

高分辨率 η 模式的数值试验*

周祖刚 张维桓 郝为锋 林乃实

(空军气象学院, 南京 211101)

摘 要 针对中尺度地形对我国天气影响的重要性, 本文先后提高了 REM 的水平和垂直分辨率, 并采用包络地形方法处理模式中尺度地形。运用常规报文资料得到初始场, 对 1993 年 8 月 4~5 日, 1994 年 7 月 12~13 日的两次大暴雨个例分别进行了数值试验。结果表明, 仅提高 REM 的水平分辨率, 对降水预报有一定的改善, 但多报出了几个大暴雨中心; 而对模式水平及垂直分辨率同时提高后, 其降水场、形势场的预报有明显的改进和提高, 虚假降水中心消失。

关键词 η 坐标 模式分辨率 包络地形 数值试验

1 引言

地形对天气气候的影响一直是气象工作者所关注的问题。陶诗言等^[1]指出, 夏季中国各地大到暴雨的日频分布和雨量分布与地形密切相关。许多观测事实表明, 暴雨和强对流天气的空间分布, 明显地受到中尺度地形的强烈影响^[2]。为了在数值模式中更好地描述地形的作用, 1983 年 Mesinger^[3,4]提出了 η 坐标方法, 避免了 σ 坐标模式中陡峭地形条件下水平气压梯度力计算误差过大的问题, 同时它仍保留了 σ 坐标系所具有的简单下边界条件。美国国家气象中心已建立 80 km、38 层的 η 坐标预报模式投入业务使用^[5]。国内宇如聪、曾庆存^[6]设计了一个能考虑我国复杂地形的 η 坐标有限区域数值预报模式 (Regional Eta-coordinate Model 简称 REM), 在对 1993 年、1994 年汛期的实时预报试验中, 降水预报的效果较好^[7,8]。

η 坐标系模式在不长的时间内所取得的成功, 取决于阶梯地形坐标的固有优越性, 而且由于中尺度地形起伏多变, 坡度远较大尺度地形“陡峭”, 这种优越性使得它相对于 σ 坐标系模式更适用于复杂的中尺度地形起伏地区。

我国是一个多山的国家, 山地 (包括丘陵) 约占全国总面积的 2/3, 中尺度地形及中尺度下垫面特征十分明显。加之我国夏季又处于东亚季风区, 水汽充沛, 中尺度强对流天气十分活跃, 因此研制中尺度数值模式进行中尺度数值试验及预报十分必要。尽管有许多工作要做, 首要的, 是在数值模式中尽可能地描述好中尺度地形及中尺度动力不稳定, 前一要求使我们选择 η 坐标模式, 而两者又都要求提高模式的水平分辨率及垂直分辨率。为此本文工作针对中尺度地形对我国天气特别是强对流天气影响的重要性, 提高了 REM 的水平分辨率、垂直分辨率, 并运用高分辨率模式对 1993 年 8 月 4~5 日, 1994 年 7 月 12~13 日的两次特大暴雨个例进行了数值试验。

1998-02-23 收到, 1998-07-27 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49745007 和空司基础理论课题共同资助

2 REM 模式的特点

REM 模式选用 IAP-GCM 的动力框架为基础进行设计, 主要是由于 IAP-GCM 动力框架可以保证完全能量守恒, 有较好的稳定性和精度。模式的垂直坐标选用 η 坐标, 此外, IAP-GCM 动力框架对温度和位势作了静力扣除^[6]。REM 的水汽平流采用正定保形方案^[9]。

模式中变量的水平分布采用 E 网格, 位势高度和垂直速度与其他预报量在垂直方向上交错分布。空间差分格式在一定的边界条件下, 保留了原微分方程的下列性质:

- (1) 总质量守恒;
- (2) 非线性平流不破坏能量守恒;
- (3) 科里奥利力单点不作功;
- (4) 总有效能量守恒。

具体差分格式从略, 详见文献^[6]。

模式的物理过程主要包括: 大尺度降水; Betts^[10]对流调整和对流降水; 水平扩散及垂直扩散; 地面辐射收支计算及边界层的整体参数化。

3 提高模式水平分辨率及其比较试验

如引言所述, REM 模式取得的预报结果是令人满意的, REM 的水平分辨率约为 75 km, E 网格所对应的两个子 C 网格的水平分辨率为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, 垂直方向等距地分为 8 层 (为方便, 以下称此模式为 A 模式), 这种分辨率对描述中尺度地形比较粗^[6]。为较好地描述中尺度地形, 对模式的水平分辨率需要进一步提高。同时, 要进行暴雨、飑线之类的强对流天气系统的数值模拟和预报, 也需要有 50 km 及以下的高水平分辨率来描述这类中尺度系统。本工作中将 A 模式的水平分辨率提高到约 35 km 左右, 对应 E 网格的两个子 C 网格水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 垂直方向仍等距地分为 8 层, 模式顶取为 $P_1 = 100$ hPa, 以下称此高水平分辨率模式为 B 模式。

3.1 模式地形的构造及模式积分参数

由 A 模式发展为 B 模式, 模式地形必须重新处理。为了获得 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的地形资料, 由 $5' \times 5'$ 的原始地形资料来构造, 并且采用 Wallace 等^[11]提出的在网格尺度平均地形上迭加不同倍数的标准差 (这个倍数称为包络度 k), 构成不同的包络地形。具体方案如下: 首先利用 $5' \times 5'$ 实际地形资料包络出 $15' \times 15'$ 地形, 然后再利用 $15' \times 15'$ 包络地形来包络 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的地形资料。在构造过程中, 为避免陆地及海岸线“扩张”, 还采取一些特殊措施。

如图 1a, 对包络度 $k=1$ 时分析发现, 包络地形保持了主要地形的走向, 如燕山、太行山、泰山、武夷山脉, 并且保持了海陆分布和海岸线不受歪曲。

由于模式的垂直坐标选用 η 坐标, 故模式地形以台阶状出现^[6,12]。为此根据包络出来的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点地形资料, 构造出了模式地形。如图 1b, 为包络度 $k=1$ 情况下的模式地形高度 (Z_s), 与 A 模式地形^[8]相比, 更接近实际地形的分布、走向, 突出了实际地形的中尺度轮廓。

由 A 模式发展为 B 模式, 水平扩散, 垂直通量及水汽参数等均进行了重新调整。

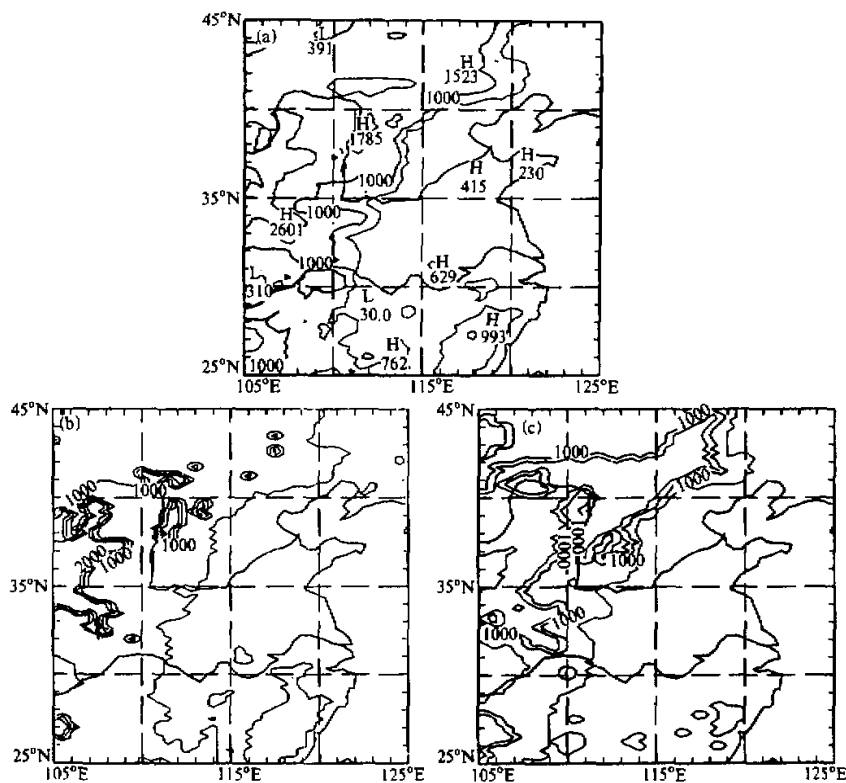


图 1 包络地形和模式地形

图中实线是间隔 500.0 m 的等高线

(a) 包络地形 (包络度 $k=1$); (b) 模式地形 ($k=8$ 层); (c) 模式地形 ($k=16$ 层)

A、B 模式中, 每一个高度格点上的地形高度, 代表的水平范围是以它的相邻四个速度点所构成的四边形范围, 即地形边界上只分布有速度点。A 模式的范围: $100^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$; 为了减小计算量, 同时也便于和 A 模式比较, B 模式的范围: $105^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$, $25^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 。

A、B 模式均采用如下边界条件: 模式侧边界条件, 在预报区域第一圈边界上取作固定值。第二圈边界上的所有变量值均通过四点平均获得; 地形内边界条件, 在阶梯地形侧边界上简单地取速度为零。

A、B 模式的时间积分方案均选用分解算法。

3.2 两次大暴雨个例的数值比较试验

试验选取 1993 年 8 月 4~5 日鲁西南特大暴雨及 1994 年 7 月 12~13 日由登陆台风低压造成的纵贯中国南北的强降水过程, 来讨论模式水平分辨率的提高对降水预报的影响。分别从 1993 年 8 月 4 日 00 时, 1994 年 7 月 12 日 00 时开始积分, 各积分 24 h

(本文中所用时间均是世界时, 若用北京时均加以说明)。

模式运行的初始资料来自气象台站日常业务使用的地面、高空报文资料。通过解报, 提出气象要素, 再进行要素检误。然后采用逐步订正法进行客观分析, 得到各标准等压面上的水平网格点的气象要素值, 然后再线性插值到模式各 η 层。没有任何的初始化过程。地面要素先将台站高度和气象要素同时客观分析到网格点上, 再根据网格点上的值订正到模式地形高度上。

以下数值试验结果为节省篇幅仅给出降水预报及实况图, 形势场预报及实况图均从略。

3.2.1 “93.8”鲁西南特大暴雨天气过程

3.2.1.1 天气过程概述

1993年8月4~5日, 一次西北低涡东移发展。500 hPa形势上, 西太平洋副热带高压明显加强西伸, 至8月3日00时达到最强, 588线北沿到达(35°N, 115°E)附近, 西西伯利亚到新疆上空为一深槽, 槽前在青海附近有一小槽正在东移。700 hPa柴达木盆地有一个西北涡随小槽移到兰州附近, 4日00时, 东移到河套东部上空时, 槽后冷空气与副高西侧的西南暖湿气流汇合, 地面上在河南西部产生了一个黄淮气旋并东移, 5日00时低涡移到鲁西南上空, 致使晋中、冀南、鲁西南和江苏大部、豫北等地区的降水一般有50~150 mm, 局部地区达300~500 mm^[13,14]。

3.2.1.2 比较试验

A模式的模拟结果, 如图2a是“93.8”24小时降水预报和实况, 要说明的是对实况降水场的分析, 主要以天气图上的资料为基础, 同时也参考文献[13,14]的降水资料, 从文献[13,14]看出, 若收集了地方气候站及水文站的观测资料, 降水量的分布同天气图上资料有一定的出入, 尤其局地降水资料数值比较大, 如盛庄镇24小时达540 mm。B

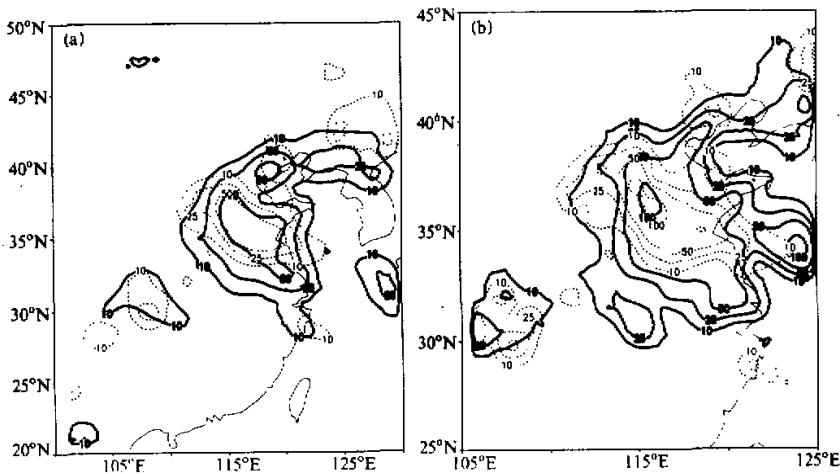


图2 “93.8”24小时降水预报和实况

图中实线是24小时降水预报的雨量线; 虚线是24小时降水实况, 以下降水场说明均如此图

(a) A模式; (b) B模式。包络度 $k=1$

模式的模拟结果, 给出了 24 小时降水预报和实况, 如图 2b。

A、B 模式初始场, 即由初始资料客观分析到各模式网格系统上的要素场是相似的。

24 小时 A、B 模式预报场区别: A、B 模式形势预报的主要系统如 850 hPa 图上的低涡位置均接近实况, 只是强度均偏强。降水场预报, A、B 模式预报出了主要的降水中心、雨带的分布、走向, 但 B 模式比 A 模式的预报有一定的改进, 如鲁西南、太原的大暴雨区均与实况比较接近。A、B 模式均在北京地区预报出了一片暴雨区, B 模式还在武汉、青岛附近多报出两片暴雨区。总之, 水平分辨率的提高无论对形势预报, 还是降水场的预报均有一定的改进, 尤对暴雨区的中心、强度预报比 A 模式明显地改善, 作为初步试验结果是比较成功的。(值得注意的是 A、B 及下文 C 模式由于模式分辨率的差异, 使得模式初始场及降水场的客观分析结果有一定的差异, 并且模式分辨率越高, 模式初始场和降水场的分析结果越接近天气实况。)

3.2.2 “94.7” 台风低压大暴雨天气过程

3.2.2.1 天气过程概述

9406 号台风在福建省南部登陆, 后转为台风低压, 并且继续北上, 到闽北中部后转向西北方向, 7 月 12 日 00 时到达湖南境内, 然后沿 115°E 经线北上, 到达山西南部后转向东北方向, 13 日 00 时到达北京附近, 14 日在东北境内变性, 后移出我国大陆。受台风低压、副高、高空槽的共同影响, 我国从南向北先后出现了一次大范围的强降水过程。这次强降水具有面积广、强度大、降水时间集中等特点。对北京而言, 出现了 50 年一遇的特大降水^[15,16]。

3.2.2.2 比较试验

A 模式的模拟结果, 给出了 24 小时降水场预报和实况如图 3a, 降水资料参考了文献[15,16]的部分资料。图 3b 是 B 模式 24 小时的降水预报和实况。

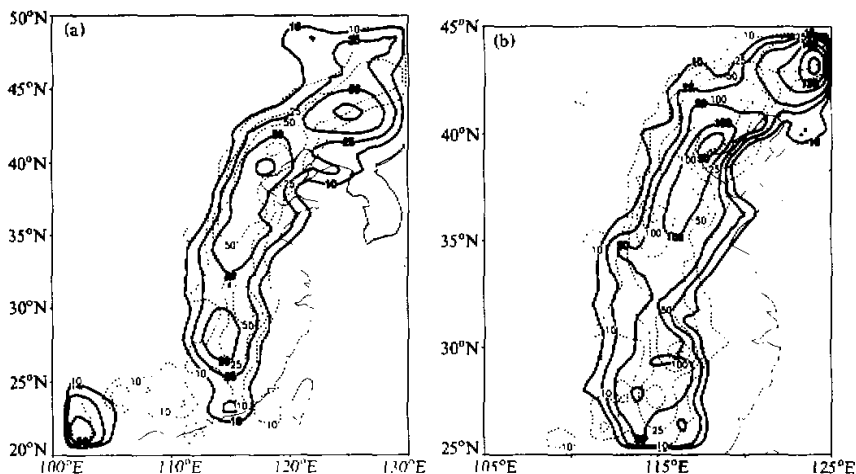


图 3 “94.7” 24 小时降水预报和实况
(a) A 模式; (b) B 模式。包络度 $k=1$

初始场, 由于个例“94.7”系统比较明显, A、B 模式客观分析场相近。

24 小时预报场: 形势场上, B 模式预报的结果比 A 模式强度偏强, 海平面气压场不如 A 模式的预报。降水场上 A、B 模式预报的降水场同实况相似, 雨带呈南北走向, 降水中心基本接近实况, 但 B 模式的 100 mm 降水区比较接近实况, 中心位置、强度、范围均同实况一致, 只是 50 mm 降水区比实况范围偏大一些, 但总的来说, 降水预报比 A 模式有一定的改进。

4 模式水平、垂直分辨率同时提高及其比较试验

η 坐标系又称为阶梯地形坐标系, 垂直分辨率越高, 对地形轮廓的描述越清楚、逼真, 因此需要对 B 模式进一步提高垂直分辨率。当然, 提高垂直分辨率也具有与其他模式类似的意义, 在水平分辨率提高的情况下, 为了保持水平分辨率与垂直分辨率的协调性, 也应提高 B 模式的垂直分辨率。另外, 在中尺度模式中, 应该尽可能地描述好中尺度动力不稳定机制, 根据理论研究, 这也要求数值模式有较高的垂直分辨率。

鉴于上述考虑, 将 B 模式由垂直方向等距地分为 8 层提高到 16 层, 提高后的模式称为 C 模式 (即水平分辨率为 35 km 左右, 垂直方向分为 16 层的模式)。

C 模式的区域, 水平分辨率, 模式地形构造方法均与 B 模式相同, 只不过 C 模式在垂直方向由 $k=8$ 层提高为 $k=16$ 层, 因而其模式地形与 B 模式不同, 如图 1c。可以看出, 垂直分层的增加, 对包络地形的分辨增强, C 模式地形比 B 模式地形更接近实际, 地形的分布及其中尺度地形轮廓与真实地形相似。同 A 模式地形相比高度稍微偏低。由于时间的限制, 对所得模式地形未作任何调整工作。

边界条件、时间积分方案与 B 模式一样。物理过程方面对边界层厚度、垂直方向水汽参数、水平扩散参数等进行了再次调整。

个例仍选取“93.8”、“94.7”两次特大暴雨个例进行数值比较试验。资料来源及处理如前述。

4.1 “93.8”鲁西南特大暴雨过程

C 模式模拟结果, 如图 4a。

初始场: 空中形势场上, 各层客观分析的主要天气系统均与手工分析天气实况图相近; C 模式海平面气压场分析同实况相似。

24 小时预报场: 形势上, 对低涡的预报比实况偏强一些, 分析其原因, 主要是模式区域较小, 西西伯利亚到新疆上空的深槽未能在初始场中反映, 影响到 500 hPa 形势场的预报。降水场方面, 雨区分布、雨带走向均与实况相似, 呈现出西北-东南走向, 大暴雨区的分布、中心位置、强度均接近实况, 50 mm 降水区域的范围比 B 模式要小, 与实况比较接近。总之, 由于水平分辨率和垂直分辨率的同时提高, 降水预报有了明显的改进。

4.2 “94.7”台风低压大暴雨天气过程

图 4b 给出了 C 模式模拟结果。

24 小时预报场: 空中形势场及海平面气压场预报均比 B 模式有较大改进, 与实况相似, 这些表明垂直分辨率的提高, 有益于形势场预报。降水场方面, 50 mm 降水区

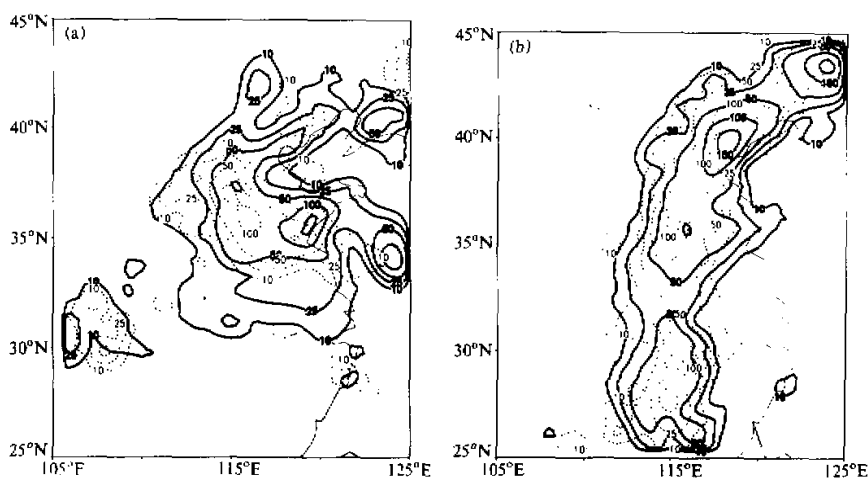


图4 “93.8”和“94.7”24小时降水预报和实况
(a)“93.8”C模式, 包络度 $k=1$; (b)“94.7”C模式, 包络度 $k=1$

比 B 模式预报的要小, 接近于实况, 虚假的暴雨区消失, 大暴雨区的分布、中心及强度均与实况相似。还要特别指出的是不论形势场、还是降水场的预报均比文献[16]用 MM4 对此个例进行模拟的结果更接近实况。

5 结论与展望

归纳本次工作, 得到以下主要结论:

(1) A 模式虽然能够较好地预报出主要降水中心, 但是由于水平分辨率和垂直分辨率不够高, 还不能较好的描述中尺度地形的作用, 而中尺度地形直接影响着强降水中心强度、位置及其分布。对 A 模式水平分辨率的提高后, 即 B 模式, 对局地大暴雨的预报有一定改进, 但多报了几个强降水中心。

(2) 为了更好地考虑中尺度地形作用, 改进 B 模式的性能, 把 B 模式由垂直方向分为 8 层提高到 16 层, 即 C 模式。运用 C 模式进行试验, 并与 A、B 模式预报的结果、实况进行对比分析, 发现 C 模式降水场预报较 A、B 模式有明显的改进和提高。初步试验结果表明, C 模式水平、垂直方向的分辨率是协调的。

C 模式初步试验是比较成功的, 但是对“94.7”过程预报辽西降水过大, 而实况却较小, 经分析其可能原因是原始报文有个别测站记录有误。结合前述形势场预报中的问题, 今后应扩大模式的计算范围, 完善模式客观分析系统。另外, 对 η 模式采用不等距分层, 使低层的分层增加, 更好地描述中尺度实际地形, 也是我们努力的方向。

致谢: 本文完成过程中得到赵思雄、宇加聪等同志的热情帮助, 在此深表谢意!

参 考 文 献

- 1 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 3~5.
- 2 齐瑛, 1993, 中尺度山地气候动力学, 北京: 科学出版社, 1~6.
- 3 Mesinger, F., 1983, A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models, *Riv. Meteor. Aeronautica.*, **43**, 260~272.
- 4 Mesinger, F., 1985, The sigma system problem, Seventh Conference on Numerical Weather Prediction, American Meteorological Society, 340~347.
- 5 Black, T. L., 1994, The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples, *Weather and Forecasting*, **9**(2), 265~278.
- 6 宇如聪, 曾庆存等, 1994, “雅安天漏”研究 II: 数值预报试验, *大气科学*, **18**(5), 535~551.
- 7 宇如聪, 1994, 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的实时预报实验, *大气科学*, **18**(3), 284~292.
- 8 宇如聪, 1994, LASG-REM对1994年中国汛期降水的实时预报实验, *大气科学*, **18** (增刊), 801~809.
- 9 Yu Rucong, 1995, Application of a shape-preserving advection scheme to the moisture equation in an η -grid regional forecast model, *Advances in Atmos. Sci.*, **12**(4), 13~19.
- 10 Betts, A. K., 1986, A new convective adjustment scheme. Part I: observational and theoretical basis, *Quart. J. R. Met. Soc.*, **112**, 677~691.
- 11 Wallace, J. M., Tibaldi, S. and Simmons, A. J., 1983, Reduction of systematic forecast errors in ECMWF model through in the introduction of an envelope orography, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **109**, 683~717.
- 12 Mesinger, F., 1988, The step-mountain coordinate: model description and performance forecast of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1493~1518.
- 13 孙兴池等, 1993年夏季(6~8月)山东天气评述, *山东气象*, 1993, **13**(3), 44~48.
- 14 朱管忠, 李玉华, 1994, “93.8”鲁南特大暴雨的分析, *气象*, **20**(2), 11~17.
- 15 方文举, 1995, “94.7”北京大暴雨的灾情分析, *气象*, **21**(10), 20~23.
- 16 周兵, 葛明, 1995, “94.7”北京大暴雨数值分析, *气象*, **21**(10), 39~42.

A Numerical Experiment with the Higher Resolution η -Coordinate Model

Zhou Zugang, Zhang Weihuan, Hao Weifeng and Lin Naishi

(The Meteorology Institute of Air Force, Nanjing 211101)

Abstract In order to research the important influence of the meso-scale topography for Chinese weather, an improvement has been made on the horizontal and vertical resolution of REM in order, and has simulated with the higher resolution model to the heavy rain cases of August 4th~5th, 1993 and July 12th~13th, 1994, using the routine data to get initial field and model orography by envelope method. Compared to the results of A, B, C model and observation, it is found that the precipitation forecast of B model has been improved a little than that of A model, and several pseudo-heavy rain centers have existed. After the horizontal and vertical resolution of REM have been changed, the precipitation and circulation pattern forecast of C model has been improved greatly than that of B model.

Key words η -coordinate model resolution envelope orography numerical experiments