

文章编号: 1000-2022(2004) 01-0036-07

自适应网格与均匀网格在数值模拟中的对比研究

郭丽霞, 沈桐立, 昝英

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘要: 采用自适应网格和均匀网格两种模式, 对 1996 年 8 月 3—4 日发生在山西、河北、河南三省交界地区的暴雨个例进行模拟和对比研究。结果表明, 自适应网格模式对所关心的天气系统及其降水的模拟精度高于均匀网格, 特别是对降水、风场、急流、涡度场的模拟精度改善显著。这说明自适应网格模拟的中尺度系统特征更清晰。

关键词: 自适应网格模式; 均匀网格模式; 对比分析; 暴雨

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A

差分网格的设计在数值求解大气方程组时很重要。为了提高数值解的精度, 人们对计算网格的设计方法不断地改进、发展。本文所采用的自适应网格是 20 世纪 90 年代引入气象模式中的连续动力适应网格^[1]。自适应网格能自动适应非定常问题的特征, 网格能响应不同时间步数值解的不断变化而重新分布, 数值解物理意义大的地方加密网格, 物理意义小的地方疏散网格, 而总格点数不变。自适应网格起步较晚, 目前研究较少。Dietachmayer^[2]模拟了运动锋生和中性环境下热力浮升问题, 刘卓等^[3]用该技术计算了月平均风应力场强迫下的南海海流, 还用自适应浅水方程组来预报台风路径。沈桐立等^[4-6]、覃丹宇等^[7]、郑祚芳等^[8]成功地将均匀网格的中尺度 MM4 及 MM5 模式改进为自适应网格模式。为了进一步研究在天气预报和模拟中自适应网格模式的性能特点, 本文首先用文献[4-7]的方法设计 MM4 的自适应网格模式, 在权函数的要素、层次的选取、平滑系数的选取等方面做了试验和改进, 然后对 1996 年 8 月 4 日的暴雨个例, 分别采用自适应网格和均匀网格两种模式进行模拟试验和对比分析。

1 模式介绍

两个模式的物理框架都是 MM4 中尺度数值预报模式。时间积分方案: 蛙跃格式。初始化方案: 整层无辐散。边条件: 时变海绵边条件。积云对流参数化方案: Anthes-Kuo 型方案。行星边界层参数化方案: 总体 PBL 方案。地面物理过程: 不包括水汽及热量通量, 地面温度由浅层模式和有云效应的能量收支平衡方程预报获得。

两模式在垂直方向采用仿地形 σ 坐标, 即 $\sigma = \frac{(p - p_s)}{(p_s - p_t)} = \frac{(p - p_t)}{p^*}$ 。这里 p^* 定义为 p^*

收稿日期: 2003-02-20; 改回日期: 2003-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40075023)

作者简介: 郭丽霞(1971-), 女, 河北唐山人, 硕士, 现在河北省唐山市气象局工作。

$= p_s - p_t$, 垂直方向分为 10 层, 顶层为 100 hPa, 垂直速度定义在整数层, 其他变量定义在半 σ 层上。两模式在水平方向网格不同, 其控制方程的求解也不同。

1.1 均匀网格

在水平方向采用跳点(Arakawa B)格式, x 轴对应 j , y 轴对应 i , 变量 p^* , T , q , Q , σ , R 等定义在叉点上, 变量 u, v 定义在圆点上。水平格距 90 km, 模拟区域 41×41 格点。中心经纬度 115°E , 35°N 。需要说明的是, 自适应网格从参数平面返回物理平面时, 其平均格距是 90 km, 只是针对天气形势, 重新处理间隔的疏密。

1.2 自适应网格

自适应网格技术的步骤是: 1) 将物理平面(x, y, σ, t)上描述的控制方程组变换到参数平面(ξ, η, σ, τ)上。2) 构造用来决定网格分布形式和疏密程度的权重函数 $W(x, y, t)$, $WS = \text{常数}$, S 是网格面积, W 值大的地方网格被加密, W 值小的地方网格变疏。3) 求得物理平面到参数平面的映射关系。4) 用均匀网格差分法求解参数平面上相应的预报方程组。

本文用覃丹宇等^[7]的方法设计 MM4 自适应网格模式。文中构造权函数 $W(x, y, t)$ 用的是 500 hPa 涡度: $\xi_{500} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{J} \left[y^\eta \frac{\partial v}{\partial \xi} - y^\xi \frac{\partial v}{\partial \eta} \right] - \left[-x^\eta \frac{\partial u}{\partial \xi} - x^\xi \frac{\partial u}{\partial \eta} \right]$, 为使模式计算稳定, 对其进行空间平滑, 平滑系数取 0.65。物理平面上的网格如图 1 所示, 其在参数平面上对应的均匀网格也采用跳点(Arakawa B)格式, 变量的分布以及模拟区域同均匀网格模式。

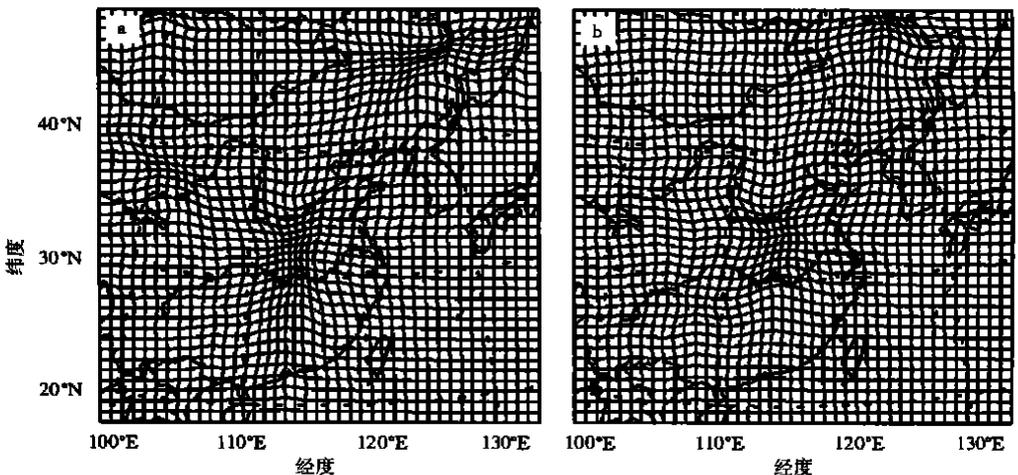


图 1 初始场和 24 h 后的自适应网格

Fig. 1 The adaptive gridpoint distributions

at the initial time and after the integration of 24 hours

该试验用的自适应网格平均涡度拟能、散度均方差、平均动能在 12 h 以后趋于稳定, 且平均涡度拟能、散度均方差变化很小, 模式是稳定的(图略)。因此, 可以用此自适应网格模式进行模拟预报。

2 试验个例

本文所取个例是 1996 年 8 月 3—4 日山西、河北南部及河南北部受减弱的台风低压影响出现的暴雨到大暴雨过程。3 日, 高空环流由纬向型向经向型调整, 台风减弱成的低气压北上至汉口, 但仍为较深厚的系统, 风场环流显著, 低压南部偏南气流强盛。3 日夜, 暴雨区移至河

北南部。4 日 08 时,河北南部最大雨量 107 mm, 低压中心北上至郑州。4 日 08 时后低压继续减弱北上,暴雨区向河北北部伸展。5 日, 低压减弱为低槽向东北方向移出,雨量减弱。另外, 3 日天气图上,在雅库次克至朝鲜半岛北部还有低涡槽,4 日 08 时已东移转竖扫过朝鲜半岛北部,造成朝鲜半岛北部的大雨。本文个例中这两个明显的系统,其中一个虽即将减弱移出模拟区域,但其强度较强,对自适应网格加密的影响不容忽视。因此,下文的模拟研究对自适应网格模式有两个以上明显加密区时的模拟性能也做了初步探讨。

3 模拟试验误差的对比

为了研究自适应网格的加密效果,本文对两模式(均匀网格、自适应网格)模拟的 24 h 位势高度、温度、风场东西分量、风场南北分量及全风速,参考图 1 的网格加密区,选取模拟域去掉外围 10 个格点圈剩下的中心区域,分别与实况对比,计算均方差及相对误差极值。

结果表明(表 1),自适应网格模式模拟精度除了低层温度场低于均匀网格模式外,其他各预报场都胜过均匀网格模式。而温度场在高层也表现为自适应网格精度更高。另外,对于风场,两模式南北风的误差都随高度减小。这可能与高层主要是纬向风,低层较多经向扰动有关。而在高层,自适应网格对南北风模拟精度的改善更明显,对全风速模拟精度的改善比低层更高。

表 1 24 h 预报量与实测均方差分析

Table 1 Mean root-square error of simulated and observed results

	850 hPa		700 hPa		500 hPa		200 hPa	
	A	F	A	F	A	F	A	F
位势高度/dagpm	6.26	6.33	7.57	7.63	9.73	9.83	9.20	9.36
温度/	1.07	1.03	1.22	1.16	0.58	0.66	0.73	0.82
东西风/ $m \cdot s^{-1}$	3.27	3.85	4.83	5.18	3.16	3.55	4.51	4.65
南北风/ $m \cdot s^{-1}$	6.69	7.25	6.71	6.97	4.61	5.07	4.55	5.02
全风速/ $m \cdot s^{-1}$	4.66	4.77	5.23	5.84	3.75	4.25	3.48	4.12

注: A 表示自适应网格模式, F 表示均匀网格模式。

对相对误差极值进行分析可以发现其他特征(表略)。首先,高度场没有正的相对误差,即两模式预报普遍偏低,这与两模式动力框架同为 MM4 有关;不过仍可见自适应网格偏差小些。其次,对于温度场,自适应网格高层偏差都小于均匀网格,且进一步看出,正偏差大,即低层温度场偏高。再次,对于风场,两模式的东风正偏差远大于负偏差,南北风负偏差远大于正偏差,即两模式模拟的风场中,西风和北风较实况强,南风、东风较实况弱。而自适应网格对模拟精度的改善主要表现在对东风、南风的模拟更强些。对本文个例来说,这种改善很重要,因为在加密区东部有强盛的偏南风急流。

4 模拟效果

4.1 降水场特征

由图 2 可以看出,降水场有 4 个明显的特征。特征 1,实况有两个暴雨中心,而两模式预报只有 1 个,长江中游的暴雨中心没报出来。特征 2,自适应网格模式预报的暴雨区 50 mm 范围的位置与均匀网格模式的相同,但暴雨中心位置比均匀网格的偏北 2 纬距,与实况更接近。特征 3,自适应网格模式预报的暴雨中心的强度明显强于均匀网格模式,中心值为 99 mm,均匀网格模式预报为 52 mm,而实况为 110 mm。特征 4,朝鲜半岛地区的雨区范围均匀网格模式

预报偏大, 自适应网格模式预报较接近实况。可见, 自适应网格模式的降水预报在强度上、落区上都明显优于均匀网格模式。

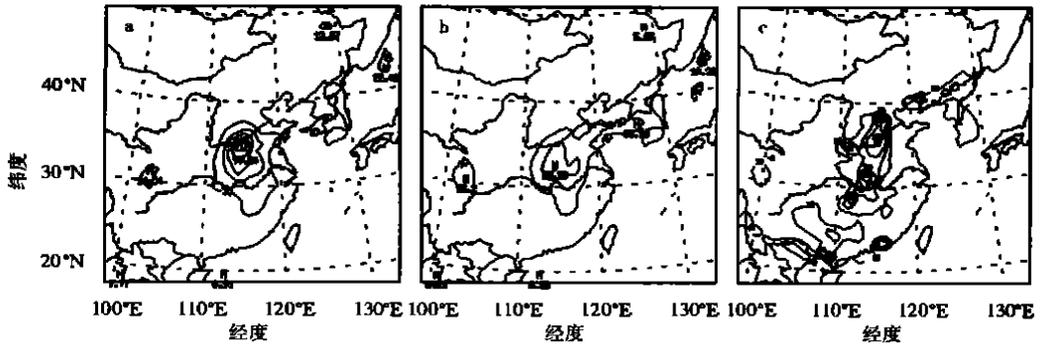


图 2 8月4日08时降水场(单位: mm)

a. 自适应网格模式预报结果; b. 均匀网格模式预报结果; c. 实况

Fig. 2 Precipitation field at 08:00 BST on 4th August (units: mm)

a. adaptive mesh model; b. uniform mesh model; c. observed rainfall field

4.2 风场特征

由风场预报图(图略)可知, 两模式预报的台风低压中心位置偏东; 对台风低压东侧强盛的偏南风急流预报不明显, 台风低压南部的西南急流或东南急流更明显些。两模式不同之处是: 对于环流中心位置, 自适应网格模式比均匀网格模式预报的偏北、偏西, 与实况更接近; 在实况出现南风急流的位置(112°E, 38°N), 自适应网格模式预报的偏南风比均匀网格模式预报的发展更强, 更接近实况。可见, 自适应网格对加密区域的风场、偏南风急流的预报都有所改善。

4.3 温度场特征

从高低层温度场分布形势看, 两模式近似, 只是在数值上略有差别。对于网格加密区, 500 hPa 自适应网格预报值比均匀网格有所改善。

4.4 高度场特征

分析高度场发现, 两模式对副热带高压预报不好。实况4日副高已呈块状西北挺, 与大陆高压是连为一体的, 而两模式预报的副高主体偏东南(图略)、台风低压带与东北低压带相通、副高及大陆高压都较弱。这可能与边条件选取有关, 如对边条件资料进一步处理, 两模式预报形势可能有所改进。不过, 自适应网格预报副高位置比均匀网格稍西北挺, 大陆高压更强且伸至渤海, 更接近实况。从台风低压中心位置来看, 自适应网格预报的偏西、偏北, 也更接近实况。

4.5 涡度场特征

分析各层涡度场特征, 可以看出, 自适应网格模式模拟的结果明显优于均匀网格模式。

由两模式模拟结果与实况的对照图(图3)发现, 在模拟域中心有大范围正涡度区, 无论从范围、中心位置, 还是中心强度, 都明显可见自适应网格模拟精度更高, 更接近实况。不足的是, 实况有两个正涡度中心, 两个模式都没能报出南面的中心。这与权函数的平滑处理有一定关系。500 hPa 涡度初始场已有两个中心(图略), 平滑后就是一个了, 再报出两个强中心就较难了。不过较均匀网格而言, 自适应网格对涡度场模拟精度的改善已十分显著了。

由沿 113°E 的涡度场垂直剖面(图4)可见, 由低层到 300 hPa, 自适应网格模式模拟的正涡度都比均匀网格大得多, 强度接近实况的北支正涡度中心。自适应网格正涡度区发展高度比均匀网格高, 更接近实况。

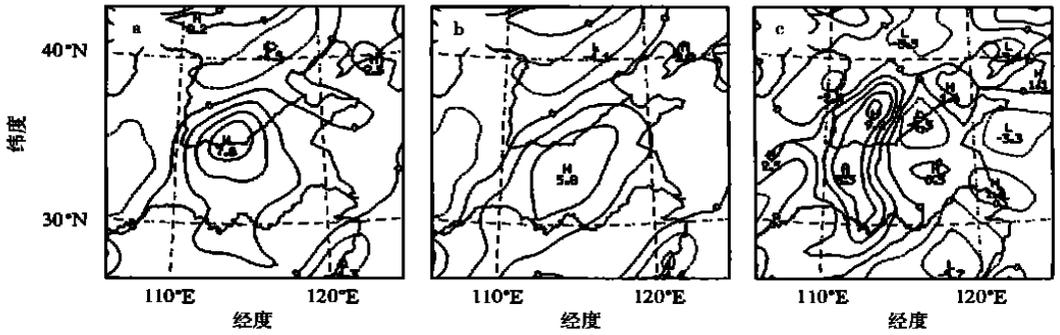


图 3 8月4日08时850 hPa 涡度场(单位: 10^{-5} s^{-1})

a. 自适应网格模式模拟结果; b. 均匀网格模式模拟结果; c. 实况

Fig. 3 850 hPa vorticity distributions on 4th August (units: 10^{-5} s^{-1})

a. adaptive mesh model; b. uniform mesh model; c. observations

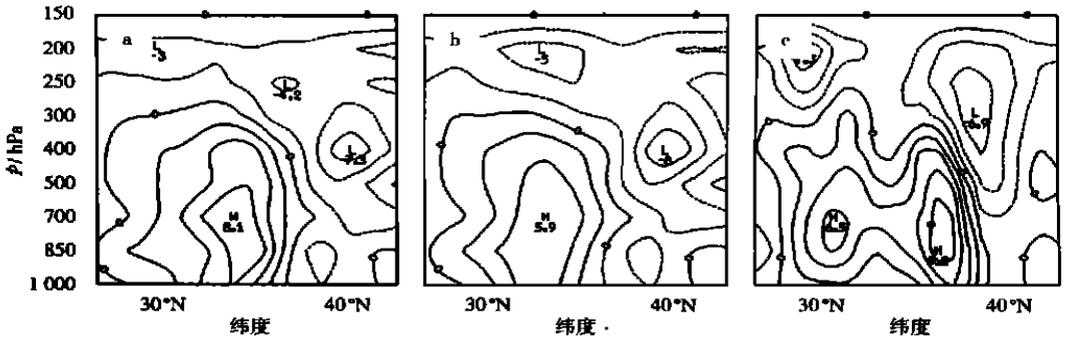


图 4 8月4日08时涡度场垂直剖面(单位: 10^{-5} s^{-1})

a. 自适应网格模式模拟结果; b. 均匀网格模式模拟结果; c. 实况

Fig. 4 Vertical distributions of vorticity on 4th August (units: 10^{-5} s^{-1})

a. adaptive mesh model; b. uniform mesh model; c. observed distribution

4.6 散度场特征

分析各层散度场发现, 自适应网格模式模拟的结果较好。对于 500 hPa、850 hPa 两模式的散度模拟值与实况(图略)对照可见, 在模拟域中心区, 实况低层有两个辐合区, 高层有两个辐散区, 其各自中心分别对应上面提到的两个正涡度中心(而两模式只预报出北面的中心区), 且高层辐散区范围广、强度大。与均匀网格模式比较, 自适应网格模式模拟的散度低层辐合、高层辐散的强度很大, 与实况接近, 只是位置比实况的北支中心区偏东。

由沿 113°E 的散度场垂直剖面(图 5)可见, 实况场北支强辐合区发展到 500 hPa 即转为辐散, 自适应网格模拟的强辐合区发展到 300 hPa 转为辐散, 与实况南支辐合区发展近似。而均匀网格模式模拟的辐合较弱, 强度与实况误差较大。可见自适应网格模拟的效果更好些。

4.7 垂直速度特征

由沿 113°E 的垂直速度经向剖面(图略)可见, 实况有两个上升中心, 对应涡度场、散度场上的两个正涡度中心和强辐合区。自适应网格模式模拟的上升速度很强, 且发展到 300 hPa 最强, 与实况较接近。均匀网格模式模拟的上升区弱, 这与其预报的涡度、散度场较弱有关。还可以看出, 两模式也报出了 30°N 南面的上升区, 但是因为较弱而未能形成另一个降水中心。

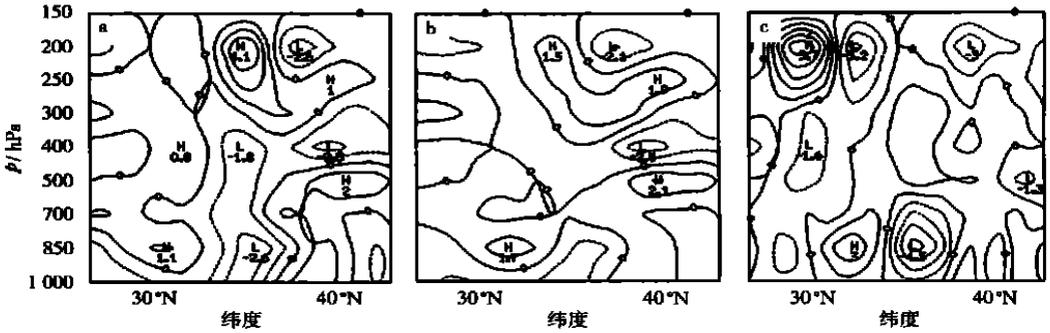


图 5 8月4日08时散度场垂直剖面(单位: 10^{-4}s^{-1})

a. 自适应网格模式模拟结果; b. 均匀网格模式模拟结果; c. 实况

Fig. 5 Vertical distributions of divergence on 4th August (units: 10^{-4}s^{-1})

a. adaptive mesh model; b. uniform mesh model; c. observations

4.8 相关系数

为了定量比较两模式的模拟效果, 分别计算了两模式预报的涡度场、散度场与实况场的相关系数。分析表 2 发现, 自适应网格模式预报的涡度、散度场与实测场的相关系数都高于均匀网格模式, 自适应网格模式对中尺度系统的模拟精度有明显改善。

表 2 两模式 24 h 预报量与实测的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of model-simulated and observed results

	850 hPa		700 hPa		500 hPa		200 hPa	
	A	F	A	F	A	F	A	F
涡度	0.69	0.53	0.58	0.50	0.66	0.59	0.47	0.35
散度	0.56	0.48	0.42	0.36	0.40	0.39	0.34	0.18

注: A 表示自适应网格模式, F 表示均匀网格模式。

4.9 自适应网格加密效果

由图 1 可看出自适应网格加密的动态变化。随着权函数高值中心的北移, 网格加密区也随之北移。在权函数大的地方网格加密, 网格最密处格距减小近一半。由网格变化图还可看出, 加密区外围网格被拉伸, 分辨率变低。因此决定网格疏密的权函数的选取很重要, 一定要代表中尺度系统, 使其外围被拉伸的网格处对分辨率要求低。本文权函数依据的是平滑后的 500 hPa 涡度场。由前面的模拟结果分析可知, 这样设计的自适应网格提高了中尺度天气系统的分辨率, 模拟精度得到明显改善, 因此这种设计是合理的。不过, 降水中心只报出一个, 显然与涡度中心只报出一个有关。从初始场看, 就只有一个涡度中心, 这是平滑的结果。由 500 hPa 涡度初始场可见, 500 hPa 涡度初始场在台风低压地区是有两个中心的。如只做弱平滑, 结果会怎样, 这是以后可再做的工作。

图 1 上网格加密区有 3 个, 比较图 2 中与之对应的降水量级、位置、范围自适应网格都比均匀网格好。可以初步认为, 当有多个网格加密区时, 网格加密的效果不会因此削弱。

5 结论与讨论

自适应网格技术起步晚, 目前只是初步引入到气象模式中, 其在应用中的加密效果有必要深入研究。通过前面对 MM4 改进的自适应网格模式与原 MM4 均匀网格模式对比模拟试验

的分析, 本文得到如下结论:

(1) 自适应网格模式在模拟降水过程的强度、落区上都明显优于均匀网格模式。

(2) 在各预报量的模拟精度上, 自适应网格模式比均匀网格模式有所改善。

(3) 自适应网格模式模拟的中尺度特征更明显, 这使得用自适应网格模拟中尺度系统极具应用意义。自适应网格模式对涡度场模拟精度的改善十分显著, 模拟的散度场高低空辐合、辐散与垂直速度配置较好, 对风场环流中心强度、位置的模拟优于均匀网格, 对急流的预报比均匀网格更接近实况。也就是说, 自适应网格模式能较好地模拟中尺度系统。

(4) 自适应网格模式的研究区域可以有一个以上的网格加密区, 互不影响加密效果。

以上虽然只是对 1996 年 8 月 4 日台风低压暴雨过程的个例模拟得出的结论, 但自适应网格模式表现出的较好模拟特性说明自适应网格模式的应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Dietachmayer G S, Droegemier K K. Applications of continuous dynamic grid adaption techniques to meterological modeling. Part 1: Basic formulation and accuraxcy[J]. M on Wea Rev, 1992, 120(8): 1 675-1 706.
- [2] Dietachmayer G S. Applications of continuous dynamic grid adaption techniques to meterological modeling. Part 2: Efficiency[J]. M on Wea Rev, 1992, 120(8): 1 707-1 722.
- [3] 刘 卓, 曾庆存. 自适应网格在大气海洋问题中的初步应用[J]. 大气科学, 1994, 18(6): 641-648.
- [4] 沈桐立, 闵锦忠, 温市耕. 套网格预报中几种边界条件的试验[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(2): 248-254.
- [5] 沈桐立, 温市耕, 陈子通. 中尺度业务模式系统侧边界的嵌套方法的研究[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 368-375.
- [6] 沈桐立, 丁一汇, 覃丹宇, 等. 有限区的非均匀网格应用研究[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(1): 98-107.
- [7] 覃丹宇, 沈桐立, 丁治英, 等. 中尺度数值模式的自适应网格设计[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 244-250.
- [8] 郑祚芳, 沈桐立. 自适应网格模式在暴雨数值模拟中的应用[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 173-179.

Comparative Study of Adaptive and Uniform Mesh Models in Numerical Simulation

GUO Li-xia, SHEN Tong-li, DING Zhi-ying

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: A heavy rain event occurring in the boundary of Hebei, Shanxi and He'nan on 3—4th August, 1996 is simulated in this paper by using an adaptive and uniform mesh model, and their results are compared. Comparing results show that the simulation accuracy of the mesoscale system and its precipitation by the adaptive mesh model is higher than the uniform mesh model, especially the accuracy of precipitation, wind and vorticity is more remarkable. All of these show that the characters of the mesoscale system simulated by the adaptive mesh model are more clear.

Key words: adaptive mesh model; uniform mesh model; comparative study; heavy rainfall