

# 雷达资料GSI分析系统对一次特大暴雨的 试验研究

董海萍<sup>1</sup> 罗雨<sup>1</sup> 汤翔<sup>2</sup>

(1 空军气象中心, 北京 100843; 2 民航局空管局气象中心, 北京 100021)

**摘要:** GSI是目前美国NCEP业务上使用的资料分析系统, 本文以北京“7·21”特大暴雨为例, 通过对雷达资料GSI同化后的模式初始场和强降水预报结果对比分析, 检验GSI同化系统对本地雷达资料的融合能力和对强降水的预报效果。通过试验对比可知, 经过GSI雷达资料同化后的分析场, 可将风场和水汽场进行有效的调整, 较好地反映了同时刻大气实际状况, 并且水汽增量由加入雷达反射率同化后产生, 而雷达径向风的同化只能改变风场结构。对北京“7·21”强降水发生的累积降水预报和逐小时降水预报的不同试验方案对比分析可知, 经过GSI雷达资料同化后的初始场对强降水预报有很好的正效应, 且同时同化雷达径向风和反射率后预报效果最好, 不但对整个雨带位置进行整体调整和改善, 而且对强降水中心强度和位置都进行了调整和修正。

**关键词:** 雷达资料, GSI同化系统, 特大暴雨, 数值预报

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.003

## Study of the Effect of Radar Data Analysis with GSI on Heavy Rainfall Prediction

Dong Haiping<sup>1</sup>, Luo Yu<sup>1</sup>, Tang Xiang<sup>2</sup>

(1 Meteorological Center of PLA Air Force, Beijing 100843 2 Civil Aviation of Meteorological Center, Beijing 100021)

**Abstract:** The assimilation of radar data using Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) analysis system was employed for prediction of “7·21” Beijing heavy rainfall. It is shown that the assimilation of radar data introduces reasonable modification to the initial analysis. The vapor increment associated with the assimilation of radar reflectivity, and the modified horizontal wind field due to the assimilated radar radial velocity provided a better initial analysis for precipitation prediction. This may effectively improve the prediction of the spatial distribution and the intensity of heavy rain. Thus the sensitivity simulations of “7·21” Beijing heavy rainfall validate a good effect of the assimilation of both radar radial velocity and reflectivity on the heavy rainfall prediction.

**Keywords:** radar data, GSI assimilation, rainfall, prediction

### 0 引言

强对流天气预报一直是天气预报的一个难点和重点。具有高时空分辨率的多普勒天气雷达可以实现强对流系统三维降水结构的细致观测, 其已成为强对流天气预警的重要手段和强降水研究中不可缺少的工具。近年来随着我国加大雷达观测站点的布网力度, 观测技术的发展也迅速接近国际先进水平。但如何将雷达资料有效地利用于数值天气预报就成为日益突出的问题, 如能充分利用其观测资料, 改善数值模式预报的初始场, 对于提高强降水天气预报有重要的价值。近年来对于雷达资料在数值预报方面也有一些研

究和应用, 杨洪平等<sup>[1]</sup>对国内外多普勒天气雷达短时预报技术进行了归纳和总结, 指出随着将变分技术引入气象研究领域, 雷达资料的变分同化技术也相应发展起来, 并且国外许多模式都相应建立了雷达资料的三维变分或四维变分同化系统。国内在此方面与国际先进水平相比还存在一定差距, 但也做了一些工作。如利用ARPS及其资料同化系统ADAS对比分析了雷达资料同化对短时数值预报的影响<sup>[2-5]</sup>; 利用WRF及其变分同化系统WRFDA检验和评估雷达资料同化对改进模式初始场及其预报能力的影响和作用<sup>[6-10]</sup>。但大部分试验还都基于单部雷达的研究, 其影响范围和试验结果都有一定的局限性。随着我国雷达建设力度不断加大和对强对流天气预报精度要求的不断提高, 同时各模式的特性和资料同化系统也在不断地改进和

收稿日期: 2015年11月26日; 修回日期: 2016年4月6日  
第一作者: 董海萍(1965—), E-mail: haiping\_dong@sina.com

完善中,为此还需针对雷达资料在数值预报中的应用做进一步的试验。本文采用的Gridpoint Statistical Interpolation (GSI)是将全球和区域的变分同化技术集于一体的资料分析系统<sup>[11-15]</sup>。它是美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)业务预报中所采用的同化系统,主要用于区域预报、全球预报、飓风预报、实时中尺度分析和快速更新预报,是目前世界上最先进和成熟的同化系统之一。它既可用于三维变分同化,也可选择使用四维变分同化、混合集合卡尔曼滤波同化,可同时对上百部雷达的径向风和反射率进行同化分析。然而,此系统是否适用于我国业务数值天气预报,尤其对提高强对流天气的预报是否有效,国内对此方面的研究应用工作至今还很少。为此,本文拟采用GSI-3Dvar同化系统,将常规观测资料和多部多普勒雷达资料的径向风和反射率进行资料同化,并利用WRF模式进行预报。重点考察雷达资料的使用对提高模式初始场以及对强降水天气的预报能力,从而评估GSI同化系统对提高我国强降水天气的预报技巧和能力。

2012年7月21日北京市发生了新中国成立以来有观测记录最强一次降水,全市共有79人死亡,因灾经济损失近百亿元,给北京市民的生产、生活和公共设施带来的影响前所未有(图1)。为此选取此次强降水天气过程,来验证GSI雷达资料同化后对强降水预报效果。预报采用的常规观测资料主要是地面和探空资料,雷达资料为河北境内的4部多普勒雷达资料,预报结果对比检验的实况资料为全国逐小时加密资料。

多普勒雷达资料同化对提高暴雨数值预报能力有重要作用,无论在24h累计降水还是在逐时降水预报方面,同化多普勒雷达资料均可使降水雨带分布和强

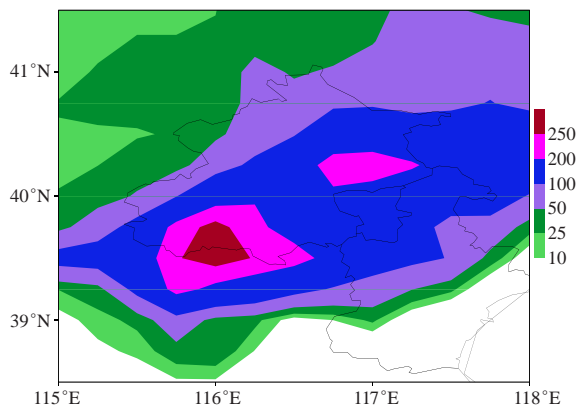


图1 2012年7月21日06时—21日18时(世界时)降水量分布图(单位:mm)

Fig.1 The pattern of precipitation at 0600 UTC to 1800 UTC on 21 July, 2012 (unit: mm)

降水中心预报的准确性得到较大改善。

## 1 GSI同化技术及试验方案

### 1.1 GSI资料同化系统

GSI分析系统最初是由美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)和NCEP在其早期业务运行的波谱统计插值(Spectral Statistical Interpolation, SSI)分析系统上发展起来的新一代区域和全球资料同化系统<sup>[16]</sup>。它与传统的三维变分方法基本一样,都是基于变分的思想,通过给定的目标函数(泛函)的极小化过程,调整背景场和观测场之间的权重比例,使分析场对背景场(第一猜值场)和观测场均达到最佳拟合状态,其产生的分析场即为当前目标函数达到最小值时的解。

$$J = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(H(x) - y_0)^T (E + F)^{-1}(H(x) - y_0) + J_c$$

式中, $x$ 为分析场(输出), $x_b$ 为背景场(输入), $B$ 为背景场误差协方差(输入), $H$ 为将来的模式或观测算子, $y_0$ 为观测资料(输入), $E+F$ 为仪器误差和代表性误差(输入), $J_c$ 为约束项。式中第一项是对背景场的作用,第二项是对观测场的作用,第三项是约束条件(区域模式中仅为动力约束和湿度约束)。

为了处理迭代过程中非线性目标函数展开的复杂问题,在目标函数极小化过程中,GSI采用两次外循环迭代和几十次内循环来完成(图2)。内循环的主要作用有计算迭代过程中的搜索方向,计算在搜索方向的最优步长,对数据资料做进一步的质量控制和为下一步外循环提供初值等。第一次外循环的背景场为初猜场,而第二次外循环的背景场为上一次外循环的计算结果。其优点在于它能够处理与大气状态模式变量有着复杂非线性关系的观测资料,从而使同化与大气状态量有着非线性关系的观测量成为可能。

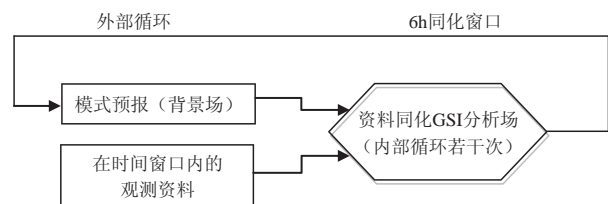


图2 GSI资料同化流程示意图  
Fig.2 The flow chart of GSI assimilation

在GSI分析系统中,可同时对多部雷达进行同化分析。对雷达径向风资料的同化,采用三维变分技术,与其他风观测资料进行变分同化分析,从而改善风场结构。对雷达反射率资料同化不是采用变分方

法，而是采用内置于GSI内部的复合云分析技术，它通过综合地面云观测、卫星观测、闪电资料和多普勒雷达反射率等多种资料计算云量，反演计算云冰、云水、雨水、雪和霰等水凝物混合比，并通过非绝热初值化方案进行热力调整，改进初始场中湿度参量，输出更接近真实情况的水凝物场和温度场，从而增强暴雨预报能力。

## 1.2 试验方案设计

预报模式采用WRFV3.5，背景场和边界由空军全球模式TL511L60的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分析场和间隔3h的预报场提供，预报中心点为(40°N, 116°E)，格距6km，格点数300×300。由于此次北京强降水主要发生在7月21日06—18时(世界时，下同)，故起报时间选定为7月21日06时，预报时效24h，采用Kain-Fritsch对流参数化方案和冰微物理方案。采取6h间隔循环同化方式，即21日00时同化观测资料后预报6h，用其6h预报结果作为背景场再次同化观测资料后进行24h预报。常规观测资料和雷达资料的同化窗口分别为同化时刻前、后3和0.5h，雷达资料选取北京大兴(39.8°N, 116.5°E)、天津塘沽(39°N, 117.7°E)、河北石家庄(38.4°N, 114.7°E)和沧州(38.3°N, 116.8°E)共4部SA波段雷达资料。模拟区域范围及雷达站点分布如图3所示。



图3 模拟区域范围及同化雷达站点分布

Fig.3 The area of simulation and the distribution of radars for assimilation

控制试验为只由全球模式提供初估场和侧边界进行预报，对比试验分别为同化观测地面和高空资料、同化常规资料和雷达径向风资料、同化常规资料和雷达反射率资料，以及同时同化常规资料、雷达径向风和反射率资料(表1)。首先对GSI同化系统加入雷达径向风和反射率资料后的模式初始场的风场和水汽场进行对比分析，考查雷达资料的同化效果；其次对

雷达径向风和反射率的加入对强降水预报效果进行对比分析，分别考查雷达径向风和反射率对强降水的效能，从而对雷达资料的同化作用有一了解。

表1 试验方案  
Table 1 Test schemes

对比试验	控制试验 模式初始场只由全球模式提供进行预报 (no)
方案1	在控制试验基础上加入常规地面和高空资料同化 (prep)
方案2	在方案1基础加入雷达径向风资料同化 (prep+rwl)
方案3	在方案1基础加入雷达反射率资料同化 (prep+ref)
方案4	在方案1基础加入雷达径向风和反射率资料同化 (prep+rad)

## 2 雷达资料同化效果分析

### 2.1 雷达资料处理

在雷达资料GSI同化前需对其进行资料处理和质量管理。这里对天气雷达资料的质量控制主要采取剔除孤立点、去除地物杂波、速度退模糊及平滑滤波等检测(图4)。另外还需对雷达反射率进行水平和垂直插值处理，并将多部雷达反射率拼图，分别将雷达径向风和反射率转换为GSI所需BUFR格式后进行资料同化。在进行GSI资料同化时，由于天气多普勒雷达可扫描收集高时空分辨率的天气信息，而相对低分辨率的模式同化系统不能直接同化所有数据资料，需对雷达径向风资料进行稀疏化处理以去除多余信息。这里采取固定方位角的跨度(5°)、仰角的跨度(0.25°)、径向点距离(5km)、时间范围(0.5h)、最大仰角(5°)、最大径向距离(100km)和最小样本数(50)进行径向风资料稀疏化处理。

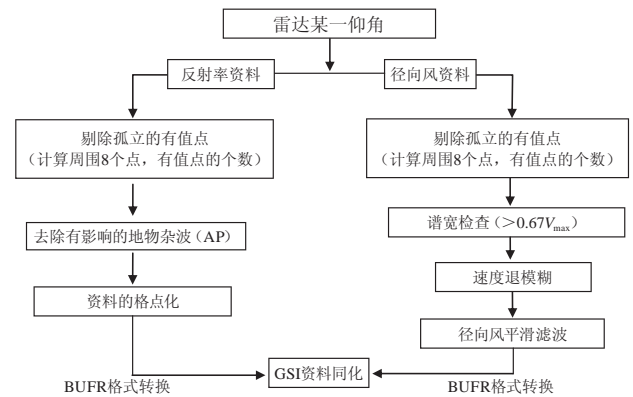


图4 雷达资料质量控制流程示意图

Fig.4 The flow chart of the quality control of radar

在GSI中首先将多部雷达反射率进行拼图，并通过复合云分析技术由雷达反射率得到三维初始云场和降水场，从而改进初始场中湿度参量。图5分别为2012年7月21日00时和21日06时的4部雷达反射率平面拼图及4部雷达1.5°仰角反射率。从中可看到，7月21

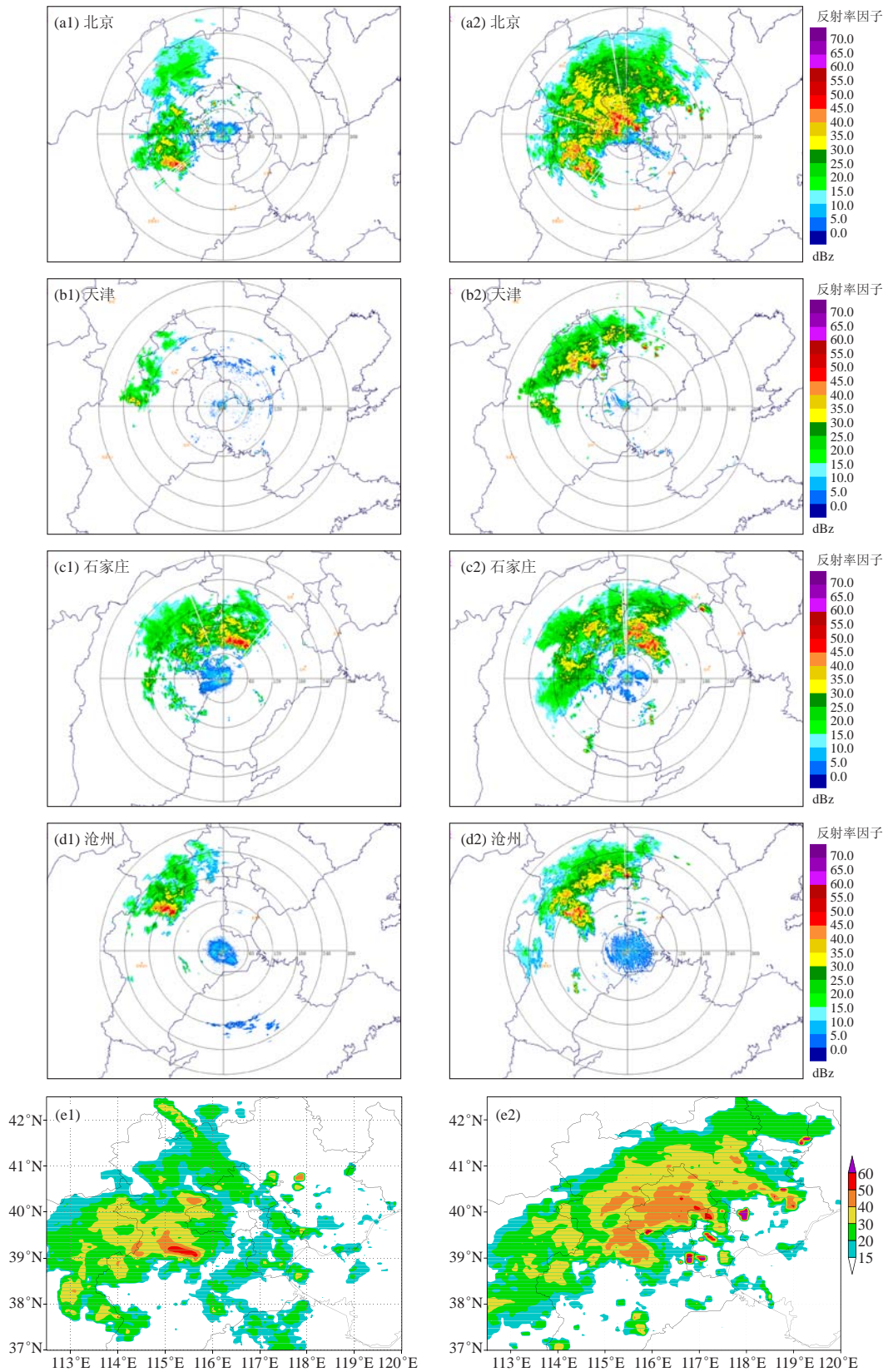


图5 2012年7月21日00时 (a1~e1) 和06时 (a2~e2), 4部雷达1.5°仰角反射率 (a1~d1; a2~d2), 4部雷达反射率平面拼图 (e1, e2) (单位: dBz)

Fig.5 The reflectivity of four radar at 1.5° elevation at 0000 UTC 21 July (a1-e1) and 0600 UTC 21 July 2012, the reflectivity jigsaw of four radar (e1, e2) (units: dBz)

日00时,在北京大兴(图5a1)的西部和西南部有较强的雷达回波,同时刻在天津塘沽(图5b1)、河北石家庄(图5c1)和沧州(图5d1)的雷达回波图上的相应位置上也有较大的反射率数值;并且从河北石家庄(图5c1)可看到,其西北部即北京西南更远的距离也有较强的雷达回波;这些在雷达拼图上都有相应的显现(图5e1),并且由于这里给出的只是4部雷达1.5°仰角反射率的情况,可能在其他仰角上有更强的雷达回波,故雷达拼图展现的回波范围更大些。同样在7月21日06时,4部雷达1.5°仰角反射率回波图(图5a2~5d2)与同时刻雷达回波拼图基本一致(图5e2),说明雷达反射率拼图较好地进行了组合,正确反映了实际状况。

## 2.2 雷达资料同化效果分析

资料同化的作用首先表现在对模式初始场的改善,由此来进一步改进预报效果。由于方案中采取的是循环资料同化方式,间隔6h连续资料同化两次后进行预报,故分别对这两时次同化雷达资料前后的分析场变化情况进行对比分析。

图6分别为7月21日00时和06时同化雷达资料前后800hPa垂直上升速度增量和风场增量及海平面气压增量分布。从21日00时的增量分布可看到(图6a),在北京西南部有气旋性环流的风场增量,说明雷达资料的同化对风场结构进行了调整,增强了北京西南部地区中小尺度对流系统发展,这也与一些试验研究中

雷达径向风资料同化可有效改善风场环流的结果相一致<sup>[7]</sup>;同时可看到,在北京以北地区海平面气压为正增量,并且有2.5hPa的增量中心,而在气旋性环流中有一0.5hPa的负变压中心存在,根据白贝罗风压定律可增强东西风的强度,从而进一步促进了低层气旋的发展。从800hPa的垂直速度增量可看到,在北京西部有强度达 $15 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 的上升气流增量区存在,这也与此时刻北京西部的较强雷达回波区相对应(图5a1)。从21日06时的增量分布可看到(图6b),在北京的南部及其以南地区有中心强度为2.5hPa的海平面气压正值区,而在其北侧正是强降水发生区。这是风暴气流场中的下沉气流所致<sup>[17]</sup>,一般认为下沉气流主要通过由雨滴重量产生的拖带力启动或产生,在雷达回波上一般在降水前缘几千米或几十千米出现,在低层或地面表现为一个中小尺度高压区。并且在800hPa上北京的西南部有气流辐合增量存在,这与强降水发生区域相吻合。同时沿着北京的西南至东北有一长条的垂直上升运动增量区,而21日06时北京的西南至东北也存在较强的雷达回波带(图5b1)。说明雷达资料的同化有效地对初始场进行了改善,对流运动得到加强。

为检测雷达资料的加入对初始场中湿度参量的影响,针对雷达回波发生的较强区域(图5),分别对21日00时沿39.3°N和06时沿40.2°N做剖面分析。图7为同化雷达后水凝物增量的垂直分布。从21日00时同化雷达资料后的水凝物增量分布可看到(图7a1,

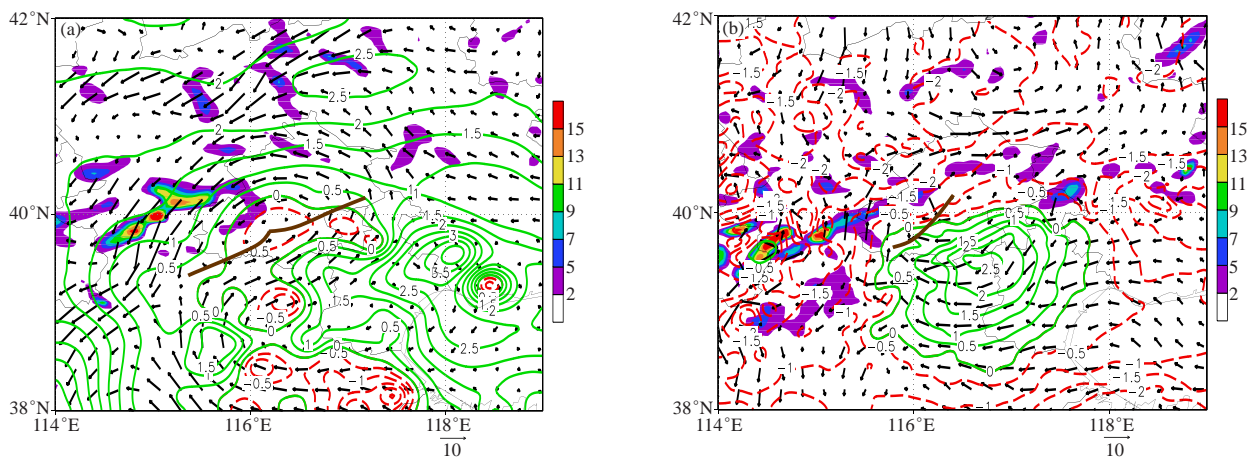


图6 2012年7月21日00时(a)和06时(b),同化雷达资料后800hPa垂直上升速度增量(阴影,单位: $10^{-2} \text{m/s}$ )和风场增量(矢量线,单位: $\text{m/s}$ )及海平面气压增量(单位:hPa)分布

Fig.6 The patterns of increments of vertical velocity (shaded, unit:  $10^{-2} \text{m/s}$ ), of level wind (vector line, unit:  $\text{m/s}$ ) and of sea level pressure (unit: hPa) at 800 hPa, 0000 UTC 21 July (a) and 0600 UTC 21 July (b) 2012, after assimilation

7b1和7c1),在 $114^{\circ} \sim 116^{\circ} \text{E}$ 区间内各高度层都为水凝物增量的正值区。其中,雨水混合比增量主要位于 $800 \sim 500 \text{hPa}$ ,最大中心分别位于 $600 \text{hPa}$ 高度的

$0.8 \text{g/kg}$ 和 $750 \text{hPa}$ 高度的 $0.4 \text{g/kg}$ ;雪混合比增量主要位于 $650 \sim 400 \text{hPa}$ ,最大中心位于 $450 \text{hPa}$ 高度的 $1.8 \text{g/kg}$ ;而水汽混合比增量主要位于 $550 \text{hPa}$ 以下至地面,最大

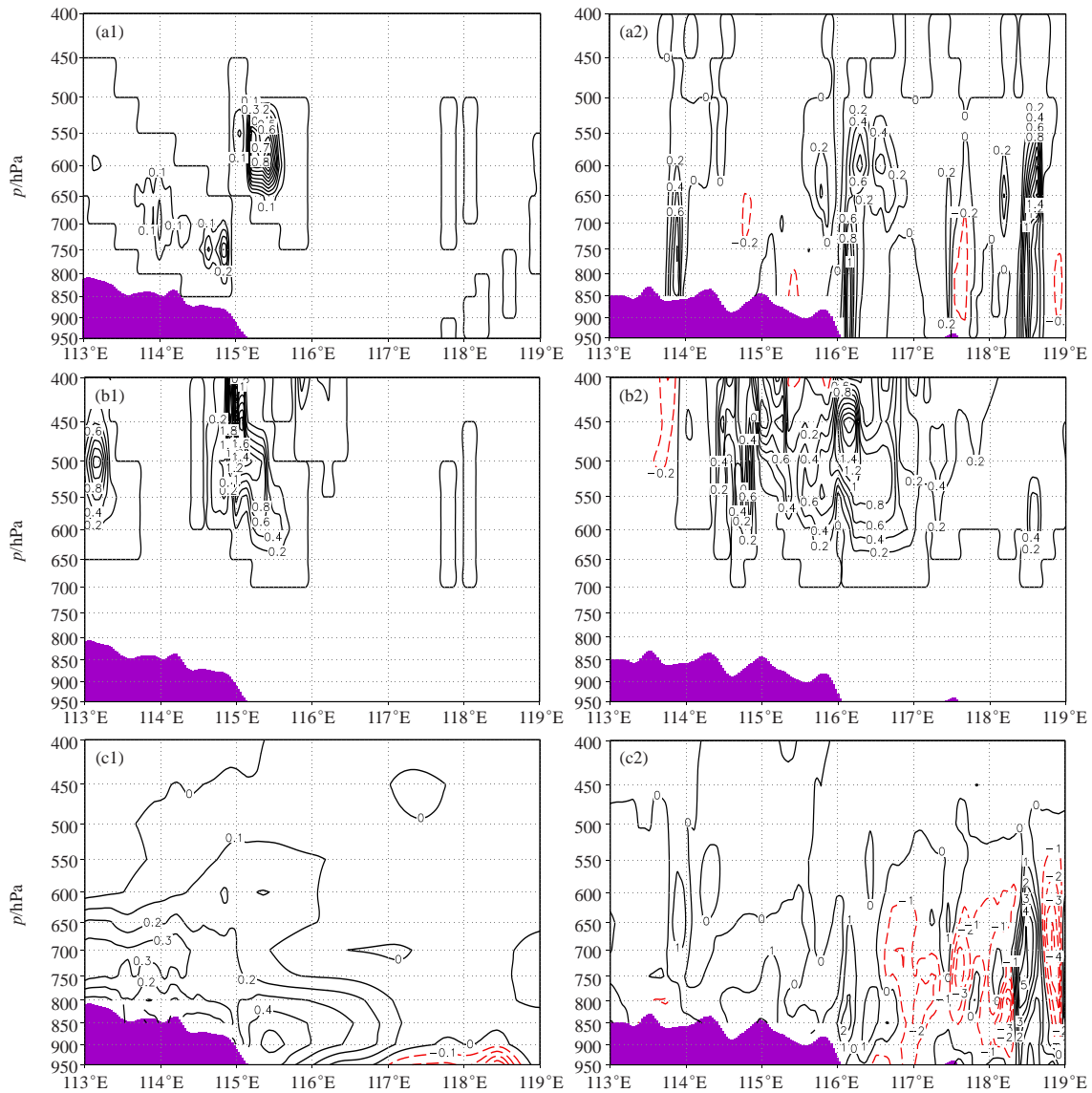


图7 同化雷达后水凝物增量的剖面垂直分布 (a1~c1: 21日00时沿39.3°N; a2~c2: 21日06时沿40.2°N)  
(阴影区为地形高度)

(a1, a2) 雨水混合比; (b1, b2) 雪混合比; (c1, c2) 水汽混合比 (单位: g/kg)

Fig.7 Vertical cross sections of water increment after assimilation: (a1, a2) rain water; (b1, b2) snow water; (c1, c2) vapour (unit: g/kg, a1~c1: 0000 UTC 21 July along 39.3°N; a2~c2: 0600 UTC 21 July along 42.2°N) (shaded area is the terrain))

中心位于900hPa高度的0.5g/kg; 并且这些水凝物的最强点都位于115.5°E附近, 这也是此时雷达回波最强区域。从21日06时同化雷达资料后的水凝物增量分布可看到(图7a2, 7b2和7c2), 在114°~116.5°E区间内各高度层基本都为水凝物增量的正值区。其中, 雨水混合比增量从500hPa至地面都有, 最大中心分别位于116.2°E附近的800hPa以下的1g/kg和114°E附近的750hPa高度的0.8g/kg; 雪混合比增量主要位于650~400hPa, 最大中心位于450hPa高度的1.8g/kg; 而水汽混合比增量主要位于550hPa以下至地面, 最大

中心位于850hPa高度的2g/kg; 并且这些水凝物的最强点都位于116.5°E附近, 强度明显较21日00时大, 从实际雷达回波图中也可看到(图5b2), 这也是此时雷达回波最强区域。由于雷达资料对初始场中湿度参量的改进主要通过雷达反射率的云分析模块, 通过对非绝热初值化方案进行热力调整, 增加云水含量, 从而增强暴雨预报能力。由此可见, 这两次雷达资料同化都有效地将实际雷达回波区的信号加入了大气初始场中, 改善了实际大气的湿度场。

通过对比分析各雷达资料同化试验方案可知(图

略),分析场中的大气动力结构的改进主要是由加入雷达径向风同化后产生的,而水凝物增量都是由加入雷达反射率同化后产生的。由此可见,雷达径向风的同化可有效改进气压和风场结构,进而改善大气的动力状态。雷达反射率同化可通过云分析技术改进初始场中水物质含量,进而达到改善湿度场的目的。

### 3 雷达资料对降水预报效果分析

由于此次北京强降水主要发生在7月21日06—18时,故首先对此段时间内的不同试验方案的降水预报结果进行评估,考查GSI资料同化系统后模式的预报效果;其次对不同试验方案的逐时降水预报结果进行对比分析,考查GSI资料同化系统后模式的逐时预报效果。

图8为7月21日06—18时不同试验方案的降水预报结果。从只用全球模式背景场作为初始场的降水预报可看到(图8b),与实况降水相比(图8a),虽然整个雨带和降水强度都预报出来了,但强降水中心位置偏北;从只进行常规观测资料同化后的降水预报增量可看到(图8c,与控制试验相比,下同),预报中心往南调整了,说明GSI常规观测资料同化对降水也有改善,但强降水中心区域范围偏小;在此基础上,增加雷达径向风资料同化,从降水预报增量可看到(图8d),降水预报中心和强度都有所调整和改善,且整个雨带位置与实际更为相符;而在同化常规观测资料基础上进行雷达发射率资料同化后,从降水预报增量可看到(图8e),强降水中心位置和强度都较只加入常规观测资料有改善,并且降水强度也比加入径向风资料的预报与实际更为接近,但雨带位置要比前者略微偏北一些;在前面基础上同时加入常规资料和雷达径向风、反射率,从降水预报增量可看到(图8f),综合了上两者的优势,强降水预报中心位置和范围,以及中心强度都与实况更为接近,整个雨带位置也与实际更为符合。由此可见,经过GSI雷达资料同化后的初始场对强降水预报有很好的正效应,不但对整个雨带位置进行整体调整和改善,而且对强降水中心强度和位置都进行了调整和修正。

图9为不同试验方案对7月21日08—14时的逐时降水预报。从中可看到,只同化常规观测资料的方案1(图9b1~9b6)的逐小时降水预报较实况(图9a1~9a6)都较其他试验方案偏差最大,而同时同化雷达径向风和反射率的方案4(图9e1~9e6)的逐小时降水预报都较其他试验方案偏差最小。如7月21日08—09时降水预报(图9a1~9e1),方案1(图9b1)虽然对雨带有所反映,但强降水中心位于北京西南方向,与实况(图9a1)偏差较大,方案2(图9c1)和

方案3(图9d1)都在北京的西南部预报出强降水中心,只是方案2预报的强降水中心较实况偏南,而方案4(图9e1)也在北京西南部预报出强降水中心,且强降雨带的位置和中心强度都较方案2和方案3更接近实际。7月21日09—10时降水预报(图9a2~9e2),方案1(图9b2)也是在北京西南方向预报出强降水中心,与实况(图9a2)偏差较大,而方案2(图9c2)和方案3(图9d2)也都在北京区域内预报出强降水中心,但方案3的预报好于方案2,而方案4(图9e2)预报的强降雨带分布和其中的强降水中心更符合实际。7月21日10—11时降水预报(图9a3~9e3),方案3(图9d3)较方案1(图9b3)和方案2(图9c3)有所调整,雨带分布更接近实际,而方案4(图9e3)雨带分布与方案3类似,但北京西南部的强降水预报得更好些。7月21日11—12时降水预报(图9a4~9e4),同样也是方案3(图9d4)较方案1(图9b4)和方案2(图9c4)有所调整,雨带分布可成型,更接近实际,而方案4(图9e4)雨带分布与实际更为相符。7月21日12—13时降水预报(图9a5~9e5),方案1(图9b5)、方案2(图9c5)和方案3(图9d5)的预报相差不大,都与实际有一定的偏差,而方案4(图9e5)的预报比较而言更好一些,对北京西南部和东北部的强降水预报更接近实际。7月21日13—14时降水预报(图9a6~9e6),同样也是方案4(图9e6)较其他方案更接近实际,强降水雨带基本预报出来了,但雨带偏北,较实际移动偏慢。

通过以上各试验方案逐小时降水预报可知,加入雷达资料同化后的降水预报对雨带分布和降水位置都较之前有一定的改善,但逐小时预报历来都是中小尺度强降水预报的难点,也与模式性能和其中各种物理过程的处理有关。

### 4 结论

本文采用美国NCEP业务上使用的GSI同化系统和区域预报模式WRFV3.5,以北京“7·21”特大暴雨为个例,检验雷达资料的使用对提高天气数值预报模式的初始场以及对强降水天气的预报能力。通过试验对比可知:

1) 经过GSI雷达资料同化后的分析场,可将风场和水汽场进行有效的调整,较好地反映了同时刻大气实际状况;并且水汽增量由加入雷达反射率同化后产生,而雷达径向风的同化只能改变风场结构。

2) 对初始场中风场和水汽场的调整,可减少模式预报对中小尺度系统和云水生成的拟合时间,有效弥补spin up所带来的影响。并且间隔6h连续两次资

料同化,也可更好地利用雷达资料,提高强降水预报效果。

3) 对北京强降水发生的累积降水预报,经过GSI雷达资料同化后的初始场对强降水预报有很好的正效应,不但对整个雨带位置进行整体调整和改善,而且对强降水中心强度和位置都进行了调整和修正。

4) 通过对不同试验方案的逐小时降水预报可知,加入雷达资料同化后的降水预报对雨带分布和降水位置都较之前有一定的改善,但逐小时预报历来都是中小尺度强降水预报的难点,这不仅考验资料同化对模式初始场的反映能力,也与模式性能和其中各种物理过程的处理有关。

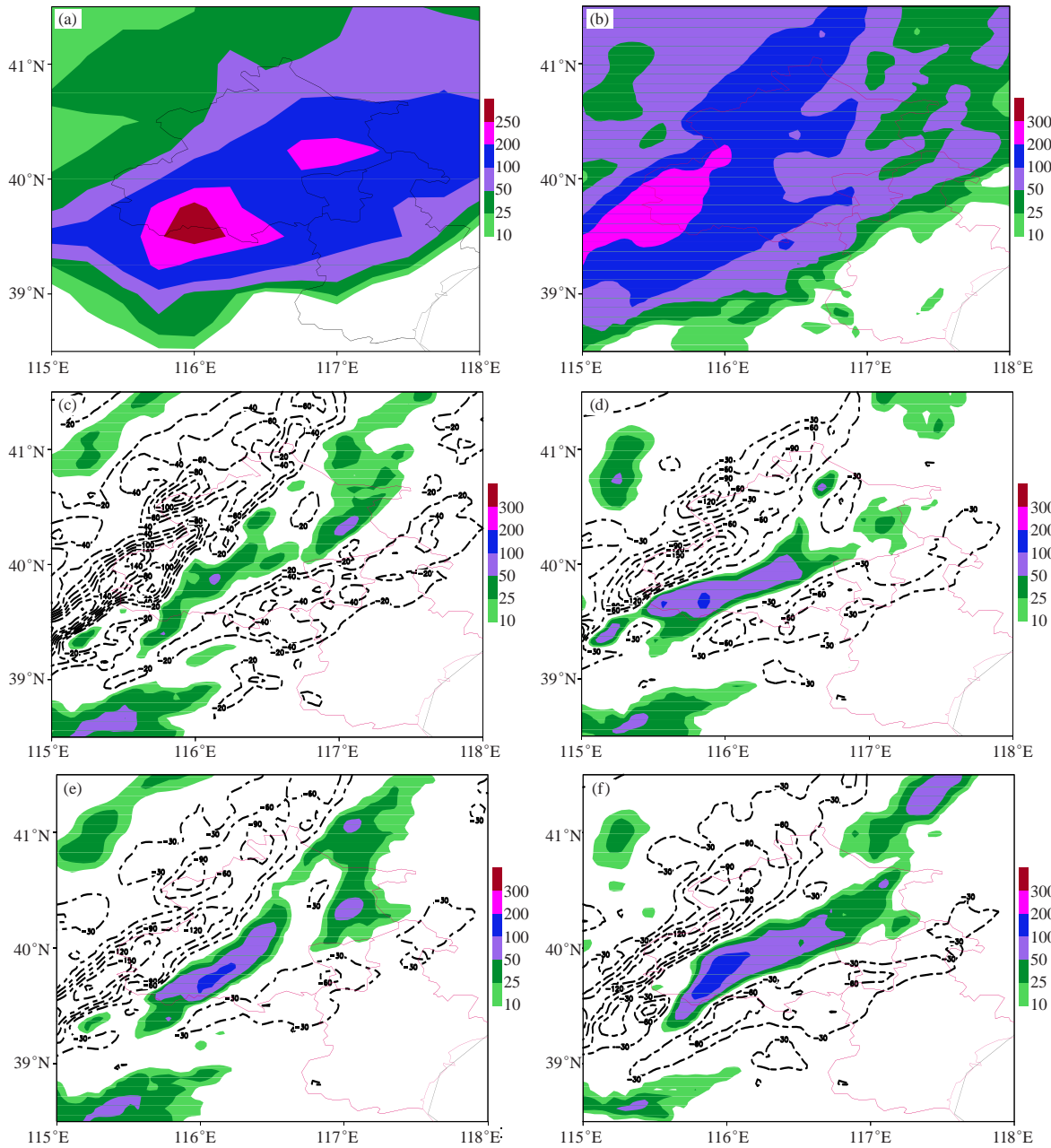


图8 2012年7月21日06—18时,降水量预报对比(单位: mm)

(a) 实况降水; (b) 控制试验的降水预报; (c) 方案1的降水预报增量(虚线为负增量,彩色阴影区为正增量,下同); (d) 方案2的降水预报增量; (e) 方案3的降水预报增量; (f) 方案4的降水预报增量

Fig.8 Comparisons of Forecasted precipitation for 0600 UTC 21 July to 1800 UTC 21 July 2012 (unit: mm)  
 (a) acture precipitation; (b) forecasted in control test; (c) precipitation increment in test 1 (broken line is minus increment, color shaded is plus increment); (d) precipitation increment in test 2; (e) precipitation increment in test 3; (f) precipitation increment in test 4

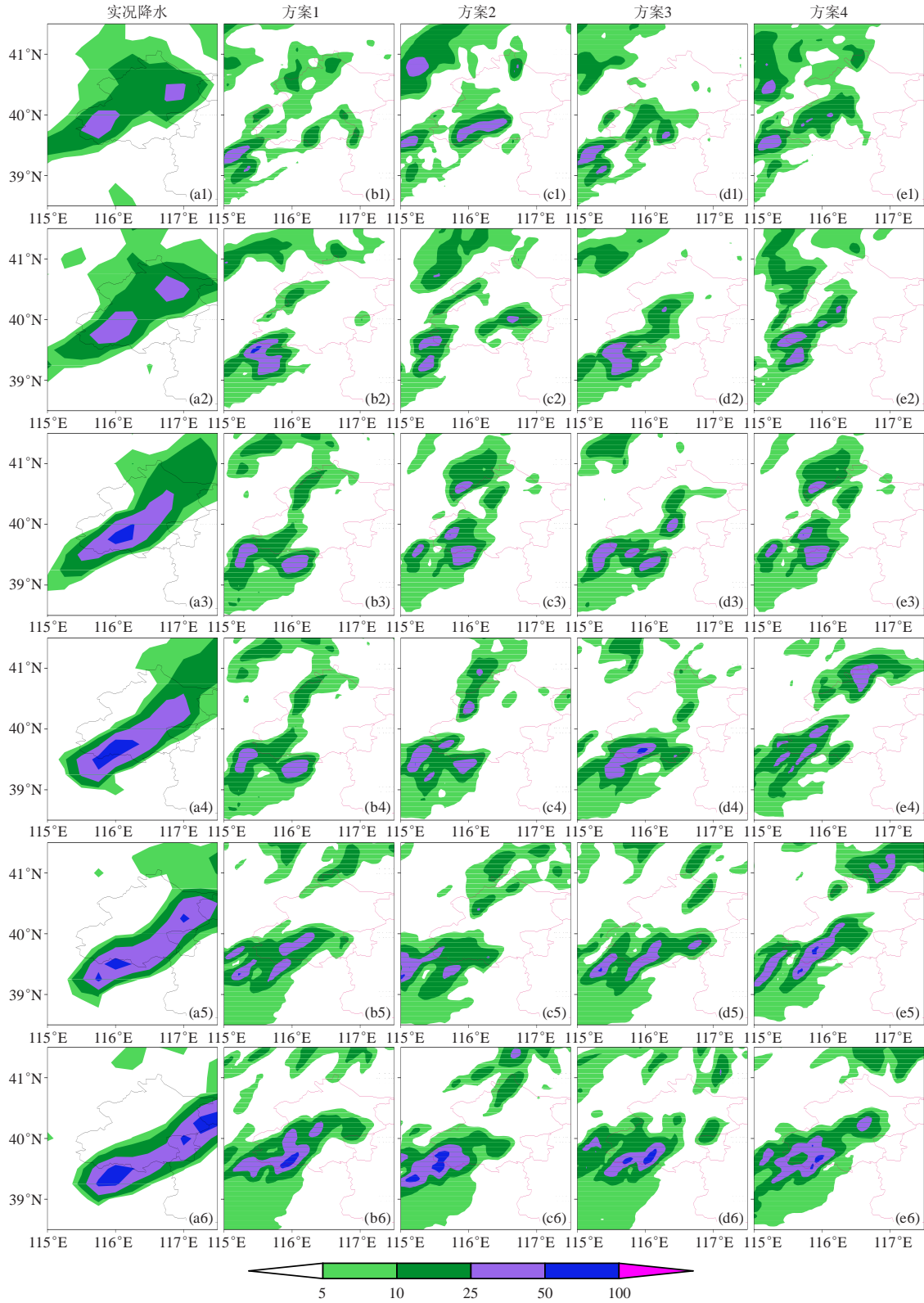


图9 7月21日08—14时, 不同方案逐小时降水预报对比 (单位: mm)

(a1~a6) 实况降水; (b1~b6) 方案1的预报; (c1~c6) 方案2的预报; (d1~d6) 方案3的预报; (e1~e6) 方案4的预报  
 Fig.9 Comparisons of Forecasts for hourly precipitation from 0800 to 1400 UTC 21 July (unit: mm) among 4 tests: (a1~a6) actual precipitation; (b1~b6) forecast in test 1; (c1~c6) forecast in test 2; (d1~d6) forecast in test 3; (e1~e6) forecast in test 4

(下转41页)

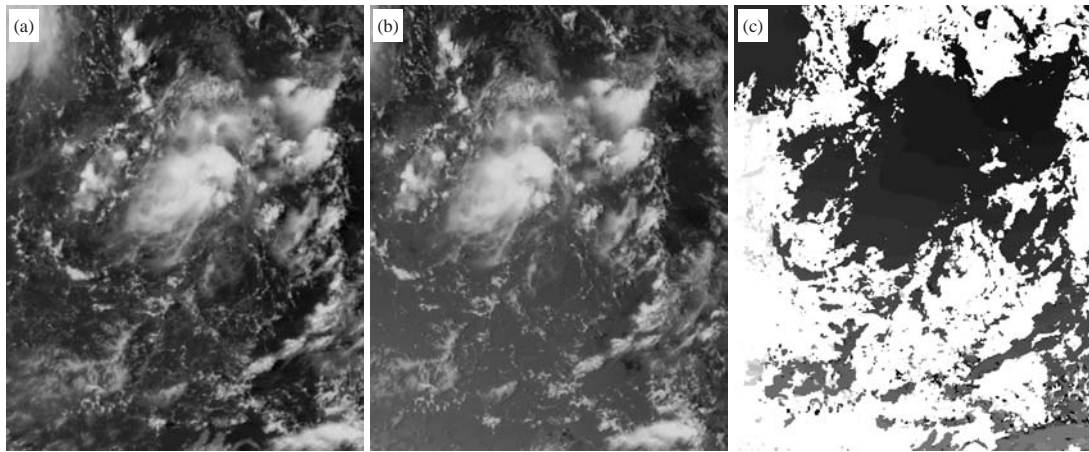


图5 校正图像对匹配后生成的视差图  
Fig. 5 The disparity map generated after matching

3) 计算出的三维空间点坐标没有一个可以参考的实际空间坐标值,不能有效地进行反向分析,需要修改整个图像数据处理流程。

4) 进一步研究和改进使用两颗或两颗以上的FY-2卫星进行三维云图测量的方法,在提高图像匹配准确性的前提下,同时提高视差图的量化等级。

#### 参考文献

- [1] Rousseeuw P J. Least median of squares regression. *J Amer Statist Asso*, 1984, 79(388): 871-880.
- [2] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(9): 1124-1137.
- [3] Bleyer M, Gelautz M. A layered stereo algorithm using image segmentation and global visibility constraints. *ISPRS J Photogrammetry and Rem Sens*, 2005, 59(3): 128-150.

(上接26页)

#### 参考文献

- [1] 杨洪平, 张沛源, 程明虎, 等. 多普勒天气雷达短时预报技术研究进展. *暴雨灾害*, 2007, 25(2): 90-96.
- [2] 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验. *气象学报*, 2006, 64(3): 39-53.
- [3] 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. *大气科学*, 2006, 30(4): 94-107.
- [4] 李国静, 徐幼平, 成巍, 等. 一次大暴雨过程的多普勒雷达资料同化的敏感性试验. *暴雨灾害*, 2009, 27(2): 3-9.
- [5] 徐广阔, 孙建华, 雷霆, 等. 多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 36-46.
- [6] 刘青松, 董海萍, 郭卫东, 等. 多普勒雷达资料的直接同化对降雨预报的影响. *暴雨灾害*, 2010, 28(2): 20-26.
- [7] 赵文斌, 齐琳琳, 何宏让, 等. 多普勒天气雷达资料在暴雨数值模拟中的同化应用. *气象科学*, 2011, 31(3): 318-324.
- [8] 杨艳蓉, 曾明剑. 雷达资料同化对暴雨预报影响的数值模拟研究. *气象科学*, 2012, 32(2): 31-38.
- [9] 陈锋, 冀春晓, 董美莹, 等. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响. *气象*, 2012, 38(10): 1170-1181.
- [10] 李华宏, 王曼, 曹杰, 等. 雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验. *热带气象学报*, 2014, 30(5): 83-95.
- [11] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center Global Spectral Statistical Interpolation Analysis System. *Wear Forecasting*, 1992, 120(8): 1747-763.
- [12] Zhu Y, Gelaro R. Observation sensitivity calculations using the adjoint of the Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) Analysis System. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(1): 335-351.
- [13] Kleist, Daryl T, Parrish, et al. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Wear Forecasting*, 2009, 24(6): 1691-1705.
- [14] Hu Ming, Xue Ming. Implementation and evaluation of cloud analysis with WSR-88D reflectivity data for GSI and WRF-ARW. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(7): 248-265.
- [15] Zhao Kun, Xue Ming. Assimilation of coastal Doppler radar data with the ARPS 3DVAR and cloud analysis for the prediction of Hurricane Ike (2008). *Geophys Res Lett*, 2009, 36(12): 91-100.
- [16] Wu Wanshu, Purser R J. Three-Dimensional Variational Analysis with Spatially Inhomogeneous Covariances. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(12): 2905-2916.
- [17] 丁一汇. *高等天气学*. 北京: 气象出版社, 1991, 442-454.