

高分辨率有限区业务数值预报 模式及降水预报试验*

闫之辉 赵俊英 朱 琪 郭肖容

(国家气象中心, 北京 100081)

张玉玲

(北京大学, 北京 100871)

提 要

该文介绍了国家气象中心在原业务有限区模式基础上开发的一个新的高分辨率有限区模式(HLAFS)。该模式除分辨率提高外,其主要改进表现在:(1)增加了地面土壤过程、地面辐射过程、地面摩擦及边界层垂直湍流输送;(2)积云对流参数化方案改用质量通量方案取代了原来的Kuo方案。文章还对模式的准业务运行结果作了较全面地评述。

关键词: 有限区预报 质量通量 暴雨预报

引 言

“八五”期间,国家气象中心在原业务有限区分析预报系统(LAFS)^[1]的基础上,建立了新一代的有限区同化预报业务系统(HLAFS),并于1996年5月15日正式投入业务运行,其48h内的降水量预报和一些诊断量产品提供全国各级气象台站使用。

与原业务系统相比,HLAFS系统主要在以下几个方面进行了改进:

(1)建立了有限区资料同化系统^[2]每天做24h资料同化,同化间隔为6h,第一次同化分析由中期预报模式T63L16提供初估场,其它3次则由有限区模式自身提供的6h预报作初估场,同化预报的侧边界值也由中期预报模式提供。分析方案由原来的等压面分析改为等 σ 面分析,减小了初值形成过程中等压面和等 σ 面之间的多次插值造成的插值误差。

(2)初值化方案由绝热非线性正规初值化方案改为非绝热非线性正规初值化方案^[3],有效地考虑了初始场非绝热过程产生的影响。

(3)预报模式主要进行了以下几方面的改进:①水平分辨率由原来的 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 提高到 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格;②在基本方程和初值形成过程中引入了虚温效应,使

* 本文由85-906-03课题资助。

1996-08-27收到,1997-03-05收到修改稿。

得温度场和湿度场的分布,尤其是在低纬度地区更为合理;③引入了地面土壤过程、地面辐射过程及边界层垂直湍流输送,特别是积云对流参数化采用了质量通量方案,从而使模式包含了更为完善的物理过程;④侧边界条件由 T63 L16 中期预报模式提供.

(4) 降水预报检验方案也由原来的基本站点检验法改为预报格点检验法^[4],即以基本预报格点为基本样本进行检验量的统计计算. 这样既省去了检验基本站点选择的麻烦,避免了因观测站点的变化而产生的统计误差,也使降水检验在模式分辨率变化时能得到较为合理的结果,增加了检验结果的可比性.

1 预报模式的改进

预报模式为等经纬度网格球面坐标原始方程模式,垂直方向取经典 σ 坐标,模式的变量分布、垂直分层、差分方案、时间积分方案等与原业务模式基本相同^[1]. 模式中对物理过程作了较大变动^[5],此外关于次网格积云对流参数化过程使用了质量通量方案,取代了原来的 Kuo 方案.

1.1 模式物理过程的变动

模式中引入了地面土壤过程、地面辐射过程、地面摩擦及边界层垂直湍流输送^[5]. 方案中,地面辐射方案主要考虑了地面辐射收支平衡,即太阳短波净辐射、大气及云向地面的散射和地面向外层空间放出的长波辐射. 大气辐射中的加热、冷却作用未加考虑. 地面土壤过程主要考虑了土壤温度及土壤湿度的变化情况. 按照地面特征把地面分为洋面和陆地两种情况,对于洋面格点,温度和湿度在积分过程中保持不变;对于陆地格点,由一个 3 层模式描述土壤变化过程,3 层的厚度分别为 $D_1=0.072\text{ m}$, $D_2=D_3=6D_1$,这种厚度的划分大致描述了土壤的日变化、中期变化和年变化的深度. 土壤过程中温度特征的变化用简单的扩散方程加以描述,并考虑了雪盖、雪融对地表温度和湿度的影响. 地面摩擦及边界层内垂直湍流输送过程,除考虑了摩擦及动量的垂直输送外,还考虑了对显热潜热的垂直输送,地面水气的蒸发过程. 同时在确定垂直扩散的高度时,引入了动力边界层高度和对流边界层高度的概念,即当大气层结稳定时,垂直扩散高度由动力边界层高度确定;而当大气层结不稳定,且不稳定高度超过动力边界层高度时,垂直扩散高度由对流边界层高度确定. 详细计算方案见参考文献^[5].

1.2 次网格积云对流参数化方案

在目前的数值预报模式中,次网格尺度积云对流的作用是十分重要的,它不仅直接影响到降水预报的准确性,同时对模式大气的温度场和湿度场的分布、动力场的垂直结构等也将产生较大的影响. 尤其在目前分辨率较低的情况下,如何较为合理地描述这一过程对大尺度环境场的影响是积云对流参数化方案要解决的主要问题. 在模式研制过程中,我们对目前应用较为广泛的 3 种积云对流参数化方案,即 Kuo 积云对流参数化方案^[6]、Betts 对流调整方案^[7]和质量通量方案^{[8][9]}进行了对比试验. Kuo 方案是继对流调整方案后应用广泛且较为成熟的一种方案,目前世界上多数国家的业务数值预报模式采用了这种方案并已收到了较好的预报效果. 此方案主要考虑了在不稳定层结下,大尺度水汽辐合通过垂直输送而产生对流凝结的过程. 在此过程中,由大尺度过程辐合的水

汽, 一部分直接凝结作为对流降水降落到地面, 另一部分则增湿环境大气. 由此产生的凝结潜热通过侧面混合使环境大气增温. Betts 对流调整方案是以热带对流活动的事实为依据, 统计了积云对流活动中所产生的温湿垂直结构的特征, 而得到较合理的温湿廓线, 并以此为依据把模式大气的温湿结构调整到这一特定的状态. 质量通量方案中则考虑了对流过程中由于空气质量的垂直输送、云和环境空气间的卷入、卷出而产生的质量场和动力场的垂直变化. 与前两种方案相比, 质量通量方案中除考虑了温湿场的变化外, 同时也考虑了积云对流过程对流场造成的直接影响及对流过程中卷入卷出对环境大气产生的影响. 质量通量方案中, 积云对流发生发展的条件为:

$$H_c > H \quad (1)$$

式中 H 为湿静力能量, $H = C_p T + Lq + gZ$, 下标 c 表示云中量, C_p 为定压比热, $C_p = C_{pd} + (C_{pv} - C_{pd})q$, L 为水汽的有效凝结潜热. $L = L_0 + (C_{pv} - C_{pd})(T - T_*)$, L_0 是温度为 0°C 时的凝结潜热, T_* 为模式最低层的温度.

$$\frac{\partial q}{\partial t} > 0 \quad (2)$$

即存在大尺度水汽辐合.

积云对流对大尺度环境场的影响由下式表示:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -M_c \frac{\partial X}{\partial p} + D(X_c - X) \quad (3)$$

式中 X 代表 u, v, q 和 H , X_c 为云中量, D 是对流过程中云团边缘区由云内向云外的卷出, M_c 是云中垂直方向的质量通量. 从式(3)可以看出, 积云对流对大尺度量的影响, 主要通过云中的质量通量和云内向云外的卷出.

根据空气的连续性和不可压缩性假定, M_c 应服从下述关系:

$$\frac{\partial M_c}{\partial p} = D - E \quad (4)$$

式中 E 为通过云的边缘区由云外向云内的卷入. 把式(4)代入式(3)可得

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{\partial(M_c X)}{\partial p} + (DX_c - EX) \quad (5)$$

式中右端第一项为垂直通量项, 第二项是卷入卷出的影响.

方案中使用了下述 3 个假定:

$$-\frac{\partial M_c}{\partial p} = \left(\frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial t}\right) \quad (6)$$

$$D = K \cdot M_c \quad (7)$$

$$-\frac{\partial M_c X_c}{\partial p} = EX - DX_c \quad (8)$$

上述假定中 K 为经验常数. 环境大气向云中的卷入由式(4)求出. 此外, 假定地面向上的质量通量, 即 $M_c|_{\sigma=1} = 0$.

在云底层有 $X_c = X$ (对 u, v, H)

$q_c = q_s(T_w)$ (T_w 是湿球温度)

积云对流产生的对流降水由下式计算

$$R = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_b} \left(\frac{\partial M_c q_c}{\partial p} + Eq - Dq_c \right) dp \quad (9)$$

式中 p_t , p_b 分别为云顶和云底的气压, q 为模式格点上预报的比湿, q_c 为云中的比湿, 其中包括环境温度下的饱和比湿和由垂直质量通量产生的云水部分. 从式(9)可以看出, 积云对流产生的降水可分为两部分, 一部分是由垂直质量通量造成的各层水分的增加, 另一部分是由卷入卷出产生的水分的净增量. 当卷入总量大于卷出时, 增加的水分转化为液态水; 如卷入小于卷出时, 则液态水会蒸发. 各层总的凝结量最终作为对流降水下落到地面.

1.3 3种积云对流参数化方案的对比试验

针对上述3种方案, 我们进行了若干个例对比试验, 这里仅给出1993年7月12日08:00时(北京时)的一次强降水过程的部分试验结果. 这次强降水过程, 降水落区出现

在河套以东的黄河中下游地区, 50 mm 的雨量等值线呈东西向带状分布, 从河套东部向东一直延伸到东部沿海, 其中3个站24 h 累积降水量超过了100 mm. 降水主要集中在12日08:00到13日08:00这一时段内, 13日08:00时后, 主要降水区东移至海上. 针对这一强降水过程, 我们对预报中心降水强度及大尺度降水和对流降水比例分布、温度反馈和对垂直速度场的影响进行了对比.

图1给出了3种方案的强降水中心雨量预报的大尺度降水与对流降水在总降水中所占的比例. 图中显示, 质量通量方案(MFL)中预报的最大降水量中心总降水量(RT)达到101 mm, 与实况较为接近, 其中, 大尺度降水(RL)为43 mm, 对流降水(RC)为58 mm, 约占总降水的58%左右, 这与夏季强降水多以对流性降水为主的观测事实较为一致. 由Betts方案(BET)得到的最大降水量预报为64 mm, 其中, 大尺度降水为59 mm,

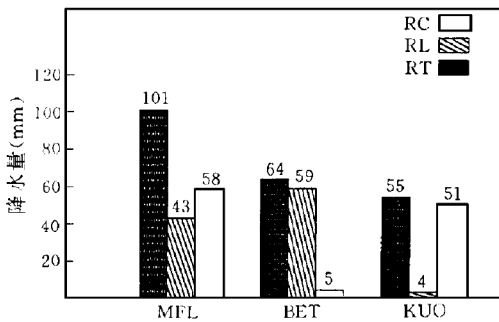


图1 3种方案降水量对比图

Fig. 1 The Precipitation amounts of RT, RL and RC predicted by three convection parameterization schemes

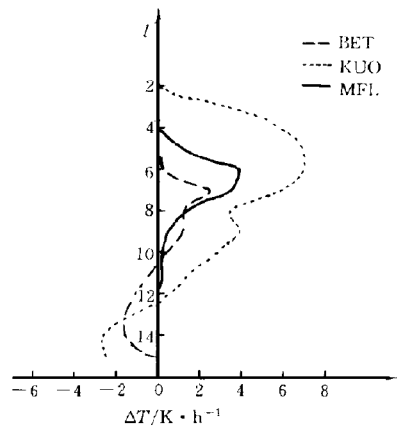


图2 3种方案对流增温垂直分布图

Fig. 2 The vertical distribution of temperature feedback predicted by three convection parameterization schemes

对流降水只有 5 mm，其在总降水中所占的比例还不到 8%。Kuo 方案则与 Betts 方案刚好相反，55 mm 的最大降水量中，大尺度降水只有 4 mm，而对流降水则高达 51 mm，在总降水中所占比例达 90% 以上。这说明采用 Kuo 方案后，在降水预报中模式过分依赖对流降水，而大尺度凝结的作用则微不足道。从以上分析可以看出，3 种方案所得到的降水量分布以质量通量方案的结果较为合理。

图 2 给出了使用 3 种方案计算的 24 h 最大降水格点上出现最强增温时刻的温度反馈垂直分布图。图中纵坐标为垂直层次(l)，横坐标为增温值($K \cdot h^{-1}$)。从图中可以看出，Kuo 方案和 Betts 方案在下层均出现负增温。3 种方案最大增温中心位置 Betts 方案较低且偏弱，增温最大中心位于 400 hPa，最大值为 $2.5 K \cdot h^{-1}$ 。Kuo 方案和质量通量方案最大增温中心则出现在 300 hPa 到 350 hPa，最大值分别为 $7.5 K \cdot h^{-1}$ 和 $4K \cdot h^{-1}$ 。Kuo 方案在 3 种增温方案中增温层最深厚，约从 850 hPa 一直到 100 hPa 以上，Kuo 方案垂直增温过于深厚这一计算结果与国内外许多气象学者的计算结果也较为一致。而质量通量方案增温层为 600~200 hPa 左右，似乎更为合理。

积云对流除通过温度反馈直接影响大气的温度层结外，也对动力场产生影响。图 3

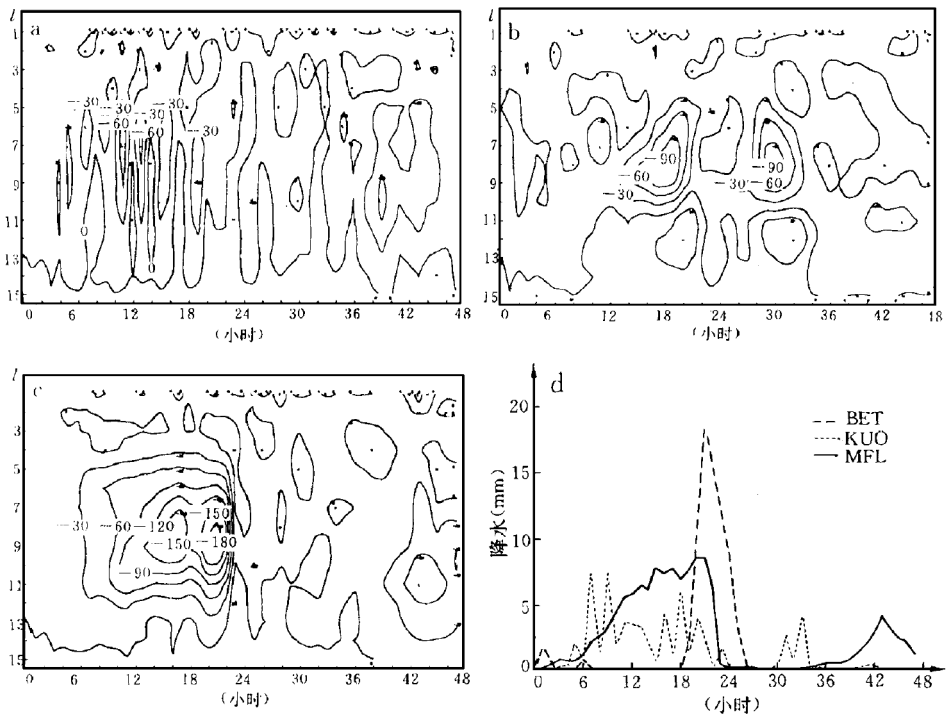


图 3 采用 3 种不同的对流参数化方案(a) Kuo 方案，(b)Betts 方案，(c)质量通量方案得到的垂直速度(ω)时空剖面图(单位： 10^{-4} hPa/s)和(d)每小时降水量时间变化图

Fig.3 The space-time profile of vertical velocity(ω) predicted by three different schemes (a) Kuo scheme (b) Betts scheme (c)mass flux scheme (unit: 10^{-4} hPa/s) and (d) the hourly precipitation variations with time

(a)(b)(c)分别给出了与图2相应格点上的垂直速度场时空剖面图,此外也给出了相应的每小时降水量时间变化图(图3d),可以发现使用Kuo方案得到的垂直速度场零乱,而且明显偏弱,这也是造成大尺度凝结偏弱的原因.这一结果可能是由于Kuo方案中上层增温较强,下层为负增温使得不稳定层结迅速稳定所致. Betts方案的计算结果显示,在大部分时间里,上升运动多出现在中上层(700 hPa以上),预报的18 h和30 h分别出现了两个较强的上升运动中心,下层则为较弱的下沉运动,强降水出现在18 h后.质量通量方案所得到的结果则与大尺度降水配合较好,上升运动出现在6 h以后,两个较强的上升运动中心分别出现在预报的第16 h和第21 h,最大值约为 $-180 \times 10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在500 hPa以下.24 h后,上升运动变为较弱的下沉运动.由于资料限制难以进行严格的对比试验,这里只能给出距离上述格点最近的站点的每6 h降水实况,它们是00:00~06:00为0 mm,06:00~12:00为46 mm,12:00~18:00为19 mm,以及18:00~24:00为1 mm,之后降水停止.上述各方案预报结果对照可以看出,Kuo方案预报降水随时间起伏较大,量值也很小. Betts方案出现的峰值明显滞后,恰恰出现在实况降水之后,相比而言质量通量方案预报的降水演变则与实况降水的发展较为一致.

从以上分析可以看出,不管是强降水中心,大尺度降水与对流降水的比例,温度反馈的垂直分布,还是对垂直速度的影响,质量通量方案的计算结果均优于另外两个方案.这里虽然仅给出一个个例试验结果,但它确是有代表性的.因此,模式中积云对流参数化选用了质量通量方案.

2 预报效果分析

该模式于1994年夏季进行了连续47天的实时预报试验,1995年6月起进行准业务运转,并于1996年5月15日正式投入业务运行.在此期间对降水预报进行了系统的统计检验和天气学个例检验.从上述检验结果可以发现新系统主要有两方面改进.

2.1 降水预报技巧有较明显改进

为了对比新旧系统降水预报水平,我们采用预报格点检验法对原业务系统(LAFS)和新业务系统(HLAFS)的降水预报进行了检验,给出了1995年7月和9月两个月的TS评分平均值的对比(见表1).表中“增加”表示HLAFS的TS评分比LAFS增加的百分

表1 HLAFS与LAFS降水预报的全国范围TS评分结果对比

Table 1 The comparison of threat score for precipitation forecast in China area between HLAFS and LAFS

降水 (mm)	24 h			48 h		
	LAFS	HLAFS	增加(%)	LAFS	HLAFS	增加(%)
1	0.330	0.436	32.12	0.325	0.380	16.92
10	0.223	0.227	24.22	0.178	0.195	9.55
25	0.125	0.157	25.60	0.082	0.104	26.83
50	0.048	0.071	47.92	0.031	0.044	41.94
100	0.006	0.022	266.67	0.003	0.013	333.33

比. 可以看出, 改进后的预报系统, 不管是 24 h 还是 48 h 预报, *TS* 评分都比原业务系统有明显提高, 尤其是对大雨到暴雨的预报, *TS* 评分提高 20% 以上. 至于 100 mm 以上的大暴雨, 由于样本太少实际上没有比较意义. 总的讲 48 h 预报的 *TS* 评分的改进幅度虽不及 24 h 那样大, 但对大到暴雨预报 *TS* 评分的改进却相当令人鼓舞.

2.2 降水预报落区夸大的现象有明显改进

首先是降水落区更接近实况. 在大部分预报中, HLAFS 较 LAFS 的预报区域明显变窄, 雨带形状、位置更接近实况. 这里仅给出 1994 年 8 月 5~9 日的一次降水过程个例. 8 月 5 日前, 高空 500 hPa 等压面图上(图略), 东亚地区为一高压脊, 其后部的贝加尔湖地区有一低压槽, 在 40°N 以北存在一高空锋区. 8 月 6 日在我国新疆和蒙古西部地区有一高空槽沿锋区东移, 配合低层偏南暖湿气流, 8 月 6、7、8 日在我国华北及东北地区造成了一次较强降水过程, 出现了日降水量 217 mm 的强降水中心. 对于这一强降水过程, LAFS 和 HLAFS 均作出了较为成功的预报, 但不管是 24 h 预报还是 48 h 预报, 不论雨区的分布及走向还是降水中心的分布等方面, HLAFS 都比 LAFS 的预报精确得多. 作为一个有代表性的个例, 这里给出了 8 月 7 日强降水实况与相应的 24 h 预报的对比图(图 4), 图 4 中降水观测实况仅标出了 50 mm 以上的强降水中心. 从图中不难看出, 降水落区、雨带的形状、强降水中心位置分布等, HLAFS 的预报都比 LAFS 更接近实况.

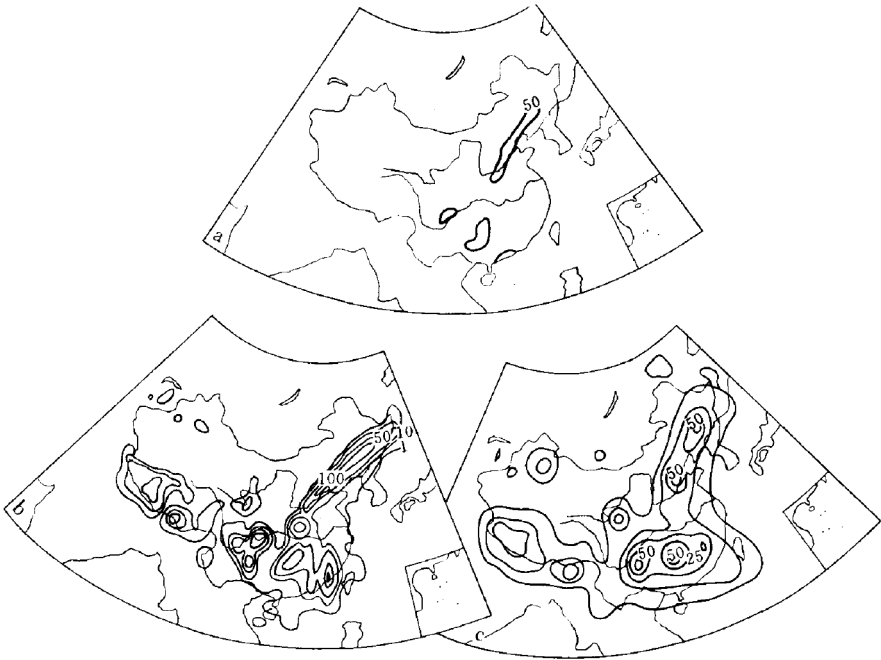


图 4 1994 年 8 月 6 日为初始场的 24 h 降水预报对比图(a) 8 月 7 日降水实况 (b) 由 HLAFS 作出的 24 h 预报 (c) 由 LAFS 作出的 24 h 预报

Fig. 4 The comparison of 24 h precipitation forecast from 00:00 UTC 6th Aug. to 00:00 7th Aug. 1994 (a) observations at 00:00 UTC 7th Aug. 1994 (b) HLAFS (c)LAFS

3 结论及存在的问题

(1) 通过对比试验,HLAFS 模式中次网格积云对流参数化选用了质量通量方案,取代了原来的 Kuo 方案,它不仅在物理上更合理,同时也带来明显的预报改进效果。

(2) 从统计检验结果可以看出,HLAFS 降水预报水平较 LAFS 有了明显改进,尤其是大到暴雨的预报, TS 评分提高的幅度较大,其中 24 h 预报改进优于 48 h。

(3) 利用 HLAFS 模式预报系统性强降水过程,降水落区明显变窄,降水中心的分布、雨带形状及走向等更接近实况。

与 LAFS 相比,目前的新模式在降水预报方面取得了较明显的改进。但也存在一些问题,如盛夏季节时由热带系统产生的降水预报准确率较低,经常出现漏报空报现象;雨带南界经常报得偏南;48 h 预报系统移动较快等。对降水预报尤其夏季暴雨预报的改进将是一个漫长的过程,上述问题还有待今后进一步研究改进。

参考文献

- 1 郭肖容,张玉玲,闫之辉,等.有限区分析预报系统及其业务应用.《气象学报》,1995,53(3):306~318.
- 2 朱宗申,马清云,郑国安.区域资料四维同化试验.《台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究》.北京:气象出版社,1996.168~174.
- 3 马丽群,沈元芳.有限区模式非绝热初值化方案的设计及初步试验.《台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究》.北京:气象出版社,1996.209~215.
- 4 陈爱琴,闫之辉,郭肖容.降水检验方法的试验研究.《台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究》.北京:气象出版社,1996.538~544.
- 5 顾弘道,钱正安,焦彦军,等.有限区域模式中一些物理过程的参数化及预报试验.《中期数值天气预报研究》成果汇编(三).北京:气象出版社,1991,225~264.
- 6 ECMWF Research Department. ECMWF Forecast Model Physical Parameterization (Revision 1 of the Original Version). Research Manual 3, 1985.
- 7 Betts A K. A new convective adjustment scheme — Part I, Observational basis. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1986, 112: 677~691.
- 8 Geleyn J F, Girard C and Louis J F. A simple parameterization of moist convection for large-scale atmospheric models. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1982, 55: 325~334.
- 9 王超,张冰,乌云康.一种质量通量积云对流参数化方案.国家气象中心技术报告,第 0113 号.北京:国家气象中心.1991.

HIGH RESOLUTION LIMITED AREA OPERATIONAL NUMERICAL PREDICTION MODEL AND PRECIPITATION FORECAST EXPERIMENT

Yan Zhihui Zhao Junying Zhu Qi Guo Xiaorong

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Zhang Yuling

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

Based on the original operational limited area model, a new high resolution limited area model was developed and started operational run on May 15, 1996. Besides the increasements of horizontal resolution, the main improvements in the model are: (1) introduction of more reasonable physical processes, such as soil process, the budget of radiation on surface, surface friction and vertical diffusion in PBL; (2) Kuo scheme is replaced by mass flux scheme in the cumulus convection parameterization. The results of quasi-operational run are reviewed completely.

Key words: Limited area forecast Mass flux Torrential rain forecast