

陈锋,冀春晓,董美莹,等. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响[J]. 气象,2012,38(10):1170-1181.

雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响^{*}

陈 锋 冀春晓 董美莹 滕卫平 林惠娟

浙江省气象科学研究所,杭州 310017

提 要: 本文应用 WRF-3DVAR 系统同化多普勒雷达径向风速资料,并利用 WRF 模式对台风麦莎(2005 年 8 月 6 日 00 时至 7 日 00 时)进行数值模拟,以此检验多普勒雷达径向风速资料在改进模式初始场及提高台风路径和降水预报准确度等方面的应用效果及意义,探讨不同同化时间间隔对同化效果的影响。通过对比同化试验和控制试验发现:雷达径向风速资料能通过调整初始风场结构,改进对台风结构的模拟,从而提高模式对台风麦莎的路径、强度和降水的模拟能力;雷达资料信号在进入模式后有一定的时效性,在一定程度上缩小同化时间间隔有助于提高同化效果。

关键词: 雷达径向速度, 资料同化, WRF-3DVAR 系统, 台风, 数值模拟

The Effects of Radar Radial Velocity Data Assimilation
on the Simulation of Typhoon Matsa

CHEN Feng JI Chunxiao DONG Meiyong TENG Weiping LIN Huijuan

Zhejiang Meteorological Research Institute, Hangzhou 310017

Abstract: Data assimilation plays an important role in numerical weather prediction. Radar radial velocity data with high spatial and temporal resolution are one of the most useful data in data assimilation. In order to investigate the effects of radar radial velocity data and data assimilation interval on typhoon Matsa's track and precipitation, the direct assimilation procedure of Doppler radar radial velocity data using the three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation method is set up for the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Five numerical experiments are conducted for the simulation of typhoon Matsa (2005): a control run (CTL) without data assimilation, and four assimilated runs (ASSG, ASSGR, ASS6h, and ASS3h).

Comparing the assimilation experiments (ASSG and ASSGR) and the control one (CTL) shows that, the radar radial velocity data can tune the typhoon structure and hence improve the simulation of typhoon Matsa's track and precipitation. During the first 12 hours, the deviation between simulation and observation of the Matsa position decreases by 19.3 km and 25.9 km for ASSG-run and ASSGR-run, respectively. Although the simulated 12-hour accumulated precipitations are both overestimated by the ASSG and ASSGR runs in Ningbo, Zhoushan, and Jiaxing regions, it is much better than that by the CTL run. In order to investigate the effects of data assimilation interval on typhoon Matsa's track and precipitation, three assimilated experiments with different data assimilation intervals are compared. Results show that small data assimilation interval can improve the result of the numerical experiment.

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金项目(41105062)、浙江省气象科技开放研究专项(kf2009005 和 kf2010001)和浙江省气象科技计划项目(2010TD03)共同资助
2011 年 9 月 26 日收稿; 2012 年 1 月 13 日收修定稿
第一作者:陈锋,主要从事数值模式及资料同化研究. Email:fchen_zj@163.com

Key words: radar radial velocity, data assimilation, WRF-3DVAR system, typhoon, numerical simulation

引 言

资料同化技术的发展,对于改进数值模式初始场的分析质量,提高对中小尺度系统的模拟能力及降水的预报能力具有非常重要的作用。但是,中小尺度系统的特点是局地性强和突发性强,依靠传统技术手段的常规气象观测网,很难及时捕捉其踪迹,更难提前做出准确的局地强对流天气预报^[1]。多普勒雷达观测资料具有高时空分辨率的特点,可以有效弥补常规观测资料的不足,在中尺度数值天气预报中得到了越来越广泛的应用,并取得了丰硕成果,提高了天气预报准确率。

近年来,雷达资料在中尺度模式中的应用已有了不少研究。在国外,Lindskog 等^[2]利用 High-Resolution Limited-Area Model (HIRLAM) 和变分同化系统(3DVAR)同化多普勒雷达风资料,提高了 24 小时风场的预报能力。秦琰琰等^[3]将集合卡尔曼滤波同化技术运用到对流尺度系统中。Gao 等^[4]发展了新的 3DVAR 系统,将雷达径向风速资料同化到 ARPS 模式中,并由 Hu 等^[5]将该方法应用到多单体暴风雨预报中。Xiao 等^[6-8]发展了基于 MM5 和 WRF 的 3DVAR 系统,先后将雷达径向风速和反射率同化到模式中,并在一些暴雨个例和台风个例中较大地改进了短时定量降水预报能力。在国内,顾建峰^[9]利用 WRF 模式及其同化系统 WRF-3DVAR 同化雷达径向风速和反射率,发现直接同化径向速度和反射率因子均能提高分析和预报质量,而且在背景场误差调优、新息向量(Innovation Vector)阈值、观测误差选取等方面还存在很大的预报技巧。陈力强等^[10]应用 WRF 模式的三维变分同化系统 WRF-3DVAR 实现了对径向风和反射率因子的直接同化,发现 WRF-3DVAR 能有效反演冷涡中尺度对流系统的三维结构,为模式提供了较好的初始场。杨毅^[11]、段云霞^[12]以 WRF-3DVAR 为平台,比较了直接和间接同化多普勒雷达径向风资料的方法,发现同化反演的水平风场的效果略优于直接同化雷达径向风的效果。闵锦忠等^[13]针对梅雨锋暴雨对比分析了多普勒雷达径向风反演同化和直接同化,表明无论直接同化还是反演同化都能够对风场增加有益的中小尺度信息,但是直接同化

对暴雨的模拟较反演同化要好。闵锦忠等^[13]、李华宏等^[14]通过个例研究,比较了不同同化时间间隔对同化效果的影响,发现同化时间间隔越短,效果越好。李媛等^[15]采用雷达资料直接对江淮暴雨作了分析。

以上研究在理论研究和业务应用中取得了极大进步,但仍有一些工作需要进一步试验与研究。例如雷达资料同化对台风模拟影响如何? 雷达资料的影响效果能维持多久? 不同同化时间间隔对同化效果的影响如何? 这些问题都还需要进一步的研究。

本文采用 WRF 模式及其同化系统 WRF-3DVAR,对 2005 年第 9 号台风麦莎进行模拟,检验多普勒雷达径向风速资料在改进模式初始场及提高台风路径和降水预报准确率等方面的应用效果及意义,探讨不同同化时间间隔对同化效果的影响。

1 WRF-3DVAR 及观测算子简介

1.1 WRF-3DVAR 简介

WRF-3DVAR 系统是在 MM5 的三维变分系统^[16]基础上发展起来的,按照 Lorenc^[17]方法,三维变分同化的基本思想是将资料同化归结为一个表征分析场与观测场和分析场与背景场偏差的二次泛函极小值问题。该泛函定义为:

$$J(\mathbf{x}) = J_b + J_o = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_o)^T \mathbf{O}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_o) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}$ 是分析变量(包括流函数、速度势、非平衡位势和比湿), $\mathbf{x}_b$ 是背景场, $\mathbf{y}_o$ 是观测值, $\mathbf{y}$ 是由分析变量导出的观测值, $\mathbf{B}$ 是背景误差协方差, $\mathbf{O}$ 是观测误差协方差。 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{x}_b$ 是 N 维模式空间的 N 维向量, $\mathbf{y}_o$ 和 $\mathbf{y}$ 是 M 维观测空间的 M 维向量, $\mathbf{B}$ 为 $N \times N$ 阶矩阵, $\mathbf{O}$ 为 $M \times M$ 阶矩阵。 $\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x})$, $\mathbf{H}$ 称为观测算子。

采用 Courtier 提出的增量方法^[18],令 $\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_b$,对 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 在 $\mathbf{x}_b$ 作 Taylor 展开,取前两项, $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x}_b + \delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{H}(\mathbf{x}_b) + \mathbf{H}' \delta \mathbf{x}$, $\mathbf{H}'$ 称为观测算子的切线性算子。令 $\mathbf{d} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_b) - \mathbf{y}_o$ 称为新息向量,用共轭梯度法和拟牛顿法下降算法求解极小化过程,

其目标泛函的增量形式及其一阶梯度和二阶导数为：

$$J(\delta x) = \frac{1}{2} [\delta x^T B^{-1} \delta x + (H' \delta x + d)^T O^{-1} (H' \delta x + d)]$$

(2)

$$\nabla_{\delta x} J = B^{-1} \delta x + H'^T O^{-1} (H' \delta x + d)$$

(3)

$$\nabla_{\delta x}^2 J = B^{-1} + H'^T O^{-1} H'$$

(4)

增量方法可使任何非平衡量的引入都限制在尽可能小的增量范围内，再将增量加到平衡的初始猜测场，这样比使用原始场分析更稳定可靠。

1.2 雷达径向风同化的观测算子

三维变分系统通过观测算子 H 将观测资料和模式变量统一起来。WRF-3DVAR 中多普勒雷达径向速度直接同化的观测算子^[19-20]为：

$$V_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} + (w - v_T) \frac{z - z_i}{r_i},$$

(5)

式中， (u, v, w) 为大气三维风场， (x, y, z) 是雷达位置， (x_i, y_i, z_i) 是雷达的观测目标位置， r_i 是观测点距离雷达位置的距离， v_T 是下落末速度，在假定雨滴谱满足马歇尔-帕尔默分布的基础上^[21]，其计算方式如下：

$$v_T = 5.40 \nu q_{ra}^{0.125}$$

(6)

式中， q_{ra} 是雨水混合比($g \cdot kg^{-1}$)，可由模式预报得到， ν 是修正因子，定义为：

$$\nu = \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0.4}$$

(7)

这里， $\bar{p}$ 是气压的基本状态， p_0 是地面气压。

另外，垂直速度增量可以利用一个基于 Richardson 方程^[22]的平衡方程估算，详细内容可参见 Xiao 等撰写的文献^[23]。

以上多普勒径向速度直接同化观测算子的切线性方程及其伴随方程，按照 WRF 模式的垂直坐标和水平坐标及其 C 型交错网格，写入 WRF-3DVAR 程序中，并进行了伴随方程的正确性检验。

2 个例选取

2.1 台风麦莎

台风 Matsa(2005)于 2005 年 7 月 31 日 12 时

(UTC,以下同)在菲律宾以东洋面上生成后向西北移动,8 月 2 日 18 时在巴士海峡以东加强为台风,8 月 4 日 12 时进入东海,最大强度 $45 m \cdot s^{-1}$,8 月 5 日 15 时 40 分在浙江玉环登陆,登陆时近中心最大风力仍在 12 级以上,6 日 18 时在安徽宣城减弱为热带风暴,7 日 03 时在安徽芜湖转向偏北沿 $119^{\circ}E$ 北上,8 日 18 时在渤海演变为温带气旋(如图 1 所示)。可见,台风 Matsa 在菲律宾以东黑潮附近快速增强,在东海海域强度维持。登陆后快速减弱,在华东中北部近海地区再次强度维持,最终在渤海减弱消亡。台风 Matsa 大风过程历时长,强风持续时间长,分布范围广,移动速度缓慢,给浙江和上海带来了狂风暴雨和严重灾害,浙江极大风速达 $45.2 m \cdot s^{-1}$,最大雨量 428.9 mm,对中国大陆共造成 3064.2 万人受灾,20 人死亡,直接经济损失人民币 177.1 亿元,是继 1997 年 11 号台风后,对中国影响最严重的台风。

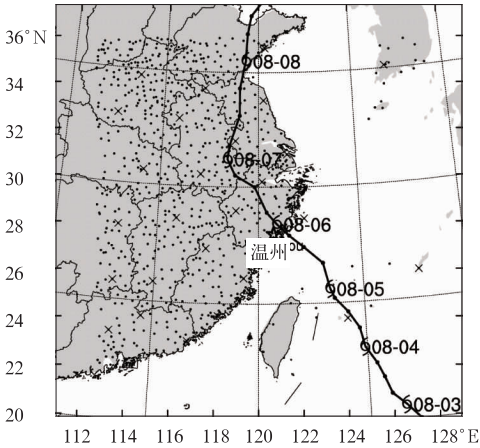


图 1 台风麦莎 6 h 一次路径、2005 年 8 月 6 日 00 时同化所用的常规资料观测站点位置(黑点为中尺度常规站,叉点为探空站)以及温州雷达站位置(五角星)示意图

Fig.1 The observed track of typhoon Matsa, and the assimilated observation data distribution in the domain (Black dots are SYNOP observations, cross dots are SOUND observations, pentagram is the Wenzhou Radar)

2.2 资料处理

图 1 给出了本文选用的常规 GTS (Global

Telecommunication System)资料观测站点和雷达站点的分布情况。其中常规 GTS 资料包括 742 个地面观测 (SYNOP, 黑点) 和 26 个无线电探空 (SOUND, 叉点), 雷达站点选用温州多普勒雷达站 (五星表示, 型号: CINRAD-SA, 位置: 27. 895°N/120. 743°E, 734. 7 m)。

常规 GTS 观测资料的预处理由 WRF-3DVAR 的 OBSPROC (observation preprocessor) 完成, 进行了一系列仔细的资料质量控制工作, 包括剔除分析区域 (水平方向和垂直方向) 之外和分析时间窗之外的资料、重新排序和合并重复的资料、在静力平衡假定下反演气压或高度、保证垂直方向上的一致性和多层观测资料的超绝热性质, 并且在预先设定的误差范围内重新估计观测误差。

雷达径向风速资料易受其他因素干扰而影响质量, 因此原始资料的质量控制非常重要。虽然地物回波和地物遮挡等已经过雷达本身软件系统修正,

但是要将雷达资料用于中尺度模式, 还需要进行额外的数据预处理。本文采用的预处理过程包括: (1) 数据插值: 读取雷达基数据, 在各个仰角径线上, 采用双线性插值方法将资料插值到 $1^{\circ} \times 1$ km 网格点上; (2) 退模糊处理: 采用 9 点滑动平均法进行褪除速度折叠; (3) 资料平滑: 用最小二乘法填补缺测资料并作滤波处理; (4) 观测误差计算: 通过计算相邻两个距离库和相邻两个方位角资料的标准偏差, 估计径向速度的观测误差; (5) 数据粗化: 按每隔 5 点取值, 输出径向分辨率为 $5^{\circ} \times 5$ km 的雷达资料; (6) 格式转换: 将雷达资料的格式转换到 WRF-3DVAR 读取的格式。图 2 给出了退模糊处理前后及处理为 WRF-3DVAR 输入格式后的雷达径向风速资料。比较图 2a 和 2b 可见, 经过退模糊处理后, 第二象限中的速度折叠 (黑框内速度负值区域中心出现了正值) 已经被褪除。

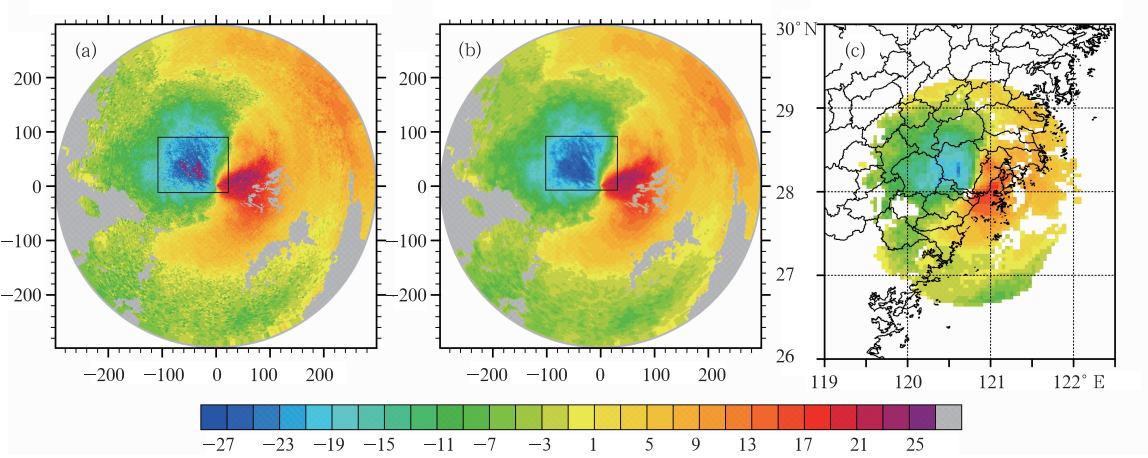


图 2 退模糊处理前后及处理为 WRF-3DVAR 输入格式后的雷达径向风速资料
(a)处理前的雷达径向风速, $1^{\circ} \times 1$ km, 仰角 1.49° ; (b)经退模糊处理后的雷达径向风速, $1^{\circ} \times 1$ km, 仰角 1.49° ;
(c)进行平滑粗化和坐标转换后的雷达径向风速, 5 km $\times$ 5 km, 高度 1600 m
(黑框位置为速度折叠区域)
Fig. 2 The radar radial velocity fields: (a) original, (b) after data quality control
and (c) data in WRF-3DVAR format
(Black rectangle for velocity folding area)

3 试验设计

本文采用单重网格, 以 (29° N、 120° E) 为中心, 水平格距为 5 km, 水平格点数为 400×400 , 垂直方向 28 层。使用的主要物理参数化方案有 Purde Lin 显式云微物理方案^[24-26]、YSU 边界层方案^[27]、RRTM 长波辐射方案^[28]、Dudhia 短波辐射方案^[27]以及 5 层热扩散陆面模式为采用积云参数化方案。背景场资料由 NCEP/NCAR FNL 每 6 h 一次的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料^[30]通过 WPS 初始化模块获取。

为检验多普勒雷达径向风速资料在改进模式初始场及提高台风路径和降水预报准确度等方面的应用效果, 同时探讨不同同化时间间隔对同化效果的影响, 本文设计了 5 组试验 (图 3)。

(1) 控制试验 CTL: 以 WPS 处理得到 2005 年 8 月 6 日 00 时的插值场作为初始场, 连续积分 12 小时至 8 月 6 日 12 时, 再以此刻的模式预报场作为初始场, 连续积分 12 小时至 8 月 7 日 00 时。

(2) 常规资料同化试验 ASSG: 与 CTL 试验相同, 但在 2005 年 8 月 6 日 00 时和 12 时各同化一次常规资料, 将同化后的分析场作为初始场, 连续积分

12 小时至 8 月 7 日 00 时。

(3) 联合同化试验 ASSGR: 与 ASSG 试验相同, 但同化的是常规气象资料和雷达径向风速资料。

(4) 6 小时同化试验 ASS6h: 与 ASSGR 试验相同, 但在 2005 年 8 月 6 日 00 时至 12 时期间, 每隔 6

小时同化一次(即在 00 时、06 时和 12 时分别同化一次雷达资料), 再以 6 日 12 时的分析场作为初始场, 连续积分 12 小时至 8 月 7 日 00 时。

(5) 3 小时同化试验 ASS3h: 与 ASS6h 试验相同, 每隔 3 小时同化一次(即在 00 时、03 时、06 时、09 时和 12 时分别同化一次雷达资料)。

其中, 试验(1)、(2)、(3)用于对比多普勒雷达径向风速资料同化效果, 试验(1)、(3)、(4)、(5)用于对比不同时间间隔同化对同化效果的影响。

4 雷达径向风速资料同化对模式初始场的影响

4.1 径向风速同化对初始场的影响

同化试验 ASSG 和 ASSGR 与控制试验 CTL

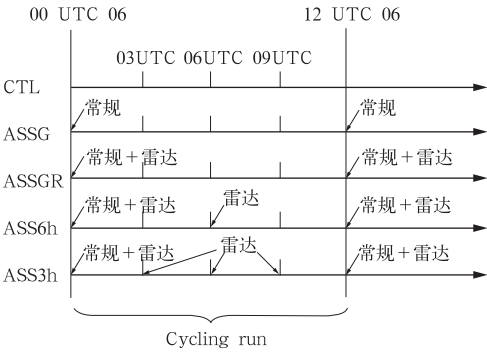


图 3 试验设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment design

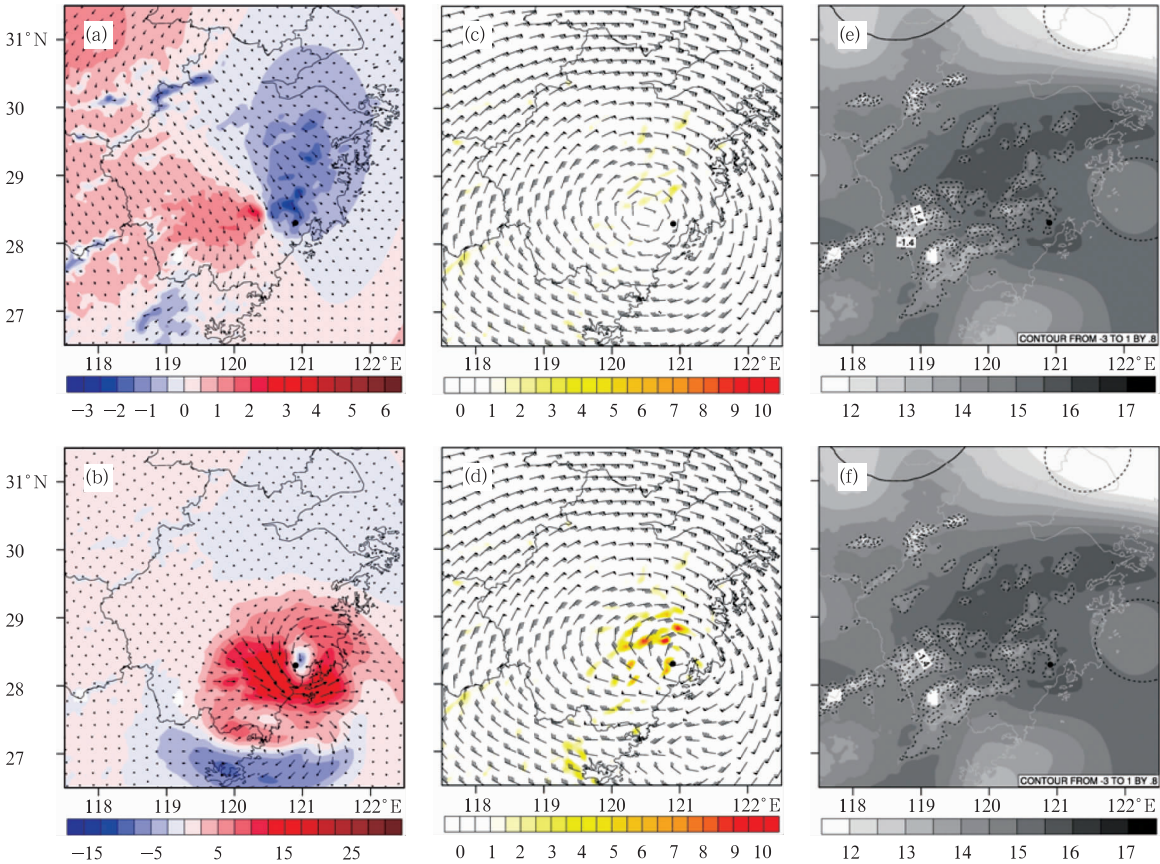


图 4 积分初始时刻(2005—08—06_00:00:00)的分析场

(a) 850 hPa 风场及风速增量 (ASSG-CTL), (b) 850 hPa 风场及风速增量 (ASSGR-CTL), (c) 850 hPa 风场及 500 hPa 垂直速度增量 (ASSG-CTL), (d) 850 hPa 风场及 500 hPa 垂直速度增量 (ASSGR-CTL), (e) 850 hPa 控制试验水汽混合比及其增量 (ASSG-CTL), (f) 850 hPa 控制试验水汽混合比及其差值 (ASSGR-CTL) (黑点为此台风中心位置)

Fig. 4 Analyzed 850 hPa wind difference vector (arrows) and velocity difference (shaded) from CTL for (a) ASSG and (b) ASSGR, the 850 hPa wind field (wind barb) and 500 hPa vertical velocity difference (shaded) from CTL for (c) ASSG and (d) ASSGR, and the 850 hPa water vapor mixing ratio (shaded) and its difference (isolines, negative lines dashed) from CTL for (e) ASSG and (f) ASSGR (The black dot is Matsa's observed position)

有相同的背景场 (first-guess field), 但同化试验在初始时刻分别同化了常规观测资料及雷达径向风速资料, 这必将引起初始场的变化。图 4a~4b 给出了同化前后 850 hPa 风场及风速的增量。由图 4a~4b 可见, 同化了常规资料后, 在浙江西南部产生微弱的西北风增量; 而在增加同化雷达径向风速资料后, 在台风中心的周围出现了一个气旋性的增量, 整个台风结构模拟加强, 从 850 hPa 的低层到 500 hPa 的中层, 台风结构变得更为明显 (500 hPa 增量图与 850 hPa 类似, 故未给出), 台风中心周围的风力在同化后增加了 $5\sim 18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。增加同化雷达径向

风速资料后, 台风中心附近 500 hPa 的垂直速度也有了较为明显的增强 (见图 4d)。另外, 对比图 4e~4f 发现, 同化常规资料后, 浙江南部地区的水汽出现了较为明显的负增量, 而在增加同化了雷达径向风速资料后, 水汽增量变化不大。由此可见, 雷达径向风速资料相对于常规资料对风场影响更大, 能有效改进台风强度的模拟, 而对水汽含量的影响不大。

4.2 不同同化时间间隔对初始场的影响

图 5 给出了各个试验在预报初始时刻 (2005-08-06_12:00:00) 的 850 hPa 风场及风速增量。

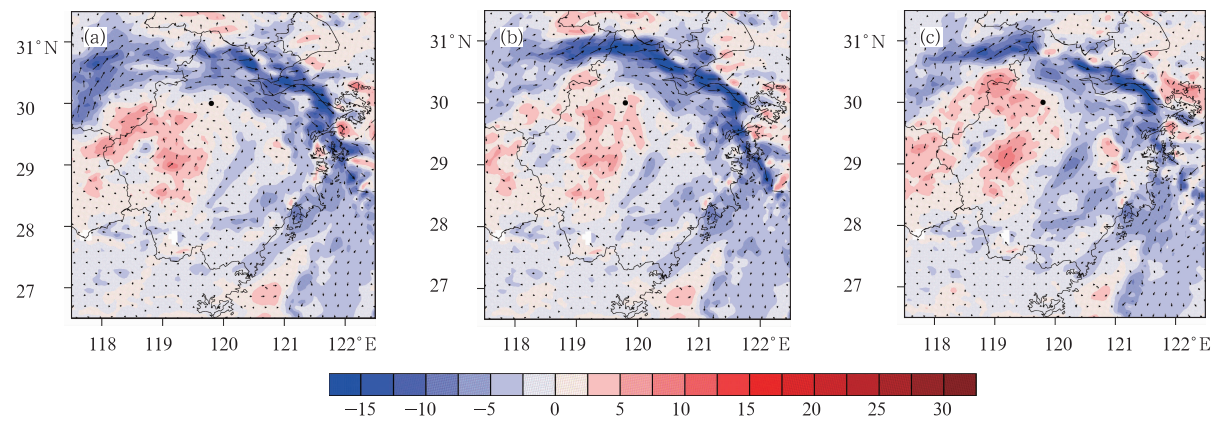


图 5 预报初始时刻 (2005-08-06_12:00:00) 的 850 hPa 风场及风速增量
(a) ASSGR-间隔 12 小时同化试验, (b) ASS6h-间隔 6 小时同化试验, (c) ASS3h-间隔 3 小时同化试验
Fig. 5 Analyzed 850 hPa wind difference vector (arrows) and velocity difference (shaded) from CTL for (a) ASSGR, (b) ASS6h, and (c) ASS3h

ASSGR、ASS6h 和 ASS3h 三个试验的唯一差别就是在前 12 小时内同化雷达资料的频率不同。比较图 5a~5c 可以看到, 虽然此时的台风中心位置与实况有一定的差距, 但是在同化了雷达资料后, 三个试验在各自模拟的台风中心区域产生了一个气旋性增量, 加强了台风结构的模拟, 而且随着同化频率的提高, 其气旋性增量越靠近与实况台风中心位置, 也就是模拟的环流场更接近实况。这说明同化频率的提高, 使更多有用的雷达观测信息进入模式, 进而改进模式的初始场, 提高了对台风路径的模拟 (见下节台风路径模拟的比较)。另外, 同化了雷达资料后, 三个试验在台风中心北面产生了一条顺时针螺旋形风场增量, 减弱了台风从海洋上带来的水汽, 这也许是造成宁波地区降水模拟减少的原因之一。

5 结果分析

5.1 雷达资料同化对台风路径和强度模拟的影响

台风路径预报是台风模拟的一个重要因子。图 6

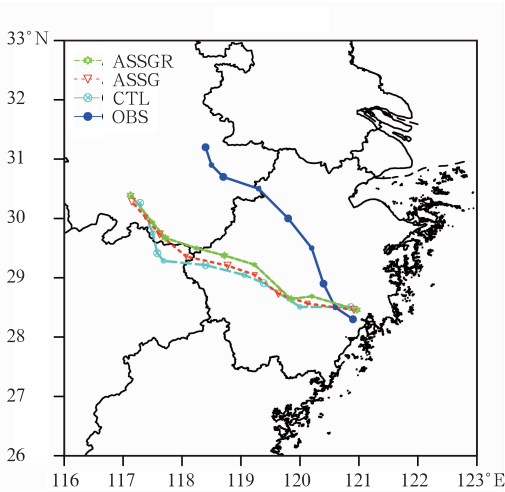


图 6 台风麦莎逐 3 h 路径模拟及实况
(OBS: 观测路径, CTL: 控制试验模拟路径, ASSG: 仅同化常规资料试验模拟路径, ASSGR: 同时同化常规资料和雷达径向风速资料试验模拟路径)
Fig. 6 Typhoon Matsa's simulated and observed tracks (OBS: observed track, CTL: track obtained from the control run, ASSG: track obtained from the assimilation run with the GTS, ASSGR: track obtained from the assimilation run with both the GTS and radar radial velocities)

给出了 CTL、ASSG 和 ASSGR 试验模拟的 3 h 台风路径及实况。由图可见,仅同化常规资料后和联合同化常规资料和雷达径向风速资料后模拟的台风路径均比控制试验有了一定的改进。表 1 统计了台风路径的模拟误差。CTL 试验在积分 0~12 h 内平均误差为 102.4 km,随着积分时间的延长,误差逐渐增加,12~24 h 内平均误差为 182.6 km;ASSG 试验在 0~12 h 内的平均误差为 83.1 km,比控制试验减小了 19.3 km,在 12~24 h 内的平均误差为 162.8 km,比控制试验减小了 19.8 km;ASSGR 试验在同时同化了常规资料和雷达径向风速资料后,

在除最后时刻外的每个时刻的误差均比控制试验有所减小,在 0~12 h 和 12~24 h 内,平均误差分别为 76.5 和 154.5 km,比控制试验分别减小了 25.9 和 28.1 km。由此可见,同化雷达径向风速资料对台风路径的模拟有一定的改善,尤其是同化后的 3~6 h 内。但是,从整体上来说路径模拟改进不大,总体表现在向西南方向偏移,其原因可能是 FNL 提供的边界场台风系统略偏南,且台风中心距离温州雷达较远、时间上距离同化时刻太久,雷达资料不足以矫正该系统偏差。

表 1 台风路径模拟误差(单位:km)
Table 1 The deviation between simulation and observation of the Matsa position (unit: km)

模拟时间	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	24 h	0~12 h 平均	12~24 h 平均
CTL	22.8	66	111.5	135.2	176.7	222.2	187.4	167	159.9	102.4	182.6
ASSG	17.5	52.1	86.4	116.9	142.8	184.5	159.5	156.7	170.5	83.1	162.8
ASSGR	18.8	48.2	67.1	111.1	137.2	159.9	156.4	153.1	165.8	76.5	154.5

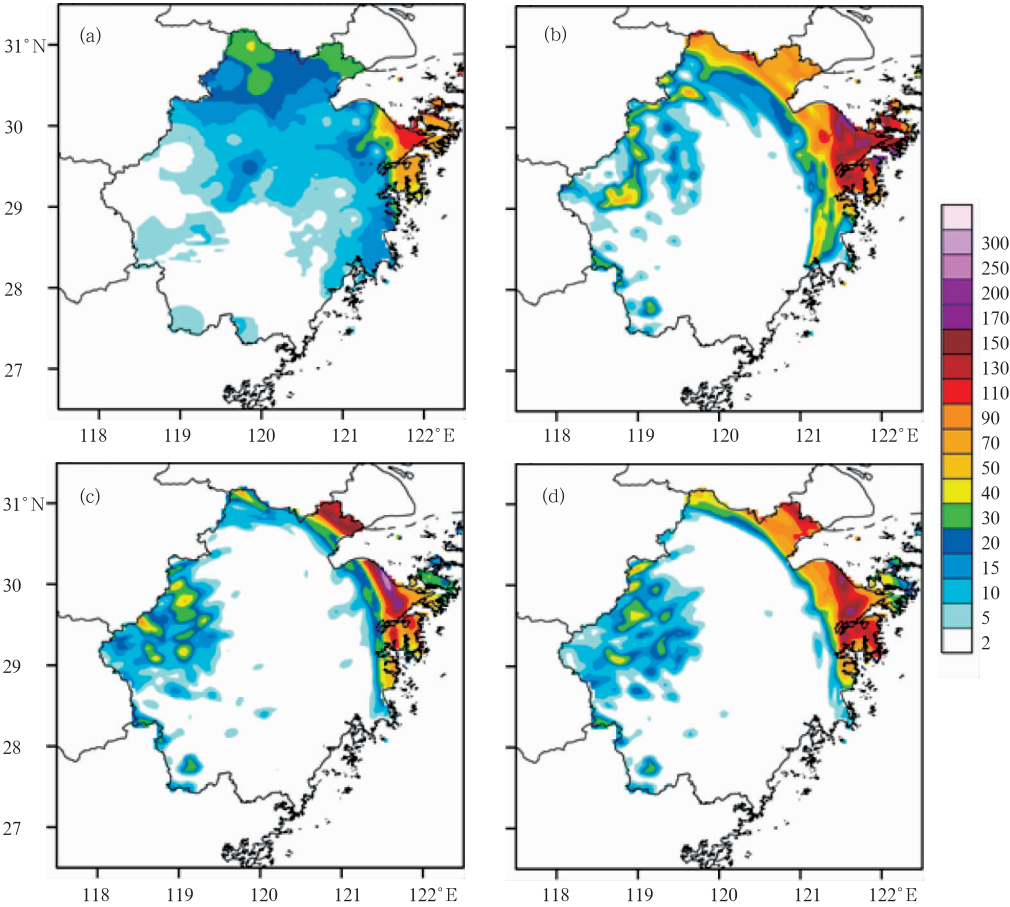


图 7 12 小时累计降水(8 月 6 日 12 时至 7 日 00 时)的模拟及实况
(a) OBS:实况,(b) CTL:控制试验模拟降水,(c) ASSG:仅同化常规资料试验模拟降水,
(d) ASSGR:同时同化常规资料和雷达径向风速资料试验模拟降水

Fig. 7 The simulated and observed 12 h accumulation precipitation from 1200 UTC 6 August to 0000 UTC 7 August 2005

- (a) OBS: observation, (b) CTL: precipitation obtained from the control run,
- (c) ASSG: precipitation obtained from the assimilation run with the GTS,
- (d) ASSGR:precipitation obtained from the assimilation run with both the GTS and radar radial velocities

5.2 雷达资料同化对降水模拟的影响

降水是台风预报中的另外一个重要因子。图 7 给出了 8 月 6 日 12 时至 7 日 00 时 12 h 累计降水的模拟及实况。从实况累计雨量分布(图 7a)可以看到,最强降水区位于宁波东北部和舟山本岛地区,其中降水前三位分别是舟山定海的 154.5 mm、舟山嵊泗的 139.7 mm 和宁波北仑的 105 mm;次强降水区则位于浙江北部的嘉兴湖州地区,降水量普遍都在 15~30 mm。将控制试验(CTL)、ASSG 试验和 ASSGR 试验与实况进行对比后发现,CTL 试验能基本上模拟出实况中的两个强降水区,但是对宁波、舟山和嘉兴地区的雨带模拟偏强(图 7b)。同化常规资料后,ASSG 试验模拟的宁波、舟山地区的强降水雨区范围有所减小,对该地区的降水高估相对于控制试验有了一定的改善,但宁波地区降水中心极

值模拟偏强且在湖州嘉兴地区的次强降水反而模拟偏小(图 7c)。进一步同化常规资料和雷达径向风速资料后,ASSGR 试验进一步缓解了 ASSG 试验在宁波地区的降水中心极值偏强,对嘉兴地区的弱降水区模拟也有了一定的改善(图 7d)。

为客观评价雷达资料同化对降水模拟的影响,图 8 统计了 3 个试验对降水模拟的绝对误差、均方根误差、TS 评分和 ETS 评分。从图 8a 中可以看到,同化了常规资料后,模式对降水模拟的绝对误差和均方根误差分别从控制试验的 13.0 和 25.2 mm,下降到了 11.6 和 23.7 mm;同时同化了常规资料和雷达径向风速后,绝对误差和均方根误差则分别下降到了 11.7 和 22.8 mm。从 TS 评分和 ETS 评分来看,ASSGR 试验的 TS 评分最高,其次为 ASSG 试验,CTL 试验评分相对最低(图 8b~8c)。ASSG 试验在阈值为 0.1 mm<P≤5 mm 时,TS 评分和 ETS 评分分别比控制试验提高了 0.11 和 0.06。ASSGR 试验在阈值为 5 mm<P≤70 mm 时,TS 评分和 ETS 评分均有明显改善,尤其是在阈值为 15 mm<P≤30 mm 时,TS 评分和 ETS 评分分别比控制试验提高了 0.12 和 0.14。这主要是因为雷达径向风速资料通过对初始风场的调整,改进了对台风路径和结构的模拟,减小了模式在宁波、舟山和嘉兴地区的降水高估情况。由此可见,同化雷达径向风速资料对改进台风降水模拟是有较好作用的。

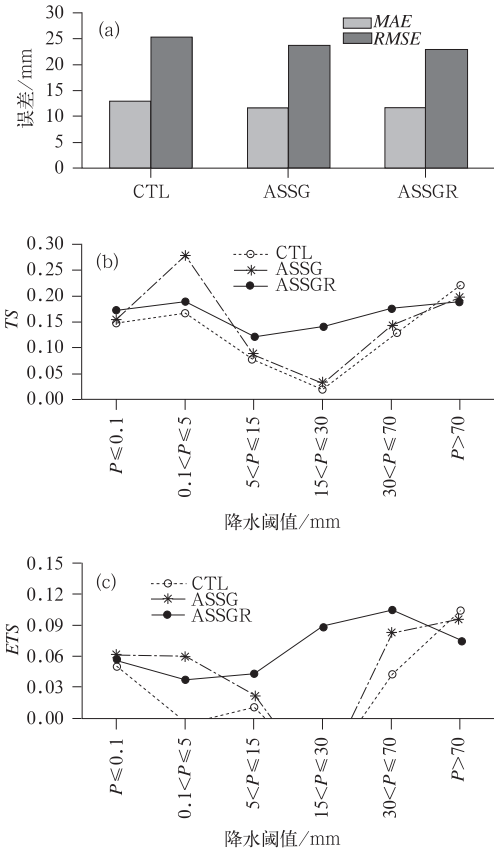


图 8 2005 年 8 月 6 日 12 时至 07 日 00 时 12 小时
累计降水量模拟检验

(a) 绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)统计,
(b) TS 评分,(c) ETS 评分

Fig. 8 The verification of simulated 12 h
accumulation precipitation during 1200 UTC
06 August to 0000 UTC 7 August 2005
(a) MAE: mean absolute error,
RMSE: root mean square error, (b) TS: threat
score, (c) ETS: equitable threat score

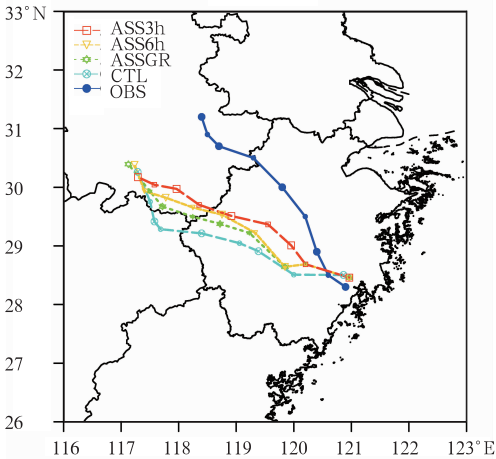


图 9 不同同化时间间隔对逐 3 h 台风路径模拟的影响
(OBS:观测路径,CTL:控制试验模拟路径,ASSGR:间隔
12 h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟路径,ASS6h:间隔
6 h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟路径,ASS3h:间隔
3 h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟路径)

Fig. 9 The effect of different assimilation interval
on track simulation of typhoon Matsa
(OBS: observed track, CTL: track obtained from the control run,
ASSGR: track obtained from the assimilation run at every 12 h,
ASS6h: track obtained from the assimilation run at every 6 h,
ASS3h: track obtained from the assimilation run at every 3 h)

5.3 不同雷达资料同化时间间隔对台风模拟的影响

为了进一步探讨不同雷达资料同化时间间隔对台风模拟的影响,图 9 给出了各个雷达资料同化试验及控制试验模拟的逐 3 h 台风路径和实况。由图中可见,由于在初始时刻雷达径向风速资料的引入,各组同化试验(ASSGR、ASS6h 和 ASS3h)在 3 h 时刻的台风路径明显比控制试验(CTL)更加靠近实况观测;到了 6 h 时刻,由于初始时刻引入的雷达资料

信号逐渐减弱,ASSGR 和 ASS6h 试验模拟的台风路径在侧边界场的强迫下,逐渐向 CTL 控制试验靠近,而 ASS3h 试验由于在 3 h 时刻又同化了一次雷达资料,因此其模拟的路径相对其他同化试验更加靠近实况观测。由此可见,雷达资料对模式的影响时效是有限的,在本试验中大约是 3~6 h。ASS6h 和 ASS3h 试验在 6 h 时刻再一次引入雷达资料后,模拟的台风路径又一次向实况路径靠近,而 ASSGR 试验由于积分误差的累积,其模拟的台风路径逐渐向控制试验靠近。表 2 给出了各个试验对台风

表 2 不同同化试验对台风路径的模拟误差(单位:km)

Table 2 The deviation between simulation and observation of the Matsa position (unit: km)											
模拟时间	0 h	3 h	6 h	9 h	12 h	15 h	18 h	21 h	24 h	0~12 h 平均	12~24 h 平均
CTL	22.8	66	111.5	135.2	176.7	222.2	187.4	167	159.9	102.4	182.6
ASSGR	18.8	48.2	67.1	111.1	137.2	159.9	156.4	153.1	165.8	76.5	154.5
ASS6h	18.8	48.2	67.1	100.2	126.1	148.5	140.1	160.6	156.4	72.1	146.3
ASS3h	18.8	48.2	50.4	72.6	111.1	136	113.9	138.4	166.2	60.2	133.1

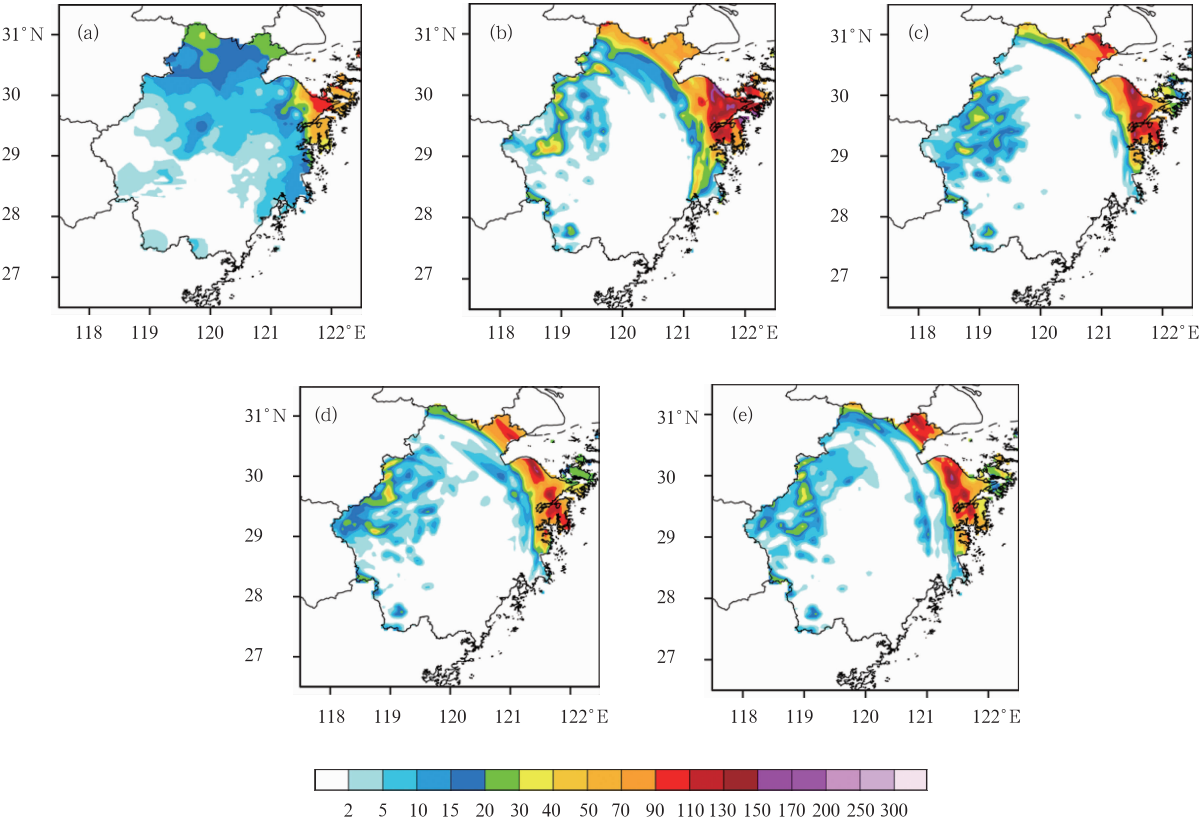


图 10 不同同化时间间隔对台风降水模拟的影响

(a)OBS-实况降水,(b)CTL-控制试验模拟降水,(c)ASSGR-间隔 12 h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟降水,(d)ASS6h-间隔 6h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟降水,(e)ASS3h-间隔 3 h 同化一次雷达径向风速资料试验模拟降水

Fig. 10 The simulated and observed 12 h accumulation precipitation from

1200 UTC 06 August to 0000 UTC 7 August 2005

(a) OBS, (b) CTL, (c) ASSGR, (d) ASS6h, (e) ASS3h

路径的模拟误差。CTL 试验在积分 0~12 h 和 12~24 h 内平均误差分为 102.4 和 182.6 km;ASS-GR 试验在 0~12 h 内的平均误差为 76.5 km,比控制试验减小了 25.9 km,在 12~24 h 内的平均误差为 154.5 km,比控制试验减小了 28.1 km;ASS6h 试验在 0~12 h 和 12~24 h 内,平均误差分别为 72.1 和 146.3 km,比控制试验分别减小了 30.3 和 36.3 km;ASS3h 试验在 0~12 h 和 12~24 h 内,平均误差分别为 60.2 和 133.1 km,比控制试验分别减小了 42.2 和 49.5 km。总的来说,同化雷达径向风速资料能有效改进台风路径的模拟,而且雷达资料信号有一定的时效性,在本次个例中,同化时间间隔为 3 小时,对路径模拟的改进最大(作者还进行了 1 小时时间间隔的数值试验,但其模拟结果不如 ASS3h,这可能是同化时间间隔太短,模式在引入观测资料后在短时间内无法快速进入协调状态,引起模式的动力和热力不稳定,导致结果还不如 ASS3h 试验,还需要进一步深入研究)。

雷达径向风速资料的同化,引起台风路径和结构模拟的变化,必然会引起台风降水的改变。图 10 给出了不同同化时间间隔试验以及控制试验模拟的 12 h 累计降水及其实况。比较各个试验结果发现,同化试验(ASSGR、ASS6h 和 ASS3h)以及控制试验(CTL)均能模拟出宁波东北部和舟山地区的主要强降水区和浙江北部嘉兴湖州地区的次要强降水区;CTL 试验对这两个降水区有较大的高估,而各同化试验均能对此高估有一定的改善(尤其是 ASS3h 和 ASS6h 试验模拟的宁波地区的强降水量级已经和实况接近,但面积还略微偏大)。

从 12 h 累计降水模拟的绝对误差、均方根误差来看,各同化试验(ASSGR、ASS6h 和 ASS3h)分别比控制试验(CTL)减小了 9.84%、9.85%、15.01%和 9.38%、12.04%、14.50%(图 11a)。从 TS 评分和 ETS 评分来看,同化试验的评分相对于控制试验均有所提高,尤其是在阈值为 $15\text{ mm} < P \leq 70\text{ mm}$ 时较为明显(图 11b 和 11c)。ASSGR、ASS6h 和 ASS3h 试验对 $30\text{ mm} < P \leq 70\text{ mm}$ 的 TS 评分和 ETS 评分分别比控制试验提高了 0.05、0.07、0.10 和 0.06、0.07、0.14。

综合雷达资料同化对台风路径和降水模拟的影响来看,雷达径向风速资料的引入能有效改进台风

麦莎的模拟,而且随着同化时间间隔的减小,改进的效果越明显。

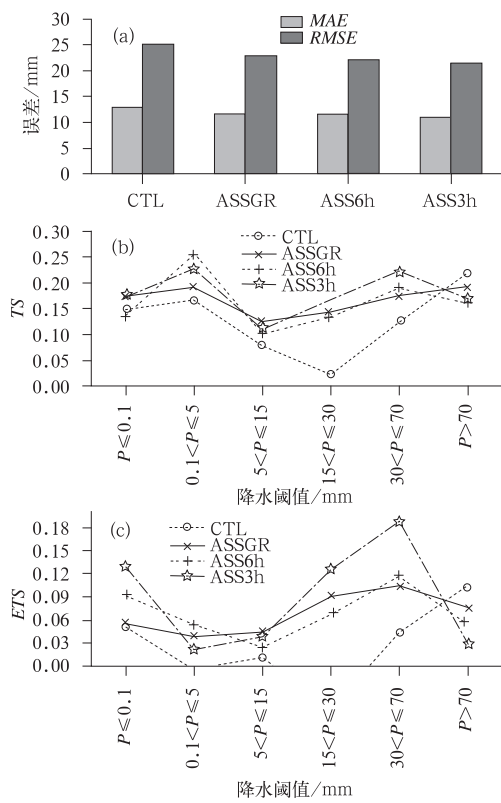


图 11 不同同化时间间隔试验的 12 小时累计降水量模拟检验

(a) 绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)统计,(b) TS 评分,(c) ETS 评分

Fig. 11 The verification of simulated 12 h cumulation precipitation for different assimilation interval experiments during 1200 UTC 06

August to 0000 UTC 7 August 2005

(a) MAE: mean absolute error, RMSE: root mean square error, (b) TS: threat score, (c) ETS: equitable threat score

6 结论与讨论

针对雷达资料在中尺度模式中的应用问题,本文应用 WRF-3DVAR 系统,同化多普勒雷达径向风速资料,并利用 WRF 模式对台风麦莎(2005 年 8 月 6 日 00 时至 7 日 00 时)进行数值模拟。通过对比同化试验和控制试验,主要结论如下:

(1)同化雷达径向风速资料能通过调整初始风

场结构,加强对台风结构的模拟,从而提高模式对台风路径和强度的模拟能力。

(2)引入常规资料后,可以改进台风降水的模拟,减小了模式在宁波以东和嘉兴地区的偏强误差;联合同化常规资料和雷达径向风速资料进一步提高了降水预报评分。

(3)对比不同时间间隔同化试验发现,雷达径向风速资料的引入能有效改进台风麦莎的模拟,且雷达资料信号有一定的时效性,在一定程度上缩短同化时间间隔有助于提高同化效果,在本次个例中,3小时的同化时间间隔的同化效果最明显。

应该指出的是,本文只是针对麦莎台风的个例研究,考虑到不同天气过程中影响要素作用的不同以及初值误差的差异,结论有一定局限性,需要今后对更多个例进行试验。同时,对观测资料的质量控制以及误差统计与定量分析方法还有待于进一步的改进。多部雷达资料同化对台风过程模拟的影响,也是下一步需要深入研究的工作。

参考文献

- [1] Kasahara A, Balgovind R C, Katz B. Use of satellite radio metric imagery data for improvement in the analysis of divergent wind in the tropics[J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116(4): 866-883.
- [2] Lindskog M, Salonen K, Järvinen H, et al. Doppler radar wind data assimilation with HIRLAM 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(5): 1081-1092.
- [3] 秦琰琰,龚建东,李泽椿. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的观测系统模拟试验[J]. *气象*, 2012, 38(5): 513-525.
- [4] Gao J, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2004, 21(3): 457-469.
- [5] Hu M, Xue M, Gao J, et al. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(2): 699-721.
- [6] Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case[J]. *J Appl Meteor*, 2005, 44(6): 768-788.
- [7] Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at landfall[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46(1): 14-22.
- [8] Xiao Q, Sun J. Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP_2002[J]. *Mon Wea Rev*, 2007, 135(10): 3381-3404.
- [9] 顾建峰. 多普勒雷达资料三维变分直接同化方法研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2006: 223.
- [10] 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, 35(12): 12-20.
- [11] 杨毅. Doppler 雷达资料同化技术研究[D]. 兰州:兰州大学, 2007: 147.
- [12] 段云霞. 将多普勒雷达资料用于台风碧利斯的结构分析和模拟研究[D]. 兰州:兰州大学, 2009: 49.
- [13] 闵锦忠,彭霞云,赖安伟,等. 反演同化和直接同化多普勒雷达径向风的对比试验[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(6): 745-754.
- [14] 李华宏,薛纪善,王曼,等. 多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 50-57.
- [15] 李媛,刘健文,董佩明,等. GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究[J]. *气象*, 2011, 37(4): 403-411.
- [16] Barker D, Huang W, Guo Y R. A three-dimensional variational (3DVAR) data assimilation system for use with MM5/NCAR Tech Notes. NCAR/TN 2453+STR, 2003.
- [17] Lorenc A C. Analysis methods for numerical weather prediction[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1986, 112(474): 1177-1194.
- [18] Courtier P, Thepaut J N, Hollingsworth A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1994, 120(519): 1367-1387.
- [19] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments[J]. *J Atmos Sci*, 1997, 54(12): 1642-1661.
- [20] Sun J, and Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm[J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(5): 835-852.
- [21] Marshall, J S, Palmer W Mc K. The distribution of raindrops with size[J]. *J Meteor*, 1948, 5(4): 165-166. doi: 10.1175/1520-0469.
- [22] White A A. A view of the equations of meteorological dynamics and various approximations[M]. // J Norbury and I Roulstone, Eds, *Analytical Methods and Numerical Models*, Vol. 1, Large-Scale Atmosphere-Ocean Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-100.
- [23] Xiao, Q N, Kuo Y H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case[J]. *J*

Appl Meteor,2005,44(6):768-788.

[24] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. J Climate Appl Meteor, 1983,22(6):1065-1092.

[25] Rutledge S A, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in mid-latitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands[J]. J Atmos Sci,1984,41(20):2949-2972.

[26] Chen S H, Sun W Y. A one-dimensional time dependent cloud model[J]. J Meteor Soc Japan,2002,80(1):99-118.

[27] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Mon Wea Rev,2006,134(9):2318-2341.

[28] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave[J]. J Geophys Res, 1997, 102 (14): 16663-16682.

[29] Dudia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. J Atmos Sci,1989,46(20):3077-3107.

[30] U. S. National Centers for Environmental Prediction, updated daily; NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Dataset ds083. 2 published by the CISL Data Support Section at the National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO. <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.

[31] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's Spectral Statistical-interpolation Analysis System[J]. Mon Wea Rev,1992,120(8):1747-1763.

[32] Wu W S, Purser J, Parrish D E. Three-dimensional variational analysis with spatial inhomogeneous covariances[J]. Mon Wea Rev, 2002,130(12):2905-2916.