

新世纪初我国数值天气预报的科技创新研究*

薛纪善

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

概要介绍最近5年在国家科技攻关项目“中国气象数值预报系统科技创新研究”框架内所取得的主要成果,重点是卫星等遥感资料在变分同化中的应用,高分辨非静力数值预报模式的发展,全球资料同化与中期数值天气预报系统的发展,数值天气预报系统的模块化与并行计算,数值天气预报新技术的研究等,并扼要介绍我国新一代数值天气预报系统的业务应用试验。最后,对我国数值天气预报的进一步发展做了讨论。

关键词:数值天气预报;科技创新;GRAPES

1 世纪之交的机遇与挑战

自20世纪50年代美国等国家率先建立数值天气预报业务以来,随着数值预报理论与方法的进一步发展以及计算机、大气遥感等科学技术的飞速进步,数值预报质量不断提高,并已经成为制作中、短期天气预报的最有效的科学方法。在数值预报模式基础上发展起来的大气数值模拟也已经成为大气科学研究的主要手段之一。数值天气预报在一定程度上反映了一个国家气象科技的综合水平,各发达国家都十分重视数值预报系统的持续发展,把它作为推进气象科技进步的重点之一^[1]。

我国是国际上开展数值预报研究较早的国家之一,但直至20世纪70年代后期才起步建立数值预报业务系统,比发达国家晚了整整四分之一世纪;加上当时数值预报业务的支撑条件,如计算机与资料库等,都与国外有很大差距。因此,为了在短时间内建立起我国数值预报业务以满足当时的业务与服务需求,主要采取了通过移植国外业务模式与相关软件的发展策略。通过这一途径,20世纪80年代末至90年代初,我国的数值预报业务体系已经基本建立起来,它包括国家级的全球同化与中期预报系统、中国区域资料同化与降水预报系统、热带气旋预报系统以及部分区域中心的有限区同化预报系统和

局地高分辨中尺度预报系统。以后又开展了集合预报等业务系统。20世纪90年代初我国跻身少数能够发布中期数值预报的国家,这在国际气象界引起了强烈反响。就数值预报业务的完整性与提供的产品来说,至20世纪90年代中期我国已与先进国家基本相同。

数值预报逐渐成为业务天气预报的重要基础,在气象业务与服务中发挥了重要的作用。但由于我国的数值预报业务化起步晚,长期以来支撑条件不足,研究规模很小,因此基础薄弱,科技水平及业务运行效果与先进国家相比存在很大差距。到新旧世纪之交,随着我国科技实力的增强,数值预报的支撑条件已经大大改善,为我国数值预报的发展提供了前所未有的机遇。与之对比,我国数值预报技术发展速度慢,国际上数值预报的新科学成就不能被有效利用并产生业务效益的问题凸现出来。而社会对气象预报的需求却大大增加,我国的数值预报面临着重大挑战。如何利用国家经济发展提供的有利条件,促进数值预报的跨越发展,满足对高质量预报的需求,成为科学家与管理部门共同关注的问题。

1999年中国气象局组织了一批数值预报业务与科研第一线的专业人员,对国际数值预报的发展动向与我国的成就及问题进行了比较全面的调研。其后形成的报告在充分肯定我国数值预报发展的成就的同时,也指出了我国数值预报发展中存在的主

* 国家“十五”科技攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”(2004BA607B)和国家自然科学基金重点项目“中国强降水天气预报研究”(40233036)共同资助。

2006-06-29收到,2006-07-30收到再改稿。

要问题^①。其中最重要的有 3 个方面:由于缺乏先进的同化技术,无法使用大量涌现的遥感资料,致使数值预报的初值误差很大;数值预报模式缺乏针对东亚季风区的天气过程的深层优化,致使模式对我国的重要天气过程的模拟预报能力偏低;多个互不相关的业务系统在同一个业务中心同时运行,致使系统运行维持与升级周期长,远远落后于计算机与气象现代化发展的速度。而这些问题的产生与我国的业务数值预报基本上建立在从发达国家移植的模式或系统的基础上、自我创新能力弱有很大关系。一方面新技术的获取在很大程度上受到供方的制约,我们不可能集约化地组织自己的发展;另一方面也缺乏对引进系统进行深层次优化的能力。尽管在我国数值预报业务发展的初期,这是不可避免的,但要推进我国数值预报的进一步发展就必须加大数值预报的自主创新。

2 科学技术关键与发展计划

纵观近 20 年数值预报发展,有 3 个最引人注目也是影响最深远的变化。首先是资料变分同化方案的发展,使大量遥感资料被同化到数值预报模式,基本解决了数值预报缺乏观测资料的问题。第二是数值预报模式包含的动力与物理过程不断向真实大气逼近,由于分辨率的提高与计算方法的改进使模式对大气的动力学简化大大减小,因而描写中小尺度动力过程的误差减小。模式包含的物理、化学过程也愈来愈丰富,特别是云内的微物理过程被显式地引入到数值预报模式,大气与地球其他圈层模式的耦合提高了模式对复杂物理过程描述的能力。第三是充分利用计算机技术发展所提供的机遇,集约化地发展数值预报系统,大大缩短了系统的升级周期。相比之下,我国恰在这 3 个方面表现出发展的滞后。因此,要实现我国数值预报的跨越发展,应该通过自主研究与开发,首先在数值预报发展的以下几个关键科学技术问题上取得突破:以遥感资料为主要对象的资料三维与四维变分同化系统的发展;多尺度通用非静力动力模式内核的发展;以云和降水为核心,包括陆气、海气相互作用的、面向东亚季风区特点的模式物理过程方案的发展;与当代高性能计算机的体系结构相适应的数值预报的计算机程序实现

方案,特别是并行计算与程序的标准化、模块化。

20 世纪 90 年代后期我国数值预报自主发展的紧迫性引起了广泛地关注,当时立项的国家重大基础研究计划项目“我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究”首先开始了对我国新数值预报模式的前期研究。2001 年国家科技部与中国气象局共同支持了为期 5 年的“中国气象数值预报系统技术创新研究”项目,并将其列入国家“十五”科技攻关计划的重点之一。这一项目的目标是在可预见的 21 世纪初叶高性能巨型计算机能力和可获取的高时空分辨率气象观测资料条件下,充分吸收国内外的研究新成果,自主开发建立一套具有持续自主创新能力的天气数值预报新体系,包括资料四维变分同化系统、有限区域中尺度数值预报系统、全球中期天气数值预报系统以及环境支持系统,其技术性能达到国际同期先进水平。通过项目的实施,在不到 5 年的时间里一个新的全球与区域同化预报系统(Global Regional Assimilation and Prediction System, 简称 GRAPES)已经建立起来并基本具备了业务应用能力。下面将概要介绍 GRAPES 的主要科学技术成果。由于 GRAPES 相当一部分成果目前还没有公开发表,其内容主要取材于项目验收时提供的科学技术报告,除已经正式发表的部分,均不一一列出原始文献,对科学内容的引用请以正式发表的论文为准。这一时期国内其他方面数值预报研究成果不包括在本文中,有兴趣的读者可参阅其他文献。

3 遥感资料的同化

资料空缺历来是长期制约我国数值预报发展的第一难题。借鉴国际上解决数值预报资料问题的经验,参加资料同化课题研究的科学家们首先发展了三维资料变分同化系统 GRAPES-3DVar^[2-4],并在 GRAPES-3DVar 系统框架内引入快速辐射传输模式作为观测算子,实现了对卫星垂直探测器的辐射率资料的直接同化^[5-7],以及其他遥感资料(如多普勒天气雷达、卫星导出产品)^[8]和常规观测的同化。这一变分同化系统根据预报模式的特点,采用全格点系统和有特色的最优化预条件方案,具有良好的计算性能,适用于全球或我国有限区域的运行。经过大量的准业务环境试验,不断改进、优化和升级,目

^① 面向 21 世纪的中国气象数值预报. 面向 21 世纪的中国气象数值预报创新技术工程体系预研究课题组印发, 2001.

前该系统已具备了同化常规观测资料、极轨卫星 (NOAA16, NOAA17, NOAA18 等) 搭载的垂直探测器 ATOVS 的辐射观测资料、静止卫星云导风以及多普勒雷达风廓线 (VAD) 资料的能力。由于 ATOVS 等星载垂直探测器的辐射观测在数值预报可用的卫星定量观测中占的比例最大, 而国际上解决资料问题的主要途径就是建立卫星资料, 特别是卫星辐射观测的直接同化系统, 因此这一系统的开发成功, 为解决我国数值预报的资料问题创造了条件。图 1 给出了利用 GRAPES-3DVar 直接同化卫星 ATOVS 资料对 2004 年 7 月云娜台风路径预报的影响, 可以看出 ATOVS 资料的直接同化对台风预报改进的贡献是十分明显的。

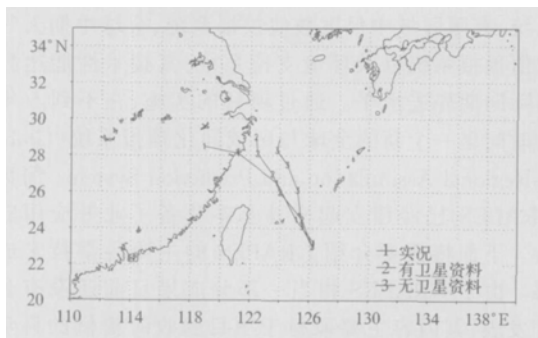


图 1 卫星资料的应用对 2004 年云娜台风路径预报的影响^[7]

我国青藏高原地区与亚洲大陆的腹部也是常规资料十分匮乏的地区, 而目前资料同化所使用的辐射传输模式中地表辐射计算的误差是卫星资料同化的重要误差来源之一。利用部分对地面敏感的微波通道辐射观测反演出地表比辐射率, 再应用于其他微波通道的辐射计算, 提高了辐射传输模式中大气顶辐射强度的计算精度, 从而改进了卫星资料同化的效果。这一方案已经被引入到 GRAPES-3DVar 所采用的快速辐射传输模式 RTTOV-7 中, 改进了陆地上空的微波资料同化, 无论对同化系统, 还是对辐射传输模式的应用都有重要价值^[9]。

在 GRAPES-3DVar 的框架内开展了对多普勒雷达的径向风与回波强度的直接同化研究, 在分析变量中增加了垂直速度与大气中的水凝物变量, 将关于径向风与回波的观测算子引入 3DVar 系统, 不仅改进了风的分析, 还提供了云的信息, 个别试验结果表明对台风与暴雨的预报都有积极的影响。

继 GRAPES-3DVar 以后又发展了一个四维变分同化系统 GRAPES-4DVar。它是 GRAPES-3DVar 的

扩展, 将模式的时间积分引入到同化系统, 可以同化不同时刻的观测资料, 并且实质上得到依赖于实际气流变化的背景场的误差分布。GRAPES-4DVar 的发展采取了国际上多数业务中心的 4DVar 的增量同化策略, 计算量最大的最优化过程是在较低分辨率上进行的, 但非线性预报模式的积分与非线性观测的计算都是在完全分辨率下进行的, 既保证了预报轨迹与观测新息向量 (innovation vectors) 计算的精度, 又节省了计算量。与多数业务中心不同的是直接采用了非静力预报模式, 这一点类似于国际上主要用于研究的中尺度四维变分同化系统 (如 MM5-4DVar), 但针对研究的同化系统具有更丰富、实用的观测算子。四维变分同化是当前国际上被认为最有效的资料同化方案, 但发展的难度很大, 除欧洲中期预报中心在 20 世纪 90 年代后期应用于业务外, 大部分发达国家也只是在最近几年才在业务中得到应用。GRAPES-4DVar 是我国建立的首个针对实际运行的预报模式的四维变分同化系统, 为我国资料同化系统的进一步升级打下了基础。GRAPES-4DVar 又是国际上为数不多的采用非静力模式的四维变分同化系统之一, 并且比前几年国外发展的 MM5-4DVar 等同化系统具有同化真实观测资料的能力, 特别是直接同化卫星遥感资料的能力。GRAPES-4DVar 研发过程中建立的切线性与伴随模式还可以应用于观测敏感区的诊断与集合预报的初值扰动。GRAPES-4DVar 的完成是我国资料同化领域的一项重大突破, 对我国资料同化水平的进一步提高具有重大意义。在发展 GRAPES-4DVar 的过程中, 参与研究的计算数学领域的科学家还发展了一套计算机自动微分系统, 它不仅成功地完成了 GRAPES 数值预报模式的切线性与伴随模式的开发, 还可以在研究与软件发展中有更广泛的应用。

4 非静力模式动力框架的发展与模式精细化

我国数值预报的模式发展与业务长期以来都采取根据不同的预报对象独立建立模式系统的策略。这样做使得单个系统的研究开发难度相对较小, 但系统间重复多, 总体运行维护与系统的升级成本很高, 周期长, 降低了数值预报的发展速度。GRAPES 借鉴国际上模式发展的新经验, 制定了发展多尺度通用动力框架作为不同模式共同基础的技术路线。

充分考虑到数值预报向精细化发展的需求,兼顾到向气候系统模式扩展的长远需要,在相同的理论设计方案与计算程序里,实现了静力与非静力可选,全球与有限区可选,水平与垂直分辨率可选^[10-12]。GRAPES 模式是我国发展的首个配有复杂物理过程的大气非静力数值模式,采用高度地形追随坐标,并引用了半拉格朗日半隐式算法与其他一系列新的计算方案,解决了非静力平衡模式求解中的精度与数值计算方案快速收敛的问题,保证了模式的业务可应用性。GRAPES 模式已可以在细至 0.1 km,粗至 500 km 的水平分辨率范围,在有限区域与全球的范围进行预报或模拟运算。它成为新一代中尺度与全球模式的共同基础,并有可能成为新一代气候系统模式的大气分量模式与大气环境模式的基础。图 2 给出一个 0.1 km 分辨率进行密度流模拟的结果,这一结果与国际上其他非静力模式的结果以及目前国际上用来作为测试标准的结果吻合。对模式模拟的大气动能谱进行分析的结果也与国际上近年发展的模式,例如美国的 WRF 一致。这些结果表明无论对于密度流这样浮力起主导作用过程的模拟,还是对大气中短波波段动力过程的描述,GRAPES 动力框架均与国际上同类模式的结果相当。对长波段的模拟能力并没有因非静力过程的引入而降低。

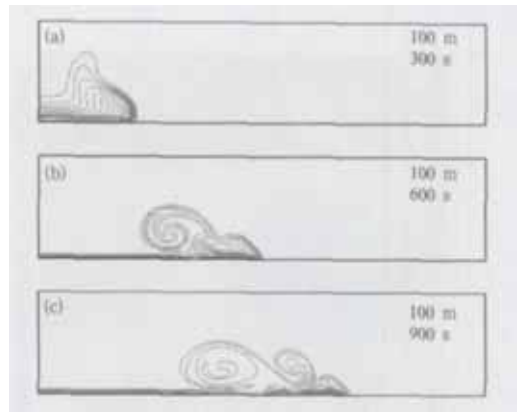


图 2 GRAPES 模式密度流试验结果 (a~c 图分别显示积分 300 s,600 s,900 s 扰动位温的演变过程,网格距为 100 m;由于对称性,试验结果有东西两支完全相同的气流,图中显示的为向东运动的一支)(胡江林提供)

非静力动力模式的发展与复杂物理过程耦合后,提高了对我国灾害性天气预报,特别是中尺度灾害性天气预报的精细度。表 1 给出目前在 GRAPES 非静力框架基础上发展的中尺度模式 GRAPES-Meso 所提供的物理过程选择。图 3 则是 GRAPES-Meso 对 2003 年伊布都台风模拟的例子,模式水平分辨率为 0.1°(约 10 km)。高分辨率非静力模式的应用大大提高了对热带气旋的三维结构、螺旋云带分布的模拟能力。

表 1 GRAPES 模式可选用物理过程参数化方案

显式降水	对流降水	长波辐射	短波辐射	近地面层	陆面过程	边界层
① Kessler	① New Kain	① RRTM	① Dudhia simple	① Similarity	① Thermal	① MRF
② Lin(Purdue)	- Fritsch	② GFDL	short wave	theory	diffusion	② Mellor Yamada-Janjic
③ NCEP simple ice	② Betts-Mille-	③ ECMWF	② DFDL	② MYJ surface	② OSU/MM5	③ 湍流二阶
④ NCEP mixed phase	Janjicr		③ GSFC	scheme	LSM	闭合方案
⑤ Eta old microphysics	③ Kain Fritsch		④ ECMWF		③ 改进的	
⑥ Eta new microphysics					NCAR LSM	
⑦ CAMS 简冰方案						
⑧ 大尺度降水迭代方案						
⑨ ECMWF 大尺度降水方案						

在非静力动力框架基础上还发展了面向城市环境的预报系统 GRAPES-Mega City。与 GRAPES-Meso 相比,前者增加了城市冠层的参数化方案,因而提高了对城市热岛等特有的城市天气气候现象的模拟能力以及城市灾害性天气预报的精度。同时也进行了耦合大气化学与气溶胶模式,以及驱动街区动力模式的试验,用以研究城市空气质量与街区尺度的风与温度场的分布,为建立新一代的空气质量模式,开展城市气象服务,特别是重大社会活动的气象服务奠定了新的基础。

5 全球中期预报系统的发展

与 GRAPES-Meso 类似,在 GRAPES 多尺度通用动力框架基础上,一方面按照球面的几何特征确定全球预报模式的动力框架配置;另一方面按照全球中期预报的过程特征,在对模式物理过程方案进行优选与优化的基础上建立了中期预报模式的物理过程模块。两部分耦合形成全球中期预报模式 GRAPES-Global,并建立球面上的三维变分同化系

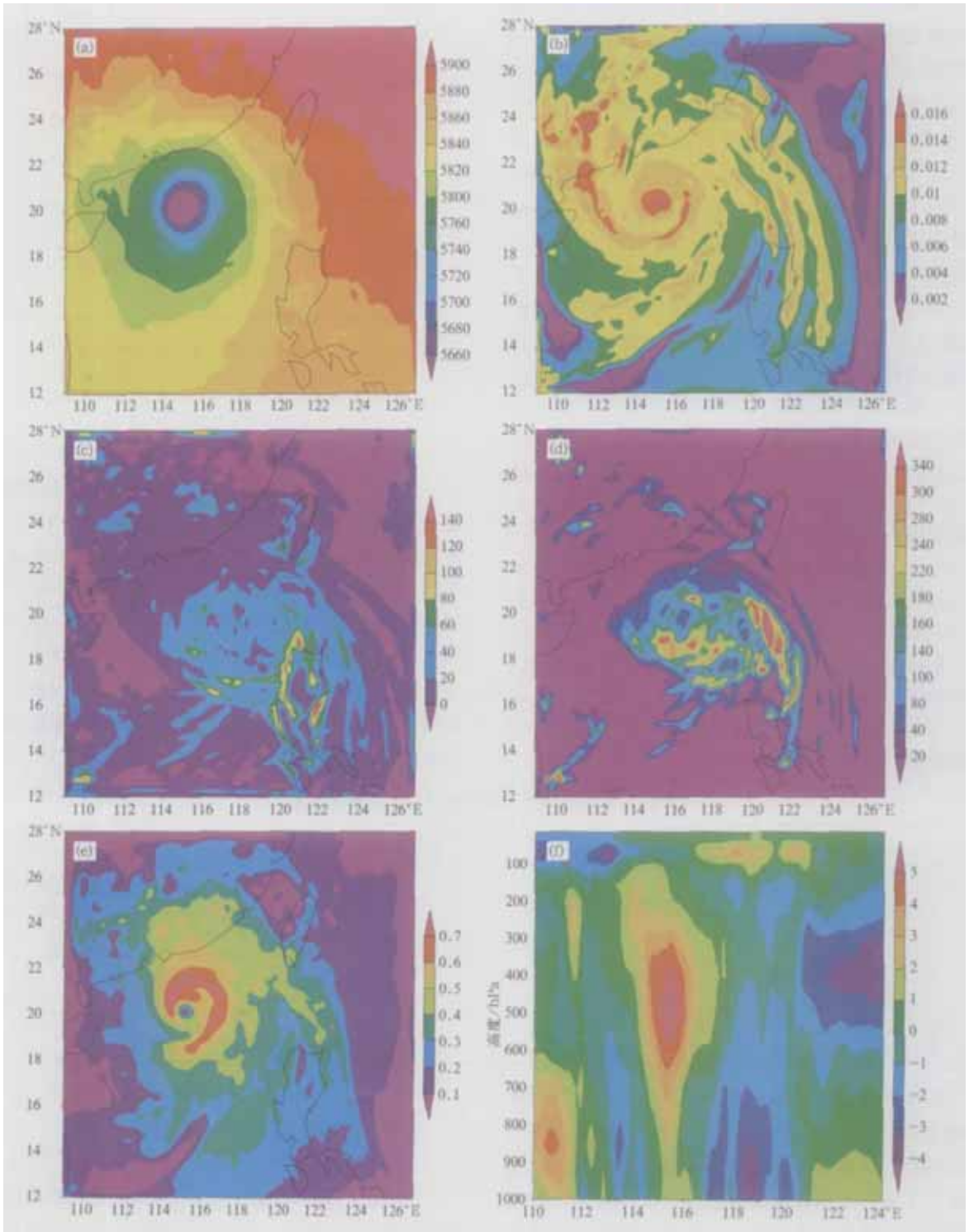


图3 2003年7月22日12:00(世界时,下同)起始的24h预报(伊布都台风)(徐国强提供)
(a) 500 hPa 位势高度(单位:gpm), (b) 700 hPa 水汽场(单位:g/kg), (c) 积云降水预报(单位:mm),
(d) 网格尺度降水预报(单位:mm), (e) 850 hPa 水汽通量(单位:g·kg⁻¹·m·s),
(f) 沿20.5°N 温度距平的高度-纬向剖面图(单位:°C)

统,形成我国新的全球资料同化与中期预报系统。GRAPES-Global 是目前国际上为数不多的全球非静力模式之一,在此之前只有英国和加拿大气象局实现了全球非静力模式的业务应用。GRAPES-Global 研究开发既需要解决非静力模式在球面上离散化,特别是极区离散化的一系列科学问题,也要针对全球不同自然地理与气候条件进行物理过程参数化方案的优化。前者涉及极地上各预报变量的离散化方案的优化,半隐式积分方案中一个三维椭圆方程在球面上的数值求解方案等。例如 GRAPES 模式动力框架使用的半拉格朗日平流方案在球坐标系中,近似精度在球面曲率较大的地方会急剧下降。因此在 GRAPES 全球模式中对于纬度高于 80° 的格点情况,采用旋转格点来求近极区的上游点。关于后者,则需要考虑物理过程方案对于广泛的天气气候与自然地理条件的适应性,因此全球模式包含的物理过程种类尽管与中尺度模式基本相似,但具体方案的选择不同,特别是沙漠、冰面等特殊的下垫面。例如陆面过程增加了新的选项,以便考虑在沙漠、冰面等多种下垫面上的适用性与模式计算的稳定性;而对于网格尺度降水方案,由于全球模式的网格相对较粗,而且对长期积分的稳定性要求更高,因此采用接近传统的大尺度凝结方案。此外,还根据国际上中期数值预报的经验,增加了对一些地区(如热带或高原邻近地区)有重要意义的浅对流、地形重力波拖曳等参数化方案。为了解决全球高分辨模式计算量较大的问题,还需要设计高效的全球并行计

算方案。

为了检验 GRAPES 全球模式动力框架的正确性,设计了过极地气流、平衡流、Haurwitz 波 3 种理想场试验方案,其中平衡流试验与过极地流试验用于检验半拉格朗日插值、边界处理及极点处理的正确性, Haurwitz 波是线性正压涡度方程的准确解,可用于检验模式对长波的预报性能。GRAPES 3 类试验结果与其他成熟的全球模式或理论的结果一致。

在 GRAPES 全球模式与全球三维变分同化方案基础上发展了全球同化预报循环系统,从 2005 年开始进行批量天气实例的历史回报试验,对回报试验结果作了统计学与天气学检验。图 4 是 2005 年冬季与夏季 5 个月 GRAPES-Global 预报试验的质量检验,作为对比也列出相同分辨率的业务模式(从国外引进的谱模式 T213)的结果,图中的曲线是 500 hPa 高度预报与分析场的距平相关系数。此图反映出新发展的模式对改进全球中期预报确实有相当潜力。对一些重大天气事件,新模式也有突出的表现,例如由于新的同化预报系统使用了 NOAA 卫星的 ATOVS 资料并进行了资料偏差订正,2005 年麦莎台风的预报得到明显改进,提前 6 d 正确预报了该台风登陆并北上的路径(图 5)。目前 GRAPES 全球资料同化与中期预报系统已经基本具备业务运行的能力,即将进入业务前的试验阶段。这一系统是我国首个自己发展的全球同化预报系统,标志着我国数值预报总体研究开发能力的提高,同时对于自主发展我国新的气候系统模式也有很大意义。

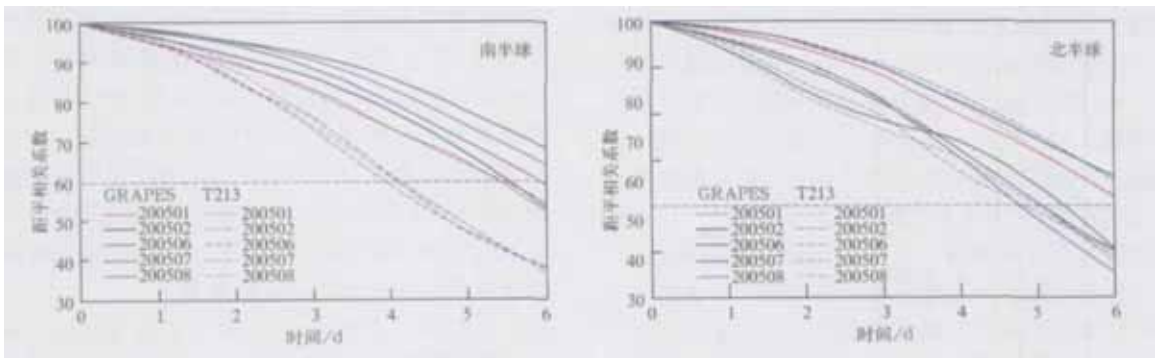


图 4 GRAPES 全球预报与相同分辨率从欧洲中期预报中心引进的谱模式 T213 的 500 hPa 高度预报与国家气象中心分析场的距平相关系数比较(杨学胜提供)

从总体上看,我国新一代数值预报系统不仅填补了我国在卫星辐射观测与多普勒天气雷达资料的变分同化、非静力平衡的具有各种物理过程的中尺度模式、高分辨的全球预报模式等研究的空白,使我

国在气象资料的同化与数值预报的模式发展技术方面逐步接近国际先进水平,也为我国数值预报业务水平的提升打下了良好的基础,对我国气象预报模式的持续发展具有重要意义。

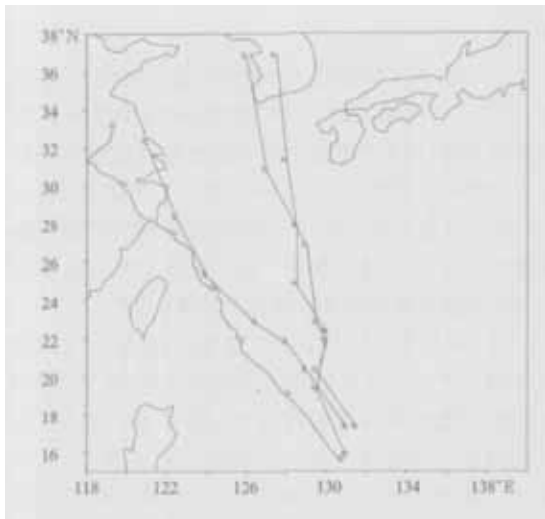


图5 GRAPES 全球模式对 2005 年 09 号台风“麦莎”预报结果的比较

(起报时间为 2005 年 8 月 1 日 12:00, 预报时间为 6 d; 图中“N”表示以 NCEP 再分析资料为初始场;“G”表示以 T213 的 12 h 预报场为背景场,通过 GRAPES-3DVar 系统同化常规观测资料而得到的初始场;“S”表示以 T213 的 12 h 预报场为背景场,通过 GRAPES-3DVar 系统同化常规观测资料和 NOAA16、NOAA17 的全球 ATOVS 资料而得到的初始场;“O”表示我国对台风“麦莎”的观测路径资料)(韩威提供)

6 数值预报的集约化发展与数值预报程序的标准化

前面提到我国数值预报模式长期以来存在更新周期长的问题,这和计算机的发展以及国际上的模式升级速度形成强烈对比。新一代数值预报系统研究开发过程中除了借鉴国际上的经验,采取多尺度通用模式动力框架和变分同化方案核心算法基础上发展各种具体预报系统的技术路线,并采取模块化与标准化编程,实现程序模块的可插拔,从而使系统的性能扩充容易实现。以变分同化方案为例,由区域三维变分系统向全球扩展只是替换了其中的一个与空间滤波方案有关的模块;而由三维变分同化向四维变分同化扩展时,前者的程序也基本保留,扩展部分集中在观测相关模块,大大缩短了研究开发的时间。从区域模式向全球模式发展的情况也相似。为了保证程序模块化与标准化,专门制定了 GRAPES 的程序规范,对语言选用与语法限制、变量命名与存放约定、子程序编写都有明确的规定,并从适应多平台并行运算的角度出发设计了系统的多

重程序结构与区域分解方案^[13]。GRAPES 程序规范是我国首个针对数值预报模式发展制定的程序标准,对于天气与气候系统数值预报模式的长远发展与各个部门与领域的科学家的广泛参与都有很大意义。

7 朝向数值天气预报的持续创新

GRAPES 的长远目标是推进我国数值预报的持续发展。从长远讲,迄今的成果只是一个起点。我们在解决我国业务数值预报系统升级的紧迫问题,即开发面向业务应用的新一代系统的同时,也在数值预报的前沿领域的研究取得了一系列成果。

在资料同化方面,考虑到四维变分同化方法尽管有多方面的优势,并在业务应用上取得很大成功,但也存在一些本质性的困难,如物理过程的处理等。跟踪国际上最近几年的新发展趋势,基于 GRAPES 预报模式的集合 Kalman 滤波资料同化的原型系统也建立起来了。它的特点是将 GRAPES-3DVar 系统与集合 Kalman 滤波结合在一起,具有集合 Kalman 滤波考虑依赖气流变化的背景场误差的优点,又具备原来 GRAPES-3DVar 在业务运行上的可行性与使用多种观测资料的能力,提供了 GRAPES-Var 以外的另一种选择。它们可应用于中尺度同化或者直接与集合预报系统相连接,形成同化与集合预报初值扰动统一的循环。同时,在多普勒雷达反射率资料同化的基础上进一步研究了具有显式云过程的模式的云中水凝物变量的初值形成,即通常所说的模式热启动问题,在新的 GRAPES-3DVar 版本中提供了这一选项。针对分析误差估计,将集合 Kalman 滤波简化为集合 Kalman 变换(ETKF),利用观测量对分析误差减小的贡献又建立起一套预报对观测敏感性的诊断系统,可以用以进行适应性观测的研究,为我国参与国际观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)提供了一个试验平台,对推进我国观测系统的研究也有很大意义。

在模式动力框架方面,引入了近年国际上出现的“阴阳网格”,初步结果表明是球面上格点模式的一种好的网格设计方案,可能被 GRAPES 全球模式的进一步发展所采用。基于初值与模式物理过程扰动的 GRAPES 集合预报试验系统也已经建立起来,为中期与中尺度集合预报打下了基础。

在数值预报的领域与内容的扩充方面,以 GRAPES 变分资料同化、中尺度模式等基本系统为基

础,近几年又通过与大气化学与气溶胶、大气电学等模式的耦合开展了沙尘暴-气溶胶模式(GRAPES-DAM)^[14]、城市空气质量模式、雷电模式的研究开发。其中沙尘暴预报已经作了超过1年的实时预报试验,显示了较好的应用价值。同时还发展了面向临近预报的短周期(例如1 h)资料同化系统,也已经具备业务应用的可能。

我国进入新世纪以来数值预报的研究开发尽管已经取得了多方面的可喜成就,但无论从满足业务与服务的需要,或者与国际上当前数值预报的发展相比,薄弱的环节还很多,需要特别加强的是模式物理过程的研究。数值预报模式一般提供多种物理过程方案选择,GRAPES也不例外,但众多方案都基于国外的研究,针对中国的天气气候与自然地理特点的物理过程方案的研究或物理方案的优化做得较少,这是一些数值预报模式在我国应用,效果常常退化的重要原因,而至今GRAPES的研究,在这方面仍然相当薄弱,需要作为我国数值预报持续发展的一个重点研究方向。

当前正在实施的国际“观测系统研究与可预报性试验计划”(THORPEX)是一个旨在加快数值预报发展的大型国际研究合作计划,由多国科学家共同起草的计划实施方案^[15]提出了通过计划实施可提供的成果,包括:建立制作14 d预报的全球交互式预报系统的原型;制作可用的14 d天气预报,并使预报的不确定性量化;与其他国际计划合作建立新的全球模式,其大气分辨率达到1 km,海洋分辨率达到10 km,用于1 d至100 d的天气和气候系统的预报;把当前天气预报技巧水平改进的速度由平均“每十年可信预报时效延长一天”提升为“每十年延长两天”,采用新的观测策略和资料同化,使各个国家中心能够有效地利用新的全球地球观测结果;在社会经济决策中形成全面利用概率预报信息的能力。这些意见大致代表了当前国际科学界对未来5~10年中数值预报发展水平的展望,可以作为我们确定未来发展的科学技术目标的借鉴。相比之下,我国还有相当长的路要走,在今后的5~10年中必须充分利用现有的基础,并跟踪国际上的新发展成果,继续坚持自主创新的道路,才能实现我国数值预报的跨越。

致 谢:感谢国家“十五”科技攻关项目“中国气象数值预报系统技术创新研究”各个课题组提供的大量最新研究结果及

允许引用部分图表。

参 考 文 献

- [1] 陈德辉,薛纪善.数值天气预报业务模式现状与展望.气象学报.2004,62(5):623-633.
- [2] 张华,薛纪善,庄世宇,等.GRAPES三维变分同化系统的理想试验.气象学报.2004,62(1):31-41.
- [3] 庄世宇,薛纪善,朱国富,等.GRAPES全球三维变分同化系统——基本设计方案与理想试验.大气科学.2005,29(6):872-884.
- [4] Xue Jishan. Development of 3DVar for operational application in CMA. Proceedings of 4th WMO International Symposium on Assimilation of Observations in Meteorology and Oceanography, WMO/ TD No.1316, 2005.
- [5] Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction. *Adv Atmos Sci*, 2004, 21(2):383-390.
- [6] Xue Jishan, Zhang Hua, Zhu Guofu, et al. Development of a 3D Variational Assimilation System for ATOVS Data in China. Proceedings of Thirteenth International TOVS Study Conference. 2003:30-36.
- [7] Dong Peiming, Liu Zhiqun, Xue Jishan, et al. The Use of ATOVS Microwave Data in the GRAPES-3Dvar System. Proceedings of 14 International TOVS Study Conference. 2005:274-280.
- [8] Xue Jishan. Satellite Data Assimilation Plan in CMA. Fifth International Workshop on Tropical Cyclone, Tropical Meteorology Research Programme. WMO/ TD No.1136, 2002.
- [9] Dong Peiming, Xue Jishan. An adjusted parameter scheme of land surface emissivity for assimilation of microwave satellite data. Proceedings of SPIE: Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: Numerical Atmospheric Prediction and Environmental Monitoring. 2005:274-280.
- [10] 陈德辉,杨学胜,胡江林,等.多尺度通用动力模式框架的设计策略.应用气象学报,2003,14(4):452-461.
- [11] Chen Dehui, Xue Jishan. GRAPES-CMA's New Generation of Weather and Climate Model: Scientific design and Development Progresses. Proceedings of the 2004 Workshop on the Solution of Partial Differential Equations on the Sphere, Yokohoma, Japan, 20-23 July 2004.
- [12] Xue Jishan. Progresses of Researches on Numerical Weather Prediction in China: 1999—2002. *Adv Atmos Sci*, 2005, 21(3):467-474.
- [13] 伍湘君,金之雁,黄丽萍,等.GRAPES模式软件框架与实现.应用气象学报,2005,16(4):539-546.
- [14] 李耀辉,赵建华,薛纪善,等.基于GRAPES的西北地区沙尘暴数值预报模式及其应用研究.地球科学进展,2005,20(9):999-1011.
- [15] THORPEX国际研究实施计划.WMO/ TD第1258号,WWRP/ THORPEX第4号(中文版)2005.

Progress of Chinese Numerical Prediction in the Early New Century

Xue Jishan

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

Abstract

The main achievements of the national key-research project “Innovative Researches on Chinese Numerical Weather Prediction System”, which is conducted in 2001—2005 co-sponsored by Chinese Ministry of Science and Technology and China Meteorological Administration are reviewed. Aiming at the development of Chinese next generation numerical weather prediction (NWP) system which will be able to improve the NWP benefited from the availabilities of more powerful computer facilities and observational data with higher temporal and spatial resolutions, the project focuses on four main issues. They are the development of advanced data assimilation system, the development of unified model dynamic core suitable to different scales, optimization of model physics and parallel computing of NWP model in high performance computer environment. It is expected that the applications of advanced technologies in the new NWP system will result in better performance and higher flexibility for the further upgrading of the system along with the further improvement of computer resources and data availability in the near future.

As the main results of this project, a new Global and Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES in short) is developed. The main components of the system are the data assimilation system GRAPES-3DVar, the global NWP model GRAPES-global and the regional NWP model GRAPES-Meso. GRAPES-3DVar is a three dimensional variational assimilation system suitable to both regional and global domains with the capability of assimilating unconventional remote sensing data, such as the radiation data from meteorological satellites. Following GRAPES-3DVar, a four dimensional variational data assimilation system (GRAPES-4DVar) is also developed, GRAPES-Global and GRAPES-Meso are based on the same unified dynamic core with hydrostatic or non-hydrostatic options. A package of model physics plug-compatible with the above model dynamic core is developed. In order to exploit the growing computer resources, parallel computing is one of the main issues in the research and the GRAPES software architecture is organized as a three-level hierarchy to make the system easily transplanted to different computers.

The preliminary results of real time pre-operation experiments in a period longer than one year are presented and analyzed briefly too. It shows that the performance of GRAPES is encouraging, but the further improvement is still a critical task to meet the needs of high quality forecasts of severe weather events in China.

Key words: numerical weather prediction; innovative researches; GRAPES