

杨袁慧, 师春香. 2015. 土壤湿度对卫星辐射率资料直接同化的影响 [J]. 大气科学, 39 (1): 37–46, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.13281. Yang Yuanhui, Shi Chunxiang. 2015. The impact of soil moisture initialization on the direct assimilation of satellite radiance data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 37–46.

土壤湿度对卫星辐射率资料直接同化的影响

杨袁慧¹ 师春香^{2,3}

1 北京市门头沟区气象局, 北京 102300

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 国家气象信息中心, 北京 100081

摘 要 本研究利用 WRF 模式及其三维变分同化系统实现了对 NOAA-16 AMSU-A 微波资料的直接同化, 针对 2010 年 6 月 19 日江西地区的一次强降水过程开展模拟与同化试验, 并利用中国区域土壤湿度同化系统 (CLSMDAS—China Land Soil Moisture Data Assimilation System) 输出的土壤湿度值替换 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 资料中的土壤湿度, 研究土壤湿度初值对辐射率资料直接同化中观测场与背景场偏差调整的影响。结果表明: 采用 CLSMDAS 输出土壤湿度初值条件下模拟的亮温值与实际观测值更为接近, 经过质量控制和偏差订正后更多的观测资料能够进入到同化系统中, 说明改进的土壤湿度初值条件下观测算子的计算值得到正的调整, 对低层地表通道的改进效果明显, 尤其以 50.3 GHz 的窗区通道 3 的结果最为理想; 针对此次强降水过程中 24 h 累积降水分布的模拟结果, CLSMDAS 输出土壤湿度初值条件下同化 AMSU-A 资料, 能够较为准确的把握整个雨带的走向、大雨以上级别降水的落区范围、降水中心落区及强度等。说明准确的土壤湿度初值能够改进卫星辐射率资料的同化结果, 进而提高数值模式的模拟预报能力。

关键词 AMSU-A 资料 直接同化 土壤湿度初值 OMB (观测场与背景场的偏差)

文章编号 1006-9895(2015)01-0037-10

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1406.13281

The Impact of Soil Moisture Initialization on the Direct Assimilation of Satellite Radiance Data

YANG Yuanhui¹ and SHI Chunxiang^{2,3}

1 *Mentougou Meteorological Bureau, Beijing 102300*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

3 *National Meteorological Information Science, Beijing 100081*

Abstract This study conducted direct assimilation experiments of microwave remote sensing data AMSU-A with the mesoscale numerical weather prediction model WRFV3.3.1 and its 3DVAR system. Our numerical simulation and assimilation experiment research focused on a heavy rainfall event that occurred at Jiangxi Province on June 19, 2010. We changed the soil moisture value in the initial field of the model and analyzed the impact of improved soil moisture accuracy on the model simulation and the directly assimilated emissivity data. Moreover, we adjusted the deviations in the observational data and the background conditions under different soil moisture conditions. The results show that: The output of the China Land Soil Moisture Data Assimilation System (CLSMDAS), after adjusting the soil moisture initial

收稿日期 2013-10-12; 网络预出版日期 2014-06-12

资助项目 财政部/科技部公益性行业科研专项 GYHY201306045、GYHY201306022、GYHY201206008, 国际科技合作与交流专项 2011DFG23150

作者简介 杨袁慧, 女, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星资料同化、数值天气预报等方面的研究工作。E-mail: yhyang871@yeah.net

通讯作者 师春香, E-mail: shicx@cma.gov.cn

condition, simulates brightness temperature values that are much closer to actual observations. Much more observational data can be entered into the assimilation system after quality control and bias correction, so the improved soil moisture initial condition can be positively adjusted, especially in window channels such as band 3, with a frequency of 50.3 GHz. Soil moisture from the output of the CLSMDAS can better represent the trend of the rain belt, the drop zone of heavy rain, and the rain center and intensity. All these show us that more accurate initial soil moisture values can improve the results of satellite data assimilation, and thus increase the numerical model forecasting capability.

Keywords AMSU-A data, Direct assimilation, Soil moisture initialization, OMB (observation minus background)

1 引言

数值预报的准确性主要依赖于数值模式本身的完善程度和数值模式初始场的准确程度,随着数值模式的不断精细化发展,初始场的准确性对预报结果的影响越来越重要。近年来,卫星辐射率资料在气象领域发挥出越来越重要的作用,已成为数值预报所用观测资料的主体,在数值模式中同化卫星辐射率资料来改善数值预报的初始场可以极大地提高预报的准确率。然而在目前的技术水平下,由于受地表辐射、云和降水等的影响,大量的卫星资料在预处理过程中被剔除掉而没能被同化系统使用起来,根据欧洲中期天气预报中心的研究(董佩明等, 2008),同化系统分析使用的卫星资料数量仅占预处理的卫星资料数量的 2%多一点,大大减小了资料的利用率,造成资源的浪费。

众所周知,陆地表面是大气下边界中既重要又复杂的一个部分,陆面与大气及其他圈层之间进行的各种时空尺度的相互作用,以及动量、能量、水汽等物理量的交换和辐射传输对大气环流及气候状况产生极大的影响(马红云等, 2009)。土壤湿度作为陆气相互作用过程中的一个重要物理参数,在陆地尺度上对大气的的影响甚至超过海面温度,它可以通过改变地面蒸散、径流以及地表热通量等来改变大气低层的水热输送,进而影响天气过程,是值得关注的的一个重要参数。许多研究(Chen et al., 1997; Chen and Dudhia, 2001; Cassardo et al., 2002; Zhao et al., 2006; 李安泰等, 2012)已经表明了土壤湿度在中尺度模拟中的重要性,土壤湿度的初始化对中尺度模式尤为重要,不合适的初始值可能会导致输出结果的失真,甚至影响地球系统过程的相互作用等(赵得明, 2005)。

由于地表信息的复杂和不确定性影响,卫星资料的同化结果并没有达到预期的效果,所以在同化过程中,以往的研究通常会将对地表比较敏感的低层通道信息剔除掉,以减少对同化效果的负面影

响。然而这样的处理方式大大减少了卫星资料的使用率,如何将低层通道的资料利用起来,增加资源的使用率是本文的主要研究问题。本文从土壤湿度初值着手,利用 WRF (Weather Research & Forecasting) 模式及其三维变分同化系统实现 NOAA-16 AMSU-A 微波资料的直接同化,并针对江西地区的一次强降水过程开展同化及模拟试验研究,在此基础上改变土壤湿度初值,关注不同的土壤湿度初值对观测场与背景场偏差的调整情况,分析改进的土壤湿度初值对辐射率资料直接同化与模式模拟结果的影响,以期进一步提高卫星辐射率资料的使用率及其对模式模拟的正效应。

2 同化系统及资料

2.1 数值模式

本文主要采用中尺度数值预报模式 WRFV3.3.1、同化系统 WRFDA (WRF Data Assimilation) 和通用辐射传输模式 CRTM (Community Radiative Transfer Model)。

WRF 模式是由美国环境预测中心和美国国家大气研究中心等联合开发的新一代中尺度数值天气预报模式,现已广泛应用于各种研究与业务预报中。与前一代中尺度数值预报模式 MM5 相比,WRF 模式考虑了比较详细的陆面过程,能描述不同下垫面的热量、水分等的传输过程,并将其耦合到边界层参数化模式中,加强了边界层物理过程的模拟,进而完善了整个模式的模拟性能 (Joseph, 2004)。

同化系统 WRFDA 为 WRF 模式中的三维变分同化系统,具有支持并行计算和系统扩展功能的软件体系架构,适用范围广,从几公里的区域中尺度模拟到数千公里的全球尺度的模拟。系统主要包括参数读取、背景场及背景误差协方差设置、观测值设置、观测与背景的差值 (O-B) 计算、目标函数最小化求解、分析值计算与输出等部分。目前的同化系统中增加了辐射率资料的直接同化模块,利用

CRTM 模式作为观测算子，可以实现辐射率资料的直接同化。

2.2 AMSU-A 资料

全功率微波扫描辐射计 AMSU-A 由两个分离部件组成，共 15 个观测通道，星下点分辨率为 45 km，每条扫描线上有 30 个扫描点，主要探测大气温度的垂直结构。

表 1 给出了 AMSU-A 的光谱通道特征以及各通道的主要探测目的（张华等，2004），发现其 1~4 通道和 15 通道的峰值能量贡献高度在地表处，由于地表状况的复杂性，很难准确计算出地表辐射率，而辐射传输模式对卫星辐射率的模拟在很大程度上取决于地表辐射率的计算准确度，因此受地表辐射影响较大的低层通道的探测资料实际很少被同化系统真正使用起来，减小了资料的使用率，造成资源的浪费，同时也大大降低了卫星资料在同化系统中的效用及其对数值模式模拟预报能力的贡献等。

表 1 AMSU-A 各通道光谱特征和主要探测目的

Table 1 Spectral characteristics and main detection purpose of each channel of AMSU-A

	通道 序号	中心频率/ Hz	主要吸 收成分	峰值能量 贡献高度	主要探测目的
AMSU-A2	1	23800	H ₂ O	地表	地表特征、可降水等
	2	31400	窗区	地表	地表特征、可降水等
AMSU-A1	3	50300	O ₂	地表	表面发射率
	4	52800	O ₂	地表	大气温度
	5	53596±115	O ₂	700 hPa	大气温度
	6	54400	O ₂	400 hPa	大气温度
	7	54940	O ₂	270 hPa	大气温度
	8	55500	O ₂	180 hPa	大气温度
	9	$F_0=57290.344$	O ₂	90 hPa	大气温度
	10	$F_0±217$	O ₂	50 hPa	大气温度
	11	$F_0±322.2±48$	O ₂	25 hPa	大气温度
	12	$F_0±322.2±22$	O ₂	12 hPa	大气温度
	13	$F_0±322.2±10$	O ₂	5 hPa	大气温度
	14	$F_0±322.2±4.5$	O ₂	2 hPa	大气温度
	15	89000	H ₂ O	地表	地表特征、可降水等

2.3 陆表土壤湿度数据

师春香等（2011）基于集合卡尔曼滤波（张生雷等，2008）及美国国家大气研究中心 NCAR 的陆面过程模型 CLM3.0 开发建立了中国区域土壤湿度同化系统 CLSMDAS (China Land Soil Moisture Data

Assimilation System)，以风云 2 号 (FY2) 静止气象卫星的小时降水（师春香和谢正辉，2008）和地面入射太阳辐射产品作为大气驱动数据，并结合 AMSR-E 卫星反演的土壤湿度产品以及地面的土壤湿度观测资料，应用于中国区域陆面土壤湿度同化试验中。朱晨等（2013）对 CLSMDAS 输出的土壤湿度数据进行定性与定量化的综合评估，利用全国 778 个农业气象土壤湿度观测站的观测数据对该系统输出的 2005~2010 年同化土壤湿度数据集进行精度检验，验证结果表明：同化系统的输出结果能较好的体现我国土壤湿度的时空分布特征，其干湿程度变化与观测基本保持一致；在对 2009 至 2010 年我国西南地区冬春干旱的连续监测中可以看到，模拟结果可以比较准确地反映出干旱地区的范围、量值和干旱中心，在空间和时间分布上与国家气候中心的旱涝检测图有一定的一致性。

3 试验个例及试验方案

3.1 天气过程与天气形势

江西省位于我国长江中游南岸的鄱阳湖流域，是冷暖空气经常交汇的地带，加上离海洋较近，海洋暖湿气流输送的充沛水汽，这里的成云致雨条件较好，暴雨频繁、危害严重。尤其汛期，在东亚季风的影响下，北方南下的冷空气与季风带来的强盛西南暖湿急流构成冷暖锋的交汇，是造成暴雨天气过程的主要影响系统。2010 年 6 月 19 日发生在江西地区的一次强降水过程，发生范围大、发展强度大、降水期集中，强降水中心日累积量达 332.4 mm，造成了严重的灾情。

分析天气形势，此次强降水是因为北方冷空气南下带来大量干冷空气，同时西南暖湿气流不断发展强盛带来大量暖湿气流，冷暖两股气流相遇导致对流迅速发展；且中低层存在明显的水汽输送通道，都是形成强降水的有利条件。图 1a 给出 19 日 00 时（协调世界时，下同）500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场叠加图，可以看出中高纬的低压槽位于我国东北地区，并一直延伸到江淮地区，东北冷涡不断生成，东移南压过程中不断甩下冷空气，而沿副热带高压脊线的北侧不断有暖湿空气输送，因而形成了冷暖空气的交汇；在风场实况图上，西南暖湿气流不断从海上输送暖湿空气，使得江西地区的低层冷暖空气交汇明显，且切变线一直维持在江西中北部地区，这些因素共同作用产生了较强的辐

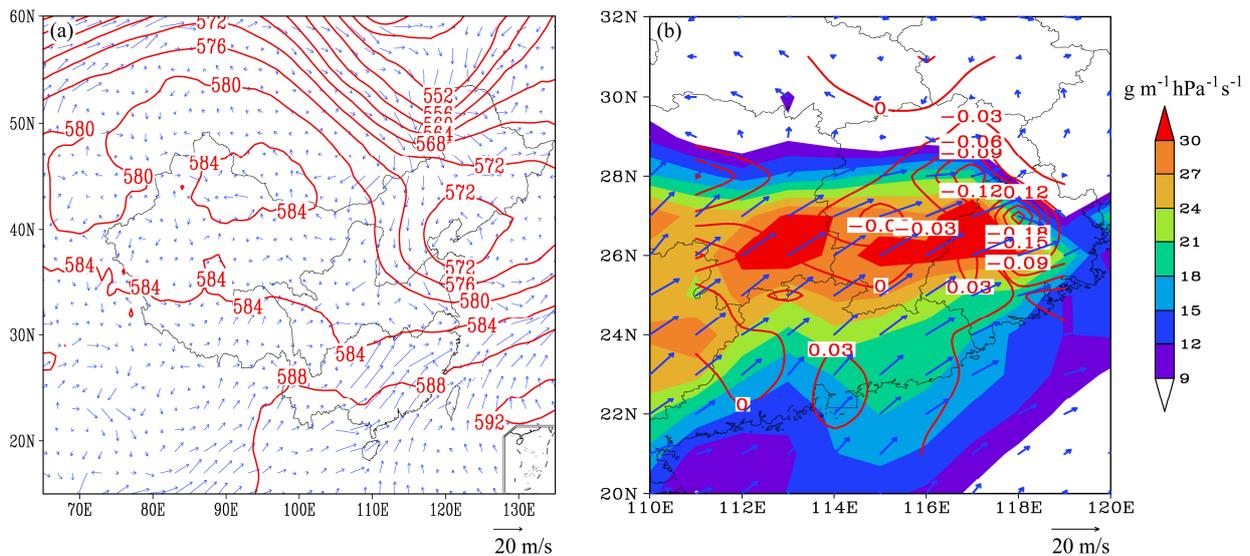


图1 2010年6月19日00时(a)500 hPa位势高度场(单位: dagpm)和850 hPa风场(单位: m s⁻¹)叠加图以及(b)850 hPa水汽通量和水汽通量散度叠加图(箭头表示850 hPa风场; 填色图为水汽通量, 单位: g m⁻¹ hPa⁻¹ s⁻¹; 等值线图为水汽通量散度, 单位: 10⁻³ g m⁻² hPa⁻¹ s⁻¹)

Fig.1 (a) The 500-hPa geopotential height (unit: dagpm) and 850-hPa wind field at 0000 UTC 19 June 2010 (unit: m s⁻¹), (b) the composite chart of moisture flux (unit: g m⁻¹ hPa⁻¹ s⁻¹) and moisture flux divergence (unit: 10⁻³ g m⁻² hPa⁻¹ s⁻¹)

合上升运动, 造成此次持续性降水过程。图1b给出19日00时850 hPa水汽通量和水汽通量散度叠加图, 可以看出, 从19日00时开始在850 hPa高度上存在一个宽的舌状水汽通量高值, 从而形成较强的水汽通道; 水汽通量散度图上, 在江西东北部存在一个西北—东南向一直延伸到福建的负值中心, 表明该地存在较强的水汽辐合, 有利于强降水的产生。

3.2 强降水实况

图2给出19日00时至20日00时的24 h累积降水量实况分布图, 实况资料为国家气象信息中心提供的中国地面逐日降水量0.25°网格数据, 该数据的来源是全国2400多台站的逐日降水量得到的网格产品。由图可以看出, 实际降水主要位于赣北南部和赣中地区, 主要呈带状分布在浙赣铁路沿线一带及其以南地区, 西部地区的降水范围明显大于东部地区的降水范围; 降水的大值中心位于抚州北部、鹰潭以及南昌交界的地区, 最大雨量值达到270 mm以上。从各站点的实际统计结果来看, 此次过程全省的平均降雨量达84.5 mm, 降水量普遍达100~300 mm, 余江、东乡、进贤、资溪等站先后出现24 h降水量历年本月最大值, 强降水造成了严重的洪涝和地质灾害。

3.3 试验方案设计

模式的初始背景场及边界条件采用 NCAR

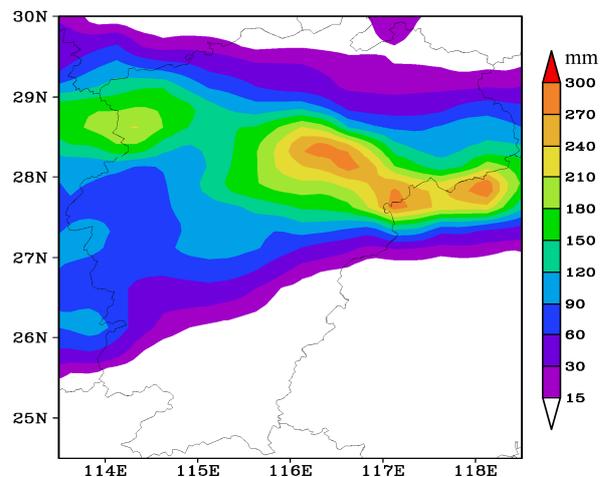


图2 6月19日00时~20日00时24 h累积降水量实况(单位: mm)
Fig. 2 Observed 24-h rainfall from 0000 UTC 19 June to 0000 UTC 20 June (unit: mm)

(National Centers for Atmospheric Research) 提供的1°×1°每日4次的NCEP FNL (Final) 全球分析场资料 ([http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/\[2011-07-08\]](http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/[2011-07-08])), 试验采用双重嵌套方式, 粗网格为细网格提供边界条件, 模式的水平分辨率为30 km和10 km, 垂直方向均考虑28层, 微物理过程选用WSM3方案, 边界层选用YSU方案, 积云对流选用Kain-Fritsch方案, 长波辐射和短波辐射分别为RRTM方案和Dudhia方案。

同化试验中同化时刻为 19 日 00 时，同化时间窗区为 3 h，采用热启动方式，用上一循环的分析场作为初猜场，融合卫星观测资料得到中尺度背景场。首先从 18 日 18 时开始通过 WRF 模式积分 6 h（启动过程），得到 19 日 00 时的预报场作为初猜场，在 WRF-3DVar 同化系统中加入 AMSU-A 资料进行同化试验，得到相关的分析场以及更新的边界文件，将更新后的结果作为模式 00 时刻的初始场和边界条件进入到模式中，模式继续向前积分 24 h 得到 20 日 00 时的模拟结果，具体的试验时间示意图如图 3 所示。

在数值模拟中应用辐射率资料，其目的是要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（齐琳琳等，2005）。为了分析卫星辐射率资料对初始背景场的调整作用，并比较不同土壤湿度初值对 AMSU-A 辐射率资料同化效果的影响，本文共设计 4 组试验（见表 2）来开展研究。同化试验的初始背景场均采用模式的 6 h 预报结果，试验主要分为两大类：其一为 NCEP 初始土壤湿度条件下的试验，A 方案为控制试验一（control1），B 方案为 AMSU-A 同化试验（amsua1）；其二为 CLSMDAS 初始土壤湿度条件下的试验，C 方案为控制试验二（control2），D 方案为改进条件下 AMSU-A 同化试验（amsua2）。试验中使用系统提供的 NCEP 背景误差协方差（cv_option=3），它是一个全球的背景误差场，适用于任何区域，控制变量包括流函数、非平衡速度势、非平衡温度、非平衡地面气压和假相对湿度五个部分。通过对比试验发现，最小化收敛条件设置为 $\text{eps}=0.005$ 是比较理想的，能够较快的达到收敛，且得到更优的估计值。

表 2 同化试验方案设计

Table 2 Different assimilation experiment schemes

编号	试验方案	初始背景场	观测资料
A	control1	NCEP 初始场	不同化观测
B	amsua1	6 小时预报	同化 AMSU-A
C	control2	CLSMDAS 初始场	不同化观测
D	amsua2	6 小时预报	同化 AMSU-A

3.4 观测资料的质量控制

由于受天气条件、下垫面状况、地理位置、观测条件等的影响，卫星观测可能会存在较大的误差，在同化前需要进行观测资料的质量控制，将观测算子不能准确模拟的观测剔除，缩短同化过程的

收敛时间，减小同化结果的误差。

粗检验：AMSU 探测的大气亮温合理范围值在 150~350 K 之间，需要将误差超过给定范围（-20~20 K）的通道观测剔除；将卫星天顶角的绝对值大于 45°的通道扫描点的信息剔除；由于临边效应，每条扫描线边缘的探测视角倾斜严重，使得大气辐射的传输路径较长，观测的辐射率偏低，一般需要将 AMSU-A 资料每条扫描线两端 1~3 和 28~30 扫描点的观测剔除。

云和降水检验：目前的正演模式主要模拟晴空下的辐射率，需要把受降水污染的观测剔除，这里采用散射指数 SI（Scattering Index）检测方法，即由每次扫描中对应探测器两个通道的亮温差计算得到，如果 SI 指数大于 3 K，则剔除该扫描点的观测。此外，虽然微波具有穿透云层探测大气湿度的能力，但当云中的水滴和冰晶粒子大于辐射波长时，其散射作用会减弱云层下方的信号影响探测，所以需要进行水滴检验，利用背景场计算出云中液态水滴的路径 CLWP（Cloud Liquid Water Path），剔除 CLWP 值超过 0.2 mm 的扫描点上的辐射亮温资料。

4 试验结果

4.1 观测分析

所有卫星资料的直接同化都要通过辐射传输模式利用模式背景场资料来计算模式的模拟亮温值，这是卫星辐射率资料直接同化的关键部分，但在同化过程中，各个步骤的误差作用将会造成观测辐射值与根据模式背景场计算的辐射值之间存在一定的偏差，在将卫星辐射值应用于数值预报模式中时很难获得正的效应。本文从初始场中的土壤湿度数据考虑，希望通过提供较为准确的土壤湿度初值后将对地表敏感的低层通道的信息利用起来，即通过预处理（质量控制和偏差订正）之后更多的观测资料能够进入到同化系统中参与同化，这里重点关注同化之前观测场与背景场的偏差 OMB（observation minus background），即卫星观测值与通过观测算子利用模式背景场资料计算得到的模拟亮温值之间的差值。

从各通道资料的观测亮温值与模式背景场模拟亮温值的分布情况可以看出（图略），对于常用的 5~12 通道的资料，由于观测亮温值与用观测算子计算得到的模拟亮温值的偏差在合理的范围值

内,因而这部分资料能够进入到同化系统中参与同化,资料的利用率本身就比较高,所以在改进的土壤湿度初值条件下,OMB 值并没有得到显著的改善,调整作用不太明显。然而对于地表敏感的低层

通道观测,土壤湿度初值条件的改变就显得尤为重要,此时利用观测算子计算得到的模拟亮温值将会有所变化,与观测亮温值的偏差减小,资料得到较优的控制,从而能够进入到同化系统中。图 4a、b

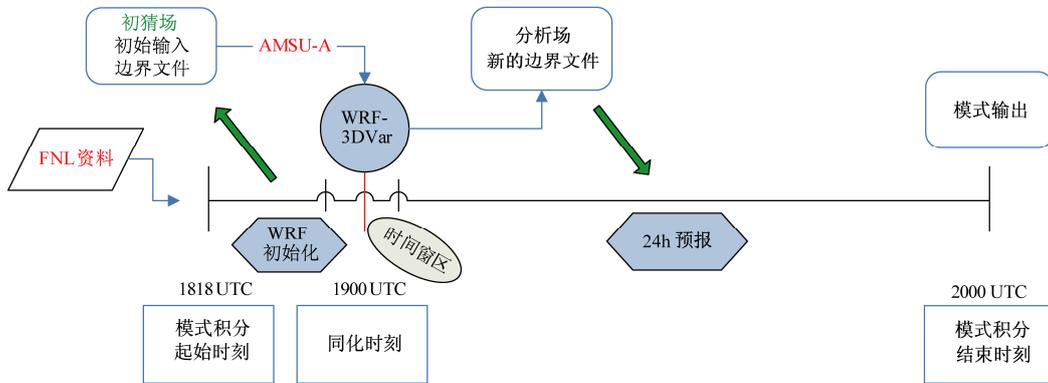


图3 试验时间示意图

Fig. 3 Time diagram of the experiment

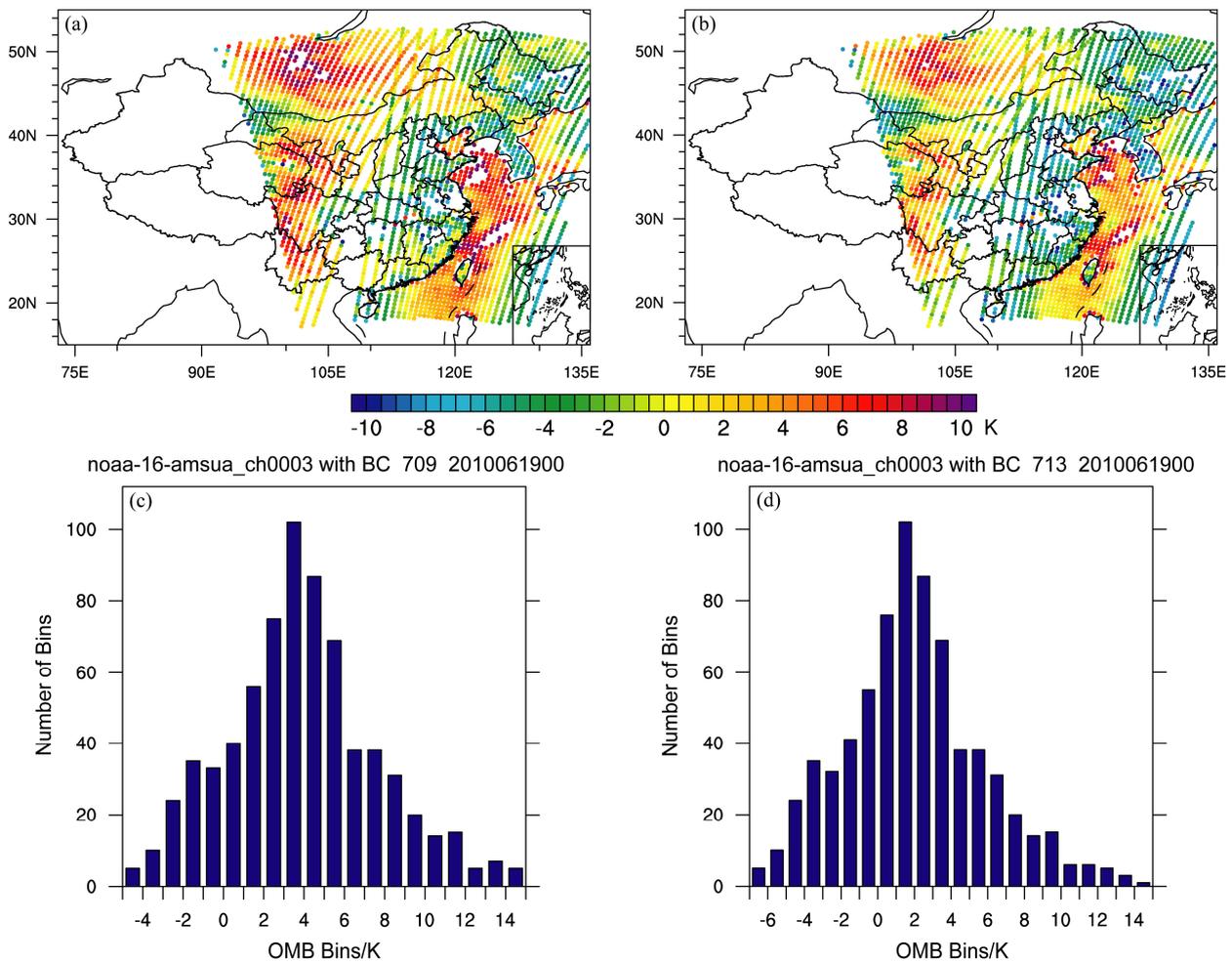


图4 (a、c) NCEP 土壤湿度初值和 (b、d) CLSMDAS 输出土壤湿度初值条件下 NOAA-16 AMSU-A 通道 3 的 OMB 分布情况: (a、b) OMB 资料分布 (单位: K); (c、d) 直方图统计 (横坐标: OMB; 纵坐标: 偏差订正后同化的观测数)
Fig. 4 The OMB distribution of NOAA-16 AMSU-A channel 3: (a, b) Distribution of OMB data; (c, d) histogram distribution of OMB (x-axis: OMB; y-axis: number of assimilated observations after bias correction). (a, c) The initial soil moisture from NCEP; (b, d) the initial soil moisture from CLSMDAS output

给出的是 50.3 GHz 的窗区通道 3 的 OMB 分布情况, 总体来讲通道 3 的调整是比较明显的, 尤其西部地区、四川盆地的 OMB 值明显减小, 模拟亮温值更加接近于实际观测, 说明该通道对土壤湿度是较为敏感的, 改进的土壤湿度初值可以减小模式模拟与观测之间的偏差, 增加该通道的资料使用率。图 4c、d 给出了通道 3 的 OMB 直方图统计结果, 可以较为直观的表现观测资料与模拟结果的偏差分布情况, 观察发现, 改进的土壤湿度初值条件下 OMB 的绝对值在 4 K 以内的观测数目明显要多于 NCEP 土壤湿度初值条件下的结果, 资料的使用率提高近 33.96%, 且整个分布几乎成正态分布, 是比较优的一种结果。

从通道 3 观测亮温值与模拟亮温值的散点分布(图略)也可以看出, CLSMADS 输出的土壤湿度初值条件下的观测值与模拟值更为接近, 各统计量明显减小, 与 NCEP 土壤湿度初值条件下的模拟亮温相比, 同化前经过偏差订正后, CLSMADS 输出土壤湿度初值条件下模拟值的平均偏差由 3.928 减小到 1.993, 均方根误差从 5.392 减小到 4.277, 说明模拟的亮温值与观测是更为接近的, 土壤湿度初值的改变带来的是正的调整作用。

研究表明, 对于地表敏感的低层通道而言, 无论是 OMB 的打点分布还是观测值与模拟值的直方图分布以及散点分布, CLSMADS 输出土壤湿度初值条件下模拟的亮温值与实际观测值更为接近, 说明改进的土壤湿度初值条件下观测算子的计算值得到正的调整, 更多的观测资料能够通过质量控制而进入到同化系统当中, 更多的资料能够被用来调整数值模式的初始场, 进而得到更为准确的模拟预报结果。

4.2 模拟结果分析

4.2.1 初始土壤湿度

土壤湿度初始场的变化对陆面过程特别是对陆面向大气的水分输送和能量通量有很大影响。图 5 给出 10cm 处 CLSMADS 输出土壤湿度和模式初始时刻土壤湿度的差异 (CLSMADS-NCEP), 由图 5b 可以看出, 研究区域 NCEP 资料的土壤湿度模拟整体高于 CLSMADS 的模拟结果, 与 Roads et al. (1999) 及 Chen and Mitchell (1999) 的研究结论一致, 即 NCEP 资料的土壤湿度偏高, 而 CLSMADS 输出的土壤湿度数据经验证与观测资料更为接近, 但 CLSMADS 的结果整体偏干, 所以导致两者的差

异比较大。

分析各层的土壤湿度差异可以发现, 浅层土壤湿度的空间变异性比较明显, 在已经发生降水的区域或者鄱阳湖附近, 两种资料的土壤湿度差异比较小; 而越往深层, 土壤湿度的差异越大, 一方面说明前期降水对深层土壤的影响还比较小, 向下的渗透未能对深层的土壤湿度产生明显的作用, 另一方面也说明模式对深层土壤湿度的模拟性能有待进一步验证, 深层土壤对陆面模式的敏感性有待进一步分析。

4.2.2 24 h 累积降水

图 6 给出各试验方案模拟的 6 月 19 日 00 时~20 日 00 时 24 h 的累积降水量分布, 比较来看, 各试验方案均大致模拟出赣北南部和赣中地区的带状降水分布和走向, 但对降水中心的模拟存在一定的差异。具体来看, 试验 A 没有能够表现江西地区 270 mm 以上量级的强降水中心, 但模拟出多个 210 mm 以上量级降水区域, 对 114°E 附近铜鼓县地区次降水中心的模拟也较差, 但能够较好的模拟出 117°E 附近与福建省接壤地区的强降水; 试验 B 中加入了 AMSU-A 辐射率资料, 模拟出多个强降水中心, 114°E 附近降水的模拟结果偏南, 117°E 附近降水的模拟强度偏小, 但对 (28.5°N, 116.5°E) 附近较强降水的模拟结果是几种方案中最好的; 试验 C 在试验 A 的基础上改变了土壤湿度初值, 采用 CLSMADS 输出的较为准确的土壤湿度替换 NCEP 资料中的土壤湿度, 总体来讲此次降水事件对土壤湿度初值还是比较敏感的, 与试验 A 的模拟结果相比有很大的改进, 能够模拟出强降水中心, 只有 0.5° 左右的偏移, 略微偏西南方向, 较好的模拟出 117°E 附近的降水, 却未能模拟出 114°E 附近的降水, 对赣中地区的模拟强度偏大; 试验 D 在改进的土壤湿度初值条件下同化 AMSU-A 资料, 是几种方案中模拟结果最优的, 但不足的是对 114°E 附近的降水模拟偏强且落区偏南。

综合以上分析可以发现: 对于 24 h 累积降水的模拟, 改进土壤湿度初值条件下同化 AMSU-A 资料对此次强降水过程的模拟效果最为理想, 对雨带的走向、大雨以上级别降水的落区范围、降水中心落区及强度的把握最为准确。

4.2.3 TS 评分检验

为定量分析不同土壤湿度初值条件下同化卫星观测资料后降水模拟结果的差异, 本文采用降水

分级检验的 TS (Threat score) 评分方法对模拟结果进行评估, 将模拟区域内的实况降水与插值到站点的模拟值做统计检验, 将降水等级划分为: 小雨 (>0 且 <10 mm), 中雨 (≥10 mm 且 <25 mm), 大雨 (≥25 mm 且 <50 mm), 暴雨 (≥50 mm 且 <100

mm), 大暴雨 (≥100 mm 且 <200 mm), 较大暴雨 (≥150 mm 且 <200 mm), 特大暴雨 (≥200 mm 且 <300 mm), 评分表达式可写为

$$TS = N_a / (N_a + N_b + N_c), \quad (1)$$

式中, 以 N 表示站点数, N_a 为正确的站点数, 即模

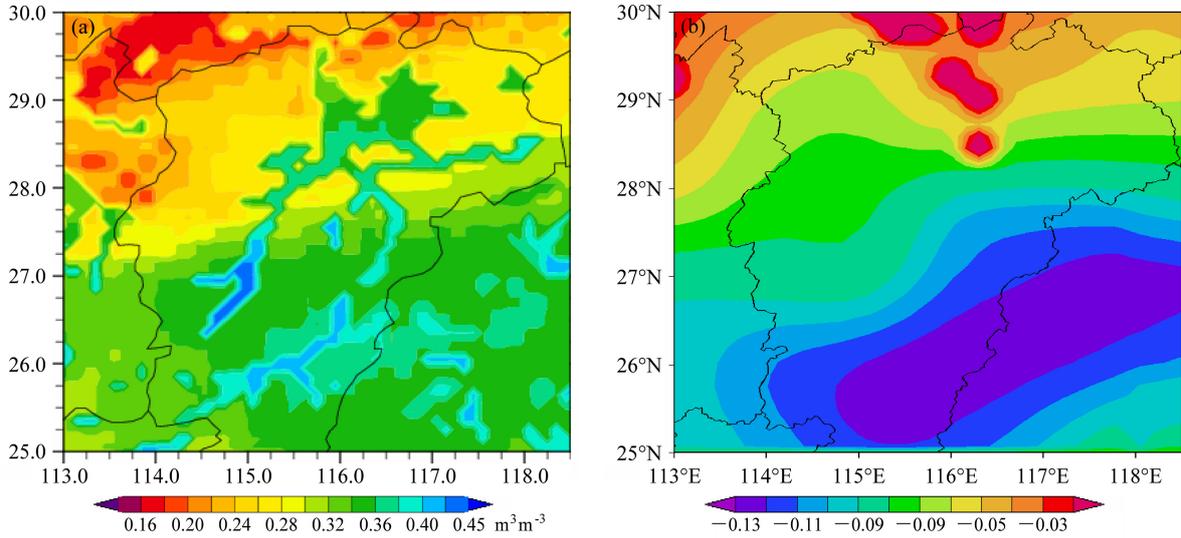


图 5 (a) CLSMDAS 模式输出的 10 cm 处土壤湿度 (单位: $m^3 m^{-3}$); (b) CLSMDAS 与 NCEP 中初始土壤湿度场 10 cm 上的差异分布 (CLSMDAS-NCEP)
Fig. 5 (a) Soil moisture at 10 cm output from CLSMDAS model; (b) differences (CLSMDAS minus NCEP) of volumetric soil moisture at 10 cm at the initial time

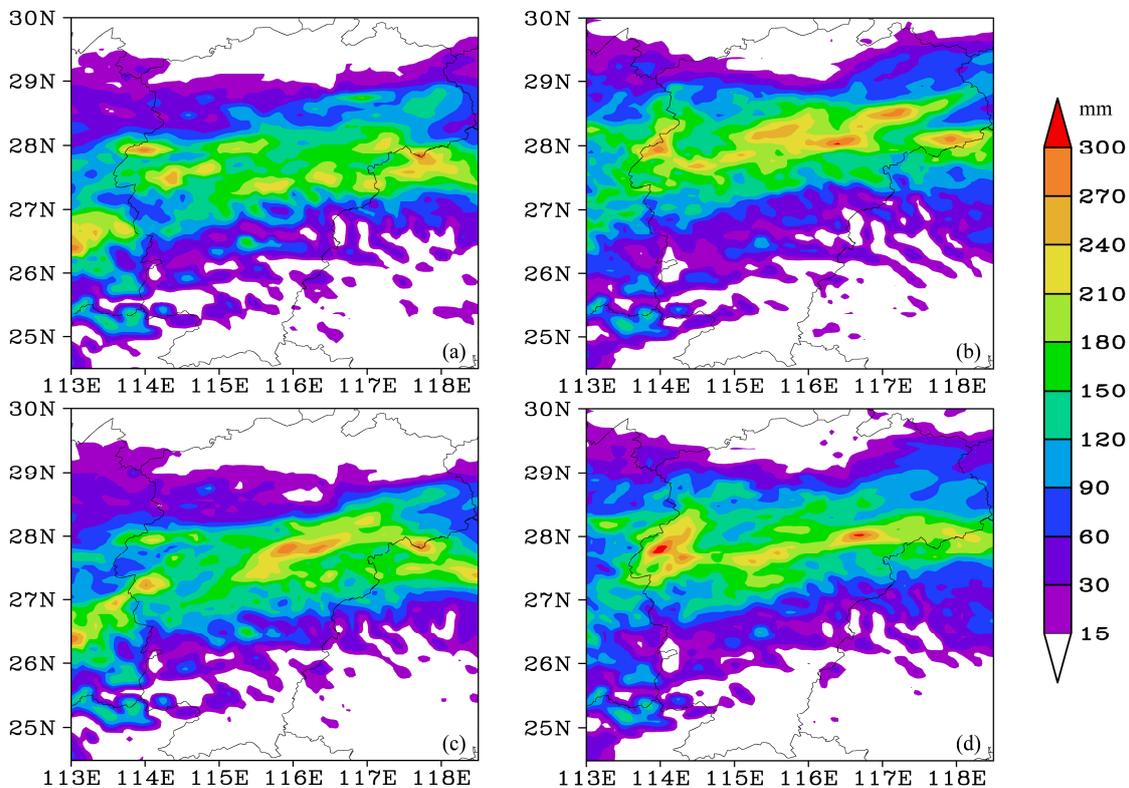


图 6 各试验方案模拟的 6 月 19 日 00 时~20 日 00 时 24 h 累积降水量 (单位: mm): (a) 方案 A; (b) 方案 B; (c) 方案 C; (d) 方案 D
Fig. 6 Simulated 24-h rainfall (mm) from 0000 UTC 19 June to 0000 UTC 20 June: (a) Scheme A; (b) scheme B; (c) scheme C; (d) scheme D

式与实况均有某量级降水; N_0 为空报的站点数, 即观测无某量级降水而模拟结果有; N_c 为漏报的站点数, 即观测有某量级降水而模拟结果无。

表 3 给出不同土壤湿度初值条件下同化卫星观测资料后模拟降水的评分结果, 可以看出: 对于小雨级别的降水, TS 评分均较高, 改进的土壤湿度初值条件下同化卫星资料的模拟结果评分值最高为 0.71; 对于中雨级别的降水, TS 评分值不是很高, 且改进试验未能带来正效果, 但卫星资料的同化提高了 TS 评分; 对大雨级别的降水, 改进试验有一定的正调整, 且同化卫星资料后 TS 评分提高了 0.14; 对于暴雨及以上级别的降水, TS 评分则有明显的提高, 如 [50, 100) 量级降水的 TS 评分提高了 0.09, 是模拟结果较好的一个量级; [100, 150) 量级较大暴雨的评分检验, 改进的土壤湿度初值条件下同化卫星资料的模拟结果评分值并不是最理想的, 其值要稍低于试验 B 的结果; [150, 200) 量级较大暴雨的评分检验, TS 评分提高了 0.05; [200, 300) 量级特大暴雨的评分检验, 可以得出与前面一致的结论, CLSMDAS 土壤湿度初值条件下降水中心的模拟结果要优于 NCEP 的, 与实况降水分布更为接近, 且更能体现降水的区域波动性特点, 但试验 D 中由于模拟出了虚假的强降水中心, 所以虽然在真实降水的模拟上效果较好, 但整体的 TS 评分值却相对要低于其它试验。除中雨和大暴雨外, CLSMDAS 土壤湿度初值条件下同化卫星观测资料后各量级降水的 TS 评分基本都要高于 NCEP 土壤湿度初值条件下的结果, 不同等级降水的模拟结果与实况站点分布更为接近。

表 3 不同土壤湿度初值条件下不同等级降水的评分结果
Table 3 Verification results of different precipitation intensities for different initial soil moisture

试验	(0, 10)	[10, 25)	[25, 50)	[50, 100)	[100, 150)	[150, 200)	[200, 300)
control1	0.67	0.35	0.31	0.51	0.43	0.22	0.36
amsua1	0.68	0.43	0.42	0.53	0.47	0.24	0.43
control2	0.68	0.33	0.33	0.56	0.38	0.25	0.42
amsua2	0.71	0.40	0.45	0.60	0.45	0.27	0.38

6 结论与讨论

本文利用 WRF 模式及其三维变分同化系统实现了 NOAA-16 AMSU-A 微波资料的直接同化, 并针对 2010 年 6 月 19 日江西地区的一次强降水过程

开展试验研究, 在此基础上, 改变模式初始场中的土壤湿度, 分析改进的土壤湿度初值对辐射率资料直接同化与模式模拟的影响, 并重点关注不同土壤湿度初值对观测场与背景场的偏差调整情况, 得到以下结论:

(1) CLSMDAS 输出土壤湿度初值条件下模拟的亮温值与实际观测值更为接近, 质量控制和偏差订正后更多的观测资料能够进入到同化系统中, 说明改进的土壤湿度初值条件下观测算子的计算值得到正的调整, 下一步可以综合考虑多种陆面方案及陆面参数(如土壤温度、地表发射率等)的影响, 为辐射传输模式提供更加准确的初始输入参数, 提高模式的正演计算精度, 减小辐射亮温值的计算偏差。

(2) CLSMDAS 输出土壤湿度初值条件下同化 AMSU-A 资料对此次强降水过程的整体模拟效果最为理想, 对 24 h 累积降水分布的模拟, 能够较为准确的把握整个雨带的走向、大雨以上级别降水的落区范围、降水中心落区及强度等; 从统计结果可以看出各量级降水的 TS 评分基本都要高于 NCEP 土壤湿度初值条件下的结果, 除中雨和大暴雨外, 不同级别降水的模拟结果与实况站点分布更为接近。此外, 这些研究对于分析区域强降水的出现时间及强度变化等有一定的指导意义, 对于探讨陆面过程及陆面参数对降水事件的影响机制研究也有一定的参考意义。本次试验主要是针对个例开展研究, 今后可以进行长时间序列或长时间气候尺度的研究, 比如分析土壤湿度对月尺度过程的影响等。

(3) 陆面土壤湿度的状况虽然不能根本改变降水的模拟, 但能起到改善作用, 模拟结果有待进一步提高。而数值模式的模拟预报能力, 在一定程度上取决于模式初始场的准确度, 未来可以综合考虑初始场中多种陆面参数的作用, 同化进去更多高时空分辨率的卫星观测资料, 得到更为准确的模拟预报结论。

参考文献 (References)

- Cassardo C, Balsamo G P, Cacciamani C, et al. 2002. Impact of soil surface moisture initialization on rainfall in a limited area model: A case study of the 1995 South Ticino flash flood [J]. *Hydrological Processes*, 16 (6): 1301-1317.
- Chen F, Janjic Z, Mitchell K. 1997. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale ETA model [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 85 (3): 391-421.

- Chen F, Mitchell K. 1999. Using GEWEX/ISLSCP forcing data to simulate global soil moisture fields and hydrological cycle for 1987–1988 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77: 167–182.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569–585.
- 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 [J]. *气象科技*, 36 (1): 1–7. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, et al. 2008. Application status and development of satellite data assimilation in numerical weather forecast [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 36 (1): 1–7.
- Joseph B K. 2004. Weather research and forecasting model: A technical overview [C]//84th AMS Annual Meeting, Seattle, U S A, Jan, 10–15.
- 李安泰, 何宏让, 张云. 2012. WRF 模式陆面参数扰动对一次西北暴雨影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 31 (1): 65–75. Li Antai, He Hongrang, Zhang Yun. 2012. Numerical simulation of effect of WRF land surface parameter disturbance on a rainstorm in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 31 (1): 65–75.
- 马红军, 郭品文, 宋洁. 2009. 耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟 [J]. *大气科学*, 33 (3): 557–567. Ma Hongyun, Guo Pinwen, Song Jie. 2009. Simulation of “2007.7” heavy rainfall case in the Changjiang–Huaihe Valley using the WRF model with different land surface schemes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 557–567.
- 齐琳琳, 孙建华, 张小玲, 等. 2005. 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*, 29 (5): 780–794. Qi Linlin, Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, et al. 2008. The ATOVS data assimilating experiments on the heavy rain over the Yangtze River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (5): 780–794.
- Roads J Q, Chen S C, Kanamitsu M, et al. 1999. Surface water characteristics in NCEP global spectral model and reanalysis [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D16): 19307–19327.
- 师春香, 谢正辉. 2008. 基于静止气象卫星观测的降水时间降尺度研究 [J]. *地理科学进展*, 27 (4): 15–22. Shi Chunxiang, Xie Zhenghui. 2008. A time downscaling scheme of precipitation by using geostationary meteorological satellite data [J]. *Progress in Geography (in Chinese)*, 27 (4): 15–22.
- 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 2011. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (3): 375–385. Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (9): 1430–1440.
- 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 [J]. *科学通报*, 49 (5): 493–498. Zhang Hua, Chou Jifan, Qiu Chongjian. 2004. The structure analysis of satellite observation assimilation of the Rammasun typhoon on Northwest Pacific Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 49 (5): 493–498.
- 张生雷, 谢正辉, 师春香, 等. 2008. 集合 Kalman 滤波在土壤湿度同化中的应用 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1419–1430. Zhang Shenglei, Xie Zhenghui, Shi Chunxiang, et al. 2008. Applications of ensemble Kalman filter in soil moisture assimilation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1419–1430.
- 赵得明. 2005. 卫星遥感资料反演土壤湿度及其在数值模拟中的应用 [D]. 南京大学博士学位论文. Zhao Deming. 2005. Soil moisture retrieval from satellite remote sensing images and its application in numerical simulation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University.
- Zhao D M, Su B K, Zhao M, et al. 2006. Soil moisture retrieval from satellite images and its application to heavy rain simulation in eastern China [J]. *Adv. Atm. Sci.*, 23 (2): 299–316.
- 朱晨, 师春香, 席琳, 等. 2013. 中国区域不同深度土壤湿度模拟和评估 [J]. *气象科技*, 41 (3): 529–536. Zhu Chen, Shi Chunxiang, Xi Lin, et al. 2013. Simulation and assessment of soil moisture at different depths in China area [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 41 (3): 529–536.