

陈德辉

(国家气象中心, 北京 100081)

提 要

介绍了近年来美国数值预报研究和业务应用方面的进展和动态, 简述了资料分析与同化、高分辨率模式、短期集合预报、热带气旋预报及物理过程参数化等方面的技术进展, 并提出了为使数值预报适应未来高性能巨型计算机技术的发展需要考虑的关于模式分辨率、资料的观测及分析同化技术等问题。

关键词: 美国 数值预报 研究 业务

引 言

近年来, 美国的大学、天气局所属部门、军队和 NOAA 所属大气研究实验室的合作异常活跃。研究部门与业务部门之间这种必要而有益的合作加速了研究结果向业务应用转化, 如 GFDL 的飓风模式已在 NCEP 运行, 使飓风路径预报误差明显减小; 变分同化方法的采用使数值预报资料同化系统直接应用各种观测资料(卫星辐射资料, NEXRAD 网的径向风资料等)成为可能; 高分辨率(小于 10km)的局地模式也已在业务部门运行。

下面将就美国数值预报研究动态和业务进展情况作扼要介绍。

1 资料分析与同化

在客观分析方案中, 用经验的方法对高斯权重函数中的特征长度参数 K (specified scale length parameter) 进行修改, 以便减少客观插值误差, 更合理地使用非均匀分布 (inhomogeneous) 的观测资料, 从而提高客观分析资料的精度 (X. YU 等)。

美国大气与海洋局预报系统实验室 (NOAA/FSL) 开发的局地区域资料分析预报系统 (LAPS, Local Analysis and Predic-

tion System) 分别与 Colorado 大学的 RAMS 模式和 Pennsylvania 大学的 MM5 模式联接, 形成两个独立的分析预报系统, 并自 1996 年年初起在 NOAA/FSL 准业务运行。LAPS-MM5 系统和 LAPS-RAMS 系统自 1996 年 3 月 14 日至 1997 年 9 月 21 日的预报检验结果 (J. S. Snook 等) 表明模式虽然不同, 两个系统的预报结果非常相近 (图略), 换句话说, 提供初值的分析系统仍起决定作用。

为了获得更合理的模式初值, 以便提高数值预报模式的预报准确率, 有必要在一些“不确定区域”(uncertainty area) 增加观测, 获得更多观测资料。Z. Pu 等, T. N. Palmer 等, Toth 等, R. E. Morss 等用准反线性和伴随的方法、奇异向量法、集合奇异向量法、准地转平衡简化模式和三维变分方法 (3DVAR) 等研究了这种所谓的“目标”或“适宜”观测问题 (Targeting or adapting observations)。

区域的三维变分同化系统和全球的三维变分同化系统 (R-3DVAR 和 G-3DVAR) 都已进入了实时业务应用阶段。与最优插值 (OI, Optimum Interpolation) 相比, 三维变分

技术可使更多的非常规观测资料直接用于模式的初值同化,如卫星亮温资料(radiance),雷达径向风(图略),商用飞机观测资料(ACARS)等。目前业务上所用的三维变分技术多为两类,一是增量法(IA, Incremental Approach),如法国、ECMWF、加拿大等国家气象中心目前资料分析同化业务系统所采用的方法;二是谱统计插值法(SSl, Spectral Statistical Interpolation),如美国国家环境预报中心目前资料分析同化业务系统所采用的方法。

四维变分同化(4DVAR)系统仍只处于研究试验阶段,原因主要是现有方案的计算成本太昂贵,业务应用难于承受。如何加快迭代收敛速度,降低计算成本,仍是4DVAR技术广泛业务应用的突出困难。蒲朝霞等采用准逆运算的方法,以提高4DVAR的计算速度。

有理论研究(C. Lu and G. Browning)指出,对于随机性模式误差和观测误差,经4DVAR同化可以把这类误差消除掉,而对系统性的模式误差和观测误差,4DVAR同化倾向于朝包含有误差的观测值收敛,或把模式误差带到分析里。对于一个多时间尺度的流体系统,经4DVAR后,这类误差还有可能被放大。这是目前的4DVAR方法所存在的本质问题。

2 高分辨率模式

英国气象局在统一模式(UM, Unified Model)的基础上初步建立了新一代全球非静力平衡模式。该模式的要点有:取高度为垂直坐标和Charney-Phillips垂直离散格式,而水平方向则取C-格点分布;平流计算取半拉格朗日方案;时间差分取半隐式方案,且不消去基态廓线;模式取非静力平衡假设;霍姆霍兹方程是三维的;无人为的水平扩散项(T. Davies等)。

美国国家环境预报中心(NCEP)开发了

一个非静力平衡中尺度谱模式(MSM, Mesoscale Spectral Model),其非静力平衡过程的处理采用完全可压和时变参考大气技术,模式可取有限区域或全球,可用于研究或业务,由于模式采用谱展开技术所造成的最小负地形高度仅有-4m。该模式的模拟结果揭示了即使在50km的水平分辨率条件下,仍清楚地看到非静力平衡动力过程在地形复杂的地区的影响作用。水平分辨率为5km、2km、甚至1km的试验,也获得稳定而合理的结果。目前,以此为基础已建立了夏威夷岛屿地区的预报试验系统(Henry Juang等)。

美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家环境预报中心和预报系统实验室(NOAA/FSL)正在合作开发一个“共用中尺度模式”(community meso-scale model),即天气研究与预报模式(WRFM, Weather Research and Forecast Model)。其目的是以一个共同模式为基础,在研究人员和业务人员之间架起一座桥梁,加强这两个领域研究人员的合作,建立未来10年内可能实现的、水平分辨率达10-1km的中尺度模式。该模式的基本设想是完全可压(full compressible)非静力平衡方程和欧拉格点、半拉格朗日和隐式时间差分方案、位温(θ)-地形追随(σ)混合坐标、采用Fortran-90进行编程,要求原码程序既能有效地在共享内存多任务式向量计算机上运行,又能自动地转换成可在分布式内存并行计算机上运行,计划两年内完成动力模式框架部分。另外,相应的伴随模式的编写也需要紧密配合进行。

3 短期集合预报

在1996年Virginia的美国气象学会学术年会上中期集合预报(MREP, Medium Range Ensemble Prediction)成了数值预报的热门内容之一。而在1998年Phoenix的年会上短期集合预报(SREF, Short Range Ensemble Forecast)又成了数值预报的热门内

容之一。短期集合预报通常基于降水过程或中尺度过程的落区和位相(出现时间)预报存在不确定性(uncertainty)的观点。样本生成的方法主要有:①用不同的初值,包括增长模繁殖法(breeding of growing modes),奇异向量法(singular vector),滞后平均法(lagged average)等;②选择不同的物理过程参数化方案的组合;③用不同的分析预报模式(包括不同的分析同化、初值化、动力框架、物理过程等)。

美国国家环境预报中心用5个全球模式增长模(bred modes)、5个ETA有限区模式增长模、5个不同分析场形成15个ETA模式的样本初值,再用5个全球模式增长模、5个RSM(Regional Spectral Model)模式增长模形成10个RSM模式的样本初值,以此构成一个25个成员的短期集合预报系统。用区域模式所做的短期集合预报结果表明,集合预报比单个控制预报有明显的改进,美国国家环境预报中心计划明年把该系统业务化。

4 热带气旋预报

S. D. Aberson 等用美国国家环境预报中心全球模式增长模作为初始扰动分量加入初始场,形成预报模式的初值,以此构成一个11个成员的短期集合预报系统,制作72小时的热带气旋路径预报。结果表明,集合预报的路径误差明显比CLIPER方法的误差小(72小时的预报误差减小40%),与美国地球物理流体动力学实验室(GFDL)的高分辨率模式相比,只有24、60、72小时的集合预报的结果稍好。而M. K. Ramamurthy等则用5个不同的积云对流参数化方案构成飓风路径的集合预报系统。

过去几年来,伴随模式技术常用于中高纬度地区的观测敏感区对数值预报影响的问题(如欧洲国家的FASTEX试验)。现在这一技术也被用于研究热带地区的气旋路径预报问题,如未来某一时刻的气旋位置周围地区

的初始误差对热带气旋路径预报的影响(G. D. Rohaly 等)。

V. M. Karyampudi 等人研究了把反演的卫星降雨和潜热加热廓线资料(SSM/I)经四维同化,用于热带气旋路径数值预报。其试验方案较简单易行:即在同时有卫星降雨和模式降雨的区域,直接用卫星潜热加热廓线代替模式对流加热廓线;在只有卫星降雨,而无模式降雨的区域,采用特定潜热加热廓线,在只有模式降雨,而无卫星降雨的区域,把模式对流加热廓线删除。试验结果表明,热带气旋路径和强度的12~24小时预报都有明显改进。

自1995年起,美国地球物理流体动力学实验室飓风预报系统作为美国国家天气局的一个业务数值预报系统正式投入业务运行。近年来的主要改进有:①从低层至高层滤去全球模式的分析涡旋;②加入目标涡旋。最新的研究则是改进目标涡旋的构造方案,主要是考虑了两点,一是用最外圈的等压线闭合圈半径及其相应的地面风速代替台风报提供的最大风速半径和最大风速;二是不考虑Beta-旋转分量(Beta-Gyre)。

5 物理过程参数化

在一个中 β 尺度模式(如 $\Delta x > 20\text{km}$)里,如何考虑积云对流参数化仍是一个有待解决的问题。J. S. Kain 等提出一个“混合”(Hybrid)+“一致性”(Consistency)办法,即在美国国家环境预报中心的Eta模式中:①同时采用Betts-Miller方案和Kain-Frisch方案;②设法确保Kain-Frisch方案中的云物理过程和模式格点分辨的云方案(grid-resolved cloud scheme)一致。

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的S. DSA 和 M. Tiedtke 等学者的研究指出,用预报性云物理方案(单气柱模式, Single Column Model),结合引用Arakawa-Schubert积云对流参数化方案,能较合理地模拟出降雨、云量和其它云微物理和动力属性的

日变化。用欧洲中期天气预报中心的模式和 TOGA-COARE 资料的模拟结果验证了这一结论。

数值预报模式中对云过程的描述越来越细致,如非降水云过程、云的成长消亡过程、云高云厚、云区的时间变化过程、冰相过程等,以往这些云微物理过程只在理想资料条件下的云研究模式中才进行模拟描述,现在也用实际观测资料和中尺度模式(如 MM5 模式)进行描述了(A. Deng 等)。

近两年来,MM5 模式中的物理过程参数化方案有了不少的改进,其中之一是行星边界层参数化方案。M. J. Otte 和 J. C. Wenggaard 等提出了一个新的行星边界层参数化方案:谱边界层参数化方案,即在行星边界层内的温度、风速分量、水汽等模式变量是用转换勒让德多项式(shifted Legendre polynomials)展开计算的。因此,实际计算中,每一个时间步长必需作格点物理空间和谱空间之间的转换。简单海—陆地表分布的理想资料试验已获得令人鼓舞的结果。三维真实资料的模拟试验正在进行中。

近年来,热带气旋路径数值预报明显改进的一个重要原因,就是在模式初始场中嵌入一个理想台风模型。D. Stemsrud 等采用类似的方法,构造了一个中尺度“冷池”(cold pool),并把它加入模式初始场对流活跃的地方,以提高模式对中尺度过程的模拟能力。

Kevin W. Manning 尝试用中尺度 MM5 模式做雾的数值预报,水平分辨率取 36km,垂直分层取 38 层,并采用二阶半闭合假设的湍流扩散过程参数方案,方案中有雾的预报方程。该雾预报模式着重考虑了两个因素,一是湍流扩散过程,二是辐射加热过程,前者有利于雾的维持加深,后者则有利于雾的减弱消散。因此,该模式所包含的辐射过程参数化方案中还考虑了长、短波辐射过程与微物理过程之间的相互作用。用实际资料

进行的初步试验结果还是令人鼓舞的。

6 结语和讨论

高性能巨型计算机技术的发展非常迅猛,几乎每 3~5 年就上一个大量级的台阶。据世界上一些高性能巨型计算机厂商最近发布的最新公报,至 2001 年将有峰值速度达每秒 40 万亿次的高性能巨型计算机投入商业使用。由此可以估计到 2005 年高性能巨型计算机的能力还将提高一个数量级(即高性能巨型计算机的峰值速度很有可能达到每秒 100 万亿次)。这将为业务数值天气预报发展提供一个极好的机遇,在这样的计算机条件下,业务运行甚高分辨率(水平:2~20km;垂直:50~90 层)的区域/全球数值预报系统是完全可以的。

为使数值预报领域适应高性能巨型计算机技术的发展,至少有三方面的问题需要着重考虑:① 甚高分辨率数值预报模式的开发;② 能提供甚高时空分辨率观测资料的综合观测系统的建立;③ 能采用各种常规与非常规观测资料的分析同化技术的开发。为此,美国方面的研究和业务部门已开始了“共用中尺度模式”(即天气研究与预报模式)的 10 年合作开发计划、三维立体综合观测系统的计划(内容包括雷达网、地基自动化观测网、GPS 网、飞机观测网、极轨和静止多系列卫星计划、臭氧观测计划等)以及四维变分同化和卡曼滤波四维资料同化技术的开发计划等。

参考文献

- 1 12th Conference on Numerical Weather Prediction, 11~16 January 1998, Phoenix, Arizona, USA.
- 2 Symposium on Tropical Cyclone Intensity Change, 11~16 January 1998, Phoenix, Arizona, USA.
- 3 Symposium on the Research Foci of the U.S. Weather Research Program, 11~16 January 1998, Phoenix, Arizona, USA.
- 4 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting, 11~16 January 1998, Phoenix, Arizona, USA.

The Progress and Development of Numerical Weather Prediction Research and Operation in USA

Chen Dehui

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract

The recent progress and development of Numerical Weather Prediction (NWP) in the USA was summarized. A general discussion about the development of operational NWP systems in China was given in the last section.

Key Words: American Meteorological Association (AMS) Numerical Weather Prediction research operation

① 国家自然科学基金资助