

文章编号: 2096-1618(2017)02-0165-10

陡峭地形特大暴雨的雷达资料变分同化试验研究

钟兰頔^{1,2}, 朱克云¹, 王炳赞^{1,3}, 张杰¹, 戴昌明¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原气象与环境重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 江西省南昌市气象局气象台, 江西 南昌 330038; 3. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水开放重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 为开展雷达基数据直接同化, 并探究在川西陡峭地形下特大暴雨变分同化模拟中的效果, 选取 2013 年 7 月 9 日-7 月 11 日发生在都江堰地区的特大暴雨天气过程, 使用具有 WRFDA 同化模块的 WRF 中尺度模式进行雷达资料同化, 其中进入同化模块的雷达资料由雷达资料预处理系统 (radar data preprocessing system, RDPS) 处理生成。采用三维变分和四维变分同化对比、雷达基数据的单独同化和综合同化等方法开展试验, 结果表明: 使用 RDPS 系统可以较好处理陡峭地形的雷达资料。三维和四维变分同化试验均提高了降水预报水平, 四维变分同化试验在降水预报综合评分上效果相对较好。两组单独同化反射率的试验较两组单独同化径向速度的试验对于西南东北走向的水汽辐合增量有较好的表现, 表明反射率因子在水汽通量散度场中还是有较大的影响; 两组单独同化径向速度的试验均使风场在都江堰地区存在气旋性的风场辐合增量。

关键词: 气象学; 数值模拟; 三维变分同化; 四维变分同化; 反射率因子; 径向速度

中图分类号: P458.1+21.1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.02.010

0 引言

数值模式的初始场对于模拟结果有着非常重要的影响, 中尺度数值模式的初始场主要由常规的观测资料和大尺度数值模式提供的背景场提供, 对于中小尺度天气系统信息往往不能很好体现。多普勒雷达资料作为一种高时空分辨率的观测资料, 能有效反映中小尺度天气系统结构及其演变过程。开展多普勒雷达资料同化, 能够有效地改善数值模式的初始场。

雷达资料的同化方法有反演同化 (间接同化) 和直接同化两种。由于在使用雷达资料进行反演同化的过程中容易产生误差, 直接同化雷达资料可以避免这些误差, 因此近年开展雷达资料直接同化研究较多。如国外 Xiao 等^[1] 使用 WRF 模式同化多部多普勒雷达的反射率和径向风资料, 结果表明同化雷达资料可以为飊线预报提供精确的初始场, 并提高了对降水的预报效果。Li^[2] 将雷达资料同化应用于热带气旋的模拟中, 结果表明雷达资料对风暴的对流、降雨、热力结构有显著的影响。在强度和路径的短期预测时, 径向速度表现了明显的正作用。Wang 等^[3-4] 使用雷达资料对美国一次飊线过程进行三维变分和四维变分同化, 并在此基础上分别同化雷达的反射率因子和径向速度, 而后进行了对比试验。结果表明: 四维变分同化能

有效提高降水预报的评分水平; 相比于同化反射率因子, 径向速度在四维变分同化中在前 4 个小时有更大的影响; 并通过诊断分析的研究表明, 四维变分同化方法在改善中尺度对流初始场方面具有较好的效果。

杨艳蓉等^[5] 利用 ARPS (the advanced regional prediction system) 模式对南京一次暴雨过程开展多普勒雷达资料同化。结果显示: 在暴雨发生最初的 1 小时内进行每 6 分钟一次的资料同化, 可以得到与实况接近的较为精细的云内气象要素场分布。赵文斌等^[6] 指出, WRF 模式能有效地同化多普勒雷达径向速度和雷达反射率因子, 使模式初始场包含更详尽的中尺度特征信息, 并能明显改善发生在广西东北部的一次大暴雨的模拟效果, 较好地提高中尺度降水预报质量。杨银等^[7] 采用 WRF 模式同化了多普勒雷达资料, 结果表明初始场能够更加精细地刻画初始风场和水汽通量场的分布与数值, 能展现出风场的辐合辐散区域。同化了多普勒雷达资料后能较为明显地提高降雨落区及强度的预报精度, 前 6 小时有明显的改善作用, 随着时间的增加改善作用逐渐减小, 前 9 小时改进作用仍很明显。其他研究人员的研究也同样表明, 将雷达资料同化进初始场中, 对降水的模拟有较好的改善^[8-11]。

以上的研究作为同化雷达资料做出贡献, 却并未对在陡峭地形影响下如何开展雷达资料同化做出叙述。四川位于中国大陆地势三大阶梯中第一级青藏高原和第二级长江中下游平原的过渡带, 地形的垂直变化梯度大, 西高东低的地貌特征十分明显, 这种复杂地

形的对中小尺度天气系统有着较大的影响,并给由其产生的暴雨的预报造成了很大困难。而且在川西都江堰周边陡峭的地形中,雷达覆盖范围内,地面垂直高度差甚至超过2 km,因此在雷达资料同化中必须考虑这类陡峭地形的影响。因此期望通过建立适用于陡峭地形下的雷达资料预处理系统,将雷达资料有效地同化到模式预报中,以期改善陡峭地形下的暴雨预报效果,并通过2013年7·9川西特大暴雨为例,进行了雷达资料三维变分和四维变分同化模拟试验的对比分析工作。

1 个例介绍

1.1 实况降水

2013年7月9日~7月11日四川省西部发生了一次连续性强降雨过程。在此次过程中盆地西部累计雨量普遍为200~400 mm,其中德阳、都江堰等部分地区有400~800 mm,都江堰市幸福镇站(图1)过程降雨总量达1151 mm,接近该地区年均1240 mm的降雨量。8日20时至9日15时降雨量高达741 mm,其中9日2时~3时单小时累积降雨量达125.4 mm,为百年一遇。

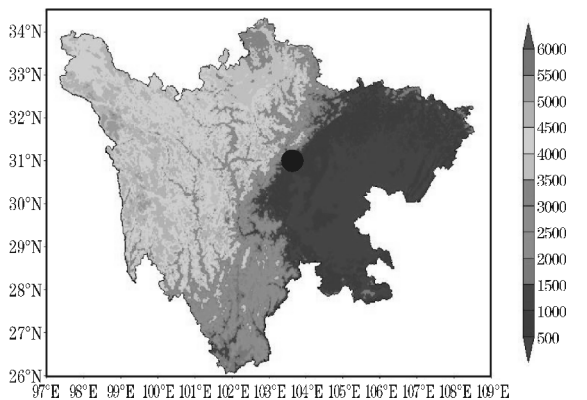


图1 四川省地形示意图(●为都江堰幸福镇位置)

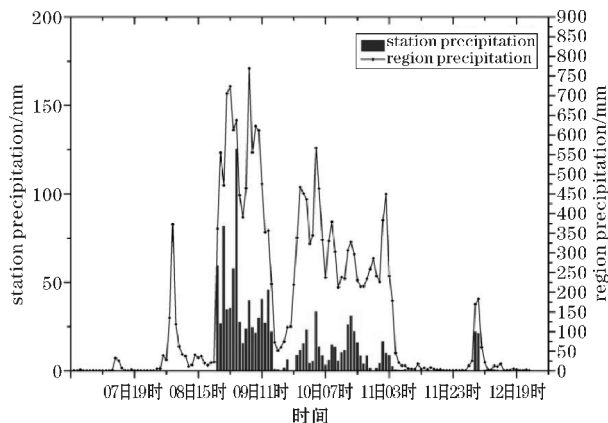
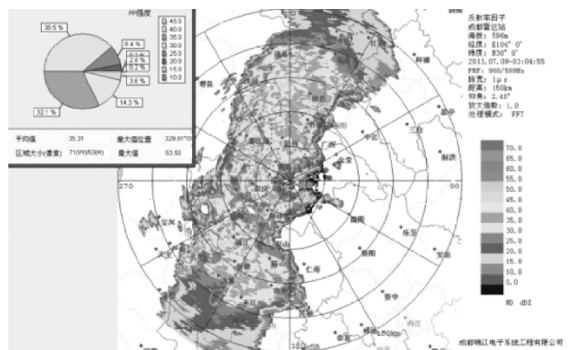


图2 2013年7月7日00时至7月12日23时
都江堰市幸福镇站逐小时降水量时序实况

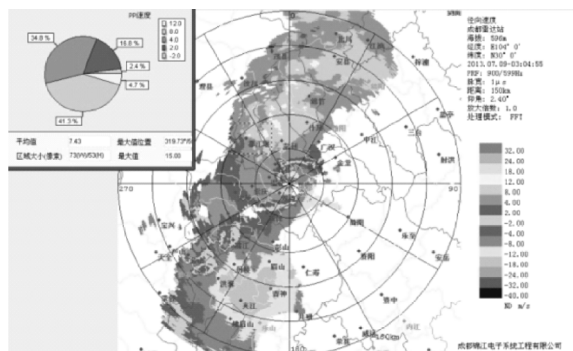
由于都江堰地区的降水趋势与幸福镇站的单站降水趋势较为一致,下面以幸福镇站开展研究。图2给出幸福镇站的降水时序实况,可见,大致分为两个强降水阶段:08日20时,第一阶段降水开始,首小时的地地区累积降水量达到了361.5 mm,都江堰站的单站降水也达到了33.2 mm,幸福镇站的单站降水量达到了59.6 mm。此后逐小时的地区和单站降水量存在波动,但是降水量依然较大。直至09日15时,第一阶段降水结束。从09日20时开始的第二阶段降水过程,单站逐小时较第一阶段减小,但其持续时间增加,因此总降水量也较大。由于第一阶段降水在逐小时降水量上有较强表现,因此称其为主降水阶段,并作着重分析。

1.2 雷达回波

四川省7部多普勒天气雷达中,仅成都与绵阳雷达能有效覆盖此次降水过程。雷达组合反射率显示都江堰地区有较强回波产生(图3a)。从径向速度来看,都江堰地区均为正速度区,分析可知云团沿着陡峭山形自西南向东北运动的情况(图3b)。



(a) 雷达反射率



(b) 径向速度图

图3 2013年7月09日03时成都站雷达反射率与径向速度图

2 试验介绍

2.1 资料介绍

使用的资料包括 NCEP/NCAR 分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的

FNL 再分析资料,四川省地面自动站逐小时观测资料及成都、绵阳两部 CINRAD/SC 雷达(见图 5)的基数据资料。资料的覆盖时间为 2013 年 07 月 08 日 17 时-07 月 11 日 08 时。

使用课题组编写开发的雷达资料预处理系统(radar data preprocessing system, RDPS)对雷达基数据进行预处理,使用 WRF_V3.5.1 及其 WRFDA_V3.5.1 变分同化模块进行同化、预报模拟试验。

2.2 RDPS 系统功能作用

WRFDA 同化模块仅提供雷达资料同化的接口,而并未提供有关雷达基数据解码转换这类预处理程序,虽然目前国外使用的雷达资料前处理软件系统如 SPRINT、VDRAS 等都可以进行雷达资料的解码和前处理工作,但这些软件均使用美国 WSR-88D 雷达数据格式为模板进行编写开发,并且部分内容还需要获取使用授权,不便于在中国使用。为满足多普勒天气雷达在数值预报工作的应用需求,团队开发了雷达资料预处理系统(RDPS)对文中涉及的雷达数据进行前期处理。当前的 RDPS 系统能完成国内不同厂家多种型号的多普勒天气雷达资料的预处理工作,其工作流程简述如下:

- (1)对 SA、SB、SC 的雷达数据进行读取并转换为统一格式。
- (2)对雷达基数据进行质量控制,目的是使雷达数据质量达到模式计算要求,避免离群数据给模拟带来不良结果。主要包含:去除孤立点和区域滤波;径向风谱宽检验;缺测点数据填补;径向缺失填补;去除噪声;速度退模糊等。
- (3)将质量控制后的雷达数据坐标转换、三维空间插值,并结合数字地形高程模型(DEM)数据,将雷达数据与陡峭地形的真实地形数据融合,满足模式的数据质量要求。
- (4)将处理后的雷达资料转换成 WRFDA 同化模块可以读取的规定格式,接入同化系统。

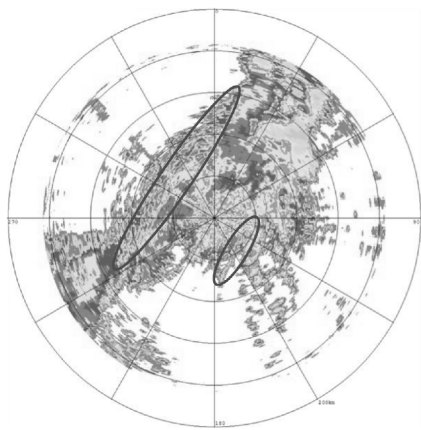
RDPS 系统中对于陡峭地形的处理主要使用 DEM 数据完成。DEM 数据为区域地面的高程数据。由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。覆盖范围广阔(60°S~60°N,180°W~180°E),分辨率精度为30 m和90 m。文中 DEM 数据来自于国际科学数据服务平台。对通过质量控制后的雷达数据,进行三维空间插值,之后对处于陡峭地形区域数据进行处理,主要内容如下:调用 DEM 数据,使之与雷达的三维变分网格数据的格距、区域范围一致。对比雷达数据的垂直高度与 DEM 数据高度,如某点高度值

小于 DEM 真实地形高度,即把此点所在的值滤除,据此可滤除部分地物杂波。

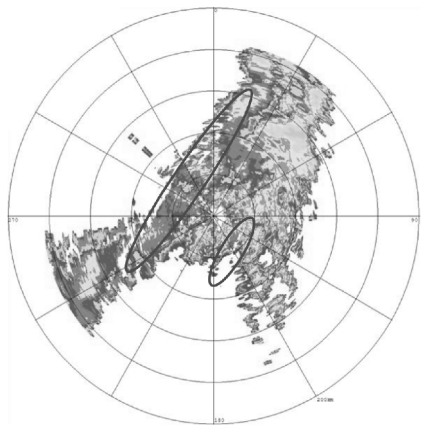
这样针对陡峭地形处理后的数据比用 DEM 数据直接替换 WRF 模式自带的 Geog 地形数据^[12]效果更佳,既不会破坏模式与地形的匹配情况,也不影响雷达数据的质量。DEM 和 Geog 的地形数据对比情况如表 1 所示,从中可见 DEM 数据具有更高的精度。

表 1 DEM 和 Geog 地形数据对比

类型	Geog_THR1	Geog_THR2	Geog_THR3	Geog_THR4	DEM
精度	0.166667° ≈18 km	0.083333° ≈9 km	0.033333° ≈3 km	0.008333° ≈0.9 km	0.000833° ≈0.09 km



(a) 处理前(含有地物)



(b) 处理后(地物已滤除)

图 4 2009 年 6 月 19 日 22 时四川成都雷达质量控制前后的 0.5°仰角反射率图

图 4 给出采用 RDPS 系统对 2009 年 6 月 19 日雷达反射率回波进行处理前后的回波图。可见在测站西北和东南两方向各有一条呈东北西南走向的强回波带,其强度达到65 dBZ以上,而在速度图中,这两条强回波对应的径向速度接近于零(图略),表明其为两条地物回波。从地理分布可知,西北侧的强回波带为龙门山脉,而东南侧的强回波带为龙泉山脉。经过 RDPS 系统处理之后,两条强地物回波已经被滤除,且

4(a)图中原有的孤立点和缺测点得到了剔除和填补,图 4(b)回波边缘轮廓清晰,滤波效果良好,数据质量可靠。

2.3 模式参数方案设计

模拟试验方案设计为采用 Lambert 地图投影坐标系,双层嵌套网格,网格嵌套以及区域如图 5 所示,粗网格中心位于102.94°E,30.19°N,覆盖范围为整个四川省;嵌套网格中心位于104.45°E,30.96°N,覆盖主要降水区域。模式垂直方向设计为 30 层 η 坐标,积分时间步长为90 s,粗网格与嵌套网格均为每 1 小时输出一 次结果。物理参数化方案配置如表 2 所示,参照屠妮妮等^[13-16]使用 WRF 模式成功模拟四川降水个例中所使用的参数化方案。由于嵌套网格水平分辨率尺度已经接近积云参数化方案使用的临界尺度,故仅在粗网格中应用积云参数化方案。

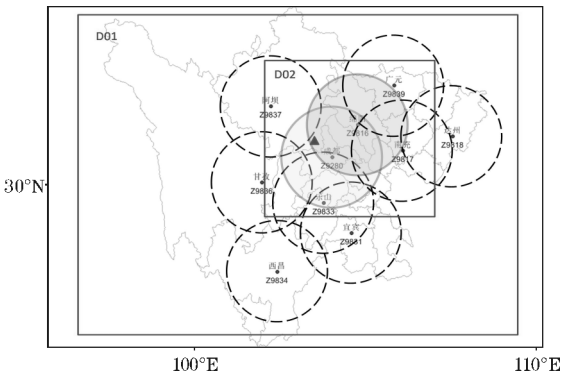


图 5 模拟区域(黑圈为雷达探测范围)

表 2 WRF 模式参数设定

方案类别	参数化方案	
	粗网格	嵌套网格
水平分辨率	15 km 105×111	5 km 94×94
积分时间	2013 年 7 月 08 日 09 时~11 日 00 时(UTC)	
微物理过程	Lin 方案	
积云参数化方案	Kain-FrisTSch 方案	无
辐射方案	波辐射:RRTM 方案; 短波辐射:Dudhia 方案	
边界层方案	YSU 方案	
陆面过程	Noah land-surface 模式	

2.4 同化试验方案设计

试验内容如表 3 所示,试验方案设计如图 6 所示。考虑 spin-up 原因 3 组实验均使用由 7 月 08 日 06 时(UTC)起报,得出的 7 月 08 日 09 时(UTC)作为初始场。控制试验将 7 月 08 日 09 时(UTC,下同)直接模

拟至 11 日 00 时。
三维变分同化试验 3DVAR 将 7 月 08 日 09 时作为初始时刻,并同化此时此刻的雷达资料,同化时间窗为 30 分钟,之后做 63 小时模拟预报,结束时间为 7 月 11 日 00 时。
四维变分同化试验 4DVAR 将 7 月 08 日 09 时作为初始时刻,并进行 3 小时的四维变分同化,使用的雷达资料时间间隔为 1 小时^[17],使用同化后的初始场进行 63 小时预报,结束时间为 7 月 11 日 00 时。
同化所使用的雷达资料来源于雷达资料预处理系统(RDPS)的输出数据。各组试验中,参数化过程一致,预报时间一致。

表 3 试验内容

试验名称	试验描述
Sim	控制试验
3DVAR	三维变分同化试验,同化雷达反射率和雷达径向速度
4DVAR	四维变分同化试验,同化雷达反射率和雷达径向速度
3DVAR_RF	三维变分同化试验,同化雷达反射率
3DVAR_RV	三维变分同化试验,同化雷达径向速度
4DVAR_RF	四维变分同化试验,同化雷达反射率
4DVAR_RV	四维变分同化试验,同化雷达径向速度

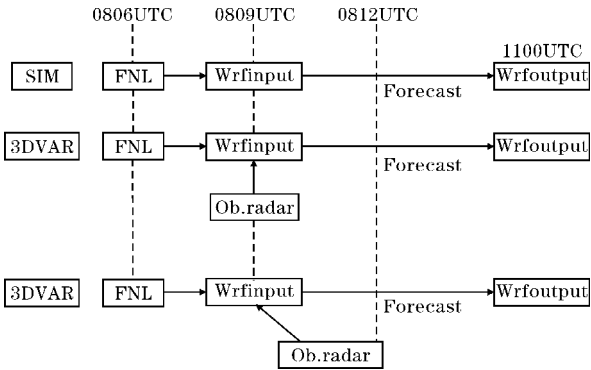


图 6 试验方案设计

3 三维与四维变分同化试验分析

3.1 变分同化试验的初始场分析

3.1.1 水汽通量散度增量场分析

水汽通量散度场描述该区域水汽通量散度分布,并可以推断水汽的辐合辐散趋势。在试验中,将同化试验的初始场减去控制试验初始场定义为增量场(下同),图 7 给出三维变分和四维变分同化各层次水汽通量散度场增量场。

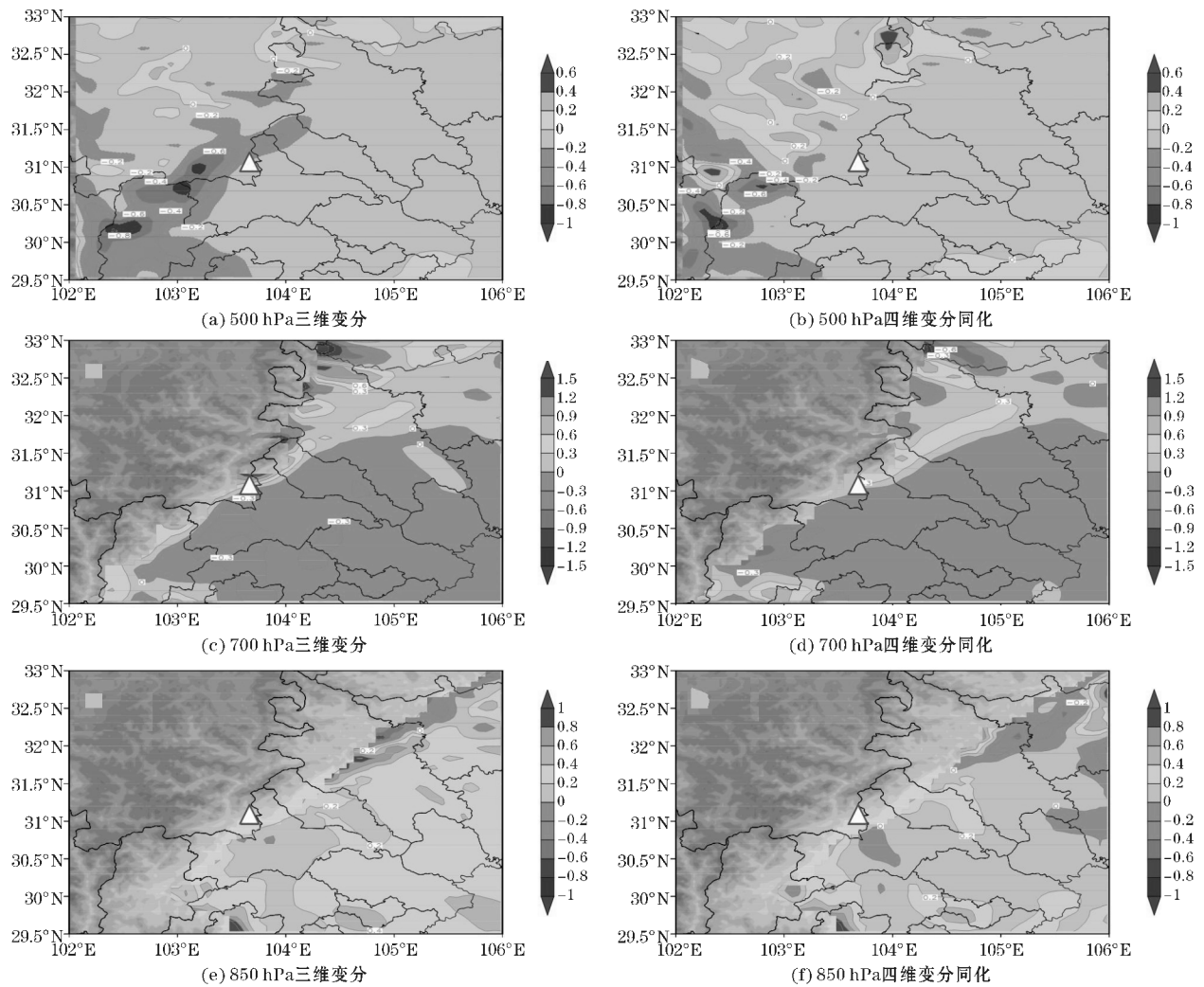


图 7 三维变分和四维变分同化各层次水汽通量散度场增量图(△都江堰)(单位: $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

由 500 hPa 水汽通量散度增量场(图 7a,b)可知,两组同化试验在大部分地区都增强水汽的辐合作用,在雅安北部地区均加强水汽的辐合场,在绵阳地区北部加强了水汽的辐散场。四维变分同化试验在水汽的辐合和辐散增量都相对较强。在 700 hPa(图 7c,d)上,两组同化试验场存在沿山的西南东北向的水汽辐散带,并且四维变分同化试验的辐散场增量场的面积和量级较三维同化更大,反映在降水图(图 9,下同)中就是四维同化及三维同化均在东北部存在着极大的降水中心,并且四维同化的降水量级更大。在 850 hPa 上,两组同化试验均在东北部区域存在水汽辐合(图略),但三维同化试验在该区域存在辐合场的减弱,而四维同化则表现为辐合场的加强。

通过上下层水汽通量散度的变化可以得知,两组试验在都江堰的东北部地区都存在较大范围的降水,并且可知水汽的主要来向与西南东北走向的都江堰地区地形有关,大背景环境及特殊地形的作用下,产生了此次西南东北走向的降水区域。

3.1.2 风场增量场分析

经 RDPS 系统预处理后的雷达资料同化结果能从风场的改变上得到明显体现。

图 8 为三维变分同化和四维变分同化风场增量场图。从 700 hPa 的风场增量场(图 8a,b)中可以看出,两组同化试验都能较好地体现了都江堰北部地区的辐合场,并可以清楚地看到南侧有风场的大值增量区,这表明同化试验中风场增加可能带来的西南水汽输送的增加,结合实况降水图(图 9)来看,增量场的辐合作用是导致最终两组同化试验雨区均偏北的主要原因。并且四维变分同化试验比三维变分同化试验有更明显的气旋性的辐合场,更有利于水汽的聚集。在 850 hPa 风场增量图(图 8c,d)上都江堰西侧地区,两组同化试验均存在增量场的辐合,能与高层形成配合。在南侧都存在辐散场,使得两组同化试验均在南侧没有模拟出降水。从风场的增量场来看,大多都能体现一个从西南向东北的气流趋势,表明同化雷达资料后对于气流的走向有明显的改善作用。

3.2 三维与四维变分同化试验结果对比分析

3.2.1 主降水阶段降水量对比分析

此次过程主降水阶段降水从 0812 UTC 持续到 0907 UTC。降水的实况、控制试验模拟量、三维试验模拟量和四维试验模拟量如图 9 所示。

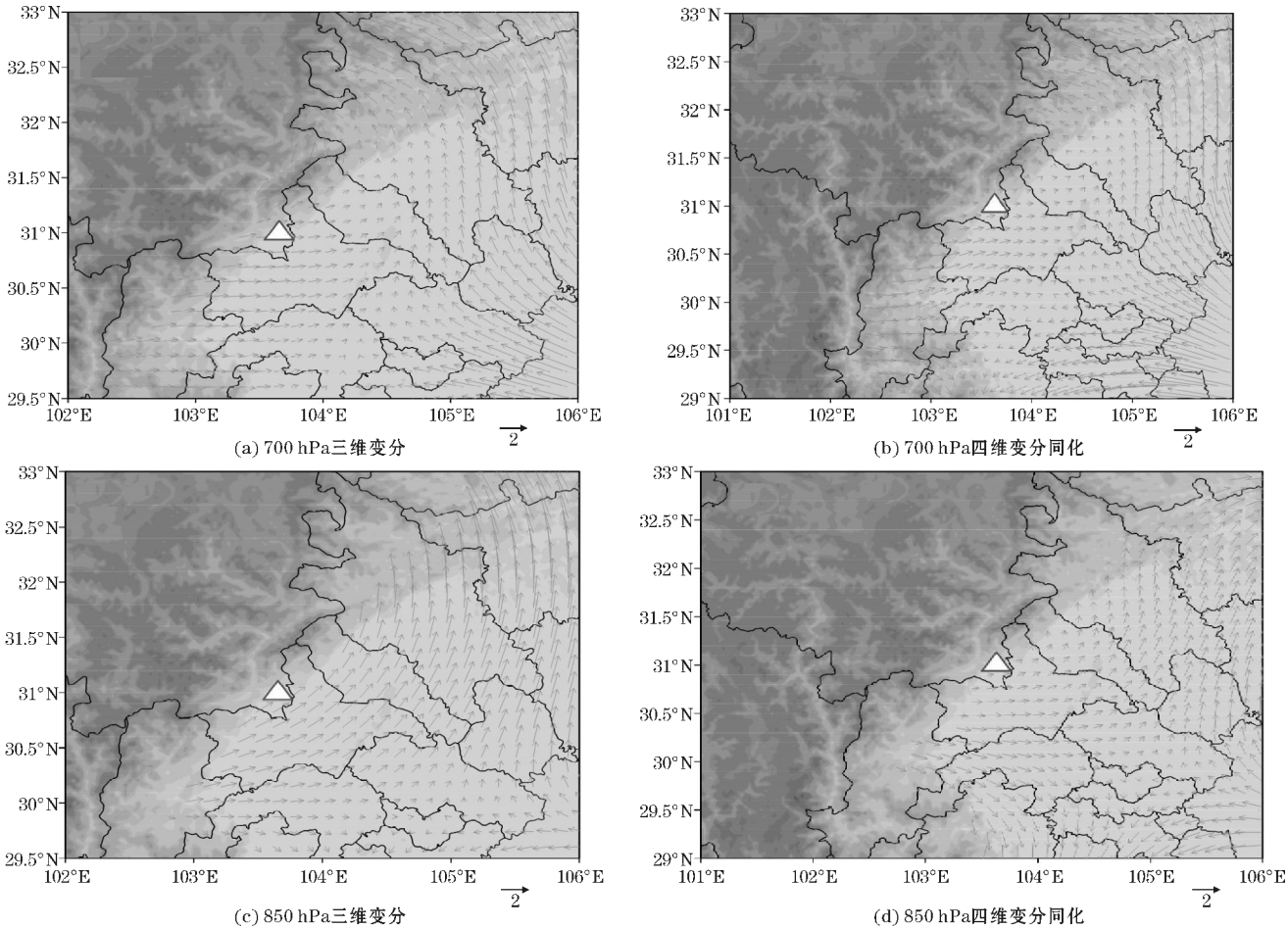


图8 三维变分和四维变分同化各层次风场增量图(△都江堰)(单位:m/s)

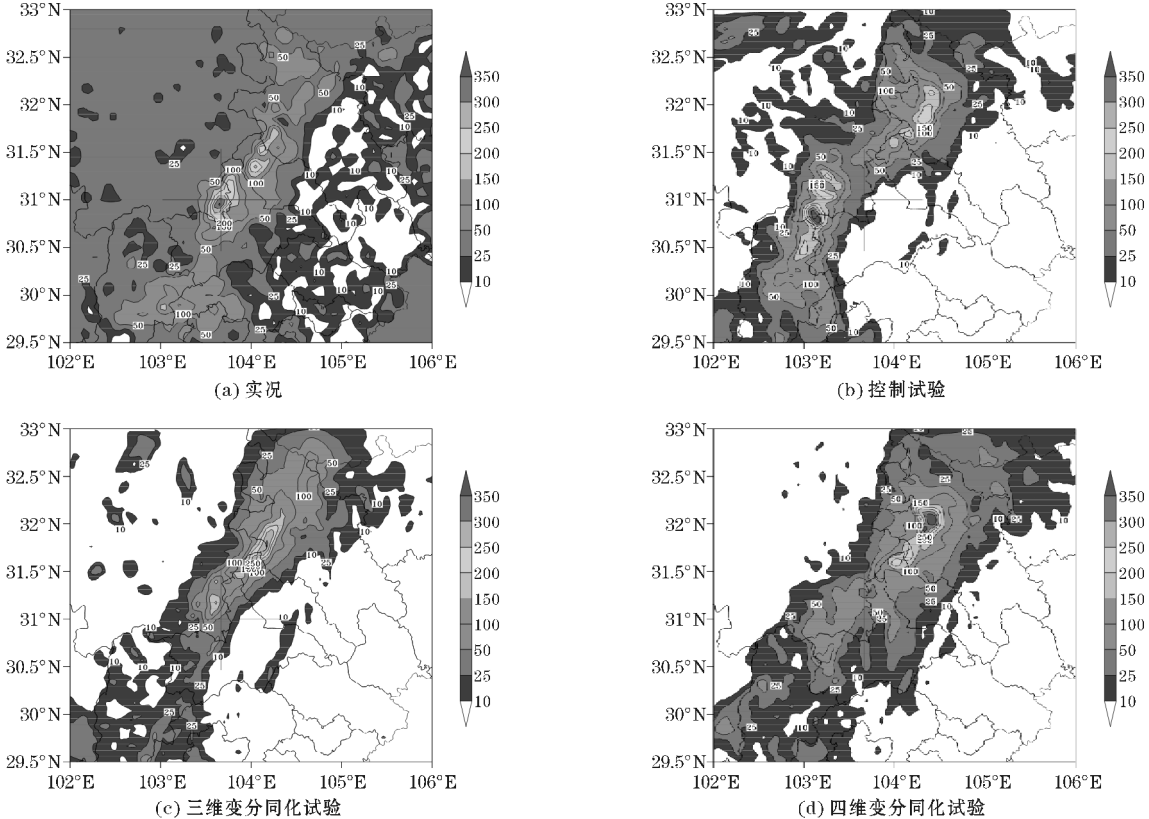


图9 2013年7月08日12时至09日07时(UTC)主降水阶段降水量(+表示实况降水中心)

从图 9(a)可以看出,实况降水在中心区域达到了 411 mm。在控制试验(图 9b)中,降雨主要范围有两个,即位于都江堰东北侧与西南侧分别存在一个强中心。三维试验(图 9c)中,降水落区体现东北西南走向,与实况一致。降水中心位置偏北,并且降水量级上较实况偏小。四维试验(图 9d)中,整体雨带也体现东北西南走向,与实况接近,降水中心与实况相比偏北,量级上与实况量级吻合。

在降水落区的模拟上,控制试验效果不理想,三维

试验与四维试验均有较好表现。四维试验中降水带的范围更广阔;在降水中心的模拟上,三组试验都未能很好体现强降水中心的准确位置。在降水量级上,控制试验和四维试验达到实况的量级,而三维试验偏小。3 个试验中都较好体现强降水带状特征,但对于 50 mm 以下的零星降水,都未能做出较好的模拟。

3.2.2 TS 评分与 BIAS 评分

TS 评分与 BIAS 评分能对试验模拟降水量效果进行定量分析。

表 4 控制试验,三维变分同化试验,四维变分同化试验主阶段降水 TS 评分

	小雨 0.1 ~ 9.9 mm	中雨 10 ~ 24.9 mm	大雨 25 ~ 49.9 mm	暴雨 50 ~ 99.9 mm	大暴雨 100 ~ 199.9 mm	特大暴雨 >=200 mm
控制试验	0.23	0.09	0.07	0.11	0.07	0.00
三维变分同化试验	0.25	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
四维变分同化试验	0.32	0.12	0.10	0.14	0.06	0.02

表 5 控制试验,三维变分同化试验,四维变分同化试验主阶段降水 BIAS 评分

	小雨 0.1 ~ 9.9 mm	中雨 10 ~ 24.9 mm	大雨 25 ~ 49.9 mm	暴雨 50 ~ 99.9 mm	大暴雨 100 ~ 199.9 mm	特大暴雨 >=200 mm
控制试验	1.48	1.07	1.10	0.54	0.41	0.00
三维变分同化试验	1.47	1.39	0.96	0.24	0.14	0.12
四维变分同化试验	1.08	1.64	1.30	0.43	0.17	0.05

由表 4 TS 评分结果可以看出,总体来讲,四维变分同化在各个量级的 TS 评分上相对较高。结合主降水阶段降水量图(图 9)分析,33 组试验对于降水强中心的模拟不很理想,在小雨预报的 TS 评分上 3 组的分值均较高,很好地对应了实况中东北西南走向的雨带,并且四维试验中,雨带范围最大,使得对小雨的 TS 评分最高。在小雨和中雨的预报上,三维和四维试验的 TS 评分高于控制试验。在大雨和暴雨的评分上,三维试验效果不理想,但在特大暴雨的评分上表现最好。结合降水实况看,三维试验在暴雨强中心的位置和面积上,比控制试验和四维试验的表现要好。但在暴雨和大暴雨的评分上,使用多时次的雷达资料进行同化的四维试验效果要比只同化一个时刻的三维试验效果好。在暴雨及以上级别的评分中,四维试验的效果较为理想。三维试验能改进小雨、中雨和特大暴雨的 TS 评分水平,但是没有提高大雨、暴雨和大暴雨的 TS 评分,而四维试验能有效地改善各级雨量的 TS 评分水平。

由 BIAS 评分表(表 5)可以看出模式对降水的预

报与实际观测值的偏差倾向。在小雨的预报上,四维试验空报的倾向最小,控制试验存在的空报倾向最大。但在中雨预报上,三维和四维试验均有较大的空报倾向。在大雨的预报上三维试验存在漏报。在暴雨到特大暴雨量级的 BIAS 评分中,三组试验均存在明显的漏报。在特大暴雨的评分中,三维试验的漏报最小。

4 反射率因子或径向速度单独同化初始场试验分析

为了研究在陡峭地形作用下,雷达反射率因子和径向速度在同化系统对初始场的不同影响,因此对三维和四维同化试验同时进行反射率因子或径向速度单独同化试验。

4.1 水汽通量散度增量场分析

图 10 为三维试验和四维试验中单独同化反射率因子或速度得到的水汽通量散度增量场图。

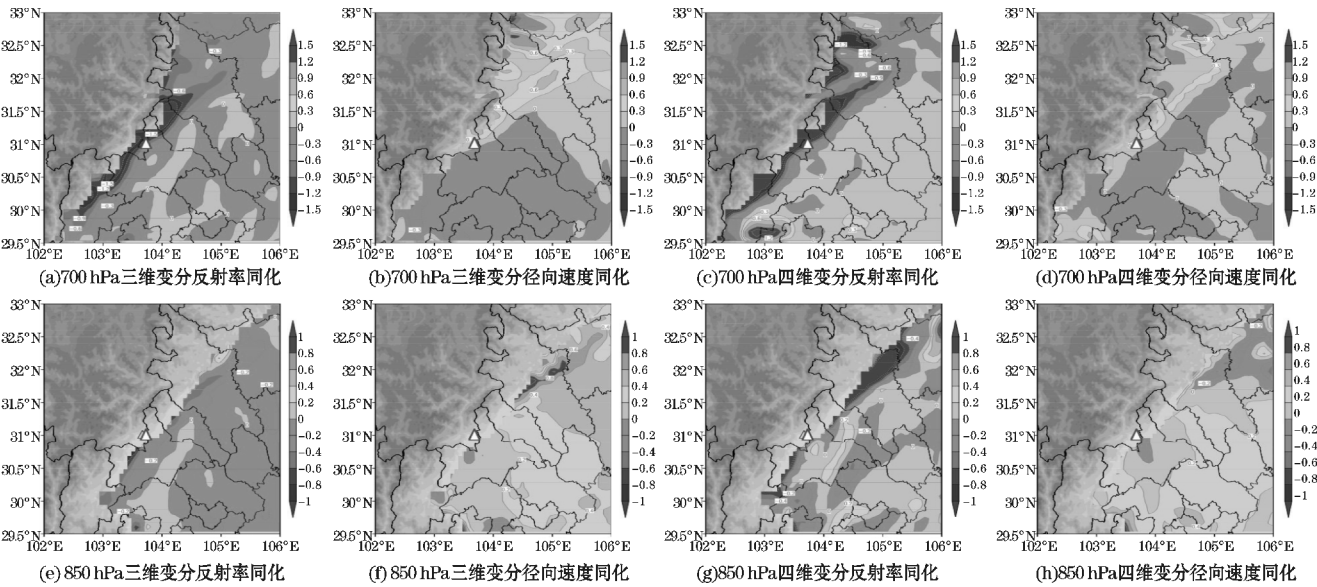


图 10 各试验 700 hPa 和 850 hPa 水汽通量散度场增量图(Δ 都江堰)(单位: $10^{-8} \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

下面分析 700 hPa 的水汽通量散度增量场(图 10a、b、c、d)。三维和四维单独同化雷达反射率因子的试验(图 10a、c),均能反映出沿山地的西南东北走向的水汽通量散度辐合增量,且辐合面积上四维试验较三维试验略大。两组单独同化径向风场的试验(图 10b、d),反映出沿山地的西南东北走向的水汽通量散度辐散增量,并有一条明显西南东北走向的舌状辐散增量带。分析 850 hPa 的水汽通量散度增量场(图 10e、f、g、h),两组单独同化雷达反射率因子的试验(图 10e、g),均能反映出西南东北走向的水汽通量散度辐合增量带,辐合增量主要集中在绵阳中部地区,四维同化反射

率试验与三维相比,在辐合增量的水汽强度与面积上都明显偏强偏大。对比 850 hPa 两组单独同化径向风场试验(图 10f、h),三维速度试验在绵阳东北部有水汽通量散度辐散增量,而四维速度试验在绵阳的东北部地区存在水汽通量散度辐合增量。两组单独同化反射率因子的试验较两组单独同化径向速度的试验对于西南东北走向的水汽辐合增量有较好的表现,表明强度因素在水汽通量散度场中还是有较大的影响。

4.2 风场增量场分析

图 11 为得到的风场增量图。

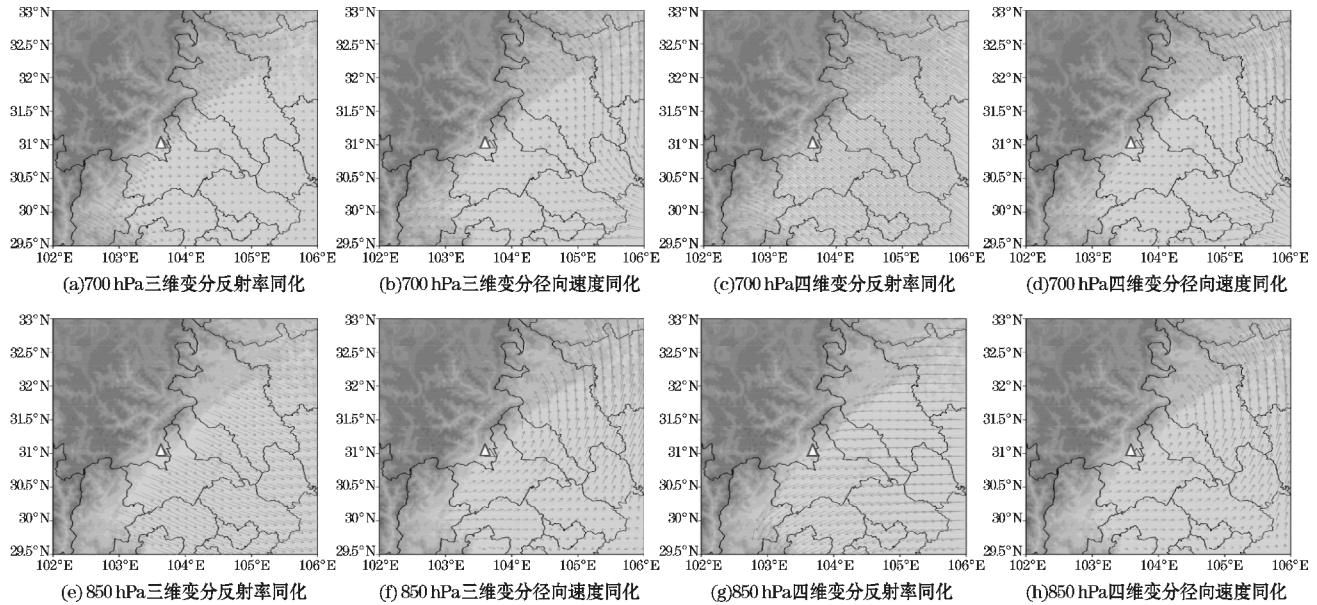


图 11 各试验 700 hPa 和 850 hPa 风场增量图(Δ 都江堰)(单位 m/s)

从 700 hPa 的风场增量场(图 11a、b、c、d)中可以看出,在单独同化反射率因子时三维同化试验(图

11a)在大部分地区只是西北风增量,没有出现辐合与辐散。四维同化试验(图 11b)在大部分地区只是东南

风的增量,在地形的作用下在都江堰地区存在气旋性的风场增量辐合。三维速度试验与四维速度试验能较好地体现都江堰北部地区的辐合并且沿着西南东北的地形走向存在气旋性的风场增量辐合。从850 hPa风场增量场(图11e、f、g、h)上,三维同化反射率试验的风场增量仍然是西北风。四维同化反射率试验在大部分区域是东风的增量,并且在地形的作用下使得在都江堰地区形成气旋性的风场增量的辐合。三维同化径向速度试验和四维同化径向速度试验整体呈现气旋性的风场增量辐合。

由此可知,两组同化单独雷达反射率因子的试验,只在某一个方向改变了风场。其中三维试验的风场增量是西北风,与实际风场方向存在差距。而四维试验将风场改变为东南风,并根据地形的走势,在都江堰地区产生了增量场的气旋性辐合。两组单独同化径向速度的试验所改变的风场与反射率、径向速度一起同化所产生的风场增量形式较为一致,在都江堰地区存在气旋性的风场辐合增量。

5 结论

对2013年7月9日-11日发生在都江堰地区的暴雨过程进行同化模拟试验,并分别单独同化反射率与径向速度,得出以下结论。

(1)针对在WRFDA同化系统中不能直接使用我国多普勒天气雷达资料的问题,由作者所在团队开发了可以处理陡峭地形下雷达数据的雷达资料预处理系统RDPS。该系统可以对中国多个型号多普勒雷达探测资料进行处理,并为WRFDA同化系统提供所需的标准化接入格式文件。并使用RDPS处理川西陡峭地形暴雨过程中的雷达资料,并同化在WRF模式中改善了模拟效果。

(2)对比分析控制试验、三维变分同化试验、四维变分同化试验与实况降水的结果,并运用TS评分与BIAS评分作为参考,在主降水阶段的降水量的模拟中,四维变分同化试验能有效地改善各个雨量预报水平,三维变分同化在特大暴雨量级的降水预报上有较好的表现。在川西都江堰地区陡峭地形的降水模拟试验中,同化试验能有效地调整初始场,并提高降水的预报效果。

(3)两组单独同化反射率的试验较两组单独同化径向速度的试验对于西南东北走向的水汽辐合增量有较好的表现,表明反射率因素在水汽通量散度场中还是有较大的影响;两组单独同化径向速度的试验均使风场在都江堰地区存在气旋性的风场辐合增量,表明

RDPS系统在处理陡峭地形的雷达资料时起到了较好的作用。

文中仅对发生在四川盆地西侧陡峭地形下的一次典型强降水过程进行了同化试验和分析研究。在接下来的工作中,可以选取更多陡峭地形暴雨过程,检验和修订RDPS系统,拓展数值预报同化工作,提高天气预报水平。

致谢:感谢江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ_0246)对本文的资助

参考文献:

- [1] Xiao Q, Kuo Y, Sun J, et al. Assimilation of Doppler Radar Observations with a Regional 3DVAR System: Impact of Doppler Velocities on Forecasts of a Heavy Rainfall Case[J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(6):768-788.
- [2] Li X. High-resolution numerical simulation of tropical cyclone intensity change with assimilation of satellite, radar, and in-situ data[D]. ProQuest Dissertations And Theses; Thesis-The University of Utah, 2008.
- [3] Wang H, J Sun, X Zhang, et al. 2013b: Radar data assimilation with WRF 4D-Var. Part I: System development and preliminary testing[J]. Mon. Wea. Rev., 2013, 141:2224-2244.
- [4] Wang H, J Sun, X Zhang, et al. Radar Data Assimilation with WRF 4D-Var Part II: Comparison with 3D-Var for a Squall Line over the U. S. Great Plains[J]. Mon. Wea. Rev., 2013, 141, 2245-2264.
- [5] 杨艳蓉, 王振, 张沛源. 利用多普勒天气雷达资料对一次暴雨过程的同化模拟[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 633-639.
- [6] 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[J]. 气象科学, 2011, 31(3): 318-324.
- [7] 杨银, 朱克云, 张杰, 等. 应用多普勒天气雷达资料对四川“7·3”暴雨的变分同化试验[J]. 成都信息工程学院学报, 2013, 28(1): 17-23.
- [8] Sugimoto S, N A Crook, J Sun, et al. An Examination of WRF 3DVAR Radar Data Assimilation on Its Capability in Retrieving Unobserved Variables and Forecasting Precipitation through Observing System Simulation Experiments[J]. Mon. Wea. Rev., 2008, 137, 4011-4029.

- [9] 潘教大,王桂臣,张红华,等.多普雷达资料对暴雨定量预报的同化对比试验[J].气象科学,2009,29(6):755-760.
- [10] 何文勇,麦雪湖,欧坚莲,等.多普勒雷达资料同化对暴雨过程模拟的影响[J].气象研究与应用,2013,34(3):61-64.
- [11] 李平,解以扬,李英华,等.C波段雷达反射率资料的同化与数值模拟[J].气象科技,2013,41(3):23-30.
- [12] 杨银.多普勒雷达资料在四川暴雨天气中的3DVAR同化研究[D].成都:成都信息工程学院,2013:14-15.
- [13] 屠妮妮,何光碧,张利红.WRF模式中不同积云对流参数化方案对比试验[J].高原山地气象研究,2011,31(2):18-25.
- [14] 屠妮妮,何光碧,张利红.不同边界层和陆面过程参数化方案对比分析[J].高原山地气象研究,2012,32(3):1-8.
- [15] 陈功,廖捷,孙凌.WRF微物理方案对四川一次强降水模拟的影响[J].高原山地气象研究,2012,32(3):43-50.
- [16] 李琴,崔晓鹏,曹洁.2014.四川地区一次暴雨过程的观测分析与数值模拟[J].大气科学,38(6):1095-1108.
- [17] Wang H, T Auligne, H Morrison. Impact of microphysics scheme complexity on the propagation of initial perturbations [J]. Mon. Wea. Rev., 2012,140, 2287-2296.

An Analytical Study on the Radar Assimilation of Extraordinary Rainstorm under Steep Terrain

ZHONG Lan-di^{1,2}, ZHU Ke-yun¹, WANG Bing-yun^{1,3}, ZHANG Jie¹, DAI Chang-ming¹

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Nanchang Observatory of Jiangxi Province, Nanchang 330038, China; 3. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to explore the effects of the three-dimensional assimilation and four-dimensional assimilation of radar data generated in the extraordinary rainstorm simulation over the steep terrain in western Sichuan, this selects the heavy rain process from July 9th to July 11th in 2013 of Dujiangyan region uses WRF mesoscale model and its assimilation module WRFDA assimilative radar data to conduct the assimilative simulation test of the process. The results show that in the precipitation simulating test of complex terrain in western Sichuan, the precipitation forecast standard improved in both three and fourdimensional assimilation. Four-dimensional assimilation is relatively good on the overall precipitation forecast. Analyling the increment of water vapor flux divergence in lower, the tests which assimilate radar reflectivity present convergence strengthening effect. The tests which assimilate radial velocity present divergence strengthening effect. Analyling the increment of wind in lower, two groups of assimilation radar reflectivity test present obvious changes in the steep terrain. And four-dimensional assimilation with radar reflectivity changes the wind field which is affected by the Dujiangyan area and form a cyclonic convergence. Two groups of assimilation radial velocity test show a cyclonic wind field convergence increment in Dujiangyan area. Us RDPS processing radar data of the steep terrain and assimilating in the WRF model can good results.

Keywords: meteorology; numerical simulation; three-dimensional assimilation; four-dimensional assimilation; radar reflectivity; radial velocity