肖明静，吴炜，刘诗军，等，2023. 多源观测数据逐半小时同化对一次区域持续性暴雨的敏感性试验[J]. 气象，49(8)：915-931.
Xiao M J，Wu W，Liu S J，et al，2023. Sensitivity experiments of half-hourly assimilation of multi-source data in one regional persistent rainstorm process[J]. Meteor Mon，49(8)：915-931(in Chinese).

多源观测数据逐半小时同化对一次区域持续性暴雨的敏感性试验*

肖明静[1,2,3] 吴 炜[1,2,3] 刘诗军[1,2,3] 夏 凡[1,2,3] 温晓培[1,2,3] 朱文刚[1,2,3]

1 山东省气象防灾减灾重点实验室，济南 250031
2 山东省气象科学研究所，济南 250031
3 长岛国家气候观象台，烟台 264000

提 要：利用基于 WRF 模式(Weather Research and Forecasting model)的逐半小时快速更新预报系统，对 2020 年 8 月 13—14 日鲁南一次区域持续性特大暴雨过程进行逐小时同化和逐半小时同化敏感性试验，以探讨高频资料同化应用问题，其中，逐半小时同化敏感性试验方案包括在半点同时同化地面自动气象站(AWS)观测资料和飞机报(AMDAR)资料及分别“拒绝”其中一种同化资料共三种方案。结果发现：半点同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料的试验对此次持续性暴雨 24 h 累计降水和短时强降水预报较逐时同化试验有显著改进作用，说明提高同化频次以提高高频资料的利用率对数值预报有正效果；在半点增加高频资料同化过程中，同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料的试验，均比“拒绝”其中一种同化资料的试验准确；“拒绝”同化 AMDAR 资料的试验比“拒绝”同化 AWS 资料的试验预报效果差，说明半小时同化试验中 AMDAR 资料同化起到了更为重要的作用；快速更新循环同化对初始场的改善是一个逐步调整的过程，不同同化资料和频次的试验对分析场的影响各有不同，同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料的半小时同化试验初始场与实况最接近；不同同化方案地面要素场高温高湿区相对辐合线的位置不同和高空冷暖空气强弱及配置不同，造成飑线系统的运动方向不同，是导致各试验区域持续性降水落区存在较大差异的主要原因；而飑线系统位置的差异导致其与西南暖湿气流中的新生系统结合程度不同，造成了未来降水强弱的差异。

关键词：逐半小时快速更新同化，自动气象站(AWS)资料，飞机报(AMDAR)资料，区域持续性暴雨

中图分类号：P435，P456 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2023.060401

Sensitivity Experiments of Half-Hourly Assimilation of Multi-Source Data in One Regional Persistent Rainstorm Process

XIAO Mingjing[1,2,3] WU Wei[1,2,3] LIU Shijun[1,2,3] XIA Fan[1,2,3] WEN Xiaopei[1,2,3] ZHU Wengang[1,2,3]

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong Province, Jinan 250031
2 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031
3 Changdao National Climatic Observatory, Shandong, Yantai 264000

Abstract: The hourly and half-hourly data assimilation sensitivity experiments for one regional persistent rainstorm process in southern Shandong from August 13 to 14 2020 are carried out using the half-hourly update and prediction system based on WRF with the purpose of exploring the application of high frequency data assimilation. The half-hourly data assimilation experiments include three assimilation schemes:

* 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD40)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J084)、山东省气象局科学技术研究项目(2022sdqxm04)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202007，QYXM202202)和山东台风与海洋气象创新团队专项(SDCXTD2021-2)共同资助
2022 年 4 月 9 日收稿； 2023 年 6 月 4 日收修定稿
第一作者：肖明静，主要从事数值模式资料同化和灾害性天气机理研究. E-mail：mjshaw0218@sina.com
通讯作者：吴炜，主要从事数值预报和海洋气象研究. E-mail：wuwei_sd@163.com

assimilating of the automatic weather station (AWS) data and the aircraft meteorological data relay (AMDAR) data at the half-hour frequency, and "rejecting" one of them respectively. The results show that the half-hourly cooperative assimilation experiment of AWS observation and AMDAR data can significantly improve the numerical prediction of 24 h accumulated precipitation and 1 h short-term severe precipitation during this persistent rainstorm relative to the hourly assimilation experiment. This indicates that increasing the assimilation frequency to increase the utilization of high-frequency data has a positive effect on the numerical prediction. In the process of half-hourly data assimilation, the experiment of assimilating AWS data and AMDAR data at the same time is more accurate than the experiment of "rejecting" one of them respectively. The result of assimilation experiment "rejecting" AMDAR data is worse than that of "rejecting" AWS data, indicating that the assimilation of AMDAR data plays a more import role than that of AWS data in half-hourly assimilation. The improvement of initial field by rapid updating cyclic assimilation is a process of gradual adjustment. The experiments with different assimilation data and frequencies have different effects on the analysis field. The initial field of half-hourly assimilation experiment of collaborative assimilating AWS data and AMDAR data is the closest to the observation. The different positions of the high temperature and high humidity area of the ground element field relative to the convergence line under different assimilation schemes, and the different strength and configuration of high-altitude cold and warm air lead to different movement directions of the squall line system, which is the main reason for the great difference of precipitation areas in each experiment. However, the location difference of squall line system leads to the different degree of integration with the newborn system in the warm and humid airflow in the southwest, resulting in the difference of precipitation intensity in the future.

Key words: half-hourly rapid update and assimilation, AWS data, AMDAR data, regional persistent rainstorm

引 言

数值预报技术是针对强对流天气短时临近预报的主要技术之一(Wilson et al,1998),而中小尺度对流系统由于水平尺度小、生命史短暂,相较于传统的数值预报系统,强对流天气预报越来越依赖于较短时间间隔的高频资料同化预报系统来提高预报的准确率(陈葆德等,2013)。为此,美国国家环境预报中心(NCEP)分别在1994年和2012年正式业务化了快速更新同化系统(RUC)(Benjamin et al,2004)和新一代快速更新同化预报系统(RR),更高分辨率的RR系统(HRRR)于2014年实现业务化(James et al,2017)。我国也发展了用于高频资料快速更新同化的业务系统,如北京基于WRF模式和3DVAR技术,建立了北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)(魏东等,2011;郝民等,2011);广州在GRAPES区域中尺度数值预报系统和3DVAR技术的基础上建立了逐时同化分析和模式预报循环系统(CHAF)(陈子通等,2010;黄燕燕等,2011);上海在2009年基于WRF模式和ADAS同化系统,建立了第一代上海快速更新同化数值预报系统(SMS-WARR V1.0)(陈葆德等,2013;王晓峰等,2015;李佳等,2017)。

如何协调利用好各种观测资料,将高时空分辨率资料有效同化进模式,对提高高分辨率模拟和中、小尺度天气系统预报的质量十分重要(黎慧琦和张大林,2021;何邓新等,2021;崔春光等,2021;赖安伟等,2021)。分钟级的地面自动气象站资料(AWS资料)具有较高时空分辨率,是描述中小尺度、短时强对流天气过程的重要观测资料之一,自然成为快速更新同化预报系统的一个重要观测资料来源。前期关于AWS资料的同化研究已有很多。王平等(2017)利用逐时快速更新同化系统对常规AWS资料和加密AWS资料进行敏感性试验,认为AWS资料的疏密影响模式初始场预报,同化所有观测资料的试验模拟效果最好;李少英等(2020)认为无论采用混合同化方法还是3DVAR,同化AWS观测均能

改善分析场和预报场;李红莉等(2014)利用 LAPS 系统(local analysis and prediction system)对雷达资料、探空资料和 AWS 资料进行融合同化分析,认为融合 AWS 资料后能改善低层的温、湿度场,但对中高层无影响;刘瑞婷等(2021)通过在雷达四维变分分析系统中加入 AWS 资料的同化方法,能有效改善边界层 1 km 高度以下的分析场,可进一步提高局地突发强对流的临近数值预报能力。除了直接应用 AWS 资料进行同化研究外,针对 AWS 资料进行订正改进的同化方案也有部分研究,如张鑫宇等(2021)、曹润东等(2021)。

飞机报资料(AMDAR 资料)作为另一种较高时空分辨率的观测资料也有一些研究成果。龚俊强等(2019)利用 WRF 模式和 3DVAR 同化系统,对 2015 年台风苏迪罗二次登陆过程同时同化无线电探空和 AMDAR 资料,能够有效改善台风移动路径、中心附近最低气压的模拟,对台风降水的预报评分有一定程度的改进,并且对台风结构的模拟也有所调整;陈锋等(2017)利用 WRF 模式与 GSI-3DVAR 同化系统开展观测系统试验,结果表明:不同类型资料同化对模拟结果贡献程度有明显差别,其中探空、雷达反射率和 AMDAR 资料对模拟结果有较大影响,分别"拒绝"这三种资料后模拟的高空各要素均方根误差均有不同程度上升;仲跻芹等(2010)利用 BJ-RUC 系统,通过对有无 AMDAR 资料参与同化的预报试验客观要素预报均方根误差和降水量 TS 评分的对比分析,认为 AMDAR 资料的同化对于前 9 h 预报时效内的高空风和温度预报有明显的正面影响,对于降水预报技巧的提高也有正效应。

上述研究有针对 AWS 资料疏密及其与雷达、探空等联合同化对预报的影响,也有针对 AMDAR 资料有无及其与雷达、探空等联合同化对预报的影响,但针对 AWS 资料和 AMDAR 资料同时同化的研究不多,且与 AMDAR 资料同化敏感试验相关的研究也以台风居多,针对区域暴雨研究的则较少。而且 3DVAR 同化对于高时间分辨率的 AWS 资料,同一位置仅能同化一个数据,若同化频率低,将不得不舍弃大量的观测资料;AMDAR 资料的特点为每个观测数据有详细的观测时间、经纬度和高度,随着探测时间远离同化时刻,获得的数据也与同化时刻的背景场差异较大,如果差异超过背景误差允许的范围就会被剔除,即使侥幸在误差范围内被允许同化也不能很好地代表同化时刻的真值。因此提高快速更新同化的频率对于提高高频资料的利用率具有十分重要的意义,但高频资料同化导致的模式初始变量不协调而引发的较长时间的 spin-up 问题与误差积累问题,又将大大消弱模式 1~2 h 的预报能力(王平等,2017),因此,提高模式同化频率的同时,须关注高频资料的使用方法及如何消除 spin-up 问题。山东省气象科学研究所在前期研究的基础上,研发了短时、短期一体化的逐半小时更新预报系统,该系统在逐时同化的基础上增加半点的 AWS 资料和 AMDAR 资料同化,并已于 2020 年 1 月正式业务运行。经验证,该系统在增加半点资料同化的同时,每个同化时刻均能在几分钟内将系统噪声降低到合理水平且预报质量较高。本文利用该系统对 2020 年 8 月鲁南一次区域持续性特大暴雨过程进行逐时同化试验和三种逐半小时同化敏感性试验(在半点同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料及分别"拒绝"其中一种同化资料),并对试验效果进行详细分析,以探讨高频资料同化需注意的问题。

1　资料和方法介绍

1.1　快速更新同化系统简介

利用山东省气象科学研究所基于 WRF-ARW 4.1.2 模式和 WRFDA4.1.2 三维变分资料同化系统建立的逐半小时更新预报系统(half-hourly update and prediction system,HHUPS)进行试验研究。HHUPS 模式系统水平分辨率为 3 km,垂直分层为 75 层,预报区域覆盖华北及其周边地区,系统采用逐半小时快速更新同化,每日 08 时和 20 时(北京时,下同)启动,初始场和侧边界条件由 NCEP 0.25°×0.25°逐 1 h 全球预报场(GFS)提供,每半小时同化一次资料,11 时和 23 时开始每小时启动一次热启动预报,提供逐1 h 高分辨率中尺度预报场,11 时和 23 时启动的预报结果预报时效为 96 h,其他时次预报时效为 36 h。同化的观测资料包括常规探空、L 波段雷达探空、GNSS/MET 水汽资料、AWS 资料和 AMDAR 资料,其中,国外范围采用国

际交换的常规探空，中国范围采用 L 波段雷达探空，并对 L 波段雷达探空秒级数据进行了稀疏化（郝民等，2014）。探空同化要素包括风、温度和湿度，AMDAR 资料同化要素为风、温度，AWS 资料同化要素包括风、温度、湿度和气压。模式的噪声水平可以用平均绝对地面气压倾向的时间连续变化特征（DPSDT）来衡量（陈敏等，2012），图 1a 显示随着同化次数增多，同化后噪声有所增大，但均在几分钟内降低到合理水平，并未将高频噪声带入到下一个循环，保证了资料同化及预报的性能。图 1b 给出了 2020 年 8 月连续一个月的逐时同化和逐半小时同化短期预报 12～36、24～48、36～60、48～72 h 四个预报时效平均的 24 h 累计降水 TS 评分，逐半小时同化短期预报在中雨、大雨、大暴雨和特大暴雨量级均有不同程度的提高。

1.2 试验设计

为了研究在逐时同化基础上增加半点同时同化上述两种资料和“拒绝”其中一种同化资料在快速更新同化系统中的作用，本文设计了一个控制试验（记为 cold）、一个逐时同化试验（记为 1h_all）和三个逐半小时同化试验（同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料的试验记为 hh_all，“拒绝”同化 AWS 资料和“拒绝”同化 AMDAR 资料的试验分别记为 hh_amd 和 hh_aws）。cold 试验从 2020 年 8 月 13 日 08 时冷启动，预报时效为 48 h，未同化任何资料；同化试验方案均从 2020 年 8 月 13 日 08 时启动，循环同化到 13 日 11 时启动预报，预报时效为 45 h；不同的是 1h_all 试验仅在整点同化数据，共进行 4 次同化，三个逐半小时同化试验则每半小时同化一次数据，共进行 7 次同化，同化试验方案见表 1。图 2a 给出了 2020 年 8 月 13 日 08 时 AWS 资料、GNSS/MET、探空及 08—11 时每半点 AMDAR 资料获取位置水平分布。08—11 时各同化时刻 AMDAR 资料有效同化数量垂直分布（图 2b）显示，同化时间窗内资料主要分布于 900～300 hPa 的对流层，其中 800～600 hPa 数量最多，基本都超过了 100 个，是对探空资料不足的有利补充。

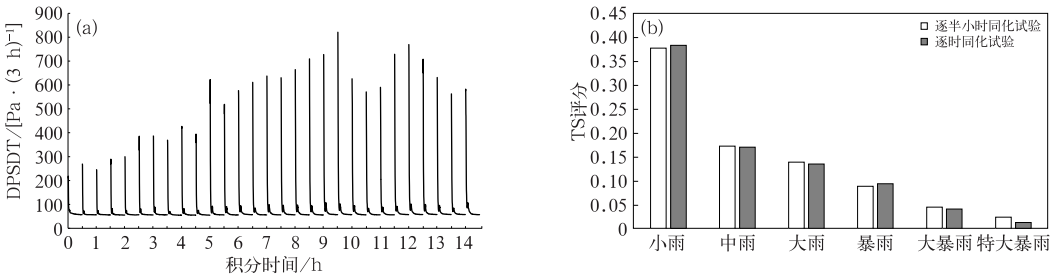


图 1 (a)系统噪声 DPSDT，(b)2020 年 8 月 24 h 累计降水 TS 评分

Fig. 1 (a) System noise DPSDT, and (b) TS score for 24 h accumulated precipitation in August 2020

表 1 各同化试验同化方案设计

Table 1 The design of data assimilation in all assimilation experiments

同化时间/BT	资料种类（相同部分）		资料种类（不同部分）							
			1h_all		hh_all		hh_amd		hh_aws	
	探空	GNSS/MET 水汽	AMDAR	AWS	AMDAR	AWS	AMDAR	AWS	AMDAR	AWS
08:00	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
08:30					√	√	√			√
09:00		√	√	√	√	√	√	√	√	√
09:30					√	√	√			√
10:00		√	√	√	√	√	√	√	√	√
10:30					√	√	√			√
11:00		√	√	√	√	√	√	√	√	√

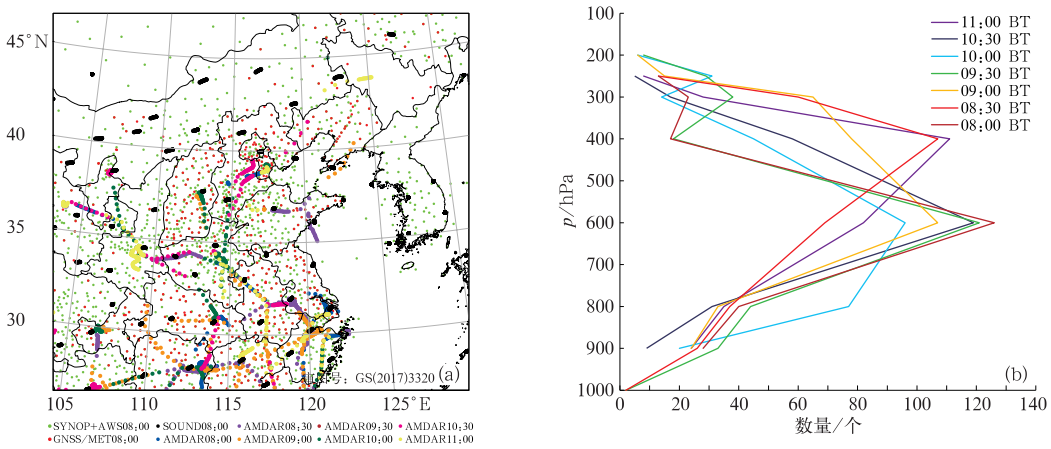


图 2　2020 年 8 月 13 日(a)08:00 地面观测资料、GNSS/MET、探空及 08:00—11:00 每半点 AMDAR 资料水平分布，(b)08:00—11:00 各同化时次 AMDAR 资料有效同化数量垂直分布

Fig. 2　(a) Horizontal distribution of ground observation, GNSS/MET, radiosonde at 08:00 BT and AMDAR data locations every half point from 08:00 BT to 11:00 BT, and (b) vertical distribution of effective assimilation quantity of AMDAR data at each assimilation time from 08:00 BT to 11:00 BT 13 August 2020

1.3　资料来源

地面实况数据来源于全国综合气象信息共享平台(CIMISS)系统的中国地面分钟资料。高空形势场来源于 2020 年 8 月 13—14 日的逐 1 h ERA5 再分析数据，分辨率为 0.25°×0.25°。模式背景场来源于 NCEP-GFS 逐 1 h 全球预报场，分辨率为 0.25°×0.25°。同化资料来源于 CIMISS 系统的全球地面逐小时资料、中国地面分钟资料、全球高空定时值资料、中国高空秒级资料、全球飞机高空探测资料和中国 GNSS/MET 水汽数据。

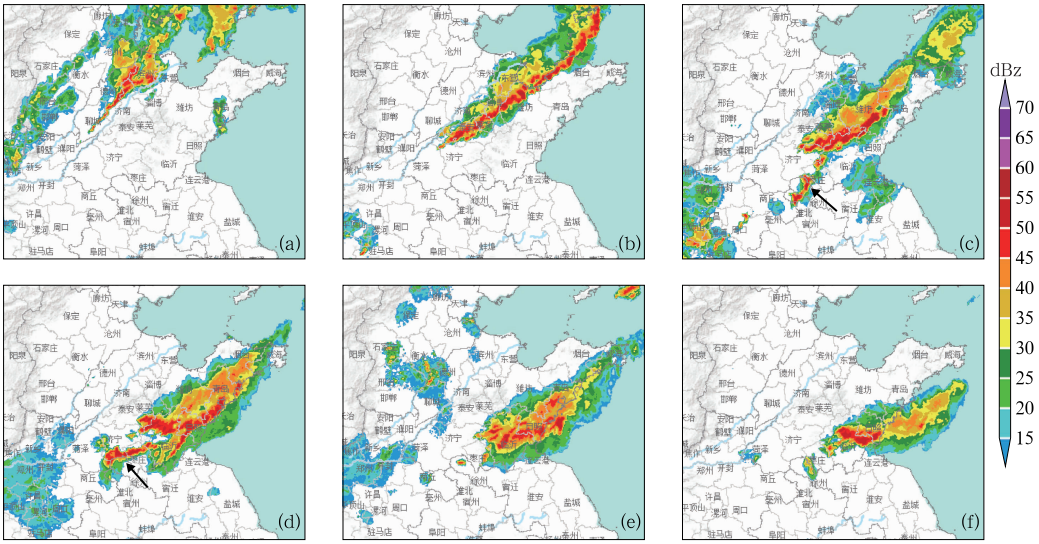
2　个例分析

2.1　天气实况

2020 年 8 月 13—14 日山东发生一次自西北向东南的全省性降水天气过程。此次降水过程主要分为两个时段。第一时段：13 日中午至夜间，为东北—西南向的线状对流性降水，由鲁西北向鲁东南不断移动(图 3a～3d)；第二时段：14 日凌晨开始该线状对流东段入海减弱，西段与西南暖湿气流中新生对流系统不断结合，于鲁东南的临沂地区维持少动，演变为区域性降水，一直持续到 14 日下午。本文重点关注第二时段的降水，该时段的区域持续性降水主要出现在鲁南和半岛地区(图 4a)，大暴雨以上量级降水主要集中在鲁东南的临沂地区，13 日 20:00 至 14 日 20:00 共计 35 个站出现 250 mm 以上降水，达到特大暴雨级别，其中，莒南县陡山水库站 24 h 累计降水量达 486.5 mm。14 日 03:00—09:00 连续 7 h 均有测站出现 50 mm·h^{-1}以上短时强降水，其中 04:00—08:00(图 4b～4f)达到 50 mm·h^{-1}降水的测站达到 3 个以上，最大雨强为 78.6 mm·h^{-1}。

13 日 08:00(图略)，蒙古东部存在一冷涡，中国北方的东部地区大部分处于西风槽前，东南沿海受西太平洋副热带高压(以下简称副高)控制，副高脊线在 30°N 左右，山东省位于西风槽前的西南暖湿气流带中。13 日 11:00(图 5)蒙古冷涡略东移，850 hPa 低空山东与河北交界处有一切变线；11:30 在冷涡后部、副高边缘的鲁西北聊城和德州交界处逐渐生成一线状对流系统(图 3a)，该系统呈东北—西南走向并向东南方向发展；12:00(图略)，其长宽比超过 5∶1，达到飑线的标准，且具有明显的组织结构；16:00(图 3b)飑线达到旺盛阶段，从鲁西中部一直绵延到辽东半岛南端；18:00 副高边缘商丘、亳州一带有对流系统发展(图略)；20:12(图 3c)与飑线弓形回波结合，此时副高边缘商丘、亳州又有新生对流系统发展；至 23:00(图 3d)该新生对流系统与飑线系统后部结合；14 日 02:00(图 3e)飑线系统基本成准东西向，其东段入海后减弱，至此第一阶段线状对流性降水结束。第二阶段，14 日 02:00—20:00，蒙古冷涡缓慢东移，副高 588 dagpm 等值线(以下简称 588 线)华北段始终位于山东南部至半岛

一带，大尺度环境系统相对稳定；588 线的北侧 850 hPa 切变线呈准东西向。雷达图（图 3f）上显示的飑线系统位于鲁南东部的临沂地区西段在老单体消亡的同时一直有新单体生成，回波强度维持在 45 dBz 以上。



注：黑色箭头代表新生对流系统。

图 3 2020 年 8 月 13 日(a)11:30、(b)16:00、(c)20:12、(d)23:00，14 日(e)02:00、(f)05:00 组合反射率因子

Fig. 3 Composite reflectivity at (a) 11:30 BT, (b) 16:00 BT, (c) 20:12 BT, (d) 23:00 BT 13, and (e) 02:00 BT, (f) 05:00 BT 14 August 2020

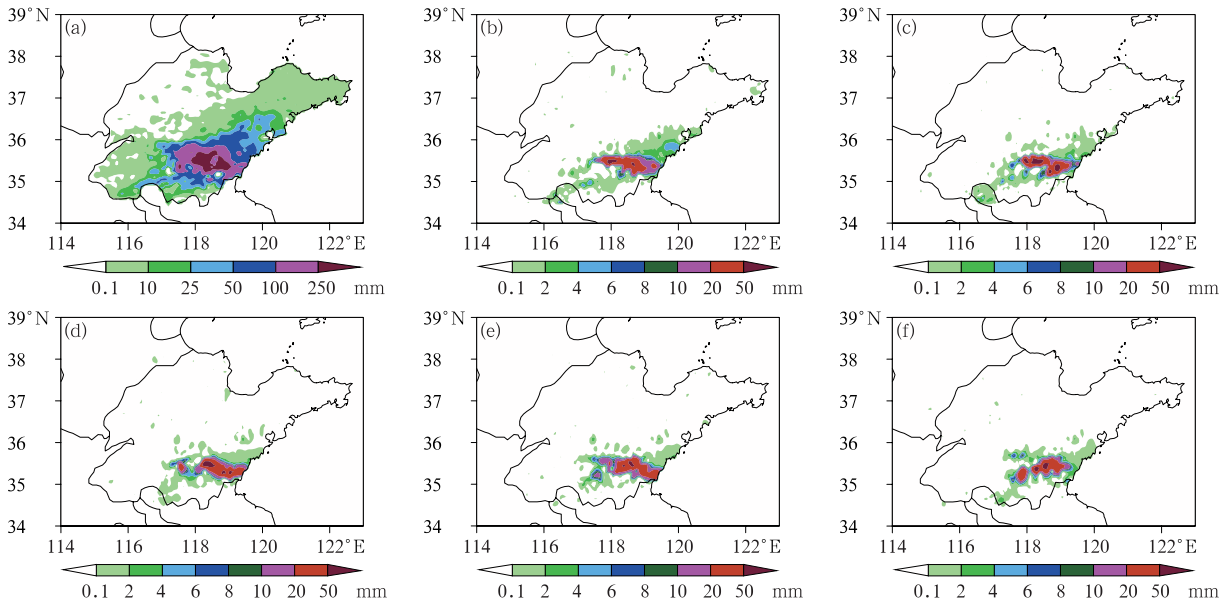
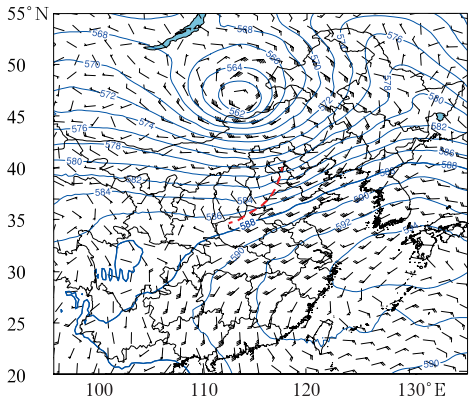


图 4 2020 年 8 月(a)13 日 20:00 至 14 日 20:00 的 24 h 累计降水量，和 14 日(b)04:00、(c)05:00、(d)06:00、(e)07:00、(f)08:00 的过去 1 h 降水量

Fig. 4 (a) 24 hour cumulative precipitation from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14, and (b—f) one hour precipitation distribution at (b) 04:00 BT, (c) 05:00 BT, (d) 06:00 BT, (e) 07:00 BT and (f) 08:00 BT 14 August 2020



注：红色虚线为切变线。

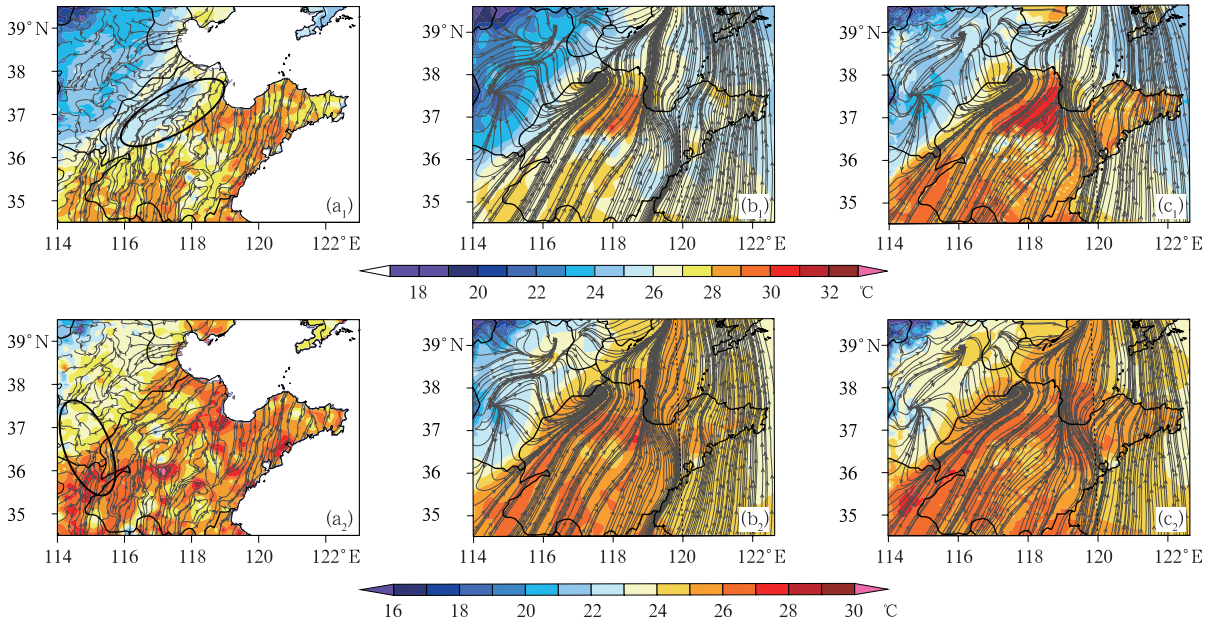
图 5　2020 年 8 月 13 日 11：00 500 hPa 高度场（蓝色等值线，单位：dagpm）和 850 hPa 风场（风羽）

Fig. 5　500 hPa geopotential height (blue contour, unit: dagpm) and 850 hPa wind field (barb) at 11:00 BT 13 August 2020

2.2　模式初始场的调整

2.2.1　地　面

各同化试验 08 时第一次同化数据相同，cold 试验初始场（图 6b）与同化试验分析场（图 6c）地面温度、露点的变化对比显示，同化分析场在鲁中山区的温度和露点均明显降低，最高降低 4℃，而鲁中山区的周边地区趋势则相反，尤其是在鲁西北的东部温度最高升高 3.8℃。地面流场则体现了资料同化后鲁中山区的绕流作用，西南暖湿气流从东西两侧绕过山地后在鲁西北东部汇集，绕流导致风速加大，使得河北南部前期降水形成的冷池出流与西南暖湿气流形成的地面辐合和鲁西北北部的气旋性辐合增强，更有利于对流系统的发生发展。与实况相比，同化试验分析场较 cold 试验更接近实况，湿度场的调整较为理想，但温度场整体略偏高于实况，尤其是鲁



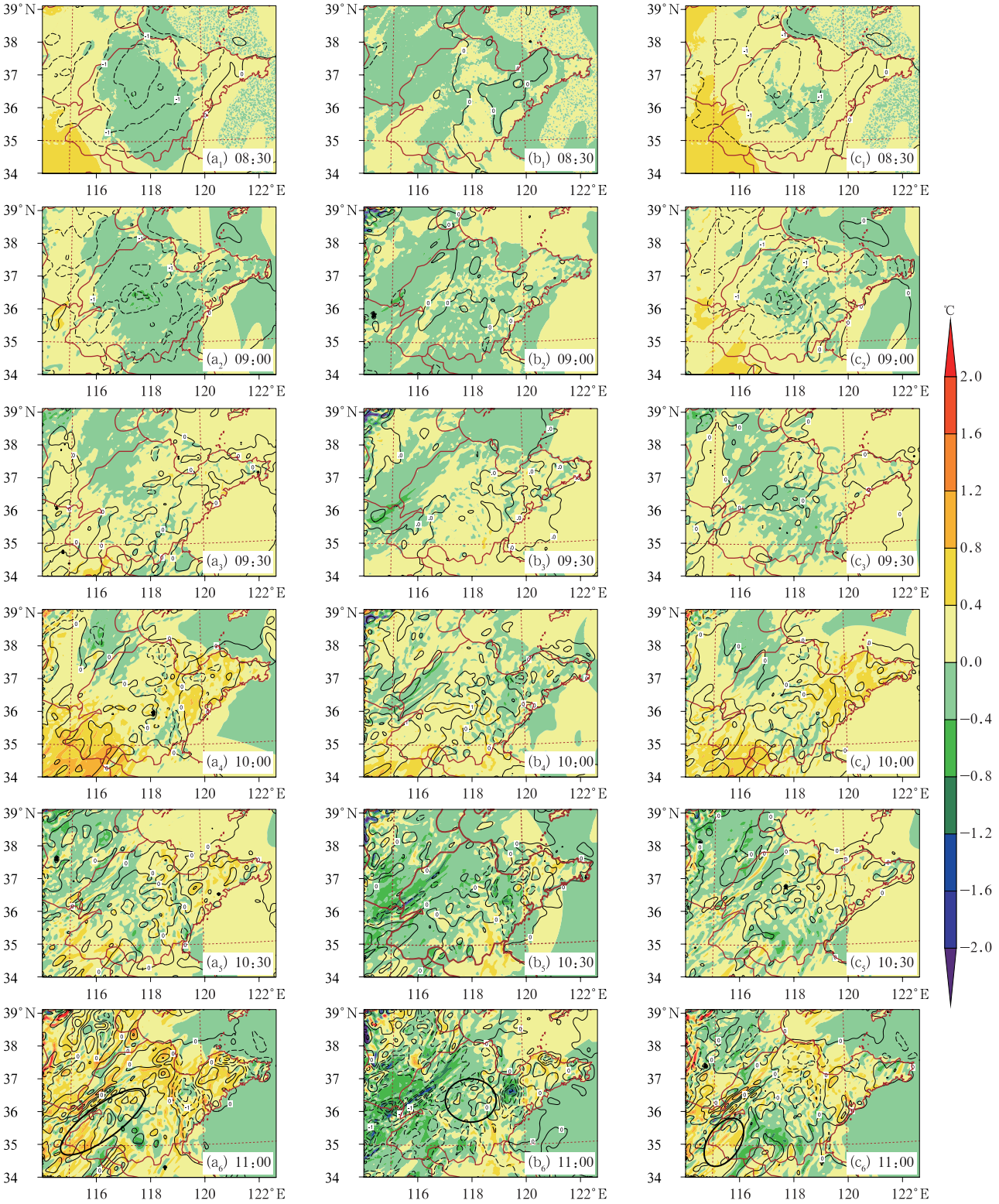
注：图中黑圈标注温湿度场差异较大之处。

图 6　2020 年 8 月 13 日 08：00（a）实况、（b）cold 试验、（c）第 1 次同化后的（a_1～c_1）地面温度（填色）和（a_2～c_2）露点温度（填色）分别配合地面流场（流线）分布

Fig. 6　（a_1－c_1）Ground temperature (colored) and（a_2－c_2）dew point temperature (colored) corresponding separately to ground flow field (streamline) of (a) observation, (b) cold experiment, (c) experiment after the 1st assimilation at 08:00 BT 13 August 2020

西北和鲁西（图 6a_1 黑圈）温度明显高于实况；辐合线西南角和西北气流湿度场略低于实况（图 6a_2 黑圈），说明一次同化结果能在一定程度上改善初始场，但也存在不理想的情况。

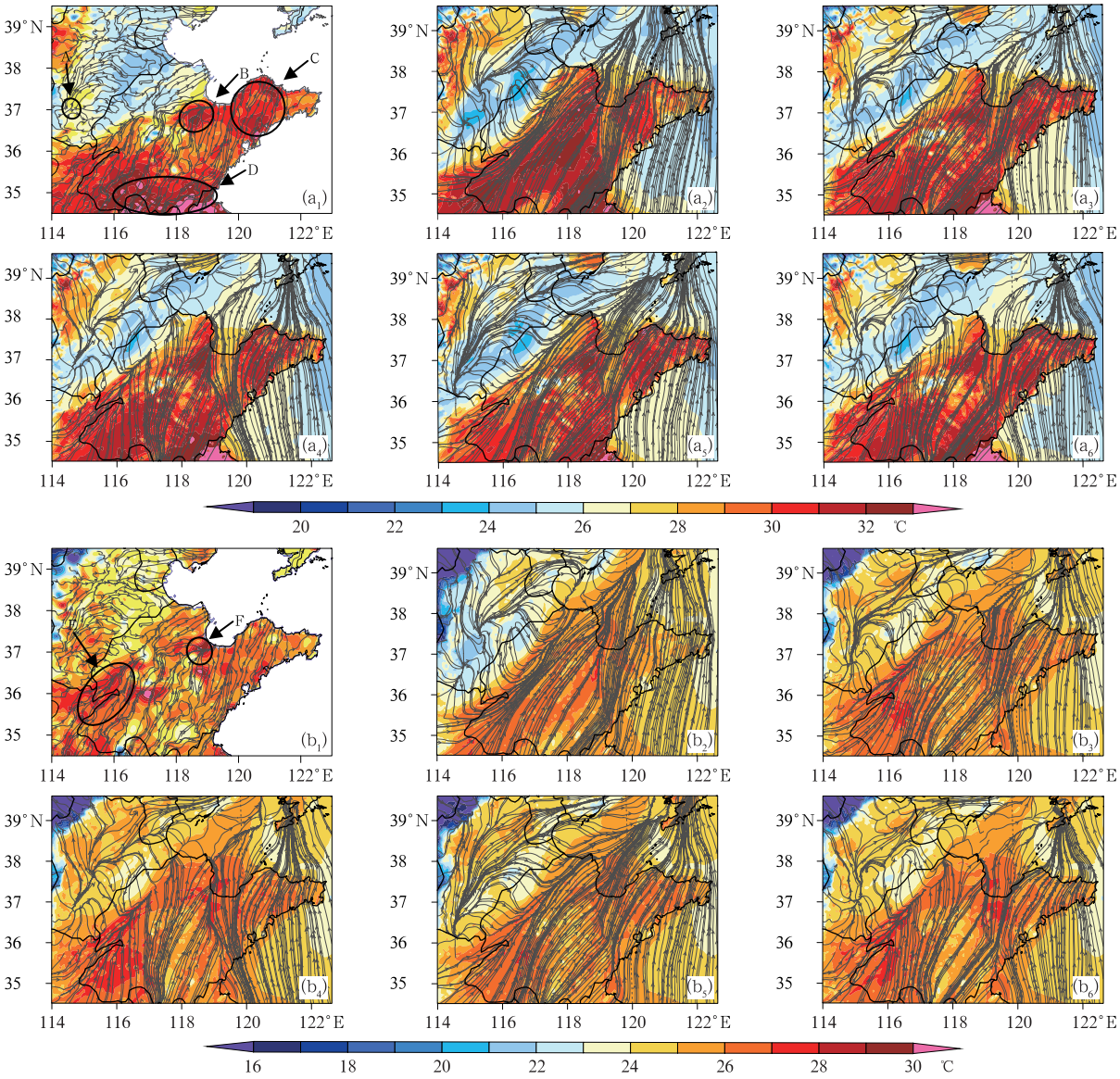
图 7 给出了 08：30—11：00 第 2～7 次同化逐半小时各同化试验与 1h_all 试验地面温湿度的差值场。08：30 第 2 次同化后，hh_amd 试验对地面温湿度场（图 7b_1）调整不明显；而 hh_aws 试验的温度差值场基本为负值，鲁西北达到－2℃，湿度差值场基本为正值，鲁西南达 1℃；hh_all 试验则为 hh_amd 和 hh_aws 试验的综合效果。结合图 8 来看，同化了 AWS 资料后的 hh_all 和 hh_aws 试验对第 1 次



注:图中黑圈标注差值场大值区。

图 7 2020 年 8 月 13 日 08:30—11:00 第 2～7 次同化(分图号下标 1～6)逐半小时同化试验与 1h_all 试验地面温度(等值线,单位:℃)和露点温度(填色)的差值场
(a)hh_all 试验,(b)hh_amd 试验,(c)hh_aws 试验

Fig. 7 Difference field of ground temperature (isoline, unit: ℃) and ground dew point temperature (colored) between half-hourly assimilation experiments and 1h_all experiment from the 2nd to 7th assimilations (subscripts 1—6) from 08:30 BT to 11:00 BT 13 August 2020
(a) hh_all experiment, (b) hh_amd experiment, (c) hh_aws experiment



注：字母 A～F 指示 hh_all 试验更接近实况之处。

图 8　2020 年 8 月 13 日 11:00(a_1,b_1)实况,(a_2,b_2)cold 试验,(a_3～a_6,b_3～b_6)第 7 次同化后各同化试验的(a)地面温度场(填色),(b)地面露点温度场(填色)分别配合地面流场(流线)分布

(a_3,b_3)1h_all 试验,(a_4,b_4)hh_all 试验,(a_5,b_5)hh_amd 试验,(a_6,b_6)hh_aws 试验

Fig. 8　(a) Ground temperature field (colored) and (b) ground dew point temperature field (colored) corresponding separately to ground flow field (streamline) after the 7th assimilation at 11:00 BT 13 August 2020

(a_1, b_1) observation, (a_2, b_2) cold experiment, (a_3, b_3) 1h_all experiment,

(a_4, b_4) hh_all experiment, (a_5, b_5) hh_amd experiment, (a_6, b_6) hh_aws experiment

同化导致的鲁西北和鲁西地面温度过高现象进行了正向调整；hh_aws 试验湿度差值场在山东大部仍为正值，呈负向调整，而 hh_all 试验湿度差值场在山东大部为负值，其他地区为正值，hh_all 湿度场调整效果最佳。从第 3 次(09:00)同化开始，hh_amd 试验(图 7b_2)对鲁西北聊城和河北交界处飑线初生阶段湿度场较 1h_all 试验明显降低，而 hh_all 和 hh_aws 试验则较 1h_all 试验湿度场升高。至 11:00 第 7 次同化后，从温湿度场的差值来看，hh_all 较 1h_all 差值基本为正，而 hh_amd 差值基本为负，这也意味着未来降水量存在一定的差别。

7 次同化后逐半小时各同化试验与 1h_all 试验

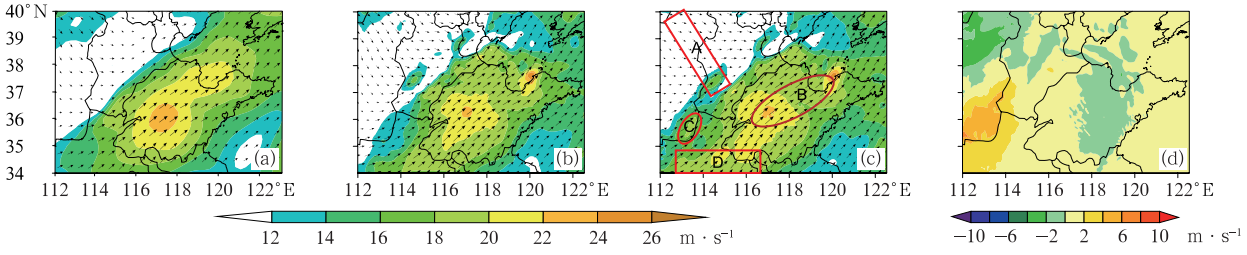
的温度、露点差值大值区与地面辐合线的相对位置不同。hh_all 试验的温湿差值大值区(图 7a$_6$)位于辐合线的东南方位,并与辐合线平行,hh_amd 试验该区域(图 7b$_6$)位于辐合线偏东方向,hh_aws 试验中(图 7c$_6$)则位于辐合线偏南方向。盛杰等(2019)研究发现高温高湿区相对于飑线的位置不同会导致飑线的传播方向不同。因此各同化试验暖湿位置的差异,导致各同化试验对流系统将沿各自的高温高湿区向不同方向传播。

与图 6 相比,2020 年 8 月 13 日 11:00,经过 7 次同化后(图 8),各同化试验地面热动力场分布对第 1 次同化造成的过度调整部分均有一定的正向调整,且鲁中山区的绕流作用使得同化试验的辐合线较 cold 试验均偏西北,与实况更相符,说明多次同化较单次同化可以得到更好的分析场。不同的是,7 次同化后各同化试验辐合线以北冷空气的风向略有不同,1h_all 为西北风,hh_all 为北西北风,hh_amd 为西西北风,hh_aws 基本为北风,各同化试验辐合线以南的暖湿空气的风向也略有不同,冷暖空气的配置不同,将导致地面辐合线未来走向不同。而从图 8a$_1$ 的河北南部的出流位置(A),鲁西北东部的温度及流场分布(B),半岛中部(C)、鲁南及江苏北部(D)的温度分布,图 8b$_1$ 鲁西聊城地区(E)及鲁西北东部(F)湿度分布均能明显看出 hh_all 试验更接近实况。

2.2.2 高 空

各同化试验 08:00 第 1 次同化数据相同,同化试验分析场(图 9c)对 700 hPa 风向调整不明显,与 cold 试验初始场(图 9b)相似,且与 ERA5 资料(图 9a)基本相符,但对风速有一定调整,对比风速订正(孟宪贵等,2018)后的 ERA5 资料,大部分位置同化有正效果,结合图 9d 可以看出同化分析场存在 A 处调整错误,B 处调整不足,C、D 处调整过度的现象,这可能与高空观测资料较少,且高空资料并非同化时刻资料而是同化时刻前后同化时间窗内的资料有关,也说明一次同化对高空场的改善并不理想。

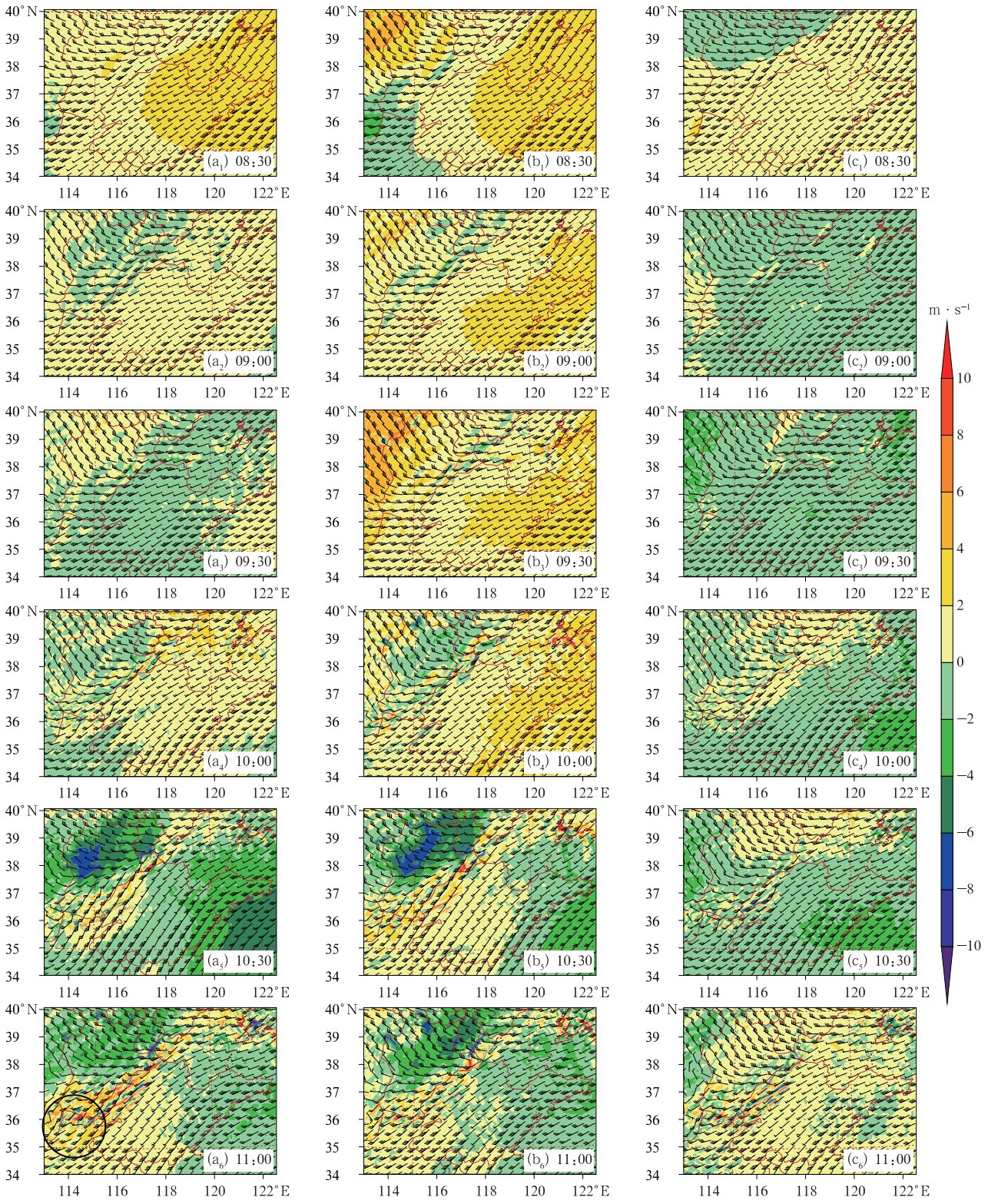
图 10 给出了 2020 年 8 月 13 日 08:30—11:00 第 2～7 次逐半小时各同化试验 700 hPa 风场及分别与 1h_all 试验风速的差值场。08:30 第 2 次同化后,hh_aws 试验对 700 hPa 风场(图 10c$_1$)调整不明显;hh_all 和 hh_amd 试验的风速较 1h_all 试验有较大调整,116°E 以东变化相似,山东中部及半岛和黄渤海部分地区最大增大了 3.7 m·s^{-1},除此之外,hh_amd 试验在山西北部和河北中部700 hPa 西北风速较 1h_all 试验明显增大,而山西南部和河南北部的西南风速则明显减小。结合图 9 来看,半点同化 AMDAR 资料后对分析场均有正向调整,弥补了第 1 次同化的不足。就风向而言,hh_amd 试验山西北部和河北中部 700 hPa 西北风与其他两个半点试验风向有大约 45°的夹角。后面几次同化:hh_amd 试验较之 1h_all 试验,西北风先增强后减弱,而西南风基本为增强;hh_aws 试验较之 1h_all 试验,则西北风先减弱后增强,西南风基本为减弱;hh_all 试验则为 hh_amd 和 hh_aws 试验同化效果的叠加。hh_amd 试验第 3 次同化后(图 10b$_2$)河北南部偏东沿山东省界出现一条东北—西南向风速强弱交替带,即有对流产生,hh_aws 生成时间最



注:字母 A～D 标注同化分析场与 cold 试验差异较大之处。

图 9 2020 年 8 月 13 日 08:00(a)ERA5,(b)cold 试验,(c)第 1 次同化后 700 hPa 风场(风矢和填色),(d)同化试验与 cold 试验 700 hPa 风速差值场

Fig. 9 (a—c) The 700 hPa wind field (vector and colored) of (a) ERA5, (b) cold experiment, (c) all experiments after the 1st assimilation, and (d) diffidence field of 700 hPa wind speed between assimilation experiments and cold experiment at 08:00 BT 13 August 2020



注：图中黑圈标注风速差异较大之处。

图 10　2020 年 8 月 13 日第 2～7 次同化(分图号下标 1～6)逐半小时同化试验 700 hPa 风场(风羽)及(a)hh_all 试验，(b)hh_amd 试验，(c)hh_aws 试验分别与 1h_all 试验风速差值场(填色)

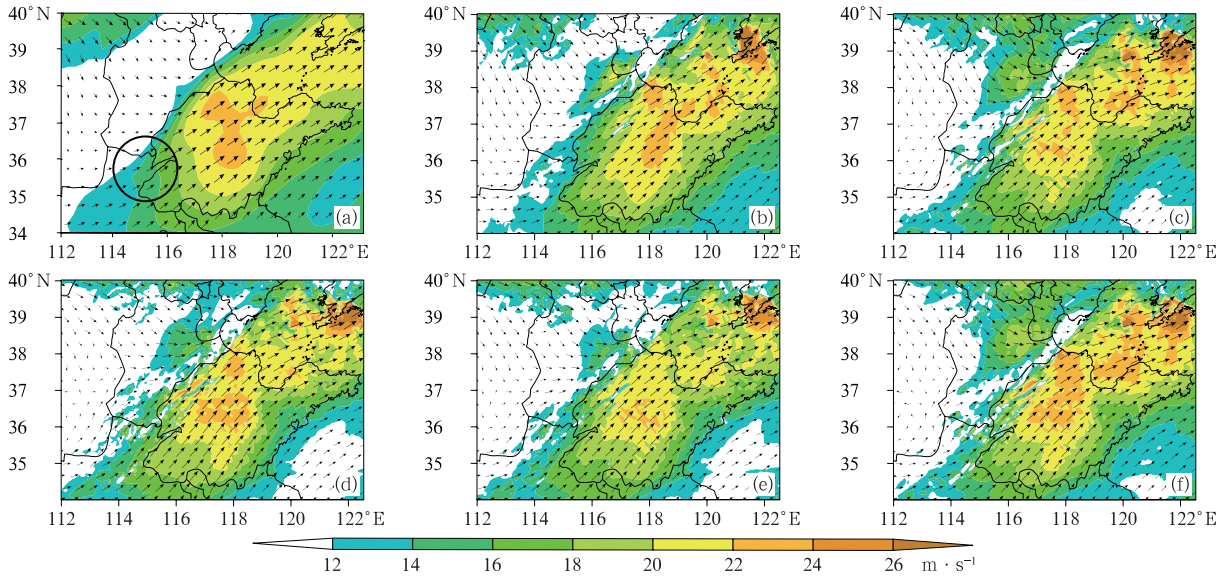
Fig. 10　The 700 hPa wind field (barb) of half-hourly assimilation experiments from the 2nd to 7th assimilations (subscripts 1−6), and wind speed difference field (colored) of (a) hh_all experiment, (b) hh_amd experiment, (c) hh_aws experiment respectively with 1h_all experiment on 13 August 2020

晚，hh_all 居中，说明 AMDAR 资料同化率先改变了高空场。

7 次同化后各试验鲁西北聊城、德州地区飑线初生位置均有一条东北—西南向的风速强弱交替带，逐半小时各同化试验与 1h_all 试验 700 hPa 飑线两侧冷暖空气的强度不同，表明干冷空气侵入的程度和西南急流的强度不同。飑线后部的冷空气，hh_amd 试验最弱，hh_aws 最强；飑线前部的暖湿空气则是 hh_all 最强（图 10a_6 黑圈）。各同化试验冷暖空气的配置差异，标志着各同化试验未来雨带分布位置不同。

图 11 给出的 13 日 11:00 各试验 700 hPa 分析场冷暖气流的风向相似，且基本与 ERA5 资料（图 11a）相符，但各试验风速及急流大值区分布有一定差别。从西北气流来看，hh_all 和 hh_amd 试验偏弱，hh_aws 试验最强。而对西南急流而言，hh_amd 试验最弱，22 m·s^{-1}以上急流区范围明显偏小，1h_all 试验次之，cold 试验 22 m·s^{-1}急流区则略偏西北。各试验对应的飑线位置为鲁西北聊城、德州一带一条东北—西南向的弱风区，而弱风区的位置不尽相同，cold 试验中该弱风区位于 37°N 以北，hh_amd 试验除存在和 cold 试验一样但略偏南的弱风区外，在河南与山东聊城交界处也有一段弱风区，其他试验则两段弱风区较连续，但弱风区北侧较模糊，南侧较清晰，各试验弱风区与急流区的位置匹配。700 hPa 弱风区的位置和地面辐合线的位置相对应，翟国庆和俞樟孝（1991）、吴海英等（2013）、高梦竹等（2017）的研究表明，飑线的触发与低层辐合线（包括阵风锋、海风锋辐合线以及地形辐合线等）、干线、锋面以及地形抬升等有关。结合图 10a_6 飑线初生位置西南方（黑圈）急流情况，hh_all 试验中此处（图 11d 黑圈）急流最强，较 1h_all 试验平均高 4～6 m·s^{-1}，且与实况更相符，有利于强对流的发生发展；cold 试验该位置急流最弱，其他三个同化试验居中。各试验弱风区情况及其西南侧急流不同意味着飑线触发位置和强弱不同。

由于资料同化对背景场的影响范围有一定的阈值设置，使得地面资料同化较容易改变近地面场，而 AMDAR 资料则较容易改变高空场，这与陈锋等（2017）结论相似。总之，从对地面和高空同化分析场的分析可以看出，前几次同化对分析场的改变是一个逐步调整的过程，每次调整单独同化某一种资



注：图中黑圈标注急流差异较大之处。

图 11 2020 年 8 月 13 日 11:00 (a)ERA5，(b)cold 试验，(c～f)第 7 次同化后各同化试验的 700 hPa 风场（风矢和填色）

(c)1h_all 试验，(d)hh_all 试验，(e)hh_amd 试验，(f)hh_aws 试验

Fig. 11 The 700 hPa wind field (vector and colored) of (a) ERA5, (b) cold experiment, and (c—f) all experiments after the 7th assimilation at 11:00 BT 13 August 2020

(c) 1h_all experiment, (d) hh_all experiment, (e) hh_amd experiment, (f) hh_aws experiment

料的试验都存在一些调整不足或调整过度的情况，而 hh_all 试验同化效果是 hh_amd 和 hh_aws 试验同化效果的叠加，且与实况最相符，多次同化是一个使分析场逐渐逼近实况的过程。

2.3　试验结果分析

2.3.1　24 h 累计降水

从 13 日 20:00 至 14 日 20:00 各试验累计降水（图 12）来看，未同化资料的 cold 试验（图 12a）降水基本在青岛地区，100 mm 以上大值区范围偏小，250 mm 以上降水漏报；1h_all 试验（图 12b）则 100 mm 以上大值区范围偏大，250 mm 以上量级降水落区偏北，范围偏小；hh_all 试验降水落区（图 12c）与实况最为一致，强降水主要集中在鲁南东部地区，且暴雨以上量级降水落区的形状、范围和走向都与实况最为一致，呈东西走向，格点 24 h 降水量最大值为 464.692 mm，格点位置为 35.560°N、118.095°E，与国家级 AWS 资料最大降水站点（沂南站）的降水量和位置（399.4 mm，35.530°N、118.430°E）均极为相似；hh_amd 试验（图 12d）降水虽然也集中在鲁南东部，但落区整体偏北，且 250 mm 以上的特大暴雨落区范围偏小；hh_aws 试验（图 12e）降水落区较 hh_all 试验明显偏西，特大暴雨以上量级降水范围偏小。半点同时同化 AWS 资料和 AMDAR 资料的试验预报效果最好，就落区形态和 250 mm 以上降水大值区范围而言，“拒绝”同化 AMDAR 资料的试验比“拒绝”同化 AWS 资料的试验预报效果差，说明试验中 AMDAR 资料同化起到了更为重要的作用。

2.3.2　1 h 降水

区域持续性降水阶段的 14 日 04:00—08:00 段实况降水连续 5 h 均有 3 个或以上测站出现超过 50 mm·h^{-1}强度的降水。图 13 给出了各试验该时段各时次过去 1 h 降水分布，hh_all 和 1h_all 试验落区相似，但 1h_all 试验降水较弱，且落区较分散，hh_amd 和 hh_aws 试验落区分别偏北、偏西南。就降水强度而言，hh_all 试验除 06:00 漏报 50 mm 以上降水外，其余时次均与实况最为接近，14 日 05:00 达此次过程小时降水量最大值（78.6 mm，双堠站，图 4c），hh_all 试验小时降水量极值达 63.22 mm，与实况最接近，1h_all、hh_amd、hh_aws 试验的该值分别为 53.15、56.88、50.36 mm。

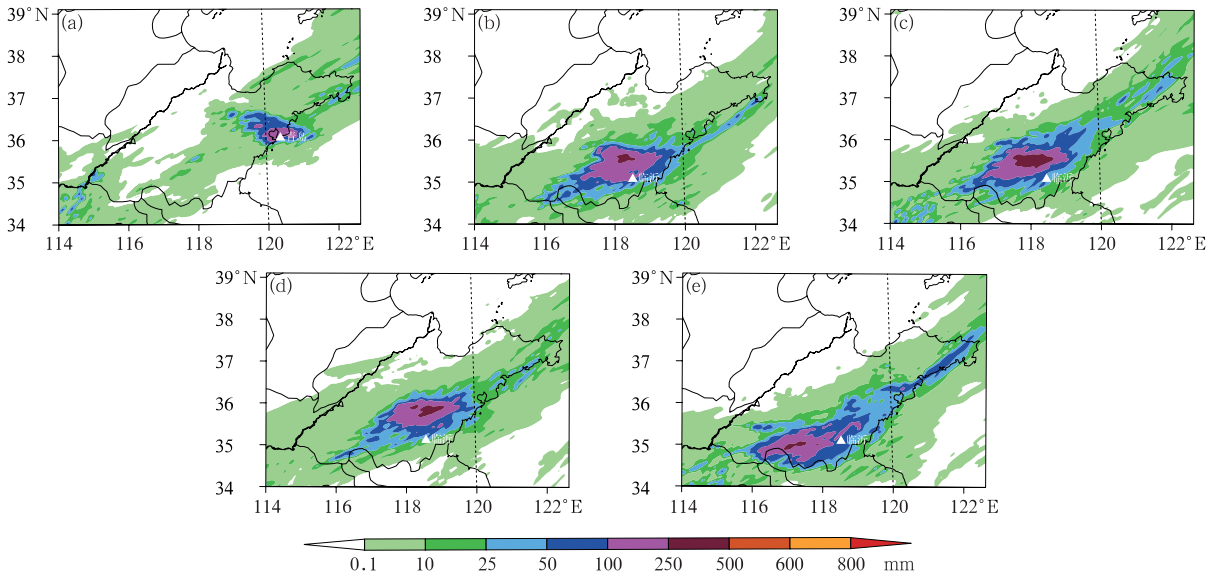
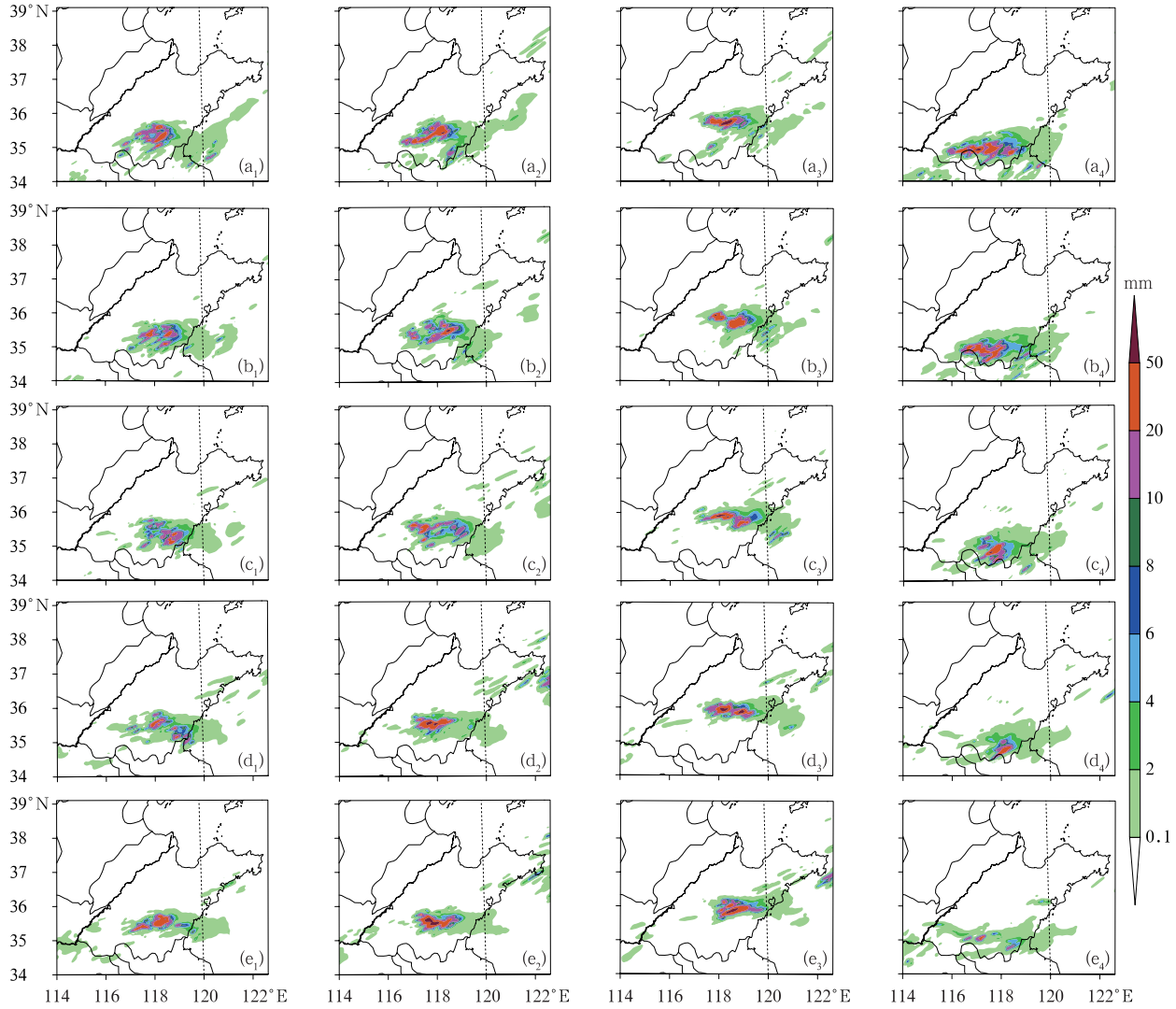


图 12　2020 年 8 月 13 日 20:00 至 14 日 20:00(a)cold 试验和(b～e)各同化试验 24 h 累计降水量

(b)1h_all 试验，(c)hh_all 试验，(d)hh_amd 试验，(e)hh_aws 试验

Fig. 12　The 24 h accumulated precipitation from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14 August 2020 of (a) cold experiment, and (b—e) all experiments

(b) 1h_all experiment, (c) hh_all experiment, (d) hh_amd experiment, (e) hh_aws experiment



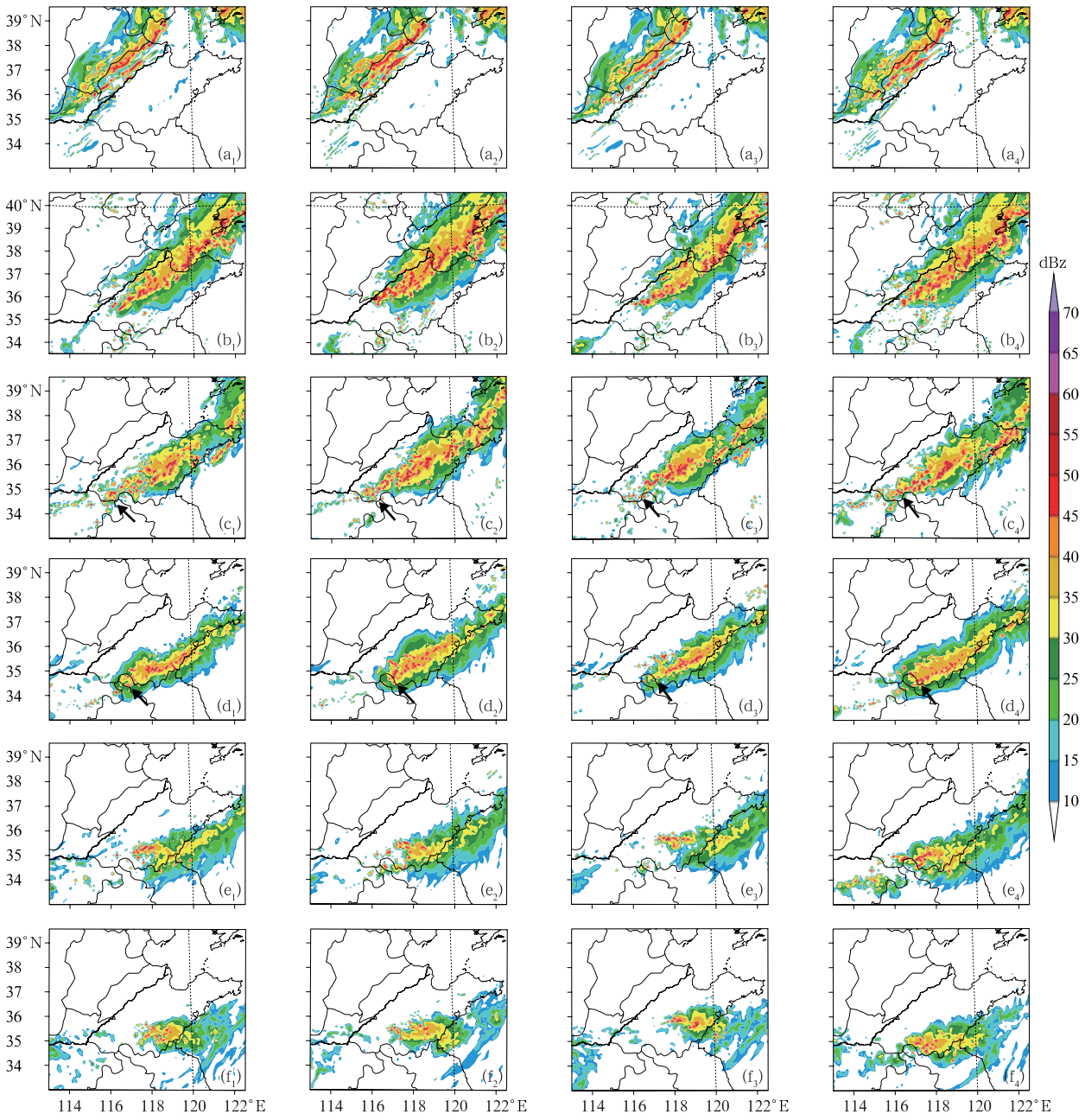
注：分图号下标 1～4 分别代表：1h_all、hh_all、hh_amd 和 hh_aws 试验。

图 13 2020 年 8 月 14 日(a)04:00,(b)05:00,(c)06:00,(d)07:00,(e)08:00 各同化试验过去 1 h 降水量

Fig. 13 The previous 1 h precipitation distribution of all experiments at (a) 04:00 BT, (b) 05:00 BT, (c) 06:00 BT, (d) 07:00 BT and (e) 08:00 BT 14 August 2020

2.3.3 组合反射率

图 14 给出了图 3 对应时次各同化试验组合反射率情况。11:30(图 14a)各同化试验均在冷涡降水南侧的鲁西北德州聊城一带生成一东北—西南向线状对流回波带，hh_all 和 hh_aws 试验线状回波带的强度和位置最为接近，与实况(图 3a)更相符，1h_all 试验(图 14a_1)略偏弱，且线状回波带东北端较实况偏东南，hh_amd 试验(图 14a_3)线状回波最弱，与实况差异较大。随时间推移，各试验线状回波均向东南移动，16:00(图 14b)与 11:30 各试验情况相似，但强回波带位置略有差异。20:00(图 14c)和 23:00(图 14d)由于线状回波所处位置不同使得各试验飑线尾部与西南新生对流系统(黑色箭头所指)的结合情况不同，1h_all 和 hh_amd 试验未结合，这也直接导致了 1h_all 和 hh_amd 试验未来降水偏弱；hh_all 试验结合位置与实况接近；hh_aws 因为飑线系统最为偏南，与新生系统结合较早，新生系统已并入飑线，形成飑线系统的新尾。02:00 飑线东半段入海减弱，西半段长时间滞留在鲁南东部地区，但各试验强回波位置略有不同，1h_all 试验前期(图 14e_1)偏西，后期(图 14f_1)向东偏移，其他试验强回波位置则相对稳定，hh_all 则一直处于临沂地区，与实况(图 3f)吻合，1h_amd 试验较 hh_all 偏北，1h_aws 则较 hh_all 偏西。



注：黑色箭头代表新生对流系统；分图号下标 1～4 分别代表：1h_all、hh_all、hh_amd 和 hh_aws 试验。

图 14　2020 年 8 月 13 日(a)11:30、(b)16:00、(c)20:00、(d)23:00，14 日(e)02:00、(f)05:00 的各同化试验组合反射率(填色)

Fig. 14　Composite reflectivity of assimilation experiments at (a) 11:30 BT, (b) 16:00 BT, (c) 20:00 BT, (d) 23:00 BT 13, and (e) 02:00 BT, (f) 05:00 BT 14 August 2020

3　结　论

中纬度地区的区域持续性暴雨时有发生，而期间连续长时间的短时强降水却不多见，由于短时强降水的对流属性，导致预报难度较大，是影响定量降水预报准确率的重要原因。本文利用逐半小时更新预报系统对 2020 年 8 月 13—14 日鲁南一次区域持续性特大暴雨过程进行逐时和在半点同时同化或分别“拒绝”AWS 资料和 AMDAR 资料的逐半小时敏感性同化试验，以分析高频资料同化应用问题，得到以下主要结论。

(1)半点同时同化AWS资料和AMDAR资料的试验对此次持续性暴雨24 h累计降水和短时强降水预报有显著改进作用,说明提高同化频次以加大高频资料的利用率对数值预报有正效果。

(2)在半点增加高频资料同化过程中,同时同化AWS资料和AMDAR资料的试验,均比"拒绝"其中一种同化资料的试验准确;"拒绝"同化AMDAR资料的试验比"拒绝"同化AWS资料的试验预报效果差,说明在半点同化试验中AMDAR资料同化起到了更为重要的作用。

(3)快速更新循环同化对初始场的改善是一个逐步调整的过程,不同同化资料和频次对分析场的影响各有不同,同时同化AWS资料和AMDAR资料的逐半小时同化试验初始场与实况最接近。

(4)在不同同化方案中,地面高温、高湿区相对辐合线的位置不同和高空冷暖空气强弱与配置不同,造成飑线系统的运动方向不同,是导致各试验区域持续性降水落区存在较大差异的主要原因;而飑线系统位置的差异导致其与西南暖湿气流中的新生系统结合程度不同,造成了未来降水强弱的差异。

参考文献

曹润东,陈军明,赵平,2021.地面观测资料地形高度订正对我国东部暴雨数值模拟的影响[J].气象与环境科学,44(1):46-55. Cao R D,Chen J M,Zhao P,2021. Influence of topographic elevation correction of surface observation data on numerical simulation of heavy rainfalls over eastern China[J]. Meteor Environ Sci,44(1):46-55(in Chinese).

陈葆德,王晓峰,李泓,等,2013.快速更新同化预报的关键技术综述[J].气象科技进展,3(2):29-35. Chen B D,Wang X F,Li H,et al,2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast[J]. Adv Meteor Sci Technol,3(2):29-35(in Chinese).

陈锋,董美莹,冀春晓,2017.不同资料同化对登陆台风菲特(2013)短时预报的影响研究[J].气象,43(9):1029-1040. Chen F,Dong M Y,Ji C X,2017. Relative impact from surface,radiosonde,aircraft,satellite,and radar observations on short-time forecasting for Typhoon Fitow(2013) at landfall[J]. Meteor Mon,43(9):1029-1040(in Chinese).

陈敏,Huang X Y,Wang W,2012.数字滤波初始化(DFI)在高水平分辨率模式中的应用[J].气象学报,70(1):109-118. Chen M,Huang X Y,Wang W,2012. Difficulties in the implementation of the digital filter initialization in a high resolution numerical weather forecast model[J]. Acta Meteor Sin,70(1):109-118(in Chinese).

陈子通,黄燕燕,万齐林,等,2010.快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析[J].热带气象学报,26(1):49-54. Chen Z T,Huang Y Y,Wan Q L,et al,2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood seasons[J]. J Trop Meteor,26(1):49-54(in Chinese).

崔春光,杜牧云,肖艳姣,等,2021.强对流天气资料同化和临近预报技术研究[J].气象,47(8):901-918. Cui C G,Du M Y,Xiao Y J,et al,2021. Study on the technique of data assimilation and nowcasting of severe convective weather[J]. Meteor Mon,47(8):901-918(in Chinese).

高梦竹,陈耀登,章丽娜,等,2017.对流移入杭州湾后飑线发展机制分析[J].气象,43(1):56-66. Gao M Z,Chen Y D,Zhang L N,et al,2017. Analysis on influence of convection after moving into Hangzhou Bay on the development of squall line[J]. Meteor Mon,43(1):56-66(in Chinese).

龚俊强,刘朝顺,刘延安,等,2019.探空和飞机观测资料联合同化对台风"苏迪罗"(2015)数值模拟的影响研究[J].热带气象学报,35(1):99-112. Gong J Q,Liu C S,Liu Y A,et al,2019. The impact of joint assimilation of radiosonde and aircraft observations on numerical simulation of Typhoon "Soudelor"(2015)[J]. J Trop Meteor,35(1):99-112(in Chinese).

郝民,田伟红,龚建东,2014. L波段秒级探空资料在GRAPES同化系统中的应用研究[J].气象,40(2):158-165. Hao M,Tian W H,Gong J D,2014. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. Meteor Mon,40(2):158-165(in Chinese).

郝民,徐枝芳,陶士伟,等,2011. GRAPES RUC系统模拟研究及应用试验[J].高原气象,30(6):1573-1583. Hao M,Xu Z F,Tao S W,et al,2011. Simulation study and application experiment of GRAPES RUC system[J]. Plateau Meteor,30(6):1573-1583(in Chinese).

何邓新,赖安伟,康兆萍,等,2021.闪电资料在快速更新同化系统中的应用研究[J].气象,47(8):995-1008. He D X,Lai A W,Kang Z P,et al,2021. Application of lightning data to high-resolution rapid refresh assimilation system[J]. Meteor Mon,47(8):995-1008(in Chinese).

黄燕燕,万齐林,陈子通,等,2011.加密探空资料在华南暴雨数值预报的应用试验[J].热带气象学报,27(2):179-188. Huang Y Y,Wan Q L,Chen Z T,et al,2011. Experiments of using dense observation data of sounding balloon in rainstorm forecast over South China[J]. J Trop Meteor,27(2):179-188(in Chinese).

赖安伟,马鹤翟,崔春光,等,2021.雷达反射率反演水汽和温度同化技术在一次飑线过程中的应用研究[J].气象,47(8):932-952. Lai A W,Ma H D,Cui C G,et al,2021. A squall line case study of assimilating the radar data,retrieval of water vapor and in-cloud potential temperature from reflectivity in a 3DVAR framework[J]. Meteor Mon,47(8):932-952(in Chinese).

黎慧琦,张大林,2021.中小尺度对流系统的高分辨率数值模拟近况和未来挑战[J].气象科技进展,11(3):75-91. Li H Q,Zhang D L,2021. High-resolution modeling of convective storms:progress and future challenges[J]. Adv Meteor Sci Technol,11(3):75-91(in Chinese).

李红莉,彭菊香,张艳霞,2014.多源观测资料在LAPS中尺度分析场

中的作用分析[J]. 暴雨灾害，33(3)：273-280. Li H L，Peng J X，Zhang Y X，2014. Analysis on the role of various observation data in LAPS mesoscale analysis fields[J]. Torr Rain Dis，33(3)：273-280(in Chinese).

李佳，陈葆德，张旭，等，2017. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析[J]. 大气科学，41(6)：1221-1233. Li J，Chen B D，Zhang X，et al，2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016[J]. Chin J Atmos Sci，41(6)：1221-1233(in Chinese).

李少英，张述文，周林帆，2020. 混合同化方法同化地面站和雷达观测对飑线影响的模拟观测试验[J]. 兰州大学学报：自然科学版，56(5)：642-649. Li S Y，Zhang S W，Zhou L F，2020. Impact of assimilating surface and radar observations on forecasting a squall line with a hybrid data assimilation method：an observation system simulation experiment[J]. J Lanzhou Univers：Nat Sci，56(5)：642-649(in Chinese).

刘瑞婷，陈明轩，肖现，等，2021. 雷达资料快速更新四维变分同化中增加地面资料同化对强对流临近数值预报的影响[J]. 气象学报，79(6)：921-942. Liu R T，Chen M X，Xiao X，et al，2021. The impact of assimilating surface observations in rapid-refresh four-dimensional variational radar data assimilation system on model-based severe convection nowcasting[J]. Acta Meteor Sin，79(6)：921-942(in Chinese).

孟宪贵，郭俊建，韩永清，2018. ERA5 再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报，38(1)：91-99. Meng X G，Guo J J，Han Y Q，2018. Preliminarily assessment of ERA5 reanalysis data[J]. J Mar Meteor，38(1)：91-99(in Chinese).

盛杰，郑永光，沈新勇，等，2019. 2018 年一次罕见早春飑线大风过程演变和机理分析[J]. 气象，45(2)：141-154. Sheng J，Zheng Y G，Shen X Y，et al，2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early spring of 2018[J]. Meteor Mon，45(2)：141-154(in Chinese).

王平，王晓峰，张蕾，等，2017. 地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验[J]. 气象，43(8)：901-911. Wang P，Wang X F，Zhang L，et al，2017. Sensitivity analysis of surface observation data in WRF-ADAS rapid refresh system[J]. Meteor Mon，43(8)：901-911(in Chinese).

王晓峰，王平，张蕾，等，2015. 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，34(1)：124-136. Wang X F，Wang P，Zhang L，et al，2015. Numerical simulation of ‘7·31’ severe convection event in shanghai using rapid refresh technique[J]. Plateau Meteor，34(1)：124-136(in Chinese).

魏东，尤凤春，杨波，等，2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估[J]. 气象，37(12)：1489-1497. Wei D，You F C，Yang B，et al，2011. Assessment and analysis of meteorological elements forecasted by Beijing rapid update cycle forecast system[J]. Meteor Mon，37(12)：1489-1497(in Chinese).

吴海英，陈海山，蒋义芳，等，2013. “090603”强飑线过程动力结构特征的观测与模拟分析[J]. 高原气象，32(4)：1084-1094. Wu H Y，Chen H S，Jiang Y F，et al，2013. Observation and simulation analyses on dynamical structure features in a severe squall line process on 3 June 2009[J]. Plateau Meteor，32(4)：1084-1094(in Chinese).

翟国庆，俞樟孝，1991. 华东飑线过程中的地面中尺度物理特征[J]. 大气科学，15(6)：63-69. Zhai G Q，Yu Z X，1991. The mesoscale surface characteristics in the squall line events over East China[J]. Sci Atmos Sin，15(6)：63-69(in Chinese).

张鑫宇，陈敏，孙娟珍，等，2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J]. 气象学报，79(1)：104-118. Zhang X Y，Chen M，Sun J Z，et al，2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA[J]. Acta Meteor Sin，79(1)：104-118(in Chinese).

仲跻芹，陈敏，范水勇，等，2010. AMDAR 资料在北京数值预报系统中的同化应用[J]. 应用气象学报，21(1)：19-28. Zhong J Q，Chen M，Fan S Y，et al，2010. Assimilation application of AMDAR data to the operational NWP system of Beijing[J]. J Appl Meteor Sci，21(1)：19-28(in Chinese).

Benjamin S G，Dévényi D，Weygandt S S，et al，2004. An hourly assimilation-forecast cycle：the RUC[J]. Mon Wea Rev，132(2)：495-518.

James E P，Benjamin S G，Marquis M，2017. A unified high-resolution wind and solar dataset from a rapidly updating numerical weather prediction model[J]. Renew Energy，102：390-405.

Wilson J W，Crook N A，Mueller C K，et al，1998. Nowcasting thunderstorms：a status report[J]. Bull Amer Meteor Soc，79(10)：2079-2100.

（本文责编：戴洋）