

文章编号: 2096-1618(2022)03-0308-10

风云三号 C 星微波湿度计资料的全天候同化 在江淮梅雨期降水预报中的应用研究

李 毓¹, 陈科艺¹, 冼智鹏^{2,3}, 陈贞璇¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:梅雨锋系统具有突发性强、发展迅速、容易引起洪涝灾害等特点,其预报一直是气象业务系统中急需解决的重难点问题。基于此,为更好地研究风云资料全天候同化对于改善模式初始场质量,以及提高数值天气预报准确度的效果,选取 2020 年 6 月 20–25 日一次典型的梅雨锋过程进行模拟。基于中尺度 WRF-ARW 模式及 WRF-DA 同化系统,利用 FY-3C 微波湿度计观测资料进行同化试验。试验结果表明:全天候同化试验提高了 FY-3C/MWHS-2 的资料使用率,在减小湿度场、温度场等方面的预报误差起到积极作用,且在梅雨锋降水预报中,减少了降水虚报问题的发生,提高了降水落区分布和降水量级的预报水平,对降水精细化预报和制定防灾减灾措施等工作具有一定的参考价值。

关键词:大气科学;卫星资料同化;风云三号 C 星;微波湿度计;全天候同化;梅雨

中图分类号:P405

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2022.03.011

0 引言

每年 6–7 月的梅雨期暴雨常常带来严重的洪涝灾害,给人民生命财产安全造成极大损害,并且造成灾害的梅雨锋系统突发性强,发生发展十分迅速,在很短时间内很容易造成严重的洪水内涝等情况,关于梅雨降水的预报难度一直很大^[1–2]。

随着数值天气预报迅速发展,资料同化在江淮梅雨期降水预报中的应用研究成为热点,虽然常规观测资料和雷达资料的同化都对降水预报有不同程度的改善^[3–7]。而卫星观测资料具有准连续性、高时空分辨率和全球覆盖率、资料统一性好、误差较常规资料更易订正等优势,是提高数值预报初始场质量,进行同化的理想资料来源。齐琳琳等^[8]通过间接同化和直接同化 ATOVS 评估其对梅雨锋降水的影响,认为直接同化的方式在暴雨落区、雨强的预报上更具有明显的正面效应,在暴雨的数值模拟中应用更加合理有效。郭锐等^[9]模拟了 2007 年 7 月 7–9 日淮河流域的一次暴雨过程,结果表明,同化 AMSU 资料对降水强度及大值区的改善较明显,连续同化比单次同化对降水预报的改善效果更加显著。张同等^[10]同化了 ATOVS 和 IASI 亮温资料对江淮区域暴雨过程进行模拟,结果表明,同化 IASI 资料对于 24 h 和 12 h 降水改善明显,最接近实

况。

以上这些研究都是在晴空条件下进行的同化,但梅雨锋暴雨爆发发展及消亡的全过程与云雨的发生发展有密切关系,采用全天候条件下同化方案,选取能在多云区提供丰富云雨信息的 FY-3C 微波湿度计观测资料作为同化资料,能进一步提高该过程的预报质量。但在全天候同化试验前,由于模式对云雨过程的描述不如晴空条件下准确,会导致其观测背景误差的概率分布呈现较强的非高斯型,不能满足同化所需基本假设。基于此,Geer 等^[11–12]提出观测误差模型,该模型的使用可以根据云量的变化对云雨资料的观测误差进行赋值,从而使云雨资料的概率分布满足高斯分布,实现在全天候条件下直接同化云雨资料。目前,ECMWF^[13]和 JMA^[14]全球业务化的数值预报系统都在使用全天候同化技术,该技术的使用在这些业务化系统中都起到积极作用。另外,全天候同化技术不仅在全球模式中发挥着作用,也被应用在了区域模式中,特别是对于台风的模拟,Xian 等^[15]利用 WRF(weather research and forecasting model)模式及能在全天候条件下模拟辐射的散射板块 RTTOV-SCATT 对风云三号 C 星微波湿度计进行同化,其结果表明,全天候同化对双台风的预报准确率有一定程度的提升。

卫星资料同化在陆面区域的应用比下垫面均匀的海面更复杂,复杂地表发射率真实变化的反映可以切实减小同化和预报结果的偏差。目前,有 3 种获取地

表发射率的方法。第一种是利用发射率模型估计地表发射率。模型需要输入多种数值预报系统中没有或者观测站有但分辨率不够的物理量,因此这种方法的预报效果并不理想^[16-17]。第二种是目前几乎所有数值模式中使用的方法,采用由卫星资料反演出的地表发射率的月平均场。但这种方法并不能反映地表发射率的真实变化,所以也会给同化和预报结果带来较大的偏差。基于此,Karbou 等^[18-19]提出利用微波垂直探测仪器的窗区通道反演动态地表发射率的方法,并且评估了该方法在晴空条件下对数值预报的影响。结果表明,在陆面上使用动态地表发射率反演能有效减小 OMB 的标准差。Chen 等^[20]研究发现在利用风云三号 B 星微波湿度计 MWHS 窗区通道反演的动态地表发射率的条件下,陆地上空同化使用数据的数量有较大程度地增加,尤其是在冰雪覆盖地区,且动态地表发射率反演的使用提高了 3~5 的预报效果。Xian 等^[15]在全天候条件下基于 WRF 区域模式使用动态地表发射率反演技术预报台风进行预报,结果显示全天候条件下的反演结果比气候态地图集更加接近实际的发射率特征,并且改进了台风强降水的预报。

FY3C/MWHS-2 包含了对云雨探测敏感的 118 GHz 通道,是世界上首次应用在极轨气象卫星上的频段。国内外学者在对 FY-3C/MWHS-2 资料进行一系列的质量评估工作^[21-24]的基础上,通过一定的试验也证明了 FY-3C/MWHS-2 资料的同化使用对预报具有一定的积极效应。Xian 等^[15]利用 FY-3C/MWHS-2 资料进行晴空同化和全天候同化试验,结果表明,全天候同化对提高台风和降水的预报均有积极作用。Jiang 等^[25]用循环同化的方式将 FY-3C/MWHS-2 资料同化进 GSI 全球系统中,结果表明,同化 MWHS-2 对 6 h 预报有一定的提升,减小了 0.55%~1% 绝对湿度的观测背景误差的标准差。为了评估全天候同化技术对于江淮梅雨降水的影响,本文选取 2020 年 6 月 19 日 12 时至 25 日 00 时的一次典型的梅雨锋降水过程,在晴空循环同化试验的基础上进行全天候循环同化试验,以评估其对梅雨期暴雨的预报影响。

1 资料与方法

1.1 FY-3C/MWHS-2 资料简介

风云三号 C 星于 2013 年 9 月 23 日在太原卫星发射中心成功发射,其过赤道的时间为当地时间上午 10 点(故为上午星)。FY-3C 上搭载的新一代微波湿度

计(MWHS-2)共有 15 个通道,其中包含 2 个用于降水检测及地表发射率反演的窗区通道(89 GHz 和 150 GHz),8 个温度探测通道(118 通道)及 5 个湿度探测通道(183 通道)。由于微波的波长长、散射小、衰减弱,对于非降水云具有强穿透性,是进行全天候同化的理想观测资料。Li 等^[26]指出:通道 1 和通道 7~10 的最佳信息层在地面,而通道 2~4 最佳信息层在平流层,通道 11~14 的最佳信息分别位于对流层高层、中层和低层。通道配置有效地弥补了对流层中高层湿度探测精度低及常规观测资料缺乏的问题。

1.2 试验情况介绍

选取 2020 年 6 月 10 日至 8 月 2 日梅雨期过程中一次典型的梅雨锋过境带来的强降水过程——6 月 20~25 日的降水过程进行同化试验的研究。同化资料为风云三号 C 星微波湿度计观测资料,同化方式为循环同化,即每 12 h 进行一次同化。为更加充分地利用微波湿度计的观测信息,提升卫星资料的使用率,在晴空循环同化试验的基础上,进行全天候条件下的循环同化试验,试验过程中均启用动态地表发射率反演。由于该个例所在区域为复杂的陆面区域,Karbou 等^[18-19]提出利用微波垂直探测仪器的窗区通道反演动态地表发射率的方法有助于预报能力的提升。

试验中背景场所用的 FNL(final operational global analysis data)资料为 NCEP(national center for environmental prediction)全球再分析格点资料,时间分辨率为 6 h,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。同化的驱动场所用的 FNL 资料为 NCEP 全球 6 h 预报场资料,时间分辨率和水平分辨率分别为 6 h 和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。降水资料为逐小时国家站点资料,其他要素为欧洲中期天气预报中心 ERA5 资料(时间分辨率和水平分辨率分别为 1 h 及 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)和高分辨率业务预报资料(时间分辨率为 6 h)提供。风云三号 C 星微波湿度计观测资料为国家卫星气象中心 FY-3C 微波湿度计 L1 数据,静止卫星资料为 FY-2G 的 1 小时平均相当黑体亮度温度资料。

1.3 观测误差模型

在全天候条件下进行云雨资料的同化过程中,云水区资料的 PDF(probability density function)分布表现很强的非高斯性,而三维变分同化都是以假设观测误差满足高斯分布为前提,因而需对非高斯性的观测背景误差进行订正,Geer 等^[11-12]提出了基于对称云预测算子的观测误差模型,该模型表达式为

$$g(C_{\text{SYM}})=\begin{cases} g_{\text{clr}}, C_{\text{SYM}}\leqslant C_{\text{clr}} \\ g_{\text{clr}}+(g_{\text{cld}}-g_{\text{clr}})\left(\frac{C_{\text{SYM}}-C_{\text{clr}}}{C_{\text{cld}}-C_{\text{clr}}}\right)^2, C_{\text{clr}}<C_{\text{SYM}}<C_{\text{cld}} \\ g_{\text{cld}}, C_{\text{SYM}}\geqslant C_{\text{cld}} \end{cases}$$

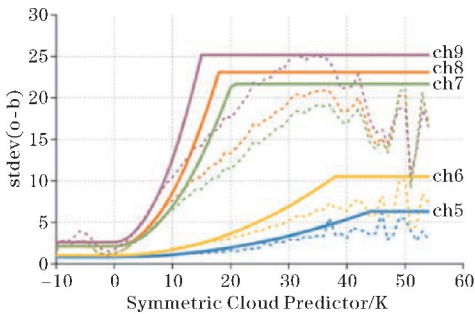
(1)

式中, g_{clr} 、 g_{cld} 、 C_{clr} 、 C_{cld} 分别为晴空同化试验中使用的观测误差值、全天候同化试验中的观测误差及对称云

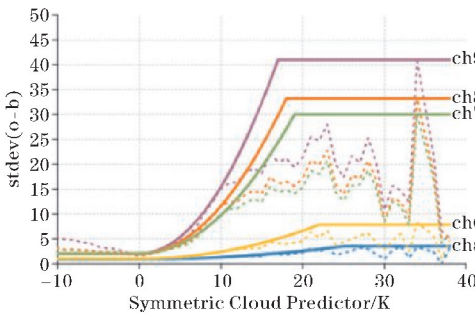
预测算子的最小值和最大值,表 1^[15]为其分别在海洋和陆地上的取值。图 1^[15]为 MWHS-2 通道 5~9 和通道 11~15 观测背景误差的标准差的统计结果(虚线)及根据式(1)所作的观测误差模型(实线),其中观测背景误差的标准差由冬季 1 月和夏季 8 月的晴空试验和全天候试验的观测误差进行统计得出。

表 1 FY-3C/MWHS-2 通道 5~9 和通道 11~15 的观测误差模型参数取值

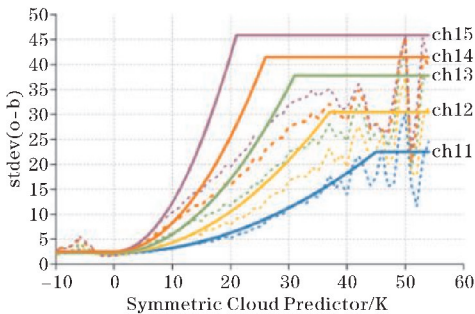
	通道序号	g_{clr}	g_{cld}	C_{clr}	C_{cld}
海洋	5	0.8	6.3	0.0	45.0
	6	1.0	10.5	0.0	39.0
	7	2.1	21.7	0.0	22.0
	8	2.1	23.1	0.0	19.0
	9	2.6	25.2	0.0	16.0
	11	2.3	22.5	0.0	45.0
	12	2.3	30.5	0.0	37.0
	13	2.3	37.8	0.0	31.0
	14	2.5	41.5	0.0	26.0
	15	2.5	45.9	0.0	21.0
陆地	5	0.9	3.5	0.0	26.0
	6	1.0	7.8	0.0	23.0
	7	2.0	30.0	0.0	20.0
	8	2.0	33.2	0.0	19.0
	9	2.0	41.0	0.0	18.0
	11	2.3	18.0	0.0	32.0
	12	2.3	30.0	0.0	32.0
	13	2.3	46.0	0.0	30.0
	14	2.5	55.0	0.0	25.0
	15	2.5	66.0	0.0	23.0



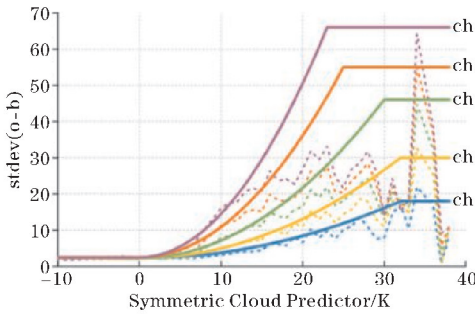
(a)5~9号通道在海洋上观测误差模型统计结果



(b)11~15号通道在海洋上观测误差模型统计结果



(c)5~9号通道在陆地上观测误差模型统计结果



(d)11~15号通道在陆地上观测误差模型统计结果

图 1 FY-3C/MWHS-2 通道 5~9 和通道 11~15 的观测背景误差的标准差的统计结果(虚线)及其对应的观测误差模型(实线)

1.4 地表发射率

地表发射率即在相同温度下地表发出的辐射与黑体辐射之比,不仅取决于频率、入射角和极化等物理量,还受土壤粒径、矿物含量、地表粗糙度、植被属性等地表特征的影响^[28-32]。

本文使用的地表发射率估计有两种:一种是由地表发射率的气候态地图集 TELSEM(the tool to estimate land surface emissivity at microwaves and millimeter waves atlas)直接提供,为气候态的月平均发射率资料。一种由微波窗区通道反演得到的动态地表发射率,其反演算法如下:

$$\varepsilon_{(\theta,\nu)} = \frac{T_b - (T_{(\theta,\nu)}^{\uparrow} + T_{(\theta,\nu)}^{\downarrow}) \Gamma_{(\theta,\nu)}}{(T_s - T_{(\theta,\nu)}^{\downarrow}) \Gamma_{(\theta,\nu)}}$$

式中, $\varepsilon_{(\theta,\nu)}$ 表示在观测天顶角 θ 和频率 ν 下的表面发射率, T_b 为卫星传感器观测到的亮温, T_s 、 $T_{(\theta,\nu)}^{\uparrow}$ 和 $T_{(\theta,\nu)}^{\downarrow}$ 分别为地表温度、地面及大气向下发出的辐射和大气层顶向上发出的辐射, $\Gamma_{(\theta,\nu)}$ 为大气的净透过率。由于江淮流域位于中低纬地区,89 GHz通道对于地表较150 GHz通道更为敏感^[20],因此采用89 GHz通道进行发射率反演并将结果分配给118 GHz和183 GHz通道进行辐射传输计算。当反演成功时,选取由89 GHz的通道1反演出的动态地表发射率值作为计算模拟亮温时使用的发射率,反演失败则采用 TELSEM 上的地表发射率。

2 同化试验

2.1 试验设计

使用 WRF-ARW3.9 版本进行试验,采用 Lambert 投影单层网格区域,模拟区域网格数为300×261,水平分辨率为15 km,区域中心为35.1 °N、111.2 °E。积分区域如图2所示,时间积分步长为60 s,垂直方向上有41个不等距层,模式层顶气压为10 hPa,其他主要的物理过程参数化方案如表2所示。

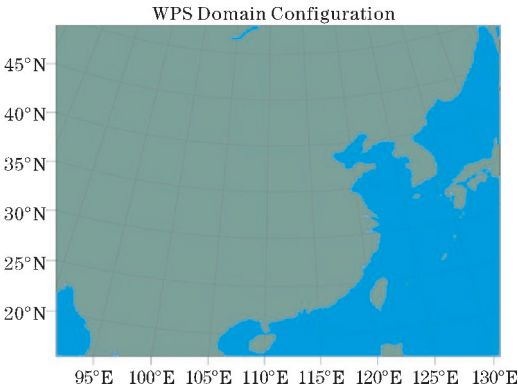


图2 模式模拟区域

表2 WRF 模式主要参数设置

参数	模式设置
微物理方案	Lin 方案 ^[37]
积云对流方案	Tiedtke 方案 ^[38]
辐射方案	RRTMG /RRTMG 长短波辐射方案 ^[39]
边界层方案	MYJ 方案 ^[40]
陆面过程方案	Noah 陆面过程方案 ^[41]

为评估全天候试验对梅雨期降水预报的影响,设置了3组试验,分别为不进行任何同化的控制试验(CONTROL),晴空同化试验(CLEARSKY),以及全天候同化试验(ALLSKY)。控制试验的起报时间为2020年6月19日12时,积分时长为5天12小时,其中前12 h为模式物理过程的初启动时间,而两组同化实验使用的是12 h循环同化方案。在全天候条件下的观测算子采用能够在云雨条件下模拟微波辐射的散射板块 RTTOV-SCATT。其他同化方案的设置如表3所示,关于同化通道的选择,Lawrence等^[21]对FY-3C/MWHS-2进行评估的结果显示,通道13、14的O-B偏差分别为2 K和3 K,明显大于其他通道0.2~0.3 K的偏差,试验采取与ECMWF相同的通道选择方案,即同化通道2,3,4,5,6,7,11,12,15。

表3 同化方案设置

项目	具体设置
同化方式	每12 h循环同化一次
同化时间窗	6 h
同化通道	118 通道+183 通道(8,9,13,14 通道除外)
地表发射率	动态(微波窗区通道动态反演得到)

2.2 质量控制与偏差订正

在进行同化试验之前需要对卫星观测资料进行质量控制,以免观测资料误差过大,质量控制方案如表4所示。为了移除同化系统模拟亮温和观测亮温之间的系统误差,采用两周的WRFDA离线变分偏差订正方案^[33]对FY-3C/MWHS-2资料进行偏差订正。

表4 质量控制方案

名称	检测标准
极值检验	剔除观测亮温小于50 K或大于550 K的观测数据
地表类型检测	剔除所有通道上混合地表上空的观测数据
扫描角检验	剔除观测资料中前5个扫描角的观测数据
绝对偏差检测	剔除偏差订正后O-B大于3倍 $g_{(C_{sym})}$ 的观测数据
地表高度检测	剔除通道11中高度大于1500 m的观测数据
	剔除通道12、13中高度大于1000m的观测数据
	剔除通道13、14中高度大于800m的观测数据
临边检测	剔除通道14、15中纬度大于60°的观测数据
云雨区判断	剔除云水总量(CLWP)大于0.2的观测数据
(只在晴空同化中使用)	剔除通道10中O-B大于5 k(海洋)/3 k(陆地)的观测数据

2.3 模拟结果讨论

2.3.1 资料误差订正

在 ALLSKY 和 CLEARSKY 中, FY-3C/MWHS-2 资料的使用情况有所不同(图 3), 底图为风云 2 号 G 星 2020 年 6 月 20 日 12 时的 TBB 资料, 图中蓝线代表长江和淮河。梅雨锋云带主要集中在江西、湖南等地, 与

同时期的降水落区基本保持一致。绿色点代表进入同化系统的观测资料的覆盖情况, 从图 3 可以看出, 在整个模拟区域中, 图 3(b) 绿色点明显比图 3(a) 密集, 说明全天候条件下进入同化系统中的卫星数据明显多于 CLEARSKY, 并且增加的使用数据大多是携带大量云雨信息的观测资料。这些资料进入到全天候同化系统对提升梅雨降水的预报具有潜在的积极作用。

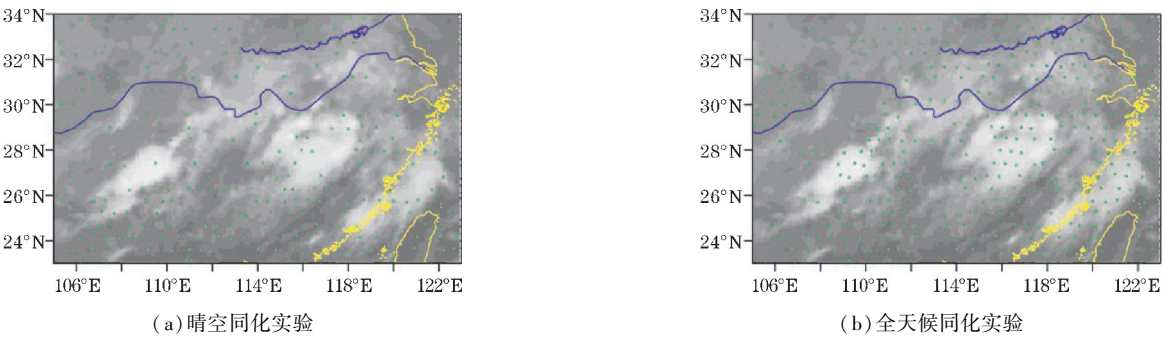


图 3 FY-3C/MWHS-2 通道 11 观测资料的使用情况

图 4 展示的是在晴空条件及全天候条件下由 FY-3C/MWHS-2 通道 15 反演出的地表发射率, 对比图 3 的云图可以看出, 地表发射率的改进区域主要位于在云层较厚的江西、湖南等地区。在全天候条件下, 同化系统更多地接收了云雨信息, 云雨较厚区域的地表发射率受云雨的影响, 接收到的地表发射率值变小, 即颜

色在厚云区变得更浅, 厚云区地表发射率的信息更加丰富。这也进一步说明了在全天候条件下使用动态地表发射率反演能够精确地获取地表发射率的真实变化, 从而提升模拟亮温的计算精度, 对于提升同化效果具有一定的正面作用。

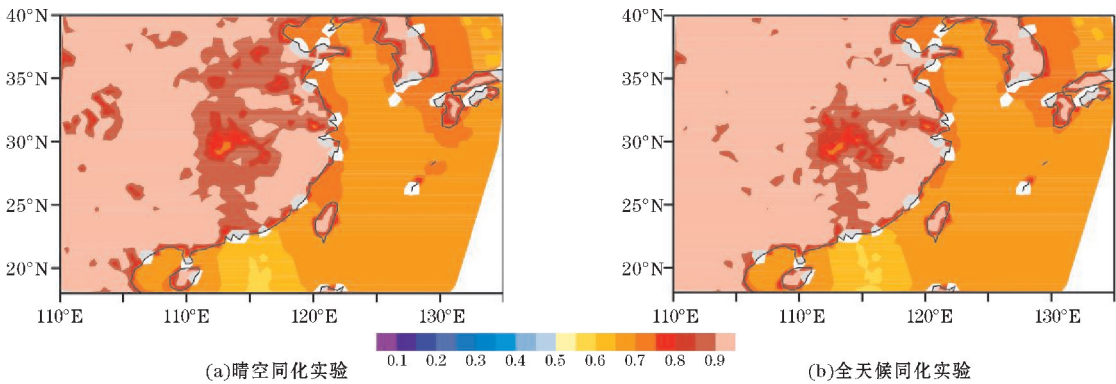


图 4 2020 年 6 月 22 日 12 时通道 15 地表发射率

2.3.2 降水要素模拟

大范围的强降水过程离不开水汽的输送, 所以水汽通量散度分布情况的好坏对于降水模拟十分重要。从图 5(a) (ERA5 资料所表述的水汽通量散度图) 可以看出, 受副高位置影响(图 6 中黄线位置)水汽自南海和孟加拉湾经副高西侧输送到江淮地区, 主要的水汽输送带呈西南-东北走向。图 6 中深蓝色区域代表最大水汽通量的辐合区。ERA5 资料表述出一个负的水汽通量散度大值区, 位于贵州—重庆—湖北一带, 整个水汽通量辐合区呈现东西走向。而 CONTROL 并没

有模拟出这一负中心, 负大值区偏向于安徽江苏一带, CLEARSKY 所模拟的水汽通量相比 CONTROL 有明显改善, 但东面的水汽通量散度的负值明显偏大。ALLSKY 相比前两个试验是最佳的, 模拟了水汽通量辐合带的负中心, 且东面的水汽通量散度负值均小于其他两组试验。另外, 对于风速的模拟来说, CONTROL 和 CLEARSKY 所模拟的风速明显大于 ERA5 资料, ALLSKY 所模拟的风速最接近实况, ALLSKY 对风向的修正也有一定的积极作用。

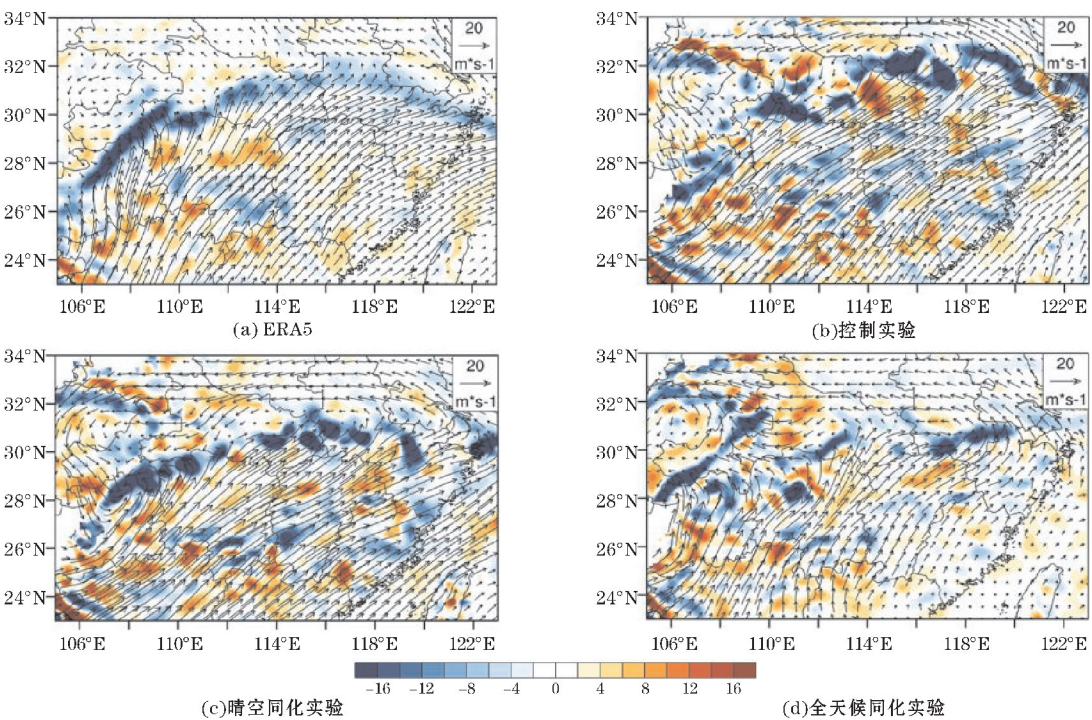


图5 2020年6月20日18时850 hPa水汽通量散度图及矢量风场图(箭头的方向代表风向,箭头大小代表风速)

西太平洋副高对梅雨的发生发展及消退起着非常重要的作用^[34],其强度及位置的变化对水汽的输送均有不同程度的影响。图6中黄线代表ERA5资料所表述的副高588特征线位置(副高位置)。6月20日00时,降水过程开始时,副高西伸脊点在100°E附近,副高的西伸越多,越有利于副高西侧的西南风将更多的水汽输送到江淮流域形成梅雨。随着时间的推移,在22日12时,整个降水较强的时刻,副高位置略微东

退,水汽经过前段时间的累积达到较大值。而在降水快要结束的时候(图6c),副高向东南方向撤退,水汽输送条件变差。图6中红线代表CONTROL,蓝线代表CLEARSKY,绿线代表ALLSKY。CONTROL和CLEARSKY对副高位置的模拟结果相差不大,但随着时间的增加,ALLSKY的优势逐渐显现,最接近ERA5资料所展示的副高588特征线。

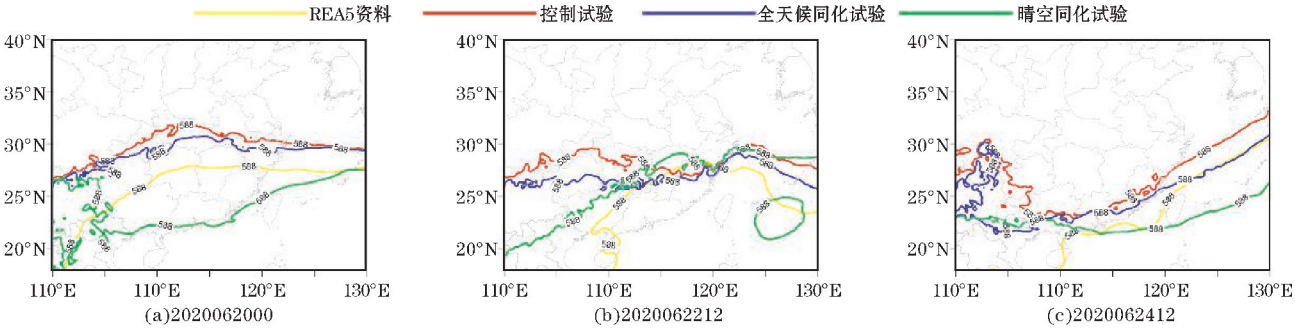


图6 各试验模拟的副高位置(588线)图

图7是500 hPa等压面上温度场的ERA5资料与模式结果的差值分布图,颜色越深代表ERA5资料表征的温度场与模式模拟的温度场差别越大,颜色越接近白色代表其模式模拟的效果越好。从图7可以看出,ERA5表征的温度场与模拟的温度场之差均小于0,即模式模拟出的500 hPa的温度场较ERA5资料普遍偏高。并且,如图7(a)所示CONTROL中存在多个

负的大值区,图7(b)所示该大值区依然存在并且其范围有一定程度的扩大。ALLSKY所模拟的温度场较其他两组实验有明显的改善,对于温度偏高的模拟有一定的修正作用,其温度场是3组中最接近ERA5资料的。说明了全天候同化技术对于改变大气中层温度场具有一定的正面效应。

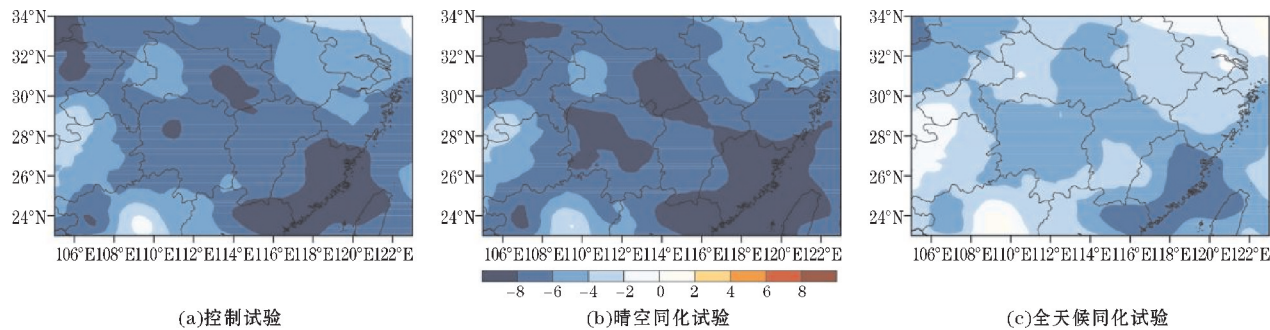


图 7 2020 年 6 月 21 日 12 时 500 hPa 等压面上 ERA5 资料温度场与各试验温度场之差

本次降水过程从 6 月 20 日开始,至 25 日雨量基本结束,图 8 是该过程每 24 h 降水分布图。其中图 8(a)~(e)是国家站站点资料插值得到的降水实况图。图 8(f)~(j)为不进行同化的 CONTROL 所模拟的降水分布图,图 8(k)~(o)是 CLEARSKY 所模拟的降水分布图,图 8(p)~(t)为 ALLSKY 所模拟的降水分布图。如图 8(a)~(e)所示,此次降水过程 24 小时累计降水量超过 100 mm 的地区主要位于贵州、重庆西南部、湖南、湖北、安徽以及云南部分地区。产生暴雨的区域相对较小,主要以中雨大雨过程为主。从图中可以看出,不进行任何同化的 CONTROL 所模拟的降水

量普遍高于观测,整个降水过程都有虚报降水的问题。而 CLEARSKY 对于降水虚报的问题并没有改善,其模拟的降水量级仍然明显大于观测。ALLSKY 对于虚假降水有明显的改善作用,其模拟的降水量级基本与观测一致。另外,ALLSKY 模拟的降水带的走向在降水过程前 4 天基本与观测一致,而 CONTROL 和 CLEARSKY 模拟的雨带位置明显偏南,并且其走向近似于东-西走向,而 ALLSKY 模拟的雨带走向为东北-西南。说明了全天候同化技术对于虚假降水、雨带走向、落区等的预报具有一定的改善作用,可提升对梅雨雨量预报的能力。

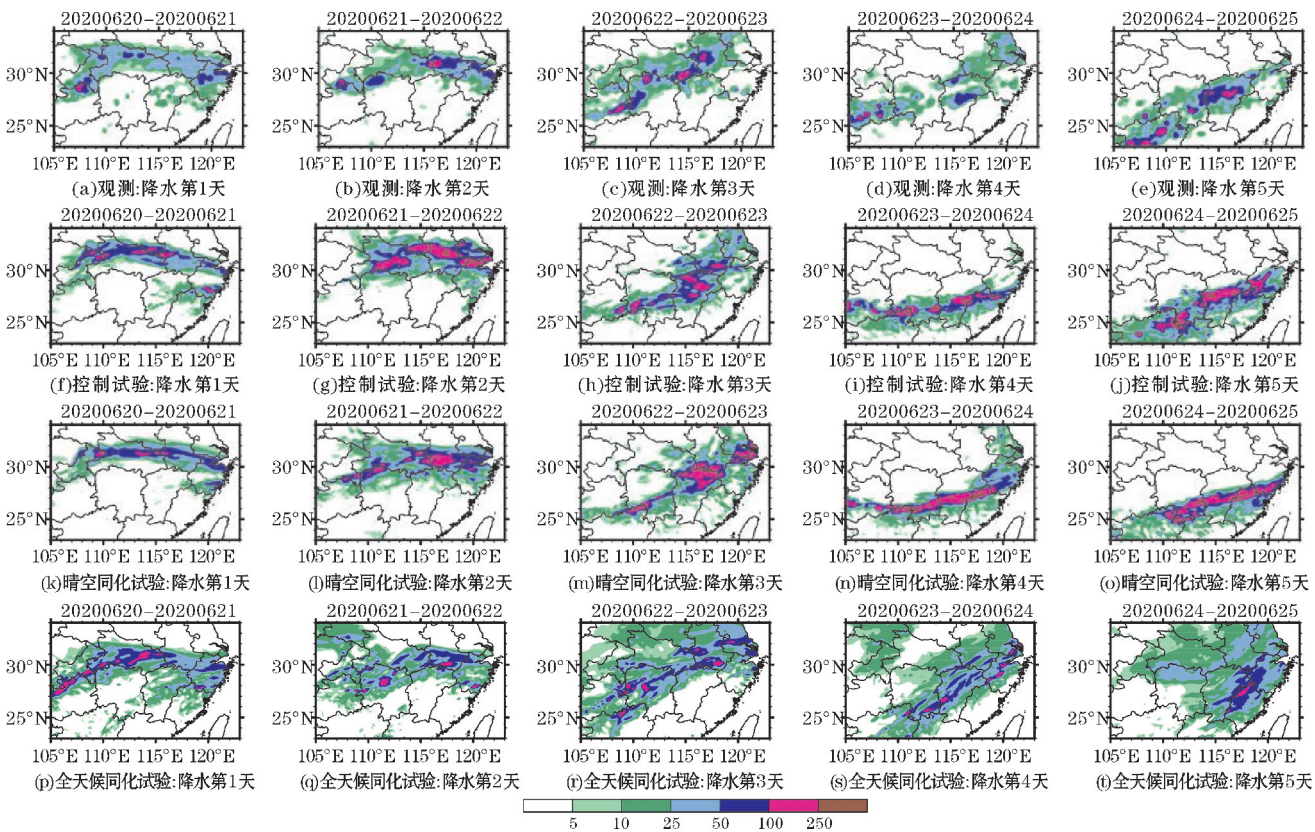


图 8 2020 年 6 月 20 日 00 时至 25 日 00 时得 24 h 累积降水量图

2.3.3 降水预报模式评估

为定量得评估 FY-3C/MWHS-2 资料对于降水预报的影响,选取命中率(POD)、TS 评分、BIAS 评分对

降水结果进行评估。

图 9(a)为整个降水过程(120 h)的 POD 评分,代表模拟出的降水区域占全部实际降水区域的比重,颜

色越偏红代表命中率越高,模拟效果越好。从图中可以看出,ALLSKY 所计算出的 POD 值大于同量级的 CONTROL 和 CLEARSKY 的 POD 值。TS 评分为评估降水较为常用的评分,从图 9 (b) 可以看出, CLEARSKY 对于 CONTROL 有较弱的提升。另外,对于 100 ~ 250 mm 量级的模拟, CLEARSKY 模拟效果较好。图 8 (c) 是 BIAS 评分,主要用来衡量模式对某一量级

降水的预报偏差^[35]。BIAS 值越接近于 1 表明模拟效果越好,即颜色越接近蓝色效果越好。从图中可以看出,对于强降水的预报, CONTROL 的 BIAS 为 9.67, CLEARSKY 高达 14.67, ALLSKY 的 BIAS 评分降低为 4.00,最接近于 1,说明 CONTROL 和 CLEARSKY 都有不同程度的虚报的问题,而 ALLSKY 对于虚假降水的修正具有一定的作用。

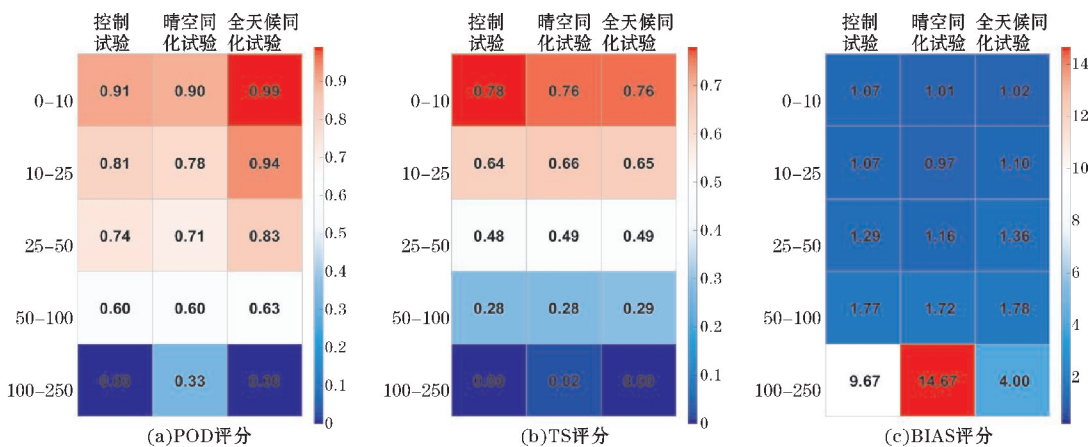


图9 2020年6月20日00时至25日00时的120 h累积降水量的评分图(横坐标代表各降水阈值)

3 结论与讨论

利用对云雨探测敏感的卫星微波资料进行全天候的同化试验能最大限度利用卫星资料,提高数值预报初始场质量。设置3组试验评估全天候同化FY-3C/MWHS-2对梅雨锋暴雨预报的影响。在进行全天候同化试验前,基于Geer等^[11-12]提出的随云量变化而变化得到的观测误差模型对观测背景误差进行计算,移除其中较大的误差,使观测背景误差的概率分布近似符合高斯分布,进而满足现有同化理论的假设和前提。CLEARSKY和ALLSKY均启用窗区通道反演动态地表发射率较陆地表面发射率气候态地图集更能准确表达实际的发射率特征及变化,增加微波遥感器的测量精度。

在ALLSKY中FY-3C/MWHS-2观测资料利用率明显高于CLEARSKY的利用率,且增加的使用数据大多是位于云层较厚区域携带云雨信息的观测资料。基于此,ALLSKY较CLEARSKY和CONTROL表现更积极的效果:ALLSKY对减小大气中层温度场的预报误差有一定改善;对于水汽通量及风场的模拟,从分布范围、走向和极值来说都是最接近实况的;对西太副高的模拟也是3个试验中最接近ERA5资料的。降水的预报主要从定性和定量两个方面进行考量,根据3组试验所模拟的24 h累积降水分布图显示,ALLSKY在整个降水过程中对于大面积虚报降水的问题有明显改善。对于降水的前4天,对雨带走向和雨量量级的修

正作用均优于CLEARSKY。同时,降水评分定量说明了同化试验对于降水有中性偏积极的影响,两组同化试验在命中率方面优于CONTROL, BIAS评分说明了ALLSKY其对于降水虚报的改进作用十分明显。总的来说,全天候条件下同化FY-3C/MWHS-2观测资料对梅雨锋暴雨的预报产生一定的积极影响,为梅雨降水的精细化预报提供新的解决思路,减少暴雨可能带来的生命财产损失。

另外,由于通道8、9、13、14的误差较大,这几个通道的数据没有被同化进入系统,但其携带了更丰富的低层水汽和温度信息,因而在未来过程中,如何订正误差,将其同化进系统也是值得研究的。将全天候同化技术应用于FY-3C的基础上,对FY-3D资料进行同化,增加卫星资料的使用率,评估其共同作用对降水等重要天气过程预报的影响很有必要。

参考文献:

[1] 胡娅敏,丁一汇. BCC——RegCM1.0对1991-2005年江淮梅雨季的数值模拟[J]. 科学通报, 2010,55(6):490-496.

[2] Sun J,Zhang Y,Liu R,et al. A Review of Research on Warm-Sector Heavy Rainfall in China[J]. Advances in Atmospheric ences,2019,36(12):1299-1307.

[3] 许小永,刘黎平,郑国光. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验[J]. 大气科学, 2006(4):712-728.

- [4] 王叶红,赖安伟,赵玉春.降水资料同化在梅雨锋特大暴雨个例模拟中的应用研究[J].气象学报,2012,70(3):402-417.
- [5] 刘寅,何光鑫,刘佳伟,等. Analysis of the effect of 3dvar and ensrf direct assimilation of radar data on the forecast of a heavy rainfall event[J]. Journal of Tropical Meteorology,2016,22(03):413-425.
- [6] Hongli Li, Xiangde Xu, Yang Hu, et al. Miglietta. Assimilation of Doppler Radar Data and Its Impact on Prediction of a Heavy Meiyu Frontal Rainfall Event[J]. Advances in Meteorology,2018.
- [7] Anwei Lai, Jinzhong Min, Jidong Gao, et al. Assimilation of Radar Data, Pseudo Water Vapor, and Potential Temperature in a 3DVAR Framework for Improving Precipitation Forecast of Severe Weather Events[J]. Atmosphere,2020,11(2).
- [8] 齐琳琳,孙建华,张小玲. 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(5):780-794.
- [9] 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.
- [10] 张同,鲍艳松,陆其峰. IASI 卫星资料同化对江淮暴雨预报的试验研究[J]. 科学技术与工程,2016,16(6):9-16.
- [11] Geer A J, P Bauer. Enhanced use of all-sky microwave observations sensitive to water vapour, cloud and precipitation[R]. ECMWF Technical Memoranda,2010:620.
- [12] Geer A J, P Bauer. Observation errors in all-sky data assimilation[J]. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.,2011,137(661):2024-2037.
- [13] Bauer P, A J Geer, P Lopez, et al. Direct 4D-Var assimilation of all-sky radiances. Part I: Implementation[J]. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.,2010,136(652):1868-1885.
- [14] Kazumori M, T Kadowaki. Development of an all-sky assimilation of microwave imager and sounder radiances for the Japan Meteorological Agency global numerical weather prediction system. [R] 21st Int. TOVS Study Conf., Darmstadt, Germany, International ATOVS Working Group,2017:1-9.
- [15] Zhipeng Xian, Keyi Chen, Jiang Zhu. All-Sky Assimilation of the MWHS-2 Observations and Evaluation the Impacts on the Analyses and Forecasts of Binary Typhoons[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2019,124(12):6359-6378.
- [16] Prigent C, Aires F, Rossow W B. Land surface microwave emissivities over the globe for a decade[J]. Bull. Amer. Meteor. Soc.,2006,87(11):1573-1584.
- [17] 钱博,陆其峰,杨素英,等. 卫星遥感微波地表发射率研究综述[J]. 地球物理学进展,2016(3):960-964.
- [18] Karbou F, Gérard E, Rabier F. Global 4D-Var assimilation and forecast experiments using AMSU observations over land. Part-I: Impact of various land surface emissivity parameterizations[J]. Weather and Forecasting,2010,25(1):5-19.
- [19] Karbou, Fatima, Rabier, et al. Global 4DVAR Assimilation and Forecast Experiments Using AMSU Observations over Land. Part II: Impacts of Assimilating Surface-Sensitive Channels on the African Monsoon during AMMA[J]. Weather and Forecasting,2010,25(1):5-19.
- [20] Keyi CHEN, Niels BORMANN, Stephen ENGLISH, et al. Assimilation of Feng-Yun-3B Satellite Microwave Humidity Sounder Data over Land[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2018,35(3):268-275.
- [21] Lawrence H, Bormann N, Geer A, et al. An evaluation and assimilation of FY-3C MWHS-2 at ECMWF[R]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Reports,2015.
- [22] Lu Q F, Lawrence H, Bormann N, et al. An evaluation of FY-3C satellite data quality at ECMWF and the Met Office[R]. ECMWF Technical Memoranda,2015.
- [23] Lawrence H, Bormann N, Geer A J, et al. Evaluation and Assimilation of the Microwave Sounder MWHS-2 Onboard FY-3C in the ECMWF Numerical Weather Prediction System[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2018:1-34.
- [24] Fabien Carminati, Brett Candy, William Bell, et al. Assessment and Assimilation of FY-3 Humidity Sounders and Imager in the UK Met Office Global Model[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2018,35(8):942-954.
- [25] Lipeng Jiang, Chunxiang Shi, Tao Zhang, et al. Evaluation of Assimilating FY-3C MWHS-2 Radiances Using the GSI Global Analysis System[J]. Remote Sensing,2020,12(16).
- [26] Li, Qin, Liu. A new generation of Chinese FY-3C microwave sounding measurements and the initial assessments of its observations[J]. International Journal of Remote Sensing,2016,37(17):4035-4058.
- [27] Parrish D F, Derber, J C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. Monthly Weather Review,

- 1992,120(8):1747–1763.
- [28] Prabhakara C, Dalu G. Remote sensing of the surface emissivity at $9\mu\text{m}$ over the globe [J]. *Geophys. Res.*, 1976, 81(21):3719–3724.
- [29] Salisbury J W, D'Aria D M. Emissivity of terrestrial materials in the $8\sim 14\mu\text{m}$ atmospheric window [J]. *Remote Sens, Environ.*, 1992, 42(2):83–106.
- [30] Wilber, Kratz D P, Gupta S K. Surface emissivity maps for use in satellite retrievals of longwave radiation [R]. NASA /TP-1999-209362. Greenbelt, MD: NASA, 1999.
- [31] Prigent C, Wigneron J P, Rossow W B, et al. Frequency and angular variations of land surface microwave emissivities: Can we estimate SSM /T and AMSU emissivities from SSM /I emissivities [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, 38(5):2373–2386.
- [32] Zhou L H, Goldberg M, Barnet C, et al. Regression of surface spectral emissivity from hyperspectral instruments [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, 46(2):328–333.
- [33] Harris B A, Kelly G. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation [J]. *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(574):1453–1468.
- [34] 毕宝贵, 章国材, 李泽椿. 2003年淮河洪涝与西太副高异常及成因的关系 [J]. *热带气象学报*, 2004, 20(5):505–514.
- [35] Kong F, Xue M, Thomas K, et al. Real-time storm-scale ensemble forecast experiment analysis of 2008 spring experiment data [C]. 24th Conference on Several Local Storms, Amer Meteor Soc, Savannah, 2008.
- [37] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(6):1065–1092.
- [38] Tiedtke M. A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models [J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(8):1779–1800.
- [39] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008:13103.
- [40] Janjic Z I. The Step-Mountain Eta Coordinate Model-further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(5):927.
- [41] Tewari M, Chen F, Wang W, et al. Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model [R]. In 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, 2004.

The Evaluation of All-Sky Assimilation of FY-3C/MWHS-2 on Mei-yu Forecasts over Jianghuai Region

LI Yu¹, CHEN Keyi¹, XIAN Zhipeng^{2,3}, CHEN Zhenxuan¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The characteristics of mei-yu frontal which is sudden to occur, develops rapidly and is easy to cause flood disaster, increase the difficulty of predictions makes the accurate forecasting of mei-yu frontal rainfall an urgent and challenging issue. Therefore, in order to study the effect of all sky assimilation on offering adequate information for the NWP initial fields and improving the accuracy of NWP, a typical mei-yu front process from June 20 to June 25, 2020 is selected for simulation. Based on the mesoscale WRF-ARW model and WRFDA assimilation system, the FY-3C microwave hygrometer observation data is used to conduct an assimilation test. The test results show that: The all-weather assimilation test has increased the data utilization rate of FY-3C/MWHS-2, and played a positive role in reducing the forecast errors in the humidity field and temperature field. Moreover, in the mei-yu front precipitation forecast, it has reduced the occurrence of precipitation false alarms. It also improves the forecasting level of precipitation area distribution and precipitation level, and has certain reference value for the work of precise precipitation forecasting and the formulation of disaster prevention and mitigation measures.

Keywords: atmospheric science; satellite data assimilation; FY-3C; MWHS-2; all-sky assimilation; mei-yu rainfall