

卫星资料变分同化在一次中尺度强暴雨模拟中的应用*

黄兵¹⁾²⁾ 刘健文²⁾ 钟中¹⁾ 白洁²⁾

¹⁾(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

²⁾(空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085)

摘要

利用 ATOVS 资料和常规观测资料,采用 GRAPES 3D-Var 同化系统和中小尺度数值模式 MM5 设计了仅同化常规观测资料的 NOATOVs 试验和同化常规观测资料及 ATOVS 辐射率资料的 ATOVS 试验,对 2004 年 6 月 22—24 日长江中下游和西南地区东部的特大暴雨进行了分析和模拟。结果表明:直接同化 ATOVS 辐射率资料获得的分析场可以有效改进对流层温、湿场分布,对风场也有一定的影响。对比试验结果表明:ATOVS 试验可以较好地模拟出暴雨天气形势、主要影响系统,对降雨的落区、强度也有较好的反映,模拟的局地暴雨强度与实际降雨量基本一致,同化卫星资料的改善效果较为明显。即同化 ATOVS 资料对于改进中小尺度局地暴雨过程模拟效果是可行的。
关键词:暴雨;资料同化;ATOVS 资料;数值模拟

引言

近年来,人们在应用数值模拟手段研究中尺度暴雨系统的结构和发生、发展机理时发现,采用常规观测资料能模拟出一些中尺度对流系统的发生发展过程^[1]。但在业务预报中,由于常规高空观测网的间距一般在 200 km 以上,数值模拟初始场远远不能满足描述中尺度天气系统的要求^[2],只采用常规观测资料对中尺度暴雨区的空报、漏报和误报的情况较多。

随着现代探测技术的进步,气象卫星等非常规探测手段取得了长足的发展,可以不间断地提供全球范围的气象资料。如何将非常规资料融合到数值预报模式中去,并使它们和数值模式在动力、热力上协调起来,以更准确地反映大气初始状态,补充模式初始场的中尺度信息是提高中尺度系统数值预报水平的一个可能途径,变分同化技术是能够满足上述要求的一种有效方法。欧洲中心(ECMWF)早在 1992 年就已经开始这方面的研究^[3-6],并在 1996

年率先实现三维变分资料同化系统的业务化,其中同化的资料中 90% 以上是卫星辐射率资料。国内在这方面的起步较晚,1994 年王宗皓等^[7]开始采用最优插值法同化卫星反演产品。由于这种间接同化卫星资料的方法会引进反演过程中的误差,同时最优插值方法不能处理卫星辐射观测资料和模式变量之间的非线性关系,因此正逐渐被变分法所取代。蒲朝霞等^[8]在卫星辐射资料变分同化理论方面进行了开创性研究,王子厚等^[9]、王宗皓^[10]进行了 HIRS2 红外探测器的辐射资料同化试验。随着 NOAA KLM 系列卫星的升空和快速辐射传输模式的发展,红外和微波辐射资料同化理论不断成熟,国内在卫星资料同化方面进行了大量的研究工作^[11-13],在此基础上,中国气象科学研究院数值预报研究中心资料同化研究组建立了我国的三维变分资料同化系统 GRAPES 3D-Var^[14-15]①。

卫星资料用于中尺度模拟研究是中尺度数值天气预报取得进展的一个有效途径,在常规观测资料基础上增补一些卫星探测资料,增加模式初始场中的一些中尺度系统信息是有意义的。特别是对测站

* 国家自然科学基金项目(40428002)和科技部社会公益研究专项资金项目(2000DIB20096)共同资助。

2005-07-12 收到,2006-03-17 收到再改稿。

① 中国气象科学研究院数值预报研究中心资料同化课题组. GRAPES 三维变分同化系统(3D-Var)使用指南. 2003.

稀少、资料分辨率较低的地区,卫星资料的应用对于改进模式场并进而改善预报效果起到重要作用^[16-17]。本文利用 GRAPES 3D-var 对 2004 年 6 月 22—24 日发生在西南地区 and 长江中下游的一个中尺度强暴雨过程进行了数值模拟试验,模拟结果揭示了此次暴雨过程的形成机理,同时也检验了 GRAPES 3D-Var 的性能。

1 天气过程

2004 年 6 月 21—22 日,青藏高原偏北方向上有一个暖性高压脊,该暖脊向东北方向延伸,使得原来维系在东北地区的东北涡东移至朝鲜半岛,同时副热带高压西伸北抬,最终和暖脊相互融合。在副热带高压和暖脊的挤压下,东北涡底部向西南方向延伸发展成一较强辐合区,来自我国东北地区和蒙古共和国东部的冷空气与副热带高压边缘含有丰富水汽的西南气流在长江中下游地区汇合。23 日四川盆地形成了西南涡,西南涡沿 500 hPa 切变线经贵州、湖南、江西、福建向东移动入海。西南涡与高空切变线相互作用,造成了明显的辐合气流环流形势。由于副热带高压西伸北抬,在低涡的右侧就是副热带高压边缘的低空急流所在,这里有充分的水汽供应。低涡中心摩擦辐合上升和低涡右前侧由于涡度变化引起的变压风促使气流辐合上升^[18-20]。在此期间降水主要发生在西南地区东部至长江中下游一带。6 月 23 日 08:00—24 日 08:00(北京时,下同) 24 h 降水量超过 100 mm 的测站有:湖南石门(134.5 mm)、沅陵(166.8 mm)、吉首(230.2 mm)、岳阳(131.8 mm)。强降水或连续降水导致局部地区出现洪涝或滑坡、泥石流等灾害^{[21]②③}。

2 试验方案

GRAPES 3D-Var 是中国气象科学研究院开发的三维变分同化系统,该同化系统是一个在水平面上为 Arakawa A 格点的经纬度网格、垂直方向上为等压面的分析系统,且水平和垂直方向上的维数均

可调。它可以同化探空、船舶报、飞机报、卫星云迹风资料以及 NOAA-KLM 系列卫星辐射率资料等。本研究使用中国气象局国家气象中心 T213L31 全球中尺度数值模式 T213 产品作为背景场,采用 GRAPES 3D-Var 同化 NOAA-16 的 ATOVS 探测器的 AMSU-A/B 和 HIRS-3 的卫星辐射率资料。其中同化过程中质量场选取温度场为分析变量,湿度场选取相对湿度为分析变量,平衡关系为地转平衡关系,同化时窗为 2 h。根据 ATOVS 探测器的权重函数分布和探测目的,本研究仅同化 AMSU-A 的 5~12 通道和 AMSU-B 的 3~5 通道以及 HIRS-3 的 3~8 和 10~15 通道。垂直层次为 17 层,分别为 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa。

ATOVS 辐射率资料在数值模拟中的应用,目的是为模式提供更为丰富的高时空分辨率的中尺度信息,从而改善模式中中尺度系统初始发展所依赖的环境场。由于 NOAA-16 卫星的 ATOVS 资料在 2004 年 6 月 22 日 18:00 的同化窗时段内覆盖模拟的区域,研究设计了 2 组对比模拟试验,即 NOATOVS 和 ATOVS 试验,尽管此时没有探空资料,为方便进行比较两组试验的模式初始时刻均为 2004 年 6 月 22 日 18:00。第 1 组 NOATOVS 试验中,模式采用 T213 产品作背景场,采用逐步订正客观分析方法,加入了常规观测资料获得 2004 年 6 月 22 日 18:00 的模式初始场,并利用 MM5 模式进行数值模拟;第 2 组 ATOVS 试验中,采用 T213 产品作为背景场,采用 GRAPES 3D-Var 对 ATOVS 辐射率资料和常规观测资料进行三维变分资料同化,其中同化的时刻是 2004 年 6 月 22 日 18:00,同化得到的最优分析场作为 6 月 22 日 18:00 的模式初始场。

本研究采用非静力、双重双向嵌套的 MM5 V3 模式,模拟区域格距分别为 45 km 和 15 km,格点数为 91×81 和 154×139。模式粗网格物理过程采用 MRF 边界层参数化方案,RRTM 云辐射方案,KF 积云参数化方案,GSFC 显式水汽方案;细网格除采用 CCM2 云辐射方案和 Kuo 积云参数化方案外,其

② 张凤英. 新型大气探测器 ATOVS 性能特征及其数据处理方法简介. 国家卫星气象中心技术报告. 2002.

③ 张鹏,张凤英,吴雪宝. 极轨环境卫星 ATOVS 系统 NOAA 业务垂直探测产品. 卫星气象技术报告. 2003.

他物理参数化方案与粗网格相同。模式侧边界采用松弛边界条件,模拟时效为 30 h,积分时间为 2004 年 6 月 22 日 18:00—24 日 08:00,侧边界条件 6 h 更新一次。采用探常规观测资料的 NOATOVs 试验和同化 ATOVS 辐射率资料的 ATOVS 试验均使用相同的物理参数化方案,且预报时段均相同。

3 模拟结果分析

3.1 变分增量场分析

分析 GRAPES 3D-Var 变分同化系统使用 ATOVS 辐射率资料后形成的 6 月 22 日 18:00 增量场发现,水平风速分量、对流层各层的温度、对流层中下层的湿度场增量均较大,其中又以沿海和青藏高原地区等常规观测资料较少的地区最明显。其中,各层水平风速增量场基本相当,但温度增量场(图 1)的显著变化层在对流层高层较大,而湿度增量场(图 2)在对流层低层较大。这个现象的原因是 ATOVS 探测器的 AMSU-A 和 AMSU-B 的权重函数峰值分别在对流层和对流层中下层较多^[22]。由

此可以看出,在高原和海洋等测站稀疏、常规资料少的地区,应用高分辨率 ATOVS 卫星资料,对于改进模式中对流层中下层的温、湿信息是可行的。尤其是 AMSU 微波资料的应用,极大丰富了模拟初始场中对流层中上层的大气温度和对流层 500 hPa 以下的大气湿度信息。模拟初始场中湿度场的改变集中在 500 hPa 以下,而温度场的影响主要体现在对流层中上层,风场的影响则在对流层各层均存在(图略)。

对比分析直接同化 ATOVS 资料形成的 2004 年 6 月 22 日 18:00 分析场与背景场(T213 产品)可以发现,直接同化 ATOVS 资料对初始温度和湿度场的影响明显。对流层低层长江中下游雨区和朝鲜半岛低涡所处地区的温度有所增大;比湿场的增强以海上为主,其次为副热带高压西北部西南涡所处的位置。除温湿场外,对流层中下层,长江中下游雨区附近西南风和西北风均有一定加强(图略),这使得造成降雨的西南暖湿气流和北方冷空气输送机制都得到了加强。以上分析表明,ATOVS 资料直接变分同化对此次暴雨模拟初始场中的温湿场以及风场都有一定改进。

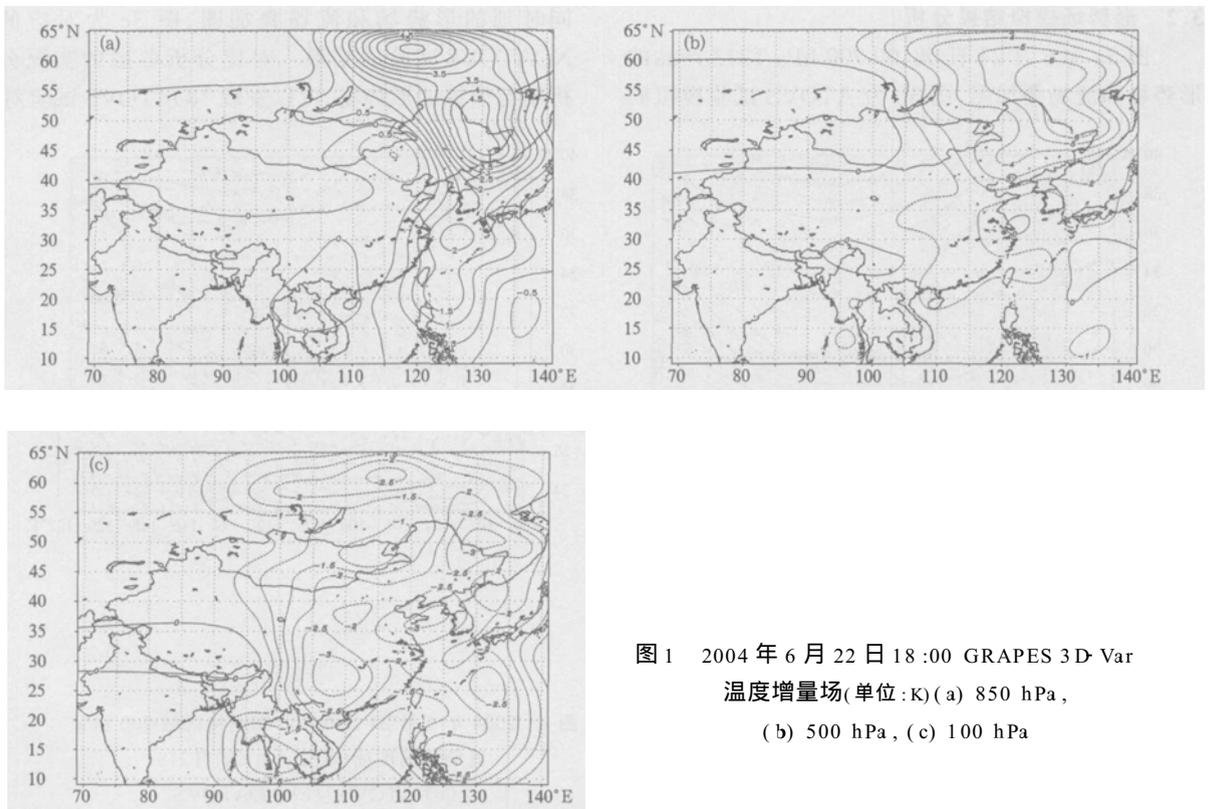


图 1 2004 年 6 月 22 日 18:00 GRAPES 3D-Var 温度增量场(单位:K)(a) 850 hPa, (b) 500 hPa, (c) 100 hPa

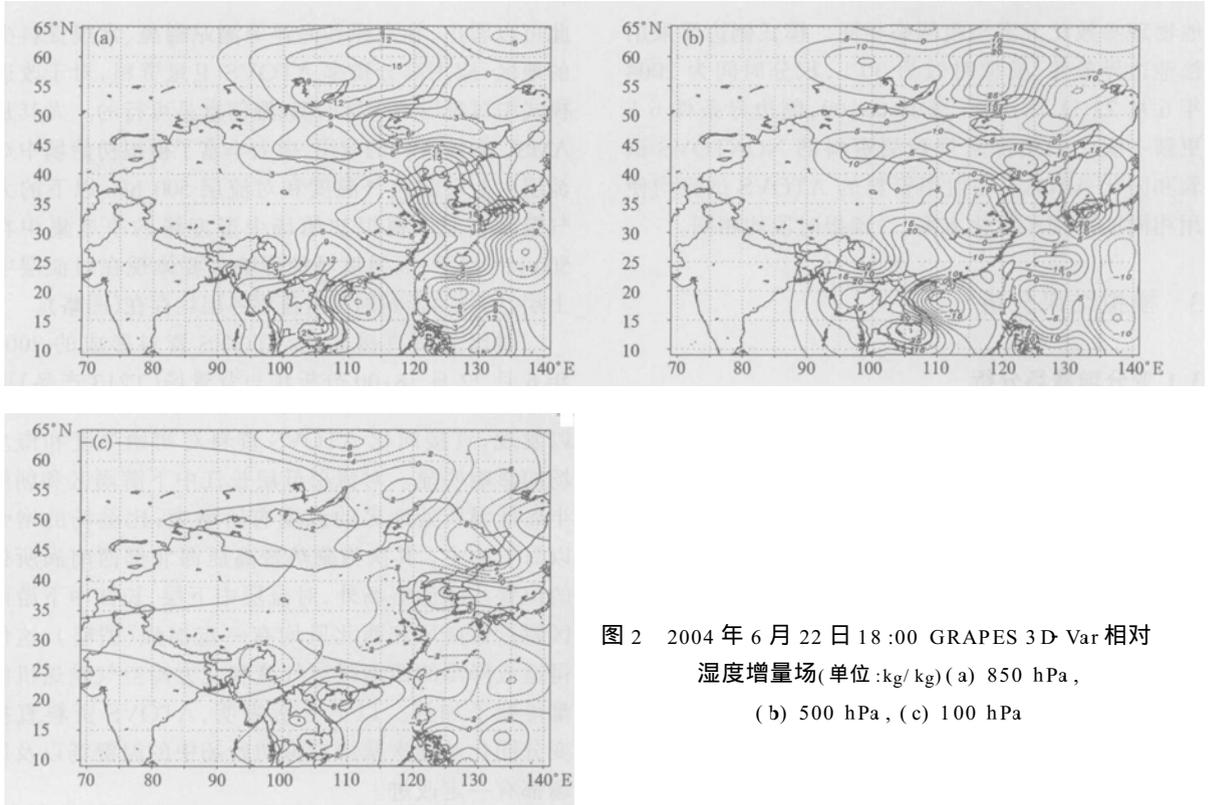


图2 2004年6月22日18:00 GRAPES 3D-Var 相对湿度增量场(单位:kg/kg) (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, (c) 100 hPa

3.2 形势场模拟结果分析

图3a为6月24日08:00 700 hPa T213产品的形势场和流场叠加图,图3b为ATOVS试验模拟的

同时刻的形势场和流场叠加图,图3c为对应的NOATOVS试验的结果。对比分析各层的实况分析场与模拟的形势场,可以发现NOATOVS试验对

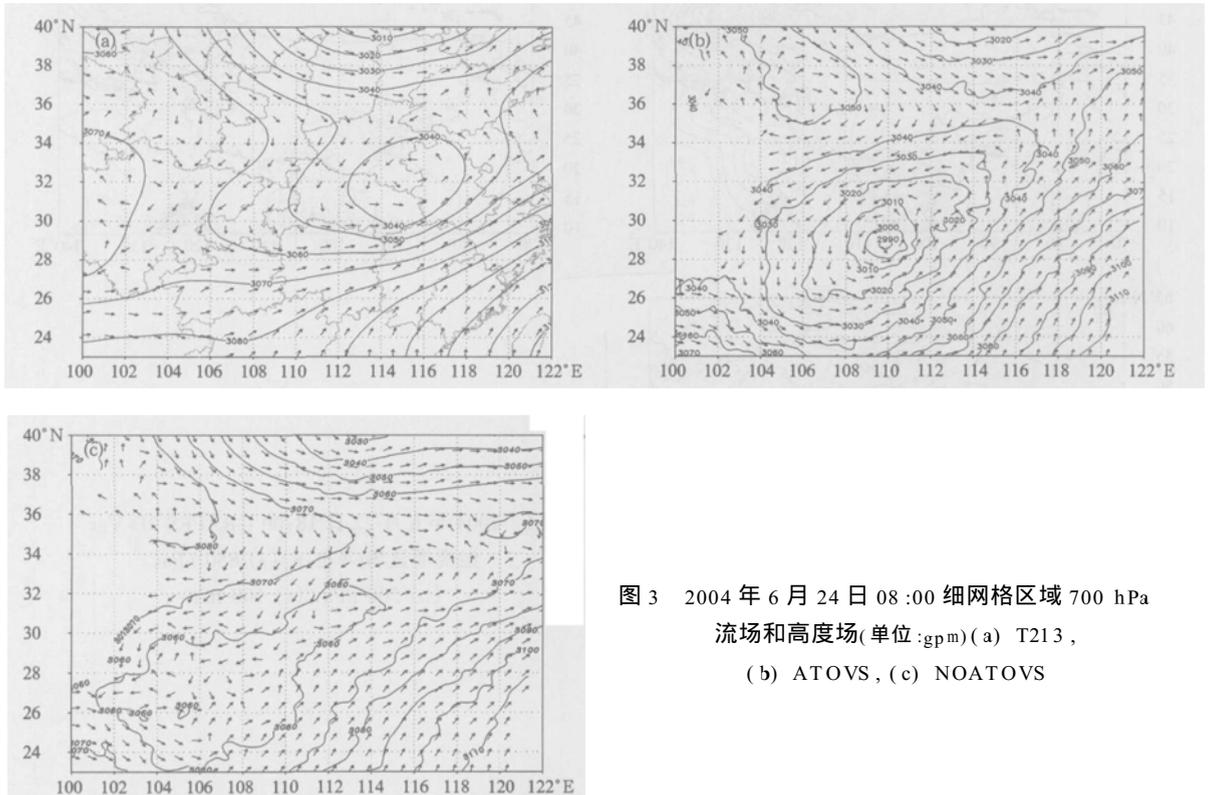


图3 2004年6月24日08:00 细网格区域700 hPa 流场和高度场(单位:gpm) (a) T213, (b) ATOVS, (c) NOATOVS

此次降雨过程中大尺度环流背景及影响系统的模拟是较成功的,模式能较好地模拟出对流层中下层逐渐南压的切变线和 500 hPa 上东北—西南向带状分布的西太平洋副热带高压,对西南涡和相应的低空急流也有较好的描述。直接同化 ATOVS 资料后,ATOVS 试验能更好地模拟出 500 hPa 上从东北地区到我国西南地区逐渐南压的高空切变线和带状分布的西太平洋副热带高压。模拟的切变线位置及发展演变均与实况基本一致。在对流层低层,模式也较好地再现出切变线和在四川盆地附近发生的西南涡沿高空切变线移动并发展起来的过程。ATOVS 试验中卫星辐射率资料的直接同化丰富了初始风场和位势场的中尺度信息,并且在长江中下游雨区附近西南风和西北风均有一定加强,得到的数值模式初始场与实况比较更为合理。

3.3 降水场模拟结果分析

利用地面报文中的降水量观测场得到如图 4a 所示的 6 月 23 日 08:00—24 日 08:00 24 h 降水实况,与 ATOVS 试验模拟降水量(图 4b)以及 NOATOVs 试验模拟降水量(图 4c)进行比较。对比此次试验中实况降水与模拟降水分布和雨量,可以看出 NOATOVs 试验基本模拟出长江流域湖南、湖北、安

徽、广西和贵州一带的降雨分布,并对湘西北地区的强降雨也有一定反映。但模拟的降雨强度均小于实际降雨量,且湖南西北部吉首附近的特大暴雨中心明显偏东,模式模拟的广西东部和广东东北部的大都是虚假降水。此外模式模拟的湖南中部的降水也是虚假降水。而位于安徽境内的巢湖和黄山附近的强降水模拟结果并没有较好的反映,有的甚至没有模拟出降水。这可能是由于造成两湖地区降雨的低涡系统尺度相对较大,模式对其发生发展有较好的模拟能力,而处于倾斜辐合带东侧的低涡(扰动)尺度较小,初始场中缺乏描述其发生发展的中尺度信息造成的。而 ATOVS 试验模拟的雨区范围和暴雨中心强度、范围均有明显改善,雨区分布呈东北—西南向,且强降雨中心与西南涡中心位置基本一致。位于湖南、湖北附近和湖北、安徽附近的暴雨中心 24 h 雨量分别可达 230 mm、140 mm 和 100 mm,模拟的降雨强度达到了实际降雨量级。ATOVS 试验和 NOATOVs 试验均模拟出发生在湖南、湖北、安徽、广西和贵州交界一带的降雨,并对强降雨中心也有一定反映。但 NOATOVs 试验中模拟的湖南西北吉首附近雨区位置偏东,湖北与安徽交界处附近的雨区位置偏西,ATOVS 的降水模拟更为合理,与降水观测更为接近。

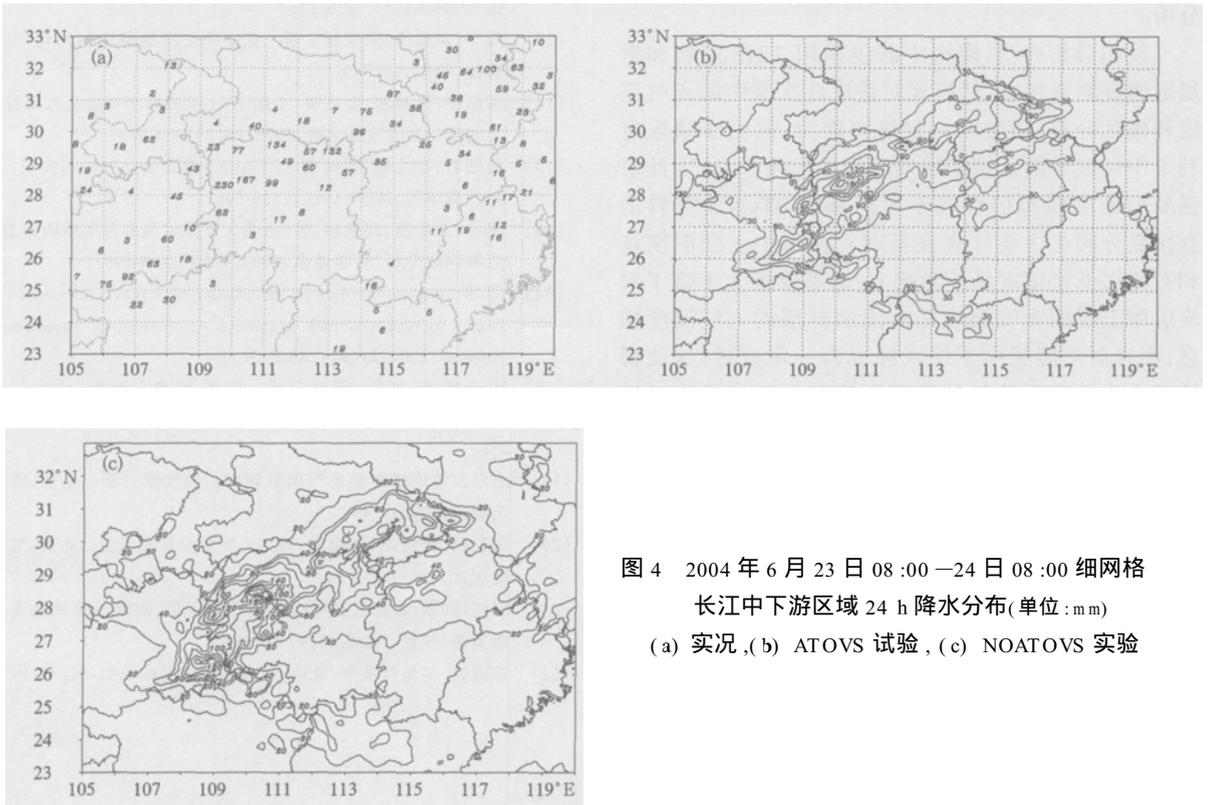


图 4 2004 年 6 月 23 日 08:00—24 日 08:00 细网格长江中下游区域 24 h 降水分布(单位: mm)
(a) 实况, (b) ATOVS 试验, (c) NOATOVs 实验

此次降雨过程模拟的形势场和降雨场对比分析表明,虽然 NOATOV5 试验对造成此次暴雨的天气系统和雨区分布、强度有一定模拟能力,但由于模拟初始场仅由 T213 资料和常规地面观测资料形成,缺乏暴雨中尺度系统初始场中的中尺度信息,因此对强暴雨区的模拟与实况仍存在较大差异。ATOVS 资料的直接变分同化使用,模式模拟的降雨效果有明显改善。这可能是同化 ATOVS 资料,特别是应用 AMSU-A/B 微波资料来最优调整初始场的温湿廓线和风场引起的。

4 结论和讨论

由于常规观测资料对于描述暴雨系统结构、物理机制方面尚显不足,而极轨卫星 NOAA-16 的 ATOVS 辐射率资料具有覆盖范围广、探测通道多、空间分辨率高等特点,不仅可以提供晴空和部分有云区的大气温度、湿度廓线,而且还可提供云天条件下大气温度、湿度廓线,具有全天候探测能力。因此,模拟研究中针对 ATOVS 辐射率资料直接同化对模式初始场及模拟效果的影响进行了试验,并将模拟结果与模拟中未使用 ATOVS 辐射率资料的模拟效果进行了对比分析。

模拟分析表明,模拟中若仅采用 T213 资料和常规地面观测资料,虽然模式对造成此次暴雨的天气系统和雨区分布、强度有一定模拟能力,但由于缺乏有利于中尺度暴雨系统初始发展的中尺度信息,因此对强暴雨区的模拟仍存在不足。采用 ATOVS 资料的直接变分同化主要体现在其对对流层中上层温度场和对流层低层湿度场的影响上,这不仅极大丰富了对流层中上层的大气温度和对流层低层的大气湿度信息,而且对对流层中下层风场也有一定改进,这使得模式中中尺度系统初始发展所依赖的环境场得以极大丰富和完善。模式直接同化 ATOVS 资料对初期暴雨中尺度系统的发生发展过程和强暴雨落区、雨强的模拟效果均有明显改善,这说明 ATOVS 资料的同化对于提高局地暴雨过程模拟效果是可行的。本文仅通过一个对比试验,还很难具体评估卫星辐射资料的同化对天气过程数值模拟的影响和其影响的机制,因此,还需大量同化分析试验来进行论证。

参考文献

[1] 程麟生,丑纪范. 大气数值模拟. 北京:气象出版社,1991:1-

- 33.
- [2] 孙建华,赵思雄. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I: 引发暴雨的中 β 尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学,2002,26(4):541-557.
- [3] Andersson E, Pailleux J. Use of cloud-cleared radiance in three/four dimensional variational data assimilation. *Q J R Meteorol Soc*,1994,120:627-653.
- [4] Milija Zupanski. Regional four dimensional variational data assimilation in a quasi operational forecasting environment. *Mon Wea Rev*,1993,121:2396-2408.
- [5] Bouttier F, Courtier P. Data Assimilation Concepts and Methods. Meteorological Training Course Lecture Series,2001.
- [6] Dale Barker, Wei Huang. A Three-Dimensional Variational (3DVAR) Data Assimilation System For User With MM5. NCAR MM5-3 Doc,2001.
- [7] 王宗皓,张凤英,王子厚,等. 数据同化/卫星反演/数值预报相互循环作用系统. 气象,1994,20(10):3-11.
- [8] 蒲朝霞,丑纪范. 对中尺度遥感资料进行四维同化共轭方法及其数值研究. 高原气象,1994,13(4):419-429.
- [9] 王子厚,王宗皓,张凤英. HIRS/2 亮温直接应用于数值预报的试验研究. 应用气象学报,1995,6(3):273-281.
- [10] 王宗皓. 卫星探测辐射率在数值天气预报中的直接应用. 应用气象学报,1995,6(1):101-108.
- [11] 翁永辉,徐祥德. 应用 TOVS 资料变分分析技术增加青藏高原地区模式初始场信息. 气象学报,2000,58(6):679-691.
- [12] 潘宁. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究. 气象学报,2003,61(2):226-235.
- [13] 潘宁,董超华,张文建,等. 变分同化及卫星资料同化. 气象科技,2001,2:29-36.
- [14] 黄丽萍,伍湘君,金之雁. GRAPES 模式标准初始化方案设计与实现. 应用气象学报,2005,16(3):374-384.
- [15] 伍湘君,金之雁,黄丽萍. GRAPES 模式软件框架与实现. 应用气象学报,2005,16(4):539-546.
- [16] 张华,丑纪范,邱崇践,等. 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,2004,49(5):493-498.
- [17] 张华. Application of direct assimilation of ATOVS microwave radiance to typhoon track prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*,2004,21(2):283-290.
- [18] 乔全明,阮旭春. 天气分析. 北京:气象出版社,1990:210-233.
- [19] 北京大学地球物理系气象教研室. 天气学分析. 北京:科学出版社,1976:193-221.
- [20] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法. 北京:气象出版社,1992:451-544.
- [21] 宋艳玲. 东北发生百年一遇的严重干旱,湘鄂川等局地受暴雨洪涝. 气象,2004,30(9):62-63.
- [22] 陈渭民. 卫星气象学. 北京:气象出版社,2003:51-112.

Variational Data Assimilation of Satellite Radiance to a Mesoscale Rainstorm Simulation

Huang Bing^{1) 2)} Liu Jianwen²⁾ Zhong Zhong¹⁾ Bai Jie²⁾

¹⁾ (Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101)

²⁾ (Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085)

Abstract

With the development of the numerical weather forecasting technology, the models are becoming more and more mature, such that the quality of forecast depends more on the initial conditions. But the conventional observation is about 200 km away to each other, it can not describe the initial condition of atmosphere well to meet the need of numerical model. To improve these conditions with ATOVS satellite radiance data some researches use T213 products as the background based on GRAPES 3D-Var and MM5 models. The GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction System) is a new generation hydrostatic/non-hydrostatic, multi-scale numerical model of China developed by Research Center for Numerical Meteorological Prediction of CAMS (Chinese Academy of Meteorological Sciences), CMA. GRAPES 3D-Var is the assimilating part of the system, it can assimilate many kinds of observations if the observation operator and observation error matrix is provided. MM5 model is the mesoscale prediction system developed by NCAR/PSU, it can be used for real-time studies, simulating or predicting the weather system such as mesoscale convective systems, fronts, land-sea breezes, mountain-valley circulations, and urban heat islands. A heavy rainstorm occurs in the middle-lower reaches of Yangtze River and in the east of the southwest China from 22 to 24 June 2004. It brings serious disasters to the people in and out Hunan Province because of mud slide and flood caused by the rainstorm. So it is very urgent to pay attention to the research of such rainstorms as to mitigate the damage. The ATOVS detector of NOAA satellite consists of HIRS, AMSU-A, AMSU-B channels, of which the radiance of AMSU channels can penetrate the cloud to reach the satellite, so the AMSU radiance contain much information in the cloud which is very important to the initial condition of numerical model. In order to identify the effect of numerical weather prediction by assimilating satellite radiance data, two experiments are carried out by use of the GRAPES 3D-Var assimilation system and the MM5 numerical prediction model to simulate the storm, the NOATOVS experiment only assimilates the conventional sounding data, the ATOVS experiment simultaneously assimilates the conventional sounding data and the ATOVS radiance data. The assimilation results show that directly assimilating ATOVS radiance data can improve the temperature, humidity and wind fields within the troposphere. The temperature increment in the lower troposphere in the mid-lower reaches of Yangtze River and Korea peninsula is positive, the humidity increment in the sea area is positive. The assimilations are applied as the initial field of the MM5 model for prediction, which then undergo analysis for comparison. The comparisons between both the ATOVS and the NOATOVS experiments show that ATOVS experiment can not only simulate the weather situation well, but also describe the intensity and the location of the rainstorm better than the NOATOVS experiment. All these analyses imply that the simulations of mesoscale convective system and heavy local rainstorm may be improved to some extent through assimilating satellite radiance data directly, but further case studies are needed to verify it.

Key words: rainstorm; data assimilation; ATOVS radiance data; numerical weather simulation