

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. 气象, 42(12): 1465-1475.

# 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<sup>\* 1</sup>

陈博宇 郭云谦 代刊 钱奇峰

国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 本文以 2013—2015 年主要登陆台风暴雨过程为研究对象, 利用 ECMWF 降水和台风路径集合预报以及中央气象台实时业务台风中心定位资料, 在统计分析的基础上, 提出一种业务上可用的针对单模式集合预报的台风降水实时订正技术(简称集合成员优选技术)。结果表明, 在登陆台风暴雨过程预报中, 集合成员优选技术对改进集合统计量降水产品有明显的帮助, 并较 ECMWF 确定性预报产品有一定优势; 该方法对改进短期时效预报产品的效果优于中期时效预报, 对大暴雨评分的改进高于暴雨和大雨评分。另外, 本文基于概率匹配平均(Probability Matching average, PM)和融合(FUSE)产品的计算原理, 提出融合匹配平均(Fuse Matching average, FM)产品, 结果表明, 对 36 h 时效预报, 优选 10~15 个成员的 PM 产品 TS (Threat Scores) 评分可达最优, 大暴雨评分较确定性预报提高近 10%; 对 60 和 84 h 时效预报, FM 产品大暴雨评分较确定性预报提高超过 20%。

**关键词:** 台风暴雨, 集合预报, 成员优选

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2016. 12. 004

## Research for the Ensemble Member Optimization Correction Technique on Typhoon Rainstorm Forecast and Its Application Experiment

CHEN Boyu GUO Yunqian DAI Kan QIAN Qifeng

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** Based on several rainstorm processes of landed typhoons in 2013—2015 and statistics, we propose a real-time correction method for typhoon rainstorm forecast (also called ensemble member optimization method) using ECMWF precipitation and typhoon track ensemble forecasts and operational positioning of National Meteorological Centre (NMC) for the operational track forecast. The results show that ensemble statistic precipitation products are improved significantly by using the ensemble member optimization method, and the improved products give better performances than the ECMWF deterministic forecasts. Improvements of ensemble statistic products for short-range forecast are more significant than medium-range forecast, and that for extra torrential rain forecast are more significant than torrential and heavy rain forecast. Moreover, Fuse Matching average (FM) product is proposed in this paper, based on the characteristics and principles of Probability Matching average (PM) and fusing products. The results also show that the PM products with 10 to 15 optimal selected members give the best performance for 36 h forecast, while the threat scores of PM products can be promoted by 10% approximately for extra torrential rain forecasts. For 60 h and 84 h extra torrential rain forecasts, the threat scores of FM products can be promoted by above 20%, compared with the ECMWF deterministic forecasts.

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002)和国家气象中心预报员专项(Y201501)共同资助  
2016 年 3 月 9 日收稿; 2016 年 10 月 10 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研究. Email: chenboyu@cma.gov.cn

**Key words:** typhoon rainstorm, ensemble forecast, optimization of ensemble members

## 引 言

台风登陆造成的灾害往往是由台风引发的暴雨造成的。暴雨会引起山洪爆发或大型水库崩塌等,造成洪水泛滥,带来巨大的损失。因此,多年来关于台风暴雨研究及其预报应用一直是备受重视的课题之一。由于目前地面雨量站点分布不均,雷达探测范围有限。这使得人们很难从定量角度及时获取登陆台风降水的全面信息,也给政府部门制定防洪决策带来了较大的困难。当前用于登陆台风降水的预报方法很多,如数值预报、统计预报等,都具有一定的预报能力。但现有模式的台风初始场同化技术、物理过程和边界层参数化方案以及卫星、雷达等非常规资料的融合应用能力仍较为薄弱。这不仅影响了台风路径预报的精度,也大大限制了对台风降水的预报能力。

早期研究表明,集合数值预报方法是一种专门用来定量估计预报误差,即预报不确定性的动力学方法,其在暴雨这类预报误差较大的预报制作过程中大有作为。集合预报方法在台风暴雨研究和预报中的应用,包括四个方面:(1)台风暴雨集合预报系统的建立,如初值和物理扰动的生成等;(2)预报方法,如再预报相似集合法等;(3)在预报后处理与订正中的应用,如概率匹配平均法(PM)和集合动力因子法等;(4)对暴雨天气系统的机理分析与模式初值改进,如集合敏感性法和目标观测等(杜钧等,2014;董全等,2016;李勇,2016;赵琳娜等,2015)。本文主要关注第三个方面,也可称集合预报释用技术应用。目前,集合预报产品已在国家级和部分省级台风预报业务中得到初步的应用和推广,相关的集合预报释用技术研发相继开展。例如,中央气象台台风海洋中心基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF,简称EC)的集合预报产品和最新台风中心定位,提出一种台风路径预报实时订正技术(ensemble forecast real-time correction method, ERCM; 钱奇峰等,2014),取得了不错的成效。在强降水预报方面,最优百分位、PM等集合统计量产品也得到不断改进和较好业务应用(吴政谦等,2012;彭相瑜等,2014;陈博宇等,2015;李俊等,2015)。因此,本文结合台风路径预报实时订正技术和集合统计量降水产品的

最新改进方法,提出一种针对台风降水预报的实时订正方法,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 EC 集合预报降水、台风路径资料以及全国范围国家级站点降水资料。需要指出,EC 确定性预报即 EC 细网格业务模式预报,其水平分辨率约为  $16\text{ km}(0.25^\circ \times 0.25^\circ)$ ; EC 集合预报系统有 51 个成员,包括 1 个控制预报和 50 个扰动成员,其针对东亚区域( $15^\circ \sim 55^\circ\text{N}$ ,  $70^\circ \sim 136^\circ\text{E}$ )降水产品水平分辨率约为  $30\text{ km}(0.5^\circ \times 0.5^\circ)$ ,含  $133 \times 81$  个格点。本文选取 2013—2015 年登陆台风尤特(1311)、潭美(1312)、菲特(1323)、海燕(1330)、威马逊(1409)、麦德姆(1410)、海鸥(1415)、灿鸿(1509)、莲花(1510)、苏迪罗(1513)和杜鹃(1521)的暴雨过程为研究对象,分别计算 EC 确定性预报以及集合统计量等客观产品 1~5 d 全国范围大雨、暴雨和大暴雨量级降水的 TS (Threat scores) 评分。

成员优选方案:基于中央气象台台风中心定位,在 51 个成员中,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(钱奇峰等,2014)。集合统计量产品:概率匹配平均(Probability Matching average, 简称 PM)和融合(FUSE)产品。PM 产品(图 1):第一步,将东亚区域内  $n$  个成员所有格点(含  $n \times 133 \times 81$  个格点)的降水预报值从大到小排列,将该序列从大到小分为  $133 \times 81$  等份,保留每一等份的中位数;第二步,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;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,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。FUSE 产品的每个格点计算规则如下(按先后优先顺序):(1)如果集合最大值  $\geq 100\text{ mm}$ ,融合值等于最大值;(2)如果集合 90%分位值  $\geq 50\text{ mm}$ ,融合值等于 90%分位值;(3)如果集合 75%分位值  $\geq 25\text{ mm}$ ,融合值等于 75%分位值;(4)如果集合中位值  $\geq 10\text{ mm}$ ,融合值等于中位值;(5)如果上述条件都不满足,则融合值等于 10%分位值。

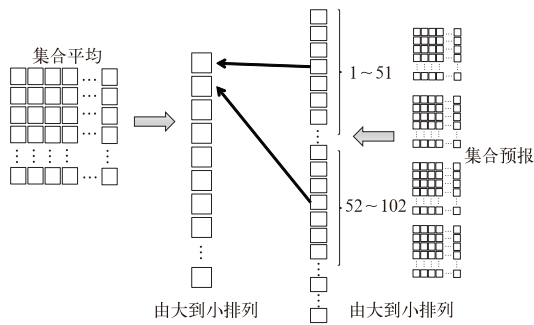


图 1 PM 产品计算原理示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of principles of PM product

## 2 成员优选技术的改进

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,除少数个例外,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,台风的登陆点很大程度决定了台风暴雨过程的降水落区,如果我们利用模式起报时刻到业务起报时刻之间时段内最新的实况来优选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,提高集合统计量降水产品的准确性。基于这种思路,在实际应用中将面临一个问题:选取多少成员可使产品的降水评分达到最高。

本文以全国范围大暴雨量级 TS 评分来评估成员优选技术对集合统计量产品的改进程度,同时为初步确定不同预报时效下最优成员数,引入函数  $R$ , 定义如下:

$$R = TS_{opti} / TS_{norm}$$

式中,  $TS_{norm}$  和  $TS_{opti}$  分别为优选前和优选后集合统

计量产品的大暴雨量级降水评分。图 2 分别给出了 2013—2015 年登陆台风暴雨过程中 PM 和 FUSE 产品的统计结果。可以看出,成员优选方法对于改进 PM 和 FUSE 产品均有明显的效果,且不同预报时效的最优成员数存在一定差异。

对于 PM 产品,优选 10~15 个集合成员对改进 36、84 和 132 h 时效预报有一定的帮助,其中,36 h 时效预报大暴雨评分改进最大接近 10%。对于 FUSE 产品,最优成员数随预报时效而增加,其中,36 h 时效预报最优个数在 4~6,60 h 时效预报最优成员数为 8~10 个,84 h 时效预报最优个数在 18~22,108 h 时效预报的最优个数在 20~28;60 h 时效的改进程度最大,可超过 20%;预报时效超过 132 h 以上,成员优选方法对改进产品预报无显著作用。因此,基于最新的台风中心实况,成员优选技术对于改进短期时效内大暴雨降水预报有较为显著的作用。

另一方面,优选成员个数对 PM 和 FUSE 产品的影响存在较大不同。对 PM 产品,函数  $R$  曲线往往存在多个极值点,存在一定的波动性;对 FUSE 产品,函数  $R$  曲线的单调性更为明显。近期研究结果显示,集合统计量降水产品对汛期暴雨和大暴雨预报具有一定的参考价值(刘琳等,2013;狄靖月等,2013;张涵斌等,2014;周迪等,2015)。对暴雨量级降水预报,PM 产品的 TS 评分与确定性预报相当,但其空报率相对较低,FUSE 产品较确定性预报有更高的 TS 评分;对大暴雨量级降水预报,PM 产品的 TS 评分低于确定性预报,而 FUSE 产品的 TS 评分高于确定性预报。通过检验 2013 年登陆台风暴雨过程,统计结果显示,FUSE 产品的空报站点数平均是确定性预报 2~3 倍(陈博宇等,2015)。优选

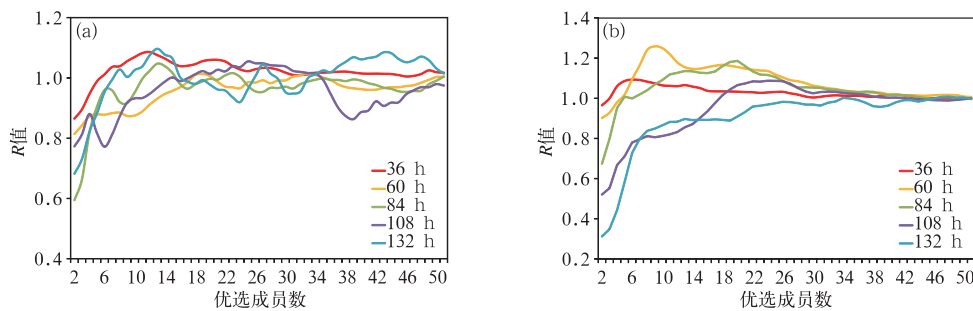


图 2 PM(a)和 FUSE(b)产品函数  $R$  随优选成员个数的变化

Fig. 2 Function  $R$  with respect to the numbers of selected ensemble members for PM (a) and FUSE (b) products

成员数的减少有利于控制 FUSE 产品的空报率,空报率的大幅下降对 FUSE 产品 TS 评分的提升有重要影响。由于 PM 产品的暴雨和大暴雨空报率相对较低,可初步判断,优选少数路径预报较好的成员后其 TS 评分的提升很大程度受降水分布改进的影响。然而,除了台风路径外,台风降水还受到台风强度等其他各种因素的影响。

### 3 成员优选产品计算方案的改进

通过第二节对成员优选技术改进作用的评估,结果显示该技术对改进集合统计量降水产品的评分有较明显的作用。此外,基于对 PM 和 FUSE 产品的分析,本节将从改进 FUSE 产品计算规则和成员优选方案两个方面入手,进一步挖掘成员优选产品的潜在应用价值。

#### 3.1 融合匹配平均产品计算规则

根据 PM 和 FUSE 产品的计算规则和统计检验结果,分析得出,PM 产品优势在于综合了集合成员降水分布的信息,但对台风暴雨过程的降水量级存在一定的低估;FUSE 产品是基于独立格点上选取不同百分位值而得出,对暴雨过程的降水量级预报较 EC 确定性预报有一定优势,但往往是以更高的空报率为代价。因此,综合上述两种产品的各自优势,考虑将 FUSE 产品与集合平均场再次匹配,得到新的融合匹配平均(Fuse Matching average, FM)产品。具体地,将计算出的 FUSE 产品所有格点上的预报值按从大到小排列;将该序列与按从大到小排列的集合平均场序列一一对应,并将 FUSE 产品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 FM 产品(图 3)。

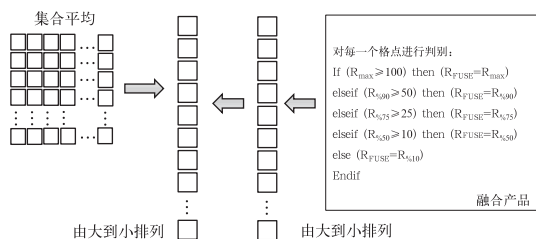


图 3 FM 产品计算原理示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of principles of FM product

一般而言,由于集合平均过程的非线性过滤作

用把成员中可预报性相对较低的成分过滤掉而留下各成员共有的信息,因此集合平均预报在降水分布上较单一预报更为准确,而原始集合成员在降水量级或各量级降水出现的频率分布比较准确,把两者有机结合起来,理论上可以得到一个较好的预报。由于引入了集合成员优选技术,本文将区分计算降水分布(集合平均场)和匹配场的优选成员数。因此,对于 PM 和 FM 产品,将分别有  $50 \times 50$  种优选成员数配置,以期获得该统计量产品的最优评分。

#### 3.2 计算集合平均场和匹配场的优选成员数

图 4 给出了在不同计算集合平均场和匹配场优选成员数的配置下,PM 和 FM 产品 36 和 108 h 时效预报的 TS 评分分布。对于 36 h 时效预报,优选 10~15 个成员确定集合平均场并匹配 10 个左右优选成员预报,计算得出的 PM 产品可使评分达到最优,较使用 51 个成员计算得出的原 PM 产品提高近 10%(图 4a);优选 10~20 个成员确定集合平均场并匹配优选 3~5 个成员计算得出的 FUSE 产品,可使由此得到的 FM 产品的评分达到最优,较优选前的 FM 产品的评分有较大程度的提高(图 4b)且最优评分与 PM 产品相当。对于 108 h 时效预报,优选 25~30 个成员确定集合平均场并匹配 30~45 个优选成员预报,计算得出的 PM 产品可在一定程度上改进原 PM 产品的评分;优选 40~45 个成员确定集合平均场并匹配优选 10~25 个成员计算得出的 FUSE 产品,也可在一定程度上改进原 FM 产品的评分,但 FM 产品的最优评分要明显高于 PM 产品。不难理解,随着预报时效的增长,初期路径预报较好的成员在验证时刻出现较大路径偏差的可能性也在增加,由此造成确定集合平均场和匹配场的最优成员数也相应增加。

通过比较 36 和 108 h 时效预报,结果显示,PM 和 FM 产品 108 h 时效预报改进程度较 36 h 时效有所下降,这说明成员优选技术对中期时效集合统计量产品的改进效果要低于短期时效统计量产品。此外,改进后的 PM 产品的评分对计算集合平均场的优选成员数较计算匹配场的优选成员数更为敏感。结果表明,36 h 时效预报中,选取少数路径预报较好的集合成员对于改进 PM 产品有一定的帮助,而计算匹配场的最优成员数则具有更明显个例依赖性。在短期时效预报中,FM 产品对于计算匹配场的优选成员数更为敏感,该结果与第二节中对 FUSE 产品改进的分析基本吻合。

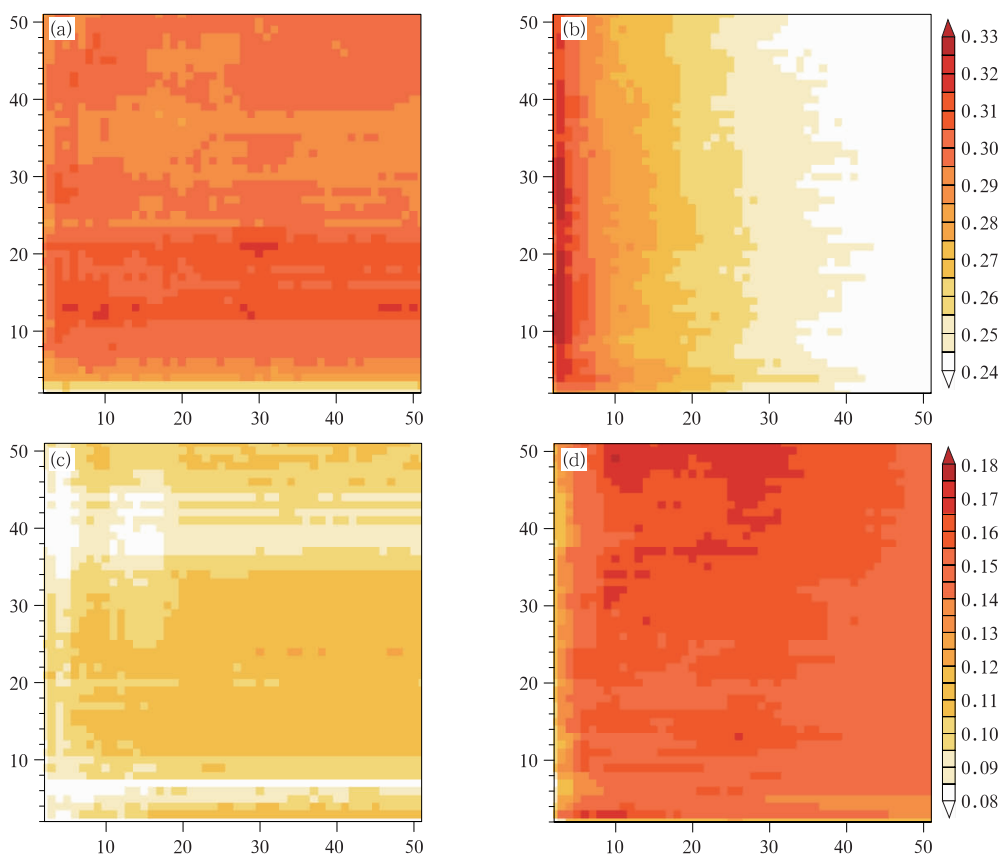


图 4 基于不同计算集合平均场(纵轴)和匹配场(横轴)优选成员数得出的 PM(a,c)和 FM(b,d)产品 36 h(a,b)和 108 h(c,d)时效预报 TS 评分(阴影)

Fig. 4 Threat scores (shaded) of 36 h (a, b) and 108 h (c, d) forecasts of PM (a, c) and FM (b, d) products with respect to the numbers of selected ensemble members for average arrays (vertical axis) and matching arrays (horizontal axis)

### 3.3 成员优选后的 PM、FUSE 和 FM 产品比较

PM、FUSE 和 FM 产品在不同预报时效的最优评分存在差异,因此,在成员优选产品业务化过程中需要确定不同预报时效下选用的统计量产品类型。

图 5 给出了通过成员优选方法改进后的集合平均(AVE)、PM、FUSE 和 FM 产品的最优 TS 评分及其相应的 Bias 评分(大暴雨)。结果显示,对于不同预报时效,FM 产品的评分要总体高于 FUSE 产品,且 FM 产品 84 h 时效空报率要明显低于 FUSE 产

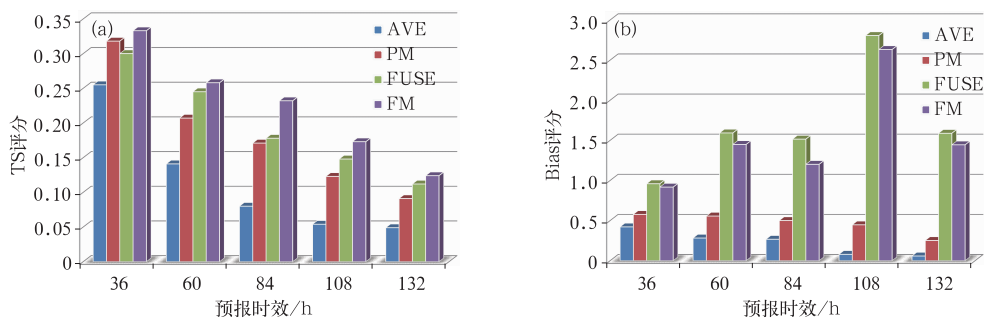


图 5 成员优选方法改进后的集合平均(AVE)、PM、FUSE 和 FM 产品的最优 TS 评分(a)及相应的 Bias 评分(b)

Fig. 5 The optimal TS (a) and Bias scores (b) of ensemble average (AVE), PM, FUSE, and FM products by the method for optimization of ensemble members

品(图略), Bias 评分较 FUSE 产品要更接近于 1, 这说明通过将 FUSE 产品匹配到集合平均场得到的 FM 产品, 在一定程度上弥补了 FUSE 产品空报率偏高的不足。

可以看出, 对于 36 h 时效预报, PM 和 FM 产品表现相当, PM 产品的空报率要明显低于 FM 产品(图略), 而 FM 产品的 Bias 评分表现更好, 因此在实际业务预报中, PM 和 FM 产品均有一定的参考价值; 对于 60 h 时效预报, FM 和 FUSE 产品的评分要明显高于 PM 产品, 但其 Bias 评分也出现显著的增加, FM 产品的 Bias 评分较 FUSE 产品略好; 对于 84 h 时效预报, FM 产品的 TS 评分要明显高于 FUSE 和 PM 产品, 因此 60 和 84 h 时效预报中, FM 产品对于提高预报员主观预报评分具有相对更好的帮助, 但由于其 Bias 评分高于 1, 使用过程中仍需综合考虑 FM 和 PM 产品对降水量级的把握。需要指出, 由于成员优选技术对中期时效预报改进不显著, 下文仅评估短期时效内成员技术的改进作用。

#### 4 个例分析

本文选取 2015 年台风苏迪罗(1513)和灿鸿(1509)暴雨过程具体评估成员优选产品的性能。1513 号台风苏迪罗是 2015 年影响我国范围最广的台风。受其影响, 7—11 日, 台湾、浙江、福建、江西东部和北部、安徽中南部、江苏中南部出现强降雨, 其中, 台湾大部降雨 200~400 mm, 局地 800~1300 mm; 浙江东部和南部、福建东北部、江苏中部、江西北部等地部分地区 350~600 mm。与台风苏迪罗相比, 1509 号台风灿鸿的影响范围相对较小, 影响

时段较短。受其影响, 10—12 日, 浙江中东部、上海、江苏东南部、安徽南部等地降雨 50~140 mm, 浙江东北部和安徽黄山降雨 150~280 mm。

#### 4.1 台风苏迪罗暴雨过程

针对台风苏迪罗暴雨过程, 分别选取了 2015 年 8 月 9 日 08 时、10 日 08 时和 11 日 08 时的 24 h 累积降水为检验对象, 检验 24 h 时效的预报员定量降水预报及前一天 20 时起报的 36 h 时效 EC 细网格模式和集合统计量降水预报产品, 其中, 统计量产品包括最优百分位(ECMWF Optimal Quantile, EOQ)、成员优选后的 PM(OPTI\_PM)和 FM(OPTI\_FM)产品。需要指出, 类似于 FUSE 产品计算原理, EOQ 产品基于历史资料统计各量级降水预报表现最佳的集合百分位产品融合而成, 是当前业务预报常用的集合统计量产品之一; 在本次检验中, OPTI\_PM 产品计算集合平均场和匹配场的优选成员数均为 11 个, 而 OPTI\_FM 产品计算集合平均场和匹配场的优选成员数分别为 11 和 3 个。

台风苏迪罗暴雨过程分为三个阶段: (1) 登陆初期台风本体降水(8—9 日); (2) 登陆后台风减弱强降水分散(9—10 日); (3) 伴随中纬度高空槽东移与南下冷空气结合降水加强(10—11 日)。表 1 分别给出了台风苏迪罗暴雨过程三个验证时段主观定量降水预报(QPF)、EC 细网格模式、EOQ、OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的暴雨和大暴雨 TS 和 Bias 评分。结果显示, 台风登陆第一和第三天, 预报员以及 EC 细网格模式、EOQ 等客观降水产品均有较好的表现; 台风登陆第二天, 由于台风系统减弱, 强降水分散, 预报员和客观产品的评分均有明显的下降; 对于上述三个阶段的降水预报, 成员优选产品的 TS 评

表 1 主观定量降水预报(QPF)、EC 细网格模式、最优百分位(EOQ)、OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品  
8 月 9 日、10 日和 11 日 08 时 24 h 累积降水暴雨和大暴雨量级 TS 评分和 Bias 评分

时间/BT	降水量级	TS(Bias)				
		QPF	EC	EOQ	OPTI_PM	OPTI_FM
9 日 08 时	暴雨	0.43 (1.25)	0.45 (1.05)	0.45 (1.20)	0.49 (0.96)	0.46 (1.06)
	大暴雨	0.47 (1.90)	0.54 (1.48)	0.54 (1.66)	0.59 (1.19)	0.55 (1.38)
10 日 08 时	暴雨	0.23 (1.84)	0.22 (1.30)	0.25 (2.02)	0.23 (1.03)	0.22 (1.48)
	大暴雨	0.20 (4.63)	0.07 (0.27)	0.16 (1.64)	0.16 (0.31)	0.18 (0.63)
11 日 08 时	暴雨	0.52 (1.09)	0.52 (0.97)	0.36 (1.82)	0.52 (1.01)	0.48 (1.19)
	大暴雨	0.49 (1.17)	0.33 (0.46)	0.34 (2.29)	0.53 (0.69)	0.56 (1.04)

分总体高于 EC 细网格、EOQ 产品及预报员主观预报,其中在第三天 OPTI\_PM 产品的暴雨和大暴雨 TS 评分表现更为显著。比较 OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品,对于本次暴雨过程 36 h 时效预报,OPTI\_PM 产品表现要略好于 OPTI\_FM 产品。

图 6 给出了台风苏迪罗登陆第一天 24 h 累积降水实况(9 日 08 时)以及 EC 细网格模式、EOQ 和 OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的降水预报分布。在图 6a 中,EC 细网格模式对暴雨雨带位置总体把握较好,暴雨和大暴雨 TS(Bias)评分分别达到 0.45 (1.05)和 0.54(1.48),但对大暴雨降水落区预报较

实况略为偏西;在图 6c 中,OPTI\_PM 产品的暴雨和大暴雨落区较 EC 细网格模式略微向东调整,其暴雨和大暴雨 TS(Bias)评分分别提高到 0.49 (0.96)和 0.59(1.19)。EOQ 和 OPTI\_FM 产品较上述两者的暴雨和大暴雨落区范围较大,空报率有所增加;比较 EOQ 和 OPTI\_FM 产品,OPTI\_FM 产品暴雨和大暴雨落区范围更接近实况,空报率相对较低。此外,对于浙江东南部出现的大暴雨量级降水,EC 细网格和 OPTI\_PM 产品预报存在一定低估,而 OPTI\_FM 和 EOQ 产品有所体现。

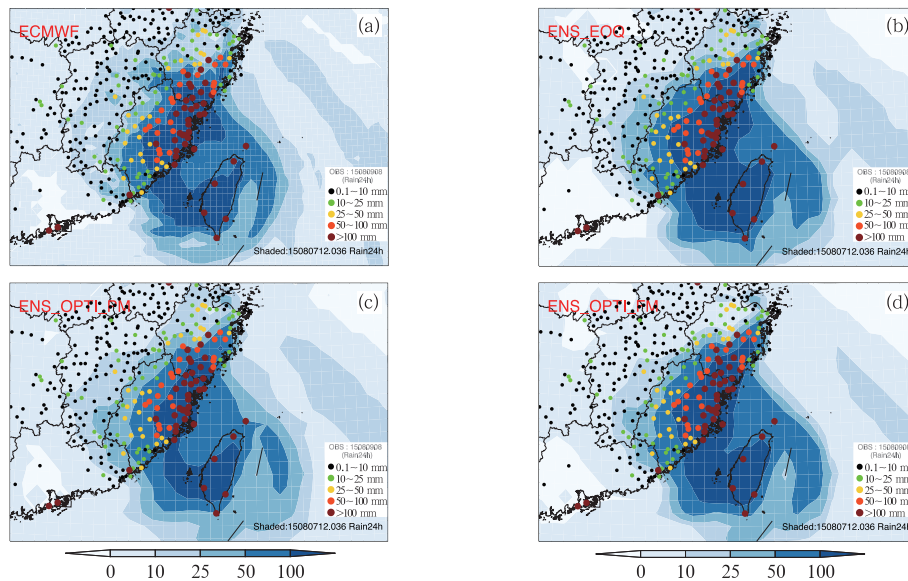


图 6 2015 年 8 月 9 日 08 时 24 h 累积降水实况以及 EC 细网格模式 36 h 时效预报(a)、EOQ(b)、OPTI\_PM(c)、OPTI\_FM(d)产品(阴影,单位:mm)

Fig. 6 Observation data of 24 h accumulated precipitation and EC 36 h deterministic precipitation forecast (a), EOQ (b), OPTI\_PM (c), OPTI\_FM (d) products (shaded, unit: mm) at 08:00 BT 9 August 2015

图 7 给出了台风苏迪罗登陆第三天 24 h 累积降水实况(11 日 08 时)以及 EC 细网格模式、EOQ 和成员优选产品的降水预报分布。在图 7a 中,EC 细网格模式对暴雨雨带位置总体把握较好,但对大暴雨的范围把握不足。具体地,EC 细网格模式大暴雨降水落区北边界与实况一致,南边界较实况明显偏北,漏报一定数量的大暴雨站点。从图 7b 中看出,EOQ 产品的大暴雨落区较 EC 细网格模式明显扩大,几乎包括所有的大暴雨站点,但不足之处是较多站点出现空报。在图 7c 和 7d 中,成员优选产品的大暴雨落区较 EC 细网格模式明显南扩,同时空

报站点并没有明显增加,可为预报员订正 EC 细网格模式大暴雨落区提供有价值的参考。对于台风环流南侧低空急流带中分散的暴雨站点,EOQ 和成员优选产品也均有一定程度的体现。通过进一步检验所有成员的降水评分,结果显示,优选出的 11 个成员中有 7 个成员评分位于所有成员评分的前 25 位,其中 4 个成员位于评分的前 10 位(图略)。

此外,比较 OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品,OPTI\_FM 产品的大暴雨落区范围较大,在江苏北部出现一定空报,但较好把握江苏西部的大暴雨站点,而 OPTI\_PM 在该区域出现漏报。总体上,对于该降

水个例,OPTI\_FM 产品对大暴雨降水把握较好,而 OPTI\_PM 产品对暴雨降水把握较好。

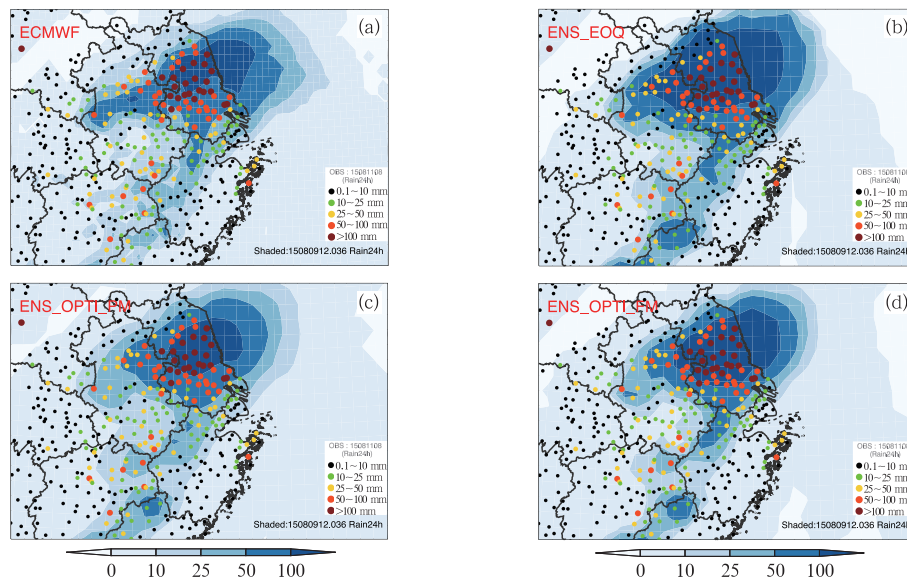


图 7 同图 6,但为 2015 年 8 月 11 日 08 时  
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 08:00 BT 11 August 2015

### 4.2 台风灿鸿暴雨过程

受台风灿鸿其影响,华东沿海地区出现了较强的风雨天气其影响时段相对台风苏迪罗较短。针对台风灿鸿暴雨过程,本文选取了 7 月 11 日 20 时 24 h 累积降水为对象,分别检验 24 h 时效的预报员定量降水预报及 08 时起报的 36、60 和 84 h 时效 EC 细网格模式、EOQ 和成员优选产品。需要指出,对于 36 h 时效预报,OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品计算集合平均场和匹配场的优选成员数与 4.1 节相同;对 60 h(84 h)时效预报,OPTI\_PM 产品为计算集合平均场和匹配场的优选成员数分别为 19(33)和 21(21)个,而 OPTI\_FM 产品为计算集合平均场和匹配场的优选成员数分别为 13(39)个和 7(5)个。

结果显示(表 2),对 36 和 84 h 时效预报,成员优选产品的 TS 评分总体高于 EC 细网格模式和 EOQ 产品,其中,36 h 时效预报,OPTI\_PM 产品的大暴雨评分要明显高于 EC 细网格模式和 EOQ 产品,84 h 时效预报,OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的暴雨和大暴雨评分均要高于上述两者;对 60 h 时效预报,成员优选产品的评分要略低于 EC 细网格模式,但仍要高于 EOQ 产品的评分。预报员定量降水预报(QPF)高估了台风降水的强度,对 EC 细网格模式预报订正出现负技巧。此外,比较 OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品,36 h 时效预报,OPTI\_PM 产品表现优于 OPTI\_FM 产品;60 h 时效预报,OPTI\_FM 产品评分要略好于 OPTI\_PM 产品;84 h 时效预报,两者 TS 评分相当,但 OPTI\_FM 产品的

表 2 同表 1,但为 7 月 11 日 20 时 36 h、60 h 和 84 h 时效预报 TS 评分和 Bias 评分

Table 2 Same as Table 1, but for 36 h, 60 h and 84 h forecast TS and Bias scores at 20:00 BT 11 July, respectively

预报时效	降水量级	TS(Bias)				
		QPF	EC	EOQ	OPTI_PM	OPTI_FM
36 h	暴雨	0.46 (1.75)	0.53 (1.43)	0.43 (1.86)	0.49 (1.33)	0.47 (1.48)
	大暴雨	0.41 (2.25)	0.42 (1.75)	0.25 (4.00)	0.54 (1.53)	0.39 (2.35)
60 h	暴雨	0.39 (2.10)	0.44 (1.82)	0.33 (2.73)	0.36 (1.87)	0.41 (2.00)
	大暴雨	0.27 (3.13)	0.26 (2.69)	0.20 (5.06)	0.24 (2.65)	0.23 (4.12)
84 h	暴雨	0.25 (1.69)	0.23 (1.76)	0.24 (3.27)	0.33 (2.19)	0.32 (2.31)
	大暴雨	0.08 (2.38)	0.08 (2.25)	0.15 (6.63)	0.19 (3.12)	0.19 (4.53)



空报率偏高。

图 8 台风灿鸿登陆当天 24 h 累计降水实况(11 日 20 时)以及 EC 细网格模式、EOQ 和成员优选产品 84 h 时效降水预报分布。在图 8a 中,EC 细网格模式的暴雨和大暴雨落区较实况显著偏南,从 EC 细网格模式 7 月 8 日 08 时起报的路径预报分析,登陆点位于浙江南部,距离实况登陆点浙江舟山有较大的偏差。从图 8b 中看出,EOQ 产品的暴雨和大暴雨落区较 EC 细网格产品明显扩大,抓住了浙江中北部的一些暴雨和大暴雨站点,但在福建北部和浙江南部出现较大范围空报。这也说明在 51 个集合成员中,有部分成员预报的台风登陆点较 EC 细网格产品偏北。在图 8c 中,OPTI\_PM 产品的暴雨和大暴雨落区范围与 EC 细网格模式是大致相当的,但落区的位置出现一定程度的北移,这样不仅抓住浙江东北部更多暴雨和大暴雨站点,而且减少福建北部和浙江南部暴雨和大暴雨的空报范围。在图 8d 中,OPTI\_FM 产品较 EOQ 产品的空报范围明显减小,而且其暴雨和大暴雨的北边界较 OPTI\_PM 产品更偏北,在浙江南部和福建北部,其暴雨和大暴雨的空报范围仍较大。不难看出,成员优选产品为预报员订正 EC 细网格模式较长时效台风降水预报可提供有用的信息,以上结果也说明对台风路径的实时订正对台风降水预报的改进有重要的作用。

图 9 给出了起始于 8 月 7 日 20 时和 7 月 8 日 08 时 EC 细网格模式和优选成员的路径预报。对于台风苏迪罗个例(图 9a),从模式初始时刻后 6 h 看出,EC 细网格模式预报台风中心位置较实况是偏西的,即高估了台风的移动速度,这与 4.1 节中的检验分析基本一致(图 6a),EC 细网格模式的暴雨和大暴雨降水落区预报较实况偏西的,而 OPTI\_PM 产品的大暴雨落区较 EC 模式略偏东,可为预报员订正 EC 细网格降水预报提供帮助。对于台风灿鸿个例,初始时刻 6 h 后实况台风中心出现在多数成员预报的北侧,据此优选出路径偏差较小的集合成员,可预计其路径预报应出现在偏北的位置。结果也显示,多数优选成员的路径预报分布在 EC 细网格模式路径预报的北侧一边,登陆点大致在浙江中北部一带,这也合理说明成员优选产品暴雨和大暴雨落区较 EC 细网格模式预报更为偏北。此外,优选成员中有较少成员预报台风灿鸿登陆点在浙江南部附近,这说明随着预报时效增加,初始阶段路径偏差较小的成员在验证时刻路径偏离增大的概率也在增加,这些预报偏差较大的成员在一定程度上会抑制成员优选产品的改进程度。因此,上述结果也可解释成员优选产品在中期时效预报中改进效果不明显的现象。

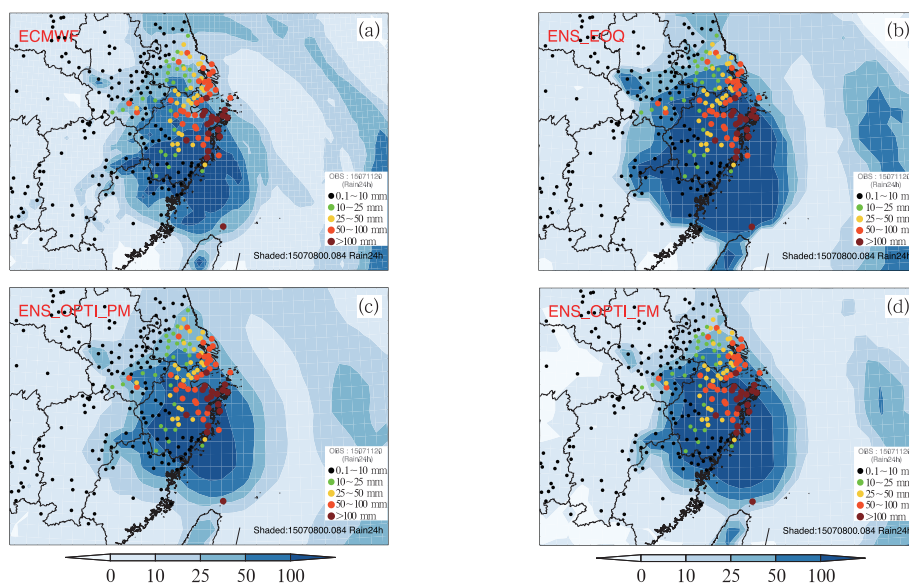


图 8 同图 6, 但为 2015 年 7 月 11 日 20 时 24 h 累积降水和 84 h 时效预报  
 Fig. 8 Same as Fig. 6, but for observation data of 24 h accumulated precipitation  
 at 20:00 BT 11 July 2015 and 84 h deterministic precipitation forecast

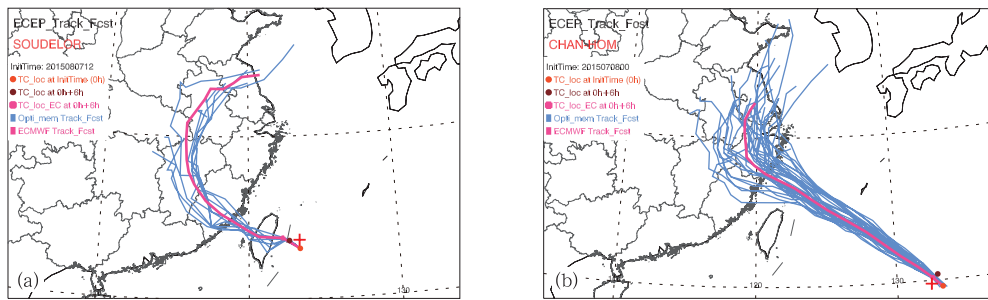


图 9 初始时刻(0 h, 红色圆点)、初始时刻后 6 h(0 h + 6 h, 棕色圆点) 台风中心位置以及起始于 2015 年 8 月 7 日 20 时(a)和 7 月 8 日 08 时(b)的 EC 细网格模式 (粉线; 粉色“+”: 初始时刻后 6 h EC 细网格模式台风中心位置预报)和优选成员的台风路径预报(蓝线)

Fig. 9 The observed typhoon center locations at initial time (0 h, red dot) and 6 h later (0 h + 6 h, brown dot) and the typhoon track forecasts of ECMWF (pink solid line; pink “+” indicates typhoon center location forecast for ECMWF at 0 h + 6 h) and selected ensemble members (blue line) initiated at 20:00 BT 7 August (a) and 08:00 BT 8 July (b) 2015

### 5 成员优选产品性能评估

在台风降水业务预报过程中,由于预报员分析和预报时间十分有限,主要业务模式精细化预报和常用客观降水产品对预报员确定并制作台风暴雨的落区和降水极值等主观预报产品有重要的影响。通过上述检验结果和个例分析,不难发现,基于实时台风中心定位的成员优选方法可以有效改善传统的集合统计量降水产品。因此,相比 EC 细网格模式和常用客观降水产品,如 EOQ、Ingredient method (IM)、多模式集成 (Multiple Model Integration, MMI)、南京大学频率匹配 (NJU Frequency Matching) 产品等,成员优选产品的预报性能是预报员关心的问题。需要指出,为更加有效评估成员优选产品在台风降水预报中的参考价值,本节增加 IM、

MMI 和 NJU 频率匹配产品参与比较。具体地,IM 产品也称配料法产品,基于暴雨等强对流天气物理机制认识基础上,通过定量计算或定性分析对暴雨发生发展起重要作用的基本物理量的搭配方式,预测是否产生暴雨; MMI 产品,以 T639、EC、JMA、NCEP 业务模式产品为基础,以相似离度、逐级归并法等方法为技术手段,形成的 24 h 定量降水的动态权重的集成预报产品; NJU 频率匹配产品,其原理是历史观测资料,假设模式降水预报频率与观测降水频率一致,通过两者频率匹配降水预报订正值,得出订正后的降水客观产品。

图 10 给出了 2015 年登陆台风过程 EC 细网格模式、QPF、EOQ、IM、MMI、NJU 频率匹配以及 OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的大暴雨和暴雨评分。对于台风暴雨过程中大暴雨量级降水预报, OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的评分要高于 EC 细

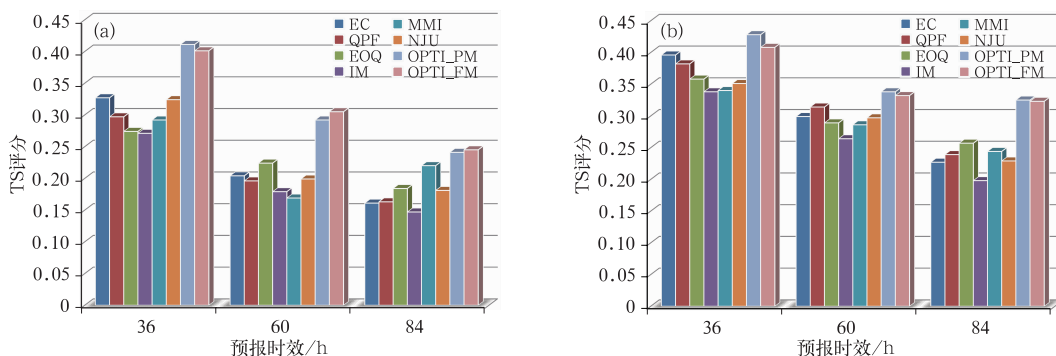


图 10 2015 年登陆台风暴雨过程 EC 细网格模式、QPF、EOQ、IM、MMI、NJU、OPTI\_PM 和 OPTI\_FM 产品的大暴雨(a)和暴雨(b)量级降水 TS 评分

Fig. 10 The extra torrential (a) and torrential (b) rain TS for EC, QPF, EOQ, IM, MMI, NJU, OPTI\_PM and OPTI\_FM products during the rainstorm processes of landed typhoon in 2015

网格模式和其他客观降水产品,其中 36 h 时效预报,OPTL\_PM 产品的评分要高于 OPTL\_FM 产品,60 和 84 h 时效预报,OPTL\_FM 产品的评分要略高于 OPTL\_PM 产品。对于暴雨量级降水预报,成员优选产品的评分整体高于 EC 细网格模式和其他客观产品,但改进程度较大暴雨预报有所降低。此外,相比 QPF 产品,成员优选产品的大暴雨和暴雨短期时效预报均有所提高。

## 6 结 论

本文以 2013—2015 年登陆我国的主要台风暴雨过程为研究对象,基于 EC 降水和台风路径集合预报以及中央气象台实时台风业务中心定位资料,提出一种针对 EC 集合预报的台风降水实时订正技术(简称集合成员优选技术),设计该技术应用的具体计算方案,考察研究该技术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,成员优选技术对改进传统集合统计量产品有明显的帮助;在大暴雨和暴雨预报中,成员优选产品较 EC 细网格模式及其他常用客观降水产品有一定的优势,对预报员预报具有一定的参考价值;成员优选技术对短期时效预报的改进大于中期时效预报,对大暴雨预报的改进大于暴雨和大雨预报。

(2)基于区分计算降水分布(集合平均场)和匹配场的优选成员数的方案,进一步提升集合统计量产品的评分。研究表明,当统计量产品的评分达到最优时,其计算集合平均场和匹配场的优选成员数并不一致,且该最佳成员数配置随预报时效而变化。结果显示,计算集合平均场和匹配场优选成员数为 10~15 个的 PM 产品在 36 h 时效预报中表现最佳,在 60 和 84 h 时效预报中,成员优选后的 FM 产品评分要高于 PM 产品,但其预报空报率偏高,因此在参考使用过程中,需综合考虑成员优选后的 FM 和 PM 产品对降水量级的把握。

(3)通过分析 PM 和 FUSE 产品各自的优势,综合两种产品的计算原理,将 FUSE 产品与集合平均场再次匹配,得出的 FM 产品,经检验统计,其 TS

评分较 FUSE 产品有一定的提高,且空报率有显著下降。

另一方面,在成员优选产品业务应用方案中,相比计算集合平均场的优选成员数,PM 产品的 TS 评分对计算匹配场的优选成员数并不敏感,确定成员优选方案的 PM 产品的预报表现可能存在一定的波动性。因此,考察匹配场最优成员数的影响因子,如台风强度等级,确定出不同强度的登陆台风暴雨过程所对应的成员优选方案,对进一步提高成员优选产品的稳定性有一定的帮助。此外,借鉴其他客观产品(如最优百分位和频率匹配产品)的设计原理来完善成员优选产品的计算方案也是今后研究的重要方面。

## 参考文献

- 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. 暴雨灾害,34(1):64-73.
- 狄靖月,赵琳娜,张国平,等. 2014. 降水集合预报集成方法研究. 气象,39(6):691-698.
- 董全,金荣花,代刊,等. 2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析. 气象,42(9):1146-1153.
- 杜钧,李俊. 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展,4(5):6-20.
- 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. 气象,41(6):674-684.
- 李勇. 2016. 2011 年长江中下游梅雨期强降水延伸期集合预报性能初探. 气象,42(9):1114-1123.
- 刘琳,陈静,程龙,等. 2013. 基于集合预报的中国极端强降水预报方法研究. 气象学报,71(5):853-866.
- 彭相瑜,代刊,金荣花,等. 2014. 欧洲中心集合预报在中国区域中期时效离散度预报技巧关系分析. 气象,40(7):777-786.
- 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. 热带气象学报,30(5):905-910.
- 吴政谦,徐海明,王东海,等. 2012. 中尺度多模式超级集合预报对 2010 年 6 月 19—20 日中国南方大暴雨过程的分析. 热带气象学报,28(5):653-663.
- 张涵斌,陈静,智协飞,等. 2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究. 气象,40(9):1076-1087.
- 赵琳娜,刘琳,刘莹,等. 2015. 观测降水概率不确定性对集合预报概率 Brier 技巧评分结果的分析. 气象,41(6):685-694.
- 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. 暴雨灾害,34(2):97-104.