影响, 因而对其进行研究具有很重要的意义。对江淮流域暴雨系统已经有一些分析和研究^[1~3]。赵思雄

等^[4]对梅雨锋上涡旋发生发展进行过能量分析,提出了梅雨锋上存在两类不同的中尺度涡旋系统;Bei 等^[5]使用非静力中尺度模式,应用常规与非常规资料,对长江流域的 β 中尺度系统进行了数值模拟;此外,对 2003 年淮河流域的暴雨,孙建华等^[6]已作了预测试验研究,对于该暴雨的带状雨区有较好的模拟结果;张庆云等^[7]从气候异常的角度,对 2003 年夏季淮河流域特大降水进行了研究,并给出了梅雨期淮河流域强降水的天气学模型,取得了可喜的进展;矫梅燕等^[8]还分析研究了影响淮河致洪暴雨发生的物理因子和各种尺度天气系统相互作用的动力机制。但我们知道,暴雨系统一般发展迅速,生命史短,具有较强的非线性特征,从而对其进行数值模拟和预报时,初始资料的误差会对结果产生较大的影响,从而使暴雨的数值预报具有某种不确定性。集合预报正是针对这一矛盾,通过辨认并模拟初始资料误差或模式误差,以消除数值预报中的这种不确定性。Epstein^[9]在 1969 年提出了随机动力学,并把随机动力学应用于描述包含大气的强迫耗散系统的方程组^[10],在这个基础上形成了集合预报的思想。其基本思想是:由于初值误差、模式误差及大气的高度非线性特征,使得数值预报的结果具有不确定性,所以在数值天气预报的过程中最好以概率的形式来认识大气状态,而不是像一般的预报方法那样只考虑一种预报状态。目前集合预报技术已被广泛应用于中、短期天气预报中,并在提高数值天气预报的准确率方面取得了较显著的效果。Palmer 进一步指出,数值预报的不确定性不仅包含在初始资料中,在模式方物理过程中也包含不确定性^[11];Murphy 利用一个五层大气环流模式,构造了一个由 7 个成员组成的集合预报,研究了集合预报对大气可预报性的预报情况^[12];Stensrud 构造了一个初值集合和一个物理集合,分别对两个中尺度对流系统个例进行了模拟^[13];Elizabeth 研究了对世界上主要的中期数值预报中心的预报结果进行了“较粗的集合预报”^[14]。近年来,在对暴雨系统的集合模拟研究上,已经出现了一些试验和研究,例如,王晨稀等^[15]利用不同的边界层方案构造了多模式集合;陈静等^[16]研究了非绝热物理过程引起的暴雨数值预报的不确定性,但是,如何考虑初值误差引起的暴雨预报

的不确定性?如何通过辨认并模拟初值误差来构造可以减少这种不确定性的集合预报方案?这些都是有待解决的问题。本文对 2003 年 6 月下旬至 7 月中旬发生在淮河流域的暴雨天气进行了集合模拟,希望通过这一探索,提出对暴雨数值预报改进的有用的思路。

2 2003 年淮河强降水的雨情与环流形势

2003 年 6 月下旬,我国主要降水带移至淮河流域,并在此地区维持约一月之久,淮河流域出现持续性强降水天气。6 月 21 日~7 月 22 日,沿淮河各主要站点的累积降水量达到 450~630 mm。安徽北部、河南东部、江苏北部等地降水总量普遍比常年同期偏多 1~2 倍,局地偏多 2~3 倍^[8]。在此期间,共出现 7 次强降水过程,时间分别为:6 月 22~23 日,6 月 24~27 日,6 月 29 日~7 月 3 日,7 月 4~7 日,7 月 8~11 日,7 月 12~13 日和 7 月 21~22 日。其中,6 月 29 日~7 月 3 日的降水过程为降水量最大的一次暴雨天气过程,在河南南部、湖北东部、安徽中北部和江苏大部出现暴雨或大暴雨,降水量一般有 50~200 mm,最大降水中心地区如河南东南部、安徽北部和江苏北部地区降水量达 210~250 mm。本文将着重对此次降水过程进行分析和试验。

中高纬的阻塞高压系统和副热带高压系统的共同作用是造成此次降水的主要原因。2003 年 6 月下旬至 7 月下旬,北半球中高纬地区建立了强大阻塞高压系统,乌拉尔山东部阻塞高压形成并维持,径向环流明显增强,导致冷空气活动频繁,频频南下。而西太平洋副热带高压在 6 月中旬以前位置较为偏南,副高脊线不超过 25°N,而到了 6 月下旬,副热带高压北跳,同时夏季风增强,冷暖空气在黄淮一带交汇,正是在这种背景下,淮河流域出现了 7 次强降水过程。其中,6 月 29 日至 7 月 3 日的大暴雨过程是在欧亚中高纬环流从两槽一脊型转换为两脊一槽型的梅雨形势下发生的。详细环流特征和主要影响系统参见文献 [8]。

3 模式简介及试验方案

试验使用的并行化全球中期数值预报模式

MPGM 是军用中期数值天气预报业务模式, 是在全球谱模式 T106/L19 的基础上发展而成的, 该模式采用随地形变化的球面混合坐标系, 水平方向用谱方法将预报变量作球谐函数的有限级数展开, 三角形截断, 业务运行最大波数为 106, 约相当于水平格距 110 km; 垂直方向用差分方法计算, 业务运行垂直层数为 19 层; 时间差分采用半隐式格式; 采用四阶线性水平扩散, 避免了非线性混淆。MPGM 包括了较为全面的物理参数化过程, 主要物理过程包括辐射、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。

集合预报的初始场采用增长模繁殖法产生。Toth 和 Kalnay^[17] 指出, 通过变分同化处理的分析资料中存在着增长性误差和非增长性误差, 其中, 增长性误差是同大气基本气流的不稳定性相联系的, 因此具有依赖于基本气流演变的动力学特征。同时, 由于增长性误差在模式积分过程中可能会迅速增长, 以致成为影响中期天气数值预报准确性的主要因素。鉴于以上两点, 对增长性误差进行分析和模拟是可能的, 也是必要的。增长模繁殖法通过对初始扰动在非线性模式中进行积分, 经过几个繁殖循环周期后, 相对于初始时刻, 增长性误差的作用将变大, 而非增长性误差的作用将变小, 以至可以忽略不计。即此方法“繁殖”出了快速增长的非线性扰动。

第 1 步: 设非线性模式方程组的离散形式为

$$f(x, t + \Delta t) = M(f(x, t)),$$

$f(x, t)$ 为满足这一形式的基本解, 对初始状态所加的扰动为 $\delta f(x, t)$, 其振幅为 A (A 是一个可变化的参数), 则我们可以得出, 扰动随时间的变化为

$$\delta f(x, t + \Delta t) = L(f, t, \Delta t) \delta f(x, t),$$

这里, $L = \partial M / \partial f$ 为方程组的切线性模式。

第 2 步: 把扰动加到基本解上, 对受扰的初始状态进行积分, 然后减去未受扰的初始状态的积分值:

$$\overline{\delta f(x, t + \Delta t)} = M[\overline{f(x, t) + \delta f(x, t)}] - M[\overline{f(x, t)}],$$

第 3 步: 设 $A + \delta A$ 为 $t + \Delta t$ 时刻扰动的振幅, 按比例将其缩小为 A , 则

$$\delta f(x, t + \Delta t) = \overline{\delta f(x, t + \Delta t)} \cdot A / (A + \delta A),$$

重复第 2 步、第 3 步, 经过几个繁殖周期, 便可得出保持了快速增长特性的繁殖向量。改变初始扰动振幅 A 的大小, 便可得出其他的繁殖向量。

试验中, 繁殖循环初始扰动由 72 h 预报的均方根误差乘随机数形成, 该随机数服从 $[-1, +1]$ 区间上的均匀分布, 繁殖循环周期为 6 h, 繁殖时间为 3 d, 集合成员个数为 9 个。预报区域为我国东部地区 ($15 \sim 55^\circ\text{N}$, $99 \sim 135^\circ\text{E}$), 预报时段为 2003 年 6 月 29 日~7 月 9 日 (考虑预报的时效性并结合 6 月 29 日~7 月 3 日的降水过程, 本文着重对前 4 d 的预报结果进行分析)。

4 结果分析

本节中将介绍数值模拟的结果, 并将集合预报及非集合预报 (本文亦称为对照试验) 作一比较。

4.1 集合预报试验与对照试验的比较

图 1 为试验中集合预报试验和对照试验相对于分析场的距平相关系数。图 2 为集合预报和控制预报相对于分析场的均方根误差 (检验量为 500 hPa 位势高度场)。由图 1、图 2 可以看出, 对于距平相关系数, 集合预报试验的值要高于对照试验, 而对于均方根误差, 集合预报试验则比对照试验略有降低, 这说明集合预报试验的结果要优于对照试验的结果, 集合预报试验是比较成

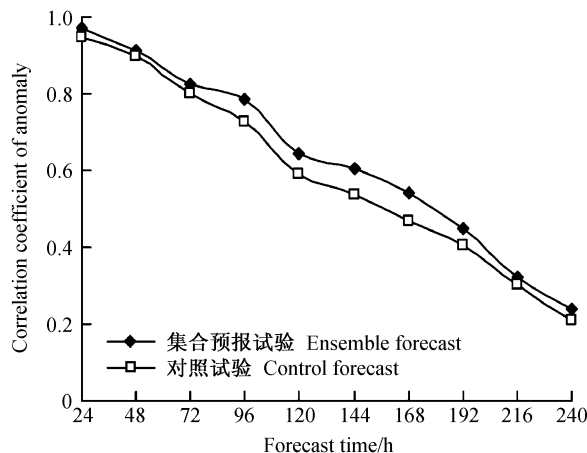


图 1 500 hPa 位势高度场距平相关系数

Fig. 1 Correlation coefficient of anomaly of geopotential height at 500 hPa

功的，在一定程度上可能消除了数值预报中的不确定性。利用集合预报技术，有可能提高数值预报的精度，延长预报时效。

4.2 各要素场试验结果

图 3、4 分别为以 2003 年 6 月 29 日 1200 UTC

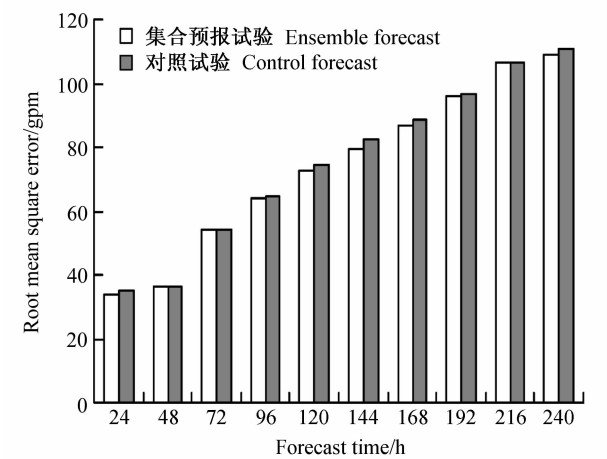


图 2 500 hPa 位势高度场均方根误差
Fig.2 Root mean square error of geopotential height at 500 hPa

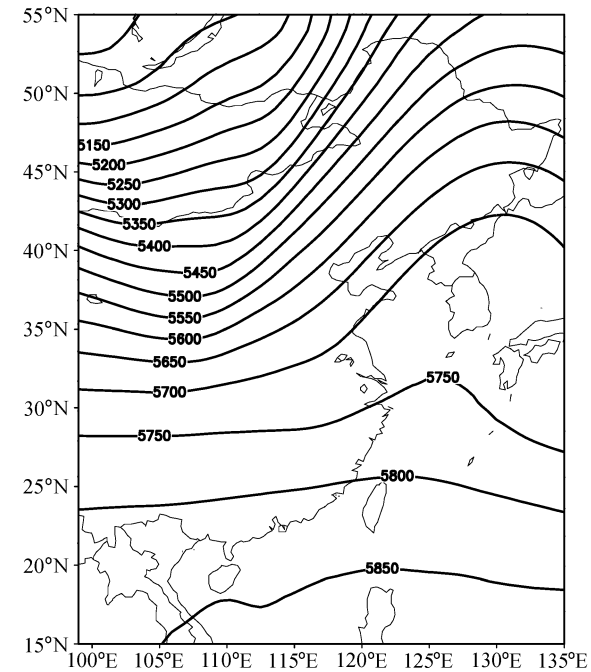


图 4 对照试验 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)
Fig.4 Predicted Geopotential height field at 500 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: gpm, control run)

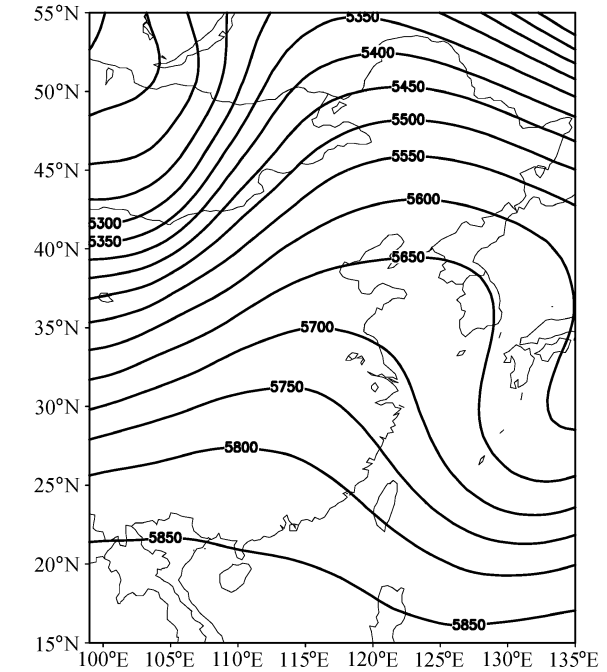


图 3 集合预报试验 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)
Fig.3 Predicted Geopotential height field at 500 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: gpm, ensemble prediction)

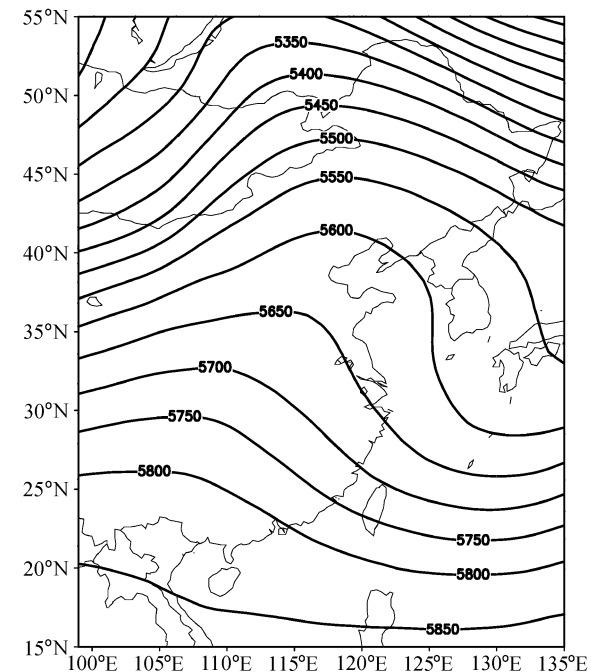


图 5 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 位势高度场实况 (单位: gpm)
Fig.5 Geopotential height field at 500 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: gpm, observation)

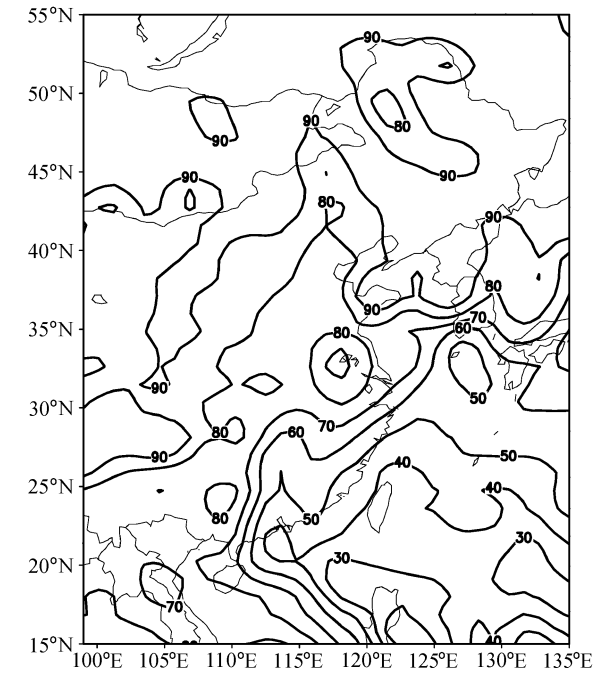


图 6 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 1 000 hPa 相对湿度场实况 (单位: %)

Fig. 6 Relative humidity field at 1 000 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: %, observation)

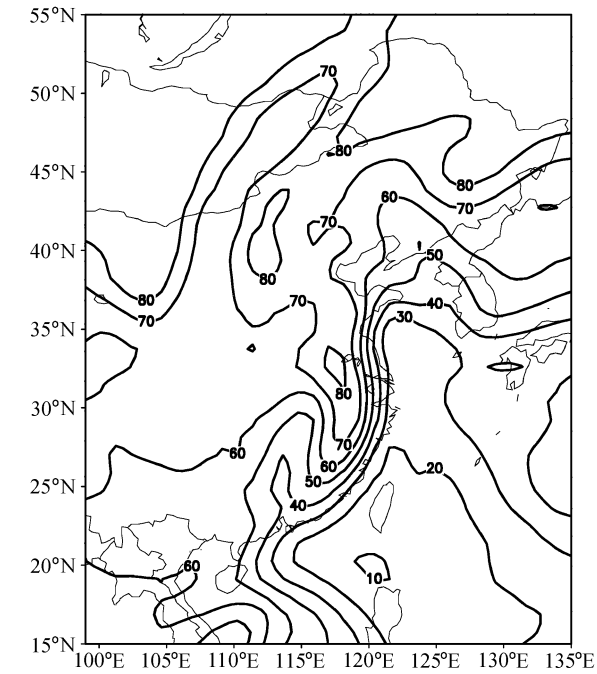


图 8 对照试验 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 1 000 hPa 相对湿度场 (单位: %)

Fig. 8 Predicted relative humidity field on 1 000 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: %, control run)

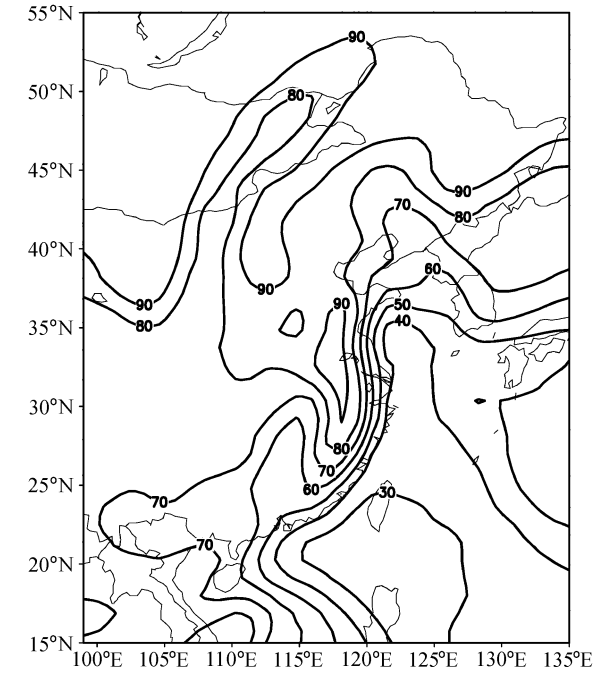


图 7 集合预报试验 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 1 000 hPa 相对湿度场 (单位: %)

Fig. 7 Predicted relative humidity field at 1 000 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: %, ensemble prediction)

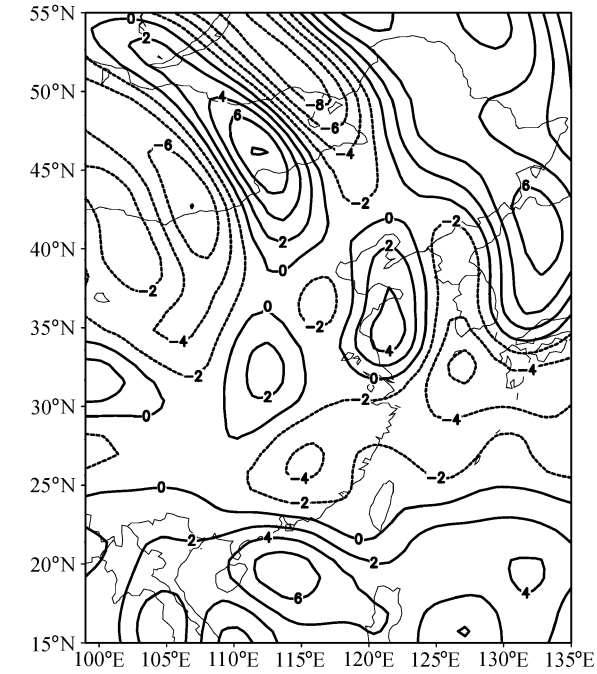


图 9 集合预报试验 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 涡度场 (单位: $10^{-5} s^{-1}$)

Fig. 9 Predicted vorticity at 500 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (units: $10^{-5} s^{-1}$, ensemble prediction)

为初值的集合预报试验、对照试验对 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 位势高度场的预报结果, 图 5 为 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 500 hPa 位势高度场实况。造成淮河流域此次特大降水的主要是由于中高纬地区对流层中上层阻塞高压与大陆上对流层高层南亚高压的相互配合, 前者导致西风带环流趋向度增大, 锋区南压, 使冷空气不断南下, 后者可影响夏季风加强, 使来自孟加拉湾和南海地区的暖湿气流加强北伸, 在二者的共同作用下, 冷暖空气交汇于淮河一带, 使雨带维持并在这里而形成持续性强降水。比较三幅图可知, 相对于对照试验的结果, 集合预报试验的高压脊线位置及强度与实况更为接近。

6 月 29 日~7 月 3 日, 淮河流域低层处于一片高湿区, 平均相对湿度在 83% 以上, 有一个明显的湿中心区。7 月 3 日, 1 000 hPa 高度上相对湿度达到了 90% 以上 (图 6), 与雨带的位置十分吻合。这说明低层水汽充沛, 再加上强劲的上升

运动, 有利于强降水天气的发生。图 7 为集合预报试验结果, 图 8 为对照试验结果, 同实况相比较, 二者对湿度中心位置预报差别不大, 但对湿度中心最大值的预报, 集合预报试验结果似乎与实况更为接近。

我国东部地区高空的正涡度区位置、中心值的大小与雨带的位置、降雨的强度有很好的对应关系。6 月 29 日~7 月 3 日, 在江淮流域上空维持着较大的正涡度中心, 图 9 为集合预报试验模拟的 7 月 3 日的 500 hPa 涡度场, 可以看出, 在淮河流域有两个较大的正涡度中心, 其最大值分别达到了 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

图 10 为集合预报试验模拟的 7 月 3 日 1 000 hPa 水汽通量及水汽通量辐合, 从图中可以看出, 在江淮流域为较强的水汽通量辐合区, 水汽通量散度小于 $-6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 可以看出南亚夏季风带来了持续强劲的暖湿气流, 从而给此地区的降雨提供了较好的水汽条件。

图 11 为淮河流域 96 h 实测雨量分布, 图 12、13 分别为集合预报试验和对照试验模拟的 96 h 累计降水情况。一般说来, 96 h 的降水预报难度比较大, 无论雨区还是雨量的预报比起短期预报来, 其偏差值均要大些。但本文的目的在讨论集合预报, 因此, 着重对集合预报试验与对照试验相对于实况的差别作对比。从图 12 和图 13 可以看出, 集合预报模拟的最大降水中心位置经纬度约为 (35°N , 117°E), 降水中心累计降水量在 240 mm, 对照试验模拟的最大降水中心位置经纬度约为 (37.9°N , 117°E), 降水中心累计降水量为 200 mm, 而在江淮流域 6 月 29 日~7 月 3 日的降水过程中, 实际的最大降水中心位置经纬度为 (32.9°N , 116°E), 降水中心累计降水量为 250 mm。相对于对照试验, 集合预报模拟的降水中心位置与实况更为接近, 对累计降水量的预报也好于对照试验的结果。尽管如此, 集合预报的结果仍有待改进之处, 如实况降水主要集中于东西两片雨区, 突出表明了中尺度系统的影响, 而模式的模拟预报中, 无论对照试验还是集合预报试验, 雨区均主要呈东西向带状分布, 更多突出了大尺度系统的特征, 这方面的不足, 需要今后继续研究改进。

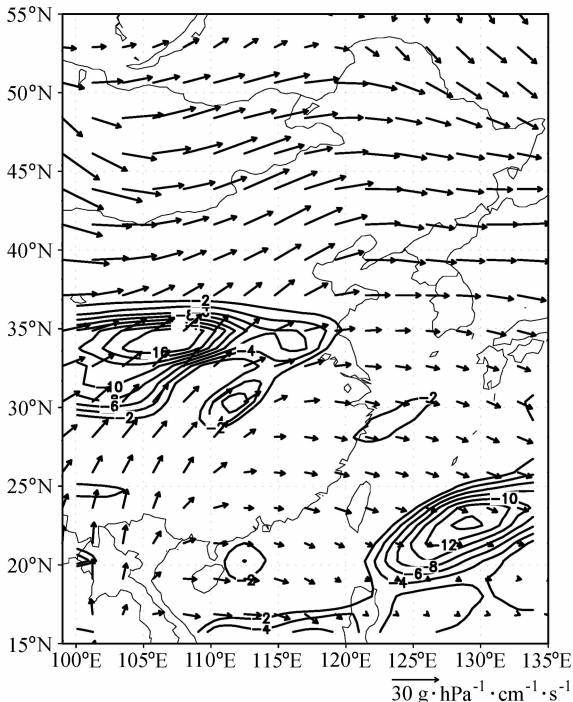


图 10 集合预报试验 2003 年 7 月 3 日 1200 UTC 1 000 hPa 水汽通量 (箭头, 单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和水汽通量辐合 (实线, 单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Water vapor flux from predicted (vector, units: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and convergence of water vapor flux (lines, units: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1 000 hPa at 1200 UTC 3 July 2003 (ensemble prediction)

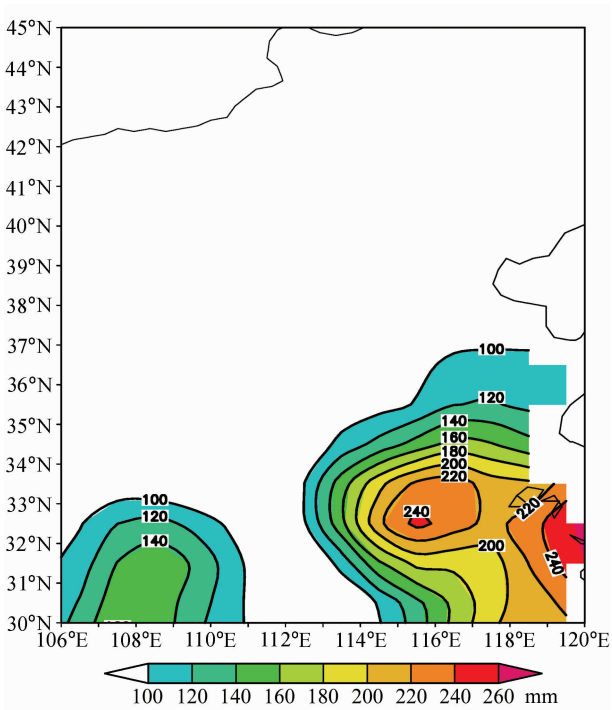


图 11 2003 年 6 月 29 日~7 月 3 日淮河流域实测累计降水量
Fig. 11 Observation of accumulated precipitation amount from 29 June to 3 July 2003 of Huaihe River

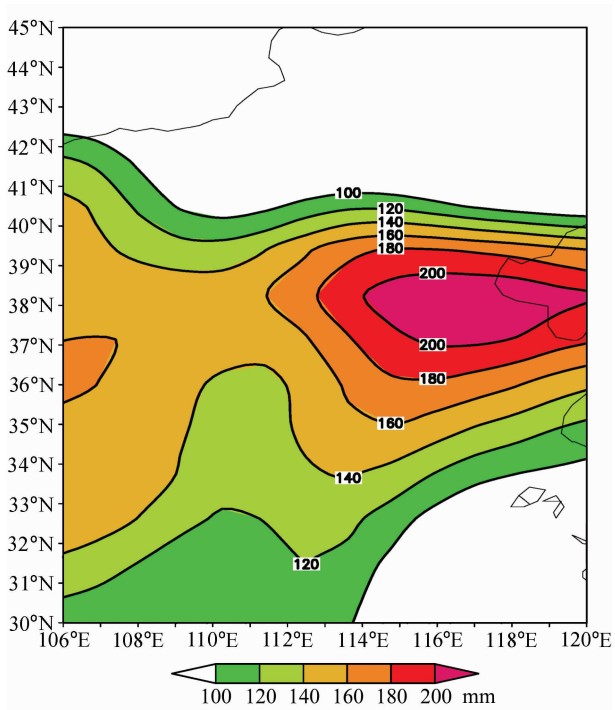


图 13 对照试验 2003 年 6 月 29 日 12 UTC~7 月 3 日 12 UTC 淮河流域累计降水量
Fig. 13 Accumulated precipitation amount from 1200 UTC 29 June to 1200 UTC 3 July 2003 (control run)

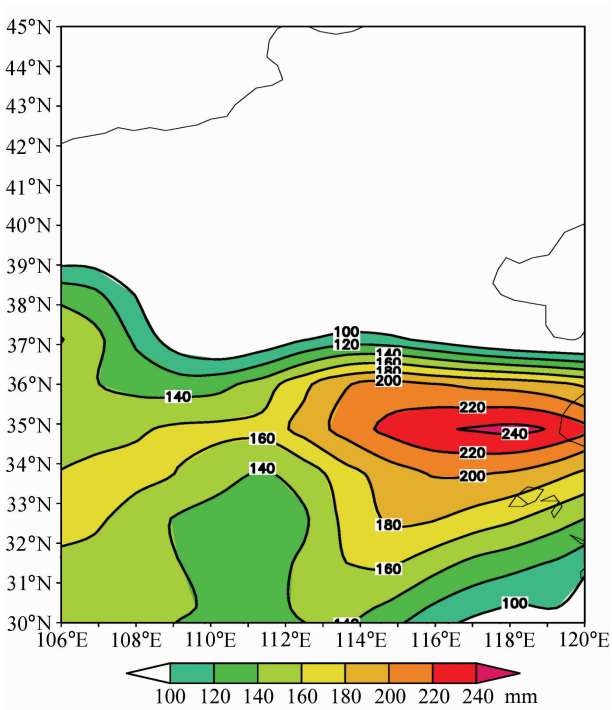


图 12 集合预报试验 2003 年 6 月 29 日 12 UTC~7 月 3 日 12 UTC 淮河流域累计降水量
Fig. 12 Accumulated precipitation amount from 1200 UTC 29 June to 1200 UTC 3 July 2003 (ensemble prediction)

5 结语

在作数值天气预报时，由于不可能精确地测量大气的初始状态，在预报一开始就可能引入误差，这种误差将在以后的各个预报阶段存在，并随着模式积分而增长，因此消除这种不确定性是提高数值预报准确度的关键。本文中采用多初值集合预报试验方案，利用增长模繁殖法产生多个初值场，对 2003 年 6 月下旬至 7 月上旬淮河流域一次强降水过程进行了集合预报试验。

繁殖循环初始扰动的选取方法对集合预报的结果有明显的影 响。在集合预报试验中，繁殖循环初始扰动取模式 72 h 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。这主要考虑了以下两点原因：1) 根据模式特点，T106/L19 模式 72 h 预报的均方根误差相对较大，按照这个标准来取繁殖循环初始扰动，会使集合成员间有一定的离散度，从而不致因离散度太小而不符合离散度合宜性的条件；2) 集合预

报试验中繁殖循环的时间取为 3 d, 取 72 h 预报的均方根误差进行繁殖循环, 能够使预报所产生误差的时间与误差增长的时间相一致, 从而更好的模拟出所需要的具有最大增长性的误差。

经预报试验表明: 尽管初值误差会给暴雨数值预报带来不确定性, 但基于多初值集合的集合预报技术在一定程度上有可能减少甚至消除这种不确定性, 提高暴雨预报的精确度。另外, 集合预报试验的结果优于不加扰动的对照试验的结果, 在本次试验中, 集合预报试验较好的模拟出了降水期间的物理量场与降水情况, 较好的再现了促使当时发生强降水的天气形势, 对降水范围与降水强度作了较好的模拟, 可以对此降水预报提供有益的参考。

最后要指出的是, 本文试验的个例还不够多, 今后需要对更多的个例进行试验, 且在扰动的选取方法上有继续改进之处。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言, 等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 1~225
Tao Shiyan, et al. *Heavy Rainfalls in China*. Beijing: Science Press, 1980, 1~225
- [2] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 1~255
Ding Yihui. *The Study About Heavy Rainfalls in Yangtze River and Huaihe River in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 1~255
- [3] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社, 2004. 147~266
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. *Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 147~266
- [4] 赵思雄. 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析. 大气科学, 1998 (特刊): 191~201
Zhao Sixiong. Study of energetics of formation and development of disturbances on Meiyu front. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998 (special issue), 191~201
- [5] Bei Naifang, Zhao Sixiong, Gao Shouting. Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2002, **80**: 153~164
- [6] 孙建华, 卫捷, 张小玲, 等. 2003 年夏季的异常天气及预测试验. 气候与环境研究, 2004, **9** (1): 203~217
- Sun Jianhua, Wei Jie, Zhang Xiaoling, et al. The abnormal weather in the summer 2003 and its real-time prediction. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (1): 203~217
- [7] 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究——2003 年. 北京: 气象出版社, 2004. 21~85
Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. *Study of Weather and Climate Anomaly in China During 2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 21~85
- [8] 矫梅燕, 姚学祥, 周兵, 等. 2003 年淮河大水天气分析与研究. 北京: 气象出版社, 2004. 95~145
Jiao Meiyan, Yao Xuexiang, Zhou Bing, et al. *Analysis and Study of Weather Systems Associated With Flood in Huaihe River During 2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 95~145
- [9] Epstein E S Stochastic dynamic prediction. *Tellus.*, 1969, **21**: 739~759
- [10] Lorenz E N. Maximum simplification of the dynamic equations. *Tellus*, 1960, **12**: 243~254
- [11] Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2004, **6**: 853~872
- [12] Murphy J M. The impact of ensemble forecasts on predictability. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1988, **114**: 463~493
- [13] Stensrud D J, Jian Wenbao, Warner T T. Using initial condition and model physics perturbation in short-range ensemble simulation of mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128** (7): 2077~2107
- [14] Elizabeth E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129** (10): 2461~2480
- [15] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 2003, **14** (1): 69~78
Wang Chenxi, Duan Yihong. Experiment and research of short-range ensemble forecasting techniques in forecasting Meiyu precipitation. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2003, **14** (1): 69~78
- [16] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验. 气象学报, 2003, **61** (4): 432~446
Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of South China heavy rain and the ensemble simulations. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (4): 432~446
- [17] Toth Z, Kalnay E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, **125**: 3297~3319