

姚梦颖,吴梦雯,刘建勇,等.浙江区域台风暴雨多模式 QPF 融合技术应用试验[J].海洋气象学报,2023,43(2):76-87.  
YAO Mengying, WU Mengwen, LIU Jianyong, et al. Application experiment of multi-model QPF fusion method for Zhejiang typhoon rainstorm[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(2): 76-87. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.007. (in Chinese)

## 浙江区域台风暴雨多模式 QPF 融合技术应用试验

姚梦颖<sup>1</sup>,吴梦雯<sup>2,1</sup>,刘建勇<sup>1</sup>,娄小芬<sup>3</sup>,郑林晔<sup>4</sup>

(1.浙江省气象科学研究所,浙江 杭州 310008;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.浙江省气象台,浙江 杭州 310007;4.福建省气象台,福建 福州 350001)

**摘要:** 基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)台风路径集合预报逐 12 h 以及中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO 3 km、CMA-MESO 10 km)、中国气象局上海数值预报模式系统(CMA-SH9)和浙江省中尺度数值预报业务系统(ZJWARMS)逐 6 h 预报资料,以 2021 年台风“烟花”“灿都”影响下浙江区域 6 h 暴雨( $R \geq 25$  mm)为研究对象,对台风降水多模式定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)融合技术在浙江台风暴雨预报中的应用效果进行评估。分析结果表明:(1)针对两次台风降水过程,4 家区域模式对浙江暴雨预报过高估计,而台风降水多模式 QPF 融合技术能够有效提高浙江暴雨预报的公平技巧评分(equitable threat score, ETS)、降低暴雨空报率。(2)与台风“烟花”暴雨预报效果最佳的 CMA-MESO 3 km 相比,台风降水多模式 QPF 融合技术对暴雨和大暴雨的预报命中率(probability of detection, POD)分别提高 18.80%和 23.41%,ETS 分别提高 24.37%和 25.76%;与台风“灿都”暴雨预报效果最佳的 ZJWARMS 相比,台风降水多模式 QPF 融合技术对暴雨和大暴雨的预报 ETS 分别提高 23.08%和 3.23%;且两次过程中该方法的暴雨预报 POD 和 ETS 均高于同期浙江业务应用的客观预报。(3)在各家区域模式的台风路径预报差异较大的情况下,采用台风降水多模式 QPF 融合技术能显著提高台风暴雨预报准确率。

**关键词:** 台风暴雨;概率匹配;集合预报;区域模式

中图分类号: P445.1;P458.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2023)02-0076-12  
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.02.007

## Application experiment of multi-model QPF fusion method for Zhejiang typhoon rainstorm

YAO Mengying<sup>1</sup>, WU Mengwen<sup>2,1</sup>, LIU Jianyong<sup>1</sup>, LOU Xiaofen<sup>3</sup>, ZHENG Linye<sup>4</sup>

(1. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310007, China; 4. Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** Taking Typhoon In-Fa (2106) and Chanthu (2114) as examples, this study investigates whether the multi-model QPF (quantitative precipitation forecast) fusion method can add values to the predicted 6-h heavy precipitation ( $R \geq 25$  mm) of typhoon rainstorm in Zhejiang. The model forecasts include precipitation and typhoon track from ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather

收稿日期:2022-05-26;修回日期:2023-01-01

基金项目:浙江省气象局科技项目(2022YB07);灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-B21)

第一作者简介:姚梦颖,女,硕士,助理工程师,主要从事集合预报释用方法研究,yaomy1095@163.com。

Forecasts) typhoon track ensemble, CMA-MESO 3 km, CMA-MESO 10 km, CMA-SH9, and ZJWARMS (Zhejiang WRF ADAS Real-time Modeling System). The analysis results are listed as follows. (1) For the two typhoon precipitation processes, all of the 4 regional models overestimate the rainstorm in Zhejiang. In contrast, the multi-model QPF fusion method can effectively improve the ETS (equitable threat score) and reduce the false alarm ratio of rainstorm forecast. (2) Compared with the best model for forecasting Typhoon In-Fa (2106), i. e., CMA-MESO 3 km, the multi-model QPF fusion method can increase the POD (probability of detection) of rainstorm and heavy rainstorm by 18.80% and 23.41%, and increase the ETS of rainstorm and heavy rainstorm by 24.37% and 25.76%, respectively. Similarly, compared with the best model for forecasting Typhoon Chanthu (2114), i. e., ZJWARMS, the new method also improves the ETS of rainstorm and heavy rainstorm by 23.08% and 3.23%, respectively. And both of the method's ETS and the POD are higher than the operational objective forecast of Zhejiang in the two case studies. (3) Furthermore, when there are large differences in the typhoon track forecasts between several regional models, the multi-model QPF fusion method can significantly increase the accuracy of typhoon rainstorm forecast.

**Keywords:** typhoon rainstorm; probability matching; ensemble forecast; regional model

## 引言

浙江省地处东南沿海,受亚热带季风气候带和东风带天气系统的双重影响,再叠加“七山二水一分田”的特殊地貌作用,各种气象灾害频繁发生。台风作为夏秋两季影响浙江的主要天气系统之一,一直是气象部门与民生部门工作的关注重点。由台风系统引发的灾害中,台风暴雨以其雨量大和强度强的特点,常引发中小河流洪水和特大山洪,是防台工作的关注重点之一<sup>[1]</sup>。而台风暴雨是多尺度环流相互作用并在下垫面影响下形成的灾害性天气,其机理复杂,预报难度较大,因此提高台风暴雨预报能力一直是气象业务、科研部门的关注重点与研究难点。

近年来随着数值预报技术的快速发展,台风路径预报能力已得到大幅度提升,然而相比于路径预报,登陆台风的强降水落区和量级预报的准确率还具有很大的提升空间<sup>[2-4]</sup>。为了推进台风暴雨预报业务的发展,国内外学者和业务工作者主要从数值模式、统计方法以及数值模式预报后处理技术等方面开展研究工作<sup>[5]</sup>。有研究表明,台风降水预报的准确率会受台风中心位置、移动方向、降水持续时间以及降水效率等诸多因素的影响<sup>[6-7]</sup>。从业务预报的角度来看,要准确预报台风暴雨就要准确预报台风暴雨的落区和强度,而台风中心位置和移动路径对台风暴雨的落区分布有重要影响<sup>[5]</sup>。随着集合预报的不断发展,集合预报的路径预报准确率从某种程度上已经超过模式确定性预报,因此,在台风预

报业务中,发展基于集合预报路径的台风暴雨释用方法已成为当前提高台风降水业务预报准确率和防灾减灾效果的可行手段。杜钧等<sup>[8]</sup>、李俊等<sup>[9]</sup>研究发现,将高分辨率模式和集合预报技术结合起来,可以提高定量降水预报准确率。集合平均是一种常用的集合预报统计后处理方法,但会倾向于低估强降水预报而高估弱降水预报<sup>[10-13]</sup>,Ebert<sup>[11]</sup>用概率匹配方法替代集合平均方法对集合预报结果进行订正,从而有效减少了降水空报率,提高了大量级降水预报命中率。周迪等<sup>[14]</sup>研究发现,概率匹配方法可以有效订正暴雨集合预报系统性误差,对暴雨预报的漏报率和空报率都能有所改善。Liu等<sup>[15]</sup>基于传统等权概率匹配方法,提出一种改进的加权滑动平均概率匹配方法,并利用3个高时空分辨率(1 h, 3 km)数值模式(CMA-MESO 3 km、CMA-GD、CMA-SH3)预报,对台风“莫拉克”(2020)暴雨预报进行订正试验,研究结果表明,改进后的概率匹配方法能显著提高台风暴雨预报能力。Fang等<sup>[16]</sup>利用低分辨率的全球集合平均路径作为参考路径,选取与该路径相近的高分辨率集合预报成员来预测台风暴雨分布的空间结构和降水量,取得了较好的改进效果。由于全球集合预报系统的台风路径预报集合平均产品有较高的可靠性,而区域模式对局地-区域暴雨及以上量级降水分布的精细化特征有较好的预报能力<sup>[17-18]</sup>。陈博宇等<sup>[5]</sup>延续Fang等<sup>[16]</sup>的研究思路,利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)和美国国

家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)台风路径集合预报,结合国内主要业务区域模式,对已投入业务应用基于观测的集合成员优选技术进行改进,研究表明,改进得到的台风降水多模式定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)融合技术能在一定程度上提高台风暴雨预报准确性。

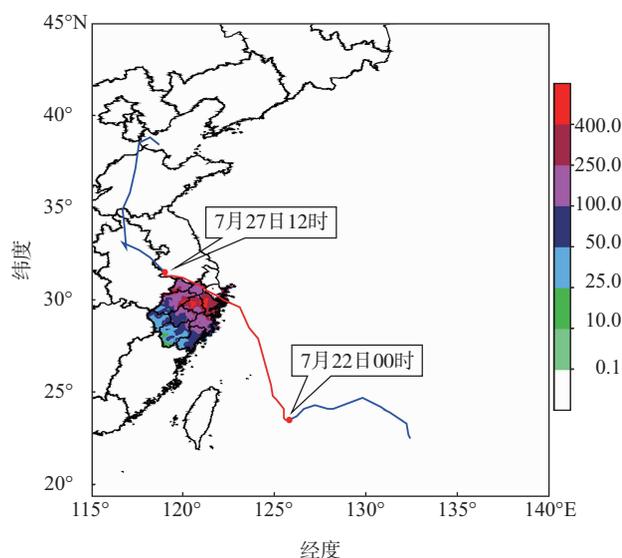
本文充分考虑浙江区域台风影响的多发性以及防台工作对民生工作的重要性,借鉴陈博宇等<sup>[5]</sup>的研究思路,对2021年浙江区域台风“烟花”“灿都”影响过程中台风降水多模式QPF融合技术的暴雨预报能力进行评估,以检验该方法在浙江区域台风降水业务应用的可行性,以期为预报员提供更具有参考价值的台风暴雨预报释用产品。

## 1 资料与方法

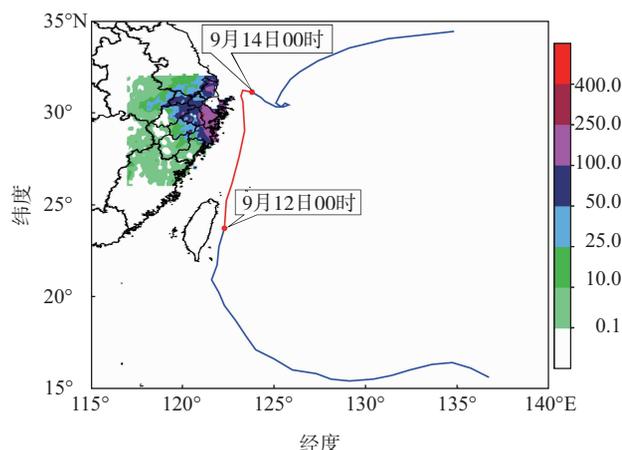
### 1.1 资料说明

受2021年第6号台风“烟花”影响,浙江区域主要降水时段为7月22日00时—27日12时(世界时,下同)(图1a)。在副热带高压、台风“烟花”以及南海热带低压“查帕卡”外围西南季风气流的共同影响下,浙江多个国家级气象观测站降水量突破1951年以来登陆浙江的台风记录,单站最大降水量达1 034 mm,出现在余姚大岚镇丁家畈,接近1323号台风“菲特”单站降水量极值(1 056 mm,出现在安吉天荒坪)<sup>[19]</sup>。受2021年第14号台风“灿都”影响,浙江区域主要降水时段为9月12日00时—14日00时(图1b),台风“灿都”路径较“烟花”偏东,在“灿都”的影响下暴雨及以上量级降水主要出现在宁波、舟山、台州、绍兴等地,宁波局地出现特大暴雨<sup>[20]</sup>。

考虑到实际业务预报中,由于模式运行、后处理及资料传输等原因,集合预报资料的获取存在12 h的滞后(例如:在00时中作为06时的预报,为前一天12时起报的18 h预报时效的预报)<sup>[21]</sup>,因此,模式预报资料皆考虑延时时效。本文采用的台风路径集合预报资料为ECMWF集合预报系统在2021年7月21日12时—26日12时、2021年9月11日12时—13日00时逐12 h起报的台风路径集合预报资料,共51个集合成员,包含1个控制预报和50个扰动预报,水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。区域模式包括与



(a) 台风“烟花”(2106)



(b) 台风“灿都”(2114)

图1 浙江区域台风过程累计降水量(色阶,单位:mm)分布与台风全路径(实线,其中红色实线段为研究时段内路径)

Fig.1 Distribution of typhoon accumulated precipitation (color scale, units: mm) in Zhejiang region and typhoon track in solid line (the red solid line is the path within the study period)

集合预报同时次起报的CMA-MESO 3 km(水平分辨率为 $0.03^\circ \times 0.03^\circ$ )、CMA-MESO 10 km(水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ )、CMA-SH9(水平分辨率为 $0.09^\circ \times 0.09^\circ$ )以及浙江省中尺度数值预报业务系统(Zhejiang WRF ADAS real-time modeling system, ZJWARMS;水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ),使用这些区域模式中的海平面气压场和降水资料。采用的台风路径观测资料为国家气象中心台风与海洋气象预报中心提供的台风实时定位资料,降水观测资料

为研究区域(26°~32°N, 117°~123°E)内自动气象观测站逐小时累计降水观测资料。业务客观预报资料包括浙江省气象台提供的 ZJ-OCF (Zhejiang Objective Consensus Forecasting) 和欧洲中期天气预报中心全球业务模式 ECHR (ECMWF High-Resolution forecasting) 降水资料。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 台风降水多模式 QPF 融合技术

台风降水多模式 QPF 融合技术包括两部分:集合成员优选与对优选成员预报进行概率匹配订正。首先,基于 ECMWF 台风路径集合预报和台风中心实时定位资料,选取模式起报后 6 h 台风中心位置预报偏差最小的前  $n$  个成员为优选成员,并认为这  $n$  个优选成员同为预报时效为 12 h 时的优选成员(陈博宇等<sup>[5]</sup>的研究中认为这  $n$  个优选成员同为 24 h 预报时效内的优选成员),随后将这  $n$  个优选成员的预报路径进行集合平均,从而得到参与降水集合的区域模式的优选参考路径。依据优选参考路径,选取沿路径逐 6 h 与台风中心位置偏差在最优偏差阈值内的区域模式的降水预报形成一组新的逐 6 h 降水集合(区域模式与参考路径的台风中心位置最优偏差阈值由区域模式优选偏差范围试验决定)。基于新的降水集合,利用概率匹配方法进行降水集合预报后处理,并对得到的逐 6 h 降水预报进行对比评估。在降水等级分类上,参考业务标准,定义暴雨为 6 h 累计降水量达 25~60 mm,大暴雨为 6 h 累计降水量达 60 mm 及以上。为了便于叙述,后文将该研究方法简记为 QPF 融合技术。

区域模式优选偏差范围试验:首先计算逐 6 h 各区域模式与参考路径的台风中心位置偏差,确定偏差阈值的整体范围,其次以偏差评分和公平技巧评分(equitable threat score, ETS)为检验指标,进行不同偏差阈值的敏感性试验,从而确定区域模式优选的最佳偏差阈值。

概率匹配方法<sup>[5,11]</sup>:首先,将降水产品区域内  $n$  个集合成员的所有格点( $m$  个格点)的降水预报值(含  $m \times n$ )从大到小排列,将该序列平分成  $m$  等份,保留每一份的中位数。其次,对每个格点上  $n$  个成员的预报计算平均,得到集合平均场,并将集合平均场中所有格点按数值从大到小的方式排列,保留各数值在平均场中的位置。最后,将保留下来的  $m$  份

中位数序列与集合平均场序列从大到小一一对应,用中位数序列中的数值替换对应集合平均场中的平均值数值,即可得到概率匹配产品(图 2)。

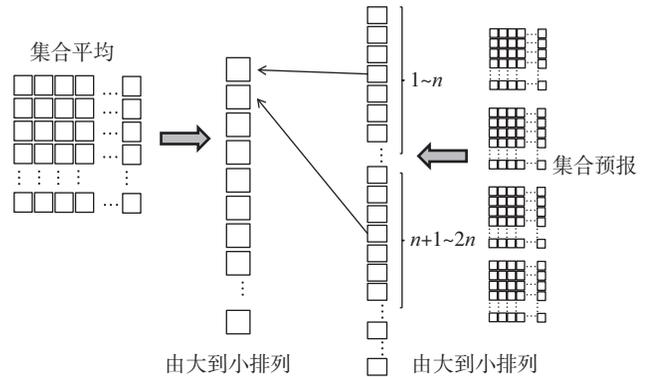


图 2 概率匹配方法计算原理图<sup>[5]</sup>  
Fig.2 Schematic diagram of principles of probability matching method<sup>[5]</sup>

#### 1.2.2 预报检验方法

为消除模式分辨率不一致对评估结果的影响,采用双线性插值方法将模式水平分辨率统一为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。采用的预报检验指标包括偏差(Bias)评分、公平技巧评分(ETS)、空报率(false alarm rate, FAR)、漏报率(missing alarm rate, MAR)和命中率(probability of detection, POD)(表 1)。检验指标中,Bias 评分越接近数值 1,表示预报发生的格点数接近观测出现的格点数;ETS 越接近 1,表示对应的预报结果越准确;其余皆为负向检验指标,数值越小,对应预报效果越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 最优区域模式选择

按照 1.2.1 节研究方法的介绍,用于区域模式优选的最优参考路径在整个 QPF 融合技术方法中至关重要。本文针对最优参考路径的选择,设计了路径优选试验。在试验中,计算研究时段内包含不同优选成员个数的集合平均路径与观测路径的偏差。以台风“烟花”为例(图 3),在 7 月 22 日 00 时—27 日 12 时时段内,当优选成员个数为 3,得到的参考路径台风中心偏差均值最小。之后,根据最优参考路径设计区域模式优选偏差范围试验,选择 QPF 融合技术 6 h 暴雨预报能力最强时对应的偏差阈值为区域模式优选最佳偏差阈值(区域模式优选

的最佳偏差阈值定为  $1^\circ$ ) (图4), 并根据最佳偏差阈值选择与参考路径台风中心位置偏差小于  $1^\circ$  的区域模式作为当前时刻的最优区域模式, 从而得到各个时刻参与集合的最优区域模式。类似可得, 台风“灿都”暴雨过程中优选成员个数为3, 区域模式优选的最佳偏差阈值为  $0.8^\circ$  (图略)。

表1 预报检验指标表达式

Table 1 Expression of forecast verification indicators

预报检验指标	表达式
Bias 评分	$V_{\text{Bias}} = \frac{N_A + N_C}{N_A + N_B}$
ETS	$V_{\text{ETS}} = \frac{N_A - r}{N_A + N_B + N_C - r}$ $r = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{N_A + N_B + N_C + N_D}$
FAR	$V_{\text{FAR}} = \frac{N_C}{N_A + N_C}$
POD	$V_{\text{POD}} = \frac{N_A}{N_A + N_B}$
MAR	$V_{\text{MAR}} = \frac{N_B}{N_A + N_B}$

注:  $N_A$  为降水预报正确的格点数,  $N_B$  为漏报格点数,  $N_C$  为空格点数,  $N_D$  为观测未发生且预报也未发生的格点数,  $V_{\text{Bias}}$ 、 $V_{\text{ETS}}$ 、 $V_{\text{FAR}}$ 、 $V_{\text{POD}}$  和  $V_{\text{MAR}}$  分别为偏差评分、公平技巧评分、空报率、命中率和漏报率对应的值。

## 2.2 区域模式降水预报性能评估

针对4家区域模式的台风“烟花”“灿都”暴雨预报性能, 表2给出了台风影响浙江区域时段内6h

暴雨、大暴雨预报检验。由ETS来看, 台风“烟花”暴雨过程中CMA-MESO 3 km降水预报显示出较高的预报技巧, 对暴雨及大暴雨降水预报ETS最高; CMA-MESO 10 km在暴雨预报中的ETS仅次于CMA-MESO 3 km, 暴雨预报能力较高; 而在大暴雨预报中ZJWARMS的ETS仅次于CMA-MESO 3 km, 预报质量优于CMA-MESO 10 km和CMA-SH9。台风“灿都”暴雨过程中, ZJAWRMS、CMA-MESO 3 km在暴雨、大暴雨预报中ETS得分较高, 显示出较高的暴雨预报技巧, 其中ZJWARMS略优于CMA-MESO 3 km。

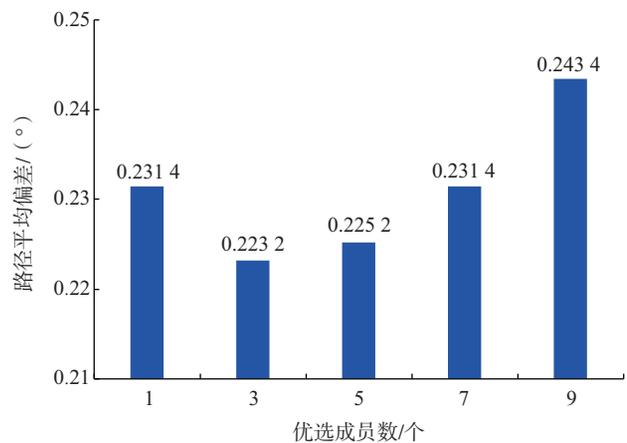


图3 台风“烟花”(2106)不同个数优选成员的参考路径平均偏差

Fig.3 Average deviation of reference tracks of different optimization numbers for Typhoon In-Fa (2106)

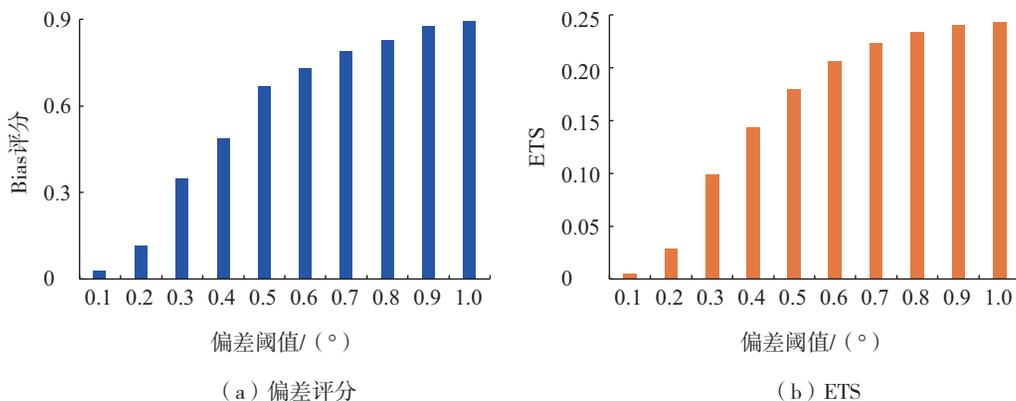


图4 台风“烟花”(2106)暴雨过程2021年7月22日00时—27日00时不同区域模式优选偏差阈值的QPF融合技术6h暴雨预报检验

Fig.4 Verification of 6-h rainstorm forecast of Typhoon In-Fa (2106) using the QPF fusion method under different optimization deviation thresholds of different regional models from 00:00 UTC 22 to 00:00 UTC 27 July 2021

表2 台风暴雨过程多模式6h降水预报检验

Table 2 Verification of multi-model 6-h precipitation forecast of typhoon rainstorm

台风(编号)	检验时段	降水量级	模式	Bias 评分	ETS	FAR	POD	MAR
烟花(2106)	2021年7月22日 00时—27日12时	暴雨	CMA-MESO 3 km	1.730	0.119	0.766	0.266	0.734
			CMA-MESO 10 km	0.868	0.111	0.714	0.260	0.740
			CMA-SH9	2.026	0.105	0.780	0.256	0.744
			ZJWARMS	1.414	0.106	0.786	0.267	0.733
			QPF 融合技术	1.574	0.148	0.750	0.316	0.687
			ZJ-OCF	0.571	0.107	0.656	0.214	0.786
			ECHR	0.665	0.133	0.664	0.253	0.747
		大暴雨	CMA-MESO 3 km	2.649	0.066	0.860	0.252	0.748
			CMA-MESO 10 km	2.213	0.017	0.943	0.086	0.914
			CMA-SH9	2.309	0.043	0.821	0.173	0.827
			ZJWARMS	2.701	0.063	0.882	0.248	0.752
			QPF 融合技术	2.004	0.083	0.855	0.311	0.689
			ZJ-OCF	0.534	0.063	0.782	0.124	0.876
			ECHR	0.524	0.063	0.736	0.106	0.894
灿都(2114)	2021年9月12日 00时—14日00时	暴雨	CMA-MESO 3 km	7.507	0.074	0.811	0.297	0.703
			CMA-MESO 10 km	14.453	0.020	0.942	0.221	0.779
			CMA-SH9	9.852	0.039	0.806	0.257	0.743
			ZJWARMS	5.006	0.078	0.870	0.354	0.646
			QPF 融合技术	5.629	0.096	0.808	0.336	0.664
			ZJ-OCF	26.953	0.009	0.978	0.187	0.813
			ECHR	29.599	0.006	0.981	0.058	0.942
		大暴雨	CMA-MESO 3 km	0.808	0.030	0.930	0.139	0.861
			CMA-MESO 10 km	3.078	-0.010	1.000	0	1.000
			CMA-SH9	2.220	0.005	0.984	0.105	0.895
			ZJWARMS	1.477	0.031	0.941	0.258	0.742
			QPF 融合技术	1.458	0.032	0.930	0.159	0.841
			ZJ-OCF	0.413	-0.001	1.000	0	1.000
			ECHR	2.044	-0.003	1.000	0	1.000

注:检验区域为整个研究区域(26°~32°N,117°~123°E)。

由命中率(POD)、空报率(FAR)以及漏报率(MAR)来看,两次台风暴雨过程中CMA-MESO 3 km、ZJWARMS的暴雨和大暴雨预报命中率相对较高,但4家区域模式都存在较高的空报率和漏报率,并随着降水量级的增加,空报率和漏报率增大,预报能力下降。结合Bias评分可以注意到,暴雨、大暴雨预报命中率表现较好的模式,预报范围较观测偏大,空报率普遍大于漏报率。这说明两次台风暴雨过程中,区域模式暴雨预报存在明显湿偏差,台风暴雨过高估计是区域模式台风暴雨预报中主要存在的问题。总体而言,在台风“烟花”“灿都”影响下,CMA-MESO 3 km、ZJWARMS对浙江区域暴雨、大暴雨量级降水预报效果较佳,但与其他两家区域模式一样,随着降水量级的增加,模式预报能力降低。

### 2.3 QPF 融合技术降水预报性能评估

为评估QPF融合技术的预报技巧,对比表2中各家区域模式和QPF融合技术的6h降水预报检验指标可知,QPF融合技术在暴雨、大暴雨预报的ETS以及预报命中率上,相较于4家区域模式预报均有

不同程度的提高。相较“烟花”过程台风暴雨预报能力最强的CMA-MESO 3 km,QPF融合技术的暴雨和大暴雨预报命中率分别提高18.80%、23.41%,ETS分别提高24.37%、25.76%;相较于“灿都”过程台风暴雨预报能力最强的ZJWARMS,QPF融合技术的暴雨和大暴雨预报ETS分别提高了23.08%、3.23%。此外,采用QPF融合技术方法后,暴雨、大暴雨预报的空报率均低于3家模式;和大多数数值模式统计后处理方法一样,QPF融合技术的降水预报能力会受限于各家区域模式原始预报质量的约束,因此,认为QPF融合技术方法具有一定的台风暴雨预报消空作用。暴雨和大暴雨的漏报率也均有明显下降,尤其是大暴雨预报,在台风“烟花”暴雨过程中QPF融合技术的大暴雨漏报率相较于区域模式下降6.8%~23.7%,在台风“灿都”暴雨过程中QPF融合技术的大暴雨漏报率相较于区域模式下降2.32%~15.90%。由Bias评分来看,采用QPF融合技术后能在一定程度上有效降低暴雨预报与观测之间的范围偏差,有效降低大暴雨的Bias评分,使

得预报范围与观测更为接近。结合以上分析发现,多模式 QPF 融合技术方法能够有效提高浙江区域台风“烟花”“灿都”暴雨和大暴雨量级的降水预报准确率,降低其空报率和漏报率,从而提高台风暴雨预报能力。

为进一步说明 QPF 融合技术方法在台风暴雨业务应用的优势,表 2 中还给出了浙江业务应用的客观预报 ZJ-OCF 和 ECHR 相应的 6 h 降水预报检验。从表 2 中可知,在台风“烟花”暴雨过程中,ZJ-OCF 和 ECHR 的暴雨预报范围较观测偏小,对暴雨低估是主要存在的问题;在台风“灿都”暴雨过程中,ZJ-OCF 和 ECHR 的暴雨预报范围较观测偏小为主,且暴雨空报率较高,大暴雨空报率、漏报率均为 1,ZJ-OCF 和 ECHR 在该过程中对浙江区域的暴雨、大暴雨预报能力较差。无论是对暴雨还是大暴雨预报相较于 ZJ-OCF 和 ECHR 而言,QPF 融合技术在两次台风暴雨过程中 ETS 更高,命中率更高,漏报率更低。从防台业务服务的角度来说,相较于 ZJ-OCF 和 ECHR,QPF 融合技术预报更能为预报员提供具有参考价值的台风暴雨预报产品。

#### 2.4 QPF 融合技术暴雨预报效果分析

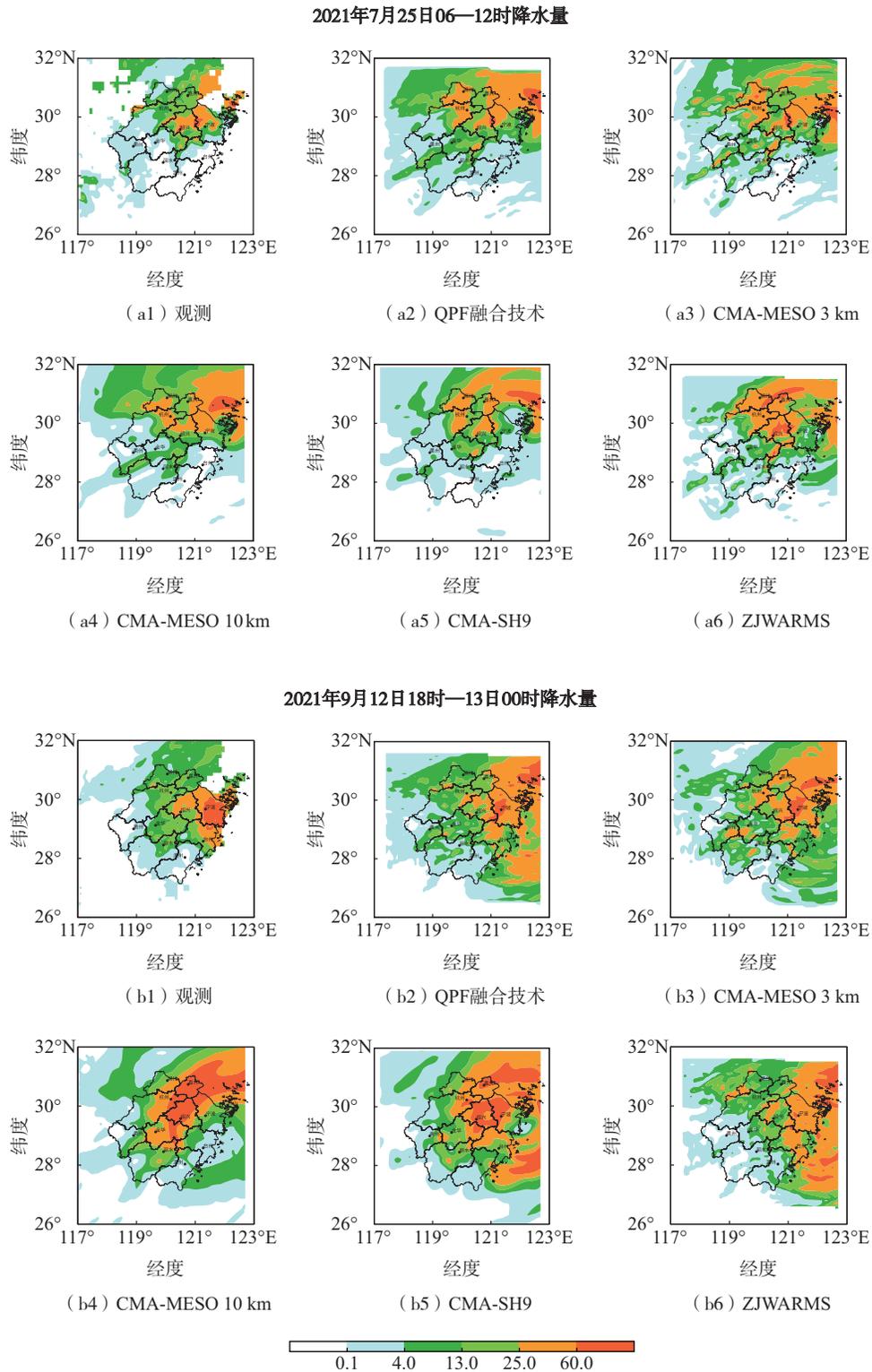
为更加直观且详细地说明 QPF 融合技术对台风暴雨和大暴雨的预报效果,图 5 给出了两次台风暴雨过程,即台风“烟花”(7 月 25 日 06—12 时)和台风“灿都”(9 月 12 日 18 时—13 日 00 时)两时段的 4 家区域模式和采用 QPF 融合技术得到的 6 h 累计降水预报与观测的空间分布对比。

台风“烟花”影响浙江期间(7 月 25 日 06—12 时),观测到的浙江省内主要暴雨区落在宁波至绍兴域内,呈东北—西南带状分布(图 5a1)。4 家区域模式虽都对该暴雨区有所反映,但均存在一定的问题:CMA-MESO 3 km(图 5a3)在两市交界处,大暴雨预报范围较观测偏大,绍兴市存在暴雨漏报;CMA-MESO 10 km(图 5a4)未能报出两市交界处的大暴雨,绍兴市存在暴雨漏报;CMA-SH9(图 5a5)在宁波市内存在明显暴雨漏报,并且宁波、绍兴两市交界处的大暴雨也未能报出;ZJWARMS(图 5a6)则存在大量暴雨空报,大暴雨落区较观测偏西且范围偏大。此外,除 CMA-MESO 3 km 外,其余 3 家模式在嘉兴市内存在大量暴雨空报。QPF 融合技术预报(图 5a2)在本时段内,通过区域模式优选,首先将存

在大量暴雨空报的 ZJWARMS 预报排除,将其他 3 家与观测更为相近的区域模式的降水落区和降水量级预报进行集合。由图 5a2 可以看出,QPF 融合技术可以有效减少嘉兴市内的暴雨空报,订正绍兴境内的暴雨落区,保留 CMA-MESO 3 km 预报中的大暴雨预报,使得本时段的暴雨、大暴雨落区以及雨带走向与观测更为相近。

相似地,台风“灿都”影响浙江期间(9 月 12 日 18 时—13 日 00 时),观测到的浙江省内暴雨区主要落于宁波、绍兴、台州 3 市境内,4 家区域模式对该暴雨区均有一定的预报能力。其中,CMA-MESO 3 km(图 5b3)和 ZJWARMS(图 5b6)的暴雨预报落区与观测更为相似,而 CMA-MESO 10 km(图 5b4)暴雨雨带较观测偏西北且量级偏大,CMA-SH9(图 5b5)暴雨落区较观测明显偏大且暴雨、大暴雨量级降水存在大量空报。QPF 融合预报技术在本时段内,通过区域模式优选,将本时段内暴雨预报能力相对较差的 CMA-MESO 10 km 和 CMA-SH9 预报排除,通过概率匹配方法将暴雨预报能力相对较强的 CMA-MESO 3 km 和 ZJWARMS 预报进行集合。对比观测(图 5b1)、QPF 融合预报(图 5b2)、CMA-MESO 3 km(图 5b3)和 ZJWARMS(图 5b6)的降水空间分布可知,QPF 融合技术有效集合了 CMA-MESO 3 km、ZJWARMS 的暴雨预报信息,保留了 CMA-MESO 3 km 宁波区域内的大暴雨预报,订正了本时段内浙江区域内的暴雨空报,使 QPF 融合技术的暴雨预报较 CMA-MESO 3 km、ZJWARMS 而言,在暴雨、大暴雨落区及降水量级上与观测更为相近。因此,QPF 融合技术有效提高了本时段的台风暴雨预报能力。

台风降水预报除了会受到台风中心位置预报的影响,还会受到台风移动路径预报的影响,而区域模式的台风路径预报可大致分为预报相似和预报不同两种情况。为检验这两种不同的台风路径预报条件下 QPF 融合技术对台风暴雨的预报能力,进一步设计了不同路径预报相似条件的 QPF 融合技术对台风暴雨预报能力的评估试验。试验中,以台风“烟花”影响的 7 月 25 日 00—06 时代表区域模式路径预报相似个例,以台风“烟花”影响的 7 月 25 日 12—18 时和台风“灿都”影响的 9 月 13 日 00—06 时代表区域模式路径预报相异个例,对这两类路径预报条件的 QPF 融合技术台风暴雨的预报能力进行分析。



注:由于原模式经纬度设定和 QPF 技术原理,在研究区域(26°~32°N, 117°~123°E)内降水预报填色图边界与坐标轴之间会存在一定的空白区域,此为正常现象。下同。

图 5 2021 年 7 月 25 日 06—12 时和 9 月 12 日 18 时—13 日 00 时观测和模式预报的 6 h 降水量(色阶,单位:mm)

Fig.5 Observation and model forecast of 6-h accumulated precipitation (color scale, units: mm) from 06:00 to 12:00 UTC 25 July and from 18:00 UTC 12 to 00:00 UTC 13 September 2021

图6给出的是7月25日00—06时区域模式路径预报相似案例。由图6a1可知,4家区域模式预报的路径位置相近,形态相似。由图6a3—a7可以看到,QPF融合技术可以有效提取4家区域模式浙北台风暴雨预报,订正浙中的暴雨空报,使得本时段内的暴雨预报无论从落区形态,还是从降水量级上都能与观测更为接近。然而,QPF融合技术虽然能在一定程度上减少湖州市内暴雨空报,但依旧会受到CMA-MESO 10 km和CMA-SH9模式预报的影响,在湖州区域内存在暴雨空报。

此外,也会因为CMA-MESO 10 km、CMA-SH9和ZJWARMS在嘉兴的大量暴雨空报,导致QPF融合技术在嘉兴市内存在大量暴雨空报,但QPF融合技术能对暴雨落区有一定的订正。表3给出了同时段各模式暴雨、大暴雨量级ETS和空报率(FAR)对比,结果表明:本时段在4个区域模式中,CMA-MESO 3 km暴雨、大暴雨预报ETS最高,FAR相对较低,预报能力最强;而QPF融合技术暴雨、大暴雨ETS均高于CMA-MESO 3 km,暴雨空报率明显低于CMA-MESO 3 km。

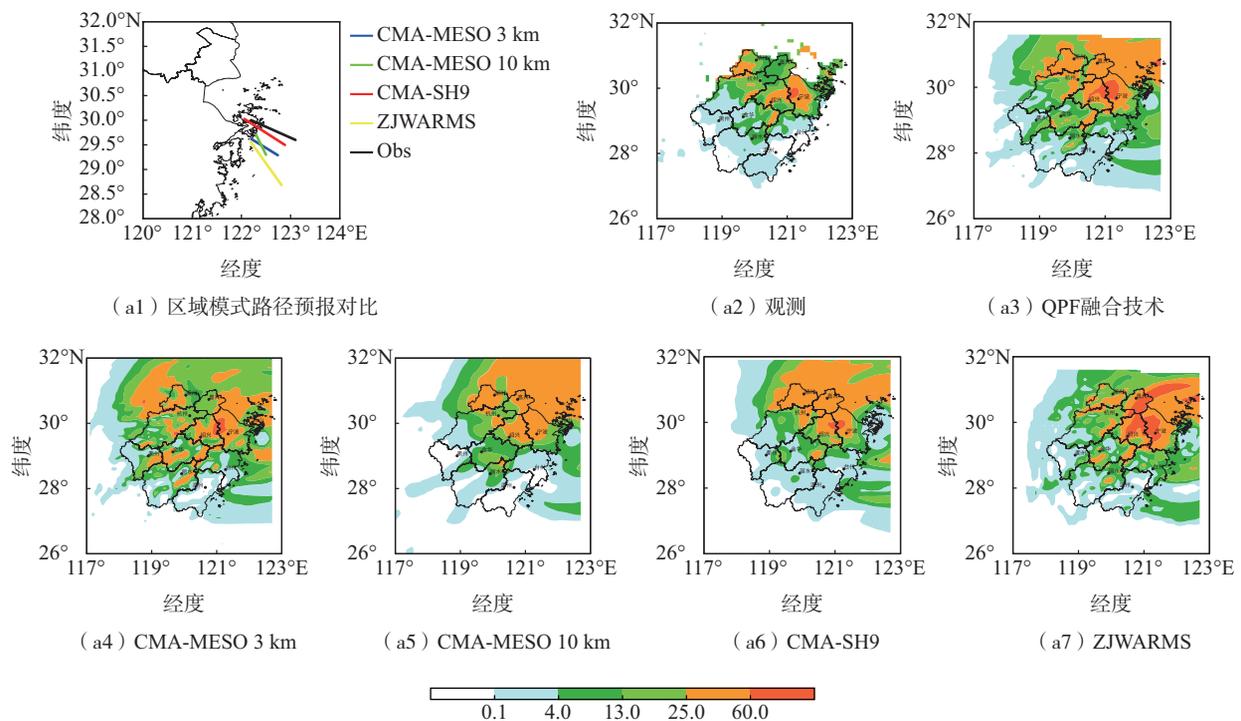


图6 7月25日00—06时预报路径相似的区域模式降水量(色阶,单位:mm)预报对比  
Fig.6 Comparison of 6-h accumulated precipitation forecasts (color scale, units: mm) between regional models with similar forecast tracks from 00:00 to 06:00 UTC 25 July 2021

表3 7月25日00—06时模式暴雨、大暴雨量级ETS和FAR

Table 3 ETS and FAR of model forecast of rainstorm and heavy rainstorm from 00:00 to 06:00 UTC 25 July 2021

检验指标	降水量级	QPF 融合技术	CMA-MESO 3 km	CMA-MESO 10 km	CMA-SH9	ZJWARMS
ETS	暴雨	0.331	0.299	0.276	0.229	0.272
	大暴雨	0.288	0.287	0.000	0.221	0.113
FAR	暴雨	0.594	0.614	0.631	0.659	0.635
	大暴雨	0.688	0.657	Null	0.650	0.875

注:“Null”表示此处数据不存在。

图7给出的是7月25日12—18时区域模式路径预报具有显著差异时,各模式及QPF融合技术对浙江区域台风“烟花”暴雨预报的对比。从图7a1中可知,4家区域模式预报的台风路径位置相近但形态各异,其中CMA-MESO 10 km与ZJWARMS的

预报路径形态差异最大,ZJWARMS、CMA-MESO 3 km和CMA-SH9的预报路径形态更为相似。由图7可以看出,区域模式台风路径预报不同时,暴雨预报也不同。在路径预报不同的情况下,QPF融合技术可保留各模式台风暴雨预报的共同特征并对预报

差异之处进行订正,图 7a3 中具体表现为保留舟山群岛及宁波至绍兴的暴雨预报,并从 ZJWAMRS、CMA-MESO 3 km 和 CMA-SH9 暴雨预报中提取嘉兴、绍兴市内暴雨量级和落区预报,用以订正 CMA-MESO 10 km 的暴雨空报。但是,QPF 融合技术会将 ZJWAMRS、CMA-MESO 3 km 以及 CMA-SH9 在宁

波市的暴雨漏报当作虚假有效信息,用以订正 CMA-MESO 10 km 宁波市内的有效暴雨预报,从而导致 QPF 融合技术在宁波市内的暴雨漏报。结合表 4 可以发现,虽受限于多个模式的原始预报质量限制,但整体上 QPF 融合技术能有效提高暴雨和大暴雨 ETS,降低暴雨和大暴雨空报率。

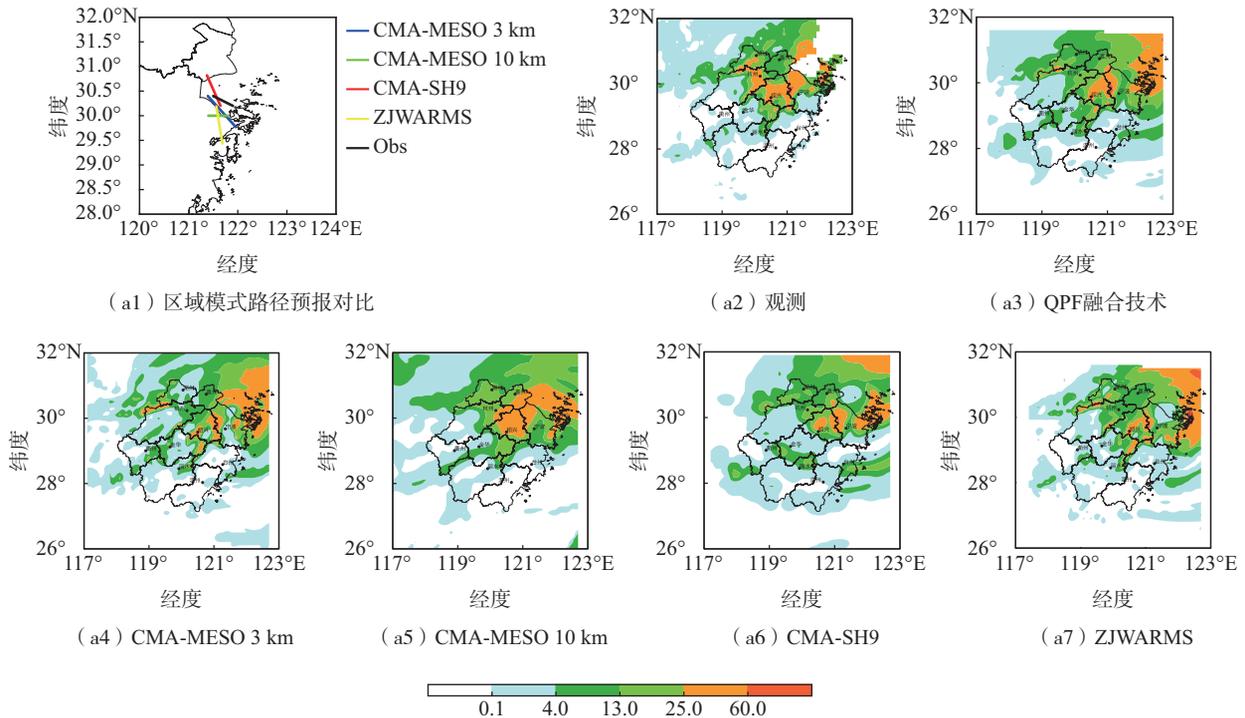


图 7 7 月 25 日 12—18 时预报路径具有显著差异区域模式的降水量(色阶,单位:mm)预报对比  
Fig.7 Comparison of 6-h accumulated precipitation forecasts (color scale, units: mm) between regional models with significantly different forecast tracks from 12:00 to 18:00 UTC 25 July 2021

表 4 同表 3,但时段为 7 月 25 日 12—18 时

Table 4 The same as Table 3, but for the period from 12:00 to 18:00 UTC 25 July 2021

检验指标	降水量级	QPF 融合技术	CMA-MESO 3 km	CMA-MESO 10 km	CMA-SH9	ZJWARMS
ETS	暴雨	0.260	0.256	0.345	0.205	0.196
	大暴雨	0.373	0.292	0.000	0.142	0.227
FAR	暴雨	0.528	0.532	0.487	0.564	0.593
	大暴雨	0.333	0.444	Null	0.333	0.684

注:“Null”表示此处数据不存在。

在图 8 给出的 9 月 13 日 00—06 时台风“灿都”路径预报相异个例中,观测到浙江区域的主要暴雨落区位于宁波、绍兴、台州 3 市(图 8a2),4 家区域模式虽对该暴雨区有一定的预报能力,但都存在漏报、空报的问题。在本时段的 4 家区域模式中,CMA-MESO 3 km(图 8a4)和 ZJWARMS(图 8a7)的暴雨落区与观测最为相近。QPF 融合技术在区域模式优选过程中,将本时段内路径预报呈偏西北走向的 CMA-MESO 3 km 和 CMA-MESO 10 km 暴雨预

报判定为无效预报,将路径预报呈偏东北走向的 CMA-SH9、ZJWARMS 暴雨预报判定为有效预报,并对二者的暴雨预报进行集合(图 8a1)。通过此种方式,先将本时段内暴雨、大暴雨空报率偏高的 CMA-MESO 10 km(图 8a5)预报剔除,而后基于概率匹配方法提取 CMA-SH9(图 8a6)和 ZJWARMS(图 8a7)相同的暴雨预报,订正暴雨预报的相异之处。对比本时段的预报检验指标(表 5)可知,在该台风路径预报相异的个例中,QPF 融合技术通过优选集合,

可有效提高暴雨、大暴雨的预报能力,并在一定程度上降低空报率。

总体而言,无论是在区域模式台风路径预报相似还是在台风路径预报不同的情况下,QPF 融合技

术方法都能有效集合多模式浙江区域台风暴雨预报,在一定程度上弥补区域模式暴雨空报率较高的缺点,订正暴雨落区,提高暴雨 ETS,为预报员判断台风暴雨落区、降水量级和雨带走向提供有效信息。

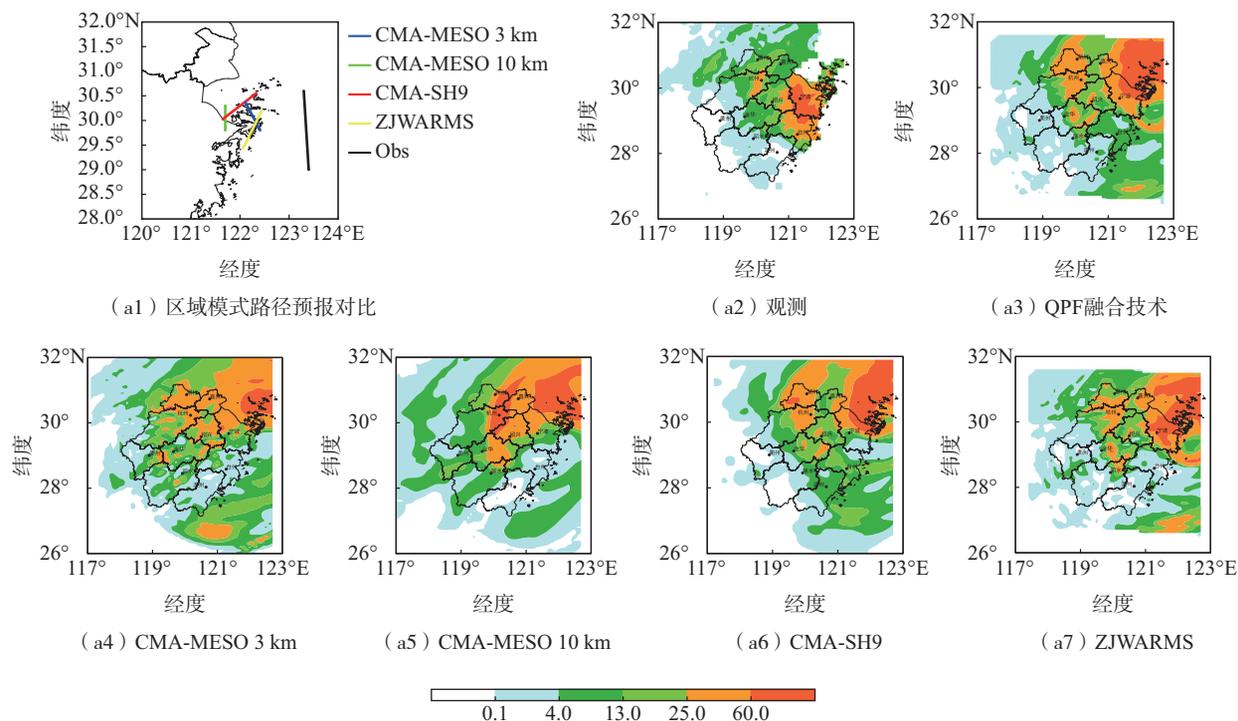


图8 同图7,但时间为9月13日00—06时

Fig.8 The same as Fig.7, but for the period from 00:00 to 06:00 UTC 13 September 2021

表5 同表3,但时段为9月13日00—06时

Table 5 The same as Table 3, but for the period from 00:00 to 06:00 UTC 13 September 2021

检验指标	降水量级	QPF 融合技术	CMA-MESO 3 km	CMA-MESO 10 km	CMA-SH9	ZJWARMS
ETS	暴雨	0.174	0.105	0.066	0.090	0.232
	大暴雨	0.016	0.026	-0.019	-0.008	0.105
FAR	暴雨	0.698	0.782	0.831	0.796	0.629
	大暴雨	0.946	0.919	1.000	0.984	0.831

注:“Null”表示此处数据不存在。

### 3 结论与讨论

基于 ECMWF 集合预报系统的台风路径预报以及 CMA-MESO 3 km、CMA-MESO 10 km、CMA-SH9、ZJWARMS 等 4 家区域模式对 2021 年影响浙江区域的台风“烟花”“灿都”路径和降水进行预报,利用 QPF 融合技术对 6 h 累计降水进行了区域模式集合试验,并评估分析了 QPF 融合技术在两次台风影响浙江区域时段内对暴雨、大暴雨量级降水的预报效果。得到的主要结论如下:

(1) 对于浙江区域受台风“烟花”“灿都”影响过程的暴雨、大暴雨量级降水,各家业务区域模式的

暴雨预报存在明显湿偏差,暴雨空报是两次台风暴雨过程中区域模式预报的主要问题。总体而言,CMA-MESO 3 km、ZJWARMS 在两次台风过程中暴雨预报能力较佳。

(2) QPF 融合技术可以有效提高浙江区域台风暴雨、大暴雨量级降水预报的 ETS 得分以及命中率,并在一定程度上降低暴雨预报的空报率,减小模式预报与观测之间的误差,提高浙江区域台风暴雨、大暴雨的预报能力。但是,QPF 融合技术对台风暴雨预报能力会受限于区域模式原始预报质量。

(3) 具体个例评估分析表明,QPF 融合技术可以有效集合区域模式暴雨预报,减少暴雨空报,订正

暴雨量级、落区及雨带走向预报。并且,可在区域模式台风路径预报不同的情况下,有效进行暴雨预报消空。

需要指出的是,本研究还存在一定的不足。一方面,仅针对2021年浙江区域两个台风QPF融合技术6h暴雨预报个例进行了评估分析,分析结果具有一定的特殊性,若要证明QPF融合技术方法在浙江区域台风暴雨预报的普遍优势,还需要用更多的个例和更长的预报时效进行检验。另一方面,QPF融合技术的台风大量级降水预报能力会受到区域模式原始预报质量的限制,而模式的降水预报能力又会受到模式水平分辨率的影响,文中所采用的区域模式例如CMA-MESO 10 km水平分辨率偏低,今后可采用模式分辨率更高的区域模式进行优选集合,以更好地提高浙江区域台风大量级降水预报能力。

#### 参考文献:

- [1] 伍远康,刘德辅.浙江省登陆台风暴雨落区研究[J].水文,2009,29(2):81-83.
- [2] 钱传海,端义宏,麻素红,等.我国台风业务现状及其关键技术[J].气象科技进展,2012,2(5):36-43.
- [3] 任福民,杨慧.1949年以来我国台风暴雨及其预报研究回顾与展望[J].暴雨灾害,2019,38(5):526-540.
- [4] 许映龙,张玲,高拴柱.我国台风预报业务的现状及思考[J].气象,2010,36(7):43-49.
- [5] 陈博宇,代刊,唐健,等.基于多模式QPF融合的台风暴雨预报后处理技术研究及应用试验[J].气象,2020,46(10):1261-1271.
- [6] 陈联寿,孟智勇,丛春华.台风暴雨落区研究综述[J].海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [7] 江漫,漆梁波.1959—2012年我国极端降水台风的气候特征分析[J].气象,2016,42(10):1230-1236.
- [8] 杜钧,李俊.集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J].气象科技进展,2014,4(5):6-20.
- [9] 李俊,杜钧,陈超君.“频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究[J].气象,2015,41(6):674-684.
- [10] CLARK A J, GALLUS W A Jr, CHEN T C. Contributions of mixed physics versus perturbed initial/lateral boundary conditions to ensemble-based precipitation forecast skill [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136(6):2140-2156.
- [11] EBERT E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation [J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(10):2461-2480.
- [12] HAMILL T M, ENGLE E, MYRICK D, et al. The U.S. national blend of models for statistical postprocessing of probability of precipitation and deterministic precipitation amount [J]. Mon Wea Rev, 2017, 145(9):3441-3463.
- [13] SCHWARTZ C S, ROMINE G S, SMITH K R, et al. Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble Kalman filter [J]. Wea Forecasting, 2014, 29(6):1295-1318.
- [14] 周迪,陈静,陈朝平,等.暴雨集合预报-观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究[J].暴雨灾害,2015,34(2):97-104.
- [15] LIU J Q, LI Z L, WANG Q Q. Quantitative precipitation forecasting using an improved probability-matching method and its application to a typhoon event [J]. Atmosphere, 2021, 12(10):1346.
- [16] FANG X Q, KUO Y H. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique [J]. Mon Wea Rev, 2013, 141(11):3908-3932.
- [17] 陈博宇,郭云谦,代刊,等.面向台风暴雨的集合预报成员优选订正技术研究及应用试验[J].气象,2016,42(12):1465-1475.
- [18] 罗玲,娄小芬,傅良,等.ECMWF极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J].气象,2019,45(10):1382-1391.
- [19] 王海平,董林,许映龙,等.台风“烟花”的主要特点和路径预报难点分析[J].海洋气象学报,2022,42(1):83-91.
- [20] 向纯怡,高拴柱,刘达.2021年西北太平洋和南海台风活动概述[J].海洋气象学报,2022,42(1):39-49.
- [21] 钱奇峰,张长安,高拴柱,等.台风路径集合预报的实时订正技术研究[J].热带气象学报,2014,30(5):905-910.