

文章编号: 1000-2022(2005)01-0044-07

自适应网格技术在 MM5 中的应用研究

李红莉^{1,2}, 沈桐立¹

(1. 南京信息工程大学 气象灾害和环境变化重点实验室, 江苏 南京 210044;

2 中国气象局 武汉暴雨研究所, 湖北 武汉 430074)

摘要: 结合 1 次暴雨过程, 将自适应网格技术应用于中尺度模式 MM5 中进行数值试验, 同时对比自适应网格方案和固定网格方案的优劣, 对模拟结果作了诊断分析。结果表明: 对于此次降水过程, 自适应网格模拟的效果取决于一些参数的选择。

关键词: 自适应网格; MM5 暴雨; 数值模拟

中图分类号: P456.7 **文献标识码:** A

许多数值模式的设计均采用等距的固定网格进行离散、剖分, 缺陷是当所求物理量的变化尺度在计算的某一区域内小于网格格距时, 计算将无法分辨出这一区域物理量的变化特性。因此, 通常采用缩小网格距以加密网格的方法来克服这一问题, 但此时计算量会大大增加, 受计算条件的限制也较大。目前比较多的是采用粗细网格嵌套技术来提高局部区域网格的分辨率, 其缺点是在内边界附近容易产生寄生波, 歪曲能量传播, 易出现计算紊乱^[1-2]。

网格构造最终是为数值计算实际问题服务的, 因此, 网格的好坏应该看它是否与物理问题解的空间分布相适应。在物理量变化剧烈区, 要用较密的网格, 才能刻画出这种变化, 而在物理量变化平缓区, 只需用较粗的网格就能反映解的情况, 这就是自适应网格的主要思想。自适应网格最大的优点就在于它能与物理问题的解相适应, 网格的疏密随物理量变化梯度的大小而自动调节。这样有可能用较小数目的网格刻画出在传统意义下较多网格才能给出的较高精度的数值解。

目前, 利用 MM5 模式对暴雨的研究工作已有许多。王建捷等^[3]对 1998 年 6 月的一次梅雨锋暴雨中尺度系统进行了模拟和诊断分析, 认为低层中尺度辐合线上强烈发展的梅雨锋暴雨中尺度对流系统是引发这次暴雨的主要系统。张小玲等^[4]的研究表明, 中尺度系统强烈发展引发了 1998 年 7 月梅雨锋突发性暴雨。王建捷等^[5]还对 1998 年 6 月暴雨时段的梅雨锋结构及梅雨锋的形成与维持进行了诊断分析, 确认了暴雨发生时期梅雨锋结构的一些普遍特征。王智等^[6]对一次西南涡及其伴随低空急流的发展演变进行了数值模拟, 揭示了西南涡和低空急流与 1999 年夏初江淮流域多日持续暴雨的关系。近 10 余年来, 自适应网格方法得到了广泛的应用。刘卓等^[7-8]将该技术应用于大气海洋问题中, 计算南海海流的月平均流, 同时引入

收稿日期: 2003-12-29 改回日期: 2004-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40075023)

作者简介: 李红莉 (1979-), 女, 湖北襄樊人, 硕士, 研究方向: 中尺度暴雨数值模拟, E-mail: lhongli2001@sina.com.cn.

正压原始方程模式预报台风路径,取得了良好的效果。覃丹宇等^[9]成功地将该技术应用于中尺度 MM 4 模式中。丁治英等^[10]利用以 MM 4 为基础的自适应网格模式对一次太平洋西部气旋强烈爆发过程进行了数值模拟,成功地揭示了其爆发的机制。康红文等^[11-12]分别结合一维和二维动力锋生过程对自适应网格技术的性能进行了研究。郑祚芳等^[13]利用中尺度 MM 4 自适应网格模式成功模拟了暴雨。鉴于目前对于自适应网格技术在暴雨研究中的应用还比较少,需要进一步深入,本文选取一次暴雨过程来检验自适应网格技术在中尺度 MM 5 模式中的应用效果。

1 自适应网格的构造原理

自适应网格的构造是通过坐标变换,将物理空间中的一个复杂的计算区域变换成参数空间中的一个简单区域,在参数空间中进行等距的网格剖分,而在物理空间的计算区域则相应产生一个非均匀不等距的网格剖分,使得生成的网格能自动适应所研究问题的特性。采用 Brackbill 等^[14]的做法,通过变分原理给出满足某些约束条件的坐标变换方程,解其边值问题求得自适应网格的坐标。其要点是:根据各网格间解的梯度值取一个权函数 $W(i, j, t)$,使得 $W \Delta x = \text{const}$ 。这样,网格间上解的梯度值越大,权函数就越大,相应的 Δx 就越小。为达到这一目的,先将其转化为一个变分问题,通过求解其欧拉方程来得到新网格点位置。自适应网格技术就是要根据物理量的特性调节网格点的疏密程度,使网格随时间变化具有灵活性。在非定常解问题中,系统随时间而变,物理量梯度大的地方随时间的不同其空间位置也不同,这就需要合适的权函数 W 来控制网格点密度,灵活地调节网格点疏密程度。例如,在某些区域网格点需要加密,则将 W 取大一些;反之, W 取小一些。因此,针对研究对象,选取具有较大物理意义的参变量作为权函数,是成功模拟的关键。

对二维自适应网格进行设计,模式必须从物理空间变换到参数空间进行计算。设

$$x = x(\xi, \eta, \tau), \quad y = y(\xi, \eta, \tau).$$

对任一变量 $F(x, y, t)$, 可求出对 F 的变换关系:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{1}{J} (y_{\eta} \frac{\partial F}{\partial \xi} - y_{\xi} \frac{\partial F}{\partial \eta}), \quad \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{1}{J} (-x_{\eta} \frac{\partial F}{\partial \xi} + x_{\xi} \frac{\partial F}{\partial \eta}),$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial \tau} - \frac{1}{J} (y_{\eta} x_{\tau} - x_{\eta} y_{\tau}) \frac{\partial F}{\partial \xi} - \frac{1}{J} (-y_{\xi} x_{\tau} + x_{\xi} y_{\tau}) \frac{\partial F}{\partial \eta} = \frac{\partial F}{\partial \tau} + U \frac{\partial F}{\partial \xi} + V \frac{\partial F}{\partial \eta}$$

其中, $J = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi}$ 为 Jacobian 项, $U = -\frac{1}{J} (y_{\eta} x_{\tau} - x_{\eta} y_{\tau})$, $V = -\frac{1}{J} (-y_{\xi} x_{\tau} + x_{\xi} y_{\tau})$ 。 U 、 V

可以视作一种有效速度,是网格点作相对运动产生的附加项,体现了自适应网格随时间变换的特点。覃丹宇等^[9]利用上述关系式,将中尺度模式 MM 4 改造成自适应网格模式。

另外,由于自适应网格技术使网格始终动态变化,相应地要求时间步长也要改变,所以时间步长的取法也很重要。如 Fiedler 等^[15]的变步长方案,取 $\Delta t = 0.3 \sqrt{s/c}$, 其中 c 为声波速率, s 代表物理平面上最小的一块网格面积, 0.3 为约束系数。本文将利用改编的 MM 5 自适应网格模式,结合一次暴雨个例,研究自适应网格的一些特性,比如,权函数的选择、网格点数、积分时间以及平滑系数对误差的影响等。本文采用固定时间步长,并在每次计算新网格前对权函数进行 4 次时间滤波,以避免在参考物理量剧变的情况下网格发生突变。

2 天气形势

1998 年 7 月 22 日 08 时至 23 日 08 时(北京时,下同)长江流域发生暴雨过程,有 3 个范围

较大的暴雨区,分别位于长江上游的四川东部地区和长江中游的武汉及长江下游的江淮地区,局部地区的 24 h 降水达到 190 mm (图 1a)。西南低涡稳定维持在重庆、贵州、湖南、湖北四省交界处。低空的中尺度气旋性低涡是长江上游暴雨的主要影响系统(图 1b)。暴雨区低层空气潮湿,并且存在强烈的上升运动。暴雨发生过程中,中低层以强辐合为主,高层为辐散气流,涡度场上对应着从地面伸展到 300 hPa 的正涡度区,而散度分布对应低层辐合、高层辐散,400 hPa 以下为辐合区,最大辐合中心出现在 700 hPa 以上为辐散区,辐散中心位于 200 hPa。在暴雨发生区域,较强的垂直上升运动,丰富的水汽与低层强辐合、高层辐散相伴随,这种有利的中尺度动力配置结构,不仅与暴雨区暴雨发生时段相对应,还是本次暴雨中尺度低涡发展和持续的动力机制。

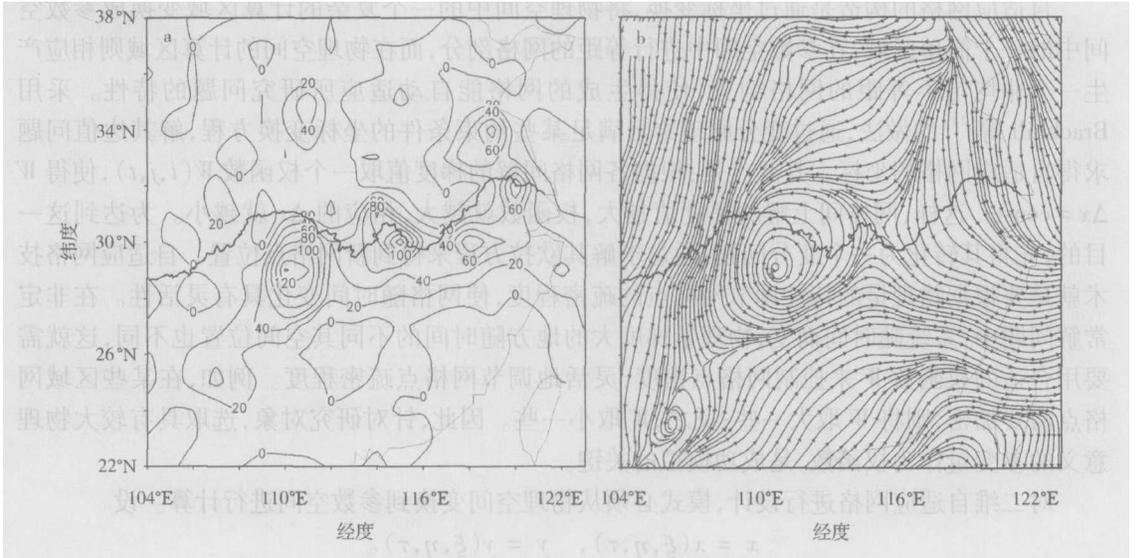


图 1 1998-07-22T08—23T08 实况降水 (a 单位: mm) 和 1998-07-22T08 850 hPa 流场 (b)

Fig 1 Observed 24-hour rainfall field (a units mm) from 0800BST 22th to 0800BST 23th July 1998 and 850 hPa stream line field (b) at 0800BST 22th July 1998

3 模式与资料

本文利用非静力中尺度模式 MM5 对 22 日 08 时—23 日 08 时的降水过程进行数值模拟。模式的垂直坐标 $\sigma = (p_0 - p_t) / (p_s - p_t)$, p_s 和 p_t 分别为地面气压和模式层顶 (100 hPa) 气压, p_0 为参考态气压, 垂直方向为 26 层。选择 (115°E, 30°N) 作为数值试验区域中心, 其东西向以及南北向均为 2 400 km。模式物理过程选用简单冰相方案、Blackadar 高分辨行星边界层方案、Anthes-Kuo 积云对流参数化方案。侧边界采用张弛逼近边界条件。资料采用国家气象中心业务模式 T106L19 的 6 h 间隔分析场资料, 结合地面、探空观测资料进行客观分析, 得到 p 面上中尺度区域网格点的分析场, 由此分析场垂直插值到 σ 层上, 并产生初始条件和边界条件。模式初始时刻为 22 日 08 时, 积分时间步长为 60 s 共积分 24 h 每 3 h 输出一次结果, 对自适应模式网格每 1 h 更新一次。

4 数值模拟结果及其与实况的比较

定义一个误差度量值为: $E = \left[\frac{\sum [(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2]}{m \times n} \right]^{1/2}$ 。其中, u, v 是模拟值, u_0, v_0 是将各个测站观测值插值到模拟网格格点上的值。对每个高度层求其误差, m, n 为模式模拟区域的水平格点数。计算区域设定 (115°E, 30°N) 为数值试验区域中心, 东西向以及南北向均为 2 400 km 的方型区域, 以下结果若无特别说明, 计算终止时间默认为 24 h。

4.1 权函数的选择

自适应网格技术就是要根据物理量的特性调节网格点的疏密程度, 网格随时间变化具有灵活性。在非定常解问题中, 系统随时间而变, 物理量梯度大的地方随时间的不同其空间位置也不同, 这就需要用合适的权函数 W 来控制网格点密度, 灵活地调节网格点疏密程度。例如, 在某些区域网格点需要加密, 则将 W 取大一些; 反之, W 取小一些。因此, 针对研究对象, 选取具有较大物理意义的参变量作为权函数, 是成功模拟的关键。对于中尺度模式主要的研究对象为降水, 通常涡度、散度是反映强降水的重要参数。本文选取了低层 850 hPa 700 hPa 的涡度、散度以及 500 hPa 的涡度作为权函数, 针对此次暴雨过程, 将水平格点数取为 41×41 , 格距取为 60 km, 分别进行数值模拟, 对各次模拟的结果比较其方差大小, 选取最优权函数。

表 1 中, E_f 表示固定网格 (fixed) 方案时 850 hPa 700 hPa 和 500 hPa 的误差, E_a 表示自适应网格 (adaptive) 方案时的误差。从表 1 中可以看出, 无论采用哪种权函数, 自适应网格方案的误差均比固定网格方案的误差小, 并且权函数取为 500 hPa 正涡度时, 误差最小, 说明 500 hPa 正涡度是该次强降水的最重要参数, 所做出的自适应网格模拟能更好地揭示此次降水的形成机制。

4.2 网格点数的影响

从表 2 中可以看出, 不论采用固定网格方案还是采用自适应网格方案, 误差均随网格点数增加逐渐减小。通过比较可以看出, 网格点数相同时, E_a 大概为 E_f 的 2/3。以 A21 表示模式采用自适应网格方案且网格点数取 21×21 , F41 表示模式采用固定网格方案且网格点数取 41×41 , 其余符号以此类推。由表 2 还可以看出 $E(A21) < E(F41)$; $E(A31) < E(F51)$; $E(A41) < E(F61)$; $E(A51) < E(F81)$ 。

表 1 误差随权函数的变化

Table 1 Errors when choosing different weight functions

权函数 W 的取值依据	$10^{-1} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
	E_f	E_a
850 hPa 涡度	9.16	6.41
700 hPa 涡度	9.14	5.98
500 hPa 涡度	8.90	5.03
850 hPa 散度	9.16	6.23
700 hPa 散度	9.14	5.94

表 2 误差随网格点数的变化

Table 2 Errors when choosing different grid points

网格点数	E_f	E_a
21×21	11.98	7.24
31×31	9.53	6.46
41×41	7.74	5.03
51×51	6.76	4.33
61×61	6.03	3.86
81×81	4.52	2.78

通过对比上面的不等式左右两边的网格点数, 可以认为, 对此个例而言, 在同等误差要求下, 采用自适应网格方案后, 只需要固定网格 $1/3$ 的网格点数。

图 2 给出了 23 日 02 时 500 hPa 高度场实况以及分别采用固定网格方案、自适应网格方案的模拟 500 hPa 高度场。从实况图 (图 2a) 中可以看出, 长江上游存在一个低压。积分 18 小时 (23 日 02 时), 当网格点数为 41×41 时 (图 2b), 固定网格在系统发展的区域网格点过少, 不能有效地反映出这里的特征, 模拟的高度场有些失真, 与实况相差较大, 没有模拟出长江上游的低压; 而自适应网格虽然具有相同的网格点, 但计算也较准确, 清楚地模拟了该低压的位置, 只是强度略微偏大 (图 2d)。固定网格只有当网格点数为 81×81 时 (图 2c), 结果才与实况接近, 强度与实况基本一致, 只是位置略微偏南。

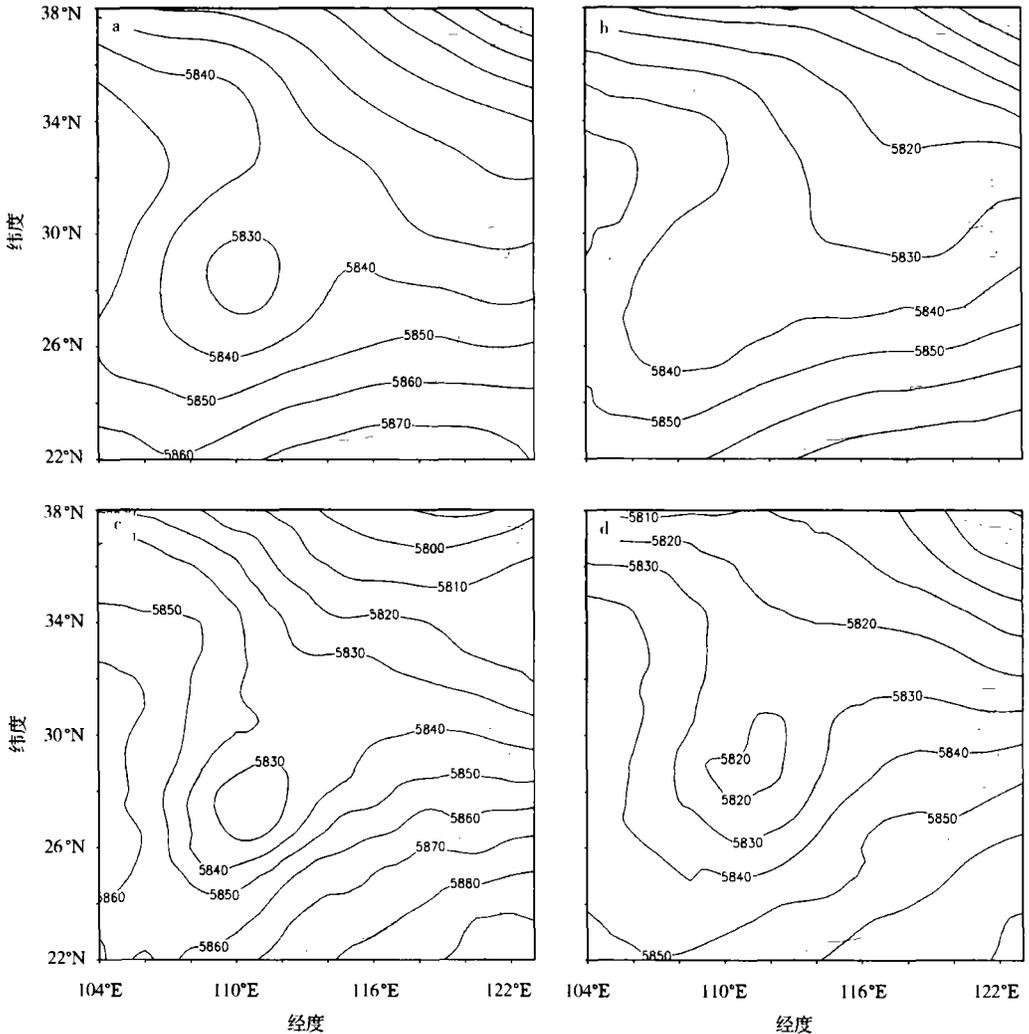


图 2 22 日 08 时起, 18 h 后 (23 日 02 时) 的 500 hPa 高度场 (单位: gpm)

a 实况; b 固定网格 41×41 ; c 固定网格 81×81 ; d 自适应网格 41×41

Fig 2 The 500 hPa heights (units gpm) after 18 hours from 0800BST 22 th

a observed b 41×41 grid points in unifom mesh

c 81×81 grid points in uniform mesh d 41×41 grid points in adaptive mesh

4.3 误差随积分时间的演变

表 3 给出了水平格点数为 41×41 时, 采用固定网格方案和自适应网格方案计算误差 E 随积分时间增长的情况。模式积分初始时刻取为 22 日 08 时, 积分时间步长为 60 s, 每隔 3 h 输出一次结果。

表 3 误差随积分时间的演变
Table 3 Errors with different forecasting time

积分时间	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	24 h
E_f	3.54	3.79	3.96	4.10	4.31	4.87	5.09	5.60
E_a	3.33	3.50	3.61	3.89	4.03	4.20	4.65	5.03

用 AT24 表示模式采用自适应网格方案且预报时间为 24 h, 类似, 用 FT21 表示模式采用固定网格方案且预报时间为 21 h, 其余符号以此类推, 每隔 3 h 计算一次误差。从表中可以看出, 两者具有如下关系: $E(AT24) \approx E(FT21)$; $E(AT21) < E(FT18)$; $E(AT18) < E(FT15)$; $E(AT15) < E(FT12)$; $E(AT12) < E(FT09)$; $E(AT09) < E(FT06)$; $E(AT06) < E(FT03)$ 。可见, 在同等误差要求下, 采用自适应网格后, 对此次降水的预报可以延长 3 h 左右。

4.4 权函数的平滑对误差的影响

为使得自适应网格在空间上变化更为协调, 对权函数进行平滑处理:

$$W_{ij} = (1 - s)W_{ij} + s(W_{i+1j} + W_{i-1j} + W_{ij+1} + W_{ij-1})/4 \quad (1)$$

权函数仍然取为 500 hPa 正涡度, 水平网格点数为 41×41 , 格距取为 60 km, 仅对平滑次数变化分别进行数值试验, 得到表 4。

表 4 误差随平滑次数 m 的变化
Table 4 Errors when choosing different smoothing numbers

平滑次数 m	15	20	25	30	35	40	45
E_a	5.33	5.17	5.06	5.03	5.04	5.08	5.10

注: 平滑次数 m 表示对 (1) 式的重复次数, m 越大, 网格沿空间变化越光滑。

由表 4 可知, m 对误差也略有影响, 对本次试验, m 的最优值为 30。在最优值附近, 对误差影响较小。当 m 较小时, 因网格沿空间变化不够光滑, 因此误差略微偏大。在最优值之后, 随着 m 的增大, 误差增长不大, 因为此时网格沿空间变化已足够光滑。

5 结 论

(1) 自适应网格模式中权函数的取法是非常重要的, 它决定了网格的变化情况, 自适应网格方案的预报误差均比固定网格方案的误差小, 并且权函数取为 500 hPa 正涡度时, 误差最小, 说明 500 hPa 正涡度是该次强降水的最重要参数。

(2) 在同等误差要求下, 采用自适应网格方案后, 只需要固定网格 $1/3$ 的网格点数。

(3) 在同等误差要求下, 采用自适应网格后, 对此次降水的预报可以延长 3 h 左右。

(4) 平滑次数 m 对误差也略有影响, 对本次试验, m 的最优值为 30。在最优值附近, 对误差影响较小。当 m 较小时, 因网格沿空间变化不够光滑, 因此误差略微偏大。

参考文献:

- [1] Shapiro L T. Hurricane vortex motion and evolution in a three-layer model [J]. J Atmos Sci 1992, 49(2): 140-153.
- [2] Jones R W. A nested grid for a three-dimensional model of a tropical cyclone [J]. J Atmos Sci 1977, 34(10): 1 528-1 553
- [3] 王建捷,李泽椿. 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析 [J]. 气象学报, 2002, 60(2): 146-151
- [4] 张小玲,陶诗言,张庆云. 1998年7月20—21日武汉地区梅雨锋上突发性中- β 系统的发生发展分析 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 385-397
- [5] 王建捷,陶诗言. 1998梅雨锋的结构特征及形成与维持 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(5): 526-534.
- [6] 王智,高坤,翟国庆. 一次与西南低涡相联系的低空急流的数值研究 [J]. 大气科学, 2003, 27(1): 75-85.
- [7] 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.
- [8] 刘卓,曾庆存. 非正常自适应网格模式在台风数值预报中的应用 [J]. 大气科学, 1995, 19(3): 301-308
- [9] 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
- [10] 丁治英,沈桐立,丁一汇. 非纬向基流中爆发性气旋的数值研究 [J]. 气象学报, 1999, 57(4): 429-437
- [11] 康红文,王鹏云,徐祥德. 自适应网格技术在数值模式中的应用研究 : 一维问题 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 615-624
- [12] 康红文,王鹏云,徐祥德. 自适应网格技术在数值模式中的应用研究 : 二维问题 [J]. 大气科学, 2000, 24(6): 749-760
- [13] 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
- [14] Brackbill J U, Saltzman J S. Adaptive zoning for singular problems in two dimensions [J]. J Comput Phys 1982, 46(2): 342-368
- [15] Fiedler B H, Trapp R J. A fast dynamic grid adaptation scheme for meteorological flows [J]. Mon Wea Rev 1993, 121(10): 2 879-2 888

A Study on Application of Adaptive Grids Technique to MM5 Model

LI Hong-li^{1, 2}, SHEN Tong-li¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster and Environmental Variation, NUIST, Nanjing 210044 China

2. Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074 China)

Abstract The adaptive mesh technique was applied to the MM5 model and numerical experiments were performed for the heavy rain event in the Yangtze River basin during 22th—23th July 1998. Simulated results using the adaptive mesh and uniform mesh were compared and diagnosed. The diagnostic results show that the effect of the heavy rain process simulation depends on parameters selected.

Key words adaptive mesh; MM5; heavy rainfall; numerical simulation