

# 区域气候自忆预测模式的计算方案及其结果\*

封国林

(扬州大学理学院物理系, 扬州 225002)

曹鸿兴 魏凤英

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

区域气候预测的自忆模式是由描写温度、降水变化的差分-积分方程构成的. 文中推导了用 EOF 展开的预测方程组, 给出了该方程组的数值计算方案和递推格式. 运用我国 1951~1992 年的月温度、降水场和区域 500 hPa 高度场格点资料, 对 6~8 月汛期预测作了回报试验, 结果表明该模式的预测能力是很高的.

关键词: 区域气候 预测模式 记忆 数值计算

## 引 言

目前区域气候预测的数值模式, 一般采取全球模式嵌套一个区域细网格模式<sup>[1]</sup>, 或者在用全球模式作出预测后, 采用所谓下插(downscaling)的统计方法来获得小范围的气候<sup>[2]</sup>. 从区域气候长期观测资料提取预测信息的观点出发, 基于非绝热作用和水分平衡, 我们导出了一个区域气候预测模式<sup>[3]</sup>. 由于该模式涉及气候系统的多个方面, 模式方程组相当复杂, 况且, 其中的物理和气象参数的确定也相当困难.

本文叙述区域气候自忆预测模式的计算原理、方法和结果. 为便于计算, 对模式变量用经验正交函数(EOF)展开, 导出了相应的计算方程. 计算中采用 3 次样条函数插值和微商公式. 由于缺乏云量资料, 不得不对它作了简化假定. 文中给出了 7 年回报计算结果, 并与他人工作作了对比.

## 1 EOF 展开的模式方程组

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>[3]</sup>

\* 国家自然科学基金会资助, 合同号 49475263.  
1998-04-01 收到, 1998-12-15 收到修改稿.

$$\frac{\partial T'_s}{\partial t} = \sigma_p n'_s / n^* + Q'_s / C_p = F_1(T'_s, T'_a, R', n'_s, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial h'}{\partial t} = K \nabla^2 h' + k_1(n'_s - n') + k_0(Q'_s - Q') \equiv F_2(h', T'_s, T'_a, R', n', t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial R'}{\partial t} = \frac{B_1}{f} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left| \frac{\partial h'}{\partial t} \right| - \frac{B_1}{f} \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left| \frac{\partial h'}{\partial t} \right| + \frac{B_2}{n^*} \frac{\partial n'}{\partial t} \equiv F_3(h', n', t) \quad (3)$$

式中“'”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,  $K$  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)~ 式(3) 导出一个差分-积分方程<sup>[3]</sup>, 再离散化得模式方程组

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

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

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

式中  $\alpha$  和  $\theta$  表示记忆系数, “ $\sim$ ”表示取中值,  $Z_i$  为由降水和高度组成的变量,  $F$  表示空间场和其他物理量对局地变量的影响,  $p$  为回溯阶。式中右边第一项为自忆项, 由差分项离散而成; 第二项为他效项, 由积分项离散而成。

模式变量用 EOF 展开

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

$$h_{mn} = \sum_{j=1}^M b_{mj} v_{jn} \approx \sum_{j=1}^{y_h} b_{mj} v_{jn}$$

$$R_{mn} = \sum_{j=1}^M d_{mj} w_{jn} \approx \sum_{j=1}^{y_R} d_{mj} w_{jn}$$

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。计算中取  $y_T = y_h = y_R = Y \ll M$ 。

将 EOF 展开代入式(4)~ 式(6), 由于两时次间无观测值, 中值用前后时次平均值替代, 且令

$$T_{mi} \equiv \sum_{j=1}^y C_{mj} u_{ji}; u_{mi} \equiv \sum_{j=1}^y C_{mj} \frac{1}{2}(u_{ji+1} + u_{ji})$$

$$F_{1mi} \equiv \sum_{j=1}^y (A_1 C_{mj} u_{ji} + A_2 b_{mj} v_{ji} + A_3 d_{mj} w_{ji}) + A_4 n'_{mi} + A_5 n'_{smi} + A_0$$

式(4)变为

$$T_{mt} = \sum_{i=-p-1}^{-1} \alpha_i u_{mi} + \sum_{i=-p}^0 \theta_i F_{1mi} \quad (7)$$

同理式(5)变为

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

式中

$$v_{mi} = \sum_{j=1}^y b_{mj} \frac{1}{2} (v_{ji+1} + v_{ji})$$

$$F_{2mi} = \sum_{j=1}^y (b_{mj} K \nabla^2 v_{ji} + C_1 C_{mj} u_{ji} + C_2 b_{mj} v_{ji} + C_3 d_{mj} w_{ji}) + C_4 n'_{mi} + C_5 n'_{smi} + C_0$$

$\nabla^2$  为水平差分拉普拉斯算子

同理式(6)变为

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

式中

$$Z_{mi} = \sum_{j=1}^y \left[ \frac{1}{2} d_{mj} (w_{ji+1} + w_{ji}) - W_1 b_{mj} (\nabla v_{ji+1} + \nabla v_{ji}) / \Delta x \right. \\ \left. - W_2 b_{mj} (\nabla v_{ji+1} + \nabla v_{ji}) / \Delta y \right]$$

$$F_{3m1} = \sum_{j=1}^y [W_1 b_{mj} (\nabla v_{jt} / \Delta x + W_2 b_{mj} \nabla v_{jt} / \Delta y)]$$

$$F_{3m2} = \sum_{j=1}^y b_{mj} \nabla v_{j-p} / \Delta x$$

$$F_{3m3} = \sum_{j=1}^y b_{mj} \nabla v_{j-p} / \Delta y$$

式中  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为水平东西向和南北向格距,  $W_1$ 、 $W_2$  为物理参数。

在式(8)和式(9)中有一阶和二阶导数, 计算中采用了 3 次样条函数插值和微商公式<sup>[4]</sup>。

## 2 模式计算

首先取  $15^\circ \sim 54^\circ \text{N}$  和  $70^\circ \sim 133^\circ \text{E}$  范围内的 1951~1992 年汛期(6~8 月)降水和温度的客观分析所得格点资料, 500 hPa 6~8 月高度取中央气象台原长期科北半球格点资料, 用内插子程序形成  $3^\circ \times 3^\circ$  经纬度网格点资料共 308 点。凡在中国范围以内的格点(109 点)取实测值, 分别求出气温、500 hPa 高度场和降水场的距平和距平百分率, 在此超出国界网格点用该年 109 点平均值代替。这样构成了降水、温度场的历史序列。基于这些场的历史演变所包含的信息来制作预报。

其次调用 EOF 子程序, 提取气温、高度和降水场的空间和时间所包含的信息; 在此基础上, 调用不同边界的 3 次样条子程序, 分别求出比湿场和高度场的分离空间场的水平东西向和南北向格距的一阶导数和二阶导数。在此基础上根据气候自忆模式原理, 调用求记忆系数矩阵子程序, 并分析系数矩阵的合理性, 反复确定边界条件。因为区域气候实质上是一个开放系统, 在我们的模式中却是一个半封闭半开放的系统, 因此, 要反复确定边界。

最后, 调用自忆预报子程序, 作出预报; 若预报序列小于 42(1951 至 1992 年共 42 年), 则由结果检验子程序, 给出  $RMSE$  (均方根误差),  $AR$  (距平相关系数),  $IP$  (距平同号

率),  $\gamma_c$  (绝对值相对误差覆盖率) 等常规检验量; 若预报序列大于 42, 仅仅给出气温、降水和 500 hPa 高度场预报实况及其距平; 最后向前预报  $q$  步并打印计算结果。

### 3 物理参数和常数

在式(7)和式(8)中都有云量距平  $n'_s$  和  $n'$ , 应将它们参数化, 表示为模式变量的函数。由于缺乏云量资料, 实际计算时简单地假定回溯期  $p+1$  时间内云量距平有正有负, 即假定

$$\sum_{i=-p}^0 (A_4 n'_i + A_5 n'_{si}) \approx 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i=-p}^0 (C_4 n'_i + C_5 n'_{si}) \approx 0 \quad (11)$$

在计算中取  $p=5$ , 即回溯期 6 年, 考虑云量的 2~3 年周期, 在此期间内云量距平有正有负。加上在式(10)中  $A_4$  为负值,  $A_5$  为正值, 前后两项有抵消之趋势, 在式(11)中也类似  $C_5$  为负值,  $C_4$  为正值,  $C_4 n'_i$  与  $C_5 n'_{si}$  有抵消之趋势。故上述假定是有实际依据的。

在式(9)中的  $W_1$  和  $W_2$ , 包含比湿气候值的水平微商, 在中国气候图上读出网格点上的值, 再作差商, 以求得  $W_1$  和  $W_2$  随格点的分布值。

模式中物理参数和常数参考前人有关工作<sup>[5,6]</sup>以及我国的实际情况事先给定, 有的多少带有任意性, 详列在表 1 中。

表 1 模式物理参数和常数

参数名	参数值	参数名	参数值	参数名	参数值
$C_D$	$3 \times 10^{-3}$	$ \bar{V} $	10 m/s	$b_E$	$10 \times 10^3$
$ V_g $	2.5 m/s	$\alpha_n$	0.50	$p_s$	1000 hPa
$a_s$	$2.1 \times 10^3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha_l$	0.04	$\bar{T}_a$	265 K
$\epsilon$	0.3	$\alpha'_s$	0.04	$\bar{T}_s$	300 K
$a_n$	$1.8 \times 10^3 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d} \cdot ^\circ\text{C})$	$\epsilon_T$	0.75	$\bar{n}$	0.5
$\epsilon_c$	0.25	$\epsilon_s$	0.30	$\alpha_s = \alpha_g$	0.14
$E'_0$	0.16	$\epsilon_p$	0.25	$\omega'$	$1.7 \times 10^2 \text{ hPa/d}$
$a_E$	$2.2 \times 10^3$	$\bar{T}_p$	223K	$B_1$	$4 \times 10^{-3}$
$K_H$	$2.3 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{d}$	$T'_p$	1.5°C	$(P_h - P_l)$	400 hPa
$K$	$2 \times 10^{10} \text{ cm}^2/\text{s}$	$\xi$	0.5	$\bar{R}$	3 mm/d
$\gamma$	6.5	$E'_a$	100 hPa	$\tau_0$	$7.8 \times 10^6 \text{ s}$

### 4 预 测

预留 1986~1992 年作试报, 故用 1951~1985 年资料<sup>[7]</sup>用最小二乘法定出式(7)、式

(8)和式(9)中的记忆系数  $\alpha_{ki}$  和  $\theta_{ki}$ ,  $k=1, 2, 3, i=-p, -p+1, \dots, 0$ . 采用有限记忆递推算  
法向前作出预报, 即由 1985 年( $t_0$ )起作 1986 年( $t_1$ )预报, 将其视为实测场吞入历史样本  
集, 同时剔除 1951 年的资料, 即始终保持样本长度  $N=35$ (图 1). 重求记忆系数, 作 1987  
年预报, 如此继续下去, 共作了 7 年( $q=7$ )汛期预报. 当回溯阶取  $p=4$  时的预报结果列在  
表 2. 表中给出了数值预报和气候预测最常用的检验统计量: 均方根误差  $RMSE$ 、距平相  
关系数  $AR$ 、距平同号率  $IP$  以及绝对值相对误差覆盖率  $\gamma_c, \gamma_c$  定义如下:

$$I_i = \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{x_i} \times 100\%$$

记  $I_c$  为事先确定的相对误差允许水平, 如 5%, 10%, ... . 对温度  $I_c$  可取 5%, 降水可取  
15% 或 20% 等.

$$\gamma_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} n_i \times 100\%$$

$$n_i = \begin{cases} 0 & I_i \leq I_c \\ 1 & I_i > I_c \end{cases}$$

若将覆盖率绘在图上, 通过对不同年的对比, 就会发现易报或难报的地点和地区. 由表 2  
可见, 高度场覆盖率明显高于降水场, 而降水场的  $I_{RC}$  取得又很宽(20%), 可见降水预测难  
度之大.

表 2 预测检验(回溯阶  $p=4$ )

年份	温度场				高度场				降水场			
	RMSE	AR	IP	$\gamma_T$	RMSE	AR	IP	$\gamma_H$	RMSE	AR	IP	$\gamma_R$
1986	1.01	0.26	63	82	1.30	0.37	60	95	0.23	0.70	76	75
1987	0.69	0.68	83	89	0.49	0.74	74	99	0.34	0.17	54	59
1988	0.85	0.39	58	75	1.53	0.15	43	95	0.47	0.10	52	63
1989	1.09	0.24	51	70	2.46	0.67	32	58	0.53	0.39	43	68
1990	0.72	0.66	70	88	1.35	0.18	63	88	0.50	0.74	39	51
1991	1.06	0.40	46	75	0.89	0.52	74	99	0.36	0.10	49	54
1992	0.85	0.62	72	85	1.74	0.50	64	81	0.48	0.42	52	55
平均	0.85	0.45	63	81	1.39	0.45	60	88	0.42	0.38	52	63

注:  $RMSE$ (单位: 温度:  $^{\circ}C$ , 高度:  $dagpm$ , 降水: %),  $AR$  距平相关系数,  $IP$  距平同号率(%),  $\gamma_T, \gamma_H, \gamma_R$  为绝对值相对误差覆盖率  
(取  $I_{TC}=5\%; I_{HC}=3\%; I_{RC}=20\%$ )

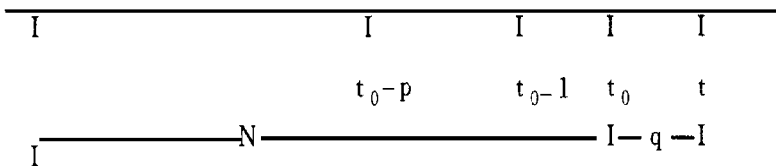


图1 预测时效  $q$ 、回溯阶  $p$  和样本集  $N$  示意图

为了察看回溯阶  $p$  对预报效果的影响, 计算  $p=3, 4, \dots, 9$  七种情况, 表 3 给出了  
1986~1992 年的平均距平相关系数和平均距平同号率, 由表可见, 尽管  $AR$  和  $IP$  随着回

溯阶  $p$  不同有着变化, 但  $AR$  变化在 0.29 至 0.47 之间,  $IP$  变化在 46 至 72 间. 其中以高度的评分最好, 七种回溯阶的  $AR$  平均为 0.43,  $IP$  平均为 63. 这是与通常的数值模式预报结果一致的, 即高度场一般报的比较好. 降水与气温的  $AR$  平均相差不大, 但  $IP$  相差较大, 一般来说降水的距平同号率很难达到高值, 这也与通常的预报经验相符. 从表 3 中还可以看到回溯阶以  $p = 4, 5, 6$  的预报效果最好.

表 3 不同回溯阶  $p$  的预测平均评分

		3	4	5	6	7	8	9	平均
气温	$AR$	0.29	0.45	0.43	0.32	0.32	0.35	0.35	0.36
	$IP$	59	63	62	51	56	54	46	56
高度	$AR$	0.47	0.45	0.43	0.43	0.46	0.30	0.45	0.43
	$IP$	62	60	72	60	65	59	58	63
降水	$AR$	0.31	0.38	0.40	0.47	0.29	0.37	0.46	0.39
	$IP$	49	52	48	45	53	53	42	48
平均	$AR$	0.36	0.43	0.42	0.41	0.36	0.34	0.42	0.39
	$IP$	57	58	61	52	58	55	49	56

由于目前国内外尚无报这样长的降水、温度和高度的场预报, 所以与工作基础颇强的月场预报相比, 看看本模式的预报能力. 王绍武<sup>[8]</sup>统计了国外 80 年代至 90 年代所作的 300 多个月预报试验, 500 hPa 月平均高度预报的距平相关系数  $AR_H$  在 0.35~0.40 之间, 小于本模式不同回溯阶时的平均值 0.43(表 2). 陈桂英、赵振国<sup>[9]</sup>对于 1971~1995 年的全国汛期降水业务预报(季节预报、提前两个月作预报)作检验, 平均  $AR_R = 0.03$ , 有的年份可高达 0.45. 这 25 年中共 300 个月的月温度预报的  $AR_T = 0.03$ , 有月份可高达 0.76. 由于我们用自忆模式所作回报(hindcast)的时效最短为 12 个月, 最长为 84 个月, 达

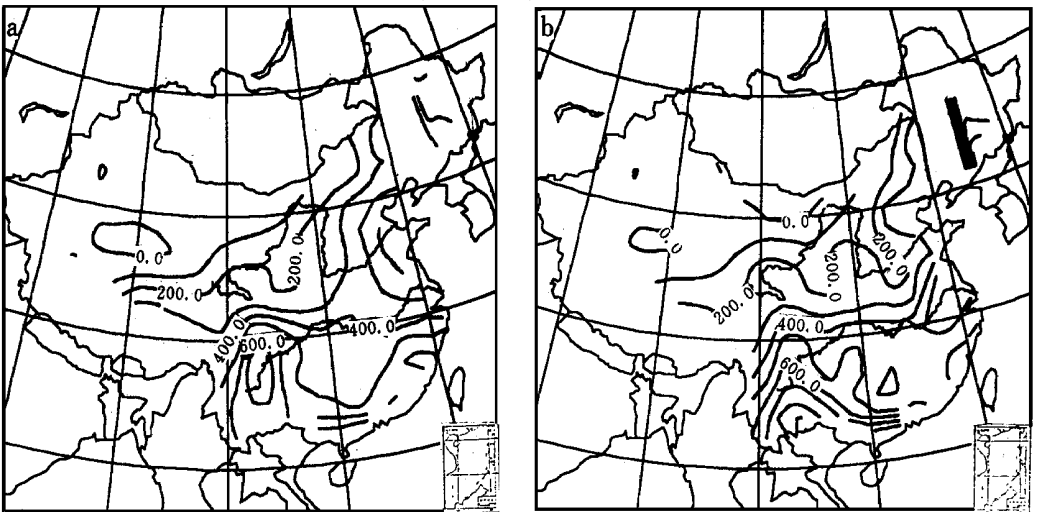


图 2 1986 年 6~8 月全国降水预测(a)和实况(b)( $p = 4$ )(单位: mm)

到的预报水平显然是很高的。由于所用的模式方程是简化的, 考虑的物理因素也仅涉及大气, 该模式改进的可能余地很大, 足见本模式有很大预报潜力, 大有开发的前景。

为了给出直观的图象, 我们绘制了回溯阶  $p=4$  时的 1986 年 6~8 月降水预测和实况图(图 2)和 1992 年 6~8 月平均气温预测和实况(图 3), 预报与实况符合得很好。

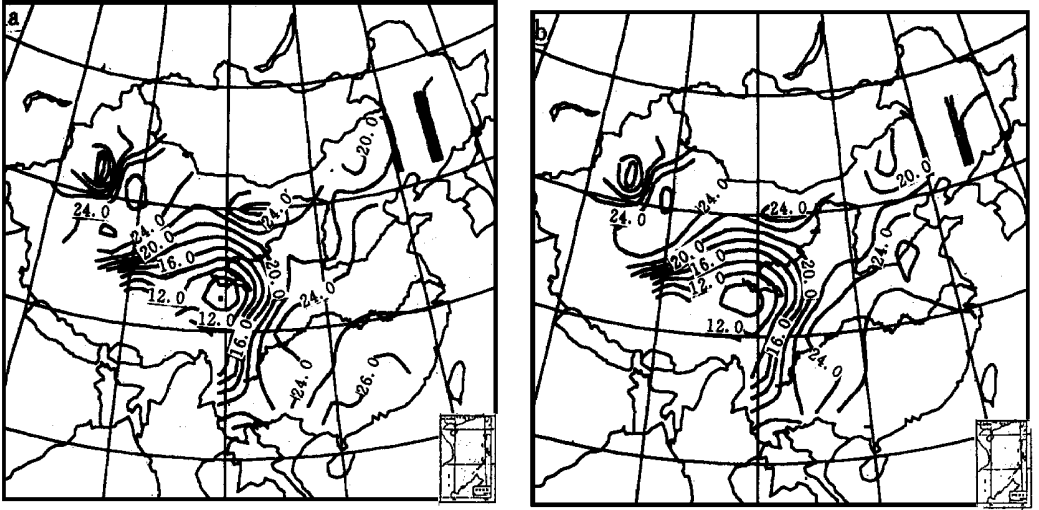


图 3 1992 年 6~8 月全国平均气温预测(a)和实况(b)( $p=4$ )(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

## 5 结论与讨论

计算结果表明, 用自忆模式制作区域气候预测是可行的, 且可达到较高的准确率。由于自忆模式不同于目前流行的气候模式, 模式设计成功显示了一种新的气候预测途径。目前比较传统的观点是运用全球气候模式获得网格产品, 再用统计方法内插到局地, 或者嵌套一个有限区细网格模式以得到局地气候预测, 而本文的观点认为, 运用长时间区域气候观测序列, 建立以动力-热力学方程为核心的自忆模式, 能达到殊途同归的目的, 且其预测效果同样可达到当前方法相当甚至更高的水平。从本文所得结果来看, 自忆模式有它独到的长处, 是一种切实可行的气候预测的途径。任何地区都可独立运转这类模式。

在设计和计算中虽然对方程作了简化, 但仍然发现, 气候资料短缺是妨碍气候预测水平提高的主要原因之一。在本自忆模式中, 云量占有重要地位, 可是由于缺乏长时间的系统性资料不得不略去它。因此全球性的气候资料网的建立是十分必需的。

从表 2 和表 3 来看, 虽然多年预测的水平相对是稳定的, 但预测的准确率年与年之间的差别很大, 且不随预测时效增长而明显下降, 这虽与目前不少动力模式与统计模式的预测实践结果相一致, 但其原因尚不清楚, 有待今后进一步研究。也可能表明了气候可预测性与天气可预报性在观念上的区别, 这种区别至今尚未为人所认识。

## 参 考 文 献

- 1 Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited-area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 1990, 3: 941~ 963.
- 2 Storch V H , et al. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in winter time. *J. Climate*, 1993, 6: 1161~ 1171.
- 3 曹鸿兴, 封国林, 魏凤英. 区域气候预测的自忆模式. *气象学报*, 1999, 57(4): 461~ 472.
- 4 刘得贵, 费景高, 于泳江, 等. FORTRAN 算法汇编, 第一分册. 合肥: 国防工业出版社, 1980. 54~ 68.
- 5 汤懋苍, 钟强, 吴士杰. 一个长期降水预报的热力学模式. *气象学报*, 1982, 40(1): 49~ 58.
- 6 Saltzman B, Moritz R E. A time-dependent climatic feedback system involving sea-ice extent, ocean temperature and CO<sub>2</sub>. *Tellus*, 1980, 32: 93~ 118.
- 7 魏凤英, 曹鸿兴. 我国月降水和气温网格点资料的处理和分析. *气象*, 1994, 20(10): 26~ 30.
- 8 王绍武. 短期气候预测研究的历史及现状. 见: 王绍武主编. *气候预测研究*. 北京: 气象出版社, 1996. 1~ 7.
- 9 陈桂英, 赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 178~ 185.

## PREDICTING REGIONAL CLIMATE WITH SELF-MEMORIAL MODEL AND ITS RESULTS

Feng Guolin

(Department of Physics, Yangzhou University, Yangzhou 225002)

Cao Hongxing    Wei Fengying

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

A self-memorial model for regional climate prediction is derived on the basis of the self-memorization principle of atmosphere. It is composed of difference-integration equations with variables of surface temperature, precipitation and height at 500 hPa. The hindcasts of the temperature and precipitation in summer for the lead time from 1951 to 1992 are made. It is shown that the prediction skill of the model is quite well, nevertheless, a new approach of the climate prediction is demonstrated.

**Key words:** Regional climate Prediction model Memorization Numerical calculation