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.

ATOVS 资料在淮河暴雨预报中的同化应用研究*

郭 锐[1] 李泽椿[2] 张国平[2]

1 北京市气象台, 北京 100089

2 国家气象中心, 北京 100081

提 要: ATOVS 资料的获取弥补了测站稀少地区常规观测资料的不足,尤其是有云条件下的温湿资料,这两种资料对于模式的降水预报极为重要。采用 T213-SSI 业务系统,对全球 NOAA16、17 的 ATOVS 资料进行同化试验,分析了 ATOVS 资料在极端暴雨天气预报中的应用效果。对 2007 年 7 月 7—9 日发生在淮河流域的一次暴雨过程进行数值模拟研究,设计 3 种同化方案,对比分析了不同方案的同化模拟结果。试验表明:长期同化 AMSU 资料,可以改善降水预报,尤其是降水强度的改善明显。通过连续同化,卫星资料能改进大尺度环境场、温湿场和动力场。剔除 AMSU-A 地面通道及低层 700 hPa 通道资料的同化效果要优于全部同化,对于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。

关键词: AMSU 资料, 变分同化, SSI 同化系统, 暴雨

Assimilation of ATOVS and Its Application in the Heavy Rainfall over the Huaihe River Basin

GUO Rui[1] LI Zechun[2] ZHANG Guoping[2]

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

2 National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract: ATOVS data make up for the conventional observations in some areas with scarce stations, and can particularly provide the temperature and humidity data under the condition with cloud for precipitation forecast by model. In order to examine the application and capacity of T213-SSI system and evaluate the impact of ATOVS data on numerical forecast of heavy rainfall in China, the T213-SSI system is used to assimilate ATOVS data from NOAA16, 17 satellites. Then a heavy rainfall event during July 7 to 9, 2007 over the Huaihe River Basin is simulated with different assimilation schemes in order to compare and analyze the results of assimilation and simulation. The main conclusions to be drawn are as follows: after AMSU data being added into the T213L31 model, the forecast of precipitation is more exact, especially the intensity of precipitation. By continuous assimilation, temperature fields and humidity fields are improved obviously. After eliminating AMSU-A terrestrial channel data, the simulating effect is better than assimilating completely on the location and the intensity of the heavy rainfall centre. Especially, the synoptic situation, the temperature, humidity and wind fields are improved much closer to the real states compared with the assimilating AMSU-A terrestrial channel data.

Key words: AMSU data, variational assimilation, SSI (Spectral Statistical Interpolation) assimilation system, heavy rainfall

* 国家自然科学基金项目(40501049)
2009 年 3 月 23 日收稿; 2009 年 8 月 4 日收修定稿
第一作者:郭锐,主要从事数值预报资料同化研究. Email:chinagr@163.com

引 言

气象卫星技术的成熟和发展，为业务及科研提供了大量全球范围的观测资料。与常规资料相比较，卫星观测资料具有准连续性、水平分辨率高、观测面广阔等优点。因此，如何将卫星探测资料融合到数值预报模式中去，改善模式初始分析场成为近年来国内外学者研究的热点。

国外很多研究表明，将非常规资料引入模式，大大提高了模式预报准确率[1-6]。近年来，NOAA 系列极轨卫星的 ATOVS 资料的应用业务化，更是极大地提高了各国数值模式预报水平[7-11]。国内对于 ATOVS 资料的同化研究虽然起步较晚，但是近些年来已取得了一定的研究成果。潘宁等[12]用增量 3D-Var 同化方法对 ATOVS 辐射亮温资料在 MM5 模式上进行了直接同化和预报，结果表明，同化 AMSU-A 资料对中高层的温度分析场的影响很明显，但对降水预报的改善作用不大。张华等[13]采用 GRAPES 3D-Var 与 WRF 模式相结合，同化NOAA 16 的 ATOVS 资料，对西北太平洋台风的结构和路径预报进行研究，表明同化微波资料可以部分地弥补热带洋面上常规观测资料的不足。张华等[14]将 ATOVS 资料同化进 WRF 模式，显著改进了台风的路径预报。齐琳琳等[15]采用 3D-Var 和 MM5V3 对 ATOVS 辐射率资料进行直接同化，并对长江流域的一次暴雨过程进行模拟研究。结果表明，直接同化 ATOVS 资料，可以有效改进对流层温、湿场分布，且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。黄兵等[16]采用 GRAPES 3D-Var 同化系统与 MM5 模式相结合，对 ATOVS 资料进行直接同化，结果表明：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，且对流层中下层风场也有一定改进。齐琳琳等[17]利用 GRAPES3D-Var 同化系统和 MM5 V3 模式，直接同化 ATOVS 资料，发现同化 ATOVS 资料对模式初始场有明显改善，在降水预报方面有很大的潜力。张爱忠等[18]采用 GRAPES 3D-Var 同化系统三维变分直接同化 AMSU-A 辐射亮温资料，并将同化后的三维场转变格式输入 MM5 V3 中尺度数值预报模式中进行个例模拟对比试验研究。研究结果表明同化卫星资料获得的分析场对于低层水汽增湿效果较明显，对中层温度的调整增大了整层大气的对流不稳定。张利红等[19]利用 GRAPES 三维变分同化系统，对 AMSU-A/B 微波遥感资料进行了同化试验，研究发现使用 AMSU 资料，对我国夏季暴雨数值预报有改进作用。沈桐立等[20]在 MM5 伴随模式中使用 NOAA16 极轨卫星探测获得的 AMSU 资料，对江淮流域的一次暴雨过程进行了数值模拟。结果表明，使用 AMSU 资料后，湿度场、温度场和风场均得到一定程度的改善，降水的落区和强度也更接近实况。朱国富等[21]详细介绍了 GRAPES 3D-Var 同化系统对实际卫星辐射率资料直接同化的实现，将 NOAA17 的 AMSU-A 的 5～11 通道资料与 AMSU-B 的 3～5 通道资料直接同化，在物理意义上验证了 GRAPES 3D-Var 系统直接同化卫星辐射率资料的合理效果。李娟等[22]利用 T213-SSI 准业务同化系统，同化了 NOAA15、16、17 的 AMSU-A 的 1～11，15 通道资料与 AMSU-B 的 1～5 通道资料，对一次川渝地区暴雨过程进行了模拟分析，研究表明卫星资料的长期使用可以改进大尺度环境场，使得暴雨天气过程的直接影响系统更接近实际。

前人的研究工作主要集中在 WRF 或者 MM5 等区域模式 ATOVS 资料同化研究中，或是致力于新模式 GRAPES 的开发研究，对于我国目前数值业务预报模式 T213L31 模式的卫星资料同化研究相对较少。作为业务模式，T213 模式比较成熟完善，并且如果其能够更好地利用 ATOVS 资料，改进预报效果，对于提高我国业务预报水平也十分重要。因此，本文选用全球谱模式 T213L31 及其三维变分同化系统 SSI，开展对 ATOVS 资料的直接同化试验，对于直接同化 ATOVS 资料在暴雨预报中的应用效果进行细致评估分析，并且探讨如何更好地同化利用 ATOVS 资料，使其应用效果得到最大化的体现。

1 ATOVS 资料及 SSI 同化系统介绍

1.1 ATOVS 资料介绍

ATOVS（Advanced TIROS-N Operational Vertical Sounder）先进的大气垂直探测器由三个相互独立的仪器组成，分别是高分辨率红外辐射探测器 3 型（HIRS/3），先进的微波探测装置 A（AMSU-A）和先进的微波探测装置 B（AMSU-B），主要是用

于大气温度和湿度垂直探测,同时也具备探测地表参数的能力。

目前业务数值预报中使用的 ATOVS 数据文件包括搭载在 NOAA15、16、17 上的 AMSU-A、AMSU-B 探测资料,其中 NOAA17 的 AMSU-A 数据不可用,NOAA15 的资料误差较大。除此之外,HIRS/3 资料也缺失,因此本文研究所用 ATOVS 资料只包含 AMSU 资料。数据格式为二进制格式数据,每种仪器每天有 4 个时次,00,06,12,18 UTC 的数据文件,每个时次的数据为将每个时次前后 3 小时的数据拼接到一起生成的数据文件。

1.2　SSI 同化系统简介

SSI 谱统计插值方案(Spectral Statistical Interpolation),是由 Parrish and Derber 开发建立起来并一直作为 NCEP 的业务分析方案。它是根据三维变分分析原理、针对全球谱模式而开发设计的资料分析方案。SSI 从 1992 年开始在 NCEP 业务化,给全球谱模式提供初始场。国家气象中心在 1997 年引进 NCEP 的 SSI, 当时 SSI 仅包括一个简单的辐射传输模式,仅仅可以处理 TOVS 资料。2003 年,国家气象中心引进了最新版本的 SSI,它的框架和计算流程设计比较合理,可以比较容易地引入新的观测算子;含有快速辐射传输计算方案(以 OPTRAN 为核心),有能力直接同化卫星辐射观测资料(包括 ATOVS 辐射资料);程序是专为大规模并行计算机设计编写,代码高度并行化,计算效率较高,可以满足业务的时效要求。

2　个例简介

2007 年 6 月 19 日起,江淮流域进入了梅雨期。2007 年 6 月 19 日至 7 月 26 日,淮河流域降水总量一般有 300～500 mm,其中河南东南部、湖北东北部、安徽沿淮一带、江苏中部达 500～700 mm[23]。其中 7 月 7—9 日降水过程最强,从 7 月 8 日 08 时到 9 日 08 时,淮河全流域平均的 24 小时降水量达到 65 mm,沿淮地区共有 26 个站出现大暴雨,12 个站降水量超过 150 mm,安徽寿县降水量达 262 mm。

此次降水为典型的梅雨期天气形势。2007 年 7 月 8—10 日,东亚上空出现了“高脊发展后,下游小槽强烈斜压性发展的现象(过程)”,7 月 9 日有深厚的高空槽移到梅雨锋上空,诱发梅雨锋上气旋生成过程和深厚的锋生过程[24]。7 日 08 时,500 hPa 中高纬度环流形势为两脊一槽,位于我国东北北部的阻高稳定维持,沿贝加尔湖至蒙古中部为低槽并形成了一个切断低压。同时,副高西脊点位于 107°E,副高脊线平均位置位于 26°N 附近。8 日 08 时,90°E上空有一个高空高压脊强烈发展,河套西北上空出现一个低压槽,这个低压槽向东南方向移动并发展。槽后不断有冷空气经我国西北南下,同时贝加尔湖低槽及其切断低压东移南压,冷空气进一步加强。与此同时副高逐步东退,其西北部的暖湿气流与冷空气再次强烈交汇于淮河流域。200 hPa 在淮河以北 39°N 附近存在明显的急流带,850 hPa 上也维持着一条西南低空急流带,此时淮河流域正处于静止锋低空辐合区与高空辐散区的控制下,上升运动强烈,形成了此次降水过程最强的一次降水。

选取 2007 年 7 月 7—9 日淮河流域这次最大降水过程作为个例,以 T213L31 模式及其三维变分同化系统 SSI 进行同化试验研究。在常规资料基础上加入 AMSU 资料进行同化,通过比对同化模拟结果,检验 AMSU 资料在业务数值预报模式中对暴雨预报的改进作用。

3　模式与模拟方案设计

3.1　模式介绍

本文使用的模式为国家气象中心数值室在引进的欧洲中期天气预报中心 IFS(Integrated Forecasting System)模式框架的基础上,经过移植改造和开发的我国新一代全球中期数值预报业务模式 T213L31。它是我国第一代大规模并行化的中期数值预报模式,T213L31 模式为三角截断的全球谱模式,截断波数为 213 个波,最小的波长分辨率为 190 km,归约高斯格点空间其水平分辨率达到 60 km,计算量大大减少,内存和结果的存储量也减少,垂直 p-σ 混合坐标 31 层,地面到 30 km,即模式顶为 10 hPa。

3.2　数值模拟方案设计

为了充分考察 AMSU 资料在夏季暴雨数值模拟中的作用,并检验 T213-SSI 同化分析预报系统同化 AMSU 资料的效果,对 2007 年 7 月 7—9 日的暴雨过程设计了三种同化试验方案(如表 1 所示)。三种方案均采用 2007063006 UTC、T213L31 模式的分析场作为初始时刻背景场,从 2007063006 UTC 时开始,积分 10 天到 2007070900 UTC,其中 A 方

案只同化常规资料(aob),B 方案同化常规资料与 NOAA16、17 的 AMSU-A 的 1～11,15 通道、AMSU-B 的 1～5 通道资料,C 方案同化常规资料与 NOAA16 的 AMSU-A 的 6～12 通道、AMSU-B 的 1～5 通道资料。

表 1 同化试验方案设计

Table 1 Design of Assimilation experiment schemes

方案	初始背景场资料	同化资料	同化积分时间
A	2007063006T213	aob	2007063006UTC－2007070900UTC
B	2007063006T213	aob＋AMSU-A(ch1～11,15)＋AMSU-B(ch1～5)	2007063006UTC－2007070900UTC
C	2007063006T213	aob＋AMSU-A(ch6～12)＋AMSU－B(ch1～5)	2007063006UTC－2007070900UTC

图 1 为 AMSU-A 资料的各个通道的权重函数分布特征,1～4 通道主要观测的是来自于地表的信息,5 通道主要观测的是 700 hPa 的信息。B 方案与 C 方案的主要区别就是在于 C 方案剔除了 AMSU-A 的地面通道与 700 hPa 通道资料。

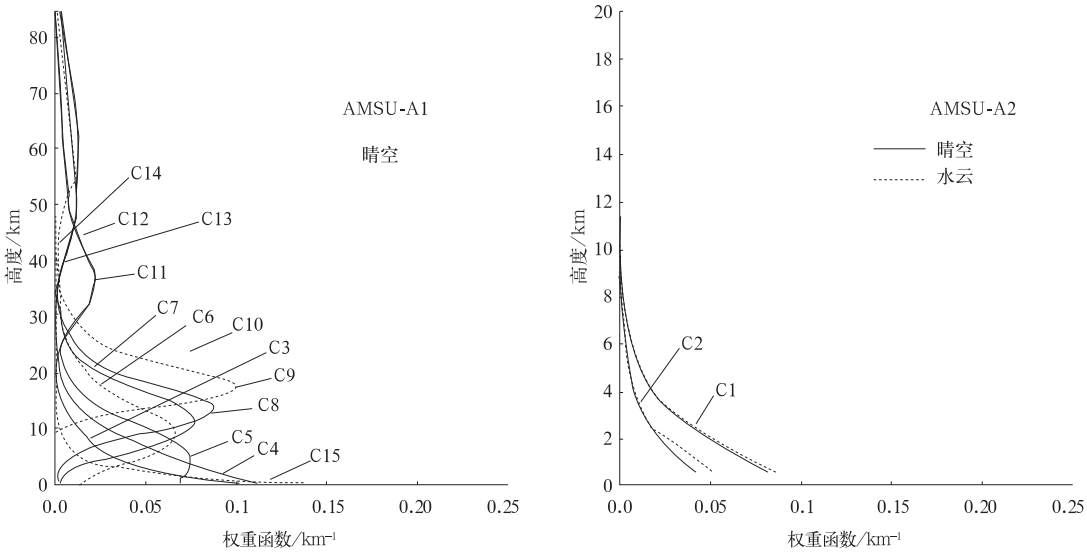


图 1 AMSU-A 通道的权重函数分布特征[25]

Fig. 1 The weight function distribution of AMSU-A channel

图 2 为连续同化 10 天过程中 2007 年 7 月 2 日 14 时欧亚地区,B 方案中经过通道选择、质量控制与偏差订正后,T213-SSI 同化系统同化的 AMSU-A/B 资料。可以看出 NOAA16 的 AMSU-A 的地面通道及 700 hPa 通道资料仅剩亚欧大陆中高纬地区零散的分布一些和西太平洋地区的资料。D 方案则完全剔除了这部分通道资料,6～11 通道的资料在亚欧地区基本都保留使用,AMSU-B 的 5 个通道由于都是大气中低层通道,所以海拔较高地区的资料被剔除,但是相比 AMSU-A 的地面通道保留下来的资料较多。我国沿海低海拔地区,以及西太平洋洋面上的资料都基本保留下来了。NOAA17 的 AMSU-B 资料剔除了许多资料,亚欧大陆中纬地区陆地上的资料都剔除掉了。

4 数值模拟结果分析

4.1 降水场模拟对比分析

2007 年 7 月 7—9 日降水过程为同年淮河梅雨期降水最强的一次过程,有 12 个测站降水量在 150 mm 以上。首先,还是分析降水场模拟情况。图 3 为 2007 年 7 月 7—9 日的每日 24 小时降水实况与 A、B 方案模拟的 24 小时降水预报对比。

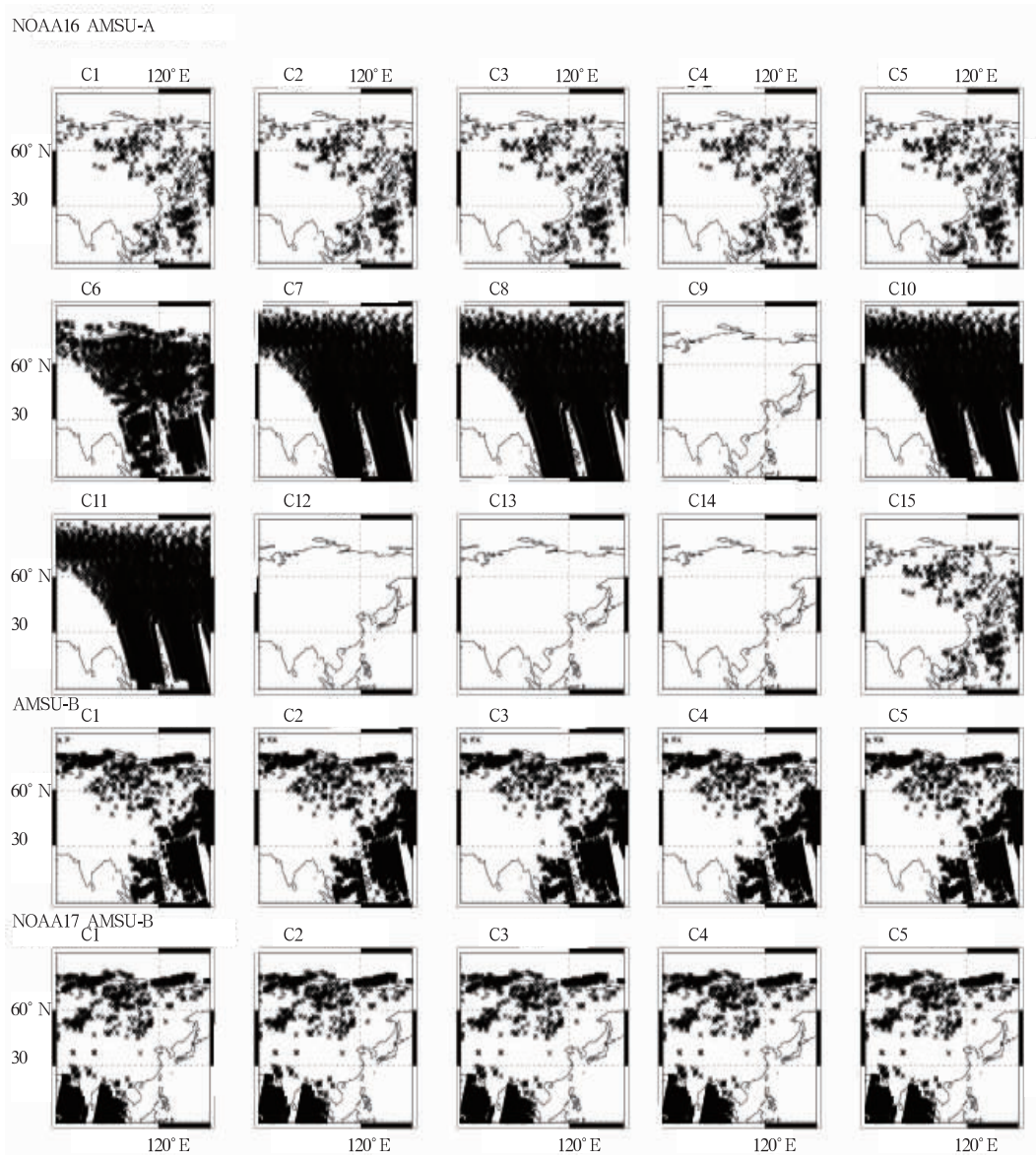


图 2　2007 年 7 月 2 日 14 时欧亚地区 B 方案中 T213-SSI 同化系统同化的 AMSU-A/B 资料

Fig 2　The distribution of AMSU-A/B data assimilated by T213-SSI in Eurasian area at 14:00 OTC 2 July 2007

首先,从 7 日 08 时至 8 日 08 时的 24 小时降水实况图上可以看出,降水区域主要集中在江苏和安徽大部地区。其中,安徽北部与江苏南部分别有一个 50 mm 以上的暴雨中心和 100 mm 以上的暴雨中心。A 方案仅同化常规资料的 24 小时预报图上,基本模拟出了降水的分布区域,并且对于安徽北部的暴雨中心,无论从位置还是强度的模拟都与实况很接近。但是对于江苏南部的降水极值区却没有模拟出来。B 方案加入同化 AMSU-A/B 资料后,模式模拟出了苏南的暴雨中心,但是位置略偏东且量级偏小。8 日的实况图上,降水呈纬向的带状分布,在湖北的中部、安徽北部和江苏中部出现了 3 个超过 150 mm 的暴雨中心。A 方案基本模拟出了雨带的纬向型分布特征,但是仅仅在安徽北部出现了一个 110 mm 的降水中心。B 方案同化卫星资料后,预报结果更加接近于实况。安徽北部的暴雨中心区域有了进一步扩大,且强度达到了 120 mm。在湖北北部也出现了一个 60 mm 的暴雨中心。9 日降水减弱,并且雨区南压,在安徽南部存在一个超过 150 mm 的暴雨中心。A 方案基本预报出了雨区的分布特征,但是湖北南部的降水中心偏南。安徽南部的强暴雨中心则完全没有预报出来,并且在安徽、

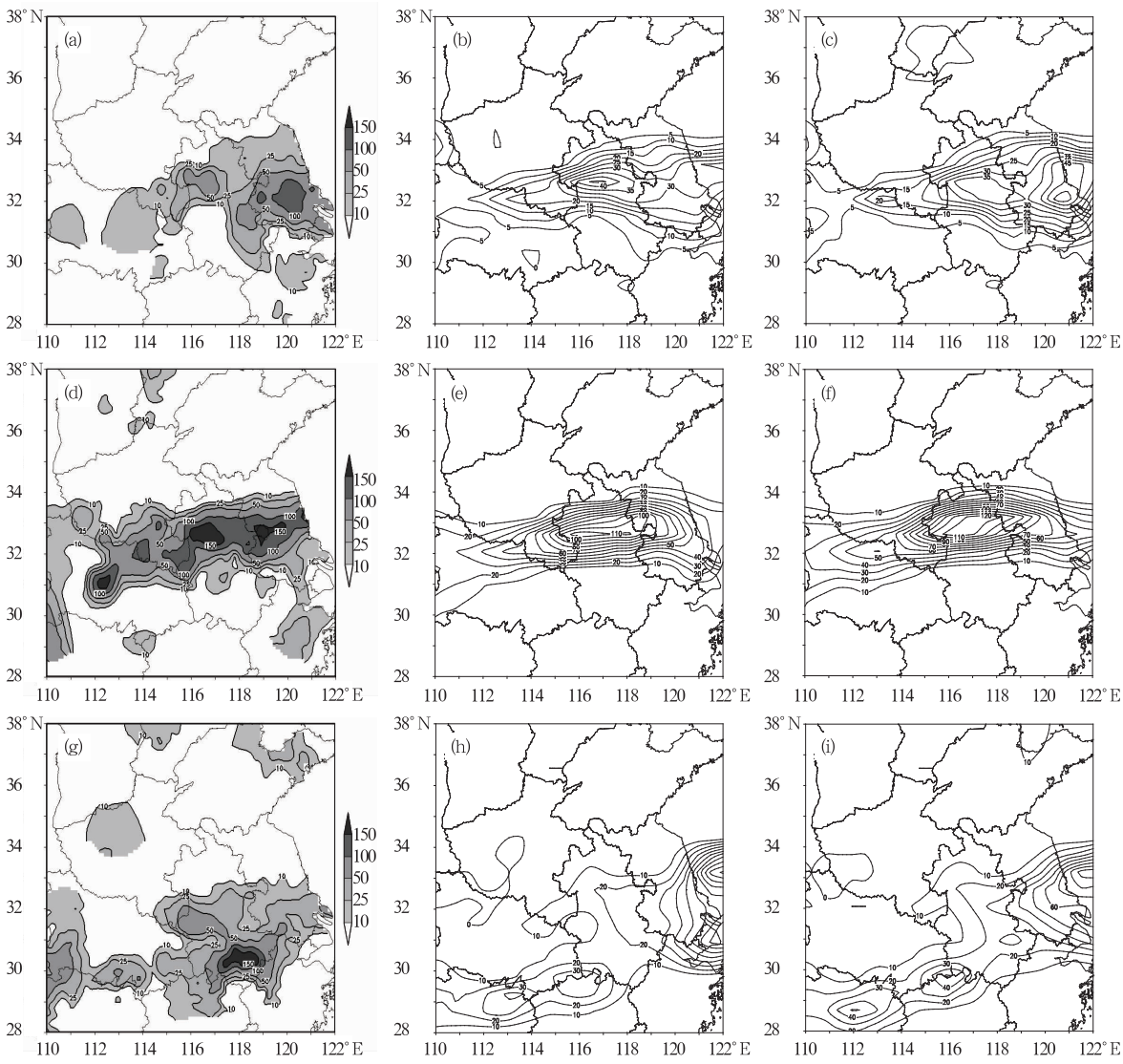


图 3 2007 年 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时 24 小时累积降水量(单位:mm)实况(a)、A 方案(b)、B 方案(c);
8 日 08 时至 9 日 08 时 24 小时累积降水量 实况(d)、A 方案(e)、B 方案(f);
9 日 08 时至 10 日 08 时 24 小时累积降水量 实况(g)、A 方案(h)、B 方案(i)

Fig. 3 The distribution of 24h accumulative precipitation (unit: mm) from 08 BT 7 to 08 BT 8 July 2007 (a) the observation, (b) Scheme A, (c) Scheme B; from 08 BT 8 to 08 BT 9 July 2007 (d) the observation, (e) Scheme A, (f) Scheme B; from 08 BT 9 to 08 BT 10 July 2007 (g) the observation, (h) Scheme A, (i) Scheme B

湖北交界处出现了一个虚假的降水中心。B 方案同化卫星资料后,对于降水场的模拟略有改进。对于湖北南部的降水中心位置虽然还是偏南,但是强度基本与实况一致。两省交界地区的虚假降水中心依然存在,但是在安徽南部出现了一个弱的中心与实况暴雨中心位置相同,只是量级还是相差很远。

从 7—9 日三天降水模拟结果来看,两种同化方案都基本模拟出了雨区的位置与分布形式,只是对暴雨中心的预报存在偏差,尤其是降水中心强度。加入同化卫星资料后,雨区分布更加接近实况,暴雨中心基本都模拟了出来。两种方案降水量的预报较实况都偏小,但是同化卫星资料后,降水量明显增加,暴雨中心强度加强。因此,同化 AMSU 资料,对于此次暴雨过程在暴雨落区及强度的模拟上均有一定程度的改善。

持续同化卫星资料对于模式降水预报有了显著改进,但是 B 方案基本选取了 AMSU-A/B 一切可用的通道资料,包括近地面通道资料。近地面通道

资料的引入是否会为初始场带来更大误差,影响改进效果? 为了进一步考察 AMSU 资料的应用效果,本文设计了 C 方案,关闭 AMSU-A 资料的地面通道及低层通道,只取对流层中上层到模式顶层的通道资料。依然连续滚动同化 10 天,做 24 小时降水预报。

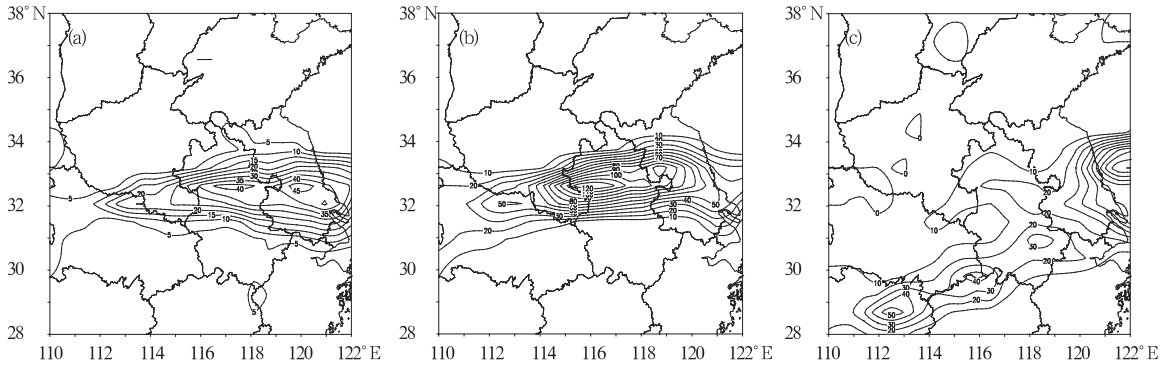


图 4　C 方案模拟的 24 小时累积降水量(单位:mm)

(a)7 日;(b)8 日;(c) 9 日

Fig. 4　The distribution of 24 h accumulative precipitation (unit: mm) on 7 (a), on 8 (b), on 9 (c) July 2007

对比分析 C 方案模拟的 7 月 7—9 日的降水场(图 4)。7 日,C 方案模拟出了位于皖北和苏南的两个暴雨中心,其中苏南的极值中心位置比 B 方案模拟的更加接近于实况,降水强度较 B 方案也有所加强。8 日的降水分布形式与方案 B 相比也有了较明显的改进。A、B 两方案都只模拟出了暴雨的一个极值中心,C 方案在剔除近地面卫星资料后,模拟出安徽北部、江苏中部的两个暴雨中心,位置基本与实况一致,强度略偏小。同时,位于湖北中部的暴雨中心虽然从降水量和落区的预报都与实况有差距,但是较前两方案已经模拟出了这个极值中心的存在。9 日,C 方案模拟的湖北南部的暴雨中心在降水量上与实况基本完全一致,但是位置仍然偏南。湖北、安徽两省交界地区的虚假降水中心还是存在,但是强度减弱,接近于实况。对于皖南的大暴雨中心的模拟,较 A、B 方案有所改善,模拟出了 30 mm 的降水中心,但是与实况超过 150 mm 的降水还是相差很大。这是由于此次过程,强暴雨都是由于梅雨锋上的锋生气旋等中尺度涡旋系统直接造成的。这些中尺度云团和雨团,甚至更小的中尺度对流系统,对于全球模式 T213 来说,它的水平分辨率只有 60 km,模拟效果很难尽如人意。从目前 C 方案模拟的降水图效果可以看出,较未同化 AMSU 资料前已经有了显著改进,与 B 方案选取 AMSU-A 的近地面通道资料同化相比较,也取得了进一步的改进。

通过对此次江淮暴雨降水的模拟效果对比分析,连续滚动同化 AMSU-A 中高层通道资料与 AMSU-B 资料要优于同化包括 AMSU-A 地面通道及低层通道资料在内的同化方案。卫星资料的引入提高了模式模拟的降水强度,去掉了 AMSU-A 地面通道资料后,其余的 AMSU 资料的引入,更是改善了暴雨中心预报,无论是位置,还是强度都得到了明显改善。

4.2　天气形势场模拟对比分析

AMSU 资料的同化,对模式降水预报起到了显著的改进作用。但是与实况相比,降水强度偏弱,暴雨中心位置出现偏差,这些问题依然存在。天气形势场作为预报员分析天气的重要根据,对于预报结果起着极为重要的作用。同化后的形势场如能更接近实际,那么,就能够为预报员提供更加准确的天气信息,从而得到更准确的预报结论。因此,进一步对比分析此次暴雨过程的天气形势场模拟情况。

此次降水从 7—9 日持续了 3 天,以 8 日降水最强。整个湖北、安徽北部、江苏中部地区都出现了大暴雨。最大降水中心安徽寿县 8 日降水量达 262 mm,有 12 个测站降水量超过了 150 mm,因此,本文重点对 8 日降水的天气形势场进行分析。由于 8 日 08 时是大暴雨发生前最近一次观测,其天气形势具有代表意义。本文对 8 日 08 时的实况场与方案 A、B 的模拟结果进行了对比分析,如图 5 所示。

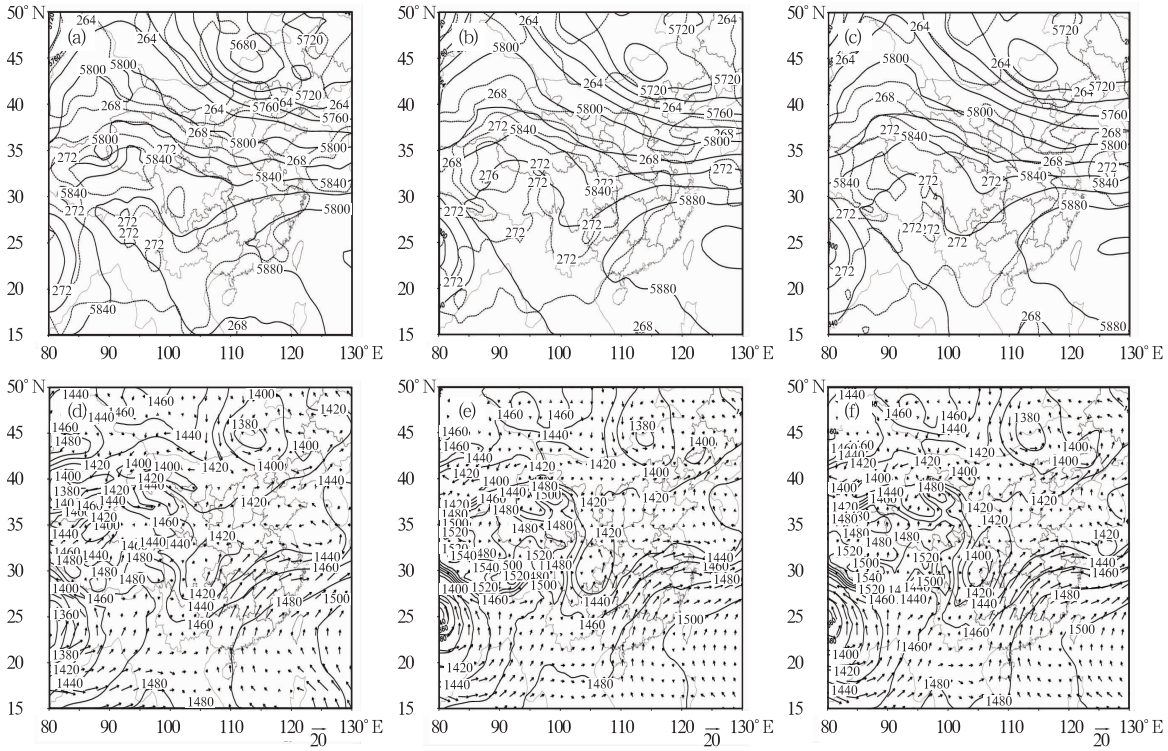


图 5 2007 年 7 月 8 日 08 时 500hPa 位势高度场与温度场(单位:gpm,K)实况(a)、A 方案模拟结果(b)、B 方案拟结果(c)与 850 hPa 位势高度场与风场(单位:gpm,m·s^{-1})实况(d)、A 方案模拟结果(e)、B 方案模拟结果(f)

Fig 5 The geopotential height (unit: gpm) and temperature (unit: K) at 500 hPa (a) the observation, (b) Scheme A, (c) Scheme B and the geopotential height (unit:gpm) and wind (unit: m·s^{-1}) at 850 hPa (d) the observation, (e) Scheme A, (f) Scheme B at 08:00 BT 8 July 2007

500 hPa 实况图上,阿尔泰山以西高压脊强烈发展,蒙古东部一低压槽正向东南方向加深发展,并在蒙古东部中蒙边界出现了一个中心为 5680 gpm 的切断低压,这个低压系统也在逐步东移南压。槽后脊前向东南方向冷平流明显,华北冷涡的东移南下也使得冷空气进一步加强。105°E 附近的南支槽与华北地区的小槽构成了阶梯槽的形势,槽前的暖湿气流被输送到淮河流域。另外,相对于 7 日 08 时,副高东退南撤,西伸脊点东退到 113°E 附近。副高的东移南撤使得副高西北侧的西南急流加强发展,冷暖空气得以在江淮地区强烈交汇,造成了 8 日的强降水过程。再分析 850 hPa 上,切变线位于安徽、江苏北部,受西南涡与西太平洋副高的共同作用,副高北侧的西南急流加强发展,使得低层暖湿空气源源不断地输送到淮河流域。可以看出,暴雨区刚好位于切变线南侧、急流出口区北侧。

将 A、B 两方案模拟的天气形势场与实况作比较,A 方案仅同化常规资料模拟的 500 hPa 场虽然大体模拟出了 08 时的形势场,但是对于影响暴雨的关键系统模拟却不尽人意。首先位于蒙古的冷舌没有模拟出并且低压的强度也偏弱;其次南支槽位置偏西,也没有呈现出阶梯槽的形势,与其配合的暖中心位置也偏西偏弱;最后,最重要的是副高没有东退南撤,这将影响对于降水位置和强度的预报。B 方案同化卫星资料后,显著改进了副高的位置,副高减弱东退,西伸脊点位于 110°E。同时也模拟出南支槽北部的小槽,虽然与实况相比偏西,但是阶梯槽的形势已经呈现出来。850 hPa 上,同样 A 方案基本模拟出高度场,但是两个关键系统的模拟存在一定误差。华北冷涡偏弱,进而其西部引导冷空气南下的北风偏弱。西南涡也偏弱,使得涡前的西南急流较实况偏弱。最为关键的安徽、江苏北部的切变线完全没有显现出来。B 方案模拟的华北冷涡无论是强度位置都与实况基本一致,西南涡的位置也大体相同,在皖苏北也出现了弱的风切变。通过以上分析发现,加入同化 AMSU 资料后,对于天气形势场有了一定改进,尤

其是对于影响降水的关键系统的改进,为预报员提供了更加准确的分析场。

再分析 C 方案模拟的天气形势场(图 6)。同样关注 8 日 08 时模式模拟的高度场、温度场及风场。500 hPa 上,位于蒙古东部的切断低压强度较 A、B 方案都有所加强,更加接近于实况。西太平洋副高也出现了减弱东退,西伸脊点位于 113°E 附近,基本与实况相一致。850 hPa 上,华北冷涡有所加强,大体上与 B 方案模拟效果相同。通过分析,可以看出 C 方案不仅在降水场模拟效果优于 B 方案,并且对于中高层天气形势场的改进效果略优于 B 方案。

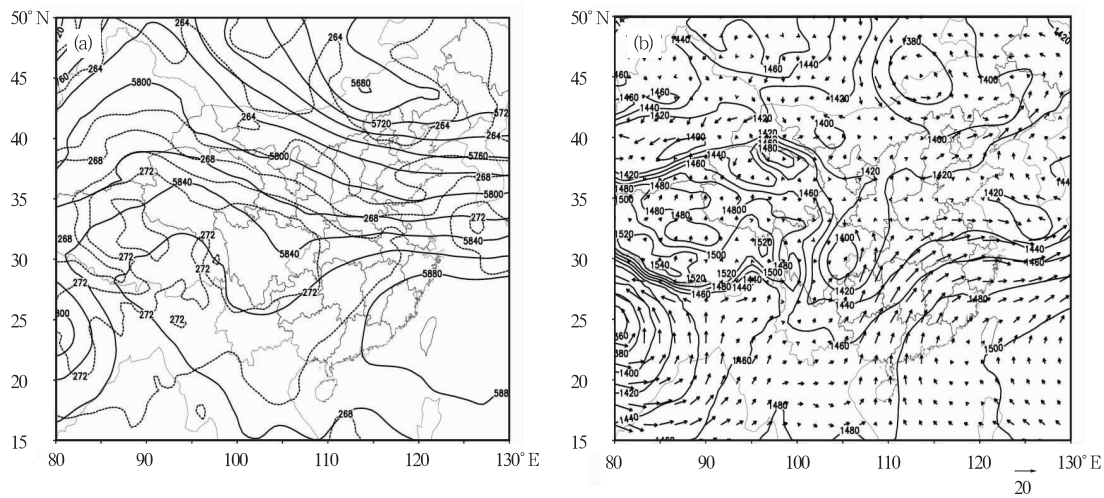


图 6　2007 年 7 月 8 日 08 时 C 方案模拟的 500 hPa 位势高度场与温度场(a,单位:gpm,K)与 850 hPa 位势高度场与风场(b,单位:gpm,m·s^{-1})

Fig 6　The geopotential height (unit: gpm) and temperature (unit: K) at 500 hPa (a) and the geopotential height (unit:gpm) and wind (unit: m·s^{-1}) at 850 hPa (b) with Scheme C at 08:00 BT 8 July 2007

4.3　要素场模拟诊断分析

卫星资料的引入,最直接调整了要素场,包括温度场、湿度场、风场等。因此,对比分析引入卫星资料前后,各要素场的改进效果,也十分必要。本文分析了相对湿度、稳定度、散度场、涡度场,考察 AMSU 资料对于各个要素的影响大小。

图 7a 为 2007 年 7 月 8 日 08 时 B 两方案模拟的 850 hPa 相对湿度场相对于 A 方案模拟结果的差值图。从图中可以看出,同化 AMSU 资料后,在整个江苏、安徽北部与湖北东北部都是正的增湿区,这一区域与 8 日的降水区基本一致。正的增湿中心达到了 5%,AMSU 资料的同化对于低层湿度场起到了一定的调整作用。

假相当位温 θ_e 是作为综合表征大气的温度、湿度条件的物理参数,也是天气预报的重要依据。本文分析了同化卫星资料后对于假相当位温的调整作用。图 7b 为 2007 年 7 月 8 日 08 时 850 hPa 上 B 方案相对于 A 方案的 θ_e 增量场。如图所示,同化卫星资料后,32°～34°N 出现了一个纬向的正增量中心带,北部则出现了一个大的负增量区。以 34°N 为界,南北高低能量区 θ_e 水平切变进一步加大,锋区形成于此,降水就在这一锋区前部。这与实况图上锋区的位置、降水区都基本对应。

再分析 300 hPa 和 850 hPa 上的散度增量场。从这两个层次的配置来看,AMSU 资料同化后,在皖苏北地区高层出现了正散度增量中心,散度加强;低层出现了负的散度增量中心,散度减弱,涡度加强。这样的高低空配置,低层涡度增强、辐合加强,高层辐散加强。这种低层流入高层流出的配置能更加促进中低层强烈的上升运动使得对流垂直运动加强,增强水汽对降水的正反馈作用,促进降水强度,并且高低空的正负涡度增量中心位置与实况降水中心基本一致。对于涡度场的模拟,与此结果一致(图略)。

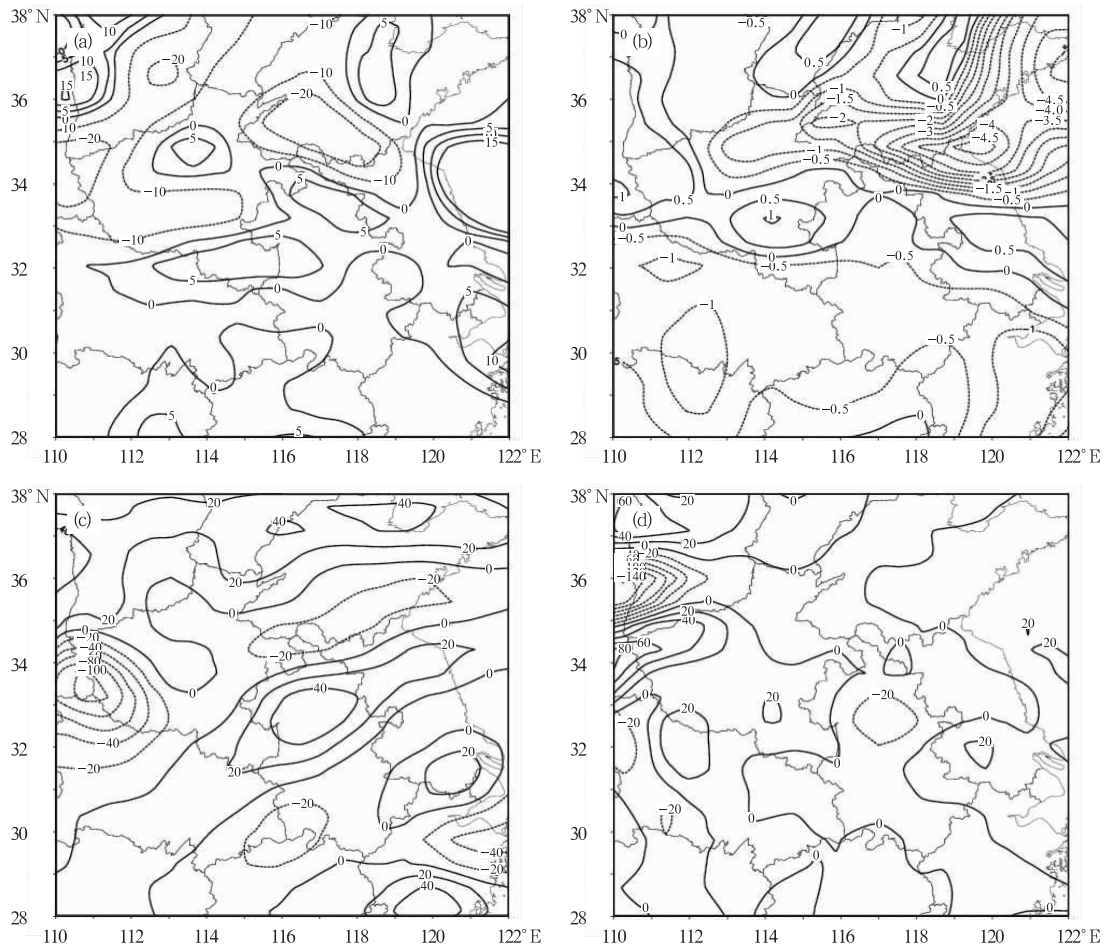


图 7 2007 年 7 月 8 日 08 时 B 方案相对于 A 方案的 850 hPa 相对湿度增量场(a,单位:%)
850 hPa 假相当位温增量场(b,单位:K)、300 hPa(c)与 850 hPa 散度增量场(d,单位:$10^{-6}s^{-1}$)

Fig. 7 B scheme relative to A scheme, the relative humidity increments (a) (Unit: %) and the pseudo-equivalent potential temperature increments (b) (Unit: K) at 850 hPa and divergence increments at 300 hPa (c) and 850 hPa (d) (Unit: $10^{-6}s^{-1}$) at 08:00 BT 8 July 2007

综合以上分析可以得出,加入同化卫星资料比仅仅同化常规资料,对于温湿场以及动力场都有明显的改进作用,尤其是相应的增湿中心、不稳定能量堆积区、上升运动增强区都基本与实况降水中心位置一致。这些要素场的准确信息也将为预报员提供更好的参考依据,对得出准确的预报结论有重要的贡献。

C 方案的降水模拟效果要优于 B 方案,且天气形势场更接近实况。因此再来比较两方案对温湿场的调整情况。从 A、C 两方案模拟的 850 hPa 相对湿度场差值图可以看出(图 8a),如 B 方案的调整情况,整个江苏、安徽北部与湖北东北部都是正的增湿区。不同于方案 B 的是在安徽西部、河南南部的正增湿中心超过了 10%,增湿效果明显。850 hPa θ_e 增量场上,高能区增量与低能区减小量较 B 方案都大,使得锋区能量更强,从而增加了降水强度。

分析 C 方案相对于 A 方案在 300 hPa 和 850 hPa 上的散度增量场(图 8c,d),可以发现,300 hPa 上正的散度增量区仍然对应着 8 日的降水区域,与 B 方案的调整情况基本相同。850 hPa 上的负散度增量中心与高层相对应,较 B 方案区域更大、强度也更强。低层散度减弱、涡度加强,高层散度增强。随之对流上升运动增强,带来更大的降水量。

综合 B、C 方案增量场的分析,可以得出,C 方案没有同化 AMSU-A 地面通道及低层通道,要比 B 方案对于温湿场,以及动力场的改进效果略好。二者对于要素场的调整区域基本相同、增量中心位置也与雨带有很好的对应关系。C 方案的调整强度明显强于 B 方案,这也许是方案 C 模拟的降水强度更强更接近于实况的原因。

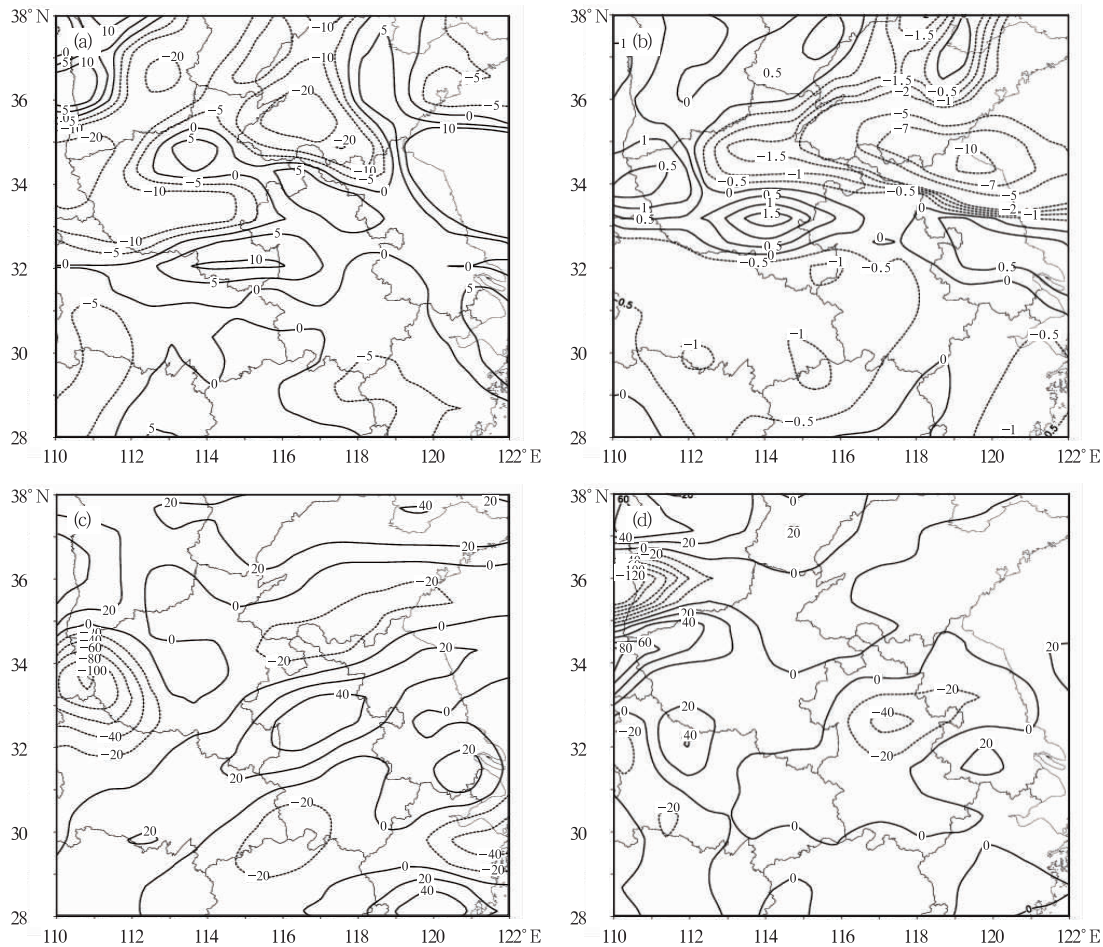


图 8　2007 年 7 月 8 日 08 时 C 方案相对于 A 方案的 850 hPa 相对湿度增量场(a,单位:%)、850 hPa 假相当位温增量场(b,单位:K)、300 hPa(c)与 850 hPa 散度增量场(d,单位:$10^{-6}s^{-1}$)

Fig. 8　C scheme relative to A scheme, the relative humidity increments (a) (unit: %) and the pseudo-equivalent potential temperature increments (b) (unit: K) at 850 hPa, and divergence increments at 300 hPa (c) and 850 hPa (d) (unit: $10^{-6}s^{-1}$) at 08:00 BT 8 July 2007

5　结语

本文采用三维变分同化系统 SSI 以及 T213L31 全球谱模式,设计多种同化方案,通过对 2007 年 7 月 7—9 日江淮地区暴雨过程的模拟对比试验,考察了 T213-SSI 同化预报系统对于 ATOVS 资料的同化应用情况,分析了 ATOVS 资料的应用对极端暴雨事件预报效果的影响,可以得出以下结论:

(1) 长期同化 ATOVS 资料,可以改善降水预报效果,尤其是降水强度。去除 AMSU-A 地面通道以及低空 700 hPa 通道资料的同化效果要优于全部同化,对于暴雨中心的模拟更加接近实况,位置、强度有较明显改进。

(2) 通过连续同化,卫星资料能改进大尺度环境场,其累计改进能得到更好的效果。低层及地面通道资料的剔除,使得中高层形势场对于降水过程的直接影响系统的模拟更加接近实况。

(3) AMSU 资料的引入改进了温湿场和动力场。仅同化 AMSU-A 中高层通道资料与 AMSU-B 资料要比同化 AMSU-A 全部通道资料改进效果要好。增湿区、不稳定能量变高区域,辐合辐散加强区都与实况雨带有很好的对应。

通过本文的研究说明,ATOVS 资料的同化对于提高我国业务数值预报模式 T213L31 对局地暴雨过程的预报效果是可行的。本文仅采用了淮河暴雨一个个例的对比试验,所得结论具有局限性,因此,还需选择更多不同时期、不同区域的个例进行同化分析试验来进行论证,进而调整卫星资料的使用,使得暴雨预报取得更好的效果。

参考文献

[1] Derber J C, W S Wu. The use of TOVS cloud-cleared radiance in the NCEP SSI analysis svstem[J]. Mon Wea Rev, 1998, 126: 2287-2299.

[2] Andrew S, Jones I C G, Thomas H. Data assimilation of satellite-derived heating rates as proxy wetness data into a regional atmosphere mesoscale model Part I: meteorology[J]. Mon Wea Rev, 1998,126(3): 634-645.

[3] Frank H. Assimilation of satellite image data and surface observations to improve analysis of circulations forced by cloud shading contrasts[J]. Mon Wea Rev, 2000. 128(2): 434-448.

[4] Alan E L, George D M. Assimilation of visible-band satellite data for mesoscale forecasting in cloudy condition[J] Mon Wea Rev, 1999, 127(3): 265-278.

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

[6] Bouttier F, Kelly Cz. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var assimilation system[J]. Q J R Meteorol Soc, 2001, 127: 1469-1488.

[7] English S J, Renshaw R J, Dibben P C, et al. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts[J]. Q J R Meteorol Soc, 2000, 126: 2911-2931.

[8] Kozo Okamoto, Masahiro Kazumori, Hiromi Owada. The assimilation of ATOVS radiances in the JMA Global analysis system[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2005, 83(2): 201-217.

[9] Ralph R Ferraro, Fuzhong Weng, Norman C Zhao. NOAA operational hydrological products derived from the advanced microwave sounding unit (AMSU) [J]. IEEE Transactions on Geoscience&-Remote Sensing, 2005, 43 (3): 1036-1049.

[10] Xu J, Wan Q, Wang D. Application of ATOVS radiance data assimilation in prediction of rainstorm over the South China Sea[C]. 2006 Western Pacific Geophysics Meeting 2006.

[11] Liu, Z-Q and Barker, D M. Radiance assimilation in WRF-Var: Implementation and initial results[R]. 7th WRF users workshop, Boulder, Colorado, 19－22 June 2006.

[12] 潘宁,董超华,张文建. ATOVS 辐射率资料的直接变分同化试验研究[J]. 气象学报,2003,61(2): 226-236.

[13] 张华,丑纪范,邱崇践. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析[J]. 科学通报,2004,49 (5): 493-498.

[14] Zhang Hua, Xue Jishan, Zhu Guofu, et al. Application of Direct Assimilation of ATOVS Microwave Radiances to Typhoon Track Prediction[J]. Adv. in Atmos. Sci, 2004, 21 (2): 283-290.

[15] 齐琳琳,孙建华,张小玲,等. ATOVS 资料在长江流域一次暴雨过程模拟中的应用[J]. 大气科学,2005,29: 780-789.

[16] 黄兵,刘建文,钟中,等. 卫星资料变分同化在一次中尺度强暴雨模拟中的应用[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 363-369.

[17] Qi Linlin, Sun Jianhua. Application of ATOVS microwave radiance assimilation to rainfall prediction in summer[J]. Adv Atmos. Sci, 2006, 23(5): 815-830.

[18] 张爱忠,纪飞,崔锦. 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[C]. 2006.

[19] 张利红, 沈桐立, 王洪利. AMSU 资料变分同化及在暴雨数值模拟中的应用研究[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1004-1012.

[20] 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.

[21] 朱国富,薛纪善,张华,等. GRAPES 变分同化系统中卫星辐射率资料的直接同化[J]. 科学通报,2008, 53(20): 2424-2427.

[22] 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.

[23] 王维国,章建成,李想. 2007 年淮河流域大洪水的雨情、水情分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 68-74.

[24] 陶诗言,卫捷,张小玲. 2007 年梅雨锋降水的大尺度特征分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 3-15.

[25] 徐萍. NOAA 卫星 ATOVS 资料反演大气温、湿廓线及其在中尺度气象模式中的同化试验[D]. 中国海洋大学硕士毕业论文,2005.