曹蓓, 赵震, 白爱娟. 2019. WRF模式云参数化方案对一次深对流系统模拟的验证和改进 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 626-638. CAO Bei, ZHAO Zhen, BAI Aijuan. 2019. Verification and Improvement of Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model for Simulation of a Deep Convection System [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 626-638. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19001

WRF模式云参数化方案对一次深对流系统模拟的 验证和改进

曹蓓^{1,2} 赵震² 白爱娟¹ 1成都信息工程大学,成都610225 2中国科学院大气物理研究所,北京100029

摘 要 使用中尺度数值模式WRF中的双参数云微物理方案WDM6针对2008年台风"凤凰"登陆过程中造成的 强降水进行数值模拟,通过卫星模拟器利用MTSAT-1R和TRMM卫星观测的红外云顶黑体亮温TBB、PR雷达反 射率资料使用统计方法验证模拟结果。通过修改云水向雨水自动转化过程、冰晶核化过程、雪和霰的下落末速 度、雪和霰的截距进行敏感性试验,减小模拟结果和卫星观测结果的差异。研究结果表明:WDM6方案模拟的 台风"凤凰"登陆后的降水,强对流云系及对流柱状雷达回波基本符合实况,但模拟结果局部偏强。WDM6方 案模拟产生了较多的浅对流云,低估了对流云系的出现频率。不同云类型模拟的雷达回波均偏强,对流云系雷达 回波垂直分布接近观测。敏感性试验结果说明修改WDM6方案中云水向雨水自动转化率有效地改善了模拟效果。 同时发现云滴初始数浓度影响云水向雨水自动转化率并最终影响云系结构和雷达反射率的模拟结果,过高的云滴 初始数浓度会使模拟结果变差。

关键词 WRF模式 双参数云物理方案 卫星模拟器 敏感性试验
 文章编号 1006-9585(2019)05-0626-13 中图分类号 P461
 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19001

模拟器 敏感性试验
中图分类号 P461 文献标识码 A

Verification and Improvement of Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model for Simulation of a Deep Convection System

CAO Bei^{1,2}, ZHAO Zhen², and BAI Aijuan¹

Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this study, strong precipitation generated by the landing of typhoon Fung-Wong in 2008 was simulated using WRF WDM6 double-moment cloud microphysics scheme. The model simulations were evaluated by statistical methods using cloud top brightness temperature (TBB) and precipitation radar reflectivity data from MTSAT-1R, TRMM satellite, and the Satellite Data Simulator Unit. To reduce the difference between the simulation results and satellite observations, sensitivity experiments were conducted in relation to autoconversion rate of cloud water to rain, ice nucleation, terminal velocity, and slopes of snow and graupel. The results show that the precipitation, strong convective cloud system, and convective columnar radar echo simulated by the WDM6 scheme are in agreement with observations,

作者简介 曹蓓,女,1993年出生,硕士研究生,主要从事中尺度数值模拟。E-mail: caobei931024@163.com

通讯作者 赵震, E-mail: zhaozhen@mail.iap.ac.cn

收稿日期 2019-01-02; 网络预出版日期 2019-06-17

资助项目 国家重点研发计划项目2018YFC1507900、2018YFC1507100,国家自然科学基金项目41575134

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC1507900 and 2018YFC1507100), National Natural Science Foundation of China (Grant 41575134)

a shallow convectiv

however, showing stronger results in some areas. The WDM6 scheme simulation produced more shallow convective clouds and underestimated the frequency of convective cloud systems. The radar echoes simulated by different cloud types are all strong, and the vertical distribution of the convective cloud radar echoes is close to observation. The experimental results show that modifying the production rate for the autoconversion of cloud water to rain in the WDM6 scheme effectively improves the simulation results. Simultaneously, it is found that the concentration of initial cloud droplets affects the production rate for the autoconversion of cloud water to rain and ultimately affects the simulation results of the cloud structure and radar reflectivity. A high concentration of initial cloud droplets will worsen the simulation result.

Keywords WRF model, Double-moment microphysical parameterization, Satellite Data Simulator Unit (SDSU), Sensitivity experiment

1 引言

数值模式已成为天气预报和气候预测的主要工 具,在数值模式中合理地描述云和降水微物理过程 显得至关重要。研究表明,云中微物理因素的变化 能影响到降水和云的结构、动量、热量、辐射收支 以及与周围大尺度环境的相互作用,所以对云微物 理过程的恰当处理十分必要(Yang and Houze, 1995)。当前数值预报研究的热点问题之一就是对 云物理方案的研发、选择以及应用,在模拟运用 时,需要对模式中各种云微物理方案进行深入细致 的分析和评估。

近年来,人们逐渐意识到数值模式中云微物理 参数化方案的不足,并致力于云微物理参数化方案 的验证和改进。Wainwright et al. (2014)将雨水、 雪、霰和冰雹粒子谱截距和含水量的幂函数关系应 用于中尺度模式ARPS模拟了超级单体和飑线过 程,并且与固定粒子谱截距的单参数方案和双参数 方案进行了比较。结果发现,单参数方案使用粒子 谱截距和含水量的幂函数关系时能改善模拟结果, 并且与双参数方案的模拟结果一致,同时保持了计 算的高效性。可见,单参数方案采用粒子谱参数的 诊断关系不仅能取得和双参数方案接近的模拟结 果,而且不增加额外计算量。张衍达等(2016)使 用耦合了一种新的双参数云微物理参数化方案的 WRF 模式 (The Weather Research and Forecasting Model) 对一次强降水过程进行模拟,分别对两种 质量加权下落末速度,常数参数及根据东亚地区实 际观测结果改进的两种粒子谱形参数的模拟结果进 行分析。结果表明粒子谱形参数对模拟降水的强度 和发展都有明显的影响,改进的谱形参数的组合试 验组对降水的预报效果有较明显的优势。Zheng and Chen(2014)使用中尺度模式ARPS中单参数 方案研究了改变雨水、冰雹和雪粒子谱截距对中国 安徽境内一次龙卷风过程模拟结果的影响,结果表 明雨水和冰雹的谱分布对模拟的微观和动力特征影 响显著。为了了解粒子下落末速度变化对云系和降 水发展的影响,陶玥等(2009)利用中尺度模式 ARPS (Advance Regional Prediction System) 对霰 开展了下落末速度敏感性试验,分析了霰下落末速 度减小对降水分布和强度、云系的移动、云系的宏 观热力和动力场的影响。结果表明改变霰的下落末 速度对云系和降水模拟结果有一定影响。Gao et al. (2011)为了改善模拟结果,采取改变雨滴谱截距 和增加雨滴破碎率为原来3倍的方法,这种方法减 小了雨滴大小从而增加了雨滴蒸发率, 使得模拟的 雷达反射率、差分反射率、微波亮温和地面降水更 接近实况等。

随着卫星遥感技术的发展及其在气象领域的应 用,卫星观测数据被广泛应用于模式云微物理参数 化方案效果评估,这些卫星包括利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission satellite), CloudSat 和 CALIPSO (The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)。有两 种方法用来评估模式云微物理参数化方案预报结果 和卫星观测的云系空间和垂直分布: 第一种方法是 比较模式输出物理量和卫星反演的物理量, 第二种 方法是直接比较卫星辐射数据和模式预报微物理量 输入卫星模拟器后计算的辐射量(Masunaga et al., 2010; Bodas-Salcedo et al., 2011; Hashino et al., 2013)。第二种方法因为能在模式和卫星模拟器之 间建立相同的水凝物粒子微物理假设比如粒子谱分 布和粒子密度,因而更加符合实际。Grasso et al. (2014) 根据卫星观测数据发现中尺度模式WRF中

单参数WSM6 云物理方案模拟的高层冰晶数量偏 少,为此将WSM6方案中6种微物理转化过程分别 减少一半进行了敏感性试验,结果表明雪碰并冰晶 过程减半能显著增加模拟的风暴云砧中冰晶数量, 说明参数化方案中的微物理过程通过合理重建能增 加模拟的高层冰晶数量从而与观测相符。Roh and Satoh (2014) 使用全球非静力的云分辨率模式和 卫星模拟器对热带太平洋深对流系统的云微物理过 程进行了评估,结果表明与TRMM观测数据相比, 低估了层状云降水,并且高估顶部高度超过12 km 的深对流云降水,基于观测结果调整雨、雪和霰粒 截距和密度等参数可以改善模拟效果。Roh et al. (2017)使用TRMM和卫星模拟器评估了全球非静 力的云分辨率模式对热带和部分中纬度地区深对流 系统的云和降水模拟结果,发现改进的微物理方案 能更好地区别热带地区的浅对流云和深对流云,并 且普遍改善全球范围内热带地区海洋上的云和降水 的模拟结果。

随着中国经济发展和南方地区强降水灾害的日 益严重,有必要利用中尺度模式中的云微物理参数 化方案对中国南方地区强降水的模拟进行验证和改 进。本文针对2008年台风"凤凰"登陆造成的强 降水使用 WRF 中 WDM6(WRF double-moment 6class)双参数云微物理方案进行数值模拟,利用卫 星模拟器检验模式模拟结果,通过敏感性试验减小 模拟结果和卫星观测结果的差异,从而改善中尺度 模式云微物理参数化方案对中国南方地区深对流系 统的预报效果。

2 卫星模拟器和资料简介

Masunaga et al. (2010)开发的卫星模拟器 SDSU (Satellite Data Simulator Unit)可用于模拟 由气象卫星传感器测量的微波亮温、雷达反射率、 雷达路径积分衰减和可见光/红外辐射亮温。SDSU 基于米散射理论的辐射传输方程,建立了与云微物 理方案中假设的水凝物尺寸、分布和密度等相同的 微物理假设,输入中尺度模式云微物理参数化方案 输出的各种水凝物粒子微物理量廓线分布可生成各 种卫星观测结果。使用卫星模拟器评估数值模式能 有效地避免卫星反演结果误差,将模式输出结果 直接与卫星观测量进行比较。本文使用 SDSU v2 版,选择 MTSAT-1R (Multi-functional Transport

衣I MIISAI-IK 造感 品 / 図	表1	MTSAT-1R遥感器参数
-----------------------	----	---------------

Table 1 MITSAI-IN Satemite remote sensor parameter	Table 1	MTSAT-1R	satellite	remote	sensor	parameter
--	---------	----------	-----------	--------	--------	-----------

通道名称		星下点空间	
(简称)	波长范围/μm	分辨/km	备注
可见光(VIS)	0.55~0.90	1	可见光与近红外
红外1(IR1)	10.3~11.3	4	长波红外
红外2(IR2)	11.5~12.5	4	红外分裂窗
红外3 (IR3)	6.5~7.0	4	水汽
红外4 (IR4)	3.5~4.0	4	中波红外

Satellites)卫星和热带降水卫星 TRMM 观测量进行 模式验证。

MTSAT-1R是日本气象厅发射的三轴稳定地球 静止气象卫星,定位于140°E上空,其主要遥感器 参数如表1所示。本文使用MTSAT-1R中心波长 10.8 μm的相当黑体亮温(Black Body Temperature, TBB)观测数据。

TRMM是由美国国家宇航局和日本国家空间 发展局共同研制,于1997年11月成功发射的第一 颗专门用于定量测量热带、亚热带降水的气象卫 星。卫星设计轨道高度350 km,倾角35°,能够满 足对热带地区加密观测的要求。2001年8月,卫星 轨道高度从350 km 调整为400 km, 以延长其使用 寿命。共搭载5种遥感仪器,分别为:可见光和红 外扫描仪(Visible and Infrared Scanner, VIRS)、微 波图像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)、降水 雷达(Precipitation Radar, PR)、闪电图像仪 (Lighting Imaging Sensor, LIS) 及云和地球辐射能 量系统 (Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES)。 降水雷达 PR 的刈幅宽度 215 km,每条扫描线由49个象素(即角库)组成,星 下点分辨率为水平方向4.5 km, 垂直方向250 m。 可见光和红外扫描仪 VIR 的刈幅宽度 720 km,星 下点水平分辨率为2.2 km。通过T3EF(TRMM Triple-Sensor Three Step Evaluation Framework) 方 法(Masunaga et al., 2008; Matsui et al., 2009) 评估 模式和观测值之间的差异。T3EF包括3个步骤: 1) 获得红外云顶亮温 TBB 和降水顶高 (precipitation-top height, PTH) 的联合直方图,并 将云分类; 2)针对不同类型的云及其雷达反射率 强度进行等频率高度图(Contoured Frequency by Altitude Diagrams, CFAD) 统计; 3) 构建 TMI 85 GHz微波亮温的累积概率分布。本文使用 V7 版 本的 TRMM 1B01 的 10.8 µm 红外云顶亮温 TBB 与

2A25 的 13.8 GHz 降水雷达反射率产品用于 T3EF 方法中, PTH 的计算采用 PR 反射率大于 17 dBZ 的 最大高度 (Roh and Satoh, 2014)。

为了将TRMM 1B01产品的10.8 μm 红外TBB 与2A25产品13.8 GHz 雷达反射率在时间和空间上 匹配,进行以下处理:由于PR和VIR对于相同目 标区的探测时间差小于1 min,可视为两者具有准 时间同步性,使用PR瞬时视场上的VIR值。由于 VIR的扫描宽度远大于PR扫描宽度,因此在融合 过程中,仅保留VIR与PR轨道重合部分,相当于 保留卫星天顶角小于17°的数据,约占总数据量的 1/3 (刘奇,2007)。将1B01像元对照PR像元进行 插值,从而得到2A25像元对应的1B01可见光反射 率与红外通道亮温值。

中国自动站与 CMORPH 融合的逐时降水量 0.1°(纬度)×0.1°(经度)网格数据集(Shen et al., 2014)使用的地面观测降水资料来自全国3万 多个自动观测站(包括国家级自动站和区域自动 站)逐时降水量,卫星反演降水产品选用由NCEP 的气候预测中心开发的实时卫星反演 CMORPH 降 水产品。该数据集质量可靠,应用于降水监测、定 量分析天气实况、检验天气气候模式精度、检验卫 星产品精度等方面。

3 降水个例天气概况

台风"凤凰"于2008年7月25日06:00(协调 世界时,下同)生成于西北太平洋洋面,26日 09:00加强,27日12:00进一步加强为强台风,27 日22:00在台湾花莲南部第一次登陆(最大风速 45 m/s,14级),之后继续沿西北方向前行,并在 28日14:00于福建省福清市东瀚镇第二次登陆,登 陆时强度仍为台风量级(最大风速33 m/s,12级)。 之后,台风"凤凰"向西北方向继续深入内陆,强 度逐渐减弱。30日06:00在江西省内减弱为热带低 压,并于18:00停止编号。

从图1环流形势中可以看出,台风"凤凰"的 移动路径主要受西太平洋副热带高压的影响。副热 带高压主体大部分时间位于海上,27日及28日呈 东南向西北走向,至29日转为南北状分布,这种 变化有利于台风"凤凰"逐渐向中高纬度移动,之 后副高逐渐东退。高纬环流形势呈现为明显的经向 环流,27~29日贝加尔湖低槽不断地加深南压, 28日槽底延伸至41°N左右,与副高共同作用,引 导台风"凤凰"北上。图1c和1d可明显看出位于 台风"凤凰"西南部的低空西南急流为台风提供了 充足的水汽供应,结合台风东侧和南侧环流从海洋 上带来的大量水汽,造成台风暴雨强度高、范围 大、影响时间长。台风"凤凰"登陆后造成中国南 方部分省份普降暴雨或大暴雨,强降雨造成的灾害 损失惨重。

4 数值模拟方案设计

使用非静力中尺度数值模式 WRF V3.9.1 (Skamarock et al., 2008) 针对台风"凤凰"的登陆 过程进行数值模拟分析,模拟时间为2008年7月 27日00:00至31日00:00,共96h。使用NCEP 0.1° (纬度) ×0.1°(经度) FNL (Final Operational Global Analysis) 实况分析资料作为模式的初始和 边界条件,模拟过程采用三重嵌套,数值模拟区域 如图2所示。模拟区域格距从外向里分别为30km、 10 km、3.33 km, 采用 YSU 边界层方案, Dudhia 短波辐射方案和RRTM长波辐射方案, 云物理方 案在区域1和2采用WSM6(WRF single-moment 6-class)方案和New Eta积云参数化方案,模拟区 域3关闭积云参数化方案只使用WDM6云微物理 方案(Lim and Hong, 2010),该方案基于WSM6方 案发展而来,对冰相粒子使用单参数方案,对云 水、雨水使用双参数方案,WDM6方案不仅可对 云水、雨水、云冰、雪和霰6种水凝物混合比进行 预报,还可对云凝结核、云滴和雨滴数浓度进行预 报。为了对WDM6方案结果进行评估和改进,本 文针对区域3模拟结果进行分析。

将WDM6方案作为对比试验(CON),针对模 拟效果选择修改云水向雨水自动转化过程、冰晶核 化过程、雪和霰的下落末速度、雪和霰的截距进行 敏感性试验,敏感性试验方案设计主要参考各经验 公式及文献实例。

WDM6方案中使用的云水向雨水自动转换过 程采用 Berry and Reinhardt (1974) 的计算公 式,即

praut =
$$\frac{L}{\tau}$$
, (1)

$$L = 2.7 \times 10^{-2} \rho_{\rm a} q_{\rm c} \left(\frac{1}{16} \times 10^{20} \sigma_{\rm c}^3 D_{\rm c} - 0.4 \right), \quad (2)$$



图 1 2008 年 7 月 (a) 27 日 12:00、(b) 28 日 12:00、(c) 29 日 12:00、(d) 30 日 12:00 FNL 数据 500 hPa 位势高度场(等值线,单位: dagpm) 和 850 hPa 大于 12 m s⁻¹的风场(矢量,单位: m s⁻¹)

Fig. 1 500-hPa geopotential height (contour, units: dagpm) and 850-hPa wind field larger than 12 m s⁻¹ (vectors, units: m s⁻¹) from FNL data at (a) 1200 UTC 27 Jul 2008, (b) 1200 UTC 28 Jul 2008, (c) 1200 UTC 29 Jul 2008, and (d) 1200 UTC 30 Jul 2008



 $\tau = 3.7 \frac{1}{\rho_a q_c} \left(0.5 \times 10^6 \sigma_c - 7.5 \right)^{-1}, \qquad (3)$

其中, praut 为云水向雨水自动转化率(单位: kg kg⁻¹ s⁻¹), *L* 为特征含水量, τ 为特征时间尺度, ρ_a 为空气密度(单位: kg m⁻³); q_c 为云水混合比(单位: kg kg⁻¹); D_c 为云水直径(单位: m); σ_c 为雨 滴谱标准差(单位: μ m), 当 $\sigma_c > 15 \mu$ m时, 进行 对云水向雨水自动转化的计算。

敏感性试验中采用Grabowski(1999)的云水向雨水自动转化计算公式:

praut =
$$1.67 \times 10^{-5} (10^3 \rho_a q_c)^2 \left(5 + \frac{3.6 \times 10^{-5} n_c}{d_c \rho_a q_c}\right)^{-1}$$
, (4)

$$d_c = 0.146 - 5.964 \times 10^{-2} \ln \frac{n_c}{2000} , \qquad (5)$$

其中, n_c 为云滴初始数浓度(单位: cm⁻³), d_c 为云 滴相对离散度,通过使用不同的 n_c 来对应不同的 d_c ,从而影响云水向雨水的转化率。敏感试验 MOD1中取 $n_c=100$ cm⁻³,MOD2中取 $n_c=300$ cm⁻³。

WDM6方案中在冰晶核化过程中对冰核浓度的计算公式为

$$N_{\rm I} = 10^3 \exp[0.1(T_0 - T)], \qquad (6)$$

其中, N_1 为冰核数浓度(单位: m^{-3}),绝对零度 $T_0 = 273.16$ K,T为温度(单位: K)。

本文基于 Cooper (1986) 及 Fletcher (1962) 的研究,修改冰核浓度的计算公式为 MOD3, MOD4:

$$N_{\rm I} = 10^{-2} \exp\left[0.6(T_0 - T)\right], \tag{7}$$

$$N_{\rm I} = 5 \exp \left[0.304 \left(T_0 - T \right) \right]. \tag{8}$$

参考张衍达等(2016)对于雪的下落末速度参数的修改,将原计算公式

avts = 11.72, bvts = 0.41 (9) (其中 avts、bvts 为随雪粒子形状、大小变化的参数)修改为MOD5:

$$N_{\rm os} = 2 \times 10^6 \exp\left[0.12(T - T_0)\right], \qquad (11)$$

其中, *N*₀₅为雪模拟方程的截距(单位: m⁻⁴)。敏感试验采用 Roh et al. (2017)及林文实等(2007)的计算方法,修改MOD6、MOD7为:

$$N_{05} = 3 \times 10^6 , \qquad (12)$$

$$N_{0S} = 2 \times 10^7$$
 (13)

参考陶玥等(2009)的研究,将WDM6中原 霰的下落末速度计算公式

$$av tg = 330, bv tg = 0.8$$
 (14)

(其中 avtg、bvtg 为随霰粒子形状、大小变化的参数)修改为MOD8、MOD9:

av tg = 1094.3, bv tg = 0.6384, (15)

$$av tg = 382, bv tg = 0.36.$$
 (16)

WDM6方案中对霰的截距的计算公式为

$$N_{0g} = 4.0 \times 10^6$$
 , (17)

其中, N_{0g}为霰模拟方程的截距(单位:m⁻⁴)。敏感性试验中,采用 Roh and Satoh (2014)对云水向雨水自动转化的计算公式作为MOD10:

$$N_{0g} = 4.0 \times 10^8 \,. \tag{18}$$

5 试验结果分析

5.1 对比试验

图3为中国自动站与CMORPH融合的逐时降 水量数据生成的2008年7月28日和29日的24h累 积降水量与对比试验的降水量模拟结果比较。由图 3a可以看出,台风"凤凰"登陆后造成浙江、福 建沿海及台湾西南部洋面上超过100 mm的大暴 雨, 其中(23°N, 118°E)更是出现了超过250 mm的特大暴雨。模式(图3b)准确模拟出了两个 主要大暴雨降水区的位置及雨带分布, 但对降水量 的模拟局部存在偏大。随着台风登陆后的移动,强 降水中心的位置也发生了改变。29日的24h累积 大暴雨强降水中心(图3c)主要分布于福建及广 东东部沿海,其中(25°N,120°E)附近累积降水 超过250mm,模式(图3d)模拟出了福建和广东 沿海的大暴雨,但模拟的大暴雨分布范围比实况 大。从整体上看,模式基本正确模拟出了台风"凤 凰"登陆后的强降水的分布和降水量,但模拟的降 水强度局部更强。

为了进一步评估模拟结果,图4给出2008年7 月28日19:00与29日18:00MTSAT-1R与WRF对比 试验模拟的10.8 μm TBB。10.8 μm的TBB大小反 映了云顶的高低,指示了云顶的相态(傅云飞等, 2016),云顶亮温越低,其云顶越高,越容易产生 降水。图4显示WRF模拟出了卫星观测的云顶亮 温小于210K的强对流云系,模拟的强对流云系的 分布和移动接近观测。但是模拟强对流云系分布范 围偏小,模拟的云顶亮温在部分地区高于观测值。

图 5 为 2008 年 07 月 28 日 00:00 至 30 日 00:00 图 4 方框范围内 TBB 区域平均值的时间演变,可见该 区域 48 h 内的模拟 TBB 与观测两者变化趋势较为 一致,模拟结果能较好地再现 TBB 的时间演变 过程。

受制于TRMM卫星的轨道限制,TRMM上PR 雷达扫描经过研究区域为2008年7月28日轨道号 为60971的观测。图6为TRMM和WRF对比试验 模拟的沿着图4中AB两点连线(第42像元)的雷 达回波垂直剖面,可见卫星观测的大于40 dBZ的 雷达回波呈现对流柱状,回波顶高最大值为9 km。 模拟的雷达回波也呈对流柱状,对流柱的位置接近 观测,但回波强度偏强,回波顶高偏高,无回波区 域偏大。



图3 2008年7月(a、b)28日00:00至29日00:00,(c、d)29日00:00至30日00:00观测(左列)和对比试验(右列)24h累积降水量水 平分布对比

Fig. 3 Comparison of 24-h accumulated precipitation from observations (left panel) and control experiment (CON) (right panel) from (a, b) 0000 UTC 28 Jul 2008 to 0000 UTC 29 Jul 2008 and (c, d) 0000 UTC 29 Jul 2008 to 0000 UTC 30 Jul 2008

	Table 2 Categorization of cloud types by the T3EF method					
	浅对流云	浓积云	中层冷云	深对流云		
云顶亮温/K	>260	>245	<245	<260		
降水顶高度/km	<4	4-7	4-7	>7		

表 2 基于 T3EF 方法的云类型分类 Table 2 Categorization of cloud types by the T3EF method

使用静止卫星 TBB产品可以很好地定位、追踪云系统,但单一的 TBB产品无法分辨云的类型,同时不同类型的云具有不同的动力过程和环境条件,因此通过云分类来评估云的定量属性非常重要(Roh and Satoh, 2014)。使用 T3EF 的云类型分类方法,将云按表2分为浅对流云、浓积云、中层冷云(在层云里面有小的冻结滴上升,也包括有云砧的浓积云)、深对流云[云内有大的冻结滴上升(Matsui et al, 2009)]。

图7为2008年7月29日18:00 TRMM及模拟的 云顶亮温TBB和降水顶高度PTH联合直方图。观 测的浅对流云、浓积云、中层冷云和深对流云每种 云类型所占百分比分别为9.2%、10.8%、22.2%和27.9%,模拟结果依次为16.4%、9.0%、10.0%和20.5%。这说明模拟产生了较多的浅对流云,低估了浓积云、中层冷云及深对流云的分布。

图8为2008年7月29日18:00 TRMM及对比试 验不同云类型的雷达反射率等高频率高度图 CFAD, CFAD方法(Yuter and Houze, 1995)统计 雷达反射率强度在垂直方向上各高度出现的频次, 该方法可以给出雷达反射率的垂直结构。图8显示 观测的浅对流云和浓积云的雷达回波从高空向地面 增加并且向地面拓展(图8a和8c),模拟的浅对流 云雷达回波不向地面增加(图8b),回波频率有低 CAO Bei et al. Verification and Improvement of Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF ...



图4 2008年7月(a、b) 28日19:00及(c、d) 29日18:00MTSAT观测(左列)和CON(右列)的红外云顶亮温TBB水平分布对比 Fig. 4 Comparison of TBBs from MTSAT observations (left panel) and CON (right panel) at (a, b) 1900 UTC 28 Jul 2008 and (c, d) 1800 UTC 29 Jul 2008



图 5 2008年7月28日00:00至30日00:00图4黑框区域内格点平均 红外云顶亮温TBB的时间序列(框线为MTSAT TBB值,点线为 CON TBB值)

Fig. 5 Time series analysis of TBBs in black box area in Fig. 4 from 0000 UTC 28 Jul 2008 to 0000 UTC 30 Jul 2008 (The frame line is the TBB from MTSAT, and the dotted line is the TBB from CON)

估而回波强度偏高。模拟的浓积云雷达回波接近观 测但回波强度偏强(图8d)。观测的中层冷云雷达 回波在5km上方有0℃度层亮带且回波强度向地 面缓慢增加(图8e),模拟的结果无明显回波亮度存在(图8f)。观测和模拟的深对流云雷达回波频率分布在5km以上接近(图8g和8h),在5km以下模拟的雷达回波分布比观测更宽。

5.2 敏感性试验

图 9a 显示对比试验模拟的 TBB 与观测 TBB 的差值分布,部分地区模拟 TBB 与观测相差较 大。由图 9b 可见 MOD1 模拟的 TBB 与观测 TBB 的差值减小,对 TBB 的模拟改善效果明显。由图 9c 可见 MOD2 改善效果不明显,部分地区模拟 TBB 与观测 TBB 差值的绝对值增大。由图 9d 可 见 MOD3 至 MOD10 这8 个敏感性试验结果与对比 试验结果相差较小,不做讨论。敏感性试验 MOD1、MOD2 的结果说明调整云水向雨水自动 转化率改善了云顶亮温 TBB 的模拟效果,云滴初 始数浓度影响云水向雨水自动转化率并最终影响 云系结构的模拟结果,过高的云滴初始数浓度会



图6 2008年7月28日19:00(a) TRMM观测和(b) CON的13.8 GHz 雷达反射率沿图4中AB线的垂直剖面 Fig. 6 Vertical cross sections of the 13.8-GHz radar reflectivity along line AB in Fig. 4 from (a) TRMM observations and (b) CON at 1900 UTC 28 Jul 2008



图7 2008年7月29日18:00(a) TRMM及(b) CON云顶亮温TBB和降水顶高度联合直方图 Fig. 7 Joint histograms of TBB and PTH from (a) TRMM and (b) CON at 1800 UTC 29 Jul 2008

使模拟结果变差。

图 10 为敏感试验方案 MOD1、 MOD2 与 TRMM 观测的雷达反射率比较,可见相比于 CON 试验模拟结果, MOD1 试验模拟的雷达回波强度 和回波顶高更接近实况,无回波区域范围减小, 有效地改善了雷达反射率的模拟效果。MOD2 的 模拟效果差于 CON 试验结果,对模拟效果无改 善。云水向雨水的自动转化过程指的是云微物理 过程中云滴碰撞合并成小雨滴的过程,它决定着 暖云降水的开始,对降水的总量及时空分布有很 大的影响。WDM6 方案采用了 Berry and Reinhardt (1974) 的公式,邓琳等 (2016) 对超强台风"威 马逊"的模拟结果显示WDM6方案增加了云雨水 自动转化率。敏感性试验中采用合适云滴初始数 浓度的云水向雨水自动转化率能有效改善WDM6 方案的模拟效果,可以克服WDM6方案中云水向 雨水自动转化过程的缺陷,并且采用MOD1的改 进模拟效果最好。

6 结论

利用中尺度模式WRF中的WDM6双参数云物 理化方案对台风"凤凰"登陆过程中的强降水过程 进行数值模拟,通过卫星模拟器利用MTSAT-1R和 TRMM卫星观测的云顶亮温TBB、PR 雷达反射率



图 8 2008 年 7 月 29 日 18:00 TRMM 及 CON (a、b) 浅对流云、(c、d) 浓积云、(e、f) 中层冷云、(g、h) 深对流云雷达反射率的等高频 率高度图

Fig. 8 Contoured Frequency by Altitude Diagram (CFAD) for cloud categories of (a, b) shallow, (c, d) congestus, (e, f) midcold, and (g, h) deep clouds for TRMM and CON at 1800 UTC 29 Jul 2008



图 9 2008年7月28日19:00 (a) 对比试验、敏感试验 (b) MOD1、(c) MOD2、(d) MOD3-10与MTSAT观测的TBB差值水平分布对比 Fig. 9 Difference in TBBs between (a) the control experiment, and sensitivity experiments (b) MOD1, (c) MOD2, and (d) MOD3-10 and MTSAT observations at 1900 UTC 28 Jul 2008



图 10 2008年7月28日 19:00(a) TRMM, 敏感试验(b) MOD1和(c) MOD2的 13.8 GHz 雷达反射率沿图4中AB 连线的垂直剖面 Fig. 10 Vertical cross sections of the 13.8-GHz radar reflectivity along line AB in Fig. 4 from (a) TRMM, the sensitivity experiments (b) MOD1 and (c) MOD2 at 1900 UTC 28 Jul 2008

表明:

资料使用统计方法验证模拟结果,同时通过修改 云水向雨水自动转化过程、冰晶核化过程、雪和 霰的下落末速度、雪和霰的截距进行敏感性试验, 减小模拟结果和卫星观测结果的差异,研究结果

(1) WDM6 方案模拟的台风"凤凰"登陆后的暴雨和大暴雨的位置和范围基本符合实况,但存在模拟的降水强度在局部偏强。WDM6 方案模拟出了卫星观测的强对流云系,模拟的强对流云系的分布和移动接近观测,但也存在模拟的强对流云系范围偏小和模拟的云顶亮温在部分地区偏高的不足。长时间序列的区域平均 TBB 表明观测和模拟的 TBB 时间变化趋势基本一致,两者呈正位相关系。模拟的对流柱状雷达回波与观测一致,对流柱的位置接近观测,但回波强度和回波顶高偏高。

(2) 云顶亮温 TBB 和降水顶高度 PTH 联合直 方图说明 WDM6 方案模拟产生了较多的浅对流 云,低估了对流云系的出现频率。不同云类型的 雷达反射率等高频率高度图 CFAD 显示模拟的雷 达回波偏强,模拟的对流云系雷达回波垂直分布 接近观测。

(3)敏感性试验结果说明修改WDM6方案中 云水向雨水自动转化率减小了模拟的云顶亮温 TBB与观测的差值,模拟的雷达回波强度和回波 顶高更接近实况,无回波区域范围减小,有效地改 善了WDM6方案的模拟效果。同时发现云滴初始 数浓度影响云水向雨水自动转化率并最终影响云系 结构和雷达反射率的模拟结果,过高的云滴初始数 浓度会使模拟结果变差,采用敏感性试验1中的云 水向雨水自动转化率能改进WDM6方案的模拟 效果。

本文针对2008年台风"凤凰"登陆强降水的 数值模拟研究表明,WRF中的WDM6云物理方案 中的云水向雨水自动转化过程存在高估,导致模拟 的云和降水与实际存在差异,需要采用合适的云水 向雨水自动转化计算方法来改进模拟效果,对该过 程的调整还需结合实际降水状况而变。需要指出的 是,本研究只是选择了一个个例进行分析,今后将 进行更多的强降水个例的数值模拟试验,利用最新 的卫星综合探测资料,更深入地评估和改进双参数 云微物理方案对强降水的模拟。

参考文献(References)

- Berry E X, Reinhardt R L. 1974. An analysis of cloud drop growth by collection. Part II: Single initial distributions [J]. J. Atmos. Sci., 31 (7): 1825–1831. doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<1825: AAOCDG >2.0.CO;2
- Bodas-Salcedo A, Webb M J, Bony S, et al. 2011. COSP: Satellite simulation software for model assessment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 92(8): 1023–1043. doi:10.1175/2011bams2856.1
- Cooper W A. 1986. Ice initiation in natural clouds [J]. Meteorological Monographs, 43: 29–32. doi:10.1175/0065-9401-21.43.29
- 邓琳,端义宏,高文华,等. 2016. 超强台风"威马逊"(2014)云微物 理特征的模拟与对比分析 [J]. 气象学报, 74(5): 697-714. Deng Lin, Duan Yihong, Gao Wenhua, et al. 2016. Numerical simulation and comparison of cloud microphysical features of super typhoon Rammasun (2014) [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74 (5): 697-714.
- Fletcher N H. 1962. The Physics of Rainclouds [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 390pp. doi:10.1119/1.1970202
- 傅云飞,潘晓,刘国胜,等. 2016. 基于云亮温和降水回波顶高度分类 的夏季青藏高原降水研究 [J]. 大气科学, 40(1): 102-120. Fu Yunfei, Pan Xiao, Liu Guosheng, et al. 2016. Characteristics of precipitation based on cloud brightness temperatures and storm tops in summer Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 102-120.
- Gao Wenhua, Sui C H, Tai-Chi Chenwang, et al. 2011. An evaluation and improvement of microphysical parameterization from a twomoment cloud microphysics scheme and the Southwest Monsoon Experiment (SoWMEX)/Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment (TiMREX) observations [J]. J. Geophys. Res., 116 (D19): D19101. doi:10.1029/2011jd015718
- Grabowski W W. 1999. A parameterization of cloud microphysics for long-term cloud-resolving modeling of tropical convection [J]. Atmospheric Research, 52(1–2): 17–41. doi:10.1016/s0169-8095(99) 00029-0
- Grasso L, Lindsey D T, Sunny Lim K S, et al. 2014. Evaluation of and suggested improvements to the WSM6 microphysics in WRF-ARW using synthetic and Observed GOES-13 imagery [J]. Mon. Wea. Rev., 142(10): 3635–3650. doi:10.1175/mwr-d-14-00005.1
- Hashino T, Satoh M, Hagihara Y, et al. 2013. Evaluating cloud microphysics from NICAM against CloudSat and CALIPSO [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 118(13): 7273–7292. doi:10.1002/jgrd.50564
- Lim K S S, Hong S Y. 2010. Development of an effective doublemoment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models [J]. Mon. Wea. Rev., 138(5): 1587–1612. doi:10.1175/2009mwr2968.1
- 林文实, 李江南, 樊琦, 等. 2007. 云微物理参数化对华北降雪影响的 数 值 模 拟 [J]. 高 原 气 象, 26(1): 107-115. Lin Wenshi, Li Jiangnan, Fan Qi, et al. 2007. Numerical simulation of impact of the microphysical parameterization on snowfall over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(1): 107-115.

- 刘奇. 2007. 基于 ISCCP 及 TRMM 观测的热带降水云与非降水云差 异的研究 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 178pp. Liu Qi. 2007. The property differences between precipitating clouds and nonprecipitating clouds over global tropics based on ISCCP&TRMM measurements [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology of China, 178pp.
- Masunaga H, Satoh M, Miura H. 2008. A joint satellite and global cloud-resolving model analysis of a Madden-Julian Oscillation event: Model diagnosis [J]. J. Geophys. Res., 113(D17): D17210. doi:10.1029/2008jd009986
- Masunaga H, Matsui T, Tao WeiKuo, et al. 2010. Satellite data simulator unit: A multisensor, multispectral satellite simulator package [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 91 (12): 1625–1632.
- Matsui T, Zeng Xiping, Tao Weikuo, et al. 2009. Evaluation of longterm cloud-resolving model simulations using satellite radiance observations and multifrequency satellite simulators [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 26(7): 1261–1274. doi:10.1175/2008jtecha1168.1
- Roh W, Satoh M. 2014. Evaluation of precipitating hydrometeor parameterizations in a single-moment bulk microphysics scheme for deep convective systems over the tropical central Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 71(7): 2654–2673. doi:10.1175/jas-d-13-0252.1
- Roh W, Satoh M, Nasuno T. 2017. Improvement of a cloud microphysics scheme for a global nonhydrostatic model using TRMM and a satellite simulator [J]. J. Atmos. Sci., 74(1): 167–184. doi:10.1175/jas-d-16-0027.1
- Shen Yan, Zhao Ping, Pan Yang, et al. 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 119(6): 3063–3075. doi:10.1002/2013jd020686
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/

TN-475+STR. doi:10.5065/D68S4MVH

- 陶玥, 齐彦斌, 洪延超. 2009. 霰粒子下落速度对云系及降水发展影 响 的 数 值 研 究 [J]. 气 象 学 报, 67(3): 370-381. Tao Yue, Qi Yanbin, Hong Yanchao. 2009. Numerical simulations of the influence of the graupel fall terminal velocity on cloud system and precipitation development [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(3): 370-381.
- Wainwright C E, Dawson D T, Xue Ming, et al. 2014. Diagnosing the intercept parameters of the exponential drop size distributions in a single-moment microphysics scheme and impact on supercell storm simulations [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 53(8): 2072–2090. doi:10. 1175/jamc-d-13-0251.1
- Yang Minghen, Houze R A. 1995. Sensitivity of squall-line rear inflow to ice microphysics and environmental humidity [J]. Mon. Wea. Rev., 123(11): 3175–3193. doi: 10.1175/1520-0493(1995)123<3175: soslri>2.0.co;2
- Yuter S E, Houze R A Jr. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity [J]. Mon. Wea. Rev., 123(7): 1941–1963. doi: 10.1175/1520-0493(1995)123<1941:tdkame>2.0.co;2
- Zheng Kailin, Chen Baojun. 2014. Sensitivities of tornadogenesis to drop size distribution in a simulated subtropical supercell over eastern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(3): 657–668. doi: 10.1007/ s00376-013-3143-7
- 张衍达, 王东海, 尹金方, 等. 2016. 粒子下落末速度和粒子谱形参数 对降水模拟影响的数值研究 [J]. 大气科学, 40(4): 841-852. Zhang Yanda, Wang Donghai, Yin Jinfang, et al. 2016. Impacts of terminal velocity and drop size distribution shape on the numerical simulation of precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 841-852.