

# 雷达热动力反演资料的高分辨率同化模拟试验<sup>\* 1</sup>

张亦洲 苗世光 陈明轩

ZHANG Yizhou MIAO Shiguang CHEN Mingxuan

中国气象局北京城市气象研究所,北京,100089

*Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

2016-03-22 收稿,2016-08-31 改回.

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 Yizhou, Miao Shiguang, Chen Mingxuan. 2017. Numerical experiments on assimilation of high-resolution radar thermodynamic data. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(1):165-177**

**Abstract** The accuracy of weather forecast in Beijing is still far from satisfying the demands of people's routine life and disaster prevention and reduction, especially the quantitative forecast for local convective rainfall. To address the demands for improved 0–12 h short-term weather forecast in Beijing, especially the forecast of local convective rainfall in the summer, an initialization module that can be used in the Weather Research and Forecasting (WRF) model is developed based on Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) in Institute of Urban Meteorology (IUM), China Meteorological Administration, Beijing. The radar data, which contain high temporal and spatial resolution three-dimensional thermodynamic characteristics, are assimilated into WRF model through the Four-Dimensional Data Assimilation (FDDA) method. Impacts of radar thermodynamic data on WRF model results are analyzed based on numerical simulation experiments of several rainfall cases. The results show that assimilation of the high-resolution radar thermodynamic data into WRF model can improve the simulation of the rainfall cases. The accuracies of simulated 2 m humidity, location, period and intensity of the rainfall are improved. The missing rates in the rainfall simulation also decrease with the application of data assimilation. Further analysis indicates that the assimilation of temperature and humidity is more important than the assimilation of wind for the improvement of the model results. Although the present study have shown that the assimilation of radar thermodynamic data into the WRF model can significantly improve the model results for the selected rainfall cases, more comprehensive and systematic investigation is needed to further study the effects of data assimilation in operational numerical model systems.

**Key words** VDRAS, WRF model, FDDA method, Rainfall

**摘要** 目前,北京地区的天气预报系统对局地对流性定量降水预报能力较弱,远不能满足人们生产、生活和防灾、减灾工作的需要。针对北京地区对提高0–12 h短时临近天气,尤其是夏季局地对流性降水预报能力的需求,基于中国气象局北京城市气象研究所变分多普勒雷达分析系统(VDRAS)的雷达热动力反演资料,建立了WRF模式初始化模块,采用四维资料同化(FDDA)方法,将VDRAS系统高时空分辨率三维热动力结构分析场资料同化到WRF模式中,实现了北京地区VDRAS分析场资料在WRF中尺度模式系统中的应用。通过降水个例的高分辨率同化模拟试验分析了雷达热动力反演资料同化对模式预报结果的影响。研究表明:雷达热动力反演资料的同化能够提高模式系统对近地面温、湿、风大气要素和降水过程的模拟能力,改善2 m比湿、降水落区、降水量级、降水时间的预报效果,减少降水漏报的现象。温度和比湿的同化比风的同化对模拟降水结果的改善更重要。虽然研究表明雷达热动力反演资料在WRF模式中的同化能够明显改善模式对选取降水个例的模拟效果,但其对模式尤其是数值业务模式系统预报效果的影响需要进一步更全面、更系统的检验,为业务化应用奠定

\* 资助课题:北京市气象局科技项目(BMBKJ201403005)、北京市科技计划课题(Z151100002115045)、国家自然科学基金项目(41175015)、国家国际科技合作专项项目(2015DFA20870)。

作者简介:张亦洲,主要从事陆面-大气相互作用的研究。E-mail: yzzhang@ium.cn

更坚实的基础。

**关键词** 变分多普勒雷达分析系统, WRF 模式, 四维资料同化(FDDA)方法, 降水

**中图法分类号** P456.7

## 1 引言

变分多普勒雷达分析系统(Variational Doppler Radar Analysis System, VDRAS)最早由 Sun 等(1997,1998)研发。之后经过一系列改进,中国气象局北京城市气象研究所(简称“城市所”)建立了适合于京津冀地区使用的 VDRAS 雷达变分分析系统(Sun, et al, 2001, 2008; 陈明轩等, 2010, 2011)。目前,该系统基于一个三维数值云模式,利用四维变分同化(4DVar)技术对京津冀 6 部多普勒天气雷达探测资料进行循环同化,并融合 5 min 自动气象站观测和北京市气象局数值预报业务系统 BJ-RUC v2.0 结果,可快速分析得出 12—18 min 更新的低层大气三维热动力场的对流尺度结构特征(陈明轩等, 2012a, 2016; 肖现等, 2010, 2013)。利用城市所 VDRAS 系统开展的北京地区降水等天气的研究表明,该系统的高时空分辨率三维热动力结构分析场,能够较好地反映降水的热、动力分布不均匀结构,有利于提高局地对流性降水的临近预警能力(陈明轩等, 2012b, 2013; 肖现等, 2015)。但是, VDRAS 系统采用笛卡尔坐标系,视地表为平面,无法考虑地形的作用。而且,其在物理过程参数化、数值方案等方面均不够完善,与 WRF (Weather Research and Forecasting model)模式相比仍有较大差距。这在很大程度上影响了 VDRAS 系统在北京这种地形复杂地区 2 h 以上的短时预报效果。因此,将 VDRAS 系统反演的包含温、湿、风变量的高时空分辨率三维热动力结构分析场与 WRF 等能够考虑地形的中尺度模式初始场融合,能够对 WRF 预报对流天气系统在复杂地形地区的发展演变及定量降水短时预报能力的提高提供有利条件(Tai, et al, 2011)。

四维资料同化(Four-Dimensional Data Assimilation, FDDA)方法是一种基于牛顿张弛的同化方法。它在模式的积分方程中增加一个逼近项,使模式中物理量趋近于同化变量场(Stauffer, et al, 1990, 1994; Liu, et al, 2006)。相比于三维、四维变分同化(3DVar, 4DVar)等其他同化方法, FDDA 方法对中小尺度的天气系统同化效果较好,且 FDDA 方法计算代价较小,适于业务应用(Seaman, et al, 1995; Leslie, et al, 1998; Cram, et al, 2001)。美国大

气研究中心(NCAR)等基于 FDDA 同化技术和 WRF 等模式开展了数值天气预报、资料同化以及其他相关科学研究工作(Liu, et al, 2006, 2007, 2008a; Pan, et al, 2015a)。这些研究和应用均表明, FDDA 方法不仅可同化的资料种类多、时间分辨率广泛,而且能够显著改进模式系统对临近天气,尤其是中小尺度对流天气的预报效果(Kim, et al, 2011; Lauvaux, et al, 2013; Shimada, et al, 2011; Yesubabu, et al, 2014; Pan, et al, 2011, 2015b; Liu, et al, 2008b)。但是, FDDA 方法不能直接用于同化雷达反射率、径向速度等非模式变量。因此,为了将雷达观测资料应用于 WRF 等中尺度数值模式,提高模式系统对降水等对流性系统的预报模拟能力,可以采用 FDDA 方法将融合了雷达、自动气象站等观测数据的 VDRAS 系统分析场资料同化到模式中。

近年来,北京地区城市扰动引发的强局地天气事件,尤其是局地强降水事件显得越来越凸出。目前北京地区的天气预报系统对局地对流性定量降水预报能力较弱,远不能满足人们生产、生活和防灾、减灾工作的需要。针对北京地区对提高 0—12 h 短时临近天气,尤其是夏季局地对流性降水预报能力的需求,本研究通过建立 WRF 模式初始化模块,采用 FDDA 方法将 VDRAS 系统高时、空分辨率三维热动力结构分析场资料同化到模式系统中,并选取降水个例,检验了 VDRAS 分析场同化对模式系统降水模拟效果的影响。为雷达、VDRAS 等非常规高时、空分辨率资料在数值业务系统中的同化应用以及数值预报水平的提高提供参考。

## 2 基于 VDRAS 分析场的 WRF 初始化模块的建立

现有 WRFv3.5.1(Skamarock, et al, 2008)中已经包含 FDDA 同化模块,具有同化站点观测和分析场资料的功能。但 WRF 中的 FDDA 模块在利用分析场资料进行同化时,只能通过 WRF 的预处理程序 WPS(WRF Preprocessing System)生成可供 FDDA 模块读取的同化变量场数据文件,不能直接采用和读取 VDRAS 等其他分析场资料。所以,文中通过编写相关程序,从 VDRAS 分析场资料中提取 FDDA 模块所需物理量,并进行插值等处理后,

输出 FDDA 模块可读的同化变量场文件,供 WRF 所用,从而建立基于 VDRAS 分析场的 WRF 初始化模块。

初始化模块的简要流程(图 1)中“wrfinput file”为 WRF 的初始场数据文件,通过读取此文件中的相关参数和变量,获取模式模拟时间、模拟区域网格经纬度、模式层高度、采用 FDDA 同化的时长及频率等信息。“wrffdda file”为采用美国环境预报中心(NCEP)的 GFS(Global Forecast System)再分析资料通过 WPS 和 WRF 原有初始化程序 real 产生的用于 FDDA 同化的数据文件,通过读取此文件中的变量获取 WRF 进行 FDDA 同化时所需的变量。“VDRAS 3D file”和“VDRAS 2D surface file”

分别为 VDRAS 分析场的三维变量和地面二维变量数据文件。初始化模块依照所需的时间从相应时次的文件中读取所需变量以及 VDRAS 分析场的各垂直层高度、水平网格距、参考点坐标和经纬度等信息。获取所需变量和参数后,初始化模块会计算 WRF 模拟区域和 VDRAS 分析场的网格经纬度和垂直层高度,并将所需的 VDRAS 分析场物理量插值到 WRF 模式网格和模式层上。最后,将插值好的数据按 WRF 要求的格式写入文件,供 WRF 调用。在 VDRAS 分析场资料高度层范围外的模式层以及 VDRAS 分析场中没有的变量仍使用 NCEP 的 GFS 再分析数据。

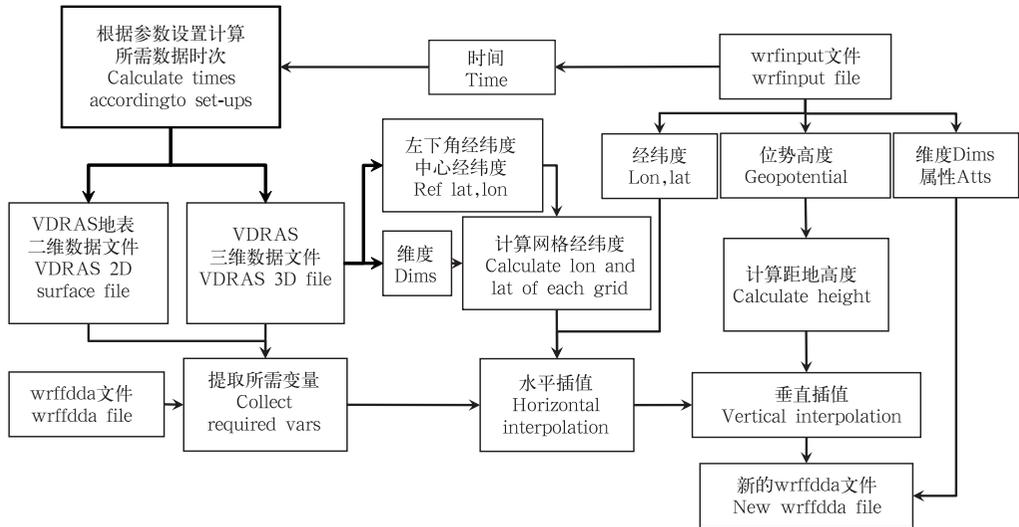


图 1 初始化模块的简要流程

Fig. 1 Flow chart of the initialization modules

图 2 是加入初始化模块的 WRF 同化 VDRAS 分析场的流程。其中“ $t$ ”为预报起始时刻,“ $m$ ”为模式系统中设置的 VDRAS 分析场同化时长。首先, WRF 需要处理生成“ $t - m$ ”时刻的初始场,然后调用文中建立的初始化模块。初始化模块利用 WRF

初始场和 VDRAS 分析场资料处理生成 FDDA 输入变量场文件。之后 WRF 读取初始场和 FDDA 输入变量场,采用 FDDA 同化方法进行积分,在积分至“ $t$ ”时刻后停止进行 FDDA 同化,模式继续积分输出预报场。

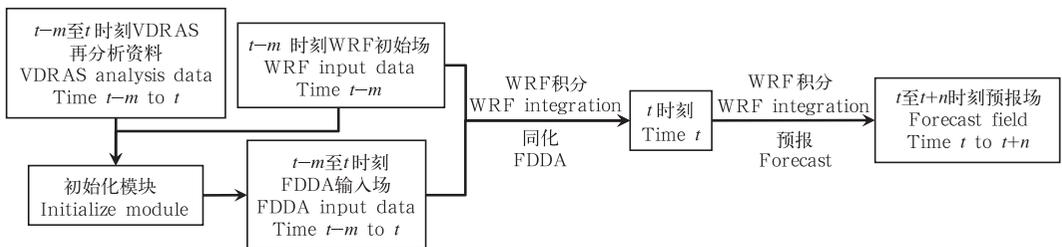


图 2 WRF 模式中 VDRAS 分析场的同化流程

Fig. 2 Flow chart of VDRAS analysis and data assimilation in WRF model

### 3 VDRAS 分析场同化模拟试验设置

选取 2013—2015 年汛期北京地区降水个例进行模拟试验, 检验 VDRAS 分析场同化对模式模拟

结果的影响。共选取 6 个降水个例, 分别为 2013 年 8 月 15—16 日、2014 年 6 月 25 日、7 月 4 日、7 月 19—20 日、2015 年 8 月 7 日、9 月 4—5 日(表 1)。

表 1 降水个例简介  
Table 1 Introduction of the rainfall cases

降水个例	降水天气现象描述	降雨时段 (北京时)	降雨量(mm)		
			全市平均	城区平均	最大降水
2013 年 8 月 15—16 日	雷阵雨伴短时大风, 雨量分布不均, 局地雨强较大, 东部降雨明显	15 日 22 时— 16 日 06 时	4.0	1.8	通州马驹桥 71.8
2014 年 6 月 25 日	自西向东出现小雨, 局地暴雨	06—20 时	2.6	0.3	房山大石窝 62.7
2014 年 7 月 4 日	分散性雷阵雨, 局地暴雨	15—20 时	0.6	0.1	平谷罗营 55.6
2014 年 7 月 19—20 日	自南向北出现分散性雷阵雨, 局地大雨, 雨量分布不均, 西南部降水较明显	19 日 20 时— 20 日 06 时	3.7	0.8	房山佛子庄 33.8
2015 年 8 月 7 日	雷阵雨, 伴有大风和冰雹, 雨量分布不均, 大部小到中雨, 局地暴雨	17—21 时	16.2	26.9	朝阳金盏 85.7
2015 年 9 月 4—5 日	自西南至东北出现大到暴雨、局地大暴雨、短时强降水	4 日 09 时— 5 日 17 时	55.3	67.7	海淀香山 179.5

模拟试验采用 WRF v3. 5. 1, 主要模式设置列于表 2。模拟试验中采用与降水个例发生时北京市气象局数值业务系统相似的模拟区域、分辨率、物理方案设置, FDDA 同化时长、频率和系数也随着业务预报的需要进行了适当调整, 因此不同个例有一定区别。2013 年 8 月 15—16 日降水个例的模拟区域与北京市气象局数值业务系统 BJ-RUC v2. 0(Bei-

jing Rapid Update Cycle)(范水勇等, 2013)的 D2 区域相同, 覆盖华北和渤海大部分地区以及东北、内蒙古及黄海部分地区, 水平分辨率为 3 km。在 2014 和 2015 年的 5 个降水个例中采用的模拟区域覆盖北京、天津以及河北大部分地区, 水平分辨率为 1 km。另外, 在 2013 和 2014 年的个例中采用的是直接由 NCEP GFS 再分析资料处理生成的 WRF

表 2 模拟试验模式设置  
Table 2 Model configurations for the simulation of selected cases

降水个例	2013 年 8 月 15 日	2014 年 6 月 25 日	2014 年 7 月 4 日	2014 年 7 月 19 日	2015 年 8 月 7 日	2014 年 9 月 4 日
分辨率	3 km	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km
网格	550×424	331×331	331×331	331×331	460×403	460×403
垂直层	50	50	50	50	50	50
云微物理	Thompson	WDM6	WDM6	WDM6	Thompson	Thompson
长波辐射	RRTM	RRTMG	RRTMG	RRTMG	RRTMG	RRTMG
短波辐射	Dudhia	RRTMG	RRTMG	RRTMG	RRTMG	RRTMG
物理方案	MM5	MOJ	MOJ	MOJ	MOJ	MOJ
近地层	MM5	MOJ	MOJ	MOJ	MOJ	MOJ
陆面过程	Noah	Noah	Noah	Noah	Noah	Noah
边界层	ACM2	BouLac	BouLac	BouLac	BouLac	BouLac
城市冠层	单层	单层	单层	单层	多层 BEM	多层 BEM
初始场来源	NCEP GFS	NCEP GFS	NCEP GFS	NCEP GFS	WRFOUT	WRFOUT
同化时长 (h)	只同化 1 次 (起算时刻)	6	6	6	3	3
FDDA 同化	同化系数	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0006
	同化频率 (min)	—	18	18	18	15
积分起算时刻	2013 年 8 月 15 日 20 时	2014 年 6 月 24 日 22 时	2014 年 7 月 4 日 06 时	2014 年 7 月 19 日 13 时	2015 年 8 月 7 日 14 时	2015 年 9 月 4 日 08 时

注: 各物理方案的介绍详见 WRF-ARW V3 User's Guide, <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>。

初始场和边界条件, 未进行 3DVar 同化。而在 2015 年的两个个例中采用的初始场和边界条件由 BJ-RUC v2.0 的 D2 区域预报场通过降尺度方法生成。FDDA 同化时长、频率和系数也分别由 6 h、18 min、0.0003 调整为 3 h、15 min 和 0.0006。对 6 个降水个例各进行两个算例的模拟, 其中一个算例采用 VDRAS 分析场同化, 另一个算例不采用 VDRAS 分析场同化, 比较分析两个算例的模拟结果, 探究 VDRAS 分析场同化对模式模拟效果的影响。

#### 4 VDRAS 分析场同化模拟结果分析

将模式模拟的逐时 2 m 气温、2 m 比湿、10 m 风速与北京市自动气象站相应的观测数据进行比较统计, 检验分析模式对近地面风、温、湿的模拟效果,

其中所有数据均为所有自动气象站观测数据的平均值以及离站点位置最近网格点上的模拟值的平均。通过对模拟结果的分析, 表明采用初始化模块同化 VDRAS 分析场资料后, 各降水个例模拟结果均有所改善, 尤其是模式对降水时间的模拟明显与观测更接近。模拟结果中 2 m 气温、2 m 比湿和 10 m 风速等预报量与观测的偏差和均方根误差有所减小, 表 3 为 2013 年 8 月 15 日 20 时(北京时, 下同)至 16 日 08 时的统计检验结果, 为统计时段内逐时数据的平均值。可见在采用 FDDA 同化后, 2 m 气温和比湿的模拟结果均有所改善。从观测和模拟的 2014 年 6 月 24—25 日 2 m 比湿和 7 月 19—20 日 2 m 气温、10 m 风速的日变化曲线(图 3, 图中数据为北京市内自动气象站站点的平均值), 可见启用初始化模

表 3 2013 年 8 月 15 日降水个例风、温、湿模拟结果的统计检验

Table 3 Statistics of simulated air temperature, humidity and wind speed for the rainfall case of Aug 15, 2013

	2 m 气温(°C)		2 m 比湿(g/kg)		10 m 风速(m/s)	
	偏差	均方根误差	偏差	均方根误差	偏差	均方根误差
未同化	-1.74	3.94	-0.34	1.95	-0.02	0.96
同化	-1.37	3.72	0.06	1.90	0.09	1.00

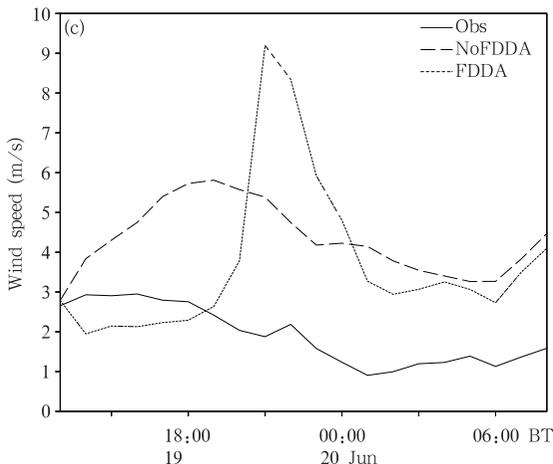
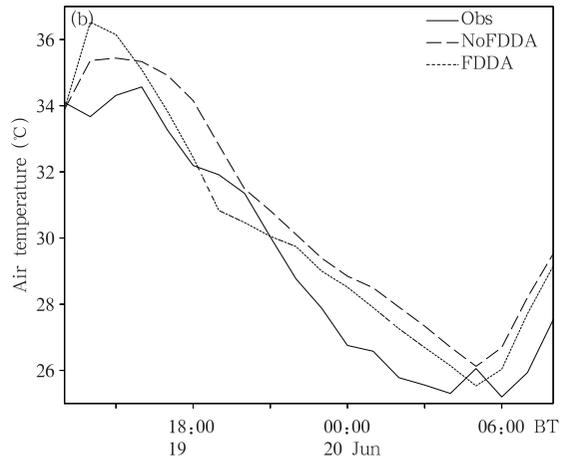
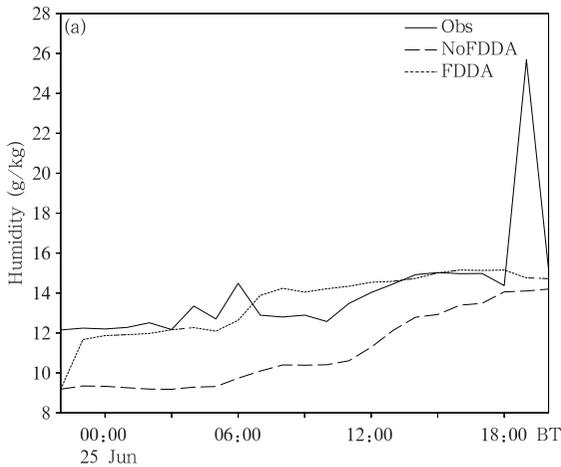


图 3 地面温、湿、风统计(实线: 观测; 长虚线: 未同化 VDRAS 分析场; 短虚线: 同化 VDRAS 分析场)  
 (a. 2014 年 6 月 24 日 22 时至 25 日 20 时 2 m 比湿,  
 b. 2014 年 7 月 19 日 13 时至 20 日 08 时 2 m 气温,  
 c. 2014 年 7 月 19 日 13 时至 20 日 08 时 10 m 风速)

Fig. 3 Statistics of surface air temperature, humidity and wind speed (Solid lines: observations, long dashed lines: results without VDRAS data assimilation, short dashed lines: results with VDRAS data assimilation) (a. 2 m humidity from 22:00 BT 24 Jun to 20:00 BT 25 Jun 2014; b. 2 m air temperature from 13:00 BT 19 Jul to 08:00 BT, 20 Jul 2014; c. 10 m wind speed from 13:00 BT 19 Jul to 08:00 BT 20 Jul 2014)

块后,模式对6月24—25日2 m比湿的模拟准确度明显提高,对7月19—20日2 m气温和10 m风速的模拟偏差也有所减小。

在降水个例的模拟试验中,模式对降水开始和结束时间、落区、降水量的模拟准确度比温、湿、风要素更为重要。对6个降水个例模拟试验结果的检验分析表明,采用初始化模块将VDRAS分析场资料同化到模式初始场后,模式对降水过程的预报效果有较明显的改善,尤其是在降水的开始和结束时间方面,准确度有明显提高。例如,在2014年6月25日的降水个例中,15时北京南部地区有较大范围的降水出现,而未同化VDRAS分析场时的模拟结果

在北京市辖区内未出现降水,同化VDRAS分析场后模拟结果中北京西南部城区及西北、东北部出现降水,虽然落区有一定偏差,但量级与观测接近(图略)。同样地,在2014年7月19—20日的降水个例中,模式在未同化VDRAS分析场时未能模拟出23时北京西部出现的降水,而在同化VDRAS分析场后,模式能够模拟出降水的发生,但落区仍与观测存在一定的偏差(图略)。从模式模拟6个降水个例的情况(表4)可见,在启用初始化模块同化VDRAS分析场后,模式对降水时间的模拟效果有显著改善,并且减少了漏报的现象。

通过计算模拟降水量的TS评分和预报偏差

表4 模式对降水个例的预报效果  
Table 4 Comparison of simulation results of rainfall cases

	2013年 8月15日	2014年 6月25日	2014年 7月4日	2014年 7月19日	2015年 8月7日	2015年 9月4日
未同化	漏报	开始时间晚, 过程不连续, 降水偏弱	降水时间、位置 偏差较大	漏报	降水偏弱, 位置偏差大	降水偏弱, 位置偏差大
同化	降水偏晚	降水时间准确, 位置有偏差	降水时间准确, 范围偏大, 强度偏强	降水时间准确, 位置有偏差	降水时间、 位置准确, 强度偏强	降水偏晚, 位置准确, 强度偏强

(BIAS)比较分析模式对2015年两个降水个例的模拟效果。BIAS反映的是针对某一阈值预报发生降水的站数与实际发生降水的站数之比,即模式对降水范围大小的预报能力,BIAS越接近1说明预报降水范围与实际观测越接近。采用的TS评分和BIAS的计算公式为

TS评分 = 命中的站数 / (命中的站数 + 空报的站数 + 漏报的站数)

BIAS = (命中的站数 + 空报的站数) / (命中的

站数 + 漏报的站数)

对小雨、中雨、大雨和暴雨4个降水量级分别进行统计,各降水量级的阈值参照北京市气象台预报标准设置(表5)。对2015年8月7日18时—8日00时和9月4日12—18时的逐时降水量以及6 h累积降水量分别计算了TS评分和BIAS。其中小时降水量的计算方法为:将统计时段内各小时的命中站数相加,各小时的空报站数相加,各小时的漏报站数相加,再按照前述公式计算TS评分和BIAS。

表5 VDRAS分析场同化对降水影响的TS评分比较  
Table 5 Comparison of TS scores for simulated precipitation

时间	算例	降水量	小雨		中雨		大雨		暴雨	
			TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS
8月7日18时—8日00时	同化	小时	0.477	1.399	0.201	2.300	0.092	2.439	0.033	2.683
	未同化	降水	0.243	0.402	0.110	0.186	0.056	0.158	0.000	0.050
	同化	6 h	0.928	1.065	0.541	1.663	0.333	2.280	0.149	3.545
	未同化	累积	0.669	0.787	0.147	0.185	0.019	0.060	0.000	0.091
9月4日12—18时	同化	小时	0.879	1.034	0.522	1.057	0.173	1.663	0.066	2.924
	未同化	降水	0.880	1.052	0.260	0.677	0.067	0.516	0.023	0.348
	同化	6 h	1.000	1.000	0.985	1.015	0.636	1.000	0.429	1.500
	未同化	累积	1.000	1.000	0.860	0.888	0.481	0.769	0.088	0.321

注:小雨:(0.1 mm/h,0.1 mm/(6 h));中雨:(2 mm/h,4 mm/(6 h));大雨:(8 mm/h,12 mm/(6 h));暴雨:(16 mm/h,25 mm/(6 h))。

由表 5 可见,在两个降水个例的小时降水和累积降水方面,同化了 VDRAS 分析场的算例各降水量级的 TS 评分均比未同化算例高。在小雨和中雨量级中,同化后算例的 BIAS 在大多数情况下也好于未同化算例。而在大雨和暴雨量级中,BIAS 由未同化时的远小于 1 变为同化后的大于 1。这说明 VDRAS 分析场的同化能够显著提高模式对这两个降水过程的模拟能力,改善模式对降水量级和降水范围的预报效果,减少漏报现象,尤其是在小雨和中雨量级,同化后的模拟结果与观测有较强的一致性。但同化后的模拟降水偏强,尤其是强降水的范围明显偏大。

通过比较观测和模拟的降水量水平分布,可以更直观地看到模式对降水量、降水时间和降水落区的预报情况。在大多数时次,同化了 VDRAS 分析场的算例对降水量、降水落区的预报比未同化算例

均更接近于观测。未同化算例的模拟结果大多降水偏弱,降水落区与观测偏差较大,模拟的降水开始和结束时间也有较大偏差。而采用同化的算例模拟降水量更接近观测,也能较好地模拟出降水落区、雨带的位置和移动,对降水时间的模拟效果也更好。但同化算例模拟的降水量往往比实际观测偏大,降水范围尤其是强降水范围也更广。例如,在 2015 年 8 月 7 日 20—21 时,由站点观测可知,北京中东部出现降水,其中城区南部、通州大部分地区和平谷部分地区降水较强,达到大雨以上量级(图 4a)。未同化算例模拟的降水范围主要位于怀柔、密云、平谷、顺义一带,其余地区以零散局地降水为主,降水强度也较弱,基本没有出现大雨以上量级,中雨量级的范围也很小,总体而言,与观测的偏差在降水落区和量级上均相差较大(图 4b)。而同化算例模拟结果中的降水范围为中东部地区,与观测比较一致。降水量

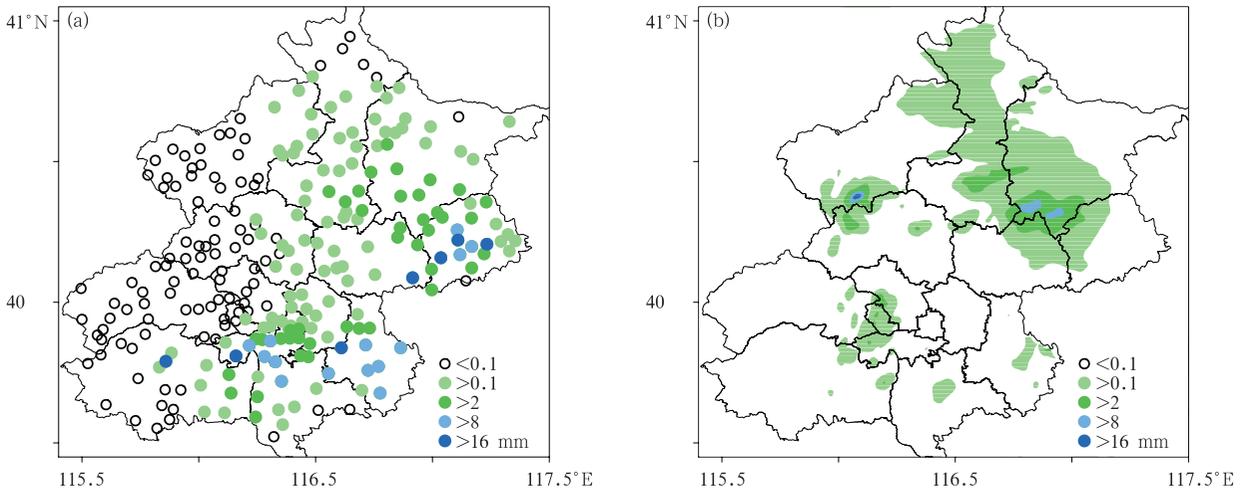


图 4 2015 年 8 月 7 日 20—21 时小时降水量(单位: mm)  
(a. 观测, b. 未同化算例的模拟结果, c. 同化算例的模拟结果)

Fig. 4 Hourly precipitation (unit: mm)  
from 20:00 to 21:00 BT 7 Aug 2015  
(a. observations, b. simulation result without  
assimilation, c. simulation result with assimilation)

级主要以小到中雨为主,部分地区出现大到暴雨,也与观测的量级一致。大到暴雨降水的落区主要位于城区南部、大兴、通州和平谷,与观测也较接近。但降水范围尤其是强降水范围比观测偏大,强降水中心也有一定偏差(图 4c)。通过 8 月 7 日 18 时至 8 日 00 时 6 h 累积降水的水平分布(图 5)也可得出类似结论,未同化算例模拟的降水强度偏弱,降水范围尤其是强降水范围偏小,强降水中心落区与观测偏差也较大。而同化算例模拟的降水范围、量级、落区均更接近观测,但降水范围偏大、强度偏强,在北京西北部还存在虚假的较强雨带。9 月 4 日 16—17 时小时降水量和 12—18 时 6 h 累积降水量的水平分布(图 6、7)也显示出类似的现象。总体而言,未

同化 VDRAS 分析场的算例模拟的降水较观测偏弱,强降水范围偏小,而同化了 VDRAS 分析场算例的模拟结果在量级、范围、落区等降水形态上更接近于观测,但模拟的降水较观测偏强,强降水范围偏大。

通过对同化算例和未同化算例 TS 评分和降水量水平分布的分析比较可知,VDRAS 分析场的同化能够提高模式对选取降水个例的预报效果,使模拟的降水量级、范围、落区、时间更接近于实际观测,尤其是模拟的降水形态与观测较一致,可以改善未同化时模拟降水强度偏弱、强降水范围偏小的现象,但同化后模拟的降水较观测偏强、强降水范围偏大。

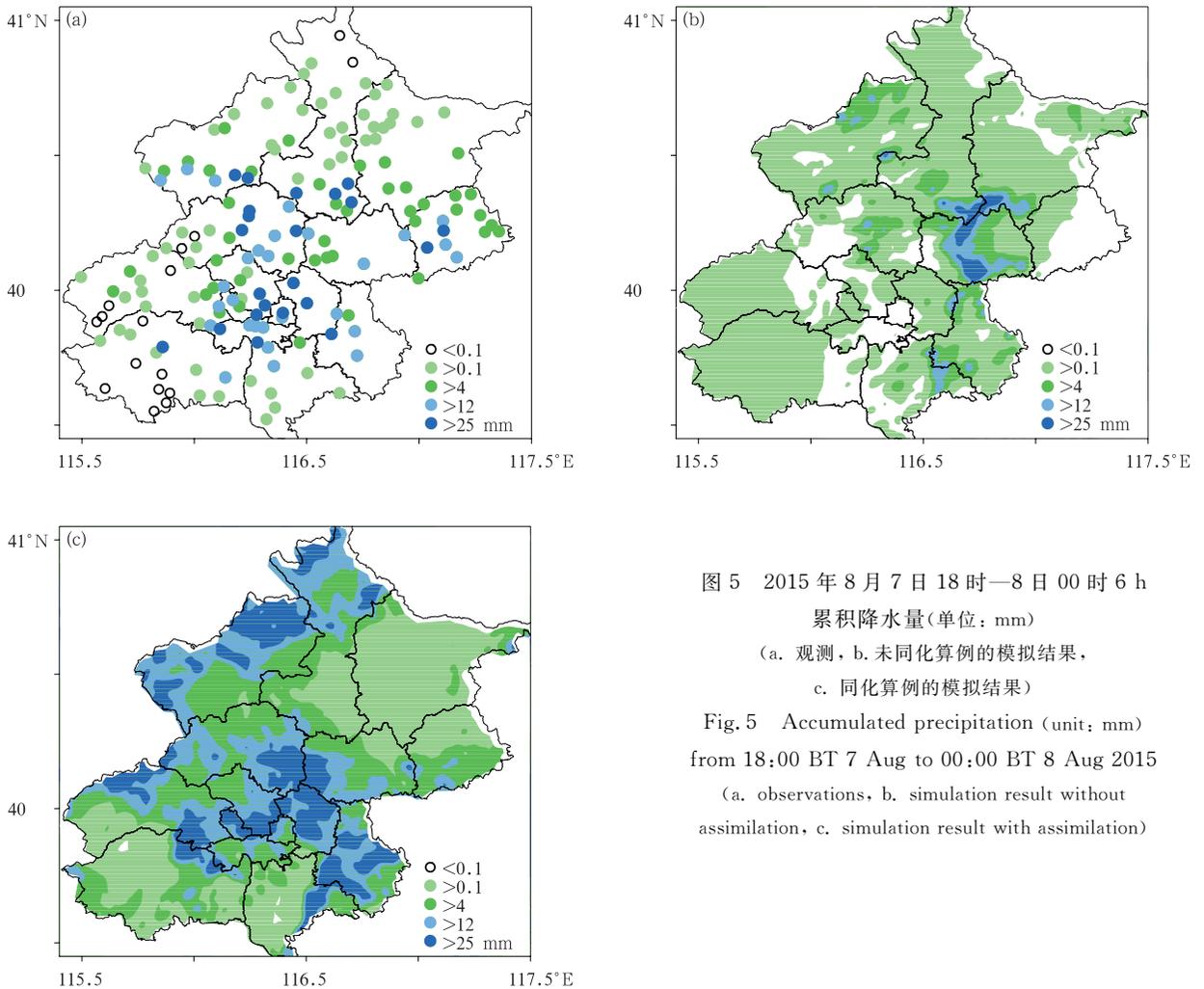


图 5 2015 年 8 月 7 日 18 时—8 日 00 时 6 h 累积降水量(单位: mm)

(a. 观测, b. 未同化算例的模拟结果, c. 同化算例的模拟结果)

Fig. 5 Accumulated precipitation (unit: mm) from 18:00 BT 7 Aug to 00:00 BT 8 Aug 2015 (a. observations, b. simulation result without assimilation, c. simulation result with assimilation)

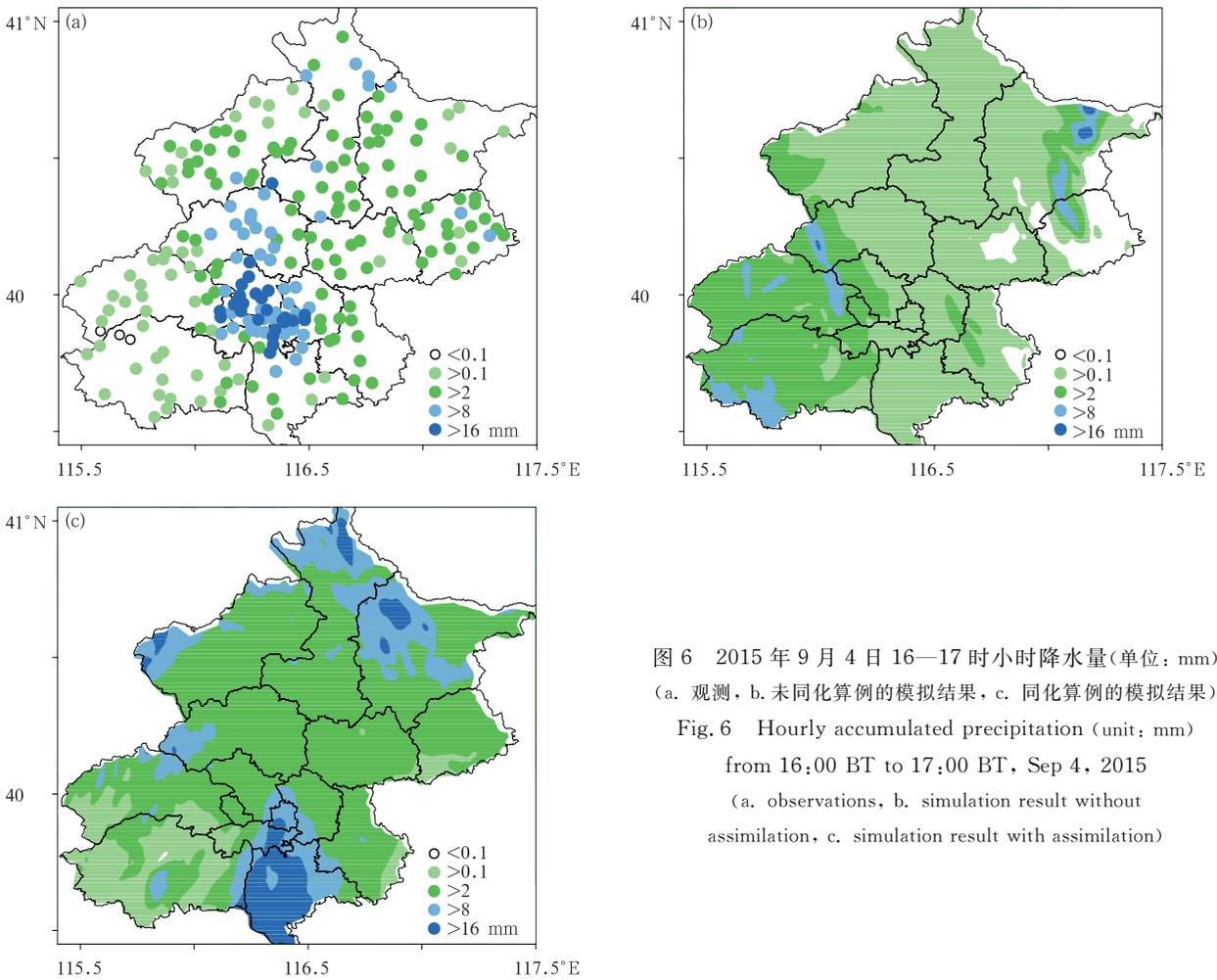


图6 2015年9月4日16—17时小时降水量(单位: mm)  
(a. 观测, b. 未同化算例的模拟结果, c. 同化算例的模拟结果)

Fig. 6 Hourly accumulated precipitation (unit: mm)  
from 16:00 BT to 17:00 BT, Sep 4, 2015  
(a. observations, b. simulation result without  
assimilation, c. simulation result with assimilation)

## 5 FDDA 同化变量及同化参数敏感性试验

为了分析同化 VDRAS 分析场中风、温、湿不同变量及其同化系数的影响,对模式中同化参数进行了一些调整设置,开展敏感性试验。敏感性试验的设置见表6。针对2015年8月7日和9月4日两个降水个例各进行了10个算例的模拟试验,其中包含同化气温与否、同化比湿与否、同化风与否以及同化系数的变化。其中,Control算例与上文中2015年降水个例采用VDRAS分析场同化的算例设置完全相同,其余算例均在Control算例基础上更改某项设置。

为了分析比较同化 VDRAS 分析场中温度、比湿、风3个变量各自对模式模拟降水能力的影响,对同时同化了3个变量的Control算例以及未同化温度的T0算例、未同化比湿的Q0算例、未同化风的U0算例的TS评分和BIAS进行统计。结果表明,

TS评分和BIAS在小时降水量和累积降水量中均显示出一致的变化趋势,因此为方便比较,表7中只列出了相应时段内小时降水量的TS评分和BIAS。通过比较表7中Control、T0、Q0、U0算例的TS评分和BIAS可知,T0和Q0算例的模拟结果明显不如Control算例。但U0算例在多数TS评分中高于Control算例,在多数BIAS中差于Control算例。这说明VDRAS分析场中温度和湿度的同化比风的同化对模式模拟降水能力的提高有更大的作用。

为了比较不同同化系数对模式模拟效果的影响,将采用不同系数算例的TS评分和BIAS列于表8。其中Control算例的温度、比湿、风的同化系数均为0.0006(表6)。同样地,这里只列出了相应时段小时降水量的统计结果。通过表8中各算例TS评分和BIAS的比较可知,在8月7日的降水个例中,T9算例的模拟结果在T3、Control、T9算例中

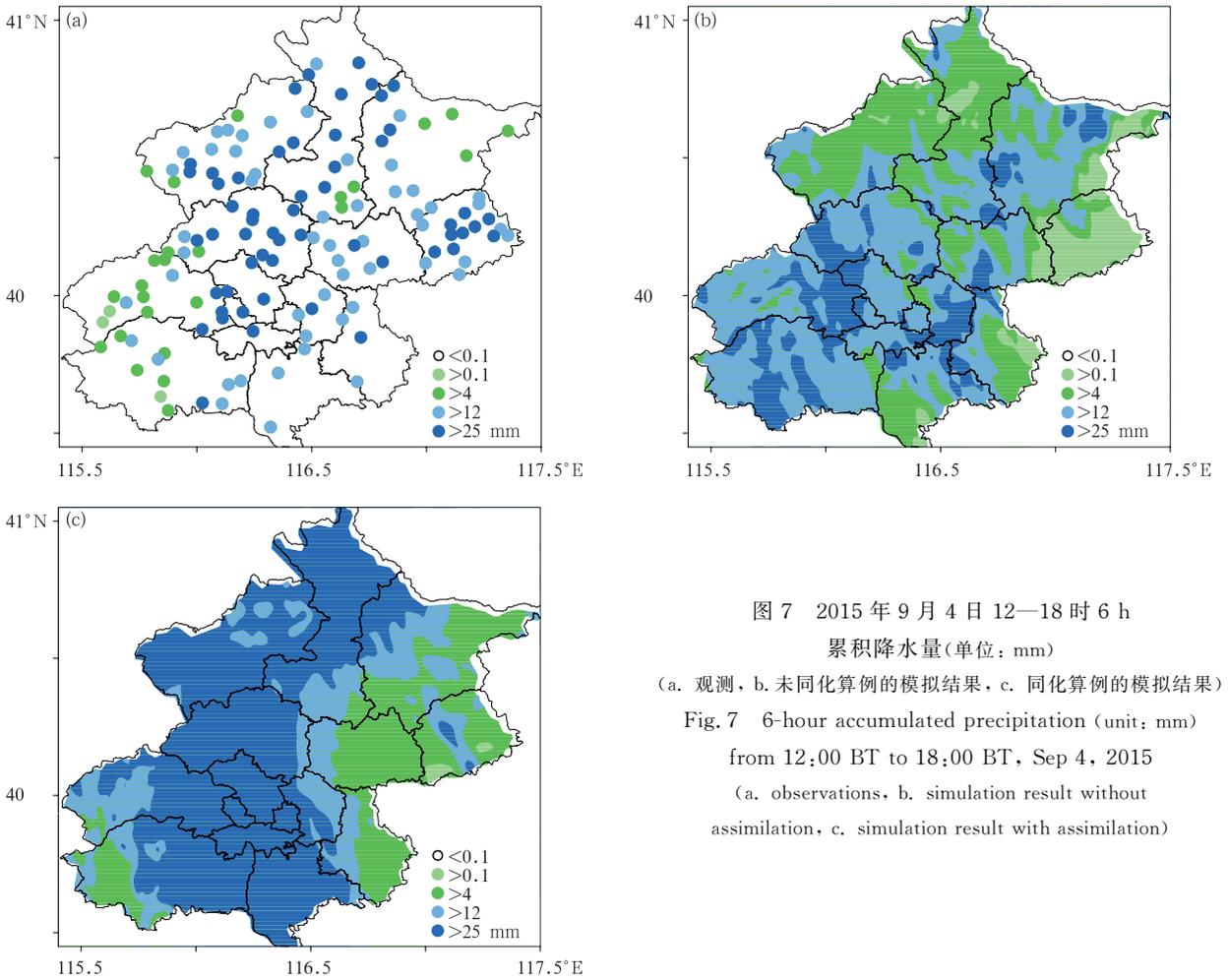


图7 2015年9月4日12—18时6 h  
累积降水量(单位: mm)  
(a. 观测, b. 未同化算例的模拟结果, c. 同化算例的模拟结果)  
Fig.7 6-hour accumulated precipitation (unit: mm)  
from 12:00 BT to 18:00 BT, Sep 4, 2015  
(a. observations, b. simulation result without  
assimilation, c. simulation result with assimilation)

表6 敏感性试验设置  
Table 6 Configurations of the sensitivity experiments

算例名称	同化气温	同化比湿	同化风	同化系数		
				气温	比湿	风
Control	是	是	是	0.0006	0.0006	0.0006
T0	否	是	是	—	0.0006	0.0006
T3	是	是	是	<b>0.0003</b>	0.0006	0.0006
T9	是	是	是	<b>0.0009</b>	0.0006	0.0006
Q0	是	否	是	0.0006	—	0.0006
Q3	是	是	是	0.0006	<b>0.0003</b>	0.0006
Q9	是	是	是	0.0006	<b>0.0009</b>	0.0006
U0	是	是	否	0.0006	0.0006	—
U3	是	是	是	0.0006	0.0006	<b>0.0003</b>
U9	是	是	是	0.0006	0.0006	<b>0.0009</b>

最好, T3 最差; Q3 算例的模拟结果在 Q3、Control、Q9 算例中最好。这表明在此个例中, 相对较大的温度同化系数和较小的比湿同化系数有利于模拟效果的改善。而在9月4日的降水个例中, 呈现出相反的趋势, T3 算例的模拟结果在 T3、Control、T9 算例中最好; Q9 算例的模拟结果在 Q3、Control、Q9

算例中最好, 即在此个例中, 相对较小的温度同化系数和较大的比湿同化系数有利于模拟效果的改善。所以, 各变量同化系数的变化在选取的两个降水个例中对模式模拟能力的影响有所不同, 还需开展更多的检验比较工作以研究同化系数的影响及其优化。

表7 同化温、湿、风各变量对降水影响的 TS 评分比较

Table 7 Comparison of the TS scores for the rainfall cases with assimilation of temperature, humidity and winds

时间	算例	小雨		中雨		大雨		暴雨	
		TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS
8月7日18时—8日00时	Control	0.477	1.399	0.201	2.300	0.092	2.439	0.033	2.683
	U0	0.530	1.462	0.269	2.624	0.164	3.430	0.121	3.933
	T0	0.351	1.147	0.091	1.232	0.022	1.053	0.000	0.900
	Q0	0.311	0.885	0.079	0.506	0.021	0.272	0.000	0.250
9月4日12—18时	Control	0.879	1.034	0.522	1.057	0.173	1.663	0.066	2.924
	U0	0.882	1.004	0.592	1.247	0.188	1.933	0.056	2.727
	T0	0.768	0.792	0.265	0.499	0.033	0.365	0.014	0.121
	Q0	0.893	1.075	0.583	1.605	0.141	2.718	0.043	4.091

表8 温、湿、风同化系数对降水影响的 TS 评分比较

Table 8 Comparison of the TS scores for the rainfall cases with different assimilation coefficients of temperature, humidity and winds

时间	算例	小雨		中雨		大雨		暴雨	
		TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS	TS	BIAS
8月7日18时—8日00时	Control	0.477	1.399	0.201	2.300	0.092	2.439	0.033	2.683
	U3	0.493	1.429	0.228	2.441	0.138	2.544	0.056	2.750
	U9	0.473	1.421	0.215	2.221	0.086	2.316	0.029	2.550
	T3	0.465	1.404	0.195	2.338	0.099	2.316	0.029	2.533
	T9	0.507	1.331	0.257	1.977	0.121	2.167	0.034	2.067
	Q3	0.490	1.276	0.228	1.871	0.094	2.272	0.041	2.367
	Q9	0.476	1.478	0.207	2.567	0.106	2.491	0.050	2.517
9月4日12—18时	Control	0.879	1.034	0.522	1.057	0.173	1.663	0.066	2.924
	U3	0.864	1.025	0.560	1.114	0.196	1.905	0.070	2.939
	U9	0.890	1.042	0.532	1.055	0.179	1.639	0.056	2.439
	T3	0.904	0.968	0.550	1.083	0.197	1.599	0.069	2.530
	T9	0.875	1.048	0.528	1.058	0.185	1.849	0.052	2.712
	Q3	0.881	1.069	0.523	1.144	0.201	1.944	0.048	2.636
	Q9	0.893	1.020	0.529	1.052	0.194	1.587	0.075	2.894

## 6 结论

通过建立一个 WRF 初始化模块,采用 FDDA 方法,将中国气象局北京城市气象研究所的 VDRAS 系统高时、空分辨率三维热动力结构分析场资料同化到 WRF 中,并选取北京地区汛期降水个例,开展高分辨率同化模拟和敏感性试验,比较分析了雷达热动力反演资料同化及温、湿、风各同化变量和同化系数对模式模拟结果的影响,结果表明:

(1) 基于城市所 VDRAS 系统建立的 WRF 数值模式初始化模块,能够有效地通过 FDDA 方法将 VDRAS 系统高时空分辨率三维热动力结构资料同化到 WRF 中,且具备了业务化应用的基本条件。

(2) 雷达热动力反演资料的同化能够有效提高 WRF 系统对近地面温、湿、风大气要素和降水过程

的模拟能力,尤其是能够改善 WRF 模拟 2 m 比湿、降水落区、降水量级、降水时间的效果,减少对降水过程漏报的现象。对温、湿、风各同化变量的敏感性试验表明,温度和比湿的同化比风的同化对模式模拟降水结果的改善更重要。

同化雷达热动力反演资料对模式尤其是数值业务模式系统预报效果的影响需要进一步更全面、更系统的检验,包括更多种类的天气个例、更全面要素和变量的比较、更多样的统计分析方法,为业务化应用奠定更坚实的基础。另外,VDRAS 系统未考虑地形造成其分析场与 WRF 背景场、GFS 再分析资料匹配性较差可能是导致同化雷达热动力反演资料后模式模拟降水偏强的原因之一,这一问题需要进一步深入分析和研究。同化参数的设置也需要通过今后的检验工作进一步优化,以便改善。

## 参考文献

- 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. 2011. 基于雷达资料4DVAR的低层热力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. *气象学报*, 69(1): 64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics. *Acta Meteor Sinica*, 69(1): 64-78 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春, 肖现等. 2012a. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热力机制的模拟分析. *大气科学*, 36(5): 929-944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2012a. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data. *Chinese J Atmos Sci*, 36(5): 929-944 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春. 2012b. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. *气象学报*, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012b. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 371-386 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春, 肖现等. 2013. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 569-592 (in Chinese)
- 陈明轩, 高峰, 孙娟珍等. 2016. 基于VDRAS的快速更新雷达四维变分分析系统. *应用气象学报*, 27(3): 257-272. Chen M X, Gao F, Sun J Z, et al. 2016. An analysis system using rapid-updating 4-D variational radar data assimilation based on VDRAS. *J Appl Meteor Sci*, 27(3): 257-272 (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 3DVar. *Acta Meteor Sinica*, 71(3): 527-537 (in Chinese)
- 肖现, 廖菲, 肖辉等. 2010. 北京对流性降水的雨滴尺寸分布瞬时特征与雷达降水的关系. *热带气象学报*, 26(4): 445-451. Xiao X, Liao F, Xiao H, et al. 2010. Systematic variation of drop size in convective of Beijing and radar-rainfall relations. *J Trop Meteor*, 26(4): 445-451 (in Chinese)
- 肖现, 王迎春, 陈明轩等. 2013. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热力机制的模拟分析. *气象学报*, 71(5): 797-816. Xiao X, Wang Y C, Chen M X, et al. 2013. A mechanism analysis of the thermo-dynamical field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing area with the radar data 4DVar. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 797-816 (in Chinese)
- 肖现, 陈明轩, 高峰等. 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对下山演变的动力学机制. *大气科学*, 39(1): 100-124. Xiao X, Chen M X, Gao F, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing. *Chinese J Atmos Sci*, 39(1): 100-124 (in Chinese)
- Cram J M, Liu Y B, Low-Nam S, et al. 2001. An operational mesoscale RT-FDDA analysis and forecasting system // Preprints 18th WAF and 14th NWP Conference on Numerical Weather Prediction. Ft. Lauderdale, AMS
- Kim J, Lee C B, Belorid M, et al. 2011. A study of sensitivity of WRF simulation to microphysics parameterizations, slope option and analysis nudging in Haeon Basin, South Korea // Proceedings of 2011 TERRECO Science Conference. Germany: Karlsruhe Institute of Technology, Garmisch-Partenkirchen
- Lauvaux T, Deng A, Gaudet B, et al. 2013. Quantification of methane sources in the Barnett Shale (Texas) using the Penn State WRF-Chem-FDDA real time modeling system // Proceedings of the 14th WRF User's Workshop. Boulder, CO, US; NCAR
- Leslie L M, LeMarshall J F, Morison R P, et al. 1998. Improved hurricane track forecasting from the continuous assimilation of high quality satellite wind data. *Mon Wea Rev*, 126(5): 1248-1257
- Liu Y B, Chen F, Warner T, et al. 2006. Verification of a mesoscale data-assimilation and forecasting system for the Oklahoma city area during the Joint Urban 2003 Field Project. *J Appl Meteor Climatol*, 45(7): 912-929
- Liu Y B, Bourgeois A, Warner T, et al. 2007. An "observation-nudging"-based FDDA scheme for WRF-ARW for mesoscale data assimilation and forecasting // Preprints of the 4th Symposium Space Weather. San Antonio, TX: American Meteorology Society, 6pp
- Liu Y B, Warner T T, Bowers J F, et al. 2008a. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U. S. army test and evaluation command. Part 1: Overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used. *J Appl Meteor Climatol*, 47(4): 1077-1092
- Liu Y B, Warner T T, Astling E G, et al. 2008b. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U. S. army test and evaluation command. Part 2: Interrange comparison of the accuracy of model analyses and forecasts. *J Appl Meteor Climatol*, 47(4): 1093-1104
- Pan L L, Liu Y B, Rostkier-Edelstein D, et al. 2011. Verification of the operational WRF-RTFDDA simulated surface variables o-

- ver the Eastern Mediterranean//Proceedings of the 12th Annual WRF Users Workshop. Boulder, CO, US:NCAR
- Pan L L, Liu Y B, Liu Y W, et al. 2015a. Impact of four-dimensional data assimilation (FDDA) on urban climate analysis. *J Adv Model Earth Syst*, 7(4): 1997-2011
- Pan L L, Liu Y B, Liu Y W, et al. 2015b. Development of a CONUS radar data assimilation WRF-RTFDDA system for convection-resolvable analysis and prediction//Proceedings of the 16th Annual WRF Users Workshop. Boulder, CO, US:NCAR
- Seaman N L, Stauffer D R, Lario-Gibbs A M. 1995. A multiscale four-dimensional data assimilation system applied in the San Joaquin Valley during SARMAP. Part I: Modeling design and basic performance characteristics. *J Appl Meteor*, 34(8): 1739-1761
- Shimada S, Ohsawa T. 2011. Accuracy and characteristics of offshore wind speeds simulated by WRF. *SOLA*, 7: 21-24, doi: 10.2151/sola.2011-006
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech Notes-475 + STR. Boulder, CO: NCAR
- Stauffer D R, Seaman N L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon Wea Rev*, 118(6): 1250-1277
- Stauffer D R, Seaman N L. 1994. Multiscale four-dimensional data assimilation. *J Appl Meteor*, 33(3): 416-434
- Sun J Z, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. I: Model development and simulated data experiments. *J Atmos Sci*, 54(12): 1642-1661
- Sun J Z, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J Atmos Sci*, 55(5): 835-852
- Sun J Z, Crook N A. 2001. Real-time low-level wind and temperature analysis using single WSR-88D data. *Wea Forecasting*, 16(1): 117-132
- Sun J Z, Zhang Y. 2008. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon Wea Rev*, 136(7): 2364-2388
- Tai S L, Liou Y C, Sun J Z, et al. 2011. Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the Weather Research and Forecasting model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. *Wea Forecasting*, 26(6): 975-992
- Yesubabu V, Srinivas C V, Ramakrishna S S V S, et al. 2014. Impact of period and timescale of FDDA analysis nudging on the numerical simulation of tropical cyclones in the Bay of Bengal. *Nat Hazards*, 74(3): 2109-2128, doi: 10.1007/s11069-014-1293-2