第 19 卷第 4 期　　南 京 气 象 学 院 学 报　　Vol. 19 No. 4
1996 年 12 月　　Journal of Nanjing Institute of Meteorology　　Dec. 1996

水汽输送的算法精度与模式暴雨预报能力的对比分析

李　峰　　葛孝贞
(南京大学大气科学系, 南京　210008)

摘　要　利用中尺度模式 MM4, 研究了中尺度模式的暴雨模拟对于不同水汽输送方案的敏感性。采用 5 种平流差分格式来计算水汽的水平输送, 用该模式对 3 次暴雨过程作了数值试验。并把不同方案的降水模拟结果与实况进行了对比。结果表明, 中尺度模式的暴雨模拟对水汽输送方案十分敏感, 正定高精度的 Prather 格式的模拟结果最接近实况。

关键词　中尺度模式, 水汽输送, 输送格式, 敏感性
分类号　P435

暴雨要持续发展, 必须得到充沛的水汽。对水汽过程的正确模拟无疑可以改进模式的暴雨预报能力, 但是, 要准确地模拟水汽过程是非常困难的。水汽场的空间分布在水平方向和垂直方向上有很大的变化, 并且存在着强烈的小尺度的源和汇, 这些源和汇又和相变联系。水汽过程既复杂又重要, 因此人们越来越重视改进对水汽过程的模拟。

在水汽方程中, 水汽的平流输送占重要地位, 因而模式对暴雨的预报能力必然与水汽输送的计算有关。MM4 计算水汽输送采用的是 B 网格二阶中心差方案, 这种格式不能保持正定, 在水汽梯度大的地方可能产生水汽负值, 在模式中用给负值赋零方法来进行订正, 这既没物理意义, 又增加了水汽量; 另一方面, 水汽空间分布不连续、干湿空气交汇处、强而持续的水汽源等都会导致大梯度的水汽分布, 用这种格式计算水汽输送会出现不合理的平滑, 明显降低对大梯度特征的分辨能力, 所以这种格式是值得改进的。

近 30 年来随着计算技术的发展, 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, 仅就保证正解而且具有高精度性能的格式而言, 已有近 10 种, 其中如保证正解并且节省计算时间的 Smolar 格式[1], 保证正解且高精度的二阶守恒的 Prather 格式[2], 以及正定的多项式拟合 Bott 格式[3]等。近年来随着计算机的发展, 给区域模式引入高精度计算技术提供了必备条件。本文将正定高精度输送格式 Prather 和 Bott 格式引入 MM4 中尺度模式, 消除水汽负值, 提高水汽输送算法精度。改进后的模式包括 5 种水汽输送算法的任意选择: 1) 原 MM4 的 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 二阶; 4) Bott 四阶; 5) Prather 格式。

为探讨模式暴雨模拟对水汽输送算法精度的敏感性, 本文利用该模式, 在模式不同水汽输送选择项下, 对 1982、1983、1986 年的 3 次暴雨过程作了数值试验。结果表明, 模式的降水模拟

国家八五攻关课题 85- 906- 03- 05, 85- 906- 04 资助项目
收稿日期: 1995- 08- 30; 改回日期: 1996- 05- 22

结果强烈地依赖于所使用的水汽输送格式, 特别体现在对暴雨区和暴雨中心的预报上。正定高精度的 Prather 格式模拟降水场最接近实况。

1　模式水汽输送新算法的设计

1.1　Prather 格式

Prather 格式是从 Upstream 格式导出, 它把标量 F 在格体中展开成密度 (x, y, z) 的分布函数, 且密度分布具有二阶多项式的形式, 在处理密度分布时引入矩方法。在进行计算时, 把每个格体分成两部分, 一部分向下游流去离开格体, 另一部分向下游流去但未离开格体, 然后将上游来的进入格体的部分和仍留在格体中的部分合并, 在格体中重新组合, 形成新的密度分布函数, 相应得到新的矩量值, 从而求出 F 在下一时步的值。为使格体保持正定, 定义了一系列约束条件, 在输送计算过程中二阶矩保持守恒。Prather 格式具有守恒、正定、精度高等优点, 有关格式的具体推导见文献 [2]。

1.2　Bott 格式

Bott 格式也是从 Upstream 格式导出。Upstream 方法守恒、正定, 但精度较低, 只有一阶, 因而数值扩散较大。Upstream 方法产生强烈数值扩散, 是因为它在计算 F 的通量时, 在一个格距里用一个常值 F_i 代替。Tremback[4] 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。Bott 发展了这种方法, 他对通量进行了正规化, 并对上下限进行限制, 这样就得到 Bott 格式。多项式的阶数 n 即对应着是 n 阶 Bott 格式, 我们在模式中引入了 Bott 二阶格式和 Bott 四阶格式。Bott 格式不但保留了Upstream方法守恒、正定的性质, 而且它精度高, 数值扩散小。

2　试验方案

模式分别采用 5 种水汽输送方案, 对 3 次暴雨过程作了数值试验。这 3 次暴雨过程是: 1982 年 6 月 19～20 日湖北省特大暴雨; 1983 年 6 月 19～20 日湖南省特大暴雨; 1986 年 6 月 26～27 日京津冀大暴雨。5 种方案是: 1) B 网格二次守恒中心差(即 MM4 原计算模式); 2) Prather 格式; 3) Bott 二阶格式; 4) Bott 四阶格式; 5) Upstream 格式。模式计算域以(115°E, 30°N) 为中心, 取 31×31 个格点, 试验用 3 个例子的格距分别取为 80 km(1982、1983 年) 和 65 km(1986 年)。垂直方向取等距 10 层, 初值采用 2.5°×2.5 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驰侧边界条件, 模式积分 24 h(1982、1983 年) 和 12 h(1986 年)。

3　试验结果

表 1 中列出了 3 次暴雨过程模式水汽输送分别采用原 MM4 格式、Prather 格式以及 Upstream格式所得到的降水场对比, 从雨区范围、暴雨中心和次降水中心三方面进行比较。其中, SOM 表示水汽输送采用 Prther 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。因为发现 Bott 二阶格式预报的降水场与 Upstream 的结果十分相似(只是中心略强), 而 Bott 四阶的预报降水场与 MM4 的结果相似(图略), 故未在表中列出。

表 1 不同水汽输送格式下模式降水预报与实况的对比

Table 1 Comparison of model rainfall from different vapor transport schemes to the observed

日期	格式	降水区范围		暴雨(≥50mm)		次中心	备注
		10～25mm	≥50mm	中心位置	中心强度(mm)		
1982 年 6 月 19 日 20 时～20 日 20 时	SOM	一致	一致	接近	170	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	168	漏报	
	UPS	基本一致	偏小	偏东约两个纬距	96	漏报	
1983 年 6 月 19 日 20 时～20 日 20 时	SOM	一致	一致	接近约偏西	79	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	79	漏报一个	
	UPS	基本一致	偏大	偏差较大	66	漏报两个	
1986 年 6 月 26 日 20 时～27 日 08 时	SOM	一致	–	接近	79	全报出	指 26 日 20 时～27 日 02 时时段, 指 27 日 02 时～27 日 08 时时段。 中心雨量 48mm, 在雨区的南部和中部有两个次中心; 中心雨量为 129mm
		一致	约偏北	接近	98.7	–	
	MM4	一致	–	偏差较大	79	漏报两个	
		一致	偏南	接近	85	多报一个	
	UPS	一致	–	接近	53	全报出	
		偏西	偏西	偏差较大	80	多报一个	

从表 1 和图 1 都可以看出, 3 种格式预报降水场中降水强度有很大差别。但 3 种格式对大范围雨区(10 mm 等值线: 1982、1983 年; 25 mm 等值线: 1986 年)的预报都比较接近实况, 相比之下, UPS 结果稍差一些。而 MM4 和 SOM 格式对大范围雨区的预报结果差不多。这说明 MM4 模式运算稳定, 有较好的模拟降水过程的能力。比较最大降雨量, 3 种格式都偏小, 其中以 UPS 格式最小, MM4 和SOM 格式相差不大。但 3 种格式降水预报场主要差别体现在对暴雨区范围(50 mm 等值线)和暴雨中心的预报上。在 1982 年的例子中, 实况暴雨区包括湖北省、安徽和浙江的部分地区。MM4 暴雨区范围明显小于实况, 没有反映湖北中西部和安徽、浙江地区的暴雨, UPS 的暴雨区位置误差较大, 它们都只报出了汉口的暴雨中心, 没能反映鄂西和浙江西部暴雨雨团的活动。而 SOM 的暴雨区范围和实况接近, 不仅报出汉口的暴雨中心, 对鄂西和浙西的两个次降水中心也有所反映。1983 年例子中, 实况暴雨位于湖南和浙江西部, 由西南至东北在雨区里分布 4 个中心。SOM 模拟的湖南暴雨区与实况一致, 4 个中心都被报出。MM4 的暴雨区范围比实况大, 只报出 3 个中心, 漏报一个。UPS 的暴雨区被分割成 4 块, 比实况小, 虽有 4 个中心, 但除了两个中心位置接近实况外, 其余两个位置与实况相差较大。1986 年, 暴雨区位于河套地区, 呈南–北向分布, 由南至北有 3 个中心, 最强为北中心。SOM 对 3 个中心都报出, 位置接近。MM4 只报出一个降水中心, 其余两个不明显。UPS 3 个中心都报出, 位置与实况接近; 在第二个 6 小时段, 实况雨区向东移至京津地区, 中心在天津附近, 雨量为 129 mm。MM4 在南边多报出一个中心。UPS 雨区范围比实况偏西, 雨区中部也多了一个降水中心。

从以上分析可以看出, 虽然 3 种格式对 10 mm 或 25 mm 雨区的预报十分接近, 最大降雨量除UPS 格式较小外, SOM 和 MM4 格式没有大的差别。但它们所预报的暴雨区和暴雨中心却有很大的不同。

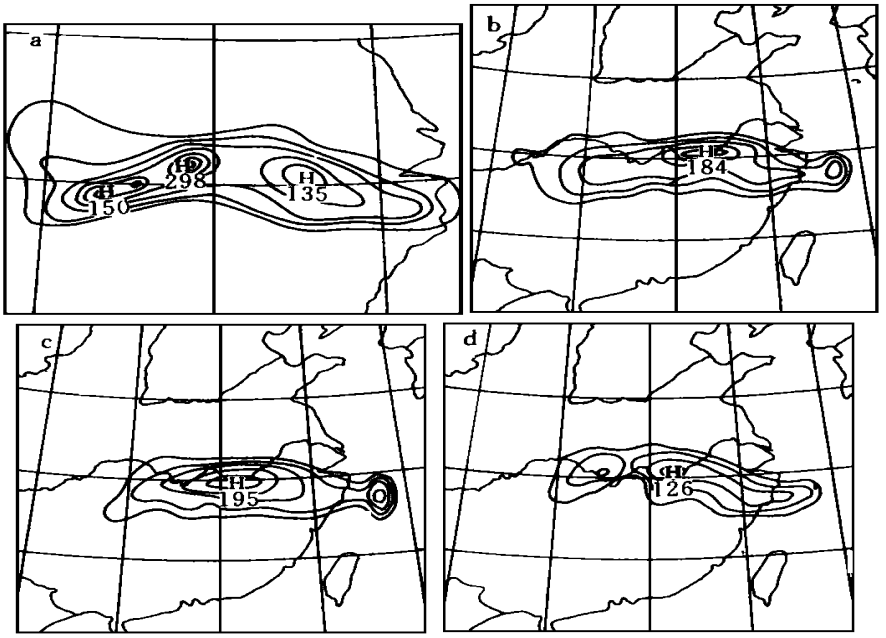

图 1　1982 年 6 月 19～20 日 20 时湖北特大暴雨降水实况和使用不同水汽输送方案的降水模拟结果

a. 实况;　b. SOM;　c. MM4;　d. UPS

Fig. 1　Model rainfall based on different moisture schemes in comparison to the measured in the exceptionally torrential rain event for 24 hrs starting from 20 h, June 19, 1982 in Hubei

在改变了水汽输送方案后, 模式模拟的降水场也有明显的变化。由于水汽平流输送的改变, 使得水汽场的分布发生变化, 从而直接影响了模式的降水模拟。下面以 "82.6 "湖北暴雨为例, 分析不同水汽输送方案下水汽场的分布。

图 2 是积分 12 h 后, MM4 和 UPS 的比湿差值, 图中的箭头表示 850 hPa 急流轴。由图可见, 在雨区上空, MM4 的比湿比 UPS 大, 最大降水区与比湿差值中心相对应, 差值最大达到 1.43g · kg^{-1}。这是由于 Upstream 方法强烈的数值扩散引起的。图 3 是积分 12 h 后, SOM 和 MM4 的比湿差值, 图中在 850 hPa 西南低空急流轴线上存在着一条狭长的正值区, 表明 SOM 在西南低空急流轴线上产生了比 MM4 更强的水汽输送通道, 雨区即分布在通道的出口处。这种水汽场的分布特征是和 3 种水汽输送格式的特征相一致的。

图 4 是积分 18 h 850 hPa 水汽通量散度分布。比较发现, 水汽通量散度的零线分布基本是一致的, 说明在较大尺度上, 3 种方案的水汽辐合区分布相似。不过, 在辐合区里的中尺度辐合中心的分布结构则有所不同, UPS 由于数值扩散大, 它在汉口附近的辐合中心值仅有 -7.5×10^{-7} g · hPa^{-1} · cm^{-2} · s^{-1}, 是其他两个方案的 $\frac{1}{2}$ 左右。SOM 在湖北中部和西部都有辐合中心存在, 为这一地区的降水中心提供了条件。

4　结　语

本文将正定高精度平流输送算法 Prather 和 Bottt 格式引入中尺度模式 MM4, 理想试验表明 Prather 和 Bott 格式数值扩散小, 无位相差, 无计算负解, 而二阶中心差分格式, 由于计算频散产生的负解, 即使通过技术处理仍无法避免位相误差、振幅衰减的影响。

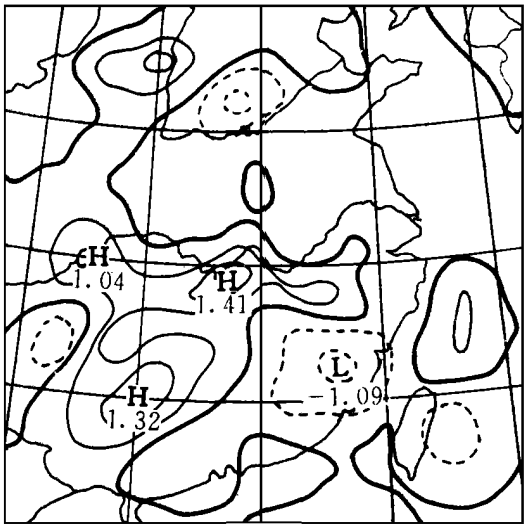

图 2 积分 12 h 850 hPa 比湿差值 (MM4－UPS) ($g \cdot kg^{-1}$)

Fig. 2 Difference (MM4－UPS) in 850 hPa specific humidity ($g \cdot kg^{-1}$) based on 12 h integration

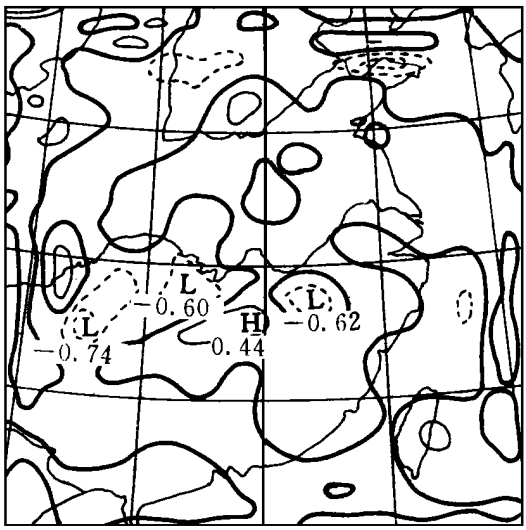

图 3 积分 12 h 850 hPa 比湿差值 (SOM－MM4) ($g \cdot kg^{-1}$)

Fig. 3 Difference (SOM－MM4) in 850 hPa specific humidity ($g \cdot kg^{-1}$) based on 12 h integration

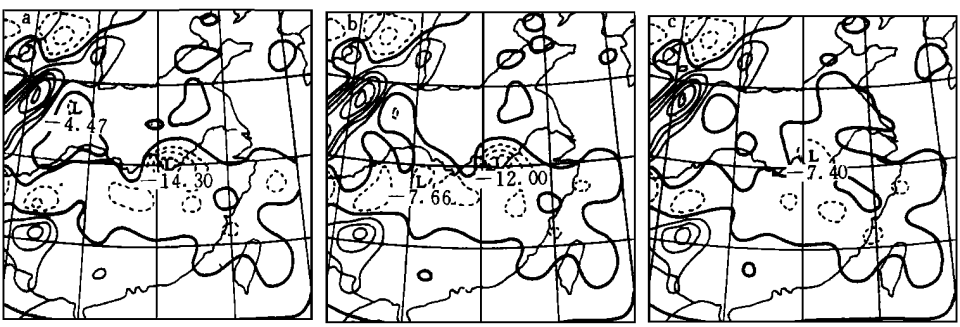

图 4 积分 18 h 不同方案 850 hPa 水汽通量散度场($10^{-7} g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)

a. MM4; b. SOM; c. UPS

Fig. 4 850 hPa vapor flux divergence ($10^{-7} g \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$) from different schemes at 18 h integration for MM4 (a), SOM (b) and UPS (c)

为验证模式的暴雨模拟对水汽输送方案的敏感性, 对 3 次暴雨过程作了数值试验。试验结果表明, 水汽输送方案改变后, 模式的暴雨预报有了很大的变化。水汽输送方案的改变使水汽场的分布和潜热释放都发生变化, 从而直接影响了模式的预报结果。另外, 水汽输送方案的变化可能还会产生一些复杂的过程来间接影响模拟结果。

最后, 我们得出以下几点结论:

(1) 模式的暴雨预报对于不同的水汽输送方案十分敏感, 预报结果强烈地依赖于所使用的水汽输送格式, 特别体现在对暴雨区和暴雨中心的预报上。

(2) 使用高精度的 Prather 格式计算水汽的水平输送, 模式能较好地预报暴雨落区和暴雨雨团的活动, 其结果比原 MM4 模式有了明显的改进, 这也说明通过改进水汽输送方案来提高

模式的暴雨预报能力是可行的、有效的。

(3) 水汽输送方案的改变, 直接影响了水汽场的分布, 从而使降水场发生变化。而且, 水汽场的分布特征和相应的平流差分格式的特征是相一致的。

至于水汽输送方案的改变究竟是通过什么机制来影响降水场的预报, 这还有待于进一步的工作来揭示。

参　考　文　献

1 Smolarkiewicz P K. The multi-dimensional Crowley advection scheme. Mon Wea Rev, 1982, 110(12): 1968～1983

2 Prather M J. Numerical advection by conservation of second-order moments. J Geophy Res, 1986, 91(4): 6671～6681

3 Bott A. A positive definite advection scheme obtained by nonlinear renormalization of the advective fluxes. Mon Wea Rev, 1989, 117(5): 1006～1015

4 Tremback C J, Powell J, Cotton W R, et al. The forward-in-time upstream advection scheme, extension to higher orders. Mon Wea Rev, 1987, 115(2): 540～555

COMPARATIVE ANALYSIS OF ACCURACY OF MOISTURE TRANSPORT ALGORITHMS TO MODEL USEFULNESS IN HEAVY RAIN FORECASTING

Li Feng　Ge Xiaozhen

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

Abstract　The mesoscale model MM4 was adopted to investigate the sensitivity of model-simulated rainstorm to moisture transport schemes. Five kinds of advection difference analogs were employed to calculate horizontal transport of vapor, followed by numerical experiments done by the model on three rainstorm events, alongside comparison of the model rainfall from different moisture schemes to the measured. Results suggest that MM4-yielded precipitation is highly sensitive to the vapor schemes and simulation from the positive definite high-precision Prather scheme is closest to the observed among the five.

Keywords　mesoscale model, moisture transport, transport scheme, sensitivity