

# 包含正定水汽输送算法改进的 MM4 中尺度 模式与暴雨实例数值试验\*

葛孝贞 郑爱军

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

## 摘 要

暴雨预报是一个既重要又十分困难的问题。水汽条件是产生暴雨的关键, 水汽的平流输送在模式的水汽方程中占有重要地位, 模式对暴雨的预报能力必然涉及到水汽输送的计算精度问题; 本文以著名的中尺度模式 MM4 为基础, 理论测试和分析为依据, 以引入新的正定高精度水汽输送算法作为消除模式水汽负值和改进中尺度模式预报能力的途径, 研制了取名为改进的 MM4 中尺度模式, 该模式除仍保留原 MM4 模式的所有功能外, 增加了 5 种水汽输送算法的改进与选择, 这 5 种算法是: 1) B 网格二阶守恒中心差(原 MM4 平流格式), 2) 上游差分, 3) Bott(2 阶), 4) Bott(4 阶), 5) Prather 格式。多个暴雨、台风个例试验表明模式预报能力对水汽输送算法精度有显著的依赖性, 采用高精度的水汽输送算法水汽保证正值并提高了模式对暴雨区、降水结构、雨团活动的预报能力。改进水汽输送算法的精度是提高中尺度模式对暴雨预报能力的重要途径。

关键词: 中尺度模式, 水汽输送, 输送格式。

## 1 引 言

暴雨预报是一直被广泛关注的研究课题。随超级计算机的研制成功及计算技术的快速发展, 大大改善了研究和改进暴雨数值预报准确率的计算条件。以世界上著名的 MM4 模式<sup>[1]</sup>为中尺度模式代表, 其主要研制目的之一是暴雨、台风等剧烈天气过程的预报。水汽条件是产生暴雨的关键, 而水汽方程中的平流项占有重要地位, 模式预报精度必然涉及到水汽输送的计算问题。水汽是正值且是标量, 计算域内经常会出现小尺度的源或汇, 空间分布不连续, 干、湿空气交汇处, 强而持续的水汽源等都会导致存在大梯度的水汽分布。如何计算具有大梯度甚至间断分布特征水汽场的输送问题是目前改进中尺度模式预报能力的一个重要问题。以前的工作多数注重于计算的稳定性, 因而所采用的平流输送格式主要考虑算法的守恒性, 但守恒性是一个总体量度, 往往会以损失精确性为代价去保证守恒。MM4 中采用守恒格式(Arakawa B 网格二阶守恒中心差格式)计算, 理论试验和实例模拟都说明: 1) 由于计算频散而导致的计算负解仍然存在; 2) 对计算像水汽具有大梯度甚至有间断分布的要素的输送, 会出现不合理的平滑, 明显降低了对"大梯度"特征的分辨能力。显然, 采用这种格式计算水汽输送过程是值得改进的。

\* 初稿时间: 1995 年 5 月 15 日; 修改稿时间: 1995 年 9 月 4 日。

资助课题: 国家“八五”攻关(85—906—04)和国家自然科学基金(49675226)。

近 30a 来随计算技术的发展,各种分属不同类别的平流输送过程的算法被研制、测试和应用,仅就保证正定而且具有高精度性能的格式而言,已有近 10 余种,其中如保证正定并且节省计算时间的 Smolar 格式<sup>[2]</sup>,保持正定且高精度的二阶矩守恒的 Prather 格式<sup>[3]</sup>,以及正定的多项式拟合 Bott 格式<sup>[4]</sup>等等,这些格式已经或正在被大气化学或输送模式引入应用,如模式 EM 2, EM 3<sup>[5,6]</sup>等取得了明显的改进效果,近年来超级巨型机的研制成功,给区域模式引入高精度计算技术提供了必备条件,根据水汽场分布特征,如何用高精度、正解算法去改进区域中尺度模式对暴雨、台风等灾害性天气过程的预测能力是一个新的和有意义的尝试。本文工作在理论测试结果对比的基础上,将高精度新输送算法引入 MM 4 中尺度模式,改进水汽输送算法精度,称其为改进的 MM 4 模式,它包括 5 种水汽输送算法的任意选择:1) 原 MM 4 模式 B 网格中心差格式,2) 上游格式(为了比较格式误差特征),3) Bott 2 阶,4) Bott 4 阶和 5) Prather 格式。

作者还为模式自行研制了前置和后置处理系统,利用改进的预报系统,在模式不同水汽输送算法的选择项下,对 1982, 1983, 1986 和 1991 年发生在中国江淮流域的暴雨过程和 4 个东海台风实例进行了数值对比实验<sup>[7-9]</sup>。结果表明,在高精度新格式选择下的模式系统提高了模式对暴雨区、降水场结构、雨团活动的预报能力,较真实地模拟出了尺度较小的降水系统的活动,结果明显优于原先的 MM 4 模式。

## 2 模式水汽输送新算法的设计

### 2.1 正定、高精度水汽输送算法的引入与试验

#### 2.1.1 二种高精度的平流输送格式

##### 2.1.1.1 二阶矩守恒 Prather 格式

为了计算模式方程中平流输送过程,在被划分为若干个网格的计算域内(设网格长度分别记为  $X, Y, Z$  计  $N \times M \times L$  个网格)某瞬时  $t$ ,任一格点上的函数  $f_{ijk}(x, y, z)$  ( $I = 1, N; J = 1, M; K = 1, L$ ) 表示以该点为中心,长度为  $X, Y, Z$  的“格元”内函数的平均值,格元体积  $V = XYZ$ ,设函数在“格元”内以二阶多项式形式连续分布:

$$f(x, y, z) = a_0 + a_x x + a_{xx} x^2 + a_y y + a_{yy} y^2 + a_{xy} xy + a_z z + a_{zz} z^2 + a_{yz} yz \quad (1)$$

其中,  $0 < x < X, 0 < y < Y, 0 < z < Z$ , 表达式(1)的正交多项式形式:

$$f(x, y, z) = m_0 k_0 + m_x k_x + m_{xx} k_{xx} + m_y k_y + m_{yy} k_{yy} + m_{xy} k_{xy} + m_z k_z + m_{zz} k_{zz} + m_{xz} k_{xz} + m_{yz} k_{yz} \quad (2)$$

其中正交函数  $k_i$  ( $i = 0, x, xx, y, \dots, zz$ ) 应满足:

$$k_i k_j dV = 0 \quad (i \neq j) \quad (3)$$

给定一组满足正交条件(3)的关系式,为了计算“格元”内在平流输送中函数的变化,利用正交多项式的性质,并定义一组与多项式系数  $m_i$  ( $i = 0, x, xx, \dots, zz$ ) 有关的系数  $S_i$  (称其为矩),这里仅给出  $S_i$  的一维表示式:

$$S_0 = \int_0^X df(x) k_0 = m_0 V$$

$$S_x = \frac{6}{X} \int_0^X df(x) k_x = m_x VX/2$$

$$S_{xx} = \frac{30}{X^2} \int_0^X df(x) k_{xx} = m_{xx} VX^2/6$$

其中: 零阶矩  $S_0$  表示格元内函数平均值, 一阶矩  $S_x$  和二阶矩  $S_{xx}$  分别表示函数的斜率和曲率。任一时刻  $t$ , 格元内函数  $f_i^t(x)$ , 用一组  $S_i^t$  的组合表示为二次连续函数, 在以风速失的平流输送中, 保持一阶, 二阶矩守恒, 以格元内  $S_i$  的改变来确定在格元内函数  $f$  的分布及改变, 随时间积分逐步确定在整个计算域内该分段连续函数随时间的变化。

据 Neumann 方法分析该平流格式的计算稳定性, 将格元内  $f$  分解为有限个 Fourier 分量, 分析其中一个波分量如:  $f(x) e^{ikx}$ , 在格元内 ( $0 < x < X$ ) 计算出该分量的  $S_i$ , 检验  $S_i$  ( $i = 0, x, xx$ ) 随时间的演变中, 其振幅是否有界, 以及保证其有限应满足的条件, 证明(略) 可得, 当  $0 < \alpha < 1$  ( $\alpha = u\Delta t/x$ ,  $u$  为一维风速) 计算稳定 ( $S_0, S_x, S_{xx}$  都有界)。

### 2. 1. 1. 2 多项式拟合的 Bott 格式

Crowly 和 Tremback<sup>[10]</sup> 先后用多项式拟合的方法获得了  $f$  在格子里的高阶多项式分布, 从而使格式的数值扩散大大减少。 $f$  在  $i$  格子里展开成象下面这种形式的  $l$  阶多项式:

$$f_{i,l}(x) = \sum_{k=0}^l a_{ikx}^k \quad (4)$$

其中  $x = (X - X_i)/\Delta x$  及  $-\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2}$ , 从  $l = 0, \dots, 4$  的系数表达式<sup>[4]</sup>,

定义积分式

$$I_i^+ (C_{i+\frac{1}{2}}) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f_{i,l}(x) dx = \sum_{k=0}^l \frac{a_{i,k}}{(k+1)2^{k+1}} [1 - (1 - 2C_i^+)^{k+1}] \quad (5)$$

$$I_i^- (C_{i+\frac{1}{2}}) = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} f_{i+1,l}(x) dx = \sum_{k=0}^l \frac{a_{i+1,k}}{(k+1)2^{k+1}} (-1)^k [1 - (1 - 2C_i^-)^{k+1}] \quad (6)$$

则得到格子右侧边界的通量, 其中  $C_{i\pm\frac{1}{2}} = u_{i\pm\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta x}$

$$F_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} [I_i^+ (C_{i+\frac{1}{2}}) - I_i^- (C_{i+\frac{1}{2}})] \quad (7)$$

再用 U\_pstream 方法便可得出  $f_{i\pm\frac{1}{2}}^{\Delta t}$  的值, 为了使解保证正定, 还必需使通量满足如下条件<sup>[4]</sup>:

$$F_{i+\frac{1}{2}} = \left[ \frac{u_{i+\frac{1}{2}}^+}{u_{i+\frac{1}{2}}^-} f_{i+\frac{1}{2}} - \frac{u_{i+\frac{1}{2}}^-}{u_{i+\frac{1}{2}}^+} f_{i+\frac{1}{2}} \right] \quad (8)$$

其中有

$$u_{i+\frac{1}{2}}^+ = \text{MAX}(0, I_i^+ (C_{i+\frac{1}{2}}))$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_{i,i+\frac{1}{2}} &= \text{MAX}(0, I\bar{u}(C_{i+\frac{1}{2}})) \\ \bar{u}_{i,i-\frac{1}{2}} &= \text{MAX}(I\bar{u}, \bar{u}_{i,i+\frac{1}{2}}^* + \bar{u}_{i,i-\frac{1}{2}} + \delta) \end{aligned} \quad (9)$$

$\delta$  是一个小数, 用来避免计算的不稳定, 这样便得到了 Bott 格式。多项式的阶数  $n$  即对应 Bott  $n$  阶格式。

### 2. 1. 2 平流格式误差特征的对比试验

这里对具有典型误差特征的 3 种常用平流差分格式(上游格式, Lax-Wendroff 格式, 二阶时空中心差格式) 和 2 种高精度格式( Bott 4 阶, Prather 格式) 作对比试验。

水汽输送的主要通道是 700– 800hPa 低空急流, 若将急流轴理想化为一维风场, 沿急流轴建立  $X$  坐标, 若设风速为常数(取为  $u = 20\text{m/s}$ ), 则一维平流方程的解析解  $f(x - ut)$ , 当计算域为  $0 < x < l$ , 取周期边界条件, 平流  $nl$  后  $f$  的解析解应与初值  $f(x - ut_0)$  等价, 这里把计算区域划分为 31 个格点, 格距取为 80km, 格点数为  $\epsilon = 0.27$ , 初值取为一维锥形波(取中心位置  $i = 16$ ), 如图 1 给出用以上平流格式, 平流输送 2 个时间周期(约相当于 69h) 的结果: 图 1a 表示上游格式, Lax-Wendroff 和二阶中心差格式的误差特征, 图 1b 表示 Bott 4 阶和 Prather 格式的数值误差特征, 其中实线是解析解, 虚线表示输送 2 个周期后的数值解。

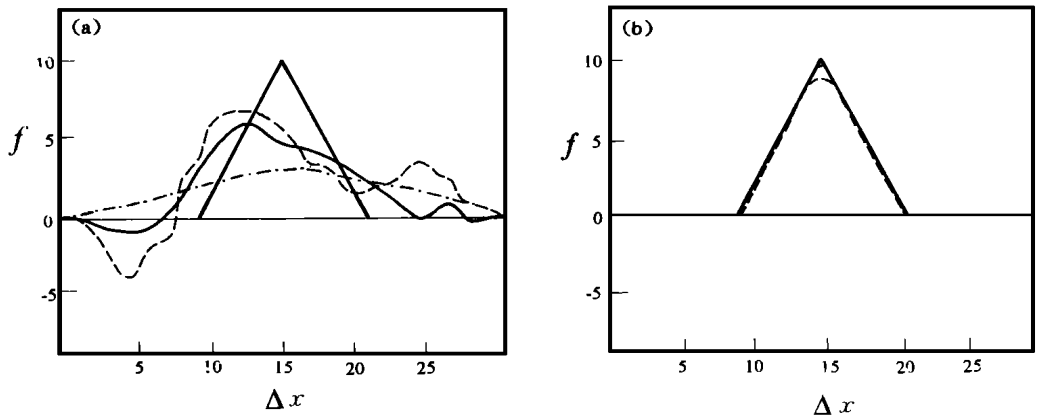


图 1 不同格式一维平流试验

(横坐标为格距  $\Delta x$  取为 80km 时的格点数, 纵坐标表示以常值风速 ( $u = 20\text{m/s}$ ) 平流输送 230 时步 (时步  $\Delta t$  取为 18min) 后函数值  $f$  的大小。其中 a: 粗实线为精确解, 细实线为 Lax-Wendroff, 虚线为二阶中心, 点虚线为上游格式; b: 粗实线为精确解, 细实线为 Prather 格式, 虚线为 Bott 4 阶格式)

图 2 依次给出上游格式, Lax-wendroff 格式, 二阶中心, Bott4 阶和 Prather 格式在计算域  $31 \times 31$  个格点, 格距取为 80km 在理想二维旋转风场下, 给定锥形波初值输送 2 个周期后的数值结果。

分析结果表明: i) 上游格式解保持正定, 无位相差, 由于数值耗散使振幅衰减 90%, Lax-Wendroff 格式有负解和位相差, 振幅有较强的衰减。ii) Bott4 阶和 Prather 格式是两种高精度格式, 保持正解, 无位相差, 数值扩散小, Prather 格式峰值衰减不到 7%。iii) 二阶

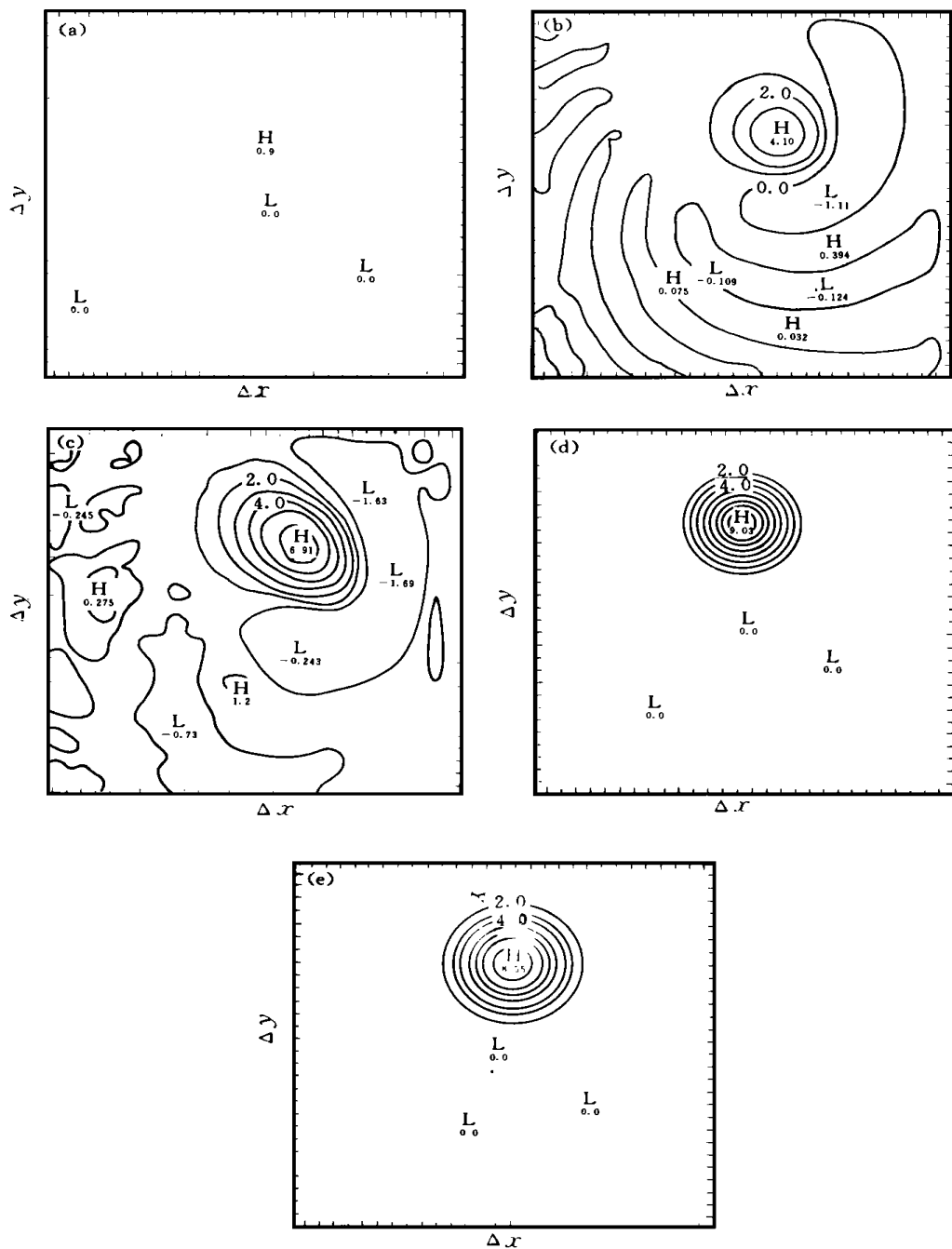


图2 不同格式二维均匀旋转风场下的试验结果

(横和纵坐标分别表示在格距取为  $\Delta x = 80\text{km}$  和  $\Delta y = 80\text{km}$  情况下的格点数(本试验取  $31 \times 31$  个格点). 图中的值是以锥形为初始分布的函数  $f$ , 在旋转2个周期后的函数分布, 其中 a: 上游格式, b: Lax-Wendroff 格式, c: 二阶中心格式, d: Prather 格式, e: Bott 格式)

中心差分格式, 输送2个周期后由于计算频散, 短波分离有计算负解小扰动遍布计算域, 如为了抑制由于时间中心差所产生的计算波, 作一次时间平滑, 计算频散仍然存在(图略), 当模式选用该类格式计算水汽输送, 负解出现后模式为了计算稳定往往强加技术处理如对负值“赋零”等“填补”措施, 虽然解保持正定, 但解出现位相落后(大约为3个格距), 锋值衰减(接近40%)的误差特征(图略)。iv) 二阶中心差分格式在理想风场条件下通常可近似认为是一些守恒差分格式的特例, 二次守恒半动量格式(平流算子  $\overline{u\delta_x\alpha} + \overline{v\delta_y\alpha}$ ) 二次守恒 Lilly 格式(平流算子  $(\overline{\alpha u})_x + (\overline{\alpha v})_y$  和 MM4 中 B 网格下中心跳点格式(平流算子  $(\overline{\alpha u^*})_x + (\overline{\alpha v^*})_y$ ) 理想试验及实例分析都表明它们与中心差分格式仍有相类似的误差特征, 研究工作<sup>[11]</sup>指出, 在给定初值及近似实例风场(斜压不稳定下狭管气流, 与低层大气急流区域中的空气运动相似), 对初值物质平流输送72h, 示出的输送结果, 对比表明, 采用二次守恒半动量格式小尺度涡旋, 负解仍然存在(图略), 与采用二阶中心差分格式输送结果的主要差别在于二阶中心差分格式使二次量增长44%而守恒格式使二次量控制不增长, 计算稳定, 就精度而言守恒格式对误差特征的改变不太明显。对中尺度模式 MM4 中(如水汽, 及在云模式中的液态水) 通过计算频散产生的负格点值仍存在, 一般对计算稳定性造成严重的障碍, 必需强加技术处理, 如对负值“赋零”或平滑等填补措施, 虽然保持了格式的正定, 但是过强的数值耗散及位相变化, 又对精度造成严重的影响。尤其对以暴雨、台风等短期天气过程为研究目的的区域中尺度模式影响更为严重。这些影响特征在实例分析对比中都得到揭示。

## 2.2 水汽要素的特征及模式水汽输送算法的改进

水汽条件是产生暴雨的关键, 尤其象暴雨、台风等剧烈天气的中尺度天气过程往往包含着很强的水汽输送, 因此中尺度模式对水汽输送过程的计算精度有着更高的要求。水汽是正值且是标量, 计算域内经常会出现与相变有关的小尺度的源或汇, 空间分布不连续, 干、湿空气交汇处, 强而持续的水汽源等都会导致存在大梯度的水汽分布。如何计算有大梯度甚至间断分布特征水汽要素场的输送问题是当前改进中尺度模式预报能力的一个既重要又难以解决的问题。影响平流格式精度的两个主要误差来源是: 数值扩散和计算频散; 数值扩散导致波形在输送中振幅衰减, 与数值扩散相联系的则是对间断解的高分辨率问题。间断解类似于气象变量梯度陡变分布的区域, 当格式的数值粘性很强时, 间断就会光滑成展延很宽的平滑过渡, 从而大大降低了对间断的分辨, 同时解的光滑部分精度也较低, 通常只有一阶。这样在模拟强而有较持久水汽源的水汽通道, 云体和锋面等具有大梯度变量分布的天气现象时必然会产生较大的误差。频散误差是平流过程中不同波数的傅氏波由于相速不同产生的波动分离的现象, 它会造成波动的迟滞或超前, 与数值频散相联系的是单调性的概念, 所谓单调性就是在定常风速的条件下, 数值解的任何一部分都不产生新的极大或极小值。换句话说, 就是如果初始时刻波形是正定的, 那么在积分过程中, 数值解必须保持正定。显然, 单调性对水汽输送的模拟有着更重要的意义。

中尺度模式 MM4 计算包括水汽输送在内的平流过程是采用 B 网格二阶守恒中心差分格式计算, 理论试验和实例模拟都说明: 1) 由于计算频散而导致的计算负解仍然存在; 2) 对计算象水汽具有大梯度甚至有间断分布的要素的输送, 会出现不合理的平滑, 明显降低

了对“大梯度”特征的分辩能力; 3) Prather, Bott 等高精度平流格式是无计算频散, 数值扩散极小, 保证正定的一组高精度格式, 这些算法引入 MM4 模式的水汽方程, 对改进 MM4 中守恒格式误差特征, 进而改进模式对暴雨的预报能力是极有意义的。这些将通过比较降水模拟结果得到揭示。

### 模式水汽输送计算方案的改进

原 MM4 模式<sup>[1]</sup>水汽连续方程, 其水汽输送计算方案

$$\frac{\partial P^* q}{\partial t} - m^2 \left[ \left( \frac{P^* \bar{U}}{m} \bar{q} \right)_x + \left( \frac{P^* \bar{V}}{m} \bar{q} \right)_y \right] - P^* \frac{\partial \bar{q}}{\partial \sigma} \quad (10)$$

其中:  $P^* = P_s - P_r$ ,  $\sigma = \frac{P - P_r}{P_s - P_r}$ ,  $P_s$  和  $P_r$  分别表示地面气压和模式大气顶气压。 $\sigma$  是模式垂直坐标,  $m$  为地图放大系数。

改进后的模式方程组中水汽平流输送方案引进2种高精度的新方案和上游差分格式(为了比较误差特征), 使模式包括对5种水汽平流格式的选择 i) MM4 中原格式, ii) 上游差分格式, iii) Bott 2阶, iv) Bott 4阶, v) Prather 格式。当选用 Prather 和 Bott 格式计算时, 模式水汽平流输送方案写如

$$\frac{\partial P^* q}{\partial t} - m^2 \left[ \left( \frac{P^* q U}{m} \right)_x + \left( \frac{P^* q V}{m} \right)_y \right] - P^* \frac{\partial \bar{q}}{\partial \sigma} \quad (11)$$

改进后的计算中, 时间积分采用分裂算法, 变为一维计算, 例如先计算与(11)式第一项对应的方程, 再依次计算与第二项对应的方程。

## 3 实例试验

利用本模式对水汽输送算法的可选择性通过对4次发生在江淮和京津冀的特大暴雨过程以及4次在闽浙沿海登陆的台风过程模拟试验揭示了在不同水汽输送算法下模式对暴雨、台风等中尺度天气过程模拟能力的差别, 以及采用高精度水汽输送算法对模式模拟能力的改进, 这里以1982年6月19日至20日发生在长江中下游的一次暴雨过程的模拟结果作一说明。

模式计算域取为以(30°N, 115°E)为中心, 31×31个格点, 格距  $\Delta S = 80\text{km}$ , 垂直方向取等距10层, 初值采用  $2.5 \times 2.5$  经纬度网格点资料, 模式选用总体边界层方案, 积云对流参数化方案和松弛侧边界条件, 模式积分24h(6月19日20时至20日20时), 水汽输送算法选择3种方案: 方案 I: 模式水汽输送算法为 B 网格二次守恒中心差(即 MM4 原计算格式), 方案 II, 水汽输送算法取 Prather 格式, 方案 III: 用上游差分格式计算水汽输送。1982年6月19至21日, 在中国长江中下游地区出现了一次大暴雨过程, 雨区呈东西走向, 雨带中出现了多个暴雨中心, 最强中心出现在武汉地区, 过程雨量在300mm 以上, 另外两个中心分别在宜恩和石首附近, 图3a 为24h(19日20时-20日20时)雨量实况特大暴雨出现在20日02-16时, 该时段对总降水量贡献最大, 如武汉地区70%的降水集中在此时段, 图3b 中的实线(1)为最大暴雨中心汉口每小时的降水分布实况。降水的特点是时间短(集中在5h内)、强度大, 三汉(汉川、汉阳、汉口)雨强平均为35mm/h, 这说明该特大暴雨是由于强度

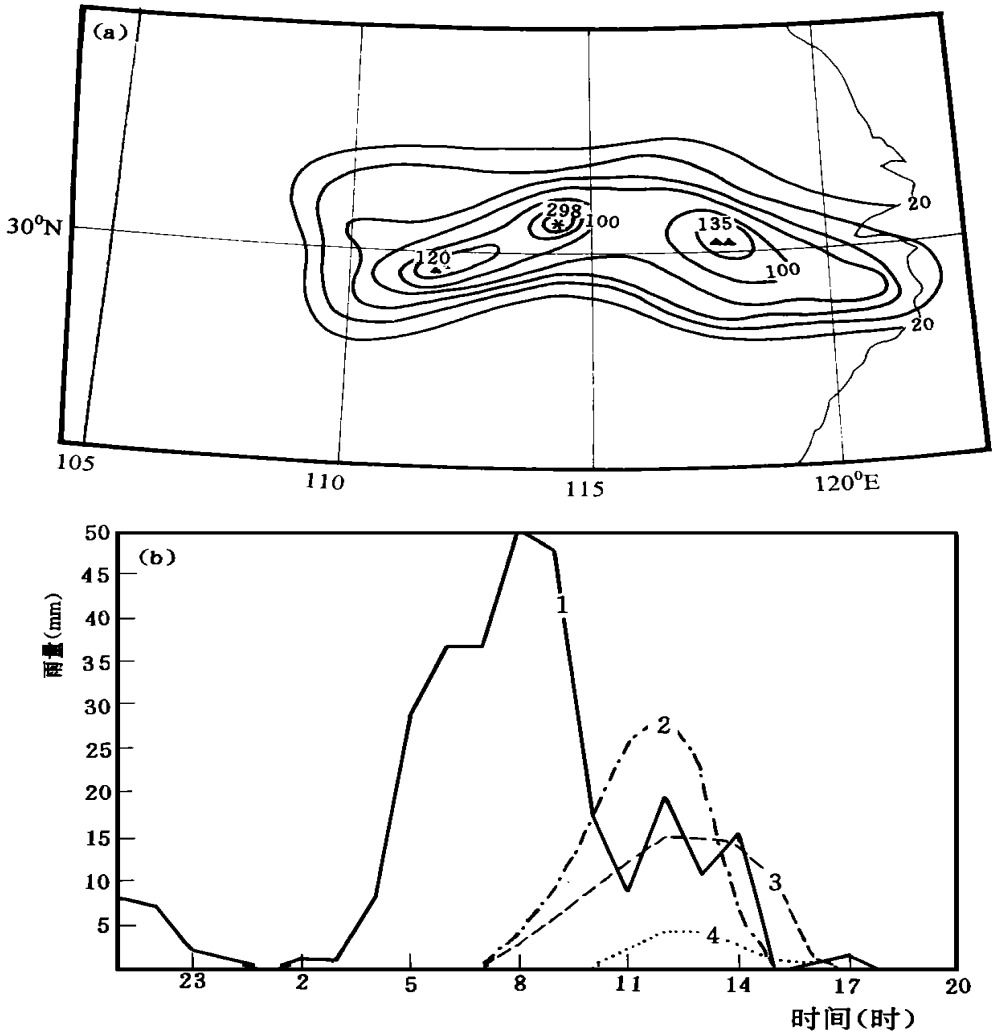


图3 1982年6月19日—20日长江中下游一次暴雨过程

(a. (19日20时—20日20时) 24h 降水实况, 单位(mm); b. 不同试验方案, 24h 最强暴雨中心(汉口附近) 每小时降水分布模拟结果对比。实线(1)表示实况; 虚点线(2)表示方案(Prather); 虚线(3)表示方案(原MM4格式); 点线(4)方案(UPS格式)

大的雨团停滞所造成的, 还有两个暴雨中心在宜恩和石首附近。以后的时段雨团移出湖北省, 在皖南造成大暴雨, 最大雨强中心在黄山附近, 同一时期浙江也出现了特大暴雨过程。

数值试验结果(由图4—图7中(a), (b), (c)依次对应的试验方案I, II, III所示)

### 3.1 水汽场

图4和图5分别是积分至18h(19日20时—20日14时)水汽输送及水汽输送散度的计算结果, 采用高精度水汽输送算法方案(图4b, 图5b), 以西南方向为急流轴的输送通道其输送强度, 及其西北侧水汽通道的出口处水汽汇合的位置和强度都刚好与实况中雨团活



动及特大暴雨的位置相一致(葛孝贞, 1996)<sup>[12]</sup>, 而图4a和图5a(方案 )输送强度稍弱, 除武汉地区最强暴雨位置外, 雨团活动其它位置上的水汽汇合在计算结果中都已衰减没有模拟出来, 图5c, 图6c, 上游方案 由于较强的数值扩散, 使得水汽输送强度、水汽的汇合都明显减弱, 这些结果表明模式水汽分布对不同水汽输送算法精度十分敏感, 而且其特征都与相应算法的误差特征相一致。

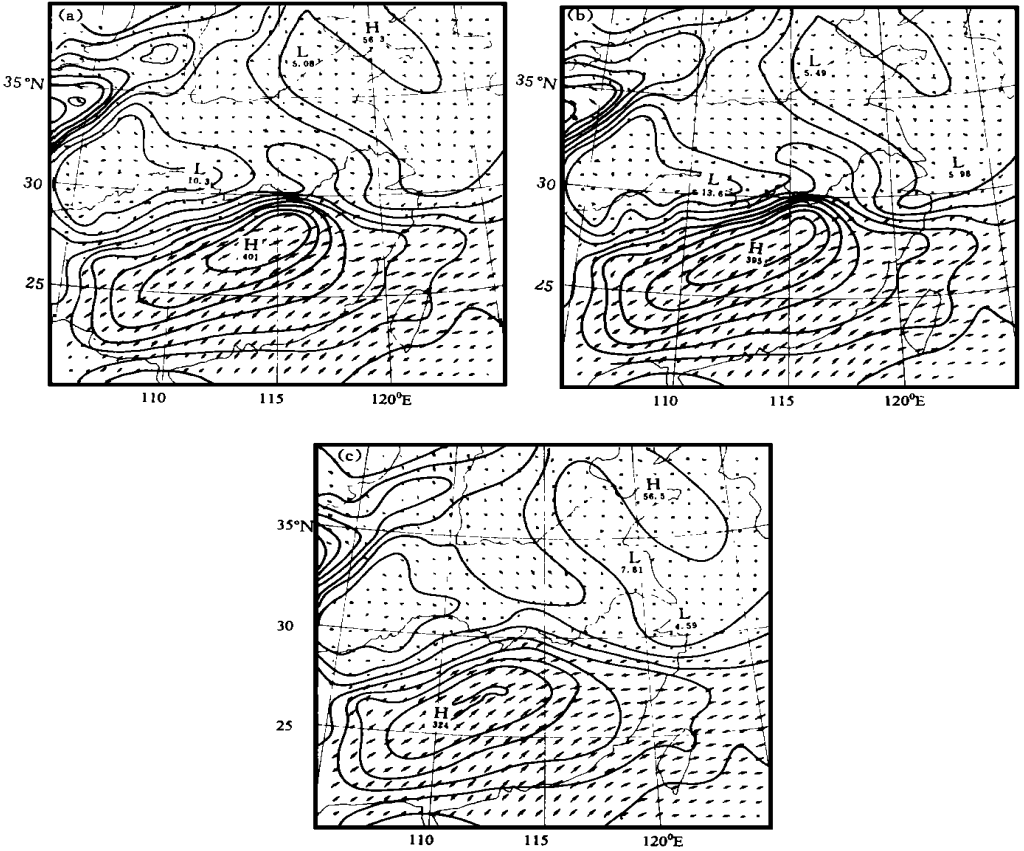


图4 模式积分18h(19日20时—20日14时)不同方案水汽输送  $qv$  的试验结果对比  
(a. 方案 (原 MM4); b. 方案 (Prather); c. 方案 (UPS 格式))

### 3.2 降水模拟结果

图6和图7是模式积分6小时(20日08时—14时)及积分24小时(19日20时—20日20时)降水结果(二者叠加表示主要降水时段的降水), 与实况(图3)对比可见方案 (图6b, 图7b)对最大暴雨中心武汉地区的降水强度、位置及暴雨出现时段, 都明显优于其它两种方案。图3b示出不同水汽输送算法的选择下, 模式积分至24h, 暴雨中心汉口在24h内的雨强变化, 其中实线(1)表示实况, 虚线(2)表示方案 , 虚线(4)上游方案 , 而虚线(3)表示方案 的模拟结果, 对比说明采用高精度算法(方案 )对特大暴雨出现的时段(开始至结束时段), 暴雨强度都有明显的改进。

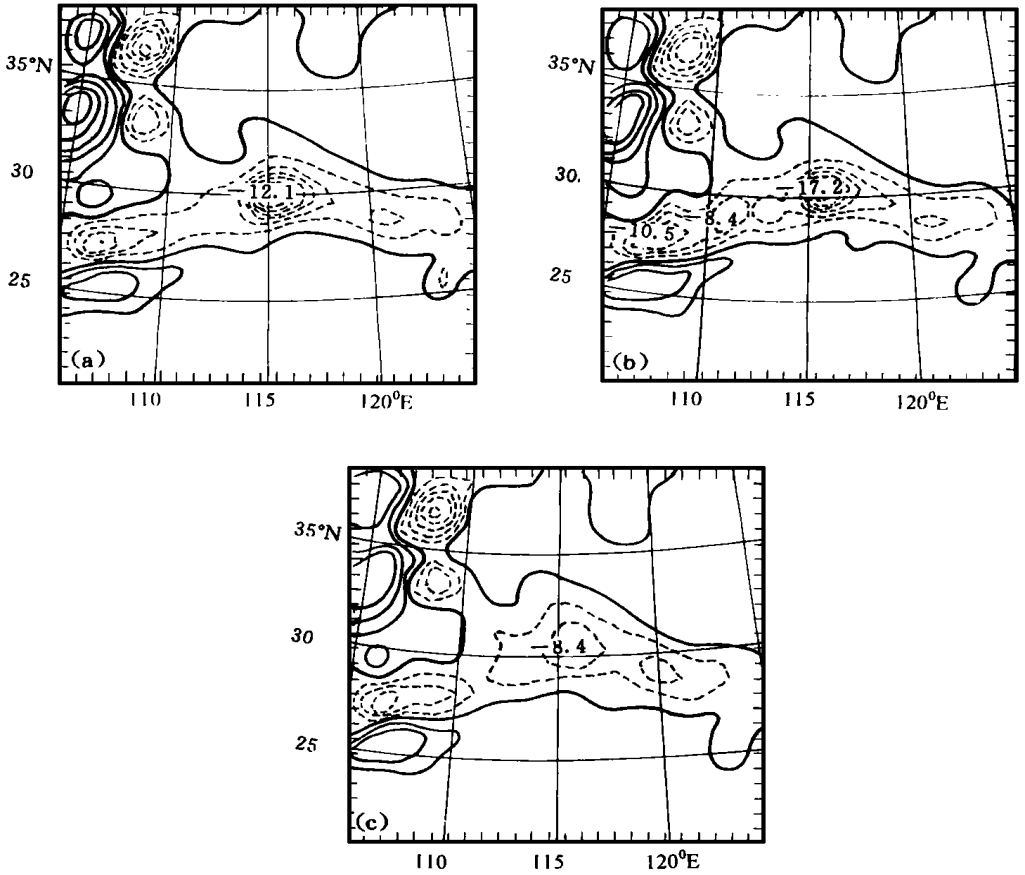


图5 模式积分18h(19日20时—20日14时)不同方案大气低层(700hPa和850hPa平均)水汽通量散度( $\nabla \cdot qv$ )的试验结果对比(单位:  $\times 10^{-5} \text{g}/(\text{kg s})$ )  
(a. 方案(原MM4); b. 方案(Prather); c. 方案(UPS))

#### 4 结语与讨论

本文介绍了近年来发展研制的Prather和Bott高精度平流输送算法,通过理想试验,比较了Prather, Bott 4阶和广泛应用的上游,中心差等平流格式的数值结果,表明Prather和Bott 4阶格式,数值扩散小,无位相差,无计算负解,而上游格式数值扩散大,在旋转风场下积分两个周期锥形初值衰减90%,二阶中心格式,由计算频散产生的负解,即使通过技术处理仍无法避免位相差、振幅衰减的影响,对二次守恒的半动量格式的接近实例风场试验亦表明,虽然能保证二次量不增长但是计算负解和小扰动仍然无法避免。水汽是降水及产生剧烈天气过程的重要条件,水汽是正值水平及垂直分布不均匀,而且常呈尺度小,大梯度的分布特征,使得对水汽要素场输送的计算既重要又困难。本文以中尺度模式MM4为基础,以引入正定高精度水汽输送算法作为消除水汽负解和改进中尺度模式预报能力的途径建立了改进的MM4的中尺度模式,为了适应研究及应用的需要该模式除仍

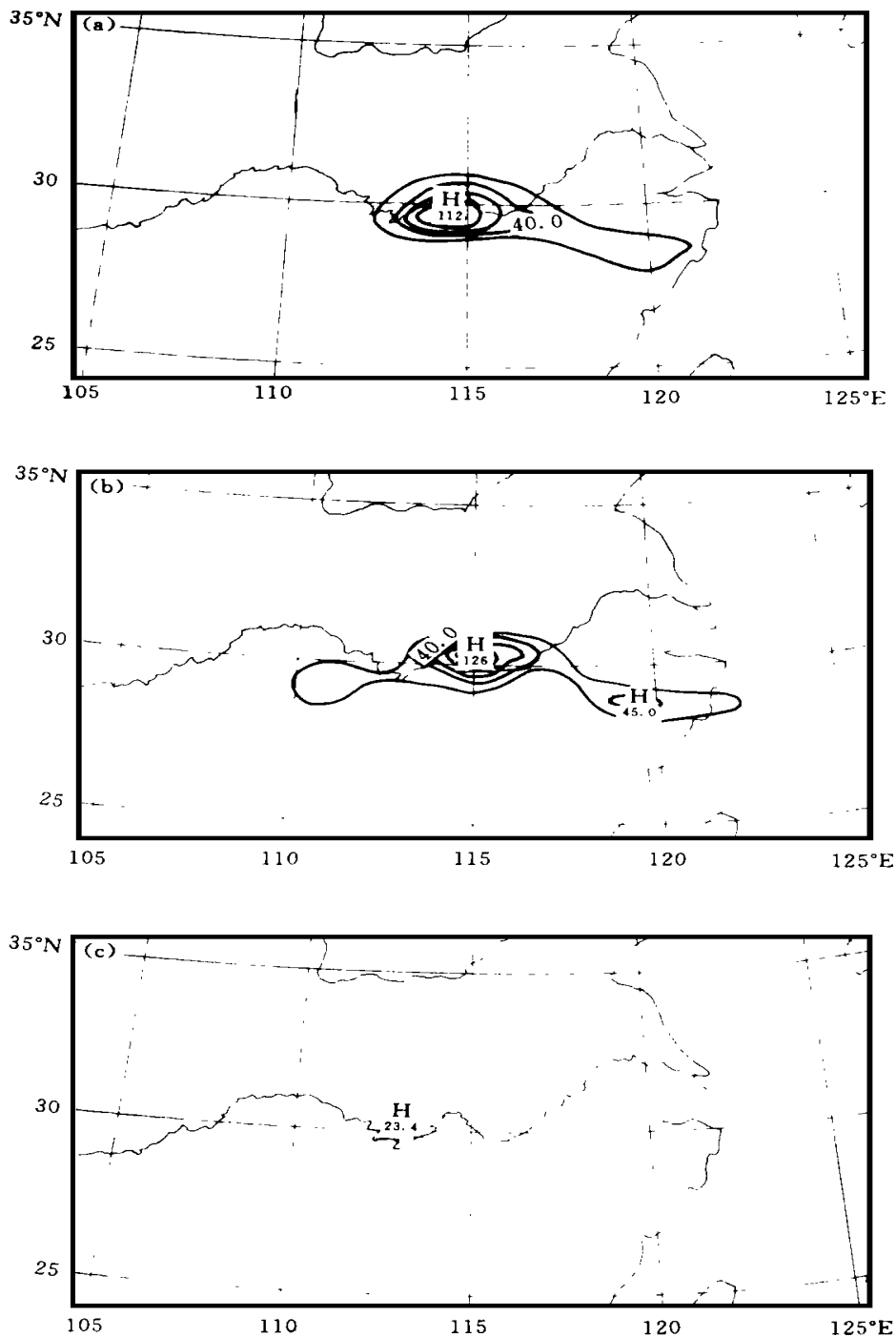


图6 降水主要降水时段(20日08—14时)模式预报降水结果对比

(a. 方案 (最大降水位在汉口西南(29.5 N, 114 E), 108mm); b. 方案 (最大值在汉口附近(30.5 N, 114 E), 127mm); c. 方案 (最大值在汉口以东(30.5 N, 115 E), 26mm))

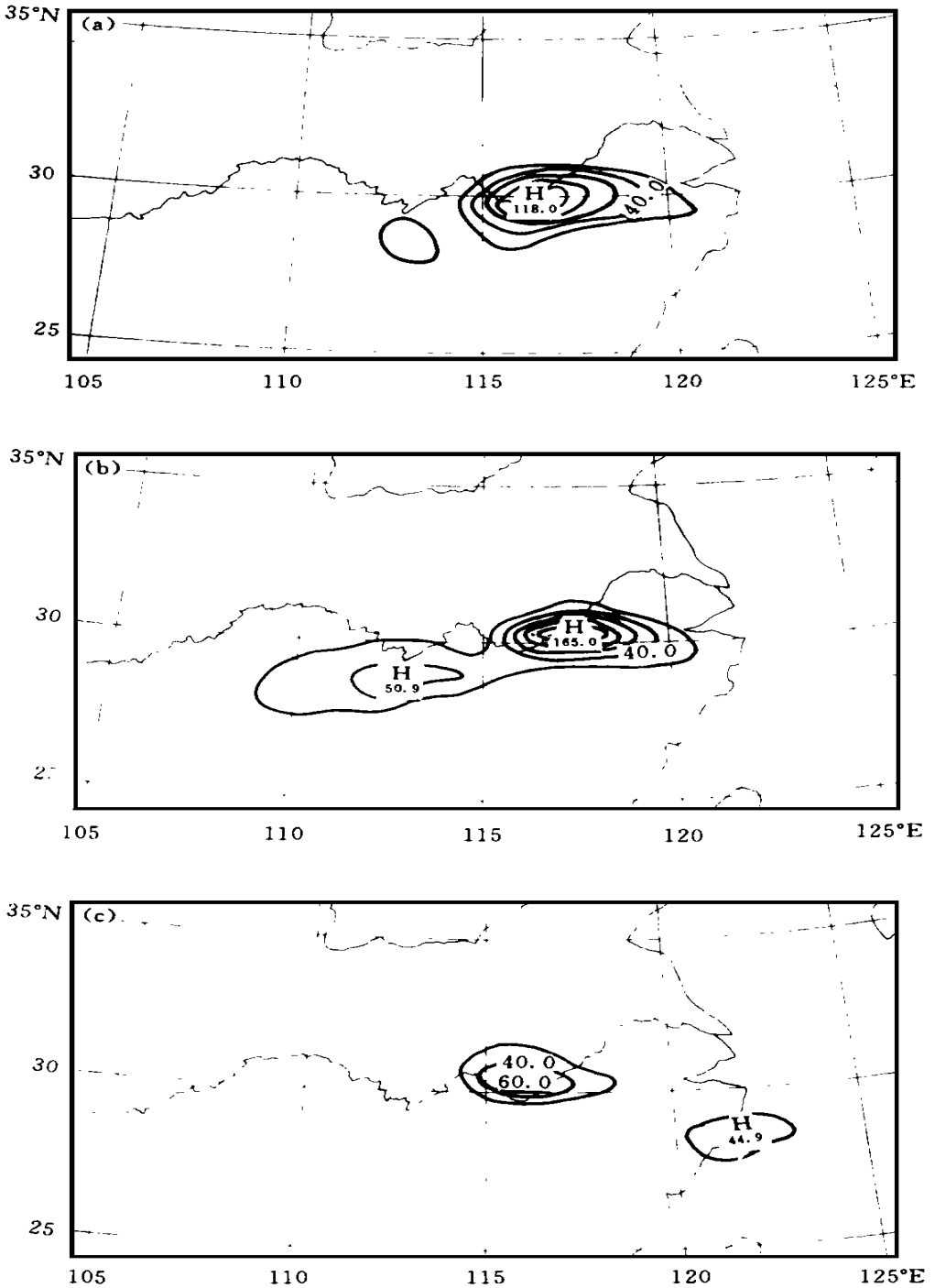


图7 降水时段(20日14—20时) 模式预报结果对比

(a. 方案 (最大值在30°N, 117°E, 118mm); b. 方案 (最大值在30.3°N, 118°E, 128mm); c. 方案 (最大值在30.3°N, 117.5°E, 81mm))

具有原 MM4 模式的所有功能外增加了 5 种水汽输送算法的改进与选择, 暴雨实例模拟试验揭示出: 1) 中尺度模式 MM4, 对降水 ( $> 10\text{mm}$ ) 具有较稳定的预报能力, 而其预报精度对不同精度的水汽输送算法精度有明显的依赖性。2) 模式水汽输送选用高精度的算法, 增强了模式对中尺度天气过程的预报能力, 暴雨的强度、位置以及最强暴雨的起止时间的模拟结果都有明显改进, 尤其增强了对降水区 (中  $\alpha$  雨带) 中, 雨峰活动的预报能力。3) 采用二次守恒算法, 计算结果趋于光滑, 变化缓慢, 虽对降水带的位置有较稳定的预报能力, 但对雨带中强降水中心的强度和位置都表现出峰值衰减位置偏移, 对次强暴雨中心多出现漏报或误报。如果模式选用具有较强数值耗散的上游差分算法计算水汽输送, 模拟降水强度明显衰减, 弱中心模拟不出, 强暴雨中心雨强偏弱 80% (图 3)。4) 4 次暴雨实例模拟都得到相仿的结论, 表 1 给出 3 次暴雨的模拟结果对比 (分析见另文), 5) 在不同水汽输送算法选择下, 台风实例模拟表明, 选择高精度的水汽输送算法, 改进了模式在弱引导气流下, 台风异常路径的预报精度 (分析见另文), 模拟结果的这些变化与改进, 既提供了中尺度模式对水汽输送算法精度非常敏感的信息, 也揭示了从改进数值方法入手改进模式预报能力的重要依据。

包含保证正解和高精度的平流输送算法区域中尺度模式 MM4, 解决了水汽负解的问题, 提高了模式对中尺度天气过程如台风、暴雨的模拟能力, 为模式自行配制了前置处理, 后置输出, 诊断分析和图形输出, 目前已形成一个完整的中尺度预报系统, 并已完成了在 PC "486" 上的稳定运行及多个实例的试验, 试验表明, 水汽保证正值, 计算稳定, 模拟精度显著改进。在 "486" 上模式 (垂直 10 层,  $\Delta S = 80\text{km}$ ,  $31 \times 31$  个格点, 选用 Prather 或 Bott 4 阶) 积分 24h 耗费计算时间 2.5h, 比模式选用原 MM4 中水汽输送算法计算时间多耗费 20min。

表 1 不同水汽输送格式下模式降水场预报与实况的对比

日 期	格 式	降水区范围		暴雨 ( $> 50\text{mm}$ )		次中心	备 注	
		10—25mm	50mm	中心位置	中心强度			
1982 年 6 月 19 日 20 时—20 日 20 时	SOM	一致	一致	接近	170mm	全报出	实况中心雨量 298mm, 在鄂西和浙西有两个次中心。见图 1	
	MM4	一致	偏小	偏东约 100km	168mm	漏报		
	UPS	基本一致	偏小	偏东约两个纬距	96mm	漏报		
1983 年 6 月 19 日 20 时—20 日 20 时	SOM	一致	一致	接近约偏西	79mm	全报出	实况中心雨量 182mm, 有 3 个次中心	
	MM4	一致	偏大	偏东一个纬距	79mm	漏报一个		
	UPS	基本一致	偏大	偏差较大	66mm	漏报两个		
1986 年 6 月 26 日 20 时—27 日 08 时	SOM	①	一致	—	接近	79mm	全报出	① 指 26 日 20 时—27 日 02 时段, ② 指 27 日 02 时—27 日 08 时段。
		②	一致	约偏北	接近	98.7mm		
	MM4	①	一致	—	偏差较大	79mm	漏报两个	
		②	一致	偏南	接近	85mm	多报一个	
	UPS	①	一致	—	接近	53mm	全报出	
		②	偏西	偏西	偏差较大	80mm	多报一个	

注: SOM 表示水汽输送采用 Prather 格式, MM4 表示水汽输送采用原 MM4 的水汽输送方案, 即 B 网格二阶中心差方案, UPS 表示采用 Upstream 方案。

## 参考文献

- [ 1 ] Anthes R A and Warner T T. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies. *Mon Wea Rev*, 1978, 106(8): 1045– 1077.
- [ 2 ] Smolarkiewicz P K. The multidimensional crowley advection scheme. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(12): 1968– 1983.
- [ 3 ] Prather M J. Numerical advection by conservation of second-order moments. *J Geophys Res*, 1986, 91(4): 6671 – 6681.
- [ 4 ] Bott A. A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advective fluxes. *Mon Wea Rev*. 1989, 117(5): 1006– 1015.
- [ 5 ] Lei Xiaoen and Chang J S. A high resolution model for chemical species exchange within the troposphere. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 6: 479– 490.
- [ 6 ] 葛孝贞, Chang J S, 雷孝恩. 高分辨区域输送模式中不同输送格式的对比试验. *大气科学*. 1996, 20(!): 37– 46.
- [ 7 ] 葛孝贞, 沈岩. 弱引导气流下凝结加热与台风异常运动的个例试验. *南京大学学报*, 1996, 32: 216– 223.
- [ 8 ] 沈岩, 葛孝贞. 不同精度的水汽平流输送格式对台风运动影响的数值试验. *南京大学学报*, 1996, 32: 216– 223.
- [ 9 ] 史历, 葛孝贞. 一个异常路径台风(8211)非对称结构的数值模拟. *南京大学学报地理专辑*, 1996, (5): 95– 98.
- [ 10 ] Tremback C J, Powell J, Cotton W R and Pielke R A. The forward-in-time upstream advection scheme, extension to higher orders. *Mon Wea Rev*. 1987, 115: 540– 555.
- [ 11 ] Bleck R. Linear advection. Programme on Short and Medium-range Weather Prediction Research (PSMP), W M O, 1984. 110– 115.
- [ 12 ] 葛孝贞, 李峰. 改进的 MM4 模式暴雨实例对比试验, *气象科学*, 1996(2): 103—109.

# A MESOSCALE MODEL INCLUDING POSITIVE WATER TRANSPORT ALGORITHMS AND NUMERICAL EXPERIMENT

Ge Xiaozhen Zheng Aijun

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210008*)

## Abstract

It is a very important and difficult problem for prediction heavy rain. The moisture transport plays important role in modeling the mesoscale weather process. Based on mesoscale model MM4, by cooperating with some more accurate water transport schemes, a mesoscale numerical weather prediction system NMM is developed. These schemes include: (1) B-grid Center Conservative Scheme which is used in MM4; (2) Bott (2-order) Scheme; (3) Bott (4-order) Scheme; (4) Upstream Scheme; (5) Prather Scheme. Bott Scheme and Prather Scheme Both Schemes are positive and produces a little numerical diffusion and computation dispersion. Numerical experiment of move heavy rain process under the model water transport algorithm's options of B-grid Center Scheme, Upstream scheme and Prather Scheme shown the high accurate water transport algorithms, just like Prather scheme improving the precipitation prediction of the mesoscale model and giving more accurate results of the short range precipitation system.

**Key words:** Mesoscale model, Moisture transport, Transport scheme.