

# 短期气候变化的数值预报\*

邢如楠

(中国科学院大气物理研究所)

短期(1个月—1年)气候变化的预报对经济建设的重要性是无疑的。现在由于计算机的发展、计算技术的进步以及我们关于气候和气候变化物理基础知识的增加,已有可能用建立在控制气候活动的物理定律基础上的数学模式,加上一定的边界条件来决定气候系统的活动和预报未来的气候状态。七十年代以来愈来愈多的气象学家为了达到用模式方法预报短期气候变化这一目标做了探索性的努力,并取得了显著的进展。在八十年代用动力学方法提高月预报和季节预报的水平是各国气象学家所共同努力的目标。

预报短期气候变化的动力学模式有两类:

(1) 大气环流模式(GCM<sub>1</sub>), 这类模式是最完全的,包含着复杂的物理过程。它不但可以模拟现在的全球气候状态和季节变化,而且一些著名的 GCM<sub>1</sub> 也可以做地面气压场和高空高度场的一个月预报<sup>[1-4]</sup>。但是这类模式要求有高级的电子计算机并要花费非常大量的计算时间,这在一定程度上限制了 GCM<sub>1</sub> 的应用。

(2) 由于人们对气候异常比气候平均状态本身更感兴趣,所以可将气候平均场从模式中除去,只保留距平部分,这样的模式称为距平模式<sup>[6-14]</sup>。距平模式的特点是模式比 GCM<sub>1</sub> 简单得多,节省计算时间,但是物理过程要高度参数化地给出或是用经验方法得到,这就不可避免地使计算结果在很大程度上依赖于参数化的精确程度。

作者等<sup>[13]</sup> 建立的三层滤波模式也是距平模式。本文将给出用此模式模拟时间尺度为 1—4 个月的短期气候变化的结果。试验结果表明,平均而言,在亚洲、美洲和欧洲三个大陆地区,地面温度的预报能力超过了惯性预报。同时我们也注意到高度场的预报还需进一步改进。

## 1. 模 式

我们知道,对于天气尺度运动,大气的可预报性一般不超过两周,若预报结果是对时间平均的,则可预报性可以延长至一个月或一个季度<sup>[16]</sup>。此外,在气候系统中气候的变化相对于天气尺度的 Rossby 波是缓慢的,因此可将 Rossby 波作为干扰长期天气过程的噪音从模式中滤去。基于上述的基本思想,本文中的模式为一个滤波的海气耦合模式,在垂直方向大气取三层,海洋仅取表面混合层。在涡度方程和热力学方程中去掉气候平均场部分,只保留距平部分,用从涡度方程中去掉时间局地变化项的方法滤去天气尺度的 Rossby 波,但在地面的热力学方程中仍保留着时间局地变化项。滤波后的涡度方程从物理上意味着 Rossby 波频散之后,位势高度场和地面加热场之间建立了平衡关系,称为适

\* 本文于 1983 年 4 月 9 日收到, 1983 年 8 月 13 日收到修改稿。

应方程。

模式在<sup>[13]</sup>一文中已有介绍, 这里为了讨论方便, 给出两个主要方程。一个是预报高度距平的适应方程, 另一个是地面温度距平预报方程。滤波后的非绝热涡度方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\phi'}{dt} + \bar{\beta}_y \frac{\partial\phi'}{\partial x} - \bar{\beta}_x \frac{\partial\phi'}{\partial y} = & -\frac{f^2}{\tau_r \bar{\sigma}_p} \frac{\partial^2\phi'}{\partial p^2} + \frac{f^2}{\bar{\sigma}_p} \frac{\partial^2}{\partial p^2} (K_p + K_r) \frac{\partial^2\phi'}{\partial p^2} \\ & - \frac{f^2}{\bar{\sigma}_p} \frac{\partial}{\partial p} \left[ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial\phi'}{\partial p} \right) - \left( \frac{\partial\bar{u}}{\partial p} \frac{\partial\phi'}{\partial x} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial p} \frac{\partial\phi'}{\partial y} \right) \right] - fR \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\bar{T}^*}{p\bar{\sigma}_p} \right) (\Delta\phi'_0) \end{aligned} \quad (1)$$

式中算子  $\frac{d}{dt} = (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} + (\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y}$ ,  $\bar{\beta}_x = \frac{\partial(\bar{\zeta} + f)}{\partial x}$ ,  $\bar{\beta}_y = \frac{\partial(\bar{\zeta} + f)}{\partial y}$ ,  $\bar{\sigma}_p$  是静力稳定度,  $\tau_r$  为牛顿辐射冷却特征时间,  $K_p = \rho^2 g^2 K_t$ ,  $K_t$  为对感热的湍流导热系数,  $K_r$  为考虑长波辐射后引进的一个参量。

将(1)式写到高空三个层次上, 在一定的边界条件下可得到三个适应方程。差分形式的适应方程的右端包含有地面温度距平  $T'_s$  的项。因此为计算高度距平, 必须首先计算出

表 1 计算的地面温度距平与实况间相同符号的百分数  $\gamma$

预 报	个 例	$\gamma_{A_s}$		$\gamma_A$		$\gamma_B$	
		预	惯	预	惯	预	惯
一个月	1978.1—2	0.76	0.74	0.74	0.73	0.59	0.45
	1978.2—3	0.83	0.74	0.66	0.63	0.80	0.65
	1978.4—5	0.62	0.50	0.50	0.48	0.41	0.50
	1978.6—7	0.78	0.81	0.73	0.58	0.56	0.65
	1978.7—8	0.55	0.59	0.53	0.53	0.76	0.76
	1978.8—9	0.49	0.37	0.69	0.51	0.62	0.74
	1977.1—2	0.75	0.71	0.53	0.50	0.63	0.59
	1977.2—3	0.50	0.38	0.58	0.61	0.83	0.76
	1977.5—6	0.74	0.72	0.51	0.51	0.65	0.71
	1976.1—2	0.51	0.51	0.49	0.51	0.46	0.43
	平 均	0.54	0.48	0.63	0.53	0.54	0.41
二个月	1978.1—3	0.76	0.78	0.90	0.81	0.96	0.91
	1978.6—8	0.65	0.60	0.73	0.62	0.79	0.61
	1978.8—10	0.63	0.49	0.70	0.51	0.61	0.31
	1977.1—3	0.21	0.28	0.71	0.50	0.64	0.56
	1977.2—4	0.24	0.33	0.59	0.64	0.45	0.48
	1977.5—7	0.45	0.42	0.55	0.53	0.53	0.73
	平 均	0.49	0.48	0.70	0.60	0.66	0.60
三个月	1978.1—4	0.69	0.63	0.72	0.53	0.70	0.46
	1978.8—11	0.70	0.51	0.83	0.62	0.75	0.19
	1977.1—4	0.45	0.51	0.60	0.65	0.41	0.29
	1977.2—5	0.43	0.36	0.36	0.47	0.46	0.54
	1977.5—8	0.41	0.41	0.65	0.39	0.38	0.58
	平 均	0.54	0.48	0.63	0.53	0.54	0.41
四个月	1978.1—5	0.35	0.33	0.64	0.49	0.36	0.36
	1977.1—5	0.51	0.32	0.55	0.44	0.41	0.36
	平 均	0.43	0.33	0.56	0.47	0.39	0.36

表 2 计算的 500 mb 高度距平与实况间相同符号的百分数  $\gamma$ 

预 报	个 例	$\gamma_{A_s}$		$\gamma_A$		$\gamma_E$	
		预	惯	预	惯	预	惯
一个月	1978.1—2	0.67	0.59	0.54	0.46	0.89	0.85
	1978.2—3	0.49	0.49	0.37	0.31	0.86	0.65
	1978.4—5	0.60	0.60	0.48	0.48	0.44	0.71
	1978.6—7	0.64	0.81	0.61	0.61	0.54	0.61
	1978.7—8	0.58	0.63	0.56	0.61	0.36	0.60
	1978.8—9	0.51	0.63	0.54	0.50	0.53	0.70
	1977.1—2	0.40	0.35	0.60	0.61	0.43	0.69
	1977.2—3	0.24	0.65	0.56	0.39	0.78	0.74
	1977.5—6	0.61	0.67	0.62	0.58	0.46	0.39
	1976.1—2	0.58	0.39	0.33	0.61	0.60	0.60
平 均	0.53	0.58	0.52	0.52	0.60	0.65	
二个月	1978.1—3	0.60	0.70	0.67	0.54	0.67	0.73
	1978.6—8	0.60	0.60	0.57	0.57	0.60	0.63
	1978.8—10	0.68	0.52	0.66	0.41	0.54	0.53
	1977.1—3	0.60	0.61	0.65	0.35	0.58	0.59
	1977.2—4	0.37	0.38	0.75	0.61	0.60	0.69
	1977.5—7	0.51	0.67	0.66	0.60	0.48	0.63
	平 均	0.56	0.58	0.66	0.51	0.58	0.63
三个月	1978.1—4	0.47	0.56	0.71	0.58	0.40	0.33
	1978.8—11	0.81	0.51	0.82	0.62	0.75	0.18
	1977.1—4	0.55	0.71	0.69	0.42	0.54	0.50
	1977.2—5	0.41	0.33	0.38	0.49	0.74	0.66
	1977.5—8	0.36	0.22	0.64	0.41	0.48	0.60
平 均	0.52	0.47	0.65	0.50	0.58	0.45	

$T'_s$ 。地面温度距平的预报方程如下:

$$T'_s{}^{t+\Delta t}(0) = DT'_s{}^t(0) - D\sqrt{K_s}\delta t \frac{\rho c_p K_T}{\rho_s c_{ps} K_s} (\Delta z H_2) + D\sqrt{K_s}\delta t \frac{\rho c_p K_T}{\rho_s c_{ps} K_s} \frac{T'_3}{\Delta Z} - DK_s \delta t \tilde{H}_1 - D\sqrt{K_s}\delta t \frac{s_0 l_b}{w_0 \rho_s c_{ps} K_s} \zeta'_{0s} \quad (2)$$

式中  $K_s$  在海洋为垂直湍流交换系数,在陆地为热传导系数,  $\tilde{H}_1$  和  $H_2$  分别为海洋表层和大气中近地面层的温度平流,  $T'_3$  为接近对流层中层的温度距平,  $\delta t$  为时间步长, 本文取  $\delta t=1$  个月, 其余符号意义见[13]。(2)式右端五项依次分别表示:

- [A]——上个月的地面温度距平即惯性项。
- [B]——近地面层的温度平流对感热的输送引起地面温度的变化。
- [C]——与对流层中下层垂直温度梯度有关的海气交界面上的扰动热通量。
- [D]——由表层洋流引起的温度平流对海表温度变化的贡献。
- [E]——由云量调节的异常辐射平衡(假定云量参数化形式是与由摩擦层顶的涡度  $\zeta'_{0s}$  大小决定的垂直运动成正比)引起地面温度的变化。

## 2. 结果与讨论

用三层滤波距平模式完成了 1—4 个月的短期气候变化的数值模拟。全部试验结果见表 1 和表 2, 表中下标  $A_s$ 、 $A$  和  $B$  分别表示亚洲、美洲和欧洲大陆地区 (图 1)。从表

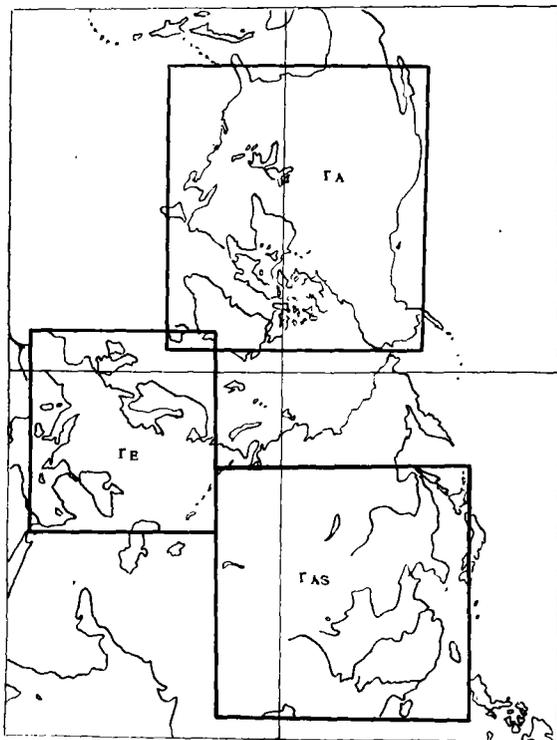


图 1 计算预报与实况相同符号百分数  $\gamma$  的三个区域

1 中可以看到, 平均而言, 对地面温度距平 1—4 个月的预报都超过了惯性预报, 特别是在美洲地区, 例如 1977 年 5 月的四个月预报  $\gamma_A$  为 0.55, 惯性预报只有 0.44, 这个个例中其它地区的距平分布型与实况基本相近 (见图 2)。对比表 1 和表 2, 还可以看到地面温度的预报比高度预报效果要好。

图 3—5 给出 1978 年 2—4 月美洲地区地面温度变化的计算结果。图中左下角的 [A]、[B] 和 [C] 等分别表示 (2) 式右端的 [A]、[B] 和 [C] 项对计算的地面温度的贡献, 这里每张图只选了二项量级较大的项。从图中看到, 1978 年 2 月 (图 3) 加拿大北部的强正距平中心的形成和 1978 年 4 月 (图 5) 格陵兰地区由负距平转成正距平都主要是 [B] 项的作用, 而 1978 年 3 月 (图 4), 从格陵兰直到佛罗里

达半岛的大片负距平则主要是 [C] 项的贡献。试验中通过分析 A—E 各项大小我们看到, 引起地面温度异常发生月际变化的物理因子是不同的。

## 3. 结 论

上述试验结果表明, 三层滤波模式可以使可预报性延伸至一个季度以上。但模式仍存在着一些不足之处, 对预报结果有一定的影响。

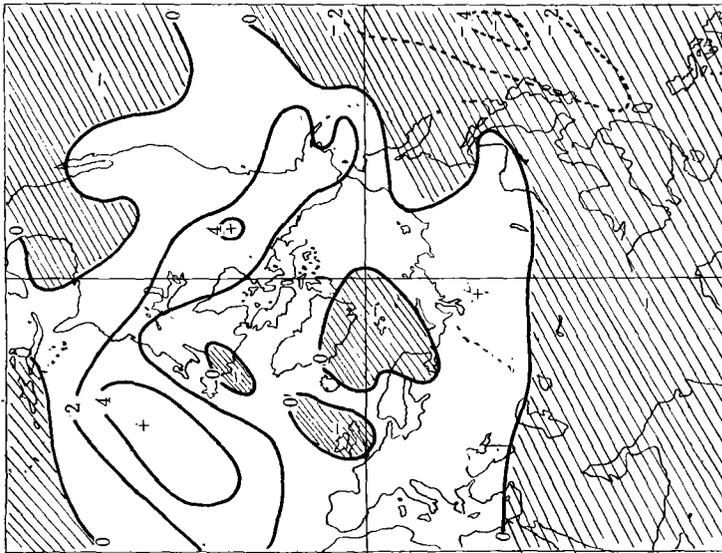
(1) 模式对参数过于敏感, 如 (2) 式中 [A] 项的系数  $D$  的值有时变化 10—20% 就可改变预报结果, 因此参数化的精确程度是很重要的。有些参数化需要改进, 如 [E] 项在计算中都非常小, 可忽略不计, 这表明如何在长期天气过程中考虑云对辐射平衡的调节作用还需要进一步研究。

(2) 原始资料的精确度对预报结果有影响。在美洲、亚洲和欧洲大陆上测站记录较全, 因此一般大陆上比缺少记录的海洋上预报得好。

(3) 亚洲地区预报效果比美洲差, 这可能与模式中没有考虑地形有关, 地形的影响有待于试验。



b 实况



a 四个月预报

图 2 1977 年 5 月地面温度距平场

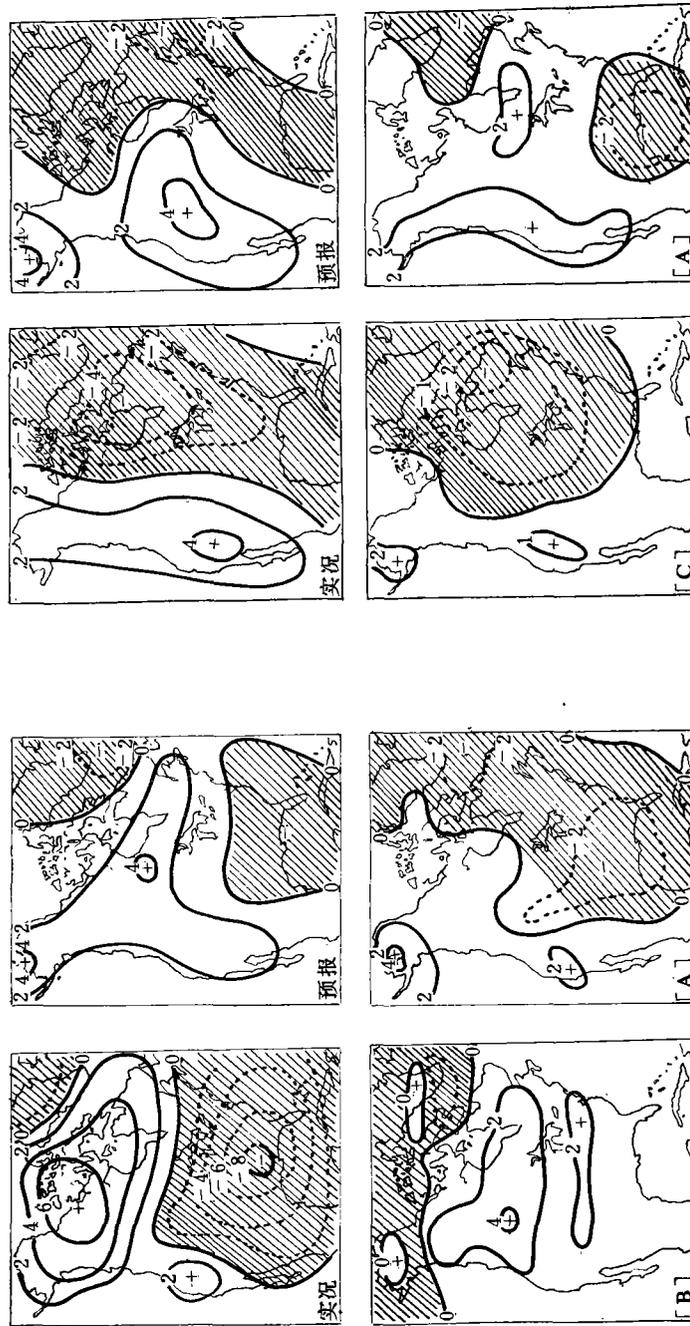


图 4 1978年3月地面温度距平(2个月预报)

图 3 1978年2月地面温度距平(一个月预报)

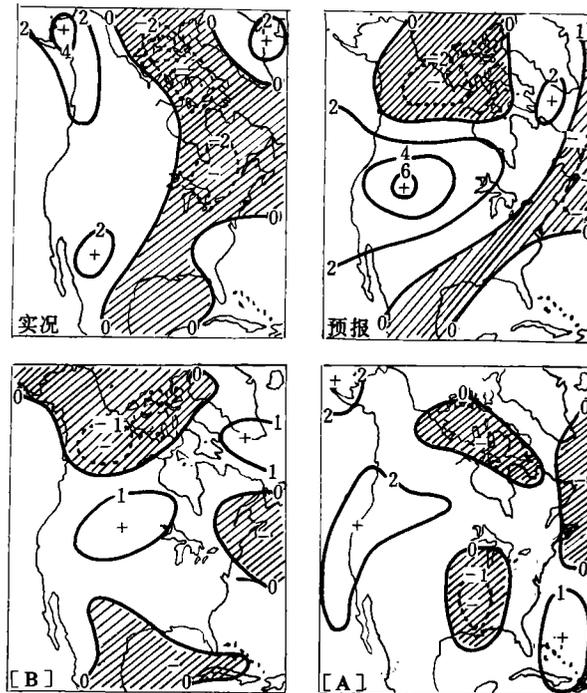


图 5 1978 年 4 月地面温度距平(3 个月预报)

(4) 改进计算方法和增加模式的垂直分辨率<sup>[13]</sup>都将会改进预报结果, 包括改进高度的预报。

### 参 考 文 献

- [1] Spar, J., R. Atlas and E. Kuo, Monthly mean forecast experiments with the GISS model, *Mon. Wea. Rev.*, **104**, 1215—1241, 1976.
- [2] Gilchrist, A., Long-range forecasting in the meteorological office, Paper presented at ECMWF Seminar, 1981.
- [3] Miyakoda, K. and J. P. Chao, Essay on dynamical long-range forecasts of atmospheric circulation, *Jour. Meteo. Soc., Japan*, **60**, 1, 292—308, 1982.
- [4] Caverly, R., K. Miyakoda and L. Umscheid, Three cases of one-month GCM forecasts, Paper presented at proceeding of the Sixth Annual Climate Diagnostic Workshop, October, 14—16, 1981.
- [5] Adem, J., On the physical basis for the numerical prediction of monthly and seasonal temperatures in the troposphere-ocean-continent system, *Mon. Wea. Rev.*, **92**, 91—104, 1964.
- [6] Musajelian, Sh. A., V. P. Sadokov, A. D. Tavadian and D. B. Shteinbok, 1982, Some problems of long-range prediction of temperature anomalies of monthly and seasonal scales, Paper presented at WMO/ICSU Study Conference on physical basis for climate prediction on seasonal, annual and decadal time scales, September, 13—17, 1982, Leningrad, USSR.
- [7] Opsteegh, J. D. and H. M. Van Den Dool, Seasonal differences in the stationary response of a linearized primitive equation model: prospects for long-range weather forecasting?, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2169—2185, 1980.
- [8] Van Den Dool, H. M., 1982, What do observations tell us about long-range predictability?, Paper presented at the KNMI Workshop, De Bilt, March, 1—3, 1981.
- [9] Hddvesma, R., 1982, Preliminary results of a cheap model to forecast the ocean surface temperature anomalies, Paper presented at the KNMI Workshop, De Bilt, March, 1—3, 1981.
- [10] 长期数值天气预报小组, 一种长期数值天气预报方法的物理基础, *中国科学*, 1977, 2, 162—172.
- [11] 长期数值天气预报小组, 长期数值天气预报的滤波方法, *中国科学*, 1979, 1, 75—84.
- [12] Chao Jinping, Guo Yufu and Xin Runan, A theory and method of long-range numerical weather forecasting, *Jour. Meteo. Soc., Japan*, **60**, 1, 282—291, 1982.
- [13] 邢如楠、郭裕福、巢纪平, 长期数值预报的三层滤波模式, *中国科学 B 辑*, 1982, 2, 186—192.
- [14] 邢如楠、巢纪平, 用三层滤波模式做季节预报的试验, *科学通报*, 1982, 12, 738—740.
- [15] Shakla, J., Predictability of monthly means, Paper presented at ECMWF Seminar, 1981.