

梅海霞, 沈新勇, 王卫国, 等. 2015. WRF 单柱模式中单参数方法对热带对流模拟能力的影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (6): 685–704. Mei Haixia, Shen Xinyong, Wang Weiguo, et al. 2015. Effects of one-moment parameterization on the capacity to simulate tropical convection using a single-column model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (6): 685–704, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15093.

WRF 单柱模式中单参数方法对热带对流模拟能力的影响

梅海霞^{1,2} 沈新勇^{1,3} 王卫国⁴ 黄小梅⁵

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

2 江苏省气象科学研究所, 南京 210009

3 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

4 美国国家海洋大气总署环境预测中心, 马里兰 20746

5 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

摘要 利用耦合 Milbrandt 2-mon (MY) 双参数微物理方案的 WRF 中的单柱模式, 对 TWP-ICE 试验 (Tropical Warm Pool International Cloud Experiment) 期间的个例进行数值模拟和敏感性试验。通过与观测资料和云分辨率模式的模拟结果进行对比发现: MY 方案默认的双参数版本和单参数版本均能够再现 TWP-ICE 期间的热带云系的总体宏观和微观特征。MY 方案的双参数版本模拟的降水率的演变特征同观测十分吻合, 冰相粒子的微观特征同观测事实较为一致。单参数默认版本的降水率、液态云的构成及冰相粒子微观特征方面同观测事实存在明显差距。然而实际业务应用中单参数方案由于计算量较小应用更为广泛, 但模拟效果有待改善。为了使方案保持计算量较为合理的同时具有较好的模拟效果, 参考双参数控制试验中的冰相物质的微观特征, 尝试对单参数方案中冰相粒子的单参数方法进行改进。冰晶单参数改进试验中虽然对于冰晶数浓度采用两种不同的处理方法, 但模拟效果均未明显改善。其中冰云总含量更加接近观测, 且冰云构成发生显著变化, 主要归因于冰晶有效半径的减小间接削弱了雪和霰的发展。云滴含量的异常增强导致液态水含量比观测偏高约一个量级, 暖云异常增厚则与上升运动的增强直接相关。雨水含量明显增强及雨滴有效半径减小综合导致了降水率仅有微弱改善。雪的单参数改进试验中, 雪的截距值增加及环境场过饱和条件改善促进了冰云的发展。通过适当调整雪的截距的经验诊断公式, 雪的截距、液态水含量以及降水率均得到较好的改善; 而指定雪截距为常数的处理方式使液态云更为偏厚, 降水率演变细节同观测仍然差异显著。改进试验结果表明, 单参数方案中采用适当的经验公式诊断雪的截距的处理方法对改善单参数方案的模拟能力具有一定的可行性。

关键词 微物理 单参数 单气柱模式 Milbrandt 2-mon 方案 截距

文章编号 1006-9585 (2015) 06-0685-20

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15093

Effects of One-Moment Parameterization on the Capacity to Simulate Tropical Convection Using a Single-Column Model

MEI Haixia^{1,2}, SHEN Xinyong^{1,3}, WANG Weiguo⁴, and HUANG Xiaomei⁵

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2015-04-18; **网络预出版日期** 2015-09-02

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2013CB430103、2015CB453201, 国家自然科学基金 41375058、41530427, 江苏省青年气象科研基金 Q201407

作者简介 梅海霞, 女, 1987 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事中小尺度数值模拟等研究。E-mail: meihaxia@meihaixia@163.com

通讯作者 沈新勇, E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

2 Jiangsu Research Institute of Meteorological Science, Nanjing 210009

3 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 National Centers for Environmental Prediction, National Oceanic and Atmospheric Administration, Maryland 20746, USA

5 Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072

Abstract A double-moment bulk microphysics scheme, Milbrandt 2-mon (MY), was evaluated using the WRF single-column model during the period of the Tropical Warm Pool International Cloud Experiment (TWP-ICE). Results from separate simulations using the double-moment and simple one-moment (1M) versions of the microphysics scheme with the default settings in WRF were able to reproduce the general characteristics of moisture variables from the macro to the micro scale, as compared with observations and cloud resolving model (CRM) results. The rain rate and microscale features of the ice phase from the double-moment control simulation (CTL) were very close to observations, but showed significant deviations from the simple 1M version simulation. One-moment bulk microphysics schemes have been widely applied in real business situations with little computation, but their simulating abilities need to be improved. In order to maintain a reasonable computational expense, but with better simulating ability, several measures were applied to improve the simple 1M versions of the MY scheme on the basis of the microscale features of the ice phase from CTL. The results from the runs with two ice 1M modified versions were similar. Both showed non-significant improvements, despite their different treatments in terms of the number concentration of ice crystals. The frozen water path and observations showed more agreement, but significant changes occurred in the composition of ice clouds, mainly attributed to the weakened growth of snow and graupel indirectly affected by smaller ice crystals. The liquid water path showed an order of magnitude larger than observations as a result of abnormal enhancement in cloud droplet content, related to enhancements in upward movement. The liquid water content and raindrop effective radius changing in an opposite direction led to a tiny improvement in the rain rate. Sensitivity tests using two snow 1M modified versions of the MY scheme showed that ice-phase cloud was enhanced after adding the snow intercept and improving the environmental conditions of superstation. The characteristics of the snow intercept, liquid water content, and rain rate became significantly improved after adjusting the empirical formula of the snow intercept properly. Meanwhile, the method of adopting the reference values of the snow intercept in CTL did not show the same performance in ice-phase clouds, resulting in thicker warm clouds and a significant discrepancy between the simulated and observed rain rate. Optimized simulations with 1M modified versions suggested that the treatment of adjusting the empirical formula of the snow intercept properly in the 1M version of the microphysics scheme has a certain feasibility.

Keywords Microphysics, Single-moment, Single-column model, Milbrandt 2-mon scheme, Intercept

1 引言

现代天气预报越来越依赖于数值预报。微物理方案在数值模式中负责描述成云致雨的过程,其中云粒子分布谱及其变化是云降水过程的关键。参数化方法是指通过谱分布函数中的参数来反映粒子谱的演变。较为常用的是假设粒子服从伽马分布函数,即

$$N(D) = N_0 D^\alpha e^{-\lambda D}, \quad (1)$$

其中, N 是粒子数浓度 (单位: m^{-3}), D 为粒子直径 (单位: m), 待定谱参数 N_0 、 λ 、 α 分别代表截距 (单位: m^{-4})、斜率 (单位: m^{-1}) 和谱形参数。根据谱参数的处理方式, 采用参数化方法的方案大致有 3 类, 一是单参数谱演变方案, 只预报比含水

量, 求得斜率; 二是双参数谱演变方案, 同时预报粒子的比含水量和比浓度 (许焕斌和段英, 1999), 即预报斜率和截距; 三参数谱演变方案在双参数方案的基础上增加了雷达反射率的预报并用来计算谱形参数, 但该方程并不独立, 雷达反射率是依赖于比数浓度和比含水量的衍生变量, 其应用还不广泛。谱函数中未预报的谱参数则通过诊断等方式给定。

相比于单参数方案, 双参数方案中斜率和截距各自独立变化使得所描述粒子谱的演变更加接近自然情况。以往的研究表明双参数方案在模拟极地云系 (Morrison et al., 2005; Morrison and Pinto, 2005, 2006; Luo et al., 2008a, 2008b)、中纬度的真实中尺度对流风暴 (Lim and Hong, 2010; Dawson et al., 2010; Jung et al., 2010, 2012)、在较细分辨率 (12

km) 条件下的华北暴雨 (马严枝等, 2012)、中纬度冬季风暴 (Reisner et al., 1998) 以及中纬度理想风暴的数值试验 (Milbrandt and Yau, 2006b; Morrison et al., 2009) 等方面总体均优于单参数方案。多参数谱演变方案在理论及实际个例模拟中优势显著, 许多研究也利用基于双参数方案的高分辨率的模拟结果进行详细的云降水及气溶胶影响降水的机理分析 (Morrison et al., 2008; 于翡和姚展予, 2009; 马国忠等, 2010; 肖辉和银燕, 2011; 董昊等, 2012; 王秀娟等, 2013; 沈新勇等, 2015)。

双参数方案物理基础更为合理, 理论优势突出, 但其增加粒子数浓度的预报所带来相关物理量的三维风场输送以及微物理过程源汇项的计算, 使得计算量大大增加 (Dawson et al., 2010)。微物理过程的计算是模式运行中最为耗时的几个部分之一 (郭妙等, 2012)。面临巨大的计算需求, 当前许多气候模式仍然采用单参数方案 (Wang et al., 2009), 实时业务中也往往更青睐单参数方案以保障计算时效 (晏晓英等, 2010; 周嘉陵等, 2011; 敖翔宇等, 2011; 陈锋等, 2012)。实现计算效率和模式性能的双赢对于气候模式以及实际业务应用具有重要的科研价值和实际意义, 单参数方案需要进行进一步地改进完善才能在实际应用中更好地发挥作用。

由于缺少相关的观测资料或者精度不高, 学者们往往以双参数方案模拟的云物理特征参量作为参考, 调整单参数方案中的谱参数处理方法以充分挖掘单参数方法的应用潜能, 改善单参数方案的模拟效果。Reisner et al. (1998) 模拟冬季真实风暴时发现单参数方案中雪的截距值通过混合比诊断相比于直接给定为常数的处理方式, 模拟结果会相对合理一些。超级单体风暴中, 雹的截距值由常数改为由斜率诊断之后, 模拟结果更加接近双参数方案的结果 (Milbrandt and Yau, 2006b)。极地混合云中, 当单参数方案中的雪的截距值采用双参数方案中的参考值之后, 雪的混合比模拟得更为合理 (Solomon et al., 2009)。可见, 对单参数方案中的谱参数的处理方法进行合理地调整之后, 往往能够实现计算量相比于双参数方案大大降低而模拟效果几乎相当的目的 (Milbrandt and Yau, 2006b; Dawson et al., 2010)。在进行适当的改进之后, 单参数方案仍然是不错的选择。本文正是参考以上思路, 探讨单参数方案的改进方法及效果。

热带地区的对流系统驱动了全球的大气环流, 在大气的水循环中扮演着重要的角色。无论是气候变化还是实时天气业务都与其息息相关。目前我们对热带云系的物理理解还比较初步 (Stephens, 2005), 以往的研究多局限于中高纬地区, 因而关于微物理方案对热带对流系统的模拟能力还需要更多的检验工作。同时鉴于热带地区在气候模式以及实时业务模式 (台风预报) 中的重要性, 为实现计算效率和模式性能二者的平衡, 借鉴中高纬度的做法, 研究单参数方案的谱参数处理方法对于热带地区模拟效果的改善潜力更显得尤为迫切。而目前这方面的研究还比较少。

本文利用 WRF 单柱模式, 初步检验了 Milbrandt 2-mon (Milbrandt and Yau, 2005a, 2005b) (MY) 方案默认的双参数版本和单参数版本对热带对流云系的模拟能力。由于 MY 方案的单参数版本 (默认) 在降水率、液态水含量以及冰云微观特征方面的模拟效果远不及双参数版本 (默认) 的模拟效果, 文中参考双参数方案模拟的关键云物理特征, 尝试对相关冰相粒子的单参数方法进行改进。通过敏感性试验考察调整之后单参数方案在热带地区模拟效果的改善能力并以此来初步探讨改进之后的单参数方案在实际应用中的可行性。

2 模式和数据

2.1 SCM 模式简要介绍

本文所用的单柱模式于 2009 年 4 月 9 日发布的 3.1 版本的 WRF 模式中首次引进。该模式是理想模式 (idealized simulation) 的单气柱模式 (single column model, 简称 SCM)。2011 年 4 月发布的 WRF3.3 版本对该试验模型进行了更新, 主要是添加了一些地表通量作为强迫场。此前 SCM 多应用于全球大气环流模式中气候模式及中尺度模式的物理过程参数化方案的质量检验工作之中 (Ghan et al., 2000; Wang et al., 2009; Song and Zhang, 2011; 梅海霞等, 2015)。在此研究中, SCM 模式被地表的显热通量和潜热通量以及大尺度的平流场驱动。

单气柱模式 SCM 是 WRF 中一个一维的理想模式。可以近似认为, SCM 是从三维 WRF 模式中抽取的一个垂直气柱, 周围气柱对 SCM 的作用则通过强迫场来直接给定。SCM 并没有考虑非线性的大尺度的动力反馈作用, 因而能够更加直接和方便地

测试微物理方案中最基本的物理过程是否正确。利用单气柱模式,可以很方便并且即时地看到某种微物理方案的具体特征是怎样的,而在三维 WRF 模式中要做到这一点,必须首先把复杂的非线性反馈过程从中分离出来。SCM 的优势主要有两点:1)它只代表了一个气柱,计算量小。强迫场直接给定,大气强迫场之间的反馈作用被消除。2)SCM 的强迫场来源于外场观测,理论上可以通过比较观测和模拟结果来识别微物理方案的缺陷。另外,单气柱模式的模拟范围是 3×3 的水平网格区域,且其最终给出是模拟水平区域的平均结果。本文相关观测数据和云分辨率模式 (cloud resolution model, CRM) 结果 (后文介绍) 均进行了区域平均,以使得对方案的模拟能力评估更加准确。

2.2 数据

本文所选的个例来自于热带暖池国际云试验 (Tropical Warm Pool International Cloud Experiment, TWP-ICE) 外场观测试验。该试验对澳洲季风期热带对流及其产生的卷云的发展演变的宏观特征进行了综合观测。试验在澳大利亚北部的季风区进行,时间从 2006 年 1 月 19 日至 2 月 13 日。TWP-ICE 包括了各种大尺度的观测以及与云的性质有关的飞机和雷达的探测资料 (May et al., 2008), 这些翔实的观测资料极大地方便了微物理方案的检验工作。SCM 的大尺度强迫场是通过 Zhang and Lin (1997)、Zhang et al. (2001) 的变量客观分析方法获得的。该客观分析方法遵循质量、动量、热量和水汽守恒的原理,能够在最大程度地减少误差的前提下,将地面观测、探空资料、卫星观测和数值模式结果综合起来。该客观分析方法已经成功地应用于美国能源部大气辐射观测项目 (Atmospheric Radiation Measurement Program) 的南大平原 (Southern Great Plains, SGP), 阿拉斯加北坡 (North Slope of Alaska, NSA) 等外场试验的观测数据的处理中。本文试验所采用的 SCM 的大尺度强迫场包含风场、位温、水汽及其水平平流项。由于文章篇幅所限,该外场观测强迫场的详细信息请参考 Xie et al. (2010)。

由于云的观测很难,不同来源的观测资料各有优缺点,因而需要结合各种手段和方法来提高与云有关的观测资料的准确程度。TWP-ICE 试验期间,雷达和一些其他的远程遥感设备负责探测云中的水凝物的垂直分布情况。云微物理特征的分布情况

主要来自于毫米波测云雷达 (millimeter wave cloud radar, MMCR)。飞机探测表明,热带地区除了在上升区的核心附近,温度低于 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时一般很少有液态水存在 (Stith et al., 2004)。反演方法假设温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时云水均为液态,温度低于 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为固态,而在 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间则是混合相态。在混合相态中,冰相粒子对雷达反射率的贡献随温度下降而线性增强。液态水含量 (Liquid Water Content, LWC) 是通过 Liao and Sassen (1994) 的线性回归方程反演雷达反射率得到,所得的结果再同非降水期间的微波辐射计的测量结果相匹配。冰相水凝物总含水量则是通过 Liu and Illingworth (2000) 提出的经验公式计算获得。云量的反演综合应用了 35-GHz (8.6 mm) MMCR、微脉冲激光雷达以及激光云高仪的观测资料,所采用的是主动遥感云定位 (Active Remotely Sensed Cloud Locations, ARSCL) 算法 (Clothiaux et al., 2000)。另外,通过结合地面云雷达和卫星高分辨率的微波测量结果,反演出以达尔文为中心 10° (纬度) $\times 10^{\circ}$ (经度) 的固态总含水量 (Frozen Water Content, FWC) 的三维空间结构 (Seo and Liu, 2005, 2006)。在 TWP-ICE 中采用了 4 个卫星的观测数据 (NOAA-15、NOAA-16、NOAA-17、NOAA-18), 将反演得到的数据在以达尔文为中心的 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$ 区域进行了平均,以便于和 SCM 的模拟结果比较。在垂直累积固态总含水量 (Frozen Water Path, FWP) 小于 100 g/m^2 时,卫星和地基观测之间的差别比较大。

CRM 模式能够显式地模拟出云尺度的发展过程,因而其模拟结果可以在观测资料缺乏或者精度降低时,作为观测的补充同 SCM 的模拟结果相比较。Varble et al. (2011) 利用 9 个 CRM 对 TWP-ICE 期间的对流活动进行了高分辨率的数值模拟,各 CRM 均采用了每 3 h 的客观分析数据集作为强迫场 (Xie et al., 2010) 且模拟的气象要素场的宏观时空分布特征同观测比较一致,对流系统的中尺度结构以及降水过程同卫星雷达的观测也比较接近,因而其模拟结果具有比较高的可信度,能够被用来作进一步的分析。由于各个 CRM 的模拟结果各有优势和不足,本文利用的是各个 CRM 模拟结果的平均和 SCM 的模拟结果相比较。

2.3 Milbrandt 2-mon 方案的主要特征

Milbrandt-Yau 双参数化方案是 Milbrandt and Yau (2005a, 2005b) 建立的一个全新的微物理显式

方案, 它于 2010 年被耦合至 WRF3.2 版本之中。该方案对所有的水凝物均采用双参数方法预报, 预报变量包括云滴、雨滴, 冰晶、雪、霰和冰雹的比含水量和比浓度, 以及水汽混合比共 13 个变量。在 MY 方案中还预留出三参数版本的接口, 其中谱形参数的值由比含水量、数浓度和雷达反射率因子方程预报给出 (Milbrandt and Yau, 2006a, 2006b), 同斜率、截距一样各自独立变化。

该方案的设计非常详细及细致, 描述物理过程全面而复杂, 考虑了核化、自动转化、碰并和繁生、冻结和融化、凝华 (升华) 和凝结 (蒸发) 以及沉降等云物理过程。与其他大多数方案不同的是该方案采用 Brandes et al. (2007) 的经验公式来设置雪的密度, 更加符合观测, 对冰相过程的模拟也具有更高的可信度。Milbrandt 2-mon 方案为用户提供了许多微物理过程以及经验公式的选择开关, 因此它能够适应不同条件下的数值模拟。另外方案中包含的 6 种水凝物各自均可以采用单参数或者双参数方法 (默认) 预报, 各个粒子的谱形参数的值以及斜率和截距的阈值等可以根据需要进行设置。

2.4 试验设计

表 1 列出了本文所做的 7 组试验, 控制试验中相关参数的设置均为默认值, 对所有粒子采用双参数的处理方法。另外 6 组是该方案冰晶或者雪的单参数版本的试验 (单参数版本试验中, 除冰晶/雪外其余类别粒子均采用方案的默认设置)。

表 1 试验名称一览表

Table 1 Summary of experiments conducted in this work

试验名称	试验描述
控制试验	MY 方案双参数版本 (默认)
1MIC	冰晶的单参数版本 (方案默认设置); $N_i=f_A(T)$
1M10Ni	冰晶的单参数版本 (改进后); $N_i=10f_A(T)$
1M2MIC	冰晶的单参数版本 (改进后); 采纳控制试验参考值; $N_{0i}=1.952 \times 10^{11} \text{ m}^{-4}$
1MSN	雪的单参数版本 (方案默认设置); $N_{0s}=f_B(T)$
1M2N0s	雪的单参数版本 (改进后); $N_{0s}=2f_B(T)$
1M2MSN	雪的单参数版本 (改进后); 采纳控制试验参考值; $N_{0s}=5.1285 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$

(1) 1MIC 试验是采用 MY 方案中默认设置的冰晶的单参数版本进行的试验 (简称为冰晶的单参数样本试验), 其中假设冰晶的数浓度 N_i (单位: m^{-3}) 是温度的函数, 随温度的降低而呈现指数上升趋势 (上限约为 10^6 m^{-3}) (Cooper, 1986):

$$N_i = f_A(T) = 5 \times e^{0.304 \times 273.15 - \max(233-T)}, \quad (1)$$

其中, $f_A(T)$ 代表冰晶数浓度随温度变化而变化的函数, T 是温度 (单位: K)。

1M10Ni 试验是在 1MIC 试验基础上进行调整, 将该诊断公式上限值调整为 10^7 m^{-3} , 其余设置不变。

(2) 1MSN 试验是采用 MY 方案中默认设置的雪的单参数版本进行的试验 (简称为雪的单参数样本试验), 其中假设雪的截距值 N_{0s} (单位: m^{-4}) 随温度的降低而呈现指数上升趋势, 该经验公式是根据中纬度锋面云系的观测得到 (Houze et al., 1979):

$$N_{0s} = f_B(T) = \min(2 \times 10^6 e^{-0.12 \min(-0.001, T-273.15)}, 2 \times 10^8). \quad (2)$$

其中 N_{0s} 取值范围为 $2 \times 10^6 \sim 2 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ 。

1M2N0s 试验是在 1MSN 试验的基础上进行调整, 将该诊断公式扩大 2 倍 (上限值不变), 其余设置不变。

(3) 1M2MIC 和 1M2MSN 试验是各自在 1MIC 和 1MSN 的基础上, 分别将冰晶的截距 (N_{0i})、雪的截距 (N_{0s}) 设置为固定常数, 该常数来自于控制试验的模拟结果的时间平均。1M2MIC 和 1M2MSN 试验分别属于冰晶、雪的单参数方案的改进试验。

表 2 列出了各个试验的相关物理量在模拟时段内的各自的平均值和均方差。

模拟采用一系列短期预报试验的方法, 目的是为了 避免气象场的漂移。共进行了 5 组短期预报试验: 从 2006 年 1 月 20 日开始, 以每日 12:00 (协调世界时, 下同) 为模拟起始时刻, 模拟 36 h, 最后将每组 36 h 中的第 12~36 h 的模拟结果取出, 拼接成 2006 年 1 月 20 日 12:00 至 26 日 00:00 整个时期的模拟结果。我们并没有采纳模式调整期间以及积分后期的模拟结果, 目的是为了削弱起转过程 (Spin-up) 和模式长时间积分后误差较大所带来的影响。该试验方法已经得到较多的应用 (Morrison et al., 2005; Wang et al., 2009)。大尺度的垂直速度场和水平平流倾向 (水汽和温度) 由每 3 h 一次的强迫场给出, 垂直分辨率是 25 hPa。大尺度水凝物的平流并未给出, 因而模式中所有的水凝物均是来自于微物理过程。

模拟采用高分辨率模拟, 以达尔文港 (12°S, 131°E) 为中心, 水平格距为 4 km, 垂直不等间距分为 100 层, 从 20 m 至 6 km 不等, 间距值绝大多数在 2 km 以下, 积分步长为 20 s, 选用 Zhang-

表 2 观测和模拟的云物质和降水率平均值和均方差

Table 2 Comparisons of mean values and standard deviations of cloud particle mixing ratio and precipitation rate for model output and observations

数据来源	垂直累积 云水含水 量/ g m^{-2}	垂直累积 的雨水含 水量/ g m^{-2}	垂直累积液 态含水量(雷 达观测)/ g m^{-2}	降水率/ mm h^{-1}	垂直累积 冰晶含水 量/ g m^{-2}	垂直累积 雪的含水 量/ g m^{-2}	垂直累积 霰的含水 量/ g m^{-2}	垂直累积固态 总含水量(卫 星观测)/ g m^{-2}
观测			102.3 ± 57.44	1.383 ± 1.95				547.4 ± 699.8
CRM模式			415.5 ± 397.0					657.6 ± 796.8
控制试验	342.8 ± 231.1	321.5 ± 351.2	664.3 ± 488.2	1.313 ± 1.832	1166 ± 1239.1	373.8 ± 578.587	29.40 ± 58.58	1569 ± 1610
IMIC试验	456.3 ± 311.1	89.4 ± 142.3	545.7 ± 421.9	0.4296 ± 0.6584	209.1 ± 175.4	596.9 ± 665.7	62.99 ± 125.4	869.0 ± 871.9
IM10Ni试验	3553 ± 1487	123.1 ± 172.1	3676 ± 1551	0.4786 ± 0.5943	550.8 ± 515.1	58.58 ± 142.7	9.417 ± 37.70	618.7 ± 636.7
IM2MIC试验	3694 ± 1661	119.0 ± 175.0	3813 ± 1724	0.4743 ± 0.6280	549.2 ± 514.2	54.53 ± 131.71	10.09 ± 42.54	613.8 ± 630.9
IMSN试验	377.4 ± 350.2	313.5 ± 322.4	690.91 ± 571.75	1.3100 ± 1.5365	706.2 ± 926.8	159.4 ± 171.9	89.89 ± 134.3	955.5 ± 1107
IM2N0s试验	367.5 ± 298.2	309.0 ± 329.6	676.47 ± 531.43	1.2980 ± 1.7868	916.1 ± 979.5	421.4 ± 523.4	46.40 ± 89.85	1384 ± 1427
IM2MSN试验	380.5 ± 386.7	400.7 ± 514.2	781.26 ± 871.64	1.3686 ± 2.2741	814.7 ± 843.6	202.3 ± 283.1	37.89 ± 109.3	1055 ± 111

McFarlane 积云参数化方案, CAM 长波辐射参数化方案, Dudhia 短波辐射参数化方案, 边界层参数化方案是 Mellor-Yamada-Janjic。本文试验的水平分辨率还未达到 100 m 的量级, 因而还未实现真正意义上的对流的显式模拟 (Bryan et al., 2003)。并且有研究表明在高水平分辨率下使用积云参数化方案对模式性能具有改善效果 (Narita and Ohmori, 2007; Lean et al., 2008)。而本文前期试验结果也发现采用积云参数化方案后模拟的总降水率、辐射场以及云物质的时空分布特征同观测更为接近。因而就本文而言采用积云参数化方案是必要的。积云参数化方案将小于 4 km 尺度的对流过程对环境的热力动力反馈包含到模式当中, 间接促进网格尺度成云致雨过程的准确性、提高模式宏微观物理量场的模拟水平。

3 控制试验和单参数样本试验的模拟结果检验

3.1 天气过程概况

本部分简要介绍模拟时段内的气象条件。May et al. (2008) 和 Xie et al. (2010) 的文章中总结了 TWP-ICE 的天气条件, 可分为 4 个阶段: 季风活跃期 (1 月 13~25 日), 季风抑制期 (1 月 26 日至 2 月 2 日), 晴空期 (2 月 3~5 日), 季风间断期 (2 月 6~13 日)。

本文所选取的个例主要涉及季风活跃期。南半球夏季时, 北半球的东北信风向南越过赤道后转向成为影响澳洲北部的暖湿的西北季风 (赵思雄和曾庆存, 2005)。季风槽内常常有热带低压生成并在

大陆的加热作用下加深发展, 低压伴随的强对流天气给当地带来强的降水。季风活跃期西风气流从海洋上带来充沛的水汽, TWP-ICE 的观测区域位于低压系统内部而且大部分被强对流云团所覆盖, 对流系统表现出典型的热带海洋性特征 (May et al., 2008)。

3.2 模拟结果检验

3.2.1 降水和云量

图 1 是 MY 方案控制试验和冰晶/雪的单参数样本试验的降水率 (precipitation rate) 的时间序列。模拟时段处于季风活跃期, 降水丰富。控制试验能够较好地模拟出降水率随时间的演变特征, 降水率的均值及峰值同观测均最为接近。单参数样本试验的降水率同观测存在显著的区别。冰晶单参数样本

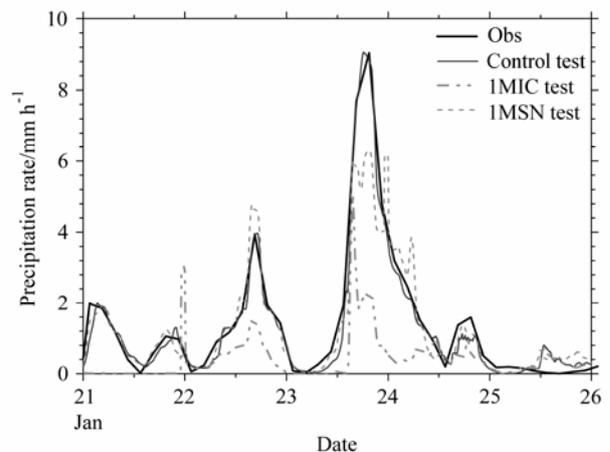


图 1 2006 年 1 月 21 日 00:00 至 26 日 00:00 区域平均的降水率随时间的演变

Fig. 1 Time series of the area-mean precipitation rate from 0000 UTC 21 Jan to 0000 UTC 26 Jan 2006

试验降水率在该时段总体偏弱, 均值仅为观测的约 1/3 (表 2), 降水率偏低主要集中在 22~24 日; 雪的单参数样本试验的降水率在模拟时段内的均值虽仅次于控制试验且接近观测, 但其在强对流时期的降水率峰值同观测吻合度较差。

观测数据表明: 季风活跃期多发生深厚的湿对流系统。该时期对流性天气发展强盛, 观测的云系从边界层一直伸展到 15 km 的高度。MY 方案能够模拟出季风活跃期的深厚的对流的云系 (图 2a) 但此时方案及云模式模拟的云系均偏多且云顶 (云量 >

5%) 偏高。

WRF 模式中的云量是利用相对湿度诊断得来, 代表每个模式格点被云所覆盖的比例, 而本文的观测云量表示单点上云的发生频率 (Xie et al., 2008)。由于两者计算方法的不同, 云量的具体数值存在一定差别。以往有研究表明 SCM 试验 (Xie et al., 2004) 以及 WRF 模式倾向于高估云量 (郑晓辉等, 2013)。这与文中各个试验模拟云量 (约 4 km 高度以上) 值显著高于观测的现象相一致。文中所参考的云模式结果由于具有较高的分辨率, 云量值相比于其他

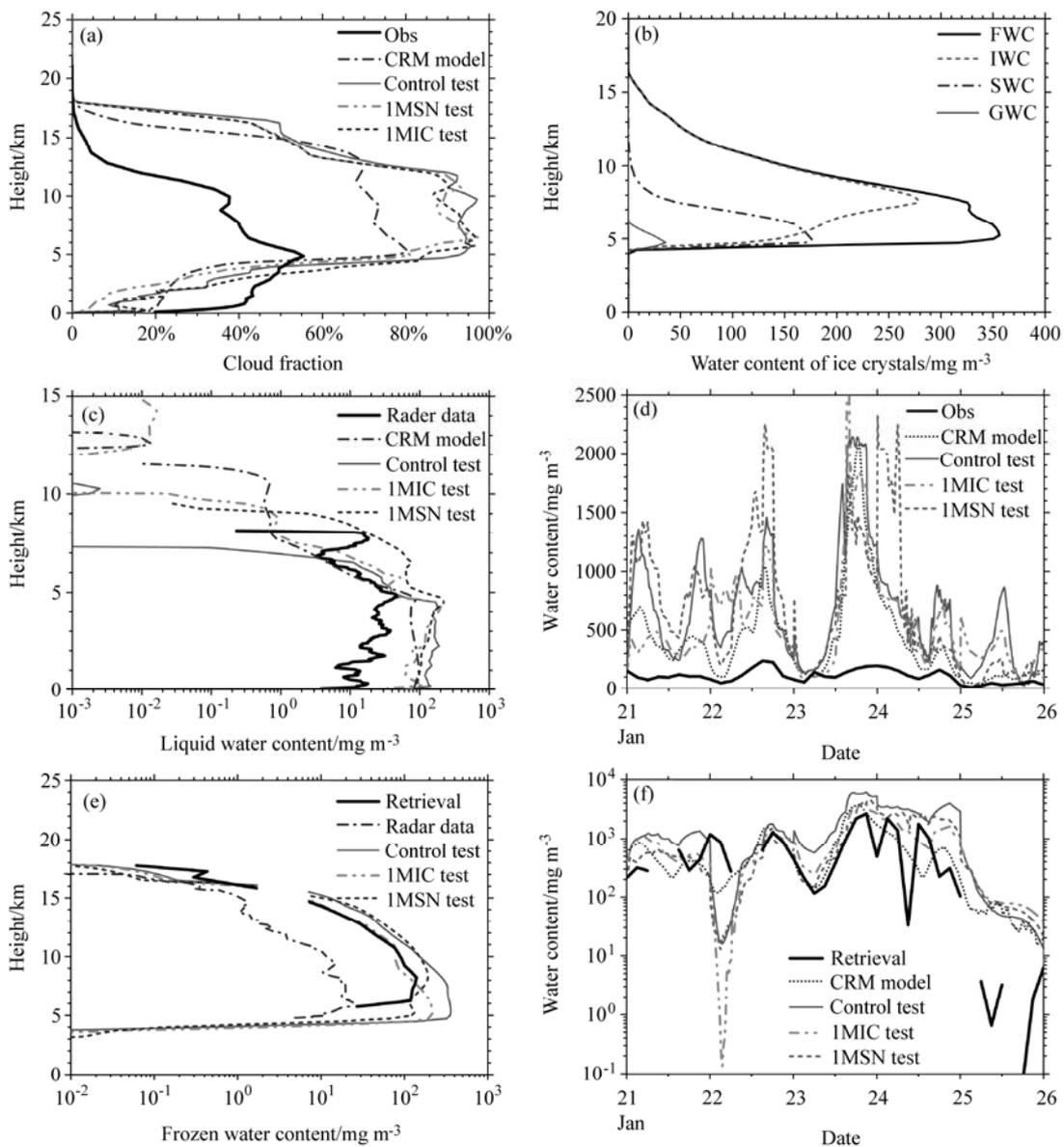


图 2 (a) 云量的垂直分布、(b) 控制试验的白云组成、(c) 液态含水量 (Liquid Water Content, LWC) 垂直分布、(d) 垂直累积液态含水量 (Liquid Water Path, LWP) 时间演变、(e) FWC 垂直分布、(f) 垂直累积固态总含水量 (Frozen Water Path, FWP) 时间演变
Fig. 2 (a) Vertical profiles of cloud fraction; (b) composition of ice clouds for model output from the control simulation; (c) vertical profiles of Liquid Water Content; (d) time series of Liquid Water Path (LWP); (e) vertical profiles of Frozen Water Content (FWC); (f) time series of Frozen Water Path (FWP)

试验更为接近观测,但也存在高估的现象。可能由于所选取个例的特性,类似的现象也出现在 Wapler et al. (2010) 的研究工作中。另外雷达由于信号的衰减,漏测了高层云系,这也是模拟高云量偏多的原因之一。控制试验和单参数样本试验模拟的云量总体上分布非常相似,在云顶高度以及云量的高值部分存在弱的差别,但两者均能够再现云系主体的基本观测特征。

3.2.2 液态含水量、固态总含水量、垂直累积液态含水量和垂直累积固态总含水量

降水期间受降水粒子的干扰作用,MMCR 观测反演的液态水含量的精确程度有所欠缺 (Mather et al., 2007),因而本文更多地参考各家云分辨率模式的平均云物质含量。由于消除了单个 CRM 模拟结果的特殊性,其具有一定的代表性;且相较于 Lin et al. (2012) 采用的反演产品,文中所参考云模式平均结果中的液态水含量在量级上具有较好的一致性,因而作为雷达观测的补充进行模拟结果检验具有一定的参考性。

MY 方案模拟的 LWC 高值区 (0~5 km) 量级上同 CRM 较为相近。就过冷水而言,单参数样本试验相比于控制试验更为活跃,向上延伸的高度更高,顶部介于雷达和云模式之间 (图 2c)。MY 方案单双参数样本试验模拟的 LWP (图 2d) 演变规律同云模式较为一致,但液态云总体偏厚 (表 2)。其中雪的单参数样本试验的峰值频频高于云模式,其模拟时段内的均值也最为偏厚。冰晶的单参数样本试验的 LWP 均值最低且最为接近观测和云模式的结果,但其垂直累积的雨水含水量 (Rain Water Path, RWP) 的均值很弱且远低于云水含量,与强对流降水的观测事实不符 (李香淑, 2007; 马占山等, 2009)。这也是导致此试验降水率偏弱的直接原因。

与暖云物理学相比,我们对冰相过程的认识有更多的不确定性。模拟时段内雷达在许多时段存在缺测,因而需要结合卫星资料对模拟结果中的所有固态水凝物的总和,即固态总含水量 FWC,进行检验。由于反演方法的不完善以及云雷达和微波辐射计对于高空薄的冰云的可能的漏测,反演产品存在一定的不确定性 (Protat et al., 2007; Heymsfield et al., 2008)。

季风活跃期冰云垂直发展深厚 (如图 2e), MY 方案模拟的 FWC 主体 ($>0.5 \text{ mg/m}^3$) 分布于 4~17 km,在量级和所处高度上同卫星资料较为一致,

同样 FWP 的量级同反演产品也比较接近。单参数样本试验的冰相物质含量 (图 2e、2f) 整体比控制试验含量更低也更加接近卫星观测。

图 2b 是 MY 方案控制试验的冰云组成情况。冰晶含水量 (Ice Water Content, IWC) 垂直贯穿整个冰云,雪物质的含水量 (Snow Water Content, SWC) 分布在 4~10 km 附近,霰的含水量 (Graupel Water Content, GWC) 较少分布于零度层附近的高度。单参数样本试验的冰云的组成结构与控制试验相似。所选个例中冰相过程主要与冰晶和雪有关,它们的发展演变对热带对流活动具有重要的作用。这也是本文选择冰晶和雪这两类粒子作为敏感性试验的对象的主要原因。

3.2.3 模拟效果总体分析

前述内容对 MY 方案的单双参数默认版本的检验结果表明:双参数控制试验中降水率的演变特征同观测十分吻合,模拟优势突出。液态云虽然总体偏厚,但是相较于单参数样本试验中云水雨水含量的比例异常或者液态水显著偏厚的现象,双参数方案的结果仍然是比较合理的。

基于卫星观测,MY 方案模拟的冰云总体偏厚。与单参数样本试验相比,双参数的控制试验的冰云虽然含量最高,但在冰相粒子的微观特征方面同观测事实却更为一致,例如冰晶粒子的数浓度、雪的截距等 (详细分析请参照文章 4.1.1 和 4.2.1 节),也说明双参数方案在微物理描述细节的刻画上更为接近自然界的真实状况。而冰云偏厚的现象可能与双参数方案中的微物理过程的不够完善有关。因而综合以上分析,双参数控制试验的效果总体上是优于单参数样本试验。这和以往的研究结果也是一致的 (Milbrandt and Yau, 2006b; Dawson et al., 2010)。

4 单参数方案改进试验

实际业务中由于需要兼顾计算时间和预报效果,往往应用单参数方案。而本文则尝试通过参考双参数控制试验中获得的更为接近观测的冰相物质的微观特征,改善单参数方案中的关键过程描述的准确程度,期望改善单参数方案中云物质及降水率的模拟效果,实现计算效率和模式性能的双赢。文中后续的敏感性试验部分进行了相关改进思路的尝试,检验其模拟效果并讨论其在实际应用中的可行性,对模拟结果的产生变化的可能物理机制也

进行了初步的分析。

4.1 冰晶的单参数方案改进试验

4.1.1 冰晶的单参数方案的改进思路

单参数和双参数方法的主要区别在于对粒子数浓度的处理方式的差异。双参数对其进行独立的预报, 而单参数方法则依赖于观测中获取的诊断关系对数浓度进行诊断, 例如假设其仅仅是温度的函数、或者由混合比和截距(常数或者某些要素的函数)两者诊断得来。单参数方法简化了计算量的同时也给其模拟效果带来了不确定性。以往的研究表明, 单参数方案对截距的处理方式非常敏感。雨滴

的截距值的改变会影响冷池的强度 (Dawson et al., 2010), 冰相粒子的截距的变化对风暴的宏观特征以及微观粒子的分布有非常显著的影响 (Reisner et al., 1998; Milbrandt and Yau, 2006b; Solomon et al., 2009)。

观测表明热带云砧卷云中的冰晶数浓度的典型量级是 10^6 m^{-3} , 飞机探测最大浓度不超过 10^7 m^{-3} (金莲姬, 2007), 因而双参数版本的控制试验中 N_i 上限值 (10^7 m^{-3}) 的设置对于本文个例是合理的, 而 1MIC 试验中冰晶粒子的数浓度随温度降低而增加, N_i 上限值 10^6 m^{-3} (233 K) 则偏小一个量

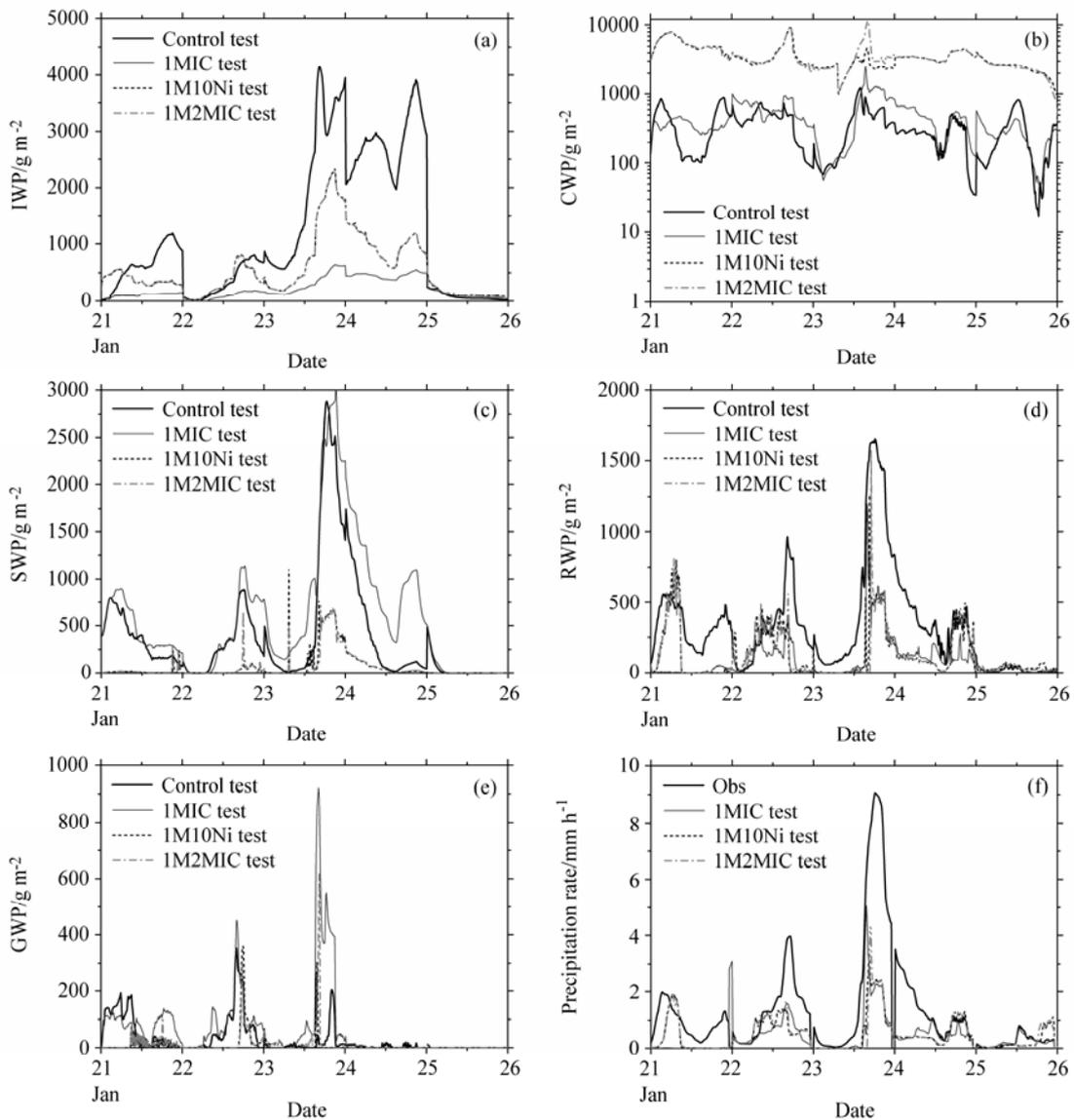


图 3 冰晶单参数试验 (a) 垂直累积冰晶含水量、(b) 垂直累积云水含水量、(c) 垂直累积雪的含水量、(d) 垂直累积雨水含水量、(e) 垂直累积霰的含水量、(f) 降水率的时间演变

Fig. 3 Time series of (a) ice water path, (b) cloud water path, (c) snow water path, (d) rain water path, (e) graupel water path, and (f) precipitation rate from model experiments with single-moment ice

级。上述差别间接导致两试验最终模拟 N_i 约 10 倍的差异 (图 5a)。单参数方案中冰晶的截距值 N_{0i} (单位: m^{-4}) 是由冰晶混合比和数浓度诊断得来。1MIC 试验 ($0.293 \times 10^{11} \text{m}^{-4}$) 中 N_{0i} 总体低于控制试验 ($1.952 \times 10^{11} \text{m}^{-4}$) (图 4a 和 4b), 质量加权得到的平均值也得出一致的结论。因而通过诊断公式获得冰晶数浓度的处理方式也直接影响了冰晶截距的模拟效果。由此可以推测, 冰晶数浓度诊断上限值偏小可能是造成 1MIC 试验模拟效果不佳的主要原因。

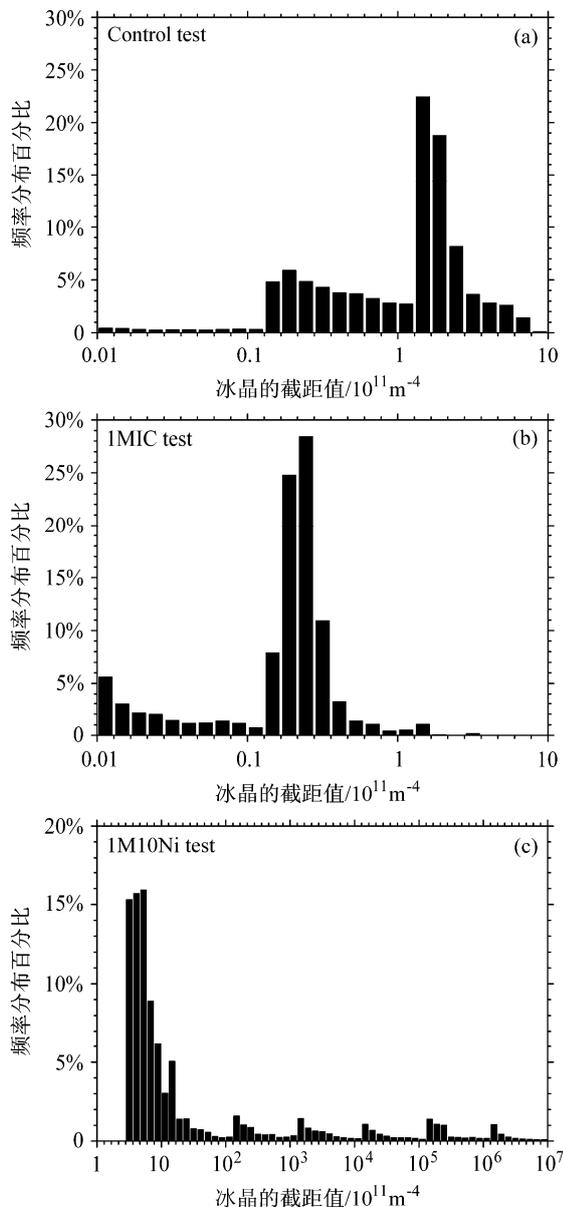


图 4 (a) 控制试验、(b) 1MIC 试验、(c) 1M10Ni 试验冰晶的截距频率分布

Fig. 4 Frequency distributions of N_{0i} from (a) control test, (b) 1MIC test, and (c) 1M10Ni test

鉴于上述差异, 基于 1MIC 设计两个改进试验。1M10Ni 试验是将 1MIC 中 N_i 的上界设置扩大 10 倍, 即和控制试验相同, 为 10^7m^{-3} ; 第二组试验为 1M2MIC, 即: 将 N_{0i} 设置成固定常数, 取值采纳控制试验中模拟时段内的 N_{0i} 平均值 ($1.295 \times 10^{11} \text{m}^{-4}$)。此时冰晶数浓度仅仅是其混合比的函数。试验的主要目的是讨论冰晶单参数默认版本的方案改进之后, 对热带对流云系的模拟效果是否有明显的改善, 改进方法如何影响云系发展演变。

4.1.2 冰晶单参数方案改进效果分析

对冰晶的单参数版本进行调整后, 两个改进试验 (1M10Ni 和 1M2MIC) 各个物理量场相比于 1MIC 的变化较为相似 (图 3)。冰云总含量显著降低 (表 2), 与卫星观测更加接近。与此同时冰云的构成比重发生显著变化。相比于 1MIC 试验, 改进试验中垂直累积冰晶含水量 (Ice Water Path, IWP) 显著增强 (均值超过 2 倍以上), 而垂直累积雪的含水量 (Snow Water Path, SWP) 及垂直累积霰的含水量 (Graupel Water Path, GWP) 大幅度减弱 (均值仅分别为 1/10 和 1/6 左右)。改进之后冰云中的主体由雪变成了冰晶, 这在一定程度上表明改进试验的冰云发展过程中冰晶向雪、霰物质的直接和间接转化的过程被削弱。液态云的变化更为突出, LWP 均值增强约一个量级且同观测偏离更甚, 其中云滴含量的异常增强是主要原因 (图 3b、表 2)。垂直廓线表明云水含水量 (Cloud Water Content, CWC) 以及雪淞附云滴的过程的转化率 (Q_{clcs}) (图 6c、6d) 在 4~5 km 范围内显著高于单参数样本试验, 极大值增强约一个量级。这些现象都间接地说明云滴含水量异常增强的现象是模式的真实结果。由于对流层中低层大气的水汽含量十分丰富, 即使改进试验中垂直累积云水含水量 (Cloud Water Path, CWP) 强度增强约一个量级时, 也仅仅消耗大气中不到 10% 的水汽, 这在理论上也是合理的。而改进试验中降水率的演变特征相比于 1MIC 试验变化十分微弱 (图 3f), 总体略有改善 (均值增强不到 1/10, 表 2), 与雨水含量的增强相一致 (图 3d、表 2)。总体而言, 冰晶单参数方案的改进试验中, 冰云总含量有所改善, 但液态过程总体显著恶化。

4.1.3 冰晶单参数方案改进效果物理机制分析

数值试验研究表明, 冰相过程在云系的发生发展以及降水的形成过程中扮演着非常重要的角色 (张大林, 1998; 孙建华和赵思雄, 2003), 而在

对流性降水中这一作用则表现得更为突出(Wang et al., 2009; 许凤雯等, 2011)。冰晶单参数方案的改进试验中为何出现一些物理量的异常变化, 冰晶粒子参数的调整是如何改变相关物理过程的。本小节将通过通过对相关的微物理过程的分析来讨论上述问题。

冰晶数浓度增加后(图 5a), 相比于 1MIC 试验, 冰晶凝华率(Q_{depi})得到增强(图 5c)。单参数方案改进试验中, 诊断获得的冰晶数浓度显著增强, 在量级上更加接近观测和控制试验(图 5a), 但 1M10Ni 试验中随温度和冰晶混合比而变化的冰晶截距值的分布比 1MIC 试验更加趋于小端(图 4c), 与控制试验差距较大。

相比于 1MIC 试验, 冰晶单参数改进试验中存在大量冰晶粒子争抢水汽, 10 km 以上高度的冰晶有效半径(R_i , 单位: μm)比 1MIC 试验明显减小(图 5b)。冰晶有效半径偏小反映了冰晶粒子谱中大的冰晶粒子偏少, 从而削弱冰晶向雪的自动转化过程的转化率(Q_{cnis})。如图 5d 中改进试验的 Q_{cnis} 峰值比 1MIC 试验和控制试验偏小约 1 个量级。如

此雪在冷云中的直接来源减少且面临同强盛的冰晶争抢水汽的局面, 雪物质的增长过程变得尤为困难。改进试验中 5 km 以上的高度雪的含水量仅为 1MIC 试验 1/10 的现象也得到合理解释(图略), 这与冉令坤等(2008)的研究结果相一致。而同时雪的变化也直接削弱了霰的发展。以上由冰晶数浓度增加而产生的一系列响应过程也解释了改进试验中冰云构成比重发生变化的原因。

冰晶单参数方法的调整直接影响冰相过程的发展, 随后液相过程以及降水也产生变化响应。增多的冰晶粒子消耗水汽并释放潜热也引起了水汽场和温度场的调整。两改进试验的水面过饱和度条件(S_w) (图 6a) 在零度层(5 km 附近)以上的高度明显变差。而冰晶单参数改进试验中 CWC 中过冷水向上延伸的高度明显降低(图 6c), 这可能与不饱和状态下, 液态水难以生存有关。对流层低层的暖湿空气抬升到一定高度后发生凝结, 上升运动随高度升高先增加并在快接近零度层附近时迅速减弱(图 6b)。因此云滴在到达此区间(4~5 km) 时出现停滞并累积且液态含水量达到峰值的现象

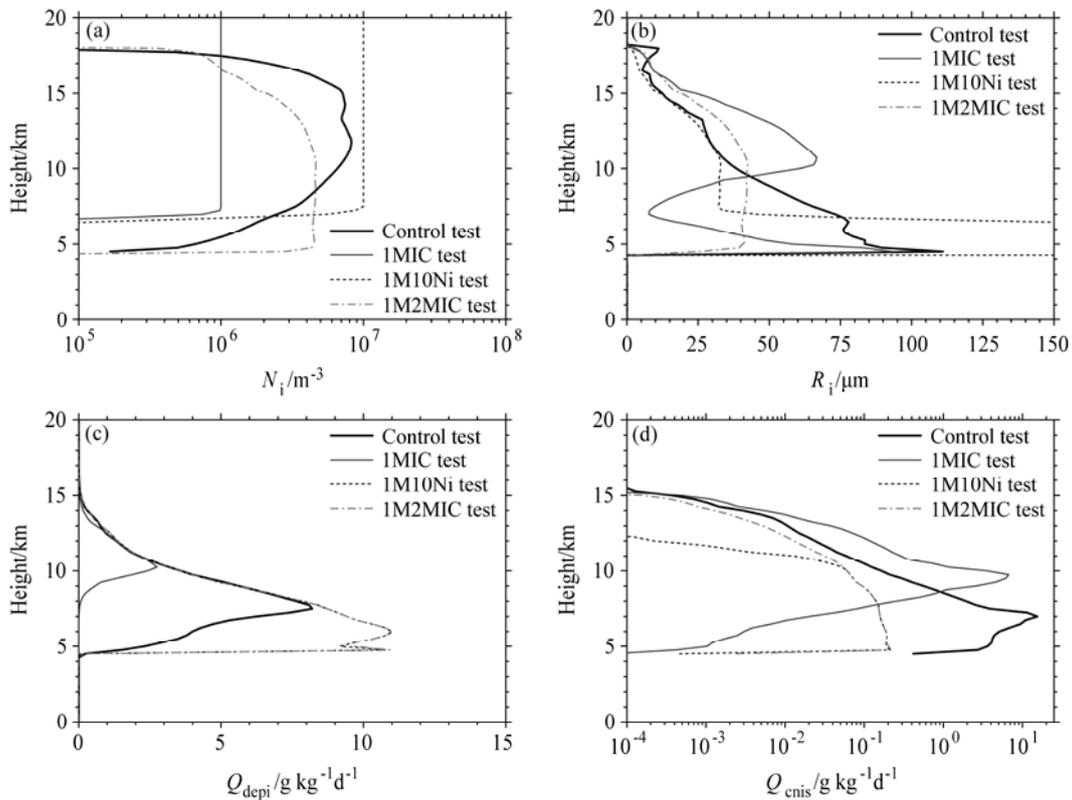


图 5 冰晶单参数试验 2006 年 1 月 23 日 12:00 至 24 日 12:00 平均 (a) N_i 、(b) R_i 、(c) Q_{depi} 、(d) Q_{cnis} 垂直分布
Fig. 5 Time averaged vertical profiles of microscopic properties for ice crystals from experiments with single-moment ice between 1200 UTC 23 Jan and 1200 UTC 24 Jan 2006: (a) N_i ; (b) R_i ; (c) Q_{depi} ; (d) Q_{cnis}

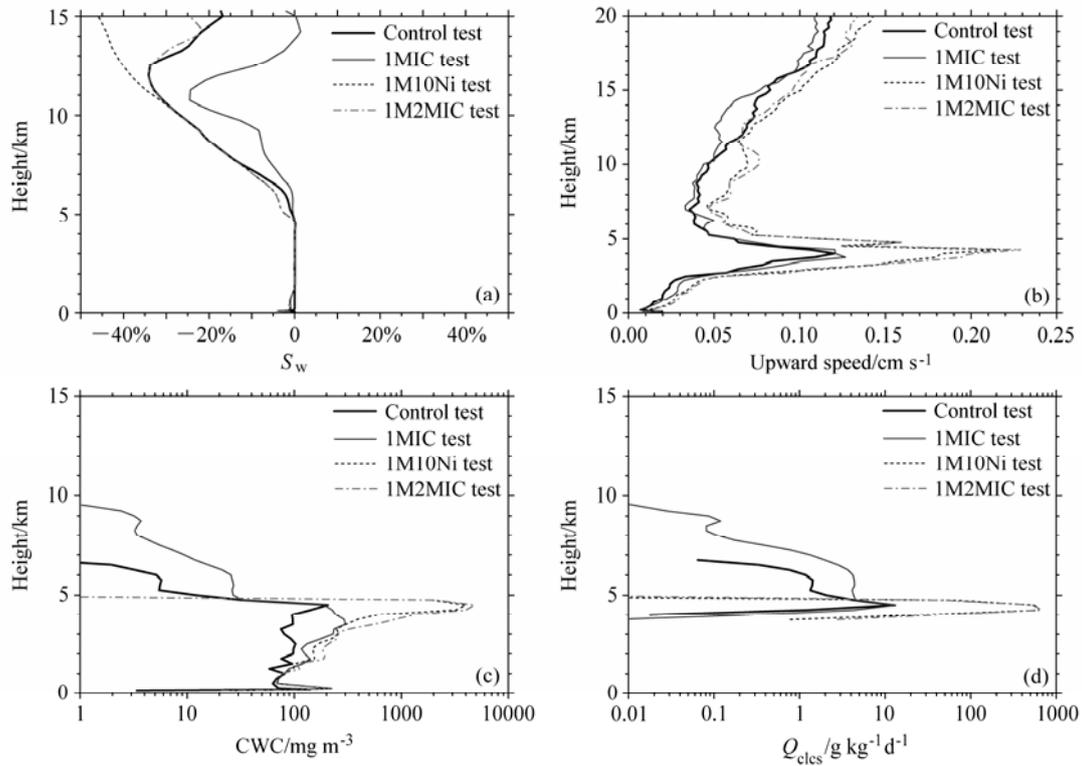


图6 冰晶单参数试验 2006 年 1 月 23 日 12:00 至 24 日 12:00 平均 (a) S_w 、(b) 上升速度、(c) CWC、(d) Q_{cles} 垂直分布

Fig. 6 Time averaged vertical profiles from experiments with single-moment ice between 1200 UTC 23 Jan and 1200 UTC 24 Jan 2006: (a) S_w ; (b) upward speed; (c) Cloud Water Content (CWC); (d) Q_{cles}

(图 6c)。相比于 1MIC 试验,改进试验中上升运动的强度总体增加,极大值则增加约一倍,这使得更多的暖湿空气到达凝结高度形成云滴,从而引起图 5b 中 CWP 相比于 1MIC 试验显著增强的现象。上升运动的增强则可能与不稳定能量、水凝物的重力拖曳等多种因素的变化有关。雪通过沉降过程降落至 5 km 附近时含水量迅速增强(图略),这可能与该高度附近雪淞附大量的云滴过程有关(图 6d,雪碰并云滴过程的增长率 Q_{cles})。

图 7 中,各个试验近地面附近的高度内(0~2 km)雨水随着高度降低雨滴数浓度(N_r)迅速减小同时伴随雨滴有效半径(R_r ,单位: μm)的增大。冰晶单参数改进试验中由于云滴向雨滴转化以及冰相粒子融化过程的加强(图略),雨水含水量(Rain Water Content, RWC)有所增强(表 2),但 R_r 总体减小约 100 μm ,雨滴的下落末速度随之降低,因而综合后降水率仅仅有微弱的改善且仍远低于观测。

1M10Ni 试验中,冰晶数浓度到达一定高度后保持为常数(图 5a),因而冰晶云在高空开始形成

和发展时,冰晶的有效半径仅仅由混合比决定;1M2MIC 试验中冰晶的截距值指定为常数,数浓度以及冰晶的有效半径也仅仅是混合比的函数。冰晶的单参数试验中,冰晶的各微观属性(斜率、截距等)往往依赖于单一因子即冰晶的混合而演变,即单参数方法的特性。然而这样简单的对应关系在描述实际天气过程时具有很大的局限性。两个冰晶的单参数改进试验的冰晶数浓度虽然在量级上已经同观测较为接近,但单参数方法前提下改进方案中冰晶的各类微物理的增长过程同实际过程可能仍然存在很大的差距,进而影响冰晶向雪的自动转化以及后续的降水相关的过程,甚至产生了云滴含量异常偏高的现象。正如图 7 中,在近地面附近,对冰晶数浓度进行诊断的单参数试验相比于对冰晶数浓度进行独立预报的双参数控制试验,雨水含水量是由大量的小雨滴构成,且雨滴的有效半径也仅仅为控制试验的 1/3 左右。冰晶的单参数处理方法可能间接地削弱雨滴的聚并、凝结等过程,从而影响最终降水的形成。

图 7 中还存在一个较为特别的现象。冰晶的单

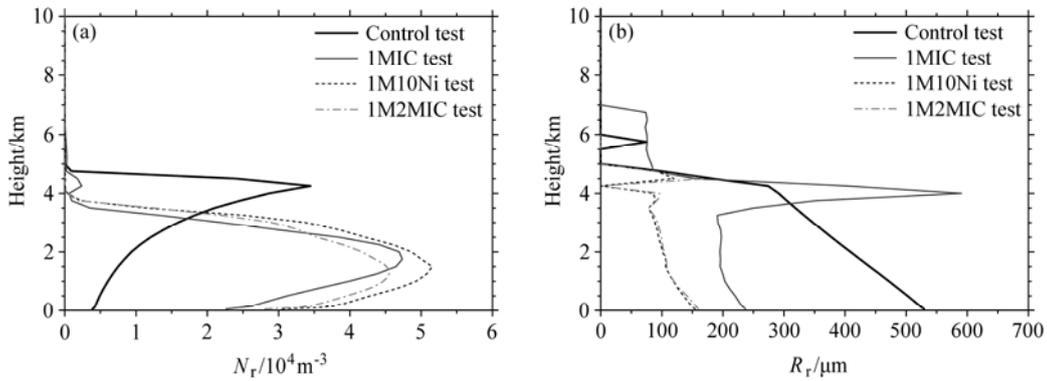


图7 冰晶单参数试验 2006 年 1 月 23 日 12:00 至 24 日 12:00 平均雨滴微观特征 (a) N_r ; (b) R_r 垂直分布

Fig. 7 Time averaged vertical profiles of micro-physical properties of raindrops from experiments with single-moment ice between 1200 UTC 23 Jan and 1200 UTC 24 Jan 2006: (a) N_r ; (b) R_r

参数方案的默认版本在 4 km 处存在 R_r 的极大值(图 7b), 而其改进试验中则表现为随高度波动且多极值的现象。雨滴有效半径的特征反映了雨滴粒子谱的总体尺寸, 同混合比和数浓度的比值成正比。在 1MIC 试验中, 在混合比相差不多的情况下(图略), 在 4 km 处 N_r 的区间极小值是 R_r 出现极大值的直接原因(图 7a)。由于 4 km 位于零度层附近, 大量的大的固态粒子融化是此处出现雨滴极大有效半径极大值的主要物理成因。

而改进试验当中, R_r 表现出一定的波动特征, 如: 4.35 km 处出现极小值, 3.75、4.75 km 高度出现区间极大值。同时零度层附近的雨滴混合比和雨滴数浓度均呈现为随高度升高而降低的趋势。由于改进试验当中云滴含量异常增强, 在此高度附近的与雨滴相关的主要物理过程更加复杂(云滴向雨滴自动转化、固态粒子融化、雨滴碰并云滴等), 粒子谱的演变受到更多因子的影响, 因而导致了该高度附近 R_r 随高度变化波动的现象。

冰晶单参数改进试验中通过人为调整相关参数设置使一部分物理量的特征更加接近观测, 但单参数方法对冰晶数浓度是诊断而非预报的本质, 成为其模拟效果改善不佳甚至一些物理量出现异常的主要原因。当然文中改进试验效果也与改进思路及方法不够完善有关。

4.2 雪的单参数方案改进试验

4.2.1 雪的单参数方案的改进思路

雪的截距值作为表征雪的数浓度 (N_{0s} , 单位: m^{-3}) 的重要特征参量, 在以往的研究中其量值的变化范围较广且各地区存在显著的差异。James

(1998) 发现波弗特海 (Beaufort Sea) 上的秋季极地边界层云系雪的截距观测值为 $2.5 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$; 而 Dudhia (1989) 在模拟冬季中国南海对流活动时采用雪的截距值为 $2 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$ 。尹金方 (2013) 总结以往研究指出东亚以外地区观测拟合的雪的截距在 $10^6 \sim 5.46 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ 区间变化。

根据 McFarquhar and Black (2004) 的研究结果, 在热带对流上升区和下沉区, 雪的截距值主体位于 $10^7 \sim 10^8 \text{ m}^{-4}$ 区间。控制试验中雪的截距主要分布在 $2 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8 \text{ m}^{-4}$ 区间, 同观测较为一致。1MSN 试验中诊断 N_{0s} 的经验公式是基于中纬度锋面云系的观测。其假定雪的截距值随温度降低而升高, 雪的截距值跨越两个量级, 且总体低于观测, 与热带对流的特征明显不符。因而 1MSN 试验中液态云过厚, 降水率与观测吻合度不高可能与 N_{0s} 模拟不够准确存在密切联系。为此设计 1M2N0s 改进试验, 根据模拟时段内的质量加权平均 N_{0s} (1MSN 试验为 $2.125 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$, 控制试验为 $5.125 \times 10^7 \text{ m}^{-4}$) 的分布特征, 将 1MSN 试验中诊断 N_{0s} 的经验公式扩大 2 倍, 尝试改善雪的单参数方案对热带雪的截距的描述能力。另外设计 1M2MSN 试验, 同 1M2MIC 试验的处理方式类似, 将 N_{0s} 设置成指定常数, 该常数由控制试验中模拟时段内的 N_{0s} 平均值获得。

雪的单参数改进试验的目的同冰晶单参数方案的改进试验相似, 主要为了考察调整之后单参数方案对模拟效果改善能力, 初步检验改进之后的单参数方案在实际应用中的可行性。另外对产生变化的可能的物理机制也进行了探讨。

4.2.2 雪的单参数方案改进效果分析

相比于 1MSN 试验, 1M2N0s 试验中降水率的均值虽然有微弱的减弱, 但其演变特征 (图 8) 同观测更加一致, 尤其是 22~24 日的强降水期间的峰值最为显著。雨水含量也存在一致的变化, 液态云显著偏厚的情况也有一定的缓解 (表 2)。但其冰云总含量出现显著的增强, 同卫星观测的差距有加大趋势。1M2MSN 试验中降水率显著增强 (表 2), 虽然其均值最为接近观测, 但在演变细节上同观测存在显著的差距, 尤其是在 23~24 日降水峰值超出观测约 1/4。同时液态云更加偏厚, 均值增加超过一成。冰云总含量的变化同 1M2N0s 试验类似,

但幅度略弱。

总体而言 1M2N0s 试验相比于 1M2MSN 试验, 液态过程改善显著, 而两个改进试验的冰相过程同观测的差距均存在不同程度的扩大。雪的单参数改进试验的结果表明, 单参数方法中对雪的截距进行处理的方法相比于直接指定为常数的方法在一定程度上更具优势。以上结果同 Milbrandt and Yau (2006b)、Solomon et al. (2009) 的研究较为一致。

4.2.3 雪的单参数方案改进效果物理机制分析

1M2N0s 试验中, 雪的截距诊断经验公式扩大为雪的单参数样本试验的两倍, 显著影响了对流系统的发生发展。冰晶和雪的含量、雪的数浓度和有

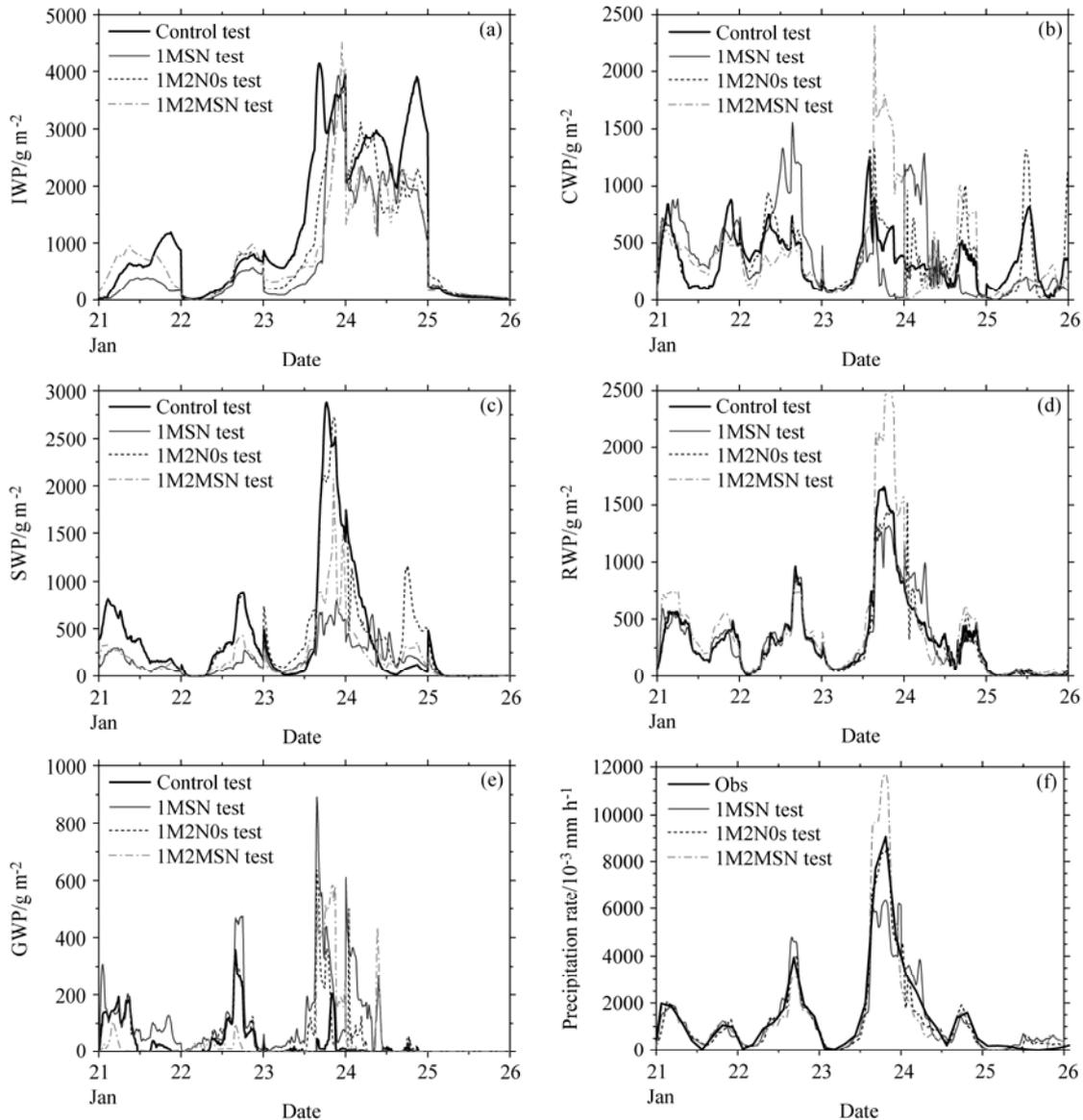


图 8 雪单参数试验 (a) IWP、(b) CWP、(c) SWP、(d) RWP、(e) GWP、(f) 降水率时间演变

Fig. 8 Time series of (a) IWP, (b) CWP, (c) SWP, (d) RWP, (e) GWP, and (f) precipitation rate from model experiments with single-moment snow

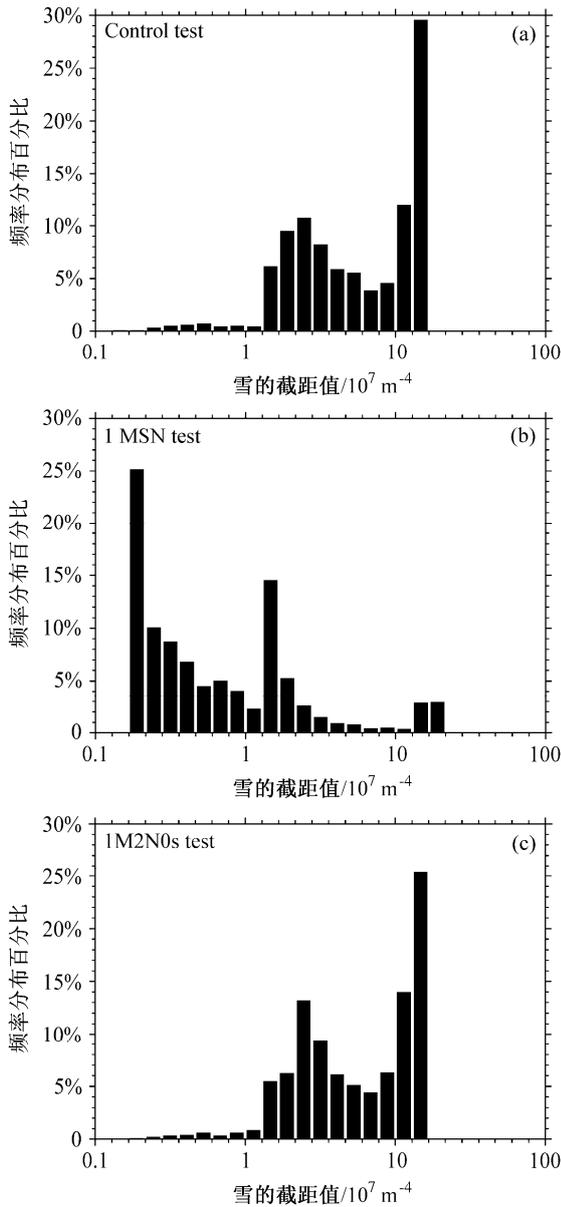


图 9 (a) 控制试验、(b) 1MSN 试验、(c) 1M2N0s 试验雪的截距频率分布
Fig. 9 Frequency distributions of N_{0s} from (a) control test, (b) 1MSN test, and (c) 1M2N0s test

效半径 (R_s , 单位: μm) 均有增强的趋势 (图略)。

冰晶通过自动转化过程形成雪的胚胎后, 在同样的混合比条件下, 截距值加倍后诊断获得雪的数浓度也会增倍。活跃期水汽供应充足, 增多的雪粒子个体仍然能够获得较为充分的发展, 同时雪对水汽的消耗过程的增强以及凝华潜热的加热效应改变了水汽和温度场的分布, 进而影响到冰面过饱和度 (S_i) 的分布。如图 10a 所示, 在 11~15 km 的冰晶最初形成之处, S_i 在 1M2N0s 试验中相比于

1MSN 试验增大了约一倍。过饱和条件的改善使得冰晶源地的冰晶形成过程得到加强 (图 10b, 10~15 km 处)。增强的冰晶通过凝华获得增长并不断沉降, 不仅加强了 5~10 km 处冰晶向雪的自动转化过程 (图 10c), 而且也有利于此处雪碰并冰晶过程的发展 (图 10d, 雪碰并冰晶过程的增长率 Q_{clis})。冰晶的自动转化过程加强为雪的发展奠定良好的基础, 1M2N0s 试验中雪的凝华率 (Q_{deps}) 扩大为 1MSN 试验的 3 倍 (图 10e)。综上所述, 雪的数浓度的加倍改变了过饱和度的分布从而加强冰晶的出生过程, 冰晶又通过自动转化和碰并过程给雪的发展形成了正反馈作用。1M2N0s 试验中霰的削弱则与雪的自动转化过程减弱相关。

1M2MSN 试验中冰相过程相比于 1MSN 变化的原理同 1M2N0s 试验相近。但在微观过程及物理量的具体变化幅度上与 1M2N0s 仍然存在显著的区别。

冰相过程发生变化之后会通过环境场以及混合相云过程等影响液态云的发生和发展。 N_{0s} 是雪粒子谱重要的微观特征参数, 模拟时段内 1M2N0s 试验中通过温度诊断获得的 N_{0s} (图 9) 偏小的情况已经得到显著改善, 同观测更加接近。这说明通过合适的经验公式诊断 N_{0s} 后, 雪云的微观特征在发展演变过程中同真实的情况可能已经愈加接近, 进而在冰相过程调整后降水率和液态云也产生了积极正面的复杂响应过程并最终取得显著的改善效果; 1M2MSN 中将截距固定为常数的处理方式忽略了 N_{0s} 随时空变化的观测事实, 在一定程度上歪曲了物理过程 (Gilmore et al., 2004), 因而其模拟效果的改善并不理想。两个改进试验中冰云含量同卫星观测的偏差都有加大的趋势。一方面卫星反演算法存在一定的误差; 另一方面 MY 方案冰相过程的参数化方法还存在诸多不完善的地方导致了冰云总含量的整体偏高。

5 总结

本文利用 WRF3.3 的单柱模式, 选用 Milbrandt 2-mon (Milbrandt and Yau, 2005a, 2005b) (MY) 方案对热带暖池国际云试验 (TWP-ICE) 期间的对流过程进行了数值模拟和敏感性试验。结合观测以及云模式的结果, 初步检验 MY 方案的默认的双参数版本和单参数版本对热带对流云系的模拟能力。双参数方案的控制试验模拟的降水率和液态水含量

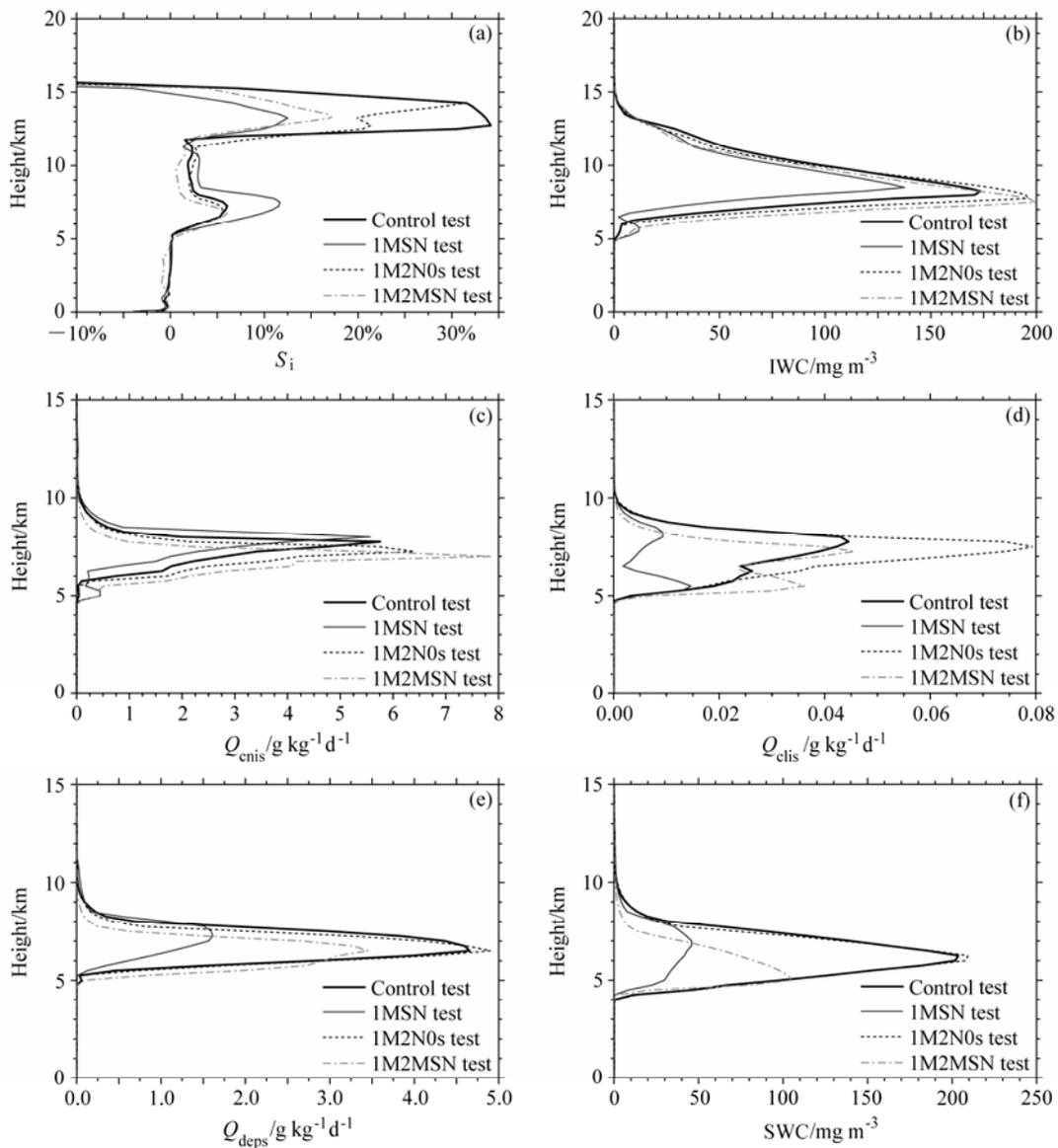


图 10 雪单参数试验 2006 年 1 月 23 日 12:00 至 24 日 12:00 平均雪的微观特征 (a) S_i 、(b) IWC、(c) Q_{cnis} 、(d) Q_{clis} 、(e) Q_{deps} 、(f) SWC 垂直分布

Fig. 10 Time averaged vertical profiles of micro-physical properties from experiments with single-moment snow between 1200 UTC 23 Jan and 1200 UTC 24 Jan 2006: (a) S_i ; (b) IWC; (c) Q_{cnis} ; (d) Q_{clis} ; (e) Q_{deps} ; (f) SWC

的演变比单参数方案更加接近观测，对于冰云微观特征（冰晶粒子的数浓度、雪的截距）的把握也更为符合观测。为了使在实际业务中应用较为广泛的单参数方案在计算量较为合理的同时具有较好的模拟效果，尝试参考双参数控制试验中获得的更为接近观测的冰相物质的微观特征，设计冰相粒子的单参数改进试验并对改善效果进行了重点讨论，对其中产生变化的物理机制也进行了初步分析。文中主要得出的结论如下：

(1) MY 方案的默认的双参数版本和单参数版

本均能够再现 TWP-ICE 期间的热带云系的总体宏观和微观特征。MY 方案的双参数版本模拟的降水率的演变特征同观测十分吻合，液态云含量及构成合理，冰相粒子的微观特征同观测事实较为一致。单参数默认版本的冰云含量更为接近观测，但降水率、液态云的构成及冰相粒子微观特征方面同观测事实存在明显差距。

(2) 受单参数方法自身的局限性影响，冰晶的两个单参数改进试验均未达到显著的改善效果。改进试验中，雨水含量明显增强及雨滴有效半径减小

综合导致了降水率仅有微弱改善, 液态云异常增厚则与暖云中的上升运动增强直接相关。而冰云总含量与卫星观测的差异缩小, 冰云构成比重也发生变化。其中冰晶数浓度增加直接导致冰晶有效半径的减小, 间接引起的雪和霰的发展变弱。

(3) 雪的单参数改进试验中, 通过调整雪的截距的诊断经验公式, 雪的截距、液态水含量以及降水率取得了显著的改善效果。而采用控制试验的参考值作为雪的截距固定值的改进思路, 液态云偏厚更为严重, 降水率的演变细节同观测仍然差异显著。改进试验中冰云总体增强, 伴随着液态云和降水的发展则经历复杂的响应过程。雪的截距值的诊断经验公式经过完善后获得的截距值同真实情况更为接近, 相比于截距值指定为常数的方法诊断公式能够反映其时空变化的特征, 因而其冰相和液态过程的发展同实际过程更加一致。就文中个例而言, 为实现计算量和模式性能的双赢, 采用适当的经验公式诊断雪的截距值的处理方法对改进单参数方案的模拟能力具有一定的可行性。

文中通过调整雪的截距值的经验公式虽然取得显著的改善效果, 但该公式是基于中纬度锋面云系的观测特征建立的。本文对经验公式的调整方法相对经验化, 将来还有待于更多的本地观测资料客观地对其进行进一步地完善和检验, 以增强普适性。针对不同的天气过程, 微物理参数化方案中的每类粒子扮演的角色各有不同, 各类物理过程亦存在复杂的相互作用, 因而将来对单参数方案的改进工作还需要因时因地而异。另外由于观测资料存在误差, 未来的工作还有待于采用强迫场集合成员的方法, 通过集合模拟的方法以确定强迫场的不确定性对模拟结果的影响。

致谢 感谢美国能源部大气辐射观测项目(Atmospheric Radiation Measurement, ARM)计划提供 TWP-ICE 期间的外场观测资料。

参考文献 (References)

- 敖翔宇, 任雪娟, 汤剑平, 等. 2011. 长江三角洲城市群对夏季日降水特征影响的模拟研究 [J]. 气象科学, 31(4): 451–459. Ao Xiangyu, Ren Xuejuan, Tang Jianping, et al. 2011. Simulation study of urbanization effects on summer daily precipitation over the Yangtze River Delta [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31(4): 451–459.
- Brandes E A, Ikeda K, Zhang G F, et al. 2007. A statistical and physical description of hydrometeor distributions in Colorado snowstorms using a video disdrometer [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 46 (5): 634–650, doi: 10.1175/JAM2489.1.
- Bryan G H, Wyngaard J C, Fritsch J M. 2003. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection [J]. Mon. Wea. Rev., 131 (10): 2394–2416, doi: 10.1175/1520-0493(2003)131<2394:RRFTSO>2.0.CO;2.
- 陈锋, 董美莹, 冀春晓, 等. 2012. WRF 模式对浙江 2011 年夏季降水和温度预报评估及其湿过程敏感性分析 [J]. 浙江气象, 33 (3): 3–12.
- Chen Feng, Dong Meiyong, Ji Chunxiao, et al. 2012. Evaluation of forecasts of 2011 summer rainfall and temperature in Zhejiang and sensitivity analysis of wet processes [J]. Journal of Zhejiang Meteorology (in Chinese), 33 (3): 3–12.
- Clothiaux E E, Ackerman T P, Mace G G, et al. 2000. Objective determination of cloud heights and radar reflectivities using a combination of active remote sensors at the ARM CART sites [J]. J. Appl. Meteor., 39 (5): 645–665, doi: 10.1175/1520-0450(2000)039<0645:ODOCHA>2.0.CO;2.
- Cooper W A. 1986. Ice initiation in natural clouds [J]. Meteor. Monogr., 21 (43): 29–32, doi: 10.1175/0065-9401-21.43.29.
- Dawson D T II, Xue M, Milbrandt J A, et al. 2010. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms [J]. Mon. Wea. Rev., 138 (4): 1152–1171, doi: 10.1175/2009MWR2956.1.
- 董昊, 徐海明, 罗亚丽. 2012. 云凝结核浓度对 WRF 模式模拟飑线降水的影响: 不同云微物理参数化方案的对比研究 [J]. 大气科学, 36 (1): 145–169.
- Dong Hao, Xu Haiming, Luo Yali. 2012. Effects of cloud condensation nuclei concentration on precipitation in convection permitting simulations of a squall line using WRF model: Sensitivity to cloud microphysical schemes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 145–169.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. J. Atmos. Sci., 46 (20): 3077–3107.
- Ghan S, Randall D, Xu K M, et al. 2000. A comparison of single column simulations of summertime midlatitude continental convection [J]. J. Geophys. Res., 105 (D2): 2091–2124, doi: 10.1029/1999JD900971.
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N. 2004. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme [J]. Mon. Wea. Rev., 132 (11): 2610–2627, doi: 10.1175/MWR2810.1.
- 郭妙, 金之雁, 周斌. 2012. 基于通用图形处理器的 GRAPES 长波辐射并行方案 [J]. 应用气象学报, 23 (3): 348–354. Guo Miao, Jin Zhiyan, Zhou Bin. 2012. GPPU accelerated massive parallel design of long wave radiation process in GRAPES-Global model [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23 (3): 348–354.
- Heymsfield A J, Protat A, Bouniol D, et al. 2008. Testing IWC retrieval methods using radar and ancillary measurements with in situ data [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47 (1): 135–163, doi: 10.1175/2007JAMC1606.1.
- Houze R A Jr, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. 1979. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds [J]. J. Atmos. Sci., 36 (1): 156–162, doi: 10.1175/1520-0469(1979)036<0156:SDOPPI>2.0.CO;2.

- James O Pinto. 1998. Autumnal mixed-phase cloudy boundary layers in the Arctic [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55: 2016–2038. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1998\)055<2016:AMPCBL>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<2016:AMPCBL>2.0.CO;2)
- 金莲姬. 2007. 热带云砧卷云微观特征及其对环境变化的响应 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 151pp. Jin Lianji. 2007. On the microphysical properties of tropical anvil cirrus and its response to changes in environmental conditions [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of information Science and Technology, 151pp.
- Jung Y, Xue M, Zhang G F. 2010. Simulations of polarimetric radar signatures of a supercell storm using a two-moment bulk microphysics scheme [J]. *J. Appl. Meteor.*, 49 (1): 146–163, doi: 10.1175/2009JAMC2178.1.
- Jung Y, Xue M, Tong M J. 2012. Ensemble Kalman Filter analyses of the 29–30 May 2004 Oklahoma tornadic thunderstorm using one- and two-moment bulk microphysics schemes, with verification against polarimetric radar data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (5): 1457–1475, doi: 10.1175/MWR-D-11-00032.1.
- Lean H W, Clark P A, Dixon M, et al. 2008. Characteristics of high-resolution versions of the Met Office Unified Model for forecasting convection over the United Kingdom [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (9): 3408–3424, doi: 10.1175/2008MWR2332.1.
- 李香淑. 2007. 南海季风试验区海洋对流结构与 TRMM 卫星反演研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 60pp. Li Xiangshu. 2007. A study on the ocean convection structure and TRMM retrieved data analyses over the SCSMEX [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 60pp.
- Liao L, Sassen K. 1994. Investigation of relationships between Ka-band radar reflectivity and ice and liquid water contents [J]. *Atmospheric Research*, 34 (1–4): 231–248, doi: 10.1016/0169-8095(94)90094-9.
- 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.
- Lin Y L, Donner L J, Petch J, et al. 2012. TWP-ICE global atmospheric model intercomparison: Convection responsiveness and resolution impact [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D9): D09111, doi: 10.1029/2011JD017018.
- Liu C L, Illingworth A J. 2000. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (7): 1130–1146, doi: 10.1175/1520-0450(2000)039<1130: TMAROI>2.0.CO;2.
- Luo Y L, Xu K M, Morrison H, et al. 2008a. Arctic mixed-phase clouds simulated by a cloud-resolving model: Comparison with ARM observations and sensitivity to microphysics parameterizations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65 (4): 1285–1303, doi: 10.1175/2007JAS2467.1.
- Luo Y L, Xu K M, Morrison H, et al. 2008b. Multi-layer arctic mixed-phase clouds simulated by a cloud-resolving model: Comparison with ARM observations and sensitivity experiments [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D12): D12208, doi: 10.1029/2007JD009563.
- 马国忠, 银燕, 王秋京. 2010. 东北地区春季冷锋云系降水个例数值模拟及机理研究 [J]. *黑龙江气象*, 27 (4): 4–8. Ma Guozhong, Yin Yan, Wang Qiujing. 2010. Mechanism and numerical simulating study of the cold front precipitation in Northeast China [J]. *Heilongjiang Meteorology* (in Chinese), 27 (4): 4–8.
- 马严枝, 陆昌根, 高守亭. 2012. 8. 19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验 [J]. *大气科学*, 36 (4): 835–850. Ma Yanzhi, Lu Changgen, Gao Shouting. 2012. The effects of different microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18–19 August 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (4): 835–850, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159.
- 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 2009. 利用 TRMM 卫星资料对人工增雨云系模式云微观场预报能力的检验 [J]. *气象学报*, 67 (2): 260–271. Ma Zhanshan, Liu Qijun, Qin Yanyan, et al. 2009. Verification of forecasting efficiency to cloud microphysical characters of mesoscale numerical model for artificial rainfall enhancement by using TRMM satellite data [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (2): 260–271.
- Mather J H, McFarlane S A, Miller M A, et al. 2007. Cloud properties and associated radiative heating rates in the tropical western Pacific [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D5): D05201, doi: 10.1029/2006JD007555.
- May P T, Jakob C, Mather J H, et al. 2008. Field research: Characterizing oceanic convective cloud systems [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89 (2): 153–155, doi: 10.1175/BAMS-89-2-153.
- McFarquhar G M, Black R A. 2004. Observations of particle size and phase in tropical cyclones: Implications for mesoscale modeling of microphysical processes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (4): 422–439, doi: 10.1175/1520-0469(2004)061<0422:OOPSAP>2.0.CO;2.
- 梅海霞, 沈新勇, 王卫国, 等. 2015. 双参数微物理方案在 WRF 单柱模式中的模拟检验和对比研究 [J]. *高原气象*, 34 (4): 890–909. Mei Haixia, Shen Xinyong, Wang Weiguo, et al. 2015. Evaluation and comparison of two double-moment bulk microphysics schemes using WRF single-column model [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 34 (4): 890–909, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00113.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3051–3064, doi: 10.1175/JAS3534.1.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2005b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (9): 3065–3081, doi: 10.1175/JAS3535.1.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2006a. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part III: Control simulation of a hailstorm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (12): 3114–3136, doi: 10.1175/JAS3816.1.
- Milbrandt J A, Yau M K. 2006b. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part IV: Sensitivity experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63 (12): 3137–3159, doi: 10.1175/JAS3817.1.
- Morrison H, Curry J A, Shupe M D, et al. 2005. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part II: Single-column modeling of Arctic clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (6): 1678–1693, doi: 10.1175/JAS3447.1.
- Morrison H, Pinto J O. 2005. Mesoscale modeling of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds using a new two-moment bulk microphysics scheme [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62 (10): 3683–3704, doi: 10.1175/JAS3564.1.
- Morrison H, Pinto J O. 2006. Intercomparison of bulk cloud microphysics

- schemes in mesoscale simulations of springtime Arctic mixed-phase stratiform clouds [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (7): 1880–1900, doi: 10.1175/MWR3154.1.
- Morrison H, Pinto J O, Curry J A, et al. 2008. Sensitivity of modeled arctic mixed-phase stratocumulus to cloud condensation and ice nuclei over regionally varying surface conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D5): D05203, doi: 10.1029/2007JD008729.
- Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (3): 991–1007, doi: 10.1175/2008MWR2556.1.
- Narita M, Ohmori S. 2007. Improving precipitation forecasts by the operational nonhydrostatic mesoscale model with the Kain-Fritsch convective parameterization and cloud microphysics [C]// Preprints, 12th Conference on Mesoscale Process. Waterville Valley, NH, Amer. Meteorol. Soc., Boston, CD-ROM, 3.7.
- Protat A, Delanoë J, Bouniol D, et al. 2007. Evaluation of ice water content retrievals from cloud radar reflectivity and temperature using a large airborne in situ microphysical database [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (5): 557–572, doi: 10.1175/JAM2488.1.
- 冉令坤, 高守亭, 洪延超. 2008. 冰相粒子质量和半径的改变对降水过程影响的数值模拟研究 [C]// 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集 (I). 北京: 气象出版社, 1106pp. Ran Lingkun, Gao Shouting, Hong Yanchao. 2008. Numerical simulating study of effects on rainfall of mixing ratio and radius of ice crystals [C]// Proceedings of Conference on 15th Processes in Cloud Physics, Precipitation, and Modification (I) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press 1106pp.
- Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (548): 1071–1107, doi: 10.1002/qj.49712454804.
- Seo E K, Liu G S. 2005. Retrievals of cloud ice water path by combining ground cloud radar and satellite high-frequency microwave measurements near the ARM SGP site [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D14): D14203, doi: 10.1029/2004JD005727.
- Seo E K, Liu G S. 2006. Determination of 3D cloud ice water contents by combining multiple data sources from satellite, ground radar, and a numerical model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45 (11): 1494–1504, doi: 10.1175/JAM2430.1.
- 沈新勇, 梅海霞, 王卫国, 等. 2015. 双参数微物理方案的冰相过程模拟及冰核数浓度的影响试验 [J]. *大气科学*, 39 (1): 83–99. Shen Xinyong, Mei Haixia, Wang Weiguo, et al. 2015. Numerical simulation of ice-phase processes using a double-moment microphysical scheme and a sensitivity test of ice nuclei concentration [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(1): 83–99, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.13310.
- Solomon A, Morrison H, Persson O, et al. 2009. Investigation of microphysical parameterizations of snow and ice in Arctic clouds during M-PACE through model-observation comparisons [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (9): 3110–3128, doi: 10.1175/2009MWR2688.1.
- Song X L, Zhang G J. 2011. Microphysics parameterization for convective clouds in a global climate model: Description and single-column model tests [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D2): D02201, doi:10.1029/2010JD014833.
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *J. Climate*, 18 (2): 237–273, doi: 10.1175/JCLI-3243.1.
- Stith J L, Haggerty J A, Heymsfield A, et al. 2004. Microphysical characteristics of tropical updrafts in clean conditions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43(5): 779–794, doi: 10.1175/2104.1.
- 孙建华, 赵思雄. 2003. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 8(4): 387–401. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2003. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (4): 387–401.
- Varble A, Fridlind A M, Zipser E J, et al. 2011. Evaluation of cloud-resolving model intercomparison simulations using TWP-ICE observations: Precipitation and cloud structure [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D12): D12206, doi: 10.1029/2010JD015180.
- Wang W G, Liu X H, Xie S C, et al. 2009. Testing ice microphysics parameterizations in the NCAR Community Atmospheric Model Version 3 using Tropical Warm Pool-International Cloud Experiment data [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D14): D14107, doi: 10.1029/2008JD011220.
- 王秀娟, 李培仁, 赵震, 等. 2013. 一次层状云系结构和降水机制的观测与数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 18 (3): 311–328. Wang Xiujuan, Li Peiren, Zhao Zhen, et al. 2013. A case study of stratiform cloud structure and precipitation mechanism based on observation and simulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (3): 311–328, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11061.
- Wapler K, May P T, Jakob C, et al. 2010. Cloud-system-resolving model simulations of tropical cloud systems observed during the Tropical Warm Pool-International Cloud Experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (1): 55.
- 肖辉, 银燕. 2011. 污染气溶胶对山西一次降水过程影响的数值模拟 [J]. *大气科学*, 35 (2): 235–246. Xiao Hui, Yin Yan. 2011. A numerical study of polluted aerosol effects on precipitation in Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 235–246.
- Xie S C, Zhang M H, Boyle J S, et al. 2004. Impact of a revised convective triggering mechanism on Community Atmosphere Model, version 2, simulations: Results from short-range weather forecasts [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D14), doi: 10.1029/2004JD004692.
- Xie S C, Boyle J, Klein S A, et al. 2008. Simulations of Arctic mixed-phase clouds in forecasts with CAM3 and AM2 for M-PACE [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D4), doi: 10.1029/2007JD009225.
- Xie S C, Hume T, Jakob C, et al. 2010. Observed large-scale structures and diabatic heating and drying profiles during TWP-ICE [J]. *J. Climate*, 23 (1): 57–79, doi: 10.1175/2009JCLI3071.1.
- 许凤雯, 崔晓鹏, 许小峰, 等. 2011. 2007年7月江淮流域降水过程云分辨尺度模拟研究 II——降水过程模拟诊断 [J]. *热带气象学报*, 27 (3): 365–372. Xu Fengwen, Cui Xiaopeng, Xu Xiaofeng, et al. 2011. A cloud-resolving modeling study of the surface rainfall processes in the Jiang-Huai Valley during July 2007 II—Diagnostic analysis of the simulated surface rainfall processes [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (3): 365–372.
- 许焕斌, 段英. 1999. 云粒子谱演化研究中的一些问题 [J]. *气象学报*, 57(4): 450–460. Xu Huanbin, Duan Ying. 1999. Some questions in studying the evolution of size distribution spectrum of hydrometeor

- particles [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (4): 450–460.
- 晏晓英, 药明, 陈长胜. 2010. 2008 年汛期两种模式降水预报的检验分析 [J]. *吉林气象*, (2): 35–38. Yan Xiaoying, Yao Ming, Chen Changsheng. 2010. Test and analysis of rainfall forecasts by two models in 2008 rainy season [J]. *Journal of Jilin Meteorology* (in Chinese), (2): 35–38.
- 尹金方. 2013. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构建 [D]. 浙江大学博士学位论文, 161pp. Yin Jinfang. 2013. The study on observation and parameterization of cloud-precipitation microphysical properties over East Asia [D]. Ph.D.dissertation (in Chinese), Zhejiang University, 161pp.
- 于翥, 姚展予. 2009. 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析 [J]. *气象*, 35 (12): 3–11. Yu Fei, Yao Zhanyu. 2009. Numerical study on the complex of the stratiform and embedded convective cloud precipitation: A case study [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35 (12): 3–11.
- 张大林. 1998. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用 [J]. *大气科学*, 22(4): 548–561. Zhang Dalin. 1998. Roles of various diabatic physical processes in mesoscale models [J]. *Chinese Journal Atmospheric Science* (in Chinese), 22 (4): 548–561, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.16.
- Zhang M H, Lin J L, Cederwall R T, et al. 2001. Objective analysis of ARM IOP data: Method and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (2): 295–311, doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<0295:OAOAID>2.0.CO;2.
- Zhang M H, Lin J L. 1997. Constrained variational analysis of sounding data based on column-integrated budgets of mass, heat, moisture, and momentum: Approach and application to ARM measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (11): 1503–1524, doi: 10.1175/1520-0469(1997)054<1503:CVAOSD>2.0.CO;2.
- 赵思雄, 曾庆存. 2005. 东亚强寒潮——冷涌越过赤道并引发南半球热带气旋和强降水的个例研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 507–525.
- Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2005. A study of East Asia strong cold wave—surge crossing Equator and influencing the development of tropical cyclone and heavy rainfall in the Southern Hemisphere [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 507–525.
- 郑晓辉, 徐国强, 魏荣庆. 2013. GRAPES 新云量计算方案的引进和影响试验 [J]. *气象*, 39 (1): 57–66. Zhen Xiaohui, Xu Guoqiang, Wei Rongqing. 2013. Introducing and influence testing of the new cloud fraction scheme in the GRAPES [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 39 (1): 57–66.
- 周嘉陵, 王文兰, 曾明剑, 等. 2011. WRF 快速更新循环同化预报系统 (WRF_RUC) 在江苏省气象台的搭建与应用 [C]// 第 28 届中国气象学会年会, 721pp. Zhou Jialing, Wang Wenlan, Zeng Mingjian, et al. 2011. Construction and application in Jiangsu meteorological observatory of WRF Rapid Update Cycle [C]// 28th Chinese Meteorological Society Annual Meeting (in Chinese), 721pp.