

陈博宇,代刊,唐健,等,2020. 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,46(10):1261-1271. Chen B Y, Dai K, Tang J, et al, 2020. Research and application experiment on post-processing technology of typhoon rainstorm forecast based on multi-model QPF fusion[J]. Meteor Mon, 46(10):1261-1271(in Chinese).

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^{*}

陈博宇 代 刊 唐 健 郭云谦 钱奇峰

国家气象中心,北京 100081

提 要: 以 2018 年主要登陆台风暴雨过程为研究对象,利用多中心多模式(ECMWF、NCEP 降水和台风路径集合预报及业务细网格模式,国内主要业务区域模式 GRAPES-Meso、GRAPES-3 km、RMAPS、SMS-WARMS)预报及国家气象中心实时台风中心定位和路径预报,在统计检验和偏差分析的基础上,对前期已业务应用的基于观测的集成员优选技术进行改进,以期获得更高分辨率和准确率率的台风降水客观预报产品。结果显示,改进后的客观产品空间分辨率较前期有明显提升,预报准确率较 ECMWF 和 NCEP 业务模式确定性预报有明显提高,TS 评分提高率在 15%~20%,同时也高于各业务区域模式预报,且暴雨 TS 评分略高于同期预报员主观预报。此外,研究表明,该客观产品的预报准确率对参考路径的选取有较强的依赖性,依据实时台风中心定位优选出 3~5 个成员形成集合平均路径,将其作为参考路径的试验评分要高于以所有成员的集合平均路径为参考的试验评分。集成员优选技术和以概率匹配方法为基础的 QPF 融合技术对改进全球和区域模式的台风暴雨预报有明显的帮助。

关键词: 台风暴雨,集合预报,区域模式,成员优选,概率匹配

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.001

Research and Application Experiment on Post-Processing Technology of Typhoon Rainstorm Forecast Based on Multi-Model QPF Fusion

CHEN Boyu DAI Kan TANG Jian GUO Yunqian QIAN Qifeng

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on statistical verification and forecast bias analysis on the rainstorm processes of landed typhoons in 2018, we improve the observation-based ensemble subsetting technique that has been applied on operational forecast, to obtain objective products of typhoon precipitation with higher resolution and forecast accuracy, using multi-model forecasts from several centers, the real-time typhoon locations and track forecasts from National Meteorological Centre. The multi-model forecasts include precipitation and typhoon track ensemble forecasts and operational high resolution forecasts from ECMWF and NCEP, the forecasts of main regional models (GRAPES-Meso, GRAPES-3 km, RMAPS, SMS-WARMS) in China. The results show that the spatial resolution of the improved objective product is significantly promoted compared with the previous version. The forecast accuracy is also significantly improved compared with the operational deterministic forecast from ECMWF and NCEP, and the improvement rate is 15%—20% roughly. The threat score of the improved objective product is also higher than the forecast of regional models,

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC1502004、2018YFC1506402)共同资助

2019 年 10 月 8 日收稿; 2020 年 6 月 5 日收修定稿

第一作者:陈博宇,主要从事天气预报和天气预报技术、集合预报、台风目标观测研究. E-mail: chenboyu@cma.gov.cn

and slightly higher than the QPF of forecaster. In addition, studies have shown that the accuracy of the improved objective product has a high correlation with the selection of reference track. The threat score of objective product based on the average track of 3 to 5 best members is higher than the one based on the average track of all members. The observation-based ensemble subsetting and QPF fusion technique based on probability matching, is helpful for improving the typhoon rainstorm forecast of the global and regional models.

Key words: typhoon rainstorm, ensemble forecast, regional model, ensemble subsetting, probability matching

引言

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,预报难度大,与其相关的预报业务和研究一直是气象业务部门的重点和难点。近年来,以欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF,简称EC)综合预报系统(Integrated Forecasting System, IFS)和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)全球预报系统(Global Forecast System, GFS)为代表的全球数值预报系统,在时空分辨率、资料同化技术、非常规观测资料的同化应用、物理过程参数化方案等方面的持续改进,台风预报时效逐步延长,预报准确率逐步提高,预报精细化程度也逐步提升(柳龙生等,2019)。然而,相比台风路径预报,登陆台风的定量降水预报(quantitative precipitation forecasts, QPF)准确率提升却相对缓慢(杨舒楠等,2019)。由于QPF提供的是一段时间内的总降水量,其准确率受台风中心位置和移动方向、降水持续时间和效率等诸多因素的影响(江漫和漆梁波,2016;陈联寿等,2017)。

为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。相关研究及业务预报检验评估表明,在现有数值模式预报能力基础上,提高QPF业务水平需要依靠3种途径:发展集合预报系统,提供降水预报的不确定信息;发展高分辨率数值模式(10 km及其以下),预报降水精细特征;将高分辨率模式与集合预报技术结合起来,优势互补(杜钧和李俊,2014;李俊等,2015;周迪等,2015;毕宝贵等,2018)。目前,EC集合预报(简称ECEP)和NCEP集合预报(简称GEFS)已在国家级和省级台风预报业务中得到广泛应用,相

关的集合预报释用技术研发相继开展。例如,国家气象中心台风与海洋气象预报中心基于ECEP产品和实时台风中心定位,设计出一种基于观测的集合成员优选技术(observation-based ensemble subsetting technique, OBEST),并研发出台风路径预报实时订正客观产品(钱奇峰等,2014; Dong and Zhang, 2016; Leonardo and Colle, 2020),取得了不错的成效。与此同时,中国气象局自主研发的全球和区域同化预报系统(Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System, GRAPES)、华北区域快速更新多尺度分析和预报系统(Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System, RMAPS)、华东区域中尺度数值预报系统(Shanghai Meteorological Service WRF ADAS Real-time Modeling System, SMS-WARMS)等高分辨率数值模式体系也得到不断的改进,预报性能稳步提升,其相关预报产品已得到广泛的业务应用。尽管目前尚没有完整的评估证明区域中尺度模式的QPF评分较全球模式有较明显的提高,但区域中尺度模式可以为预报员提供对流系统演变发展的重要信息(聂浩浩等,2016;徐同等,2019;张小雯等,2020)。

从业务预报的角度,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,台风的中心位置和移动路径对台风暴雨的落区分布有重要的影响。相关研究和预报检验表明,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,根据实时的台风中心定位优选路径偏差较小的集合成员,对于减小台风路径预报的发散度,改进集合预报QPF后处理产品的准确率有明显的帮助(陈博宇等,2015;2016;罗玲等,2019)。另一方面,台风暴雨的落区和强度与台风涡旋结构(如台风眼壁或内核区、螺旋雨带)和台风下垫面的强迫作用有密切的联系。相比全球模式,区域模式对局地-区域对流系统以及复杂地形引起的强降水有较好的表现能力,可

提供更加接近真实的强降水分布特征。Fang and Kuo(2013)利用低分辨率的全球集合预报系统(36 km,32 个成员)的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(4 km,8 个成员)成员来预测台风暴雨分布的空间结构和降水量,取得较好的改进效果。该研究表明,采用上述双分辨率模式预报相结合的后处理方法,提供产生一个新的高分辨率 QPF 产品来预报台风暴雨具有业务应用的可行性。

本研究主要针对影响我国的台风暴雨过程,根据当前国家级业务预报平台的数据环境,在已被业务应用的 OBEST 技术基础上改进计算方案,提出一种新的基于多个不同分辨率模式的台风暴雨预报后处理技术,以期从海量预报数据中获得最优的客观预报,为预报员业务预报提供参考。

1 资料与方法

本文所用资料包括:(1)国家气象中心台风与海洋气象预报中心实时定位和全国国家级站点日累积降水量资料;(2)EC、NCEP 降水和台风路径集合预报资料;(3)EC、NCEP 全球业务模式的降水和台风路径预报资料;(4)GRAPES 区域模式(GRAPES-Meso 和 GRAPES-3 km)、RAMPS 和 SMS-WARMS 区域模式的海平面气压和降水预报资料。需要指出:ECEP 包含 51 个成员,包括 1 个控制预报和 50 个扰动成员;GEFS 包含 21 个成员,包括 1 个控制预报和

20 个扰动成员;EC 全球业务模式(ECHR)降水预报产品的水平分辨率约为 9 km;NCEP 全球业务模式降水预报产品的水平分辨率约为 28 km;GRAPES-Meso、RMAPS、SMS-WARMS 模式降水预报产品的水平分辨率约为 9 km;GRAPES-3 km 模式降水预报产品的水平分辨率约为 3 km。

本文选取 2018 年度 7 个登陆台风,即“艾云尼”(1806)、“安比”(1810)、“云雀”(1812)、“摩羯”(1814)、“贝碧嘉”(1816)、“温比亚”(1818)和“山竹”(1822)台风为研究个例,选取前一天 20 时(北京时,下同)为模式起报时刻,以 36 h 预报时效的日累积降水量的模式预报及后处理预报产品为检验对象。另外,本文选取当天 08 时为业务起报时刻,以 24 h 预报时效的日累积降水量的预报员主观预报(业务 QPF)为检验对象(具体个例验证时段见表 1)。需要指出,“艾云尼”和“温比亚”暴雨过程表现出明显的极端性。在“艾云尼”和季风共同影响下,广东、湖南、海南、江西共有 8 个市(县)日降水量突破当地 6 月极值,广东云浮雨量突破建站以来历史极值。受“温比亚”影响,山东西南部、中南部至潍坊一带出现特大暴雨,泰安站土门村雨量突破历史极值。

本文采用 2×2 列联表所示的检验方法来计算模式降水预报的评分指数(表 2),其中,A、B、C、D 分别代表正确预报的站点数(事件发生)、空报站点数、漏报站点数以及预报不发生且观测也未发生的站点数。评分指数分别为:(1)临界成功指数,

$$CSI = \frac{A}{A + B + C}$$
,也称之为 TS(threat scores)评

表 1 台风暴雨过程的验证时段和降水描述
Table 1 Verification periods and outlines of typhoon rainstorm processes

台风(编号)	验证时段	降水描述
艾云尼(1806)	6 月 07 日 08 时至 08 日 08 时	海南岛、广东大部、湖南东南部、江西中南部出现暴雨,其中海南岛中北部、广东中部和南部、江西南部
	6 月 08 日 08 时至 09 日 08 时	出现大暴雨,海南岛北部和广东中南部局地特大暴雨
安比(1810)	7 月 22 日 08 时至 23 日 08 时	上海、江苏东部、山东中部、河北东部、天津、北京东部、
	7 月 23 日 08 时至 24 日 08 时	辽宁西部、内蒙古东部、吉林北部、黑龙江西部出现
	7 月 24 日 08 时至 25 日 08 时	暴雨,其中山东中部、天津、内蒙古东部局地大暴雨
云雀(1812)	8 月 02 日 08 时至 03 日 08 时	上海、浙江北部出现暴雨,局地大暴雨
摩羯(1814)	8 月 12 日 08 时至 13 日 08 时	山东大部、安徽中北部、江苏东南部及西北部、浙江
	8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时	中北部、上海出现暴雨,局地大暴雨;北京、河北东部、辽宁南部出现暴雨到大暴雨,其中河北东部局地特大暴雨
贝碧嘉(1816)	8 月 16 日 08 时至 17 日 08 时	雷州半岛、海南岛出现暴雨,局地大暴雨
温比亚(1818)	8 月 17 日 08 时至 18 日 08 时	上海、浙江北部、江苏、安徽和山东大部、河南
	8 月 18 日 08 时至 19 日 08 时	中东部、辽宁和吉林东部出现暴雨到大暴雨,其中河南东部、山东北部、安徽北部局地特大暴雨
山竹(1822)	9 月 16 日 08 时至 17 日 08 时	广东、广西、贵州南部、海南岛出现暴雨到大暴雨,
	9 月 17 日 08 时至 18 日 08 时	广东南部局地特大暴雨;浙江北部、江苏南部、上海出现暴雨,局地大暴雨

分, 阈值范围 $0 \sim 1$; (2) 偏差评分, $Bias = \frac{A+B}{A+C}$, Bias 评分接近于 1 表示预报发生的站数接近观测出现的站数, 也说明预报对事件发生范围的估计与观测较为接近。

集合预报较确定性预报的优势在于涵盖预报的多种可能性, 通过业务检验发现, 除少数例外, 在 EC 集合预报的 51 个成员中, 总能找到一些成员与台风实际路径非常接近。不难理解, 台风的移动路径很大程度上决定了台风暴雨过程的降水落区, 如果利用模式起报时刻至业务起报时刻之间时段内实时的观测来选取预报偏差较小的成员, 形成新的预报集合。可以预计, 将在一定程度上减小验证时段内集合预报的不确定, 提高台风路径和降水预报的准确率。

本文所使用的多模式 QPF 融合后处理方案: (1) 基于 EC 和 NCEP 的台风路径集合预报以及台风中心实时定位资料, 选取模式起报后 6 h 时刻中心位置预报偏差最小的前 n 个成员为优选成员; (2) 将优选成员的台风路径预报进行集合平均, 并将该集合平均作为区域模式降水预报优选的参考路径; (3) 根据选定的参考路径 (图 1 中实线), 沿此路径上逐 6 h 选取台风中心位置偏差较小的区域模式成员 (图 1 中圆圈黑点), 形成一组区域模式逐 6 h 降水预报的集合; (4) 基于新的降水预报集合, 运用概率匹配 (probability matching, PM) 方法进行降水融合, 并对融合后的逐 6 h 降水产品进行累加, 得到精细化的台风降水客观产品 (24 h 累积降水量)。

对于概率匹配方法 (Ebert, 2001; 代刊等, 2018): 首先, 将降水产品区域内 n 个成员所有格点 (m 个格点) 的降水预报值 (含 $m \times n$ 个预报值) 从大到小排列, 将该序列从大到小分为 m 等份, 保留每一等份的中位数; 其次, 对每个格点上 n 个成员预报计算平均, 得到集合平均场, 将集合平均场所有格点的数值按从大到小排列, 并保留各数值在平均场中的位置; 然后, 将第一步保留下来的预报值序列与集合平均场序列从大到小一一对应; 最后, 将第一步的预报值保留至其对应数值所在集合平均场中的位置, 即得到概率匹配产品 (图 2)。

表 2 降水检验列联表

Table 2 Contingency table for scoring rainfall forecasts

预报事件	观测事件	
	发生	未发生
发生	A	B
未发生	C	D

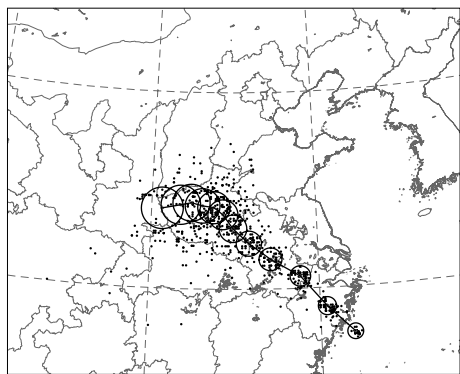


图 1 后处理方案的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of post processing technique

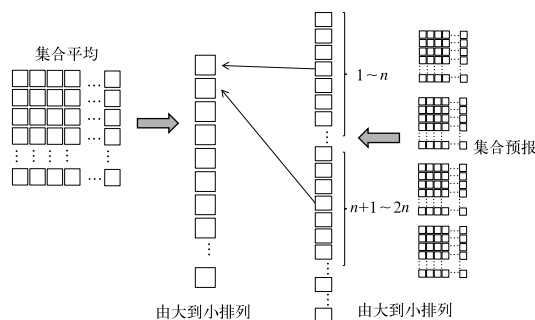


图 2 概率匹配产品计算原理示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of principles of PM product

2 区域模式降水预报评估

区域模式相比全球模式, 对短期时效 ($0 \sim 3$ d) 内局地-区域对流系统以及复杂地形引起的强降水预报表现出一定优势。区域模式的检验工作一直受到广大气象工作者的高度重视, 尤其是针对模式基本气象要素和降水预报的定量化统计检验。由于台风降水后处理产品的计算方案是基于区域模式降水预报进行优选和融合, 因此对四个区域模式的降水预报进行检验是必要的环节。

图 3 给出了 2018 年登陆台风暴雨过程 ECHR、NCEP、GRAPES-Meso、GRAPES-3 km、RMAPS 和 SMS-WARMS 模式的暴雨和大暴雨量级的降水的 TS 评分。对于台风暴雨过程中暴雨量级降水预报, 从图 3 可见, SMS-WARMS 的降水预报 TS 评分显示出较高的预报技巧, 优于 EC 和 NCEP 模式, 同时也优于其他三个区域模式。此外, GRAPES-Meso 与 EC 和 NCEP 的 TS 评分较为接近, 而 GRAPES-3 km 和

RMAPS 要低于上述模式。对于台风暴雨过程中大暴雨量级降水预报,从图 3 可以看出, SMS-WARMS 模式相对于其他模式显示出更为明显的预报技巧,而 GRAPES-3 km 模式的 TS 评分要高于全球模式和 GRAPES-Meso 模式。总体而言, SMS-WARMS 模式在登陆台风暴雨预报中表现出较好的性能, SMS-WARMS 和 GRAPES-3 km 对登陆台风艾云尼、温比亚极端降水预报较全球模式有一定的优势。

图 4 为 2018 年登陆台风暴雨过程不同模式的暴雨和大暴雨量级降水的 Bias 评分。对于台风暴雨过程中暴雨量级降水预报,从图 4 可以看出,全球模式以及 RMAPS 的预报范围较实况偏小, GRAPES-Meso 和 GRAPES-3 km 的预报范围与实况较为接近,而 SMS-WARMS 预报较实况偏强。对于台风暴雨过程中大暴雨量级降水预报,从图 4 可以看出,全球模式以及 RMAPS 的预报范围较实况明显偏小, GRAPES-Meso 对大暴雨的范围也存在一定的低估, GRAPES-3 km 的预报范围与实况接近,而 SMS-WARMS 的预报明显偏强。总体而言, GRAPES-3 km 模式对暴雨和大暴雨的预报范围与实况较为接近,全球模式和 RMAPS 模式存在明显的低估,而 SMS-WARMS 模式的预报较实况明显偏强。

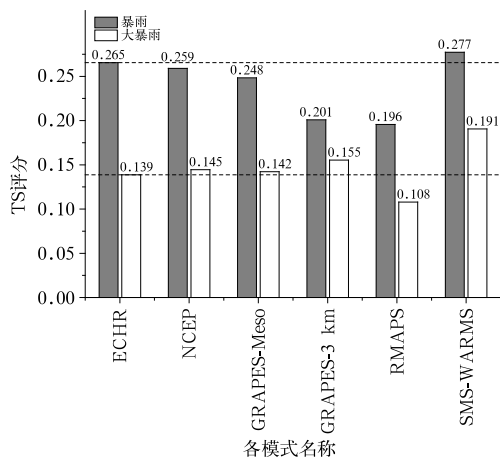


图 3 2018 年登陆台风暴雨过程 ECHR、NCEP、GRAPES-Meso、GRAPES-3 km、RMAPS 和 SMS-WARMS 模式的暴雨和大暴雨量级降水 TS 评分
Fig. 3 The torrential and severe torrential rain threat scores for ECHR, NCEP, GRAPES-Meso, GRAPES-3 km, RMAPS and SMS-WARMS during the rainstorm processes of landed typhoons in 2018

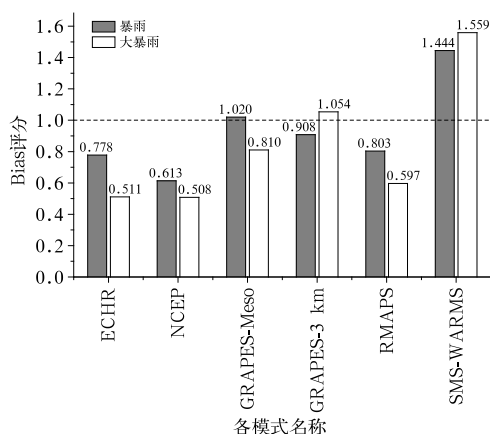


图 4 同图 3, 但为 Bias 评分

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the Bias scores

可以看出,四个区域模式对台风暴雨的预报性能不尽相同。SMS-WARMS 的 TS 评分较高,但空报率也较高; SMS-WARMS 和 GRAPES-3 km 模式较全球模式表现出一定的优势, GRAPES-Meso 对台风暴雨预报的表现总体与全球模式持平,而 RMAPS 模式的评分相对偏低。

3 后处理产品的性能评估

从第 2 节区域模式的降水预报评估可以看出,区域模式对台风暴雨预报较全球模式有一定的优势。如果考虑加入路径因子进行后处理得出的客观产品,具有超过单个模式预报准确率的可能性。基于第 1 节介绍的后处理产品计算方案,在实际应用中将面临如下问题: (1) 选定 EC 集合预报的集合平均路径预报作为参考路径,得出的后处理产品的预报准确率较全球模式和其他区域模式能否获得提高? (2) 选取多少成员可使产品的降水评分达到最高? (3) 随机选择成员路径预报作为参考路径,得到的后处理产品是否同样获得准确率提升? (4) 后处理产品的空报率是否能得到改进?

根据上述问题,本文设计试验对三类客观产品进行检验: (1) 基于 EC 集合平均路径预报为参考路径输出的后处理产品 (ECEP_AVE); (2) 基于 N 个优选成员的集合平均路径预报为参考路径输出的后处理产品 (根据业务起报时刻前 6 h 的台风中心定位,选取偏差较小的前 N 个成员), 包括 1 个 (T01_AVE)、3 个 (T03_AVE)、5 个 (T05_AVE)、7 个 (T07_AVE) 和 9 个 (T09_AVE) 优选成员的情况; (3) 随机选择 EC 集合预报成员作为参考路径输出

的后处理产品,包括 R01_AVE、R02_AVE 和 R03_AVE。

图 5 给出了 2018 年登陆台风暴雨过程预报主观预报(QPF)、ECHR 和 SMS-WARMS 模式以及基于 EC 集合平均路径预报、优选成员集合平均路径预报和随机成员路径预报后处理产品的暴雨量级降水 TS 和 Bias 评分。对于台风暴雨过程中各降水产品的 TS 评分(图 5a),基于 EC 集合平均路径预报和优选成员集合平均路径预报的后处理产品的 TS 评分较全球模式和区域模式均有一定程度的提升,而基于优选成员集合平均路径预报的后处理产品的 TS 评分要高于基于 EC 集合平均路径预报的后处理产品(ECEP_AVE)。结果表明,基于集合预报集合平均路径预报的后处理产品在一定程度上可以改进全球模式和区域模式的台风强降水预报的准确率。首先,该产品相比全球模式降水产品包含更多精细化的强降水信息;其次,相比单个区域模式,后处理方案包含了天气尺度的台风路径订正信息。据此,高分辨率模式和集合预报相结合的后处理方案具有业务应用的可行性。

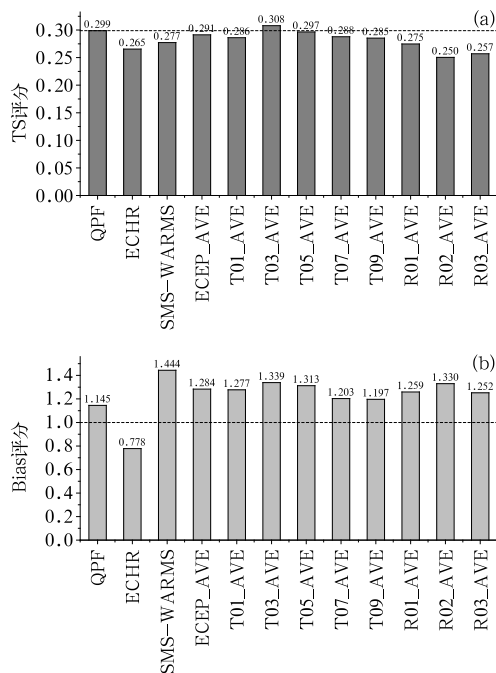


图 5 2018 年登陆台风暴雨过程 QPF、ECHR 和 SMS-WARMS 模式以及各后处理产品暴雨量级降水 TS(a)和 Bias(b)评分

Fig. 5 The torrential rain threat scores (a) and Bias scores (b) for QPF, ECHR, SMS-WARMS, and post-processing products during the rainstorm processes of landed typhoons in 2018

此外,从图 5a 中可以看出,T03_AVE 产品的 TS 评分为最高,相比全球模式(ECHR)和区域模式(SMS-WARMS)分别提高了约 16% 和 11%,同时也略高于预报员对登陆台风暴雨主观定量降水预报(QPF)。结果表明,选择 3~5 个中心位置偏差较小的成员可以使后处理产品的 TS 评分达到最高,同时也表明,路径偏差订正对后处理产品降水落区的改进有明显的影 响。另外,从 R01_AVE、R02_AVE 和 R03_AVE 的 TS 评分看,基于集合预报不同成员路径预报的后处理产品预报表现有一定的差异,且相对于全球模式和单个区域模式的预报评分,没有显著的提高。

对于台风暴雨过程中各降水产品的 Bias 评分,从图 5b 可以看出,基于 EC 集合平均路径预报、优选成员集合平均路径预报和随机成员路径预报的后处理产品的暴雨量级 Bias 评分均要低于 SMS-WARMS 模式 Bias 评分(约为 1.444),略高于预报员主观预报的 Bias 评分。结果表明,成员优选方案对区域模式降水预报具有一定的消空作用,但后处理产品的暴雨预报范围大于实况范围。

4 个例分析

本文选取 2018 年台风摩羯暴雨过程,具体评估台风降水后处理产品的性能。“摩羯”以强热带风暴级于 8 月 12 日午后在浙江温岭沿海登陆,之后进入安徽,并于 13 日午后减弱为热带低压。受其影响,12—14 日,浙江东部和北部、安徽中北部、江苏西北部、山东中西部、河北南部和东部等地出现 100~200 mm 降雨,安徽六安和安庆、江苏徐州、山东潍坊、河北沧州等地降水量为 250~380 mm(图 6a)。针对台风摩羯暴雨过程,选取 8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时为验证时段(表 1)。从图 6b 可以看出,在验证时段内,台风强降水主要出现在安徽中北部、山东西南部和莱州湾等地,而预报员预报出的暴雨落区存在明显的偏差,整体向西偏移,降水中心位于河南东部,且对东北地区南部出现的强降水也存在一定程度的低估。

图 7 给出了 8 月 12 日 20 时起报的 ECHR、集合预报各成员路径预报、实况路径、集合预报概率匹配降水预报(PM)及 500 hPa 等压面 5 840 和 5 880 gpm 面条图。对于验证时段的路径预报,从图 7a 可以看出,集合预报存在明显的分岔现象,ECHR 和

多数集合成员预报台风向河南西部移动,少数集合成员预报台风向河南东部与山东交界处移动,与实况路径接近,而台风在减弱阶段出现明显的北翘,路径较大部分集合成员更为偏东。从图 7b 可以看出,8 月 14 日 08 时,两类低压中心分别位于河南中部和安徽西北部,而低压中心偏东的成员所对应的副热带高压(以下简称副高)(5880 gpm 等高线)西边界位于最偏东的位置。对比 14 日 08 时的 24 h 降水实况(图 6b),基于 EC 集合预报的概率匹配产品(PM)与多数成员一致,降水落区较实况明显偏西。

可以看出,台风的移动路径对台风暴雨落区有

关键影响,而台风的移动路径又受到周围大尺度系统引导作用和本体内力作用的影响。下文将针对验证时段内预报和实况的逐 6 h 环流形势和降水演变进行对比分析。通过对集合成员预报检验分析,发现 18 号成员的移动路径与实况较为接近。图 8 给出了 8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时内逐 6 h 降水实况,8 月 12 日 20 时起报的 ECHR 和 18 号成员 12~36 h 时效的逐 6 h 500 hPa 位势高度预报以及 ECHR 和区域模式 6 h 降水预报。对于环流形势场:13 日 14 时(图 8e,8i),ECHR 和第 18 号成员预报较为相似;13 日 20 时(图 8f,8j),第 18 号成员预

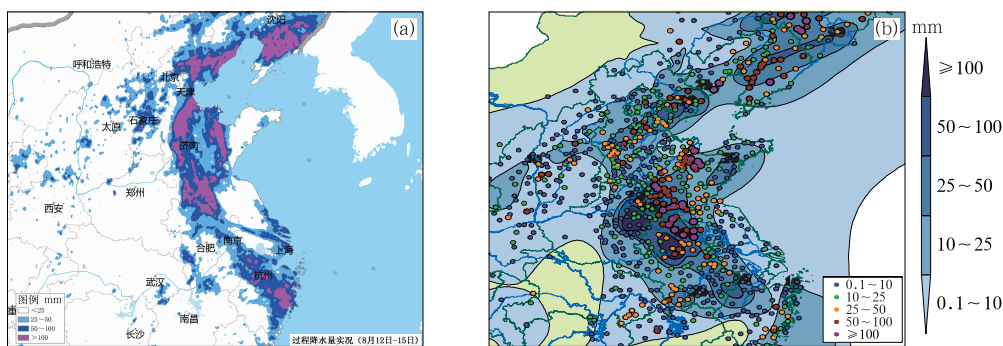


图 6 台风摩羯暴雨过程 2018 年 8 月 12 日 08 时至 15 日 08 时累积降水量(a)

以及 14 日 08 时 24 h 累积降水量和 QPF 24 h 时效预报

(b; 彩色圆点:降水量级,单位:mm; 填色:QPF)

Fig. 6 Accumulated precipitation of the Typhoon Yagi from 08:00 BT 12 to 08:00 BT 15 August 2018 (a)

and 24 h accumulated precipitation at 08:00 BT 14 August 2018, 24 h QPF

(b; colored dots: observation, unit: mm; shaded: QPF)

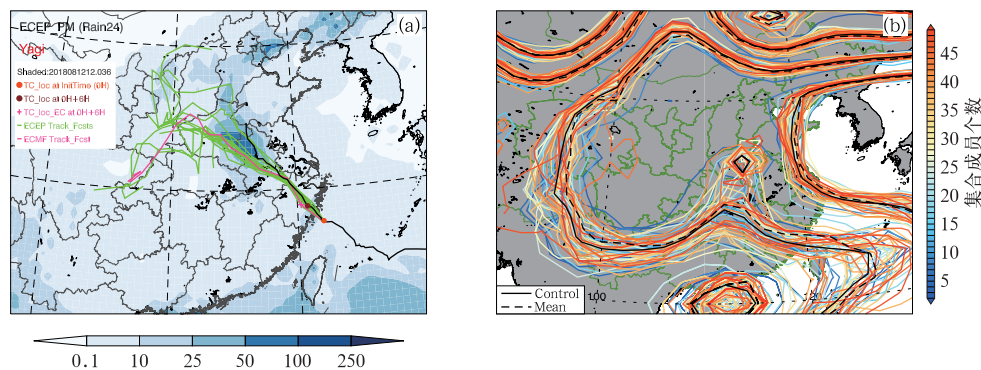


图 7 初始时刻为 2018 年 8 月 12 日 20 时的 ECHR(粉线)、集合预报各成员路径预报(绿线)、

实况路径(黑线)以及集合预报概率匹配(阴影)24 h 降水预报(a)

和 14 日 08 时 500 hPa 等高线集合预报面条图(b)

Fig. 7 (a) The typhoon tracks of ECHR (pink line), EC ensemble members (green line)

initial time at 20:00 BT 12 August 2018 and observation track (black line),

ensemble PM 24 h accumulated precipitation

(shaded: PM product) and (b) 500 hPa geopotential

height ensemble spaghetti chart at 08:00 BT 14 August 2018

报副高的西边界较 ECHR 预报偏东,且台风与副高交界的风向更为偏南;14 日 02 时(图 8g,8k),第 18 号成员预报低压环流范围较 ECHR 预报偏小,表明其预报台风减弱趋势较 ECHR 预报更早;14 日 08 时(图 8h,8l),除第 18 号成员预报台风强度和副高位置较 ECHR 预报偏弱偏东外,位于华北北部的西风槽槽底位置较 ECHR 预报偏南,表明中纬度西风槽的强度和移速对台风移动路径也有较大的影响。

对比逐 6 h 降水预报和实况演变:从图 8a,8e,8i 可以看出,前 6 h ECHR 预报和实况较为接近,GRAPES-3 km 降水落区预报略偏东;从图 8b,8f,8j 可以看出,8 月 13 日 14—20 时,强降水区位于安徽东北部,ECHR 落区预报略偏西,GRAPES-3 km

强度和落区预报与实况较为一致;从图 8c,8g,8k 可以看出,8 月 13 日 20 时至 14 日 02 时,山东西南部和中部、安徽北部、江苏西北部出现强降水,ECHR 强降水落区预报明显偏西,而 SMS-WARMS 对上述地区强降水以及华北南部和东部出现的局地强降水有较好的体现;从图 8d,8h,8l 可以看出,8 月 14 日 02—08 时,在山东西南部和莱州湾、华北东北部和东北地区南部,出现了与台风本体环流相关的强降水区以及与中纬度西风槽相互作用产生的远距离强降水带,ECHR 对上述地区出现的强降水存在明显低估,而第 18 号成员预报降水落区和强度与实况较为接近。

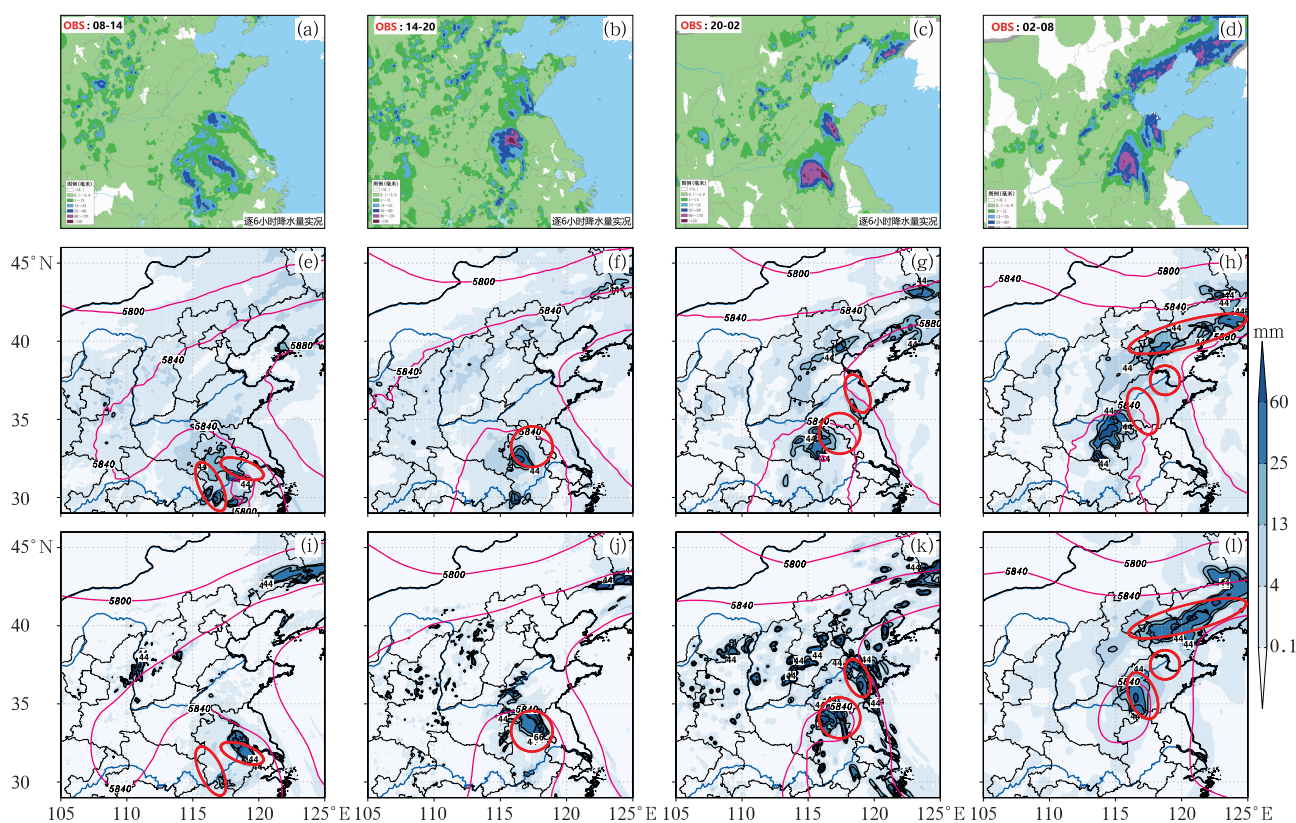


图 8 2018 年 8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时逐 6 h 降水实况(填色;a,b,c,d),ECHR 逐 6 h 降水预报(填色)和 500 hPa 位势高度预报(e,f,g,h,单位:gpm),集合预报第 18 号成员的逐 6 h 500 hPa 位势高度预报(等值线)及区域模式和第 18 号成员 6 h 降水预报(填色):(i)GRAPES-3 km,(j)GRAPES-3 km,(k)SMS-WARMS,(l)ECHR 第 18 号成员(红色圆圈代表实况强降水出现的位置)

(a,e,i)13 日 08—14 时,(b,f,j)13 日 14—20 时,(c,g,k)13 日 20 时至 14 日 02 时,(d,h,l)14 日 02—08 时
Fig. 8 The 6 h hourly accumulated precipitation (colored) from 08:00 BT on 13 to 08:00 BT 14 August (a, b, c, d), 6 h hourly QPF (colored) and 500 hPa geopotential height forecasts (unit: gpm) of ECHR (e, f, g, h), 6 h hourly 500 hPa geopotential height forecasts of 18th member of ECEP and 6 h QPF (colored) of regional models and 18th member: (i) GRAPES-3 km, (j) GRAPES-3 km, (k) SMS-WARMS, (l) 18th member of ECEP (Red circles mean the locations of heavy rain)

(a, e, i) from 08:00 BT to 14:00 BT 13, (b, f, j) from 14:00 BT to 20:00 BT 13, (c, g, k) from 20:00 BT 13 to 02:00 BT 14, (d, h, l) from 02:00 BT to 08:00 BT 14

综上所述,台风周围大尺度系统的演变以及台风自身强度的变化对台风的移动路径有关键作用。对比 ECHR 和第 18 号成员预报可以发现,副高西边界偏东,中纬度西风槽移动偏快,引导气流的偏南分量更大,使得台风向北移动的趋势更为明显;另一方面,第 18 号成员预报台风减弱偏早,根据台风内力定义公式,向西的移动分量也会相应减弱。另外,从逐 6 h 降水检验看,对于台风摩羯暴雨过程,GRAPES-3 km 和 SMS-WARMS 无论在台风强降水落区、强度以及外围局地强降水预报较全球模式有更好的表现。

图 9 给出了降水实况以及基于优选成员集合平均路径预报和区域模式降水预报的台风降水后处理产品(OBEST_MULTI_PM)。对比图 6b 和图 7a 可以看出,后处理产品的强降水落区明显偏东,对安徽东北部、江苏西北部、山东西南部及莱州湾的强降水有较好的体现。此外,对比 8 月 13 日 02 时台风

中心实况和集合平均预报的位置(图 9b 中棕色圆点和“+”),集合预报中心位置较实况略偏北偏西,而基于 02 时台风中心实况优选偏差较小的 3 个成员形成的集合平均路径预报(OBEST_Tracks_AVE,深蓝实线),较 EC 集合平均路径预报(橙色实线)更加偏北偏东。另外,GRAPES-Meso、GRAPES-3 km、RMAPS 和 SMS-WARMS 的路径预报较 EC 集合平均路径预报明显偏东,其中,GRAPES-3 km 和 SMS-WARMS 对台风实况路径北翘的特征有所体现。

表 3 给出了 8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时,预报员主观预报、全球模式、区域模式、集合预报最优百分位(EOQ)和台风降水后处理产品的暴雨和大暴雨量级 TS 评分。结果显示:ECHR 的降水评分偏低,NCEP 降水评分高于 ECHR,SMS-WARMS、GRAPES-3 km 和 RMAPS 评分高于全球模式;预报员在全球模式预报基础上做出有效订正,但评分

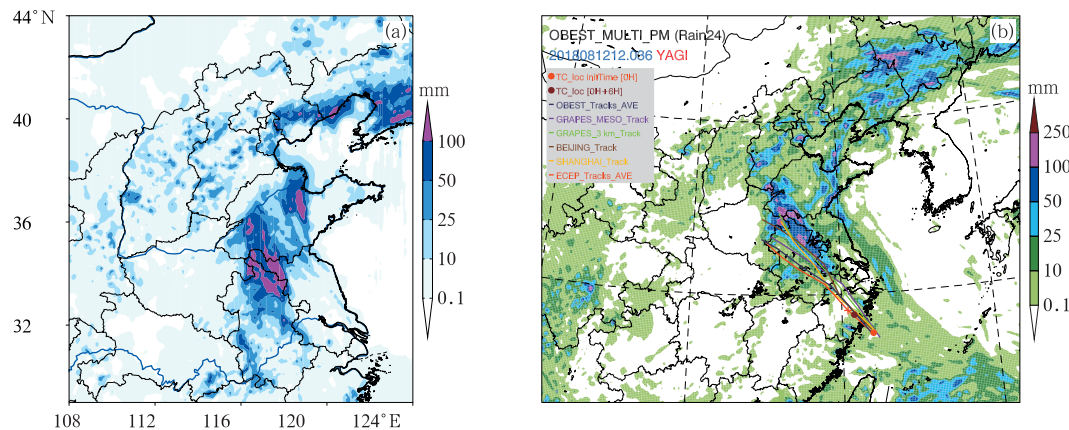


图 9 2018 年 8 月 13 日 08 时至 14 日 08 时 24 h 降水实况(a),初始时刻为 8 月 12 日 20 时 EC 集合平均(橙线)、OBEST_Tracks_AVE(蓝线)、GRAPES-Meso(紫线)、GRAPES-3 km(绿线)、RAMAPS(棕线)和 SMS-WARMS(黄线)路径预报及台风降水后处理产品(填色)(b)

Fig. 9 The 24 h accumulated precipitation from 08:00 BT on 13 to 08:00 BT 14 August 2018 (a), track forecasts of EC ensemble mean (orange line), OBEST_Tracks_AVE (deep blue line), GRAPES-Meso (purple line), GRAPES-3 km (green line), RMAPS (brown line) and SMS-WARMS (yellow line) initial time at 20:00 BT 12 August 2018, and OBEST_MULTI_PM product (colored) (b)

表 3 主观定量降水预报(QPF)、EC 细网格模式(ECHR)、NCEP、GRAPES-Meso、GRAPES-3 km、RMAPS、SMS-WARMS、集合预报最优百分位(EOQ)和台风降水后处理(OBEST_MULTI_PM)产品 2018 年 8 月 14 日 08 时 24 h 累积降水暴雨和大暴雨量级 TS 评分

Table 3 The 24 h accumulated precipitation threat scores of torrential and severe torrential rain of QPF, ECHR, NCEP, GRAPES-Meso, GRAPES-3 km, RMAPS, SMS-WARMS, EOQ and OBEST_MULTI_PM products at 08:00 BT 14 August 2018

TS	QPF	ECHR	NCEP	GRAPES-Meso	GRAPES-3 km	RMAPS	SMS-WARMS	EOQ	OBEST_MULTI_PM
暴雨	0.14	0.03	0.12	0.05	0.16	0.13	0.22	0.11	0.22
大暴雨	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.10	0.02	0.10

仍偏低;台风降水后处理产品(OBEST_MULTI-PM;需要指出,OBEST_MULTI-PM采用了T03_AVE计算方案)评分与SMS-WARMS持平,明显高于集合预报最优百分位产品、预报员主观预报、全球模式和其他区域模式。总体而言,对于此次过程,台风降水后处理产品可以为预报员将雨带向东调整提供有效的信息。

5 结论与讨论

本文以2018年登陆我国的主要台风暴雨过程为研究对象,基于EC、NCEP台风路径集合预报、国家气象中心实时台风中心定位资料以及国内主要业务区域模式的降水预报资料,提出一种针对台风暴雨预报的实时订正技术(简称台风降水多模式QPF融合技术),介绍了该技术应用的具体计算方案,并分析了该方法业务应用的可行性,得出了以下主要结论:

(1)在台风暴雨过程的降水预报中,成员优选技术可以改进传统的集合预报QPF后处理产品;在大暴雨和暴雨预报中,成员优选产品较ECHR及其他常用集合预报客观降水产品有一定的优势。

(2)对于台风暴雨预报,各家区域模式预报表现不尽相同,但总体而言,区域模式(SMS-WARMS和GRAPES-3 km)对台风暴雨预报较全球模式有一定的优势;对暴雨范围的预测,全球模式预报存在明显低估,而区域模式存在明显高估。

(3)研究表明,基于EC集合平均路径预报和优选成员集合平均路径预报的后处理产品的TS评分较全球模式和区域模式均有一定程度的提高,选择3~5个中心位置偏差较小的成员可以使后处理产品的TS评分达到最高,而选择随机成员预报作为参考路径,并不能为后处理产品带来降水评分的提升;此外,成员优选和概率匹配技术对于区域模式降水预报具有一定的消空作用。

(4)通过具体个例分析,台风的移动路径对台风强降水落区有关键影响,而台风的移动路径又受到周围大尺度系统引导作用和台风强度的影响。因此,基于成员优选和概率匹配技术的多模式QPF融合方案则是从实时的观测中提取信息,降低大尺度系统的位置和强度预报不确定性,同时结合区域模式精细化预报,给出较为准确的台风强降水后处理产品。

另一方面,除了台风路径对台风暴雨的影响,利用台风强度等级,确定出不同强度的登陆台风所对应的暴雨预报成员优选方案,对进一步提高基于成员优选和概率匹配技术的多模式QPF融合产品的预报稳定性有一定的帮助。此外,借鉴其他客观产品(如历史百分位和频率匹配产品)的设计原理来完善多模式QPF融合产品的计算方案也是今后研究的重要方面。

参考文献

- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).
- 陈博宇,代刊,郭云谦,2015. 2013年汛期ECMWF集合统计量产品的降水预报检验与分析[J]. 暴雨灾害,34(1):64-73. Chen B Y, Dai K, Guo Y Q, 2015. Precipitation verification and analysis of ECMWF ensemble statistic products in 2013 flooding season[J]. Torr Rain Dis, 34(1):64-73(in Chinese).
- 陈博宇,郭云谦,代刊,等,2016. 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,42(12):1465-1475. Chen B Y, Guo Y Q, Dai K, et al, 2016. Research for the ensemble member optimization correction technique on typhoon rainstorm forecast and its application experiment[J]. Meteor Mon, 42(12):1465-1475(in Chinese).
- 陈联寿,孟智勇,丛春华,2017. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报,37(4):1-7. Chen L S, Meng Z Y, Cong C H, 2017. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. J Mar Meteor, 37(4):1-7(in Chinese).
- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 杜钧,李俊,2014. 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,4(5):6-20. Du J, Li J, 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(5):6-20(in Chinese).
- 江漫,漆梁波,2016. 1959—2012年我国极端降水台风的气候特征分析[J]. 气象,42(10):1230-1236. Jiang M, Qi L B, 2016. Analysis on climatic characteristics of extreme precipitating typhoon in China during 1959—2012[J]. Meteor Mon, 42(10):1230-1236(in Chinese).
- 李俊,杜钧,陈超君,2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究[J]. 气象,41(6):674-684. Li J, Du J, Chen C J, 2015. Applications of “frequency matching” method to ensemble precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 41(6):674-684(in Chinese).
- 柳龙生,吕心艳,高拴柱,2019. 2018年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报,39(2):1-12. Liu L S, Lyu X Y, Gao S

- Z, 2019. Overview of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea[J]. *J. Mar. Meteor.*, 39(2): 1-12 (in Chinese).
- 罗玲, 娄小芬, 傅良, 等, 2019. 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*, 45(10): 1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in typhoon rainstorm in east China [J]. *Meteor. Mon.*, 45(10): 1382-1391 (in Chinese).
- 聂皓浩, 刘奇俊, 马占山, 2016. 高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究[J]. *气象*, 42(12): 1431-1444. Nie H H, Liu Q J, Ma Z S, 2016. Simulation and analysis of heavy precipitation using cloud microphysical scheme coupled with high resolution GRAPES model[J]. *Meteor. Mon.*, 42(12): 1431-1444 (in Chinese).
- 钱奇峰, 张长安, 高拴柱, 等, 2014. 台风路径集合预报的实时订正技术研究[J]. *热带气象学报*, 30(5): 905-910. Qian Q F, Zhang C A, Gao S Z, et al, 2014. Real-time correction method for ensemble forecasting of typhoon tracks[J]. *J. Trop. Meteor.*, 30(5): 905-910 (in Chinese).
- 徐同, 杨玉华, 李佳, 等, 2019. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. *气象*, 45(8): 1065-1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al, 2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in Southwest China[J]. *Meteor. Mon.*, 45(8): 1065-1074 (in Chinese).
- 杨舒楠, 曹勇, 陈涛, 等, 2019. 台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J]. *气象*, 45(1): 38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on day 2 after landing[J]. *Meteor. Mon.*, 45(1): 38-49 (in Chinese).
- 张小雯, 唐文苑, 郑永光, 等, 2020. GRAPES_3 km 数值模式对流风暴雨预报能力的多方法综合评估[J]. *气象*, 46(3): 367-380. Zhang X W, Tang W Y, Zheng Y G, et al, 2020. Comprehensive evaluations of GRAPES_3 km numerical model in forecasting convective storms using various verification methods[J]. *Meteor. Mon.*, 46(3): 367-380 (in Chinese).
- 周迪, 陈静, 陈朝平, 等, 2015. 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*, 34(2): 97-104. Zhou D, Chen J, Chen C P, et al, 2015. Application research on heavy rainfall calibration based on ensemble forecast vs. observed precipitation probability matching method in the Sichuan Basin[J]. *Torr. Rain Dis.*, 34(2): 97-104 (in Chinese).
- Dong L, Zhang F Q, 2016. OBEST: an observation-based ensemble subsetting technique for tropical cyclone track prediction[J]. *Wea. Forecasting*, 31(1): 57-70.
- Ebert E E, 2001. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(10): 2461-2480.
- Fang X Q, Kuo Y H, 2013. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(11): 3908-3932.
- Leonardo N M, Colle B A, 2020. An investigation of large along-track errors in extratropical transitioning north Atlantic tropical cyclones in the ECMWF ensemble[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 148(1): 457-476.