

数值天气预报方法改进和各国业务预报进展*

胡英 贾朋群

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 介绍近年来在数值天气预报方面取得的一些重要进展, 对有代表性国家在业务数值预报方面的更新换代和新技术的引进作一概述。

关键词 数值天气预报 业务预报 进展

引言

数值预报模式的改进一直是模式研究者不断追求的目标。在由欧洲中期预报中心主持的关于数值预报方法研讨会上, 总结了这一领域近10年来的发展轨迹^[1]。在近年来计算平台不断更新的前提下, 数值预报模式的改进主要是提高算法的准确性和在采用更经济的算法的同时提高模式的分辨率。在采用更为准确的算法方面, 传统的半拉格朗日方案没有形式上的守恒性质, 准单调半拉格朗日方案的提出解决了浅水波方程中质量守恒或平流量守恒问题。另一个解决方案是采用优化的联插值(cascade interpolation)。另外半拉格朗日方案在模拟过山气流时, 由于持续地形驱动会出现虚假的共振, 改进的半拉格朗日方案缓解了这一问题, 而且ECMWF模式采用后也改进了模式的质量守恒性质。所谓采用更经济的算法, 就是在计算结果保持不变或变化很微小的前提下, 通过算法上的改进, 使得计算过程消耗的计算机资源大大减少。在这方面最为成功的例子是相当成熟的拉格朗日算法对传统的欧拉算法的全面替代, 结果使新方案对计算机资源的耗费平均仅是旧方案的十分之一或更少。另外较为有效的方法还有: 针对采用经纬线网格的模式

在极区因为网格线的自然加密而引起冗长的计算的情况, 在靠近极区时减少的高斯网格的密度而对计算结果几乎没有影响。另一个减少计算资源耗费的办法是先采用三时间层半拉格朗日方案, 再转为二时间层方案并采用线性高斯网格。在算法更经济和计算平台更强大的条件下, 许多模式都大幅度地提高了时空分辨率。但是当只对某一区域进行模拟时, 许多模式采用可变分辨率解决这一问题, 使最高分辨率仅在感兴趣区域内。可变分辨率, 即旋转球坐标系统的思想以两种截然不同的方法来实现, 并且都取得了成功。一种旋转的结果是使感兴趣区域位于计算地球的赤道地区, 适用于有限差分或有限元水平离散算法, 新一代加拿大业务预报模式将采用这一方案。另一种旋转的结果是使感兴趣区域的中心位于北极, 然后用正常分辨率。适用于谱水平离散算法, 并能实现统一分辨率, 该方案已被法国气象局业务预报模式选中。

半拉格朗日方法在20世纪90年代已经成熟, 或者说这一方法的潜力已经基本挖尽。很自然的话题是: 21世纪数值预报模式怎样发展? 是依靠半拉格朗日方法将模式的分辨率提高, 再提高, 还是另辟蹊径。根据大气能量谱的形状, 有人认为半拉格朗日方法的优势会随着分辨率的提高而消失, 也有人认为半

* 本文得到973中国暴雨项目办公室的资助

拉格朗日方法会朝气蓬勃。究竟情况会怎样还需时间作出回答。

世界气象组织发布了1998年度(1998~1999年)数值天气预报进展报告^[2],介绍了20余个国家和地区在数值预报业务和研究中的新进展。包括中国在内的气象工作者已经将数值预报模式应用到气象预报和研究中作为一项综合性的工程来进行。各国的气象业务和研究机构不仅为数值预报模式工作配备了最先进的巨型计算机,而且根据已知的影响数值预报准确性的关键因素,或调整已有的观测系统使以往仅用于研究的特种观测业务化,或者引进更先进国家的解决方案以提高模式的分析和预报能力。另外,各国的模式研究者都重视了资料同化系统的改进和完善,这是因为今后数值预报模式上的突破,是依赖于观测平台的多样化和观测的连续化,而资料同化系统是使多样化和连续化的资料被模式所利用的必由之路。

1 澳大利亚

用于业务预报模式为 LAPS (Limited Area Prediction System, 有限区域预报系统) 的3个版本,即覆盖整个澳大利亚的版本(LAPS)和热带(TLAPS)及中尺度(MesoLAPS)版本。TLAPS以澳大利亚为中心覆盖了从40°N至40°S的更大范围,而在预报包括洪水在内的灾害性天气方面较粗网格模式 MesoLAPS 有更强的能力,每天进行2次36 h 预报,覆盖区域为澳洲东南和西南25°(纬度)×30°(经度)的两个地区。模式的研制者有效地提高了3个版本的分辨率,垂直层都由19层增加到29层,LAPS和TLAPS的水平格距为0.375°,MesoLAPS的水平分辨率升至0.125°。除分辨率的提高之外,模式的改进还包括在模式分析中嵌入了从LAPS预报档案中得到的结构函数和标准差;在边界层参数化方案中,采用了ECMWF的加入局地土壤湿度的方案。完善后的模式于1999年年中在澳大利亚国家气象业务中心投入业务运

行。

除上述3个业务版本之外,LAPS的2个研究版本也在改进和试运行之中。当在澳大利亚地区一个被命名的热带气旋(TC)生成时 MesoLAPS 的一个嵌套版本 TCLAPS 投入准业务运行。TCLAPS 近年来已被完全重写,加进了初始涡旋设定代码和一个预报、同化和分析3个阶段的迭代循环圈,目的在于反映大尺度环境初始涡旋的真实情况。TCLAPS 的研究结果令人振奋,有望在2000年内业务化。另一个正在研制的高分辨率 LAPS 版本,其水平分辨率将达到0.05°(经、纬度),垂直方向仍为29层。目前该模式已在以 Melbourne 和 Sydney 为中心的8°(纬度)×8°(经度)范围内进行日常试运行,并且模式输出通过 Internet 发布。该模式将用于大城市空气质量预报系统之中,并为今年晚些时候的奥运盛会做出贡献。

2 德国

1998年夏季,新 GME 模式(水平分辨率约60 km,31层)移植到 MPP Cray T3E 1200 计算机上,同时移植的还有非流体静力平衡的有限区域模式 LM (Local Model),LM 为325×325网格,格距约7 km,35层。从1998年7月1日开始,两个模式进行业务前加密对比检验。结果表明,两个模式均较前一代模式有了改进。与 LM 的上一代模式 DM (regional gridpoint model,格距为14 km,30层)相比,前者主要在云量和降水预报上有重要改进。1999年秋 GME 和 LM 投入业务运行。

德国与丹麦、芬兰合作,已在境内建立了20多个 GPS 接收站获取垂直总水汽资料并用于对模式的资料同化方案的检验之中。对 GPS 站同时也是天气站的 GPS 资料实时处理系统也正在试验中。为了改进 LM 模式对降水类型的预报,由雷达网得到的降水率资料引入 LM 的工作正在进行中,由于 LM 采用4D 张弛逼近同化方案,故选择了“潜热张

驰逼近”的方法。

对 LM 改进的另一项工作是跃阶山地坐标(step mountain coordinate)的引进。该坐标的引进使得即使在地形变异很大的情况下,大气低层也能保持有不同大小的垂直层,即不同水平格点有同样数量的层数。这项工作主要改进模式中的重力波。

另一项动力适应精细网格的研究可以大大降低模式(尤其是细网格模式)对计算机条件的依赖。适用于浅水模式的方案已开发完毕。

3 日本

日本研制了用于全球分析的 TOVS 辐射率一维变分资料同化方案,并于1999年应用于业务预报。用于全球分析的三维变分资料同化系统也将于2000年投入业务应用。用于区域分析的四维变分资料同化系统正在紧张的研制中。一种臭氧资料同化系统也正在研制中。

日本开展了关东地区用于中尺度预报的观测系统试验,进一步研究观测资料如风廓线、多普勒雷达、ACARS、由 NSCAT 和 ERS-2 得到的海面风资料、通过 GPS 和 SSM/I 得到的可降水量数据以及从 GMS 导出的水汽假设资料对预报的影响。正在研究从陆基 GPS 导出可降水量的效果。进行了非流体静力区域预报模式研究。

从1998年3月开始,日本开始中尺度模式 MSM 的业务试验,每天2次并在初始时刻后的1.5 h 内作出12 h 预报,MSM 是网格距为10 km 的区域谱模式,通过 MSM 提前3 h 预运行使其物理初始化,每小时1次的雷达-AMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System, 一种高密度自动观测网)降水资料同化进 MSM 模式。

日本的强风潮数值预报业务从1998年7月开始,每当台风接近日本时,每天4次进行强风潮数值预报。使用的动力模式东西向水平分辨率为1.9 km,南北向为1.5 km,为日

本群岛西部沿海地区作出预报。

从1998年7月起,ERS-2 (Remote Sensing Satellite-2) 散射仪资料被同化进全球模式。使用两种从散射仪观测的回收资料(一种是海面风资料,另一种是海面压力资料)进行 ERS-2 散射仪资料对 T213L30 全球模式的影响研究,在分析域使用风和压力两种资料比仅用风资料可以产生更大的影响。研究发现,ERS-2 资料对南半球预报的改进作用最大,对北半球和热带的作用较小,这些作用不仅在地面预报上,而且在高空预报上都将存在。

1998年7月耦合海洋-大气模式投入业务应用。1998年10月日本在区域谱模式和台风模式取得下列业务进展:①对同化雷达-AMeDAS 降水资料物理初始化被再次引用于 RSM 预报;②修正项被引进比湿的水平扩散以减少陡坡的虚假混合;③云对短波辐射光学参数被修正。

4 俄罗斯

利用 Cray Y-MP 8E 计算机的矢量传输设备处理器的潜力,设计了 T40L15 业务 sigma 模式的优化版,为这种具有增强分辨率模式的全球版实现业务化开辟了一条道路。

俄罗斯已设计出用于半球位势、温度和风客观分析的三维最佳初值化方案,它利用 SYNOP、SHIP、BUOY、TEMP、PILOT、AIREP、SATEM 和 SATOB 信息。开发并完成了对俄罗斯和邻近国家用于48 h 预报的网格分辨率为75 km、10层的 sigma 模式,以替代业务中分辨率为150 km 的区域 p 模式。

在一个10层、水平分辨率为75 km 的区域 sigma 模式进行业务预报的基础上,进一步研制了潮湿大气模式。研究的重点放在微物理过程上。在模式中嵌入了解冻和蒸发引起降水的算法。通过分析模式降水量对雨滴尺度分布函数的依赖,表明在 gamma 分布函数中定常参数的增加引起模式降水的明显增

加。降水预报的数值试验表明,模式中微物理参数的变化使得降水预报技巧增加,提高最明显的是0.1~3.0 mm/天的降水区间。

在中尺度模式方面,开发了HMRCR(俄罗斯水文气象研究中心)业务中尺度模式的非弹性版Mesomode-I,含有15层大气和5层土壤,水平分辨率为10 km,共300×300网格点。该模式在Cray Y-MP8E上运行。包含了地形作用的中尺度模式的弹性版Mesomode-II也在设计中,并将与区域模式沟通。

5 法国

1998年6月用于运行业务模式和分析的计算机从Cray C98更新为Fujitsu Vpp700E(有26个处理器),这些增加的计算机资源在1998年法国世界杯足球赛期间调试完成。自1995年11月起,法国主要气象业务模式已是半拉格朗日模式ARPEGE展宽全球版,展宽因子3.5。

1997年5月以来,业务同化方案一直是以3D-VAR方案为基础,分析增长的分辨率比例与总的ARPEGE模式大致相同,从T95增加到T127。1998年6月,有限区域模式ALADIN已达到完全业务化,因为它可与全球模式ARPEGE同时运行,因此这些结果可被预报员及时地用于业务应用中。其增加的分辨率与ARPEGE很相似,水平格点以10 km代替12 km,垂直层数以31层代替27层。

从1998年9月起,法国气象业务全球数值天气预报模式一直是谱展宽的原始方程模式,水平分辨率从T149增加到T199,垂直层数由27层增加到31层。法国地区网格分辨率最大格距为20 km,全球分辨率最小处为250 km。3D-VAR增加分辨率是T127/C1,法国有限区域模式ALADIN的网格尺寸比ARPEGE最大的网格小两倍,ALADIN初始状态从ARPEGE 3D-VAR(非指定有限区域资料同化业务运行)中导出,ARPEGE和

ALADIN的初始平衡通过数字滤波器预置技术完成,用于物理参数化的通用综合成套设备被用于这两种模式。

1998年3月业务预报模式的另一个重要变化是完成了一种新的称为ISBA的地面方案,它对评估地面植被和各种物理特征比以前的方案先进的多,这种新方案包括适时修正来自陆地测站地面天气报告的土壤湿度观测资料。

6 英国

从1998年2月起,英国所有运行的业务预报模式从Cray C90型计算机移植到Cray T3E计算机。Cray T3E是拥有840个处理器的大规模并行计算机,业务预报模式同时在144个处理器上运行。同时,全球预报模式分辨率从90 km提高到60 km,网格点使用325×432替代217×288,垂直层数以30层替代19层。

在全球预报模式的地形表示方面,通过与英国南极考察队合作,修正了全球预报模式中南极区域的地形描述。从而减少了南极地区局地环流误差,同时也订正了南半球较大尺度的误差。英国改进了卫星风和晴空大气湍流计算,并将其应用到业务中。海洋模式预报已扩展到5天。在全球预报模式中改进了数字滤波器以适应高纬度极地风速和切变。同时使用288个处理器,将并行运行英国中尺度预报模式引进到初始全球预报模式。

1998年,在所有模式配置中引进了一种新的观测系统,为了适应观测网络,为了调查观测对模式预报准确率的影响,英国开展了资料影响研究。使用3~12 h以内英国累积降水量预报,对中尺度区域内不同类型观测的相对优点进行评估,结果表明,在预报降水分布和强度中,大部分常见的影响来自各种观测类型的同化高空探测资料、地面资料和来自湿度观测处理系统(此系统从卫星和雷达降水图像对云进行的三维分析)的资料。在有限区域模式域内,使用在锋和大西洋风暴

路径试验期间制作的30 h内平均海平面气压的预报,开展了进一步的评价工作,以找出不同类型观测的相对优点。

1998年6月,英国中尺度业务预报模式分辨率由16.7 km 提高到12.3 km,网格点也从 92×92 扩大到 146×182 ,垂直层数由31增加到38。该模式每天进行4次 $T + 36$ h 预报,资料截止2 h,为了处理阿尔卑斯山脉附近地形,调整了模式中的计算方案。还对模式中云和降水微物理过程进行了改进,将云冰作为一个诊断变量,并且在云冰液体和降水之间有多达11个转换方式。新的微物理方案的最大改进是能够对过冷层积云进行模式处理。由于云凝结成冰/液体的转化与温度有关,而冰可以在多层之间下落,原方案允许过多的冰降离云顶而误报雾的产生,新方案减少了高压区域少量降水或毛毛雨误报次数。

7 香港

香港观测台区域谱模式(RSM)进入半运行状态,来自本地雷达和雨量计的降雨信息通过物理初始化结合进模式。完成一种用于后处理、显示和RSM输出验证的广延组软件,它包括天气图的生成、Kalman滤波技术的应用、显示和对香港点预报的验证。

目前运行的RSM水平分辨率为60 km,垂直层数为20层,覆盖 $5^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$ 这一区域,从前一次运行中通过12 h 预报提供第一猜值,该模式在00:00和12:00UTC资料基础上每天运行两次,通过日本每6 h 一次的GSM预报提供48 h 预报边界条件,1999年安装增加的计算机设备后计划运行RSM达到水平分辨率为20 km,垂直层数36层。

完成了将来自雷达和雨量计的降雨信息通过物理初始化过程结合进RSM中。为测试非对称台风在RSM预报中的影响以及GMS云运动矢量在RSM TC预报中的影响,进行了敏感性研究,找到了预报TC风场结构的改进措施。现已发现在RSM中利用

GMS数字资料结合水汽假设对湿度场的分析和预报是有益的。

8 美国

美国业务预报的准确性,随着数值预报模式性能的提高,自70年代开始呈缓慢上升趋势,图1给出美国降水预报评分改进百分率。近年来美国业务数值模式的改进中,在降水物理方面,一是引进了针对饱和条件不稳定格点气柱的格点尺度对流调整,二是为了改善在海洋地区热带降水预报“牛眼”问题,引入云做功相对函数张弛法,使得垂直运动不再决定于云底而减弱。

1998年2月9日,中尺度Eta模式由48 km/38层升级至32 km/45层。目前Eta-32模式占用几乎整台C-90计算机计算1 h 进行48 h 预报,较Eta-48计算量增加了2.3倍。6月3日起,模式区域覆盖了整个北美地区(增加了45%的格点),但因延长了步长(用90 s 替代72 s),使计算量持平。Eta-32的改进主要有:在目前土壤-植被-水文方案中增加了2层土壤层,并改进了方案中的径流计算,融化雪的处理和参数估算。另外将一种精确方法引入Eta模式中的步长地形中。模式时间方案的修正可以严格将水平平流和调整的时段分开,这使得增加时间步长成为可能。因为这种区分可以使偶尔出现的能造成垂直运动噪声场的气流和风场的不相容性消失。

目前美国NCEP正在与NCAR、FSL和CAPS(NOAA 风暴分析和预报中心)等单位共同开发下一代风暴尺度中尺度模拟系统以用于研究和业务。

三维变分分析方案已全面取代了最优插值,这使得许多新类型的观测资料得以利用。针对三维变分的一个重要补充是包括了在高层订正了误差的高度资料。通过变分拟合高度和温度两个变量,有可能得到最好的结果,即相对于最优插值系统改进了对高度资料的拟合,并得到三维变分已经取得的对温度和风资料拟合的改进。进入业务Eta模式同

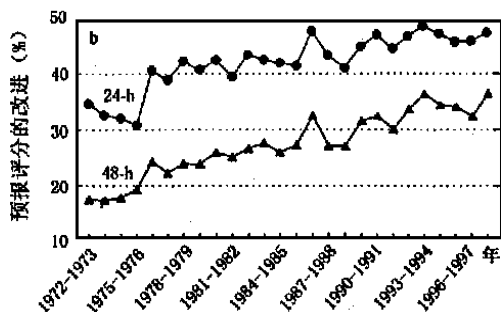
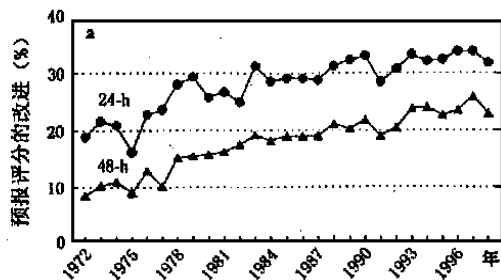


图1 美国降水可能性预报概率评分相对于气候均值的改进 (a)暖季(4~9月) (b)冷季(10~3月)(评分基于美国大陆1983年以前的约80个站和之后的约90个站每天00:00和12:00两次12和24 h 预报结果)

化系统的新资料有: WSR-88D 每小时风廓线资料; GOES8和 GOES10 4层可降水量反演值; GOES 高密度云漂浮资料(GOES 8/GOES 9和 GOES 10观测值分别自1997年12月16日和1998年7月29日进入业务 Eta 模式); ACARS (Automated Communications and Addressing Reporting System, 自动通讯和导航报告系统)温度报告(风资料已应用); SSM/I 陆地和海洋表面风速。WSR-88D 径

向风速地面中尺度网的资料收集和业务应用被推迟。

参考文献

- 1 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (1999). Seminar Proceedings, Recent development in numerical method for atmospheric modelling. 7-11 September 1998
- 2 WMO(1999). Numerical weather prediction progress report for 1998, WMO/TD-No. 968