

模式输出统计预报

丁士晟 编著

《陕西气象》编辑部
陕西省气象科学研究所情报室



第一章 应发展模式输出统计预报

第一节：天气预报的过去、现在和未来

天气与人类生活、生产以及军事活动关系十分密切，所以古代人民就非常注意天气变化，随着自然科学的发展天气预报有了迅速的发展。

一、天气预报的过去

根据天气预报的发展，大体上可以分为四个阶段，即天气预报的古代阶段、经验阶段、过渡阶段和现代阶段。

我国古代人民由于生活和生产与天气关系密切，并且造了字。早在三千多年前的商代我国最早的文字——甲骨文中就包括了大量与天气有关的字，如雨、霜、雹、雪、阴、晴、雷、电、虹、雾等，这说明在商代对于天气已有了相当认识。在古代对于天气预报已有大量的实践和研究，我国古书上记载着大量成功的天气预报实例。三国时期诸葛亮借东风是大家熟知的，我国著名科学家沈括曾根据“湿土用事”，也就是利用湿土成功地预报了一次降雨。在古代我国做天气预报主要是利用本地前期征兆来做天气预报，这一阶段是古代阶段，前期征兆主要根据大气湿度变化、大气光学现象、云雾活动、雷电以及动物活动进行预报，并且编了大量天气预报谚语，在许多古书，如《淮南子·本经训》、《论衡·变动篇》、《田家五行》、《农候杂占》、《闽杂记》、《天气占候》、《相雨书》等都有大量记载。如“风雨之变，可以音律知之”就是由于

湿度变化，琴弦就变了，因而影响乐器声音变化预测天气的变化。“朝霞不出门，暮霞行千里”是许多人所熟知的。

国外随着科学的发展，著名科学家伽里略（Galileo）1597年发明了第一支测温器，是大气科学一个大的转折，由古代直觉和零星发展成为近代科学，在伽里略之后不到五十年时间发明了气温、气压、风、降水等观测仪器并组建了气象观测网，这为天气预报奠定了基础。1820年布兰底斯（Brandes）绘制了1783年欧洲39个地面测站风和气压距平图，这是第一张天气图，是现代天气图的雏型。在克里米亚战争中，正当英法联军在黑海追击帝俄的舰队，并准备登陆，不料1854年11月14日黑海刮起30米/秒的暴风，英法联军几乎全军覆没。这件事之后拿破仑三世要巴黎天文台台长，发现海王星的著名天文学家拉·瓦利尔（Le Verrier）进行研究。他发了250封信，收集了1854年11月12—16日各地的气象观测资料，经过研究，他在学术会议上宣布“若组织观测网，迅速将观测资料集中一地，分析绘制天气图，便可推知未来风暴的行径”。这促进了天气预报的发展，荷兰首先建立了天气观测网，并在1860年正式发布天气预报，这是第一次有组织的天气预报，是近代天气预报发展的标志。接着英国（1861年）和法国（1863年）也开始发布天气预报，从上世纪末到本世纪初许多国家都组建了气象站网，并发布天气预报。1860年以后气象理论发展很快，但天气预报的手段是地面天气图，主要依靠经验做预报，

从1860年——1920年这一阶段称经验阶段。

第一次世界大战后，维·皮雅克尼斯（V. Bjerknes）为首的挪威学派创立了气团、锋面和气旋的概念和学说，为近代天气预报奠定了理论基础，并提出天气预报应分为两步，第一步是利用天气图及一些气象理论、预报气团、锋面和气旋的位置。第二步根据预报的天气形势气团、锋面和气旋的位置预报未来的天气。这种天气预报的办法到现在仍广泛采用。1926年探空仪的发现，三十年代末组建了探空网，为芝加哥学派提供了物质基础，芝加哥学派以罗斯贝（Rossby）为首先发现了大气波动、长波理论、高空急流、极锋理论。人们把1920年——1950年称过渡阶段，这一阶段天气预报主要依靠天气学方法，已开始使用动力学原理。天气图仍是主要手段，但除了地面图之外，高空图在预报中的作用是很重的。预报虽然仍旧要依靠经验，这已不是单纯的经验，是挪威学派和芝加哥学派理论以及其它理论在实际工作中的应用的经验。

从1950年开始现代科学技术得到迅速发展，并应用到天气预报，使天气预报进入一个新的阶段，称作现代阶段或科学阶段。这一阶段由于数学——物理方法、动力气象学原理，以及计算机、卫星、雷达在天气预报中得到广泛应用使天气预报逐步走向客观、定量。天气预报技术在这三十多年得到了飞快的发展，新技术很快用于天气预报。如英国在第二次世界大战期间研制成雷达，到四十年代末就制成天气雷达，五十年代在美国就布设天气雷达网。1946年美国研制出世界第一台电子计算机就用于做数值预报。1958年我国制造第一台电子计算机也首先用于数值预报。1957年苏联第一颗人造卫星上天不久，1960年

美国就发射第一颗气象卫星泰罗斯1号。遥感、激光等新技术也都很快应用到气象上来。正是电子计算机、卫星、雷达在天气预报的广泛应用，推动了天气预报技术的发展，这一阶段天气预报技术和预报质量都得到较快的提高。

二、国外天气预报的现状

天气预报近三十年来发展很快，由于各国科学技术水平和国民经济情况不一，各国天气预报技术水平、设备配置差异也很大，这两方面来讲美国和日本比较先进，第三世界有的国家天气预报技术和装备仍停留在五十年代水平，我国和美国、日本等国仍有较大差距。

美国天气预报基本上是实现客观化、定量化、自动化。美国目前形势预报主要依靠数值预报，人只是对数值预报结果进行适当修正，要素预报主要依靠用模式输出统计预报做出的指导预报，预报员在此基础上进行修改；已经实现气象业务和服务自动化，即AFOS(Automation of Field Operations and Services)简称阿弗斯系统。AFOS是用显象器(电视型)、复印装置和小型电子计算机系统代替电传打字机和无线电传真机。每个预报台(WSFO)和国家中心都将装配两架小型电子计算机(Eclipse S-230)，每个气象台(WSO)和河流预报中心(RFC)配备一套。使用AFOS系统，气象观测、天气预报和天气图资料都能迅速地显象在显象器上，如果需要可用“印刷——绘图器”的复印装置在20秒钟内把任何所需显象的内容复制出来。每个预报台安装七个AFOS操纵台，每个气象台则安装三个，每个操纵台包括一个或数个显象器和一个计算机终端的打字机键盘。AFOS系统加强了条条结构，减少了

重复劳动和节省了时间。有了AFOS系统国家气象中心为基层台站提供大量预报产品和有关资料,并且传递速度大大提高了,一张图象传送只需原来传真的1/3时间,而目前我国通过传真图传送一张图需20分钟,是美国AFOS系统的60倍,有了AFOS系统预报员可以更快地得到所需资料,自绘图表大大减少,用于辅助性的业务活动时间省了一半,而用在专业工作上的时间可增加50%—75%。美国现在不仅要素预报,可以由计算机直接给出,同时还可以给出文字预报,预报员稍加修改就可以传送到用户,这些也都是AFOS系统的功能。

至于预报水平,美国气象学会自1957年起多次发表关于天气预报的政策声明,从几次声明来看二十多年美国天气预报是有较明显提高,以1979年9月声明来看:

12时以内预报:已达到相当高的水平,预报的细微程度随时效的延长而减小。1小时以内的预报,可报出包括强风暴在内的尺度为几公里的天气现象;12小时的预报,可报出如锋、飑线和有规律的降水区等较大的天气特征。在大气主要是受山脉、海岸线和城市影响的某些情况下,用中尺度数值模式已可作出更细微的预报。

12—48小时预报:在预报水平尺度为1000公里以上的天气系统的12小时变化方面已达到很高的技术水平,特别通过采用数值模式。对于出现强风暴、大雨等灾害性天气现象的一般区域,经常可在24小时之前作出预报,但还报不出龙卷出现的准确位置。对一般云量、空气质量、温度和降水,可作出直到48小时的预报。

2—5天预报:能作出具有中等技术水平和有用处的逐日温度预报。能作出直到第三天具有相当技术水平的降水预报。到第四、五天,降水预报的技术水平

下降,但仍稍超过气候预报。

5天—1个月预报:平均温度的预报具有一定技术水平,特别是6—10天预报。6—10天期间的降水预报具有较低的技术水平,但时效再长,则水平已处于边缘地步。对超过10天的逐周预报水平未作讨论。

超过一个月的预报:季节展望技术水平还低。

日本为了在日常业务预报中,最大限度地应用新技术、新装备,逐步改进预报技术,避免重复,进行有效的配套,并从七十年代中期以主观预报为主,转到以客观定量预报为主,更好地满足社会需要,最大限度地采用自动化处理,把已有的系统和将发展的系统有机结合起来,制定了国家天气监视网计划NWW(National Weather Watch),1977年定型预计整个计划1983年完成。NWW计划要求加强对府县预报的指导预报,气象厅加强数值预报及模式输出统计预报,使府、县气象台站缩短从大尺度形势场做出局地天气预报所花费的时间,改变各气象台重复自绘天气图的现象。NWW实现后,日本从观测、通信、资料处理、预报直到提供情报服务等一系列的工作流程,使用电子计算机连接、处理,使其成为更有效率的高度系统化的业务体系。在预报业务体制上经过大幅度地调整,客观化的短时及短期预报技术将有进展,能在业务预报中应用,使负责府、县预报服务的地方气象台能够向当地提供内容充实的气象情报,使预报的准确性、服务质量均有提高。日本实现国家天气监视网的目的是改进、提高天气预报水平和服务质量,提供地区、时间上都很细微的天气预报,并且都是通过数值预报和模式输出统计方法来实现,这与美国AFOS系统很相似,但NWW不象

AFOS那样专门建设一套自动化工作系统,而只改善现行业务,尽量利用已有的系统和设备,减少重复和浪费,使现有设备充分发挥效率。日本NWW自动化没有美国高,还是用电传、传真两套系统,但传输速度由50比特/秒提高到200比特/秒(美国AFOS是2400比特/秒),手工填图改为全国中心自动填图,传给各级气象台、站,而美国分析天气图已实现电子计算机分析。

三、天气预报的未来

据有关资料,今后国外在气象业务和服务自动化系统方面还会取得重大进展。美国AFOS系统还将采用许多新技术,如动画显示、交互显示、快速通信、彩色视频转换显示等,人一机相互作用数据存取系统将投入业务使用,卫星资料经计算和处理,可以得到高空风场、气温场、湿度场,以及流线分析、散度场、涡度场、中尺度分析,而这些资料是半小时或更短时间就可以得到一次。

到2000年预计天气预报将更精确、更及时,天气尺度数值预报模式已有较大改进,12小时以上预报几乎用不到人工干预。根据这些数值预报制作的动力统计预报的要素预报将有更高的精度。中尺度数值模式也已投入业务使用,但还需人工修改。中期数值预报模式比现在更成熟,其精度可以与现在短期数值预报相近,长期数值预报将有明显进展,长期预报也将在长期数值预报基础上制作,到那时地方预报员的主要任务是不断改进由数值预报具体“解释”为地方天气,并主要从事短时预报和特殊预报,进行社会服务,发展地方预报技术以及监视自动化预报系统的运转。

第二节 形势预报应依靠数值预报

在1920年前天气预报已有了二、三千年历史,并且由局地前期微兆发展到利用天气图外推做具体天气预报,但每种天气现象的预报基本上是孤立地进行,发展十分缓慢。挪威学派和芝加哥学派都认为要做好天气预报,首先要做好形势预报,在形势预报的基础上再去做具体天气预报。这种观点半个多世纪以来,一直是天气预报遵守有效的规律,使天气预报得到了迅速的发展。在五十年代以前形势预报主要依靠天气学原理和预报员经验,用天气学方法制作形势预报。除了用天气学方法做形势预报外,还可以用统计学方法做形势预报和数值预报方法做形势预报,目前美国、欧洲、日本、苏联中、短期形势预报已经由数值预报取代天气学方法,而长期形势预报大多数国家仍依靠统计学方法做长期形势预报。我国1982年2月五层北半球原始方程模式也就是B模式正式投入业务,我国广大台站已经配备或正在配备传真机,使得广大台站可以直接收到我国和日本数值预报,有必要时,美国、苏联、欧洲中心的数值预报也可以得到。这样,对广大基层台站来说这是一个很大的变化,过去做形势预报主要靠天气学原理和预报员经验,现在可以得到数值预报给出的形势预报,是依然按照老办法凭经验做形势预报,还是依靠数值预报的形势预报,是摆在我们面前的一个大问题。

预报员最关心的是数值预报做形势预报能否优于预报员的主观预报。对于这个问题,在五十年代瑞典和世界气象组织曾做过严格比较,结果是数值预报的24小时和48小时500毫巴预报图优于主观预报。这时数值预报还比较简单,是正压模式,近三十年来数值预报的质量已有了极大提高。关于这个问题,美国也做过严格检验,表1.1给出美国国家中心500毫巴36小

时形势预报和地面30小时形势预报的质量比较。

表 1.1 美国形势预报评分

	主观预报	正压模式	地转模式	原始方程模式	细网格模式
500 mb高度					
36小时预报	34.7	46.3	52.8	56.2	63.4
地面气压					
30小时预报	13.2	14.5	21.3	32.6	39.0

由此可见，不论500毫巴形势预报，还是地面形势预报，数值预报都明显优于主观预报。粗略来讲，500毫巴形势预报质量，细网格模式比主观预报提高接近一倍，地面气压场预报则提高近二倍。数值预报模式每次更新预报质量都有所提高，地转模式优于正压模式，原始方程模式优于地转模式，而细网格模式优于原始方程模式。

美国曾给出1947年到1972年26年30小时地面预告图的质量，其中1947年到1957年为主观预报，1958年到1972年为数值预报。我们计算了这两段时间预报相对改进率，在主观预报11年中，平均每年相对改进率仅为0.27%，11年总共才改进了3%，而采用数值预报后的15年，平均每年相对改进率为1.46%是主观预报时期的5.4倍。也就是说数值预报使形势预报质量的提高要比主观预报快得多，数值预报投入业务以来不到三十年形势预报的改进大约相当主观预报经过一百多年才能得到。

数值预报的形势预报质量优于主观预报，我国预报员通过实践是否也得到这个结论，我国东北、华北、华东许多气象台站接受日本数值预报传真图已有5到8年的历史，一些比较认真参考，使用日本传真图的预报员普遍认为日本短期数值预报有较高的参考价值，其形势预报比有经验的预报员还好，我国B模式正式广播已

十个月了，B模式在中、高纬度有较好的预报能力。一些气象台使用欧洲中期天气预报中心的中期数值预报，都认为其预报质量较高，优于主观预报。

数值预报的形势预报提高比较快，预报员也有一些感性认识，我国B模式数值预报就比原来三层原始方程的A模式好，日本今年将八层北半球原始方程取代四层北半球原始方程，将十层有限区细网格原始方程取代六层有限区细网格原始方程，使形势预报质量有了明显提高。

数值预报制作的形势预报明显优于主观预报，数值预报的形势预报质量提高比较快，这两个事实要被广大预报员都接受并不是件容易的事。其原因一方面预报员二、三十年来已经习惯用主观预报的办法制作形势预报，并且已经积累了一定经验，另一方面许多老预报员对数值预报并不熟悉，再加之，要承认数值预报的形势预报优于预报员自己凭经验制作的形势预报，就是要自己否定自己，自己承认不如计算机，对有的人来讲是痛苦的。所以要广大预报员都接受上述两个事实并不容易，人不如计算机，对于数字计算是大家所承认的，人的经验不如计算机计算结果，就不那么容易被接受，但事实我们应该承认。例如世界象棋冠军与电子计算机比赛，结果是人输了，这说明世界象棋冠军只是人类冠军而不是地球上的冠军，机

器生产比人强，计算机操纵机器比人操纵强，但人可以改进和制造机器和计算机。

预报员不易很快接受数值预报制作的形势预报比自己做的形势预报好，不仅我国是这样，在许多国家都是这样。有的国家为了推广数值预报的应用还采取了强硬的组织措施，如美国数值预报投入业务应用比较早，但当时有相当数量的预报员不愿接受数值预报，美国气象局采取了压缩编制和将一些预报员换成新毕业的大学生。我们是社会主义国家，不应该采取某些资本主义的强硬措施，我国广大预报员有丰富的预报经验和为社会服务的经验，这些都是我们气象系统的宝贵财富。我们应该多做宣传工作，使得广大预报员相信数值预报的形势预报优于主观预报，并且通过办训练班、讲座等形式使得预报员逐渐了解和熟悉数值预报。更重要的是在相信数值预报优于主观预报的同时还要更好发挥预报员经验的作用。

事物总是一分为二的，数值预报有优于主观预报、精度高、质量提高快等优点，但它也有不足之处。如果我们不充分认识数值预报的优点和长处，我们就不会认真利用数值预报，但不认识到它的缺点，就不能很好利用数值预报，不能很好发挥人的能动作用。

135°E之间日本48小时到192小时西风槽预报和实况的平均偏差。其结果由表1.2给出。

数值预报的缺点，有四条：

第一：数值预报对于天气系统的预报往往偏慢。

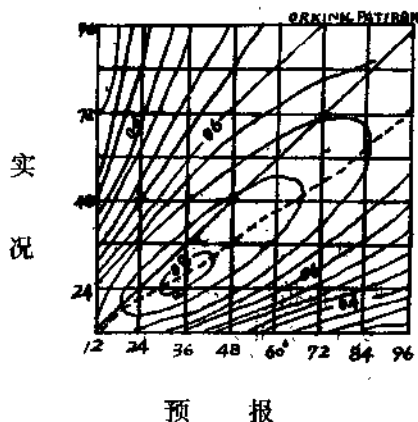


图1.1

日本气象厅对北半球模式数值预报进行检查，其结果由图1.1给出，由图1.1可见，对于96小时相关系数最大是72小时，48小时相关系数最大是36小时，而并不是96小时与96小时相关最大，48小时与48小时相关最大。可以粗略来看日本北半球模式数值预报大约慢1/4。日本气象厅也检查了他们的八天预报，得到在平直环流时144小时预报大约慢二天，在径向度大时192小时预报大约慢10个经度，也就是才慢一天。

我们曾统计1980年6—9月110°—

表1.2 日本数值预报东亚西风槽预报和实况的平均偏差表

	48小时	72小时	96小时	120小时	144小时	172小时	192小时
平均偏慢							
(经度)	2.1	5.6	7.3	5.2	6.8	7.9	11.6

数值预报使天气系统报得偏慢不是偶然的，也不是日本数值预报所特有的，用差分法做数值预报都这样，这是由于微分方程在进行数值预报计算时采用差分格式所造成的。

下面给出简单的证明：

可以有：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -C \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1.1)$$

其中 u 是风速， C 是波动的速度。

如果风速 u 是一个周期函数

$$u = e^{ikx} \quad (1.2)$$

其中 k 是波数，则有

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -C \frac{\partial u}{\partial x} = -C \frac{\partial e^{ikx}}{\partial x} = -C \frac{\partial e^{ikx}}{\partial (ikx)} \cdot \frac{\partial (ikx)}{\partial x} = -ikCu \quad (1.3)$$

如果用差分法则有

$$\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_j = -C \left(\frac{\Delta u}{\Delta x} \right)_j = -C \frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} \quad (1.4)$$

$$\text{其中 } u_{j+1} = e^{ik(x_j + \Delta x)}, u_{j-1} = e^{ik(x_j - \Delta x)}, u_j = e^{ikx_j} \quad (1.5)$$

Δx 为网格距。

$$\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_j = -C \frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta x} = -\frac{C}{2\Delta x} \left(e^{ik\Delta x} - e^{-ik\Delta x} \right) e^{ikx_j} \quad (1.6)$$

对于周期函数有：

$$\sin x = \frac{1}{2i} \left(e^{ix} - e^{-ix} \right) \quad (1.7)$$

(1.6)式可写成以

$$\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_j = -iC \frac{\sin k\Delta x}{\Delta x} \cdot u_j \quad (1.8)$$

$$\text{令 } C^* = C \frac{\sin k\Delta x}{k\Delta x} \quad (1.9)$$

则(1.8)可写成：

$$\left(\frac{\Delta u}{\Delta t} \right)_j = -iKC^* u_j \quad (1.10)$$

这样就可以清楚看到由于采用差分法，波动移动速度的计算介 C^* ，与微分方程的解析介 C 差了一个系数 $\frac{\sin k\Delta x}{k\Delta x}$ 。

我们将(1.9)写成波长形式，则有

$$C^* = C \frac{\sin \frac{2\pi\Delta x}{L}}{\frac{2\pi\Delta x}{L}} \quad (1.11)$$

其中 L 为波长。

表1.3给出不同格距波动移速系数，其中 m 为几倍格距波。

表 1.3 m 倍格距波移速系数

m	2	4	6	8	10	12
$\frac{\sin \frac{2\pi \Delta x}{L}}{\frac{2\pi \Delta x}{L}}$	0	0.637	0.827	0.900	0.935	0.955
m	16	20	40	60	180	360
$\frac{\sin \frac{2\pi \Delta x}{L}}{\frac{2\pi \Delta x}{L}}$	0.974	0.984	0.996	0.998	0.999	0.9999

由表1.3可见,对于大了二倍格距波,用差分法计算的波速均偏慢,并且波长愈短,慢得愈厉害。这和日本数值预报统计平直形势下慢得多,经向度大时慢得少是一致的。关于小于二倍格距波的情况比较

复杂,并且数值预报对它们没有任何预报能力,在此不进行讨论。

不同数值预报模式,由于格距不一,它们不同波长的移速系数由表1.4给出,

表1.4 不同模式对于不同波长波的移速系数

	格距 (km)	500km	1000km	1500km	2000km	4000km	6000km
B模式							
日本半球模式	381	-0.208	0.284	0.626	0.778	0.941	0.974
北大细网格	190.5	0.284	0.778	0.897	0.941	0.985	0.993
6L-LFM	152.4	0.49	0.854	0.933	0.962	0.990	0.995
10L-LFM	127	0.626	0.897	0.953	0.973	0.993	0.997

其中6L-LFM是日本六层细网格模式,10L-LFM是日本十层细网格模式,日本半球模式包括四层北半球模式和八层北半球模式。

由表1.4可见,我国B模式对于4000公里以上的波动才能报得好一些,而日本改进后的十层细网格原始方程模式(10L-FLM)对于1500公里以上的波动就可以报得较好。

第二、数值预报都有系统误差,各种数值预报模式,对于物理过程考虑不能和实际情况一样,所以都有系统误差。

日本4L-NHM和6L-FLM数值预

报模式中,由于高原高度没有采用实际高度,500毫巴的预报图,亚洲大陆偏低,中心在高原东北侧,其中心值可低40—80位势米,由于海—气关系考虑不够及青藏高原高度的考虑不够,太平洋洋面上预报值偏高,在日本东北的太平洋洋面上预报值偏高,在日本东北的太平洋洋面上预报值可比实际值高20—70位势米。

第三、数值预报对有的天气系统预报能力差。经我们统计日本数值预报对于气旋的新生和移动报得比较好,特别是江淮气旋北上,渤海气旋新生都报得较好,但对于副高和东北冷涡切断报得较差。分析

其原因,副高由于处于低纬海上记录少,相对误差大,再加上预报员对副高往往只看一根等值线的西伸东退,北抬南撤,所以看起来副高报得差。所以在应用数值预报关于副高指标应尽量少,用588线的北界、西伸点等某一根等高线的指标。冷涡切断报得差的原因之一是在于数值预报往往采取多次光滑,如果数值预报刚预报出冷涡切断,由于采取光滑,这个冷涡也将光滑成一个深槽。

第四、低纬报得差,中高纬报得好,山地报得差,平原报得好。

美国气象学会1979年9月关于天气预报的政策声明指出:热带地区的预报比中纬度低得多,一般说来,热带地区有技术水平的天气预报很难超过12—24小时。

在低纬地区数值预报报得差,这也是数值预报模式的通病。其原因一方面低纬洋面多,陆地少,气象记录稀少。另一方面在低纬,风场并不与气压场相适应,对于天气来讲风场比气压场和高度场更有价值,而数值预报初始场一般都不采用实测风的风场,并且预报能力也是高度场优于风场。同时低纬气象要素在一般情况下,其变化幅度比中高纬度小,数值预报在低纬预报的相对误差较大。并且有的数值预报南边界一般在北纬10度左右,低纬地区在边界附近误差也大。

在山地气候复杂,并且海拔高度变化大,数值预报对于地形影响的一般处理比较简单,真实地形一般在数值预报模式中都要加以简化,有的对地形还限制高度,这样造成山地误差大。所以数值预报一般在山地报得差,平原报得好。

总之,我们要向广大预报员讲清楚数值预报的形势预报优于主观预报,并且可以较快提高的事实,以及充分利用数值预报是历史发展的必然趋势。更应向广大预

报员讲清楚数值预报的缺点,以便订正其缺点,更好地利用好数值预报,搞“人—机结合”。国外研究指出数值预报的形势预报比人的主观预报要高10—20%,但经预报员订正,其结果又可比数值预报高10%,所以搞人—机结合可以更好发挥数值预报的作用,也可以更好地发挥预报员经验的作用。必须指出,我们强调形势预报要依靠数值预报而不是依赖数值预报,是要相信数值预报而不是迷信数值预报。方法不能依赖,因为方法还需改进,科学也不能迷信,因为科学也要发展,数值预报的形势预报,还需不断改进,不断发展,不断提高。

第三节:要素预报应重点发展模式输出统计预报

在上一节我们已经讲了形势预报要依靠数值预报,这对气象台特别是基层气象台将带来很大的变化。省气象台和专、地气象台的根本任务是做好气象要素预报,为国民经济和人民生活,同时为广大基层台站提供指导预报。在这一节将着重介绍为什么要发展模式输出统计预报,和如何发展模式输出统计预报。

一、省、地气象台应把预报的重点及时转为做好要素预报。

过去,我国没有建立起自己的数值预报业务,各级气象台站也没有配备传真机,他们不能收到国家中心发布的形势预报。这样省、地台只能依靠自己填绘与分析的天气图表示自己用天气系统理论及经验去做好形势预报,并且在此基础上做好要素预报,为国民经济服务,为台站提供形势及要素的指导预报。当时提出省台预报工作的重点是做好大形势预报,地区台做好影响系统的预报。这些都是无可非议的,是符合当时实际情况的。

现在,情况开始有了变化,我国数值预报B模式已投入业务使用,并且效果较好,形势预报可以在一定程度上依靠它。同时气象台站正在广泛配备传真机,这样不仅可以直接收到中央台的数值预报广播,同时可以收到日本等外国的数值预报广播。这样我们可以在形势预报方面更多地依靠数值预报,在此基础上做些订正搞“人—机结合”。而要素预报则是我们的薄弱环节,在日常讨论预报时,主要是讨论形势预报,要素仅作为一个副产品似的,在总结和科研中往往也侧重形势,对于具体要素的预报着眼点、预报方法极少涉及。总的来看,广大气象台在要素预报上下的功夫不大,潜力不大。国家气象局1982年正式提出省台、专台预报重点是做好要素预报是非常适时的。

省、地两级气象台要及时将预报工作重点由形势预报转为要素预报,也不是一件容易的事,会遇到习惯势力的抵触。长期以来在预报员心目中认为形势预报高于要素预报,大气环流高于影响系统。对于习惯势力要做好思想工作,反复宣传,注意引导。要实现这个转变也会遇到缺乏技术方法等实际困难,这要通过学习和科学研究加以逐步解决,也要注意引进新技术,改进已有的技术方法。

二、做好要素预报,当前应重点发展“MOS”方法。

做气象要素预报主要有天气学方法,数值预报方法及统计预报方法三大类技术方法。

天气学方法主观、定性、预报质量难以稳定提高,所以它不能作为主要技术方法和发展方向。

数值预报方法对于形势预报很有效,但用它来预报具体天气并投入业务使用,还有一段距离,估计在一、二十年内或更

长时间不可能成为气象要素预报的主要方法。

统计预报我国广大气象台、站预报员比较熟悉,特别是七十年代中期我国的统计热、一方面使得统计预报有较大普及,另一方面有的台、站通过搞没有物理基础的统计预报,结果对统计预报失去了信心,个别人甚至对统计预报产生反感。在这里将对统计预报制作要素预报作一介绍,统计预报方法做要素预报可以分为四种。

(1)纯统计预报:它拟合好,预报差,预报准确率不稳,并且效果差,所谓纯统计预报是指预报因子一般经过普查和严格检验得到,但并不追求其物理意义,预报方程的建立是严格的。我们曾做过江淮气旋北上纯统计预报方程,其拟合率为 $40/40=100\%$,但用独立资料试报其准确率仅 $9/20=45\%$,实际预报也仅50%左右。我们还用大量因子普查进行大雨试验,一共普查了2976条指标站的因子,可以得到68条信度为0.05的预报因子,从中挑选38条准确率较高的因子,用独立资料进行验证,其准确率为 $274/494=55.5\%$,经 χ^2 检验和随机预报相似。这两个试验都说明纯统计预报是不行的,特别对于中短期天气预报是不可取的。在统计热中失败、失去信心的,真是由搞纯统计预报所致。

(2)天气统计:作者1975年提出天气统计预报的因子应具有三条,即从预报员经验出发,经过严格统计检验,并且讲得出道理,才可作为候选因子,利用这些因子建立的预报方程效果稳定,预报员容易接受。我们也据此建立江淮气旋北上的天气统计预报方程,其拟合率为 $38/40=95\%$,用独立资料试报准确率为 $18/20=90\%$,经几年实践考验其准确率稳定在80

%以上。两组统计预报方程所用样本完全一样,但结果很不一样,这说明了天气统计明显优于纯统计方法。但天气统计有时效短,不是所有问题都可以用天气统计方法建立统计预报方程的缺点。

(3)完全预报:1958年美国数值预报正式投入业务不久,1959年克莱因(Klein)提出完全预报方法。所谓完全预报是指统计历史天气图上的要素与预报量之间的同时关系,经筛选建立统计预报方程,假定数值预报的形势预报是完全正确,用它代入统计预报方程,就可以得到预报量的预报。这里所指的“完全”,不是预报方法完美无缺,已经完全了,也不是预报结果完全可靠,而是假定数值预报是完全正确的“完全”。完全预报方法简称PPM、或PP(Perfect Prog Method)。1959年Klein提出完全预报,经七年努力,于1966年成为全国要素预报的主要方法,并投入业务使用,这之后许多国家纷纷开展完全预报,至今欧洲还有一些国家主要用完全预报做要素预报。

完全预报由于应用了数值预报的结果,它的预报时效较长,精度也高于天气统计。它的优点还在于它可以应用历史上大量资料进行统计,并且不受数值预报模式更替的影响。但是它没有很好考虑数值预报的系统误差和预报往往偏慢的缺点,

使得它的精度受到一定影响,同时由于历史天气图上没有许多物理量,较好的物理量因子难以选进方程。

(4)模式输出统计方法:1972年美国格莱恩(Glahn)和劳利(Lowry)针对完全预报的优点,提出了模式输出统计方法,它是统计数值预报的形势预报及物理量预报与预报量的同时关系,建立预报方程用数值预报结果代入方程,做出气象要素的预报,称谓模式输出统计,简称“MOS”(Model OutPut Statistics)或译为模斯。所谓模式是指数值预报模式,输出是指数值预报输出的形势预报和物理量预报,统计是指统计预报量和模式输出量之间的关系。

美国经过严格比较,证明“MOS”方法优于完全预报,于1972年起用“MOS”方法逐渐取代完全预报成为业务预报中的主要方法。表1.5给出气温预报误差的均方差和降水评分的比较。

日本大滝俊夫对比了完全预报和“MOS”方法大于0.1毫米降水的复相关系数,其结果由表1.6给出。

日本经比较证明了“MOS”方法优于完全预报,所以日本在1979年6月将“MOS”方法投入业务使用,更替完全预报。法国也做过类似比较,证明“MOS”方法优于完全预报。

表1.5 美国气温、降水评分

	气 温				降 水		
	PPM	MOS	相差		PPM	MOS	相差
今天最高	3.9°F	3.4°F	0.5°F	0-12h	19.7	30.4	10.7
今天最低	3.9°F	3.4°F	0.5°F	12-24h	14.4	24.1	9.7
明天最高	4.6°F	4.2°F	0.4°F	24-36h	9.1	15.0	5.9
明天最低	4.4°F	3.9°F	0.5°F	36-48h	0.3	6.4	6.1

表1.6 日本 >0.1 毫米降水的复相关系数

	0小时	12小时	24小时	36小时	48小时
完全预报	0.635	0.633	0.565	0.472	0.380
MOS方法			0.623	0.587	0.551

许多国家大量对比都说明“MOS”方法优于完全预报，很有说服力的是完全预报的创始人克莱因(Klein)1975年也证明“MOS”方法优于完全预报，并且他本人以后在发展“MOS”方法方面做了大量工作。本特森(Benytsson)在总结1980年世界天气预报的进展时指出，“从事大尺度预报的天气解释这项工作是很积极的，并且进行许多国家正在高度重视这项工作。一般的经验是“MOS”方法优于完全预报方法，至少用均方根误差鉴定预报性能时是如此。”

完全预报是由形势预报与要素预报之间误差和数值预报误差这两种误差的叠加，而“MOS”方法直接统计数值预报形势预报与要素预报之间的关系，只有一个误差。这好比完全预报是两个直角边，

“MOS”方法是斜边，所以“MOS”方法优于完全预报。有人担心数值预报变了“MOS”方程将失效。克莱因(Klein)写道：过去几年的经验证明，MOS预报对于业务上正式数值模式并不十分敏感。例如，从PE(原始方程)模式推导的MOS方程，用于LFM(有限区细网格)模式作几种天气要素的最初指导预报，在预报质量上没有明显的下降。另外国家气象中心所作的减小LFM模式(1977年8月)和PE模式(1978年1月)的格距，也没有引起MOS预报精确度的明显变化。显然细网格模式的质量改进，补偿了它带给MOS方法的偏差性质的改变。当然，我们最终要从新的模式重新推导出MOS方程，并

且可能作出更好的MOS预报。但在这以前天气服务不应仅仅因为计划在未来改变数值模式而耽搁MOS系统的开始时间。我们也有类似实践，用1978年以来日本数值预报模式输出建立的MOS方程，在1982年3月1日日本数值预报模式有了较大改进，由4L-NHM改为8L-NHM，细网格模式也由6L-LFM改为8L-LFM，不仅层次多了网格距也缩短了，由原来152.4km缩小到127km，所有MOS方程今年应用仍维持较高的水平。如果数值预报都采用差分体系，一般不会出现原来模式系统偏慢有很大改进，特别对于长波改进更为缓慢。

完全预报比MOS预报可以应用更多的样本，这对于小概率事件，完全预报要比MOS预报更合适，但对于一般天气的预报美国十余年的实践表明动力统计方程的精度，不取决于样本的多少，而主要取决于因子的优劣。美国最初建立动力统计方程用了十八年的样本，现在缩小到仅用2年样本，原来候选因子仅几项，现在候选因子增加到几百项。样本多，完全预报是优势，而“MOS”预报可以取得更多因子。

综上所述，许多国家都经严格比较，逐步采用MOS预报更替完全预报，MOS预报是要素预报发展的方向，我们不一定先搞完全预报，然后再搞“MOS”预报，我们应该尽量采用新技术，积极发展“MOS”方法。

三、我国应同时发展中心“MOS”和地方“MOS”

“MOS”方法近十年来得到了较快的发展,据我们实践和分析,可以将“MOS”方法分为三类。

中心MOS:中心MOS是指国家气象中心自己做数值预报,利用数值预报的产品,用大型电子计算机制作本国各地“MOS”指导预报。美国1972年发展的“MOS”方法和其它国家也搞“MOS”方法,这些“MOS”方法都是属于中心MOS,现在我们见到的国外有关“MOS”的文献,谈的MOS方法绝大多数都是中心MOS。上海徐一鸣、郭永润1978年利用上海台三层模式制作冬季降水概率MOS预报,这也属于中心MOS,其技术方法和国外的中心MOS相似。

局地MOS:美国“MOS”方法很快得到广泛应用,经八年实践证明要素预报靠国家气象中心包下来还有些问题,预报质量不易较大幅度提高。美国1980年正式提出在发展中心MOS的同时要发展局地MOS,并且要组成MOS系统。局地MOS是指在中心MOS的基础上,用本地最新实况和简单平流模式,用统计方法建立本地18小时以内的MOS方程。美国虽提出了局地MOS的计划,在1982年第9届天气分析预报会议上有了介绍。

地方MOS:地方MOS是我们1979年发展起来的一种MOS技术方法,它是在数值预报产品的基础上,发挥基层台站的优势,用一些简便的统计方法建立本地区的中短期MOS方程,来做本地区的要素预报。这里说的数值预报产品,是指本国甚至别国数值预报的形势预报,物理量预报和用MOS方法做的要素预报。所谓发挥基层台站的优势,是指本地区天气气候特点、最新实况、预报员的经验以及天气

形势分型等。这里的统计方法要求严格、简单、有效以便预报员应用和大面积推广。经四年的实践证明地方MOS是有效的,是有生命力的。

美国是在中心MOS充分发展之后,才提出搞局地MOS,日本等其它国家目前仍在发展中心MOS。我国目前中心MOS还没有搞起来,“MOS”方法应如何发展,一是采用美国和日本等国的办法,先发展中心MOS,在中心MOS充分发展之后,地方气象台、站再搞MOS方法。这样,我国地方气象台站五年之后才能开始搞客观、定量方法。二是要素预报由国家气象中心包下来,只发展中心MOS,地方气象台、站预报功能逐渐消亡,在中心MOS的指导预报基础上进行服务,或者进行少量的补充订正。我国国土辽阔,地形复杂,气候复杂,技术力量十分分散,加之过去国家气象中心并没有做好全国各地各种要素预报的实践。所以,由国家气象中心包下来显然是不合适的。采用第一个办法,虽然比较稳妥,但大约要损失五年左右的宝贵时间,所以也是不可取的。我们认为最好的办法是我们采取中心MOS和地方MOS同时发展,这样有利于调动一切积极因素,把我国预报工作更快搞上去,尽早使我国天气预报实现客观、定量。

四、发展地方MOS应充分发挥台站的优势

我们设想的地方MOS是以数值预报产品为基础,这数值预报产品是以我国数值预报产品为主,同时用一些国外数值预报产品,这样做的目的是可以得到更高质量的地方MOS方程。省、专气象台及县气象站要搞MOS方法,并不具备国家气象中心的三大优势:自己做数值预报,有大量

数值预报产品提供数以万计的候选因子,以及有高速大容量电子计算机。所以,地方MOS不能照搬外国已有的MOS方法。搞局地MOS也不合适,一是我国还没有中心MOS,要求积累中心MOS资料以后再搞局地MOS,就要延误3—5年时间。二是我国广大台站还没有配小型或微型电子计算机,各气象台站自己搞简易平流模式现在还办不到。三是我国省、专气象台对下负有指导任务,同时要做全省、全地区预报服务。四是预报时效不能只满足18小时以内,一般要有48小时以内,甚至十天以内。

所以我国地方气象台、站要搞MOS方法,要走我们自己的路,地方MOS要取得高质量,必须发挥自己的优势。地方气象台站的优点是四个方面:一是对本地天气气候特点及生产需要比较熟悉。二是有更多更近的各种实况,当基层台站收到数值预报产品一般在12—14小时以后,这样有新的常规观测、卫星云图资料 and 雷达观测。三是地方气象台、站在天气分析和预报中经常采用分类的方法,用分类建MOS方程比较见效。四是预报员有丰富的经验,这是高速大容量的电子计算机无法取代的,也是国家气象中心或上级气象台无法取代的。基层气象台站这四个方面的优势中前二方面在MOS预报中应用,是很容易被人们所接受,在这不多加阐述。

分类是对不同性质的矛盾,采用不同处理方法。许多科学是建立在分类基础上,搞MOS也应分类,分类的办法预报员比较习惯,不少经验是建立在分类基础上或与分类有关。分类还可以将小概率事件转化为大概率事件,如吉林省7、8月大范围大雨的概率不足10%,而在气旋影响条件下出现大范围大雨的概率为34%,在

几种特定路径的气旋其大雨概率为70%。分类可以大幅度提高MOS的质量,美国佩奇尔(Paegle)的试验证明做降水概率MOS预报时,据500毫巴气流分型比不分型质量明显好,吉林省的实践也证明这一点。

我们讲的预报员经验,包括科研成果在内,预报员经验是我国气象事业的宝贵财富,我们搞MOS不应弃之不用,不应完全从头搞起。应该在总结广大预报员经验基础上,充分利用这些经验,才能保证地方MOS优于主观预报。同时这样做,广大预报员更容易接受,可以吸收更多的预报员来搞地方MOS,来应用推广地方MOS,使得这次天气预报的变革进行得更顺利。吉林省通过对比试验,用了预报员经验可以提高MOS预报质量,如在分类基础上应用预报员经验可以大幅度提高预报质量。

五、推广MOS方法应作为系统工程来考虑

要在我国推广MOS方法,是天气预报一项重大变革,它牵涉到我国为数众多的气象台和气象站,它牵涉到预报、通讯、计算等方面,还牵涉到科研、业务、设备、经费、教育等,气象系统大约有1/5到1/3的人与此有关,这是有明确的目标,而相互之间关系十分密切,一、二个环节出毛病就会影响最终目标的实现,因此,这必须作为一个系统工程来考虑。1975年美国科学技术辞典将系统工程定义为:“系统工程是研究许多彼此密切联系的要素所组成的复杂系统的设计科学。设计这种复杂系统时,应有明确的预定功能及目标,而组成的各要素之间及各要素与系统整体之间应有机地联系、配合协调,以使系统整体能达到最优目标。在设计时还要考虑到参与系统中的人的因

素和作用。”我们从这定义也可以看到推广MOS方法作为一个系统工程来考虑是必要的。

要在我国实现MOS方法这一变革,将它作为一个系统工程,下面应分为三个主要的系统工程,即MOS技术方法子系统工程,通讯子系统工程,计算机子系统工程。而MOS技术方法子系统工程,它包括中心MOS和地方MOS两种技术方法,如何发挥各自优势,尽量避免重复,它的进展很大程度上取决于国家气象中心提供数值预报产品的质量和数量,我国没有中期数值预报业务,就不能将地方中期MOS建立在我国数值预报基础上,我国气象中心不能提供更多更高质量的物理量,将迫使广大气象台站大量应用国外的数值预报,使得我国数值预报不能更好发挥应有的效益。通讯子系统工程,应研究我国气象通讯应采用有线、无线、卫星通讯那个为主,怎样结合,数码和国家传输应如何更好地进行,传真如何高质量、快速,使省、专气象台从大量自绘图的重重复劳动中解放出来,当然对于上级气象台MOS指导预报如何传递给下级台站也应很好考虑。计算机子系统工程,应研究我国气象系统应发展什么样的计算机系列,各级气象台站应配备什么样的电子计算机才能满足MOS工作的需要,同时兼顾资料、农气、观测以及科研等方面,各级气象台站计算机之间如何实现实时传输信息,而历史信息用什么载体,并且各气象台、站如何互相通用。这三个子系统工程关系十分密切,如要实现,则整个系统工程应采用定量研究,对比研究,找出最省钱、最省力的途径,也就是实现最优化。

为了实现国家气象局关于天气预报变革的设想,应加强总体研究、设计,建立指挥系统,协调各方面的工作,只有设计

合理,指挥得当,整个工作进展才能多快好省。

六、“MOS”并非万能

“MOS”方法主要依靠数值预报和统计预报,对于数值预报要积累一定数量的资料,积累数值预报资料少的天气,不会有较好的预报效果。对于统计预报来讲小概率事件、小样本事件,预报起来是困难的,由于灾害性天气,往往是小概率事件,这就不能完全依靠常规的“MOS”方法,还应结合其它方法来解决。对于大范围灾害性天气预报,我们应该了解其物理成因,然后用诊断分析、完全预报等技术方法结合“MOS”方法来解决。对于局地灾害性天气预报,除了上述方法外,还应结合雷达、卫星、实况来做好短时预报。

我们在介绍、宣传“MOS”方法时,除了讲它的优点外,更应介绍它的缺点和局限性。其缺点和局限性有四条,首先它要积累一定数量的传真图,这一条许多气象台站现在还不具备。第二对于小概率事件预报能力差,而灾害性天气往往是小概率事件,它对预报服务工作很重要。第三MOS预报的效果优劣,关键在于我们对预报对象认识的深度,以及因子如何严格、客观、有效地选择,到现在我们对许多天气现象的认识还不够。第四数值预报模式变了,对“MOS”将有一定影响,而数值预报模式是在经常改进,不断发展。

有人问,“MOS”预报是不是永恒的,回答是否定的,“MOS”方法,只是在目前的科学和技术水平条件下是最优的气象要素预报方法,不可能成为气象要素预报最终最完善的预报方法。随着科学的发展,它将会被更好的预报方法所取代,但是现阶段“MOS”方法是发展的方向,是一种很有效的要素预报方法,值得大力提倡,大量推广。

第二章 数值预报简介

第一节 数值预报基础

在第一章中介绍了用数值预报做形势预报比主观预报好，做要素预报目前最好的方法是MOS方法。MOS方法是在数值预报基础上，用数理统计方法做出要素预报。而数值预报是怎样做出来的，台站预报员一般不很熟悉，要想比较深入地学习数值预报，需要一定的数理基础，并且要经较长时间的学习。在这一章只想简要介绍数值预报是怎样做出来的。

数值预报这一名词广大预报员已经熟悉，但它不是天气预报方面的专用名词。用数值计算的方法进行预报都可以叫数值预报，例如地震、海潮等也有数值预报。气象的数值预报是根据大气动力学和热力学定律，以大气实况资料，用数值方法计算，对未来高压、低压等扰动进行预报。由于这种预报是计算出来的，结果不因人而异，所以它是客观的，定量的。

一、理查逊试验

1922年理查逊出版了一本书，名叫《用数学的方法做天气预报》。理查逊在没有高空资料和电子计算机的情况下大胆进行了试验，他用大气流体力学方程组，用数值积分制作天气预报。方程组为：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + f v - g \frac{\partial H}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) - f u - g \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = - H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \left(u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \quad (3)$$

其中 f 为科氏力， $f = 2 \omega \sin \varphi$ (4)

u 、 v 为风速的西风分量和南风分量， H 为等密度大气的高度， $P = \rho g H$ (5)， ρ 为空气密度， P 为地面气压。

如果这三个方程右端都可以计算出来，这样它的左端 $\frac{\partial u}{\partial t}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial H}{\partial t}$ 就可以得

到。而微分如何计算，理查逊采用了差分法，如图2.1：