

一种集成预报技术——最优调合法^①

曹鸿兴 谷湘潜

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

为使多种方法的预报结果集成一个优化的预报,作者提出了一种称为最优调合法的集成预报技术。该技术既考虑了持续性预报又考虑了预报方法所具有的系统性误差。首先运用多种方法建立多年试报数据集,随后对数据集构建线性模型,用此模型对我国汛期(6~8月)降水场进行了试验,证明最优调合法能显著提高预报技巧,但其效果有明显的年际差别。

关键词: 预报集成 年际气候预报 最优化

引 言

当我们用多种方法,如数值模式的、统计方法的、人工智能的等,作出了对某一预报对象的预报后,就面临着如何从这若干种预报中选择其中之一以提供给用户,认为它是这些预报中与未来实况最符合的那个预报,这是一种几者必居其一的做法。另一种做法则是将这若干种预报组合起来,尤其对气象来说,常常面临的是一个物理场的预报,这种称之为集成预报的方法就能博采各种方法的长处,即某种方法可能在某地区、另一种方法可能在温度而不是降水上报得更好,而一旦几种预报组装起来,就可能得到一个比较符合未来实况的预报。

集成预报的想法由来已久^[1],但只是在基于计算机的客观方法投入业务后,集成预报问题才显得突出出来。在国际上通常将集成预报称为组合预报(combining 或 consolidated forecast)^[2],虽已对此有不少研究,但无论在理论上,还是在实践上都处于初创期。

Brown 和 Murphy 运用英国气象局和 Oceanroutes 公司关于路面气温预报的结果试作了组合预报^[3],其结果表明,用多元回归

能改进预报技巧,并明确指出,运用组合预报可以吸取各种方法的长处而不是陷在孰优孰劣的无谓争论中。

将数值模式产品和统计预报结果组合起来,尤其令人注目。因为这两种方法的争论由来已久。现在的战略是何者报的好就用它而不是人为淘汰某种方法。Colman 等^[4]运用三种方法的预报结果(多元回归、判别分析和 GCM 模式)试作跨月的 1998 年春季(3~5月)巴西东北部的降水集成,其与实况的相关系数达 0.626。Unger 等^[5]则试图将海气耦合模式(CGCM)、构造相似(CA)和典型相关分析(CCA)三者预报结果组合起来。起报月为 1998 年 1 月,跨隔 2、3、4 月,做 5 月至下一年 5 月共 12.5 月的预报,预报对象为 Ni-no 3.4 的海温,其结论为,组合预报要比当时三者中最好的预报要差,但要比三者的平均预报要好。

本文针对集成预报问题的性质,运用最优化理论中的观点,提出了一种预报集成方法,将此方法应用到汛期(6~8月)降水预报中,取得了明显效果。

1 原理

① 由中国气象科学研究院专项研究基金资助

设有 p 种方法对在时次 t 场 x_t 作出了 p 个预报:

$$X_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{pt})^T$$

而相应观测值为 z_t , 集成预报可以提成一个最优化问题。设目标函数 Q 为:

$$Q = \sum_{t=1}^q (z_t - W^T X_t)^T H^{-1} (z_t - W^T X_t) \quad (1)$$

式中 W 为集成系数向量, $W = (w_1, w_2, \dots, w_p)^T$ 。在数学上, 可将 W 视为对 X_t 的一种变换。 H 为集成预报误差协方差阵; T 表示转置, -1 表示矩阵之逆。当预报场 X_t 具有 M 个测站或网格点时, $H = (h_{ij})_{MXM}$ 为一实对称阵。 q 为采样次数。显然集成预报问题就变为对目标函数 Q 求极小值, 即当 $\min Q$ 时, 求系数向量 W 。由于在式(1)中的 H 与 W 取值有关, 因此求 Q 极小就变为一个非线性问题。

当只对一个测站或一个格点求集成预报时 H^{-1} 变为一个数, 式(1)就变为

$$Q = \sum_{t=1}^q e_t^2 \quad (2)$$

式中 $e_t = (z_t - W^T X_t)$ 。求系数向量 W 就变成一个误差平方极小化问题。最通常的办法是用最小二乘法来求解。

现在针对汛期预报的特点设计我们的方案。设第 k 测站的集成值 $\hat{y}_k, k = 1, 2, \dots, M, M$ 为测站数, 第 i 个方法的预报值 $x_{ik}, i = 1, 2, \dots, p$, 上年 k 站的实况 y_k^i , 预报年的观测值 z_k , 显然有

$$\hat{y}_k = z_k + e_k \quad (3)$$

e_k 为误差。设

$$\hat{y}_k = y_k^c + w_0 (y_k^i - y_k^c) + \sum_{i=1}^p w_i (x_{ik} - \bar{x}_{ik}) \quad (4)$$

式中 \bar{x}_{ik} 为第 i 种方法对第 k 站作了 N 年预报的平均值, y_k^c 为第 k 站预报量 y 的气候平均值。式(4)中考虑 \bar{x}_{ik} 是为了消除集成预报的系统性误差。式中第二项是为了考虑持续性预报的贡献。显然有

当 $w_0 = 0, w_i = 0 (i = 1, 2, \dots, p)$ 时, $\hat{y}_k = y_k^c$, 即取气候均值作为预报值。

当 $w_0 = 1, w_i = 0$ 时, $\hat{y}_k = y_k^i$, 即持续性预报。

式(4)的含义是, 第 k 站的集成预报等于该站气候平均值 y_k^c 加上一个订正, 该订正由持续性预报和 p 个方法预报的线性组合来构成。

省略 k , 令 $W = (1, w_0, w_1, \dots, w_p)^T$

$$A = \begin{bmatrix} y^c & \Delta y_1^i & \Delta x_{11} & \Delta x_{21} & \dots & \Delta x_{p1} \\ y^c & \Delta y_2^i & \Delta x_{12} & \Delta x_{22} & \dots & \Delta x_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y^c & \Delta y_N^i & \Delta x_{1N} & \Delta x_{2N} & \dots & \Delta x_{pN} \end{bmatrix}$$

式中 $\Delta y_j^i = (y_j^i - y^c)$ $\Delta x_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_i)$, N 为估计集成系数 w 所用为样本量, 将式(4)写为矩阵形式

$$Z = AW + e \quad (5)$$

系数 W 为最小二乘估计

$$\hat{W} = (A^T A)^{-1} A^T Z \quad (6)$$

对降水预报来说, 当它用距平百分率表示时, 式(4)中的 y_k^i 已不存在, 式(4)改写为(省略 k)

$$\hat{R} = a_0 + w_0 R^l + \sum_{i=1}^p w_i (R_i - \bar{R}_i) \quad (7)$$

式中 a_0 为待求常数, R^l 为上一年实测降水距平百分率, R_i 为第 i 种方法对预报年的降水预报, \bar{R}_i 为第 i 种方法作了 N 年预报的平均值。下面的计算是用式(7)来进行的。

如式(4)、(7)所示, 若将持续性预报视为初估值, 而多个方法的预报视为 p 个“测站”的观测值, 式(4)、(7)所表示的公式其思想与数值预报中的最优内插法相类似^[6], 故我们称之为集成预报的最优调合法^[7]。

运用最小二乘估计、极大似然估计以及发展不久的遗传算法等, 估计出式(7)中的权重 $a_0, w_0, w_1, \dots, w_p$ 等, 即可将 p 种预报结果集成。

2 持续性预报

在短时、短期天气预报中, 持续性预报往往有很高的评分, 因为天气变化常是一种连续的过程。而在月际、季际和年际气候预报

中,则凭经验认为持续性预报的效果差。实际情况是否如此呢?我们用1951~1997年的全国汛期(6~8月)降水资料作了持续性预报试验,即把上一年的实测值当作当年的预报,再计算两个降水场间的距平相关系数(ACC)、均方根误差($RMSE$)和国家气候中心预测室评分 p_c ^[8](表略)。有些年份如1986年,持续性预报的评分都达到很高的技巧, $ACC = 0.23$, $RMSE = 40.7\text{mm}$, $p_c = 77.5\%$,这是一些相当有效的预报方法也难以达到的水平。1995年也相当高, $ACC = 0.25$, $RMSE = 48.5\text{mm}$, $p_c = 76.3\%$ 。有些年份则持续性预报相当差,如1981年, $ACC = -0.27$, $RMSE = 76.9$, $p_c = 57.3\%$ 。三种预报评分在同一年可以有很大的差别,例如,1955年 $ACC = 0.25$ 是很高的,但 $RMSE = 59.5\text{mm}$ 却很大, p_c 评分也不高, $p_c = 71.6\%$ 。46年的平均, $ACC = 0.01$, $RMSE = 54.8\text{mm}$, $p_c = 65.7\%$,我们统计了1996~1997年各家用不同方法所作41次预报的平均, $ACC = 0.00073$, $p_c = 64.06\%$ 。由此可见在式(4)中引进持续性预报是需要的,因为就多年平均而言,它有着一定的预报技巧。

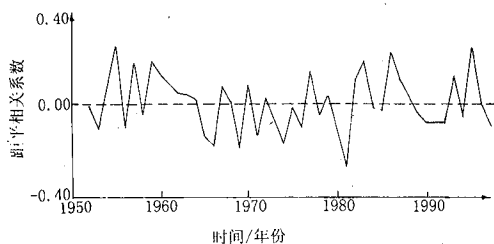


图1 持续性预报的距平相关系数(ACC)逐年变化

由于 ACC 是国际上通用的场预报评分,故绘出了持续性预报 ACC 的逐年变化图(图1)。由图可见,在某些时段,持续性预报评分较高,如1957~1964年,8年 ACC 平均达0.08,而1969~1979年期间评分则低,8年平均仅为-0.07。1989~1992年和1993~1996年期间 ACC 平均分别为正值和负值。可以看出场降水的年际持续性有一定的周期特征。

3 降水预报集成

预报对象为6~8月全国降水总量。以1951~1979年资料作为样本集,对1980~1997年作回报,预报时效为一年,即制作实际预报。计有三种方法制作回报值,方法一为考虑海温、副高等因子的多元回归,其中还考虑我国降水场的周期;方法二为相加法;方法三为均生函数场模型。利用1980~1997年三种方法回报值为数据,运用最小二乘法对式(7)中的参数 a_0 、 w_0 、 w_1 、 w_2 、 w_3 进行估计,藉此制作1998年汛期降水预报。

表1列出了三种方法及其集成预报的均方根误差($RMSE$)。由表可见,无论哪种方法,各年的均方根误差有很大的差别,如方法一,最小的 $RMSE$ 仅30.82mm(1989),最大为57.04mm(1992),最大与最小之差达 $(57.04 - 30.82)/30.82 = 85.1\%$;而方法三,最大与最小 $RMSE$ 之差仅为70.9%。经用式(7)集成后 $RMSE$ 明显减小。三种回报的 $RMSE$ 的18年平均值分别为41.54、44.22、46.99mm,而集成预报的 $RMSE$ 仅为34.26mm,从三法 $RMSE$ 平均44.25下降到34.26mm,下降了22.6%。另外,我们还用距平相关系数(ACC)和国家气候中心预测室评分 p_c 对回报场和集成预报场进行了检验,18年的平均值见表2。可见无论是 ACC 还是 p_c ,集成预报都有明显的改进,这一方面应归因于最优调合法的集成能力,另一方面可能与三种方法的预报能力各有千秋有关。按 $RMSE$ 评分,以方法一最好,以 ACC 评分,方法三最好,以 p_c 评分,三者很接近。这样通过最优调合法集成,能达到互补的目的。另外,三种方法 ACC 和 p_c 平均值比持续性预报高不了多少,有的甚至还低,但一经集成,它的 $RMSE$ 、 ACC 和 p_c 比持续性预报明显要好,可见最优调合法的集成效果相当好。但这是就平均情况而言的,若就某一年而言,并不能保证该年集成预报一定好于三种方法之一者。另外须注意,表2是18年拟合的平均,并非实际预报。

表1 均方根误差的统计(单位:mm)

年份	法一	法二	法三	集成
1980	45.25	48.53	45.78	36.02
1981	55.38	66.65	50.06	48.29
1982	42.32	32.15	35.03	27.11
1983	45.98	41.85	45.69	31.21
1984	37.43	37.51	47.29	32.22
1985	36.28	40.17	46.11	35.46
1986	35.52	31.99	44.80	27.47
1987	36.64	42.86	42.96	34.21
1988	38.82	41.78	43.67	31.71
1989	30.82	35.32	36.99	26.76
1990	37.30	37.78	40.56	29.34
1991	39.19	48.46	46.87	35.91
1992	57.04	57.86	59.86	41.16
1993	52.10	49.73	51.62	38.64
1994	41.04	55.24	54.02	34.14
1995	35.22	41.67	51.97	32.74
1996	45.77	48.09	59.63	41.93
1997	35.62	38.24	42.86	32.33
平均	41.54	44.22	46.99	34.26

运用1980~1997年三种方法的回报数据以及6~8月降水实测数据,对各站建立一个4元回归,因子即为持续性预报和三个回报。用此方程对1998年汛期降水作了实际预报(见表3),由表可知,实报效果要低于18年拟合平均。但ACC和 p_c 高于1996~1997年41个预报的平均值。分析其原因,因1998年长江、嫩江和松花江流域发生了罕见洪涝,而1997年为正常年份,因此持续性预报效果差,加上方法二和方法三的预报并不好,故尽管方法一的预报评分高,却被其他三个因子抵消了。由此可见,集成预报十分依赖于原预报的效果。在集成预报方程式(7)中三种方法的预报起了回归因子作用,通过最小二乘法大大提高了拟合程度,但在对1998年的实报中,就不一定能保证这一程度的预报水平了。

表2 距平相关系数和 p_c 评分的

1980~1997年平均值

	法一	法二	法三	集成
距平相关系数	0.02	-0.04	0.04	0.50
$p_c/\%$	65.78	64.59	65.24	82.76

表3 1998年汛期预报评分

	法一	法二	法三	集成
距平相关系数	0.31	-0.05	0.12	0.07
均方根误差/mm	42	48	49	51
$p_c/\%$	83	65	65	70

4 结语

我们提出了将预报集成提为一个泛函极值问题。在目标函数取二次线性型时对汛期降水作了试验,表明最优调合法能改进预报。由于所用回报数据年份不够统计样本量要求,因此所得结论是初步的。

参考文献

- 1 王宗皓,李麦村等. 天气预报中的概率统计方法. 北京: 科学出版社,1974:179~180.
- 2 Fraedrich K. Combining weather forecast and its application, Preprints of the 12th conference on Probability and statistics in the Atmospheric Sciences. June 22~26,1992,Toronto.
- 3 Brown B. G. and Murphy A. H. Improving forecasting performance by combining forecasts; the example of road-surface temperature forecasts. Meteorological Applications, 1996, 3(3):257~266.
- 4 Colman A. et al. Prediction of March-April-May 1998 rainfall in Northeast Brazil using input from multiple regression, discriminant analysis and an atmospheric global circulation model. Experimental Long-lead Forecast Bulletin, 1998, 7(1):75~79.
- 5 Unger D. et al. Consolidated forecasts of tropical Pacific SST in Nino 3,4 using one dynamical model and two statistical models. Experimental Long-Lead Forecast Bulletin, 1998, 7(1):43~45.
- 6 Гангун А. С. Объективный Анализ Метеорологический полей Ленинград, Гурро-метеорологическое Узгатабство, 1963.
- 7 叶庆凯,王肇明. 优化与最优控制中的计算方法. 北京: 科学出版社,1986.
- 8 陈桂英,赵振国. 短期气候预测评估方法和业务初估. 应用气象学报,1998,9(2):178~185.

A Technique of Combining Forecast: Optimal Blending Method

Cao Hongxing Gu Xiangqian

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

In order to combine forecasts made with several methods with an optimizing forecast, a technique of combining forecast, which is called an optimal blending method, is suggested. The technique considers both a persistence forecast and systematic errors existing in the methods. A hindcast data set for years was established. Then a linear model was set up with the data set. The test for the precipitation field in summer (June, July, August) was conducted. It shows that the optimal blending method can improve the forecast skill significantly, but the skill varies year-to-year.

Key Words: combining forecast interannual climate forecast optimization