

盛春岩, 荣艳敏, 刘诗军, 等. 一次局地大暴雨的地面观测资料同化预报试验研究[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 71-80.
Sheng Chunyan, Rong Yanmin, Liu Shijun, et al. Numerical study of surface data assimilation to a local torrential rain forecast[J].
Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 71-80. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.008. (in Chinese)

一次局地大暴雨的地面观测资料同化预报试验研究

盛春岩, 荣艳敏, 刘诗军, 范苏丹, 肖明静

(山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031)

摘要: 基于 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式及其 3DVAR (3-Dimensional Variational) 资料同化系统, 采用 36 km、12 km、4 km 三层嵌套网格进行逐 3 h 资料同化和快速更新循环预报, 对 2011 年 5 月 8 日鲁中一次局地大暴雨过程进行了资料同化敏感性试验。试验结果表明, 地面观测资料同化和快速更新循环对本次降水的预报起到了关键性作用。在快速更新循环预报时不同化地面观测资料, 或同化全部观测资料进行冷启动预报, 模式均不能预报出山东的降水。同化地面观测资料后, 显著改进了模式降水落区预报。地面观测资料同化可以影响到 700 hPa 高度以上温湿风要素的变化, 从而改变了大气初始场的温湿结构, 导致模式预报的 700 hPa 附近高空大气湿度和热力不稳定增强, 700 hPa 以下低层风场更强, 850 hPa 鲁中以南风速较无观测资料同化的增强 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 低层风场的动力作用触发高空的不稳定大气, 降水出现在山东。

关键词: WRF 模式; 快速更新循环; 大暴雨; 地面资料同化; 敏感性试验

中图分类号: P435 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0071-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.008

Numerical study of surface data assimilation to a local torrential rain forecast

SHENG Chunyan, RONG Yanmin, LIU Shijun, FAN Sudan, XIAO Mingjing

(Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China)

Abstract Using the WRF (Weather Research and Forecasting) model and its 3DVAR (3-Dimensional Variational) data assimilation system, data assimilation sensitivity experiments on a local torrential rain event in middle Shandong on 8 May 2011 are carried out adopting data assimilation and rapid update cycle of 36 km, 12 km and 4 km nested grid at three-hour intervals. Results show that both surface data assimilation and rapid update cycle are playing key roles in the precipitation forecast. During rapid update cycle, the model cannot forecast the rainfall in Shandong if assimilating no surface observational data or assimilating all surface observational data with cold start. The rainfall area forecast is significantly improved due to surface data assimilation, which can influence the atmospheric elements such as temperature, pressure, humidity, and wind over 700 hPa. Therefore, the temperature and humidity structure of initial atmospheric conditions is altered, the upper humidity and thermal instability are enhanced at around 700 hPa, the lower wind field becomes stronger under 700 hPa, the wind speed is 2

收稿日期: 2018-04-27; 修订日期: 2018-06-05

基金项目: “十三五”山东现代农业气象服务保障工程项目; 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201106006); 山东省超级计算科技专项项目(2011YD01106); 山东省重点研发计划项目(2016GSF120017); 山东省气象科学研究所数值天气预报应用技术开放研究基金(SDQXKF2014Z02)

作者简介: 盛春岩, 女, 研究员级高级工程师, 主要从事数值天气预报和海洋气象研究, sdqxscy@126.com。

to $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ stronger than that without data assimilation at 850 hPa to the south of middle Shandong, and the upper unstable atmosphere is triggered by the dynamic effect of the lower wind field. As a result, the rainfall appears in Shandong.

Key words WRF model; rapid update cycle; torrential rain; surface data assimilation; sensitivity experiments

引言

随着数值模式改进和资料同化技术的发展,数值天气预报成为天气预报的基础和核心,在暴雨等灾害天气预报中发挥着重要作用。在数值模式发展过程中,先进的资料同化系统和各种综合观测资料的同化应用,成为提高数值模式预报准确率的重要手段^[1-11]。研究^[12-13]表明,采用快速更新循环的方式同化北京地区局地 GPS/MET 水汽资料,可以明显增强模式初始场湿度,改进模式对北京暴雨大阈值降水时段、落区和强度的预报水平,但由于资料的局地性,并不能为模式总体预报性能带来明显差异。郝民等^[14]研究了 L 波段探空资料同化对模式预报的影响,将全国 120 个站点连续自动测定的高空温、压、湿、风等高垂直分辨率秒级和分钟级探空廓线数据应用于区域 GRAPES-3DVAR 变分同化预报系统,发现在 850 hPa、500 hPa 等层次上 L 波段探空分析比传统探空分析更接近 NCEP 分析,风场在 200 hPa 以上的高层分析中改进显著。同时由于模式初值的改进,模式降水预报评分有所提高,预报偏差明显变小。

徐枝芳等^[15]研究了 Ruggiero 和郭永润两种地面观测资料同化方案,结果表明,两种方案同化地面观测资料后都是从模式低层到高层对分析场产生影响,中低层高度影响比较大,高层影响较小,并且对 24 h 模拟结果产生一定的影响。基于 MM5_3DVAR 同化系统,利用近地面层相似理论将地面观测资料进行直接三维变分同化分析,发现地面观测资料(温度、湿度、风场、地面气压)中各物理量同化到数值模式都能影响 24 h 降水数值结果,但各物理量起的作用大小不一样,其中影响最大的是温度,其次为湿度^[16]。何光碧等^[17]基于 WRF 模式及 ADAS 资料分析同化模块,研究了区域地面站资料对模式初值及预报的影响,结果表明,西南区域自动站资料的同化有一定的正效果,对强降水落区等更准确,但不显著;相对而言,是否同化区域站资料在较强降水过程中的作用更明显,通常同化的自动站资料越多,所起的作用越大。冯良敏^[18]基于

WRF 模式及其 3DVAR 资料同化系统,研究了地面自动站资料同化对江淮梅雨锋暴雨过程的影响,结果表明,同化质量控制后的资料,能够更有效地调整初始场,从而明显改进了雨带结构和降水强度的预报。邵长亮^[19]基于集合卡尔曼滤波实现了在 WRF 模式中同化地面观测资料,结果表明,地面观测资料温度、湿度、风场、地面气压等各物理量分别同化到数值模式中都能影响 18 h 降水预报,但各物理量所起作用大小不同,其中对结果影响最大的是露点温度。

山东地处中纬度地区,受高空槽、低空急流、副热带高压等天气系统影响,易发生暴雨天气^[20-22],特别是局地性暴雨一直为预报难点。本文将基于 WRF 模式及其 3DVAR 资料同化系统,通过对地面等观测资料快速更新循环同化,对 2011 年 5 月 8 日一次鲁中局地大暴雨过程进行数值试验。

1 过程概述

2011 年 5 月 7 日 20 时—8 日 20 时,山东出现了一次明显降水过程,强降水中心出现在鲁中地区,最大降水量超过了 100 mm。本次降水过程天气系统不显著,但是降水持续时间短、降水量集中、局地性强。由降水实况(图 1)分析表明,强降水主要出现在 8 日凌晨至上午,02—14 时,最大降水量为 105.9 mm(淄川)。本次过程的预报难点在于对降水的局地性和强度把握不够,各种数值模式对于降水的强度预报普遍偏弱。

2 数值试验方案

基于 WRF 模式及其 3DVAR 资料同化系统,对本次大暴雨过程进行数值预报试验。WRF 模式采用 36 km、12 km、4 km 三层嵌套网格,三层网格格点数分别为 126×101 、 151×121 、 181×127 ,内层网格中心点为(36.0°N, 117.8°E)。模式采用的微物理方案为 WSM-6,积云对流参数化方案为旧的 K-F 方案,边界层方案为 YSU 方案。模式起报时间为 2011 年 5 月 7 日 08 时(北京时,下同),采用 7 日 08 时 GFS 分析场作为全球背景场,GFS 逐 3 h 预报场作

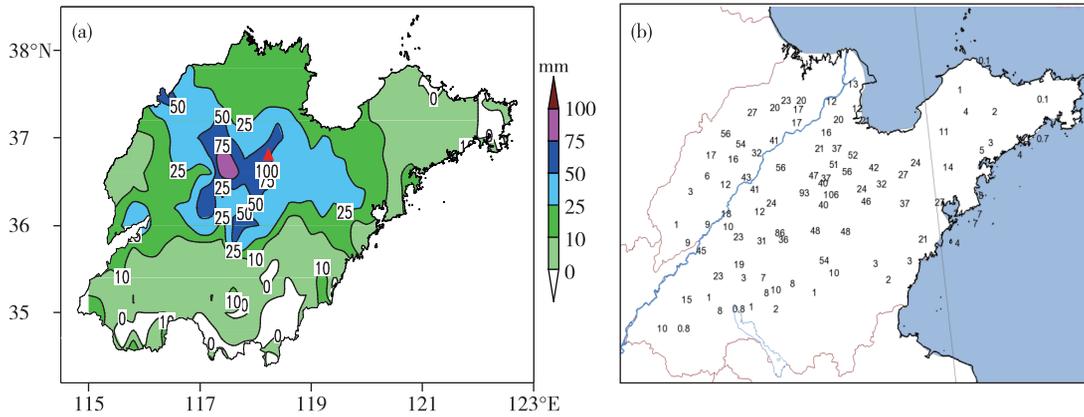


图1 2011年5月8日山东大暴雨过程累计降水量(a.8日02—14时降水量等值线,红色三角位置为最大降水点,b.8日02—14时降水量填图;单位:mm)

Fig.1 Accumulated amount of precipitation of the torrential rain in Shandong on 8 May 2011 (a. precipitation isoline from 02:00 to 14:00 on 8, red triangle for the location of maximum precipitation; b. precipitation chart from 02:00 to 14:00 on 8; units: mm)

为外层侧边界,进行逐3 h 同化循环预报(同化循环预报流程见图2),同化的资料包括全国国家级地面观测站资料、探空资料、山东25个GPS/MET站水汽资料、船舶资料,预报时效24 h。

为试验地面观测资料同化对暴雨预报的敏感性,在进行快速更新循环同化预报的基础上,选取预报较好的7日14时作为对比试验时间,分别进行地面和GPS/MET水汽资料同化对比试验(模式同

化的地面观测资料和GPS/MET资料站点分布见图3),共包括4组方案(试验1—4)。同化的地面观测资料包括温压湿风基本要素。

同时,为对比快速更新循环同化预报的效果,设计了7日08时和14时基于GFS全球背景场的冷启动预报进行对比分析(试验5、6),具体试验方案设计见表1。下面将对不同试验方案预报的降水量结果进行对比分析。

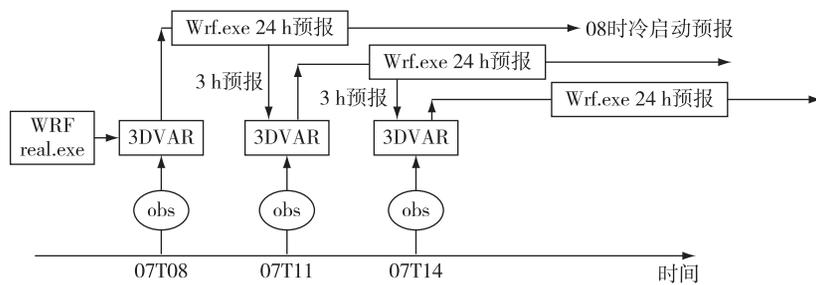


图2 逐3 h 同化循环预报流程示意图

Fig.2 Flow chart of assimilation cycle forecast at three-hour intervals

表1 数值试验方案设计

Table 1 Numerical experiments design

试验名称	起报时间	初始场	同化资料	侧边界
试验1	7日14时	WRF 11时预报场	地面、GPS/MET	GFS
试验2	7日14时	WRF 11时预报场	GPS/MET	GFS
试验3	7日14时	WRF 11时预报场	地面	GFS
试验4	7日14时	WRF 11时预报场	无	GFS
试验5	7日08时	GFS分析场	地面、GPS/MET、探空、船舶	GFS
试验6	7日14时	GFS 6 h 预报场	地面、GPS/MET	GFS

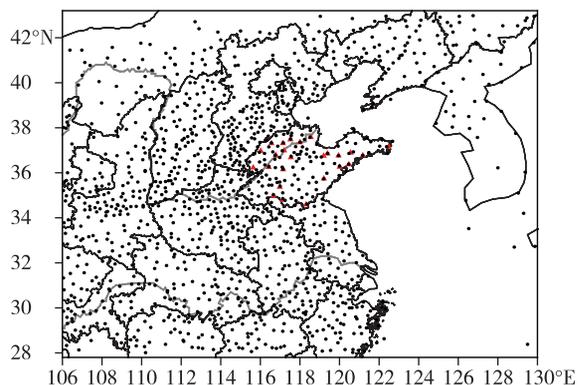


图3 模式同化的地面观测资料(黑色圆点)和GPS/MET资料(红色三角)分布

Fig.3 Distribution of model-assimilated surface observational data (black dot) and GPS/MET data (red triangle)

3 试验结果分析

3.1 不同试验预报的降水量对比

分析不同试验方案4 km 预报的降水发现,WRF 模式预报的山东降水主要集中在8日02—14时,为此,重点分析该时段不同试验的预报结果。图4a-d 给出了快速更新循环同化基础上同化不同观测资料的降水预报结果,可以发现,不同化任何观测资料进行暖启动(试验4,图4d),模式预报在鲁中以西有弱降水,山东其他地区没有降水。同化地面观测资料后(试验3,图4c),模式在鲁中预报出大雨强度的降水,雨带呈东北—西南走向,落区和走向与实况非常接近,但强度偏弱。同时同化地面观测资料和GPS/MET水汽资料(试验1,图4a)与同化地面观测资料(试验3,图4c)预报的降水落区非常一致,但试验1增加GPS/MET水汽资料同化后模式预报的降水强度略增强。而仅同化山东GPS/MET水汽(试验2,图4b)未预报出山东的降水,表明地面观测资料同化对于山东降水的预报起到了决定性作用。

在同化所有观测资料的基础上,采用冷启动的方式直接进行预报,无论是08时冷启动预报(试验5,图4e)还是14时冷启动预报(试验6,图4f),模式均未能预报出山东的降水。以上对比试验结果表明,在快速更新循环同化预报的基础上同化地面观测资料,是决定数值模式能否成功预报山东降水的关键因素,二者缺一不可。

为分析地面资料同化对降水预报的作用和影响,下面将以试验3和试验4作为对比分析对象,对

地面观测资料同化对降水预报的影响作用进行分析。

3.2 同化地面观测资料对模式降水预报的影响分析

3.2.1 同化地面观测资料后模式初始场变化

为了分析地面观测资料同化对模式同化初始场的影响,沿山东中部分别做东西向和南北向垂直剖面图,并做同化地面观测资料前后(试验3与试验4)初始场不同要素的差值。由图5可以发现,同化地面观测资料后,初始场中基本要素的影响变化向上至700 hPa附近,主要表现为,低层大气温度升高(图5a1、a2),湿度降低(图5b1、b2),位温增大(图5c1、c2)。相应地,风场也有变化(图5d1、d2),总体上,800 hPa以上高度风速略增大,低层风速略减小。通过同化地面温压湿风要素观测资料,对模式初始场中低层要素进行了调整。

3.2.2 同化地面观测资料后大气热力特征发展变化

分析试验3模式预报的大气温湿场发展变化可以发现,同化地面观测资料后,模式预报700 hPa附近的大气湿度场逐渐增强(图6a1、a2),在降水发生前(图6b1、b2),同化地面观测后模式预报的36°N以南700 hPa附近的高空大气相对湿度达90%,较不同化观测资料的湿度更高,大气位温也较高,相应地,大气热力不稳定逐渐增强。由图6c1、c2、d1、d2可以发现,同化地面观测资料后模式预报的高空大气假相当位温更高,在35°N上空约850 hPa假相当位温中心达339 K,高空大气存在明显的潜在不稳定,温湿条件好于无资料同化的方案(试验4),为暴雨的发生提供了有力的热力条件。

3.2.3 同化地面观测资料后模式预报的对流系统及大气动力场演变

首先,对同化地面观测资料后(试验3)模式预报的降水系统演变(图7)进行了分析,可以发现,降水于8日凌晨02—05时在泰山西南部开始,雨量较小(图7a)。3 h后降水增强,主要出现在泰山顶附近(图7b),6 h后降水系统向东北方向移动,强度进一步增强(图7c)。11—14时,降水系统移动到莱州湾附近,强度减弱(图7d)。其后,降水移出山东。由降水系统的演变可以看出,对流系统自鲁中开始向东北方向移动和发展。

为分析降水发生发展过程中大气垂直运动的演变,沿118°E作500 hPa以下大气水平风场和垂直运动场剖面图(图8),可以发现,在降水开始前,

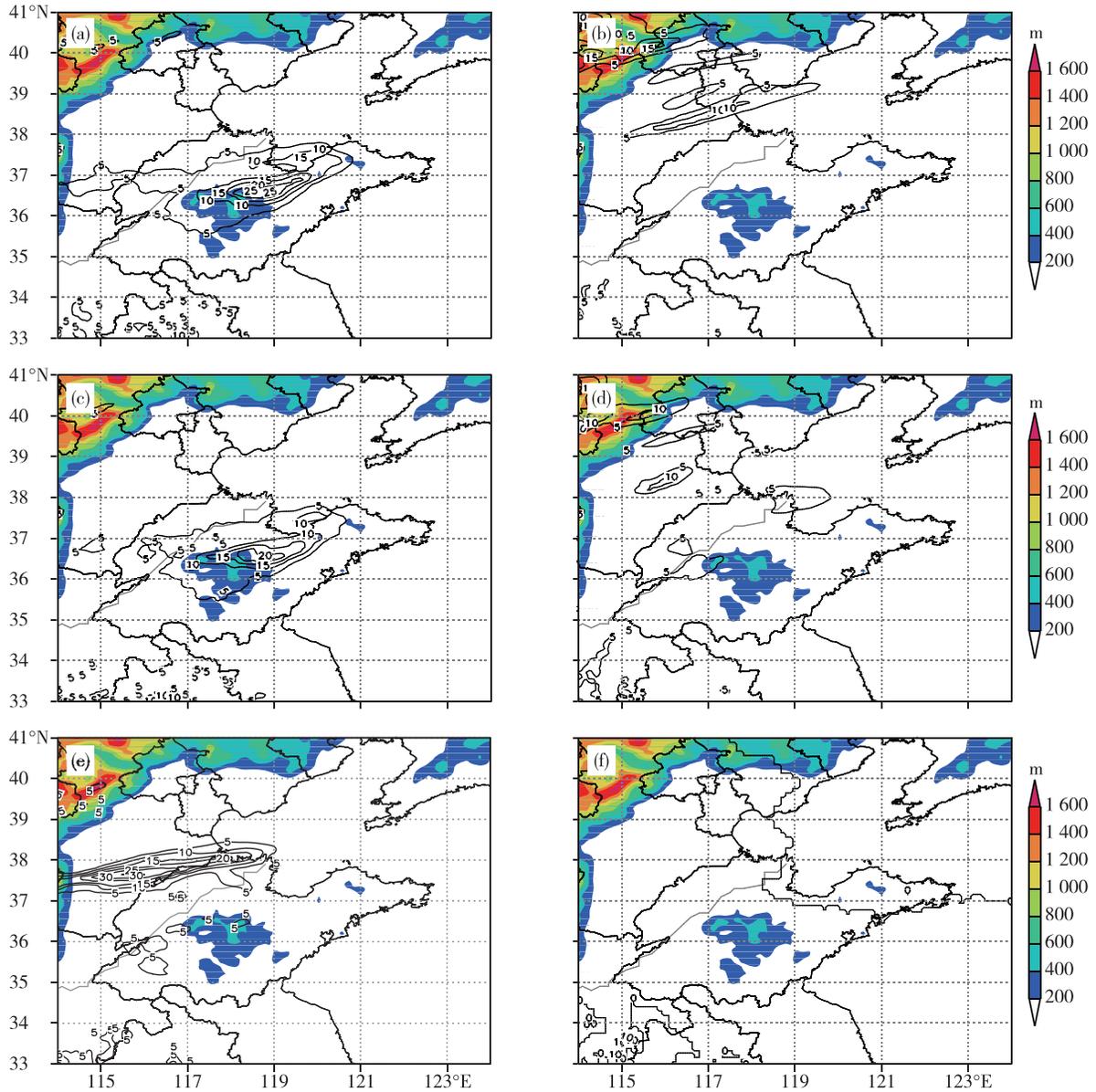


图 4 6 种不同数值试验方案预报的 8 日 02—14 时降水量 (a. 试验 1, b. 试验 2, c. 试验 3, d. 试验 4, e. 试验 5, f. 试验 6; 单位:mm; 填色区为地形海拔高度)

Fig.4 Amount of precipitation from 02:00 to 14:00 on 8 from 6 different numerical experiments (a. Experiment 1, b. Experiment 2, c. Experiment 3, d. Experiment 4, e. Experiment 5, f. Experiment 6; units: mm; colored area: terrain elevation)

850 hPa 以下低层大气为东南风气流,850~700 hPa 高空为西南风气流。同化地面观测资料后(试验 3),模式预报的 37°N 以南低层风速较不同化观测资料的风速偏强。低层风场辐合抬升作用增强,触发高空的不稳定大气,对流首先在 37°N 以南 850~700 hPa 高空出现,降水开始。

图 9 给出了降水开始前后 850 hPa 风场分布,可以发现,8 日 02 时降水开始前(图 9a),鲁中以南为较强的偏南风,同化地面观测资料(试验 3)模式预报的 850 hPa 风速较不同化观测资料(试验 4)的

普遍偏强 2~3 $m \cdot s^{-1}$ 。降水开始后(图 9b),同化地面观测资料(试验 3)模式预报的鲁南地区风场普遍较试验 4 偏强 2~4 $m \cdot s^{-1}$,较强的低层风场动力作用为降水的发生提供了有力条件。

综上所述可见,同化地面观测资料后,改变了 700 hPa 以下模式初始要素场的分布,从而使得模式预报的大气热力不稳定增强,低层风速增强,在风速的辐合抬升作用下触发了高空不稳定大气,导致降水发生。

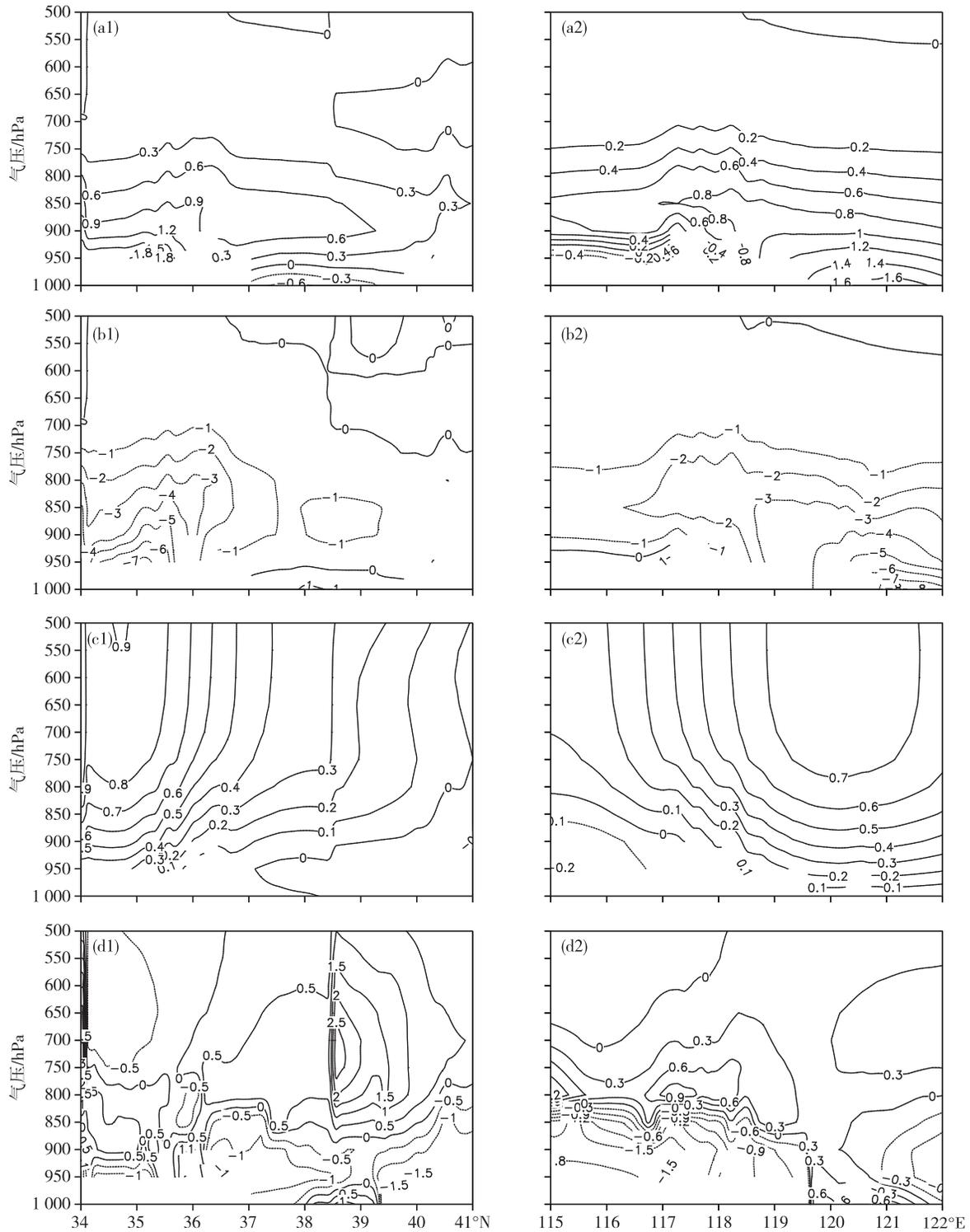


图5 同化地面观测资料(试验3)与无资料同化方案(试验4)垂直要素差(左:沿 118°E 剖面,右:沿 36.5°N 剖面; a1、a2.温度,单位:K; b1、b2.相对湿度,单位:%; c1、c2.位势高度,单位:dagpm; d1、d2.风速,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.5 Vertical difference of atmospheric elements (a1, b1, c1, d1. cross-section diagram along 118°E , a2, b2, c2, d2. cross-section diagram along 36.5°N ; a1, a2. temperature, units: K; b1, b2. relative humidity, units: %; c1, c2. geopotential height, units: dagpm; d1, d2. wind speed, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) between the experiment with surface data assimilation (Experiment 3) and the experiment without data assimilation (Experiment 4)

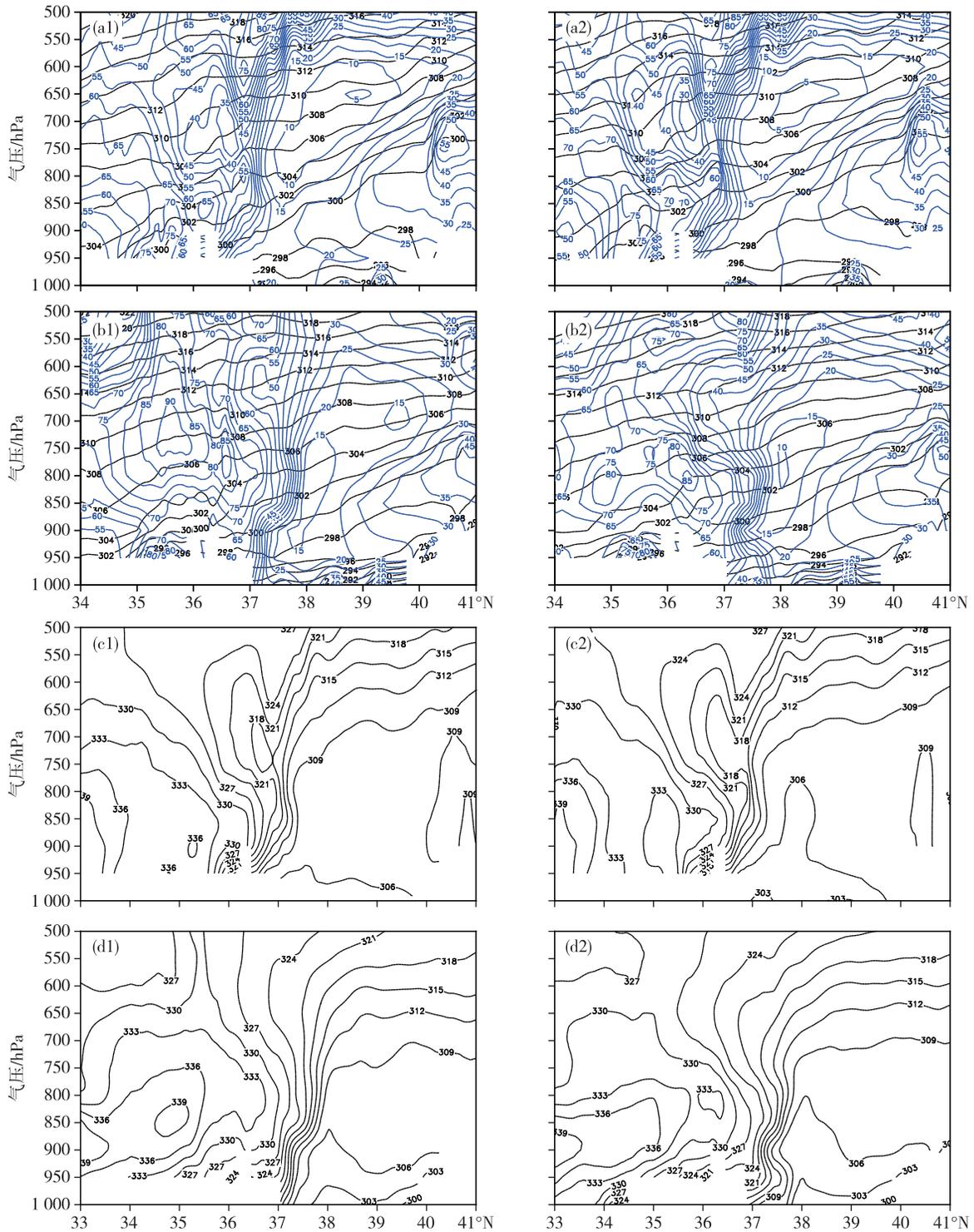


图 6 试验 3(左)和试验 4(右)模式预报的大气热力场沿 118°E 垂直剖面(a1, a2. 7 日 20 时,位温:黑线,单位:K,相对湿度:蓝线,单位:%;b1, b2. 8 日 02 时,位温:黑线,单位:K,相对湿度:蓝线,单位:%;c1, c2. 7 日 20 时,假相当位温,单位:K;d1, d2. 8 日 02 时,假相当位温,单位:K)

Fig.6 Cross-section diagram of atmospheric thermal field (a1, a2/b1, b2. 20:00 on 7/02:00 on 8, potential temperature in black line, units: K, relative humidity in blue line, units: %; c1, c2/d1, d2. 20:00 on 7/02:00 on 8, pseudo-equivalent potential temperature, units: K)

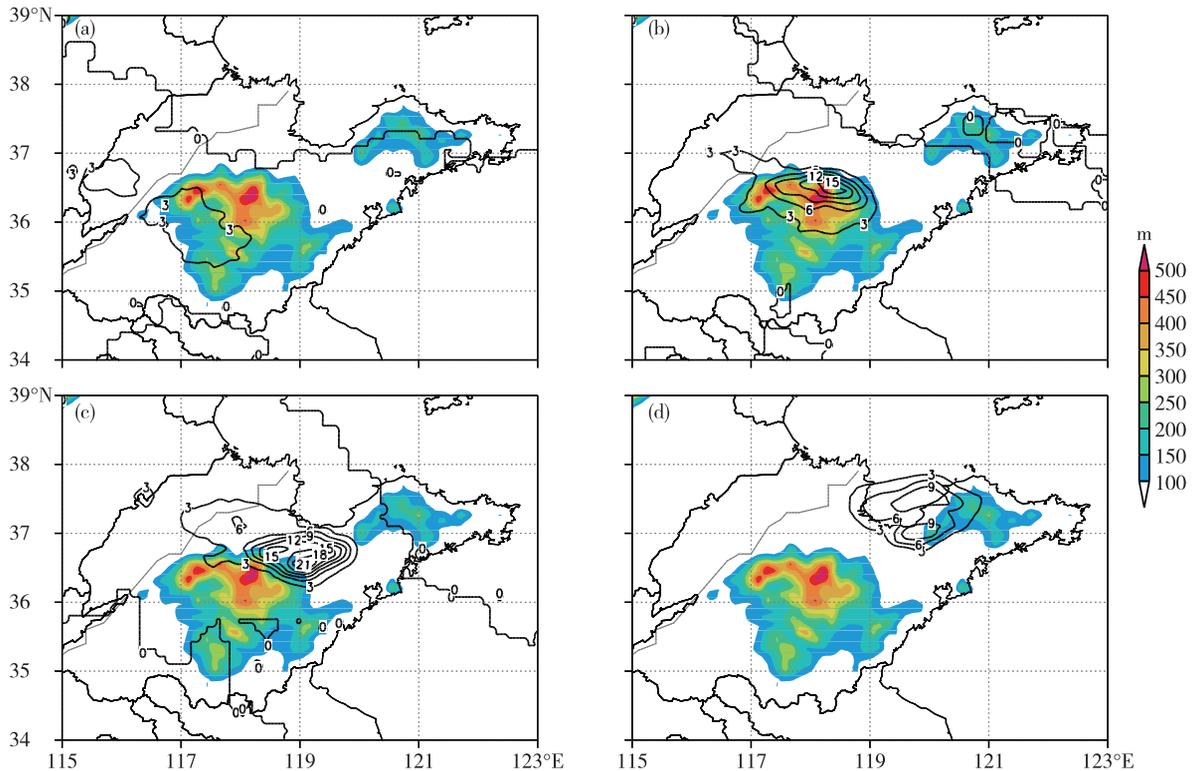


图7 同化地面观测资料后(试验3)模式预报的逐3 h降水量演变(a. 02—05时,b. 05—08时,c. 08—11时,d. 11—14时;单位:mm;填色区为地形海拔高度)

Fig.7 Evolution of three-hour precipitation forecast from Experiment 3 with surface data assimilation (a. from 02:00 to 05:00, b. from 05:00 to 08:00, c. from 08:00 to 11:00, d. from 11:00 to 14:00; units; mm; colored area; terrain elevation)

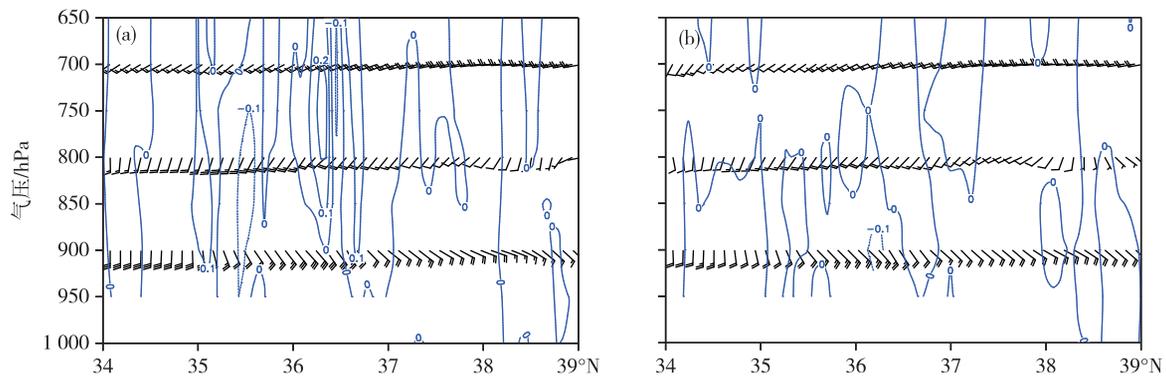


图8 模式预报的8日02时大气水平风场和垂直速度(蓝实线)沿118°E剖面图(a.试验3,b.试验4;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.8 Cross-section diagram of the horizontal wind field and vertical velocity(blue solid line) of the model along 118°E at 02:00 on 8 (a. Experiment 3, b. Experiment 4; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4 结论与讨论

基于WRF模式及其3DVAR资料同化系统,采用36 km、12 km、4 km三层嵌套网格,进行逐3 h资料同化和快速更新循环预报,对2011年5月8日山东一次局地大暴雨过程进行了资料同化敏感性试验,可以得出以下结论:

1) 地面观测资料同化和快速更新循环对本次

降水的预报起到了关键性作用。不同化地面观测资料,模式不能预报出山东的降水。在快速更新循环同化的基础上同化地面观测资料后,显著改进了模式降水落区预报,预报的降水落区跟实况非常吻合。同化山东GPS/MET水汽资料对降水强度起到了增幅作用,但仅同化GPS/MET水汽资料不能预报出山东的降水。

2) 地面观测资料同化可以影响700 hPa以下高

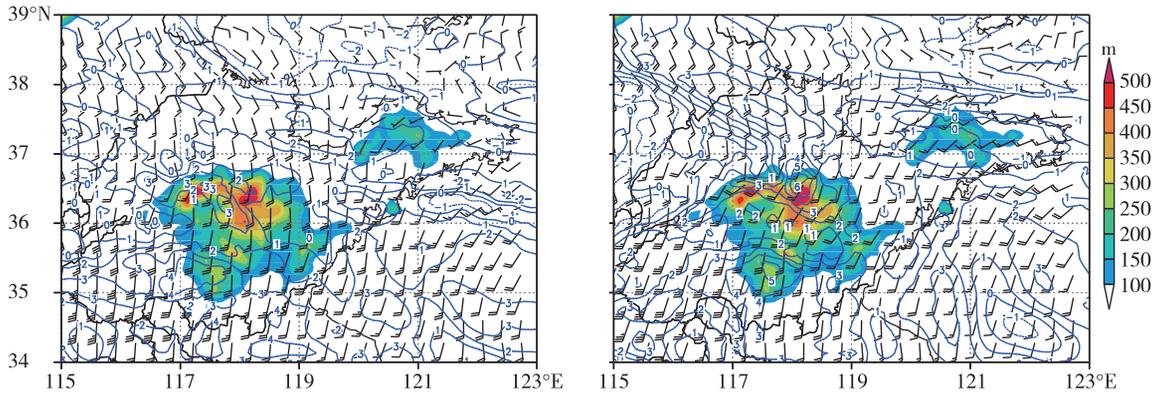


图9 试验3模式预报的8日02时(a)、05时(b)850 hPa风场以及试验3与试验4全风速差(蓝色实线)分布图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;填色区为地形海拔高度)

Fig.9 Wind field of 850 hPa at 02:00 LST (a) and 05:00 LST (b) on 8 May 2011 from Experiment 3 and full wind speed difference (blue line) between Experiment 3 and Experiment 4 (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; colored area: terrain elevation)

度大气要素的垂直变化,从而改变了大气初始场的温湿结构,导致模式预报的700 hPa附近高空大气湿度和热力不稳定增强,为暴雨的发生提供了条件。

3)同化地面观测资料后,模式预报的700 hPa以下低层风场更强,850 hPa鲁中以南风速较无观测资料同化的偏强 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低层风场的动力作用触发高空的不稳定大气,导致降水发生。

从本文研究结果看,虽然同化地面观测资料和快速更新循环同化对降水的发生起到了关键作用,但预报的降水强度较实况明显偏弱。下一步将通过模式不同物理参数化方案调试等工作,进一步研究影响数值模式局地性大暴雨强度预报的原因。

参考文献:

- [1] Sun J, Xue M, Wilson J W, et al. Use of NWP for nowcasting convective precipitation: Recent progress and challenges [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2014, 95 (3): 409-426.
- [2] Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. Prediction of convective storms at convection-resolving 1km resolution over continental United States with radar data assimilation: An example case of 26 May 2008 and prediction forecasts from spring 2009 [J]. Adv Meteor, 2013(3):1-9.
- [3] Zhang F, Snyder C, Sun J Z. Impacts of initial estimate and observation availability on the convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter [J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(5): 1238-1253.
- [4] Tong M J, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments [J]. Mon Wea Rev, 2005, 133 (7): 1789-1807.
- [5] Wang X G, Barker D M, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF Model. Part I: Observing system simulation experiment [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136(12): 5116-5131.
- [6] Wang X G, Barker D M, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF Model. Part II: Real observation experiments [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136(12): 5132-5147.
- [7] Li Y Z, Wang X G, Xue M. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble-3DVAR hybrid system for the prediction of Hurricane Ike (2008) [J]. Mon Wea Rev, 2012, 140(11): 3507-3524.
- [8] 徐枝芳, 都民, 朱立娟, 等. GRAPES-RAFS 系统研发 [J]. 气象, 2013, 39(4): 466-477.
- [9] 王晓峰, 王平, 张蕾, 等. 上海“7·31”局地强对流快速更新同化数值模拟研究 [J]. 高原气象, 2015, 34(1): 124-136.
- [10] 王晓峰, 王平, 张蕾, 等. 多源观测在快速更新同化系统中的敏感性试验 [J]. 高原气象, 2017, 36(1): 148-161.
- [11] 王静菊, 高小雨, 高山红. 一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 42-53.
- [12] 陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验 [J]. 气象学报, 2010, 68(4): 450-463.
- [13] 楚艳丽, 郭英华, 张朝林, 等. 地基 GPS 水汽资料在北京“7·10”暴雨过程研究中的应用 [J]. 气象, 2007, 33(12): 16-22.
- [14] 郝民, 田伟红, 龚建东. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究 [J]. 气象, 2014, 40(2): 158-165.
- [15] 徐枝芳, 龚建东, 王建捷, 等. 地面观测资料同化初步研

- 究[J].应用气象学报,2006,17(增刊):1-10.
- [16] 徐枝芳,龚建东,王建捷,等.复杂地形下地面观测资料同化I.模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究[J].大气科学,2007,31(2):222-232.
- [17] 何光碧,屠妮妮,高笃明,等.西南区域自动站资料对区域模式预报影响的同化试验分析[J].高原山地气象研究,2017,37(3):1-9.
- [18] 冯良敏.自动站资料质量控制及其三维变分同化研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.
- [19] 邵长亮.WRF_EnSRF 同化地面自动站资料的实现与技术研究[D].南京:南京信息工程大学,2011.
- [20] 刁秀广,侯淑梅.4次大暴雨过程雷达径向速度和超低空西南急流特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):46-53.
- [21] 杨晓霞.副热带高压边缘连续两次强降水形成机制分析[J].海洋气象学报,2017,37(3):62-72.
- [22] 高帆,张永婧,李瑞,等.2015年8月3日山东西北部暴雨过程的中尺度特征分析[J].海洋气象学报,2017,37(2):96-101.