

复杂地形条件下WRF模式的适用性： 以滇西地区降水模拟为例

杨澄 付志嘉

(大理国家气候观象台, 大理市气象局, 大理 671003)

摘要: 使用WRF模式和GSI同化系统对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行控制模拟和同化模拟试验, 探讨WRF模式在复杂地形条件下的适用性, 得到以下结论: 控制试验和同化试验都能模拟出此次降水过程中云南雨带的位置, 但强度偏大。同化试验中雨带的降水强度有所减弱, 但位置略有南移。控制试验和同化试验的强降水与TRMM相比, 表现为开始时间晚, 持续时间长。控制试验的强降水落区与TRMM相似, 同化试验的强降水落区比TRMM的强降水落区偏西。同化探空数据能够显著减小模式降水模拟中各站点的24 h累积降水量及其RMSD, 改进此次降水模拟中站点累积降水量的误差。控制试验对于此次过程的小时降水量的模拟值普遍偏大, 同化试验模拟的各地的站点小时降水量相应减小, 并且对于单峰型的日降水类型具有一定的模拟能力, 峰值与实况较为接近。但是, 对于多峰值降水区, 以及无降水或者弱降水地区, 控制试验和同化试验均有较大误差。WRF模式对于滇西复杂地形区的降水具有一定模拟能力, 耦合GSI同化系统后, 能够对模式输入场各变量分布进行调整, 从而影响模式模拟性能, 但总体模拟效果还有待进一步提高。

关键词: WRF模式, GSI, 探空资料, TRMM资料, 复杂地形, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.01.004

Applicability of the WRF Model in Complex Topographic Conditions: A Case Study on Precipitation Simulation in the Western Yunnan Region

Yang Cheng, Fu Zhijia

(Dali National Climate Observatory, Dali Meteorological Bureau, Dali 671003)

Abstract: This study investigated the applicability of the WRF model in complex topographic conditions by modeling a weather incident that occurred in the west Yunnan region on July 13, 2014, using the WRF model and GSI assimilation system. The results showed that the location of the precipitation belt could be predicted by both the control model and assimilation model, although the intensity predicted by the control model was a little larger. The intensity of precipitation predicted by the assimilation model was somewhat weaker and the location of precipitation moved southward. In comparison to the results from TRMM, the precipitation predicted by the control model and assimilation model started late and had a longer duration. The precipitation region predicted by the control model was similar to the results from TRMM, while that predicted by the assimilation model was a little westward. In combining with the assimilated sounding data, the model significantly decreased the 24h-accumulated rainfall and RMSD of each site. The 1.0-h rainfall at each site simulated by the control model was larger, while the 1.0-h rainfall of each site simulated by the assimilation model was relatively small. This suggests that the assimilation model had the ability to predict single-peak precipitation. The simulation results for both the control and assimilation models for the area with multi-peak rain, and no or weak rain, had large errors. The WRF model has the ability to simulate precipitation incidents in complex terrain in the West Yunnan region. Coupling the model with GSI, it could adjust the distribution of each variable of the mode input field to influence the model simulation performance, however, the overall simulation results need to be further improved.

Keywords: WRF model, GSI, sounding data, TRMM, complex terrain, precipitation

0 引言

WRF模式作为目前较为成熟的中尺度数值预报模式, 一直有很多的研究者在对其进行开发利用,

从模式本地化参数方案的选取, 到下垫面和物理过程的改进等方面, 不断地优化模式, 使其更加适合研究者所关注的区域^[1-7]。而数据同化作为模式改进的重要手段, 同化系统也在不断地发展, 较为常用的是变分法和卡尔曼滤波, 现在较为流行的是三维变分(3D-Var)和四维变分(4D-Var), 集合卡尔

收稿日期: 2017年4月5日; 修回日期: 2017年10月9日

第一作者: 杨澄(1985—), Email: yangcheng0105@163.com

曼滤波 (EnKF) 也是近几年发展较快的数据同化方法^[8-10]。GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) 系统是统一标准的全球和区域数据同化系统, 它首先是由美国国家环境预报中心 (NCEP) 的环境预报模式中心 (EMC) 作为业务系统SSI (Spectral Statistical Interpolation) 分析系统的二代产品所开发, 之后美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 业务部门加入开发以后, 使之成为NOAA全球预报系统 (GFS) 中北美中尺度模式中业务用数据同化系统, 随着美国空军气象局 (AFWA) 和美国国家航空航天局 (NASA) 等多个部门的应用, GSI得到了进一步的发展。目前, GSI已包含了二维变分 (2D-Var)、三维变分 (3D-Var)、四维变分 (4D-Var)、混合变分 (hybrid ensemble variational) 和四维集合变分 (4DEnVar) 同化方法, 可以和多种数值模式进行耦合^[11]。国外已经使用GSI做了很多研究工作^[12], 国内较多使用的是WRF-DA同化系统^[13-16], GSI引入国内的时间相对较晚, 基本处于研究应用阶段^[17-18], 尚没有投入业务应用, 但其作为美国国家气象中心的业务系统, 其算法和性能的发展都具有较好的保证。

云南省地处青藏高原东南缘, 自滇西北向滇东南海拔逐渐降低, 滇西处于青藏高原南部缓冲带, 遍布高山峡谷, 地形极其复杂, 孟加拉湾水汽在向内陆输送过程中, 经常受滇西地形的影响而产生局地天气系统, 由于尺度小、观测站点分布稀疏, 常规天气分析手段较难捕获局地系统的发展过程, 因此本文结合云南西部地区一次降水过程, 引入GSI同化系统, 并将其耦合到WRF模式当中, 利用探空数据进行同化试验, 一方面研究WRF模式在滇西复杂地形条件下的适用性, 另一方面也为将来进一步应用GSI同化系统和深入了解滇西局地环流特征做铺垫。

1 资料与方法

1.1 资料选取

天气背景分析以ECMWF Interim的再分析资料为依据, 分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 模式初始场采用NCEP的FNL再分析资料, 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 观测数据为大理白族自治州 (简称“大理州”) 12个国家级气象站地面常规观测数据, 第三次青藏高原大气科学试验获取的青藏高原及其周边地区19个L-BAND探空数据, 以及TRMM卫星 ($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$) 的3 h累积降水数据。

1.2 方法介绍

本文采用WRF模式对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行模拟试验, 模式控制试验采用3层嵌套, 水平分辨率分别为25 km、5 km和1 km, 垂直方向90层, 模拟时间设计为2014年7月11日08

时—13日20时 (北京时, 下同), 积分60 h, 将7月12日14时之前的时间剔除为spin up时间, 分析时段选取时间为7月12日14时—13日14时, 模式中的主要物理参数见表1。同化试验中将19个L-BAND探空站 (站点分布如图1所示) 的探空数据利用GSI同化系统进行同化, 其他参数设置与控制试验相同, 将同化试验分别和观测数据与控制试验进行对比。

表1 WRF模式主要参数设置
Table 1 Configuration of the WRF model

参数	设置		
	d01	d02	d03
水平分辨率	25 km	5 km	1 km
垂直层数	90	90	90
微物理方案	WSM 6-class graupel scheme		
长波辐射方案	RRTM		
短波辐射方案	Dudhia		
陆面模式	Noah Land Surface Model		
湖泊模式	Off		
积云对流方案	Grell-3	Grell-3	Off
边界层方案	YSU scheme		

2 结果

2.1 天气背景及实况

2014年7月12日08时, 云南西北地区上空500 hPa流场 (图2) 为气旋性, 其槽线一直延伸到滇中地区, 滇西南500 hPa流场表现为反气旋性旋转, 反气旋的前部偏西气流与槽线附近的滇中偏南气流汇合, 在滇中地区与东南暖湿气流交汇, 引起高空气流辐合, 为降水提供水汽和动力条件。700 hPa的滇西南有明显的气流辐合, 辐合带还出现了低空急流, 使得辐合区进一步加强, 滇中与滇东地区的偏南气流带来了充沛的水汽。此次过程造成云南省西部地区普降大雨, 局部暴雨。7月12日14时—13日14时大理州境内6个站点累积降水量达到了大雨量级, 3个站点达到了暴雨量级, 其中最大累积降水量为大理站的64.2 mm。

2.2 GSI 同化系统评估

将探空数据分别与各层模式输入场进行同化, 由于各嵌套区域大小逐级递减, 因此, 三层区域中包含的站点数分别为19, 8和4个, 探空数据进入GSI同化系统后, 代价函数和梯度函数均收敛, 也即探空数据正确进入了同化系统当中。同化探空数据以后, 对模式的输入场进行了相应的调整, 图3表明, d01的地面温度场同化探空数据以后在四川盆地上为负增量, 起到降温作用, 高原地区同样为降温作用, 但负增量较小, 由于滇南地区距离探空站较远, 探空数据对该地区地面温度的影响作用不明显。U风分量在四川盆地也为负增量, 在盆地与高原交汇区则为明显的正增量, 其他地区增量较小, 可见同化探空数据对地面

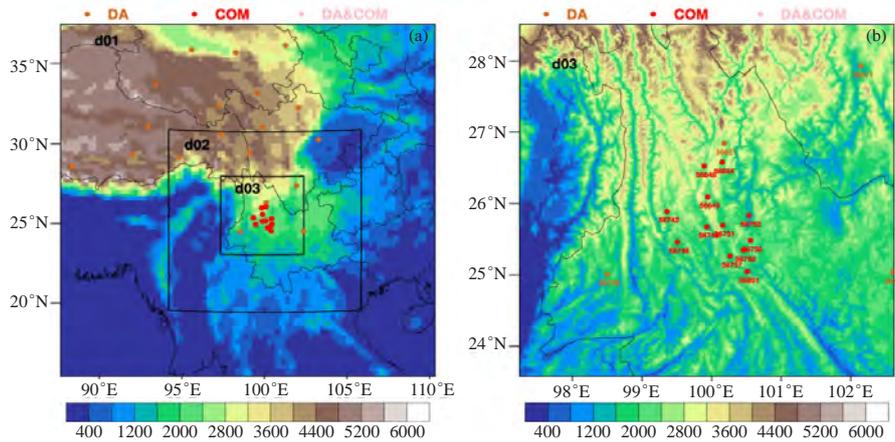


图1 模式区域设置 (a) 及最内层嵌套区域 (b) 地形高程和所用站点分布 (单位: m)

DA: 同化站点; COM: 对比站点; DA&COM: 同化与对比站点

Fig. 1 The domains setting (a) and in nest domain (b) of model with elevation and stations (DA represents data assimilation, COM represents comparison, DA&COM represents both DA and COM)

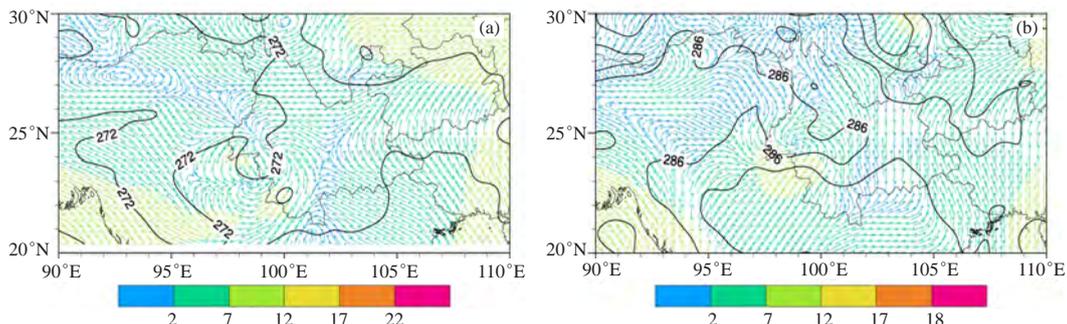


图2 2014年7月12日08时ECMWF Interim ($0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$) 500 hPa (a) 和700 hPa (b) 流场 (填色, 单位: m/s) 和温度场 (等值线, 单位: K) 分布

Fig. 2 The stream (fill color) and temperature (contour) field of ECMWF Interim on 500 hPa (a) and 700 hPa (b) at 08 BT July 12, 2014

东西风的调整主要在四川盆地附近较为显著。V风分量与U风分量的增量分布恰好相反, 四川盆地为正增量, 云贵高原和青藏高原东部为负增量。地面比湿增量表现为青藏高原东部为正增量, 其他地区以负增量为主, 从比湿的最大增量层上来看 (图略), 青藏高原东部的正增量相对较小, 最大正增量在四川盆地东北部, 负增量集中在青藏高原腹地和东北地区, 其他大部分地区增量较弱。在垂直方向上各变量也有不同的增量强度, 也即在同一个地区的垂直方向上各变量并没有表现为向上或向下单调地增减, 而是在不同层次正增量和负增量均会出现, 这也是探空资料垂直方向非单调变化的体现。

从同化探空数据后的模式输入场中的各个变量增量来看, 探空数据的同化能够实际改变模式输入场的变量分布, 起到调整模式输入场的作用。

2.3 试验结果与卫星数据的对比

2.3.1 降水落区对比

图4中的TRMM卫星观测数据表明此次过程降水

呈带状分布, 我国境内在云南地区有一条明显的雨带, 自滇西北向滇东南分布, 雨带两端的滇西北和滇东南地区的累积降水量显著高于雨带中部的滇中地区, 该雨带的24 h最大累积降水量为25~50 mm。控制试验模拟了云南雨带的位置, 但是强度明显要比TRMM的降水强度大, 在云南东北部和川西、贵州和广西出现了明显的虚假降水。同化试验同样模拟出了云南雨带, 位置略有南移, 雨带强度得到削弱, 但是虚假降水范围进一步扩大, 虚假降水量也较大。

2.3.2 降水强度对比

从TRMM观测的3 h累积降水量来看 (图5), 云南的此次降水于2014年7月12日14时开始加强, 之后的17—23时的强降水分布与云南雨带对应, 表明此次云南的强降水持续时间约为6 h, 之后降水强度减弱, 系统逐渐消散。

控制试验 (图略) 中的强降水落区与TRMM的一致性较好, 降水在12日20时后开始显著增强, 至13日08时以后降水逐渐减弱, 强降水开始时间有所滞后,

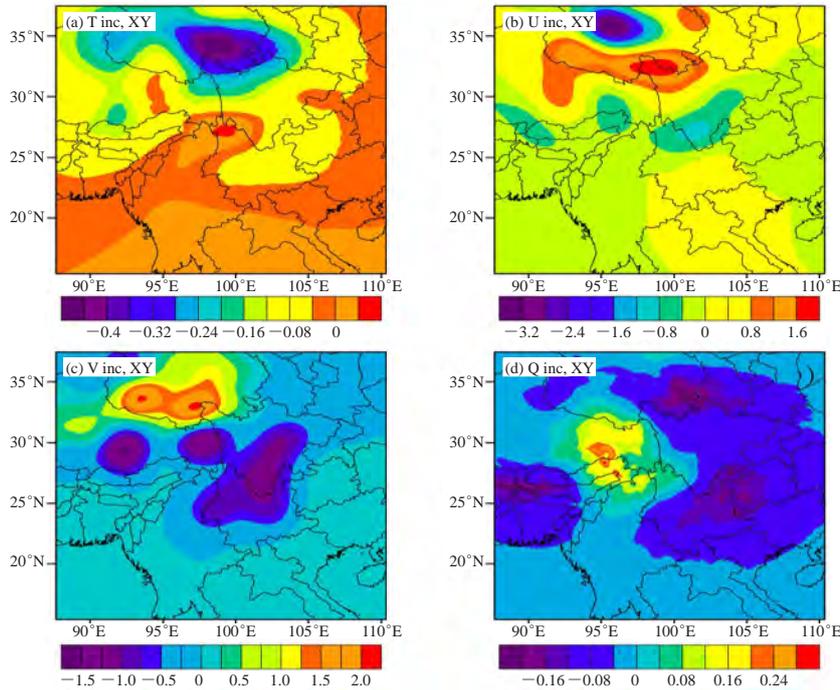


图3 同化探空数据后模式初始时刻d01输入场近地层的温度 (a, 单位: K)、U风分量 (b, 单位: m/s)、V风分量 (c, 单位: m/s) 和比湿 (d, 单位: g/kg) 增量
Fig. 3 The temperature (a), U wind component (b), V wind component (c) and special humidity in the WRF domain that assimilated sounding data at the initial time

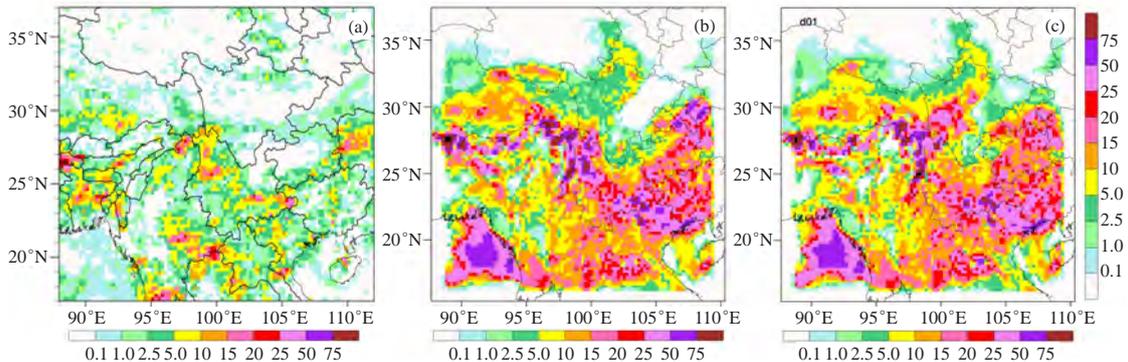


图4 2014年7月12日14时—13日14时TRMM卫星观测的累积降水量 (a) 与控制试验 (b) 和同化试验 (c) 的d01累积降水量分布 (单位: mm, 下同)
Fig. 4 Accumulation of precipitation from the TRMM (a), the control model (b) and the assimilation model (c) in domain one on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

持续时间达到了12 h。同化试验 (图6) 的强降水时间与控制试验相似, 但强降水落区有一定偏差, 表现为强降水落区主要集中在滇西北地区, 并且从模拟的降水量级来看, 同化试验和控制试验模拟的降水强度均高于TRMM的观测结果。从降水时间上来看, 控制试验和同化试验的强降水开始时间晚, 持续时间长。

2.4 试验结果与台站观测数据的对比

挑选控制试验和同化试验的模拟值中距离大理州12个地面气象观测站最近的格点降水量与实测降水量进行比较。从24 h累积降水量来看 (图7), 12日14

时—13日14时, 大理12个观测站 (obs) 除了56851站外均观测到了降水, 其中6个站达到了大雨, 其他站点为中雨以下。从模拟结果来看, 控制试验各站点降水量级基本偏大, 差别最大的站点为56746, 其d02的模拟值在观测值的2倍以上。从控制试验的平均均方根误差 (RMSD) 来看, d03的模拟误差是最大的, d01的平均RMSD最小。各站点的RMSD分布显示, 56649、56745和56752站的3个域的RMSD较为接近, 但是56752站各域的RMSD均是最小的, 56745站各域的RMSD均是最大的, 推测与地形高程有直接关系,

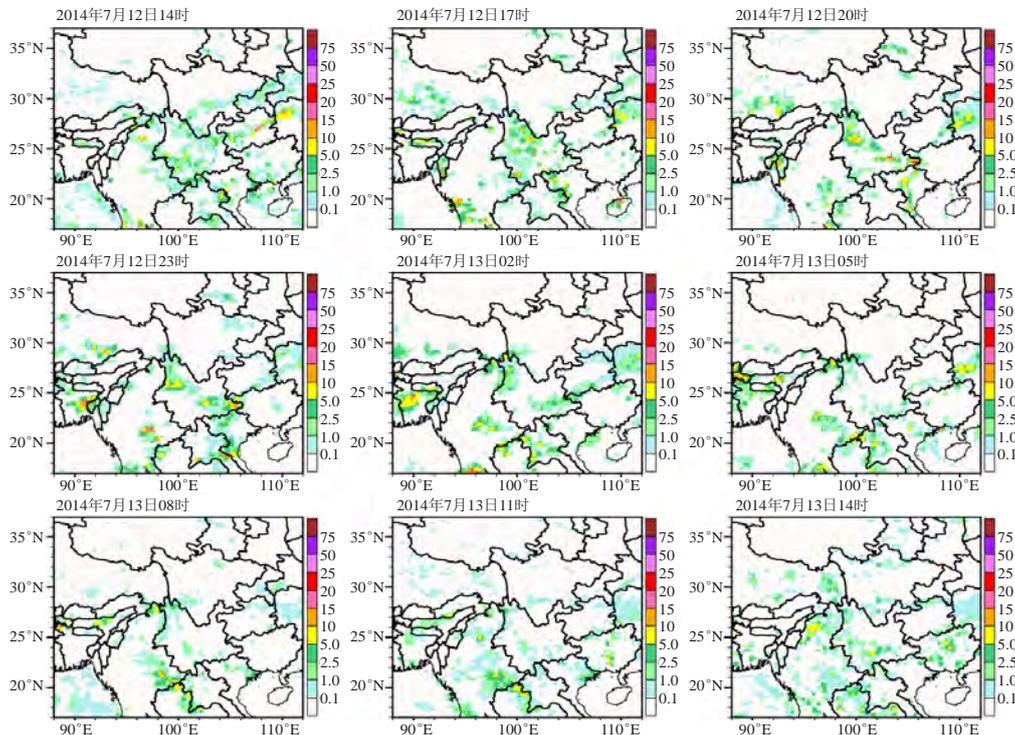


图5 2014年7月12日14时—13日14时TRMM卫星观测的3 h累积降水量

Fig. 5 The accumulated 3 hour precipitation from the TRMM on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

56745站位于苍山西面，上游为复杂的山地，下游为高大的苍山，地形复杂，对近地层环流的扰动影响非常大，56752站则处于低海拔地区，与周围的地形高度差也较小，地形对局地环流的影响相对较弱。其他站点的3个域的RMSD均有一定差异，这些站点位置均在高海拔地区，站点周围均存在海拔高差较大的山体，随着模式分辨率的提高，对这些山体的识别程度不同，因此也会造成均方根误差的差异性。同化试验中，各域模拟的累积降水量均得到了显著减少，特别是实况降水为小到中雨的站点，同化试验的模拟累积降水量与实况已非常接近，但是降水量级为大雨以上的站点，同化试验的模拟值比实况值要小，分析这几个站点发现其地理位置均处于高海拔地区，并且四周山谷和盆地交错分布且水平距离较小，海拔高差较大，使得模式模拟更加困难。与控制试验相比较，同化试验的平均RMSD显著减小，各站点的RMSD也相应的减小，并且d01和d02的RMSD普遍比d03的小，这可能与同化的站点数有关系。总之，同化探空数据能够显著改进此次降水模拟中累积降水量的量级，使得累积降水量更接近实况。

从控制试验的小时降水量来看（图略），模拟的各小时降水量基本比实况降水量大，而且在无降水时段内，模拟产生了较强降水，从而导致了累积降水量偏大。同化试验模拟的各域的站点小时降水量得到

了减小（图8），并且对于日降水特征为单峰值的降水类型而言，同化试验的d01也较好地模拟出了降水峰值，虽然峰值出现时间有所推迟，但模拟的峰值降水除了56742和56745站与实况有较大出入外，其他站点的峰值降水与实况已较为相近，d02和d03也没有模拟出单峰型降水的峰值，这个原因可能是由于d01中使用了更多的探空站数据，使得d01能够更加接近真实降水情况。对于多峰值降水而言，控制试验和同化试验均不理想，在无降水（56851站）或者弱降水（56757站）地区，控制试验和同化试验均有降水产生，可能与模式分辨率有较大关系，这需要在下一步工作中进一步研究。另外，实况降水量分布的巨大差异，也表明了此次降水过程局地环流对降水分布的影响是较为明显的，而在这样的小尺度复杂地形下，模式模拟性能还有待进一步提高。总的而言，同化试验的结果表明探空数据在模式中通过有效降低小时降水量，能够影响滇西复杂地形区降水过程中的小时降水量，使得模式对降水过程的模拟性能得到提高。

3 结论与讨论

本文使用WRF模式对2014年7月13日云南省西部地区的一次天气过程进行控制模拟试验，同时使用GSI同化系统，利用青藏高原及其周边地区19个L-BAND探空站的探空数据进行同化试验，将同化试验与控制试验分别和TRMM与地面台站观测数据进行对比，探

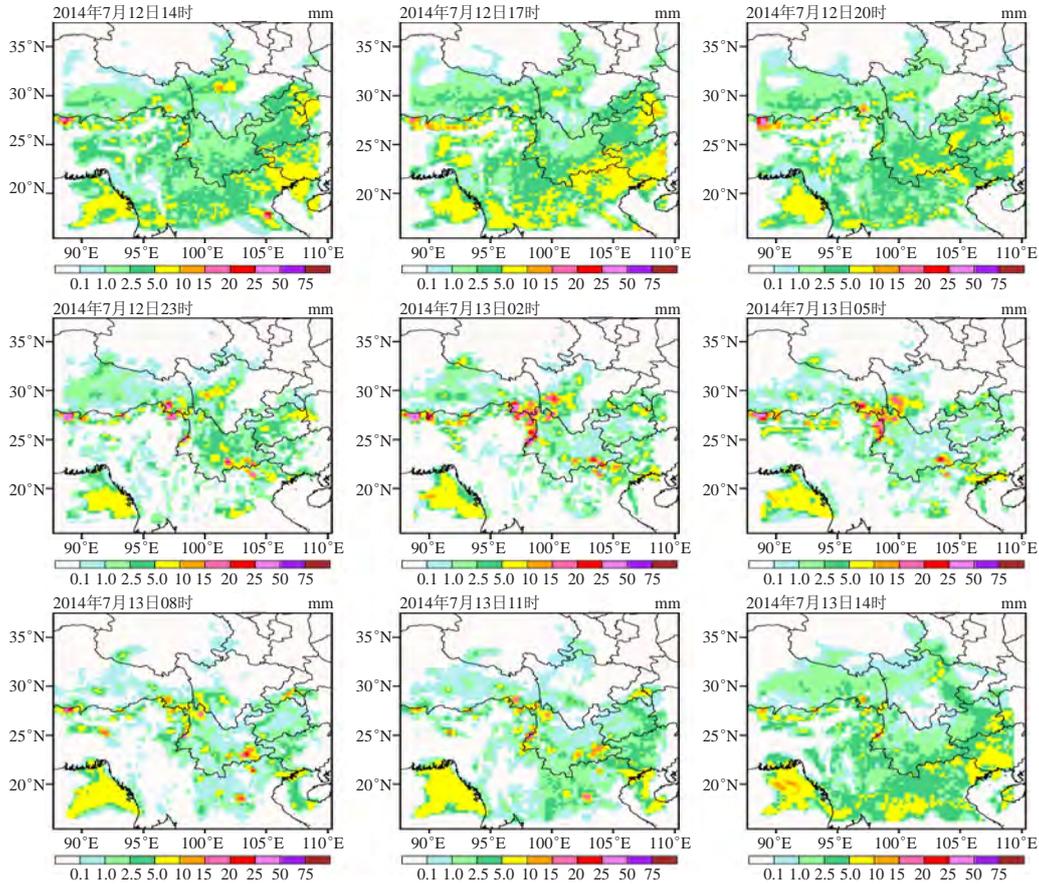


图6 2014年7月12日14时—13日14时同化试验d01的3 h累积降水量

Fig. 6 The accumulated 3 hour precipitation from assimilation modeling in domain one on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

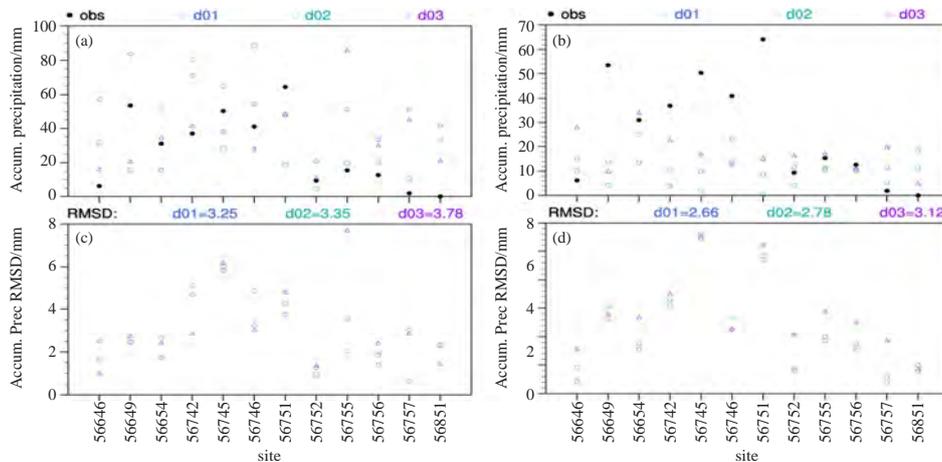


图7 2014年7月12日14时—13日14时控制试验 (a, b) 和同化试验 (c, d) 的各区域模拟的24 h格点累积降水量与对应站点累积降水量 (a, c) 及其均方根误差 (b, d)

Fig. 7 The accumulated precipitation (a, c) and root mean square deviation (b, d) from the control model (a, b) and the assimilation model (c, d) on July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

讨WRF模式在复杂地形条件下的适用性，以及GSI同化系统在该地区的应用效果，得到以下结论：

1) 控制试验和同化试验都能模拟出此次降水过程中云南雨带的位置，但强度偏大。同化试验中雨带的降

水强度得到一定的订正而有所减弱，但位置略有南移，产生虚假降水的范围也进一步扩大。控制试验和同化试验的强降水开始时间比TRMM的观测晚6 h，且持续时间比TRMM长，控制试验的强降水落区与TRMM相似，

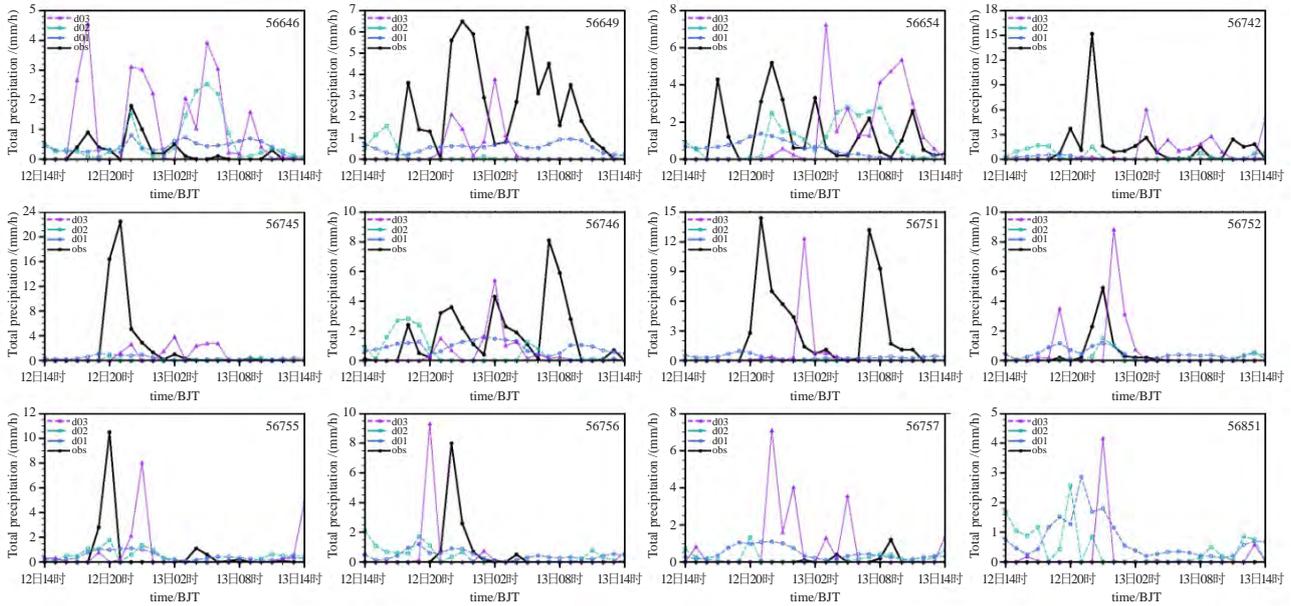


图8 2014年7月12日14时—13日14时同化试验各区域模拟的格点小时降水量与对应站点小时降水量
Fig. 8 One hour precipitation from the assimilation model in July 12, 2014, 14 hours and then 24 hours later

同化试验的强降水落区往滇西北地区偏移。

2) 控制试验对于此次过程的小时降水量的模拟普遍偏大, 在实况无降水时段内, 也模拟产生了较强降水。同化试验模拟的各域的站点小时降水量相应减小, 并且对于单峰型的日降水类型具有一定的模拟能力, 峰值与实况较为接近。但是, 对于多峰值降水区, 以及无降水或者弱降水地区, 控制试验和同化试验均有较大误差。从24 h的站点累积降水量来看, 同化探空数据能够减小模式降水模拟数据中各站点的累积降水量及其RMSD, 对改善此次降水模拟中对台站累积降水量的误差具有一定作用。

3) 总的来看, WRF模式对复杂地形条件下的局地降水具有一定的模拟能力, 同时通过使用GSI同化系统, 能够将探空数据有效同化到模式输入场中, 并对模式输入场各变量分布进行调整, 从而影响模式模拟结果。

由于本文中所用探空站点基本处于青藏高原腹地, 滇西地区仅有4个探空站进入了同化试验中。另外, 本文的模拟结果始终有降水量系统性误差, 这可能是由于物理参数的设置、地表粗糙度、分辨率以及模式算法等多方面的原因所致。此次模拟仅为一个个例试验, 虽然WRF模式在复杂地形条件下具有一定的模拟能力, 但不同的参数化方案、模式分辨率与下垫面的敏感性、同化站点的多寡与同化的数据源(探空、卫星、地面观测等)等问题均会对模拟结果产生影响, 下一步工作中, 我们将通过加入更多观测站点数据, 不断修改模式配置, 使得模式在复杂地形条件下对滇西地区的降水模拟能力得到进一步提高。

参考文献

- [1] Collier E, Immerzeel W W. High-resolution modeling of atmospheric dynamics in the Nepalese Himalaya. *Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 9882-9896.
- [2] Wang D, Miao J F, Tan Z M. Impacts of topography and land cover change on thunderstorm over the Huangshan (Yellow Mountain) area of China. *Nat Hazards*, 2013, 67: 675-699.
- [3] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展. *地球科学进展*, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [4] 许建伟, 高艳红. WRF模式对夏季黑河流域气温和降水的模拟及检验. *高原气象*, 2014, 33(4): 937-946.
- [5] 段旭, 王曼, 陈新梅, 等. 中尺度WRF数值模式系统本地化业务试验. *气象*, 2011, 37(1): 39-47.
- [6] 何建军, 余晔, 刘娜, 等. 复杂地形区陆面资料对WRF模式模拟性能的影响. *大气科学*, 2014, 38(3): 484-498.
- [7] 许鲁君, 刘辉志, 曹杰. 大理苍山一洱海局地环流的数值模拟. *大气科学*, 2014, 38(6): 1198-1210.
- [8] 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 集合-变分数据同化方法的发展与应用. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 648-656.
- [9] 刘成思, 薛纪善. 关于集合Kalman滤波的理论和方法的发展. *热带气象学报*, 2005, 21(6): 628-633.
- [10] 马旭林, 陆续, 于月明, 等. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展. *热带气象学报*, 2014, 30(6): 1188-1195.
- [11] Developmental Testbed Center. Gridpoint statistical interpolation (GSI) user's guide for version 3.4. 2015, <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/index.php>.
- [12] Zhu K F, Pan Y J, Xue M, et al. A regional GSI-based ensemble Kalman filter data assimilation system for the rapid refresh configuration: testing at reduced resolution. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 4118-4139.
- [13] 范水勇, 郭永润, 陈敏, 等. 高分辨率WRF三维变分同化在北京地区降水预报中的应用. *高原气象*, 2008, 27(6): 1181-1188.
- [14] 程磊, 沈桐立, 徐海明, 等. 地面加密自动站资料同化和数值模拟. *气象科学*, 2011, 31(1): 24-32.
- [15] 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): 881-893.
- [16] 张飞民, 王澄海. 利用WRF-3DVAR同化常规观测资料对近地层风速预报的改进试验. *高原气象*, 2014, 33(3): 675-685.
- [17] 郝民, 郭英华, 马再忠. 一次降水天气过程的GPS掩星资料在GSI同化系统中的应用. *高原气象*, 2010, 29(1): 164-174.
- [18] 段华, 潘晓滨, 臧增亮, 等. 基于GSI同化系统的卫星辐射率资料的同化试验. *干旱气象*, 2015, 33(6): 895-901.