

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*

王丹¹ 余贞寿¹

¹ 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008

摘要

本文利用中尺度模式 WRF V4.0.2 (Weather Research and Forecasting Model, Version 4.0.2) 对浙江省两次梅雨锋暴雨过程进行数值模拟, 分别选用 WSM6 和 Thompson 云微物理方案、YSU 和 MYJ 边界层方案、以及 11 种对流参数化方案进行试验, 探究不同积云对流参数化方案对梅雨锋暴雨的 1 km 高分辨率预报的影响, 结果表明: (1) 在对各试验的降水预报评估过程中, 使用传统点对点方法 (P2P 和 G2G) 和邻域法 (FSS) 都能客观表现出各试验的预报水平, 而 FSS 检验法能更客观地评估模式对小范围强降水的预报水平。(2) 三类积云对流方案 (包括: 无积云对流方案、传统积云对流方案和尺度自适应积云对流方案) 都能较好地模拟出小雨降水的发生情况, 但随着降水强度增强至暴雨、大暴雨强度时, 尺度自适应的积云对流方案对降水的预报结果有明显改善。(3) 尺度自适应积云对流方案对微物理和行星边界层方案的反应更为敏感, 在不同微物理和边界层组合方案下, 尺度自适应积云对流方案的模拟结果差异更显著, 而传统积云对流方案的模拟结果的效果差异不明显。(4) 在 1-10 km 的“灰色区域”范围内, 当网格分辨率逐渐提高到 1 km 时, 尺度自适应积云对流方案较传统积云对流方案对模式的预报结果有明显的改善。本研究的结果在一定程度上可为高精度业务预报工作中对尺度自适应积云对流参数化方案的应用提供参考。

关键词: WRF 模式, 积云对流参数化方案, 尺度自适应, 高分辨率评估方法

文章编号

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2022-05-18; **网络预出版日期**

作者简介 王丹, 女, 工程师, 主要从事降水和数值天气预报研究. E-mail: 465486434@qq.com

通讯作者 余贞寿, 主要从事数值预报和台风研究. E-Mail: yuzhenshou@163.com

资助项目 浙江省基础公益研究计划项目 (LGF20D050001)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2021Z085) 以及浙江省气象科技计划项目 (2017ZD05、2019ZD11、2020ZD06、2021YYZX06) 共同资助

Funded by Public Projects of Zhejiang Province (LGF20D050001), Special Program for Innovation and Development of China Meteorological Administration (CXFZ2021Z085), Science and Technology Plan Projects of Zhejiang Province (2017ZD05, 2019ZD11, 2020ZD06, and 2021YYZX06)

Impact of cumulus parameterization schemes on the high-resolution numerical simulation of heavy Meiyu front rainfall events

WANG Dan¹, YU Zhenshou¹

¹ Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

Abstract This study used the WRF V4.0.2 (Weather Research and Forecasting Model, Version 4.0.2) to simulate two Meiyu front precipitation processes in Zhejiang Province. Two microphysics schemes (WSM6 and Thompson), two boundary layer schemes (YSU and MYJ), and 11 cumulus convective parameterization schemes were selected for comparative analyses to explore the influence of different cumulus convective parameterization schemes on Meiyu front precipitation forecast. The results show that: (1) In the process of precipitation forecast evaluation for each experiment, both traditional methods (P2P and G2G) and the neighborhood method (FSS) can objectively show the prediction level of each experiment. However, the FSS method performs more objectively evaluation of the prediction level of small-scale heavy precipitation. (2) Three types of cumulus convection solutions (no cumulus convection, traditional cumulus convection, and the scale-aware cumulus convection) can better simulate the light precipitation, but with the intensification of precipitation to rainstorm and heavy rainstorm, the scale-aware cumulus convection schemes improve the forecast results significantly. (3) The scale-aware cumulus convection scheme is more sensitive to microphysics and planetary boundary layer schemes, and the simulation results of the scale-aware cumulus convection schemes are more significant under different microphysics and boundary layer combination schemes, while the simulation results of the traditional cumulus convection scheme are not obvious. (4) In the "gray zone" range of 1-10 km, the scale-aware cumulus convection scheme can significantly improve the prediction results of model compared with the traditional cumulus convection scheme when the grid resolution is increased to 1 km. To some extent, results of this study can provide a reference for the application of scale-aware convective parameterization schemes in high-precision operational forecasting.

Keywords: WRF model, 1-km resolution, Scale-aware, Verification methods for high-resolution grid

56 1 引言

57 梅雨锋暴雨是华东地区汛期最主要的气象灾害之一，严重威胁着该地区的经济发展
58 和人民的生命财产安全。此外，梅雨锋降水通常受多种尺度的天气和系统的影响，其形
59 成机制也非常复杂（陶诗言等，2004）。所以梅雨锋暴雨的预报一直是气象业务关注的
60 重点和难点。现今，数值预报已成为天气预报业务的核心支撑，且随着高性能计算机的
61 迅速发展，模式的水平分辨率得以不断提高，已能达到可以分辨积云对流活动的程度，
62 而精细的区域高分辨率数值模式对实现预报能力显著提升有重要作用（王春明等，2004；
63 漆梁波，2015；李祥等，2020）。与此同时，高分辨率的预报准确率对模式的动力框架
64 和云物理参数化方案也提出了更高的要求，有必要对这两方面进行更深入的研究（马雷
65 鸣和鲍旭炜，2017；张旭等，2017；刘梦娟等，2018；康兆萍等，2019）。

66 目前，大部分数值天气预报中心的中尺度业务模式水平分辨率已经能达到 10 km 以
67 下（Schwartz et al., 2017；张旭等，2017；Zhang et al., 2021）。然而伴随模式分辨率
68 的提高，不可避免地会遇到“灰色区域”尺度的问题（Wyngaard, 2004；Gerard, 2007），
69 此时传统的积云对流参数化方案不再适用。“灰色区域”即指某个分辨率区间，在这个
70 区间内，既包括不能被模式的动力结构完全解析的物理过程、又存在模式无法给定合理
71 的参数化方案来表达的物理过程（Arakawa and Wu, 2013；Suhas and Zhang, 2015；张
72 旭等，2017）。模式的“灰色区域”问题在一定程度上限制了数值天气预报模式在高分
73 辨率条件下性能的提高，甚至还有可能出现分辨率提高而预报变差的现象（Deng and
74 Stauffer, 2006；赵晨阳和徐国强，2020）。在“灰色区域”尺度内是否使用对流参数化
75 方案、以及如何准确描述“灰色区域”尺度的对流过程仍是值得探讨的问题。

76 为了克服这一问题，一些中尺度天气模式中提出了尺度自适应（scale-aware）的参
77 数化方案，其中，尺度自适应的积云对流方案是指积云参数化过程需要尽可能地与模式
78 分辨率保持一致，使物理过程在网格分辨率变化时能够适应模式的变化。例如：Zheng
79 et al. (2016) 通过调整 Kain-Fritsch (KF) (Kain and Fritsch, 1993) 方案的中尺度对流
80 触发、动力控制以及闭合假设、同时将夹卷率调整为依赖模式水平分辨率的夹卷，发展
81 了尺度自适应的 MKF 方案。Grell and Freitas (2014) 在 GD (Grell and Dévényi, 2002)
82 方案的基础上发展了适用于高分辨率模拟的尺度自适应 Grell-Freitas 方案。

83 如今，尺度自适应方案已成为数值天气预报模式发展的重要方向（Han et al., 2017；
84 Song and Zhang, 2018；Majumdar et al., 2021）。例如，王瑞等（2021）对一次极端降
85 水过程进行回报分析，结果表明当大比例的双层嵌套网格的外网格中使用尺度自适应的
86 积云方案时，能更真实地模拟出内圈高分辨率网格的极端降水总量和降水的日变化情况。
87 赵晨阳和徐国强（2020）通过比较分析有、无尺度自适应的 KFeta 方案的模拟结果，认

为增加尺度自适应能力的方案更适用于高分辨率数值预报模式。杨扬等（2021）分别用两种尺度自适应方案和三种传统方案对夏季降水进行模拟，发现尺度自适应方案能在一定程度上改善小量级降水的空报率和大量级降水的漏报率。

然而关于尺度自适应的积云对流方案在中国地区的应用研究还比较少（Sun et al., 2014; 刘伟光等, 2019; Zhang et al., 2021），一些研究认为，当模式网格距小于 5 km 时，使用显示对流可以对极端降水事件进行更合理的预报（Han et al., 2016; 徐之骁和徐海明, 2017）；但也有研究表明，高分辨率情况下使用显示对流模拟，仍然存在很多系统性偏差。即使网格分辨率提高到 1 km，对流参数化方案的预报结果也会受不同类型的暴雨过程的影响（Lee et al., 2011）。总而言之，对高分辨率模拟是否适用对流参数化方案仍没有一致的结论（Gerard, 2007），关于尺度自适应的积云对流方案在公里尺度下对区域降水模拟的适用性也尚不明确。

基于以上问题，本文利用 WRF 中尺度天气模式，选取不同的微物理参数化方案和边界层方案、以及 11 种对流参数化方案分别对 2019 年 6 月 6 日至 6 月 7 日和 2020 年 7 月 7 日至 7 月 8 日在浙江省及周边地区发生的两次梅雨暴雨过程进行数值模拟，模拟的水平分辨率为 1 km，研究在“灰色区域”内，不同对流参数化方案对浙江梅雨锋暴雨模拟的影响，以期为区域数值模式对梅雨锋暴雨的高分辨率预报效果提供一定程度的改善依据。

2 个例简介

个例一（CASE_1）：2019 年 6 月 6 日 08 时至 7 日 08 时，西太副高西伸加强，高空浅槽东移，低层低涡发展东移，且低涡南侧伴随一支西南急流，使浙江西南部地区出现了一次强降水天气过程。这是 2019 年江南梅雨入梅的首场暴雨过程，其中丽水、衢州多个乡镇累积雨量超过 150 mm，浙江省 24 小时累积雨量有 2 站分别为江山市莲华山 310.6 mm、江山市耕读村 303.8 mm，全省超过 50 mm 的雨量站共 176 个。在此次特大暴雨的影响下，浙江西南部地区出现了严重的洪涝以及人员伤亡。

个例二（CASE_2）：2020 年 7 月 7 日 08 时至 8 日 08 时，受西太副高西伸加强、高空槽东移加深、低空切变东移的影响，加上切变线南侧有西南急流配合，大气层结表现出上干下湿的强烈不稳定性，导致 2020 年梅汛期一次典型的江南梅雨锋暴雨过程。浙江西部出现了暴雨，局部大暴雨，尤其在开化、淳安两县 24 小时雨量分别 97.2 mm 和 89.2 mm，浙江省过程累积雨量最大的站为淳安县芹川村（175.1 mm），全省超过 50 mm 的雨量站共 360 个。此外，此次降水过程还造成新安江水库增水明显，截至 7 日 22 时 15 分，新安江水库水位 108.42 m，超汛限水位 1.75 m，在已开启 7 孔泄洪的情况下

119 水位还在持续上涨，新安江水库不得不在 8 日 09 时开启全部 9 个泄洪闸泄洪，这是水
120 库建成运营 61 年来首次全面开闸。

121 3 数值模式与试验设计

122 表 1 试验设计描述

123 Table 1 Summary of numerical experiments

试验组别	微物理方案	行星边界层方案
G1	Thompson (Thompson et al., 2008)	YSU (Hong et al., 2006)
G2	Thompson	MYJ (Janjić, 1994)
G3	WSM6 (Hong and Lim, 2006)	YSU
G4	WSM6	MYJ

124 表 2 积云对流方案描述

125 Table 2 Summary of cumulus convection schemes

积云对流方案	方案简称
None	NONE
Kain-Fritsch (Kain, 2004)	KF
Betts-Miller-Janjić (Janjić, 1994)	BMJ
Grell-Freitas (Grell and Freitas, 2014)	GF
Grell-3 (Grell, 1993)	Grell
Tiedtke (Tiedtke, 1989)	TK
Zhang-McFarlane (Zhang and McFarlane, 1995)	ZM
KF-CuP (Berg et al., 2013)	KF-C
Multi-scale KF (Zheng et al., 2016)	MKF
KIAPS SAS (Kwon and Hong, 2017)	KSAS
New Tiedtke (Zhang et al., 2011)	NTK

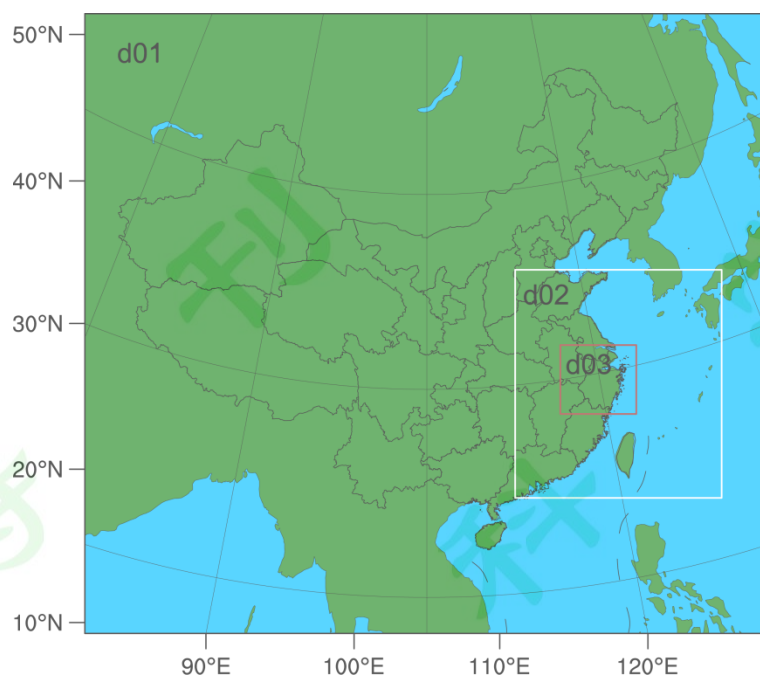


图 1 模式模拟区域

Fig. 1 Model domain of numerical simulations

本文利用 WRF V4.0.2 模式，设计单向三重嵌套，模拟区域如图 1 所示。垂直方向分为 51 层，水平网格距为 $9 \times 3 \times 1$ km，时间步长分别为 36 s、24 s、12 s。模式的第一、二重嵌套选取一致的微物理、边界层和积云对流参数化方案（分别为 WSM6、YSU 和 BMJ）。在第三重嵌套区域中，本文选择两个微物理方案（WSM6 和 Thompson）和两个行星边界层参数化方案（YSU 和 MYJ）进行交叉组合，形成 4 组方案（G1-G4，见表 1），再配合模式中的多套积云参数化方案（表 2），组成不同的对流参数化试验，其中，NONE 表示不考虑对流的方案，GF、MKF 和 KSAS 为三组具有尺度自适应能力的积云对流方案，其余均为传统的积云对流方案。此外，模式中剩下的参数设置均保持一致，表面层采用 Monin-Obukhov 方案，陆面过程采用 Unified Noah 陆面模式，长波、短波辐射分别选用 RRTM 和 RRTMG 方案。模式的初始场和侧边界场均采用 NCEP GFS 资料，起报时间分别为 2019 年 6 月 6 日 08 时和 2020 年 7 月 7 日 08 时（北京时），网格分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

4 检验评估方法

本文使用浙江省气象信息网络中心提供且已经过质量控制的 2961 个气象站（包括自动站）的观测降水资料对省内 24 小时模拟降水做定量检验评估。具体的统计指标包括相关系数（Corr）、空报率（FAR）、漏报率（FOM）、范围偏差评分（FBIAS）、TS 评分（Threat Score）和 FSS 评分（Fractions Skill Score）等（Roberts and Lean, 2008; Weusthoff et al., 2010），再结合传统的站点-站点（P2P）、格点-格点（G2G）和邻域

法（FSS）三种评估方法检验分析模拟试验的降水强度和降水分布与实际降水的差异，定量地展示不同积云方案对梅雨锋降水的预报水平。

利用美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）数值预报发展试验中心（Developmental Tested Center, DTC）研发的模式检验评估工具 MET V8.1.2（Model Evaluation Tools V8.1.2, Newman et al., 2018）对 TS 评分、FAR 评分、FOM 评分、FBIAS 评分以及 FSS 评分进行计算，具体表达如下：

$$TS = NA / (NA + NB + NC) \quad (1)$$

$$FAR = NB / (NA + NB) \quad (2)$$

$$FOM = NC / (NA + NC) \quad (3)$$

$$FBIAS = (NA + NB) / (NA + NC) \quad (4)$$

$$FSS = 1 - \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (P_{mi} + P_{oi})^2 / \frac{1}{N_x N_y} \left[\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} P_{mi}^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} P_{oi}^2 \right] \quad (5)$$

在公式（1）-（4）中，NA 表示正确预报部分，NB 表示空报部分，即预报有降水而观测无降水，NC 表示漏报部分，即预报无降水而观测有降水；TS 表示 TS 评分，它的值在 0-1 之间，评分越接近 1 表示预报准确度越高，越接近 0 则认为预报效果越差；FAR 表示空报率，FOM 表示漏报率，它们的值都介于 0-1 之间，越接近 0 表示预报结果越好，等于 0 表示预报完全准确；FBIAS 即为范围偏差评分，它的数值越接近 1，表示预报效果越好，当 FBIAS > 1 时，说明预报降水范围要大于实际降水范围，反之则表示预报降水范围小于实际的；公式（5）中，FSS 表示 FSS 评分， N_x 、 N_y 分别表示研究区域内 x、y 轴方向的格点数， P_{mi} 和 P_{oi} 分别表示邻域半径内的预报概率值和观测概率值。FSS 评分的范围同样为 0-1，它代表预报结果和实际发生降水格点重叠的比率，当 FSS 趋于 1 时表示预报与实况的事件发生概率一致，趋于 0 时则认为无预报技巧。

在模拟与观测降水进行对比分析之前，对于 P2P 检验，本文首先利用最近邻插值法将模拟结果插值到对应的观测站点，对于 G2G 检验，则首先利用反距离加权的插值方法将观测站点资料插值到对应的模式网格点。此外，本文还按降水阈值将降水分成不同类型（表 3）。

表 3 不同降水类型的阈值划分

Table 3 Threshold division of different precipitation types

阈值	$\geq 0.1\text{mm}$	$\geq 10.0\text{mm}$	$\geq 25.0\text{mm}$	$\geq 50.0\text{mm}$	$\geq 100.0\text{mm}$
降水类型	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨

考虑到本文主要目的是研究有、无积云对流参数化方案对高分辨率格点降水预报结果的影响，以及尺度自适应的积云对流参数化方案对提升 1 km 高分辨率降水预报能力

176 的影响，因此在后文的比较分析中，本文将 11 个积云对流参数化方案的试验结果分为
177 三类：（1）无积云对流参数方案（试验 NONE），（2）传统积云对流参数方案（7 组
178 试验：KF、BMJ、Grell、TK、ZM、KF-C 和 NTK），（3）尺度自适应的积云参数化方
179 案（3 组试验：GF、MKF 和 KSAS），再分类进行比较研究。

180 5 模拟结果分析

181 5.1 不同检验评估方法的比较

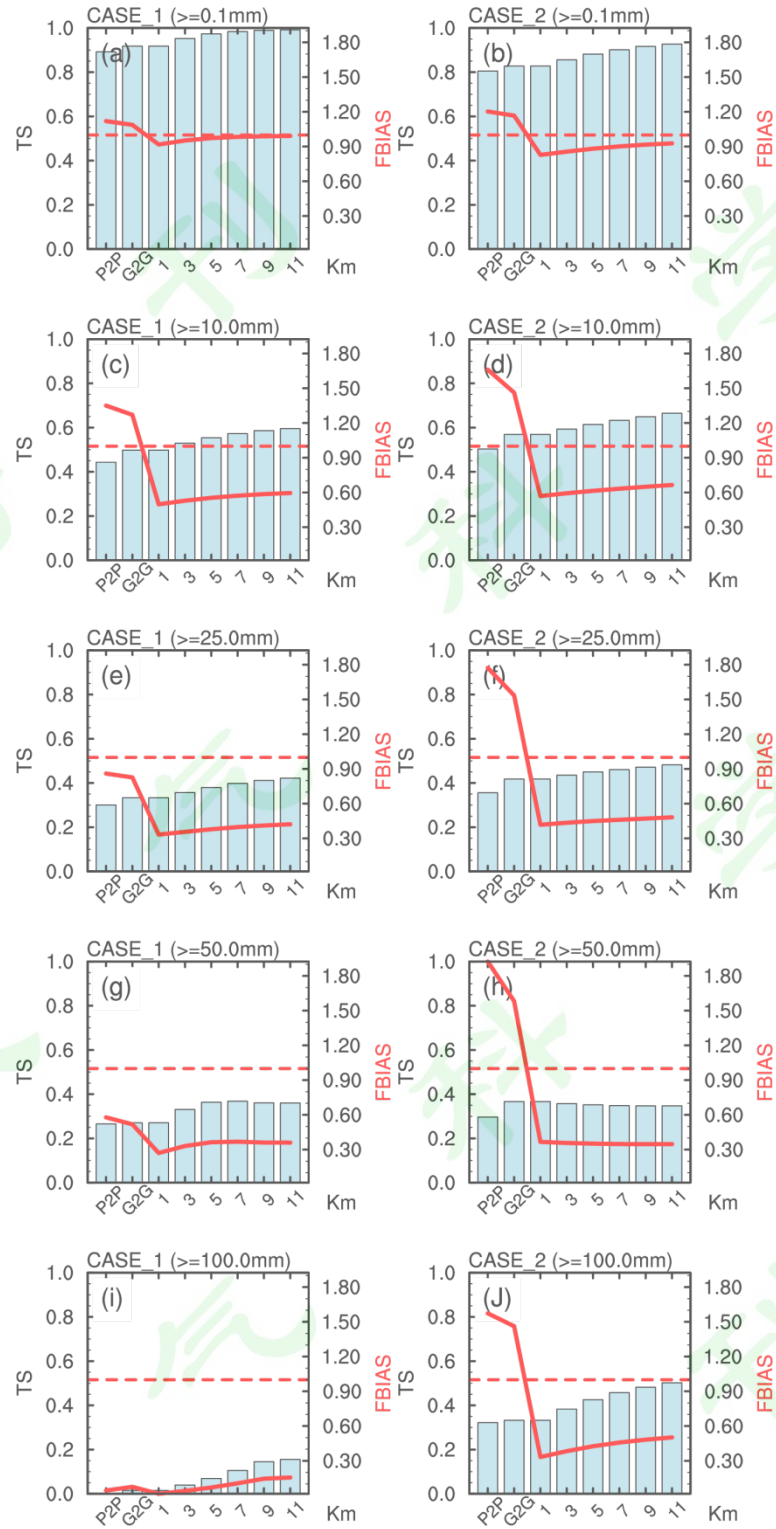


图 2 不同分辨率网格降水预报检验方法对 G1_NONE 中不同降水量级的 TS（柱状图）和 FBIAS 评分（红色实线）图，红虚线为 FBIAS=1 的参考线。横坐标中，“P2P”表示传统的站点-站点检验、“G2G”表示传统的格点-格点检验、以及不同邻域半径下（单位：km）的邻域（FSS）检验结果。左列（a，小雨；c，中雨；e，大雨；g，暴雨；i，大暴雨）表示 CASE_1 的结果，右列（b，小雨；d，中雨；f，大雨；h，暴雨；j，大暴雨）表示 CASE_2 的模拟结果。

Fig. 2 The TS (blue histogram) and FBIAS (red line) of 24 hours precipitation forecast of G1_NONE for different threshold precipitation by different test methods, where the red dotted line is the reference line with FBIAS=1. In X-axis, “P2P” indicates the traditional site-site verification; “G2G” indicates the traditional grid-grid verification; and the neighborhood (FSS) test method for different neighborhood windows (unit: km). The left column (a, c, e, g, i) are results of CASE_1, and the right column (b, d, f, h, j) are results of CASE_2

对于高分辨率格点降水预报的结果，客观有效的评估方法往往能更清晰地表现模式的预报水平（Chakraborty, 2010; Mittermaier and Roberts, 2010），当前天气业务预报中常采用传统点对点（包括 P2P 和 G2G）以及邻域检验方法。其中，传统点对点方法能在空间上表现出高分辨率格点降水预报的地域差异，而邻域法能够通过变换邻域半径从而获得不同空间尺度上的预报评估（潘留杰等, 2017），可见，不论是传统的点对点方法还是邻域法，对高分辨率格点降水的预报性能的评估都具有重要的适用价值。本文以 G1 组试验中不考虑积云对流方案的 NONE 试验（G1_NONE）为例，展示不同评估方法的预报技巧（图 2）。从图中可看出，不论是传统的点对点方法还是邻域法，随着降水量级的增加，FBIAS 和 TS 评分都呈减小的变化趋势，尤其是在 CASE_1 中，到大暴雨量级时，FBIAS 和 TS 评分已趋于 0，FBIAS 评分趋近于 0 表明降水预报的落区范围很小、接近于 0，TS 评分趋近于 0 表明模式对降水的预报准确度很低，两个指标都说明模式对该次降水的大暴雨预报效果较差。在同一降水量级的预报结果中，传统方法检验中 FBIAS 评分 > 1，邻域法检验中为 FBIAS 评分 < 1，说明预报的降水范围的检验在严格的点对点方法中偏高，而在邻域检验方法中普遍低于观测的降水范围。随着邻域法中邻域半径的增加，FBIAS 评分逐渐趋近于 1，TS 评分也呈现出缓慢增加的趋势。

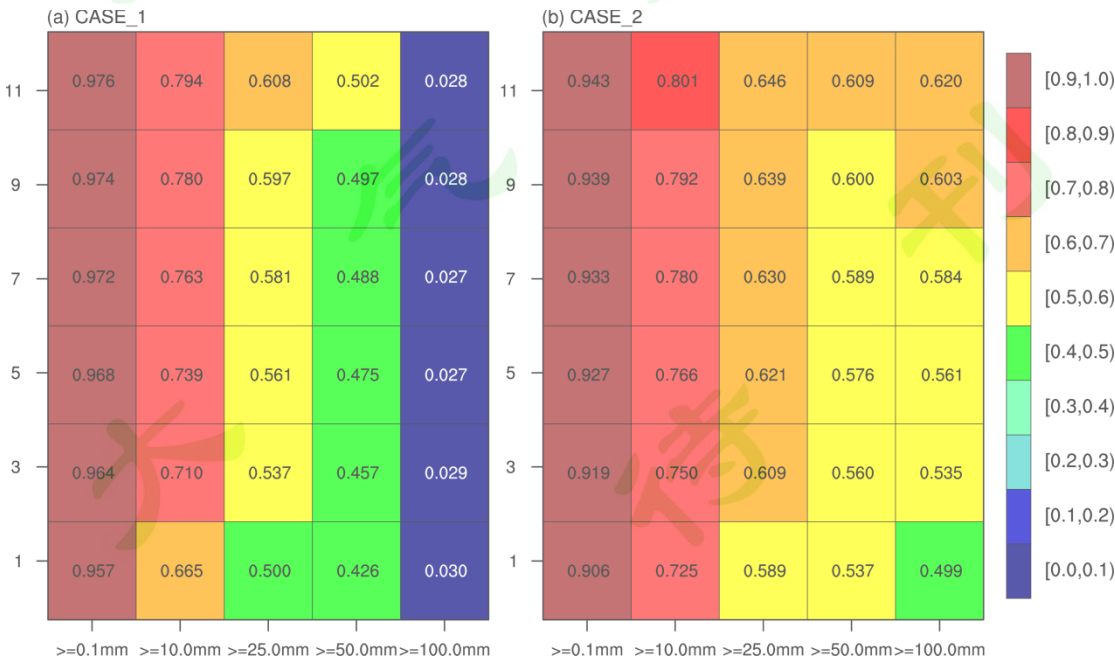


图 3 不同降水量级和邻域半径下, G1_NONE 试验的 24 小时累积降水预报的 FSS 评分。纵坐标表示邻域半径 (单位: km); 横坐标表示降水量级 (单位: mm)。

Fig. 3 The FSS of 24 hours precipitation forecast by G1_NONE for different thresholds of precipitation and spatial scales. The Y-axis represents the radius (unit: km); the X-axis represents the threshold of precipitation (unit: mm)

更进一步地, 针对 FSS 检验法, 本文还比较了不同邻域半径的 FSS 评分 (图 3)。结合图 2 的结果, 我们可以判断 FSS 检验法采用多大半径范围能得到最优的预报技巧表现。具体地, 图 3 中对于小雨量级的降水, CASE_1 和 CASE_2 的 FSS 评分都很高 (>0.9), 说明模式对发生降水的预报较为准确; 随着降水量级的增加, FSS 评分逐渐减小, 其中, CASE_1 的大暴雨 FSS 评分不足 0.1, 表明模式没有抓住该次降水的大暴雨过程; CASE_2 中, 从小雨到大雨量级的 FSS 评分呈线性减小, 大雨到大暴雨类型的 FSS 评分略有减少, 邻域半径为 1 km 时, 对大暴雨预报的 FSS 评分也接近 0.5, 表明模式对 CASE_2 中各类降水类型都具有很好的预报能力, 并且能较好地模拟出该次降水的强降水雨带。此外, 随着邻域半径范围的不断增加, 同一降水量级的 FSS 评分呈逐渐增大的变化。随着邻域半径由 1 km 增大到 3 km, FSS 也有较显著的增大, 但当邻域半径大于 3 km 后, FSS 评分的变化已较为缓和。此外, 本文还利用传统方法与邻域方法对其他对流方案的模拟结果也进行了评估, 都表现出与 G1_NONE 一致的变化特征 (图略)。

可见, 相较于传统的点对点检验方法, FSS 检验法对暴雨模拟的检验结果表现更好一些, 并且在邻域半径为 3 km 时的预报表现最优。但不论是传统的检验方法还是 FSS 检验法, 都能一定程度地反映出模式对降水的预报性能, 传统点对点的检验方法更苛刻地表现出高分辨率格点降水预报的地域差异, 而邻域法对小范围的强降水的模拟评估更客观。因此, 在后文的分析中, 本文主要以邻域半径为 3 km 的 FSS 检验法的检验结果来具体研究讨论不同积云对流参数化方案对两次降水过程的预报表现水平。

5.2 不同积云对流参数化对降水模拟的影响

本节将各积云对流参数化方案的预报结果分为三类: 无积云对流方案、传统积云对流方案以及尺度自适应积云对流方案, 利用 3 个评估指标 (TS、FOM 和 FAR 评分) 定量地比较分析不同积云对流方案对两次梅雨锋暴雨的 1 km 高分辨率预报水平。

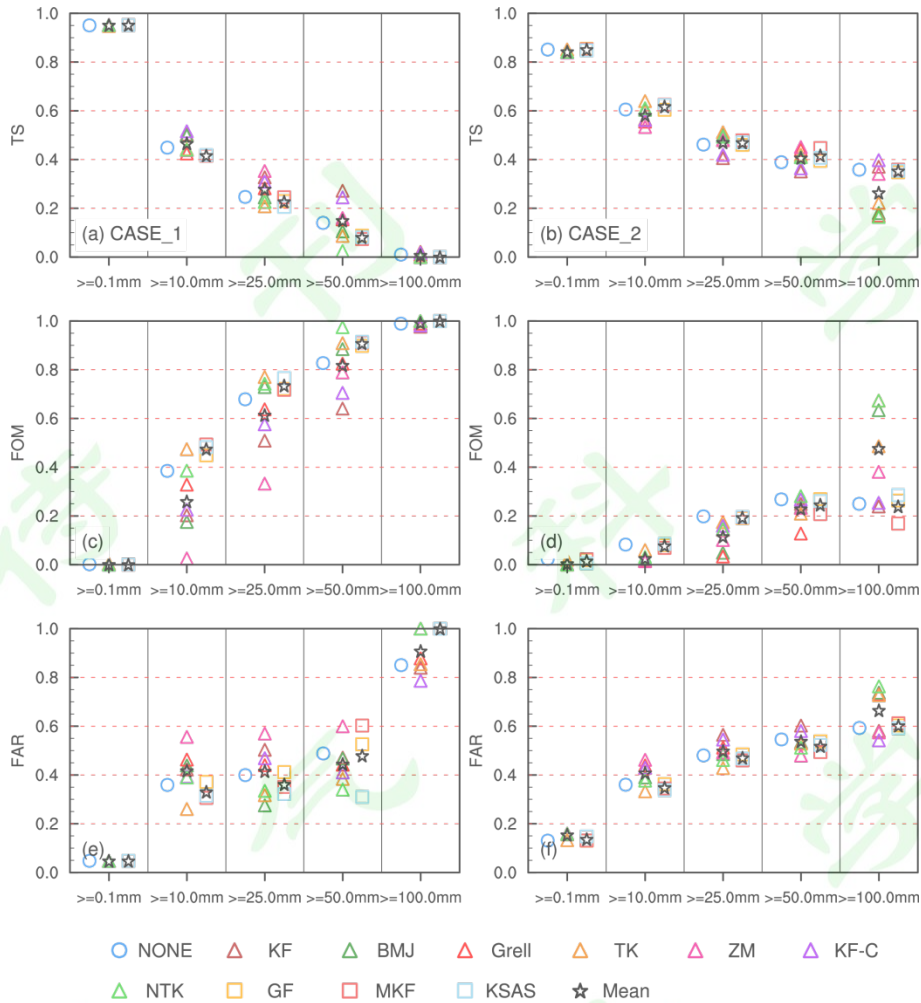


图 4 三类积云对流方案在 G1-G4 组合方案下预报的集合平均结果：TS 评分（a-b），FOM 评分（c-d）和 FAR 评分（e-f）。左列（a, c, e）为 CASE_1 的结果，右列（b, d, f）为 CASE_2 的结果。

Fig. 4 Average forecast ensemble results of three types of cumulus convection schemes in G1-G4 combination schemes: TS (a-b), FOM (c-d), and FAR (e-f). The left column (a, c, e) is the result of CASE_1, and the right column (b, d, f) is the result of CASE_2

图 4 为三类积云对流方案在四组微物理和行星边界层参数化组合方案（G1-G4）下模拟结果的集合平均。在小雨降水类型中，三类积云方案在 CASE_1 和 CASE_2 中的 TS 评分都较高（TS 评分：CASE_1 ≥ 0.9 ，CASE_2 ≥ 0.8 ），并且 FAR 评分（ < 0.2 ）和 FOM 评分（ ≈ 0 ）都很小，说明各方案都能较好地再现出 CASE_1 和 CASE_2 发生降水的情况。但随着降水量值的增大，三类积云方案的评分也逐渐呈现差异，并且各方案对不同降水个例的预报水平也有明显的区别。

在 CASE_1 中（图 4a, c, e），TS、FOM 和 FAR 评分随着降水阈值增大都呈现线性变差的特点（即 TS 评分越来越小、FOM 和 FAR 评分越来越大的变化特征）。TS 评分减小说明各方案对 CASE_1 发生降水的预报整体变差，即预报的降水范围与观测降水

的范围重合度降低，而 FOM 和 FAR 评分的增大说明模式的漏报率和空报率增大、预报失误增加，进一步验证模式预报降水的区域与实际观测降水区域间的差异变大，模式对暴雨-大暴雨量级的预报没有对小雨-中雨量级落区的预报结果好。具体看来，在中雨-大雨量级中，传统积云方案集合平均结果的漏报率（FOM）（空报率（FAR））比尺度自适应积云方案集合平均结果的低（高），说明传统积云方案的预报降水范围偏大，击中率（1-FOM）高但空报率也高，而尺度自适应积云方案的预报降水范围偏小，空报率低但击中率也偏低，其中 ZM 方案的 FOM 评分最小（在中雨量级中基本为 0，大雨量级中为 0.25），但 FAR 评分是积云方案中最高的（中雨和大雨量级中评分接近，在 0.55 左右）；而尺度自适应方案的结果较为集中，GF 方案的表现稍好。从 TS 评分看来，尺度自适应积云方案的结果要略低于传统积云方案的。当降水量级达到暴雨-大暴雨量级时，此时三类积云对流方案模拟结果的 3 个评分也都表现得越来越差，说明模式普遍低估了此次降水事件的降水量级，基本没再现出大暴雨量级的降水，对暴雨量级的降水范围也远低于实际观测的降水情况，尤其是尺度自适应积云方案的模拟结果，集合平均结果普遍略低于传统积云方案的结果。

在 CASE_2 中（图 4b, d, f），随着降水阈值的增大，FOM 评分和 FAR 评分呈逐渐增加、TS 评分呈逐渐减小的变化特征。中雨量级的模拟结果与 CASE_1 的类似，但各方案的结果相较于 CASE_1 而言分布更为集中，其中传统积云方案的空报率在三类积云方案中最高，而漏报率集中分布在 0 值附近，说明模式对降水范围的预报偏高；此时尺度自适应积云方案的漏报率（FOM）也很低（在 0.1 左右分布），TS 评分大于传统积云方案的，并且空报率（FAR）为三类积云方案中最低的，表明尺度自适应积云方案在一定程度上改善了中雨量级降水预报的空报率（FAR），且它的预报结果与实际观测降水更为接近。当降水量级达到大雨量级时，各评分在图中的分布情况与中雨时的结果一致，不过传统积云方案的评分的离散程度更大；在 TS 评分中，传统和尺度自适应的积云方案的集合平均结果都为 0.5，其中传统积云方案的 Grell 和 BMJ 方案的 TS 评分低于 0.5；FOM 与 FAR 评分也表明尺度自适应积云方案的预报结果要优于传统积云方案的结果。当降水量级达到暴雨-大暴雨量级时，此时尺度自适应积云方案对预报结果的改善效果更加明显，传统积云方案的预报结果不论是在预报降水的漏报率、空报率上都不如尺度自适应积云方案的结果好，说明尺度自适应积云方案也对大量级降水预报的漏报率有一定改善作用，这也与杨扬等（2021）的结论一致。综合而言，尺度自适应积云方案的 TS 评分依旧是明显高于传统积云方案的结果的。

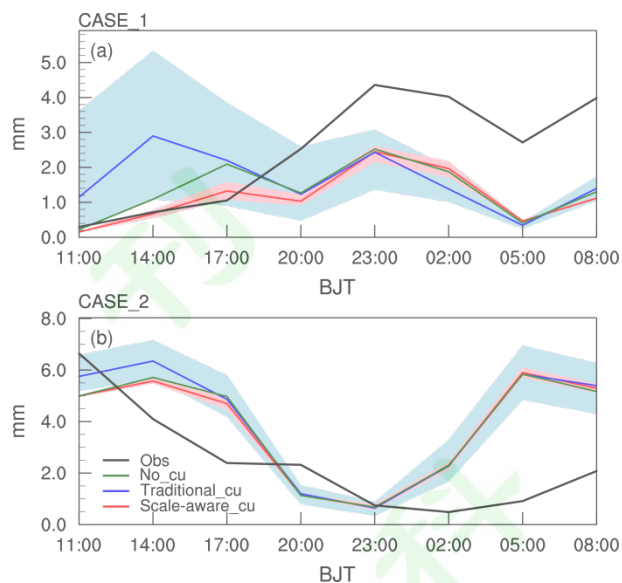


图 5 (a) CASE_1 和 (b) CASE_2 在三类积云对流参数化方案下的 3 小时降水量随时间的变化与同时段内实际降水量的变化 (单位: mm)。其中, 黑线表示实况变化; 彩色实线表示三类积云方案的集合平均变化; 阴影表示集合内各试验在每个时段的最大/小值范围。

Fig. 5 3 hours variations of observed (Obs) and precipitation forecast over Zhejiang province of three types of cumulus convection schemes respectively are cumulus convection free (No_cu), traditional cumulus convection (Traditional_cu), and scale-aware cumulus convection (Scale-aware_cu). (a) CASE_1; (b) CASE_2

此外, 本文还分析了 CASE_1 和 CASE_2 的降水日变化情况 (图 5)。对于 CASE_1 来说, 降水主要呈单峰结构, 由于西南急流带中不断有中尺度扰动系统新生后沿着雨带主轴移动而形成“列车效应”, 导致强降水时间持续且较为集中, 在 23:00 达到降水峰值, 并在凌晨 05:00 之前始终维持较强的持续性降水, 图 5a 中可看出, 三类积云方案都能模拟出该时段的持续性降水, 但量值整体偏低。在 17:00 之前, 无积云方案和传统积云方案的降水模拟明显高于观测, 并在 14:00 出现一个降水峰值, 而实况中的降水在该时段是一个逐渐增长的趋势, 没有出现明显峰值, 尺度自适应积云方案的结果与实况一致。在 CASE_2 中 (图 5b), 最大降水量出现在前 3 小时的累积降水中, 随后降水呈减弱趋势, 第二天凌晨 05:00 起, 降水又有增加的趋势。整体看来, 三类积云方案的降水日变化表现一致, 模拟结果出现两个峰值现象, 第一个峰值在午后 14:00 左右, 第二个峰值出现在第二天凌晨 05:00。对于第一个峰值, 实况中并没有相应的变化与之对应, 模拟结果明显强于实际情况, 相比较而言, 尺度自适应积云方案的平均结果在此时段最接近观测 (图 5b 中红线), 到 20:00-23:00 时段, 模拟与观测结果最为接近, 随后, 观测的 3 小时累积降水量从夜间 02:00 开始增加, 但模式从 23:00 就开始增加, 较观测提

前了 3 小时。三类积云方案对降水过程后 12 小时的模拟结果较为一致，模拟的降水量值明显强于观测的。

5.3 积云对流方案对不同微物理和边界层参数方案的敏感性分析

上述分析都是基于 4 组不同的边界层和微物理方案组合（G1-G4）的集合平均结果而言的，对于预报结果受不同边界层和微物理方案影响的具体情况尚不清晰。因此，本节在传统积云对流方案和尺度自适应积云对流方案的预报结果中挑选出表现相对较好的方案，以此展现传统积云对流方案和尺度自适应积云对流方案对梅雨锋暴雨的 1 km 分辨率预报结果受不同边界层和微物理方案的影响差异。关于积云对流方案的选择，考虑到业务预报中对暴雨-大暴雨的预报更为关注，所以本文以暴雨-大暴雨降水量级的各类评估指标作为参考依据，选择表现最优的积云对流方案的结果。对 CASE_1 而言，模式对暴雨-大暴雨降水量级的预报结果普遍较差，所以我们主要参考大雨降水量级的结果，传统积云对流方案选择 KF 方案、尺度自适应积云方案选择 KSAS 方案的结果；对于 CASE_2，综合考虑各积云对流方案的暴雨-大暴雨的预报结果，最终传统积云对流方案选择 KF-C 方案、尺度自适应积云方案选择 KSAS 方案的结果。

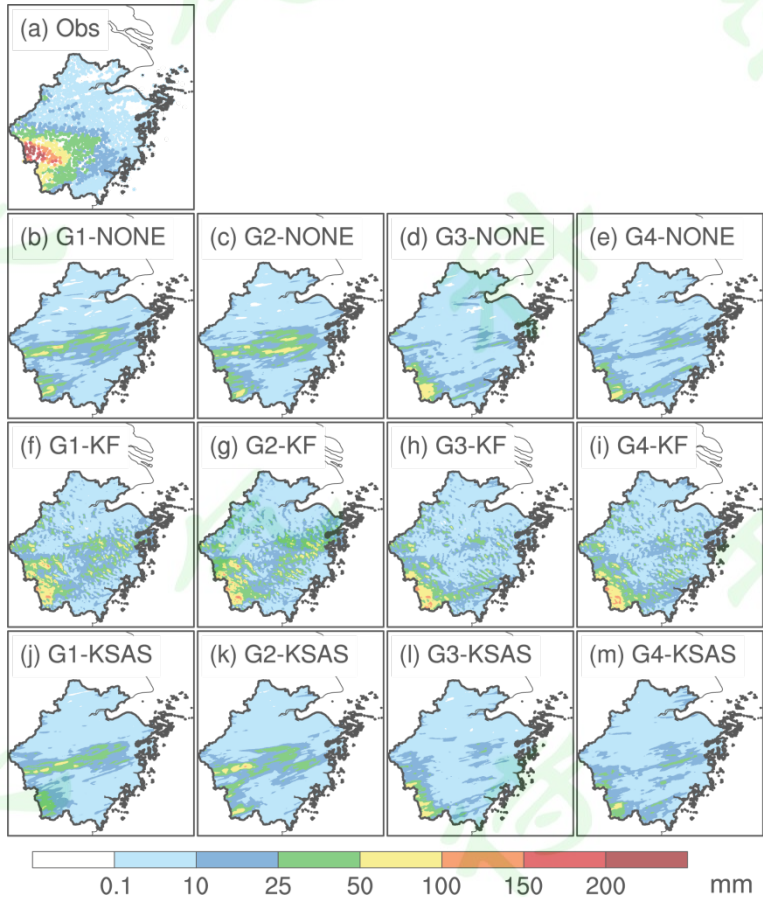


图 6 CASE_1 中 24 小时累积观测降水 (a) 以及 G1-G4 的组合方案下三类积云对流参数化方案的预报的累积降水 (b-m) 的空间分布 (单位: mm)。b-e: 无积云对流方案 (NONE) 的结果; f-i: KF 方案的结果; j-m: KSAS 方案的结果。

Fig. 6 Spatial distribution of 24 hours precipitation process forecast in CASE_1 for observation (a) and different parametric scheme designs (b-m). It includes the simulation results of no cumulus convection scheme (b-e), KF (f-i), and KSAS (j-m)

图 6 和图 7 分别为 CASE_1 和 CASE_2 中, 观测和不同参数化方案配置下模式预报的 24 小时累积降水空间分布情况。在 CASE_1 中 (图 6), 从站点观测的降水分布图 (图 6a) 中可以看出, 降水影响了整个浙江省地区, 雨带的纬向分布较宽, 而极端暴雨的范围较小, 200 mm 以上特大暴雨面积不足 1000 平方公里, 最大降水量中心分布在 28-29° N 之间、119.5° E 以西地区。三类积云对流方案预报的 24 小时累积降水 (图 6b-m) 再现了全省范围的大面积降水情况, 但对暴雨及以上量级的降水量模拟普遍偏低, 没能很好地再现出浙江西南部地区的大暴雨。模式中的降水大值区主要在丽水市的西南角, 相比实况落点偏南, 由于大值区的偏移, 使模式中整个雨带呈现西南-东北走向的分布。具体地, 从不同的微物理和边界层方案的组合结果来看, 不同组合对 KF 方案的影响没有对尺度自适应的 KSAS 方案和 NONE 方案的影响明显, 尺度自适应的 KSAS 方案从 G1-G2 的方案组合到 G3-G4 的方案组合中, 降水量明显减小, G1-G2 中的浙江中部一带出现了一个强度在 25-50 mm 的降水中心, 到了 G3-G4 该处的降水强度降为 0.1-10 mm, 整个浙江地区大于 10 mm 强度的降水分布面积远远小于实际观测的降水情况; KF 方案中, 浙江中部的降水强度和范围要高于实际观测, 而强降水中心的降水又比观测的降水弱, 方案组合由 G1-G2 到 G3-G4, 中部地区 25-50 mm 强度的降水分布分散, 西南角的降水中心强度增强。对比 G1 和 G2 方案组合的结果, 能看出 G1 的降水强度在无积云和尺度自适应积云方案中都明显弱于 G2 的降水强度。结合表 1 可看出, G1 和 G2 的微物理方案一致 (Thompson), G3 和 G4 的微物理方案一致 (WSM6), 说明在积云对流方案一致的情况下, 微物理方案对降水预报的影响较为明显, 尤其是对强降水的分布, 相较而言, 边界层方案对降水预报的影响稍弱, 对降水强度有一定的影响作用。此外, 尺度自适应的 KSAS 方案对不同边界层和微物理方案的改变比传统的 KF 方案更敏感。

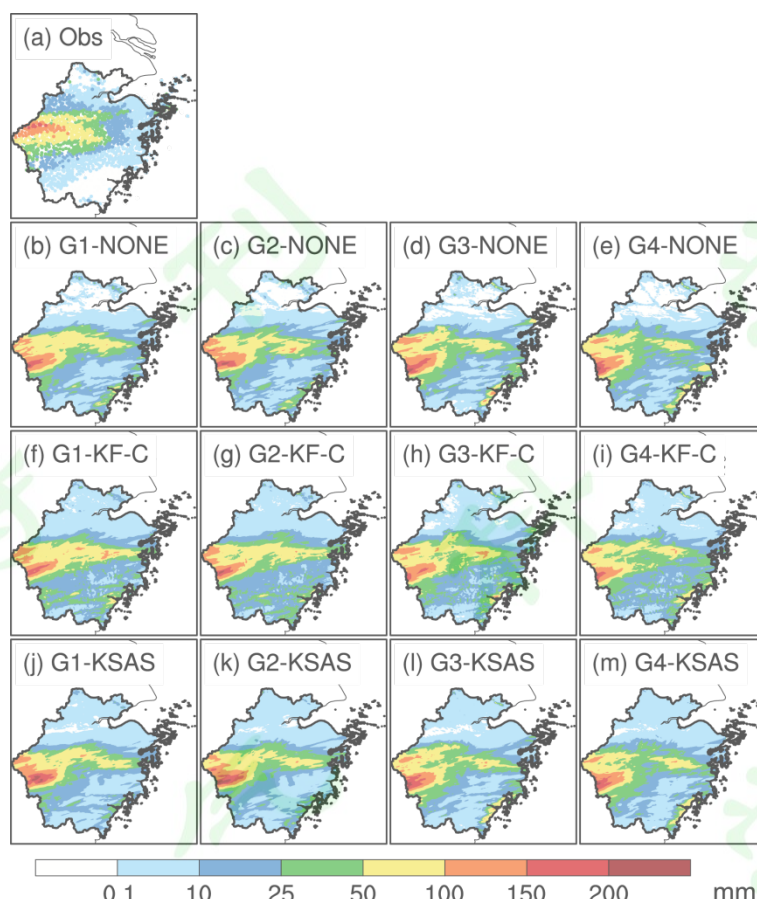


图 7 CASE_2 中 24 小时累积观测降水 (a) 以及 G1-G4 的组合方案下三类积云对流参数化方案的预报的累积降水 (b-m) 的空间分布 (单位: mm)。b-e: 无积云对流方案 (NONE) 的结果; f-i: KF-C 方案的结果; j-m: KSAS 方案的结果。

Fig. 7 Spatial distribution of 24 hours precipitation process forecast in CASE_2 for observation (a) and different parametric scheme designs (b-m). It includes the simulation results of no cumulus convection scheme (b-e), KF-C (f-i), and KSAS (j-m)

对于 CASE_2 的累积降水分布情况如图 7 所示, 此次降水的影响范围更大, 且累积降水强度也更强, 降水范围主要分布在 $28-30.5^{\circ}\text{N}$ 之间, 其中最大降水量在 $29-30^{\circ}\text{N}$ 间、 120°E 以西地区 (图 7a)。模式基本都能模拟出西-东走向的雨带分布, 但对降水中心的模拟普遍偏南, 且不同方案对降水大值区范围的判断有所区别。与 CASE_1 的预报结果类似, 受不同微物理方案的影响, G1 的降水空间分布与 G2 的较为一致, G3 的与 G4 的较为一致。具体地, G1 和 G2 预报的降水偏强, 暴雨雨带的经向分布大于实际观测的降水情况, 而 G3 和 G4 模拟的雨带经向分布范围更接近实际降水, 但在 $120-121^{\circ}\text{E}$ 之间依旧出现了一个虚假的降水大值区。对比不同类型的积云参数化方案结果可看出, KF-C 方案对 120°E 以西的降水中心的降水强度偏弱, 而又高估了 120°E 以东、以及 28°N 以南地区的降水强度; 而 NONE 方案与尺度自适应的 KSAS 方案的结果分布较为相似, 它们对实际降水的强度模拟与实况更为接近。同样, 从不同的微物理和边界层方案

的试验结果看来，微物理方案的改变比边界层方案改变对降水预报带来更显著的影响；此外，与 KF-C 方案的结果相比，不同微物理和边界层方案对尺度自适应的 KSAS 方案的影响更为明显。

5.4 积云对流方案对不同水平分辨率的敏感性分析

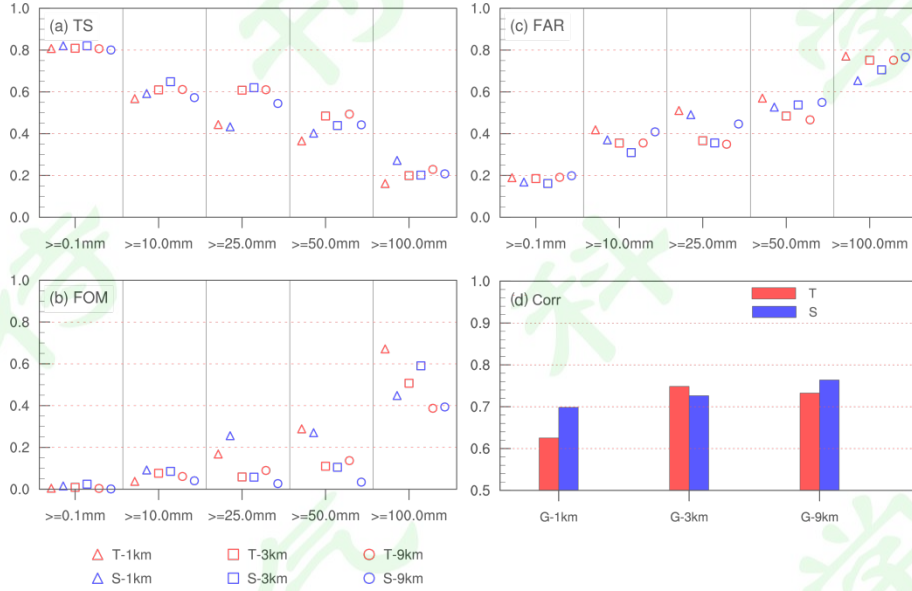


图 8 传统积云对流和尺度自适应的积云对流方案在三种网格分辨率（1 km，3 km 和 9 km）下模拟的 24 小时累积降水的不同降水类型的（a）TS 评分、（b）FOM 评分、（c）FAR 评分，以及（d）与观测降水的相关系数（Corr）。其中，红色符号表示传统积云对流方案模拟的集合平均结果（T），蓝色符号表示尺度自适应的积云对流方案模拟的集合平均结果（S）。

Fig. 8 (a) TS, (b) FOM, (c) FAR, and (d) correlation coefficient (Corr) and of 24 hours precipitation forecast for traditional cumulus convection and scale-aware cumulus convection schemes at three grid resolutions (1 km, 3 km, and 9 km). The red symbols represent the ensemble mean of traditional cumulus convection scheme simulation (T), and blue symbols represent the ensemble mean of scale-aware cumulus convection scheme simulation (S)

考虑到模式中 1-10 km 内都可视为“灰色区域”尺度的范围，而本文主要围绕 1 km 分辨率的模拟结果进行分析讨论，因此，我们又增加了 3 km 和 9 km 分辨率的两组试验，初步探讨在“灰色区域”范围内，对尺度自适应的积云对流方案而言，是否模式网格的分辨率越高，越有利于提高模式的模拟结果。以 CASE_2 例，利用不同的积云对流参数化方案模拟不同网格分辨率下的降水情况。图 8 为传统积云对流和尺度自适应的积云对流方案在不同网格分辨率下的 24 小时累积降水的模拟情况，将模式模拟结果按传统积云参数化方案（T）和尺度自适应积云参数化方案（S）分为两类进行集合平均，再利用 TS 评分、FOM 和 FAR 评分、以及相关系数（Corr）对各方案的结果进行定量的比

较分析。从图 8a 中可看出, 在大暴雨类型中, 模式分辨率由 9 km 提高到 1 km 时, 尺度自适应积云对流方案对模拟结果有明显改善, 主要体现在 TS 评分相较于传统积云对流方案的结果有显著提升, 并且落报率和空报率也都明显下降; 在中雨-大雨量级中, 网格分辨率的提高对降水模拟的空报率有所改善, 其他两个评估指标改善不明显, 大雨类型中随着分辨率提高 TS 评分反而降低。此外, 从各方案的预报结果与观测降水的相关系数(图 8d)可看出, 对于此次降水事件而言, 提高模式模拟的网格分辨率没能改善模式的模拟结果, 但在同等的网格分辨率下, 尺度自适应方案的相关系数始终普遍高于传统积云对流方案的, 说明在“灰色区域”范围内, 对降水的高分辨率预报而言, 选择尺度自适应的积云对流方案对提高模式的预报能力有更显著的贡献。

6 总结与讨论

本文依据对已有工作的调研, 选择使用 WRF V4.0.2 版本中对中尺度天气预报表现较优和气象业务预报中常用的云微物理方案和边界层方案, 分别与三类积云对流参数化方案(分别为: 无积云对流方案、传统积云对流方案和尺度自适应积云对流方案)组合, 探讨有、无积云对流参数化方案对 1 km 高分辨率格点降水预报结果的影响, 以及尺度自适应的积云对流参数化方案对降水预报的作用, 主要结论如下:

(1) 利用 P2P、G2G 和 FSS 检验法评估不同方案设计对降水模拟的结果, 发现传统的点对点检验方法和 FSS 检验法都能一定程度反映出各方案的降水预报水平。其中, 传统的点对点检验法能更严格地展现出高分辨率降水预报的地域差异, 而 FSS 检验法对小范围的强降水预报的评估则更客观。

(2) 三类积云对流方案对两次降水个例的小雨降水发生情况预报较好, 随着降水强度的增大, 各积云对流方案的预报水平出现明显差异。降水强度为中雨-大雨强度时, 各评估指标(TS、FOM 和 FAR 评分)都表明尺度自适应积云对流方案的结果要略优于传统积云对流方案的。当降水强度增大到暴雨-大暴雨强度时, 模式在 CASE_1 中普遍低估了实际降水强度, 不论是传统积云对流方案还是尺度自适应积云对流方案基本都没有再现出大暴雨类型的降水; 而在 CASE_2 中, 对大暴雨强度的降水而言, 尺度自适应积云对流方案对预报结果有明显改善, 不论是从预报的漏报率、空报率还是 TS 评分表现来看, 都要优于传统积云对流方案的结果。

(3) 在积云对流方案一致的情况下, 改变微物理方案对累积降水的空间分布有较明显的影响, 而边界层方案的改变对预报结果的影响相对较弱, 对降水强度的预报有一定影响。其中, 尺度自适应的积云对流方案在不同微物理和边界层方案下的模拟结果差异较明显, 而传统积云对流方案在 G1-G4 中的反应较弱(尤其是 CASE_1 中的结果)。

(4) 此外，文中以 CASE_2 为例，比较分析 1 km、3 km 和 9 km 三个网格分辨率下的降水模拟结果，发现随着网格分辨率的提高，尺度自适应的积云对流方案对大暴雨的模拟存在明显优势，但在其他降水类型下，分辨率的提高对模拟结果无明显改善。此外，对高分辨率的降水预报而言，尺度自适应的积云对流方案对模拟结果有比较明显的改善作用。

参考文献

- Arakawa A, Wu C M. 2013. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**: 3731–3742. doi:10.5194/acp-11-3731-2011
- Berg L K, Gustafson W I, Kassianov E I, et al., 2013. Evaluation of a modified scheme for shallow convection: implementation of CuP and case studies [J]. *Monthly Weather Review*, **141**: 134–147. doi: 10.1175/mwr-d-12-00136.1
- Chakraborty A. 2010. The skill of ECMWF medium-range forecasts during the year of tropical convection 2008 [J]. *Monthly weather review*, **138**: 3787–3805. doi: <https://doi.org/10.1175/2010MWR3217.1>
- Deng A, Stauffer D R. 2006. On improving 4-km mesoscale model simulations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **45**: 361–381. doi: 10.1175/jam2341.1
- Gerard L. 2007. An integrated package for subgrid convection, clouds and precipitation compatible with meso-gamma scales [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **133**: 711–730. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.58>
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Monthly weather review*, **121**: 764–787. doi: 10.1175/1520-0493(1993)121<0764:Peoaub>2.0.Co;2
- Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. *Geophysical Research Letters*, **29**: 38–31–38–34. doi: 10.1029/2002gl015311
- Grell G A, Freitas S R. 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**: 5233–5250. doi: 10.5194/acp-14-5233-2014
- Han J Y, Hong S Y, Sunny Lim K S, et al. 2016. Sensitivity of a cumulus parameterization scheme to precipitation production representation and its impact on a heavy rain event over Korea [J]. *Monthly Weather Review*, **144**: 2125–2135. doi: 10.1175/mwr-d-15-0255.1
- Han J, Wang W, Kwon Y C, et al. 2017. Updates in the NCEP GFS cumulus convection schemes with scale and aerosol awareness [J]. *Weather and Forecasting*, **32**: 2005–2017. doi: 10.1175/waf-d-17-0046.1
- Hong S Y, Lim J O J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, **42**: 129–151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Monthly Weather Review*, **134**: 2318–2341. doi: 10.1175/mwr3199.1

- Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Monthly Weather Review*, **122**(5): 927–945. doi: 10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2
- Kain J S. 2004. The Kain–Fritsch convective parameterization: An update [J]. *Journal of Applied Meteorology*, **43**: 170–181. doi: 10.1175/1520-0450(2004)043<0170:Tkcnpau>2.0.Co;2
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain–Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Emanuel K A, and Raymond D J, Eds., American Meteorological Society, 165–170.
- Kwon Y C, Hong S Y. 2017. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions [J]. *Monthly Weather Review*, **145**: 583–598. doi: 10.1175/mwr-d-16-0034.1
- Lee S W, Lee D K, Chang D E. 2011. Impact of horizontal resolution and cumulus parameterization scheme on the simulation of heavy rainfall events over the Korean Peninsula [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, **28**(1): 1–15. doi: <https://doi.org/10.1007/s00376-010-9217-x>
- Majumdar S J, Sun J, Golding B, et al. 2021. Multiscale forecasting of high-impact weather: Current status and future challenges [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102**: E635–E659. doi: 10.1175/bams-d-20-0111.1
- Mittermaier M, Roberts N. 2010. Intercomparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the fractions skill score [J]. *Weather and Forecasting*, **25**: 343–354. doi: <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222260.1>
- Newman K, Jensen T, Brown B, et al. 2018. The model evaluation tools v8.1 (METv8.1) user's guide. *Developmental Testbed Center*. <https://dtcenter.org/community-code/model-evaluation-tools-met/documentation/>, 437 pp.
- Roberts N M, Lean H W. 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events [J]. *Monthly Weather Review*, **136**: 78–97. doi: 10.1175/2007mwr2123.1
- Schwartz C S, Romine G S, Fossell K R, et al. 2017. Toward 1-km ensemble forecasts over large domains [J]. *Monthly Weather Review*, **145**: 2943–2969. doi: 10.1175/mwr-d-16-0410.1
- Song F, Zhang G J. 2018. Understanding and improving the scale dependence of trigger functions for convective parameterization using cloud-resolving model data [J]. *Journal of Climate*, **31**: 7385–7399. doi: 10.1175/jcli-d-17-0660.1
- Suhas E, Zhang G J. 2015. Evaluating convective parameterization closures using cloud-resolving model simulation of tropical deep convection [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**: 1260–1277. doi: 10.1002/2014jd022246

- Sun Y, Yi L, Zhong Z, et al. 2014. Performance of a new convective parameterization scheme on model convergence in simulations of a tropical cyclone at grey-zone resolutions [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **71**: 2078–2088. doi: 10.1175/jas-d-13-0285.1
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit Forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. *Monthly Weather Review*, **136**: 5095–5115. doi: 10.1175/2008mwr2387.1
- Tiedtke M. 1989. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models [J]. *Monthly Weather Review*, **117**: 1779–1800. doi: 10.1175/1520-0493(1989)117<1779:Acmsfs>2.0.Co;2
- Weusthoff T, Ament F, Arpagaus M, et al. 2010. Assessing the benefits of convection-permitting models by neighborhood verification: Examples from MAP D-PHASE [J]. *Monthly Weather Review*, **138**: 3418–3433. doi: 10.1175/2010mwr3380.1
- Wyngaard J C. 2004. Toward numerical modeling in the "terra incognita" [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**: 1816–1826. doi: 10.1175/1520-0469(2004)061<1816:Tnmitt>2.0.Co;2
- Zhang C, Wang Y, Hamilton K. 2011. Improved representation of boundary layer clouds over the Southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme [J]. *Monthly Weather Review*, **139**: 3489–3513. doi: 10.1175/mwr-d-10-05091.1
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model [J]. *Atmosphere-Ocean*, **33**: 407–446. doi: 10.1080/07055900.1995.9649539
- Zhang X, Yang Y H, Chen B D, et al. 2021. Operational precipitation forecast over China using the weather research and forecasting (WRF) model at a gray-zone resolution: Impact of convection parameterization [J]. *Weather and Forecasting*, **36**: 915–928. doi: 10.1175/waf-d-20-0210.1
- Zheng Y, Alapaty K, Herwehe J A, et al. 2016. Improving high-resolution weather forecasts using the weather research and forecasting (WRF) model with an updated Kain–Fritsch scheme [J]. *Monthly Weather Review*, **144**: 833–860. doi: 10.1175/mwr-d-15-0005.1
- 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 (in Chinese)*, **38(06)**: 658–667. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.011
- 李祥, 张立凤, 王敬国. 2020. 梅雨锋暴雨预报对分辨率与积云参数化的敏感性[J]. *暴雨灾害*, **39(6)**: 637-646. Li Xiang, Zhang Lifeng, Wang Jingnan. 2020. The sensitivity of

538 the prediction of Meiyu torrential rainfall to model resolution and cumulus
 539 parameterization [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 39(6):637–646
 540 刘梦娟, 张旭, 陈葆德. 2018. 边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估
 541 [J]. *大气科学*, 42(01): 52–69. Liu Mengjuan, Zhang Xu, Chen Baode. 2018.
 542 Assessment of the suitability of planetary boundary layer schemes at “grey zone”
 543 resolutions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (1): 52–69,
 544 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16269
 545 刘伟光, 陈海山, 俞淼. 2019. 积云对流参数化方案对东亚夏季环流和降水模拟的影响
 546 [J]. *大气科学*, 43(1): 64–74. Liu Weiguang, Chen Haishan, Yu Miao. 2019. Impacts
 547 of cumulus convective parameterization schemes on simulation of East Asian summer
 548 circulation and rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(1):
 549 64–74. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17222
 550 马雷鸣, 鲍旭炜. 2017. 数值天气预报模式物理过程参数化方案的研究进展[J]. *地球科*
 551 *学进展*, 32(07): 679–687. Ma Leiming, Bao Xuwei. 2017. Research progress on
 552 physical parameterization schemes in numerical weather prediction models [J].
 553 *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 32(7): 679–687. doi: 10.11867/j.issn.1001-
 554 8166.2017.07.0679
 555 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳等. 2017. 三种高分辨率格点降水预报检验方法的对比[J]. *气候*
 556 *与环境研究*, 22(1): 45–58. Pan Liujie, Xue Chunfang, Zhang Hongfang, et al.
 557 2017. Comparison of three verification methods for high-resolution grid precipitation
 558 forecast [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 22(1): 45–58. doi:
 559 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16012
 560 漆梁波. 2015. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J]. *气象*, 41(6):
 561 661–673. Qi Liangbo. 2015. Operational progress of high resolution numerical
 562 model on severe convective weather warning [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*,
 563 41(6): 661–673.
 564 陶诗言, 张晓玲, 张顺利. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社,
 565 1–192. Tao Shiyan, Zhang Xiaoling, Zhang Shunli. 2004. Tao Shiyan, Zhang Xiaoling,
 566 Zhang Shunli. 2004. A Study on the disaster of heavy rainfalls over the Yangtze River
 567 Basin in the Meiyu period [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press,
 568 1–192.
 569 王春明, 王元, 伍荣生. 2004. 模式水平分辨率对梅雨锋降水定量预报的影响[J]. *水动力*
 570 *学研究与发展*, 19(1): 71–80. Wang Chunming, Wang Yuan, Wu Rongsheng. 2004.
 571 The effect of model horizontal resolution on quantitative precipitation forecast for Meiyu

front torrential rainfall [J]. Journal of Hydrodynamics (in Chinese), **19(1)**: 71–80. doi: 10.3969/j.issn.1000-4874.2004.01.012

王瑞, 乔枫雪, 丁杨, 等. 2021. 不同嵌套方式下的积云对流方案对上海崇明极端暴雨高分辨率模拟的影响研究[J]. 气候与环境研究, **26**: 58–74. Wang Rui, Qiao Fengxue, Ding Yang, et al. 2021. Impact of cumulus parameterization schemes with multigrid nesting on the high resolution simulation of an extreme heavy rainfall event in Chongming, Shanghai [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), **26 (1)**: 58–74. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20016

徐之骁, 徐海明. 2017. 不同积云对流参数化方案对“7·21”北京特大暴雨模拟的影响[J]. 气象, **43(02)**: 129–140. Xu Zhixiao, Xu Haiming. 2017. Simulation contrast of different cloud parameterization schemes for the extremely severe torrential rainfall event in Beijing on 21 July 2012 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), **43(2)**: 129–140.

杨扬, 卢冰, 王薇, 等. 2021. 基于 WRF 的积云对流参数化方案对中国夏季降水预报的影响研究[J]. 气象学报, **79(4)**: 612–625. Yang Yang, Lu Bing, Wang Wei, et al. 2021. Impacts of cumulus parameterization schemes on the summertime precipitation forecast in China based on the WRF model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), **79(4)**: 612–625. doi:10.11676/qxxb2021.045

张旭, 黄伟, 陈葆德. 2017. 高分辨率数值预报模式的尺度自适应物理过程参数化研究[J]. 气象科技进展, **7(06)**: 105–110. Zhang Xu, Huang Wei, Chen Baode. 2017. A Study of the scale-aware physical parameterizations in high-resolution numerical weather prediction models [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), **7(6)**: 105–110. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.013

赵晨阳, 徐国强. 2020. 尺度适应的对流参数化方案对一次华南飑线模拟的影响[J]. 大气科学, **44(2)**: 297–314. Zhao Chenyang, Xu Guoqiang. 2020. The impact of scale-aware cumulus parameterization scheme on the numerical simulation of a squall line in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), **44(2)**: 297–314. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1905.18236