

何邓新,赖安伟,张文,等.2024.同化ECMWF短时预报场对区域中尺度模式预报的影响研究[J].暴雨灾害,43(3):288–298. HE Dengxin, LAI Anwei, ZHANG Wen, et al. 2024. Study on the influence of ECMWF short-term forecast field assimilation on regional mesoscale model forecast [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(3):288–298 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–258

同化ECMWF短时预报场对区域 中尺度模式预报的影响研究

何邓新^{1,2}, 赖安伟^{1,2,4}, 张文¹, 康兆萍¹, 王俊超¹,
王珊珊³, 郭英莲¹, 马鹤翟¹, 王志斌¹

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室/中国气象局流域强降水重点开放实验室, 武汉 430205;
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 10081; 3. 武汉气象中心台, 武汉 430205;
4. 三峡国家气候观象台, 宜昌 443000)

摘要:全球数值天气预报模式的预报场常作为背景场驱动区域中尺度天气模式业务系统,其数据质量对区域模式的预报结果具有重要的影响。华中区域中尺度业务模式使用美国环境预报中心的全球预报场(NCEP GFS)作为背景场,其预报精度有待提高。为提高模式的短期预报能力,提出一种利用三维变分方法同化高质量欧洲中期天气预报中心(ECMWF)细网格预报场改善模式初始场的方法,将NCEP GFS预报场作为背景场,同化ECMWF三维格点预报要素,开展个例和批量同化试验。首先,利用探空观测对NCEP GFS和ECMWF的12 h预报产品进行误差特征统计,ECMWF 12 h细网格预报的温度、水平风场、相对湿度的均方根误差都小于NCEP GFS预报场,因此对其进行同化是可行的。然后,对2021年8月11—13日的强降水个例进行不同分辨率的ECMWF预报场同化敏感性试验。最后,基于不同敏感性试验的结果,选择 $1^\circ \times 1^\circ$ 的ECMWF预报场对2021年8月进行批量同化试验。结果如下:(1) 2021年8月11—13日的强降水个例同化预报试验表明,要素场预报误差得到了较为显著的改善,尤其是在模式低层;对12~36 h、36~60 h、60~84 h累积降水的TS评分具有一定的改善能力,尤其是暴雨量级。(2) 不同分辨率的ECMWF预报场同化敏感性试验表明ECMWF预报场 $1^\circ \times 1^\circ$ 的预报效果要优于 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。(3) 2021年8月的批量试验结果显示,同化ECMWF 12 h $1^\circ \times 1^\circ$ 预报要素后,12 h、36 h和60 h预报的温度、湿度和风场在垂直方向上比控制试验均方根误差有所降低,降水TS评分提高明显,特别是50 mm暴雨降水TS评分,提升了13.33%,可有效改善华中区域数值天气预报系统对强降水的预报能力。

关键词: ECMWF, 三维变分同化, 强降水, 华中区域中尺度模式

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–258

Study on the influence of ECMWF short-term forecast field assimilation on regional mesoscale model forecast

HE Dengxin^{1,2}, LAI Anwei^{1,2,4}, ZHANG Wen¹, KANG Zhaoping¹, WANG Junchao¹,
WANG Shanshan³, GUO Yinglian¹, MA Hedi¹, WANG Zhibin¹

(1. *Institute of Heavy Rain, CMA, Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory, Wuhan 430205*; 2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*; 3. *Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074*; 4. *Sanxia National Climate Observatory, Yichang 443000*)

Abstract: The forecast of the global numerical weather prediction model is often used as the background field to drive the regional mesoscale weather models, and its forecast quality has an important impact on the prediction skill of regional models. The mesoscale operational

收稿日期: 2022–12–21; 定稿日期: 2023–09–05

资助项目: 国家自然科学基金项目(42230612, 42005121, 41705019); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J010); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW–A03); 湖北省气象局科技发展基金项目(2021Z03, 2023Q03, 2023Y03)

第一作者: 何邓新, 主要从事数值预报与资料同化研究。Email: whihredx@163.com

通信作者: 张文, 主要从事数值预报检验和评估研究。Email: 10110487@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

model in Central China uses the Global Forecast Field (NCEP GFS) of the US Center for Environmental Prediction as the background field, and its forecast accuracy needs to be improved. This paper proposes a method to improve the initial field of the model by using the three-dimensional variational method to assimilate the high-quality European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) fine-grid forecast field to improve the short-term forecasting ability of the model. At first, the error characters of the 12 h forecast products of NCEP GFS and ECMWF were analyzed by using sounding observations. The RMSE (root mean square error) of temperature, horizontal wind field and relative humidity of ECMWF 12 h forecast are smaller than those of NCEP GFS forecast. Second, sensitivity experiments of ECMWF forecast field assimilation with different resolutions were conducted. Finally, $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ resolution was selected based on the sensitivity experiments and a series of the data assimilation experiments with $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ resolution was performed for August 2021. The results are as follows. (1) The assimilation forecast of heavy rain from 11 to 13 August 2021 shows that after 12 hours of spin-up, the forecast error of the element field has been significantly improved, especially at the bottom of the model. The TS score of 12–36 h, 36–60 h and 60–84 h cumulative precipitation has a certain improvement, especially the forecast of rainstorm magnitude. (2) ECMWF forecast field assimilation sensitivity experiments with different resolutions show that the forecast effect of ECMWF forecast field with $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ resolution is better than $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ and $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$. (3) A series of the data assimilation experiments for August 2021 shows that the assimilation of ECMWF 12 h $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ predicted variables has a lower RMSE of the 12 h, 36 h and 60 h forecasted temperature, humidity and wind field in the vertical direction than the control experiments, and the TS score was significantly improved, especially for 50 mm heavy rain precipitation, with an increase of 13.33%, which can effectively improve the forecast skills of the Wuhan Mesoscale Model.

Key words: ECMWF, 3DVar, heavy rain, Wuhan Mesoscale Model

引言

全球数值天气预报模式的预报场常作为背景场驱动区域中尺度天气模式业务系统,其预报质量对区域模式的预报结果至关重要。作为一个初值问题,背景场资料的质量对数值模式的预报水平起着关键作用;已有研究表明,初始场的微小变化对中尺度对流系统的预报具有显著影响(Melhauser and Zhang, 2012; Wu et al., 2013)。利用多源观测资料改善全球和区域中尺度数值天气预报模式的初始场质量是提升数值模式预报性能的重要方法之一(陈葆德等, 2013; 李泽椿等, 2014)。然而,常规观测资料在空间覆盖面和时间尺度尤其是时空分辨率上,受观测设备分布的局限,常常无法捕捉发展迅速且变化剧烈的中小尺度天气过程(毛璐等, 2022; 许冬梅等, 2022)。因此,仅使用常规观测资料进行同化,相应的分析场将难以刻画实际大气的中小尺度天气系统(张旭斌等, 2015)。同化卫星等非常规资料是目前较为重要的研究和业务应用工作,但非常规观测资料常受限于如资料的质量控制、偏差订正、遥感仪器发射率的修正等技术问题,从研究阶段到实现业务化应用还有相当的距离。因此,在区域业务模式中同化高时空分辨率的观测资料从而达到快速提高预报水平仍存在一定的困难;选择质量更高的背景场资料驱动区域模式,更容易提升模式预报能力。一些研究者通过将ECMWF细网格预报场直接作为背景场驱动业务预报,从而提高模式预报水平,例如,朱红芳等(2007)利用GRAPES使用T213 L31和NCEP GFS资料作为初始和边界条件进行个例试验,初步探讨了GRAPES模式对

不同初始条件的敏感性。徐国强等(2019)针对一次发生在华南地区的暴雨个例,模式背景场分别采用NCEP GFS资料和T639 (T639_run)资料,利用CMA-Meso模式进行模拟,指出用GFS资料为背景场进行数值模拟时,实际暴雨区上空的上升气流较弱,水汽输送也较弱,预报效果弱于使用T639资料做背景场的预报效果。董美莹等(2021)利用高质量ECMWF资料作为背景场,采用谱逼近的方法对浙江省台风进行精细化研究,有效提高了台风路径、强度及降水预报效果。

华中区域中尺度数值预报业务模式系统以NCEP GFS (National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System) 预报场为背景场,基于WRF-ARW V4.4.1模式(Skamarock et al., 2008),分别于每日08:00、20:00 (北京时,下同)起报,向华中区域稳定提供84 h的业务预报(陈超君, 2014; 赖安伟等, 2017; 王明欢等, 2019)。然而应用评估也表明,系统存在预报效果尤其是TS评分不如欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF)模式这一局限(Molteni et al., 1996)。

NCEP GFS 12 h预报数据空间分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, ECMWF预报产品细网格数据空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$, ECMWF预报产品拥有更高的分辨率。对比两者的预报效果,ECMWF预报明显更优(李庆等, 2014; 王晓峰等, 2021),获取更优质的背景场成为提高华中区域中尺度业务模式预报水平面临的挑战之一。然而,湖北省能够实时获取的ECMWF细网格预报场虽然分辨率较高,但因其要素较少,直接作为背景场驱动业务模式难以实时运行。因此就业务应用而言,类

似于华中区域的大部分区域数值预报模式系统,多采用 NCEP GFS 或 CMA-GFS (China Meteorological Administration-Global Forecast System)前 12 h 或 6 h 起报的全球预报场驱动区域模式,如新一代上海区域中尺度模式 SMS-WARMS v2.0 采用 GFS 作为背景场(徐同等,2016)。

将 ECMWF 预报和业务模式结合,提高业务模式的预报效果,是本文拟解决的问题。庄照荣等(2020)在 GRAPES-RAFS (Global/Regional Assimilation and Prediction System-Rapid Analysis and Forecast System)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,不仅可以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。将 ECMWF 等全球模式产品作为额外的信息源应用于区域模式预报和模式检验中,对更好地利用模式产品做出有效的天气预报有重要的作用,有效提高了区域天气预报的水平。因此本文在现有基础条件下(采用 NCEP GFS 或者 CMA-GFS 驱动区域数值预报业务系统),提出利用三维变分方法同化高质量 ECMWF 细网格预报场改善模式初始场的方法,以提高区域数值预报产品的准确性。该方法通过将 ECMWF 预报场在分析区域内的温度、气压、湿度和风向风速等要素场作为“观测”,采用三维变分的方法同化到业务系统中,达到优化初始场的效果,以期提高业务模式系统的预报能力。

1 模式介绍及资料与方法

首先利用探空资料对 ECMWF 预报场的误差进行统计分析,获得“观测误差”;随后,通过强降水个例同化试验探究不同分辨率 ECMWF 预报场同化对强对流降水过程的影响,以筛选最优分辨率同化方案;最后,开展了一个月的批量同化及预报试验来检验 ECMWF 预报产品同化的效果,并最终实现 ECMWF 细网格预报场在中尺度业务模式中的应用。

1.1 华中区域中尺度模式

华中区域中尺度数值模式(Wuhan Mesoscale Model, WHMM)目前采用两层嵌套网格(见图1),全国范围和华中区域的水平分辨率分别为 27 km 和 9 km,格点数分别为 370×214 和 250×190 ,中心位于(114.133°E , 30.617°N),垂直方向均为 51 层,模式层顶气压为 20 hPa,采用的是 WRF 三维变分同化系统。主要物理过程参数化方案包括 Noah 陆面过程方案(Chen and Dudhia, 2001)、RRTMG 短波和长波辐射方案(Iacono et al., 2008)、YSU 大气行星边界层方案(Hong et al., 2006)、Thompson 云微物理方案(Thompson et al., 2008)和

Tiedtke 积云参数化方案(Tiedtke, 1989)。WHMM 每日 08:00 和 20:00 各起报一次。为了利用更多的观测资料以提高初始场精度和缩短 spin-up 时间,WHMM 在暖启动前有一次冷启动。冷启动以起报时间前 12 h 的 NCEP GFS 预报场数据作为同化分析的背景场,暖启动预报则利用前一次冷启动的 6 h 预报场作为背景场,并同化观测资料,再进行 84 h 预报。暖启动可以改善模式 spin-up 问题,获得更优的初始场。

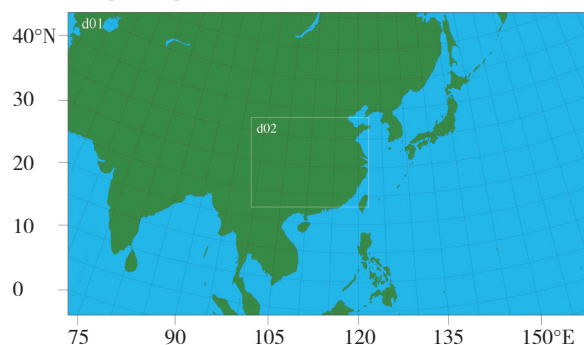


图1 模式模拟区域设置(d02、d01 区域水平格距分别为 9 km 和 27 km)

Fig. 1 Configuration of the model domain, (the d01 corresponds to the 27-km horizontal resolution, the d02 with thick white frame has a 9-km resolution)

1.2 资料来源

研究使用的资料主要为 2021 年 8 月的数据,包括:(1)取自 CIMISS 自动站数据库的华中区域(105° — 120°E , 25° — 35°N)国家及区域气象站实况降水数据和约 1 300 个国家气象观测站的温、压、湿、风观测资料。(2)每日 08:00 和 20:00 的实况探空数据,垂直方向包括近地层、850、700、500 和 200 hPa,要素值包括位势高度、温度、风速风向、温度露点差等。(3) NCEP GFS 数据,预报时间间隔为 3 h,每天更新四次,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,垂直方向层数为 31 层,数据包括气压、温度、比湿、风和露点等。(4) ECMWF 细网格预报数据,时间间隔为 6 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向层数为 60 层,数据包括气压、温度、风、比湿和露点等。

1.3 同化试验设计

选取 2021 年 8 月 11—13 日的降水过程进行敏感性试验,共设计控制试验(CTRL)和三组不同分辨率的 ECMWF 数据同化试验。控制试验设置和业务模式相同,只同化常规观测资料;另外三组试验在同化常规观测资料的基础上,分别同化经过稀疏化处理的 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 分辨率(EXP_1.0)、 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率(EXP_0.5)和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率(EXP_0.25)的 ECMWF 细网格数据。根据个例敏感性试验筛选出最优的 ECMWF 数据分辨率方案,对 2021 年 8 月 1—31 日的降水进行批量

试验。

1.4 三维变分同化算法

利用三维变分同化方法同化不同分辨率的EC-MWF预报场在预报区域内的温度、压强、湿度和风向风速等要素场。3DVar的最优分析是通过求解代价函数的极小值而获得,其代价函数(Ide et al., 1997)为

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(H(x) - y^0)^T \mathbf{R}^{-1}(H(x) - y^0) + J_c(x) \quad (1)$$

式(1)中, J 为目标函数, x 为分析向量, x^b 为背景向量, y^0 为观测向量。 H 为观测算子, J_c 为弱约束; \mathbf{B} 为背景误差协方差矩阵; \mathbf{R} 为观测误差协方差矩阵。资料同化的分析场由 \mathbf{B} 和 \mathbf{R} 共同决定。

2 结果与分析

2.1 ECMWF和NCEP GFS数据特征分析

试验之前,首先对ECMWF和NCEP GFS数据进行误差特征分析。以华中区域探空观测数据作为真实场,对比2021年8月份ECMWF资料和NCEP GFS资料

的12 h预报场在该区域与探空数据的均方根误差(RMSE)。将ECMWF和NCEP GFS预报场插值到探空站点,计算高度、温度、湿度和风的RMSE(图2)。

从图2a可以看出,ECMWF数据和NCEP GFS高度场的均方根误差均随着高度增加而增大,ECMWF高度场的均方根误差偏大;ECMWF和NCEP GFS温度的均方根误差均呈现随高度先减小后增大的相似趋势,而前者相对小一些(图2b);湿度则呈现出相反的趋势,随高度增加均方根误差先增大后减小,但ECMWF湿度场的均方根误差仍整体小于NCEP GFS数据(图2c);ECMWF预报场的纬向风的均方根误差小于NCEP GFS预报场,两者随着高度均有所增大(图2d);ECMWF预报场和NCEP GFS预报场的经向风的均方根误差均随着高度先增大后减小,在低层,ECMWF和NCEP GFS预报场的经向风均方根误差差距较小,超过700 hPa后,ECMWF的均方根误差显著小于NCEP GFS(图2e)。ECMWF预报的高度场的均方根误差偏大,温度、湿度和风场等变量相对于NCEP GFS均是偏小的。

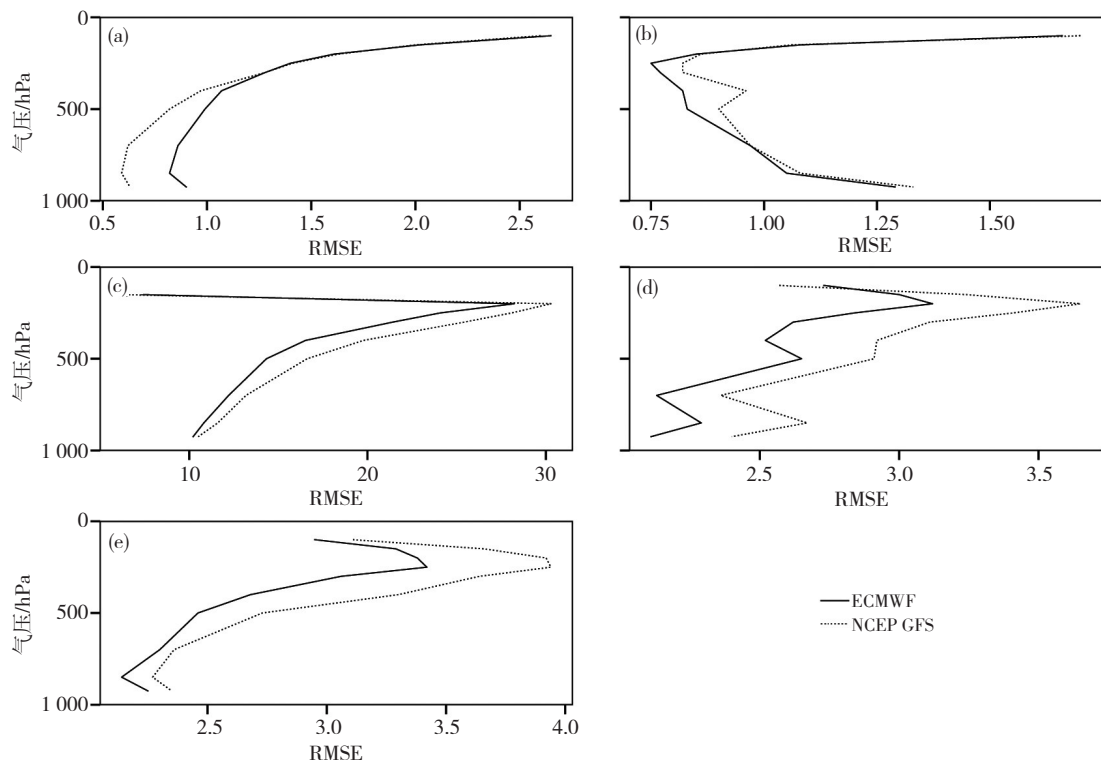


图2 ECMWF和NCEP GFS 12 h预报场位势高度(a, 单位: gpm)、温度(b, 单位: °C)、湿度(c, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、纬向风(d, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和经向风(e, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的均方根误差(RMSE)

Fig. 2 Area-mean profiles in RMSE of (a) geopotential height (unit: gpm), (b) temperature (unit: °C), (c) relative humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) zonal wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (e) meridional wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) for ECMWF and GFS

2.2 个例试验

2.2.1 个例概况

2021年8月11—13日,湖北省出现了当年强度最强、范围最广、持续时间最长的降水过程,多站出现极

端降水事件,湖北1453个站雨量超过50 mm(占总站数52.9%),445个站超过100 mm(占总站数16.2%),宜城、南漳、随州3站降水量达极端3日降水事件标准,其中以12日大暴雨范围最广、强度最强(国家站出现

7站大暴雨、1站特大暴雨)。此次强降水区雷达回波具有中尺度涡旋结构特征,整体呈西北—东南向带状分布于鄂北中部一带,具有稳定少动、降水效率高、持续时间长等特点(汪小康等,2022),因此选择该个例开展同化对比试验可更有效地筛选最优分辨率方案,选取11日08:00作为起报时间,进行84 h预报。

2.2.2 分析场增量分析

利用WRFDA同化系统同化观测资料后会改变背景场,其改变量被称为分析增量,通过数值积分,进而影响模式预报结果。因此,首先分析同化EC-

MWF数据后模式分析场的水汽、水平风场和温度增量变化。以模式第五层为例,图3、4、5分别为EXP_1.0、EXP_0.5、EXP_0.25三组试验相对CTRL控制试验的水汽、水平风场和温度增量。

由图3可以看出,三组同化试验的水汽增量空间分布结构是类似的,在预报区域的西北区域,有一个负的水汽增量,而在东南区域,有正的水汽增量,水汽增加明显。东南部地区低层水汽的增加,有利于降水的形成。同时,EXP_0.25试验(图3c)具有更精细的水汽增量,如在福建、浙江有负的水汽增量,说明更精细的观测,能带来更精细的增量。

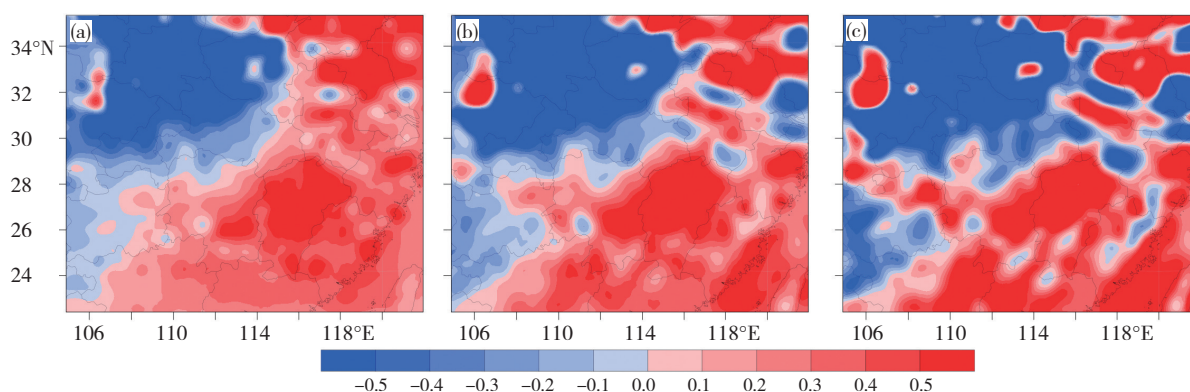


图3 EXP_1.0 (a)、EXP_0.5 (b)、EXP_0.25 (c)试验在模式d02第五层相对CTRL控制试验的水汽增量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 3 Analysis increment of the fifth model level between the experiment (a) EXP_1.0, (b) EXP_0.5, (c) EXP_0.25 and the experiment CTRL for humidity (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) over d02

图4为EXP_0.25、EXP_0.5、EXP_1.0三组试验初始场在模式第五层的风场增量。可见,在降水系统以南地

区,三组试验以南风增量为主;在降水系统以北,则以北风增量为主。再结合水汽增加,有利于后续降水的发生。

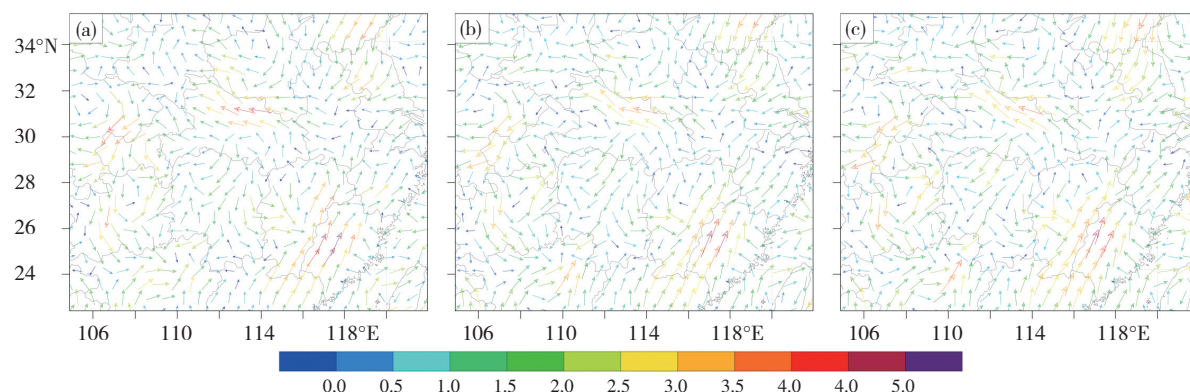


图4 EXP_1.0 (a)、EXP_0.5 (b)和EXP_0.25 (c)试验在模式d02第五层相对CTRL控制试验的风场增量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 Analysis increment of the fifth model level between the experiment (a) EXP_1.0, (b) EXP_0.5, (c) EXP_0.25 and the experiment CTRL for wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) over d02

图5可以看出三组试验相对CTRL控制试验的温度增量分布相似、形态接近,在山西、重庆及甘肃等地,主要表现为正增温,在其他地区,主要表现为负增温。

初始场动力和热力的变化对后续降水的发展至关重要,在降水系统东南部地区南风分量增量和水汽的增加,有利于后续降水的发生。从不同的分辨率敏

感性同化试验结果来看,同化的ECMWF数据分辨率越高,水汽和温度增量小尺度信息更丰富,量级也越大,但其准确程度依赖于ECMWF对小尺度信息的预报能力。因此,精细的增量场对降水的准确预报的影响是复杂的,也可能会造成降水的高估,下文将具体评估对降水的影响。

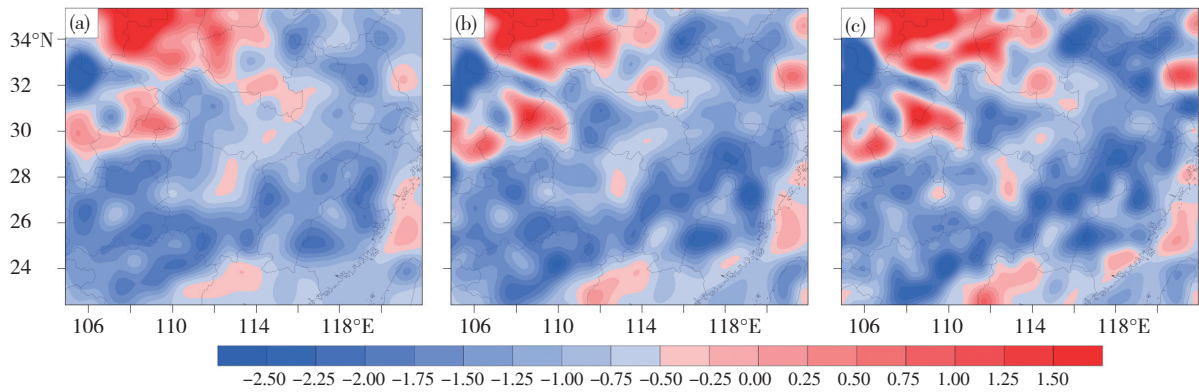


图5 EXP_1.0 (a)、EXP_0.5 (b)和EXP_0.25 (c)试验在模式d02第五层对比CTRL控制试验的温度增量(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 Analysis increment of the fifth model level between the experiment (a) EXP_1.0, (b) EXP_0.5, (c) EXP_0.25 and the experiment CTRL for temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) over d02

2.2.3 同化ECMWF预报场对预报要素的影响评估

下面将分析ECMWF预报场资料同化对2021年8

月11日降水个例位势高度、温度、压强、湿度和风的影
响。图6为2021年8月11日08:00起报,预报时效分

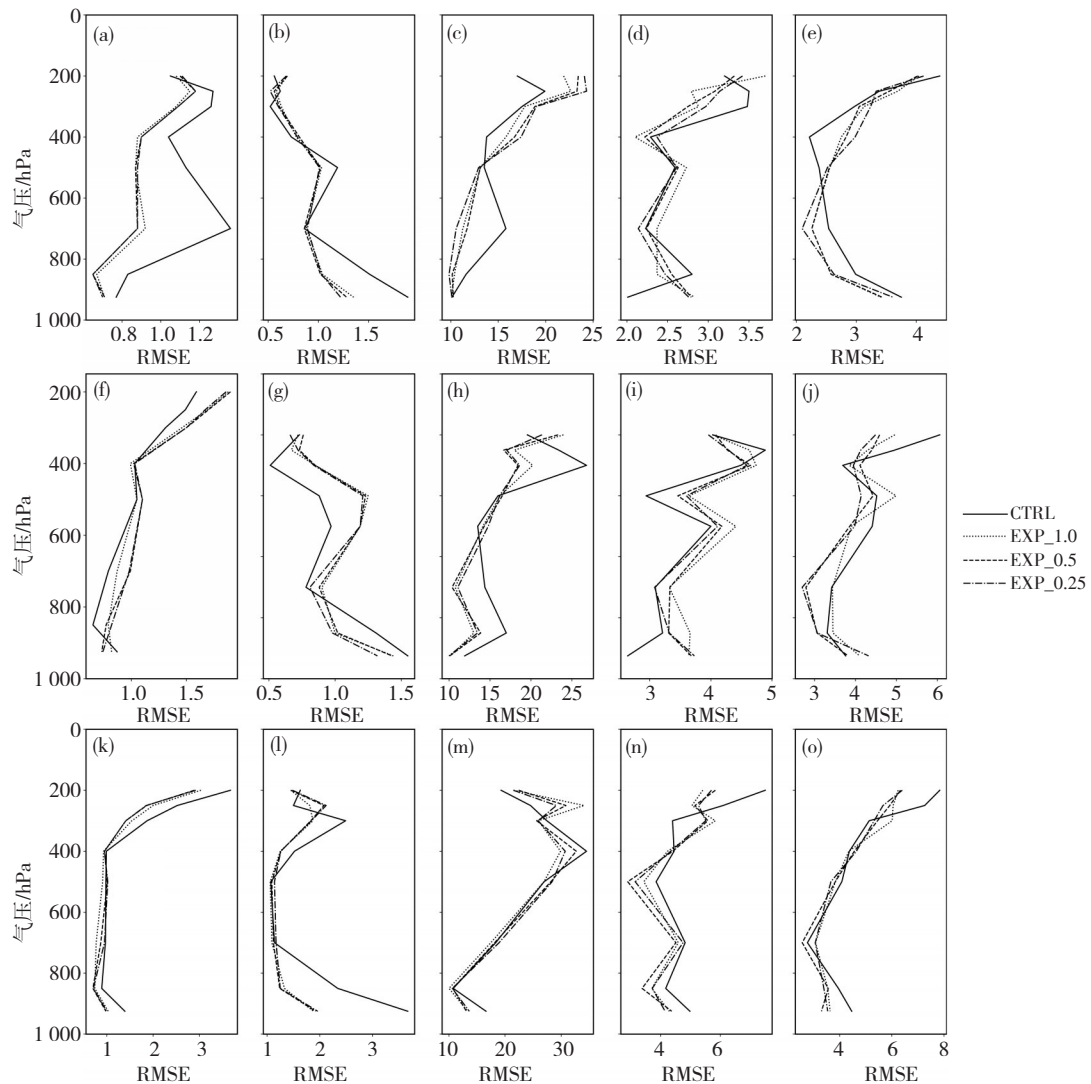


图6 四组预报试验各要素12 h (a—e)、36 h (f—j)和60 h (k—o)预报场位势高度(a、f、k,单位: gpm)、温度(b、g、l,单位: $^{\circ}\text{C}$)、湿度(c、h、m,单位: %)、纬向风(d、i、n,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和经向风(e、j、o,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的均方根误差(RMSE)

Fig. 6 Area-mean profiles in RMSE of (a, f, k) geopotential height (unit: gpm), (b, g, l) temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), (c, h, m) relative humidity (unit: %), (d, i, n) zonal wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and (e, j, o) meridional wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) for ECMWF and GFS data of forecast elements (a—e) 12 h, (f—j) 36 h and (k—o) 60 h

别为 12 h (图 6a—e)、36 h (图 6f—j) 和 60 h (图 6k—o) 的模式预报结果相对于观测(探空)的均方根误差统计结果。可见同化 ECMWF 预报场后, 三组试验的 12 h 预报对比控制试验均有效减小了高度场误差(图 6a), 气温(图 6b)、湿度(图 6c)和经向风(图 6e)的均方根误差在低层有所减小, 在高层则有一定的增大; 纬向风(图 6d)则与控制试验差别不大, 在 850—750 hPa 和 400—200 hPa 之间小于控制试验。这是因为数值模式在起报后由于 spin-up 问题使得模式在物理量场与动力场间需要时间调整来达到较为平衡的状态。三组同化试验对 36 h 预报对相对湿度(图 6h)、经向风(图 6j)和 700 hPa 以下的温度(图 6g)的均方根误差有较为明显的改善, 对位势高度(图 6f)、纬向风(图 6i)无明显改善, 反而有一定的增大; 60 h 预报三组同化试验对位势高度(图 6k)、气温(图 6l)、纬向风(图 6n)均有明显改善, 对相对湿度(图 6m)和经向风(图 6o)影响较小。

2.2.4 模式降水预报

2021 年 8 月 11 日 20:00—12 日 20:00 强降水(图 7a)主要分布在陕西南部, 湖北北部和浙江安徽江苏一带; 2021 年 8 月 11 日 08:00 起报的 11 日 20:00—

12 日 20:00 24 h 累计降水, 控制试验(图 7b)对陕西南部到湖北一带的带状降水有一定的呈现, 位置偏北, 整体强度偏弱, 在河南东南部有明显空报; 在重庆、湖北南部等地区, 强度偏弱, 落区偏北; 在安徽南部、江苏北部地区, 强降水落区偏小。EXP_1.0 (图 7c)对降水分布有所调整, 强降水区域的带状分布更为清晰, 雨带收窄, 对发生在鄂北中部的强降水雨带的预报位置也有一定改善。对发生在安徽南部地区的降水, 相比控制实验, 降水区域向东南方向调整, 有效改善河南南部地区的空报现象, 和实况更为接近, 这可能是分析场中该区域南风增大, 水汽增加产生的影响。此外, 对发生在重庆、湖南北部和湖北南部的降水强度预报落区有所调整, 和实况也更为接近。EXP_0.5 (图 7d)和 EXP_0.25 (图 7e)两组试验强降水区域增大, 降水强度也偏弱, 对鄂北中部的强降水中心, 预报位置偏东偏北。总体来看, 三组同化试验对降水落区和强度的预报与实况有较好的对应, 相对于控制试验有一定的提高, 尤其是 EXP_1.0, 对发生在重庆、湖南南部的降水以及湖北河南接壤处、安徽南部和江苏北部的降水雨带有有效的调整, 下文将给出定量评估。

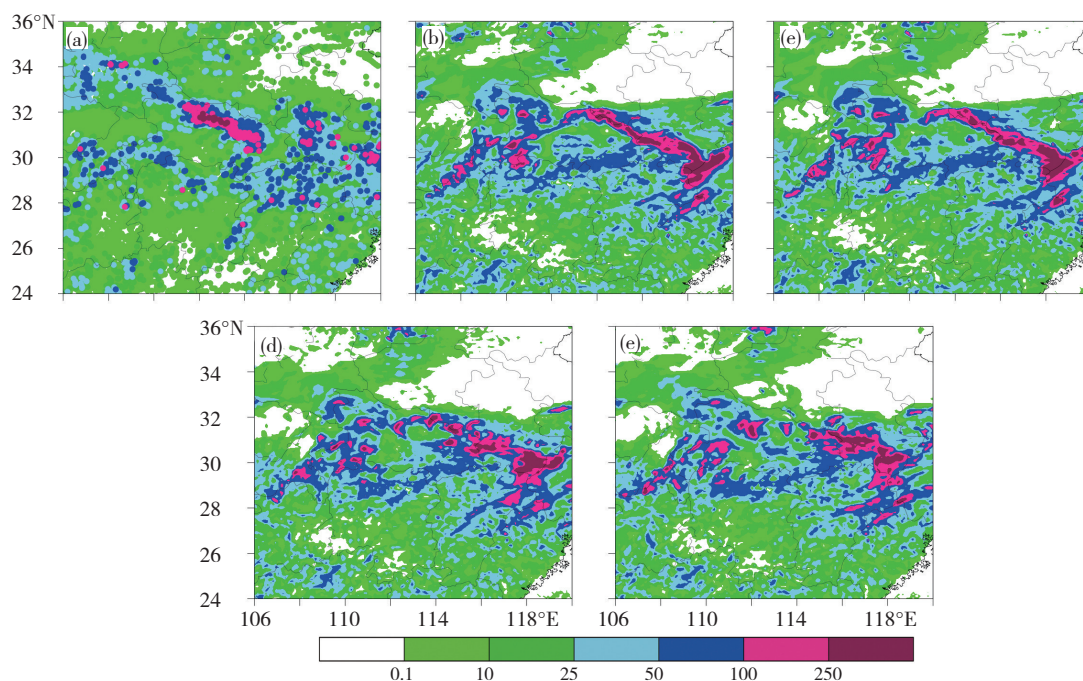


图 7 2021 年 8 月 11 日 20:00—12 日 20:00 观测(a)、CTRL (b)、EXP_1.0 (c)、EXP_0.5 (d) 和 EXP_0.25 (e) 的 24 h 累积降水(单位: mm)空间分布

Fig. 7 24-hour accumulated rainfall (unit: mm) distribution from 20:00 BT 11 August to 20:00 BT 12 August 2021 for

(a) Observation, (b) CTRL, (c) EXP_1.0, (d) EXP_0.5 and (e) EXP_0.25

四组试验在华中区域预报时效分别为 12~36 h、36~60 h、60~84 h 三个时间段内的 24 h 累积降水预报的 TS 评分(图 8)表明, 12~36 h (图 8a)的 24 h 降水预报, EXP_1.0 在小雨($\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、中雨($\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

和大雨($\geq 25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)量级的 TS 评分对比控制试验均有提高, 暴雨($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)预报水平有所下降, EXP_0.25 和 EXP_0.5 的降水预报效果没有得到改善; 36~60 h (图 8b)的 24 h 降水预报, EXP_1.0 的 TS 评分均优

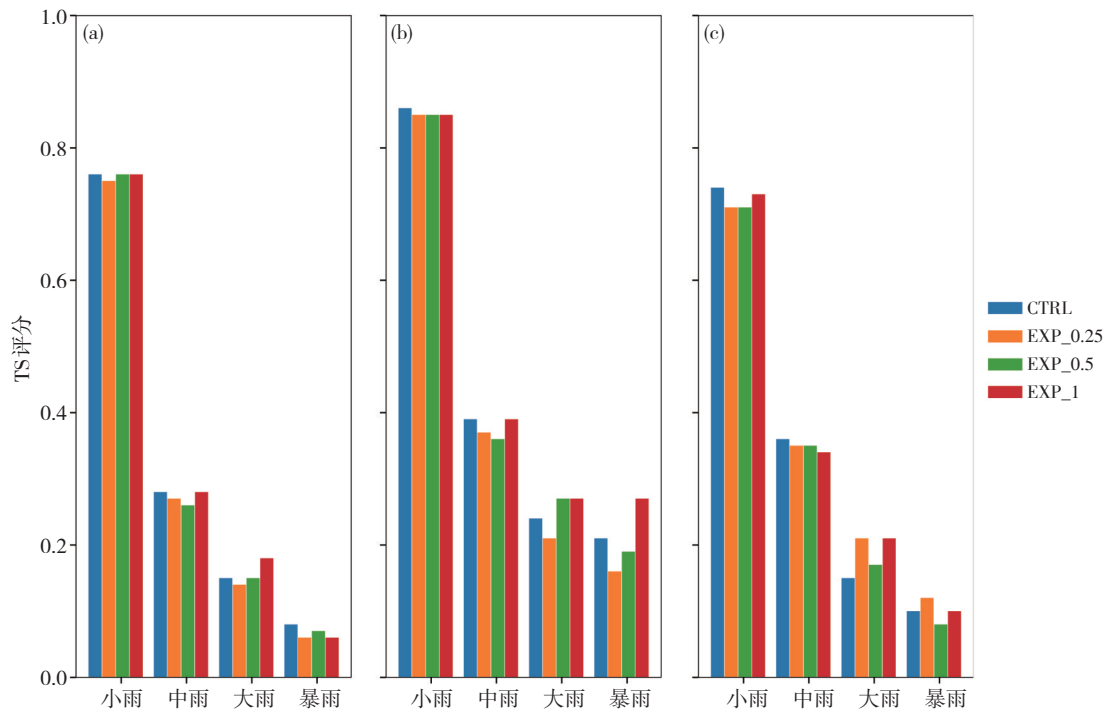


图8 控制试验和EXP_0.25、EXP_0.5、EXP_1.0在预报时效为12~36 h (a)、36~60 h (b)和60~84 h (c)的24 h累计降水预报TS评分

Fig. 8 The TS of 24 h accumulated rainfall for the experiment EXP_CTRL and EXP_1.0, EXP_0.5, EXP_0.25 during the forecast period of (a) 12~36 h, (b) 36~60 h and (c) 60~84 h

于EXP_0.5和EXP_0.25,在中雨、大雨和暴雨量级,对比控制试验,评分得到提高;在60~84 h(图8c)的24 h降水预报,三组试验在小雨和中雨量级对比控制试验对TS评分没有提高,在大雨量级,三组试验均优于控制试验,在暴雨量级,EXP_0.25达到了改善降水评分的效果。总体来看,在12~36 h和36~60 h时段,EXP_1.0对降水预报的改善比较明显。此外,由于大气模式的有效分辨率是小于它的格点分辨率的,因此,同化的数据比模式分辨率略大为佳(Jacques et al., 2018)。基于上述原因,下文选择EXP_1.0进行批量试验。

2.3 ECMWF 预报场批量同化试验

为研究ECMWF资料同化对数值模式预报的影响,本节采用探空观测数据为基准,对比分析各试验预报的高度、温度、湿度及水平风等变量的均方根误差特征。

图9为控制试验和EXP_1.0试验在2021年8月的批量试验结果,统计两组试验在12 h、36 h和60 h的预报场中高度、温度、湿度和风场在垂直方向上与探空观测资料的均方根误差。对于高度场(图9a),EXP_1.0试验的12 h预报有效减小均方根误差,700—200 hPa均方根误差减小明显,随着预报时效的延长,EXP_1.0试验高度场预报均方根误差反而对比控制试验有所增大,这和上文ECMWF特征分析一致。对于温度场

(图9b),EXP_1.0试验的12 h预报700 hPa以上和36 h预报300 hPa以上均方根误差有所增大,其余时刻,均方根误差有明显减小,而对于湿度(图9c)和风场(图9d、e),EXP_1.0试验的均方根误差在各个预报时效均有效减小,尤其是在700—200 hPa之间,且随着预报时效的延长,改进效果增大。

图10为2021年8月控制试验和EXP_1.0试验12~36 h、36~60 h和60~84 h三个预报时效在华中区域不同量级降水量级的24 h降水TS评分的结果。08:00起报的TS评分结果表明,12~36 h预报(图10a),EXP_1.0试验的降水评分除了在中雨量级外,其他降水区间均优于控制试验,其中暴雨量级TS评分由0.16增加到0.18,改进率为12.5%;36~60 h(图10b)预报,同化试验的TS评分在小雨和大雨量级与控制试验接近,在中雨和暴雨量级优于控制试验;60~84 h(图10c)预报,EXP_1.0试验在大雨量级TS评分略低于控制试验,在其他量级和控制试验相当。20:00起报的TS评分对比中,EXP_1.0试验在12~36 h(图10d)、36~60 h(图10e)、0~84 h(图10f)预报各个降水量级均优于控制试验。总体来看,EXP_1.0试验对于提高降水预报评分效果明显,小雨、中雨、大雨和暴雨的平均TS评分分别提高了2.73%、1.12%、7.38%和13.33%,对大雨和暴雨级别降水预报能力的提高较为显著。

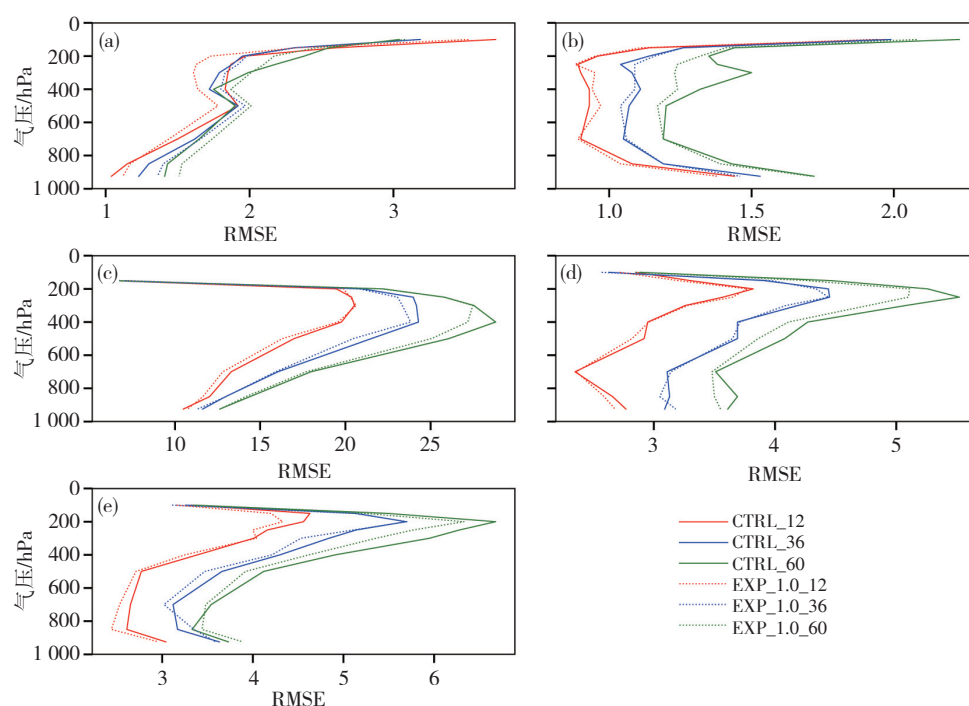


图9 控制试验CTRL和EXP_1.0试验在2021年8月预报变量位势高度(a,单位: gpm)、温度(b,单位: $^{\circ}\text{C}$)、湿度(c,单位: %)、纬向风(d,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和经向风(e,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的平均垂直廓线的均方根误差(RMSE)

Fig. 9 Area and time mean profiles in RMSE of (a) geopotential height (unit: gpm), (b) temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$), (c) relative humidity (unit: %), (d) zonal wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and (e) meridional wind (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) of August 2021 for the experiment CTRL and EXP_1.0

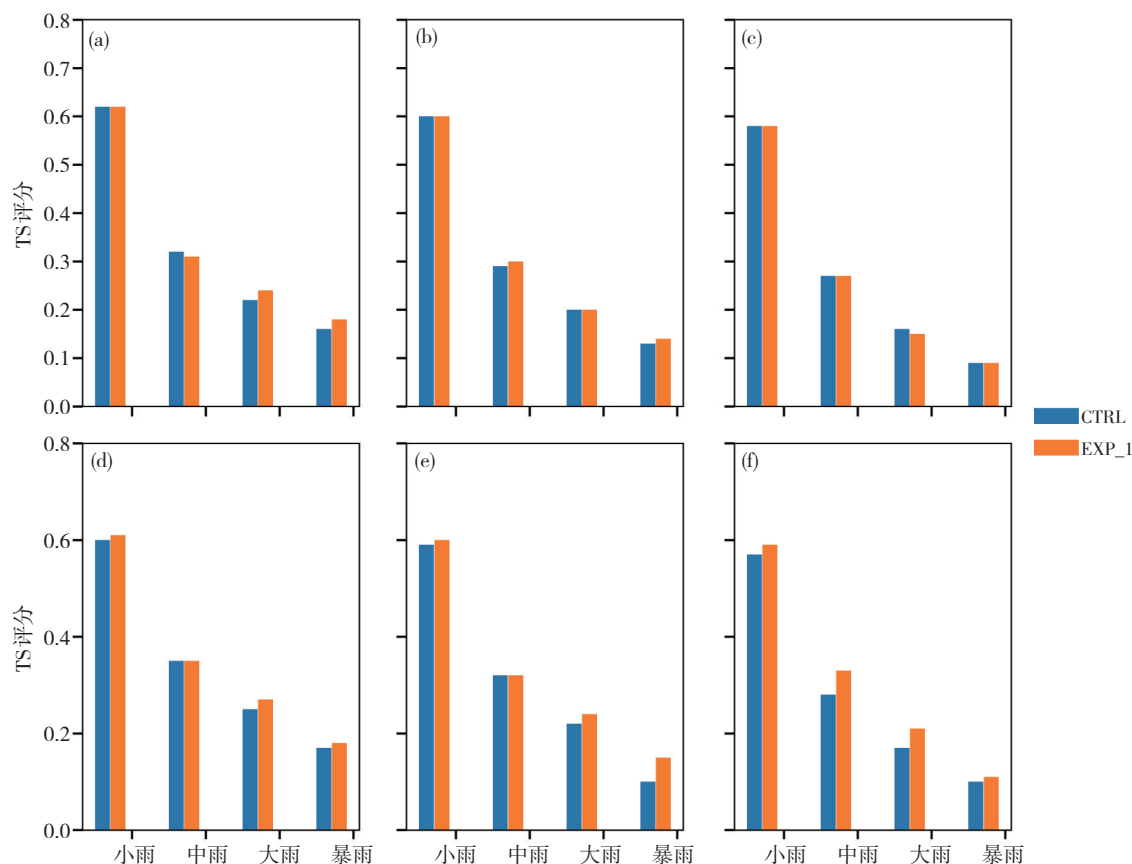


图10 2021年8月CTRL和EXP_1.0试验在08:00(a—c)起报的预报时效分别为12~36 h (a)、36~60h (b)、60~84 h (c)的降水评分和20:00(d—f)起报的预报时效分别为12~36 h (d)、36~60h (e)、60~84 h (f)的降水评分

Fig. 10 Average threat scores of 24 h accumulated precipitation of forecast time (a) 12–36 h, (b) 36–60 h, (c) 60–84 h, starting at (a–c) 08:00 BT and forecast time (d) 12–36 h, (e) 36–60 h, (f) 60–84 h, starting at (d–f) 20:00 BT on August 2021 for the experiment CTRL and EXP_1.0

3 结论与讨论

本文利用三维变分同化系统,以NCEP GFS作为背景场,将ECMWF预报要素作为“观测”进行同化研究,主要得到以下结论:

(1) 对比ECMWF和NCEP GFS数据和探空实况数据的均方根误差,ECMWF数据在温度场、湿度场和水平风场均具有小于NCEP GFS数据的均方根误差,高度场略有偏大,因此,本文提出的同化ECMWF高质量预报场以达到改进模式预报的设想是合理的。

(2) 2021年8月11—13日的强降水个例同化预报的要素场预报误差得到较为显著的改善,尤其是在模式低层,对12~36 h、36~60 h、60~84 h累积降水的TS评分具有一定的改善能力,尤其是暴雨量级。

(3) $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的ECMWF数据同化效果相对 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 更优,在20:00预报的要素场有更小的均方根误差,对12~36 h和36~60 h降水预报有更高的TS评分。

(4) $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的ECMWF数据同化在要素场均方根误差和降水TS评分的表现均优于控制试验,小雨、中雨、大雨和暴雨的平均TS评分分别提高了2.73%、1.12%、7.38%和13.33%,对大雨和暴雨级别降水预报能力的提高较为显著。

将ECMWF预报场作为“观测”进行同化改进初始场,并提升模式预报能力,其前提是长时间的模式检验表明ECMWF预报产品预报误差小于NCEP GFS。然而,在实际的业务应用中,某些个例或者区域存在前者预报误差大于后者的情况。如果仍然采用上述方法,模式初始场和预报场可能变差。因此,在下一步研究中,一方面需要统计更长时间内(如3~5 a)ECMWF预报产品在不同季节和不同区域的误差特征;另一方面,可以利用探空观测资料实时检验两个全球模式20:00预报场在不同区域的误差分布特征,只有当前者小于后者,才开展同化应用,从而实现动态调优。本文的研究方法,也可应用于其他全球数值模式系统(如CMA-GFS)提供背景场的区域模式中。

参考文献(References):

陈葆德,王晓峰,李泓,等.2013.快速更新同化预报的关键技术综述[J].气象科技进展,3(2):29–35. Chen B D, Wang X F, Li H. 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 3(2): 29–35 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2013.02.003

陈超君,李俊,王明欢.2014. 2013年华中区域中尺度业务数值预报的客观检验[J].暴雨灾害,33(2):187–192. Chen C J, Li J, Wang M H. 2014. Objective verification on the operational numerical prediction system

in central China in 2013 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 33(2): 187–192 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2014.02.012

董美莹,陈锋,邱金晶,等.2021. ECMWF 驱动场谱逼近对浙江超强台风“利奇马”(2019)精细化数值预报的影响[J]. 大气科学,45(5): 1071–1086. Dong M Y, Chen F, Qiu J J, et al. 2021. Impact of spectral nudging technique driven with ECMWF data on the fine numerical prediction of super typhoon Lekima (2019) in Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 45(5): 1071–1086 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2101.20193

赖安伟,王明欢,陈晓霞,等.2017.基于SMS的华中区域中尺度数值天气预报系统设计和实现[J].气象科技,45(1):52–58. Lai A W, Wang M H, Chen X X. 2017. Design and implementation of Central China mesoscale numerical weather prediction system based on SMS [J]. *Meteorological Science and Technology*, 45(1): 52–58 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20160013

李庆,王力群,马卫民,等.2014. ECMWF和GFS模式对一例温带气旋预报性能的对比分析[J].海洋预报,31(1):22–28. Li Q, Wang L Q, Ma W M, et al. 2014. Forecasting performance analysis of ECMWF and GFS model for a case of extra-tropical cyclone [J]. *Marine Forecasts*, 31(1): 22–28 (in Chinese). doi:10.11737/j.issn.1003–0239.2014.01.004

李泽椿,毕宝贵,金荣花,等.2014.近10年中国现代天气预报的发展与应用[J].气象学报,72(6):1069–1078. Li Z C, Bi B G, Jin G R, et al. 2014. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(6): 1069–1078 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2014.090

毛璐,谢彦辉,刘瑞霞,等.2022. FY-3C微波湿度计辐射率资料同化对RMAPS-ST系统的降水预报影响[J].高原气象,41(4):896–908. Mao L, Xie Y H, Liu R X, et al. 2022. Impact of assimilating radiances from the microwave sounder MWS-2 onboard FY-3C on rain forecasts in RMAPS-ST [J]. *Plateau Meteorology*, 41(4): 896–908 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000–0534.2021.00025

王明欢,赖安伟,周志敏,等.2019.华中区域中尺度业务模式水平风场预报能力的检验评估[J].暴雨灾害,38(4):373–379. Wang M H, Lai A W, Zhou Z M, et al. 2019. Verification of horizontal wind for Wuhan Mesoscale Model [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(4): 373–379 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2019.04.010

王晓峰,周荣卫.2021.全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J].气象,47(10):1193–1205. Wang X F, Zhou R W. 2021. Performance verification of global precipitation forecast over Yalong River Basin in flood season [J]. *Meteorological Monthly*, 47(10): 1193–1205 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.10.003

汪小康,杨浩,崔春光,等.2022. 2021年中国降水异常特征及四次典型极端天气过程分析[J].暴雨灾害,41(5):489–500. Wang X K, Yang H, Cui C G, et al. 2022. Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(5): 489–500 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–045

许冬梅,李玮,武芳,等.2022.红外高光谱IASI卫星资料同化对一次大风过程的影响研究[J].沙漠与绿洲气象,16(1):124–132. Xu D M, Li W, Wu F, et al. 2022. Impact of assimilating IASI infrared radiances on the numerical results of a strong wind case [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 16(1): 124–132 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2022.01.017

- 徐国强,赵晨阳.2019.2017年5月7日广州特大暴雨模拟中的背景场影响分析[J].气象,45(12):1642–1650. Xu G Q, Zhao C Y. 2019. Impact of background field in the numerical simulation of extremely severe rain-storm in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly,45(12): 1642–1650 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2019.12.002
- 徐同,李佳,杨玉华,等.2016. SMS–WARMS V2.0模式预报效果检验[J].气象,42(10):1176–1183. Xu T, Li J, Yang Y H, et al. 2016. Verification of SMS–WARMS V2.0 model forecast results [J]. Meteorological Monthly,42(10):1176–1183 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526. 2016.10.002
- 张旭斌,万齐林,薛纪善,等.2015.风廓线雷达资料质量控制及其同化应用[J].气象学报,73(1):159–176. Zhang X B, Wan Q L, Xue J S, et al. 2015. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(1):159–176 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.015
- 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[J].气象学报,78(1):33–46. Zhuang Z R, Wang R C, Li X L. 2020. Application of global large scale information to GRAEPS RAFS system [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(1):33–46 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.002
- 朱红芳,王东勇,管兆勇,等.2007.不同初始场条件对GRAPES模式数值预报的影响[J].气象学报,65(4):493–502. Zhu H F, Wang D Y, Guan Z Y, et al. 2007. Effects of different initial fields on GRAPES numerical prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica,65(4):493–502. doi:10.11676/qxxb2007.046
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Review,129(4): 569–585. doi:10.1175/1520–0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly Weather Review,134(9):2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. Journal of Geophysical Research,113(D13): D13103. doi:10.1029/2008JD009944
- Ide K, Courtier P, Ghil M, et al. 1997. Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational (gtspecial issue) data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan.Ser.II,75(1B):181–189. doi: 10.2151/jmsj1965.75.1B_181
- Jacques D, Michelson D, Caron J F, et al. 2018. Latent heat nudging in the Canadian regional deterministic prediction system [J]. Monthly Weather Review,146(12):3995–4014. doi:10.1175/MWR–D–18–0118.1
- Melhauser C, Zhang F Q. 2012. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales [J]. Atmospheric Science,69(11):3350–3371. doi:10.1175/JAS–D–11–0315.1
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. Quarterly journal of the royal meteorological society,122(529):73–119. doi:10.1002/qj.497122 52905
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. No. NCAR/TN–475 + STR. doi: 10.5065/D68S4MVH
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. Monthly Weather Review,136(12):5095–5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1
- Tiedtke M. 1989. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models [J]. Monthly Weather Review,117(8): 1779–1800. doi:10.1175/1520–0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2
- Wu D C, Meng Z Y, Yan D C, 2013. The Predictability of a squall line in South China in 23 April 2007 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 30(2):485–502. doi:10.1007/s00376–012–2076–x

(责任编辑 唐国瑛)