

# 长江三角洲汛期预报模式的研究及其初步应用\*

封国林

(扬州大学理学院物理系, 扬州, 225009)

曹鸿兴

魏风英

丑纪范

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

(北京气象学院, 北京, 100081)

## 摘 要

在短期自忆气候模式的基础上, 着重考虑了区域性降水特点, 组合均生函数时序模型, 构造了区域降水预报模式。以降水预报为实例, 计算表明, 它能滚动制作月、季、年降水预报, 尤其对汛期(6~8月)降水预报, 具有相当好的预报能力。

关键词: 区域气候, 组合预报, 记忆, 均生函数模型。

## 1 引 言

大气是一个混沌动力系统, 初始时刻任何较小的误差都可能在预报中引起误差增大, 进而导致预报信息的彻底丧失。只要存在随机性与不确定性, 即使模式十分完善, 未来气候系统变化也很难预报。误差的增长率和可预报性丧失的时间依赖于(如环流系统、季节和地理区域等)诸多因素。但借助于在多个不同的初始条件下对数值模式进行积分, 增加模式的预报性信息是可能的。

当今关于月、季乃至年度气候预报的工作仍使用数值天气预报(NWP)方法, 即通过一次又一次对方程操作积分来获得瞬时预报值, 再对这些预报进行月、季、年的平均, 得到相应时段的气候预报。这种NWP方法由于动力可预报性存在2~3周的限制, 即使500 hPa高度的月预报, 至今仍未达到业务预报水平。

目前, 区域气候预报作为一种基础性研究, 除了统计模式外, 采用全球数值模式嵌套有限区网格模式, 与NWP一样, 通过一步一步数值积分来进行。这种方法涉及气候系统各因子系统: 大气、海洋、陆面、冰雪圈和生物圈的物理、化学过程及其观测值, 不但模式结构复杂, 观测数据又短, 加上方法本身的问题, 使得区域气候预报离可用程度尚远。

文中的研究目标是短期区域气候预报, 预报时间之长使得用数值积分制作显得十分

\* 初稿时间: 1999年8月12日; 修改稿时间: 2000年2月16日。

资助课题: 国家自然科学基金(49875025)和国家重点基础研究发展规划(G1998040901-1)项目资助。

棘手。因此考虑从另一种研究途径来着手。

首先, 我们认为这样长时间的气候过程中热力作用应占主导地位, 因此考虑非绝热加热率的热流量方程为基本出发方程; 其次, 考虑到气候状态的统计特征, 预报变量直接运用月、年平均值而不是瞬时值; 再则, 为了获得更多预报信息, 运用了包含多时次气候场的自忆性方程<sup>[1]</sup>, 在求记忆系数过程中将长时间观测资料中包含的有用信息提取出来, 即从区域气候序列中提取预报信息来代替从单一时次全球气候场中提取信息, 一言以蔽之, 以“时间”信息来代“空间”信息。事实上, 对任何非线性动力系统而言, 本研究提供了运用大信息量来制作预报的方法。在统计方面, 对组合预报的多个因素平均可使预报比单一预报结果更可靠。另外, 从组合预报的分布, 可以估计预报的可靠性, 且对足够大的样本而言, 任何预报量都可由概率表示。

文中简要地给出根据区域气候自忆模式组合统计方法建立的降水滚动预报模式及其计算结果。本模式的一个长处是在任何月份均可制作月、季、年降水预报。

## 2 降水滚动模式制作

### 2.1 区域气候自忆模式(RSM)预报

制约模式变量地表气温  $T_s$ , 500 hPa 高度  $h$  和降水距平百分率  $R$  的方程分别为<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \sigma_p n_s / n^* + Q_s / C_p = F_1(T_s, T_a, R, n_s, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = k_1 \cdot h + k_0(n_s - n) + k_0(Q_s - Q) = F_2(h, T_s, T_a, R, n, t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{B_1}{f} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) - \frac{B_1}{f} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) + \frac{B_2}{n^*} \frac{\partial n}{\partial t} = F_3(h, n, t) \quad (3)$$

式中带“ $\bar{\quad}$ ”的量表示距平,  $n_s$  和  $n$  分别表示地面和高空云量距平,  $Q_s$  和  $Q$  为地面和高空非绝热加热率,  $C_p$  为空气定压比热,  $f$  为科氏参数,  $k$  为 A dem 大型湍流交换系数,  $k_1, k_0, B_1$  和  $B_2$  为物理参数,  $n^*$  为经验常数, 其余符号为气象常用。

假定记忆系数仅是时间的函数, 不随空间格点而变, 则先由式(1)~(3)导出一个差分-积分方程, 再离散化得模式方程组

$$T_t = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_{1i} \tilde{T}_i + \sum_{i=-p}^0 \theta_{1i} F_{1i} \quad (4)$$

$$h_t = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_{2i} \tilde{h}_i + \sum_{i=-p}^0 \theta_{2i} F_{2i} \quad (5)$$

$$R_t = \sum_{i=-p-1}^0 \alpha_{3i} \tilde{R}_i + \sum_{i=1}^3 \theta_{3i} F_{3i} \quad (6)$$

式中  $\alpha$  和  $\theta$  表示记忆系数,  $\tilde{\quad}$  表示取中值,  $F$  表示空间场和其他物理量对局地变量的影响,  $t$  为预报时刻,  $p$  为回溯阶, 为行文方便下文中略去了模式变量的上标“ $\sim$ ”及变量  $T_s$  的下标“ $s$ ”。式中右边第一项为自忆项, 由差分项离散而成; 第二项为它效项, 由积分项离散而成。

模式变量用 EOF 展开

$$T_{mn} = \sum_{j=1}^M C_{mj} u_{jn} \quad y_T \quad \sum_{j=1}^M C_{mj} u_{jn}$$

$$h_{mn} = \sum_{j=1}^M b_{mj} v_{jn} \quad Y_h \quad \sum_{j=1}^M d_{mj} w_{jn} \quad Y_R$$

式中  $m=1, 2, \dots, M$ ;  $n=1, 2, \dots, N$ 。  $M$  为场空间点数,  $N$  为序列样本量。在实际计算中取  $Y_T = Y_h = Y_R = Y \ll M$ , 这里取  $Y=10$ 。

将 EOF 展开代入式(4)~(6), 若两时次间无观测值, 中值用前后时次平均值替代, 得到表征地表气温、500 hPa 高度、降水的三变量距平的自忆性方程<sup>[6]</sup>

$$T_{mi} = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_{1i} U_{mi} + \sum_{i=-p}^0 \theta_{1i} F_{1mi} \quad (7)$$

$$h_{mi} = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_{2i} U_{mi} + \sum_{i=-p}^0 \theta_{2i} F_{2mi} \quad (8)$$

$$R_{mi} = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_{3i} \omega_{mi} + \sum_{i=1}^3 \theta_{3i} F_{3mi} \quad (9)$$

将长江三角洲10站月、季、年降水量作为预报对象, 记  $R_i, i=1, 2, \dots, 10$ 。考虑到长江三角洲范围很小, 因此用内插得到为  $1 \times 1$  格点资料, 先运用区域气候自忆模式(RSM)<sup>[6]</sup>制作中国大陆部分地表气温( $T$ )、降水( $R$ )、500 hPa 高度( $h$ ) 格点上的预报,  $n_s$  和  $Q_s$  以及其它物理参数的方法和数值参考文献[2]。例如, 将1951年6月、1952年6月、..., 1998年6月的  $T, R, h$  资料输入 RSM 模式, 作一步预报即得1999年6月中国大陆部分地区  $\hat{T}_i, \hat{R}_i, \hat{h}_i$  格点上预报。

## 2.2 模式输出统计

由 RSM 得到中国大陆部分地区格点预报, 结合使用 MGF<sup>[4]</sup>得到长江三角洲10站的降水预报。采用模式输出统计法(MOS)将两者组合, 而得到最终给用户的预报。例如: 已知 RSM 得中国大陆部分地区格点温度  $\hat{T}_i$ 、降水  $\hat{R}_i$ 、500 hPa 高度  $\hat{h}_i$  的6月份预报, 已用 MGF 得长江三角洲10站6月份降水预报, 每站记为  $\hat{R}_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 。建立预报第  $i$  站降水的方程, 即多元回归

$$y_i = a_0 + a_1 \hat{R}_i + a_2 \hat{R}_{nei} + a_3 \hat{R}_{max} + a_4 \hat{T}_{max} + a_5 \hat{T}_{nei} + a_6 \hat{R}_{iy} + a_7 \hat{R}_{im} \quad (i=1, 2, \dots, 10) \quad (10)$$

式中  $y_i$  为第  $i$  站降水组合预报, 也是最后给用户的预报。 $\hat{R}_i$  为用 MGF 得到的  $i$  站6月份降水量,  $\hat{R}_{nei}, \hat{T}_{nei}$  为最靠近第  $i$  站的由 RSM 得到的某格点降水量和温度,  $\hat{R}_{max}$  为中国大陆部分地区  $M$  个格点中与第  $i$  站降水相关最大的那个格点的由 RSM 预报的降水量和温度,  $\hat{R}_{iy}$  为年持续性预报因子,  $\hat{R}_{im}$  为月持续性预报因子, 若某个月无实测资料, 则用多年平均值代替。

式(10)中遵循下列原则取得自变量:

### (1) 邻近原则

设第  $i$  站( $i=1, 2, \dots, 10$ )的经纬度为  $x_i^1, y_i^1$ ,  $M$  个格点中第  $j$  个格点的经纬度为  $x_j^0, y_j^0$ , 则计算欧氏距离  $d_{ij} = [(x_i^1 - x_j^0)^2 + (y_i^1 - y_j^0)^2]^{1/2}$ 。当  $d_{ij}$  取最小值时,  $x_j^0, y_j^0$  格点即为第  $i$  站邻近格点, 该格点上的 RSM 预报值即为  $\hat{R}_{nei}$  和  $\hat{T}_{nei}$ 。

### (2) 遥相关原则

对  $\hat{R}_{max}$  和  $\hat{T}_{max}$  则用  $\hat{R}, \hat{T}$  场上与第  $i$  站降水相关系数最大格点上的 RSM 预报值。例

如10站中第  $i$  站6月份实测降水为  $y_i$ , 计算  $y_i$  与所有格点 RSM 预报值( $\hat{R}_j^i, \hat{T}_j, j = 1, 2, \dots, M$ ) 之间的相关系数  $r_{ij}$ , 当  $r_{ij}$  取最大值时,  $j$  格点上的 RSM 预报值即为  $\hat{R}_{\max}$  和  $\hat{T}_{\max}$ 。

式(10)为 MOS 方程, 其特点是方程右边自变量的数值为模式(RSM, MGF)输出(预报)值, 不是实际观测值, 而左边组合预报值  $y_i$  则为观测值, 其优点是通过式(10)可以自动校正 RSM 和 MGF 模式中的缺陷, 提高预报准确率。

### 2.3 回报计算

通过回报计算式(10)中右边的  $\hat{R}_i, \hat{R}_{nei}, \hat{R}_{\max}, \hat{T}_{nei}, \hat{T}_{\max}$ 。用 MGF 模型算  $\hat{R}_i$ , 设年样本数为  $N_a$ , 例如1951~1997年, 则  $N = 47$ , 留  $Q$  年作回报, 例如回报1980~1997年,  $Q = 18$ , 即要计算18 a 每月的  $\hat{R}_i$ 。也就是说, 以1951年1月~1980年1月自然序列为样本, 以1980年2月作为起报月, 外推4步, 第4步即为6月降水量预报,  $R^i(6), j = 80$ , 这时  $e_x = 4$ 。若作7月预报, 则  $e_x = 5$ 。然后又以1951年1月~1981年1月自然序列为样本, 以1981年2月作为起报月, 外推4步, 得  $R^i(6), i = 1, 2, \dots, 10, j = 81$ , 得到18 a 的, 如此继续,  $R^i(6), i = 1, 2, \dots, 10; j = 80, 81, \dots, 98$ , 这样得到了式(10)中  $\hat{R}_i(6)$  MOS 资料。

用 RSM 模式计算  $M$  格点的  $T, P, h$ , 这时用逐年6月份的观测资料来计算。即1951年6月的  $T, P, h$ , 1952年6月的  $T, P, h, \dots, 1979$ 年6月的  $T, P, h$ , 用 RSM 外推一步, 得1980年6月的  $\hat{T}, \hat{P}, \hat{h}$ 。记为  $W^i(6), j = 80$ , 接下来, 用1951年6月, 1952年6月的  $T, P, h, \dots, 1980$ 年6月的  $T, P, h$ , 用 RSM 推一步得1981年6月的  $\hat{T}, \hat{P}, \hat{h}$ , 记为  $W^i(6), i = 1, 2, \dots, M, j = 81$ 。注意作1981年6月份预报时, 对1980年6月用的是实测值, 即只作1 a 外推,  $e_p = 1$ , 以此类推, 得  $W^i(6), j = 80, 81, \dots, 98, i = 1, 2, \dots, M$ 。在求得  $W^i(6)$  的18 a RSM 资料后, 就可利用邻近原则和遥相关原则, 求得式(10)中所需的  $\hat{R}_{nei}, \hat{T}_{nei}, \hat{R}_{\max}, \hat{T}_{\max}$ 。

用回归估计式(10)中的  $a_0, a_1, \dots, a_7$  的系数, 式(10)左边的为实测降水量(1980年~1997年6月)  $Q = 18$ , 而右边各量均为 MGF 和 RSM 的预报结果。用最优子集回归求得每站( $i = 1, 2, \dots, 10$ )的回归系数  $a_i, i = 0, 1, \dots, 7$ 。

这样事先确定  $N, Q, e_x, e_p$ , 输入  $T_j, h_j, R_j, R_i; i = 1, 2, \dots, 10; j = 1, 2, \dots, M$ 。计算机按程序自动完成所有上述计算, 最后得到组合预报  $\hat{y}_i, i = 1, 2, \dots, 10$ , 即最终给用户的预报。

## 3 预报试验

### 3.1 区域气候自忆模式

取15~54°N 和70~133°E 范围内3°×3°经纬度网格点资料内插成1°×1°的网格点共2706点。1951年1月~1998年12月降水和温度取客观分析所得格点资料。北半球500 hPa 月平均高度资料取自中国国家气候中心预测室。凡在中国范围以内的格点取实测值, 以外所有点均取该月多年平均值, 这样构成了降水、温度场的历史序列。利用 RSM 进行了中国大陆范围的1988~1997年汛期(6~8月)降水预报试验。具体做法是: 取1951~1987年实测资料, 用最小二乘法确定出记忆系数, 回溯阶  $p$  取为5, 采用有限记忆递推法向前作1步预报, 即作出1988年汛期的降水预报。再取1951~1988年实测资料, 重新确定记忆系数, 再作1步预报, 即作出1989年的预报, 如此继续下去, 共作出10 a 预报。从统计意义上讲, 进行了10 a 独立样本的预报试验, 是实际意义上的预报。距平相关系数( $A_c$ )可以反映降水距平

的预报水平,是国际上通用的检验气候模式预报效果的指数。由于降水气候预报的难度,就跨季度汛期降水(时效为2至3月)而言,业务预报近20 a距平相关系数的平均值仅为0.03。表1给出1988~1997年观测与预报之间的距平相关系数( $A_c$ )及距平符号一致率( $A_p$ )。

表1 自忆模式预报1988~1997年全国汛期降水效果检验

年份	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	平均
$A_c$	0.23	0.04	-0.08	0.23	0.41	0.24	-0.10	-0.05	-0.13	-0.22	0.07
$A_p$	0.53	0.49	0.44	0.55	0.42	0.52	0.45	0.43	0.54	0.37	0.48

从表1第2行可以看出,就年际汛期降水预报(时效为12个月)而言,10 a距平相关系数为0.07,最高年份1992年 $A_c=0.41$ ,而最差年份是1996年和1997年 $A_c$ 分别为-0.13,-0.22,其中1988,1991,1992,1993年的预报技巧得分是相当不错的。第3行表示距平符号实况与预报一致的个数占格点数的百分率。其中1988,1991,1993,1996年距平符号一致率超过了50%。说明本模式有一定的年际气候预报能力。

大范围汛期降水的短期气候预测更注重降水分布的趋势特征,尤其是检验将出现多雨或少雨的区域位置报得是否准确。1991年夏季江淮流域出现了特大洪涝,洪涝程度严重但范围不广,主要集中在江淮中下游地区,降水距平百分率高达50%以上,而江南东部,华北大部及西北地区降水偏少,呈中间降水多,南北降水偏少的分布型式,中国国家气候中心确定为Ⅱ类雨型(图略)。自忆预测模式基本上将这种降水异常分布趋势报出来了,尽管东部降水偏多、偏少的程度远不及实况那么强,但是中间多,南北少的分布格局还是接近实况的。1996年实况与预报场之间距平相关系数 $A_c=-0.13$ ,但距平符号一致率比较高 $A_p=0.54$ ,所以主要多雨区的位置预报还是与实况比较吻合。1996年夏季主要多雨区集中在长江沿岸及其以南地区,属Ⅱ类雨带类型,北方的降水趋势预报基本与实况相反,但是淮河、长江以南大范围的降水偏多趋势还是正确的,但强度偏弱。

比较运用 $3 \times 3$ 经纬度网格点资料RSM运算结果,采用 $1 \times 1$ 经纬度细网格资料后,RSM预报准确率并没有多大改进。说明了区域气候模式无限增长网格的分辨率,并不能从根本上提高预报准确率。

### 3.2 组合预报

通过回报计算式(10),确定各参量,将区域气候自忆模式与均生函数模型的预报结果进行组合预报(表2),从表2可以看出,预报效果有明显的改观,1988,1991,1992,1993,1997年预报技巧是相当好的,1988,1989,1991,1992,1993,1997年距平符号一致率超过了60%,比单独用均生函数模型有很大的提高。

表2 组合预报长江三角洲1988~1997年汛期降水效果的检验

年份	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	平均
$A_c$	0.28	0.09	-0.07	0.15	0.43	0.35	-0.12	0.03	-0.15	0.12	0.11
$A_p$	0.70	0.60	0.40	0.60	0.90	0.80	0.30	0.40	0.40	0.60	0.57

### 3.3 制作实际预报

1998年夏季中国大部分地区降水偏多,多雨中心位于长江流域和东北西部,内蒙东部地区(图1a)。长江出现了全流域性的特大洪水;嫩江,松花江的洪涝亦是超历史记录的。在1998年3月用自忆预测模式进行的预报(图1b),尽管与实况有不小的差距,但在长

江中下游, 东北和内蒙部分地区降水是呈现偏多趋势的,  $A_c = 0.10$ ,  $A_c = 0.54$ ; 组合预报长江三角洲,  $A_c = 0.19$ , 报对7个站点。1999年夏季出现了江淮流域梅雨季节特长, 有强降水, 降水距平百分率高达80%以上(图1c); 1999年3月用自忆模式预报当年汛期降水, 基本上将这种降水异常分布趋势报出来了(图1d), 尽管不及实况那么强, 但分布格局还是比较接近实况的,  $A_c = 0.32$ ,  $A_p = 0.63$ ; 组合预报长江三角洲,  $A_c = 0.45$ , 报对9个站, 表3为1999年3月15日的长江三角洲降水预报, 表4为实况。

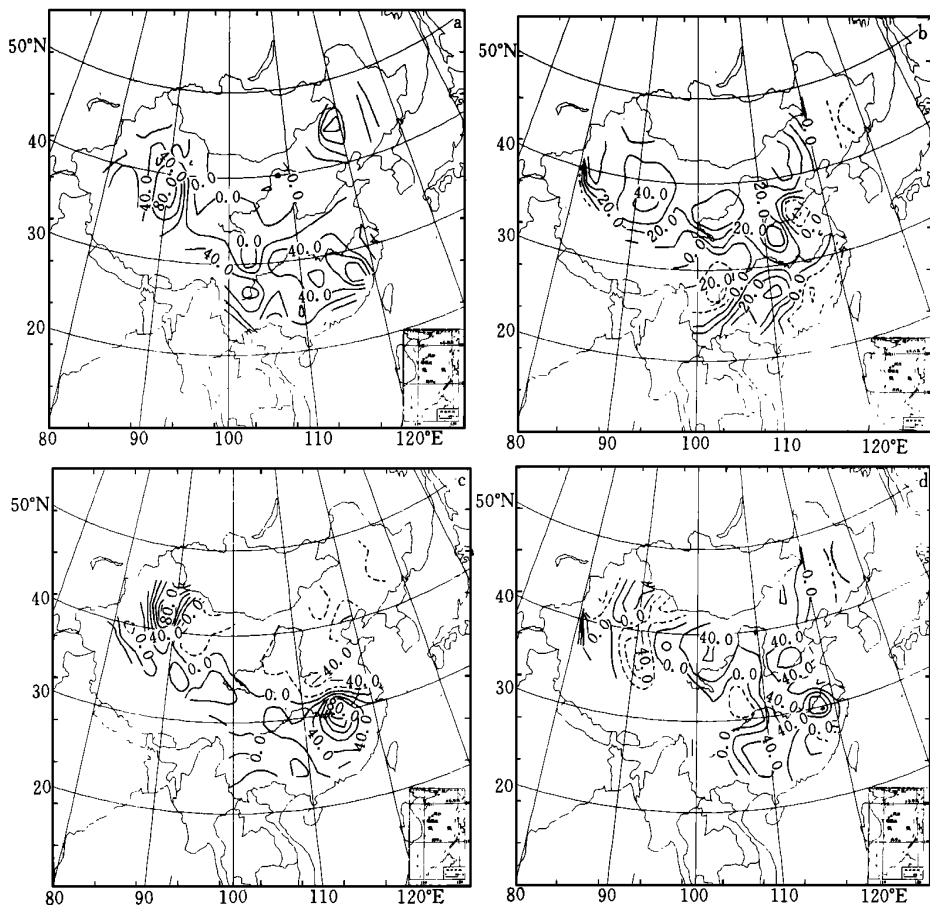


图1 中国夏季大部分地区降水距平百分率

(a. 1998年实况, b. 1998年预报, c. 1999年实况, d. 1999年预报)

表3 1999年3月组合预报长江三角洲汛期降水量

站名编号	58238	58251	58259	58343	58345	58358	58367	58457	58464	58366
降水量	577	558	505	680	513	509	720	795	534	600
距平	23	6	5	47	10	13	61	61	22	41

表4 1999年3月 长江三角洲汛期降水量实况

站点编号	58238	58251	58259	58343	58345	58358	58367	58457	58464	58366
降水量	713	367	797	838	1083	1162	1176	1126	1060	1172
距 平	52	- 31	65	80	132	158	163	127	143	175

## 4 结论与讨论

实际预报试验表明,文中提出的汛期预报模式不但在一定程度上提高了预报技巧,而且可以较好地把握住夏季降水的趋势分布。组合预报效果的好坏主要依赖于自忆模式和均生函数模型的预报能力。如果模式能基本报对夏季降水的主要趋势,那么组合预报就可能会有好的结果,反之,组合预报不可能有根本的改变,只可能有所改进。

区域气候自忆模式具有一定的预报技巧,对降水异常分布也能作出较好的预报。当然,像其它气候数值模式和统计预测一样,本模式在预报汛期降水分布方面效果还不够稳定,有待今后从物理以及计算上进行改进。

## 参考文献

- 曹鸿兴. 大气运动的自忆性方程. 中国科学 B 辑, 1993, 23(1): 104~112
- 曹鸿兴, 封国林, 魏凤英. 一种区域气候预测模式的构建. 气象学报, 2000, 58(2): 159~167
- 封国林, 曹鸿兴, 魏凤英. 区域气候自忆模式的计算方案及其结果. 应用气象学报, 1999, 10(4): 470~477
- 魏凤英, 曹鸿兴. 长期预测的数学模型及其应用. 北京: 气象出版社, 1990, 157p

# ON AREA RAINFALL ENSEMBLE PREDICTION AND ITS APPLICATION

Feng Guolin

(Department of Physics, College of Science, Yangzhou University, Yangzhou 225009)

Cao Hongxing Wei Fengying

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Chou Jifan

(Beijing Meteorological College, Beijing 100081)

## Abstract

Based on the short-range self-memorial climatic model and area rainfall characteristics, an area rainfall ensemble prediction model is built, which combines mean-generating function model. This model is used to give the hindcasts of the precipitation in month, season and year, and its forecast effect is totally superior to the other climatic models.

**Key words:** Area climate, Ensemble prediction, Memory, Mean-generating function model.