



CMA-MESO与ZJ3KM模式对浙江省短时强降水预报性能检验分析

刘雪晴 邱金晶 龚琬丁 陈晔峰 张红蕾 许雯

Refined performance of CMA-MESO and ZJ3KM in forecasting short-term heavy precipitation over Zhejiang Province

LIU Xueqing, QIU Jinjing, GONG Wandong, CHEN Yefeng, ZHANG Honglei, XU Luan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-145>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

伊犁河谷两次短时强降水过程的双偏振雷达特征对比分析

A comparative analysis of Dual-Polarization Radar characteristics of two short-term heavy precipitation events in the Ili river valley

暴雨灾害. 2025, 44(4): 504–514 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-124>

四川地区精细化降水预报融合订正试验及检验

Experiment and verification of fine gridded precipitation forecast fusion correction in Sichuan

暴雨灾害. 2024, 43(2): 176–184 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-077>

山西复杂地形下CMA-MESO 3km系统降水预报检验及订正

Assessment and correction of precipitation forecast with the CMA-MESO 3 km model under the complex terrain in Shanxi Province

暴雨灾害. 2023, 42(4): 384–394 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-218>

基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究

Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data

暴雨灾害. 2025, 44(1): 60–70 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-062>

尺度分析降水检验方法在一次暴雨评估中的应用

Application of the scale analysis precipitation verification method in the evaluation of a heavy rainfall event

暴雨灾害. 2025, 44(4): 554–564 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-180>

短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比

Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain

暴雨灾害. 2023, 42(1): 1–12 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-119>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘雪晴,邱金晶,龚琬丁,等. 2026. CMA-MESO 与 ZJ3KM 模式对浙江省短时强降水预报性能检验分析[J].暴雨灾害,45(4):500–512.
LIU Xueqing, QIU Jinjing, GONG Wanding, et al. 2026. Refined performance of CMA-MESO and ZJ3KM in forecasting short-term heavy precipitation over Zhejiang Province [J]. Torrential Rain and Disasters,45(4):500–512 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–145

CMA-MESO 与 ZJ3KM 模式对浙江省短时强降水 预报性能检验分析

刘雪晴, 邱金晶, 龚琬丁, 陈晔峰, 张红蕾, 许变

(浙江省气象科学研究所, 杭州 310008)

摘 要: 为深入评估中国气象局中尺度天气数值预报系统 (China Meteorological Administration Mesoscale Model, CMA-MESO) 与浙江快速更新同化预报系统 (Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System, ZJ3KM) 对浙江省短时强降水的精细化预报性能, 基于自动气象站观测降水和模式预报资料, 针对 2023 年 6—9 月五类天气背景下短时强降水 (冷切型、暖切型、高空槽型、热带气旋型、副高控制型), 综合运用过程检验、邻域空间检验 FSS (Fractions Skill Score) 评分、MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation) 检验以及 TS 评分等传统检验方法, 从降水强度落区、频率、日变化特征、空间结构等多方面系统评估两模式的预报性能。结果表明: (1) 落区上, CMA-MESO 对暖切型和热带气旋型短时强降水的落区与频率预报效果更优, ZJ3KM 在冷切型和副高控制型的降水总量、频率及强度空间分布上更具优势, 两模式对高空槽型短时强降水的预报均存在较大偏差。(2) 日变化特征方面, CMA-MESO 整体接近实况但低估副高控制型降水, ZJ3KM 普遍高估降水频率且峰值时间偏早。(3) 传统检验显示, CMA-MESO 在热带气旋型的 TS 评分更高、空报率更低, ZJ3KM 在副高控制型表现更优且多数类型下命中率更高、范围偏差更小。(4) 空间检验表明, CMA-MESO 在热带气旋型占优, ZJ3KM 在其余类型降水强度指示性更好但落区存在偏差。两种模式均存在强降水对象识别不足的问题, CMA-MESO 在冷、暖切型的空间匹配度更好, ZJ3KM 在其他三类中表现更优; 位置偏差方面, 除冷切型外 CMA-MESO 多偏东偏南, ZJ3KM 多偏东偏北。该研究结果可为 CMA-MESO 和 ZJ3KM 模式更好地应用在浙江地区短时强降水预报业务提供参考。

关键词: 数值预报模式; 短时强降水; 精细化检验; FSS; MODE

中图法分类号: P459.9

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–145

Refined performance of CMA-MESO and ZJ3KM in forecasting short-term heavy precipitation over Zhejiang Province

LIU Xueqing, QIU Jinjing, GONG Wanding, CHEN Yefeng, ZHANG Honglei, XU Luan

(Zhejiang Meteorological Research Institute, Hangzhou 310008)

Abstract: To better understand the forecasting performance of the China Meteorological Administration Mesoscale Model (CMA-MESO) and the Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System (ZJ3KM) for short-term heavy precipitation in Zhejiang Province. The analysis is based on short-term heavy precipitation events associated with five typical synoptic patterns—cold shear, warm shear, upper-level trough, tropical cyclone, and subtropical high—during June–September 2023. This study systematically assesses the two models using precipitation process verification, traditional verification methods, as well as FSS (Fractions Skill Score) and MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation). Model performance is assessed in terms of rainfall intensity, spatial distribution, diurnal cycle, and structural characteristics. The results are as follows: (1) CMA-MESO performs better in capturing the rainfall coverage and frequency for warm-shear and tropical cyclone types, whereas ZJ3KM exhibits superior skill in simulating the total precipitation, frequency, and intensity distributions for cold-shear and subtropical high types. Both models show pronounced biases for upper-level trough cases. (2)

收稿日期: 2025–08–04; 定稿日期: 2026–02–13

资助项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目 (2024C03256); 浙江省自然科学基金联合基金项目 (LZJMY23D050004, LZJMY23D050003, LZJMY24D050007); 国家自然科学基金青年项目 (42305010); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-053)

第一作者: 刘雪晴, 主要从事集合预报及模式检验研究。E-mail: liuxqzy@163.com

通信作者: 邱金晶, 主要从事天气预报技术及其相关应用研究。E-mail: jinjing_qiu@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

Regarding diurnal variation, CMA-MESO generally matches observations but underestimates precipitation in the subtropical high type, whereas ZJ3KM tends to overestimate precipitation frequency and advance the timing of peak rainfall. (3) CMA-MESO achieves a higher Threat Score (TS) and lower false alarm rate for the tropical cyclone type, whereas ZJ3KM performs better for the subtropical high type and achieves higher hit rates and smaller domain biases for most precipitation types. (4) Spatial verification indicates that CMA-MESO performs better for tropical cyclone, while ZJ3KM provides superior precipitation intensity indication for other types, albeit with location biases. Both models show insufficient identification of heavy precipitation objects. Regarding spatial matching, CMA-MESO demonstrates better performance for cold- and warm-shear cases, whereas ZJ3KM excels in the remaining three categories. For position bias, except in cold shear, CMA-MESO tends to have eastward and southward deviations, while ZJ3KM shows eastward and northward biases. Overall, optimal operational application should integrate the strengths of both models--leveraging of trend evolution information CMA-MESO, and intensity of ZJ3KM and local small-scale details, while applying targeted corrections to mitigate their respective location biases.

Key words: numerical weather prediction systems; short-term heavy precipitation; refined verification analysis; FSS; MODE

引言

短时强降水是我国南方主要灾害性天气之一,常造成城市积涝、农田被淹等,且极易诱发山洪、泥石流等次生灾害,严重威胁人民生命财产安全。例如,2023年7月22日傍晚至23日凌晨(北京时,下同),杭州市富阳区出现短时强降水,引发山洪致使局部山体塌方和泥石流,共造成5人死亡、3人失联。由于短时强降水系统空间尺度小、突发性强、维持时间短,一直以来都是预报业务的一大难题(董美莹等, 2024)。

近年来,随着气象科学、大气探测技术和计算机技术快速发展,数值天气预报技术取得长足进步,高分辨率数值预报模式成为短时强降水预报不可或缺的工具。数值模式检验评估是理解模式预报偏差、完善数值预报模式和提升预报服务产品质量的有效方法,是现代数值模式发展的基础环节之一(陈昊明等, 2021)。开展业务模式的短时强降水预报检验评估是提升我国强天气精细化预报水平的一个重要基础性工作。当前评估技术方法众多,包括传统的点对点检验方法、邻域检验和面向对象的空间检验方法以及降水过程检验技术等(Davis et al., 2006)。

传统检验方法对于高分辨率数值模式存在空报漏报的“双重惩罚”缺陷(Davis et al., 2006; 茅懋等, 2016),尤其对于短时强降水,模式虽然能够较好的表征对流系统结构,但是预报目标位置相对实况存在一定偏差。邻域检验方法通过对比预报场与观测场时空邻近范围内特征的准确程度,能够弥补传统检验方法存在的不足(Theis et al., 2005)。目前应用较为广泛的邻域检验方法为Roberts和Lean(2008)提出的分数技巧评分FSS(Fractions Skill Score),该方法可以提供尺度依赖的评价结果和预报技巧尺度,具备将检验结果和预报产品后处理建立联系的特殊

优势(Mittermaier and Roberts, 2010; 董美莹等, 2024)。MODE(Method for Object-Based Diagnostic Evaluation)检验方法是另一种常用的高分辨率模式空间检验评估方法(Davis et al., 2006a, 2006b; 刘凑华和牛若芸, 2013; 邱金晶等, 2015; 李玲萍, 2025),该方法可以客观地从预报和观测场中识别出检验目标,并对预报和观测目标的位置、形状、移向等相关属性进行对比,相对于传统检验方法其受气候概率影响较小,可以提供更多模式预报误差的诊断信息,检验结果更加客观(潘留杰等, 2017; 徐同等, 2020)。此外,围绕精细化预报发展需求,高分辨率数值模式也需要通过降水过程检验技术,从降水小时尺度特征(如降水频次、强度等)方面对数值预报产品进行更细致的评估,以揭示模式对于日内降水特性的预报偏差,这类评估结果能够在一定程度上反映模式动力、热力因子偏差的综合影响(Lin et al., 2000; 陈昊明等, 2021; 屠妮妮等, 2025; 谢傲等, 2026)。

浙江省位于我国东南沿海,地形复杂,同时受西风带和东风带天气系统双重影响,不同天气背景下短时强降水多发频发(吕劲文等, 2019; 俞佩, 2022; 王宇浩等, 2025),开展业务模式对浙江地区短时强降水评估更具现实意义。目前中国气象局区域中尺度天气数值预报模式(CMA-MESO)和浙江快速更新同化预报模式(ZJ3KM)是浙江省强天气预报业务中常用的两个区域模式。针对对流可分辨尺度两种模式的对比评估研究仍较为有限,尤其在短时强降水精细化预报能力方面缺乏系统性分析。为此,本文将浙江2023年6—9月1h累积降水作为评估对象,基于降水过程检验技术、传统检验方法、FSS方法、MODE检验,系统评估CMA-MESO和ZJ3KM在不同典型天气背景下短时强降水过程的预报能力,揭示CMA-MESO和ZJ3KM模式对不同天气背景下短时强降水的预报性能和偏差信息,以期了解两种模

式各自的优势和不足,为数值预报系统产品使用和
改进提供有价值参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

(1) 降水实况资料为 2023 年 6—9 月浙江省约
5 000 多个站点的小时雨量累计值,站点平均空间分
辨率约 4~5 km,来源于浙江省气象局信息网络中心
的自动站数据库。(2) 同时段 ERA5 再分析资料,来
源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF),空间分辨率
为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 1 h。基于上述时段的
降水实况和再分析资料,针对不同天气背景的短时
强降水过程,对 CMA-MESO 和 ZJ3KM 两种模式同
期的预报结果进行精细化对比分析。

CMA-MESO 和 ZJ3KM 均具备 3 km 空间分辨率
和逐 3 h 更新的快速循环同化能力。不同的是,CMA-
MESO 是中国气象局自主研发的业务模式,通过
CMA 高分辨率变分同化系统融合最新观测信息和
全球大尺度环流信息;而 ZJ3KM 将 WRF_3.4.1 作为
预报模式,利用 ADAS (ARPS Data Assimilation System)
同化系统同化多种观测资料。此外,CMA-MESO 还
同化了多普勒雷达,风廓线雷达以及卫星资料。ZJ3KM
同化的观测站资料更为稠密,且利用 ADAS 中的复杂
云分析系统同化了新一代天气雷达 CINRAD-SA/SB
的反射率。两种模式均同化了探空观测和地面气象
站观测数据 (包括常规天气观测,船舶观测,飞机报,
浮标报等)。两种模式具体说明见表 1,物理过程参
数化方案对比说明见表 2。

表 1 CMA-MESO 和 ZJ3KM 模式预报产品信息对比

Table 1 Comparison of CMA-MESO and ZJ3KM model forecast products information

产品信息	预报区域	空间分辨率	起报时间	预报时效	预报输出频次
CMA-MESO	70°—145°E; 10°—60°N	3 km	8 time·d ⁻¹ , 00:00, 12:00 UTC冷启动	00:00, 12:00 UTC; 72 h; 03:00, 06:00, 09:00, 15:00, 18:00, 21:00 UTC; 36 h	1 h
ZJ3KM	117°—124°E; 26°—32°N	3 km	8 time·d ⁻¹ , 06:00, 18:00 UTC冷启动	24 h	1 h

表 2 CMA-MESO 和 ZJ3KM 模式物理过程参数化方案对比

Table 2 Comparison of physical process parameterization schemes between CMA-MESO and ZJ3KM models

方案名称	云微物理方案	陆面过程方案	边界层方案	近地面层方案	长波辐射方案	短波辐射方案	积云参数化方案
CMA-MESO	WSM6	Noah	NMRF	Monin-Obukhov	RRTM	Dudhia	浅对流参数化
Z3KM	WSM6	Noah方案, 包括Urban Canopy Model 城市冠层方案	YSU	MM5 Monin- Obukhov	RRTMG	RRTMG	无积云参数化方案

1.2 研究方法

1.2.1 短时强降水天气背景分型

采用《浙江省天气预报手册》、沈晓玲等
(2022) 的短时强降水分型标准,依据天气背景,将
浙江省短时强降水过程分为冷切型、暖切型、热带
气旋型、高空槽型、西北太平洋副热带高压 (以下
简称副高) 控制型五种类型。具体划分标准如下:
(1) 冷切型, 850 hPa 有冷切变南压或低涡后部冷切
东移影响浙江,切变线南侧一般有西南急流,短
时强降水多发生在冷切南侧。(2) 暖切型, 850 hPa
有暖式切变线北抬或低涡前部暖切变东伸影响浙
江,暖切变一般为西南风与东南风或偏南风切变,
短时强降水多发生在暖切变以南的西南暖湿气流

内。(3) 热带气旋型,热带气旋本体登陆或在浙江
沿海北上时其外围云系造成降水。(4) 高空槽型,
850 hPa 有低槽东移影响浙江,槽前有西南气流,短
时强降水多发生在槽前。(5) 副高控制型,浙江省
受副高控制,短时强降水多发生在午后副高内部暖
区内。随着天气系统的移动,降水会先后影响不同
区域,在分类时认为同一组云团发展或移入直至减
弱或移出期间造成的降水为一次过程。短时强降
水的形成往往不取决于单一的天气系统,在分类时
采用影响最大或直接导致降水的天气系统。对于
连续性强降水其影响天气系统可能存在多个系统
的更替,在分类时则将其不同阶段分为不同天气背
景型。

1.2.2 过程检验方法

筛选短时强降水过程的标准(沈晓玲等, 2022)为: 浙江省达到或超过 5 个站点出现 1 h 降水量 ≥ 20 mm 的降水记为一次短时强降水过程。基于筛选到的 2023 年 6—9 月短时强降水过程, 定义发生短时强降水的当天记为一个短时强降水日。

降水过程检验着眼于降水小时尺度特征, 评估高分辨率模式对不同天气背景下的短时强降水精细化特征的预报能力, 包括各类天气背景下短时强降水的总降水量、降水频率和强度分布以及降水的日变化情况。针对单站点 24 h 预报序列, 统计检验时段内各个站点位置上模式预报与观测强降水 (≥ 20 mm·h⁻¹) 时次除以所有时次即为降水频率, 强降水时次的平均降水量即为降水强度(陈昊明等, 2021)。利用降水日变化曲线检验各站点 24 h 预报在一天中不同时刻平均降水量的曲线分布, 并同观测曲线直接比较。

1.2.3 空间检验方法

邻域检验方法 FSS (记为 F_{SS}) 评分公式如下

$$F_{SS} = 1 - \frac{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (NP_{F(i,j)} - NP_{O(i,j)})^2}{\frac{1}{N_x N_y} \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} NP_{F(i,j)}^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} NP_{O(i,j)}^2 \right)} \quad (1)$$

式中, N_x 、 N_y 分别为研究区域内经向、纬向格点总数, $NP_{F(i,j)}$ 、 $NP_{O(i,j)}$ 分别是邻域窗内预报场和观测场中格点 (i,j) 降水发生概率。FSS 评分介于 0 到 1 之间, 其中完全不匹配为 0, 完美匹配为 1。考虑浙江省陆域面积以及天气系统的尺度, 本文选取邻域半径为 1、5、9、…、61 倍格距, 即 3、15、27、…、183 km 对模式预报结果进行 FSS 评分。

面向对象空间检验采用 MODE 获取目标属性(面积、质心、轴向等), 计算预报降水落区和实况的相似程度, 评估模式的降水预报能力。该方法可以简要归纳为三步: 首先, 利用滤波函数对原始数据场进行卷积滤波, 公式如下

$$C(x,y) = \sum_{u,v} \phi(u,v) f(x-u, y-v) \quad (2)$$

式中, f 代表原始数据场, ϕ 代表滤波函数, C 为处理后的卷积场, 变量 (x,y) 和 (u,v) 为格点坐标, 滤波函数 ϕ 是由影响半径和高度决定的简单圆柱形滤波器。其次, 对卷积场进行阈值处理, 生成一个开关掩模场, 在掩模场的空间上给出对象的边界。最后, 将原始的降水值还原到对象内部, 进而分析降水对象

的数据特征(Davis et al., 2006a, 2006b)。本文中检验阈值为 20 mm·h⁻¹, 卷积半径设置为 1 个网格点。

在采用降水过程检验技术、FSS 评分以及 MODE 检验时, 利用反距离插值法和双线性插值法分别将观测、CMA-MESO 预报资料处理成与 ZJ3KM 模式匹配的网格数据。采用传统检验方法时, 利用邻近点匹配法将模式资料插值到气象观测站点。

2 结果与分析

2.1 不同天气背景下短时强降水类型统计

基于前文分型规则, 结合 ERA5 再分析资料, 筛选得到 2023 年 6—9 月短时强降水 942 个时次, 经统计为 106 次降水过程, 包括冷切型 42 次, 暖切型 34 次, 高空槽型 11 次, 热带气旋型 7 次, 副高控制型 7 次和其他类型 5 次(不做讨论)。表 3 显示, 2023 年短时强降水过程以冷切型为主, 占 39.6%, 其次为暖切型, 两种类型共占 71.6%, 即 2023 年浙江一半以上的短时强降水由中低层切变线造成。热带气旋型降水为 7 次, 其他类型降水则发生频率较低。

表 3 2023 年 6—9 月浙江省五种类型短时强降水过程发生次数(单位: 个)

Table 3 Number of occurrences of various weather types during short-duration heavy precipitation processes in Zhejiang Province from June to September 2023 (unit: times)

月份	冷切型	暖切型	高空槽型	热带气旋型	副高控制型
6月	10	8	3	1	0
7月	8	10	5	1	5
8月	16	8	2	2	0
9月	8	8	1	3	2
合计	42	34	11	7	7
(占比)	(39.6%)	(32.1%)	(10.4%)	(6.6%)	(6.6%)

2.2 降水过程检验

图 1 给出不同天气背景短时强降水日累计降水量的空间分布, 由图可知, 两种模式对 2023 年 6—9 月各类短时强降水日降水总量预报整体均偏强。冷切型短时强降水分布受地形影响明显, 金衢盆地和东南沿海地区存在强度较大的降水中心, ZJ3KM 模式预报出浙江南部降水量大于北部的特征, CMA-MESO 预报的东南沿海雨带呈东西走向, 与实况西南—东北走向的分布存在较大差异(图 1a₁—c₁)。暖切型短时强降水主要集中在浙西和浙北北部地区, CMA-MESO 在落区预报方面更具优势, ZJ3KM 对东部沿海空报明显(图 1a₂—c₂)。高空槽型短时强降水

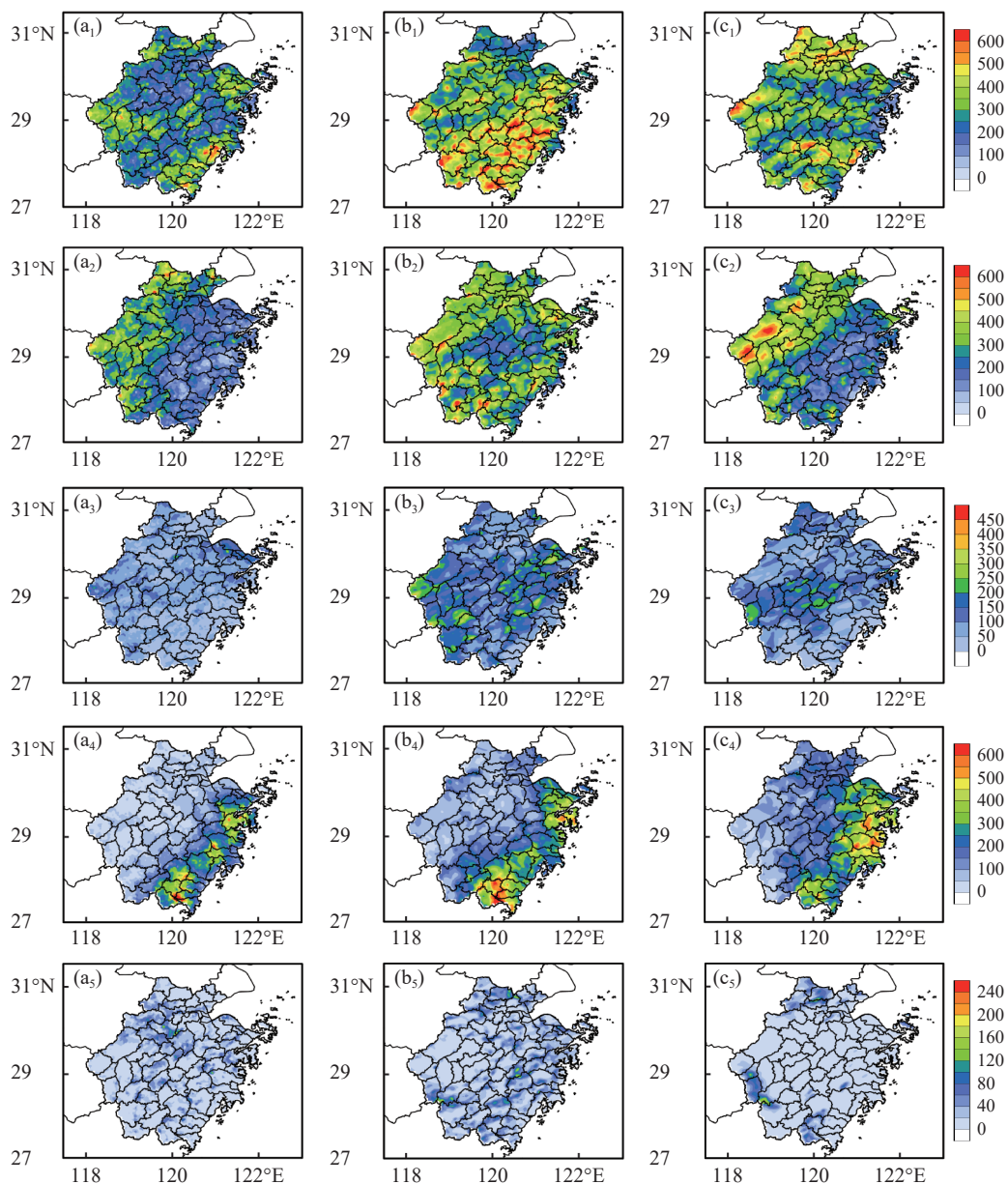


图 1 2023 年 6—9 月观测 (a_1 — a_5) 与 ZJ3KM (b_1 — b_5)、CMA-MESO (c_1 — c_5) 模式预报冷切型 (a_1, b_1, c_1)、暖切型 (a_2, b_2, c_2)、高空槽型 (a_3, b_3, c_3)、热带气旋型 (a_4, b_4, c_4) 和副高控制型 (a_5, b_5, c_5) 短时强降水日累计降水量 (单位: mm) 分布

Fig. 1 Distributions of accumulated precipitation (unit: mm) for short-term heavy precipitation days of (a_1, b_1, c_1) cold shear, (a_2, b_2, c_2) warm shear, (a_3, b_3, c_3) upper-level trough, (a_4, b_4, c_4) tropical cyclone and (a_5, b_5, c_5) subtropical high from (a_1 — a_5) observations, (b_1 — b_5) ZJ3KM and (c_1 — c_5) CMA-MESO model forecasts during June–September 2023

总量较少, CMA-MESO 未预报出浙东北的降水弱中心 (图 1 a_3 — c_3)。两个模式均能准确捕捉热带气旋型短时强降水主要集中于浙江东部沿海的特征, 但 CMA-MESO 对浙东北强降水预报范围偏大, ZJ3KM 对中部沿海强中心存在漏报 (图 1 a_4 — c_4)。副高控制型短时强降水分布分散, CMA-MESO 对降水落区与实况相差较多, ZJ3KM 更优 (图 1 a_5 — c_5)。

不同天气背景下短时强降水频率分布 (图 2) 显示, 高值区与累计降水量的分布基本一致。相比于实况, ZJ3KM 对冷切型短时强降水频率空间分布把

握较好, CMA-MESO 在浙南和浙北地区存在明显的降水高频区 (图 2 a_1 — c_1)。ZJ3KM 模式预报暖切型短时强降水频率明显高于实况, 尤其是在沿海地区, CMA-MESO 相对准确, 但对浙南局地存在高估 (图 2 a_2 — c_2)。对高空槽型短时强降水, ZJ3KM 整体高估降水频率且预报范围偏大, CMA-MESO 与实况接近, 但预报略偏南 (图 2 a_3 — c_3)。热带气旋型短时强降水高频集中在沿海, ZJ3KM 在中部沿海存在漏报, CMA-MESO 接近实况, 但在浙西出现虚假高频区 (图 2 a_4 — c_4)。副高控制型短时强降水高频区主要集中在浙西

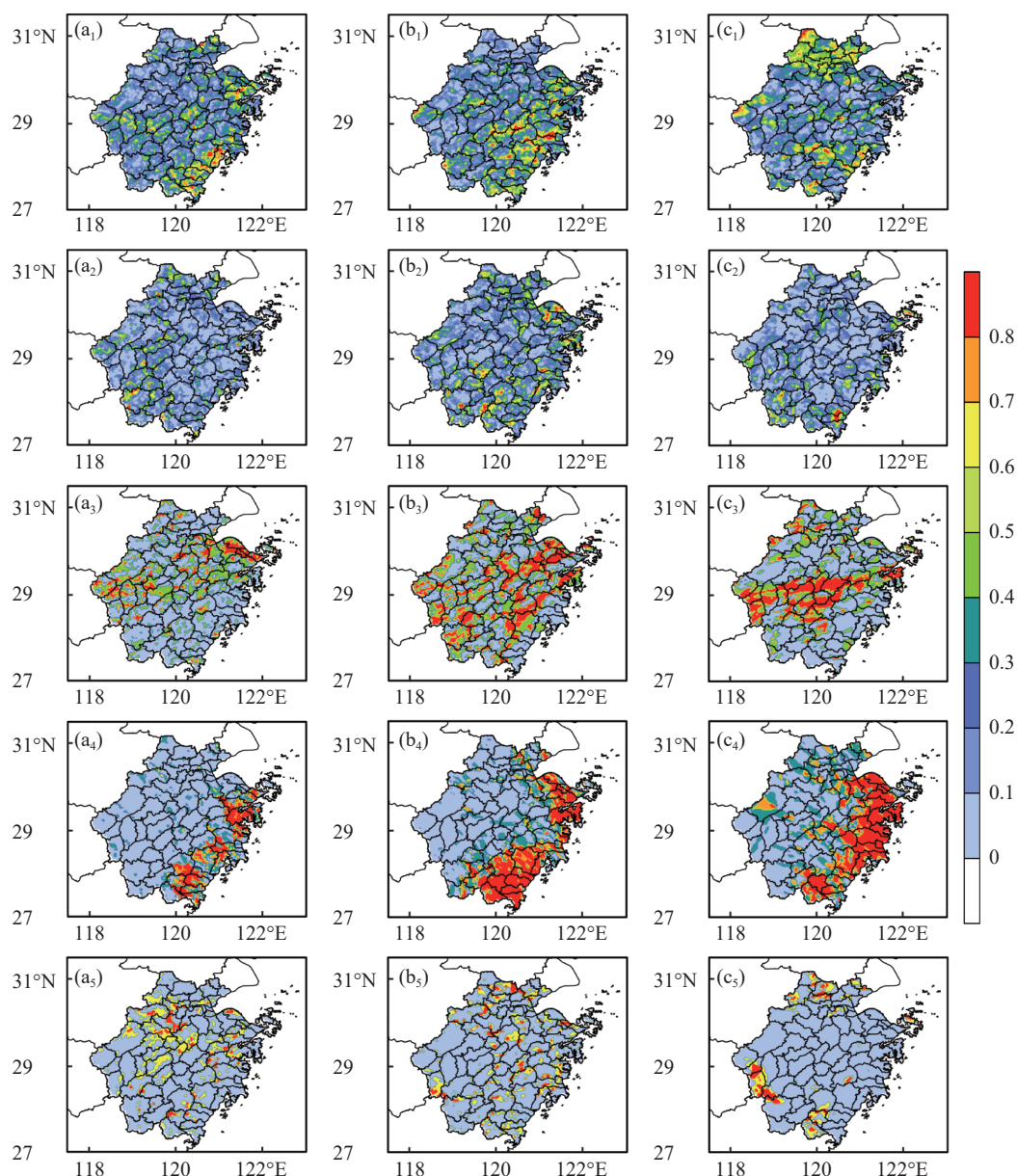


图2 同图1, 但为短时强降水频率分布

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the frequency distribution of short-term heavy precipitation.

北, ZJ3KM 预报相对较好但落区仍存在偏差, CMA-MESO 未能反映实况高频分布特征 (图 2a₅—c₅)。

图 3 给出不同天气背景下短时强降水日小时降水强度的分布, 对冷切型, ZJ3KM 预报的降水强度高值区接近实况, CMA-MESO 的预报落区存在偏差, 且对浙北预报明显偏强 (图 3a₁—c₁)。对暖切型, ZJ3KM 在沿海出现虚假强度高值, 存在明显预报偏差, CMA-MESO 捕捉到该高值区但强度偏强 (图 3a₂—c₂)。对高空槽型, ZJ3KM 对强度高值区分布反映较好但在浙南存在明显高估, CMA-MESO 对浙东北高值区存在漏报 (图 3a₃—c₃)。两种模式对热带气旋型小时降水强度分布特征把握较好, 其中 CMA-MESO 相对占优, 而 ZJ3KM 对中部沿海小时

降水强度低估 (图 3a₄—c₄)。对副高控制型, ZJ3KM 预报表现优于 CMA-MESO, 后者与实况存在较大偏差 (图 3a₅—c₅)。

考虑到模式 05 时 (北京时, 下同) 起报的预报产品是每日早间天气预报会商的重要决策依据, 具有较高的业务关注度。因此选取短时强降水日模式 05 时起报的 0—24 h 逐时降水量预报数据进行日变化特征的预报检验 (图 4)。模式对五种不同天气背景下的短时强降水日小时平均降水量日变化预报特征 (图 4a₁—c₁) 总体与短时强降水发生频率的日变化特征 (图 4a₂—c₂) 相似, 可见降水量日变化的误差特征主要取决于模式对短时强降水发生频率的预报。由图可知, 两种模式初始运行时均存在启动预热现象, 即模式初始阶段因初始场与模式物理过程不协

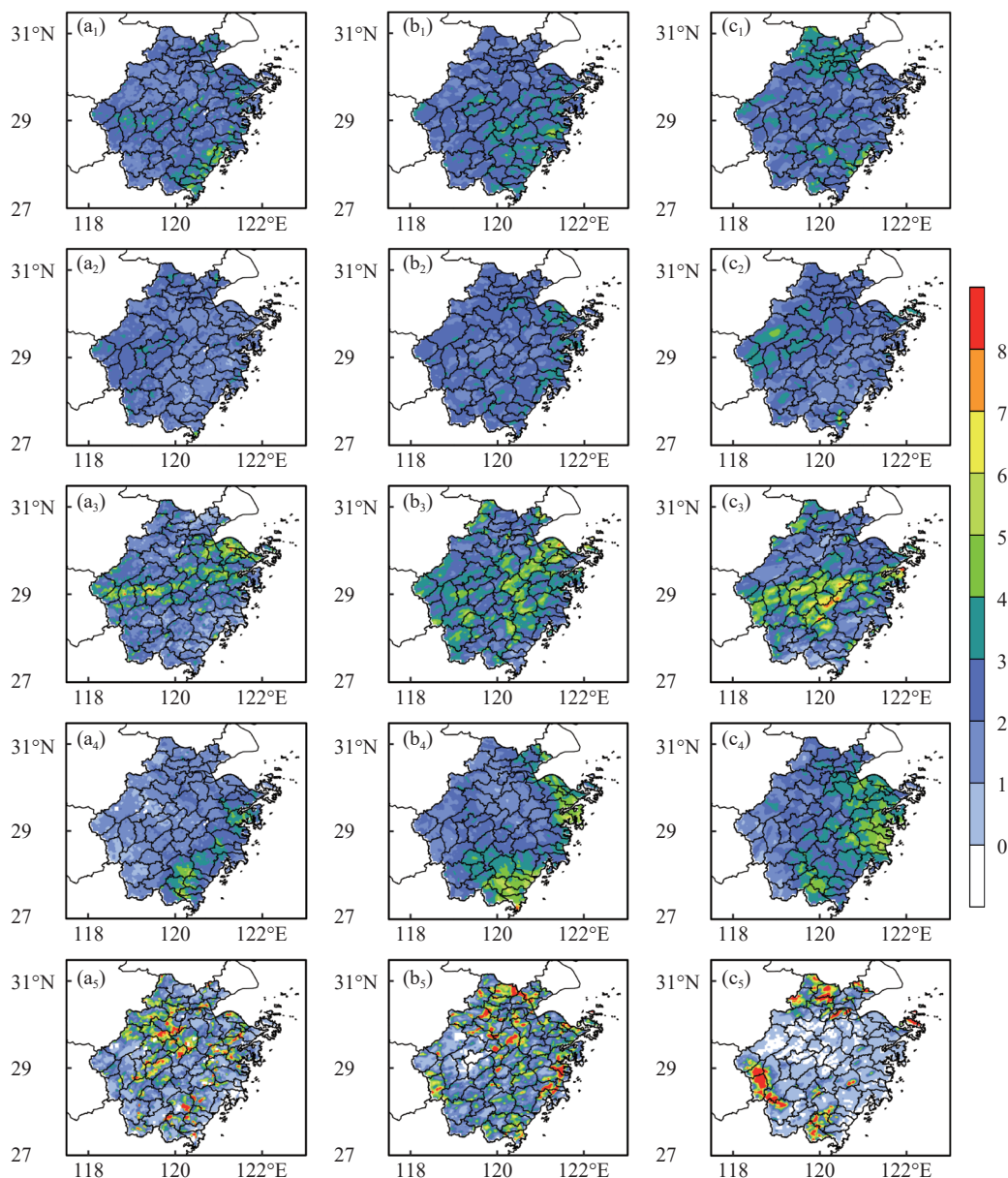


图 3 同图 1, 但为短时强降水日小时降水强度 (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 分布

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the hourly precipitation intensity (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) distribution of short-term heavy precipitation.

调导致的预报偏差, 出现异常峰值。排除其影响, 分析可知, ZJ3KM 对不同天气背景下短时强降水日小时降水量、短时强降水频率的日变化峰值均高估, 尤其是对高空槽型高估较多, 同时预报冷切型、高空槽型和副高控制型峰值发生的时间较实况有所提前。ZJ3KM 对各天气背景下小时降水强度的日变化特征预报 (图 4a₃—c₃) 总体与观测相似, 对冷切型降水下午至夜间的小时降水强度预报较好, 其余时间偏低; 对暖切型降水预报白天略有高估, 夜间 (03 时以前) 有所低估; 对高空槽型、热带气旋型预报以高估为主; 对副高控制型小时降水强度预报以低估为主。CMA-MESO 预报冷切型、暖切型和高空槽型小时降水量、发生频率日变化特征与实况较为接近, 尤其对小时降水量峰值把握较好, 但对副高控制型降

水预报存在低估。CMA-MESO 对冷切型降水下午期间的小时降水强度预报偏低, 后半夜预报偏高; 对高空槽型傍晚降水强度预报与实况接近, 白天存在低估, 夜间存在高估; 对热带型气旋型预报偏强; 对暖切型和副高控制型降水强度预报明显低估。

综合降水总量、短时强降水频率分布以及小时降水强度的空间分布来看, ZJ3KM 对冷切型、高空槽型、副高控制型短时强降水空间分布特征的预报与实况更接近, 而 CMA-MESO 对暖切型、热带气旋型的降水预报占优。全省平均小时降水量日变化的误差特征主要取决于模式对短时强降水发生频率的预报。相比于 ZJ3KM, CMA-MESO 预报冷切型、暖切型和高空槽型短时强降水小时降水量、发生频率的日变化特征与实况更为接近, 尤其对峰值把握较

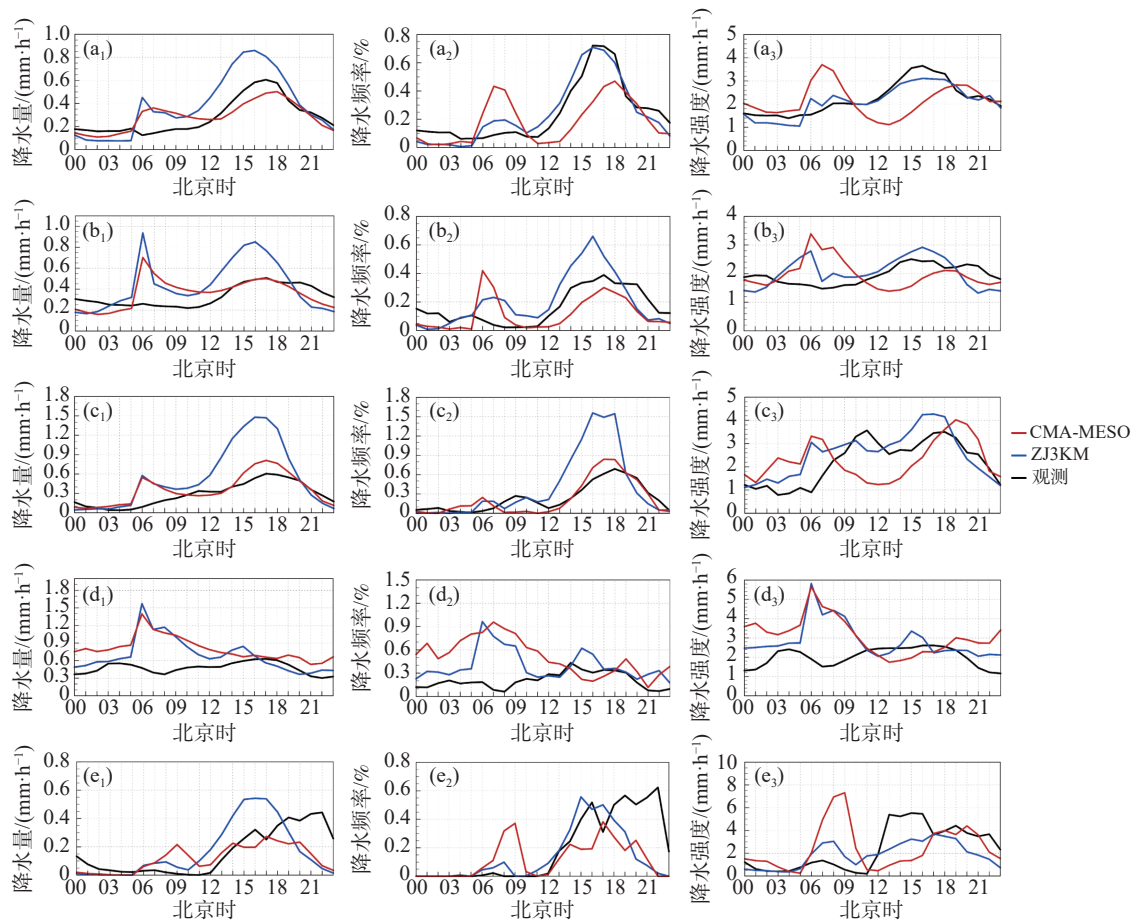


图4 2023年6—9月观测与模式预报冷切型(a₁—a₃)、暖切型(b₁—b₃)、高空槽型(c₁—c₃)、热带气旋型(d₁—d₃)、副高控制型(e₁—e₃)短时强降水日平均小时降水量(a₁, b₁, c₁, d₁, e₁)、频率(a₂, b₂, c₂, d₂, e₂)和强度(a₃, b₃, c₃, d₃, e₃)日变化

Fig. 4 Diurnal variations of province-averaged (a₁, b₁, c₁, d₁, e₁) hourly precipitation (a₂, b₂, c₂, d₂, e₂) frequency and (a₃, b₃, c₃, d₃, e₃) intensity for short-term heavy precipitation of (a₁—a₃) cold shear, (b₁—b₃) warm shear, (c₁—c₃) upper-level trough, (d₁—d₃) tropical cyclone and (e₁—e₃) subtropical high from observations and model forecasts during June–September 2023

好。ZJ3KM对副高控制型的降水量峰值模拟较好但较实况提前,两种模式对热带气旋型降水量日变化特征预报均欠佳。

2.3 传统检验

采用传统检验评分,分析CMA-MESO和ZJ3KM模式不同时次起报3—24 h提前量下不同天气背景下短时强降水预报能力。由综合评分图(图5)所示,对于副高控制型短时强降水,ZJ3KM的命中率、成功率、TS评分及位置偏差均表现更优。对热带气旋型,则为CMA-MESO模式表现更优。对于其他天气背景短时强降水,则为CMA-MESO的成功率和TS评分表现更优,而ZJ3KM的命中率更高,且范围偏差更小。从预报的范围偏差来看,CMA-MESO对于短时强降水的预报范围偏小,而ZJ3KM的预报范围略偏大。

2.4 邻域空间检验

进一步采用邻域法FSS评分检验预报性能,两种模式在不同天气背景下提前3~24 h的短时强降水

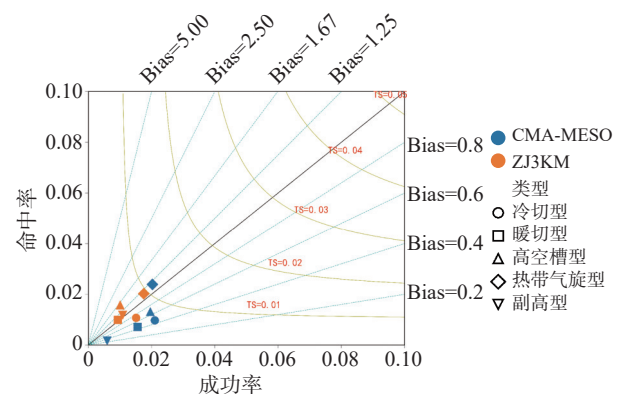


图5 3—24 h提前量不同天气背景下短时强降水预报传统检验评分均值综合评分图

Fig. 5 Statistical mean comprehensive score chart of different types of short-term heavy precipitation forecasts under 3-24 h lead times

预报FSS评分均值随邻域半径的变化如图6所示。CMA-MESO和ZJ3KM的FSS评分均随邻域半径的增加而增大。当邻域半径较小(<27 km)时,两模式对不同天气背景下短时强降水的评分均较低且差异不大,表明两种模式对对流尺度降水精确落区的预

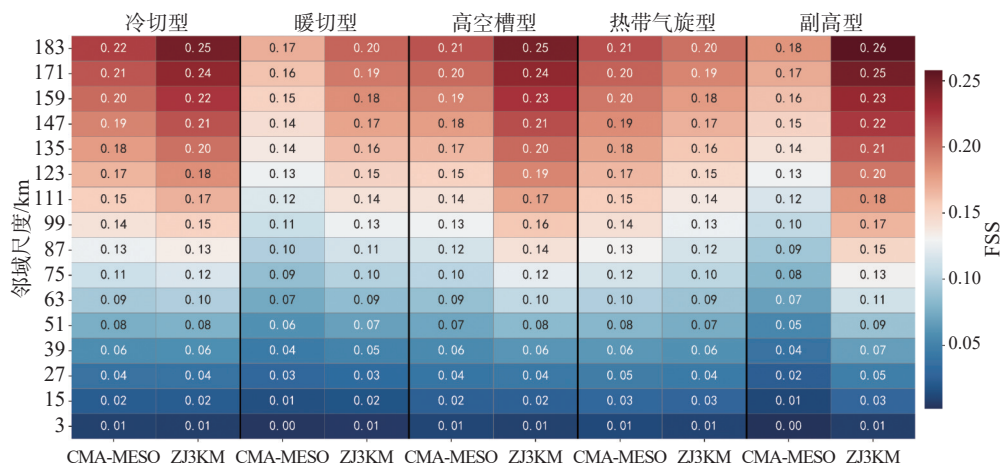


图 6 两种模式不同天气背景下短时强降水的 FSS 评分均值随邻域半径的变化热点图

Fig. 6 The variation of mean FSS with neighborhood scale for different types of short-term heavy precipitation for two models

报能力均有限,这符合高分辨率模式预报的普遍特征。随着邻域半径增大至中尺度范围,ZJ3KM 的 FSS 评分在冷切、暖切、高空槽和副高控制型上开始优于 CMA-MESO。这表明 ZJ3KM 对上述中尺度对流系统的强度和分布具有更好的指示意义,但落区存在一定偏差。当邻域半径进一步增大,CMA-MESO 对热带气旋型降水的预报优势得以显现。这得益于其更优的大尺度环流背景场,使其能更准确地把握台风降水的整体空间范围,与传统检验中 CMA-MESO 对热带气旋型降水落区把握更好的结论一致。综上所述,ZJ3KM 在捕捉中尺度对流系统的发生强度和概率方面更具优势,而 CMA-MESO 在把握大范围天气系统降水的整体结构和范围方面表现更稳健。业务应用中,可根据关注的天气系统类

型和所需的空间尺度,有针对性地参考不同模式的预报产品。

2.5 面向对象检验

针对预报预警实时业务需求,结合业务系统更新频次和时效性,选取两种模式预报时效 6 h 的预报产品,对不同天气背景下短时强降水过程开展 MODE 检验,对比和探讨模式在短时强降水预报中的表现与差异。

从对象数量和对象面积的对应关系(图 7)来看,实况降水表现为面积越大的对象数量越少,两种模式对暴雨对象数量随面积的变化趋势预报与实况基本一致。在对象数量方面,CMA-MESO 和 ZJ3KM 对不同天气背景下短时强降水对象的预报均普遍偏少。具体分型来看,对于冷切型短时强降水,CMA-

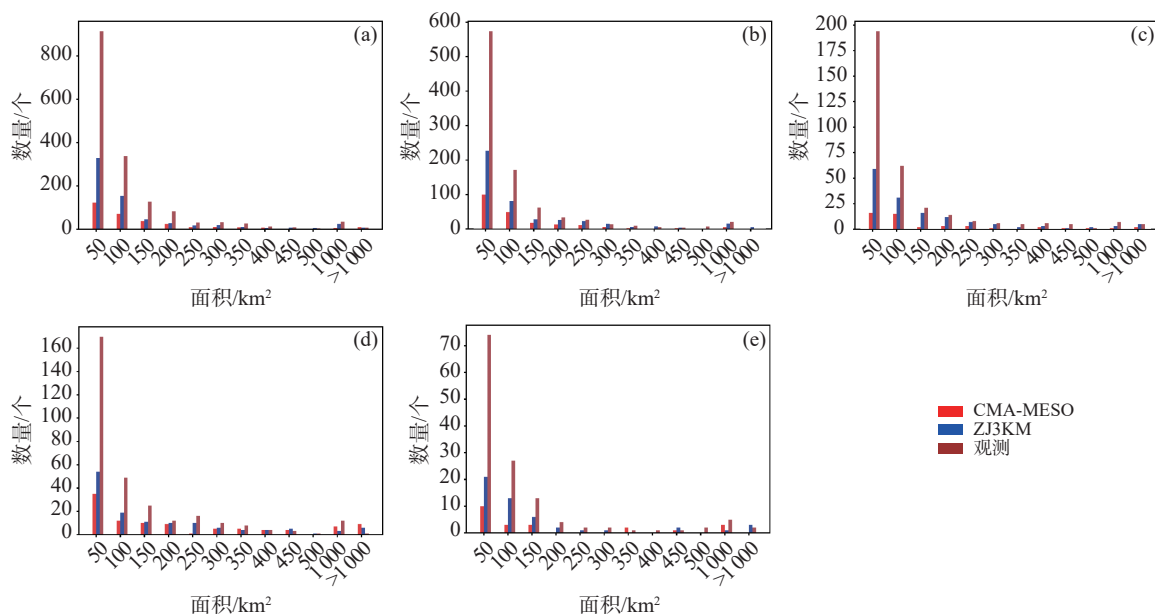


图 7 冷切型(a)、暖切型(b)、高空槽型(c)、热带气旋型(d)、副高控制型(e)降水预报值和观测值的对象数量随对象面积的变化

Fig. 7 Relationships between the number of independent objects and object area for precipitation forecasts and observation under (a) cold shear, (b) warm shear, (c) upper-level trough, (d) tropical cyclone, and (e) subtropical high

MESO 和 ZJ3KM 在各面积尺度的对象数量均小于实况 (图 7a), 说明两种模式对该类型短时强降水预报能力存在不足。对于暖切型, CMA-MESO 在各面积尺度的对象数量均小于实况, ZJ3KM 则对面积 $250\sim 300\text{ km}^2$ 和 $350\sim 400\text{ km}^2$ 的对象数量预报偏多, 对其他面积尺度预报偏少 (图 7b)。对于高空槽型, CMA-MESO 对象数量-面积与实况的对比特征与暖切型基本一致, ZJ3KM 在各面积尺度的对象数量均较实况偏少 (图 7c)。对于热带气旋型, CMA-MESO 对各面积尺度的对象均预报偏少, ZJ3KM 对于 $400\sim 450\text{ km}^2$ 和大于 $1\,000\text{ km}^2$ 的对象预报偏多, 其他面积尺度的对象数量预报偏少 (图 7d)。对于副高控制型, 两个模式对面积小于 150 km^2 的对象预报数量均偏少, 在其他面积区间, CMA-MESO 对 $300\sim 350\text{ km}^2$ 对象数量预报偏多, 其他预报偏少 (图 7e)。ZJ3KM 则对 $400\sim 450\text{ km}^2$ 和大于 $1\,000\text{ km}^2$ 的预报数量偏多, 其他预报偏少。综上所述, 尽管两个模式能够捕捉到面积与对象数量之间的反比关系, 但存在预报对象数量偏低的问题。其中 CMA-MESO 对各类型短时强降水的对象识别能力普遍不足, 而 ZJ3KM 的预报表现出随面积尺度和不同天气背景变化的差异: 整体预报对象偏少, 但对于 400 km^2 附近以及大于 $1\,000\text{ km}^2$ 的预报对象存在高估。

由于暴雨面积大于 $2\,000\text{ km}^2$ 的样本数量较少,

因此选择暴雨面积小于 $2\,000\text{ km}^2$ 的对象分析预报降水强度的 90% 分位数与对象面积的关系。如图 8 所示, 实况暴雨对象强度 90% 分位数在冷、暖切型降水集中在 $20\sim 80\text{ mm}$ (图 8a、b), 对于高空槽型、热带气旋型和副高控制型集中在 $20\sim 60\text{ mm}$ (图 8c—e), 且面积较小的暴雨对象也可能有较大强度的降水。CMA-MESO、ZJ3KM 对于各天气背景下短时强降水的强度预报与观测较为接近, 但对象面积偏大。

张宏芳等 (2021) 提出预报和观测对象的相似度超过 0.6 即预报能力较好。从预报与观测对象相似度和重叠面积的关系 (图 9) 来看, 当重叠面积大于 10 km^2 , 预报与观测对象的重叠面积越大, 相似度越高。整体来看, 对于冷、暖切型 CMA-MESO 的重叠面积更大, 相似度更高 (图 9a、b)。高空槽型、热带气旋型及副高控制型, ZJ3KM 的重叠面积更大, 相似度更高 (图 9c—e)。对比两种模式不同天气背景下短时强降水重叠面积 50 km^2 以下预报与观测的相似度高于 0.6 的占比, 冷切型、暖切型、高空槽型及热带气旋型均为 CMA-MESO 相似度高于 0.6 的占比更高, 对于副高控制型, 两种模式预报与观测的相似度均大于 0.6。说明两种模式对各天气背景下短时强降水的预报与实况相似度较高但落区存在偏差。

从对象质心距离的经向、纬向偏差 (图 10) 可知, 对于冷切型和副高控制型短时强降水, CMA-

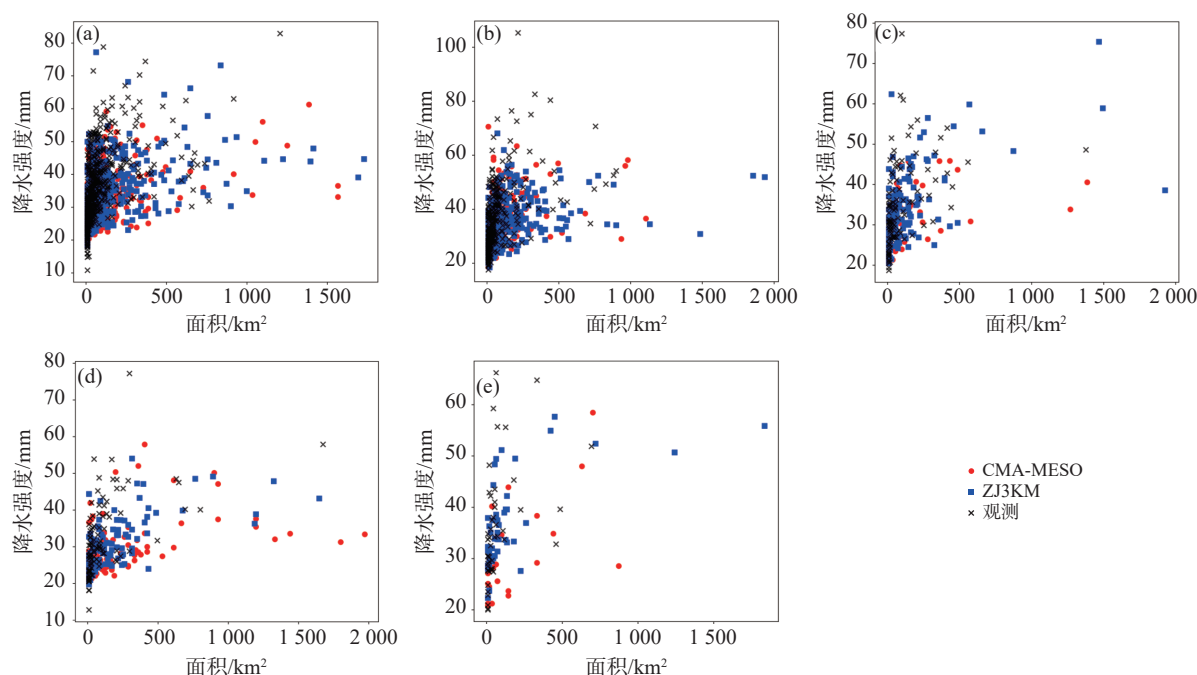


图 8 冷切型 (a)、暖切型 (b)、高空槽型 (c)、热带气旋型 (d)、副高控制型 (e) 降水预报值和观测值的对象降水强度 90% 分位数随 $2\,000\text{ km}^2$ 以内对象面积的变化

Fig. 8 Relationship between the 90th percentile of precipitation intensity of independent precipitation objects and object area less than $2\,000\text{ km}^2$ for precipitation forecasts and observation under (a) cold shear, (b) warm shear, (c) upper-level trough, (d) tropical cyclone, and (e) subtropical high

MESO 纬向误差大于经向, ZJ3KM 则相反 (图 10a、e)。对于暖切型, 两种模式均为经向误差大于纬向 (图 10b)。对于高空槽型, 两种模式均为纬向误差大于经向 (图 10c)。对于热带气旋型, ZJ3KM 纬向误差大于经向, CMA-MESO 反之 (图 10d)。分析预报误差小于 1° 的比例, 冷切型 CMA-MESO 的占比更高, 暖切型

经向误差两种模式相近, 纬向 ZJ3KM 的占比更高, 高空槽和副高控制型 ZJ3KM 的占比更高, 误差更小, 热带气旋型经向 ZJ3KM、纬向 CMA-MESO 占比更高。总体而言, CMA-MESO 的对象质心距离偏差普遍表现出偏东偏南 (冷切型偏西偏南) 的特点, 而 ZJ3KM 的偏差普遍表现为偏东偏北 (冷切型

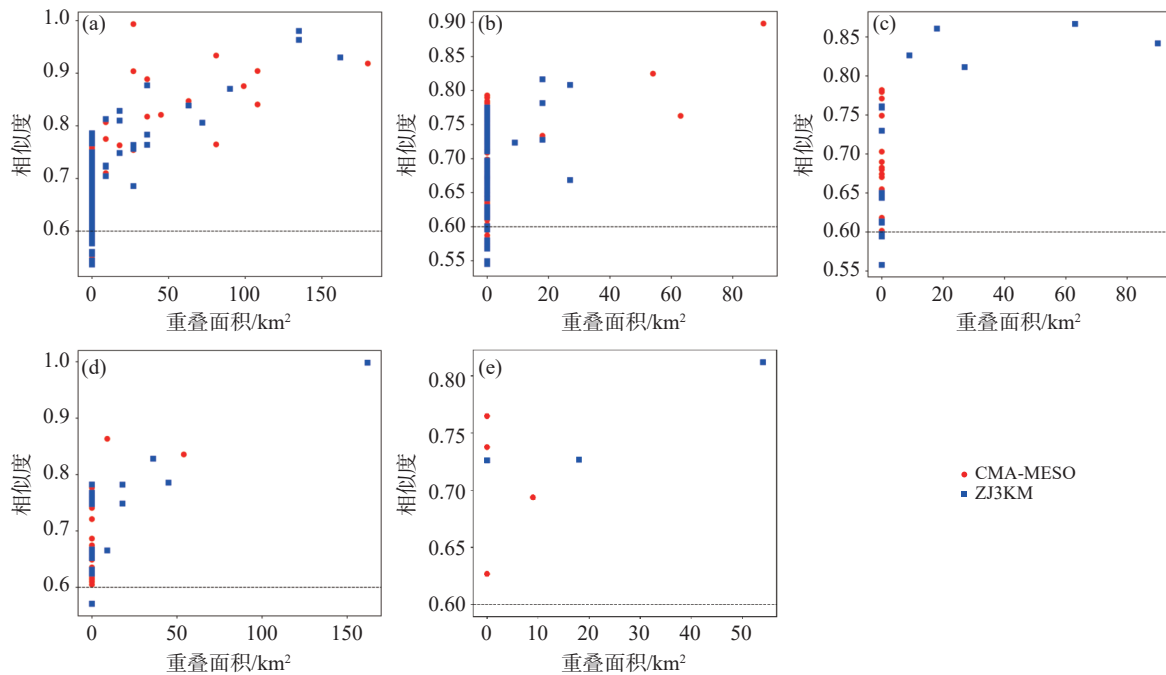


图 9 冷切型 (a)、暖切型 (b)、高空槽型 (c)、热带气旋型 (d)、副高控制型 (e) 降水预报值的对象相似度随重叠面积的变化

Fig. 9 Relationship between the precipitation forecast object similarity and overlapping area under (a) cold shear, (b) warm shear, (c) upper-level trough, (d) tropical cyclone, and (e) subtropical high

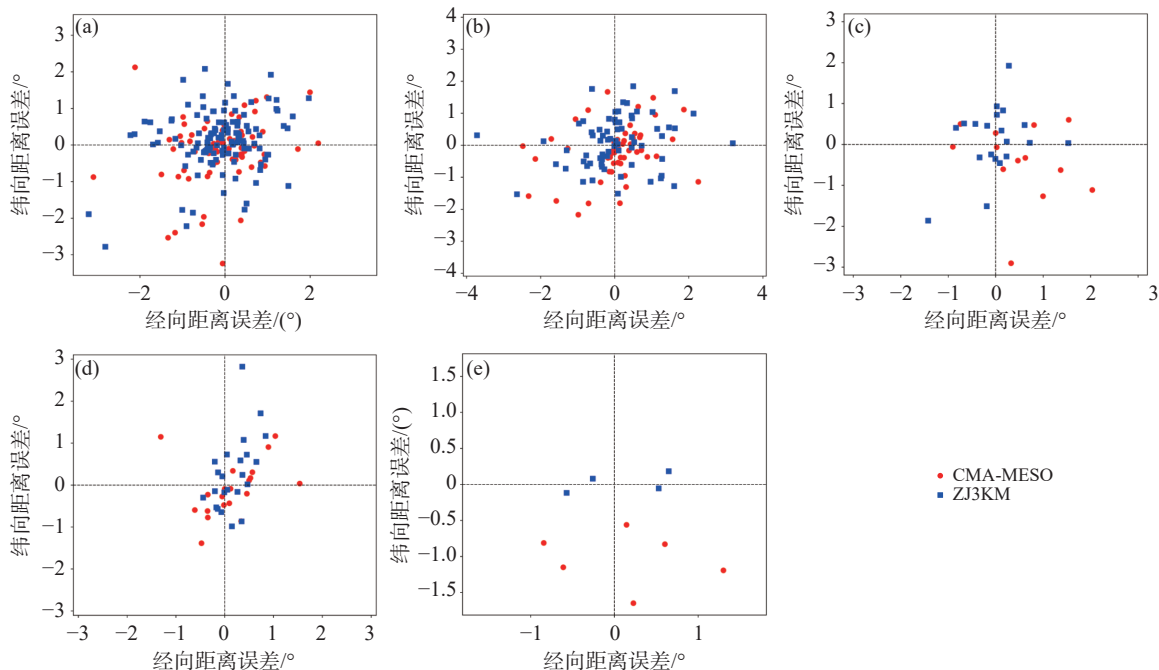


图 10 冷切型 (a)、暖切型 (b)、高空槽型 (c)、热带气旋型 (d)、副高控制型 (e) 降水预报值匹配组合对象的纬向、经向距离误差

Fig. 10 Zonal and meridional errors of matched composite objects from precipitation forecasts under (a) cold shear, (b) warm shear, (c) upper-level trough, (d) tropical cyclone, and (e) subtropical high

偏西偏北)。ZJ3KM 对暖切、高空槽和副高控制型短时强降水的预报落区误差更小, CMA-MESO 对冷切型短时强降水预报落区误差更小, 对于热带气旋型, ZJ3KM 在经向上的落区误差更小, 而 CMA-MESO 在纬向上的落区误差更小。

3 结论与讨论

2023 年 6—9 月浙江短时强降水包括冷切型 42 次、暖切型 34 次、高空槽型 11 次、热带气旋型 7 次和副高控制型 7 次。针对不同天气背景下的短时强降水, 采用降水过程检验、传统检验法、邻域检验法和 MODE 检验, 探讨了 CMA-MESO 和 ZJ3KM 模式对于浙江省短时强降水的预报能力。得到以下主要结论:

(1) CMA-MESO 在暖切型和热带气旋型短时强降水的落区分布及频率特征捕捉上更优, 但易出现雨带走向偏差及虚假高值区。ZJ3KM 模式在冷切型和副高控制型短时强降水的总量、频率及强度预报占优, 对暖切型短时强降水空报明显, 对热带气旋型短时强降水的局部强中心存在漏报和强度低估。对于高空槽型短时强降水两者均存在较大偏差。

(2) 模式降水量误差主要源于对短时强降水频率的预报偏差。CMA-MESO 对冷切、暖切和高空槽型短时强降水日变化预报较接近实况, 但显著低估副高控制型短时强降水。ZJ3KM 普遍高估各类短时强降水的量级和短时强降水频率的峰值, 且冷切型和高空槽型短时强降水峰值时间预报偏早, 未能准确反映副高控制型短时强降水的日变化特征, 峰值存在明显低估。

(3) 3—24 h 提前量预报传统检验评分显示, 热带气旋型为 CMA-MESO 的 TS 评分、命中率和成功率表现更优, 副高控制型 ZJ3KM 表现更优, 其他天气背景下, CMA-MESO 的成功率和 TS 评分更优, ZJ3KM 的命中率更高且范围偏差更小。CMA-MESO 对于短时强降水的预报范围偏小, 而 ZJ3KM 的预报范围偏大。

(4) FSS 评分显示, 在邻域半径 ≤ 39 km 时, 两个模式评分接近。当邻域半径 > 39 km 后, 热带气旋型 CMA-MESO 更优, 其他天气背景下 ZJ3KM 更优。MODE 检验表明, 两种模式预报对象数量均偏少。CMA-MESO 对象识别能力整体偏弱, 但在冷、暖切型短时强降水中预报对象的重叠面积与相似度更高; ZJ3KM 在高空槽型、热带气旋型及副高控制型中表现更好。位置偏差上, 除冷切型外, CMA-MESO 整体偏东偏南, ZJ3KM 偏东偏北。CMA-MESO 对冷切型短时强降水误差更小, ZJ3KM 在暖切、高空槽

和副高控制型短时强降水的位置误差更小, 而在热带气旋型中 ZJ3KM 经向、CMA-MESO 纬向误差更小。

需要指出的是, 浙江省复杂地形对气流的强迫抬升等作用, 也是造成降水空间分布偏差的重要因子。当前误差成因分析主要基于典型个例诊断, 且检验结果受限于不同天气背景下的样本量差异, 下一步仍需积累更多样本进行深入探究。基于两种模式在不同天气背景下短时强降水的精细化检验结果, 在实际应用中可考虑 CMA-MESO 与 ZJ3KM 按天气背景分型选用并做好偏差订正, 并通过优势互补, 对 CMA-MESO 的趋势演变信息和 ZJ3KM 的强度及局地小尺度信息进行综合研判, 以提升浙江省短时强降水的预报水平。

参考文献 (References):

- 陈昊明, 李普曦, 赵妍. 2021. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望[J]. *气象科技进展*, 11(3): 155–164. Chen H M, Li P X, Zhao Y. 2021. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 11(3): 155–164 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.018
- 董美莹, 邱金晶, 陈锋, 等. 2024. 基于累加气候概率的 FSS 检验方法对多模式短时暴雨预报的评估[J]. *大气科学*, 48(4): 1478–1498. Dong M Y, Qiu J J, Chen F, et al. 2024. Forecast evaluation of short-term heavy precipitation from operational models by the Fractions Skill Score method based on the cumulative climatological probability [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 48(4): 1478–1498 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22175
- 李玲萍, 李天江, 李岩瑛, 等. 2025. 基于 MODE 方法的 SCMOC 降水产品在河西走廊干旱区的检验[J]. *沙漠与绿洲气象*, 19(4): 138–146. Li L P, Li T J, Li Y Y, et al. 2025. Evaluation of SCMOC precipitation forecast in the arid region of Hexi Corridor based on the MODE method [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 19(4): 138–146 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2312.22001
- 刘凑华, 牛若芸. 2013. 基于目标的降水检验方法及应用[J]. *气象*, 39(6): 681–690. Liu C H, Niu R Y. 2013. Object-based precipitation verification method and its application [J]. *Meteorological Monthly*, 39(6): 681–690 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.003
- 吕劲文, 姚日升, 涂小萍, 等. 2019. 浙江省 6—9 月午后短时强降水空间分布特征分析[J]. *暴雨灾害*, 38(4): 320–328. Lyu J W, Yao R S, Tu X P, et al. 2019. Analysis on spatial distribution characteristics of afternoon flash heavy rain from June to September in Zhejiang [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(4): 320–328 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.004
- 茅懋, 戴建华, 李佰平, 等. 2016. 不同类型强对流预报产品的目标对象检验与分析评价[J]. *气象*, 42(4): 389–397. Mao M, Dai J H, Li B P, et al. 2016. Object based verification and evaluation for different types of severe convection forecasting products [J]. *Meteorological Monthly*, 42(4): 389–397 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.

2016.04.001

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].*气候与环境研究*,22(1):45–58. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al. 2017. Comparison of three verification methods for high-resolution grid precipitation forecast [J]. *Climatic and Environmental Research*,22(1):45–58 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2016.16012

邱金晶,陈锋,董美莹,等.2015.浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估[J].*气象科技进展*,5(6):6–12. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, et al. 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF-ADAS rapid refresh system [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,5(6):6–12 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095–1973.2015.06.001

沈晓玲,黄海迅,章丽娜.2022.2010—2019 年浙江暖季短时强降水特征分析[J].*气象科技*,50(1):103–113. Shen X L, Huang H X, Zhang L N. 2022. Characteristics of short term heavy precipitation in warm season of Zhejiang Province from 2010 to 2019 [J]. *Meteorological Science and Technology*,50(1):103–113 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20210049

屠妮妮,冯勇,康岚,等.2025.三个数值模式对四川省 2022 年汛期降水检验评估[J].*高原山地气象研究*,45(4):88–99. Tu N N, Feng Y, Kang L, et al. 2025. Evaluation of three numerical models for precipitation in Sichuan Province during the 2022 flood season [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(4):88–99 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2025.04.009

王宇浩,王晓慧,顾小丽,等.2025.基于分钟雨量的浙江省汛期短时强降水特征研究[J].*暴雨灾害*,44(1):60–70. Wang Y H, Wang X H, Gu X L, et al. 2025. Investigating the characteristics of short-duration heavy rainfall during flood season in Zhejiang Province using the minute rain gauge data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(1):60–70 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–062

谢傲,李易芝,罗伯良,等.2026.湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析[J].*暴雨灾害*,45(1):130–141. Xie A, Li Y Z, Luo B L, et al. 2026. Analysis of diurnal variation characteristics and formation causes of summer precipitation in Hunan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,45(1):130–141 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–012

徐同,张蕾,李佳,等.2020. MODE-TD 检验方法在上海快速更新同化业务预报系统中的初步应用[J].*沙漠与绿洲气象*,14(5):1–10. Xu T,

Zhang L, Li J, et al. 2020. Preliminary application of object-based time-domain verification method to domestic rapid updated cycling analysis and forecast system [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,14(5): 1–10 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2020.05.001

俞佩.2022.浙江省短时强降水的时空分布特征[J].*气候与环境研究*,27(3):397–407. Yu P. 2022. Temporal and spatial distribution characteristics of short-time heavy rainfall in Zhejiang Province [J]. *Climatic and Environmental Research*,27(3):397–407 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9585.2021.21043

张宏芳,潘留杰,卢珊,等.2021.基于时域对象的网格降水预报的追踪诊断分析[J].*高原气象*,40(3):559–568. Zhang H F, Pan L J, Lu S, et al. 2021. Tracking diagnosis analysis of grid precipitation forecast based on time-domain object [J]. *Plateau Meteorology*,40(3):559–568 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00021

Davis C, Brown B, Bullock R. 2006a. Object-based verification of precipitation forecast. Part I: method and application to mesoscale rain areas [J]. *Monthly Weather Review*,134:1772–1784. doi:10.1175/MWR3145.1

Davis C, Brown B, Bullock R. 2006b. Object-based verification of precipitation forecast. Part II: application to convective rain systems [J]. *Monthly Weather Review*,134:1785–1795. doi:10.1175/MWR3146.1

Lin X, Randall D A, Fowler L D. 2000. Diurnal variability of the hydrologic cycle and radiative fluxes: comparisons between observations and a GCM [J]. *Journal of Climate*,13(23):4159–4179. doi:10.1175/1520–0442(2000)013<4159:dvothc>2.0.co;2

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(1):343–354. doi:10.1175/2009WAF2222260.1

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(1):78–97. doi:10.1175/2007MWR2123.1

Theis S E, Hense A, Damrath U. 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: a pragmatic approach [J]. *Meteorological Applications*,12(3):257–268. doi:10.1017/S1350482705001763

(责任编辑 杨 浩)