

北京降水概率预报业务试验

周 兵 雷振发

(北京市气象科学研究所, 北京 100081)

摘 要 在数值模式输出产品和实时天气资料分析的基础上, 应用统计分析方法建立北京地区两个降水级别(分别为 ≥ 0.1 mm 和 ≥ 10.0 mm)的客观降水概率预报方程, 并制作主观降水概率预报。同时分析概率预报的经济价值, 最后对主客观预报结果进行比较及质量评估, 给出预报概率值与实际观测相对频率的关系。

关键词 降水 概率预报 预报评估

1 引言

自现代社会开展天气预报业务以来, 已发展了多种预报形式^[1], 大致可分为: 定性预报, 形态预报, 定量预报和概率预报 4 种类型。预报验证评分方法的研究也已有 100 多年的历史。数值天气预报的发展和大气可预报性理论及实践表明, 数值模式对中短期降水过程有一定预报能力, 这使得模式产品释用工作的开展具有可靠依据; 另一方面, 由于模式初始条件不能完善地确定, 模式物理过程的描述具有复杂性和局限性, 定量预报尚得不到理想的业务预报效果。60 年代以后数值天气预报与统计天气预报相结合, 预报形式也有了改变。美国国家气象局(NWS)最先把概率预报用于日常气象业务, 并于 1965 年开始进行降水概率预报的业务试验^[2]。

早在 20 年代就有人提出天气概率预报的初步设想, Brier^[3]于 1950 年提出概率预报准确率的评分方法, Murphy^[4]进一步完善了评分过程。北京等地于 1995 年首先在降水预报中采用概率预报方法^[5], 取得了重要进展, 但由于刚起步, 还需丰富预报经验, 不断改进和完善。

2 模式产品与统计分析

2.1 模式产品的应用

近年来, 中尺度数值模式得到广泛的研究和应用。北京市气象局采用 Anthes 等^[6]发展的中尺度数值模式(MM4)对 1992~1993 年汛期降水进行了模拟预报试验, 并于 1994 年正式投入业务运行, 降水 TS 评分参见表 1。区域范围是指北京 20 个地面测站平均情况, 城区是指市区 5 站平均。两者 TS 值稍有不同, 尤其是中雨以上降水这种差异更加明显。这主要是降水时空分布不均匀性和模式不能分辨次网格降水等因素引起的。

1996-04-12 收到, 1996-07-19 收到修改稿

模式有量降水 TS 值较高, 区域值 0.865 优于城区 0.827, 小雨评分结果也是如此, 但中雨和大雨城区 TS 值高于区域, 中雨总体预报水平 TS 约为 0.4, 大雨为 0.3。城区暴雨 TS 值甚至高达 0.5, 主要是由于仅出现两次暴雨, 一次报对, 一次报错, 样本较少, 统计意义不大。评分结果在量值和趋势两个方面均能说明模式对北京地区夏季降水预报是有预报能力的, 因此夏季客观降水概率预报主要依赖于 MM4 提供的数值产品。概率方程是通过 1987 年, 1991~1994 年近 200 个样本建立的, 选择的模式产品因子包括不同层次垂直速度、涡散度、水汽通量场、风分量、假相当位温、比湿和降水量等。

表 1 1994 年汛期 MM4 降水预报 TS 评分

	有量降水	小雨	中雨	大雨	暴雨
区域	0.865	0.676	0.333	0.250	0.500
城区	0.827	0.629	0.412	0.429	0.250

2.2 统计分析方法

在数值模式输出产品基础上, 可应用多重判别分析 (MDA)、相似方法、事件概率回归估计 (REEP) 等技术制作天气概率预报^[7]。进入回归方程的备选因子有以下 4 种: (1) 数值模式提供的模式输出产品及诊断量; (2) 实时观测资料及客观分析变量; (3) 天气雷达和卫星云图等遥感资料有关的变量; (4) 气候变量及分析参数。

首先对预报因子进行标准化处理, 即把距平变量除以标准差后得到 $x_z = (x - \bar{x}) / s$, 而不采用简单的 0, 1 化。新变量 x_z 的平均值为 0, 标准差为 1, 这样可以消除气候变化的影响, 起到滤波的作用, 同时还有效地扩大样本容量。对预报量为某一级别的降水事件可根据它的出现与否分成两类, 出现认为其概率为 1, 否则为 0。事件概率回归估计方程

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m, \quad (1)$$

回归系数 b 表示回归自变量对回归对象出现概率的贡献, 也表示回归因子与回归对象相关的密切程度。由于 REEP 建立的预测模型不是全局最优的, 因此需穷尽因子所有组合, 用双评分准则确定最优子集回归方程。降水概率预报方程平均选入因子 6~10 个, 在预报实践中比较稳定, 有一定的预报能力, 预报结果将在第 4 部分详细讨论。

3 概率预报的经济价值

应用成本-损失费用比方法研究概率预报的经济价值^[3]。若以 p_c 表示不利天气的气候概率, C 是采取防护行动的成本 (Cost), L 为没有采取防护行动且不利天气出现时遭受的损失 (Lost)。那么气候预报、完全预报、分类预报和概率预报的费用分别为

$$E(\text{clim}) = \min \left[\frac{C}{L}, p_c \right], \quad (2)$$

$$E(\text{Perl}) = p_c \left(\frac{C}{L} \right), \quad (3)$$

$$E(\text{Cat}) = \frac{1}{n} \left[\sum_{p_k < p_c} n_k \bar{d}_k + \left(\frac{C}{L} \right) \sum_{p_k > p_c} n_k \right], \quad (4)$$

$$E(\text{Prob}) = \frac{1}{n} \left[\sum_{p_k < C/L} n_k \bar{d}_k + \left(\frac{C}{L} \right) \sum_{p_k > C/L} n_k \right], \quad (5)$$

其中, P_c 为判别概率, n_k 预报数目, $\bar{d}_k$ 实测相对频率, P_k^k 第 k 个概率值。对于一套假设的完全可靠的概率预报, $P_k = \{0.0, 0.1, \dots, 1.0\}$ 共 11 个级别, 每个级别的预报频数 n_k 均为 10 次, 且实测的相对频率 $\bar{d}_k = \{0.0, 0.1, \dots, 1.0\}$ 与预报概率一致, $P_c =$

0.5。这些预报费用的图解描述见图 1

($P_c = 0.5$)。图中 $E(\text{Prob}) \leq E(\text{clim})$,

$E(\text{Prob}) \leq E(\text{Cat})$ 。在 C/L 的中间范围

内, $E(\text{Cat}) < E(\text{clim})$, 在此范围之外

则相反。因此应用分类或概率预报所得

的费用最大可能的缩减是与那些采取

的行动和作业有关。值得注意的是当一

些预报概率值很不可信时, 对于多数的

C/L 值, 与概率预报相关的费用要比

气候和分类预报相关的费用少很多。

1995 年降水概率预报的试行表明, 在

防汛工作、电力配给、仓储业等防灾决

策过程中均有良好的经济效益。

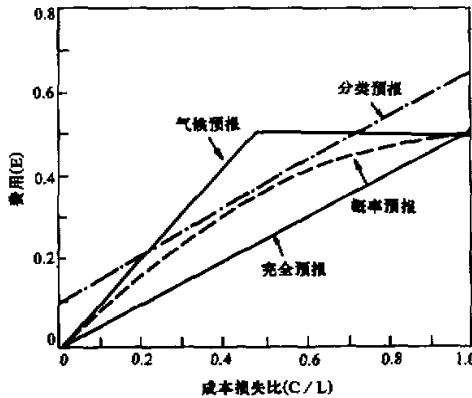


图 1 一套完全可靠的概率预报费用图解

4 主、客观降水概率预报的比较及评估

在模式输出产品和实时天气资料分析的基础上, 建立北京地区分片降水概率预报方程, 即客观降水概率预报。预报员根据上述结果及最新天气资料和预报经验对降水可能性进行综合决策, 发布主观降水概率预报。夏季暂时仅制作两个降水级别(≥ 0.1 mm 和 ≥ 10.0 mm)的概率预报, 秋季仅发布 0.1 mm 以上降水概率预报。实际预报流程参见图 2。

表 2 列举北京夏季 0.1 mm 以上降水客观概率预报和主观概率预报的计算结果。客观方法夜间 (12~24 h) 时段平均预报概率 0.46, 比白天 (24~36 h) 时段的价值 0.42 稍高, 这与气候特征的趋势是一致的, 但存在较大的偏差, 平均偏差测度值在 20%~50%, 且均为正值, 这表明它与气候概率相比较预报有中度偏高倾

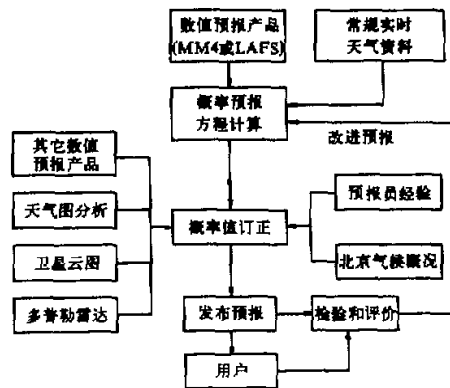


图 2 北京降水概率预报业务流程示意图

表2 夏季 0.1 mm 以上降水主、客观概率预报评分比较

		客观预报				主观预报			
		B	$\bar{p}$	B_s	B_{ias}	B	$\bar{p}$	B_s	B_{ias}
城区	12~24 h	0.171	0.475	25.0%	0.35	0.130	0.457	42.9%	0.30
	24~36 h	0.216	0.540	6.9%	0.48	0.159	0.461	31.5%	0.27
西北	12~24 h	0.144	0.435	36.8%	0.24	0.139	0.469	39.0%	0.34
	24~36 h	0.191	0.384	16.2%	0.09	0.182	0.449	20.2%	0.28
东北	12~24 h	0.165	0.470	26.3%	0.39	0.136	0.473	39.3%	0.40
	24~36 h	0.179	0.417	12.3%	0.46	0.170	0.461	16.7%	0.61
西南	12~24 h	0.179	0.452	12.3%	0.58	0.123	0.453	39.7%	0.58
	24~36 h	0.167	0.403	23.7%	0.24	0.133	0.419	39.3%	0.29
东南	12~24 h	0.193	0.468	5.4%	0.64	0.146	0.439	28.4%	0.54
	24~36 h	0.202	0.381	7.8%	0.17	0.151	0.403	31.1%	0.24

注: $\bar{p}$ 为平均预报概率, B 为半布策尔评分, B_s 为技巧评分, B_{ias} 为偏差测度。公式详见文献[5]。以下各表同此。

向 B 评分结果是夜间比白天小, 由于 B 值是逆向的, 因此客观预报在 (12~24 h) 时段效果更好些。技巧评分的结果也是如此, 夜间 B_s 近似为 0.1~0.4, 平均为 0.21, 白天 B_s 近似为 0.1~0.25, 平均为 0.13。北京西南和东南两片夜间预报技巧较低, 这与降水气候特征有关, 需进一步深入研究。与客观预报相比, 主观降水概率预报尽管在平均预报概率和偏差测度上没有明显改善, 但 B 评分和 B_s 评分有了提高, B 值平均减小 0.03~0.04, B_s 值提高 14%~17%。这表明在客观预报基础上的主观降水概率预报技巧水平有明显提高, 在预报时段 (24~36 h) 尤为显著。北京秋季降水气候概率在 0.10 左右, 预报结果见表 3。由于秋季降水属小概率事件, B 值虽然很小, 但已没有指示意义。客观预报中城区 (24~36 h) 和东北片 (12~24 h) B_s 评分出现负值。因此与气候预报相比无技巧性了。主观预报 B_s 值在 0.22~0.56, 比夏季的结果更好些, 主要原因是秋季降水系统比较容易把握, 另外所用的数值预报产品质量比夏季差所造成的。

表 4 为夏季 10.0 mm 以上降水主客观概率预报评分比较。由于北京中雨以上降水气候概率 0.08~0.12, 也属小概率事件。客观预报与气候预报相比基本上在 24~36 h 时段出现负 B_s , 无参考价值。主观预报的结果稍好些, 但同样存在负 B_s , 只是程度上有所改进。无论客观预报还是主观预报, B_{ias} 值严重偏大, 即存在过度预报 (Over-

表3 秋季 0.1 mm 以上降水主、客观概率预报评分比较

		客观预报				主观预报			
		B	$\bar{p}$	B_s	B_{ias}	B	$\bar{p}$	B_s	B_{ias}
城区	12~24 h	0.088	0.113	38.0%	-0.34	0.081	0.191	42.9%	0.12
	24~36 h	0.130	0.258	-12.1%	0.93	0.050	0.177	56.9%	0.32
西北	12~24 h	0.149	0.195	0.7%	0.06	0.090	0.202	40.0%	0.11
	24~36 h	0.105	0.184	1.9%	0.51	0.063	0.188	41.1%	0.54
东北	12~24 h	0.168	0.384	-12.0%	1.09	0.087	0.196	42.0%	0.07
	24~36 h	0.075	0.101	23.5%	-0.08	0.076	0.188	22.4%	0.71
西南	12~24 h	0.121	0.110	9.7%	-0.31	0.096	0.193	28.4%	0.21
	24~36 h	0.075	0.099	35.3%	-0.26	0.053	0.177	54.3%	0.32
东南	12~24 h	0.104	0.121	22.4%	-0.24	0.075	0.187	44.0%	0.18
	24~36 h	0.065	0.051	26.1%	0.48	0.067	0.172	23.9%	0.76

表 4 夏季 10.0 mm 以上降水主、客观概率预报评分比较

		客观预报				主观预报			
		B	$\bar{p}$	B_s	B_{iss}	B	$\bar{p}$	B_s	B_{iss}
城区	12~24 h	0.097	0.257	5.8%	1.19	0.090	0.208	12.6%	0.78
	24~36 h	0.109	0.260	-78.7%	3.00	0.075	0.187	-22.9%	1.87
西北	12~24 h	0.078	0.194	16.1%	0.87	0.084	0.182	9.6%	0.75
	24~36 h	0.123	0.229	-19.4%	0.96	0.102	0.175	0.9%	0.49
东北	12~24 h	0.101	0.239	1.9%	1.04	0.094	0.208	8.7%	0.78
	24~36 h	0.074	0.194	-21.3%	1.98	0.074	0.173	-21.3%	1.66
西南	12~24 h	0.083	0.205	10.8%	0.97	0.069	0.190	25.8%	0.83
	24~36 h	0.111	0.271	-82.0%	3.17	0.080	0.188	-31.1%	1.89
东南	12~24 h	0.073	0.216	12.1%	1.37	0.060	0.181	27.7%	0.98
	24~36 h	0.111	0.204	-33.7%	1.24	0.084	0.175	-1.2%	0.92

forecasting) 现象。造成 24~36 h 预报 10.0 mm 以上降水能力下降的主要原因是中尺度数值模式预报时效的限制, 在 24 h 后数值输出产品可信度下降, 同时模式中雨预报明显低于小雨预报等也是事实。主观预报的质量受客观预报质量下降的影响, 也与预报员缺乏概率预报经验有关。

降水概率预报质量的优劣除定量计算的 B 评分、 B_s 评分和 B_{iss} 评估外, 还可通过预报概率-观测相对频率相关图来反映。主观预报结果见图 3a。对角线表明概率值的应用完全正确, 即观测的与预报的完全相符, 因此可认为预报概率值的可信度最好。但实际预报不可能这么理想, 总存在着一定的偏离。对角线上方为预报偏少, 对角线下方为预报偏多。图中 12~24 h 0.1 mm 以上降水预报概率在 0.7~1.0 和 0.0~0.1 两个区间内基本上分布在对角线附近, 因此较为可信, 尤其是预报概率 ≥ 0.8 时, 可信度更高。但在 0.2~0.6 的区间内预报概率与实际观测结果相差较大, 特别是 $P_0 P = 0.5$ 这一概率值可信度最差, 预报有严重过度倾向。24~36 h 的结果也与此类似, 中间概率值有预

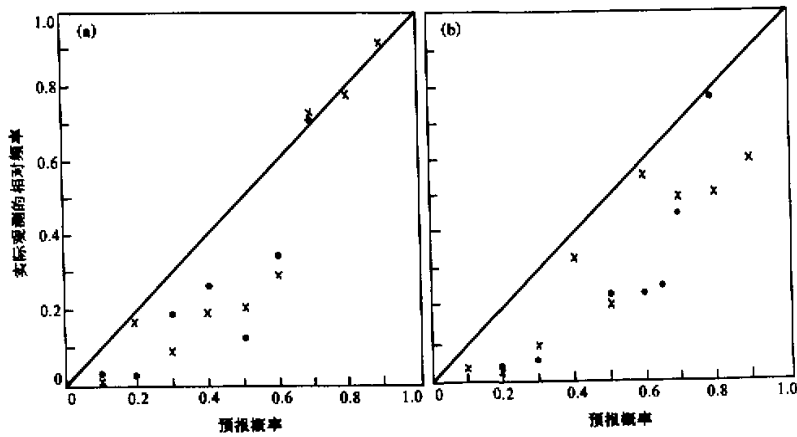


图 3 主观降水概率预报和实际观测的相对频率对应关系图
点为 12~24 h, 叉为 24~36 h。(a) 0.1 mm 以上降水; (b) 10.0 mm 以上降水

报过度行为, 另外在 0.7、0.9 这两个概率值上预报稍有偏少倾向, 尤其是 0.7 值, 两个时段均在对角线上方。因此我们认为中等概率值的使用明显地存在困难, 这在客观预报中同样存在。主原因是预报员缺乏一定的概率预报经验, 同时不排除对预报概率值的应用存在错误理解, 难于把握可能性的大小。

中雨以上降水也存在着中等概率值使用困难现象 (图 3b)。图中 12~24 h 预报概率 0.4 的实际观测频率为 0, 因此预报是完全不可信的。同时概率值在 0.7~0.9 之间, 观测相对频率稳定在某一范围, 24~36 h 的结果更加明显, 主要原因是与 MM4 预报中雨以上降水的能力随着预报时效的延长而下降。根据上述相关图我们计算了实际预报的可信度, 结果是 0.1 mm 以上降水 12~24 h 和 24~36 h 的可信度分别为 0.786 和 0.776; 10.0 mm 以上降水的为 0.529 和 0.568。有关分析表明降水过度预报主要是由于预报员对预报时间长度对概率影响方面的误解。在美国大多数地方, 当预报时间长度下降 1/2 时, 降水气候概率下降 1/3。预报员修正时忽视这些就会产生比较大的过度预报。随着降水概率预报的进一步深入, 概率值的使用会更加合理, 预报可信度会增大。

5 结论和问题

通过以上分析和比较, 我们得到以下主要结论和认识:

(1) 天气概率预报是社会经济发展到一定阶段的必然, 是天气预报不确定性和天气变化随机性的统一。对北京的降水业务预报工作是有益的尝试。

(2) 客观降水概率预报的优劣直接地与数值模式输出产品的质量有关。在客观预报基础上制作的主观降水概率预报在 B 评分、 B_s 评分及 B_{ias} 值等方面有一定改善。因此随着模式输出产品质量的提高, 以及预报经验的积累, 降水概率预报总体水平会更高。几种预报的比较发现, 概率预报的社会经济效益是比较明显的。

(3) 预报概率-观测相对频率相关分析表明中等概率值的使用存在偏高倾向, 尤其是概率值为 0.4~0.5 的使用效果最差。0.1 mm 以上降水 $P_0 P \geq 0.7$ 时基本可信, 而 10.0 mm 以上降水 $P_0 P$ 在 0.7~0.9 之间实际观测相对频率在 0.6 左右, 中雨预报的可信度在 50%~60%。

致谢: 参加本课题的还有陆晨、周晓平、陈大刚、葛明、张明英, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 丁金才, 1995, 天气预报方法评述, 南京气象学院学报, 18(1), 143~150.
- 2 周兵, 1995, 国内外降水概率预报研究及业务应用概况, 北京气象, No.3, 8~12.
- 3 Brier, Q. W., 1950, Verification of forecasts expressed in term of probability, *Mon. Wea. Rev.*, 78, 1~3.
- 4 Murphy, A. H., 1973, Hedging and skill scores for probability forecasts, *J. Appl. Meteor.*, 12, 215~223.
- 5 周兵等, 1996, 北京地区夏季降水概率预报业务应用研究, 气象, 22(1), 3~6.
- 6 Authes, R. A., 1978, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1045~1078.
- 7 Krizinga, S., 1983, Use of an analogue procedure to formulate objective probabilistic temperature forecasts in the

Netherlands, *Mon. Wea. Rev.*, 111, 2244~2254.

- 8 Murphy, A. H., 1980, 天气预报的价值: 一些理论结果, 统计天气预报译文集 (中央气象局天气气候预报研究所编译), 北京: 农业出版社, 129~148.

An Operational Experiment of Precipitation Probability Forecast over Beijing

Zhou Bing and Lei Zhenfa

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100081)

Abstract Based on the analysis to the data obtained by the numerical model and the real synoptic data, objective probability equations of two precipitation levels (≥ 0.1 mm and ≥ 10.0 mm, respectively) were made by the statistical method, and the subjective forecasts of the precipitation probability were built. Then the values of probability forecasts were analyzed, the results of different forecasts were compared and assessed. At last, the relationship was discussed between forecasting probability and the relative frequency of real observation.

Key words precipitation probability forecast forecasting assessment.

第六届全国统计气象学学术会议在北京举行

由中国气象学会统计气象学委员会、中国现场统计研究会气象地质水文统计专业委员会、“九五”国家重中之重科技项目“我国短期气候预测系统的研究”第四课题组、北京气象学院、中国科学院大气物理研究所、中国气象学会气候学委员会、中国人民解放军总参谋部大气环境研究所联合发起,于1997年11月3~5日在北京气象学院举行了第六届全国统计气象学学术会议。

会议收到论文61篇,这些论文反映的近年来的新成果有:从大气自忆性角度探讨了新的数值模式,证明滞后平均预报等价于自忆数值模式的预报;从动力学方程出发推导出月降水距平和500 hPa月平均高度场的关系,然后用实际资料建立了月降水预报方程;提出了一个多维多步时间序列预报方法,这个方法既能考虑不同变量之间的相互作用,又能作出多步预报;分析了以往时间序列周期叠加外推预报方法中存在的问题,提出了正规化周期回归预报模型;分析了目前概率回归模式的不足,提出了一个概率天气预报的贝叶斯方法;将最优化方法和神经网络方法用于集成预报研究;将t检验推广到多尺度滑动计算,并用于气候突变的检测;提出了一种提取非线性动力系统控制参数的新方法,并用于气候突变的分析;推导出一个Y为二值X为多级的相关量度公式,可用于小概率事件的因子选择;提出了一个改进的相似高度,设计了一种动态相似气象要素插值方法;将Kalman滤波用于业务预报,获得了较好的预报效果。

同时,与会代表也指出:今后需要加快统计方法业务化的进程,并加强对各种方法的理论研究、误差分析、统计检验和评估。在业务预报中应进一步加强物理因子统计分析和统计释用的研究。

(周家斌 黄嘉佑 董双林)