

唐健,代刊,宗志平,等,2018.主客观融合定量降水预报方法及平台实现[J].气象,44(8):1020-1032.

主客观融合定量降水预报方法及平台实现*

唐 健 代 刊 宗志平 曹 勇 刘凑华 高 嵩 于 超

国家气象中心,北京 100081

提 要: 随着天气预报业务现代化的发展,预报员面临气象数据爆发增长、服务前端需求不断提高以及客观预报技术广泛应用带来的挑战。传统以手工绘制降水落区为主的定量降水预报(QPF)技术流程已经不能帮助预报员在更高层次体现附加值。为支撑预报员在 QPF 流程中的核心作用,设计和开发了主客观融合 QPF 平台。该平台从海量预报数据选取、多源 QPF 集成、QPF 调整和订正、格点化处理和服务产品制作五个方面帮助预报员控制数字化预报全流程。发展了多项关键技术支持平台的智能化,包括多模式 QPF 数据集构建技术、多模式 QPF 集成技术、QPF 预报场调整和订正技术以及格点场后处理技术。基于 MICAPS4 系统,实现了主客观融合 QPF 平台的主要功能,发布了“QPF Master Blender 1.0”版本,并在 2017 年 5 月投入业务应用,取得良好反馈和效果。最后,对平台的未来发展进行了展望,包括发展数值模式检验评估工具支持预报员做出最优判断,研究多尺度模式信息的融合技术等。

关键词: 定量降水预报,大数据,智能化预报,格点预报,天气预报系统

中图分类号: P456,P409

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.08.004

Methods and Platform Realization of the National QPF Master Blender

TANG Jian DAI Kan ZONG Zhiping CAO Yong LIU Couhua GAO Song YU Chao

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: With the development of the weather forecast modernization, forecasters are facing challenges brought by meteorological data explosion, the increasing demand of the service front end as well as the wide use of objective forecasting technology. Traditional quantitative precipitation forecast (QPF) technology, which is mainly based on manually plotting precipitation areas, can no longer assist forecasters to demonstrate added value at higher levels. To support the forecasters' central role in the QPF procedure, a subjective and objective QPF blender was designed and developed. This platform helps forecasters to take control of the whole process of numerical forecast from the following five aspects: selection from mass forecast data, integration of multi-source QPF, adjustment and correction of QPF, grid processing and service product production. The intelligence of the platform is secured by the development of a number of key supporting techniques, including multi-model QPF dataset construction technology, multi-model QPF integration technology, QPF field adjustment and correction techniques and gridded QPF post-processing technology. Based on MICAPS4, the main functions of this QPF platform has been realized. The “QPF Master Blender 1.0” version was released and put into operation in May 2017, which has obtained good feedback and effectiveness. By the end of this paper, the future development of the platform is prospected, including the development of numerical model verification tools to support forecasters to make the best judgments, and research on the fusion technologies of multi-scale model information.

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306002 和 GYHY201206005)及中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015Z06)共同资助
2017 年 11 月 8 日收稿; 2017 年 12 月 20 日收修定稿

第一作者:唐健,主要从事集合预报、天气预报方向的研究. Email: tangjian@cma.gov.cn

通信作者:代刊,主要从事集合预报、定量降水预报方向的研究. Email: daikan1998@163.com

Key words: quantitative precipitation forecast (QPF), big data, intelligent forecast, gridded QPF, weather forecast system

引 言

降水是最重要的天气产品之一,在许多预报应用领域起到关键作用(Kim and Barros, 2001; Messner et al, 2014; 王凤娇等, 2011; 薛建军等, 2010)。为应对需求,各国预报中心建立了定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)业务。毕宝贵等(2016)全面回顾了 QPF 预报技术的进展,指出数值模式不断发展和统计后处理技术的应用使得 QPF 精准度持续提升,但预报员在其基础上能够提供的附加值越来越有限。近年来,随着天气预报业务现代化的发展,如何保持预报员在 QPF 业务流程中的核心地位,受到三个方面的挑战。

首先是来自于海量预报数据信息的挑战。现代 QPF 业务建立在数值模式预报基础之上。为提升降水预报能力,各国全球数值预报模式都在加强数据同化、完善物理过程和升级时空分辨率,如欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的确定性数值预报系统分辨率达到 9 km/137 层(Malardel et al, 2016);我国自主研发的 GRAPES 模式系统(Global/Regional Assimilation and Prediction System; 陈德辉和沈学顺, 2006; 陈德辉等, 2008; 张人禾和沈学顺, 2008)提供 25 km 分辨率的预报数据。此外,由上海市气象局牵头建设的数值预报云实时提供 GRAPES-Meso (陈德辉等, 2008)、GRAPES-RAFS、GRAPES_3 km, 以及华北、华东和华南区域中心高分辨率模式数据(<http://cma-nwp.org>), 已成为精细化预报业务的重要支撑。另外,为提供降水预报的不确定性信息以及进行极端天气早期预警,集合模式系统也得到快速发展,如 ECMWF (Palmer et al, 1993)和 NCEP(National Centers for Environmental Prediction; Toth and Kalnay, 1993; 1997)的全球集合预报系统,我国在 2014 年升级的 T639 集合模式系统,以及交互式全球大集合(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble, TIGGE)系统(Bougeault et al, 2010)。除全球集合模式外,目前对流尺度的集合预报系统成为研究前沿热点(Gebhardt et al, 2008; Golding et al,

2014),我国的 GRAPES_Meso 区域集合系统也在不断完善(张涵斌等, 2014; 严明良等, 2009; 陈力强等, 2005)。因此,随数值预报的快速发展,其数据信息呈现数量级增长。中国气象局矫梅燕副局长在广州召开的世界气象组织基本系统委员会 2016 年技术大会上指出,2015 年我国气象部门每天处理的数据达到 6.54 TB,预计到 2020 年将升至近 60 TB 以上,这给预报员如何从海量数据中挖掘有效预报信息带来巨大挑战。

其次是来自 QPF 产品应用前端需求不断提高的挑战。如在水文应用中, QPF 的时空分辨率达到 1 h 和 10 km 以下才能满足山洪预报的要求(Arnaud et al, 2002; Zehe et al, 2001),且准确率至关重要(Knebl et al, 2005)。为适应需求,美国天气预报中心(Weather Prediction Center, WPC)建立了完整的产品体系,包括未来逐 3/6/24 h 累积 QPF 和降水概率等格点化产品,空间分辨率达到 2.5 km。中央气象台也已开展 QPF 业务多年,并在 2015 年建立了格点化 QPF 预报业务,采用客观技术将预报员的落区预报转换为分辨率 5 km 的 QPF 产品(曹勇等, 2016)。2016 年发布的《现代气象预报业务发展规划(2016—2020 年)》提出更高目标,要求至 2020 年发布空间和时间分辨率分别达到 1~2.5 km 和 1 h 的精细格点化预报,且暴雨准确率相对国际先进模式保持 10%~20% 的提高率。传统基于主观绘制 QPF 流程,已不能支撑预报员实现上述目标。

第三,大数据挖掘技术在预报业务中的广泛应用,对预报员的传统价值提出挑战。如 Novak et al (2014)对 WPC 的 QPF 预报进行评估,表明预报员相对于经过偏差订正和降尺度方法处理后的客观 QPF 预报没有体现出优势;同样的情况在国家气象中心 QPF 业务中也存在,如“集合最优百分位”方法在 TS 评分上已经接近或略微超过预报员(毕宝贵等, 2016)。客观预报技术比预报员表现出更好评分技巧的原因,有 3 个方面:(1)预报员的传统价值体现在对模式降水量级系统性偏差的订正上,客观 QPF 方法能够更好地替代预报员这部分工作;(2)除量级订正外,预报员还通过对天气系统演变的分析来对雨区的位置和分布进行调整,然而这非常困

难,TS 评分也很难表现出来;(3)当发布暴雨预警时,预报员为保证服务效果或避免人为漏报,会增大空报率。

面对上述挑战,预报员需要在海量信息及数据挖掘技术的基础上,寻找新的附加值,在更高层面发挥作用。毕宝贵等(2016)指出,预报员的角色需要从传统的手工产品制作中解脱出来,通过基于广泛检验评估对模式预报深入理解的能力和周密设计的人工智能对海量信息挖掘的辅助,向基于预报信息的传递和解释以帮助用户进行科学决策的角色转变。代刊等(2016)也提出,迫切需要发展便捷、高效的预报编辑工具,帮助预报员实现附加值。为此,本研究提出设计主客观融合 QPF 平台,帮助预报员应对多种挑战。

1 业务流程设计

如何整合海量模式预报数据信息以获得精准的 QPF 产品,是主客观融合 QPF 平台需要解决的首要问题。来自不同预报中心的模式系统同化了不同的观测资料,同时采用不同的动力框架和物理参数过程,因此对不同区域、季节、时效和类型的天气表现各有优缺点。另外,不同类型的数据源可提供相互补充的 QPF 预报信息,例如全球数值模式系统能够提供大尺度系统的降水信息,集合模式系统能够提供预报的不确定性和低概率的极端天气信息,高分辨率的中尺度模式可以提供对流性降水系统的形态、演变等特征。目前,国际上重要的业务中心都在发展能够帮助预报员快速挖掘海量预报信息的工具。如在美国 WPC 的 QPF 预报流程(Petersen et al, 2014)如下:预报员需要对 100 多个数值模式的预报结果进行检验评估,利用“WPC MASTER BLENDER”软件平台,快速选择模式预报并依据检验评估给出相应的权重,输出相对粗分辨率的产品;使用自动化后处理技术形成高分辨率产品并下发给各区域天气业务中心,经过当地天气预报员借助预报图形化编辑器进行格点预报编辑,最后传回、拼接并对外发布。

中央气象台传统的 QPF 业务流程(图 1)中,预报员通常以单个模式的 QPF 为基础(通常为 ECM-WF 全球确定性高分辨率模式),参考其余几个模式或客观预报方法输出,然后利用 MICAPS 的绘图工具绘制不同等级的降水落区等值线,最后将落区

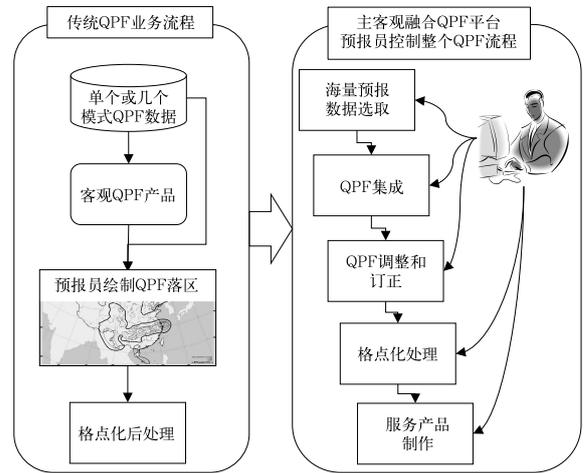


图 1 传统 QPF 业务流程与主客观融合 QPF 平台流程对比

Fig. 1 Comparison between the traditional QPF process and the subjective and objective integrated QPF process

等值线通过自动化后处理作业转换为格点产品。其缺点在于:无法有效利用海量模式数据信息;花大量时间在手工绘制等值线落区上;对于格点化后处理进程无法控制;没有工具根据用户服务需求制作不同种类的产品。为此,依据代刊等(2016)提出的数字化中短期业务预报技术流程框架,设计主客观融合 QPF 平台流程,分为以下 5 个步骤:(1)基于多模式 QPF 实时数据集,依据针对不同时效、不同季节、不同需求的使用经验,挑选合适的 QPF 数据源;(2)根据对历史、近期的预报检验和对未来不确定性的评估,采用多模式 QPF 集成技术获得最优猜测场;(3)基于各种天气概念模型和对模式误差的理解,利用 QPF 预报场调整技术、等值线订正技术进一步校正最优猜测场;(4)利用格点化后处理技术,对最优猜测场进行空间降尺度和时间拆分,得到高分辨率的格点预报场;(5)最后根据各种服务需求,如暴雨预警、台风暴雨、过程降雨量、单点预报等,制作相应服务产品。该流程应用多项智能技术帮助预报员控制整个数字化预报流程,并快速实现主观校正思路。

2 关键技术

2.1 多模式 QPF 数据集构建技术

主客观融合 QPF 平台以多模式 QPF 实时数据

集为基础。目前,不同模式来自不同的数据源,具有不同的地图投影、时空分辨率、累积计算方式等(表 1)。因此,需要设计标准的数据格式及存储规范以构建统一的多模式 QPF 实时数据集。标准数据格式采用遵循气候和预报数据惯例的 NetCDF 文件格式(Unidata, 2017),包括确定性和集合预报两类元数据。存储规范使用具有标准命名规则的文件集,即:

```
XXX_IT_YYYYMMDDHH_VT_YYYYMMD-
DHH_FH_FFF_AT_VVV.nc
```

这里 XXX 表示数据名称,IT 标示模式起报时间 YYYYMMDDHH,VT 标示模式预报时刻

YYYYMMDDHH,FH 标示预报时效,AT 标示降水累积时长(逐 3/6/12/24 h)。此外,统一 QPF 预报场的空间范围为(0°~60°N、70°~140°E),分辨率为 0.1°×0.1°。采用不同插值方法将模式 QPF 场投射到统一网格上:若模式数据原始分辨率低于统一场,则采用双线性插值;若模式原始分辨率接近或高于统一场,双线性插值会造成降水场的平滑及不守恒,使用 Accadia et al(2003)提出的 Remapping 技术,即将统一场上每个网格划分成为 5×5 的子网格,各子网格点值等于最邻近原始网格点的值,然后对 25 个子网格点求平均得到中心上统一场格点的降水。

表 1 业务模式数据源列表

Table 1 List of data sources of operational numerical weather prediction model

模式类型	名称	空间分辨率	时间分辨率	数据源
全球确定性 模式系统	中国气象局 GRAPES 全球模式/ GRAPES_GFS_Global	0.25°	0~120 h 逐 3 h//120~168 h 逐 6 h 168~240 h 逐 12 h//24~240 h 逐 24 h	CIMISS 数据库
	中国气象局 T639 模式/ T639_GFS_Global	0.28125°		
	欧洲中心全球高分辨率模式/ ECMWF	0.125°	0~72 h 逐 3 h//72~240 h 逐 6 h 24~240 h 逐 12/24 h	
	德国全球模式/GERMAN	0.25°	0~48 h 逐 6 h//48~168 h 逐 12 h 24~168 h 逐 24 h	
	日本全球模式/JMA 美国全球模式/NCEP	0.25° 0.5°	0~84 h 逐 3/6/12/24 h 0~240 h 逐 3/6/12/24 h	
全球集合 模式系统	欧洲中心集合预报模式/ ECMWF_GEFS	0.5°	0~360 h 逐 12/24 h	国家气象信息 中心集合 预报数据 FTP 服务器
	中国气象局 T639 集合预报模式/ T639_GEFS	0.5°	0~360 h 逐 6/12/24 h	
	加拿大全球集合预报模式/ CMC_GEFS 美国集合预报模式/NCEP_GEFS	1° 1°	0~384 h 逐 6/12/24 h 0~384 h 逐 6/12/24 h	
区域中心 中尺度 模式系统	中国气象局 GRAPES 中尺度模式/ GRAPES_Meso	0.1°	0~84 h 逐 3/6/12/24 h	中国气象局 数值预报云
	中国气象局 GRAPES 3 km 中尺度数值 模式/GRAPES_3 km	3 km	0~36 h 逐 1/3/6/12/24 h	
	华东区域中心 9 km 中尺度数值 模式/WARMS_9 km	9 km	0~72 h 逐 1/3/6/12/24 h	
	华北区域中心 9 km 中尺度模式/ RMAPSST_9 km 华南区域中心 9 km 中尺度模式/ GZ_GRAPES_9 km	9 km 9 km	0~84 h 逐 3/6/12/24 h 0~168 h 逐 3/6/12/24 h	
客观预报 方法产品	相似降水预报 (严明良等, 2009; 林建等, 2013)	0.1°	036~180 h 逐 24 h	国家气象中心 客观产品数据 服务器
	频率订正法(李俊等, 2014)	0.1°	036~180 h 逐 24 h	
	逻辑回归订正(张芳华等, 2016)	0.1°	024~252 h 逐 12 h	
	集合最优百分位(毕宝贵等, 2016)	0.1°	024~252 h 逐 12 h	

2.2 多模式 QPF 集成技术

已有研究表明,集成多模式预报信息的 QPF 比单个模式表现出更好的预报技巧,如 Ebert(2001)发现简单集合平均的预报技巧和精度(均方根误差和 ETS 评分)要远高于任何单个模式,而最大改进来自于降水空间分布更接近实况(减少误差比重占 30%)。多模式 QPF 集成技术有多种,包括:Ebert(2001)提出的权重平均(权重依据前期检验定量确定)、中位值预报(只对半数成员预报降水的格点进行平均)、偏差减少(依据面积偏差比值线性变换集合平均场)和概率匹配平均来代替简单集合平均;陈力强等(2005)和林建等(2013)提出的利用多模式之间相似性确定权重的集成方法;代刊等(2016)发展的最优百分位方法,设计算法规则将不同降水等级上最优的百分位值集成起来;Novak et al(2014)介绍的伪偏差校正方法,主要考虑预报的不确定性信息来计算集成的权重系数。上述集成方法通常基于数种模式,针对某个评分目标或应用场景(如强降水预警、中长期预报)进行优化,因此不能完全代替预报员的主观作用。在主客观融合 QPF 平台中,为反映预报员对模式检验评估的结果,权重系数由预报员给定:

$$QPF_{\text{guess}} = \sum_{i=1}^N \omega_i QPF_i, \text{ 且 } \sum_{i=1}^N \omega_i = 1 \quad (1)$$

式中, N 为挑选出的数值模式数量, ω_i 为预报员给定 QPF_i 的权重系数, QPF_{guess} 为输出的集成猜测场。

由于降水为非高斯分布的变量,采用式(1)获得的猜测场将使得小量级降水范围扩大,大量级降水受到平滑而减弱,从而损失了有效的预报信息。为解决该问题,引入概率匹配技术(Ebert, 2001),将具有较好空间分布和具有较好量级频率分布的两个 QPF 预报场合成起来。具体步骤(图 2):(1)首先将猜测场的 $W \times H$ 个格点按照从大到小顺序排列得到序列 A;(2)预报员选取匹配场,可以是评估的降水概率分布误差最小的单个模式或客观预报场,按照从大到小顺序排列得到序列 B;(3)用序列 B 的值替换 A 相同位置的猜测值;(4)将序列 A 恢复到猜测场的原位置,即得到概率匹配猜测场。此外,为了避免全场概率匹配使得距离较远的降水区域相互影

响,增加局地概率匹配选项,即对每个格点,以该格点为中心选取正方形区域(如 $5^\circ \times 5^\circ$),计算该区域的概率匹配场,中心值即为该格点的概率匹配猜测场值,依次循环每个格点得到概率匹配猜测场。

初步分析权重系数的特征。图 3 给出 2017 年夏季 36 h 时效的 24 h 累积 QPF 的 5 个业务中心的数值模式最优权重系数(即权重系数的组合能获得最高 TS 评分)。由图可见,预报员一直作为基本场的 ECMWF 降水预报并不在大部分时间占据最高权重;部分时段某个模式呈现持续的高权重,如 6 月中旬的 ECMWF 模式、8 月上旬的 T639 模式和 GRAPES_GFS 模式,这为利用近期检验评估来确定模式权重提供信心;在很多时间,需要使用 2 个或以上数量的模式才能获得最高预报技巧。

2.3 QPF 预报场调整和订正技术

基于权重平均和概率匹配技术得到的最优猜测场,能够比单模式表现更高的预报技巧的原因,除了集成来自不同模式的优势信息之外,还平滑滤除了一些可预报性较低的中小尺度特征(Surcel et al, 2014)。在实际预报中,预报员可以根据对天气概念模型的理解、模式预报误差的判断等,进一步对最优猜测场进行调整和订正,增加降水分布的细节。主客观融合 QPF 平台提供多种技术,帮助预报员从全局或局部对预报场进行校正,实现预报订正思路。

全场频率调整技术用于将最优猜测场的频率分布曲线调整到预报员给定的频率分布曲线上,从而使全场降水量级得到改变。算法分为 3 个步骤(图 4):(1)首先将降水量级按照间隔 5 mm 分段,计算各段内出现的格点数量,之后利用局地多项式

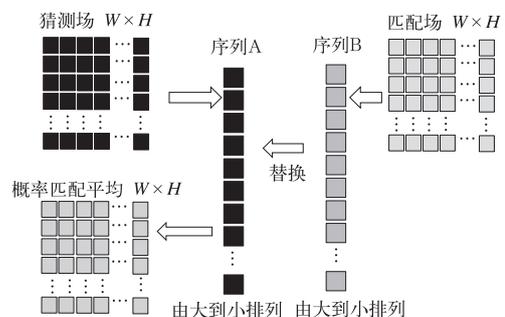


图 2 概率匹配平均方法示意图

Fig. 2 Schematic of probability matched mean method

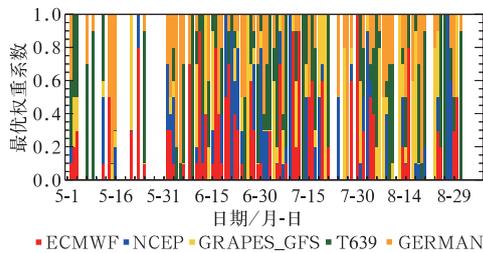


图 3 2017 年汛期 ECMWF 模式、NCEP 模式、GGRAPES_GFS 模式、T639 模式和 GERMAN 模式的 36 h 时效 24 h 累积降水的最优权重系数 (图中空白处表示该日期模式数据不完整)

Fig. 3 Best weight for 24 h-accumulated QPF from ECMWF, NCEP, GRAPES_GFS, T69, GERMAN models at step +36 h in rainy season 2017 (Empty slot is due lack of model data)

拟合(Cleveland et al,1991)得到猜测场频率分布曲线(虚线);(2)预报员按照预报经验主观给出调整场频率分布曲线(实线);(3)针对每个格点上的猜测值“RAW”可以通过猜测频率分布曲线(虚线)获得出现频率值,为保证猜测场与调整场具有相同频率分布,则在调整频率分布曲线(实线)上找到同样频率的位置,其对应的降水量即为调整后的预报值“CAL”。图 5 给出调整前和调整后降水场的对比:对于小到中等量级的降水(≤ 50 mm),由于猜测曲线在调整曲线之上,表明预报员要调整预报偏湿的情况,反映在图 5b 上降水范围得到有效的缩小;对于大量级的降水(> 50 mm),猜测曲线则在调整曲

线之下,表明预报员要增大强降水的量级,反映在图 5b 上安徽南部的强降水中心值增大。

全场滤波调整技术主要用于滤除降水场的噪音分布,应用情景包括最优猜测场主要来自高分辨率中尺度模式预报,或者集成成员之间差别较大而造成明显噪音。滤波调整技术算法通常分为 3 个步骤:对于每个格点,搜寻周围领域点,可以是矩形范围内,或者半径为 R 的圆形范围;对该格点及其领域点赋予权重值,不同的滤波方法采取不同的权重策略(表 2);最后求权重平均,得到滤波值。

单点和目标雨区的值域调整技术主要用于最优猜测场的局部调整。单点值域调整即在预报员指定格点上增加或减少预报值 ΔQ ,同时为了防止与周围格点的不连续性,其领域点值增减 $\Delta Q_i = \Delta Q e^{-\frac{d_i^2}{2R^2}}$,这里 d_i 为领域点到单点的距离, R 为指定

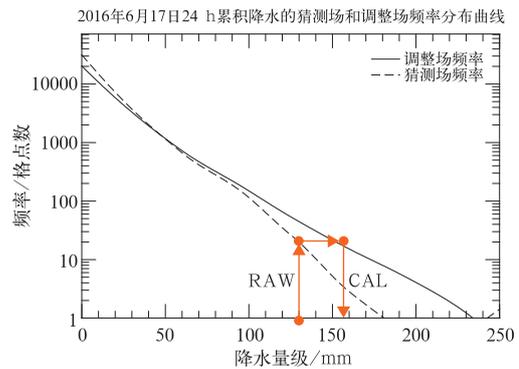


图 4 全场频率调整技术示意图

Fig. 4 Schematic of frequency adjusting method for whole field

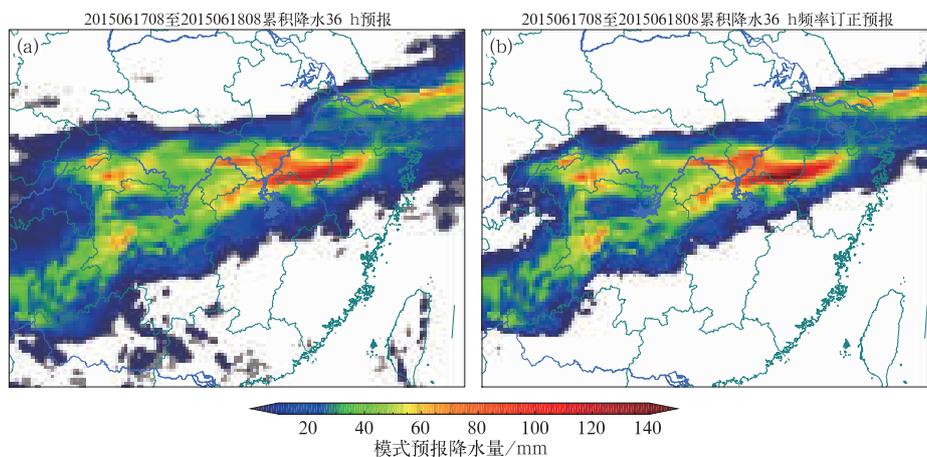


图 5 全场频率调整前(a)和调整后(b)的 QPF

Fig. 5 QPF before (a) and after (b) whole field frequency adjusting

表 2 全场滤波调整方法列表
Table 2 Methods of whole field QPF filter

方法名称	权重系数	参数说明
9 点平滑滤波	选取格点及其周围点,中心点为 1,东西南北方向上 4 个点为 0.5,斜对角方向上 4 个点为 0.3	
Gauss 滤波方法	$w_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{d_i^2}{2\sigma^2}}$	d_i 为领域点到格点的距离, σ 为影响半径
Cressman 滤波方法	$w_i = \frac{(R^2 - d_i^2)}{(R^2 + d_i^2)}$	R 为搜索半径, d_i 为领域点到格点的距离
Circular 滤波方法	$w_i = \frac{\text{Bessel}(3.8317d_i/R)}{3.8317d_i/R}$	$\text{Bessel}()$ 为贝塞尔函数, R 为搜索半径, d_i 为领域点到格点的距离
Rectangular 滤波方法	$w_i = \frac{\sin(\pi x/R)}{\pi x/R} \times \frac{\sin(\pi y/R)}{\pi y/R}$	x 和 y 为经向和纬向上的距离, R 为搜索半径

的影响半径。目标雨区调整技术首先需要识别降水场上所有雨区对象,这里每个对象为降水值大于指定阈值且空间连通的格点集,然后针对选定的单个或者多个目标对象进行值域调整。目标雨区识别采用图像处理中的 Blob 分析方法,由两个步骤组成:首先依据指定降水阈值 Q_c ,将降水场变换为二值图像,即 $\geq Q_c$ 的格点值设为 1,其余格点值设为 0;然后进行二值图像的连通区域标记,这里采用直接扫描八领域标记算法(Shapiro and Stockman, 2002),如图 6a 给出对图中降水场识别得到的 ≥ 50 mm 的雨区,中心标记出雨区的序号。识别出雨区之后,可

以进行值的增减,或者极值调整,其计算公式为:

$$Q'_i = \frac{Q'_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} (Q_i - Q_{\min}) + Q_{\min} \quad i \in S \quad (2)$$

式中, Q_{\max} 和 Q_{\min} 为雨区 S 的最高和最低值, Q'_{\max} 为调整后的雨区最大值, Q_i 为雨区内格点降水值,而 Q'_i 为调整后降水值。

目标雨区位置调整技术将降水中心或雨带进行任意方向移动,从而实现对位置偏差的订正。若将雨区进行整体平移,则会造成原区域格点的降水值空缺,而新区域与周围格点值不连续。为解决该问

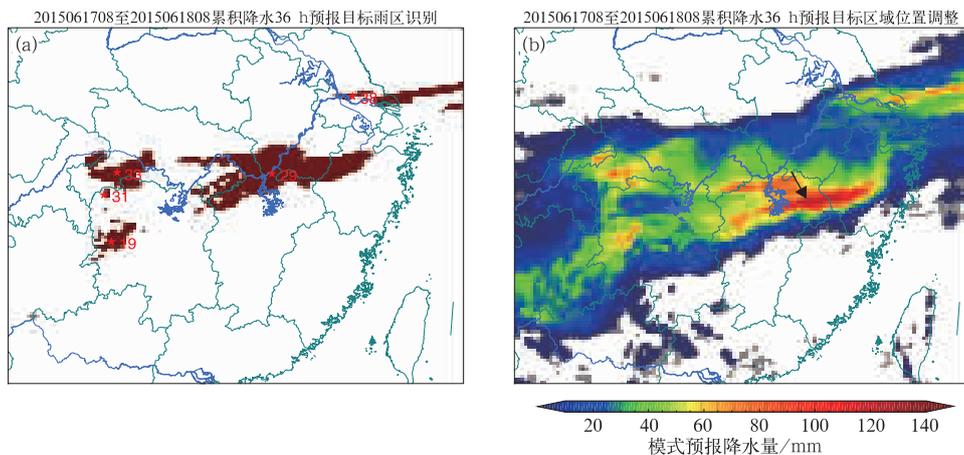


图 6 (a) 标记出的目标雨区(红色数字为识别号,这里忽略格点数量 < 10 的雨区),
(b) 采用图像变换方法将第 29 号雨区向南移动 10 个格距后得到的降水场
(图中黑色箭头表示雨区移动方向和距离)

Fig. 6 (a) Target rain area (Red number is the marker, while rain area with grid points below 10 is not marked);
(b) precipitation field obtained by moving the No. 29 rain area to south by 10 grids using the image transformation method
(Black arrow indicates the direction and distance of the rain area movement)

题,引入图像处理中的图像变形技术(Wolberg, 1990),设计针对雨区移动的变形算法:(1)设降水场 Q 为 $M \times N$ 的格点场;(2)选择需要调整位置的目标雨区,其格点位置集合为 $X_C = (x_i, y_i)$, 指定雨区的移动格点数为 (a, b) , 则平移后的雨区格点位置为 $X_O = (x_i + a, y_i + b) = (x'_i, y'_i)$, 记除了 X_C 和 X_O 之外的所有格点为 $X_U = (x_u, y_u)$;(3)将 X_C 和 X_U 格点集合合并得 $X_{CU} = (x_{i \cup u}, y_{i \cup u})$, X_O 和 X_U 格点集合合并得 $X_{OU} = (x'_{i \cup u}, y'_{i \cup u})$;(4)将 X_{OU} 当作非规则分布点生成 Delaunay 三角网格, 然后分别构建 $(x'_{i \cup u}, y'_{i \cup u}, x_{i \cup u})$ 和 $(x'_{i \cup u}, y'_{i \cup u}, y_{i \cup u})$ 三角网格曲面, 将曲面插值到 $M \times N$ 网格场上, 得到雨区移动后的映射坐标 X' 和 Y' ;(5)将 Q 线性插值到坐标为 X' 和 Y' 的网格上, 即得到变形后的降水场。如图 6a 中位于安徽南部和江西北部的第 29 号雨区, 若将其向南移动 10 个格距, 采用雨区移动变形算法得到图 6b, 可见与原预报场(图 5a)相比: 强降雨带位置南移到江西中北部; 其北侧空出的原位置降水区得到线性插值, 而在新位置其与周围格点降水无明显不连续性; 除移动范围外, 其余区域降水未受影响。

等值线落区订正技术是对预报员传统订正方式的支撑, 主要分为 3 个步骤: 首先从最优猜测场自动生成指定量级的等值线落区, 无须预报员在传统业务流程中进行完整绘制; 其次将等值线落区载入 MICAPS4 平台, 预报员利用等值线修改工具对重点区域(如强降雨或高影响天气)进行修改; 将修改后的等值线落区反演到网格场上, 并与最优猜测场进行权重叠加得到最终的 QPF 猜测场(这里权重由预报员给定, 当等值线落区修改较多时, 给反演场更多的权重)。这里涉及到的主要技术包括等值线落

区生成技术和等值线落区—网格场反演技术。等值线落区生成技术算法包含以下步骤:(1)对于取值为 C_1 的等值线, 搜索格点场上相邻两个格点满足 $P_1 \geq C_1$ 和 $P_2 \leq C_1$, 采用线性内插确定等值线的第一个描点位置(图 7a 中绿点);(2)如图 7a, 将等值线描点所在段 I 围绕 P_2 顺时针旋转 90° , 得到线段 II, 由上述两条线段及与其相邻的线段 III 和 IV 组成矩形方框(黄色方框), 通过方框四个顶点的格点值内插确定下一个描点的位置(图 7b 中第二个绿点);(3)重复步骤 2, 即根据最新描点确定下一个描点所在方框(图 7b 中黄色方框), 从而确定下一个描点(图 7c 中黄色方框第三个绿色实点);(4)直到最新描点到达边界, 或者和第一个描点重合, 则表示该等值线生成结束;(5)重复步骤 1~4, 搜索格点场中其他值为 C_1 等值线;(6)对于其他取值的等值线重复步骤 1~4。在实际使用中, 为了获得较平滑的等值线, 可对相邻 N 个等值线描点取位置的滑动平均。等值线落区—网格场反演技术主要利用分等级反距离权重客观分析算法, 将等值线描点值插值到与最优猜测场同分辨率的网格场上(Ruth, 1992; 曹勇等, 2016)。

2.4 格点场后处理技术

格点场后处理技术主要将调整及订正后的 QPF 猜测场通过空间降尺度和时间拆分技术, 得到更高时空分辨率的格点场。曹勇等(2016)对格点后处理技术进行了详细描述, 因此本文只做简要介绍。空间降尺度采用统计方法, 将 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率格点场投射到 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 高分辨率格点场, 包括 3 个步骤:(1)利用历史同期 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 高分辨率定

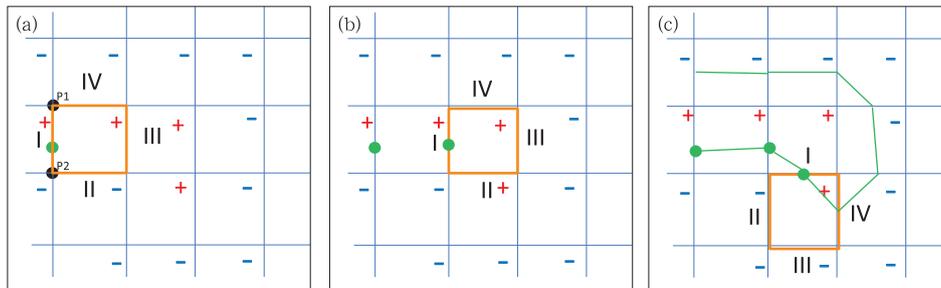


图 7 等值线落区生成技术示意图

(图中+/-代表大于/小于等值线值 C_v 的格点, 绿点表示等值线点, 详细说明见正文)

Fig. 7 Schematic of QPF contour auto generation techniques

[+ (-) represents the grid points larger than (smaller than) the contour line C_v , green dot represents contour point. See the main text for details]

量降水估测平均场 A , 将其线性插值到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格点场 B , 再将 B 线性插值到 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 格点场 C ; (2) 计算降尺度比例场 $R=A/C$; (3) 将 QPF 猜测场线性插值到 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 格点场 E , 最终计算高分辨率 QPF 猜测场 $Q_{\text{high}}=R \times E$ 。时间拆分方法可将逐 24 h 累积降水拆分为逐 3 h 累积降水, 同样分为 3 个步骤: (1) 选择一个具有逐 3 h 累积时间分辨率的模式或客观 QPF 预报作为参考场, 计算每个格点的逐 3 h 累积降水变化曲线; (2) 计算逐 24 h 累积降水与逐 3 h 累积参考 QPF 之间的比例系数; (3) 逐 24 h 累积降水乘上比例系数, 得到拆分后的逐 3 h 累积 QPF。

3 基于 MICAPS4 的平台实现

3.1 平台软件架构设计

在气象信息综合分析处理系统 MICAPS4 (高嵩等, 2017) 上开发了主客观融合 QPF 平台 1.0 版本 (QPF Master Blender V1.0)。MICAPS4 对于高分辨率模式预报数据提供更为高效的显示及分析速度, 同时采用开放框架, 提供了非常方便的扩展能力, 为平台的实现建设提供基础。

平台采用分层体系结构 (图 8): 最底层是数据处理和存储层, 进行数据收集、格式转换和按照标准存放所有数据; 其上为数据访问层, 专门设计了统一的数据访问层来访问和检索数据, 底层可适配不同

的存储系统, 并提供统一的接口供上层应用调用; 数据访问层之上是业务逻辑层, 采用面向服务的设计思想, 把各个系统组件和业务功能组织为服务功能接口, 供模块和业务系统调用。平台基于“框架即服务”的理念, 采用组件式的设计模式, 实现模块界面表现层和业务逻辑层的热插拔, 提高了系统的可靠性、可扩展性和稳定性。业务表现层主要由多数据源集成订正视图、格点反演视图和产品生成视图三个部分组成, 将新 QPF 业务流程融入便捷的交互界面中, 在不增加预报员手工工作量的同时, 实现工具的便捷化操作。

3.2 平台交互界面功能

QPF Master Blender V1.0 由多数据源集成订正模块和格点场后处理模块两部分组成。多数据源集成订正模块包括 4 个交互界面 (Graphical User Interface, GUI) (图 9): GUI 1 为数据源选取界面, 通过选择不同业务中心、起报时效及预报时效的模式或客观预报输出, 实现对海量预报数据选取; GUI 2 为多源 QPF 集成界面, 通过给定选中模式不同权重得到集成 QPF 场, 并可以对集成结果进行概率匹配订正操作, 获得最优猜测 QPF; GUI 3 为 QPF 场调整界面, 包括滤波调整、单值和目标值域调整等; GUI 4 为等值线生成和修改界面。格点场后处理模块包括 1 个界面, 即 GUI 5 为格点化处理界面, 用于格点化产品处理和输出 (图 10), 可进行主客观产品融合及时空分辨率降尺度操作。各界面之间直接通过内存和本地文件传递数据。

3.2.1 多数据源集成订正模块功能

应用多数据源集成订正模块, 预报员首先通过 GUI1 从多模式 QPF 实时数据集中选取适当的模式组成预报, 之后通过 GUI2 设置预报场权重和进行概率匹配集成形成最优猜测场, 在 GUI3 通过值域调整、单点或目标调整、滤波调整等来校正最优猜测场, 最后通过 GUI4 输出格点场和生成等值线。各 GUI 具体功能如下:

GUI 1 (图 9a), 左侧是数据源选择列表, 界面启动时会根据当前预报时效自动从多源 QPF 数据集中匹配的最新模式起报结果, 如果缺失则列表中显示为不可用状态。界面右侧是预览窗口, 用户可以在此预览当前所选模式结果。界面的右下部会显示当前选中左侧模式的相关信息, 如起报时间、预报时效和最大预报时效等。

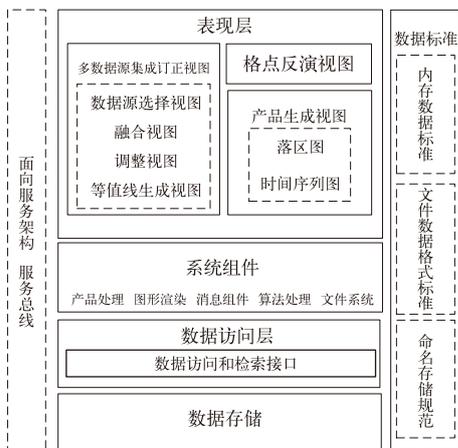


图 8 主客观融合 QPF 平台的总体架构设计图

Fig. 8 Schematic of QPF Master Blender architecture

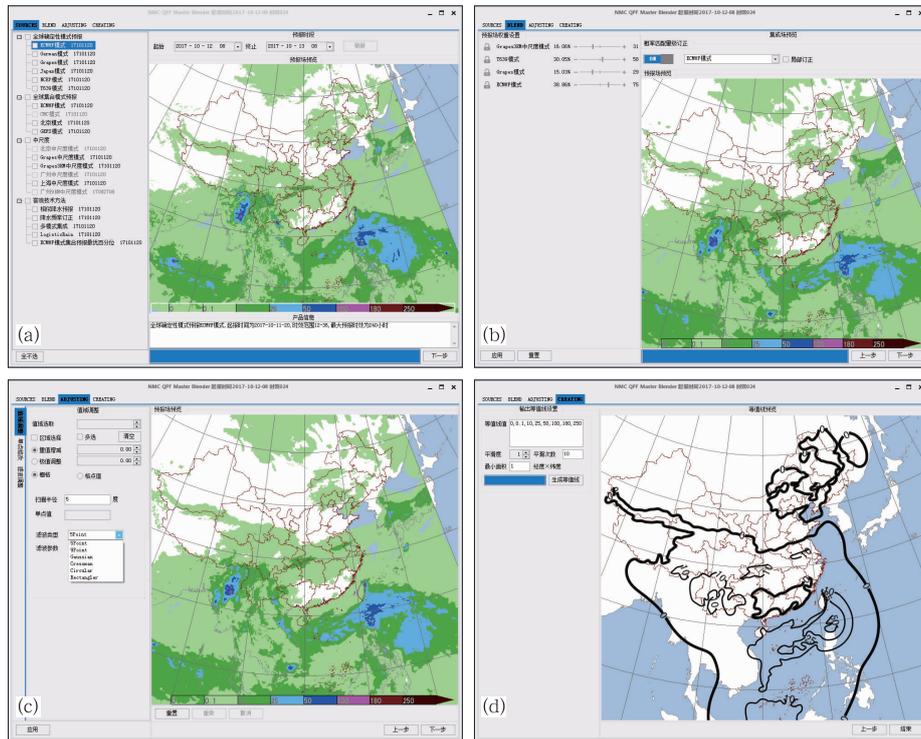


图 9 多数据集成订正模块的 4 个界面

(a)数据源选取界面,(b)多源 QPF 集成界面,(c)QPF 场调整界面,(d)等值线自动生成和修改界面

Fig. 9 Four GUIs of multi-data integration and correction module

(a) GUI for data source selection, (b) GUI for multi-QPF data integration,

(c) GUI for QPF adjusting, (d) GUI for contour auto generation and modification

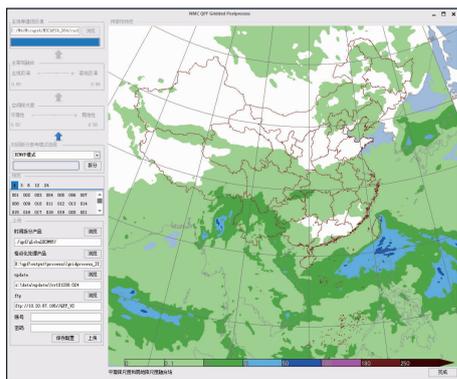


图 10 格点场后处理模块界面

Fig. 10 GUI for gridded QPF post process

GUI 2(图 9b)左侧用户可对选中模式设置对应权重系数(每个权重系数范围是 0~100,总和等于 100),也可锁定某一个或多个模式的比重,锁定后可以在选定模式占比不变情况下,调整剩余其他模式配比。多模式权重设置完毕后可根据每种模式的比重通过加权平均算法计算得到一个新 QPF 场数据。预报员可以进一步选择是否进行概率匹配集成来对

QPF 场的量级进行修改。

GUI 3(图 9c)左侧是依次值域调整、单点修改和滤波调整的功能窗口,右侧是 QPF 场预览窗口。预报员可以选取目标值域(即大于或等于某一阈值的降水区域)进行量值增减和极值调整操作;可以通过给定扫描半径,对半径内的格点进行量值调整;可以选择不同滤波调整算法以及给定不同滤波参数对 QPF 场进行滤波处理。

GUI 4(图 9d)可生成相应等值线场。界面左侧可以设置所需生成等值线值来确定需要输出的等值线间隔;通过设定平滑度、平滑次数和最小平滑面积来确定所生成等值线的平滑程度;最终输出 QPF 格点场和相应的 MICAPS 第 14 类格式等值线场。之后将闭合等值线返回给 MICAPS4 落区编辑界面,通过等值线订正工具对其降水落区进行必要的操作。

3.2.2 格点场后处理模块功能

传递进格点场后处理模块界面 GUI 5 中有两种数据,分别是最优猜测格点场及其经过预报员主

观订正的 QPF 等值线落区。GUI 5 包括 5 部分功能。GUI 5(图 10)左侧第一个功能中将主观订正的 QPF 落区预报反演成格点 QPF;第二功能是进行格点场融合,等值线反演格点场主要考虑等值线附近的预报信息,而最优猜测场主要较准确地反映无等值线区域的预报信息。可通过控制等值线反演格点场和最优猜测场的比例,控制合成的格点降水预报场。然后使用空间统计降尺度功能,实现粗网格降水格点场至高分辨率网格格点场的转化,将 QPF 从水平 10 km 的分辨率提高至 5 km 分辨率;在降尺度过程中主要考虑平滑性和局地性两个因素,平滑性主要表现为层状云或大尺度区域降水(冬季),局地性是对流性降水特点较强(夏季),预报员通过设定平滑性和局地性的比例,来控制生成的 QPF 场;第四子功能是时间拆分模块,可以选择更高时间分辨率的模式预报作为参照,将 24 h 累积 QPF 预报拆分为逐 1、3、6、12 h 累积 QPF 预报。最后,上传功能将生成的高分辨率 QPF 格点场传输到产品服务服务器,支持多样化的服务产品制作。

4 个例应用及业务效果

4.1 个例应用

下面通过个例应用演示(图 11),示范说明基于主客观融合 QPF 平台的预报思路及操作流程。

2016 年 7 月 1—2 日,江淮地区出现强降水过程。这是一次通过权重配比调整雨带位置的个例。通过评估多模式数据源发现:ECMWF 模式强降水位置预报在江淮中北部,较其余多业务中心模式偏北;NCEP GFS 以及 T639 模式强降水位置预报在长江流域,较 ECMWF 模式偏南;选择 ECMWF、NCEP GFS、T639、WARMS_9 km 四家模式进入融合操作,其中华东中尺度主要用于提供中尺度预报信息;给定 WARMS_9 km : T639 : NCEP GFS : ECMWF 的权重配比为 12 : 38 : 38 : 12;考虑到 T639 模式的近期预报检验量级跟实况接近,其余全球模式偏小,而 WARMS_9 km 偏大,因此概率匹配量级订正选取 T639 模式;利用滤波调整,去除“噪音”降水,保留可信平滑的预报结果;再考虑由于滤波操作,可能造成调整后强降水量级偏弱,通过值域调整操作进一步完成降水强度订正;进而自动生成等值线及格点背景场,预报员在此基础上稍作调整和修改即可完成预报。这次典型个例中 ECMWF 模式雨带预报偏北,通过多模式对比、选择和融合完成落区订正,并通过值域调整等操作完成量级订正。最终预报效果较 ECMWF 原始模式提高幅度明显。

4.2 业务效果

QPF Master Blender V1.0 于 2017 年 5 月 1 日正式投入业务使用。通过 TS 评分检验业务运行期间(2017 年 5 月 1 日至 8 月 31 日)主客观融合 QPF

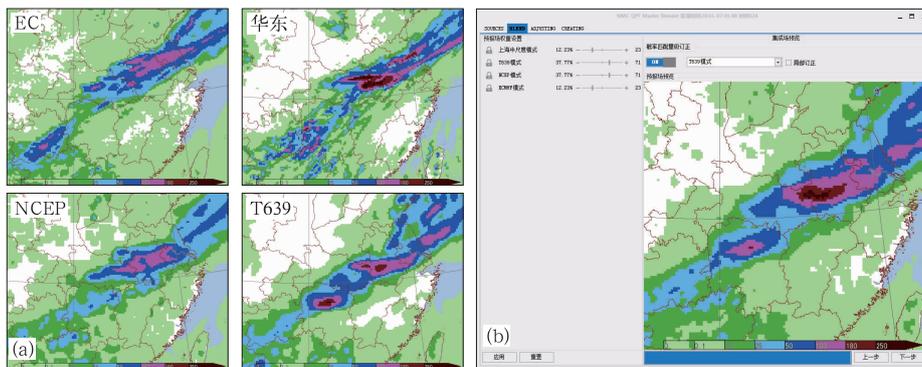


图 11 2016 年 7 月 1—2 日江淮强降水过程使用主客观融合 QPF 平台示意图

(a) 四家模式(ECMWF、华东中尺度、NCEP_GFS 和 T639)2016 年 6 月 30 日 20 时起报 36 h 预报数据, (b) 相应权重集成选择界面

Fig. 11 Schematic diagram of forecast heavy rainfall in Jianghuai Region in 1—2 July 2016 using QPF Master Blender

(a) 36 h forecasts by ECMWF, Huadong_Meso, NCEP_GFS and T639 initiated at 20:00 BT 30 June 2016, (b) four corresponding weights

平台输出的高分辨率格点产品质量,并与ECMWF、T639业务数值模式进行对比。结果表明:主客观融合QPF产品的暴雨预报TS评分为0.204,较ECMWF模式的0.167和T639的0.154分别提高了22%和32%,提高增量为近3年同期最高。需要指出的是,TS评分较模式预报的提高率与气候背景、预报员的培训等因素亦有关系,但这也从一个侧面表明主客观融合QPF平台对新业务流程的适应性;较传统流程,预报员能够制作更高分辨率的QPF产品;此外,主客观融合QPF平台的主要作用是提供了一个智能预报工具,至于预报员如何发挥最好的价值,需要其他方面更强有力的支撑。

5 结论与展望

面对天气预报业务现代化带来的数据爆发性增长、前端需求不断提高以及客观预报技术广泛应用等带来的挑战,传统QPF业务技术流程已经不能体现预报员的核心价值。为此,设计和实现了主客观融合QPF平台,以帮助预报员从海量预报数据选取、QPF集成、QPF调整和订正、格点化处理和服务产品制作5个方面控制整个数字化预报流程,并重新定义了预报员的价值,即“在天气理解的基础上进行大数据挖掘”。主客观融合QPF平台集成了多项关键技术:多模式QPF数据集构建技术,包括设计标准的数据格式及存储规范、不同分辨率转换技术;多模式QPF的权重叠加和概率匹配集成技术;丰富多样的QPF预报场调整和订正技术,包括全场频率调整技术、全场滤波调整技术、单点和目标雨区的值域调整技术、目标雨区位置调整技术、等值线落区订正技术;格点场空间降尺度和时间拆分技术。基于MICAPS4系统,实现了主客观融合QPF平台的主要功能,发布了“QPF Master Blender 1.0”版本。最后通过个例应用描述了新的QPF业务预报思路。2017年5月,“QPF Master Blender 1.0”在中央气象台通过业务化测试,成为业务主要支撑工具并初步显示出较好的反馈和成效。

对于主客观融合QPF平台未来的发展,主要包括以下5个方向:(1)平台主要为预报员提供了智能的预报编辑工具,然而若要支持预报员做出正确的主观判断,需要进一步开发能帮助预报员发现、追踪和理解模式预报误差的手段,例如能够提供历史同类型天气模式误差统计、近期模式预报能力检验以

及未来模式预报的不确定性或稳定性等信息的天气学数值模式检验工具;(2)基于权重的集成还不能解决不同尺度数值模式有效信息的融合,例如若需要将全球模式的大尺度降水与中尺度模式的对流性降水融合起来,还需要尺度分离及合成技术,需要进一步研究;(3)对于冬季降水相态、台风暴雨、复杂地形降水等专门的预报情景,需要发展有针对性的数据挖掘和集成技术,进一步提高QPF预报能力;(4)目前主客观融合QPF平台只能提供最有可能的预报结果,未来还需要同时提供相应的概率预报以传递预报的不确定信息,有利于用户进行科学决策;(5)加入人文地理、社会经济等信息,开发服务产品制作功能,支持预报员进行解释预报结果,并进行影响预报。

参考文献

- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016.定量降水预报技术进展[J].应用气象学报,27(5):534-549.
- 曹勇,刘清华,宗志平,等,2016.国家级格点化定量降水预报系统[J].气象,42(12):1476-1482.
- 陈德辉,沈学顺,2006.新一代数值预报系统GRAPES研究进展[J].应用气象学报,17(6):773-777.
- 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等,2008.GRAPES新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J].科学通报,53(20):2396-2407.
- 陈力强,周小珊,杨森,2005.短期集合预报中定量降水预报集合方法初探[J].南京气象学院学报,28(4):543-548.
- 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.
- 高嵩,毕宝贵,李月安,等,2017.MICAPS4预报业务系统建设进展与未来发展[J].应用气象学报,28(5):513-531.
- 李俊,杜钧,陈超君,2014.降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J].气象,40(5):580-588.
- 林建,宗志平,蒋星,2013.2010—2011年多模式集成定量降水预报产品检验报告[J].天气预报,1(5):67-74.
- 王凤娇,吴书君,王立静,等,2011.海盐生产的降水塑苦决策分析[J].气象,37(1):116-121.
- 薛建军,王维国,王秀荣,等,2010.决策气象服务回顾与展望[J].气象,36(7):69-74.
- 严明良,缪启龙,沈树勤,2009.基于超级集合思想的数值预报产品变权集成方法探讨[J].气象,35(6):19-25.
- 张芳华,曹勇,徐珺,等,2016.Logistic判别模型在强降水预报中的应用[J].气象,42(4):398-405.
- 张涵斌,陈静,智协飞,等,2014.基于GRAPES_Meso的集合预报扰动方案设计与比较[J].大气科学学报,37(3):276-284.
- 张人禾,沈学顺,2008.中国国家级新一代业务数值预报系统GRAPES的发展[J].科学通报,53(20):2393-2395.
- Accadia C, Mariani S, Casaioli M, et al, 2003. Sensitivity of precipita-

- tion forecast skill scores to bilinear interpolation and a simple nearest-neighbor average method on high-resolution verification grids[J]. *Wea Forecasting*, 18(5):918-932.
- Arnaud P, Bouvier C, Cisneros L, et al, 2002. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction[J]. *J Hydrol*, 260(1/2/3/4):216-230.
- Bougeault P, Toth Z, Bishop C, et al, 2010. The THORPEX interactive grand global ensemble[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(8):1059-1072.
- Cleveland W S, Grosse E, Shyu W M, 1991. Local regression models [M]//Chambers J M, Hastie T J. *Statistical Models in S*. London:Chapman and Hall/CRC:309-376.
- 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.
- Gebhardt C, Theis S, Krahe P, et al, 2008. Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model [J]. *Atmos Sci Lett*, 9(2):67-72.
- Golding B W, Ballard S P, Mylne K, et al, 2014. Forecasting capabilities for the London 2012 Olympics[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(6):883-896.
- Kim G, Barros A P, 2001. Quantitative flood forecasting using multi-sensor data and neural networks[J]. *J Hydrol*, 246(1-4):45-62.
- Knebl M R, Yang Z L, Hutchison K, et al, 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event[J]. *J Environ Manage*, 75(4):325-336.
- Malardel S, Wedi N, Deconinck W, et al, 2016. A new grid for the IFS [R]. ECMWF Newsletter No. 146. Shinfield Park, Reading; European Centre for Medium-Range Weather Forecasts:23-28.
- Messner J W, Mayr G J, Zeileis A, et al, 2014. Heteroscedastic extended logistic regression for postprocessing of ensemble guidance[J]. *Mon Wea Rev*, 142(1):448-456.
- Novak D R, Bailey C, Brill K F, et al, 2014. Precipitation and temperature forecast performance at the weather prediction center[J]. *Wea Forecasting*, 29(3):489-504.
- Palmer T N, Molteni F, Mureau R, et al, 1993. Ensemble prediction [C]//Proceedings of ECMWF Seminar on Validation of models over Europe. Reading:ECMWF.
- Petersen D, Brill K F, Bailey C, et al, 2014. The evolving role of the forecaster at the weather prediction center: World Weather Open Science Conference[C].
- Ruth D P, 1992. The Systematic Interpolative Radial Search (SIRS) — A method to compute gridpoint values from contours[R]. TDL Office Note 92-14. U. S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Systems Development, Techniques Development Laboratory:1-16.
- Shapiro L G, Stockman G, 2002. Computer Version[M]. Englewood: Prentice Hall PTR:69-73.
- Surcel M, Zawadzki I, Yau M K, 2014. On the filtering properties of ensemble averaging for storm-scale precipitation forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 142(3):1093-1105.
- Toth Z, Kalnay E, 1993. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(12):2317-2330.
- Toth Z, Kalnay E, 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. *Mon Wea Rev*, 125(12):3297-3319.
- Unidata, 2017(2017-10-23). Network Common Data Form (netCDF) version 4. 5. 0[CP/OL]. Boulder:UCAR/Unidata. <http://DOI.org/10.5065/D6H70CW6>.
- Wolberg G, 1990. Digital Image Warping[M]. Los Alamitos: Wiley-IEEE Computer Society Press
- Zehe E, Becker R, Bardossy A, 2001. The influence of spatial variability of soil moisture and precipitation at different scales on runoff production and infiltration[C]//van Loon E E, Troch P A. *Book of Abstracts. International Workshop Catchment Scale Hydrologic Modeling and Data Assimilation*. Wageningen.