

张华龙,程正泉,肖柳斯,等,2022.集合百分位融合法在广东台风降水预报中的改进[J].气象,48(1):84-95. Zhang H L, Cheng Z Q, Xiao L S, et al, 2022. Improvement of the optimal percentile fusion method based on ensemble forecast of typhoon rainfall in Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 48(1):84-95(in Chinese).

集合百分位融合法在广东台风降水预报中的改进^{*}

张华龙¹ 程正泉¹ 肖柳斯² 吴乃庚³ 罗 聪¹

1 广东省气象台,广州 510640

2 广州市气象台,广州 511430

3 广东省生态气象中心,广州 510640

提 要: 基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报的客观检验结果,构建了针对广东台风降水的最佳百分位融合产品,检验表明强降水风险评分(TS)较集合平均产品提升显著,预报时效越长,提升幅度越大,但预报偏差(Bias)与虚警率(FAR)也相应增大。最佳百分位融合产品的强降水预报范围偏大与台风路径预报的发散度有较大关联,因融合产品在较大降水量级采用高百分位进行映射,强降水的融合结果与各成员强降水落区的并集接近,台风路径越发散,各成员强降水落区的空间位置通常也更发散,造成融合产品预报的强降水落区范围偏大。为克服这一缺陷,引入集合预报对某一降水阈值的概率预报指标,通过该指标判识可能存在明显空报的强降水预报,从而改进最佳百分位融合产品,在测试期,改进后的融合产品暴雨 TS 在维持的情况下,Bias 从 1.27 下降至 1.03,FAR 从 0.51 下降至 0.43;预报时效越长,融合产品 Bias 的改进效果越显著,TS 的提升幅度也越大。上述改进可为业务中提供强降水范围更合适、落区更准确的网格定量降水客观产品。

关键词: 集合预报释用,最佳百分位融合,台风降水,改进

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.061701

Improvement of the Optimal Percentile Fusion Method Based on Ensemble Forecast of Typhoon Rainfall in Guangdong Province

ZHANG Hualong¹ CHENG Zhengquan¹ XIAO Liusi² WU Naigeng³ LUO Cong¹

1 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510640

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

3 Guangdong Ecological Meteorology Center, Guangzhou 510640

Abstract: Based on ECMWF ensemble forecast, the optimal percentile fusion product of typhoon rainfall in Guangdong Province is developed by using customized fusion parameters. Verification indicates that threat score (TS) of severe precipitation is significantly improved than the ensemble average product. The longer the forecast lead time, the greater the increment, but Bias and false alarm ratio (FAR) also become greater accordingly. The over-estimation of severe precipitation forecast is related to the divergence of typhoon path forecast. Since the fusion product uses high percentile field for mapping in large rainfall grades, the fusion result of severe precipitation is close to the union of severe rainfall locations of each member. When the typhoon paths are more dispersed, the spatial location of the severe precipitation area of each member

^{*} 广东省科技计划项目(2018B020208004)、广东省气象局科技创新团队(GRMCTD202102、GRMCTD202004)、广东省重点领域研发计划项目(2019B111101002)、中国气象局气象预报业务关键技术发展专项[YBGJXM(2020)5A-04]和广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2018Z05)共同资助

2020 年 11 月 10 日收稿; 2021 年 10 月 8 日收修定稿

第一作者:张华龙,主要从事短期与灾害性天气预报方法研究. E-mail: zhlchris@126.com

通讯作者:程正泉,主要从事台风海洋预报与研究. E-mail: chengzq1975@126.com

is generally more divergent, resulting in the large range error of the severe rainfall area predicted by the fusion product. In order to solve this problem, a forecast index describing the probability of forecasting a certain precipitation threshold is introduced, which can effectively identify the heavy rainfall forecast samples with large false alarms but few hit alarms. Using the index, we are likely able to improve the optimal percentile fusion product. Under the condition of maintaining TS, the improved fusion products have Bias decreasing from 1.27 to 1.03 and FAR from 0.51 to 0.43 during the test period. Meanwhile, the longer the forecast time, the greater the improvement effect of Bias and TS of the fusion products. Therefore, the revised products can provide grid quantitative precipitation forecast with more appropriate severe precipitation scope and more accurate rainfall location in forecasting operation.

Key words: ensemble forecast interpretation, optimal percentile fusion, typhoon rainfall, improvement

引 言

广东省拥有漫长的海岸线,是我国受台风影响最严重的省份之一。登陆台风会引起沿海地区的强降水,造成山洪爆发或诱发地质灾害。广东地区的极端降水记录与登陆台风密切相关(江漫和漆梁波,2016;夏侯杰等,2017)。过去几十年,在台风路径预报取得了巨大进步的背景下,台风降水预报能力的进步仍十分有限(Leroux et al,2018)。影响台风降水的因子较多(陈联寿等,2017;任福民和杨慧,2019),对台风路径、强度、涡旋结构、台风环流与周围环境大气相互作用和下垫面强迫等上述任一因子的预报不足均会直接影响台风降水预报能力。目前数值预报模式对台风降水预报能力仍十分有限(任福民和向纯怡,2017),对于登陆台风的强降水预报,24 h 降水量大于 250 mm 的公平风险评分(equitable threat score, ETS)不足 0.1(Yu et al,2020),长时效的预报水平更低。模式对台风降水预报的误差主要来源于台风降水形态预报的差异(Chen et al,2018)与对极端降水的低估(Yu et al,2020;王新敏和栗晗,2020),即表现为对台风降水空间分布和局地降水强度预报的不足,难以满足目前网格预报业务精准化的需求。

近年来,应用集合预报对台风降水预报方法开展的研究逐渐变得活跃起来(Wu et al,2018;Teng et al,2020)。利用集合预报进行降水后处理有较大优势:一方面,离散的集合成员有更大概率包含极端天气信息,是目前解决极端天气预报问题的一个重要工具(高丽等,2019);另一方面,多个集合预报成员的共有信息是集合系统中可预报性较高的成分,因此针对性的后处理方法具有比单个成员更高的预

报技巧(杜钧和李俊,2014)。目前已有数十种针对降水集合预报的后处理方法(代刊等,2018;苏翔和袁慧玲,2020),且相关方法在国家/省级精细化网格预报业务中发挥重要的支撑作用(湛芸等,2021;罗聪等,2021)。集合最优百分位值融合法(代刊等,2016)是国家气象中心发展的一种降水集合预报客观订正技术,主要思路是对不同的降水阈值,以评分最优的集合百分位映射。2013—2015 年夏季降水的风险评分(threat score, TS)检验结果表明,最优百分位融合产品与预报员主观预报相当(代刊等,2016),由于该方法的百分位值选取可按照不同季节、区域、预报时效、历史资料时段而变化,因此采用针对特定区域和季节的百分位值参数会获得更优效果(陈圣劼等,2019)。该方法以检验评分为依据,侧重于对降水量级的调整,因此研究人员也尝试将该方法与其他方法融合(陈博宇等,2015;2016),以集成不同方法的优势。

广东省于 2013 年开展基于集合预报的研究与业务应用,张华龙等(2017)针对不同的季节集合预报百分位产品进行检验。随后基于检验结果,曾沁和胡胜(2019)研发了本地化的最优百分位融合产品。通过检验发现,对特定类型降水专门设计融合参数将使产品具有更优表现:对于强降水(大雨以上)预报,针对台风降水的百分位融合产品较针对各季节的百分位融合产品具有更高的 TS 评分。降水评分的季节性差异原因复杂,但台风降水较高的 TS 与数值模式对台风系统较好的预报能力密切相关。台风降水区域和台风路径密切相关,降水强度通常以台风为中心呈轴对称分布(Yu et al,2017),因此较好的台风路径预报能力将有助于降水预报技巧提升。在台风临近登陆时,其路径预报不确定性较小,采用最优百分位融合法具有较其他类型降水更显著

的订正效果,这体现了针对台风降水开发最优百分位产品的必要性。

然而,台风的路径预报误差随预报时效增长而不断增大,路径预报的不确定性将在多大程度影响融合产品的预报能力?针对这一问题的检验评估有助于在业务中更好理解和使用该产品。另一方面,TS评分是选取百分位的唯一依据,为获取小概率事件的高评分,融合产品倾向于使用较高的百分位映射大量级的降水预报,使融合产品较其他释用产品具有更高的偏差(陈圣劼等,2019)和更多的强降水空报,过大范围的强降水落区预报将不利于采取精准有效的防灾措施。为克服这一缺陷,本文在分析评估台风预报不确定性对融合产品影响的基础上,基于集合成员不确定性信息引入一个定量指标,用于改进融合方法,使融合产品在维持强降水高TS评分的同时,显著降低正偏差与空报率,为业务制作台风降水的精细化预报提供更有力的支撑。

1 数据和方法

1.1 研究数据

本文利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报系统的降水预报进行释用。ECMWF集合预报系统包含1个控制预报和50个扰动成员,模式水平分辨率约为16 km,输出产品水平分辨率为 0.5° ,时间分辨率为6 h,集合预报系统的具体参数及详细情况可参见ECMWF(2018)官方技术文档(<https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation>)。Huang and Luo(2017)对多个全球集合预报模式在华前汛期的降水预报表现进行评估,认为ECMWF集合预报在所有预报产品中具有最优的预报技巧。ECMWF集合预报各成员台风路径预报资料来自全球交换式大集合数据集(TIGGE)的热带气旋交换数据,该资料包含了每个成员预报的TC中心位置、最低海平面气压以及中心附近最大风速。

融合产品/改进方法的训练期和测试期分别为2013—2017年、2018—2019年所有登陆或严重影响广东的台风对应的降水日。台风降水日的选取标准为:对于直接登陆或者中心移入广东省预报责任海

区的台风,从进入责任海区开始到台风离开责任海区、停止编号或登陆后离开广东省陆地边界所对应覆盖时间段作为台风影响时段;以每日20时作为降水日界线,台风影响时段的首尾两端不足一日的也归为台风降水日。经上述处理,2013—2019年台风降水日共有95 d。

模式释用与检验使用的地面资料为广东区域范围内地面气象站(包含基本站和自动站)的日雨量数据,为保证不同降水日的实况数据稳定性,仅选用在所有台风降水日数据均正常的站点资料,站点数目为2031个。

1.2 集合释用与检验指标

最优百分位融合法是目前在国家气象中心运行的集成方法(代刊等,2016;2018),思路是将不同预报百分位在不同降水等级预报优势集成起来,采取以下处理方式:

$$\text{若 } P_{X_k}(M_i) \geq T_k, \text{ 则 } F_i = P_{X_k}(M_i) \\ k \in (1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (1)$$

式中: F_i 为不同格点*i*的最优百分位预报值, M_i 为格点*i*的集合成员预报, $P_{X_k}(\cdot)$ 表示百分位 X_k 的计算函数, T_k 为预先设定的降水阈值, X_k 则为 T_k 对应的最优百分位。在具体融合过程中,应用基于2013—2017台风降水日检验得到的不同降水量级的最优百分位参数进行融合,并将融合产品应用于2018—2019年台风降水日进行测试评估。

评价产品性能以风险评分(TS)、偏差(Bias)、命中率(POD)、虚警率(FAR)等多个检验指标为依据(Yu et al,2020)。预报产品与站点实况的比对规则为:使用双线性插值方法,将格点预报产品插值到站点上,并利用站点日雨量实况进行比对和指标计算。

2 台风降水最优百分位融合法评估与分析

2.1 检验评估结果

最优百分位融合产品(简称融合产品,下同)实现了在不同降水量级利用不同百分位场进行映射。对于不同时效产品,各量级降水选取的最优百分位

值是不同的,需通过检验得到。另一方面,最优的百分位不一定对应最优偏差(即 Bias 接近 1),有可能是以过度空报的技巧得到较高的 TS。因此在应用融合产品前,需全面理解各百分位产品的具体表现。图 1 为不同百分位产品在不同量级降水中的 Roebber 检验图,该图能直观地展示空报率、漏报率、TS 与 Bias 多个检验指标(Roebber,2009)。可见,随着降水量级增大,各个百分位 TS 和 POD 均下降,对应最优 TS 也同步下降。最优 TS 对应的百分位在中雨以上量级均高于 50%,随着量级增大,对应最优 TS 的百分位越高。

最优 TS 分位场的降水预报能力随着预报时效增大而相应下降;但在较长预报时效,最优 TS 较

50%分位数 TS 的提升幅度更高,表明融合方法在长预报时效具有更大的应用潜力。从长时效预报(84 h 以上)的高、低百分位产品对比还可发现,较高的百分位在不同预报时效的 TS 差异较小,随着百分位值逐渐降低,TS 差异增大,这一特征在强降水预报(图 1c,1d)更为明显。若按融合法思路,分别以高、低百分位降水场作为强降水与普通降水的定量预报,则强降水预报的不确定性对检验评分影响较普通降水预报相对较小,即融合产品在长时效对强降水的预报更加稳定,也更具有应用优势。另外随着预报时效增长,最优分位场对应的暴雨和大暴雨的 Bias 有显著的增大趋势,意味着最优百分位融合产品将在较长的预报时效具有显著空报的特征。

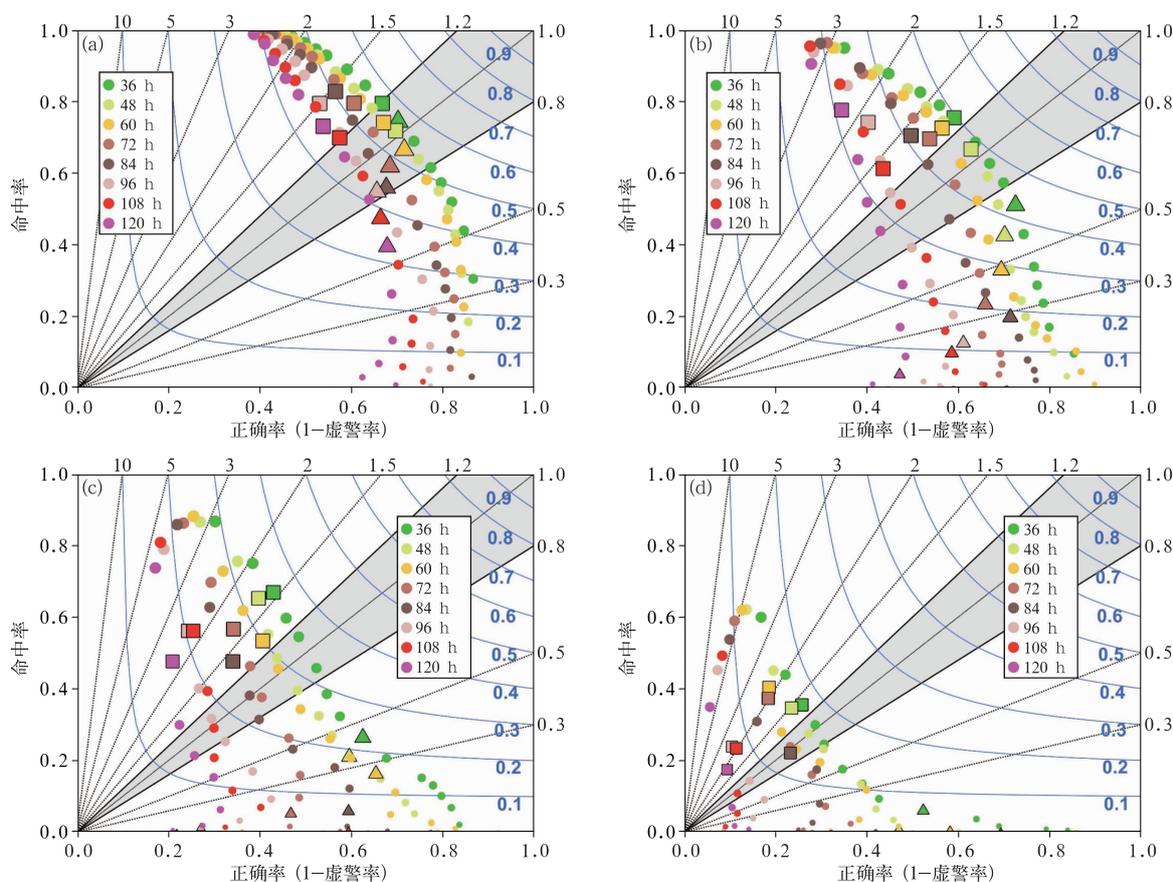


图 1 中雨(a)、大雨(b)、暴雨(c)、大暴雨(d)不同预报时效与不同百分位产品 Roebber 检验图 (标记符号从小到大大分别对应从低到高的百分位检验结果,正方形标记对应最优 TS 百分位产品,三角形符号对应 50%分位产品;黑色实线和虚线分别对应不同 Bias 等值线;阴影区为 Bias 在[0.8,1.2]范围区间;蓝色实线对应不同 TS 评分等值线)

Fig. 1 Roebber charts of percentile products at different forecast lead time for moderate rain (a), heavy rain (b), torrential rain (c) and severe torrential rain (d) (Symbols from small to large represent verification results from low to high percentiles, square markers correspond to the optimal TS percentile products, triangle symbols correspond to the median products; black solid lines and dotted lines correspond to different Bias values respectively; shaded areas correspond to the ranges of Bias within [0.8, 1.2]; solid blue lines correspond to different TS scores)

2.2 台风预报的不确定性对融合产品的影响

当模式对台风预报不确定性更大时,集合成员预报台风暴雨落区更发散,从而导致高分位数的暴雨落区过大以及 Bias 增大。以 2018 年的“艾云尼”和“山竹”两次台风过程为例,“艾云尼”是在南海中部形成的台风,生成后移动缓慢、生命史长,台风强度较弱,模式预报的不确定性大;从 ECMWF 集合预报的各成员台风路径预报(起报时为 2018 年 6 月 5 日 20 时)可见(图 2a),起报时后的 12~72 h,各成员的移向逐渐趋于发散,且各成员预报台风强度均较弱,在 6 月 7 日 14 时(预报时效 42 h),各成员预报台风为热带低压或热带风暴级别(图 2c 红色标记),较弱的台风易受周围环流与下垫面的影响,导致降水具有不对称分布特征,加之当台风移速缓慢,地形与台风环流长时间相互作用,降水分布不均匀,致使各成员降水预报具有更大不确定性。

台风山竹于 9 月 7 号在太平洋中部形成。在“山竹”生命史期间,环流形势稳定,所有成员对“山

竹”路径和强度预报均趋于一致,多数成员预报台风登陆前达到强热带风暴级别的强度(图 2d 红色标记)。由于台风强度高,结构对称,台风移动速度快,降水时段集中,因此各成员对“山竹”降水预报的落区均较为一致。

由于台风降水与台风位置具有密切关系,因此分散的台风位置预报(图 2a)使“艾云尼”各成员的强降水区也更离散,融合产品的强降水预报也具有更大范围。从图 3c 可见,100%分位降水的暴雨覆盖广东、广西大部分区域,而当百分位数下降,暴雨范围急剧缩小,以最优百分位融合产品为例,90%分位数暴雨落区(图 3b 的融合产品暴雨落区)仅分布在广东的西部,与实况暴雨落区具有位置偏差,主要是由集合各成员的路径预报偏差所致;由于暴雨落区离散,相同站点预报暴雨的成员较少,因此融合产品的暴雨区内的暴雨概率较低(10%~30%);与“艾云尼”相比,“山竹”成员预报强降水落区更集中,100%分位产品预报的暴雨落区内暴雨概率(图 3f)较高(70%~90%),各分位产品对应的暴雨落区与

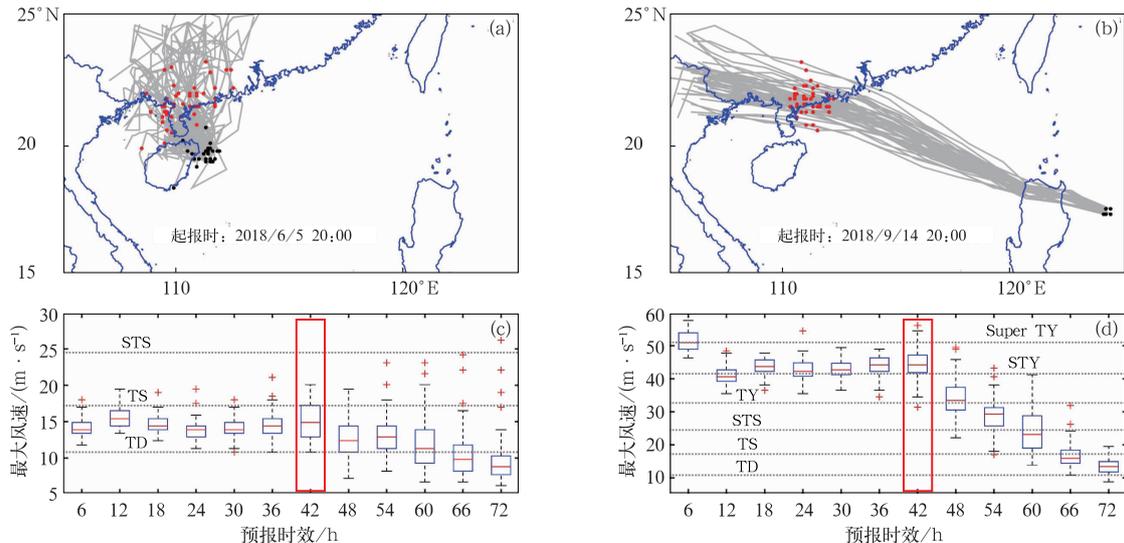


图 2 ECMWF 集合预报各成员对“艾云尼”(a,c)和“山竹”(b,d)台风路径(a,b)和强度(c,d)预报

(图 2a,2b 中黑点代表起报时各成员的台风中心位置,红点代表预报时效为 48 h 的台风中心位置,

灰线为各成员路径预报,预报时长为 72 h;图 2c,2d 箱线图对应台风中心附近最大 10 m 风速,

不同的台风强度等级以预报风速划分,红框对应集合预报对台风强度预报最强的时刻)

Fig. 2 Members of ECMWF ensemble system forecasting the typhoon tracks (a, b) and intensities (c, d) of ‘Ewiniar’ (a, c) and ‘Mangkhut’ (b, d)

(Black and red dots in Figs. 2a, 2b respectively represent the typhoon center at initial time and the forecast typhoon center at 48 h lead time of each member; gray lines are forecast path of each ensemble member, and forecast lead time is 72 h; boxplots in Figs. 2c, 2d correspond to the maximum sea surface wind speed near the typhoon center, the force of typhoons is divided by the forecasted wind speed; red marks correspond to the time when the typhoon intensity of ensemble forecast is strongest)

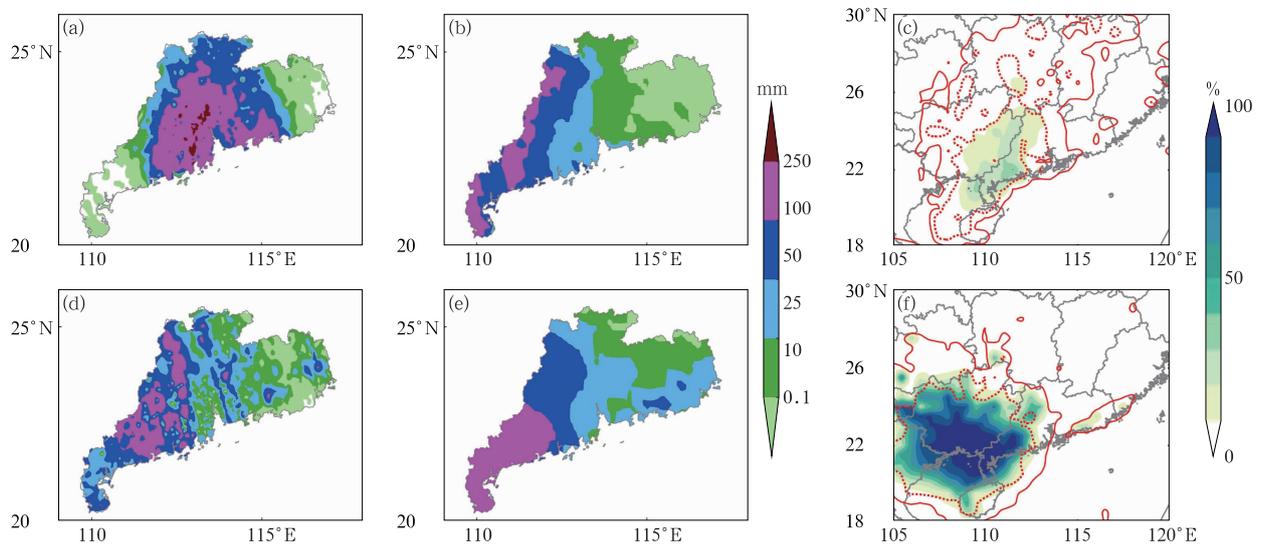


图 3 2018 年 6 月 8 日 20 时(a~c)与 9 月 17 日 20 时(d~f)实况日雨量(a,d)、最优百分位融合产品(b,e),100%分位产品(大)暴雨落区和暴雨概率(c,f) (预报时效均为 72 h;图 3c,3f 中红色实线、虚线分别对应 100%分位产品暴雨、大暴雨落区,填色对应预报暴雨成员占总成员数比例)

Fig. 3 Daily precipitation of observation (a, d), the optimal percentile fusion products (b, e), the range of severe (torrential) rain and the torrential rain probability of maximum products (c, f) at 20:00 BT 8 June (a—c) and 20:00 BT 17 September (d—f) 2018 (The forecast lead time is 72 h; solid red and dotted red lines in Figs. 3c, 3f respectively correspond to the torrential rain and the severe torrential rain area of maximum products, colored grades correspond to the proportion of members forecasting torrential rain in the total number of members)

TS 差异均较小。

上述两个台风是预报发散度差异明显的典型过程。研究表明,成员之间路径预报的一致性与暴雨预报技巧具有一定关系(何斌等,2020),对类似“艾云尼”的路径预报发散的台风,采用较高的百分位降水扩大暴雨预报落区,是一个提高 TS 评分的策略,但也会导致暴雨预报范围过大,空报增加,这也是融合产品在业务应用中存在的主要问题。为克服这一缺陷,需要进一步优化融合策略,使其在保留较高预报技巧的基础上,具有更合理的预报偏差。

3 最优百分位融合产品的改进

3.1 基于降水预报概率的改进方法

通过第 2 节分析可知,虽然较大的强降水落区预报可获得更高 TS,但却存在较多空报,因此从集合降水的预报不确定性信息出发,在融合产品对应的分位数达到暴雨以上时,进一步引入某一较小量级降水的预报概率(预报该量级降水的成员数占总

成员数比例)作为判别融合产品强降水预报是否存在明显空报的判据。使用某一量级的降水概率而非另一个常用的体现不确定性的指标——集合离散度(Spread)的原因为:(1)集合离散度与预报量的大小密切相关(彭相瑜等,2014),当模式预报某一区域降水量级较大时,离散度也较大,但对于强降水预报(如大雨以上预报),其可信度却是相对较小的,因此离散度体现的是降水量预报的不确定性,而非强降水事件预报的不确定性;(2)在实际试验中,该指标与强降水预报空报率密切相关,但离散度与强降水预报空报率的相关性较小(见图 5 相关分析)。因此使用该指标,而非离散度,可获得更优的改进效果。为进一步将该指标应用到客观订正中,引入以降水量级 P 的预报概率为判别依据的指标,公式如下:

$$S_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^N J_{i,j,n}}{N}$$

$$J_{i,j,n} = \begin{cases} 1 & F_{i,j,n} \geq P \\ 0 & F_{i,j,n} < P \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{i,j}$ 为 ECMWF 集合预报在格点 (i, j) 对大于

降水阈值 P 的预报概率; N 为集合成员总数; $J_{i,j,n}$ 为第 n 个成员在空间格点 (i, j) 上是否大于量级降水 P 的预报判据; $F_{i,j,n}$ 第 n 个成员在空间格点 (i, j) 上的 24 h 降水量预报。该指标在 $[0, 1]$ 范围内变化, 值越大, 对于该量级降水预报概率越高, 反之则越小。

为体现指标与强降水空报的关系, 以 $P=10$ mm 为判据, 对 2013—2017 年训练期的 100% 分位产品的暴雨预报站点, 按照 S 大小划分为 3 组数据, 具体

表 1 不同样本组分类标准

样本选取标准	样本组 1	样本组 2	样本组 3
集合 100% 分位降水量预报	≥ 50 mm	≥ 50 mm	≥ 50 mm
预报 >10 mm 的成员占总成员概率	$S \geq 0.9$	$0.6 \leq S < 0.9$	$S < 0.6$

依据指标 S 剔除某一固定阈值降水预报概率较低的样本, 可有效减少空报站点数量, 但会同时舍弃一部分暴雨命中样本, 降低命中率, 因此理想的改进方案是在降低空报率和提升命中率之间取得一个平衡。以降水量级为 10 mm 为例, 图 5a 为指标 S 在不同阈值以下, 命中站点与空报站点的数目。对于 $S \leq 0.3$ 的样本, 命中的站点数目为零, 空报站点数目为 134 个, 随着 S 逐渐增大, 空报命中比呈逐渐下降的趋势, 因此若对 S 设置固定阈值, 作为可接受的消空标准, 则阈值设置越高, 空报命中比越低, 消空代价越高。与之相对, 若尝试以离散度作为消空指标, 则无论是对于高离散度或低离散度样本, 模式预报暴雨的命中样本与空报样本数量均相当 (图 5b), 即空报命中比与离散度相关性小, 无有效

划分标准见表 1, 3 组数据的样本量分别为 10.6×10^4 、 11.3×10^4 和 1.9×10^4 。检验 3 组数据的 TS 和 FAR (图 4), 可见 S 较大的样本对应较高的暴雨预报 TS, 3 组样本对于暴雨量级预报的 TS 分别为 0.313、0.214 和 0.126。低指标样本的误差主要来自于对暴雨的过度空报, 从图 4b 可见, 对于所有降水预报量级的 FAR, 当预报降水量 ≥ 10 mm 概率逐渐减小时, 对应样本的 FAR 也逐渐增大。

改进作用。

指标 S 对应的最优的降水阈值与概率阈值应通过试验得到。图 6 为应用不同的雨量阈值, 变化不同概率阈值计算最优 Bias (Bias 最接近 1), 将该 Bias 所对应的概率阈值作为最优消空概率, 同时计算对应条件下的最优 TS 评分和 FAR。从图中可见, 在较小雨量阈值的范围内 ($0 \sim 30$ mm), 最优 TS 总体维持在较高水平; 而当雨量阈值超过 30 mm 时, TS 开始迅速下降, 主要原因为空报数量显著增多。雨量阈值在 $1 \sim 30$ mm 时, 对最优 TS 的影响不大, 并均成功地将 Bias 降至接近 1 的水平。对于不同预报时效的融合产品, 经客观检验得到的雨量阈值和最优概率阈值分别见表 2。

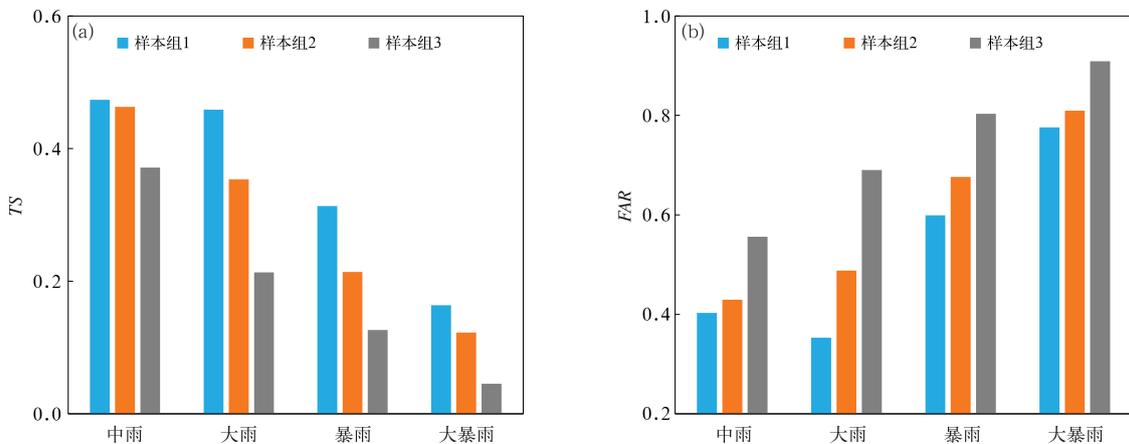


图 4 不同样本组的 TS(a)与 FAR(b)检验对比

Fig. 4 TS (a) and FAR (b) comparison of different sample groups

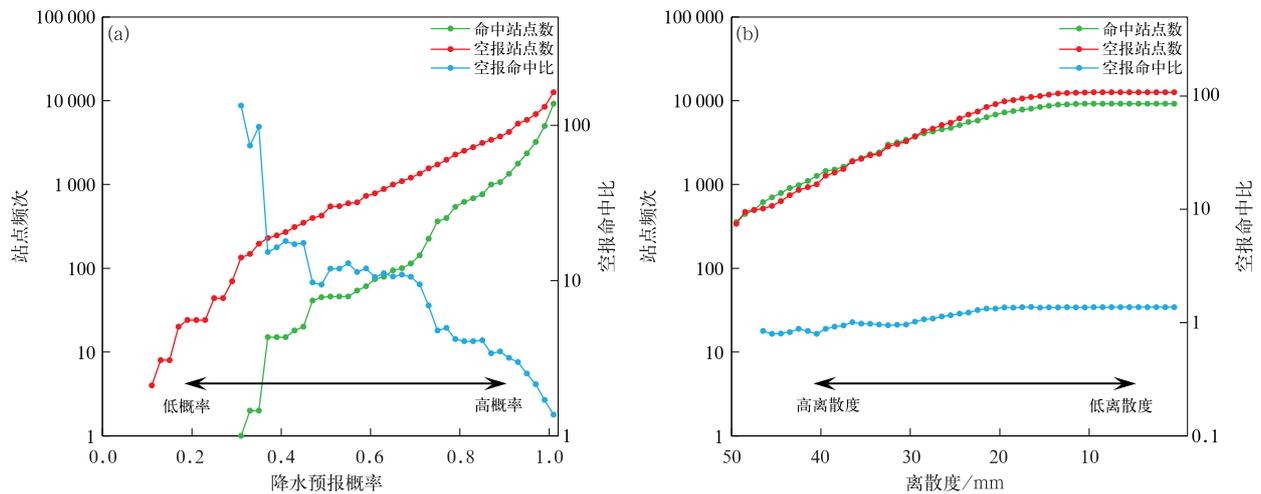


图 5 命中/空报站点数、空报命中比与降水预报概率(a)、离散度(b)关系

(纵坐标轴均使用对数坐标,图 5a 的降水阈值为 10 mm)

Fig. 5 The relationship of hit frequency, false alarm frequency and ratio of hit alarms and false alarms with index S and ensemble spread

(The y-axis is expressed in logarithmic coordinates, the precipitation threshold in Fig. 5a is 10 mm)

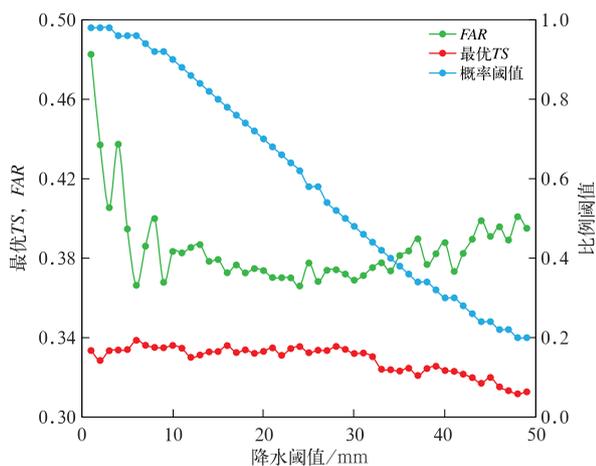


图 6 最优 Bias 条件下 FAR、TS 和对应概率阈值与降水阈值关系

(最优 Bias 条件即 Bias 最接近 1)

Fig. 6 Plots of FAR, TS and proportion thresholds corresponding to different precipitation thresholds under the optimal Bias condition

(The optimal Bias condition is that Bias is closest to 1)

表 2 不同预报时效对应 S 指标阈值

Table 2 Thresholds of index S corresponding to different forecast time

预报时效/h	48	72	96	120
雨量阈值/mm	7	10	10	21
概率阈值	0.94	0.9	0.88	0.6

在业务应用中,首先应用 ECMWF 集合预报计

算最优百分位融合产品;然后对融合产品预报的每个暴雨量级以上(≥ 50 mm)格点,按照表 2 的雨量阈值计算指标 S,若 S 小于表 2 的概率阈值,则对该格点的暴雨进行消空,替代的雨量值为在最优百分位融合过程[参考式(1)]中更低融合级别的非暴雨雨量,以 48 h 预报时效的产品为例,步骤先后顺序如下:(1)若大雨融合量级对应的 80%分位数产品雨量值 < 50 mm,即使用 80%分位数雨量进行替代;(2)若 80%分位数产品雨量值 > 50 mm,且中雨融合量级对应的 50%分位数产品雨量值 < 50 mm,使用 50%分位数进行替代;(3)若 50%分位数产品雨量值 > 50 mm,使用小雨融合量级对应的 10%分位数进行替代。

3.2 改进效果

基于固定阈值降水预报概率的改进方法能在维持较高 TS 评分基础上,有效降低融合产品过高的 Bias,改善产品过度空报的现象,对于较大量级的降水,效果更加明显。以预报时效为 48 h 的改进后融合产品(表 3)为例,改进前融合产品暴雨和大暴雨的训练期、测试期 Bias 分别为 1.50、1.27 和 2.09、1.31;改进后上述产品测试期的 Bias 分别下降至 1.06、1.03 和 1.66、0.93, FAR 也有同步的下降。TS 评分也得益于空报率的下降,改进后产品均较改进前略有提升。但对于大雨量级,该改进方案的效果较不明显,无论是训练期或测试期, FAR 降低均

不显著, TS 也没有明显变化。另外, 改进后产品 POD 也存在一定程度的下降, 以训练期暴雨为例, POD 从 0.61 降至 0.55, 测试期暴雨 POD 则从 0.59 降至 0.57。从多组预报数据(图 7)的检验可知, 损失的命中数均未导致 TS 的下降。

为检验该改进方案在长时效降水预报中的效果, 对 48、72、96 和 120 h 预报时效的最优百分位融合产品, 分别检验改进前后效果。图 7 为不同时效融合产品改进前后 TS 与 Bias 的变化, 可见随着预报时效增长, TS 提升幅度与 Bias 的下降幅度均不

表 3 训练期(2013—2017 年台风降水日)与测试期(2018—2019 年台风降水日)融合产品改进前后检验对比

Table 3 Comparison of the optimal percentile fusion products and revised fusion products in training period (typhoon rainfall days in 2013—2017) and test period (typhoon rainfall days in 2018—2019)

检验量级	样本	检验对象	Bias	TS	FAR	POD
大雨	训练期	改进前	1.20	0.47	0.41	0.71
		改进后	1.19	0.47	0.41	0.71
	测试期	改进前	2.09	0.16	0.43	0.73
		改进后	1.66	0.17	0.42	0.73
暴雨	训练期	改进前	1.50	0.32	0.60	0.61
		改进后	1.06	0.33	0.53	0.55
	测试期	改进前	1.27	0.41	0.51	0.59
		改进后	1.03	0.42	0.43	0.57
大暴雨	训练期	改进前	2.09	0.16	0.80	0.42
		改进后	1.66	0.17	0.77	0.39
	测试期	改进前	1.31	0.14	0.78	0.28
		改进后	0.93	0.16	0.73	0.28

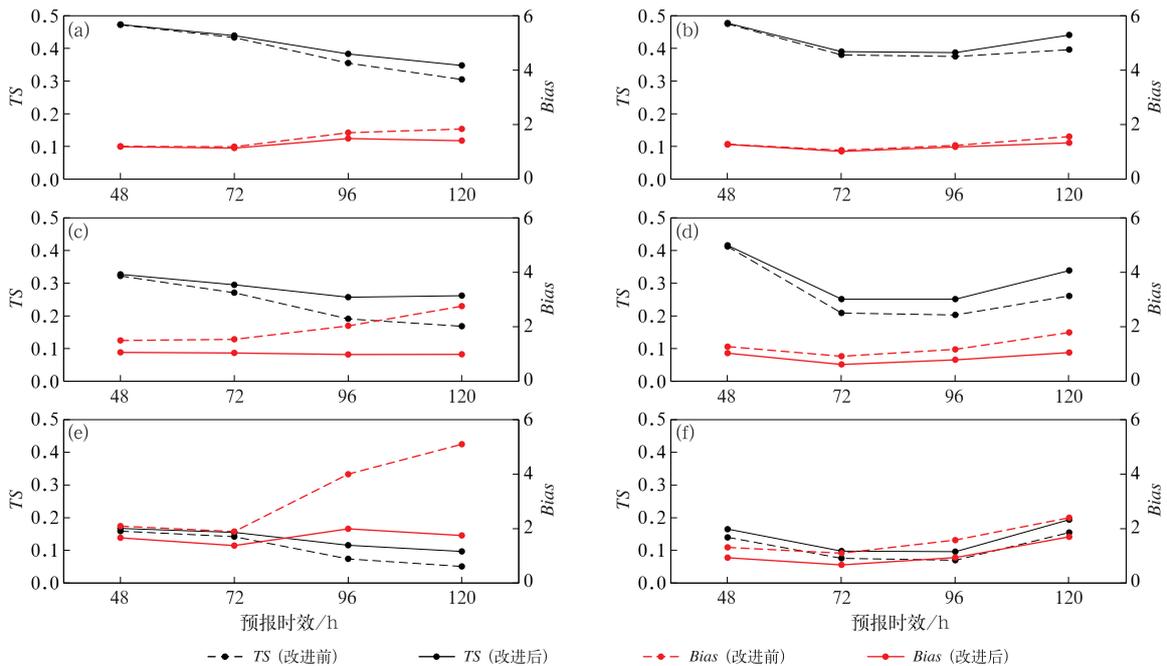


图 7 训练期(a, c, e)与测试期(b, d, f)不同预报时效融合产品改进前后大雨(a, b)、暴雨(c, d)、大暴雨(e, f)检验结果对比

Fig. 7 Comparison of the verification results of heavy rain (a, b), torrential rain (c, d) and severe torrential rain (e, f) before and after the revision by the fusion products at different forecast lead times in training period (a, c, e) and test period (b, d, f)

断增大,并且在更大的降水量级(如暴雨或大暴雨),该特征更明显。以训练期为例,预报时效为 120 h 的融合产品的暴雨 Bias 达到了 2.76,大暴雨 Bias 达 5.1;改进后 Bias 分别下降至 0.99 和 1.75,大幅减少了强降水空报,暴雨、大暴雨 TS 评分也因此分别从 0.17、0.05 提升至 0.26、0.1。在测试期,改进方案也使暴雨 TS 从 0.26 提升至 0.34,大暴雨 TS 从 0.15 提升至 0.19。

改进方案在更长时效应用效果更优的可能原因是远距离台风路径以及强降水落区预报的不确定性更大,因此融合产品的在大量级降水落区也更加偏大,这一特征在图 1 的检验结果也有所体现。在这一背景下,应用 S 指标的改进效果更优, Bias 或 TS 改进幅度均更大,可见其在远距离台风的降水预报中,具有更大的应用潜力。

在实际日降水量的后处理中,该方法也取得较好效果。从表 4 可见,2018 年台风降水日共有 13 d,其中存在明显空报($Bias > 1.5$)的有 7 d,改进后,7 个样本日的 Bias 均显著下降,同时 TS 提升明显,体现了该方法抑制空报的作用。需要注意的是,

模式和集合预报产品的降水误差均是多方面的,以“艾云尼”为例,集合预报系统对于预报时效为 72 h 的路径预报较实际路径更偏西,导致融合产品暴雨区与实况出现了位置偏移,强降水 TS 评分较低。另外在某些情况下,模式对华南的台风降水容易出现低估。上述两种情况均会导致改进方案失效。

以 6 月 6 日、8 月 11 日为例,改进后产品 TS 反而有所下降,原因均为出现明显漏报。这两个台风降水漏报日的环流形势有一定相似性,分别对应 1804 号台风艾云尼和 1816 号台风贝碧嘉;两台风中心均位于南海西北部海面,台风东侧的偏南或东南气流携带南海丰富的水汽汇入内陆,在地形和山脉作用下产生迎风坡降水增幅。在数值模式中,由于初始分析资料不够准确、模式分辨率较低或物理过程不完善等原因,会导致地形降水模拟的准确性下降(Fang et al, 2011),评估也表明 ECMWF 模式对这一类降水常出现低估(徐燚等, 2019),导致百分位融合方法得到的降水预报也存在偏低的态势。在这种情况下,使用改进方法反而进一步增加漏报,导致评分降低。

表 4 2018 年台风降水日融合产品与改进后产品逐日检验对比
Table 4 Daily verification of optimal percentile fusion products and revised fusion products in 2018

台风名称	台风降水日	Bias(50 mm)		TS(50 mm)	
		改进前	改进后	改进前	改进后
艾云尼	6 月 5 日	0.03	0.03	0.03	0.03
	6 月 6 日	0.28	0.08	0.17	0.03
	6 月 7 日	0.35	0.24	0.04	0.04
	6 月 8 日	1.01	0.88	0.64	0.65
	6 月 9 日	2.81	1.06	0.22	0.39
贝碧嘉	8 月 11 日	0.99	0.83	0.33	0.28
	8 月 12 日	1.87	1.74	0.49	0.52
	8 月 13 日	9.82	2.24	0.08	0.31
	8 月 14 日	2.88	1.85	0.20	0.26
	8 月 15 日	10.56	6.12	0.07	0.12
	8 月 16 日	1.20	1.10	0.42	0.42
山竹	9 月 16 日	1.51	1.43	0.61	0.64
	9 月 17 日	2.06	1.69	0.42	0.44

对于所有空报显著的台风降水日,该改进方法均可使融合产品的暴雨预报 Bias 下降, TS 上升。尤其是对于台风结构完整或路径预报误差较小的台风,经过改进方法进一步处理后可得到预报范围合适、空间位置较准确的暴雨落区。以 2018 年 6 月 8 日 20 时至 9 日 20 时的 24 h 改进后产品为例(图 8),台风艾云尼登陆后强度逐渐减弱,并在 6 月 9 日 06 时

停止编号。在“艾云尼”生命史最后 12 h,多数成员均预报台风及残余环流向东北方向移动,仅有少数成员预测路径偏西,因此应用改进方法,对降水预报概率较低的广东佛山、肇庆的暴雨预报进行了消空(图 8b),但较好地保留了中北部的暴雨区,与实况较为一致,改进前后 TS 分别为 0.22 与 0.39, Bias 分别为 2.81 和 1.06,体现了较好的订正效果。

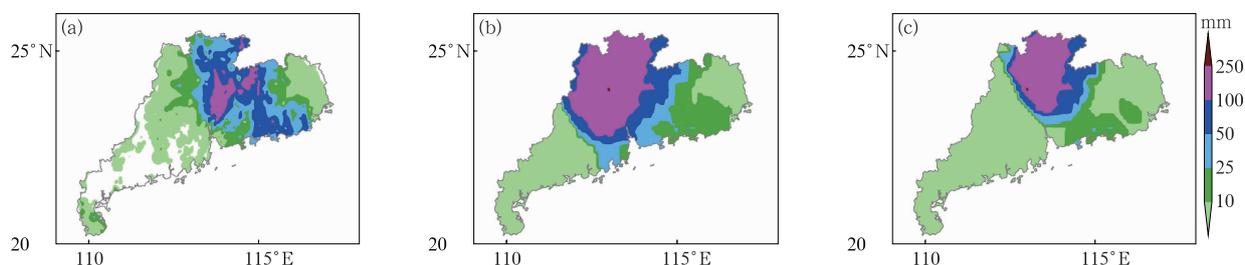


图 8 2018 年 6 月 9 日 20 时 24 h 降水量实况(a)、最优百分位融合产品(b)与改进后融合产品(c)

Fig. 8 Daily precipitation of observation (a), optimal percentile fusion products (b) and revised fusion products (c) at 20:00 BT 9 June 2018

4 结论与讨论

检验评估表明,基于集合预报的最优百分位融合产品在登陆或严重影响广东的台风造成的降水中具有更优的表现。针对广东台风降水日开发最优百分位融合产品并进行检验,结果表明,最优百分位产品与融合产品在越长的预报时效,相对于集合平均的 TS 评分提升幅度越大,表明具有越大的应用潜力;更长时效的强降水预报也较弱降水预报更加稳定,但随着预报时效增长,Bias 显著增大,空报严重,对于强降水的空报尤为明显。

融合产品对强降水过度空报特征与台风路径预报的不确定性有很大关系。当各集合成员离散度越大时,在强降水量级采用更高百分位的融合产品预报落区也更大,导致融合产品具有明显空报特征。引入某一降水阈值预报概率的指标可有效降低空报率,以该指标高低为标准区分 3 组样本,检验表明 3 组样本的暴雨 TS 和 FAR 具有较大差异。在指标较小的样本组中,空报率较高,对该组暴雨样本进行消空,损失的暴雨命中站点数量较少。应用该指标设计最优百分位法融合产品的改进方法,训练期与测试期的改进后产品强降水预报较改进前在维持较高 TS 的基础上,Bias 和 FAR 均显著下降,预报时效越长,融合产品 Bias 的改进效果越显著,TS 评分的提升幅度也越大,表明其在远距离台风降水预报具有更优的应用效果。

改进方法从集合预报的不确定性信息中提取指标,作为强降水的消空依据,当各成员的离散预报均匀分布在实况目标附近的情况下,改进方法能取得最优效果。但当集合预报存在其他系统偏差,如路径预报与实况存在单侧偏差,或对地形降水预报低估时,该方法适用性下降。因此在后续工作中,针对模式对台风降水其他方面的不足,将尝试引入其他

订正方法,并与本方法试验融合,以增强台风降水网格产品的稳定性。在实际业务中,预报员需了解该改进方法的局限性,通过分析流场形势,增强对台风及降水预报不确定性的理解,通过多渠道信息判断方法的适用情况,以获得最优的订正效果。

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[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).
- 陈圣劼,刘梅,张涵斌,等,2019. 集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估[J]. 气象,45(7):893-907. Chen S J, Liu M, Zhang H B, et al, 2019. Evaluation on forecasting heavy rainfall over Jiangsu Region using ensemble forecast techniques and products [J]. Meteor Mon, 45(7):893-907(in Chinese).
- 谌芸,曹勇,孙健,等,2021. 中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J]. 气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J, et al, 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre [J]. Meteor Mon, 47(6):655-670(in Chinese).
- 代刊,曹勇,钱奇峰,等,2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J]. 气象,42(12):1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short- and medium-range weather forecast [J]. Meteor Mon, 42(12):1445-1455(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).
- 高丽, 陈静, 郑嘉雯, 等, 2019. 极端天气的数值模式集合预报研究进展[J]. *地球科学进展*, 34(7): 706-716. Gao L, Chen J, Zheng J W, et al, 2019. Progress in researches on ensemble forecasting of extreme weather based on numerical models[J]. *Adv Earth Sci*, 34(7): 706-716 (in Chinese).
- 何斌, 楼茂园, 李海军, 等, 2020. 集合预报对台风天鹅(2015)远距离暴雨的不确定性研究[J]. *气象*, 46(1): 15-28. He B, Lou M Y, Li H J, et al, 2020. Research on uncertainty of ensemble forecasts of the far distance torrential rainfall by Typhoon Goni (2015)[J]. *Meteor Mon*, 46(1): 15-28 (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).
- 罗聪, 张华龙, 曾沁, 等, 2021. 多模式融合的广东网格定量降水预报方法的研发与评估[J]. *气象*, 47(5): 539-549. Luo C, Zhang H L, Zeng Q, et al, 2021. Development and verification of a gridded quantitative precipitation forecast method in Guangdong Province based on multi-model integration[J]. *Meteor Mon*, 47(5): 539-549 (in Chinese).
- 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[J]. *气象*, 40(7): 777-786. Peng X Y, Dai K, Jin R H, et al, 2014. Analysis of spread-skill relations using the ECMWF ensemble prediction in medium-term period over China [J]. *Meteor Mon*, 40(7): 777-786 (in Chinese).
- 任福民, 向纯怡, 2017. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J]. *海洋气象学报*, 37(4): 8-18. Ren F M, Xiang C Y, 2017. Review and prospect of researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones[J]. *J Shandong Meteor*, 37(4): 8-18 (in Chinese).
- 任福民, 杨慧, 2019. 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*, 38(5): 526-540. Ren F M, Yang H, 2019. An overview of advances in typhoon rainfall and its forecasting researches in China during the past 70 years and future prospects[J]. *Torr Rain Dis*, 38(5): 526-540 (in Chinese).
- 苏翔, 袁慧玲, 2020. 集合预报统计学后处理技术研究进展[J]. *气象科技进展*, 10(2): 30-41. Su X, Yuan H L, 2020. The research progress of ensemble statistical postprocessing methods[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 10(2): 30-41 (in Chinese).
- 王新敏, 栗哈, 2020. 多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J]. *气象*, 46(6): 753-764. Wang X M, Li H, 2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models[J]. *Meteor Mon*, 46(6): 753-764 (in Chinese).
- 夏侯杰, 朱伟军, 任福民, 2017. 两广地区热带气旋极端降水特征及成因初探[J]. *热带气象学报*, 33(4): 510-518. Xia H J, Zhu W J, Ren F M, 2017. Characteristics of tropical cyclone extreme precipitation and its preliminary causes over mainland of the South China[J]. *J Trop Meteor*, 33(4): 510-518 (in Chinese).
- 徐燧, 钱浩, 罗玲, 等, 2019. 基于 ECMWF 模式预报的台风降水地形订正方法[J]. *气象学报*, 77(4): 674-685. Xu Y, Qian H, Luo L, et al, 2019. A study of terrain correction method on typhoon precipitation based on ECMWF forecasts[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(4): 674-685 (in Chinese).
- 曾沁, 胡胜, 2019. 网格数字天气预报—广东实践[M]. 北京: 气象出版社. Zeng Q, Hu S, 2019. *Gridded Digital Forecast in Guangdong: A Practitioner's Guide*[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 张华龙, 吴乃庚, 唐思瑜, 等, 2017. 广东省 ECMWF 降水集合预报统计量的检验与分析[J]. *广东气象*, 39(2): 1-6. Zhang H L, Wu N G, Tang S Y, et al, 2017. Verification and analysis of statistics of rainfall ensemble forecast by ECMWF in Guangdong Province [J]. *Guangdong Meteor*, 39(2): 1-6 (in Chinese).
- Chen Y J, Ebert E E, Davidson N E, et al, 2018. Application of contiguous rain area (CRA) methods to tropical cyclone rainfall forecast verification[J]. *Earth Space Sci*, 5(11): 736-752.
- ECMWF, 2018. IFS documentation CY45R1-Part I: observations [R]. Reading, UK: ECMWF.
- Fang X Q, Kuo Y H, Wang A Y, 2011. The impacts of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot's record-breaking rainfall: a high-resolution ensemble simulation[J]. *Wea Forecasting*, 26(5): 613-633.
- Huang L, Luo Y L, 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the pre-summer rainy season[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 122(16): 8494-8516.
- Leroux M D, Wood K, Elsberry R L, et al, 2018. Recent advances in research and forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall[J]. *Trop Cycl Res Rev*, 7(2): 85-105.
- Roebber P J, 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality [J]. *Wea Forecasting*, 24(2): 601-608.
- Teng H F, Done J M, Lee C S, et al, 2020. Dependence of probabilistic quantitative precipitation forecast performance on typhoon characteristics and forecast track error in Taiwan[J]. *Wea Forecasting*, 35(2): 585-607.
- Wu M C, Yang S C, Yang T H, et al, 2018. Typhoon rainfall forecasting by means of ensemble numerical weather predictions with a GA-based integration strategy[J]. *Atmosphere*, 9(11): 425.
- Yu Z F, Chen Y J, Ebert B, et al, 2020. Benchmark rainfall verification of landfall tropical cyclone forecasts by operational ACCESS-TC over China[J]. *Meteorol Appl*, 27(1): e1842.
- Yu Z F, Wang Y Q, Xu H M, et al, 2017. On the relationship between intensity and rainfall distribution in tropical cyclones making landfall over China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(10): 2883-2901.