doi:10.11676/qxxb2019.017 气象学报

临近预报的两种高时空分辨率定量降水预报融合算法的对比试验*

程丛兰[1] 陈 敏[1] 陈明轩[1] 高 峰[1] 宋林烨[1]
秦 睿[1] 杨 璐[1] 王 勇[2]
CHENG Conglan[1] CHEN Min[1] CHEN Mingxuan[1] GAO Feng[1] SONG Linye[1]
QIN Rui[1] YANG Lu[1] WANG Yong[2]

1 北京城市气象研究院,北京,100089
2 奥地利国家气象局,维也纳,1190
1 *Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing* 100089, *China*
2 *Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna* 1190, *Austria*
2018-04-04 收稿,2018-08-06 改回.

程丛兰,陈敏,陈明轩,高峰,宋林烨,秦睿,杨璐,王勇. 2019. 临近预报的两种高时空分辨率定量降水预报融合算法的对比试验. 气象学报, 77(4):701-714

Cheng Conglan, Chen Min, Chen Mingxuan, Gao Feng, Song Linye, Qin Rui, Yang Lu, Wang Yong. 2019. Comparative experiments on two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation nowcasting. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4):701-714

Abstract For a long time, the radar echo extrapolation method is the main technique applied for the 0-2 h nowcasting system. However, its actual effective lead time is only ≤1 h. The mesoscale numerical model is limited by the spin-up time and the first two hours of precipitation prediction is invalid. In order to solve the deficiencies in the above two types of prediction methods, the most popular technique that blends the extrapolated prediction and the numerical model prediction is applied worldwide to develop uniform 0-6 h lattice high resolution seamless quantitative precipitation prediction system. In this paper, two high spatiotemporal resolution blending algorithms for quantitative precipitation prediction are compared to provide references for their operational applications. In the RAPIDS algorithm, the precipitation intensity and phase of the model prediction are corrected based on quantitative precipitation analysis of the automatic station rainfall merged with radar precipitation estimation. In the INCA algorithm, the extrapolation of the precipitation movement vector is corrected by the wind field of the numerical model. In the two methods, the weight of the extrapolated prediction is gradually reduced and the weight of the model prediction is gradually increased within the lead time of 0-6 h, achieving a smooth transition between the extrapolated prediction and the model prediction. The experimental results show that the two methods are superior to a single extrapolation prediction or model prediction for rain band and precipitation intensity forecast. The development of an optimal seamless blending algorithm for precipitation prediction with high spatial and temporal resolution, which combines the advantages of the two methods, will help to further improve the high resolution quantitative 0-6 h seamless precipitation prediction.

Key words Nowcasting, Quantitative precipitation prediction, Blending prediction, Numerical weather prediction (NWP), Radar extrapolation prediction, Quantitative precipitation estimation

---

* 资助课题:国家重点研发计划项目(2017YFC1502104)、国家自然科学基金项目(41575050、41705091、41105024)、北京市科技计划课题(Z171100004417008)。

作者简介:程丛兰,主要从事融合预报技术研究和试验。E-mail: clcheng@ium.cn

摘 要 长期以来,雷达回波外推技术是0—2 h临近预报系统主要采用的方法,但其实际有效预报时间≤1 h,而中尺度数值模式预报则受平衡约束时间的限制,最初2 h的降水预报无效。为解决上述两种预报的缺陷,目前国际上流行采用外推预报与数值模式预报融合的技术,形成统一的0—6 h格点化的高分辨率无缝隙定量降水临近预报系统。对目前流行的两种融合算法(INCA(Integrated Nowcasting and Comprehensive Analysis System)算法及RAPIDS(Rainstorm Analysis and Prediction Integrated Data-processing System)算法)进行了分析和对比试验,以期为业务应用提供借鉴。RAPIDS算法的核心是用自动气象站雨量融合雷达估测得到的定量降水对模式预报的降水强度和位相进行修正;INCA算法则是用数值模式预报的风场修正外推技术的降水移动矢量。两种方法在0—6 h预报时效内,外推预报的权重均逐渐减小,模式预报的权重逐渐增大,从而实现外推预报和模式预报的平滑过渡。试验结果表明,两种方法对降水雨带和降水强度的预报均优于单一的外推预报或模式预报。集二者的优势研发最优的高时、空分辨率降水预报无缝隙融合算法,将有助于进一步提升高分辨率定量降水0—6 h无缝隙预报水平。

关键词 临近预报,定量降水预报,融合预报,数值模式预报,雷达外推预报,定量降水估测

中图法分类号 P457.6 P459.9 P456.9

1 引 言

随着天气雷达技术的进一步发展,强对流天气短时临近预报技术的研究取得了显著进步。以雷达探测资料为基础的外推预报技术中,交叉相关追踪法和回波特征追踪法是当前发展比较成熟的技术,已应用于许多短时临近预报系统中,其核心仅依赖于雷达探测资料外推预报,对于发展演变剧烈的对流系统,预报误差将随时间(30 min后)快速增大(俞小鼎等,2012)。中尺度数值模式快速更新循环预报作为支撑短时临近预报业务的一种重要技术手段,利用多普勒天气雷达探测资料和其他中小尺度观测资料进行数值模式初始化来预报雷暴的发生、发展和消亡已经成为研究热点(范水勇等,2013),它能在一定程度上描述中尺度天气系统未来的演变情况。受模式本身动力学及热力学性能的局限,高分辨率精细化预报的降水落区和强度仍然具有较大的预报偏差,还无法直接用于对分辨率和精细度要求较高的短时临近预报(俞小鼎等,2012)。目前的临近预报系统多采用雷达探测资料外推技术,主要针对强对流系统的0—2 h预报,强对流降水单体的非线性发展导致其外推有效时间极短(≤1 h),因此,单独利用外推方法,虽然有用但效果有限。因此,有必要在预报中考虑对流系统的非线性变化,将雷达外推资料与数值模式预报资料融合进行强对流天气(包括回波及降水)短时临近预报(Atencia,et al,2010;Hwang,et al,2015)。近几年来,随着精细数值天气预报技术和计算机技术的发展,数值模式和外推预报融合的模型发展较快,主要用于提高0—6 h的短时临近预报效果,解决临近预报外推和数值预报资料同化的时效以及模式的起转等问题(邹德龙等,2014;Bailey,et al,2014)。

目前,英国、美国、加拿大、澳大利亚、奥地利和中国等国家以及香港天文台均在开展基于融合技术的定量降水和强对流天气0—6 h无缝隙预报技术研究,并取得积极进展,部分成果已经在业务中得到初步应用(郑永光等,2010)。其中最有代表性的是奥地利国家气象局发展的融合多种资料的综合分析临近预报系统INCA(Integrated Nowcasting and Comprehensive Analysis System)及中国香港天文台研发的融合外推技术和模式预报系统RAPIDS(Rainstorm Analysis and Prediction Integrated Data-processing System)。RAPIDS系统的融合算法基于格点降水实况,识别中尺度模式降水预报落区及强度的误差,并利用"位相修正"技术对模式预报降水落区误差进行修正,同时根据格点降水实况调整模式降水预报强度,并将外推预报降水和经校正的模式预报降水经双曲线正切函数进行融合(Wong,et al,2006,2009)。INCA系统则通过对数值模式预报、天气雷达、地面自动观测站网、下垫面地形地表信息等多种数据进行精细化融合分析,结合线性外推技术和数值预报结果,对降水、温度、湿度、风、云等做出高分辨率的短时临近预报(颜琼丹等,2010;Haiden,et al,2011;Kann,et al,2015)。

文中将在具体介绍INCA与RAPIDS这两套融合预报算法的基础上,分别应用这两套算法在京津冀地区进行个例试验及针对京津冀地区汛期长序列检验对比,分析其特点,以期为进一步改进算法并集二者优势研发最优的高时、空分辨率降水预报无缝隙融合算法提供借鉴。

2 两种融合算法及核心技术

2.1 RAPIDS 算法

RAPIDS 算法是中国香港天文台在外推系统 SWIRLS("小涡旋")的基础上发展起来的,主要利用快速傅里叶变换法(FFT)及多尺度光流变分法(Multi scale Optical flow by Variational Analysis, MOVA)识别模式定量降水预报落区误差。香港天文台以雷达估测的降水为"真值",北京在本地化时,用融合降水分析场(即自动气象站雨量融合雷达估测得到的格点降水场)作为"真值",同时利用韦伯累计分布函数识别降水强度误差,然后根据雷达定量降水估测值或格点融合降水值调整模式降水位相及强度误差(Wong,et al,2006,2009)。通过将香港天文台融合技术的快速傅里叶变换法和多尺度光流变分法应用于计算模式降水的相位偏差并进行位相修正,在不同情况下给两种降水场(模式降水和外推降水)以不同的权重做融合,在京津冀地区降水无缝隙预报中取得较好效果(程丛兰等,2013)。

2.1.1 RAPIDS 算法对数值模式预报的位相修正

Carbone 等(2002)的研究指出,对流的日循环特征主要是由于太阳加热作用的日变化造成的,并且可预报性较差(日变化是规律的循环变化,可预报性强;所谓可预报性差,是因为热对流的尺度很小,随机性强),而数值模式主要是基于准平衡气流和天气尺度强迫的动力学基础而设计的,其对由于天气尺度形成的具有较长周期性变化和生命史特征的对流系统具有较高的可预报性,而盛夏期间主要以热力对流系统为主,数值模式预报的准确性要差很多。因此,基于格点定量降水估测(QPE)场,对数值模式预报的降水落区误差进行位相修正,同时利用韦伯累计分布函数调整模式降水强度,引入实时格点定量降水估测场进入融合系统,可提升数值模式预报的效果,为下一步融合提供高质量数值模式结果。

RAPIDS 算法采用两个步骤对数值模式降水预报做位相修正。首先采用快速傅里叶变换修正雨带整体位移偏差,之后再用多尺度光流变分法调整雨带的走向和小范围降水落区,使得模式预报的降水落区与实况更吻合。根据格点融合定量降水估测来实现模式降水强度的调整,假设模式定量降水预报与格点定量降水估测场满足韦伯分布,且累计分布函数相同。

2.1.2 RAPIDS 算法融合权重分配

融合权重是外推预报和数值模式预报融合具体方法的体现,是融合预报的关键点之一。RAPIDS 算法通过动态选择正切权重来实现外推预报与模式预报的融合。模式预报的权重变化用一个双曲正切线来表示,正切曲线的两个端点根据降水天气类型和预报员的天气变化经验给定,结合不同降水系统的时空尺度,在不同情况下取不同的权重。

根据经验式(1)(杨丹丹等,2010)计算模式预报权重

$$W_{\mathrm{m}}(t)=\alpha+\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)\times\{1+\tanh[\gamma(t-3)]\}\quad(1<t<6)\tag{1}$$

式中,$W_{\mathrm{m}}(t)$为融合时数值模式权重,α 和 β 分别为 $t=0$、6(表示当前时刻及未来 6 h)模式预报的权重,γ 为融合时段中间部分 $W_{\mathrm{m}}(t)$的斜率,表示融合权重曲线的变化快慢,γ 值根据降水系统类型和降水过程快慢等确定。动态正切权重融合法可以根据实际运行情况进行调整。例如,不同天气系统降水个例融合的权重可以根据天气类型和预报员经验进行调整,也可根据不同天气类型和模式预报能力对融合权重合理调整;而且数值模式预报检验结果也可尝试用于优化融合权重、提高融合效果(Wong,et al,2006,2009;程丛兰等,2013)。

2.2 INCA 算法及核心技术

INCA 由奥地利国家气象局研发,是一套基于多源观测及多系统产品融合技术、复杂地形订正技术和动力降尺度技术建立的资料快速融合及临近预报系统。该系统将大多数站点观测值作为"真值"处理,通过动力降尺度实现局地观测资料与模式结果的数据融合(Haiden,et al,2011)。INCA 系统主要有 4 个分析和预报模块,包括降水、温度、湿度和风,不同种类观测资料通过不同功能模块进行融合分析。其中降水模块首先基于雷达、自动气象站等多源观测资料融合后得出格点定量降水估测,然后计算降水预报的移动矢量,配合模式预报的引导风场,得出降水的外推预报。

2.2.1 格点定量降水估测(QPE)的融合

格点定量降水估测的融合技术结合了雨量筒降水观测的准确性和雷达观测覆盖面广两者的优点。雷达可以探测到站点以外的雨量、雨带,而雨量筒降水观测的插值可以有效弥补雷达波束无法观测的区

域,并修正雷达估测降水的误差。

INCA 降水融合分析模块主要步骤为:

第一步:将雷达定量降水估测经双线性插值到网格并进行雷达气候误差统计校正和空间平滑。

第二步:将雨量筒降水观测经距离权重插值后形成网格化降水分布。

第三步:将网格化后的雨量筒降水分布与经气候校正后的雷达定量降水估测按式(2)进行权重融合。

$$P_{\mathrm{INCA}}(i,j) = P_{\mathrm{STAT}}(i,j) + v[P^{**}_{\mathrm{RADAR}}(i,j) - P^{**}_{\mathrm{RADSTAT}}(i,j)] \quad (2)$$

式中,$P_{\mathrm{INCA}}(i,j)$为 INCA 分析的格点定量降水估测结果,$P_{\mathrm{STAT}}(i,j)$为插值到格点上的自动气象站降水观测,P^{**}为经过气候订正后插到格点和站点上的雷达定量降水估测,v 为利用雷达气候误差校正值计算获得的融合权重。

图 1 为 INCA 融合定量降水估测的技术流程,由于雷达回波强度依赖于探测距离并受地物遮挡等影响,导致雷达定量降水估测有时误差较大,需要经过雷达气候统计误差校正减小误差。

INCA 利用逐 10 min 融合定量降水估测的移动轨迹、配合数值模式预报的 500 和 700 hPa 环境引导风场计算降水预报的移动矢量,并据此进行降水外推预报。由此可见,格点定量降水估测的融合是降水融合预报的基础,融合定量降水估测的"真实性"直接决定了降水预报的可靠性,是 INCA 算法中做好降水无缝隙预报的关键技术。

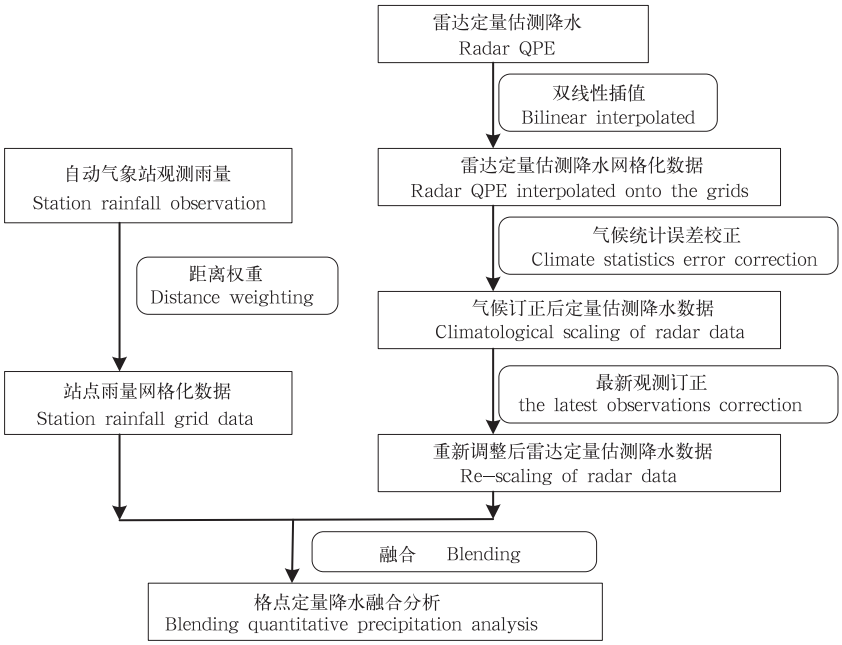

图 1 INCA 融合定量降水估测的技术流程

Fig. 1 Technical block diagram of INCA merge quantitative precipitation analysis (QPE)

2.2.2 格点定量降水预报(QPF)的融合

如前所述,外推临近预报的有用时效不超过 1 h,即便是长生命史的超级单体风暴和强飑线,外推的有用时效也通常不超过 3 h,其主要原因在于支配对流系统演变的主要因素并不包括在其过去的历史之中。解决这一问题的主要方法是将外推临近预报和高分辨率数值预报结果相结合,形成 0—6 h 无缝隙融合预报(俞小鼎等,2012)。由于 INCA 算法 2 h 时效内外推预报效果较优,因此,2 h 内的降水预报完全采用外推,2—6 h 的预报则根据权重函数从外推预报逐渐过渡到数值预报(Haiden, et al, 2011)。计算式为

$$P_{\mathrm{INCA}}(t_i) = g(t_i)P_{\mathrm{nowcast}}(t_i) + (1 - g(t_i))P_{\mathrm{NWP}}(t_i) \quad (t_i = 2, 3, \cdots, 6) \quad (3)$$

式中,权重函数 $g(t_i) = \max[\min(1 - \dfrac{t_i - T_{p1}}{T_{p2} - T_{p1}}, 1),$

0],其中 $T_{p1}=2$ h,$T_{p2}=6$ h,P_{nowcast}为外推预报雨量,P_{NWP}为模式预报雨量,P_{INCA}为融合预报雨量。

图 2 为 INCA 融合定量降水预报的技术流程。外推预报降水量和模式预报降水量按时间权重相融合,得出最终的预报结果。降水外推预报基于逐 10 min 格点融合定量降水估测计算出降水移动矢量,并根据模式环境引导风场,配置移动矢量,进行外推预报。模式预报由高分辨率区域数值模式来提供。

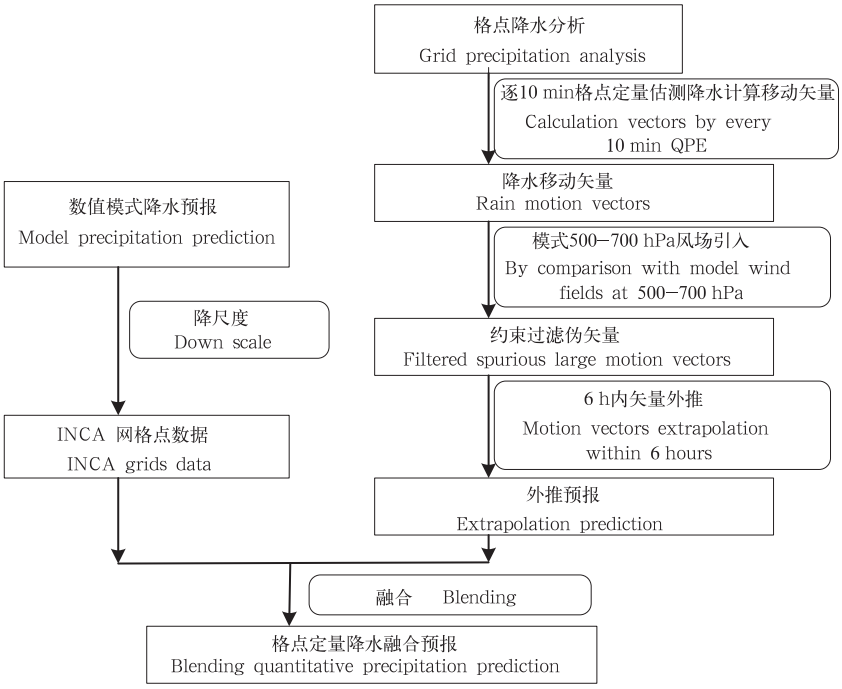

图 2 INCA 算法的定量降水预报的技术流程

Fig. 2 Technical block diagram of INCA quantitative precipitation prediction (QPF)

2.2.3 雷达气候统计误差校正

随着中国气象局新一代天气雷达布网的完成和雷达探测资料的多年积累,在京津冀地区已经建立了日趋完善的天气雷达网,但地形、山区、建筑物等遮挡雷达波束的影响不可避免(勾亚彬等,2014;师春香等,2008)。为了消除地形、山区、建筑物等遮挡雷达波束的影响,并在雷达出现异常情况时及时更正,在 INCA 算法的格点定量降水估测融合技术中,采用了雷达气候统计误差校正,同时可以消除部分自动气象站疏密带来的降水分析误差(Haiden, et al,2009)。

雷达气候统计误差校正是利用雷达和自动气象站历史降水资料,构建雷达定量降水估测与雨量筒降水观测的本地化定量误差校正参数(Radar Factor of Correction, RFC),利用定量误差校正参数值对雷达定量降水估测进行误差校正。

通过对自动气象站降水和雷达定量降水估测的统计计算获得的定量误差校正参数值(图 3)同时考虑自动气象站观测和雷达估测的降水分布特征。根据 INCA 格点定量降水估测融合技术中的雷达气候统计误差校正算法,若定量误差校正参数>1(<1),表示雷达定量降水估测比自动气象站观测的降水偏弱(强),定量误差校正参数接近 1,则表示雷达定量降水估计和自动站雨量筒观测的降水量级越接近;定量误差校正参数>10 一般表示的是雷达几乎覆盖不到的区域,例如京津冀北部部分地区。可以看到,定量误差校正参数值的空间分布和 INCA 地形高度存在一定程度的联系,地形越高的区域定量误差校正参数值越大,即表明定量降水雷达估测偏弱(图3、4),这可能反映了山区地形遮挡对雷达回

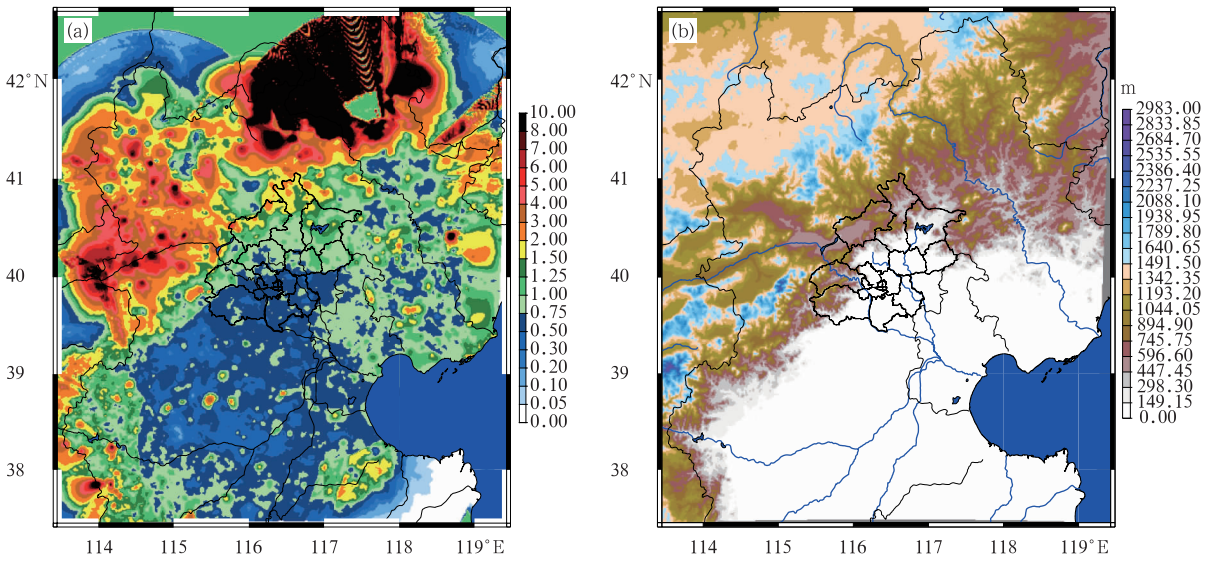

图 3 计算的定量误差校正参数(RFC)(a)和 INCA 范围地形高度分布(b)

Fig. 3 The calculated quantitative correction of the RFC values (a) and the terrain height distribution in the INCA region (b)

波的影响。利用该定量误差校正参数值对雷达定量降水估测进行气候尺度的误差约束,可以减小降水分析的系统误差,提高格点定量降水分析的精度和降水分析的雨带特征。

图 4 给出了引入雷达气候误差校正前、后定量降水估测的对比。结果表明,经过雷达气候校正后,融合定量降水估测场的最大值更接近自动气象站观测(图 4 中黑色区域),雨带结构比较细致,整个雨带形态与雷达定量降水估测比较接近。

2.2.4 基于格点融合定量降水估测的外推预报

INCA 降水预报算法包括两部分:(1)基于格点融合定量降水估测的外推定量降水预报;(2)外推定量降水预报和模式定量降水预报根据预报时效线性权重分配进行融合。

通过矢量交叉相关法导出格点融合定量降水估测在过去的移动矢量,并基于半拉格朗日约束计算出逐 10 min 的降水外推预报矢量,再根据数值模式 500 和 700 hPa 环境风场约束移速过快的伪矢量(Haiden,et al,2011),这是因为根据雷达气候研究结果,不同高度的盛行风代表不同的天气系统和形势,500—700 hPa 高度的盛行风代表影响对流移动和传播的天气系统或引导气流,与对流的每日发展演变和传播存在密切关系(陈明轩等,2014),因此,选用数值模式 500 或 700 hPa 风场作为对流系统移动的引导气流。以数值模式 1 h 预报为背景场,将数值模式有关对流移动和传播的环境场引入到外推预报中,提高了外推预报效果和有效时数。计算式为

$$|V|+|V-V_{NWP}|\leqslant|V_{NWP}|+2\Delta \quad (4)$$

式中,V 为计算的移动矢量,V_{NWP} 为数值模式 500 或 700 hPa 风场(以更接近移动矢量的为准),Δ 为规定的风速变化幅度,决定了移动矢量和对流传播的引导气流(500 或 700 hPa 风场)两者之间允许的偏差量,经验值取 $\Delta=5$ m/s。

2.3 两种融合算法的输入资料

2.3.1 降水实况

利用京津冀地区同步的 6 部新一代天气雷达(北京、天津、石家庄、秦皇岛 S 波段和张北、承德 C 波段)的反射率因子回波拼图和北京自动临近预报系统(BJANC)局地 *Z-R* 关系算法,计算得到 10 min 更新的 1 h 雷达定量降水估测(陈明轩等,2010,2016),并采用京津冀地区逐 5 min 自动气象站观测资料对雷达定量降水估测进行融合订正,作为融合预报试验的格点降水“真值”。

2.3.2 数值模式预报

基于数值模式的 0—6 h 定量降水预报由北京高分辨率区域数值模式来提供。该系统 3 h 更新循环、3 km 分辨率区域覆盖京津冀地区,预报产品输

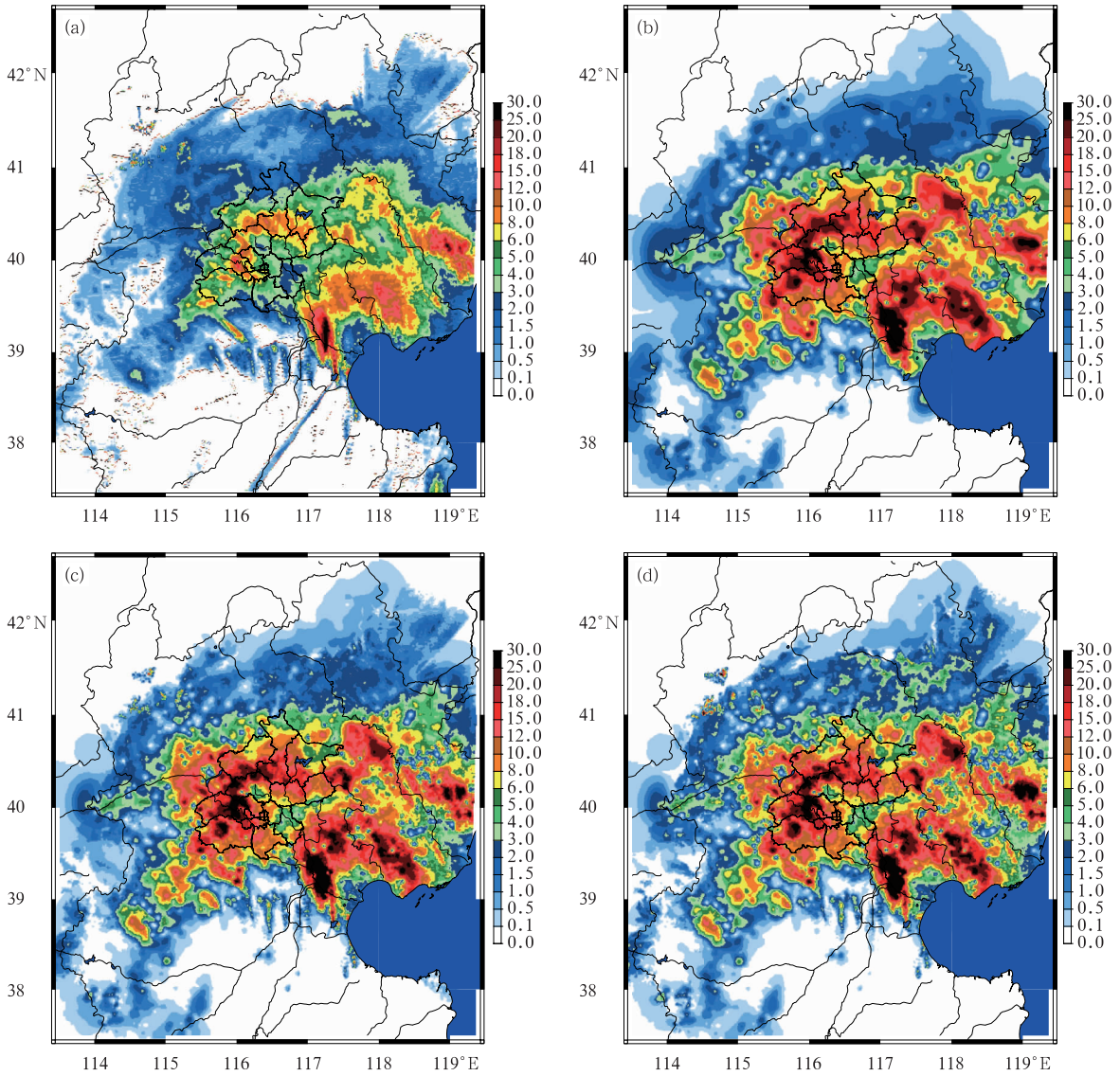

图 4 2016 年 7 月 20 日 06—07 时降水(单位:mm)分析经气候校正的前后对比

(a. 雷达定量降水估测,b. 自动气象站插值定量降水观测,c. 无校正的融合定量降水估测,

d. 经雷达气候校正的融合定量降水估测)

Fig. 4 Comparison of precipitation (unit: mm) 06:00 - 07:00 UTC 20 July 2016 before and after the climate correction

(a. radar QPE, b. automatic station interpolation QPE, c. merged QPE without correction, d. merged QPE after the radar climate correction)

出间隔为 1 h(陈敏等,2010,2014;张亦洲等,2017;仲跻芹等,2017)。

3 两种算法的降水预报对比

由上述介绍可见,INCA 与 RAPIDS 这两种高时空分辨率定量降水预报无缝隙融合算法均有各自的技术优势,为分析实际预报哪种方案更适合本地,在京津冀地区进行了个例试验对比以及汛期检验对比,为新系统集成研发及核心技术改进提供参考。

3.1 两种算法总体对比

表 1 给出 INCA、RAPIDS 两种融合算法的技术特点对比。

表1 INCA和RAPIDS两种定量降水预报融合算法对比

Table 1 Comparison of performances of INCA and RAPIDS

性能、方法及技术	INCA	RAPIDS
资料	自动气象站降水观测,雷达降水估测,模式预报	格点降水实况(自动气象站观测与雷达估测融合),雷达外推预报,模式预报
性能(产品)	格点定量降水分析,降水外推预报(0—6 h),降水融合预报(0—12 h)	降水融合预报(0—6 h)
降水分析功能	有	无(本地化时已添加)
外推预报功能	有	无
融合预报功能	有	有
网格分辨率(km)	1	1
快速更新频率(min)	10	10
外推预报方法	矢量外推	依赖BJANC临近预报
融合预报时效(h)	0—6	0—6
融合预报时间分辨率(min)	10	60
融合方法	外推预报与模式预报随时间权重融合	BJANC临近预报与模式预报随时间权重融合
融合权重线型	随时间的线性	双曲正切曲线
对模式预报处理	分配到10 min	位相和强度订正

3.2 降水个例试验预报效果对比

Chen等(2012)研究表明,北京夏季降水主要分为西南来向对流降水、自西北向东南对流降水、以及层状云大范围降水等3类,选取其中两类过程,利用INCA和RAPIDS系统对北京2015—2016年夏季典型降水个例进行预报试验,并基于自动气象站降水观测进行检验。

3.2.1 2015年7月16日西南来向对流降水的个例

2015年7月16日过程属于西南来向对流降水,主要降雨时段出现在16日后半夜到17日早晨,北京房山、门头沟、昌平和城区大部分地区出现大雨到暴雨,部分地区大暴雨,其他地区为小到中雨,部分地区达大雨量级。16日00时至17日08时(世界时,下同),全市平均降雨36.4 mm,城区平均45.8 mm,此次强降雨雨量分布极不均匀,短时雨强大,持续时间较长。利用INCA和RAPIDS系统对此次过程降水融合分析和1、2 h降水融合预报对比(图5)。

图5a_1—c_1给出INCA、RAPIDS两种算法融合雷达定量降水估测和自动气象站观测后形成的2015年7月16日23时降水分析场,以及与自动气象站观测小时降水量分布的对比,图5a_2—c_2给出2015年7月17日00时的对比。可见,INCA和RAPIDS具有相似的融合效果,各量级降水强度与自动气象站观测较为一致,且由于融合了雷达观测信息,具备更为细致的降水结构分布。

2015年7月16日22时起报的1 h降水预报、2 h降水预报分别与图5c_1、c_2给出的实况对比,INCA、RAPIDS的1 h预报雨带走向和强度与实况一致,2 h预报雨区分布和强度与实况接近,表明二者对此过程降水强度和对流移动速度预报准确,数值模式(BJRUC)和外推预报(BJANC)也报出了此次过程,但降水强度和区域有明显偏差,RAPIDS东南部小雨的空报来源于数值模式。

3.2.2 2015年7月27日西北来向对流降水的个例

2015年7月27日过程属于自西北向东南的降水,主要降雨时段出现在27日11—16时,暴雨集中出现在北京房山东北部、丰台北部、密云东南部及平谷北部,房山和丰台的个别站点出现大暴雨;27日09—22时,全市平均降雨29.3 mm,城区平均39.9 mm。利用INCA和RAPIDS系统对此次过程降水融合分析和1、2 h降水融合预报对比(图6)。

图6a_1—c_1、a_2—c_2分别给出2015年7月27日15和16时两个时次INCA、RAPIDS的逐时降水分析和北京地区自动气象站小时累计降水实况。可以看出,这两种方法形成的降水分析场量级和落区均与实况观测具有很高的一致性,分析效果可靠。

与降水分析及实况相对应,图6d_1、e_1、d_2、e_2给出INCA、RAPIDS在2015年7月27日14时起始的0—1和1—2 h降水预报。从图6d_1来看,INCA

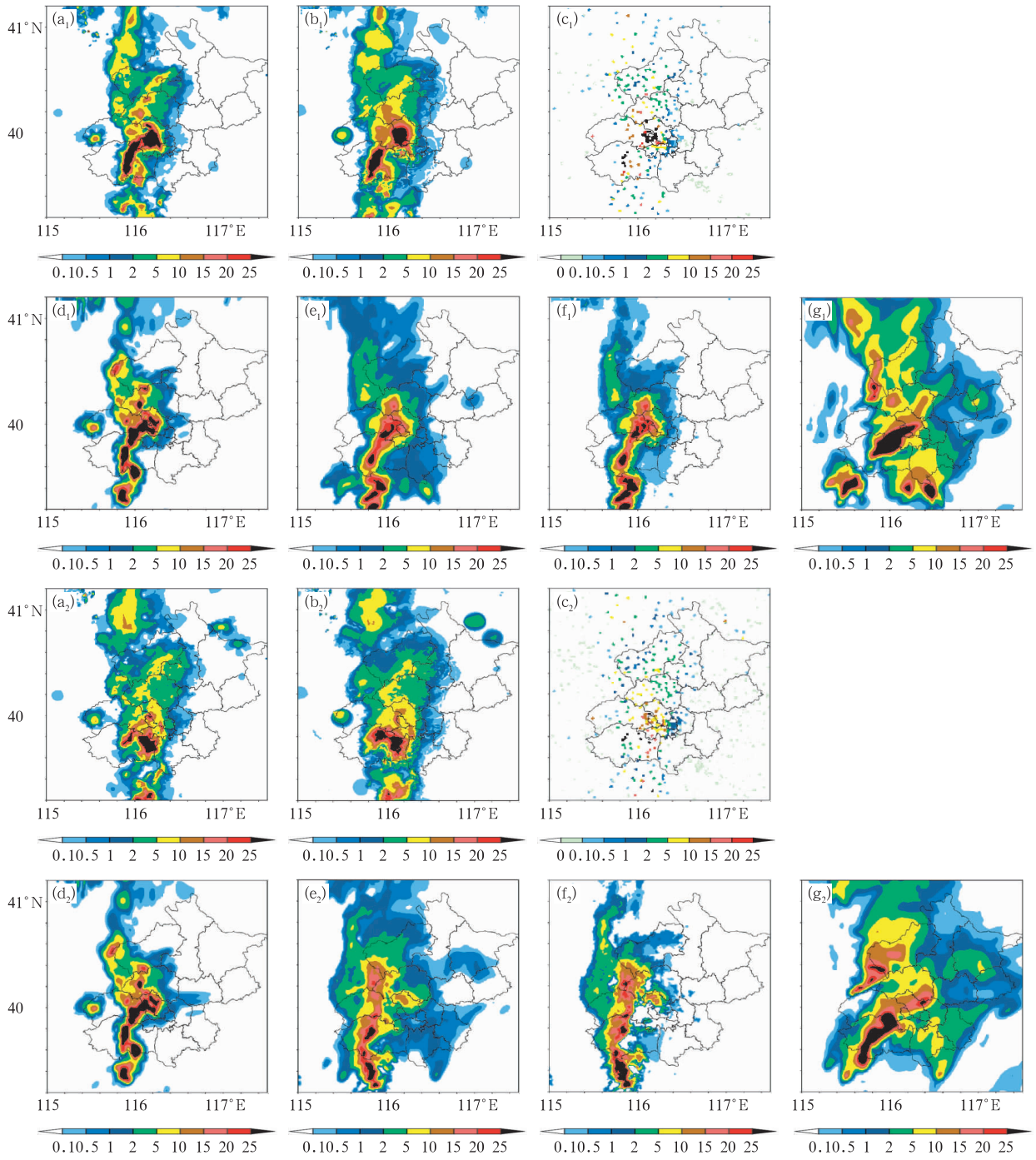

图 5 2015 年 7 月 16 日 22 时起始的 1 h 累计降水分析、预报降水量对比(单位:mm)

(a_1—g_1. 2015 年 7 月 16 日 23 时 0—1 h 分析、预报,a_2—g_2. 17 日 00 时 1—2 h 分析、预报;a、b. INCA、RAPIDS 的 1 h 累计降水分析,c. 自动气象站观测,d—g. INCA、RAPIDS、BJANC、BJRUC 降水预报)

Fig. 5 1 h accumulative precipitation comparisons between analysis and forecast starting from 22:00 UTC 16 July 2015. Precipitation analyses at 23:00 UTC 16 July 2015 are shown for INCA (a_1) and RAPIDS (b_1); automatic station observations are shown in (c_1), 0 − 1 h precipitation forecasts are shown for INCA (d_1), RAPIDS (e_1), BJANC (f_1), BJRUC (g_1). Precipitation analyses at 00:00 UTC 17 July 2015 are shown for INCA (a_2), RAPDIS (b_2), automatic station observations are shown in (c_2), and 1 − 2 h precipitation forecasts are shown for INCA (d_2), RAPIDS (e_2), BJANC (f_2), BJRUC (g_2) (unit: mm)

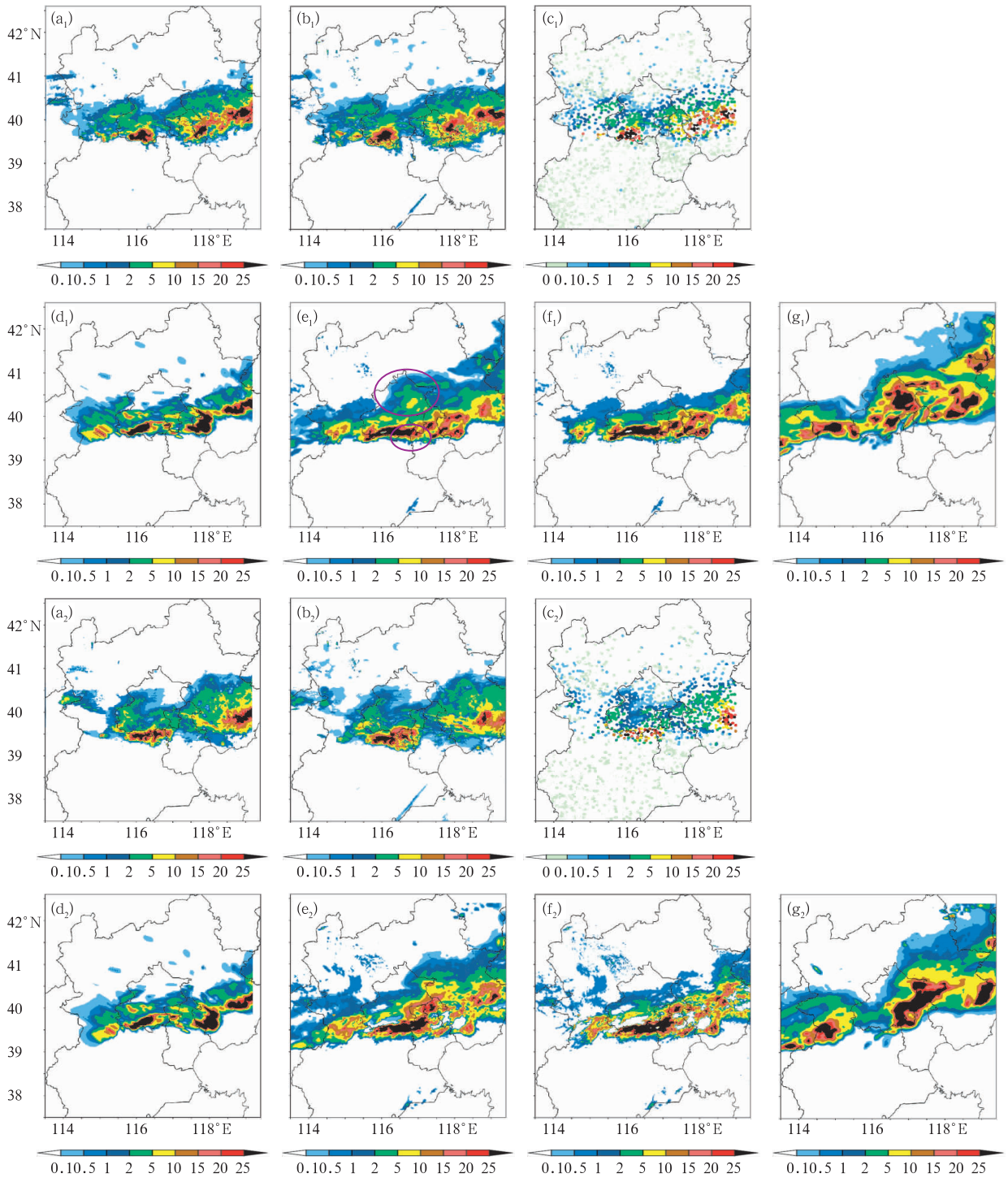

图 6 同图 5,起始时间是 2015 年 7 月 27 日 14 时

Fig. 6 Same as Fig. 5 but for the starting time is 14:00 UTC 27 Jul 2015

0—1 h 预报的降水雨带位置和走向较 RAPIDS 更接近实况,但降水较实况强;由于 INCA 降水融合预报在其 0—2 h 内几乎完全依赖于降水移动矢量进行外推,图 6d_2 给出的 INCA 1—2 h 预报雨带走向和强度均与 0—1 h 非常相似,但整体上略有东移,因此也可以预见,INCA 的 0—2 h 降水预报对于降水稳定移动的过程将具有较好的预报效果,对于降水生消发展、移动变化剧烈的过程,其融合预报的可

参考性将降低。

需要指出的是,RAPIDS 均由上述两个时次的外推预报(BJANC)(图 6f_1、f_2)和模式预报(BJRUC)(图 6g_1、g_2)经时间权重融合后形成。如图 6e_1 所示,RAPIDS 较好地预报出北京西南部的强降水中心,但北京东南部和北部均有明显的空报。不难看出,其中 RAPIDS 在北京东南部的空报降水(小椭圆内)实际上是由 BJANC 外推 0—1 h 预报(图 6f_1)空报造成的,而 RAPIDS 在北京东北部空报(大椭圆内)与 BJRUC(图 6g_1)模式降水预报的落区偏差有关。根据式(1)可知,在 $t=1$ h 时模式预报权重(0.05)远小于外推预报(0.95),因此,BJRUC 在北京东北部的空报实际上造成 RAPIDS 在该地区降水落区的预报偏差,但空报的降水强度仍然远小于 BJRUC 的模式预报。由此可见,RAPIDS 的融合预报性能将由 BJANC 和 BJRUC 代表的外推和模式预报直接决定,只有在模式预报和外推预报效果较好时,才能发挥融合预报的优势;而数值预报或外推预报雨区及量级的预报偏差也均会带入融合降水预报形成明显的空/漏报。

总之,INCA 和 RAPIDS 融合降水采用了不同的降水外推预报技术,以及不同的权重融合计算方法,但二者预报性能的差异表明有效的降水外推预报仍然是高分辨率融合临近预报的关键。综合上面两个不同类型的降水过程试验,INCA、RAPIDS 对降水落区和强度的预报均优于单一的外推预报或数值模式预报,相比而言,INCA 降水预报更接近实况。

3.3 两种算法的汛期检验对比

前文应用 INCA 和 RAPIDS 算法针对北京夏季几类典型降水过程进行了预报效果检验。为了更全面了解这两种算法的预报性能,应用 INCA 和 RAPIDS 算法开展了 2015 和 2016 年的汛期整体试验和检验对比(检验期间为 6 月 1 日—9 月 15 日)。汛期整体的降水检验,包括对流降水和层状云降水等各种天气类型的降水,也包括小雨、中雨、大雨等不同量级的降水,更能说明两种算法的业务应用情况,为进一步改进算法及业务应用提供了可靠的参考。

汛期降水检验使用 CSI(Critical Success Index)和 BIAS 两个检验评分进行联合评估。CSI 表征预报的准确程度,数值范围为 0—1,越接近 1,表示预报准确率越高,BIAS 衡量预报降水范围和实际观测范围的偏移,越接近 1 表示预报降水和观测降水的范围越一致,大于 1 时说明预报存在空报,小于 1 时表示预报存在漏报。由于 2015 年汛期多种降水预报检验结果与 2016 年结果类似,故仅给出 2016 年检验结果(图 7)。

图 7a_1—e_1 和 a_2—e_2 分别给出了 2016 年汛期 1—6 h 降水预报逐时检验 CSI 和 BIAS 评分。整体上看,对于所有阈值和时效,INCA 均具有最好的 CSI 评分,尤其对于前 2 h 及 5 mm/h 以上的大量级降水预报,而且其 BIAS 评分整体上也更接近 1,即 INCA 降水预报在强度和落区上均明显优于其他客观预报方法。RAPIDS 性能次优,其 CSI 评分随预报时效延长与 BJRUC 趋于一致,但 BIAS 评分在 1—2 h 时与 BJANC 接近,而在 3—6 h 时与 BJRUC 接近,降水预报综合性能也反映了 RAPIDS 融合算法的特点。由 BJRUC 代表的模式预报整体上 1—6 h 均为稳定的 CSI 评分,但 BIAS 整体大于 1,表明模式逐时降水预报存在空报现象,尤其对于大阈值降水则更为明显。但从 INCA 和 RAPIDS 的 BIAS 评分来看,模式的降水空报经融合后得到了大幅度的修正。BJANC 的 CSI 评分随预报时效迅速下降,但在 1—2 h 时仍然具有最为合理的 CSI 评分,这反映了外推预报仅在临近 1—2 h 内有效的局限性。综上,融合预报在 0—6 h 内对降水结构和强度的预报均优于单一的外推预报或模式预报,具有良好的预报性能,融合技术是目前解决 0—6 h 高分辨率定量降水无缝隙业务预报的最合适技术。

4 结论与讨论

INCA 和 RAPIDS 是目前具有较大影响力的两套基于融合算法的定量降水 0—6 h 无缝隙预报技术,这两套算法的技术侧重点并不一样,导致它们的预报结果也存在一定差异。文中介绍了这两种技术的基本原理,并应用其对北京地区夏季降水进行了试验,基本结论如下:

(1) RAPIDS 算法融合技术对于模式预报降水位相和强度采用了两步校正法。基于格点定量降水分析场,对数值模式预报的降水落区误差进行位相修正,同时利用韦伯累计分布函数调整模式降水强度,及时引入实时格点定量降水分析场进入融合系统。

图 7 2016 年汛期的多种降水预报逐时检验

(a_1—e_1. CSI, a_2—e_2. BIAS; a—e. 阈值分别为 0.1、1.0 、5.0、10.0、25.0 mm/h)

Fig. 7 Verification of quantitative precipitation forecast of warm season cases in 2016 in Beijing-Tianjin-Hebei region: CSI (a_1 – e_1) and BIAS (a_2 – e_2). The thresholds are 0.1 mm/h (a), 1.0 mm/h (b), 5.0 mm/h (c), 10.0 mm/h (d) and 25.0 mm/h (e)

(2) INCA 算法格点定量降水融合分析采用了雷达气候统计误差校正。其定量降水分析引入雷达气候统计误差校正值后,格点定量降水融合分析更接近自动站观测的降水量级,且降水结构细致。

(3) RAPIDS 算法实现外推预报与数值模式融合的具体方法是动态正切权重融合法,结合不同降水系统的时空尺度特征,在不同情况下取不同的融合权重。

(4) INCA 算法基于格点融合定量降水估测的外推预报,将数值模式有关对流移动和传播的环境风场引入到外推预报中,提高了外推预报效果和有效时数。

(5) 通过个例试验及京津冀汛期长序列检验表明,有效的降水外推预报技术是高分辨率融合预报的关键技术之一,精确的高分辨率格点融合降水分析场是降水融合预报的基础。不论是 INCA 还是 RAPIDS 算法,对降水结构和降水强度的预报均优于单一的外推预报或模式预报,融合预报在 0—6 h 具有良好的预报性能,表明融合技术是目前解决 0—6 h 高分辨率定量降水无缝隙业务预报的最合适技术。

目前,北京城市气象研究院正在研发新一代定量降水无缝隙预报系统,计划将 INCA 和 RAPIDS 两种算法的优势技术进行集成和优化改进。集二者优势拓展研发最优的高时空分辨率降水无缝隙预报融合算法,将有助于提升 0—6 h 降水定量预报水平。

参考文献

陈敏, 范水勇, 郑祚芳等. 2010. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探. 气象学报, 68(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al. 2010. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast. Acta Meteor Sinica, 68(1): 181-194 (in Chinese)

陈敏, 陈明轩, 范水勇. 2014. 雷达径向风观测在华北区域数值预报系统中的实时三维变分同化应用试验. 气象学报, 72(4): 658-677. Chen M, Chen M X, Fan S Y. 2014. The real-time radar radial velocity 3DVar assimilation experiments for application to an operational forecast model in North China. Acta Meteor Sinica, 72(4): 658-677 (in Chinese)

陈明轩, 高峰, 孔荣等. 2010. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. 应用气象学报, 21(4): 395-404. Chen M X, Gao F, Kong R, et al. 2010. Introduction of auto-nowcasting system for convective storm and its performance in Beijing Olympics meteorological service. J Appl Meteor Sci, 21(4): 395-404 (in Chinese)

陈明轩, 王迎春, 高峰等. 2014. 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用. 气象科技进展, 4(5): 30-41. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2013. An overview of progresses in radar climatology and its prospective applications in nowcasting severe weather over urban regions. Adv Meteor Sci Technol, 4(5): 30-41 (in Chinese)

陈明轩, 肖现, 高峰等. 2016. 基于雷达四维变分分析系统的强对流高分辨率模拟个例分析和批量检验. 气象学报, 74(3): 421-441. Chen M X, Xiao X, Gao F, et al. 2016. A case study and batch verification on high resolution numerical simulations of severe convective events using an analysis system based on rapid-refresh 4-D variational radar data assimilation. Acta Meteor Sinica, 74(3): 421-441 (in Chinese)

程丛兰, 陈明轩, 王建捷等. 2013. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. 气象学报, 71(3): 397-415. Cheng C L, Chen M X, Wang J J, et al. 2013. Short-term quantitative precipitation forecast experiments based on blending of nowcasting with numerical weather prediction. Acta Meteor Sinica, 71(3): 397-415 (in Chinese)

范水勇, 王洪利, 陈敏等. 2013. 雷达反射率资料的三维变分同化研究. 气象学报, 71 (3): 527-537. Fan S Y, Wang H L, Chen M, et al. 2013. Study of the data assimilation of radar reflectivity with the WRF 3D-Var. Acta Meteor Sinica, 71(3): 527-537 (in Chinese)

勾亚彬, 刘黎平, 杨杰等. 2014. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估. 气象学报, 72(4): 731-748. Gou Y B, Liu L P, Yang J, et al. 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic. Acta Meteor Sinica, 72(4): 731-748 (in Chinese)

师春香, 谢正辉. 2008. 基于静止气象卫星观测的降水时间降尺度研究. 地理科学进展, 27(4): 15-22. Shi C X, Xie Z H. 2008. A time downscaling scheme of precipitation by using geostationary meteorological satellite data. Prog Geogr, 27(4): 15-22 (in Chinese)

颜琼丹, 苏洵, 韦庆华等. 2010. 一种基于多种资料融合技术的短时临近预报方法. 气象研究与应用, 31(4): 49-52. Yan Q D, Su X, Wei Q H, et al. 2010. Nowcasting approach based on a variety of data fusion. J Meteor Res Appl, 31(4): 49-52 (in Chinese)

杨丹丹,申双和,邵玲玲等.2010. 雷达资料和数值模式产品融合技术研究.气象,36(8):53-60. Yang D D, Shen S H, Shao L L, et al. 2010. A study on blending radar and numerical weather prediction model products. Meteor Mon, 36(8):53-60 (in Chinese)

俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang

X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. Acta Meteor Sinica, 70(3): 311-337 (in Chinese)

张亦洲，苗世光，陈明轩. 2017. 雷达热动力反演资料的高分辨率同化模拟试验. 气象学报，75(1)：165-177. Zhang Y Z, Miao S G, Chen M X. 2017. Numerical experiments on assimilation of high-resolution radar thermodynamic data. Acta Meteor Sinica, 75(1): 165-177 (in Chinese)

郑永光，张小玲，周庆亮等. 2010. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战. 气象，36(7)：33-42. Zheng Y G, Zhang X L, Zhou Q L, et al. 2010. Review on severe convective weather short-term forecasting and nowcasting. Meteor Mon, 36(7): 33-42 (in Chinese)

仲跻芹，Guo Y R，张京江. 2017. 华北地区地基 GPS 天顶总延迟观测的质量控制和同化应用研究. 气象学报，75(1)：147-164. Zhong J Q, Guo Y R, Zhang J J. 2017. A study of quality control and assimilation of ground-based GPS ZTD in North China. Acta Meteor Sinica, 75(1): 147-164 (in Chinese)

邹德龙，冯业荣，梁巧倩等. 2014. 0—3 小时短时定量降水预报算法研究. 热带气象学报，30(2)：249-260. Zou D L, Feng Y R, Liang Q Q, et al. 2014. Study of 0－3 hour short-term forecasting algorithm for rainfall. J Trop Meteor, 30(2): 249-260 (in Chinese)

Atencia A, Rigo T, Sairouni A, et al. 2010. Improving QPF by blending techniques at the meteorological service of Catalonia. Nat Hazarda Earth Syst Sci, 10(7): 1443-1455, doi: 10.5194/nhess-10-1443-2010

Bailey M E, Isaac G A, Gultepe I, et al. 2014. Adaptive blending of model and observations for automated short-range forecasting: Examples from the Vancouver 2010 Olympic and Paralympic Winter Games. Pure Appl Geophys, 171(1-2): 257-276, doi: 10.1007/s00024-012-0553-x

Carbone R E, Tuttle J D, Ahijevych D A, et al. 2002. Inferences of predictability associated with warm season precipitation episodes. J Atmos Sci, 59(13): 2033-2056

Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2012. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology. J Geophys Res, 2012, 117(D20): D20115, doi: 10.1029/2012JD018158

Haiden T, Pistotnik G. 2009. Intensity-dependent parameterization of elevation effects in precipitation analysis. Adv Geo Sci, 20: 33-38

Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. 2011. The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the eastern Alpine region. Wea Forecast, 26(2): 166-183, doi: 10.1175/2010WAF2222451.1

Hwang Y S, Clark A J, Lakshmanan V, et al. 2015. Improved nowcasts by blending extrapolation and model forecasts. Wea Forecast, 30(5): 1201-1217, doi: 10.1175/WAF-D-15-0057.1

Kann A, Wittmann C, Bica B, et al. 2015. On the impact of NWP model background on very high-resolution analyses in complex terrain. Wea Forecast, 30(4): 1077-1089, doi: 10.1175/WAF-D-15-0001.1

Wong M C, Wong W K, and Lai S T. 2006. From SWIRLS to RAPIDS: Nowcast applications development in Hong Kong. WMO PWS Workshop on Warnings of Real-Time Hazards by Using Nowcasting Technology. Sydney, Australia, 9 - 13 October 2006

Wong W K, Yeung L H Y, Wang Y C, et al. 2009. Towards the blending of NWP with nowcast operation experience in B08FDP // WMO Symposium on Nowcasting. Whistler, BC, Canada: WMO