



# WRF3.0参数化敏感性及集合预报试验

李刚<sup>1</sup>, 王铁<sup>1</sup>, 谭言科<sup>1</sup>, 冯文田<sup>2</sup>, 白涛<sup>1,3</sup>

(1.解放军理工大学 气象学院,江苏 南京 211101; 2.解放军 66393部队,河北 保定 071000;

3.解放军 94162部队,陕西 西安 710614)

**摘要:** 为了研究 WRF 模式中的参数化方案对暴雨数值模拟的影响及物理过程集合预报在 WRF 降水集合预报中的适用性,利用中尺度 WRF3.0 数值模式,将模式中的物理过程参数化方案进行组合,构造了 20 个集合预报成员,对 2003 年 7 月 8 9 日发生在江淮地区的一次降水过程进行了集合预报试验。得到:集合成员之间存在一定的不确定性,不确定性随降水量级增大而增大,最终维持在一个较高的水平;通过定量比较发现,对于 0.1 mm 量级降水和 25 mm 以上量级降水,积云对流参数化方案对降水的影响要大于行星边界层方案对降水的影响;而对于 10 mm 量级降水,行星边界层方案对降水的影响要大于积云参数化方案对降水的影响。对 20 个预报成员进行了集合平均及降水概率预报试验,结果表明,集合平均的结果要比各个成员的稳定、可靠;概率预报能够提供一些有利于降水预报的信息。

**关键词:** 集合预报; WRF 模式; 物理参数化方案; 暴雨

**中图分类号:** P456      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3443(2010)01-0089-08

## Impact of parameterization schemes in WRF 3.0 model on numerical simulation of rainstorm and experiment of ensemble forecast

LI Gang<sup>1</sup>, WANG Tie<sup>1</sup>, TAN Yan-ke<sup>1</sup>, FENG Wen-tian<sup>2</sup>, BAI Tao<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China;

2. No. 66393 Unit of PLA, Baoding 071000, China; 3. No. 94162 Unit of PLA, Xi'an 710614, China)

**Abstract:** To study the impact of the parameterization schemes in WRF model on the rainstorm simulation and WRF physics ensemble forecast, 20 ensemble members were constructed by choosing different physics parameterization schemes from WRF3.0 and an experiment of the ensemble forecast was made with the precipitation case from July 8 to July 9 in 2003. The results indicate that there are uncertainty in the ensemble members. The uncertainty becomes larger as the grade of the precipitation increases and is in a high level at last. Quantitative comparison shows that the impact on the precipitation of the cumulus parameterization schemes is larger than that on the PBL parameterization schemes in the grade of 0.1mm, 25mm and 50mm, and the impact on the precipitation of the PBL parameterization schemes is larger than that on the convective parameterization schemes in the grade of 10mm. The ensemble average is performed at last and its result is more stable and credible than those of the forecast members. The analysis of the precipitation probability forecast is also performed, which provides some useful information about the precipitation forecast.

**Key words:** ensemble forecast; weather research and forecasting model; physics parameterization scheme; rainstorm

收稿日期: 2008-10-08.

基金项目: 国家 973 计划资助项目 (2007CB411805).

第一作者: 李刚 (1983-), 男, 博士生.

联系人: 谭言科, 副教授; 研究方向: 气象学与天气预报;

E-mail: yktan@sohu.com.

如何提高暴雨预报的准确率是数值天气预报领域中的一个非常重要的课题。目前中尺度数值模式已成为暴雨预报业务和研究工作的主要工具之一,它对暴雨预报准确率的提高起到了重要推动作用。

中尺度数值模式中的物理参数化方案主要包括积云对流参数化方案、行星边界层方案等,许多学者研究了它们对暴雨的影响。陈静<sup>[1]</sup>等利用MM5模式和4个暴雨个例,研究了非绝热物理过程对中国暴雨动力场和热力场预报的影响,结果表明,在短期预报中,非绝热物理过程对高度场预报影响较小,但边界层方案和对流参数化方案对产生暴雨的3个基本条件即水汽通量散度、垂直速度和不稳定层结的影响很明显;陈炯<sup>[2]</sup>等利用WRF模式模拟了一次江淮暴雨,并就边界层参数化方案进行了对比试验,研究表明,采用边界层方案要比不采用边界层方案的模拟效果好,边界层物理过程对格点尺度降水影响很小。以上研究大都侧重于物理参数化方案对降水的影响,由研究结果可以看出,物理参数化方案对强降水的发生时间、地点和强度影响较大,这使得强降水预报存在不确定性。如何降低这种不确定性,进一步提高暴雨预报准确率?采用集合预报便是一个重要途径之一。

集合预报最初是针对大气初始状态的不确定性提出的。从20世纪90年代起,针对中尺度数值模式中的物理过程参数化方案引起的预报不确定性,一些学者将不同物理参数化方案进行组合,构造模式扰动集合预报,并运用模式扰动集合预报研究强降水过程。D. J. Stensrud<sup>[3]</sup>等运用MM5模式,对其本身物理参数化过程进行集合并在此基础上进行模式扰动,开展对中尺度对流系统的研究,发现在大尺度的强迫作用弱的情况下,基于物理参数化过程的不确定性的集合预报有较好的预报效果;王晨稀等<sup>[4]</sup>首次以MM5模式作为试验模式,对梅雨降水进行了集合预报试验,结果表明,虽然集合平均预报不能在每个降水门槛上都好于集合预报系统中单个成员的确定预报,但从总体上要比确定预报更为稳定。

随着WRF模式的发展,它所提供的物理参数化方案越来越完善、成熟<sup>[5-7]</sup>。一些学者将WRF模式和MM5模式做了对比研究,孙建<sup>[8]</sup>等用WRF模式和MM5模式模拟了1998年的3次暴雨过程,并进行对比分析,结果显示,WRF模式可以更好地模拟引起降水过程中的天气系统的位置和移动过程,这使得WRF模拟的降水落区要好于MM5;赵洪<sup>[9]</sup>等采用MM5模式和WRF模式,对2007年3月3-4日发生在中国渤海和黄海海域的强冷空气和黄海气旋发生过程的数值预报结果进行了比较分析,结果表明,WRF模式更好地预报了引起这次大风过程

的主要天气系统的位置和移动路径。以上研究结果表明,WRF模式对中国地区天气过程有很好的模拟能力,运用它来研究中国地区天气过程是可行的。

目前,涉及采用WRF模式的物理参数化方案构造模式扰动集合预报的工作比较少,本文以中尺度数值模式WRF3.0为试验模式,将模式中的物理参数化方案进行组合,构造了20个集合成员,对发生在2003年7月8-9日的江淮地区的一次强降水过程进行了降水集合预报试验,并研究了扰动WRF模式的物理参数化方案所构造的集合预报对降水预报的影响。

## 1 个例简介

2003年7月8-10日,由于大尺度环流形势出现异常,副高东退至华南沿海地区,北方和西南地区均有槽东移,槽后的冷空气伴随槽前的暖湿气流,使得淮河地区出现了暴雨,局部大暴雨。7月8-9日,降水带变窄,强降水主要发生在江淮地区、湖北北部、河南南部、安徽大部以及江苏大部,降水量在50-100 mm,其中湖北北部地区降水量达150-200 mm,图1是这次降水过程的24 h实况累积降水图。

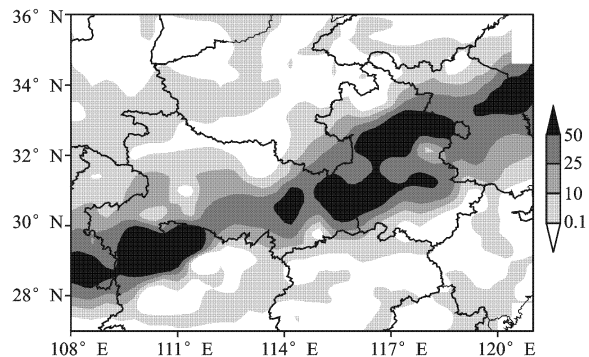


图1 2003年7月8日00时~2003年7月9日00时(世界时)24h累积降水量(单位:mm)

Fig. 1 Accumulative precipitation in 24h from 00 July 8 to 00(UTC) July 9 (unit mm)

从图1中可以看出,整条雨带大致呈东北-西南走向,24 h累积降水量超过50 mm的降水区域由西南到东北分别是:第1个大致位于湖南西北部及重庆南部地区;第2个位于湖北东部与安徽交界处及安徽中部地区;第3个位于江苏中东部地区。

## 2 试验模式简介及方案设计

水平方向采用二重双向嵌套,模拟区域的中心点位于(30°N, 114°E),粗网格区域格点数是90×90,网格距为36 km,细网格区域格点数是190×

181,网格距为 12 km,粗网格采用 2 min 地形资料,细网格采用 30 s 地形资料,垂直方向采用 Z 坐标,分为 27 层,顶层气压为 50 hPa

WRF 模式提供了 5 种行星边界层方案 5 种积

云对流参数化方案和 9 种微物理过程方案,为构造模式扰动集合预报提供了便利条件。在本文中,分别选取了 3 种边界层方案、3 种积云对流参数化方案、5 种微物理过程方案,如表 1 所示。

表 1 集合成员构造

Tab. 1 Model configurations used in the physics ensemble

成员	微物理过程方案	行星边界层方案	积云对流参数化方案
1	Kessler	YSU	Grell-Devenyi ensemble
2	Kessler	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Grell-Devenyi ensemble
3	Kessler	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Grell-Devenyi ensemble
4	Lin et al.	YSU	Betts-Miller-Janjic
5	Lin et al.	YSU	Grell-Devenyi ensemble
6	Lin et al.	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Betts-Miller-Janjic
7	Lin et al.	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Betts-Miller-Janjic
8	WSM 3-class simple ice	YSU	Kain-Fritsch (new Eta)
9	WSM 3-class simple ice	YSU	Betts-Miller-Janjic
10	WSM 3-class simple ice	YSU	Grell-Devenyi ensemble
11	WSM 3-class simple ice	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Kain-Fritsch (new Eta)
12	WSM 3-class simple ice	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Betts-Miller-Janjic
13	WSM 3-class simple ice	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Grell-Devenyi ensemble
14	WSM 3-class simple ice	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Kain-Fritsch (new Eta)
15	WSM 3-class simple ice	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Betts-Miller-Janjic
16	WSM 3-class simple ice	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Grell-Devenyi ensemble
17	WSM 5-class simple ice	YSU	Grell-Devenyi ensemble
18	Ferrier microphysics	YSU	Grell-Devenyi ensemble
19	Ferrier microphysics	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Betts-Miller-Janjic
20	Ferrier microphysics	ACM 2 (Pleim) PBL (ARW)	Betts-Miller-Janjic

从数学上看,本文所选方案可形成  $3 \times 3 \times 5 = 45$  个预报成员,但由于计算条件的限制,本文使用以上所选的物理参数化方案组成 20 个集合成员(表 1),并假设每个集合成员的预报技巧是相同的。其他物理过程,长波方案采用 RRTM 方案,短波辐射方案采用 Dudhia 方案,每隔 36 min 调用一次辐射方案模式的初始场和侧边界条件由 NCEP 的  $1^\circ \times 1^\circ$  的 FNL 资料生成,每 6h 更换一次边界,从 2003 年 7 月 8 日 00 时(UTC)开始积分,共积分 24 h,积分步长为 180 s,每 1 h 输出一次模拟结果,将细网格区域输出的数据作为分析数据

### 3 检验方法

本文使用  $T_s$  评分和  $B_s$  评分对降水进行检验。公式定义如下:

$$T_s = \frac{N_o}{N_x + N_y - N_o}, B_s = \frac{N_x}{N_y}$$

其中:  $N_x$  为模拟发生降水的格点数;  $N_y$  为实况发生降水的格点数;  $N_o$  为模拟和实况同时发生降水的格点数。本文统计的范围与实况降水图的范围相同,并将降水分为 4 个不同的量级, 0.1 10 25 50 mm,分

别求这 4 个量级的  $T_s$  评分和  $B_s$  评分。采用的集合方法是等权集合方法,即认为各个成员对集合预报的贡献是相同的,每个成员的权重为  $\frac{1}{n}$ , 定义为:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$$

其中:  $n$  为集合成员个数;  $f_i$  为预报成员;  $\bar{f}$  为集合平均。

## 4 试验结果分析

### 4.1 不同量级降水的 $T_s$ 评分分析

图 2 是 24 h 累积降水量的  $T_s$  评分图。从图中可以看出,随着降水量级模式的模拟能力下降,但下降的趋势不同,从 25~ 50 mm 量级,下降趋势最大,而从 10~ 25 mm,下降趋势最小。将各个量级降水的  $T_s$  评分最大值与最小值之差定义为参数化方案对降水模拟的不确定性,从图中可看出,随降水量级增大,不确定性逐渐增大,但从 25 mm~ 50 mm 量级降水,不确定性有所减小,而从总体上看,随降水量级增大,不确定性呈增大的趋势,最终维持在一个较高水平。

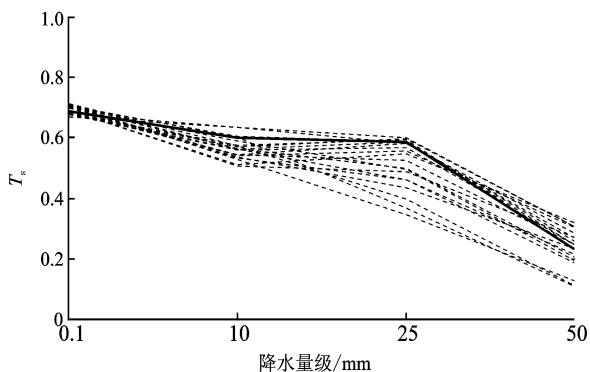


图 2 24 h 累积降水的  $T_s$  评分

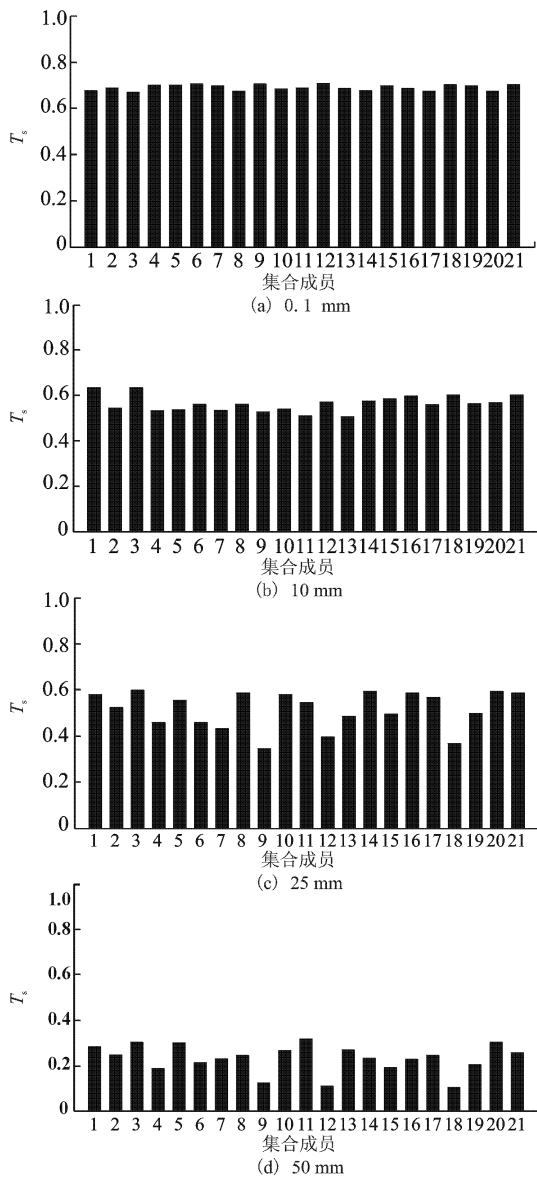
Fig. 2  $T_s$  of 24h accumulative precipitation (unit mm)

从图 3 中可以看出,除了成员 3 在 10~ 25 mm 量级降水中始终是最优的,对于不同量级降水,其他各个成员对降水模拟能力各不相同,对于 0.1 mm 量级降水,成员 12 最优,成员 3 最差;对于 10~ 25 mm 量级降水,其最差成员分别是成员 13 和成员 9;对于 50 mm 量级降水,成员 11 最优,成员 12 最差。由此可知,某一预报成员在某一或者某些量级降水上所表现出的优势是相对的,其模拟结果有很大的不确定性,但平时所用的确定预报是其中某一成员所做的预报,显然其预报结果有很大的不确定性,只有降低这种不确定性才能真正提高预报水平。

而集合预报就是降低这种不确定性的途径之一。从图 3 中看出集合预报在各个不同量级 24 h 累积降水的  $T_s$  评分的变化,对于 0.1 mm 量级降水,集合平均的  $T_s$  评分 0.7036,高于 16 个集合成员;对于 10 mm 量级降水,集合平均的  $T_s$  评分为 0.6039,高于 18 个集合成员;对于 25 mm 量级降水,集合平均的  $T_s$  评分为 0.5859,高于 15 个集合成员;对于 50 mm 量级降水,集合平均的  $T_s$  评分为 0.2562,高于 13 个集合成员。由此可看出,虽然集合平均的  $T_s$  评分值不能在每个量级降水中排名最高,但集合平均的  $T_s$  评分却始终要比大多数预报成员的  $T_s$  评分高,这表明集合预报的确减小了预报成员的不确定性,与成员相比,其稳定性增大,有利于做出更加精确的预报。

### 4.2 不同量级降水的 $B_s$ 评分分析

图 4 是 24 h 累积降水量的  $B_s$  评分变化图。对于 0.1 mm 量级降水,集合成员的最大值与最小值之差为 0.1775,不确定性较小;对于 10 mm 量级降水,集合成员的最大值与最小值之差为 0.6661,可以看出,相对 0.1 mm 量级降水而言,不确定性迅速增大;对于 25 mm 量级降水,集合成员的  $B_s$  最大值和最小值之差为 0.715;而对于 50 mm 量级降水,集合



注: 1~ 20 表示集合成员, 21 表示集合平均。

图 3 各个量级降水的  $T_s$  评分

Fig. 3 Threat scores ( $T_s$ ) of the 24h accumulated precipitation for different grades in the numerical experiment

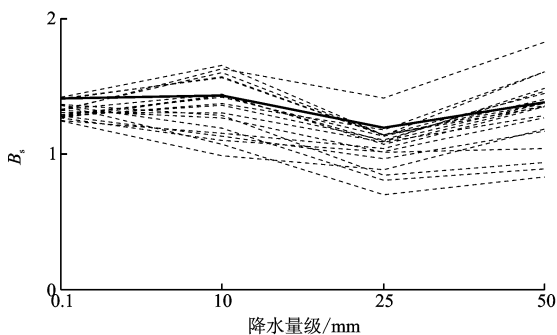


图 4 24 h 累积降水的  $B_s$  评分

Fig. 4  $B_s$  of the 24 h accumulative precipitation

成员的  $B_s$  最大值和最小值之差为 0.9883。由此可知,虽然不确定性随降水量级的增大而增大,但增大

的趋势却不同,不确定性从 0.1~ 10 mm 量级降水的增长速度要明显大于 10 mm 量级以上降水的增长速度。结合  $B_s$  评分的最大值与最小值的变化,可看出,随降水量级的增大,模式的集合成员不但有产生过度降水的倾向,而且还出现了低估降水的倾向。从集合预报的  $B_s$  值的变化,可以看到集合预报呈现“增大—减小—增大”的趋势,从 0.1~ 10 mm,集合预报的  $B_s$  值由 1.4037 增大到 1.4271,从 10~ 25 mm,集合预报的  $B_s$  值由 1.4271 减小到 1.1925,而从 25 mm~ 50 mm,集合预报的  $B_s$  增大至 1.3841,由此可知,集合预报始终高估降水,而且对小雨和大雨的高估程度比较大,对中和暴雨的高估程度比较小。从图 5 中可以看到,集合预报的  $B_s$  曲线的变化比

绝大多数预报成员的  $B_s$  曲线变化要平滑,集合预报的这种变化是可以理解的,它消除了成员之间的不确定性,所以结果要比预报成员的稳定、准确。

### 4.3 积云参数化方案和行星边界层方案对降水影响的分析

以上分析了降水  $T_s$  评分和  $B_s$  评分的变化。在本文试验中,引起预报成员中  $T_s$  和  $B_s$  评分变化的根本原因是物理参数化过程的不同,需要说明的一点是,本文侧重于积云对流参数化方案和行星边界层方案的分析,暂不分析微物理过程对降水的影响,在以后工作中会专门对微物理过程方案进行分析。

为了清楚的看出积云对流参数化方案和行星边界层方案对降水的影响,设计了如表 2 3 的方案。通过对表 2 中的方案 A、B 和 C 进行对比分析,可揭示积云对流参数化方案对降水的影响,其中方案 A 由集合成员 8、9 和 10 组成,方案 B 由集合成员 11、12 和 13 构成,方案 C 由成员 14、15 和 16 组成,而通过对表 3 中的方案 D、E、F 进行对比分析,可揭示行星边界层对降水模拟的影响,方案 D 由成员 8、11 和 14 组成,E 由成员 9、12 和 15 组成,F 由成员 10、13 和 16 组成。

表 2 积云参数化方案对降水影响的方案设计

Tab. 2 Schemes of the impact of the cumulus parameterization on the rain model configurations used in the physics ensemble

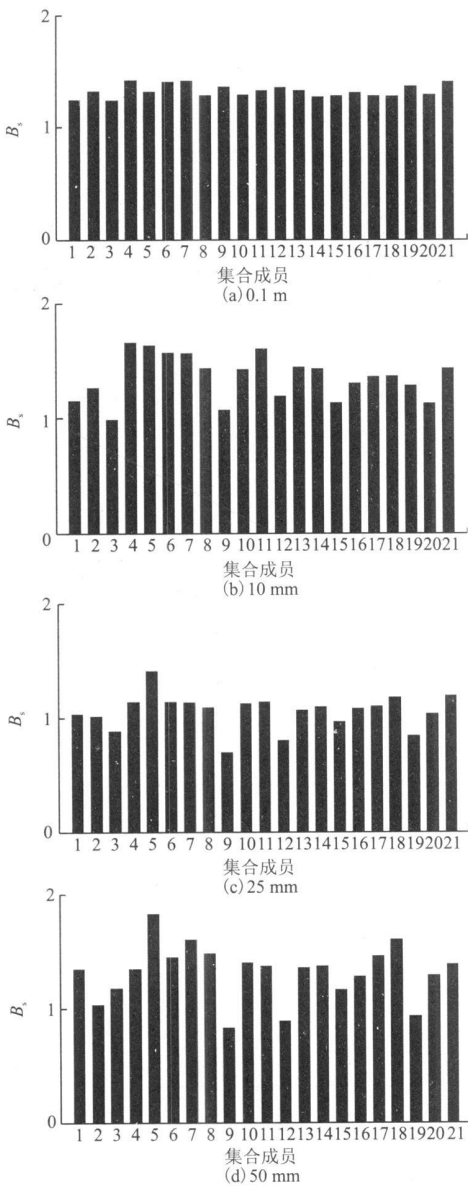
方案	成员	目的
A	8 9 10	分析积云对流参数化方案对降水的影响
B	11 12 13	
C	14 15 16	

表 3 行星边界层方案对降水影响的方案设计

Tab. 3 Schemes of the impact of the PBL scheme on the rain

方案	成员	目的
D	8 11 14	分析行星边界层方案对降水的影响
E	9 12 15	
F	10 13 16	

分别统计了表 2 3 中这 6 组方案在各个量级降水中的  $T_s$  评分最大值与  $T_s$  评分最小值之差,如表 4,差值越大,表明不确定性越大,即对降水的影响越大,反之越小。



注: 1~ 20 表示集合成员, 21 表示集合平均。

图 5 各个不同量级降水的  $B_s$  评分

Fig. 5 Bias scores of the 24 h accumulated precipitation for different grades in the numerical experiment.

表4 Ts评分之差  
Tab. 4 Difference in the Ts

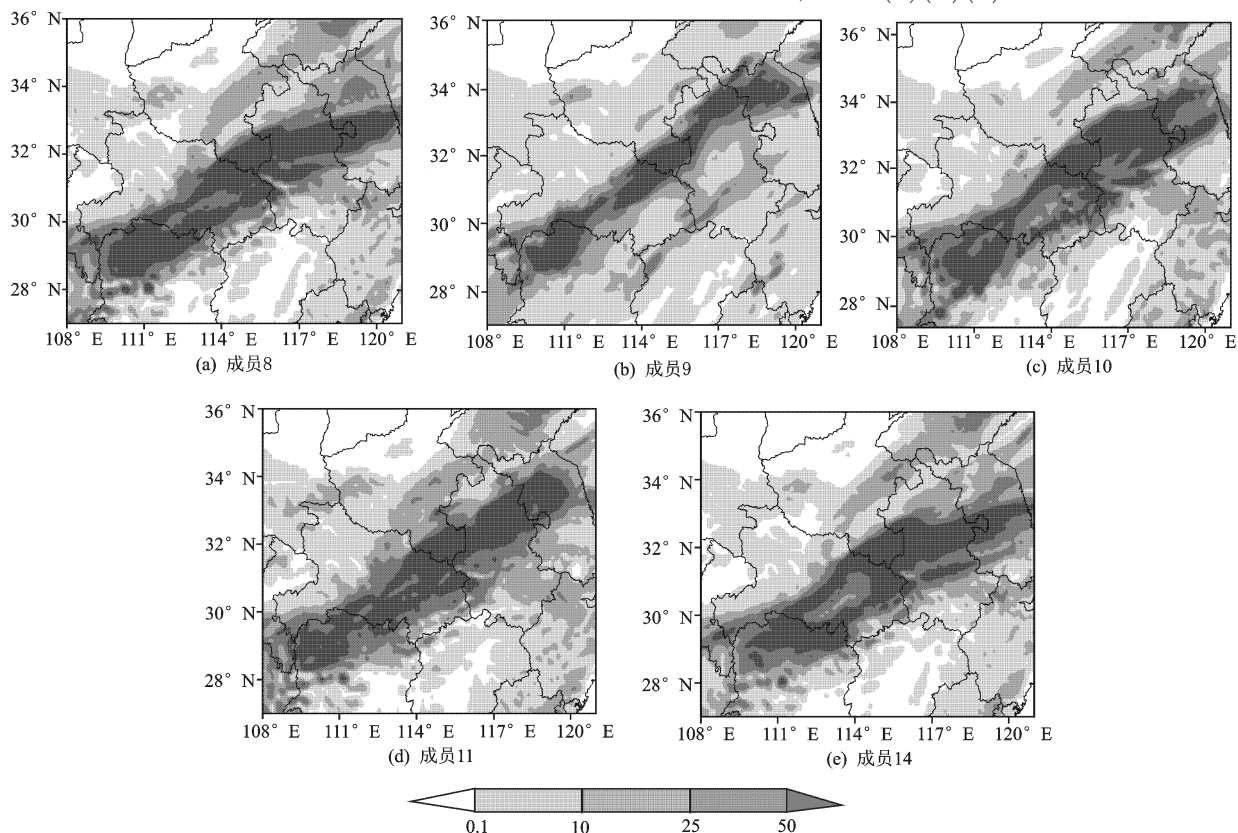
降水量级 /mm	积云对流参数化方案对降水的影响				行星边界层方案对降水的影响			
	A	B	C	平均	D	E	F	平均
0.1	0.0313	0.0219	0.0208	0.0247	0.0142	0.0112	0.0035	0.0096
10	0.0343	0.0647	0.0243	0.0411	0.0623	0.0599	0.0918	0.0713
25	0.2411	0.1496	0.0991	0.1633	0.0482	0.1500	0.1000	0.0994
50	0.1434	0.2082	0.0405	0.1307	0.0842	0.0835	0.0410	0.0696

由表4可看出,对于0.1 mm量级降水,方案A、B和C的Ts评分之差的平均值是方案D、E和F的平均值的2.5倍多,表明改变积云对流参数化方案对降水产生的影响要明显大于改变行星边界层方案对降水的影响;而对于10 mm量级降水,从各自Ts评分之差的平均值来看,改变行星边界层方案对降水的影响要大于改变积云对流参数化方案对降水的影响;对于25 mm量级降水和50 mm量级降水,从各自的Ts评分之差的平均值来看,积云参数化方案对降水的影响要大于行星边界层方案对降水的影响。总体上看,随降水量级的增大,积云对流参数化方案对降水的影响要大于行星边界层方案对降水的影响,产生这种状况的一个基本原因就是积云参数化方案和行星边界层方案对降水的影响机制不同。

陈静<sup>[1]</sup>等指出,边界层方案对底层的热力场影响较大,而积云对流参数化方案对降水量、垂直速度、水汽通量散度影响最大,所以积云参数化方案对降水有直接影响,而行星边界层只是对热力场有影响,所以积云参数化方案对降水的影响大于行星边界层方案对降水的影响。

下面以方案A为分析对象,分析不同的积云对流参数化方案对降水落区的影响,对方案B和方案C进行分析所得的结论与A类似,不再赘述。

图6(a)(b)(c)是集合成员图,其中图6(a)对应成员8,图6(b)对应成员9,图6(c)对应成员10。从图中可看出,积云参数化方案对50 mm量级降水的雨带的分布的影响最明显。实况(图1)中位于江苏东部的暴雨区域,在图1(a)(b)(c)中均没有正确的反映,



注:(a)(b)(c)对应不同的积云对流参数化方案,(a)(d)(e)对应不同的行星边界层方案

图6 不同参数化方案对应的24 h累积降水图(单位:mm)

而且 (a)(b)(c) 中这部分区域的暴雨各不相同,图 6(a) 位于江苏北部,图 6(b) 中位于江苏南部,图 6(c) 位于江苏西部;而位于安徽中部的暴雨区域在 (a)(b)(c) 中也有不同的反映。图 6(a) 中倾向于产生 25 mm 以上的虚假降水,图 6(b) 所产生的 0.1 mm 虚假降水分布要比其余 2 个大。而位于河南北部的一小块降水,在 3 张图上分布各不相同,其中心和形状变化明显。此外,分别计算了图 6(a)(b)(c) 与实况的相关系数,分别为 0.6506, 0.5069, 0.6041。

以方案 D 为对象,分析不同的行星边界层方案对降水分布的影响,对方案 E 和方案 F 进行分析所得的结论与方案 D 相似,不再赘述。

图 6(a)(d)(e) 是集合成员图,其中,图 6(a) 对应成员 8,图 6(d) 对应成员 11,图 6(e) 对应成员 14。从图中可看出,位于江苏东部和安徽中部的降水在 3 张图上均有反映,而且位于河南北部的一小块降水在 3 张图上也始终有反映,并且形状相似,中心始终位于 (34.8°N, 114°E)。图 6(a)(d)(e) 与实况的相关系数分别为 0.6506, 0.6688, 0.6239, 其变化相对积云参数化方案的变化来说非常小。这表明改变行星边界层方案对降水的分布的影响要小于改变积云参数化方案对降水分布的影响。

以上从分析了积云参数化方案和行星边界层方案对降水的影响。从 0.1 mm 量级降水到 25 mm 量级降水,积云参数化方案对降水的影响越来越大,而且较为明显;但是改变行星边界层方案对降水的影响却不明显。而对于 50 mm 量级降水,改变积云参数化方案对降水预报影响相对 25 mm 量级降水的预报来说有所降低;改变行星边界层方案对 50 mm 降水预报的影响要小于改变积云参数化方案对 50 mm 量级降水的影响。

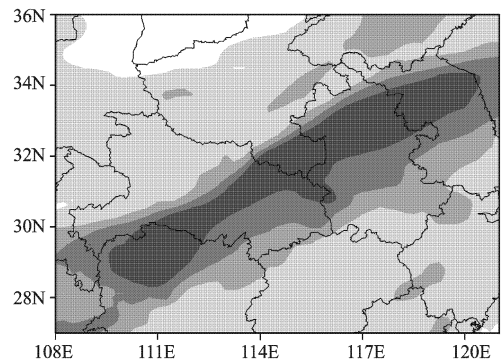
#### 4.4 集合平均结果分析

通过以上分析可知,积云参数化方案和行星边界层方案对降水模拟均有影响,而且随着降水量级的增大,它们对降水的影响有增大的趋势,这种影响使得模拟存在不确定性,影响预报准确率的提高。如何来降低这种不确定性,提高模拟的准确性?集合平均便是一个途径。

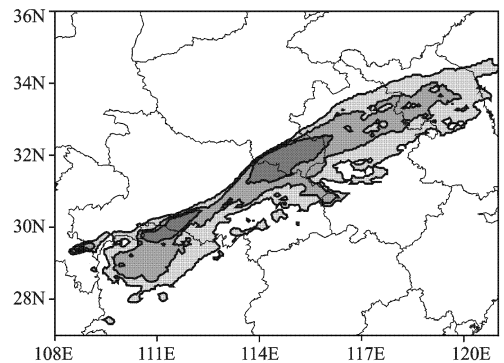
图 7(a) 是各个成员的 24 h 累积降水量集合平均图。从图中可以看出,整个江苏中北部,安徽北部,河南南部的一部分,湖北中部以及湖南北部的部分地区的降水量的集合平均值都达到了 50 mm 以上,相对于各个集合成员来说(图略),集合平均能够明显改善对位于江苏中东部,安徽中部以及湖南北部等

区域的降水的模拟。

图 7(b) 是降水概率分布图,图中的 0.3 0.6 和 0.9 分别表示 30%、60% 和 90% 的概率。在降水概率图上我们可以看到,出现 50 mm 量级以上降水区域的概率都在 0.3 以上。在实际业务运用中,必须对这些区域加以关注。但同时发现,集合平均虚报了湖北中部和河南南部的暴雨,而漏报发生在湖北东部和安徽南部的暴雨,模式的初始场误差和物理参数化方案对降水模拟的不确定性都可能是造成这种不确定性的原因。实况中发生暴雨的区域几乎都包含在 30% 的概率范围内。通过概率预报可以看到湖南北部发生暴雨的概率大于 90%。而实况中这部分地区达到了暴雨。对于在集合平均模拟结果中的范围偏小的暴雨,如安徽南部和湖北东部交接部分,在概率图也有所反映,其中湖北东部发生暴雨的概率大于 60%,安徽南部发生暴雨的概率也在 30% 以上,只是概率有所偏小。总体上看,相对集合成员来说,集合平均能够明显降低模拟的不确定性,提高模拟质量,而且结合降水概率分析 1 可以得到更加准确的模拟结果。



(a) 集合平均



(b) 降水概率

图 7 24 h 累积降水的集合平均 (单位: mm) (a) 和大于 50 mm 量级降水概率图 (b)

Fig. 7 Ensemble mean of the 24 h accumulated precipitation of the 20 members (unit: mm) (a) and the probability over 50 mm (b)

## 5 结 论

本文选取了 2003 年 7 月的一次强降水过程, 以中尺度模式 WRF3.0 作为试验框架, 选用模式中的物理参数化方案进行组合, 构造了 20 个预报成员, 进行了物理过程集合预报试验, 得到了以下结论:

(1) 随着降水量级增大, 各个成员的  $T_s$  评分下降, 表明模式对降水的模拟能力下降, 但下降趋势不同, 从 25 mm 到 50 mm 量级降水, 下降趋势最大, 而从 10 mm 到 25 mm 量级降水, 下降趋势最小; 此外, 成员对降水模拟的不确定性随降水量级增大逐渐增大, 并最终维持在一个较高的水平。

(2) 从 0.1 mm 到 50 mm 量级降水, 根据各成员的  $B_s$  评分的变化, 可知随降水量级的增大, 预报成员不但有高估降水的倾向, 而且还出现了低估降水的倾向; 集合预报对降水始终存在高估, 而且对小雨和大雨的高估程度大, 对中和暴雨的高估程度小。

(3) 积云参数化方案和行星边界层方案对降水的影响不同, 对于 0.1、25 和 50 mm 量级降水, 积云对流参数化方案对降水的影响较大, 而对于 10 mm 量级降水, 行星边界层方案对降水的影响较大。原因是它们各自对降水的影响机制不同, 而这种不同的影响机制使得单一确定性预报存在较大的不确定性, 而集合预报是降低这种不确定性的途径之一。

(4) 集合预报可以降低成员的不确定性, 产生更加稳定、准确的预报结果; 同时结合降水概率分析结果, 可以克服集合平均的一些不足, 降水概率分析可以提供更加丰富的预报信息, 以便做出更可靠集合平均结果。

(5) 试验结果表明, 通过组合模式中的不同物理参数化方案来制作集合预报是可行的。集合平均结果对模拟结果有一定程度的提高, 虽然试验只是集合预报的初步工作, 但是得到的结论是令人鼓舞的。在以后的工作中可对集合方法作深入的研究, 同时需要结合更多的降水个例进行试验, 为制作业务集合预报的开展提供意见。

### 参考文献:

[1] 陈 静, 薛纪善, 颜 宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究 [J]. 气象学报, 2003, 61(2): 508-523.

CHEN Jing, XUE Ji-shan, YAN Hong. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(2): 508-523. (in Chinese).

[2] 陈 炯, 王建捷. 边界层参数化方案对降水预报的影响 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(增刊): 11-17.  
CHEN Jiong, WANG Jian-jie. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(z1): 11-17. (in Chinese).

[3] STENSRUD D J, BAO J W, WARNER T T. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 2077-2107.

[4] 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 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(1): 69-78.  
WANG Chen-xi, DUAN Yi-hong. Experiment and research of short-range ensemble forecasting techniques in forecasting meiyu precipitation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(1): 69-78. (in Chinese).

[5] HONG S Y, Dudhia J, CHEN S H. A Revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 2004, 132(1): 103-120.

[6] GRELL G A, DEVENYI D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. Geophys. Res. Lett., 2002, 29(14): 1693.

[7] PLEIM J E. A combined local and non-local closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing [J]. J. Appl. Meteor. and Clim., 2007, 46(9): 1383-1395.

[8] 孙 建, 赵 平. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析 [J]. 气象学报, 2003, 61(6): 692-701.  
SUN Jian, ZHAO Ping. Simulation and analysis of three heavy rainfall processes in 1998 with WRF and MM5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6): 692-701. (in Chinese).

[9] 赵 洪, 杨学连, 邢建勇, 等. WRF 与 MM5 对 2007 年 3 月初强冷空气数值预报结果的对比分析 [J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 2-8.  
ZHAO Hong, YANG Xue-lian, XING Jian-yong, et al. The analysis of a Yellow Sea cyclone with WRF and MM5 [J]. Marine Forecasts, 2007, 24(2): 2-8 (in Chinese).