

# 与非线性区域预测方法结合的月延伸预报试验 I: 纬向平均环流的预报\*

陈伯民

(上海市气象科学研究所, 上海, 200030; 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

纪立人 杨培才 张道民

(中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029)

## 摘 要

为克服数值模式普遍存在的纬向平均环流预报误差, 文中在 36 a NCEP/NCAR 再分析高度场资料的基础上, 应用非线性时空序列预测理论的局域近似法构建了 200, 300, 500 和 700 hPa 4 个等压面上的月尺度逐候纬向平均高度距平场非线性动力学区域预报模型。对 1996 年 12 个月所做的预报试验表明, 无论是南、北半球中高纬度地区还是低纬度地区, 非线性模型的候纬向平均高度预报结果均优于持续性预报、气候预报和 T42L9 模式动力预报。用非线性结果对 T42L9 模式月平均高度场预报结果进行订正, 则使该谱模式系统性预报误差显著减少, 也大大减少了其预报高度场的均方根误差, 相应地, 高度场距平相关评分也有一定程度的提高, 表明纬向平均高度的非线性预报比谱模式动力预报包含了更多的有用信息。

关键词: 月延伸预报, 纬向平均环流, 持续性预报, 气候预报, 非线性区域预报, 事后订正。

## 1 引 言

虽然纬向平均环流(本文指高度场纬向平均分量)理论上应具有较长的可预报时间<sup>[1~3]</sup>, 但近年来大量的月动力延伸预报试验显示, 环流的这一缓变分量存在明显的系统性预报误差, 而且在总误差中所占的比例相当大<sup>[4~9]</sup>。也就是说, 纬向平均环流是许多动力模式一个共同的预报误差来源。月延伸预报评分一直较低和模式对纬向平均环流的预报普遍较差有很重要的关系。针对数值模式的这一问题, 国内外学者提出一些解决办法, 如从大量预报结果总结出系统性误差及其分布, 以此来订正模式的个例预报结果; 用多年月平均值或气候倾向订正模式结果<sup>[4~7]</sup>, 收到一定的效果。尽管这些办法多是经验性的, 但都从预报角度进一步强调和证实了纬圈平均环流的重要性。

考虑到大气是一个具有非线性特征的复杂系统, 本文尝试用重构相空间理论和非线性动力学区

域预测方法<sup>[9~16]</sup>给出对模式误差贡献大、具有普遍性、动力学意义又十分重要的纬圈平均环流(本文指纬圈平均高度), 取代数值模式相应的结果, 以期消除模式与之有关的系统性预报误差。和数值预报模式相比, 非线性时空序列分析预报是用相对隐式的形式来反映系统的动力学规律, 它建立在重构相空间理论基础之上, 可认为在一定程度上是动力性质的, 尽管所建立的预测方程仍是对原动力系统的逼近; 另外, 它较好地保留了系统本身的非线性特征, 一定程度上反映了其非线性反馈机制; 由于这种方法更适合处理物理规律尚不十分清楚的问题, 也就避免了在确定系统物理规律时的主观性; 它还能最大限度地使用历史资料, 这一点已被证明在短期气候预报中是非常重要的<sup>[7,8,19~21]</sup>。

本文所用的模式是中国科学院大气物理研究所 ECMWF 基础上发展的全球谱模式(下称 T42L9, 详见文献[23])。所用的资料为 1960~1996 年共 37 a 的 NCEP/NACR 再分析高度场资

\* 初稿时间: 2002 年 7 月 22 日; 修改稿时间: 2003 年 6 月 25 日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(40175013)、中国科学院项目(ZKXC2-SW-210)及国家“九五”科技攻关 96 908 项目 02-01。

料。

## 2 纬向平均高度场的非线性区域预报

### 2.1 重构相空间理论和时空序列预测方法

20 世纪 80 年代以后, Packard 及 Takens 等<sup>[9~13,16]</sup> 提出了基于单个变量的时间序列恢复原来系统动力学的思想, 就是针对时间序列  $x(t_n)$  ( $n = 1, 2 \dots N$ ,  $N$  为序列长度), 通过引入一个给定的空间维数  $m$  ( $m$  称为嵌入维数, 且只要  $m > d$ ,  $d$  为系统的吸引子维数) 和时间滞后参数  $\tau$  ( $\tau$  为观测间隔的整数倍), 建立相应的时滞坐标:  $x(t), x(t + \tau) \dots x(t + (m - 1)\tau)$ , 重新构造一个  $m$  维的嵌入相空间, 则在这个空间中可以恢复原来系统的相型(吸引子)。被恢复的嵌入流型为:

$$X_m(t_n) = \left\{ x(t_n), x(t_n + \tau) \dots x(t_n + (m - 1)\tau) \right\} \quad n = 1, 2 \dots N - (m - 1)\tau \quad (1)$$

$X_m(t_n)$  表示嵌入空间中第  $n$  时刻的状态矢量,  $x(t_n), x(t_n + \tau) \dots x(t_n + (m - 1)\tau)$  为其坐标(分量)。

重构相空间理论的提出大大推动了混沌科学走向实际应用, 也使得人们能够利用实际观测序列来建立非线性预测模型。只是在建立模型时常遇到资料数量不足的问题, 这是因为现实中的观测序列长度有限往往不能满足理论要求。就预测而言, 对系统未来状态的预测依赖于对过去所经历的状态的了解, 过短的历史不可能对系统的状态集合给出一个完整的描述(即遍历性问题)。为了突破资料瓶颈这个难题, “多变量时间序列方法”(时空序列方法)近年被提了出来<sup>[14~17]</sup>, 其思想是通过联合不同空间位置上的观测资料来重构动力系统, 以弥补单变量时间序列资料不足的缺陷。后来的实践也证明, 这种方法在一定程度上可以改善系统的遍历性。对本文而言, 就是将一定范围内不同纬圈的逐候纬向平均高度距平序列合并以进行区域预测。

### 2.2 逐候纬向高度距平场非线性区域预报模型的建立

区域预测的关键是合并不同空间点的观测序列。但这种合并的前提是不同空间点序列受同一个动力系统控制。目前还没有一套被普遍接受的方法供人们做这样的判定。较为常见的经验办法是比较不同位置序列的非线性动力学不变量是否一致。我们曾利用 36 a 的资料计算并比较了 T42L9 模式高斯纬圈逐候纬向平均高度距平序列的最小完全嵌入

维数  $m$  和时间滞后参数  $\tau$ , 还对这些序列做了小波分析, 据此确定了 3 个预测区域: 北半球中高纬度地区(20~70°N), 南半球中高纬度地区(20~70°S) 和低纬度地区(20°S~20°N)<sup>[9,17]</sup>。在建立这 3 个区域非线性预测模型时, 为便于和 T42L9 模式动力预报结合, 模型的预报步长定为以候为单位。

首先用  $\{\Delta h(j, t_n)\}$  表示预测区域内某等压面层高斯纬圈  $j$  上逐候纬向高度距平的时空序列,  $j = 1, 2 \dots J$ ,  $J$  为预测区域内的所有纬圈总数,  $n = 1, 2 \dots N$ ,  $N$  为序列的长度。假设已在一个  $m$  维的嵌入相空间中恢复了其系统的动力学(这里大气已被近似看成一个非线性动力系统), 相应地, 它的轨线为

$$H(j, t_n) = \left\{ \Delta h(j, t_{n - (m - 1)\tau}) \dots \Delta h(j, t_{n - \tau}), \Delta h(j, t_n) \right\} \quad (m - 1)\tau + 1 \leq n \leq N \quad (2)$$

若  $H(j, t_N) = (\Delta h(j, t_{N - (m - 1)\tau}) \dots \Delta h(j, t_{N - \tau}), \Delta h(j, t_N))$  表示当前状态点(初始状态), 则它的第  $m$  个分量  $\Delta h_j(t_N)$  也是各纬圈候平均高度距平场初值(本文指某月最后 1 候的值), 那么所要建立的预报模型是方程:

$$H(j, t_{N+k}) = F_{k,j}(H(j, t_N)) \quad (3)$$

其中  $k = 1, 2 \dots 6$ , 为预报(外推)步数(这里指候), 即对月预报最长预报 6 候。  $H(j, t_{N+k}) = \{\Delta h(j, t_{N - (m - 1)\tau + k}) \dots \Delta h(j, t_{N - \tau + k}), \Delta h(j, t_{N+k})\}$  为  $H(j, t_N)$  未来  $k$  步的状态。  $F_{k,j}$  表示两者之间的映射关系。

由于真正需要预报的是  $\Delta h(j, t_N)$   $k$  候后的值  $\Delta h(j, t_{N+k})$ , 它也是  $H(j, t_{N+k})$  的第  $m$  个分量, 故把预报模型(3)改写成:

$$\Delta h(j, t_{N+k}) = F_{k,j}^{(m)}(H(j, t_N)) \quad (4)$$

其中  $F_{k,j}^{(m)}$  是  $F_{k,j}$  的第  $m$  个分量。这样, 问题归结为映射  $F_{k,j}^{(m)}$  的确定。

这里我们采用局域近似法<sup>[9~11,17]</sup>, 在  $H(j, t_N)$  的附近定出一个容量为  $L$  的最邻近点集合  $\{H_l(j, t_N), l = 1, 2 \dots L\}$  ( $L$  为邻近点的数量, 或称规模)。然后用这个点集所包含的信息(即演变规律)来构造映射  $F_{k,j}^{(m)}$ 。最邻近点集成员  $H_l(j, t_N)$  是指满足距离定义(5)的所有状态点  $H(r, t_n)$  (这里  $r$  也指纬圈序号,  $1 \leq r \leq J$ ,  $(m - 1)\tau < n < N$ )。实际操作中, 受控制的是邻近点的规模  $L$  而不是  $\varepsilon$ 。

$$\|H(j, t_N) - H(r, t_N)\| \leq \varepsilon \quad (5)$$

需要特别强调的是, 最邻近点可以来自预测区域内的不同纬圈的序列, 这是和单变量序列预测的最大区别。

首先, 根据  $\{\Delta h_l(j, t_{N+k}), l = 1, 2 \dots L\}$  的分布直接对当前点的未来状态进行预测, 最简单的形式是取其平均构成 0 阶近似:

$$\Delta h(j, t_{N+k}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \Delta h_l(j, t_{N+k}) \quad (6)$$

或对  $L$  中分布更集中的一部分 ( $L'$ ) 进行平均:

$$\Delta h(j, t_{N+k}) = \frac{1}{L'} \sum_{l=1}^{L'} \Delta h_l(j, t_{N+k}) \quad (7)$$

这种作法借鉴了胞映射的思想<sup>[24, 25]</sup>。这里要求  $L' < L$ , 且两者均大于  $m$ 。

若使  $F_{k,j}^{(m)}$  成为一个多项式, 则取一阶多项式 (一阶近似) 有

$$\Delta h(j, t_{N+k}) = \mathbf{H}(j, t_N) \mathbf{A} + a_0 \quad l = 1, 2 \dots L \quad (8)$$

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2 \dots a_m)^T$$

它的标量形式是

$$\Delta h(j, t_{N+k}) = a_0 + \sum_{p=1}^m a_p \Delta h(j, t_{N-(p-1)\tau}) \quad (9)$$

式中的参数  $a_0, a_p$  则由体现当前状态邻近点演变规律的式 (10) 来确定。

$$\Delta h_l(j, t_{N+k}) = a_0 + \sum_{p=1}^m a_p \Delta h_l(j, t_{N-(p-1)\tau}) \quad (10)$$

其中  $\Delta h_l(j, t_{N+k})$  和  $\Delta h_l(j, t_{N-(p-1)\tau})$  ( $p = 1, 2 \dots m$ ) 均为邻近点的状态分量。

若取二阶多项式 (二阶近似), 则有

$$\begin{aligned} \Delta h(j, t_{N+k}) = & a_0 + \sum_{p=1}^m a_p \Delta h(j, t_{N-(p-1)\tau}) + \\ & \sum_{p=1}^m a_{pp} \Delta h^2(j, t_{N-(p-1)\tau}) + \\ & \sum_{p=1}^m \sum_{q=p+1}^{m-1} a_{pq} \Delta h(j, t_{N-(p-1)\tau}) \cdot \\ & \Delta h(j, t_{N-(q-1)\tau}) \end{aligned} \quad (11)$$

式中参数  $a_0, a_p$  和  $a_q$  的确定和一阶近似相仿。

这样, 映射  $F_{k,j}^{(m)}$  中的待定系数 (数目为  $C_{m+\alpha}^m$ ,  $\alpha$  为多项式的阶数) 便可通过最小二乘法获取。在求解时文中采用了平方根解法<sup>[24]</sup>。

上面的预测方程都是直接构造当前状态与  $k$  步状态之间的映射关系  $F_k^{(m)}$ , 通常称为直接法。另一种方法是迭代法, 就是在外推一步后将预报值作为新的“当前状态”, 再以同样方式继续向前外推, 重复同样的步骤直到预报结束, 相当于用映射  $F_1^{(m)}$  进行  $k-1$  次复合运算<sup>[14]</sup>。

$$F_k^{(m)}(\mathbf{H}) = \underbrace{F_1^{(m)}(F_1^{(m)}(F_1^{(m)} \dots))}_{k \text{ 次}} \quad (12)$$

理论研究显示<sup>[16, 27]</sup>, 二阶多项式的预报精度高于一阶多项式 (线性) 映射, 而迭代法的效果优于直接法。然而, 实际观测的序列远比已知的理论混沌系统情况复杂得多<sup>[9, 17]</sup>。对于本文的预测模型而言, 采用何种类型的映射关系和时间外推方式, 以及模型中各参数的取值需要通过大量的试验结果来确定。

表 1 500, 700, 300 和 200 hPa 层北半球、南北半球中高纬度地区及两半球低纬度地区逐候纬向高度距平的非线性预测模型参数

Table 1 The parameters of the pentad zonal-mean height departure nonlinear prediction model on 500, 700, 300 and 200 hPa over the Northern Hemisphere, the Southern Hemisphere and the tropical

等压面 (hPa)	预测区域	$m$	$\tau$	映射关系	预报方式	邻近点规模 $L, L'$
500	20~ 70°N	6	2, 3	零阶近似	直接法	$L = 100, L' = 50$
	20°S~ 20°N	5	3	一阶近似	直接法	$L = 100$
700	20~ 70°S	6	3	零阶近似	直接法	$L = 100, L' = 50$
	20~ 70°N	6	4	零阶近似	直接法	$L = 120, L' = 60$
300	20°S~ 20°N	5	4	一阶近似	直接法	$L = 80$
	20~ 70°S	6	4	零阶近似	直接法	$L = 120, L' = 60$
200	20~ 70°N	6	4	零阶近似	直接法	$L = 140, L' = 70$
	20°S~ 20°N	5	4	一阶近似	直接法	$L = 100$
	20~ 70°S	6	4	零阶近似	直接法	$L = 140, L' = 70$

我们把 1960~ 1996 年中前 36 a 的资料用于调

试预测模型, 其中 1995 年 12 个月的数据作为调试

试验所用的个例资料。而紧靠调试试验个例(月份)之前的所有资料均作为选择当前状态邻近点以构造预报模型的样本资料集。经过数千次的调试,最终得到表1中的结果。

### 2.3 非线性预报结果与持续性预报和气候预报的对比

用上述非线性模型对37a中的最后1年(1996年)全部12个月做了月预报试验。下面对其500hPa层结果和持续性预报与气候预报做一比较。

这12例平均的6候预报结果(图1)可以看出,大部分情况下,非线性模型预报的3个区域的纬向平均高度的异常相关系数(ACC)高于持续性预报结果,而且评分的差异大体上是随预报步数增多而增大的。总体上看,相反的结果比较少,且出现非线性预报ACC评分小于持续性预报的情况时,两者都较为接近。也就是说,从ACC评分看,非线性模型总体上取得了优于持续性预报的ACC评分。

再看预报的均方根预报误差(RMSE)(图2)。南、北半球中高纬度这两个地区而言,非线性预报评分结果明显比持续性预报小得多,而且这种差异第2候以后变得十分明显;同时,非线性预报评分结果也比气候预报小,尽管这种差别要小于和持续性预报的差别。在两半球的低纬度地区,由于大尺度大气运动比较稳定,所以3种预报得到的RMSE均很小,非线性预报与持续性预报结果的差别不大,和气候预报的结果则更接近。考虑到气候预报不能给出纬向平均高度距平相关,应该说,非线性方法的预报也比气候预报好。就不同区域而言,非线性方法的效果在南半球要更显著一些。

### 2.4 非线性预报结果与T42L9模式结果的对比

下面是12例500hPa月平均纬向平均高度场非线性模型和T42L9模式预报误差的一个比较。从图3中可以明显地看到,T42L9模式给出的结果除北半球极区外,都比实况明显偏低,误差达到-40

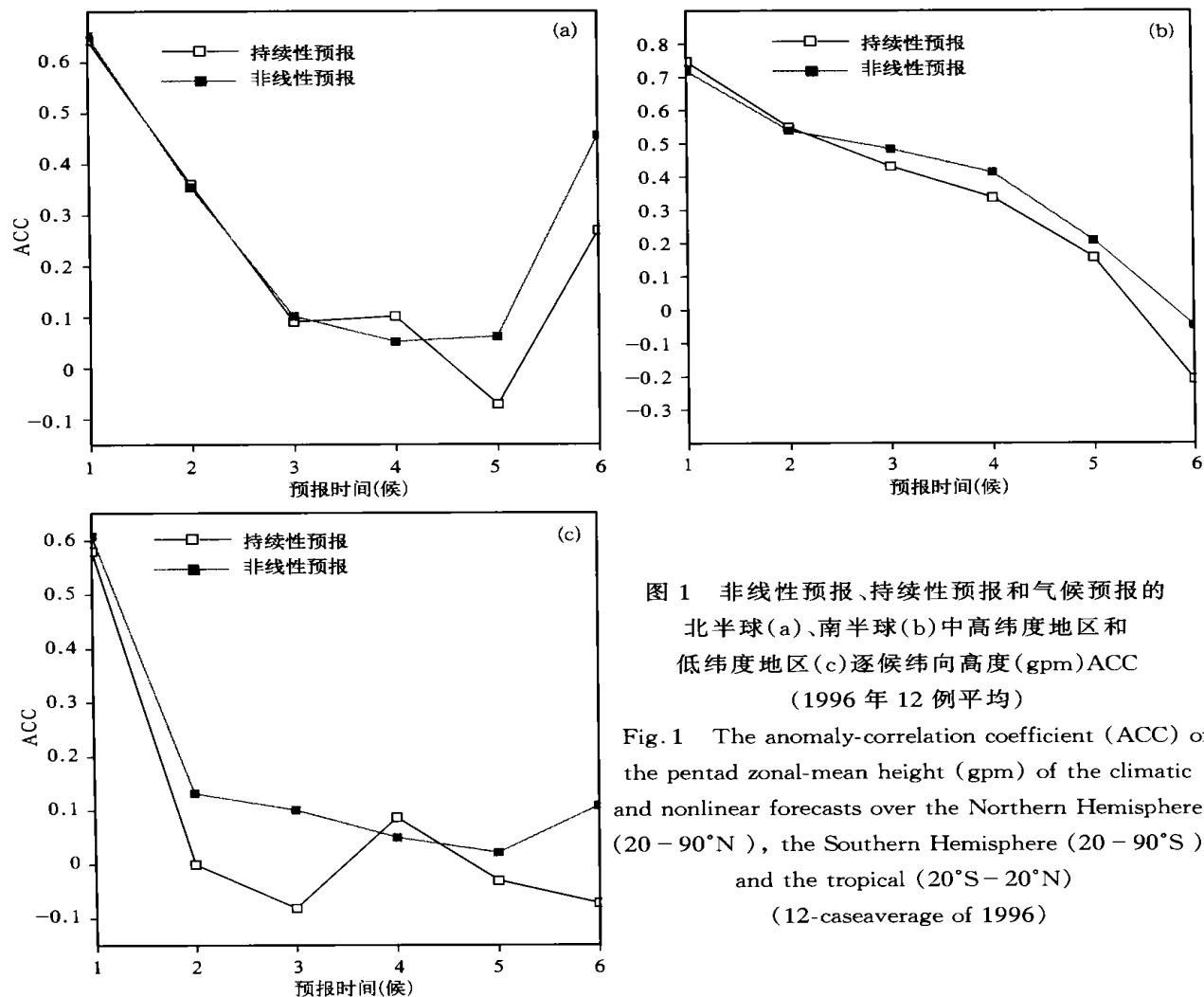


图1 非线性预报、持续性预报和气候预报的北半球(a)、南半球(b)中高纬度地区和低纬度地区(c)逐候纬向高度(gpm)ACC (1996年12例平均)  
 Fig. 1 The anomaly-correlation coefficient (ACC) of the pentad zonal-mean height (gpm) of the climatic and nonlinear forecasts over the Northern Hemisphere (20-90°N), the Southern Hemisphere (20-90°S) and the tropical (20°S-20°N) (12-caseaverage of 1996)

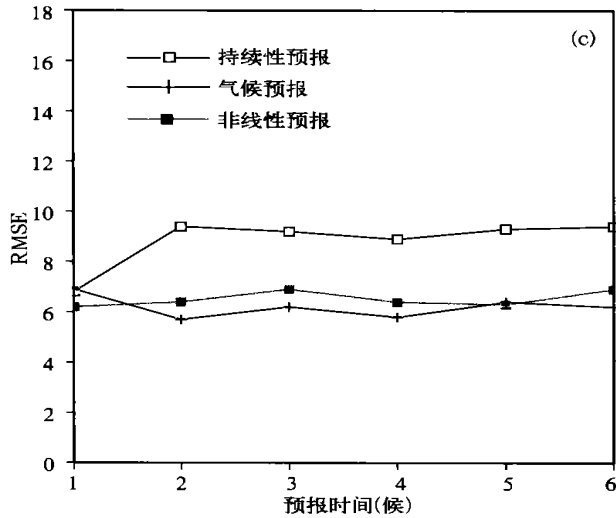
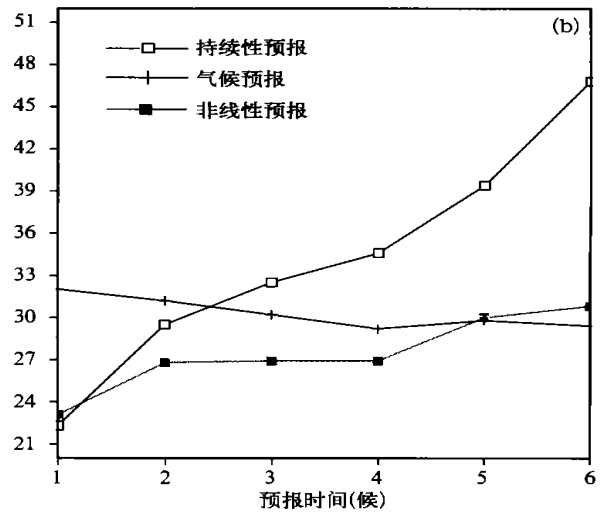
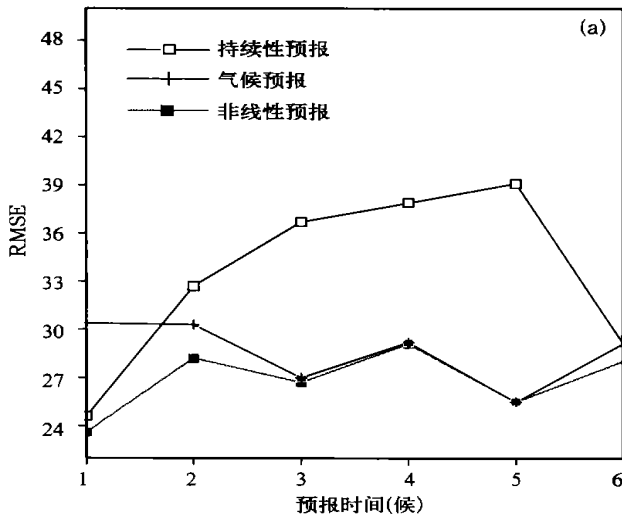


图 2 非线性预报、持续性预报和气候预报的南半球(a)、北半球(b)中高纬度地区和低纬度地区(c)逐候纬向高度(gpm)RMSE (1996年12例平均)

Fig. 2 The root-mean-square error (RMSE, unit: gpm) of the pentad zonal-mean height of the persistent, climatic and nonlinear forecasts over the Northern Hemisphere, the Southern Hemisphere and the tropical (12-case average of 1996)

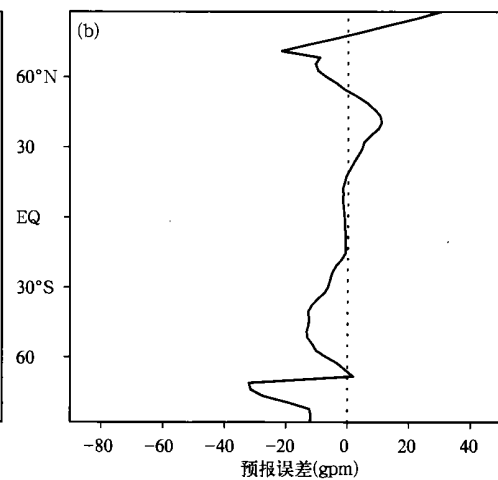
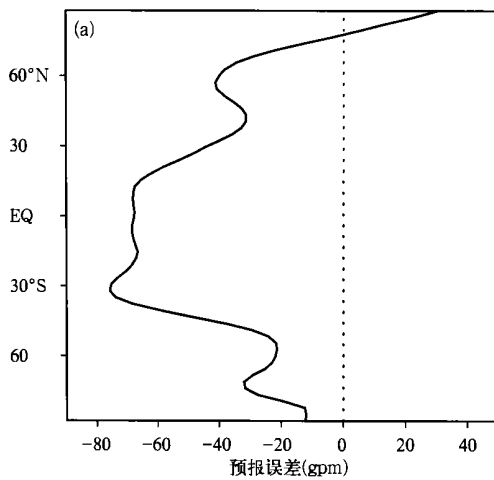


图 3 预报的 1996 年 12 例 500 hPa 月平均纬向高度场与实况之差

(a. T42L9 模式预报结果, b. 非线性预报结果。初值及实况使用 NCEP/NCAR 再分析资料(摘自文献[11]))

Fig. 3 The 500 hPa forecasted zonal mean height minus the actual field of 12 case average of 1996 from Chen et al (2003) ( a, T42L9 model; b, the nonlinear model. The initial value of T42L9 model and actual field are NCAR/NECP reanalysis data )

~ - 80 gpm。而由非线性方法给出的平均结果与实况十分接近, 中低纬度地区范围内的预报值和实况的偏差总体上甚至未超出 10 gpm。事实上对每个个例而言, 非线性模型的预报值都和实况的差别很小(图略), 而且其他层次的预报情况也大体如此。

### 3 非线性区域预报对 T42L9 模式预报高度场的订正

用非线性方法预报纬向高度距平场, 其目的是通过减小 T42L9 模式的系统性预报误差(图 3), 改善其各等压面上的高度场预报水平。于是用 500 hPa 逐候高度距平场的非线性预报结果从第 2 候开始取代 T42L9 模式预报结果的相应部分进行

事后订正。具体做法是: 先由非线性预报的逐候纬向距平值和相应的候候值得到纬向平均高度各候的非线性预报值, 再从第 2 候开始用非线性预报的纬向平均高度候预报值代替模式相应各候每一天的值。为了使这种代换相对平滑, 第 5 天的事后订正中实行了两种预报的加权平均处理。

从结果看, 事后订正在使模式高度场系统性预报误差明显减少的同时(图 1, 2), 也使得订正前后的总的高度场预报评分发生了很大变化。下面 1996 年 12 例预报的评分。

#### 3.1 订正前后(1~ X)d 平均的预报结果与相应实况的 ACC 和 RMSE 评分

首先比较事后订正对 T42L9 模式预报的(1~

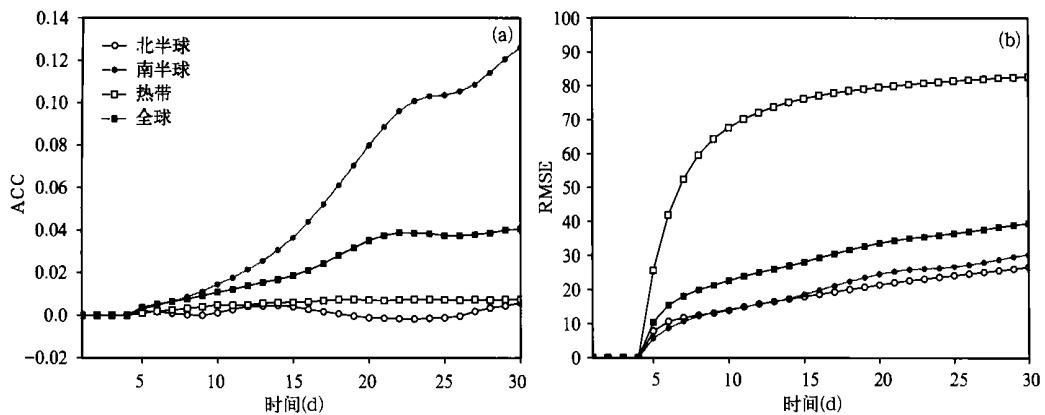


图 4 用非线性预报结果对 T42L9 模式 12 例 500 hPa 高度场预报结果订正引起的 ACC 变化(a) 和 RMSE 相对变化(b)

Fig. 4 The change of ACC and the relative change of RMSE of 500 hPa height predicted by T42L9 model with nonlinear correction (12-case average of 1996)

表 2 T42L9 模式预报的 1996 年 12 例 500 hPa 高度场订正前后(1~ 30)d 的平均 ACC

Table 2 ACC of day 1- 30 average 500 hPa height predicted by T42L9 model with and without nonlinear correction (12-case results of 1996)

个例(月份)	北半球(20°~ 90°N)		南半球(20°~ 90°S)		热带(20°S~ 20°N)		全球(90°S~ 90°N)	
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
1	0.212	0.170	0.301	0.555	0.803	0.817	0.273	0.352
2	-0.015	0.126	0.109	0.264	0.761	0.770	0.147	0.244
3	0.264	0.158	0.060	0.426	0.816	0.814	0.241	0.299
4	0.683	0.637	0.340	0.507	0.810	0.812	0.538	0.594
5	0.263	0.266	0.546	0.559	0.731	0.741	0.425	0.469
6	0.242	0.231	0.307	0.336	0.727	0.730	0.397	0.381
7	0.437	0.509	0.118	0.088	0.589	0.611	0.331	0.302
8	0.210	0.389	0.540	0.390	0.634	0.627	0.468	0.435
9	0.487	0.412	0.620	0.548	0.564	0.588	0.535	0.461
10	0.350	0.403	0.170	0.519	0.790	0.786	0.289	0.482
11	0.227	0.199	0.419	0.518	0.826	0.824	0.392	0.418
12	0.310	0.248	0.115	0.441	0.813	0.829	0.280	0.360
平均	0.306	0.312	0.304	0.429	0.739	0.746	0.360	0.400

表 3 T42L9 模式预报的 1996 年 12 例 500 hPa 高度场经订正后

(1~30) d 的平均 RMSE 的减小率 ( $|\Delta\text{RMSE}|/\text{RMSE}\%$ )Table 3 A relative decrease ( $|\Delta\text{RMSE}|/\text{RMSE}\%$ ) of RMSE of day 1~30 average 500 hPa height predicted by T42L9 model with nonlinear correction (12 case results of 1996)

月份	北半球(20°~90°N)	南半球(20°~90°S)	热带(20°S~20°N)	全球(90°S~90°N)
1	29.4	28.6	80.1	38.5
2	30.4	32.2	84.8	40.3
3	24.5	40.5	86.5	40.2
4	21.0	46.4	84.3	49.4
5	17.6	33.8	79.8	39.7
6	21.7	23.0	80.4	32.7
7	30.6	22.0	75.7	32.7
8	33.9	26.1	76.7	36.9
9	29.8	26.2	83.0	42.7
10	39.8	40.8	86.8	53.0
11	24.8	21.5	87.2	35.8
12	16.7	26.3	84.9	33.7
平均	26.5	30.3	82.6	39.4

$X$ ) d ( $X=1, 2 \dots 30$ ) 500 hPa 平均高度 ACC 的影响。图 4a 是订正后与订正前的 ACC 之差(12 例平均)均大于零, 而且两者之差随  $X$  的增加两者之差是逐渐增大的。也即平均天数  $X$  的增多, 订正后的 ACC 评分也随之提高。当  $X=30$  时即为对月平均的情况(表 2), 这时南半球中高纬度地区 ACC 提高了 0.125(41%), 即由订正前的 0.304 提高到 0.429; 热带地区 ACC 提高了 0.007(1.0%), 订正前为 0.739, 订正后为 0.746。北半球的 ACC 提高了 0.006(2.0%), 订正前后分别为 0.306 和 0.312; 全球的 ACC 由 0.360 提高到 0.400, 提高了 11%。总体上看, 订正对 ACC 评分的改进在南半球较显著, 而在北半球和热带地区不很明显。当然, 订正的效果还要看均方根误差(RMSE)的变化。

图 4b 为订正前后(1~ $X$ ) d 平均预报高度场 RMSE 的减小率。可以清楚地看到, 3 个预报区域订正后预报高度场的 RMSE 都大大小于订正前; 同样地, 平均天数  $N$  越多, 则 RMSE 的减小越显著。月平均的 RMSE 评分, 南、北半球中高纬度地区和热带地区分别由订正前的 71.2, 73.0 和 68.5 gpm 减小到 52.3, 51.0 和 11.9 gpm, 减小了 26.5%, 30.3% 和 82.6%; 全球范围由订正前的 71.7 gpm 减小到 43.4 gpm, 减小了 39.4%(表 3)。就是说, 无论哪个区域, 通过非线性预报结果的订正, 都大幅度地减小了 T42L9 模式 500 hPa 预报高度场的均方根误差。

就不同月份(个例)不同区域的订正效果而言, 北半球中高纬度地区大约有一半的月份订正后的 ACC 高于订正前(表 2), 平均还是订正后的 ACC 略高; 南半球中高纬度地区共 9 个月订正后的 ACC 高于订正前, 仅 7, 8, 9 月例外, 这两个区域似乎夏季月份的订正效果更好一些。对热带地区, 由于 T42L9 模式预报的 ACC 本身就较高, 订正后的变化不大, 但高于订正前的月份也居多。

从 RMSE 来看, 全部 12 个月(1~ $X$ ) d 订正后的值无一例外地都小于订正前, 且差异十分显著(表 3)。表 3 进一步说明, 订正后热带地区的 RMSE 减小的幅度最大。从季节变化看, 中高纬度地区夏季 RMSE 减小的幅度比冬季更大些; 热带地区则相反。

### 3.2 订正前后(1~ $X$ ) d 平均预报结果与相应 30 d 平均实况的评分

由于一般模式前几天的预报结果总体都较好, 且平均本身相当于滤波, 所以在对(1~ $X$ ) d 进行平均会随着加进的预报结果的逐渐增多(即  $X$  由 1 开始逐渐增大)趋向于接近相应 30 d 平均实况, 但随着  $X$  的进一步增大, 被加进的预报结果中包含的各种预报误差也越来越多, 使得平均结果逐渐远离 30 d 实况。就是说, (1~ $X$ ) d 的预报平均和相应 30 d 平均实况的 ACC 随加进天数  $X$  呈现出开始逐渐增多, 然后又逐渐减小的分布。于是存在这样的  $X_{\max}$ , 使  $X=X_{\max}$  时, (1~ $X$ ) d 的平均预报对应着 ACC 峰值。

表4 T42L9 模式预报的 1996 年 12 例北半球(20~ 90° N)、南半球(20~ 90°)及全球(90° S~ 90° N) 500 hPa 高度场订正前后的  $X_{\max}$  值

Table 4 Xmax of 500 hPa height prediction by T 42L9 model over the Northern Hemisphere (20- 90° N ), the Southern Hemisphere ( 20- 90° S ) and the Globe (90° S- 90° N) with and without correction (12-case results of 1996)

月份	北半球(20~ 90° N)		南半球(20~ 90° S)		全球(70° S~ 90° N)	
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
1	10	11	5	8	8	10
2	1	24	3	4	1	1
3	3	3	5	5	3	3
4	9	8	21	22	20	21
5	6	6	4	4	5	5
6	12	12	4	4	4	4
7	10	10	6	6	7	7
8	11	13	11	10	10	10
9	28	27	10	21	7	7
10	15	30	17	23	16	23
11	19	10	14	14	14	14
12	30	30	9	13	17	26
平均	12.8	15.3	9.1	11.2	9.3	10.8

Tracton(1989) 由 108 例模式预报结果得到的  $X_{\max} = 8$ 。张道民等(1996) 的 6 例模式结果平均为: 北半球  $X_{\max} = 13$ , 南半球  $X_{\max} = 8$ 。本文对上述 12 例 T42L9 模式预报结果分别进行统计, 然后平均, 得到的北半球  $X_{\max} = 12.8$ , 南半球  $X_{\max} = 9.1$ (表 4)。和 ACC 正好相反, 对 30 d 平均高度场实况的 RMSE 分布中, 存在  $X_{\min}$ , 则当  $X = X_{\min}$  对应 RMSE 最小值。本模式结果是, 北半球  $X_{\min} = 18$ , 南半球  $X_{\min} = 11$ 。显然,  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  越大说明预报结果越好。

对订正前后每个个例单独统计  $X_{\max}$ , 结果订正后大部分个例的  $X_{\max}$  都有不同程度的增加, 对所有个例的  $X_{\max}$  进行平均, 则 12 个例 3 个区域  $X_{\max}$  分别增加了 2.5, 2.1 和 1.5 d(表 4)。订正后  $X_{\min}$  的增大更是十分明显的, 在北半球由 18 变为 25, 南半球由 11 变为 30, 而且没有例外的个例。

订正后  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  的增大, 连同前述 ACC 和 RMSE 评分的改善意味着非线性方法给出的纬向平均高度场预报结果中确实比模式结果包含了更多的有用信息。

## 4 结论

本文将重构相空间理论和非线性时空序列预测方法应用于纬向平均环流的预报, 以克服数值模式对这一分量预报普遍存在的缺陷。首先在 36 a

NCEP/NCAR 再分析高度场资料的基础上, 建立了南、北半球中高纬度地区和低纬度地区 500, 300, 200 和 700 hPa 4 层的月预报逐候纬向高度距平场的非线性预报模型, 然后通过大量的试验确定了预报模型中的各参数等。

对 1996 年的 12 个月进行的逐候纬向高度距平场的月预报试验表明, 非线性模型总体上取得了优于持续性预报、气候预报和 T42L9 模式预报的结果, 表明非线性预测区域的划分以及预测模型中各参数的取值是基本合理的, 非线性时空序列的区域预测方法可以用于纬向高度距平场的月尺度逐候预报。

用非线性方法预报的 500 hPa 逐候纬向高度距平场对 T42L9 模式的相应预报结果进行了订正(事后订正), 不仅减小了模式的系统性误差, 也使 T42L9 模式 500 hPa 预报高度场评分得到一定程度的提高。其中南半球中高纬度地区 500 hPa 月平均预报高度场的 ACC 由订正前的 0.304 提高到 0.429, 提高了 41%; 热带地区 ACC 由订正前为 0.739, 提高到 0.746, 提高了 1.0%; 北半球的 ACC 由 0.306 提高到 0.312, 提高了 0.2%; 全球范围的 ACC 由 0.360 提高到了 0.400, 提高 11%。南、北半球中高纬度地区和热带地区的 RMSE 分别减小了 26.5%, 30.3% 和 82.6%; 全球范围减小了 39.4%。这些结果意味着非线性方法给出的纬向平均高度场预报结果的确比模式结果包含了更多的有用信息。



## 参考文献

- 1 丑纪范, 郗吉东. 长期数值天气预报(修定本). 北京: 气象出版社, 1995. 353pp
- 2 雷兆崇, 章基嘉. 数值模式中的谱方法. 北京: 气象出版社, 1991. 240pp
- 3 王绍武. 短期气候预测研究进展和现状. 见: 王绍武主编. 气候预测研究. 北京: 气象出版社, 1996. 1~ 17
- 4 Saha S. Response of the NMC MRF model to systematic error correction with integration. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(2): 345~ 360
- 5 Baumhelfner D B. Numerical extended-range prediction: Forecast skill using a low-resolution climate model. *Mon Rev Wea*, 1996, 124: 1965~ 1980
- 6 张道民, 纪立人, 李金龙. 动力延伸(月)预报的季节变化和误差分析. *大气科学*, 1997, 21(4): 141~ 150
- 7 龚建东. 统计与动力相结合改进月动力延伸预报的研究: [博士论文]. 兰州: 兰州大学大气科学系, 1999
- 8 李维京. 月动力延伸预报研究进展. 见: 项目办公室, 项目执行专家组编. 短期气候预测业务动力模式的研制(国家“九五”重中之重科技项目 96- 908 科技项目“我国短期气候预测系统的研究”之二). 北京: 气象出版社, 2000. 3~ 9
- 9 陈伯民. 改进动力延伸月预报的一种新方法. [博士论文]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000
- 10 Chen Bomin, Ji Liren, Yang Peicai, et al. Systematic errors of zonal-mean flow in dynamical monthly prediction and its improvement. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 20(1): 17~ 27
- 11 陈伯民, 纪立人, 杨培才等. 改善月动力延伸预报水平的一种新途径. 2002, 48(5): 513~ 520
- 12 Packard N H, Cretchfield J P, Farmer J D, et al. Geometry from time series. *Phys Rev Lett*, 1080, 45: 712~ 715
- 13 Taken F. Detecting strange attractors in turbulence. In: D A R, L S Younged. *Dynamical Systems and Turbulence*. New York: Springer-Verlag, 1981. 366~ 381
- 14 Essex C, Lookman T, Nerenberg M A H. The climate attractor over short timescales. *Nature*, 1987, 326: 64~ 66
- 15 Keppenne C L, Nicolis C. Global properties and local structure of the weather attractor over Western Europe. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 2356~ 2370
- 16 Abarbanel H D I. The analysis of observed chaotic data in physical system. *Rev Modern Phys*, 1993, 65(4): 1331~ 1392
- 17 杨培才. 场时间序列、时空混沌和区域预测- 混沌时间序列分析的一个新台阶. 见: 国家自然科学基金委员会, 中国科学自然与社会协调发展局, 中国科学院大气物理研究所等编. 现代大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 1996. 189~ 193
- 18 Yang Peicai, Zhou Xiuji, Bian Jianchun. A nonlinear regional prediction experiment on a short-range climatic process of the atmospheric ozone. *J Geophys Res*, 2000, 105(D10): 12253~ 12258
- 19 卞建春. 一些大气过程的非线性统计分析和预报: [博士论文]. 北京: 北京大学大气科学系. 1999
- 20 龚建东, 丑纪范. 论过去资料在数值天气预报中的理论和方法. *高原气象*, 1999, 18(3): 392~ 399
- 21 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
- 22 Zhang Daomin, Li Jinlong, Ji Liren, et al. A global spectral model and test of its performance. *Adv Atmos Sci*, 1995, 12(1): 67~ 78
- 23 陈伯民, 纪立人, 杨培才等. 与非线性区域预测结合的月延伸预报试验 II: 波动分量预报的改进. 2004, 62(1): 11~ 19
- 24 范新刚. 集合预报方法的全局研究. *气象学报*, 1999, 57(1): 74~ 83
- 25 范新刚, 张红亮, 丑纪范. 气候系统的可预报性的全局研究. *气象学报*, 1999, 57(2): 190~ 197
- 26 徐士良. 计算机常用算法(第二版). 北京: 清华大学出版社, 1995. 26~ 28
- 27 Casdagli M. Nonlinear prediction of chaotic time series. *Phys D*, 1989, 35: 335~ 356

## MONTHLY EXTENDED PREDICTING EXPERIMENTS WITH NON-LINEAR REGIONAL PREDICTION I : PREDICTION OF ZONAL MEAN FLOW

Chen Bomin

(*Shanghai Meteorological Institute, Shanghai 200030;  
Institute of Atmospheric Physics, LASG, CAS, Beijing 100029*)

Ji Liren Yang Peicai Zhang Daomin

(*LASG, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029*)

### Abstract

Systematic errors have recently been founded to be distinct in the zonal mean component forecasts, which account for a large portion of the total monthly-mean forecast errors. To overcome the difficulty of numerical model, the monthly pentad-mean nonlinear dynamic regional prediction models of the zonal mean geopotential height at 200, 300, 500 and 700 hPa based on a large number of historical data (NCEP/NCAR reanalysis data) were constituted by employing the local approximation of the phase space reconstruction theory and nonlinear spatio-temporal series prediction method. The 12-month forecast experiments of 1996 indicated that the results of the nonlinear model are better than those of persistent, climatic prediction and T42L9 model either over the high- and mid-latitude areas of the northern and southern hemisphere or over the tropical area. The monthly-mean height root-mean-square of T42L9 model was considerably decreased with a change of 30.4%, 26.6%, 82.6% and 39.4% respectively over the high- and mid-latitude of the Northern Hemisphere, over the high- and mid-latitude of the Southern Hemisphere, over the tropics and over the Globe respectively. The corresponding anomaly correlation coefficients over the four areas were respectively increased from 0.306 to 0.312, from 0.304 to 0.429, 0.739 to 0.746 and from 0.360 to 0.400 (averagely a relative change of 11.0% over the Globe) by nonlinear correction after integration. It implies that the forecasts given by nonlinear model includes more useful information than those of T42L9 model.

**Key words:** Dynamical extended prediction, zonal flow, persistent prediction, climatic prediction, nonlinear regional prediction, correction.