

刘君,黄江平,董佩明,等. 2013. 卫星资料循环同化应用对区域数值预报效果影响分析. 气象,39(2):156-165.

卫星资料循环同化应用对区域数值 预报效果影响分析^{* 1}

刘 君^{1,2} 黄江平^{2,4} 董佩明^{2,3}
张文军² 严仕尧⁵ 张长国¹

1 解放军 94578 部队,盐城 224003
2 北京航空气象研究所,北京 100085
3 中国气象局数值预报中心,北京 100081
4 中国科学院大气物理研究所 LAPC 国家重点实验室,北京 100029
5 解放军 96217 部队,贵阳 550000

提 要: 为提高卫星资料在同化系统中的利用率及验证卫星微波资料对区域数值预报效果的影响,本文以 2008 年 8 月 1—31 日为研究时段,利用 WRF 模式及其 WRF-3DVAR 同化模块,设计并构建了卫星微波资料的快速循环同化方案,分析循环同化方案对数值预报的改进效果。结果表明,相比于单时段同化,循环同化方案使各预报要素的相关系数在一定程度上得到改善,均方差也呈现减小的趋势。此外,对研究时段内暴雨和台风个例的具体分析显示,循环同化方案能够有效改善降水和台风路径的预报。

关键词: 区域数值预报, 卫星微波观测, 快速循环同化, WRF-3DVAR

中图分类号: P435 **文献标识码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 02. 004

Analysis of the Effect of Satellite Data Cycle Assimilation on the Regional Numerical Prediction

LIU Jun^{1,2} HUANG Jiangping^{2,4} DONG Peiming^{2,3}
ZHANG Wenjun² YAN Shiyao⁵ ZHANG Changguo¹

1 PLA Unit No. 94578, Yancheng 224003
2 Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085
3 Numerical Forecast Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081
4 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
5 PLA Unit No. 96217, Guiyang 550000

Abstract: Large amount of satellite observations have been used in numerical weather prediction and improving the forecasts greatly. Most works focus on the case study for influence of microwave satellite data on regional numerical weather prediction, while the study for long time is very little. The motivation of this paper is to improve the utilization of microwave satellite data in assimilation system and validating the influence of satellite microwave data on regional numerical prediction. In this paper, the study time of numerical prediction is from 1st to 31st August, 2008. Rapid Update Cycle (RUC) assimilation system of microwave satellite data is designed and constructed, which is based on the regional mesoscale model WRF

^{*} 国家自然科学基金(41075017)资助
2011 年 10 月 24 日收稿; 2012 年 8 月 9 日收修定稿
第一作者:刘君,主要从事卫星资料同化工作研究. Email:edwardl@126. com
通信作者:黄江平,主要从事数值模拟工作. Email:hjptfq@126. com

and WRF-3DVAR system. Therefore the improvement effect of RUC assimilation system on the regional numerical prediction can be analyzed. The results show that, the RUC assimilation scheme is better than single time assimilation scheme. Compared with the former, the RUC assimilation scheme can improve the correlation coefficient of every forecast element to a certain extent. The correlation coefficients of wind field, temperature field and potential height field on the bottom level are improved remarkably. Except the 400 hPa humidity field correlation coefficient is reduced, other various levels of humidity field correlation coefficients are increased, especially in the 700 hPa and 200 hPa, the humidity field increased significantly. RUC assimilation scheme can also reduce the average square errors on the most levels. The forecast effect of microwave satellite data application on land and sea area is consistent with the characteristics; There are slightly differences in detail. On the whole, the improvement on sea area is better than the land surface area, because the surface effect is more complex. Furthermore, in the case of heavy rain and typhoon, the analyses reveal that, RUC assimilation of satellite data scheme can improve the simulation of the precipitation and typhoon track, and can simulate the attribution of heavy rainfall better, especially to improve the strong precipitation center in the simulation, and can also improve the typhoon path prediction to some extent, especially the path trend after the typhoon landing. Overall, it shows that on regional numerical weather prediction, RUC assimilation system can fully use the assimilation of microwave satellite data, and is a useful and necessary method to improve the forecast accuracy.

Key words: regional numerical prediction, satellite microwave observation, Rapid Update Cycle (RUC) assimilation, WRF-3DVAR

引 言

数值模拟已经成为天气预报中不可或缺的部分。目前,数值模式的动力框架和计算方案已经非常成熟,因此,如何得到准确的初始场是提高预报水平的关键。通过资料同化的方法能够将模式预报和观测统计相结合从而得到更加精确的初始场。近年来,卫星资料同化应用对数值预报初始场的改进已被公认是全球数值预报质量快速提高的主要原因之一(薛继善,2009)。

国外众多的数值预报研究和业务单位都已将多种卫星资料应用到数值预报模式的同化分析系统中。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)公布的数据表明,卫星资料占到所有同化资料的90%以上,其中,卫星辐射率资料占到所有使用资料的80%以上(杨寅等,2011)。美国国家环境预报中心(NCEP)通过总结发现,微波资料直接同化是数值预报准确性显著提高的主要原因(董佩明等,2008)。

目前,国内也开展了一系列卫星微波资料直接同化的研究工作。潘宁等(2003)采用增量3DVAR方法在MM5中尺度数值预报模式中直接同化AMSU-A亮温资料进行研究,结果表明,直接同化AMSU-A辐射亮温资料对中高层温度分析场的影响最为明显,对温度和水汽混合比预报有总体上的正效应。张华等(2004)对台风威尔逊的研究表明,

直接同化ATOVS微波资料可以揭示出台风的三维暖心结构特征,台风路径模拟也更加接近实况。李娟等(2008)对一次中尺度暴雨两个例进行分析,结果表明:长期使用卫星资料可以改进大尺度环境场,使暴雨天气过程的直接影响系统更接近实际;其中,AMSU-A资料对温度场的调整幅度较大,AMSU-B资料对湿度场也有比较明显的影响。郭锐等(2010)研究表明:长期同化AMSU-A资料能够改善降水预报,尤其是对暴雨中心的模拟位置、强度有较明显改进,中高层形势场的降水直接影响系统也更加接近实况,温湿场、风场的调整作用尤其明显。张爱忠等(2006)采用GRAPES-3DVAR同化系统直接同化AMSU-A亮温资料,发现对降水模拟方面的改善效果较为明显。但在区域数值预报中,目前大多数的研究只是针对个例进行分析,对较长时间段内卫星资料应用对区域数值预报效果的影响还缺乏完整的统计评估。

此外,目前普遍使用的三维变分同化方法(单时次3DVAR)都是在模拟初始时刻同化此时刻前后数小时的观测资料,由于同化窗口短(单时次3DVAR同化窗不宜超过6h),单时次3DVAR一般只能利用到很少的卫星资料,有时甚至没有,因此并不能有效改善区域数值预报效果。而资料循环同化方案能够同化一个时间段内几乎所有的观测数据,大大提高资料的使用率。同时,循环同化3DVAR扩展的同化时段恰好可提供模式进行动力

时启动数字滤波器滤除虚假高频波。同化结束后将得到的分析场作为模式的初始场,以热启动的方式启动 WRF 模式。在下一同化时刻,按照同样的方法同化卫星微波资料,然后不断地循环下去,从而实现了卫星微波资料的循环同化。当系统进行到预报起报时刻,将上一时刻循环同化得到的分析场作为模式的初始场进行短期预报。需要说明的是,在系统运行的过程中,由 NCEP 再分析资料不断为系统提供边界条件。

1.2 参数设置及资料使用

模式的背景场和边界条件由 NCEP 的 FNL 再分析资料提供,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。模拟区域包括陆地和海面区域,中心经纬度为 26°N 、 127°E ,水平分辨率为 30 km,格点数 141×111 ,垂直分层为 28 层。选用的物理过程包括边界层过程 YSU 方案,积云方案为 Kain Fritsch 方案,WSM 3 类简单冰微物理过程方案,长波辐射 PRTM 方案,短波辐射 Dudhia 方案。

文中使用的卫星资料为 Level 1b 层次辐射率资料,主要包括先进的微波探测器 AMSU-A/B 资料。AMSU-A 资料来自美国极轨卫星 NOAA15, NOAA16 和 NOAA18,主要用于探测大气温度,有 15 个通道,最大扫描角为 48.33° ,星下点分辨率为 48.05 km。AMSU-B 资料来自美国极轨卫星 NOAA15, NOAA16 和 NOAA17,主要用于探测大气湿度,有 5 个通道,最大扫描角为 48.95° ,星下点分辨率为 16.0 km。

1.3 试验方案

本文设计了三组试验,分别为不同化卫星资料的控制试验、单时次同化卫星资料试验、循环同化卫星资料试验:(1)控制试验以 NCEP 再分析资料作为 WRF 模式的初始场,进行 60 h 预报;(2)单时次同化试验在 1200 UTC 同化卫星微波资料,并将得到的分析场作为初始场进行 60 h 预报;(3)循环同化试验每隔 6 h(即每日的 1800、0000、0600 和 1200 UTC)同化一次卫星微波资料,并将同化得到的分析场作为模式的初始场向下滚动预报,在 1200 UTC 将上一时刻的 6 h 预报场作为背景场同化卫星微波资料,并进行 60 h 预报。在以上的同化试验中,同化窗口为 6 h,包括同化时刻前后各 3 h 的卫星微波资料。

将两种同化卫星资料试验分别与控制试验比

较,可以分析两种同化方式下卫星资料对区域数值预报的影响。预报结果的评估包括分别对单时次同化试验、循环同化试验和控制试验要素场(风场 U、V,位势高度 PHI,温度场 TK 和湿度场 RH)的预报结果与各自分析场进行相关系数和均方根误差的统计。对海陆区域的统计分别进行,在陆地区域,通过模式输出结果的土地覆盖类型(Landmask)来剔除海面的模拟结果;在海面区域,同样通过此方法来获取海面区域的模拟结果。

2 效果检验

图 2a~2d 为陆地区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场的相关系数分别与控制试验结果求差的结果,正值代表同化卫星资料后增强了预报和分析场的相关,负值代表同化卫星资料后减小了预报和分析场的相关。由图 2 可以看出,单时次同化的试验结果在各个等压面高度上相关性相比控制试验是减少的;而循环同化试验从整体上看,其相关性有所改善,特别是在低层和高层,风场,位势高度和温度场相关性是增加的。湿度场除 300 hPa 相关性是减少外,其他层次湿度场的相关系数均为增加的,相关系数在 700 和 200 hPa 均有较大程度的增加。

图 3a~3d 为海面区域的结果。与陆地区域类似,海面区域单时次同化的试验结果在各个等压面高度上相关性相比控制试验是减少的。循环同化试验 24 h 结果在低层的风场和位势高度的相关性是增加的,湿度场的相关系数在大部分层次均为增加的,48 h 预报结果在个别层次的湿度场也是增加的。

图 4a~4d 为陆地区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场的均方根误差分别与控制试验结果求差的结果,正值代表同化卫星资料后增加了预报和分析场的均方根误差,负值代表同化卫星资料后减小了预报和分析场的均方根误差。可以看出,单时次同化的试验结果在各个等压面高度上均方根误差相比控制试验是增加的,循环同化试验和控制试验各要素的均方根误差相当,特别在 700 和 200 hPa 湿度场的均方根误差是明显减少的,在 400 hPa 以上高度,位势高度的均方根误差也是明显减少的。

图 5a~5d 为海面区域的结果,与陆地区域类似,海面区域单时次同化的试验结果在各个等压面高度上均方根误差相比控制试验大部分是增加的。循环同化试验各要素的均方根误差控制试验相当,

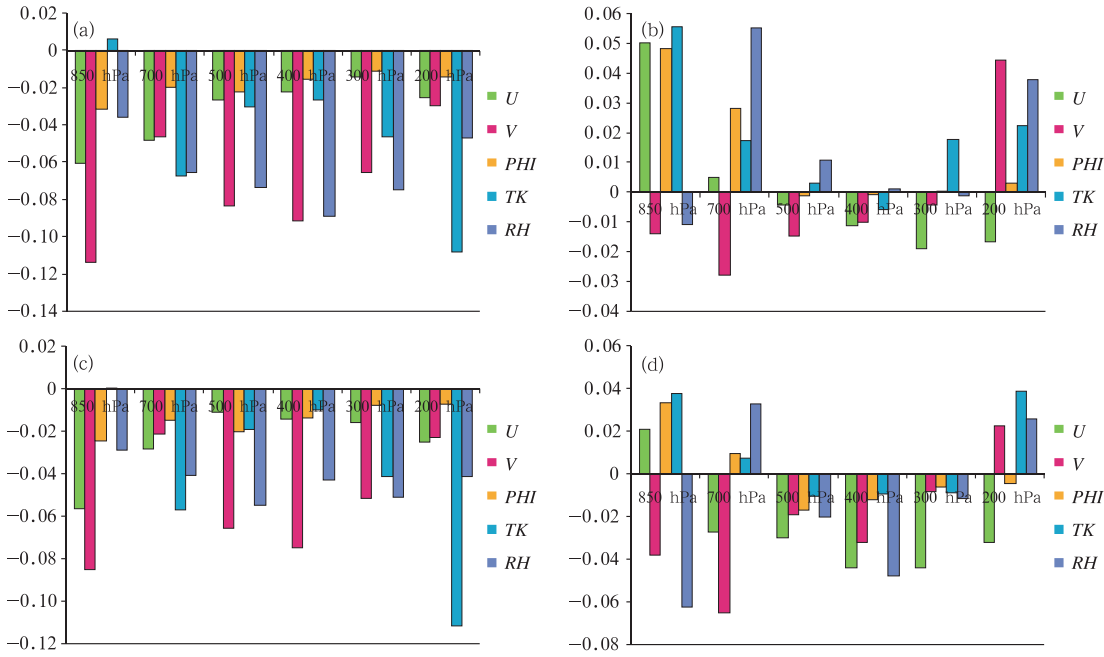


图 2 陆地区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场相关系数分别与控制试验结果求差的结果
(a) 24 h 单时次同化试验, (b) 24 h 循环同化试验, (c) 48 h 单时次同化试验, (d) 48 h 循环同化试验
Fig. 2 The correlations of single time assimilation experiment and cycle assimilation experiment related to analysis fields subtracting that of control experiment on land area for
(a) 24 h single time assimilation experiment, (b) 24 h cycle assimilation experiment,
(c) 48 h single time assimilation experiment, and (d) 48 h cycle assimilation experiment

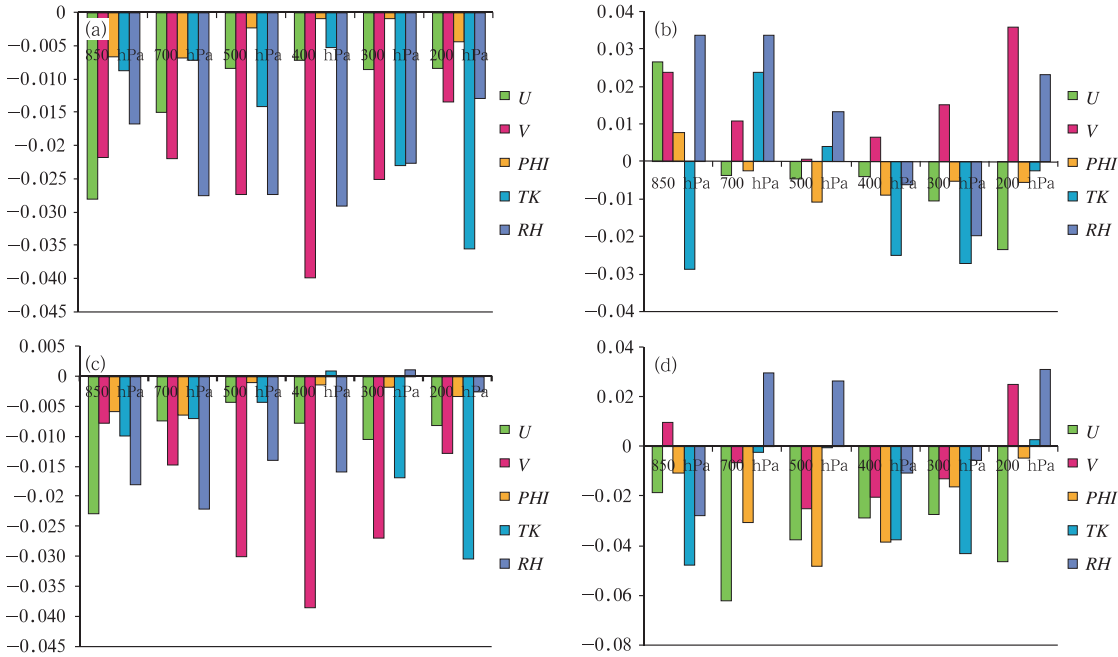


图 3 海洋区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场相关系数分别与控制试验结果求差的结果
(a) 24 h 单时次同化试验, (b) 24 h 循环同化试验, (c) 48 h 单时次同化试验, (d) 48 h 循环同化试验
Fig. 3 The correlations of single time assimilation experiment and cycle assimilation experiment related to analysis fields subtracting that of control experiment on sea area for
(a) 24 h single time assimilation experiment, (b) 24 h cycle assimilation experiment,
(c) 48 h single time assimilation experiment, and (d) 48 h cycle assimilation experiment

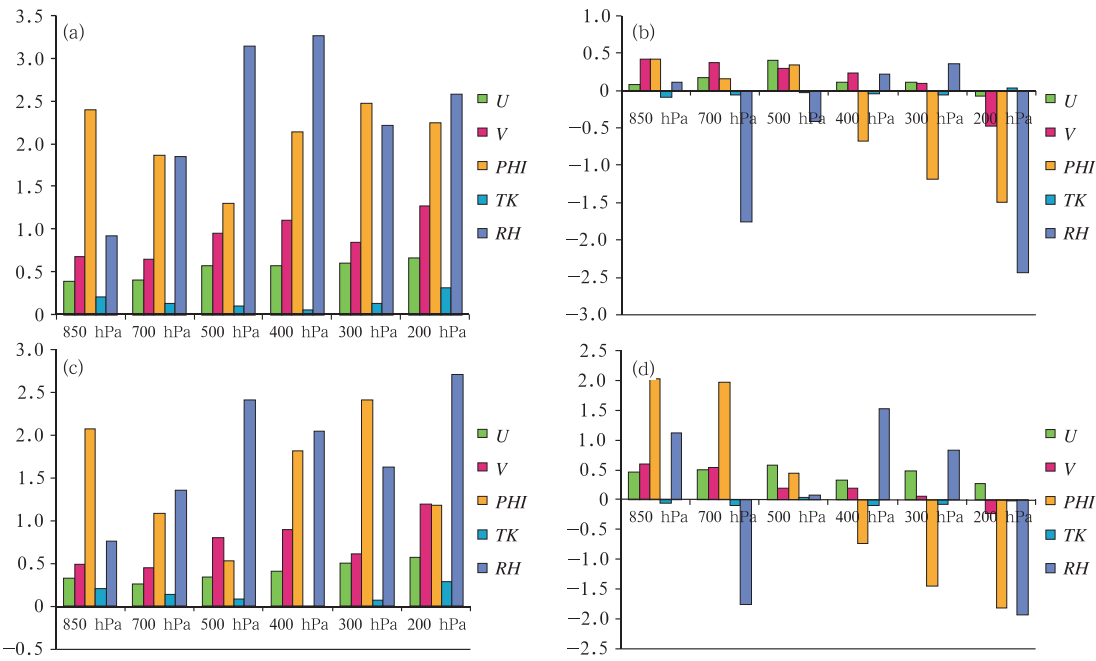


图 4 陆地区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场的均方根误差分别与控制试验结果求差的结果
(a)24 h 单时次同化试验,(b)24 h 循环同化试验,(c)48 h 单时次同化试验,(d)48 h 循环同化试验
Fig. 4 The average square errors of single time assimilation experiment and cycle assimilation experiment subtracting control experiment on land area for
(a) 24 h single time assimilation experiment,(b) 24 h cycle assimilation experiment,
(c) 48 h single time assimilation experiment, and (d) 48 h cycle assimilation experiment

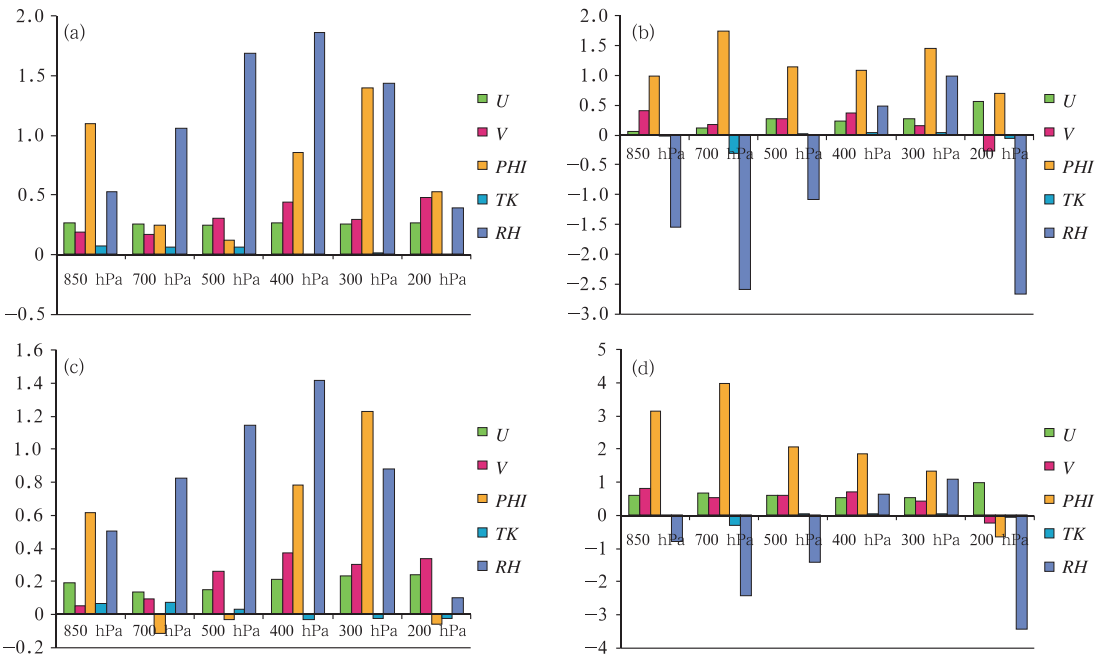


图 5 海洋区域单时次同化试验、循环同化试验和分析场的均方根误差分别与控制试验结果求差的结果
(a) 24 h 单时次同化试验,(b) 24 h 循环同化试验,(c) 48 h 单时次同化试验,(d) 48 h 循环同化试验
Fig. 5 The average square errors of single time assimilation experiment and cycle assimilation experiment subtracting control experiment on sea area for
(a) 24 h single time assimilation experiment, (b) 24 h cycle assimilation experiment,
(c) 48 h single time assimilation experiment, and (d) 48 h cycle assimilation experiment

特别是大部分高度上湿度场的均方根误差是明显减少的。

3 降水个例检验

图 6 和图 7 为 8 月 28 日 1800 UTC, MICAPS 实际观测和各试验模拟的 24 和 48 h 降水模拟图。从图中可以看出 48 h 内, 山东东南部、安徽南部、河

南大部、湖北大部、湖南西北部、重庆东北部、贵州东部和陕西东部等地都出现降水, 降水中心主要位于湖北中部、东部和湖南西北部。其中湖南西北部的降水中心地区, 24 h 最大降水量达到 100 mm, 48 h 最大降水量达到 160 mm 以上。湖北中部的降水中心地区, 24 h 最大降水量达到 160 mm, 48 h 最大降水量达到 200 mm 以上。

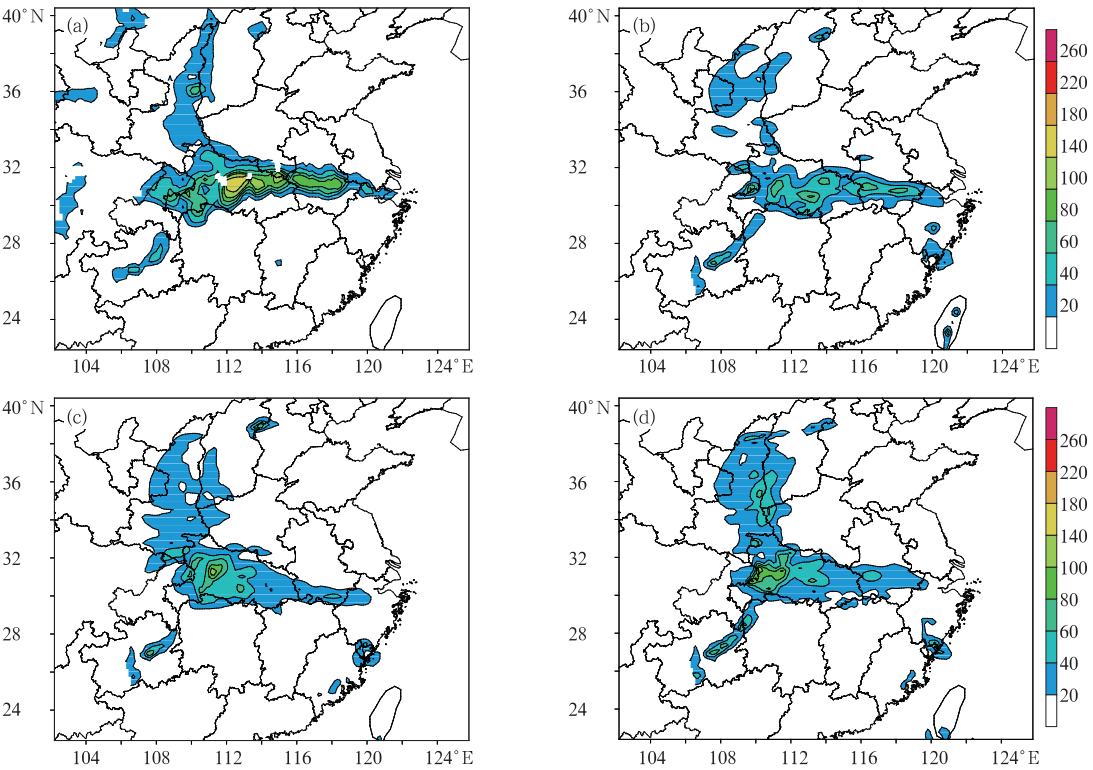


图 6 各试验模拟的 2008 年 8 月 28 日 24 h 降水与实际观测对比图(单位:mm)
(a) 观测, (b) 控制试验, (c) 单时次同化试验, (d) 循环同化试验
Fig. 6 The 24 h precipitation (unit : mm) on 28 August 2008 for
(a) observation, (b) control experiment, (c) single time assimilation
experiment, and (d) cycle assimilation experiment

在不同化卫星资料的情况下, 24 h 预报的降水强度和范围与实况有一些偏差, 陕西东部的降水范围相对于实况明显偏小。24 h 预报的安徽南部和湖北中部的降水强度相对实况明显偏小, 湖北中部的降水中心 24 h 降水量只有 80 mm, 远小于实况。单时次同化卫星资料后, 24 h 预报的陕西东部的降水强度和范围有所改善, 湖北中部的降水中心强度有所增强, 24 h 降水量达到 120 mm。但 24 h 预报的安徽南部的降水中心强度相对不同化卫星资料预报的强度有所减小。而循环同化卫星资料后, 24 h

预报的陕西东部降水强度和范围进一步改善, 接近实况水平。湖北中部的降水中心强度也有所增强, 24 h 降水达到 120 mm; 24 h 预报的安徽南部的降水中心强度也有所增强, 较同化单次同化卫星资料的预报有所改善, 但仍小于不同化卫星资料预报的强度。产生此情况的原因是由于不同卫星和传感器的资料因仪器性能差异、扫描位置等因素存在误差, 将多种资料(多颗卫星的资料)引入到同化系统中的同时, 也带来了相应的累积误差, 因此反而有可能导致同化效果出现下降。

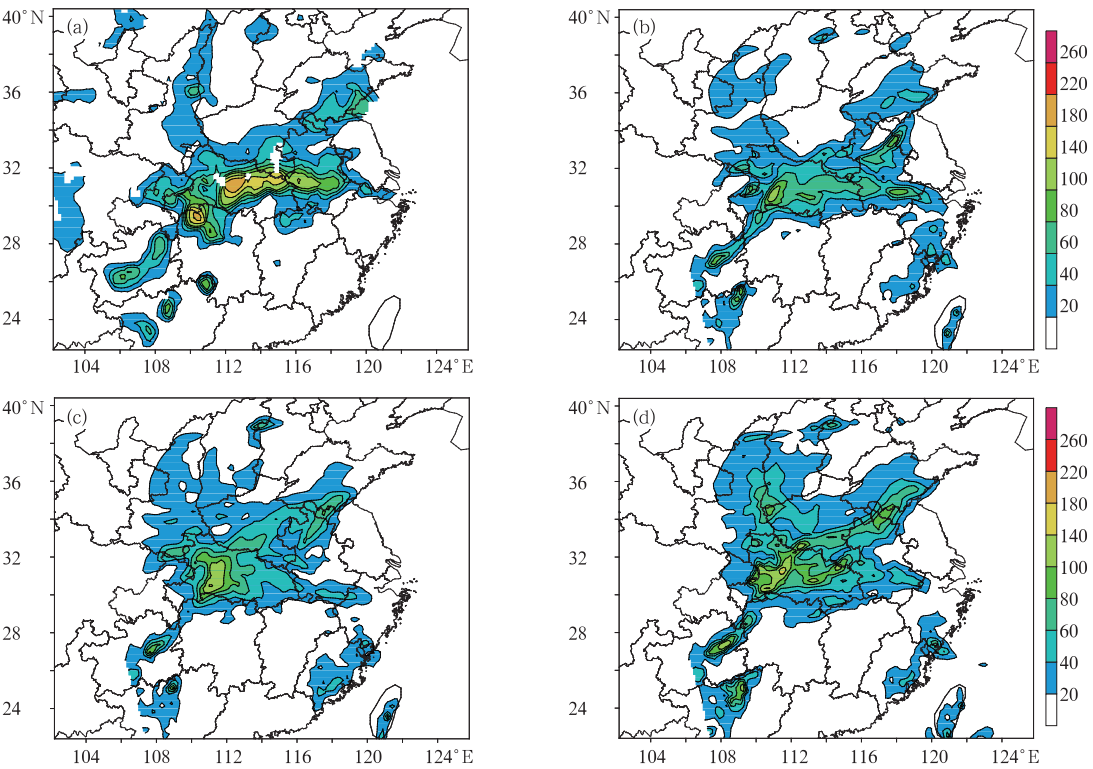


图 7 各实验模拟的 2008 年 8 月 28 日 48 h 降水与实际观测对比图(单位:mm)

(a) 观测,(b)控制试验,(c)单时次同化试验,(d)循环同化试验

Fig. 7 The 48 h precipitation (unit: mm) on 28 August 2008 for

(a) observation, (b) control experiment, (c) single time assimilation experiment,

and (d) cycle assimilation experiment

在不同化卫星资料的情况下,48 h 预报的湖南北部的降水中心位置不够准确,较实况有明显偏差,强度也远小于实况水平,48 h 降水只有 120 mm。湖北中部的降水中心强度远小于实况,48 h 降水只有 100 mm。安徽南部和湖北东部的降水中心没有体现出来,强度也远小于实况。同化单次卫星资料后,湖南西北部的降水中心强度有所改善,48 h 降水达到 140 mm。但湖北中部和安徽南部的降水中心预报的强度和范围没有改善。而循环同化卫星资料后,湖北中部的降水中心预报的强度和位置有很大的改善,48 h 降水达到 160 mm,接近实况水平。湖北中部和安徽南部的几个降水中心也有所体现,接近实况水平。

图 8 为 8 月 28 日 1800 UTC,预报区域 24 和 48 h 预报降水 TS 评分。由于模式的起报时间为 1800 UTC,而降水观测的时间为每天的 0000 UTC,检验的 24 和 48 h 降水预报实际上对应的是模式的 6—30 h 和 6—54 h 预报,图中表示的 24 和 48 h 分别表示此时段的结果。由图可以看出,对于

24 h 预报,在单时次同化卫星资料的情况下,除大雨的 24 h 降水评分有比较明显的提高外,小雨、中雨和暴雨的 24 h 降水评分均有所下降,特别是暴雨的 24 h 降水评分相对于控制试验有明显的下降。在循环同化卫星资料的情况下,中雨和暴雨的 24 h 降水评分均有所下降,但与控制试验相差不大,而小雨和大雨的 24 h 降水评分均有所提高。对 48 h 预报而言,在单时次同化卫星资料的情况下,除暴雨的 48 h 降水评分与控制试验保持一致外,小雨、中雨、大雨的 48 h 降水评分均有所下降。在循环同化卫星资料的情况下,中雨的 48 h 降水评分有所下降,小雨和大雨的 48 h 降水评分与控制试验基本一致,暴雨的 48 h 降水评分相对于控制试验和单时次同化卫星资料的情况有较大的提高。

因此在降水评分方面,单时次同化卫星资料并不能有效地改善降水评分,甚至在一定程度上,降低降水评分。而循环同化卫星资料后,能够很有效地改善这种情况,能够在很大程度上提高降水评分,特别是在暴雨方面,能够很大程度上改善暴雨的降水

评分,对天气预报起到积极的作用。此外,分析不同同化方案的 TS 评分的样本数发现,循环同化卫星资料的暴雨样本数比单时次同化卫星资料和控制试验的样本数都有所增加,结合之前单时次同化试验、

循环同化试验和控制试验各种要素的相关系数之差和均方根误差之差的分析结果,证明循环同化卫星资料对 700 hPa 的湿度场的订正能够明显改进降水的预报,特别是暴雨级别降水的预报。

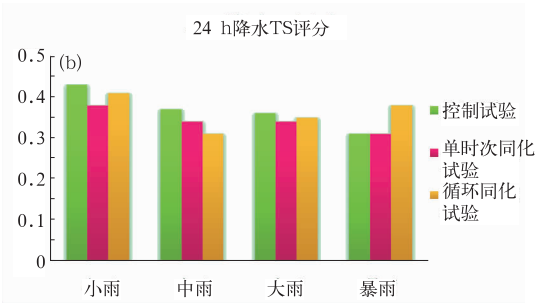
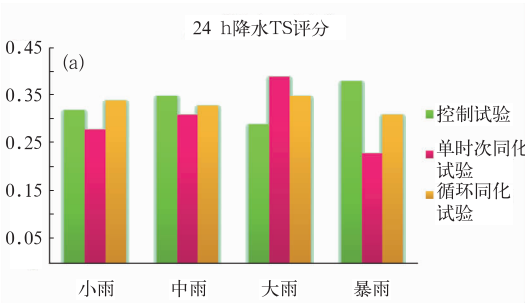


图 8 2008 年 8 月 28 日 1800 UTC 降水 TS 评分
(a) 24 h, (b) 48 h

Fig. 8 The TS evaluations of 24 h (a) and 48 h (b) precipitation at 1800 UTC 28 August 2008

4 台风个例检验

图 9 为台风北冕 2008 年 8 月 5 日 1200 UTC 的 48 h 路径模拟对比图。从图中实际观测路径可以看出,北冕在南海北部海面生成,生成后向西北方向移动,于 8 月 6 日 0600 UTC 于广东省阳西县登陆。登陆后,北冕向西南方向偏转,并迅速移动,北冕在穿过雷州半岛后,于 7 日 0000 UTC 进入北部湾海面(梁宝荣,2009)。在不同化卫星资料的情况下,模拟的台风路径在台风登陆前能够较好地模拟台风的移动趋势,但台风登陆后的模拟路径明显偏北,不能够很好地模拟台风登陆后向西南方向移动的趋势,与实际观测路径有较大的偏差。在单时次同化卫星资料的情况下,模拟的台风路径较不同化

卫星资料的模拟路径有所改善,但与实际观测路径仍有较大的偏离。在循环同化卫星资料的情况下,模拟的台风路径能够很好模拟台风的移动趋势,特别是开始时刻模拟的台风位置与实际观测位置非常接近,模拟其路径也能够较好地模拟台风登陆后移动的趋势。表 1 为台风路径模拟偏差统计,通过比较可以看出,循环同化试验的模拟路径的平均偏差为 84.78 km,明显好于单时次同化试验(平均偏差为 97.11 km)和控制试验(平均偏差为 121.2 km)。

表 1 2008 年 8 月 5 日 1200 UTC 至 7 日 1200 UTC
台风路径模拟的偏差统计(单位:km)

Table 1 Deviations of typhoon track simulated by different methods during 1200 UTC 5 to 1200 UTC 7 August 2008

预报时间	控制试验	单时次同化试验	循环同化试验
0 h	46	46	29
6 h	52	63	47
12 h	63	74	25
18 h	101	77	117
24 h	125	125	179
30 h	249	183	127
36 h	169	170	127
42 h	188	66	29
48 h	98	70	83
平均偏差	121.2	97.11	84.78

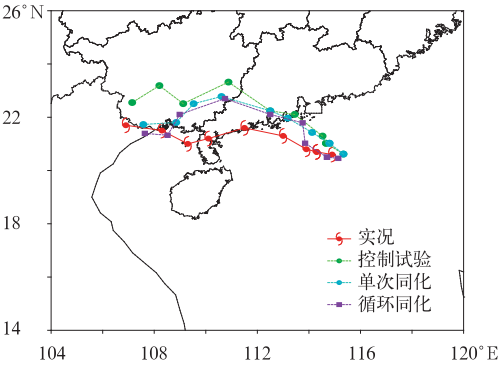


图 9 台风北冕 48 h 路径模拟对比
Fig. 9 The 48 h path forecast of typhoon Kammuri

5 结论及展望

本文设计并构建快速更新循环同化方案,运用该方案针对卫星微波资料的同化应用,进行了一系

列的数值模拟对比试验,通过相关系数、均方根误差等统计结果从整体上分析检验了卫星微波资料同化对 WRF 模式预报效果的影响,证明了快速更新循环同化方案同化卫星微波资料的可行性,结果表明:

(1)整体上,循环同化方案比单时次同化方案使各要素的相关系数得到一定程度的改善,除400 hPa湿度场的相关系数是减少的外,其他各个层次湿度场的相关系数都是增加的,尤其是在700和200 hPa,湿度场增加明显;循环同化方案对低层风场,位势高度和温度相关系数的改善也很明显。整体上,均方根误差也呈现减少的趋势。

(2)卫星资料的应用在陆地和海洋区域预报效果整体呈一致的特征,细节上略有一定的差距。总体上,海面区域的改善程度要优于陆面区域,说明陆面区域受复杂地表影响,资料的同化应用较海面要复杂。

(3)在进行区域数值预报时,循环同化方案在充分利用卫星资料、对预报准确性的提高是一种有效的方式,也是十分必要的。

(4)对暴雨和台风个例分析显示,循环同化方案能够较好地模拟出我国降水的主要分布情况,特别是能够改善对强降水中心的模拟。同时,循环同化方案能够较好地模拟出台风路径的变化趋势,特别是能够模拟台风登陆后路径的移动趋势。

但卫星资料对区域数值预报的影响比较复杂,仍需要开展大量深入细致的工作。目前的同化方案中只是单纯利用卫星微波资料,其他的常规资料并没有引进,这可能是造成目前同化效果不甚理想的原因所在。此外,随着卫星探测技术的发展,新一代的全球大气探测系统包括了高光谱分辨率探测仪器,高光谱探测仪器采用了先进的红外分光仪、干涉仪,探测的光谱分辨率大幅度提高,仪器的探测通道数已经由几十增加到几千,分辨率理论上达到了1 km。下一步工作就是在同化系统中应用高光谱资料,验证其在循环同化系统中的使用以及对数值

预报的影响。

参考文献

- 董佩明,薛纪善,黄兵,等. 2008. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展. 气象科技,36(1):1-7.
- 范水勇,陈敏,仲跻芹,等. 2009. 北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估. 暴雨灾害,28(2):119-125.
- 范水勇,郭永润,陈敏,等. 2008. 高分辨率 WRF 三维变分同化在北京地区降水预报中的应用. 高原气象,27(6):1181-1188.
- 郭锐,李泽椿,张国平. 2010. ATOVS 资料在一次淮河暴雨预报中的同化应用研究. 气象,36(2):1-12.
- 郝世峰,潘劲松,崔晓鹏. 2010. 热带气旋自同化技术试验研究. 热带气象学报,26(2):181-186.
- 李娟,朱国富. 2008. 直接同化卫星辐射率资料在暴雨预报中的应用研究. 气象,34(12):36-43.
- 梁宝荣. 2009. 0809 号热带风暴北冕的特征分析. 气象研究与应用,30(1):38-39.
- 潘宁,董超华,张文建. 2003. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. 气象学报,61(2):226-235.
- 薛纪善. 2009. 气象卫星资料同化的科学问题与前景. 气象学报,67(6):903-911.
- 杨寅,韩威,董佩明. 2011. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述. 气象,37(11):1395-1401.
- 张爱忠,纪飞,崔锦. 2006. ATOVS 微波辐射资料变分同化试验研究. 中国气象学会 2006 年年会"中尺度天气动力学,数值模拟和预测"分会场论文集.
- 张华,丑纪范,邱崇践. 2004. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析. 科学通报,49(5):493-498.
- 郑祚芳. 2008. RUC 产品在一次强降水预报中的应用分析. 气象,34(s1):85-88.
- Bauer P. 2002. Microwave radiative transfer modeling in clouds and precipitation. Part I: Model description. NWP_SAF Rep. NW-PSAF-EC-TR-006,27pp.
- Benjamin S G, Kevin J, Brundage. 1994. The Rapid Update Cycle Part I: Analysis/model description. Technical Procedures Bulletin No. 416, NOAA/NWS:16.
- Turpeinen, Olli M. 1990. Diabatic initialization of the Canadian regional finite-element model(RFE), using satellite data Part II: Sensitivity to humidity enhancement, latent heating profile and rain rates. Mon Wea Rev,118(7):1396-1407.