

# 地面和探空资料的EnKF同化对北京7·21 极端暴雨模拟的影响

孟智勇<sup>1,†</sup> 唐晓静<sup>1</sup> 岳健<sup>2</sup> 白兰强<sup>1</sup> 黄龄<sup>3</sup>

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 中国气象科学研究院,  
北京 100081; † E-mail: zymeng@pku.edu.cn

**摘要** 针对2012年7月21日北京极端暴雨的业务预报误差, 详细地考察地面和探空资料的EnKF同化对7·21极端暴雨总体时空分布和暴雨触发地面特征模拟的影响, 进而揭示预报误差的可能原因。结果表明, 资料同化显著地改善了北京地区降水时空分布的模拟结果, 证实了前人基于观测和敏感性分析提出的“低涡是北京7·21暴雨的关键影响系统”的判断, 揭示出低涡对应的地面低压东侧倒槽对北京7·21暴雨的直接贡献。研究结果显示, 业务数值模式对此次极端暴雨预报失败的主要原因可能是对低涡和低涡对应的地面低压东侧倒槽强度和位置有较大的预报误差。

**关键词** 7·21暴雨; 低涡; 倒槽; 极端暴雨; 北京

## Impact of EnKF Surface and Rawinsonde Data Assimilation on the Simulation of the Extremely Heavy Rainfall in Beijing on July 21, 2012

MENG Zhiyong<sup>1,†</sup>, TANG Xiaojing<sup>1</sup>, YUE Jian<sup>2</sup>, BAI Lanqiang<sup>1</sup>, HUANG Ling<sup>3</sup>

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. National Meteorological Center, Beijing 100081; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; † E-mail: zymeng@pku.edu.cn

**Abstract** Regarding the forecasting errors of operational models for the high-impact extremely heavy rainfall event in Beijing on July 21, 2012, this work examines the impact of assimilating surface and rawinsonde observations using EnKF data assimilation system on the simulation of rainfall distribution and the surface features in the initiation period of the rainfall in Beijing, and reveals the possible reasons for the forecasting errors. Results show that data assimilation significantly improves the simulation of rainfall distribution, confirming that the cyclonic vortex is the key influencing system of the heavy rainfall event, which was proposed by previous researchers based on observations and sensitivity analyses. This work also reveals that the surface low and its associated inverted trough are the direct producers of the rainfall in Beijing. These results indicate that the reason of the failure of the operational models in this extremely heavy rainfall is the large forecasting errors in the strength and location of the cyclonic vortex and the associated inverted trough eastward of the surface low.

**Key words** 7·21 heavy rainfall; cyclonic vortex; inverted trough; extremely heavy rainfall; Beijing

### 1 北京7·21暴雨过程天气回顾

2012年7月21日, 北京地区发生一次极端暴雨事件(简称7·21暴雨), 出现大暴雨(大于100 mm/24 h)的范围占全市总面积的86%以上<sup>[1]</sup>(图1(a))。房山

区河北镇的总雨量最大, 达541 mm(数据来自北京市防汛办公室)。这次暴雨过程共造成79人死亡, 经济损失达116.4亿元。

此次暴雨过程具有多尺度特征, 表现为横贯我国西南到东北的弱雨带和京津冀地区的局地极端暴

国家自然科学基金(41375048, 41425018)资助

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-07-05; 网络出版日期: 2019-01-07

雨。北京地区的降水可以分为两个阶段,即21日10—20时(北京时,下同)的对流性降水(图1(b)和(c),图2)和21日20时至22日04时的锋面降水<sup>[2]</sup>(图1(c)和(d),图2)。虽然7·21暴雨是在典型的华北暴雨天气背景下形成的,但业务数值预报模式对北京地区雨带位置、强度以及时间的预报均存在明显偏差<sup>[3]</sup>,降雨的开始时间比实况晚6小时,雨量预报也明显偏小。Zhang等<sup>[4]</sup>指出,数值模式预报的是大尺度的弱降水,对前期对流性降水的预报出现较大的偏差。王淑莉等<sup>[5]</sup>基于地面和探空观测资料的EnKF资料同化的预报集合,通过对比暖区降水模拟好坏样本的差异,认为是初始场低值系统的位置差异导致对暖区降水模拟的差别。然而,他们只分析了两个样本的3个时刻,没有关注累积雨量的分布及雨带的多尺度结构和演变,没有分析暴雨触发阶段的地面天气特征,对同化后的集合模拟以及基于分析集合平均的确定性模拟结果也没有提及,因而难以了解集合同化后暴雨集合模拟的全貌。本文的研究目的是考察地面和探空观测资料的EnKF同化对北京7·21极端暴雨发生和发展的总体以及细致结构特征模拟的可能贡献。

基于观测和敏感性分析,有研究认为北京7·21暴雨的关键影响因子是河套低涡<sup>[6-8]</sup>。该低涡在21日08时位于陕西北部(图3(a)),随后在向东北方向移动过程中加强,其高层伴随一个500 hPa低槽,在700 hPa高度,自低涡中心向东北方向有暖切变线发展,低涡前部的明显低空急流有利于向暴雨区输送大量水汽。地面上是双倒槽结构(图4(a)),陕西北部有一个低压中心,与700 hPa的低涡中心相对应,陕西和山西北部至河北北部有一个狭长的倒槽A,河北中部到北京南边界有一个短倒槽B。倒槽B造成的对流性降水于21日10时进入北京西南边界,标志着北京极端暴雨的开始。后期,倒槽B在北京地区长久地维持,雨带后向增长和列车效应造成北京7·21极端暴雨。

## 2 资料和方法

本文使用的资料同化系统是WRF-EnKF<sup>[9-11]</sup>,所用模式是WRF 3.4<sup>[12]</sup>。以NCEP/FNL资料为初始条件和边界条件,采用三重双向嵌套,水平分辨率分别为40.5, 13.5和4.5 km,垂直分辨率为35层。积云参数化方案选用Grell-Devenyi<sup>[13]</sup>(第三重嵌套区域不使用积云参数化),微物理方案选用WSM6<sup>[14]</sup>,

边界层采用YSU方案<sup>[15]</sup>。模拟区域设置如图5所示。

本文以7月20日14时的NCEP/FNL最后分析资料为初始场,基于3DVar的CV3背景误差协方差选项<sup>[16]</sup>产生随机扰动,形成30个样本的初始集合<sup>[17]</sup>。区域平均水平风速 $u$ 和 $v$ 的标准偏差分别为2.14和2.11 m/s,位温的标准偏差为1.02 K,气压的标准偏差为101.45 Pa,水汽混合比的标准偏差为0.51 g/kg。首先基于初始集合,做6小时的集合预报,然后分别在3个嵌套区域同时同化20日20时、21日02时和21日08时的地面和探空资料。协方差松弛<sup>[18]</sup>的张弛系数采用0.8。将21日08时同化3个时刻的实测资料之后的各集合成员的分析场和分析集合平均场作为初始值,做24小时的模拟(命名为Ensemble\_Mean)。为了与同化试验对比,进行以20日14时和21日08时的NCEP/FNL为初始场的不同化实测资料的确定性模拟对照试验,分别命名为CNTL\_2014和CNTL\_2108。由于第三重嵌套的模拟结果有较大的噪音,后面的分析全部基于第二重嵌套13.5 km的模拟结果。

## 3 模拟结果

与业务预报类似,本文两个对照试验的24小时累积降水量均比观测值小,降水中心位置也有很大的偏差(图6)(CNTL\_2108的误差比CNTL\_2014大,图略)。从降水强度最大的北京西南部(图6(a)中方框区域)平均小时雨量的演变(图7)来看,CNTL\_2014的降水峰值比实况晚7小时,且峰值雨量仅为观测值的一半,降水中心偏北(图6(a)和(b))。与CNTL\_2014相比,CNTL\_2108模拟降水的预报误差更大,北京没有出现明显的降水峰值(图7)。

对地面和探空资料的同化显著地改善了暴雨的模拟结果。以21日08时的分析集合平均为初始场的确定性模拟试验Ensemble\_Mean的24小时累积雨量的强度和分布范围都更接近观测值(图6(c))。霞云岭、河北镇和挂甲峪都出现暴雨中心,但是霞云岭的雨量偏小,挂甲峪的雨量偏大,北京以南的河北固安附近的降水极值没有模拟出来(图6(c))。Ensemble\_Mean的小时平均雨量演变也更加接近观测值,暴雨极值与观测值十分接近,仅落后观测时间4小时(图7)。

在以21日08时的分析集合为初始场的集合模拟结果中,有些样本(如样本6, 16和26)的降水模拟与实况十分接近(图7)。样本16模拟的平均小时雨量

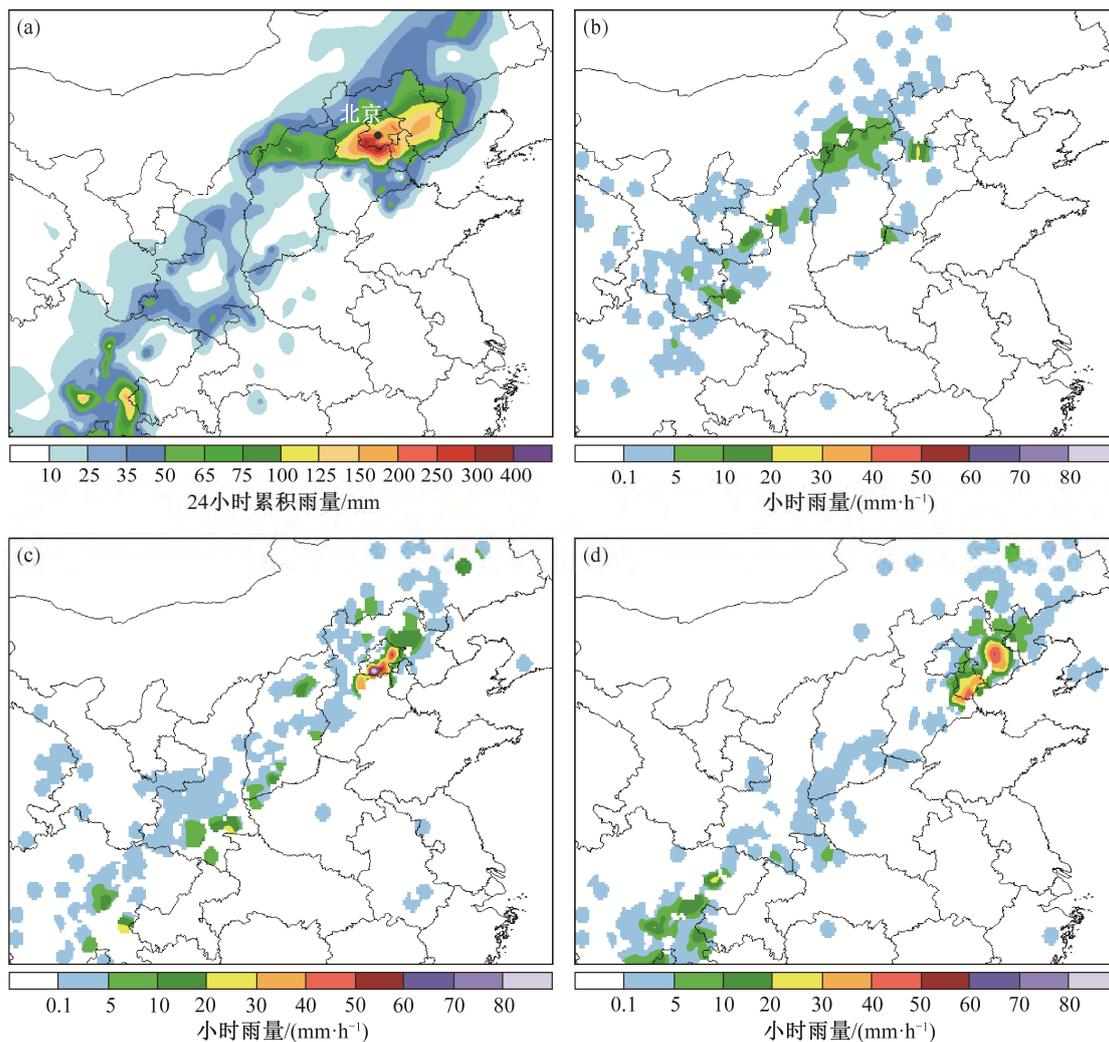


图 1 北京 21 日 08 时至 22 日 08 时的 24 小时累积雨量 (a) 和 21 日 10 时 (b)、21 日 20 时 (c) 以及 22 日 04 时 (d) 的小时雨量

Fig. 1 24-h accumulated rainfall in Beijing from 08 LST July 21 to 08 LST July 22 (a) and hourly rainfall at 10 LST July 21 (b), 20 LST July 21 (c) and 04 LST July 22 (d)

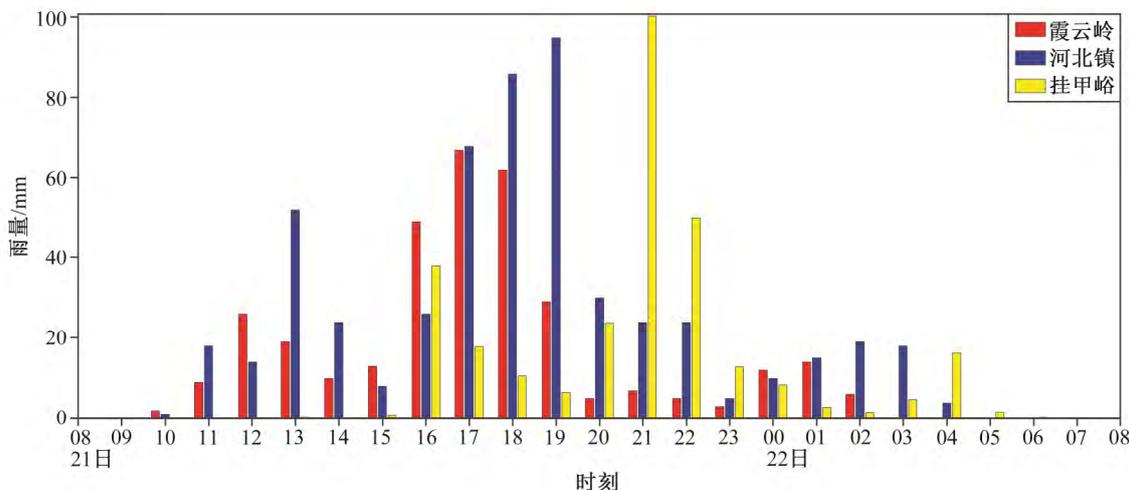
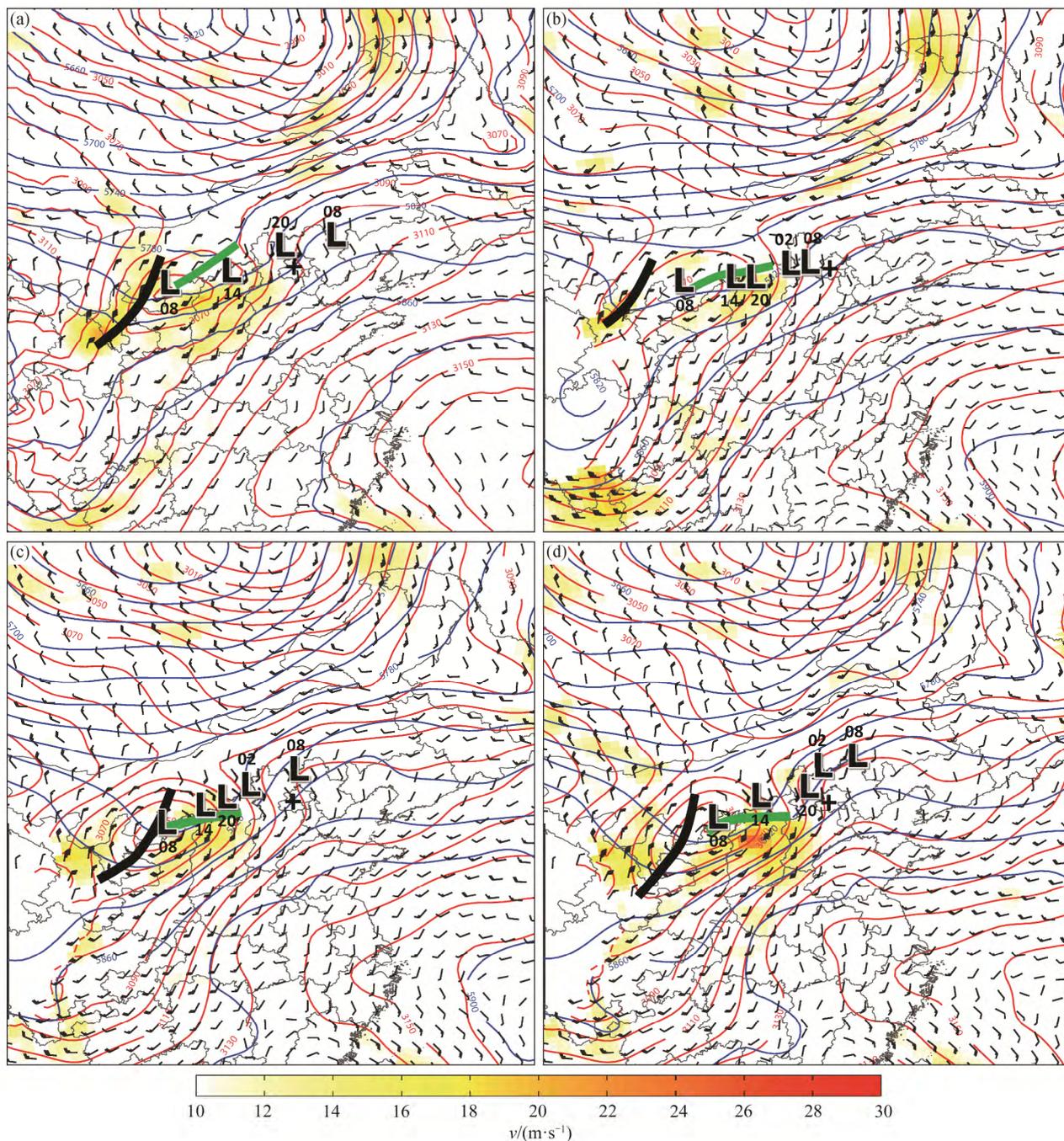


图 2 7·21 暴雨过程中霞云岭、河北镇和挂甲峪的小时雨量演变

Fig. 2 Evolution of hourly rainfall at Xiayunling, Hebeizhen and Guajiyu



(a) GFS (global forecast system, 全球预报分析系统)分析场; (b) CNTL\_2014的模拟结果; (c) Ensemble\_Mean 的模拟结果; (d) 样本16的模拟结果。风杆: 全杆代表4 m/s, 半杆代表2 m/s, 下同; “+”号代表北京, 黑线代表500 hPa的低压槽, 绿线代表700 hPa 低涡切变线, L 型符号代表21日08时到22日08时700 hPa 的低涡中心演变

图3 21日08时500 hPa位势高度、700 hPa位势高度、风场和全风速

Fig. 3 500 hPa geopotential height, 700 hPa geopotential height, wind barb sand full wind speed at 08 LST July 21, 2012

演变在极值和时间上最接近观测值, 降水极值与实况仅有1小时的偏差, 北京地区24小时累积降水模拟结果也最接近实况(图6(d)), 但是河北东北部的观测降水模拟比实况偏北、偏强, 固安的降水没有

模拟出来。

降水开始影响北京阶段, CNTL\_2014的模拟雷达回波与观测值相差较大, 山西北部的雨区与观测值比较接近, 但北京南部没有出现对流(图8)。同化

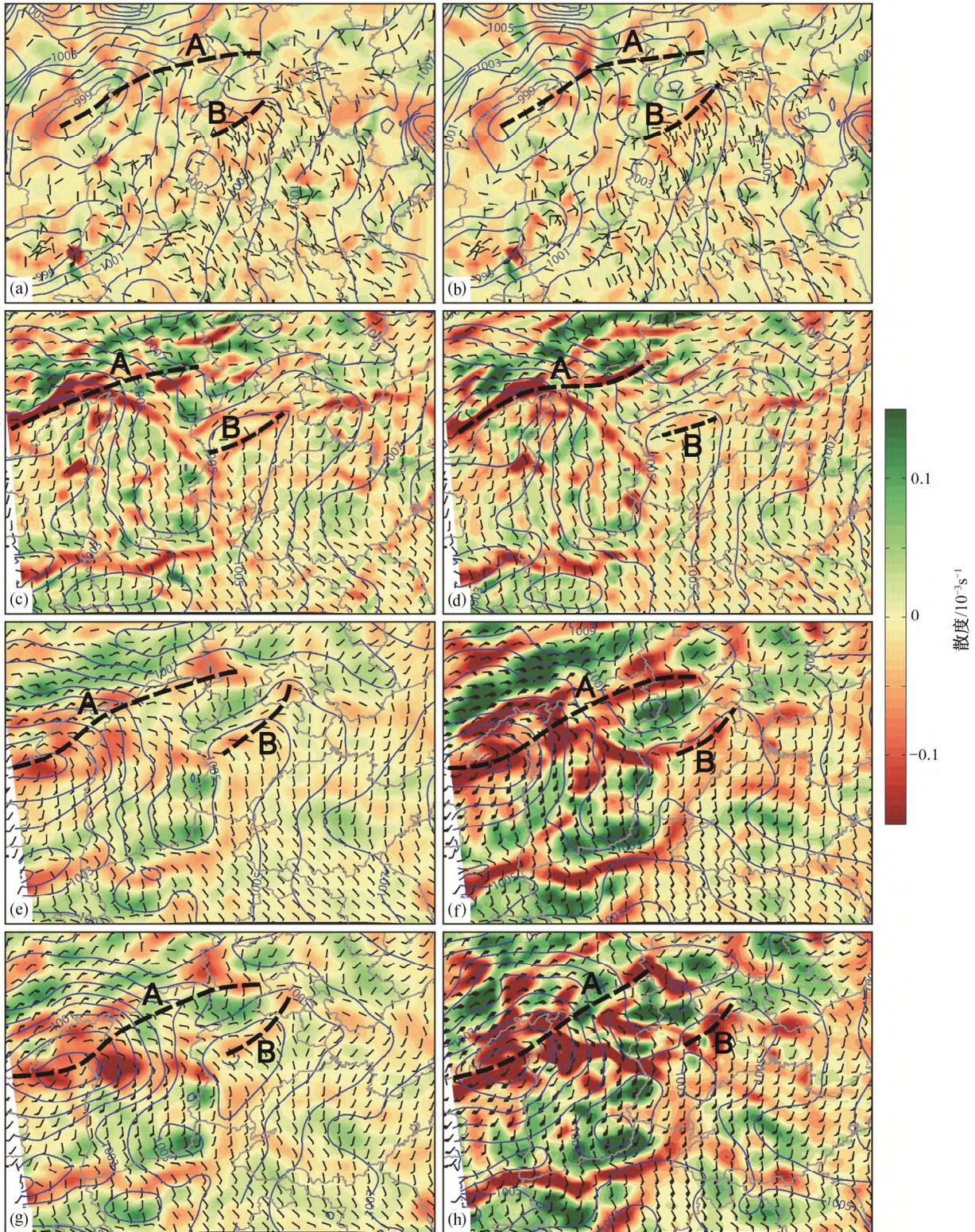


图4 21日08时(第一列)和21日09时(第二列)观测值(第一行)与对照试验CNTL\_2014(第二行)、EnKF同化试验 Ensemble\_Mean(第三行)和样本16(第四行)的地面风场、散度场和海平面气压(蓝线,单位:hPa)

Fig. 4 Surface wind barbs, divergence and sea level pressure (blue contour, unit: hPa) of observation (first row), CNTL\_2014 (second row), Ensemble\_Mean (third row) and Member16 (fourth row) at 08 LST July 21 (first column) and 09 LST July 21 (second column)

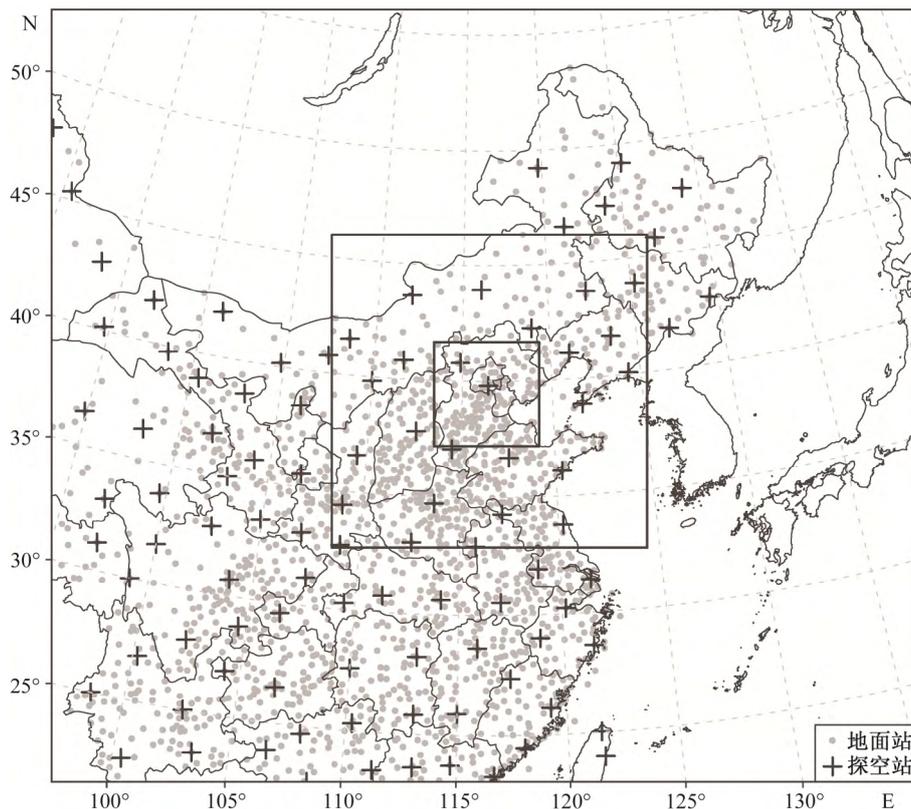


图5 模拟区域以及资料同化的地面及探空站分布

Fig. 5 The model domain and distribution of surface and rawinsonde stations

试验雷达回波的形态则非常接近观测值, Ensemble\_Mean在北京西南部有对流发展, 样本16的雷达回波更接近观测值, 21日12时北京南部的西北-东南向对流线、山西北部的倒槽降水以及河北西北边界处的弱降水带都成功地模拟出来了。

为了考察同化试验改善模拟降水和雷达回波的原因, 本文对比同化试验与没有资料同化试验的风场和气压场特征。结果表明, 21日08时, 没有资料同化的对照试验模拟得到的700 hPa低涡和低涡前方急流的强度明显比观测值弱(图3(a)和(b))。随后, 低涡向东的移动速度也比观测值慢, 导致低涡中心的位置比观测值偏西。基于同化的分析集合平均场的模拟明显地改善了低涡和急流的强度, 同时也修正了低涡中心的位置和后期演变(图3(a)和3(c))。样本16模拟的低涡和急流的强度则更强, 低涡中心的演变也更接近观测值(图3(a)和3(d))。这一结果证实, 低涡是7·21北京极端暴雨的关键影响系统。

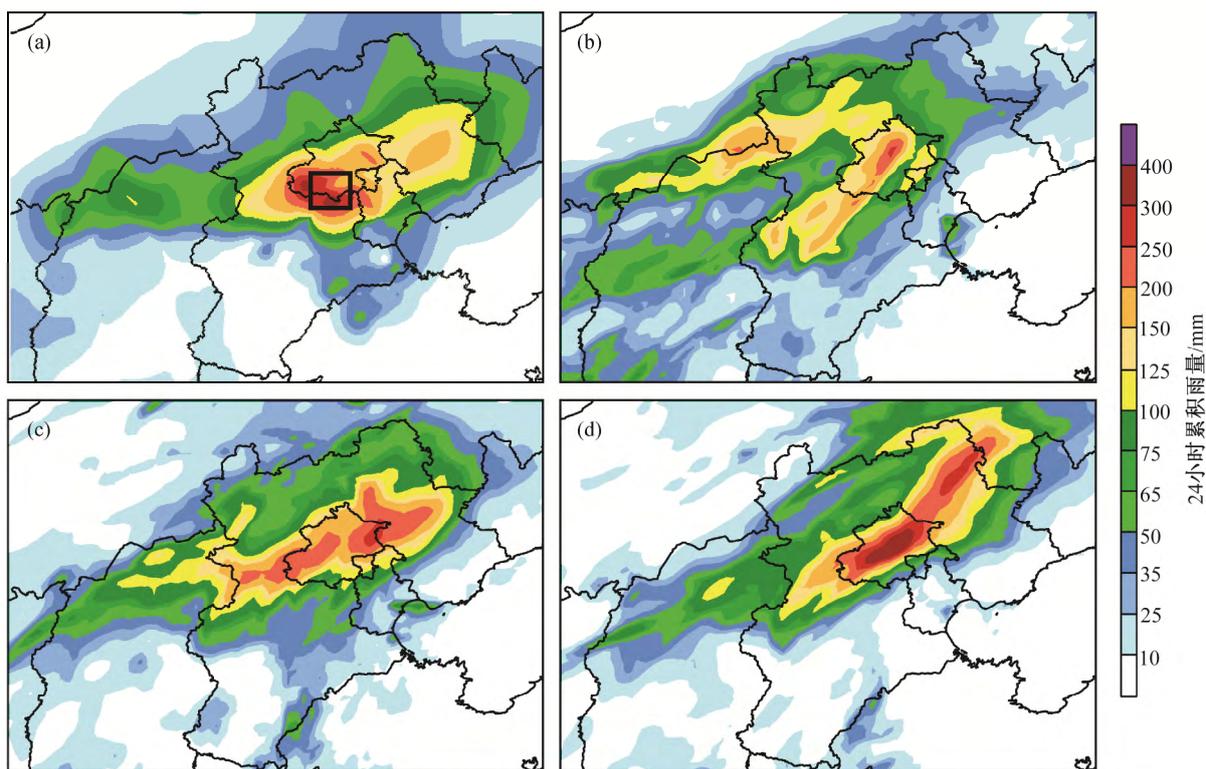
为了进一步了解低涡造成北京极端暴雨的细节, 我们比较3个试验(CNTL\_2014, Ensemble\_Mean和样本16)中北京地区降水开始阶段的地面散度、

海平面气压和地面风场特征(图4), 发现资料同化使得对应700 hPa低涡中心的地面东侧倒槽B的位置更接近观测值, 并在北京南侧产生更强的辐合, 导致暴雨的发生。对照试验(CNTL\_2014)虽然也模拟出倒槽B, 但是位置偏东南, 没有在北京西南形成持续的强辐合。基于同化的分析集合平均场的模拟(Ensemble\_Mean)结果中, 倒槽B比对照试验偏西, 更接近北京地区, 导致北京地区出现较强的辐合。样本16模拟的倒槽B比Ensemble\_Mean更接近北京西部, 强度也更大, 导致北京西南地区的辐合更强, 使得降水更加接近实况。由此可见, 资料同化对低涡对应的地面低压东部倒槽的改善是7·21暴雨模拟改善更直接的原因。

综上所述, 对地面和探空资料进行EnKF同化后, 通过对低涡及其相应地面低压东部倒槽B的强度和位置的改善, 显著地提高了对7·21极端暴雨的模拟效果。

#### 4 小结

本研究考察了地面和探空资料的EnKF同化对



(a) 观测值; (b) CNTL\_2014; (c) Ensemble\_Mean; (d) 样本16。黑色方框内为图7用于求取雨量面积平均的区域

图 6 21 日 08 时至 22 日 08 时的 24 小时累积雨量

Fig. 6 24-h accumulated rainfall from 08 LST July 21 to 08 LST July 22

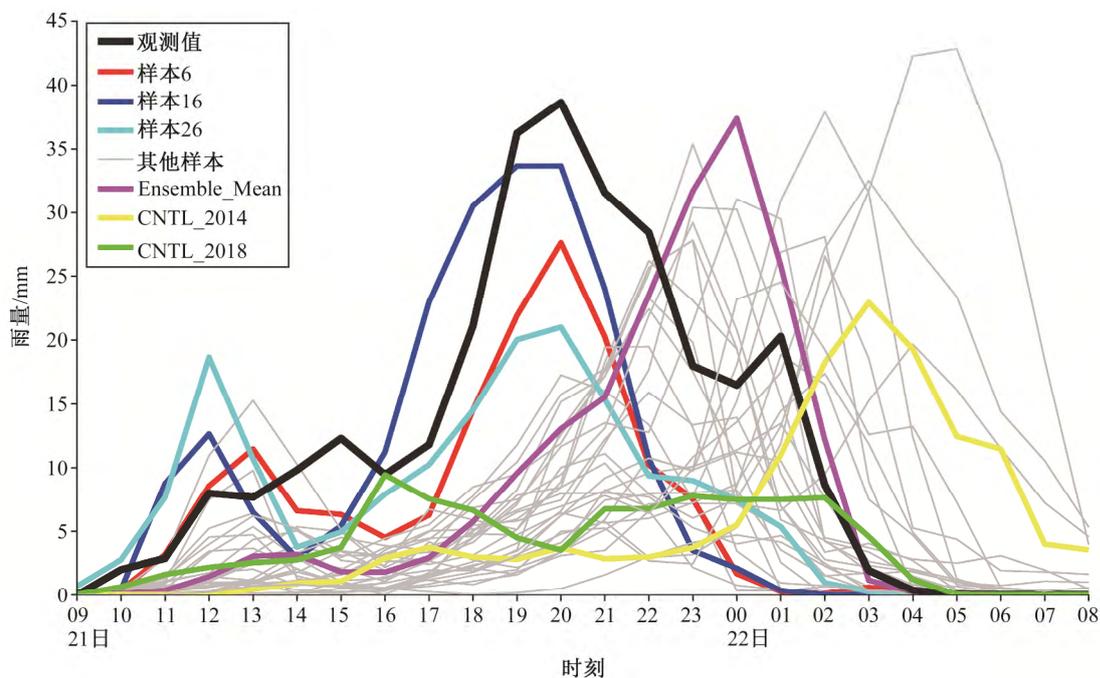


图 7 EnKF 同化试验 30 个样本的集合模拟和基于集合平均的确定性模拟试验 Ensemble\_Mean 的小时雨量在北京西南地区面积平均值的演变

Fig. 7 Evolution of hourly rainfall averaged over southwest Beijing of the ensemble forecasts initiated from the analysis ensemble of EnKF and the Ensemble\_Mean

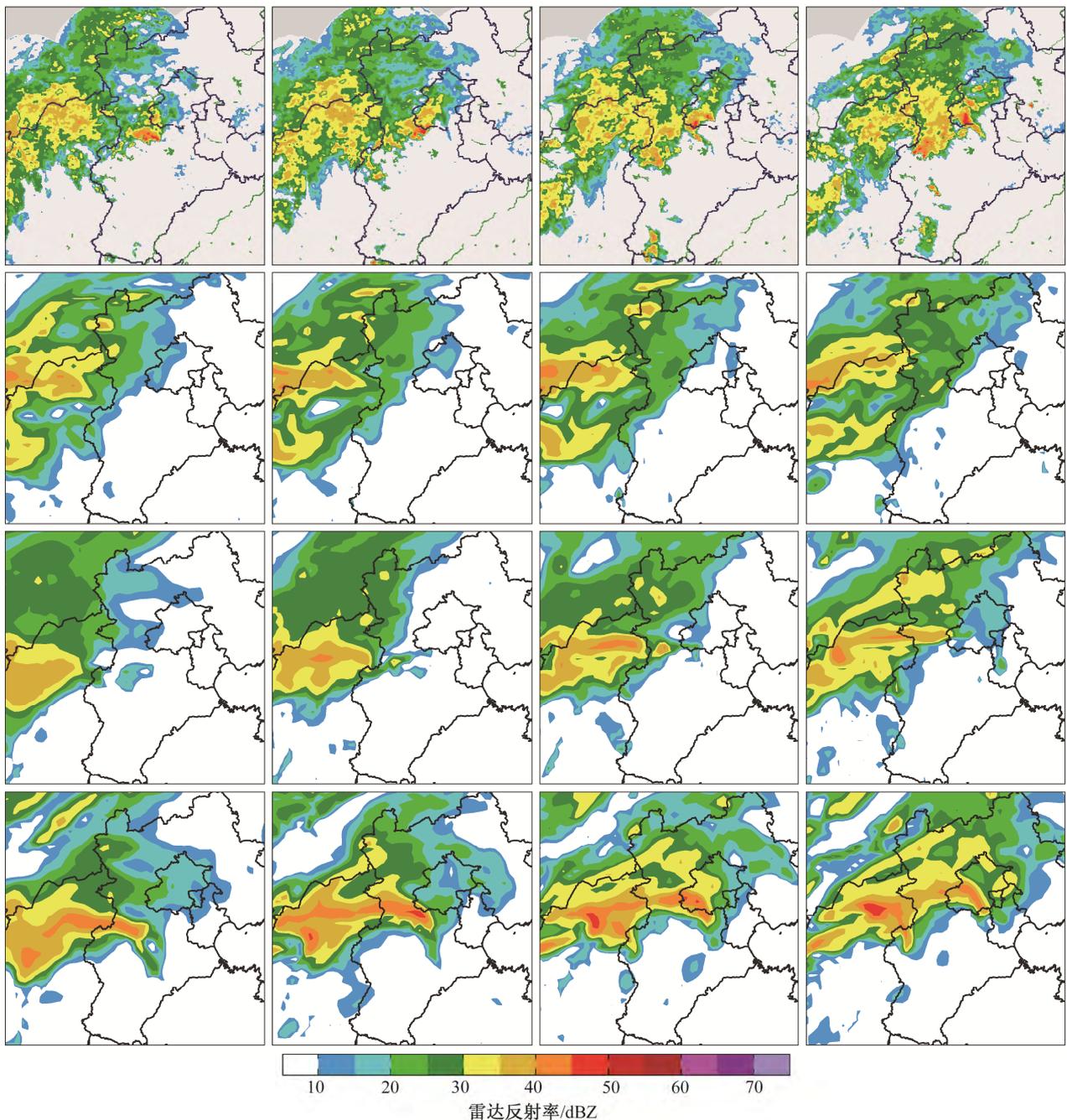


图8 21日09时(第一列)、21日10时(第二列)、21日11时(第三列)和21日12时(第四列)观测的0.5°仰角基本反射率(第一行),相应时刻没有资料同化的对照试验CNTL\_2014(第二行)、EnKF同化试验Ensemble\_Mean(第三行)以及样本16(第四行)的雷达组合反射率

Fig. 8 Basic reflectivity at elevation angel of 0.5°of observation (first row) and composite radar reflectivity of CNTL\_2014 (second row), Ensemble\_Mean (third row) and Member16 (fourth row) at 09 LST July 21 (first column), 10 LST July 21 (second column), 11 LST July 21 (third column) and 12 LST July 21 (fourth column)

7·21北京极端暴雨时空分布和暴雨触发地面特征模拟的影响,结果表明,与没有进行资料同化的对照试验相比,以资料同化后的分析集合平均为初始场的模拟降水无论是时间演变,还是累积雨量和雷达

回波的水平分布都更接近实况。样本16对累积降水的强度和分布、小时雨量演变的时间和极值都非常接近观测值,面积平均小时雨量极值的时间偏差从没有资料同化的对照实验CNTL\_2014的7小时减小

到 Ensemble\_Mean 的 4 小时和样本 16 的 1 小时, 降水极值的误差也显著减小。

对试验结果的分析表明, 基于资料同化集合平均和最佳集合样本的模拟降水相对于对照试验的逐步改善对应着低涡及地面低压东侧倒槽模拟的逐步改善。该结果进一步证实了前人基于观测和敏感性分析提出的低涡是北京 7·21 极端暴雨过程的关键影响系统的判断, 同时还揭示出低涡对应的地面低压东侧倒槽对北京 7·21 极端暴雨的直接贡献。

本文的模拟结果揭示, 数值模式对北京 7·21 极端暴雨的预报失败的可能原因主要是对低涡及其对应的地面低压东侧倒槽的强度和位置有较大的预报误差。数值模式比较容易捕捉西侧尺度较大、强度较弱的低压和锋面降水, 导致业务降水预报偏弱、偏晚。对地面和探空资料的同化则有利于模式更好地捕捉低涡的中尺度结构, 特别是其对应的地面东侧倒槽的发生和发展, 从而有利于极端暴雨模拟的改善。

致谢 感谢北京市防汛办公室提供河北镇的小时雨量资料。

### 参考文献

- [1] 湛芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考. 气象, 2012, 38(10): 1255–1266
- [2] 孙继松, 何娜, 王国荣, 等. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探. 暴雨灾害, 2012, 31(3): 218–225
- [3] 方翀, 毛冬艳, 张小雯, 等. 2012 年 7 月 21 日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 2012, 38(10): 1278–1287
- [4] Zhang D, Lin Y, Zhao P, et al. The Beijing extreme rainfall of 21 July 2012: “right results” but for wrong reasons. Geophysical Research Letters, 2013, 40: 1426–1431
- [5] 王淑莉, 康红文, 谷湘潜, 等. 北京 7·21 暴雨暖区中尺度对流系统的数值模拟. 气象, 2015, 41(5): 544–553
- [6] 孙永刚, 孟雪峰, 仲夏, 等. 河套气旋发展东移对一次北京特大暴雨的触发作用. 高原气象, 2014, 33(6): 1665–1673
- [7] 张迎新, 李宗涛, 姚学祥. 京津冀“7.21”暴雨过程的中尺度分析. 高原气象, 2015, 34(1): 201–209
- [8] Yu H, Meng Z. Key Synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China on 21 July 2012. Tellus A, 2016, 68: 31045
- [9] Meng Z, Zhang F. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part III: comparison with 3DVar in a real-data case study. Mon Wea Rev, 2008, 136: 522–540
- [10] Meng Z, Zhang F. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part IV: comparison with 3DVar in a month-long experiment. Mon Wea Rev, 2008, 136: 3671–3682
- [11] Zhang F, Weng Y, Sippel J A, et al. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 2009, 137: 2015–2125
- [12] Skamarock W, Klemp J, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note TN-475+STR, 2008
- [13] Grell G, Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophys Res Lett, 2002, 29(14): 38-1–38-4
- [14] Hong S, Dudhia J, Chen S. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon Wea Rev, 2004, 132: 103–120
- [15] Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data. Bound Layer Meteor, 2003, 107: 401–427
- [16] Barker D, Huang W, Guo Y, et al. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results. Mon Wea Rev, 2004, 132: 897–914
- [17] Zhang F, Meng Z, Aksoy A. Test of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: perfect model experiments. Monthly Weather Review, 2006, 134: 722–736
- [18] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1238–1253