

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).

多模式融合的广东网格定量降水预报 方法的研发与评估^{*}

罗 聪¹ 张华龙¹ 曾 沁² 胡 胜^{1,3} 吴乃庚^{1,3}
陈炳洪^{1,4} 时 洋¹ 黄晓莹¹ 唐思瑜¹

1 广东省气象台,广州 510080

2 国家气象信息中心,北京 100081

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所,广州 510080

4 广州市气象台,广州 511430

提 要: 基于 ECMWF 全球集合预报、华南区域 GRAPES 中尺度模式及短时临近预报模式,对不同模式降水预报在广东气候背景下的应用效果进行分析,发展耦合多种方法的客观释用产品,实现多尺度模式的融合应用。通过个例和批量检验,结果表明:多尺度模式融合是一个有发展前景的模式客观释用技术,利用频率匹配和最优百分位方法发挥集合预报解释在天气尺度的应用优势,并基于本地化分型检验建立了强降水空间订正和晴雨消空订正方法,进一步优化了特定天气场景下降水空间分布和强度的预报,利用中尺度模式对日变化特征描述的优势,进行时间降尺度,一定程度上提高了逐时降水预报能力;考虑不同订正方法的相互依赖和影响,确立了“频率匹配-最优百分位-强降水空间订正-晴雨消空订正-时间协调一致”的广东网格定量降水释用流程,实现了多种不同技术的耦合集成,形成优势互补,提升了广东降水客观预报的准确性。

关键词: 多模式融合,网格定量降水,强降水空间订正,晴雨订正,优选集成

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.003

Development and Verification of a Gridded Quantitative Precipitation Forecast Method in Guangdong Province Based on Multi-Model Integration

LUO Cong¹ ZHANG Hualong¹ ZENG Qin² HU Sheng^{1,3} WU Naigeng^{1,3}
CHEN Binghong^{1,4} SHI Yang¹ HUANG Xiaoying¹ TANG Siyu¹

1 Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080

4 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

Abstract: This study evaluates the performance of the ECMWF global ensemble prediction system, the short-term-forecast mesoscale model, and the rapid-updated nowcasting model for South China based on GRAPES, by analyzing the spatio-temporal characteristics of precipitation forecast under the local climate background of Guangdong Province. Based on the evaluation results, a hybrid method for multi-model

^{*} 广东省省级科技计划项目(2019B020208016,2018B020207012)、广东省气象局科技项目(GRMC2018Z05)与广东省气象局智能网格预报技术创新团队(GRMCTD202004)共同资助

2020 年 7 月 14 日收稿; 2021 年 3 月 5 日收修定稿

第一作者:罗聪,主要从事网格预报技术研究. E-mail:luoc@gd121.cn

通讯作者:胡胜,主要从事短临预报和网格预报技术研究. E-mail:sheng_hu@gd121.cn

post-processing is developed to produce high-resolution gridded quantitative precipitation forecast (GQPF). The results are as follows: Multi-scale model integration is a promising technique for objective model post-processing. The frequency-matching and optimal-percentile methods show the advantages in ensemble forecast interpretation at synoptic scale, while the spatial correction and clear-rainy elimination based on localized stratified verification can help further optimize the space distribution and intensity for specific weather scenarios. Temporal downscaling based on the characteristics of the mesoscale model in diurnal variation is beneficial to improve the hourly precipitation forecasting. Considering the interdependence and complementary advantages of different methods, the GQPF method for Guangdong is established with a sequential flow of “frequency-matching, optimal-percentile, spatial correction, clear-rainy elimination, time-downscaling”, which improves the accuracy of precipitation objective forecast.

Key words: multi-model integration, grid quantitative precipitation, spatial correction for heavy rainy, clear-rainy correction, optimal integration

引 言

华南地处我国最南端,每年汛期开始早、结束晚,暴雨频发、持续时间长,且暴雨类型多:如锋面暴雨、暖区暴雨、台风暴雨等,成因复杂,是气象学者的研究热点。我国先后开展了华南前汛期暴雨试验、华南暴雨科学试验(HUAMEX)、中国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX),南海季风降水试验(SCRMEX)等外场加密观测科学试验,对产生华南暴雨的多尺度作用机理进行了深入研究,并形成一系列的暴雨监测和预报理论(倪允琪等,2006;Luo et al, 2017;2020)。

过去几十年,随着天气理论研究的不断深入,数值天气预报模式也得到了迅速的发展,基于数值模式开展降水的客观释用也取得了明显的效果。由于大气的内在可预报性和数值天气预报的初始场误差以及模式动力框架、物理过程、数值方法等的不完美,单一的确定性数值预报对降水的预报通常存在较大的不确定性。20 世纪末,集合预报得到发展,集合预报产品开始逐步在业务预报中发挥重要的作用。前人研究结果表明,利用集合预报能一定程度上反映数值模式预报的不确定性,开展集合预报的释用可以提升数值模式对极端天气的预报能力(刘琳等,2013;陈静等,2005;董全等,2017)。代刊等(2016;2018)总结了最优百分位、概率匹配平均等一系列集合预报定量释用方法在业务中的应用,张华龙等(2017)针对广东开展了 ECMWF 集合预报的百分位统计订正,取得了优于确定性预报的效果,江

崑等(2019)发展了基于频率匹配的对流尺度集合预报降水订正技术,智协飞和吕游(2019)、智协飞和赵忱(2020)利用频率匹配方法开展降水多模式预报订正,有效减小了降水量预报的误差,且订正后各量级降水的雨区面积与实况更加接近。集合预报已经成为预报员在中短期天气预报中的重要支撑,在业务上得到了广泛的应用(杨学胜,2001;杜钧和康志明,2014;罗玲等,2019;陈圣劼等,2019)。

以往研究多围绕单一集合预报开展,大多集中在提升日累积雨量预报准确率,发展了多种行之有效的订正技术。广东降水频繁且影响系统复杂,很难有一种客观方法适用于所有降水过程。如何实现不同释用技术的关联集成,形成优势互补,值得探讨。随行定位的精细服务不断发展,如何响应降水日变化特征,给出逐时预报,值得研究。因此,综合使用多尺度模式(全球与区域、集合预报与确定性预报模式)、发展有针对性的客观订正方法、建立一个耦合多种方法的释用流程,实现多尺度模式集成和集合预报应用技术会是天气预报业务技术发展的一个重点方向。

本文基于 ECMWF 集合预报与华南 GRAPES 模式(包括华南区域中尺度模式 GRAPES_GZ 3 km 与华南区域短时临近预报系统 GRAPES_GZ_R 3 km)定量降水预报数据,利用频率匹配、最优百分位融合、强降水空间订正、晴雨消空订正等技术,实现基于多数值模式预报的优选融合预报,并利用要素时间降尺度实现不同时效(24 h、3 h、1 h)降水量预报的协调一致。

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

(1)ECMWF 集合预报:2013—2019 年,欧洲中心集合预报产品,包含 51 个预报成员,水平网格距为 0.5° ,提供 240 h 预报,时间分辨率为 6 h。

(2)华南 GRAPES 区域模式:包括华南中尺度模式 GRAPES_GZ 3 km 和短时临近模式 GRAPES_GZ_R 3 km,其中 GRAPES_GZ 3 km 每天运行两次,提供 96 h 预报,水平网格距为 0.03° ,时间分辨率为 1 h,资料时长为 2018—2019 年;GRAPES_GZ_R 3 km 逐时循环更新,提供 24 h 预报,水平网格距为 0.03° ,时间分辨率为 1 h,资料时长为 2018—2019 年,每年 4 月 1 日至 9 月 30 日。

(3)实况资料:2013—2019 年,广东省 86 个国家自动气象站和经中国气象局认定的 371 个区域自动站逐时和日降水数据。

(4)网格指导预报(SCMOC):2019 年 6—9 月,国家气象中心网格定量降水预报产品,水平网格距为 0.05° ,时间分辨率为 1 h,本文所用的指导预报为每日 20 时(北京时,下同)起报的 24 h 预报。

上述 2013—2018 年的资料用于建模,2019 年 6—9 月的资料用于检验。为实现技术成果在广东的业务应用,采用双线性插值方法将不同来源的数据统一到 0.025° 的网格再进行计算,最终的释用产品预报范围为 $20^\circ\sim 25.7^\circ\text{N}$ 、 $109.4^\circ\sim 118^\circ\text{E}$ (与广东业务化的网格预报区域范围完全一致),时间分辨率为 1 h。

基于以上资料,利用频率匹配和最优百分位方法发挥集合预报解释应用在天气尺度的优势,同时针对晴雨和强降水等具体场景进行空间和强度做进一步订正,然后利用中尺度模式在日变化等方面的特征进行时间降尺度应用,形成耦合多种方法的释用产品(GQPF)。总体的技术框架如图 1。

1.2 频率匹配

频率匹配法是实现对集合成员降水频率订正至与实况降水频率一致的方法,主要思路是统计一系列降水阈值以上的预报频率与实况频率的累积概率

密度,并把有偏差的预报频率调整至与实况频率一致,从而订正降水偏差(Ebert,2001;Zhu and Luo,2015;李俊等,2015)。降水频率的计算方法如下:

$$F_k = \frac{B_k}{A} \quad (1)$$

式中: k 表示不同的降水阈值, F_k 为降水阈值 k 所对应的频率; A 为样本总量, B_k 为超过降水阈值 k 的样本出现频次。根据式(1)计算 2013—2018 年 6—9 月广东省区域自动站观测 24 h 累积降水量实况的累积概率分布曲线,以及集合预报在广东区域内所有格点与所有成员预报 24 h 累积降水量的累积概率分布曲线(图 2),可见实况与预报在降水量级谱两端存在着明显的概率分布差异:对于日降水量 15 mm 以下,预报样本频率显著高于观测,而对

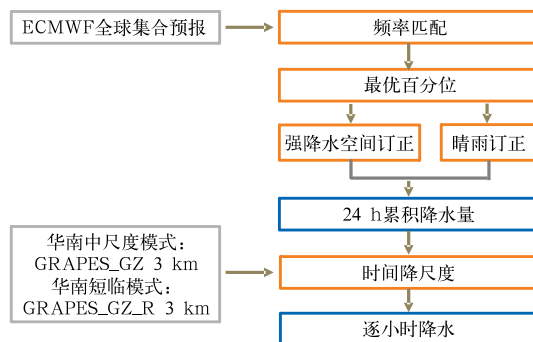


图1 技术框架

Fig. 1 Technical Framework

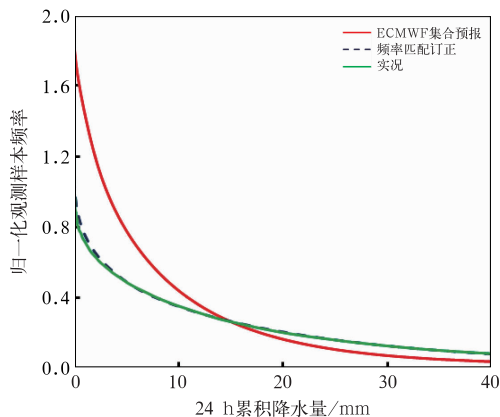


图2 ECMWF 集合预报 24~48 h 累积降水量预报、实况与频率匹配订正的概率密度分布曲线

Fig. 2 The probability density distribution of 24—48 h accumulated precipitation from the ECMWF ensemble forecast, observation and frequency matching correction

于日降水量 15 mm 以上则预报样本频率低于实况出现频率,表明集合预报系统存在小雨预报频率偏高,大雨预报频率偏低的偏差特征。

根据上述频率统计特征,以订正 24 h 累积降水量预报使其概率分布曲线与观测一致为目标,构建订正方程:对于每一累积概率密度,由于其对应的预报降水量和观测降水量具有一定的偏差,而订正量即是上述二者的差,因此可通过拟合不同的预报降水量与对应订正量之间的关系,构建订正函数:

$$D(x) = F[N(x)] - x \quad (2)$$

式中: x 为模式预报降水量, $D(x)$ 为与预报降水量有关的降水订正函数, $N(x)$ 为预报样本频率的拟合函数; $F(y)$ 为观测样本频率拟合函数的反函数,即与预报降水量 x 所对应的样本频率 y 相同频率的观测降水量。

构建 $D(x)$ 的方法为:计算各频率对应不同的预报降水量与预报降水偏差量之间的散点图(图 3),并对两组数据进行拟合。从图 3 可见,在不同的降水阈值区间,两者并不是严格一致的线性关系,为使构建的订正函数 $D(x)$ 与建模数据样本尽可能一致,选取 4 个阈值区间,分别构建不同的拟合函数:在 0.1~3.9 mm,将预报量直接订正为 0.1 mm;在 4.0~10 mm 和 10~100 mm 阈值内分别拟合构建二次函数,对于大于 100 mm 的降水量,则拟合构建线性函数(图 3)。将集合预报每个成员的降水量预报代入订正方程,即可得到对应的订正量以及订正后累积降水量,频率匹配订正后的频率分布与实况频率更为一致(图 2)。

1.3 最优百分位

最优百分位是集合预报释用的重要方法。主要思路为:针对不同的降水量分级(根据业务规定划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨),检验集合预报不同百分位成员预报对相应降水量的 TS 评分,确定不同等级降水量 T_k 的集合成员最优百分位 P_{x_k} ,然后按照 T_k 的从大到小排列顺序,依次判别对应等级的最优百分位上的集合成员预报 $P_{x_k}(M_i)$ 是否超过 T_k ,若满足条件则停止判别,取该位置的预报值 F_i 为 $P_{x_k}(M_i)$,若都不满足则 F_i 为 0,从而得到基于集合预报的最优百分位融合产品(代刊等,2016)。公式为:

$$\begin{aligned} &\text{若 } P_{x_k}(M_i) \geq T_k, \text{ 则 } F_{x_k} = P_{x_k}(M_i) \\ &k \in (1, 2, 3, 4, 5, 6) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: F_i 为位置 i 的最优百分位预报值, M_i 为位置 i 的所有成员预报, $P_{x_k}(M_i)$ 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。

张华龙等(2017)统计分析了广东地区基于原始的 ECMWF 集合预报的最优百分位,本文在沿用该方法的基础上,先对集合预报各成员进行频率匹配订正,再重新统计分析订正后集合成员的最优百分位,重点对降水量大的预报采用不同的分位数进行融合。

与原始的集合预报最优百分位相比,频率匹配后强降水的最优百分位明显下降(图 4),对大雨、暴雨和大暴雨的原始集合预报最优百分位分别为 85%、90%、95%,频率匹配订正后最优百分位分别为 70%、70%、85%。由于频率匹配有效订正了集合预报系统对降水量大的预报偏弱的特征,因此大雨以上阈值所有百分位产品的降水量预报均增大,从而最优百分位也相应下移。

1.4 强降水空间订正

暖区暴雨是华南暴雨预报的难点之一,而模式对此类暴雨的预报能力较弱。为进一步提升对广东暖区强降水(因暴雨样本的次数较少,以下针对大雨以上降水进行分析)的预报能力,利用 2013—2018 年的 6—9 月降水数据,选取西南气流影响下的典型暖区降水日(共 145 d)进行分析(图 5),标准为:剔除台风影响过程,925 hPa 广东的珠江口西侧(20°~23°N、110°~113.5°E)有超过 12 m·s⁻¹ 的西南急

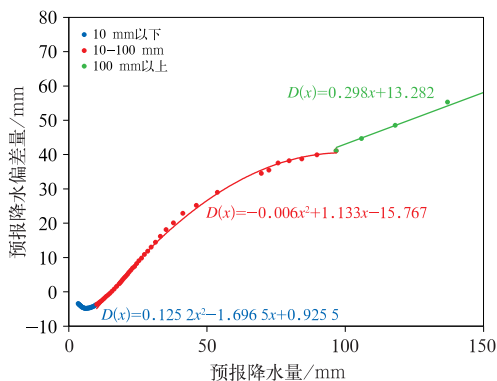


图 3 ECMWF 集合预报 24~48 h 累积雨量分段订正函数

Fig. 3 The piecewise correction function of 24—48 h accumulated precipitation for ECMWF ensemble forecast

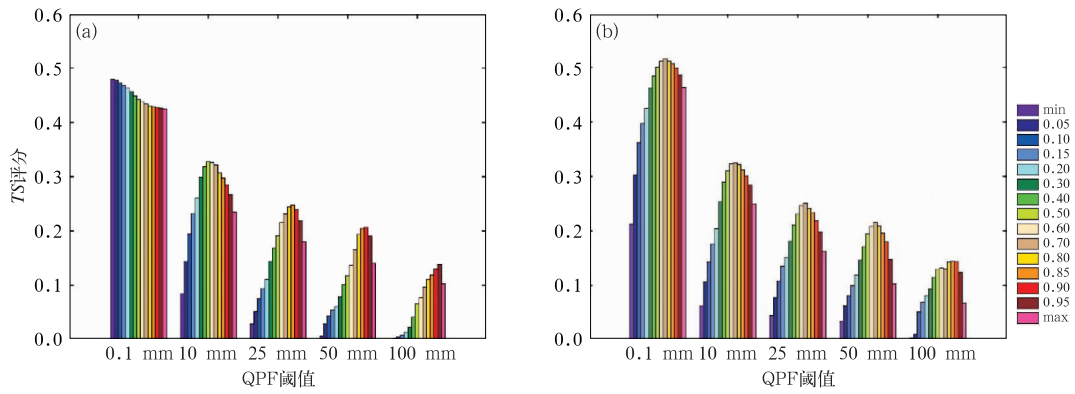


图4 不同分位数的集合降水 24~48 h 累积雨量预报 TS 评分

(a)原始集合预报,(b)频率匹配订正后

Fig. 4 TS score of 24–48 h accumulated precipitation for ECMWF ensemble forecast in different quantiles

(a) original ensemble forecast, (b) after frequency matching correction

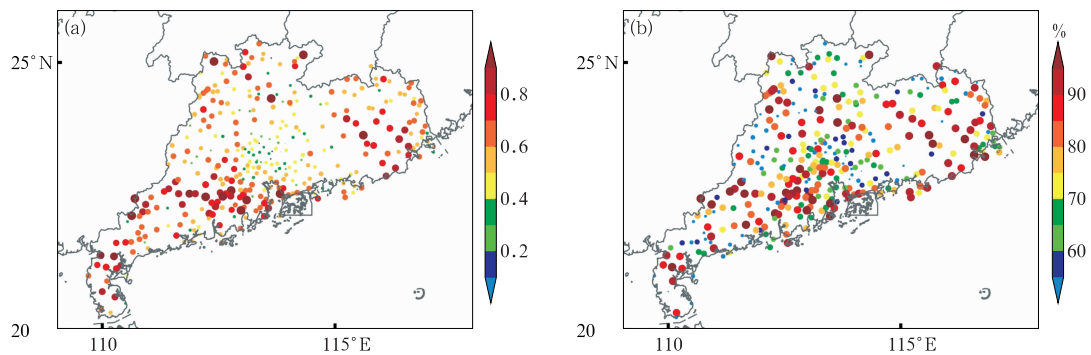


图5 暖区背景下 ECMWF 集合预报大雨以上降水漏报率(a)及最优百分位(b)

Fig. 5 Missing alarm rate (a) and optimal percentile (b) for ECMWF ensemble forecast of heavy precipitation above 25 mm in warm-sector background

流,同时东侧($21^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 、 $113.5^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)无西南急流存在,为便于定量分析,上述标准近似为风场的 v 分量达到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。分类型降水检验表明:暖区背景条件下,粤东、河源、梅州、珠江口西侧市县、湛江一带存在大雨以上降水严重漏报的站点,模式在该区域对该类强降水预报能力欠缺。

基于以上原因,尝试发展针对华南暖区暴雨的强降水空间订正技术:1)针对暖区降水过程进行集合百分位 TS 分析,得到具有差异性的统计特征,对于大雨以上降水漏报率较高的站点,最优 TS 对应的百分位已经达到 90% 以上,远高于平均状态下的 70% 最优百分位,因此对上述站点计算新的频率匹配订正系数和百分位。2)实际业务中,根据前文的标准利用模式预报时段内的 08 时和 20 时的 925 hPa 风场客观判断,如果是为暖区降水背景则对上

述站点采用新的百分位融合方案。3)采用最近距离法,将上述站点对应的融合方案应用于周边网格点,实现网格化的强降水空间订正。

1.5 晴雨订正

晴雨预报是公众对日常天气预报的关注重点,其预报准确率也是反映气象部门业务预报能力的关键指标之一。根据业务现行的晴雨检验标准(表 1),对 2018 年 ECMWF 数值模式的晴雨准确率进行分析,发现晴雨预报误差主要来源于对较弱降水的空报,空报的站(次)数占总预报站(次)数的比例在汛期和非汛期分别为 36.4% 和 25.3%,而漏报仅为 1.3% 和 4.8%,空报站(次)数远远高于漏报,在汛期空报情况更为明显,这是造成晴雨预报准确率失分的重要原因(图 6)。

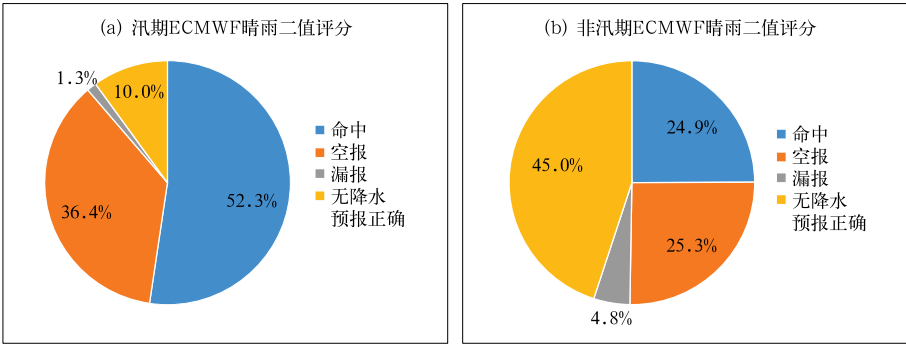


图 6 ECMWF 数值模式的晴雨预报检验
(a)汛期,(b)非汛期

Fig. 6 The clear sky-rainy score for the ECMWF numerical model
(a) flood season, (b) non-flood season

表 1 晴雨检验标准

实况	预报	
	有降水	无降水
0.0 mm	命中 (NA)	无降水预报正确 (ND)
≥0.1 mm	命中 (NA)	漏报 (NC)
无降水	空报 (NB)	无降水预报正确 (ND)

经过前面的频率匹配订正和最优百分位统计,较大幅度上改进了 ECMWF 集合预报对较弱降水预报偏大,尤其是较强降水预报偏小的缺点,但是对于纯粹的晴雨预报,仍然存在微弱降水空报多的问题,如何通过消减阈值,减少空报、增加无降水预报的正确站次,是提高预报准确率的关键。基于以上原因,本文利用集合成员的降水预报进行晴雨优化订正,主要思路为:1)对集合预报成员的站点降水预报减去某一阈值 p 进行消空;2)定义消空后仍预报有雨(大于 0.1 mm)的不同成员数占总集合成员比例为 r ,计算不同比例 r 对应的晴雨 TS;3)计算历史训练期晴雨 TS 最高时对应的消空阈值 p 和成员比例 r 的最优组合;4)业务应用中,当达到阈值 p 的成员比例超过 r 时,认为该点有雨,保留强降水空间订正结果,否则为晴,从而得到最终的 24 h 累积降水预报。计算公式如下:

$$F_n = \begin{cases} 0, & f_n < p \\ 1, & f_n \geq p \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{cr} = \begin{cases} F_{sc}, & \left[\frac{\sum_{i=0}^n F_n}{m} \geq r \right] \\ 0, & \left[\frac{\sum_{i=0}^n F_n}{m} < r \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_n 为原始集合成员预报, p 为消空阈值, r 为成员比例, m 为集合成员总数, F_{sc} 为强降水空间订正结果, F_{cr} 为晴雨订正后的 24 h 降水量预报。

利用 2013—2018 年的汛期降水资料,得到广东的弱降水预报最优消空阈值为 2.4 mm,最优成员比例数为 75%(图 7)。在此阈值条件下,模型训练期的晴雨预报准确率达到最优,为 77.08%。

1.6 时间降尺度

前面的方法重点是对集合预报的 24 h 累积降水量进行释用,然而为了提高降水预报的时间分辨率至逐小时,需要对其进行时间降尺度,将 24 h 累积降水量订正结果合理分配至逐小时的预报时段内。主要思路是:选取某一确定性模式,假定其能较好地模拟出降水的时间演变过程,但是降水量预报的准确度不高。因此需将集合释用的 24 h 累积降水量按照参考模式的降水演变趋势,合理分配到各时段。主要包括三个步骤:1)利用参考模式降水信息,

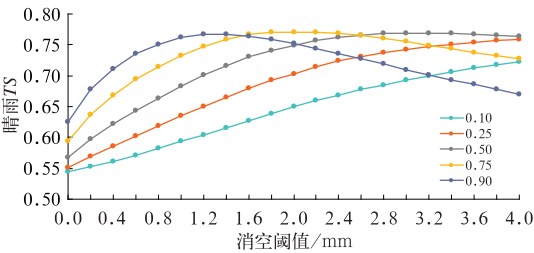


图 7 ECMWF 集合预报 24~48 h 累积降水量的晴雨消空阈值与成员比例
Fig. 7 Clear sky-rainy elimination threshold and member ratio for 24—48 h accumulated rainfall of the ECMWF ensemble forecast

计算逐个网格的小时降水序列曲线;2)利用逐1 h降水和总降水量,获取逐1 h降水比例;3)根据逐1 h降水比例关系,将集合释用的累积降水量拆分成逐1 h定量降水,若某网格的集合释用累积降水量不为零,而参考模式的降水量预报为零,则搜寻周边最近不为零的网格点比例关系,应用于该网格点。

该方法的关键在于所采用的模式需对降雨演变趋势有较好预报能力。华南中尺度模式 GRAPES_GZ 3 km 采用模式动力框架和物理过程耦合,减少了预报场不连续现象,通过改进云分析系统,改善短时临近预报效果,改进陆面模式及其分析方案,提高地面要素预报能力;而华南短时临近模式 GRAPES_GZ_R 3 km 进一步通过快速同化雷达资料、地面自动站资料,改进了初生对流的预报能力。基于上述原因,本研究联合应用集合预报多种方法释用结果和 GRAPES_GZ 3 km、GRAPES_GZ_R 3 km 模式的逐时预报,进行降水要素时间降尺度融合处理(当两套华南区域模式的预报时段重叠时,取 GRAPES_GZ_R 的权重系数为1,GRAPES_GZ 的权重为0),实现不同时效(24 h、3 h、1 h)降水量预报的一致和高精度的逐时预报。主要业务及技术流程如图8。

2 检验与分析

为了评估多模式融合的定量降水预报效果,本研究对2019年6月1日至9月30日的数据进行检验,主要检验对象为晴雨准确率和强降水准确率(其中格点预报时长为24 h和3 h,站点预报时长为1 h)。由

于本方法的24 h累积降水主要来源于ECMWF的集合预报释用,并基于GRAPES 3 km数值模式进行时间降尺度,考虑到数值模式产品的滞后性,基于实际业务应用的角度,以下检验采用本方法(GQPF)前一日20时起报的48 h预报时效与当日指导预报(SCMOC)20时起报的24 h预报时效、GRAPES_GZ_R模式14时起报的6~18 h预报时效和GRAPES_GZ模式08时起报的24~36 h预报时效进行对比。为便于业务应用,下文图表均以指导预报时效所对应时次的各家预报作为参考时间,结果分析如图8。

2.1 晴雨预报检验分析

本方法采用的晴雨预报TS和预报技巧STS计算公式如下:

$$TS = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \quad (6)$$

$$STS = \frac{TS_P - TS_N}{1 - TS_N} \quad (7)$$

式中:NA、NB、NC、ND的定义见表1;TS_P为本方法的广东范围网格晴雨预报准确率,TS_N为国家气象中心网格指导预报在对应网格范围的晴雨预报准确率。

在前面的方法介绍中已指出:晴雨预报最大的误差来源于对较弱降水的空报。本方法经过针对性的消空订正后,晴雨预报表现最为突出:本方法24~48 h预报时效的晴雨预报TS为0.7575,对应同期的24 h晴雨指导预报TS为0.7088,本方法相对于指导预报的技巧为0.167,华南中尺度模式GRAPES_GZ的12~36 h晴雨预报TS为0.6819,

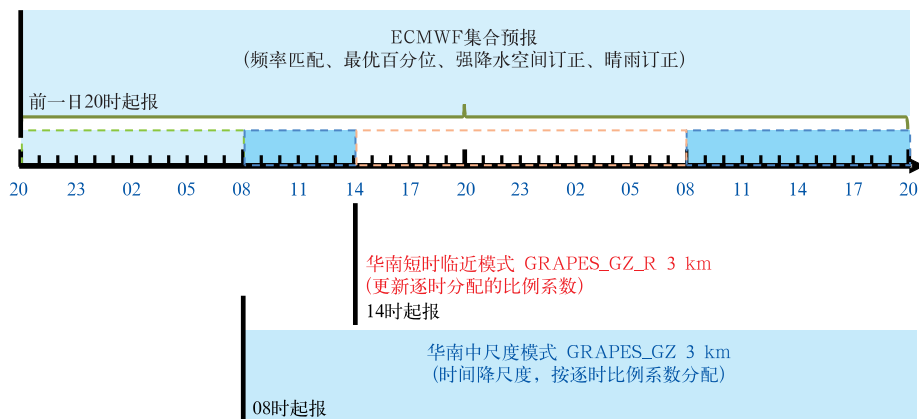


图8 业务及技术流程

Fig. 8 Operational and technical flow

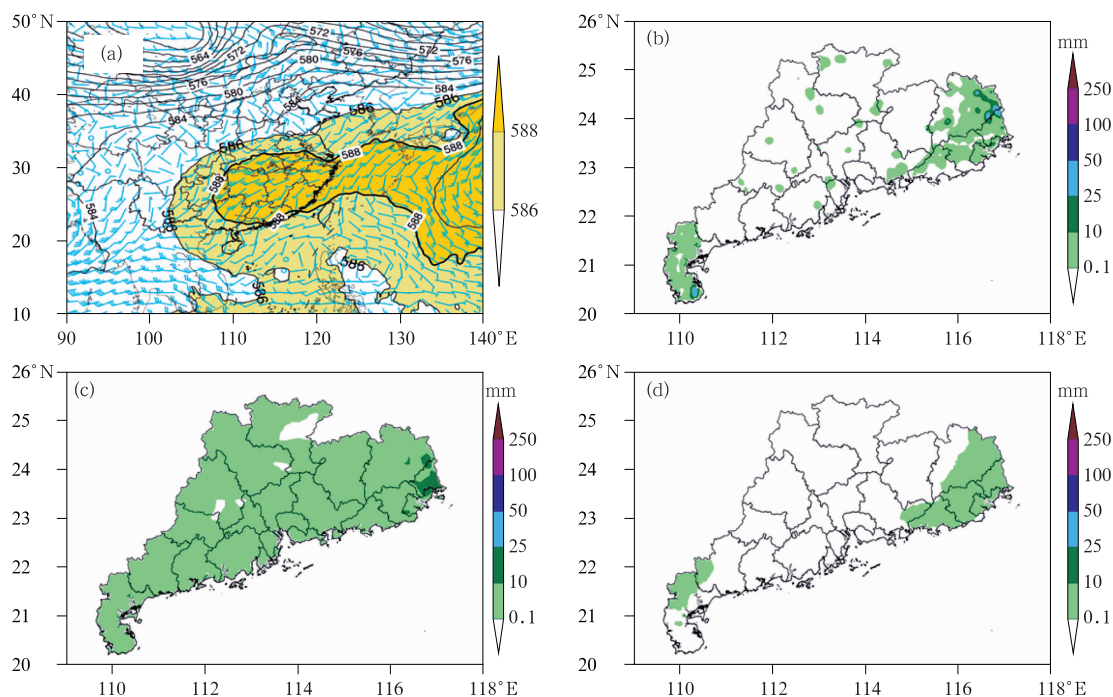


图 9 2019 年 7 月一次弱降水个例的晴雨消空订正效果对比

(a) 27 日 08 时 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场, (b) 26 日 20 时至 27 日 20 时累积降水量实况,

(c) ECMWF 模式 25 日 20 时预报 26 日 20 时至 27 日 20 时累积降水量,

(d) 晴雨订正后 26 日 20 时至 27 日 20 时累积降水量

Fig. 9 A case of comparison of clear-rainy elimination corrections in July 2019

(a) 500 hPa geopotential height field and 850 hPa wind field at 08:00 BT 27,

(b) rainfall observation from 20:00 BT 26 to 20:00 BT 27,

(c) accumulated rainfall of ECMWF model forecasts from 20:00 BT 26 to 20:00 BT 27,

(d) accumulated rainfall after the clear-rainy elimination from 20:00 BT 26 to 20:00 BT 27

而华南短临模式 GRAPES_GZ_R 因预报时效未能完全覆盖指导预报对应时次,不进行 24 h 晴雨预报对比。选取部分弱降水的个例进行分析(图 9): 2019 年 7 月 27 日,中层为受副热带高压南侧的偏东气流影响,低层 850 hPa 和 925 hPa 受弱西南风控制,粤东偏东市县出现了小雨局部中雨降水;2019 年 7 月 25 日 20 时的 ECMWF 确定性模式 48 h 预报广东大部市县有小雨,其中粤东市县局部有中雨,晴雨预报 TS 为 0.1948;本方法经过晴雨消空订正后的预报则仅保留了粤东偏东市县的小雨局部中雨降水,与实况较为吻合,晴雨预报 TS 提升至 0.8726。

除了 24 h 累积量的晴雨预报,随着定位气象服务需求的增长,更高时间分辨率的降水预报准确率成为新的关注点。本方法融合了全球集合预报和区域数值模式,利用区域模式降水要素的时间曲线进

行降尺度,得到逐 3 h 格点和逐 1 h 站点的降水预报。

本方法的逐 3 h 的晴雨预报均为正技巧(图 10), 24~48 h 内的逐 3 h 晴雨预报 TS 最高为 0.8451,最低为 0.7303,总体随着预报时效增加呈一定的下降趋势;站点(广州)逐小时的晴雨预报亦全面表现为正技巧,同样呈现类似的变化趋势(图 11)。无论是逐 1 h 还是逐 3 h 预报,本方法总体上也略优于华南区域数值模式。上述结果表明,多尺度模式的融合应用可以提升广东更高时间分辨率的网格要素预报准确率。

2.2 强降水空间订正分析

本方法定义的强降水标准为 24 h 累积降水量达到 50 mm,或 3 h 累积降水量达到 20 mm,采用的

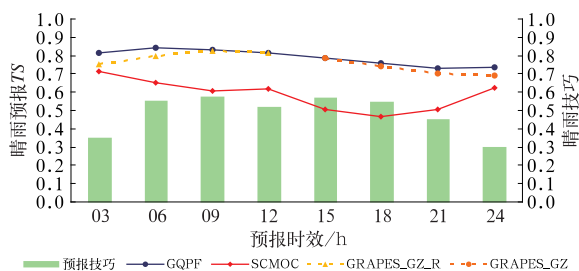


图 10 2019 年 6 月 1 日至 9 月 30 日, 20 时起报的
格点逐 3 h 晴雨预报准确率和预报技巧

Fig. 10 Accuracy and skills of 3 h
precipitation forecast for grid points
from 1 June to 30 September 2019,
starting from 20:00 BT

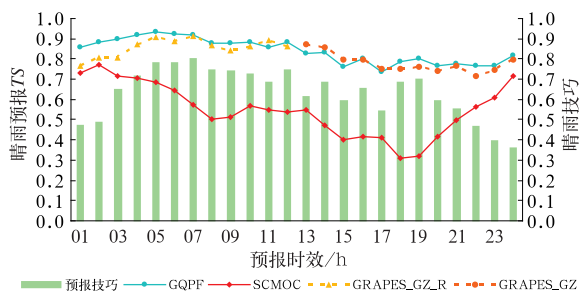


图 11 同图 10, 但为广州站逐 1 h

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for 1 h precipitation
forecast for Guangzhou Station

强降水预报 TS 的计算公式如下[预报技巧计算方法同式(7)]:

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \quad (8)$$

式中: NA 为强降水预报正确站(次)数、 NB 为空报站(次)数、 NC 为漏报站(次)数。

本方法 24~48 h 强降水预报 TS 为 0.217, 与同期的 24 h 指导预报持平, 优于 GRAPES_GZ 的 12~36 h 强降水预报(TS: 0.167); 对于 24~48 h 内的逐 3 h 强降水预报, 本方法和指导预报同样大致持平, 大部分时次的 TS 相差在 0.01 以内, 其中本方法比指导预报高 0.02 的时次有 2 个, 低于指导预报 0.02 的时次有 1 个, 但普遍优于 GRAPES_GZ_R 和 GRAPES_GZ 模式(图 12)。

对于强降水预报, 业务常用方法是主客观融合, 可以保留主观预报的落区等级优势和客观预报的精细分布, 而针对特定天气类型(如本文的暖区降水)

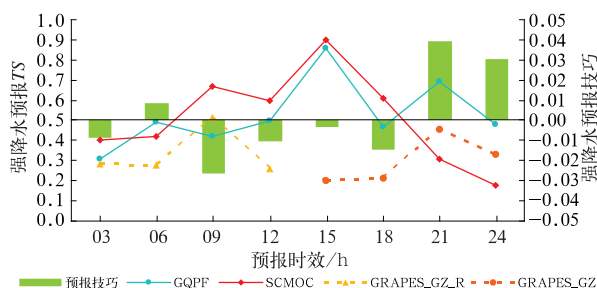


图 12 同图 10, 但为逐 3 h 强降水

Fig. 12 Same as Fig. 10, but for 3 h heavy
rainfall forecast for grid points

进行强降水空间客观订正则是一个新的尝试。2019 年 8 月 17 日, 500 hPa 的副热带高压位于南海中东部海面, 广东位于副热带高压的西北侧, 在 925 hPa 和 850 hPa, 广东的西部受西南急流影响, 受其影响, 广东西南部出现了大雨到暴雨, 局部大暴雨的降水; 8 月 15 日 20 时的集合最优百分位融合 48 h 预报粤西有大雨降水, 对暴雨以上降水有明显的漏报, 而经过分类强降水空间订正的产品则预报粤西有大雨到暴雨的降水, 暴雨 TS 评分达到 0.25, 尽管对于大暴雨仍然出现了漏报, 总体较订正前有了明显的改进(图 13)。

3 结论与讨论

本文在参考国内众多的基于确定性预报和集合预报的释用方法的基础上, 对不同预报产品在广东气候特征背景下的应用效果进行分析, 并针对预报业务流程无缝隙、精细化、准确性、滚动更新等方面的需要开展技术方法研究, 实现多模式融合的广东网格定量降水预报。主要结论如下:

(1) 基于 ECMWF 集合预报、华南区域中尺度模式(GRAPES_RZ 3 km)与华南区域短时临近模式(GRAPES_GZ_R 3 km)三种数值预报系统的定量降水预报产品, 研发了释用技术, 该技术融合了集合预报在刻画天气尺度特征方面的优势, 并针对晴雨和强降水等具体场景进行空间和强度做进一步订正, 然后利用中尺度模式对日变化等方面的精细预报进行时间降尺度, 形成融合多种方法的释用产品。

(2) 在集合预报释用方法上, 利用频率匹配订正针对弱降水频率预报偏高、强降水频率预报偏低的

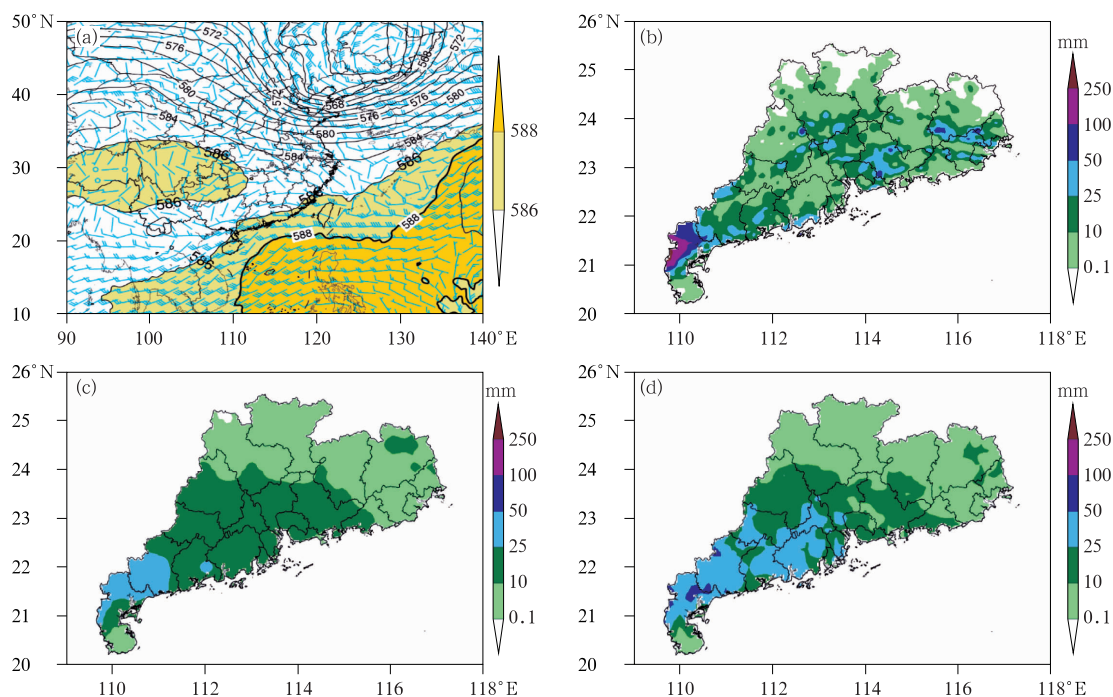


图 13 2019 年 8 月一次强降水个例的强降水空间订正效果对比

(a) 17 日 08 时 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场, (b) 16 日 20 时至 17 日 20 时累积雨量实况,
(c) 最优百分位 15 日 20 时预报 16 日 20 时至 17 日 20 时累积雨量,
(d) 强降水空间订正后 16 日 20 时至 17 日 20 时累积雨量

Fig. 13 A case of comparison of spatial correction for heavy rainfall in August 2019

(a) 500 hPa geopotential height field and 850 hPa wind field at 08:00 BT 17,

(b) rainfall observation from 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17,

(c) accumulated rainfall of optimal percentile from 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17,

(d) accumulated rainfall after spatial correction of severe precipitation from 20:00 BT 16 to 20:00 BT 17

偏差特征;将传统的集合预报订正与利用环境物理量因子订正的不同方法相融合,利用地形动力因子进行集合百分位统计检验,优化了集合预报融合产品,进一步订正了广东暖区强降水空间分布的预报;通过统计不同降水类型的消空阈值和多种百分位特征,并进行组合消空,进一步提升了晴雨预报准确率。

(3)对多个技术进行集成应用时,考虑了其相互的依赖性和影响,通过不同技术集成顺序及检验效果的试验与研究,最终确定频率匹配-百分位融合-强降水空间订正-晴雨消空订正-时间协调一致的广东网格定量降水释用技术流程,实现了技术的优选集成应用。

总体而言,多模式的融合应用有助于提升降水客观预报能力,但在本方法中区域模式主要是作为降雨的时间演变趋势参照,用于对集合预报释用结果进行时间降尺度,未来还需对区域模式开展逐时

释用研究,从而进一步提高逐时预报的准确率;同时,还需针对强降水预报在不同天气类型中的偏差特征,结合天气分型,引入反映大气动、热力特征的环境因子和地形因子,开展多因子订正方法研究,提升强降水预报能力。

参考文献

- 陈静,薛纪善,颜宏,2005.一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J].大气科学,29(5):717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 717-726 (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).
- 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).
- 董全, 代刊, 陶亦为, 等, 2017. 基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报产品应用和检验[J]. 气象, 43(9):1095-1109. Dong Q, Dai K, Tao Y W, et al, 2017. Application and verification of extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 43(9):1095-1109(in Chinese).
- 杜钧, 康志明, 2014. 天气预报中不确定性问题的调查分析[J]. 气象科技进展, 4(1):58-67. Du J, Kang Z M, 2014. A survey on forecasters' view about uncertainty in weather forecasts[J]. Adv Meteor Sci Technol, 4(1):58-67(in Chinese).
- 江崧, 陈训来, 朱江山, 等, 2019. 深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨中的应用研究[J]. 气象科技进展, 9(3):124-131. Jiang Y, Chen X L, Zhu J S, et al, 2019. Application of Shenzhen storm-scale ensemble forecast system in heavy rainfall of South China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(3):124-131(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).
- 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[J]. 气象学报, 71(5):853-866. Liu L, Chen J, Cheng L, et al, 2013. Study of the ensemble-based forecast of extremely heavy rainfalls in China: experiments for July 2011 cases[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):853-866(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).
- 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 等, 2006. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报, 17(6):690-704. Ni Y Q, Zhou X J, Zhang R H, et al, 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in Southern China[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):690-704(in Chinese).
- 杨学胜, 2001. 业务集合预报系统的现状及展望[J]. 气象, 27(6):3-9. Yang X S, 2001. The new development and the outlook of the operational ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 27(6):3-9(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).
- 智协飞, 吕游, 2019. 基于频率匹配法的中国降水多模式预报订正研究[J]. 大气科学学报, 42(6):814-823. Zhi X F, Lyu Y, 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method[J]. Trans Atmos Sci, 42(6):814-823(in Chinese).
- 智协飞, 赵忱, 2020. 基于集合成员订正的强降水多模式集成预报[J]. 应用气象学报, 31(3):303-314. Zhi X F, Zhao C, 2020. Heavy precipitation forecasts based on multi-model ensemble members[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):303-314(in Chinese).
- 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.
- Luo Y L, Xia R D, Chan J C L, 2020. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: research progress during 2008—2019[J]. J Meteor Soc Japan, 98(1):19-42.
- Luo Y L, Zhang R H, Wan Q L, et al, 2017. The Southern China monsoon rainfall experiment (SCMREX)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(5):999-1013.
- Zhu Y J, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. Wea Forecasting, 30(5):1109-1124.