

随机动力气候模式的预报试验*

黄嘉佑 何燕萍

(北京大学地球物理系 100871)

提 要

本文主要是对海-气耦合随机动力模式作进一步的研究与分析。借以深入探讨该模式对西太平洋副热带高压进行长期预报的预报效果问题。与以往工作不同,本文采取提取主分量的预报方法,预报试验除包括以往不同预报时间长度的试验以及加白噪声的试验外,还比较了取不同时间积分长度的预报效果。为了进一步提高模式的预报效果,本文还附加讨论了把年代细分为普通年、海温异常增暖年和海温异常变冷年三种情况分别预报的预报效果。试验结果表明利用提取主分量的方法预报效果较好,半年预报的平均预报效果相关系数在 0.3 左右;加上白噪声以后,独立预报的效果有较大提高,个别年份相关系数可提高到 0.75 以上,另外本文的研究还表明将年代细分为三类情况分别预报,提前半年预报的效果更佳。

关键词: 随机气候模式;统计动力预报;主分量;副热带高压。

一、引 言

大气运动的规律,实际上表现为确定性的过程和随机性的过程两类;单纯采用动力方法或单纯采用统计方法都有其固有的缺陷。一个新近提出的问题是,怎样由各种方法做出预报,特别是在长期预报中如何将动力方法和统计方法结合起来,做出最好的预报。本文是在以往工作^[1]的基础上,对海-气耦合随机动力气候模式作进一步的分析与研究。与以往工作相同,本文采用统计方法,用大量历史资料对积分系数进行反演估计,且上下网格点要素任意对应,谓之多网格点模式。由于原来的模式直接以高度场上每个网格点的要素值作为预报对象,一个网格点上的要素值与 72 个前期要素有关,但是历史资料只有 35 年,这就给反演带来了不稳定因素。本文对原来模式进行了改进,将高度场和海温场转换为主分量场,用较少的主分量描述场中的 36 个变量,对主分量场进行预报,然后再将主分量的预报场还原回要素场。这样处理,一方面可以减少因资料样本数少于待求变量数造成的不稳定因素,另一方面也减少了模式的计算量,节省了大量机时。考虑到与我国气候变化联系最密切的海域是太平洋地区,其中赤道东太平洋地区尤其令人注目,有研究表明,赤道海温与北太平洋副热带高压长期演变之间有明显的正相关,因此将海温场选在赤道东太平洋地区,高度场选在北太平洋副热带高压所在区域。

以半年预报为主,研究用当年 1 月资料预报当年 6 月副热带高压的预报效果。预报

1993 年 3 月 25 日收到,7 月 20 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助课题。

分为两类:一类直接用 1951—1985 年的资料作为历史资料预报 1986—1989 年的副高;另一类先将 1951 到 1989 年各年按 1 月份海温场分为三组:普通年、海温异常增暖年和海温异常变冷年,然后对三组分别进行拟合预报和独立预报。

二、预 报 原 理

根据李麦村、黄嘉佑等人推导出的海气耦合随机动力气候模式^[2],经过适当处理给出 500hpa 的位势高度距平场 H' 与海温距平场 T'_s 的海气耦合方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial H'}{\partial t} = \beta_1 T'_s + \beta_2 H' + c_1 \varepsilon_1 W \\ \frac{\partial T'_s}{\partial t} = \beta_3 T'_s + \beta_4 H' + c_2 \varepsilon_2 W \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 与海洋、大气的物理因子有关。方程式右边第三项为随机外力项,其中 ε 代表随机外力振幅, W 为白噪声, c 为振幅的调整系数。考虑某网格点 i 上的 H'_i, T'_{si} 与周围若干点的 H', T'_s 均有关,可将以上模式推广到多网格点的随机动力差分模式。设一个网格点上的要素值与 m 点气温 n 点海温有关,则

$$\begin{cases} \frac{\partial H'(i)}{\partial t} = \sum_{k=1}^m \beta_1(i, k) T'_s(k) + \sum_{k=1}^m \beta_2(i, k) H'(k) + c_1 \varepsilon_{1i} W & (i = 1, \dots, m) \\ \frac{\partial T'_s(j)}{\partial t} = \sum_{k=1}^n \beta_3(j, k) T'_s(k) + \sum_{k=1}^n \beta_4(j, k) H'(k) + c_2 \varepsilon_{2j} W & (j = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

由于我们选取的高度场和海温场各包含 36 个网格点,因此一个要素值与 72 个前期要素值有关,方程组(2)中左侧含有 72 个变量,历史资料样本只有 35 年,待求变量数多于样本数,反馈系数 β 不够稳定。所以对高度场和海温场的标准化距平提取主分量,用较少的主分量描述高度场和海温场,再用向前差分有

$$\begin{cases} PH_i(t+1) = PH_i(t) + \sum_{j=1}^n \beta_{2i} PH_j(t) + \sum_{j=1}^n \beta_{1i} PT_j(t) + c_1 \varepsilon_{1i} W & (i = 1, \dots, n) \\ PT_j(t+1) = PT_j(t) + \sum_{i=1}^m \beta_{4j} PH_i(t) + \sum_{i=1}^m \beta_{3j} PT_i(t) + c_2 \varepsilon_{2j} W & (j = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

上式中 PH 和 PT 分别代表高度场和海温场的标准化距平场的主分量值。方程组(3)包含 $2n$ 个方程,每个方程可视为对某个新变量的回归方程,方程右边含有 $2n$ 个因子,回归系数就是各因子的反馈系数。用历史资料可求出方程组(3)中的月反馈系数 β ,再用 Δt (天)/30 天乘以月反馈系数作为时间积分步长为 Δt 的反馈系数。有了 t 时刻的反馈系数和 t 时刻主分量值,就可作出 $t+1$ 时刻的主分量预报。利用这种方法我们就可以用前几个月的主分量值(如 1 月)预报 6 月副高的主分量,再利用特征函数将主分量场还原回要素场;如此就可完成 6 月份副高的预报。(3)式方程右边第三项随机外力项的估计,是把各月高度场与海温场各格点回归方程的误差项看作各格点上的随机外力,相应的外力振幅可用回归方程的残差均方差估计。

检验预报效果采用以下指标: 一是平均预报误差 S , 定义为 $S = \left[\sum_{i=1}^m (X_i - Y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$,

其中 X_i 和 Y_i 分别为高度场第 i 个格点上的观测值和预报值的标准化距平值。它反映观测场与预报场的数值偏差; 另一是两场的相关系数 R , $R = (\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i / m) / [(\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / m)(\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / m)]^{\frac{1}{2}}$, 该指标反映两场的相似程度(其中 m 为检验样品数)。

三、用历史资料预报 500hpa 高度场

本文用 1951—1985 年的历史资料预报 1986—1989 年 6 月份 500hpa 高度场。预报分为拟合预报和独立预报两种, 主分量选用前八个, 预报当年 6 月份 500hpa 高度场的标准化距平场。预报试验分以下几组:

1. 不同时间积分步长的预报试验

用当年 1 月份高度场和海温场的标准化距平场预报当年 6 月份高度标准化距平场。预报分拟合预报(1951—1985)和独立预报(1986—1989)两种。预报中不考虑白噪声, 高度模式和海温模式取同一时间步长 Δt , Δt 分别取 30 天、15 天和 1 天。

表 1 为拟合预报试验, 表中 S 和 RH 值是 35 年的平均值。表 2 为独立预报试验。从表 1 和表 2 可以看出逐月积分效果最佳, 相关系数在拟合预报中达到 0.4 左右, 在独立预报中达到 0.3 左右。逐日预报和半个月的预报效果虽比逐月预报稍差, 但也都是正值。半年预报能达到如此效果, 说明该模式对我国副热带高压的长期预报具有可预报性。继续改进可望效果更好。由于试验表明逐月积分效果最佳, 因此以下试验都针对逐月积分预

表 1 拟合样本试验

Δt (天)		30	15	1
R		0.376	0.261	0.164
S		0.866	0.950	0.959

表 2 独立样本试验

Δt (天)		年	1986	1987	1988	1989	平均值
30	R		0.495	0.325	0.243	0.124	0.297
	S		0.94	1.08	0.50	0.87	0.85
15	R		0.312	0.086	0.172	0.099	0.166
	S		1.00	1.35	0.59	0.85	0.95
1	R		-0.163	0.167	0.215	0.156	0.094
	S		1.01	1.36	0.60	0.84	0.95

报进行讨论。

2. 加白噪声的试验

为了提高独立预报的预报效果,我们在方程中加入白噪声,以便进一步提高预报效果。预报时用当年1月份高度场和海温场的标准化变量场通过逐月积分预报当年6月的高度场。

表3给出独立预报的结果,表中高度模式和海温模式都加入了白噪声。表中 c_1 代表高度模式中随机外力的系数, c_2 代表海温模式的随机外力系数。从表3可以看出,在独立样本预报试验中加入白噪声以后,预报效果明显改善。尤其是 $c_1 = 0.1$ 时效果最佳, R 的平均值从不加白噪声的0.3左右提高到加入白噪声后的0.36左右。当 $c_1 \leq 0.1$ 时, c_1 越大 R 值越高, S 值变化不大;当 $c_1 > 0.1$ 时, c_1 越大, R 值越小, S 值越大。因此可以考虑在今后的预报中取 $c_1 = 0.1$ 。加入白噪声后预报效果的改善在个别年表现更为突出,如1986年 R 值从原来的0.5上升到0.75,完全达到了实际预报水平。

表3 加入白噪声的预报效果

预报年 c_1	1986		1987		1988		1989		平均值	
	R	S	R	S	R	S	R	S	R	S
0	0.495	0.94	0.325	1.08	0.243	0.50	0.124	0.87	0.297	0.85
0.01	0.526	0.93	0.329	1.08	0.234	0.51	0.134	0.87	0.306	0.85
0.1	0.731	0.90	0.336	1.10	0.147	0.53	0.212	0.84	0.356	0.85
0.5	0.754	0.90	0.265	1.26	0.024	0.91	0.343	1.16	0.347	1.06
1	0.686	1.18	0.228	1.57	-0.004	1.57	0.361	2.01	0.318	1.58
5	0.609	5.47	0.189	5.09	-0.028	7.33	0.359	10.14	0.282	7.01

表4为独立预报中只在高度模式或海洋模式中加入白噪声的预报效果。从表4可以看出,在高度模式或海洋模式中分别加入白噪声对 R 值的影响是不同的。这次试验,在高度模式中加入白噪声预报效果明显提高,单纯在海洋模式中加入白噪声效果反而下降。

表4 仅在高度模式或海洋模式中加入白噪声

	$c_2 = 0$				$c_1 = 0$			
	$c_1 = 0.01$	$c_1 = 0.1$	$c_1 = 0.5$	$c_1 = 1$	$c_2 = 0.01$	$c_2 = 0.1$	$c_2 = 0.5$	$c_2 = 1$
R	0.306	0.354	0.348	0.325	0.296	0.278	0.033	-0.008
S	0.85	0.85	1.07	1.63	0.85	0.86	1.02	1.38

总结以上分析表明,白噪声对独立预报起着很大作用。一般加入白噪声以后,预报场的平均误差 S 增大,但相关系数一般来说将得到提高。另外白噪声在方程组中的配置不同效果也不同,上例在高度模式中加入白噪声,能大幅度改进预报效果。

3. 关于不同预报时间长度的试验

试验中均采取逐月积分,不加白噪声。

表 5 提前预报月份数的试验(拟合样本)

预报长度	5 个月	4 个月	3 个月	2 个月	1 个月
R	0.376	0.425	0.436	0.467	0.554
S	0.866	0.839	0.820	0.773	0.706

表 5 结果表明在拟合样本试验中, 预报时间越短, 预报效果越好。

表 6 提前预报月份数的试验(独立样本)

预报时间	5 个月	4 个月	3 个月	2 个月	1 个月
R	0.297	0.028	0.022	0.007	0.093
S	0.85	0.96	1.00	1.02	0.98

表 6 结果表明独立预报中 5 个月的预报效果最好, 这可能与海气间存在着半年振荡有关。

四、分类预报

由于海表温度在 ENSO 年异常增暖, 反 ENSO 年异常冷, 在这些年海洋与大气相互作用的物理规律与平常年不同。为了进一步改进预报效果, 我们希望对普通年、ENSO 年和反 ENSO 年分别考虑。因为在年初预报时有时无法判定该年是否为 ENSO 年或是反 ENSO 年, 因此我们采取如下一种较客观的划分方法, 使结果尽可能符合实际, 并且把划分成的三种情况分别称为普通年、海温异常增暖年、海温异常冷年。具体划分方法如下: 用 1951—1985 年 35 年的年平均值作为气候平均值, 求出 1951—1989 年海温场各格点上诸年的标准化距平值 T'_i , 再求出每年海温场 36 个格点的 T'_i 平均值 $\bar{T}'_i$, 根据 $\bar{T}'_i$ 判定该年属于哪种情况。我们定义 $\bar{T}'_i > 0.5$ 的年份为海温异常增暖年, $\bar{T}'_i < -0.45$ 的年份为海温异常冷年; $-0.45 < \bar{T}'_i < 0.5$ 的年为普通年。按照这种划分方法 1951—1989 年中有 18 个普通年, 12 个异常增暖年, 9 个异常冷年, 具体为:

普通年(在 a 代表): 1951、1953、1954、1955、1956、1957、1960、1961、1962、1963、1965、1967、1975、1978、1979、1980、1981、1986。

海温异常增暖年(用 E 代表): 1952、1958、1959、1964、1966、1969、1970、1973、1977、1982、1987、1988。

海温异常冷年(用 N 代表): 1968、1971、1972、1974、1976、1982、1984、1985、1989。

考虑到主分量个数不能太多, 同时又要抓住要素场的主要特征, 最后我们在普通年组中选取 8 个主分量描述要素场, 异常增暖年中选取 6 个主分量, 在异常变冷年中选取 5 个主分量。由于每组的拟合样本数和独立样本数都太少, 因此预报结果只能作为参考。在以下的预报试验中我们的预报对象仍是当年 6 月份的 500hPa 高度场。

1. 不同时间积分步长的试验

比较分类预报与前面不分类的预报可以发现,无论是在拟合预报还是独立预报中,分

表 7 依赖样本中的试验

	$\Delta t = 30$ 天		$\Delta t = 15$ 天		$\Delta t = 1$ 天	
	R	S	R	S	R	S
a	0.909	0.27	0.004	2.44	0.06	8279
E	0.929	0.22	-0.036	16.3	-0.032	749
N	0.923	0.27	-0.129	58.5	-0.219	820

表 8 独立样本中的试验

		$\Delta t = 30$ 天		$\Delta t = 15$ 天		$\Delta t = 1$ 天	
		R	S	R	S	R	S
a	1986	0.163	1.27	-0.182	2.86	-0.110	18474
	1987	0.345	51	-0.140	19.7	0.207	1013
	1988	0.448	76	0.223	28.6	0.005	2286
N	1989	0.181	200	-0.168	28.2	-0.119	1956

类预报也是逐月积分效果最佳。分类预报与不分类预报的不同点是: 1) 逐月积分的拟合效果极佳, 半年预报的相关系数高达 0.9 以上, S 值只有 0.2 左右, 而从表 1 可见综合起来笼统考虑的平均拟合效果 R 值只有 0.4 左右, 这表明每种类型确有各自的特点, 分类预报正是抓住了每种类型的各自特点, 才能有如此好的拟合效果; 2) 独立预报中以异常增暖年的 R 值最高, 表明分类预报对 ENSO 年效果尤佳; 3) 分类预报中有个明显特点是 S 值在一些情况过高, 有的高达上百乃至上千, 造成这种情况的可能原因是由于分类以后每组的历史样本数太少, 如 E 组和 N 组的历史样本数少于因子数, 造成了计算的不稳定。

表 9 分类独立样本试验

类型	预报年		$c_1 = 0$	$c_1 = 0.1$	$c_1 = 1$	$c_1 = 5$
a	1986	R	0.163	0.157	-0.104	-0.127
		S	1.26	1.21	2.32	11.57
E	1987	R	0.345	0.345	0.347	0.349
		S	51	51	48	-37
	1988	R	0.448	0.448	0.450	0.456
		S	0.76	0.76	0.77	0.83
N	1989	R	0.181	0.187	0.219	0.278
		S	200	192	102	61

2. 加白噪声的试验

我们在独立预报中加入白噪声, 结果表明在逐月积分预报中, E 组和 N 组加入白噪声 R 值得到提高, S 值越来越小, 总体预报效果得到改善, 这点从表 9 即可看出。

3. 不同预报时间长度的试验

预报对象还是当年 6 月的高度场, 作逐月积分预报。试验结果表明, 拟合预报效果几乎不随预报时间长度的变化而变化; 而在独立预报中仍是 5 个月的 R 值总体预报效果最佳, S 值随着预报时间长度的缩短迅速减小(见表 10)。

表 10 提前预报月份数的试验

类型	预报年		5 个月	4 个月	3 个月	2 个月	1 个月
a	1986	R	0.163	-0.265	-0.143	0.301	-0.056
		S	1.26	10.12	6.85	2.37	12.90
E	1987	R	0.345	-0.079	-0.20	-0.22	-0.21
		S	51	24	7.1	3.2	9.6
	1988	R	0.448	0.131	0.260	0.106	0.142
		S	76	4.2	8.7	8.4	2.62
N	1989	R	0.181	0.199	-0.165	0.198	-0.138
		S	210	109	36	4.29	3.02

五、结 论

本文对海-气耦合随机动力气候模式作了进一步的改进, 将原来直接对要素场进行预报转换成对要素场的主分量进行预报, 这就增强了模式计算的稳定性。另外模式由原来的海温场与高度场选在同一区域, 改为海温场选在赤道东太平洋地区, 有助于研究赤道海温异常活跃区对我国副热带高压的影响。最后本文还附加讨论了把年代细分为普通年、海温异常增暖年和海温异常变冷年三种情况下的预报结果。预报试验的结论如下:

(1) 利用提取主分量的方法进行逐月预报效果最佳, 半年预报的独立预报效果相关

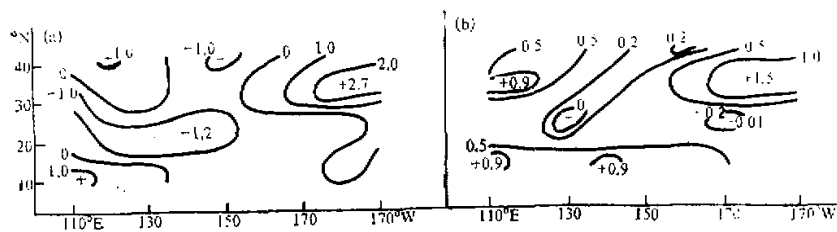


图 1 1986 年 6 月份 500hpa 高度形势场预报-实况标准化距平场比较图

(a) 实况场; (b) 预报场。

系数达到 0.3 左右;

(2) 加上白噪声以后, 独立预报的效果有较大提高, 相关系数的平均值提高到 0.36 左右, 有的年份相关系数甚至可提高到 0.7 以上;

(3) 预报时间的长度不同, 预报效果也不同。一般在独立预报中 5 个月的预报效果最佳, 这可能和大气环流与海温异常变化间的韵律性有关。

(4) 将各年细分为三类情况以后, 半年预报的拟合预报效果极佳, 相关系数高达 0.9 以上。

最后给出一个用该模式所做的 6 月份提前 5 个月的 500hpa 高度形势场的预报比较图(图 1)。

本文仅侧重主分量及分类预报试验, 关于随机项, 拟另作红噪声试验。

本工作得到王绍武教授指导, 谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] 黄嘉佑、宋玉梅、王绍武, 用随机动力模式作副高预报试验(即将在气象学报发表)
- [2] 李麦村、黄嘉佑, 1984, 关于海温准三年及半年振荡随机气候模式, 气象学报, Vol. 42, 168—175.
- [3] 王绍武等, 1983, 月平均环流异常的持续性、韵律性和海气相互作用, 气象学报, Vol. 41, 33—42.

The Forecasting Experiments in A Stochastic Statistical-Dynamical Climate Model

Huang Jiayou He Yanping

(Department of Geophysics, Peking University, 100871)

Abstract

The purpose of this paper is to study further a stochastic air-sea interaction climate model, and to investigate deeply the effects of this model on forecasting the subtropical high. In contrast with the previous work, we change from the forecasting element field to the forecasting principal component field using the method of abstracting principal componet. In the experiments, the effect of different intergrating time intervals is considered, besides considering the effects of the white noise and different forecast periods which are also considered in the previous work. In order to improve the forecasting samples classified according to normal, abnormal warm and cold sea surface temperature were tested. The main conclusions of the experiments are that properly increasing time interval will not decrease the forecast accuracy, and the six month prediction has higher accuracy with the correlation coefficient of 0.3 in mean value. The accuracy is improved with independent samples, it can be more than 0.75 in some chses. The classification forecasting has higher accuracy than others.

Key words: Stochastic climate model; [Statistical dynamica] forecasting; Principal component; Subtropical high.