

沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化. 应用气象学报, 2017, 28(1): 1-10.
DOI: 10.11898/1001-7313.20170101

GRAPES_GFS 全球中期预报系统的研发和业务化

沈学顺* 苏勇 胡江林 王金成 孙健 薛纪善 韩威 张红亮
陆慧娟 张华 陈起英 刘艳 刘奇俊 马占山 金之雁 李兴良
刘琨 赵滨 周斌 龚建东 陈德辉 王建捷

(中国气象局数值预报中心, 北京 100081)

摘 要

该文回顾了中国气象局全球中期数值天气预报系统 GRAPES_GFS 的研发历程, 重点介绍了近年来在 GRAPES_GFS 研发过程中的重要进展, 概要阐述了这些进展对 GRAPES_GFS 业务化的贡献。动力框架方面的改进主要包括位温垂直平流的算法、极区滤波方案、标量平流方案、垂直速度衰减(damping)算法、提高模式分辨率等, 改善了模式框架的稳定性、计算精度以及质量守恒性。物理过程方面的改进主要包括 RRTMG 辐射方案、CoLM 陆面过程方案、积云对流、边界层过程、双参数云物理方案, 以及物理过程的调用计算等, 全面提升了模式物理过程的预报能力。全球三维变分同化方面, 研发了模式空间三维变分(3DVar)系统、资料质量控制和偏差订正技术、卫星资料同化方面的相关技术等。同时, 对目前 GRAPES_GFS2.0 的预报能力进行了评估, 总体来说, 该系统各项预报指标全面超越 GRAPES_GFS1.0, 与 T639 相比等压面要素预报在对流层也有明显优势, 降水、2 m 温度等预报也优势明显。

关键词: GRAPES_GFS; 动力框架; 物理过程; 三维变分同化

引 言

全球中期数值天气预报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提供边界条件和背景信息, 也是全球集合预报的基础。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^[1]。因此, 发展和不断改进全球中期预报系统是世界各天气预报业务中心的重点任务^[2]。

全球区域一体化同化预报系统 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)是在科学技术部和中国气象局支持下我国自主发展的数值预报系统^[3]。至“十五”攻关结束, 完成了 GRAPES 系统^[4]、同化等基础算法和全球/区域预报原

型系统的研发, 其中 GRAPES 中尺度预报系统实现了业务化^[5]。之后, 围绕提高 GRAPES 中尺度系统的业务预报能力、建立 GRAPES 全球中期预报系统并实现业务应用, 对模式、同化系统和以卫星资料为重点的观测资料同化等技术的深入研发和改进成为重要任务。

在“十一五”科技支撑计划的支持下, 建立了 GRAPES 全球同化预报系统试验版。2007 年 7 月面向业务应用, 开始系统地建立和优化 GRAPES_GFS(GRAPES Global Forecast System)全球数值预报系统。在中国气象局数值模式创新基地科研业务人员的共同努力下, 2009 年 3 月完成了 GRAPES_GFS 的前期试验, 并在业务环境建立了运行试验平台, 确定了 GRAPES_GFS 的准业务版本 GRAPES_GFS1.0^[6]。2009 年 3 月 31 日中国气象局预测减灾

2016-03-22 收到, 2016-10-12 收到再改稿。

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAC22B00), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006013, GYHY201106008, GYHY201206007, GYHY201406005), 中国气象局数值预报 GRAPES 发展专项(GRAPES-FZZX-2016-15)

* email: shenxs@ema.gov.cn

司组织召开 GRAPES_GFS1.0 准业务化运行专家评审会,并通过专家评审。专家组认为,GRAPES_GFS1.0 达到了规定要求,系统运行稳定,分析和预报结果合理,对影响我国的一些主要天气系统有较好的预报能力,整体方案先进,预报能力与当时同等分辨率的业务数值预报系统 T213 相当,具有业务应用的潜力和实用性,达到了准业务运行的条件。

但准业务版本 GRAPES_GFS1.0 在之后的业务运行过程中,表现出形势场预报技巧不稳定、前 72 h 预报技巧衰减过快、同化得到的初值精度偏低、预报偏差较大、在中国大陆地区预报降水偏弱 TS(threat score)评分不高等现象,与 2009 年投入业务的 T639 相比有一定差距,尤其是在东亚地区的预报技巧偏低,特别是模式预报出现不稳定的个例较多。究其原因,与 GRAPES_GFS 及同化系统中的一些基础算法和技术细节没有得到合理、正确解决有关。

就全球模式而言,动力框架^[7-8]的半隐式半拉格朗日算法的计算精度偏低以及未考虑如何提高质量守恒性、与半拉格朗日方案有关的计算噪声处理在算法设计中未得到充分考虑、大地形处理及次网格地形动力作用考虑不足、模式物理过程优化不足、与云和降水有关的物理过程之间的相互协调和平衡未作细致的评估和调整等问题,严重影响了模式的预报稳定性和精度。就全球同化系统而言,准业务版本所采用的等压面分析导致同化到模式空间存在不必要的插值误差以及分析变量和预报变量不一致、背景误差协方差缺乏合理估计和优化、观测资料的质量控制和偏差订正技术粗糙、卫星资料的高质量同化应用技术欠缺等问题,影响了同化精度。

因此,在 GRAPES_GFS1.0 准业务化之后,开展了 3 个阶段的攻关。第 1 阶段以完善模式物理过程为代表,辐射方案引入 RRTMG(the Rapid Radiative Transfer Model for GCMs)提高辐射计算精度,以 CoLM(Common Land Model)陆面模式代替简单的 5 层热扩散模型(SLAB),引入次网格地形重力波参数化,并对积云对流参数化进行了改进和优化,这些工作使 GRAPES_GFS 具备了适用于全球预报的一套物理过程。第 2 阶段重点攻克模式空间 GRAPES 三维变分同化系统以避免同化后插值到模式空间带来的误差,并在改进卫星资料同化应用效果的同时增加更多卫星资料的同化应用。第 3 阶段以同化和模式协同攻关为代表,重点解决动力

框架中部分影响计算精度的问题、以云-降水为重点的物理过程协调性改进和大幅度升级优化、部分影响模式计算稳定性的动力框架和物理过程中的问题、同化系统中风压平衡问题、背景误差协方差随季节变化问题、同化系统中背景廓线的精确插值和求解、观测资料的质控和偏差订正以及更多卫星资料的同化应用等问题。

以上问题的解决,大幅度提高了 GRAPES 的预报精度和稳定性,同化精度也得到了较大改进。据此,建立了水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、垂直方向为 60 层的预报系统版本 GRAPES_GFS2.0。利用 2013 年 9 月—2015 年 8 月共 2 年的回报试验,对 GRAPES_GFS2.0 的预报能力进行了综合评估。与 GRAPES 准业务模式、T639 全球业务模式以及中国气象局获得的 ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecast)、NCEP(National Center for Environment Prediction)和日本气象厅等国际主流同期业务预报产品的对比分析表明,与 ECMWF、日本等国际主要数值预报产品相比,GRAPES_GFS2.0 预报形势场统计检验指标虽与国际一流水准尚存在一定差距,但相对 T639 已有较为明显改进,且降水的小雨预报能力已经接近 ECMWF 的预报水平,不同阈值下的模式空报问题得到抑制,中国区域的降水预报形势,特别是中国东南部主降水区的形势与实况更为接近。

本文在简要回顾 GRAPES_GFS 研发历程的同时,简单评述该模式及同化的主要技术进步。

1 主要研发进展

1.1 全球模式动力框架改进

GRAPES 动力框架采用两时间层的半隐式半拉格朗日积分算法^[9-10]。在构造时间离散化方案时,预报方程右端项沿拉格朗日轨迹的积分近似为右端项在上游点和到达点的权重平均。为保持积分稳定性,GRAPES 通常取权重系数 $1/2 < \alpha < 1$,时间离散化精度仅为一阶。另外,计算上游点和方程右端非线性项时需要时间外插,这是造成模式计算噪声并进一步导致个别情况计算不稳定的原因之一^[11-12]。

为此,GRAPES_GFS 动力框架重点围绕计算精度和稳定性,完成了 7 个方面的改进,包括非插值半拉格朗日位温垂直平流计算、极区滤波方案的优

化、引入地形滤波考虑有效地形缓解气压梯度力的计算误差、高精度守恒的标量平流方案研发和优化、质量守恒订正、引入垂直速度衰减(damping)技术抑制计算噪音、平流层引入瑞利摩擦效应。这些改进显著提高了模式动力框架的稳定性、质量守恒性和计算精度。集成以上改进,近年来,动力框架历经 3 次升级,并通过批量预报试验确认了各项改进工作及其集成的效果。

2014 年年底的第 1 次升级包括以下 4 点内容:

①提高模式垂直分辨率,模式垂直层次由 36 层增加至 60 层,层顶高度由 32500 m 提高至 36354 m;提高模式水平分辨率,由 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 提高至 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。模式分辨率的提高对形势场预报有弱的正效果,对预报误差的减小较为显著。②研发了非插值半拉格朗日位温垂直平流,提高了温度和垂直速度的计算精度,大幅度改进了模式的质量守恒性,增加了模式的稳定性。③发展新的 GCR 加速算法,

提高了模式的计算效率。④模式地形滤波,有效缓解了大地形处气压梯度力的计算误差,改进了东亚地区形势场的预报效果。

表 1 给出了此次动力框架升级对模式预报性能的影响。其中,L60a25 表示垂直为 60 层、水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的模式版本,相对于提高分辨率之前的 L36a50,500 hPa 高度场距平相关系数得到大幅度提升,北半球预报技巧提高约 0.6 d,东亚区提高约 1.2 d。可以看出,分辨率的提高有一定贡献,更为重要的贡献来自于模式动力框架的改进。

GRAPES_GFS 的水平和垂直分辨率提高以后,模式积分溢出个例明显增加。如垂直为 60 层、水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的模式版本,以 NCEP FNL(final analysis)资料为初值进行 192 h 预报,2013 年全年的 365 个样本中,大约有 20 个个例积分溢出。溢出的个例多出现在季节转换期间,伴随着风速过大、垂直速度场的噪音等问题。

表 1 不同分辨率下批量预报试验 1 个月平均的距平相关系数

积分时间/h	北半球 500 hPa			东亚 500 hPa		
	L36a50	L60a50	L60a25	L36a50	L60a50	L60a25
0	1	1	1	1	1	1
24	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
48	0.97	0.98	0.98	0.96	0.98	0.98
72	0.94	0.96	0.96	0.92	0.94	0.95
96	0.89	0.92	0.93	0.84	0.89	0.89
120	0.79	0.83	0.84	0.75	0.82	0.82
144	0.69	0.75	0.75	0.67	0.75	0.74
168	0.58	0.66	0.66	0.58	0.69	0.69
192	0.48	0.57	0.57	0.47	0.62	0.59

针对上述问题,研发了垂直速度的 damping 技术^[13-14],调整了水平扩散在高层风速大值处的扩散系数,优化了瑞利摩擦方案,并对 PRM(piece-wise rational method)标量平流方案的并行算法和极区处理进行了优化。2015 年 8 月对这些改进进行了集成后的批量预报试验,以 NCEP FNL 资料为初值的 2013 年 9 月—2014 年 8 月 1 年回算试验表明,365 个个例全部完成了预报 192 h 的稳定积分。可以说,这次集成大幅度提高了模式的积分稳定性,并对形势场预报技巧也有弱的正效果(图略)。

虽然通过改进位温半拉格朗日平流算法较好地缓解了模式质量严重不守恒的问题,但与 ECMWF(积分 240 h 模式总质量大约增加 0.01%)等模式相比,GRAPES_GFS 质量守恒(240 h 积分损失约

0.8%)依然会影响模式对副热带高压等的预报。为此,研发了质量守恒的修正方案,并改进了极点 v 风的计算精度。这两项工作的集成批量试验表明:低层高度场的预报偏差明显减小,天气系统偏弱的问题有所缓解,尤其对副热带高压的预报有所提高。

1.2 全球模式物理过程改进

在准业务版本 GRAPES_GFS1.0 基础上,GRAPES_GFS 物理过程历经两次大幅度升级和一次深入优化,形成了 GRAPES_GFS2.0 的物理过程包。第 1 次升级包括 RRTMG 辐射^[15-17]和 CoLM 陆面过程^[18]的引入,使 GRAPES_GFS 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 2 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 mac-

ro-cloud 方案,引入了次网格尺度地形重力波参数化^[19-21]。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;改进了边界层过程的调用计算(从 Lorenz 跳点到 Charney-Phillips 跳点)^[22],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 Hadley 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。

表 2 给出了(深、浅)积云对流和边界层参数化升级后对模式预报的改进情况,分别为南北半球 500 hPa 高度场的距平相关系数和均方根误差,基于 NCEP FNL 分析场为初值的 2009 年 7 月的批量预报试验进行。从 500 hPa 高度场的距平相关系数和预报均方根误差看,考虑物理机制更为完善的积云对流和边界层过程之后(具体物理机制的改进详见表 3),对形势场的预报有较为显著的改进。

表 2 2009 年 7 月批量预报试验的统计检验结果

Table 2 Statistics verification for forecast experiments in Jul 2009

积分时间/h	北半球 500 hPa				南半球 500 hPa			
	距平相关系数		均方根误差		距平相关系数		均方根误差	
	ORI	NEW	ORI	NEW	ORI	NEW	ORI	NEW
0	1	1	2	2	1	1	4	3
24	0.97	0.98	8	8	0.98	0.99	13	11
48	0.96	0.97	17	15	0.97	0.98	24	22
72	0.93	0.95	26	23	0.94	0.96	39	36
96	0.86	0.89	36	32	0.89	0.91	55	50
120	0.76	0.80	46	41	0.80	0.83	73	67
144	0.67	0.72	56	50	0.72	0.76	91	84
163	0.54	0.60	63	57	0.61	0.65	104	97
192	0.45	0.52	69	63	0.49	0.54	118	111

注:ORI 为未更新时的预报结果,NEW 为更新积云对流和边界层参数化之后的预报结果。

表 3 积云对流和边界层的改进物理方案

Table 3 The improvement of cumulus convection and boundary layer scheme

物理过程方案	改进点
深对流	①基于局地 CFL 条件的云底最大容许质量通量 ^[23] ②引入有组织的卷入 ^[24] ③考虑由于积云对流引起的气压梯度力变化而带来的动量输送 ^[25-26]
浅对流	①湍流扩散型的方案改为质量通量型 ②云底质量通量计算改为地表浮力通量的函数 ^[27] ③夹卷率计算改为 Siebesma(2003)方案 ^[28]
边界层	①考虑层积云顶由于辐射冷却引起的湍流混合 ②对于夜间稳定边界层,将基于近地层稳定度函数的扩散计算改为局地扩散方案

1.3 全球三维变分同化改进

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(three-dimensional variational assimilation, 3DVar),分析变量为位势高度、风和相对湿度,在 17 层标准等压面和 Arakawa-A 网格上分析后,将导出模式预报变量插值到模式

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。因此,在 GRAPES_GFS1.0 准业务运行之后,全球 3DVAR 围绕提高分析精度的 3 个关键问题开展了攻关研究,包括研发模式空间 3DVar 以避免分析空间到模式空间的插值误差、发展精细化的观测资料质控和偏差订正

技术以实现高质量观测资料的同化以及研发以卫星高光谱红外探测仪为重点的更多卫星资料同化技术。

针对模式空间 3DVar 同化框架的研发和优化,在完成等压面分析向模式空间分析框架改写的同时,完成了 6 项关键技术研发,较大幅度提高了同化分析精度,包括:①完成了不可分离的水平和垂直相关的理论研究和技术方案,为提高框架精度奠定了基础;②改进了系统梯度计算精度;③研究和建立了模式面上的平衡方程求解方案;④研究并实现了动力-统计相结合的平衡方程;⑤采用非等距差分显著提高了背景温度廓线的计算精度,解决了在模式垂直分层厚度剧烈变化层次上背景温度廓线误差大的问题;⑥更新了背景误差协方差。另外,通过重构和优化数字滤波模块,提高了同化预报循环系统的稳定性和计算效率。

针对观测资料质量控制和偏差订正,研发了以下 4 项技术,包括:①根据 GRAPES_GFS 的特点,借鉴数学物理反问题中“极小模解”的思想,采用卫星辐射率资料定标的信息作为先验约束,发展了有约束的卫星资料偏差订正方案。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,较好地剔除了资料本身的系统性偏差,更好地利用观测信息,提高了分析精度。②针对 GNSS/RO (Global Navigation Satellite System/Radio Occultation) 掩星折射率资料存在的负偏差,基于 NECP FNL 或 ERA-Interim 资料估计的偏差发展了偏差订正方法。经过偏差订正后的 GNSS 掩星折射率,同化后高度场的分析偏差和预报偏差显著减小。同时,改进了掩星折射率观测算子中的插值方案。③ GRAPES_3DVar 中背景场检查质量控制方案中假设亮温的背景误差和观测误差相同,用观测误差代替背景误差,忽略了亮温资料背景误差随高度、纬度和时间变化等重要特征,造成大量资料被剔除。为此,发展了控制变量随机扰动方法,解决了 GRAPES_3DVar 亮温资料质量控制中的严重不足,改进了 AMSU-A 亮温资料的质量控制,显著提高了亮温资料的使用率。④研发并实现了探空资料的变分质量控制,提高了探空资料同化应用的效果。变分质量控制与变分分析同步进行,在极小化迭代过程中进行质量控制,并作为变分问题解的一部分,所用的观测资料通过观测算子、背景场约束和模式约束影响质量控制结果,保证了质量控制与同化分析的相互

作用和高度协调一致性。

针对卫星资料同化,从云检测、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发展了一套相对成熟的方法,尤其是实现了高光谱辐射率资料的同化关键技术,在 GRAPES_3DVar 中增加了多种卫星观测资料的同化能力。增加的卫星资料包括:①AIRS 高光谱辐射率资料,②IASI 高光谱辐射率资料,③ATMS 微波辐射率资料,④ASCAT 海面风场资料,⑤Metop-B AMSU-A 辐射率资料,⑥FY-3C MWTS 微波辐射率资料。

模式空间 3DVar 的建立和框架细节优化、观测资料的高质量同化应用等为 GRAPES_GFS 初值精度的大幅度提高奠定了重要基础^[29]。图 1 给出了 2010—2015 年 GRAPES_GFS 3DVar 同化与 ERA-Interim 相比精度逐年提高的情况,同时也给出了 NCEP FNL 和 T639 在 2015 年与 ERA-Interim 比较的结果。可以清楚看到 GRAPES_GFS 3DVar 分析精度的巨大进步。

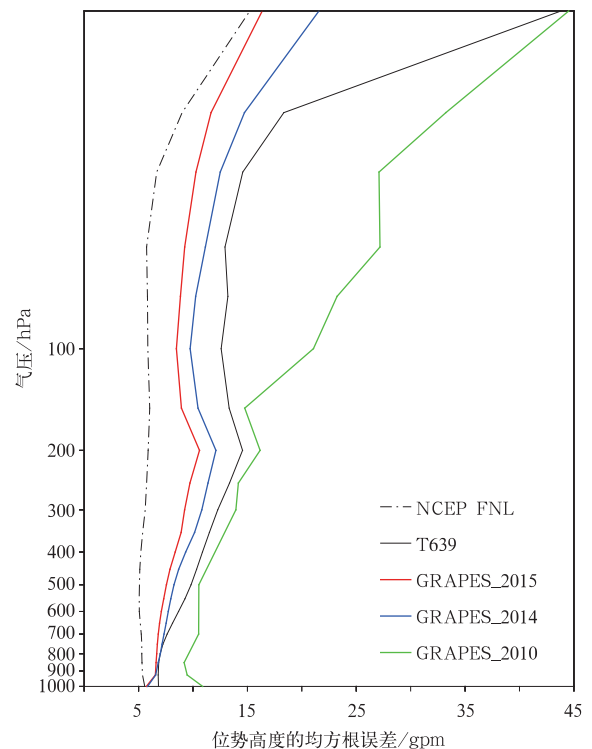


图 1 年平均北半球位势高度分析场与 ERA-Interim 再分析资料相比较的均方根误差随高度的分布

Fig. 1 Annual mean of geopotential height root mean square error analyzed by GRAPES_3DVar against ERA-Interim averaged over the Northern Hemisphere

2 GRAPES_GFS 2.0 预报能力评估

利用 2013 年 9 月—2015 年 8 月共 2 年同化预报循环试验结果,从等压面要素预报、地面要素预报、多业务中心预报技巧对比 3 个方面对 GRAPES_GFS2.0 进行检验评估和比对分析。

对 GRAPES_GFS2.0 与现行业务 T639 模式的两年循环预报结果在全球 4 个主要评估区域范围内,针对高度场、温度场、风场在各个等压面上的距平相关系数和均方根误差进行统计检验,具体评分值略。结果显示,GRAPES_GFS2.0 各项指标几乎都优于 T639,只是在热带和东亚地区温度及高度场部分层次及预报时刻上表现出较小的差距。特别是对于风场预报,GRAPES_GFS2.0 较 T639 有更为显著的改进。

表 4 给出北半球及东亚地区 500 hPa 高度场距平相关系数不同预报时刻的平均演变。可以看到,无论是在东亚还是在北半球,GRAPES_GFS2.0 在不同预报时刻相对于 T639 以及 GRAPES_GFS1.0 均显示出明显的改进效果。通过小波分解进一步分析在不同空间尺度上的改进,在各空间尺度上均有改进,尤其在行星尺度上改进更为显著(图略)。从预报均方根误差看,GRAPES_GFS2.0 的预报精度较 T639 有明显进步(图略)。需要指出的是,GRAPES_GFS2.0 在南半球相对于 T639 有更为显著的改进(图略)。

进一步考察预报第 1,3,7 天北半球 500 hPa 高度场距平相关系数和均方根误差连续 1 年的演变特征,如图 2 中所示,GRAPES_GFS2.0 逐日预报技巧其稳定性与 T639 一致性较好,且大部分情况下距平相关系数高于 T639,GRAPES_GFS2.0 第 1,

表 4 两年循环预报试验结果在北半球和东亚区的距平相关系数

Table 4 Anomaly correlation coefficient in the Northern Hemisphere and east Asian for two-year cycle forecast

积分时间/h	北半球 500 hPa			东亚 500 hPa		
	T639	GRAPES_GFS 1.0	GRAPES_GFS 2.0	T639	GRAPES_GFS 1.0	GRAPES_GFS 2.0
0	1	1	1	1	1	1
24	0.99	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99
48	0.97	0.95	0.97	0.96	0.94	0.97
72	0.93	0.90	0.94	0.93	0.89	0.94
96	0.88	0.84	0.89	0.86	0.82	0.88
120	0.80	0.74	0.81	0.80	0.72	0.82
144	0.70	0.64	0.72	0.71	0.62	0.73
168	0.59	0.54	0.62	0.60	0.51	0.63

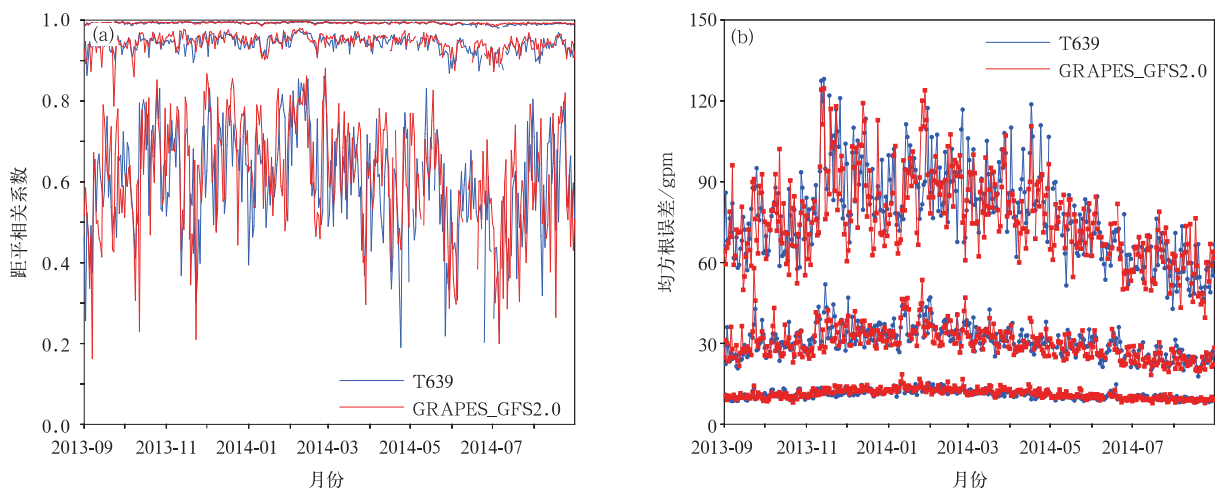


图 2 1 年循环试验中第 1,3,7 天预报的北半球 500 hPa 高度场距平相关系数(a)和均方根误差(b)

Fig. 2 500 hPa geopotential height anomaly correlation coefficient(a) and root mean square error(b) for the 1st,3rd,7th-day forecast in one year cycle run over the Northern Hemisphere

3,7 天距平相关系数的平均值分别为 0.993,0.945,0.615,T639 依次为 0.992,0.940,0.600。但从距平相关系数的逐日变化中也可以看到,两个模式均存在预报技巧波动较大的问题。

图 3 给出了 2 年平均的 GRAPES_GFS2.0 与 T639 预报降水的 ETS(equitable threat score)及 Bias(降水偏差)评分。从 ETS 评分可以看到,相对

于 T639 模式,GRAPES_GFS2.0 在小雨或者降水落区(图略)的预报方面表现出明显优势,在中雨以上量级降水预报上略微有差距,但随着预报时效的增加,GRAPES_GFS2.0 逐渐表现出改进的效果。从 Bias 评分可以看到,GRAPES_GFS2.0 整体低于 T639 模式,较为有效地改善了 T639 空报过高的问题。

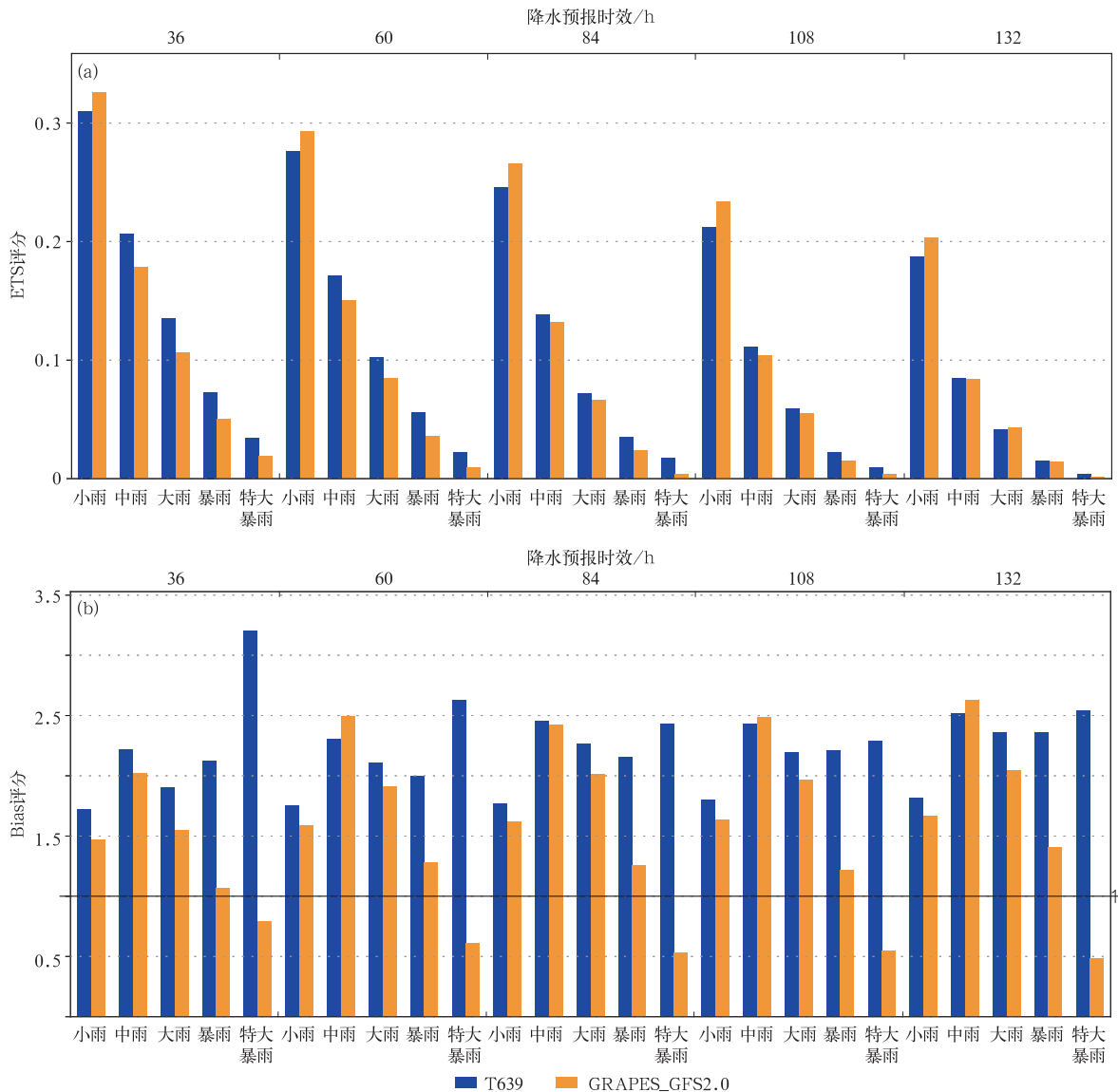


图 3 GRAPES_GFS2.0 与 T639 预报的中国区域各量级降水 ETS(a)和 Bias(b)技巧评分

Fig. 3 Two-year averaged ETS and Bias scores over mainland China for GRAPES_GFS2.0 and T639

此外,对风场、温度场及近地面要素(2 m 温度、10 m 风场)也进行了全面的统计检验,并与 ECM-WF,NCEP 等主要数值预报业务中心的模式进行了比较分析。由以上检验结果可知:① GRAPES_

GFS2.0 各项预报指标均全面超越 GRAPES_GFS1.0,与 T639 相比,GRAPES_GFS2.0 的等压面要素预报在对流层有明显优势。②对于降水预报,与 T639 相比,GRAPES_GFS2.0 在小雨预报中

体现出了明显优势,中雨及以上量级降水预报显示出一定的落后趋势,但随着预报时效的增加,GRAPES_GFS2.0 逐渐显示出了改进的效果。同时,T639 空报明显,而 GRAPES_GFS2.0 优势明显。③近地面要素的 2 m 温度误差方面 GRAPES_GFS2.0 相对 T639 有明显改进,有效降低了 T639 在青藏高原地区的误差。但 10 m 风场预报还存在一定的误差略大问题。④与 ECMWF,NCEP 等国际主要数值预报产品的对比分析发现,GRAPES_GFS2.0 形势场统计检验指标在时间演变趋势上保持一致,但量值上存在一定差距。降水的小雨预报能力已接近 ECMWF 的预报水平,不同阈值下的模式空报问题得到了抑制,中国区域的降水预报形势,特别是中国东南部的降水形势与实况更为接近。

3 展 望

未来 5 年建立以 GRAPES_GFS 为核心的新数值预报体系是中国气象局数值预报业务发展的重要内容,到 2020 年实现 GRAPES_GFS 的水平分辨率达到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。从以上对 GRAPES_GFS2.0 的预报能力评估可以看出,虽然与现行 T639 相比有一定优势,但与国际主要数值预报业务中心相比,预报技巧尚有差距。因此,继续提高 GRAPES_GFS 的预报能力以满足我国精细化天气预报的需求是今后 2~3 年的重要任务。需要在以下 6 个方面强化研发工作,推动 GRAPES_GFS 预报精度的提升:

1) 加快全球 GRAPES_4DVar 的业务应用,提高同化精度。目前 GRAPES_4DVar 在分析精度和预报技巧方面已经达到与 GRAPES_3DVar 相当的水平,且在对流层内显示出一定优势。针对 GRAPES_4DVar,需要重点优化变分框架,实现高低分辨率内外循环、多重外循环和高低分辨率之间的插值精度,优化线性化物理过程使之发挥作用,有效使用卫星等多时次连续观测资料,优化计算效率保障业务运行的时效。

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、实现微波湿度计同化能力,并发展受地表影响的微波资料在 GRAPES 中的同化应用。同时,发展风云三号气象卫星微波温度资料和微波湿度资料,开展卫星高层通道的应用研究。

3) 发展陆面资料分析同化技术。基于最优插值(OI)或集合卡尔曼滤波(ETKF),应用台站 2 m 温湿观测资料或陆表微波亮温资料,发展土壤温湿度分析同化技术,提高 GRAPES_GFS 对近地层气象要素的精细化预报能力。

4) 改进 GRAPES_GFS 动力框架,进一步提高稳定性和计算精度。包括二阶精度半隐式半拉格朗日方案的研发、等温参考大气廓线的改进、垂直方向二阶精度非等距差分方案改造、全球统一算法的拉格朗日上游点计算方案研发、质量守恒改进等。

5) 提高 GRAPES_GFS 模式的计算效率和可扩展性,实现 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 水平分辨率 GRAPES_GFS 业务应用。

6) 深入优化 GRAPES_GFS 物理过程,改进动力物理耦合算法,提高模式的预报精度。以云降水、次网格尺度地形动力作用、平流层物理过程等为重点,优化 GRAPES_GFS 物理过程,提高模式对中国区域降水和热带环流的预报水平。参考 ECMWF 和 UKMO UM 模式的动力物理耦合计算方法,改进 GRAPES_GFS 的预报精度和计算稳定性。

致 谢:本文是对 GRAPES 全球中期预报系统研发和业务化工作的综述,是 GRAPES 研发团队的一项集体性工作的总结。在研发过程中,GRAPES 团队精诚团结、奋发向上的精神感人至深。限于篇幅,不能将所有参与工作的人员列入,在表达谢意的同时也致以歉意。在研发过程中,与原 ECMWF Martin Miller 博士、原 NCEP 潘华陆博士、美国 Scripps Institution of Oceanography 张广俊博士、夏威夷大学王玉清教授等的多次深入讨论和交流,尤其是 Martin Miller 博士对模式问题的独到见解,促进了研发的深入和进步,在此一并致以衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525: 47-55.
- [2] Met Office Science Strategy: 2016—2021. London: UKMO, 2015.
- [3] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 773-777.
- [4] 陈德辉, 杨学胜, 张红亮, 等. 多尺度非静力通用模式框架的设计策略. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 452-461.
- [5] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] Zhang R H, Shen X S. On the development of the GRAPES-A new generation of the National operational NWP system in China. *Chin Sci Bull*, 2008, 53(22): 3429-3432.
- [7] 胡江林, 沈学顺, 张红亮, 等. GRAPES 模式动力框架的长期

- 积分特征. 应用气象学报, 2007, 18(3): 276-284.
- [8] 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.
- [9] Temperton C, Hortal M, Simmons A. A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 111-127.
- [10] Gospodinov I, Spiridonov V, Geleyn J. Second-order accuracy of two-time-level semi-Lagrangian schemes. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 1017-1033.
- [11] McDonald A. The Origin of Noise in Semi-Lagrangian Integrations // Seminar Proceedings on Numerical Methods in Atmospheric Models. 1991, 2: 308-334.
- [12] Hortal M. The development and testing of a new two-time-level semi-Lagrangian scheme (SETTLS) in the ECMWF forecast model. *Q J R Meteorol Soc*, 2002, 128: 1671-1687.
- [13] Klemp J B, Dudhia J, Hassiotis A D. An upper gravity-wave absorbing layer for NWP applications. *Mon Wea Rev*, 2008, 136: 3987-4004.
- [14] Wood N, Staniforth A, White A, et al. An inherently mass-conserving semi-implicit semi-Lagrangian discretization of the deep-atmosphere global non-hydrostatic equations. *Q J R Meteorol Soc*, 2015, 140: 1505-1520.
- [15] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16663-16682.
- [16] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 91: 233-244.
- [17] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res*, 2008, 113: 1395-1400.
- [18] Dai Y, Zeng X, Dickinson R E, et al. The Common Land Model (CLM). *Amer Meteor Soc*, 2003, 84: 1013-1023.
- [19] Palmer T, Shutts G J, Swinbank R. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Q J R Meteorol Soc*, 1986, 112: 1001-1039.
- [20] McFarlane N A. The effects of orographically excited gravity waves on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 1775-1800.
- [21] Lott F, Miller M. A new sub-grid scale orographic drag parameterization: Its formulation and testing. *Q J R Meteorol Soc*, 1997, 123: 101-127.
- [22] 苏勇, 沈学顺, 张倩, 等. 应用样条插值提高 GRAPES 模式物理过程反馈精度. 应用气象学报, 2014, 25(2): 202-211.
- [23] Jakob C, Siebesma A P. A new subcloud model for mass-flux convection schemes-Influence on triggering, updraught properties and model climate. *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 2765-2778.
- [24] Bechtold P, Kohler M, Jung T, et al. Advances in simulating atmospheric variability with the ECMWF model: From synoptic to decadal time-scales. *Q J R Meteorol Soc*, 134, 634: 1337-1351.
- [25] Han J, Pan H L. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea Forecasting*, 2011, 26: 520-533.
- [26] Han J, Pan H L. Sensitivity of hurricane intensity forecast to convective momentum transport parameterization. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 664-674.
- [27] Grant A. Cloud-base fluxes in the cumulus-capped boundary layer. *Q J R Meteorol Soc*, 2001, 127: 407-421.
- [28] Siebesma A P, Bretherton C S, Brown A, et al. A large eddy simulation intercomparison study of shallow cumulus convection. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 1201-1219.
- [29] 刘艳, 薛纪善, 张林, 等. GRAPES 全球三维变分同化系统的检验与诊断. 应用气象学报, 2016, 27(1): 1-15.

Development and Operation Transformation of GRAPES Global Middle-range Forecast System

Shen Xueshun Su Yong Hu Jianglin Wang Jincheng Sun Jian Xue Jishan Han Wei Zhang Hongliang
Lu Huijuan Zhang Hua Chen Qiying Liu Yan Liu Qijun Ma Zhanshan Jin Zhiyan
Li Xingliang Liu Kun Zhao Bin Zhou Bin Gong Jiandong Chen Dehui Wang Jianjie

(*Numerical Weather Prediction Center of CMA, Beijing 100081*)

Abstract

The developing history of GRAPES global middle-range numerical weather prediction system (GRAPES_GFS) of China Meteorological Administration is reviewed. Important progresses in recent years are summarized and their contributions to GRAPES_GFS operation are introduced.

From the aspect of dynamic frame aspect, an algorithm for vertical advection of temperature and the polar filter scheme are improved. New algorithms are introduced, including terrain filtering algorithm, scalar advection scheme with conservation and high accuracy, w-damping noise suppression algorithm, and Rayleigh friction in the stratosphere, etc. Besides, horizontal and vertical resolutions are enhanced. These improvements significantly improve the stability, accuracy and mass conservation of the dynamic core.

From the aspect of physical process, the RRTMG radiation program is upgraded, the CoLM land surface process scheme is introduced, the cumulus convective scheme and boundary layer scheme are improved, and a two-parameter cloud physics scheme is developed. On these basis, the prediction cloud scheme is further developed, the interface between dynamic and physics is adjusted, the calculation of sea ice and surface albedo are also optimized. These improvements and optimizations improve the prediction ability of the physical package.

From the aspect of global three-dimensional variational assimilation (3DVar), the model space 3DVar is developed to avoid the interpolation error of the analysis space to the model space, fine quality control and deviation correction techniques are developed to achieve high quality observation data assimilation, and more satellite data assimilation techniques are adopted especially using satellite hyperspectral infrared detector as the focus.

At the same time, the prediction ability of GRAPES_GFS2.0 is being evaluated based on results of two-year assimilation forecast cycle test, and compared with T639. Generally speaking, the forecast indicators of the system are fully beyond the GRAPES_GFS 1.0 version. Model outputs of isobaric elements in the troposphere forecast, including precipitation and 2 m temperature, have obvious advantages comparing with T639.

Key words: GRAPES_GFS; dynamic frame; physical process; 3DVar