

集合数值预报发展与研究进展*

陈 静 陈德辉

(中国气象科学研究院,北京 100081)

颜 宏

(中国气象局,北京 100081)

提 要

较系统地概述了集合预报系统发展过程与集合预报中的主要研究问题,总结了集合预报概念、系统组成、初始扰动理论技术和产品解释与应用原理的研究成果,简单分析了近年来集合预报中的一些研究热点,介绍了先进国家集合预报的发展计划。

关键词:集合预报系统 初始扰动 解释应用 研究进展

引 言

1992 年 12 月美国 NCEP 和 ECMWF 中期集合预报投入业务应用,标志着数值天气预报进入了一个新的发展阶段。加拿大、南非、日本、巴西、中国的集合预报系统也随后相继投入业务或准业务运行。集合预报与资料同化、耦合模式、高分辨率模式一起被 WMO 列为未来数值预报领域的四个发展战略之一,显示出强大的生命力。

集合预报思想由 Epstein^[1]和 Leith^[2]首先提出,经历了三个发展阶段。第一阶段是 20 世纪 70~80 年代,主要集中于集合预报的理论研究和数值实验上;第二阶段是进入 90 年代后,随着大规模并行计算机的发展,1992 年集合预报系统在美国国家环境中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)投入业务运行,集合预报系统成为这两个中心数值天气预报的重要组成部分;第三阶段是 90 年代末以来,集合预报广泛应用于日常预报中,研究也更加深入,开始研究模式的扰动问题、多模式多分析初值的超级集合预报问题和热带地区集合预报问题。我国集合预报起步较晚,已有一些介绍性文章^[3~10]。本文侧重介绍国内外中短期集合预报系统的发展和研究成果,讨论分析集合预报最新研究动向和存在的问题。

1 集合数值预报概念和各国集合预报系统

数值预报是大气控制方程的初值问题,预报误差来源于两方面,一是离散化的模式大气与真实大气的误差;二是模式初值与真实大气状态的误差,模式初始场是通过插值方法

* 由国家自然科学基金项目(编号 40171653)资助。

2000-12-27 收到,2001-04-28 收到修改稿。

和客观分析将非均匀分布的、非常稀疏的气象要素值插值到规则网格点上,这仅是真实大气状态的一个近似值,以此为初值的数值模式解仅仅是实际情况的一个可能解。而大气的高度非线性使大气系统具有混沌特性,这使得数值模式对初值误差具有高度敏感性。因此,模式的误差、初值的误差及大气的混沌特性使数值预报存在不确定性。

由于初始场的不确定和模式的不确定,形成集合预报的技术方案相应有两种,一种假设数值模式是“完美的”,集合成员由不同的模式初值积分得到,另一种方案认为数值模式也是不确定的,对模式加以扰动,从不同的初值和不同的模式积分得到预报结果。与传统的“单一”确定性数值预报不同的是,模式初值不只“一个”或者模式也不只一个,因此,预报结果不是“一个”而是“一组”。将这组预报与未受扰动的控制预报的全体称为集合预报。由于模式不同或积分初始条件不同,每个集合成员在相空间中的演变轨迹也不同(图略)。

一个完整的集合预报系统不仅包括形成集合预报的技术方案,还包括集合预报产品解释和应用技术研究。产品解释技术是设法从近似海量的集合预报产品中提取有用的信息,形成便于预报员使用的图像、数据等产品。产品形式有邮票图、集合平均图、面条图、分簇图、概率预报图等。集合预报可应用于日常天气预报、极端天气预报,还与其它应用模式耦合,制作专业气象服务集合产品。图 1 是中短期集合预报系统的结构图。

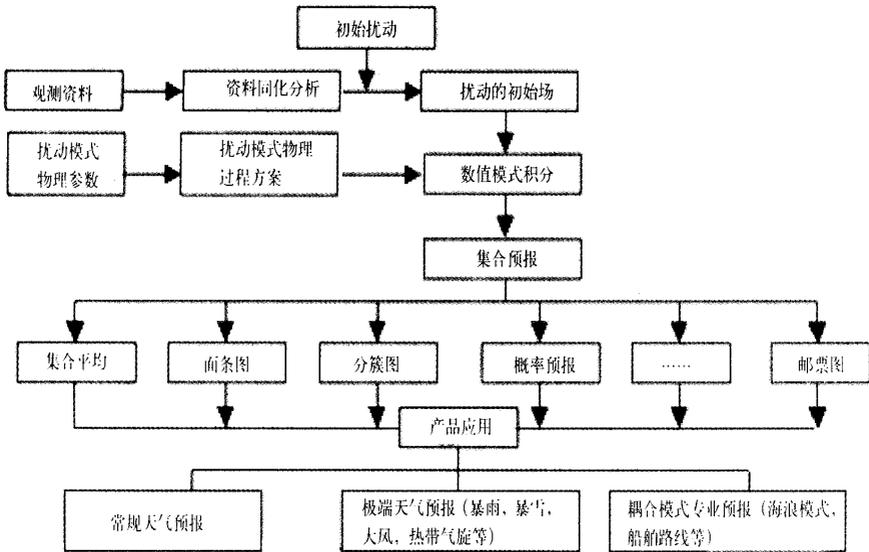


图 1 集合预报系统结构图

表 1 是已实现业务化或准业务化的中短期集合预报系统的基本情况,实现业务化的只有 ECMWF、加拿大、美国、南非,南非的集合预报系统是从 NCEP 引进的,系统结构与美国相同。

表 1 ECMWF 美国和加拿大等国集合预报业务系统

国家与业务状态	预报模式	扰动模式	初始扰动	模式扰动	预报时效(d)	集合成员数	产品输出
ECMWF (业务化)	TL255L40	T42L40	SVs	对非绝热项加上随机扰动	10	51	集合平均、离散度、离散度分布、面条图、烟羽图、分簇图、概率预报图
加拿大 (业务化)	SEF:T95 GEM:1.875	SEF:T95 GEM:1.875	BGM	谱模式+格点模式+物理过程	10	16	集合平均、面条图、降水概率、地面温度和 10 d 平均温度 PPM
美国 (业务化)	中期 T170	T62	BGM	无	14	24	集合平均、离散度、面条图、ACC 分簇图、概率预报图
	短期 ETA 模式+区域谱模式	T62	BGM	不同的物理参数方案组合	0~3	10	
南非 (业务化)	T62	T62	BGM+LAG	无	14	16(0~7 d) 43(8~14 d)	分簇图、降水、最高最低温度、风速等概率预报
中国 (准业务化)	T106	T21	SVs	无	10	32	集合平均、概率预报图、面条图、烟羽图
日本 (业务试验)	T106L40	有	BGM		9	25	

2 集合预报扰动技术与研究现状

2.1 初始场扰动方法

初始扰动场的质量好坏直接影响模式预报质量。初始场扰动方法的基本原则是:(1)扰动场特征与实际分析资料可能的误差分布较一致,以保证每个初始场都可能代表大气实际状态。(2)每个初始扰动场在模式中的演变方向尽可能大地发散,以保证预报集合最大可能地包含实际大气可能状况。

初始场扰动技术研究始于 20 世纪 70 年代,初始场扰动方法是估计分析误差的概率分布,如 Monte Carlo 随机扰动法^[11]、时间滞后平均法^[12]和加拿大的观测扰动技术。90 年代以来,在数值预报误差分析基础上,应用同化技术,提出了沿预报系统相空间最不稳定的方向确定扰动初始条件,形成具有动力学结构的初始扰动场。代表性方法有“增长模繁殖法”(BGM)^[13]和奇异向量法(SVs)^[14~15]。下面简要介绍这些方法的原理。

(1) 随机扰动法(MCF):最简单方法是 Monte Carlo 随机扰动法,有不同方式的随机扰动,如将随机值加到格点场、谱系数或经验正交函数中。缺点是与动力模式不相协调,从随机扰动产生的初始场要演变成动力不稳定结构差异较大的大尺度环流,需要较长的时间。这导致集合成员间的分离度很小,目前较少使用该方法。

(2) 滞后平均法(LAF):把过去相隔一定时间的一系列模式格点分析场作为集合预报的系列初始场,由此得到集合预报。

(3) 增长模培育法(BGM):是 Toth 和 Kalnay 提出的一种方法。选择模式 6 h 预报场与同一时刻的分析场之偏差作为初始扰动。主要步骤有:①将一个随机扰动加到数值模式的初始分析场上;②对扰动初始场和未扰动初始场(控制预报)作 6 h 积分,③用控制预报减去扰动预报,④将差值按比例缩小到与初始扰动有相同的大小(在均方根误差意义上),⑤将该扰动加到如①所述的下一个 6 h 同化分析中,依时间多次重复上述步骤。平均积分 1.5 d 后,扰动增长率达到最大。同化周期计算的预报场与分析场的误差主要来自于不稳定环流型。

(4) 奇异向量法(SVs):基本原理是利用非线性动力学理论中的有限时间不稳定理论和数值天气预报中同化技术即切线性和伴随模式,求取切线性模式的奇异值和奇异向量,最大奇异值对应的奇异向量就是增长得最快的扰动。求取切线性模式的奇异值和奇异向量就是求线性和伴随模式乘积的特征值和特征向量。数学上如 Lorenz(1965)所描述的,在给定一个较短的积分时段内,假设快速增长的扰动是线性的, $A(t_1 - t_0)$ 是 $t_0 - t_1$ 时刻扰动的线性传播算子。 A^* 是它的伴随算子, A^*A 的积是 A 在 $t_0 - t_1$ 的最优奇异模态。最大的扰动就是 A^*A 的最大特征向量。动力系统中,最大特征向量的增长较其它模态快得多。ECMWF 采用这个方法产生集合预报的扰动。

表 2 初始扰动产生方法

方法	优点	缺点	应用部门
时间滞后法 (LAF)	1. 考虑了与动力模式的协调 2. 简单,容易实现,计算量小	1. 增加样本困难 2. 难以确定每个初始场的统计权重 3. 发散度不确定	1. 中国气象局 2. 日本气象厅 (多用于长期集合预报)
奇异向量法 (SVs)	1. 较好处理资料同化中许多不定量的假设 2. 容易增加集合预报成员数 3. 中高纬扰动结构与物理意义明确 4. 容易捕获分析误差 5. 可以确定最快的扰动发展方向,发散度好	1. 计算量大 2. 忽略误差短期不增长的部分 3. 扰动结构受同化分析中切线模处理过程影响,热带地区的扰动效果较差 4. 扰动结构与模式大气层结构不一致	1. ECMWF 2. 日本气象厅 3. 中国气象局
增长模繁殖法 (BGM)	1. 计算量小 2. 容易捕获分析误差 3. 扰动结构与模式大气结构协调性较好	1. 忽略误差增长率及误差中短期不增长的部分 2. 扰动振幅影响集合预报技巧 3. 真实误差概率密度函数分布不可知	1. NCEP, 2. 日本气象厅 3. 美国(海军)舰队数值海洋中心 4. 南非气象局 5. 加拿大气象中心
观测扰动技术	1. 计算量相对较小 2. 容易捕获分析误差	1. 与动力模式不相协调 2. 真实误差概率密度函数分布不可知	加拿大气象中心
综合扰动技术	1. 动力因子明晰 2. 物理意义清楚	1. 难以确定最优扰动增长方向 2. 难以确定最优的物理方案组合	加拿大气象中心

(5) 观测扰动技术:用类似于 Monte Carlo 的随机噪声代表观测误差,对观测资料加

以扰动,每个扰动的同化分析周期都是独立的,由此产生独立初始分析场,通过积分模式得到预报结果。

(6) 综合扰动技术:用初始扰动场与不同动力模式、不同的物理过程参数化方案组合产生集合预报,这是加拿大(CMC)采用的方法^[16]。他们用增长模繁殖法产生一套扰动初值,用两个动力模式(全球谱模式和全球格点模式),每个动力模式选取若干个(现在是 8 个)不同的物理过程参数化方案组合,由此形成集合预报系统。

各种初始扰动方法的优缺点和应用情况如表 2 所示,不再赘述。

2.2 热带地区初始场扰动的研究进展

热带地区集合预报初始扰动场的生成较困难。这主要由于热带地区的非绝热过程很重要且有很强的非线性,线性化绝热模式在热带地区不是最优的。过去,ECMWF 初始奇异向量限于 30°N 到极地这一纬带。近年来,ECMWF 将非绝热过程引入模式和伴随切线模式,考虑湿度场,计算热带地区的初始奇异向量,对台风路径和强度作集合预报试验^[17-18]。2000 年 2 月 18 日热带气旋 Eline 在莫桑比克登陆,ECMWF 对其移动路径集合预报如图 2 所示,集合预报提前 5 d 预报气旋入侵莫桑比克的概率极大。

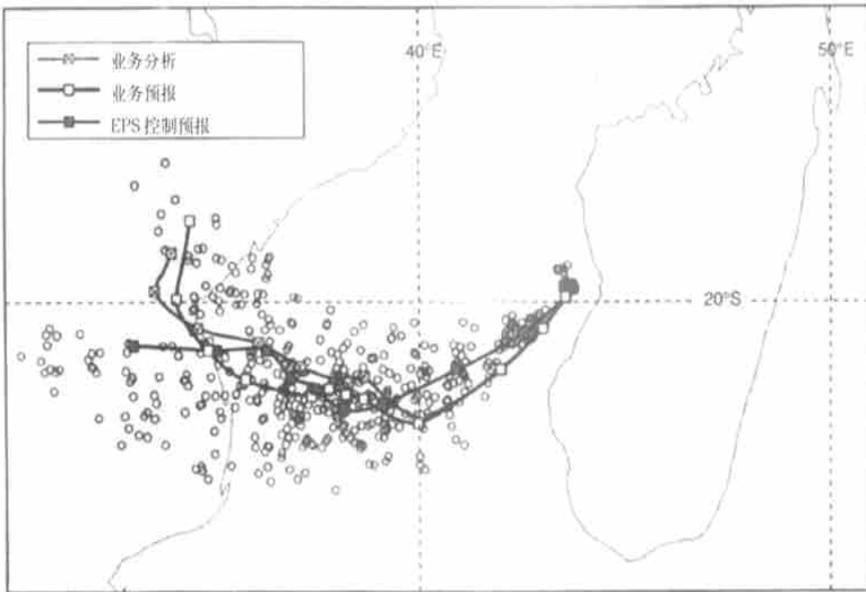


图 2 2 月 13 日预报的 2 月 13~18 日热带气旋路径图
(引自文献^[18],小圆表示集合成员的预报)

Zhang^[19]在飓风路径集合预报实验中,初始场扰动方法是扰动飓风中心初始位置和大尺度温度场和 wind 场,具体步骤是:1) 假设初始时段的模式扰动增长是线性的;2) 将飓风观测位置分别向东、西、南、北各位移 50 km,形成四个扰动初始飓风位置;3) 对随机扰动分析场和同化分析场的差值用经验正交函数求第一主分量,获得初始状态的最快增长模。该方法用在飓风路径集合预报实验中,预报效果得到提高。

2.3 扰动模式研究现状

模式的不确定性对误差的影响不能忽略^[20-21],基于两个模式的集合预报在某些方面优于一个模式的集合预报。CMC、ECMWF 和 NCEP 对此作了尝试。CMC 采用同一初始扰动、不同的动力模式和不同的物理过程参数化方案组成的“模式扰动”集合预报方法。ECMWF 在模式积分过程中,在非绝热强迫项中加入随机增倍噪声,以反映引起模式误差的次网格物理过程参数化的不确定性。ECMWF 从 1998 年 10 月 21 日开始将该方案用于业务运行。NCEP 用区域谱模式作短期集合预报时,初始扰动是由不同的物理过程与由 BGM 方法产生的初始场扰动相结合,预报 48 h 内中尺度对流系统的发展,产生降水的集合预报。

从现有的研究看,模式扰动方法多为“物理参数化方案扰动”。研究表明,扰动模式物理过程可以增加成员间的发散度,提高较小尺度天气事件的预报概率。但单纯扰动模式所形成的集合成员数较少,现在一般都把模式扰动与初始扰动相结合以增加集合成员数。

3 集合预报产品解释与应用技术研究

3.1 集合预报产品

集合预报系统生成了大量数据,产品解释技术的任务是设计合理的方法,对集合产品分布作出有气象意义的解释。目前的产品主要有以下几类:

(1) 集合平均图(ensemble mean)是集合预报成员的数学平均。集合平均可以过滤掉每个成员的不可报预报因素,给出总体的预报趋势。但由于平滑作用,集合平均不能预报极端天气,也不代表模式的相空间轨迹,它也同样包含了模式扩散和大气演变。

(2) 集合预报离散度(ensemble spread)是集合预报不确定性的量度指标。它可用各成员同控制预报场的均方差(RSM)量度,也可用各成员同总体平均场的距平相关系数(ACC)平均值量度。离散度在一定程度上可代表模式的预报技巧,一般说,离散度小,预报技巧较高,预报可信度高;但离散度大,预报技巧不一定低,预报可信度也不一定很低。

(3) 概率烟羽图:计算某一点上预报成员对各预报值范围出现的概率,绘制集合成员对预报对象的预报概率分布的时间演变图。不同的预报对象可设计不同的烟羽图。

(4) 天气要素预报概率图:假定每个集合预报成员是等权重的,对降水、气温、风等天气要素,计算某区域内不同量级或大小范围出现的预报概率分布图。

(5) 面条图:选取一条特征等值线(如 500 hPa 图上 5640 gpm 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应出预报的可信度,越是集中时可信度越大。

3.2 集合预报分簇技术研究进展

3.2.1 选择分簇方法

分簇目的是提取集合预报概率分布的最重要信息,将集合预报分成具有不同天气意义的几簇。分簇方法一般是用聚类分析原理对 500 hPa 环流分型。根据聚类分析算法的差异,各主要气象中心的分簇方法可分为两类,一类是非系统聚类法,如 NCEP 的距平相关(ACC)逐步聚类法、ECMWF 的种子场聚类法(Seeds clustering)和中央聚类法(Central

clusteing);另一种是系统聚类法,如 ECMWF 的 Ward 算法和重心聚类法。管形聚类法 (Tubing) 是最新的一种聚类方法。

3.2.2 非系统聚类法

NCEP 的 ACC 逐步聚类法^[22]用距平相关系数 (ACC) 表示样本距离,首先寻找临近阈值的两个最不相似的成员,以这两个成员为凝聚点,计算其他成员与这两个凝聚点的距离,将达到临界值(如 ACC 大于 0.6)的成员分入最接近的一类;第二步,在剩余的没有被分类的样本中用系统聚类法寻找最相似的两个成员,其它成员围绕着这两个成员分类,后一步不断重复,直至分类结束。这种方法的优点是强调最不相似的预报图形。

ECMWF 种子场聚类法和中央聚类法的基本原理与 NCEP 的 ACC 逐步聚类法近似,但样本距离用均方根误差 (RMS),人为确定凝聚点。ECMWF 选择控制预报、高分辨率模式 T319、UK 统一模式、DWD 模式的四个预报场作分类种子场,其它扰动成员以它们为中心分类。ECMWF 的中央聚类法假设集合平均值就是集合成员的中心点,围绕着集合平均聚类。

3.2.3 系统聚类法

系统聚类法是聚类分析最常用的方法。ECMWF 使用 Ward 的递推算法,样本距离定义为集合成员 500 hPa 高度场均方差 (RMS),递推过程中,事先定义一个阈值,当过程参数大于该阈值时,便终止聚类。ECMWF 事先规定的阈值有:1) 分类总数超过某一值(如 6 类);2) 某类内部方差超过某一绝对值(如分类标准差 ≤ 50 m) 或者是一个相对大小值(如分类标准差小于总体方差的 50%);3) 按分类标准定义的方差偏离该类平均(中心点)达一临界值(如 50%);4) 某一类样本量超过一临界值,如 17 个成员即可满足集合分类选择。

管形聚类法^[23](tubing) 基于以下三条假设:1) 集合成员通常是单模态分布;2) 实况最可能出现在集合平均附近;3) 集合众数通常是不可信的,如果出现多模态,实况可能更接近于集合平均而不是集合众数。管形聚类法原理如图 3 所示。

管形聚类法的计算过程是:1) 围绕集合平均聚类,得到集合中央类。中央类的成员被包围在临界方差值为半径的圆中;2) 确定离集合平均距离最远的样本位置,定义它为第一类管端,以集合中心点到管端位置的连线为对称轴线,以中央类的半径为半径形成一个管柱,管柱的一端是集合中央类的边界,另一端是极远样本所在位置。落入管柱内的集合成员被归入第一管形类;3) 这一过程反复进行,直至所有的成员都被聚类,同时遵循下面的原则,已被分入某管形类的成员不能成为管端,但仍可被归入另一管形类。

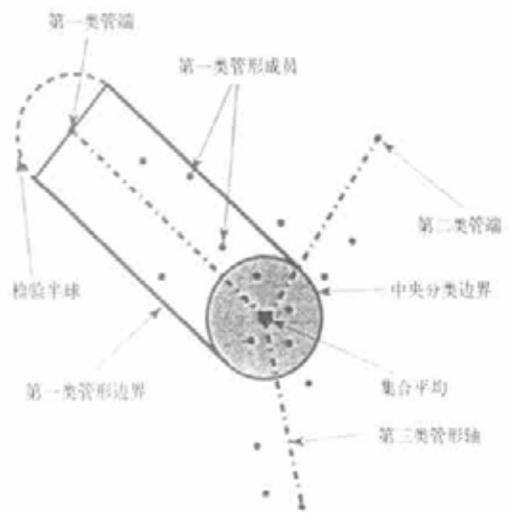


图 3 管形聚类法示意

(引自文献[17],中央类位于集合平均附近,用距集合平均极端最远的成员位置定义管端和管形类别)

无论是系统聚类方法、非系统聚类方法、还是管形聚类法,都力图反映对初值敏感的大气系统存在多个吸引子的非线性特征,体现集合预报的概率预报特性。ECMWF 的 Wards 算法、NCEP 的 ACC 逐步聚类法体现了相空间的多模态分布特征(multi modality),其他的聚类法体现了相空间的单模态化特征(monomodal)。因此分簇技术的关键问题是如何定义与吸引子有关的中心分类和确定成员相似标准。

3.3 集合预报产品应用简介

ECMWF 各成员国和加拿大、美国等国集合预报已广泛用于日常预报业务。法国气象局用集合预报产品建立中期天气预报多媒体系统“ NEBULE MEDIA”,提供 ECMWF 集合预报产品和一些有特色的解释应用技术^[24]。预报员根据集合预报产品分析 4 天后法国可能受哪一种环流控制,还可查阅管形聚类的分簇数,建立信心指数。有些天气要素如最高气温和最低气温概率预报效果并不理想,一般用统计方法建立多元回归方程,如美国用 MOS 方法,加拿大用 PPM 方法。瑞士则用神经网络。

集合预报还可应用到极端天气预报中,将降水概率预报作为高分辨率模式降水预报的一个可信度指数。Palmer^[18]将极端天气的预报概率与其气候概率相比较,如预报概率远远大于气候概率,则不能否认其可能性。如发生在 1999 年 12 月 26 日法国和德国的“ 圣诞风暴”, T319 高分辨率业务模式和 T159 控制预报模式都没能预报出低气压中心,但部分集合成员预报出了这一低气压中心,风暴的预报概率远大于其气候概率(如图 4 所

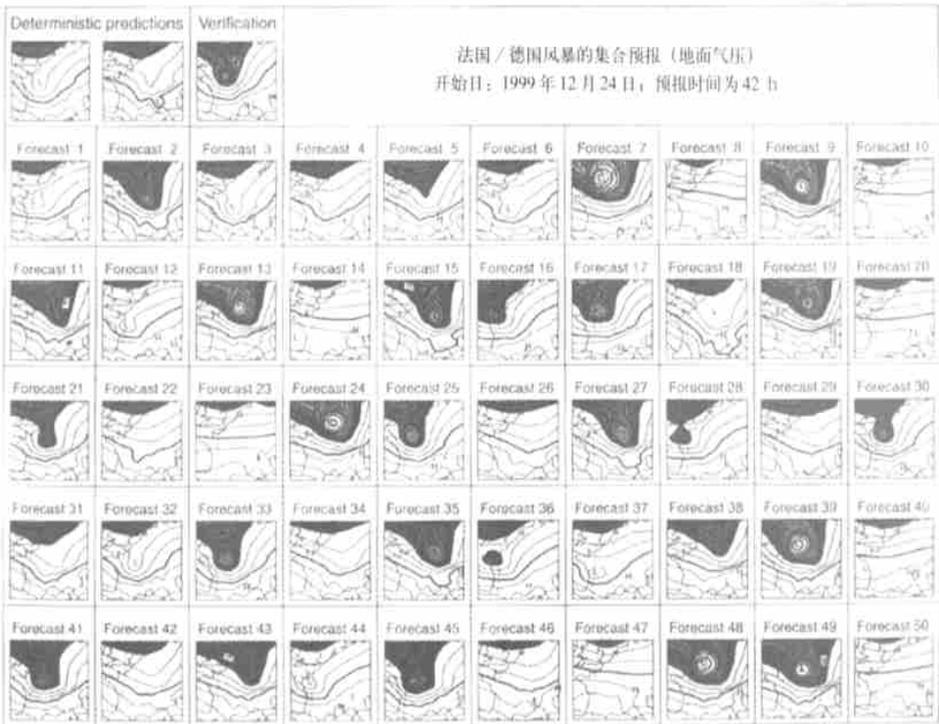


图 4 ECMWF TL255 集合预报模式从 23 日积分到 26 日的 42 h 集合预报海平面气压场邮票图 (引自文献[18],深色区的气压低于 980 hPa,第一排从左向右分别是 TL159, TL319 确定性预报和实况图,第 2 至第 5 排是 50 个集合成员预报结果)

示)。因此关键问题是如何找到更好的方法分析集合产品,发现极端天气的蛛丝马迹。

集合预报还可与其它模式耦合制作一些专业气象预报。ECMWF 将集合预报与海浪预报模式耦合,每天发布海浪集合预报。并用大气和海浪集合预报一起制作以最少成本横渡大西洋的最优船舶航线预报。法国气象局用污染模式与 ECMWF 集合预报模式耦合,成功地预报了 1999 年 12 月 12 日法国海面的一次石油泄漏形成的污染物漂移过程。ECMWF 将集合预报产品还应用到未来 1~10 d 电力需求的预报中,用需求量的概率分布统计其不确定性。

4 集合预报研究的一些问题

4.1 模式分辨率和集合成员数对集合预报系统的影响

模式分辨率和集合成员的增加能对集合预报系统产生正面的影响,但会增加计算机的计算成本。Buizza^[25]发现增加模式水平分辨率对奇异向量的结构影响不大,T42 和 T63 生成的奇异向量扰动结构和能量谱都很相似,但 T63 的计算时间较 T42 增加了 5 倍。ECMWF T319 和 T511 预报表明极端天气数值模拟对模式分辨率很敏感,因此,增加集合预报模式分辨率能提高极端天气预报概率;集合成员数增加时,仅有部分统计参数显示可提高预报技巧。当模式分辨率和集合成员数同时提高时,集合预报的整体性能表现最好,但怎样平衡与计算费用的矛盾还是一个难以解决的问题。NCEP 的研究结果也与此类似^[26]。

Buizza 认为集合预报应有适当的成员数,才能保证从集合预报中得到的大气分布状况能在一定程度上代表真实的大气概率密度分布。例如对某一天气事件,当 50 个成员的集合预报没有一个预报该事件,在 1% 的置信度范围用最简单 χ^2 检验不能认为真实大气就不会产生这一天气,100 个成员的集合预报没有一个预报该事件时,可接受该假设。

4.2 多模式多分析初值的超级集合预报问题

集合预报的一些新方法是多模式和多分析初值的集合预报系统(MMAE: multi model and multi-analysis),以充分考虑初值和模式的不确定性,增加集合成员的离散度。多模式多分析集合预报系统包含几个独立的模式和独立的客观分析方法。

1999 年开始,ECMWF 的集合预报模式与英国气象局的统一模式(UM)共同组成一个多模式多分析集合预报系统^[27,28]。结果表明多模式多分析系统在 36~240 h 预报技巧较 ECMWF 集合预报系统增加了 5%~10%。但值得注意的是短期时效内效果却远不如 ECMWF 单一集合预报。Richardson 试验了一种多分析集合预报系统,预报模式是 ECMWF 的中期模式,初始扰动场用奇异向量法获得,但用不同的 NWP 中心及其平均值作为初始场。结果显示集合预报效益有 50%~80%来自于多个分析场,用各中心初始场平均值的方法收效甚微。

与单一模式集合预报相比,多模式多分析系统的理论基础不清楚,需要对多模式多分析集合系统的理论和技术方法做更多的研究。

4.3 先进国家集合预报发展战略

集合预报未来发展的重点有两个:一是极端天气警报能力的提高,ECMWF 计划用基

于四维变分的同化技术来产生更好的初始扰动,用更好的物理过程,提高模式分辨率,增加集合成员数等手段来提高集合预报系统对极端天气事件的预报能力;NCEP计划发展短期集合预报来达到这一目的。二是将集合预报直接与应用模式相联系,开发对天气敏感的商业与人类活动的定量概率预报工具(如将集合海浪预报应用到海上导航预报),这种面向用户端点到端点(End To End)的集合预报分析方式还处于起步阶段。

NCEP计划将不同气象中心业务数值模式组合成“超级”集合预报系统,或开发一个能考虑随机和系统误差的模式。开发足够的预报指导产品,提供站点的概率预报。ECMWF将发展短期气候集合预报系统,针对多分析多模式“超级”集合的作用进行评估。

5 结束语

综上所述,集合预报的发展在发达国家已进入了成熟期,集合预报在天气预报业务系统中的重要地位和作用已获得广泛认可。集合预报在我们国家刚开始准业务运行,对现行集合预报系统的性能和预报能力认识不是很多,如初始扰动方法是否适合我国的区域特征?模式的可预报性如何?集合产品检验效果?如何向各区域中心提供直观明了的集合产品等?如何在全国气象部门内推广应用集合预报产品?这些问题还需要做大量艰苦而细致的工作,以缩小我国与先进国家在集合数值预报系统研究领域的差距。

参考文献

- 1 Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, **21**: 739 ~ 759.
- 2 Leith C S. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, 1974, **102**: 409 ~ 418.
- 3 毛恒青,王建捷. 集合预报业务使用现状和趋势. *气象*, 2000, **26**(6): 24 ~ 29.
- 4 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.
- 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 皇甫雪宫. 国家气象中心集合数值预报检验评价. *应用气象学报*, 2002, **13**(1): 29 ~ 36.
- 7 杨学胜, Nicolau J, Girardot N. 位移和最大相关距离在 ECMWF 集合预报产品中的应用. 2002, **13**(1): 37 ~ 46.
- 8 毛恒青,陈 谊,陈德辉. 基于神威中期集合数值预报系统的产品开发. 2002, **13**(1): 47 ~ 55.
- 9 毛恒青,陈 谊,陈德辉. 神威中期集合数值预报产品的业务应用. 2002, **13**(1): 56 ~ 61.
- 10 杨学胜,陈德辉,冷亭波,等. 时间滞后与奇异向量初值生成方法的比较试验. 2002, **13**(1): 62 ~ 66.
- 11 Hollingsworth A. An experiment in Monte Carlo forecasting procedure. ECMWF Workshop on Stochastic Dynamic Forecasting. ECMWF, 1980.
- 12 Hoffman R N, Kalnay E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus*, 1983, **35A**: 100 ~ 118.
- 13 Toth Z, Kalany Y. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. *Bull Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**: 2317 ~ 2330.
- 14 Mureau F, Molteni F. Ensemble prediction using dynamically conditioned perturbations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1993, **119**: 269 ~ 323.
- 15 Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 73 ~ 119.
- 16 Laurence J W. Canadian meteorological center ensemble prediction system. WMO Workshop on the Use of Ensemble Prediction. Beijing, 2000.

- 17 Puri K, Barkmeijer J, Palmer T N. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors. ECMWF Technical Memorandum, 1999, 298.
- 18 Palmer T N, Barkmeijer R, Buizza R, et al. The future of ensemble prediction. ECMWF Newsletter No. 88, Summer / Autumn 2000.
- 19 Zhang Z, Krishnamurti T N. Ensemble forecasting of hurricane tracks. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 2785 ~ 2795.
- 20 Buizza R, Barkmeijer J, Palmer T N. Current status and future developments of the ECMWF ensemble prediction system. *Meteorol. Appl.*, 2000, **7**: 163 ~ 175.
- 21 Stensrud D J, Jian-wen Bao, Thomas T W. Using initial condition and model physics perturbation in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 2077 ~ 2107.
- 22 Tracton M S, Kalany E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 1993, **8**: 379 ~ 398.
- 23 Atger F. Tubing: A alternative to clustering for the classification of ensemble forecast. *Weather and Forecasting*, 1999, **14**(5): 741 ~ 757.
- 24 Nicolau J. Use of ensemble forecasting at Meteor France. WMO Workshop on the Use of Ensemble Prediction. Beijing, 2000.
- 25 Buizza R, Petroliaigi T, Palmer T N, et al. Impact of ensemble resolution and size on the performance of an ensemble prediction system. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 1935 ~ 1960.
- 26 Szunyogh I. The impact of model resolution on the performance of the NCEP global ensemble forecast system. Contribution to the 13th ANS Conference on Numerical Weather Prediction, 13 - 17 Sep., 1999.
- 27 Evans R E, Harrison M S J, Graham R J, et al. Joint medium range ensembles from the UKMO and ECMWF systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 3104 ~ 3127.
- 28 Mylne K R. Quasi-operational multi-model multi-analysis ensembles on medium-range time scales. WMO Workshop on the Use of Ensemble Prediction. Beijing, 2000.

A BRIEF REVIEW ON THE DEVELOPMENT OF ENSEMBLE PREDICTION SYSTEM

Chen Jing¹⁾ Chen Dehui¹⁾ Yan Hong²⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

The main issues of the Ensemble Prediction System (EPS) are presented, such as ensemble prediction concepts, the structure of an EPS, approaches for generating initial perturbation, interpretation and application schemes of EPS outputs. The recent advancements and progresses of the operational implementation and research results of EPS are systematically summarized, as well as the projects of EPS development in the developed countries.

Key words: Ensemble prediction system Initial perturbation Interpretation and application