

ATOVS 资料在长江流域一次暴雨过程模拟中的应用

齐琳琳^{1, 2} 孙建华³ 张小玲³ 赵思雄³

1 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 利用 2002 年“973”中国暴雨试验(ChERES)期间获取的常规、非常规观测资料, 对 7 月 22~23 日长江中下游地区的一次大暴雨过程进行了分析和模拟研究。分析表明, 此次降雨过程是由东北—西南向梅雨锋上发生发展的 β 中尺度对流云团造成。在高低空环流的共同作用下, 高空槽后干冷气流与西南暖湿气流在长江中下游地区频繁交汇, 使得中尺度对流系统得以持续发展。模拟研究发现, 由于梅雨锋云带结构比较松散, 造成降雨的强对流系统尺度较小, 仅利用常规探空资料难以理想地模拟出降雨过程中对流云团的强度、演变。为此, 采用不同同化方案同化 NOAA-16 卫星的 ATOVS 资料, 对此次降雨过程进行了对比模拟试验。结果发现, 形成模式初始场时考虑间接同化 ATOVS 反演得出的温、湿资料, 模式虽然同样能较好地造成暴雨的主要天气系统、降雨的主要落区以及暴雨发生的时段进行模拟, 但雨区和雨强的模拟效果没有明显改进。相比而言, 采用增量三维变分同化系统, 直接同化 ATOVS 资料形成初始场, 不仅可以较好地模拟出暴雨天气形势、主要影响系统, 而且对降雨的落区、强度、暴雨发生时段均有较好的反映。模拟试验结果表明, 直接同化 ATOVS 资料, 模拟的梅雨锋上局地暴雨强度与实际降雨量级基本一致, 且可以有效改进对流层温、湿场分布。这不仅说明 ATOVS 资料的使用对于提高梅雨锋上局地暴雨过程模拟效果是可行的、必要的, 而且也为该资料用于梅雨锋暴雨的预报奠定了基础。

关键词 梅雨锋 β 中尺度对流云团 ATOVS 资料 资料同化

文章编号 1006-9895(2005)05-0780-15

中图分类号 P458

文献标识码 A

The ATOVS Data Assimilating Experiments on the Heavy Rain over the Yangtze River Basin

QI Lin-Lin^{1, 2}, SUN Jian-Hua³, ZHANG Xiao-Ling³, and ZHAO Si-Xiong³

1 *Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The routine and intensive observational data of “China Heavy Rain Experiment and Study - ChERES” are used for analyzing and simulating the heavy rain along the Meiyu front on 22 - 23 July 2002. It is found that the environmental condition between the southern edge of the westerlies and the northern rim of the subtropical high of the western Pacific is favorable for the development of Mesoscale Convective Systems (MCSs) and the occurrence of heavy rain. MCSs develop continuously over there while the low-level jet transports warm and moisture air to the south of MCSs. The heavy rain at the interface between Hunan and Hubei provinces is caused by the MCSs, which occurs and develops continuously along the incompact Baiu front. The horizontal scale of these MCSs is much

收稿日期 2004-04-08, 2004-07-13 收修定稿

基金项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418307, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213 和中国科学院奥运科技项目 KACX1-02

作者简介 齐琳琳, 女, 1973 年出生, 博士, 工程师, 目前从事中尺度天气分析和数值模拟研究 E-mail: niceqll@mail.iap.ac.cn

smaller and the life cycle is less than 6 hours. Because there are some difficulties in simulating the heavy rain occurring along the incompact Baiu front by only using the routine observational data, it is worth to do the simulation by using some intensive observational data, such as ATOVS.

Using the MM5 model, three experiments, i. e., NOATOVS, INDIRATOVS and DIRATOVS, are performed to simulate the heavy rain process. In Experiment NOATOVS, only the conventional radiosonde and surface data are analyzed using a successive correction scheme on the basis of first guess. And in Experiment INDIRATOVS, the conventional radiosonde observations and temperature, humidity obtained from the retrieval of ATOVS, which can be called indirect assimilation, are analyzed on the basis of first guess. In Experiment DIRATOVS associated with the radiosonde observations, brightness temperatures of ATOVS at 0600 UTC 22 July and 1800 UTC 22 July are directly assimilated to form the initial field of the model. The simulated studies are focuses on understanding the influence of the ATOVS radiance data on the numerical simulation of the mesoscale convective systems in Meiyu front.

By analyzing the results of the experiments, it is found that (1) although the simulated major weather systems associated with the heavy rain, such as the vortex, low-level southwesterly jet and the northeast - southwest shear line, are in good agreement with the observations in each experiment, the location and intensity of the vortex in Experiment DIRATOVS are generally better than other experiments. (2) The increments of Experiment DIRATOVS show that the direct assimilation of ATOVS radiance data can adjust the temperature and humidity background of the troposphere distinctly. In Experiment DIRATOVS, the temperature and humidity of the initial field are enhanced in the troposphere by using the ATOVS radiance data. (3) The experimental results show that both the location and the 24-h maximal precipitation in Experiment INDIRATOVS seem not superior to that in Experiment NOATOVS, while these results in Experiment DIRATOVS are the best. The successful simulated results in Experiment DIRATOVS can reproduce the main feature of the observed heavy rain, such as the location of the heavy rain and the maximum of 6-h precipitation. (4) The simulated experiments imply that the results of the mesoscale convective system (MCS) and the heavy rain can be improved when ATOVS are assimilated directly, especially when the conventional observations are not enough.

Key words Meiyu front, meso- β convective system, ATOVS radiance data, data assimilation

1 引言

梅雨以及梅雨锋降水一直是中日两国气象学家致力研究的重要问题。20 世纪 80 年代末至 90 年代初,日本气象学者提出了梅雨锋上天气尺度、 α 中尺度、 β 中尺度、 γ 中尺度系统相互依存的多尺度概念模式^[1~3]。与此同时,我国气象学家也对梅雨锋上的不同尺度系统进行了大量的研究^[4~6],并且已取得了相当成就。近年来,在采用数值模拟手段研究 α 中尺度、 β 中尺度系统的结构和发生、发展机理中^[7~9],虽然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,但在业务预报中,只采用常规观测资料对中尺度暴雨区的空报和漏报仍然较多,即只采用常规资料,仍难以准确预测中尺度暴雨系统。

目前,随着探测技术的发展,卫星、雷达、飞机、风廓线仪等非常规观测资料的丰富、更新使得资料的覆盖面与时空分辨率大大提高,这为暴雨中尺度系统的深入分析和数值预报能力的提高提供了可靠保证。因此,如何有效、全面地将这些新型资

料用于数值天气预报系统,以提供尽可能准确的初始客观分析场就成为当前提高数值天气预报水平的工作重点。而代表着当今国际资料同化发展趋势的变分同化正是能够适应上述要求的一种有效方法。朱民等^[10]采用 GMS 5 可见光、红外资料反演出中尺度水汽场作初值,以替代模式中原有的大尺度光滑水汽场。王子厚等^[11]利用国家气象中心的有限区域分析/预报模式系统进行了 NOAA-11 HIRS/2(High Resolution Infrared Sounder)亮温资料的直接同化试验。这些研究表明,将卫星资料用于中尺度模拟研究不仅是近年来中尺度数值天气预报取得的重要进展,而且在常规观测资料中增补一些卫星、雷达探测、反演出的温度、湿度资料,对于增加模式初始场中的一些中尺度环流信息是有意义的。特别是对测站稀少、资料分辨率较低的地区,卫星资料的应用对于改进模式初始客观分析场起到重要作用。

2002 年 6~7 月在长江中下游地区开展了“973”中国暴雨试验(CHeRES),试验的 IOP 观测期间获取了各类常规、非常规观测资料,如每日 4

次探空、极轨卫星 NOAA-16 的垂直探测资料 ATOVS(Advanced Television and Infrared Observation Satellite Operational Vertical Sounder), 这些资料为研究梅雨锋上尺度较小的暴雨中尺度系统提供了有力依据。试验期间, 7 月 22~23 日长江流域中下游地区出现了一次较强的暴雨过程, 结构松散的梅雨锋上, 尺度相对较小的一系列中尺度对流云团是造成暴雨的直接系统。鉴于常规资料对于尺度较小, 且发生在结构松散梅雨锋上的暴雨中尺度系统结构、演变的分析、模拟均存在一定难度, 本文利用 NCAR/NCEP 逐日再分析 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点资料、地面、探空加密观测资料、静止卫星 TBB 资料、极轨卫星 NOAA-16 的 ATOVS 资料, 首先对此次大暴雨过程的雨情及天气形势进行了分析。之后, 将 ATOVS 资料分别以直接同化和间接同化的方式用于此次降雨过程的模拟研究, 并与不考虑 ATOVS 资料的模拟结果进行对比分析。其目的主要是探讨卫星资料的使用在提高梅雨锋上局地暴雨过程和揭示梅雨锋降水系统特征描述能力上的可行性。

2 7 月 22~23 日雨情及天气形势

2002 年 7 月 21~24 日的雨区分布一直呈东北—西南向。其中 21 日的暴雨区很小, 仅为湖南局地暴雨过程, 而 22~23 日山东南部、江苏、安徽北部、河南南部、湖北东部一带均出现降雨, 而且还

出现较大范围的暴雨区(图 1)。其中, 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC, 湖南北部、湖北南部和安徽西部地区出现超过 100 mm 的暴雨过程。暴雨主要出现在 23 日凌晨湖北与湖南交界的长江沿岸, 其中五峰 110 mm、江陵 149 mm、石门 139 mm。五峰、石门的逐小时降雨分布显示(图 2), 五峰、石门 22 日 0400 UTC~23 日 0000 UTC 一直持续降雨, 其中五峰最强降雨出现在 22 日 1600 UTC, 雨强为 $17 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。而石门的 strongest 降雨出现在 22 日 2000 UTC, 雨强为 $37 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。降雨最强时段均出现在 23 日凌晨。

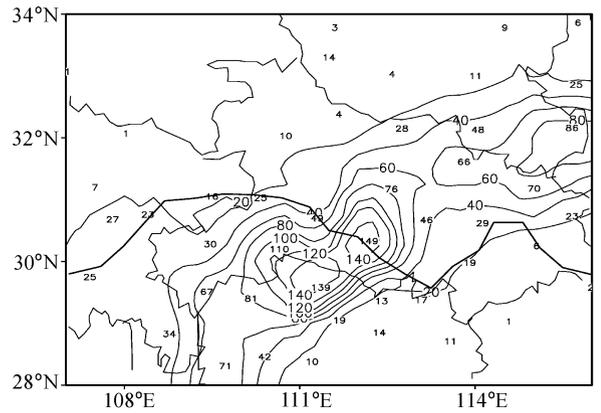


图 1 2002 年 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC 24 h 实况降雨分布(单位: mm)

Fig. 1 The observational precipitation from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 Jul 2002 (units: mm)

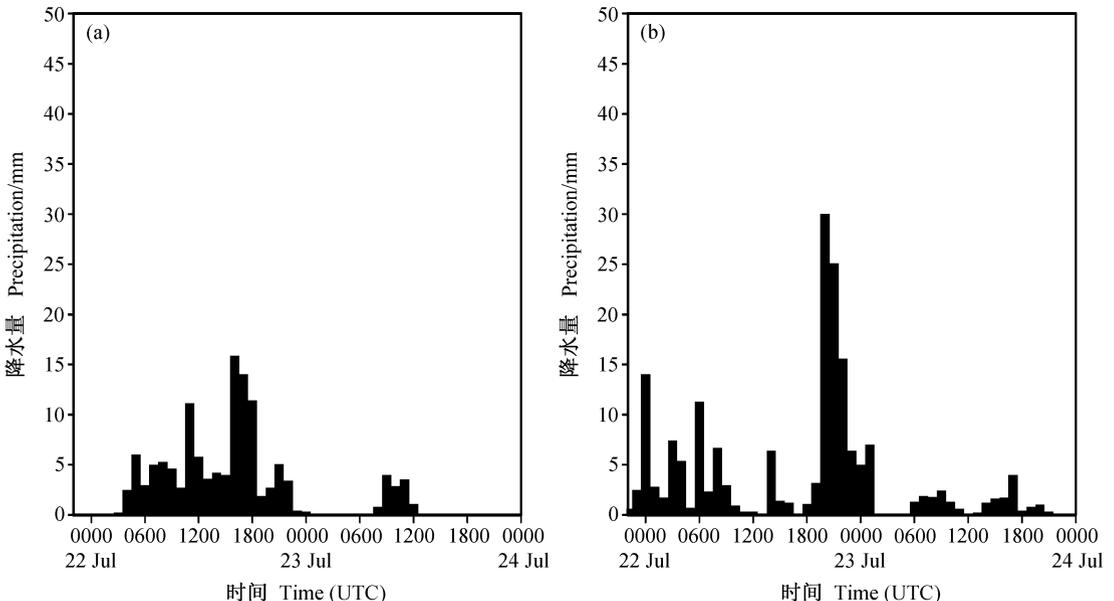


图 2 2002 年 22 日 0000 UTC~24 日 0000 UTC 逐时降雨量分布: (a) 五峰; (b) 石门

Fig. 2 The observational hourly precipitation from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 24 Jul 2004; (a) Wufeng; (b) Shimen

暴雨过程天气形势分析显示,这次过程与历史上典型梅雨期的“两脊一槽”天气形势正相反。500 hPa 上中高纬度呈“两槽一脊”形式分布,即对流层中高层 80~110°E 的中高纬度地区受一高压脊控制(图 3),高压在缓慢东移过程有明显加强,中心强度从 21 日 0000UTC 的 5800 gpm 增加到 23 日 0000 UTC 的 5840 gpm。与此同时,高压脊东西两

侧均为低槽区,其中,高脊东侧从鄂霍次克海沿岸到中国西南地区的东北—西南向低槽在逐渐南伸的同时还不断加强。因此可以说,此次降雨过程中,高纬度地区的冷空气是沿槽后从东北向南下的,与东北—西南向带状分布的副高西北侧的西南气流正好形成一东北—西南向的辐合带(图 4),即倾斜的梅雨锋雨带。

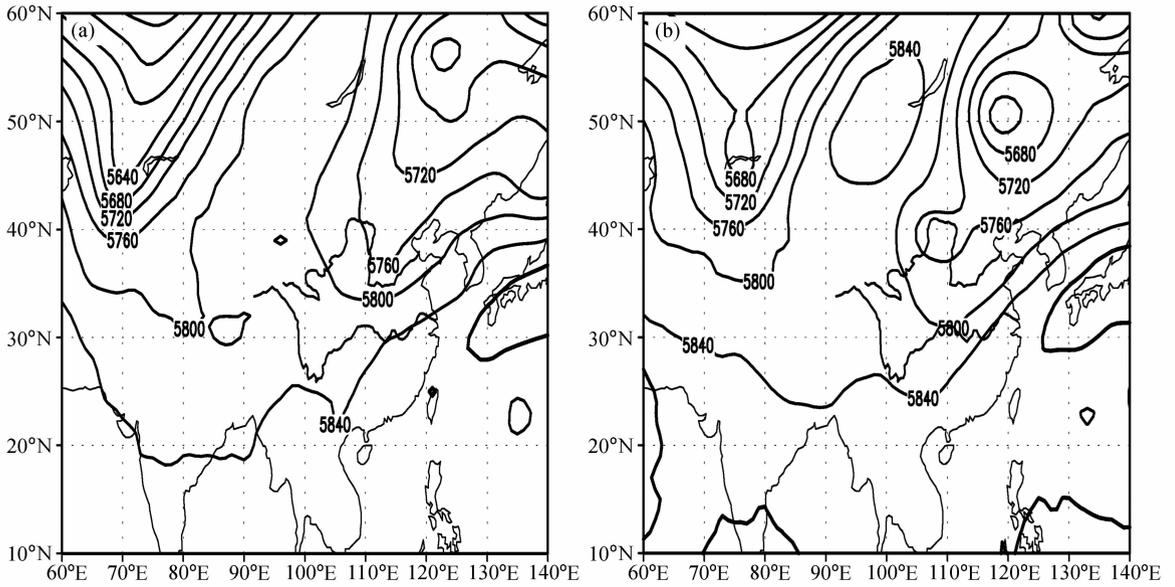


图 3 2002 年(a)7月 22 日 0000 UTC、(b) 23 日 0000 UTC 500 hPa 位势高度场(单位: gpm)

Fig. 3 The geopotential height at 500 hPa at (a) 0000 UTC 22 Jul and (b) 0000 UTC 23 Jul in 2002 (units: gpm)

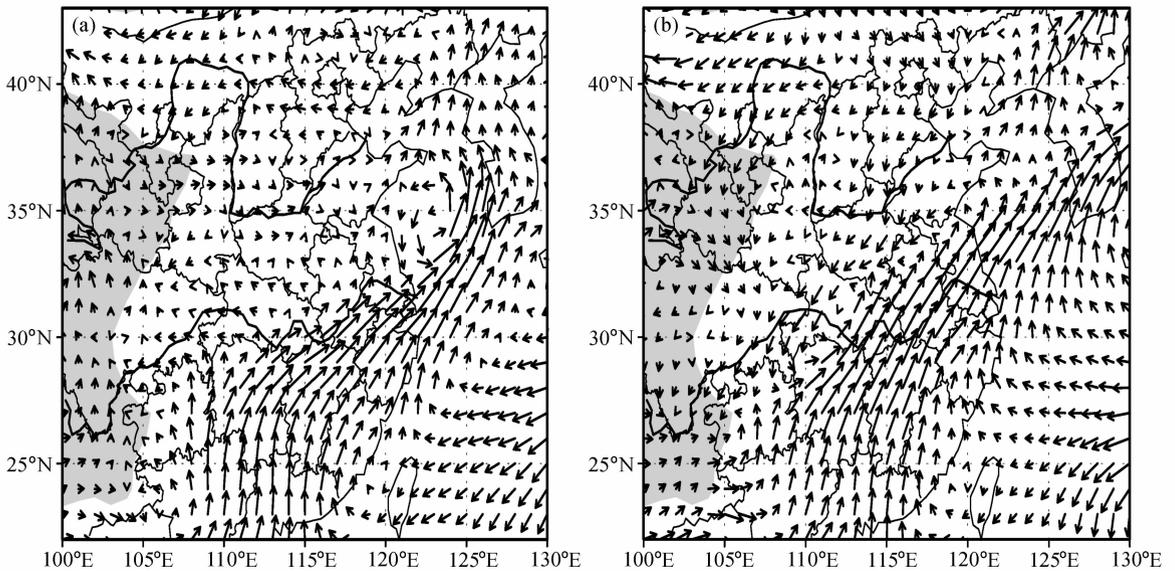


图 4 2002 年(a)7月 22 日 0000 UTC、(b) 23 日 0000 UTC 850 hPa 风场(单位: $m \cdot s^{-1}$, 阴影: 地形 > 1500 m)

Fig. 4 The wind at 850 hPa at (a) 0000 UTC 22 Jul, (b) 0000 UTC 23 Jul in 2002 (units: $m \cdot s^{-1}$; shaded: terrain > 1500 m)

22~23日卫星云图上,锋面云带结构较松散,其内不断有 β 中尺度对流云团发生发展,暴雨的出现应与在倾斜辐合带上发生发展的若干低涡密切相关(图5)。具体来看,湘鄂大暴雨的发生主要是受22日活跃于这个地区的多个 β 中尺度对流云团影响。22日0200 UTC,云带位于重庆和湖北西部地区,较强的对流活跃于重庆与湖北交界处。之后,该云系逐渐发展东移,其中有一些较小尺度强对流系统活动,22日0800 UTC,在云系的南侧开始有一系列的强对流系统生成,

这些系统主要位于贵州、湖南、湖北地区,从西南向西北地区移动。1000 UTC在湖南、湖北交界处强烈发展,TBB小于 -70°C 。中尺度对流云团在随后的几小时仍不断发展,最后在23日凌晨减弱消亡。此外,当 β 中尺度对流云团于22日1400 UTC逐渐东移出暴雨区后,又不断有新的中尺度对流云团在暴雨区附近发展,但生命史都未超过6 h。因此,7月22日~23日的湖南、湖北一带的持续降雨主要是由层状云产生,但其中也有一些小尺度的强对流活动。

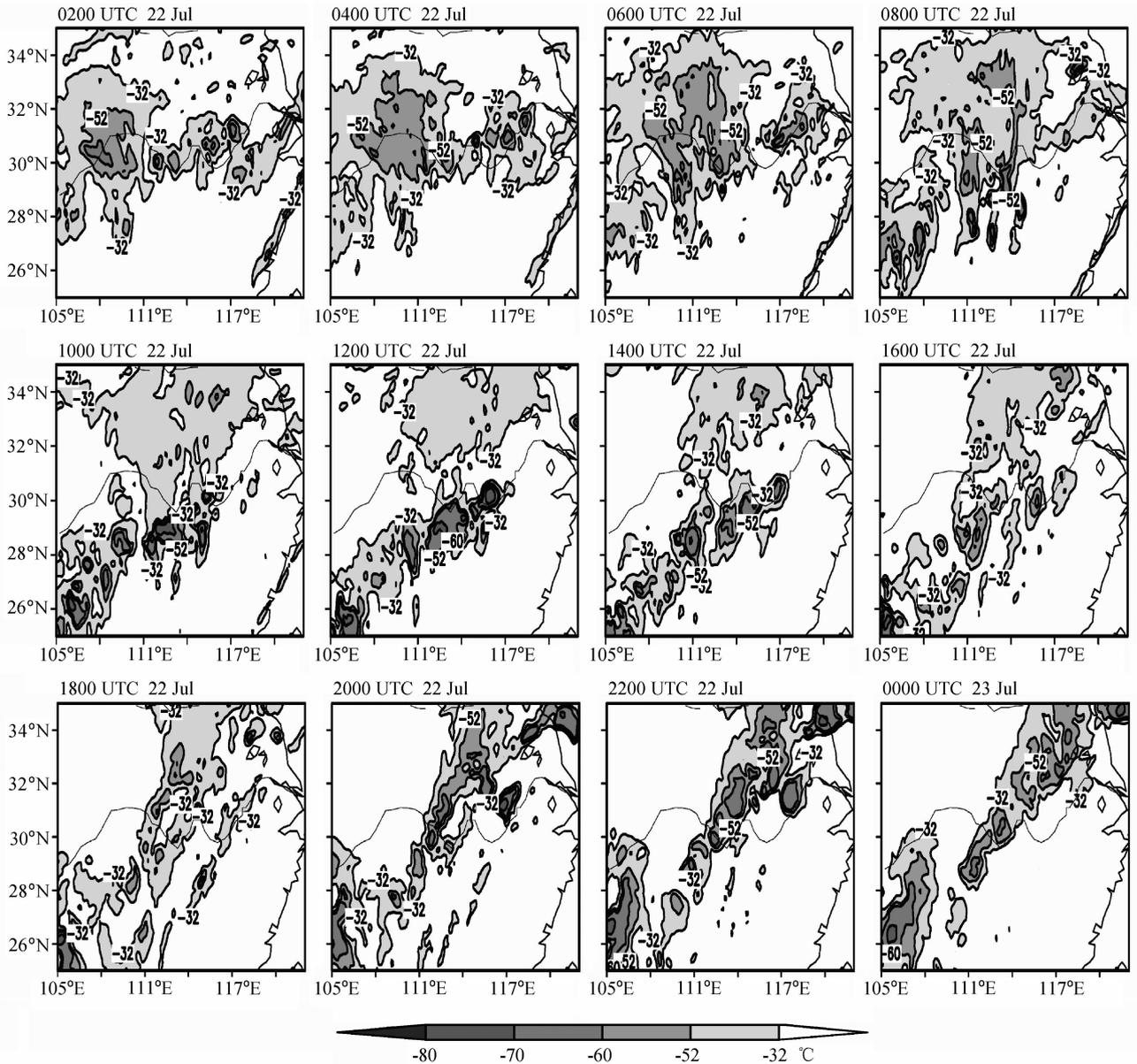


图5 2002年7月22日0200 UTC~23日0000 UTC TBB分布

Fig. 5 The TBB distributions from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 Jul 2002

3 ATOVS 辐射率资料及其在数值预报模式中的应用

3.1 ATOVS 辐射率资料

极轨卫星 NOAA-16 主要携带两套探测器, 分别是用于环境监测的 AVHRR 和用于大气垂直探测的 ATOVS。ATOVS 是大气垂直探测器 TOVS 的改进型, 由 3 个相互独立探测器组成: (1) 高分辨率红外探测器 3 型——HIRS/3(High Resolution Infrared Sounder), (2) 先进的微波探测器 A 型——AMSU-A(Advanced Microwave Sounder Unit A) 和 (3) 先进的微波探测器 B 型——AMSU-B(Advanced Microwave Sounder Unit B)。其中 HIRS/3 有 20 个通道, 即 19 个红外通道和 1 个可见光通道, 主要用于探测大气温度、湿度廓线、臭氧总含量等。AMSU-A 有 15 个通道, 用于改进温度廓线, 尤其是云区。AMSU-A 与 HIRS/3 的结合将大大提高温度探测产品水平。而 AMSU-B 是一个 5 通道微波湿度探测器, 除提供高分辨率大气湿度廓线外, 两个窗区通道还可用来监测积雪、水体等地表参数。由于 ATOVS 具有探测通道多, 空间分辨率高等特点, 而且增加一个专门用于探测大气湿度的高分辨率微波探测器 AMSU-B, 因此大大改进了大气湿度的探测水平, 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, 从而达到全天候探测能力。一般情况下, NOAA-16 卫星探测轨道上、下午各有 3 个时段路经我国上空, 因此, 我国大陆可接收到的 ATOVS 资料基本为逐日 6 个时段。ATOVS 探测资料的广泛性将为数值天气预报、天气分析和预报、气候研究等提供大量新的有用信息, 从而进一步推动数值天气预报技术的发展及其它相关领域的应用研究。

3.2 ATOVS 辐射率资料的应用途径及应用技术

目前, 极轨卫星 NOAA-16 的 ATOVS 资料在数值预报模式中的应用主要有两种途径, 一种是间接途径, 也称将辐射率转换成预报模式变量估值的“卫星到模式”的反演途径。即通过辐射传输方程反演成大气温、湿廓线, 进而将反演出的温、湿场与常规观测场一起形成模式的初始场, 此方法即间接同化。另一种为直接途径, 也称“模式到卫星”的途径。即利用预报模式变量, 通过辐射传输方程计算

模拟辐射率, 及其与探测辐射率之差, 附加某种约束条件, 构成一种泛函, 用优化方法求出其泛函极值。此方法即变分同化法。变分法具有非线性分析能力, 已成为当今国际上直接同化卫星辐射率资料的主流同化方法, 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)等已在其业务四维/三维变分(4D/3D-VAR)同化系统中实现了 TOVS 和 ATOVS 辐射率资料的直接同化^[12, 13]。

3.2.1 ATOVS 辐射率资料的间接同化

利用辐射传输方程对极轨 NOAA-16 卫星的 ATOVS 辐射率资料进行反演, 可以获得高空间分辨率的大气温、湿场资料。反演得出的离散型温、湿场主要包括地面气压及 1000、850、700、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa 15 个标准层的位势高度、大气温度和露点温度, 模式对 ATOVS 资料的间接同化就是将反演得出的温、湿场资料与常规探空观测资料一起形成模式初始场。从 ATOVS 反演得出的 22 日 850 hPa 温度、温度露点差分布(图略), 可以看到, ATOVS 反演得出的温、湿场分布较为合理, 且可以极大弥补海洋、高原、北半球高纬度等地区观测资料稀少或分辨率较低的不足。因此可以说, 模式初始场中考虑 ATOVS 反演得出的温、湿场后可以有效地完善资料缺乏之处的初始信息。

3.2.2 ATOVS 辐射率资料的直接同化

ATOVS 辐射率资料的直接同化涉及到变分技术和观测算子两方面技术, 下面就分别加以介绍。

对于变分技术, 由于卫星资料与分析要素之间存在复杂的非线性关系, 因此, 过去主要以空间插值为基本思路或更广泛一些适应于观测要素与分析要素间存在简单线性依赖关系的分析方法就不再适应, 即不能适应以卫星观测为主的探测系统发展要求。以通过调整大气模式的初值, 寻找一个在最小二乘的意义下, 尽可能接近给定时间段内的有效观测的模式解为基本思想的三维变分同化方法就是能够满足上述要求的一种同化技术。它允许模式变量(分析变量)与观测变量之间有复杂的非线性关系。具体应用时一般是用预报模式变量, 通过某种数学方法计算模拟观测量, 及其与实际观测量之差, 附加某种约束条件, 构成一种泛函(目标函数), 再用优化的方法求出其泛函极值, 从而将变分问题处理成通过极小化目标函数以获得最优分析增量问题。

文中使用的三维变分资料同化系统正是基于此原理。

本文用于直接同化 ATOVS 辐射率资料的三维变分同化系统具有以下主要特点：模式变量和分析变量采取分离形式；对彼此无关的分析变量进行预调节处理。即将分析变量变换为控制变量。图 6 是该变分同化系统主程序的流程，系统利用系统模式变量的初估值、其背景场误差协方差以及观测场三个源信息产生分析增量场，进而得到分析场。系统可以同化探空、云迹风和卫星辐射率(亮温)等各类观测资料。

对于观测算子，通常根据所需同化资料来选择。目前，变分系统中对 ATOVS 资料的处理多采用当今较为领先的快速辐射传输模式 RTTOV6。RTTOV6 模式是由 ECMWF 开发的在数值预报中同化卫星资料的第六代快速辐射传输模式系统，可以处理 NOAA 系列极轨卫星、GOES 系列静止卫星的 TOVS/ATOVS 不同通道红外和微波的探测资料。模式利用大气温度、湿度、臭氧、云中液态水垂直廓线以及若干云顶气压、云量和地面大气参数，如地面气压、2 m 高度的温度、比湿、地面水平风速等作为输入变量，计算卫星相应通道的辐射亮

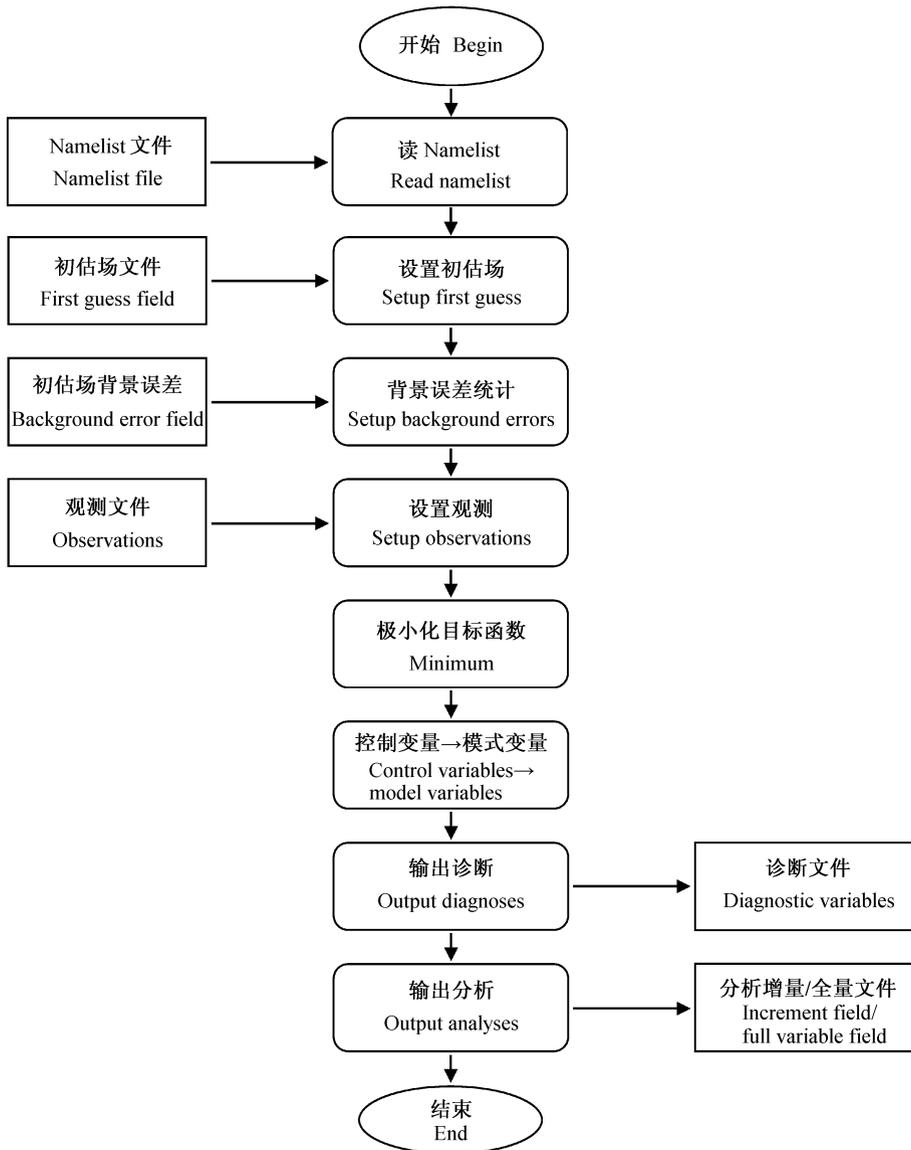


图 6 三维变分同化系统程序流程

Fig. 6 The 3D-Var assimilation system flow chart

温。RTTOV6 模式的垂直层次为 43 层(1013.2~0.1 hPa), 不仅考虑了高层大气中水汽对红外/微波辐射的吸收作用(300 hPa), 而且对总透过率的计算充分考虑了水汽、均匀混合气体和臭氧的相互作用。对于微波探测资料, 模式使用了 FASTEM 模式计算微波洋面表面辐射出射率, 并且考虑了云中液态水对微波通道的影响。

4 暴雨过程的数值模拟研究

4.1 数值模拟方案

非静力中尺度数值模式 MM5V3^[14, 15] 是 PSU/NCAR 发展的有限区域中尺度数值预报系统。目前, 利用该模式已成功地模拟了夏季华南、长江流域梅雨的降水过程^[7~9], 本文也将采用 MM5V3 对此次暴雨过程进行模拟研究。模拟采用非静力、双重双向嵌套方案, 模拟区域格距分别为 45 km、15 km, 格点数为 120×100, 163×142。模式物理过程分别采用 Blackadar 边界层参数化方案, 云辐射方案, Grell 积云对流参数化方案和混合相微物理显式方案。模拟时效为 24 h, 即模式拟积分时间为 2002 年 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC。

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, 从而极大改善模式中中尺度系统初始发展所

依赖的环境场。因此, 我们设计了 3 组对比模拟试验, 即 NOATOVS、INDIRATOVS 和 DIRATOVS 试验。3 组模拟试验中, 模式均采用 NCEP 的 1°×1° 格点资料作背景场, 其中 NOATOVS 试验中采用逐步订正客观分析方法, 模式仅考虑了常规地面、探空观测资料; 而 INDIRATOVS 试验中, 模式中除考虑了常规地面、探空观测资料外, 还考虑了 ATOVS 辐射率资料反演得出的温、湿场资料。资料在模式中的使用仍采用逐步订正客观分析方法; DIRATOVS 试验中, 已作了必要临边订正、地理定位匹配和地表发射率订正等质量控制的 ATOVS 辐射率资料是利用三维变分同化系统直接用于模式初始场的形成中。此外, 常规地面、探空资料仍采用逐步订正客观分析方法用于形成模式初始场。

4.2 不采用 ATOVS 资料的模拟效果分析

将 NOATOVS 试验模拟的 7 月 23 日 0000 UTC 500 hPa、850 hPa 形势场与实况分析场对比分析, 可以发现, 模式较好地模拟出对流层中上层从东北地区到中国西南地区的东北—西南向逐渐南压的低槽和 500 hPa 上东北—西南向带状分布的西太平洋副热带高压(图 7a)。较好地再现了高空槽、副热带高压的分布及发展演变。对对流层低层, 模式也较好地模拟出东北—西南向分布的切变线, 位于切变线上两湖地区的低涡及与低涡相伴的低空急

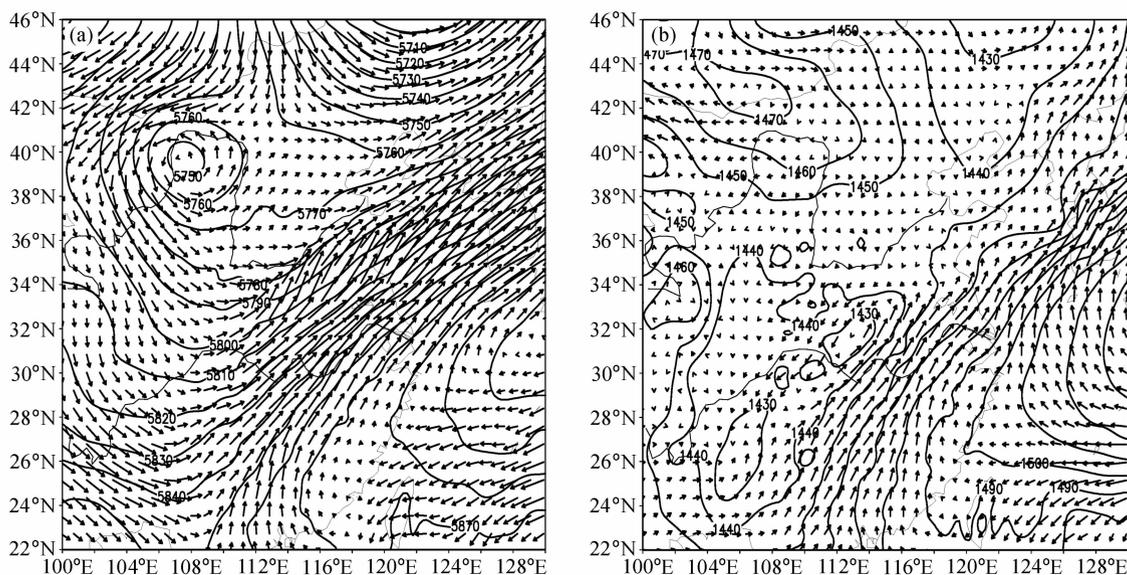


图 7 NOATOVS 试验区域 D01 模拟的 7 月 23 日 0000 UTC 位势高度场(单位: gpm)与风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布: (a) 500 hPa; (b) 850 hPa

Fig. 7 The geopotential height (units: gpm) and wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of D01 at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 0000 UTC 23 Jul 2002 in NOATOVS

流(图 7b)。虽然模拟的低涡强度偏弱,但与湖南、湖北的强降雨区基本对应。因此,不采用 ATOVS 资料模式对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。

图 8 是 NOATOVS 试验中 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC 24 h 降雨分布。与实况降雨相比,模式基本模拟出长江流域湖南、湖北、安徽一带的降雨分布,并对两湖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、湖北的暴雨中心略偏北和东北,强度明显偏弱。另外,模式未能模拟出湖北南部与安徽西部交界处附近的强降雨。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,从而导致模拟降雨的失败。

以上的分析中可以看到,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,但由于模拟初始场仅由 NCEP 资料和常规观测资料形成,缺乏对暴雨中尺度系统初始发展的中尺度信息的有力描述,因此模拟效果,尤其是对强降雨区的模拟与实况仍存在较大差异。

4.3 间接同化 ATOVS 资料的模拟效果分析

分析 INDIRATOVS 试验的模拟效果可以看到,其对天气形势和降雨系统的模拟与 NOATOVS 试验基本一致。同样较好地模拟出对流层

中上层逐渐南压的低槽、500 hPa 上东北—西南向带状分布的西太平洋副热带高压、对流层低层 850 hPa 上东北—西南向分布的切变线及其上的低涡(图略)。对于 7 月 22~23 的降雨,INDIRATOVS 试验中虽然也模拟出了倾斜梅雨锋雨带的东北—西南向分布,并对雨带上的暴雨中心有所反映(图 9),但与实况降雨和 NOATOVS 试验模拟的降雨对比来看,该试验除对强降雨落区的模拟有一定改变外,降雨强度的模拟效果并未有明显改善,模拟的强降雨中心仍小于实际观测。

模拟的 7 月 22 日 1200 UTC 对流层中下层比湿异常场显示(图略),对流层低层 850 hPa 上,两试验模拟的雨区及其附近地区的比湿场分布基本相近,均模拟出雨区所在处的高湿区和强降雨中心正位于高湿中心前部的分布。而对流层中层 500 hPa 上,INDIRATOVS 试验模拟出的雨区及其南侧大部分地区比湿区分布均有明显增强,这可以认为是模拟中考虑了 ATOVS 资料反演的湿度场后增加了对流层中层水汽。因此可以说,虽然 INDIRATOVS 试验对于雨区、雨强的分布改善并不明显,但增加了雨区及其以南大部分地区,特别是对流层中层水汽含量。对于温度场分布,尽管 INDIRATOVS 试验中模拟的强降雨中心附近温度有一定增强,这可能与降雨释放的凝结潜热有所增强有关。但总体而言,INDIRATOVS 试验与 NOATOVS 试验对于温度场的模拟基本相近(图略)。

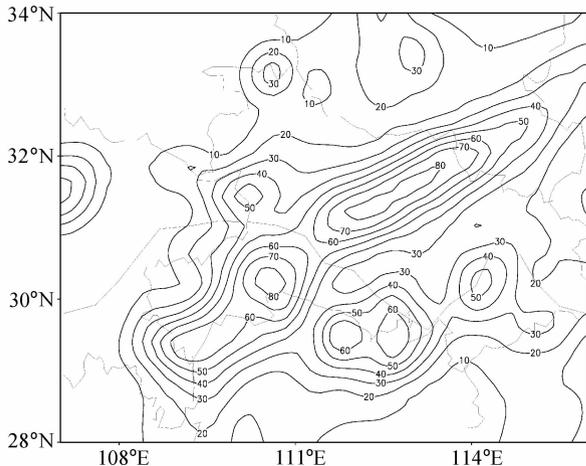


图 8 NOATOVS 试验区域 D01 模拟的 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC 24 h 降雨分布(单位: mm)

Fig. 8 The simulated rainfall of D01 from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 Jul 2002 in NOATOVS (units: mm)

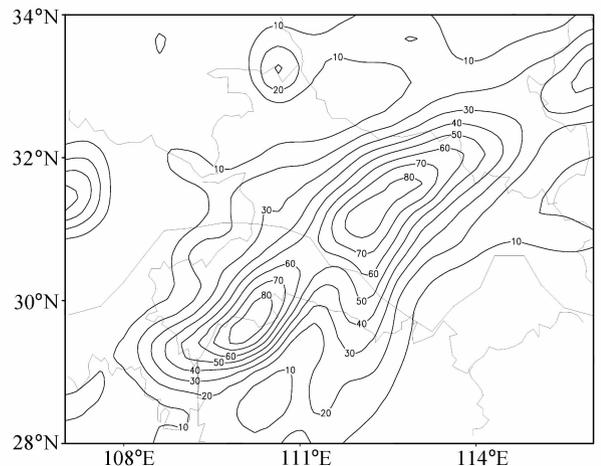


图 9 INDIRATOVS 试验区域 D01 模拟的 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC 24 h 降雨分布(单位: mm)

Fig. 9 The simulated rainfall of D01 from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 July 2002 in INDIRATOVS (units: mm)

由于 ATOVS 资料的间接同化主要是利用了 ATOVS 资料反演得出的温、湿场, 因此, 对比分析 INDIRATOVS 试验与 NOATOVS 试验模拟初始场中温度、相对湿度分布, 可以有助于我们了解间接同化 ATOVS 辐射率资料对于模拟初始场的影响。分析两组试验初始场中对流层中下层 850 hPa、500 hPa 温度分布(图 10)可以看到, 考虑 ATOVS 反演得出的温度场对对流层低层和中层的影响基本相反, 即对流层中层内陆地区主要是降温, 海上及高纬度高原附近主要是增温, 而对流层低层内陆地区主要是增温, 海上及高纬度高原附近则主要是降温, 且雨带所在区域的温度差在对流层低层较为明显。对于初始场对流层中下层 850 hPa、500 hPa 相对湿度分布(图略), 比较发现, ATOVS 反演得出的湿度场对初始场中相对湿度分布的影响较大, 尤其是水汽含量相对高的海上和水汽含量相对少的高原、河套中上游地区。相对而言, 雨带所在区域对流层中层的湿度场有加强趋势。由此可以说, 间接同化 ATOVS 资料对对流层低层温度场和对流层中层湿度场初始信息均有所改变。另外, 应该指出的是, 由于对 ATOVS 辐射率资料的反演存在若干不确定因素, 因此, ATOVS 资料的间接同化对于模拟初始场的效果到底如何, 应视具体个例、具体分析而定。但总的来说, 反演

ATOVS 资料得出温、湿场在海上及高纬度地区分布明显, 这体现出在测站稀少、资料分辨率较低的地区, 卫星资料应用的有益性。

上述分析表明, 模式初始场中考虑 ATOVS 资料反演出的温、湿场后, 虽然对强降雨落区、量级的影响并不明显, 但相对改变了降雨过程中温、湿度场分布, 特别是对强暴雨中心的温、湿场分布具有一定影响。对于不同时刻降雨模拟效果的不稳定性, 可能与反演 ATOVS 资料时采用的初估场及反演方法有关。另外, 由于原始辐射率没有水平和垂直相关, 而反演数据有相关性, 卫星资料的反演问题又是用 m 个离散频谱波段的辐射值, 确定 n 个大气层次的温度和湿度。因此反演问题没有稳定的唯一解。因此, 如果处理不善, 反而能降低数值预报的精度。

考虑到近年来越来越受关注的卫星资料直接同化具有很多优点, 如: 1) 实现用正演方法求解反演问题, 从方法论上避开反演问题的复杂性; 2) 避免计算复杂的不适定问题所带来的反演计算误差; 3) 使卫星探测信息转换过程与数值天气预报模式紧密相联, 考虑预报模式物理约束, 控制卫星探测转换误差; 4) 通过正演模式的物理精确化, 用背景场模拟探测辐射率, 相互质量控制。因此, 下面就来看看直接同化 ATOVS 资料的三维变分同化模拟对此次暴雨过程的模拟效果。

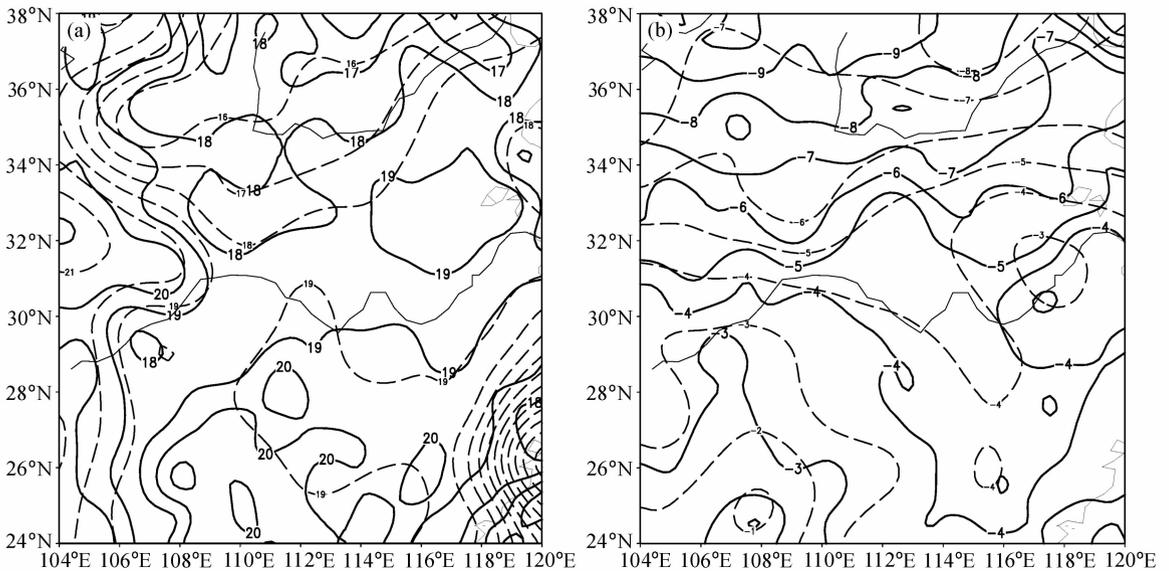


图 10 7 月 22 日 0000 UTC (a) 850 hPa、(b) 500 hPa 上 INDIRATOVS 试验(实线)与 NOATOVS 试验(虚线)温度分布(单位: °C)
 Fig. 10 The temperature (units: °C) at (a) 850 hPa and (b) 500 hPa at 0000 UTC 22 Jul 2002 in INDIRATOVS (solid line) and NOATOVS (dashed line)

4.4 直接同化 ATOVS 资料的模拟效果分析

4.4.1 变分同化系统形成的初始场分析

分析变分同化系统使用 ATOVS 辐射率资料后形成的 7 月 22 日 0000 UTC 增量场发现, 对流层各层的温度、水平风速分量和对流层中下层的比湿增量场均有一定变化, 增量场的变化又以临海沿岸和西北高原地区最明显, 其中, 各层水平风速增量场变化基本相当(图略), 但温度增量场主要位于对流层高层(图 11), 而湿度增量场主要位于对流层低层(图 12)。由此可以说, 在高原、海洋等测站分散、资料少的地区, 增补一些高分辨率卫星 ATOVS 资料, 对于改进模式中温、湿场的分布是可行的。特别是 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。因此, 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)。

在增量场分析的基础上, 我们将直接同化 ATOVS 资料形成的模拟初始场与 NOATOV 试验的初始场进行对比分析。发现, 直接同化 ATOVS 资料对初始场中温度、湿度的影响更为明显。除对对流层低层长江中下游雨区的温度有一定增暖外, 对流层低层比湿场的增强以海上为最强(图略), 而对流层中层, 虽然比湿场的增强弱了许多, 但长江中下游地区仍处于正比湿差值区内。除温湿场外, 对流层中下层, 长江中下游雨区附近西风 and 南风均有一定加强(图略), 这说明初始场中对造成降雨的暖湿空气输送机制有所加强。以上分析表明, DIRATOV 试验对此次梅雨锋降雨模拟初始场中的温湿场以及风场都有一定影响。

4.4.2 DIRATOV 试验的模拟结果分析

对比分析 7 月 23 日 0000 UTC 500 hPa、850 hPa 实况分析场与 DIRATOV 试验模拟的形势场可以发现(图 13), 直接同化 ATOVS 资料后, 模式也能较好地模拟出 500 hPa 上从东北地区到中国西南地区的东北—西南向逐渐南压的低槽和东北—西南向带状分布的西太平洋副热带高压。模拟的低槽位置、发展演变及沿槽后南下的冷空气的走向均与实况一致, 但槽的强度略偏强。在对流层低层, 模式也较好地再现出东北—西南向的切变线、在长江中游附近切变线上的发生发展起来的低涡及与低涡

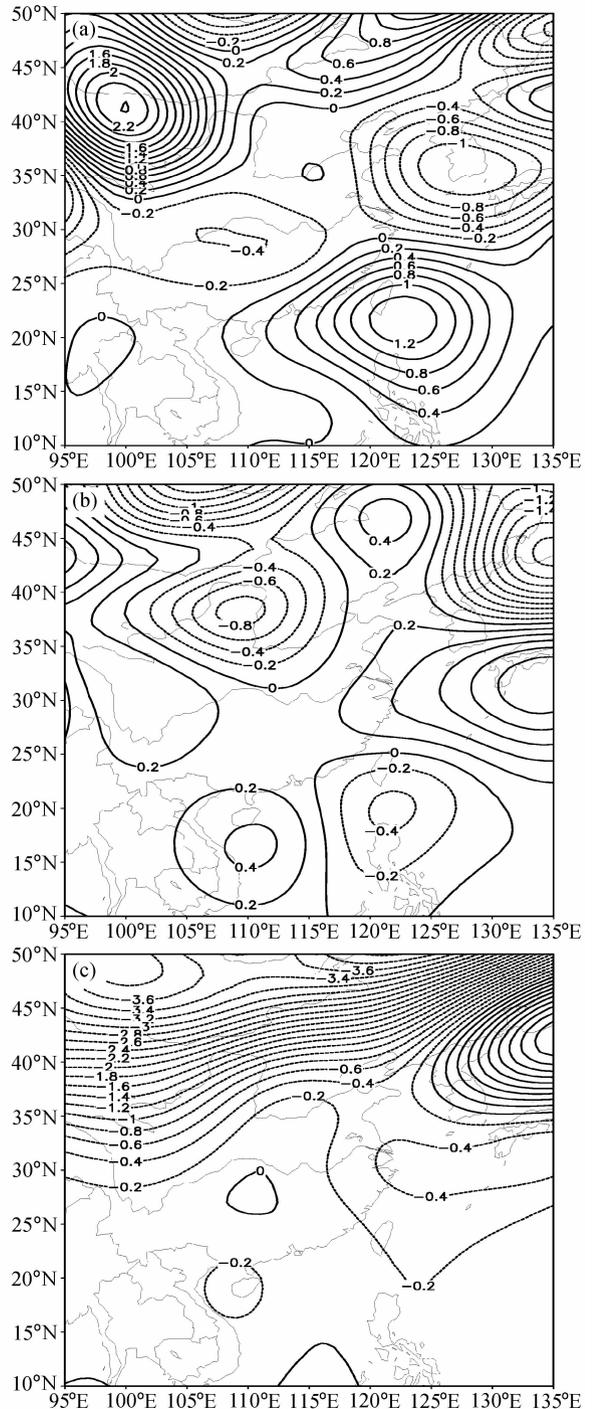


图 11 7 月 22 日 0000 UTC (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa 温度增量场(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 11 The temperature increments at (a) 300 hPa, (b) 500 hPa, (c) 850 hPa at 0000 UTC 22 Jul 2002 (units: $^{\circ}\text{C}$)

相伴的低空急流。模拟的低涡正位于湖南、湖北附近, 低涡中心强度比 NOATOV 试验模拟的该低涡偏强, 正是该低涡造成此次湖南、湖北的强降

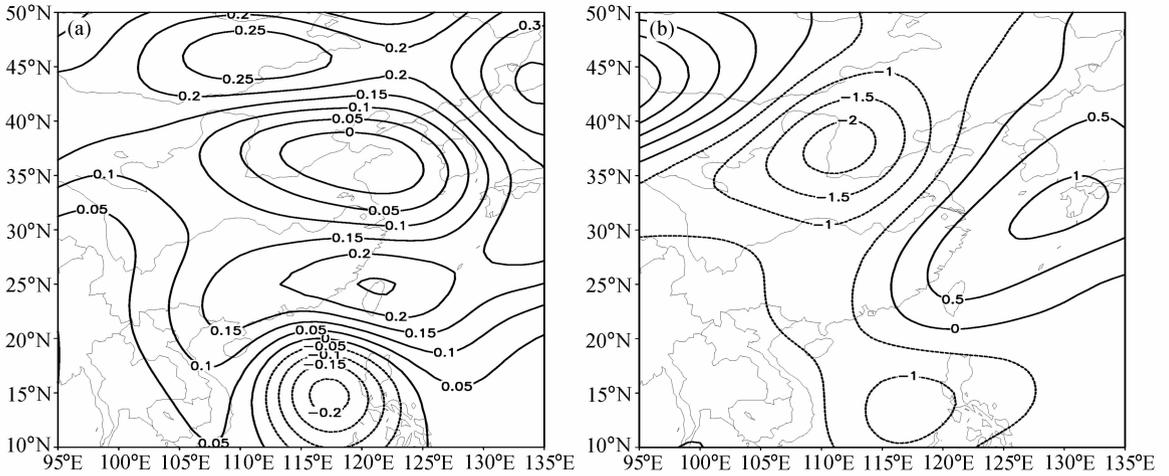


图 12 7 月 22 日 0000 UTC (a) 500 hPa、(b) 850 hPa 比湿增量场(单位: $g \cdot kg^{-1}$)

Fig. 12 The specific humidity increments at (a) 500 hPa, and (b) 850 hPa at 0000 UTC 22 Jul 2002 (units: $g \cdot kg^{-1}$)

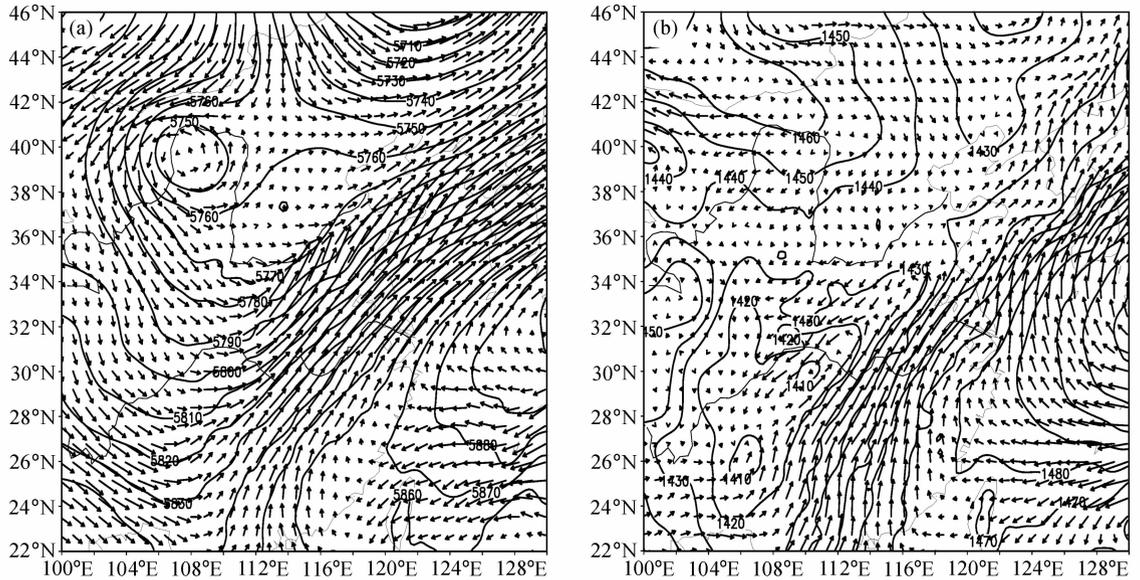


图 13 DIRATOVS 试验区域 D01 模拟的 7 月 23 日 0000 UTC (a)、500 hPa、(b) 850 hPa 位势高度场(单位: gpm)与风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)分布

Fig. 13 The geopotential height (units: gpm) and wind (units: $m \cdot s^{-1}$) of D01 at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 0000 UTC 23 Jul 2002 in DIRATOVS

雨。

图 14 是 DIRATOVS 试验中模拟的 7 月 22 日 0000 UTC~23 日 0000 UTC 24 h 的降水分布。将其与实况降雨和 NOATOVS 试验中模拟的 24 h 降雨分布作对比分析可知, DIRATOVS 试验和 NOATOVS 试验均模拟出发生在湖南、湖北、安徽一带的降雨, 并对强降雨中心也有一定反映。但 NOATOVS 试验中模拟的湖南、湖北雨区位置偏南, 湖北与安徽交界处附近的雨区位置偏西, 且暴雨中

心强度弱, 模拟的降雨强度未达到实际降雨量级。而 DIRATOVS 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, 且强降雨中心与低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 140 mm 和 100 mm, 模拟的降雨强度达到了实际降雨量级。

另外, 比较降雨过程中每 6 h 实际降雨分布与 DIRATOVS、NOATOVS 试验模拟的每 6 h

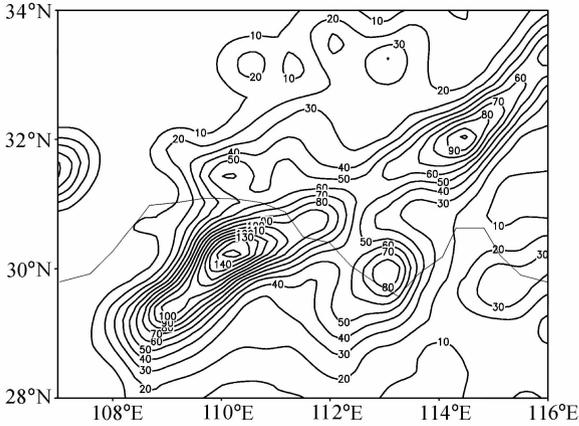


图 14 DIRATOVS 试验区 D01 模拟的 7 月 22 日 0000 UTC ~ 23 日 0000 UTC 24 h 降雨分布(单位: mm)

Fig. 14 The simulated rainfall of D01 from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 Jul 2002 in DIRATOVS (units: mm)

降雨不难发现(图 15), 22 日 0000 UTC ~ 0600 UTC 时段内, 长江流域有两片相对独立的雨区: 湖北东部、湖南北部, 模拟试验中对其均有描述, 模拟的湖南北部雨区与观测基本一致, 模拟的湖北东部雨区稍偏南; 对于 22 日 0600 UTC ~ 1200 UTC 中心位于湖南、湖北交界的雨区, 模式也均有一定反映。比较而言, NOATOVS 试验模拟强降雨区位置偏南, 强度偏大, 而 DIRATOVS 试验不仅没有虚假的降雨中心, 且模拟的降雨中心强度、位置相对更接近实况。对于 22 日 1200 UTC ~ 1800 UTC、1800 UTC ~ 23 日 0000 UTC 时段内的降雨, 两试验模拟的雨区位置基本一致, 但雨强差异较为明显。NOATOVS 试验模拟的降雨强度与前一时段基本一致, 未能较好反映出 23 日凌晨湖北

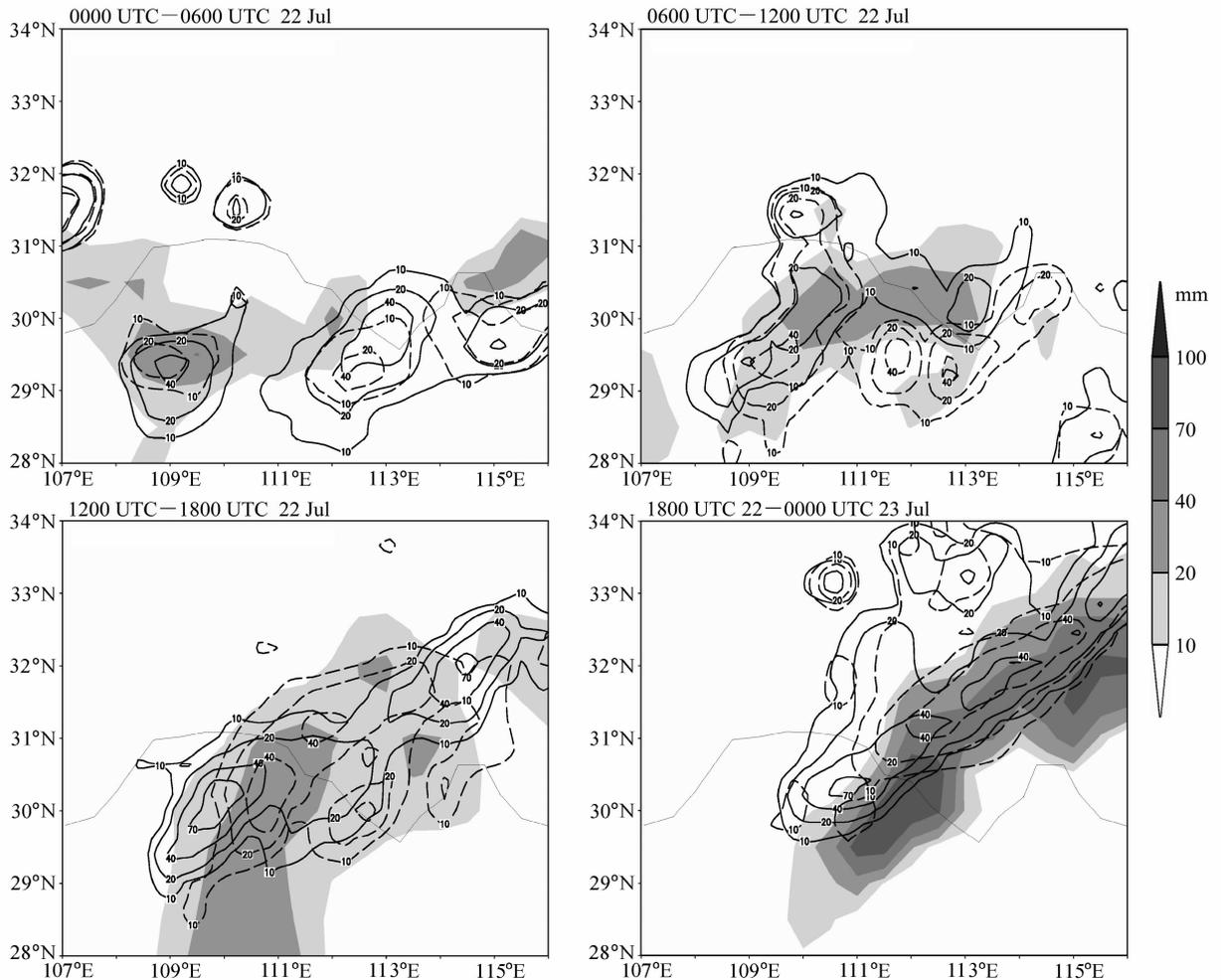


图 15 2002 年 7 月 22 日 0000 UTC ~ 23 日 0000 UTC 每 6 h 实况降雨(阴影)与 DIRATOVS(实线)、NOATOVS(虚线)试验区 D01 模拟的每 6 h 降雨分布(单位: mm)

Fig. 15 The observed 6 h rainfall (shaded) and the simulated 6 h rainfall of D01 in DIRATOVS (solid line) and NOATOVS (dashed line) from 0000 UTC 22 to 0000 UTC 23 Jul 2002 (units: mm)

与湖南交界处雨量突然加强的过程,而 DIRA-TOVS 试验则较好体现出该时段内降雨的加剧过程。模拟的 22 日 1200 UTC~1800 UTC 强降雨中心基本位于湖北与湖南交界的长江沿岸,暴雨中心 6 h 降雨量可达 70 mm,较合理地再现出五峰、石门附近 22 日 1600 UTC 的强降雨。因此可以说,DIRATOVS 试验对此次暴雨过程雨区、雨强的模拟是令人满意的。

此次降雨过程模拟的形势场和降雨场对比分析表明,考虑 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,这可能与 ATOVS 资料,特别是 AMSU-A/B 资料引起的一定温度、水汽调整有关。当然,由于在同化以探测大气湿度为主的 AMSU-B 资料时,不同通道资料的应用会造成很大不同,因此,还需大量同化分析试验来进行论证。

5 结论和讨论

利用 2002 年“973”中国暴雨试验(ChERES)期间获取到的常规、非常规观测资料,对 7 月 22~23 日湘鄂交界大暴雨过程进行分析和模拟研究。分析发现,7 月 22~23 日湘鄂交界出现的大暴雨是由倾斜的东北—西南向梅雨锋上发生发展的低涡造成。在对流层中上层东北—西南向逐渐加强并南压的低槽与中纬度地区东北—西南向带状分布的西太平洋副热带高压相互配置的有利环流背景下,南下的冷空气与北上的西南暖湿气流形成了一条倾斜的梅雨锋带,梅雨锋云带结构比较松散,其上有水平尺度相对较小的中尺度对流系统发生发展。

由于强暴雨主要发生在 7 月 23 日凌晨的湖北与湖南交界的长江沿岸,常规观测资料的分析对于描述暴雨系统结构、物理机制方面尚显不足,因此本文利用 MM5 对暴雨过程进行了模拟研究。鉴于极轨卫星 NOAA-16 的 ATOVS 资料具有广泛性、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,使卫星大气探测达到全天候探测能力。因此,模拟研究中针对 ATOVS 辐射率资料间接同化和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 资料的模拟效果进行了对比分析。

模拟研究表明,模拟中若仅采用 NCEP 资料和常规地面、探空观测资料,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,但由于缺乏有利于暴雨中尺度系统初始发展的中尺度信息,因此对强降雨区的模拟仍存在不足。而初始场中考虑 ATOVS 资料的间接同化后,相对而言,模式对于海洋、高原等资料缺乏地区的模拟效果有较大改善,对于长江流域测站较为密集的区域,虽然对降雨过程的温湿形势场分布有一定影响,但影响效果并不大,而且该方法对于暴雨的落区、雨强影响具有不稳定性,因此 ATOVS 间接同化方案在数值模拟中并不是最理想的。

相对而言,直接同化 ATOVS 资料在暴雨数值模拟中具有更广泛的前景。本例中 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。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加强影响,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降雨落区、雨强的模拟效果均有明显改善,这不仅说明 ATOVS 资料的使用对于提高梅雨锋上局地暴雨过程模拟效果是可行的、必要的,而且也为该资料用于梅雨锋暴雨的预报奠定了基础。

致谢 国家卫星气象中心的张凤英为研究工作提供了卫星观测资料及技术支持,中国气象科学研究所的朱国富为研究工作提供了有利思路 and 大力帮助,在此表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Akiyama T. Large synoptic and meso-scale variations of Baiu front during July 1982, Part II: Frontal structure and disturbances. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1990a, **68**: 557~574
- [2] Akiyama T. Large synoptic and meso-scale variations of Baiu front during July 1982, Part III: Space-time scale and structure of frontal disturbances. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1990b, **68**: 705~727
- [3] Ninomiya K, Akiyama T. Multiscale feature of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 467~495
- [4] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 1~225
Tao Shiyuan. *The Heavy Rainfall in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1~225
- [5] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象

- 出版社, 1993. 255pp
- Ding Yihui. *Research of Excessively Torrential Rain over Changjiang - Huaihe River Valley in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 255pp
- [6] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京: 气象出版社, 2001. 184pp
- Tao Shiyang, Ni Yunqi, Zhao Sixiong, et al. *Research of the Formational Mechanism and Prediction of Heavy Rainfall in China in the Summer of 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 184 pp
- [7] 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟. 科学通报, 2000, **45**(18): 1988~1922
- Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Hongqing, et al. A numerical simulation study of mesoscale convective system associated with the Meiyu front in South China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **45**(18): 1988~1922
- [8] 高坤, 徐亚梅. 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究. 大气科学, 2001, **25**(6): 740~756
- Gao Kun, Xu Yamei. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22 - 30 June 1999. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(6): 740~756
- [9] 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 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学, 2002, **26**(4): 541~557
- Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China Part I: A numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**(4): 541~557
- [10] 朱民, 郁凡, 郑维忠, 等. 卫星反演湿度场及其在暴雨预报中的初步应用分析. 气象学报, 2000, **58**(4): 470~478
- Zhu Min, Yu Fan, Zheng Weizhong, et al. The study of preliminary application of satellite-derived relative humidity in rainstorm forecast. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2000, **58**(4): 470~478
- [11] 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): 273~280
- Wang Zihou, Wang Zonghao, Zhang Fengying. A study of application of HIRS/2 brightness temperature to NWP without retrieval. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1995, **6**(3): 273~280
- [12] Derber J C, Wu W S. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 2287~2299
- [13] McNally A P, Andersson E, Kelly G, et al. The use of raw TOVS/ATOVS radiances in the ECMWF 4D-Var assimilation systems. *ECMWF Newsletter*, 1999, **83**: 377~384
- [14] Dudhia J. A nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 1493~1513
- [15] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NACR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994, 138pp