

卡尔曼滤波技术在暴雨中期预报中的应用

魏文秀

任彪

(河北省气象台, 石家庄 050021)

(河北经贸大学, 石家庄 050091)

杨海龙 史凤兰

(河北省气象台, 石家庄 050021)

提 要

在河北暴雨中期预报系统中,应用卡尔曼滤波技术对 ECMWF 500hPa 高度预报场进行了订正。通过对 ECMWF 500hPa 高度场的多种订正试验,分析比较未订正的和各种不同订正方案的高度预报均方根误差,证明卡尔曼滤波双因子订正对于提高暴雨中期预报能力是有效的。

关键词: 卡尔曼滤波 500hPa 高度 暴雨 中期预报

引 言

暴雨的中期预报,目前主要是在数值预报的基础上进行的。500hPa 环流形势对于暴雨的发生至关重要,因此500hPa 高度场的预报水平直接关系到暴雨的预报准确率。欧洲中期天气预报中心(以下简称 ECMWF)发布的数值预报产品中,500hPa 高度场预报水平是较高的,但存在着准系统性误差^[1,2],如果该误差得到订正,则可提高暴雨预报的准确率。

卡尔曼滤波技术目前在国外的天气预报中使用较为广泛,在国内也开始使用。但由于这种方法只适于连续变量,所以一般仅用于温度和风速的预报。在河北暴雨中期预报系统中,我们采用卡尔曼滤波方法对 ECMWF 500hPa 高度预报场这一逐日连续变量进行订正,效果良好,提高了预报准确率。因而使这种优越的统计技术间接地用在了暴雨这一离散型小概率事件的预报上。

1 卡尔曼滤波订正方法

1.1 订正区域、时效及方式

订正区域: 20~60°N、90~140°E,共99个格点。

订正时效: 96~144小时(4~6天)。

订正方式: 分时效订正。由于 ECMWF 资料是格点资料,所以在订正过程中,需要对一个时效的500hPa 高度预报场的逐个格点进行订正,从而完成对该时效高度场的订正。因而对于每一时效的每个格点都有一个订正公式。

1.2 订正公式

采用卡尔曼滤波方法对 ECMWF 500hPa 格点高度预报值进行订正的公式为卡尔曼滤波递推系统中的量测方程^[3]。单个预报量、两个预报因子的量测方程为:

$$\begin{aligned}y(t) &= x(t) \cdot b(t) + e(t) \\ &= b_0(t) + b_1(t) \cdot x_1(t) + b_2(t) \cdot \\ &\quad x_2(t) + e(t)\end{aligned}$$

作为订正方程,其各项的意义是: $y(t)$ 为某格点 ECMWF 500hPa 高度预报值的订正结

果; $x(t)$ 为订正因子向量; $b(t)$ 为随时间变化的订正系数向量; $e(t)$ 为订正误差。

1.3 订正因子

在现有资料的条件下,选择了两个因子。因子1($x_1(t)$)为被订正的格点上500hPa高度预报值。因子2($x_2(t)$)为该格点上,当日(指资料日)的500hPa高度实况值(指ECMWF 0小时资料)与其相对应的500hPa高度预报值之差。

需要指出的是,因子2是复合因子,实况值与预报值之间存在着时间变量的对应问题。这里,时间变量是资料日。由于ECMWF资料是逐日的,所以时间步长是1天。如果用 H 表示高度, H 的下标表示预报时效(单位:天),那么,资料日为 t 的实况值可表示为 $H_0(t)$,当预报时效为 d 时,与之相对应的预报值应为 $H_d(t-d)$ 。因而 $x_2(t) = H_0(t) - H_d(t-d)$ 。

1.4 初始参数的确定

卡尔曼滤波递推系统需要确定4个初始参数,我们采用客观方法确定^[4]。由于选用了两个订正因子,所以递推公式中的向量是三维的,矩阵是三阶的。

$$(1) b(0|0)$$

样本取1992~1994年7、8月的ECMWF资料,用最小二乘法确定。

$$(2) c(0|0)$$

假定 $b(0|0)$ 与理论值相等,所以 $c(0|0)$ 是3阶的零方阵。

$$(3) w$$

根据动态噪声及动态系统的性质可推得:

$$w = \begin{bmatrix} (\Delta b_0)^2/\Delta t & 0 & 0 \\ 0 & (\Delta b_1)^2/\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & (\Delta b_2)^2/\Delta t \end{bmatrix}$$

$\Delta b_i (i = 0, 1, 2)$ 为由两组样本分别求出的两个回归系数向量的分量差, Δt 为两组样本的时间差。使用1995年7~8月的样本资料,用最

小二乘法分别求出 b_1 和 b_1 , Δt 取31。

$$\Delta b_i = b_{1i} - b_{1i}, i = 0, 1, 2.$$

$$(4) V$$

当预报量只有一个时, V 变成了标量 V ,是一个数值。用1992~1994年7、8月的资料,建立ECMWF 500hPa格点高度预报订正的回归方程,求出其残差平方和 $q.q/(k-m-1)$ 就是 V 的无偏估计值,其中 k 为样本个数186, m 为矩阵阶数3。

由初始参数的确定方法可以看出,不同时效、不同格点的订正因子虽然相同,但它们的初始参数不同,因而订正公式不相同。

2 业务运行情况

用该方法建立的暴雨中期预报系统于1996年和1997年汛期在业务中使用,用订正后的ECMWF资料和未订正的资料所作的暴雨预报结果见表1。由表1可以看出:

① 订正后的预报水平明显高于未订正的预报水平。暴雨预报成功率(TS评分)和预报有无暴雨的正确率3个时效的平均值分别提高15%和4%。

② 系统对暴雨的空报少,漏报多。主要原因是,ECMWF模式的网格较大,省台所能得到的资料太少,使得预报系统对中、小尺度天气系统造成的局地暴雨预报能力较差。

表1 1996~1997年7、8月暴雨预报评分

类别	时效/h	对	空	漏	正确率/%	TS/%
未订正	96	8	5	27	74	20
	120	6	6	29	72	15
	144	13	5	22	78	33
订正	96	12	4	23	78	31
	120	19	13	16	77	40
	144	17	5	18	81	43

一般来说,数值预报的准确率会随着时效的延长而降低,但表1的情况却与此不符。这一问题有待于进一步探讨。我们认为这可能与我们在预报系统中所选取的预报指标有关。

另外,值得一提的是,1996年汛期,河北

省境内降雨频繁,出现了30年一遇的洪涝灾害。对于几次范围大、强度大的暴雨过程(如8月1~2日,3~5日等过程),该系统都作出了较准确的预报。

3 订正试验

3.1 不同方法的订正试验

3.1.1 资料及试验方法

资料:1996年7、8月 ECMWF 500hPa 高度资料。订正区域、时效及方式与预报系统中采用的相同。

试验中采用了4种订正方法:① 预报系统中采用的订正,称卡尔曼滤波双因子订正(简称 *KF2*)。② 把 *KF2* 中的第二个因子去掉,变成卡尔曼滤波单因子订正(简称 *KF1*)。③ 与 *KF2* 订正因子相同的回归订正(简称 *REG2*)。④ 与 *KF1* 订正因子相同的回归订正(简称 *REG1*)。

我们分别用上述4种方法对各时效的1996年7月1日~8月31日500hPa 高度预报值进行逐日订正,然后计算其各格点上的500hPa 高度预报值的均方根误差。

3.1.2 均方根误差的区域平均情况

为了考察各种方法、各个时效的订正效果,我们分别对未订正的(简称 *ORI*)和4种订正的各时效的500hPa 格点高度预报的均方根误差在整个订正区域上进行平均(99个格点的平均),结果见表2。

表2 未订正和各种订正的 ECMWF 500hPa 高度订正范围内平均预报均方根误差/10gpm

类别	96h	120h	144h
<i>ORI</i>	2.89	3.41	3.83
<i>KF2</i>	2.82	3.12	3.26
<i>REG1</i>	2.96	3.41	3.90
<i>KF1</i>	3.01	3.43	3.96
<i>REG2</i>	3.82	4.15	4.70

由表2可以看出以下几点:

① 对于未订正和同一种订正来说,平均均方根误差随着时效的延长而增大。这是由数值模式的特点决定的。

② *KF2* 中各时效的平均均方根误差都低于 *ORI* 的平均均方根误差,但其它3种订正的这一误差多数高于 *ORI*,个别的与 *ORI* 持平。这说明 *KF2* 的订正效果明显,而其它订正方法基本无效。

③ 对于 *KF2* 来说,144 小时的订正效果最好,平均均方根误差比 *ORI* 降低0.57,120 小时降低0.29,96 小时的订正效果不是很明显,仅降低0.07。这可能与 ECMWF 模式的预报时效越短误差越小有关。

3.1.3 均方根误差的纬向平均情况

在试验中发现,未订正的和各种订正的预报均方根误差的大小与纬度有明显的关系,表3中列出了未订正的和卡尔曼滤波双因子订正的各时效、各纬线上的500hPa 格点高度预报的均方根误差的平均值(11个格点的平均),其它订正方法的纬向平均情况略。

表3 未订正和 *KF2* 订正的500hPa 高度纬线上的平均预报均方根误差/10gpm

纬度/°N	96h		120h		144h	
	<i>ORI</i>	<i>KF2</i>	<i>ORI</i>	<i>KF2</i>	<i>ORI</i>	<i>KF2</i>
60	5.00	5.12	6.22	5.52	7.22	6.18
55	4.48	4.24	5.46	5.41	5.84	4.79
50	3.95	3.54	4.71	4.19	5.29	3.97
45	2.98	3.03	3.48	3.55	4.08	3.64
40	2.07	2.34	2.47	2.54	2.79	2.72
35	2.07	2.06	2.30	1.90	2.64	2.20
30	1.78	1.63	2.00	1.55	2.21	1.70
25	1.71	1.56	1.84	1.49	2.16	1.87
20	1.99	1.83	2.18	1.96	2.37	2.21

由表3可以看出, *ORI* 与 *KF2* 的预报均方根误差的分布有一个共同特征,即自北向南逐渐减小,到20°N 又有所回升。两者特征相同可能与 ECMWF 500hPa 高度预报值作订正因子有关。这同时也反映出 ECMWF 模式对500hPa 高度预报在这一区域上的预报误差随纬度的变化。

3.2 不同的 *b(0)* 对系统的影响

为了检验回归系数向量初始值 *b(0)* 对系统的影响,我们作了一个试验。在试验中,

把1996年8月31日的 $b(t)$ 作为回归系数向量的初始值 $b(0)$, 而其它3个初始参数与业务运行中采用的相同。用这样的初始参数运行该系统, 作1997年7、8月的逐日预报, 预报评分(略)明显低于1997年系统业务运行的评分。试验中的500hPa 高度预报的均方根误差也明显高于业务运行的均方根误差(见表4)。

表4 业务和试验的500hPa 高度预报的平均均方根误差/10gpm

类别	96h	120h	144h
业务	4.08	4.79	5.54
试验	4.31	5.48	6.64

由此可以看出, $b(0)$ 的选取直接影响卡尔曼滤波的订正效果, 进而影响预报水平。用客观方法求取的 $b(0)$ 比随机选取的效果好。

4 结语

用卡尔曼滤波方法对 ECMWF 500hPa 高度预报场进行订正, 效果明显。使用订正后的 ECMWF 资料作中期暴雨预报, 其预报水

平明显提高。

在暴雨中期预报系统中仅订正了 ECMWF 500hPa 高度。如果对 850hPa 温度和地面气压也作订正的话, 有可能进一步提高预报准确率。

为克服系统对局地暴雨漏报较多的缺点, 设想今后将我国自行研制的 T106L19 模式的预报产品用于系统, 以补偿 ECMWF 模式的不足。

参考文献

- 1 晁淑懿, 李月安. 欧洲中期天气预报中心 T213L31 模式夏季预报性能检验. 气象, 1994, 20(7): 26~31.
- 2 魏文秀, 杨海龙, 史凤兰等. 对 ECMWF 模式 7~8 月 500hPa 高度值的检验及误差分析. 河北气象, 1995, 14(3): 3~6.
- 3 黄嘉佑, 谢庄. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用. 气象, 1993, 19(4): 3~7.
- 4 陆如华. 卡尔曼递推滤波系统的气象应用技术. 数值预报产品评价公报, 1995: 11~12, 25~30.

Application of Kalman Filter method to the Medium-range Forecasting System for Heavy Rain

Wei Wenxiu

(Hbei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021)

Ren Biao

(Hebei University of Economy and Trade, Shijiazhuang 050091)

Yang Hailong Shi Fenglan

(Hbei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021)

Abstract

In the medium-range forecasting system for heavy rain, the ECMWF 500hPa height predictions are corrected with Kalman filter method. The approach was put into the operational application in the summers of 1996 and 1997. The results show that the approach is effective and the forecast accuracy is improved. In this paper, the correction method is introduced, and experiments of correcting ECMWF 500hPa height predictions are made, the root mean square errors of uncorrected and corrected 500hPa height predictions are analyzed and compared.

Key Words: Kalman filter 500hPa height forecast of heavy rain root mean square error