

徐同,王琴,漆梁波,等,2025. CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对中国东部地区降水预报的性能检验[J]. 气象,51(2):167-181.
Xu T, Wang Q, Qi L B, et al, 2025. Verificaiton of CMA-MESO and CMA-SH9 models for precipitation forecast in eastern China[J]. Meteor Mon, 51(2):167-181(in Chinese).

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

提 要: 采用标准降水检验方法和 MODE 空间检验方法, 对 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式的 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。综合四个季度的 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”河南特大暴雨和台风烟花的 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

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2024. 093001

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, CMA, 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 (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation) spatial method are applied to evaluate the performance of the CMA-MESO and CMA-SH9 models in predicting precipitation in eastern China in 2021 in this article. The results show that the two models have relatively high prediction skills for the second and third seasons of 2021, while the prediction skills for the first and fourth seasons are relatively low. The regional numerical models have good application potential in warm season precipitation forecasting. Based on the ETS and BIAS of the four

^{*} 华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ202302)和中国气象局上海台风研究所基本科研业务费专项基金项目(2024JB01)共同资助
2023 年 9 月 18 日收稿; 2024 年 7 月 17 日收修定稿

第一作者: 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

seasons, the overall precipitation prediction skills of the CMA-MESO model in the third season 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 false alarm ratio in each season. Improving the shortcomings of these two aspects is an important means to enhance the precipitation prediction skills of regional models. The spatial verification results of torrential rain for four seasons show that CMA-MESO and CMA-SH9 models have relatively better forecasting abilities for the second and third seasons, and both of them tend to overestimate the object area of torrential rain. 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 season. Spatial verification of the MODE for the July 2021 severe 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 heavy torrential rain levels. Nonetheless, these models continue to underpredict the maxima of rainfall, with the CMA-SH9 model outputs more closely aligned with the observed extreme values.

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,2022b);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,2022a;孔期等,2022;姚秀萍和李若莹,2023;张云济等,2022;Zhang et al, 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地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水平分辨率3 km、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24 h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(以下简称 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,研究结果表明,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,徐同等(2016; 2019)、屠妮妮等(2020)、聂安祺等(2020)、赵宁坤等(2021)、苏翔等(2022)、刘静等(2022)和张博等(2024)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。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。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降水预报提供参考依据,更有效地发挥数值模式的业务效能。

1 观测资料和模式

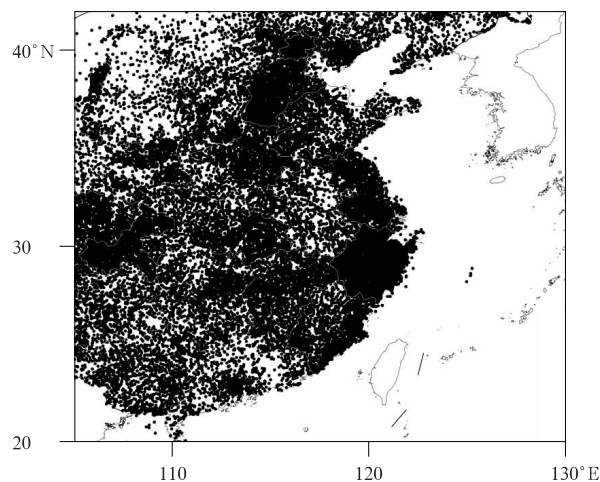
用于统计检验的模式预报资料为 2021 年 1—12 月 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 20 时(北京时,下同)起报的降水预报资料,关注模式预报时段为 12~36 h,即用于检验的 24 h 累计降水为 12~36 h 预报。降水观测资料采用地面自动气象站 1 h 降水资料,与模式预报的降水资料进行逐小时匹配,24 h 由 1 h 间隔资料累加获得。本文定义的中国东部地区检验范围为 20°~42°N、105°~135°E,评估区域站点分布如图 1 所示,共有 29 604 个观测站点。CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式主要参数见表 1,其中 CMA-MESO 模式相关参数设置引自沈学顺等(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,底图无修改。

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



注:共有 29 604 个站点。

图 1 检验区域观测站点分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in verification region

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/km	3	9
垂直层次/层	50	51
同化系统	GRAPES-3DVar	ADAS5.3.3

分和预报偏差 BIAS。两种评分指数的参数均来自于列联表(表 2)。

表 2 降水检验列联表

Table 2 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

ETS 评分和 BIAS 计算如式(1)和式(2)所示:

$$ETS = \frac{A - C_1}{A + B + C - C_1} \quad (1)$$

式中: $C_1 = \frac{(A+B)(A+C)}{A+B+C+D}$ 为随机击中次数, A、B、C、D 参数见表 2。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,其取值范围为 $[-1/3, 1]$, 等于 1 表示预报完美。

$$BIAS = \frac{A+B}{A+C} \quad (2)$$

式中:BIAS 为预报偏差,表示预报事件发生的次数与观测事件发生次数的比率,等于 1 表示预报完美。

2.2 MODE 空间检验方法

Davis et al(2006a; 2006b)发展了一种基于目标

的诊断评估方法(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,如式(3)所示:

$$C(x, y) = \sum_{u, v} \phi(u, v) f(x - u, y - v) \quad (3)$$

式中: 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 是一个由影响半径 R 和高度 H 决定的简单圆柱形滤波器。

$$\phi(x, y) = \begin{cases} H & x^2 + y^2 \leq R^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中参数 R 和 H 并不是相互独立的,满足如下关系式:

$$\pi R^2 H = 1 \quad (5)$$

因此 R 是卷积过程中的唯一可调参数。即 R 值确定后, H 值由式(5)确定。对处理后的卷积场 C 设定阈值得到屏蔽场,则可以定义为 M :

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & C(x, y) \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中, T 为阈值。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 :

$$F(x, y) = M(x, y) f(x, y) \quad (7)$$

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 IN :

$$IN(\alpha) = \frac{\sum_i w_i S_i(\alpha) I_i(\alpha_i)}{\sum_i w_i S_i(\alpha)} \quad (8)$$

式中: I 为相似度因子,取值 $0 \sim 1$; S 为可信度因子,在 $0 \sim 1$; w 为权重系数; IN 为总相似度,在 $0 \sim 1$ 。给 IN 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 3 km ,因此对 CMA-MESO 模式做升尺度处理将模式资料插值到 9 km 分辨率与观测资料进行格点匹配。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 年四个季度降水预报的 ETS 评分以及 BIAS 情况。如前所述,模式起报时次均为 20 时,预报时效为 $12 \sim 36 \text{ h}$ 。24 h 累计降水分别按照小雨 [$0.1 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$],中雨 [$10 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$],大雨 [$25 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$],暴雨 [$50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$],大暴雨 [$100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$]和特大暴雨 [$250 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$]进行检验。本文中,降水检验采用的是单向阈值方法。其中四个季度定义如下:第一季度(2021 年 1—3 月),第二季度(2021 年 4—6 月),第三季度(2021 年 7—9 月),第四季度(2021 年 10—12 月)。

如图 2a, 2c, 2e, 2g(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

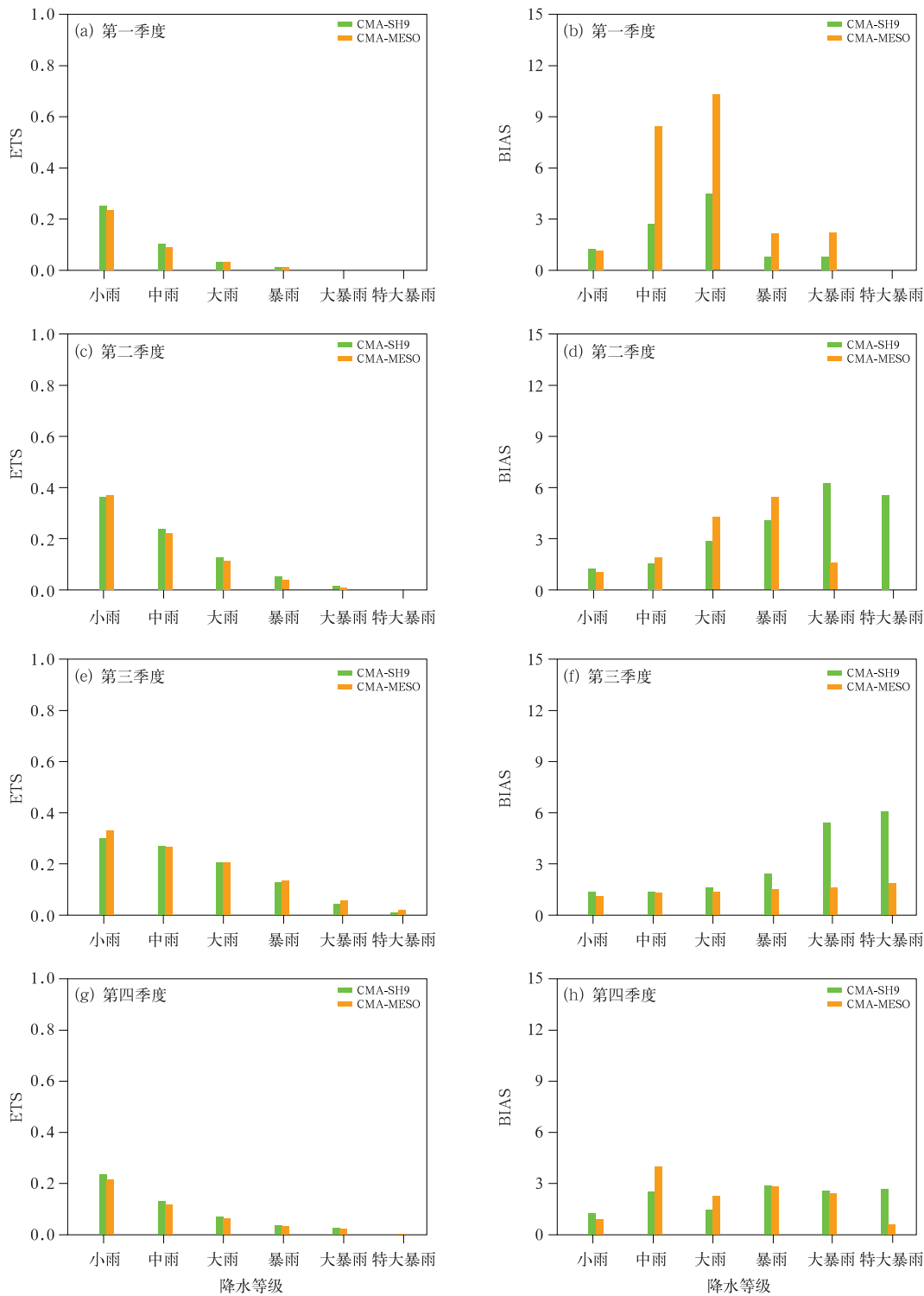


图 2 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对中国东部地区 2021 年四个季度降水预报(a,c,e,g)ETS 评分及(b,d,f,h)BIAS

Fig. 2 (a, c, e, g) ETS and (b, d, f, h) BIAS of precipitation forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 models in eastern China in four seasons of 2021

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 模式分别为 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 和 0.05, CMA-SH9 模式分别为 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。

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 BIAS 越接近 1, 说明该量级预报范围越接近实况, 大于 1 说明该量级预报降水较实况偏多(范围偏大), 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 BIAS(图 2b)可见, CMA-MESO 模式对小雨至大暴雨的 BIAS 均大于 1, CMA-SH9 模式对暴雨以下量级的 BIAS 大于 1, 对大暴雨和特大暴雨的 BIAS 小于 1。CMA-SH9 小雨 BIAS 大于 CMA-MESO 模式, 中雨至大暴雨 BIAS 小于 CMA-MESO 模式。从第二季度的 BIAS 分析(图 2d), CMA-SH9 模式对各个量级降水预报的 BIAS 均大于 1, CMA-MESO 除特大暴雨外, 对小雨至大暴雨的 BIAS 大于 1。CMA-SH9 模式对小雨、大暴雨和特大暴雨的 BIAS 高于 CMA-MESO 模式, 中雨、大雨和暴雨则是 CMA-MESO 模式 BIAS 较高。CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式对第三季度各个量级的 BIAS 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 BIAS 大于 CMA-MESO 模式, 中雨 BIAS 则是 CMA-MESO 相对较高。从第四季度的 BIAS 可见(图 2h), CMA-SH9 模式对各量级降水的 BIAS 均大于 1, CMA-MESO 模式对小雨和特大暴雨 BIAS 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 BIAS 大于 CMA-MESO 模式, CMA-MESO 模式对中雨和大雨的 BIAS 高于 CMA-SH9 模式。

综上所述, 两个区域模式在第二和第三季度的 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、第二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 BIAS 看, CMA-MESO 和

CMA-SH9 模式在四个季度均表现出偏大的特征, 而 CMA-SH9 模式对第三季度暴雨以上量级的 BIAS 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。这也是造成其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、浙江东部及黄淮地区。CMA-MESO 模式暴雨 TS 评分分布与 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、江苏北部和安徽南部。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 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 年四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 4a 所示, 从四个季度来看, 两家模式对第二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 124 km 和 118 km, 而第一和第四季度目标质心距离分别为 184 km 和 218 km。对比两家模式, CMA-SH9 模式四个季度

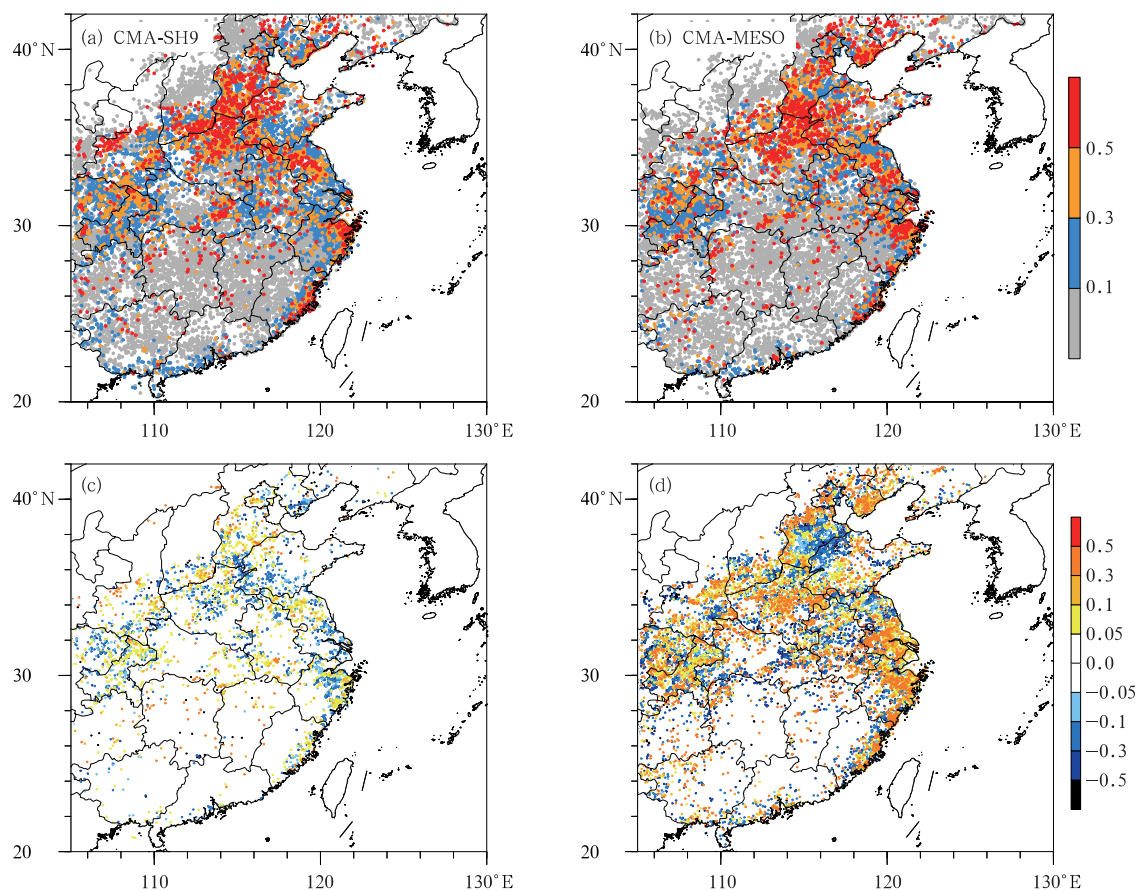
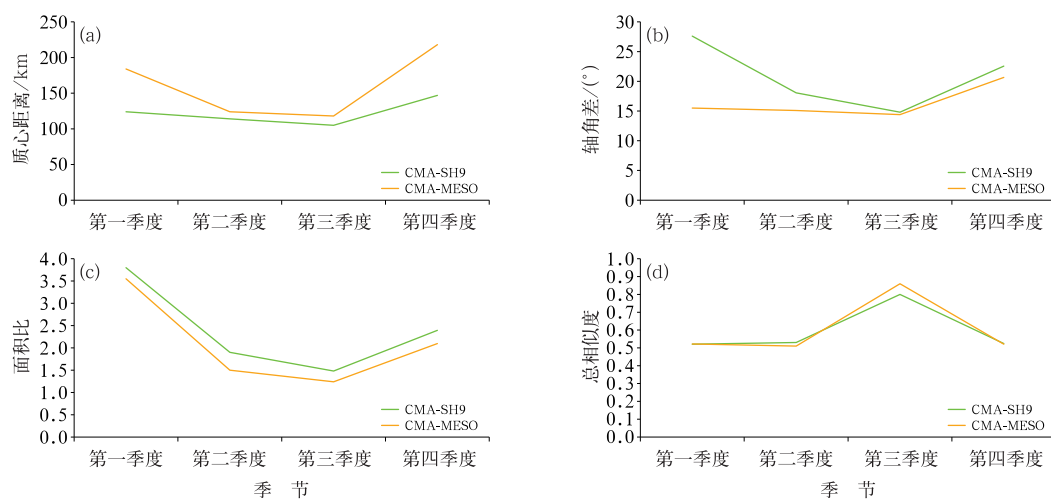


图3 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式对 2021 年第三季度中国东部地区暴雨预报
(a,b)TS 评分,(c)TS 评分差值和(d)空报率差值分布

Fig. 3 Distribution of (a, b) TS, (c) TS difference and (d) false alarm ratio difference of torrential rain forecasted by CMA-SH9 and CMA-MESO models in eastern China in the third season of 2021



注:阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。

图4 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报经由 MODE 方法识别出的 2021 年
四个季度暴雨降水目标空间检验指标统计结果

(a)质心距离,(b)轴角差,(c)面积比,(d)总相似度

Fig. 4 The statistical results of spatial verification indicators identified through the MODE method for torrential rain forecasted by the CMA-MESO and CMA-SH9 models in four seasons of 2021

(a) centroid distance, (b) axial-angle difference, (c) area ratio, (d) total similarity

的降水目标质心距离整体小于 CMA-MESO 模式。图 4b 和 4c 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 4a 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 4d 为两家模式预报降水目标的总相似度,从图中可以看出,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。

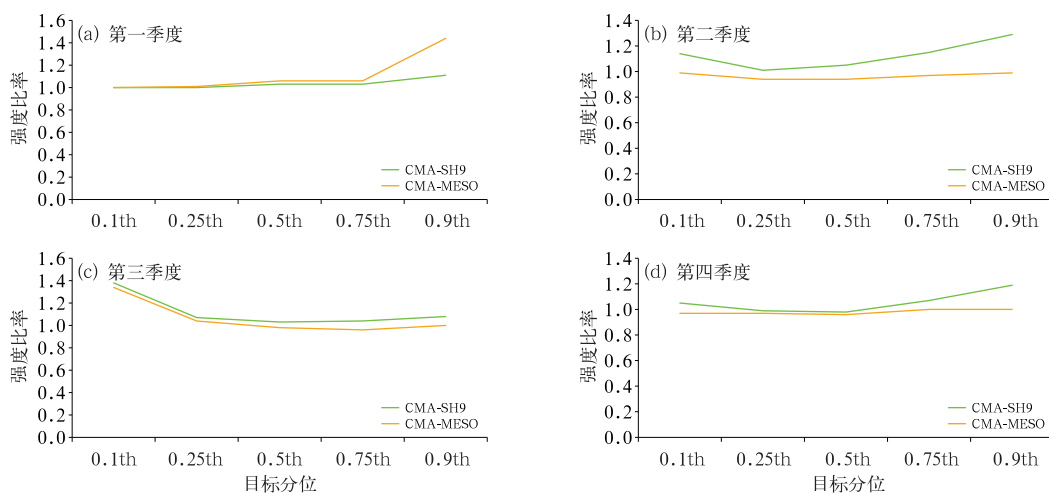
图 5 显示了 CMA-SH9 和 CMA-MESO 模式降水预报经由 MODE 空间检验方法识别出的 2021 年四个季度暴雨降水目标分位强度比率统计结果。比率高于 1 表示模式预报降水强于观测,反之则表示模式预报降水较观测偏弱。其中 0.1th 分位代表暴雨降水目标中较低的分位数值即一般暴雨值,0.9th 分位代表暴雨降水目标中的较高分位数值。如图 5a 所示,第一季度,两家模式对 0.1th 分位的强度比率均接近于 1,表明预报值与观测值较为一致,即模式对暴雨目标中一般暴雨值的预报较为准确。随着分位的增加,模式预报降水强度逐渐表现为强于观测的特征,在 0.9th 分位表现得更为明显。整

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 5b),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 5c),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 5d),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。

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



注:阈值为 $50 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ 。

图 5 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报经由 MODE 方法识别出的 2021 年四个季度暴雨降水目标分位强度比率

Fig. 5 The quantile plots of object intensity ratios identified through the MODE method for torrential rain forecasted by the CMA-MESO and CMA-SH9 models in four seasons of 2021

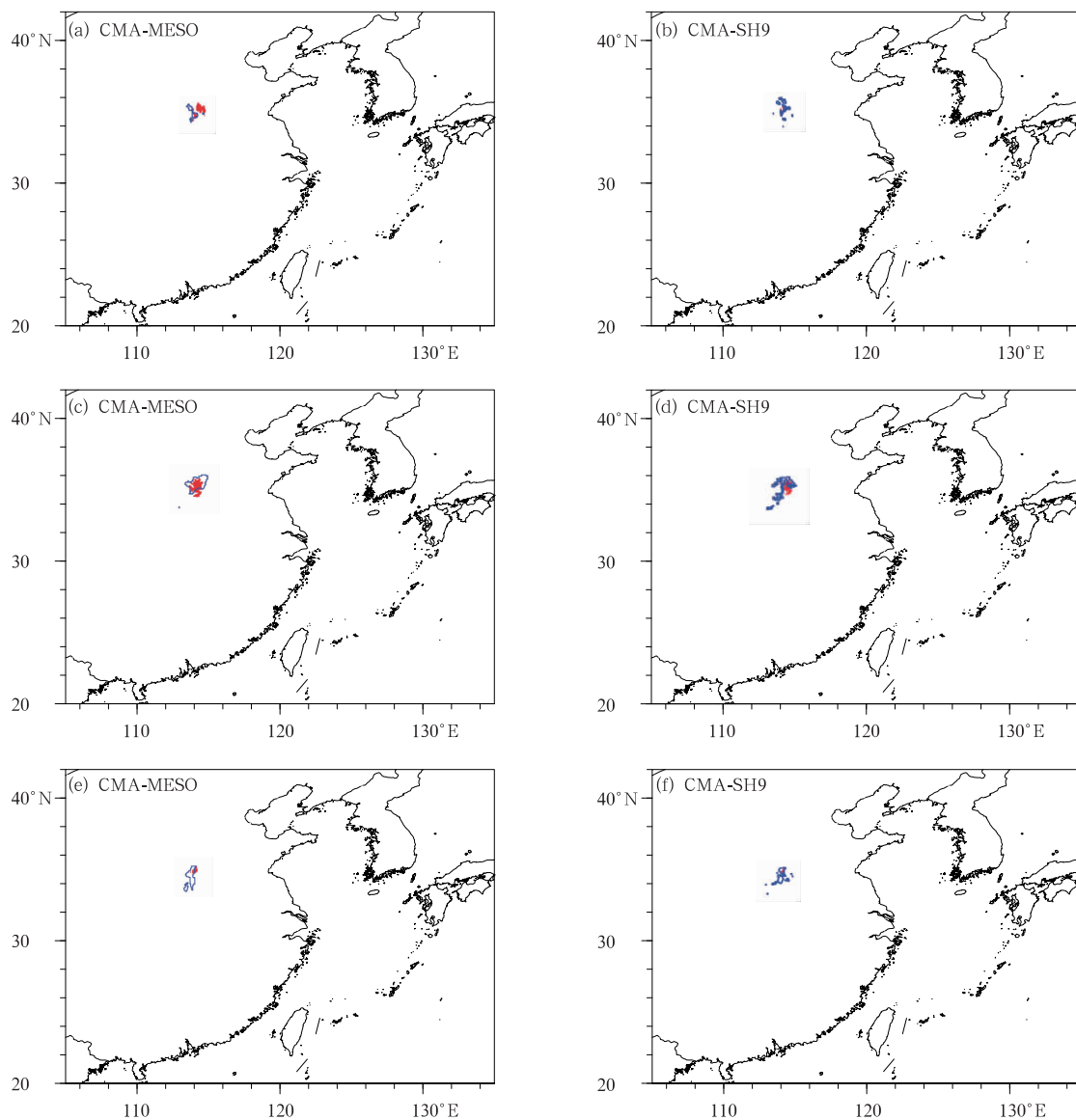
选择 2021 年“21·7”河南特大暴雨过程和台风烟花大暴雨过程作为代表性个例, 并采用 MODE 空间检验方法对两家模式强降水空间预报能力进行检验。

3.2.1 “21·7”河南特大暴雨过程

2021 年 7 月 17—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、短时降水强、降水极端性突出等特点, 郑州、新乡、鹤壁、安阳等地都出现连续大暴雨、特大暴雨。本次过程河南省多个国家级气象观测站日降

水量突破建站以来历史极值, 其中郑州站单日降水量(552.5 mm, 郑州全年平均降水量 641 mm)和小时降水量(201.9 mm, 20 日 16—17 时)皆打破了建站以来的历史纪录, 小时降水量更是突破中国大陆小时降水量历史极值。

图 6 显示了 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年 7 月 18 日 20 时、19 日 20 时和 20 日 20 时起报的 12~36 h 累计降水经由 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



注: 阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$, 红色填色区域为观测降水目标, 蓝色廓线为预报降水目标。

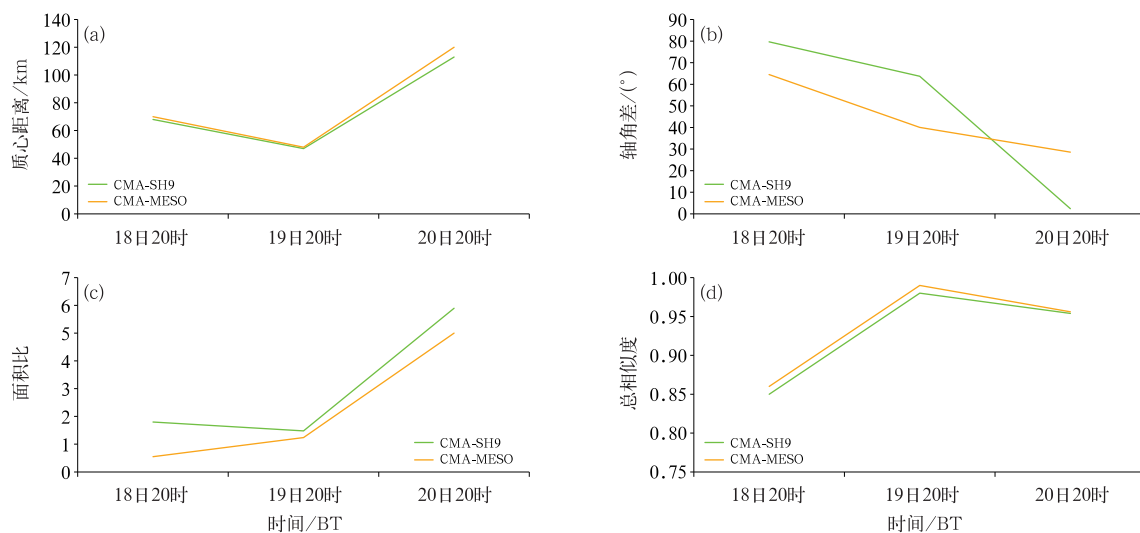
图 6 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年 7 月(a,b)18 日 20 时、(c,d)19 日 20 时和 (e,f)20 日 20 时起报的 12~36 h 累计降水经由 MODE 方法识别出的降水目标

Fig. 6 The rainfall object identified by MODE method of 12—36 h accumulated rainfall forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 models initiated at (a, b) 20:00 BT 18, (c, d) 20:00 BT 19 and (e, f) 20:00 BT 20 July 2021

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 时至 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降水目标影响范围更为接近(图 6c),而 CMA-SH9 大暴雨落区向南延伸至湖北境内(图 6d),表现出较大的南北向跨度,与观测差异较为明显。7 月 21 日 08 时至 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 7 为两家模式预报经由 MODE 方法识别出的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、19 日 20 时和 20 日 20 时,阈值为 $100\text{ mm} \cdot (24\text{ h})^{-1}$ 。如图 7a 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 2 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 7d 为两家模式预报此次强降水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 和 CMA-SH9 模式 3 次预报平均总相似度分别为 0.93 和



注:阈值为 $100\text{ mm} \cdot (24\text{ h})^{-1}$ 。

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

(a)质心距离,(b)轴角差,(c)面积比,(d)总相似数

Fig. 7 The statistic results of spatial verification indicators of rainfall objects identified by MODE method during the July 2021 severe torrential rain in Henan forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 models

(a) centroid distance, (b) axial-angle difference, (c) area ratio, (d) total similarity

0.92。表3为两家模式3次预报对河南“21·7”大暴雨目标中心极值的预报比率,由表可见,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。

表3 2021年7月18—20日CMA-MESO和CMA-SH9模式河南“21·7”大暴雨目标中心极值预报比率

Table 3 The ratio of extreme value forecast for the object center of the July 2021 severe torrential rain in Henan by CMA-MESO and CMA-SH9 models during 18—20 July 2021

预报时次/BT	大暴雨目标中心极值预报比率	
	CMA-MESO	CMA-SH9
18日20时	0.62	0.83
19日20时	0.90	0.92
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2021年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、河北等省份,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天的20时起报数据。

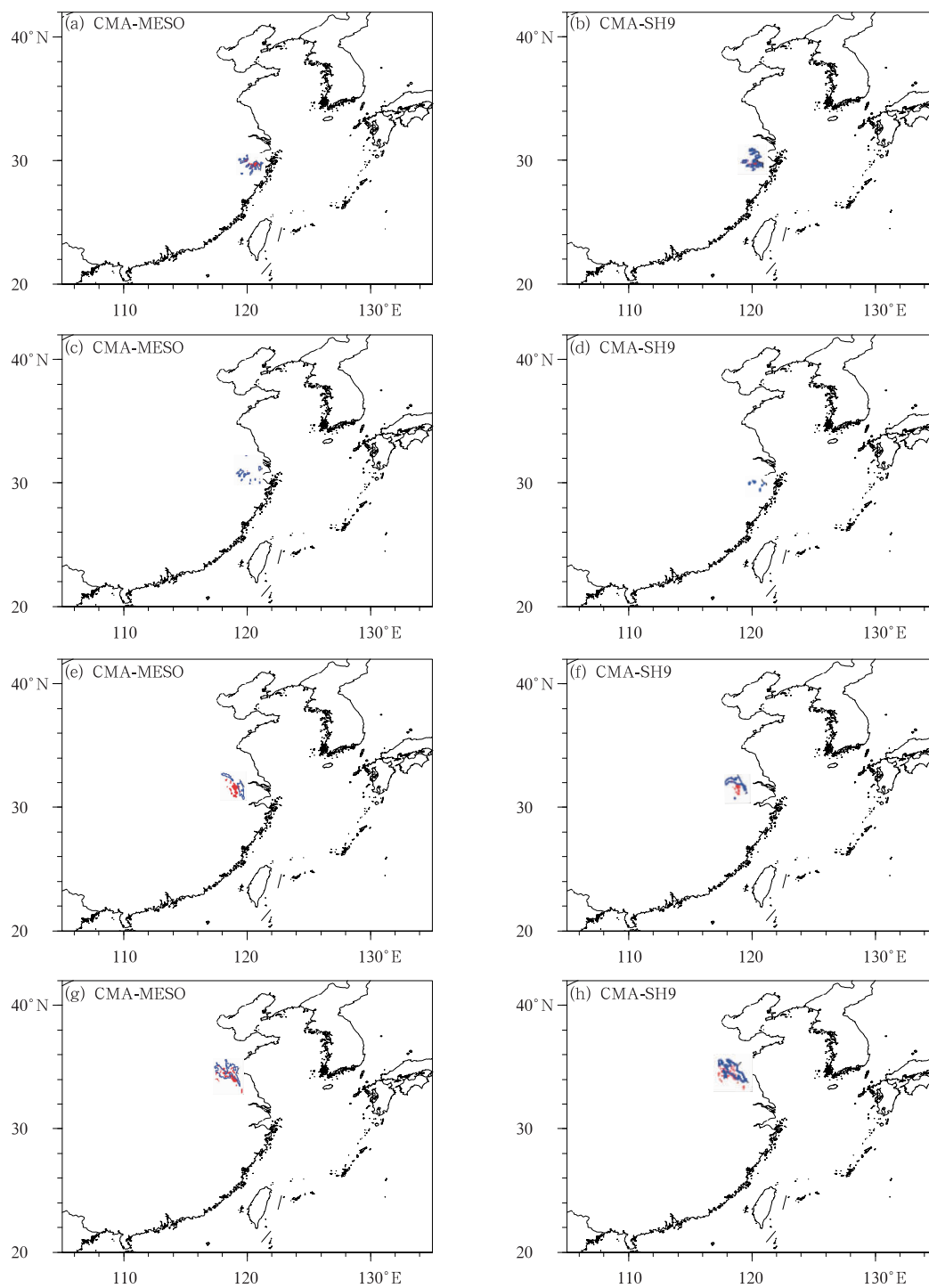
图8显示了CMA-MESO和CMA-SH9模式2021年7月24日20时、25日20时、26日20时和27日20时起报的12~36h累计降水经由MODE方法识别出的降水目标,阈值为 $100\text{ mm} \cdot (24\text{ h})^{-1}$ 。从7月24日20时的起报结果看,观测降水目标主要位于浙江北部,CMA-MESO模式预报降水目标相对观测略偏南,预报降水目标质心纬度为 29.91°N ,观测为 30.05°N ;CMA-SH9模式预报目标相对偏北,预报降水目标质心纬度为 30.52°N 。从降水预报影响范围看,两家模式都存在降水范围预报偏大的特征。7月26日08时至27日08时(图8c,8d),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,8f),CMA-MESO预报降水目标相对观测位置偏东(预报的目标质心经度为 120.11°E ,观测目标则为 119.58°E);CMA-SH9预

报降水目标相对观测位置偏北(预报目标质心纬度为 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,其中CMA-SH9更为明显。7月28日08时至29日08时,从实况看,大暴雨以上量级降水有所北移,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9为两家模式预报经由MODE方法识别出的降水目标空间检验指标统计结果,阈值为 $100\text{ mm} \cdot (24\text{ h})^{-1}$ 。从图9a可以看出,对于100mm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。从图9b可以看出,CMA-MESO模式7月24日20时、25日20时、26日20时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° ,而CMA-SH9模式为 49.65° 。从100mm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。

综上所述,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。



注:阈值为 $100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$,红色填色区域为观测降水目标,蓝色廓线为预报降水目标。

图 8 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式 2021 年 7 月 (a,b)24 日 20 时、
(c,d)25 日 20 时、(e,f)7 月 26 日 20 时和 (g,h)27 日 20 时起报的
12~36 h 累计降水经由 MODE 方法识别出的降水目标

Fig. 8 The rainfall object indentified by MODE method of 12—36 h accumulated
rainfall forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 models initiated
at (a, b) 20:00 BT 24, (c, d) 20:00 BT 25, (e, f) 20:00 BT 26
and (g, h) 20:00 BT 27 July 2021

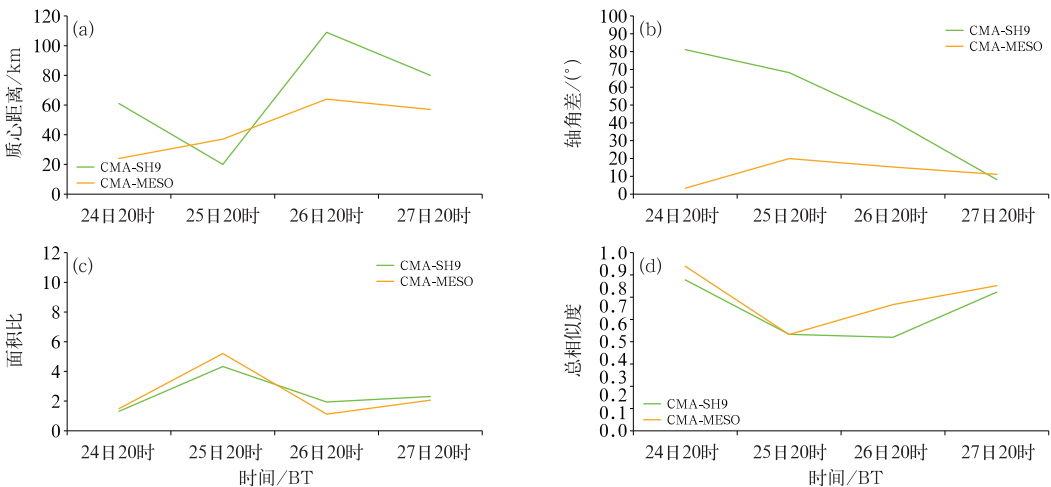


图 9 2021 年 7 月 24—27 日 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报台风烟花经由 MODE 方法识别出的降水目标空间检验指标统计结果

Fig. 9 The statistic results of spatial verification indicators of rainfall objects identified by MODE method during Typhoon In-Fa forecasted by CMA-MESO and CMA-SH9 models during 24—27 July 2021

表 4 2021 年 7 月 26—29 日 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对台风烟花大暴雨目标中心极值预报比率

Table 4 The ratio of extreme value forecast for the object center of Typhoon In-Fa torrential rain by

CMA-MESO and CMA-SH9 models during 26—29 July 2021

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

4 结论与讨论

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、第二和第四季度则是 CMA-SH9 模式预报技巧相对更高。

(2)从 BIAS 看,CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式在四个季度均表现出 BIAS 偏大的特征,CMA-SH9 模式对第三季度暴雨以上量级的 BIAS 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 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。

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,湛芸,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,崔春光,王婧羽,等,2022a.“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, 2022a. 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).
- 汪小康,杨浩,崔春光,等,2022b.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, 2022b. 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).
- 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).
- 杨涵洧, 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).
- 于翥, 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, 52(10): 1929-1947 (in Chinese).
- 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 Wea 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.
- 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.

(本文责编: 俞卫平)