

赵德显, 郁红弟, 沈桐立. GPS 折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用[J]. 气象, 2011, 37(12): 1511-1518.

GPS 折射率资料在梅雨锋暴雨 数值模拟中的应用^{* 1}

赵德显^{1,3} 郁红弟² 沈桐立³

1 民航云南空管分局, 昆明 650200

2 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094

3 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

提 要: 运用 WRF 三维变分同化系统同化 GPS 掩星折射率资料, 并应用到 2007 年 7 月 4—6 日梅雨锋暴雨两个例中进行数值模拟试验, 以此考察 GPS 掩星折射率资料在梅雨锋暴雨数值模拟中的应用。同化结果表明: GPS 掩星折射率资料对初始资料的调整主要是中低层湿度场, 对于温度场和高度场的调整都是从底层到高层逐渐增大; 加入 GPS 掩星折射率资料对降水预报有所改进, 这与中低层湿度场的初始调整有关系; 从对模拟结果进行诊断和结构分析中可以发现负散度增量和正涡度增量与降水中心和区域有很好的对应, 同化资料之后对于各降水中心地区增强了产生降水的动力条件。

关键词: GPS 掩星折射率资料, 三维变分同化, 梅雨锋暴雨, 散度, 涡度

The Application of GPS Refractive Index Data to Numerical Simulation of Meiyu Front

ZHAO Dexian^{1,3} YU Hongdi² SHEN Tongli³

1 Yunnan Air Traffic Management Sub-Bureau, CAAC, Kunming 650200

2 61741 Troops of PLA, Beijing 100094

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of
Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: In this paper, GPS occultation refractive index data are assimilated by three-dimensional variation assimilation system of WRF model which is used to explore the improvement of its initial value through the numerical simulation of 4—6 July 2007 Meiyu. GPS occultation data adjustments to the initial data are mainly at low-level moisture field; For the temperature and height fields, adjustments are gradually increasing from bottom to top. The horizontal and vertical incremental analysis is able to explore the effects of assimilation on improving the forecast, as well as learn more about the spatial structure of the system as a way to explore the dynamic mechanism of its occurrence and development. Assimilated results show that adding GPS occultation data to precipitation forecasting is the most obvious because of the initial low-level moisture field adjustment. The negative divergence and positive vorticity increments are well corresponding to precipitation zones. And it enhances the dynamic conditions of precipitation.

Key words: GPS occultation refractive index data, three-dimensional variation assimilation, heavy rain of Meiyu front, divergence, vorticity

* 国家自然科学基金 40975037 和 40775033 共同资助

2010 年 11 月 16 日收稿; 2011 年 5 月 13 日收修定稿

第一作者: 赵德显, 主要从事中尺度数值模拟和资料同化研究. Email: zdx_1982@163.com

引 言

近年来,虽然中尺度数值模式得到很大改进,但对中小尺度系统的降水预报能力仍然有限。模式对于初值的质量要求很高,特别是精细化的数值模式,所以资料同化在数值预报系统中作用越来越重要^[1-5]。目前在中小尺度系统中同化主要是常规观测资料,非常规资料主要是雷达资料^[6-7]和云导风资料^[8-9]的运用,而采用高垂直分辨率的 GPS 折射率资料尚少。鞠永茂等^[10]选取 2003 年 7 月长江中下游一次梅雨锋暴雨过程个例,对垂直分辨率影响模式模拟结果以及空间分辨率的协调问题进行了数值模拟试验和探讨,发现当模式水平分辨率达到较高的精度后,垂直分辨率如果没有相应的提高,会使数值模式放大中尺度地形的作用,而不能很好地描述大气本身尤其是垂直方向上的特征,从而对降水的模拟产生不利影响,所以同化高垂直分辨率的 GPS 折射率资料能提高中尺度系统降水预报和中尺度结构分析,研究 GPS 折射率资料的同化很有必要。黄清勇等^[11]使用 WRF-3DVAR 将 GPS 掩星观测折

射率资料及传统观测资料同化进 WRF 中尺度模式,以了解同化折射率对台风数值模拟结果的影响。结果显示同化 GPS 掩星观测资料对于台风路径模拟影响较小,对降雨模拟则有改善。本文应用 NCEP 和 NCAR 等美国科研机构发展的 WRF-3DVAR 系统,对 GPS 掩星折射率资料在 2007 年 7 月 4—6 日梅雨锋暴雨个例中应用进行了同化试验,从而得出 GPS 折射率资料三维变分同化对梅雨锋暴雨预报的改进之处。

1 环流形势及降水实况

2007 年 7 月 4 日 08 时至 5 日 08 时(北京时,下同),淮河雨带全面加强,强降雨带主要集中在安徽北部阜阳和亳州附近,整个河南南部雨量达 100 mm 左右,江苏北部雨量稍小。7 月 4—5 日出现的暴雨最强时间段集中在 7 月 4 日 22 时至 5 日 02 时之间,整个东西向带状雨带中心分别位于安徽宿州和亳州附近 160 mm 以及山西南部 164 mm(图 1a); 6 日,雨带强度全面减小,位置稍微北移,降水中心东移至安徽和江苏北部为 102 mm(见图 1b)。

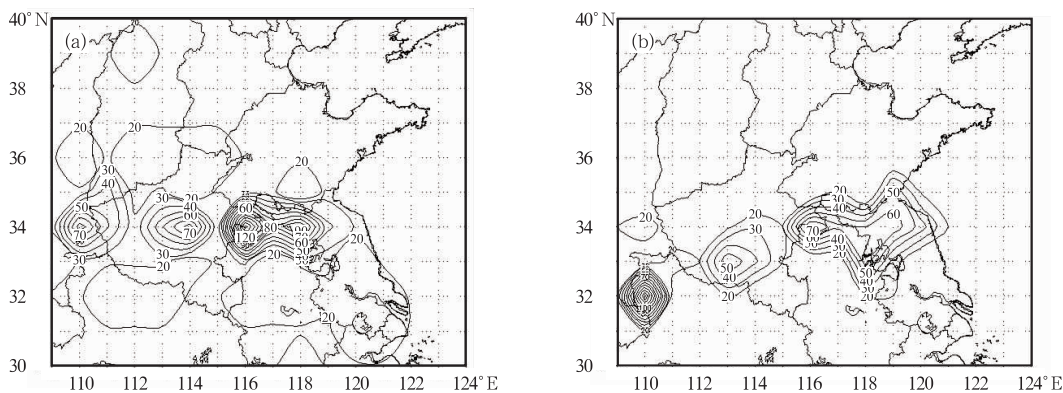


图 1 2007 年 7 月 4 日 08 时到 7 月 5 日 08 时(a)和 7 月 5 日 08 时到 7 月 6 日 08 时(b)
降水量分布(MICAPS)(单位:mm)

Fig. 1 Precipitation distributions (unit:mm) produced by MICAPS in different periods

(a) 08 BT 4 July—08 BT 5 July 2007, (b) 08 BT 5 July—08 BT 6 July 2007

2007 年 7 月 4 日 08 时天气形势图显示:500 hPa(图 2a)上中高纬度地区呈两槽一脊型,中高纬度槽后脊前不断有冷空气扩散南下,并有高空急流存在,西太平洋副热带高压不断西伸北抬;850 hPa(图 2b)上可见,副高外围的低层低空急流将暖湿气流携带北上与高空急流汇合。700 hPa(图略)上还可可见 7 月 5 日 08 时有东西向切变线位于秦岭附近。

这样在黄河中下游以及江淮地区 500 hPa 以上高空为西北干冷气流入侵,对流层低层的 700、850 hPa 为西南低空暖湿气流输送,这样的高低空急流配合造成了这次降水过程。

从 2007 年 7 月 5—6 日 FY-2C 卫星云图 TBB 资料可以清晰看到,此次过程有 MCS 的消生发展过程。7 月 4 日 08 时(图略)河南南部出现一个

MCS,并迅速发展,随云带移动,5 日 00 时(图 3a)最强云团到达了安徽北部,18 时(图 3b)TBB 最强区

域向东移动至苏皖交界北部地区,后逐渐减弱。

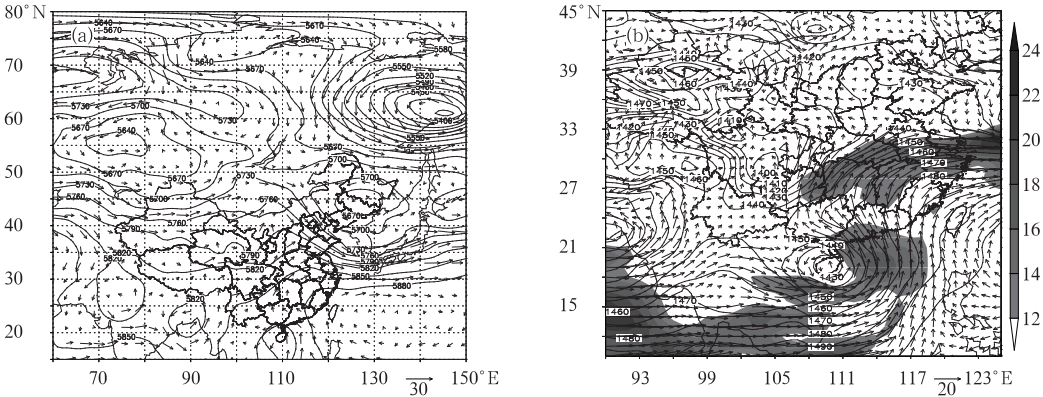


图 2 2007 年 7 月 4 日 08 时 500 hPa(a)和 850 hPa(b)高度场(单位:dagpm)和
风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)合成图
阴影区风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 2 The wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and height (unit: dagpm) fields at 08:00 BT 4 July 2007
for (a) 500 hPa and (b) 850 hPa
The wind velocity are more than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in shaded areas

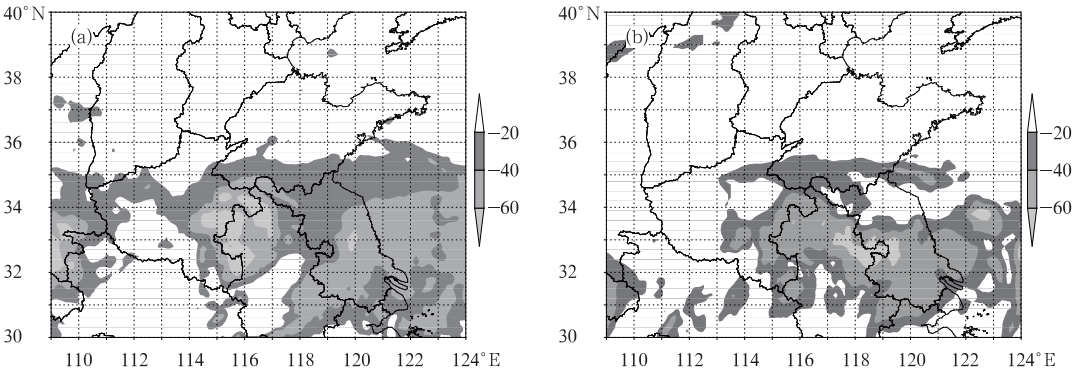


图 3 2007 年 7 月 5 日 00 时(a)和 18 时(b)TBB (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 The TBB (unit: $^{\circ}\text{C}$) distributions at 00:00 BT (a) 5 July and 18:00 BT (b) 5 July 2007

2 模拟方案设计和同化资料分析

2.1 模拟方案设计

本文采用完全可压缩非静力中尺度数值模式 WRF,选用非静力方案,中心位置(35°N 、 115°E),外域水平网格为 148×133 个格点,内域水平网格为 151×151 个格点,格距为 30 km、10 km,垂直分层 31 层。模式使用的资料为 NCEP 的每 6 小时一次的再分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,初始时间积分为 2007 年 7 月 4 日 08 时,积分 48 h,每 3 小时输出一

次模拟结果。所同化的资料为 CHAMP 和 COSMIC 卫星的 GPS 掩星折射率资料,同化资料之前经过了严格的质量控制。为了更好地研究 GPS 折射率资料对初始场的调整,加入了云导风资料进行比较。云导风资料分为红外和水汽通道两种,以下 EXP3 和 EXP4 试验所用的云导风资料均为国家卫星气象中心提供的大气矢量产品,该数据每隔 6 小时输出一次。试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 The experimental schemes

试验方案	同化方法及资料
CTL 试验	不同化任何资料
EXP1 试验	初始时刻同化 wetprf 资料
EXP2 试验	每 6 小时循环加入 wetprf 资料
EXP3 试验	初始时刻同时加入 wetprf 资料和云导风资料
EXP4 试验	每 6 小时循环加入 wetprf 资料和云导风资料

2.2 GPS 折射率资料分析

GPS 掩星资料目前每天提供接近 3000 个大气垂直分辨率的廓线资料,平均每 6 小时内全球上空掩星点分布约为 500 个。选择个例的粗网格区域里发生的掩星事件一共有 12 个;细网格区域里的掩星事件于 2007 年 7 月 4 日 01 时 37 分 56 秒发生在 (40.935°N、119.545°E) 位置。以此为例,选择细网

格区域进行同化,同时考察单点同化对初始场的影响。图 4 为观测所得折射率和反演的温度、水汽、气压廓线,垂直分辨率为 0.1 km。经质量控制后,该掩星点 1.2 km 以下的资料去除掉,从反演的各物理量的垂直廓线分布来看,大体与 NCEP 资料(略)一致,但 GPS 掩星资料保留了更多细节的变化,特别反映在中低层水汽廓线上,如图 4b 在 2~5 km 直接水汽的变化。经同化后这些高垂直分辨率廓线

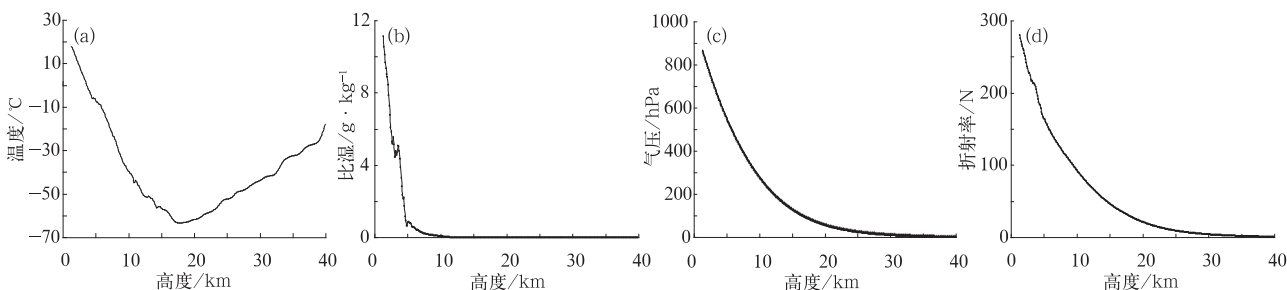


图 4 反演的温度(a)、水汽(b)、气压(c)和掩星点大气折射率(d)的垂直分布

Fig. 4 The vertical distributions of temperature (a, unit: $^{\circ}\text{C}$), vapour (b, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), pressure (c, unit: hPa) and refractive index (d, unit: N)

的信息将在一定程度上改善预报初始场。

2.3 同化后方差分析

图 5 给出风、温度、高度、比湿在垂直方向的方差。由图 5 可见,初始同化云导风资料对于风场的调整比 GPS 折射率资料大,特别是在高层, GPS 折射率对于风场的调整各层都比较小;对于温度场的调整, GPS 折射率资料的调整在各层相差比较大,调整得最大在中层,而云导风资料调整的趋势是底层调整大,然后减小到 11 层以上又增大到 19 层达到最大;对于高度场的调整,二者趋势基本一致,调整范围都是在 9~23 层,只同化 GPS 资料的方差幅度是加入云导风之后的 2 倍;对湿度场的调整主要是 GPS 折射率同化的作用,方差从底层到第 7 层增加至最大,调整范围最高只到第 20 层 300 hPa 左右,云导风红外通道对于湿度调整贡献微乎其微。结合同化增量分析可得, GPS 折射率资料的同化主要改善了湿度场的初值特别是中低层,对温度场和高度场的调整也主要是中低层而云导风资料调整的主要是对中高层风场的调整。

3 模拟结果分析

从实况图 1 可见,7 月 5 日 24 小时累积降水雨

带呈东西走向,中心沿纬度 34°N 分布在经向 110°E、114°E、116°E、118°E 上 4 个中心;7 月 6 日 24 小时累积降水雨带呈西南—东北走向,中心分别在 (32°N、110°E), (33°N、113°E), (34°N、116°E)。从 7 月 5 日 24 小时模拟的降水范围(图 6)来看,除了 EXP4 没有模拟出苏皖北部降雨区之外,其他的试验都模拟出了和实况相接近的降雨区域,这与循环加入云导风资料增大误差而且积分时间不充分有很大的关系;EXP3 模拟的降水中心在河南东北部,相对于实况略有偏移,这也和多加入非常规资料增大误差有关,而前 3 个试验均和实况相近;在模拟最大降水量上,EXP1 模拟的最大降水量 143.3 mm 相对于其他试验更接近于实况。可见 GPS 折射率资料在初始场调整湿度场有利于提高降水模拟。

从 7 月 6 日 24 h 模拟(图 7)来看,加入非常规资料模拟的降水区域都比 CTL 试验更接近实况降水区域,但 EXP3 位于河南西南部的降水中心略往北偏移,EXP2 和 EXP4 在山东南部产生了虚假的降水中心,EXP1 模拟出的降水最大值 103.2 mm 和实况 102 mm 相近,所以综合来看,EXP1 试验的模拟无论从降水区域,降雨中心位置和降水量都和实况接近,加入的非常规资料种类越多和频率越大往往引起误差的增大,效果也不一定好。

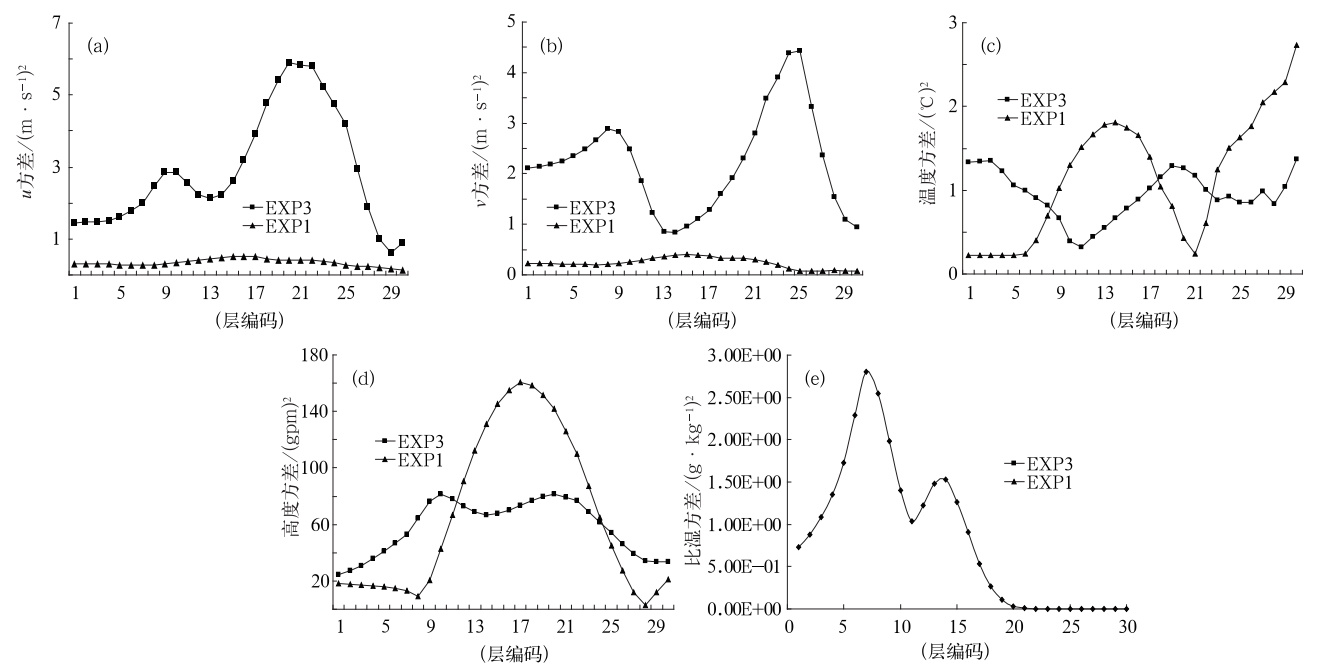


图 5 纬向风(a)、经向风(b)、温度(c)、位势高度(d)、比湿(e)
在垂直方向上的方差

Fig. 5 The variance of zonal wind (a), meridional wind (b), temperature (c),
height (d), and humidity (e) in the vertical direction

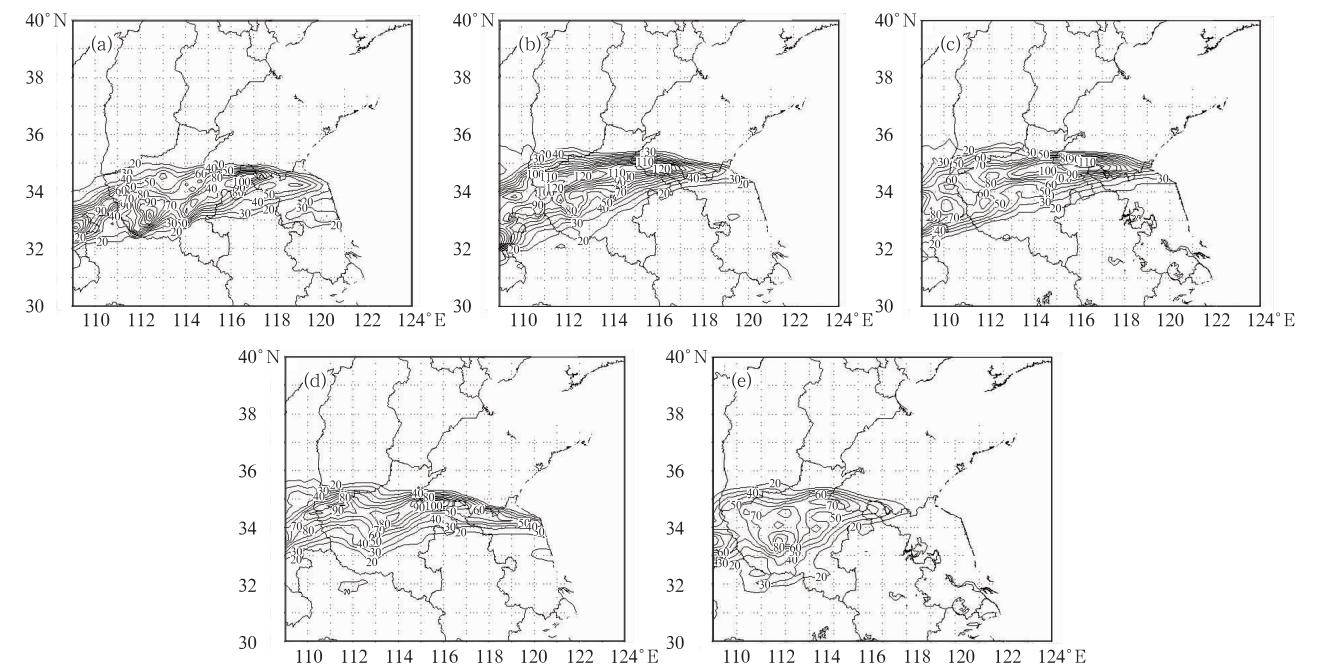


图 6 2007 年 7 月 5 日各试验模拟 24 h 降水量(单位:mm)

(a) CTL, (b) EXP1, (c) EXP2, (d) EXP3, (e) EXP4

Fig. 6 Simulated 24 h precipitation on 5 July 2007 (unit: mm) by various schemes

(a) CTL, (b) EXP1, (c) EXP2, (d) EXP3, (e) EXP4

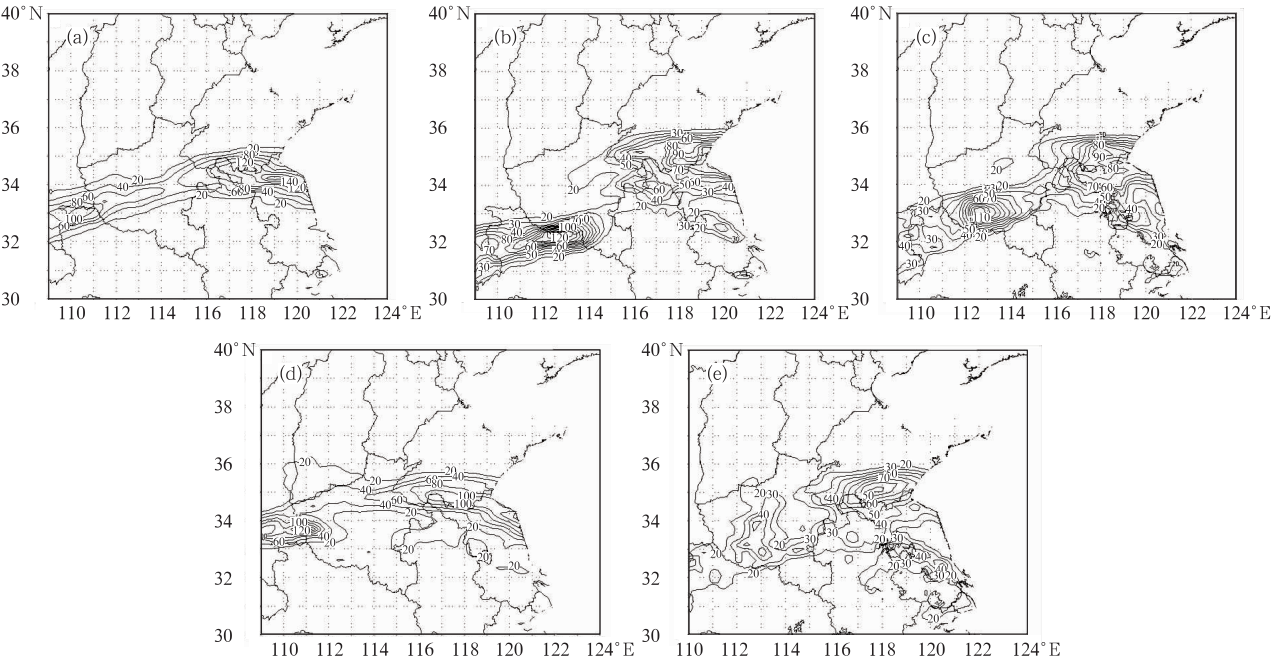


图 7 2007 年 7 月 6 日各试验模拟 24 h 降水量(单位:mm)
(a) CTL, (b) EXP1, (c) EXP2, (d) EXP3, (e) EXP4
Fig. 7 As in Fig. 6, but for 6 July 2007

4 模拟结果诊断和结构分析

图 8、9 是 GPS 同化试验相对于 CTL 试验涡度和散度水平增量图,从图中可以发现在各降水中心和主要雨带都有明显的负散度增量和正涡度增量对应,说明同化资料之后对于各降水中心地区增强了产生此次降水的动力条件。

图 10~12 分别反映了此次过程的梅雨锋暴雨

的水平和垂直结构,降水中心在锋面的北边,属于暖锋前降水,锋前从底层到上空 800~300 hPa 之间是强烈的垂直上升区。从图 11 可以发现在 26°~28°N 范围有一条大于 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的超低空西南风急流,由于超低空西南风急流接近地面,比湿大,所以是暴雨区所需水汽的最大提供者,也有利于暴雨区超低空对流不稳定层结的建立和维持,以及超低空天气尺度上升气流的建立和触发对流不稳定能量释放,还有 200 hPa 高度上淮河以北 39°N 附近有一条

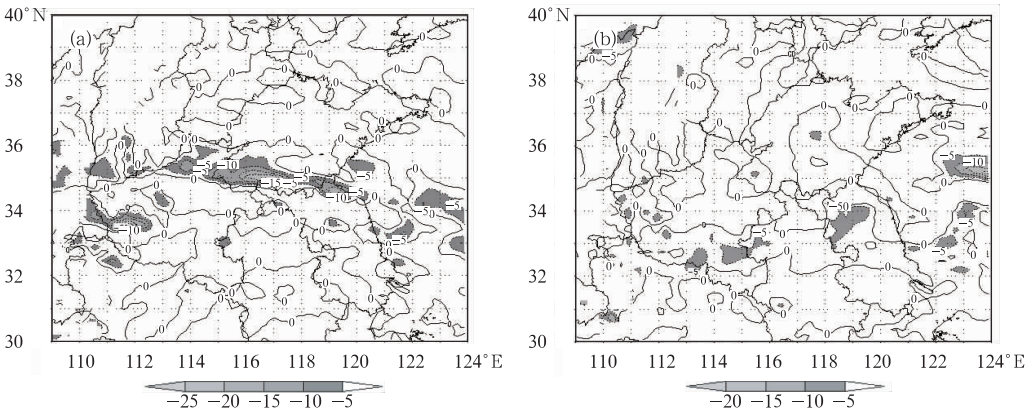


图 8 EXP1 试验模拟相对于 CTL 试验散度增量(单位: 10^{-5} s^{-1})
(a) 7 月 5 日 08 时, (b) 7 月 6 日 08 时
Fig. 8 Divergence increment of the EXP1 simulation in relation to CTL (unit: 10^{-5} s^{-1})
(a) 08:00 BT 5 July, (b) 08:00 BT 6 July

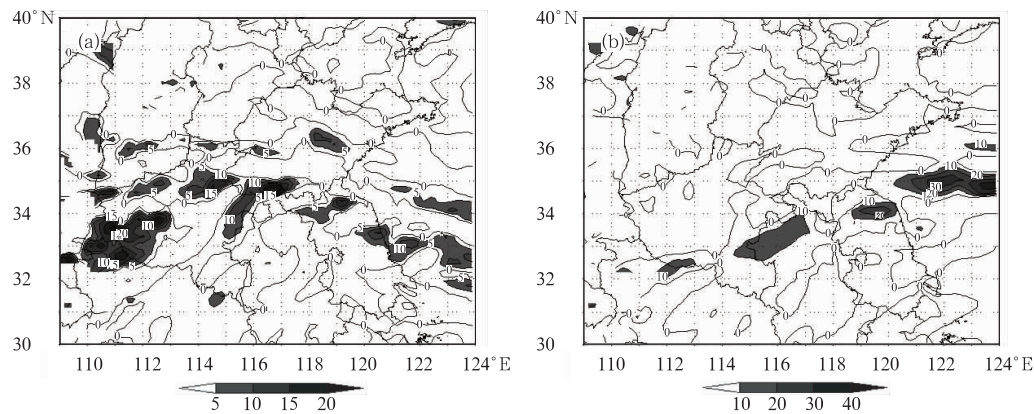


图 9 EXP1 试验模拟相对于 CTL 试验涡度增量(单位: 10^{-5} s^{-1})
(a) 7 月 5 日 08 时, (b) 7 月 6 日 08 时

Fig. 9 Vorticity increment of the EXP1 simulation in relation to CTL (10^{-5} s^{-1})
(a) 08 BT 5 July, (b) 08 BT 6 July 2007

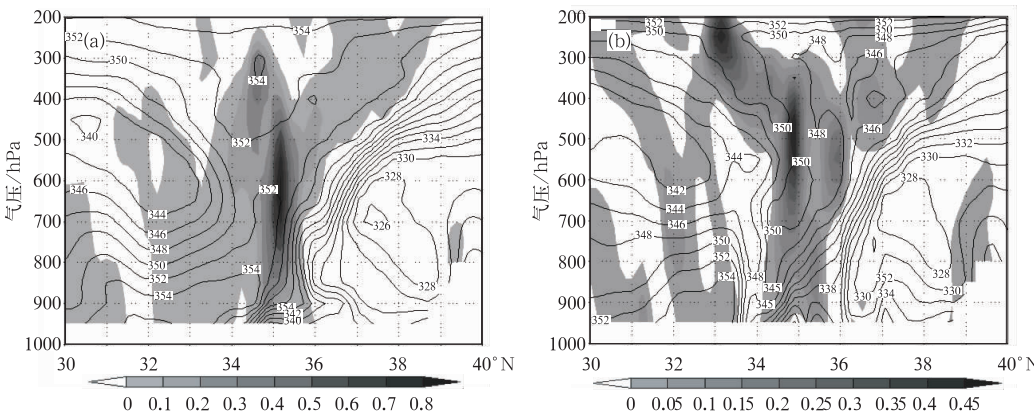


图 10 EXP1 试验模拟假相当位温(单位:K)和垂直速度(阴影区, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 115°E 经向垂直剖面图
(a) 7 月 4 日 12 时, (b) 7 月 5 日 12 时

Fig. 10 Vertical cross-sections of θ_{se} (unit: K) and vertical speed (shaded area, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 115°E by EXP1 simulation
(a) 12:00 BT 4 July, (b) 12:00 BT 5 July 2007

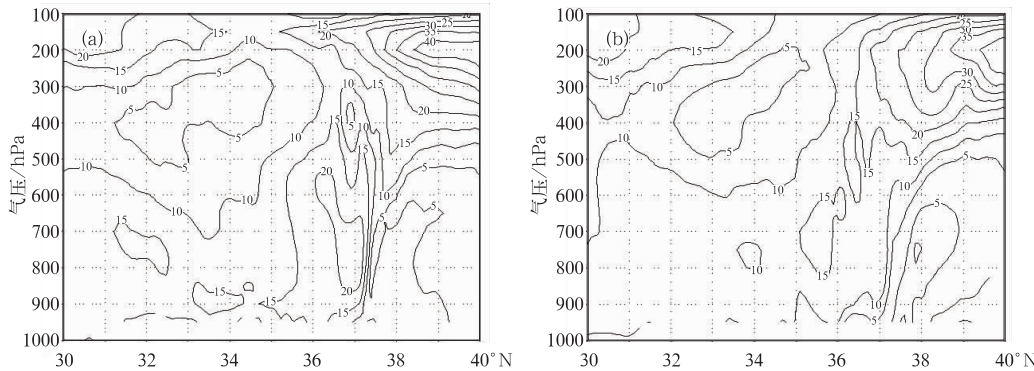


图 11 EXP1 试验模拟沿 115°E 经向垂直风场剖面图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 7 月 4 日 12 时, (b) 7 月 5 日 12 时

Fig. 11 As in Fig. 10, but for wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

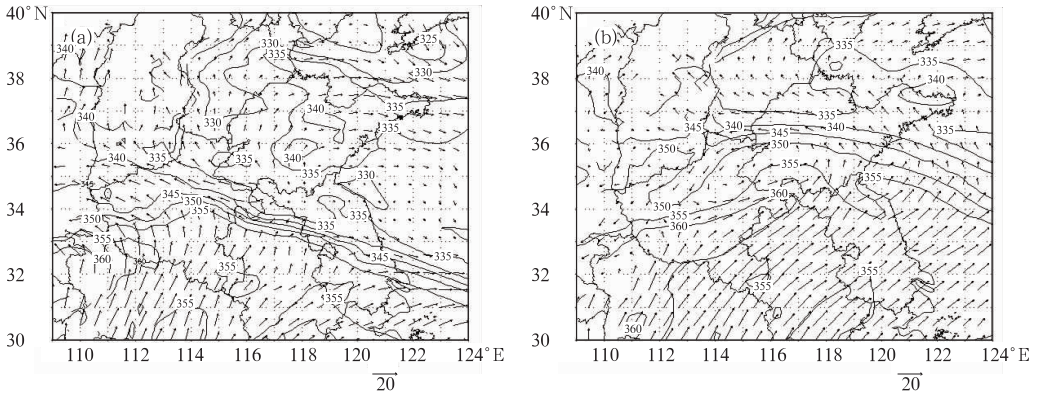


图 12 EXP1 试验 850 hPa 假相当位温(单位:K)和风场图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 7 月 4 日 12 时, (b) 7 月 5 日 12 时

Fig. 12 The 500 hPa θ_{se} (unit: K) and the wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) distributions by EXP1 scheme

(a) 12 BT 4 July, (b) 12 BT 5 July 2007

明显的高空西风急流带。850 hPa(图 12)淮河以南也维持着一条低空西风急流带, 降水流域正好位于高空急流入口区右侧以及低空急流出口区左侧。这种高低空急流配合有利于辐合上升运动增强, 将副高西部外围的东南和热带低压东部的西南暖湿气流抬升, 与槽后携带的高空冷空气相遇, 导致了此次暴雨过程的发生。

5 小 结

本文通过同化 GPS 掩星折射率资料对 2007 年 7 月 4—6 日梅雨锋暴雨的影响得出以下结论。

(1) 产生梅雨锋暴雨的云团具有 MCS 特征。TBB 最低值与暴雨中心对应较好, 可作为临近预报的参考。

(2) 详细分析了 Wetprf 初始资料特征, Wetprf 资料的水汽和温度廓线比之于平滑的 NCEP 或 ECMWF 廓线丰富得多, 垂直分辨率更高, 为中小尺度数值模拟提供中小尺度信息。

(3) 将同化后的水平和垂直偏差以及方差对比分析, 同化的 Wetprf 资料折射率资料对于中低层湿度和温度场的改善比较明显, 加入云导风资料对于中高层风场改进明显, 二者对于高度场的调整主要在高层。

(4) 从降水量的数值模拟结果发现直接同化折射率资料的模拟比较成功, 其他的可能与连续同化和加入云导风资料之后引入更大的误差有关。

(5) 通过 GPS 试验相对于 CTL 试验的模拟散度和涡度增量分析发现, 正涡度增量中心和负散度中心与降水中心符合, 说明同化资料之后对于各降水中心地区增强了产生此次降水的动力条件, 从锋

面附近的假相当位温和风场水平和垂直分析中发现, 降雨区正位于低空急流出口和高空急流入口, 该区域也是对流不稳定区域。

综合来说, 加入 GPS 掩星折射率资料之后有利于提高梅雨锋暴雨模拟结果, 以及增强垂直辐合上升的动力条件, 有利于提高梅雨锋暴雨机制和结构的分析。

参考文献

[1] Alexander G D, Weinman J A. The effect of assimilating rain rates derived from satellite and lightning on forecasts of the 1993 super storm[J]. Mon Wea Rev, 1999, 127: 1433-1456.

[2] Guo Y-R, Kuo Y-H, J Dudhia, et al. Four-dimensional variational data assimilation of heterogeneous mesoscale observations for a strong convective case[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128: 619-643.

[3] 郭锐, 李泽椿, 张国平. ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 1-12.

[4] 沈桐立, 何如意, 张利红, 等. 在 MM5 伴随模式中使用 AMSU 资料对暴雨的数值模拟[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 208-213.

[5] 李娟, 朱国富. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用研究[J]. 气象, 2008, 34(12): 36-43.

[6] 陈力强, 杨森, 肖庆农. 多普勒雷达资料在冷涡强对流天气中的同化应用试验[J]. 气象, 2009, 12(35): 12-20.

[7] 李红莉, 王叶红. 单多普勒雷达资料在伴随模式同化系统中的应用研究[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(3): 211-216.

[8] 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟. 气象学报, 2002, 60(3): 309-317.

[9] 李红莉, 沈桐立, 公颖. 云导风资料同化在伴随模式同化系统中的应用[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 358-363.

[10] 鞠永茂, 钟中, 卢伟. 模式垂直分辨率对梅雨锋暴雨数值模拟的影响[J]. 气象科学, 2006, 26(1): 10-16.

[11] 黄清勇, 周涛, 郭勉之. GPS 掩星折射率资料同化对于台风模拟的影响[J]. 大气科学, 2007, 35(2): 135-150.