

一个三重嵌套的中尺度模式及暴雨模拟试验*

郑国安 郭肖容

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

该文介绍了新近发展的一个高分辨率有限区模式(HLAM).它是通过三重嵌套在现有计算机(CYBER-992)条件下实现的,其范围、地理位置及侧边界宽度均设计为灵活可变,尤其水平分辨率可按任意倍数提高.利用水平分辨率为50km左右的模式版本进行了实际资料的降水个例实验.结果是令人鼓舞的:(1)与嵌套的低分辨率(格距增大4倍)模式预报比较,不论低压中心位置、强降水落区、雨带走向及降水中心位置的预报都更接近实况;(2)高分辨率模式积分区域虽然缩小,但并未影响预报效果,其48小时预报仍有较高精度.

初步试验表明,进一步完善和改进后的HLAM完全可以发展为一个用于中尺度研究及业务使用的高分辨率区域模式.

关键词:三重混合嵌套;中尺度模式;暴雨模拟.

1 引 言

暴雨是影响人类的严重灾害性天气之一,但到目前为止,对暴雨的预报效果仍不十分理想.利用数值模式模拟研究暴雨已成为一个重要的手段.暴雨往往是伴随着较强的中、小尺度天气系统出现的,要模拟它需要有较高分辨率的数值模式.目前世界上一些国家的气象部门已开发了分辨率较高的中(α)尺度模式,对暴雨的模拟研究也取得了不少成果.在我国,由于计算机条件的限制,利用高分辨率数值模式进行暴雨等中尺度天气现象的研究还比较困难.采用多重嵌套是在现有的计算机条件下尽可能提高重点预报区域的分辨率的有效途径.

国家气象中心“七五”期间研制了一个新的有限区分析预报系统(LAFS)^{[1][2]},并于1990年9月10日正式投入准业务使用.该系统使用的有限区预报模式(LAM)是一个球面网格原始方程模式,它与业务运行的全球谱模式(T42L9^[8])进行单向非同步嵌套.由于计算机条件限制,目前业务使用LAM版本分辨率仍较低,为1.875°等经纬度网格.这显

* 本文得到中国气象局强风暴开放实验室和“八五”项目共同资助.

1993-09-25收到,1994-04-24收到修改稿.

然不能满足与中尺度(α)系统有关的暴雨过程的模拟研究及预报试验. 在现有计算机条件下, 进一步提高重点预报区域分辨率有二条途径: 一是在 LAM 的预报区域内再嵌套一个高分辨率区域模式(HLAM); 二是由 T42L9 直接嵌套更高分辨率区域模式. 作为后一条途径, 即水平分辨率高倍数增加的异模式二重嵌套其优点是计算机花费上比较经济, 但却面临二个较大的难点, 一是对包含复杂的青藏大地形的东亚地区, 当高分辨率区域模式边界通过高原时, 由于二种不同模式地形造成的变量间不协调性会明显加重; 二是由于异模式侧边界附近变量的不协调, 可用的预报范围受到较大限制. 而对于第一条途径即先异模式后同模式的三重嵌套, 虽然计算机时花费稍大些, 但由于内部二重嵌套为自模式嵌套, 重点预报区域可移动自如, 且可大大增加可用预报范围.

本工作就是采用第一条途径设计了三重嵌套的高分辨率有限区模式, 并在该模式上利用实际资料进行了暴雨个例模拟试验.

2 三重嵌套数值模式简介

为了适合于暴雨等中尺度天气系统的研究, 在国家气象中心新的有限区分析预报业务系统(LAFS)所用有限区模式 LAM^[2]的基础上, 发展了一个三重嵌套的高分辨率模式, 简称 HLAM. 该模式的基本结构与 LAM 相同, 但采用较高水平分辨率及较小积分区域, 与 LAM 进行单向嵌套, HLAM 网格区域的地理位置、范围大小及侧边界宽度在 LAM 网格区域内灵活可变, 分辨率提高的比例也可以自由设定.

2.1 基本方程组

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\cos\theta} Z p, v \cos\theta + \frac{1}{a \cos\theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + E) + \frac{RT}{a \cos\theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = F_u + D_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + Z p, u \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} (\Phi + E) + \frac{RT}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} (\ln p_s) + \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = F_v + D_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{1}{a \cos\theta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \lambda} (p_s u) + \frac{\partial}{\partial \theta} (p_s v \cos\theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial \sigma} (p_s \dot{\sigma}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left\{ \frac{1}{a \cos\theta} (p_s u \frac{\partial q}{\partial \lambda} + p_s v \cos\theta \frac{\partial q}{\partial \theta}) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} \right\} = S + D_q \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{p_s} \left\{ \frac{1}{a \cos\theta} (p_s u \frac{\partial T}{\partial \lambda} + p_s v \cos\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}) + p_s \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} - \frac{\kappa T \omega}{\sigma} \right\} = Q + D_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n \sigma} = -RT \quad (6)$$

其中, Z 是绝对位涡度, 表示为:

$$Z = \frac{1}{p_s} \left\{ f + \frac{1}{a \cos\theta} \left[\frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial}{\partial \theta} (u \cos\theta) \right] \right\} \quad (7)$$

E 是单位质量动能, 由下式给出:

$$E = \frac{1}{2} \left[u^2 + \frac{1}{\cos\theta} (v^2 \cos\theta) \right] \quad (8)$$

$\kappa = R/c_p$, ω 是 p 坐标中的垂直速度. F_u 、 F_v 为摩擦项, Q 为非绝热加热项, S 为水汽的源汇

项, D_u, D_v, D_q 和 D_t 为水平扩散项.

2.2 网格结构及时间积分方案

模式的垂直坐标采用 Phillips(1957)提出的 σ 坐标系,取不等距 15 层:

$$\sigma_k = 0.75(k/15) + 1.75(k/15)^3 + 1.5(k/15)^4 \quad (k = 1, \dots, 15) \quad (9)$$

模式的水平网格采用 Arakawa C 格式^[3],时间积分方案采用蛙跃格式.

2.3 主要物理过程和地形

模式的主要物理过程包括大尺度凝结和蒸发、积云对流凝结和蒸发、动量的垂直输送和水平扩散. 模式地形采用真实地形资料.

2.4 初值形成

LAM 模式初值使用了风、高度及相对湿度资料. 为了抑制初始时刻由于风场和高度场之间的不协调,采用了非线性正规初值化方案^[4]. HLAM 初值直接使用 LAM 网格的初值化后的初始资料.

2.5 侧边界的嵌套处理

模拟试验时实际上是采用了三个模式,即 LAM 与 T42L9 全球谱模式间的异模式单向嵌套及 HLAM 与 LAM 的自模式单向嵌套,亦即三重混合嵌套. 为了克服谱模式与格点模式嵌套时来自两个模式变量的不协调, T42L9 与 LAM 的嵌套进行了特别处理^[5], LAM 与 T42L9、HLAM 与 LAM 均采用单向倾向值嵌套方案和 Davies 边界处理^[6]. 对某一预报变量 A , 每一步作如下处理:

$$A^{r+1} = (1 - \alpha)A^{r+1*} + \alpha\tilde{A}^{r+1} \quad (10)$$

$$\tilde{A}^{r+1} = \tilde{A}^r + \Delta\tilde{A}^{r+1} \quad (11)$$

式中 A^{r+1*} 、 A^{r+1} 分别为嵌套处理前、后的预报变量, \tilde{A}^r 为 t 时刻细网格模式变量值, $\Delta\tilde{A}^{r+1}$ 是由粗网格每 3 小时提供的预报值计算的该时间步的平均倾向值. α 是松弛系数:

$$\alpha = 1 - \tanh(kk) \quad kk = 0, 1, 2, 3 \quad (12)$$

kk 为边界由外向内四排格点序号.

3 模式统计特性分析

由于水平分辨率提高,积分区域缩小,模式的稳定性能可能受到影响. 为了从总体上分析 HLAM 和 LAM 的稳定性等特征,在进行模拟试验时,我们输出统计下列 5 种量: (1)平均位势涡度拟能 E_v (单位: $10^{-3}\text{hPa}^{-2}\text{s}^{-2}$); (2)平均动能 E_k (单位: $10^{-2}\text{hPa ms}^{-1}$); (3)散度均方根 RD (单位: 10^{-6}s^{-1}); (4)地面气压倾向均方根 RPT (单位: 10^{-3}hPa s^{-1}); (5)地面气压倾向绝对值平均 MPT (单位: 10^{-3}hPa s^{-1}).

从 LAM 的 E_k 、 E_v 、 RPT 、 MPT 和 RD 在 48 小时内随时间的变化曲线中可以看到,

LAM 的 E_k 和 E_p 变化最平稳,与零时刻该量的值相比,48 小时内最大变幅 E_k 为 2.46%, E_p 为 6.38%, RD 无突变现象.可见 LAM 在 48 小时内是稳定的(图 1a).

为了便于与 HLAM 比较,我们还给出 LAM 的 HLAM 网格范围内的各统计量时间变化曲线.由于 48 小时内 HLAM 积分区内有一个较强的低压系统发展,所以 HLAM 积分区内各种统计量要比 LAM 全场的统计量的变化幅度大.但 E_k 变化仍然十分平稳, E_p 变化比较平稳.在 48 小时内 E_k 最大变幅仅为 18.64%, E_p 为 33.26%(图 1b).

在 HLAM 中, E_k 的变化最平稳,48 小时内最大变幅为 25.91%, E_p 为 48.58%, RD 无突变现象, RPT 和 MPT 在 6 小时前变幅较大.6 小时以后到 36 小时之间 RPT 和 MPT 变化平稳,36 小时和 44 小时之间 RPT 和 MPT 有起伏变化. E_k 和 RD 在相应的时段里也有上升趋势.这是该低压系统发展较快的时段,这种变化 44 小时后趋于平稳(图 1c).

综上所述,HLAM、LAM 的 E_k 是守恒稳定的, E_p 也较为稳定, RD 无突变现象.对于 MPT 和对各种扰动较敏感的 RPT ,LAM 的变化稳定,HLAM 的变化基本稳定.

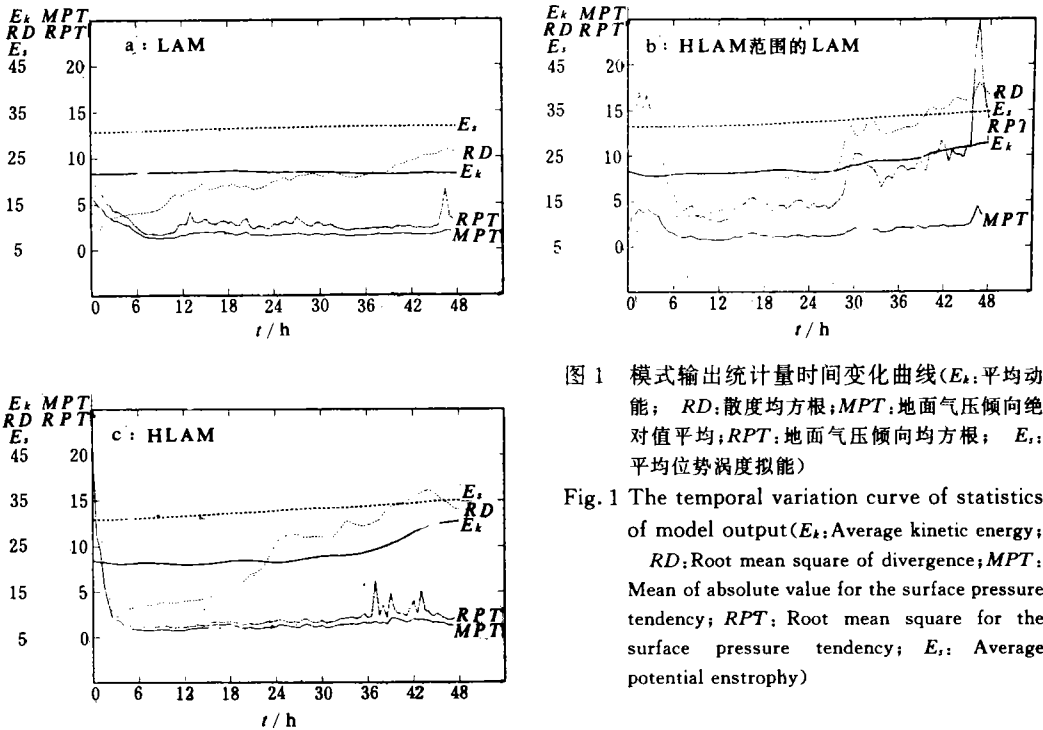


图 1 模式输出统计量时间变化曲线(E_k :平均动能; RD :散度均方根; MPT :地面气压倾向绝对值平均; RPT :地面气压倾向均方根; E_p :平均位势涡度拟能)

Fig. 1 The temporal variation curve of statistics of model output (E_k : Average kinetic energy; RD : Root mean square of divergence; MPT : Mean of absolute value for the surface pressure tendency; RPT : Root mean square for the surface pressure tendency; E_p : Average potential enstrophy)

4 个例模拟试验

4.1 研究个例

1991 年 7 月 27 日 00UTC 500hPa 形势场上(图略),新疆北部的贝加尔湖槽正在加深南下,但槽底位置还较偏北,在台湾东部 9 号台风正在向偏北方向移动;24 小时后(图略),低压槽明显加强东移南下至河套地区,东海的 9 号台风北上至 125°E 、 27.5°N 附近;

48 小时后(7 月 29 日 00UTC, 图略), 低槽继续向东南加深移动, 移至河套地区东部, 另外第 9 号台风继续北上移到朝鲜半岛南部, 受南下冷空气与台风的共同影响, 28~29 日自黄淮至东北南部出现了一条近于南北向的窄长雨带(图 5a).

4.2 数值模拟结果

用 1991 年 7 月 27 日 00UTC 资料作为初始场, 分别用 LAM 和 HLAM 进行 48 小时数值模拟比较, LAM 的水平分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$, HLAM 的水平分辨率较 LAM 高 4 倍(40°N 附近相当于 $40\sim 50\text{km}$), 预报范围取 $105^{\circ}\sim 129^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$ (图 2).

(1) 24 小时模拟结果 通过比较, 24 小时 HLAM 形势场预报的低槽位置及强度均与 LAM 较接近; 24 小时降水实况在天津附近有一个较大中心, LAM、HLAM 预报不够理想, 降水中心偏北(图略). 在 7 月 28 日 00 时海平面气压天气实况图上 35°N 、 115°E 附近有一个弱低压中心, HLAM 报出来了, 而 LAM 的客观分析和 LAM 24 小时预报均无描述, 这说明 HLAM 对天气系统描述更细致, 也说明 LAM 分辨率的客观分析对一些天气系统分析的局限性.

(2) 48 小时模拟结果 图 3 和图 4 分别给出了 48 小时 500hPa 高度场的模拟结果及相应的实况场和 48 小时海平面气压场模拟结果及相应的实况场. 图 5 给出了时效为 48 小时的 24 小时总降水量及相应的实况场.

从 500hPa 形势和海平面气压场的模拟结果来看, HLAM 较准确地给出了低压系统的移动状况, 低压中心位置与实况比较接近, 特别是海平面气压场南北向的低压形状与实况十分接近. 而 LAM 对低压系统的预报则偏慢了, 特别是海平面气压场出现东西向较大低压与实况相差较大. 另外, HLAM 和 LAM 均存在 48 小时低压系统较实况偏强, 这是今后对模式本身要加以改进的.

从降水量场来看 HLAM 较 LAM 更加与实况接近, 这主要体现在两个方面: (1) 降水落区及雨带的走向: LAM 预报的整个雨带明显地较实况偏西, 雨带偏宽; 而 HLAM 48 小时近于南北向的狭窄的雨带位置及形状与实况相当吻合. 形势场也是这样的情况. (2) 强降水中心位置: HLAM 模拟的强降水中心与实况图上在黄河入海处的西北部以及天津附近的降水中心十分接近; 而 LAM 则由于整个雨带的位置偏西, 其降水中心也与实况偏离较大. 但 HLAM 在 40°N 以北偏东部分降水区预报仍不大理想.

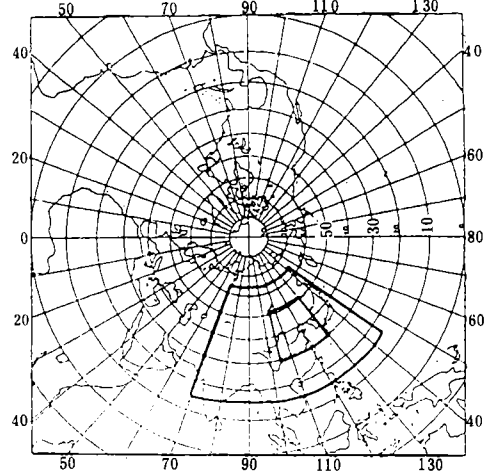


图 2 有限区域模式预报范围(粗线范围为 LAM 积分区域, 细线范围为 HLAM 积分区域)

Fig. 2 The forecast domain of LAM(thick line) and HLAM(thin line)

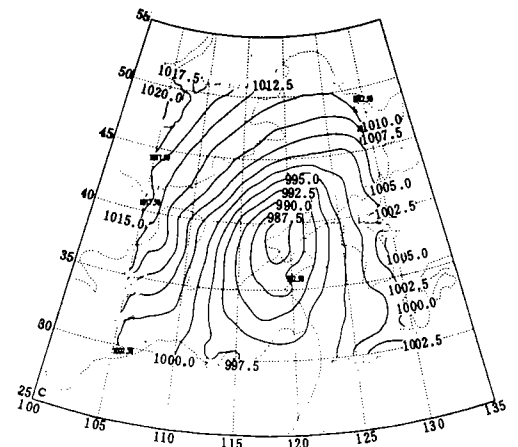
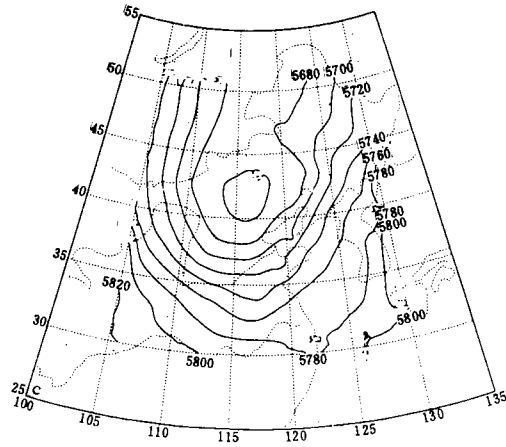
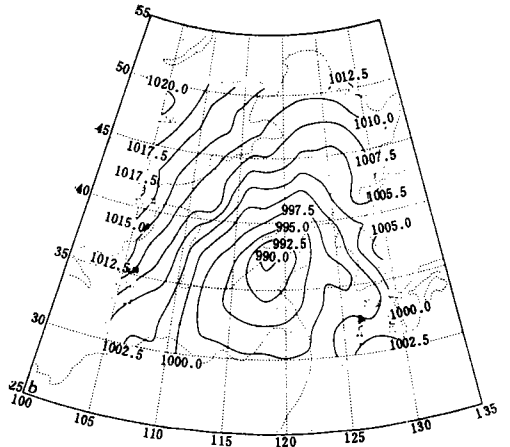
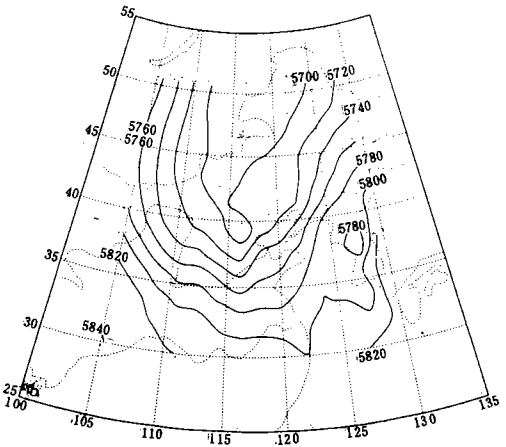
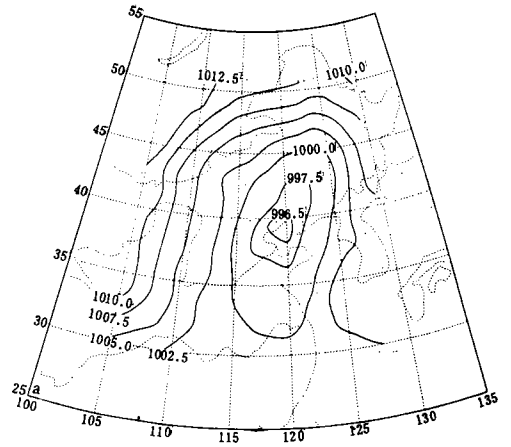
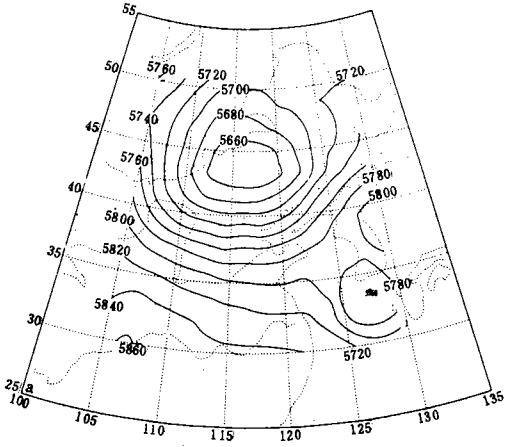


图3 1991-07-27 00UTC 48h 500hPa 高度场
预报 (a:实况;b:LAM;c:HLAM)

图4 1991-07-27 00UTC48h 海平面气压预报
(a:实况; b:LAM; c:HLAM)

Fig. 3 The 48h forecast of 500hPa geopotential height at 00UTC July 27, 1991 (a: analysis; b: LAM; c: HLAM)

Fig. 4 The 48h forecast of sea level pressure at 00UTC July 27, 1991 (a: analysis; b: LAM; c: HLAM)

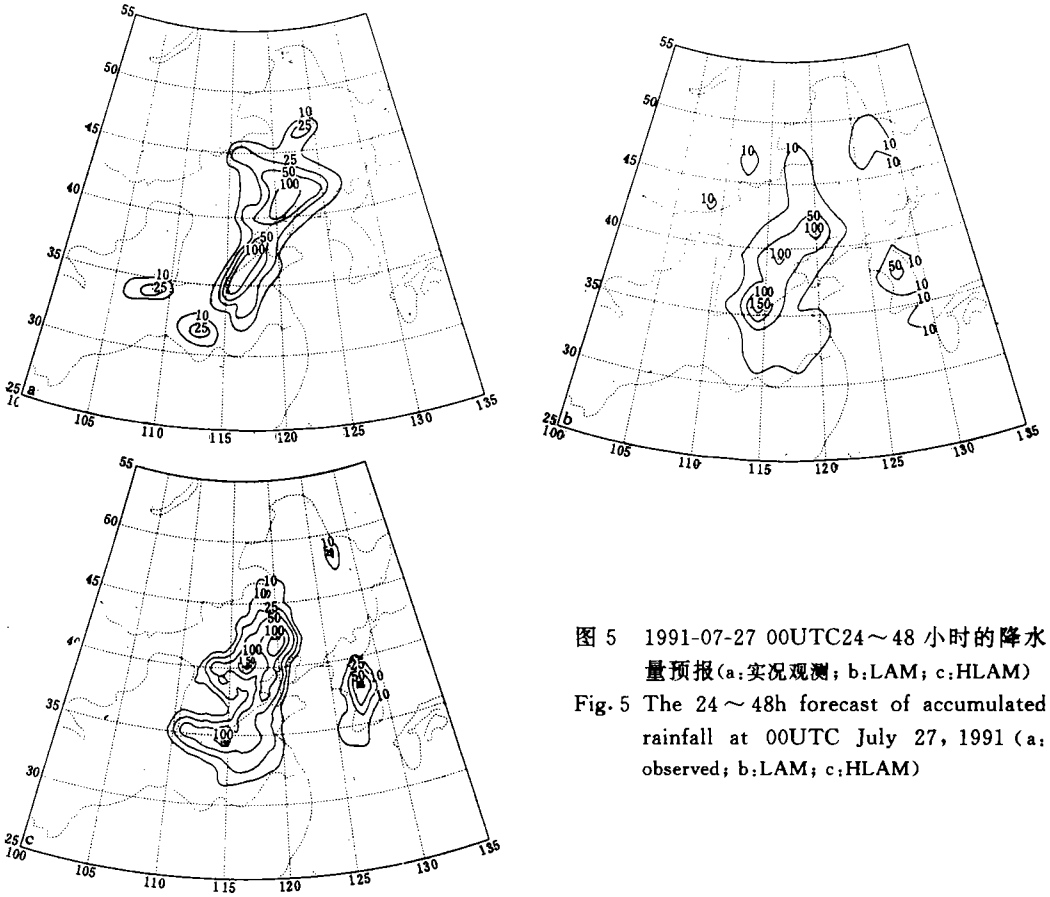


图 5 1991-07-27 00UTC 24~48 小时的降水量预报 (a: 实况观测; b: LAM; c: HLAM)
 Fig. 5 The 24~48h forecast of accumulated rainfall at 00UTC July 27, 1991 (a: observed; b: LAM; c: HLAM)

(3) 客观评分检验结果 除了 48 小时均方根误差外, 其余指标 HLAM 明显优于 LAM (见表 1)。

表 1 HLAM、LAM 高度场客观评分误差检验统计表

Table 1 The verification of the geopotential height for LAM and HLAM

技巧评分	LAM				HLAM											
	均方根误差 (gpm)		偏差 (gpm)		相关系数		技巧评分		均方根误差 (gpm)		偏差 (gpm)		相关系数			
	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h		
100hPa	41.8	60.3	29.7	33.4	24.1	31.7	0.96	0.95	38.9	50.6	32.5	43.0	22.7	28.0	0.97	0.96
150hPa	29.9	34.9	32.2	27.1	24.5	27.1	0.98	0.98	30.1	33.6	35.5	32.7	23.4	27.7	0.99	0.99
300hPa	37.1	42.3	24.5	32.6	21.3	31.3	0.98	0.97	37.1	41.8	28.8	36.5	20.9	33.5	0.99	0.98
500hPa	39.7	57.1	16.5	25.4	16.4	25.4	0.96	0.90	35.7	49.2	15.3	33.9	14.7	24.7	0.97	0.91
700hPa	47.6	65.1	14.6	26.8	13.1	26.6	0.86	0.66	46.9	58.8	13.3	36.3	12.8	28.3	0.87	0.71
1000hPa	49.7	56.8	18.3	32.3	15.0	32.2	0.87	0.89	48.5	49.2	18.3	34.2	15.6	32.5	0.87	0.94

5 问题讨论

本文利用 15 层有限区嵌套模式对北方一次强降水天气过程的模拟表明 HLAM 对强降水有较好的预报能力,同时我们也看到由于 HLAM 仍处于发展之中,本文的工作仍存在一些不足,最主要的是:(1)初值问题:由于模式 HLAM 的水平分辨率较高,网格格距小于 0.5° ,而目前使用的初始资料仍采用自 LAM σ 面的初始资料通过水平双线性插值得到的资料,这样做会由于地形影响带来较大不协调,从图 1c 可以看到 HLAM 的 6 小时前的 *RPT* 和 *MPT* 的变化幅度很大,这说明 HLAM 的初值质量有待进一步提高.最理想的是能进行高分辨率的客观分析;(2)模式的物理过程处理较简单;此外,当分辨率提高后,次网格过程的参数化方法还有待进一步研究改进^[7];(3)模式的稳定性能:一般来说水平分辨率提高,积分区域缩小后,HLAM 的稳定性可能不如 LAM,但从这次试验的结果分析看,HLAM 基本是稳定的,今后对 HLAM 的初值形成及物理过程等方面的进一步改进,将会使 HLAM 稳定性进一步提高.此外,本文所选用的个例有限,结果的分析是初步的,今后还需进一步改进完善 HLAM.

6 小 结

本文介绍了新发展的可方便地移动位置及变化预报范围的 15 层有限区嵌套模式 HLAM,并用该模式对一个强降水过程进行数值模拟,以此来考验该模式的性能尤其是其稳定性能及对强降水的预报能力.可以得出以下初步结论:

(1)对两个模式输出统计量的时间变化曲线和预报结果分析表明 LAM 具有较好稳定性,HLAM 基本稳定;

(2)HLAM 与 LAM 的嵌套是成功的,嵌套后 HLAM 计算稳定,侧边界附近天气系统的移入移出都很正常,未发现计算波激发和反射现象;

(3)48 小时强降水模拟预报结果表明 HLAM 比 LAM 具有更强的强降水预报能力.前者在低压中心位置、暴雨中心位置及强降水落区等均较后者更接近实况.但同时也应看到,LAM 和 HLAM 的 48 小时低压系统均较实况偏强,有待进一步改进;

(4)反复试验表明,在 LAM 预报范围内可以方便地设定 HLAM 的水平分辨率、地理位置、预报范围及侧边界宽度.

由此可见,进一步完善的 HLAM 可望作为局地天气增强预报模式或中尺度研究的较好工具.

参 考 文 献

- 1 郭肖容,郑国安,朱宗申等.一个新的有限区分析预报系统.《中期数值天气预报研究》成果汇编(三),北京:气象出版社,1990. 88~107.
- 2 张玉玲,郭肖容,阎之辉等.十层有限区细网格模式的试验研究.《中期数值天气预报研究》成果汇编(一),北京:气

象出版社,1990.152~168.

- 3 Arakawa A, Lamb V R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computation Physics*, 1976, **17**:174~264.
- 4 薛纪善,李玘,王志明.非线性正规模初值化原则在有限区模式的实现.《中期数值天气预报研究》成果汇编(一),北京:气象出版社,1990.58~69.
- 5 郭肖容,朱琪,汪厚君等.具有不同模式地形的差分模式与谱模式的嵌套及预报试验.《中期数值天气预报研究》成果汇编(三),北京:气象出版社,1990.149~189.
- 6 Davies H C. A lateral boundary formulation for multilevel prediction model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1976, **102**:405~418.
- 7 郭肖容,郑国安,朱琪.次网格对流参数化效果对水平分辨率的敏感试验.大气科学,1992, **16**(1):92~102.
- 8 皇甫雪官.中期数值预报绝热谱模式的数值试验.《中期数值天气预报研究》成果汇编(一),北京:气象出版社,1990.107~138.

A TRIPLE NESTED MESOSCALE MODEL AND THE NUMERICAL SIMULATION FOR HEAVY RAIN

Zheng Guoan Guo Xiaorong

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

A triple nested High resolution Limited Area Model (HLAM) is recently developed and runs on computer CYBER-992. The model's domain, geographical location, lateral boundary width, especially horizontal resolution are highly flexible. A case of heavy rain is simulated using this model with horizontal resolution of 50km. The results are encouraging: (1) The location of low pressure centers, the area of heavy rainfall and the trend of rain-band are more closer to those of analysis as compared with low resolution nested grid model. (2) Although the area of high resolution model's simulation is reduced, the forecast effect is not influenced and 48 hour forecast still has high precision.

Preliminary experiments show that HLAM can be developed into a regional high resolution model for mesoscale research and operational forecasts.

Key words: Triple nested; Mesoscale model; Simulation for heavy rain.