

全球大尺度信息在 3 km GRAPES-RAFS 系统中的应用*

庄照荣 王瑞春 李兴良

ZHUANG Zhaorong WANG Ruichun LI Xingliang

1. 国家气象中心, 北京, 100081

2. 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081

1. *National Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China*

2. *Center of Numerical Weather Prediction, CMA, Beijing 100081, China*

2019-03-15 收稿, 2019-08-20 改回.

庄照荣, 王瑞春, 李兴良. 2020. 全球大尺度信息在 3 km GRAPES-RAFS 系统中的应用. 气象学报, 78(1): 33-47

Zhuang Zhaorong, Wang Ruichun, Li Xingliang. 2020. Application of global large scale information to GRAEPS RAFS system. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(1):33-47

Abstract To alleviate the problem caused by fixed boundary condition in the GRAPES-RAFS system and improve the forecast qualities of regional model, a blending method to merge large scale information of global model with meso-scale information of regional analysis is implemented in the GRAPES-RAFS system using Discrete Cosine Transform (DCT) filter. During 9 May to 9 June 2018, the forecast qualities between the control experiments of the cold-start and experiments of warm-up initialization and the blending scale analysis by the GRAPES-RAFS are compared. The numerical results indicate that the large scale information and variables' harmony of analyses increase, and the spin-up time is decreased with the global information and analysis in GRAPES-RAFS at 3 h intervals merged. The forecast quality of surface variables, analysis and precipitation with warm-start has been obviously improved. In addition, the simulated track of typhoon Ewiniar is much closer to observation by using the blending analysis. The warm-up initial physical fields, which lead to far smaller surface pressure tendency, are more harmonic than those of cold-start initialization. However, it is observed that the warm-up forecast quality of 2 m temperature and 10 m wind is not better than that of the cold-start, and that the warm-up precipitation score of ETS is lower than that of the cold-start as well.

Key words Global large scale information, GRAPES-RAFS, Regional 3DVar, Blending scale analysis

摘要 为了缓解快速分析预报循环过程中固定边界条件造成的预报锁定, 缩短动力、热力调整时间, 提高模式预报能力, 全球模式产品的大尺度部分的信息被引入 GRAPES-RAFS 系统中, 通过二维离散余弦变换方法对全球模式产品和区域分析进行谱分解, 获得综合全球大尺度和区域中小尺度信息的混合尺度分析。通过 2018 年 5 月 9 日—6 月 9 日 1 个月间歇分析预报循环, 比较对照试验和混合尺度分析试验的冷启动和暖启动预报结果表明, 在快速分析预报循环中, 全球大尺度信息的加入不仅增加分析的大尺度部分信息和降低地面气压倾向, 缩短模式预报的动力、热力调整时间, 且地面要素场、分析场和降水的暖启动预报质量有显著提高; 台风艾云尼路径预报也更加接近观测。另外, GRAPES-RAFS 循环的暖启动与冷启动预报相比, 初始场更加协调, 但地面 2 m 气温和 10 m 风场的预报质量比冷启动预报差, 且其 ETS 降水评分也明显低于冷启动预报。混合尺度方案在 RAFS 系统中的应用能有效提高初始场的协调性, 地面、高空要素和降水预报质量得到提升。

关键词 全球大尺度信息, GRAPES-RAFS, 区域三维变分, 混合尺度分析

中图法分类号 P435

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507502 和 2017YFC1502001)。

作者简介: 庄照荣, 主要从事资料同化研究。E-mail: zrzhuang@cma.gov.cn

1 引言

全球和区域模式产品在不同空间尺度的模拟上各有优势,一般全球模式不受边界的影响,可同化大量的卫星观测资料,因而对大尺度部分描述更加准确;而区域模式分辨率更高,可同化更多高时、空分辨率的观测资料,模式物理过程对大气中、小尺度系统的描述能力更强,所以区域模式对天气系统的中、小尺度部分模拟得更好。因而,利用全球模式产品的大尺度信息和区域以外上游信息的影响是改进区域模式预报的便捷方式之一。全球信息引入区域模式的方法有2种:(1)全球信息被当成观测资料进入三维变分的目标泛函中进行分析(Guidard, et al, 2008; Dahlgren, et al, 2012; Yang, et al, 2019), (2)直接采用滤波方法对全球模式的大尺度信息和区域模式的中、小尺度信息进行混合尺度分析(Yang, 2005; Hsiao, et al, 2015; 庄照荣等, 2018)。利用全球大尺度信息的混合尺度方法不仅用在区域分析中,全球集合模式的大尺度部分也通过滤波和谱分析技术与区域集合样本进行混合,集合样本的混合方案对集合预报效果也有明显改进(Wang, et al, 2014; Zhang, et al, 2015)。

全球大尺度信息在区域分析和集合预报中应用有一定效果,在快速分析预报循环系统中,大尺度信息的引导和上游观测信息持续输入对分析预报的潜在影响还不清楚。面对生命史短的灾害性天气预报的需求,近20多年区域快速更新循环同化系统(Rapid Update Cycle, RUC)发展迅速,该系统能充分利用时、空高分辨率的观测资料来提高模式初始场质量,在短时临近预报中发挥重要作用。美国在1994年开始业务运行基于三维变分同化系统的3 h循环60 km分辨率的快速更新系统,2002年分辨率提高到20 km、1 h循环(Benjamin, et al, 2004),2005年分辨率提高到13 km。2012年建立了基于混合变分集合同化的快速更新系统(Rapid Refresh, RAP),2014年发展了高分辨率的3 km快速更新系统(High Resolution Rapid Refresh, HRRR)(Benjamin, et al, 2016)。中国2000年后也开始开展快速分析预报循环系统的研究,如2007年北京城市气象研究所基于WRF的三维变分和模式系统建立的针对北京地区的BJ_RUC进入准业务运行(范水勇等, 2009);广州热带气象研究所基于GRAPES (Global/ Regional

Assimilation and Prediction System)等压面三维变分(张华等, 2004; Xue, et al, 2008)和区域模式系统(Chen, et al, 2008; Zhang, et al, 2008)建立了针对华南地区天气预报的GRAPES_CHAF系统(陈子通等, 2010)。中国气象局国家气象中心基于GRAPES_CHAF系统,采用模式面三维变分分析(马旭林等, 2009)和GRAPES v3.0模式建立的全国区域15 km分辨率31层3 h循环的GRAPES RAFS (Rapid Analysis and Forecast System)于2010年进行准业务运行(徐枝芳等, 2013),在2014年业务GRAPES-RAFS模式水平分辨率提高到10 km,垂直分50层,GRAPES模式版本升级为4.0,升级后模式要素场和降水预报都有明显改进(黄丽萍等, 2017)。在GRAPES-Meso v4.0的基础上,覆盖中国东部区域3 km水平分辨率的试验系统于2015年建立,(许晨璐等, 2017)针对这个模式系统的降水预报性能进行了细致评估,但目前还缺乏3 km分辨率的GRAPES-RAFS系统的评估工作。

GRAPES-RAFS系统虽然具有一定的短时临近预报能力,但由于有限的观测资料和连续循环中固定边界对预报的锁定作用,短时临近预报仍面临严重挑战。考虑到全球大尺度信息应用到GRAPES-Meso对区域分析和降水预报有明显改进(庄照荣等, 2018),在GRAPES-RAFS中引入全球大尺度信息来缓解固定侧边界的不利影响,通过谱分析、地面要素、高空要素和降水预报检验等测试混合尺度方案对GRAPES-RAFS系统的分析和预报的影响。

2 引入大尺度信息的GRAPES-RAFS

2.1 GRAPES-RAFS系统

GRAPES-RAFS系统是在GRAPES三维变分和区域模式系统基础上建立起来的间歇快速分析预报循环系统(徐枝芳等, 2013),主要模块包括:观测资料预处理与质量控制、全球模式资料前处理、三维变分分析系统、云分析、模式标准初始化、数字滤波、中尺度数值模式。观测资料预处理与质量控制主要是对各类观测资料的处理和质量控制,处理后的观测信息(Y_o)提供给三维变分分析系统进行同化,同时也为云分析提供云顶高度、亮温和反射率等和云水物质相关的信息。全球模式资料前处理是解码全球模式分析预报产品为等压面数据,然后通过

标准初始化过程把全球产品和静态资料等处理成三维变分分析系统需要的模式面背景场(X_b)和区域模式需要的侧边界(GRAPESbdy), 以及为混合尺度分析提供模式面的预报或分析场(X_b/X_a)。观测信息通过三维变分和云分析来订正背景场, 分别获得常规模式变量的分析和水物质变量的分析(X_a), 然后经过数字滤波后分析作为初始场(GRAPESinput)驱动区域模式向前积分, 区域模式的预报作为下一次分析的背景场, 从而使分析预报循环滚动。系统中直接采用全球模式降尺度的预报作为背景场进行的分析预报为冷启动, 采用区域模式自身预报作为背景场进行的分析预报为暖启动, GRAEPS-RAFS 系统结构流程见图 1。

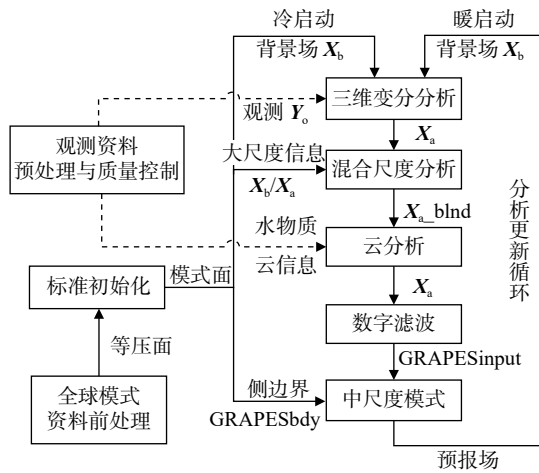


图 1 GRAPES-RAFS 系统结构流程

Fig. 1 The flow diagram of GRAPES-RAFS

2.2 三维变分分析

GRAPES-RAFS 系统采用全球区域一体化的三维变分分析 (GRAPES-3DVar) 获得最优的分析场 (马旭林等, 2009; 薛纪善等, 2008, 2012), GRAPES-3DVar 与区域中尺度模式采用一致的垂直坐标、水平网格分布及模式变量。模式变量为 u 、 v 风场、无量纲气压、位温和比湿。控制变量为流函数、非平衡的势函数、非平衡的无量纲气压和比湿。背景误差协方差为美国国家气象中心 (NMC) 方法统计获得, 风压场的平衡关系依赖于线性回归关系 (王瑞春等, 2012), 误差方差为随高度和纬度变化的二维场, 垂直相关采用统计的垂直相关系数。水平相关关系用高斯函数来描述, 水平相关尺度为固定参数, 湿度取为 200 km, 其他控制变量为 500 km。

2.3 中尺度数值模式

GRAPES 区域中尺度数值模式采用地形追随坐标, 半隐式半拉格朗日差分方案, 全可压非静力平衡动力框架, 可自由组合的物理过程参数化方案。在 3 km 分辨率下, 区域模式不用积云对流方案, 辐射采用 RRTM 长波方案和 Dudhia 短波方案, 微物理方案采用 WSM6, 陆面过程采用 Noah 方案, 近地面层采用莫宁-奥布霍夫方案, 边界层方案采用 MRF。

2.4 混合尺度分析

GRAPES 区域三维变分同化全球电信系统 (GTS) 传输的常规观测资料, 以及雷达速度方位显示 (VAD) 反演风场和 GPS 掩星反演可降水量 (GPS PW), 考虑到区域分析中使用的观测资料有限, 而在全球分析中采用了更多观测资料, 特别是有大量的卫星观测资料, 观测资料使用的不同造成区域和全球分析各有优势。并且区域分析框架更多考虑如何获得中、小尺度信息, 背景误差协方差中变量之间的关系更加复杂, 考虑更多非线性平衡相关关系; 而全球分析分辨率相对较低, 变量之间的相关基本建立在地转平衡和静力平衡的基础上, 因而全球分析更侧重大尺度分析。在快速分析预报循环系统中, 固定边界条件对每次分析预报的质量影响很大, 引入全球大尺度信息不仅包含区域分析所没有的卫星资料信息, 而且区域外的观测信息, 特别是区域上游信息的传播也能在多次循环分析中缓解固定边界的不良影响。

为了获得全球和区域模式产品中的不同尺度信息, 采用二维离散余弦转换 (Discrete Cosine Transform, 2D-DCT) 方法对有限区域二维气象场进行谱分解 (Denis, et al, 2002; 郑永骏等, 2008)。庄照荣等 (2018) 混合尺度方案采用降尺度后全球分析增量的大尺度部分 (T_{dxa}^L) 与区域分析增量的中小尺度部分 (G_{dxa}^S) 组成新的分析增量, 混合尺度分析 (G_{blind}) 为

$$G_{blind} = G_{xb} + T_{dxa}^L + G_{dxa}^S = G_{xb} + F_{filter}^L (T_{global} - G_{xb}) + G_{dxa} - F_{filter}^L (G_{dxa}) \quad (1)$$

式中, G_{xb} 为区域模式的背景场, 通常也是全球模式 6 h 的预报降尺度场; T_{global} 为全球模式分析; G_{dxa} 为区域模式分析增量, 即 $G_{xa} - G_{xb}$; F_{filter}^L 算子为采用 2D-DCT 方法截取大尺度部分的滤波算子; 因而混合尺度分析是全球分析增量的大尺度部分和区域分析增量的中小尺度部分的线性组合。由于 F_{filter}^L 算子满足线性

变换,式(1)可写为

$$\begin{aligned}
 G_{\text{blind}} &= G_{\text{xb}} + G_{\text{dxa}} + F_{\text{filter}}^L(T_{\text{global}}) - F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xb}}) - F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xa}} - G_{\text{xb}}) \\
 &= G_{\text{xa}} + F_{\text{filter}}^L(T_{\text{global}}) - F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xb}}) - F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xa}}) + F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xb}}) \\
 &= G_{\text{xa}} + F_{\text{filter}}^L(T_{\text{global}}) - F_{\text{filter}}^L(G_{\text{xa}}) \\
 &= G_{\text{xa}} + F_{\text{filter}}^L(T_{\text{global}} - G_{\text{xa}})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

在 GRAPES-RAFS 中, 三维变分分析后加入混合尺度分析过程(图 1), 由于每个分析时刻并不都存在全球分析, 因而 T_{global} 可用全球模式的预报代替。

3 GRAPES-RAFS 试验设置

采用 GRAPES 区域快速分析预报循环系统进行两组间歇分析预报循环试验, 试验时段为 2018 年 5 月 9 日—6 月 9 日, 分别在 00 和 12 时(世界时, 下同)开始每隔 3 h 做分析循环预报, 循环到 12/00 时终止。在起始 00/12 时进行的长时间预报为冷启动预报(图 2 虚线表示), 预报时效为 36 h, 每 3 h 分析后的暖启动预报(图 2 实线表示)时效为 24 h。试验范围为中国东部区域(17°—50°N, 102°—135°E), 模式分辨率为 3 km, 垂直分为 51 层, 模式层顶达 33 km。对照试验(Ctrl)采用与业务 10 km 分辨率一样的流程, 考虑到数字滤波方案为滤除多次循环中初始场累积的噪音, 只在暖启动时采用。冷启动采用 NCEP 全球模式的 6 h 预报场作为背景场, NCEP 模式产品分辨率为 50 km, 垂直方向 1000—10 hPa 共分 26 层。混合尺度试验(Blnd)是在对照试验的

基础上, 在循环中分别把 NCEP 模式的分析(00、06、12、18 时)或其 3 h 预报(03、09、15、21 时)的大尺度信息引入, 各变量尺度分离的截断波长为 600 km。对无量纲气压、 u 、 v 风场和位温进行混合尺度分析, 湿度变量还以区域分析为主。另外, 对无量纲气压和位温的扰动变量在混合分析的基础上进行更新。RAFS 流程如图 2 所示。文中比较 00 时起报的 4 组试验: 对照试验冷启动(Ctrlcold)和暖启动预报(Ctrlwarm), 混合尺度试验冷启动(Blndcold)和暖启动预报(Blndwarm)。

3.1 观测资料

三维变分同化的观测资料如表 1 所示, 为了采用更多的观测资料, 冷启动分析观测资料同化的时间窗为正负 3 h, 其他分析时刻同化时间窗为正负 90 min, 同化时间窗内的观测资料都作为分析时刻的资料进入同化系统。其中地面、船舶、GPS 可降水和雷达 VAD 资料的观测时间与分析时刻相差几分钟。

从同化的各类观测资料类型以及不同时段观测站数(表 1)可以看出, 探空观测资料同化风场、温

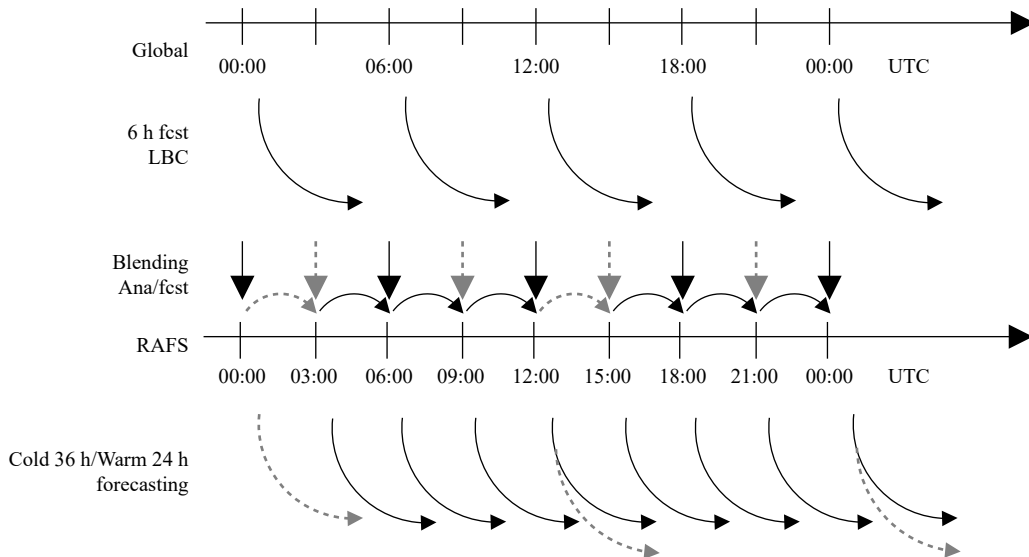


图 2 GRAPES 快速分析预报循环系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of the 3 h Rapid Assimilation and Forecast System with blending scale analyses

表 1 RAFS 系统中同化的观测资料
Table 1 Observations assimilated into RAFS

观测类型	同化变量	不同时段观测量(站点数)
探空	风, 温度, 湿度	107—110(00/12时); 5—31(06/18时)
地面报	湿度, 地面气压	1600(00/12时); 2500(其他时段)
船舶报	湿度, 地面气压	20—50
飞机报	风, 温度	1000—1600(00—12时); 300—600(15—21时)
云导风	风	300—700
GPS可降水	可降水量	200—500
雷达VAD	风	10—70

度和相对湿度, 探空站主要在 00 与 12 时资料较多, 06/18 时资料少, 其他时段没有探空资料。探空资料相对其他资料水平和垂直上分布较均匀, 在分析时刻前 45 min 和后 20 min 放球的资料都作为分析时刻观测使用。地面报资料同化地面气压和相对湿度, 为了避免资料重复使用, 00/12 时在探空观测站附近的地面资料予以剔除, 此时地面资料站数在 1600 个左右, 其他时段在 2500 站左右。船舶资料站点很少, 也只同化地面气压和相对湿度。飞机报同化风场和温度, 资料的分布非常不规则, 主要依赖于飞机的飞行路线和高度, 并且白天(00—12 时)有 1000—1600 观测点, 在夜晚只有几百个观测点。云导风、GPS 可降水资料和雷达 VAD 资料在各个时段上相差不大, 其中 VAD 资料只有几十个观测点, 其他资料有几百个观测点。所有类型观测资料

同化份数在 00/12 时有 2 万多, 目前的观测数量远小于分析变量的数量($1101 \times 1101 \times 50 \times 4$)。

3.2 侧边界条件

业务上 RAFS 循环的侧边界为 00/12 时冷启动分析时刻前的 6 h 全球模式起报的预报场, 即 00 时开始循环的侧边界为前一天 18 时起报的全球模式预报场。为了使侧边界的预报时效更接近分析时刻, 文中在每次分析时采用全球模式预报时效最近的预报作为侧边界, 即 00 时循环的侧边界为 00 时起报的全球模式 0—6 h 预报, 12 时暖启动的侧边界是全球模式同一时刻起报的预报场。且分析后都依据分析场对侧边界进行更新。

3.3 数字滤波

在 RAFS 循环中为了消除分析场不协调在模式积分过程中产生的快速增长的虚假重力波, 采用数字滤波(Lynch, et al, 2010; 刘艳等, 2019)。数字滤波时段为 2 h, 即在关闭物理过程绝热条件下模式向后积分 1 h, 然后打开物理过程非绝热条件下模式向前积分 2 h, 采用时间滤波后的初值作为模式预报的初始场。

模式预报的地面气压倾向可以作为衡量模式是否存在高频振荡和虚假重力波噪音的指标(Lynch, et al, 1992)。图 3 比较了 4 组试验在 2018 年 5 月 10 日 12 时起报的地面气压倾向, 可以看出, 对照试验冷启动预报未采用数字滤波, 初始时刻地面气压倾向最大(0.55 hPa/(10 min)), 经过 3 h 预报, 地面气压倾向有所下降, 接近于 0.21 hPa/(10 min)。

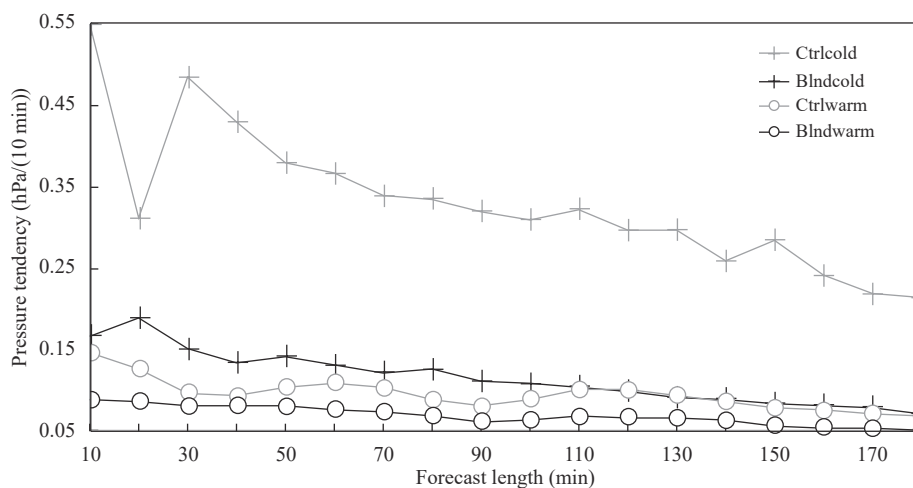


图 3 2018 年 5 月 10 日 12 时起报的地面气压倾向

Fig. 3 Surface pressure tendency starting from 12:00 UTC 10 May 2018

以上说明对照试验冷启动预报的初始场非常不协调, 经过 3 h 的模式预报调整, 虚假噪音略有消除, 但没有完全消除。经过分析循环和数字滤波后, 对照试验暖启动初始时刻地面气压倾向 ($0.14 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$) 远小于冷启动, 预报 3 h 后, 暖启动预报的地面气压倾向为 $0.06 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$, 说明暖启动的初始场经过数字滤波后更协调, 3 h 预报后虚假噪音基本消除, 暖启动预报的动力、热力调整时间更短。同样, 混合尺度试验暖启动初始时刻的地面气压倾向 ($0.08 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$) 也明显小于其冷启动的预报值 ($0.17 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$)。

比较对照和混合尺度试验的冷启动预报, 二者都未经数字滤波, 只加入一次大尺度信息, 混合尺度试验的地面气压倾向也有大幅度减小 (约为 $0.17 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$); 说明全球模式产品的大尺度部分较协调, 加入区域分析中后初始场更协调。经过多次循环, 混合尺度试验的地面气压倾向最小, 初始时刻接近 $0.05 \text{ hPa}/(10 \text{ min})$, 比对照试验暖启动预报的地面气压倾向进一步降低。变量之间协调的大尺度信息持续加入分析系统, 使初始预报动力和质量场更平衡, 近 1 h 预报模式内虚假噪音基本消除, 地面气压倾向趋于稳定。

3.4 混合尺度分析

从 3.3 节可知, 引入全球模式大尺度信息后分析更加协调, 冷启动和暖启动预报的初始地面气压倾向比对照试验都明显降低。本节通过诊断 RAFS 循环过程中不同尺度上功率谱分布来考察混合尺度分析的作用。

图 4 为 2018 年 5 月 10 日 00—12 时一个 RAFS 循环过程中不同波长上混合尺度分析和区域分析的功率谱差别, 把分析的功率谱在垂直层上进行累加, 考察总功率谱随循环时次的变化。从无量纲气压、比湿总功率谱的变化 (图 4a、b) 可以看出, 600 km 以上的混合尺度分析的大尺度部分总功率谱比对照试验大, 随着循环时次的增加, 总功率谱差别为正并且在增大, 说明大尺度部分信息随着循环次数的增加而增多, 在 600—250 km 尺度上混合方案的功率谱也较对照试验有所增大。从风场总功率谱的差别 (图 4c、d) 可以看出, 850 km 以上混合尺度分析的总功率谱随着循环次数的增加, 比对照试验的总功率谱大, 在前 3 次分析的中小尺度部分的总功率谱也略增大, 说明风场中小尺度信息也比对照试验丰富。

大量的观测事实表明, 大气动能谱的动能与波数的关系在大尺度区域满足 $E \propto K^{-3}$, 在中尺度区域

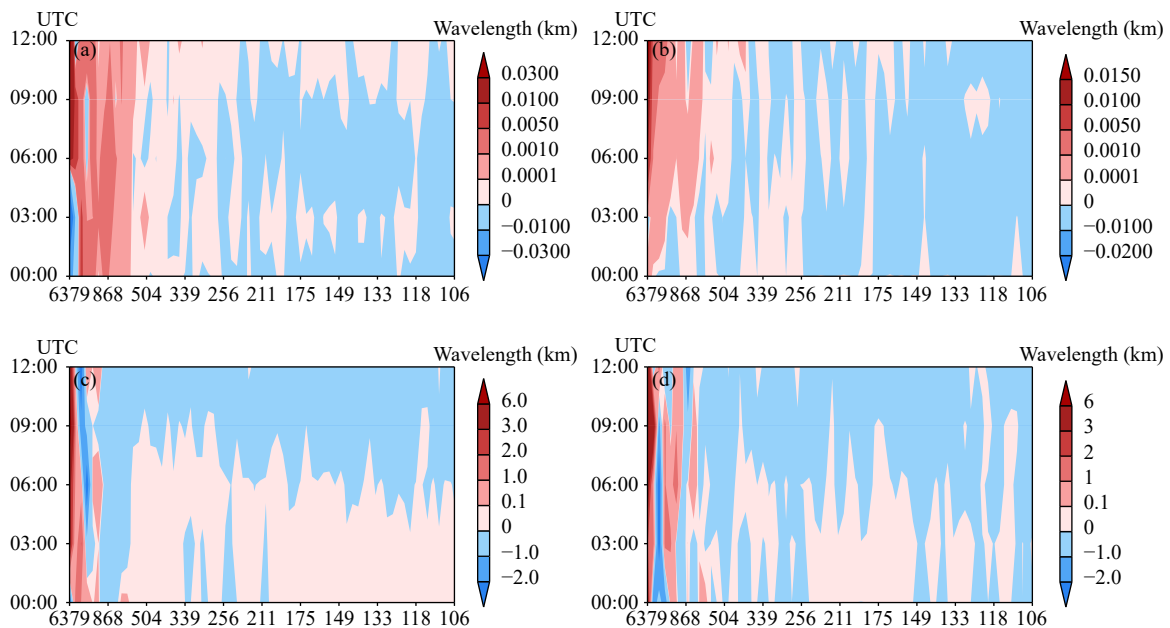


图 4 混合尺度试验与对照试验各物理量的分析功率谱差 (单位: m^3/s^2) 随波长和循环时间的变化
(a. 无量纲气压, b. 比湿, c. U 风, d. V 风)

Fig. 4 Variations of the power spectrum (unit: m^3/s^2) of Blnl minus Ctrl analyses
(a. non-dimensional pressure, b. specific humidity, c. U -component, d. V -component)

过渡到 $E \propto K^{-5/3}$ 。通过比较模式动能谱与实际大气动能谱可以评估模式的性能,考察模式对不同尺度大气状况的描述能力和模式积分动力、热力调整时间,比较一个循环过程中分析场动能谱的变化,可以看出 00 时开始,对照试验动能谱在 100 km 以下中小尺度部分比较小,与观测动能谱线相差最大,随着循环次数的增加,下一时次的分析动能谱线越来越接近观测谱线,分析的中小尺度信息增多,加速了模式预报的动力、热力过程(图 5a)。分析的中小尺度信息增多主要原因是循环中采用了区域模式自身的 3 h 预报作为背景场,模式经过 3 h 积分,变量之间协调性越来越好,模式预报能产生和发展更多的中小

尺度系统。从混合尺度试验(图 5b)也可以看出,循环中第 2 次以上分析动能谱线比对照试验更接近观测谱线,说明混合尺度分析更加协调,3 h 预报产生的中小尺度信息更丰富,能更快速缩短模式预报动力、热力时间。

综上所述,引入全球大尺度信息的混合分析场更加协调,协调的初始场缩短模式预报的动力、热力调整时间,使其 3 h 预报场产生更多的中小尺度信息,在 RAFS 循环中产生良性循环,从而使预报的地面气压倾向低于对照试验的值,分析场中小尺度部分的功率谱也明显大于对照试验。

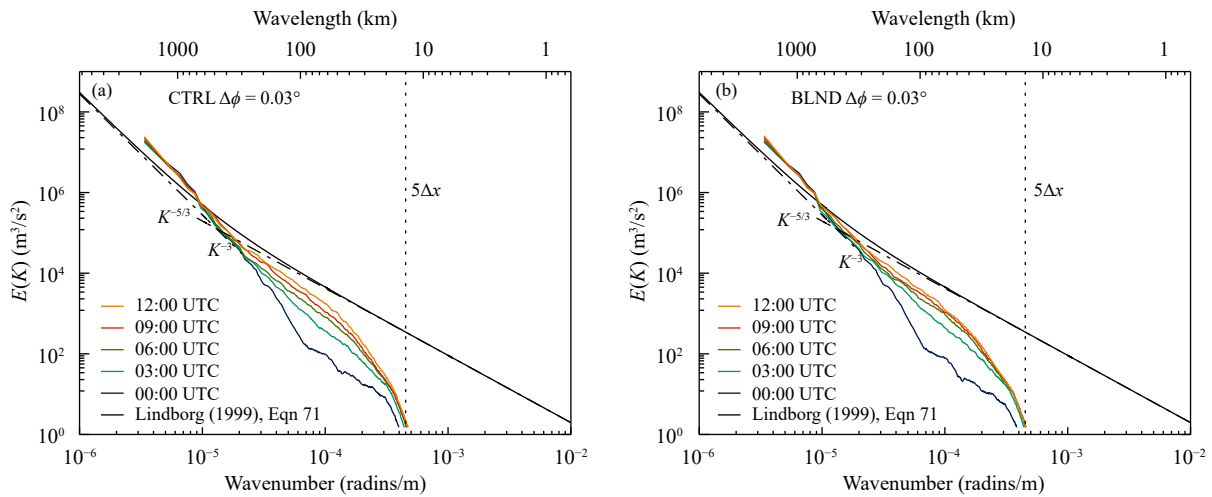


图 5 GRAPES-RAFS 循环中分析动能谱(单位: m^3/s^2)的变化 (a. 对照试验, b. 混合尺度试验)

Fig. 5 Simulated kinetic energy (unit: m^3/s^2) of the analyses in GRAPES-RAFS (a. Ctrl. b. Blnd)

4 分析预报检验

将 1 个月的试验结果与地面观测要素、探空观测及观测降水进行比较,同时通过对台风艾云尼的强降水和路径模拟考察全球大尺度信息对灾害性天气预报的影响。

4.1 地面要素场

比较分析 00 时起报的冷启动和暖启动地面要素预报与观测的月平均均方根误差(图 6),可以看到,2 m 气温和 10 m 风场前 12 h 对照试验暖启动的预报质量明显比冷启动差;12—24 h 对照试验暖启动 2 m 气温和 10 m V 风场预报的均方根误差均略小于冷启动预报,10 m U 风场暖启动预报质量也略比冷启动差。混合尺度试验的冷启动和暖启动预报地

面要素场的检验结论与对照试验结论相似。

比较对照试验和混合尺度试验的冷启动预报可以看出,只引入 1 次大尺度分析信息对地面要素场预报影响不大,二者均方根误差相当(图 6);而从两种试验的暖启动预报(图 6)可以看出,多次循环后,混合尺度试验的地面要素预报质量有明显提高,均方根误差均明显小于对照试验,特别是前 12 h 预报,其中前 9 h 预报 2 m 气温的均方根误差下降约 0.1 K,初始时刻 10 m 风场的均方根误差均下降了 0.2 m/s 以上。

4.2 背景与分析场

比较暖启动 00 时 1 个月平均的背景场(探空观测与背景场的差别,图 7 中 inno 表示)和分析场(探空观测与分析场的差别,图 7 中 ans 表示)的偏差和

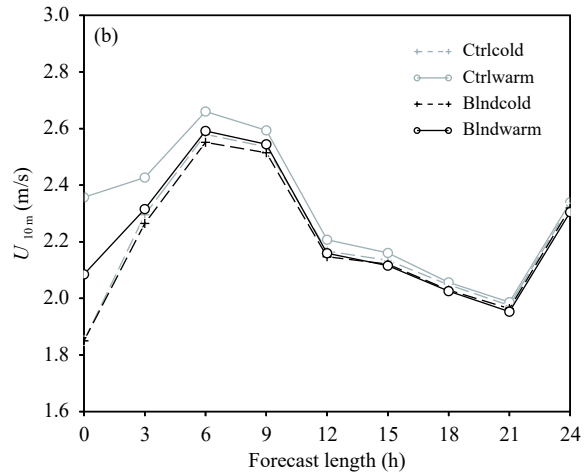
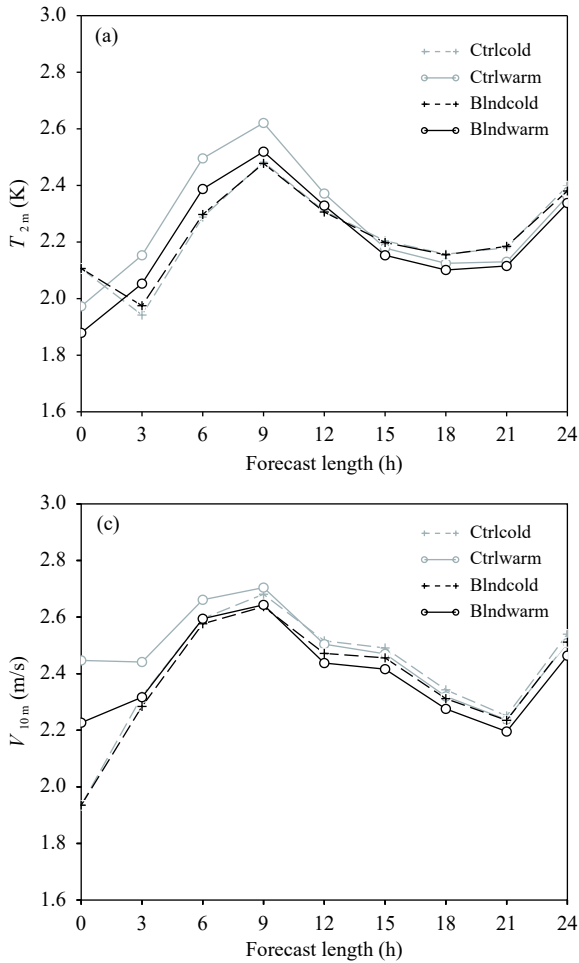


图6 地面要素预报的月平均均方根误差
(a. 2 m 温度, 单位: K; b. 10 m U 风场,
单位: m/s; c. 10 m V 风场, 单位: m/s)

Fig. 6 Root mean square errors of monthly
average forecast,
(a. 2 m temperature, unit: K; b. 10 m U -component,
unit: m/s; c. 10 m V -component, unit: m/s)

均方根误差(图 7a₁、a₂)可以看出, 对照试验 U 风场的背景场在 400—150 hPa 和 20 hPa 高度存在正偏差, 200 hPa 的正偏差达到 1.0 m/s, 其他层存在负偏差, 经过分析后, 分析场偏差有所减小; 而混合尺度试验在 300 hPa 以上存在明显的背景场正偏差, 分析偏差比背景偏差明显减小。从均方根误差可以看出, 混合尺度试验的背景场均方根误差大大低于对照试验的值; 经过分析后对照试验和混合尺度试验的分析场均方根误差比背景场的明显降低, 混合尺度试验的分析场均方根误差最小。

V 风场(图 7b₁、b₂) 两组试验的背景场和分析场偏差基本为负, 混合尺度试验的背景场偏差在 200 hPa 高度以上远小于对照试验, 分析后对照试验和混合尺度试验的分析场偏差比背景场偏差更接近 0 线。混合尺度试验的背景场均方根误差明显低于对照试验; 经过分析后, 对照试验和混合尺度试验分析场均方根误差比背景场的大幅度降低, 混合尺度试验的分析场均方根误差也小于对照试验。

温度(图 7c₁、c₂)混合尺度试验的背景场与分析场的均方根误差都略小于对照试验; 湿度(图 7d₁、d₂)对照试验和混合尺度试验的背景场都偏高明显, 经过分析后偏高问题都有所缓解, 混合尺度试验湿度的背景场与分析场均方根误差也整体略小于对照试验。

由以上分析可知, 经过多次分析循环后, 混合尺度试验的背景场和分析场质量都好于对照试验, 特别是风场, 其背景场和分析场的均方根误差明显小于对照试验。

4.3 降水预报

从月平均 24 h 预报降水分布(图 8b、c)可以看出, 对照试验暖启动预报 3—8 mm 量级降水比冷启动预报在东北区域、河北、河南、山东出现大范围空报; 混合尺度试验暖启动预报中这些区域的降水空报现象有明显改善(图 8d), 降水预报与对照试验冷启动预报相当。对照试验暖启动预报 8—15 mm 量级降水在安徽、江西、浙江的空报现象在其冷启动

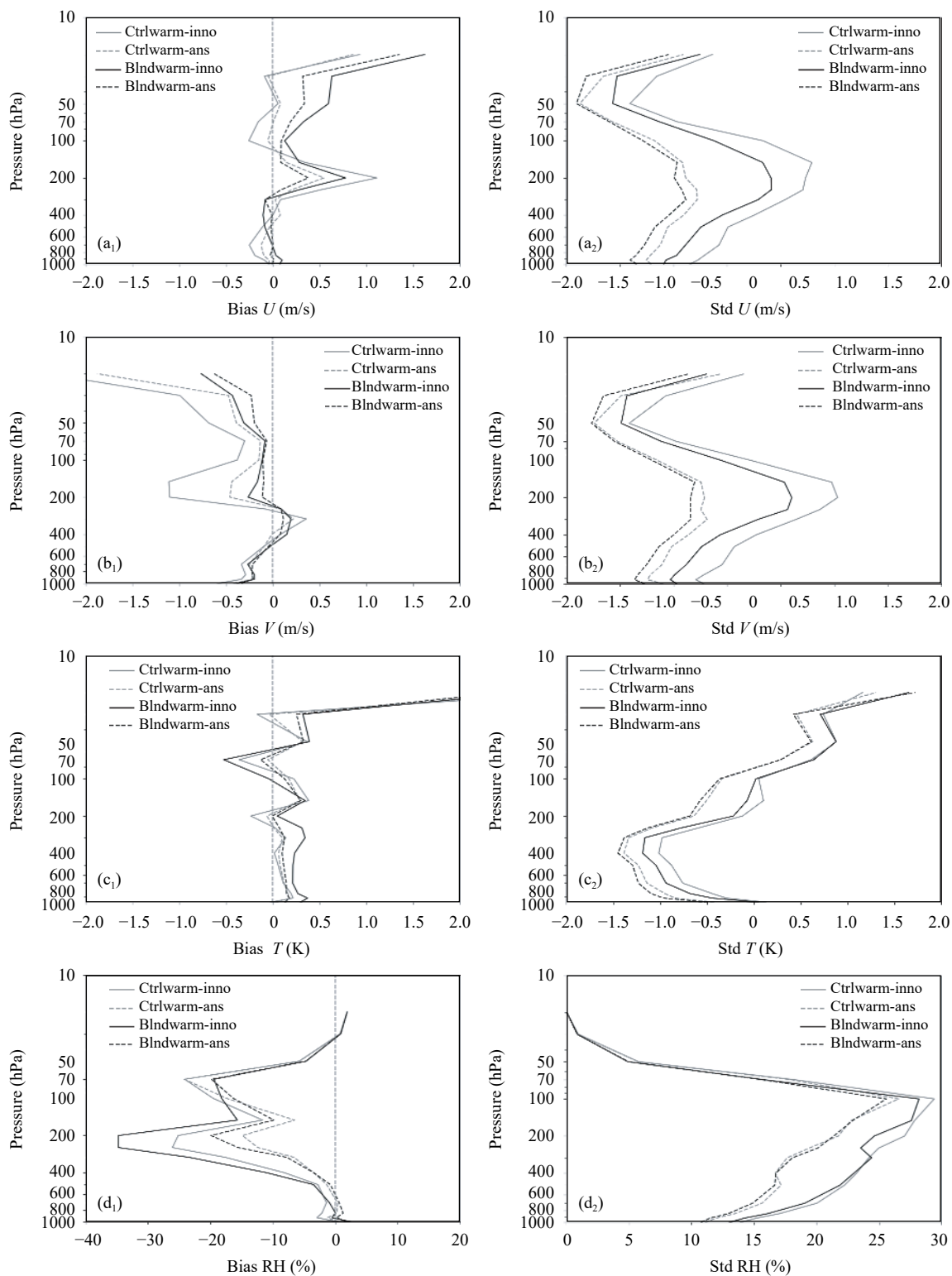


图 7 暖启动 00 时的背景场与分析场的月平均 (a_1-d_1) 偏差和 (a_2-d_2) 均方根误差

(a. U 风场, 单位: m/s; b. V 风场, 单位: m/s; c. 温度, 单位: K; d. 相对湿度, 单位: %)

Fig. 7 Biases (a_1-d_1) and root mean square errors (a_2-d_2) of monthly average background and analysis with radiosonde observations

(a. U -component, unit: m/s; b. V -component, unit: m/s; c. temperature, unit: K; d. relative humidity, unit: %)

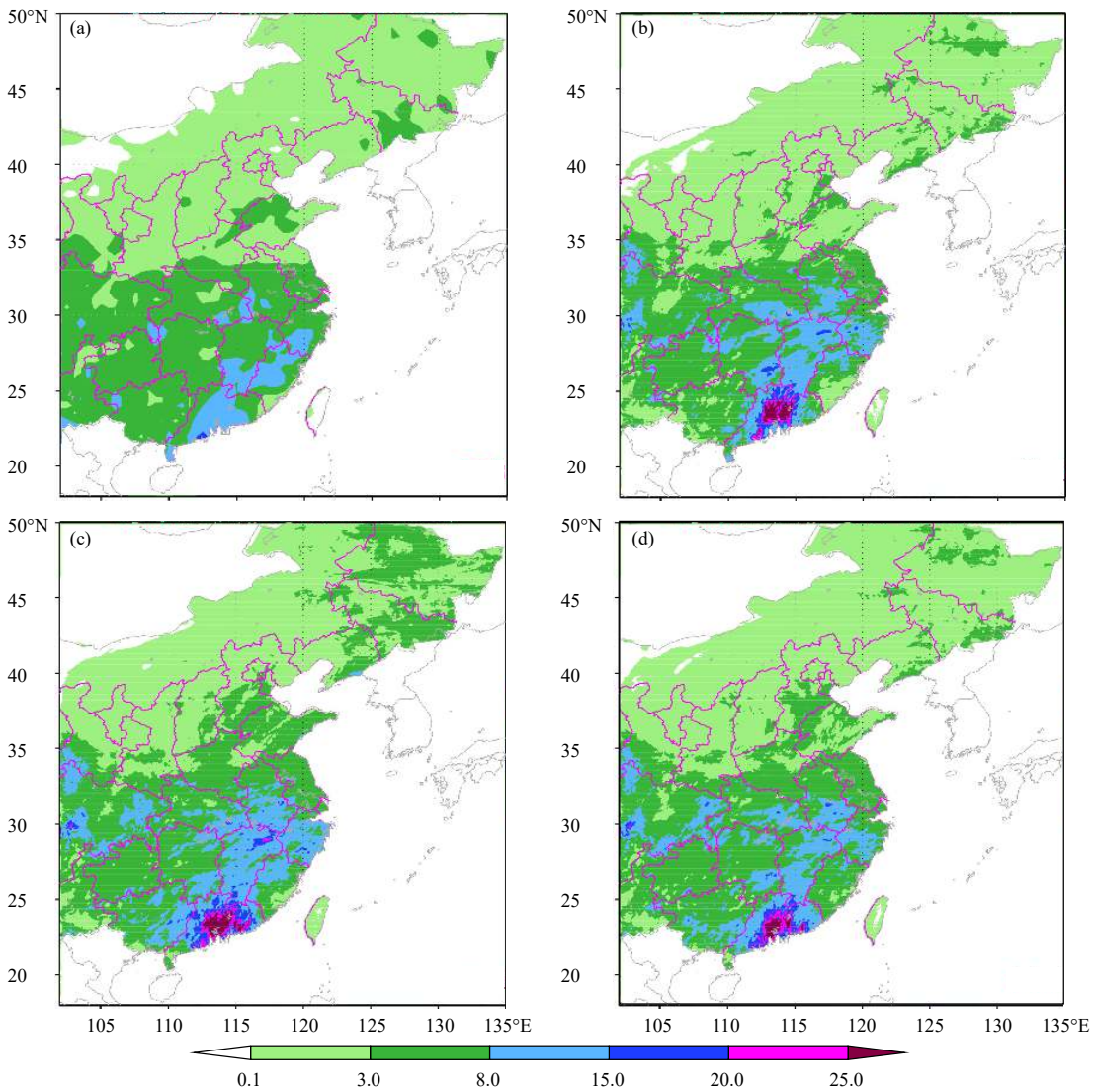


图8 月平均24 h降水(单位: mm)

(a. 观测, b. 对照试验冷启动预报, c. 对照试验暖启动预报, d. 混合尺度试验暖启动预报)

Fig. 8 Monthly mean 24 h accumulated precipitation (unit: mm)

(a. observations, b. Ctrlcold, c. Ctrlwarm, d. Blndwarm)

和混合尺度试验暖启动预报中也有缓解(图8b、c、d)。与降水观测比较(图8a), 对照试验暖启动预报在江西北部预报降水过强(15—25 mm); 混合尺度试验暖启动降水预报值最接近观测。同时对对照试验暖启动预报广东省月平均降水15 mm以上量级的范围偏大, 强度偏强, 其冷启动预报和混合尺度试验范围略小, 相对更接近观测。由于冷启动预报只进行一次分析, 混合尺度与对照试验的冷启动月平均24 h预报降水差别不明显(图略)。

比较4组试验月平均每6 h降水预报的ETS评

分和偏差评分, 从对照试验冷启动和暖启动预报结果(图9)可以看出, 暖启动预报除6—12小时的ETS评分在中雨以上量级高于冷启动预报, 其他时段和降水量级的ETS评分都明显低于冷启动预报。同样比较混合尺度试验的冷启动和暖启动预报, 整体来说冷启动也比暖启动预报的ETS评分高。

比较对照试验和混合尺度试验的冷启动降水预报的ETS评分, 除去0—12小时的特大暴雨, 12—18小时的大雨和暴雨, 18—24小时的小雨和暴雨, 混合尺度试验其他时段和降水量级的ETS评分

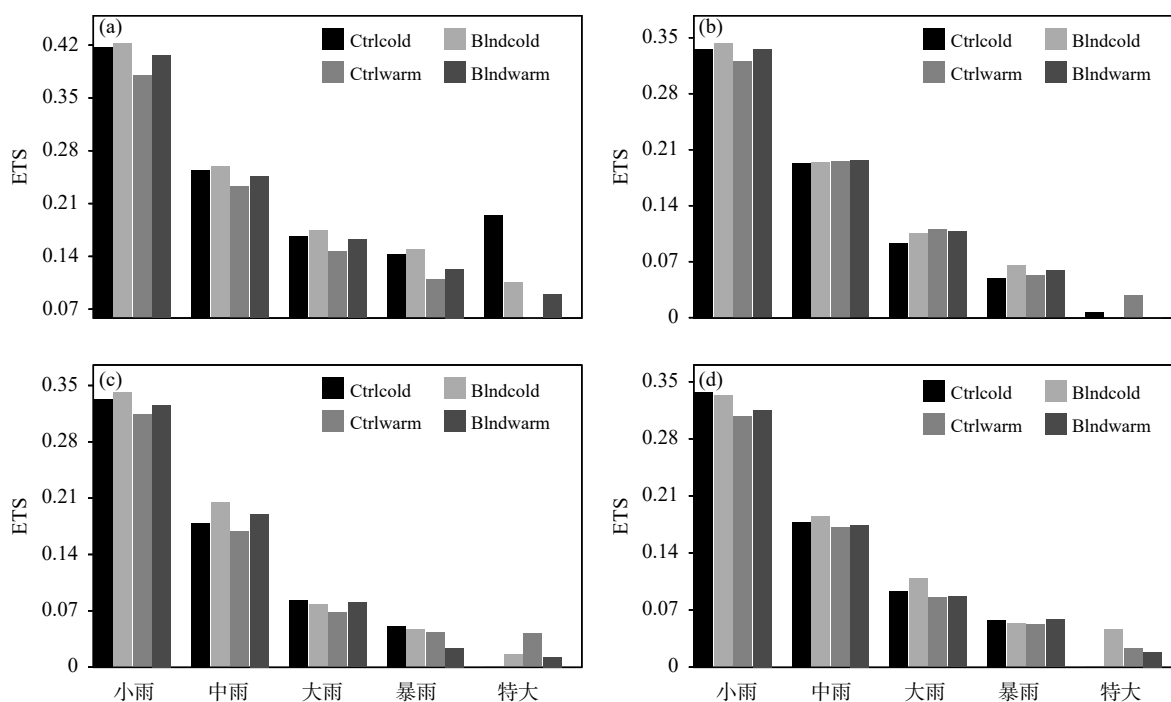


图9 各时次月平均降水预报 ETS 评分

(a. 0—6 小时, b. 6—12 小时, c. 12—18 小时, d. 18—24 小时)

Fig. 9 ETS scores of accumulated precipitation forecasts

(a. 0—6 hour, b. 6—12 hour, c. 12—18 hour, d. 18—24 hour)

都明显大于对照试验,说明一次大尺度信息的引入对降水预报整体有正影响。混合尺度试验暖启动多次引入大尺度信息后,对降水预报的正贡献更加明显,其在 0—6 小时和 18—24 小时各个降水量级的预报质量明显优于对照试验;6—12 小时的小雨和暴雨,12—18 小时大雨以下量级的 ETS 评分也明显高于对照试验。

比较对照试验冷启动和暖启动预报的月平均降水预报偏差(图 10),除去 12—18 时的大雨和暴雨,18—24 小时的特大暴雨,暖启动预报其他时段和量级的预报偏差都明显大于冷启动预报,说明对照试验暖启动空报比冷启动严重。同样比较混合尺度试验的冷启动和暖启动预报,0—6 小时各量级降水和 6—12 小时的特大暴雨,18—24 小时的暴雨,暖启动预报偏差都大于冷启动预报,有明显空报;18—24 小时特大暴雨暖启动空报率明显小于冷启动,其他时段和降水量级暖启动和冷启动预报的偏差相当。总之,对照试验暖启动比冷启动预报的空报更严重,在混合尺度试验中暖启动在 0—6 小时的空报较冷启动严重。

比较对照和混合尺度试验的冷启动降水预报偏差,0—6 小时的暴雨,6—12 小时的特大暴雨,12—18 小时的暴雨和特大暴雨,18—24 小时的中雨、暴雨和特大暴雨,混合尺度试验降水预报偏差明显低于对照试验,加入大尺度信息后对照试验的空报现象得到缓解。同样两种试验的暖启动预报在各个时段和各降水量级混合尺度试验的降水预报偏差基本都明显低于对照试验,混合尺度分析显著减少了对照试验的空报现象。

4.4 台风艾云尼试验

在两组分析预报循环试验中选取艾云尼台风个例,对台风的降水和路径预报进行详细比较,对照试验和混合尺度分析试验的设置与前面的批量试验一致。

从台风艾云尼引起的强降水模拟(图 11)可以看出,对照试验和混合尺度试验都较准确地预报出暴雨和大暴雨的落区和强度,但对照试验在河南与山东交界处以及江西北部 and 安徽南部的暴雨预报落区范围大、强度较强,混合尺度试验更接近观测;同时对对照试验对四川东北部的降水有漏报,混合尺度试

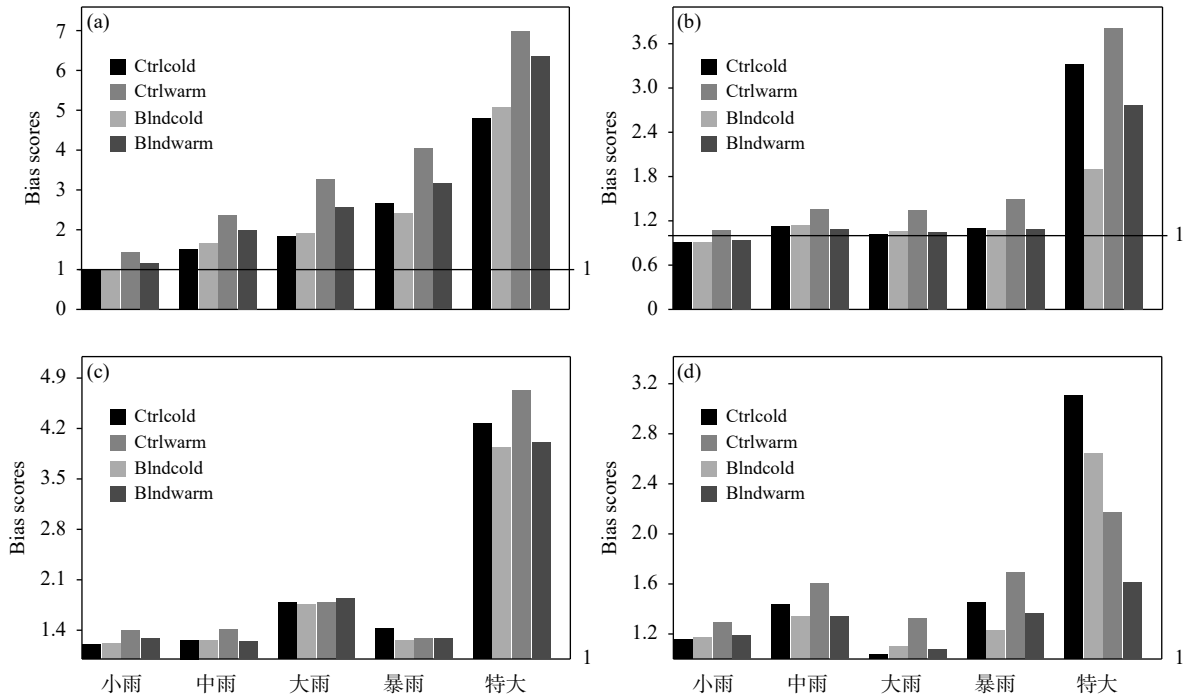


图 10 月平均降水预报偏差评分

(a. 0—6 小时, b. 6—12 小时, c. 12—18 小时, d. 18—24 小时)

Fig. 10 Bias scores of accumulated precipitation forecasts

(a. 0—6 hour, b. 6—12 hour, c. 12—18 hour, d. 18—24 hour)

验的小雨雨带位置预报与观测一致。

考察 4 组试验的台风路径预报(表 2 与图 12), 初始时刻冷启动预报两组试验的台风位置距离观测 32 km 左右, 对照试验暖启动预报初始时刻台风位置最接近观测, 路径误差 15.57 km, 混合尺度试验暖启动预报的台风位置偏南 47 km 左右; 在随后的 6—24 小时预报, 混合尺度试验暖启动的路径预报最接近观测, 在 23 km 之内; 其次是对照试验暖启动 6—18 小时预报路径比冷启动的两组试验路径预报都要接近观测。说明通过持续引入大尺度信息, 分析场和预报场的大尺度环境场模拟的更好, 从而整体台风的位置预报也更加接近实况。

5 结论与讨论

为了提高区域模式预报质量, 缓解固定边界条件不良影响和减少动力、热力调整时间, 在 GRAPES-RAFS 中引入全球模式产品的大尺度信息, 获得综合全球大尺度和区域中小尺度信息的混合尺度分析。通过 1 个月的间断循环分析预报试验, 初步得到如下结论:

(1) 混合尺度分析不仅增加大尺度部分信息, 在循环过程中也引入了区域外的信息, 使分析的动力场和热力场更协调, 更加协调的分析场使模式预报的中小尺度信息比对照试验更丰富, 从而在循环中进一步缩短模式预报的动力、热力调整时间。

(2) 比较对照试验和混合尺度试验的暖启动预报, 全球大尺度信息不断引入对暖启动的最后一次分析以及地面要素的暖启动预报改进显著, 也明显提高暖启动前 24 h 各个时段和各个量级的降水预报质量, 尤其明显减少对对照试验暖启动的空报现象。台风艾云尼的数值试验表明: 在快速分析预报循环系统中大尺度信息的持续不断引入使初始场更协调, 同时区域内外的大尺度环境场信息也逐渐引入分析中, 台风的强降水和路径预报更加接近实况。

(3) 比较对照试验的冷启动和暖启动预报, 由于采用区域模式的预报作为背景场和使用数字滤波, 从地面气压倾向可以看出暖启动的初始场比冷启动更加协调, 从动能谱分布可知暖启动的中小尺度信息也比冷启动更丰富, 因而暖启动比冷启动预报能有效减少模式动力、热力调整时间。但暖启动预报

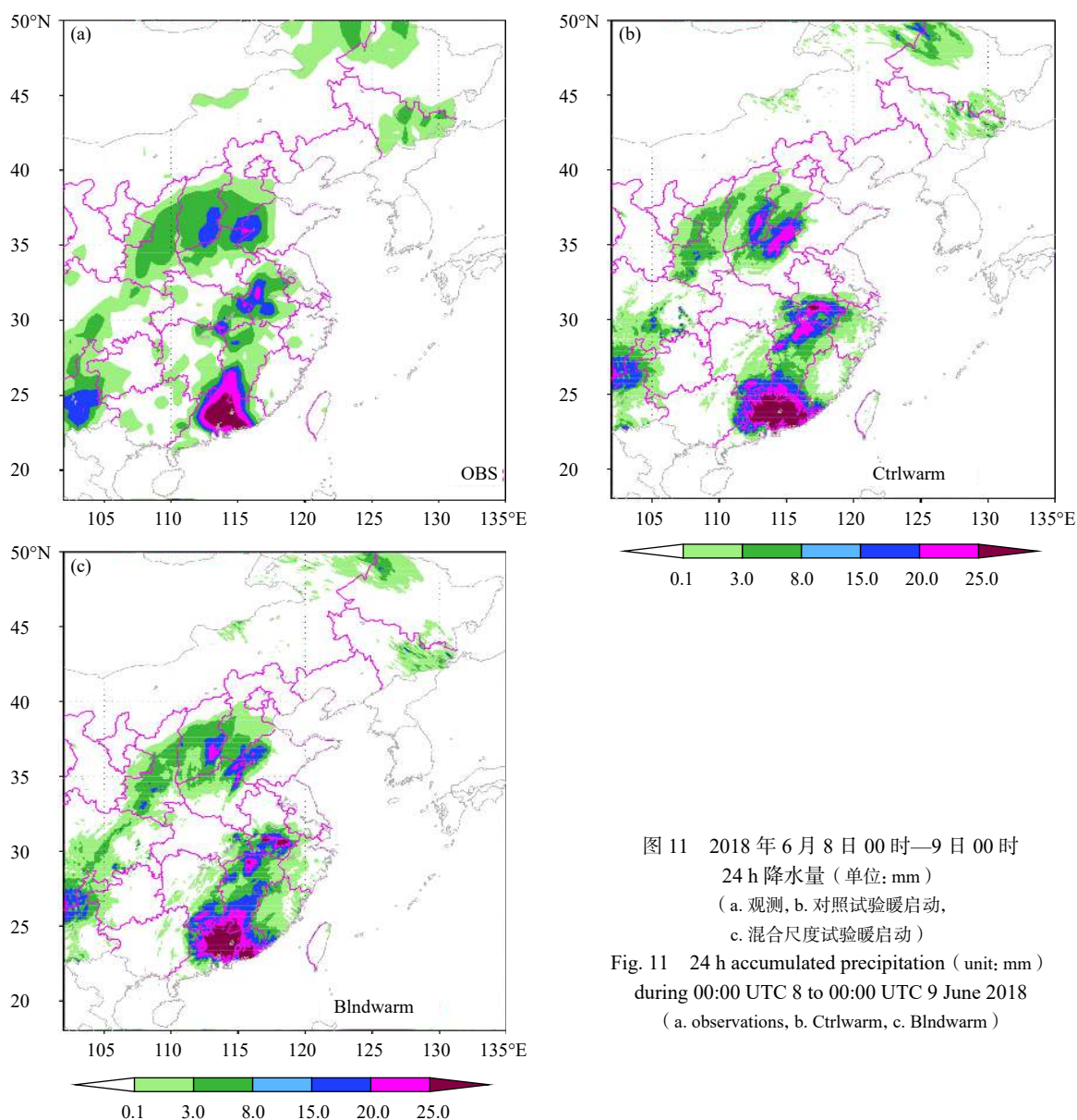


图 11 2018 年 6 月 8 日 00 时—9 日 00 时
24 h 降水量 (单位: mm)
(a. 观测, b. 对照试验暖启动,
c. 混合尺度试验暖启动)
Fig. 11 24 h accumulated precipitation (unit: mm)
during 00:00 UTC 8 to 00:00 UTC 9 June 2018
(a. observations, b. Ctrlwarm, c. Blndwarm)

表 2 2018 年 6 月 7 日 00 时起报的台风艾云尼各时次路径预报误差 (单位: km)
Table 2 Biases of the forecast path of Typhoon Ewinari initialized at 00:00 UTC 7 July 2018 (unit: km)

	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	24 h
Ctrl冷启动	32.51	5.83	52.11	42.24	50.27	32.89	29.87	51.6	35.98
Blnd冷启动	32.37	14.44	39.58	52.02	46.87	35.30	32.51	19.32	17.75
Ctrl暖启动	15.57	18.56	35.65	22.02	15.57	30.19	28.80	41.61	34.68
Blnd暖启动	47.33	18.16	18.69	14.1	16.92	16.77	17.62	22.46	21.12

12 h 内 10 m 风场的均方根误差明显高于冷启动预报, 除初始场外, 12 h 内 2 m 气温的暖启动预报效果也不如冷启动, 其前 24 h 预报的各时段 ETS 降水评分也明显低于冷启动预报, 降水空报现象比冷启动严重。

目前 GRAPES-RAFS 暖启动的短时临近预报还达不到预期的效果, 主要原因有分析框架还没有达到高分辨率中小尺度分析的要求, 观测资料数量和类型也还欠缺, 其次区域模式还需要进一步升级。分析中背景误差协方差的描述还比较简化, 例如系

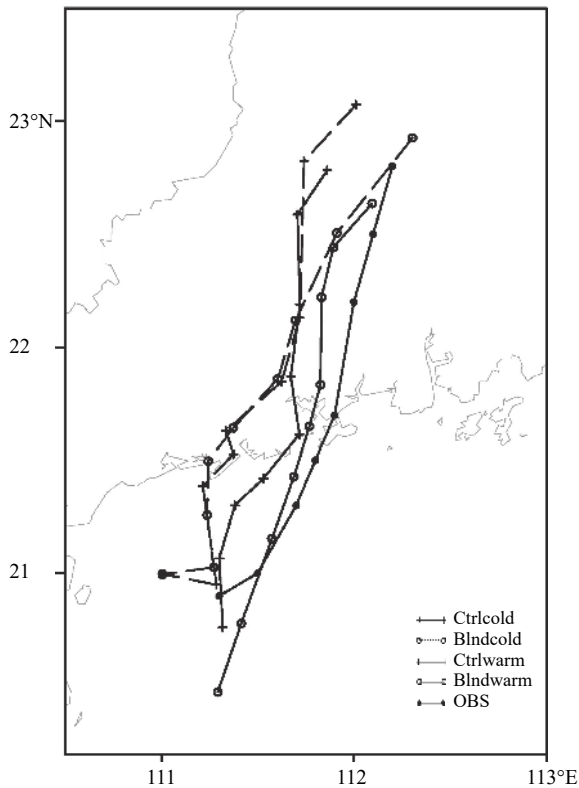


图 12 台风艾云尼路径预报

Fig. 12 Simulated track of typhoon Ewinari starting from 00:00 UTC 7 July

统中背景误差只随高度和纬度变化,背景误差水平相关尺度也只是单一固定参数,实际上采用区域模式预报场统计的背景误差和水平相关尺度不仅随高度和纬度有明显变化,其中的无量纲气压和比湿还具有明显的局地性和季节变化特征(庄照荣等, 2019)。另外在 GRAPES 全球 3DVar 系统的背景误差协方差结构中已经引入湿度与温度的统计平衡约束关系(龚建东等, 2016), 而区域分析中湿度分析还只是单变量分析。分析采用的观测资料类型和数量还太少, 缺乏高频高密度观测资料, 例如雷达径向风和反射率资料; 并且同化的观测资料时间与分析时刻偏差较大, 例如探空资料观测时间和分析时刻最多可相差 45 min; 冷启动飞机报观测时间与分析时刻最多相差 3 h, 暖启动时最多相差 90 min, 把同化时间窗的观测都当作分析时刻的观测进行同化, 在高分辨率模式和强对流天气系统中会引入很大的信息向量偏差, 较大同化时间窗也容易造成观测资料重复使用。GRAPES-3DVar 中地面和船舶报只同化地面气压, 而云导风和雷达 VAD 资料只同化风

场, 单一观测变量的同化也可造成不恰当的风压平衡分析增量。以上原因可能造成循环中观测的影响不能抵消循环中 3 h 预报误差。另外, 暖启动循环中采用数字滤波方案在滤除虚假的重力波的同时也滤除了部分有用的分析信息, 降低了暖启动的预报质量。RAFS 系统中还缺乏对短时临近预报非常重要的近地面变量的分析和陆面同化, 以及如何使模式在较短时间内产生协调的, 不需要重大动力、质量调整的高精度预报场也是一种挑战。

致谢: 感谢中国气象局数值预报中心模式研发室黄丽萍、邓莲堂、王皓和王丹在 GRAPES 区域模式预报检验上的帮助, 感谢郑永骏在谱分解及动能谱诊断上的帮助!

参考文献

- 陈子通, 黄海燕, 万齐林等. 2010. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析. *热带气象学报*, 26(1): 49-54. Chen Z T, Huang Y Y, Wan Q L, et al. 2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood seasons. *J Trop Meteor*, 26(1): 49-54 (in Chinese)
- 范水勇, 陈敏, 仲跻芹等. 2009. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. *暴雨灾害*, 28(2): 119-125. Fan S Y, Chen M, Zhong J Q, et al. 2009. Performance tests and evaluations of Beijing local high-resolution rapid update cycle system. *Torr Rain Dis*, 28(2): 119-125 (in Chinese)
- 龚建东, 王瑞春, 郝民. 2016. 温湿统计平衡约束关系对 GRAPES 全球湿度分析的作用. *气象学报*, 74(3): 380-396. Gong J D, Wang R C, Hao M. 2016. The impact of a balance constraint between temperature and humidity on the global humidity analysis in GRAPES. *Acta Meteor Sinica*, 74(3): 380-396 (in Chinese)
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂等. 2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验. *应用气象学报*, 28(1): 25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al. 2017. Main technical improvements of GRAPES_Meso V4.0 and verification. *J Appl Meteor Sci*, 28(1): 25-37 (in Chinese)
- 刘艳, 薛纪善. 2019. GRAPES 的新初始化方案. *气象学报*, 77(2): 165-179. Liu Y, Xue J S. 2019. The new initialization scheme of the GRAPES. *Acta Meteor Sinica*, 77(2): 165-179 (in Chinese)
- 马旭林, 庄照荣, 薛纪善等. 2009. GRAPES 非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展. *气象学报*, 67(1): 50-60. Ma X L, Zhuang Z R, Xue J S, et al. 2009. Development of 3-D variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES. *Acta Meteor Sinica*, 67(1): 50-60 (in Chinese)
- 王瑞春, 龚建东, 张林. 2012. GRAPES 变分同化系统中动力平衡约束的统计求解. *应用气象学报*, 23(2): 129-138. Wang R C, Gong J D, Zhang L. 2012. Statistical estimation of dynamic balance constraints in

- GRAPES variational data assimilation system. *J Appl Meteor Sci*, 23(2): 129-138 (in Chinese)
- 许晨璐, 王建捷, 黄丽萍. 2017. 千米尺度分辨率下 GRAPES-Meso4.0 模式定量降水预报性能评估. *气象学报*, 75(6): 851-876. Xu C L, Wang J J, Huang L P. 2017. Evaluation on QPF of GRAPES-Meso4.0 model at convection-permitting resolution. *Acta Meteor Sinica*, 75(6): 851-876 (in Chinese)
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟等. 2013. GRAPES_RAFS 系统研发. *气象*, 39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al. 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS. *Meteor Mon*, 39(4): 466-477 (in Chinese)
- 薛纪善, 陈德辉. 2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用. 北京: 科学出版社, 1-64. Xue J S, Chen D H. 2008. Scientific Design and Application of GRAPES. Beijing: Science Press, 1-64 (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文档. 中国气象局数值预报中心技术手册. 北京: 中国气象局, 1-11. Xue J S, Liu Y, Zhang L, et al. 2012. Scientific documentation of GRAPES-3DVar version for global model. Numerical Weather Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing: China Meteorological Administration, 1-11 (in Chinese)
- 张华, 薛纪善, 庄世宇等. 2004. GRAPES 三维变分同化系统的理想试验. *气象学报*, 62(1): 31-41. Zhang H, Xue J S, Zhuang S Y, et al. 2004. Idea experiments of GRAPES three-dimensional variational data assimilation system. *Acta Meteor Sinica*, 62(1): 31-41 (in Chinese)
- 郑永骏, 金之雁, 陈德辉. 2008. 半隐式半拉格朗日动力框架的动能谱分析. *气象学报*, 66(2): 143-157. Zheng Y J, Jin Z Y, Chen D H. 2008. Kinetic energy spectrum analysis in a semi-implicit semi-Lagrangian dynamical framework. *Acta Meteor Sinica*, 66(2): 143-157 (in Chinese)
- 庄照荣, 陈静, 黄丽萍等. 2018. 全球和区域分析的混合方案对区域预报的影响试验. *气象*, 44(12): 1509-1517. Zhuang Z R, Chen J, Huang L P, et al. 2018. Impact experiments for regional forecast using blending method of global and regional analyses. *Meteor Mon*, 44(12): 1509-1517 (in Chinese)
- 庄照荣, 王瑞春, 王金成等. 2019. GRAPES_Meso 背景误差特征及应用. *应用气象学报*, 30(3): 316-331. Zhuang Z R, Wang R C, Wang J C, et al. 2019. Characteristics and application of background errors in GRAPES_Meso. *J Appl Meteor Sci*, 30(3): 316-331 (in Chinese)
- Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon Wea Rev*, 132(2): 495-518
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2016. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh. *Mon Wea Rev*, 144(4): 1669-1694
- Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al. 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): General scientific design. *Chinese Sci Bull*, 53(22): 3433-3445
- Dahlgren P, Gustafsson N. 2012. Assimilating host model information into a limited area model. *Tellus A*, 64(1): 15836
- Denis B J, Côté J, Laprise R. 2002. Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limited-area domains using the Discrete Cosine Transform (DCT). *Mon Wea Rev*, 130(7): 1812-1829
- Guidard V, Fischer C. 2008. Introducing the coupling information in a limited-area variational assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(632): 723-735
- Hsiao L F, Huang X Y, Kuo Y H, et al. 2015. Blending of global and regional analyses with a spatial filter: Application to typhoon prediction over the western North Pacific Ocean. *Wea Forecasting*, 30(3): 754-770
- Lynch P, Huang X Y. 1992. Initialization of the HIRLAM model using a digital filter. *Mon Wea Rev*, 120(6): 1019-1034
- Lynch P, Huang X Y. 2010. Initialization//Lahoz W, Khattatov B, Menard R. Data Assimilation: Making Sense of Observation. Berlin Heidelberg: Springer, 241-259
- Wang Y, Bellus M, Geleyn J F, et al. 2014. A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: Blending. *Mon Wea Rev*, 142(5): 2043-2059
- Xue J S, Zhuang S Y, Zhu G F, et al. 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional variational data assimilation system of GRAPES. *Chinese Sci Bull*, 53(22): 3446-3457
- Yang M J, Gong J D, Wang R C, et al. 2019. A comparison of the blending and constraining methods to introduce large-scale information into GRAPES mesoscale analysis. *J Trop Meteor*, 25(2): 227-244
- Yang X H. 2005. Analysis blending using spatial filter in grid-point model coupling. *HIRLAM Newsletter*, 49-55
- Zhang H B, Chen J, Zhi X F, et al. 2015. Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system. *Adv Atmos Sci*, 32(8): 1143-1155
- Zhang R H, Shen X S. 2008. On the development of the GRAPES: A new generation of the national operational NWP system in China. *Chinese Sci Bull*, 53(22): 3429-3432