

集合预报及其在中期天气 预报中的应用

李小泉 刘金达 汪迎辉

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

作者概述了集合预报的基本概念,集合预报在中期天气预报中的意义与作用,现有的主要集合预报产品以及集合预报在美国国家气象中心和欧洲中期天气预报的业务运行。简要介绍了我国国家气象中心在动力延伸预报和集合预报方面的试验研究情况。

关键词: 动力延伸预报 集合预报 集合预报产品 业务试验与应用

前 言

近年来,天气预报领域的一个重大发展,是动力延伸预报(Dynamical Extended Range Forecasting, DERF)和集合预报(Ensemble Prediction)的研究与应用。

由于大气非线性系统内在的不稳定性,初始场又不可能完全精确获得,从而使得初始场必然存在的微小误差可能迅速增长,通过非线性相互作用影响到天气尺度甚至行星尺度的运动,从而使得在有限时间内,整个大气运动变得不确定,这就是大气的可预报性问题。这样,对于较短的预报时效来说,即在初始微小误差增长不大的情况下,预报可以认为是确定性的。但在积分若干天之后,从稍有差别的初始场出发,即使用完全模式,其预报轨迹也可能发散到较大的区域,这时,大气状态应该认为是随机性的,于是预报问题就成为对它的概率分布进行估计的问题了。如图1所示。

众所周知,大气系统详细发展过程的可预报性为2—3周。实践表明^[1,2],尽管目前动力学方法逐日环流形势的可用预报一般不超过10天,但预报技巧对不同的个例差别很

大,不少情况下延长动力模式的预报时效仍然可以提供很多有用信息,特别是如果事前就能够对预报的可信程度和几种类别出现的可能性作出估计,是很有意义的。随着计算技术的快速发展和计算能力的急剧提高,使得建立可供实用的动力延伸预报和集合预报成为可能。

1 动力延伸预报(DERF)

1996年11月举行的世界气象组织基本系统委员会第11次会议的文件中,对于不同类型天气预报的预报时效,作了明确的说明^[3]。“中期天气预报”指的是3—10天的天气预报。在“中期天气预报”与“长期天气预报”之间,增加了“延伸时期天气预报”(Extended-range Weather Forecasting)一栏,指的是“10天以后至30天时效的天气预报,通常以平均或相对气候值的偏差来表示”。而“长期天气预报”则指的是“30天以后到两年时段的预报”。这就意味着,时效为10—30天这段时间的天气预报,要作为一个专门的问题来看待。因此,所谓DERF,应理解为将动力学方法的预报延伸计算到中期预报/可用预报时限以后,并提取有意义的预报信息。

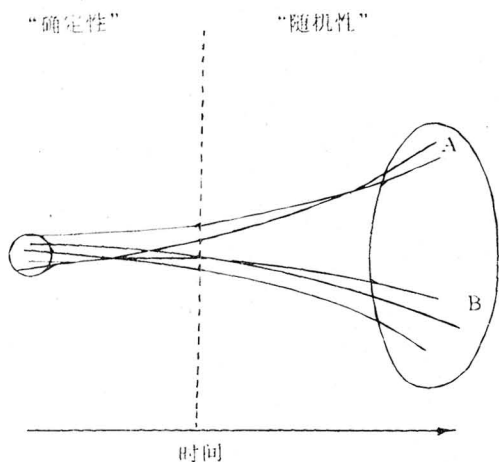


图1 集合预报示意图

左方小圈代表初始条件的不确定性,线条表示不同成员的预报轨迹,右方的大椭圆代表预报值可能出现的范围。A、B表示可以根据预报轨迹分组。

80年代中期,美国国家气象中心制定了开展动力延伸预报试验的计划^[2]。他们以1986年12月14日到1987年3月31日每天00UTC的资料为初始场,用中期数值预报业务模式(R40L18)进行了108次将预报时效延伸到30天的DERF试验。此外,还用1987年1月1—10日的资料,进行了初始场间隔12小时和用低分辨率(R20)模式作30天DERF的对比试验。

英国、日本、法国等国家以及ECMWF近年来都先后开展了DERF的试验研究^[4-7]。归纳起来,有如下几点主要结果:

(1)延伸时期的预报有明显的系统性偏差(模式气候漂移),如出现系统性的纬向气流增强和高度场系统性偏低。

(2)不同个例之间,延伸预报的效果差别很大,对不同的初始场,有的很好,有的很差,对于延伸预报时效较长的情形表现得更为明显。总体来说,时间平均的预报场要比相同时效的逐日预报场有较高的准确率,且平均的时间越长,效果越明显。

(3)对有一定预报技巧的DERF产品,用统计方法进行适当处理后,如时间平均、系

统误差订正、EOF展开平滑等,能够在一定程度上提高其预报水平,但对原来预报效果就差的个例则不明显。

(4)进行DERF计算时,一定预报时效以后,适当降低模式分辨率,可以大大节省计算机资源,而不致明显降低预报效果。

2 集合(Ensemble)预报问题

2.1 问题的提出

由于初始场存在不可避免的观测和分析误差,即不确定性,我们实际应用中建立的某个初始场,从概率论的角度看,仅是无数个真正“初始场”中的一个。为能更好地描述初始场的状况,需要尽可能多的样本的集合。如果将完全的大气环流模式用于该集合的每个成员,那么,计算所得的全部解便组成大气未来发展的概率分布。英文Ensemble是“整体”、“总效果”、“全体演出”的意思。因此,集合预报的原意,指的是从大气初始场的不确定性和大气系统的不稳定性考虑出发,给出大气未来发展的概率分布。但是,我们既没有完全精确的大气环流模式,也无法得到初始场的全部可能样本和对所有的样本逐一进行计算。因此,集合预报通常指的是在实际观测和分析所得的初始场的基础上,叠加适当小扰动,从而形成稍有差别的多个初始场,作出多个动力延伸预报,然后进行综合,以获取更多的有用信息。目前,不少部门也将这个基本思路用于10天以内的中期预报。

2.2 初始场的形成

如何选择和形成合理的、并在人们当前认识到的可能误差范围之内的小扰动,是进行集合预报首先遇到的问题。

早期集合预报初值的形成,大多用蒙特卡洛(MC)方法^[10],即在客观分析的基础上叠加随机小扰动。由于随机扰动生成的任意性以及初值样本位象空间的维数远大于实际可能做的集合预报个数,因此,难以产生适用的扰动初值,效果不理想。1983年Hoffman和Kalnay提出了时间滞后平均预报(Lagged

Average Forecasting, LAF) 方法^[11],即用间隔为6小时或12小时的多个初始场分别作预报,然后把相同时刻的预报结果求平均。试验表明,LAF方法较MC方法效果有所提高。1993年,Toth和Kalnay提出了一种称为增长模繁育(Breeding of Growing Modes, BGM)的方法^[12],提取存在于循环分析场的快速增长模,以此作为叠加在初始场中的小扰动。ECMWF所建立的集合预报系统^[8],则根据短时间内不稳定扰动与线性传播主向量相对应的原理,用求解模式不稳定扰动矩阵的方法,形成扰动初值,称为奇异向量法(SV)。

初始场的随意“制造”,显然是不合理的。如何选择和形成最佳的集合预报初值,仍然是进行集合预报需要研究和解决的重要问题。

2.3 集合预报产品

从不同初始场出发,分别进行延伸预报,得到大量预报信息。怎样将如此众多的信息浓缩,以简捷和便于应用的形式给预报员提供反映未来大气发展主要特征的集合预报产品,是集合预报业务应用面临的又一个重要问题。ECMWF和美国国家气象中心实时业务的集合预报产品,有如下几种^[1,2,8]:

2.3.1 邮票图。ECMWF将所有集合成员的欧洲500hPa形势预报图缩小,依次排列组成一张大图,每个成员图的大小形似邮票^[13](图略)。虽然每单个图中的细节可能不太清楚,但预报员可以借此判断天气系统未来可能的发展方向。同时,若其中出现了异常的个例,则提供了值得注意和进一步研究的问题,这无疑对实际业务服务是有益的。

2.3.2 集合平均、聚类集合平均图。在理想情况下,对所有相同时刻预报场求平均,可以平滑掉个别成员中的随机扰动成份,从而总体来说,应该获得较随意挑选的个别成员更有效的预报技巧。虽然实际上,我们只有不完全的模式和有限的初始场样本,不过,统计表

明,用简单算术平均所作的集合平均也能够使预报技巧有所提高^[1,2]。

通过统计聚类分析的手段将诸集合成员进行分类,分别计算各类集合成员的平均,可以给预报员提供天气形势未来发展若干可能类型的有用信息。

2.3.3 离散度图。集合成员之间的离散程度,反映出它们的总体差异大小。显然,离散度越大,表示预报值可能出现的范围越大,预报可信的程度就越低。这样,集合预报成员之间的离散度便可以用来反映预报的可信程度。

附表 108次延伸预报和LAF方法的集合预报试验中,不同时间平均的北半球(20°—80°N)500hPa高度预报准确率(距平相关系数)与集合成员一致率的相关关系^[2]

时间平均/天	集合成员一致率与预报 准确率的相关系数	预报准确率
1—5	0.22	0.90
6—10	0.36	0.44
11—15	0.12	0.15
16—20	-0.02	0.10
1—10	0.42	0.72
6—15	0.35	0.32
11—20	0.09	0.16
1—15	0.39	0.56
6—20	0.33	0.28
11—25	0.13	0.17
1—20	0.40	0.47
6—25	0.31	0.25
1—25	0.43	0.42

附表是根据美国国家气象中心所做的108次30天延伸预报和LAF方法的集合预报试验,不同时间平均的北半球500hPa高度预报准确率(预报与实况的距平相关)与集合成员的一致率(集合成员之间的平均距平相关)的相关系数。可见,两者之间的正相关是明显的,尤其在预报时效较短和平均时间较长的情况下。随着预报时效延长,平均预报准确率下降,预报准确率与集合成员一致率的相关关系也下降。

2.3.4 概率烟羽图。对于感兴趣的特定地点,统计计算集合成员各类预报数值的出现概率,从而绘出预报对象在不同预报时效集合预报成员的概率分布,该图状如烟羽发散,由此得名。图2是ECMWF1993年11月13日所作的巴黎850hPa温度集合预报概率烟羽图的例子。

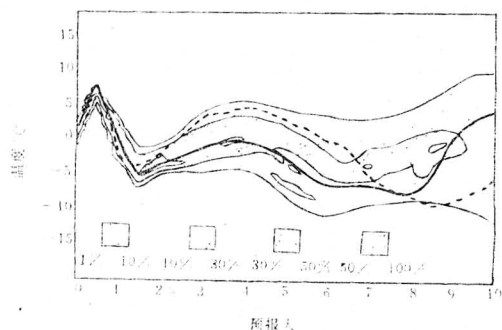


图2 初始场为1993年11月13日巴黎地区(48.67°N, 2.5°E)850hPa温度的集合预报概率烟羽图^[8]

粗实线为T63, 断线为分析

2.3.5 天气概率分布图。统计各集合成员预报某种天气类型(如降水>10mm/天)出现的概率,绘制成天气概率分布图,得出该类天气的概率分布图,用以显示该类天气在不同地区出现的可能性。

3.5.6 高低压中心、距平中心、特征等高线综合图。将各集合成员在相同预报时效的高低压中心和强度、正负距平中心和数值、某些特征等高线(等压线)综合绘于一张图上,这类图表有利于帮助预报员分析和判断天气系统未来的发展变化及其可信程度。

3 集合预报的业务应用

美国国家气象中心和ECMWF均从1992年12月起正式建立了各自的集合预报业务系统并投入实际业务运行。

3.1 美国国家气象中心

图3是美国国家气象中心用LAF与BGM方法相结合的集合预报计算方案示意图^[1]。他们每天将00UTC初始场的T126模

式计算到第5天,然后降阶为T62延伸计算到12天,将12UTC初始场的T126模式计算3天航空预报之后,也降阶为T62并延伸到12天;对00UTC初始场用T62模式做12天的预报;对00UTC的初始场加上或扣除用BGM方法获得的扰动,用T62模式做两个12天预报。这样,每天在10天预报时段内有14个预报场供进行集合处理。

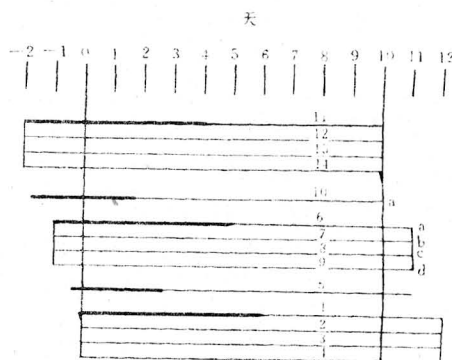


图3 美国国家气象中心集合预报计算方案示意图

粗线为T126, 细线为T62

a. T126转为T62延伸预报, b. T62控制预报, c. 叠加增长扰动, d. 减去增长扰动

每天提供的集合预报产品包括环流形势的集合平均与客观分类集合平均、集合成员离散度空间分布、特征等高线综合图、高低压中心和正负距平中心综合图等。

3.2 ECMWF

ECMWF的集合预报扰动初值,用前述的奇异向量法在业务客观分析基础上分别叠加和扣除16个奇异向量所形成,用T63L19模式计算10天预报,这样,每个集合预报由1个控制预报(以业务客观分析为初始场)加上32个扰动预报所组成,共有33个成员。在现有计算机系统上(CRAY C90 16个处理器)完成一次集合预报计算约需2.7小时,为T213L31 10天业务预报所需机时的1.3倍。从1992年12月起,ECMWF向各成员国散发和提供多种中期时间尺度的集合预报产

品,包括邮票图、欧洲地区地面气压的聚类集合预报平均图、850hPa 温度概率烟羽图以及不同级别降水、风、850hPa 温度的概率分布图等。

1996年5月,T. Petroligis 等报告了将ECMWF的集合预报成功地用于欧洲地区强降水中期预报的3个例子^[9]。1994年10月21—22日,希腊地区出现了强降水和突发性洪水,两周以后,在意大利西北部和法国南部的一些地区也出现了日雨量超过100mm的强降水,均造成数十人死亡和巨大损失。对这两次强降水过程,T213L31中期预报业务模式在5天前做出了预报,而集合预报系统给出的强降水概率预报图反映出该地区出现强降水的可能性很大,事实证明预报是成功的。1994年9月中旬初,中期预报业务模式T213L31预报9月14—16日意大利北部将有强降水,而集合预报则反映该地区强降水出现的概率较低,集合成员之间的离散度也大,因而不支持。实际上,9月中旬中该地区并未出现强降水。实践表明,将集合预报产品是否支持业务模式预报作为一种判据,对于增强预报的可信度,减少空报是很有好处的。

4 我国国家气象中心的延伸预报和集合预报试验

1991—1994年,国家气象中心用T42L9模式在Cyber992计算机上进行了50次30天延伸预报试验,并投入了业务试运行^[14]。计算时使用海温观测值作下垫面强迫,用对纬圈的平均偏差距平的方法来消除模式的气候漂移。结果表明,第一句(前10天)500hPa平均高度距平符号的平均准确率有72%左右,平均距平相关系数在0.51—0.57之间,对实际业务有较好参考价值。第二句的预报准确率明显下降,高度距平符号的准确率在60%左右,平均相关系数在0.10到0.17之间。第三句的平均高度距平符号准确率仅55%到57%,距平相关系数则接近于零。月

平均(30天)500hPa高度距平符号的预报准确率为62%—64%,平均距平相关系数0.18—0.27,明显低于第一句,但高于第二、三句。与相同时期各种“无技巧”的预报(持续性、随机、气候预报)相比较,月尺度延伸预报的平均准确率最高,表明是有技巧的。

1994年9月到1995年2月,利用银河Ⅱ巨型机上的T63L16模式,用相同的初始场与T42L9模式进行了14次30天延伸预报的对比试验^[14]。结果表明,80%以上情况准确率有所提高,第一、二旬和月平均500hPa高度场的距平符号准确率平均提高4%—5%,距平相关系数平均提高0.01—0.08。

1996年,按照国家气象中心领导的布置与要求,数控室与气象台合作,在SP2计算机上开展中期时间尺度的集合预报试验。首先,克服了机型不同带来的操作系统、计算精度、非标准语句等诸多困难,成功地将T63L16模式及其后处理程序移植到SP2上去,实现了CRAY机上的客观分析初始场向SP2的无误传输和SP2上的预报结果向气象台中期科的传输和输出。

由于原程序在SP2上使用公用磁盘运行耗时太多,为此,修改了其中大量读/写语句,尽可能使用各结点的本地磁盘,从而大大缩小了计算时间,为实时业务应用创造了必要前提。在SP2上的并行计算尚未完全实现之前,设计了多结点多个T63模式同时运行的方案,即用连续3天4个时次的CRAY机上的客观分析为初始场,逐一送到SP2,在不同结点上分别用T63模式进行13—15天的延伸预报,这样,它们便可以组成有12个成员的LAF集合预报,参加国家气象中心中期科的实时预报会商和参考使用。

1996年9月下半月到11月,在SP2计算机上进行了8次实时集合预报试验。图4是9月19日参加9月下旬天气预报会商进行集合预报的计算方案示意图。图5给出了

参加预报会商的第一候(1—5天)和第二候(6—10天)500hPa 高度的集合平均与控制

预报(集合成员中最后一次预报)的准确率(以距平相关表示)的比较。

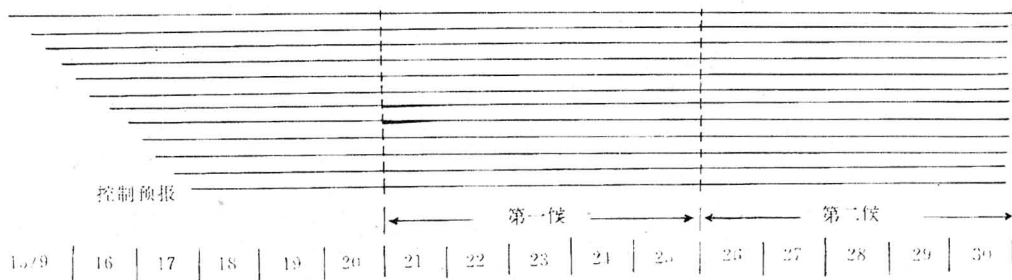


图4 1996年9月19日参加9月下旬天气预报会商的集合预报计算方案示意图

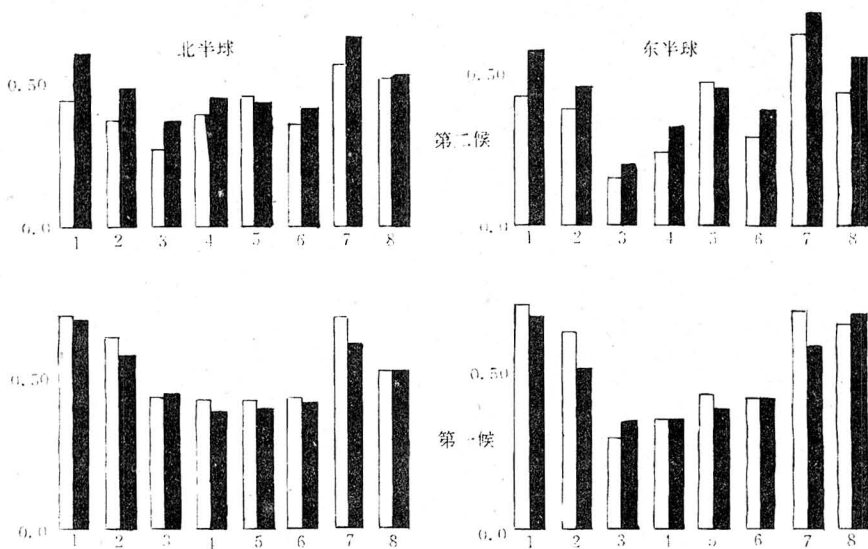


图5 参加中期预报会商的8次500hPa 高度集合平均与控制预报准确率的比较

白区:控制预报

黑区:集合预报

可以看到,在绝大多数情况下,第一候的预报准确率集合平均低于控制预报;第二候则明显超出,距平相关系数平均约提高0.06—0.08,无论是北半球、东半球还是按纬圈统计(图略)情况基本一致。这就显示出,通过对延伸预报产品的集合平均可以部分消除其中的随机误差,从而在一定程度上提高预报准确率。

5 几点认识与看法

5.1 进行集合预报,是建立在对于中期以上时间尺度天气预报这种认识的基础之上,即,

客观上就不存在唯一的确定性的解,而是概率分布。集合预报的目的,在于对未来天气出现的范围和可能性提供可靠的估计。因此,集合预报不是“预报集成”,并非试图通过某种途径,将众多技巧较差的产品,“集合”成为有更高技巧水平的确定性预报来。

5.2 全体集合成员预报产品的平均虽然能在一定程度上消除随机误差,提高预报准确率,但实践表明,提高是有限的。而且往往使预报产品变得平滑,异常天气的特点难以显示出来。因此,集合预报的主要功能是以多种

形式提供未来大气发展不确定性的信息,帮助预报员和用户作出判断。特别是当前我国的中期预报实际业务服务还不是概率预报的形式,如何更好地应用集合预报产品还要更多的依靠预报员的分析判断和经验积累。

5.3 开展集合预报需要进行多次延伸预报计算,需要强有力计算机的支持。即使在计算机资源允许的条件下,如何生成合理的初值和形成适用的集合预报产品,仍然是需要进一步研究的重要问题。目前使用的LAF方法,并非是扰动初始场生成的最佳方法,只提供全体成员简单算术平均一种集合产品,也是不够的。

参考文献

- 1 Tracton, M. S., and E. Kalnay. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: Practical aspects. *Wea and Forecasting*. 1993, 8(3): 378—398.
- 2 Tracton, M. S., K. MO, and W. Chen. Dynamical extended range forecasting (DERF) at the National Meteorological Center. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, 117: 1604—1635.
- 3 Definition of forecasting ranges. Item 6. 3, CBS—X1/PINK13, Appendix B, P. 8.
- 4 Milton, S. F., Practical extended-range forecasting using dynamical models. *Mete. Maga.* 1990, 119 (1420): 221—231.
- 5 Royer, J. F. and Mo Deque, Improvement of long-range predictions by combination of model forecasts. *WMO/TD* 1991, NO. 395: 235—240.
- 6 WMO 1995: Long-range forecasting progress report for 1993/1994. *WMO/TD—NO.* 679.
- 7 Brankovic, C. etc., Extended-range predictions with ECMWF models: Time-lagged ensemble forecasting. *Q. J. R. Mete. Soc.* 1990, 116: 867—912.
- 8 Molteni, E. et al. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. *Q. J. R. Mete. Soc.* 1996, 122: 73—119.
- 9 Petraliagis, T. et al. Extremen rainfall prediction using the ECMWF ensemble Prediction system (内部报告), 1996.
- 10 leith, C. E., Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.* 1974, 102: 409—418.
- 11 Hoffmann, R. N., and E. Kalnay, Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 1983, 35A: 100—118.
- 12 Toth, E. and E. Kalnay, Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bulletion of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317—2330.
- 13 Buizza, R. Optinal perturbation time evaluation and sensitivity of ensemble prediction to perturbation amplitude. *Q. J. R. Mete. Soc.* 1995, 121: 1705—1738.
- 14 李小泉, 李维京, 罗艳, 张小礼. 月尺度动力学延伸预报试验. 气候预测研究. 北京: 气象出版社, 1996年: 61—72.

The Ensemble Prediction and Its Application in Medium Range Weather Forecast

Li Xiaoquan Liu Jinda Wang Yinghui

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The fundamental conception, the sense and function in medium-range weather forecast of ensemble prediction as well as the main ensemble products in present are summarized. The operation of ensemble prediction in NMC of USA and ECMWF, the experimental research of DERF and ensemble prediction in NMC of China are reviewed.

Key Words: dynamical extended range forecasting (DERF) ensemble prediction
ensemble products research experiment and application in operation