

不同分辨率和云微物理方案对四川盆地一次暴雨过程的影响分析

马怡轩^{1, 2} 徐国强^{1, 2}

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

摘要: 本文以美国国家环境预报中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)的GFS(Global Forecast System)全球数值天气预报产品作为模式预报初始场, 利用区域中尺度预报系统CMA-MESO(China Meteorological Administration Mesoscale Model)(原GRAPES_MESO)5.1版本对2021年9月3-5日发生在四川盆地的一次暴雨过程, 采用3种不同分辨率(1km、3km、10km)和2种云微物理参数化(WSM6、Thompson)方案设计5组试验进行数值模拟研究, 结果表明: (1) 试验模拟雨带与实况基本一致, 但强降雨时间、降水落区和降水强度与实况存在差异。随着降水阈值的提高, TS评分下降同时Bias变幅增大, 空报漏报率也随之增加。(2) 同分辨率是否采用积云参数化方案与同分辨率采用不同微物理方案对水汽通量模拟结果差异不大; 5组试验在各自模拟的暴雨区均对应强烈的上升气流, 且模拟强度均随分辨率提高而增大。(3) 1km分辨率下采用不同云微物理方案模拟液态粒子结果差异不大, 但固态粒子明显不同。(4) 3km分辨率下加入积云参数化方案后, 对于强降雨中心的模拟结果存在较大偏差。整体而言, 针对此次降水过程的各个试验模拟结果表明, 在高分辨率条件下, Thompson方案饱和和调整方案效果略好于WSM6方案, 1km_thompson方案对雨带刻画也更精准, 降水模拟最优。

关键词: CMA-MESO, 云微物理, 分辨率, 暴雨

文章编号 2022197A

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2306.22197

Analysis of the Influence of Different Resolutions and Cloud Microphysical Schemes on a Rainstorm Process in Sichuan Basin

MA Yixuan^{1, 2} XU Guoqiang^{1, 2}

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

2 Center for Earth System Modeling and Prediction of CMA, Beijing, 100081

收稿日期 2022-10-12; 网络预出版日期

作者简介 马怡轩, 女, 1999年生, 硕士研究生, 主要从事数值模式物理过程研究, Email: mayx199921@163.com

通讯作者 徐国强, 主要从事数值模式物理过程研究, Email: xugq@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(42175167, U2142213), 风云卫星先行计划(FY-APP-ZX-2022.01)

Funded by National Natural Science Foundation of China(Grant 42175167, U2142213), FY Meteorological Satellite Initiative(FY-APP-ZX-2022.01)

Abstract: This paper uses the GFS (Global Forecast System) global numerical weather forecast product of NCEP (National Centers for Environmental Prediction) as the initial field of the model forecast, and uses the regional mesoscale forecast system CMA-MESO (China Meteorological Administration Mesoscale Model) (formerly GRAPES_MESO) version 5.1 to analyze a rainstorm process that happened in Sichuan Basin on September 3-5, 2021. Five groups of experiments were designed with three different resolutions (1km, 3km, 10km) and two cloud microphysical parameterization schemes (WSM6、Thompson) for numerical simulation. The results show that: (1) The simulated rain belt in the test is basically consistent with the actual situation, but there are differences between the time, area and intensity of heavy rainfall. With the increase of precipitation threshold, TS score decreases while Bias amplitude increases, which lead the rate of false report and missed report also increases. (2) There is no significant difference in the simulation results of water vapor flux between the same resolution cumulus parameterization scheme and different microphysical schemes; There are strong updraft in the simulated rainstorm regions of the five groups of experiments, and the simulation intensity increased with the increase of resolution. (3) The simulation results of liquid particles with different cloud microphysics schemes at the 1km resolution are similar, but the results of solid particles are obviously different. (4) When cumulus parameterization scheme is added to the 3km resolution, there is a large deviation for the simulation results of heavy precipitation center. On the whole, the experimental simulation results of the precipitation process show that under the condition of high resolution, the saturation adjustment scheme of Thompson scheme is slightly better than that of WSM6 scheme, and the 1km_thompson scheme is more accurate in depicting rain belts, and the precipitation simulation is the best.

Key Words: CMA-MESO, Cloud Microphysics, Resolution, Rainstorm

1 引言

四川盆地被青藏高原、云贵高原等环绕，海拔只有 250-750m，全年温暖湿润，属中亚热带湿润气候区，降水主要集中在夏秋季节，年降水量可达 1000-1300mm，乐山和雅安之间的西缘山地更是有“华西雨屏”之称。频繁的降水活动给当地造成严重的人员伤亡和巨大的经济财产损失，气象工作者为此做出了诸多研究。其中有些研究针对地形进行模拟试验，对比不同地形下强降水的垂直结构特征(段静鑫等, 2018; 沈程锋等, 2022; 李剑婕等, 2022); 有些研究是针对动力和热力条件的模拟试验，通过对环流形势、影响系统等进行诊断，分析暴雨形成和发展的原因(何跃等, 2019; 何光碧等, 2020; 束艾青等, 2021; 周懿等, 2022)。

随着对暴雨的深入研究和云微物理学的不断发展，越来越多研究人员倾向于采用天气学方法和云微物理过程相结合来分析暴雨过程(Yang and Ching, 2005; 朱格利等, 2014; Khain et al., 2016; 康兆萍等, 2019; Hou et al., 2020; 周文昊等, 2020; 周志敏等, 2021; 陆婷婷等, 2022)。云微物理过程反映了云中水汽和各种水凝物之间的相互转换，模式中合理的云微物理参数化方案设置是影响数值天气预报和气候预测准确性的最大因素(尹金方等, 2014)。云微物理参数化方案按描述水凝物粒子群尺度谱演变特征的方法分为体积水参数化法(bulk)和分档法(bin)(Clark et al., 1973; Garvert et al., 2005)，bin 方案描述水凝物

尺度演变过程十分复杂，根据水成物的相态、粒子大小、形状、密度等微物理特征将水成物分成几十或几百档，故计算量巨大难以满足实际的业务需求；bulk 方案只描述各种水成物的总体特征，有单参数和双参数两种谱描述方法，根据模式预报变量和物理过程的不同可以分为暖云方案、简单冰相方案和复杂冰相方案，该方案计算量小，故广泛应用于实际的业务和理论研究中（楼小凤等，2003；史月琴等，2006）。由于云中含有云冰、雪和霰等多种冰相粒子，随着冰相粒子的分类复杂且物理过程繁多，混合相云方案正逐渐成为主流，一些复杂的云微物理方案被逐渐引入数值模式中。其中，单参数方案如 WSM6 类方案仅能模拟水凝物的混合比（Lin et al., 1983；Hong et al., 2004），而双参数方案如 Thompson 方案双参方案能模拟水凝物的混合比和数浓度（Cotton et al., 1986；Thompson et al., 2004；Morrison et al., 2005）。

不同的物理参数化方案对水成物的种类、密度、数目等设置差别较大，从而引发的对强降水预报的不确定性一直是天气预报的重难点问题。为了比较不同云微物理参数化方案的模拟差异，国内外学者进行了众多试验。Yin et al. (2017) 对我国东部一次飑线过程利用 bin 方案和 bulk 方案分别进行研究，表明 bulk 方案模拟的降水落区和强度更与实况一致。Jankov et al. (2005) 采用 3 种微物理方案对 8 个夏季中尺度对流系统进行模拟试验，发现不同积云对流参数化方案会对预报结果产生较大影响。J Park et al (2020) 在 WRF 模式中选择 WSM3 和 WSM6 方案对 20 个台风进行模拟研究，并指出复杂云微物理方案对改善台风路径和降水模拟有一定的正效果。黄乾和钱悦（2021）采用 WRF3.9 模式的 16 种云微物理方案分别对 2016 年 6 月 30 日—7 月 4 日江淮流域的一次强降水过程进行模拟，结果表明单参云微物理方案模拟低层暖云降水过程效果较优，双参云微物理方案适用于冷云降水过程。Wang et al (2021) 采用 WRF 模式和 3 种云微物理参数化方案，研究其对超强台风“Rammasun”的影响，结果表明包含霰过程的云微物理方案更优，Thompson 方案的台风强度预测最为准确。

随着我国自主开发的中尺度天气数值预报体系 CMA-MESO 模式不断发展，经过十几年的不懈努力，先已逐渐取代引进的数值模式系统。CMA-MESO 模式自 2004 年 3 月 2.0 版本开始业务应用以来，2010 年升级为 3.0 版本，水平分辨率提高到 15 km，2014 年 6 月 4.0 版本提高水平分辨率到 10 km，2020 年 6 月 5.1 版本水平分辨率进一步提升至 3km（黄丽萍等，2017；沈学顺等，2020）。随着分辨率的提高，模式对降水的预报效果也不断得到改善，卢萍（2021）对比分析了不同水平分辨率的西南区域业务模式对冕宁“6.26”突发性暴雨过程的预报效果，结果表明提高模式分辨率对雨带刻画更精准。但是诸多研究发现，高分辨率改善预报效果的同时，其模拟的降水强度偏强，空报偏多（黄海波等，2011；邓莲堂等，2012），彭筱等(2019)采用不同分辨率基于 CMA-MESO 模式对西北四省的预报效果检验表明，10km 分辨率模式对西北地区暴雨预报能力优于 3km 分辨率模式，两个分辨率在降水的空报率上都偏高。

综上所述，在 3km 甚至 1km 的“对流可分辨”尺度下，采用何种云微物理参数化过程有利于提高降水模拟效果仍值得研究。因此本文基于 CMA-MESO 模式 5.1 版本，选取 3 种

分辨率和 2 种云微物理方案对 2021 年 9 月 3 日-5 日发生四川盆地的暴雨过程进行数值模拟，对比分析不同分辨率和云微物理方案对四川盆地暴雨模拟的影响，以期改进该地区数值模式预报效果提供依据。

2 资料与试验方案

2.1 资料

模式初边界数据来源于美国国家环境预报中心（NCEP，National Centers for Environmental Prediction）的 GFS（Global Forecast System）全球数值天气预报产品，其采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库，是一个包含多要素，范围广且延伸时段长的综合数据集。选取数据分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，初边界条件均采用 6 小时预报，垂直层为 32 层；模式中云分析系统所用红外辐射、总云量、雷达资料来自于 FY-2G 黑体亮温（black-body temperature, TBB）、FY-2G 总云量产品（cloud total amount, CTA）。同时使用国家级自动观测站 3h 和 24h 累积降水资料（由中国气象局地球系统数值预报中心提供）与模式结果进行对比分析。

另外，使用欧洲中期天气预报中心 ECMWF（European Center for Medium-Range Weather Forecasts）的 ERA5（The fifth global reanalysis）再分析资料（水平分辨率为 31km，时间分辨率为 1h）分析 500hPa 位势高度场和 850hPa 风场。

2.2 云微物理方案

WSM6 方案作为单参数方案，其预报量包括水汽（ Q_v ）、云水（ Q_c ）、雨水（ Q_r ）、云冰（ Q_i ）、雪（ Q_s ）和霰（ Q_g ）的混合比。该方案保留了 Lin 方案的大部分过程，并在其基础上增加了 Dudhia（1989）和 Hong et al.（1998）提出的对冰和水的饱和修正过程。此外该方案为了提高垂直廓线的精度，在冰、雪下降过程考虑凝结和融化，适合云分辨率尺度的模拟（Hong et al, 2004）。

Thompson 方案作为双参数方案，除了对水汽（ Q_v ）、云水（ Q_c ）、雨水（ Q_r ）、云冰（ Q_i ）、雪（ Q_s ）和霰（ Q_g ）的混合比进行预报，还包括雨水（ N_r ）和云冰（ N_i ）的数浓度预报。该方案是对 Reinsler 方案的改进，假定雪粒子直径分布与冰水含量和温度有关，由指数函数和 Gamma 函数分布共同决定；假定雪粒子为非球形，其密度与直径成反比。Thompson 方案饱和调整方案更准确，且更适用于高分辨率模拟（Thompson et al, 2008）。

2.3 试验方案设计

本文采用区域中尺度预报系统 CMA-MESO 模式 5.1 版本，组合 3 种分辨率和 2 种云微物理方案，设计了 5 组试验对此次暴雨过程进行数值模拟，模拟时间分别为 2021 年 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时和 4 日 00 时-5 日 00 时，模式积分结果每 3 小时输出一次，模式顶层气压 10 hPa，垂直方向为 49 层，5 组试验的时间积分步长均为 30s。详细的模式配置见表 1。

表 1 模式试验设置

Table.1 Mode scheme setting

方案	分辨率	网格设置	积云参数化方案	微物理过程	其他参数化过程
3km	3km	2501×1671	无	WSM6 类方案	
3kmCu	3km	2501×1671	Kain-Fritsch	WSM6 类方案	长波辐射: RRTM 方案
10kmCu	10km	444×222	Kain-Fritsch (new Eta) 方案	WSM6 类方案	短波辐射: Dudhia 方案
1km_WSM6	1km	1201×901	无	WSM6 类方案	陆面过程: Noah 方案
1km_thompson	1km	1201×901	无	Thompson 方案	

3 暴雨过程介绍

2021年9月3日00时-5日00时（世界时，下同），四川盆地发生大范围降水过程，雨带呈东北-西南走向，3日00时-4日00时主要大暴雨区集中在乐山市和广元市境内（图1a），4日00时-5日00时雨带东移，主要大暴雨区移至巴中市与达州市交界处和重庆市西部（图1b），两日24h累积降水量均超过150mm，受强降雨影响，岷江、沱江、嘉陵江等9条中小河流10站次出现超警戒水位洪水，其中4条4站出现超保证水位洪水，这对防洪工作带来巨大挑战。

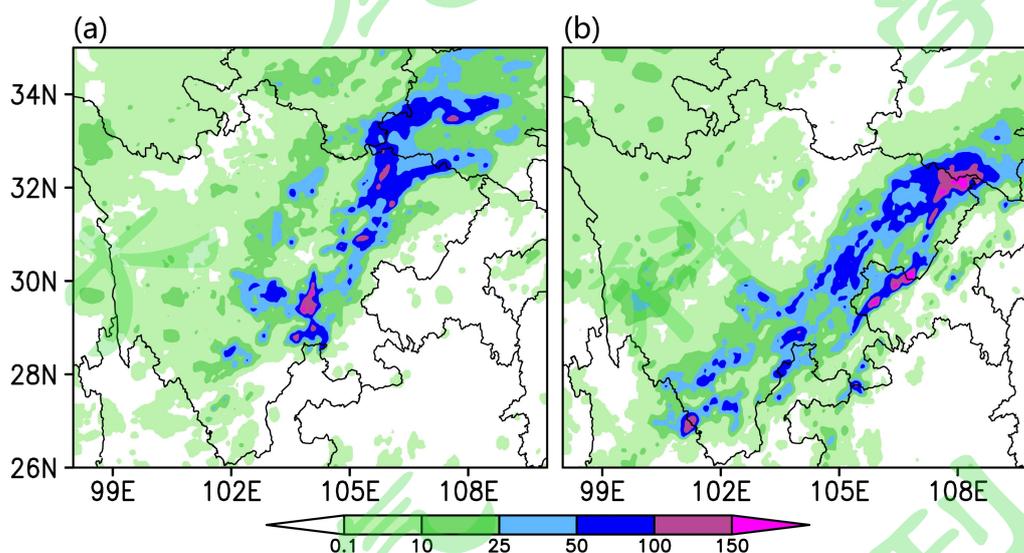


图1 2021年9月3日00时-4日00时（a）和4日00时-5日00时（b）实况24h累积降水量（单位：mm）

Fig.1 24h accumulation precipitation from 00 UTC 3 September to 00 UTC 4 September (a) & from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September (b), 2021 (unit: mm)

图2为ERA5再分析资料的500hPa位势高度场和850hPa风场的分布情况，从天气系统来看，2021年9月3日12时500hPa高纬为“两槽一脊”型，高压脊位于我国东北，两槽分别位于新疆以西和鄂霍茨克海地区，中低纬长江以南至华南一带大范围地区受西太平洋副热带高压控制，在副高影响下，暖湿空气滞留在四川东部。4日12时，高纬地区脊加深东移，中低纬副高西伸，四川盆地处在副高边缘，有利于偏西南暖湿气流的输送。3日12时低层850hPa在四川东北部，冷空气从西伯利亚南下，与南来的暖湿气流交汇形成对峙，产

生辐合区，广西、贵州到四川有低空急流活动，该西南气流将孟加拉湾和南海的水汽输送至暴雨区。4日12时辐合区东移，雨带也随之东移。

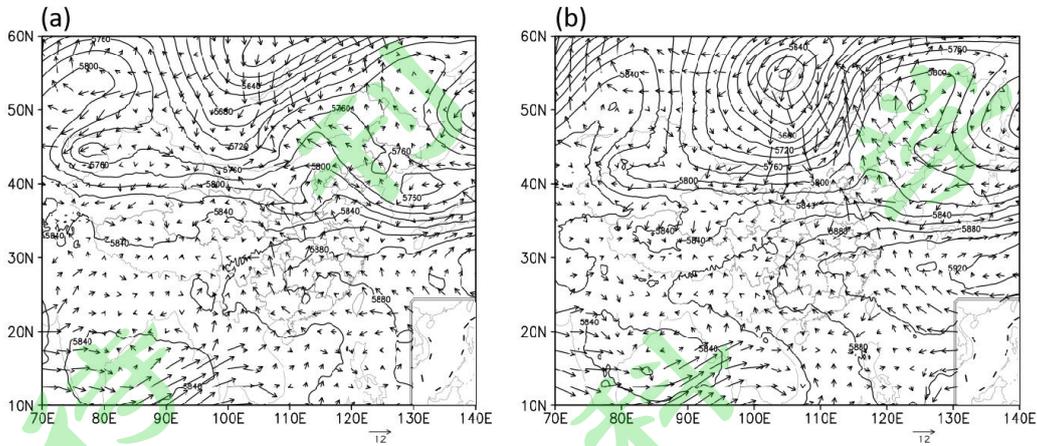


图2 2021年9月3日12时(a)和4日12时(b)500hPa位势高度场和850hPa风场(黑线为高度场,单位: gpm; 箭头为风场, 单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig.2 Geopotential height of 500 hPa & wind of 850 hPa at 12 UTC 3 September (a) & 12 UTC 4 September (b), 2021(Black line: geopotential height, unit: gpm; arrow: wind, unit: $m \cdot s^{-1}$)

4 模拟结果分析

4.1 24h 累积降水量

2021年9月3日00时-4日00时和4日00时-5日00时24h累积降水量图,5组试验(图3a-e、f-j)均模拟出与实况(图1a、b)相似的东北-西南向雨带,但各组试验在降水落区和降水强度上与实况存在一定差异。3日00时-4日00时,5组试验中除10kmCu方案外模拟的暴雨范围($\geq 50mm$)均远大于实况;3km方案的南部和北部降水中心强度与实况相比较强;3kmCu方案模拟南部降水较实况偏西,且中部和北部降水均大于实况;10kmCu方案未模拟出中部降水,其模拟的南部降水中心偏北,北部降水中心偏东且强度过强;1km分辨率模拟出与实况相似的“Y”字型雨带,其中1km_WSM6方案模拟雨带较长,范围较宽,其南部降水中心偏西,北部降水强度与实况较接近;1km_thompson方案模拟雨带与实况最为接近,但其南部和北部降水中心强度较小。4日00时-5日00时,5组试验模拟的雨带与实况相比差异较大,除1km_WSM6方案外,其余4组试验模拟的北部强降水中心均偏东;5组试验模拟的南部强降水中心强度均远小于实况;但各试验左段剖面线的降水强度和范围比实况大。3kmCu方案模拟的降水带相比3km方案较偏西;10kmCu和1km_thompson方案均漏报了重庆市西部的大暴雨,其他3组试验在该落区降水强度均较小;1km_WSM6和1km_thompson方案模拟的降水范围在四川东北与实况更接近。整体来看,相同微物理参数化方案下,降水量模拟随分辨率提高而增大,10kmCu方案模拟的降水量最小。3km分辨率下加入积云对流参数化方案后,模拟的降水量明显降低;1km分辨率下,降水量的模拟主要取决于微物理参数化方案,1km_WSM6方案模拟的降水量远大于1km_thompson方案,1km_thompson方案模拟效果更接近实况。

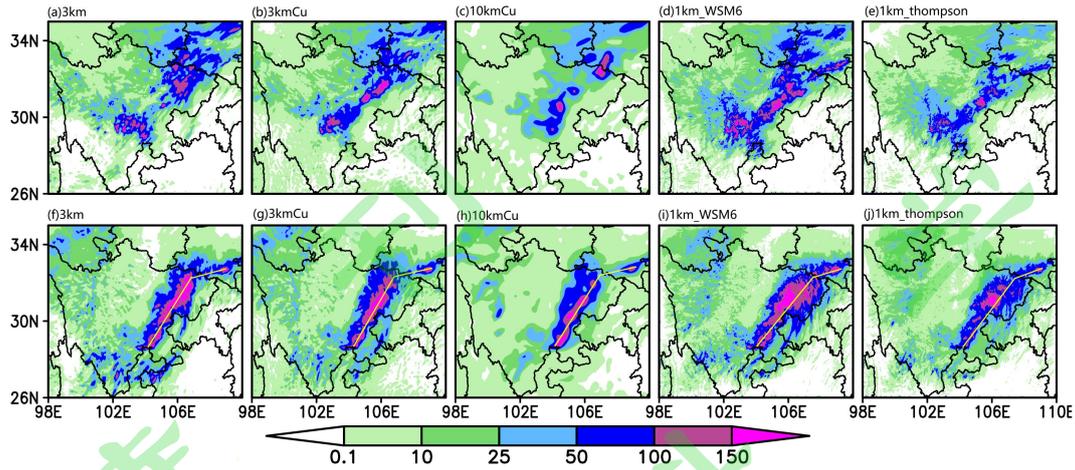


图3 2021年9月3日00时-4日00时(a-e)和4日00时-5日00时(f-j)的24h累积降水量(单位: mm; 图g-i中黄线为图7、8中剖面线)

Fig.3 24h accumulation precipitation from 00 UTC 3 September to 00 UTC 4 September (a-f) & from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September (g-i), 2021 (unit: mm; The yellow lines in Figure g-i are the cross-sectional line in Fig.7 & 8)

4.2 降水量评分

为了客观反应5组试验的降水模拟结果,图4和图5分别给出了2021年9月3日00时-4日00时和4日00时-5日00时24h累积降水量的TS评分和Bias评分,其中3kmCu和10kmCu方案的降水量为云微物理方案计算的降水量与积云参数化方案计算的降水量总和。图中可以看出,5组试验的TS评分均随降水量级的增大而明显减小,在0.1mm量级评分均达到0.8以上,10kmCu方案在该量级均表现较好。3日00时-4日00时(图4a)25mm及以上量级3km方案模拟效果最好,这是由于图3中其他4组试验在该时段模拟的南部强降水中心强度均较小;1km分辨率,25mm和50mm量级下1km_WSM6方案的TS评分高于1km_thompson方案,这与1km_WSM6方案北部强降水中心强度与实况较接近有关。4日00时-5日00时(图4b),25mm和50mm量级1km_thompson方案模拟效果最好,这与1km_thompson方案在剖面线上的降水强度较小有关;100mm量级1km_WSM6方案模拟最好,这与1km_thompson方案在该时段漏报重庆市西部的大暴雨有关。整体来看,1km分辨率采用不同云微物理方案模拟的TS评分,在0.1mm、25mm和50mm量级有明显差异;3km分辨率加入积云参数化过程后,仅0.1mm量级模拟较好;当模式设置相同时,无论采用那种分辨率,5组试验对于25mm以下量级的模拟能力相当,对于50mm及以上量级,10km分辨率表现较差,1km分辨率表现较优。

从Bias评分来看,不同起报时次差别不大,随着降水量级的增大,Bias评分增大,即空报漏报率增加。对于0.1mm阈值的降水,Bias评分均接近1.0,空报和漏报最少。对于10mm及以上阈值的降水,除1km_thompson方案外,其余4组试验的Bias评分均随分辨率增高而增大,1km_WSM6方案的Bias值最大,10km方案的Bias值最小,即随分辨率提高空报漏报率增大。3km分辨率加入积云参数化方案后,随降水量级增大,同量级下Bias

评分减小，即加入积云参数化方案后降低了空报漏报率；1km 分辨率下，1km_thompson 方案的 Bias 评分明显低于 1km_WSM6 方案，表明 thompson 参数化方案明显降低了空报漏报率。

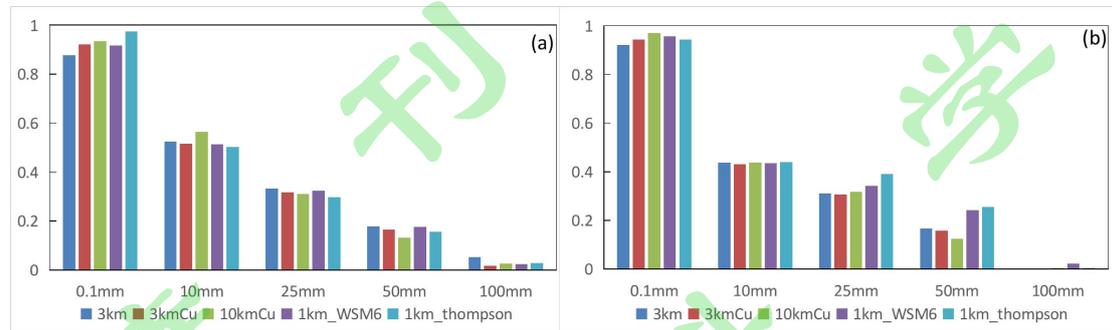


图 4 2021 年 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时 (a) 和 4 日 00 时-5 日 00 时 (b) 24h 累积降水量的 TS 评分

Fig.4 Threat score for cumulative precipitation from 00 UTC 3 September to 00 UTC 4 September (a) & from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September (b) , 2021

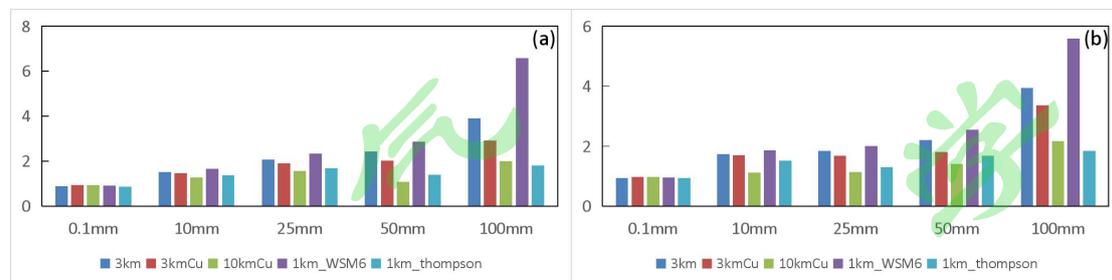


图 5 2021 年 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时 (a) 和 4 日 00 时-5 日 00 时 (b) 24h 累积降水量的 Bias 评分

Fig.5 Threat score for cumulative precipitation from 00 UTC 3 September to 00 UTC 4 September (a) & from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September (b) , 2021

4.3 逐 3h 降水量

为定量评价不同组合试验对此次暴雨过程的模拟效果，图 6 给出了 9 月 3 日 00 时-5 日 00 时 5 组试验逐 3h 区域平均降水量随时间演变图。实况降水结果在 4 日 00 时达到第一个峰值，4 日 21 时达到第二个峰值，但是 5 组试验第一个峰值在 4 日 03 时，与实况相比较晚，这可能与模式在起报初期进行初值协调有关，随后 3h 差异逐渐缩小，第二个峰值模拟与实况较为一致。5 组试验降水量整体来看均大于实况；3km 和 3kmCu 方案相比可以看出，加入积云参数化方案后对于降水量的预报有明显提升；3kmCu 和 10kmCu 方案在 4 日 12 时差异较大，即相同方案下不同分辨率模拟降水量差异在某些降水阶段比较明显；1km_WSM6 和 1km_thompson 方案相比预报误差更大，即相同分辨率下不同云微物理方案模拟降水量存在一定差异。整体来看，3km 和 1km_WSM6 方案降水量远大于实况，这与图 3 中 24h 累积降水量结果一致。

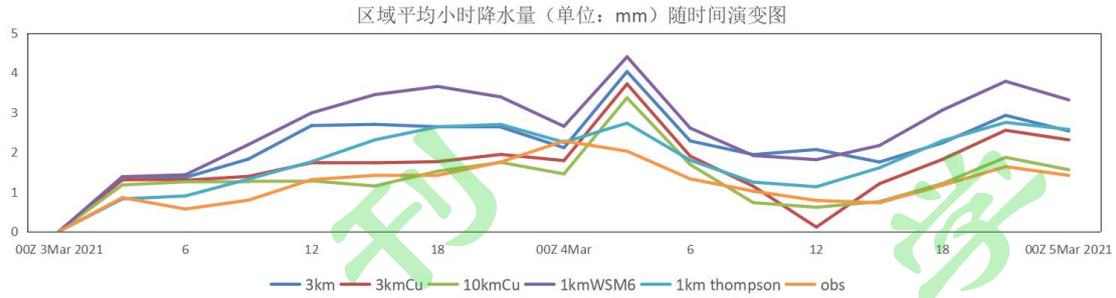


图 6 2021 年 9 月 3 日 00 时-5 日 00 时区域平均逐 3h 降水量 (单位: mm) 随时间演变图

Fig.6 Regionally-averaged 3 hourly precipitation changes (unit: mm) from 00 UTC 3 September to 00 UTC 5 September, 2021

5 暴雨发生条件分析

5.1 动力条件

垂直上升运动将水平输送来的水汽向上输送,同时使空气达到饱和状态,进而形成降水,上升速度越大,降水量越大。暴雨过程中,往往整层大气都是上升运动。沿图 3 中黄线做各个试验 2021 年 9 月 4 日 18 时的垂直速度剖面图 (图 7), 可以看出 5 组试验在各自模拟的暴雨区均有明显的垂直速度正值区, 对应为上升运动, 且随分辨率提高垂直速度明显增大。3km、3kmCu、10km 和 1km_thompson 方案中较强的上升气流主要集中在 106° E- 107.5° E 之间, 而 1km_WSM6 方案在 108° E 附近仍有较强的上升气流, 这与该方案在 4 日 00 时-5 日 00 时模拟的北部强降水中心与实况较为接近有关。整体来看, 3km 分辨率是否采用积云参数化方案对上升气流区域的模拟存在差异, 这正对应 2 种方案模拟的降水雨带位置存在偏差; 相同积云参数化方案下不同分辨率的上升气流区分布较为一致; 相同分辨率下不同云微物理方案的垂直速度整层分布差异较大。

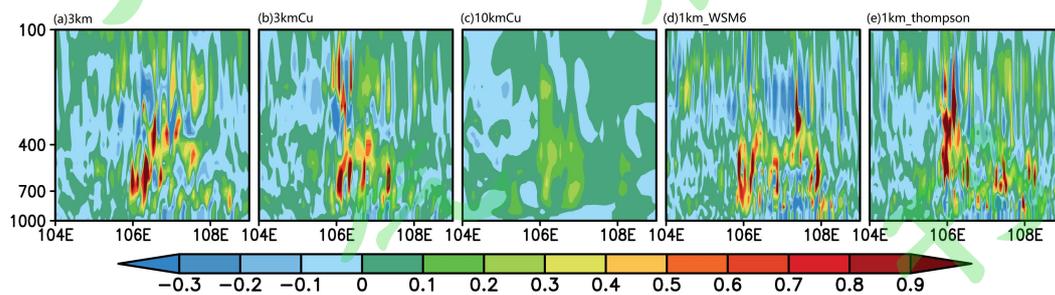


图 7 2021 年 9 月 4 日 18 时的垂直速度 (单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 剖面图

Fig.7 Cross-section of vertical velocity at 18 UTC 4 September,2021 (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

为进一步分析此次暴雨过程的辐合辐散条件,图 8 给出了 2021 年 9 月 4 日 18 时沿图 3 中黄线所做的涡度剖面图。图中涡度垂直分布同样随分辨率提高而明显增大, 1km_WSM6 和 1km_thompson 方案相比, 第一个涡度大值中心较偏东, 这与 2 种方案的垂直速度分布较吻合。5 组试验在各自上升运动大值区的低层都存在明显正涡度中心, 且高层均有与之配合良好的负涡度区域, 这为暴雨发生发展提供了良好的动力条件。

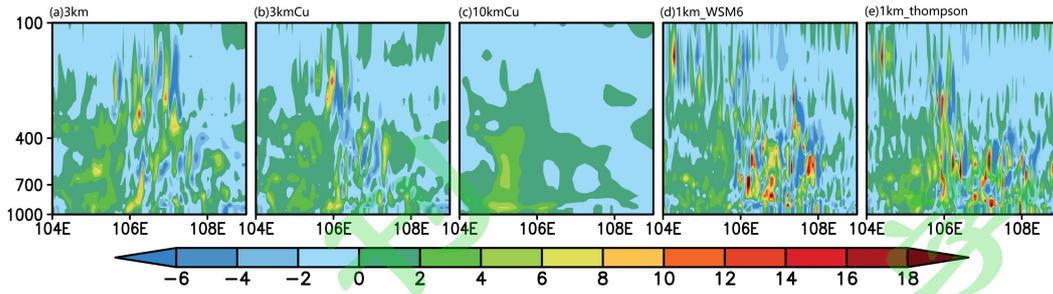


图 8 2021 年 9 月 4 日 18 时 850hPa 的涡度 (单位: $10^{-4} \cdot s^{-1}$) 剖面图

Fig.8 Cross-section of vorticity at 18 UTC 4 September,2021 (unit: $10^{-4} \cdot s^{-1}$)

5.2 水汽条件

暴雨发生需要源源不断的水汽供应,图 9 给出 2021 年 9 月 4 日 18 时 850hPa 水汽通量,5 组试验在四川东北部均位于低空急流的出口区,水汽通量超过 $20g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$,有明显的暖湿气流输送。随着分辨率的提高,水汽通量呈减小趋势,其中 10kmCu 方案水汽输送最强,但由于上文中提到其动力条件较弱(图 7, 8),故模拟的累积降水量较小;1km_WSM6 和 1km_thompson 方案水汽输送较弱,但与之相配合有较强的上升气流,故累积降水量模拟较强,与实况一致性更高。整体来看,3km 分辨率是否采用积云参数化方案和 1km 分辨率采用不同微物理方案对于水汽通量的模拟结果差异不大。水汽通量散度揭示了水汽输送在某个区域集中及集中的程度,850hPa 大的水汽通量给四川省东北部带来充沛的大量水汽输送,为该地区暴雨的产生和维持提供了充沛的水汽条件。

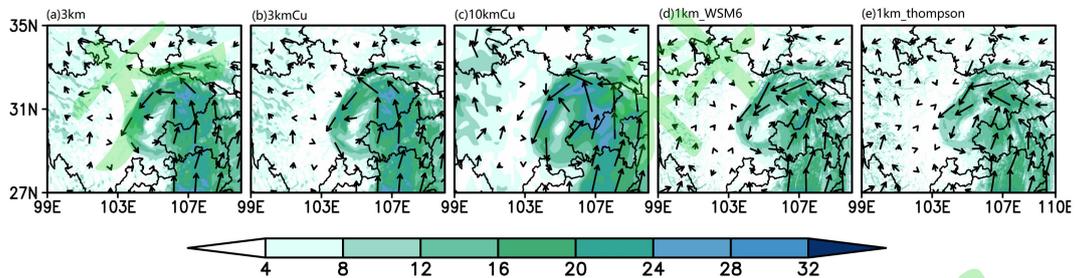


图 9 2021 年 9 月 4 日 18 时 850hPa 水汽通量图 (单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

Fig.9 850 hPa water vapor flux at 18 UTC 4 September,2021 (unit: $g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1}$)

6 1km 分辨率下不同云微物理方案模拟对比

为进一步比较同分辨率下不同云微物理方案的模拟效果,图 10 给出了 1km_WSM6 和 1km_thompson 方案 5 种水凝物含量在 2021 年 9 月 4 日 00 时-5 日 00 时的整层分布情况。液态水成物中,1km_thompson 方案云水和雨水含量略大于 1km_WSM6 方案(图 10a1、a2、b1、b2),但分布范围较为一致,两种方案整层云水含量均超过 $1.2kg \cdot m^{-2}$,雨水粒子整层含量超过 $3kg \cdot m^{-2}$,其大值区对应各自模拟的降水量大值区。固态水成物中,数值上来看雪粒子含量较多,云冰粒子含量较少,2 种方案模拟结果呈现出较大差异,1km_thompson 方案(图 10c2、d2、e2)雪粒子含量最多,霰粒子含量极少且几乎没有云冰粒子,这是由于 Thompson 参数化方案中过饱和度超过 25%才会形成冰核,并通过贝吉龙过程生成云冰粒子

后迅速转化为雪粒子。1km_WSM6 方案（图 10c1、d1、e1）冰相粒子含量分布比较均匀，大值区主要落在降水大值区以东。因此，同分辨率下不同云微物理方案对于水凝物的模拟存在较大差异，对比来看 Thompson 方案饱和和调整方案更适用于高分辨下的降水模拟。

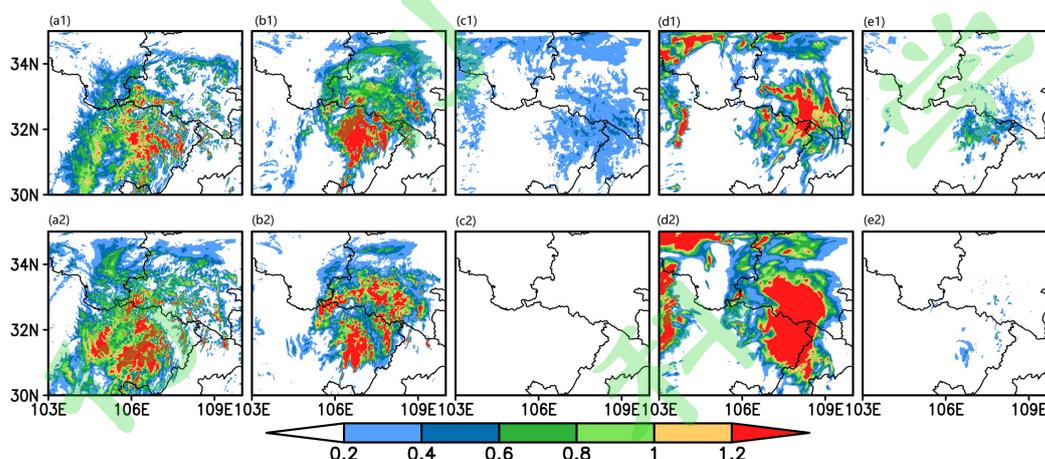


图 10 2021 年 9 月 4 日 00 时-5 日 00 时 1km_WSM6 方案 (a1-b1) 和 1km_thompson 方案 (a2-b2) 5 种水凝物整层积分含量 (单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 分布: (a1、a2) 云水, (b1、b2) 雨水, (c1、c2) 云冰, (d1、d2) 雪, (e1、e2) 霰

Fig.10 Five kinds of condensate integral content (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) distribution of 1km_WSM6 scheme (a1-b1) and 1km_thompson scheme (a2-b2) from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September, 2021: (a1, a2) cloud water, (b1, b2) rain, (c1, c2) cloud ice, (d1, d2) snow, (e1, e2) graupel

7 3km 分辨率下有无积云参数化方案模拟对比

为比较同分辨率下是否采用积云参数化方案的模拟效果，图 11 给出了 3km 和 3kmCu 方案 2021 年 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时和 4 日 00 时-5 日 00 时 24h 的累积降水量图，其中 A、B、C 分别为 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时的 3 个 24h 强降水中心，D、E 分别为 9 月 4 日 00 时-5 日 00 时的 2 个 24h 强降水中心。3 日 00 时-4 日 00 时，2 种方案模拟的降水落区和降水量有明显差异，其中 3kmCu 方案模拟的强降水中心 A 偏西，3km 方案未模拟出强降水中心 B，2 种方案模拟的强降水中心 C 降水强度均大于实况。4 日 00 时-5 日 00 时，2 种方案模拟的雨带均偏西且与实况差异较大，其中 3km 方案模拟的强降水中心 D 强度只达到暴雨量级，远小于实况降水强度，3kmCu 方案模拟的强降水中心 D 强度极小且偏南，2 种方案模拟的强降水中心 F 均偏东北。由 TS 评分（图 4）可知，3km 分辨率加入积云参数化过程后，仅小雨量级模拟较好，而积云降水以小到中雨为主，与微物理过程降水相加后降水区域比 3km 方案覆盖范围更广。整体来看，3km 分辨率下加入积云参数化方案后并没有显著提高模拟效果。

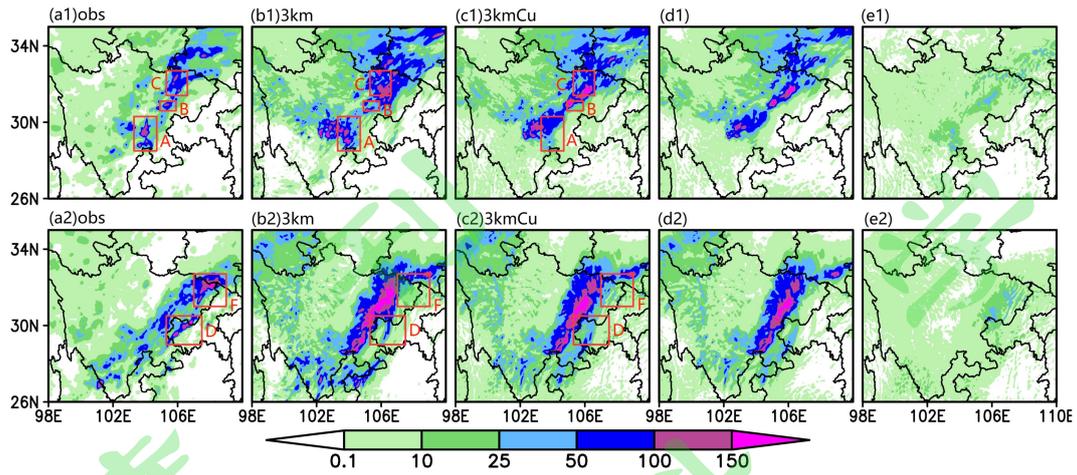


图 11 2021 年 9 月 3 日 00 时-4 日 00 时 (a₁-e₁; A、B、C 分别为该时段 3 个强降水中心) 和 4 日 00 时-5 日 00 时 (a₂-e₂; D、E 分别为该时段 2 个强降水中心) 的 24h 累积降水量 (单位: mm); d₁、d₂ 分别为 3kmCu 方案下云微物理降水; e₁、e₂ 分别为 3kmCu 方案下积云降水

Fig.11 24h accumulation precipitation from 00 UTC 3 September to 00 UTC 4 September (a₁-e₁; A, B and C are the three heavy precipitation centers in this period) & from 00 UTC 4 September to 00 UTC 5 September (a₂-e₂; D and E are the two heavy precipitation centers in this period), 2021 (unit: mm); d₁&d₂ are cloud microphysical precipitation of 3kmCu scheme; e₁&e₂ are cumulus precipitation of 3kmCu scheme

8 结论与讨论

通过利用 CMA-MESO 模式 5.1 版本对 2021 年 9 月 3 日 00 时-5 日 00 时四川盆地一次暴雨过程进行数值模拟, 结合地面实况降水资料探讨不同分辨率 (3km、10km、1km) 和不同微物理参数化方案 (WSM6、Thompson) 对此次暴雨过程的影响, 得到如下结论:

1) 5 组试验均能模拟出与实况相似的东北-西南向雨带, 但各组试验在降水落区和降水强度上与实况存在一定差异, 相同微物理参数化方案下, 降水量模拟随分辨率提高而增大; 相同分辨率下, 降水量的模拟主要与微物理参数化方案关系密切; 3km 分辨率下加入积云对流参数化方案后, 模拟的降水量明显降低。TS 和 Bias 评分显示, 随着降水阈值的提高, TS 评分下降同时 Bias 变幅增大, 空报漏报率也随之增加。1km 分辨率采用不同云微物理方案模拟结果, 在 0.1mm、25mm 和 50mm 量级 Thompson 方案 TS 评分高于 WSM6 方案, 且 Bias 评分明显低于 WSM6 方案, 表明 Thompson 参数化方案在此次降水过程模拟效果优于 WSM6 方案。3km 分辨率加入积云参数化过程后, 随降水量级增大, 同量级下 Bias 评分减小, 即降低了空报漏报率。5 组试验在逐 3h 降水量演变中, 第一个降水峰值均落后于实况, 第二个峰值与实况较吻合。

2) 动力条件模拟中, 5 组试验在各自模拟的暴雨区均对应强烈的上升气流, 且模拟强度均随分辨率提高而增大。相同积云参数化方案下不同分辨率的垂直速度正值区分布较为一致; 相同分辨率下不同云微物理方案的垂直速度整层分布差异较大。

3) 水汽条件模拟中, 随着分辨率的提高, 水汽通量呈减小趋势, 但由于动力条件随分辨率提高而增强, 故 1km 分辨率模拟降水较强且接近实况。3km 分辨率是否采用积云参数

化方案和 1km 分辨率采用不同微物理方案对于水汽通量模拟结果差异不大。

4) 1km 分辨率下采用不同云微物理方案对于液态粒子模拟结果差异不大, 但固态粒子明显不同, WSM6 方案冰相粒子含量分布比较均匀, Thompson 方案雪粒子较多, 且几乎不含云冰和霰粒子。对比来看 Thompson 方案饱和调整方案更适用于高分辨下的降水模拟。

5) 3km 分辨率下加入积云参数化方案后, 仅小雨量级模拟效果得到提升; 对于强降水中心的模拟, 3kmCu 方案模拟结果存在较大偏差。

通过对四川盆地 2021 年 9 月 3-5 日发生的暴雨过程的模拟和分析, 证明了不同分辨率和参数化方案对暴雨模拟存在一定的影响。各个结果比较中可以看出, 1km_thompson 方案对雨带刻画更精准, 降水模拟最优。

本次研究仅针对四川盆地一次暴雨过程采用不同分辨率和微物理方案进行数值模拟, 而暴雨过程的模拟结果不仅受以上 2 种因素影响, 也受到地形、初边界条件和高空槽、低涡、锋面气旋等不同天气系统的共同影响。因此本文的结果是否具有普遍性需要更多的个例验证。此外, 对于在何种分辨率下需要加入积云参数化方案以取得更佳的模拟效果, 仍需要进一步研究。

参考文献 (References)

- Cotton W R, Tripoli G J, Rauber R M, et al. 1986. Numerical simulation of the effects of varying ice crystal nucleation rates and aggregation processes on orographic snowfall[J]. *J Climate Appl Meteor*, 25(11): 1658-1680.
- Clark, Terry L. 1973. Numerical modeling of the dynamics and microphysics of warm cumulus convection[J]. *J Atmos Sci*, 30(5): 857-878.
- 邓莲堂, 史学丽, 闫之辉. 2012. 不同分辨率对淮河流域连续暴雨过程影响的中尺度模拟试验[J]. *热带气象学报*, 28(02): 167-176. Deng Liantang, Shi Xueli, Yan Zhihui. 2012. Mesoscale Simulation of a heavy rainfall in the Huaihe River Valley in July 2003: Effects of different horizontal resolutions[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 28(02): 167-176.
- 段静鑫, 赵天良, 徐祥德, 等. 2018. 四川暴雨过程中盆地地形作用的数值模拟[J]. *应用气象学报*, 29(03): 307-320. Duan Jingxin, Zhao Tianliang, Xu Xiangde. 2018. Simulation of Basin Topography Impacts on Rainstorm in Sichuan[J]. *Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese)*, 29(03): 307-320.
- Garvert M F, Woods C P, Colle B A, et al. 2005. The 13-14 December 2001 IMPROVE-2 Event. Part II: Comparisons of MM5 model simulations of clouds and precipitation with observations. *J Atmos Sci*, 62(10): 3520-3534.
- 何光碧, 师锐, 曾波. 2020. 2018 年 7 月四川盆地降水异常特征及成因分析[J]. *气象与环境学报*, 36(06): 21-30. He Guangbi, Shi Rui, Zeng Bo. 2020. Characteristics and causes of abnormal precipitation in Sichuan Basin in July of 2018[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 36(06): 21-30.

- 何跃, 李强, 刘伯骏, 等. 2019. 四川盆地一次西南涡作用下大暴雨过程的短时强降水分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(06): 29-38. He Yue, Li Qiang, Liu Bojun, et al. 2019. Analysis of Short-term Heavy Rainfall in a Rainstorm Process under the Action of Southwest Vortex[J]. Desert and Oasis Meteorology, 13(06): 29-38.
- 黄海波, 陈春艳, 朱雯娜. 2011. WRF 模式不同云微物理参数化方案及水平分辨率对降水预报效果的影响[J]. 气象科技, 39(5): 529-536. Huang Haibo, Chen Chunyan, Zhu Wenna. 2011. Impacts of Different Cloud Microphysical Processes and Horizontal Resolutions of WRF Model on Precipitation Forecast Effect[J]. Meteorological Science and Technology, 39(5): 529-536.
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. 2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报, 28(1): 25-37. Huang LiPing, Chen DeHui, Deng LianTang, et al. 2017. Main Technical Improvements of GRAPES Meso V4.0 and Verification[J]. Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese), 28(1): 25-37.
- 黄乾, 钱悦. 2021. 单双参云微物理方案对强降水过程中云宏微观特征模拟的对比分析[J]. 大气科学学报, 44(04): 615-625. Huang Qian, Qian Yue. 2021. Comparative analysis of single-moment and double-moment microphysics schemes in WRF on the heavy precipitation process of the macroscale and microscale characteristics of the cloud[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 44(04): 615-625.
- Hong S Y, Juang H M H, Zhao Q Y. 1998. Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model [J]. Mon. Wea. Rev., 126 (10): 2621 - 2639.
- Hong S Y, J. Dudhia, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation. Mon. Wea. Rev., 132: 103-120.
- Hou T, Lei H, Hu Z. 2020. Simulations of Microphysics and Precipitation in a Stratiform Cloud Case over Northern China: Comparison of Two Microphysics Schemes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 37(1): 117-129.
- Jankov I, Gallus WA, Segal M, et al. 2005. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall[J]. Weather and forecasting, 20(6): 1048-1060.
- J Park, D H Cha, Min Kyu Lee, et al. 2020. Impact of Cloud Microphysics Schemes on Tropical Cyclone Forecast Over the Western North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(18).
- 康兆萍, 周志敏, 李红莉. 2019. 不同分辨率和云微物理方案对华中暴雨模拟的影响分析[J]. 暴雨灾害, 38(06): 658-667. Kang Zhaoping, Zhou Zhimin, Li Hongli. 2019. Analysis on the effects of different horizontal resolutions and microphysical schemes on the simulation of a rainstorm in central China[J]. Torrential Rain and Disasters, 38(06): 658-667.
- Khain A P, Beheng K D, Heymsfield A, et al. 2015. Representation of microphysical processes in cloud-resolving models: Spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization[J]. Rev. Geophys, 53(2): 247-322.
- 李剑婕, 郑佳锋, 刘艳霞, 等. 2022. 四川盆地与周边地区的降水垂直结构和宏微观差异研究[J]. 气象学报, 80(02): 205-223. Li Jianjie, Zheng Jiafeng, Liu Yanxia, et al. 2022. A study on vertical structure and macro- to micro-characteristics and differences of precipitation in Sichuan basin and the surrounding

- areas[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 80(02): 205-223.
- 楼小凤, 胡志晋, 王鹏云, 等. 2003. 中尺度模式云降水物理方案介绍[J]. *应用气象学报*, 14(ZI): 49-59. Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, Wang Pengyun, et al. 2003. Introduction to microphysical schemes of mesoscale atmospheric models and cloud models[J]. *Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese)*, 14(ZI): 49-59.
- 卢萍. 2021. 不同分辨率西南区域模式对冕宁“6.26”突发性暴雨过程的模拟[J]. *高原山地气象研究*, 41(02): 23-31. Lu Ping. 2021. Study of “6.26” Sudden-Rainstorm in Mianning with Different Horizontal Resolution Business Model (SWC-WARR) [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 41(02): 23-31.
- 陆婷婷, 崔晓鹏. 2022. 2016年北京“7·20”特大暴雨降水物理过程模拟诊断研究[J]. *大气科学*, 46(02): 359-379. Lu Tingting, Cui Xiaopeng. 2022. Simulation and Diagnosis of the Physical Process of the “7·20” Heavy Rainfall in Beijing in 2016[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(02): 359-379.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J Appl Meteor Sci.*, 22(6): 1065-1092.
- 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.
- 彭筱, 陈晓燕, 黄武斌. 2019. 2016年夏季不同分辨率 GRAPES_MESO 模式的西北地区预报效果检验[J]. *气象研究与应用*, 40(04): 6-11. Peng Xiao, Chen Xiaoyan, Huang Wubin. 2019. Test of prediction effect on Northwest China with different resolutions of GRAPES_MESO model[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 40(04): 6-11. .
- 沈程锋, 李国平. 2022. 基于 GPM 资料的四川盆地及周边地区夏季地形降水垂直结构研究[J/OL]. *高原气象*: 1-12. Shen Chengfeng, Li Guoping. 2022. The Vertical Structure of Heavy Orographic Precipitation by Using GPM Dual-frequency Spaceborne Precipitation Radar[J/OL]. *Plateau Meteorology*: 1-12.
- 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等. 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. *气象学报*, 78(03): 451-476. Shen XueShun, Wang JianJie, Li ZeChun, et al. 2020. China’s independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(03): 451-476.
- 史月琴, 楼小凤. 2006. 显式云物理方案的研究进展[J]. *气象科技*, (05): 513-520. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng. 2006. Progress in Researches on Explicit Cloud Microphysical Schemes[J]. *Meteorological Science and Technology*, (05): 513-520.
- 束艾青, 魏鸣, 武芳, 等. 2021. 2019年7月10日四川一次暴雨过程的数值模拟与诊断分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 57(04): 551-558+568. Shu Aiqing, Wei Ming, Wu Fang, et al. 2021. Diagnostic analysis and numerical simulation of a rainstorm in Sichuan Province on July 10, 2019[J]. *Journal of Lanzhou University (Nature Sciences)*. 57(04): 551-558+568.
- Thompson Gregory, Roy M. Rasmussen, Kevin Manning. 2004. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. *Mon Wea Rev.*, 132(2): 519-542.
- Thompson Gregory, Field Paul R., Rasmussen Roy M. 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an

Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Mon Wea Rev.*, 136(12): 5095-5115.

Wang C X, Ying M. 2021. Impact of Different Cloud Microphysics Parameterization Schemes on Typhoon Intensity and Structure[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 27(2).

尹金方, 王东海, 翟国庆. 2014. 区域中尺度模式云微物理参数化方案特征及其在中国的适用性[J]. *地球科学进展*, 29(02): 238-242+249+243-248. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing. 2014. A study of characteristics of the cloud microphysical parameterization schemes in mesoscale models and its applicability to China[J]. *Advances in Earth Science*, 29(02): 238-242+249+243-248.

Yang M J, Ching L. 2005. A modeling study of typhoon Toraji (2001): Physical parameterization sensitivity and topographic effect [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16 (1): 177-213.

Yin L, Ping F, Mao J H. 2017. A comparative study between bulk and bin microphysical schemes of a simulated squall line in East China [J]. *Atmospheric Science Letters*, 18(5): 195-206.

周文昊, 陆春松, 高文华, 等. 2020. 华南一次暖区暴雨的演变及云微物理机制模拟研究[J]. *热带气象学报*, 36(06): 805-820. Zhou Wenhao, Lu Chunsong, Gao Wenhua, et al. 2020. A Modeling study of the evolution and microphysical mechanisms of a warm-sector heavy rainfall in south China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 36(06): 805-820.

周懿, 青逸雨, 郭云云, 等. 2022. 四川盆地“8.11”暴雨过程中低空急流作用分析[J]. *高原山地气象研究*, 42(01): 51-60. Zhou Yi, Qing Yiyu, Guo Yunyun, et al. 2022. Analysis on Low-level Jet Stream of the '8.11' Rainstorm in Sichuan[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 42(01): 51-60.

周志敏, 崔春光, 胡扬, 等. 2021. 一次梅雨锋暴雨过程数值模拟的云微物理参数化敏感性研究[J]. *大气科学*, 45(06): 1292-1312. Zhou Zhimin, Cui Chunguang, Hu Yang, et al. 2021. Sensitivity of Microphysical Parameterization on the Numerical Simulation of a Meiyu Front Heavy Rainfall Process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(06): 1292-1312.

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(03): 513-523. 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(03): 513-523.