

海-气耦合距平滤波模式的月、季数值预报*

巢纪平 王晓晔 陈英仪 王立治

(国家海洋环境预报研究中心)

提 要

本文用海-气耦合三层距平滤波模式 (AFM) 作了 1976—1977 以及 1982—1983 两个 El Nino 事件年冬季八个月预报个例实验。其结果表明, 该模式成功地预报了大尺度月地表温度距平场, 预报与实况的相关系数基本上都超过了惯性预报。与距平大气环流模式 (AGCM) 相比, 两者的结果相差不大, 但 AFM 可节省近一百倍的计算时间。与此同时, 我们还作了季节预报试验, 即提前三个月作月预报, 完成了 1977 年 2 月、3 月和 1983 年 2 月、3 月四个试验例子。结果表明, 用该模式作大尺度环流的季节异常预报的潜力是存在的。最后, 结合本文的结果, 我们把提出距平滤波模式以来近十年的工作作了小结, 对模式的预报能力作了评价。

一、引 言

巢纪平等^[1-3]首先提出可避免预报不容易报好的气候场, 而只预报距平场, 同时把瞬变 Rossby 波作为“高频噪音”滤掉, 从而发展了一个海洋、陆地和大气耦合的长期预报的距平滤波模式 (简称 AFM)。并且, 曾在大气取一层的情况下, 用该模式做了月地表温度距平场和 500 hPa 上距平位势高度场的大量预报试验例子^[4,5]。结果表明, 该模式具有一定的预报潜力, 计算时间也较短。在没有“巨型”计算机的情况下, 有相当高的实用价值。

然而, 由于大气只考虑一层, 在计算地表温度距平时, 大气中各种动力学量就不得不用 500 hPa 上的值, 从而带来了一定误差, 而且, 这样也限制了大气斜压性的作用以及高层和低层间的相互调整。改进的途径之一是增加模式的层次, 使模式成为对大气的三层距平滤波模式。

二、模 式

与以前所用的模式稍有不同, 在涡度距平方程中, 考虑到应有雷诺应力项出现, 故采用混合长度理论把这项表示成水平的湍流交换, 因此有:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta \phi') + \frac{1}{f} J(\bar{\phi} + \phi', \Delta \phi') + J\left(\phi', f + \frac{1}{f} \Delta \bar{\phi}\right) = f^2 \frac{\partial \omega'}{\partial P} + K' \nabla^4 \phi' \quad (1)$$

相应的热力学第一定律为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi'}{\partial P} \right) + \frac{1}{f} \left[J\left(\bar{\phi} + \phi', \frac{\partial \phi}{\partial P}\right) - J\left(\phi', \frac{R}{P} \bar{T}\right) \right] - \frac{\partial}{\partial P} (k + k_r) \frac{\partial^2 \phi'}{\partial P^2}$$

* 本文于 1985 年 5 月 6 日收到, 1985 年 8 月 30 日收到修改稿。

$$+\frac{1}{\tau_r} \frac{\partial \phi'}{\partial P} = -\tilde{\sigma}_r \omega' - \frac{R \varepsilon_0}{P \rho C_p} \quad (2)$$

上式最后一项表示凝结热交换,其参数化形式^[6]也作了改进,表示为:

$$\frac{\varepsilon_0}{\rho C_p} = -\frac{L}{C_p} H_s D_s \gamma \left(\frac{\partial \ln \bar{e}_s}{\partial T} \right)_0 \left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right) T'_s \quad (3)$$

其中

$$D_s = (\text{div } \mathbf{V})_s$$

从方程(1)和(2)中消去 ω' , 并取 Rayleigh 摩擦, 即

$$K' \nabla^4 \phi' \approx -K' \alpha \nabla^2 \phi' = -K \nabla^2 \phi' \quad (4)$$

则可以得到非绝热的涡度距平方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\Delta + \frac{f^2 \partial^2}{\tilde{\sigma}_r \partial P^2} \right) \phi' + \frac{1}{f} J(\bar{\phi} + \phi', \Delta \phi') + J\left(\phi', f + \frac{1}{f} \Delta \bar{\phi}\right) \\ + K \Delta \phi' - \delta_1 K^* T'_s = \frac{f^2}{\tilde{\sigma}_r} \frac{\partial G}{\partial P} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$G = -\frac{1}{f} \left[J(\bar{\phi} + \phi', \frac{\partial \phi'}{\partial P}) - J\left(\phi', \frac{R \bar{T}}{P}\right) \right] + \frac{\partial}{\partial P} (k + k_r) \frac{\partial^2 \phi'}{\partial P^2} - \frac{1}{\tau_r} \frac{\partial \phi'}{\partial P} \quad (6)$$

$$K^* = f R H_s D_s \frac{L}{C_p} \gamma \left(\frac{\partial \ln \bar{e}_s}{\partial T} \right)_0 \left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right)_0 \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{1}{P \tilde{\sigma}_r} \right) \quad (7)$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & D_s < 0 \\ 0 & \text{当 } D_s > 0 \end{cases} \quad (8)$$

考虑到上下边界 $\omega' = 0$, 且无凝结, 则有边界条件:

$$P = P_s, \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi'}{\partial P} \right) - G = 0 \quad (9)$$

$$P \rightarrow 0, \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi'}{\partial P} \right) - G = 0 \quad (10)$$

$$P = P_s, \frac{\partial \phi'}{\partial P} = -\frac{R}{P_s} T'_s \quad (11)$$

$$P \rightarrow 0, \frac{\partial \phi'}{\partial P} = 0 \quad (12)$$

对于地球表面温度预报方程, 我们仍取文献[6]或[2]中的形式, 即:

$$\begin{aligned} z=0, \frac{\partial T'_{s,i,j}}{\partial t} + \left(\frac{\delta}{D_0} + \frac{1}{D_s} \right) \frac{K_s}{h} T'_{s,i,j} + K_s H_{1,i,j} \\ + \frac{K \tau_r}{D} \frac{K_s}{h} H'_{2,i,j} = -\frac{s_0 l_b}{W_0 \rho_s C_p K_s} (\zeta'_{0s})_{i,j} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$D_0 = \rho_s C_p K_s / \left(L \rho K \tau_r \gamma \frac{\partial \ln \bar{e}_s}{\partial T} \right)_0 \left(\frac{\partial q_s}{\partial T} \right)_0 \quad (14)$$

$$D_s = \rho_s C_p K_s \sqrt{K \tau_r} / \rho C_p K_T \quad (15)$$

三、计算方法

方程(13)可以写成差分形式:

$$T'_{i,j,t+\delta t} = \left[1 - \frac{K_s \delta t}{h} \left(\frac{\delta}{D_o} + \frac{1}{D_s} \right) \right] T'_{i,j,t} + \delta t \left[K_s H_{1i,j} + \frac{K_{\tau_s}}{D_s h} H_{2i,j} + \frac{s_0 l_b b}{W_0 \rho_s C_p K_s} \Delta \phi'_{1i,j} \right] \quad (16)$$

以上一个月的地表温度距平及大气位势高度场距平为初值,便可得到预报月的地表温度距平场。

求出预报月的 T'_s 后,代入方程(5),可得到预报月的位势高度距平场。对大气取三层,即 300 hPa, 500 hPa 以及 700 hPa。滤瞬变 Rossby 波的方法是去掉方程(5)的时间偏导数项,变成一个适应方程,用超松弛法求解。

四、月预报实验结果

根据上节的计算方案, δt 取一个月,网格距在水平方向取 540 km。我们计算了 1976—1977 及 1982—1983 年冬季各四个月的逐月预报例子,预报与实况场的相关系数以及预报月与上个月实况场间的相关系数(惯性相关)列于表 1。

表 1 8 个月预报例子的相关系数比较

编号	预报月份	T'_s		ϕ'_{700hPa}		ϕ'_{500hPa}		ϕ'_{300hPa}	
		预报	惯性	预报	惯性	预报	惯性	预报	惯性
1	1976.11→1976.12	0.42	0.39	0.28	-0.15	0.31	-0.10	0.27	-0.17
2	1976.12→1977.1	0.41	0.19	0.48	0.38	0.58	0.01	0.64	0.28
3	1977.1→1977.2	0.56	0.25	0.61	0.47	0.70	0.53	0.66	0.42
4	1977.2→1977.3	0.59	0.31	0.27	-0.14	0.32	-0.12	0.38	0.15
5	1982.11→1982.12	0.60	0.47	0.26	0.20	0.34	0.42	0.16	0.15
6	1982.12→1983.1	0.48	0.56	0.27	0.35	0.23	0.12	0.33	0.38
7	1983.1→1983.2	0.44	0.51	0.17	0.61	0.40	0.58	0.21	0.36
8	1983.2→1983.3	0.62	0.56	0.51	0.44	0.47	0.22	0.53	0.46
平均		0.52	0.41	0.35	0.27	0.42	0.21	0.40	0.25

由表 1 可知,地表温度距平场的预报结果,除了 1983 年 1 月和 1983 年 2 月比惯性预报稍差外,其它例子都超过了惯性预报。高度场有五个例子比惯性预报好,二个例子接近惯性预报的水平,还有一个例子,即 1983 年 1 月报 1983 年 2 月的结果很差。值得注意的是,预报的好坏并不完全取决于环流形势的持续性。如在例 3 和例 8 中,环流的持续性很强(惯性相关很高),预报结果却都高于惯性相关,而在例 7 中,环流的惯性相关也很高,但预报结果却比惯性预报差。另一方面,在例 1 和例 4 中,高度场的月惯性相关是负的,但预报结果却接近中等水平(相关系数在 0.3 左右)。

就平均来说,无论是地表温度还是各层的高度场预报水平都高于惯性预报。而且,也比一层模式的结果好。图 1 和图 2 分别给出 1977 年 3 月地表温度场距平以及 500 hPa 的位势高度距平场的结果。1983 年 3 月 700 hPa 的高度场预报放在图 3 中。上述各图中

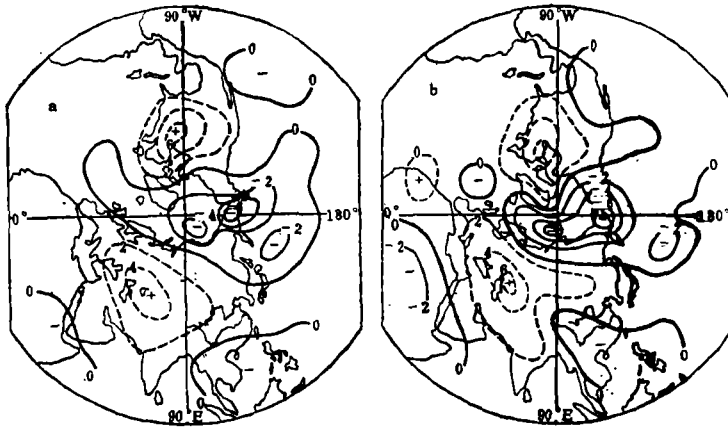


图 1 1977 年 3 月地表温度距平场

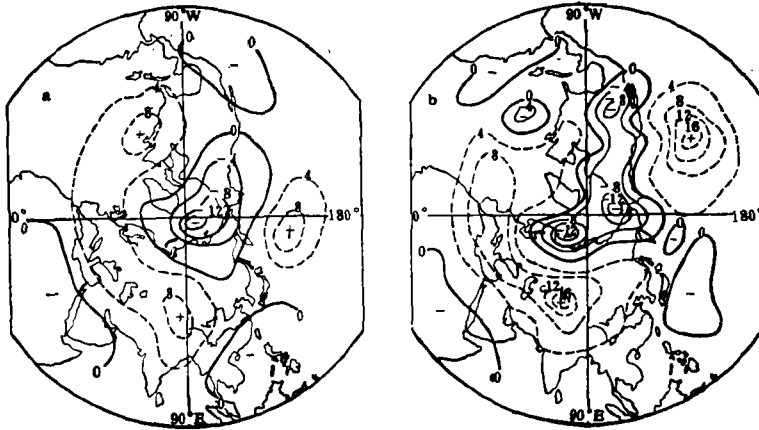


图 2 1977 年 3 月 500 hPa 位势高度距平场

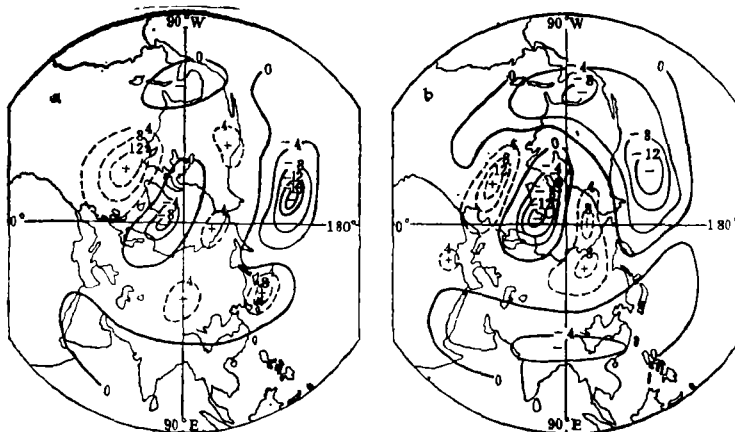


图 3 1983 年 3 月 700 hPa 位势高度距平场

(a)为预报结果,(b)为实况。位势高度距平的单位为 10 m。

五、与大气环流模式的比较

我们仍采用 AFM 的程序预报地表温度距平,保留方程(5)的时间偏导数项(即保留瞬变 Rossby 波),我们称这种方法为距平大气环流模式,简称 AGCM。积分时间步长取 1h,积分一个月后取平均值。我们用这种方法完成了 6 个试验例子,并把 AGCM 与 AFM 两种方法预报的结果列于表 2 中。

由表 2 可见,AGCM 和 AFM 的预报能力是很接近的。在低层(700hPa),AGCM 比 AFM 要略好一些,但所用计算机时大不相同,用 ND-560 机,AGCM 需 180min,而 AFM 只需 2 min。

用 AGCM 作的 1983 年 3 月 700 hPa 位势高度的预报表示在图 4 中。

表 2 AGCM 和 AFM 预报相关系数的比较

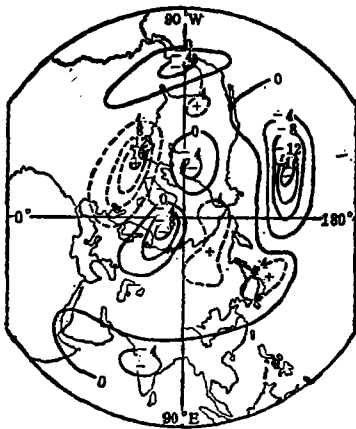


图 4 用 AGCM 预报的 1983 年 3 月 700 hPa 位势高度距平

预报月份	ϕ'					
	700 hPa		500 hPa		300 hPa	
	AGCM	AFM	AGCM	AFM	AGCM	AFM
1976.12→ 1977.1	0.56	0.48	0.54	0.58	0.60	0.64
1977.1→ 1977.2	0.68	0.61	0.67	0.70	0.65	0.66
1977.2→ 1977.3	0.29	0.27	0.35	0.32	0.38	0.38
1982.12→ 1983.1	0.24	0.27	0.29	0.23	0.39	0.33
1983.1→ 1983.2	0.20	0.17	0.35	0.40	0.28	0.21
1983.2→ 1983.3	0.57	0.51	0.50	0.47	0.51	0.53
平 均	0.42	0.39	0.45	0.45	0.47	0.46

六、季节预报的潜力

初值取三个月前的地表温度距平和大气位势高度距平值,我们作了 1977 年 2 月、3 月和 1983 年 2 月、3 月四个预报例子。 δt 可取一个月算三步或取三个月算一步,结果表明后者不比前者差。由于用前一方法调整参数较难,所以我们采用后者。季预报结果及惯性相关的相关系数列于表 3。在这四个例子中,有三个的相关系数不仅高于惯性预报,而且达到了中等水平(大于 0.3)。只有 1983 年 2 月的位势高度预报失败。平均而言,比惯性相关高。尽管我们的例子不多,预报的水平也尚未达到稳定的程度,但看来用该模式作大尺度环流的季节异常预报的潜力是存在的。图 5 和图 6 分别为 1977 年 3 月地表温度距平和 500 hPa 位势高度距平的季节预报结果。

试验结果还表明,位势高度场的预报对初值的依赖极小。换言之,位势高度场距平主要取决于外源(在此为地表温度距平)的形式,或者说是大气环流场对加热场的适应。但是,地表温度场预报的好坏,却与初始场有关。这在物理上很容易理解,因为地表温度(特

表 3 季预报试验的相关系数

预报月份	T_s'		ϕ'					
			700 hPa		500 hPa		300 hPa	
	预报	惯性	预报	惯性	预报	惯性	预报	惯性
1976.11→1977.2	0.46	0.39	0.58	-0.17	0.74	-0.13	0.76	-0.03
1976.12→1977.3	0.36	0.02	0.16	-0.10	0.29	-0.05	0.34	0.07
1982.11→1983.2	0.16	0.16	-0.03	0.18	-0.09	0.06	-0.09	-0.27
1982.12→1983.3	0.45	0.44	0.36	0.31	0.40	0.39	0.48	0.41
平均	0.36	0.25	0.28	0.06	0.34	0.07	0.38	0.05

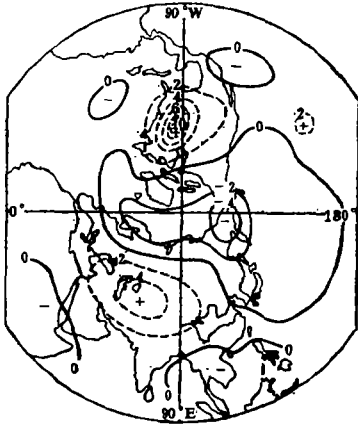


图 5 1977年3月地表温度的季预报结果

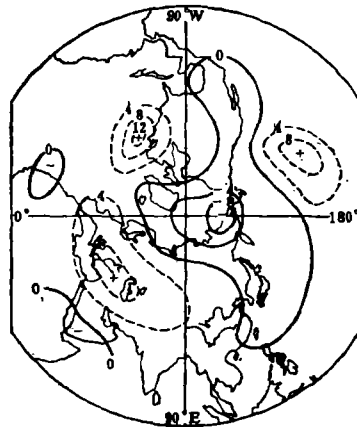


图 6 1977年3月500 hPa位势高度的季预报结果

别是海温)具有较大的热惯性,而大气运动自身的记忆却很短。当时间尺度足够长后,初始场的作用就不重要了,主要依赖大气内部各种过程的调整对外源的适应。

七、对模式和结果的讨论

自1977年^[1]提出制作长期数值预报距平滤波模式的概念和物理基础及1979年^[2]发表了第一个预报试验例子以来,作为研究长期数值预报的一种途径,已在国内外同行中引起了不同的反响和评论^[7-10]。事物总是一分为二的,任何一个长期预报方法也不例外。结合本文的结果,我们对该模式作一小结。

距平模式的优点是显然的,它避开了至今连数值模拟都尚未逼真的气候场本身的预报,而把实际观测到的月平均气候场作为已知量输入到距平模式中去,这样我们就可以不管气候场如何形成的问题。当然,气候场本身对距平场的发展起一定作用。在作长期预报方面,AGCM比一般的GCM具有优越性,这一点似乎尚未有人提出过怀疑,尽管人们似乎更偏爱用GCM来作长期预报。

事实上,Navarro和Miyakoda^[12]曾作过一个比较试验,他们先给定一个参考性的大气环流距平场,当他们用谱的GCM去“预报”这个参考场时,纬向波数要取到30个,“预

报场”才能逼近参考场,但纬向波数取到 15 个波时,距平意义下的大气环流形势几乎与参考场完全反了过来。然而,他们发现如果用 AGCM 去“预报”这个参考场时,即使只用 15 个波,所得的结果比 GCM 用 30 个波所得的结果好。

不过,要建立一个严格的 AGCM 存在一个困难,就是如何把距平场从总场中分离出来。如果对大气运动方程组取时间平均(如时间平均取一个月),这样由于方程的非线性就必然出现雷诺应力项。这一项如何处理则是湍流经典理论的困难。在我们过去的距平模式中干脆去掉了这一项。当然,也可以采取通常的作法,将雷诺应力项用参数化方法变成对距平分量的湍流耗散项。本文就是这样做的,这种方法的结果是众所周知的,雷诺应力项在此只起耗散和平滑距平场发展的作用。然而,Navarro 和 Miyakoda 的试验表明,雷诺应力项的存在并不对预报出的距平场的形势存在明显的影响,而只是使距平中心的强度有所减弱。如果在所有场合下雷诺应力项的作用只是如此,这自然是一件幸运的事。否则,就会象经典的湍流理论那样,为闭合方程组而陷入死胡同。

争议较多的是对 Rossby 波的过滤问题。由于 Rossby 波在大气和海洋中不仅存在,而且实践也表明了它在短期预报中的重要作用。因而,即使在长期数值预报中滤掉 Rossby 波,也确实容易引起争论。Egger^[9]用一个简单化的模式从理论上讨论过这一问题。他认为如果滤去扰动的快变部分(相应的可以看成是 Rossby 波),则由于去掉了扰动快变部份和低频部份之间的相互作用,将对预报结果造成重大误差。然而,Egger 用于理论分析的方程并不是真正的距平模式,而在距平模式中,由于还包括了气候场部份,因此,正如丑纪范^[11]所指出的那样,Egger 过高的估计了滤掉 Rossby 波对于预报造成的相对误差。本文的作者认为丑纪范已把问题说清楚了,故不再对 Egger 的文章作进一步的评价。然而,有争议的问题仍然存在。近年来,有很多人认为超长波在中、长期天气过程中扮演主要角色。而在 AFM 中连超长波也去掉了,保留的仅是准定常的强迫 Rossby 驻波。这里称 Rossby 驻波是准定常的,是因为地球表面的加热场是缓变的,大气环流的气候场也是随时间缓变的,只是月与月间不同。因此,一个值得讨论的问题是滤掉了超长波而只保留准定常的 Rossby 驻波,将会给月和季这样时间尺度的预报带来多大误差?另一方面,滤掉 Rossby 波所带来的误差还可以通过数值试验来估计。在上述 Navarro 和 Miyakoda 的文章中就作过估计。他们认为 AFM 的预报结果与 AGCM 或 GCM 的结果相比,对于大尺度环流的形势场并无明显影响,只是预报的中心强度要弱。而在本文中连强度也差不多。如果 AFM 对所有的预报例子强度都弱的话,那只要调整一下参数问题就可以解决了。不过这要经过大量预报例子的实验,选出一些在统计上比较稳定的参数,使预报水平稳定。这种试验从一层模式开始我们就着手进行了。同时由于 AFM 将大量节省计算时间,在没有巨型计算机的情况下是重要的。即使有巨型计算机,用 Navarro 和 Miyakoda 的话来说,AFM 仍可以作为一种“快照”(Quick look),先把预报场的正负距平区确定下来。

除了上述原则性的问题外,AFM 仍有一些技术性的问题有待于改进。根据我们所作的大量例子来看,极区的预报结果一般都不好,看来这要对极冰和反照率之间的反馈过程有所考虑。一个简单的方法是象[13]那样做。另外,就统计结果看,美洲部份一般比亚洲部分要好,看来这和没有考虑青藏高原的影响有关,因此,考虑地形影响是势在必行的。

再者,辐射和云量间的相互作用不仅对气候的形成是重要的,对长期预报也是重要的,应寻求一个切合实际的有效参数化方法把它加在模式中。

最后一个带有理论性的问题是热带和中纬度大气环流之间的相互作用,特别是在El Nino年。分析^[14]和理论^[15]均表明,当赤道“ENSO”出现时,中纬度大气将要有重大调整,多年统计事实的研究也表明了这一点^[16]。然而,本文所用的是一个准地转模式,自然不适用于热带地区的预报。但本文所取的两个年份都是“ENSO”年。除了1983年1月报2月的例子没有报好外,其它例子均接近和超过惯性预报。由此提出一个问题,即使在“ENSO”年中,中纬度大气环流对赤道地区海温的响应比起对局地温度场的响应来讲,究竟要占多大比例。当然,我们不能排除在“ENSO”年中纬度的局地温度(特别是海温)本身和赤道海温间就有一种关系。但究竟要多长的时间尺度赤道海温的巨变才会影响到中纬度是值得讨论的。这就需要模式加以改进,使它能将热带包括进去,这对预报总是有好处的。

参 考 文 献

- [1] Group of long-range numerical weather forecasting, On the physical basis of a model of long-range numerical weather forecasting, *Scientia Sinica*, 20, 377-390, 1977.
- [2] —, A filtering method for long-range numerical weather forecasting, *Scientia Sinica*, 22, 661-674, 1979.
- [3] Chao, Jiping, Guo Yufu & Xia Runan, A Theory and method of long-range numerical weather forecasts, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 282-291, 1982.
- [4] Chao Jiping, Filtered anomaly model and its application to monthly and seasonal climate forecasts, WMO/ICSU Study Conf. Phys., Basis for climate prediction, Leningrad. 1982.
- [5] Guo Yufu, & Chao Jiping, Simplified dynamical anomaly model for long-range numerical forecasts, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1, 30-39, 1984.
- [6] Chao Jiping, Wang Xiaoxi, Chen Yingyi & Wang Lizhi, An atmosphere-ocean/land coupled anomaly model for monthly and seasonal forecasts, Proc. International Climate Symposium, Beijing, 1984 (to be published).
- [7] Chao Jiping, & R. Caverly, An anomaly model and its application to long-range forecasts, Proc. sixth annual climate diagnostic workshop, Lamont-Ponerty Geological Observatory Columbia University, Palisades, New York, 316-319, 1982.
- [8] Miyakoda, K., & J.P. Chao, Essay on dynamical long-range forecasts of atmospheric circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 292-306, 1982.
- [9] Egger, J., Simplified dynamics approach, Proc. WMO-CAS/JSC expert study meeting on long-range forecasting, Princeton, 207-218, 1982.
- [10] Barnett, T. P., & R. C. J. Somerville, Advances in short term climate prediction, 18th general assembly international union of geodesy and geophysics, Hamburg, August 15-27 1983, Contribution in Meteorology, U. S. National Report, 1979-1982, 1098-1102.
- [11] 丑纪范, 长期数值天气预报(即将由气象出版社出版), 1985.
- [12] Navarro, A., & K. Miyakoda, Anomaly model using a barotropic vorticity equation, Proc. seventh annual climate diagnostics workshop, NCAR, Boulder, Colorado, 456-460, 1982.
- [13] Chen Yingyi, & Chao Jiping, A two-dimensional energy balance climate model including radiation and ice caps-albedo feedback, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1, 234-245, 1984.
- [14] Horel, J. D., & J. M. Wallace, Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the southern oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 813-829, 1981.
- [15] Hoskins, B. J., & D. Karoly, The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, 38, 1179-1196, 1981.
- [16] Pan Yihong, & A. H. Oort, Global climate variations connected with sea surface temperature anomalies in the Eastern Equatorial Pacific Ocean for the 1958-73 period, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 1244-1258, 1983.

MONTHLY AND SEASONAL NUMERICAL FORECASTS BY USING THE ANOMALY OCEAN-ATMOSPHERE COUPLED MODEL

Chao Jiping Wang Xiaoxi
Chen Yingyi Wang Lizhi

(National Research Center for Marine Environmental Forecasts, Beijing)

Abstract

Monthly predictions for eight winter months during 1976—1977 and 1982—1983 El Nino events were performed by using a three-layer anomalous filtered model (AFM) in which transient Rossby waves were filtered. The results show that this model predicts successfully the large-scale patterns of the monthly mean surface temperature anomalies. The correlation coefficients between the observations and the predictions are higher than those of persistence predictions. By comparison with the anomalous general circulation model (AGCM) the AFM gives almost identical results, but the computer time required for running the AFM is almost 100 times less than that required for running the AGCM. It is also shown that the results of the three-layer model are better than those of the one-layer model. In the meanwhile, four seasonal forecasts were also carried out by using the same model. It seems to be shown that the AFM possesses potential ability in predicting seasonal large scale circulation anomalies.