

沈学顺,陈起英,孙健,等,2021.中央气象台全球中期数值预报业务系统的发展[J].气象,47(6):645-654. Shen X S, Chen Q Y, Sun J, et al, 2021. Development of operational global medium-range forecast system in National Meteorological Centre[J]. Meteor Mon, 47(6):645-654(in Chinese).

中央气象台全球中期数值预报业务系统的发展*

沈学顺^{1,2} 陈起英^{1,2} 孙 健^{1,2} 韩 威^{1,2} 龚建东^{1,2} 李泽椿² 王建捷^{1,2}

1 中国气象局数值预报中心,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

提 要: 回顾中央气象台全球中期数值天气预报业务系统的发展历程,重点回顾和综述中央气象台建立全球预报业务以来的科学技术进步,总结了引进的谱模式系列在本地化、业务应用及发展过程中取得的成就,着重介绍在自主发展 GRAPES_GFS 全球中期预报系统的不同阶段取得的科技成果。

关键词: 谱模式, GRAPES_GFS, 动力框架, 物理过程, 四维变分同化

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.001

Development of Operational Global Medium-Range Forecast System in National Meteorological Centre

SHEN Xueshun^{1,2} CHEN Qiyi^{1,2} SUN Jian^{1,2} HAN Wei^{1,2}

GONG Jiandong^{1,2} LI Zechun² WANG Jianjie^{1,2}

1 Numerical Weather Prediction Centre of CMA, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Developments of operational global medium-range forecast system of National Meteorological Centre are reviewed. The topics focus on the advances in science and technology in National Meteorological Centre since the setup of global forecast system. The improvements in localization, operational application and further development of sequence of spectral model series are summarized, and those in progress of self-developed global medium range forecast system, GRAPES_GFS, are described in detail.

Key words: spectral model, GRAPES_GFS, dynamic core, physics, 4DVar

引 言

全球中期数值天气预报业务系统是数值预报业务体系的核心,既为区域中尺度数值预报系统提供边界条件和背景信息,也是全球集合预报系统的基础。全球中期预报模式和同化技术的不断发展在很

大程度上推动了世界数值预报整体研究和预报水平的不断提高(Bauer et al, 2015)。因此,发展和不断改进全球中期预报系统得到世界各天气预报业务中心的高度重视(Melvin et al, 2019; Kühnlein et al, 2019)。

中国自 1954 年开始数值预报研究,是国际上较早开展数值天气预报的国家之一(顾震潮, 1959;

* 国家重点研发计划(2017YFC1501904)、中国工程院中国工程科技中长期发展战略研究(2019-ZCQ-06)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406007)和国家自然科学基金面上项目(41375107)共同资助

2020 年 6 月 9 日收稿; 2021 年 5 月 7 日收修定稿

第一作者:沈学顺,主要从事数值预报研究. E-mail: shenxs@cma.gov.cn

通讯作者:陈起英,主要从事数值预报研究. E-mail: chenqy@cma.cn

Blumen and Washington, 1973)。在 20 世纪 60 年代,中央气象局数值预报组曾经应用准地转正压模式制作亚欧范围内 24 h 和 48 h 的 500 hPa 形势预报(中央气象局数值预报组,1965)。20 世纪 70 年代后期,中央气象台与中国科学院大气物理研究所、中央气象局气象科学研究所和北京大学合作,先后业务运行亚欧区域 3 层原始方程绝热模式(当时称为 A 模式,1980 年开始发布 48 h 形势预报)、北半球 5 层格点模式(当时称为 B 模式,1982 年业务运行;陶诗言等,2003)和一个有限区域的 5 层格点模式(当时称为 B 小模式,1982 年业务运行),以及有限区域 LAFS(Limited Area Analysis and Forecast System)和 HLAFS(High-Resolution LAFS)模式(郭肖容等,1995;闫之辉等,1997)。这些系统形成了自动化程度较高的短期数值预报业务能力。但由于各方面条件所限,特别是计算机条件的限制,并未形成全球预报业务能力。

虽然建立了短期数值天气预报业务系统,但远远满足不了社会和部门内的需求。1975 年欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecast, ECMWF)的成立以及随后成功开展的全球中期业务数值预报在世界范围内产生了较大影响。因此,20 世纪 80 年代初,国家气象局做出发展中期数值天气预报的决策,并开展了调研和筹备工作,将国家气象中心气象台数值科扩建成国家气象中心数值室,拉开了建立全球中期预报业务的大幕。当时,建立中期数值天气预报业务涉及通信、计算机系统、土建工程诸多方面。在 20 世纪 90 年代初,先后引进了国产银河-II、美国 CRAY C90、CYBER 992 大型计算机,解决了运行全球中期数值预报业务系统的高性能计算问题。“七五”期间,引进了 ECMWF 的全球谱模式,并进行本地化开发,在国产银河大型机上建立了 T42L9(T 是 triangular 首字母缩写,表示是采用三角截断的谱模式;L 是 layer 的首字母的缩写,表示垂直层次)全球预报系统,并于 1991 年投入业务运行。CYBER 机的引进使得中期数值预报由原来的 T42L9 很快升级到 T63L16 并开展试验,最后在银河与 CRAY 上形成 T63 全球数值预报系统,于 1995 年业务运行,产品下发全国。“七五”时的技术路线是引进、消化、吸收、改造和创新,经过业务试验、准业务、业务几个阶段,中国的中期数值预报产品在中国气象业务部门扎下了根。不少潜心钻研数

值天气预报产品的预报员,不断积累经验,熟悉这些方案性能,运用 T42、T63 等都做出了精彩的预报。这些成功经验为后续 T 系列谱模式的技术改进和分辨率的不断提高奠定了技术和科技人才的基础。1997 年,系统升级为 T106L19,2000 年实现了 T106L19 集合预报系统业务化;2003 年,分辨率进一步升级为 T213L31,2006 年实现了台风路径和集合预报系统业务化运行;2008 年,谱模式完成了动力框架和物理过程的升级改造,分辨率升级为 $T_L639L60$ [T_L 是指采用线性(linear)格点的三角截断的谱模式],2014 年实现了 $T_L639L60$ 台风数值预报系统和集合预报系统的业务化。20 世纪 90 年代该系统的建立标志着中国具备了从全球中期到区域短期的现代化数值天气预报业务和服务能力,为之后开展自主研发工作奠定了重要基础。

20 世纪末至 21 世纪初,中国气象局对未来数值天气预报业务发展的技术路线进行了战略调整,由引进为主转为自主开发为主,开启了中国新一代数值天气预报系统的自主研发之路。2001 年开始,在科学技术部“十五”国家重点科技攻关项目“中国气象数值预报系统创新研究”支持下,中国气象局联合多家单位,自主研究并初步建立了新一代多尺度通用资料同化与数值天气预报系统(Global/Regional Assimilation Prediction System, GRAPES;薛纪善和陈德辉,2008)。随后,在科技部“十一五”“十二五”科技支撑计划以及中国气象局 GRAPES 专项的连续支持下,对 GRAPES 模式和同化进行了持续的改进,研制了基于预估修正算法的新 GRAPES 模式,发展了全球四维变分同化和适应于千米尺度的三维变分同化系统,发展了系列卫星资料同化技术。持续攻关成果的积累和在业务环境下研发与业务各方面的锤炼,逐步建成了从区域 3~10 km 到全球 25~50 km 分辨率的确定性与集合预报的完整数值天气预报业务技术体系,并锻炼培养出一支数值天气预报业务全链条(即从观测资料前处理和质量控制、资料同化、模式动力框架和物理过程、模式并行计算到模式系统集成、数值天气预报产品后处理等)研发队伍。

在“十五”科技攻关项目成果 GRAPES 全球中期数值预报试验系统的基础上,于 2007 年 7 月开始 GRAPES 全球中期数值天气预报系统 GRAPES_GFS(Global Forecast System)的业务化。首先结合 GRAPES_Meso 的业务化成果,研发了适用于全球

业务预报的动力框架、物理过程以及全球卫星资料的系列同化应用技术。全球模式是基于区域模式同样的架构与算法,在区域模式基础上扩展而研发,区域系统的四维变分分析系统(4DVar),也为全球4DVar研发提供了宝贵的经验与教训。2009年3月实现了准业务化运行(沈学顺等,2009),这是GRAPES_GFS的第一个版本(GRAPES_GFS 1.0),水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直方向为36层,预报效果超过了当时国家气象中心业务运行的T213系统。这期间建立了全球多卫星平台资料的业务接收和处理流程,数值天气预报技术的自主创新也带动了气象业务全链条的进步。

GRAPES_GFS 1.0的成功研发,使中国有了第一个自主发展的、能够稳定运行的、结果合理的全球预报系统。接下来,从模式动力框架和物理过程、变分同化框架和卫星资料同化应用等关键问题着手,实施了相关深化改进工作。这些工作包括物理过程的全面升级,模式空间GRAPES三维变分同化系统的研发和业务应用,以及更多卫星资料的同化应用(沈学顺等,2017)。在此过程中,针对GRAPES_GFS全球模式框架中影响计算精度和稳定性的问题,研发了垂直方向非插值半拉格朗日算法、W-damping、高精度水汽平流计算、平流层瑞利摩擦等技术方案,大幅度提高了模式框架的计算精度和稳定性。在上述研究成果的基础上,GRAPES_GFS由1.0升级为2.0版本,模式分辨率提高为水平 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向为60层。2015年年底GRAPES_GFS 2.0通过业务化验收,预报性能超过当时国家气象中心业务运行的T₁639L60系统(沈学顺和王建捷,2015)。

2008年开始研发GRAPES全球四维变分同化系统(4DVar),2018年7月在GRAPES_GFS 2.0中实现了业务应用。全球GRAPES-4DVar业务的应用代表了中国全球中期预报业务的重要技术进步。GRAPES-4DVar成功的原因,一方面在于解决了业务应用中存在的计算效率、观测剖分、多次外循环更新等技术细节问题,解决了4DVar的线性化物理过程等关键科学难题;另一方面,在一个预报性能稳定且较为成熟的全球预报平台(GRAPES_GFS 2.0)上的“迭代式”开发也起到了非常重要的作用。有关GRAPES-4DVar的具体科学技术细节可参考Zhang et al(2019)。2018年7月带有GRAPES-4DVar的GRAPES_GFS 2.4版本实现业务运行。

GRAPES-4DVar的业务运行标志着中国业务数值天气预报同化技术水平迈入国际前列,国家气象中心成为国际上少数具有自主研发和业务应用4DVar的国家级预报中心之一。

1 谱模式全球预报系统的发展和业务应用

1.1 引进为主的初期发展阶段

1981年,根据中国当时的计算机条件和数值预报研究现状,引进了ECMWF的T42谱模式和美国国家气象中心的多元最优插值客观分析方案。在消化吸收的基础上,结合中国预报业务情况加以改进和提高,最后建成了一个完备的、自动化水平较高的中期数值天气预报业务系统。这是中央气象台第一代具有中等分辨率T42L9(2.8125° ,约为300 km)的全球模式,于1990年1月1日先在M-360计算机上进行准业务运行(每日进行2次同化,1次2 d北半球预报),于1991年9月12日在CYBER 992计算机上投入正式业务运行,并向全国发送数值预报产品。该系统每日进行4次同化,1次5 d预报。该系统的建成填补了中国在中期数值预报领域的空白,使中国步入了当时世界上少数几个能开展中期数值天气预报的国家行列(李泽椿,2010)。

经过国家“七五”重点科技攻关项目和延续项目的支持,第二代中期天气预报业务模式T63L16(1.875° ,约为200 km)于1994年6月1日投入准业务运行,它是在20世纪80年代中后期引进的ECMWF的业务谱模式T106L19的基础上改造的。随着新巨型机CRAY C92的安装,于1995年6月1日正式投入业务运行。该系统每日进行4次同化,1次7 d预报,并为台风和暴雨系统提供侧边界和初始场。T63L16可用预报时效比T42延长近1.5 d,大大提高了模式的预报准确率。随着并行计算机的问世,1997年6月1日开始,建立了第三代中期数值预报业务系统T106L19(1.125° ,约为100 km)(杨学胜,2010)。

T63和T106模式除了分辨率不同,系统特征基本一样,它们与T42一样采用多元最优插值客观分析方案,所用观测资料只有常规资料,包括探空、测风、地面/船舶、飞机、卫星测风和测厚、浮标站和高空人造站。T42垂直方向采用 σ 坐标,垂直层次

均匀等分,用非线性绝热正规化初始化,使用串行运行方式;T63/T106 垂直方向采用 $\sigma-p$ 混合坐标,垂直层次非均匀等分,低层更密,采用非线性非绝热正规化初始化,多任务并行;T42 采用谱地形,T106 采用包络地形,并且参数化了地形重力波的拖曳作用。三者的大尺度降水均采用饱和凝结法,次网格尺度的深对流都采用 Kuo 方案,但是 T63/T106 还增加了浅对流参数化;三者的水平扩散都采用四阶线性隐式扩散方案。T42 的湍流交换系数仅取决于混合长和风的切变,T63/T106 则进一步考虑了大气的稳定度。T42 的陆面过程方案在陆面、雪面和海冰上的表面温度采用能量平衡方程计算,在洋面上采用气候平均温度。T63/T106 陆面温度采用热传导方程进行预报,洋面温度与 T42 一样。T42 采用 20 世纪 70 年代美国地球物理流体动力实验室 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL) 的辐射方案,考虑了云、 CO_2 、 O_3 对辐射的吸收、气体的散射和地面的反射作用。T63/T106 采用 20 世纪 80 年代中期的 ECMWF 辐射方案,考虑瑞利散射、云和气溶胶的散射和吸收、地表的吸收和反射,气溶胶随高度变化,且随城市、海洋、沙漠、平流层而不同 (皇甫雪官,1995)。

1.2 消化吸收基础上的改进升级阶段

在引进 ECMWF 全球谱模式的基础上,通过改造向量长度以适应超标量技术的计算机、对勒让德变换、短波辐射等计算瓶颈程序进行优化,采用非同步、非阻塞消息传递机制,以及实现 MPI 与 OpenMP 的混合并行编程等改造,首次以分布与共享相结合的方式在 IBM/SP 高性能计算机上实现了全球谱模式 T213L31 (0.5625° , 约为 60 km) 的高效运行,并研发了与 T213L31 全球谱模式相配套的最优插值并行处理分析系统,建立了后处理系统和检验系统以及自动作业监控系统。在北半球和东亚地区,T213 的可用预报天数比 T106 延长了 1 d;对降水预报也有比较明显的改进,晴雨预报的 TS 评分比 T106 提高了 5%~10%;同时,T213 对西风指数的逐日演变、副热带高压脊点和北界的进退变化、台风的路径预报都较 T106 有了明显的改善 (陈起英等,2004a)。由此,建立了中央气象台第四代中期预报系统 T213,并于 2003 年 9 月正式业务运行,该系统是中国首次在大规模并行计算机环境下建立的全局中期数值预报业务系统。

与 T106L19 相比,T213L31 对主要物理过程参数化方案都作了较大改进。长波和短波辐射方案都进行了整体升级,短波通量用光子路径分布方法,分开考虑辐射传输中散射和吸收过程的贡献。晴天长波通量的计算用比辐射率方法,改进了长波吸收对温度和压力的依赖关系;增加考虑了 T106 模式中没有的 e 型连续吸收。T106 采用包络地形加上重力波拖曳参数化方案,因为包络地形是人为抬高的地形,在同化过程中有很多低层数据会被认为是在地形之下而被抛弃,同时抬高的地形也会造成更多的虚假对流降水,T213 采用的是真实的平均地形,同时考虑了重力波拖曳和阻塞流拖曳来解决原来只有重力波拖曳时总的拖曳力不够的问题。T213 开始采用总体质量通量型的对流参数化方案代替 T106 的大尺度水汽辐合方案,是目前广泛应用的积云对流方案,引入了 T106 方案中没有的积云下沉支、积云动量传输和 中层对流参数化。T213 采用了 Tiedtke(1993)的预报云方案,取代 T106 采用的诊断云方案,使云与水物质收支有更好的一致性,且与辐射、动力过程有更好的相互作用。T106 的陆面过程方案仅对两层土壤温湿层进行预报,第三层是一个土壤温度和湿度随月变化的“气候层”,在积分过程中容易向“气候场”飘移;T213 的四层土壤温湿层都是预报的,增加了 T106 没有考虑的周一季时间尺度的土壤水文过程,并且对土壤水文过程进行了更加物理化的改进 (陈起英等,2004b)。

之后,为满足日益增加的精细化预报需求,对 T213L31 模式进行了升级改进,采用规约线性高斯格点,水平分辨率由 T213 提高到 $T_1.639(0.28125^\circ$, 约为 30 km),垂直层次从 31 层提升到 60 层,模式层顶从 10 hPa 升至 0.1 hPa。伴随着分辨率和模式层顶的提高,引入瑞利摩擦,增加平流层的计算稳定性;通过稳定外插两层半隐式半拉格朗日算法的引入,解决了传统半拉格朗日算法在计算轨迹中点风速和预报方程非线性项时采用时间外插带来的计算噪音,提高了模式积分的稳定性,并延长了模式的积分时间步长 (陈起英等,2007)。同时,以云和降水过程为重点,改进了积云对流参数化和格点云降水方案 (陈起英等,2009)。在建立 $T_1.639$ 系统过程中,建立了地形和下垫面资料处理系统,生成全球谱模式所需的下垫面地理要素场和气象要素场。通过引进谱统计插值 (spectral statistical interpolation, SSD) 以及随后升级的格点统计插值 (gridpoint sta-

tistical interpolation, GSI), 资料同化系统由最优插值实现了向三维变分同化的升级, 并对并行计算效率、背景误差协方差、通道最优选择等进行了优化。在此基础上, 加入动态偏差订正和模式偏差订正项等, 实现了 NOAA15-18 ATOVS 资料的同化。在此过程中, 也建立了 ATOVS 资料的实时收集与入库、质量控制与数据加工流程。中央气象台第五代中期预报系统 T639 于 2008 年 8 月实现业务化。T639 系统比 T213 系统有明显改进, 东亚地区可用预报天数提高达 1 d, 各量级降水的 TS 评分也得到明显提高(管成功等, 2008)。

1.3 谱模式预报效果演变

图 1 为 1990 年 1 月至 2010 年 1 月中央气象台业务中期预报谱模式第 3、5、7 天预报的北半球 500 hPa 高度场距平相关系数(anomaly correlation coefficient, ACC)演变。可以看到, 历经 T42、T63、T106、T213 和 T639 五代中期预报谱模式, 中期数值预报水平在不断提高。以 ACC 达到 0.6 作为可用预报时效的标准, 可用预报天数从 T42 的 3 d 增加到 T639 的 7 d, 增加了 4 d。T 系列从 1991—2016 年服务于全国的天气预报业务, 在逐日天气预报、防灾减灾、重大活动气象保障及服务其他行业中发挥了重要作用。

2 GRAPES_GFS 的发展和业务应用

如前所述, 在“十五”科技攻关项目成果 GRAPES 全球中期数值预报试验系统的基础上, 于 2007 年 7 月开始 GRAPES_GFS 全球预报系统的业务化, 从准业务版本 GRAPES_GFS 1.0 到具有四维变分同化能力的 GRAPES_GFS 2.4 版本, 模式、同化和观测资料应用得到了大幅度提升。目前的业务版本为 GRAPES_GFS 2.4, 业务配置如表 1 所示, 系统的业务应用效果介绍可以参照沈学顺和王建捷(2015)。以下概述 GRAPES 的主要科学技术进展。

2.1 GRAPES 模式动力框架改进

半隐式半拉格朗日时间离散化算法由于可取较长的时间步长和具有较高的计算稳定性, 因而为数值预报业务中心的模式所采用(Mengaldo et al, 2019)。研发 GRAPES 模式时, 设计采用了两时间层的半隐式半拉格朗日积分算法(Temperton et al, 2001; Gospodinov et al, 2001)。两时间层半隐式半拉格朗日算法在隐式处理非线性项和计算拉格朗日轨迹中间点风速时传统上采用时间外推算法, 虽简洁易实现但却存在导致计算噪音的潜在危险(McDonald,

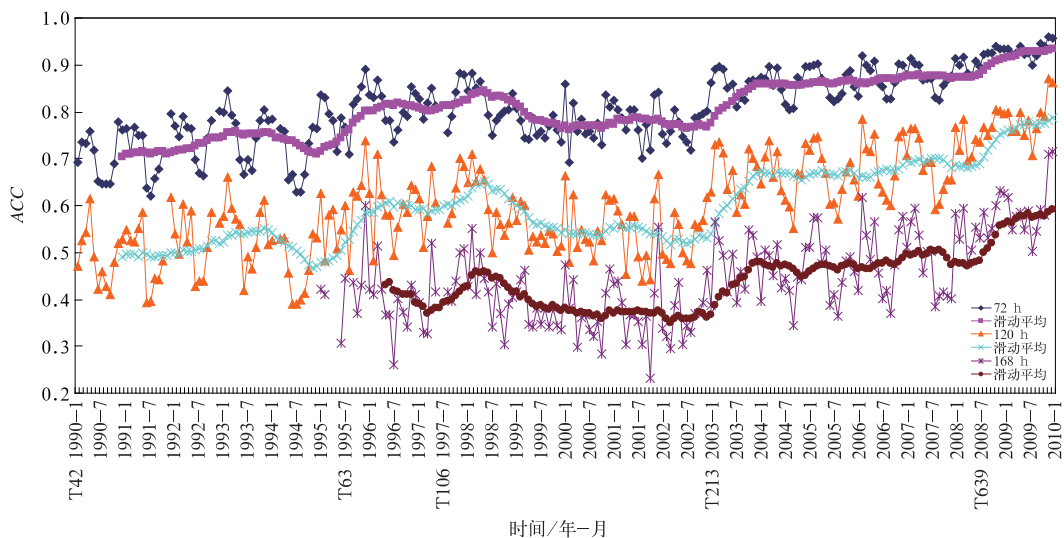


图 1 1990 年 1 月至 2010 年 1 月中国业务中期预报谱模式 500 hPa 高度场 ACC 演变 (细线为逐月演变情况, 粗线为 6 个月滑动平均的结果)

Fig. 1 Time series of ACC of 500 hPa height for 72 h (blue), 120 h (red) and 168 h (light purple) forecasts by operational global spectral model system from January 1990 to January 2010 (Thin lines are for monthly change, and thick lines for 6-month running means)

1991; Hortal, 2002)。在 GRAPES_GFS 1.0 研发成功之后,通过研制非插值半拉格朗日位温垂直平流计算、高精度守恒的标量平流方案、W-damping、水平扩散和平流层瑞利摩擦,以及滤波地形等方案,显著提高了模式动力框架的稳定性和质量守恒性。这些多方位改进的动力框架构成了 GRAPES_GFS 2.0 版本的模式动力框架(沈学顺等, 2017; 苏勇等, 2013)。

表 1 GRAPES_GFS 业务预报系统配置表
Table 1 Configuration of GRAPES_GFS

GRAPES_GFS 全球预报系统	
分辨率	0.25°×0.25°, L60
模式区域	全球, 模式顶 3 hPa
预报时次	00, 06, 12, 18 UTC
预报时长	240 h
同化系统	4DVar
物理过程	(1) 双参数云物理方案
	(2) 宏云物理与预报云方案
	(3) NSAS 积云对流参数化
	(4) RRTMG 长短波辐射
	(5) CoLM 陆面过程
	(6) NMRF 边界层参数化
	(7) 次网格地形重力波拖曳
	(8) 小尺度地形湍流拖曳

2.2 GRAPES 新动力框架开发

如 2.1 节所述, GRAPES 模式动力框架采用了传统的两时间层半隐式半拉格朗日算法, 线性化时采用等温参考大气, 选取较大的半隐式权重系数以保持计算稳定, 算法中非线性项处理及上游点计算时中间点风速通过时间外推来计算, 这些都会影响计算精度, 并带来计算稳定性问题(Simmons and Temperton, 1997; Ritchie and Tanguay, 1996; Temperton et al, 2001)。为解决这些问题, 发展了预估修正半隐式半拉格朗日算法, 并在线性化时引入三维参考大气。GRAPES 预估修正算法在计算非线性项时采用微分方程数值求解时常用的 Adams-Bashforth 二步梯形法(ABT; Kar, 2012; Clancy and Pudykiewicz, 2013), 在隐式计算线性项时采用二阶 Adams-Moulton 方案(AM2; Durran and Blossey, 2012; Clancy and Pudykiewicz, 2013)。ABT-AM2 方案在保持二阶计算精度的同时避免了时间外推计算。构造半隐式算法时, 需要选取参考态将控制方程组线性化。线性化后的方程组将成为大项线性项与小项非线性项之和。如果采用等温大气为参考态, 非线性项有时不一定为小项, 尤其当模式垂直层

次向上扩展时更是如此, 这将给计算精度带来较大影响。为此, 引入了三维参考大气, 保证线性化后的方程组各项具有合理的量级。基于上述新的算法设计, 重写了 GRAPES 动力框架, 将三维参考大气与预估-修正算法结合, 在减小非线性项数量级的同时, 通过迭代算法避免时间外推带来的影响, 也可以使半隐式系数接近 0.5, 计算精度接近二阶(苏勇等, 2018)。GRAPES 新动力框架已经应用于抬高 GRAPES_GFS 模式顶至 0.1 hPa 的开发工作, 该系统已于 2020 年 7 月投入业务应用。

2.3 GRAPES 物理过程改进

在准业务版本 GRAPES_GFS 1.0 基础上, GRAPES 模式物理过程历经两次大幅度升级和一次深入优化, 形成了 GRAPES_GFS 2.0 的物理过程包(沈学顺等, 2017; Chen et al, 2016; Liu et al, 2015; Ma et al, 2018; Chen et al, 2020)。第一次升级包括 RRTMG 辐射和 CoLM 陆面过程的引入, 使得 GRAPES 全球模式具有了相对完备的适用于全球大气环流模拟预报的物理过程包。第二次升级从物理机制上改进了积云对流、边界层过程, 并发展了基于双参数云物理方案的云宏物理方案, 引入了次网格尺度地形重力波参数化(Chen et al, 2016; Liu et al, 2015; Chen et al, 2020)。这些升级大幅度改进了模式对热带降水、全球云量的预报, 减缓了在中国东南部的南风预报偏差, 并改进了模式对形势场的预报。在两次升级的基础上, 进一步研发了预报云量方案, 针对格点尺度云物理过程与积云对流的反馈, 从机理上完成了优化改进(Ma et al, 2018); 改进了边界层过程的调用计算(从 Lorenz 跳点到 Charney-Phillips 跳点), 避免了物理过程倾向插值带来的误差; 在辐射计算中, 考虑了短波辐射太阳高度角订正和气溶胶的直接辐射效应, 改进了陆地上空的温度预报偏差; 采用英国气象局哈德莱中心的海冰分布气候场, 优化了 CoLM 中的海冰分布, 并改进了海冰的反照率; 参考 ECMWF 模式, 改进了陆地地表反照率的计算; 在优化过程中, 修正了湖模式初始化及叶面温度计算中可能引起模式积分不稳定的问题, 强化了模式的计算稳定性。

2.4 全球变分同化框架改进和 4DVar 的发展

GRAPES_GFS 1.0 的同化系统是一个在标准等压面上的三维变分分析系统(3-dimensional

variational assimilation, 3DVar), 分析变量为位势高度、势函数、流函数和相对湿度, 在 17 层标准等压面和 Arakawa-A 网格上分析之后, 通过静力关系导出模式预报变量, 再插值到模式格点上作为初值。由于插值误差, 等压面 3DVar 存在提高精度上的局限性。为此, 研发了与模式格点空间完全匹配的 3DVar 同化框架(薛纪善等, 2012), 并完成了相关模型、平衡约束关系、背景误差协方差、数字滤波等同化框架的优化, 较大幅度提高了同化分析的精度。这些成果形成了版本 GRAPES_GFS 2.0 的 3DVar 同化系统。

在模式空间全球 3DVar 框架基础上, 2008 年开始研发 GRAPES 全球 4DVar, 至 2018 年 7 月实现业务应用, 历经 10 年。在全球非静力 GRAPES 模式基础上, 发展了非静力的切线和伴随模式。为保持在同化时间窗内切线性模式与非线性模式在演变轨迹上较高的近似程度, 研发了基于简化物理过程的切线性物理过程, 包括积云对流、云物理、边界层垂直扩散、次网格地形阻塞流拖曳, 这些研发工作成为 GRAPES 全球 4DVar 系统的重要基础。GRAPES 全球 4DVar 采用增量分析方案, 在代价函数中引入数字滤波作为弱约束以抑制高频重力波, 在系统中设计了多重外循环, 极小化算法采用 Lanczos-CG 算法(Zhang et al, 2019; Liu et al, 2018)。4DVar 分析框架采用了水平和垂直不可分离的背景场误差协方差模型, 水平相关模型采用二阶自回归模型, 相关尺度随高度变化, 垂直相关模型则直接由集合样本统计得到。平衡约束考虑了旋转风和散度风、旋转风和散度风、非平衡散度风和质量场的平衡, 采用动力和统计结合方案实现。GRAPES 全球 4DVar 的业务应用显著大幅度提高了观测资料使用量, 提高了全球分析的质量, 并进一步在各个时效上改善了预报效果。基于 4DVar 成果, 2018 年 7 月 GRAPES_GFS 2.0 升级为 GRAPES_GFS 2.4 版本。

2.5 卫星资料同化技术研发

GRAPES 卫星资料同化技术的系统性研发始于 2004 年, 在早期的 GRAPES 等压面 3DVar 中加入了 NOAA-16 微波温度计 AMSU-A 辐射率资料的直接同化(Zhang et al, 2004)。包括 NOAA 系列(NOAA-15、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18) ATOVS、GPS 掩星资料、静止和极轨卫星云导风等

批量卫星资料同化技术的系统研发和业务应用始于 GRAPES_GFS 的开发(沈学顺等, 2009)。在 GRAPES_GFS 准业务化、业务化过程中, 陆续开发了中国风云气象卫星系列、欧洲 Metop 气象卫星等的 AMSU-A、微波湿度计(MHS)、高光谱大气红外等辐射率(IASI、AIRS)资料, 多平台卫星资料的成功同化是 GRAPES_GFS 预报能力持续提高的重要因素(沈学顺和王建捷, 2015)。伴随 GRAPES_GFS 的不断进步, 在卫星资料同化方面形成了云检测、质量控制、偏差订正、通道选择、稀疏化处理、观测误差协方差估计等各环节相对成熟的方法。

卫星资料偏差订正是影响卫星资料同化效果的重要因素之一。在 GRAPES_GFS 研发初期, 针对卫星探测仪器普遍存在的系统性偏差, 采用了 Harris and Kelly(2001)的偏差订正方案。随后依据 GRAPES 模式的偏差特征, 发展了有约束卫星资料偏差订正方案(Han, 2014; Han and Bormann, 2016)。该方案减小了模式的背景偏差对卫星辐射率资料偏差订正的影响, 较好地去除了资料本身的系统性偏差, 更好地利用了观测信息。业务 GRAPES_GFS 是不间断的同化预报循环, 对卫星资料质量的起伏非常敏感。为了解决在实时业务运行中由于卫星探测仪器老化、偏差订正方程系数退化以及季节变化等原因造成的观测数据漂移问题, 张华等(2018)开发了适用于卫星辐射率资料的动态偏差订正方案, 采用一维变分方法, 利用经过同化模式质量控制的近期卫星观测数据对偏差订正系数进行动态更新。

2.6 GRAPES_GFS 预报技巧演变

图 2 是 2010 年 1 月至 2019 年 6 月 GRAPES_GFS 预报第 5 天 500 hPa 高度场 ACC 的时间序列, 同时在图中也给出了 ECMWF、NCEP 的预报结果。可以看到, 2010 年以来 GRAPES_GFS 对形势场的预报技巧逐步提高, 虽与 ECMWF、NCEP 还有差距, 但逐年预报技巧的不断提高反映了 GRAPES_GFS 在模式、同化以及观测资料应用等诸方面的巨大进步, 如 2.1~2.5 节中所述。近些年, 以 GRAPES_GFS 为核心基础的 GRAPES 模式预报产品也得到越来越广泛的应用(宫宇等, 2018; 钱媛等, 2019; 王新敏和栗晗, 2020)。

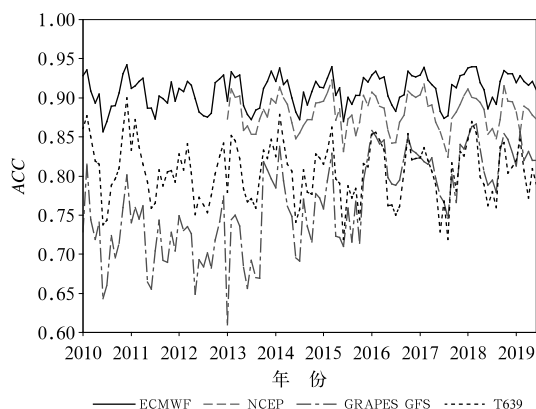


图 2 2010 年 1 月至 2019 年 6 月 GRAPES_GFS 预报第 5 天 500 hPa 高度场 ACC 演变

Fig. 2 Time series of ACC of 500 hPa height for the 5th day forecast by GRAPES_GFS from January 2010 to June 2019

3 中央气象台全球预报系统的未来发展

ECMWF 一直走在全球数值预报技术和预报质量的前沿。Magnusson and Källén(2013)系统总结了 ECMWF 预报技巧逐年提高的原因,指出:预报模式的不断改进和分辨率的提高、资料同化技术的进步以及日益增加的观测资料(尤其是卫星资料),构成了三大主要贡献因素。这三大要素也正是今后持续发展 GRAPES_GFS 的着重点。

从现状的 GRAPES_GFS 预报能力来看,虽然与引进的 T639 相比有一定优势,但与国际先进数值预报业务中心的全球预报系统相比,预报技巧尚有差距。围绕上述三大要素,今后努力的重点可以概括为以下几个方面:

(1) 进一步发展 GRAPES 全球 4DVar 技术,加快实现集合预报信息在 4DVar 中的应用,提高同化分析的精度。

(2) 发展先进的卫星资料同化技术。重点发展卫星变分质量控制、变分偏差订正技术,并发展受地表影响的微波资料在 GRAPES 中的同化应用。

(3) 发展陆面、积雪、海洋等资料分析同化技术,为 GRAPES_GFS 提供高质量的下垫面初边界值。

(4) 继续改进 GRAPES 动力框架的计算精度、计算效率和可扩展性,并继续深入优化 GRAPES 模式物理过程,实现 10~15 km 分辨率的全球预报系

统的业务应用。

(5) 为适应未来精细化和无缝隙天气预报、气候预测业务需求,以及未来异构众核高性能计算机发展的挑战,研发高精度可扩展守恒的大气模式新框架和尺度自适应物理过程,并逐步开展耦合数值预报技术的研究,从而迎接未来局地百米、全球千米级分辨率和耦合数值预报的发展挑战。

参考文献

- 陈起英,管成功,姚明明,等,2007. 全球中期模式升级关键技术研发和预报试验[J]. 气象学报,65(4):478-492. Chen Q Y, Guan C G, Yao M M, et al, 2007. Development of key techniques and experiments in global model upgrading[J]. Acta Meteor Sin, 65(4):478-492(in Chinese).
- 陈起英,李泽椿,管成功,等,2009. T213L31 全球模式的云和对流参数化方案改进试验[J]. 气象学报,67(2):227-240. Chen Q Y, Li Z C, Guan C G, et al, 2009. The revised cloud and convective parameterization schemes in the operational T213L31 global model of China and associated forecast experiments[J]. Acta Meteor Sin, 67(2):227-240(in Chinese).
- 陈起英,金之雁,伍湘君,等,2004a. 中期数值预报系统 T213L31 在 IBM/SP 高性能计算机上的建立[J]. 应用气象学报,15(5):523-533. Chen Q Y, Jin Z Y, Wu X J, et al, 2004a. Foundation of medium-range numerical forecast system T213L31 on high performance computer IBM/SP[J]. J Appl Meteor Sci, 15(5):523-533(in Chinese).
- 陈起英,姚明明,王雨,2004b. 国家气象中心新一代业务中期预报模式 T213L31 的主要特点[J]. 气象,30(10):16-21. Chen Q Y, Yao M M, Wang Y, 2004b. A new generation of operational medium-range weather forecast model T213L31 in National Meteorological Center[J]. Meteor Mon, 30(10):16-21(in Chinese).
- 宫宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象,44(9):1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast [J]. Meteor Mon, 44(9):1148-1159(in Chinese).
- 顾震潮,1959. 我国数值预报的成就[J]. 气象学报,30(3):236-242. Gu Z C, 1959. Achievement of numerical prediction in China[J]. Acta Meteor Sin, 30(3):236-242(in Chinese).
- 管成功,陈起英,佟华,等,2008. T639L60 全球中期预报系统预报试验和性能评估[J]. 气象,34(6):11-16. Guan C G, Chen Q Y, Tong H, et al, 2008. Experiments and evaluations of global medium range forecast system of T639L60 [J]. Meteor Mon, 34(6):11-16(in Chinese).
- 郭肖容,张玉玲,阎之辉,等,1995. 有限区分析预报系统及其业务应用[J]. 气象学报,53(3):306-318. Guo X R, Zhang Y L, Yan Z H, et al, 1995. The limited area analysis and forecast system and its operational application[J]. Acta Meteor Sin, 53(3):306-318(in Chinese).

- 皇甫雪官,1995. T63 中期数值天气预报谱模式[J]. 气象,21(5):18-21. Huangfu X G,1995. The medium range numerical weather prediction spectral model T63[J]. Meteor Mon,21(5):18-21(in Chinese).
- 李泽椿,2010. 回顾数值预报业务的建立发展历程[C]. 难忘的记忆-中央气象台60周年征文选:11-16. Li Z C,2010. Review of history of NWP operation[C]. Unforgettable Memory-Essay Selection of National Meteorological Center's 60th Anniversary:11-16(in Chinese).
- 钱媛,马旭林,郭启云,等,2019. 基于 FNL 和 GRAPES 分析场的探空温度数据的误差分析[J]. 气象,45(10):1464-1475. Qian Y, Ma X L, Guo Q Y, et al,2019. Error analysis of sounding temperature data based on the FNL and GRAPES analysis fields [J]. Meteor Mon,45(10):1464-1475(in Chinese).
- 沈学顺,韩威,孙健,等,2009. GRAPES_GFS 全球数值预报系统准业务化验收技术报告[R]. 北京:中国气象局数值模式创新基地:150. Shen X S, Han W, Sun J, et al,2009. Technical report for quasi-operation of GRAPES_GFS global numerical prediction system[R]. Beijing:Innovation base of Numerical Model of the China Meteorological Administration:150(in Chinese).
- 沈学顺,苏勇,胡江林,等,2017. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化[J]. 应用气象学报,28(1):1-10. Shen X S, Su Y, Hu J L, et al,2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system[J]. J Appl Meteor Sci,28(1):1-10(in Chinese).
- 沈学顺,王建捷,2015. GRAPES_GFS 技术报告[R]. 北京:中国气象局数值预报中心:232. Shen X S, Wang J J,2015. Technical report of GRAPES_GFS[R]. Beijing:Center of Numerical Weather Prediction of CMA:232(in Chinese).
- 苏勇,沈学顺,陈子通,等,2018. GRAPES_GFS 中三维参考大气的研究:理论设计和理想试验[J]. 气象学报,76(2):241-254. Su Y, Shen X S, Chen Z T, et al,2018. A study on the three-dimensional reference atmosphere in GRAPES_GFS: theoretical design and ideal test[J]. Acta Meteor Sin,76(2):241-254(in Chinese).
- 苏勇,沈学顺,彭新东,等,2013. PRM 标量平流方案在 GRAPES 全球预报系统中的应用[J]. 大气科学,37(6):1309-1325. Su Y, Shen X S, Peng X D, et al,2013. Application of PRM scalar advection scheme in GRAPES global forecast system[J]. Chin J Atmos Sci,37(6):1309-1325(in Chinese).
- 陶诗言,赵思雄,周晓平,等,2003. 天气学和天气预报的研究进展[J]. 大气科学,27(4):451-467. Tao S Y, Zhao S X, Zhou X P, et al,2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast[J]. Chin J Atmos Sci,27(4):451-467(in Chinese).
- 王新敏,栗哈,2020. 多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J]. 气象,46(6):753-764. Wang X M, Li H,2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models[J]. Meteor Mon,46(6):753-764(in Chinese).
- 薛纪善,陈德辉,2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社:383. Xue J S, Chen D H,2008. Scientific Design and Application of GRAPES Numerical Prediction System[M]. Beijing:Science Press:383(in Chinese).
- 薛纪善,刘艳,张林,等,2012. GRAPES 全球三维变分同化系统模式变量分析版[Z]. 中国气象局数值预报中心技术文档. Xue J S, Liu Y, Zhang L, et al,2012. Version of global 3DVar system at model space[Z]. Documentation of Numerical Weather Prediction Center of CMA(in Chinese).
- 闫之辉,赵俊英,朱琪,等,1997. 高分辨率有限区业务数值预报模式及降水预报试验[J]. 应用气象学报,8(4):393-401. Yan Z H, Zhao J Y, Zhu Q, et al,1997. High resolution limited area operational numerical prediction model and precipitation forecast experiment[J]. Appl Meteor Sci,8(4):393-401(in Chinese).
- 杨学胜,2010. 中期数值预报系统任重道远[C]. 难忘的记忆-中央气象台60周年征文选:79-80. Yang X S,2010. Medium-range numerical forecast system has a long way to go[C]. Unforgettable Memory-Essay Selection of National Meteorological Center's 60th Anniversary:79-80(in Chinese).
- 张华,王雪曼,王丹,2018. 卫星辐射率资料一维变分动态偏差订正方案[Z]. 中国气象局数值预报中心技术文档:25. Zhang H, Wang X M, Wang D,2018. 1DVar dynamic bias correction of satellite radiance[Z]. Documentation of Numerical Weather Prediction Center of CMA:25(in Chinese).
- 中央气象台数值预报组,1965. 我国的数值预报业务工作[J]. 科学通报,16(2):131-133. Numerical Prediction Team of Central Meteorological Bureau,1965. Operational tests of numerical prediction in China[J]. Chin Sci Bull,16(2):131-133(in Chinese).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G,2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature,525(7567):47-55.
- Blumen W, Washington W M,1973. Atmospheric dynamics and numerical weather prediction in the People's Republic of China 1949-1966[J]. Bull Amer Meteor Soc,54(6):502-518.
- Chen J, Ma Z S, Li Z, et al,2020. Vertical diffusion and cloud scheme coupling to the Charney-Phillips vertical grid in GRAPES global forecast system[J]. Quart J Roy Meteor Soc,146(730):2191-2204.
- Chen Q Y, Shen X S, Sun J, et al,2016. Momentum budget diagnosis and the parameterization of subgrid-scale orographic drag in global GRAPES[J]. J Meteor Res,30(5):771-788.
- Clancy C, Pudykiewicz J A,2013. A class of semi-implicit predictor-corrector schemes for the time integration of atmospheric models[J]. J Computat Physics,250:665-684.
- Durrant D R, Blossey P N,2012. Implicit-explicit multistep methods for fast-wave-slow-wave problems[J]. Mon Wea Rev,140(4):1307-1325.
- Gospodinov I G, Spiridonov V G, Geleyn J F,2001. Second-order accuracy of two-time-level semi-Lagrangian schemes[J]. Quart J Roy Meteor Soc,127(573):1017-1033.
- Han W,2014. Constrained variational bias correction for satellite radiance assimilation[C]//Proceedings of the 19th International TOVS Study Conference. Jeju Island, South Korea.
- Han W, Bormann N,2016. Constrained adaptive bias correction for

- satellite radiance assimilation in the ECMWF 4D-Var system [R]. ECMWF Technical Memorandum, No. 783, ECMWF.
- Harris B A, Kelly G, 2001. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(574):1453-1468.
- Hortal M, 2002. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128(583):1671-1687.
- Kar S K, 2012. An explicit time-difference scheme with an Adams-Bashforth predictor and a trapezoidal corrector[J]. *Mon Wea Rev*, 140(1):307-322.
- Kühnlein C, Deconinck W, Klein R, et al, 2019. FVM 1. 0: a non-hydrostatic finite-volume dynamical core for the IFS[J]. *Geosci Model Dev*, 12(2):651-676.
- Liu K, Chen Q Y, Sun J, 2015. Modification of cumulus convection and planetary boundary layer schemes in the GRAPES global model[J]. *J Meteor Res*, 29(5):806-822.
- Liu Y Z, Zhang L, Lian Z H, 2018. Conjugate gradient algorithm in the four-dimensional variational data assimilation system in GRAPES[J]. *J Meteor Res*, 32(6):974-984.
- Ma Z S, Liu Q J, Zhao C F, et al, 2018. Application and evaluation of an explicit prognostic cloud-cover scheme in GRAPES global forecast system[J]. *J Adv Model Earth Syst*, 10(3):652-667.
- Magnusson L, Källén E, 2013. Factors influencing skill improvements in the ECMWF forecasting system[J]. *Mon Wea Rev*, 141(9):3142-3153.
- Melvin T, Benacchio T, Shipway B, et al, 2019. A mixed finite-element, finite-volume, semi-implicit discretization for atmospheric dynamics; Cartesian geometry[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(724):2835-2853.
- Mengaldo G, Wyszogrodzki A, Diamantakis M, et al, 2019. Current and emerging time-integration strategies in global numerical weather and climate prediction[J]. *Arch Comput Methods Eng*, 26(3):663-684.
- McDonald A, 1991. The origin of noise in semi-Lagrangian integrations[C]//Seminar Proceedings on Numerical Methods in Atmospheric Models. ECMWF:308-334.
- Ritchie H, Tanguay M, 1996. A comparison of spatially averaged eulerian and semi-Lagrangian treatments of mountains[J]. *Mon Wea Rev*, 124(1):167-181.
- Simmons A J, Temperton C, 1997. Stability of a two-time-level semi-implicit integration scheme for gravity wave motion[J]. *Mon Wea Rev*, 125(4):600-615.
- Temperton C, Hortal M, Simmons A, 2001. A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(571):111-127.
- Tiedtke M, 1993. Representation of clouds in large-scale models[J]. *Mon Wea Rev*, 121(11):3040-3061.
- Zhang H, Xue J S, Zhu G F, et al, 2004. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiances to typhoon track prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 21(2):283-290.
- Zhang L, Liu Y Z, Liu Y, et al, 2019. The operational global four-dimensional variational data assimilation system at the China Meteorological Administration[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(722):1882-1896.