

MM4 模式积云参数化方案的改进和检验 : 改进模式的检验试验

董美莹, 俞卫平, 寿绍文

(南京气象学院大气科学系, 南京 210044)

摘要: 为了检验用 Fritsch-Chappell 积云参数化方案改进的 MM4 模式^[1]对梅雨锋暴雨系统的模拟能力, 初步确定该模式的稳定性、可靠性, 用不同的侧边界条件、地形条件、行星边界层参数化方法进行了模拟试验, 并将模拟结果与采用 Kuo-Anthes 积云参数化方案的模式模拟结果分别进行了比较。结果表明, 改进模式对高度场和降水的预报均有改善, 并能预报出一些细致特征。此外, 改进模式对侧边界条件和地形极为敏感, 而对行星边界层参数化方法的敏感性较弱, 因此在模式侧边界条件选取和地形处理方面应十分谨慎。

关键词: 改进 MM4 模式, 检验试验, 相关系数, TS 评分

中图分类号: P435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2001)02-0228-09

众所周知, 由于模式对物理过程参数化描述不尽精确及计算条件的限制, 在模式的数学表达式中不得不做各种假定和简化; 同时, 大气变量初始场仅是从有限空间点获取, 因此, 大气数值模式不可能完全精确地表示真实大气。对数值模式的检验试验就是就其输出结果与相应实际观测给出定量关系和评价。要评价一个模式的性能, 必须要有一套客观的检验模式预报能力的技术。文献[1]用改进 Fritsch-Chappell 积云参数化方案(以下简称 F-C 方案)取代 Kuo-Anthes 积云参数化方案^[2](以下简称 K-A 方案), 将 MM4 模式^[1]作了改进。这些改进一方面是根据原始 F-C 方案^[3]的基本原理和特点; 另一方面还结合了积云属性的新的研究成果^[4]。显而易见, 这些改进都是有理论依据的。但是, 在实际应用中改进模式是否真能提高对梅雨锋暴雨系统的预报能力, 改进模式的稳定性、可靠性、敏感性又如何, 都只能通过对模式的检验试验才能知道。为此, 设计了参照试验和对比试验两类试验, 并对两类试验中模式对高度场及降水的预报结果进行对比分析。

1 检验试验的设计

检验试验分为两类: 一类是选用 K-A 方案的参照试验, 包括海绵侧边界和时变海绵侧边界条件下的 2 个试验; 另一类是选用 F-C 方案的对比试验, 包括不同地形、不同侧边界、不同行星边界层参数化时的 4 个试验。表 1 给出了各试验的参数化方案、边界条件及具体参数。

收稿日期: 2000-01-17; 修订日期: 2000-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 49775259

作者简介: 董美莹, 女, 1973 年 10 月生, 硕士, 现在浙江省气象台工作

1) Hise E Y. MM 4 (Penn State/NCAR) mesoscale of model version 4 documentation. 1987

表 1 各检验试验设计

Table 1 The experiment schemes for model verification

试验名称	水分循环	侧边界条件	地形资料分辨率	行星边界层参数化方法	格距 (km)	格点数	步长 (s)
KA	K-A 方案	海绵	$1^\circ \times 1^\circ$	总体 PBL	60	$41 \times 41 \times 10$	95
KAT	K-A 方案	时变海绵	$1^\circ \times 1^\circ$	总体 PBL	60	$41 \times 41 \times 10$	95
FC	F-C 方案	海绵	$1^\circ \times 1^\circ$	总体 PBL	30	$61 \times 61 \times 10$	40
FCP	F-C 方案	海绵	$1^\circ \times 1^\circ$	高分辨 PBL	30	$61 \times 61 \times 10$	40
FCD	F-C 方案	海绵	10×10	总体 PBL	30	$61 \times 61 \times 10$	40
FCT	F-C 方案	时变海绵	$1^\circ \times 1^\circ$	总体 PBL	30	$61 \times 61 \times 10$	40

考虑到改进 MM4(选用 F-C 方案)的特点和模拟对象是水平尺度在 20~200 km, 时间尺度是几小时至十几小时的中- β 尺度系统, 模拟中将水平格距取为 30 km, 模式中心、模拟区域和诊断区域如图 1、2 所示, 积分时间取为 18 h。由于取格距为 30 km 时, 水平分辨率较高, 为使模式的水平与垂直分辨率相互协调, 垂直分层也应加密。但由于现有计算机条件和计算时间的限制, 这些改进将在今后进行。

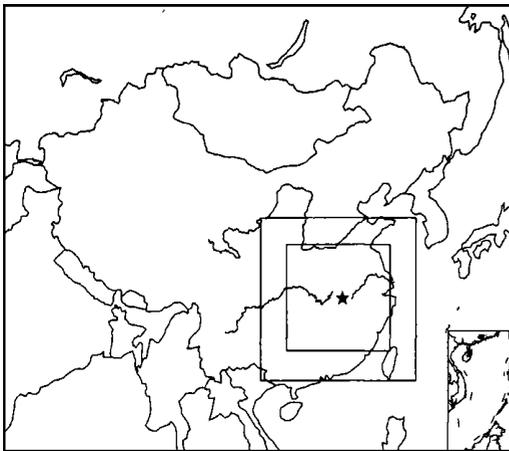


图 1 模式中心(星号处)、模拟区域(外矩形区)和诊断区域(内矩形区)示意图

Fig. 1 The illustration of model domain (shown as the outer rectangular) with its center (shown by a star) and diagnostic area (shown as the inner rectangular)

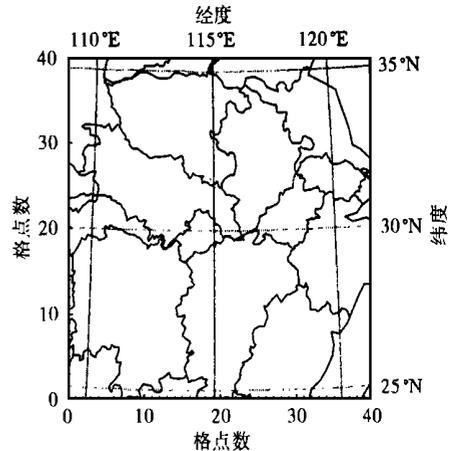


图 2 模式诊断区域内地形坐标及对应的模式直角坐标中格点

Fig. 2 The latitude-longitude grid point distribution associated with model rectangular coordinate

2 试验资料和处理方法

各试验的初始场资料取自 T₄₂模式每隔 12 h 输出的动力协调资料, 包括 7 层(1 000、850、700、500、300、200、100 hPa) 垂直分布的温、压、湿、风场资料。初始场时间定于 1991 年 7 月 5 日 20 时, 将 1991 年 7 月 6 日 08 时的资料用于效果检验。此外, 用于降水预报检验的降水实况资料取自苏、皖、豫、鄂 4 省 288 个地面测站的逐时雨量资料。对以上资料作客观分析^[5]时, 水平方向采用 Cressman 逐步订正法, 垂直方向采用 Lagrange 插值方法。

3 模拟效果的初步检验

3.1 高度场预报检验

高度场是模式预报的重要物理量之一, 能否较好地预报高度场在很大程度上反映模式的可靠性。根据试验设计, 分别进行了 18 h 模拟, 并将各试验模拟 12 h 的输出结果与 6 日 08 时的高度场实况进行了相关系数统计检验。相应于两类试验不同格距的选取, 将实测高度场也做同样处理, 然后对他们分别求相关。相关系数的计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中 x_i, y_i 分别是预报高度场和实况高度场; N 为格点数; \bar{x}, \bar{y} 分别代表预报场、实况场的平均值。表 2 给出各试验 850、700、500 hPa 的高度场与实测场的相关系数。由表可见, 取海绵侧边界条件时高度场与实况的相关性普遍较好, 相关系数在 0.94 ~ 0.99 之间; 而在同一侧边界条件下, 具体的相关性不尽一致。

表 2 各试验 12 h 模拟高度场与实况的相关系数

Table 2 The correlation between the observed geopotential height and 12 h-predicted variable for each experiment

高度/hPa	模拟高度场与实况的相关系数					
	KA	FCD	FC	FCP	KAT	FCT
850	0.882 47	0.334 69	0.900 76	0.899 00	0.967 23	0.946 44
700	0.892 58	0.412 83	0.903 52	0.905 14	0.988 52	0.965 92
500	0.860 66	0.607 90	0.952 30	0.927 45	0.987 63	0.978 40

3.1.1 海绵侧边界条件^[6]

海绵侧边界条件是指在边界向内的一定范围内设置一个过渡带, 这个过渡带称为“海绵边界”; 它可由公式表示为

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_n = w(n) \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x}\right)_{MC}, n = \begin{cases} 1, 2, 3, 4 & \text{对叉点变量;} \\ 1, 2, 3, 4, 5 & \text{对圆点变量。} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 表示任何变量; 下标 MC 表示由模式计算的倾向; n 是从最靠边界 ($n=1$) 算起的网格点数 (图 2)。对于叉点变量, 权重系数从边界向内依次取 0.00、0.40、0.70、0.90; 而对于圆点变量, 各权重又是 0.00、0.20、0.55、0.80、0.95; 对其内域格点, 有 $w(n)=1$ 。

由表 2 提供的数据可知, 如果地形资料分辨率均是 $1^\circ \times 1^\circ$; 那么采用 F-C 方案的模拟高度场与实况的相关大体比参照试验好一些。其中, 若采用总体行星边界层参数化, 500 hPa 的相关系数比参照试验大 9%, 3 层相关系数平均提高约 4%; 若采用 Blackadar 高分辨行星边界层, 3 层相关系数平均提高 3%。但是, 当对比试验选用高分辨率 ($10^\circ \times 10^\circ$) 的地形资料时, 相关性明显变小, 850 hPa 的相关系数仅有 0.33。由此可见, 用 F-C 方案改进的 MM4 对地形十分敏感, 采用高分辨率地形后能使模式地形变得不够平坦, 甚至不连续, 导致陡坡地形下气压梯度力计算的困难及积分过程中产生不稳定, 最终影响模拟的质量。因此, 处理地形问题时尤为谨慎。

3.1.2 时变海绵侧边界条件^[7]

所谓时变海绵侧边界条件,就是在上述海绵侧边界条件的基础上再考虑大尺度提供的边界倾向(文中取5日20时到6日08时实况场的12 h平均倾向作为大尺度倾向)。因此,此时侧边界条件由大尺度时变倾向和模式计算倾向两部分组成,若以方程表示,则比(2)式多了大尺度边界倾向项,即

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_n = w(n)\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{MC} + (1-w(n))\left(\frac{\partial x}{\partial t}\right)_{LS}, \quad n = \begin{cases} 1, 2, 3, 4 & \text{对叉点变量;} \\ 1, 2, 3, 4, 5 & \text{对圆点变量。} \end{cases} \quad (3)$$

式中下标LS代表大尺度倾向。由上式可知,如果大尺度倾向为零,即无大尺度的边界倾向,那么(3)式与(2)式等同。从此意义上说,海绵边界条件是时变海绵边界条件的一个特例。

采用时变海绵边界条件时,各层次模拟高度场与实况的相关普遍较好(表2)。进一步比较还可发现,选用F-C方案得到的结果的相关系数虽略有降低(平均而言,大概降低了1%),但也均大于0.94,所以,该模拟结果还是不错的。

通过对850、700、500 hPa高度场的相关分析得到,总体上,F-C方案的应用使得模式对高度场的模拟能力有了提高,其中以FC试验的模拟结果为最好。

图3、4分别是FC试验、参照试验输出的12 h模拟结果与高度场、温度场实况。由图3可知,FC试验基本预报出了850 hPa实况中存在于湖北上空的1440 gpm的低压,中心强度及范围均与实况大体相当,而K-A方案却未能预报出来;700 hPa上的情况也大抵如此。再看500 hPa(图4),F-C方案模拟的高度场的主要槽区和等高线的整体走向与实况场的吻合程度比K-A方案要好。这些结果与定性分析结果是一致的。另外,从温度场的分布可得,F-C方案还模拟出了许多细致特征——实况中并没有或者说实况中没法观测到而实际上是合理存在的具体特征。如图3所示,F-C方案模拟出低压区对应一个冷中心。我们知道,该低压区对应地面暴雨,由于F-C方案考虑了下沉气流及夹卷作用,从中层卷入的干冷空气随湿下沉气流下沉过程中强烈蒸发冷却,在地面形成一个冷空气堆,故而出现了冷中心。而在中高层如500 hPa,由于湿上升气流中水汽的不断凝结,持续释放的潜热不断加热大气,因此该高度上的地面暴雨区上空暖心结构明显。实际上,这也是F-C方案得出的典型温度场分布^[7]。这种温度场的高层配置是合理的,并已在一些实际观测^[8]中得到验证。本文所用实况场中没有出现上述特征可能是由于观测密度不够而造成的。

3.2 降水预报检验

近几年,有关降水预报检验的研究^[9,10]指出,现有的统计检验方法虽不甚理想,但使用TS评分指标进行分析比较,对于判断不同技术方案的优劣、评价模式的改进仍不失为一种可取的方法。因此,沿用传统TS评分的定义,分别定义了3个评分指标 TS_1 、 TS_2 、 TS_3 。

$$TS_1 = \frac{\text{预报正确降水面积内的降水量}}{\text{实况发生降水面积内的降水量} + \text{空报降水面积内的降水量}} \times 100\%; \quad (4)$$

$$TS_2 = \frac{\text{预报正确降水面积}}{\text{实况发生降水面积} + \text{空报降水面积}} \times 100\%; \quad (5)$$

$$TS_3 = 0.2 \times TS_1 + 0.8 \times TS_2. \quad (6)$$

由以上定义可知, TS_1 衡量对降水量的预报能力, TS_2 衡量对降水落区预报的准确程度,而 TS_3 则是对 TS_1 和 TS_2 的一个加权平均值,用来衡量对降水量及降水落区的综合预报能力。显然, TS_3 的计算涉及到两个权重的确定,它的取值取决于人们对降水量和降水落区的重视程度。一般而言,人们更为关注降水落区问题,因此本次试验中将降水落区的权重取为0.8,

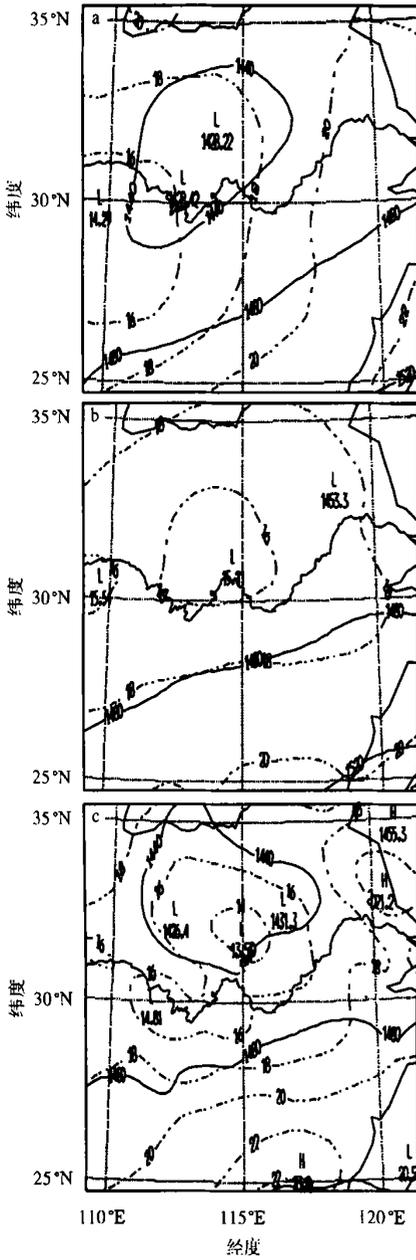


图3 7月6日08时850 hPa高度场(实线, 单位:gpm)和温度场(虚线,单位:)的比较
a. 实况; b. K-A 方案预报结果; c. F-C 方案预报结果

Fig. 3 The distribution of geopotential height (solid lines) in unit of gpm and air temperature (dashed) in unit of degree of Celsius at 800 hPa at 0000 GMT 6 July, 1991. The observed is shown in (a), the predicted with K-A scheme in (b) and the predicted with F-C scheme in (c)

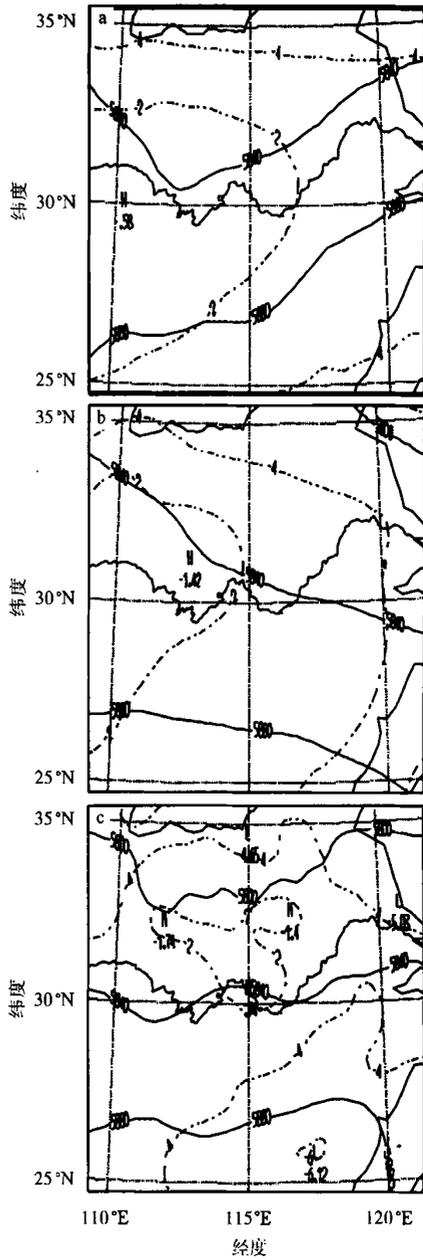


图4 7月6日08时500 hPa高度场(实线, 单位:gpm)和温度场(虚线,单位:)的比较
a. 实况; b. K-A 方案预报结果; c. F-C 方案预报结果

Fig. 4 The distribution of geopotential height (solid lines) in unit of gpm and air temperature (dashed) in unit of degree of Celsius at 500 hPa at 0000 GMT 6 July, 1991. The observed is shown in (a), the predicted with K-A scheme in (b) and the predicted with F-C scheme in (c)

而将另一权重取为0.2。当然,这种取法仅是一种大致的估计。为全面起见,分别计算了以上3个指标以供具体分析所用。由于降水的分布具有很强的局地性,故反映降水的平均特征不如较

好地预报主要降水分布重要, 因此, 本文进行分级降水评定和主要降水评定。

3.2.1 分级降水评定

分级降水评定指的是取一定的临界降水量 R_c , 对所有大于 R_c 的降水量进行 TS 评分比较。将预报的 12 h 累积降水分为 3 个级别, 临界值 R_c 分别是 0.00 mm、12.50 mm、25.00 mm。当 R_c 等于 0.00 mm 时, 计入所有发生降水的格点进行 TS 评分, 它反映对总体降水的平均特征的预报能力; 而 R_c 等于 12.50 mm 和 25.00 mm 分别表示对重要降水和暴雨预报的 TS 评分, 两者反映的是对较强降水的预报能力。评分结果见表 3。

表 3 各试验分级降水 TS 评分

Table 3 The categorical TS assessment for rainfall in each experiment

试验名称	$R_c = 0.00$ mm			$R_c = 12.50$ mm			$R_c = 25.00$ mm		
	TS_1	TS_2	TS_3	TS_1	TS_2	TS_3	TS_1	TS_2	TS_3
KA	0.397	0.614	0.571	0.083	0.171	0.154	0.000	0.000	0.000
FC	0.335	0.432	0.413	0.228	0.397	0.363	0.099	0.158	0.146
FCD	0.280	0.408	0.382	0.138	0.253	0.230	0.039	0.062	0.057
FCP	0.412	0.481	0.467	0.191	0.326	0.299	0.094	0.154	0.142
KAT	0.354	0.498	0.469	0.089	0.164	0.149	0.000	0.000	0.000
FCT	0.150	0.231	0.215	0.093	0.156	0.144	0.050	0.069	0.065

分析表 3 提供的数据可得, F-C 方案对重要降水尤其是对暴雨的预报能力较 K-A 方案有明显提高。将后两级 TS 评分作一比较还可发现, 两者的 TS 评分结果比较一致, 且均以 FC 试验的 TS 评分为最高。结果表明, F-C 方案对于强对流系统的预报能力比 K-A 方案强得多, 预报的降水量更接近实况。这与 F-C 方案中既考虑了上升气流作用又考虑了下沉气流作用, 并允许下沉气流触发新的上升气流而使降水加强有关; 同时, F-C 方案中引入的积云模式的其他方面能较好刻画出深对流云的具体特征也是使得预报降水更接近实况的原因所在。

3.2.2 主要降水评定

主要降水评定是指将大于平均值的实况降水和大于平均值的预报降水进行 TS 评分。主要降水评定类似于分级降水评定中的后两级评定, 只是将实况降水及预报降水的临界值分别取为各自的平均降水量(依次记为 R_{c1} 和 R_{c2})。作此考虑的原因在于模式预报的降水量往往要比实况降水量小, 若两者用同一个临界值来衡量, 那么取定的适合于实况的临界值对于预报降水量而言很可能要求过高, 以致于出现表 3 中的 TS 评分为零的情况。所以, 主要降水评定过程中, 将所有降水量大于 R_{c1} 的实况降水和降水量大于 R_{c2} 的预报降水参加评分, 计算公式仍是(4)~(6)式, 计算结果列于表 4。

表 4 各试验主要降水 TS 评分

Table 4 The major rainfall TS assessment in each experiment

试验名称	TS_1	TS_2	TS_3	R_{c1}/mm	R_{c2}/mm
KA	0.058	0.267	0.225	16.04	10.22
FC	0.143	0.318	0.283	21.82	13.77
FCD	0.064	0.164	0.144	21.82	13.01
FCP	0.109	0.253	0.224	21.82	14.41
KAT	0.050	0.160	0.138	16.04	11.07
FCT	0.079	0.192	0.169	21.82	13.91

由主要降水评定的概念可知, 它反映了实况降水极值区与预报降水极值区

的吻合程度,反映了对主要降水的预报能力。分析比较表 4 中的数据易得,评定结果与表 3 中后两级的评定结果大体一致,仍以 FC 试验的 TS 评分最高,并将 TS_3 的评分由原来的 0.225 提高到了 0.283。

由以上评分结果可知,FC 试验,即采用 F-C 方案、总体行星边界层参数化方法、 $1^\circ \times 1^\circ$ 低分辨率地形(较 $10^\circ \times 10^\circ$ 分辨率而言)、海绵边界条件时,模式对降水的模拟效果较好。为加深认识,用 FC 试验输出的 12 h 累积降水、每隔 3 h 的降水结果和苏、皖、鄂、豫 4 省的实况降水资料进行了比较,发现 F-C 方案预报的 12 h 累积降水的雨区范围和雨带走向与实况更为相似。另外,从每 3 h 的降水分布看(图 5,为简明起见,图中显示的是降水的极值区),预报降水

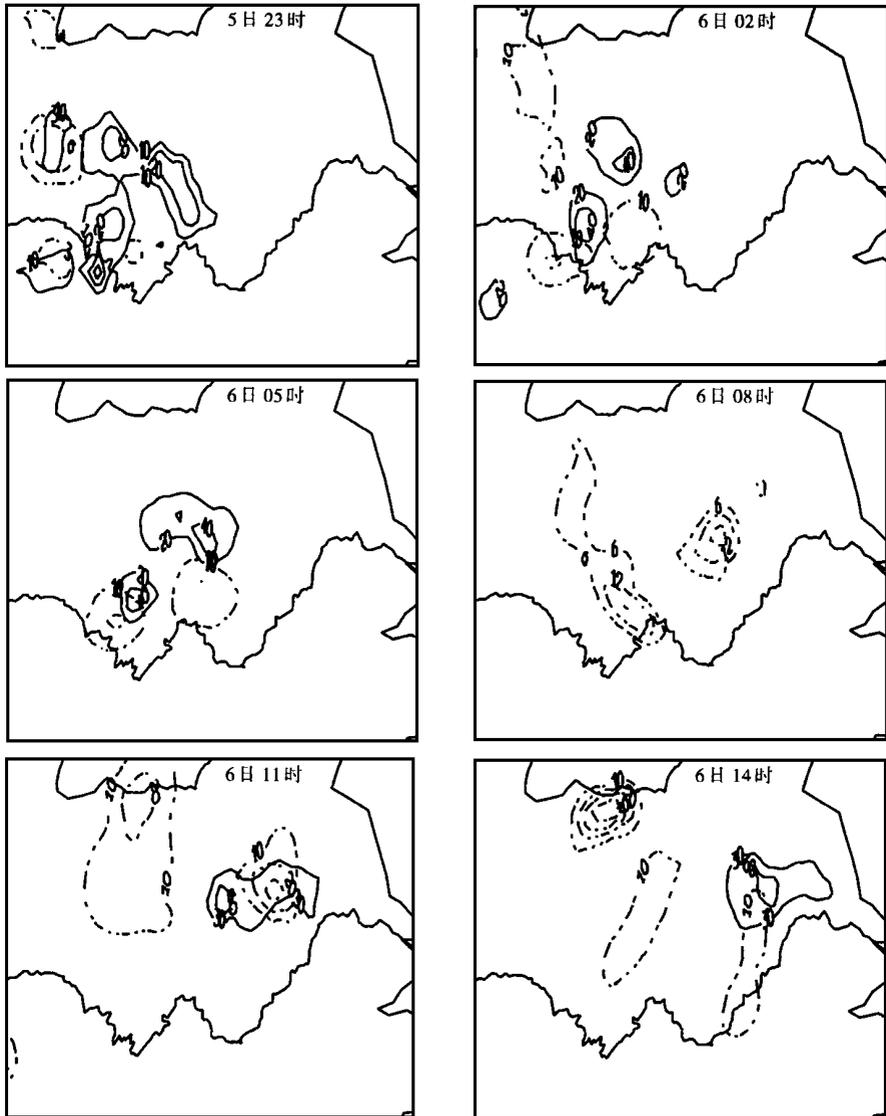


图 5 FC 试验预报的每 3 h 降水量极值区(---)与实况(——)分布及其演变(单位: mm)

Fig. 5 Comparison of maximum rainfall in unit of mm (3 h accumulated) and its evolution with time from 1200 GMT 5 July 1991 to 0600 GMT 6 July 1991 between the observed and predicted (F-C scheme) results

极值区基本位于实况极值区附近或与其吻合,移向也与实况大体一致。

4 结 语

(1) 采用 F-C 方案改进的细网格 MM4 模式的预报能力比原 MM4 增强了,其中以 FC 试验的总体效果最好。尤其值得一提的是,改进模式能刻画出梅雨锋暴雨系统中的一些更为细致的特征,对深入了解和研究梅雨锋暴雨系统将十分有帮助。

(2) 改进模式对地形和侧边界条件极为敏感,而对行星边界层参数化方法的敏感性较弱。高分辨率地形的引入使得计算中易出现噪声,预报效果反而不好,因此模式地形的处理是否得当十分重要。采用海绵边界条件时的降水预报效果比采用时变海绵边界条件时效果好,而对高度场的预报却是前者比后者略差。实际模拟中,选择大尺度倾向存在着不确定性,预报降水对此也相当敏感,因为这相当于初始场中加入了一个大尺度倾向,这可理解为模式对不同初始场的敏感性的反映。选用两种行星边界层参数化方法得出的模拟结果比较一致,可能与模式中垂直分层不等距和分辨率不够高有关。

总而言之,改进的 MM4 模式虽然仍有不少可以继续改进的地方,但与原模式相比,模式对梅雨锋暴雨系统的模拟效果已有了可喜的提高,对重要降水和高度场的预报均有不同程度的改善。事实上,这些结果也正是我们所预料的。考虑到所用资料本身的局限和现有的运行环境条件的限制,应该说,这样的结果还是比较令人满意的。

参考文献:

- [1] 董美莹,俞卫平,寿绍文. MM4 模式积云参数化方案的改进和检验 : MM4 模式积云参数化方案的改进[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 66 ~ 73
- [2] ANTHES R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model[J]. Mon Wea Rev, 1977, 105(3): 270 ~ 287
- [3] FRITSCH J M, CHAPPELL C F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part 1: Convective parameterization[J]. J A S, 1980(a), 37(8): 1722 ~ 1733
- [4] KAIN J S, FRITSCH J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization[J]. J A S, 1990, 47(23): 2784 ~ 2802
- [5] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法[J]. 中国科技大学研究生院, 1993. 11 ~ 12
- [6] 程麟生. 中尺度大气数值模式[M]. 北京: 气象出版社, 1994. 313 ~ 383
- [7] ZHANG D L, FRITSCH J M. Numerical simulation of Meso- β scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part 1: Model description and verification[J]. J A S, 1986, 43(18): 1913 ~ 1943
- [8] 张丙辰. 长江中下游梅雨锋暴雨的研究[M]. 北京: 气象出版社, 1990. 109 ~ 139
- [9] 崔波, 王建捷, 郭肖容. MM5 在国家气象中心 CRAY-C92 的实时预报试验尝试[J]. 应用气象学报, 1999, 10(2): 129 ~ 140
- [10] 陈爱琴, 阎之辉, 郭肖容. 降水检验方法的试验研究[C]. 见: 85-906-03 课题组主编. 台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究. 北京: 气象出版社, 1996

Improvement and examination of the cumulus parameterization of MM4 model : examination of the improved version of the model

DONG Mei-ying, YU Wei-ping, SHOU Shao-wen

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: Some numerical experiments are carried out with the improved MM4 model by incorporating with different lateral boundary conditions and topographic forcing as well as the different parameterization schemes of the planetary boundary layer. This helps us to understand the reliability of the model and to verify whether the model is able to simulate the Mei-yu front systems together with the storm events when the Fritsch-Chappell cumulus parameterization scheme is incorporated. A comparison is made between the simulation with Fritsch-Chappell cumulus parameterization and that with Kuo-Anthes scheme. It is found that the forecasting skill of geopotential height and rainfall is significantly improved in the improved MM4 model. The improved version of the model is very sensitive to the lateral boundary condition and the topography other than the parameterization scheme of the planetary boundary layer. It should be very careful if the lateral boundary condition or topographic forcing in the model is changed.

Keywords: the improved MM4 model, verification experiment, correlation coefficient, TS assessment