暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

四种数值模式对山东半岛两类暴雨天气预报的检验分析

李蕊 张萍萍 刘奕辰 万夫敬 王西岳

Verification and analysis of four numerical models for forecasting rainstorm associated with two weather patterns in Shandong Peninsula

LI Rui，ZHANG Pingping，LIU Yichen，WAN Fujing，WANG Xiyue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-102

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

2018年三个华东登陆台风暴雨数值预报结果的空间检验

Spatial verification of multi-model forecast of three landing typhoons induced rainstorm in East China in 2018

暴雨灾害. 2022, 41(4): 365-374 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.001

山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探

Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula

暴雨灾害. 2025, 44(1): 9-18 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-137

YHGS模式产品在华中一次暴雨预报应用的评估

Application evaluation of theYHGS model products in a rainstorm forecast in central China

暴雨灾害. 2020, 39(5): 462-469 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.004

高分辨率区域模式降水预报在云南的检验

Verifications of high-resolution regional numerical model precipitation forecast in Yunnan Province

暴雨灾害. 2021, 40(1): 78-86 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.010

一次江淮特大暴雨过程的预报着眼点反思

Rethink on forecast focus of a torrential rainfall event at Jianghuai region

暴雨灾害. 2020, 39(6): 647-657 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.013

暴雨数值预报若干关键技术发展的回顾与思考

Review and thinking on the development of several key technologies for heavy rainfall numerical weather prediction

暴雨灾害. 2024, 43(3): 243-254 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-230

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李蕊,张萍萍,刘奕辰,等.2025.四种数值模式对山东半岛两类暴雨天气预报的检验分析[J].暴雨灾害,44(5):632−641. LI Rui, ZHANG Pingping, LIU Yichen, et al. 2025. Verification and analysis of four numerical models for forecasting rainstorm associated with two weather patterns in Shandong Peninsula [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):632−641 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−102

四种数值模式对山东半岛两类暴雨天气预报的检验分析

李蕊[1], 张萍萍[1], 刘奕辰[2], 万夫敬[3], 王西岳[4]

(1. 山东省威海市气象局, 威海 264200; 2. 山东省济南市章丘区气象局, 济南 250200; 3. 山东省青岛市气象局, 青岛 266003; 4. 北京风云气象科技发展有限公司, 北京 100081)

摘　要: 为分析不同数值模式在山东半岛暴雨预报中的表现, 利用山东半岛 302 个国家和区域气象站降水实况资料、地面-卫星-雷达三源融合实况格点降水数据 (CMPAS-5 km) 及 2 个大尺度模式 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)、CMA-GFS (China Meteorological Administration Global Forecast System)、2 个中尺度模式 CMA-MESO (China Meteorological Administration Mesoscale Weather Numerical Prediction System)、CMA-SH9 (China Meteorological Administration Shanghai Numerical Prediction Model) (以下分别简称 EC、GFS、MESO、SH) 产品, 对 2021—2023 年山东半岛副热带高压 (以下简称副高) 高边缘切变型和气旋型暴雨, 采用传统检验方法及面向对象目标的两种空间检验方法 (MODE、SAL) 分析模式暴雨预报能力。结果表明: (1) 依据传统检验方法, 针对副高边缘切变型暴雨的预报, MESO 为最优模式, GFS 漏报率最高, 但空报率较低, EC 空报率较高; 针对气旋型暴雨的预报, SH 表现最优, MESO 漏报率最低, 总体来看两类暴雨中尺度模式预报效果优于大尺度模式。(2) 基于 MODE 方法的各模式目标整体相似度检验表现为气旋型暴雨大于副高边缘切变型暴雨, 针对副高边缘切变型和气旋型暴雨, 目标对象重叠面积比例均值排名分别为 MESO > SH > EC > GFS、SH > EC > MESO > GFS, EC 和 GFS 对副高边缘切变型暴雨存在预报对象面积较实况偏小的情况, SH 面积预报偏大, 几乎所有模式对两种暴雨质心的预报均存在偏北或偏西情况, 综合来看, 副高边缘切变型暴雨优先参考中尺度模式, 气旋型暴雨优先参考 SH 和 EC。(3) 基于 SAL 空间检验结果, 在降水平均强度方面, 副高边缘切变型优先参考 MESO, 而气旋型优先参考大尺度模式。

关键词: 天气类型; 数值模式; 暴雨; 检验; MODE; SAL

中图法分类号: P456　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−102

Verification and analysis of four numerical models for forecasting rainstorm associated with two weather patterns in Shandong Peninsula

LI Rui[1], ZHANG Pingping[1], LIU Yichen[2], WAN Fujing[3], WANG Xiyue[4]

(1. *Weihai Meteorological Bureau of Shandong Province*, *Weihai* 264200; 2. *Jinan Zhangqiu Meteorological Bureau of Shandong Province*, *Jinan* 250200; 3. *Qingdao Meteorological Bureau of Shandong Province*, *Qingdao* 266003; 4. *Beijing Fengyun Meteorological Science & Technology Development Co., Ltd.*, *Beijing* 100081)

Abstract: To study the performance of different numerical models in forecasting rainstorms in Shandong Peninsula, precipitation data from 302 national and regional meteorological stations, the 5 km real-time data (CMPAS-5 km) from the CMA Multi-source Precipitation Analysis System, and products of two large-scale models ECMWF, CMA-GFS, two meso-scale models CMA-MESO, CMA-SH9 (hereinafter referred to as EC, GFS, MESO, and SH, respectively) were used. For the rainstorm cases of the shear line pattern at the edge of western Pacific subtropical high (shear line rainstorms, hereinafter) and the cyclone pattern (cyclonic rainstorms, hereinafter) in Shandong Peninsula from 2021 to 2023, the traditional verification and two spatial verification methods (MODE and SAL) were employed to analyze the forecast ability of the models. The results are as follows. (1) According to traditional verification methods, MESO proved to

收稿日期: 2024−05−24; **定稿日期:** 2025−02−24

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42105154); 中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2023-072); 山东省气象局科学技术研究项目 (2022SDQN16); 青岛市气象局科研项目 (2023qdqxz02)

第一作者: 李蕊, 主要从事天气预报分析研究。E-mail: 18810988559@163.com

通信作者: 张萍萍, 主要从事暴雨及极端降水天气预报分析研究。E-mail: zpp7117@126.com

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

be optimal for the shear line rainstorms, GFS exhibited the highest missing alarm rate but a lower false alarm rate, while EC had a higher false alarm rate. For cyclonic rainstorms, SH performed the best, and MESO had the lowest missing alarm rate. Overall, meso-scale models outperformed large-scale models. (2) The MODE-derived overall object-based similarity for the cyclonic rainstorms exceeded that for the shear line rainstorms. For the shear line and the cyclonic rainstorms, the mean overlapping area ratio was ranked as MESO > SH > EC > GFS and SH > EC > MESO > GFS, respectively. EC and GFS tended to underestimate the area of shear line rainstorms, whereas SH tended to overestimate it. Almost all models exhibited a northward or westward deviation in rainstorm object centroids for both patterns. Overall, for the shear line rainstorms at the edge of the western Pacific subtropical high, meso-scale models (SH and MESO) were preferred. For the cyclonic rainstorms, priority was given to SH and EC. (3) Based on the SAL spatial verification results, for the shear line rainstorms, MESO was recommended in average precipitation intensity forecasting, whereas large-scale models were more appropriate for the cyclonic rainstorms.

Key words: weather patterns; numerical models; rainstorm; verification; MODE; SAL

引　言

山东半岛地区三面环海, 多丘陵, 地形相对复杂, 受海陆风环流影响, 汛期洪涝灾害时有发生, 暴雨及以上量级强降水预报一直是预报工作的重点和难点。尽管数值预报模式分辨率不断提高, 但暴雨的预报仍面临诸多技术挑战: 高分辨率的模式初值获取、云微物理过程的显式表达、以及非线性数值模式的不确定性等问题 (张立凤, 2024)。目前大尺度 ECMWF (简称 EC)、CMA-GFS (简称 GFS) 及中尺度 CMA-MESO (简称 MESO)、CMA-SH9 (简称 SH9) 等模式产品已成为山东半岛地区常规预报业务中的重要参考。由于可参考的模式众多, 导致预报员无法确定在何种情况下, 采用哪个模式更好, 准确率更高。不同模式对于不同类型天气系统影响下的暴雨过程降水量级预报偏大或偏小时, 如何在科学的思维和理论支持下, 选择最优模式进行预报和订正, 是预报员暴雨预报工作中的难点。因此检验和评估模式降水预报性能、对其产品进行订正等研究工作是必不可少的。

近几年, 预报员普遍反映中尺度模式对于暴雨预报具有较好的指示意义, 而不同的模式对于不同天气系统预报结果可能有很大差别。如陈涛等 (2020) 对比了华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的可预报性, 指出主流模式对锋面对流系统的预报更准确。苏翔等 (2020) 基于江苏预报业务常用模式、本地客观预报和预报员的主观预报, 评估 2020 年江苏主汛期短期暴雨 (稳定性暴雨和对流性暴雨) 预报性能, 指出在预报稳定性暴雨时, 主要参考 EC、48 h 时效内本地客观预报和 MESO; 预报对流性暴雨时, 主要参考 SH、江苏区域模式 (Precision Weather Analysis and Forecast System, PWAFS) 和 24 h 时效内本地客观预报。该研究创新之处在于先明确降水性质再进行相关检验, 而稳定性和对流性暴雨仍可进一步细分为不同天气系统影响产生的暴雨。

近年来, 有关数值模式降水预报产品检验研究工作较多。张宁娜等 (2012)、肖红茹等、刘静等 (2014)、宋雯雯等 (2023) 检验了 EC 和其他主流业务数值预报模式在本地区的预报情况, 指出 EC 预报效果整体表现较优。徐同等 (2016)、沈学顺等 (2020) 研究发现, SH 和 MESO 作为中尺度模式, 与 EC 模式相比也有自己的预报优势和特点。王婧卓等 (2021) 为检验模式降水预报能力, 采用了确定性预报检验评分预报偏差 BIAS (Donaldson et al., 1975)、公平技巧评分 ETS (Schaefer, 1990)、概率预报检验评分 Brier (Brier, 1950)、相对作用特征 ROC (Relative Operating Characteristic) (Mason, 1979; Swets, 1986)、可靠性 reliability 评分 (Bröcker and Smith, 2007) 和降水 FSS 评分 (Fraction Skill Score) (Roberts and Lean, 2008) 对 GRAPES-REPS V3.0 区域集合预报模式的降水预报能力给予了客观评价。

目前传统点对点的检验 (TS 评分等) 仍是预报业务中最常用的一种评分方法, 但其无法提供模式预报雨带的空间属性, 而近些年空间检验方法发展迅速 (Gilleland et al., 2009), 能够从结构、强度和位置等多维度定量评估雨带的特征, 弥补了这一不足。林惠娟等 (2011) 以 2010 年 7 月 24—27 日浙江一次暴雨过程为例, 应用 MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluations) (Davis et al., 2006a, 2006b; Brown et al., 2007) 空间检验方法对 WRF (V3.2) 模式进行了检验, 该方法识别出 2 个降水目标, 预报降水面积较实况略偏大, 预报质心与实况近于重合, 预报与观测目标对象空间偏差较小。茅懋等 (2016) 应用 MODE 方法对强对流预报产品进行了检验, 指出 MODE 方法可以量化预报对象在空间属性方面的偏差, 检验评估信息更加丰富。周胜男等 (2024) 针对 2021 年安徽梅雨期, 应用传统和 MODE 空间检验方法对比分析了 6 个客观模式和 1 个主观订正预报产品的表现, 指出 EC 预报偏差主要源于纬度预报偏

差, 而 NCEP-GFS 预报偏差源于降水强度预报偏弱、面积预报偏小。关于其他空间检验方法, 如公颖 (2010) 阐释了 SAL (Structure Amplitude and Location) 方法在降水预报检验评估中的应用效果, 指出该方法可从强度 (A)、位置 (L)、结构 (S) 三方面进行评估, 对降水预报效果指示意义最大的为 L 值, A 值其次。金小霞等对 2017 年梅雨期一次强降水过程的数值预报产品进行检验时指出 SAL 较 MODE、FSS 等方法更适用于日常业务。于跃等 (2022) 采用传统和 SAL 空间检验方法, 针对 2021 年 7 月 12—14 日辽宁气旋暴雨过程, 从结构、强度、位置三个方面对比分析了 EC、CMA_MESO 3 km、CMA_MESO 10 km、GFS 模式预报偏差的原因, 指出 CMA 区域模式对雨带内部结构预报最好, CMA_MESO 3 km 强度预报接近实况, 落区预报最优。邓国卫等 (2024) 同样基于 SAL 空间检验方法分析 CMPAS 降水融合产品在四川区域性暴雨过程中的监测能力, 指出 1 km、5 km 融合产品对区域性暴雨过程的空间位置、走向、结构和范围等方面的监测具有较高精度。王新敏和栗晗 (2020) 采用 FSS 评分和 CRA (Contiguous Rain Area) (Ebert and Gallus, 2009) 两种不同类别的空间检验方法, 对比检验了 EC、GFS、MESO 和 SH 模式对 2018 年 8 月三次台风暴雨过程的预报效果, 指出区域模式对于局地性强降水或大尺度降水的强中心预报有一定优势, 全球模式对于较小量级降水的范围预报可参考性更好。

暴雨数值模式检验在国内外已有大量研究, 但不同天气类型下各模式暴雨预报能力不同。因此, 本文主要针对 2021—2023 山东半岛不同天气类型暴雨过程, 利用传统检验方法与空间检验方法相结合的方式分析 EC、GFS、MESO 和 SH 模式对于暴雨的预报能力, 检验评估各模式降水预报性能, 为预报员在预报工作中针对不同类型暴雨过程择优选择模式提供依据。

1 资料与方法

1.1 使用资料与暴雨过程

1.1.1 资料说明

本文所用资料包括: (1) 中国气象局气象大数据云平台 (天擎) 的山东半岛 (包括青岛、烟台和威海) 302 个国家和区域气象站降水观测数据, 作为传统检验的实况资料。(2) 来源于天擎的地面-卫星-雷达三源融合实况格点降水数据 (CMPAS-5 km), 作为空间检验的实况资料。(3) 全球数值预报模式 EC (0.125°×0.125°)、GFS (0.25°×0.25°)、区域数值预报模式 MESO (3 km×3 km)、SH (9 km×9 km) 暴雨前一日 08:00 (北京时, 下同) 起报的 20:00—当日 20:00 的 24 h 降水量预报产品。

1.1.2 山东半岛暴雨过程天气学分型

选取 2021—2023 年山东半岛 14 次典型的区域性暴雨过程 (表 1) 进行检验, 共计 19 个暴雨日 (20:00—次日 20:00 降水量达到 50 mm)。按照天气系统及环境场分类, 从天气类型来看, 有 5 次西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 边缘切变型暴雨、6 次气旋型暴雨、1 次冷涡型暴雨、1 次暖区对流暴雨和 1 次冷锋型暴雨。可见, 副高边缘切变型和气旋型是造成山东半岛区域性暴雨的主要类型, 占 80% 以上, 因此本文研究主要针对这二者。

表 1 2021—2023 年山东半岛各型暴雨过程分类及发生时段

Table 1 Classification and occurrence periods of various types of rainstorm cases in Shandong Peninsula from 2021 to 2023

暴雨类型	发生日期
副高边缘切变型	2021年7月13日、2021年8月31日、2021年9月27日、2022年7月12日、2022年8月9—13日
气旋型	2021年7月3日、2021年8月23日、2021年9月20日、2022年6月27—28日、2022年10月2日、2023年4月4日
冷涡型	2022年6月14日
暖区对流型	2022年6月26日
冷锋型	2022年10月3日

1.2 检验方法

1.2.1 传统检验方法

传统检验方法是将数值模式格点资料采用双线性插值方法插值到站点进行检验, 检验指标包括: TS 评分、空报率、漏报率、BIAS、ETS 评分、均方根误差 (RMSE) 等。其中, ETS 评分是对 TS 评分的改进, 对空报或漏报进行惩罚, 使评分相对后者更加公平 (Jolliffel and Stephenson, 2016)。

1.2.2 空间检验方法 MODE

空间检验方法 MODE 的基本原理是通过在预报场和观测场中识别一系列“对象”, 并赋予这些对象一定的空间属性 (位置、形状、面积等), 对比两个场中对象的属性, 应用模糊逻辑算法计算“对象”的相似度, 最终给出两个场预报的整体表现 (Davis et al., 2006a, 2006b, 2009)。MODE 方法重点分析雨区整体降水的统计分布, 计算流程如下: (1) 观测和预报场平

滑、雨量阈值提取、选取关注的降水面积最大最小值, 提取目标。(2) 通过目标质心距离、目标面积等属性, 将观测场和预报场目标进行匹配。(3) 将观测场和预报场多对多的目标进行合并。(4) 计算目标的多种属性, 如面积、长短轴长度、方位角等。(5) 计算观测和预报的相似度矩阵。

本文选取 114°—125°E、34°—39°N 范围进行空间检验, 将格点实况和模式资料采用双线性插值统一映射到 0.1°网格, 选用半径为 2 倍格距的圆盘形卷积内核进行平滑, 阈值为 50 mm。

1.2.3 空间检验方法 SAL

SAL 方法是在 MODE 方法的基础上将降水主体从结构 S、强度 A、位置 L 3 个方面进行量化检验, 检验预报和观测间的均匀性、平均强度和距离等偏差属性 (Wernli et al., 2008)。其中, $S>0$ 表示模式预报范围较实况偏大, 或最大降水量较实况偏小, 或两者均存在, $S<0$ 则相反; $A>0$ 为模式预报较实况偏强, $A<0$ 为模式预报较实况偏弱, 绝对值越接近 0, 则降水预报与实况越接近; L 为位置参数, 由 L_1、L_2 组成, L_1、L_2 的相对大小可以解释位置预报偏差的原因, $L_1=0$ 时, 即预报与实况降水主体重心重合, 但此时预报效果不一定好, L_2 的意义就是考虑了降水主体重心与降水场内每个降水 (个) 体重心之间的平均距离。当预报降水主体重心和实况降水主体重心重合且实况与预报的各降水 (个) 体重心到降水主体重心距离的加权平均相等时, 位置预报最优 (公颖, 2010)。

2 检验分析结果

2.1 基于传统检验方法的预报检验结果

为分析山东半岛 302 个国家和区域气象站的平均降水量和最大降水量的模式预报情况, 采用双线性插值法将模式格点数据插值到站点, 计算每个暴雨日模式预报的各站平均降水量和最大降水量, 并与实况进行对比 (图 1)。可见, 平均降水量预报 MESO 与实况相关性最高, SH 次之, EC 和 GFS 预报有偏小趋势 (图 1a—d)。最大降水量预报 SH 表现最好, 其他模式大部分过程预报偏小 (图 1e—h)。

针对副高边缘切变型和气旋型暴雨, 为分析模式对各暴雨日的预报表现, 图 2 给出了各暴雨日评分箱线图。为分析模式对相同天气类型所有暴雨日的整体预报表现, 表 2 给出了相同天气类型全部样本评分。从图 2a 可见, 在个例暴雨预报均值上, 两种天气类型的空报率表现为中尺度模式均大于大尺度模式, 而从全部样本统计可见 (表 2), 副高边缘切变型和气旋型暴雨排名分别为 EC > SH > MESO > GFS、GFS > MESO > SH > EC; 从个例暴雨预报均值和全部样本统计可见, 两种天气类型的漏报率均表现为中尺度模式小于大尺度模式 (图 2b、表 2), TS 评分 (图 2c、表 2) 排名均为 SH > MESO > EC > GFS, 且气旋型>副高边缘切变型, 即模式对气旋型暴雨的预报好于副高边缘切变型暴雨, 副高边缘切变型中尺度模式离散度较大, 表明其预报不稳定性较高, 而气旋型 SH 和 GFS 预报的不稳定性高于 MESO 和

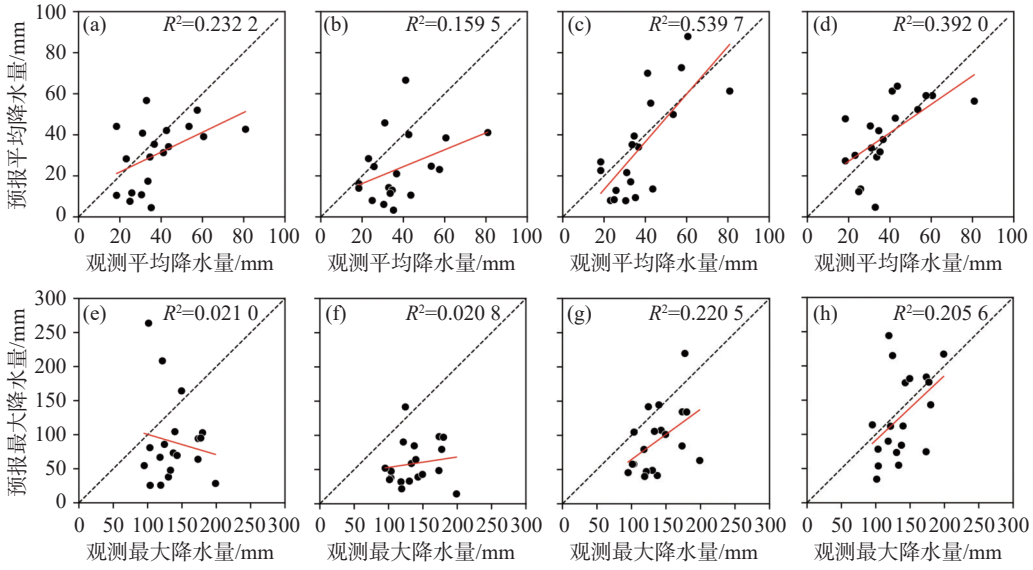


图 1 山东半岛 19 个暴雨日 EC (a、e)、GFS (b、f)、MESO (c、g)、SH (d、h) 预报平均降水量 (a—d)、最大降水量 (e—h) 与观测平均降水量、最大降水量的相关性 (红色线为线性拟合趋势线, R^2 为决定系数, 虚线为 1:1 线, 下同)

Fig. 1 Correlation between the (a-d) average and (e-h) maximum precipitation predicted by the EC (a, e), GFS (b, f), MESO (c, g), and SH (d, h) models and actual observations in Shandong Peninsula of 19 rainstorm-occurrence days (The red line represents the linear trend line, R^2 denotes the coefficient of determination, the same hereinafter. The dashed line indicates the 1:1 reference line)

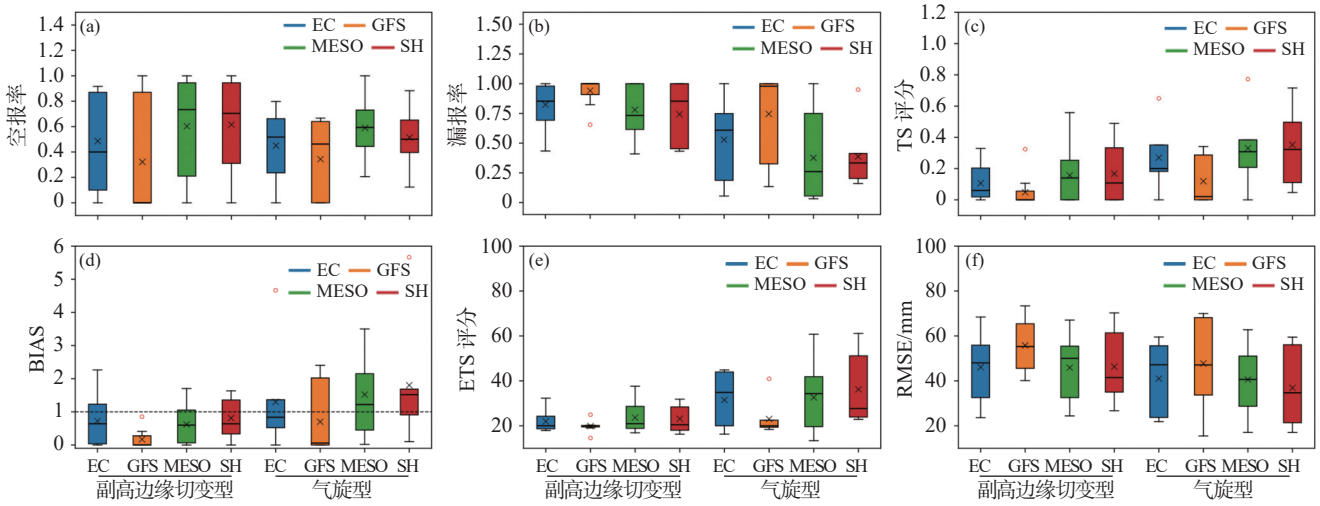


图 2 不同模式对山东半岛副高边缘切变型和气旋型两类暴雨预报的空报率 (a)、漏报率 (b)、TS 评分 (c)、BIAS (d)、ETS 评分 (e) 和均方根误差 RMSE (f) 箱线图 (线段最高处为最大值, 最低处为最小值; 箱体上框线为第 75% 分位值, 下框线为第 25% 分位值, 箱内线为中位数值, ×为平均值, 红色圆圈为异常值, 下同, 虚线为 BIAS=1 线)

Fig. 2 Boxplots of (a) false alarm rate, (b) missing alarm rate, (c) TS scores, (d) BIAS, (e) ETS scores, and (f) RMSE for the shear line and the cyclonic rainstorm cases forecasted by different numerical models in Shandong Peninsula (The highest and lowest points show the maximum and minimum value. The box upper and lower frame lines denote the upper and lower quartiles. The line inside the box is the median. "×" denotes the mean value. The outliers in the box plot are marked with red circles, the same hereinafter. The dashed line indicates the reference line at y = 1)

表 2 不同模式对山东半岛副高边缘切变型和气旋型两类暴雨预报的空报率、漏报率、TS 评分、BIAS、ETS 评分、均方根误差 RMSE (基于相同天气类型的全部样本计算)

Table 2 False alarm rate, Missing alarm rate, TS scores, BIAS, ETS scores, and RMSE for the shear line and the cyclonic rainstorm cases forecasted by different numerical models in Shandong Peninsula (computed using all samples sharing the same weather pattern)

暴雨类型	模式	空报率	漏报率	TS评分	ETS评分	BIAS	RMSE/mm
副高边缘切变型	EC	0.609 1	0.779 4	0.164 2	0.059 4	0.564 4	48.849 4
	GFS	0.392 2	0.866 8	0.122 7	0.073 1	0.219 1	57.376 0
	MESO	0.456 9	0.639 0	0.276 9	0.163 9	0.664 7	45.709 7
	SH	0.498 2	0.591 7	0.290 5	0.161 8	0.813 7	48.522 9
气旋型	EC	0.472 0	0.541 7	0.325 0	0.160 1	0.867 9	41.271 3
	GFS	0.622 1	0.776 9	0.163 1	0.029 5	0.590 2	48.611 6
	MESO	0.493 8	0.312 5	0.411 4	0.205 4	1.358 1	45.688 3
	SH	0.475 0	0.329 2	0.417 3	0.219 4	1.277 6	35.742 5

EC; 在个例暴雨预报均值和中位数上, 副高边缘切变型的 BIAS 表现为各模式均小于 1, 即观测暴雨范围大于预报暴雨范围, 气旋型则表现为 MESO 和 SH 大于 1, 即二者预报暴雨范围大于观测暴雨范围 (图 2d); 在个例暴雨预报均值上, 副高边缘切变型的 ETS 评分排名为 MESO > SH > EC > GFS, 即 MESO 对副高边缘切变型暴雨观测出现暴雨与预报出现暴雨的匹配程度更好, 而气旋型排名为 SH > MESO > EC > GFS, 即 SH 匹配程度更好 (图 2e), 而从全部样本统计可见 (表 2), 副高边缘切变型 EC 最低, 主要原因是由于其较高的空报率; 分析模式暴雨预报的 RMSE (图 2f, 表 2) 可知, 各模式对气旋型暴雨量级的预报要优于副高边缘切变型暴雨, 其中, 副高边缘切变型暴雨的预报 MESO 最优, 气旋型 SH 最优。

综上, 针对副高边缘切变型暴雨, MESO 模式 ETS 评分最高, 且 RMSE 最小, 为最优模式, SH 次之, 同样在多项评估指标 (漏报率、TS 评分、BIAS) 上表现出色, GFS 漏报率最高, 但空报率较低, 适合对暴雨风险保守的预报需求, 基于全部样本计算的 TS 评分 EC 虽较 GFS 高, 但由于其较高的空报率导致 ETS 评分最低; 针对气旋型暴雨, SH 模式在 TS、ETS 评分和 RMSE 中均表现最优, 为最优模式, MESO 漏报率最小, TS、ETS 评分和 BIAS 表现仅次于 SH, 但优于大尺度模式。总体来看, 中尺度模式在多数情况下展现出较为全面的预报能力, 适用于两种天气类型暴雨预报需求。

2.2 暴雨预报的 MODE 空间检验结果

传统检验方法能够反映特定地点的暴雨预报情况, 而空间检验结果可以解释 TS 评分的高低。对于雨区结构、强度和位置某一方面预报较好时, TS 评分不一定高, 而整体预报相对较好时则对应较高的 TS 评分, 实际工作中应将二者结合, 客观综合进行检验分析。

基于个例暴雨预报均值分析不同模式对两种天气类型暴雨预报的 MODE 方法检验结果发现, 副高边缘切变型和气旋型的目标整体相似度排名分别为 SH > MESO > EC > GFS、SH > EC > MESO > GFS, 且气旋型暴雨各模式均大于副高边缘切变型暴雨, 相似度的离散度气旋型小于副高边缘切变型暴雨, 其中气旋型暴雨 EC、MESO 和 SH 目标整体相似度均值大于 0.7, 说明这几种模式对气旋型暴雨对象识别预报优于副高边缘切变型暴雨, 且较稳定 (图 3a)。从图 3b 可见, 两种天气类型的目标对象重叠面积比例排名分别为 MESO > SH > EC > GFS、SH > EC > MESO > GFS, 模式对气旋型暴雨对象落区重叠度预报高于副高边缘切变型暴雨。副高边缘切变型和气旋型暴雨观测与预报对象质心距离排名分别为 GFS > SH > MESO > EC、MESO > EC > GFS > SH (图 3c)。

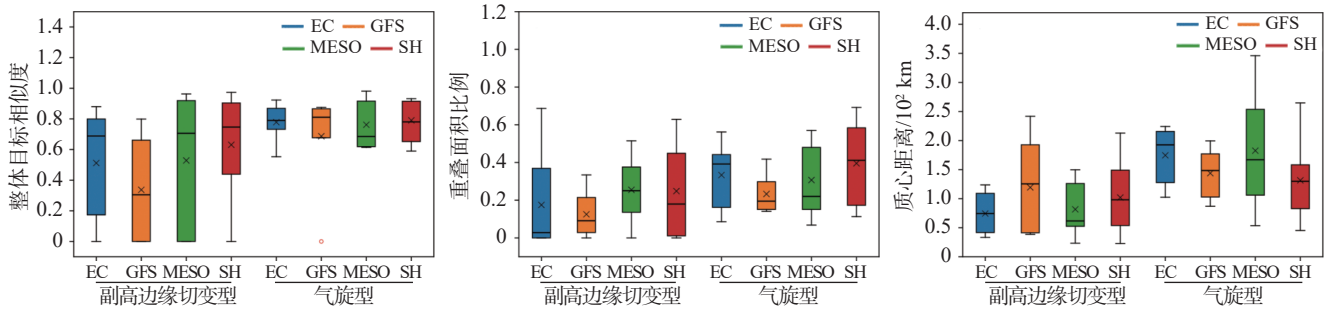


图 3 基于 MODE 方法的不同模式对山东半岛副高边缘切变型和气旋型两类暴雨预报的目标整体相似度 (a)、目标对象重叠面积比例 (b) 和质心距离 (c) 箱线图

Fig. 3 Boxplots of the MODE-derived (a) overall object-based similarity, (b) overlapping area ratio, and (c) object-based centroid distance between forecast and observed fields of the shear line and the cyclonic rainstorm cases in Shandong Peninsula

从基于 MODE 方法的观测与预报对象面积的相关关系图 (图 4a—d) 可见, 不区分两种天气类型时 SH 面积预报最好, GFS 最差。面积预报偏小的概率 EC 为 50% (副高边缘切变型 55.6%, 气旋型 42.9%), GFS 为 61.5%, 且对副高边缘切变型 (71.4%) 和气旋型 (50%) 的偏小概率均在 50% 及以上, MESO 为 46.7% (副高边缘切变型 62.5%, 气旋型 28.5%), SH 为 33.3% (副高边缘切变型 20%, 气旋型 50%), 为四种模式最低, 可解释其漏报率最低的原因。EC 和 GFS 对副高边缘切变型暴雨存在预报对象面积偏小的情况, 表明副高边缘切变型暴雨范围预报偏小是大尺度模式漏报率较高的原因之一; SH 暴雨面积预报偏大, 是造成其空报率相对高的原因之一。另外, GFS 对 2022 年 8 月 10 日和 12 日、EC 对 2022 年 8 月 11 日暴雨的预报在研究范围内没有识别出目标对象, 原因在于这几次过程为副高边缘切变型暴雨, 暴雨范围小, 较局地, 大尺度模式存在降水强度预报偏小的情况, 也是造成其漏报率相对高的原因之一。各过程中尺度模式预报场均识别出目标对象, 模式预报的偏差主要由空间位置和面积预报的偏差造成, 这与刘静等 (2022) 的相关研究结果一致。

分析各模式匹配的观测场对象面积与主轴倾角 (暴雨落区的长轴与 X 轴的夹角) 的关系 (不区分两种天气类型) (图 4e—h) 可知, 面积较小时, 主轴倾角离散度较大, 既有东北—西南走向, 也有西北—东南走向; 面积较大时, 主轴倾角的离散度较小, 即随着暴雨面积的增大, 主轴倾角越小, 雨带越接近东北—西南走向, 这与尤凤春等 (2011) 的相关研究结果一致。

对模式预报与观测对象的质心偏离程度和方向检验 (图 4i—l) 可知, 针对副高边缘切变型暴雨, 质心经纬度偏差在 1°以内的概率 EC 为 88.9%, GFS 为 42.9%, MESO 为 75%, SH 为 50%, 即 EC 质心预报优于中尺度模式, GFS 表现较差; 针对气旋型暴雨, 质心经纬度偏差在 1°以内的概率 EC 为 28.6%, GFS 为 33.3%, MESO 为 14.3%, SH 为 37.5%, 即 SH 参考性较高。EC 对副高边缘切变型暴雨质心预报有偏北情况, 对气旋型暴雨质心预报有偏西情况; GFS 质心偏差的离散度相对较大, 对两种天气类型暴雨质心预报均有偏西情况; MESO 对副高边缘切变型暴雨质心预报有偏西北、东南趋势, 而对气旋型暴雨质心预报均偏西; SH 对两种天气类型暴雨质心预报均有偏北和偏西趋势。上述结果可为质心订正提供依据。

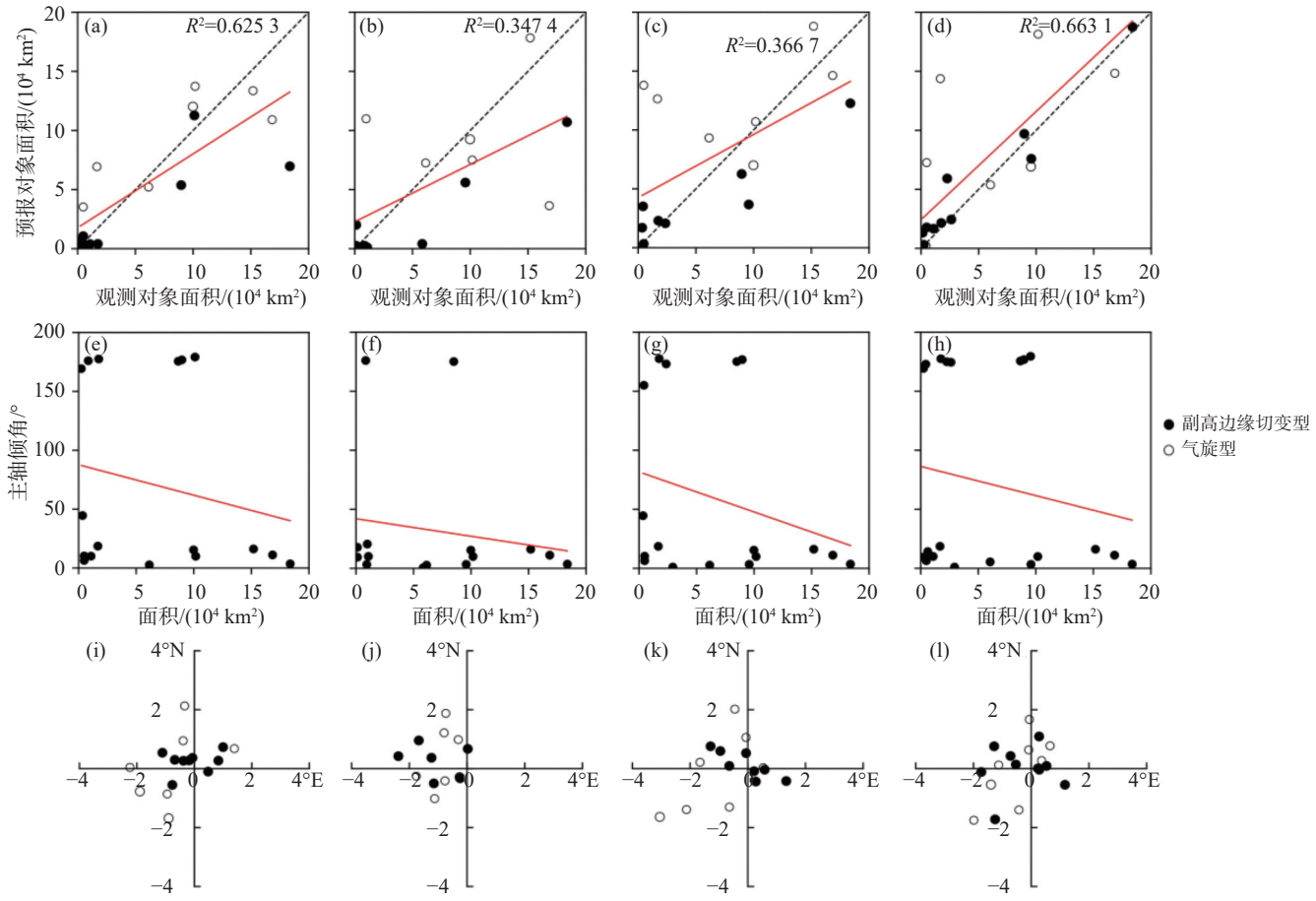


图 4 基于 MODE 方法的 EC (a、e、i)、GFS (b、f、j)、MESO (c、g、k)、SH (d、h、l) 预报与观测对象面积的相关性 (a—d)、匹配的观测场对象主轴倾角随面积的变化 (e—h) 以及预报与观测对象的质心偏离程度和方向 (i—l)

Fig. 4 Object-based verification using the MODE method analyzes (a, e, i) EC, (b, f, j) GFS, (c, g, k) MESO, and (d, h, l) SH forecasts, evaluating: (a-d) correlation between forecasted and observed object areas, (e-h) variation of the main axis tilt angle with area for observed objects matched to different models, and (i-l) deviation magnitude and direction between forecasted and observed object centroids

2.3 暴雨预报的 SAL 空间检验

SAL 检验表明: 在个例暴雨预报均值上, 两种天气类型 EC 和 MESO 的结构参数 *S* 最接近 0, 雨带结构预报最优; GFS (*S* 均值> 0) 预报范围偏大或最大降水量偏小, 或两者均存在, SH 则相反 (*S* 均值< 0) (图 5a)。两种天气类型强度参数 *A* 排名均为 SH > MESO > EC > GFS, SH 降水平均强度预报明显偏强; 针对副高边缘切变型暴雨, 大尺度模式预报场对象降水平均强度较实况偏小 (*A* 均值< 0), 中尺度模式偏大 (*A* 均值> 0), MESO 最接近实况; 针对气旋型暴雨, 各模式预报降水平均强度均较实况偏大 (*A* 均值> 0), 大尺度模式更接近实况 (图 5b)。从位置参数 *L* 检

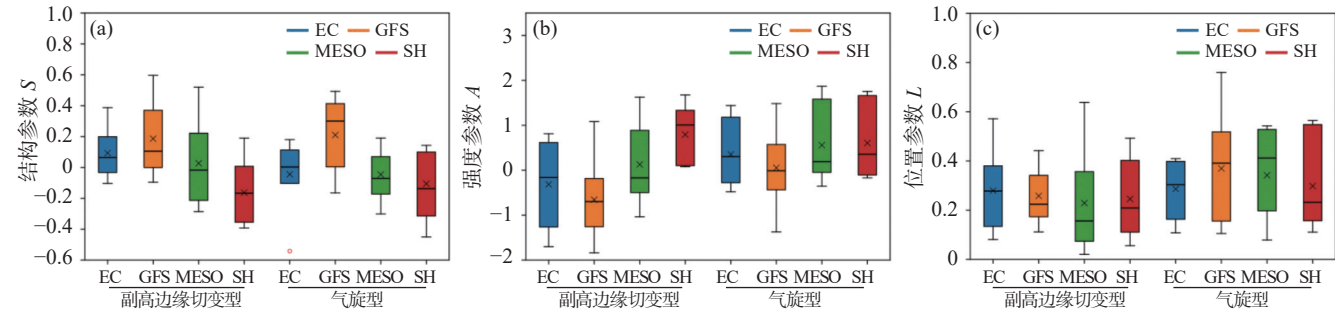


图 5 基于 SAL 方法的不同模式对山东半岛副高边缘切变型和气旋型两类暴雨预报的结构参数 *S* (a)、强度参数 *A* (b) 和位置参数 *L* (c) 箱线图

Fig. 5 Boxplots of the SAL-derived (a) structure (*S*), (b) amplitude (*A*), and (c) location (*L*) parameters from different model forecasts for the shear line and the cyclonic rainstorm cases in Shandong Peninsula

验可见, 针对副高边缘切变型暴雨, 中尺度模式 L 均值小于大尺度模式, 即中尺度模式暴雨位置预报更接近实况, 而针对气旋型暴雨, EC 和 SH 更接近实况 (图 5c)。

MODE 和 SAL 方法可互补地提供关于模式预报能力的评估。从本文 MODE 检验结果可见, 副高边缘切变型暴雨优先参考中尺度模式, 气旋型暴雨优先参考 SH 和 EC, 而 SAL 方法中最重要的参数为位置参数 L, 对 L 检验发现其结果与 MODE 方法给出的目标整体相似度一致, 且 SAL 方法可给出降水平均强度检验, 即副高边缘切变型优先参考 MESO, 而气旋型优先参考大尺度模式, 研究结果可为模式选取及订正提供参考。

2.4 典型个例预报结果检验分析

受气旋影响, 2022 年 6 月 27 日鲁南和山东半岛地区出现区域性大暴雨, 局地特大暴雨, 最大 24 h 降水量达 374.6 mm。26 日 20:00 地面气压场上山东、河北、河南交界处就已形成闭合低压中心, 27 日 08:00 气旋中心位于山东, 中心气压值达到 997.5 hPa, 26 日 20:00—27 日 20:00 是强降水发生的主要时间段。

此次过程模式对于山东半岛暴雨预报的 TS 评分排名为 SH (0.494) > MESO (0.371) > EC (0.198) > GFS (0.186), 从 MODE 方法匹配目标属性检验结果 (表 3)、目标匹配结果 (图 6) 可见: 目标整体相似度排名为 EC (0.923) > MESO (0.916) > SH (0.895) > GFS (0.875), 面积预报除 EC 偏小外, 其他三种模式预报偏大, 各模式暴雨质心预报均较实况偏北, 中尺度模式重叠面积比例高于大尺度模式, 可以解释 TS 评分的相对大小。

SAL 检验结果表明 (表 4), EC、GFS、MESO 结构参数 $S>0$, 造成 S 的误差为最大降水量较实况偏小, GFS 和 MESO 还有预报降水范围较实况偏大的原因, SH 结构参数 $S<0$, 造成 S 的误差为最大降水量较实况偏大, 从 S 的数值上看, SH 最接近于 0, 雨带结构预报最优; 从强度参数 A 检验可见, MESO 更接近于 0, 降水强度预报更接近实况; 从位置参数 L 检验可见, SH 和 EC 模式 L 最小, 位置预报与实况更接近, 四家模式位置参数 L_1 对于 L 的整体贡献较大, 说明暴雨落区的误差主要由于预报目标降水主体重心与实况降水主体重心偏差较大造成。

表 3 2022 年 6 月 27 日暴雨过程不同模式暴雨目标对象的 MODE 空间检验结果

Table 3 The MODE spatial verification results of rainstorm object for the rainstorm case on June 27, 2022

	面积/(10 000 km^2)	主轴倾角/°	质心_x/°E	质心_y/°N	中位数强度/mm	观测与预报对象面积比			
						面积比	重叠面积比例	质心距离/(100 km)	目标整体相似度
观测	15.188	16.194	119.093	35.563	91.260				
EC	13.359	23.646	118.705	36.510	69.430	0.880	0.392	1.024	0.923
GFS	17.828	20.883	118.298	36.778	65.670	0.852	0.298	1.452	0.875
MESO	18.750	22.039	119.031	36.622	90.233	0.810	0.468	1.061	0.916
SH	22.000	13.076	119.747	36.338	88.084	0.690	0.597	1.014	0.895

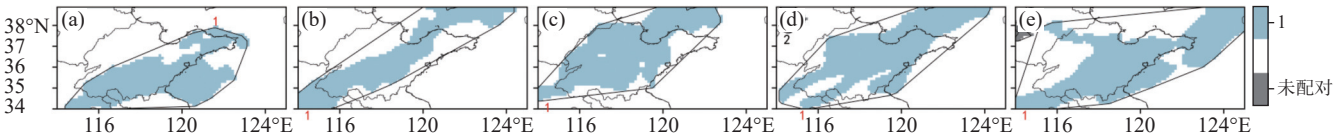


图 6 2022 年 6 月 27 日气旋型暴雨过程基于 MODE 方法的观测场 (a) 和 EC (b)、GFS (c)、MESO (d)、SH (e) 模式预报场暴雨目标对象匹配结果

Fig. 6 MODE-based rainstorm object matching results between (a) observed and forecast fields from (b) EC, (c) GFS, (d) MESO, and (e) SH for the cyclonic rainstorm case on June 27, 2022

表 4 2022 年 6 月 27 日暴雨过程不同模式的 SAL 空间检验结果

Table 4 The SAL spatial verification results of different models for the rainstorm case on June 27, 2022

模式	结构参数(S)	强度参数(A)	位置参数(L)	位置参数(L_1)	位置参数(L_2)
EC	0.180 1	−0.481 7	0.107 9	0.106 9	0.001 0
GFS	0.492 8	−0.254 5	0.155 8	0.144 5	0.011 3
MESO	0.190 0	0.189 9	0.197 4	0.131 3	0.066 1
SH	−0.137 5	0.355 1	0.110 8	0.076 6	0.034 2

3 结论与讨论

为分析大尺度模式 (EC、GFS) 和中尺度模式 (MESO、SH) 在山东半岛暴雨预报中的表现，本文采用传统检验方法及面向对象目标的两种空间检验方法 (MODE、SAL) 对 2021—2023 年山东半岛典型暴雨过程进行了天气系统分型检验 (副高边缘切变型和气旋型)。得出主要结论如下：

(1) 传统检验结果表明中尺度模式在多数情况下展现出较为全面的预报能力，且各模式对气旋型暴雨的预报均好于副高边缘切变型暴雨。

(2) 基于 MODE 方法的各模式目标整体相似度检验表现为气旋型暴雨大于副高边缘切变型暴雨，针对副高边缘切变型和气旋型暴雨，目标对象重叠面积比例均值排名分别为 MESO > SH > EC > GFS、SH > EC > MESO > GFS，EC 和 GFS 对副高边缘切变型暴雨存在预报对象面积较实况偏小的情况，SH 面积预报偏大，几乎所有模式对两种暴雨质心的预报均存在偏北或偏西情况，综合 MODE 和 SAL 空间检验结果表明副高边缘切变型暴雨优先参考中尺度模式，而气旋型暴雨优先参考 SH 和 EC。

(3) 基于 SAL 空间检验结果可知，在降水平均强度预报方面，副高边缘切变型暴雨预报应优先参考 MESO，而气旋型暴雨预报则优先参考大尺度模式。

上述研究结果能够使预报员进一步了解不同模式对山东半岛两种天气类型暴雨预报的特点和可信程度，可为模式选取、订正、改进预报技术和提高暴雨预报准确率提供参考。文中暴雨天气类型是按照天气系统和环境场所作的主观分类，今后可以采用客观方法进一步优化分类标准。本文传统检验聚焦于山东半岛，空间检验研究范围有所扩张，预报场中可能存在被检验目标对象的部分区域落于研究区域外，但各过程目标对象的大部及质心仍在研究范围内，四种模式的研究范围一致，目标整体相似度的相对大小，仍能够说明哪一模式相对更好，且空间检验统计了多个个例的平均情况，可提供预报上的参考。目前，本文选取用于检验的两种天气类型暴雨个例数量较少，检验结果与选取的过程有关，今后可进一步收集整理不同天气类型暴雨过程，并建立相应的个例库，对检验结果进行验证和订正，使研究结果更加可信。另外，后期研究可对比模式 36 h 和 48 h 时效的预报情况，即模式的稳定性等方面仍有待进一步研究。空间检验方法可以量化对象属性特征，本文选取了重点关注的特征进行统计分析，如何将其与传统二分法列联表检验相结合，是下一步研究重点和未来发展方向。

参考文献 (References)：

陈涛,陈博宇,于超,等.2020.华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J].气象,46(9):1129−1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al. 2020. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China [J]. Meteorological Monthly,46(9):1129−1142 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.09.001

邓国卫,孙俊,郭海燕.2024. CMPAS 降水融合产品在四川区域性暴雨过程监测中的质量评估[J].高原山地气象研究,44(4):119−127. Deng G W, Sun J, Guo H Y. 2024. Quality assessment of CMPAS precipitation fusion products in regional rainstorm process monitoring in Sichuan [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(4):119−127. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.04.013

公颖.2010. SAL 定量降水预报检验方法的解释与应用[J].暴雨灾害,29(2):153−159. Gong Y. 2010. The explanation and application of SAL quantitative verification for precipitation forecasts [J]. Torrential Rain and Disasters,29(2):153−159 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2010.02.009

Jolliffel T,Stephenson D B. 2016.预报检验—大气科学从业者指南 (第 2 版) [M]. 李应林,译.北京:气象出版社:58-68. Jolliffel T, Stephenson D B. 2016. Forecast Verification-A Practitioner's Guide in Atmospheric Science [M]. Li Y L, trans. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 58-68 (in Chinese)

林惠娟,陈锋,董美莹,等. 2011. WRF 模式对一次东风低空急流暴雨预报检验[C]// 第 28 届中国气象学会年会. Lin H J, Chen F, Dong M Y,et al. 2011. Verification of WRF model for forecasting an intense rainfall event driven by a low-level East wind jet [C]// The 28th annual meeting of China Meteorological Society (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]. Meteorological Monthly,48(10):1292−1302 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.050502

刘静,叶金印,张晓红,等.2014.淮河流域汛期面雨量多模式预报检验评估[J].暴雨灾害,33(1):58−64. Liu J, Ye J Y, Zhang X H, et al. 2014. The performance evaluation of the multi-model forcasting of areal rainfall for Huaihe River Basin during flood season [J]. Torrential Rain and Disasters,33(1):58−64 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2014.01.008

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

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 Meteorologica Sinica,78(3):451−476 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.030

宋雯雯,淡嘉,龙柯吉,等.2023.岷江上游面雨量多模式预报检验与集成研究[J].高原山地气象研究,43(4):84−90. Song W W, Dan J, Long K J, et al. 2023. Multimodel forecast verification and integration of area

rainfall in the upper reaches of Minjiang River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,43(4):84−90 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1674−2184.2023.04.011

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]. Meteorological Monthly,48(3):357−371 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.071301

王婧卓,陈法敬,陈静,等.2021. GRAPES 区域集合预报对 2019 年中国汛期降水预报评估[J].大气科学,45(3):664−682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al. 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,45(3):664−682 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2008.20146

王新敏,栗晗.2020.多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J].气象,46(6):753−764. Wang X M, Li H. 2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models [J]. Meteorological Monthly,46(6):753−764 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2020.06.003

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]. Meteorological Monthly,42(10):1176−1183 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.10.002

尤凤春,王国荣,郭锐,等.2011. MODE 方法在降水预报检验中的应用分析[J].气象,37(12):1498−1503. You F C, Wang G R, Guo R, et al. 2011. The application analysis of MODE method to the rainfall forecast test [J]. Meteorological Monthly,37(12):1498−1503 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.12.004

于跃,毕明林,阎琦,等.2022.辽宁区域性大暴雨成因分析及多模式数值预报空间检验[J].气象与环境学报,38(4):11−18. Yu Y, Bi M L, Yan Q, et al. 2022. Cause analysis and spatial test of multi-mode numerical prediction on regional rainstorms in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment,38(4):11−18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2022.04.002

张立凤.2024.暴雨数值预报若干关键技术发展的回顾与思考[J].暴雨灾害,43(3):243−254. Zhang L F. 2024. Review and thinking on the development of several key technologies for heavy rainfall numerical weather prediction [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):243−254 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−230

张宁娜,黄阁,吴曼丽,等.2012. 2010 年国内外 3 种数值预报在东北地区的预报检验[J].气象与环境学报,28(2):28−33. Zhang N N, Huang G, Wu M L, et al. 2012. Contrastive verification of three numerical prediction products in the northeast of China in 2010 [J]. Journal of Meteorology and Environment,28(2):28−33 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673−503X.2012.02.006

周胜男,王东勇,冯颖,等.2024.安徽省 2021 年梅雨期降水预报检验分析[J].沙漠与绿洲气象,18(1):165−173. Zhou S N, Wang D Y, Feng Y, et al. 2024. Verification and analysis of precipitation forecast during the Meiyu period of 2021 in Anhui province [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(1):165−173 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.01.021

Brier G W. 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability [J]. Monthly Weather Review,78(1):1−3. doi:10.1175/1520−0493(1950)078<0001:VOFEIT>2.0.CO;2

Bröcker J, Smith L A. 2007. Increasing the reliability of reliability diagrams [J]. Weather and Forecasting,22(3):651−661. doi:10.1175/WAF993.1

Brown B G, Bullock R, Halley G J, et al. 2007. Application of the MODE object-based verification tool for the evaluation of model precipitation fields [C]// AMS 22nd Conference on weather analysis and forecasting and 18th conference on numerical weather prediction, 25-29 June, Park City, Utah: American Meteorological Society (Boston), http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/124856.pdf

Davis C A, Brown B G, Bullock R G. 2006a. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas [J]. Monthly Weather Review,134(7):1772−1784. doi:10.1175/MWR3145.1

Davis C A, Brown B G, Bullock R G. 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part Ⅱ: application to convective rain systems [J]. Monthly Weather Review,134(7):1785−1795. doi:10.1175/MWR3146.1

Davis C A, Brown B G, Bullock R G, et al. 2009. The Method for Object-based Diagnostic Evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC spring program [J]. Weather and Forecasting,24(5):1252−1267. doi:10.1175/2009WAF2222241.1

Donaldson Jr R J, Dyer R M, Kraus M J. 1975. An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events [C]// Preprints: Ninth Conference on Severe Local Storms. Norman:American Meteorological Society:321-326

Ebert E E, Gallus Jr W A. 2009. Toward better understanding of the contiguous rain area (CRA) method for spatial forecast verification [J]. Weather and Forecasting,24(5):1401−1415. doi:10.1175/2009WAF2222252.1

Gilleland E, Ahijevych D, Brown B G, et al. 2009. Intercomparison of spatial forecast verification methods [J]. Weather and Forecasting, 24(5):1416−1430. doi:10.1175/2009WAF2222269.1

Mason I. 1979. On reducing probability forecasts to yes/no forecasts [J]. Monthly Weather Review,107(2):207−211. doi:10.1175/1520−0493(1979)107<0207:ORPFTY>2.0.CO;2

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

Schaefer J T. 1990. The critical success index as an indicator of warning skill [J]. Weather and Forecasting,5(4):570−575. doi:10.1175/1520−0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2

Swets J A. 1986. Indices of discrimination or diagnostic accuracy: their ROCs and implied models [J]. Psychological Bulletin,99(1):100−117. doi:10.1037/0033−2909.99.1.100

Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. 2008. SAL-A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts [J]. Monthly Weather Review,136(11):4470−4487. doi:10.1175/2008MWR2415.1

(责任编辑　闵爱荣)