

马怡轩,徐国强,于翡.尺度适应积云对流参数化方案对台风“暹芭”的数值模拟[J].海洋气象学报,2025,45(1):34-44.  
MA Yixuan, XU Guoqiang, YU Fei. Impact of scale-aware cumulus convection parameterization scheme on numerical simulation of Typhoon Chaba [J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45 (1): 34-44. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240625002. (in Chinese)

## 尺度适应积云对流参数化方案对台风“暹芭”的数值模拟

马怡轩<sup>1</sup>,徐国强<sup>2,3</sup>,于翡<sup>2,3</sup>

(1.陕西省气象局,陕西 西安 710014;2.中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081;3.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

**摘要** 传统的积云对流参数化方案难以较好地适用于高水平分辨率,特别是10 km以下水平分辨率的降水数值模拟,尺度适应(scale-aware)积云对流参数化方案是对此进行改进的有效方法。在中国气象局中尺度模式(China Meteorological Administration MESOScale model, CMA-MESO)中应用尺度适应KFeta(Kain-Fritsch eta)积云对流参数化方案对台风“暹芭”进行800 m、1 km、3 km、10 km和20 km这5种水平分辨率的数值模拟试验。结果表明:(1)随着水平分辨率的提高,尺度适应KFeta积云对流参数化方案模拟的降水强度和落区更接近实况,显著减少了由积云引起的虚假性降水,提高了网格降水量。(2)随着对流强度减弱,尺度适应KFeta积云对流参数化方案TS(threat score)评分优势逐渐凸显,空报率和漏报率明显改善。(3)在降水最大时刻的强对流区域,尺度适应KFeta积云对流参数化方案雷达组合反射率因子的模拟结果更优。整体来看,尺度适应KFeta积云对流参数化方案在对流强度较弱的条件下表现更出色,为改进现行数值模式强降水预报提供了参考。

**关键词** CMA-MESO模式;KFeta方案;积云对流参数化方案;台风“暹芭”

中图分类号: P444;P456.7 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)01-0034-12

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240625002

## Impact of scale-aware cumulus convection parameterization scheme on numerical simulation of Typhoon Chaba

MA Yixuan<sup>1</sup>, XU Guoqiang<sup>2,3</sup>, YU Fei<sup>2,3</sup>

(1. Shaanxi Meteorological Service, Xi'an 710014, China; 2. CMA Earth System Modeling and Prediction Center, Beijing 100081, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Traditional cumulus convection parameterization schemes may be inefficient in the numerical simulation of precipitation with high resolution model, especially when the grid size less than 10 km, while the scale-aware cumulus convection parameterization scheme is an effective alternative. In this study, 5 simulation experiments with horizontal resolutions of 800 m, 1 km, 3 km, 10 km and 20 km are carried out using the CMA-MESO model (China Meteorological Administration MESOScale model) and the scale-aware KFeta (Kain-Fritsch eta) cumulus convection parameterization scheme for Typhoon

收稿日期:2024-06-25;修回日期:2024-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(42175167,U2142213);中国气象局能力提升联合研究专项(22NLTSZ006);中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2023022)

第一作者简介:马怡轩,女,硕士研究生,主要从事数值模式云微物理过程研究, mayx199921@163.com。

通信作者简介:徐国强,男,博士,研究员,主要从事数值模式云微物理过程研究, xugq@cma.gov.cn。

Chaba. The results are as follows. (1) With the increase of horizontal resolution, the precipitation intensity and falling area simulated by the scale-aware KFeta cumulus convection parameterization scheme are closer to the real situation, which significantly reduces the false precipitation caused by cumulus clouds and improves the grid precipitation. (2) With the weakening of convective intensity, the advantages of the scale-aware KFeta cumulus convection parameterization scheme gradually become prominent, and the missing ratio and false alarm ratio are significantly reduced. (3) In the strong convection area at the time of the maximum precipitation, the simulation results of the radar composite reflectivity of the scale-aware KFeta cumulus convection parameterization scheme are better. On the whole, the scale-aware KFeta cumulus convection parameterization scheme performs better under weak convective intensity, which provides a reference for improving the prediction of heavy precipitation in the current numerical model.

**Keywords** CMA-MESO model (China Meteorological Administration MESOscale model); KFeta (Kain-Fritsch eta) scheme; cumulus convection parameterization scheme; Typhoon Chaba

## 引言

台风带来的狂风暴雨是破坏性极强且危险性极高的灾害性天气,登陆中国的台风每年平均有 7~8 个,严重威胁到人民生命财产安全<sup>[1]</sup>。因此,对台风暴雨的研究一直是气象工作者的重难点之一。近几十年来,数值预报模式以及各种物理过程的应用不断推进台风暴雨的研究<sup>[2-4]</sup>。李超等<sup>[5]</sup>采用 5 km 水平分辨率 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式对超强台风“桑美”进行数值模拟及诊断分析,其模拟结果较好地再现了台风“桑美”的发展演变过程及登陆情况。庞琦焯等<sup>[6]</sup>利用 WRF 模式采用 4 种微物理方案对比分析各方案对台风“彩虹”的模拟效果,结果表明不同云微物理方案模拟差异主要在于云冰、雪和霰粒子。李宸昊等<sup>[7]</sup>利用 WRF 3.7.1 版本,选取 6 种积云对流参数化方案,对台风“尤特”进行数值模拟敏感性试验,研究发现积云对流参数化方案对台风路径和强度影响较为明显。

尽管台风暴雨相关研究已取得很大进展,但随着数值模式水平分辨率的不断提高和中尺度数值模式系统的不断完善,近年来在 1 km 甚至次千米网格距开展中、小尺度对流系统的数值模拟研究<sup>[8-10]</sup>不断涌现,而目前模式中还没有发展出适合水平分辨率小于 10 km 的积云对流参数化方案<sup>[11]</sup>,高分辨率模式难以显示解析积云对流过程,从而导致暴雨模拟中虚假性降水增多<sup>[12-13]</sup>。Bullock 等<sup>[14]</sup>认为在 WRF 模式中,由于对流时间尺度  $t$  值通常为默认下限,以至于产生较高的对流性降水。而有研究<sup>[15]</sup>发现,仅依靠模式动力过程和微物理过程会使得对流发生偏晚偏强,使

用对流参数化方案可以更快地触发对流。

因此在数值模式中采用微物理过程和积云对流参数化过程相结合的方式对预报性能更优,改进传统的积云参数化方案使其随模式水平分辨率而调整,即具有尺度适应性(scale-aware)是数值天气预报模式发展的重要方向之一<sup>[16-17]</sup>。徐道生等<sup>[18-19]</sup>通过对积云参数化方案的云底质量通量进行限制,其结果可以有效地消除高水平分辨率模式中引起的虚假降水,同时又合理引入一些次网格尺度弱对流的影响,达到改进模式降水预报效果的目的。Zheng 等<sup>[20]</sup>通过修改积云对流参数化方案的对流时间尺度、格点垂直速度和夹卷率,并在高水平分辨率模式中进行试验,有效提高了降水落区和强度预报。赵晨阳等<sup>[21]</sup>对华南一次飏线过程采用尺度适应 KFeta (Kain-Fritsch eta) 积云对流参数化方案进行数值模拟,结果表明该方案更适用于高水平分辨率数值预报模式。杨扬等<sup>[22]</sup>选取 4 种积云对流参数化方案研究其对夏季降水预报的影响,结果表明 KF (Kain-Fritsch) 和 New Tiedtke 尺度适应方案对夏季平均降水的量级和落区预报比原方案更优。

当数值模式水平分辨率提高至 10 km 以下时,对流参数化方案中的卷入、卷出和垂直输送过程难以被模式显示分辨,这极大地限制高水平分辨率数值模式性能的提高。基于这一点,通过在中国气象局中尺度模式 (China Meteorological Administration MESOscale model, CMA-MESO) 中应用尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案,对 2022 年致使中国受灾严重的台风“暹芭”进行数值模拟研究,旨在分析不同水平分辨率下积云对流参数化方案对台风暴雨的预报性能,重点关注尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案对不同水平

分辨率和对流强度降水预报的影响。

## 1 模式试验设置和资料

### 1.1 模式试验设置

为了评估尺度适应积云对流参数化方案在不同水平分辨率和对流强度下的效果,通过在 CMA-MESO 模式中应用尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案,组合5种水平分辨率(800 m、1 km、3 km、10 km 和 20 km)对台风“暹芭”造成的华南地区暴雨过程进行数值模拟,模式模拟时间分别为 2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时(世界时,下同)和 4 日 00 时—5 日 00 时,时间积分步长为 60 s,垂直层数为 49 层,模拟范围为 15°~30°N、100°~121°E。共设计 3 组试验:(1)采用模式中已有的 KFeta 积云对流参数化方案,记为 KF 组。(2)采用尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案,该方案主要的改进包括对流时间尺度的动力调整、格点垂直速度和夹卷率,记为 scale 组。(3)不采用积云对流参数化方案,记为 phy 组。

3 组试验均包含 800 m、1 km、3 km、10 km 和 20 km 这 5 种水平分辨率,其余物理方案一致,即微物理参数化方案为 WSM6 (WRF Single-moment 6-class microphysics scheme) 方案,长波辐射过程为 RRTM (rapid radiative transfer model) 方案,短波辐射过程为 Dudhia 方案,陆面过程为 Noah 方案。

### 1.2 资料

模式的初始场数据采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的全球预报系统 (Global Forecast System, GFS) 数值天气预报产品,水平分辨率为 0.5°×0.5°。模式云分析过程采用风云二号 F 星 (FY-2F) 0.1°×0.1°水平分辨率的逐小时相当黑体温度产品、总云量产品。

采用的其他观测资料包括:中国气象局地球系统数值预报中心 (CMA Earth System Modeling and Prediction Center, 简记为“CEMC”) 提供的国家级气象观测站 24 h 累计降水资料、中国多普勒天气雷达组合反射率因子三维组网拼图资料。

## 2 方案介绍

### 2.1 KFeta 方案

KFeta 积云对流参数化方案是基于旧 KF 方案改进而来的,该方案主要通过夹卷释放有效位能,考

虑云中上升气流卷入和下沉气流卷出以及简单微物理过程的影响,有效抑制了弱辐合条件下的深对流活动,同时提高了强辐合环境下的深对流。在 KFeta 方案中,对流受到大气稳定度、低层辐合和格点尺度垂直速度的共同作用,能更真实地表征出云和环境的相互作用。

### 2.2 尺度适应 KFeta 方案

尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案基于 Zheng 等<sup>[20]</sup>提出的 KFeta 方案,将对流时间尺度调整为与模式水平网格尺度相适应,利用次网格上升气流质量通量提高格点垂直速度,并调整夹卷率使其依赖于模式水平网格尺度。由于原 KFeta 方案中大多参数考虑网格尺度为 25 km<sup>[23]</sup>,随着模式水平分辨率的不断提高,为了使对流参数化方案在空间尺度上有效衔接,对流时间尺度  $t$  应随着网格水平分辨率的提高而增加,使得进行参数化的对流过程减少,从而维持 KFeta 方案过渡到网格尺度云物理方案的稳定性,最终给出尺度适应参数  $\beta$ 。

$$\beta = \left[ 1 + \ln \left( \frac{25\,000}{\Delta x} \right) \right] \quad (1)$$

其中: $\Delta x$  为网格格距,单位为 m,下同。

#### 2.2.1 对流时间尺度的动力调整

$$t = \frac{H}{W} \beta \quad (2)$$

$$W = (\delta m_b A_e)^{1/3} \quad (3)$$

$$t = \frac{H}{(\delta m_b A_e)^{1/3}} \left[ 1 + \ln \left( \frac{25\,000}{\Delta x} \right) \right] \quad (4)$$

其中: $t$  为对流时间尺度,单位为 s; $H$  为云厚,单位为 m; $W$  为估算的对流云平均垂直速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\beta$  为尺度适应参数; $m_b$  为单位密度云底上升气流质量通量,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $A_e$  为夹卷过的对流有效位能,单位为  $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

#### 2.2.2 格点垂直速度

$$W_n = W_g + W_{up} \quad (5)$$

$$W_{up} = \frac{M/\Delta x^2}{\rho} \quad (6)$$

其中: $W_n$  为变形格点尺度垂直速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $W_g$  为格点尺度垂直速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $W_{up}$  为估算的次网格上升气流垂直速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在原公式中用一种简单的线性化方法增强了次网格上升气流质量通量对垂直速度的影响,可能有利于缩短模式在对流活跃

区域的起转过程 (spin-up) 时长;  $M$  为上升气流质量通量, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\rho$  为对流气块密度, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

### 2.2.3 夹卷率

$$\Delta M_e = M_b \frac{C}{R} \Delta p \quad (7)$$

$$\Delta M_e = M_b \frac{C\beta}{Z_{\text{LCL}}} \Delta p \quad (8)$$

其中:  $\Delta M_e$  为环境气块与上升气流混合的夹卷率, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $M_b$  为云底上升气流质量通量, 单位为  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $C$  为控制夹卷率大小的常数, 值为 0.03, 单位为  $\text{m}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ;  $R$  为积云的云底半径, 单位为  $\text{m}$ ;  $\Delta p$  为模式层之间的气压差, 单位为  $\text{Pa}$ ;  $Z_{\text{LCL}}$  为抬升凝结高度, 单位为  $\text{m}$ 。由于夹卷随着模式水平分辨率的提高而增加, 为了使方案中的夹卷更符合模式高水平分辨率的需求, 用尺度适应参数  $\beta$  来代表水平网格尺度对夹

卷率的影响。

## 3 数值试验结果分析

### 3.1 降水落区分析

根据国家级气象观测站 24 h 累计降水资料的插值结果, 2022 年 7 月 2 日 00 时, “暹芭” 加强为台风, 2 日 07 时在广东电白沿海登陆, 4 日 00 时停止编号, 给华南地区带来强烈的暴雨影响, 造成巨大的人员伤亡和财产损失。2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时 (图 1a), 台风“暹芭”造成的降水主要分布在海南南部、雷州半岛和广东大部分地区, 呈东北—西南走向, 降水量超过 150 mm 的强降水中心主要位于广东和海南西南部。4 日 00 时—5 日 00 时 (图 1b), 雨带北移, 降水量大幅减少, 强降水中心移至广西南部 and 广东北部。

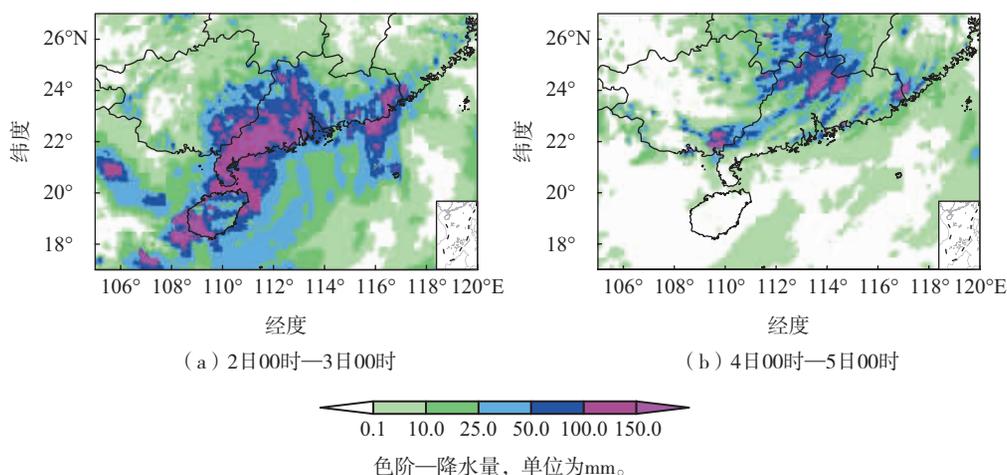


图 1 2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时和 4 日 00 时—5 日 00 时实况 24 h 累计降水量  
Fig.1 The 24-h accumulated precipitation observed from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 3 July  
and from 00:00 UTC 4 to 00:00 UTC 5 July 2022

图 2a—e、f—j、k—o 分别为 KF 组、scale 组和 phy 组试验在 800 m、1 km、3 km、10 km 和 20 km 水平分辨率下 2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时 24 h 累计降水量。3 组试验模拟的降水带与实况分布较为一致, 均呈东北—西南走向, 但降水量模拟结果差异较大, 特别是高水平分辨率下 3 组试验在雷州半岛及其周边海域空报严重, 而 20 km 水平分辨率下均未模拟出海南西南部的强降水中心, 其余水平分辨率下在该区域模拟的降水量均较小。KF 组在各水平分辨率下均空报了广东东南沿海的降水量。phy 组试验在 10 km 和 20 km

水平分辨率下模拟的降水落区范围远大于实况, 在 800 m 水平分辨率下模拟的广东降水量远小于实况。scale 组相比其余 2 组, 减小了广东中东部降水量的模拟, 与实况更接近。

图 3a—e、f—j、k—o 分别为 KF 组、scale 组和 phy 组试验在 800 m、1 km、3 km、10 km 和 20 km 水平分辨率下 2022 年 7 月 4 日 00 时—5 日 00 时 24 h 累计降水量。3 组试验在广东中部降水量超过 150 mm 的强降水中心与实况相比略偏南。KF 组和 phy 组试验对广西南部和广东中部的强降水区域模拟降水强度较小, 而 scale 组在该地区的模拟结果明

显改善且与观测结果更一致。从降水模拟结果整体来看,3组试验随着水平分辨率的提高,所模拟的降水落区与观测更接近。其中 scale 组对于强降水

中心(24 h 累计降水量大于 150 mm)的模拟效果较优,且随水平分辨率提高和对流强度减弱这种优势更加明显。

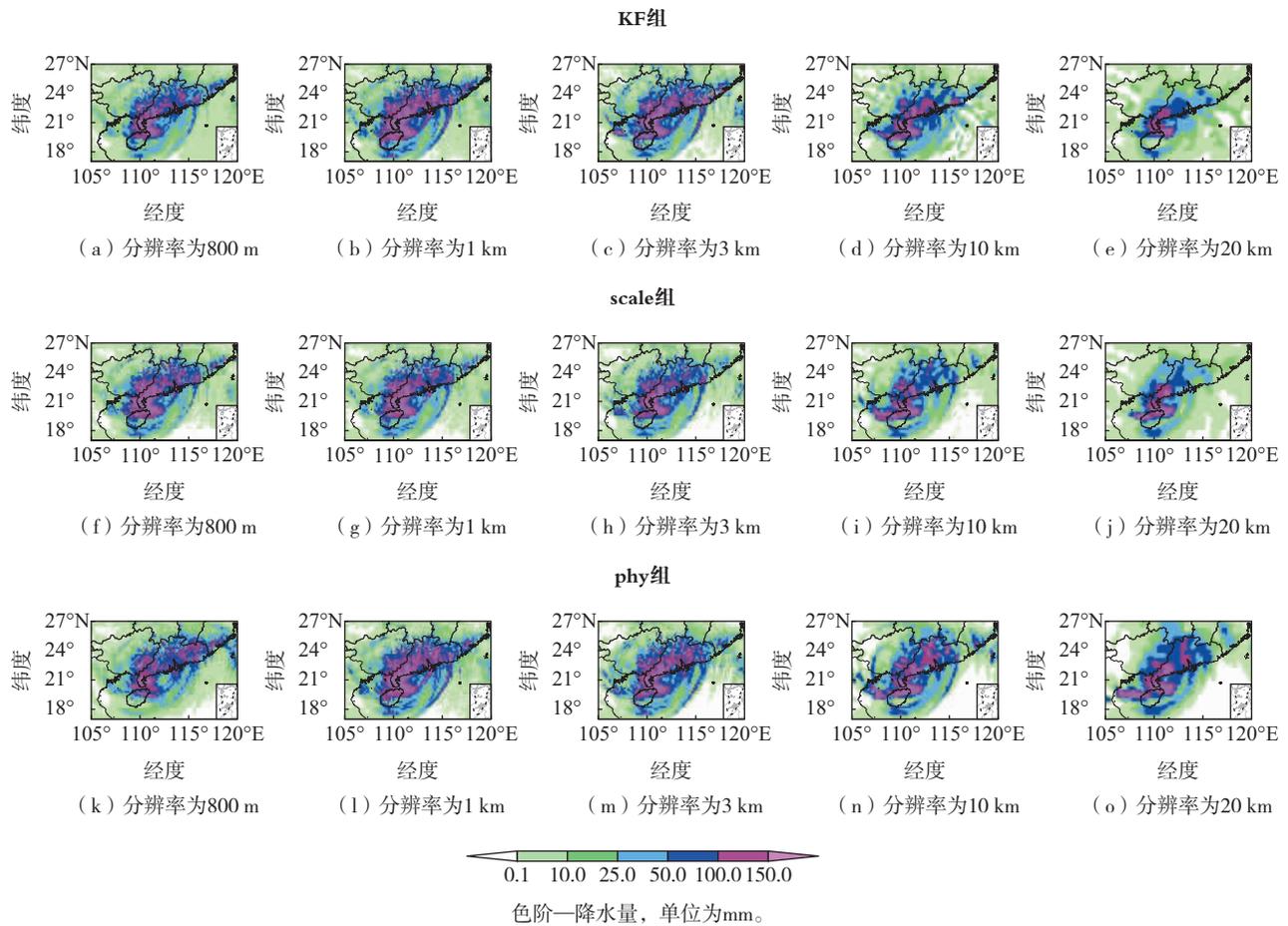
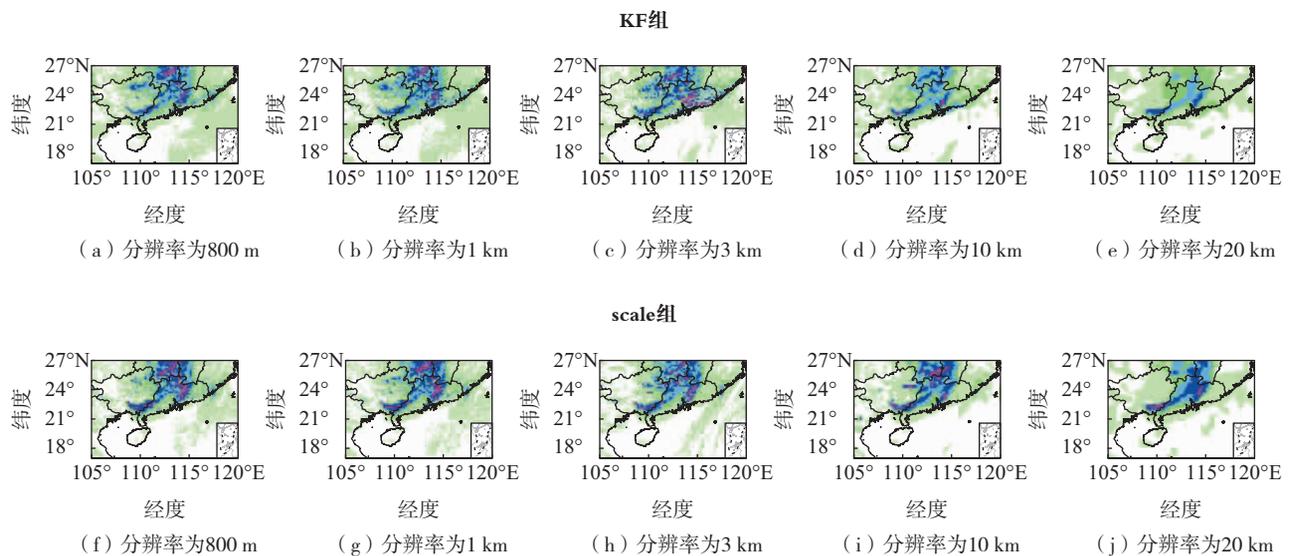


图2 2022年7月2日00时—3日00时KF组、scale组和phy组模拟的24 h 累计降水量  
 Fig.2 The 24-h accumulated precipitation simulated by KF experiment, scale experiment and phy experiment from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 3 July 2022



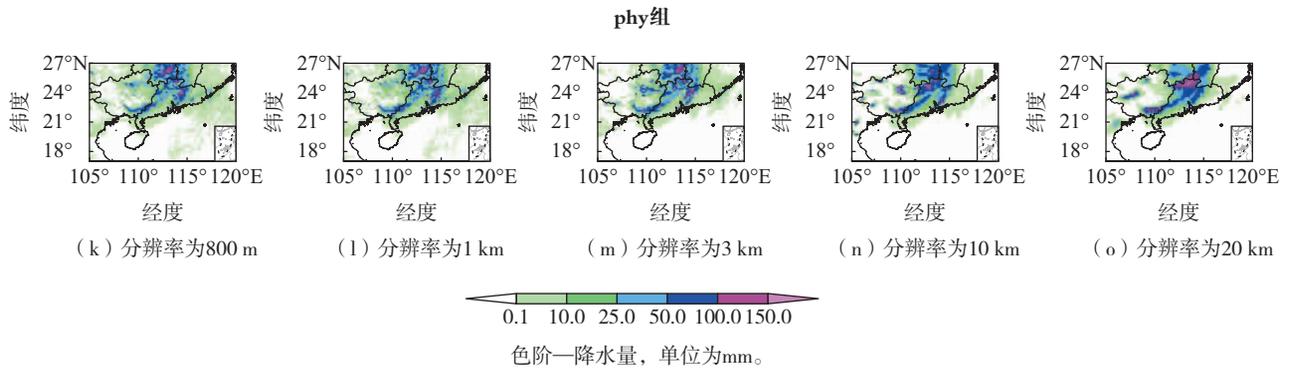


图 3 2022 年 7 月 4 日 00 时—5 日 00 时 KF 组、scale 组和 phy 组模拟的 24 h 累计降水量  
 Fig.3 The 24-h accumulated precipitation simulated by KF experiment, scale experiment and phy experiment from 00:00 UTC 4 to 00:00 UTC 5 July 2022

为进一步研究尺度适应 KFeta 积云对流方案对不同水平分辨率降水模拟的影响,分别分析 KF 组和 scale 组试验由积云过程引起的次网格降水量和由微物理过程引起的网格降水量。2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时,由 24 h 积云累计降水量(图 4)可以看出 KF 组试验在广东中部及沿海地区有明显的次网格降水,而 scale 组试验次网格降

水量随着模式水平分辨率的提高明显减少,同时在次网格降水量减少的区域总降水模拟结果与实况更接近。基于上述分析结果,不可否认 scale 组试验对于降水模拟结果有一定的改进,其具体表现在减少了由于积云引起的虚假降水(图 4),增加了网格降水量(图 5),降水强度和落区分布更接近实况。

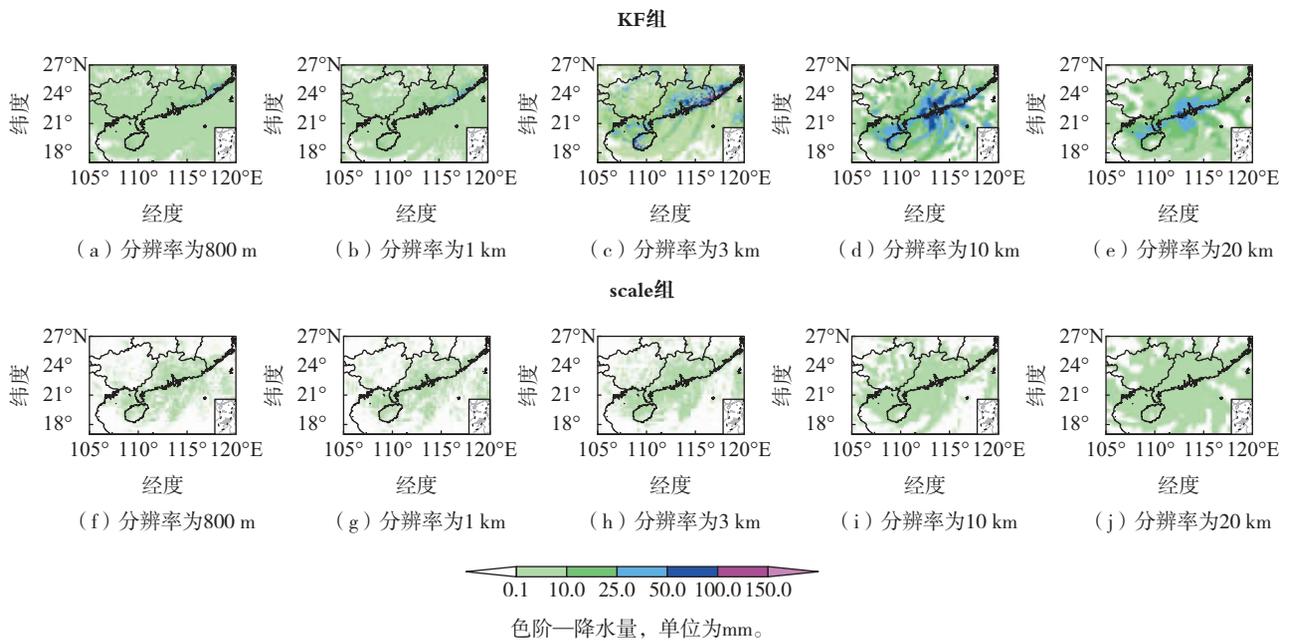


图 4 2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时 KF 组、scale 组的 24 h 次网格累计降水量  
 Fig.4 The 24-h subgrid accumulated precipitation simulated by KF experiment and scale experiment from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 3 July 2022

### 3.2 降水评分分析

为了更客观地分析尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案的降水模拟效果,采用数值模拟结果与国家级气象观测站 24 h 累计降水资料的 TS(threat

score)评分与 Bias 评分分降水等级进行评估。TS 评分越接近 1.0,表示数值模式对该等级降水预报效果越好。Bias 评分能够衡量预报与实况的近似程度。当 Bias 评分小于 1.0 时,出现漏报,反之则为空

报;当 Bias 评分等于 1.0 时,表示预报与观测降水基本一致。两者计算公式如下。

$$V_{TS} = \frac{A}{A+B+C} \tag{9}$$

$$V_{Bias} = \frac{A+B}{A+C} \tag{10}$$

其中: $V_{TS}$ 为 TS 评分值, $V_{Bias}$ 为 Bias 评分值, $A$ 表示预报命中格点数, $B$ 表示空报格点数, $C$ 表示漏报格点数。

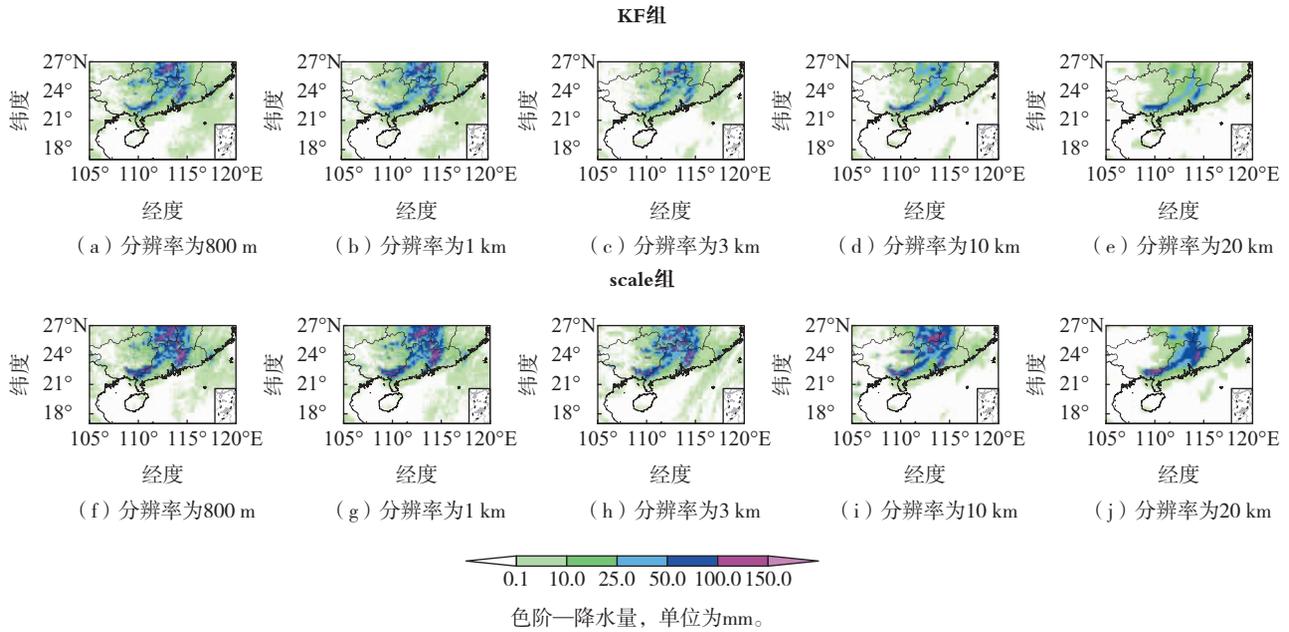


图5 2022年7月4日00时—5日00时KF组、scale组24h网格累计降水量  
Fig.5 The 24-h grid accumulated precipitation simulated by KF experiment and scale experiment from 00:00 UTC 4 to 00:00 UTC 5 July 2022

由2022年7月2日00时—3日00时(图6—7)和7月4日00时—5日00时(图8—9)不同量级24h累计降水量的TS评分和Bias评分来看,7月2日00时—3日00时,KF组和phy组在25mm及以上量级的TS评分中优势较明显,但phy组的Bias评分(除800m外)均随水平分辨率增大而远大于1.0,出现严重的空报现象;50mm及以上量级scale组试验TS评分相比其余2组明显提高,Bias评分更接近1.0,可见尺度适应KFeta积云对流参数化方案的应用很大程度降低了空

报和漏报现象。7月4日00时—5日00时,当水平分辨率达到3km时,scale组和KF组25mm及以上量级的TS评分均较高,但KF组相比更优,考虑是scale组在湖南南部降水偏大所致;就Bias评分而言,scale组几乎在各降水量级都更接近1.0。以上结果表明模式中仅使用微物理过程会造成严重的空报和漏报现象。综合分析可以认为尺度适应KFeta积云对流参数化方案(scale组)对不同水平分辨率24h降水模拟均有一定的改进作用,在降水强度较小时改进效果更明显。

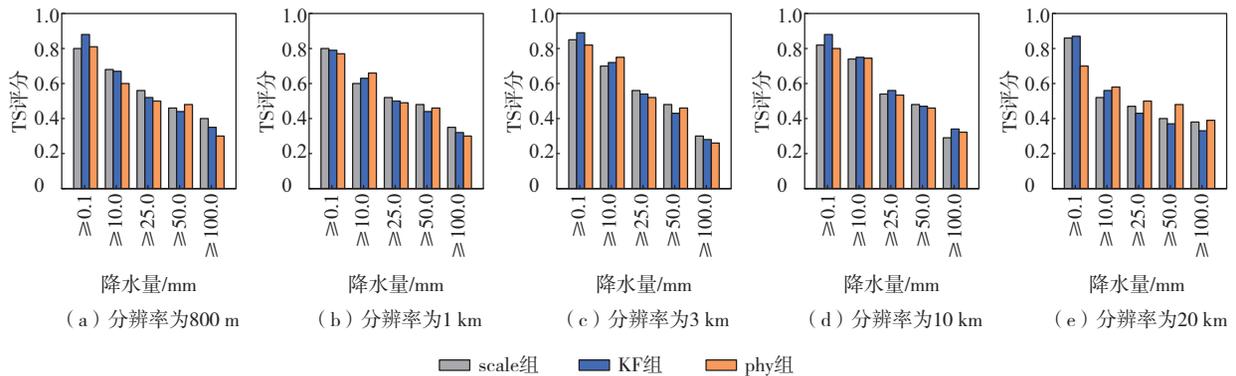


图6 2022年7月2日00时—3日00时24h累计降水量的TS评分  
Fig.6 Threat score of the 24-h accumulated precipitation from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 3 July 2022

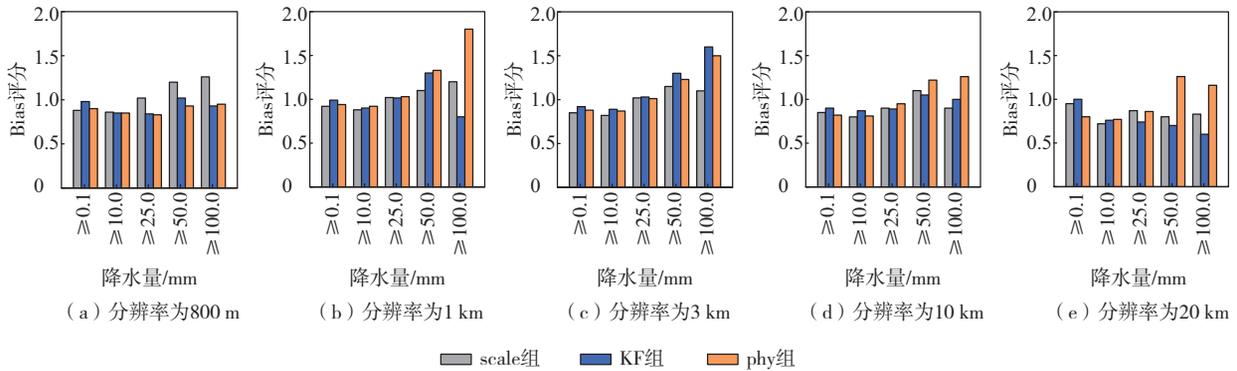


图 7 2022 年 7 月 2 日 00 时—3 日 00 时 24 h 累计降水量的 Bias 评分  
Fig.7 Bias score of the 24-h accumulated precipitation from 00:00 UTC 2 to 00:00 UTC 3 July 2022

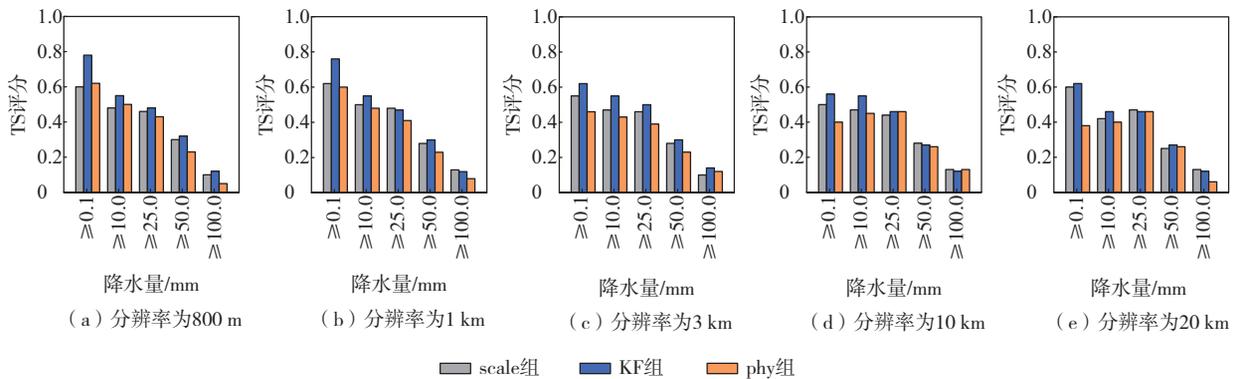


图 8 2022 年 7 月 4 日 00 时—5 日 00 时 24 h 累计降水量的 TS 评分  
Fig.8 Threat score of the 24-h accumulated precipitation from 00:00 UTC 4 to 00:00 UTC 5 July 2022

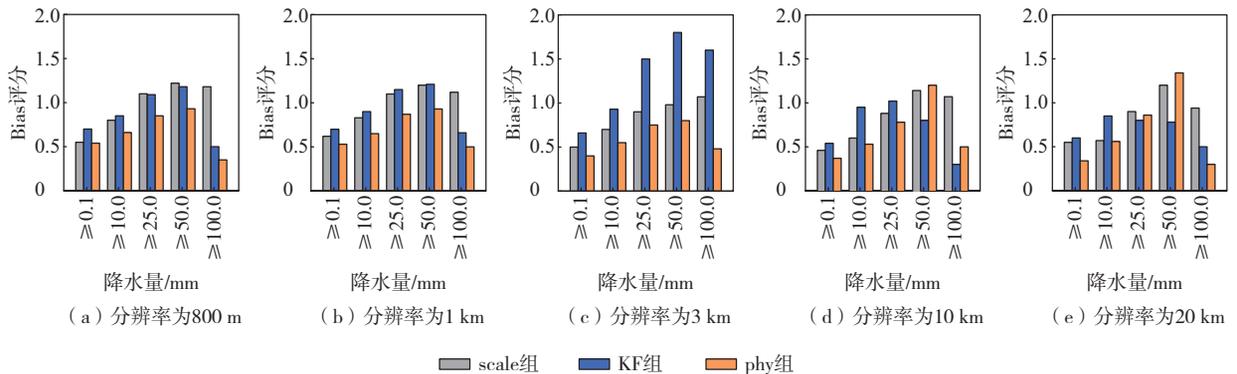


图 9 2022 年 7 月 4 日 00 时—5 日 00 时 24 h 累计降水量的 Bias 评分  
Fig.9 Bias score of the 24-h accumulated precipitation from 00:00 UTC 4 to 00:00 UTC 5 July 2022

### 3.3 雷达组合反射率因子分析

为了解 3 组试验对台风内部结构的模拟差异, 分别选取 2022 年 7 月 2 日 09 时和 4 日 06 时 (2—3 日和 4—5 日降水量最大时刻) 的雷达组合反射率因子进行进一步分析研究。由图 10a 可看出, 台风“暹芭”登陆后中心位于广东西南部, 在台风中心外围均有密实的线状强回波带, 回波强度超过 50 dBZ。2022 年 7 月 2 日 09 时(图 11), 除 20 km 水平分辨率外, 3 组试验在北部湾至海南北部形成明

显回波带, 且随水平分辨率提高回波强度有所增大, 3 组试验在台风中心组合反射率因子大于 35 dBZ 的区域均过小。其中 scale 组相比 KF 组在东侧海面以及回波中心附近的组合反射率因子强度略有减小, 而在广东中部略强, 这点与观测结果更为一致。7 月 4 日 06 时(图 10b), 台风“暹芭”已经减弱为热带低压, 其回波强度有所减小, 整体呈东北—西南向的带状分布, 在广东西南部有新生对流单体。随着水平分辨率的提高, 3 组试验模拟结果(图 12)在广

东西南部的回波强度均较小,但 scale 组试验略大于其余 2 组,且在湖南南部回波强度略小于其余 2 组,这 2 点优势更接近实况观测结果。整体来看,7 月 2 日 09 时和 7 月 4 日 06 时实况回波强度大于 35 dBZ 的区域,3 组试验回波强度在低水平分辨率下相比实况略小但分布范围略大,随着水平分辨率

的提高,模拟雷达回波强度增强,且与实况图中雷达回波所显示的对流范围分布更一致;其中 scale 组在 7 月 4 日 06 时对广东西南部的新生对流单体模拟得更好。因此尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案的应用使得雷达组合反射率因子模拟更优,同时反馈得到的降水强度和分布也更接近实况。

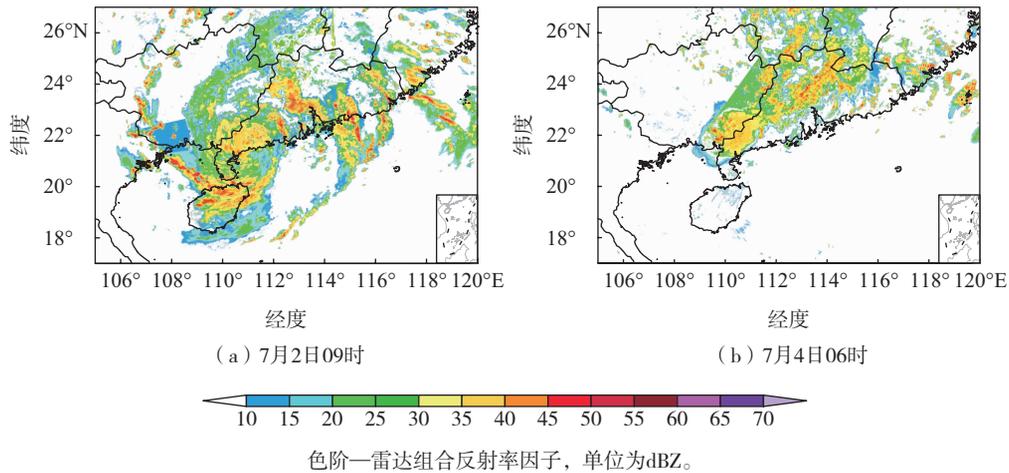


图 10 2022 年 7 月 2 日 09 时和 4 日 06 时观测雷达组合反射率因子  
Fig.10 Radar composite reflectivity observed at 09:00 UTC 2 and 06:00 UTC 4 July 2022

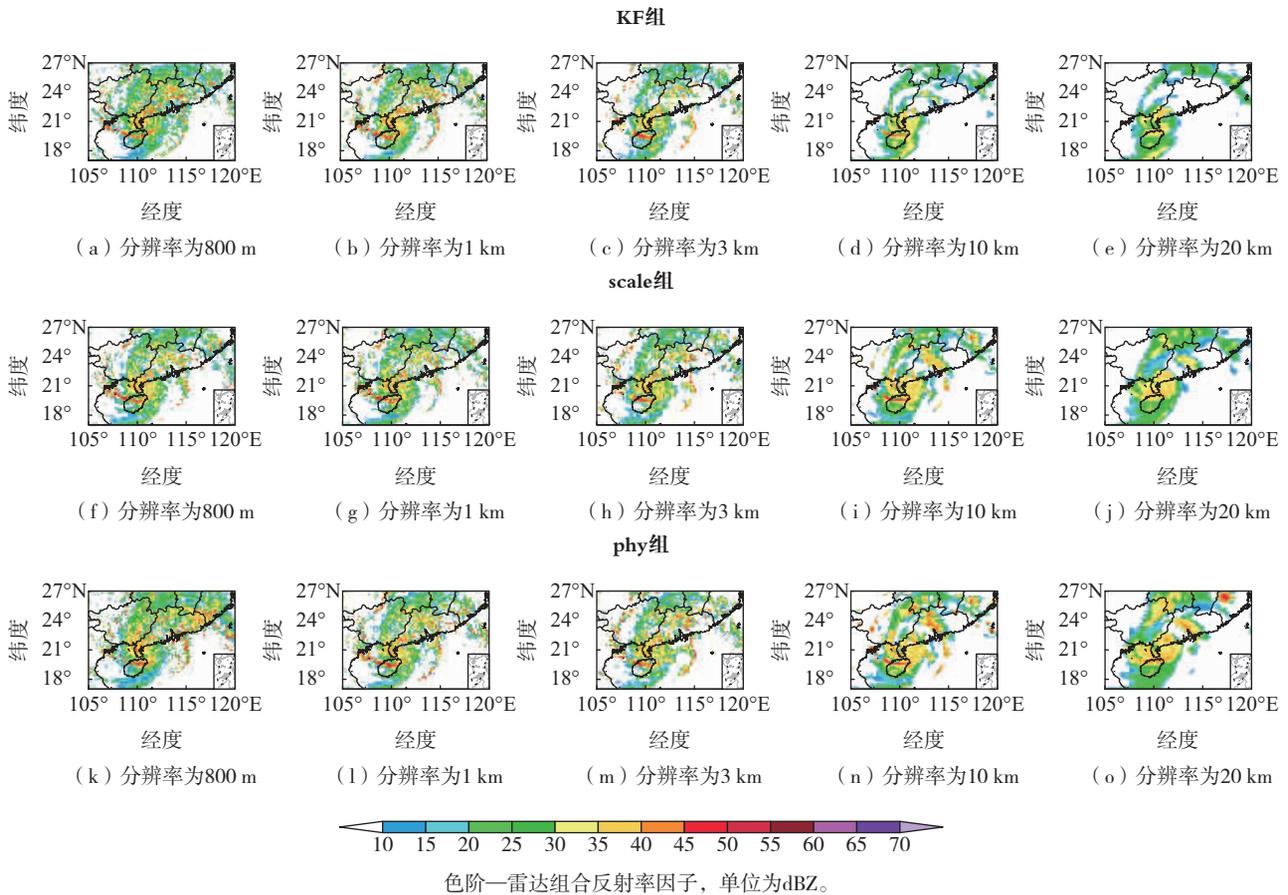


图 11 2022 年 7 月 2 日 09 时 KF 组、scale 组和 phy 组的雷达组合反射率因子  
Fig.11 Composite radar reflectivity simulated by KF experiment, scale experiment and phy experiment at 09:00 UTC 2 July 2022

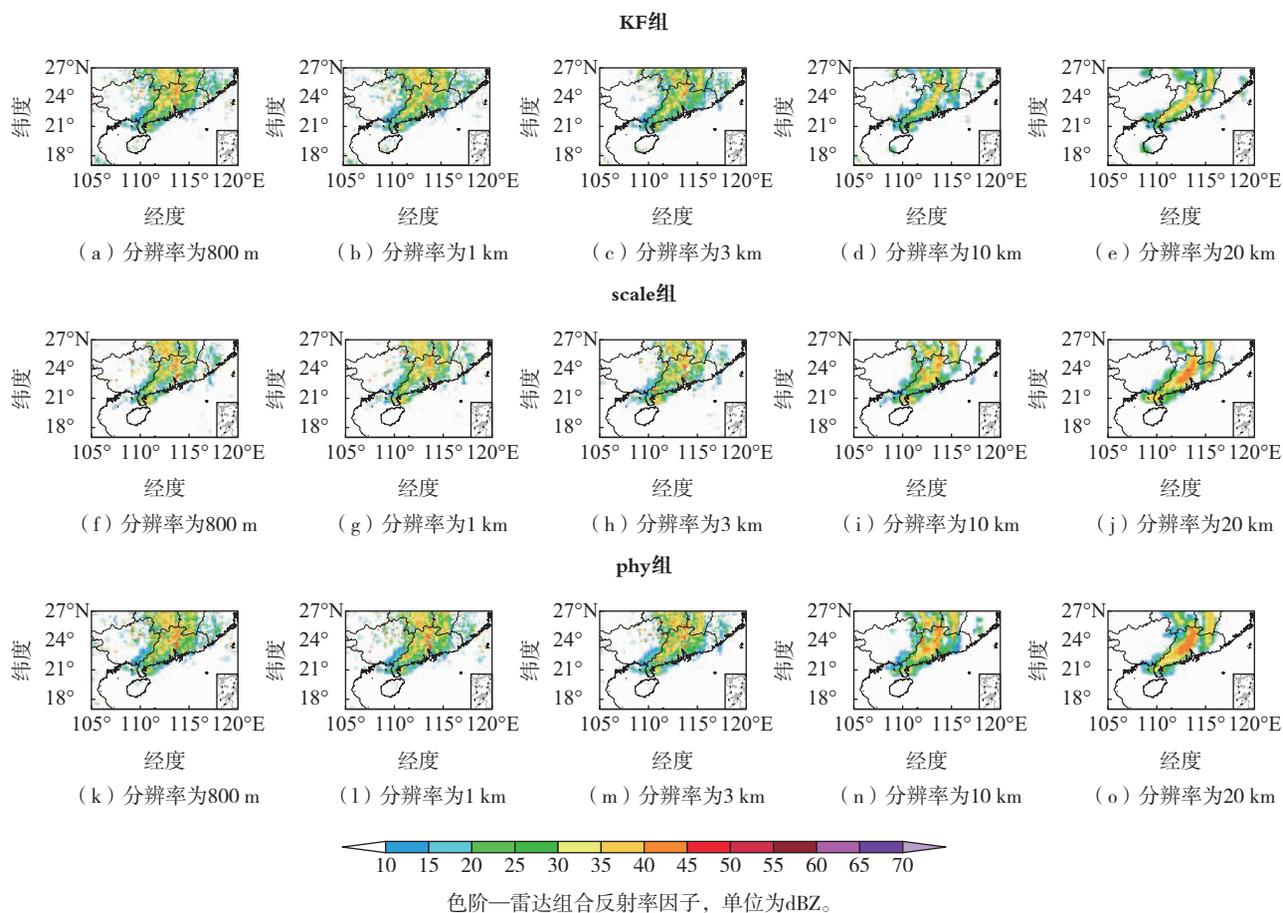


图 12 2022 年 7 月 4 日 06 时 KF 组、scale 组和 phy 组的雷达组合反射率因子

Fig.12 Composite radar reflectivity simulated by KF experiment, scale experiment and phy experiment at 06:00 UTC 4 July 2022

#### 4 结论与讨论

采用 CMA-MESO 5.1 版本,组合 5 种水平分辨率(800 m、1 km、3 km、10 km 和 20 km),设计 3 组试验对台风“暹芭”造成的华南地区暴雨过程进行数值模拟,探究尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案在不同水平分辨率和对流强度下的模拟效果。通过对比模拟的降水结果和雷达组合反射率因子,得到如下结果:

(1)3 组试验均能模拟出与实况相似的降水雨带,但降水强度略有差异。随水平分辨率增大和对流强度减弱,scale 组试验模拟的强降水中心落区与实况更接近,由于积云引起的虚假性降水明显减少,有效提高了网格降水量,对总降水量模拟有一定的改善。

(2)24 h 累计降水量的 TS 评分和 Bias 评分表明,对流强度较强时 KF 组和 phy 组存在明显空报现象,scale 组能很大程度降低这一现象。同时随对流强度减小,scale 组 TS 评分相对提高且 Bias 评分

更接近 1.0。总体而言,尺度适应 KFeta 方案对不同量级的降水模拟结果均有一定的改进作用,且在对流强度较弱时改进更明显。

(3)对 2022 年 7 月 2 日 09 时和 4 日 06 时(2—3 日和 4—5 日降水量最大时刻)雷达组合反射率因子的分析发现,scale 组试验在强对流区域模拟的雷达回波更接近实况观测,对于新生单体的模拟也更优。

整体而言,对台风“暹芭”前后期的模拟结果表明,在高水平分辨率 CMA-MESO 模式中采用尺度适应 KFeta 积云对流参数化方案对降水模拟有一定的优势,并且这一优势在对流强度较弱的条件下表现更出色,为提高数值模式在 10 km 水平分辨率以下的模拟效果提供了一定的实践依据。文中只是尺度适应 KFeta 积云参数化方案对台风“暹芭”的数值模拟研究,其区域也仅限于华南平原地区,未来将进一步将该尺度适应方案拓展至不同地形和不同季节的强对流天气过程中,以更好地验证该方案的普适性。

## 参考文献:

- [1] 程正泉,陈联寿,徐祥德,等.近10年中国台风暴雨研究进展[J].气象,2005,31(12):3-9.
- [2] 谭晓伟.边界层高度和动量粗糙度的不确定性对台风“天鸽”(1713)模拟的影响[J].海洋气象学报,2023,43(1):39-51.
- [3] 王海平,渠鸿宇,董林,等.CMA数值模式对台风“杜苏芮”(2305)的预报性能分析[J].海洋气象学报,2023,43(4):21-31.
- [4] 程佳佳,徐国强.郑州“7·20”极端暴雨过程中水汽和高低空急流作用机制的数值模拟[J].海洋气象学报,2022,42(3):57-68.
- [5] 李超,沈菲菲,许冬梅,等.超强台风“Saomai”的数值模拟及诊断分析[J].陕西气象,2019(3):8-17.
- [6] 庞琦烨,平凡,沈新勇,等.不同微物理方案对台风“彩虹”(2015)降水影响的比较研究[J].大气科学,2019,43(1):202-220.
- [7] 李宸昊,董文杰.登陆型台风“尤特”积云对流参数化方案的数值模拟研究[J].海洋预报,2021,38(3):19-28.
- [8] 辅天华,陈海山,曾智华,等.云微物理参数化对东亚近海热带气旋活动模拟的影响[J].海洋气象学报,2020,40(1):12-21.
- [9] MESSMER M, GONZÁLEZ-ROJÍ S J, RAIBLE C C, et al. Sensitivity of precipitation and temperature over the Mount Kenya area to physics parameterization options in a high-resolution model simulation performed with WRF V3.8.1[J]. Geosci Model Dev, 2021, 14(5):2691-2711.
- [10] 刘静,任川,赵梓淇,等.多区域高分辨率模式强降水预报检验分析[J].气象,2022,48(10):1292-1302.
- [11] 黎慧琦,张大林.中小尺度对流系统的高分辨率数值模拟近况和未来挑战[J].气象科技进展,2021,11(3):75-91.
- [12] ARAKAWA A, JUNG J H. Multiscale modeling of the moist-convective atmosphere: a review[J]. Atmos Res, 2011, 102(3):263-285.
- [13] 王德立,徐国强.高分辨率模式中积云参数化方案对模拟台风“凡亚比”的影响[J].气象科技,2012,40(6):949-959.
- [14] BULLOCK O R Jr, ALAPATY K, HERWEHE J A, et al. A dynamically computed convective time scale for the Kain-Fritsch convective parameterization scheme [J]. Mon Wea Rev, 2015, 143(6):2105-2120.
- [15] HONG S Y, DUDHIA J. Next-generation numerical weather prediction: bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2012, 93(1):ES6-ES9.
- [16] 张旭,黄伟,陈葆德.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,2017,7(6):105-110.
- [17] WANG D, PREIN A F, GIANGRANDE S E, et al. Convective updraft and downdraft characteristics of continental mesoscale convective systems in the model gray zone [J]. J Geophys Res: Atmos, 2022, 127(16):e2022jd036746.
- [18] 徐道生,陈子通,钟水新,等.积云参数化方案中云底质量通量的限制及在高分辨率模式中的应用[J].热带气象学报,2014,30(3):401-412.
- [19] 徐道生,张艳霞,王刚,等.meso-SAS 对流参数化方案的改进及其在9 km 分辨率模式中的应用[J].热带气象学报,2015,31(5):608-618.
- [20] ZHENG Y, ALAPATY K, HERWEHE J A, et al. Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with an updated Kain-Fritsch scheme [J]. Mon Wea Rev, 2016, 144(3):833-860.
- [21] 赵晨阳,徐国强.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,2020,44(2):297-314.
- [22] 杨扬,卢冰,王薇,等.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,2021,79(4):612-625.
- [23] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. J Appl Meteor, 2004, 43(1):170-181.