

热带岛屿地区不同云微物理方案对强降水模拟性能研究

——以海南岛为例

焦悦^{1,2}, 黄诗彤^{1,2}, 邢益航^{1,2}, 吴晶³, 尚明⁴, 施晨晓⁵, 贺音⁶,
白磊^{1,2,7*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²海南大学, 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海南 海口

³兰州中心气象台, 甘肃 兰州

⁴河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

⁵海南省气象信息中心, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

⁶陕西省气象局, 陕西省气象信息中心, 陕西 西安

⁷海南智慧低空气象大数据研究中心, 海南 海口

收稿日期: 2025年4月7日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月16日

摘要

在全球气候变暖加剧极端降水的背景下, 热带岛屿地区的精准降水预报对防灾减灾和可持续发展具有关键意义。海南岛作为典型热带季风区, 其强降水过程受多重天气系统影响, 但现有研究多聚焦于中高纬度地区, 针对热带岛屿云微物理机制的认知仍存在显著缺口。本研究基于WRF V4.2模式, 选取12类典型强降水事件(含台风、季风和对流系统), 系统评估Kessler、Lin、WSM3/5/6、Ferrier和Thompson共7种云微物理方案在海南岛的适用性, 结合地面观测、CMPAS融合降水产品和GSMaP遥感数据, 通过相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和Kling-Gupta效率系数(KGE)等多维度指标验证模拟性能。研究发现: (1) 方案表现呈现显著时空分异性, Ferrier方案在秋季降水模拟中相关系数最高($R = 0.77$), 而Thompson方案在误差控制($RMSE = 1.67 \text{ mm/h}$)和台风降水峰值捕捉(20 mm/h)方面最优; (2) Thompson (MP8)和WSM6方案(MP6)在降水过程模拟中展现出较高的综合可靠性; (3) 简单暖云方案Kessler在3月季风转换前期($R = 0.53$)和9月残余台风降水($R = 0.63$)中表现突出, 揭示了热带降水暖云主导机制与复杂冰相参数化的适应性矛盾; (4) 提出季节-天气型动态方案配置策略: 季风转换前期(3~4月)采用Kessler方案(MP1), 主汛期(5~9月)优选Thompson方案(MP8), 台风中后期(10~11月)切换至WSM3方案(MP3)。

关键词

敏感性分析, ERA5再分析数据, CMPAS数据融合, 预报偏差, 时空分布, 模型分辨率

*通讯作者。

Study on the Performance of Different Cloud Microphysics Schemes in Simulating Heavy Precipitation over Tropical Islands

—A Case Study of Hainan Island

Yue Jiao^{1,2}, Shitong Huang^{1,2}, Yihang Xing^{1,2}, Jing Wu³, Ming Shang⁴, Chenxiao Shi⁵, Yin He⁶, Lei Bai^{1,2,7*}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

²Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Hainan University, Haikou Hainan

³Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu

⁴School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

⁵Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Hainan Meteorological Information Center, Haikou Hainan

⁶Shaanxi Meteorological Information Center, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an Shaanxi

⁷Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Center, Haikou Hainan

Received: Apr. 7th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 16th, 2025

Abstract

In the context of global warming exacerbating extreme precipitation, accurate precipitation forecasting in tropical island regions is crucial for disaster prevention, mitigation, and sustainable development. As a representative tropical monsoon region, Hainan Island experiences heavy precipitation influenced by multiple weather systems. However, existing studies predominantly focus on mid- and high-latitude regions, leaving significant gaps in the understanding of cloud microphysical mechanisms over tropical islands. This study employs the WRF V4.2 model to evaluate the applicability of seven cloud microphysics schemes—Kessler, Lin, WSM3/5/6, Ferrier, and Thompson—by selecting 12 typical heavy precipitation events, including typhoons, monsoons, and convective systems. Using ground-based observations, the CMPAS merged precipitation product, and GSMaP satellite data, the simulation performance is validated through multiple metrics, including correlation coefficient (R), root mean square error (RMSE), and Kling-Gupta efficiency (KGE). The key findings are as follows: (1) The performance of the schemes exhibits significant spatiotemporal variations. The Ferrier scheme achieves the highest correlation coefficient in autumn precipitation simulations ($R = 0.77$), while the Thompson scheme excels in error control ($RMSE = 1.67 \text{ mm/h}$) and capturing typhoon precipitation peaks (20 mm/h); (2) The Thompson (MP8) and WSM6 (MP6) schemes demonstrate strong overall reliability in simulating rainfall processes; (3) The simple warm-rain Kessler scheme performs particularly well during the pre-monsoon transition in March ($R = 0.53$) and residual typhoon rainfall in September ($R = 0.63$), revealing a mismatch between warm-cloud-dominated tropical rainfall and overly complex ice-phase parameterizations; (4) A season-weather-type dynamic scheme configuration strategy is proposed: use the Kessler scheme (MP1) during the pre-monsoon transition period (March-April), adopt the Thompson scheme (MP8) during the main rainy season (May-September), and switch to the WSM3 scheme (MP3) in the late typhoon season (October-November).

Keywords

Sensitivity Analysis, ERA5 Reanalysis Data, CMPAS Data Merging, Forecast Bias, Spatiotemporal

Distribution, Model Resolution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变率加剧和极端天气事件频发背景下,强降水预报研究日益重要。在热带季风区,强降水事件具有高发性和短时高强度特征,易诱发次生灾害。海南岛位于我国最南端,其特殊的地理位置和海洋性气候特征,使局地强降水成为该区域最具破坏性的天气过程之一。提高海南强降水预报能力对防灾减灾和区域发展具有重要现实意义。

数值天气预报模式作为研究和预报极端天气过程的重要工具,其预报效果在很大程度上依赖于物理过程参数化方案的合理配置。云微物理过程是湿物理过程的核心,描述了大气中水汽、云水等水成物之间的转化演变,其合理预报不仅影响降水分布,还对上升运动和热力效应有重要反馈作用。WRF 模式提供的云微物理参数化方案包括:暖云方案(如 Kessler 方案[1])、单参数方案(如 Lin 方案[2]、WSM3/5/6 方案[3] [4])、双参数方案(如 Morrison 方案[5] [6]、WDM5/6 方案[7]、Thompson 方案[8] [9])和多参数方案(如 CAM5.1 方案[10])等,这些方案在复杂程度和过程描述上存在差异。

国内外学者针对不同天气系统已开展了大量云微物理方案对比研究。相关研究表明 Thompson 方案和 Morrison 2-moment 方案在模拟台风“安比”的强降水特征方面具有明显优势[11]。针对华北“7.21”特大暴雨的数值试验结果显示,NSSL 系列方案对不同等级降水的模拟效果最为突出[12]。研究发现,12 km 分辨率配合 Lin 方案的组合在华中暴雨系统预报方面表现最优[13]。局地对流系统的模拟结果证实,双参数方案较单参数方案具有优势[14]。NSSL 2-moment 方案在高原切变线强降水的预报能力方面表现最佳[15]。针对华西秋雨系统的研究显示,Ferrier 和 WSM3 方案对降水过程具有较好的模拟能力[16]。Lin 方案在海雾模拟研究中表现最优[17] [18]。对 WRF 模式云微物理方案的系统检验显示,Lin 方案对冰相粒子和强降水的预报效果较好[19] [20]。单、双参数方案的对比研究显示,不同方案在模拟云的宏观特征(如云量、云厚)和微观特征(如水成物粒径、含水量)方面表现不同,各具优势[21] [22]。这些研究为改进数值模式预报能力提供了重要参考。然而,现有研究主要集中在中高纬度地区,对热带岛屿地区强降水过程的云微物理机制研究相对不足。

目前,不同区域和类型的极端天气预报中云微物理方案的系统性对比研究已有较多成果,但针对海南地区强降水事件的模拟研究相对不足。作为热带岛屿,海南地区强降水过程受季风、台风及局地对流等多重因素影响,具有发展迅速、降水跨度大等特点。与华中、华北等地区相比,海南独特的海陆交互作用背景使其云物理及降水过程呈现出不同特征,这些特征尚未得到充分研究。本研究拟选取海南典型强降水个例,采用 WRF 模式对比分析多种云微物理方案的模拟能力,评估各方案在热带降水预报中的适用性与局限性,探讨其物理机制,以期为海南地区强降水预报业务提供参考,并为改进 WRF 模式云微物理方案提供科学依据。

2. 方法与数据

2.1. 研究区域与时段

本研究选取中国海南岛为研究区域(图 1)。海南岛位于南海北部(18°10'N~20°10'N, 108°37'E~111°03'E),

是我国最南端的热带岛屿，地处热带北缘，属于热带季风气候区。该地区四周环海，地形呈中部高、四周低的特征，这种复杂的地形特征与海洋环境的相互作用，使得该地区降水类型复杂多样。受季风环流、热带气旋等天气系统的影响，海南岛年平均降水量约为 1639 毫米，但降水时空分布不均，极易出现旱涝灾害。

研究时段选取 2017 年海南雨季(4 月至 11 月)。该时段内，海南岛经历了多次强降水天气过程，尤其叠加来自西北太平洋的热带气旋影响，降水事件频发，具有雨量大、持续时间长的特点。

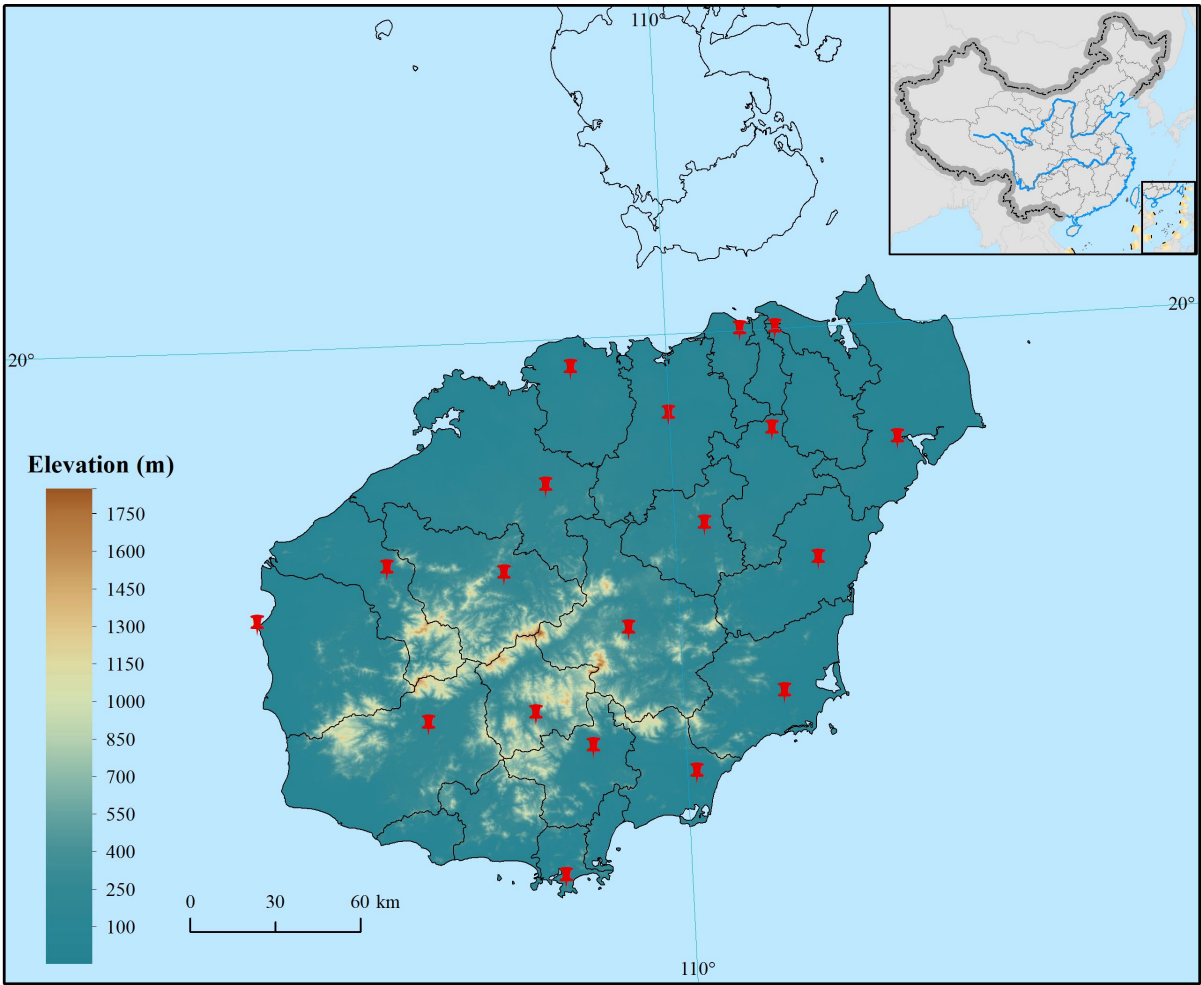


Figure 1. Study area location and meteorological station distribution map (Approval No. GS (2019)1822)

图 1. 研究区位置及气象站点分布图(审图号：GS(2019)1822 号)

2.2. 典型降水事件选取

基于海南省气象局提供的降水观测资料和天气分析报告，本研究筛选出 12 个具有代表性的强降水过程(表 1)。这些个例可分为以下几类：

(a) 热带气旋降水：包括台风“天鸽”、“杜苏芮”、“卡努”和“海葵”引发的风雨天气。其中“海葵”残余环流与弱冷空气共同作用，导致海口市出现暴雨到大暴雨，3 小时降水量达 191.7 毫米。

(b) 中尺度对流系统降水：如 3 月 31 日万宁市的龙卷风天气，以及 5 月 24 日海口市出现的短时强降水，6 小时单站降水量达 95.8 毫米。

- (c) 季风性降水: 如 5 月 20~21 日受季风环流影响的全岛性降水, 以及 6 月中旬的持续性雷阵雨天气。
- (d) 复合系统降水: 包括热带扰动与季风共同作用、冷空气南下与低空急流和东风波动相互配合等天气系统造成的区域性强降水。如 7 月中旬受热带扰动和季风共同影响, 局地降水量达 100~200 毫米。

Table 1. Typical precipitation events in Hainan in 2017 and simulation experiment design
表 1. 2017 年海南典型降水事件及模拟试验设计

案例编号	时间范围	天气系统	降水分布特征	最大降水量 (mm/h)
MC1	3.29~4.2	局地强对流系统	局地强对流	-
MC2	5.18~5.23	季风环流	全岛范围性降水	-
MC3	5.22~5.27	中尺度对流系统	海口市局地强降水	95.8 (6h)
MC4	6.11~6.16	季风环流	全岛持续性降水	-
MC5	7.12~7.17	热带扰动与季风耦合系统	区域性强降水	100~200
TC1	8.22~8.27	台风“天鸽”	东北部暴雨到大暴雨	100~120
TC2	9.11~9.16	台风“杜苏芮”	16 个市县 81 个乡镇强降雨	-
MC6	10.3~10.8	低空偏东急流	8 个市县 48 个乡镇强降水	214.7
TC3	10.14~10.19	台风“卡努”	12 个市县 116 个乡镇强降雨	-
MC7	11.4~11.9	东风波动与冷空气系统	4 个市县暴雨	-
TC4	11.12~11.17	台风“海葵”残余环流与冷空气	海口市大部分地区暴雨到大暴雨	191.7 (3h)
MC8	11.17~11.22	冷空气与偏东急流系统	5 个市县强降雨	-

注: 191.7 (3h)等括号内为降水累计时间; 未注明累计时间的为单小时最大降水量。

选取的个例在时间分布上覆盖了海南岛主要的降水季节, 在空间分布上涵盖了岛内不同地理区域, 在降水强度上包含了从小雨到大暴雨的不同等级。这些个例既包括台风等天气尺度系统造成的大范围持续性降水, 也包括中尺度对流系统引发的局地性暴雨; 既有冷暖空气交汇引起的锋面降水, 也有热带扰动导致的对流性降水, 因此具有较强的代表性和典型性, 可为深入研究海南岛不同类型降水系统的微物理特征提供基础。

2.3. 数据来源

本研究采用三类观测和全球大气再分析数据用于模式初始化、驱动和验证。地面观测资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 主要包括海南岛 19 个国家级气象站点的逐时常规气象要素观测数据, 如气压、气温、相对湿度、风向风速和降水量等。地面观测资料主要用于模式模拟结果的定量评估。模式初始场和边界场采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析资料, 该数据集涵盖 1940 年至今的全球大气再分析资料, 包含温度、相对湿度、位势高度和风场等多个要素。为了对模式的降水模拟效果进行精细化评估, 本研究还引入了由国家气象信息中心研制的 CMPAS (China Merged Precipitation Analysis System)降水融合产品。该产品综合利用地面观测、天气雷达和卫星遥感资料, 通过先进的融合算法生成空间分辨率为 1 km 的逐小时降水格点数据, 能够较好地反映降水的空间分布特征和时间演变规律。在降水模拟过程评估中, 我们将模式输出的降水场与国家气象信息中心 CMPAS 降水产品进行对比, 并利用地面观测站点的实测降水量进行定量验证。通过多源数据的综合应用, 可以全面评估不同云微物理方案对海南岛强降水事件的模拟能力。

2.4. 实验方法与设计

本研究采用 WRF (Weather Research and Forecasting) V4.2 版本对海南岛强降水事件进行数值模拟研究。WRF 模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)、国家环境预报中心(NCEP)等机构于 1997 年联合开发的新一代中尺度数值预报模式和同化系统。该模式以中尺度模式 MM5 的非静力动力框架为基础,集成了多种物理过程参数化方案,在全球 160 多个国家得到广泛应用。

模拟试验使用三类主要数据:海南岛 19 个国家级气象站点的地面观测资料(来源于中国气象数据网);欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 再分析资料,用于提供模式初始场和边界条件;以及国家气象局研制的 CMPAS (China Merged Precipitation Analysis System)降水产品,该产品融合了地面站点、天气雷达和卫星资料,具有 1 km 的空间分辨率,用于模式结果的评估验证。

考虑到研究区域的地理特征和天气系统尺度,模式采用单层网格设置,网格中心位于 19.05°N, 109.05°E,覆盖整个海南岛及其周边海域。水平分辨率为 5 km,网格点数为 150 (经向) × 150 (纬向)。垂直方向设置 33 层,模式顶层气压为 50 hPa,时间积分步长为 90 s。本研究重点考察不同云微物理方案对海南岛强降水的模拟效果,选取了 7 种具有代表性的方案进行对比:Kessler 方案(MP1,仅考虑暖云过程),Lin 方案(MP2,包含完整的冷云过程),WSM3 方案(MP3,简单高效的 3 类水凝物方案),WSM5 方案(MP4,改进的 5 类水凝物方案),Ferrier 方案(MP5,业务预报常用方案),WSM6 方案(MP6,完整的水凝物单参数方案)和 Thompson 方案(MP8,先进的混合相态方案)。其他物理过程采用 Kain-Fritsch 积云对流方案、YSU 行星边界层方案、Noah 陆面过程方案、RRTM 长波辐射方案以及 Dudhia 短波辐射方案。每个个例进行 120 小时积分,其中前 12 小时作为模式预热时段。

2.5. 统计指标

本文通过计算相关系数(Correlation coefficient, R)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以及 Kling-Gupta 效率系数(Kling-Gupta Efficiency, KGE)对模拟出的降水量进行检验。

相关系数(R)采用的是斯皮尔曼相关系数(spearman),该指标与均方根误差(RMSE)主要用于测试模拟值与实测值之间的偏差关系等。KGE 是对纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)的扩展,基于预测和观测之间的相关性、标准差之比以及均值之比来反映模拟数据与实测值之间的趋势、变异性和平均状态。本文统计指标由下式得出。

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_Y}{\sigma_V}, \beta = \frac{\bar{Y}}{\bar{V}}$$

其中, R 为站点观测值与模型模拟值的相关系数, σ_Y 和 $\bar{Y}$ 为气象站点数据降水均方差和平均值; σ_V 和 $\bar{V}$ 为模拟值提取到气象站点得到的降水均方差和平均值。KGE 的取值范围为 $(-\infty, 1]$, 其中 $KGE = 1$ 表示模拟结果与观测数据完全一致,效果最佳; $KGE > 0.5$ 通常被认为是可接受的模拟结果,表明模型在一定程度上能够反映观测数据的趋势和变异性。

3. 结果

3.1. 站点尺度统计对比

从图 2 热图分析结果可以看出,不同云微物理方案在海南岛不同时段降水模拟表现出显著差异。MP5 (Ferrier)方案展现出最优的整体模拟效果,平均相关系数达到 0.50 ± 0.14 。之后是 MP6 (WSM6)方案

和 MP4 (WSM5)方案, 平均相关系数分别为 0.48 ± 0.15 和 0.46 ± 0.16 。在时间上, 各方案的模拟能力呈现明显的季节性特征。在季风转换前期(3~5 月中旬)和台风中后期(10~11 月), 大多数云微物理方案都表现出较好的模拟效果。在 10 月 14 日案例过程, MP5 (Ferrier)方案的相关系数高达 0.77。而在主汛期(5~8 月)期间, 所有方案的模拟效果普遍偏低, 其中 7 月 12 日案例过程的模拟效果最差, 即使是表现最好的 MP5 方案, 相关系数也仅为 0.36。然而, MP1 (Kessler)方案虽然是最简单的暖云方案, 但在某些特定时段表现突出, 如 3 月 29 日案例过程(0.53)和 9 月 11 日案例过程(0.63)的相关系数较高。相比之下, 在 5 月 22 日案例过程和 6 月 11 日案例过程, MP2 和 MP3 方案的相关系数为 0.00, 显示这些方案在特定条件下可能完全失效。

总体上, 没有一个云微物理方案能在雨季所有时段都表现最佳。MP5 (Ferrier)方案虽然具有最高的平均相关系数和较好的稳定性, 但在汛期前中期(5~6 月)效果不好。因此, 在实际应用中, 建议根据模拟时段的特点选择合适的方案: 3 月和 9 月可选择 MP1 (Kessler)方案, 汛期前中期(5~6 月)适合使用方案 MP8 (Thompson), 台风中后期(10~11 月)则以 MP5 (Ferrier)方案为佳。

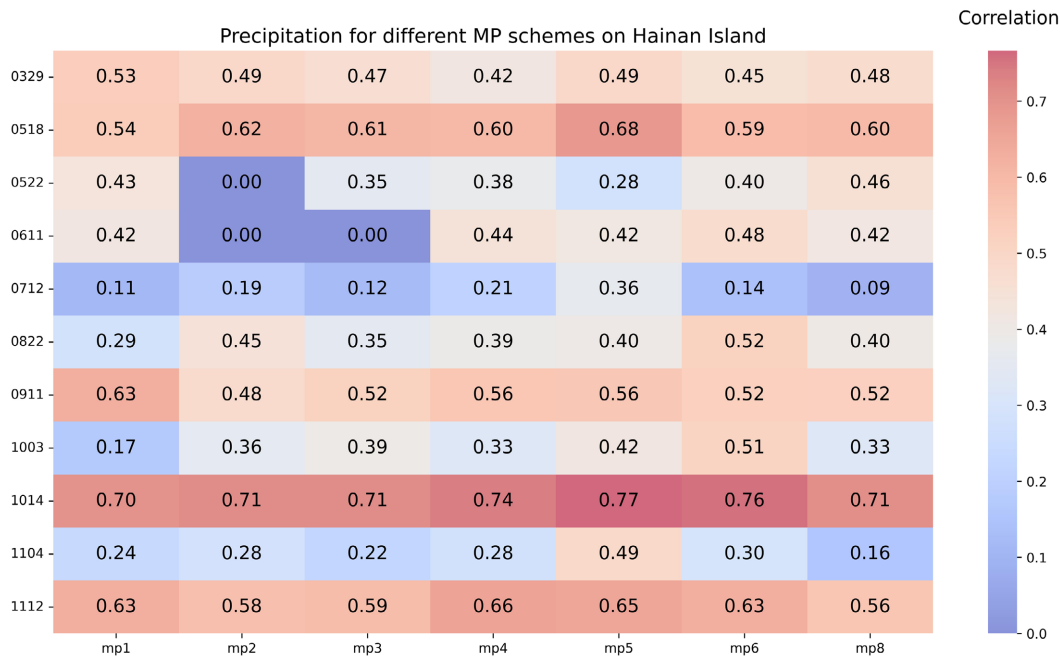


Figure 2. Statistical diagram of correlation coefficients between simulated values and observed values for seven cloud microphysics schemes in rainy season cases
图 2. 七种云微物理方案在雨季案例的模拟值与观测值的相关系数统计图

图 3 为海南岛不同云微物理方案与实测值之间的均方根误差。研究结果显示, Thompson 方案(MP8)和 Kessler 方案(MP1)虽然复杂度差异显著, 但均取得了最优的平均模拟效果(RMSE 为 1.67 mm/h)。总体上, 非汛期(3 月和 11 月)各方案模拟误差普遍较小(RMSE 在 0.7~1.3 mm/h 之间), 而在汛期(5~10 月)误差明显增大, 特别是在台风影响期间, 如 8 月份 Ferrier 方案(MP5)出现了 8.54 mm/h 的极端误差值。WSM 系列方案(MP3、MP4 和 MP6)的表现证实, 增加水凝物类别并不必然提升模拟精度。从业务应用角度看, Kessler 方案(MP1)和 Thompson 方案(MP8)展现出优异的适应性和稳定性。Ferrier 方案(MP5)虽然在某些时段表现不佳(最高 RMSE 达 8.54 mm/h), 但其对降水时间演变特征的把握仍有其独特优势。结果表明, 不同云微物理方案的 RMSE 存在差异。其中, Thompson 方案(MP8)和 Kessler 方案(MP1)的误差最小, 分

别为 1.68 ± 0.63 mm/h 和 1.68 ± 0.71 mm/h。Lin 方案(MP2)、WSM3 方案(MP3)和 WSM6 方案(MP6)次之, RMSE 介于 $1.72 \sim 1.83$ mm/h 之间,而 WSM5 方案(MP4)和 Ferrier 方案(MP5)误差最大,分别为 2.38 ± 1.72 mm/h 和 2.40 ± 2.00 mm/h。而从不同时间来看,3 月和 11 月各个方案均误差较小,方案之间也相差较小,大多处于 $0.7 \sim 1$ 之间,而 5~10 月为海南地区雨季,模拟误差较大,特别是 8 月,出现最大误差 8.54 mm/h。因此,使用 Thompson 方案(MP8)或 Kessler 方案(MP1)模拟海南地区降水较为稳定并且误差较小。

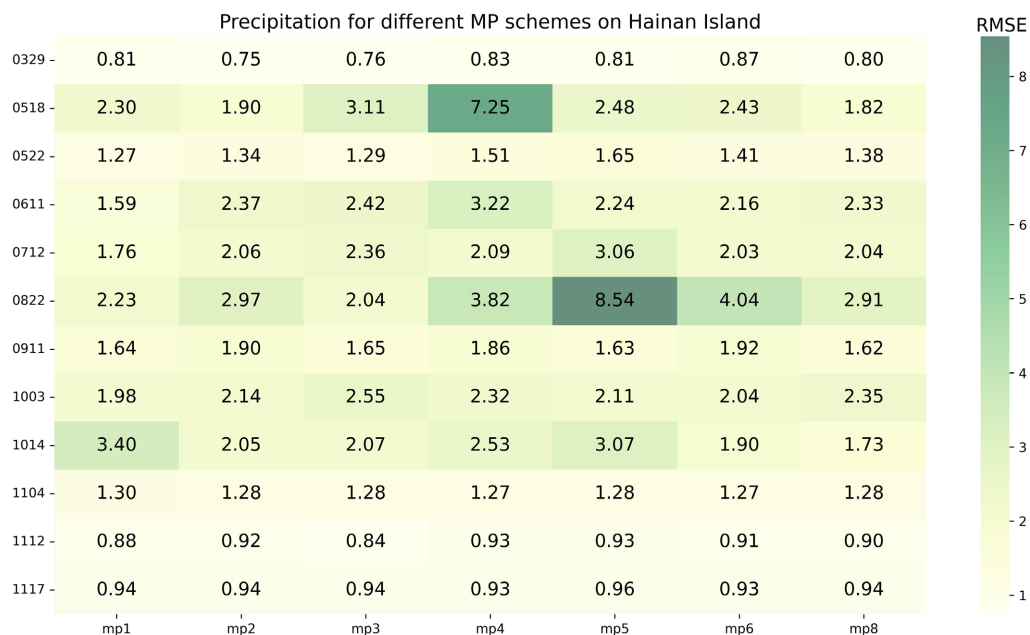


Figure 3. Statistical diagram of root mean square error between simulated values and observed values for seven cloud microphysics schemes in rainy season cases

图 3. 七种云微物理方案在雨季案例的模拟值与观测值的均方根误差统计图

基于 Kling-Gupta 效率指数(KGE)的评估显示,海南地区降水模拟的方案选择呈现显著的时空依赖特征(图 4)。Kessler 方案(MP1)展现出最优的综合性能(平均 KGE 为 -0.45),因为该方案虽然物理过程相对简单,但在热带海洋性气候区仍能取得良好效果。时间序列分析揭示了显著的季节性特征:3 月,各方案普遍表现良好,KGE 值多在 0.5 以上,其中 WSM5 方案(MP4)最优(0.70);而进入汛期(5~10 月)后,模拟效果普遍下降,部分方案甚至出现 KGE 值低至 -9.73 的极端情况(如 8 月 22 日案例过程的 Ferrier 方案(MP5)),相比之下,Kessler 方案(MP1)平均 KGE 优于其他方案,为 -0.69 ± 1.07 。而在台风中后期(10~11 月),Thompson 方案(MP8)由于其先进的混合相态方案表现较好,平均 KGE 为 -0.342 ± 0.32 。这种显著的季节性差异反映了热带降水系统复杂性的时间演变特征。特别值得注意的是,不同方案在特定时段表现出明显的优势期:Thompson 方案(MP8)在台风中后期(10~11 月)表现突出,而在汛期(5~10 月)Kessler 方案(MP1)则表现更佳。

3.2. 多个降水过程对比分析

在图 5 中在 3 月 29 日案例降水过程,所有方案都准确捕捉到双峰降水特征,但普遍高估第一次降水峰值,其中 WSM6 方案(MP6)模拟的降水率接近 4 mm/h,远高于实测的 1.5 mm/h,而对第二次降水峰值则整体偏低,反映出模式在处理强对流云系参数化时存在系统性偏差。在夏季风期间的降水事件中(5 月 18 日、6 月 11 日和 8 月 22 日等),各方案虽然能较好地把握降水趋势,但存在显著的时间提前偏差,

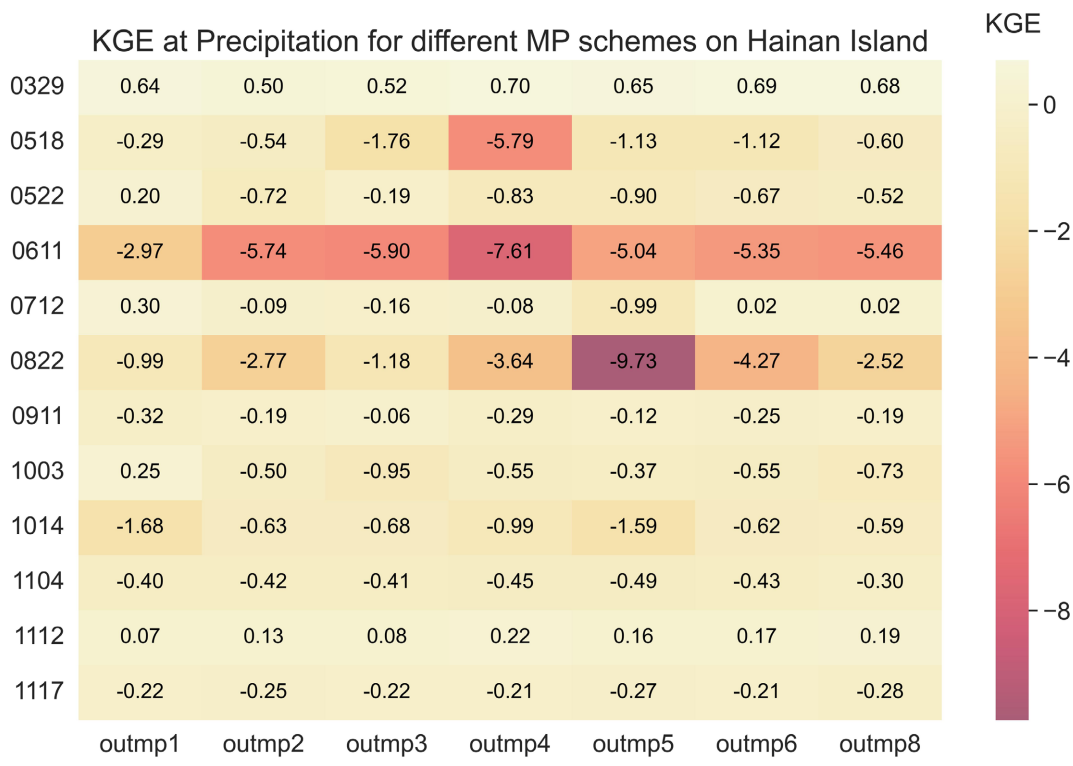


Figure 4. Statistical diagram of Kling-Gupta efficiency (KGE) between simulated values and observed values for seven cloud microphysics schemes in rainy season cases statistics of seven cloud microphysics schemes across 12 time periods

图 4. 七种云微物理方案在雨季案例的模拟值与观测值的 KGE 统计图

特别是在 5 月 22 日的案例中平均提前约 12 小时。值得注意的是，在 5 月 24 日案例过程中，除 Ferrier 方案外，其他方案表现较好，尤其是 Thompson 方案(MP8)成功模拟出接近 20 mm/h 的降水峰值。然而，随着积分时间延长，模式误差逐步累积，如 7 月 12 日事件中，虽然初期模拟结果与观测较为吻合，但最终预测的总降水量达到约 250 mm，显著高于实测值 129.6 mm。在台风“杜苏芮”影响期间(9 月 13~15 日)，特别是 9 月 14 日 22:00 时段，Kessler (MP1)、WSM5 (MP4)、WSM6 (MP6)和 Thompson 方案(MP8)都较好地模拟出约 15 mm/h 的降水强度，展现出在复杂天气系统下的优秀性能。进入台风中后期(10~11 月)，各方案在降水时间预测上较为准确，但存在强度预测偏差，其中 WSM6 方案(MP6)表现出较好的稳定性，而 Kessler 方案(MP1)则随天气系统变化显示出较大波动。总体而言，尽管目前没有任何单一方案能在所有天气情景下保持最优表现，但 Thompson(MP8)和 WSM6 方案(MP6)展现出较高的综合可靠性。多数方案在把握降水总体趋势方面表现尚可，但在定量预测上仍存在 2~5 倍的系统性偏差，这反映了当前云微物理参数化方案在处理多尺度强对流和复杂边界层过程中具有一定的局限性。

3.3. 典型降水过程空间比较

通过对海南地区不同云微物理参数化方案的系统评估表明(图 6)，各方案在模拟降水空间分布特征时呈现出独特的性能特点。以 2017 年 7 月 13 日 17 时的典型降水个例为例，GSMaP 观测数据显示降水主要集中在海南岛东部沿海地区(19°N, 110.3°E 附近)，呈现明显的带状分布特征，单小时最大降水强度达 7 mm 以上。在图中，大多数方案模拟的最大降水强度分布在 4~8 mm 区间，与 GSMaP 观测数据具有一定的可比性。然而，尽管地面观测未记录到降水，GSMaP 反演结果显示该区域存在降水过程，模式模拟结果也再现了这一特征，这可能反映了卫星遥感数据与地面观测在降水探测方面的差异。具体而言，

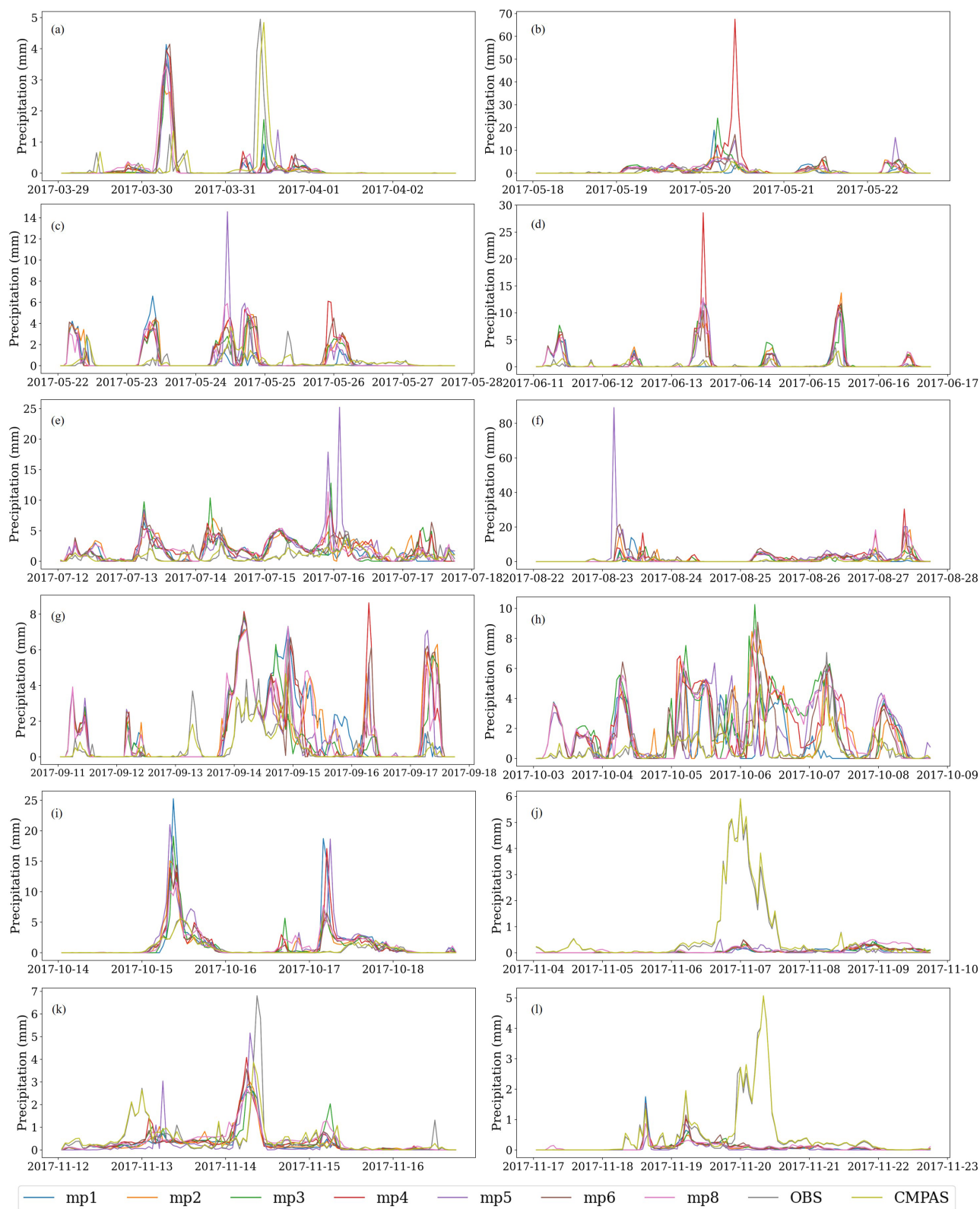


Figure 5. Time variation of the average precipitation amount simulated by seven cloud microphysics schemes and station observations for 12 precipitation events in Hainan in 2017

图 5. 2017 年 12 个案例期间 7 种云微物理方案模拟结果与气象站实际观测值的对比图

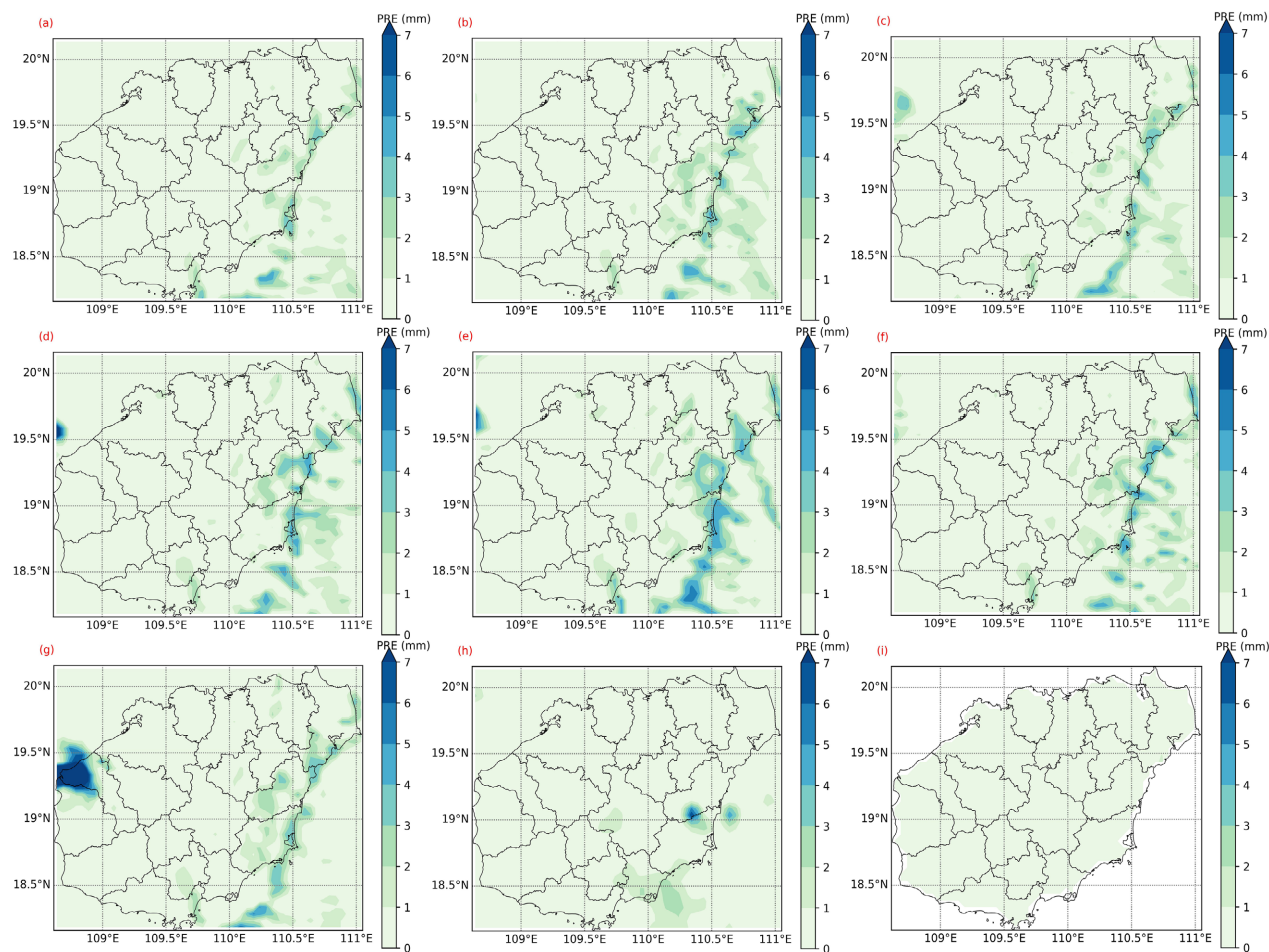


Figure 6. Precipitation simulated by Kessler (a), Lin (b), WSM3 (c), WSM5 (d), Ferrier (e), WSM6 (f), and Thompson (g) schemes, along with precipitation observed by GSMaP (h) and CMPAS (i) in Hainan at 17:00 on July 13, 2017

图 6. 2017 年 7 月 13 日 17 时海南地区 Kessler (a)、Lin (b)、WSM3 (c)、WSM5 (d)、Ferrier (e)、WSM6 (f)、Thompson (g) 方案模拟的降水量和 GSMaP (h)、CMPAS (i) 观测的降水量

Kessler 方案(MP1)表现出最佳的综合性能,其模拟的降水强度分布较为均匀,降水中心强度约为 5 mm,空间分布范围为观测值的 0.8 倍,最接近实际情况。相比之下, Lin 方案(MP2)和 WSM6 方案(MP6)模拟的局地降水强度偏大,最大值超过 8 mm,且呈现出较为剧烈的空间梯度变化,这可能与包含的详细冰相过程参数化有关。从空间结构来看, WSM3 (MP3)和 WSM5 (MP4)方案的表现最为突出,能够较好地再现东部沿海地区的带状降水特征。而 Thompson 方案(MP8)则显示出明显的过度预报特征,其模拟的降水覆盖面积约为实际降水区域的 1.2 倍。Ferrier 方案(MP5)在降水空间连续性方面表现欠佳,倾向于产生更加零散的降水分布型态。值得注意的是,所有方案在模拟降水精细结构时都存在一定程度的平滑效应,特别是在模拟局地强降水中心时表现出明显不足。总体上,在海南这类热带海洋性气候区域,相对简单的云微物理方案(如 Kessler、WSM3)可能比包含复杂冰相过程的方案表现更好,这很可能与该地区降水过程以暖云降水机制为主导有关。

基于对 2017 年 7 月 12~18 日海南地区降水过程的深入分析,我们对不同云微物理方案的模拟性能进行了系统评估(图 7)。通过与 GSMaP 和 CMPAS 观测产品的定量对比,研究揭示了各方案在模拟降水空间分布和强度方面的特征及局限性。观测数据显示,该时段降水主要呈东北-西南走向的带状分布, GSMaP

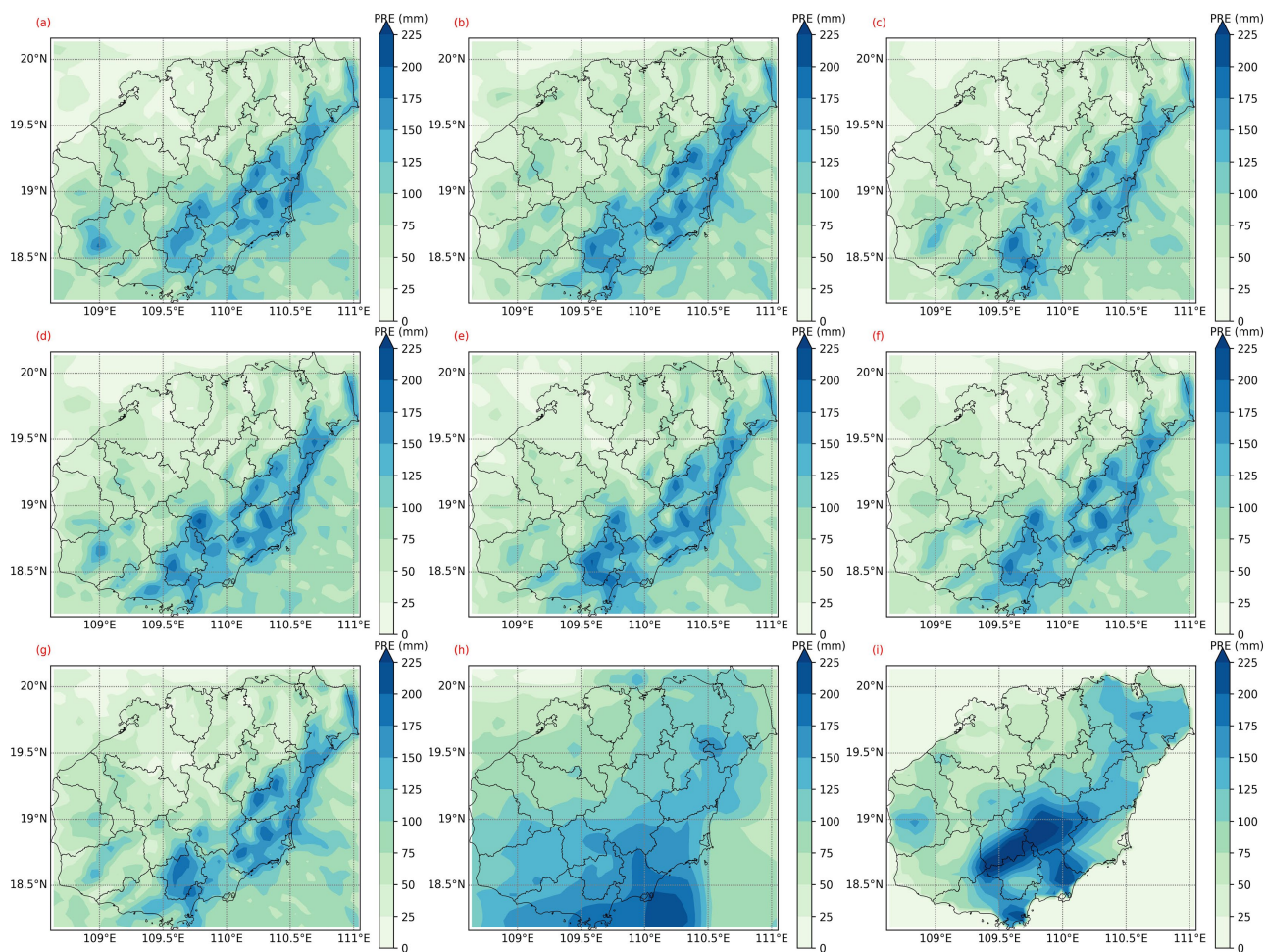


Figure 7. Total precipitation simulated by Kessler (a), Lin (b), WSM3 (c), WSM5 (d), Ferrier (e), WSM6 (f), and Thompson (g) schemes, along with total precipitation observed by GSMaP (h) and CMPAS (i) in Hainan from 00:00 on July 12 to 00:00 on July 18, 2017.

图 7. 2017 年 7 月 12 日 0 时至 7 月 18 日 0 时海南地区 Kessler (a)、Lin (b)、WSM3 (c)、WSM5 (d)、Ferrier (e)、WSM6 (f)、Thompson (g) 方案模拟的总降水量和 GSMaP (h)、CMPAS (i) 观测的总降水量

记录的区域平均降水量为 112 mm，而 CMPAS 在海南岛东南部观测到最大降水中心，降水量超过 225 mm。所有微物理方案都能较好地再现这种带状分布特征，但在定量表现上存在显著差异。WSM3 方案 (MP3) 表现出最佳的综合性能，其模拟的降水中心位置 (18.3°N, 110.1°E) 与观测最为接近，总降水量为 234 mm，虽然仍高于 GSMaP 观测值，但优于其他方案。其他方案的模拟结果普遍在 250~260 mm 之间，平均相对误差超过 130%。从降水强度频率分布来看，Kessler (MP1) 和 WSM3 方案 (MP3) 模拟的强降水 (>50 mm) 面积占比约为 15%，与观测较为接近，而其他方案这一比例普遍高达 20%~25%。在降水空间形态方面，CMPAS 显示的降水带较为集中，具有明显的梯度特征。Kessler (MP1) 和 WSM3 方案 (MP3) 较好地模拟出了这种空间渐变特征，而 Lin (MP2)、WSM5 (MP4)、Ferrier (MP5)、WSM6 (MP6) 和 Thompson (MP8) 等方案则呈现出更为弥散的分布。从物理机制角度分析，WSM3 方案 (MP3) 采用简单的三类水物质 (水汽、云水/云冰、雨水/雪) 分类方案，在热带海洋性气候区域表现较好，这可能是由于过于复杂的冰相过程参数化反而会引入更多不确定性。值得注意的是，模式评估结果可能受到观测数据本身不确定性的影响，这从 GSMaP 和 CMPAS 之间存在的差异可以看出。

4. 讨论

本研究通过 WRF 模式对 2017 年海南岛 12 个典型强降水事件的多维度评估,揭示了云微物理方案在热带海洋性气候区应用的关键特征。研究从站点、时间和空间三个尺度进行系统分析,发现了显著的一致性特征:首先,在站点尺度上,Ferrier 方案(MP5)展现出最优的整体表现,平均相关系数达 0.50 ± 0.14 ,在 10 月份更达到 0.77 的高相关,而简单的 Kessler (MP1)和 WSM3 方案(MP3)在特定时段(如 3 月 29 日和 9 月 11 日)也达到了 0.53、0.63 和 0.47、0.52 的相关系数。其次,时间尺度分析揭示了普遍存在的系统性偏差,包括降水预报提前 8~12 小时和累积降水量偏高 2~5 倍的问题,典型案例如 7 月份的累计降水量达 250 mm,远超观测值 129.6 mm。在空间尺度上,WSM3 方案(MP3)表现出最佳的综合性能,而 Kessler 方案(MP1)在降水分布特征上最接近观测,其模拟的降水空间分布范围为观测值的 0.8 倍[4]。

从季节性表现来看,研究发现各方案性能存在明显的时段差异:在 3 月,Kessler 方案(MP1)表现突出,相关系数达到 0.53;在台风中后期(10~11 月),Ferrier 方案(MP5)表现最佳,平均相关系数达 0.50 以上;而在汛期(5~10 月),各方案性能普遍下降,如 8 月 22 日 Ferrier 方案(MP5)的 RMSE 达到 8.54 mm/h。这种季节性差异与天气系统类型密切相关。例如,在以暖云降水为主的 3 月和 11 月,Kessler 方案(MP1)的降水空间分布最接近观测;而在受台风影响的汛期盛期(7~8 月),Thompson 方案(MP8)虽然在降水覆盖范围上偏大,但能较好地模拟出系统性降水特征[12] [13]。

基于这些发现,建议在业务应用中采取如下具体的分时段配置策略:

- 季风转换前期(3~4 月): 优先使用 Kessler 方案(MP1), 次选 WSM3 方案(MP3);
- 汛期前中期(5~6 月): 建议采用 Ferrier 方案(MP5), 尤其是在局地对流性降水情况下;
- 汛期盛期(7~8 月): 台风影响期间使用 Thompson(MP8)或 WSM6 方案(MP6), 非台风天气系统使用 WSM3 方案(MP3);
- 台风中后期(10~11 月): 以 Ferrier 方案(MP5)为主, 暖云降水天气过程可切换为 Kessler 方案(MP1)。

这种分时段策略需要配合天气系统判别,特别是在主汛期,应根据天气系统特征及时调整方案选择。同时,考虑到现有 5 km 分辨率模拟存在的不足,无法充分解析中小尺度对流系统的精细结构。

5. 结论

基于 WRF 模式对海南岛热带强降水过程的数值模拟研究,结合多源观测数据对七种云微物理方案的评估,得出以下主要结论:

1) 不同方案在季节和天气系统类型下表现差异显著。Ferrier 方案(MP5)在相关系数上整体最优(平均 $R = 0.50 \pm 0.14$),但 Thompson 方案(MP8)在均方根误差($RMSE = 1.67 \text{ mm/h}$)和稳定性上更具优势。汛期(5~10 月)模拟效果普遍低于季风转换前期和台风中后期,甚至 Ferrier 方案(MP5)有个别案例误差增大至 $RMSE = 8.54 \text{ mm/h}$,反映复杂对流过程参数化仍存在局限性。

2) 各方案在降水过程模拟中能够捕捉降水趋势,但模拟精度较差,特别是在强对流和复杂天气系统下。Thompson (MP8)和 WSM6 方案(MP6)展现出较高的综合可靠性。

3) Kessler 方案(MP1)虽仅描述暖云过程,但对 3 月($R = 0.53$)和 9 月台风残余降水($R = 0.63$)模拟效果突出,其平均 KGE (-0.45 ± 0.97)优于复杂方案。这表明,在海南地区的强降水中,暖云机制占主导地位,过于复杂的冰相过程参数化反而可能引入误差,降低降水空间分布的精度。这与中高纬度地区降水模拟的需求存在本质差异。

4) 单一方案无法适应所有天气类型,但构建季节-天气型适配方案组合可显著改进预报效果。研究建议,季风转换前期(3~4 月)采用 Kessler 方案(MP1),主汛期(5~9 月)优选 Thompson 方案(MP8),台风中后期(10~11 月)切换至 WSM3 方案(MP3)。

致 谢

感谢闫笑笑、李嘉怡、苏怡臻、许梦雨同学对文章的协助；感谢海南百旺信智算中心对该项目支持。

基金项目

国家自然科学基金(No. 32260294)；海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083)；海南省自然科学基金(423QN317)。

参考文献

- [1] Kessler, E. (1969) On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. In: Kessler, E., Ed., *On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations*, American Meteorological Society, 1-84. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-36-2_1
- [2] Lin, Y., Farley, R.D. and Orville, H.D. (1983) Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 1065-1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:bpotsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:bpotsf>2.0.co;2)
- [3] Hong, S.Y. and Lim, J.O.J. (2006) WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Monthly Weather Review*, **42**, 129-151.
- [4] Hong, S., Dudhia, J. and Chen, S. (2004) A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. *Monthly Weather Review*, **132**, 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:aratim>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:aratim>2.0.co;2)
- [5] Morrison, H., Curry, J.A. and Khvorostyanov, V.I. (2005) A New Double-Moment Microphysics Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **62**, 1665-1677. <https://doi.org/10.1175/jas3446.1>
- [6] Morrison, H., Thompson, G. and 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. *Monthly Weather Review*, **137**, 991-1007. <https://doi.org/10.1175/2008mwr2556.1>
- [7] Hong, S., Lim, K.S., Lee, Y., Ha, J., Kim, H., Ham, S., *et al.* (2010) Evaluation of the WRF Double-Moment 6-Class Microphysics Scheme for Precipitating Convection. *Advances in Meteorology*, **2010**, Article ID: 707253. <https://doi.org/10.1155/2010/707253>
- [8] Thompson, G., Rasmussen, R.M. and Manning, K. (2004) Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. *Monthly Weather Review*, **132**, 519-542. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0519:efowpu>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0519:efowpu>2.0.co;2)
- [9] Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M. and Hall, W.D. (2008) Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, **136**, 5095-5115. <https://doi.org/10.1175/2008mwr2387.1>
- [10] Neale, R.B., Gettelman, A., Park, S., Chen, C.-C., Lauritzen, P.H., Williamson, D.L., *et al.* (2012) Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0). Boulder, CO.
- [11] 庞杨, 朱锐, 刘浩, 等. 不同云微物理方案对台风“安比”降雨模拟的影响[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(1): 64-75.
- [12] 徐之骁, 徐海明. 不同云微物理方案对“7.21”特大暴雨模拟的对比试验[J]. 气象科学, 2016, 36(1): 45-54.
- [13] 康兆萍, 周志敏, 李红莉. 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, 2019, 38(6): 658-667.
- [14] 黄丹莲, 高士博, 闵锦忠. 不同云微物理方案对一次飑线过程模拟的影响[J]. 气象科学, 2017, 37(2): 173-183.
- [15] 顾小祥, 李国平. 云微物理方案对一次高原切变线暴雨过程数值模拟的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 526-536.
- [16] 艾凯, 郑益群, 曾新民, 等. WRF 模式不同云微物理方案对华西秋雨模拟影响[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(2): 1-10.
- [17] 许广, 费建芳, 黄小刚, 等. 一次飑线过程的云微物理参数化方案数值试验及其成因分析[J]. 气象科学, 2017, 37(3): 283-292.
- [18] 饶莉娟, 高山红, 张恺. WRF 模式中不同边界层及云微物理方案对两次黄海海雾个例数值模拟的影响[J]. 气象科技进展, 2019, 9(6): 12-19.
- [19] 王佳, 梅钦, 陈钰文. WRF 模式不同微物理方案水凝物的预报能力检验与集成试验[J]. 气象, 2017, 43(5): 552-559.

-
- [20] 于晓晶, 于志翔, 唐永兰, 等. 不同云微物理方案对新疆冷锋暴雪的预报影响分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 33-41.
- [21] Madhulatha, A., Dudhia, J., Park, R., Bhan, S.C. and Mohapatra, M. (2023) Effect of Single and Double Moment Microphysics Schemes and Change in Cloud Condensation Nuclei, Latent Heating Rate Structure Associated with Severe Convective System Over Korean Peninsula. *Atmosphere*, **14**, Article 1680. <https://doi.org/10.3390/atmos14111680>
- [22] Molthan, A.L. and Colle, B.A. (2012) Comparisons of Single- and Double-Moment Microphysics Schemes in the Simulation of a Synoptic-Scale Snowfall Event. *Monthly Weather Review*, **140**, 2982-3002. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00292.1>