

龙清怡, 刘海文, 顾建峰, 等. 2014. 雷达资料与中尺度数值预报的融合方法研究及其在临近预报中的应用. 气象, 40(10):1248-1258.

雷达资料与中尺度数值预报的融合方法研究 及其在临近预报中的应用^{*}

龙清怡^{1,2} 刘海文^{1,3} 顾建峰⁴ 张亚萍⁵ 翟丹华⁵ 杨 春⁵

1 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225
2 重庆市綦江区气象局, 重庆 401420
3 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147
4 中国气象局, 北京 100081
5 重庆市气象台, 重庆 401147

提 要: 通过融合多普勒天气雷达资料与中尺度数值预报产品, 发展了一种便于临近预报业务使用的方法。该方法首先通过相关分析计算当前相同时刻雷达估测降水与中尺度数值预报的反射率因子估测降水之间的位置偏差, 导出一个位移偏差矢量场; 然后, 利用人机交互的方式对矢量场进行分区, 并对各分区的矢量场进行平滑处理, 计算出各分区的平均位移偏差矢量; 最后, 采用最小二乘法对各分区连续多次的平均位移偏差矢量进行线性拟合, 得到各分区平均位移偏差矢量随时间的变化特征, 订正未来时段相应区域的数值预报反射率因子估测降水的位置偏差。利用该方法对 2012 和 2013 年夏季发生在重庆西部、四川东部的 3 次强降水天气过程进行临近预报试验并对预报结果进行了检验, 结果表明: 对 0~2 h 的临近预报, 融合预报效果总体上优于模式预报效果; 另外, 与雷达外推定量降水预报相比, 0~1 h 雷达外推预报效果优于融合预报效果, 1~2 h 融合预报效果优于雷达外推预报效果。

关键词: 多普勒天气雷达, 中尺度数值预报, 相关分析, 临近预报, 融合

中图分类号: P413, P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.10.009

Study on Blending Radar Data and Mesoscale Numerical Weather Prediction and Its Application to Nowcasting

LONG Qingyi^{1,2} LIU Haiwen^{1,3} GU Jianfeng⁴ ZHANG Yaping⁵ ZHAI Danhua⁵ YANG Chun⁵

1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
2 Qijiang Meteorological Office of Chongqing, Chongqing 401420
3 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147
4 China Meteorological Administration, Beijing 100081
5 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: A nowcasting method based on blending Doppler weather radar data and mesoscale numerical weather prediction (NWP) model products is presented. The method is as follows: Firstly, by using correlation analysis, position errors are calculated between radar precipitation estimate and precipitation estimated from reflectivity factor from the output of NWP model in this same time, and thus displacement deviation vectors fields are obtained. Then, displacement deviation vector fields are partitioned with human-computer interaction and each deviation vector field gets smoothed, so the average displacement deviation

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206028 和 GYHY201006015)、重庆市气象局业务技术攻关重点(团队)项目(ywgg-201205)、重庆市气象局开放式研究基金项目(KFJJ-201102)和重庆市博士后科研项目共同资助
2013 年 8 月 21 日收稿; 2014 年 5 月 5 日收修定稿
第一作者: 龙清怡, 主要从事雷达资料与中尺度数值预报的融合研究. Email: 373083612@qq.com

vector of each partition is obtained. Finally, the trend variation characteristic of average displacement deviation vector of each partition with time is established by using least square method to linearly fit the continuous time multiple average displacement deviation vectors for each partition, and according to the trend, spatial position deviation of precipitation estimated from reflectivity factor from the output of NWP model is corrected in the future periods. The method was once applied to three severe precipitation cases in the summers of 2012 and 2013 that happened in the west of Chongqing and the east of Sichuan. The nowcasting verification results show that for the 0—2 h nowcasting, the performance of blending forecasts is generally superior to model forecasts. Compared with quantitative precipitation forecast (QPF) of radar-based extrapolation, the performance of radar-based extrapolation QPF is superior to blending forecasts in the first hour but the performance of blending forecasts is superior to radar-based extrapolation QPF in the second hour.

Key words: Doppler weather radar data, mesoscale numerical weather prediction, correlation analysis, nowcasting, blending

引 言

近年来,我国常用的 0~3 h 临近预报技术主要包括基于雷达资料的雷暴识别追踪、外推预报技术和数值预报技术以及概念模型预报技术等(陈明轩等,2004)。一方面,尽管通过同化多普勒天气雷达资料等改善数值模式初始场来预报对流天气系统的生消变化已取得一定进展(Benjamin et al, 2009),但在实际预报业务应用中还不够完善,预报起转延迟(spin-up)现象在开始一段时间内仍会存在;此外,在通常的同化技术中一般是先反演风场,再反演热力场的“两步走”方式,这样会造成较大的反演误差,导致预报误差(顾建峰,2006)。另一方面,在基于雷达资料的识别追踪和外推技术中,交叉相关外推(Rinehart et al, 1978; Bjerkaas et al, 1980; Li et al, 1995; Li et al, 2000; 张亚萍等, 2006; 陈明轩等, 2007; 王明筠等, 2010; 符式红等, 2012)和回波特征追踪识别外推(Dixon et al, 1993; Einfalt et al, 1990; 陈明轩等, 2006)应用虽然较为成熟,但仍具有预报时效较短,预报雷暴的发展演变能力较弱等缺陷(陈明轩等, 2004; 俞小鼎等, 2012)。因此,将快速更新循环的高时空分辨率数值预报和基于雷达资料的外推预报相融合的预报技术是改善两者不足的重要方法,也是近年来国内外临近预报方法研究的重要方向(郑永光等, 2010)。

目前,国内外的融合方法主要可分为三类(郑永光等, 2010):第一类是随时效分别计算外推预报和数值模式预报结果的权重系数,然后通过加权平均

进行融合预报。比如由 Golding(1998)研发的 Nimrod 强降水预报系统, Pierce 等(2000)研发的 Gandolf 临近预报系统和美国 NCAR 的 NIWOT 定量降水融合预报系统(Wilson et al, 2006),以及 Tera-da 等(2004)、颜琼丹等(2010)、杨丹丹等(2010)的工作中均用到类似的物理空间融合技术,融合过程中均认为数值模式预报所占权重随时效增加,而外推预报权重随时效减小。第二类是趋势融合法,比如 NIWOT 系统(Wilson et al, 2006),该系统的一部分是利用模式降水落区和强度预报的趋势变化,对雷达外推预报结果进行修正,从而进行定量降水预报融合。第三类是通过计算当前时刻模式降水预报的落区或强度误差,并估计误差的时间变化趋势,利用估计的误差趋势特征,对未来相应时段的模式降水预报结果进行修正。比如, Wong 等(2009)利用香港天文台研发的第二代“小涡旋”临近预报系统(Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems, SWIRLS-2; Yeung et al, 2009)中的多尺度光流变分法(Multi-scale Optical flow by Variational Analysis, MOVA)识别模式定量降水预报的落区误差并进行相位修正,同时利用韦伯累积分布函数识别降水强度误差,根据雷达定量降雨估测值调整模式降水强度;程从兰等(2011)则借鉴香港天文台的融合技术分别应用快速傅里叶变换 FFT 和 MOVA 计算模式降水的相位偏差并进行修正,另外程从兰等(2013)还对中尺度数值模式输出的定量降水预报在谱空间进行相位校正;此外, Du-Fran 等(2009)利用 VET 方法(the Variational radar Echo Tracking algorithm)计算模式预报的降水

与雷达观测的相位误差,并导出误差的时间变化趋势来修正降水相位误差。

本文设计的融合方法属于上述第三类融合法,与上述第三类方法相比,其主要不同是尝试利用相关分析方法计算当前相同时刻雷达估测降水与模式反射率因子估测降水(简称为模式估测降水,下同)之间的位置偏差,并估计位置偏差的时间变化趋势,对未来相应时段的模式估测降水预报结果进行订正。文中主要探索 0~2 h 的模式估测降水的订正效果,并检验其能否好于利用雷达反射率因子外推的定量降水预报效果,进而为预报员发布 0~2 h 临近预警提供重要的科学依据。

1 资料选取及预处理

1.1 资料的选取

由于直接观测的降水在时、空分辨率上较难与数值预报降水产品匹配,所以选用与降水预报密切相关的模式预报的反射率因子(dBz)作为研究对象,便于与雷达观测反射率因子比较。雷达在 3 km 的探测效果最佳,故选用的雷达反射率因子和模式反射率因子的高度均为 3 km。但由于反射率因子(dBz)呈对数量级增长,在订正结果检验时,不便于统计量的计算。因此本文的处理方式是将 3 km 高度的雷达反射率因子和模式反射率因子均转换成降水后再进行融合试验。

1.2 资料的预处理

(1) 本文以 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 GFS 预报场资料作为模式背景场,模式采用双重单向嵌套网格,外层格距为 12 km,格点数为 283×223 ,内层格距为 4 km,格点数为 423×363 ,内外层中心位置均为 $(29.88^\circ \text{N}, 107.73^\circ \text{E})$,均采用相同的垂直层,共 37 层,垂直分辨率为 625 m。外层的输出结果作为内层的背景场,雷达资料在内层中加入,用 ARPS 的复杂云分析方案(Hu et al, 2006a)及 ARPS-3DVAR 系统(Hu et al, 2006b)整点单次同化重庆雷达资料(CINRAD/SA)的反射率和径向风数据更新初始场,将同化后的初始场应用中尺度数值模式 WRF 进行数值预报。预报结果输出间隔为 12 min,预报时效为 3 h,水平分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 。将 3 km 高度的数值预报反射率因子数据,通过 Z-R 关系转

换为 12 min 的降水数据作为模式估测降水。本文所用的 Z-R 关系(Fulton et al, 1998)为:

$$Z = 300R^{1.4} \quad (1)$$

式中, Z 为反射率因子,单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{h}^{-1}$, R 为雨强,单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2) 雷达反射率因子拼图数据(重庆雷达、宜宾雷达,宜宾雷达型号为 CINRAD/SC)和反射率因子拼图的外推预报数据由中国气象局灾害天气短时临近预报业务系统(Severe Weather Automatic Now-cast System, SWAN; 胡胜等, 2011; 李俊等, 2012)提供。产品输出的时间分辨率为 6 min,水平空间分辨率均为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,外推预报数据的预报时效为 3 h。将 3 km 高度间隔 12 min 的反射率因子拼图数据和外推预报数据通过 Z-R 关系转换为 12 min 降水数据,然后用双线性方法插值成水平分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的降水数据,下文分别简称为雷达估测降水和雷达外推定量降水预报。

2 融合方法介绍

本文设计的融合方法主要包括三部分:(1) 查找匹配网格阵列块并计算位移偏差矢量场;(2) 将矢量场分区和平滑处理,计算出各分区的平均位移偏差矢量;(3) 估计各分区的平均位移偏差矢量随时间的变化趋势特征,根据此特征,对相应时段和分区的模式估测降水位置偏差进行订正。

2.1 位移偏差矢量场的计算

参考 TREC 跟踪方法中划分网格阵列求相关的思路(王改利等, 2007),取 3 km 高度、同一时刻 t 的模式估测降水(图 1a)和雷达估测降水(图 1b)作为试验对象。图 1 示意地给出了模式估测降水和雷达估测降水之间位移偏差矢量的计算过程。首先将模式估测降水和雷达估测降水均划分成若干大小相同的网格阵列块,称之为阵列块,每个阵列块包含相同的网格点数,且各个阵列块几何中心有一定间隔距离。然后将其中一个模式估测降水阵列块与一定搜索半径 r 内的所有雷达估测降水阵列块求相关,相关系数(R)的计算公式(王改利等, 2007)为:

$$R = \frac{\sum_k Z_r(k) Z_m(k) - \frac{1}{N} \sum_k Z_r(k) \sum_k Z_m(k)}{\left[\left(\sum_k Z_r^2(k) - N \bar{Z}_r^2 \right) \left(\sum_k Z_m^2(k) - N \bar{Z}_m^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中, Z_r 、 Z_m 分别为 t 时刻雷达估测降水阵列块和模式估测降水阵列块内各个网格点上的值, N 是每

个阵列块的格点数($k=1,2,\cdots,N$)。

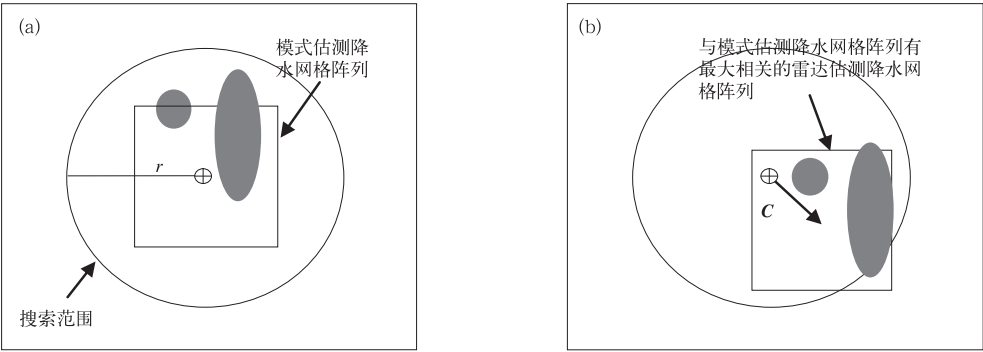


图 1 位移偏差矢量计算方法示意图
 t 时刻 3 km 高度的模式估测降水(a)和雷达估测降水(b)
(其中 r 为搜索半径, C 为位移偏差矢量)

Fig. 1 Schematic diagram of displacement deviation vector calculation method model
precipitation estimation (a) and radar precipitation estimation (b) at 3 km height at t
(r is the search radius, C is displacement deviation vector)

将相关系数最大的雷达估测降水阵列块称之为与该模式估测降水阵列块最为匹配的阵列块。以该模式估测降水阵列块中心为起点, 与之最匹配的雷达估测降水阵列中心为终点, 构成模式估测降水阵列块与雷达估测降水阵列块的位移偏差矢量 C 。位移偏差矢量反映了模式估测降水阵列块与其匹配的雷达估测降水阵列块之间的位置偏差, 位移偏差矢量的长度为位置偏差的大小, 指向为位置偏差的方向。同理, 求得所有模式估测降水阵列块的位移偏差矢量, 构成位移偏差矢量场。

需要说明的是: 在初始时刻, 对于某一个模式估测降水阵列块而言, 由于模式同化雷达数据, 认为该阵列块与其最匹配的雷达估测降水阵列块的位置是无偏差的, 但经过较短的时间 Δt 后, 两个阵列块之间位置逐渐出现偏差, 这种偏差具有时空连续性。由于 Δt 较短, 这两个阵列块之间的距离应相距不远, 为避免在较远处找到错误的最匹配阵列块, 导致得到错误的位移偏差矢量, 因此针对位移偏差, 需指定搜索半径 r 来加以约束。

图 2 给出了搜索半径的确定方法示意图。如图 2 所示, 这里做几点假设: 在间隔较短时间 Δt 内, 3 km 高度的模式估测降水阵列块移动由该高度上模式风场引导, 移动距离 $\leq V_{\text{模式}} \times \Delta t$; 同样地, 3 km 高度的雷达估测降水阵列块移动由该高度上实际风场引导, 移动距离 $\leq V_{\text{实际}} \times \Delta t$; 3 km 高度上, 当模式

预报的风场与实际风场差距不大时, 图 2 中 α 较小。经这样假设后, 位移偏差矢量 $C_{\text{偏差}}$ 的大小不应超过 $V_{\text{模式}} \times \Delta t$, 也不超过 $V_{\text{实际}} \times \Delta t$ 。为计算方便, 将搜索半径定为:

$$r = V_{\text{max}} \times \Delta t \tag{3}$$

式中, V_{max} 为模式起报时刻(即初始同化时刻)所选研究区域, 3 km 高度的模式预报的最大风速; Δt 为时间间隔。

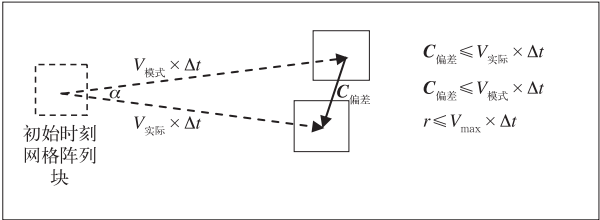


图 2 搜索半径的确定方法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the search
radius determination method

2.2 分区的平均位移偏差矢量的计算

由于夏季降水往往分布不均, 具有成片区的分布特点, 因此, 位移偏差矢量场同样具有这样的特征。为此, 本文参考 NCAR 的 Auto-nowcast system(Mueller et al, 2003) 人机交互操作的处理方式, 把位移偏差矢量较一致的区域划为一个分区。

此外,为提高每个分区位移偏差矢量场的连续性和一致性,对矢量场进行了平滑处理。即在每个分区内,如果一个位移偏差矢量与其周围矢量的平均方向相差超过 40° ,则用其周围一定扫描半径内非零矢量(不少于 10 个)的平均值代替;然后再计算每个分区的位移偏差矢量的平均值,简称为平均位移偏差。用同样的方法,对未来连续几个时次(间隔 Δt 不宜过长)的位移偏差矢量场做分区、平滑处理,计算出各分区的平均位移偏差。

2.3 模式估测降水的订正

由于各分区的平均位移偏差随时间在变化,因此需计算平均位移偏差在未来时段方向、大小的变化趋势特征。文中采用最小二乘法对每个分区连续几个时次的平均位移偏差分别进行线性拟合,得到

每个分区平均位移偏差随时间的变化趋势特征。将未来某一时刻各分区的平均位移偏差作为模式估测降水订正的依据,即模式估测降水沿着对应时刻、对应分区的平均位移偏差的方向、大小移动,由此订正模式估测降水的位置偏差,从而进行融合预报。

3 试验及检验

3.1 试验设计

为了验证上述融合方法在临近预报中的效果,选取 2012 和 2013 年夏季发生在重庆西部、四川东部的 3 次强降水天气过程来进行预报试验,试验参数见表 1,所用时间均为世界时。

表 1 试验设计各项参数
Table 1 Experiment design parameters

	试验 1 2012 年 7 月 21 日	试验 2 2013 年 6 月 08 日	试验 3 2013 年 6 月 30 日
初始同化时刻(模式起报时刻)/UTC	13:00	07:00	13:00
模式预报时间/UTC	13:00—16:00	07:00—10:00	13:00—16:00
试验区域(检验区域)	(26.938°~31.0°N、 104.288°~107.0°E)	(29.0°~31.0°N、 105.0°~107.5°E)	(29.0°~31.0°N、 105.0°~107.0°E)
$V_{\max}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	9	13	11
3 次求偏差时刻/UTC	13:12,13:24,13:36	07:12,07:24,07:36	13:12,13:24,13:36
3 次求偏差对应的搜索半径	6 km,12 km,18 km	10 km,20 km,30 km	8 km,16 km,24 km
融合(订正)时间/UTC	13:48—16:00	07:48—10:00	13:48—16:00
阵列块大小	40 km×64 km	40 km×40 km	40 km×40 km
观测雷达	重庆雷达和宜宾雷达	重庆雷达	重庆雷达

下文以试验 1 为例给出了详细的融合试验过程及分析,试验 2 和 3 类似,不再赘述。

图 3 给出了 2012 年 7 月 21 日 13:12、13:24 和 13:36 UTC,3 km 高度的模式估测降水和雷达估测降水。由图 3 可见,尽管与同时刻雷达估测降水相比,模式估测降水能大致反映出降水分布的基本特点,即大致以 29.5°N 为界,南、北部各有一个呈带状分布的降水中心;但南部的模式估测降水中心位置偏向雷达估测降水中心位置的西南方,北部的模式估测降水中心位置在 13:36 UTC 也略偏向雷达估测降水位置的西南方,在空间分布上存在着一定的位置偏差。利用第二节所述方法对 2012 年 7 月 21 日的强降水过程进行融合试验。如表 1 中试验 1,根据此次过程降水分布情况,选取矩形区域($26.938^{\circ}\sim 31.0^{\circ}\text{N}$ 、 $104.288^{\circ}\sim 107.0^{\circ}\text{E}$)作为试验区域;计算位移偏差矢量场的时次为 13:12、13:24

和 13:36 UTC;由于 $V_{\max}$ 约为 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此 3 个时次搜索半径分别定为 6、12 和 18 km。Tuttle 等(1990)研究认为,虽然计算最大相关系数的阵列块大小可以任意选择,但若阵列块太小,不能包含足够的资料点计算一个相对稳定的相关系数,若太大,则不能获得较精细的特征;而且在相关系数的计算过程中对噪声等低阈值回波非常敏感。因此,此个例以 29.5°N 以北的降雨中心范围大小为选取阵列块的标准,对于水平分辨率为 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 的网格,选用长方形阵列块大小 11×17 ,即范围 $40\text{ km}\times 64\text{ km}$,基本将北部的降雨中心包括在内(如图 3a 红色实线方框所示),阵列块移动间隔定为 1 个格距,即 4 km。此外,本文将计算相关系数的 12 min 反射率因子估测降水的最低阈值均设为 0.472 mm (相当于反射率因子最低阈值为 30 dBz);为有效减少边界错误的矢量,在选取阵列块时,如果阵列块内

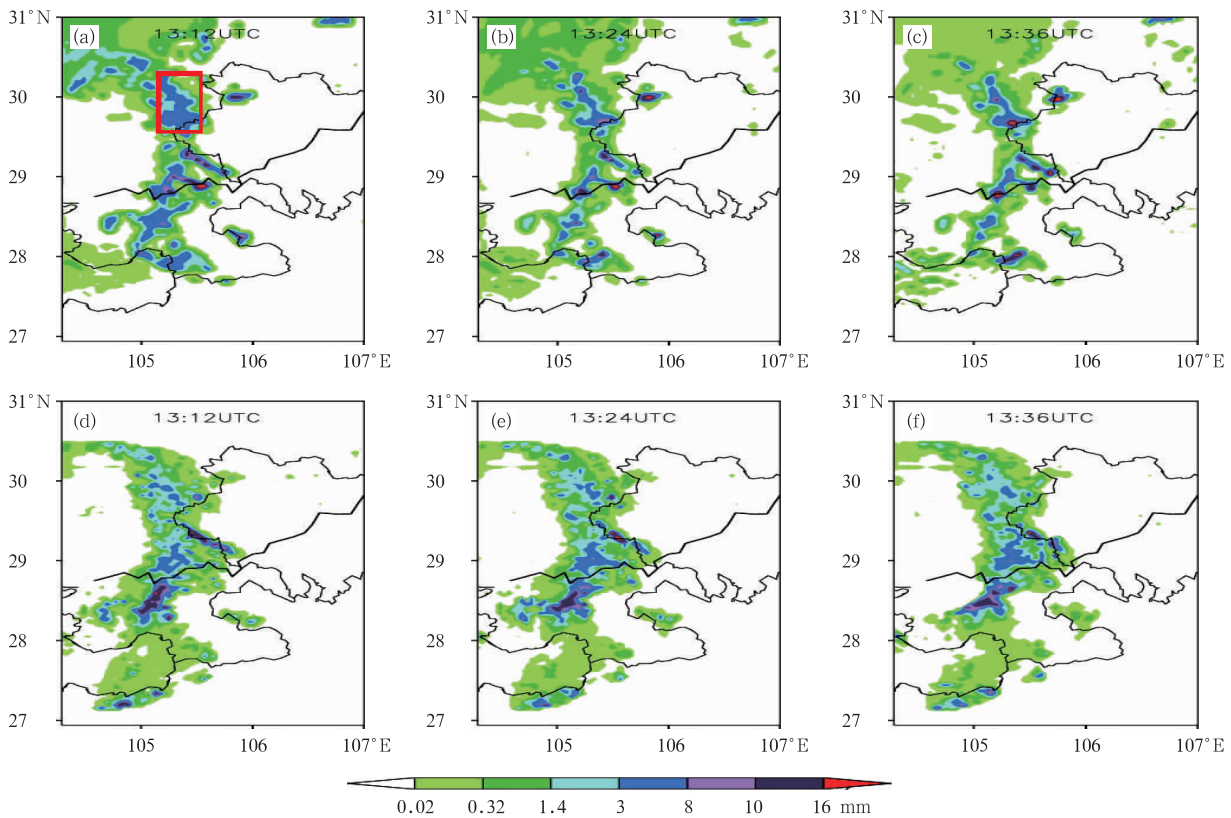


图 3 2012 年 7 月 21 日 13:12、13:24 和 13:36 UTC, 3 km 高度的 12 min 模式
估测降水(a~c)和 12 min 雷达估测降水(d~f)
(彩色阴影, 单位: mm; 红色实线方框表示了阵列块大小)

Fig. 3 12 min model precipitation estimate (a, b, c) and 12 min radar precipitation estimate (d, e, f)
at 13:12, 13:24 and 13:36 UTC 21 July 2012 at 3 km height
(color shaded, unit: mm; red box stands for grid array size)

≥最低阈值的格点数之和<阵列块内总点数的3/5, 则该阵列块被视为无效, 不计算位移偏差矢量。

3.2 位移偏差矢量场

图 4a、4c 和 4e 分别是 2012 年 7 月 21 日 13:12、13:24 和 13:36 UTC 未经过分区、平滑处理的位移偏差矢量场, 从图中可以看出两个特征, 一是某些成片的区域内位移偏差的大小、方向较一致, 但与周边区域的位移偏差的方向、大小有较大差别; 二是在成片的位移偏差的大小、方向较一致的区域内, 有少数位移偏差与附近主要位移偏差差别较大、不连续。于是, 采用 2.2 节所述方式进行分区、平滑处理, 得到 4 个分区的平均位移偏差场(图 4b、4d 和 4f)。由图 4b、4d 和 4f 与图 4a、4c 和 4e 对比可见, 经过分区、平滑处理后, 每个分区的平均位移偏差场与对应位置未经过分区、平滑处理的位移偏差场的

整体方向保持一致, 并且对每个分区内少数差别较大的位移偏差得以一定改善。由图 4b、4d 和 4f 可见, 平均位移偏差在 1 区和 2 区基本指向东北方, 3 区基本指向偏北方, 且 1~3 区平均位移偏差的大小随时间逐渐增大, 表明模式估测降水与雷达估测降水之间的位置偏差在平均位移偏差方向上随时间逐渐增大, 4 区由指向西南方逐渐转为指向偏北方, 表明 4 区平均位移偏差随时间有指向东北方的增长趋势。对每个分区的平均位移偏差进行最小二乘线性拟合, 得到每个分区平均位移偏差随时间趋势变化特征, 对 13:48—16:00 UTC 的模式估测降水进行订正。

3.3 预报结果及分析

图 5 给出了 2012 年 7 月 21 日 13:48—16:00 UTC 时段 3 km 高度的模式估测降水预报和融合估

测降水预报结果。由图可见,在 13:48—14:12 UTC 时段,雷达估测降水基本稳定在重庆西部与四川接壤的区域,呈准南北向;融合前,模式估测降水位置与雷达估测降水位置较一致,但模式估测降水范围较雷达估测降水范围窄,其东西两侧有明显的“空白”区(图 5a~5c),融合后,东侧边缘的“空白”区显著减少,但是西部边缘的“空白”区却扩大(图 5a₁~5c₁),可见,在这一时段的融合预报效果较模式预报略有改善但优势不显著。在 14:24—14:48 UTC 时段,北部(29.5°N 以北,下同)的雷达估测降水位置基本稳定不动,南部(29.5°N 以南,下同)的雷达估测降水逐渐向东北方移动,逐渐进入重庆地区;融合前,模式估测降水位置偏向雷达估测降水位置的西南方,南部模式估测降水位置偏离较明显(图 5d~5f);融合后,与雷达估测降水位置比较,虽然北

部的融合估测降水位置略微出现偏东现象,但总体略胜于模式估测降水预报,而南部的融合估测降水位置与雷达估测降水位置十分接近,模式估测降水位置偏西南的情况得以改善(图 5d₁~5f₁),可以看出,此时段融合预报效果更优。在 15:00—16:00 UTC 时段,北部的雷达估测降水向东北方缓慢移动,南部仍继续向东北方移动;融合前,模式估测降水位置明显偏向雷达估测降水位置的西南方,形状有了明显不同,两者间的偏差已经非常明显(图 5g~5l),融合后,融合估测降水位置与雷达估测降水位置基本重合(图 5g₁~5l₁),由此表明,此时段融合预报效果明显优于模式预报效果。综上所述,对于 0~2 h 左右的临近预报,融合预报效果总体优于模式预报效果。用同样的方法,进行试验 2 和试验 3,所得的融合预报效果与试验 1 类似(图略)。

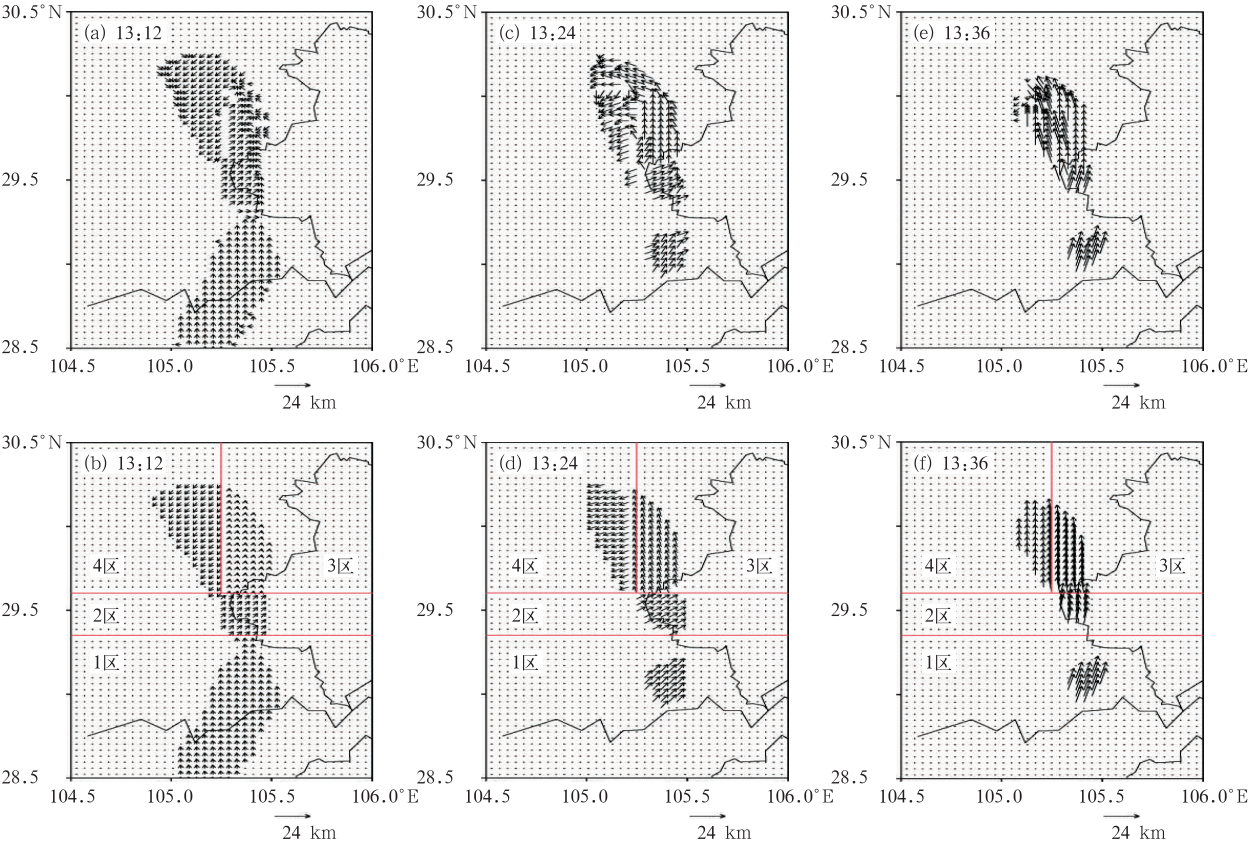


图 4 2012 年 7 月 21 日 13:12、13:24 和 13:36 UTC, 3 km 高度的位移偏差矢量场(a,c,e)和分区的平均位移偏差矢量场(b,d,f)
(单位: km, 实线: 划分区域线)

Fig. 4 Displacement deviation vector fields (a, c, e) and partitioned average displacement deviation vector fields (b, d, f) at 13:12, 13:24 and 13:36 UTC July 21 2012 at 3 km height
(unit: km, solid line is partition line)

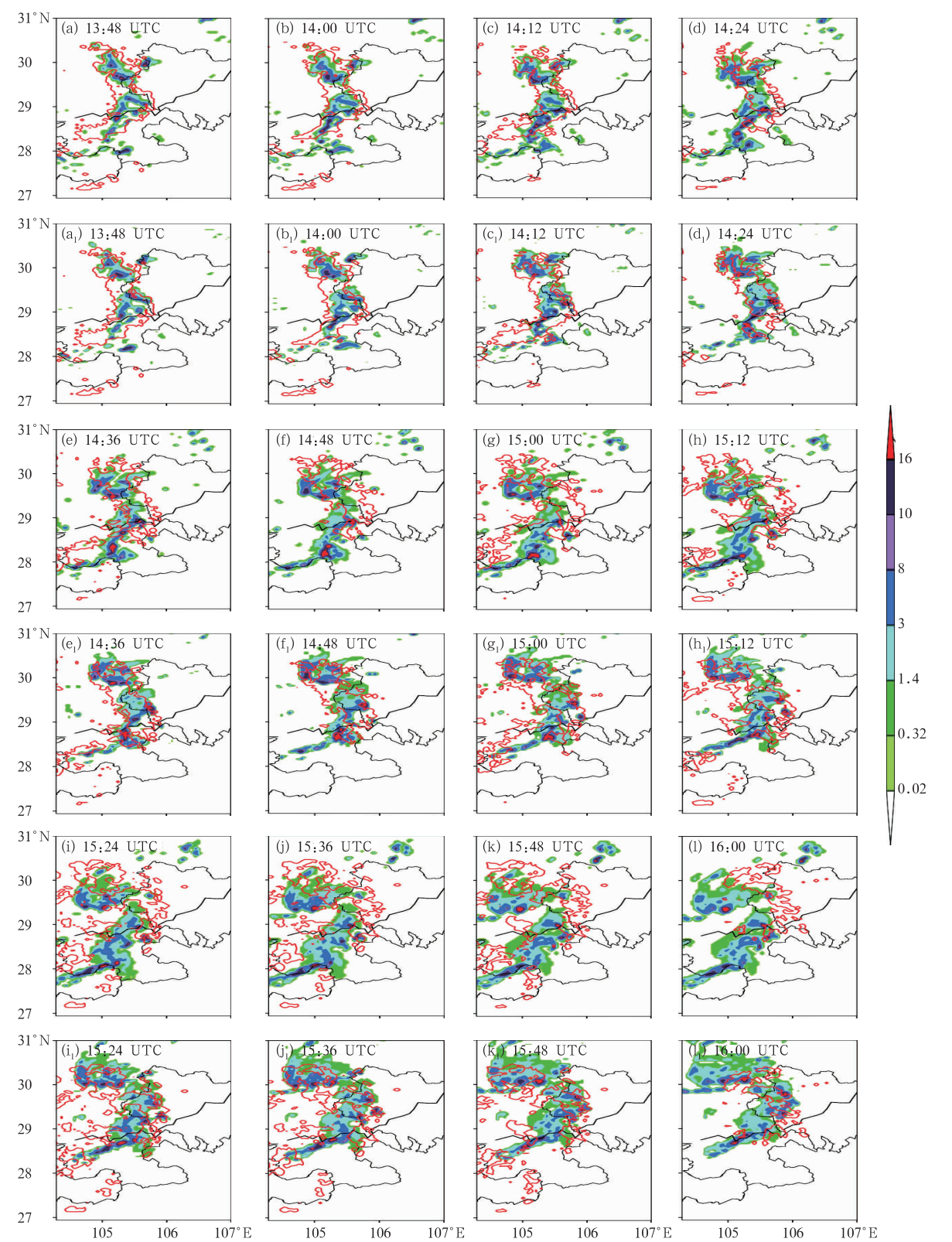


图 5 2012 年 7 月 21 日 13:48—16:00 UTC, 3 km 高度的 12 min 模式估测降水预报(a~l) 和 12 min 融合估测降水预报(a₁~l₁)
(彩色阴影 ≥ 0.472 mm, 实线: 对应时刻 3 km 高度上 12 min 雷达估测降水的 0.472 mm 等值线)
Fig. 5 Model precipitation estimate forecast (a~l) and blending precipitation estimate forecast (a₁~l₁) at 3 km height per 12 min from 13:48 to 16:00 UTC 21 July 2012
(color shaded ≥ 0.472 mm, solid line: 0.472 mm isoline of radar precipitation estimate per 12 min at 3 km height)

3.4 定量检验分析

为进一步检验上述融合方法对临近预报效果的改进,将对 3 次试验的融合估测降水预报、模式估测降水预报和雷达外推定量降水预报的预报效果进行定量对比分析。选用的检验方法是将格点上对应时刻的估测降水预报数据与雷达估测降水数据逐一比较,如果一个格点上雷达估测降水数据与预报数据都大于预先设定的阈值,则认为该格点击中,如果格点上雷达估测降水数据大于阈值而预报数据小于阈值,则认为该格点为漏报,如果格点上雷达估测降水数据小于阈值而预报数据大于阈值,则认为该格点为空报。采用以下 3 个指标来进行客观评价(胡胜等,2012;傅娜等,2013):

$$POD = \frac{N_{\text{击中}}}{N_{\text{击中}} + N_{\text{漏报}}} \tag{4}$$

$$FAR = \frac{N_{\text{空报}}}{N_{\text{击中}} + N_{\text{空报}}} \tag{5}$$

$$CSI = \frac{N_{\text{击中}}}{N_{\text{击中}} + N_{\text{漏报}} + N_{\text{空报}}} \tag{6}$$

式(4)~(6)中, POD 为命中率、 FAR 为空报率、 CSI 为临界成功指数, $N_{\text{击中}}$ 、 $N_{\text{漏报}}$ 、 $N_{\text{空报}}$ 分别为预报击中、漏报、空报的格点数目。

图 6 是 3 次强降水个例试验的模式估测降水预报、融合估测降水预报和雷达外推定量降水预报各自的 CSI 时间变化曲线及总的 CSI 、 POD 和 FAR 时间变化曲线。由图 6a~6c 可见,在 144 min (约 2 h) 的整个订正过程中,总体而言,3 次试验融合估测降水预报的 CSI 均高于模式估测降水预报的 CSI ;雷达外推定量降水预报的 CSI 均呈下降趋势。由试验 1 的 CSI 可见,在 0~60 min 订正过程中,雷达外推定量降水预报的 CSI 最高;60~144 min 是融合估测降水预报的 CSI 最高,雷达外推定量降水预报的 CSI 高于模式估测降水预报的 CSI (图 6a)。由试验 2 的 CSI 可见,在 0~48 min (约 1 h) 订正过程中,雷达外推定量降水预报的 CSI 最高;48~144 min 是融合估测降水预报的 CSI 最高,雷达外推定量降水预报的 CSI 低于模式估测降水预报的 CSI (图 6b)。由试验 3 的 CSI 可见,

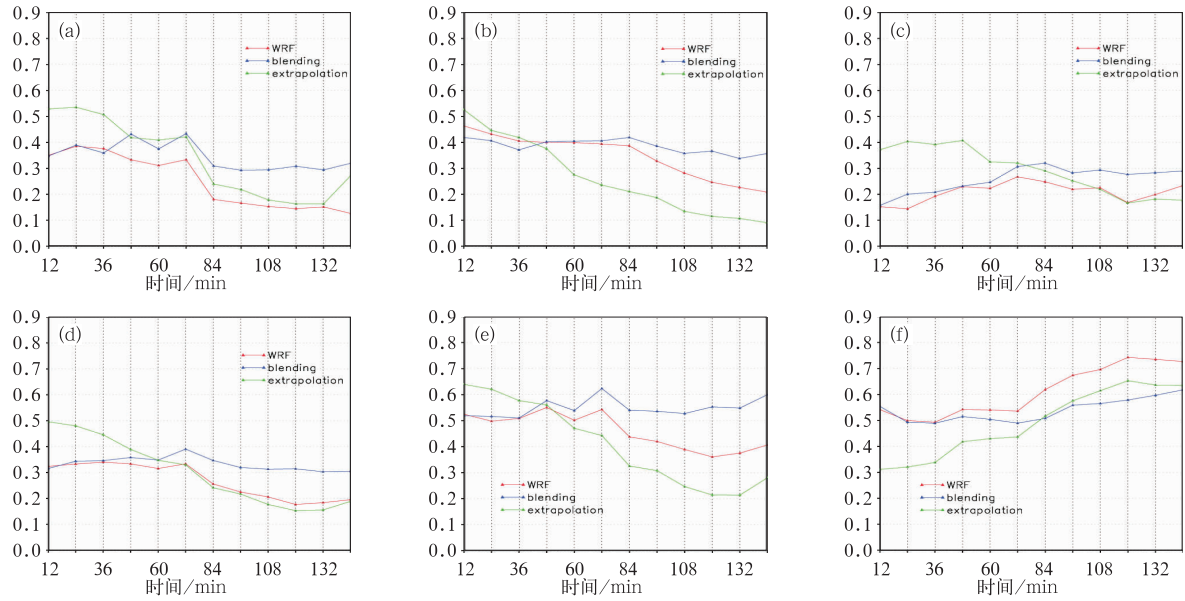


图 6 3 次试验每 12 min 的模式估测降水预报(红线: WRF)、融合估测降水预报(蓝线: blending)和雷达外推定量降水预报(绿线: extrapolation;外推预报由起始订正时开始)各自的 CSI 时间变化曲线
(a) 试验 1、(b) 试验 2、(c) 试验 3, 及总的 CSI (d), POD (e), FAR (f) 时间变化曲线
(阈值: 0.472 mm)

Fig. 6 Three tests of respective CSI (a, b, c) and total CSI (d), total POD (e), total FAR (f) time curves of model precipitation estimate forecast (red line: WRF), blending precipitation estimate forecast (blue line: blending) and radar-based extrapolation QPF (green line: extrapolation, extrapolation forecast starts beginning of correction) per 12 min (a) Test 1, (b) Test 2, (c) Test 3 (threshold: 0.472 mm)

在0~72 min(约1 h)订正过程中,雷达外推定量降水预报的CSI最高,72~144 min是融合估测降水预报的CSI最高(图6c)。综上可见0~1 h,3次试验的雷达外推定量降水预报CSI最高,预报效果最优;1~2 h,融合估测降水预报CSI最高,预报效果最优,雷达外推定量降水预报效果和模式估测降水预报效果各有优劣。

如图6d所示,在144 min(约2 h)的整个订正过程中,3次试验融合估测降水预报总的CSI高于模式估测降水预报总的CSI;雷达外推定量降水预报的总的CSI呈下降趋势,0~60 min是雷达外推定量降水预报的CSI最高,60~144 min为融合估测降水预报总的CSI最高。图6e与6d比较,3次试验的3种预报方法总的POD与总的CSI趋势均相似。如图6f所示,在144 min的整个订正过程中,3次试验的3种预报方法总的FAR整体均呈上升趋势;融合估测降水预报总的FAR低于模式估测降水预报总的FAR。0~72 min(约1 h)订正过程中,雷达外推定量降水预报总的FAR最低,72~144 min为融合估测降水预报总的FAR最低。由此可见,0~1 h,3次试验雷达外推定量降水预报总的CSI和总的POD都最高、总的FAR最低,雷达外推定量降水预报效果最优;1~2 h,融合估测降水预报总的CSI和总的POD都最高、总的FAR最低,融合估测降水预报效果最优。

综上所述,基于所分析的3次夏季强降水个例,对0~2 h左右的临近预报,融合预报效果总体上优于模式预报效果;0~1 h,雷达外推定量降水预报效果最优,雷达外推定量降水预报效果总体呈下降趋势,1~2 h,融合预报效果最优。

4 结论和讨论

本文发展了一种对多普勒天气雷达资料与中尺度数值预报产品进行相关分析的融合方法,并利用该方法对夏季发生在重庆西部、四川东部的3次强降水天气个例进行临近预报试验及检验评价,得出以下结论:

(1) 对0~2 h左右的临近预报,融合预报效果总体上优于模式预报效果。

(2) 与雷达外推定量降水预报效果相比,对0~2 h左右的临近预报,0~1 h雷达外推定量降水预报效果优于融合预报效果;1~2 h,融合预报效果优

于雷达外推定量降水预报效果,可见,在临近预报1~2 h时效内,本文设计的融合技术对夏季强降水临近预报有一定应用价值。

另外,由于该融合方法是通过对当前几个时次各分区平均位移偏差进行线性拟合,并根据线性拟合趋势特征订正模式估测降水预报结果,因此主要应用于0~2 h临近预报中。如果订正时间较长,这种线性拟合趋势特征可能与实际情况之间存在较大误差,所以文中没有研究该融合方法应用于2~6 h的数值预报结果。今后可以尝试非线性的方式进行拟合并探讨该融合方法对2~6 h数值预报降水订正的可行性。

同时,该融合方法亦存在一些局限:首先,该融合方法依赖于模式对反射率因子的预报效果,本方法不适用于雷达观测的反射率因子和模式预报的反射率因子结构有较大差别的情况。其次,本文对位移偏差矢量场进行分区主要是采用人机交互操作的处理方式,把位移偏差矢量较一致的区域划为一个分区,在实际应用时,还需要发展对位移偏差进行自动分区的方法。另外,本文选择求取相关的阵列范围对于局地或尺度小的降水过程不一定适合,阵列大小的选择对不同尺度降水过程订正效果的影响等方面还需要进一步探讨。

参考文献

- 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等. 2004. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展. 应用气象学报, 15(6): 754-766.
- 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等. 2006. 北京2004年“7.10”突发性对流强降水的雷达回波特征分析. 应用气象学报, 17(3): 333-345.
- 陈明轩,王迎春,俞小鼎. 2007. 交叉相关外推算法的改进及其在对流临近预报中的应用. 应用气象学报, 18(5): 690-701.
- 程从兰,陈明轩,杨汉贤,等. 2011. 北京地区短时降水融合预报系统的构建. 厦门:第28届中国气象学会年会.
- 程从兰,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.
- 傅娜,陈葆德,谭燕,等. 2013. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验. 气象, 39(10): 1247-1256.
- 符式红,钟青,寿绍文. 2012. 对多普勒雷达集合交叉相关外推技术的构造与实例检验. 气象, 38(1): 47-55.
- 顾建峰. 2006. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究. 南京:南京信息工程大学.
- 胡胜,罗聪,黄晓梅,等. 2012. 基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报的对比分析. 气象, 38(3): 274-280.
- 胡胜,孙广凤,郑永光,等. 2011. 临近预报系统(SWAN)产品特征及在2010年5月7日广州强对流过程中的应用. 广东气象, 33

- (3):11-15.
- 李俊,支树林,郭燕,等. 2012. SWAN 系统雷达定量降水估测产品在江西的应用. *气象与减灾研究*, 35(2):61-66.
- 王改利,刘黎平,阮征. 2007. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用. *应用气象学报*, 18(3):388-396.
- 王明筠,赵坤,吴丹. 2010. T-TREC 方法反演登陆中国台风风场结构. *气象学报*, 68(1):114-124.
- 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.
- 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.
- 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.
- 张亚萍,程明虎,夏文梅,等. 2006. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用. *气象学报*, 64(5):631-646.
- 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.
- Benjamin S G, Hu M, Weygandt S, et al. 2009. Integrated assimilation of radar/sat/METAR cloud data for initial hydrometeor/divergence to improve hourly updated short-range forecasts from RUC/RR/HRRR. Whistler: World Meteorological Organization Symposium on Nowcasting and Very Short Term Forecasting.
- Bjerkaas C L, Forsyth D E. 1980. Operational test of a three-dimensional echo tracking program. Preprints 19th Conf Radar Meteorology, Miami Beach: Amer Meteor Soc, 244-247.
- Dixon M, Wiener G. 1993. TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting—A radar-based methodology. *J Atmos Ocean Tech*, 10(6):785-797.
- DuFran Z M, Carpenter R L, Shaw B L. 2009. Improved precipitation nowcasting algorithm using a high-resolution NWP model and national radar mosaic. Williamsburg: AMS 34th Conference on Radar Meteorology.
- Einfalt T, Denceux T, Jacquet G. 1990. A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes. *J Hydro1*, 114(3-4): 229-244.
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D, et al. 1998. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 13(2):377-395.
- Golding B W. 1998. Nimrod A system for generating automated very short range forecasts. *Meteor Appl*, 5(1):1-16.
- Hu M, Xue M, Brewster K. 2006a. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level—II data for the prediction of the fort worth, Texas, Tornadoic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon Wea Rev*, 134(2):675-698.
- Hu M, Xue M, Brewster K. 2006b. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level—II data for the prediction of the fort worth, Texas, Tornadoic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 134(2):699-721.
- Li L, Schmid W, Joss J. 1995. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J Appl Meteor*, 34(6):1286-1300.
- Li P W, Wong W K, Chan K Y, et al. 2000. SWIRLS—An evolving nowcasting system. Technical Note, No. 100, Hong Kong Observatory.
- Mueller C K, Saxen T, Roberts R D, et al. 2003. NCAR auto-nowcast system. *Wea Forecasting*, 18(4):545-561.
- Pierce C E, Hardaker P J, Collier C G, et al. 2000. GANDOLF: A system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteor Appl*, 7(4):341-360.
- Rinehart R E, Garvey E T. 1978. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 273:287-289.
- Terada M, Kataoka K, Ikebuchi S, et al. 2004. The development of short-term rainfall prediction system in mountainous region by the combination of extrapolation model and meso-scale atmospheric model. Melbourne: In Sixth International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar.
- Tuttle J D, Foote G B. 1990. Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *J Atmos Ocean Techn*, 7(2): 218-232.
- Wilson J, Xu M. 2006. Experiments in Blending Radar Echo Extrapolation and NWP for Nowcasting Convective Storms. ERAD 2006, Barcelona, Spain. <http://www.grahi.upc.edu/ERAD2006/proceedingsMask/00140.pdf>
- Wong W K, Yeung L H Y, Wang Y C, et al. 2009. Towards the Blending of NWP with Nowcast Operation Experience in B08FDP. Whistler: WMO Symposium on Nowcasting.
- Yeung L H Y, Wong W K, Chan P K Y, et al. 2009. Applications of the Hong Kong Observatory nowcasting system SWIRLS-2 in support of the 2008 Beijing Olympic Games. Whistler: WMO Symposium on Nowcasting.