

基于卫星观测资料对中尺度模式云微物理参数化方案的评估分析

骆三 余洋 李红莉 张文 王俊超

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430205

2 全国暴雨研究中心, 武汉 430205

3 中国气象局流域强降水重点开放实验室, 武汉 430205

4 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

摘要: 针对 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日一次由青藏高原东移云团造成的长江中游强降水过程, 基于卫星观测资料和通用辐射传输模式 (CRTM), 对 WRF 模式模拟的三种云微物理方案进行评估。结果显示: 与高分辨率卫星融合降水相比, 三种方案均很好地模拟了降水的发生、发展与成熟阶段, 其中 Morrison 模拟效果最好, 然而三种方案在固态水凝物的模拟方面具有很大的不确定性, 与葵花 8 亮温数据和 ERA5 云量相比, 三种方案低估了中低云云量, 高估了高云云量。通过与卫星反演云产品对比发现, 三种方案因模拟的云水和云冰含量偏小, 云有效半径偏大造成在雨区模拟的下行短波辐射偏小。WRF 模式模拟所用初始场水汽与 GPS 大气可降水量相比在降水区域(湖北东部地区)偏低。模拟极端降水的误差是热力、动力和云物理综合作用的结果, 本文结果为极端降水模拟评估与改进提供了借鉴。

关键词: 红外亮温, 通用辐射传输模式 (CRTM), 微物理方案

Evaluation of Cloud Microphysical Parameterization Schemes for Mesoscale Model Based
on Satellite Observations

LUO San YU Yang LI Hongli ZHANG Wen WANG Junchao

1 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 Heavy Rainfall Research Center of China Wuhan 430205

3 CMA Basin Heavy Rainfall Key Laboratory Wuhan 430205

4 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan 430205

Abstract: Based on satellite observations and the community radiative transfer model (CRTM), this paper evaluates the simulation results of three cloud microphysical schemes (Morrison, Thompson, and WD6) aiming at a heavy rainstorm process in the middle reach of Yangtze River. The heavy rainstorm once occurred from 29 June to 1 July 2016 and was brought by the clouds moving eastward from the Tibet Plateau. The results show that compared to the high-resolution fused satellite precipitation observations, the three cloud microphysical schemes perform very well as a whole. They all successfully simulate the beginning, developing and the maturing stages of the rainstorm, of which the performance of Morrison scheme is the best. However, the three schemes have greater uncertainties in simulating the solid hydrometeor. Relative to the ERA5 cloud cover data and the brightness temperature observation from Himawari-8, the three schemes overestimate the high-level cloud cover

湖北省气象局科技发展基金青年项目 (2019Q04) 和全国暴雨研究开放基金 (BYKJ2024M12) 的共同资助

第一作者: 骆三, 主要从事极端天气与气候分析与模拟研究. E-mail: 570037169@qq.com

but underestimate the mid-low cloud cover. Compared to the satellite-retrieved cloud products, it is found that the downward shortwave radiations (SWDR) simulated by the three schemes are smaller in the rainstorm area due to the smaller contents of cloud ice and cloud water as well as the larger cloud effective radius (CER). Furthermore, the initial field water vapor used in WRF model simulation is less than the GPS atmospheric precipitable water in the area of rainstorm (i.e., eastern Hubei Province). The error of extreme precipitation simulation is the result of the combined effects of thermodynamics, dynamics, and cloud physics. These findings could serve as a reference for the evaluation and improvement of extreme precipitation simulation.

Key words: brightness temperature, community radiative transfer model (CRTM), cloud microphysical schemes

引言

长江中下游地区受季风气候影响显著, 全年降水主要集中在汛期, 期间强降水事件频发。6-7 月, 长江流域附近常常会出现连阴雨天气, 由于此时正值江南梅子黄熟季节, 故称“梅雨”。梅雨期是东亚夏季风季节性北推的重要阶段, 梅雨期间频繁的强降水过程常给我国长江中下游地区带来严重的洪涝灾害, 给地方经济造巨大的损失, 并严重威胁人民群众的生命财产安全(马悦等, 2022; 钟倩媚等, 2023; 杨雅涵等, 2024; 杜如意等, 2024)。夏季青藏高原云团发生东移往往会带来高原东部以及长江流域的强降水, 其中高原东移云团向长江流域的传播是 1998 年 7 月长江流域大暴雨发生的重要背景条件之一 (Zhang et al, 2021; Zhao et al, 2022; 范旭燕和李跃清, 2022; 庄照荣等, 2025)。对于梅雨期极端降水事件, 现有模式对其降水预报在量级以及时空分布上精准预报难度较大 (Zhang et al, 2025)。

云微物理过程在降水系统的发生、发展、成熟和衰亡阶段起着至关重要的作用 (Cui et al, 2021; Xu et al, 2021; Tong et al, 2021), 其通过进一步综合影响中尺度系统的动力、热力结构来呈现出不同的中尺度环流特征 (王艳杰, 2009)。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 云微物理过程是形成云的关键, 深入理解云微物理过程, 是国际前沿的热点和难点问题, 也是天气与气候模式发展的瓶颈 (IPCC, 2023), 云微物理过程及其反馈机制是导致数值模式预报不确定性的最大因素 (Houghton et al, 2001)。合理描述云物理过程以及云与大尺度环境的相互作用是准确模拟各种天气过程的关键之一 (Cess et al, 1989; 尹金方等, 2014)。国内外进行了大量云微物理参数化方案对极端降水模拟的影响研究(王丹和余贞寿, 2023)。Lin et al (2022) 评估了 WRF 模式三种微物理方案对台风“利奇马”不同雨带的雨滴谱特征的模拟表现, 结果表明, 三种方案均高估了雨滴平均直径而低估了数浓度, 且模拟雨滴

谱在台风眼墙和雨带之间的变化幅度小于观测事实。针对干旱地区的极端降水模拟，[Mekawy et al \(2023\)](#) 评估了 6 种云微物理参数化对于发生在埃及的一次极端强降水事件模拟性能差异,发现 Lin 和 Goddard 方案表现最佳。[Mwageni et al \(2025\)](#) 利用不同的云微物理和陆面参数化方案组合对坦桑尼亚的一次极端降水时间进行评估,发现 WSM6 表现更好。[Luo and Wu \(2025\)](#) 通过不同参数化方案对于华南两次不同类型的强降水模拟评估指出,云微物理参数化方案的模拟性能依赖于降水类型。针对云微物理参数化对于复杂地形下极端强降水模拟的敏感性,[Biswasharma et al \(2024\)](#) 评估了不同积云对流参数化和云微物理参数化方案的组合对印度东北部那加兰邦丘陵地带的极端降水模拟性能差异。[Tiwari and Bush \(2025\)](#) 评估显示,地形强迫与微物理过程的耦合效应是模拟偏差的关键来源。不同的云微物理参数化方案再现不同类型天气过程的能力存在着较大的差别,即使各方案对于同一天气过程大气环流形势的演变、降水分布和强度等能够进行合理的再现,各方案对于云微物理过程的模拟能力仍旧存在着较大的差别(林文实等, 2009)。国内在云微物理方案改进上也做了较多工作,[Zhao et al \(2021\)](#) 对原有的单参云微物理参数化方案优化,研发了双参数方案,极大改进了飑线的模拟效果;徐晓齐等(2024)通过加入云滴活化过程并实时更新云滴数浓度和植入云滴混合蒸发参数化,对 2021 年川藏铁路沿线汛期的大范围降水过程的模拟效果得以提升;[Deng et al \(2025\)](#) 针对台风暴雨模拟中云微物理参数化方案因静风假设导致的模拟偏差,通过融入水平风速、垂直风切变及湍流等动力因子和调整粒子间碰撞速度差改进碰撞破碎率,显著提升了台风降水微物理过程的模拟精度。

以往对于云微物理方案的评估均是以降水观测来作为参照,而降水模拟结果的优劣不仅与微物理过程有关,还与热力、动力条件以及陆面等因素有关,因此,仅以降水为参照来评估微物理参数化方案的适应性存在着局限性。水凝物的源汇分析结果也大多是模式模拟结果,缺乏有效的观测证实。数据是欧洲中期天气预报中心提供的第五代再分析资料(ERA5),包含 1950 年以来的大气、海洋和地表产品,与 ERA-interim 数据相比,其数据质量有所提升而且拥有更高的时空分辨率([Hersbach et al, 2020](#)),其中水凝物和云量再分析数据可用来评估模式模拟的云微物理误差。

利用辐射模式和大气模式预报的气象要素(温、压、湿、云) 计算亮度温度(以下简称亮温), 并与实时卫星观测相比较, 可用来评估模式模拟效果(Luo et al, 2016; Galligani et al, 2017; Yao et al, 2020)。Sun and Rikus(2004)利用静止卫星和辐射亮温模式诊断出澳大利亚全球数值预报模式的亮温暖偏差是由于冰水含量偏低造成的。陈靖等(2015)利用 MTSAT 卫星观测和辐射亮温模式诊断出 TJ-WRF 模式模拟的对流强度偏弱, 地面温度偏高。Zou et al(2016)利用 ECMWF 再分析资料和 CRTM 与 RTTOV 评估了葵花 8 卫星资料的系统偏差。Yao et al (2020) 利用葵花卫星资料和 CRTM 评估了三种再分析资料的精度。Li et al (2020) 发展了一个新的辐射传输模式(ERTM), 并利用台风个例评估显示, 模拟的台风与观测有很好的 consistency。即利用静止卫星资料与辐射传输模式相结合可以在很多方面开展研究应用, 特别是在对模式进行诊断与评估方面。由于卫星观测的亮温在很大程度上由云顶温度所确定, 根据亮温的高低可判定云的高度, 从而确定云的存在、云类型及其发展程度。只要辐射模式的精度与卫星的观测精度一致, 模式与卫星亮温的偏差就可归结于模式热力和云微物理模拟的误差。

一次降水过程的发生, 主要受高低空不同天气系统配置的综合影响, 当天气系统的位置和强度发生变动时, 必会影响降水的发生位置、强度和持续时间。大气中的非绝热加热是维持大气环流和天气系统发展的主要热力强迫因子(高丽和李建平, 2013), 因此由于天气系统造成的降水过程与非绝热加热之间存在密不可分的关系(姚秀萍等, 2019)。大气的非绝热加热包括辐射加热、感热加热和潜热加热, 其中辐射加热偏差可从侧面反映出云物理结构的差异, 进而对降水产生重要影响(Luo et al, 2016)。因此, 对模拟辐射加热的偏差进行评估是很有必要的。

水汽是产生降水的物质基础, 充足的水汽是产生强降水的必要条件(余洋等, 2024)。当今全球卫星导航系统(GNSS)水汽监测网及其探测技术日益成熟(Wolfe and Gutman, 2000), 连续、高时空分辨率的大气可降水(PWV)可更好地刻画降水过程前后的水汽演变特征。余洋等(2024)基于 2019 年和 2020 年 6-7 月 GNSS 水汽监测网 PWV 和并址气象站的同步数据, 利用临界成功指数和命中率两个检验指标, 探索建立了基于 PWV、6h 水汽增量及假相当位温距平的短时强降水阈值预报方法, 对梅雨期短时强降水以及暴雨发生区域有较好的指示性。本文也将利用 GNSS 的 PWV 数据分析模式模拟降水的水汽偏差来源。

124 综上，本研究将利用多种观测资料，分析 WRF 模式模拟模拟的降水误差在云微
125 物理、辐射以及水汽方面的误差表现。

126
127 1 资料和方法

128 1.1 资料说明

129 实况降水量采用 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 的小时降水量融合降水产品（宇婧婧等，2013），
130 本文采用每日 08 时至次日 08 时的累计降水量作为日降水量。利用 ERA5 再分析数据
131 （Hersbach et al, 2020）的水凝物和云量作为基准来评估模拟误差。（Bessho et
132 al,2016）。红外亮温资料来自葵花 8 卫星 6.2、8.6、11.2 μm 通道，时间分辨率为 10min，
133 星下点水平分辨率为 2km；另外还使用了葵花 8 卫星反演的云光学厚度和云有效半径
134 数据。辐射数据来自东亚-太平洋地表下行长短波辐射数据集
135 （<https://cstr.cn/18406.11.Meteoro.tpd.271729>），时间分辨率为 10min，空间分辨率为
136 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ ，并充分考虑到了云、高气溶胶背景和地形效应对辐射的影响，均方根误
137 差小于 ERA5 等常用辐射产品。利用 GPS/MET 数据反演的大气整层可降水量评估模
138 式预报场的水汽误差（李红莉等，2017）。

139 采用 WRF4.0 版本进行模拟，两层嵌套，内、外层嵌套分辨率分别为 3km、9km，垂
140 直方向上为 38 层，模式顶高为 50 hPa。模式驱动数据采用美国国家环境预报中心（NCEP）
141 的 FNL 全球分析资料，时间分辨率为 6h，空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直分辨率为 32 层，起始时
142 间为 2016 年 6 月 29 日 12 时（世界时，下同）。图 1 为区域设置，表 1 为模式运行用到的
143 方案设置，其中，云微物理方案分别为 WD6、Thompson 和 Morrison 方案，三种方案的水
144 凝物种类和数量相同，具体种类包括云水、雨水、冰晶、雪、霰和雹。

WPS Domain Configuration

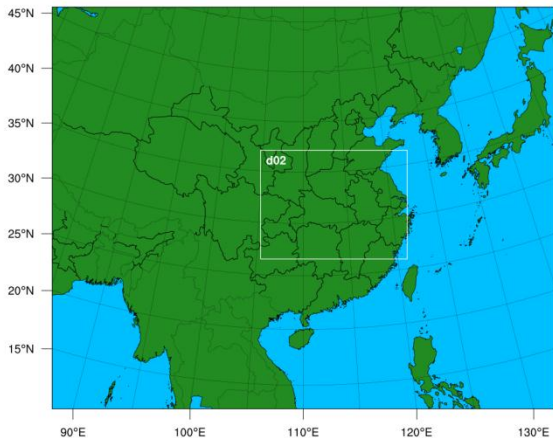


图 1 WRF 模拟的区域设置

Fig.1 Regional area for WRF simulation

表 1 WRF 模式物理参数化方案

Table 1 WRF physical parameterizations schemes

物理过程	方案名称
微物理方案	WRF D6
	Thompson
	Morrison
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
表层方案	Monin-Obukhov
陆面过程方案	Noah LSM
边界层方案	ACM2

利用辐射传输模式（CRTM）检验模式云微物理过程的模拟结果 (Johnson et al, 2023), 先利用 WRF 模式预报场（大气，云以及地面预报数据）作为辐射传输模式的输入，输出结果与葵花 8 卫星观测亮温进行对比（图 2），来评估模式模拟的云微物理过程误差（Sun and Rikus, 2004）。

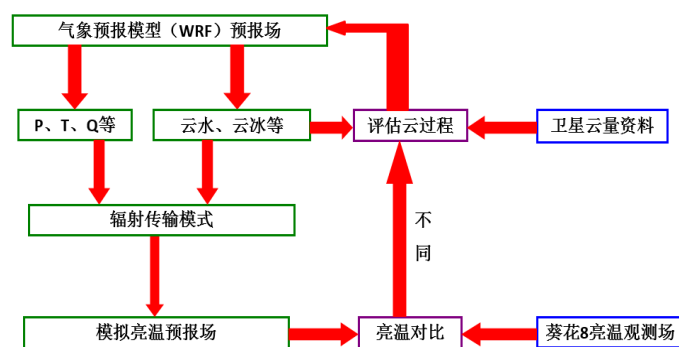


图 2 CRTM 工作流程

Fig.2 Flow chart of CRTM

1.2 统计方法

本文用到的统计函数有偏差（Bias）、相关系数（ r ）、均方根误差（RMSE）和平均绝对误差（MAE），其中 Bias 越接近 1 表示偏差越小， r 越大表示相关性越强，RMSE 和 MAE 数值越小代表预测越精准。

2 降水量模拟

2.1 降水过程实况

2016 年 6 月底至 7 月初长江流域发生了特大暴雨，造成了 1 重大伤亡和经济损失（Chen et al, 2020）。6 月 29 日至 7 月 5 日，湖北境内总降水量大部分在 200mm 左右，其中东部超过 500mm（图 3a）；有 150 个以上区域自动气象站累计降水量超过 200mm，最大达 796.1mm（黄冈红安）；有 37 个国家级气象观测站累计降水量超过 100mm，其中有 3 个站突破 1949 年以来历史极值(张萍萍等, 2018)。从逐日降水量演变来看（图 3b, 3c），湖北主要降水时段在 6 月 30 日和 7 月 1 日，有两个降水中心。

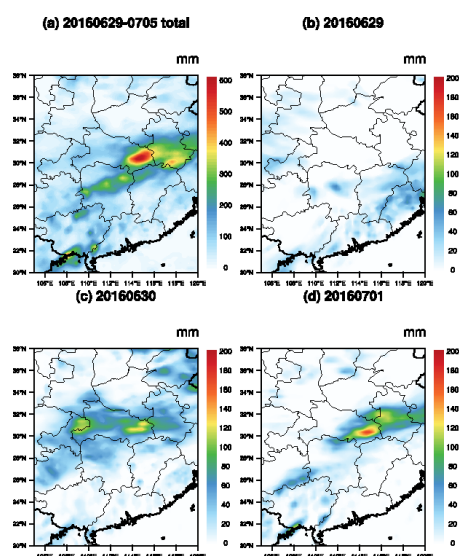


图 3 2016 年(a)6 月 29 日至 7 月 5 日累计降水量，(b)6 月 29 日、(c) 6 月 30 日、(d) 7 月 1 日逐日降水量分布

Fig.3 Distribution of (a) accumulated precipitation from 29 June to 5 July, and daily precipitation on (b) 29 June, (c) 30 June, and (d) 1 July 2016

2.2 降水量模拟评估

对此次过程湖北降水极值时段进行模拟分析，模拟结果如图 4 所示。与降水观测相比，WRF 模式 3 种云微物理方案均很好地模拟出了降水的初始、发展与成熟阶段，与观测有很好的 consistency。其中 Morrison 模拟效果最好，其平均相关系数最高，Bias 也最小，而对于 RMSEMAE，几种方案均比较接近(表 2)。总体看来，相对于其他两种方案，Morrison 模拟降水结果与观测更接近。

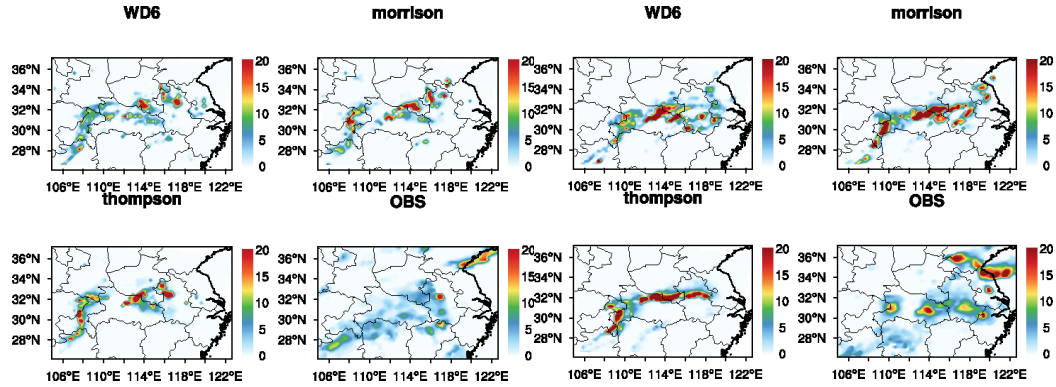


图 4 2016 年 6 月 30 日 (a) 12 时, (b) 18 时观测以及三种云微物理方案模拟的小时降水量

Fig.4 Hourly precipitation observed and simulated by three cloud microphysics schemes at (a) 12:00 UTC and (b) 18:00 UTC 30 June 2016

表 2 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日三种云微物理方案模拟的小时降水量统计值平均

Table 2 Average of hourly precipitation statistics simulated by three cloud microphysics schemes from 29 June to 1 July 2016

	Thompson			Morrison			WD6					
	<i>R</i>	Bias	RMSE	MAE	<i>R</i>	Bias	RMSE	MAE	<i>R</i>	Bias	RMSE	MAE
平均	0.234	0.12	2.81	0.918	0.31	0.12	2.724	0.878	0.25	0.181	2.46	0.829

为评估三种云微物理方案模拟降水的时间变化结果, 对模拟区域结果作面积平均并与相应观测区域降水平均结果惊醒比较。从图 5 来看, 观测小时降水量峰值在 6 月 30 日 18 时, Thompson 方案的模拟的峰值在 7 月 1 日 00 时, 滞后 6 h, Morrison 和 WD6 方案模拟的降水峰值时间与观测一致, 但是量级偏小。

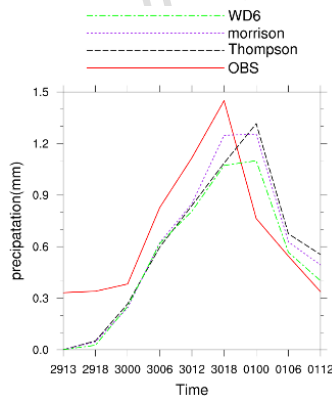


图 5 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日观测与模拟的面积平均小时降水量时间序列

Fig.5 Time-series of observed and simulated area-averaged hourly precipitation from 29 June to 1 July 2016

为评估模式固态和液态水凝物模拟结果，对模拟结果作面积平均并与 ERA5 相应区域面积平均作比较。由图 6 可知，与 ERA5 几种水凝物的垂直廓线相比，在整个强降水时段三种参数化方案中只有云水含量与其比较接近，而对于其他三种水凝物在强降水时段的模拟具有一定的不确定性，其中冰水含量不确定性最大，这是由于 thompson 方案模拟云冰的含量量级很小，远低于 morrison、WD6 和 ERA5，而 thompson 方案模拟的雪含量较 morrison、WD6 和 ERA5 大很多。对于雨水的模拟，三种方案均大于 ERA5，且有较大的不确定性。而 WD6 方案模拟霰的含量较 Thompson 和 MORRISON 大。对于 6 月 29 日 18 时至 7 月 1 日 12 时的平均云量，与 ERA5 相比，三种方案对 600~300hpa 的中高云存在高估，而对于中低云存在低估。由此可见云微物理方案在液态水凝物中对于云水的模拟与 ERA5 相比比较接近，而对于其他水凝物的模拟具有较大的不确定性，这是由于不同微物理方案对于固态水凝物的生成、转化与消耗存在较大差异所致（毛志远等，2025）。

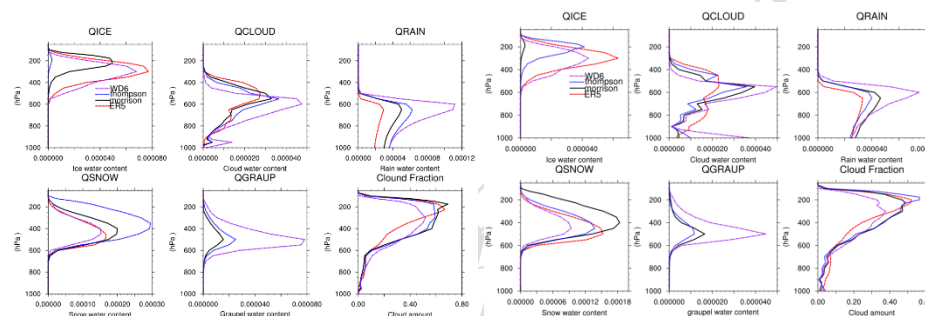


图 6 2016 年 6 月 (a) 30 日 12 时各水凝物含量和云量以及 (b) 6 月 29 日 18 时至 7 月 1 日 12 时平均水凝物含量和云量的垂直廓线

Fig.6 Vertical profiles of hydrometeor content and cloud fraction at (a) 12:00 UTC 30 June and (b) the averaged hydrometeor content and cloud fraction from 18:00 UTC 29 June to 12:00 UTC 1 July 2016

综上，三种微物理方案较好地模拟了降水过程，但是还存在一定的偏差。根据经验，水汽、云微物理、动力和热力等模拟偏差均会带来降水量的误差。此外，模拟误差还与模式本身有关系，比如模式分辨率，陆面过程、模式后处理，初始场等。下文主要分析模式模拟降水量误差在云微物理、辐射以及水汽方面的误差表现。

3 亮温模拟评估

利用葵花 8 卫星的三个通道(6.2、8.6、11.2 μm)红外亮温资料和 CRTM 辐射传输模式对 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日 WRF 模式模拟的三种微物理方案进行适应性评估。结果如图 7 所示, 三种微物理方案模拟的云的发生和发展过程与观测有很好的一致性, 但在水汽通道模拟亮温偏高。

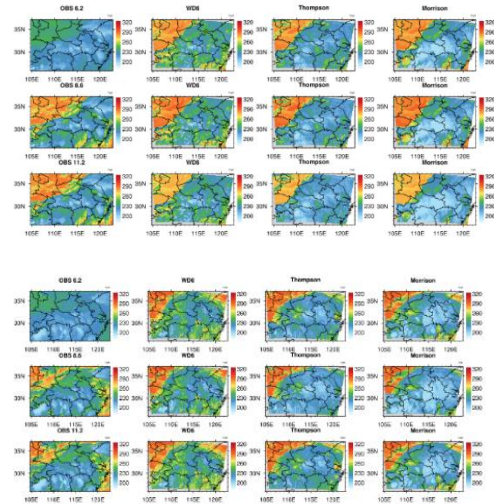


图 7 2016 年 6 月 30 日 (a) 12 时、(b) 18 时葵花 8 卫星三个通道观测及三种云微物理方案模拟亮温

Fig.7 Brightness temperatures observed by three channels of Himawari-8 and simulated by three cloud microphysics schemes at (a) 12:00 UTC and (b) 18:00 UTC 30 June 2016

从水汽通道 (6.2) 散点分布 (图 8) 可以看出, 三种方案模式模拟的亮温大小在 200~300K, 而观测在 190~245K, 表明模式模拟低估了中低云的发生频率。而对于 8.6、11.2 通道, 三种方案观测较为一致。

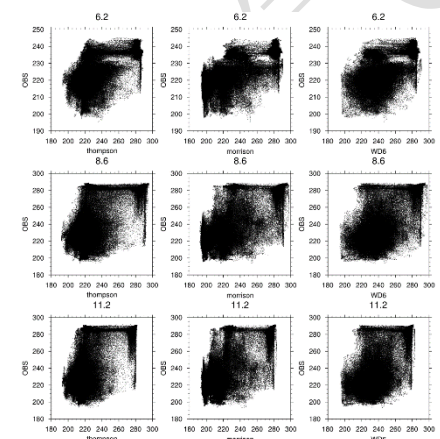


图 8 2016 年 6 月 30 日 18 时葵花 8 卫星三个通道观测以及三种云微物理方案模拟的亮温散点图

Fig. 8 Scatter plots of brightness temperatures observed by three channels of Himawari-8 and simulated by three cloud microphysics schemes at 18:00 UTC 30 June 2016

在 $8.6\mu\text{m}$ 通道中, 不同相态的云的吸收率是相似的, 但在 $11.2\mu\text{m}$ 通道中, 冰云的吸收率比水云要大很多。因此当冰云含量较高时, 二者亮温差值一般为正, 而当水云含量较高时, 亮温差值一般为负, 因此, 可通过这两个通道的亮温差值来判断冰云、水云含量。由于 $6.2\mu\text{m}$ 为很强的水汽吸收通道, 且对流层温度递减率为负值, 因此与 $11.2\mu\text{m}$ 通道亮温差值往往为负, 且随着云高的增加而增加, 由于水汽和较高的地面温度的影响, 最大的负值一般在晴空区域。正值或者接近于零值的亮温差异一般来自于云顶(Yao et al, 2020)。因此, $6.2\mu\text{m}$ 与 $11.2\mu\text{m}$ 通道的亮温差值往往被用来区分不同高度的云, 当亮温差值在 $-45 \sim -30\text{K}$, 则被认为是低层云; 在 $-30 \sim -10\text{K}$, 则被认为是中层云; 大于 -10K , 则被认为是高层云(Yao et al, 2020)。

根据以上原理, 如图 9 所示, 葵花 8 卫星观测的 $8.6\mu\text{m}$ 和 $11.2\mu\text{m}$ 通道亮温差值在湖北西部为负、东部为正, 而三种方案模拟的数值在这两个区域均为正, 且量级大于观测亮温差异, 这表明三种方案模拟结果在湖北西部低估了冰云, 而在东部高估了水云。而对于 $6.2\mu\text{m}$ 和 $11.2\mu\text{m}$ 通道亮温差值, 观测亮温差值在湖北西部为负, 且均小于 -20K , 以中低云为主, 而在东部为负, 在 $-10 \sim 0\text{K}$, 以高云为主, 而三种方案的模拟结果在湖北西部为正, 因而以高云为主, 这表明三种方案在湖北西部对于中低云的模拟存在低估。

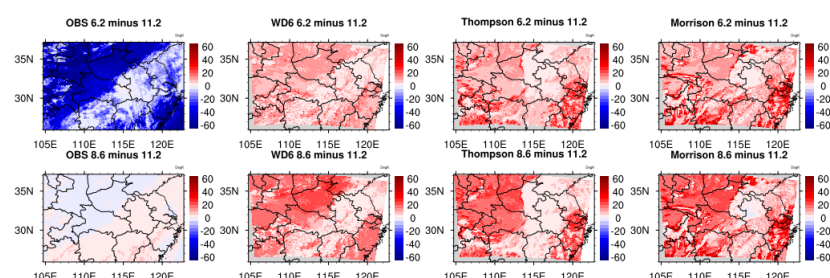


图 9 2016 年 7 月 1 日 07 时葵花 8 卫星观测亮温差值和三种云微物理方案模拟的亮温差值

Fig. 9 Brightness temperature differences observed by Himawari-8 and simulated by three cloud microphysics schemes at 07:00 UTC 1 July 2016

从各通道模拟亮温与观测的差值来看(图 10), 水汽通道($6.2\mu\text{m}$)三种方案模拟的亮温均大于观测, 存在着一定范围的正偏差, 数值范围分别在 $0-50\text{K}$, 表明对应所在的降水区域模式背景场水汽观测相比存在着低估。WD6 和 Thompson 模拟正偏差主要在湖北东部和西南部, 将在第四节水汽模拟部分进一步分析其原因。而对于 $8.6\mu\text{m}$ 和 $11.2\mu\text{m}$ 通道, 三种方案模拟结果与观测的差值分布与 $6.2\mu\text{m}$ 较为相似。

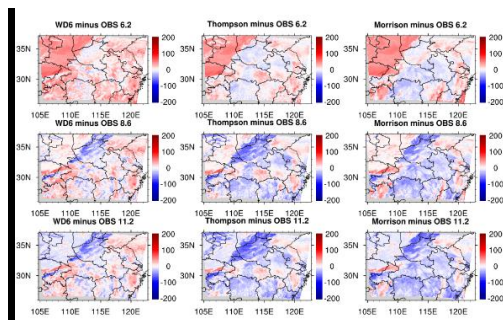


图 10 2016 年 6 月 30 日 18 时三个通道三种云微物理方案模拟与葵花 8 卫星观测的亮温差值分布

Fig. 10 Distribution of brightness temperature differences of three channels between simulations by three cloud microphysics schemes and observations by Himawari-8 at 18:00 UTC 30 June 2016

为进一步分析冰云在降水模拟中的重要性，通过敏感性试验模拟对比有无冰、雪、霰粒子，当模式模拟不包含这三种粒子时，三种方案模拟的亮温正偏差更大（图略），表明冰云在亮温模拟过程中具有重要作用。

4 下行辐射和水汽模拟

4.1 下行辐射模拟

为了评估三种云微物理方案的下行段辐射模拟结果，用模拟结果减去观测，得到模拟下行短波辐射偏差分布（图 11）。由图 11 可知，在雨区边缘 WRF 模拟辐射与观测相比，偏差为正，数值范围为 $200 \text{ w}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右，而在雨区偏差为负，这表明在雨区范围，偏差可能是由于模式模拟的云量过量，云水或云冰路径偏多造成的，而在非雨区可能是由于水汽偏少造成偏差为正，将在 4.2 节水汽模拟部分进一步证明。

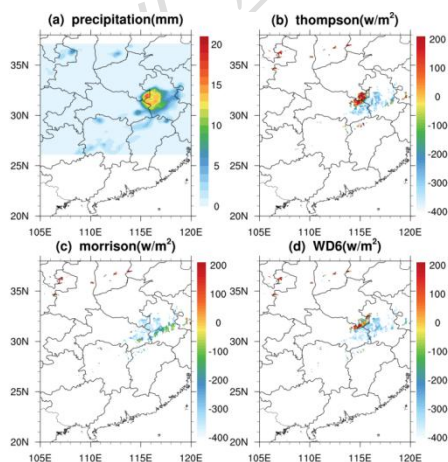


图 11 2016 年 7 月 1 日 07 时（a）降水量观测，（b~d）模拟下行短波辐射与观测的差值分布

Fig.11 Distribution of (a) observed precipitation and (b–d) downward shortwave radiation differences between simulations and observations at 07:00 UTC 1 July 2016

本文利用的云观测资料是来自葵花 8 反演的云光学厚度和云有效半径产品，其算法与来自 Terra 和 Aqua 平台中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的官方 Collection-6 云检测产品相匹配 (闵敏, 2021)。本文对于模拟云光学厚度和云有效半径的计算方法参考 Yao et al(2018)。结合图 11a, 从图 12a 可以看到, 在雨区, 模式模拟的云光学厚度偏低, 而云有效半径偏大 (图 12b) 这将导致模式模拟的下行短波辐射偏差为负。由于云水、云冰含量与云光学厚度成正比, 而与云有效半径成反比, 因此, 模式模拟的雨区内云水、云冰含量偏低。

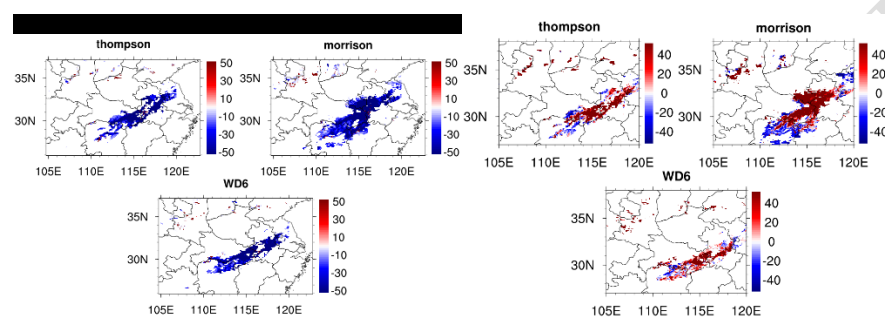


图 12 2016 年 7 月 1 日 7 时三种云微物理方案模拟的 (a) 云光学厚度和 (b) 云有效半径与观测的差值分布

Fig. 12 Distribution of differences between the simulations of (a) cloud optical thickness and (b) cloud effective radius by three cloud microphysics schemes and the observations at 07:00 UTC 1 July 2016

4.2 水汽模拟

为了进一步分析模式初始场中水汽是否存在低估, 将模式模拟的大气可降水量插值到站点, 与相同位置的 GPS 观测站 (图 13) 进行比较, 共 30 个站点, 其中 15 个站点为差值为负, 15 个站点为正。差值分布显示, 在湖北西南部和东部的降水区域模式模拟的大气可降水量差值均为负, 其中阳新和嘉鱼模拟结果分别为 35.06mm 和 36.09mm, 而观测分别为 61.31 和 65.67mm, 差值分别达 -26.25 和 -29.58mm。表明在降水区域模式模拟大气可降水量明显偏低, 这也解释了图 11 中 WD6 和 Thompson 水汽通道模拟亮温正偏差主要分布在湖北东部和西南部的原因, 与图 12 非雨区模拟下行短波辐射为负的分析结果是一致的, 模式模拟降水量偏小与初始场水汽偏低有关。

为了检验模式初始场水汽是否在整个降水时段均偏弱，每 6h 挑选一个时刻计算其模拟大气可降水量并与 GPS 观测对比，结果均显示湖北东部模拟的大气可降水量偏弱（图略）。

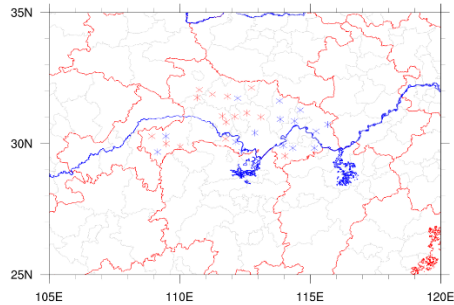


图 13 2016 年 6 月 30 日 17 时三种云微物理方案模拟的大气可降水量与观测的差值分布

Fig. 13 Distribution of the difference between the simulated atmospheric precipitable water vapor by three cloud microphysics schemes and the observation at 17:00 UTC 30 June 2016

5 结论和讨论

本文基于多源遥感资料和 CRTM 辐射模式对 2016 年 6 月 29 日至 7 月 1 日一次由青藏高原东移云团造成的强降水进行模拟，主要对云微物理、辐射和水汽模拟结果进行评估。结果如下：

（1）三种方案均很好地模拟出了降水的初始，发展与成熟阶段，与观测较为一致。其中 Morrison 模拟效果最好，与观测结果平均相关系数最高，Bias 也最小。三种云微物理方案在云水含量的模拟数值与 ERA5 比较接近，而在其他水凝物的模拟均具有较大的不确定性。

（2）与葵花 8 亮温数据相比，三种云微物理方案模拟与观测有很好的 consistency，模拟低估了中低云的发生频率。当模拟不包含冰、雪和霰时，三种方案模拟的亮温正偏差数值更大，表明冰云在亮温模拟过程中有着不可替代的作用。

（3）与卫星反演下行短波辐射、云光学厚度和云有效半径数据对比表明，在雨区模式模拟的下行短波辐射偏差为负，这是由于模式模拟的雨区光学厚度偏小、云有效半径偏大造成的，也表明模式模拟雨区云水、云冰含量偏小。

（4）在降水区域，模式模拟的大气可降水量与 GPS 观测的差值均为负，其中阳新和嘉鱼的模拟偏差分别达到 -26.25 mm 和 -29.58 mm。这表明模式模拟的降水量偏小与初始场水汽偏低有关。

极端降水的模拟误差是热力、动力和云物理综合作用的结果，以往研究只从某一个方面进行评估（如云微物理过程）来分析模拟降水误差来源，后续可在本文研究方法的基础上通过结合多种观测资料（云雷达、双偏振雷达等观测资料）和微波亮温模拟等进一步查找极端降水模拟的误差来源，为后续模拟极端降水评估与改进提供借鉴。

参考文献：

- 陈靖, 孙治安, Rikus L, 等, 2015. TJ-WRF 模式对天津地区暴雨和台风个例亮温检验[J]. 气象与环境学报, 31(5): 1-8. Chen J, Sun Z A, Rikus L, et al, 2015. Validation of brightness temperature on cases of forecasting torrential rainstorm and typhoon by TJ-WRF model[J]. J Meteor Environ, 31(5): 1-8 (in Chinese).
- 杜如意, 宋雨佳, 赵传湖, 等, 2024. 1961—2020 年长江下游地区夏季降水趋势分析[J]. 大气科学学报, 47(4): 557-569. Du R Y, Song Y J, Zhao C H, et al, 2024. Analysis of summer precipitation trends in the lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2020[J]. Trans Atmos Sci, 47(4): 557-569 (in Chinese).
- 范旭燕, 李跃清, 2022. 夏季青藏高原热源对下游降水影响的研究进展[J]. 高原山地气象研究, 42(4): 60-66. Fan X Y, Li Y Q, 2022. Research progress of the influence of heat sources on the Tibetan Plateau in summer on downstream precipitation[J]. Plateau Mt Meteor Res, 42(4): 60-66 (in Chinese).
- 高丽, 李建平, 2013. 非绝热加热对大气局地扰动位能的影响和机理[J]. 地球物理学报, 56(10): 3255-3269. Gao L, Li J P, 2013. Impacts and mechanism of diabatic heating on atmospheric perturbation potential energy[J]. Chin J Geophys, 56(10): 3255-3269 (in Chinese).
- 林文实, 孟金平, 蒙伟光, 等, 2009. 华北暴雪的云微物理参数化方案的比较模拟[J]. 气象科学, 29(2): 150-156. Lin W S, Meng J P, Meng W G, et al, 2009. Numerical simulation about a heavy snowfall event in north China: the sensitivity of cloud microphysical parameterization schemes[J]. J Meteor Sci, 29(2): 150-156 (in Chinese).
- 李红莉, 张文刚, 付志康, 等, 2017. 一次暴雨过程的 LAPS 分析场与多源观测对比分析[J]. 暴雨灾害, 36(3): 207-216. Li H L, Zhang W G, Fu Z K, et al, 2017. Comparative study on LAPS analysis fields and multi-source observations in a heavy rain event[J]. Torrential Rain Disaster, 36(3): 207-216 (in Chinese).
- 马悦, 信飞, 卢楚翰, 2022. 长江三角洲梅汛期降水与大气环流季节内演变的关系及延伸期预报[J]. 气象学报, 80(2): 190-204. Ma Y, Xin F, Lu C H, 2022. Meiyu in the Yangtze River Delta and its extended-range forecast associated with intraseasonal evolution of atmospheric circulation[J]. Acta Meteor Sin, 80(2): 190-204 (in Chinese).
- 毛志远, 黄彦彬, 付丹红, 等, 2025. WRF 模式不同云微物理方案对海南岛一次飢线过程的数值模拟研究[J]. 气象, 51(3): 298-312. Mao Z Y, Huang Y B, Fu D H, et al, 2025. Numerical simulation of a squall line process in Hainan Island by different cloud microphysical schemes of WRF model[J]. Meteor Mon, 51(3): 298-312 (in Chinese).
- 闵敏, 2021. 基于 MODIS 的风云 4A 和日本葵花 8 云检测产品比较[C]//第一届全国碳中和与绿色发展大会. 深圳: 中国环境科学学会. Min M, 2021. Comparison of cloud retrieval products between Fengyun-4a and Himawari-8 from Japan based on MODIS[C]//The First National Conference on Carbon Neutrality and Green Development. Shenzhen: Chinese Society for Environmental Sciences.
- 王丹, 余贞寿, 2023. 公里尺度分辨率 WRF 模拟梅雨暴雨对积云对流参数化的敏感性试验研究[J]. 大气科学, 47(6): 1876-1890. Wang D, Yu Z S, 2023. Effect of cumulus parameterization schemes on the high-resolution numerical simulation of heavy Meiyu front rainfall events[J]. Chin J Atmos Sci, 47(6): 1876-1890 (in Chinese).
- 王艳杰, 2009. 2007年7月7-8日梅雨锋强降水过程云雨结构的分析与模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang Y J, 2009. Simulation and analysis on cloud and rain structure during a strong Mei-yu front rain process from July 7th to 8th in 2007[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 徐晓齐, 衡志伟, 李跃清, 等, 2024. 云微物理参数化的改进及其对川藏铁路沿线降水的模拟优势. 中国科学: 地球科学, 54(3): 874-891. Xu X, Heng Z, Li Y, et al, 2024. Improvement of cloud microphysical parameterization and its advantages in simulating precipitation along the Sichuan-Xizang Railway. Science China Earth Sciences, 67(3): 856-873.
- 姚秀萍, 闫丽朱, 张硕, 2019. 大气非绝热加热作用的研究进展与展望[J]. 气象, 45(1): 1-16. Yao X P, Yan L Z, Zhang S, 2019. Research progresses and prospects of atmospheric diabatic heating[J]. Meteor Mon, 45(1): 1-16 (in Chinese).
- 余洋, 万蓉, 付志康, 等, 2024. 基于 GNSS 水汽和地面假相当位温观测的短时强降水阈值预报方法研究[J]. 气象, 50(5): 603-615. Yu Y, Wan R, Fu Z K, et al, 2024. Development of a threshold prediction model for short-time severe precipitation based on GNSS-derived PWV and pseudo-equivalent temperature[J]. Meteor Mon, 50(5): 603-615 (in Chinese).

371 杨雅涵, 翟盘茂, 周佰铨, 2024. 基于 SOM 的长江流域持续性强降水过程典型环流的客观分型[J]. 气象学报, 82(5): 632-644. Yang Y H, Zhai P M, Zhou
372 B Q. 2024. SOM-based circulation classification for persistent heavy precipitation processes in the Yangtze river basin[J]. Acta Meteor Sin, 82(5): 632-644, (in
373 Chinese).

374 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(2): 238-249. Yin J F, Wang D H,
375 Zhai G Q. 2014. A study of characteristics of the cloud microphysical parameterization schemes in mesoscale models and its applicability to China[J]. Adv
376 Earth Sci, 29(2): 238-249 (in Chinese).

377 宇婧婧, 沈艳, 潘咏, 等, 2013. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报, 24(5): 544-553. Yu J J, Shen Y, Pan Y, et al, 2013.
378 Improvement of satellite-based precipitation estimates over China based on probability density function matching method[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 544-
379 553 (in Chinese).

380 钟倩媚, 马静, 王璐, 2023. 2016 与 2020 年江淮流域梅雨期降水准双周振荡特征的对比分析[J]. 气象学报, 81(2): 235-257. Zhong Q M, Ma J, Wang L,
381 2023. Biweekly oscillation of the Meiyu-season precipitation in 2016 and 2020 over the Yangtze-Huaihe river basin: a comparative analysis[J]. Acta Meteor
382 Sin, 81(2): 235-257 (in Chinese).

383 庄照荣, 田伟红, 陈雨潇, 等, 2025. 青藏高原观测对 2020 年长江中下游地区梅雨降水过程预报的影响[J]. 大气科学学报, 48(2): 217-228. Zhuang Z R,
384 Tian W H, Chen Y X, et al, 2025. Impact of Qinghai-Xizang Plateau observations on the forecasting of Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze
385 River in 2020[J]. Trans Atmos Sci, 48(2): 217-228 (in Chinese).

386 张萍萍, 孙军, 车钦, 等, 2018. 2016 年湖北梅汛期一次极端强降雨的气象因子异常特征分析[J]. 气象, 44(11): 1424-1433. Zhang P P, Sun J, Che Q, et al,
387 2018. Analysis on abnormal characteristics of meteorological factors during an extremely heavy rainfall in 2016[J]. Meteor Mon, 44(11): 1424-1433 (in
388 Chinese).

389 Biswasharma R, Umakanth N, Pongener I, et al, 2024. Sensitivity analysis of cumulus and microphysics schemes in the WRF model in simulating Extreme
390 Rainfall Events over the hilly terrain of Nagaland[J]. Atmos Res, 304: 107393.

391 Bessho K, Date K, Hayashi M, et al, 2016. An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites[J]. J Meteor Soc
392 Jpn Ser II, 94(2): 151-183.

393 Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al, 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models[J]. Science,
394 245(4917): 513-516.

395 Cui C G, Dong X Q, Wang B, et al, 2021. Phase two of the integrative monsoon frontal rainfall experiment (IMFRE-II) over the middle and lower reaches of
396 the Yangtze river in 2020[J]. Adv Atmos Sci, 38(3): 346-356.

397 Chen Y L, Zhang A Q, Zhang Y H, et al, 2020. A heavy precipitation event in the Yangtze River Basin led by an eastward moving Tibetan Plateau cloud
398 system in the summer of 2016[J]. J Geophys Res Atmos, 125(15): e2020JD032429.

399 Deng L, Bao X W, Geresdi I, et al, 2025. Previously neglected effects of strong horizontal winds on raindrop collisions in tropical cyclones[J]. Geophys Res
400 Lett, 52(8): e2025GL115535.

401 Galligani V S, Wang D, Alvarez Imaz M, et al, 2017. Analysis and evaluation of WRF microphysical schemes for deep moist convection over south-eastern
402 South America (SESA) using microwave satellite observations and radiative transfer simulations[J]. Atmos Meas Tech, 10(10): 3627-3649.

403 Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

404 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049, doi: 10.1002/qj.3803.

405 IPCC, 2023. Climate change 2023: synthesis report[R]. Cambridge: IPCC.

406 Johnson, B T, C Dang, P Stegmann, et al, 2023. The Community Radiative Transfer Model (CRTM): community-focused collaborative model development
407 accelerating research to operations[J]. Bull Amer Meteor Soc, 104, E1817-E1830.

408 Lin L M, Yuan H L, Bao X W, et al, 2022. Evaluation of the raindrop size distribution representation of microphysics schemes in typhoon Lekima using
409 disdrometer network observations[J]. Atmos Res, 278: 106346.

410 Luo Q, Wu Y L, 2025. Evaluation of cloud microphysics for all-sky radiance simulation during two typical heavy rainfall events in South China[J]. J Trop
411 Meteor, 31(2): 178-196.

412 Luo S, Sun Z A, Zheng X G, et al, 2016. Evaluation of ACCESS model cloud properties over the Southern Ocean area using multiple-satellite products[J].
413 Quart J Roy Meteor Soc, 142(694): 160-171.

414 Li W W, Zhang F, Shi Y N, et al, 2020. Efficient radiative transfer model for thermal infrared brightness temperature simulation in cloudy atmospheres[J]. Opt

Express, 28(18): 25730-25749.

Mekawy M, Saber M, Mekhaimar S A, et al, 2023. Evaluation of WRF microphysics schemes performance forced by reanalysis and satellite-based precipitation datasets for early warning system of extreme storms in hyper arid environment[J]. Climate, 11(1): 8.

Mwageni D G, Wang S Z, Assenga G T, 2025. Evaluating the performance of land surface models and microphysics schemes on simulation of an extreme rainfall event in Tanzania using the weather research and forecasting model[J]. Atmos Climate Sci, 15(1): 42-71.

Sun Z A, Rikus L, 2004. Validating model clouds and their optical properties using geostationary satellite imagery[J]. Mon Wea Rev, 132(8): 2006-2020.

Tiwari U, Bush A B G, 2025. Significance of cloud microphysics and cumulus parameterization schemes in simulating an extreme flood-producing precipitation event in the central Himalaya[J]. Atmosphere, 16(3): 298.

Tong M J, Zheng Z H, Fu Q, 2021. Characteristics of Meiyu seen from multiple observational analyses and reanalyses[J]. Earth Space Sci, 8(4): e2021EA001647.

Wolfe D E, Gutman S I, 2000. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: network design and results[J]. J Atmos Ocean Technol, 17(4): 426-440.

Xu G R, Zhang W G, Wan X, et al, 2021. Cloud occurrence frequency and cloud liquid water path for non-precipitating clouds using ground-based measurements over central China[J]. J Atmos Solar Terr Phys, 215: 105575.

Yao B, Liu C, Yin Y, et al, 2020. Evaluation of cloud properties from reanalyses over East Asia with a radiance-based approach[J]. Atmos Meas Tech, 13(3): 1033-1049.

Yao B, Liu C, Yin Y, et al, 2018. Radiance-based evaluation of WRF cloud properties over East Asia: Direct comparison with FY-2E observations[J]. J Geophys Res Atmos, 123(9): 4613-4629.

Zhang C Y, Wu M W, Luo Y L, 2025. Evaluation of WRF-based convection-permitting ensemble forecasts for an extreme rainfall event in East China during the mei-yu season[J]. Adv Atmos Sci, 42(10): 2102-2124.

Zhang G S, Mao J Y, Wu G X, et al, 2021. Impact of potential vorticity anomalies around the eastern Tibetan Plateau on quasi-biweekly oscillations of summer rainfall within and south of the Yangtze Basin in 2016[J]. Climate Dyn, 56(3): 813-835.

Zhao Y, Park C, Son S W, 2022. Importance of diabatic heating for the eastward-moving heavy rainfall events along the Yangtze River, China[J]. J Atmos Sci, 80(1): 151-165.

Zou X, Zhuge X, Weng F, 2016. Characterization of bias of advanced Himawari imager infrared observations from NWP background simulations using CRTM and RTTOV[J]. J Atmos Ocean Technol, 33(12): 2553-2567.

Zhao X, Lin Y L, Luo Y L, et al, 2021. A double-moment SBU-YLIN cloud microphysics scheme and its impact on a squall line simulation[J]. J Adv Model Earth Syst, 13(11): e2021MS002545.