

深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨中的应用研究

江崧^{1,2} 陈训来^{1,2} 朱江山³ 王德立^{1,2} 陈元昭^{1,2}

(1 深圳市气象局, 深圳 518040; 2 深圳南方强天气研究重点实验室, 深圳 518040;

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 针对深圳对流尺度集合预报系统降水预报偏差的特征, 开展了基于频率匹配方法的降水偏差订正技术研究, 并对华南地区西南季风暴雨和台风暴雨典型过程中的应用试验。分析表明: 1) 该方法能有效订正深圳对流尺度集合预报的集合平均降水预报的雨量 and 雨区面积的系统性偏差, 订正后降水预报强度和雨区范围得到改善; 2) 订正后降水预报的ETS和BIAS评分有一定程度的提高, 改进了对流尺度集合预报系统对降水预报的空报现象; 3) 基于目标对象的空间检验方法(MODE)检验结果显示, 订正后降水预报的覆盖面积比、质心距离、强度比率等指标都得到改进, 与观测更加接近。研究成果也为对流尺度集合预报系统应用及改进提供参考依据。

关键词: 频率匹配, 集合预报, 偏差订正, MODE方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.03.017

Application of Shenzhen Storm-Scale Ensemble Forecast System in Heavy Rainfall of South China

Jiang Yin^{1,2}, Chen Xunlai^{1,2}, Zhu Jiangshan³, Wang Deli^{1,2}, Chen Yuanzhao^{1,2}

(1 Meteorological Bureau of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040; 2 Shenzhen Key Laboratory of Severe Weather in South China, Shenzhen 518040; 3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10081)

Abstract: By using frequency matching method (FMM), an experiment is performed to correct the precipitation bias from Shenzhen Storm-Scale Ensemble Forecast system (SZ-SSEF). The principle of this method is to use ensemble member based on precipitation frequency to calibrate the simple ensemble mean frequency to correct smoothing effect caused by ensemble averaging. It is applied to experiments of extreme rainfall events in South China induced by southwest monsoon on June 19 and the strong Typhoon Hato on 23 August 2017. The results show that the method can effectively eliminate system biases in precipitation amount and area coverage. Large area of erroneous or spurious rain from model forecasts can be effectively removed, and ETS and BIAS scores for precipitation forecast are significantly improved. The results of MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluation) test indicated that the corrected precipitation is closer to the observations in the precipitation average area ratio, centroid distance separation and the intensity value ratio. This paper aims to provide references for the application and improvement of the SZ-SSEF.

Keywords: frequency matching, ensemble forecast, bias correction, MODE (method for object-based diagnostic evaluation)

0 引言

华南暴雨研究工作一直以来备受气象学者的关注, 取得了许多有意义的成果^[1-6], 也是预报业务中

的难点和热点问题。随着计算机技术和数值预报技术的快速发展, 数值预报产品在各级气象台站发挥着越来越重要的作用, 特别是从2001年美国率先在业务中应用区域短期集合预报系统^[7], 集合预报产品在业务中应用日趋广泛, 已成为预报员中短期天气预报的重要参考产品^[8-9]。集合预报结果的传统处理方法为集合平均(EM), 即对所有集合成员的预报结果进行平均, 由于集合平均过程的非线性过滤作用把成员中可预报性较低的成分过滤掉而留下各成员共有的信息, 因此集合平均预报往往比单个预报更准确^[10]。

降水预报是业务中最为关注的天气要素之一,

收稿日期: 2018年12月7日; 修回日期: 2019年4月9日
通信作者: 陈训来(1979—), Email: cxlxun@163.com
资助信息: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-081); 重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2017YFC1502103); 国家自然科学基金项目(91544102); 广东省气象局重点项目(GRMC2018Z06); 广东省科技厅科技项目(2019B020208016)

但在降水预报中，集合平均预报则并不总是比单个预报更准确。研究发现，虽然平均后降水位置可能变得比较准确，但简单集合平均的平滑作用会造成小降水区扩张过大而大降水区缩减过小的问题，降低了集合预报对极端天气过程的预报能力，对很强或很弱的降水集合平均预报结果存在一定的缺陷^[11-13]。因此，很多气象学者研究了集合模式定量降水预报的统计后处理技术，以便改善集合模式预报结果的可靠性和预报技巧^[14]，如Slougher等^[15]研究了基于贝叶斯集合平均的定量降水释用方法；Yuan等^[16]发展了人工神经网络订正方法；Glahn等^[17]发展了集合核密度模式输出统计EKDMOS方法，对定量降水集合预报效果有所改进。Zhu等^[18]提出了频率匹配订正技术（Frequency-Matching Method, FMM）对集成员预报结果进行综合处理，得到了广泛的应用^[19-22]。Ebert^[19]利用集成员的原始降水频率来订正简单的算术集合平均降水预报，频率匹配集合平均既可保持经集合平均光滑后位置预报较准确的优点，同时又结合了原始集成员在降水量级分布上较准确的优点。李莉等^[20]采用频率匹配的方法对T213降水预报进行了订正，结果表明该方法对T213降水预报的偏差有明显改善；李俊等^[21]将该方法应用于AREM模式降水预报，能够显著改善模式降水预报中雨量和雨区范围的系统性偏差；周迪等^[22]针对四川盆地暴雨，采用Gamma函数来拟合频率分布曲线，进而使用频率匹配方法有效地订正了T213暴雨集合预报系统性误差。

频率匹配订正技术原理是假设降水预报频率与观测频率一致，统计关键区域的降水累积概率分布函数，将区域内包含的格点或站点作为同一资料序列进行统计分析，通过两者频率匹配获得降水预报订正值。因此，在应用频率匹配订正技术需要重点考虑不同区域的累积概率分布函数具有明显的差异，而目前针对华南地区对流尺度集合降水预报的频率匹配订正技术在实际业务中应用的研究仍然较少。

深圳市气象局自2013年开始引进和应用美国俄克拉荷马大学雷暴分析和预报中心（CAPS）技术，发展了深圳对流尺度集合预报系统（Shenzhen Storm-Scale Ensemble Forecast system, SZ-SSEF）。孔凡铀^[23]详细介绍了具有对流分辨率（convection-allowing model, CAM）的雷暴尺度集合数值预报研究面临的科学问题和研究现状。本文基于深圳对流尺度集合预报系统（SZ-SSEF）降水集合平均预报产品，研究频率匹配订正技术对华南地区强降水集合平均预报偏差的订正，以及该方法在典型暴雨过程中的应用效果，以期改进实际预报业务中对暴雨的预报能力。

1 深圳对流尺度集合预报系统简介

深圳对流尺度集合预报系统（SZ-SSEF）以美国雷暴分析和预报中心（CAPS）开发的ARPS模式为雷达同化和数据前后处理，预报部分采用WRF模式（V3.5.1）。该系统采用单向两重嵌套网格，外层网格和内层网格水平格距分别为12 km（DOM1）和4 km（DOM2）（表1），垂直方向为51层。该系统在外层区域分别采用欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的0.125°×0.125°资料和美国全球集合预报系统（GEFS）1°×1°资料作为初始场和边界条件，在内层区域利用ARPS模式的三维变分系统（ARPS3DVAR）和云分析模块分别同化广东省全省11部多普勒雷达的径向风和反射率资料，并选择不同的微物理过程和边界层参数化方案构建系统的10个集成员，形成了多模式初值、多微物理过程和多边界层过程的对流尺度集合预报系统。

表1 深圳对流尺度集合预报系统Dom2区域（4 km）模式成员的配置

Table 1 Settings of the model members in the Dom2 (4 km) of Shenzhen Storm-Scale Ensemble Forecast System

集成员序号	微物理参数化方案	边界层参数化方案	陆面模式
M00	Thompson	MYJ方案	Noah
M01	Morrison	YSU方案	RUC
M02	Morrison	MYJ方案	Noah
M03	Thompson	ACM2方案	Noah
M04	Morrison	ACM2方案	RUC
M05	WSM6	MYNN方案	Noah
M06	WDM6	MYJ方案	RUC
M07	Thompson	YSU方案	Noah
M08	WDM6	QNSE方案	Noah
M09	Thompson	MYNN方案	Noah

注：WDM6表示WRF Double-Moment 6-class；MYJ表示Mellor-Yamada-Janjic；YSU表示Yonsei University；ACM2表示Asymmetric Convective model version2；MYNN表示Mellor-Yamada Nakanishi and Niino；QNSE表示Quasi-Normal scale elimination；RUC表示Rapid update cycle。

深圳对流尺度集合预报系统的外层网格区域每天08和20时（北京时，下同）启动两次，预报时效为72 h，内层网格区域每隔3 h启动一次，每天启动8次，预报时效为36 h，系统实现从资料收集、资料处理、模式预报到预报结果处理与产品输出的全自动化，每小时输出模式集合预报结果，包括概率预报产品、集合均值、最大值、离散度等产品。深圳对流尺度集合预报系统在华南暴雨、强对流等预报业务中具有重要的参考价值^[24]。

2 频率匹配订正方法和资料

2.1 频率匹配订正方法简介

频率匹配订正法最早由Zhu等^[18]提出，Zhu等^[25]

进一步对该方法进行改进。频率匹配方法主要分为两个步骤：1) 通过构建样本降水预报量级以及相应观测量的累积分布函数获得降水频率分布。累积分布函数通过计算指定空间范围内超过一系列降水阈值（升序排列）的预报或观测的格点数量而获得。2) 进行预报调整，即通过频率匹配方法来使得预报与观测尽量保持频率分布的一致性。对于一个原始预报值“RAW”可以通过预报频率分布曲线（实线）获得出现频率值（图1），为保证预报与观测具有相同频率分布，则在观测频率分布曲线（虚线）上找到同样频率的位置，其对应的观测量级即为订正后的预报值“CAL”。通过此方法，可以看到在“RAW”值上预报频率高于观测（过度预报），通过频率匹配订正可以适当减小预报量级。

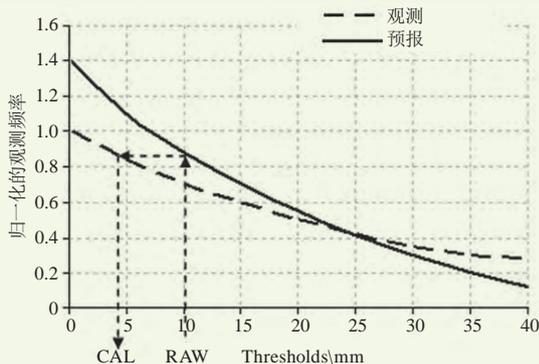


图1 频率匹配订正方法示意图^[25]

(虚线为观测频率分布曲线，实线为预报，均使用观测频率进行归一化处理)

Fig. 1 Schematic of the frequency-matching algorithm demonstrated as precipitation distributions normalized by observation frequency varying with threshold^[25]
(The dashed line is for observed and the solid line is for forecast precipitation)

2.2 资料

本文选取2014—2017年深圳对流尺度集合预报系统(SZ-SSEF)系统每日08时预报的24 h累积集合平均雨量数据，实况降水资料采用中国国家气象信息中心基于“PDF+BMA+OI”方法研制的中国区域地面自动站、卫星、雷达三源降水融合数据(CMPA_Hourly V2.0)^[26]，降水融合数据空间分辨率为5 km，时间分辨率为1 h。每天采用格点统计的方式计算降水频率，预报和实况降水频率的计算方法如下

$$F_{\text{频}j} = \frac{\sum_{i=1}^{i=30} B_j}{\sum_{i=1}^{i=30} A} \quad (1)$$

式中， $F_{\text{频}j}$ 为某个阈值降水的平均频率， B 为某个阈值降水每天出现的总次数， j 代表某个降水阈值， A 为每天的总站次， i 表示滑动平均窗口的天数。为了有足

够的样本数而又大致考虑到相似的天气形势，本文采取滑动平均的方法计算过去三年同时期30 d(前后各15 d)观测各阈值降水的平均频率作为参考频率，预报频率为同时期30 d深圳对流尺度集合预报系统集合平均降水预报对应阈值的平均频率，并基于集合平均预报的相似性进行了简单的训练样本分类。相似样本选择标准为：历史同期区域总降水量与当前区域总降水量的比值在0.5~1.5，同时历史同期降水面积与当前降水面积比值在0.5~1.5，在同期历史集合平均预报中挑选与当前个例相似的样本，并统计偏差，这样可以消除由于天气形势差异、模式系统(包括初、边值)缺陷造成的系统误差。

3 检验方法

3.1 分类检验方法

本文中采用的分类检验方法主要为公平技巧评分ETS(equitable threat score)和偏差评分BIAS(Bias score)，这也是目前气象部门对降水预报效果进行评定的有效方法，使用这两种方法对集合平均降水预报及订正效果做统计检验。以国家气象局颁布的降水强度等级划分标准为参考定义降水等级(表2)，将24 h累积降水划分为5个量级：小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~99.9 mm)、大暴雨(≥ 100.0 mm)。

表2 降水等级

Table 2 The levels of precipitation

降水等级	24 h累积降水量/mm
小雨	0.1~9.9
中雨	10.0~24.9
大雨	25.0~49.9
暴雨	50.0~99.9
大暴雨	≥ 100.0

偏差评分BIAS主要用来衡量模式对某一量级降水的预报偏差，该评分在数值上等于预报区域内满足某降水阈值的总格点数与对应实况降水总格点数的比值^[26]。BIAS评分的计算公式为

$$BIAS = \frac{F}{O} \quad (2)$$

式中， F 为预报区域内满足所需量级的降水总格点数； O 为该区域内实况满足该量级的总格点数。当 $BIAS > 1$ 时，表示预报结果较实况偏大；当 $BIAS < 1$ 时，表示预报结果较实况偏小；当 $BIAS = 1$ 时，则表示预报结果更接近实况，预报技巧最高。

由于BIAS评分主要是用于衡量预报区域内满足某降水阈值的预报技巧，并不能衡量降水的准确率，因此还需引入公平技巧评分ETS用于衡量对流尺度集合

预报的预报效果。*ETS*评分表示在预报区域内满足某降水阈值的降水预报结果相对于满足同样降水阈值的随机预报的预报技巧，因此该评分方法有效地去除了随机降水概率对评分的影响，相对而言更加公平、客观。*ETS*评分的具体计算公式如下

$$ETS = \frac{N_A - R(a)}{N_A + N_B + N_C - R(a)}, \quad (3)$$

$$R(a) = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{N_A + N_B + N_C + N_D}, \quad (4)$$

式中， $R(a)$ 表示随机情况下可能正确预报的次数； N_A 、 N_B 、 N_C 、 N_D 由表3定义。 N_A 表示“正确命中次数”； N_B 表示“虚报次数”； N_C 表示“漏报次数”； N_D 表示“正确拒绝次数”。根据定义，如果 $ETS > 0$ 时，表示对于某量级降水来说预报有技巧；如果 $ETS \leq 0$ 时，则表示预报没有技巧；如果 $ETS = 1$ 时，则表示该预报为完美预报。

表3 降水的检验分类表

Table 3 The classification of precipitation verification

实况	预报	
	有	无
有	N_A	N_C
无	N_B	N_D

3.2 基于目标对象的空间检验方法

空间预报检验方法是近年来发展起来的新兴检验技术，主要面向中尺度天气数值预报模式。采用WRF模式MET (Model Evaluation Tools) 检验包中基于目标对象的空间检验方法MODE (Method for Object-Based diagnostic Evaluation) [27]，该方法可以辨识二维场中的空间特征，对预报和实况中的降水目标识别和配对后，从预报降水和观测降水落区的质心距离、边界距离、重合面积、面积比率等多方面综合考虑相似度属性，给出相似度评分，为模式使用人员提供更多、更丰富的检验信息，得到了较为广泛的应用[28-31]。

4 集合预报订正试验及结果分析

为了说明频率匹配订正法的应用效果，本文选取了2017年6月19日西南季风暴雨过程和8月23日强台风天鸽暴雨过程做具体分析。2017年6月19日受西南季风影响，华南地区出现一次大范围较明显的强降水过程，其中广西中南部、粤东、粤西、珠江三角洲和福建北部市(县)出现了暴雨局部大暴雨的降水(图3c)；2017年第13号强台风天鸽8月23日12时50分登陆珠海金湾区沿海，是1965年以来登陆珠江三角洲的最强台风，给广东、广西南部沿海带来了狂风暴雨，其中珠江三角洲、粤西和广西南部市(县)普遍出现了暴雨到大暴

雨(图4c)，造成18人死亡、5人失踪，直接经济损失达281.05亿元。为方便叙述，文中将这两次区域性暴雨过程分别称为个例1和个例2。

4.1 累积频率分布

图2是根据2014—2016年同时期的实况观测和对流尺度集合预报系统预报降水数据计算的2017年6月19日和8月23日前后各15 d降水的累积频率分布图。如图2a所示，对个例1暴雨过程的降水集合平均预报，在70 mm的降水，实况观测和模式系统预报降水的累积频率一致；但对小于70 mm的降水，模式系统预报的累积频率小于实况观测累积频率，表明模式系统对降水预报频率具有系统性偏大的特征，需通过频率匹配订正适当减小降水预报量级；而对大于70 mm以上的强降水，模式系统预报累积频率大于实况观测累积频率，表明模式对降水预报频率具有系统性偏小的特征，需通过频率匹配订正适当增大降水预报量级。对个例2(图2b)也有类似的现象，但实况观测结果和模式系统预报的降水在135 mm时两者的累积频率才一致。

4.2 订正前后落区对比

从深圳对流尺度集合预报系统预报的24 h累积集合平均雨量分布图上可以看出，对于个例1，对流尺度集合预报系统较好地预报出了由西南季风造成的

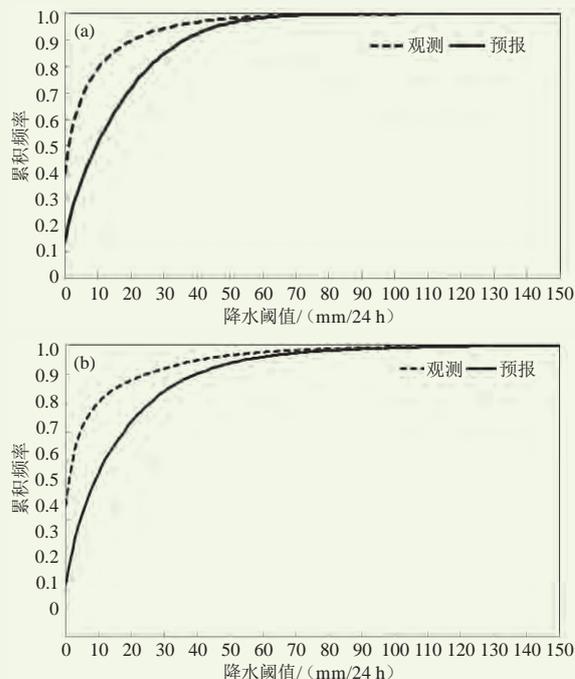


图2 实况观测和模式预报降水的不同阈值累积频率分布曲线 (a) 个例1; (b) 个例2

Fig. 2 Cumulative frequency curves of observed and forecasted precipitation over various precipitation thresholds (a) Case 1, (b) Case 2

覆盖广西、广东和福建的区域性暴雨过程（图3a），东北—西南走向的雨带形状和位置与实况较为一致，较好地预报出了位于广东、广西交界处以及福建中部的强降水中心（图3c）；但集合预报系统预报的集合平均雨量偏大，强降水雨带范围较实况区域偏大，重庆、贵州北部和湖南北部小雨区域空报现象较为明显。通过频率匹配方法订正后（图3b），降水量级偏大现象得到订正，强降水雨带范围与实况比较接近，小雨区域范围明显减小，降低了降水的空报。对个例2，

对流尺度集合预报系统较准确地预报出了强台风天鸽螺旋雨带和强降水总体分布特征，珠江口两侧、粤西和广西南部的大暴雨位置和强度与实况比较接近（图4a）。与个例1类似，小雨区域范围明显偏大，强降水中心的范围也较实况偏大，空报明显（图4b）。通过频率匹配方法订正后，广西北部、湖南和江西南部的小雨区域范围减小，珠江三角洲及粤东市县的暴雨和大暴雨预报区域范围也有较大程度的缩小，空报现象得到了较大改善（图4c）。

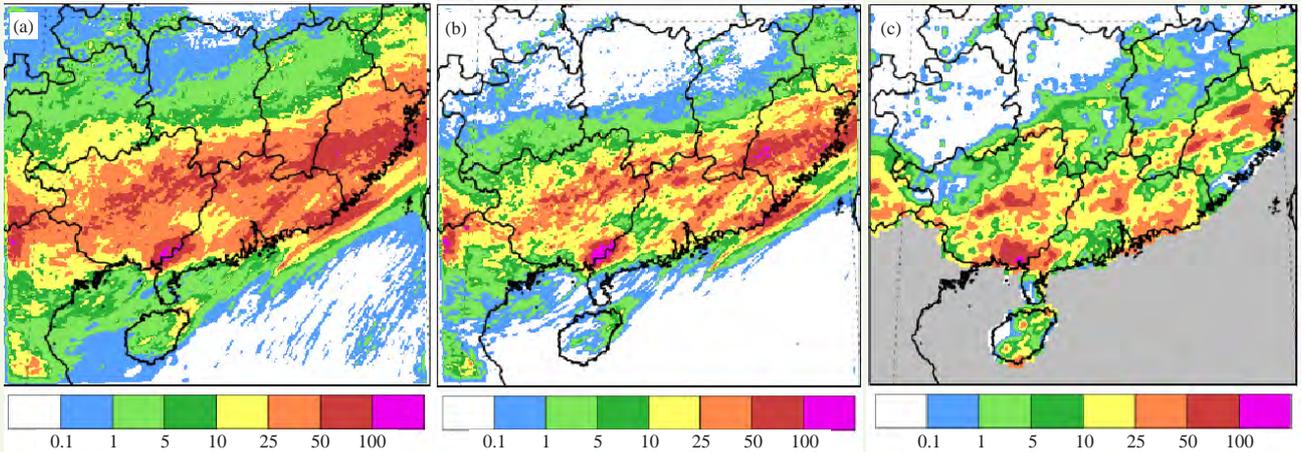


图3 2017年6月19日订正前后的24 h降水预报：（a）订正前，（b）订正后，（c）实况

Fig. 3 24 h precipitation forecasts at 08:00 BT 19 June 2017: (a) before BIAS correction, (b) after BIAS correction, (c) observation

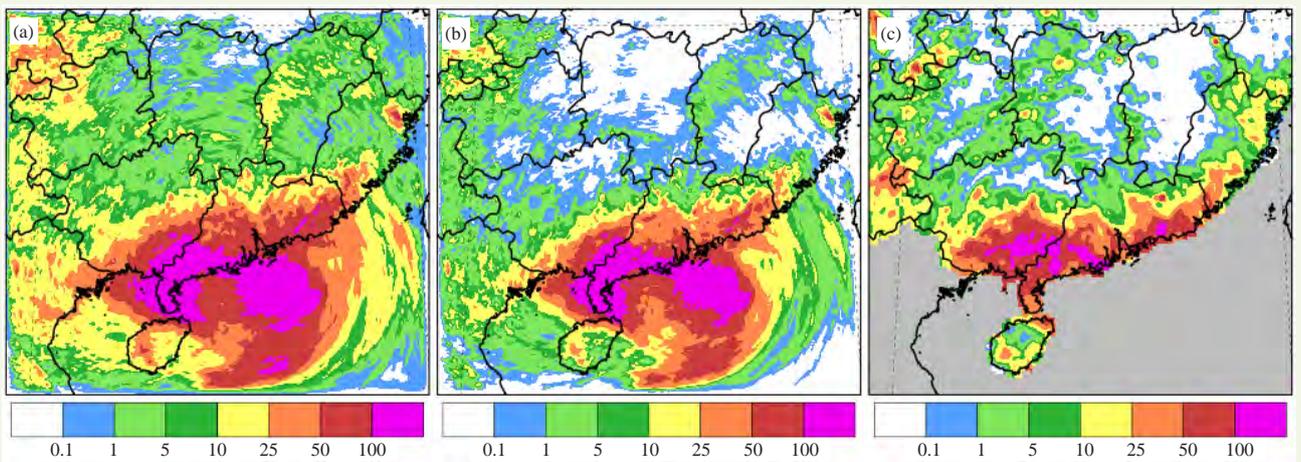


图4 2017年8月23日订正前后的24 h降水预报：（a）订正前，（b）订正后，（c）实况

Fig. 4 24 h precipitation forecasts at 08:00 BT 23 August 2017: (a) before BIAS correction, (b) after BIAS correction, (c) observation

另外，从这两个区域性暴雨过程也可以看出，尽管雨量大小和雨区范围的偏差得到了订正，但雨区的形状（走向）在订正前后变化不大。

4.3 订正前后分类检验评分

前面定性分析了频率匹配订正法应用效果对比，接下来从降水预报评分角度进行定量分析。降水预报

评分是衡量集合预报系统性能的重要指标，本文选取被广泛应用的ETS评分和偏差BIAS对订正前后模式预报效果进行检验，评分范围为模式区域范围内有融合降水观测数据的格点。从ETS评分结果看（图5a和图6a），对个例1和个例2，经过订正后，不同量级的降水预报ETS评分大部分都有一定程度的正向提升，其

中对小雨量级的ETS评分改善较为明显，ETS评分分别提高了20%和10%，主要是因为集合平均预报中大片虚报的小雨量级降水区域经过订正后被消除了。但总的来说，对大雨量级以上降水的ETS评分改进不是很明显。

从图5b和图6b中可以看出，经过频率匹配订正法后降水预报的BIAS评分改进较为明显，各个阈值的降水预报BIAS评分都有改进，订正后BIAS评分值接近与1，与实况更吻合，尤其是对于个例1中的暴雨和大暴雨量级的BIAS评分改进最为显著，分别从4.98和5.83减小到2.43和2.63，减小了一半以上，明显改进了对强降

水的空报现象，订正后对流尺度集合预报系统的强降水量级与实况较为一致，降水强度预报更准确。

经过订正后，虽然雨区和雨量得到改善的情况下，但ETS评分却没有明显提高，这与频率匹配订正法的基本原理有关：该方法主要是根据观测与预报降水量值的频率分布进行匹配，着重调整的是模式降水量值的总体强度，即模式的系统性偏差，并未涉及到降水落区的调整，而ETS评分主要是衡量降水落区的准确性，此方法订正后的雨区的边界附近有一定的效果，但雨区主体还得依赖模式本身的预报，故ETS评分提升效果不明显。

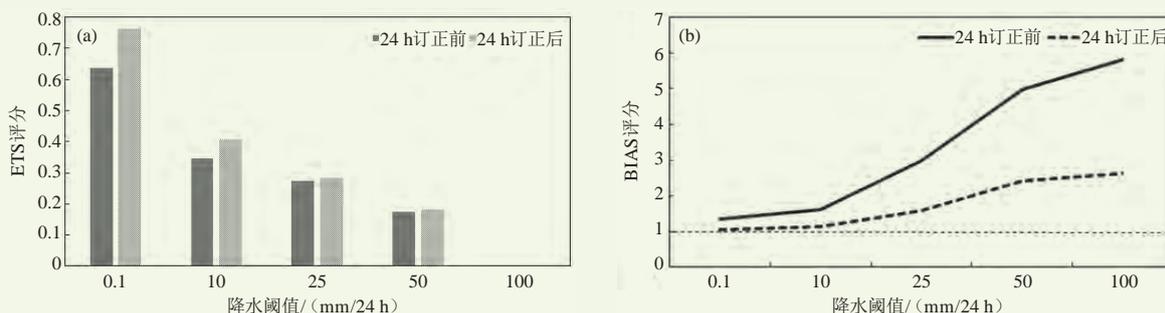


图5 2017年6月19日订正前后24 h降水预报的ETS评分 (a) 和BIAS评分 (b)

Fig. 5 ETS scores (a) and BIAS scores (b) before and after being calibrated for heavy rain forecasting results on 19 June 2017

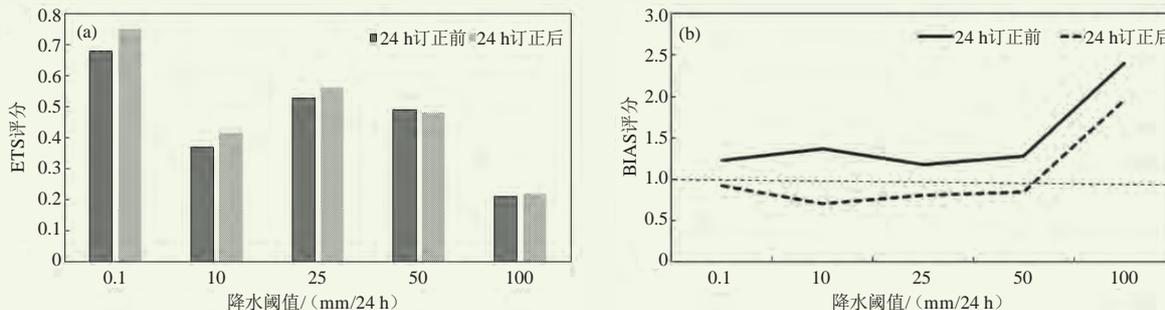


图6 2017年8月23日订正前后24 h降水预报的ETS评分 (a) 和BIAS评分 (b)

Fig. 6 ETS scores (a) and BIAS scores (b) before and after being calibrated for heavy rain forecasting results on 23 August 2017

4.4 订正前后空间检验结果

下面对这两次典型个例过程使用空间检验MODE方法进行检验和分析。首先对对流尺度集合预报结果和观测实况进行直径5格点的卷积操作，然后使用5 mm阈值提取降水对象，计算预报和观测实况降水对象各项特征的相似性。计算特征主要包括预报和观测之间的面积比、质心距离、轴角差异、强度比率等。

图7分别为2017年6月19日经过频率匹配订正前后的MODE识别出的目标匹配图，在本次个例共识别出1个配对目标。在订正前，模式预报5 mm以上降水区域要大于实况，降水预报与观测面积比（预报值比观

测值，下同）为1.38（表4），订正后，降水预报的面积明显减小，预报与观测面积比为1.01，与实况基本相当。识别区域的质心距离也由订正前的23.03 km减小到订正后的10.94 km，订正后预报目标与观测目标之间的空间偏差更小，并且轴角差分别为3.27°和4.87°，说明主要雨区的走向与实况比较接近。从预报强度来看，订正前降水预报目标第50%分位强度和第90%分位强度分别30.59和57.80 mm，对应观测目标第50%分位强度和第90%分位强度分别为16.13和39.13 mm，强度比率为1.90和1.48，而订正后，降水预报目标第50%分位强度和第90%分位强度分别21.73

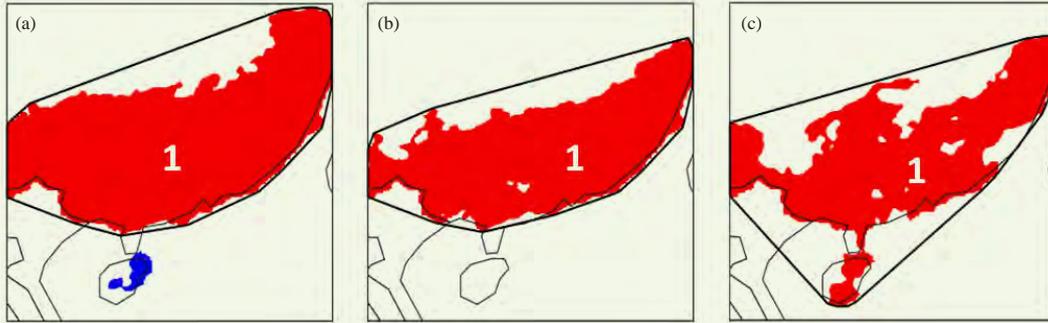


图7 2017年6月19日订正前后24 h降水识别出的目标匹配分布图
(a) 订正前预报, (b) 订正后预报, (c) 实况
(其中不同颜色识别多个合成目标, 蓝色代表没有配对的目标)

Fig. 7 Spatial distribution of matching objects for 24h precipitation forecasts on 19 June 2017
(a) before bias correction, (b) after bias correction, (c) observation

表4 2017年6月19日预报场和实况场匹配目标的诊断量值
Table 4 Attributes of matching object of 24 h precipitation forecasts on 19 June 2017

	面积比	质心距离/km	轴角差/°	第50%分位强度比率	第90%分位强度比率
订正前预报结果	1.38	23.03	3.27	1.90	1.48
订正后预报结果	1.01	10.94	4.87	1.35	1.36

和53.14 mm, 更接近实况观测, 强度比率也分别减小到1.35和1.36, 表明订正后改进了模式对预报降水偏强现象。

图8为2017年8月23日过程的检验结果。在订正前预报中, 集合平均的平滑作用导致华南沿海地区的降水与北部若干降水区域连成一体, 被识别为一个降水对象, 与实况观测中的降水对象差异较大(图8a和图8c), 订正预报则较好的区分了两个不同的降水目标对象, 预报与实况落区较为一致。为了便于对比分析, 表5中仅给出目标对1的属性诊断量统计值。从表中可以看出, 订正前预报与观测面积比为1.95, 预

报降水覆盖面积接近实况观测的2倍, 明显偏大, 而采用频率匹配法订正后, 预报与观测面积比为0.99, 两者覆盖面积基本相当; 质心距离也由订正前的54.07 km减小到14.33 km, 订正后预报目标与观测目标之间的空间偏差明显减小, 位置更接近, 轴角差都较小, 说明预报雨区的走向与实况基本一致。从预报强度来看, 订正后第50%分位强度比率为0.98, 比订正前更接近实况观测, 但是订正后的第90%分位强度比率高于订正前, 说明订正预报可能对高量级降水存在一定过度订正。总的来说, 经过频率匹配订正前后预报降水覆盖面积比、质心距离、强度比率等指标优于订正前的预报结果。

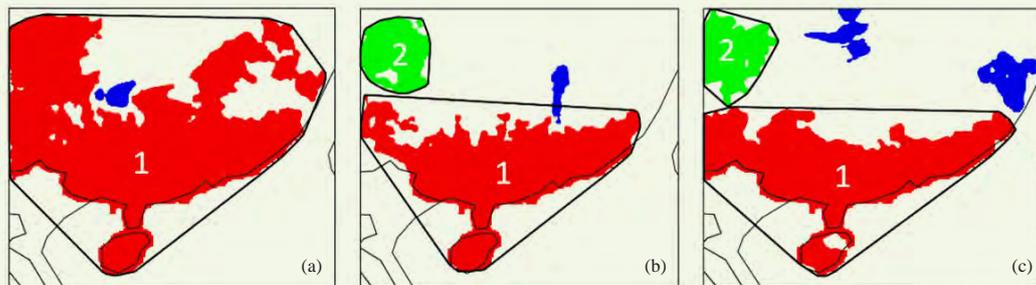


图8 2017年8月23日订正前后24 h降水识别出的目标匹配图
(a) 订正前预报, (b) 订正后预报, (c) 实况
(其中不同颜色识别多个合成目标, 蓝色代表没有配对的目标)

Fig. 8 Spatial distribution of matching objects for 24 h precipitation forecasts on 23 August 2017
(a) before bias correction, (b) after bias correction, (c) observation

5 结论与讨论

1) 采用频率匹配法能有效订正深圳对流尺度集合预报系统的集合平均降水预报的雨量 and 雨区面积的

系统性偏差, 订正后, 降水量级和雨区范围的预报得到改善, 特别是小雨量级的区域范围明显减小, 强降水中心的强度和范围也与实况更加吻合。

表5 2017年8月23日预报场和实况场匹配目标的诊断量值
Table 5 Attributes of matching object of 24 h precipitation forecasts on 23 August 2017

	面积比	质心距离/km	轴角差/(°)	第50%分位强度比率	第90%分位强度比率
订正前预报结果	1.95	54.07	0.99	0.60	1.02
订正后预报结果	0.99	14.33	2.87	0.98	1.23

2) 基于分类检验方法的客观评分表明, 订正后降雨预报的ETS评分有所提高, 各个阈值的降水BIAS评分都有改进, 订正后BIAS评分值接近1, 与实况较吻合, 可以减小暴雨量级和大暴雨量级的BIAS偏差, 改进了对流尺度集合预报系统对强降水的空报现象。

3) 应用面向目标的空间检验方法(MODE)对订正前后降雨预报进行了空间检验, 订正后降水预报的覆盖面积比、质心距离、强度比率等大多数指标都优于订正前的预报结果, 订正后预报结果更加接近观测。

本文主要介绍了频率匹配订正法在华南地区西南季风暴雨和台风暴雨典型个例中的应用试验, 由于个例的特殊性, 其结论具有一定的局限性, 对其他类型降水过程的订正效果如何还需要批量试验和系统性的检验分析。同时, 文中采用近三年同期30 d的降水平均频率作为参考频率, 并基于集合平均预报的相似性进行了简单的训练样本分类, 但仍会对一些偏离平均状况的降水过程的预报偏差修正效果不佳, 未来将进一步根据华南地区典型类型的强降水过程进行更细致的分天气类型、分季节进行统计分析和研究, 以减少由于降水类型差异而导致的误差。另外, 华南地理位置特殊, 影响暴雨因素复杂, 下一步将通过对流集合预报模拟试验进一步研究华南暴雨的影响因子和机制。最后需要指出的是, 由于集合预报系统降水预报误差的因素很多, 基于频率匹配法的降水订正主要用于减少模式系统误差, 如果系统性误差不显著时, 对预报改进特别是暴雨落区预报改进能力有限, 因此, 还需要进一步提高对流尺度集合预报系统对降水的预报能力。

参考文献:

[1] 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 广东省天气预报技术手册. 北京: 气象出版社, 2006.
[2] 薛纪善. 1994年华南夏季特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1999.
[3] 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 98华南暴雨科学试验研究. 北京: 气象出版社, 2003.
[4] 何立富, 周庆亮, 陈涛. “05.6”华南暴雨中低纬度系统活动及相互作用. 应用气象学报, 2010, 21(4): 386-394.
[5] 陈炳洪, 林良勋, 张维, 等. 5·23广东特大暴雨过程特点及数值诊断分析. 热带气象学报, 2011, 27(5): 738-744.
[6] 蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰, 等. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程. 热带气象学报, 2007, 23(6): 521-530.
[7] Du J, Steve T. Implementation of a real-time short range ensemble forecasting system at NCEP: an update. Preprint, 9th conference

on mesoscale processes. Ft. Lauderdale, Florida, American Meteorological Society, 2001, 355-356.
[8] 杨学胜. 业务集合预报系统的现状及展望. 气象, 2001, 27(6): 3-9.
[9] 杜钧, 康志明. 天气预报中不确定性问题的调查分析. 气象科技进展, 2014, 4(1): 58-67.
[10] 杜钧, 陈静. 单一预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革. 气象, 2010, 36(11): 1-11.
[11] Du J, Mullen S L. Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. Monthly Weather Review, 1997, 125(10): 2427.
[12] 李俊, 杜钧, 王明欢, 等. AREM模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验. 热带气旋学报, 2010, 26(6): 733-742.
[13] 李俊, 王明欢, 公颖, 等. AREM短期集合预报系统及其降水预报检验. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 32-39.
[14] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理研究技术综述. 气象学报, 2018, 76(4): 493-510.
[15] Sloughter J M L, Raftery A E, Gneiting T, et al. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging. Monthly Weather Review, 2007, 135(9): 3209-3220.
[16] Yuan H, Gao X, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1287-1303.
[17] Glahn B, Peroutka M, Wiedendorf J, et al. MOS uncertainty estimates in an Ensemble framework. Monthly Weather Review, 2009, 137(1): 246-268.
[18] Zhu Y, Iyengar G, Toth Z, et al. Objective evaluation of the NCEP global ensemble forecasting system. Preprints, 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA, American Meteorological Society, 1996, J79-J82.
[19] Ebert E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Monthly Weather Review, 2001, 129(10): 2461-2480.
[20] 李莉, 朱跃建. T213降水预报订正系统的建立与研究. 应用气象学报, 2006, 17(Z1): 130-134.
[21] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析. 气象, 2014, 40(5): 580-588.
[22] 周迪, 陈静, 陈朝平, 等. 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, 2015, 34(2): 97-104.
[23] 孔凡铀. 雷暴尺度天气集合数值预报研究. 气象科技进展, 2018, 8(3): 53-60.
[24] 陈训来, 魏晓琳, 谢坤, 等. 雷暴尺度集合预报系统在深圳强对流春季试验中的应用//第33届中国气象学会年会 S8 数值模式产品应用与评估. 2016.
[25] Zhu Y, Luo Y. Precipitation calibration based on the frequency-matching method. Weather and Forecasting, 2015, 30: 1109-1124.
[26] 潘昶, 谷军霞, 徐宾, 等. 多源降水数据融合研究及应用进展. 气象科技进展, 2018, 1: 143-152.
[27] Kong F, Xue M, Thomas K, et al. Real-time storm-scale ensemble forecast experiment-analysis of 2008 spring experiment data // 24th Conference on Several Local Storms, American Meteorological Society, 2008, Savannah.
[28] Davis C A, Brouwn B G, Bullock R, et al. Object based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain system. Monthly Weather Review, 2006, 134: 1785-1795.
[29] Micheas A C, Fox N I, Lack S A, et al. Cell identification and verification of QPF ensemble using shape analysis techniques. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2007, 343(3-4): 105-116.
[30] 王国荣, 陈敏, 由凤春, 等. 基于对象诊断的空间检验方法(MODE). 气象科技, 2014, 42(4): 652-656.
[31] 李佳, 陈葆德, 徐同. 目标检验方法在高分辨率数值天气预报检验中的应用. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(5): 1-9.