

朱格利, 林万涛, 曹艳华. 2014. 用 WRF 模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析 [J]. 大气科学, 38 (3): 513–523, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13202. Zhu Geli, Lin Wantao, Cao Yanhua. 2014. Numerical simulation of a rainstorm event over South China by using various cloud microphysics parameterization schemes in WRF model and its performance analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 513–523.

用 WRF 模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析

朱格利^{1,2} 林万涛¹ 曹艳华²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 华北电力大学数理系, 北京 102206

摘 要 本文使用中尺度数值模式 WRFV3.4 中的 8 种不同云微物理过程参数化方案, 模拟 2010 年 5 月 6~7 日华南一次暴雨事件, 探讨不同云微物理方案对华南暴雨模拟的影响。结果表明: 不同云微物理方案对不同量级降水模拟效果总体较好。WSM3 方案对小到大雨和大暴雨的模拟效果最好, 对暴雨的模拟最差; WDM5 方案对暴雨模拟效果最好。结合 TS 评分和误差分析结果, 整体效果最好的是 WSM5 方案, 最差的是 Lin 方案。对于同一云微物理参数化方案, 不同分辨率的降水模拟结果差异不大, 但同一分辨率的不同云微物理参数化方案的降水结果差异较大, 这说明云微物理过程比模式分辨率对暴雨模拟的影响更大。

关键词 WRF 模式 云微物理参数化方案 华南 暴雨 TS 评分

文章编号 1006-9895(2014)03-0513-11

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13202

Numerical Simulation of a Rainstorm Event over South China by Using Various Cloud Microphysics Parameterization Schemes in WRF Model and Its Performance Analysis

ZHU Geli^{1,2}, LIN Wantao¹, and CAO Yanhua²

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Beijing 102206

Abstract In this study, eight cloud microphysics parameterization schemes (schemes Kessler, Lin, WSM3, WSM5, Eta, WSM6, WDM5, and WDM6) in the weather research and forecasting (WRF) model were used to simulate a rainstorm that occurred over South China during May 6–7, 2010, to study the effects of the cloud microphysics parameterization schemes on the simulation ability of the rainstorm. A comparison of the experimental results with the observation revealed an overall agreement in the simulation skills of various cloud microphysical schemes to various precipitation scales. The WSM3 schemes performed best for light to heavy rainfall and downpours. For simulating the rainstorm, however, WDM5 performed best, and WSM3 performed worst. According to the analysis results of threat score (TS) and error, the WSM5 scheme performed best, and the Lin scheme was worst. One parameterization scheme showed a small difference among various resolutions and a large difference in the simulation ability of the rainstorm among various

收稿日期 2013-06-26, 2013-12-18 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA01020304

作者简介 朱格利, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事中尺度数值模拟研究。Email: juliekkxl@126.com

microphysics parameterization schemes, which suggests that cloud microphysics parameterization schemes are more effective than resolution for simulating heavy rain.

Keywords WRF model, Cloud microphysics parameterization schemes, South China, Rainstorm, Threat score

1 引言

近年来,大气探测技术的飞速发展和计算机技术的突飞猛进,不仅为中尺度模式提供了更多的可用资料:多普勒雷达资料、卫星遥感资料、全球定位系统气象(GPS/MET)探空资料以及高分辨的地面观测网资料,也为运用和处理这些资料以及发展完善更复杂的中尺度模式物理过程参数化方案提供了依据(程麟生,1999)。在此基础上,中尺度数值预报模式及其模拟研究已经取得了很大的进展(Ninomiya, 1986; Pielke, 2002)。WRF (Weather Research and Forecasting) 模式(Skamarock et al., 2008)是美国环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)等联合研发的业务与研究共用的新一代高分辨率、完全可压非静力中尺度数值天气预报模式。水平格点选用 Arakawa-C 格点,垂直方向采用地形追随质量坐标(欧拉质量坐标),时间积分上采用二阶或三阶 Runge-Kutta 算法,集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体(Kain and Fritsch, 1993),重点解决分辨率为 1~10 km,时效为 60 h 以内的有限区域天气预报和模拟问题。自 2000 年推出后,因其完全开放、可移植性强、更新快等特点,在短期天气预报和模拟(张宇等, 2013)、气候研究(Yu et al., 2010)等方面得到了广泛应用,并在不断地更新完善。

WRF 模式之所以发展迅速的一个主要原因在于模式本身考虑了较为详细的物理过程,给出了丰富的物理参数化方案,能够更好地改善对中尺度天气的模拟和预报(Skamarock et al., 2008)。暴雨是中尺度天气过程,用中尺度数值模式研究其形成机制已经成为实际暴雨预报的主要手段(Yih and Walsh, 1991; 崔波等, 1999)。由于不同的动力和物理过程对降水有很大影响(Colle et al., 2005),合理选择参数化方案能很大程度地改善模拟结果。为此,大量研究工作着力于对不同物理过程参数化方案的对比检验。

Rajeevan et al. (2010) 通过分析 WRF 模式的 4

个不同云微物理过程对印度东南部(甘地)雷雨事件的敏感性发现,降水对云微物理参数化方案的选择比较敏感, Thompson 方案模拟的降水与观测最为接近,而其他 3 种方案模拟结果均偏高。李安泰和何宏让(2011)用 WRF 模式的 3 种云微物理参数化方案模拟 2010 年舟曲特大暴雨,结果显示不同云微物理参数化方案模拟的物理量存在很大差异,这可能是造成模式对降水模拟效果优劣的关键,且 Kessler 方案模拟的降水特征与实况最接近。Jankov et al. (2004) 比较 19 种不同参数化方案对降水的敏感性,发现对流方案对降水最敏感,对于弱降水过程,边界层和云微物理方案的敏感性是相当的,而对于强降水,云微物理方案比较敏感。Jankov et al. (2005) 采用包括三种微物理方案的十八种不同组合方案对 8 个夏季 MCS(即中尺度对流系统)个例进行模拟,结果表明,不同组合方案对不同个例不同量级的降水模拟,其 ETS 评分差异不大,没有一种方案明显优于其他方案,尽管不同微物理和边界层方案对预报结果有明显作用,但对预报结果产生最大影响的是积云对流参数方案的选择。利用 WRF 模式,采用 36 km、12 km 和 4 km 的格点分辨率,选用七种微物理方案,对华北地区的一次暴雨过程进行了敏感性试验,试验结果表明:选用不同的微物理方案,可以不同程度地模拟这场暴雨的范围和强度,且选择合理的微物理方案对细网格(4 km)嵌套的模拟也可以相应的提高,从而提高了暴雨模拟的分辨率,为中小尺度暴雨的成因分析提供了参考(马严枝等, 2012)。

以上研究结果表明,云微物理过程可以通过调整温湿场结构来影响积云对流发生发展的条件,进而影响积云降水的预报(牛俊丽和闫之辉, 2007),选择不同的云微物理方案对降水模拟结果有很大影响(Jankov et al., 2005)。华南位于我国大陆纬度最低地区,东临世界最大洋面,西有世界最高的青藏高原耸立,北回归线横贯其中,处于对气候变化敏感的南海季风区和全球气候变化趋势南北位相相反的交界带,海陆气交换强烈,中小尺度对流系统活动频繁而易形成强降水,甚至引发持续性暴雨,其中极强或持续性大暴雨造成的灾害最为严重

(陶诗言, 1980), 所以, 华南暴雨预报成为气象学者们研究的重点内容。但由于华南特殊的气候地理环境, 加上数值模式初始误差、模式系统误差、各种参数化方案的误差, 削弱了模式对华南暴雨预报的准确性, 而为了减少模式预报误差, 参数化方案的合理选择尤为重要。目前, 探讨模式云微物理过程对华南暴雨影响的研究还不是很多。本文利用 WRF 模式模拟 2010 年 5 月 6 日 00 时~7 日 00 时(协调世界时, 下同)华南一次暴雨事件, 结合统计的方法对比不同云微物理过程参数化方案对华南暴雨模拟的影响, 对华南地区如何合理选择和使用 WRF 模式中的云微物理参数化方案进行了探讨。

2 试验设计及 WRF 模式参数化方案简介

2.1 区域设置

模式采用三重嵌套网格(图 1), 试验区域中心定为(29°N, 105°E), 模式水平分辨率分别为 54 km、18 km 和 6 km, 对应网格格点数分别为 92×109, 148×160, 160×160, 垂直方向 28 层, 模式顶层气压为 50 hPa。

2.2 试验数据

本文以 NCEP 一日四次的 1°×1° FNL 再分析资料作为天气背景场和模式初边界条件, 采用 Lambert 地图投影, 用 54 km 分辨率的模拟结果作为 18 km 分辨率的模拟初边界条件, 18 km 分辨率的模拟结果作为 6 km 分辨率的模拟初边界条件, 连续积分 24 小时, 逐时输出模式结果。观测降水为 MICAPS 的 2010 年 5 月 6~7 日的 24 小时累计台站降水数据(diamond 3), 图 1 中的点即为 430 个站点分布。分析平面图时, 将站点数据插值到 0.5°×0.5°网格点上, 模式结果不做处理; 计算站点相关系数、平均绝对误差、均方根误差和 TS 评分时, 均将模式数据插值到图 1 所示的站点上。

2.3 WRF 模式参数化方案简介

本文使用的 WRF 模式为 2012 年 4 月 6 日发布的 WRFV3.4 版本, 为讨论不同云微物理过程在不同分辨率下对华南降水的影响, 在同一分辨率下, 除云微物理方案外, 其他物理过程方案都固定选取同样的方案配置, 包括: RRTM 长波辐射方案(Mlawer et al., 1997), Dudhia 短波辐射方案(Dudhia, 1989), MM5 Monin-Obukhov 近地面层方案, 高分辨率 Yonsei University (YSU) 行星边

界层方案(PBL)(Hong et al., 2006), NOAH 陆面过程方案(Chen and Dudhia, 2001), 水平分辨率为 54 km 和 18 km 时, 使用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案(Kain and Fritsch, 1990, 1993), 而水平分辨率为 6 km 时不考虑积云对流参数化方案。在这些物理过程方案的基础上, 分别就不同云微物理过程参数化方案设计 8 组对比试验: ①Kessler 方案、②Lin 方案(Chen and Sun, 2002)、③WSM3 方案、④WSM5 方案(Hong et al., 2004)、⑤Eta 方案、⑥WSM6 方案(Hong and Lim, 2006)、⑦WDM5 方案(Wang et al., 2011)、⑧WDM6 方案(Lim and Hong, 2010), 对 2010 年 5 月 6~7 日的降水事件进行 8 组预报, 对比不同方案的预报结果分析云微物理过程对华南降水预报的影响。下面是对 WRFV3.4 模式的云微物理方案的简单介绍。

2.3.1 Kessler 暖云方案

来自于 COMMAS 模式(Wicker and Wilhelmson, 1995), 是一个简单的暖云降水方案, 忽略了液体水与冰之间的相变过程。云水的产生来自水汽的凝结(遇不饱和层时产生蒸发), 考虑的微物理过程包括: 水汽的凝结、云水向雨水的自动转换、雨水与云水的碰并、雨水的蒸发, 雨滴的下落速度参数化等, 无冰相过程。

2.3.2 Purdue Lin 方案

Lin 方案是物理过程描述较为复杂的方案, 与水相物质有关的预报量有水汽混合比、云水、雨水、云冰、雪和霰。所有的参数化选项都是在 Lin et al. (1983) 以及 Rutledge and Hobbs (1984) 的参数化方案的基础上得到, 饱和度修正方案采用 Tao et al. (1989) 的方法。这个方案是 WRF 模式中相对较成熟的方案, 更适合于高分辨率模拟和理论研究。

2.3.3 WRF Single-Moment 3-class (WSM3) 方案

该方案来自旧的 NCEP3 方案(Hong et al., 2004)的修正, 也称为简单冰方案。云水和云冰被作为同一类来计算, 区别在于温度, 当温度低于或等于凝结点时云冰存在, 否则云水存在, 雨水和雪也同样考虑。与其他方案不同的是诊断关系所使用冰的数浓度是基于冰的质量而非温度。包括三类水物质: 水汽、云水或云冰、雨水或雪, 适用于业务模式的中尺度网格。

2.3.4 WRF Single-Moment 5-class (WSM5) 方案

该方案与 WSM3 类似, 来自对 NCEP5 方案的修正, 与水相有关的预报量有: 云水、云、雨水、

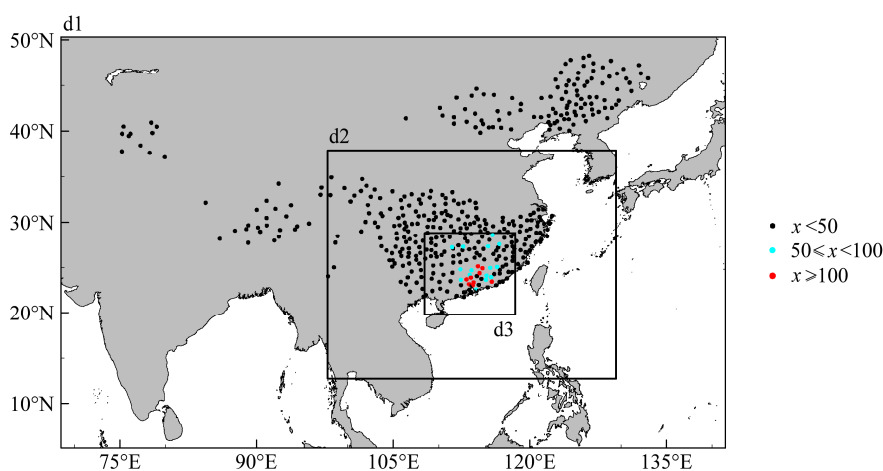


图1 模拟区域和观测降水站点分布 (圆点为站点位置; 颜色代表站点降水的量级; x 为 24 小时累计降水量, 单位: mm)

Fig. 1 Model domains and the distribution of the stations (dots indicate locations of the observation stations; colors of dots indicate different precipitation grades; x represents the 24-h accumulative rainfall, units: mm)

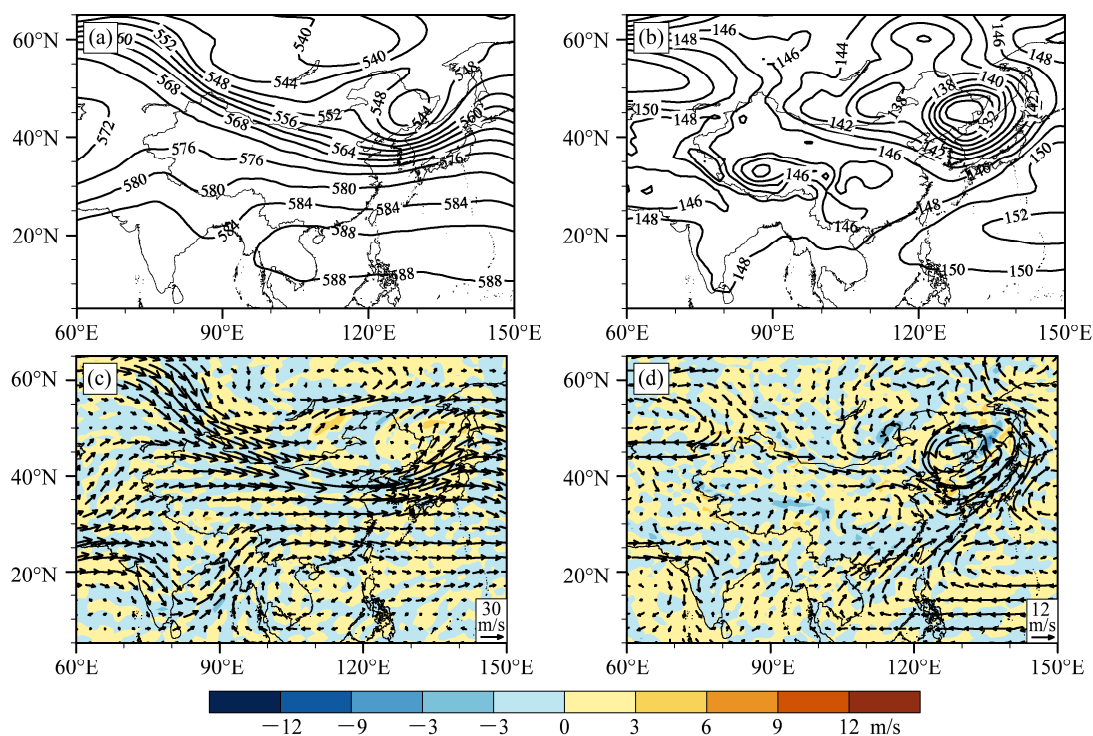


图2 2010 年 5 月 6 日 00 时~7 日 00 时平均场: (a) 500 hPa 和 (b) 850 hPa 位势高度平均场 (单位: dagpm); (c) 300 hPa 和 (d) 850 hPa 平均风场 (箭头, 单位: m/s) 及平均散度场 (阴影, 单位: $10^{-6} s^{-1}$)

Fig. 2 (a) 500-hPa and (b) 850-hPa average geopotential height (dagpm), (c) 300-hPa and (d) 850-hPa average horizontal wind (arrows, unit: m/s) and average divergence (shaded, unit: $10^{-6} s^{-1}$) from 0000 UTC 6 May to 0000 UTC 7 May in 2010

雪和水汽混合比, 比 WSM3 物理过程稍微复杂些, 允许混合变相过程和过冷却水的存在, 除 WSM3 中的微物理过程外, 方案中还包括: 在冷雨过程中增加了雨与冰、雪与云的交叉碰并过程, 代替了 NCEP5 版本。

2.3.5 Eta Ferrier 方案

此方案预报模式平流项中水汽混合比和总

凝结降水的变化, 模式变量中与水相物质有关的预报量有两类: 云水 (或云冰)、水汽的混合比。这个方案改变了模式中水汽和冷凝物的平流输送。在雪、霰或者冰雨形成中, 可以提取局地云水、雨、云冰和冰水密度变化的第一猜测信息。这样能够快速调整微物理过程, 以适应大时间积分步长。

2.3.6 WRF Single-Moment 6-class (WSM6) 方案

该方案扩充了 WSM5 方案,还包括霰和与它关联的一些过程。这些过程的参数化大多和 Lin et al. (1983) 的方案相似,在计算增长和其他参数上有些差别。与 WSM3、WSM5 一样,饱和度调节按 Dudhia (1989) 和 Hong et al. (1998) 的方案分开处理冰和水的饱和过程,对计算的量级进行最优化处理,减小方案对模式时间步长的敏感性,适合于高分辨的模拟。

2.3.7 WRF Double-Moment 5-class (WDM5) 方案

在 WSM5 方案的基础上,不仅预报各种水物质的混合比,还增加了云、雨水浓度等预报变量和后报变量云凝结核数 (CCN)。

2.3.8 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) 方案

基于 WSM6 发展而来,加强了雷达反射率,削弱 (增强) 了弱 (强) 降水活动,减轻了 WSM6 方案导致的一些系统偏差 (Khain et al., 2008)。除了延续 WSM6 预报水汽混合比、云水、云冰、雪、雨水和霰的混合比的能力,还可以预报云和雨水的浓度,并产生后报变量云凝结核数,用来分析气溶胶对云属性和降水过程的影响。

模式不同物理参数化方案对降水的预报效果不同,一部分原因在于方案预报的水相变量的差异,表 1 为各云微物理方案预报的与水相有关的变量列表。

表 1 各云微物理方案的水凝物变量
Table 1 The hydrometeor variables for different cloud microphysics schemes

云微物理方案	质量变量	冰相过程	混合过程
Kessler	Q_c, Q_r	无	无
Lin	Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g	有	无
WSM3	Q_c, Q_i, C_r, Q_s	有	无
WSM5	Q_c, Q_i, C_r, Q_s	有	无
Eta	Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g	有	有
WSM6	Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g	有	有
WDM5	Q_c, Q_i, C_r, Q_s	有	无
WDM6	Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g	有	无

注: Q_c, Q_r, Q_i, Q_s, Q_g 分别为云水、雨水、冰、雪和霰的质量。

3 天气背景

2010 年 5 月 5 日开始,江南至华南共经历 6 次持续性暴雨天气过程: 5~7 日、8~10 日、12~14 日、16~19 日、20~23 日、26~31 日,这 6 次强降水过程具有影响范围广、过程雨量大、局部地区降雨强度强、灾害重等特点。不少站点累积降水量

超过 500 mm,接近当地平均年降水量的三分之一 (王晓芳等, 2010)。5~7 日,受高空低槽、中低层切变线和东移出川的西南低涡共同影响,我国江南、华南及西南地区东部出现一次强烈风雹及大暴雨天气过程。6~7 日,广东连平、增城降水量分别达 203.1 mm、175.3 mm,均突破当地 5 月份日降水量极值,增城、东莞最大雨强分别达 126.4 mm/h、107.4 mm/h,均为历史之最,广州日降水量达 213.0 mm,其中 1 h 和 3 h 最大降水量分别达 99.1 mm, 199.5 mm,均创历史记录。

500 hPa 位势高度场上,欧亚中高纬度地区为两脊一槽形势 (图 2a),乌拉尔山附近为阻塞高压,低压槽盘踞在贝加尔湖上空,一直延伸到淮河流域,槽后冷空气东移南下,低压槽也愈加深厚。850 hPa 位势高度场 (图 2b) 上存在一东北冷涡,33°N 附近有一个弱的东西向切变线,来自高纬地区的北方干冷空气沿着东北反气旋边缘南下,而西南风将来自南海和孟加拉湾的水汽沿副高外围输送到华南地区,两股干湿气流在 25°N 左右汇合,华南地区辐合加强 (图 2d); 300 hPa 风场图上,中南半岛上有一个反气旋性环流,携带南海的水汽与孟加拉湾的西南气流在 90°E 汇合形成一股强西南暖湿气流,为华南提供充足水汽,同时加剧了高空急流,华南出现明显的高空辐散 (图 2c),这种对流层中低层辐合,高层辐散加剧了上升运动,有利于降水的产生。

4 模拟结果分析

4.1 降水分析

本文以国家气象局颁布的降水强度等级划分标准为参考定义降水等级,如表 2。

表 2 降水等级

Table 2 The levels of precipitation

降水等级	24 小时累积降水量/mm
小雨/阵雨	0.1~0.9
中雨	10.0~24.9
大雨	25.0~49.9
暴雨	50.0~99.9
大暴雨	100.0~249.9

对比 54 km 水平分辨率的不同云微物理方案的模拟结果 (图略),各模拟结果的空间分布差距不大,均模拟出一条东北—西南走向的雨带,暴雨中心位置与观测一致,只是雨带范围和暴雨中心东西向偏大,南北偏小,没有模拟出雨量大于 100 mm 的大暴雨降水中心。模拟的广西南部的大雨雨带明

显偏北,雨量偏大,基本没有模拟出 25°N 以北的降水带,这可能是模式分辨率低的直接结果。

图 3 为水平分辨率为 18 km 时,5 月 6~7 日 24 小时累积降水实况 (OBS) 和不同云微物理方案的模式模拟结果。其中,左上角为站点相关系数,其值由模式结果插值到图 1 的第二重嵌套区域 (d2) 的 291 个站点的模式数据与对应台站数据计算而得,其计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2}}, \quad (1)$$

其中, N 为站点数, P_i 、 $\bar{P}_i$ 为第 i 站模拟降水量及其平均值, O_i 、 $\bar{O}_i$ 为第 i 站观测降水量及其平均值。相关系数仅仅反映模式模拟值与观测值的对应关系,在某种程度上体现了模拟结果偏离观测值的程度 (Storch and Zwiers, 1999), 相关系数越大,说明模式结果与站点观测越接近。

由图 3 可以看出,8 种云微物理方案的模拟结果与观测降水有很好的站点相关性,相关系数都超过 0.5, WSM3 最高, WDM5 次之, Lin 方案和 Eta 方案相对较低,分别只有 0.50 和 0.53,但总体来说,模式模拟的第二重嵌套区域的站点的降水等级与观测偏差不是很大。8 组试验基本都能模拟出本次降水的主要雨带及其走向,但局部地区雨量过大,导致东西向的暴雨区域明显伸长。具体来看,模式结果都较好的模拟出了位于重庆附近的降水中心位置,对于中雨的模拟范围偏小直接导致整体降水区域偏小。模式基本都能模拟出位于广州的暴雨中心, WSM3 方案、WDM5 方案和 WSM5 方案与观测结果的站点相关性最高,但 WSM3 方案没有模拟出广东和江西交界处的暴雨中心, WDM5 的模拟结果在交界处太弱,相对来说, WSM5 方案的空间分布与观测最接近。Kessler 方案和 Lin 方案模拟的降水量过大,使得在湖南西部和江西南部出现多个虚假降水中心,和其他方案一样,这两个方案模拟的

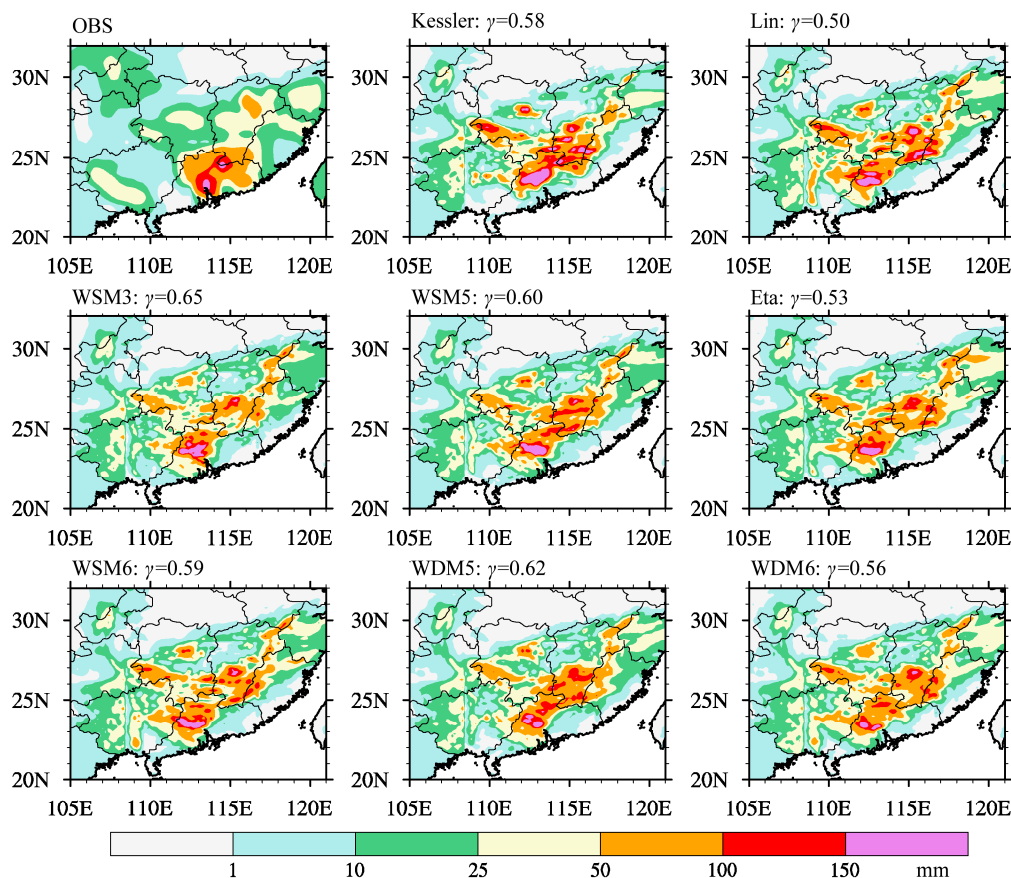


图 3 2010 年 5 月 6 日 00 时~7 日 00 时 24 小时降水实况 (OBS) 和不同云微物理参数化方案模拟结果 (分辨率为 18 km) (单位: mm) 及站点相关系数

Fig. 3 The 24-h accumulated precipitation (mm) observed (OBS) and simulated with different cloud microphysics schemes (the resolution is 18 km) from 0000 UTC 6 May to 0000 UTC 7 May in 2010 and the correlation coefficient of station

广东省的暴雨中心范围偏小,除了广州的雨强偏强,周边降水带的雨量均偏弱,且暴雨带从广州降水中心向东北蔓延,导致江西南部、福建西北部的暴雨区域明显增大,江西中部大到暴雨区偏南,与广东省的暴雨中心连为一片,而福建沿海一带的降水量级普遍偏小,可能与南岭($24^{\circ}\text{N}\sim 26^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E}\sim 116^{\circ}\text{E}$)、武夷山($25^{\circ}\text{N}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $116^{\circ}\text{E}\sim 118^{\circ}\text{E}$)的地形影响有关。对浙江的雨带范围模拟的最准确,基本能完整的模拟出浙江的降水范围, Lin 方案、Eta 方案、WDM5 方案和 WDM6 方案模拟的浙江中南部的大雨区和观测基本一致,其他方案虽然也能模拟出这一降水区域,但范围稍偏小。总体来说, WSM5 方案模拟的本次暴雨分布与观测最为接近,而 Kessler 方案和 Lin 方案模拟效果较差。

水平分辨率为 6 km 时,不同云微物理方案的模式模拟结果为图 4。整体来看,由于模式分辨率较高而观测数据分辨率相对较低,模拟结果均出现了较多细小降水中心和虚假中心,各个云微物理方

案模拟的雨带范围与观测也有不同程度的偏差,但均表现出暴雨范围偏大,雨量偏强。Kessler 方案和 Lin 方案模拟的整个降水中心雨量明显比观测大很多, Lin 方案的最大降水量甚至出现 447.2 mm,比观测的降水强度偏大一倍多,在江西、福建出现多个虚假降水中心,与观测数据的站点相关也最低; WSM3 方案模拟的江西和广东交界处的暴雨中心偏西北,且范围偏小,模拟的最大降水量也较观测偏高,但对广州市的降水中心位置模拟的相对较好,且强降水主要聚集这里,只有江西北部一个虚假降水中心,这也是 WSM3 方案与观测数据的站点相关最高的主要原因。WSM5 方案和 WDM5 方案的空间分布相似,站点相关差距也不大,均较好的模拟出广州、广东与江西交界处的降水中心,只是第二个降水中心稍偏北; Eta 方案、WSM6 方案没有模拟出广东、江西两省交界处的降水中心, WDM6 方案虽然模拟到了这个降水中心,但分散成两个,且强度较弱。

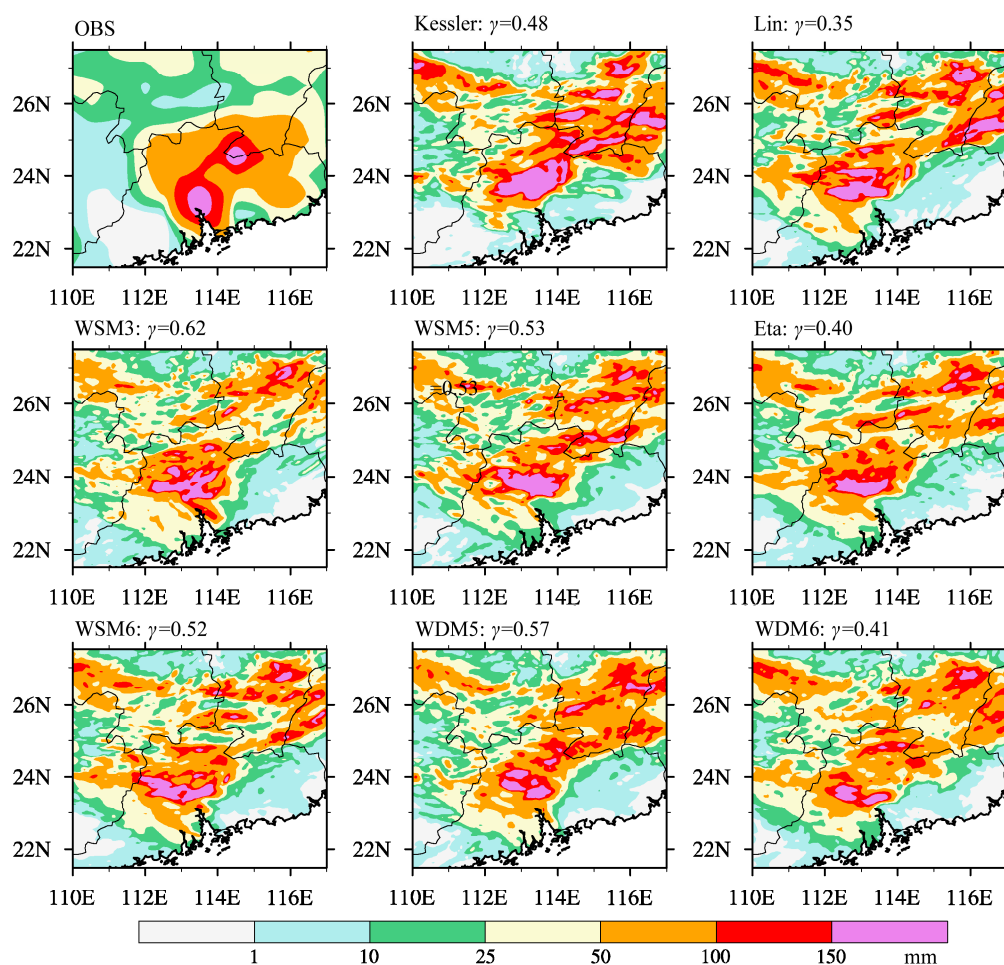


图4 同图3,但模式分辨率为 6 km

Fig. 4 Same as Fig. 3, except that the model resolution is 6 km

综合以上分析可以发现, 54 km 分辨率模式结果对暴雨位置模拟较好, 但没有模拟出大暴雨中心以及 25°N 以北的降水区域, 可能是模式分辨率太低的原因; 18 km 分辨率和 6 km 分辨率的不同的云微物理方案均能模拟出广东省的强降水中心, 但都不同程度的偏北 0.2°~0.3° (纬度)。模拟的暴雨中心雨量偏大, 而广州东部的降水量级偏低, 最终导致暴雨中心偏小, 反而由于模式分辨率高, 在江西、福建模拟了大片暴雨区和多个虚假降水中心。对比不同方案的模拟结果, WSM5 方案和 WDM5 方案模拟的暴雨中心位置相对更接近观测, WSM5 方案在不同分辨率的模拟中整体效果最好。

4.2 不同云微物理方案模拟效果检验

TS (Threat Score) 评分是目前气象部门对短期天气预报效果进行评定的有效方法之一 (Etherton and Santos, 2008)。本文使用该方法对模式模拟的降水做统计检验。降水等级划分如表 2, 这里将小雨、中雨和大雨划分为同一个等级, 称为小到大雨 (24 小时累计降水大于 0.1 mm 而小于 50 mm), 鉴于本次降水事件最大降水量为 213 mm, 且只有两个站点出现 200 mm 以上量级的降水, 故 TS 评分以介于 100 mm 到 200 mm 的降水为大暴雨。

TS 评分的公式为

$$TS = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C}, \quad (2)$$

其中, N_A 为预报降水且预报正确的站点数 (站点和预报都出现某量级的降水的站点数); N_B 为空报站点数 (预报出现某量级的降水而观测非此量级降水的站点数); N_C 为漏报站点数 (观测出现某量级的降水而预报非此量级降水的站点数)。显然, TS 评分只显示有降水时模式预报某一等级降水的准

确率, 其值介于 0 和 1 之间, 当预报的降水区域的降水量级与观测一致时, TS=1, 模拟效果最好, 而 TS 越小, 预报效果越差。

本文为了对比不同分辨率的 TS 评分效果, 选取水平分辨率为 6 km 的第三重嵌套区域 d3 内的 114 个站点作为有效评分站点 (图 1)。表 3 为不同云微物理方案在不同分辨率下模拟不同等级降水的 TS 评分结果。从 TS 评分结果来看, 8 种方案不同分辨率对不同等级降水的总体模拟效果令人满意, 并呈现一定差异。对于同一分辨率下, 除了 WDM5 方案和 WDM6 方案外, 其他云微物理方案对不同降水等级的 TS 评分均表现出“两头大, 中间小”的特征, 即模式对小到大雨的 TS 评分最高, 都超过了 0.6, 而暴雨的 TS 评分低。分别看各云微物理方案在不同分辨率下的 TS 评分结果, 分辨率为 54 km 时, 各个方案的 TS 评分差距不是很大, WSM3 方案和 WDM5 方案对小到大雨的 TS 评分最高, 其次是 WSM5 方案, 而 Lin 方案最低; 对于暴雨的 TS 评分, WSM5 方案稍低于 WDM5 方案, WSM3 方案最低, Lin 方案也只获得 0.057 的评分; WSM3 方案对大暴雨的模拟最好, 其次是 WSM5 方案, WDM6 方案模拟效果最差, TS 评分为 0。分辨率为 18 km 时, 对小到大雨的 TS 评分最高的是 WSM3 方案和 WSM5 方案, 最低的是 WDM6 方案, Lin 方案紧随其后; WDM5 方案对暴雨的 TS 评分最高, Kessler 方案和 WSM5 方案次之, WSM3 对大暴雨的 TS 评分最高, 而对暴雨和大暴雨 TS 评分最低的分别是 WSM3 方案和 WDM6 方案。分辨率为 6 km 时, 对小到大雨和大暴雨的模拟, WSM3 方案的 TS 评分依然最高, 其次是 Eta 方案、WSM5 方案, 而 TS 评分最低的分别是 WDM6

表 3 不同云微物理方案对于不同等级降水的 TS 评分结果
Table 3 TS of different cloud microphysics schemes for different precipitation levels

水平分辨率	降水等级/mm	不同云微物理参数化方案的 TS 评分							
		Kessler	Lin	WSM3	WSM5	Eta	WSM6	WDM5	WDM6
54 km	[0.1,50)	0.650	0.637	0.683*	0.670	0.663	0.631	0.683*	0.663
	[50,100)	0.091	0.057	0.032	0.132	0.108	0.077	0.147*	0.098
	[100,200)	0.312	0.200	0.364*	0.333	0.300	0.200	0.300	0
18 km	[0.1,50)	0.616	0.615	0.680*	0.680*	0.660	0.647	0.653	0.608
	[50,100)	0.156	0.091	0.061	0.156	0.091	0.083	0.167*	0.132
	[100,200)	0.250	0.214	0.300*	0.250	0.273	0.200	0.231	0.091
6 km	[0.1,50)	0.626	0.644	0.721*	0.673	0.68	0.654	0.653	0.606
	[50,100)	0.138	0.107	0	0.100	0.103	0	0.192*	0.118
	[100,200)	0.188	0.067	0.300*	0.222	0.250	0.091	0.143	0.083

注: 黑色加粗带*为最优方案, 黑色加粗不带*为最差方案

方案和 Lin 方案；暴雨的 TS 评分最低的是 WSM3 方案和 WSM6 方案，模拟准确率为 0，与 TS 评分最高的 WDM5 方案相差 0.19。

综合上述，从不同分辨率的不同云微物理方案的 TS 评分结果可以发现：各个方案的优劣在不同分辨率的模拟结果中表现较为一致，即 WSM3 方案对小到大雨和大暴雨的模拟效果最好，而对暴雨的模拟效果最差，对暴雨模拟效果最好的是 WDM5 方案。再看同一云微物理方案在不同水平分辨率下的降水模拟效果：除了 Lin 方案和 WDM6 方案外，其他方案关于大暴雨的 TS 评分都是随分辨率的提高而减小，而另外两个降水等级没有明显表现出 TS 评分随模式水平分辨率变化的规律性特征，说明模式的不同参数化过程对降水的模拟效果并不一定会伴随分辨率的变化而体现出统一的变化。整体来看，模拟效果最好的是 WSM5 方案，其次 WDM5 是方案和 WSM3 方案，而 Lin 方案最差，WDM6 方案和 WSM6 方案模拟效果也不理想；考虑不同等级的降水模拟效果，TS 评分最高的是小到大雨，且差距不大，说明云微物理过程对小到大雨的模拟影响较小；除了 WDM6 方案，大暴雨的 TS 评分基本都比暴雨的 TS 评分高，且不同云微物理方案的模拟结果有一定差距，由此可知，降水量级越大，模式模拟效果对云微物理过程越敏感。

4.3 不同云微物理方案的误差分析

TS 评分反映的是有降水发生时模式预报效果的准确性，而平均绝对误差 (MAE) 能较好地反映由模式参数和数值方法引起的系统误差，均方根误差 RMSE 受平均绝对误差和方差的影响，对系统误差和一些大的误差较敏感，反映模式总误差 (Mölders, 2008)，这两种统计方法能定量的更直

接的反映模式预报效果和观测之间的偏差。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - P_i|, \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}, \quad (4)$$

这里 N 、 O_i 、 P_i 与公式 (1) 含义一样，和 TS 评分选择同样区域， $N=114$ 。表 4 即为误差分析所用的变量值，其中相关系数公式采用公式 (1)。

由表 4 可以看出，除了 WDM6 方案在三重嵌套区域相关性不变，其他 7 种云微物理方案的相关系数随模式水平分辨率变化的趋势一致：当模式水平分辨率由 54 km 提高到 18 km 时，相关系数减小；而当水平分辨率再由 18 km 继续提高到 6 km 时，相关系数又增加。第二重嵌套区域的站点相关性比粗网格和细网格的相关性都低。

模式的平均误差（表中省略）在第一重和第二重嵌套区域几乎全为负值，第三重也大多为负，且平均绝对误差和均方根误差较大，说明模拟降水比观测强，模式存在明显的系统性误差。Lin 方案和 WDM6 方案的平均绝对误差随分辨率的提高而不断增加，其余方案都是在水平分辨率由 54 km 提高到 18 km 时，平均绝对误差增大；水平分辨率由 18 km 提高到 6 km 时，平均绝对误差减小。都表现为 18 km 分辨率的误差最大，不同的是 WSM3 方案的第三重嵌套区域误差最小，而其他方案为第一重嵌套区域误差最小。均方根误差变化趋势与平均绝对误差变化趋势完全一致，说明平均绝对误差对均方根误差贡献最大。

从表 4 可以明显地看出，对于不同的云微物理方案，不同分辨率下的最优和最差方案几乎一致：除了 WSM5 方案在 54 km 分辨率时的平均绝对误差最

表 4 模式结果与观测的相关系数、平均绝对误差 (mm) 和均方根误差 (mm)

Table 4 Correlation coefficient, mean absolute error (mm), and root mean square error (mm) between the simulated and observed precipitation

水平分辨率	统计量	不同云微物理参数化方案							
		Kessler	Lin	WSM3	WSM5	Eta	WSM6	WDM5	WDM6
54 km	相关系数	0.55	0.37	0.56*	0.55	0.45	0.48	0.55	0.41
	MAE	29.45	33.33	26.87	26.80*	28.95	29.33	27.20	30.07
	RMSE	40.85	44.79	36.16*	36.84	39.86	39.30	36.94	40.65
18 km	相关系数	0.47	0.34	0.55*	0.48	0.39	0.47	0.52	0.41
	MAE	32.12	35.04	27.49*	28.78	30.02	31.32	28.68	31.02
	RMSE	46.14	48.01	36.80*	40.47	42.64	41.82	39.40	41.58
6 km	相关系数	0.48	0.35	0.62*	0.53	0.40	0.52	0.57	0.41
	MAE	31.85	35.69	25.44*	27.79	29.31	30.89	27.60	31.20
	RMSE	45.21	49.68	34.58*	38.98	42.16	41.62	37.72	41.96

注：黑色加粗带*为最优方案，黑色加粗不带*为最差方案

小, WSM3 方案在三个嵌套区域的相关性最高, 平均绝对误差和均方根误差最小, 表现出绝对的优势, 其次是 WDM5 方案和 WSM5 方案, 与 TS 评分最高的前 3 个方案一致; 而 Lin 方案的相关性比其他方案都低, 平均误差和均方根误差都最大, 表明 Lin 方案的模拟效果最差, 与降水空间分布和 TS 评分分析结论一致。总体来看, 同一参数化方案在不同水平分辨率下的平均绝对误差和均方根误差的差异都不是很大, 而同一水平分辨率, 不同云微物理方案的结果相差较大, 说明模式云微物理参数化方案对模拟结果的影响强于模式分辨率对模拟结果的影响。

5 结论

为比较 WRF 模式的不同云微物理过程对暴雨模拟结果的影响, 本文使用 WRFV3.4 版本的 8 种云微物理方案, 采用三重嵌套网格, 对 2010 年 5 月 6~7 日发生在华南暴雨事件进行回报, 通过分析模式结果得出以下结论:

(1) 54 km 分辨率的模式模拟由于分辨率太低, 只对暴雨位置模拟较好, 对降水低值刻画不明显, 没有模拟出大暴雨中心以及 25°N 以北的降水区域; 18 km 分辨率和 6 km 分辨率的试验结果基本都能模拟出本次降水的雨带分布, 对广东省的强降水中心模拟较好, 只是位置偏北 0.2°~0.3°(纬度); 而 WSM3 方案、Eta 方案和 WSM6 方案没有模拟出广东和江西交界处的暴雨中心, 其他方案模拟的位置偏北, 范围偏小; 模拟的位于广州的暴雨中心雨量偏大, 而其东部地区降水量级偏低, 最终导致降水中心暴雨区域偏小, 反而由于模式分辨率高, 加上南岭、武夷山的地形作用, 在江西、福建模拟了大片暴雨区和多个虚假降水中心。

(2) 从试验结果的 TS 评分可以知道, 对同一分辨率, 除了 WDM5 方案和 WDM6 方案外, 其他方案的 TS 评分均表现出“两头大, 中间小”的特征, 即模式对小到大雨的 TS 评分最高, 且差距不大, 而对暴雨的 TS 评分低, 这也说明云微物理过程对小到大雨的模拟效果影响较小; 除了 WDM6 方案, 大暴雨的 TS 评分基本都比暴雨的 TS 评分高, 且不同云微物理方案的模拟结果有一定差距, 可以推测, 降水量级越大, 模式模拟效果对云微物理过程越敏感。

(3) 对小到大雨和大暴雨的模拟效果最好的是

WSM3 方案, 而此方案对暴雨的模拟效果最差, 对暴雨模拟效果最好的是 WDM5 方案。结合不同分辨率下的模拟结果, 模拟效果最好的是 WSM5 方案, 其次是 WDM5 方案和 WSM3 方案, 而 Lin 方案最差, WDM6 方案和 WSM6 方案模拟效果也不理想。

(4) 除了 Lin 方案和 WDM6 方案外, 其他方案关于大暴雨的 TS 评分都是随分辨率的提高而减小, 而另外两个降水等级没有明显表现出 TS 评分随模式水平分辨率变化的规律性特征; 误差分析也显示, 同一参数化方案在不同水平分辨率下对降水模拟的平均绝对误差和均方根误差差异不大, 而同一区域的不同云微物理方案的结果相差较大, 进一步说明了云微物理过程对模拟结果的影响强于模式分辨率对模拟结果的影响。

本文的结论只是 WRF 模式对华南一次降水个例的模拟结果, 由于不同的天气过程主要影响因素不同, 模拟的准确性除了受不同物理过程影响外, 还与模拟区域的选取和大尺度天气背景场有关, 因此, 结论是否适用于其他暴雨事件, 还有待进一步检验。

参考文献 (References)

- 程麟生. 1999. 中尺度大气数值模式发展现状和应用前景 [J]. 高原气象, 18: 350-360. Cheng Linsheng. 1999. The current status of mesoscale numerical model development and its application prospects [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18: 350-360.
- 崔波, 王建捷, 郭肖容. 1999. MM5 在国家气象中心 CRAY-C92 的实时预报试验 [J]. 应用气象学报, 10 (2): 129-140. Cui Bo, Wang Jianjie, Guo Xiaorong. 1999. Real-time forecast experiments using MM5 in national meteorological center [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 10 (2): 129-140.
- Colle B A, Garvert M F, Wolfe J B, et al. 2005. The 13-14 December 2001 IMPROVE-2 event. Part III: Simulated microphysical budgets and sensitivity studies [J]. J. Atmos. Sci., 62: 3535-3558.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (1): 569-585.
- Chen S H, Sun W Y. 2002. A one-dimensional time dependent cloud model [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80 (1): 99-118.
- 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.
- Etherton B, Santos P. 2008. Sensitivity of WRF forecasts for South Florida to initial conditions [J]. Wea. Forecasting, 23: 725-740.
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. J. Korean Meteor. Soc., 42: 129-151.

- Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126 (10): 2621–2639.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132: 103–120.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (9): 2318–2341.
- Jankov I, Gallus J W A, Shaw B, et al. 2004. An investigation of IHOP convective system predictability using a matrix of 19 WRF members [C] // *Proceedings of the 84th AMS Annual Meeting*, Seattle, U. S. A. Jan. 10–15.
- Jankov I, Gallus J W A, Segal M, et al. 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall [J]. *Wea. Forecasting*, 20 (6): 1048–1060.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2784–2802.
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization in mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme [C] // *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*. Boston, MA: American Meteorological Society, 24: 165–170.
- Khain A P, BenMoshe N, Pokrovsky A. 2008. Factors determining the impact of aerosols on surface precipitation from clouds: An attempt at classification [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 1721–1748.
- 李安泰, 何宏让. 2011. 不同云微物理参数化方案对舟曲“8.8”暴雨过程模拟的影响 [J]. *气象与减灾研究*, 34 (3): 9–16. Li Antai, He Hongrang. 2011. Impact of different cloud microphysical parameterization schemes on the numeric simulation results of “8.8” rainstorm process in Zhouqu [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (in Chinese), 34 (3): 9–16.
- 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: 1587–1612.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22: 1065–1092.
- 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]. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 36 (4): 835–850.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated- k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14): 16663–16682.
- Mölders N. 2008. Suitability of the Weather Research and Forecasting (WRF) model to predict the June 2005 fire weather for interior Alaska [J]. *Wea. Forecasting*, 23: 953–973.
- Ninomiya K. 1986. Mesoscale numerical weather prediction—Numerical prediction of mesoscale severe phenomena in Japan [C] // *Short and Medium Range Numerical Weather Prediction*. WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo, 517–531.
- 牛俊丽, 闫之辉. 2007. WRF 模式微物理方案对强降水预报的影响 [J]. *科技信息*, (23): 17–20. Niu Junli, Yan Zhihui. 2007. WRF microphysical model programs on the impact of heavy rainfall forecast [J]. *Science and Technology Information* (in Chinese), (23): 17–20.
- Pielke R A. 2002. *Mesoscale Meteorological Modeling* [M]. New York: Academic Press, 676.
- Rajeevan M, Kesarkar A, Thampi S B, et al. 2010. Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunder storm event over Southeast India [J]. *Ann. Geophys.*, 28: 603–619.
- Rutledge S A, Hobbs P V. 1984. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41 (20): 2949–2972.
- Skamarock W, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyao. 1980. Storm in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 225.
- Tao W K, Simpson J, Mccumber M. 1989. An ice-water saturation adjustment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117 (2): 231–235.
- von Storch H, Zwiers F W. 1999. *Statistical Analysis in Climate Research* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 484.
- Wang J, Huang B M, Huang A, et al. 2011. Parallel computation of the Weather Research and Forecast (WRF) WDM5 cloud microphysics on a many-core GPU [C] // *Proceedings of the 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*. Tainan: IEEE, 1032–1037.
- 王晓芳, 徐明, 闵爱荣, 等. 2010. 2010 年 5 月我国南方持续性暴雨过程分析 [J]. *暴雨灾害*, 29 (2): 193–199. Wang Xiaofang, Xu Ming, Min Airong, et al. 2010. Analysis of precipitation and affecting systems features on persistent heavy rain in South China in May 2010 [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 29 (2): 193–199.
- Wicker L J, Wilhelmson R B. 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (15): 2675–2703.
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 3 (6): 325–329.
- Yih A C, Walsh J E. 1991. Sensitivities of numerical model forecasts of extreme cyclone events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 8 (1): 51–66.
- 张宇, 郭振海, 林一骅, 等. 2013. 中尺度模式风电场风速短期预报能力研究 [J]. *大气科学*, 37 (4): 955–962. Zhang Yu, Guo Zhenhai, Lin Yihua, et al. 2013. Predictive capacity of mesoscale model for short-range wind speed forecasting at wind power farm [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 37 (4): 955–962.