

GRAPES_YY 模式发展及其对梅雨锋降水模拟的性能检验*

赵益帆 李晓涵 彭新东
ZHAO Yifan LI Xiaohan PENG Xindong

中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2019-10-24 收稿, 2020-04-01 改回.

赵益帆, 李晓涵, 彭新东. 2020. GRAPES_YY 模式发展及其对梅雨锋降水模拟的性能检验. 气象学报, 78(4): 623-635

Zhao Yifan, Li Xiaohan, Peng Xindong. 2020. The development of the GRAPES_YY model and its performance verification for Meiyu frontal precipitation simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4):623-635

Abstract GRAPES_YY is a global non-hydrostatic model developed on the basis of a spherical quasi-uniform Yin-Yang grid, which is currently capable of forecasting medium-range weather with a full physical parameterization package being implemented. To verify the model performance and its capability of predicting multi-scale weather systems, especially the circulations, precipitation and corresponding error patterns, we first analyze a series of medium-range hindcast from 2 June to 17 July 2018, and then highlight the analysis of a Meiyu process in East China during 4–7 July 2018. The ERA-interim data and gauge-radar-satellite combined precipitation data in China are taken as the "true" situation. The model shows excellent numerical stability after the improvement of the upper boundary condition. The results display realistic distributions of global circulation and precipitation within the first three-day prediction. The model successfully reproduced the two 24 h accumulated precipitation peaks in the low-latitude and mid-latitude regions, respectively, although it overestimated convective precipitation in the low-latitudes and large-scale precipitation in the mid-latitudes. The model not only well described the location, orientation and north-south displacement of the Meiyu rain belt, but also realistically simulated the movement and evolution of the synoptic systems for the case occurred during 4–7 July. However, the simulated heavy rainfall center is weaker than observations and is located further north due to the limitation of resolution and inaccurate description of the wet physical process. In conclusion, the GRAPES_YY model on the Yin-Yang grid produces reasonable results. It demonstrates ability to predict precipitation associated with Meiyu fronts in the mid-latitude and the performance is slightly better than the original GRAPES_GFS model.

Key words GRAPES_YY global non-hydrostatic model, Yin-Yang grid, Performance verification, Model forecasting bias, Meiyu front

摘 要 GRAPES_YY 是在球面准均匀阴阳网格动力框架基础上发展起来的全球非静力模式, 目前已耦合全套物理过程参数化方案, 具备了中期天气预报能力。为了解模式对环流和降水的实际预报效果, 检验模式对多尺度天气系统的预报能力和误差分布特征, 以 ERA-interim 资料和逐时地面融合降水产品为参考, 对 1 个月 (2018 年 6 月中旬—7 月中旬) 批量试验结果和一次长江流域梅雨个例 (7 月 4—7 日) 模拟结果进行分析。结果表明: 在改进上边界条件基础上, 模式有较好的稳定性, 短期预报时效内对全球环流和降水刻画准确, 模式 24 h 累计降水纬向平均成功再现了低纬度和中纬度地区的两个降水峰值, 但对低纬度对流性降水和中纬度格点尺度降水预报偏强。其次, 模式成功模拟出 7 月 4—6 日中国东部梅雨雨带位置、走向及南北摆动, 整体上能

* 资助课题: 国家重点研发计划项目“重大自然灾害监测预警与防范”(2018YFC1507005)、国家自然科学基金项目(41575103)。

作者简介: 赵益帆, 主要从事数值天气预报研究。E-mail: zyf19951103@foxmail.com

通信作者: 彭新东, 主要从事数值天气预报研究。E-mail: pengxd@cma.gov.cn

正确反映主要天气系统的移动演变,但受分辨率限制以及湿物理过程影响,暴雨以上量级降水还存在强度预报偏弱、位置偏北的问题。GRAPES_YY 模式模拟结果基本合理可信,对高低纬度梅雨锋降水的预报能力较 GRAPES_GFS 略有改善。

关键词 GRAPES_YY 全球非静力模式, 阴阳网格, 性能检验, 模式预报偏差, 梅雨锋降水

中图法分类号 P456.7

1 引言

建立高分辨率精细全球数值预报模式已经成为大气科学研究和数值天气预报的主要任务,全球非静力大气模式也成为未来高分辨中期数值天气预报的重要工具,如日本的正二十面体非静力大气动力模式(NICAM, Satoh, et al, 2014)、德国的 ICON(ICO-sahedral Non-hydrostatic, Zängl, et al, 2015)和跨尺度大气预报模式(MPAS-A, Skamarock, et al, 2012)等。中国气象局自主研发的 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)是基于经纬度网格的完全可压、非静力模式,采用半隐式-半拉格朗日方法求解,包含多个优化的物理过程参数化方案,是全球区域一体化的同化与预报系统(陈德辉等, 2006; 沈学顺等, 2017)。早期研究表明,全球经纬度格点模式极区存在两个数值问题:一是极点奇异性,风矢量难以表达;二是极区网格辐合严重,限制了时间步长的选取(Williamson, 2007)。针对以上问题,GRAPES 全球模式采用极地滤波方案来缓解极地的高频振荡(Wang, et al, 2004; 杨学胜等, 2007),但也会滤掉大量的有效信息和增加计算负担。此外,高纬度地区网格点过多会降低亥姆霍兹方程迭代收敛的速度,极区频繁通信和近极地拉格朗日上游点的计算也都增加了模式的复杂性,降低了运行效率(杨学胜等, 2007)。而且随着模式分辨率的提高,传统经纬度网格在极区格点密集问题会更加凸显,严重限制了并行计算的可扩展性(Staniforth, et al, 2012),最终影响高分辨率模式的业务应用。

球面准均匀水平网格系统因此受到青睐,它可以避免传统经纬度网格经线辐合引起的差分计算不稳定问题,如正二十面体(Tomita, et al, 2004)、立方球心投影网格(Ullrich, et al, 2012)和阴阳网格(Kageyama, et al, 2004)等。其中,阴阳网格是由两个完全相同经纬度网格的低纬部分以互补的方式扣合而成的一个完整的全球网格系统,二者只在边界存在重叠区域。它具有相当理想的数值特性,无奇异点,网格正交且准均匀,对传统的经纬度网

格有很好的继承性,两个子网格间可以通过坐标转换公式变换(Kageyama, et al, 2004)。为了将这种优势应用到大气环流模式中, Peng 等(2006)和 Baba 等(2010)先后发展了二维和三维浅水模式阴阳网格动力框架,并利用理想试验进行了验证。目前,阴阳网格已经成为开发先进数值模式系统的选择之一,加拿大气象中心(CMC)研发了全隐式和半拉格朗日的阴阳网格动力框架,并构建了 GEM(Global Environmental Multiscale operational model)模式的阴阳网格版本(Qaddouri, et al, 2011)。

GRAPES 在阴阳网格上的重建可以从根本上解决极区问题带来的困扰,有利于实现模式向更高分辨率发展。Li 等(2015, 2018)研发了基于阴阳网格的 GRAPES_YY 模式动力框架,将原 GRAPES 全球模式的一整套物理参数化方案耦合其中,并通过水球试验长期积分验证了动力和物理过程相互作用及计算稳定性,与其他全球模式对比,初步研究了 GRAPES_YY 模拟的降水和环流特征。本研究旨在检验 GRAPES_YY 对实际大气环流和梅雨期极端降水过程的模拟能力,以评估其中短期天气预报能力。

梅雨是夏季影响中国的一类最主要的天气过程,经常导致江淮流域出现洪涝灾害。提高模式对灾害性天气的预报能力是减灾、防灾的一项重要工作任务,而梅雨锋结构由于其典型性、多样性以及多尺度相互作用明显特征(郑永光等, 2007; Luo, et al, 2014; 孙素琴等, 2015; 郑婧等, 2015)经常被作为模式检验对象,模式对梅雨锋降水的成功预报也可以初步说明其对强降水系统的刻画能力。文中主要通过批量试验和一个个例诊断分析来检验模式对平均环流和强降水的模拟能力。

2 模式、试验设计及资料

2.1 模式动力框架介绍

GRAPES_YY 是基于阴阳网格的全球非静力中期预报模式,动力框架采用半隐式-半拉格朗日积分方案,并在动力方程组中考虑了三维科里奥利力作用(Li, et al, 2015)。水平坐标基于阴阳网格坐标,垂直坐标为“高度地形追随坐标”(Gal-Chen, et

al, 1975)。水平方向和垂直方向的变量离散化分别采用 Arakawa-C 网格分布 (Arakawa, et al, 1977) 和 Charney-Phillips 跳层分布(Charney, et al, 1953)。在半隐式积分过程中通过广义共轭余差(GCR)算法对亥姆霍兹方程进行求解,实现变量更新。由于阴阳网格是由两个完全相同的子网格系统组成,两个网格系统可以共享统一的方程组和代码(Li, et al, 2015)。阴阳网格重叠区域的处理比较特殊,由于重叠区域的拉格朗日轨迹上游点会超出本网格系统计算域范围,因此其变量信息需在另一个网格系统通过双三次拉格朗日插值得到(Li, et al, 2006)。为保证模式长期积分中满足质量守恒,在动力方程组求解后,对 Π 添加了守恒强迫方案(Li, et al, 2018)。模式中采用了分段有理函数方案(PRM)计算水物质平流,有利于提高全球模式的降水预报效果(Xiao, et al, 2004; 苏勇等, 2013)。GRAPES_YY 模式中不使用人工黏性扩散处理,对模式上边界条件进行了改进,使其从数学上满足“固定盖子”边界条件。

2.2 试验设计和资料

首先通过 1 个月的批量预报试验对 GRAPES_YY 全球预报结果做初步检验,验证模式稳定性和对真实大气模拟结果的统计合理性,其次通过中国区域一次梅雨个例的模拟进一步分析模式对雨带和天气系统位置、强度和移动速度的预报效果,为模式的改进提供思路。试验中具体模式设置见表 1,模式的初始场采用 0.75°的 ERA-interim 再分析资料插值得到。批量试验从 2018 年 6 月 2 日到 7 月 17 日,每日 00 时(世界时,下同)起报,积分 15 d,预

报结果与同分辨率的 ERA-interim 再分析资料作对比分析。个例试验的分析范围为长江中下游地区,参考 ERA-interim 再分析资料和由国家气象信息中心制作的 0.05°分辨率的中国地面卫星雷达三源融合逐时降水产品(CMPA-Hourly v2.0)进行比较。

3 模拟结果

3.1 全球环流和降水预报性能检验

图 1 为连续 1 个月(2018 年 6 月 17 日—7 月 17 日)北半球各物理量的模式预报场与分析场的距平相关系数(ACC)和均方根误差(RMSE)的平均结果。距平相关系数表征两个异常场的分布形势相似性,越接近 1 表明两个场相似度越高;均方根误差表征两个场之间的偏差大小,值越小代表偏差越小。500 hPa 位势高度场的 24、72 和 168 h ACC 分别为 0.992、0.934 和 0.582, RMSE 分别为 10.979、22.016 和 50.658 gpm,按照世界气象组织的定义,500 hPa 位势高度场 ACC 超过 0.6 的天数为可用预报时效,则 GRAPES_YY 在这 1 个月的可用预报时效接近 7 d。850 hPa 温度场的 24、72 和 168 h ACC 分别为 0.912、0.797 和 0.433, RMSE 分别为 1.891、2.493 和 3.434 K。整体上看,GRAPES_YY 预报场与分析场的相关较好,均方根误差随预报时效延长而增大,0.75°分辨率模式的位势高度可用预报时效接近 7 d,流场和温度场也都表现出较好的模式预报能力。

图 2 为模式各预报时段 24 h 累计降水(包括总降水、对流降水和格点尺度降水)月平均的纬向平均与 ERA-interim 资料对比。预报场和分析场在各

表 1 GRAPES_YY 主要运行参数设置
Table 1 Configuration of GRAPES_YY model in the simulation

模式参量	设置
水平分辨率	0.75°×0.75°
垂直分辨率	60层
模式层顶高度	36 km
模式积分步长	450 s
辐射方案	RRTMG长短波辐射方案(Mlawer, et al, 1997; Iacono, et al, 2008)
近地层混合方案	基于莫宁-奥布霍夫相似理论设计的迭代算法(Zeng, et al, 1998)
边界层方案	MRF方案(Hong, et al, 1996)
积云对流方案	NSAS方案(Han, et al, 2011)
云微物理方案	双参数混合相云参数化方案(胡志晋等, 1998)
陆面过程	CoLM陆面方案(Dai, et al, 2003)

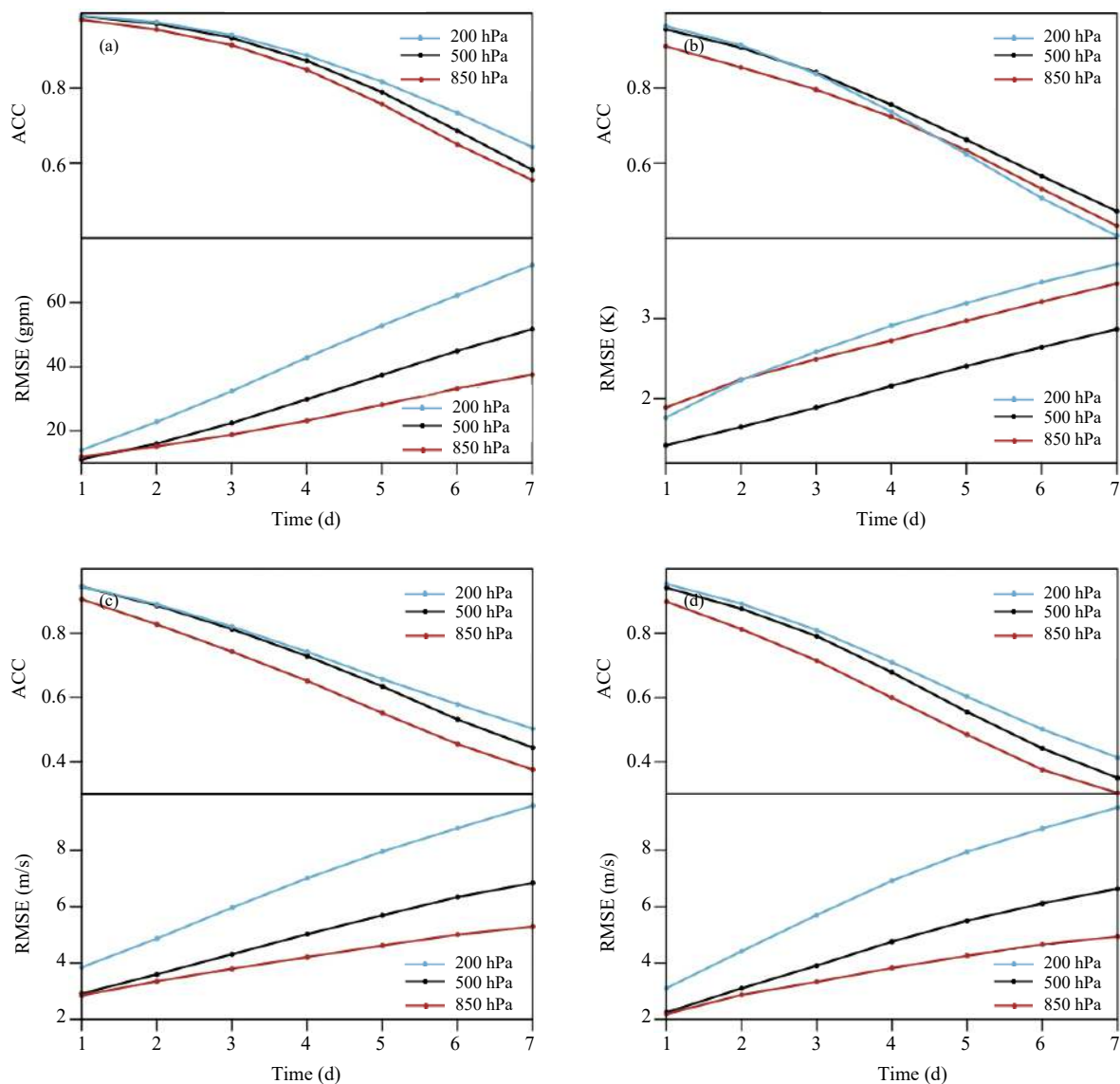


图 1 北半球各层距平相关系数 (ACC) 与均方根误差 (RMSE)

(a. 位势高度, b. 温度场, c. 纬向风, d. 经向风)

Fig. 1 Averaged anomaly correlation coefficients (ACCs) and root mean square errors (RMSEs) in the Northern Hemisphere

(a. geopotential height, b. temperature, c. u component, d. v component field)

纬度的变化趋势都基本吻合。首先,受太阳辐射季节变化的影响,夏季哈得来环流上升支和赤道辐合带位置偏北,低纬度地区降水峰值在 10°N 附近;其次,南半球中纬度地区存在次降水峰值,北半球不明显。对比各预报时效结果发现,0—24 h 预报与分析场最为接近,但随着预报时效延长,模式预报的峰值降水量明显偏高,低纬度地区总降水峰值 48—72 h 预报场比分析场偏多约 5 mm/d ,相应的中纬度地区总降水峰值偏高约 1 mm/d 。结合图 2b、

c 可以看出,低纬度降水预报偏多的主要类型是对流性降水,中纬度预报偏多的是大尺度降水,归因于简化 AS 积云对流参数化方案在低纬度过于活跃,而微物理过程造成的网格尺度凝结在中纬度过强。需要说明,不同分辨率下,两种类型降水的模拟偏差情况会有所不同,这是因为对流性降水和格点尺度降水的贡献比率与模式分辨率相关,即对于更高分辨率而言,模式可以解析更多的对流系统,减少次网格对流的参数化比例,因此对流性降水在

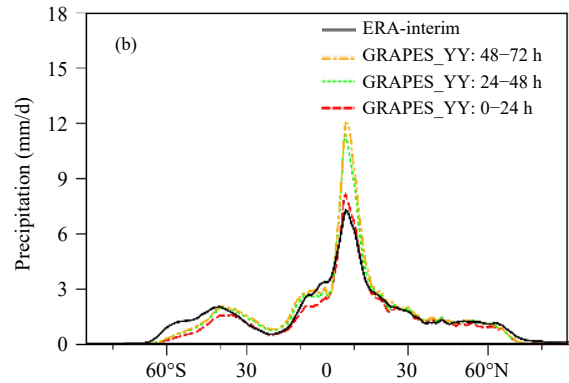
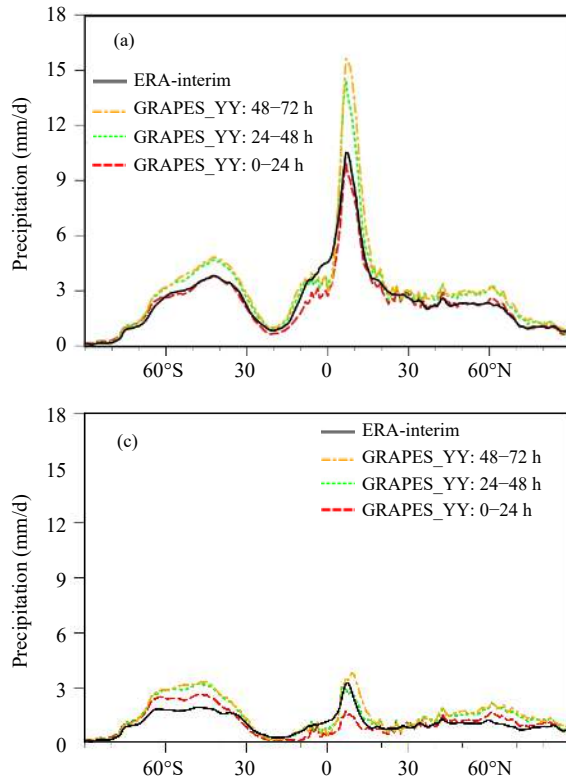


图2 模式各预报时段内24 h累计平均降水量纬向平均与分析场对比

(a. 总降水量, b. 对流性降水, c. 格点尺度降水)

Fig. 2 Zonal mean 24 h accumulated precipitation of reanalysis and model output in different time periods (a. total precipitation, b. convective precipitation, c. large-scale precipitation)

总降水中的比重会相应减小。

图3给出了模式和ERA-interim资料1个月内不同预报时效的全球24 h累计总降水量逐日变化的对比曲线。从逐日演变趋势上看,模式预报的全球总降水基本恒定,存在的逐日降水量波动也与再分析资料基本相同,其中0—24、24—48和48—72 h结果最为接近,而预报时效大于3 d时,预报效果变差。从各预报时效结果来看,模式预报的0—24 h总降水量比分析场少,可能是模式前6小时起转的原因,之后预报时效越长,模式预报的全球总降水量偏多越厉害,3 d后开始趋于稳定,总降水量随着预报时效的延长表现更加稳定。

3.2 梅雨个例检验

通过对模式在全球范围降水预报性能的分析,已经初步证明GRAPES_YY模式对真实大气环流和降水模拟的正确性,下面将分析2018年7月4—7日发生在中国长江中下游的梅雨强天气过程来评估模式对梅雨过程的模拟效果。

2018年7月4—7日的梅雨过程,发生在1807号台风派比安(6月29日—7月2日)过境后,副热带高压重新西伸,梅雨带重建的天气背景下。这次过程副热带高压位置比常年偏东,其南侧的东风引

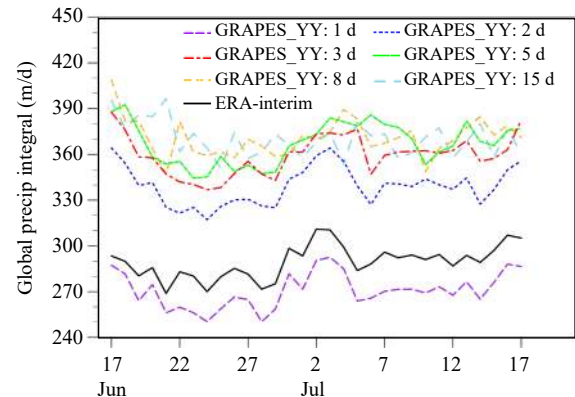


图3 模式不同预报时效的全球24 h累计降水量逐日变化与ERA-interim对比

Fig. 3 Variation of 24 h accumulated global precipitation with forecast lead time in comparison with the ERA-interim data

导气流对江淮地区影响较小,造成雨带位置大气尤其不稳定,在江淮流域南北摆动,以短时强降水天气为主,而非连续阴雨天气,按照姚学祥等(2004)的非典型梅雨特点及分类,其属于非典型的梅雨锋暴雨过程。

3.2.1 降水预报检验

观测(图4a)显示,7月4日有两条主雨带,北边

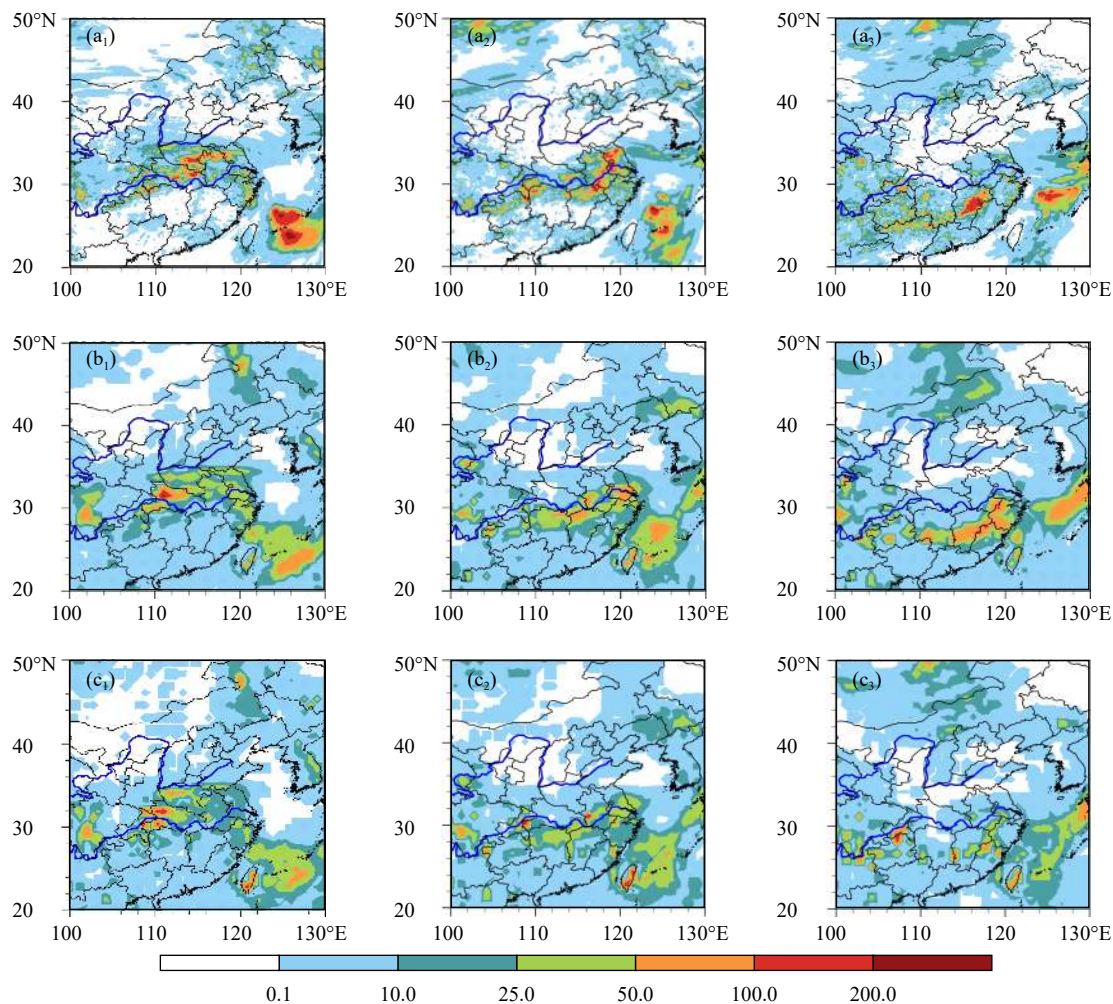


图4 模式7月4—6日逐日24 h累计降水(单位: mm/d)与两种资料的对比

(a₁—a₃, 中国地面卫星雷达三源融合逐时降水产品, b₁—b₃, GRAPES_YY模式0—24 h预报结果,

c₁—c₃, GRAPES_GFS模式0—24 h预报结果, a₁、b₁、c₁, 7月4日, a₂、b₂、c₂, 7月5日, a₃、b₃、c₃, 7月6日)

Fig. 4 24 h accumulated precipitation (unit: mm/d) simulated by GRAPES_YY during 4—6 July compared with that of observations and simulations by the GRAPES_GFS

(a₁—a₃, Gauge-radar-satellite combined precipitation data in China, b₁—b₃, GRAPES_YY and c₁—c₃, GRAPES_GFS simulations on July 4 (a₁, b₁, c₁), July 5 (a₂, b₂, c₂) and July 6 (a₃, b₃, c₃))

雨带位于河南中部、安徽北部和江苏北部,呈东西走向,南边雨带位于湖北中部、湖南北部和贵州北部,呈东北—西南走向。7月5日,强降水带由两条东西走向的雨带转变为沿长江干流的东北—西南走向,位于江苏省北部、安徽南部和江西北部。7月6日,雨带继续南撤到江南地区,强降水发生在江西中部、贵州南部、广西北部。虽然降水位置多变,没有造成单个地区连续几天持续性降水,但局地日降水量仍可达200 mm,如7月4日红安站累计降水211.9 mm,7月5日景德镇站累计降水303.1 mm,7月6日金溪站累计降水224.4 mm,都超过了大暴

雨的量级,造成洪涝灾害。

对比高分辨率中国地面卫星雷达三源融合逐小时降水产品(图4a₁—a₃)和GRAPES_YY模式对7月4—6日逐日24 h累计降水的0—24 h预报结果(图4b₁—b₃),模式对降水落区的模拟效果较好,如雨带的位置、走向及南北摆动情况等都与实况一致,梅雨带及梅雨带上的强降水中心都得到较好地再现,但模式对暴雨以上量级(24 h降水量超过50 mm)的预报较差,对暴雨量级预报偏小,暴雨位置也不够准确。7月4日,模式预报出了南雨带中的暴雨中心,量级超过200 mm,但与实况相比,暴

雨位置预报偏西,实况发生于湖北中东部,而模式报在湖北西部。7月5日,模式未能预报出位于江苏的北段降水,7月6日对浙江的降水存在空报现象。当然这与模式分辨率选取较低无法精细模拟中小尺度对流系统有关,同时反映出积云参数化和微物理过程方案仍需改进。

另外,在相同的模式设定条件下,传统经纬度网格 GRAPES_GFS 模式也较好模拟出此次梅雨锋降水雨带(图 4c),但位于雨带上的强降水中心明显偏弱或未能成功模拟出来,在梅雨降水强度方面,

GRAPES_YY 模式较 GRAPES_GFS 略有提升,特别是 7 月 5 和 6 日的结果表现更为明显。

3.2.2 天气形势场检验

图 5 给出了 7 月 4 日 00 时模式预报的环流形势与分析场的对比。500 hPa 高度的中高纬度为两脊一槽,东西阻塞高压稳定少动,冷空气沿着贝加尔湖附近的低槽南下,同时中纬度地区平直西风带上有小槽东移,输送小股冷空气到长江中下游地区。此时 1807 号台风派比安已经减弱北移至朝鲜半岛东部,前期受其影响,副热带高压位置偏东,

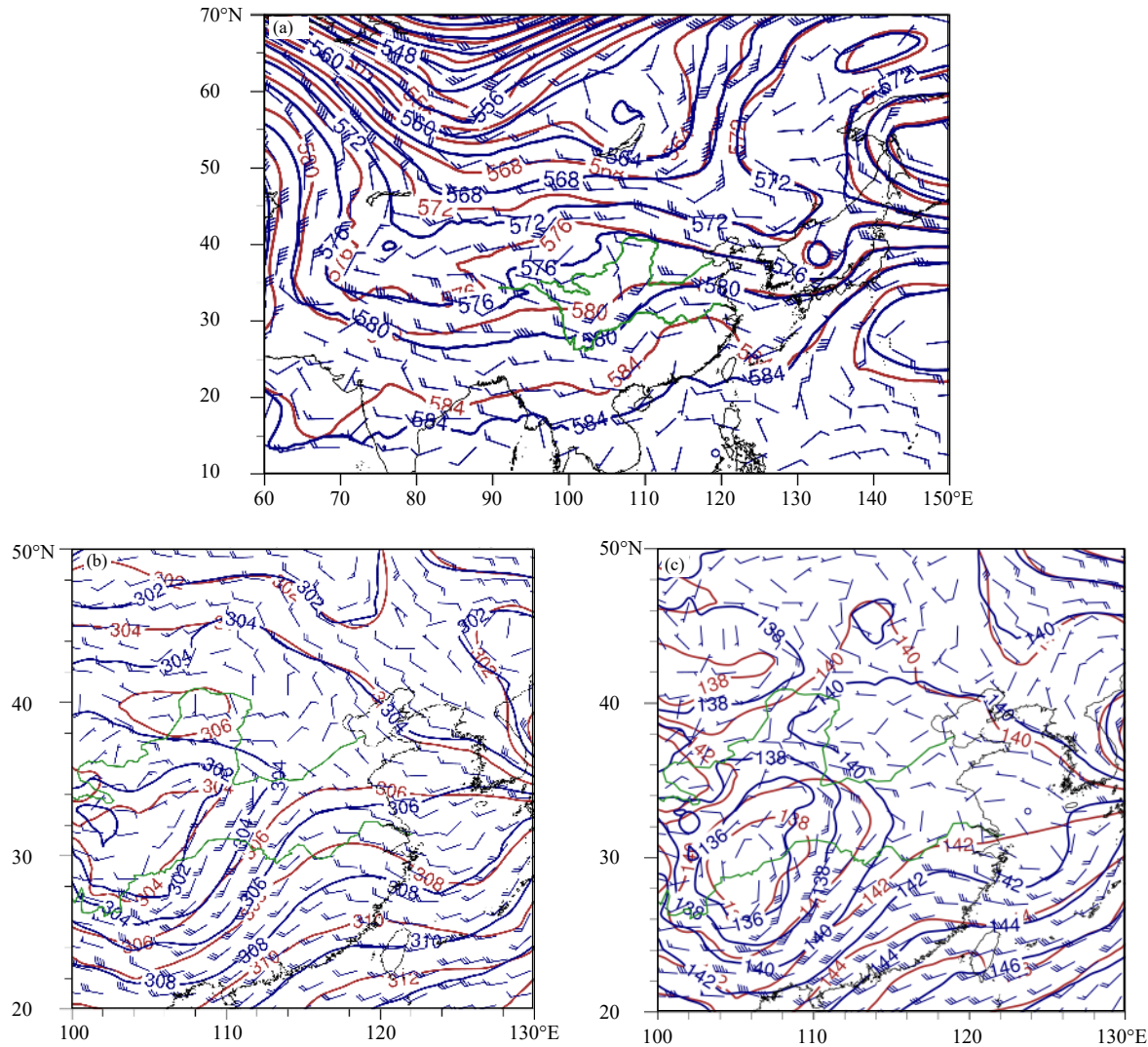


图 5 模式预报的 7 月 4 日 00 时风场(单位: m/s)、位势高度场(单位: dagpm)(24 h 预报)与对应分析场的叠加图
(a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa; 蓝实线和蓝风杆为模式预报, 红实线为分析场)

Fig. 5 24 h forecasts of wind (unit:m/s) and geopotential height field (unit:dagpm)
at 00:00 UTC 4 July and corresponding analysis

(a. 500 hPa, b. 700 hPa, c. 850 hPa; blue lines and wind barbs show forecasts of geopotential height and wind,
red contours show the analysis)

588 dagpm 等值线位于 140°E 附近, 但派比安过后副热带高压开始西伸, 南支槽前的西南暖湿气流也会重新影响中国。低层 700 和 850 hPa, 四川盆地及长江中下游、黄淮地区为范围较大、深厚的东北—西南走向的低涡切变系统所控制, 低涡前部有西风急流不断输送暖湿气流到暴雨区, 在低涡沿切变线东移过程中, 造成多次强降水。从图中可以看出模式所给出的环流场形势与分析场比较一致, 天气系统的强度和范围仍存在偏差, 下面将重点对天气系统的预报做分析检验。

3.2.3 梅雨锋系统的检验

梅雨锋系统是多尺度系统相互作用的产物, 包括天气尺度系统高低空急流、低空涡旋与中尺度对流系统等, 它们的相互作用造成了梅雨锋系统结构的复杂性和多样性(郑永光等, 2007; 郑婧等, 2014)。图 6、7 分别给出了模式预报的高低空急流、低涡系统与分析场的对比, 由于其提供了中尺度系统发展

的基本条件和环境场, 对中尺度系统的发生、发展至关重要。因此, 将重点分析高、低空急流和低涡发展的模拟情况。

(1) 高、低空急流

低空急流对梅雨锋系统维持起到至关重要的作用, 除了将高温、高湿的气流输送到梅雨锋区, 建立了不稳定层结外, 其左前端的强气旋性切变区还有利于触发对流, 释放不稳定能量(Chen, 1982; Chou, et al, 1990)。从分析场(图 6a、b)可以看出, 5 日 00 时 850 hPa 急流核位于湖南南部到广西东北部地区, 风速超过 14 m/s , 输送来自孟加拉湾和中国南海暖湿气流的同时, 也促进了梅雨锋上低涡的发展, 到 6 日 00 时该急流大幅度减弱, 急流核消失, 而低涡北部的东北气流增强为东风急流, 中心风速大于 14 m/s 。对比图 6c、d, 模式成功预报出 5 到 6 日 850 hPa 西风急流的减弱和东风急流的增强, 但预报的西风急流更强, 范围也更广, 造成强降水

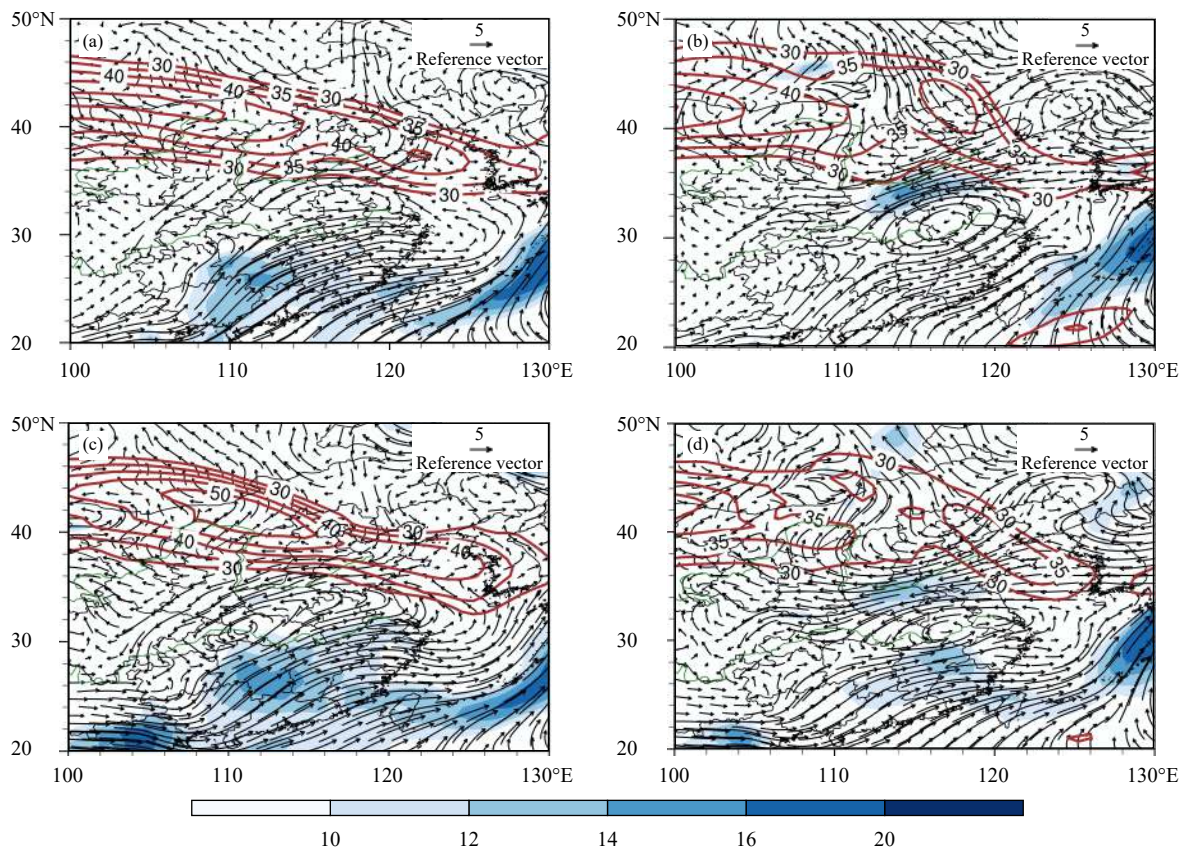


图 6 7 月 5—6 日 850 hPa 风场、低空急流 (阴影, 单位: m/s) 和 200 hPa 高空急流 (红实线, 单位: m/s) 分析场 (a、b) 与 GRPES_YY 模拟结果 (c、d) 对比 (a、c, 7 月 5 日 00 时; b、d, 7 月 6 日 00 时)

Fig. 6 Horizontal wind and low-level jet (shaded, unit: m/s) at 850 hPa and upper-level jet (red solid, unit: m/s) at 200 hPa (a, b) from the ERA-I analysis in comparison with simulations (c, d) at 00:00 UTC 5 (a, c) and 6 (b, d) July

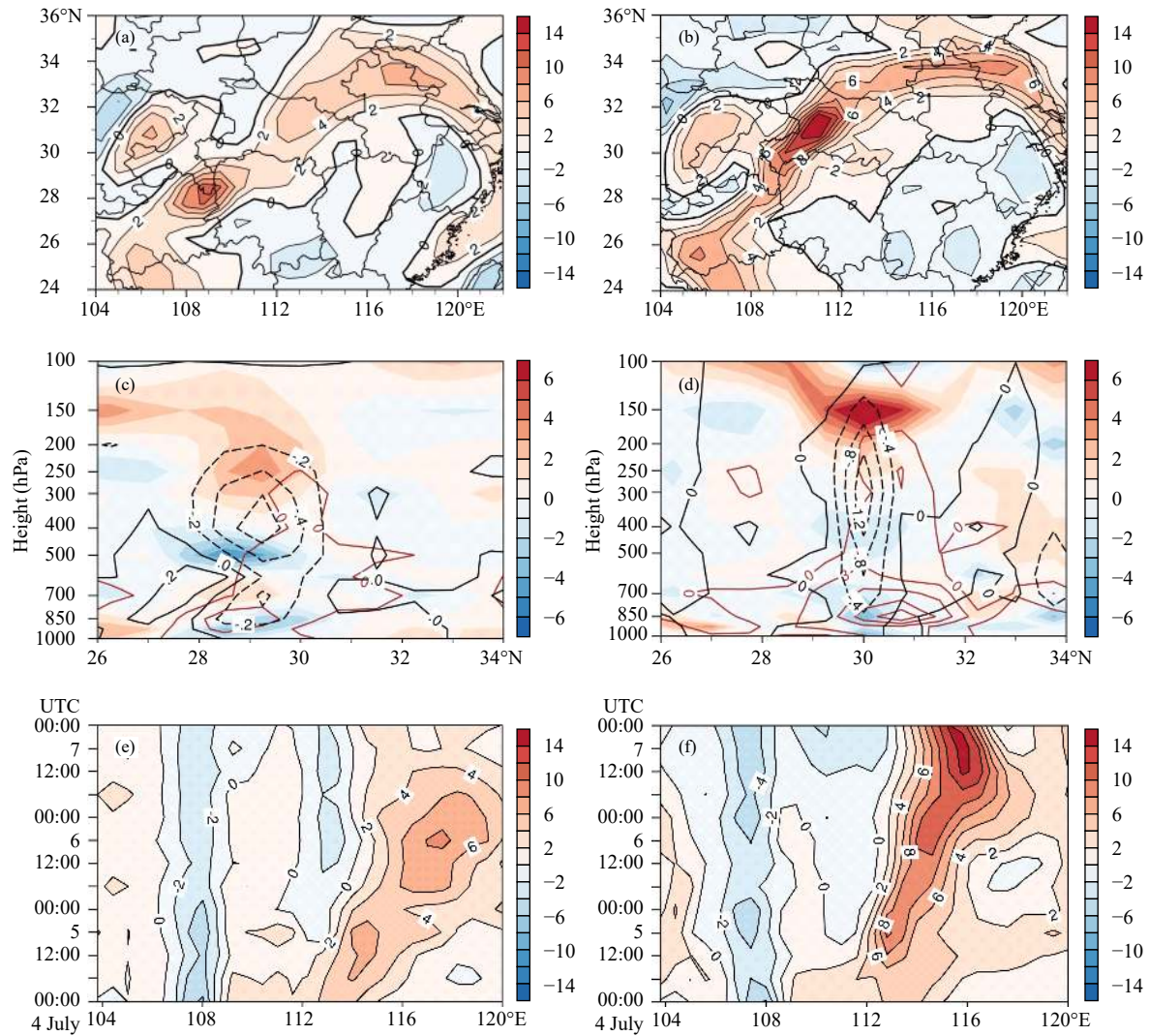


图7 7月5日00时散度(单位: 10^{-5} s^{-1})、涡度(单位: 10^{-5} s^{-1})与垂直速度(单位: Pa/s)再分析场(a、c、e)与模式24 h预报场(b、d、f)对比(a、b. 850 hPa相对涡度;c、d. 相对涡度(红)、散度(阴影)和垂直速度(黑)沿110°E的垂直剖面;e、f. 31°—33°N平均涡度的纬向-时间演变)

Fig. 7 Comparison of relative vorticity (10^{-5} s^{-1}), divergence (10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (Pa/s) between the ERA-interim reanalysis (a, c, e) and 24 h simulation (b, d, f) at 00:00 UTC 5 July

(a, b. 850 hPa relative vorticity at 00:00 UTC 5 July; c, d. vertical cross sections of relative vorticity (10^{-5} s^{-1} , red), divergence (10^{-5} s^{-1} , shaded) and vertical velocity (Pa/s , black) along 110°E; e, f. longitude-time cross sections of vorticity averaged over 31°—33°N)

区水汽能量更加充沛,低涡发展更加迅速,6日00时模拟结果同时存在的西风急流和东风急流更是增强了低涡切变。

高空急流右后侧的辐散对低层大气有抽吸作用,其与低空急流的耦合又有利于垂直次级环流的产生和促进梅雨锋上对流的发展(Hsu, et al, 1994; 廖捷等, 2005; 杨舒楠等, 2017)。5日高空急流南压至江淮地区上空,与强盛的低空急流相互配合,造成江苏和安徽发生强对流活动,6日高空急流明

显减弱,主体北退到40°N附近,相应的低空急流也明显减弱,江淮地区降水减少。就高空急流的强度变化而言,模式与实况表现一致,但模式预报的急流核位置比分析场偏东,可能与预报的急流核东移速度较快有关。

(2)低涡切变

梅雨锋系统的一个重要组成部分就是低涡切变,低涡切变线的每一次发展和东移,往往都伴随着强降水的发生。模式对低涡的预报主要体现在

位置、强度和移动。5日00时,从850 hPa涡度分析场(图7a、b)来看,黄淮、江淮到江汉、西南地区东部为东北—西南走向暖性低压带控制,主要包括两个涡度中心,东部的范围较大、强度弱,位于黄淮和江淮地区,西部范围小、强度强,位于贵州和湖南北部,刚好与5日的两个强降水中心相对应。经对比发现,模式预报的低压带更加狭长、位置偏北,中心强度明显偏强。

图7c、d给出了沿贵州北部低涡中心的垂直涡散诊断分析结果,在低涡中心,强垂直上升运动与涡柱共存,程麟生等(1995)曾提到这种垂直涡柱的形成和发展是暴雨中尺度系统持续发展的重要结构。模式预报的低涡中心垂直速度为 -1.6 Pa/s ,涡柱高度到达200 hPa,而对应的分析场为 -0.6 Pa/s 和250 hPa,而且高层辐散明显强于低层辐合,低涡处于继续发展阶段。分析发现,预报的低层辐合并

不很强,由于高层强辐散抽吸,促进了对流的发展,而对流潜热释放加热和对流的热量输送又进一步促进高层辐散,这种正反馈过程和过强的对流运动导致模式预报偏差。图7e、f为 31° — 33°N 平均涡度的经向-时间演变,可见,4—6日东部低涡一直沿着切变线缓慢东移,中间经历了减弱、重新加强,最终减弱填塞的过程。对比发现,模式预报的低涡移动速度更加缓慢,72 h只东移了4个经度,而且在6日并没有表现出减弱的趋势,因此梅雨降水的预报偏差除与对流和微物理过程描述相关外,还与平流过程、物理和动力相互作用造成的系统移动偏差有关。

(3) 梅雨锋结构

由于梅雨锋两侧气团温度差异不明显,湿度差异较大,故选用假相当位温密集带来表示。从图8a、b可以看出,5日00时850 hPa梅雨锋区位于从淮

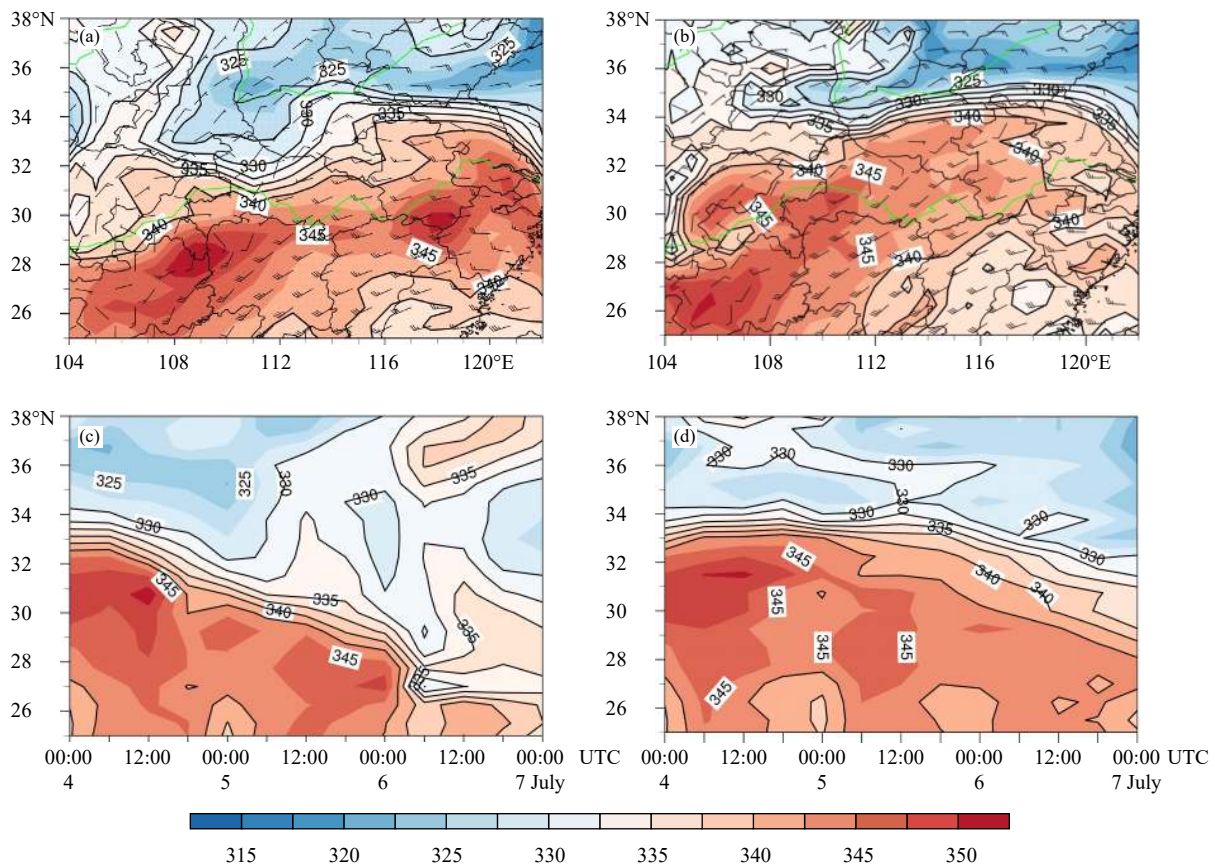


图8 再分析(a、c)与模式预报(b、d)的7月5日00时850 hPa梅雨锋水平结构对比(a、b.假相当位温(θ_{se} ,单位:K)与风场分布,c、d.假相当位温(θ_{se} ,单位:K)沿 112°E 的经向-时间剖面;阴影和粗实线表示假相当位温)

Fig. 8 850 hPa wind and pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se} , unit: K) (a, b) and latitude-time cross sections of θ_{se} along 112°E (c, d) at 00:00 UTC 5 July for the reanalysis (a, c) and simulation (b, d) (shaded and bold contours indicate θ_{se})

河平原、江汉平原到四川东部一带,呈东北—西南走向,其北侧为来自高压脊前部的偏东干冷气流,南侧为来自暖洋面上的西南暖湿气流,锋区位置与 6 h 累计降水量(图略)对应较好,降水位于锋区南侧暖湿气流的前端,属于暖区降水。对比实况和模拟结果,发现模拟的 850 hPa 东北段锋区一直从山东南部延伸到了河南北部,造成河南北部降水较实况偏强。究其原因,是由于模式对南下到河南和湖北的干冷气流预报存在偏差,一直盘踞在北方,没有南下,未能模拟出分析场中侵入锋面系统过程和中段锋区南压。图 8c、d 给出了 112°E 锋区的经向-时间演变,可以看出在分析场中该段锋区受干冷空气影响一直在南移,由于西南急流的大幅度减弱,锋区最终减弱,模式成功预报出了锋区的强度

变化,但未报出锋区的位置演变。

图 9 为 7 月 4 日 12 时沿梅雨锋的 θ_{se} 、比湿和环流的经向-垂直剖面,等 θ_{se} 线显示在 32°—35°N 对流层低层存在一条向北倾斜的锋区,锋面南侧的偏南暖湿气流与北侧的偏北干冷气流交汇辐合上升。锋面南侧 600 hPa 到 400 hPa 为 θ_{se} 大值中心,600 hPa 以下为不稳定层结,有利于对流发生、发展,同时伴随着强上升运动的还有深厚湿舌,此外在对流层中层 400 hPa 存在干侵入,表现为 θ_{se} 低中心。锋面北侧 850 hPa 以下为南风气流,以上为北风气流,造成低层强风垂直切变。对比模式与分析场发现,模式与实况基本一致,但中低层水汽预报偏多,造成锋面爬升运动偏强,对流层中层干侵入现象强度偏弱。

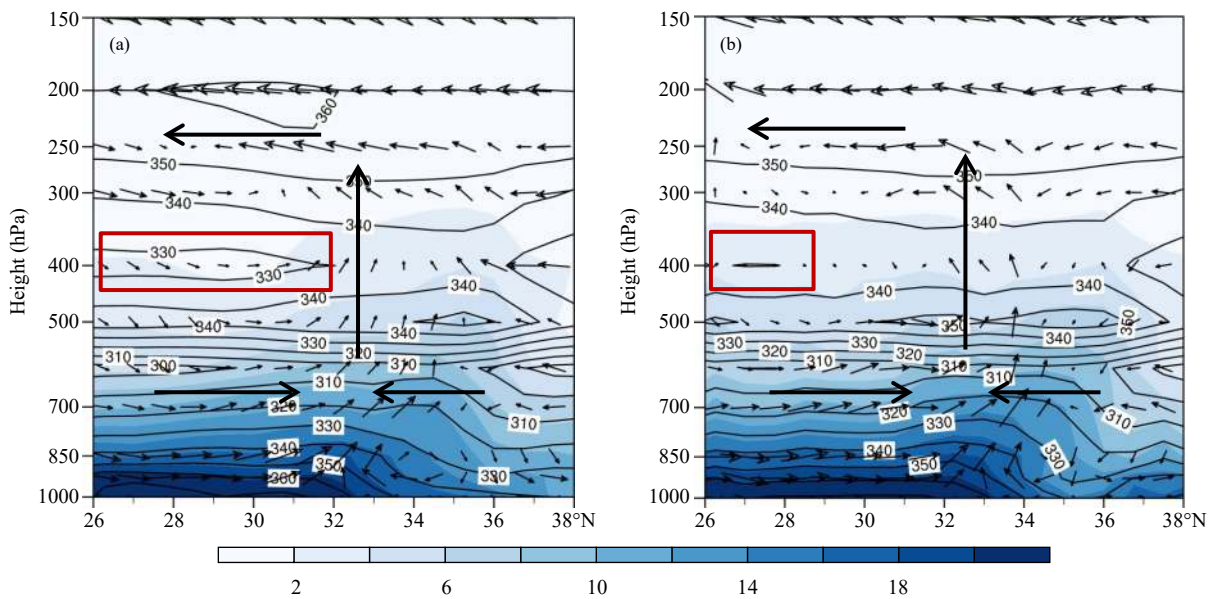


图 9 7 月 4 日 12 时假相当位温(单位: K)、比湿(单位: g/kg)和流场($[v, 10\omega]$)矢量再分析(a)与模式预报场(b)沿 114°E 的垂直剖面(阴影表示比湿,等值线表示 θ_{se} ,红色方框表示中层干侵入)

Fig. 9 Vertical cross sections of θ_{se} (contours, unit: K), specific humidity (shaded, unit: g/kg) and velocity vector ($[v, 10\omega]$) along 114°E for (a) reanalysis and (b) simulation at 12: 00 UTC 4 July

4 结论与讨论

通过 1 个月批量试验对 GRAPES_YY 模式的全球环流和降水预报能力进行评估,并通过对一次梅雨个例检验分析,检验模式对强天气过程的预报能力,得到了如下结论:

(1)GRAPES_YY 模式对北半球环流场预报结果比较令人满意,各层温、压、风场的预报与分析

相关较好。模式预报的全球总降水基本恒定,短期预报时效内的逐日变化趋势也与分析场表现一致。模式 24 h 累计降水纬向平均成功再现了低纬度和中纬度地区的两个降水峰值,但两个降水峰值明显比分析场偏多,低纬度地区表现为对流性降水预报偏多,中纬度地区则是格点尺度降水预报偏多,反映出湿过程需要重点改进。

(2)GRAPES_YY 模式成功模拟出了 7 月 4—

6 日长江中下游强降水雨带的位置、走向及南北摆动, 梅雨雨带、降水强度和其中的强降水中心的位置和强度较 GRAPES_GFS 有一定改善, 但与实况相比, 暴雨以上量级降水仍存在预报偏小和降水中心位置偏差。

(3) 模式对影响这次梅雨过程的天气系统预报较好, 改善了 GRAPES_GFS 对梅雨锋降水的预报能力。由于热带对流过程的明显偏强和中纬度微物理降水偏强, 在物理与动力过程的相互作用中表现出主要天气系统的位置、强度和移动速度存在偏差。第一, 模式预报的高低空急流核偏强, 耦合作用更明显, 产生的垂直次级环流促进了低涡发展, 更多的水汽能量输送又为低涡的维持提供了能量, 导致低涡切变系统强度预报偏强、维持久、移出慢的问题。第二, 通过诊断分析发现, 模式预报的低涡中心低层辐合与实况接近, 但高层辐散过强, 导致涡柱在垂直方向上发展更高, 垂直速度更强。第三, 梅雨锋结构上, 模式预报出 850 hPa 梅雨锋走向、锋生及锋消, 但对高压脊后部干冷空气南下入侵锋面系统的预报偏弱, 导致该段锋区南退缓慢; 垂直方向上, 存在低层水汽预报偏大, 锋面爬升运动偏强和对流层中层干侵入偏弱的问题, 其中湿物理过程的刻画能力和物理与动力过程的相互作用与耦合方法将成为今后模式改进的主要方面。

参考文献

- 陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. *应用气象学报*, 17(6): 773-777. Chen D H, Shen X S. 2006. Recent progress on GRAPES research and application. *J Appl Meteor Sci*, 17(6): 773-777 (in Chinese)
- 程麟生, 彭新东, 马艳. 1995. “91.7”江淮暴雨低涡发展结构和演变的中尺度数值模拟. *高原气象*, 14(3): 270-280. Cheng L S, Peng X D, Ma Y. 1995. Mesoscale numerical simulation of developing structure and evolution for vortex with heavy rain in Jiang-Huai areas during 4-7 July 1991. *Plateau Meteor*, 14(3): 270-280 (in Chinese)
- 胡志晋, 楼小凤, 包绍武等. 1998. 一个简化的混合相云降水显式方案. *应用气象学报*, 9(3): 257-264. Hu Z J, Lou X F, Bao S W, et al. 1998. A simplified explicit scheme of phase-mixed cloud and precipitation. *Quart J Appl Meteor*, 9(3): 257-264 (in Chinese)
- 廖捷, 谈哲敏. 2005. 一次梅雨锋特大暴雨过程的数值模拟研究: 不同尺度天气系统的影响作用. *气象学报*, 63(5): 771-789. Liao J, Tan Z M. 2005. Numerical simulation of a heavy rainfall event along the Meiyu front: Influences of different scale weather systems. *Acta Meteor Sinica*, 63(5): 771-789 (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. *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 Appl Meteor Sci*, 28(1): 1-10 (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. *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. *Chinese J Atmos Sci*, 37(6): 1309-1325 (in Chinese)
- 孙素琴, 郑婧, 郑树林等. 2015. 一次由“列车效应”引发的梅雨锋暴雨研究. *高原气象*, 34(1): 190-201. Sun S Q, Zheng J, Zhi S L, et al. 2015. Analysis of a Meiyu-front rainstorm caused by “train effect”. *Plateau Meteor*, 34(1): 190-201 (in Chinese)
- 杨舒楠, 路屹雄, 于超. 2017. 一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统及低层风场影响分析. *气象*, 43(1): 21-33. Yang S N, Lu Y X, Yu C. 2017. Analysis on mesoscale convective system and impact of low-level wind in a Meiyu heavy rainfall event. *Meteor Mon*, 43(1): 21-33 (in Chinese)
- 杨学胜, 陈嘉滨, 胡江林等. 2007. 全球非静力半隐式半拉格朗日模式及其极区离散处理. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(9): 1267-1272. Yang X S, Chen J B, Hu J L, et al. 2007. A semi-implicit semi-lagrangian global nonhydrostatic model and the polar discretization scheme. *Sci China Ser D Earth Sci*, 50(12): 1885-1891
- 姚学祥, 王秀文, 李月安. 2004. 非典型梅雨与典型梅雨对比分析. *气象*, 30(11): 38-42. Yao X X, Wang X W, Li Y A. 2004. Comparison analysis of non-typical and typical Meiyu. *Meteor Mon*, 30(11): 38-42 (in Chinese)
- 郑永光, 陈炯, 葛国庆等. 2007. 梅雨锋的典型结构、多样性和多尺度特征. *气象学报*, 65(5): 760-772. Zheng Y G, Chen J, Ge G Q, et al. 2007. Typical structure, diversity and multi-scale characteristics of Meiyu front. *Acta Meteor Sinica*, 65(5): 760-772 (in Chinese)
- 郑婧, 孙素琴, 吴静等. 2014. 梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析. *气象*, 40(5): 570-579. Zheng J, Sun S Q, Wu J, et al. 2014. Analysis on multi-scale ambient field for short-time severe torrential rain on Meiyu front. *Meteor Mon*, 40(5): 570-579 (in Chinese)
- 郑婧, 孙素琴, 许爱华等. 2015. 强锋区结构的梅雨锋短时暴雨形成和维持机制. *高原气象*, 34(4): 1084-1094. Zheng J, Sun S Q, Xu A H, et al. 2015. Mechanism of formation and maintenance for a torrential rain on strong Meiyu front. *Plateau Meteor*, 34(4): 1084-1094 (in Chinese)
- Arakawa A, Lamb V R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods Comput Phys: Adv Res Appl*, 17: 173-265
- Baba Y, Takahashi K, Sugimura T, et al. 2010. Dynamical core of an atmospheric general circulation model on a Yin-Yang grid. *Mon Wea Rev*, 138(10): 3988-4005
- Charney J G, Phillips N A. 1953. Numerical integration of the quasi-geostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows. *J*

- Meteor, 10(2): 71-99
- Chen Q S. 1982. The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low-level jet and heavy rainfall. *J Meteor Soc Japan*, 60(5): 1041-1057
- Chou L C, Chang C P, Williams R T. 1990. A numerical simulation of the Mei-Yu front and the associated low level jet. *Mon Wea Rev*, 118(7): 1408-1428
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(8): 1013-1024
- Gal-Chen T, Somerville R C J. 1975. On the use of a coordinate transformation for the solution of the Navier-Stokes equations. *J Comput Phys*, 17(2): 209-228
- Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea Forecasting*, 26(4): 520-533
- Hong S Y, Pan H L. 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast Model. *Mon Wea Rev*, 124(10): 2322-2339
- Hsu W R, Sun W Y. 1994. A numerical study of a low-level jet and its accompanying secondary circulation in a Mei-Yu system. *Mon Wea Rev*, 122(2): 324-340
- 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 Geophys Res Atmos*, 113(D13): D13103
- Kageyama A, Sato T. 2004. "Yin-Yang Grid": An overset grid in spherical geometry. *Geochem Geophys Geosyst*, 5(9): Q09005
- Li X H, Peng X D, Li X L. 2015. An improved dynamic core for a non-hydrostatic model system on the Yin-Yang grid. *Adv Atmos Sci*, 32(5): 648-658
- Li X H, Peng X D. 2018. Long-term integration of a global non-hydrostatic atmospheric model on an Aqua Planet. *J Meteor Res*, 32(4): 517-533
- Li X L, Chen D H, Peng X D, et al. 2006. Implementation of the semi-Lagrangian advection scheme on a quasi-uniform overset grid on a sphere. *Adv Atmos Sci*, 23(5): 792-801
- Luo Y L, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China. *Mon Wea Rev*, 142(1): 203-221
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res Atmos*, 102(D14): 16663-16682
- Peng X D, Xiao F, Takahashi K. 2006. Conservative constraint for a quasi-uniform overset grid on the sphere. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132(616): 979-996
- Qaddouri A, Lee V. 2011. The Canadian Global Environmental Multiscale Model on the Yin-Yang grid system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(660): 1913-1926
- Satoh M, Tomita H, Yashiro H, et al. 2014. The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Prog Earth Planet Sci*, 1(1): 18
- Skamarock W C, Klemp J B, Duda M G, et al. 2012. A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal voronoi tessellations and C-grid staggering. *Mon Wea Rev*, 140(9): 3090-3105
- Staniforth A, Thuburn J. 2012. Horizontal grids for global weather and climate prediction models: A review. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(662): 1-26
- Tomita H, Satoh M. 2004. A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn Res*, 34(6): 357-400
- Ullrich P A, Jablonowski C. 2012. MCORE: A non-hydrostatic atmospheric dynamical core utilizing high-order finite-volume methods. *J Comput Phys*, 231(15): 5078-5108
- Wang B, Wan H, Ji Z Z, et al. 2004. Design of a new dynamical core for global atmospheric models based on some efficient numerical methods. *Sci China Ser A Math*, 47(S1): 4-21
- Williamson D L. 2007. The evolution of dynamical cores for global atmospheric models. *J Meteor Soc Japan*, 85B: 241-269
- Xiao F, Peng X D. 2004. A convexity preserving scheme for conservative advection transport. *J Comput Phys*, 198(2): 389-402
- Zängl G, Reinert D, Ripodas R, et al. 2015. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(687): 563-579
- Zeng X B, Zhao M, Dickinson R E. 1998. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO Data. *J Climate*, 11(10): 2628-2644