

# 中尺度自忆模式在强降水预报中的应用\*

贾晓静<sup>1)</sup> 封国林<sup>2)</sup> 曹鸿兴<sup>3)</sup>

1) (国家气象中心, 北京 100081)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

3) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘 要** 根据大气自忆性原理提出的回溯时间积分格式应用于中尺度格点模式 MM5, 构建了中尺度自忆模式 SMM5 并做了短期强降水预报的实验。结果表明, SMM5 模式与 MM5 模式相比, 由于使用了多个时刻的场资料, 预报精度有了明显的提高, SMM5 预报的最大雨区的中心位置与降水量也比 MM5 更接近实际观测场。

**关键词:** 中尺度数值模式; 短期天气预报; 降水

## 1 引言

在微分方程初值问题的预报研究中, 通常将微分方程化为差分方程, 然后构造差分格式进行数值求解。常用的差分格式如欧拉法、蛙跃格式、Lax - Wendroff 格式等, 这些格式中或涉及两个时间层次或三个时间层次。在常微分方程的线性多步法中用到初始时次前若干时次的数值, 但这些时次上的起报值仍然由初值运用方程计算得到的。这就是说, 人们在预报问题中始终恪守只用一个初值的原则<sup>[1~4]</sup>。在天气预报中, 数值积分只用到一个起报场, 即最后一个时次的观测场。大量的起报场以前的观测记录对预报是无用的。因此从充分利用观测数据中包含的信息来看, 传统的求解微分方程以预测未来的方法显然是有不足之处。

基于大气运动的不可逆性而提出的大气自忆性思想<sup>[5]</sup>是多时刻模式<sup>[6,7]</sup>的新发展, 能使用历史资料改进天气预报, 是动力与统计相结合并在实际数值预报中应用取得成效的一个途径。回溯时间积分方案正是自忆性思想的具体体现<sup>[8~10]</sup>, 它是现有差分格式的一种推广, 能够融缩前期多个时次的历史资料的信息而提高预报的精度, 所以这种时间积分方案适合于中尺度数值模式<sup>[11]</sup>。本文正是将这种有效的的时间积分方案应用到 MM5 模式中, 以进一步验证这种时间积分方案的性能。根据自忆性原理与回溯时间积分的思想, 本文推导出数值计算的具体表达式, 并且称之为自忆 MM5 模式 (SMM5)。针对 1998 年 7 月发生在长江中下游的特大暴雨, 我们用 SMM5 与 MM5 分别进行了数值实验, 并将两者的预报结果进行了对比, 其中着重比较分析了本次暴雨过程中的降水场。

2001 - 06 - 18 收到, 2001 - 09 - 17 收到修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目 40275031 和 40231006 及国家重点基础研究发展规划项目 G1999043408 共同资助

## 2 数学原理

### 2.1 回溯差分格式与自忆中尺度模式

#### 2.1.1 模式方程的统一

MM5 以原始流体力学基本方程组通量形式表示, 模式中的控制方程中的变量为  $p^* u$ 、 $p^* v$ 、 $p^* w$ 、 $p^* p'$ 、 $p^* T$ , 其中,  $u$ 、 $v$  分别为速度的东西分量和南北分量,  $w$  为垂直速度,  $p'$  为气压扰动量,  $p' = p_s - p_t$ ,  $p_s$  参考态的地表气压,  $p_t$  是参考态的大气顶层气压。

如果将所有的变量统记为  $Z$ , 则 MM5 的控制方程可以简写为

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F. \quad (1)$$

如对水平动量方程就有下列等式:

$$\begin{cases} Z_u = p^* u, \\ F_u = -m^2 \left( \frac{\partial p^* u u/m}{\partial x} + \frac{\partial p^* v u/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^* u \dot{\sigma}}{\partial \sigma} + u D_i \\ \quad - \frac{m p^*}{\rho} \left( \frac{\partial p^*}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) + p^* f v + D_u, \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $F_u$  代表水平动量随时间的变化,  $D_u$  为水平方向上的扩散系数,  $D_i$  为质量散度。在静力平衡方程中,  $D_i$  项是不存在的, 现在因  $p^*$  不随时间变化, 出现了  $D_i$  项, 这样静力连续性方程不再适用。在 MM5 的控制方程中唯一忽略的是对扰动气压趋势有贡献的非绝热项。由于它只在加热中产生一些小辐散, 所示通常可以忽略。其他方程也有:  $Z_v$ 、 $Z_w$ 、 $Z_{p'}$ 、 $Z_T$  和  $F_v$ 、 $F_w$ 、 $F_{p'}$ 、 $F_T$ , 对于这样的方程, 根据文献 [1], 我们可以将其作为动力核, 从而得到它的自忆性方程。

#### 2.1.2 计算模式变量序列与源函数 $F$ 序列

先用 MM5 积分一定的时间长度, 得到以回溯差分格式进行预报需要的具有指定采样间隔的时间序列。

将网格点  $i$ 、 $j$  在时刻  $n$  的值记为  $Z_{i,j,n}$ , 设  $t_0$  时刻为起报时刻, 用 MM5 向前积分得到时刻  $t_1 = t_0 + R_T$  的值,  $R_T = k \Delta t$ , 其中  $\Delta t$  为积分步长,  $k$  为积分步数, 如果将  $t_0$  记为  $n$ ,  $t_1$  记为  $n+1$ , 可以得到:

$$F_{i,j,n} = \frac{Z_{i,j,n+1} - Z_{i,j,n}}{R_T}. \quad (3)$$

用 MM5 向前积分时间长度  $R_T$ , 便得到一个预报场, 连续积分  $L$  次, 即总积分时间为  $L \times R_T$ , 便可以得到  $L$  个预报场, 因此, 由 (3) 式可以得到  $F_{i,j,n+1}$ ,  $F_{i,j,n+2}$ ,  $\dots$ ,  $F_{i,j,n+l}$ ,  $\dots$ , 样本长度为  $L$ 。(3) 式表示用得到的预报场与初始场相减, 就得到我们所需要的  $F$  序列。显然这是一种近似作法, 直接的作法应该用 (2) 式使用观测资料来计算  $F$  序列。

在积分过程中已计算得到一个相应的  $Z$  序列, 即 (3) 式中的  $Z_{i,j,n}$ ,  $Z_{i,j,n+1}$ ,  $Z_{i,j,n+2}$ ,  $\dots$ ,  $Z_{i,j,n+l}$ ,  $\dots$  依照自忆模式需要, 对实测资料采用采样间隔为  $R_T$ , 如取 1 ~

12 h。受实际资料限制, 数值试验中取 12 h。这样我们得到了  $F$  和  $Z$  的两个序列。

### 2.1.3 建立自忆模式 SMM5

由以上得到的两个序列, 运用回溯差分格式, 可以得到预报方程

$$Z_{i,j}(t + R_T) = \sum_{k=-p-1}^{-1} \alpha_k Z(t_0 + k R_T) + \sum_{k=-p}^0 \theta_k F(t_0 + k R_T) R_T, \quad (4)$$

$Z \equiv Z_u, Z_v, Z_w, Z_{p'}, Z_T; F \equiv F_u, F_v, F_w, F_{p'}, F_T$ , 其中  $p$  为回溯阶, 因采样间隔  $R_T$  已事先给定, 计算时事先将它吸纳入  $\theta_k$ , 用  $L$  样本长度的  $Z$ 、 $F$  以最小二乘法定出系数  $\alpha_k$ 、 $\theta_k$  之后, 就可以用 (4) 式进行预报。还应该注意的, 这里的回溯阶  $p$  与样本量  $L$  是可以变化的, 具体的回溯阶的取值, 可以根据具体的样本量及样本数据进行动态的调试, 一般来说, 回溯阶取 2~5 之间比较合适。

## 2.2 比较两种积分方法的结果

回溯阶确定以后, 自忆预报模式 SMM5 就确定了。我们下面就可以用已有观测的气象场, 用 SMM5 模式做预报了。

## 3 降水预报实验

### 3.1 模式参数

在模式中选择区域的中心经度是  $115^\circ\text{E}$ , 中心纬度是  $30^\circ\text{N}$ , 东西方向格点数是 51, 南北方向格点数是 45, 时间步长是 4 min, 预报时效是 48 h, 每隔 12 h 输出一次预报场。使用了两层嵌套。

### 3.2 模式物理过程

模式的积云参数化方案采用 Anthes - Kuo 方案, 行星边界条件采用了高分辨率的 Blackder 方案, 大气辐射方案采用简单冷却方案, 显式水汽方案采用混合冰相方案, 地温方案则是多层土壤温度模式。

### 3.3 资料

本试验使用 1998 年 7 月 16 日~28 日 T106 分析资料, 将其作为第一猜测场, 等压面共分为 17 层, 水平格距为  $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 。物理量为纬向风  $u$ 、经向风  $v$ 、温度  $T$ 、位势高度  $H$ 、相对湿度  $R_h$ 。另外, 加入了常规探空与地面观测资料。常规探空资料的范围是 00、12 (世界时), 常规地面观测资料的范围是 00、06、12、18 (世界时), 半 Sigma 层取为 23 层, 模式顶层气压为 10 hPa。

### 3.4 自忆 MM5 用作同化的计算

#### 3.4.1 自忆 MM5 预报用作初始场

资料同化是当前数值天气预报研究的热点之一<sup>[12]</sup>, 已发展了如四维变分同化、卡尔曼滤波等多种资料同化方法。所以试验的第二部分工作是将 SMM5 的预报场作为 MM5 积分的初始场, 以研究用自忆模式发展资料同化的可能性。在通过试算确定回溯阶后就可以使用  $L$  样本长度的观测场, 用 (4) 式建立 SMM5, 接着用 SMM5 模式制作某时刻  $q$  的预报。同时, 用 MM5 以  $q - R_T$  时刻的气象场为初始场向前积分, 也得到时刻  $q$  的预报场。这时 MM5 改为由 SMM5 预报的  $q$  时刻的场作为初始场向前积分 48 h, 记此积分结果为 MM5 - S。与此同时 MM5 以其本身预报的  $q$  时刻场作为初始场也

向前积分 48 h, 将 MM5-S 与 MM5 的每 12 小时预报结果进行比较, 如风场、气压场、温度场、降水场等用评分标准进行检验。以考察用 SMM5 预报场替代 MM5 预报场之后, 有没有提高模式的预报准确率。在数值试验中取采样间隔  $R_T = 12$  h,  $L$  则随预报个例而定。

用 7 月 16 日 00 时至 7 月 21 日 12 时的资料作为过去资料 (样本量  $L = 12$ ) 建 SMM5, 制作 12 h 预报, 即得到 1998 年 7 月 22 日 00 时的预报, 记为 MM5-S, 同时用 MM5 以 7 月 21 日 12 时作为初始场, 向前积分 12 h, 得到 7 月 22 日 00 时的预报场, 记为 MM5, 对比见表 1。

表 1 1998 年 7 月 22 日 00 时 700 hPa 预报场比较

变量 \ 评分	相关系数 ( $r$ )		均方根误差 ( $\sigma_r$ )	
	MM5	MM5-S	MM5	MM5-S
模式				
$u$	0.6234	0.7805	0.1369	0.1234
$v$	0.5019	0.6121	0.1303	0.0814
$w$	0.9886	0.9887	4.2768	4.1762
$T$	0.9997	0.9998	0.0422	0.0291

由表 1 可见, SMM5 对 22 日 00 时的预报比 MM5 的预报效果好, 我们用它作为初始场, 用 MM5 积分 48 h, 得到每 12 小时的 4 个预报场, 记为 MM5-S。同时用 MM5 以其本身的预报场作为初始场也向前积分 48 h, 每隔 12 h 模式输出一次, 也得到 4 个预报场, 记为 MM5。

图 1 和 2 分别给出了 700 hPa 气压场和温度场 48 h 预报与实况相关系数变化图。

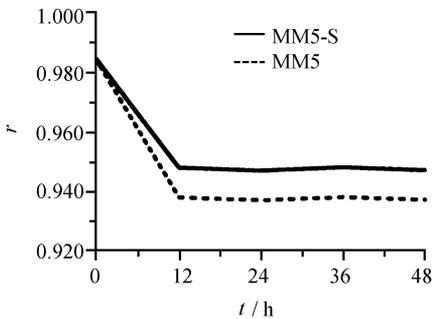


图 1 700 hPa 气压场 48h 预报与实况相关系数变化图

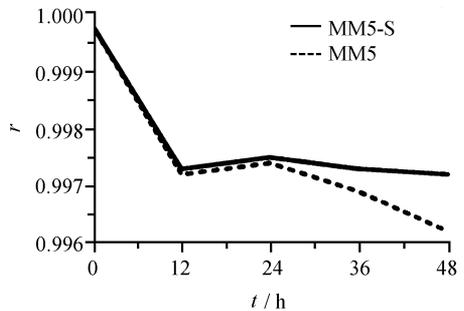


图 2 700 hPa 温度场 48 h 预报与实况相关系数变化图

### 3.4.2 对比分析

下面就风场、气压场、温度场、降水场对 MM5-S 和 MM5 预报作一对比分析。

(1) 风场 (表 2) 1998 年 7 月 22 日 12 时至 24 日 00 时的风场  $u$ , MM5-S 的  $r$  与 MM5 相比, 24 h 以内提高的百分点是 2%, 到 36 h 为 4%, 48 h 是 6%。从均方根误差来看, MM5-S 与 MM5 12 h 的  $\sigma_r$  相比较的差别不很明显; 到 36 h 以后, MM5-S 的  $\sigma_r$  的减小与 MM5 相比, 维持在 5% 左右。从  $v$  场的相关系数  $r$  来看, 类似于  $u$  场的预报结果。总之, 从风场来看, 24 h 以内的预报, MM5-S 比 MM5 都有了改善, 但效果不很明显, 而且也不稳定; 而 24 h 以后直到 48 h, 相对来说, MM5-S 的预报

效果更好且更稳定。这可能与所用的观测资料的时间间隔是 12 h 有关, 若资料的时间间隔减小, 有可能提高 24 h 以内的预报效果。

表 2 MM5-S 和 MM5 预报风场的对比分析

模式 \ 时效	$u$ 场均方根误差 $\sigma_r$				$v$ 场相关系数 $r$			
	12 h	24 h	36 h	48 h	12 h	24 h	36 h	48 h
MM5-S	0.0482	0.0431	0.0463	0.0435	0.4674	0.3926	0.3960	0.3170
MM5	0.0484	0.0489	0.0483	0.0459	0.4397	0.3789	0.3425	0.2950

(2) 气压场与温度场 (表 3) 从气压场的预报结果来看, 由于 MM5 的预报效果本身就比较好, 所以 MM5-S 与 MM5 相比相关系数虽也有所提高, 但是不显著, 均方根误差总体提高 7% 左右。温度场与气压场类似, 两种方法的效果都比较好, 但 MM5-S 仍改进了 MM5 预报。而且从提高程度来看, 无论相关系数还是均方根误差, 24 h 以后的预报比其前者的要好。

表 3 MM5-S 和 MM5 预报气压场和温度场的对比分西

模式 \ 时效	气压场均方根误差 $\sigma_r$				温度场均方根误差 $\sigma_r$			
	12 h	24 h	36 h	48 h	12 h	24 h	36 h	48 h
MM5-S	2.9320	2.9621	2.9829	2.9542	0.0262	0.0262	0.0263	0.0264
MM5	3.1701	3.1849	3.1933	3.1644	0.0265	0.0261	0.0283	0.0269

(3) 降水场 (表 4) 从实际降水场来看, 无论 24 h 还是 48 h 的降水场, 都有两个降水中心, 48 h 最大降水中心在 (30°N, 115°E), 最大降水量为 395 mm; 另一个次大降水中心在 (28°N, 110°E), 最大降水量为 360 mm。

表 4 7 月 24 日降水实况与预报

	最大降水中心		次大降水中心	
	位置	强度/mm	位置	强度/mm
实况	(30°N, 115°E)	395	(28°N, 110°E)	360
MM5-S 预报	(30°N, 115°E)	400	(28°N, 113°E)	360
MM5 预报	(32°N, 116°E)	400	(25°N, 110°E)	330

从 MM5-S 预报的降水场来看, 48 h 的降水场也有两个相对应的降水中心, 一个最大的降水中心在 (30°N, 115°E), 预报的最大降水量为 400 mm; 另一个次大降水中心在 (28°N, 113°E), 最大降水量为 360 mm (图 3, 见图版)。

从 MM5 预报的降水场来看, 48 h 的降水场也有两个相对应的降水中心, 一个最大降水中心在 (32°N, 116°E), 最大降水量为 400 mm; 另一个次大降水中心在 (25°N, 110°E), 最大降水量为 330 mm (图 4, 见图版)。

48 h 的降水预报 MM5-S 要比 MM5 有所改进。从降水中心来看, 对最大降水中心的降水强度来说, 两个模式的预报效果相同, 但次大降水中心 MM5-S 比 MM5 的预报效果要好, 而且 MM5-S 的中心雨区与 MM5 相比较明显更加接近实测结果。而且从整个雨区的走势来看, MM5-S 的结果也是与实测结果 (图 5, 见图版) 更相似。因为大范围汛期降水的短期天气预报更加注重降水分布特征, 即降水的落区预报, 所

以 MM5 - S 的预报效果更加有现实的意义。

下面我们用 TS 评分来定量验证这两种模式预报的结果。对于 24 h 的降水场,从降水区的预报来看,MM5 - S 的 TS 评分的结果是 0.6994,而 MM5 的 TS 评分为 0.6564。从对暴雨(日降水量超过 50 mm)预报的结果来看,MM5 - S 的 TS 评分的结果是 0.2358,而 MM5 的 TS 评分为 0.1603。因此,无论是降水区域的预报还是暴雨区域的预报,MM5 - S 的预报结果都优于 MM5 的预报结果。我们再来看 48 h 的降水场的预报,对于有雨区的预报,MM5 - S 的 TS 评分的结果是 0.7890,而 MM5 的 TS 评分为 0.7369,从对暴雨预报的结果来看,MM5 - S 的 TS 评分的结果是 0.3812,而 MM5 的 TS 评分为 0.3062。从场相关来看,MM5 的预报结果与实际降水场的相关系数是 0.1747,而 MM5 - S 的预报结果与实际降水场的相关系数是 0.2120,MM5 - S 预报也明显高于 MM5 的。提高暴雨预报准确率是一件十分困难的事,由此可见即使仅仅用了 SMM5 的预报场作为 MM5 的初始场,就显著提高了 48 h 的暴雨预报,这一结果可以从大气记忆性来解释,即由 SMM5 预报作为初始场,该场已融入了其前若干天的观测场的信息。这一点与 Michaud 的论点相符<sup>[13]</sup>,他认为当用海气耦合模式以 1982 年 12 月作为初始场做 1983 年 1 月大气环流预报时,由于初始场已为前期夏季的厄尔尼诺及其环流所“调制”,即初始场记忆着其前的大气状态,因此作准了 1983 年 1 月的大气环流预报,而从 1982 年夏季至 1983 年 1 月均为厄尔尼诺发生期。

## 4 结 论

综上所述,在 SMM5 对 12 h 预报的改进方面,对南北风场与温度场比较明显,对东西风  $u$  的改进略差些。对气压场的预报,由于 MM5 本身就有着比较好的预报结果,所以 SMM5 的预报虽然有一些改进,但是不十分明显。在以 SMM5 预报的场作为初始场的试验中,从风场、气压场、温度场的总体比较的结果来看,MM5 - S 预报效果的提高在 24 h 以内并不显著,而且也不是很稳定,24 h 以后,MM5 - S 的预报效果有了较为显著的提高而且趋于稳定。这与自忆谱模式和自忆正压模式的结果相一致,即若延长预报时效,自忆模式对预报的改进更明显,这是自忆模式最值得令人关注之点。

MM5 - S 对降水场的改进效果也是比较明显的,无论从降水落区的预报,还是从暴雨落区的预报来看,MM5 - S 的预报都更加接近实际观测结果。这对我们是一个鼓舞,因为提高降水预报是十分困难的事。由于我们所用的资料时间间隔 12 h,这对于短期天气预报来说显然是不够的。因此使用更短的时间间隔(如用 1 ~ 3 h)的资料有望进一步提高模式的预报效果。

在用自忆 MM5 作预报的过程中,回溯阶的取值是比较关键的,它直接关系到预报结果的好坏,我们的回溯阶取在 2 ~ 5 之间,经验上当回溯阶取 3 ~ 4 的时候效果比较理想。用 SMM5 的预报作为 MM5 的初始场,研究 SMM5 作为资料同化的可能性,本数值试验结果表明,用自忆性方程来发展一种四维同化方案是有前途的。

最后需要说明的是,由于仅仅用了 1998 年的观测资料做数值实验,显然所得结果是有限制的,但是至少说明在中尺度模式中运用回溯时间积分格式的可行性与有效性,更多的实例有待今后的工作。

## 参 考 文 献

- 1 Steppeler, J. , The SO as an example of a simple, ordered subsystem of a complex chaotic, *J. Climate*, 1997, **10** (3), 473 ~ 480.
- 2 Clifford, F. M. , and Y. -H. Kuo, Regional real - time numerical weather prediction; Current status and future potential, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1998, **79** (2), 253 ~ 263.
- 3 Cotton, W. R. , G. Thompson, and P. W. Mielke Jr. , Real - time mesoscale prediction on workstation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1994, **75** (2), 349 ~ 362.
- 4 Ji Zhongzhen, and Wang Bin, Construction and applied examination of a kind of square - conservative scheme in high precision in the time direction, *Progress in Natural Science*, 1994, **4** (1), 73 ~ 82.
- 5 曹鸿兴, 大气运动的自忆性方程, 中国科学 (B 辑), 1993, **23** (1), 104 ~ 112.
- 6 顾震潮, 作为初值问题的天气形式数值预报由地面天气历史演变做预报的等值性, 气象学报, 1958, **29** (2), 176 ~ 186.
- 7 丑纪范, 天气数值预报中使用历史资料的问题, 中国科学, 1974, **1** (6), 635 ~ 644.
- 8 游性恬、朱禾、曹鸿兴, 回溯时间积分格式的有效性研究, 应用气象学报, 1998, **9** (3), 122 ~ 123.
- 9 Feng Guolin, Cao Hongxing, and Dong Wenjie, A new differential scheme with multi - time levels, *Chinese Physics*, 2001, **10** (11), 1104 ~ 1110.
- 10 曹鸿兴、封国林, 数值模式中的回溯时间积分格式, 应用气象学报, 2000, **11** (2), 249 ~ 250.
- 11 曹鸿兴、谷湘潜, 自忆谱模式制作中期天气预报的试验, 应用气象学报, 2000, **11** (4), 455 ~ 465.
- 12 闵锦忠、沈桐立, 卫星云图资料反演的质量控制及变分同化数值试验, 应用气象学报, 2002, **11** (4), 410 ~ 418.
- 13 Michaud, R. , Extended memory of the initial conditions in long - range forecast of the January 1983 atmospheric circulation, *J. Climate*, 1990, **3** (4), 461 ~ 482.

## Use of the Mesoscale Self – Memorization Model in the Heavy Rainfall Forecasting Experiments

Jia Xiaojing<sup>1)</sup>, Feng Guolin<sup>2)</sup>, and Cao Hongxing<sup>3)</sup>

1) (*Chinese National Meteorological Center, Beijing 100081*)

2) (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

3) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

**Abstract** In view of the fact that the atmospheric motion is an irreversible process, a memory function which can recall the observation data in the past has been introduced. Retrospective time integration scheme contains historical information so this scheme adapts to mesoscale weather forecast. The purpose of this paper is to apply this scheme to MM5 model and validate the efficiency of this scheme. Based on the atmospheric self – memorization principle, the retrospective time integration scheme in a mesoscale numerical model is developed which is called SMM5, and the experimental results are compared with the kernel model MM5. It shows that because of using information of several history fields, SMM5 can improve the prediction accuracy. As to the rainfall field, both the precipitation areas and precipitation intensities of SMM5 is more similar to the observed field than that of MM5.

**Key words:** numerical weather prediction; short – range weather forecast; rainfall