

热带岛屿多尺度降水系统的积云对流参数化方案模拟性能评估

——以海南岛为例

焦悦^{1,2}, 邢益航^{1,2}, 黄诗彤^{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2日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月9日

摘要

降水作为地球水循环与能量循环的核心环节,对全球气候演变、水文过程及人类社会活动具有深远影响。热带地区贡献了全球约三分之二的降水量,而海南岛作为典型热带海岛,其独特的下垫面条件和复杂的海陆相互作用导致降水呈现多尺度、多形态特征,对数值模式中积云对流参数化方案的适应性提出了更高挑战。本研究基于WRF模式(V4.2),选取7种积云对流参数化方案(包括Kain-Fritsch、BMJ、Modified Tiedtke等),结合ERA5再分析资料、地面观测站数据、CMPAS融合降水产品及GSMaP卫星反演数据,对海南岛2017年雨季13类典型降水案例开展高分辨率(5 km)模拟,并通过相关系数(R)、平均绝对误差(MAE)和Kling-Gupta效率系数(KGE)等多指标评估方案性能。结果表明:(1) Modified Tiedtke(cu6)和New Tiedtke(cu16)方案在热带海岛环境表现最优,尤其是Modified Tiedtke(cu6)在台风活跃期(9~10月)相关系数高达0.913,全案例平均达 0.41 ± 0.26 ;(2)“灰区”分辨率(4~10km)下综合季节性和降水类型差异,提出分时段优化策略:传统的Kain-Fritsch方案(cu1)和改进的Kain-Fritsch方案(cu10)适合模拟降水增长过程,但需要注意其在时间和降水量上的系统性偏差;Modified Tiedtke方案(cu6)和BMJ方案(cu2)适合模拟弱降水过程,并且Modified Tiedtke方案(cu6)在强降水情况下表现也较好;Multi-scale Kain-Fritsch方案(cu11)、KSAS方案(cu14)和新版Tiedtke方案(cu16)则展现出较好的综合性能。(3) Multi-scale Kain-Fritsch方案(cu11)在降水中心位置、降水空间分布和虚假降水控制上表现出优异性能。(4) 综合季节性和降水类型差异,提出分时段优化策略:台风季节和季风转换前期选择Modified Tiedtke方案(cu6)或新版Tiedtke方案(cu16),雨季盛期采用Kain-Fritsch方案(cu1)和Modified Kain-Fritsch方案(cu10)的集合平均。研究结果为热带海岛地区降水模拟的参数化方案优化提供了关键科学依据。

关键词

灰色地带分辨率, 对流触发机制, 虚假降水控制, 地形过渡带, Kling-Gupta效率系数, 多尺度对流系统

*通讯作者。

Evaluation of Cumulus Parameterization Schemes in Simulating Multi-Scale Precipitation Systems over a Tropical Island

—A Case Study of Hainan Island

Yue Jiao^{1,2}, Yihang Xing^{1,2}, Shitong Huang^{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. 2nd, 2025; accepted: May 1st, 2025; published: May 9th, 2025

Abstract

Precipitation plays a pivotal role in the global water and energy cycles, significantly impacting climate evolution, hydrological processes, and human activities. The tropics contribute approximately two-thirds of global precipitation, and as a representative tropical island, Hainan Island exhibits distinct precipitation characteristics due to its unique underlying surface conditions and complex land-sea interactions, posing significant challenges to the applicability of cumulus convection parameterization schemes in numerical models. This study employs the Weather Research and Forecasting (WRF) model (V4.2) to simulate 13 typical precipitation cases during the 2017 rainy season at a high resolution (5 km), using seven cumulus parameterization schemes, including Kain-Fritsch, BMJ, Modified Tiedtke, etc. The simulation results are evaluated against ERA5 reanalysis data, ground-based observations, CMPAS merged precipitation products, and GSMaP satellite-derived data using multiple metrics, including correlation coefficient (R), mean absolute error (MAE), and Kling-Gupta efficiency (KGE). The results indicate that (1) the Modified Tiedtke (cu6) and New Tiedtke (cu16) schemes perform best in the tropical island environment, with Modified Tiedtke (cu6) achieving a correlation coefficient of up to 0.913 during the typhoon-active period (September–October) and an overall case-average of 0.41 ± 0.26 ; (2) considering the “gray-zone” resolution (4~10 km), a time-dependent optimization strategy is proposed: the traditional Kain-Fritsch scheme (cu1) and its modified version (cu10) are suitable for simulating precipitation growth but exhibit systematic biases in timing and magnitude, while the Modified Tiedtke scheme (cu6) and BMJ scheme (cu2) excel in weak precipitation scenarios, with Modified Tiedtke (cu6) also performing well in heavy precipitation events; (3) the Multi-scale Kain-Fritsch scheme (cu11), KSAS scheme (cu14), and New Tiedtke scheme (cu16) demonstrate strong overall performance, with the Multi-scale Kain-Fritsch scheme (cu11) exhibiting superior accuracy in capturing precipitation center locations, spatial distribution, and reducing false precipitation; (4) based on seasonal variations and precipitation type differences, a phased optimization strategy is recommended: the Modified Tiedtke scheme (cu6) or New Tiedtke scheme (cu16) for the typhoon season and early monsoon transition, and an ensemble of the Kain-

Fritsch (cu1) and Modified Kain-Fritsch (cu10) schemes for the peak rainy season. This study provides critical scientific insights for optimizing cumulus parameterization schemes in precipitation simulations over tropical island regions.

Keywords

Gray-Zone Resolution, Convective Trigger Mechanism, Spurious Precipitation Suppression, Topographic Transition Zone, Kling-Gupta Efficiency Coefficient, Multi-Scale Convective Systems

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

降水是地球水循环和能量循环的关键环节，对全球和区域气候、水文以及人类社会经济活动具有深远影响。准确模拟和预报降水，特别是极端降水事件，对防灾减灾和气候变化应对至关重要。热带地区是全球降水的主要发生地，集中了全球约三分之二的降水量[1]。其中热带海岛地区由于独特的下垫面条件和局地环流特征，降水过程表现出更强的多尺度特征[2]。

在数值天气预报中，当模式水平分辨率处于 4~10 km 的“灰色地带”时，部分对流尺度仍需借助积云对流参数化来描述次网格尺度过程[3]。不同的积云对流参数化方案基于不同的理论假设，在触发机制、质量通量、夹卷和去卷等过程的处理方法上存在差异[4]，这可能导致模拟的降水在量级和时空分布上产生较大偏差[5]。

国内外已有大量研究针对不同积云对流参数化方案在各类地形区域的降水模拟效果开展了系统评估。在青藏高原地区，Grell-3D 积云对流参数化方案对平均降水和日变化的模拟效果较为理想[4]；在台湾海峡及东南沿海区域，MIT-Emanuel 方案被认为最适合模拟降水特征[6]；在长江流域梅雨锋暴雨过程中，不同方案对降水强度和云物理特征的模拟存在显著差异[7]；在西北太平洋台风路径与强度模拟中，Kain-Fritsch 方案模拟的垂直对流最强[8]。对于不同尺度的降水系统，Betts-Miller-Janjic 方案在小雨预报方面表现突出[9]，而 Grell-3D 方案则在强降水区域具有明显优势[10]。然而，这些研究主要集中于内陆、山区及高原等区域，对于热带海岛地区尤其是海南岛这类独特的下垫面环境，系统性研究相对不足。尽管已有一些研究从案例角度探讨了海南热带积云降水特征[11][12]，但缺乏对积云对流参数化方案在该区域适用性的全面评估。海南岛处于南海季风北端，受季风环流、海陆热力对比以及热带对流系统的多重影响，其降水过程呈现出显著的多尺度特征，这对积云对流参数化方案的选择和优化提出了更高要求。

本研究拟利用 WRF 模式，选取多种常用的积云对流参数化方案，对海南岛 2017 年不同季节的降水过程进行高分辨率数值模拟，并结合地面观测资料和卫星反演降水资料，对模拟结果进行多尺度、多指标的综合评估。通过对比分析不同方案模拟的降水，揭示不同方案在海南岛地区的适用性和局限性，为海南岛地区数值天气预报和气候预测业务中积云对流参数化方案的合理选择提供参考。

2. 资料与方法

2.1. 研究数据

本研究采用多源观测和再分析数据进行模式评估。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 全球大气再分析资料[13]。该数据集提供 1940 年至今的数据, 包含温度、相对湿度、位势高度和风场等要素的逐小时估计值, 水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 垂直方向从地表至 0.1 hPa 共 37 层。模式验证采用三类数据: 一是来自中国气象数据网的海南岛 19 个国家级气象站点逐时常规气象要素观测资料, 包括气压、气温、相对湿度、风向风速和降水量等; 二是国家气象信息中心研制的 CMPAS 降水融合产品[14], 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, 能较好反映降水的空间分布特征和时间演变规律; 三是由日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)开发的 GSMaP (全球卫星降水制图)产品[15], 该产品融合了 GPM 核心卫星的双频降水雷达(DPR)观测、多颗微波辐射计卫星数据以及地球静止卫星的红外观测资料, 提供 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 空间分辨率的全球逐小时降水估计。GSMaP 产品采用了独特的卡尔曼滤波追踪算法, 能够较好地捕捉降水系统的时空演变特征, 尤其在热带海洋区域表现突出, 为评估海南岛及周边海域的降水模拟提供了连续、全面的验证数据, 通过多源数据的综合应用, 可全面评估不同积云对流参数化方案对海南岛降水系统的模拟能力。

2.2. 典型降水事件选取

本研究选取中国海南岛($18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'N$, $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03'E$)作为研究区域(图 1)。海南岛地处南海北部,

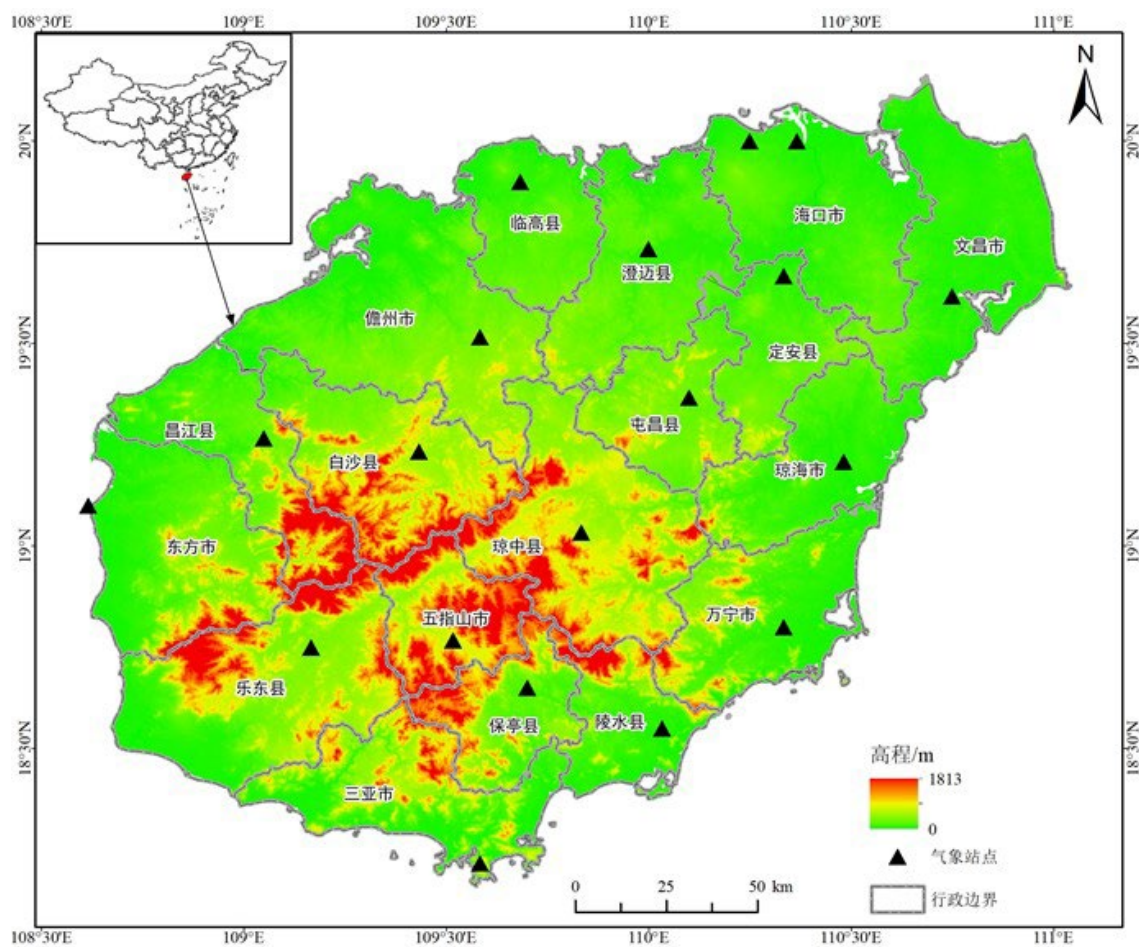


Figure 1. Study area location and meteorological station distribution map (Approval No. GS (2019)1822)

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

四周环海，地形呈中部高、四周低的特征。该区域降水类型复杂多样，年平均降水量约 1639 毫米，但时空分布不均匀，极易出现旱涝灾害[16]。

研究时段选取 2017 年雨季(4~11 月)，共筛选出 13 个典型降水过程(见表 1)，可分为以下四类：(1) 热带气旋降水，如台风“天鸽”、“杜苏芮”等引发的强降水，其中台风“海葵”残余环流与弱冷空气共同作用导致海口市 3 小时降水量达 191.7 毫米[16]；(2) 中尺度对流系统降水，如 3 月 31 日万宁市的龙卷风天气和 5 月 24 日海口市的短时强降水，后者 6 小时降水量达 95.8 毫米；(3) 季风性降水，典型案例包括 5 月 20~21 日的全岛性降水和 6 月中旬的持续性雷阵雨；(4) 复合系统降水，主要由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引发，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。选取的个例时空分布具有较强代表性：时间上覆盖主要降水季节，空间上涵盖不同地理区域，强度上包含从小雨到大暴雨的不同等级，系统类型上既包括天气尺度的持续性降水，也包括中尺度的局地性暴雨，为研究海南岛不同类型降水系统的参数化特征提供了基础。

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

个例编号	模拟时段	降水特征	天气系统	最大降水量(mm/h)
Case1-0329	3.29~4.2	局地强对流	强对流	-
Case2-0518	5.18~5.23	全岛性降水	季风环流	-
Case3-0522	5.22~5.27	强降水	中尺度对流系统	95.8 (6 h)
Case4-0611	6.11~6.16	持续性降水	季风环流	-
Case5-0622	6.22~6.28	区域性强降水	低空急流	-
Case6-0712	7.12~7.17	区域性强降水	热带扰动 + 季风	100~200
Case7-0822	8.22~8.27	台风降水	台风“天鸽”	100~120
Case8-0911	9.11~9.16	台风降水	台风“杜苏芮”	-
Case9-1003	10.3~10.8	区域性强降水	低空急流	214.7
Case10-1014	10.14~10.19	台风降水	台风“卡努”	-
Case11-1104	11.4~11.9	区域性暴雨	东风波动 + 冷空气	-
Case12-1112	11.12~11.17	台风残余环流	台风“海葵”	191.7 (3 h)
Case13-1117	11.17~11.22	区域性强降水	冷空气 + 东风急流	-

注：191.7 (3 h)等括号内为降水累计时间。

2.3. WRF 模式及选用方案简介

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。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。本研究选取了 7 种积云对流参数化方

案进行对比实验(表 2): 包括传统的 Kain-Fritsch (KF)方案和 Betts-Miller-Janjic (BMJ)方案, 以及多个改进版本。其中, Modified Tiedtke 方案针对高分辨率模拟进行了优化; Modified KF 方案引入了基于概率密度函数的触发机制; Multi-scale KF 方案着重改进了多尺度对流的模拟能力; KSAS 方案针对灰区分辨率范围进行了优化; 新版 Tiedtke 方案则改进了深对流的表征效果[17]-[19]。

Table 2. The cumulus convection parameterization schemes used in the study
表 2. 研究中采用的积云对流参数化方案

方案编号	方案名称	主要特点
cu1	Kain-Fritsch	基础 KF 方案, 适用于中尺度对流
cu2	Betts-Miller-Janjic	基于质量守恒的传统方案
cu6	Modified Tiedtke	改进高分辨率性能
cu10	Modified KF	引入 PDF 触发函数
cu11	Multi-scale KF	优化多尺度对流模拟
cu14	KSAS	适用于灰区分辨率
cu16	New Tiedtke	改进深对流表征

2.4. 评估方法

本文通过计算相关系数(Correlation coefficient, R)和平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)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)采用的是皮尔森相关系数(Pearson), 该指标与平均绝对误差(MAE)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。

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}$$
$$\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_v}, \beta = \frac{\bar{Y}}{\bar{V}}$$

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。

3. 结果

3.1. 降水模拟的相关性与过程特征分析

通过对七种积云参数化方案的 Pearson 相关系数分析表明, 模拟效果呈现显著的时空异质性(图 2)。相关系数的数值范围跨度很大(-0.09 至 0.91), 充分反映了 WRF 模式对海南岛降水模拟的复杂性。时间维度上, 模拟效果呈现出明显的季节性特征: 季风转换前期(3 月底至 5 月中旬)平均相关系数为 0.55 ± 0.15 , 其中 0329 案例 cu14 方案达到 0.782 的高值; 夏季雨季盛期(6 月中下旬)是模拟效果最差的时期, 0622 案例所有方案的平均相关系数仅为 0.08 ± 0.04 ; 而在台风活跃期(9~10 月), 模拟效果显著提升, 1014 案例的平均相关系数高达 0.73 ± 0.18 。

从参数化方案的整体表现来看, Modified Tiedtke 方案(cu6)、Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)和 Newer Tiedtke 方案(cu16)这三个改进方案表现最为突出。具体而言, Newer Tiedtke 方案(cu16)方案则展现出最

高的平均相关系数(0.44), 但其在 0622 和 1117 案例相关系数仅为 0.08 和 0.1, 在 0329、0911、1014 和 1104 案例相关系数均超过 0.6, 这说明该方案可以在区域台风和强降水状况下展现出较好的表现; Modified Tiedtke 方案(cu6)方案在季风转换前期(0329 和 0518 案例)以及台风活跃期(0911 和 1014 案例)均达到最高相关系数(0.64、0.74 和 0.91); Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)方案则展现出较好的稳定性, 标准差为 0.20, 为所有方案中最小。相比之下, Betts-Miller-Janjic 方案(cu2)表现最不理想, 不仅在 0522 案例出现-0.09 的负相关, 其全年平均相关系数也仅为 0.32 ± 0.23 , 这一结果表明该方案在热带海岛环境下存在系统性偏差。其余方案如 Kain-Fritsch 方案(cu1)、Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)和 KSAS 方案(cu14)表现一般, 全年平均相关系数在 0.39~0.42 之间, 但时间稳定性不如前述三个最优方案。但值得注意的是, 模拟效果最差的雨季盛期(0611 和 0622 案例)中, 综合两个案例的平均相关系数, 表现较好的是 Kain-Fritsch 方案(cu1)、Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)和 KSAS 方案(cu14), 相关系数明显优于其他方案。

基于模式性能评估的定量分析, 建议在业务应用中采用“多方案集合”的策略: 在季风转换前期和台风活跃期优先使用 cu6 或 cu16 方案(该方案在强对流条件下平均相关系数达 0.63 ± 0.24 ; 0.63 ± 0.17); 而在雨季盛期, 建议同时采用 cu1、cu10 和 cu14 三个方案的集合平均, 以降低单一方案的系统性偏差。

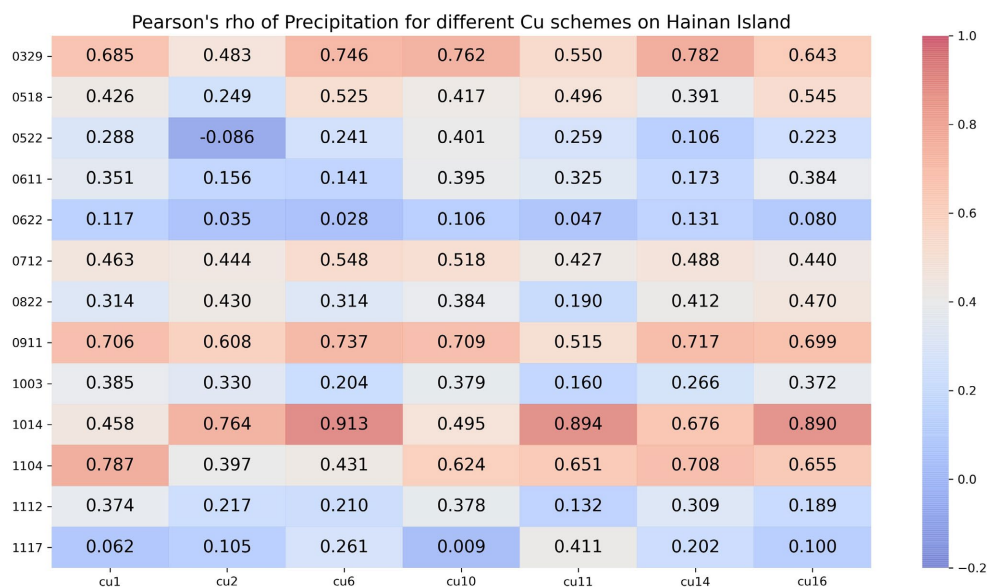
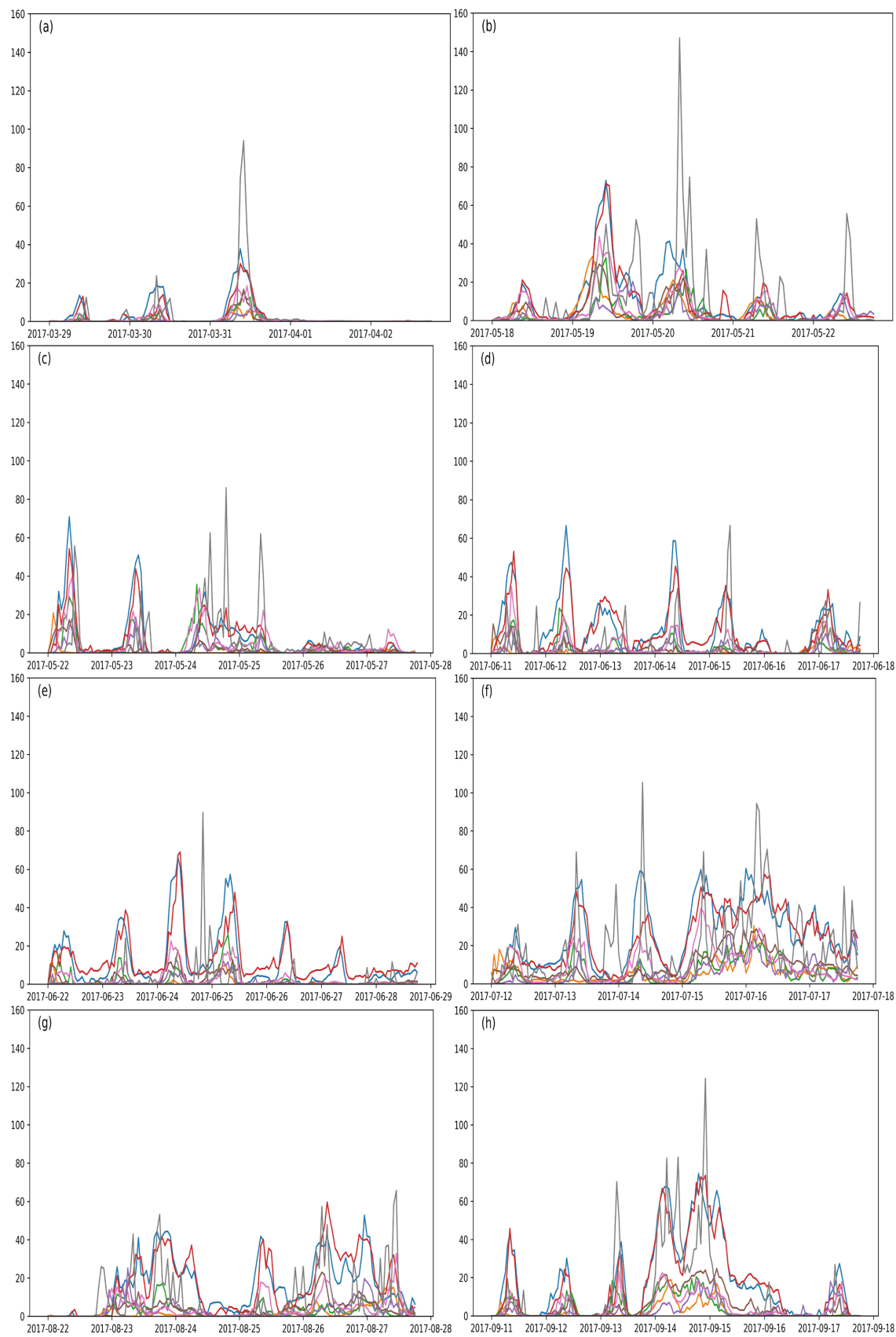


Figure 2. Correlation coefficients between simulated and observation for seven cumulus parameterization schemes across 13 cases

图 2. 七种积云对流参数化方案在 13 个案例的模拟值与观测值的相关系数统计图

从降水时间演变特征来看, 各方案对强降水过程普遍存在低估现象, 以 1014 案例为例, 在第 2 天的降水峰值模拟中, 即使表现最好的 cu10 方案, 其模拟值也比观测值低估了约 80 mm/h (图 3)。这种系统性偏差主要源于参数化方案对深对流发展的抑制作用。

在积云对流方案原理上, Kain-Fritsch 方案(cu1)、Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)和 Newer Tiedtke 方案(cu16)的优异表现(全案例平均相关系数分别为 0.42 ± 0.21 、 0.43 ± 0.20 和 0.44 ± 0.24)主要得益于其改进的对流触发机制和更细致的云微物理过程描述。Cu1 方案和 cu10 方案在捕捉降水变化趋势时具有较大优势, 可能得益于其优化的对流触发机制, 使其对不同类型降水的响应更为敏感; cu16 方案通过改进的深对流表征机制, 实现了较好的整体性能。相比之下, BMJ 方案(cu2)在热带海岛环境下表现不佳, 不仅无降水时段实现虚假降水, 还大幅低估实际降水量, 这主要是由于其基于调整法的参数化方案的



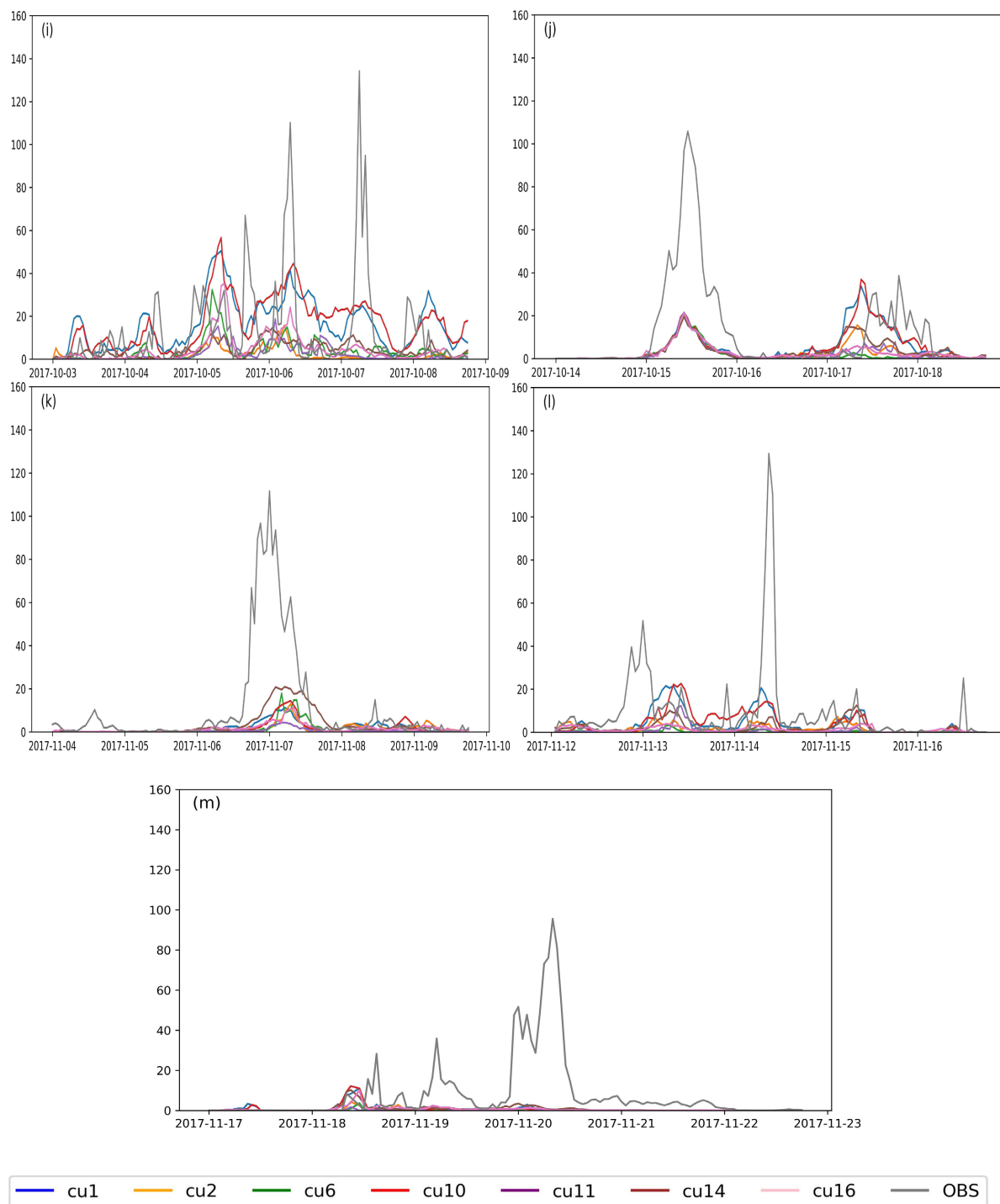


Figure 3. Comparison of simulations using seven cumulus convection schemes against actual meteorological station observations across 13 case periods in 2017

图 3. 2017 年 13 个案例期间 7 种积云对流方案模拟结果与气象站实际观测值的对比图

系统性偏差较大。

基于上述分析,建议在业务应用中在关注降水过程时优先使用单一 Kain-Fritsch 方案(cu1)或者 Kain-Fritsch 方案(cu1)、Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)和 Newer Tiedtke 方案(cu16)三个方案的集合平均以降

低单一方案的系统性偏差。

3.2. 降水模拟的误差特征与方案性能评估

基于平均绝对误差(MAE)的系统性评估表明, WRF 模式在海南岛地区的降水模拟呈现出显著的时空异质性和方案依赖特征(图 4)。在时间序列上, MAE 值在不同案例间存在明显差异: 弱降水过程的案例(0329、0611 和 0622)表现出较低的 MAE 值(2~4 mm/h), 而在强降水过程的案例(0712 和 1003), MAE 值普遍升高至 10~17 mm/h。特别是 0712 案例, Kain-Fritsch 方案(cu1)的 MAE 高达 16 mm/h, 而 1003 案例也达到 14.12 mm/h, 反映了现有参数化方案在模拟强降水过程时的系统性偏差。

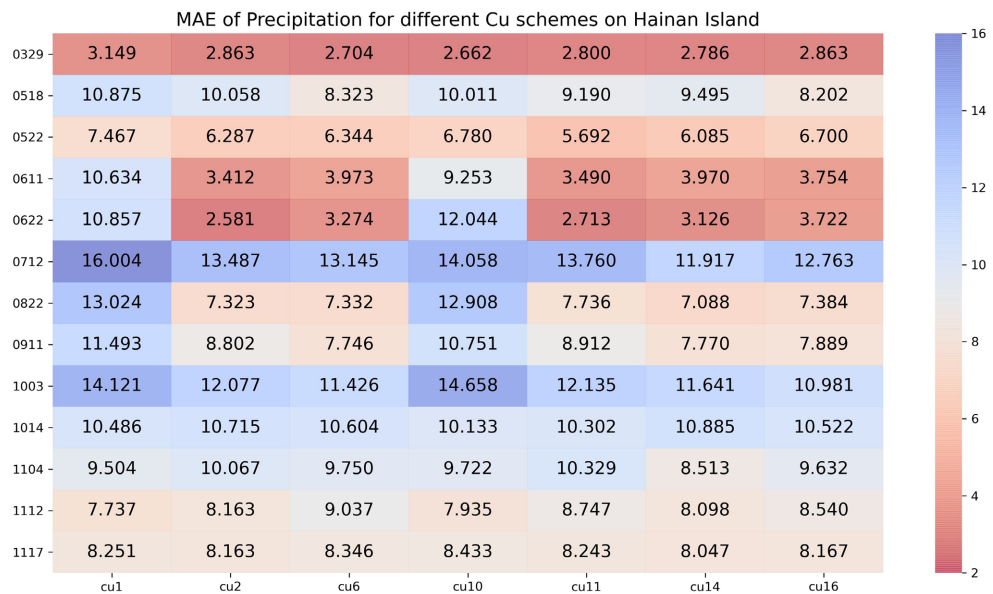


Figure 4. Comparison of mean absolute error (MAE) between simulated and observed precipitation values for seven cumulus parameterization schemes across 13 precipitation events in Hainan during 2017
图 4. 2017 年海南地区 13 个降水事件中 7 种积云参数化方案的模拟值与观测值之间的平均绝对误差(MAE)比较

从方案性能对比来看, KSAS 方案(cu14)表现最为稳定, 其全案例平均 MAE 为 7.65 ± 2.90 mm/h, 明显优于其他方案。Modified Tiedtke 方案(cu6)和新版 Tiedtke 方案(cu16)次之, 平均 MAE 分别为 7.85 ± 3.02 mm/h 和 7.78 ± 2.84 mm/h。这种性能差异主要源于方案物理机制的不同: Tiedtke 类方案通过改进的对流触发机制和更详细的云微物理过程描述, 实现了较好的整体性能; KSAS 方案(cu14)专门针对灰分辨率设计, 方案显著提升了在热带海岛复杂地形条件下对高分辨率不同强度降水的模拟能力; 而传统的 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)由于对深对流响应过强, 导致平均 MAE 接近或超过 10 mm/h, 且在多个案例出现显著高估。值得注意的是, MAE 与相关系数之间并不存在简单的对应关系。例如, 在台风活跃期的台风降水案例(0911 和 1014), 尽管相关系数普遍较高(平均达 0.67 和 0.73), 但 MAE 值仍维持在 9~10 mm/h 之间, 这说明即使模式能够较好地捕捉降水的时间演变特征, 在降水量的定量预报上仍存在显著偏差。这种现象在 Multi-scale KF (cu11)上表现得尤为明显: 虽然其相关系数普遍较低, 但 MAE 值相对适中(平均 9.61 ± 1.56 mm/h), 这可能是由于过度平滑了质量通量参数化, 对台风对流时空离散化, 通过闭合假设的强约束维持了水物质平衡, 但牺牲了部分降水时空相关性。

基于上述分析, 建议在业务应用中模拟中高尺度时采用分类型的方案选择策略: 对于弱降水过程, 可以选择 BMJ 方案(cu2)或 Modified KF (cu10)方案; 对于强降水过程, 优先考虑 KSAS 方案(cu14)或新版

Tiedtke 方案(cu16); 而台风降水过程建议选择 Multi-scale KF 方案(cu11)。

基于 Kling-Gupta 效率系数(KGE)的系统性评估显示, WRF 模式在海南岛地区的降水模拟呈现出显著的方案依赖性和时间演变特征(图 5)。从定量角度看, 大部分案例的 KGE 值呈现负值, 特别是 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)出现了极端负值, 分别在 0822 案例达到-17.70 和-16.64。这种极端负值的出现, 反映了这两个方案在模拟降水的时间演变和定量预测方面存在显著偏差, 尽管它们在降水增长趋势的捕捉上表现较好。

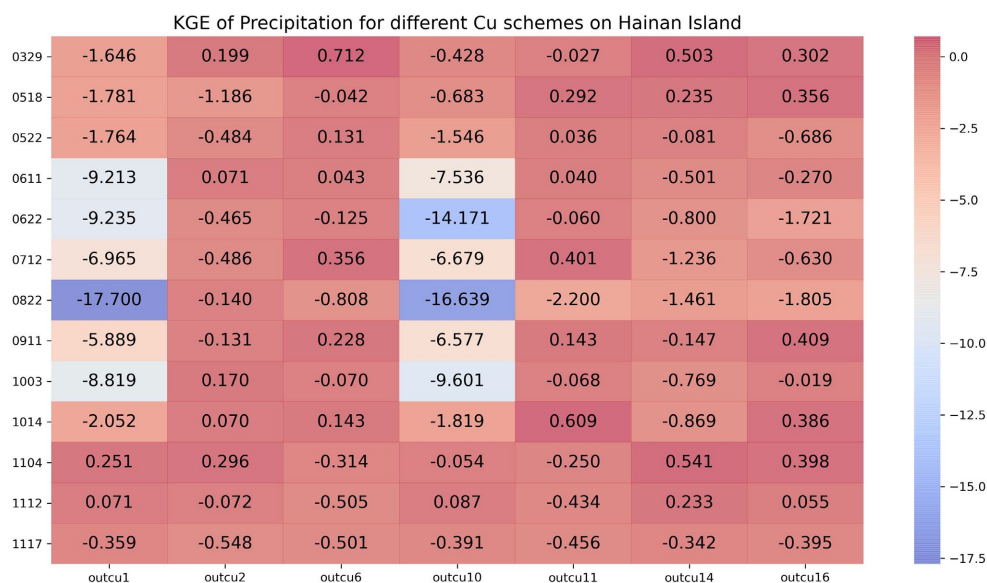


Figure 5. Kling-Gupta efficiency (KGE) statistics of simulated and observed values for seven cumulus parameterization schemes across 13 precipitation events in Hainan in 2017

图 5. 2017 年海南地区 13 个降水事件 7 种积云参数化方案的模拟值与观测值的 KGE 统计图

在时间序列上, KGE 值展现出明显的季节性特征: 季风转换前期案例(如 0329)KGE 值相对较高, 平均值在-1.65 至 0.71 之间波动; 而在降水过程复杂的夏季案例(0518 和 0622), KGE 值普遍降低, 多数方案的 KGE 值低于-1.0。这种时间依赖性主要源于不同季节天气系统的复杂程度差异。特别值得注意的是, 新版 Tiedtke 方案(cu16)展现出优异的稳定性, 在全年中有超过 38.5% 的案例保持 KGE 值大于 0.3, 这一性能显著优于其他方案。除此, Modified Tiedtke 方案(cu6)和 BMJ 方案(cu2)表现出较好的整体性能, 它们的 KGE 值分布相对集中, 标准差分别为 0.39 和 0.40, 明显小于 cu1 和 cu10 的 5.05 和 5.45。这种性能差异主要源于方案物理机制的不同: cu6 方案通过改进的对流边界层处理机制和更精细的降水过程参数化, 显著提升了对不同强度降水的模拟能力; 而传统的 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)由于对深对流响应过强, 在时间和强度预测上容易出现较大偏差。特别的, 现有积云参数化方案在处理不同类型降水时表现出明显的系统性差异: Tiedtke 类方案(cu6、cu16)通过改进的对流触发机制和更详细的云微物理过程描述, 实现了较好的整体性能; 而 Kain-Fritsch 类方案(cu1、cu10、cu11)在处理强对流时倾向于过度响应, 导致较大的定量偏差。

综上所述, 不同方案具有各自的适用条件: 传统的 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)适合模拟降水增长过程, 但需要注意其在时间和降水量上的系统性偏差(标准差超过 5.05); Modified Tiedtke 方案(cu6)和 BMJ 方案(cu2)适合模拟弱降水过程, 并且 Modified Tiedtke 方案(cu6)在强降水情况下表现也较好; Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)、KSAS 方案(cu14)和新版 Tiedtke 方案(cu16)则展现出

较好的综合性能, 其中新版 Tiedtke 方案(cu16)的稳定性最为突出(KGE 大于 0.3 的案例占比最高)。

3.3. 典型个例的降水空间分布特征分析

通过对海南岛地区 0518 案例 116 个小时样本的系统性筛选分析, 确定了 2017 年 5 月 22 日 04 时作为最具代表性的个例案例进行深入评估(图 6)。观测资料显示, 该时刻实际降水主要集中在海南岛东部地区(19.8°N, 110.6°E 附近), 呈现出东北-西南带状分布特征, 降水中心强度为 1.2 mm/h。WRF 模式采用的七种积云参数化方案在降水空间分布的模拟上呈现出显著差异性。

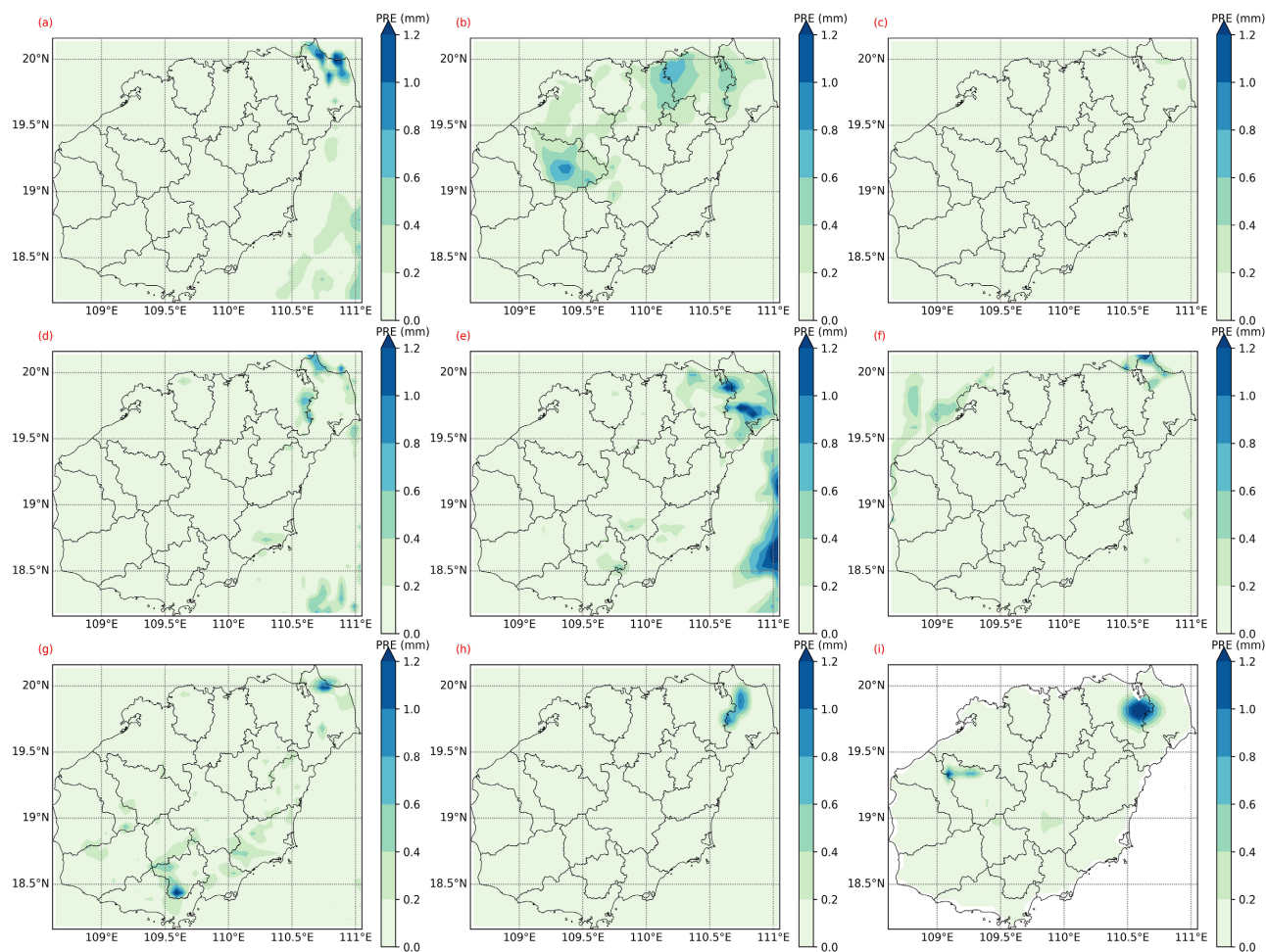


Figure 6. Precipitation simulated by Kain-Fritsch (a), BMJ (b), Modified Tiedtke (c), Modified Kain-Fritsch (d), Multi-scale Kain-Fritsch (e), KSAS (f), and New Tiedtke (g) schemes, along with precipitation observed by GSMaP (h) and CMPAS (i) in Hainan at 04:00 on May 22, 2017

图 6. 2017 年 5 月 22 日 04 时海南地区 Kain-Fritsch (a)、BMJ (b)、Modified Tiedtke (c)、Modified Kain-Fritsch (d)、Multi-scale Kain-Fritsch (e)、KSAS (f)、新版 Tiedtke (g) 方案模拟的降水量和 GSMaP (h)、CMPAS (i) 观测的降水量

定量分析表明, Kain-Fritsch 系列方案(cu1 和 cu10)在降水强度模拟上存在明显的过估计现象, 其模拟值比观测值偏高 167%~250% (约 2~3 mm), 这种系统性偏差需要引入 0.3 的校正系数才能实现与观测值的合理匹配。从物理机理角度分析, 这主要是由于这两个方案在计算对流不稳定能量释放过程中, 对垂直水汽输送强度的估计偏大导致的。特别是在处理海陆交界区的对流发展时, 方案对局地热力和动力强迫的响应过于敏感。在降水空间分布方面, 除 Modified Tiedtke 方案(cu6)外的其他方案都成功捕捉到了

主要降水区域,但在虚假降水区的控制上表现出显著差异。BMJ 方案(cu2)和新版 Tiedtke 方案(cu16)产生的虚假降水区域最为广泛,其空间范围达到实际降水区的 4~5 倍。这种现象主要源于方案在处理边界层不稳定性和对流触发条件时的判据设置过于宽松,导致在非降水区域容易触发虚假对流过程。相比之下,KSAS 方案(cu14)和 Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)在虚假降水控制上表现出明显优势,其虚假降水区面积仅为其他方案的 30%~40%。其中, cu14 方案的降水中心位置出现了约 0.3° 的北偏现象,而 cu11 的降水中心与实际位置的偏差不得超过 0.1° 。这种改进主要得益于这两个方案在热量、湿度和动量垂直输送参数化方面的优化,特别是在对流触发条件的判据设置上采用了更严格的标准。

综合评估显示, Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)在降水中心位置、降水空间分布和虚假降水控制上表现出优异性能。这些结果表明,在复杂地形和强海陆相互作用的海南岛区域,积云参数化方案的选择需要特别注意降水空间分布的准确性和虚假降水的控制。建议在实际业务应用中,采用 Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)的预报方案,但仍需根据具体天气系统特征选择合适的参数化方案。

基于 WRF 模式对 2017 年 5 月海南岛降水空间分布的系统性评估显示,观测降水呈现出显著的空间非均匀性特征,主要降水中心位于岛屿西偏北侧,最大降水量超过 200 mm (图 7)。各积云参数化方案

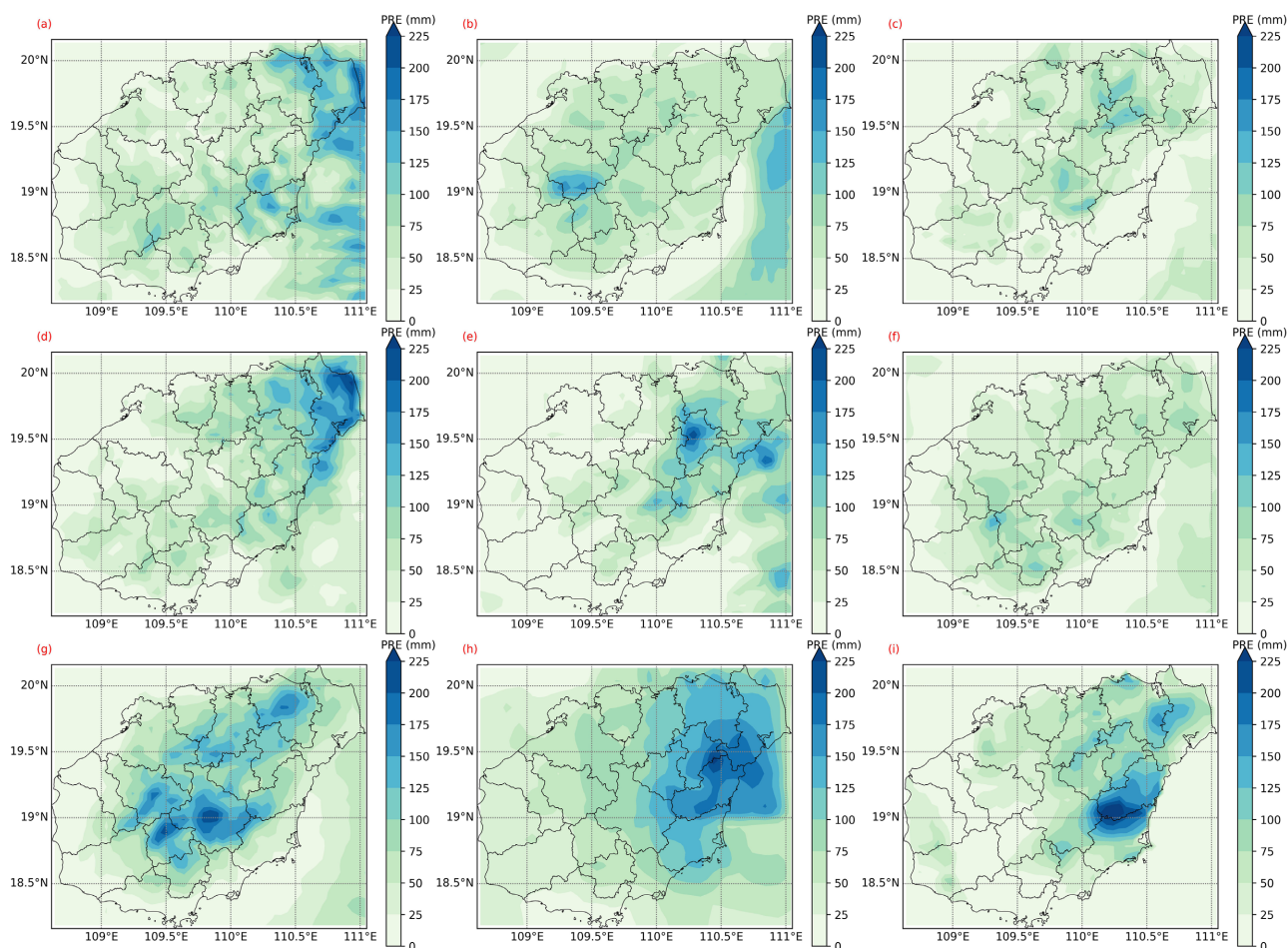


Figure 7. Total precipitation simulated by Kain-Fritsch (a), BMJ (b), Modified Tiedtke (c), Modified Kain-Fritsch (d), Multi-scale Kain-Fritsch (e), KSAS (f), and New Tiedtke (g) schemes, along with total precipitation observed by GSMaP (h) and CMPAS (i) in Hainan in May 2017

图 7. 2017 年 5 月海南地区 Kain-Fritsch (a)、BMJ (b)、Modified Tiedtke (c)、Modified Kain-Fritsch (d)、Multi-scale Kain-Fritsch (e)、KSAS (f)、新版 Tiedtke (g) 方案模拟的总降水量和 GSMaP (h)、CMPAS (i) 观测的总降水量

在模拟这种复杂的降水分布格局时表现出显著差异。定量分析表明,除 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)外,其他方案的模拟降水量普遍偏小,需要引入 2.3 的校正系数才能与观测值进行合理对比,这反映出当前参数化方案在模拟强降水过程时存在系统性低估问题。

从空间上看,Kain-Fritsch 系列方案(cu1 和 cu10)在岛屿东北部的降水高值区与实际观测存在 30%~40% 的空间重叠率,显示出对强降水系统位置的一定预报能力。Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)虽然在降水中心位置上取得了最高的吻合度(空间偏差小于 0.1°),但其模拟的降水强度仅为观测值的 35%~45%,范围也明显偏小。新版 Tiedtke 方案(cu16)在中北部地区与实测降水有约 25%的空间重合度,但其主要降水中心错位到中南部(偏差约 0.5°),显示出明显的系统性偏差。所有方案在模拟海南岛西部低值降水区(观测降水量 $< 50\text{ mm}$)时都表现出显著不足,平均模拟偏差达到 60%~70%。这种普遍性偏差主要源于海南岛独特的地形配置:中部山地平均海拔 800~1200 m,向四周逐渐降低至平原,这种地形特征导致了复杂的海-陆相互作用和显著的垂直运动差异。

4. 讨论

在热带海岛环境下,WRF 模式的积云对流参数化方案表现出显著的方案依赖性和时空异质性特征。研究结果显示,Modified Tiedtke(cu6)方案在台风活跃期表现最为突出,1014 案例相关系数达 0.913,全案例平均相关系数维持在 0.41 ± 0.26 。本研究在海南岛地区获得了更高的模拟精度,这可能得益于改进后的对流触发机制。特别是在“灰区”分辨率(4~10 km)范围内,传统参数化方案普遍存在较大不确定性。例如,BMJ 方案(cu2)的全案例平均相关系数仅为 0.32 ± 0.23 ,这与 Chen 等[4]在青藏高原地区的研究发现相似。在降水强度模拟方面,大多数方案存在 25%~40%的系统性低估,需要引入 0.3 和 2.3 的校正系数,而 Kain-Fritsch 系列方案却出现 30%~50%的过估现象。这与 Zhang 等[17]的研究结论存在显著差异,表明热带海岛环境下的降水模拟机制可能更为复杂。

在“灰区”分辨率问题上,本研究发现 KSAS 方案(cu14)在热带海岛复杂地形条件下,能有效提升高分辨率降水模拟的数值稳定性,但其对降水空间分布格局的模拟能力仍需改进。这暗示了在 4~10 km 分辨率范围内,单纯依靠参数化方案或显式模拟都难以完全准确描述对流过程,可能需要发展新的混合参数化策略。研究还揭示了季节性差异显著影响模拟效果,特别是在雨季,所有方案的平均相关系数降至 0.1 ± 0.05 ,这一现象在以往研究中较少被关注。基于这些发现,建议在业务应用中采用分时段的差异化策略,并积极发展考虑局地适应性的混合参数化方案。

5. 结论

1) 在热带海岛环境下,Modified Tiedtke 方案(cu6)和 Newer Tiedtke 方案(cu16)展现出显著优势,尤其在台风活跃期,相关系数最高达 0.913,全案例平均维持在 0.41 ± 0.26 。这一性能优势主要源于其优化的对流触发机制和精细的云微物理过程描述。

2) 在“灰区”分辨率 4~10 km 分辨率区间,各方案表现出显著的系统性偏差。从降水过程来看,模拟降水应使用 Kain-Fritsch 方案(cu1)或者 Kain-Fritsch 方案(cu1)、Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)和 Newer Tiedtke 方案(cu16)方案三个方案的集合平均以降低单一方案的系统性偏差。而从平均偏差和 KGE 来看,传统的 Kain-Fritsch 方案(cu1)和改进的 Kain-Fritsch 方案(cu10)适合模拟降水增长过程,但需要注意其在时间和降水量上的系统性偏差;Modified Tiedtke 方案(cu6)和 BMJ 方案(cu2)适合模拟弱降水过程,并且 Modified Tiedtke 方案(cu6)在强降水情况下表现也较好;Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)、KSAS 方案(cu14)和新版 Tiedtke 方案(cu16)则展现出较好的综合性能。

3) 在模拟降水空间落区过程中,Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)在降水中心位置、降水空间分布

和虚假降水控制上表现出优异性能。因此, 建议在实际业务应用中, 采用 Multi-scale Kain-Fritsch 方案(cu11)的预报方案, 但仍需根据具体天气系统特征选择合适的参数化方案。

4) 基于各方案在不同降水类型下的差异表现, 建议采用分时段的方案选择策略: 台风季节(9~10月)和季风转换前期(3~5月中旬)选择 Modified Tiedtke 方案(cu6)或新版 Tiedtke 方案(cu16), 雨季盛期(6月中下旬)采用 Kain-Fritsch 方案(cu1)和 Modified Kain-Fritsch 方案(cu10)的集合平均。

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

感谢国家自然科学基金(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)为研究提供的基金支持。

参考文献

- [1] Wang, B., Liu, J., Kim, H., Webster, P.J. and Yim, S. (2012) Recent Change of the Global Monsoon Precipitation (1979-2008). *Climate Dynamics*, **39**, 1123-1135. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1266-z>
- [2] 张强, 张红丽, 张良, 岳平. 论我国夏季风影响过渡区及其陆-气相互作用问题[J]. 地球科学进展, 2017, 32(10): 1009-1019.
- [3] Grell, G. and Freitas, S. (2013) A Scale and Aerosol Aware Stochastic Convective Parameterization for Weather and Air Quality Modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **14**, 5233-5250. <https://doi.org/10.5194/acpd-13-23845-2013>
- [4] 陈颖, 杨显玉, 吕雅琼, 文军, 朱家宁. 对流解析与对流参数化方案模拟青藏高原夏季降水对比研究[J]. 高原气象, 2023, 42(6): 1429-1443.
- [5] 黄安宁, 张耀存, 朱坚. 中国夏季不同强度降水模拟对不同积云对流参数化方案的敏感性研究[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1212-1224.
- [6] 谭红建, 蔡榕硕, 齐庆华. 积云对流参数化方案模拟我国东南沿海及台湾海峡地区降水的适用性[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(1): 122-129.
- [7] 侯瑞钦, 程麟生. 积云对流参数化方案对梅雨锋暴雨过程模拟的影响[J]. 气象科技, 2007, 35(4): 458-463.
- [8] 李响. WRF 模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1966-1978.
- [9] 马艳, 顾瑜, 陈尚, 董海鹰. WRF 中不同积云对流参数化方案对青岛降水预报影响的对比分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 19-26.
- [10] 胡浩楠, 刘引鸽. 基于 WRF 模式的渭河上游夏季降水及气温模拟[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 256-264.
- [11] 黄巧明. 对比分析海南热带积雨云带的降水特征[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(1): 120-135.
- [12] 黄巧明, 邢峰华, 黄彦彬. 海南热带积雨云带降水特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(1): 48-60.
- [13] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [14] 孙帅, 师春香, 潘旻, 谷军霞, 白磊, 苏传程, 韩帅, 孙金森. 中国区域三源融合降水产品的改进效果评估[J]. 水文, 2020, 40(6): 10-15.
- [15] Ushio, T., Sasashige, K., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., *et al.* (2009) A Kalman Filter Approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from Combined Passive Microwave and Infrared Radiometric Data. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **87**, 137-151. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87a.137>
- [16] 海南省气象局. 盘点海南省 2017 年十大天气气候事件[EB/OL]. <https://www.hainan.gov.cn/hainan/tingju/201802/1f510beed574a5ea2aa2b587b35d1f5.shtml>, 2018-02-27.
- [17] Zhang, C., Wang, Y. and Hamilton, K. (2011) Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme. *Monthly Weather Review*, **139**,

- 3489-3513. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-10-05091.1>
- [18] Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, **43**, 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:tkepau>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:tkepau>2.0.co;2)
- [19] Bechtold, P., Semane, N., Lopez, P., Chaboureau, J., Beljaars, A. and Bormann, N. (2014) Representing Equilibrium and Nonequilibrium Convection in Large-Scale Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **71**, 734-753. <https://doi.org/10.1175/jas-d-13-0163.1>