

长三角地区不同环流型下强降水模式预报性能评估

张欣¹ 刘凑华² 戴建华^{1*} 朱佳蓉¹ 储海¹

¹ 上海中心气象台, 上海 200030

² 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

摘要: 对 2022 年 9 月至 2024 年 9 月长三角地区的强降水事件按天气形势进行分型, 评估 CMA-MESO、CMA-GFS、CMA-TYM、CMA-SH9、ECMWF 模式在低涡切变、副高配合低槽、冷式切变、台风本体及外围四种主要天气型下的预报性能。研究结果显示, 24h 降水预报小雨量级空报率高、暴雨以上量级 TS 评分低。3h 降水预报中弱降水 CMA-MESO 模式最优, 强降水在冷式切变和低涡切变型下更难捕捉、预报性能更弱。空间特征评估方面, 南北方向上, 低涡切变型和副高配合低槽型下除 CMA-SH9 模式外多数模式存在偏北的系统性误差, 而台风本体及外围天气型下则相反。东西方向上, 台风本体及外围天气型下模式预报普遍偏东, 其他天气型下多数模式具有偏西的系统性误差。时间特征评估方面, 各天气型下模式对降水开始时间的预报准确率均最高, 结束时间其次, 峰值时间的预报准确率较低。

关键词: 检验评估, 天气预报, 强降水, 天气分型, 数值模式

Evaluation of Heavy Precipitation Forecast Performance of Numerical Weather Models under Different Circulation Patterns in the Yangtze River Delta Region

ZHANG Xin¹ LIU Couhua² DAI Jianhua¹ ZHU Jiarong¹ CHU Hai¹

¹ Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

² CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract: This study classified the weather situations of heavy precipitation events in the Yangtze River Delta region from September 2022 to September 2024 and evaluated the forecast performance of the numerical models CMA-MESO, CMA-GFS, CMA-TYM, CMA-SH9 and the ECMWF model under four main weather types. The research results show that in the 24 h precipitation forecasts, there is a high false alarm rate of forecast for light rain, while torrential rain and above are difficult to accurately predict, thus the TS score is low. In the 3 h forecasts, the CMA-MESO model performs best for light precipitation. However, under cold shear and low-vortex shear patterns, heavy precipitation becomes harder to capture, and the model forecast performance weak. In terms of spatial feature evaluation, except the CMA-SH9 model, most models have northern systematic errors in the low-vortex shear and subtropical high with low trough types in the north-south direction, but the situation is the opposite for the typhoon body and peripheral weather type. In the east-west direction, these models generally exhibit an eastern systematic bias in the typhoon body and peripheral weather types, while in other weather types, most models have western systematic errors. For the evaluation of temporal characteristics, all the models have the highest accuracy in forecasting the start time of precipitation, followed by the forecast of end time, and the accuracy in forecasting the peak time is relatively low.

Key words: verification, weather forecast, heavy precipitation, weather type, numerical model

引言

近年来, 在全球变暖的大背景下, 我国乃至全球都呈现出极端天气事件增加的趋势(赵丽等, 2016; 杨浩等, 2019; 郑小华等, 2019)。长三角地区东临东海, 受热带气旋、江淮梅雨、低槽冷锋等多种天气系统的影响(漆梁波等, 2015)。作为经济活跃度和人口密度均位于全国前列的超大型城市群, 长三角地区也呈现出对暴雨、短时强降

*国家自然科学基金气象联合基金项目 U2142214、中国气象局创新发展专项项目 CXFZ2024J020、上海市自然科学基金面上项目 23ZR1463000、中国气象局复盘总结专项 FPZJ2025-041 共同资助

第一作者: 张欣, 主要从事预报检验和客观预报技术研究. E-mail: jingshuiliushen784@126.com

通讯作者: 戴建华, 主要从事强对流天气预报预警技术研究及检验工作. E-mail: djhnn@sina.com

水等极端性、灾害性天气更高的暴露度和脆弱性，气象灾害可能对人民的生命财产和经济建设造成严重影响。对长三角地区暴雨的形成原因、时空分布、致灾影响等方面一些学者已有一定研究成果（徐伟等，2019；傅新姝等，2020；李海宏等，2021）。为了最大限度降低灾害事故损失，全力保护人民群众生命财产安全，近年来对精细化降水预报的时间和空间准确率都有了更高的要求，需要更精准的预报。

数值模式是气象预报业务最重要的参考依据。为深入认识数值模式的预报性能，前人对部分业务模式的强降水预报性能进行了检验评估。孙素琴等（2017）针对2015年4月上旬至7月上旬江西发生的区域性暴雨，对欧洲中心数值模式（ECMWF）、日本模式（JMA）和国家气象中心全球谱模式（T639）的降水产品时空分布特征进行检验分析，发现三家模式对于暴雨以上量级降水均具有较高漏报率，在雨带分布上JMA表现最优，ECMWF总体偏北，T639预报面积范围偏大。党英娜（2018）对ECMWF和华东区域气象中心中尺度数值预报模式（WARMS）两家模式在山东35个暴雨日的降水预报进行检验评估，发现ECMWF模式预报降水强度偏弱而CMA-SH9预报偏强，两家模式强降水开始时间均偏晚。宫宇等（2018）选取2013—2016年包含南方暴雨、北方暴雨、热带扰动降水共38次暴雨过程，对GRAPES全球数值预报系统（GRAPES-GFS，现为CMA-GFS）、ECMWF和T639模式进行了检验分析，发现在短期时效GRAPES-GFS预报效果明显优于T639模式。卜文惠等（2022）针对ECMWF模式对2020年夏季江淮流域降水的预报偏差进行分析，诊断模式对强降水落区的质心经纬度、面积、长度、宽度、轴角等空间特征的预报性能，并探究了偏差出现的可能原因。王晓峰和周荣卫（2021）结合气象和水文观测资料，分析了ECMWF-IFS、NCEP-GFS、GRAPES-GFS三种全球模式在雅砻江流域2018年汛期日降水预报效果，ECMWF-IFS最佳，其次为GRAPES-GFS，最后为NCEP-GFS。王新敏和栗晗（2020）针对2018年汛期三个影响较大的登陆台风“摩羯”“温比亚”“云雀”，对采用FSS和CRA方法对登陆台风降水的模式预报性能进行检验评估，结果表明两家区域模式（CMA-SH9、CMA-TYM）在强降水量级预报上更具优势，而两家全球模式（ECMWF、CMA-GFS）对弱降水量级的预报效果更好。刘静等（2022）基于目标对象检验法和邻域法，全面评估了三种高分辨率数值预报模式在2019—2020年辽宁主汛期的强降水预报性能，发现预报性能受降水类型、预报时效等多种因素影响，并指出改进方向。苏翔等（2022）以2020年江苏6—9月暴雨个例的短期预报为例，检验评估了ECMWF、NCEP-GFS、CMA-GFS、CMA-TYM、CMA-SH9及江苏本地研发的精确化天气分析与预报系统（PWAFS）和本地客观订正产品以及预报员的主观预报产品，整体来看24h时效内主观暴雨预报具有优势，对于样本占比较高的对流性暴雨CMA-SH9、PWAFS和24h时效内的本地客观产品表现较好。吴俞等（2023）采用面向降水过程的时空检验方法，评估了CMA-GD、CMA-SH9和CMA-MESO在海南岛暖季非台风降水日小时预报效果，结果表明三种模式均能较好地捕捉降水的空间分布和日变化特征，但CMA-GD和CMA-SH9的降水频率和强度整体偏强偏多。Feng et al（2023）对CMA-GD、CMA-SH9、CMA-MESO在海南岛区域内暖季小时降水预报中的表现进行评估，针对岛内不同地区的降水强度、频率、持续时间及日变化方面的表现，并结合地形复杂性对模式误差进行了探讨。陈龙等（2024）对影响湖南2021年汛期的四类主要环流型下华南快速循环同化模式的预报效果进行检验评估，各环流型的临近时效降水预报效果较好，短时强降水发生频次最高的西南涡切变型晴雨准确率较低，副热带高压（以下简称副高）边缘南风型在较大量级降水表现相对较差，降水落区空间检验显示西南涡切变型、切变型过程模式位置预报较接近实况。

现有的业务检验评估工作还有一些不足。第一，检验多为对日降水的检验，已无法满足气象服务在空间和时

间分辨率方面更精细的需求，需要在更高时空分辨率上开展评估工作。第二、技术方法上多采用空报率、漏报率、TS 评分、ETS 评分等常规的预报检验方法(刘凑华和牛若芸, 2013; 刘凑华等, 2023; 茅懋等, 2016; 赵滨和张博, 2018; 陈昊明等, 2025), 从统计意义上定量给出简单的对错评价, 而缺乏导致误差原因的信息。但在预报业务中, 更重要的是通过分析数值模式对天气系统的强弱程度、空间位置、移动速度等导致降水预报误差来源的可能原因, 来帮助预报员提高对数值模式的应用效果。第三、业务模式对不同天气系统的机理模拟效果有差异(徐之骁等, 2022), 因此对天气形势加以区分也能更好地评估模式对不同天气形势下强降水的预报效果, 在业务中更有针对性地选取应用。第四、一部分检验工作从个例分析的角度着手, 虽然可以对天气系统、降水演变等方面给出较为深入的评价, 但统计意义较弱, 预报员很难在今后的预报中有足够信心采用前期个例检验得出的结论。

为提高强降水的预报预警和服务能力, 更精细地从空间、时间等方面认识和评价强降水过程预报, 本文对 2022 年 9 月至 2024 年 9 月长三角地区的强降水过程通过主客观融合的方法对强降水个例的大气环流型进行划分, 对不同天气形势下数值模式降水预报从强度、空间、时间等角度进行检验评估, 寻找模式预报误差的总体特征, 以为客观降水订正方法改进提供支撑, 为预报员主观订正提供依据, 最终达到提升预报服务产品质量的目的。

1 资料与方法

1.1 资料

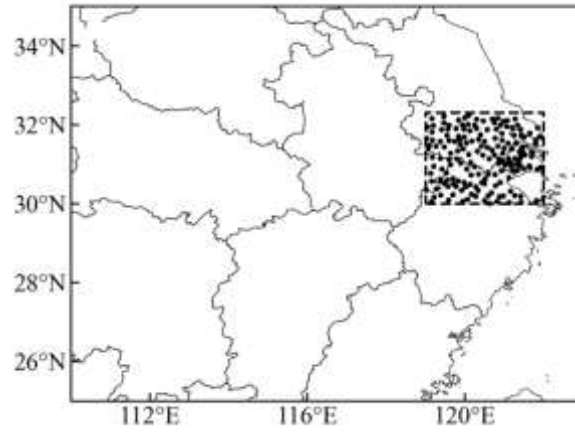
实况资料主要包括: 长三角地区 175 个气象站的逐日、逐 3h 降水观测; 国家气象信息中心提供的中国地面-卫星-雷达三源融合逐小时降水产品, 空间分辨率 $5\text{ km}\times 5\text{ km}$; 欧洲中期天气预报中心发布的第五代全球气候再分析数据集(ERA5)。

选取的气象数值模式分别为: 欧洲中期天气预报中心全球确定性预报模式(ECMWF), 水平分辨率为 $0.125^\circ\times 0.125^\circ$; 中国气象局全球模式(CMA-GFS), 资料水平分辨率为 $0.125^\circ\times 0.125^\circ$; 中国气象局台风模式(CMA-TYM), 水平分辨率为 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$; 中国气象局高分辨率区域模式(CMA-MESO), 水平分辨率为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$; 华东区域数值模式(CMA-SH9), 水平分辨率为 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$ 。

所用资料时段均为 2022 年 9 月至 2024 年 9 月, 所用时间均为北京时。

1.2 研究范围

本文的核心研究范围为图 1 虚线内所示的长三角地区($30^\circ\sim 32.3^\circ\text{N}$ 、 $119^\circ\sim 122^\circ\text{E}$), 实况检验站点为其中所包含的中国气象局预报司选定的 175 个考核站点。由于该区域范围较小, 仅相当于一个中尺度天气系统的大小, 常常并不能覆盖一次降水过程的整体落区, 因此在对降水预报的时空特征进行检验时, 将研究范围拓展至图 1 外框所示的区域($25^\circ\sim 35^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\sim 123^\circ\text{E}$)。



注：虚线方框表示核心研究范围。

图 1 研究范围及检验站点（黑色圆点）

Fig.1 Study area and observation stations (black dots)

1.3 评分指标和检验方法

本文选取降水检验评分指标包括 TS 评分、BIAS 评分、空报率、漏报率，计算方法可参考 Ian T 和 David B(2012)。

面向对象的诊断评估方法(Method for Object- based Diagnostic Evaluation, MODE)是高分辨率模式空间检验技术中最具代表性的方法之一(Davis et al, 2006, 2009; 徐同等, 2020)。主要通过分析实况对象与预报对象之间在强度、位置、结构等方面的空间差异, 来诊断评估模式对降水目标的预报质量(尤凤春等, 2011; 王彬雁等, 2020; 高翠翠等, 2025)。

MODE 方法主要包括目标识别、目标合并与匹配、目标检验三个步骤。在目标识别阶段, 首先对观测场和预报场数据进行预处理, 通过卷积平滑消除噪声干扰, 并设定降水阈值进行目标识别。目标识别后, 进行目标的合并与匹配, 通过空间距离和重叠率等标准, 判断哪些观测目标与预报目标属于同一匹配组。最后, 在目标检验阶段, 根据匹配结果计算质心距离、面积比和重叠率等指标, 定量评估预报场与观测场的空间分布差异, 完成目标对象的空间检验。

本研究中 MODE 方法选取的 24h 降水阈值为 50 mm, 即主要针对暴雨量级降水, 卷积系数选为 3, 仅对识别出的最大目标进行分析检验。为了弥补自动气象站在时、空连续性上的不足(师春香等, 2019; 卜文惠等, 2023), 更精确描述强降水分布信息, 实况选用中国地面-卫星-雷达三源融合逐小时降水产品, 。在检验过程中采用双线性插值方法将不同分辨率的数值模式预报场统一插值到 5 km×5 km 网格点上。

1.4 天气分型方法

由于数值模式对不同天气系统的机理模拟效果有差异, 为了对不同天气形势下模式预报效果加以评估, 本文采用了主客观融合的方法对强降水个例进行天气形势划分。客观分析方法采用基于旋转 T 模态主成分分析与 K-means 聚类相结合的方法, 针对 500、700 和 850 hPa 位势高度场、风场和海平面气压场等多个变量, 先由旋转 T

125 模态主成分分析方法进行天气分型，再对得到的荷载向量场对应的时间系数采用 K-means 方法进行聚类，以实现
126 对不同天气形势的划分（李玉梅等，2016，2020；陈亮等，2018；陈龙光等，2025）。通过对同一天气形势个例
127 的气象要素作平均场，可得到导致长三角地区强降水的典型天气型。

128 2 个例选取及天气分型

129 2.1 强降水个例选取

130 本文以长三角地区 175 个考核站为对象，将 2022 年 9 月至 2024 年 9 月 5 个及以上站点日降水量达暴雨量级
131 的日期认定为强降水个例。为涵盖预报空报样本，除实况强降水日期外，模式预报中 5 个站及以上发生强降水的
132 日期也纳入研究。为避免同一模式不同起报时间的预报结果重复统计，对于同一模式在不同起报时间预报出的强
133 降水日数进行了去重处理，依此原则共选出 114 个强降水个例。

134

135 2.2 天气分型

136 通过 1.4 节所述主客观融合天气分型方法，将天气形势划分为 9 类(表 1)。其中，低涡切变、副高配合低槽、
137 冷式切变、台风本体及外围四类日数占比位列前四位，合计占比达 73.7%。基于统计意义及代表性考虑，后续工
138 作选取这四类天气型下的强降水个例作为研究对象。

139

表 1 2022 年 9 月至 2024 年 9 月各天气型日数及占比分布

140

Table 1 Distribution of days and their proportions of various weather types from September 2022 to September 2024

类型	低涡切变	副高配合低槽	冷式切变	台风本体及外围	江淮气旋	低涡南侧	台风倒槽	低槽冷锋	其他
日数/d	30	28	14	12	9	5	4	3	9
占比/%	26.3	24.6	12.3	10.5	7.9	4.4	3.5	2.6	7.9

141

142 图 2 展示了四类天气型下由 ERA5 再分析资料计算得到的 500、700、850 hPa 平均位势高度场及平均风场特征。
143 从图中可以看出,低涡切变类研究区域在 850 hPa 上存在较为明显的低涡切变线，低涡中心位于湖北地区；副高配
144 合低槽类副热带高压西伸北进至我国东南沿海地区，研究区域位于 584 dagpm 线附近，在 35°~40°N 地区存在明
145 显的高空槽活动；冷式切变类研究区域位于槽前西南风控制的区域中，低空存在明显的冷式切变线，冷暖空气在
146 长三角地区交汇；台风本体及外围类中，研究区域受台风本体或其外围气流影响。

147 值得注意的是，虽然平均天气形势场在展示大尺度环流特征时具有明显优势，能够较好地反映大尺度系统的
148 平均状态和整体分布规律，但由于槽脊位置的差异，可能会出现位相叠加效应，从而削弱槽脊的强度。此外对于
149 低涡、切变线等中小尺度系统，其特征可能在平均场中被弱化。例如，不同个例中低涡中心位置的偏移可能使得
150 平均风场失真，而切变线的风向差异则可能因位置的变化而削弱风速，甚至导致切变线完全消失。因此，尽管通
151 过平均天气场能较好地反映大尺度天气系统的整体特征，但这一方法也存在一些明显的局限性。

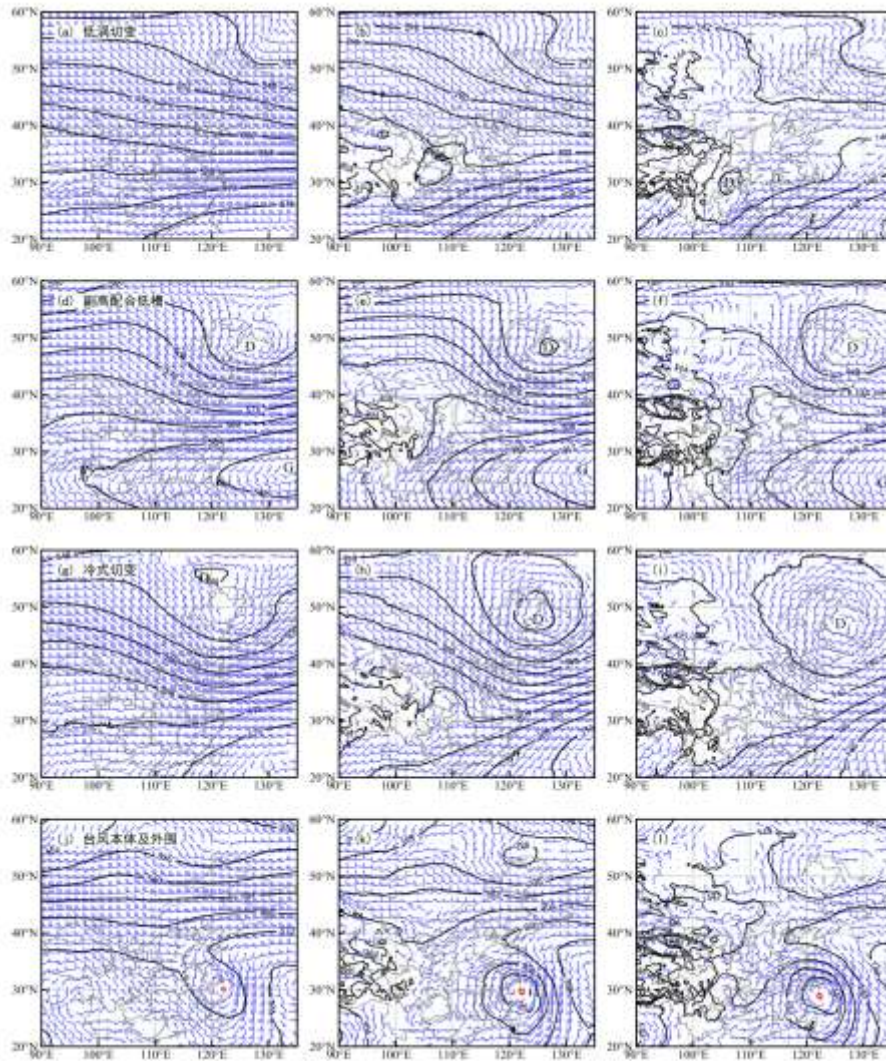


图2 2022年9月至2024年9月平均位势高度场（等值线，单位：dagpm）和平均风场（风羽）
 (a~c) 低涡切变型, (d~f) 副高配合低槽型, (g~i) 冷式切变型, (j~l) 台风本体及外围型

Fig.2 Average geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) from September 2022 to September 2024
 (a-c) low vortex shear type, (d-f) subtropical high with low trough type, (g-i) cold shear type, (j-l) typhoon body and periphery type

3 检验评估

通过对强降水日的天气形势进行分型后，针对四种主要天气型，对强降水预报从综合检验评分、空间特征和时间特征检验三方面评估五个业务模式降水预报效果。

3.1 综合评分

为全面评估各降水预报模式在不同天气类型下的性能表现，针对各模式在强降水日的24 h降水预报展开综合检验与评估，降水强度阈值划分为四级：小雨 (≥ 0.1 mm)、中雨 (≥ 10 mm)、大雨 (≥ 25 mm) 及暴雨 (≥ 50 mm)。

166 mm)。此外,为进一步检验各模式在精细化预报以及短时强天气过程中的适用性,同步开展 3 h 降水预报的检验
167 评估,降水强度以 20 mm h^{-1} 作为强、弱降水划分阈值。

168 需要说明的是,尽管本节分析中涉及了 24h 降水中暴雨以下量级以及 3h 降水中弱降水的检验评估,但本文所
169 选研究对象为长三角区域内 5 个及以上站点同时出现暴雨过程的强降水日。因此,这些弱降水量级的预报检验实
170 质上也发生在强天气背景下,属于同一强对流过程的组成部分。

171 以 24h 降水预报为检验对象,图 3 展示了各模式在不同天气型下降水预报的综合评估结果。图中不同颜色和
172 形状的符号代表各模式在不同等级降水下的综合评分表现。符号越靠近对角线,说明空报率与漏报率之间的平衡
173 越好;越接近右上角,则表明模式的整体性能更优。

174 由图 3 可见,在小雨预报中,所有模式均存在较高空报率。其中, CMA-MESO 模式综合表现最优,其 TS 评
175 分在各类天气型下均大于 0.5, Bias 评分除在台风本体及外围天气型外,其余类型均最接近 1,显示出较强的适应
176 能力。其他模式的 TS 评分虽与 CMA-MESO 模式接近,但空报率普遍偏高。

177 中雨预报方面, CMA-GFS 模式的 Bias 评分更接近于 1,表明预报量级较为合理,但 TS 评分相对较低,说明
178 空间命中率不足。其余四种模式延续小雨级别的特点,空报率较高,其中 ECMWF 模式的 TS 评分相对更优。

179 在大雨及暴雨以上量级的检验中,低涡切变天气型下 CMA-GFS 模式因漏报率较高,预报效果欠佳; ECMWF
180 模式在空报率与漏报率之间更为平衡,在暴雨预报中表现最好,但其大雨量级的 TS 评分明显低于中尺度模式
181 CMA-TYM 和 CMA-MESO。副高配合低槽天气型中,全球模式 CMA-GFS 与 ECMWF 表现为漏报偏多,而中尺
182 度模式整体上空报偏多。冷式切变天气型下,综合 TS 与 Bias 评分, CMA-TYM 模式表现较好。但对于暴雨以上
183 量级, CMA-SH9 与全球模式的 TS 评分极低,尤其 CMA-SH9 模式,经散点回归分析发现其在该天气型下的暴雨
184 预报与观测呈负相关,预报效果较差。全球模式则表现为降水量级系统性偏低明显,导致评分较低(图略)。在
185 台风本体及外围天气型中, ECMWF 模式的 TS 评分最高,但空报率也相对较高; CMA-GFS 模式的 Bias 评分最接
186 近 1,表明其预报量级较为合理。

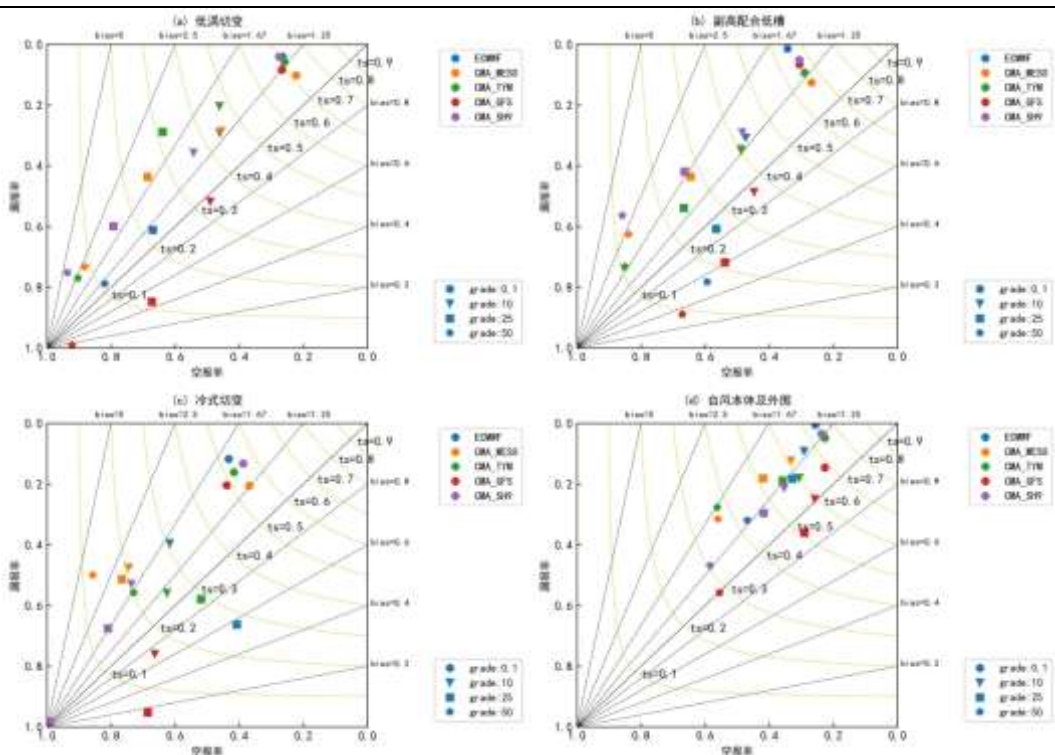


图 3 不同天气型 24h 降水预报评估综合表现

(a) 低涡切变型，(b) 副高配合低槽型，(c) 冷式切变型，(d) 台风本体及外围型

Fig.3 Comprehensive performance of 24 h precipitation forecast assessment for different weather types

(a) low-vortex shear type, (b) subtropical high with low trough type, (c) cold shear type, (d) typhoon body and periphery type

为评估模式在精细化降水预报中的表现，对各家模式的 3 小时降水预报能力进行了检验分析，选取 0.1 mm 和 20 mm 作为弱降水与强降水的代表性阈值进行评估。

图 4 显示，在 3h 弱降水预报中，各天气型下模式预报 TS 评分较为接近，台风本体及外围天气类型下得分最高，模式预报效果较好。从空报与漏报均衡的角度来看，各模式对弱降水普遍存在空报偏多的问题，其中 CMA-MESO 模式的 Bias 评分最接近于 1，表现相对最为出色。在 3h 强降水预报中，各天气型下模式预报 TS 评分基本均在 0.1 以下，预报难度较大，其中冷式切变型和低涡切变型相较于副高配合低槽和台风本体及外围型评分更低，强降水过程更难以捕捉，预报性能更弱。

综合 24h 和 3h 降水预报的检验结果，在四类天气形势中，台风本体及其外围天气型的 TS 评分最高，预报效果相对较好；而冷式切变型的各级降水预报难度相对更大。同时，各模式在强天气背景下对弱降水的预报更容易出现空报现象。

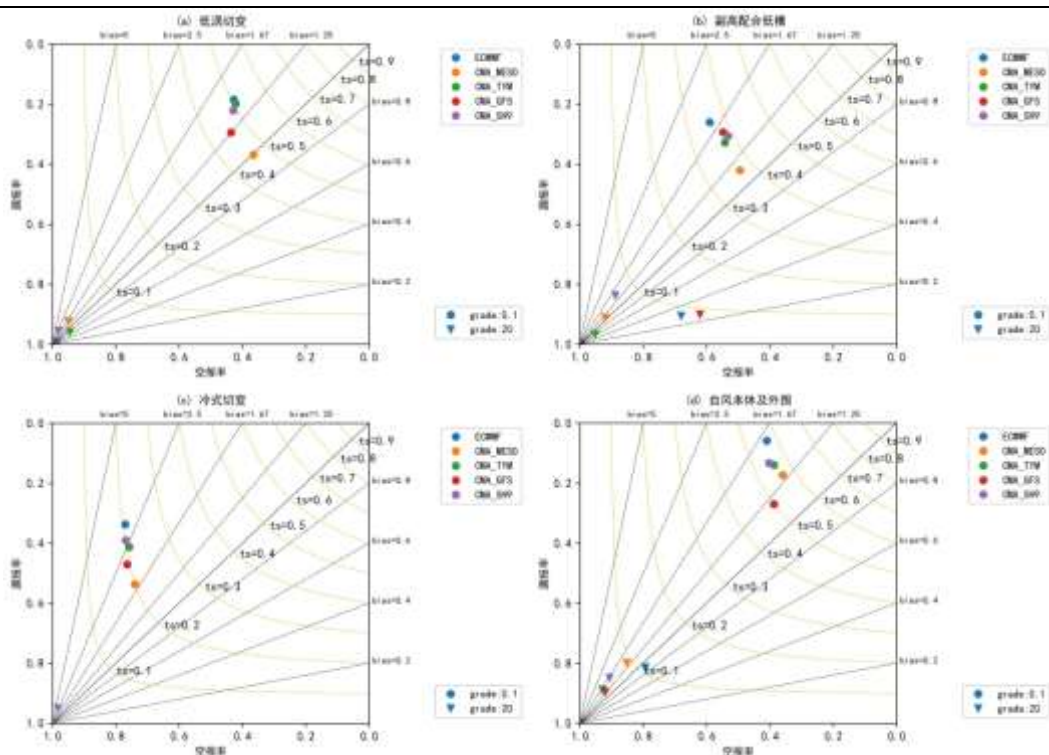


图4 不同天气型 3h 降水预报评估综合表现

(a) 低涡切变型, (b) 副高配合低槽型, (c) 冷式切变型, (d) 台风本体及外围型

Fig.4 Comprehensive performance of 3 h precipitation forecast assessment for different weather types

(a) low-vortex shear type, (b) subtropical high with low trough type,

(c) cold shear type, (d) typhoon body and periphery type

3.2 空间特征检验

为了从雨带位置等空间落区角度来检验模式预报效果, 本节基于 MODE 算法对 24h 降水的空间特征进行检验。以 MODE 方法识别出的 50 mm 阈值降水量最大目标为研究对象, 以其质心位置差异代表雨带位置差异来进行评估。

从检验结果来看, 针对低涡切变天气类型的降水质心位置误差 (图 5a, 5e), 南北方向上除 CMA-SH9 模式预报偏南外, 其余模式均有偏北的系统性误差, 其中 CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式预报系统偏差稍大; 东西方向上除 CMA-SH9 模式外, 其余模式的预报位置普遍偏西, 且均有较大离散度, 预报稳定性较差。低涡切变天气型与江淮梅雨期的天气形势相似, 卜文惠等 (2022) 的研究指出, 2020 年江淮梅雨期 ECMWF 模式预报空间位置较实况偏北、偏西较多, 少部分个例偏南、偏东; 梁钰等 (2024) 对一次江淮气旋引起的区域暴雨过程研究也发现 ECMWF 对于强降水落区的预报偏北, 与本文研究结果较为一致。

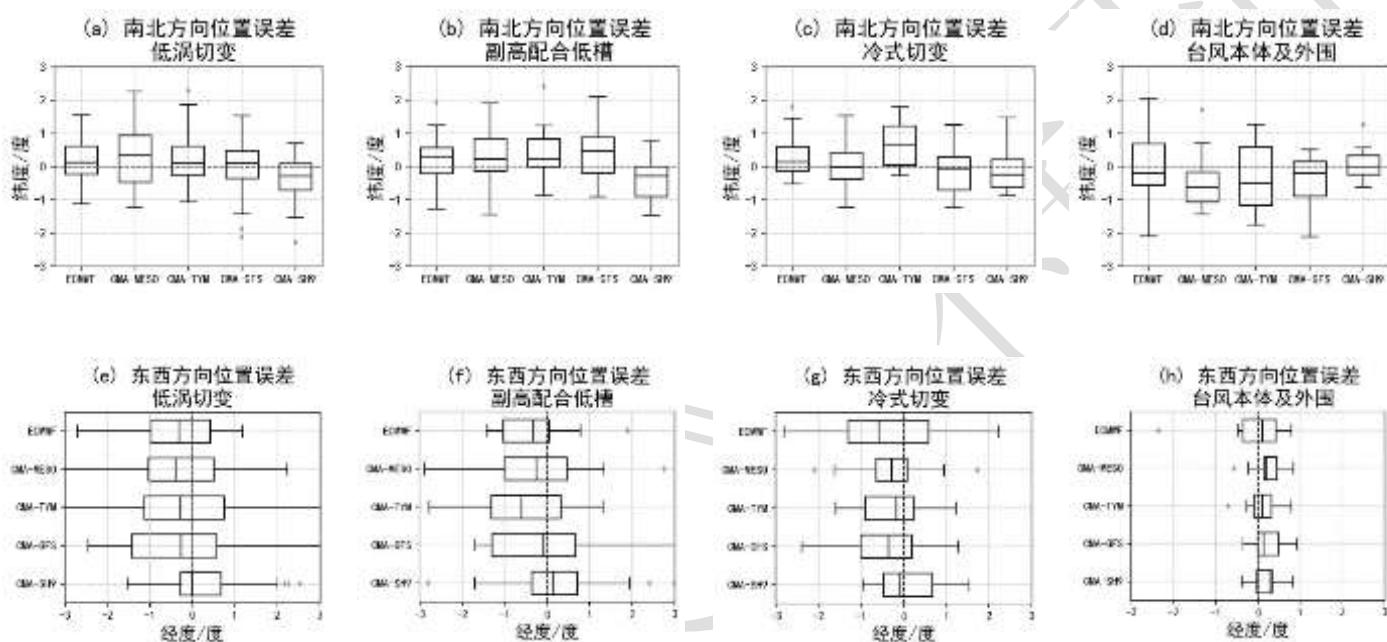
对于副高配合低槽天气类型 (图 5b, 5f), 与低涡切变型类似, 从中位数上来看在南北方向上除 CMA-SH9 模式外均系统性偏北, 而在东西方向上除 CMA-SH9 模式外均系统性偏西, 离散度依然较大。ECMWF 模式在副高配合低槽型下依然存在偏西、偏北的系统误差, 这与郑婧等 (2018) 的研究结论一致。CMA-GFS 模式在副高配合低槽型下有较明显的偏北误差, 经个例分析发现在这一天气型下 CMA-GFS 对于北部低槽的预报较实况偏弱、移速偏快 (图略), 这导致冷暖系统结合位置偏北, 进一步导致降水落区上的误差。

冷式切变天气类型下 (图 5, 5g), 在南北方向上 ECMWF 模式和 CMA-TYM 模式误差系统性偏北, CMA-

227 SH9 模式误差系统性偏南；在东西方向上均存在偏西的系统性误差。

228 台风本体及外围天气类型（图 5d, 5h）下，各模式在东西方向上的误差整体集中在 0.05° 以内，相对另几个天
229 气型预报准确率更高，系统性误差相较于其他三个天气型由偏西转为偏东；在南北方向上，各模式的降水质心位
230 置普遍偏南。

231 综合四种天气类型的表现，在南北方向上，除 CMA-SH9 模式外，低涡切变型和副高配合低槽型下其余几种
232 模式普遍出现偏北的系统性误差，台风本体及外围天气型下其余几种模式则偏南；冷式切变型下 ECMWF 模式和
233 CMA-TYM 模式偏北，CMA-SH9 模式偏南。在东西方向上，几家模式在台风本体及外围天气型下均存在偏东的系
234 统性误差，而另几种天气型下除 CMA-SH9 外均普遍存在偏西的系统性误差。因此，预报业务中在参考数值预报
235 产品的强降水落区位置时可适当进行相应的系统性调整。



注：菱形表示异常值。

图5 基于 MODE 方法的暴雨最大目标质心位置预报偏差箱线图

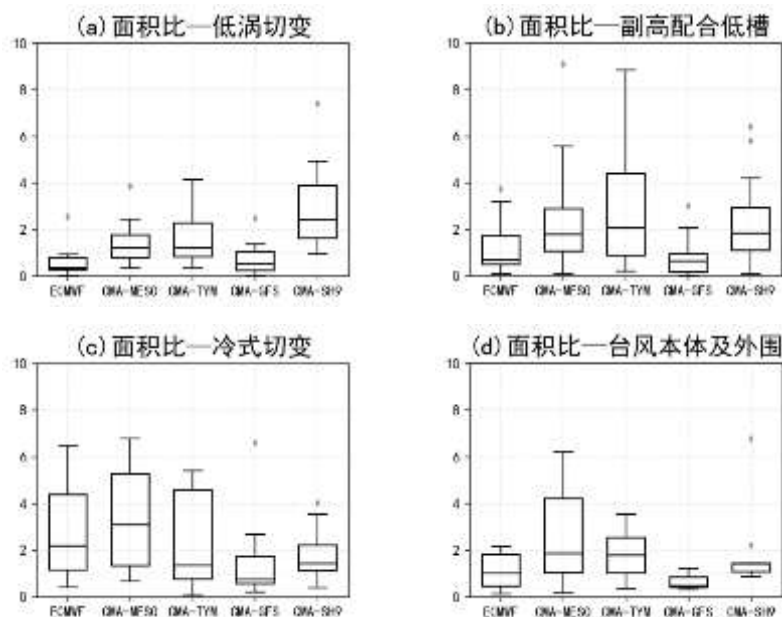
(a,e) 低涡切变型, (b,f) 副高配合低槽型, (c,g) 冷式切变型, (d,h) 台风本体及外围型
(a~d) 南北方向, (e~h) 东西方向

Fig.5 Box plots of forecast deviation for the centroid position of maximum rainstorm objects based on the MODE Method

(a,e) low-vortex shear type, (b,f) subtropical high with low trough type, (c,g) cold shear type, (d,h) typhoon body and periphery type
(a~d) north-south direction, (e~h) east-west direction

244 以 MODE 方法识别出的暴雨最大目标为研究对象，通过计算不同模式预报面积与观测面积的比值，系统分析
245 各模式对雨带预报面积的偏差特征。如图 6 所示，从中位数统计结果来看，三类中尺度模式（CMA-MESO、
246 CMA-TYM 和 GMA-SH9）在四类天气型下的面积比值均大于 1，表明这些模式普遍存在强降水预报面积偏大的系
247 统偏差。相比之下，全球模式中 CMA-GFS 模式在所有天气型下的面积比均小于 1，显示出对强降水面积预报偏保
248 守的特征；ECMWF 模式呈现出天气型依赖性，在低涡切变和副高配合低槽两类天气型下预报面积偏小，在冷式
249 切变型下偏大，而在台风本体及外围型下预报则较为准确。进一步分析发现，相较于 10 mm 以下量级降水（图
250 略），各模式在暴雨预报方面表现出更大的不确定性。在副高配合低槽、冷式切变以及台风本体和外围天气型下，

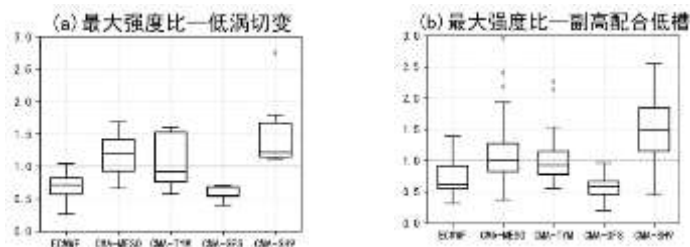
251 预报结果的离散度显著增加，预报稳定性明显降低。



252 图6 基于MODE方法的暴雨识别最大目标面积比箱线图
253 (a) 低涡切变型, (b) 副高配合低槽型, (c) 冷式切变型, (d) 台风本体及外围型
254 Fig.6 Box plots of area ratio of maximum rainstorm objects identified based on the MODE method

255
256 (a) low-vortex shear type, (b) subtropical high with low trough type, (c) cold shear type, (d) typhoon body and periphery
257 type

258
259
260 以MODE方法识别最大目标的预报最大降水强度与实况最大降水强度比值(即最大降水强度比)作为检验对
261 象,从图7来看,在台风本体及外围天气型下,所有模式比值中位数均小于1,预报偏弱。ECMWF模式和CMA-
262 GFS模式在四种天气型下的最大强度比均小于1,表明在几种天气形势下,其对强天气极端降水的预报低估较明
263 显。CMA-SH9模式则在除台风型以外的其他三种天气型下明显高估极端降水,这与图3所示的3h降水预报与观
264 测频率匹配的结果较为一致。CMA-MESO模式在副高配合低槽和冷式切变型下对降水极值把握较好,在低涡切变
265 型下预报偏大。而CMA-TYM模式除在低涡切变型下高估降水极值以外,在另三种天气型下略低估降水强度。



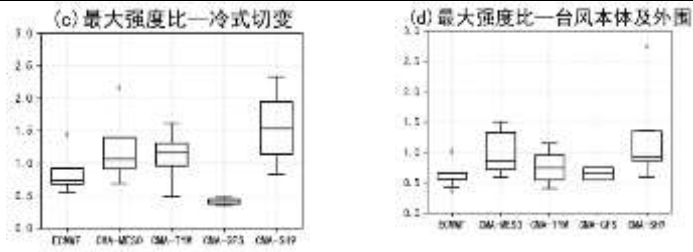


图 7 基于 MODE 方法的暴雨最大目标的最大降水强度比箱线图
 (a) 低涡切变型, (b) 副高配合低槽型, (c) 冷式切变型, (d) 台风本体及外围型

Fig.7 Box plots of maximum precipitation intensity ratio of maximum rainstorm objects based on the mode method

(a) low-vortex shear type, (b) subtropical high with low trough type, (c) cold shear type, (d) typhoon body and periphery type

3.3 时间特征检验

本节针对强降水个例的降水开始时间、结束时间以及降水峰值时间进行检验,以评估不同天气型下模式预报的降水开始、结束、峰值时间与观测之间的误差是否有一定规律,为今后预报订正提供依据。

宇如聪等(2021)对单站降水事件定义为 1h 降水量开始 ≥ 0.1 mm 时次判定为降水事件开始时刻,当某一降水时次之后连续 2h 没有降水时认定此时次为本次降水事件的结束时刻。选取区域强降水日内单站降水事件的 3h 降水量为研究对象,设定 3h 降水量开始 ≥ 0.1 mm 的时次为降水过程开始时刻,此时次之后 3h 降水量开始 < 0.1 mm 的时次设定为降水过程结束时刻。进一步在自动站实况中挑选 3h 降水量达到 20 mm 以上的强降水时段,将日最大强度出现的时间定义为降水峰值时间(宇如聪等, 2014; 2021; 陈昊明等, 2021)。

受模式性能所限,预报的降水过程次数很可能与观测不一致,这将导致难于对两者进行客观匹配,因此本文仅在某强降水日单站计算的预报和观测的降水过程数相等时,对当日当站的降水过程预报时间特征进行检验。选用了 114 个强降水日的 175 个站点逐 3h 降水,以 ECWFM 模式 20 时起报的 12~36h 时效逐 3h 降水为例,按此规则共匹配出 8020 个单站降水过程,其中低涡切变、副高配合低槽、冷式切变、台风本体及外围四种天气型样本数分别为 4029、1588、1122 和 1281 个,保证了充足的统计样本。此外,值得注意的是,单站降水时间的预报准确性显著依赖于降水空间落区的预报精度,空间落区偏差会直接影响时间预报的准确性。本研究未对空间偏差进行系统性订正,未来需进一步探讨空间偏差的订正方法,以提升降水时空预报检验的可靠性。

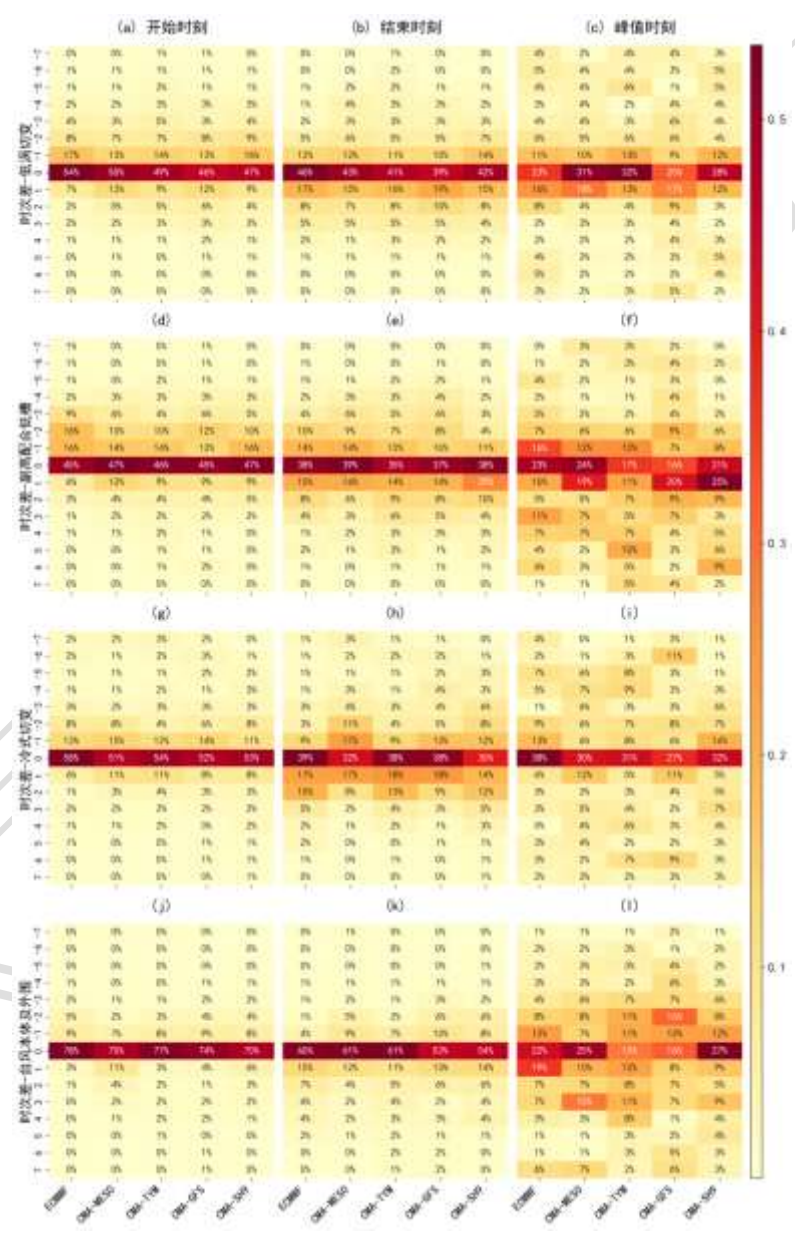
图 8 分别展示了四类天气型预报的降水开始、结束及峰值时间与观测的对比。图中纵坐标为预报时间与实况时间的差值,零代表预报与实况判定时间没有偏差,预报和观测的降水开始(结束、峰值)时间相同,定义为预报“准确”;负值代表预报开始(结束、峰值)时间早于观测的开始(结束、峰值)时间,定义为预报“偏早”;正值则为“偏晚”。逐 3h 降水预报在 24h 内最多相差 7 个时次。

对于降水开始时间预报,四种天气型的占比由大到小均为准确、偏早、偏晚,说明数值模式对降水开始时间的预报准确率较好。其中台风型准确率最高,准确占比在 70%~80%,其他三类天气型约有 33%的预报提前,20%的比例预报偏晚,其中副高配合低槽型下 ECMWF 模式偏早最为明显。党英娜(2018)研究指出,对于强降水开始时间的预报,ECMWF 模式和 CMA-SH9 模式均表现为偏晚为主,与本文结果不一致,这可能由于研究范围及大气环流分型类别有所不同,且两项研究时间相距较长,数值模式版本升级也会造成影响。

297
298
299
300
301
302
303
304
305
306

对于降水结束时间预报，四种天气型整体占比由大到小为准确、偏晚、偏早，，但相对于开始时间预报准确率有所下降，尤其是冷式切变天气型下 ECMWF、CMA-SH9、CMA-TYM 模式以及副高配合低槽天气型下的 CMA-SH9 模式和 CMA-TYM 模式均预报结束时间偏晚占比最多，但冷式切变天气型下 CMA-MESO 模式预报显著偏早。其他几种天气型下，尽管准确占比最高，但预报偏晚占比大于偏早可能会导致模式预报总降水时间进一步延长。

对于降水峰值时间预报，预报难度明显大于降水开始和结束时间的预报，准确占比基本低于偏早和偏晚的比例，对于副高配合低槽天气型各家模式预报的峰值时刻偏晚占比最高，而冷式切变天气型下均为偏早占比最高。台风本体与外围型型的降水开始时间和结束时间的预报准确率最高，但峰值时间预报难度较大，这可能时由于台风强降水时段比较平均（图略），一定程度上增加了峰值时间的预报难度。



注：填色代表相应数据的比例值。颜色越深表示比例值越高，颜色越浅表示比例值越低。

图 8 预报与观测的降水开始、结束和峰值时间的时次差占比

307
308
309

(a) 低涡切变型, (b) 副高配合低槽型, (c) 冷式切变型, (d) 台风本体及外围型

($a_1 \sim d_1$) 开始时间, ($a_2 \sim d_2$) 结束时间, ($a_3 \sim d_3$) 峰值时间

Fig.8 Proportion of the time difference between the forecast and the observed start, end and peak times of precipitation

(a) low-vortex shear type, (b) subtropical high with low trough type, (c) cold shear type, (d) typhoon body and periphery type

($a_1 - d_1$) start time, ($a_2 - d_2$) end time, ($a_3 - d_3$) peak time

4 结论和讨论

针对 2022 年 9 月至 2024 年 9 月长三角地区的强降水事件, 评估了五种业务常用数值预报模式在低涡切变、副高配合低槽、冷式切变和台风本体及外围四种主要天气形势下对强降水事件的预报性能, 得到如下结论:

(1) 在常规评分指标上, 对于 24h 降水预报, 小雨预报中所有模式均存在空报率偏高的问题, 弱降水存在明显的泛预报现象; 而在暴雨以上量级的预报中, 整体命中率下降, 反映出强降水过程的预报难度较大。在精细化 3h 降水预报中, 针对弱降水量级, 四类天气型下均以 CMA-MESO 模式表现最优; 在 20 mm 以上的强降水预报中, 冷式切变和低涡切变型相较于副高配合低槽和台风本体及外围型检验评分更低, 强降水过程更难以捕捉, 预报性能更弱。

(2) 从基于 MODE 方法的空间落区检验来看, 在南北方向上, 除 CMA-SH9 模式外, 低涡切变型和副高配合低槽型下其余几种模式普遍系统性偏北, 而台风本体及外围天气型下则系统性偏南; 冷式切变型下 ECMWF 模式和 CMA-TYM 模式系统性偏北, CMA-SH9 模式系统性偏南。在东西方向上, 几家模式在台风本体及外围天气型下均存在偏东的系统性误差, 而其余几种天气型下除 CMA-SH9 模式外均普遍存在偏西的系统性误差。预报业务中在参考数值预报产品的强降水落区位置时可适当进行相应的系统性调整。

(3) 降水落区预报面积检验来看, 中尺度模式在四类天气型下普遍存在强降水预报面积偏大的系统性偏差; CMA-GFS 模式则均有系统性偏小的特征; ECMWF 模式在低涡切变和副高配合低槽两类天气型下预报面积偏小, 在冷式切变型下偏大。

(4) 从 MODE 方法识别的最大目标的最大降水强度预报检验结果看, 在台风本体及外围天气型下所有模式对最大降水强度预报均偏弱; ECMWF 模式和 CMA-GFS 模式在四种天气型下对最大降水强度的预报均倾向于低估; CMA-SH9 模式则在除台风型以外的其他三种天气型下明显高估极端降水; CMA-MESO 模式除在低涡切变型下高估较大以外, 在副高配合低槽和冷式切变天气型下预报较为准确。

(5) 从时间特征检验上看, 降水开始时间的预报准确率最高, 峰值时间的准确率最低。对于开始时间和结束时间, 虽然准确的占比最高, 但开始时间预报偏早占比高于偏晚, 结束时间预报则相反。峰值时间的预报难度最高, 四种天气型均较难于合理预报出峰值时间。

本研究对常用业务模式在不同环流型下的强降水预报能力展开了多维度评估, 涵盖强度、空间与时间等方面, 着力探寻模式预报偏差的系统性特征, 旨在为预报订正工作夯实基础, 提升强降水预报准确率。在主观订正方面, 可结合不同天气型在本研究中择取相关信息, 作为预报决策的有力参考, 进而实施系统性误差调适; 在客观预报方法改进方面, 可将系统性误差融入数值模式释用及人工智能预报方法之中, 针对各异的天气型设定差异化的误差权重, 建立不同的释用订正方案, 以此提高客观方法的预报准确率。

然而,受制于研究方法与数据资料的局限性,本研究的评估结果尚无法全然精准地呈现各业务数值模式针对长三角地区强降水的预报成效,亦未对预报偏差产生的根源展开深入探究。前人研究成果表明,此类预报偏差的产生或许与数值模式在局地热力环流、边界层动力条件、地形高度、低空急流以及超低空急流等要素的刻画不够充分存在关联(孙继松和杨波,2008;宇如聪等,2021;钟琦等,2022),后续工作仍需对此进行更为深入的研究。

参考文献

- 卜文惠,陈昊明,李普曦,2022. ECMWF 模式对 2020 年夏季江淮流域降水的预报偏差分析[J]. 暴雨灾害, 41(3): 315-323. Bu W H, Chen H M, Li P X, 2022. Analysis of the deviation of precipitation forecast of ECMWF model over the Yangtze-Huaihe River Valley in summer 2020[J]. Torr Rain Dis, 41(3): 315-323 (in Chinese).
- 卜文惠,陈昊明,李普曦,2023. 江淮流域大范围雨带降水的精细化特征研究[J]. 气象学报, 81(3): 361-374. Bu W H, Chen H M, Li P X, 2023. Refined characteristics of precipitation and circulation in large-scale rainbelts derived from CMPAS and ERA5 over the Yangtze-Huaihe river valley[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 361-374 (in Chinese).
- 陈亮,段建平,马柱国,2018. 大气环流形势客观分型及其与中国降水的联系[J]. 地球科学进展, 33(4): 396-403. Chen L, Duan J P, Ma Z G, 2018. Objective analysis on large-scale circulation type and its links to precipitation over China[J]. Adv Earth Sci, 33(4): 396-403 (in Chinese).
- 陈龙,陈静静,胡媚,等,2024. 华南快速循环同化模式在湖南不同环流型下的小时降水预报性能检验[J]. 气象, 50(4): 434-448. Chen L, Chen J J, Hu M, et al, 2024. Evaluation of hourly quantitative precipitation forecast of the rapid updating cycle assimilation and forecasting system in South China based on circulation classification in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 50(4): 434-448 (in Chinese).
- 陈龙光,陈斌,赵瑞瑜,等,2025. 基于天气分型的四川盆地西侧极端强降水事件环流异常配置与演变特征[J]. 大气科学, 49(2): 491-506. Chen L G, Chen B, Zhao R Y, et al, 2025. Configuration of large-scale circulation anomalies and their evolution for extreme heavy-precipitation events in the west of the Sichuan Basin based on classified weather patterns[J]. Chin J Atmos Sci, 49(2): 491-506 (in Chinese).
- 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]. Adv Meteor Sci Technol, 11(3): 155-164 (in Chinese).
- 陈昊明,李建,李普曦,等,2025. 中国数值模式评估方法的研究进展综述[J]. 气象学报, 83(3): 566-581. Chen H M, Li J, Li P X, et al, 2025. A review of research progress on numerical model verification and evaluation in China[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 566-581 (in Chinese).
- 党英娜,2018. ECMWF 和华东 WARMS 模式对山东半岛汛期暴雨的预报能力检验[J]. 海洋气象学报, 38(4): 136-144. Dang Y N, 2018. Verification of the rainstorm forecast by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season in Shandong Peninsula[J]. J Marine Meteor, 38(4): 136-144 (in Chinese).
- 傅新妹,顾问,彭杰,等,2020. 2020 年梅雨期上海一次强降水过程垂直结构的综合观测分析[J]. 暴雨灾害, 39(6): 658-665. Fu X S, Gu W, Peng J, et al, 2020. Observational analysis of vertical structure of a heavy precipitation event in Shanghai during Meiyu period in 2020[J]. Torr Rain Dis, 39(6): 658-665 (in Chinese).
- 高翠翠,陈浩伟,徐道生,等,2025. 基于 MODE 方法的 2022 年极端“龙舟水”模式降水预报偏差特征[J]. 气象, 51(5): 566-580. Gao C C, Chen H W, Xu D S, et al, 2025. Model forecast Biases for the extreme dragon-boat precipitation in 2022 based on the MODE method[J]. Meteor Mon, 51(5): 566-580 (in Chinese).
- 宫宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验特征[J]. 气象, 44(9): 1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast[J]. Meteor Mon, 44(9): 1148-1159 (in Chinese).
- 李海宏,吴吉东,王强,等,2021. 基于机器学习方法的上海市暴雨内涝灾情预测模型研究[J]. 自然灾害学报, 30(1): 191-200. Li H H, Wu J D, Wang Q, et al, 2021. A study on rainstorm waterlogging disaster prediction models in Shanghai based on machine learning[J]. J Nat Dis, 30(1): 191-200 (in Chinese).
- 李玉梅,李勋,冯文,等,2016. 秋季西沙非台风强降水天气形势分析[J]. 气象, 42(8): 934-943. Li Y M, Li X, Feng W, et al, 2016. Investigation of the synoptic situation associated with autumnal non-TC heavy precipitation in Xisha[J]. Meteor Mon, 42(8): 934-943 (in Chinese).
- 李玉梅,李勋,周方聪,2020. 海南岛冷空气降水天气形势差异分析[J]. 气象与环境学报, 36(1): 43-50. Li Y M, Li X, Zhou F C, 2020. Analysis of the background differences of precipitation influenced by cold air in Hainan island[J]. J Meteor Environ, 36(1): 43-50 (in Chinese).
- 梁钰,张亚春,董俊玲,等,2024. 一次江淮气旋引起的区域大暴雨可预报性分析及模式检验[J]. 河南科学, 42(11): 1644-1652. Liang Y, Zhang Y C, Dong J L, et al, 2024. Predictability analysis and model verification of a regional rainstorm caused by a Jianghuai Cyclone[J]. Henan Sci, 42(11): 1644-1652 (in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 39(6): 681-690 (in Chinese).
- 刘凑华,代刊,林建,等,2023. 天气预报全流程检验评估程序库的设计与实现[J]. 气象, 49(3): 351-364. Liu C H, Dai K, Lin J, et al, 2023. Design and implementation of whole process evaluation program library of weather forecast[J]. Meteor Mon, 49(3): 351-364 (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).
- 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]. Meteor Mon, 42(4): 389-397 (in Chinese).
- 漆梁波,朱佳蓉,徐秀芳,等,2015. 上海地区暴雨预报及分析手册[M]. 北京:气象出版社.

- 393 师春香, 潘畅, 谷军霞, 等, 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 77(4): 774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-
394 source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 774-783 (in Chinese).
- 395 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
396 torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteor Mon, 48(3): 357-371 (in Chinese).
- 397 孙继松, 杨波, 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 32(6): 1352-1364. Sun J S, Yang B, 2008. Meso- β scale torrential rain affected by
398 topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6): 1352-1364 (in Chinese).
- 399 孙素琴, 郑婧, 金米娜, 等, 2017. 基于多模式 2015 年江西省汛期区域性暴雨的检验[J]. 气象与环境学报, 33(2): 1-7. Sun S Q, Zheng J, Jin M N, et al, 2017.
400 Validation of forecasting regional rainstorms from multi-models over Jiangxi province during the flood season in 2015[J]. J Meteor Environ, 33(2): 1-7 (in Chinese).
- 401 王彬雁, 陈朝平, 丛芳, 等, 2020. MODE 方法在西南区域模式降水预报检验中的应用[J]. 高原山地气象研究, 40(2): 26-30. Wang B Y, Chen C P, Cong F, et al,
402 2020. The evaluation and analysis of high rain in SWC-WARMS based on MODE method[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 40(2): 26-30 (in Chinese).
- 403 王晓峰, 周荣卫, 2021. 全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J]. 气象, 47(10): 1193-1205. Wang X F, Zhou R W, 2021. Performance verification of
404 global precipitation forecast over Yalong River basin in flood season[J]. Meteor Mon, 47(10): 1193-1205 (in Chinese).
- 405 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
406 rainstorm by multiple numerical models[J]. Meteor Mon, 46(6): 753-764 (in Chinese)
- 407 吴俞, 李玉梅, 李勋, 冯箫, 姜小云, 2023. 海南岛暖季区域数值模式降水精细化预报检验[J]. 气象, 49(2): 235-248. WU Yu, LI Yumei, LI Xun, FENG Xiao, JIANG
408 Xiaoyun, 2023. Verification of Precipitation Refinement Forecast of Regional Numerical Models in the Warm Season of Hainan Island[J]. Meteor Mon, 49(2): 235-248.
- 409 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,
410 2020. Preliminary application of object-based time-domain verification method to Shanghai rapid updated cycling analysis and forecast system[J]. Desert Oasis Meteor, 14(5):
411 1-10 (in Chinese).
- 412 徐伟, 杨晓月, 徐菁, 等, 2019. 近 60 a 上海金山地区暴雨的气候变化特征及暴雨雨量风险评估研究[J]. 暴雨灾害, 38(2): 177-182. Xu W, Yang X Y, Xu J, et al,
413 2019. Study on climate change characteristics of rainstorm and risk assessment of rainstorm rainfall in Jinshan of Shanghai in recent 60 years[J]. Torr Rain Dis, 38(2): 177-
414 182 (in Chinese).
- 415 徐之骁, 漆梁波, 王元, 2022. 上海地区三类主要暴雨天气的云微物理和边界层敏感性模拟研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 58(5): 766-779. Xu Z X, Qi L B,
416 Wang Y, 2022. Numerical study of sensitivities of three major types of heavy rainfall in the Shanghai region to microphysical and planetary boundary layer processes[J]. J
417 Nanjing Univ (Nat Sci), 58(5): 766-779 (in Chinese).
- 418 杨浩, 崔春光, 王晓芳, 等, 2019. 气候变暖背景下雅鲁藏布江流域降水变化研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(6): 565-575. Yang H, Cui C G, Wang X F, et al, 2019.
419 Research progresses of precipitation variation over the Yarlung Zangbo River basin under global climate warming[J]. Torr Rain Dis, 38(6): 565-575 (in Chinese).
- 420 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
421 analysis of MODE method to the rainfall forecast test[J]. Meteor Mon, 37(12): 1498-1503 (in Chinese).
- 422 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等, 2014. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 72(5): 948-968. Yu R C, Li J, Chen H M, et al, 2014. Progress in studies of the
423 precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 948-968 (in Chinese).
- 424 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等, 2021. 中国降水日变化[M]. 北京: 科学出版社.
- 425 赵滨, 张博, 2018. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J]. 暴雨灾害, 37(1): 1-7. Zhao B, Zhang B, 2018. Application of neighborhood spatial verification
426 method on precipitation evaluation[J]. Torr Rain Dis, 37(1): 1-7 (in Chinese).
- 427 赵丽, 韩雪云, 杨青, 2016. 近 50a 西北干旱区极端降水的时空变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 10(1): 19-26. Zhao L, Han X Y, Yang Q, 2016. Spatial and temporal
428 variability of the extreme precipitation in the arid region of Northwest China during recent 50 years[J]. Desert Oasis Meteor, 10(1): 19-26 (in Chinese).
- 429 郑小华, 娄盼星, 刘环, 等, 2019. 陕西极端降水时空变化特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(4): 9-16. Zheng X H, Lou P X, Liu H, et al, 2019. Spatial and temporal
430 variability of extreme precipitation in the Shaanxi Province during 1961-2011[J]. Desert Oasis Meteor, 13(4): 9-16 (in Chinese).
- 431 郑婧, 许爱华, 孙素琴, 等, 2018. 高空西北气流下特大暴雨的预报误差分析及思考[J]. 气象, 44(1): 93-106. Zheng J, Xu A H, Sun S Q, et al, 2018. Forecast error
432 analysis of extremely heavy rain under high-level northwest flow[J]. Meteor Mon, 44(1): 93-106 (in Chinese).
- 433 钟琦, 孙卓, 陈昊明, 等, 2022. 京津冀强降水日变化的多模式预报偏差及成因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 52(9): 1831-184. Zhong Q, Sun Z, Chen H M, et al,
434 2022. Multi model forecast Biases of the diurnal variations of intense rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Sci China Earth Sci, 65(8): 1490-1509 (in Chinese).
- 435 Davis C, Brown B, Bullock R, 2006. Objected-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems[J]. Mon Wea Rev, 134(7):
436 1785-1795.
- 437 Davis C A, Brown B G, Bullock R, et al, 2009. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to numerical forecasts from the 2005 NSSL/SPC
438 spring program[J]. Wea Forecasting, 24(5): 1252-1267.
- 439 Feng X, Wu Y, Yang W, et al, 2023. Zoning evaluation of hourly precipitation in high-resolution regional numerical models over Hainan Island[J]. J Trop Meteor, 29(4):
440 460-472.
- 441 Ian T, David B, 2012. Forecast Verification: A Practitioner's Guide In Atmospheric Science[M]. Hoboken: John Wiley & Sons.