

集合数值天气预报的研究进展^①李 俊¹ 纪 飞² 齐琳琳² 张爱忠¹ 张文军²

(1. 解放军理工大学气象学院, 南京 211101; 2. 航空气象研究所)

提 要

集合预报是目前国外广泛应用的一种新的数值预报技术,国内由于计算条件的限制,集合预报的研究应用起步较晚,目前虽已取得了一些研究成果,但还没有广泛的应用到实际的业务预报之中。集合预报的应用,在天气预报上主要是概率预报,另外在“目标观测”、资料同化等方面也有广泛应用。集合概率预报的一系列适用的验证,增加了概率预报的信度。

关键词: 集合预报 概率预报 集合产品验证

引 言

数值天气预报的准确性取决于模式本身和模式初始场的准确性。一方面,描述大气的模式永远不可能完美,必然存在着误差;另一方面,由于观测站的分布不均以及观测资料 and 客观分析不可避免地存在着误差,使得模式初始场不可能精确地获得。而且大气是一个高度非线性的混沌系统^[1],数值天气预报的结果对初始条件的微小误差非常敏感。因此,数值预报误差会随着模式积分过程迅速增长,积分若干天后,预报结果就变得具有明显的随机性了。所以像决定性预报方法那样,仅用众多可能的预报状态的一种来描述大气的将来状态是不够科学的,更合理的方法是以概率的形式来认识大气预报状态,而对所有可能的预报状态及这些预报状态的概率分布进行预报,这种预报方法就是集合预报^[2~4]。集合预报通常的做法是在实际观测和分析得到的初始场基础上,叠加适当的小扰动,从而形成稍有区别的多个初始场,分别

进行动力延伸预报,然后进行综合,以获取更多有用的信息。

1 集合预报的发展

集合预报从理论提出到业务化的实现,经过了二十多年的数值研究和试验。1963年, Lorenz^[3]发现了大气中的混沌现象,天气预报的不确定性引起了众多学者的兴趣。1969年, Epstein^[2]为解决数值天气预报对初始条件误差的敏感问题,首先在理论上提出了动力随机预报方法。1974年 Leith^[4]提出了可实际应用的“蒙特-卡洛法”(Monte Carlo forecasting)预报概念,即用一个随机函数产生扰动而形成的初始场进行集合,现在的集合预报正是基于此概念而发展起来的^[5]。1992年12月,美国国家气象中心(NMC)^[6,7]和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)^[8]开始了中期集合业务预报,标志着集合数值预报发展到了比较成熟的业务应用阶段。随后,加拿大、日本、法国等多个国家相继建成了集合数值预报系统,集合预报产品

① 自然科学基金 40375016 资助。

成了各国预报员预报天气的一个重要参考。而中国由于受计算条件的限制,集合预报的研究及应用起步较晚,1999年底才建立起基于国产神威计算机的集合预报系统。

2 集合预报的分类

根据产生集合成员的不同方法,集合预报可以分为初值集合和模式集合。早期的一些集合预报试验表明:在相空间随机采样不能很好地描述预报状态的真实分布。因此,初始扰动的产生成为集合预报中的一个核心问题,即如何产生扰动集合使之能够真实地反映初始条件的不确定性。在同一模式下通过一定的扰动方法产生一系列不同的初始场进行积分,集合成员来自不同的初始条件的集合就是初值集合;另外,由于在构造模式的过程中,人们对大气物理过程的描述不完善是模式误差引入不确定性的主要原因^[9],所以可以在同一模式的框架下,采用物理参数化过程的不同实现方案来构成集合,这就是模式集合。

初值集合产生扰动的方法有多种,最早采用的是 Monte Carlo 扰动法,但扰动收敛到动力不稳定模态需要较长时间。1983年, Hoffman 和 Kalnay 提出时间滞后平均预报法(the lagged average forecasting: LAF)^[10],即利用不同时刻的业务预报,把在同一预报时刻的预报结果作为集合预报的成员。1993年,Toth 和 Kalnay^[11]提出的增长模繁殖法(breeding of growing modes: BGM)能够生成与数值天气模式的最大 Lyapunov 指数相关联的矢量。美国 NMC 集合预报方案是基于 BGM 和 LAF 的综合扰动技术。ECMWF^[8]建立的集合预报系统,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,形成扰动初始场,即所谓的奇异向量法(Singular vectors: SVs)。中国国家气象中心的第一代中期集合数值预报系统,采用时间滞后平均法生成

初始扰动,1999年建成的第二代及第三代集合预报系统采用奇异向量法生成初始扰动。BGM 和 SVs 是目前世界上普遍采用的两种初始扰动产生方法。

模式集合就是在同一初始条件下,集合成员由同一模式采用不同的物理参数化方案构成或者不同的数值模式(目前世界上的数值模式种类比较多)。更完备地消除预报中不确定性的方法是同时使用初值、模式混合集合和包含多初值和多模式的超级集合。例如“poor man”^[12]法集合预报技术就是来自几个业务中心的确定性预报作为集合预报的成员,相对于发展并运行一个集合预报系统,该方法便宜而且容易实现。

根据预报时效,集合预报又可以分为中期集合和短期集合。集合预报发展之初主要用于中期预报,并取得了大量的研究成果。1994年 Brooks、Mullen^[13,14]等人开始了短期集合预报的研究,发现短期集合预报优于确定性预报的一个主要的好处是可以根据任何一个模式参数得到概率密度函数,从而做出概率预报。由于短期天气预报能够帮助预报员精确地评估天气事件发生的概率,因而具有广阔的应用前景。目前,大气科学领域中各个尺度的预报都在积极地应用集合预报这一概念和技术。

3 集合预报产品及其验证

由于集合预报的输出信息量相当丰富,预报员要在短时间内从中获取有用的信息十分困难,因此,一个完整的集合预报系统包括集合预报的集合方案,以及集合预报产品的解释和应用。集合产品的释用就是要从大量的集合预报输出中提取有用的信息,形成便于预报员使用的图像、数据等产品。目前,集合预报主要有三类产品:集合平均预报、大气可预报性的预报和概率预报。这三类产品也代表了集合产品发展的三个阶段。

“邮票”图^[15]是展示集合预报产品最直

接、最基本的一种方法。它将所有集合成员和业务预报的结果放在同一张大图上,预报员凭经验进行主观判断,因此对于成员较多的集合预报,分析效率比较低。平均图就是所有预报成员的平均,由于平均能够过滤掉不可预报的随机信息,集合平均往往比单一确定性预报准确,但集合平均也会过滤掉少数成员预报出来的极端天气事件。集合平均预报是初级阶段的集合产品,为集合预报的进一步发展奠定了基础。后来发展了分类图,就是采用一定的分类方法,如系统聚类法、非系统聚类法、管形聚类法^[16,17,18]等,将所有的预报成员分成几类,给出每种类型的分类平均以及该类型的典型形势图。

大气的可预报性通常用集合预报成员间的发散程度来度量。这种发散程度除了用集合成员与控制预报之间的均方差和相关系数来定量表示外,还可以用“面条”图来定性表示,即选取一条特征等值线,把所有成员中预报的该等值线绘制在同一张图上。一般来说,等值线的发散程度大致反映出预报的可信度,等值线越是集中,可信度越大。

集合预报发展到了成熟期以后,便有了气象要素的概率预报。概率分布包含了集合预报系统所能提供的所有信息,最大程度的包含了实际大气可能发生的种种情况,概率预报是表达集合预报最全面的方法之一。例如降水、气温、风等要素,可以制作出不同量级或大小范围的概率预报,甚至对于某一特定的地点,可以制作出概率烟羽图。2004年1月NCEP开始了新的试验^[19],从84~180小时运行T126L28,缩短积分步长,集合成员增加到45个,并且增加了总降水量、雨、雪、冰粒、冻雨的概率预报产品。

集合预报产品的验证对于集合产品的使用具有重要意义,通过对比分析,能够直观、量化地体现出集合预报的优势。对于集合成员预报以及集合平均的评价,一般采用均方

根误差或者与实况的相关系数来表示。对于概率预报有一套适合的评价方法,如偏差评分(BS)^[20]、准确性和预报技巧评分,这可以增大概率预报的可信度。BS评分能够精确的给出概率预报与实况的距离,进一步还可以计算与气候平均的距离。对于多极概率事件的概率预报,等级概率评分(rps)^[21,22]比BS更能灵敏地反映出概率预报与实际观测之间的距离的变化。相对作用特征(ROC)^[23,24]曲线是关于预报命中率(H)和误警率(F)之间的关系曲线,ROC曲线下方的面积(A)可作为概率预报系统质量的指标。一个完美的预报系统的 $A=1.0$,而没有技巧的预报系统($H=F$)的 $A=0.5$ 。一般来讲, $A\geq 0.7$ 时认为该系统是可用的,当 $A\geq 0.8$ 时认为该系统性能良好。ROC验证的优点是它允许确定性预报和概率预报系统之间的直接比较。集合预报产品的验证,对于集合预报来讲,可以提高预报的信度,而对于用户来讲,则可以增加使用产品的信心,因此产品验证是必不可少的。

目前,中国集合预报产品主要有500hPa高度场分类图,1mm、10mm、25mm、50mm以及100mm各等级的降水概率预报图,850hPa温度距平概率预报,500hPa高度场特定等高线面条图等。集合产品还相对比较简单,且没有广泛的业务应用,目前仅中央气象台在用基于T106的10天中期形势场的集合预报产品。由于集合成员间的差异比较明显,导致集合预报比实况平滑得多,因而也仅是在作趋势性预报中加以参考应用,成员间的离散度与预报可信度之间的关系还有待进一步分析和验证。另外,中国目前的集合预报仅限于中期形势预报场的集合,还没有短期预报关注的气象要素预报,集合产品如邮票图、概率烟羽图等也还亟待开发。因此,集合产品解释应用方面还有很大的开发潜力。

4 集合预报应用

对于许多天气预报的用户来说,他们关心的是与特定临界值有关的风险评价(花费损失比: C/L),而不是分类预报。决策者根据概率预报来决定是否采取防护措施,无论事件发生与否,花费是 C ;如果事件发生了,但没有采取防护措施,决策者的损失是 L 。根据情况,对于 C/L 小即存在较大损失风险的决策者,应在事件发生概率较小时就采取防护措施,从而避免更大的损失发生;而对于 C/L 大即存在较小损失风险的决策者,可以等事件的发生概率更大一些,形势更明朗些再采取措施,从而避免盲目行动带来的浪费。概率预报以精确的数值给出了未来种种天气情况发生的概率,用户则可以根据自己的风险评价做出不同的决策,而这是确定性预报无法做到的。

集合预报技术及产品除进行天气预报外,还可以指导大气观测的实施,即“目标观测”^[5]。由于某一重要天气系统的集合预报中预报成员的集合离散度与其上游某一地区的气象初始场资料存在较大相关,据此可以对该上游区域利用各种可能的探测工具如雷达、飞机等进行加密观测,以改进该区域气象初始场的质量,从而更准确地预报未来天气系统的发展演变过程。1997年1~2月实施的东大西洋风暴试验(FASTEX)^[25]就是利用集合预报确定观测目标,从而取得了比较好的预报结果。这种根据具体天气系统而设定的移动性加密观测网,能够非常有效地运用有限的观测经费而达到提高重要天气过程的预报准确率的效果。

近年来,集合预报在资料同化过程中的应用也有很大的发展^[5,26]。可以利用集合预报离散度的信息,来估计气象资料背景场上误差的可能分布。其优于传统同化方法之处就在于,基于集合预报的误差分布估计是与当时真实天气背景场相关的,所以是真实的;

而传统的方法所估计的误差分布只是统计意义上的,所以是历史的。

5 小结

随着集合预报系统发展的日渐成熟,越来越显示其优越的预报能力,集合预报已经成为未来数值天气预报的发展的一个重要方向。目前,世界上两大数值天气预报中心:ECMWF和NCEP采用的奇异矢量法和增长模繁殖法已经被各国普遍采用,两种初始扰动场的产生方法殊途同归,并且正在不断地改进和完善。随着计算机运算速度的提高,模式分辨率也将进一步提高,集合成员也将进一步增加,集合预报输出信息也将极大的丰富。对于集合预报输出产品的信息提取,各国水平不一,法国、英国气象局^[15]利用集合预报产品制作定点气象要素的预报已经相当成熟。ECMWF的集合预报产品应用最为广泛,并不断研究、检验及开发新的产品,而中国的集合预报产品还没有正式投入业务应用,与国外的差距还比较大。随着集合预报成员的不断增多,快速有效提取集合产品的信息愈发显得迫切了。

参考文献

- 1 Lorenz E N. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(3): 130—141.
- 2 Epstein E S. Stochastic Dynamic Prediction. *Tellus*, 1969, 21(6): 739—759.
- 3 Lorenz E N. A Study of the Predictability of a 28-variable Atmospheric Models. *Tellus*, 1965, 17(3): 321—333.
- 4 Leith C S. Theoretical Skill of Monte Carlo Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, 102(6): 409—418.
- 5 杜钧. 集合预报的现状和前景. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 16—28.
- 6 Tracton M S, Kalnay E. Operational Ensemble Prediction at the National Meteorological Center: Practical Aspects. *Weather and Forecasting*, 1993, 8(3): 378—398.
- 7 Toth E, Kalnay E. Ensemble Forecasting at NMC: The Generation of Perturbations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317—2330.

- 8 Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF Ensemble Prediction System. Methodology and Validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, 122(1): 73—119.
- 9 Tribbia J J, Baumhefner D P. The Reliability of Improvements in Deterministic Short-range Forecasts in the Presence of Initial State and Modeling Deficiencies. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 116(11): 2276—2288.
- 10 Hoffmann R N, Kalnay E. Lagged Average Forecasting an Alternative to Monte Carlo Forecasting. *Tellus*, 1983, 35A(2): 100—118.
- 11 Toth Z, Kalnay E. Ensemble Forecasting at NMC: The Use of the Breeding Method for Generating Perturbations. Preprints, 10th Conference on Numerical Weather Prediction. Portland, Oregon: Amer. Meteor. Soc., 1994: 202—205.
- 12 Ebert Elizabeth E. Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129(10): 2461—2480.
- 13 Hamill Thomas M, Colucci Stephen J. Perturbations to the Land-surface Condition in Short-range Ensemble Forecasts. Preprints, 12th Conference on Numerical Weather Prediction. Phoenix: Amer. Meteor. Soc., 1998: 273—276.
- 14 Brooks H E, M S Tracton, et al. Short-range Ensemble Forecasting: Report from a Workshop, 25—27 July 1994. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, 76(9): 1617—1624.
- 15 毛恒青, 王建捷. 集合预报业务使用现状和趋势. *气象*, 2000, 26(6): 26—29.
- 16 陈 静, 陈德辉, 颜 宏. 集合数值预报发展与研究进展. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 497—507.
- 17 李泽椿, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 1—15.
- 18 Atger F. Tubing: An Alternative to Clustering for the Classification of Ensemble Forecast. *Weather and Forecasting*, 1999, 14(5): 741—757.
- 19 章国才. 中短期天气集合预报问题. *气象*, 2004, 30(4): 3—5.
- 20 Brier G W. Verification of Forecasts Expressed in Terms of Probability. *Mon. Wea. Rev.*, 1950, 78(1): 1—3.
- 21 Thomas M Hamill, Stephen J Colucci. Verification of Eta-RSM Short-Range Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125(6): 1312—1327.
- 22 Thomas M Hamill, Stephen J Colucci. Evaluation of Eta-RSM Ensemble Probabilistic Precipitation Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126(3): 711—724.
- 23 Mason I B. A model for Assessment of Weather Forecast. *Aust. Meteor. Mag.*, 1982, 30(4): 291—303.
- 24 Wandishin Matthew S, et al. Evaluation of a Short-range Multimodel Ensemble System. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129(4): 729—747.
- 25 Toth Z, Szunyogh Istvan et al. Ensemble-based Targeted Observations during FASTEX. Preprints, 12th Conference on Numerical Weather Prediction. Phoenix Arizona: Amer. Meteor. Soc., 1998: 24—27.
- 26 Houtekamer P L, Mitchell H L. Data Assimilation Using Ensemble Kalman Filter Technique. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126(3): 796—811.

Advance in Ensemble Numerical Weather Prediction

Li Jun¹ Ji Fei² Qi Linlin² Zhang Aizhong¹ Zhang Wenjun²

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101;

2. Institute of Aviation Meteorology)

Abstract

Ensemble prediction technology is a new numerical weather forecast technology, which is widely used in meteorology abroad. For the limitation of domestic computer resource, the study on ensemble prediction falls behind. Although some progress has been achieved currently, the ensemble product has not been comprehensively used in operational forecasts. As applied in weather prediction like probability forecast, ensemble prediction has been used for “targeted observation” and data assimilation. Some appropriate verifications make ensemble prediction more credible.

Key Words: ensemble prediction probability prediction ensemble product verification