两种分辨率全球模式对中国区域天气模拟能力分析

贾佳^{1,2} 丹利¹ 王立志¹ 詹思玙¹马再忠³马柱国¹

1 中国科学院大气物理研究所

2 中国科学院大学



摘要:数值天气模拟效果的改进依赖于模式物理过程的完善、模式初 始场的改进以及模式空间分辨率的提高,其中模式分辨率的提高已成 为改善模式模拟效果一个有效途径。基于全球数值预报模式,利用 T1534 (13km) 和 T254 (55km) 两种不同分辨率模式进行预报,并对 中国区域气温、气压、风速和降水模拟效果进行分析。结果表明:两 种分辨率模拟针对中国区域逐日气压的模拟中,华北地区的模拟效果 最好, 7 个子区域的均方根误差随着分辨率增高均显著降低; 对逐 日气温的模拟中,对东部地区的模拟效果优于西部地区;对风速的模 拟中,对于西北地区而言,随着模式分辨率的增加,风速均方根误差 却小幅度增大。模式对气压、气温等具有较强周期变化规律的模式变 量模拟效果要好于风速等周期变化不明显的变量。造成差异的原因主 要是风速的局地性较强,受地形和下垫面类型的影响较大,仅提高模 式分辨率不一定能对风速的模拟起到积极的作用。针对 2019 年 8 月 10 日山东地区发生强降水天气过程,两种不同分辨率均能较好的模 拟出降水特征,覆盖了实际降水落区,高分辨率模式预报各种降水等 级的偏差评分均低于低分辨率。此次强降水过程在降水当日相对湿度

接近于饱和状态,易于凝结,且随着模式分辨率的提高,相对湿度增强,结构更加精细,同时高分辨率模式模拟的低层气旋中心气压较低分辨率模式更低,气旋的强度更大,对流降水过程更强。 关键词 全球模式;不同分辨率;中国区域;极端降水;模拟能力



Simulation of regional weather forecast over China by Global Forecast System in two resolutions

JIA Jia^{1,2}, DAN Li¹, WANG Lizhi¹, Zhan Siyu¹, Ma Zaizhong³, Ma Zhuguo¹

- 1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100029
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
- 3 National Oceanic Atmospheric Adminstration/Environmental Modeling Center

Abstract: The improvement of numerical weather prediction depends on the improvement of the model physical process, the model initial field and model spatial resolution. The improvement of the model resolution has become an effective way to improve the model prediction effect. Based on the global forecast system, T1534 (13km) and T254 (55km) models with different resolutions were used to forecast the temperature, pressure, wind speed and precipitation over China. The results show that, in the simulation of the two resolution models for the daily pressure over China, the prediction effect of North China is the best, and the root mean square error of the seven sub-regions decreases significantly with the increase of the resolution. In the simulation of daily temperature, the simulation effect of eastern region is better than that of western region. In

the simulation of wind speed, for the northwest region, the root mean square error of wind speed increases slightly with the increase of model resolution. To sum up, the simulation effect of model variables with strong periodic changes, such as air pressure and temperature, is better than that of variables with insignificant periodic changes, such as wind speed. The main reason for this difference is that the wind speed is licalized, which is greatly affected by terrain. According to the heavy precipitation weather process in Shandong on August 10, 2019, the two models with different resolutions can simulate the precipitation characteristics well and cover the actual precipitation falling area. The deviation scores of various precipitation grades predicted by the high resolution model are lower than those of the low resolution model. In this heavy precipitation process, the relative humidity was close to saturation on the precipitation day, which was easy to condense, and with the improvement of the model resolution, the relative humidity was enhanced and the structure became more refined. Meanwhile, the central pressure of the low-level cyclone simulated by the high resolution model was lower than that of the low-resolution model, and the cyclone intensity was greater and the convective precipitation process was stronger.

Keywords Global Forecast System; different resolution; China area; Extreme precipitation; Capability of simulation

116

1、 引言

数值天气模拟效果的改进无外乎三个方面,首先是模式物理过程 的完善,其次是模式初始场的改进,再就是模式空间分辨率的提高。 20 世纪以来,随着计算机水平的不断发展,模式分辨率的提高已成 为改善模式模拟效果一个有效途径(Filippo et al., 1996; 高学杰等, 2006: 姜勇强等, 2006: Gentry et al., 2010: 袁招洪等, 2015: Wagner et al., 2018; 彭筱等, 2019)。过去, 针对模式分辨率的提高做了大 量的研究,如李锁锁(2005)等针对降水过程进行模拟研究,结果表 明高分辨率对降水中心位置的模拟有较大的改善,但会产生虚假降水 中心:也有研究发现提高模式分辨率对温压湿风等基本气象要素的模 拟具有一定影响(张宇等,2010),尤其是对温度和湿度的影响较大: 利用 WRF 模式对淮河流域多次暴雨过程进行模拟表明,提高分辨率有 助于改善模拟效果,但模拟的降水偏强(邓莲堂等,2012);卢萍等 (2021)指出,提高模式分辨率可刻画更复杂地形,从而得到更准确 的局地动力热力状况,模拟的雨带更加清晰。针对一次暴雨过程进行 数值模拟试验,康兆萍等(2019)发现模拟的雨带与实况一致,降雨 落区的模拟对分辨率更为敏感。Langhans 等(2013)研究表明,模 式水平分辨率的提高显著改善对降水极值的过高估计。

暴雨是夏季较常见的极端天气事件,严重威胁着人民的生命财产 安全。因此,针对暴雨等极端天气事件的数值模拟和预报一直是科学 研究和业务预报重点关注的问题(Lee et al.,2013;Kopparla et al.,2013; Wedi et al.,2014; Soares et al.,2018; Wagner et al.,2018; 郑丽娜等,2021; 梁依玲等,2022; 庞玥等,2022; 张丁丁等,2022; 邢蕊等,2023, You et al.,2023)。Kopparla et al. (2013)的工作指出,模式分辨率的提高对极端降水的模拟至关重要,但分辨率的改进不能完全消除模拟的偏差;研究也发现,分辨率的提高对极端降水的频率、变幅和变率都有重要的影响(Jong et al.,2023);刘静等(2022)评估了多种模式对降水预报的模拟,发现粗分辨率模式对台风型降水过程中的短时强降水模拟效果最差;曹萍萍等(2022)检验分析了多种数值预报降水预报能力,结果表明欧洲中心模式对于雨日的空报最明显,但其暴雨量级的预报较实际降水偏小。

美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, 简称 NCEP) 的全球数值预报模式 (Global Forecast System, 简称 GFS) 是目前世界上最先进数值预报模式之一, 随着计算机技术的发展,模式运行的分辨率也在逐步提高,但更高的分辨率 所需的计算资源也更多,在计算资源一定的情况下,分辨率的提高对 于模拟效果的提升效果还需要进行定量的评估。目前,已有不少学者 针对 GFS 在中国区域的模拟效果分析评估,孙逸涵等 (2013)分析了 GFS 在中国区域内的近地层风速模拟效果,结果表明在利用气象站资料检验时,GFS 针对风速介于 (3-15) m/s 的模拟效果最好;牛嫣静 等 (2020) 研究发现 GFS 气温预报存在偏低预报的趋势,且预报存在

季节变化,均方根误差表现为夏秋季由于春冬季,相关系数表现为秋 冬季优于春夏季。目前针对 GFS 在中国区域的模拟效果分析评估大多 针对局部地区、单气象要素,缺少针对中国区域的多气象要素的整体 评估以及区域对比分析。为此,本文基于 GFS 模式,通过分析对比两 种分辨率模式对中国区域气温、气压以风速的模拟效果,并选取典型 极端降水个例分析评估,探讨两种分辨率对数值模拟效果的影响。



2.1 资料

本文所使用的观测数据为中国气象局整编的中国区域 2423 个自动气象站逐日气象数据,包括温度、降水、风速及海平面气压。站点分布如图1所示。



图 1 全国自动气象站分布及区域划分

Fig. 1 Locations of the meteorological stations and sub-regional division

欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)是全球最主要的再分析数据中 心之一。其推出的第五代全球大气再分析资料(ERA5)具有较高的分 辨率,使用户能够更准确地分析过去的大气状态。ERA 系列数据产品 在天气和气候研究中得到广泛应用,ERA5 的适用性已有得到验证 (Stopa et al.,2013; 刘鸿波等,2021),因此,本文选择 ERA5 再 分析数据用于相关研究。

研究时间段为2019年7月25日-2019年8月24日,共30天, 选取要素为气温、气压及风速。为了分析评估两种分辨率模式对降水 预报的能力,选取了2019年8月10日在山东省发生的暴雨过程进行 研究。

2.2 方法和思路

由于气象要素的分布具有明显的区域特征,本文参考第二次气候 变化国家评估报告,将中国地区分为7个子区域(图1),分别为: 西北[分区1:(38°N~46°N,82°E~92°E)]、东北[分区2:(42.5° N~50°N,120°E~130°E)]、华北[分区3:(36°N~43°N, 111° E~119°E)]、华中[分区4:(28°N~36°N, 106°E~115°E)]、 华东分区5:(28°N~36°N, 116°E~122°E)]、西南[分区 6:(21°N ~28°N, 98°E ~ 106°E)]、华南 [分区 7: (20°N ~ 27°N, 107. 5° E~120°E)]。

本文利用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)的全球数值预报模式(Global Forecast System,简称 GFS)进行计算。模式版本为 GFS-T1534 与 GFS-T254, 水平分辨率分别为 13k 和 55km, 垂直分层为 64 层。本文通过运行两 种分辨率模式,对其预报各要素资料(气温、气压和风速)进行对比 分析,评估两种分辨率模式的模拟效果。

计算此次降水过程的偏差评分(BIAS)、TS 评分(Threat Score)、 空报率(False Alarm Rate, FAR)以及命中率(Hit Rate, HR)。对 于降水过程,根据实测降水与预报对应关系计算对应评分。其中, BIAS、TS、HR、FAR的计算公式如下:



式中: NA 表示预报时段内预报值和观测降雨量均出现的站点数, 及命中预报的站点数; NB 表示预报出现降水而观测未出现降水的站 点数,即空报站点数; NC 表示未预报降水而观测出现降水的站点数, 即漏报站点数; ND 表示预报和观测均未出现降水的站点数。

3 结果分析

3.1 两种分辨率模式在中国区域预报能力的比较



为分析评估两种分辨率模式在中国区域的预报能力,针对中国7 个子区域分别统计了两种分辨率模式运行下各区域与 ERA5 再分析数 据比较的误差指标值的平均值。如表1所示为两种分辨率模式预报的 逐日气压在中国7个子区域评估指标均值。整体来看,模拟效果最好 的是华北地区,两种分辨率模式预报与 ERA5 再分析资料评估的相关 系数均达0.99 以上,均方根误差均小于0.06。中国7个子区域在模 式分辨率提高后,模拟效果均有所改善,相关系数增大,均方根误差 减小,尤其是西南和西北地区,均方根误差分别缩小至 61.5%和 60.3%。

表1两种分辨率逐日气压中国7个子区域相关系数和均方根误差均值

Table 1 The correlation coefficient and the mean root mean square error of 7subregions of daily atmospheric pressure in China over different resolution

	分辨率	东北	华东	华北	华南	西北	西南	华中
相关系数	55km	0.996	0.995	0.988	0.985	0.976	0.948	0.981
均方根误差	13km	0.996	0.997	0.992	0.987	0.986	0.961	0.989
	55km	0.580	0.586	0.744	0.622	1.642	1.507	0.815
	13km	0.054	0.048	0.065	0.061	0.101	0.091	0.053

表 2 两种分辨率逐日气温中国 7 个子区域相关系数和均方根误差均值

subregions of daily temperature in China over different resolution								
	分辨率	东北	华东	华北	华南	西北	西南	华中
相关系数	55km	0.922	0.758	0.872	0.454	0.734	0.270	0.679
	13km	0.914	0.785	0.880	0.396	0.750	0.349	0.679
均方根误差	55km	1.603	2.047	1.509	1.176	5.180	1.437	1.691
	13km	0.668	1.658	1.484	1.353	4.260	2.147	1.566
		y /					2	

Table 2 The correlation coefficient and the mean root mean square error of 7

气温是与人们日常生活紧密相连的气象要素,将两种分辨率模式预报的中国7个子区域气温与 ERA5 再分析资料进行评估,分别统计相关系数和均方根误差的偏差情况,如表2所示。七个区域中东北地区的相关系数最高,但随着模式分辨率的提高后,相关系数却有所降低。西北地区气温预报的均方根误差较大,在提高模式分辨率后均方根误差大幅度减小,降低为先前的82.2%;东北地区的均方根误差较小为1.603,在提高模式分辨率后均方根误差进一步减小为0.668,减少了58.3%。

将两种分辨率模式预报的中国 7 个子区域经向风和纬向风与 ERA5 再分析资料进行评估,分别统计相关系数和均方根误差的偏差 情况,如表 3 和表 4 所示。7 个区域中华东区域预报经向风和纬向风 与ERA5 再分析资料的相关系数最高,且纬向风的相关系数高于经向

表 3 不同分辨率逐日纬向风中国 7 个子区域相关系数和均方根误差均值 Table 3The correlation coefficient and the mean root mean square error of 7 subregions of daily zonal wind in China over different resolution

- HA	分辨率	东北	华东	华北	华南	西北	西南	华中
相关系数	55km	0.867	0.907	0.755	0.855	0.553	0.680	0.731
	13km	0.889	0.924	0.799	0.870	0.679	0.701	0.679
均方根误差	55km	1.499	1.699	1.384	1.810	2.057	0.649	0.959
	13km	1.760	1.537	1.475	1.594	2.778	0.680	1.266

表4不同分辨率逐日经向风中国7个子区域相关系数和均方根误差均值

Table 4 The correlation coefficient and the mean root mean square error of 7 subregions of daily meridional wind in China over different resolution

	分辨率	东北	华东	华北	华南	西北	西南	华中
相关系数	55km	0.853	0.880	0.843	0.854	0.509	0.649	0.677
	13km	0.898	0.884	0.863	0.865	0.628	0.679	0.753
均方根误差	55km	1.499	1.538	1.848	1.598	2.341	0.957	1.143
×	13km	1.446	1.553	2.212	1.513	2.510	0.938	1.134
					(9)			

风,高分辨率模式均高于低分辨率模式。西北地区预报纬向风和经向 风与 ERA5 再分析资料的相关系数最小,但随着分辨率的升高,相关

系数分别增大 122.7%和 123.4%。华中地区的纬向风相关系数在提高 分辨率之后有所提高,高分辨率模式的均方根误差却稍大于低分辨率 模式。模式分辨率提高后,纬向风的均方根误差有所增大,其中西北 地区纬向风的均方根误差小幅度最大。



图 2 不同分辨率模式预报气压与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异在中国七个 子区域的空间分布(图(a)和图(c)为55km模式的相关系数和均方根误差:图(b)和图 (d)为13km模式的相关系数和均方根误差;1、西北;2、东北;3、华北;4、华中;5、华东;6、 西南;7、华南)

Fig. 2 Spatial distribution of pressure correlation coefficient and root mean square error difference with different resolution in seven sub-regions of China (Fig. (a) and Fig. (c) are correlation coefficient and root mean square error difference with 55km system; Fig. (b) and Fig. (d) are correlation coefficient and root mean square error difference with 13km system; 1. Northwest; 2. Northeast China; 3. Central part of northern China; 4. Central China; 5. East China; 6, Southwest China; 7. South

China)

为进一步分析评估两种分辨率模式在中国 7 个子区域的预报能 力的差异,统计了中国7个子区域两种分辨率模式运行下各区域与 ERA5 再分析数据比较的误差指标值分布情况。图 2 为两种分辨率模 式预报气压与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异在中国 7个子区域的空间分布图。由于气压的相关系数普遍较高,因此图中 红色区域表示相关系数大于 0.97,蓝色区域表示相关系数小于 0.97. 从图中可以直观的看出随着分辨率的升高 7 个子区域的相关系数显



图 3 不同分辨率模式预报气温与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异在中国七个 子区域的空间分布(图(a)和图(c)为 55km 模式的相关系数和均方根误差;图(b)和图 (d)为 13km 模式的相关系数和均方根误差;1、西北;2、东北;3、华北;4、华中;5、华东;6、 西南;7、华南)

Fig. 3 Spatial distribution of tempeture correlation coefficient and root mean square error difference with different resolution in seven sub-regions of China (Fig. (a) and Fig. (c) are correlation coefficient and root mean square error difference with 55km system; Fig. (b) and Fig. (d) are correlation coefficient and root mean square error difference with 13km system; 1. Northwest; 2. Northeast China; 3. Central part of northern China; 4. Central China; 5. East China; 6, Southwest China; 7. South China)

著增大,其中华中大部分地区的相关系数达到 0.99 以上,低分辨率模式中西南小部分区域的相关系数低于 0.97,而高分辨率模式中西南地区相关系数几乎全部在 0.97 以上。各子区域的均方根误差随着

分辨率增高均显著降低,从图中可看出西南地区的降幅最大,分辨率 升高后西南地区的均方根误差普遍小于1。

图 3 为两种分辨率模式预报气温与 ERA5 再分析资料的相关系数 和均方根误差差异在中国 7 个子区域的空间分布图,图中红色区域表



图 4 不同分辨率模式预报纬向风与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异在中国七 个子区域的空间分布(图(a)和图(c)为55km模式的相关系数和均方根误差;图(b)和 图(d)为13km模式的相关系数和均方根误差;1、西北;2、东北;3、华北;4、华中;5、华 东;6、西南;7、华南)

Fig. 3 Spatial distribution of zonal wind correlation coefficient and root mean square error difference with different resolution in seven sub-regions of China

(Fig. (a) and Fig. (c) are correlation coefficient and root mean square error difference with 55km system; Fig. (b) and Fig. (d) are correlation coefficient and root mean square error difference with 13km system; 1. Northwest; 2. Northeast China;
3. Central part of northern China; 4. Central China; 5. East China; 6, Southwest China; 7. South China)

示相关系数为正,蓝色区域表示相关系数为负。可以看出,西南和华 南的部分地区两种分辨率模式预报气温与 ERA5 再分析资料的相关系 数存在部分负值区域,东北地区的相关系数最高,分布在 0.9 以上。 7个子区域的均方根误差均随着分辨率的提高而显著降低,特别是西 北地区,在低分辨率的模式预报中存在部分地区均方根误差大于7, 而在提升模式分辨率之后,西北地区的均方根误差大都低于4,远低 于低分辨率模式的结果。



图 5 不同分辨率模式预报经向风与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异在中国七 个子区域的空间分布(图(a)和图(c)为 55km 模式的相关系数和均方根误差;图(b)和 图(d)为 13km 模式的相关系数和均方根误差;1、西北;2、东北;3、华北;4、华中;5、华 东;6、西南;7、华南)

Fig. 3 Spatial distribution of meridional wind correlation coefficient and root mean square error difference with different resolution in seven sub-regions of China

(Fig. (a) and Fig. (c) are correlation coefficient and root mean square error difference with 55km system; Fig. (b) and Fig. (d) are correlation coefficient and root mean square error difference with 13km system;1. Northwest; 2. Northeast China;
3. Central part of northern China; 4. Central China; 5. East China; 6, Southwest China; 7. South China)

图 4 和图 5 分别为两种分辨率模式预报纬向风和经向风与 ERA5 再分析资料的相关系数和均方根误差差异的空间分布图。图中红色区 域表示相关系数为正,蓝色区域表示相关系数为负,如图所示,西北 区域存在部分地区纬向风和经向风与 ERA5 再分析资料的相关系数为 负。华南地区的相关系数最高,其中纬向风相关系数普遍在 0.8 以上。 综合来看,在地形复杂的地区相关系数偏低,负值区基本出现在西北 地区,这可能是由于西北地区的地形复杂,高分辨率模式更容易造成 误差累积;观测站点较少,当分辨率增加时对于资料的同化效率未存 在明显改善。季风区的相关系数普遍高于非季风区。北部的纬向风和 经向风预报值的均方根误差普遍大于南部区域,华南和西南地区的均 方根误差普遍小于 2,随着纬度的增加均方根误差逐渐增大。对于西 北地区而言,随着模式分辨率的增加,纬向风和经向风的均方根误差 却小幅度增大,造成这种差异的原因主要是风速的局地性较强,受地 形和下垫面类型的影响较大,仅提高模式分辨率不一定能对风速的模 拟起到积极的作用。

3.2 两种分辨率模式的极端降水个例分析

为了评估两种模式分辨率对于极端降水的预报能力,本文选取了 2019年8月10日在山东发生的一次大暴雨降水过程作为研究对象, 分别对两种分辨率的降水预报产品与气象站点实测资料以及欧洲中 心 ERA5 再分析资料进行对比评估。

如图 6a 所示,2019 年 8 月 10 日山东地区发生强降水天气过程,多地 24 小时累计降水量超过 50mm,达到暴雨等级。图 6b、图 6c 和图 6d 分别为欧洲中心再分析 ERA5 资料、55km 分辨率以及 13km 模式

的模拟结果。由图可以看出。两种分辨率的模式均能较好的模拟出降水特征,覆盖了实际降水落区,但两种不同预报模拟的降水落区均较

实际偏大。



图 6 不同分辨率模式预报与站点实测降水以及欧洲中心 ERA5 再分析资料对比 (图(a)站 点实况;图(b) ERA5 再分析资料;图(c) 55km 模式预报;图(d) 13km 模式预报)

Fig. 6 Comparison of precipitation predicted by different resolution models and measured at stations, as well as ERA5 reanalysis data from European center (Fig. (a) Station; Fig. (b) ERA5 reanalysis data; Fig. (c) 55km model forecast; Fig. (d) 13km model forecast

表 5 降水预报检验指标

降水等级	模式分辨率	BIAS 评分	TS 评分	命中率	空报率			
小雨	13km	1.057	0.945	1	0.054			
1	55km	1.058	0.946	1	0.054			
中雨	13km	1.109	0.814	0.946	0.146			
	55km	1.157	0.815	0.969	0.166			
大雨	13km	1.113	0.704	0.858	0.203			
	55km	1.162	0.679	0.874	0.247			
暴雨	13km	0.916	0.524	0.659	0.280			
	55km	1.089	0.478	0.676	0.379			
大暴雨	13km	0.566	0.269	0.322	0.383			
	55km	0.611	0.239	0.311	0.491			

Table 5 Index of precipitation forecast

将两种分辨率模式与降水实况进行分析,分别计算了小雨、中雨、 大雨、暴雨以及大暴雨5个等级降水的多种评估指标,包括TS评分、 BIAS 评分、命中率和空报率。低分辨率对于中雨和大雨的偏差评分 最大,分别为1.157和1.162,而对大暴雨的预报偏差最小仅为0.611。 高分辨率模式对中雨和大雨的预报偏差评分最大,而暴雨和大暴雨的 偏差评分则小于1。高分辨率模式预报各种降水等级的偏差评分均低 于低分辨率。随着降水等级增大,两种不同分辨率降水预报 TS 评分



图 7 2019 年 8 月 10 日 12 时和 24 时 500hPa 上不同分辨率模式预报与欧洲中心 ERA5 再分析 资料相对湿度(阴影)、位势高度(等值线)和风场(矢量)对比 (图(a)和图(d)分别为 55km 模式 12 时与 24 时高空图;图(b)和图(e)分别为 13km 模式 12 时与 24 时高空图;图 (c)和图(f)分别为 ERA512 时与 24 时高空图)

FIG. 7 Comparison of ERA5 reanalysis data on relative humidity (shadow), geopotential height (contour line), and wind field (vector) at 500hPa with different resolutions on August 10, 2019 (FIG. (a) and FIG. (d) show the upper air at 12 and 24 hours of 55km model, respectively; Figure (b) and Figure (e) show the upper air at 12 and 24 hours of the 13km model respectively. Figure (c) and Figure (f) are the upper air at 12 and 24 hours of ERA5 respectively.

降低,但高分辨率的 TS 评分始终高于低分辨率,其中对于暴雨的预 报最为明显,低分辨率评分比高分辨率低 9.6%。对于小雨的预报, 两种分辨率的预报命中率均为 100%,同时随着降水等级的升高,命 中率逐渐降低。低分辨率模式对于中雨、大雨以及暴雨的预报命中率 20 均高于高分辨率模式,而高分辨率模式对于5种等级降水的预报中仅



图 8 2019 年 8 月 10 日 12 时和 24 时 850hPa 上不同分辨率模式预报与欧洲中心 ERA5 再分析 资料相对湿度(阴影)、位势高度(等值线)和风场(矢量)对比 (图(a)和图(d)分别为 55km 模式 12 时与 24 时高空图;图(b)和图(e)分别为 13km 模式 12 时与 24 时高空图;图 (c)和图(f)分别为 ERA512 时与 24 时高空图)

FIG. 8 Comparison of ERA5 reanalysis data on relative humidity (shadow), geopotential height (contour line), and wind field (vector) at 850hPa with different resolutions on August 10, 2019 (FIG. (a) and FIG. (d) show the upper air at 12 and 24 hours of 55km model, respectively; Figure (b) and Figure (e) show the upper air at 12 and 24 hours of the 13km model respectively. Figure (c) and Figure (f) are the upper air at 12 and 24 hours of ERA5 respectively.

有大暴雨等级的预报命中率高于低分辨率。高分辨率对于5种等级降水的空报率均低于低分辨率,且随着降水等级的增高,两种分辨率模式的空报率也随之增大。

图 7 为降水当日 500hPa 上不同分辨率模式预报以及 ERA5 再分 析资料的高空形势图,其中阴影部分为相对湿度。分析发现,模拟结 果与再分析资料的空间分布特征基本一致,在降水当日相对湿度接近 于饱和状态,易于凝结,且随着模式分辨率的提高,相对湿度增强, 结构更加精细。强降水的成因与高空环流形式及其他系统的协同作用 是分不开的。从图7中可以看出,两种分辨率模式模拟的环流特征都 接近于 ERA5 再分析场,气旋性环流十分明显,高分辨率模式模拟的 低压中心为5680hPa,低于低分辨率模式模拟的5740hPa,且更接近于 ERA5 再分析资料的结果。

图 8 为降水当日 850hPa 上不同分辨率模式预报以及 ERA5 再分析 资料的高空形势图,其中阴影部分为相对湿度。从图上能明显的看出 高分辨率模式所模拟的相对湿度在 850hPa 上也显著高于低分辨率模 式模拟结果,大气湿层深厚且水汽充沛。低层气旋所造成的低空辐合 区促使气流向上输送,增强了上升运动。高分辨率模式模拟的低层气 旋中心气压较低分辨率模式更低。

4 结论

本文利 13km 和 55km 两种分辨率的 GFS 全球数值预报模式的产品, 对 2019 年 7 月 25 日-2019 年 8 月 24 日中国区域逐日气温、气压和 风场进行对比检验,并选取 2019 年 8 月 10 日山东省强降水过程作为 研究对象,分析了不同分辨率模式的模拟能力。结论如下:

(1)两种分辨率全球模式对中国区域逐日气压的模拟中华北地区的模拟效果最好,7个子区域的均方根误差随着分辨率提高均显著降低;逐日气温的模拟,东部地区的效果优于西部地区。逐日风速

的模拟,两种分辨率产品在季风区的相关系数普遍高于非季风区。对 于西北地区,随着模式分辨率的提高,风速均方根误差却有小幅度增 大。原因是风速的局地性较强,受地形和下垫面类型的影响大,而天 气模式缺乏对局地地形地貌的考虑,因此,仅依赖模式分辨率的提高 难以改善风速的模拟效果。可以说,提高分辨率后天气模式对华东和 华北地区气压、气温等的模拟效果较好,而对于受地形地貌等局地因 素较大的地面风模拟效果并不理想,甚至变差。因此,对地形复杂的 地区,提高分辨率的天气模式需要考虑与包含有地形地貌的陆面模式 耦合方能达到提高模拟效果的目的。

(2)针对2019年8月10日山东地区发生的一次强降水天气过程,两种不同分辨率模式均能较好的模拟出降水特征,覆盖了实际降水落区。随着降水等级的增高,两种分辨率模式的空报率也随之增大。高分辨率模式预报 5 种降水等级的偏差评分以及空报率均低于低分辨率模式预报。说明,模式分辨率的提高有助于对不同等级降水量的预报。且随着模式分辨率的提高,相对湿度增强,结构更加精细。两种分辨率模式模拟的环流特征均接近于 ERA5 再分析场,气旋性环流十分明显,低层气旋的低空辐合区促使气流向上输送,增强了上升运动。高分辨率模式模拟的低层气旋中心气压较低分辨率模式更低,气旋的强度更大,对流性降水更强。

(3)本文就全球模式水平分辨率对模拟效果的影响问题进行了 初步评估和探讨,对其中的物理机制的分析还需要更深入的研究,同 时在分析时仅选取了一次发生在山东地区的极端降水过程进行分析 评估,未涉及复杂地形的降水过程的模拟和多个例的比较,下一步我 们将选取多个典型极端降水个例对比分析,为提高天气模式模拟极端 降水的能力和深刻认识其机制提供佐证。

参考文献:

- 曹萍萍,王佳津,肖递祥,等. 2022.攀西地区 2021 年夏季多模式降水预报检验[J].高 原山地气象研究, 42(04):96-103. Cao Pingping, Wang Jiajin, Xiao Dixiang et al. 2022. Verification of Multi-Model Precipitation Forecast in Panxi Region in Summer of 2021[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research(in Chinese). 42(04):96-103.
- 邓莲堂, 史学丽, 闫之辉. 2012.不同分辨率对淮河流域连续暴雨过程影响的中尺 度模拟试验[J]. 热带气象学报, 28(2): 167-176. Deng Liantang, Shi Xueli, Yan Zhihui. 2012. Meso-scale simulation of a heavy rainfall in the Huaihe river valley in July 2003: Effects of different horizontal resolutions[J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28(2): 167-176.
- Filippo G and Maria R M.1996. An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implication for climate studies[J]. Monthly Weather Review, 124: 148-166.
- Gentry M S, Lackmann G M. 2010. Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution [J]. Monthly Weather Review, 138(3): 688-704.
- 高学杰,徐影,赵宗慈,等.2006.数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的 试验[J].大气科学,2006(02):185-192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci et al. 2006. Impacts of Horizontal Resolution and Topography on the Numerical

Simulation of East Asian Precipitation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese),2006(02):185-192.

- Lee J W and Song Y. 2014.Potential for added value to downscaled climate extremes over Korea by increased resolution of a regional climate model[J]. Theor Appl Climatol, 117:667-677. DOI 10.1007/s00704-013-1034-6.
- Jong B T, Delworth T L, Cooke W F et al. 2023. Increases in extreme precipitation over the Northeast United States using high-resolution climate model simulations[J]. npj Climate and Atmospheric Science (2023) 18.
- 姜勇强,张维桓,周祖刚.2006. 模式水平分辨率提高对一段大暴雨预报结果的影响 [J].高原气象,2006(06):1071-1082. Jiang Yongqiang, Zhang Weihuan, Zhou Zugang. 2006. Impact of Finner Model Horizontal Resolution on a Heavy Rainstorm Forecast[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 2006(06):1071-1082.
- Kopparla P, Erich M. F, Cécile H et al. 2013. Improved simulation of extreme precipitation in a high-resolution atmosphere model[J], Geophysical Research Letters, 40(21):5803–5808.
- 康兆萍,周志敏,李红莉.2019.不同分辨率和云微物理方案对华中暴雨模拟的影响 分析[J].暴雨灾害,38(6):658-667. Kang Zhaoping, Zhou Zhiming, Li Hongli. 2019. Analysis on the effects of different horizontal resolutions and microphysical schemes on the simulation of a rainstorm in central China [J]. Torrential Rain and Disaster(in Chinese),38(6):658-667.
- 刘静, 任川, 赵梓淇, 等, 2020. 多区域高分辨率模式强降水预报检验分析[J]. 气象, 48(10): 1292-1302. Liu Jing, Ren Chuan, Zhao Ziqi et al.2022. Comparative analysis on verification of heavy rainfall forecasts in different regional models[J].

Meteor Mon(in Chinese), 48(10):1292-1302.

- 卢萍. 2021. 不同分辨率西南区域模式对冕宁"6.26"突发性暴雨过程的模拟[J].高 原山地气象研究, 41(02):23-31. Lu Ping. 2021. Study of "6.26" Sudden-Rainstorm in Mianning with Differ Horizontal Resolution Business Model (SWC-WARR) [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research(in Chinese), 41(02):23-31.
- 李锁锁,吕世华,高艳红,等. 2005. 模式水平分辨率对祁连山区降水模拟影响的初 步分析[J].高原气象,2005(04):496-502. Li Suosuo, Lu Shihuang, Gao Yanhong et al. 2005. Effect of Different Horizontal Resolution on Simulation of Precipitation in Qilian Mountain[J]. Pleateau Meteorology(in Chinese), 2005(04):496-502.
- 刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. 2021. ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速 气候特征及变化趋势再现能力的评估 [J]. 气候与环境研究,26(3): 299-311. LIU Hongbo, DONG Li, YAN Ruojing, et al. 2021. Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China's Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (3): 299-311. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101
- Langhans W, Schmidli J , Fuhrer O, et al . 2013.Long -term simulations of thermally driven flows and orographic convection at convection parameterizing and cloud -resolving resolutions [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 52 (6): 1490-1510.

梁依玲, 覃月凤, 陈见. 2022. 2020 年广西开汛暖区暴雨特点及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用, 43(3):77-82. Liang Yiling, Qin Yuefeng, Chen Jian. 2022. Analysis on the characteristics and forecast deviation of heavy rain in the warm area at the beginning of flood season of Guangxi in 2020[J].Journal of Meteorological Research and Application, 43(3):77-82.

- 牛媽静,徐向军,郭欢,等. 2020.三种全球预报产品中国区近地面气温短期模拟效果 检验[J]. 气象与环境学报, 36(4): 18-27. NIU Yanjing,XU Xiangjun,GUO Huan, et al. 2020.Verification of the short-term forecast of near-surface temperature using different global forecast products in China[J].Journal of Meteorology and Environment, 36(4): 18-27.
- 彭筱,陈晓燕,黄武斌.2019.2016 年夏季不同分辨率 GRAPES__MESO 模式的西北 地区模拟效果检验[J].气象研究与应用, 40(04):6-11. Peng Xiao, Chen Xiaoyan, Huang Wubin. 2019. Test of prediction effect on Northwest China with different resolutions of GRAPES_MESO model[J]. Journal of Meteorological Research and Application(in Chinese), 40(04):6-11.
- 庞玥,刘祥,韩潇,等. 2022. ECMWF 集合预报产品在重庆暴雨预报中的检验与应用.
 气象科学, 42(4):549-556.Pang Yue, Liu Xiang, Han Xiao et al. 2022.
 Verification and application on forecasting heavy rainfall over Chongqing region by using ECMWF ensemble forecast products. Journal of the Meteorological Sciences, 42(4): 549 556.
- Stopa J E, Cheung K F, Tilman H L, et al, 2013. Patterns and cycles in the Climate Forecast System Reanalysis wind and wave data [J]. Ocean Modelling, 70: 207-220, doi:10.1016/j.ocemod.2012.10.005
- Soares P M M. and Rita M. C. 2018. A simple method to assess the added value using high-resolution climate distributions: application to the EURO-CORDEX daily precipitation[J]. Int. J. Climatol, 38(3): 1484–1498.
- 孙逸涵,何晓凤,周荣卫.2013.不同背景场近地层风速的模拟效果检验[J].资源科学, 35(12):2481-2490. Sun Yihan, He Xiaofeng, Zhou Rongwei. 2013. Evaluation of

Forecasting Results of Wind Speed Based on Different Background Fields in the Surface Layer[J]. Resources Science(in Chinese), 35(12):2481-2490.

- Wagner A, Dominikus H, Sven W et al. 2018. Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: high-resolution simulations over areas of different topography in Germany[J], Monthly Weather Review, 146:1925-1944.
- Wedi NP. 2014. Increasing horizontal resolution in numerical weather prediction and climate simulations: illusion or panacea? [J]. Phil. Trans. R. Soc. A., 372: 20130289. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0289.
- 邢蕊,杨健博,田梦,等. 2023. 不同边界层参数化方案对台风"烟花"北上阶段暴雨 模拟的影响试验[J]. 干旱气象,41(1):91-102. Xing Rui,Yang Jianbo,Tian Meng,et al. 2023. Effect of different boundary layer parameterization schemes on simulation of the heavy rainfall during Typhoon In-Fa(2106) moving northward period[J]. Journal of Arid Meteorology(in Chinese),41(1):91-102.
- You Y and Ting M. 2023. Improved performance of high-resolution climate models in simulating Asian monsoon rainfall extremes[J]. Geophysical Research Letters, 50, e2022GL100827.
- 袁招洪. 2015. 不同分辨率和微物理方案对飑线阵风锋模拟的影响[J]. 气象学报, 73(4):648-666 Yuan Zhaohong. 2015. Study of the influence of the different horizontal resolutions and microphysical setups on the idealized simulation of a squall line.Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 73(4):648-666.
- 张丁丁,黄莉,周琰,等. 2022.年广西南宁一次极端暴雨特征及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用,43(3):72-76. Zhang Dingding, Huang Li, Zhou Yan. Analysis on the characteristics and forecast deviation of an extreme rainstorm in Nanning city in2020[J]. Journal of Meteorological Research and Application(in Chinese),2022. 43(3):72-76.

- 郑丽娜,王媛,张子涵. 2021.2019 年台风利奇马引发山东特大暴雨成因分析[J]. 气 象科技, 49(03):437-445. Zheng Lina, Wang Yuan, Zhang Zihan. 2021.Causual Analysis of Extra Torrential Rain of Typhoon Lekima in Shandong in 2019[J]. Meteorological Science and Technology(in Chinese),49(03):437-445.
- 张宇,郭振海,张文煜,等. 2010. 中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征模拟能 力分析[J].大气科学,34(3): 653-660. Zhang Yu,Guo Zhenhai,Zhang Wenyu et al. 2010. Analysis of mesoscale numerical mode'ls ability of atmospheric multiscale characteristics simulation in variety resolution[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 34(3):653-660.

