

张武龙,陈朝平,杨康权.2024.四川地区精细化降水预报融合订正试验及检验[J].暴雨灾害,43(2):176–184. ZHANG Wulong, CHEN Chaoping, YANG Kangquan. 2024. Experiment and verification of fine gridded precipitation forecast fusion correction in Sichuan [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(2):176–184 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–077

## 四川地区精细化降水预报融合订正试验及检验

张武龙<sup>1,2</sup>, 陈朝平<sup>1,2</sup>, 杨康权<sup>1,2</sup>

(1. 四川省气象台,成都 610072;2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072)

**摘要:**精细化定量降水网格预报是天气预报业务的重点和难点,基于西南区域智能数值网格模式预报系统(Southwest China WRF-based Intelligent Numeric Grid forecast System, SWC-WINGS)1 km × 1 km 分辨率的小时降水预报,利用时间滞后和概率匹配方法开展融合订正试验,再利用中国气象局多源融合降水系统(CMA Multi-source Precipitation Analysis System, CMPAS)三源融合降水实况格点数据,对2022年7—8月四川地区的小时降水预报融合订正结果进行检验,并在四川盆地西部一次短时强降水天气过程中进行应用,结果表明:(1)时间滞后集合降水预报相较于模式降水预报,存在小量级预报过度,大量级预报过于保守的问题;(2)时间滞后结合概率匹配的降水预报融合订正方法有效提升了各量级降水预报的TS评分,尤其1~2 h 预报时效提升显著,小时雨量超过0.1 mm、5 mm、10 mm 和20 mm 量级的TS评分平均提升率分别为7.2%、17.2%、28.3%和36.3%;(3)一次短时强降水天气过程的应用结果表明,时间滞后结合概率匹配的融合订正方法对模式小时降水预报有较好的改进效果,尤其对大量级降水预报有较强的订正能力。

**关键词:**SWC-WINGS模式;概率匹配;时间滞后;融合订正

中图分类号:P456

文献标志码:A

DOI: 10.12406/byzh.2023–077

## Experiment and verification of fine gridded precipitation forecast fusion correction in Sichuan

ZHANG Wulong<sup>1,2</sup>, CHEN Chaoping<sup>1,2</sup>, YANG Kangquan<sup>1,2</sup>

(1. *Sichuan Provincial Meteorology Observatory, Chengdu 610072*; 2. *Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072*)

**Abstract:** Fine-scale quantitative precipitation forecast is a key issue and challenge in weather forecasting services. In this study, based on hourly precipitation from the 1 km × 1 km resolution Southwest China WRF-based Intelligent Numeric Grid forecast System (SWC-WINGS), a fusion-corrected experiment was conducted using time lag and probability matching methods. The fusion-corrected forecast of hourly precipitation was then verified utilizing the CMA Multi-source Precipitation Analysis System (CMPAS) three-source merged precipitation observation grid data from 1 July to 31 August 2022 in Sichuan. Finally, the fusion-corrected method was applied to a short-term heavy precipitation process over the western Sichuan Basin. The results show that: (1) Compared with the model precipitation forecasts, the time-lagged ensemble forecast was over-optimistic for small-scale precipitation and over-conservative for large-scale precipitation. (2) However, the fusion-corrected method by time lag and probability matching methods overcame the above difficulties and showed significant improvement in the TS score, particularly in 1 ~ 2 h nowcast time. The TS score for hourly precipitation exceeding 0.1 mm, 5 mm, 10 mm, and 20 mm were increased on average by 7.2%, 17.2%, 28.3%, and 36.3%, respectively. (3) A case studies also showed that the fusion-corrected method had good improvement and correction capabilities on the hourly precipitation forecast, especially for large-scale precipitation forecasts.

**Key words:** SWC-WINGS model; probability matching; time lag; fusion correction

收稿日期: 2023-04-25; 定稿日期: 2023-10-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3000900); 四川智能网格预报创新团队项目(SCQXCXTD-202201); 中国气象局气象能力提升联合研究项目重点专项(22NLTSZ006); 四川省重点实验室项目(SCQXKJZD202101, SCQXKJYJXMS202112); 四川省重点研发项目(2022YFS0542, 2022YFS0540); 西南区域创新团队项目(XNQYCXTD-202202); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J016, CXFZ2024J013)

第一作者: 张武龙, 主要从事灾害性天气和智能网格预报研究。E-mail: zwl\_scqx@163.com

通信作者: 陈朝平, 主要从事智能网格预报研究。E-mail: 77760543@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

## 引言

随着社会经济高速发展,气象理论和科技不断进步,天气业务进入精细化发展阶段(金荣花等,2019)。降水是多尺度天气系统相互作用的产物,易受地形影响,且不同区域降水机理复杂,预报难度非常大(孙继松等,2012;马玉坤等,2022;韦惠红等,2022)。因此,高时空分辨率的定量降水预报是无缝隙精细化网格天气预报业务发展的重点,也是难点(代刊等,2016;金荣花等,2019;曹勇等,2021)。

随着物理过程、数据同化、动力框架等方面完善和提高,数值预报技术发展迅速,特别是高时空分辨率区域模式预报性能的提升使得快速滚动更新的精细化定量降水预报成为可能(衡志炜和程晓龙,2018;黄丽萍等,2022)。然而,模式自身的系统性误差,初值场的不确定性,使得模式降水预报不可避免存在偏差。不同预报时效产生的高频次预报结果也影响着模式降水产品的实际应用效果。因此,需要一些模式后处理技术,以减小模式预报偏差,提升模式应用水平(代刊等,2018)。不同于气温、气压等气象要素,降水为非连续变量,呈非正态分布,采用的模式后处理技术也更为复杂,包括时间滞后(Hoffman and Kalnay, 1983)、频率匹配(周迪等,2015)、最优百分位(张华龙等,2022)、概率匹配(Ebert, 2001)、邻域法(Theis et al., 2005)等偏差订正集成技术,其中时间滞后和概率匹配是两种较为成熟的偏差订正技术。傅娜等(2013)基于华东区域模式开展时间滞后集合试验,发现小到大雨量级集合平均优于集合成员,而暴雨量级反之。唐文苑和郑永光(2019)基于中国气象局全球/区域同化与预报系统的中尺度快速分析数值预报子系统(Global/Regional Assimilation and Prediction System-Rapid Analysis and Forecast System, GRAPES-RAFS),利用时间滞后集合技术,得到订正后的晴雨TS评分显著高于模式最新时效预报的结果。张武龙等(2021)利用西南区域中尺度数值预报系统(South West Center-WRF ADAS Real-time Modeling System, SWCWARMS)不同时效的降水预报,通过时间滞后构建集合成员,结果表明集合平均对于晴雨TS评分提升明显,而对于大量级降水订正能力有限。马申佳等(2018)在开展对流尺度集合预报试验时发现,传统集合平均对小量级降水预报效果较好,概率匹配对极端降水预报有明显优势,可改进集合平均对大量级降水预报能力偏弱的问题。庞玥等(2022)利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECWMF)集合预报产品对重庆暴雨预报进行检验分析,结果表明概率

匹配对暴雨强度和落区预报均有较好的订正效果。刘扬等(2022)针对“21·7”河南暴雨开展灾害风险评估,研究发现概率匹配可有效综合各集合成员的预估结果,优于集合平均的简单集成。不难发现,前人的工作多是基于时间滞后或概率匹配的方法得到模式降水订正结果,而对于结合二者开展融合订正试验方面的研究尚不多见。

西南区域智能数值网格模式预报系统(Southwest China WRF-based Intelligent Numeric Grid forecast System, SWC-WINGS)是中国气象局成都高原气象研究所最新研发的3—1 km分辨率快速更新循环同化预报模式,本文基于SWC-WINGS模式降水产品开展融合订正试验,利用时间滞后构建集合成员,并得到集合平均预报结果;再利用概率匹配对集合平均场进行优化,提升大量级降水预报订正能力,得到逐小时滚动更新的1 km网格降水预报融合订正结果,并通过检验分析,考察时间滞后结合概率匹配融合订正方法对模式预报的改进效果,以期提升快速更新模式降水预报能力。

## 1 SWC-WINGS模式介绍

SWC-WINGS使用美国国家环境预报中心全球预报系统(National Centers for Environmental Prediction Global Forecast System, NCEP GFS)全球分析预报资料作为模式背景场和边界条件,同化地面站、探空、飞机报、船舶、浮标、雷达反射率和卫星资料等。1 km模式垂直方向为51层(模式层顶10 hPa),格点数1180×1030,每日逐小时滚动预报,预报时效30 h,可提供覆盖四川地区(97.25°—108.65°E, 26°—34.45°N)的高时空分辨率的气象要素产品。实际业务中模式产品可在滞后4 h以内提供至服务器,供业务使用。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

本文所用资料包括模式预报资料和实况资料,资料时段为2022年7—8月,资料范围为四川地区(97.25°—108.65°E, 26°—34.45°N),同模式预报范围一致。模式预报资料为SWC-WINGS模式每日逐小时滚动预报的小时降水产品,预报时效30 h,空间分辨率1 km×1 km,时间分辨率1 h。实况资料选取基于中国气象局多源融合降水系统(CMA Multi-source Precipitation Analysis System, CMPAS)的三源融合降水实况格点数据(师春香等,2019),空间分辨率1 km,时间分辨率1 h,与模式资料一致。CMPAS实况降水融合产品的适用性评估工作(许冠宇等,2020;龙柯吉等,2020)较多,结果表明1 km产品优于5 km产品,三源产品优

于二源产品,CMPAS的1 km三源融合小时降水实况格点数据与站点数据较为一致,具有很高的可信度(龙柯吉等,2020)。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 融合订正方法

(1) 时间滞后集合方法。时间滞后集合方法是利用不同起报时刻对某一时刻预报结果进行集合的方法(Hoffman and Kalnay, 1983)。图1给出本文时间滞后集合预报生成示意图。对于  $H$  时刻的预报而言,假设当前能获得的模式最新起报时刻为  $h$ ,则从  $h$  时刻开始搜索  $H$  时刻预报的集合成员,由于SWC-WINGS模式预报时效为30 h,则理论上最多可搜索到  $h-30$  h,那么最大集合成员数为30。集合成员数  $N$  的具体计算方式如下

$$N = 30 - (H - h) + 1 \quad (1)$$

显然,当  $H-h=1$  时,  $N$  取最大值为30。然而,实际业务中考虑资料的传输运算时间所导致的滞后效应,最大集合成员数必然小于30,随着预报时刻  $H$  增加,集合成员数  $N$  逐渐减小。再将  $H$  时刻所有集合成员进行集合平均,则可得到  $H$  时刻的时间滞后集合预报。计算公式(2)中  $T_{lc}$  为时间滞后集合预报(Time-Lagged Ensemble, TLE),  $R_i$  为第  $i$  个集合成员的预报。

$$T_{lc} = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N} \quad (2)$$

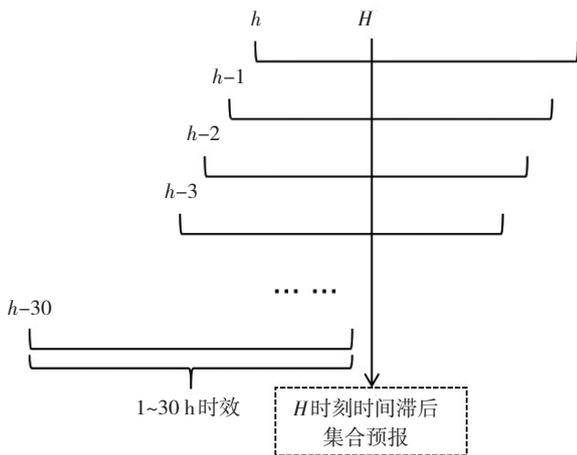


图1 时间滞后集合示意图

Fig.1 Time-lagged ensemble configuration

(2) 概率匹配订正法。概率匹配通常用于混合两种具有不同时空分布的数据类型,其中一种类型具有较好的空间表示,而另一种类型则可提供更高的精度信息(Ebert, 2001)。研究表明,集合平均可使降水落区变得更加准确,但也会使集合成员降水预报强度被低估,损失掉量级预报精度,降低强降水的预报能力(马申佳等, 2018; 代刊等, 2016)。因此,集合平均可体现

出更好的空间分布,而集成员则具有更高的量级精度信息。概率匹配方法原理演示如图2所示,假设通过时间滞后构建了三个集成员 Member1、Member2 和 Member3,各成员包含有  $3 \times 3$  的网格降水预报。首先,对三个成员进行集合平均,并按照平均值大小进行排序,网格中最大值为51,标记为“Rank 1”,依次类推。其次,对三个成员的所有网格预报值从大到小进行排序,每三个一组,“Rank 1”、“Rank 2”、“Rank 3”为第1组(“Team 1”),依次类推。最后,取每组的中位数,赋给集合平均中相同序号的网格点,如“Team 1”的中位数45,赋给集合平均中标记为“Rank 1”的网格点,依次类推。最终,通过概率匹配对时间滞后集合平均场的优化,得到时间滞后结合概率匹配的融合订正结果(Fusion Correction Ensemble, FCE)。

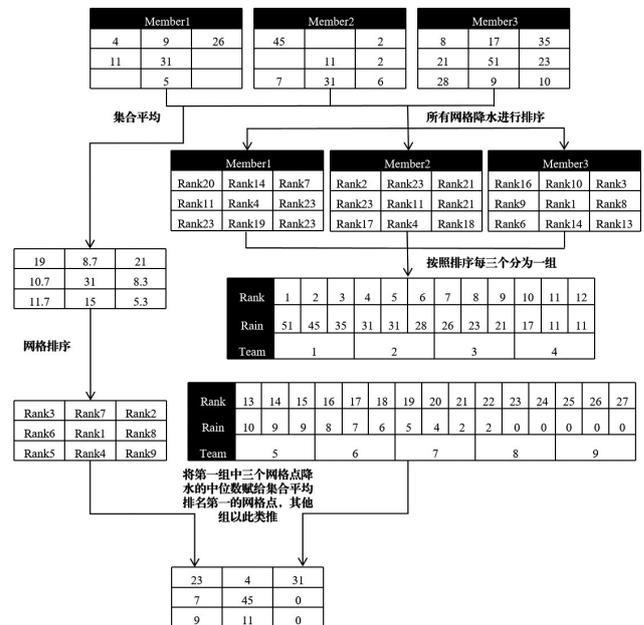


图2 概率匹配示意图

Fig.2 Probability matching configuration

### 2.2.2 检验方法

检验评估方法包括计算准确率PC(记为  $P_c$ )、空报率FAR(记为  $R_{fa}$ )、漏报率PO(记为  $P_o$ )、TS评分(记为  $T_s$ )四种方法,具体计算公式如下

$$\begin{cases} P_c = \frac{N_a + N_d}{N_a + N_b + N_c + N_d} \\ R_{fa} = \frac{N_b}{N_a + N_b} \\ P_o = \frac{N_c}{N_a + N_c} \\ T_s = \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中  $N_a$  为某一量级降水预报与实况均发生的格点数,  $N_b$  为某一量级降水预报发生而实况未发生的格点

数,  $N_c$  为某一量级降水预报未发生而实况发生的格点数,  $N_d$  为某一量级降水预报与实况均未发生的格点数。

### 3 试验方案

本文按照实际业务需求开展试验,需在每个整点前 0.5 h 形成新的 1 ~ 24 h 时效的 1 km 网格降水预报,运算时间 15 m 左右,试验方案如图 3 所示。首先,基于 SWC-WINGS 模式  $0.01^\circ \times 0.01^\circ$  分辨率的小时降水预报,利用时间滞后构建集合成员,再通过集合平均得到时间滞后集合预报(TLE)。然后,利用概率匹配对时间滞后集合平均降雨率进行重新分配,得到时间滞后结合概率匹配的融合订正结果(FCE)。以 08:00(北京时,下同)起报为例,07:15 前能获取的 SWC-WINGS 模式最新起报时次为 03:00,那么 08:00 起报的 1 h (2 h, 3 h, ..., 24 h) 时效对应的模式最新时次预报为模式 03:00 起报 6 h (7 h, 8 h, ..., 29 h) 时效,集合成员数  $N$  为 25(24, 23, ..., 2)。将 08:00 起报的 1 h 时效对应的 25 个集合成员进行集合平均,则可得到该时效的时间滞后集合预报。然后,利用概率匹配的方法,整合该时效的 25 个集合成员网格降水预报信息并进行排序,再与时间滞后集合平均网格排序结果一一匹配,最终得到该时效的时间滞后结合概率匹配的融合订正结果,其他时效依此类推。

研究表明,集合成员数的多少直接影响集合订正效果,集合成员数越多,预报准确率越高(唐文苑和郑永光,2019)。此外,考虑每隔 1 h 滚动更新,得到新的 1 ~ 24 h 集合订正场,更关注临近时效的预报结果。因此,本文主要针对 2022 年 7—8 月逐小时起报的 1 ~ 12 h 时效的 TLE、FCE 和相应的 SWC-WINGS 模式小时降水预报,利用逐小时 1 km 实况格点数据,采用“点对点”的方式进行晴雨准确率、空报率、漏报率、TS 评分检验对比分析,在集合成员充足的情况下考察融合订正的提升效果。

### 4 结果分析与检验

研究表明,针对降水的模式后处理技术,可能对晴雨预报质量提升较大,但对大量级降水订正能力有限(马申佳等,2018;张武龙等,2021)。因此,本文分为晴雨检验和分级检验两个部分,对时间滞后结合概率匹配的融合订正结果进行分析。

#### 4.1 晴雨检验

为了考察时间滞后和概率匹配对模式晴雨预报的改进效果,对小时降水超过 0.1 mm 量级进行准确率 PC、空报率 FAR、漏报率 PO 和 TS 评分检验。图 4 给出了 2022 年 7 月 1 日—8 月 31 日逐小时起报 1 ~ 12 h 时效的

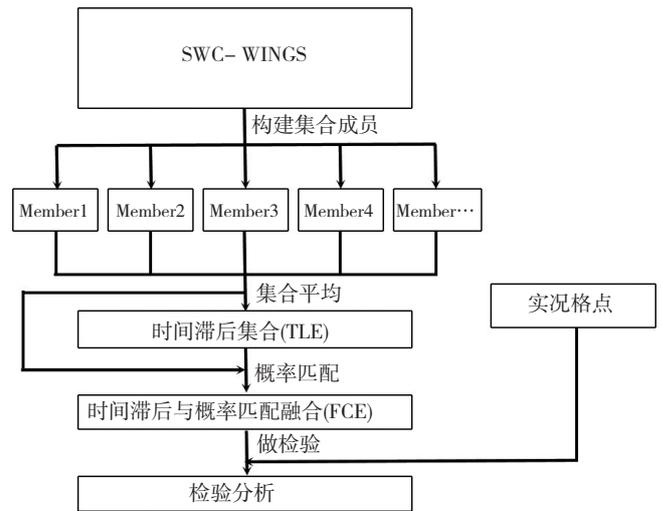


图 3 时间滞后结合概率匹配的融合订正试验方案  
Fig.3 Experiment scheme of the fusion correction by time lag and probability matching methods

TLE、FCE 和相应的 SWC-WINGS 模式小时降水预报的晴雨(小时降水超过 0.1 mm)准确率 PC,从图 4 中可见,模式预报在各时效晴雨准确率较为一致,1 ~ 12 h 时效的平均预报准确率为 86.6%。TLE 的晴雨准确率在各时效明显低于模式预报,平均预报准确率为 78.4%。进一步使用了概率匹配优化之后,各时效晴雨准确率较 TLE 有明显提升,且分布较为一致。FCE 晴雨准确率在各时效均高于模式预报,平均预报准确率为 87.2%。

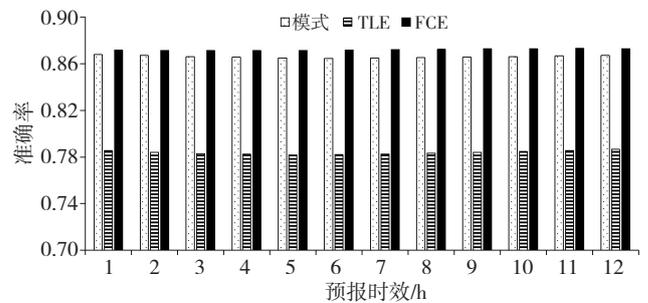


图 4 2022 年 7 月 1 日—8 月 31 日逐小时起报 1 ~ 12 h 时效的 TLE、FCE 和相应的 SWC-WINGS 模式最新时次小时降水预报的晴雨准确率

Fig.4 Sunny or rainy accuracy for hourly precipitation forecasts derived from the 1-h runs, 1 ~ 12 h period validity TLE, FCE and the up-to-date SWC-WINGS model from 1 July to 31 August in 2022

图 5 给出了 2022 年 7 月 1 日—8 月 31 日逐小时起报 1 ~ 12 h 时效的 TLE、FCE 和相应的 SWC-WINGS 模式小时降水预报的晴雨空报率 FAR、漏报率 PO 和 TS 评分以及 FCE 相较于模式 TS 评分的提高率。从图 5a 可以看到,模式降水预报的空报率随着预报时效的延长逐渐增加,平均空报率为 0.669。FCE 的空报率随时效的变化趋势与模式一致,但其空报率明显低于模式,平均空报率为 0.646。TLE 的空报率则明显高于模式,随着预报时效变化趋势不明显,平均空报率为

0.732。从三者晴雨漏报率的对比来看(图5b),模式预报的漏报率随着预报时效的延长逐渐增加,平均漏报率为0.624。FCE的漏报率随时效的变化趋势与模式一致,但其漏报率低于模式,平均漏报率为0.608。TLE的漏报率也明显低于模式,平均漏报率为

0.286。由此可见,TLE相较于模式预报,虽然减小了漏报率,但增加了空报率,从而使其晴雨准确率反而不如模式预报。FCE相较于模式预报,减小了漏报率的同时,也减小了空报率,从而使其晴雨准确率高于模式预报。

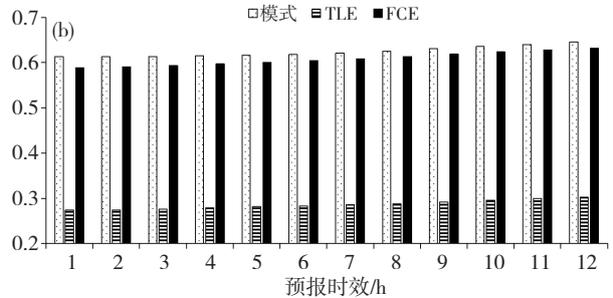
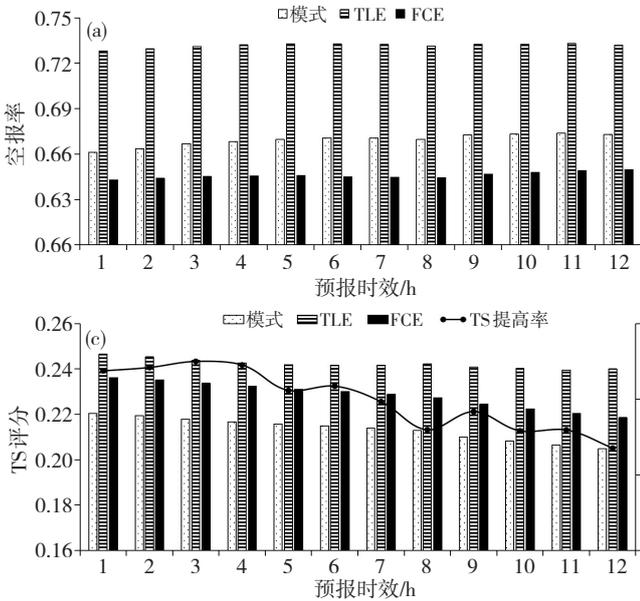


图5 2022年7月1日—8月31日逐小时起报1~12h时效的TLE、FCE和相应SWC-WINGS模式最新时次小时降水预报的晴雨空报率(a)、漏报率(b)和TS评分以及FCE相较于模式TS评分的提高率(c)

Fig.5 Sunny/rainy (a) false alarm rate, (b) missing alarm rate, (c) TS score and the increased percentage of TS score between FCE and model for hourly precipitation forecasts derived from the 1-h runs, 1 ~ 12 h period validity TLE, FCE and the up-to-date SWC-WINGS model from 1 July to 31 August in 2022

从图5c中可见,模式预报随着预报时效的延长,TS评分逐渐降低,平均TS评分为0.213。三者对比来看,TLE的TS评分最高,且TS评分随着预报时效的延长变化不明显。根据时间滞后集合的计算原理,当某一个集合成员预报有雨的情况下,集合平均结果则必然预报有雨,从而使得空报率增加,漏报率减小,导致过度预报的问题。因此,TLE的TS评分较模式预报提高明显,是在增加空报率的基础上实现的,它的综合预报效果是不好的。FCE的TS评分随时效的变化趋势与模式一致,

并且其TS评分在各时效均高于模式,平均TS评分为0.228。FCE在同时降低空报率和漏报率的情况下,有效的提升了模式晴雨TS评分,1~2h时效的平均提高率为7.2%,1~12h时效的平均提高率为7.0%。

4.2 分级检验

为了考察时间滞后和概率匹配对模式各量级小时降水预报的改进效果,分别对小时降水超过5 mm、10 mm、20 mm量级进行空报率FAR、漏报率PO和TS评分检验。图6给出2022年7月1日—8月31日逐小

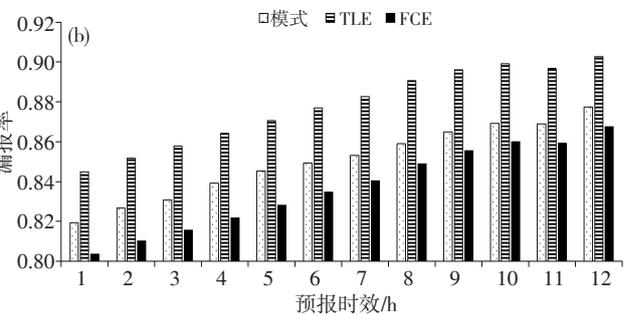
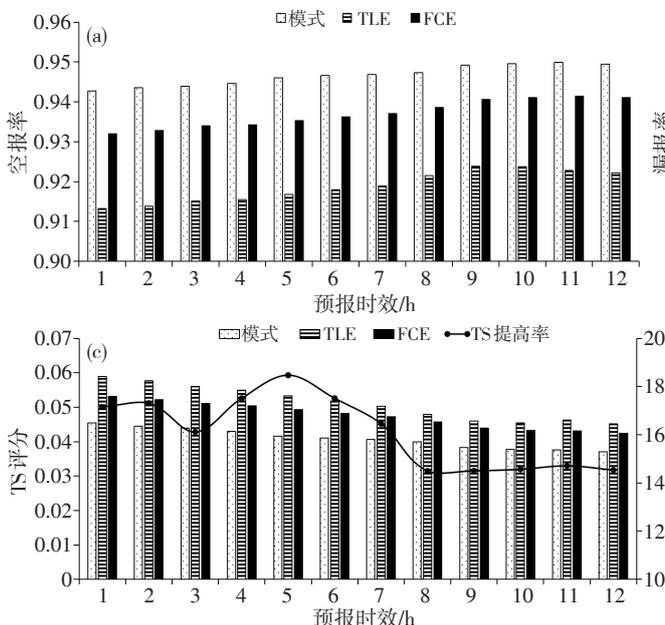


图6 同图5,但为小时降水超过5 mm

Fig.6 Same as Fig.5, but for hourly precipitation exceeding 5 mm

时 起 报 1~12 h 时 效 的 TLE、FCE 和 相 应 的 SWC-WINGS 模 式 预 报 的 5 mm 以 上 量 级 小 时 降 水 空 报 率、漏 报 率、TS 评 分 以 及 FCE 相 较 于 模 式 TS 评 分 的 提 高 率。图 6a 表 明,各 预 报 时 效 TLE 空 报 率 小 于 FCE,也 小 于 模 式 预 报,且 三 者 均 表 现 为 随 预 报 时 效 增 加 而 增 加 的 趋 势。模 式 预 报、TLE 和 FCE 的 1~12 h 时 效 平 均 空 报 率 分 别 为 0.947、0.919 和 0.937。从 三 者 漏 报 率 对 比 可 以 看 到(图 6b),FCE 漏 报 率 小 于 模 式 预 报,小 于 TLE,整 体 上 也 表 现 为 随 预 报 时 效 增 加 而 增 加 的 趋 势。模 式 预 报、TLE 和 FCE 的 1~12 h 时 效 平 均 漏 报 率 依 次 为 0.850、0.878 和 0.837。时 间 滞 后 集 合 方 法 可 以 降 低 5 mm 以 上 量 级 降 水 的 空 报 率,但 却 增 加 了 其 漏 报 率,这 是 由 于 时 间 滞 后 集 合 对 于 大 量 级 降 水 的 平 滑 作 用,导 致 其 对 于 大 量 级 降 水 预 报 过 于 保 守。进 一 步 使 用 概 率 匹 配 优 化 之 后,可 以 消 除 时 间 滞 后 集 合 方 法 造 成 的 平 滑 作 用,突 出 单 个 集 合 成 员 的 大 量 级 降 水 预 报,使 得 漏 报 率 明 显 降 低(图 6b)。

分 析 图 6c 可 知,三 者 TS 评 分 均 表 现 为 随 预 报 时 效 增 加 而 减 小 的 趋 势。TLE 的 1~12 h 时 效 平 均 TS 评 分 为 0.051,较 模 式 预 报 提 升 明 显,但 是 在 增 加 漏 报 率 的 基 础 上 实 现 的,存 在 预 报 过 于 保 守 的 问 题。FCE 的 1~12 h 时 效 平 均 TS 评 分 为 0.048,虽 略 低 于 时 间 滞 后 集 合,但 高 于 模 式 预 报,并 且 是 在 同 时 降 低 空 报 率 和 漏 报 率 的 情 况 下 实 现 的,预 报 效 果 更 好。FCE 在 1~2 h 时 效 的 5 mm 以 上 量 级 降 水 的 TS 评 分 平 均 提 高

率 为 17.2%,1~12 h 时 效 平 均 提 高 率 为 16.1%。

2022 年 7 月 1 日—8 月 31 日 逐 小 时 起 报 1~12 h 时 效 TLE、FCE 和 相 应 的 SWC-WINGS 模 式 预 报 的 小 时 降 水 超 过 10 mm 量 级 的 空 报 率、漏 报 率 和 TS 评 分 对 比 与 5 mm 量 级 类 似(图 略)。TLE 在 10 mm 以 上 量 级 降 水 的 空 报 率 小 于 模 式 起 报,漏 报 率 大 于 模 式 起 报,依 然 存 在 预 报 过 于 保 守 的 问 题。经 过 概 率 匹 配 优 化 之 后,空 报 率 和 漏 报 率 同 时 减 小,TS 评 分 也 有 较 明 显 提 升。FCE 的 1~12 h 时 效 10 mm 以 上 量 级 降 水 平 均 TS 评 分 为 0.025,1~2 h 时 效 的 TS 评 分 平 均 提 高 率 为 28.3%,1~12 h 时 效 平 均 提 高 率 为 17.4%。

三 者 的 20 mm 以 上 量 级 降 水 空 报 率、漏 报 率 对 比 检 验 结 果 与 5 mm 和 10 mm 量 级 类 似(图 7a,b),不 再 赘 述。然 而,三 者 20 mm 以 上 量 级 降 水 的 TS 评 分 结 果 却 与 5 mm 和 10 mm 量 级 有 明 显 差 异。从 图 7c 中 可 见,TLE 的 TS 评 分 要 明 显 低 于 模 式 预 报,更 低 于 FCE。在 5 mm 和 10 mm 以 上 量 级 降 水 的 TS 评 分 检 验 中,TLE 在 增 加 漏 报 率 的 情 况 下,TS 评 分 是 高 于 其 余 二 者 的。这 说 明 相 较 于 5 mm 和 10 mm 以 上 量 级 降 水,TLE 对 于 20 mm 以 上 量 级 降 水 的 预 报 更 加 保 守。FCE 的 TS 评 分 在 大 多 数 时 效 内 优 于 模 式 预 报,特 别 是 在 临 近 时 效 有 很 好 的 改 进 效 果。FCE 的 1~12 h 时 效 的 20 mm 以 上 量 级 降 水 的 平 均 TS 评 分 为 0.01,在 1~2 h 时 效 平 均 提 高 率 为 36.3%,1~12 h 时 效 平 均 提 高 率 为 12.2%。

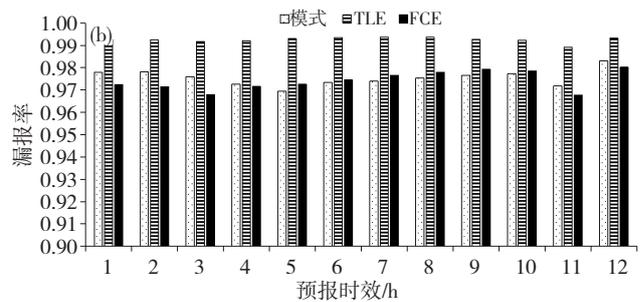
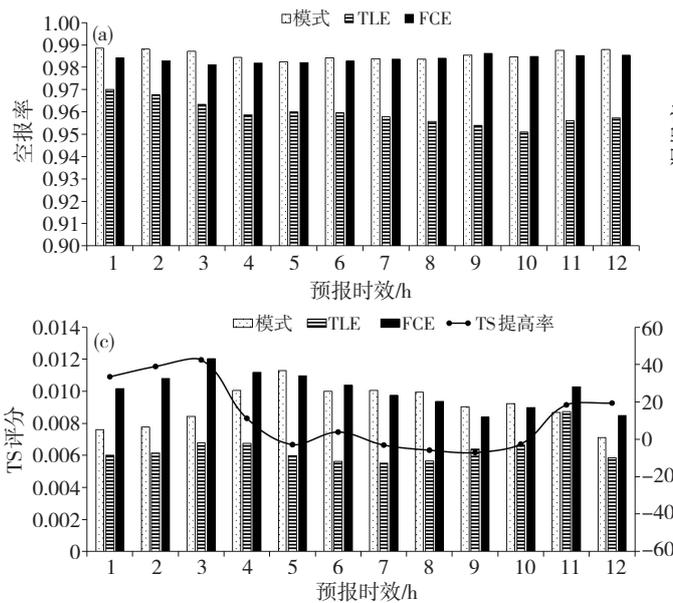


图 7 同 图 5,但 为 小 时 降 水 超 过 20 mm  
Fig.7 Same as Fig.5, but for hourly precipitation exceeding 20 mm

由 此 可 见,时 间 滞 后 集 合 预 报 的 晴 雨(小 时 降 水 超 过 0.1 mm)漏 报 率 较 SWC-WINGS 模 式 预 报 有 所 减 小,但 空 报 率 有 所 增 加,存 在 预 报 过 度 的 问 题。对 于 5 mm、10 mm 和 20 mm 以 上 量 级 降 水 空 报 率 较 模 式 有 所 减 小,但 漏 报 率 有 所 增 加,存 在 预 报 过 于 保 守 的 问

题。经 概 率 匹 配 优 化 之 后,在 同 时 降 低 空 报 率 和 漏 报 率 的 情 况 下,时 间 滞 后 结 合 概 率 匹 配 的 融 合 订 正 预 报 有 效 的 提 升 了 各 量 级 的 TS 评 分,尤 其 在 1~2 h 时 效 提 升 显 著,小 时 降 水 超 过 0.1 mm、5 mm、10 mm 和 20 mm 量 级 的 TS 评 分 平 均 提 升 率 分 别 为 7.2%、17.2%、28.3% 和 36.3%。

### 5 降水预报个例订正检验

通过以上分析得知,经时间滞后结合概率匹配融合订正后,预报质量较模式预报有明显提升。但是上述结果是基于2022年7—8月长时间的批量检验评分,对降水预报的订正效果还需要一些典型的强降水个例进一步检验。本文选取四川盆地西部一次强降水个例,采用融合订正技术改进模式降水预报并检验分析。2022年7月12日20:00—13日08:00,四川盆地西部出现了一次暴雨到大暴雨过程,并伴有明显的短时强降水。雷达组合反射率拼图显示(图略),7月12

日23:00—13日00:00,盆地西部有对流初生,到13日01:00—02:00,逐渐发展为线状对流,选取这2个代表性时段的实况和预报降水进行评估分析。根据业务试验流程,7月13日00:00的降水实况对应的是7月12日23:00起报TLE和FCE的第1h时效预报,模式最新时次预报则是18:00起报模式的第6h时效预报。

7月13日00:00的降水实况显示,在盆地西部沿山出现了南北两个强降水中心(图8a);模式预报在整个盆地西部沿山均出现了分散的20mm以上强降水(图8b);TLE预报能够将南北两个降水中心突显出来,但量级偏小,且川西高原弱降水有明显空报(图8c);经

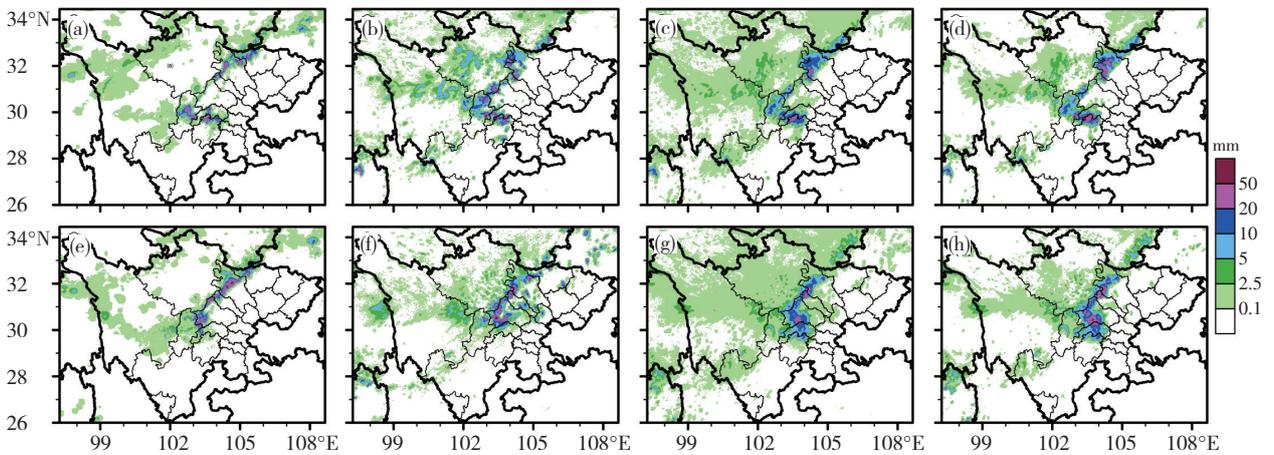


图8 2022年7月13日00:00(a)和02:00(e)1h降水实况、SWC-WINGS模式7月12日18:00(b)和7月12日20:00(f)起报第6h时效雨量预报、TLE 7月12日23:00(c)和7月13日01:00(g)起报第1h时效雨量预报和FCE 7月12日23:00(d)和7月13日01:00(h)起报第1h时效雨量预报

Fig.8 Precipitation observation at (a) 00:00 BT and (e) 02:00 BT on 13 July, the 6-h forecast from SWC-WINGS model initialized at (b) 18:00 BT and (f) 20:00 BT on 12 July, the 1-h forecast from TLE initialized at (d) 23:00 BT on 12 July and (h) 01:00 BT on 13 July, 2022 the 1-h forecast from FCE initialized at (d) 23:00 BT on 12 July and (h) 01:00 BT on 13 July, 2022

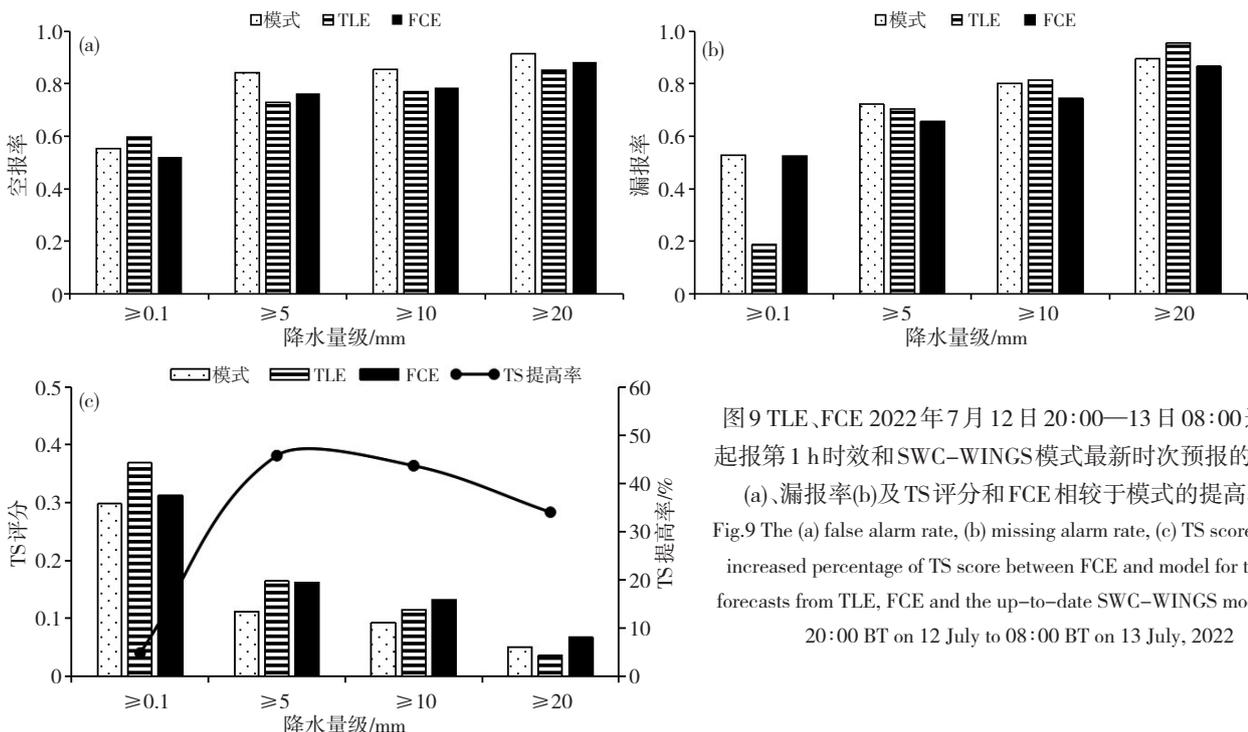


图9 TLE、FCE 2022年7月12日20:00—13日08:00逐小时起报第1h时效和SWC-WINGS模式最新时次预报的空报率(a)、漏报率(b)及TS评分和FCE相较于模式的提高率(c)  
Fig.9 The (a) false alarm rate, (b) missing alarm rate, (c) TS score and the increased percentage of TS score between FCE and model for the 1-h forecasts from TLE, FCE and the up-to-date SWC-WINGS model from 20:00 BT on 12 July to 08:00 BT on 13 July, 2022

概率匹配优化之后,南北两个降水中心的预报雨量明显增大,与实况较为一致(图8d)。至7月13日02:00,南北两个实况强降水中心逐渐连接形成线状强降水对流雨带(图8e);模式预报在盆地西部沿山的强降水落区与实况接近,但空间分布较为离散,且对流雨带右侧有空报的分散强降水(图8f);TLE的强对流雨带量级偏弱,并存在大片弱降水的空报(图8g);经概率匹配优化之后,强对流雨带更加清楚,降水量级增加,并且对于弱降水进行了明显的消空处理(图8h)。该过程中TLE、FCE的第1h时效与模式预报的空报率、漏报率和TS评分如图9所示。可见在0.1mm以上量级降水检验中,TLE在增加空报率的情况下,TS评分优于FCE,更优于模式预报。在较大量级检验中,FCE在同时降低空报率和漏报率的情况下,TS评分均高于TLE,更高于模式预报,5mm、10mm和20mm以上量级降水的TS评分提高率分别可达45.7%、43.7%和34.0%。

由此可见,个例订正试验与批量订正检验结果基本一致。无论从空间对比,还是TS评分检验,时间滞后结合概率匹配的融合订正方法对模式预报均有明显改善。

## 6 结论与讨论

本文基于SWC-WINGS模式1km×1km分辨率的1小时降水产品,采用时间滞后和概率匹配方法在四川地区开展融合订正试验,得到逐小时滚动更新的1km网格降水预报,再利用CMPAS三源融合降水实况格点数据,对2022年7—8月四川地区的小时降水融合订正试验结果进行检验,并应用于四川盆地西部一次短时强降水过程的模式预报订正,得到以下主要结论:

(1) 时间滞后集合预报的晴雨(小时降水超过0.1mm)漏报率较SWC-WINGS模式预报有所减小,但空报率有所增加,存在预报过度的问题。对于5mm、10mm和20mm以上量级降水空报率较模式有所减小,但漏报率有所增加,存在预报过于保守的问题。

(2) 经概率匹配优化之后,在同时降低空报率和漏报率的情况下,时间滞后与概率匹配的融合订正预报有效的提升了各量级的TS评分,尤其在1~2h时效提升显著,小时降水超过0.1mm、5mm、10mm和20mm量级的TS评分平均提升率分别为7.2%、17.2%、28.3%和36.3%。

(3) 四川盆地西部的一次短时强降水天气过程的模式预报订正评估分析表明,时间滞后结合概率匹配的融合订正方法对模式预报有较好的改进效果,尤其对大量级降水有较强的订正能力。

整体而言,使用时间滞后结合概率匹配融合方法订正后的SWC-WINGS模式预报明显优于其未订正的预报,可为四川地区公里级小时降水预报提供有意义的参考。本研究利用单一的快速更新循环同化系统产生的高频预报场构建集合成员,可能存在系统性偏差和离散度不够等问题。其次,随着预报时效的延长,模式自身预报的准确性下降,集合成员数的选取也可能影响最终的订正效果。下一步,可尝试开展多模式集合研究,尽可能融合更多的预报不确定性信息,通过敏感性实验确定合理的集合成员数,进一步提高公里级小时降水预报能力。

## 参考文献(References):

- 曹勇,包红军,张恒德,等.2021.基于快速滚动更新的无缝隙定量降水预报模型[J].河海大学学报(自然科学版),49(4):303-308. CAO Y, Bao H J, Zhang H D, et al. 2021. Seamless quantitative precipitation forecasting model based on rapid rolling update technique [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),49(4):303-308 (in Chinese). doi:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.04.002
- 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]. Meteorological Monthly,42(12):1445-1455 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.002
- 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 Meteorologica Sinica,76(4):493-510 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.015
- 傅娜,陈葆德,谭燕,等.2013.基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J].气象,39(10):1247-1256. Fu N, Chen B D, Tan Y, et al. 2013. Time-Lag ensemble forecasting experiment and evaluation based on SMB-WARR[J]. Meteorological Monthly,39(10):1247-1256 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.10.002
- 衡志伟,程晓龙.2018.西南涡加密资料同化对西南区域模式降水预报的影响[J].高原山地气象研究,38(2):3-10. Heng Z W, Chen X L. 2018. Influence of assimilation of southwest vortex intensive observation on precipitation forecast of southwestern regional model [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,38(2):3-10 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2018.02.001
- 黄丽萍,邓莲堂,王瑞春,等.2022. CMA-MESO关键技术集成及应用[J].应用气象学报,33(6):641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al. 2022. Key technologies of CMA-MESO and application to operational forecast [J]. Journal of Applied Meteorological Science,33(6):641-654 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20220601
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等.2019.我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J].气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al. 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China [J]. Meteorological Monthly,45(4):445-457 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.001
- 刘扬,唐健,王铸,等.2022.基于CMA区域集合预报的暴雨灾害风险预估

- 研究—以“21·7”河南暴雨为例[J]. 气象与环境科学,45(2):14-19. Liu Y, Tang J, Wang Z, et al. 2022. Study on rainstorm disaster risk pre-assessment based on the CMA regional ensemble prediction system—taking the July 2021 Henan extreme torrential rain as an example [J]. Meteorological and Environmental Sciences,45(2):14-19 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2022.02.002
- 龙柯吉,谷军霞,师春香,等.2020. 多种降水实况融合产品在四川一次强降雨过程中的评估[J]. 高原山地气象研究,40(2): 31-37. Long K J, Gu J X, Shi C X, et al. 2020. Quality assessment of several merged precipitation products in a heavy rainfall Process in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,37(4):1-7 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1674-2184
- 马申佳,陈超辉,何宏让,等.2018. 基于BGM的对流尺度集合预报试验及其检验[J].高原气象,37(2):495-504. Ma S J, Chen C H, He H R, et al. 2018. Experiment and verification of the convective-scale ensemble forecast based on BGM [J]. Plateau Meteorology,37(2):495-504(in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00073
- 马玉坤,马俊强,李菲,等.2022. 青藏高原边坡临夏地区短时强降雨时空分布及海拔特征分析[J].沙漠与绿洲气象,16(3):16-23. Ma Y K, Ma J Q, Li F, et al. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time strong rainfall and its altitude distribution in Linxia at plateau slope [J]. Desert and Oasis Meteorology,16(3):16-23(in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.03.003
- 庞玥,刘祥,韩潇,等.2022. ECMWF集合预报产品在重庆暴雨预报中的检验与应用[J].气象科学,42(4):549-556. Pang Y, Liu X, Han X, et al. 2022. Verification and application on forecasting heavy rainfall over Chongqing region by using ECMWF ensemble forecast products[J]. Journal of the Meteorological Sciences,42(4):549-556 (in Chinese). doi: 10.12306/2021jms.0042
- 师春香,潘畅,谷军霞,等. 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al. 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteorologica Sinica, 77(4): 774-783 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb 2019.043
- 孙继松,何娜,王国荣,等. 2012. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Torrential Rain and Disasters,31(3):218-225 (in Chinese). doi:1004-9045(2012)03-0218-08
- 唐文苑,郑永光.2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J].气象,45(3):305-317. Tang W Y, Zheng Y G. 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and forecast [J]. Meteorological Monthly,45(3):305-317 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.002
- 韦惠红,黄小彦,刘文婷,等.2022. 复杂山地下引发特大暴雨的准静止 MCS 观测分析[J].暴雨灾害,41(3): 241-253. Wei H H, Huang X Y, Liu W T, et al. 2022. Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):241-253 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.001
- 许冠宇,李琳琳,田刚,等.2020. 国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估[J].暴雨灾害,39(4):400-408. Xu G Y, Li L L, Tian G, et al. 2020. Assessing the applicability of national precipitation merged products in the Yangtze River Basin [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4): 400-408 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.010
- 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]. Meteorological Monthly,48(1):84-95 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn. 1000-0526.2021.061701
- 张武龙,王彬雁,陈朝平,等. 2021. SWCWARMs 模式小时降水量时间滞后集合预报研究[J].气象科技,49(4):561-568. Zhang W L, Wang B Y, Chen C P, et al. 2021. Time-lagged ensemble forecast of hourly precipitation based on SWCWARMs model [J]. Meteorological Science and Technology,49(4):561-568 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.20200376
- 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]. Torrential Rain and Disasters, 34(2):97-104(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.02.001
- Ebert E E. 2001. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation [J]. Monthly Weather Review,129(10): 2461-2480. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<2461:AOAPMS>2.0.CO;2
- Hoffman R N, Kalnay E. 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting [J]. Tellus series A-dynamic meteorology and oceanography,35(2):100-118. doi:10.1111/j.1600-0870.1983.tb00189. x
- Theis S E, Hense A, Damrath U. 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach [J]. Meteorological Applications,12(3):257-268. doi:10.1017/S1350482705001763

(责任编辑 张 文)