焦涵,赵益帆,常飞,等,2021.全球非静力 GRAPES\_YY 高分辨率模式对一次梅雨锋降水过程的模拟分析[J]. 气象,47(11): 1359-1368. Jiao H, Zhao Y F, Chang F, et al, 2021. Numerical simulation of a Meiyu frontal precipitation process with the global high-resolution non-hydrostatic model GRAPES YY[J]. Meteor Mon,47(11):1359-1368(in Chinese).

# 全球非静力 GRAPES\_YY 高分辨率模式 对一次梅雨锋降水过程的模拟分析\*

焦 涵<sup>1</sup> 赵益帆<sup>2</sup> 常 飞<sup>3</sup> 彭新东<sup>2</sup>

1 日本京都大学防灾研究所,京都 611-0011,日本

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

3 中国民用航空西北地区空中交通管理局甘肃分局,兰州 730087

提 要:为开展全球高分辨率数值天气预报和模拟,以中国气象局现有业务模式 GRAPES 为基础,发展了水平 0.1°×0.1° 分辨率的球面准均匀阴阳网格全球非静力模式 GRAPES\_YY。选择 2020 年 7 月 6—8 日出现在安徽南部的一次强降水个例 作为研究对象,利用 0.1°×0.1°分辨率 GRAPES\_YY 模拟结果,结合 FNL 0.25°×0.25°再分析资料、逐时降水融合产品和雷 达资料,对模拟结果进行分析和检验。结果表明,此次强降水受高空槽、低涡切变线、低空急流的共同影响,由稳定梅雨锋上 的不断东移的中尺度对流系统形成,模拟的大尺度环流系统的位置及强度与 FNL 0.25°×0.25°再分析结果基本一致。模式 较好模拟出 24 h 累积降水雨带的大值区位置和走向,但强降水强度和弱降水雨带分布有差异,强降水区维持明显的低层水汽 辐合以及西南水汽通道。模拟结果显示,强降水和对流中心对应异常强的 500 hPa 假相当位温的大值区,其位置的南北摆动 保持一致,表现在剖面图上为梅雨锋对流区的深厚对流中性区和锋区南北为对流不稳定区,锋区的 850 hPa 以下的边界层内 表现为一致的对流不稳定。

**关键词:** 阴阳网格,非静力模式,梅雨锋,对流,降水 中图分类号: P456 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn. 1000-0526. 2021. 11.005

## Numerical Simulation of a Meiyu Frontal Precipitation Process with the Global High-Resolution Non-Hydrostatic Model GRAPES\_YY

JIAO Han<sup>1</sup> ZHAO Yifan<sup>2</sup> CHANG Fei<sup>3</sup> PENG Xindong<sup>2</sup>

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto 611-0011, Japan
State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
Gansu Branch, CAAC Northwest Regional Administration, Lanzhou 730087

Abstract: For global high-resolution numerical weather prediction, based on the GRAPES developed by China Meteorological Administration, an updated version, the GRAPES\_YY, has been developed on the Yin-Yang grid, which is now available at  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  resolution. The "violent Meiyu" process that took place in the middle and lower reaches of Yangtze River during 6–8 July 2020 is selected as the object of simulation. A case of Meiyu severe rainfall in south of Anhui Province is analyzed by using the  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  model outputs, FNL  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  reanalysis data and hourly rainfall observation and weather radar reflectivity. Results show that the severe rainfall was a direct result of eastward moving mesoscale convective

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1507005)资助

<sup>2020</sup>年12月17日收稿; 2021年8月19日收修定稿

第一作者:焦涵,主要从事数值模式研究.E-mail:han jiao@outlook.com

通讯作者:彭新东,主要从事数值模式研究. E-mail:pengxd@cma.gov.cn

systems under the joint action of upper trough, low vortex shear lines and low-level jets. The simulated position and intensity of the large-scale systems is comparable with the FNL 0.  $25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  reanalysis results. The orientation and position of the 24 h precipitation are well described in the simulation although distinction on severe-rainfall intensity and weak-rainfall region is found. Persistent severe rainfall depends on the low-level vapor convergence and smooth vapor transport. The severe rainfall is in accordance with the large  $\theta_{se}$  region at 500 hPa, showing up as convectively neutral zone. Except the instable below 850 hPa in frontal zone, convectively instable layer appears at both south and north of the front.

Key words: Yin-Yang grid, non-hydrostatic model, Meiyu front, convection, precipitation

### 引 言

2020年6-7月,在我国长江中下游地区发生 了极不寻常的梅雨天气,持续时间长达40d,出现了 极为严重的暴雨灾害(张芳华等,2020),累积降水量 超过了1998年同期,成为1961年以来的历史最高 值(陈涛等,2020)。

梅雨是影响我国夏季长江中下游地区的主要天 气过程,因降水持续时间长、雨区范围广、累计雨量 大、强降水过程多的特点(刘芸芸和丁一汇,2020), 经常导致长江中下游地区洪涝灾害,能否准确预报 梅雨锋的持续时间、范围以及强度等,对于防灾减灾 有十分重要的意义。由于梅雨锋降水具有持续性多 样性和多尺度相互作用的特点(彭新东等,1999;郑 永光等,2007;孙素琴等,2015;郑婧等,2015),梅雨 锋的动力热力结构特征以及对应的降水系统多尺度 特点的正确模拟也是大气数值研究的难点之一。苟 阿宁等(2019)利用多普勒天气雷达、逐小时地面加 密观测资料和 EC 0.25°×0.25°细网格模式数据,对 一次梅雨锋附近极端暴雨的降水特征、中尺度对流 系统演变和暴雨成因等进行了系统分析,验证了"列 车效应"是造成 2016 年 7 月武汉暴雨的主要原因。 隆霄等(2009)利用中尺度数值模式 MM5 对一次非 典型梅雨锋过程进行了模拟,证明中尺度系统的强 风切变、低空急流核、以及强高空辐散、低空辐合有 利于中尺度系统的发展。张吉等(2012)利用区域大 气数值模式 RAMS 6.0,模拟了长江中下游的一次 梅雨锋大暴雨过程,结果表明 RAMS 模式较好地模 拟出这次大暴雨过程以及中小尺度系统的生消演 变。

GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System)是基于球面经纬度网格坐标系

统的完全可压、非静力天气预报模式(Chen et al, 2008;Zhang and Shen,2008),经过多年的改进和发 展,目前业务模式 GRAPES\_GFS 水平分辨率已达 到 0.25°×0.25°,但仍然无法满足业务对更高分辨 率预报结果的需求。在现有计算条件下,为了提高 模式的水平分辨率、提高计算效率、降低计算成本, 需要对模式的水平网格进行改造,构建球面准均匀 网格模式动力框架。基于球面阴阳网格, Li et al (2015)开发了 GRAPES\_YY 非静力模式动力框架, 并耦合一整套物理过程(Li and Peng, 2018;赵益帆 等,2020),形成了具有良好可扩展性和高性能的 GRAPES\_YY 大气动力模式,初步具备稳定中期预 报的能力,并尝试了实际天气过程的 0.75°×0.75° 低分辨率批量中期预报试验,且 500 hPa 位势高度 的距平相关系数平均达到 0.6 以上的有效预报时效 接近7d。

本文采用 GAPES\_YY 模式,针对 2020 年 7 月 7-8 日的长江下游强梅雨降水过程,以 6 日 08 时 (北京时,下同)美国 NCEP/FNL 再分析资料为初 值,进行了全球 0.1°×0.1°分辨率数值模拟,以分析 这次长江中下游地区梅雨锋降水过程的持续性对流 降水形成机制和模式检验效果。

### 1 模式介绍及试验设计

### 1.1 模式及模式设置

GRAPES\_YY模式是在球面阴阳网格上构建的全球非静力大气动力模式,具有以下主要特征:水平网格准均匀,不存在极点问题,不存在经纬度网格那样在高纬度经线过度收缩、网格距变小的缺点;其次,针对阴阳网格,特别考虑了包含完整三维科氏力分量的动量方程,改善模式的惯性力计算精度,并实

现两个网格域上的代码完全相同;采用具有更好计 算稳定性的半隐式-半拉格日时间积分方案。为了 提高模式的示踪物计算守恒性,GRAPES\_YY中还 采用了通量形式水物质平流方程,采用守恒、保形的 PRM 平流方案计算水物质平流过程。相对原 GRAPES模式,GRAPES YY还增加了全球质量 守恒强迫计算(Li and Peng, 2018)。GRAPES\_YY 模式中耦合的物理方案包括 RRTMG 长短波辐射 传输方案、MRF 边界层参数化方案、陆面模式 CoLM 以及 NSAS 深浅积云对流方案和一个双参 数混合相云微物理方案。表 1 给出了本研究的模式 主要参数设置。

表 1 GRAPES\_YY 主要参数设置 Table 1 Configuration of the GRAPES YY model

模式参数	预设值
水平分辨率	0.1°× 0.1°
垂直分辨率	60 层
模式层顶高度	36 km
模式积分步长	60 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	莫宁一奥布霍夫相似理论(Zeng et al, 1998)
边界层方案	MRF 方案(Hong and Pan, 1996)
积云对流方案	NSAS 方案(Han and Pan, 2011)
云微物理方案	双参数混合相云参数化方案(刘奇俊等,2003)
陆面过程	CoLM 陆面方案(Dai et al,2003)

#### 1.2 资料应用及模式初值

本研究采用的观测和分析资料包括美国 NCEP/NCAR的FNL 0.25°×0.25°分辨率再分析 资料、国家气象信息中心制作的 0.05°×0.05°的中 国地面-卫星-雷达三源融合逐时降水产品(CMPA-Hourly V2.0)、中国气象科学研究院大气科学试验 与研究平台提供的华东地区天气雷达回波拼图作为 梅雨降水分析和高分辨模式检验的参考。

高分辨率 GRAPES\_YY 的初始场也由 FNL 0.25°×0.25°分辨率再分析资料经过水平和垂直插 值得到。本模拟选择 2020 年 7 月 6 日 08 时为模式 冷启动初始时刻,积分 8 d,由于过程最强降水发生 在 7—8 日,所以重点分析前 3 d 的模拟结果,以认 识造成 7—8 日的梅雨强降水的锋面特征、水汽条件 和中尺度系统动力和热力结构,检验模式模拟效果。

### 2 天气环流形势以及降水模拟

#### 2.1 环流形势

GRAPES\_YY 模拟的 8 d 500 hPa 和 850 hPa

环流场基本反映了长江流域稳定梅雨锋维持的大尺 度环流形势演变,位势高度场与再分析结果比较契 合,但槽脊位置随预报时效延长偏差增大。这里重 点分析降水发生时段的环流模拟情况。图 1a 和 1b 分别为 2020 年 7 月 7 日 08 时和 8 日 08 时 FNL 分 析资料 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场结果。 7月7日08时(图 1a),在500 hPa 高度场上,整体 呈现"两槽一脊"的环流形势,在我国华东地区,出现 一个明显的低槽。588 dagpm 线控制江南地区,东 北冷涡明显。850 hPa上西南低空急流强度较大, 在长江中下游地区出现低涡切变,为降水提供了有 利条件。7月8日08时(图1b),500 hPa高度场 上,588 dagpm 线南退至华南南部,东北部槽加深, 东北冷涡略有东移,而华中、华东地区高空槽减弱。 850 hPa长江中下游地区的低空低涡切变明显加 大,风速加强。图 1c 和 1d 分别为 2020 年 7 月 7 日 08 时和 8 日 08 时 GRAPES YY 模式模拟出的 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场预报结果,在 500 hPa 高度场上, GRAPES YY 模式较好地模拟 了大尺度环流形势,500 hPa 位势高度等值线与分 析结果吻合,850 hPa 低空急流、低涡切变线等重要 系统都得以较好模拟。

1362



(a, b) FNL analysis, (c, d) GRAPES YY simulation

### 2.2 降水模拟

降水是最重要的数值预报量之一,也是模式检 验的重要指标。就全程 8 d 的降水中期模拟结果 看,降水分布和强度随模拟时间的延长,误差增长明 显,其中降水强度误差更大(图略),这里仍然重点分 析短期模拟结果。2020年7月7日08时和8日08 时截止的观测日降水量和 GRAPES\_YY 模式模拟 的日降水量(图 2),7日 08 时的 24 h 降水量显示, 在我国西南到长江中下游地区形成了一个狭长的雨 带,降水的大值区主要集中于长江中下游地区,尤其 以湖北东部、安徽南部以及浙江北部降水量最大,达 200 mm 以上。GRAPES YY 模式很好地模拟出了 24 h 降水的西南一东北走向,安徽南部的降水大值 区与实况基本吻合,但湖北东部的大值区没有很好 地模拟出来,而浙江东北部的降水大值区略微偏东, 24 h 累计模拟降水也表现出更宽的梅雨锋外围弱 降水带,基本为大范围的层状网格尺度降水。相对 而言,0.75°×0.75°低分辨率的 GRAPES\_YY 模式 模拟的降水大值区较弱,雨带上降水强度相对均匀

(图略),因此高分辨率模式相对于低分辨率模式可 以更好地模拟降水的落区和降水强度。7月8月08 时与7日08时的降水分布情况类似,观测降水更为 集中于湖北东部、江西东北部和安徽南部地区 (图2b),降水大值区相连。模拟结果也显示了同样 的特点(图2d),模拟雨带走向和分布基本反映了实 际情况观测,但模拟降水大值区(100 mm 以上)范围 较观测略大,200 mm 以上的强降水中心则明显偏小。

### 3 热力和水汽条件

对于这样一次持续性特大梅雨过程而言,除有 利的环流形势控制外,一定有有利的热力和水汽条 件相配合(屠妮妮等,2008),利用高分辨率 GRAPES\_YY模拟结果,我们诊断形成本次持续性 梅雨暴雨的热力不稳定条件和水汽供应状况,首先 给出7日和8日08时的模拟K指数分布,与模拟 降水进行分析对比,并给出几个时次的700 hPa水 汽通量散度和风场,说明水汽收支与暴雨形成的关 系。



图 2 2020 年 7 月 7 日 08 时(a,c)及 8 日 08 时(b,d)24 h 累计降水 (a,b)中国地面卫星雷达三源融合逐时降水产品,(c,d)GRAPES\_YY 模拟结果 Fig. 2 The 24 h accumulated precipitation at 08:00 BT 7 (a, c) and 08:00 BT 8 (b, d) July 2020 (a, b) gauge-radar-satellite combined observation in China, (c, d) GRAPES\_YY simulation

### 3.1 K指数

K 指数是反映中低层稳定度和水汽条件的综合 指标,也可以理解为低层的对流稳定性判据,是不稳 定和对流性天气发展的一个热力指标,方便对流性 降水天气过程的判别。K 值越大,表明中低层处于 越不稳定的状态,有利于对流发展和对流降水的发 生。从图 3a 可以看出,2020 年 7 月 7 日 08 时在中 国的西南到长江中下游地区,形成了一个最大值超 过了 40℃的狭长的 K 指数大值区,恰好与梅雨雨带 位置对应,强降水中心正位于K指数40℃区域、K 值大梯度区的南侧,强降水发生在低层强烈的对流 不稳定区,应主要为对流性降水。2020年7月8日 08时(图3b),超过40℃的K指数位于长江中下游 地区,分布更加分散、宽广,与雨带分布一致,K等值 线较前日疏散,对应的雨带中心分裂。7-8日,狭 长的K指数大值区南北加宽,降雨带也变得南北更 广,除了锋区的南北摆动外,可能与水汽辐合条件有 关。



图 3 2020 年 7 月 7 日 08 时(a)和 8 日 08 时(b)K 指数分布(等值线,单位:℃) 和 1 h 累计降水量(填色)

Fig. 3 Distributions of K index (contour, unit: °C) and 1 h accumulated precipitation (colored) at 08:00 BT 7 (a) and 08:00 BT 8 (b) July 2020

#### 3.2 水汽条件

持续性暴雨必须有充足、持续的水汽供应,水汽 通量散度可反映水汽输送和水汽辐合的分布。通过 对比图 4a 和图 3a 以及图 4d 和图 3b 可以看出,水汽 通量散度的大值区与降水的大值区中心相吻合,2020 年7月7日08时的降水大值区和水汽通量散度大值 区重合,在水汽通量散度小于-18×10<sup>-7</sup> g• cm<sup>-2</sup>• hPa<sup>-1</sup>•s<sup>-1</sup>的大值中心处形成了西北一东南走向的 降水中心。对于这次持续性梅雨过程,水汽的持续 输送和辐合对降水形成很关键,水汽通量散度对于 降水的预报具有较好的指示意义。从7月7日08 时至8日08时,长江中下游地区一直存在较强的水 汽通量散度,长江中下游地区始终是水汽输送的目 的地和水汽汇。7日08时至8日08时水汽的辐 合,与图 1a 中 850 hPa 低空切变线与图 2 的地面降 水雨带重合,低空辐合不仅提供了水汽条件,也有利 于静力上升加速。在四川盆地,发展的西南低涡外 围环流配合来自西南的暖湿气流,为长江中下游提 供充足的水汽和热力源。水汽通量散度场诊断反映 出,这次强降水过程的维持是明显低层切变线造成 的水汽辐合以及西南水汽通道的共同作用。

### 4 梅雨锋上中尺度对流系统的发展

梅雨降水是多尺度天气系统相互作用的结果, 持续性强降水的发生与稳定的梅雨锋位置、水汽供 应、锋区不断生成及发展的中尺度对流系统密切相 关。这里我们首先根据雷达观测资料分析对流系统 的发展和移动,然后根据高分辨非静力模式资料分 析梅雨锋的结构、对流维持机制,进一步理解持续性 梅雨降水形成的热力和动力原因。

#### 4.1 对流发展的雷达观测

通过天气雷达观测我们来分析本次过程中直接 降水系统——对流云团的生成和移动情况。图 5 为 中国气象科学研究院大气科学试验与研究平台提供 的华东地区 7 月 6 日 18 时和 20 时雷达拼图,在长 江中下游地区,存在多个大于 45 dBz 的强雷达反射 率中尺度对流云团,其中以安徽南部的中尺度对流 系统最为强烈且集中。对流云团整体上在对流云带 上不断新生东移、发展,形成了稳定的梅雨降水带, 但安徽南部的对流云团则在原地不断新生和发 展,稳定的对流云团到 20 时略有东移加强,在安徽



图 4 2020 年 7 月 7 日 08 时(a)、7 日 16 时(b)、8 日 00 时(c)和 8 日 08 时(d)700 hPa 水汽通量散度 (填色,单位:10<sup>-7</sup> g・cm<sup>-2</sup>・hPa<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>)和 700 hPa 风场(风羽,单位:m・s<sup>-1</sup>) Fig. 4 Divergence of moisture flux (colored, unit: 10<sup>-7</sup> g・cm<sup>-2</sup>・hPa<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>) and winds (wind barb, unit: m・s<sup>-1</sup>) at 700 hPa at 08:00 BT 7 (a), 16:00 BT 7 (b), 00:00 BT 8 (c), 08:00 BT 8 (d) July 2020

南部造成持续强对流降水。这种梅雨锋上有组织的 强对流活动,以及对流单体的不断生消,在该地区造 成持续性降水。因此判断能否模拟出稳定的梅雨锋 和对流不稳定环境是模式是否成功模拟持续的对流 系统的关键。

### 4.2 梅雨锋热力结构与中尺度对流发展

图 6 为 2020 年 7 月 6 日 1 8 时 和 2 0 时 的 500 hPa



图 5 2020 年 7 月 6 日 18 时(a)和 20 时(b)雷达组合反射率 Fig. 5 Radar composite reflectivity at 18:00 BT 6 (a) and 20:00 BT 6 (b) July 2020



图 6 2020 年 7 月 6 日 18 时(a,c)和 20 时(b,d)500 hPa 假相当位温(填色)和风场(风羽,单位:m・s<sup>-1</sup>)(a,b), 及假相当位温(等值线,单位:K)和 v-10w 矢量(箭头,单位:m・s<sup>-1</sup>)沿 117.9°E 的垂直剖面(c,d) Fig. 6 (a, b) Pseudo-equivalent potential temperature (colored) and winds (wind barb, unit: m・s<sup>-1</sup>) at 500 hPa, and (c, d) vertical cross-section of pseudo-equivalent

potential temperature (contour, unit: K) and v-10w velocity vector (arrow, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ) along 117.9°E at 18:00 BT 6 (a, c) and 20:00 BT 6 (b, d) July 2020

假相当位温以及水平风场分布。如图 6a,6b 所示, 大于 348 K 的高湿高能区从华中地区经长江中下游 地区一直延伸到东海,正位于其北部偏北风和南部 偏南风的切变气流中,并在湖北中西部以及安徽南 部形成了两个 354 K 以上的 θ<sub>se</sub>高值中心。图 6a 中 安徽南部的 θ<sub>se</sub>大值中心与图 5a 中雷达反射率大值 区对应,是强对流凝结的结果,图 6b 中的假相当位 温的大值区与图 5b 中的雷达反射率大值区重合,可 见对流过程对梅雨锋的热力结构的维持作用明显。 从对应的假相当位温经向剖面和 v-w 垂直环流 (图 6c,6d)可以看出,θ<sub>se</sub>等值线密集区即锋区位置 位于 30°~32°N,锋区 850~250 hPa 都表现出垂直 均匀的 θ<sub>se</sub>分布,说明了锋区内强烈的对流活动和充 分的对流混合作用,形成深厚的对流中性大气层。 明显的锋区南北风辐合,造成锋区强烈的上升运动 和对流降水,体现了梅雨锋和对流系统间紧密的联

系和相互作用。850 hPa 以下大气边界层内,中低 纬度都处于不稳定状态,在水汽和对流扰动的配合 下,容易在梅雨锋区激发对流。锋区南北,600 hPa 以下为对流不稳定区,尤以锋区以北的偏干气团表 现更明显。对比图 6c,6d 可见,20 时锋区较 18 时 向南小幅摆动,与图 5 中对流云团的南移相对应。

#### 4.3 梅雨锋区对流发展的中尺度动力过程

梅雨锋特殊的热力结构为中尺度对流系统持续 发展提供了有利条件,锋区底层边界层内对流不稳 定的存在是对流扰动不断生成发展的关键,那么梅 雨锋上对流发展对应的中尺度动力过程成为我们关 心的另一个重要问题。我们从锋区边界层的对流强 迫、大尺度垂直运动、梅雨强降水的对应关系进一步 分析。图 7 中给出了垂直速度、网格和次网格降水 量、以及对应时刻 700 hPa 以下的温度距平,即模





Fig. 7 (a, b) Vertical velocity (contour, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ), temperature anomaly (colored, unit: °C) and v = 10w vector (unit:  $m \cdot s^{-1}$ ), and (c, d) 1 h accumulated precipitation along 117.9°E at 18:00 BT 6 (a, c) and 20:00 BT 6 (b, d) July 2020

式格点温度与各层温度经向平均的差。6日18时 (图 7a),30°N 附近 700~380 hPa 显示垂直风速超 过 1.8 m •  $s^{-1}$  的 较 强 的 上 升 运 动, 中 心 位 于 500 hPa, 而 700~600 hPa 有明显的水平风辐合配 合,低空大尺度辐合风场造成的上升运动与锋区对 流共同促成水汽凝结,产生强降水(图7c)。而在 850 hPa 以下近地面层, 30°N 附近表现出明显的冷 空气堆,这是锋区对流降水在云下蒸发形成的,它对 低空偏南风形成阻挡,强迫近地面湿空气抬升并对 对流起到触发作用。可见锋面前期降水过程与后期 对流激发和发展密切相关,边界层内的动力抬升作 用和 700~600 hPa 低层辐合动力抬升共同作用促 使对流在锋区内不断形成和发展。20时(图 7b)边 界层冷空气堆变弱,且并没有接地,对近地面湿空气 的抬升作用下降,中层上升运动减弱,垂直速度中心 的高度也降至 400 hPa 以下,垂直速度降至 1.0 m · s<sup>-1</sup>以下,相应的降水也明显减少,对流和降水中心 位置南移,与雷达回波观测一致。从降水的分类来 看,0.1°×0.1°分辨率模式模拟锋区降水相对于 0.75°×0.75°分辨率模式(图略)更多表现为网格尺度 降水,次网格对流降水明显减少,也反映出 0.1°× 0.1°高分辨率模式中云微物理过程描述的网格尺 度水汽更容易饱和、网格降水有所增加的合理表现。

### 5 结 论

本文利用 FNL 再分析资料、逐时降水融合产品、雷达资料和高分辨率 GRAPES\_YY 模拟结果, 对 2020 年 7 月影响我国长江中下游地区的超强梅 雨过程进行了研究,分析了安徽南部的强降水个例, 并进行高分辨率模式模拟结果的检验,主要结论如 下:

(1)2020年7月6-8日影响安徽南部强降水 的主要天气系统为高空槽,低空急流以及低涡切变 线,降水主要产生于梅雨锋上不断东移的对流云团。 0.1°×0.1°高分辨率GRAPES\_YY模式对本次过 程的大尺度环流形势、中尺度系统以及降水落区都 给出了较好的模拟效果,模拟的大尺度环流系统的 位置及强度与FNL再分析结果基本一致,模拟降水 带和强降水中心基本与观测一致,但模拟弱降水区 范围偏大。

(2)2020年7月7—8日,强降水区维持明显的 低层水汽辐合以及畅通的西南水汽通道,水汽通量 散度大值区与地面降水相吻合,明显的低层水汽辐 合以及畅通的西南水汽通道是此次超强梅雨持续性 强降水维持的条件。GRAPES\_YY模式 0.1°× 0.1°高分辨率较 0.75°×0.75°低分辨率模拟的锋面 降水结构和分布有明显改进。

(3)持续性梅雨降水过程中,高分辨率模式刻画 了梅雨锋和中尺度对流系统的发展过程。锋区 850 hPa 以下对流不稳定和 850~250 hPa 都维持 θ<sub>se</sub>对流中性分布,既是对流活动的结果,也是对流激 发的条件。充足的水汽供应和大量的水汽辐合是造 成对流区高 θ<sub>se</sub>和降水的条件。

### 参考文献

- 陈涛,张芳华,于超,等,2020.2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨 天气特征分析[J]. 气象,46(11):1415-1426. Chen T, Zhang F H,Yu C, et al,2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June — July 2020[J]. Meteor Mon,46(11):1415-1426(in Chinese).
- 苟阿宁,王玉娟,张家国,等,2019. 一次梅雨锋附近"列车效应"致灾 大暴雨过程观测分析[J]. 气象,45(8):1052-1064. Gou A N, Wang Y J, Zhang J G, et al, 2019. Analysis on heavy rainfall event caused by "train effect" in a Meiyu front of Hubei Province[J]. Meteor Mon,45(8):1052-1064(in Chinese).
- 刘奇俊,胡志晋,周秀骥,2003. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨 和云的模拟(I)云降水显式方案[J]. 应用气象学报,14(S1):60-67. Liu Q J, Hu Z J, Zhou X J,2003. Explicit cloud schemes of HLAFS and simulation of heavy rainfall and clouds, Part I: explicit cloud schemes[J]. J Appl Meteor Sci,14(S1):60-67(in Chinese).
- 刘芸芸,丁一汇,2020.2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气 象,46(11):1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H,2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon,46(11):1393-1404(in Chinese).
- 隆霄,潘维玉,邱崇践,等,2009. 一次非典型梅雨锋暴雨过程及其中 尺度系统的数值模拟[J]. 高原气象,28(6):1335-1347. Long X, Pan W Y,Qiu C J, et al,2009. Numerical simulation on a nontypical Meiyu front rainstorm and its mesoscale systems[J]. Plateau Meteor,28(6):1335-1347(in Chinese).
- 彭新东,吴晓鸣,坪木和久,1999. 积云对流参数化对一次梅雨锋暴雨 过程影响的模拟检验[J]. 高原气象,18(3):451-461. Peng X D, Wu X M,Tsuboki K,1999. Numerical test of convective parameterization on the simulation of a Meiyu-front rainstorm[J]. Plateau Meteor,18(3):451-461(in Chinese).
- 孙素琴,郑婧,支树林,等,2015. 一次由"列车效应"引发的梅雨锋暴 雨研究[J]. 高原气象,34(1):190-201. Sun S Q, Zhen J, Zhi S L, et al, 2015. Analysis of a Meiyu-front rainstorm caused by 'train effect'[J]. Plateau Meteor,34(1):190-201(in Chinese).
- 屠妮妮,陈静,何光碧,2008.高原东侧一次大暴雨过程动力热力特征 分析[J].高原气象,27(4):796-806.Tu N N,Chen J,He G B,

2008. Dynamical and thermal character analyses of a heavy rain on the east side of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 27(4):796-806(in Chinese).

- 张芳华,陈涛,张芳,等,2020.2020年6─7月长江中下游地区梅汛 期强降水的极端性特征[J]. 气象,46(11):1405-1414. Zhang F H,Chen T,Zhang F,et al,2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June – July 2020[J]. Meteor Mon,46 (11):1405-1414(in Chinese).
- 张吉,王元,许丽人,2012. 一次梅雨锋大暴雨过程的数值模拟分析 [J]. 高原气象,31(6):1704-1710. Zhang J, Wang Y, Xu L R, 2012. Synoptic analysis and numerical simulation of heavy rainstorm process caused by a Meiyu front[J]. Plateau Meteor,31 (6):1704-1710(in Chinese).
- 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[J]. 气象学报,78(4):623-635. Zhao Y F,Li X H,Peng X D,2020. The development of the GRAPES\_YY model and its performance verification for Meiyu frontal precipitation simulation[J]. Acta Meteor Sinica, 78(4):623-635(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[J]. 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[J]. Plateau Meteor, 34(4):1084-1094(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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin,65(5):760-772 (in Chinese).
- Chen D H,Xue J S,Yang X S,et al,2008. New generation of multiscale NWP system (GRAPES): general scientific design[J].

Chin Sci Bull, 53(0):1-13.

- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al, 2003. The common land model[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(8):1013-1024.
- Han J, Pan H L, 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System[J]. Wea Forecasting, 26(4):520-533.
- Hong S Y, Pan H L, 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. Mon Wea Rev, 124(10): 2322-2339.
- 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]. J Geophys Res: Atmos, 113 (D13): D13103.
- Li X H, Chen C G, Xiao F, et al, 2015. A high-order multi-moment constrained finite-volume global shallow-water model on the Yin-Yang grid[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 141(691); 2090-2102.
- Li X H, Peng X D, 2018. Long-term integration of a global non-hydrostatic atmospheric model on an aqua planet [J]. J Meteor Res, 32(4):517-533.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. J Geophys Res, 102(D14): 16663-16682.
- 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]. J Climate, 11 (10):2628-2644.
- Zhang R H,Shen X S,2008. On the development of the GRAPES——A new generation of the national operational NWP system in China [J]. Chin Sci Bull,53(22):3429-3432.