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 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19001

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

CAO Bei[1,2], ZHAO Zhen[2], and BAI Aijuan[1]

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *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,

收稿日期 2019-01-02；**网络预出版日期** 2019-06-17

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

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)

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 6-class）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 Satellites）卫星和热带降水卫星TRMM观测量进行模式验证。

表1 MTSAT-1R遥感器参数

Table 1 MTSAT-1R satellite remote sensor parameters

通道名称（简称）	波长范围/μm	星下点空间分辨/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

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96 h。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30 km、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

$$\text{praut} = \frac{L}{\tau}, \tag{1}$$

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

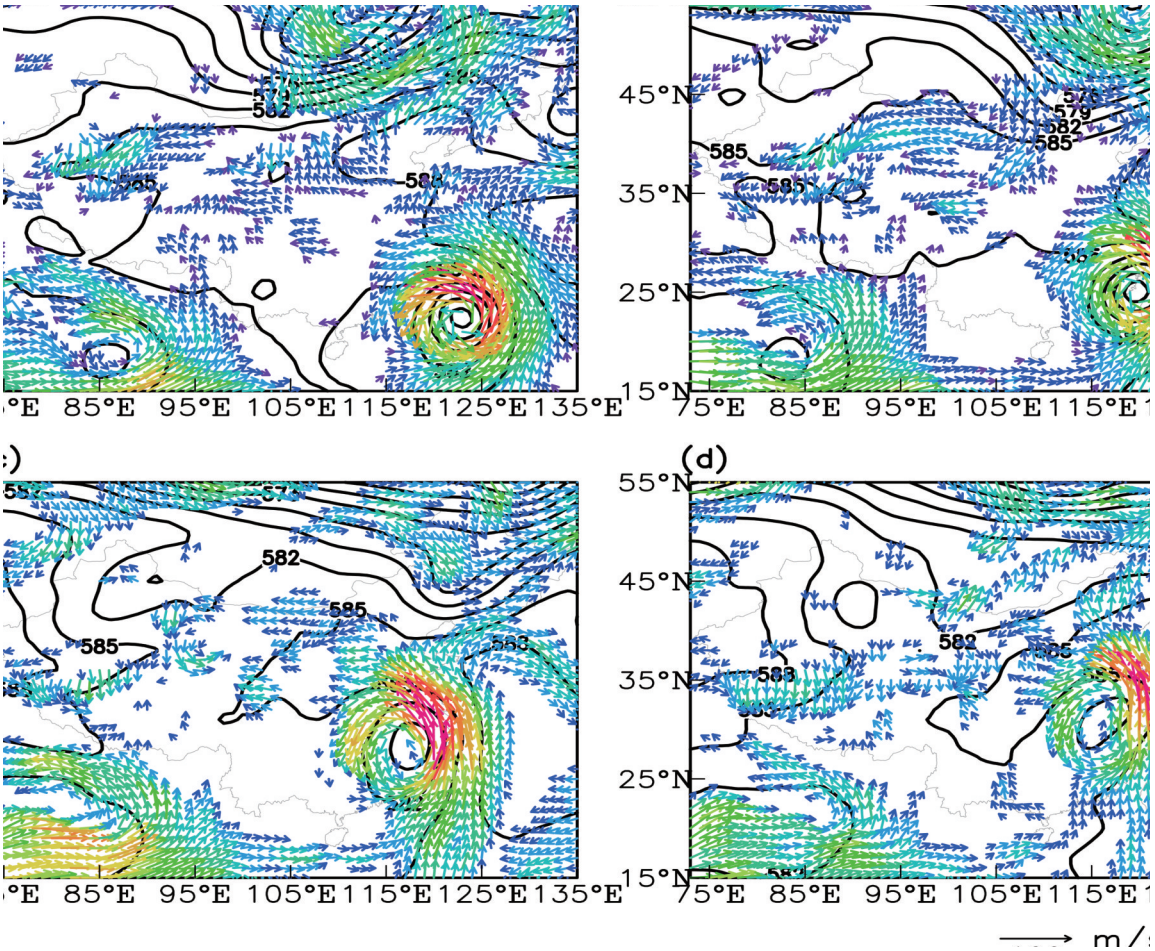

图1 2008年7月（a）27日12:00、（b）28日12:00、（c）29日12:00、（d）30日12:00 FNL数据500 hPa位势高度场（等值线，单位: dagpm）和850 hPa大于12 m s^{-1}的风场（矢量，单位: m s^{-1}）

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

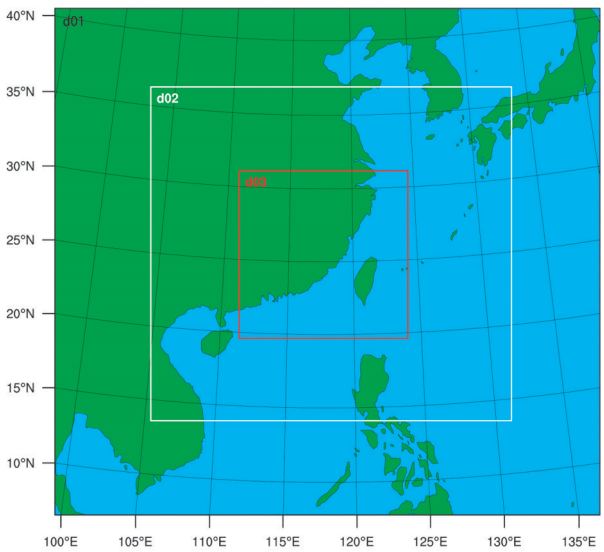

图2 数值模拟区域示意

Fig. 2 WRF simulation domains

$$\tau = 3.7\frac{1}{\rho_a q_c}(0.5\times10^6\sigma_c - 7.5)^{-1}, \quad (3)$$

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：μm），当$\sigma_c > 15$ μm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：

$$\text{praut} = 1.67\times10^{-5}\left(10^3\rho_a q_c\right)^2\left(5+\frac{3.6\times10^{-5}n_c}{d_c\rho_a q_c}\right)^{-1}, \quad (4)$$

$$d_c = 0.146 - 5.964\times10^{-2}\ln\frac{n_c}{2000}, \quad (5)$$

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

$$N_I = 10^3 \exp\left[0.1(T_0 - T)\right], \quad (6)$$

其中，N_I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：

$$N_I = 10^{-2} \exp\left[0.6\left(T_0 - T\right)\right], \quad (7)$$

$$N_I = 5\exp\left[0.304\left(T_0 - T\right)\right]. \quad (8)$$

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

$$\text{avts} = 11.72,\ \text{bvts} = 0.41 \quad (9)$$

（其中avts、bvts为随雪粒子形状、大小变化的参数）修改为MOD5：

$$\text{avts} = 8.996,\ \text{bvts} = 0.42. \quad (10)$$

WDM6方案中雪模拟方程截距的计算公式为

$$N_{0S} = 2 \times 10^6 \exp\left[0.12\left(T - T_0\right)\right], \quad (11)$$

其中，N_{0S}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：

$$N_{0S} = 3 \times 10^6, \quad (12)$$

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

参考陶玥等（2009）的研究，将WDM6中原霰的下落末速度计算公式

$$\text{av tg} = 330, \text{bv tg} = 0.8 \quad (14)$$

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

$$\text{av tg} = 1094.3,\ \text{bv tg} = 0.6384, \quad (15)$$

$$\text{av tg} = 382,\ \text{bv tg} = 0.36. \quad (16)$$

WDM6方案中对霰的截距的计算公式为

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

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：

$$N_{0g} = 4.0 \times 10^8. \quad (18)$$

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24 h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24 h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250 mm，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210 K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。

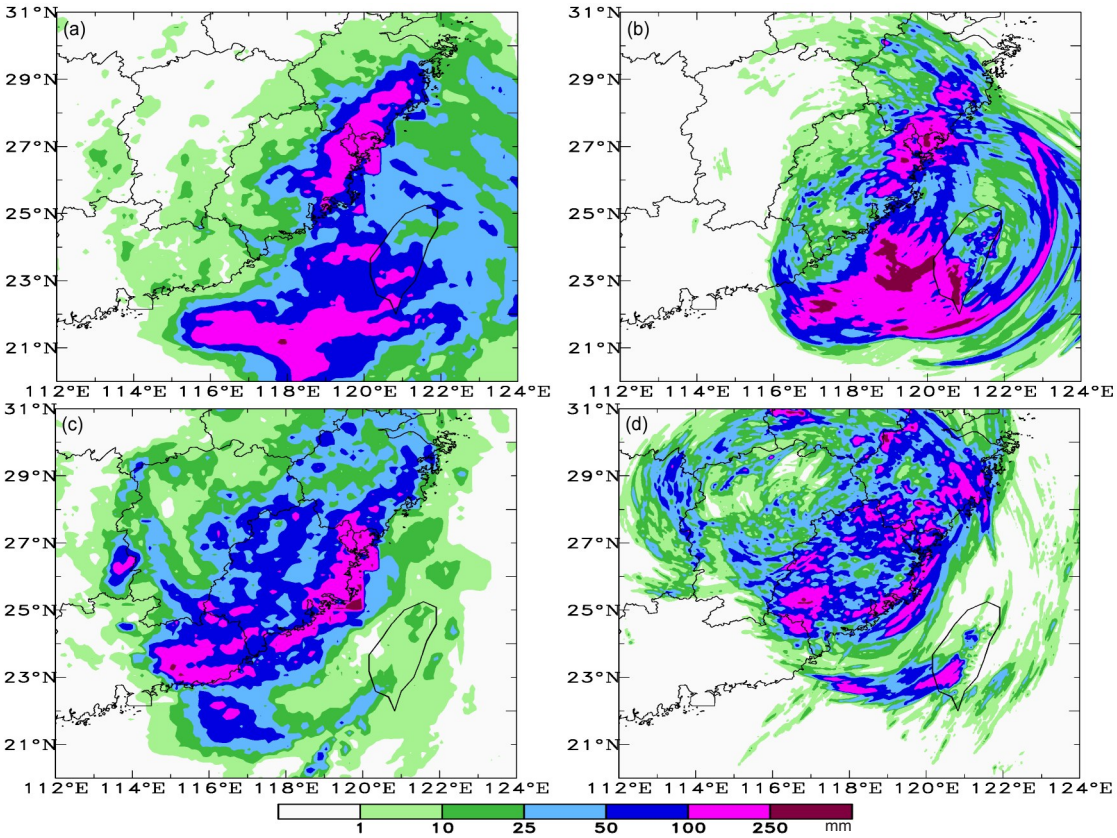

图3 2008年7月（a、b）28日00:00至29日00:00，（c、d）29日00:00至30日00:00观测（左列）和对比试验（右列）24 h累积降水量水平分布对比

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

表2 基于T3EF方法的云类型分类

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

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

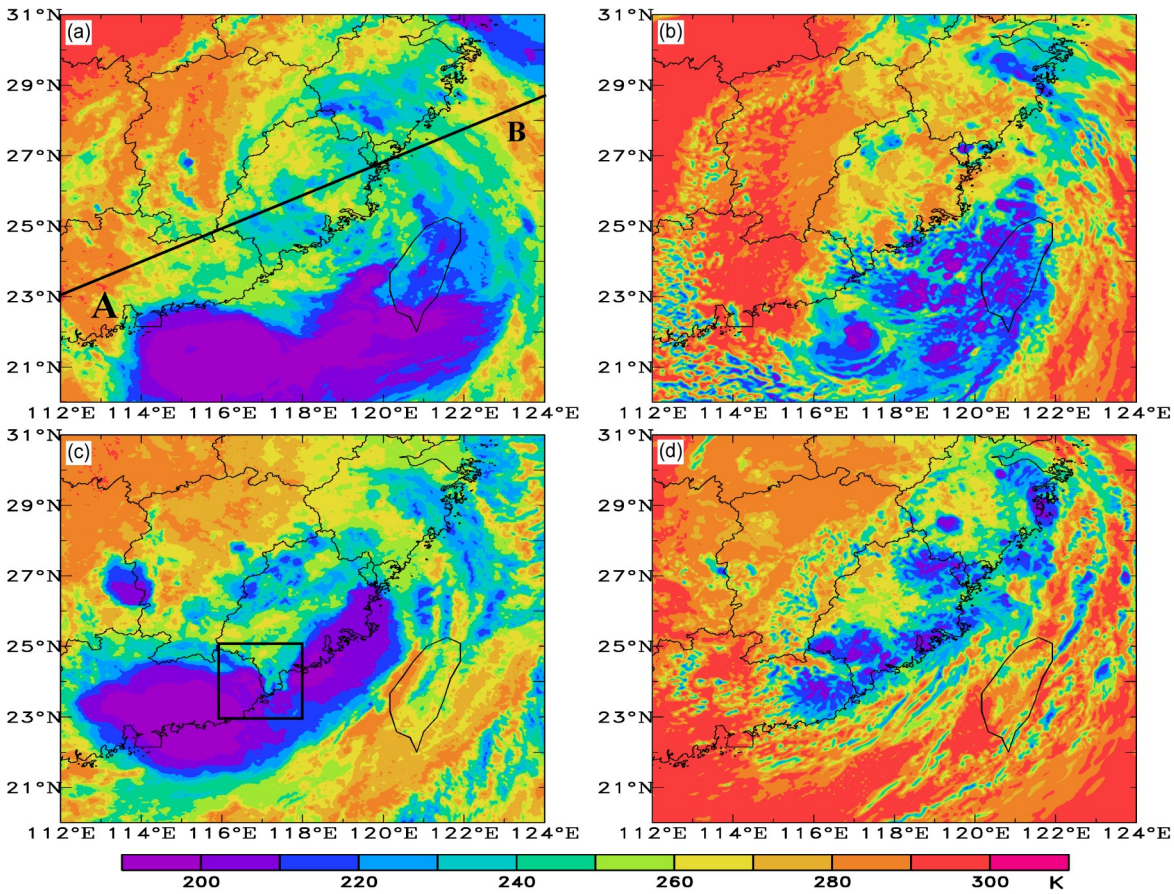

图4　2008年7月（a、b）28日19:00及（c、d）29日18:00MTSAT观测（左列）和CON（右列）的红外云顶亮温TBB水平分布对比

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

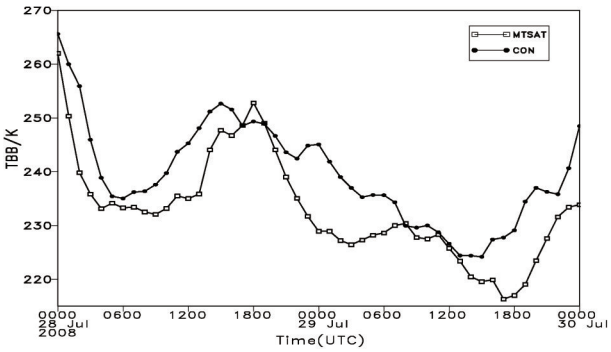

图5　2008年7月28日00:00至30日00:00图4黑框区域内格点平均红外云顶亮温TBB的时间序列（框线为MTSAT TBB值，点线为CON TBB值）

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5 km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5 km以上接近（图8g和8h），在5 km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

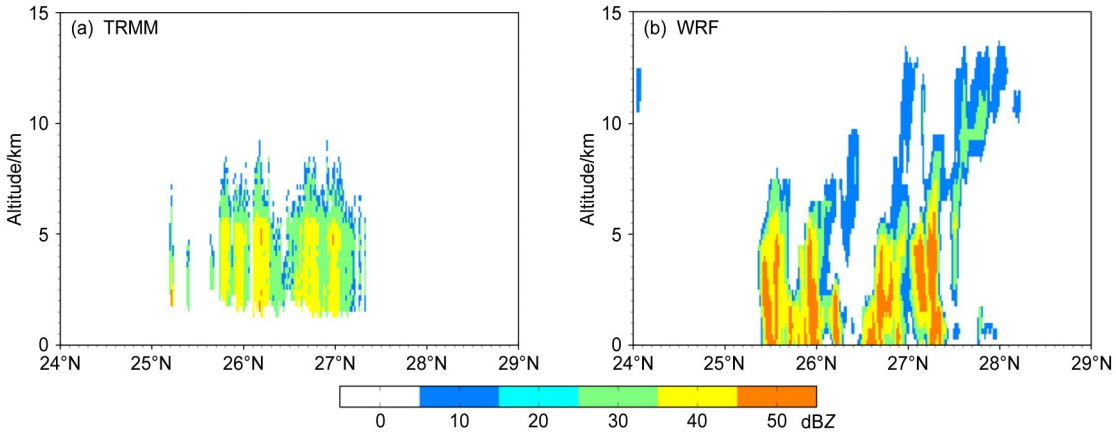

图6 2008年7月28日19:00（a）TRMM观测和（b）CON的13.8 GHz雷达反射率沿图4中AB线的垂直剖面

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

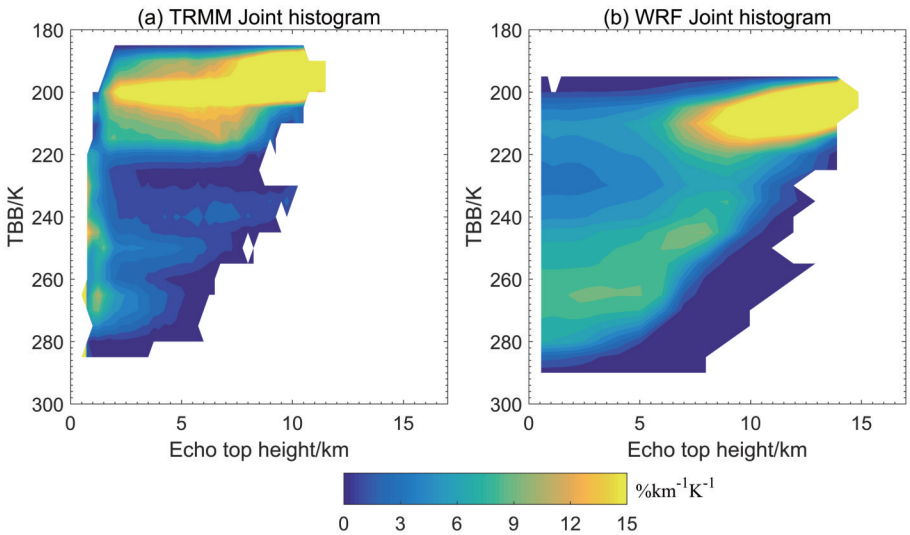

图7 2008年7月29日18:00（a）TRMM及（b）CON云顶亮温TBB和降水顶高度联合直方图

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

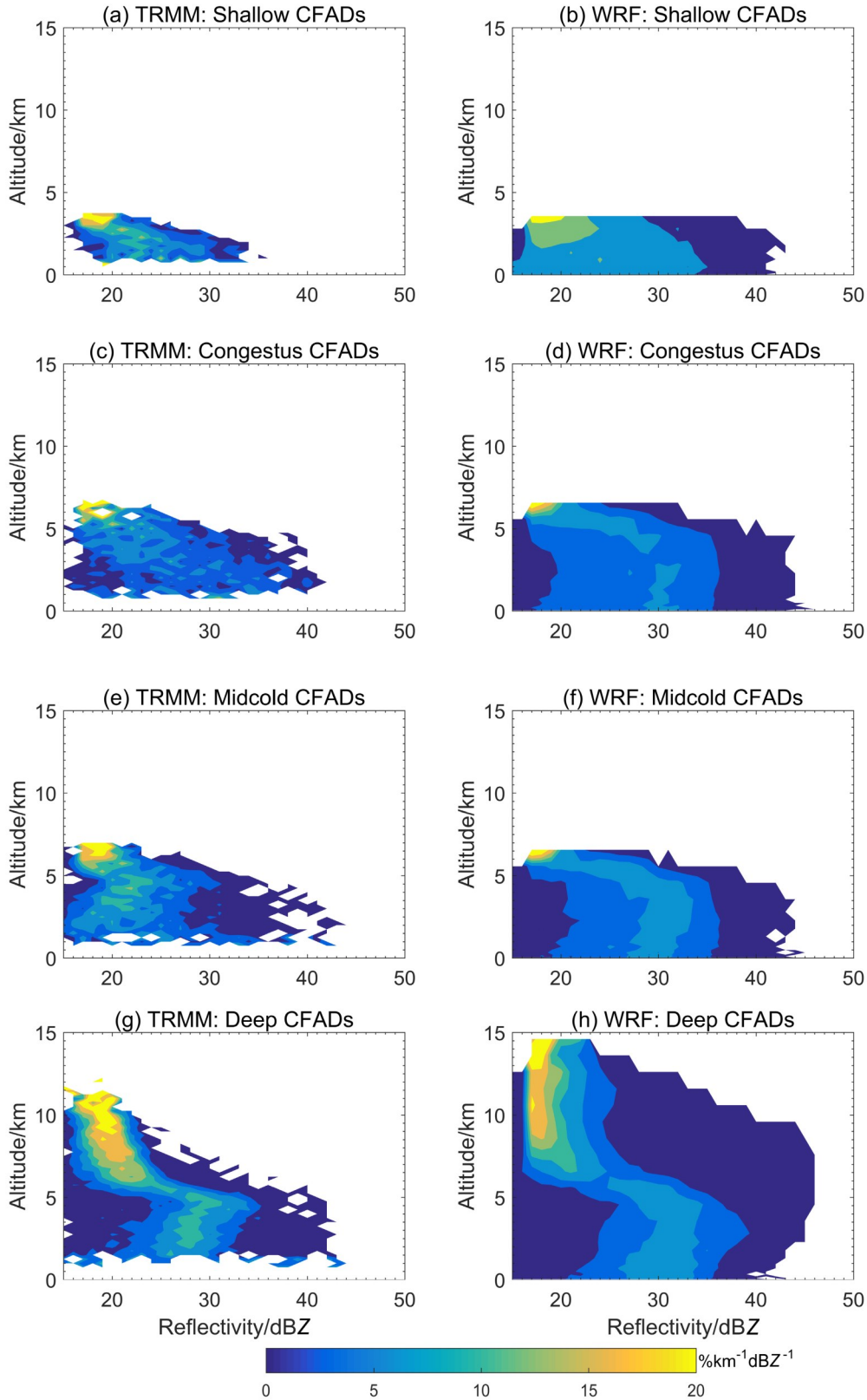

图8　2008年7月29日18:00 TRMM及CON（a、b）浅对流云、（c、d）浓积云、（e、f）中层冷云、（g、h）深对流云雷达反射率的等高频率高度图

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

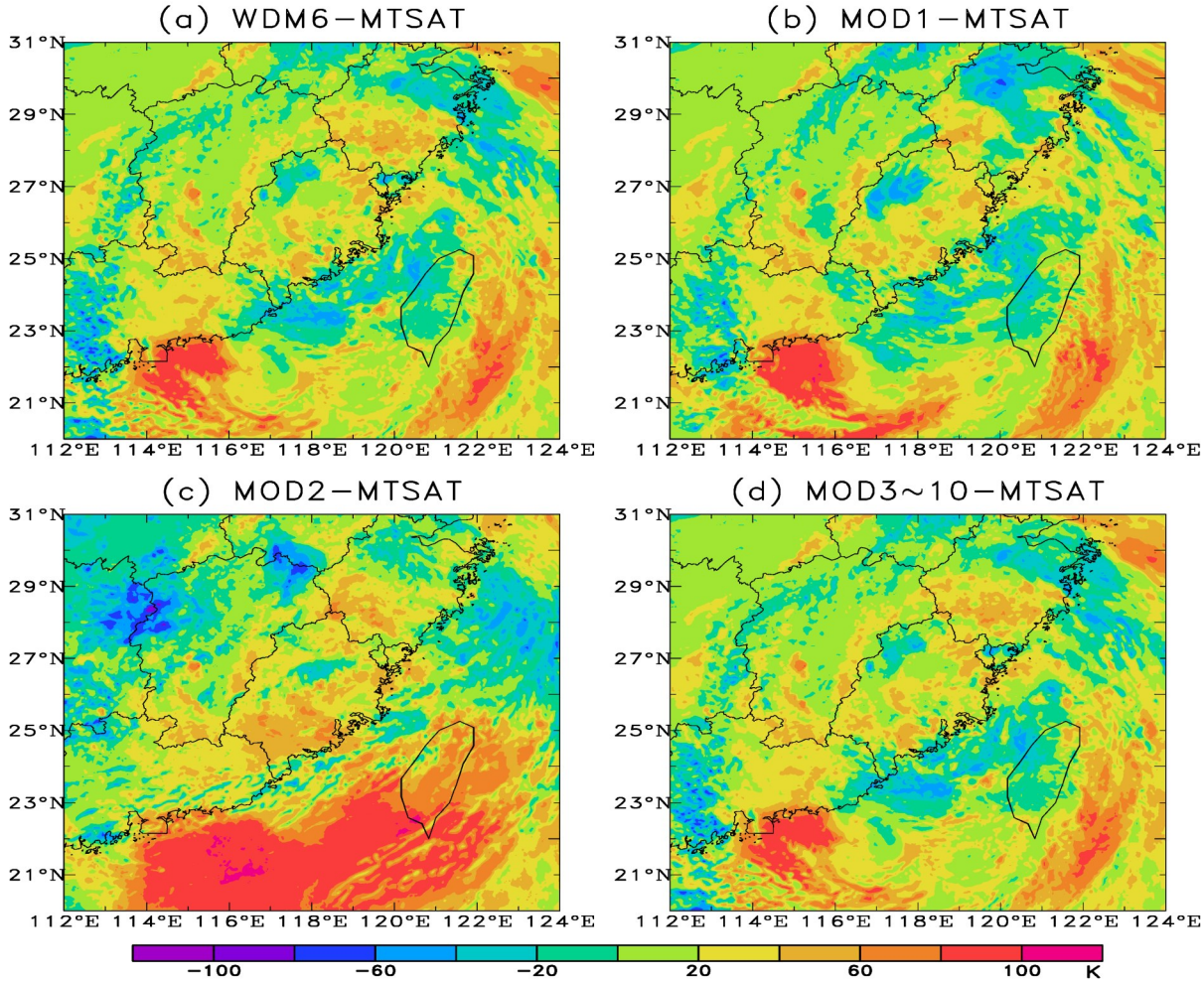

图9 2008年7月28日19:00（a）对比试验、敏感试验（b）MOD1、（c）MOD2、（d）MOD3-10与MTSAT观测的TBB差值水平分布对比

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

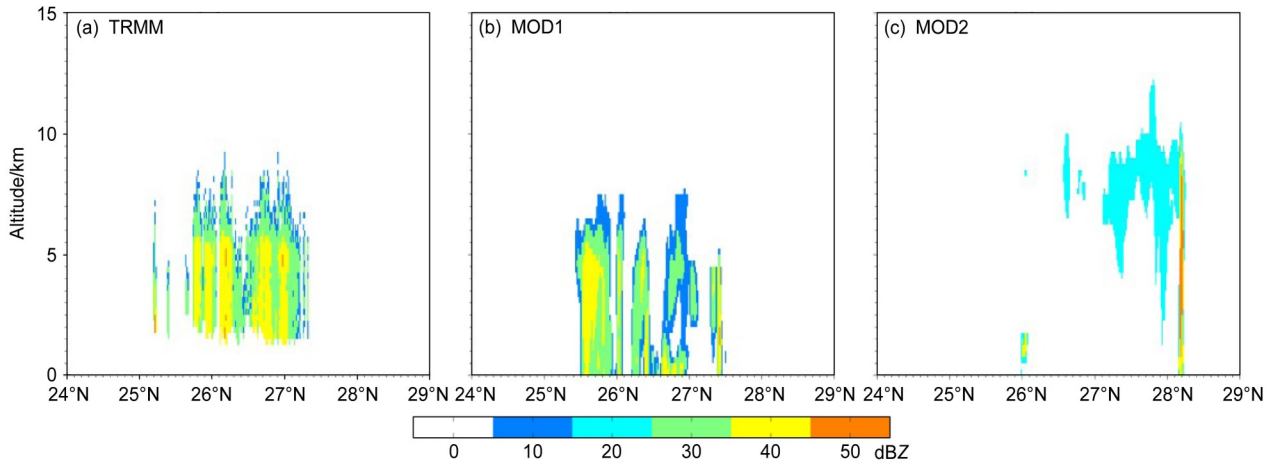

图10 2008年7月28日19:00（a）TRMM，敏感试验（b）MOD1和（c）MOD2的13.8 GHz雷达反射率沿图4中AB连线的垂直剖面

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

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，研究结果表明：

（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 two-moment 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 double-moment 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 non-precipitating 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 long-term 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.