

中尺度数值模式中初始场和地形的不同处理对 降水预报的影响及相对比较*

潘在桃

(国家气象局气象科学研究所)

与天气尺度系统相比,中尺度天气系统的环流场较重要,散度场和降水量有很好的相关性。那么在中尺度模式的初始资料处理中是否能沿用天气尺度模式的处理方法,如环流的无辐散处理等。另一方面,中尺度系统中强迫过程如地形的作用也很重要。这两方面分别有过不少研究^[1,2],但对某一地区,特别是地形复杂的地方,弄清中尺度数值模拟是对初始场还是对地形处理敏感,将有助于中尺度模式的研究改进和地形作用的探讨。

1. 模式简介

本文所用的 PSU/NCAR 原始方程静力平衡中尺度模式 MM 4 已应用于不少工作中,它的主要物理结构这里不再赘述,要详细了解其主体结构可参见文献[3]。本文取模式水平分辨率为 90 × 90 km,垂直方向上不等距 10 层,预报范围 2700 × 2700 km,中心在 38°N, 115°E。下面仅就该模式的初始资料和地形处理作一简介。

1) 客观分析

MM 4 的客观分析是在 CRESSMEN 逐步订正法的基础上,考虑了中尺度系统中环流场结构的重要,加重沿气流方向的权重,把扫描区域改为椭圆。如果气流弯曲扫描区变为弯曲了的椭圆即香蕉形^[4]。设 P 点观测值对网格点(i, j)值的权重函数

$$W_{i,j} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_m^2}{R^2 + d_m^2} & d_m < R \\ 0 & d_m \geq R \end{cases} \quad (1)$$

R 第一次扫描取 520 km,下几次扫描逐次递减。 d_m 是网格点和观测点之间的“有效”距离。

(1) 圆形: $d_m =$ 几何距离

(2) 椭圆形: $d_m = \frac{x'^2}{E_p^2} + y'^2 \quad (2)$

$$x' = D_{i,j} \cdot \frac{V_p}{|V_p|}$$

$$y' = K \cdot \left(D_{i,j} \times \frac{V_p}{|V_p|} \right)$$

$$E_p = (1 + 0.2 |V_p|)^{\frac{1}{2}}$$

其中 $D_{i,j}$ 是网格点到观测点的位置矢量, V_p 是 P 点风矢量, K 为垂直方向单位矢量。

(3) 香蕉形:

$$d_m = \left[\frac{r_p^2 (\theta_p - \theta_{i,j})^2}{E_p^2} + (r_p - r_{i,j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

* 本文于 1988 年 4 月 25 日收到, 1989 年 5 月 24 日收到修改稿。

其中 r , 为 P 点的流线曲率半径; θ , 为过 P 点流线曲率半径与 X 轴的夹角; r_{ij} 为 (i, j) 点到 P 点流线曲率中心的距离; θ_{ij} 为曲率中心到 (i, j) 点的连线与 X 轴的夹角。

2) 初始化

经客观分析观测值内插到网格点上, 由于观测精度所限和内插误差等, 各种变量间的平衡关系会受到歪曲而导致虚假的重力波。所以对客观分析后的观测值需进行初始化。首先对观测精度低、变化范围大并对中尺度系统更为重要的风场处理。本文采用

(1) 全(场)无辐散处理 风场由流函数 ψ 给出,

$$u = -m \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = m \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (4)$$

其中 m 为地图因子, ψ 由泊松方程给出:

$$\nabla^2 \psi = \zeta \quad (5)$$

这里 ζ 是实测风的相对涡度。

(2) 整层无辐散处理 它不象全场无辐散那样要求空间任一点散度为 0, 而是让气柱整层平均散度等于 0, 水平面上仍可有散度。首先

$$\nabla^2 \chi = \nabla \cdot p^* \frac{\bar{V}}{m} \quad (6)$$

其中 $(\bar{\quad})^{\sigma}$ 代表垂直平均, $p^* = p_s - p_t$ (p_s, p_t 分别为模式底、顶部气压), χ 速度势。然后平均散度风分量

$$u_D = \frac{m}{p^*} \frac{\partial \chi}{\partial x}, \quad v_D = \frac{m}{p^*} \frac{\partial \chi}{\partial y} \quad (7)$$

最后无辐散风分量

$$\begin{aligned} \hat{u} &= u - u_D \cdot w_{\sigma} \\ \hat{v} &= v - v_D \cdot w_{\sigma} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 w_{σ} 为平均散度的垂直分布函数, w_{σ} 简单地等于 1.0。

其次要对温度场处理。由于各种误差风场和温度场之间可能存在着严重的不平衡, 为此从非线性平衡方程

$$\nabla^2 \phi = f \nabla^2 \psi + 2 m^2 (\psi_{yy} \psi_{xx} - \psi_{xy}^2) + \beta \psi_y \quad (9)$$

解出 ϕ 。再由静力平衡方程

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p} \quad (10)$$

求出温度场。本模式中高度即 ϕ 是诊断量, 不必处理。

3) 地形处理

MM 4 用的是实际地形高度, $1^\circ \times 1^\circ$ 的地形资料经 CRESSMAN 一步内插到 90×90 km 的网格点上。

2. 试验设计

为了比较中尺度模式中初始场和地形对降水的影响, 设计了下面 7 个试验。EX 1 是简单的圆形扫描, 风场经过了整层平均散度为 0 的处理, 初始高度和温度场未经处理, 见表 1。EX 2 和 EX 1 一样, 仅是扫描区域为香蕉形。EX 3 与 EX 2 的差别只是初始温度场分别从平衡和静力平衡方程算出。EX 4, EX 5 是为无辐散处理设计的, EX 4 为有辐散即风场不经处理, EX 5 为全场无辐散。EX 6 和 EX 7 在 EX 1 的基础上对初始场的客观分析和地形处理中的扫描半径的大小进行试验。初始场的客观分析中共有 4 次扫描, 每次扫描半径按一定比例减小, 即每次乘以递减率, EX 1 和 EX 6 的递减率分别为 0.7

和0.5。EX 7的目的是以地形的平滑程度即平滑(扫描)的范围来反映小地形的作用, EX 7的地形扫描半径为EX 1的一半(90 km)。

表 1 试验特征

试 验	扫描形状	风 场 处 理	温 度 处 理	扫描半径递减率	地形平滑半径
EX1	圆	垂直平均散度为 0	不 处 理	0.7	二倍格距
EX2	香蕉	垂直平均散度为 0	不 处 理	0.7	二倍格距
EX3	香蕉	垂直平均散度为 0	向风场平衡	0.7	二倍格距
EX4	香蕉	不 处 理	不 处 理	0.7	二倍格距
EX5	香蕉	全场无辐散	不 处 理	0.7	二倍格距
EX6	圆	垂直平均散度为 0	不 处 理	0.5	二倍格距
EX7	圆	垂直平均散度为 0	不 处 理	0.7	一倍格距

3. 试验结果

1) 天气背景 这次试验的初始资料为1986年6月26日20时常规地面和高空观测。这是京津冀地区的一次大暴雨过程,其强度和范围为建国以来所罕见,其中北京26日08—27日08时降水量达157 mm,创1895年以来同期日雨量记录。

在这次暴雨之前亚洲中高纬度500 hPa形势从一槽一脊调整到二脊一槽型,大陆上空呈明显的经向环流,冷空气从蒙古低涡后部沿河西走廊南下。同时华北高压东移与副高在115°E以东打通,形成缓慢东移的高压坝,西南急流东移加强,把水汽直接输送到华北北部。26日20时850和700 hPa上太原附近有一中尺度低涡,其中心散度值为 $-6.5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$,同时低空急流前方,北京北面有一辐合中心(图略)。计算结果约6小时后这二个辐合中心合并,这时500 hPa ω 达 $-26 \cdot 10^{-3} hPa s^{-1}$,降水明显加大,见图1a。在红外卫星云图(图1b)上这二个云系确实合并了,且合并后回波顶显著增高,与计算结果很一致。

2) 各个试验的落区比较 降雨的落区是中尺度预报中一个关键量,图2给出了预报得较好(见表2)的EX 7 24小时预报与实况比较。预报的雨区和实况基本重合,68 mm的雨量中心位于177 mm的实况中心西北约100 km处,其他几个中心虽有150—200 km的偏差,但大致一一对应,只是量值偏小(85 mm的中心除外)。

图3给出了各个试验的3小时落区预报,可见EX 1和EX 2, EX 4三个试验之间的雨区形状及位置差别不大,均为一条东北—西南向的雨带,大于20 mm的中心位于西南角,说明早在3小时内扫描形状和整层无辐散处理对落区的影响已不明显。地形平滑程度(EX 7)的作用突出,其雨带断开并在原雨带的中部出现一个大于15 mm的中心。全无辐散处理(EX 5)使西南角的中心明显减弱。另外,初始场分析中扫描半径递减率(EX 6)对雨量有相当的影响,温度场向风场平衡也有一定的影响。

6小时后除20 mm以上强降水外,各个试验的雨区分布差别甚微(图略),说明这时大范围弱降水已不再受影响,而只是强雨中心的不同。表2列示各个试验的6小时25 mm以上降水预报的 T_s 评分。由表2可见落区报得最好的是EX 7,其 $T_s=0.73$,可见地形作用的重要性,其次是EX 4, $T_s=0.60$,而EX 3, EX 5和EX 6的 T_s 均小于0.25。

3) 小地形对强降水分布的影响 EX 1和EX 7中分别以180和90 km平滑半径来反映小地形的作用,EX 1中地形平滑,太行山和燕山平坦广阔,而EX 7中太行山和燕山走向真实,坡度陡,地形细微结

$$1) T_s = \frac{\text{报对面积}}{\text{预报面积} + \text{实况面积} - \text{报对面积}}$$

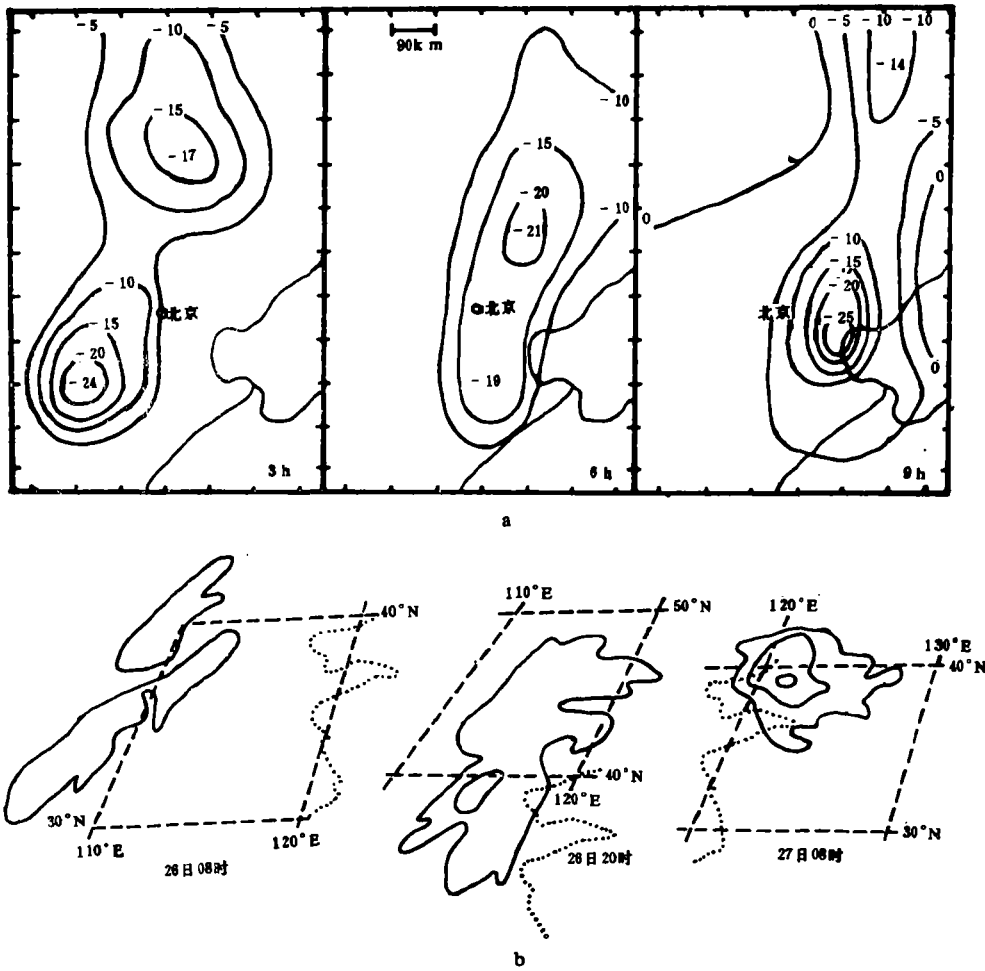


图 1 低空急流前方辐合区和中小尺度低涡的合并过程[a:计算(EX1)得 500 hPa $\omega(10^{-3} \text{ hPas}^{-1})$, b: 红外卫星云图(最外一层温度为 $-32 \sim -46^\circ\text{C}$, 中间一层为 $-47 \sim -60^\circ\text{C}$, 最里一层为 $-61 \sim -70^\circ\text{C}$)]

表 2 各个试验 6 小时 $>25\text{mm}$ 降水预报的 T_s 值

试 验	EX1	EX2	EX3	EX4	EX5	EX6	EX7
T_s	0.48	0.48	0.13	0.60	0.13	0.22	0.73

显。图 4 给出了这二个试验 6, 12 和 24 小时雨量分布。二格距平滑范围时降水为一块大区域, 而一格距时降水出现 3 个中心。12, 24 小时雨区形状基本相同, 但 EX 7 大于 20 mm 降水明显不均匀。有趣的是 180 和 90 km 间的差别仅限于大于 20 mm 降水, 大范围弱降水却无差别。另外 270 km 的结果(图略)与 180 km 几乎相同, 这说明中尺度降水预报对小地形比大地形敏感。

由上可见地形平滑程度减弱即分辨率提高可使原来大降水区分成几个中心, 这是否与实况相符? 从图 5 可见, 6 小时降水实况与预报(EX 7)均有 3 个降水中心, 位置也相符, 直到 24 小时, 这种多中心仍与实况对应得很好(见图 2)。

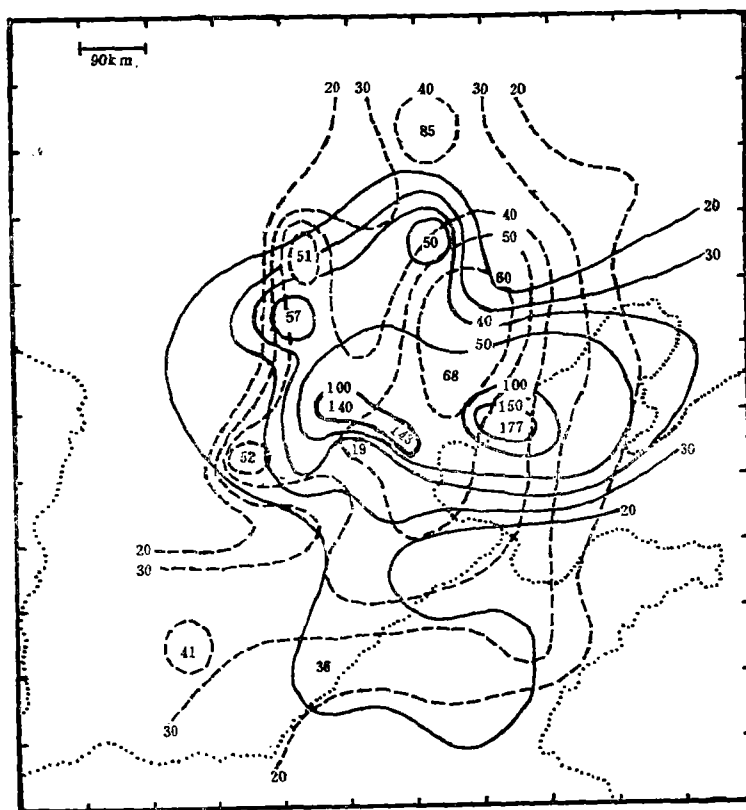


图 2 1986 年 6 月 26 日 20 时—27 日 20 时降水量预报(虚线)与实况(实线)比较(单位: mm)

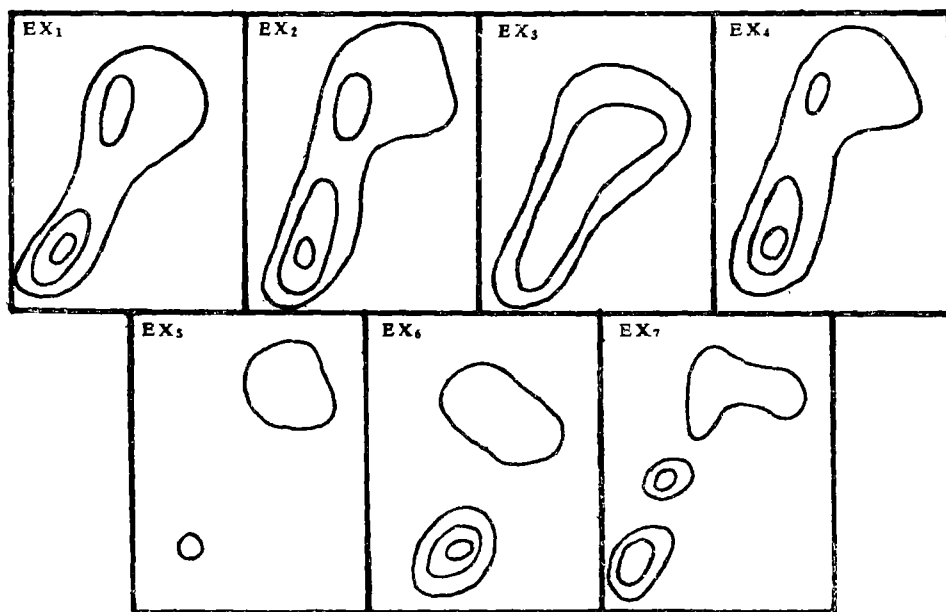


图 3 各个试验的 3 小时降水落区比较
(等值线分别为 10, 15 和 20 mm)

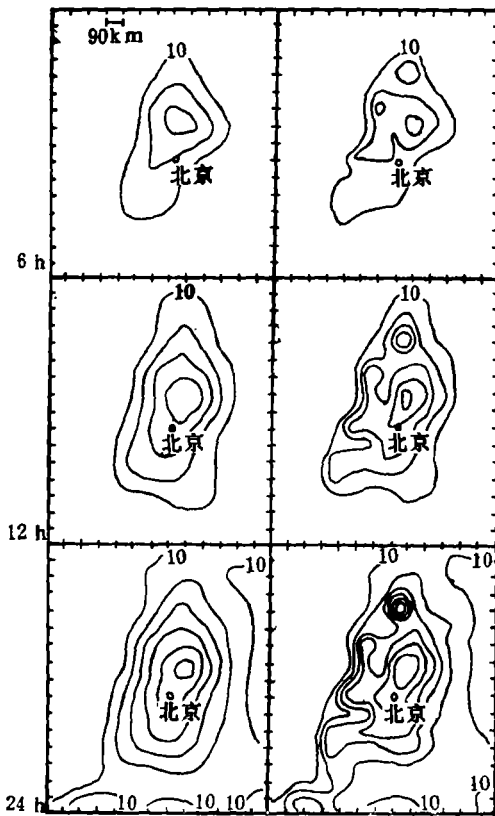


图4 180(左)和90 km(右)地形平滑半径对降水分布的影响及其比较(间隔10 mm)

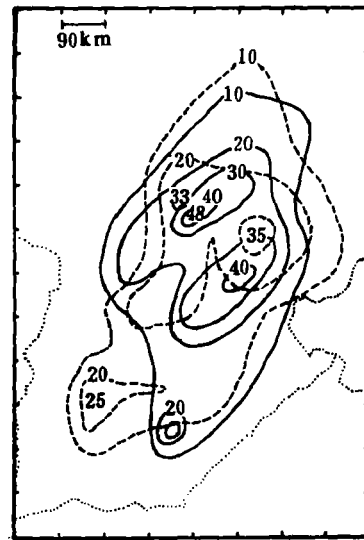


图5 26日20时—27日02时6小时降水预报(虚线)与实况(实线)比较(单位: mm)

4) 初始场对落区的影响 EX 6的客观分析中逐次扫描半径递减率为0.5, 其24小时降水(图略)与EX 1(递减率=0.7)相比可知, EX 6的雨区明显变窄, 但并未能把几个雨量中心报出来。这与地形的平滑作用完全不同, 后者能细报出多中心而不改变雨区范围。

EX 3(平衡)的降水(图略)与EX 1(EX 3的对比试验应是EX 2, 但EX 2和EX 1的差别不大)相比可知, 平衡处理使雨区变成窄条状, 但也有3个大于60 mm的中心, 但中心位置与实况相差很远。

5) 各个试验的最大降水量比较 图6给出了不同试验中累积雨量随时间的演变。由EX 2, EX 3比较可知, 温度场向风场平衡使雨量减小, 并随着时间增加雨量差别有增大的趋势¹⁾。到18小时EX 3比EX 2雨量少约10 mm(20%)。经全无辐散处理后, 前3小时因初始时刻散度为0而雨量减小, 但3小时后很快增加, 9小时比未经处理的EX 4大9 mm, 是所有试验中最大者。不过到24小时这二个试验的差别有所减小, 说明有一趋于恢复的过程。EX 6的降水在6小时之前稍小于EX 1, 之后降水增加缓慢, 12小时比EX 1小11 mm(30%), 是所有试验中最小者。

表3列出了所有试验的3, 6, 12和24小时累积雨量。3小时之前差别较大, 最大相差约一倍。所有试验中雨量报得最大的为EX 5, 最小的为EX 6, 它们之间12和24小时雨量之比分别为68%和80%。

1) 因机器故障只积到18小时。

4. 小结与讨论

1) 7个试验可归为下列5个因子对降水预报的影响: 扫描形状(EX 1, 2), 温度向风场平衡(EX 2, 3), 无辐散处理(EX 4, 5), 扫描半径大小(EX 1, 6)和地形平滑程度(EX 1, 7)。其中扫描形状(圆、香蕉)对雨量和落区均无显著影响。

2) 全无辐散处理对风场修改较大, 使3小时前降水减小, 然后迅速增大, 6—18小时明显超过未经处理的EX 4, 18小时后趋于恢复。这种无辐散处理增加降水现象也曾发生过^[1], 只是因积分时间短未显出18小时后的恢复期。这种现象是否可以这样解释: 3小时前人为地调整风场, 使其散度为0, 改变了原来的平衡关系, 但这是暂时的, 在积分过程中由于一些强迫过程如下垫面等条件, 模式还是要把风场调到原来的平衡位置, 但由于惯性可能“调过了头”(overshooting), 使降水反而加大。18小时后又是“过头”的恢复, 降水量回升过程, 可见, 风场经全无辐散处理后, 雨量并未减小, 反而增加, 尤其是在9—18小时之间。

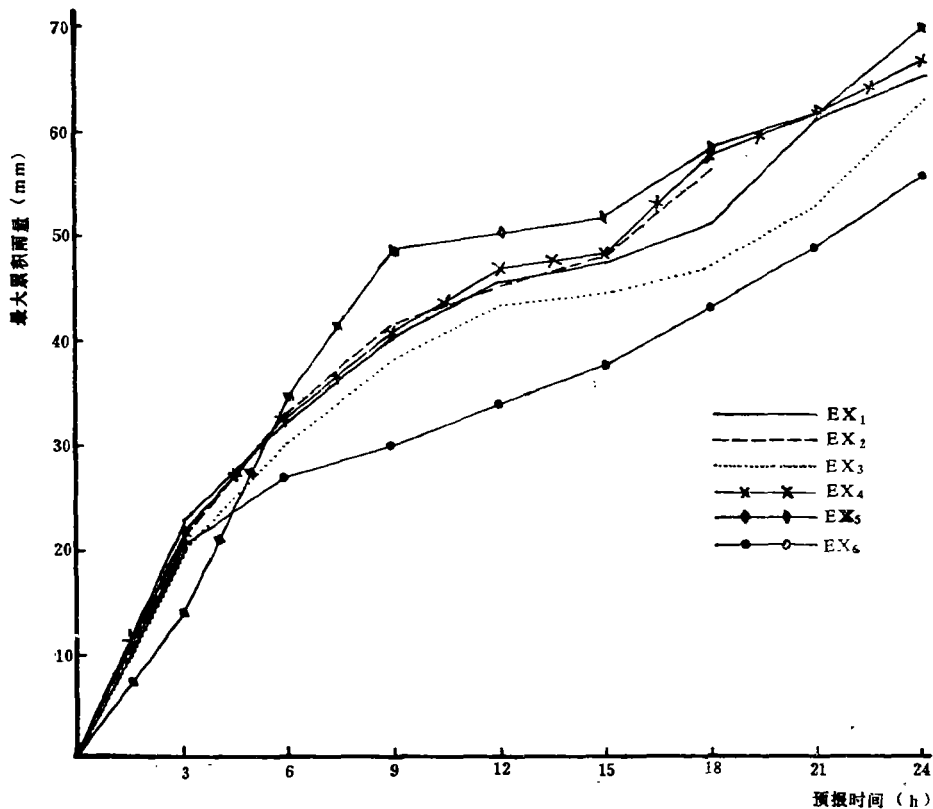


图6 不同试验中最大雨量值比较

3) 客观分析中的扫描半径(递减率)稍小可以增加降水, 但不能太小, 否则很可能丢掉一些有用的信息, 使降水减小。另外温度场向风场平衡可能造成雨区畸形, 成为虚假的多中心。

4) 当地形平滑范围从270(未列出)减小到180 km降水分布几乎无变化, 再进一步缩小到90 km几个未报出来的雨量中心全报出来了, 这和文献[5]中无云贵高原西南涡就不出现非常相似。这说明中尺度降水对小地形敏感, 而对大地形不太敏感。另外, 即使地形平滑范围从180缩为90 km时大范围的弱降水也未受影响。这似乎说明大尺度地形只影响大范围弱降水, 而小地形只改变小区域强降水, 二者之

表 3 各试验中不同时间最大累积雨量

试 验 时 间	3 小时	6 小时	12小时	24小时
EX1	23.0	32.4	45.6	65.3
EX2	20.9	33.2	45.4	
EX3	19.4	30.3	43.5	63.3
EX4	21.1	32.6	47.0	67.0
EX5	13.6	34.9	50.4	70.1
EX6	20.3	27.1	34.2	56.2
EX7	13.3	35.3	52.2	67.8

间可能存在着一一定的尺度关系。

5) 初始场平滑程度只改变雨区范围, 而不能把多中心预报出来, 但地形分辨率的提高能补报出雨量的多中心, 同时又不改变雨区范围。考虑到地面观测站网密度与现用的地形资料($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) 相当, 初始场分辨率的提高不能报出多中心, 可能说明初始气象场内不含与这多中心有关的小系统信息。它们是后来由局地条件所致。就高空资料(远疏于地面)而言, 也许含有这样的信息, 但现有的探空网还不能分辨出来。不过如大气中存在这些小尺度系统的话, 在地面上反应的可能性应比高空大。

6) 总之, 这次试验中地形对降水的作用比初始资料的影响大, 所以中尺度模式中要尽可能精确地描述地形。另外虽然降水量值在 24 小时时对初始场不太敏感, 但 9—18 小时中各个试验的中心雨量还是有一定的差别。

参 考 文 献

- [1] Tarbell, T. C., T. T. Warner and R. A. Anthes, the initialization of the divergent component of the horizontal wind in meso-scale numerical weather prediction model and its effects on initial precipitation rates, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 77—95, 1978.
- [2] Browning, K. A., C. W. Pardoe and F. F. Hill, the nature of orographic rain at wintertime cold fronts, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101, 333—352, 1975.
- [3] Anthes, R. A., Y. K. Kuo and E. Y. Hsieh, Description of the Penn. State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4), NCAR Technical Note, NCAR/TN-282-STR, 66 pp.
- [4] Benjamin, S. G., and N. L. Seaman, A simple scheme for objective analysis in curved flow, *Mon. Wea. Rev.*, 113, 1184—1198, 1985.
- [5] Kuo, Y. H., and L. S. Chen, Numerical simulation of the Sichan flood catastrophe: 11—15 July, 1981, Res. Rept., MRS/NCAR, 1986.

ROLE OF INITIAL METEOROLOGICAL FIELDS AND TERRAIN HEIGHT AND THEIR COMPARISON IN MESOSCALE NUMERICAL RAINFALL FORECAST

Pan Zaitao

(Academy of Meteorological Science, State Meteorological Administration)

Abstract

By using the PSU/NCAR mesoscale numerical model MM 4 which is currently replanted to the DPS-7 computer, 7 experiments are conducted to test the effects of different methods used in objective analysis/initialization and terrain consideration. Also, the comparison is made between the effects of initial meteorological fields and terrain height.