

平均环流参数化预报的初步试验

陈英仪 佟建平

(国家海洋环境预报中心, 北京, 100081)

提 要

本文提出一个对包括下垫面温度在内的未知总强迫项进行参数化作平均环流的预报方法。该参数化方案是假设未知作用力距平与流函数距平成正比, 其比例系数是空间位置的函数, 得到一个平均环流距平的预报方程。该方程表明, 预报结果的好坏不仅取决于初始状态和动力学的考虑, 还取决于环流的历史演变情况。

根据历史资料反求其比例系数, 所作的平均环流距平的历史拟合结果令人满意。独立样本的预报结果比不上历史拟合的结果。试验结果还表明, 如果加长历史资料的时间序列, 把310天的历史资料增加到620天, 则独立样本的预报结果有较大的改善, 不仅有很多旬平均和月平均的个例非常成功, 而且预报的平均准确率已超过一般惯性预报的水平。

关键词: 平均环流; 参数化; 预报。

一、引 言

长期数值预报是各国气象工作者主攻的课题之一。到目前为止, 不仅报两周后某一天的天气不可能, 即使预报两周后某一时段的平均天气也尚未达到能发布业务预报的水平。不论用GCM的动力学模式还是用经验的统计预报方法, 长期的平均天气预报的准确率虽然对不少的预报个例来说相当成功, 但总的来说, 其准确率和一般的惯性预报水平相差不太多。

像GCM这样的动力学预报方法和经验的统计预报方法各有其优缺点。正如丑纪范指出^[1]: “统计方法利用了积累的大量实况资料, 却没有或没有充分利用我们已掌握的物理知识; 动力方法正巧相反, 它利用了物理知识, 却没有利用或没有充分利用已有的大量实况资料。”

在我国也曾发展过具有特色的、介于这两者之间的方法。如“长期数值预报小组”^[2,3]提出的距平滤波模式有其独到之处。然而, 由于该模式的第一步要报好地面(海面)温度, 而人们现在对海洋及陆地的物理规律远远比不上对大气过程了解得透彻, 资料相对也很缺乏。兰州大学建立了一个考虑演变的动力-统计模式(见文献[1]的第五章), 该模式能把统计和动力方法的优点吸收过来, 但由于它把下垫面温度分布作为解预报问题的初始条件, 这也遇到了与距平滤波模式同样的困难。

本文根据陈英仪等^[4,5]推导的预报平均环流距平的模式, 提出了一个对包括地面温

度在内的所有未知强迫项进行参数化处理的方法, 建立一个既考虑了动力学也考虑了环流历史演变的参数化预报模式, 并用实况资料进行预报试验。

下一节将简单地描述一下模式及所用的资料; 未知强迫项的参数化方案及预报结果在第三和第四节给出; 第五节作一些预报的改进试验; 最后一节是结论和讨论。

二、模式及资料

大气的非绝热准地转正压位涡距平方程可写成

$$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla^2 - \lambda^2) \psi' + J(\bar{\psi}, \nabla^2 \psi') + J(\psi', \nabla^2 \bar{\psi} + \sin \varphi) = F', \quad (1)$$

方程已用 $(2\Omega)^{-1}$ 和地球半径 a 作为时间和长度尺度无量纲化了, λ^2 为散度订正因子, ψ 为流函数, 上标“—”表示气候平均, “'”为对气候平均的距平值, Jacobi 行列式中的 $\sin \varphi$ 项为 β 效应, F' 为非绝热和非地转作用距平以及瞬变涡旋距平的合成, 称为总的未知强迫作用距平。

对(1)式的时间导数取前差近似, 并对距平流函数 ψ' 取某段时间的平均($\hat{\psi}$), 可得平均流函数距平的方程为(详细推导见文献[5])

$$\left[1 + \frac{1}{2} \Delta t (Q-1) (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} L \right] \hat{\psi} = [1 - \Delta t (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} L] \psi'(0) + \Delta t (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} F'(0) + \frac{\Delta t}{Q} (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} \sum_{n=1}^{Q-1} (Q-n) [F'(n\Delta t) - L\psi''(n\Delta t)], \quad (2)$$

其中 L 为线性算子, 其表达式为

$$L = J(\bar{\psi}, \nabla^2) + J(-, \nabla^2 \bar{\psi} + \sin \varphi), \quad (3)$$

Δt 为时间步长, Q 是达到想预报平均时间所需的步数, 而 $\psi'' = \psi' - \hat{\psi}$ 是每天相对于气候值的距平量与所研究的平均距平量之差。

本文所用的资料是 1967—1976 年 1 月每日平均的北半球 500hPa 位势高度, 并在波数 15 处作三角截断的球谱函数的系数。流函数可用平衡方程由位势高度场算出。我们把高度场处理成对赤道为对称, 因而所导出的流函数场对赤道为反对称。根据这样的资料, 本文的所有计算将在球谱空间中进行。

三、未知强迫项的参数化方案

文献[5]已详细分析了(2)式各项对平均环流距平的相对贡献, 发现对长于 10 天的平均环流预报起决定作用的因子是未知的总强迫项。本文的重点就是研究如何参数化强迫项, 从而提高平均环流预报的准确率。

由于非绝热作用一般可用下垫面的距平温度来参数化(见文献[2]), 而下垫面的距平温度与大气的距平高度场(或流函数场)有一定的关系。另外, 大气的瞬变涡旋距平有一些文献中认为起一种耗散作用^[6,7], 并用类似 $\sim (-\psi')$ 的关系作参数化处理。所以, 我们可以假设现在的未知强迫力距平与流函数距平有如下关系:

$$F' = \alpha \psi', \quad (4)$$

正如上节指出,本文的所有计算是在球谐谱空间进行,因此,本文所有公式中的量均是球谐谱的复系数,并略去了 n, m 波数的上下标。(4)式中的比例系数 α 是与 n, m 有关的一个矩阵。

若有 S 次观测资料,(4)式就是 S 个线性方程组。 F' 和 ψ' 都可借助于观测资料得到(F' 可根据实况资料由(1)式求得),并认为是实测值。现在的问题是要找一个 α ,使(4)式计算得到的左端项的近似值与实测的 F' 值的偏差的平方和为极小值。 α 可采用下述方法计算。

(1) 最小二乘法

根据最小二乘法的原理, α 可表示为

$$\alpha = (G^T F)^T (G^T G)^{-1}, \quad (5)$$

其中 G 和 F 分别为 ψ' 和 F' 的实测值组成的 $S \times I$ 矩阵, I 为 ψ' 和 F' 向量的维数。在作波数为15的三角截断的情况下,它们都是136维的向量, S 是观测资料数,对1967—1976年1月份日平均资料而言, $S=310$ 。上标“ T ”表示矩阵的转置,最后得到的 α 为 $I \times I$ (即 136×136)的方阵。

(2) 反演方法

用(5)式计算 α 时,可能会因为 $(G^T G)$ 是奇异矩阵或接近奇异矩阵而出现困难(见文献[1]中§5.8节),反演方法就是为了克服这困难而设计的,计算公式为

$$\alpha^T = V_P \Lambda_P^{-1} U_P^T F. \quad (6)$$

设 $(G^T G)$ 这个 $I \times I$ 阶实对称矩阵有 P 个不为零的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_P$,而 $(I-P)$ 个特征值为零或接近零。相应这 P 个特征值的特征向量可组成一个 $I \times P$ 矩阵 V_P ; Λ_P 是由 P 个特征值组成的对角矩阵; U_P 是 $S \times P$ 矩阵,可由下式计算得到

$$U_i = \frac{1}{\lambda_i} G V_i. \quad (7)$$

由(6)式计算得到的 α 将使无论 $(G^T G)$ 是奇异矩阵或者是非奇异矩阵,问题都是适定的(详细证明见文献[1]中§5.8)。

下面推导参数化的预报方程。把(4)式代入正压距平位涡方程(1)后,可写成

$$\frac{\partial \psi'}{\partial t} = (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} (\alpha - L) \psi'. \quad (8)$$

由上式可见,参数化的结果实际上是对算子 L 作个修正。仿照文献[5]的步骤,可推导出平均环流满足的方程:

$$\hat{\psi} = \left[1 + \frac{1}{2} \Delta t (Q-1) (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} L_P \right]^{-1} [1 - \Delta t (\nabla^2 - \lambda^2)^{-1} L_P] \psi'(0), \quad (9)$$

其中

$$L_P = L - \alpha \quad (10)$$

可称为参数化算子。(9)式已略去了包含 ψ'' 的项,因为文献[4, 5]都已证明这一项是不重要的。(9)式就成了平均环流参数化的预报模式,该式与文献[5]的“修正的惯性预报模式”在形式上是完全一样的,所不同的是现在的参数化算子 L_P 代替了线性算子 L 。一旦 α 从历史资料中求得后,平均流函数距平 $\hat{\psi}$ 很容易根据(9)式求一矩阵的逆并作适当的矩阵运算得到。当参数 λ^2 取定后(本文取 $\lambda^2=120$),平均距平流函数 ψ 主要受初始状

态 $\psi(0)$ 、线性算子 L 以及由历史资料计算得到的参数 α 的影响。而 α 的计算实际上考虑了环流的历史演变。因此, 这个模式既考虑了大气变化的物理规律也考虑了历史的演变资料, 这就将问题提为初值问题的动力学预报方法和依据历史演变的统计预报方法结合起来了。

四、参数化的预报结果和讨论

预报好坏的标准采用两个指标来衡量, 一是预报场和观测场之间的相关系数 ρ , 二是预报和观测场之间的均方根误差 E 。它们在球谐函数中的表达式为

$$\rho = \frac{\sum_m \sum_n X_n^m Y_n^m f - X_0^0 Y_0^0 / 2}{\left(\sum_m \sum_n Y_n^m f - Y_0^0 / 2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_m \sum_n X_n^m f - X_0^0 / 2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$E = \left[\sum_m \sum_n (X_n^m - Y_n^m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

其中

$$f = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{对 } m=0 \\ 1, & \text{对 } m>0 \end{cases}$$

X_n^m 和 Y_n^m 分别为预报的和观测场的球谐函数的系数, X_0^0 和 Y_0^0 为它们在半球上的平均值。E 是一个无量纲数, 把它化为有量纲数时应与 ψ 有相同的量纲, 即应乘以 $2\Omega a^2$ 。除了上述两个判据之外, 预报结果的好坏还准备与惯性预报作比较, 这是因为冬季的惯性预报一般都较好, 而且, 只有结果超过惯性预报的预报方法在实际预报中才有意义。我们所用惯性预报是指把初始一天的天气外推以后一段时间的平均天气, 但也有人把前一段时间的平均天气外推下一时段平均天气定义为惯性预报。Roads 等^[9]曾指出, 由前者定义得到的惯性预报与实况的相关系数一般比后者的定义高。因此, 我们这里用的是较高的标准。

最好采用上节叙述的反演方法求 α , 但由于该方法需要的计算机内存较大, 计算也较复杂, 而最小二乘法相对比较简单, 但可能因矩阵奇异使结果的误差较大。因此, 本文首先采用一般的最小二乘法, 然后检查 $(G^T G)$ 的特征值。如果这些特征值没有零或接近零的值, 则最小二乘法的结果可认可; 否则再用反演方法进行计算。

拟合和预报的结果见图 1 和图 2。图 1 和图 2 中的曲线 I_A 为 1967—1976 年 1 月份历史拟合的平均距平流函数与观测值之间的平均相关系数和平均均方根误差。惯性预报的结果用曲线 P 也表示在这两个图中。由图可见, 拟合的结果令人满意, 1 天平均的相关系数达 0.86, 10 天平均的相关也达到 0.73, 而且均方根误差也非常小。不过, 和惯性预报一样, 随着所取平均时间的加长, 相关系数下降得很快, 30 天平均的相关降到 0.37, 但均方差随所取时间的长短变化不很大。

由于资料序列较短, 我们采用交叉检验来设计独立样本的预报。其方法是, 用其它九年的资料作为“历史”资料计算 α , 用它来预报该年的天气。例如, 用 1967—1975 年的资料求得的 α 预报 1976 年; 用 1967—1974 年以及 1976 年的资料求出 α 去预报 1975 年, 依此类推, 这样我们可得到 10 年的独立样本序列。独立样本预报的结果见图 1 和

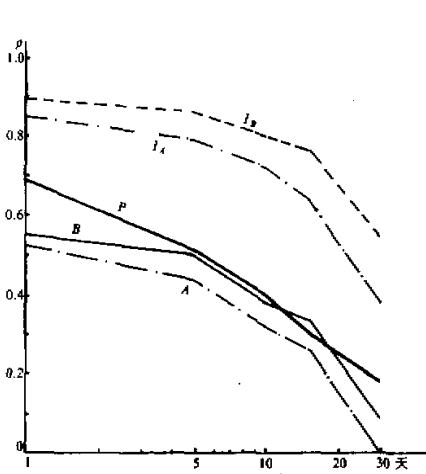


图1 平均流函数的历史拟合和预报结果与观测场之间的平均相关系数与所取平均时间的关系

详细说明见正文

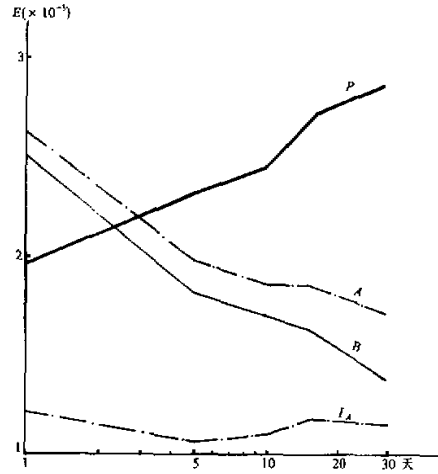


图2 除纵坐标为均方根误差外,其余与图1相同。

图2中的曲线A,可见,相关系数不但比历史拟合结果差很多,而且也比不上一般的惯性预报。然而,与惯性预报不同的是独立样本参数化预报的均方差随所取平均时间的加长而减小,预报的误差虽然比历史拟合大,但除1天的平均预报外,5—30天平均预报的均方差均比一般的惯性预报小。由此看来,参数化预报在报强度上比较成功,但在报正、负中心位置上不如惯性预报。

独立样本参数化预报与实况之间的流型相关系数不比一般惯性预报好的可能原因有两个。其一是当 $\alpha=0$ 时,只有线性算子 L 作用在一个初始场 $\psi'(0)$ 上的修正惯性预报比一般惯性预报差(见文献[5]),原因也正如文献[5]分析那样,很可能是我们的时间步长取得太大($\Delta t=24$ 小时,受观测资料的限制)所致,造成Jacobi项的计算不准确。另一个原因是我们用的历史资料序列太短,按一般最小二乘法的要求,资料的数目最好比未知数大5倍以上,这里我们的未知数为136,资料只有310天,估计这是造成预报结果不够好的主要原因。

五、参数化预报的改进试验

根据上节的分析造成结果的相关系数不够好的原因,本节准备从以下两方面作进一步的试验。

首先,假如由于线性算子 L 计算不准确,我们索性把这不准确的部分归入未知的强迫项中,即令

$$\frac{\partial \psi'}{\partial t} = F' = \alpha_1 \psi' \quad (13)$$

略去 ψ'' 项后的平均环流的参数化预报方程为

$$\hat{\psi} = \left[1 - \frac{1}{2} \Delta t (Q-1) \alpha_1 \right]^{-1} (1 + \Delta t \alpha_1) \psi(0). \quad (14)$$

按上节同样的步骤求 α_1 。历史拟合和独立样本预报的结果见图 1 和图 2 中的曲线 I_B 和 B (图 2 只给出独立样本预报的结果)。由图可见, 不论是历史拟合还是独立样本预报的结果都有所改善, 独立样本预报的相关系数已经接近惯性预报, 其均方根误差除 1 天平均预报外都远小于惯性预报, 也小于上节的独立样本预报。

其次, 我们加进 1967—1976 年 12 月的资料, 即认为冬季的天气可归结成相同的类型, 主要目的在于做增加历史资料的时间序列的试验。把 10 年 1 月和 12 月份的资料一起取平均, 从实况资料减去该平均值作为距平值。采用 (13) 式的办法, 甚至可不必把高度场转换为流函数场, 直接预报 500hPa 平均高度距平场, 即

$$\frac{\partial H'}{\partial t} = \alpha_2 H', \quad (15)$$

略去 H'' 后的平均高度距平的参数化预报方程为

$$\hat{H} = \left[1 - \frac{1}{2} \Delta t (Q-1) \alpha_2 \right]^{-1} (1 + \Delta t \alpha_2) H(0). \quad (16)$$

用上节同样的步骤计算 α_2 , 这时总的历史资料的天数为 620 天, 比上节多一倍, 未知数仍为 136。历史拟合和独立样本参数化预报与实况的相关系数见图 3 中的曲线 I_B 和 B , 一般惯性预报的结果仍用曲线 P 表示。可见, 独立样本参数化预报的平均相关系数已超过一般的惯性预报, 均方根误差也比惯性预报小 (图略), 而且历史拟合与独立样本参数化预报的结果之间的差别也大大减小了。

图 4 和图 5 给出了用 (16) 式预报的 1 月份旬平均预报的 30 个个例和月平均预报的 10 个个例与实况的相关系数的结果 (曲线 B)。一般惯性预报的结果用虚线 P 表示。可见每个个例的结果差别是较大的。从某些个例看, 预报结果是非常不错的, 如 1967 年头 2 个旬、1968 年各旬、1969 年头旬、1970 年头旬和 1972—1976 年各旬的预报, 以及除 1968、1971 和 1975 年 1 月份的月平均预报外, 其它例子的预报都是很成功的。

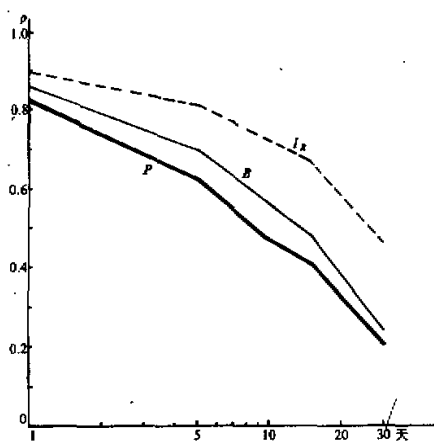


图 3 用 (16) 式预报的平均距平高度场与观测场之间的平均相关系数与所取平均时间的关系
详细说明见正文

当然也有不少个例的预报结果还未超过惯性预报。另外, 1 月份的预报结果比 12 月好(12 月的预报结果没有用图表示), 但作为平均水平, 正如图 3 所示, 已超过了惯性预报。

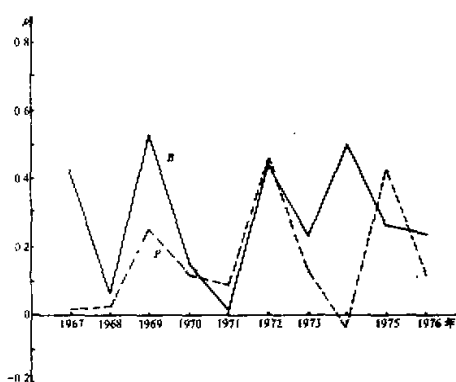


图 4 用(16)式预报的 1 月份旬预报的高度场的
30 个个例与实况之相关
虚线 P 为一般惯性预报的结果

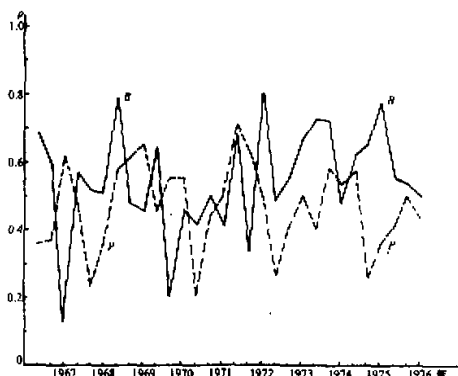


图 5 除为月平均预报外, 其余与图 4 相同

六、结论和讨论

本文提出一个对包括下垫面温度在内的未知强迫作用进行参数化作平均环流预报的方法。该参数化方案比较简单, 假设未知强迫力距平与流函数距平成正比, 得到一个平均环流距平的预报模式。该模式表明, 预报结果的好坏不仅取决于初始状态和动力学的考虑, 还取决于环流的历史演变情况。从而把动力学的预报方法以及统计预报方法有机地结合了起来。

根据历史资料反求其比例系数, 所作的平均环流距平的历史拟合结果令人满意。独立样本参数化预报的结果不如历史拟合的结果好。试验结果也表明, 如果加长历史资料的时间系列, 把 310 天增加到 620 天, 则独立样本参数化预报的结果有很大改善。独立样本参数化预报的准确率平均已超过一般的惯性预报水平。有不少旬平均和月平均预报个例结果非常成功。

这一参数化预报方法的优点是明显的, 首先它不必先报下垫面温度, 而且可以充分利用所观测到的比较完整的大气演变的历史资料。

用本文的预报方法进一步提高预报准确率的潜力是存在的。首先, 由于现有的模型是线性的, 而统计预报的经验告诉我们, 所取的历史资料越多越好, 且本文用增加历史资料样本数的试验也证明了这一点, 相信用更多的历史资料会得到更好的结果。其次, 还可以从动力学的角度作改进。假如不考虑任何作用力的修正惯性预报的结果能超过一

般的惯性预报, 则作用力参数化的结果将会在修正惯性预报的基础上提高一步, 从而必将大大优于一般的惯性预报。毫无疑问, 继续作更多的预报试验研究是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] 江纪范, 1986, 长期数值天气预报, 气象出版社, 190—191.
- [2] Group of Long-Range Numerical Weather Forecasting, 1977, On the physical basis of a model of long-range numerical weather forecasting, *Scientia Sinica*, **20**, 377—390.
- [3] Group of Long-Range Numerical Weather Forecasting, 1979, A filtering method for long-range numerical weather forecasting, *Scientia Sinica*, **22**, 661—674.
- [4] Chen Y. Y., Chen S. C. and Roads, J. O., 1991, Linear predictions and diagnosis of time-averages, *Tellus*, in press.
- [5] 陈英仪, 佟建平, 平均环流的诊断与预报, 大气科学, 即将发表.
- [6] Lau, N. C., 1979, The observed structure of tropospheric stationary waves and the local balances of vorticity and heat, *J. Atmos. Sci.*, **36**, 996—1016.
- [7] Youngblut, C., and T. Sasamori, 1980, The nonlinear effects of transient and stationary eddies on the winter mean circulation, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 1944—1957.
- [8] Roads, J. O., and T. P. Barnett, 1984, Forecasts of 500 mb height using a dynamically oriented statistical model, *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1354—1369.

Preliminary Experiments of Parameterized Forecasts of Time-Mean Circulations

Chen Yingyi Tong Jianping

(National Research Center for Marine Environment Forecasts, Beijing, 100081)

Abstract

A scheme of parameterizing all unknown forcings for time-mean forecasts is proposed. It is assumed that the relationship between all unknown forcings and the anomaly streamfunction is spatially dependent, a parameterized model for time-mean circulation forecasts which depends not only upon the initial state and the dynamics but also upon the historic evolution of circulations is developed.

The parameterized forecasts show significant improvement in a dependent data set. But the results of independent data set are worse than those of dependent one. The experiments here also show that the more the data, the better the forecasts in the independent data set. When the time series of the data set are long enough, the skills of forecasts are very successful in some cases and are superior to the persistence on an average sense.

Key words: Time-mean Circulations; Parameterization; Forecasts.