

CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对中国东部地区 降水预报的性能检验

徐同¹ 王琴² 漆梁波³ 黄伟¹

1 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

2 上海海洋中心气象台, 上海 200030

3 上海中心气象台, 上海 200030

摘要: 本文采用标准降水检验方法和 MODE 空间检验方法对 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年我国东部地区降水预报效果进行评估。结果表明: CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对第二季度和第三季度的预报技巧相对较高, 第一和第四季度的预报技巧相对较低, 显示区域数值模式在暖季降水预报方面有较好的应用潜力。综合 4 个季度的 ETS 评分和 BIAS 分析, CMA-MESO 模式第三季度降水预报技巧整体高于 CMA-SH9 模式, 其他季节则是 CMA-SH9 模式预报技巧相对更高, 另外, 两家模式在各季度均存在 BIAS 偏大的特征, 而且总体呈现出空报率较高的特征, 改善这两方面的不足是提升区域模式降水预报技巧的重要抓手。四个季度的暴雨 MODE 空间检验结果显示, CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对第二和第三季度的预报能力相对更优, 但均存在对暴雨降水目标面积预报偏大的特征。CMA-SH9 模式四个季度对暴雨降水目标各分位强度预报均相对观测值偏强, 而 CMA-MESO 模式与观测值更为接近, 仅第一季度呈现预报偏强特征。‘21.7’河南暴雨和台风“烟花”的 MODE 空间检验结果显示 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对大暴雨以上量级强降水预报均表现出影响范围偏大的特征, 但对于降水极值仍预报偏小, CMA-SH9 模式与观测极值更为接近。

关键词: CMA-MESO; CMA-SH9; 中国东部地区; 降水检验

中图分类号: P456.7 文献标识码: A

Verificaiton of CMA-MESO and CMA-SH9 Models for Precipitation Forecast in Eastern China

XU Tong¹ WANG Qin² Qi Liangbo³ Huang Wei¹

1 Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

2 Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 200030

3 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

Abstract: The standard precipitation verificaiton method and the MODE spatial method were applied to evaluate the performance of the CMA-MESO and CMA-SH9 models in predicting precipitation in the eastern region of China in 2021 in this article. The results show that two models have relatively high prediction skills for the second and third quarters, while the prediction skills for the first and fourth quarters are relatively low. The regional numerical models have good application potential in warm season precipitation forecasting. Based on the ETS and BIAS of the

华东区域气象科技协同创新基金合作项目 (QYHZ202302)、中国气象局上海台风研究所基本科研业务费专项资金项目 (24A11)

共同资助

作者简介: 徐同, 主要从事数值天气预报检验工作, E-mail: xut@mail.typhoon.gov.cn

通讯作者: 漆梁波, 主要从事天气预报及其相关方法研究, E-mail: qlb1999@hotmail.com

four quarters, the overall precipitation prediction skills of the CMA-MESO model in the third quarter are higher than those of the CMA-SH9 model, while in other seasons, the CMA-SH9 model has relatively higher prediction skills. Both models show a higher BIAS and a higher FAR in each quarter. Improving the shortcomings of these two aspects is an important way to enhance the precipitation prediction skills of regional models. The spatial verification results of heavy rainfall for four quarters show that CMA-MESO and CMA-SH9 models have relatively better forecasting abilities for the second and third quarters, and both models tend to overestimate the object area of heavy rainfall. The CMA-SH9 model tends to overestimate the object quantile intensities of torrential rainfall in four seasons compared to observations, whereas the CMA-MESO model shows closer agreement with observations, exhibiting an overestimation only in the first quarter. Spatial verification of the MODE for the '21.7' torrential rain in Henan and Typhoon 'In-Fa' reveals that both the CMA-MESO and CMA-SH9 models exhibit a tendency to overestimate the affected area for intense precipitation exceeding torrential levels. Nonetheless, these models continue to underpredict the maxima of rainfall, with the CMA-SH9 model yielding results more closely aligned with the observed peaks.

Key words: CMA-MESO;CMA-SH9; Eastern China; Precipitation Verification

引言

我国东部地区地处季风区,夏季降水受到热带和中高纬度环流系统的共同影响,气候变率较大,气候异常所造成的旱涝灾害,常给我国国民经济和社会生活造成严重损失。(张丽霞和周天军, 2020; 陈玥等, 2023; 钱维宏和陆波, 2010; 杨涵洧等, 2021)。近年来,我国东部地区暴雨事件频繁发生,如2016年梅雨期长江中下游地区发生区域性大洪水,部分支流发生特大洪水(赵娴婷等, 2020)。2021年我国春季强对流天气频繁且灾害损失严重,夏季气候异常性特征突出,极端天气气候事件频发(汪小康等, 2022a)。7月17~23日,河南发生特大暴雨洪涝灾害(杨浩等, 2022; 汪小康等, 2022b; 孔期等, 2022; 姚秀萍和李若莹, 2023; 张云济等, 2022; 刘松楠等, 2022; 齐道日娜等, 2023)。7月25~30日,台风烟花两次在浙江登陆,北上影响华东、华北和东北等地,造成大范围的暴雨灾害(邢蕊等, 2023; 蔡志颖等, 2023; 李静怡等, 2023; 李洪兵等, 2024)。因此对我国2021年东部地区的整体降水和强降水个例进行检验是非常重要的。

随着计算机技术的迅速发展,区域数值模式也日趋成熟,成为国家和区域气象中心的一个重要研究和业务预报手段。区域数值模式具备模拟中小尺度天气系统和地形影响环流的能力,并且伴随着高性能计算能力的不断增强和模式分辨率不断提高,区域数值模式可以更好的模拟出大气真实状态和观测事件的强度(如强降水)(Kain et al, 2004)。在科技部和中国气象局的支持下,我国自主发展了新一代的数值模式 GRAPES 及其有限区域版本 GRAPES-MESO(Global/Region Assimilation and Prediction System mesoscale model)。

2019年6月,由中国气象局数值预报中心研发的分辨率3km、覆盖全中国的CMA_MESO模式正式上线,该模式对强降水的预报能力将GRAPES业务应用水平推上了新的台阶(于翥等,2018)。根据中国气象科学研究院对2019年主汛期CMA_MESO模式的检验表明,CMA_MESO模式对24h内的晴雨预报评分高于ECMWF高分辨率预报产品,对降水频次、强度分布与强度结构的预报明显优于ECMWF模式(沈学顺等,2020)。除了中国气象局数值预报中心研发的CMA_MESO模式,我国各区域气象中心也都自主研发了面向全国和区域的中尺度天气数值预报系统。华东区域气象中心围绕现代化气象预报业务体系建设需求,由华东数值预报创新中心在原有长中短临一体化数值预报体系的基础上,按照现有高性能计算机架构,设计研发了上海新一代多尺度一体化高分辨率数值模式体系,其中上海区域中尺度数值预报系统(以下均简称为CMA-SH9模式)于2015年业务化运行,预报覆盖全国区域,并在全国气象部门广泛应用,研究表明,新一代模式各量级降水的TS和ETS评分都相对上一代区域模式有所提高(徐同等,2016)。

自2019年以来,CMA-MESO模式在多方面进行了改进,预报性能有明显提升,从业务实践看,在预报业务中的被采信程度也越来越高。近年来,国内一些学者分别对CMA-MESO和CMA-SH9模式对我国不同地区的降水预报性能开展评估研究(徐同等,2016;徐同等,2019;屠妮妮等,2020;聂安祺等,2020;赵宁坤等,2021;苏翔等,2022;刘静等,2022;张博等,2024)。我国东部地区是暴雨频发的地区,作为我国自主研发的模式,目前针对CMA-MESO模式对我国东部地区降水性能的统计研究工作开展还相对较少,因此开展相关研究是非常有必要的。在当前数值模式系统国省协同研发的背景下,针对在业务预报中被常用的CMA-MESO和CMA-SH9模式的降水预报能力的性能进行对比研究是十分必要的,有利于了解两个模式的共同优势和各自的不足,能有效推进国省协同研发的效率。以下本文采用传统检验方法和MODE空间检验方法对上述两个区域模式2021年在我国东部地区的降水预报能力进行客观评估和高影响降水个例分析,以期改进模式预报性能提供参考思路,也可以为预报员应用不同区域模式的预报降水提供参考依据,更有效地发挥数值模式的业务效能。

1 观测资料和模式

用于统计检验的模式预报资料为2021年1月~2021年12月CMA-MESO和CMA-SH9模式20时(北京时)起报的降水预报资料,关注模式预报时段为12h~36h,即用于检验的24h累计降水为预报12h~36h。降水观测资料采用地面自动站1h降水资料,与模式预报降水资料进行逐小时匹配,24h由1h间隔资料累加获得。本文定义的中国东部地区检验范围为20°~

42° N, 105° ~135° E, 评估区域站点分布如图 1 所示, 共有 29604 个观测站点。CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式主要参数见表 1, 其中 CMA-MESO 式相关参数设置引自沈学顺等 (2020)。

文中地图底图均根据全国地理信息资源目录服务系统提供的 1:100 万全国基础地理数据库(审图号: GS (2016) 2556 号)进行绘制。

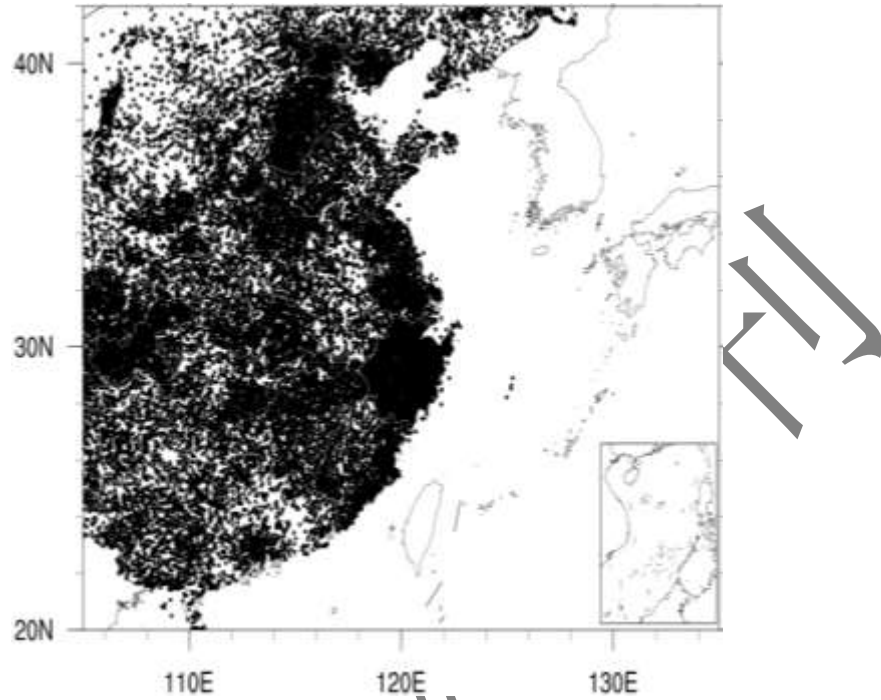


图 1 检验区域的观测站点分布, 共 29604 个站点

Fig. 1 The distribution of observation stations in verification region, including 29604 stations

表 1 CMA-MESO 与 CMA-SH9 模式主要参数

Table 1 Main parameters of CMA-MESO and CMA-SH9

主要参数	CMA-MESO	CMA-SH9
水平分辨率	3km	9km
垂直层次	50	51
同化系统	GRAPES-3DVar	ADAS5. 3. 3

2 检验方法

2.1 标准降水检验方法

本文常规降水检验方法主要采用 ETS 技巧评分和预报偏差 BIAS。两种评分指数均来自于列联表 (表 2), 计算公式分别表示如下: (1) 临界成功指数 $CSI = \frac{A}{A+B+C}$, 通常也称之为

TS 评分, TS 评分的取值范围为 [0, 1], 等于 1 表示预报完美; (2) $ETS = \frac{A-C_1}{A+B+C-C_1}$, 其中

$C_1 = \frac{(A+B)(A+C)}{A+B+C+D}$, 为随机击中次数, ETS 评分克服了受局地气候影响条件下随机预报正确的次数, 取值范围为 $[-1/3, 1]$, 等于 1 表示预报完美; (3) 预报偏差 $BIAS = \frac{A+B}{A+C}$, 表示预报事件发生的次数与观测事件发生次数的比率, 偏差等于 1 表示预报完美。

表 2 降水检验列联表

Table1 The contingency table of rainfall verification

预报事件	观测事件	
	发生	未发生
发生	A	B
未发生	C	D

2.2 MODE 空间检验方法

Davis 等(2006a, b)发展的一种基于目标的诊断评估方法(Method for Object-Based Diagnostic Evaluation;MODE)。该方法可以客观地从预报和观测场中识别出检验目标, 并且可以对预报和观测目标的相关属性进行对比, 这些属性包括诸如位置、形状、移向等, MODE 检验方法相对于传统检验方法可以提供更多模式预报误差的诊断信息。

MODE 中用于分解原始数据场降水对象的过程称作卷积阈值过程。原始数据场先由滤波函数进行卷积, 如下式所示

$$C(x, y) = \sum_{u, v} \phi(u, v) f(x-u, y-v) \quad (1)$$

公式(1)中, f 代表原始数据场, ϕ 代表滤波函数, C 代表处理后得到的卷积场。变量 (x, y) 和 (u, v) 代表格点坐标。滤波函数 ϕ 是一个有影响半径 R 和高度 H 决定的简单圆柱形滤波器。

$$\phi(x, y) = \begin{cases} H & X^2+Y^2 \leq R^2 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

其中参数 R 和 H 并不是相互独立的, 满足如下关系式

$$\pi R^2 H = 1$$

(3)

因此影响半径 R 是卷积过程中的唯一可调参数。即 R 值确定后, H 值由上面的方程确定。对处理后的卷积场 C 设定阈值得到屏蔽场, 则 M 可以定义为

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & C(x, y) \geq T \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (4)$$

对象是 $M=1$ 的连续区域。最后, 原始数据被重新恢复到初始对象中获得对象场 F

$$F(x, y) = M(x, y) f(x, y) \quad (5)$$

这样，两个参数(影响半径 R 和阈值 T)控制着原始场识别对象的整个过程。当原始场中的单降水目标被识别出之后，降水目标的多个空间检验属性被计算出，例如面积、轴角、质心等。之后对预报和观测场中的降水目标进行配对并输出空间检验结果，如面积比、轴角差、质心距离、分位强度等，并根据各类空间检验指标的权重系数计算出总相似度 T

$$T(\alpha) = \frac{\sum_i w_i C_i(\alpha) I_i(\alpha_i)}{\sum_i w_i C_i(\alpha)} \quad (6)$$

其中， I 为相似度因子，在0~1之间； C 为可信度因子，0~1在之间； ω 为权重系数； T 为总相似度，在0~1之间。给 T 设定阈值，对不同物理量场之间高于阈值的目标进行匹配。

由于 MODE 空间检验需要将模式资料与观测资料在相同空间格点上进行分析，因此首先将观测站点资料进行客观分析插值到与 CMA-SH9 模式相同分辨率的格点上。此外，由于 CMA-MESO 模式的水平分辨率为 3km，因此对 CMA-MESO 模式做升尺度处理将模式资料插值到 9KM 分辨率与观测资料进行格点匹配。本文中对预报和观测场分别采用阈值方法进行降水目标的识别，单个预报或观测场中对多个降水目标采用双阈值的方法进行目标合并，并计算出合成降水目标的面积。预报和观测场中降水目标的匹配方法采用模糊引擎 (fuzzy engine) 方法。本文中 MODE 统计检验的检验阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ ，高影响天气个例检验阈值选用 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。

3 检验结果分析

3.1 标准检验方法和 MODE 方法统计分析

图 2 显示了 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对我国东部地区 2021 年 4 个季度降水预报的 ETS 评分以及 BIAS 偏差情况。如前所述，模式起报时次均为为 20 时，预报时效为 12h~36h。24h 累计降水分别按照小雨 ($0.1 \text{ mm}/24 \text{ h}$)，中雨 ($10 \text{ mm}/24 \text{ h}$)，大雨 ($25 \text{ mm}/24 \text{ h}$)，暴雨 ($50 \text{ mm}/24 \text{ h}$)，大暴雨 ($100 \text{ mm}/24 \text{ h}$) 和特大暴雨 ($250 \text{ mm}/24 \text{ h}$) 进行检验。本文中，降水检验采用的是单向阈值方法。其中四个季度如下定义，第一季度 (2021 年 1 月~3 月)，第二季度 (2021 年 4 月~6 月)，第三季度 (2021 年 7 月~9 月)，第四季度 (2021 年 10 月~12 月)。

如图 2 左列 (ETS 评分) 所示，两家模式对我国东部地区的降水评分总体随着降水量级的增加而降低，即小雨评分最高，特大暴雨评分最低。对比不同季度的降水预报技巧可见，CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对第二季度和第三季度的预报技巧相对较高，而第一和第四季度的预报技巧相对较低。显示区域模式在暖季降水中，有更好的表现。这很大可能是因为两家

区域模式均对深对流进行了显式处理，因而对对流活动的描述更为有效。从第一季度的 ETS 评分分析(图 2a), CMA-SH9 模式对小雨和中雨的预报技巧高于 CMA-MESO 模式, 而 CMA-MESO 模式对大雨预报技巧高于 CMA-SH9 模式。从第二季度的预报效果来看(图 2c), CMA-SH9 模式对中雨以上各个量级的预报技巧均高于 CMA-MESO 模式。CMA-SH9 模式第二季度中雨至暴雨量级 ETS 评分分别为、0.23、0.12 和 0.04; CMA-MESO 模式为、0.21、0.11 和 0.03。CMA-MESO 模式对第三季度的小雨和暴雨以上级别预报技巧高于 CMA-SH9 模式(图 2e)。CMA-MESO 模式小雨、暴雨和大暴雨预报评分分别为 0.32、0.13、0.05 和, CMA-SH9 模式为 0.29、0.12 和 0.03。从第四季度的检验结果分析(图 2g), CMA-SH9 模式对小雨至大雨的预报技巧高于 CMA-MESO 模式, 暴雨以上量级的预报技巧两家模式基本相当。

预报偏差 BIAS 是统计区域内(该降水等级)预报降水站数与实况降水站数的比值, 因此预报偏差越接近 1, 说明该量级预报范围越接近实况, 偏差大于 1 说明该量级预报降水较实况偏多(范围偏大), 偏差小于 1 说明该量级预报降水较实况偏少(范围偏小)。对比两家模式第一季度的预报偏差(图 2b)可见, CMA-MESO 模式对小雨至大暴雨的预报偏差均大于 1, CMA-SH9 模式对暴雨以下量级的预报偏差大于 1, 对大暴雨和特大暴雨的预报偏差小于 1。CMA-SH9 小雨预报偏差大于 CMA-MESO 模式, 中雨至大暴雨预报偏差小于 CMA-MESO 模式。从第二季度的预报偏差分析(图 2d), CMA-SH9 模式对各个量级降水预报的偏差均大于 1, CMA-MESO 除特大暴雨外, 对小雨至大暴雨的预报偏差大于 1。CMA-SH9 模式对小雨、大暴雨和特大暴雨的预报偏差高于 CMA-MESO 模式, 中雨、大雨和暴雨则是 CMA-MESO 模式预报偏差较高。CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式对第三季度各个量级的预报偏差均大于 1(图 2f), CMA-SH9 模式对小雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨的预报偏差大于 CMA-MESO 模式, 中雨预报偏差则是 CMA-MESO 相对较高。从第四季度的预报偏差可见(图 2h), CMA-SH9 模式对各量级降水的预报偏差均大于 1, CMA-MESO 模式对小雨和特大暴雨预报偏差小于 1, 其余量级均大于 1, CMA-SH9 模式对小雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨的预报偏差大于 CMA-MESO 模式, CMA-MESO 模式对中雨和大雨的预报偏差高于 CMA-SH9 模式。

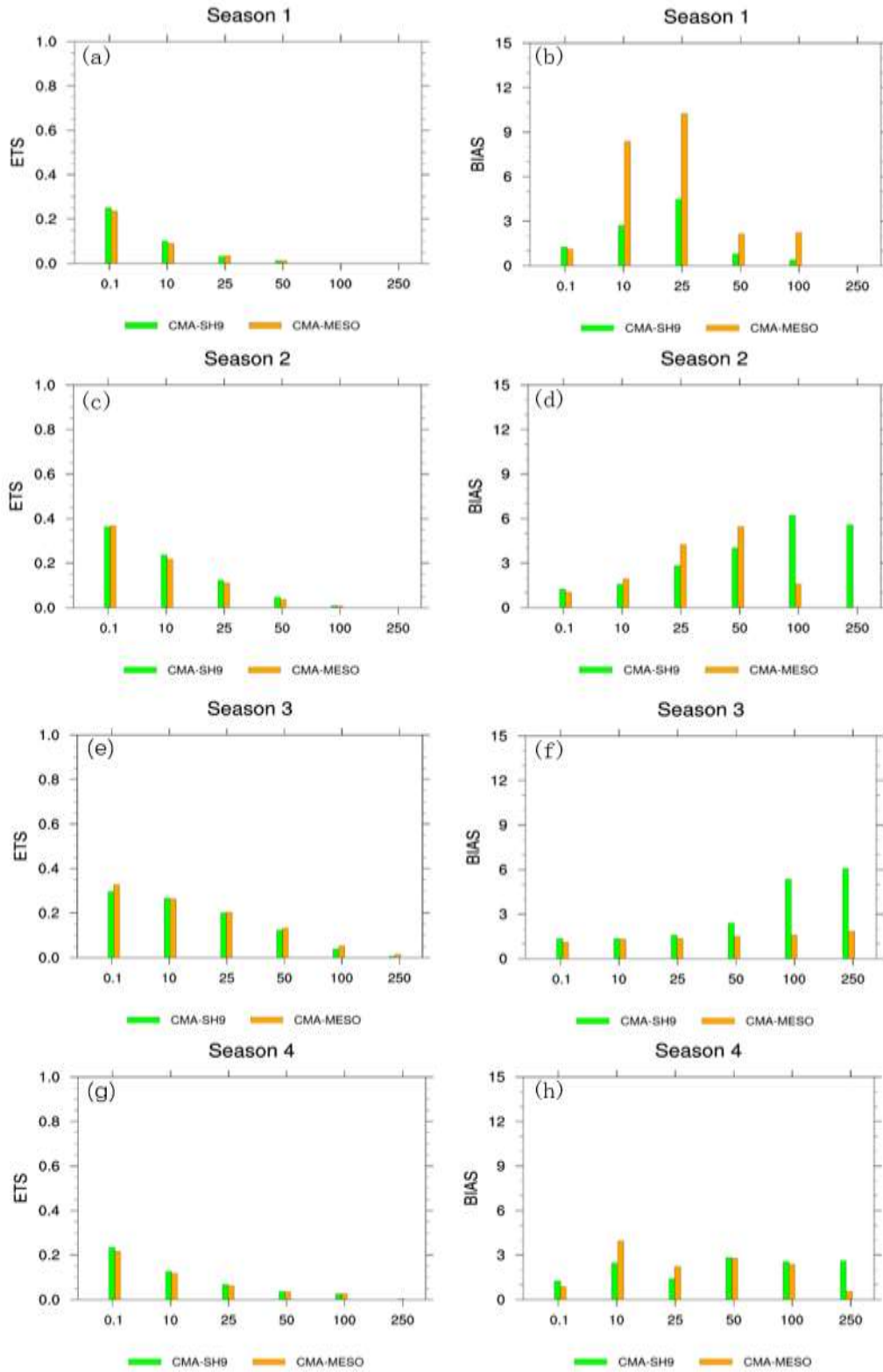


图2 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对中国东部地区 2021 年 4 个季度降水预报 ETS 评分 (左列) 及预报偏差 (右列)

Fig.2 Ets(left column) and bias(right column) of precipitation forecast of four quarterly in Eastern China by CMA-MESO and CMA-SH9 model

综上，两个区域模式在第二季度和第三季度的 ETS 评分明显好于其他两个季度，显示区域模式在暖季降水中有更好的应用潜力。对比而言，CMA-SH9 模式对第一季度、第二季度和第四季度我国东部地区降水预报技巧高于 CMA-MESO 模式，第三季度则是 CMA-MESO 模式预报技巧高于 CMA-SH9 模式。第三季度 CMA-MESO 模式暴雨以下量级预报技巧与 CMA-SH9 模式相当，暴雨以上预报技巧优于 CMA-SH9 模式。从预报偏差看，CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式在四个季度均表现出预报偏差偏大的特征，而 CMA-SH9 模式对第三季度暴雨以上量级的预报偏差明显高于 CMA-MESO 模式，即表现出空报数明显高于漏报数的特征，究其原因可能是 CMA-SH9 模式没有使用积云对流参数化，部分次网格通量就会被强制在网格尺度上表现出来，通常的表现是网格尺度上的垂直速度过强，激发的对流过强，从而导致预报降水更为偏强。这也是造成在第三季度预报技巧相对较低的原因。

由上文分析可知，CMA-MESO 模式对第三季度的暴雨以上级别预报技巧高于 CMA-SH9 模式，由于第三季度是我国东部地区降水最为集中的季度，因此有必要进一步从检验指标的空间分布来分析两家模式的预报误差分布特征并分析原因。图 3 显示了 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年第三季度对东部地区暴雨预报 TS 评分、两个模式的 TS 评分差值（CMA-SH9 模式减去 CMA-MESO 模式）和空报率差值（CMA-SH9 模式减去 CMA-MESO 模式）分布情况。如图 3a 所示，第三季度 CMA-SH9 模式预报 TS 评分较高的地区主要位于福建东部沿海地区、浙江东部及黄淮流域。CMA-MESO 模式暴雨 TS 分布与 CMA-SH9 模式较为一致（图 3b），但总体评分相对更高（TS 评分大于 0.5 的范围更大些）。图 3c 为两家模式 TS 评分差值分布情况，如图所示，CMA-SH9 模式相对 CMA-MESO 模式评分较低的地区主要位于河北南部、河南中部、江苏南部和浙江北部；而相对评分较高的地区主要位于山东北部、河南北部、江苏北部、安徽南部。分析两家模式的空报率差值可知（图 3d），两家模式暴雨以上量级 TS 评分相对较低的地区都存在空报率相对较高的特征，而 TS 评分较高的地区则对应于较低的空报率。由此可见，空报率过高是导致区域模式降水评分较低的主要原因之一。

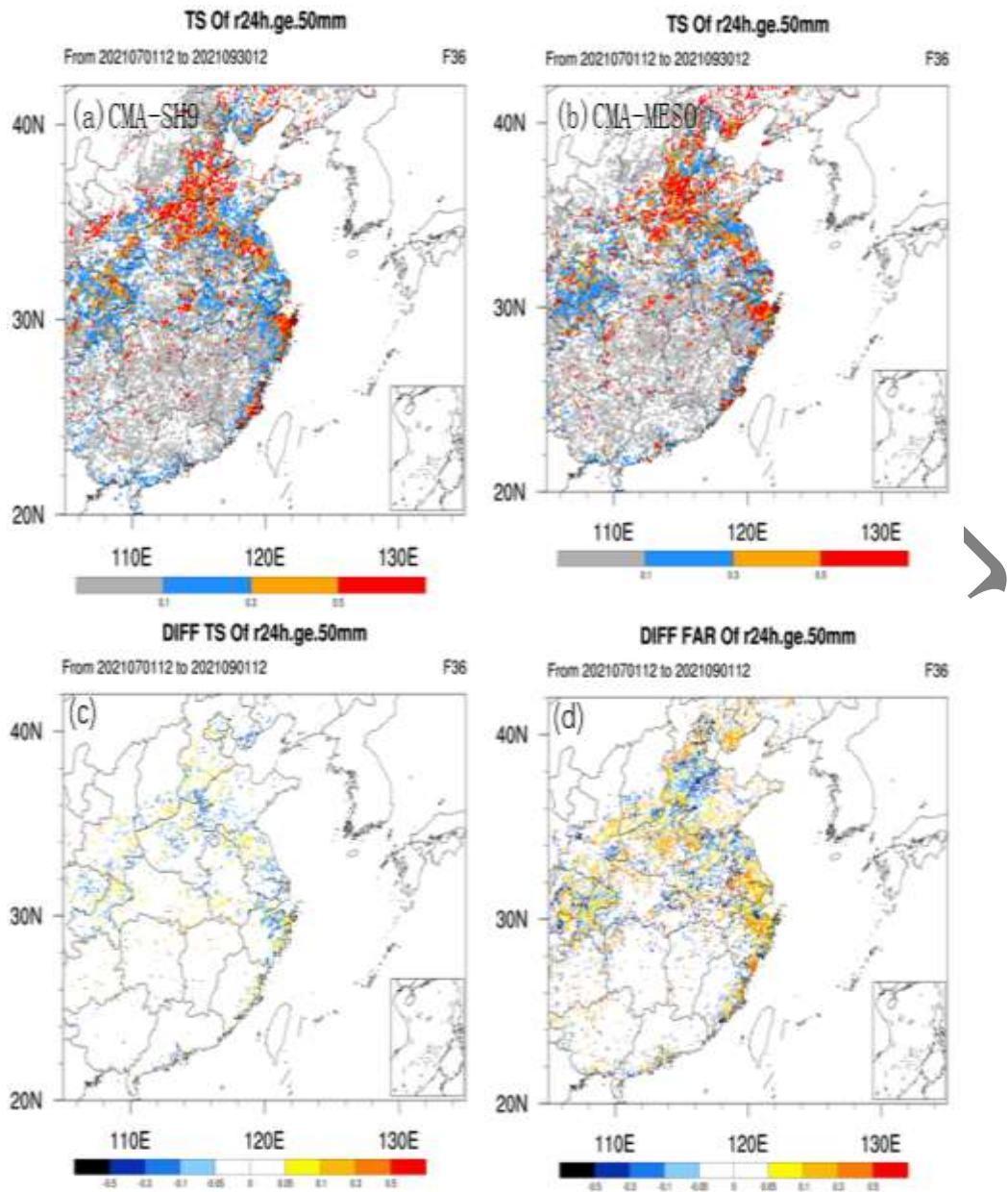


图3 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式 2021 年第三季度中国东部地区暴雨 TS 评分 ((a), (b)), TS 评分差值 (c) 和空报率差值 (d) 分布图

Fig.3 Distribution map of TS((a),(b)), TS difference (c) and false alarm ratio difference (d) of rainstorm in eastern China in the third quarter of 2021 in CMA-SH9 and CMA-MESO models

图 4 为 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式降水预报经由 MODE 空间检验方法识别出的 2021 年 4 个季度暴雨降水目标的平均空间检验指标统计结果,MODE 方法中卷积阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。如图 4(a)所示,从四个季度来看,两家模式对第二季度和第三季度的降水目标质心距离预报较小,第一和第四季度质心距离较大。如 CMA-MESO 模式第二和第三季度目标质心距离分别为 124km 和 118km,而第一和第四季度目标质心距离分别为 184km 和 218km。对比两家模式,CMA-SH9 模式四个季度的降水目标质心距离整体小于 CMA-MESO 模式。图 4(b)和图 4(c)分别为两家模式预报降水目标轴角差和面积比的统计结果,与图 4(a)类似,模式对第二和第三季度的预报相对更好,而第一和第四季度预报误差相对较大;不同之处在于从轴角差和面积比指标来看,CMA-MESO 对四个季度的暴雨降水目标预报整体优于 CMA-SH9 模式。图 4(d)为两家模式预报降水目标的总相似度,如图所示,CMA-SH9 模式第二季度预报总相似度高于 CMA-MESO 模式,第三季度则是 CMA-MESO 模式预报总相似度更高,两家模式第一和第四季度的预报总相似度总体相当;从四个季度来看,两家模式对第二季度和第三季度的预报总相似度相对更高,其中第三季度最高。

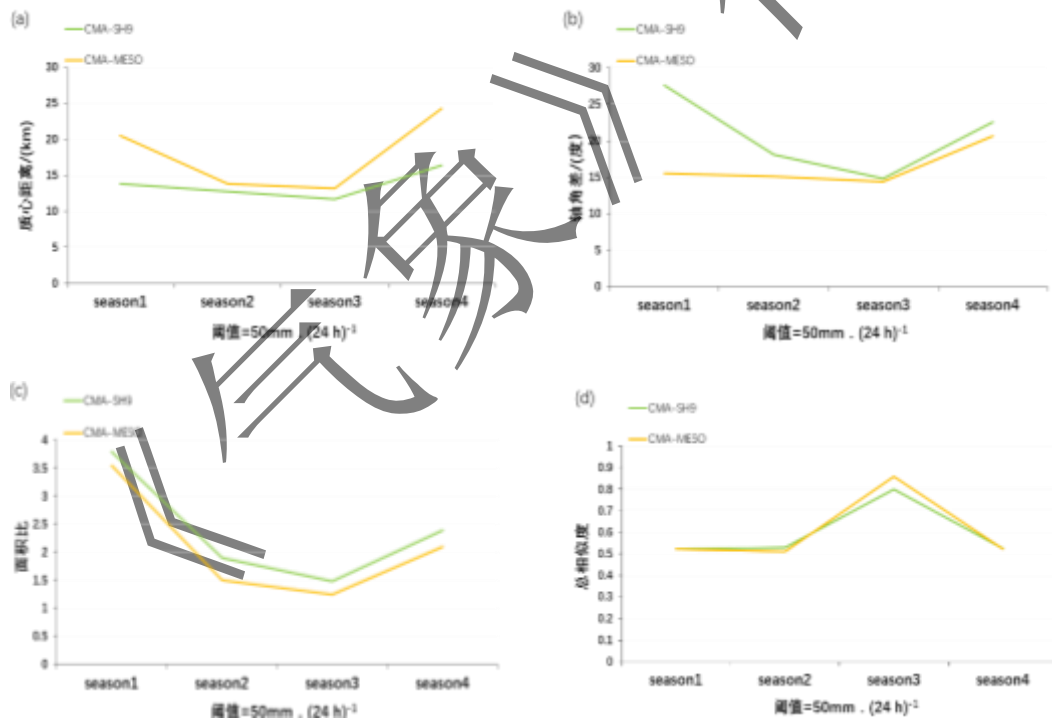


图 4 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式经由 MODE 方法识别出的 2021 年 4 个季度暴雨降水目标空间检验指标统计结果 (阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

Fig.4 The statistical results of spatial verification indicators for heavy rainfall in four quarters of 2021 that identified by the CMA-MESO and CMA-SH9 models through the MODE method (threshold: $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

图 5 显示了 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式降水预报经由 MODE 空间检验方法识别出的 2021 年 4 个季度暴雨降水目标分位强度比率统计结果。比率高于 1 表示模式预报降水强于观测，反之则表示模式预报降水较观测偏弱。其中 0.1th 分位代表暴雨降水目标中较低的分位数值即一般暴雨值，0.9th 分位代表暴雨降水目标中的较高分位数值。如图 5(a) 所示，第一季度，两家模式对 0.1th 分位的强度比率均接近于 1，表明预报值与观测值较为一致，即模式对暴雨目标中一般暴雨值的预报较为准确。随着分位的增加，模式预报降水强度逐渐表现为强于观测的特征，在 0.9th 分位表现的更为明显。整体而言，CMA-MESO 模式第一季度暴雨目标 0.5th 分位以上强度预报高于 CMA-SH9 模式。分析第二季度的强度比率结果可知(图 5(b))，CMA-SH9 模式对暴雨目标各分位强度预报均强于观测目标，而 CMA-MESO 模式则相反，各分位强度预报都低于观测。分析第三季度检验结果可见(图 5(c))，CMA-SH9 模式暴雨目标各分位强度均表现出强于观测的特征。CMA-MESO 模式则有所不同，在 0.1th 和 0.25th 分位强度，模式预报强于观测，而对于 0.5th 以上分位，预报则低于观测或与观测接近。两家模式对一般暴雨值均预报偏强，对于较高分位暴雨值，CMA-SH9 模式预报偏强，CMA-MESO 模式与观测更为接近。CMA-SH9 模式第四季度暴雨目标 0.1th、0.75th 和 0.9th 分位强度预报高于观测(图 5(d))，0.25th 和 0.5th 分位预报低于观测。

整体而言，CMA-SH9 模式四个季度对暴雨降水目标各分位强度预报均相对观测偏强，而 CMA-MESO 模式与观测值更为接近，仅第一季度预报偏强。对比两家模式，CMA-MESO 模式第一季度各分位强度预报均强于 CMA-SH9 模式，第二至第四季度则相反。

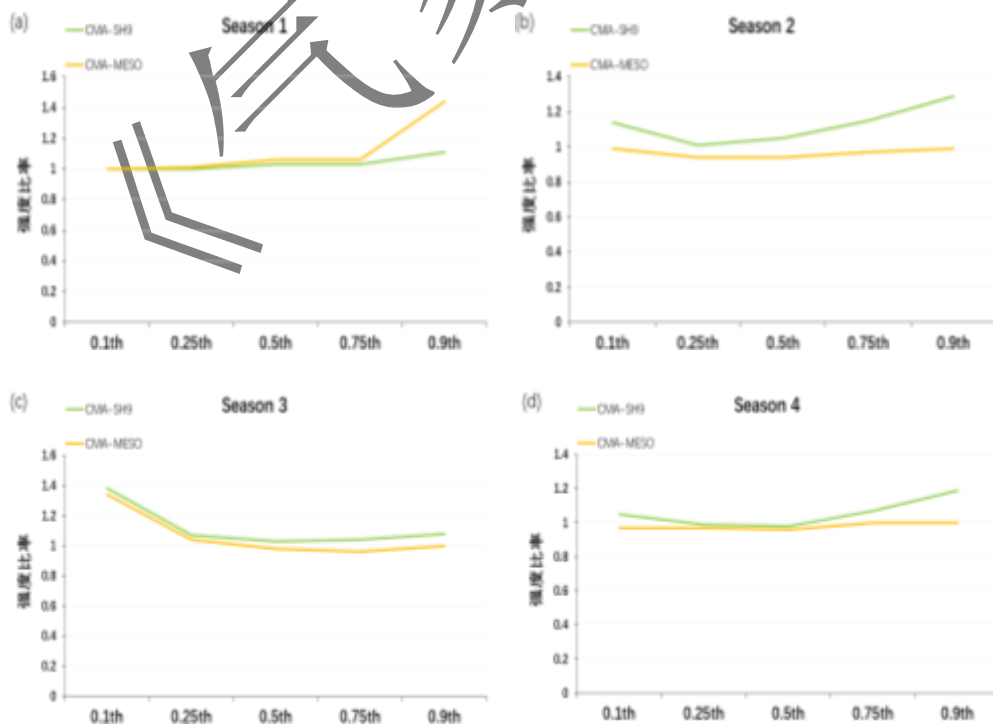


图 5 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式经由 MODE 方法识别出的 2021 年 4 个季度暴雨降水目标分位强度比率图 (阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

Fig.5 The quantile plots of object intensity ratios for heavy rainfall in four quarters of 2021 that identified by the CMA-MESO and CMA-SH9 models through the MODE method (threshold: $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

3.2 重大天气过程检验

重大天气过程降水预报能力是体现中尺度区域数值预报模式预报性能的重要指标之一,因此本文选择 2021 年 ‘21.7’ 河南特大暴雨过程和台风 “烟花” 大暴雨过程作为代表性个例, 并采用 MODE 空间检验方法对两家模式强降水空间预报能力进行检验。

3.2.1 ‘21.7’ 河南特大暴雨过程

2021 年 7 月 17 日~22 日, 河南省中北部大部分地区出现特大暴雨。本次降水过程有累计雨量大, 持续时间长, 短时降雨强, 降雨极端性突出等特点, 郑州、新乡、鹤壁、安阳等地都出现连续大暴雨、特大暴雨过程。本次过程河南省多个国家级气象站日降水量突破建站以来历史极值, 其中郑州站单日降水 (552.5 mm , 郑州全年平均降水量 641 mm) 和 1 小时降水 (201.9 mm , 20 日 16 时~17 时) 皆打破了建站以来的历史记录, 小时降雨量更是突破中国大陆小时降雨量历史极值。

图 6 显示了 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年 7 月 18 日 20 时、2021 年 7 月 19 日 20 时和 2021 年 7 月 20 日 20 时起报的 12~36h 累积降水经由 MODE 方法识别出的降水目标, 阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$, 图中红色填色区域表示观测降水目标, 蓝色廓线为预报目标。从 7 月 18 日 20 时起报检验结果可见, CMA-MESO 模式预报降水目标相对于观测目标落区较为偏西 (图 6a), 预报降水目标和观测降水目标的质心经度分别为 112.56° E 和 113.26° E , 相对而言 CMA-SH9 模式预报目标质心经度与观测目标更为接近, 为 113.07° E 。从降水影响范围分析, CMA-MESO 预报降水目标影响范围相对小于观测, 而 CMA-SH9 模式预报降水目标范围明显大于观测 (图 6b)。7 月 20 日 08 时~21 日 08 时, 从实况降水目标可以看出大暴雨影响范围进一步加大, 主要位于河南北部至中部一带。对比降水影响范围可以看出, CMA-MESO 模式预报的降水目标与观测目标影响范围更为接近 (图 6(c)), 而 CMA-SH9 大暴雨落区向南延伸至湖北境内 (图 6d), 表现出较大的纬向跨度, 与观测差异较为明显。7 月 21 日 08 时~22 日 08 时, 大暴雨落区仍主要位于河南北部地区, 但影响区域有所减小, 对比两家模式的预报降水目标可见, 模式预报降水落区都存在相对观测偏南偏西的特征, 影响范围都较观测偏大, CMA-SH9 模式相对更为明显。

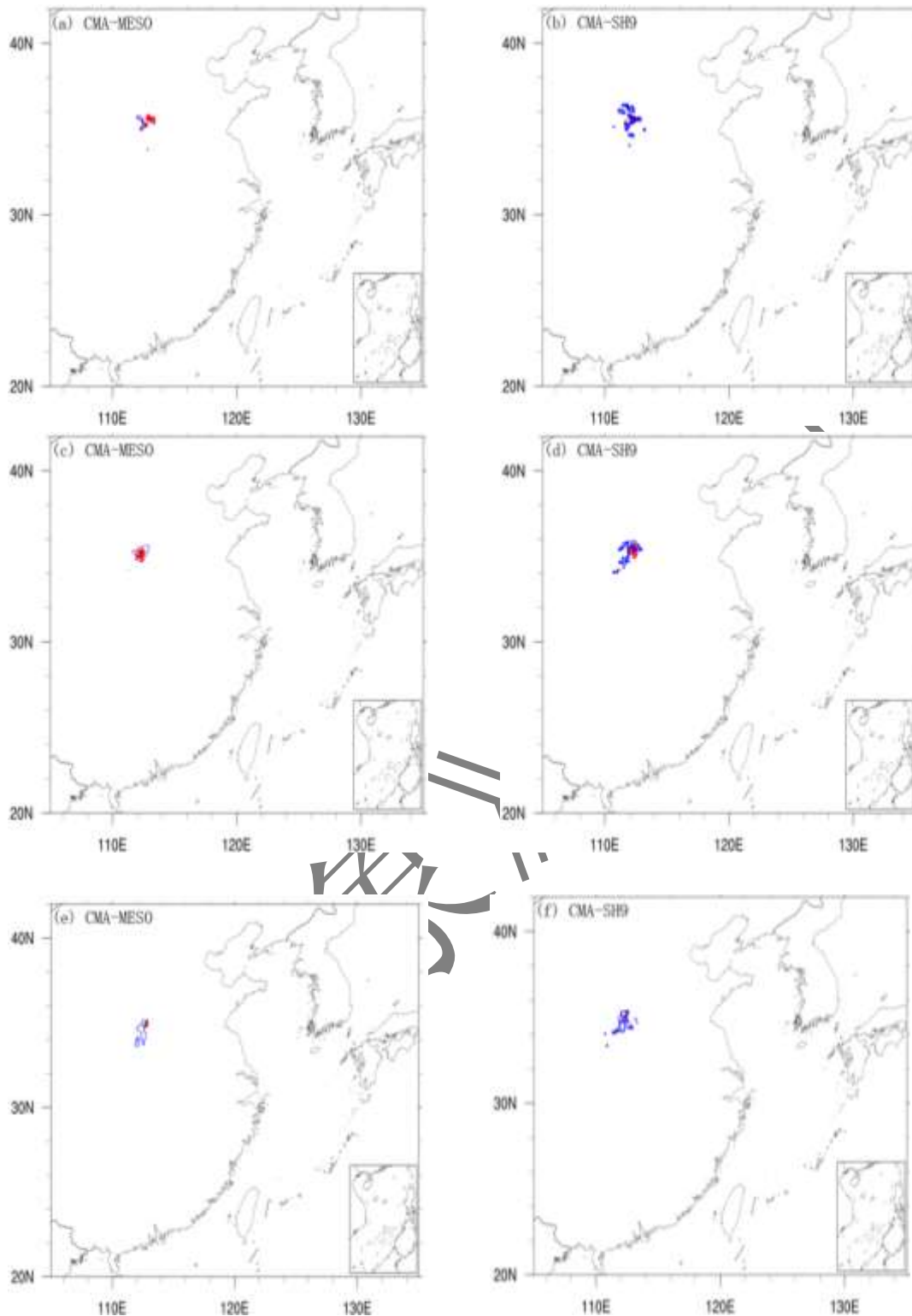


图6 CMA-MESO (a), (c), (e) 和 CMA-SH9 (b), (d), (f) 模式 2021071820 时、2021071920 时和 2021072020 时起报的 12~36h 累积降水经由 MODE 方法识别出的降水目标 (阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$), 红色填色区域为观测目标, 蓝色廓线为预报目标

Fig.6 The 12~36h rainfall object recognized by MODE forecasted by CMA-MESO (a),(c),(e) and CMA-SH9(b),(d),(f) at 20:00 BT 18 July, 20:00 BT 19 July and 20:00 BT 20 July in 2021 (threshold: $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$), the red coloring area indicates the observation object and blue outline is the forecast object

图 7 为两家模式预报经由 MODE 方法识别出降水目标空间检验指标统计结果，检验预报时次分别为 7 月 18 日 20 时至 7 月 20 日 20 时共 3 次预报，阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。如图 6a 所示，对于 100 mm 以上量级降水，CMA-SH9 模式连续 3 次预报的降水目标质心距离均小于 CMA-MESO 模式，CMA-SH9 模式 3 次预报降水目标质心距离平均值约为 76 km ，CMA-MESO 模式约为 79 km 。从轴角差空间检验指标分析可知（图 7b），CMA-MESO 模式 7 月 18 日和 19 日 20 时两次预报的降水目标轴角差小于 CMA-SH9 模式。从 100 mm 降水目标面积比可见（图 7c），两家模式对河南‘21.7’特大暴雨影响范围预报均较实况偏大。CMA-MESO 模式 3 次预报的平均面积比值为 2.26 ，CMA-SH9 模式为 3.06 。图 6d 为两家模式预报此次强降雨过程降水目标和观测目标的总相似度，由图可见，CMA-MESO 模式对此次降水过程的大暴雨预报总相似度略高于 CMA-SH9 模式，CMA-MESO 模式和 CMA-SH9 模式 3 次预报平均总相似度为 0.93 和 0.92 。表 3 显示了两家模式 3 次预报对河南‘21.7’大暴雨目标中心极值的预报比率，如表所示，CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对大暴雨中心极值预报都相对观测偏小，相对而言，CMA-SH9 模式对大暴雨中心极值预报与观测更为接近。

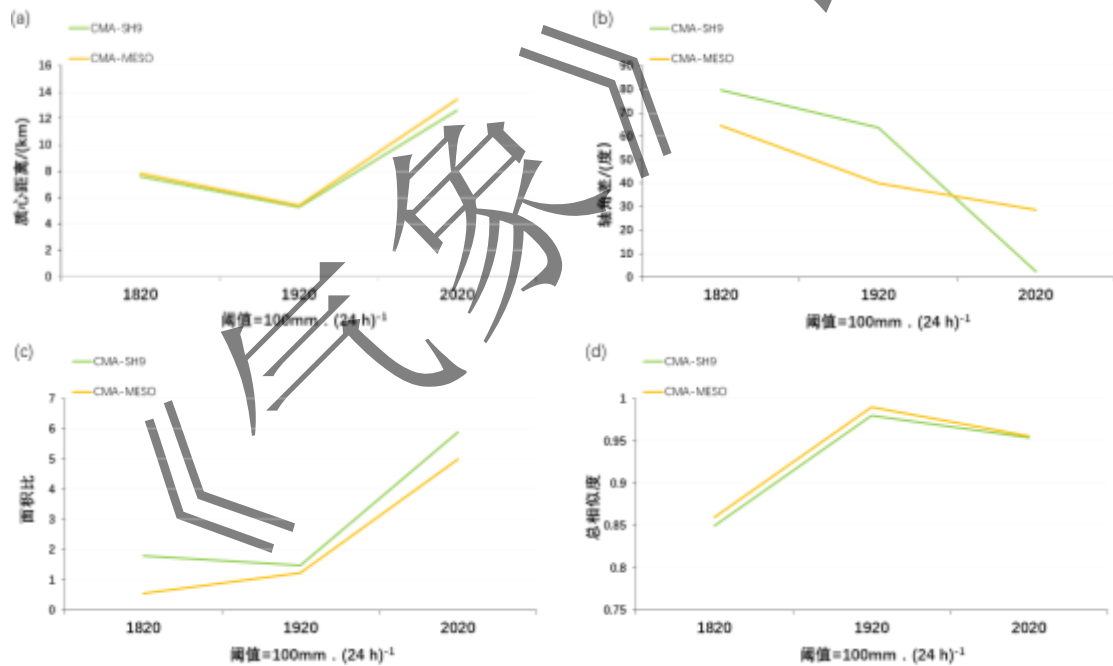


图 7 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报河南‘21.7’特大暴雨过程经由 MODE 方法识别出的降水目标空间检验指标统计结果(阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

Fig.7 The spatial verification statistic results of rainfall objects recognized by MODE method of ‘21.7’ rainstorm in Henan forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 model (threshold: $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

表 3 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式河南 ‘21.7’ 大暴雨目标中心极值预报比率

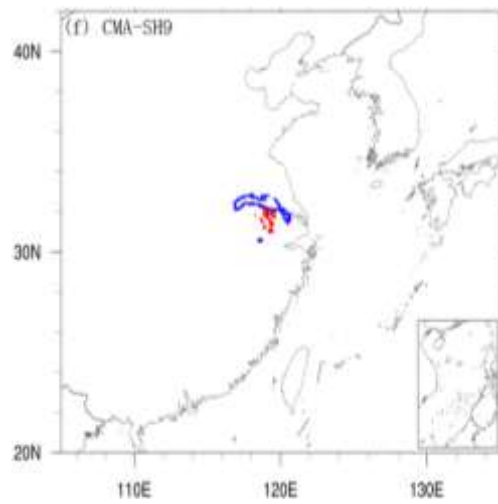
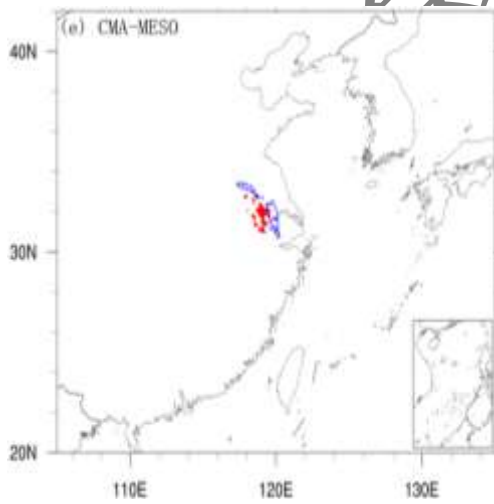
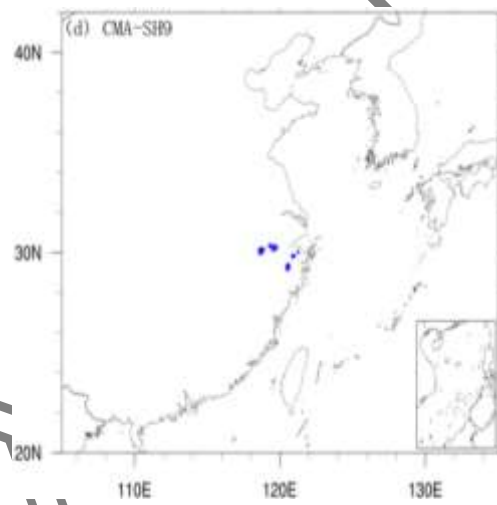
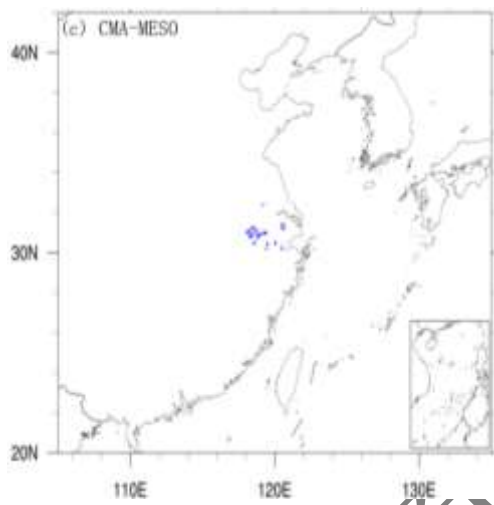
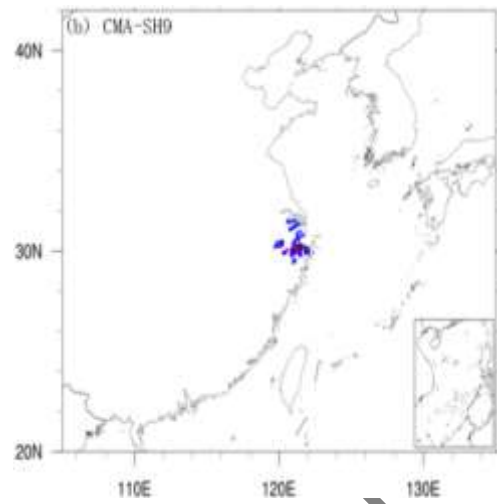
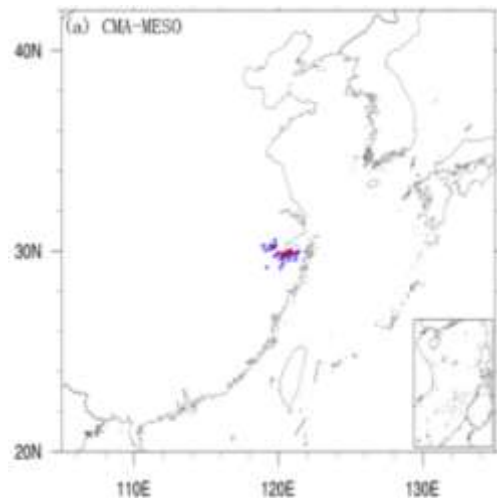
Table3 The ratio of extreme value forecast for the object center in Henan’s ‘21.7’ torrential rain by CMA-MESO and CMA-SH9 models

预报时次	大暴雨目标中心极值预报比率	
	CMA-MESO	CMA-SH9
7 月 18 日 20 时	0.62	0.83
7 月 19 日 20 时	0.90	0.92
7 月 20 日 20 时	0.81	0.98

3.2.2 2106 号台风“烟花”大暴雨过程

2106 号台风“烟花”于 7 月 18 日 02 时在西北太平洋洋面生成，“烟花”生成后移动缓慢，持续时间特别长，先后两次在浙江登陆，沿途经过江苏、安徽、山东、河北等省市，对我国东部地区造成了严重降水影响。选择“烟花”登陆前后最强降水影响时间段做 MODE 空间检验分析，资料分别选取 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式 7 月 24 日起连续 4 日的 20 时起报数据。

图 8 显示了 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年 7 月 24 日 20 时、2021 年 7 月 25 日 20 时、2021 年 7 月 26 日 20 时和 2021 年 7 月 27 日 20 时起报的 12~36h 累积降水经由 MODE 方法识别出的降水目标，阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。从 7 月 24 日 20 时的起报结果看，观测降水目标主要位于浙江北部，CMA-MESO 模式预报目标相对观测略偏南，预报降水目标质心纬度为 29.91° N ，观测为 30.05° N ；CMA-SH9 模式预报目标相对偏北，预报降水目标质心纬度为 30.52° N 。从降水预报影响范围看，两家模式都存在降水范围预报偏大的特征。7 月 26 日 08 时~27 日 08 时（图 8c-d），从实况降水看，100mm 以上降水范围有所减小，两家模式的预报降水范围均明显偏大。7 月 26 日 20 时的起报结果显示（图 8e-f），CMA-MESO 预报降水目标相对观测位置偏东，预报降水目标质心经度为 120.11° E ，观测降水目标经度为 119.58° E ；CMA-SH9 预报降水目标相对观测位置偏北，预报降水目标质心纬度为 33.15° N ，观测质心纬度为 32.17° N 。从降水预报范围来看，两家模式预报降水范围均偏大，CMA-SH9 更为明显。7 月 28 日 08 时~29 日 08 时，从实况看，大暴雨以上量级降水所有北移，主要位于江苏北部和山东，CMA-MESO 模式预报降水目标与观测有较好的匹配，CMA-SH9 模式预报降水目标相对观测位置偏东，预报降水目标质心经度为 118.47° E ，观测降水目标质心经度为 117.73° E 。



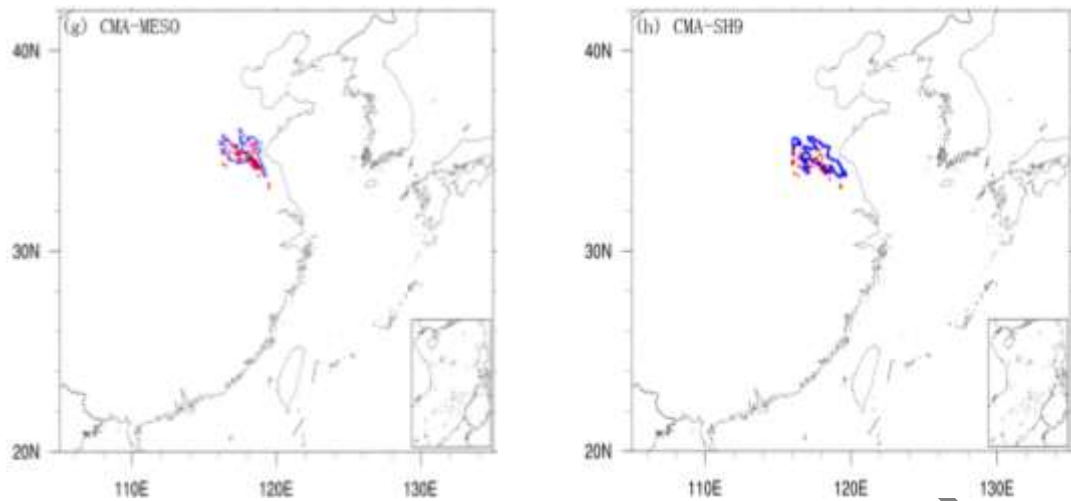
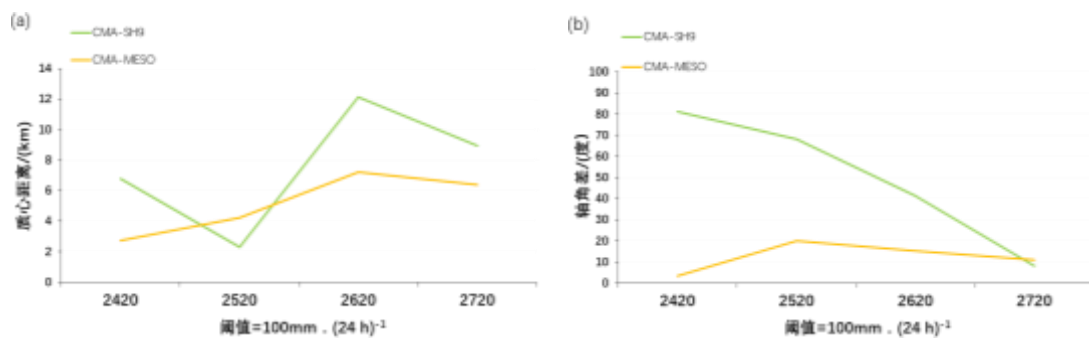


图8 CMA-MESO (a), (c), (e), (g) 和 CMA-SH9 (b), (d), (f), (h) 模式 7 月 24 日 20 时、7 月 25 日 20 时、7 月 26 日 20 时和 7 月 27 日 20 时起报的 12~36h 累积降水经由 MODE 方法识别出的降水目标 (阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$), 红色填色区域为观测目标, 蓝色廓线为预报目标

Fig.8 The 12~36h rainfall object recognized by MODE forecasted by CMA-MESO (a),(c),(e) and CMA-SH9(b),(d),(f) at 20:00 BT 24 July, 20:00 BT 25 July, 20:00 BT 26 July and 20:00 BT 27 July in 2021. (threshold: $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$), the red coloring area indicates the observation object and blue outline is the forecast object

图 9 为两家模式预报经由 MODE 方法识别出降水目标空间检验指标统计结果, 阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。如图 9a 所示, 对于 100 mm 以上量级降水, CMA-MESO 模式 7 月 24 日 20 时、26 日 20 时和 27 日 20 时预报的降水目标质心距离小于 CMA-SH9 模式。如图 9b 所示, CMA-MESO 模式 7 月 24 日、25 日、26 日预报的降水目标轴角差均小于 CMA-SH9 模式, CMA-MESO 模式 4 次预报的平均轴角差为 12.38 度, 而 CMA-SH9 模式为 49.65 度。从 100 mm 降水目标面积比可见 (图 9c), 两家模式对台风“烟花”暴雨影响范围预报均较实况偏大。CMA-MESO 模式 4 次预报的平均面积比值为 2.46 , CMA-SH9 模式为 2.47 。图 9d 为两家模式预报台风暴雨降水目标和观测目标的总相似度, 由图可见, CMA-MESO 模式对台风“烟花”降水过程的暴雨预报总相似度高于 CMA-SH9 模式, CMA-MESO 模式 4 次预报平均总相似度为 0.79 , CMA-SH9 模式为 0.73 。表 4 显示了两家模式 4 次预报对台风“烟花”大暴雨目标中心极值的预报比率, 两家模式对大暴雨中心极值预报都相对观测偏小, 但 CMA-SH9 模式与观测更为接近。



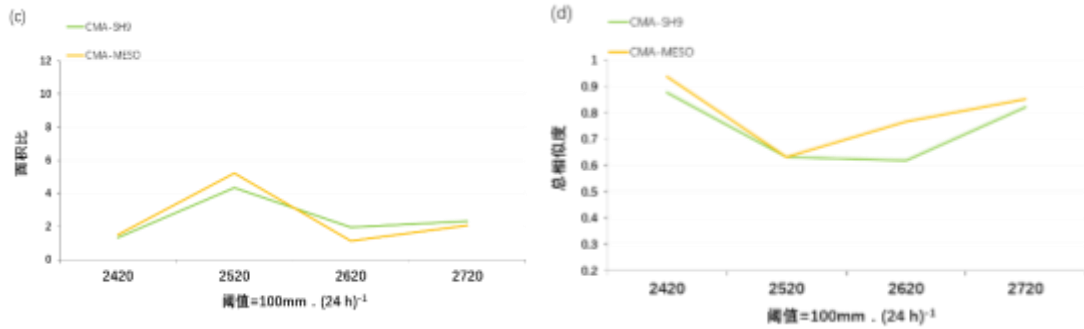


图9 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报台风“烟花”经由 MODE 方法识别出的降水目标空间检验指标统计结果 (阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

Fig.9 The spatial verification statistic results of rainfall objects recognized by MODE method of typhoon In-Fa forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 model (threshold: $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$)

表4 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式台风“烟花”大暴雨目标中心极值预报比率

Table4 The ratio of extreme value forecast for the object center in typhoon In-Fa torrential rain by CMA-MESO and CMA-SH9 models

预报时次	大暴雨目标中心极值预报比率	
	CMA-MESO	CMA-SH9
7月26日20时	0.79	0.86
7月27日20时	0.92	0.98
7月28日20时	0.91	0.95
7月29日20时	0.85	0.94

综上,由 MODE 空间检验方法可知,CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对河南‘21.7’和台风“烟花”大暴雨降水过程均呈现降水预报范围偏大的特征,但对于降水极值仍预报偏小,相对而言 CMA-SH9 模式预报极值与观测更为接近。

从前文检验结果已知,在第三季度,CMA-MESO 模式的暴雨预报技巧高于 CMA-SH9 模式,上述分析的两个重大天气过程均发生在第三季度,而两个个例的评估显示,CMA-MESO 模式的各项指标均略好于 CMA-SH9 模式,这也能部分解释 CMA-MESO 模式为什么能在第三季度技巧占优。

4 结论和讨论

本文采用多种降水检验方法评估 2021 年 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对我国东部地区的降水预报性能,得出以下主要结论:

1)、两个区域模式在第二季度和第三季度的 ETS 评分明显好于其他两个季度,显示区域模式在暖季降水中有更好的应用潜力。传统检验评分方法显示 CMA-MESO 模式第三季度降水预报技巧整体高于 CMA-SH9 模式,暴雨量级以上预报技巧优于 CMA-SH9 模式。第一季度、第

二季度和第四季度则是 CMA-SH9 模式预报技巧相对更高。

2)、从预报偏差看, CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式在四个季度均表现出预报偏差偏大的特征, CMA-SH9 模式对第三季度暴雨以上量级的预报偏差明显高于 CMA-MESO 模式。从第三季度东部地区暴雨预报 TS 评分、评分差值和空报率差值分布可知, 两家模式暴雨以上量级 TS 评分相对较低的地区都存在空报率相对较高的特征, 而 TS 评分较高的地区则对应于较低的空报率。

3)、从四个季度的暴雨 MODE 空间检验结果可见, CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对第二和第三季度的预报能力相对更优, 且均有对暴雨降水目标面积预报偏大的特征, 从总相似度来看, CMA-MESO 模式对第三季度的暴雨空间形态预报相对更优。

4)、CMA-SH9 模式四个季度对暴雨降水目标各分位强度预报均相对观测偏强, 而 CMA-MESO 模式仅第一季度预报偏强。CMA-MESO 模式第一季度各分位强度预报均强于 CMA-SH9 模式, 第二至第四季度则相反。

5)、‘21.7’河南暴雨和台风“烟花”的 MODE 空间检验结果显示 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式均有对大暴雨以上量级强降水预报影响范围偏大的特征, 但对于降水极值仍预报偏小, 相对而言 CMA-SH9 模式对中心极值预报与观测更为接近。

从本次的检验对比看, 两个区域模式均存在预报偏差 (BIAS) 过大、空报率偏高以及降水目标面积预报偏大的问题, 改善这些方面的不足是提升区域模式降水预报技巧的重要抓手。本文所得结论仅针对 2021 年我国东部地区降水进行了检验和讨论, 未来还将进一步对更多高影响天气个例进行检验分析, 对造成区域模式降水误差的原因进行更深入的研究。

致谢: 感谢两位匿名审稿专家为本文提供了宝贵的修改建议, 感谢中国科学院大气物理研究所黄永杰博士提供的包含正确中国国界和行政区划的底图数据。

参考文献

- 蔡志颖, 郑艳, 段晶晶, 等, 2023. 台风“烟花”影响浙江期间 GPM 卫星降水产品的评估及订正[J]. 暴雨灾害, 42(6): 704-715.
- Cai Z Y, Zheng Y, Duan J J, et al, 2023. Evaluation and correction of GPM satellite precipitation products during Typhoon “In-Fa” affecting Zhejiang[J]. Torr Rain Dis, 42(6): 704-715 (in Chinese).
- 陈玥, 王爱慧, 支蓉, 等, 2023. 中国东部降水中大尺度环流和局地陆—气相互作用的贡献: 河南“21·7”强降水事件特征影响因子探究[J]. 大气科学, 47(2): 551-566. Chen Y, Wang A H, Zhi R, et al, 2023. Contributions of large-scale circulation and local land-atmosphere interaction to precipitation in eastern China: investigation on influencing factors of the July 2021 heavy precipitation event in Henan province[J]. Chin J Atmos Sci, 47(2): 551-566 (in Chinese).
- 孔期, 符娇兰, 谌芸, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J]. 气象, 48(12): 1512-1524. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al, 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan province during the July 2021 severe torrential rain[J]. Meteor Mon, 48(12): 1512-1524 (in Chinese).
- 李洪兵, 枚雪彬, 夏羽, 2024. IMERG 降水产品在 2021 年台风“烟花”降水过程的检验分析[J]. 暴雨灾害, 43(1): 73-83. Li

- H B, Mei X B, Xia Y, 2024. Verification and analysis of IMERG during the precipitation process of typhoon In-Fa in 2021[J]. *Torr Rain Dis*, 43(1): 73-83 (in Chinese).
- 李静怡, 武艳, 席琳, 等, 2023. 台风“烟花”衰减后引发江苏中部降水加强分析[J]. *气象科技*, 51(6): 835-847. Li J Y, Wu Y, Xi L, et al, 2023. Analysis of intensification of precipitation in central Jiangsu after weakening of typhoon “In-Fa”[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(6): 835-847 (in Chinese).
- 刘静, 任川, 赵梓淇, 等, 2022. 多区域高分辨率模式强降水预报检验分析[J]. *气象*, 48(10): 1292-1302. Liu J, Ren C, Zhao Z Q, et al, 2022. Comparative analysis on verification of heavy rainfall forecasts in different regional models[J]. *Meteor Mon*, 48(10): 1292-1302 (in Chinese).
- 刘松楠, 汪君, 王会军, 2022. 高分辨率卫星对“21·7”河南特大暴雨监测能力分析[J]. *气象学报*, 80(5): 765-776. Liu S N, Wang J, Wang H J, 2022. Analysis of the monitoring ability of high-resolution satellites for the “21·7” heavy rain in Henan[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(5): 765-776 (in Chinese).
- 聂安祺, 李得勤, 滕方达, 等, 2020. 辽宁省夏季多模式降水预报检验及晴雨预报技术研究[J]. *气象与环境学报*, 36(5): 10-17. Nie A Q, Li D Q, Teng F D, et al, 2020. Verification of multi-model precipitation forecast in Liaoning province in summer and research on clear or rain forecast method[J]. *J Meteor Environ*, 36(5): 10-17 (in Chinese).
- 齐道日娜, 王秀明, 俞小鼎, 等, 2023. 河南“21.7”极端暴雨过程天气尺度系统发展维持机制分析[J]. *气象学报*, 81(1): 1-18. Qi D R N, Wang X M, Yu X D, et al, 2023. Analysis of the mechanisms for development and maintenance of synoptic-scale weather systems during the 19-21 July extreme heavy rainfall in Henan, China[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(1): 1-18 (in Chinese).
- 钱维宏, 陆波, 2010. 我国汛期季度降水预报得分和预报技巧[J]. *气象*, 36(10): 1-7. Qian W H, Lu B, 2010. Score and skill of seasonal forecasts of summer precipitation in China[J]. *Meteor Mon*, 36(10): 1-7 (in Chinese).
- 沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等, 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. *气象学报*, 78(3): 451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 451-476 (in Chinese).
- 苏翔, 刘梅, 康志明, 等, 2022. 2020年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J]. *气象*, 48(3): 357-371. Su X, Liu M, Kang Z M, et al, 2022. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. *Meteor Mon*, 48(3): 357-371 (in Chinese).
- 屠妮妮, 何光碧, 衡志炜, 等, 2020. 三种数值模式对四川省汛期降水预报性能的检验[J]. *高原山地气象研究*, 40(4): 1-9. Tu N N, He G B, Heng Z W, et al, 2020. The precipitation verification of three models during rainy season in Sichuan province[J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 40(4): 1-9 (in Chinese).
- 汪小康, 杨浩, 崔春光, 等, 2022a. 2021年中国降水异常气候特征及4次典型极端天气过程分析[J]. *暴雨灾害*, 41(5): 489-500. Wang X K, Yang H, Cui C G, et al, 2022a. Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021[J]. *Torr Rain Dis*, 41(5): 489-500 (in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022b. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. *气象*, 48(5): 533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022b. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 533-544 (in Chinese).
- 邢蕊, 杨健博, 田梦, 等, 2023. 不同边界层参数化方案对台风“烟花”北上阶段暴雨模拟的影响试验[J]. *干旱气象*, 41(1): 91-102. Xing R, Yang J B, Tian M, et al, 2023. Effect of different boundary layer parameterization schemes on simulation of the heavy rainfall during typhoon In-Fa (2106) moving northward period[J]. *J Arid Meteor*, 41(1): 91-102 (in Chinese).
- 徐同, 李佳, 杨玉华, 等, 2016. SMS-WARMS V2.0模式预报效果检验[J]. *气象*, 42(10): 1176-1183. Xu T, Li J, Yang Y H, et al, 2016. Verification of SMS-WARMS V2.0 model forecast results[J]. *Meteor Mon*, 42(10): 1176-1183 (in Chinese).
- 徐同, 杨玉华, 李佳, 等, 2019. SMS-WARMS V2.0模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. *气象*, 45(8): 1065-1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al, 2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in Southwest China[J]. *Meteor Mon*, 45(8): 1065-1074 (in Chinese).
- 杨涵涓, 龚志强, 王晓娟, 等, 2021. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J]. *大气科学*, 45(3): 683-696. Yang H W, Gong Z Q, Wang X J, et al, 2021. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme

-
- precipitation over eastern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(3): 683-696 (in Chinese).
- 杨浩, 周文, 汪小康, 等, 2022. “21•7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. *气象*, 48(5): 571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21•7” severe torrential rain in Henan province[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 571-579 (in Chinese).
- 姚秀萍, 李若莹, 2023. 河南“21.7”极端暴雨的研究进展[J]. *气象学报*, 81(6): 853-865. Yao X P, Li R Y, 2023. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan province, China[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(6): 853-865 (in Chinese).
- 于翡, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. *大气科学*, 42(5): 1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5): 1146-1156 (in Chinese).
- 张博, 张芳华, 李晓兰, 等, 2024. “23•7”华北特大暴雨数值预报检验评估[J]. *应用气象学报*, 35(1): 17-32. Zhang B, Zhang F H, Li X L, et al, 2024. Verification and assessment of “23•7” severe rainstorm numerical prediction in North China[J]. *J Appl Meteor Sci*, 35(1): 17-32 (in Chinese).
- 张丽霞, 周天军, 2020. 夏季亚洲对流层中上层温度年际变率的预测水平评估及其在我国东部降水预测中的应用[J]. *大气科学*, 44(1): 150-167. Zhang L X, Zhou T J, 2020. Evaluation on the prediction skill of the interannual variability of summer Asian upper tropospheric temperature and its application to prediction of precipitation in eastern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(1): 150-167 (in Chinese).
- 张云济, 于慧珍, 张慕容, 等, 2022. 河南“21•7”极端暴雨预报的不确定性和误差增长机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 52(10): 1929-1947. Zhang Y J, Yu H Z, Zhang M R, et al, 2022. Uncertainties and error growth in forecasting the record-breaking rainfall in Zhengzhou, Henan on 19-20 July 2021[J]. *Sci China Earth Sci*, 65(10): 1903-1920.
- 赵娴婷, 王晓芳, 王珏, 等, 2020. 2016年7月18-20日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. *气象*, 46(4): 490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei province during 18-20 July 2016[J]. *Meteor Mon*, 46(4): 490-502 (in Chinese).
- 赵宁坤, 张秀年, 孙俊奎, 等, 2021. 高分辨率区域模式降水预报在云南的检验[J]. *暴雨灾害*, 40(1): 78-86. Zhao N K, Zhang X N, Sun J K, et al, 2021. Verifications of high-resolution regional numerical model precipitation forecast in Yunnan province[J]. *Torr Rain Dis*, 40(1): 78-86 (in Chinese).
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006a. Object-based verification of precipitation forecast. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas[J]. *Mon Weather Rev*, 134(7): 1772-1784.
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006b. Object-based verification of precipitation forecast. Part II: application to convective rain systems[J]. *Mon Wea Rev*, 134(7): 1785-1795.
- Kain J S, Weiss S J, Levit J J, et al, 2004. Examination of convection-allowing configurations of the WRF model for the prediction of severe convective weather: the SPC/NSSL Spring Program 2004[J]. *Wea Forecasting*, 21(2): 167-181.