

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).

基于 MODE 方法的 2022 年极端“龙舟水”模式 降水预报偏差特征*

高翠翠¹ 陈浩伟¹ 徐道生² 林晓霞² 张邦林³

1 广东省韶关市气象局,韶关 512028

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州 510640

3 国防科技大学气象海洋学院,长沙 410000

提 要: 2022 年 5 月 21 日至 6 月 21 日期间,华南地区发生了近 10 年来最强的“龙舟水”。此次“龙舟水”极端性强、累计降水量大、强降水过程频繁,造成了重大经济损失。选取华南地区比较常用的 TRAMS 和 ECMWF 两种业务模式预报产品,将“龙舟水”期间暴雨过程划分为锋面和暖区暴雨两类,并分别进行检验评估,旨在了解极端“龙舟水”背景下两种模式对于锋面和暖区暴雨的预报偏差特征。和传统点对点方法相比,MODE 方法能够有效避免模式中由于降水位置偏差导致的高空报率现象。进一步对 MODE 方法中暴雨对象的数量、位置、面积和强度评估结果进行分析,发现:高分辨率的 TRAMS 模式降水预报产品比 ECMWF 模式具有更好的暴雨对象识别和匹配能力;TRAMS 模式对暖区暴雨的位置预报大多偏东,而 ECMWF 模式的锋面暴雨预报则基本偏北,上述两种降水位置偏差特征与不同模式对低空偏南气流的预报误差密切相关;TRAMS 模式对锋面暴雨面积的预报与观测较为接近,对暖区暴雨面积的预报则偏大;ECMWF 模式对锋面暴雨和暖区暴雨面积的预报均偏小;TRAMS 模式对于暴雨强度和极值的预报比 ECMWF 模式更接近实况,但是对极端强降水仍然存在低估的现象。研究结果可为预报员了解不同业务模式对于“龙舟水”的预报误差特征提供新经验,对于进一步开展 TRAMS 模式的误差来源诊断和模式改进也有参考价值。

关键词: “龙舟水”,锋面暴雨,暖区暴雨,检验评估,模式预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.011501

Model Forecast Biases for the Extreme Dragon-Boat Precipitation in 2022 Based on the MODE Method

GAO Cuicui¹ CHEN Haowei¹ XU Daosheng² LIN Xiaoxia² ZHANG Banglin³

1 Shaoguan Meteorological Office of Guangdong Province, Shaoguan 512028

2 Guangdong Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction/Guangzhou Institute of
Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510640

3 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000

Abstract: From 21 May to 21 June 2022, the heaviest dragon-boat precipitation process in the last decade occurred in South China. This extreme precipitation process, featured with strong extremity, large accumulated rainfall and frequent occurrence of severe rainfall, caused significant economic losses. In this paper,

* 国家自然科学基金项目(U2142213、42075014)、广东省气象局科研项目(GRMC2022M24、GRMC2023M48、GRMC2023M02)和中国气象局城市气象重点开放实验室开放基金(LUM-2023-07)共同资助

2024 年 5 月 31 日收稿; 2025 年 1 月 13 日收修定稿

第一作者:高翠翠,主要从事短期天气预报工作. E-mail:gaocc2016@foxmail.com

通讯作者:徐道生,主要从事区域数值天气预报模式技术研发. E-mail:dsxu@gd121.cn

the forecast products from two operational models, TRAMS and ECMWF, which are commonly used in South China, are selected to divide the torrential rain processes during dragon-boat precipitation into front-zone torrential rain and warm-sector torrential rain. The results are verified and evaluated, so as to understand the characteristics of the two models' biases for the front-zone torrential rain and warm-sector torrential rain under the background of the extreme dragon-boat precipitation. Compared with the traditional point-to-point method, the MODE method can effectively avoid the phenomenon of high false alarm ratio caused by precipitation position deviation in the model. Further analysis of the number, position, precipitation area and intensity of torrential rain objects based on MODE method shows that the high-resolution model TRAMS has better ability to identify and match torrential rain objects than the global model ECMWF. The location of warm-sector torrential rain predicted by TRAMS is mostly biased to the east, while the front-zone torrential rain predicted by ECMWF is basically biased to the north. The deviations in precipitation position in the above two are closely related to the forecast errors of southerly airflow at low altitude by different models. The area prediction of the front-zone torrential rain by TRAMS is close to the observation, but the forecast area of warm-sector torrential rain is larger. The forecast areas by ECMWF for both front-zone torrential rain and warm-sector torrential rain are smaller. The prediction of torrential rain intensity and extreme value by TRAMS is closer to the observation than that by ECMWF, but it still underestimates the extreme precipitation. This study can provide new experience for forecasters to understand the prediction biases of different operational models for dragon-boat precipitation process. It also has some reference values for model developers to further carry out research on error source diagnosis and technical improvement of TRAMS model.

Key words: dragon-boat precipitation, front-zone torrential rain, warm-sector torrential rain, verification and evaluation, numerical model

引 言

5月下旬到6月中旬,正值端午节赛龙舟之时,是华南前汛期降水最集中的时段,经常会出现持续性大范围的强降水过程,容易引发严重的洪涝灾害,人们将这种类型的降水称为“龙舟水”(钱光明,2008)。2022年华南“龙舟水”期间(5月21日至6月21日),降水极端性强、累计降水量大、强降水过程频繁,是近10年来最强和1951年以来第二强的“龙舟水”。2022年极端“龙舟水”具有“北多南少”的特点,在广西北部、广东东北部和福建南部地区的累计降水量达到600 mm以上,与常年同期相比偏多5成至近3倍(伍红雨等,2024)。“龙舟水”期间华南地区出现连续强降水过程,逐日平均降水量普遍达到10 mm以上,导致“龙舟水”后期珠江发生流域性洪水,造成广东韶关、清远、河源、梅州等14个市、61个县受灾,受灾人口达156.5万人,直接经济损失为73.42亿元(王丹丹,2022)。因此,提升极端“龙舟水”的业务预报能力对于防灾减灾意义重大。

数值预报模式产品已经成为“龙舟水”降水预报的主要参考依据,然而目前不同模式的业务预报性能仍然存在较大的不确定性。例如,华南区域中尺度模式 TRAMS 和欧洲中期天气预报中心全球模式 ECMWF 对于本次极端“龙舟水”的累计降水量预报存在着非常明显的差异,前者普遍达到 800 mm 以上,而后者基本不超过 600 mm,导致模式预报不确定性的原因可能与华南前汛期同时存在锋面和暖区这两种可预报性存在明显差异的天气系统有关(陈涛等,2020;吴乃庚等,2020;Wu et al,2020;刘文君等,2023)。对“龙舟水”的模式预报能力进行检验和评估,可以帮助预报员更好地了解不同业务模式产品的偏差特征,从而在模式预报出现较大分歧时做出更加可靠的降水预报估计(唐思瑜等,2022;胡榕等,2024)。

传统数值预报评估中通常在点对点对比的基础上定义命中率(POD)、空报率(FAR)、预报偏差(Bias)、风险评分(TS评分)以及公平技巧评分(ETS评分)等一系列指数来判别模式的预报表现(Schaefer,1990;Brill and Mesinger,2009)。然而,

随着计算机性能的不断提高,国际上各个数值预报中心的区域模式分辨率已经达到 5 km 或更高。例如在华南区域气象中心业务运行的 TRAMS 模式分辨率已经达到 3 km(徐道生等,2016)。在此分辨率下,模式基本能够显式地模拟对流尺度天气系统,这可以有效减少低分辨率模式中对流参数化造成的预报不确定性,但是中小尺度系统模式预报误差也可以通过非线性相互作用快速增长,并导致对流系统和降水位置预报出现明显偏差(马杰等,2021;苏翔等,2021;庄潇然等,2022)。Mass et al(2002)、Casati et al(2008)和 Ebert et al(2013)研究指出,对于千米尺度分辨率模式来说,当出现降水位置预报偏差时,传统的点对点评估方法可能出现“双重惩罚”的现象并导致客观检验结果与预报员对模式的主观评判不尽相同。

为解决上述问题,人们已经针对高分辨率模式降水预报评估的需求提出了许多基于降水空间结构特征的邻域评估方法(潘留杰等,2014;2024;陈昊明等,2021)。目前应用较为广泛的空间邻域检验方法是 Roberts and Lean(2008)提出的分数技巧评分(FSS),该方法通过设置不同的邻域半径计算 FSS 值,可有效避免传统点对点评估方法面临的“双重惩罚”问题。FSS 方法近年来已经被应用于 TRAMS 模式降水预报的评估中(林晓霞等,2021;Zhang et al,2023)。另外一类比较主流的高分辨率降水评估方法是基于对象的诊断方法,其中比较有代表性的是由美国国家大气研究中心(NCAR)研发的 MODE 方法(Davis et al,2006a;2006b;2009;Marzban and Sandgathe,2006;Gilleland et al,2008)。其方法的主要思路是通过识别和追踪降水对象,然后根据这些对象来计算 POD、FAR、漏报率(MR)和 ETS 评分等指数,从而避免降水位置偏差导致的“双重惩罚”。此外,MODE 方法还能提供中小尺度对流系统降水特性(位置、面积等)的预报偏差信息,这有助于使用者更加全面地了解模式预报性能。苏翔和康志明(2020)利用 MODE 方法对超强台风利奇马降水预报进行评估时发现,ECMWF 模式对于降水位置预报偏差较小且主要表现为偏北,而 GRAPES-MESO(现为 CMA-MESO)的位置预报偏差相对较大且主要表现为偏南,这说明不同模式对于降水位置偏差的可预报性存在差异。苏翔等(2021)针对 ECMWF 模式在 2020 年我国江淮流域超长梅雨期暴雨雨带预报中的不确定性,选取

10 个典型的狭长暴雨雨带,基于 MODE 方法对雨带东西段的位置预报偏差、稳定性以及偏差的连续性等进行分析。李晓兰和符娇兰(2021)对 ECMWF 模式的 2016—2018 年华南前汛期降水预报进行了检验评估,发现 87% 的强降水过程都存在明显位置预报偏差,且模式预报的降水面积较实况偏大的个例较多。刘静等(2022)基于目标对象检验法和邻域法,对辽宁主汛期降水中不同模式降水预报的落区形态和质心位置偏差进行了检验,从不同角度挖掘区域模式的附加信息,为预报决策提供了一定的参考。吴俞等(2021;2023)利用面向降水过程的时空检验方法评估了海南岛暖季非台风降水的模式预报效果,发现相对于传统的点对点检验评估方法,MODE 方法具有捕捉模式预报偏差特征的优势。

从上述研究可以看出,MODE 方法等基于对象的评估方法已经成为了解高分辨率模式降水预报偏差特征的有效工具,但是目前这类方法在华南“龙舟水”降水预报检验中的应用仍然比较少见。为此,本文拟基于 MODE 方法开展 TRAMS 和 ECMWF 模式对 2022 年极端“龙舟水”期间降水预报的检验评估,目的是增加不同模式对锋面暴雨和暖区暴雨的总体偏差特征的认识,以便在业务应用中提升模式预报的订正能力,同时为华南区域模式的诊断分析和技术改进提供参考。

1 资料和方法

1.1 模式和观测资料

本文检验的对象包括 TRAMS 和 ECMWF 模式。TRAMS 中尺度区域模式是由华南区域气象中心发展并业务运行的数值预报系统,范围为(16.6°~42.88°N、93.64°~126.34°E),水平分辨率为 0.03°(徐道生等,2016)。ECMWF 模式是由欧洲中期天气预报中心研发并实时业务运行的高分辨率全球数值预报模式,水平分辨率为 0.09°(ECMWF,2019)。本文检验范围为华南地区(18°~27°N、105°~120°E)。两种模式产品的起报时间为每天 08 时和 20 时(北京时,下同),TRAMS 和 ECMWF 模式最长预报时效分别为 96 h 和 240 h,为方便两者的预报效果进行对比,检验的预报时效选取 24~96 h。检验目标为 2022 年“龙舟水”期间(5 月 21 日至 6 月 21 日)的暴雨及以上量级降水,其中暴雨日定义

为华南地区 5 个相邻站点 08 时至次日 08 时累计降水量达到暴雨(50 mm)及以上量级,影响天气系统基本相同的暴雨日被认定为同一个降水过程。

本文同时采用传统点对点方法和 MODE 方法进行降水评估。在传统点对点方法评估中采用的降水实况资料为华南地区的 10 578 个自动气象站观测资料,而在 MODE 空间检验时所用的降水资料为同期相应范围内的水平分辨率为 0.05°的地面-卫星-雷达三源融合 24 h 降水分析产品(CMPA;潘旻等,2015)。

1.2 检验方法

定义 ETS 评分、POD、FAR 和 MR 四个评分指标检验模式降水预报效果:

$$ETS = \frac{a - a_{\text{ref}}}{a + b + c - a_{\text{ref}}} \quad (1)$$

$$a_{\text{ref}} = \frac{(a + c)(a + b)}{a + b + c + d} \quad (2)$$

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (4)$$

$$MR = \frac{c}{a + c} \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为某一检验时段内统计暴雨的命中站数、空报站数和漏报站数。传统的点对点评估方法采用邻近点匹配法(WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification, 2008)对观测与实况进行匹配,而 MODE 方法则是先对预报场和观测场的降水对象进行识别和匹配。除了提供 ETS 评分、POD、FAR 和 MR 等传统降水评分指标外,MODE 方法还可以提供模式对检验对象的空间位置、面积、强度等的预报偏差信息。

MODE 方法中的对象识别过程实际上是一个聚类分析的过程。首先通过给定的卷积半径和降水阈值对需要评估的要素场进行卷积和要素场的卷积平滑,卷积平滑可以过滤掉较弱的降水对象,同时使降水区变得更加连续。然后将平滑后观测和预报场中降水量小于设定阈值的格点设置为 0,将每个格点作为一个初始对象,并根据邻近度进行多次对象的合并,直至所有对象之间的邻近度都小于设定阈值,所剩对象即为算法识别出的降水对象(刘湊华和牛若芸,2013)。在完成观测场和预报场的对象识别之后,将观测和预报的对象进行匹配。计算识别出

的单个目标物的面积、质心、强度百分位数等属性,对预报和观测对象的各个属性进行比较,再通过模糊逻辑算法计算两个对象的相似度,相似度达标的对象匹配成功。对于匹配成功的预报和观测强降水雨带对象,可以计算位置误差、面积误差、强度偏差等相关信息,而对于未匹配成功或空报、漏报的统计,也是重要的预报参考信息。

2 2022 年“龙舟水”过程的降水类型划分

2022 年“龙舟水”期间广东共出现 6 次暴雨过程。考虑到数值模式对于锋面暴雨和暖区暴雨的预报性能存在较大差异(陈涛等,2020;吴乃庚等,2020),本文将这两种类型的降水进行分类评估,以便更加明确地了解 ECMWF 和 TRAMS 模式对于“龙舟水”期间不同类型暴雨预报性能的差异。分类方法如下:由冷暖空气对峙形成的锋面和切变线造成的暴雨过程划分为锋面暴雨,发生在锋前的暖区或者无锋面和切变的西南气流里的暴雨过程则划分为暖区暴雨。根据上述分类标准,本次“龙舟水”出现了 4 次锋面暴雨和 2 次暖区暴雨过程(表 1)。从图 1 可以看出,两个数值模式都能报出南岭附近的锋面雨带,其中 TRAMS 模式对降水量级的预报明显优于 ECMWF 模式。对于暖区暴雨,TRAMS 模式能够预报出粤东沿海的暖区暴雨,但是漏报了粤西沿海的暖区暴雨,而 ECMWF 模式则完全漏报了粤东和粤西沿海的暖区暴雨。

表 1 2022 年“龙舟水”期间广东 6 次暴雨过程分类
Table 1 Classification of six torrential rain events in Guangdong during the dragon-boat precipitation in 2022

类型	强降水过程	总天数/d
锋面暴雨	5月26—27日	11
	6月5—7日	
	6月8—9日	
	6月12—15日	
暖区暴雨	6月10—11日	8
	6月16—21日	

图 2 是每次暴雨过程对应的低空风场。第一次暴雨过程出现在 5 月 26—27 日,26 日 20 时冷暖气团在粤北和广西中北部形成低空切变线,27 日西南季风加强,切变有所北推,受其影响,粤北和广西中北部出现暴雨、局部大暴雨(图 2a)。6 月 5—7 日对应着冷暖气流交汇形成切变线,并配合 500 hPa 高

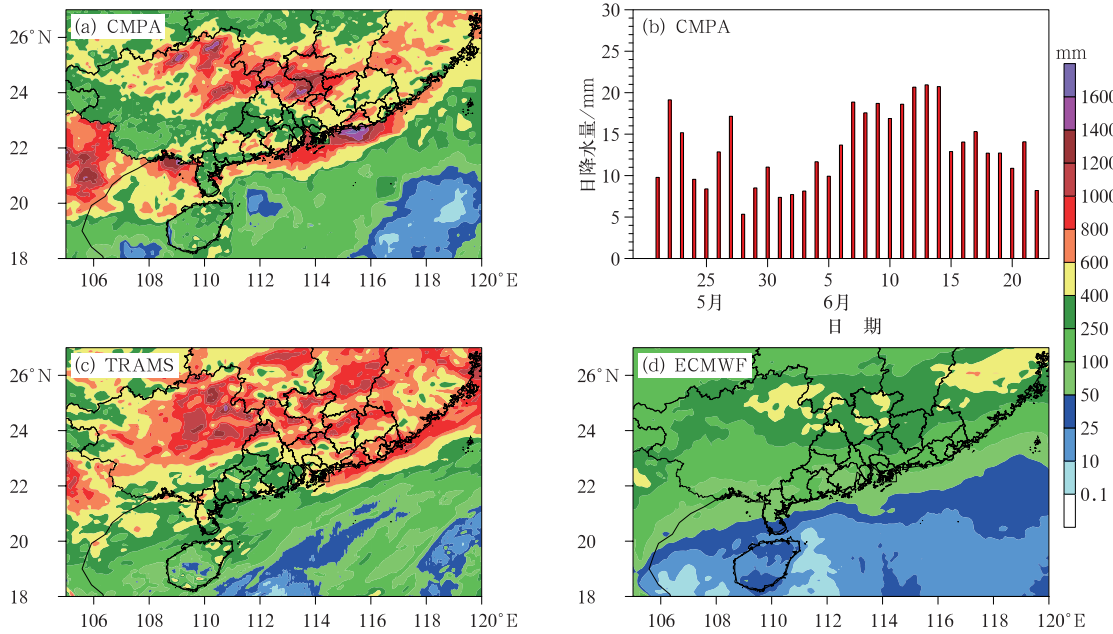
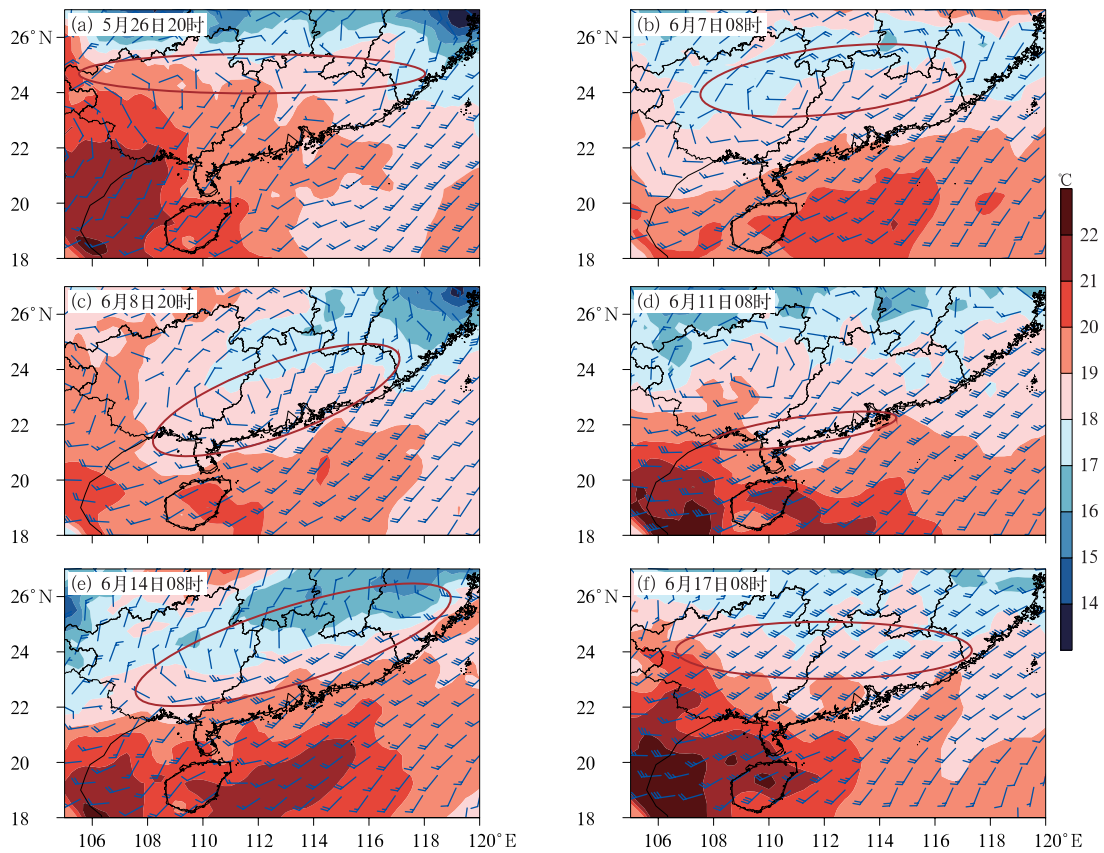


图 1 2022 年 5 月 21 日至 6 月 21 日华南“龙舟水”期间(a,c,d)累计降水量和(b)逐日降水量
(a,b)CMPA,(c)TRAMS 模式预报,(d)ECMWF 模式预报
Fig. 1 (a) Observed accumulated precipitation, (b) observed daily precipitation; (c, d) accumulated precipitation of (c) TRAMS, (d) ECMWF during the dragon-boat precipitation in South China from 21 May to 21 June 2022



注:红色椭圆为降水落区。

图 2 2022 年“龙舟水”期间广东 6 次暴雨过程对应的 850 hPa 风场(风羽)和温度场(填色)
Fig. 2 The 850 hPa wind field (barb) and temperature (colored) in the six torrential rain processes during the dragon-boat precipitation in Guangdong in 2022

空槽东移,广东大部分地区出现暴雨(图 2b)。6 月 8—9 日随着季风气流的加强,华南地区的冷暖空气切变转变为低涡暖式切变,降水主要出现在暖切变附近及低涡移动方向的右前侧,在粤西到粤北南部和广东沿海地区出现暴雨到大暴雨(图 2c)。虽然这次降水发生在低涡切变的南侧,但是强降水落区主要出现在暖切变附近及其南侧 200 km 之内,将本次暴雨判为暖区暴雨不符合黄土松等(1986)定义。但是高守亭等(2018)提出比较广义的暖区暴雨定义,认为距离锋面 200 km 之内但不受冷空气影响的暴雨也可称为暖区暴雨。对 6 月 8—9 日暴雨过程进行进一步检查,发现强降水发生在低涡南压之后,并且雨带的移动与低涡的移动比较一致,这说明冷空气对本次降水过程有较大的影响,因此将本次过程定义为锋面暴雨类型。10—11 日西南季风加强过程中受海岸线、地形等因素引起的低空辐合,在粤西沿海地区产生暖区暴雨(图 2d)。12—15 日西南季风与冷空气交汇形成低空切变线,由于西南季风强度较强,使切变线在广东和广西上空摆动,相应地区出现持续性锋面暴雨过程(图 2e)。16—21 日随着西南季风的进一步加强,暖湿气流在粤北地形的辐合抬升影响下,在韶关、清远等地形成了持续性暖区暴雨过程,这是本次“龙舟水”的最强降水时段(图 2f)。

3 检验评估结果

3.1 传统点对点方法和 MODE 方法检验结果对比

如前文所述,基于对象的检验评分关注的是模式预报的对象与观测能否匹配,即模式能不能报出观测对象,而并不关心预报对象和观测对象点对点的重合程度,这可以避免传统点对点评估方法中降水位置预报偏差对于评估结果的影响。由于点对点方法“双重惩罚”现象和模式对于局地暴雨的预报效果都与模式分辨率密切相关,对于不同分辨率的降水预报产品,MODE 方法和传统点对点方法之间的差异程度可能会有所不同。下面分别对 9 km 分辨率的 ECMWF 模式和 3 km 分辨率的 TRAMS 模式降水产品检验评估结果进行对比,目的在于了解传统点对点方法和 MODE 方法在不同分辨率下的具体表现差异。

图 3 给出了 TRAMS 和 ECMWF 模式预报评

分随预报时效的变化。传统点对点方法下,TRAMS 模式对锋面暴雨和暖区暴雨的 ETS 评分均明显高于 ECMWF 模式(图 3a);图 3c 表明 TRAMS 模式对两类暴雨的 POD 明显高于 ECMWF 模式,但是 TRAMS 模式的 FAR 也高于 ECMWF 模式(图 3e);从 MR 可以看出,ECMWF 模式对两类暴雨的 MR 接近于 1,明显高于 TRAMS 模式(图 3g)。MODE 方法评估得到的 ETS 评分(图 3b)、POD(图 3d)和 MR(图 3h)也表明,TRAMS 模式的降水预报技巧明显高于 ECMWF,不同之处在于此时 TRAMS 模式的空报率明显低于 ECMWF 模式(图 3f);另外,MODE 方法评估得到的 ETS 评分和 POD 明显高于传统点对点评分,MR 明显低于传统点对点评分。

从式(1)~(5)可以看出,传统点对点评估方法中 ETS 评分、POD、FAR 和 MR 的计算结果主要取决于命中站数、空报站数和漏报站数,而 MODE 方法中则主要取决于命中对象数、空报对象数和漏报对象数。由于 TRAMS 模式分辨率(3 km)高于 ECMWF 模式(9 km),当出现降水位置偏差时,传统点对点评估方法一方面命中站数减少,一方面空报站数增加,最终导致图 3e 中 TRAMS 模式 FAR 明显高于 ECMWF 模式,即所谓的“双重惩罚”现象。MODE 方法采用降水对象的命中数和空报数计算 FAR,而 TRAMS 模式对暴雨的识别和匹配能力优于 ECMWF 模式(见 3.2 节),所以 MODE 方法中 TRAMS 模式的 FAR 会低于 ECMWF 模式。MODE 方法在计算 ETS 评分和 POD 时,重点关注预报对象与观测对象的匹配情况,以及空报和漏报情况,相比点对点评分,MODE 方法避免了“双重惩罚”的问题,命中对象的比例显著提高,同时漏报和空报对象的比例明显降低,因此 ETS 评分明显高于传统点对点评分。POD 的计算相比 ETS 评分减少了对空报对象的考量,因此 MODE 方法中 POD 相对于点对点评分的提高较 ETS 评分更加明显。MR 关注的重点是漏报对象和命中对象的情况,相比点对点评分,MODE 方法命中对象的比例显著提高,漏报比例降低,因此两个模式的 MR 均降低,但 ECMWF 模式 MR 降低幅度较小,这与 ECMWF 模式存在明显的漏报情况有关。

3.2 暴雨对象数量检验

MODE 方法通过对预报和观测的降水对象进

行识别和匹配,可以获取模式对暴雨对象数量方面的系统偏差信息,从而评判模式与实况的匹配度。图 4 给出了 TRAMS 和 ECMWF 模式不同时效预报场中识别的暴雨对象数量(图 4a, 4b)及其中与实况对象相匹配的数量(图 4c, 4d)。在锋面暴雨过程中,实况观测的暴雨对象一共有 25 个(图 4a 中黑色虚线),TRAMS 模式预报的暴雨对象数量总体略多于实况,而 ECMWF 模式在不同时效预报的对象数量只有 9~13 个,明显少于实况(图 4a)。从模式和

观测的匹配度来看,TRAMS 模式与实况匹配的对象数量多达 18~22 个,与实况(25 个)非常接近;而 ECMWF 模式与实况匹配的对象数量只有 3~6 个(图 4c),这说明 ECMWF 模式对于锋面暴雨的预报存在较严重的漏报情况。从图 4b 和 4d 可以看出,两种模式对于暖区暴雨对象数目的预报性能与锋面暴雨基本类似。

综上,不管是锋面暴雨还是暖区暴雨,ECMWF 模式表现为比较严重的漏报现象,而 TRAMS 模式

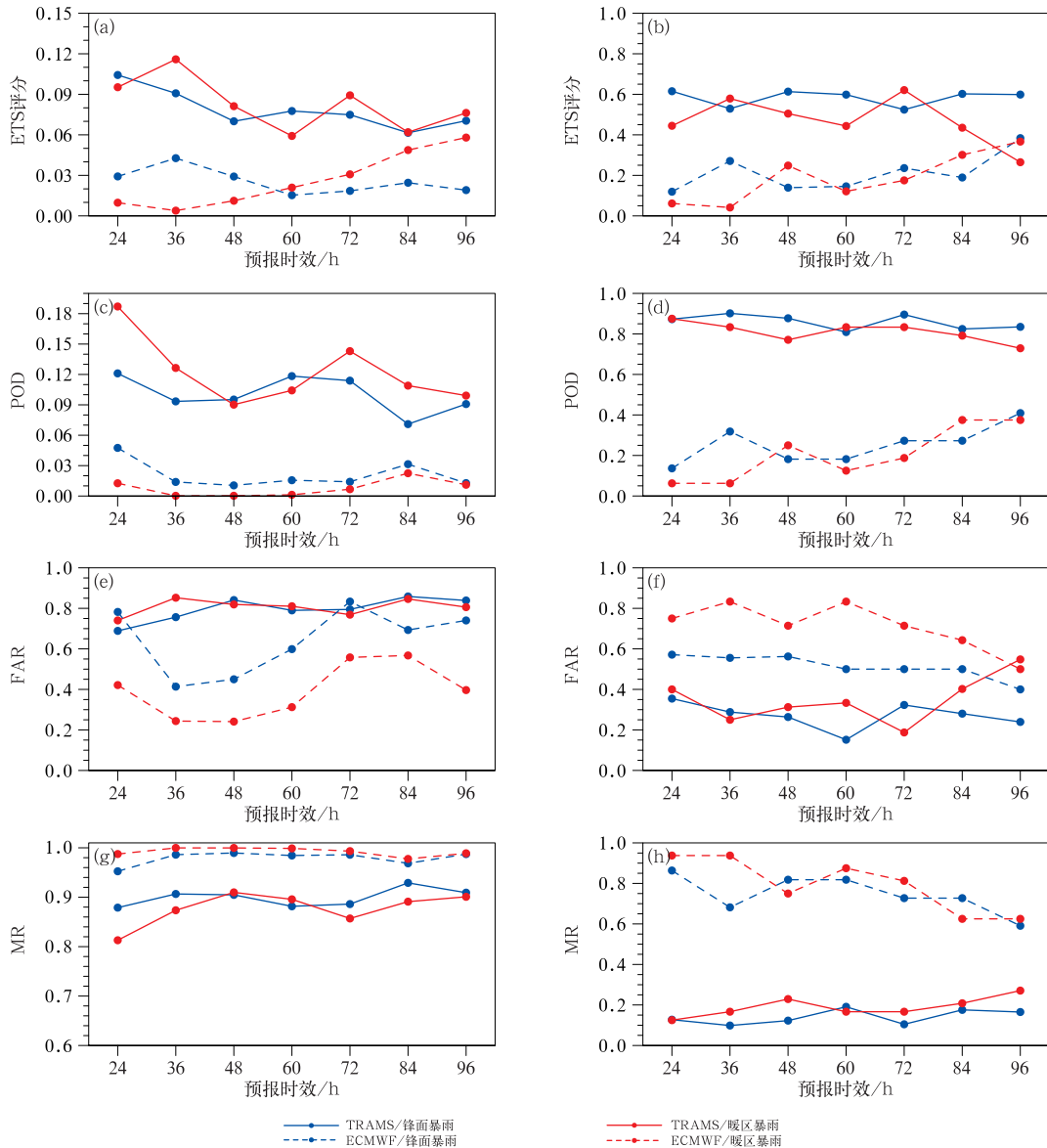
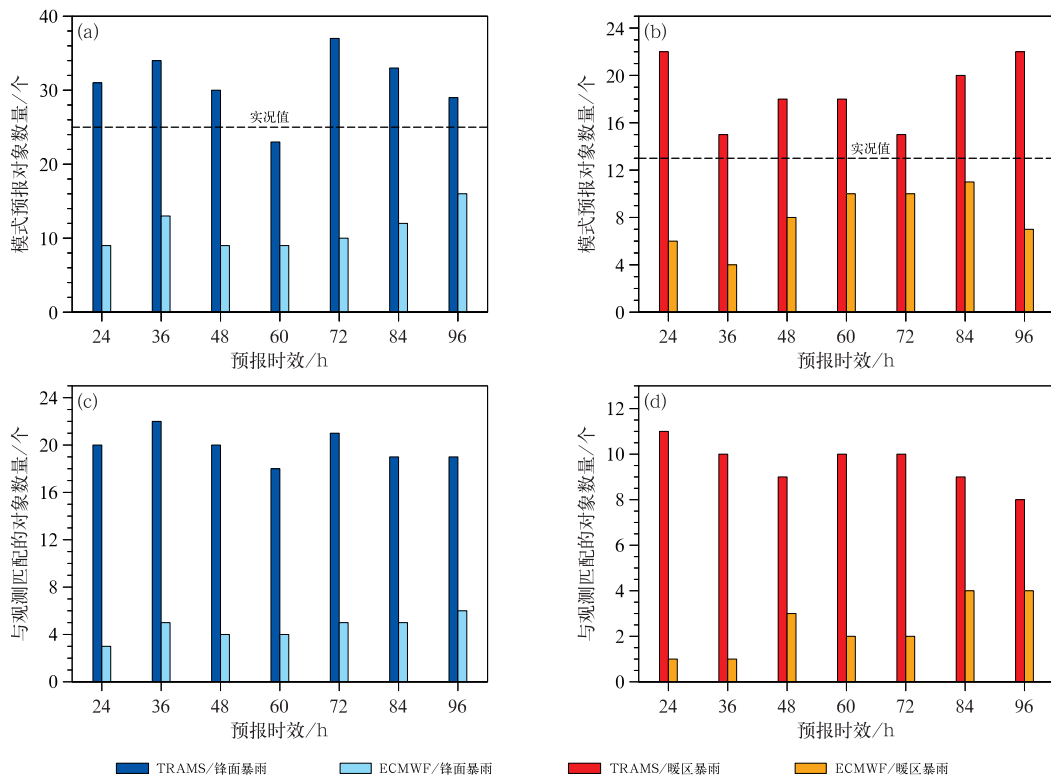


图 3 2022 年“龙舟水”期间 TRAMS 和 ECMWF 模式对锋面暴雨和暖区暴雨评分随预报时效的变化 (a, c, e, g)传统点对点方法, (b, d, f, h)MODE 方法

Fig. 3 The score variation of front-zone and warm-sector torrential rains forecasted by the TRAMS and ECMWF models with the forecast lead time during the dragon-boat precipitation in 2022 (a, c, e, g) traditional point-to-point method, (b, d, f, h) MODE method



注:图 a, b 中黑色虚线分别表示实际观测的锋面和暖区降水对象数量。

图 4 2022 年“龙舟水”期间(a, c)锋面暴雨和(b, d)暖区暴雨过程中 TRAMS、ECMWF 模式预报的 (a, b)降水对象数量,以及(c, d)与观测匹配的对象数量随预报时效的变化

Fig. 4 (a, b) The total object counts and (c, d) matched object counts in (a, c) front-zone and (b, d) warm-sector torrential rains with different forecast lead times by the TRAMS and ECMWF models during the dragon-boat precipitation in 2022

存在一定程度的空报,这可能与模式分辨率提高以后可以更加容易地描述华南前汛期局地强对流有关(林晓霞等,2021)。

3.3 位置偏差检验

位置偏差是降水预报偏差的一个重要方面,也是对流系统位置预报偏差的直接体现。从降水预报偏差特征的角度进行天气学分析,有助于进一步诊断模式对暴雨相关天气系统的预报偏差。

基于 3.2 节中观测与模式互相匹配的降水对象,图 5 给出了不同预报时效下两个模式对锋面暴雨和暖区暴雨降水预报中心位置偏差分布情况。TRAMS 模式的评估结果表明:预报时效为 24 h 的降水位置整体偏北,东西方向的偏差不超过 $\pm 4^\circ$,其中位置偏东的降水对象偏北程度更加明显(图 5a);当预报时效介于 36~60 h 时,东西方向的位置偏差幅度进一步增大至 $\pm 4^\circ$ (图 5b~5d);当预报时效进

一步延长至 72 h 以后时,降水位置在西侧的偏差基本限制在 2° 以内,而东侧的偏差可达到 4° (图 5e~5g)。总体而言,在 TRAMS 模式中暴雨位置预报均表现出总体性偏东,部分时次暖区暴雨的位置偏东特征比锋面暴雨更加明显(图 5c~5d)。唐思瑜等(2022)也基于 MODE 方法对本次“龙舟水”进行评估,同样发现 TRAMS 模式的暴雨位置预报容易偏东。ECMWF 模式(图 5h~5n)不同时效的降水预报均表现出偏北的现象(特别是锋面降水),并且 24~84 h 预报时效的降水都表现出“位置偏东时偏北程度更大”的现象,但是东西方向的偏差幅度相对较小,一般不超过 $\pm 2^\circ$ 。胡榕等(2024)也分析了 ECMWF 模式集合预报对“龙舟水”期间一次暴雨过程的预报偏差,同样发现该模式对于锋面雨带的位置预报存在偏北的现象。

下文分别针对 TRAMS 和 ECMWF 模式各选取一个代表性案例,主要从影响暴雨的关键性天气

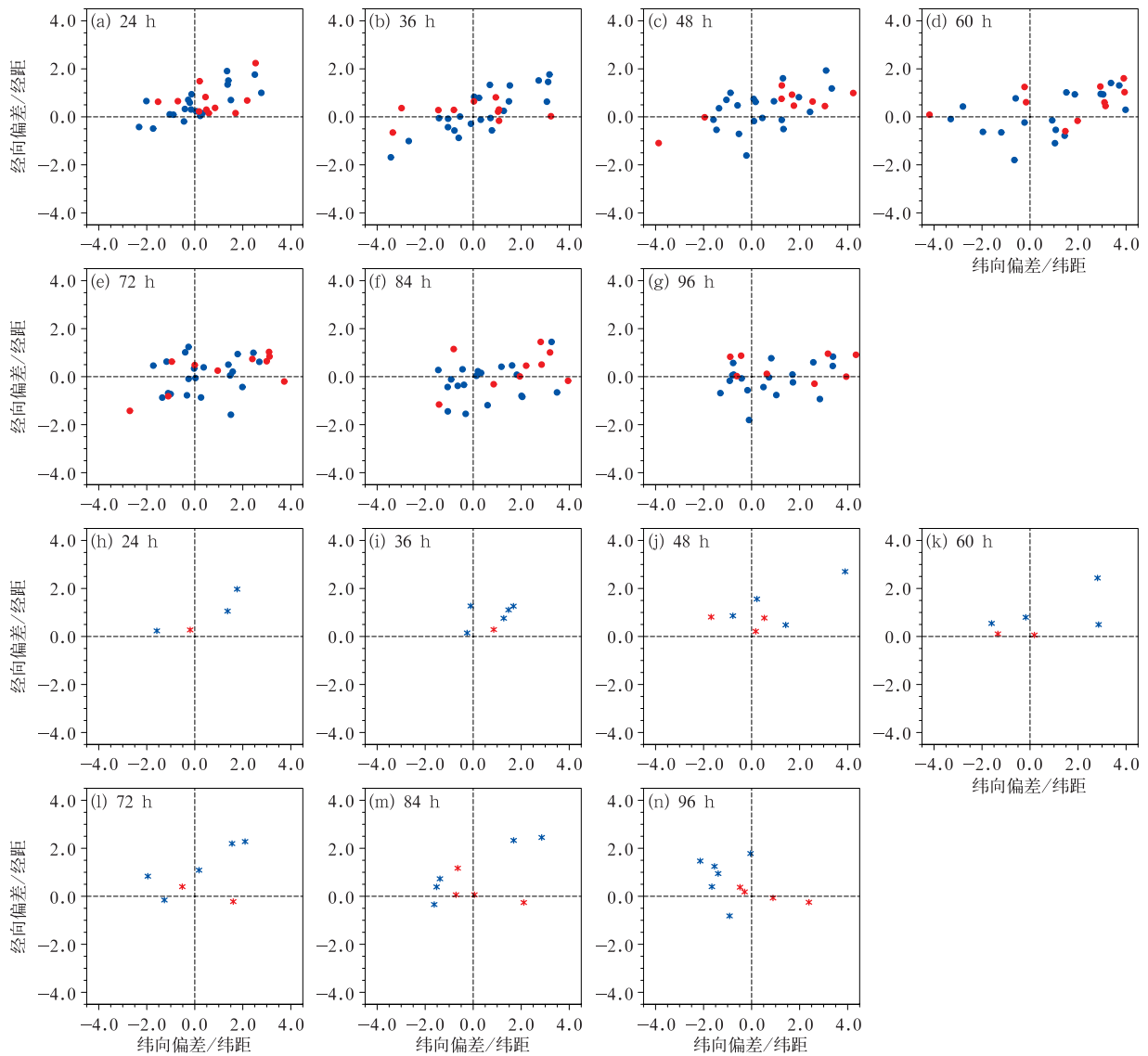
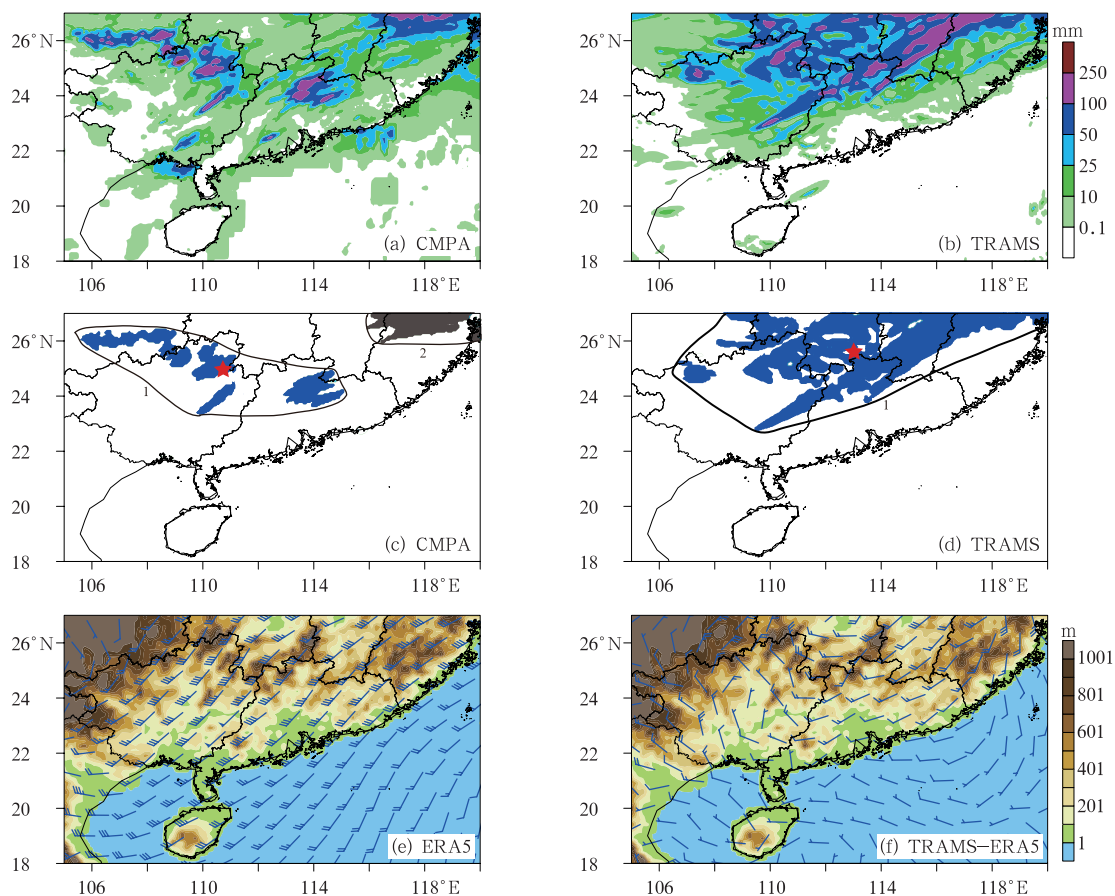


图 5 2022 年“龙舟水”期间不同预报时效下(a~g)TRAMS(圆点)和(h~n)ECMWF(星号)模式对锋面暴雨(蓝色)和暖区暴雨(红色)的位置预报偏差

Fig. 5 The forecast position deviations by (a~g) TRAMS (dot) and (h~n) ECMWF (star) models for front-zone (blue) and warm-sector (red) torrential rains with different forecast lead times during the dragon-boat precipitation in 2022

系统的角度开展分析,进一步探讨模式降水预报位置偏差的形成原因。首先通过 TRAMS 模式对 2022 年 6 月 17 日广西北部地区暖区暴雨的预报案例分析其位置预报(图 6a,6b)偏东的原因。图 6c 中黑色线包围的区域是 MODE 方法从实况降水(图 6a)识别的暖区暴雨对象(标记为数字 1),其主要分布在贵州南部、广西北部和广东东北部地区。从图 6e 中可以看出,本次暖区暴雨主要由西南季风在云贵高原及南岭地形阻挡作用下辐合抬升而形成。与 ERA5 再分析资料相比,TRAMS 模式在广西境内的南风明显偏弱,较弱低空气流无法直接翻越广

西北部的山脉而转向东侧的湖南南部绕流,从而导致湖南南部的偏西风分量加强(图 6e,6f)。湖南南部的偏西风与广东东北部的偏南风急流形成辐合,造成 TRAMS 模式在湖南南部和江西南部地区出现范围较大的虚假降水。在使用 MODE 方法进行对象识别时,由于广西北部和湖南南部的降水互相连接,因此被划分为同一个对象,最终导致其质心位置比实况偏东(图 6d)。2022 年 6 月 5 日,南岭南北两侧冷暖气流在地形抬升作用下分别形成两条雨带(图 7a),而在 ECMWF 模式中预报的降水只有一条雨带,其位置与南岭山脉基本一致(图 7b)。MODE



注:图 c,d 中的数字为暖区暴雨对象,红色星号为暴雨对象质心位置,填色为 50 mm 及以上的降水区域;图 e,f 中的填色为地形高度。

图 6 2022 年 6 月 17 日 08 时至 18 日 08 时(a,b)累计降水量及(c,d)MODE 方法从中识别的降水对象, (e)ERA5 850 hPa 风场(风羽)及(f)TRAMS 相对于其的差异(风羽) (a,c)CMPA, (b,d)TRAMS

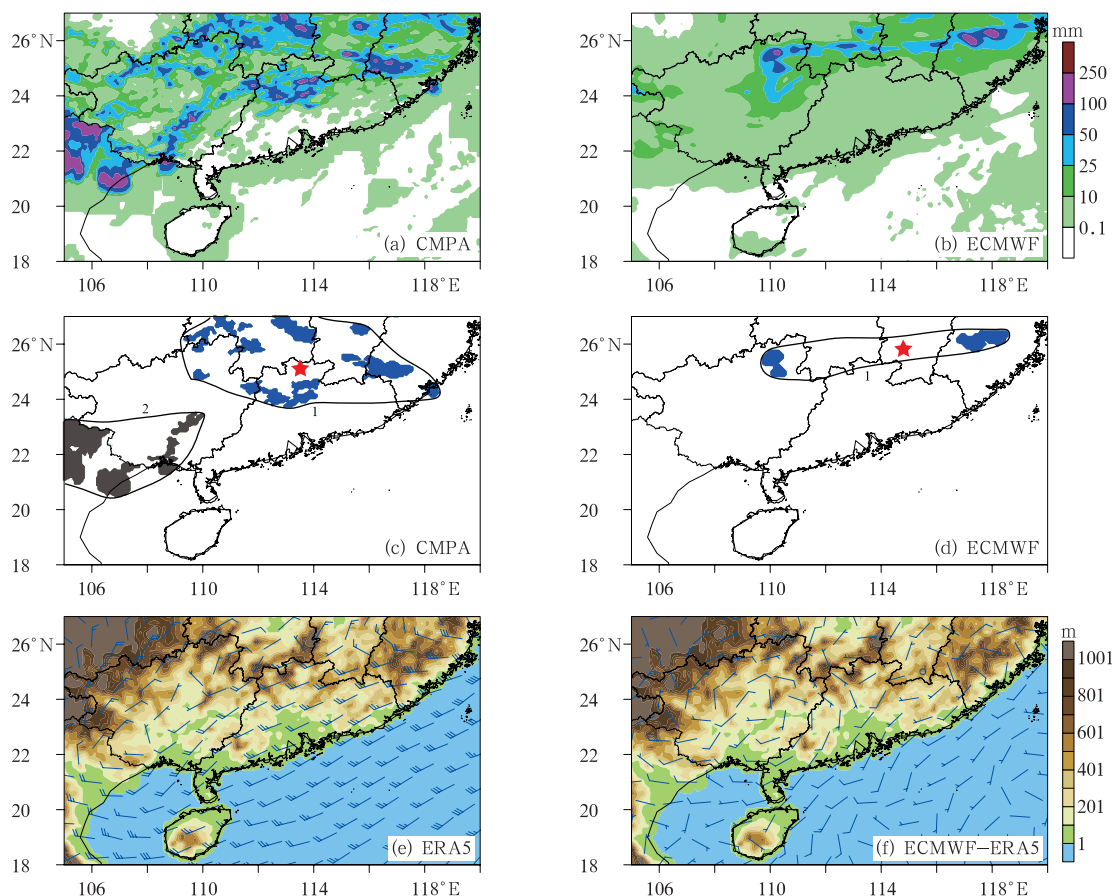
Fig. 6 (a, b) Accumulated precipitation, (c, d) precipitation objects identified by the MODE method, (e) ERA5 850 hPa wind field (barb), (f) wind difference (barb) between TRAMS and ERA5 from 08:00 BT 17 to 08:00 BT 18 June 2022 (a, c) CMPA, (b, d) TRAMS

方法能够识别南岭附近的锋面雨带,并对观测和预报进行匹配,并且 ECMWF 模式预报的锋面雨带质心位置比实况偏北(图 7c,7d)。从 850 hPa 风场可以看出,南岭南侧锋面降水的水汽主要来源于广西境内低涡东侧的偏南气流(图 7e),ECMWF 模式对于该低涡系统的预报比实况偏强(图 7f),这使得广东境内偏南气流也随之加强,更多的暖湿空气被输送至南岭北侧并直接与冷空气辐合形成降水,这是 ECMWF 模式只能预报出一条雨带并且位置偏北的主要原因。

3.4 暴雨面积和强度的偏差检验

暴雨面积的准确预报对于实际决策部门的防灾

减灾工作也有重要参考价值。基于 3.2 节中观测与模式互相匹配的降水对象,本文进一步对 TRAMS 和 ECMWF 模式的暴雨面积预报性能进行评估。从图 8 可以看出,TRAMS 模式对锋面暴雨面积的预报并不存在系统性偏差,但是对暖区暴雨面积的预报总体偏大。暖区暴雨的实际面积主要分布在 $4 \times 10^4 \sim 12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (对应的水平尺度大约为 200 ~ 350 km 的区域性暴雨),而 TRAMS 模式的预报中有一部分暴雨对象的面积达到了 $12 \times 10^4 \sim 18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。进一步分析(图略)发现,这些被高估的对象对应于 6 月 16—21 日发生在低空急流和南岭交汇处的暴雨过程。从图 6 中对 6 月 17 日暖区暴雨个例的低空风场偏差分析可以看出,TRAMS 模式在湖南南



注:图 c,d 中的数字为锋面暴雨对象,红色星号为暴雨对象质心位置,填色为 50 mm 及以上的降水区域;图 e,f 中的填色为地形高度。

图 7 2022 年 6 月 5 日 08 时至 6 日 08 时(a,b)累计降水量及(c,d)MODE 方法从中识别的降水对象, (e)ERA5 850 hPa 风场(风羽)及(f)ECMWF 相对于其的差异(风羽)
(a,c)CMPA, (b,d)ECMWF

Fig. 7 (a, b) Accumulated precipitation, (c, d) precipitation objects identified by the MODE method, (e) ERA5 850 hPa wind field (barb), (f) wind difference (barb) between ECMWF and ERA5 from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 6 June 2022
(a, c) CMPA, (b, d) ECMWF

部西风分量和广东北部南风分量的偏强导致南岭附近水汽辐合明显加强,这是江西南部出现大面积虚假暴雨的主要原因。ECMWF 模式对锋面暴雨和暖区暴雨面积的预报均存在系统性的低估,特别是在预报时效不超过 72 h 时模式预报的暴雨面积普遍低于 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$,这可能与 ECMWF 模式分辨率较低导致对强对流模拟偏弱有关。

从降水强度评估结果(图 9a~9d)来看,TRAMS 模式的预报偏差出现了较大的离散度,说明其对降水强度的预报存在较大的不确定性。对于降水量低于 80 mm 的暴雨对象,TRAMS 模式并没有明显的系统性偏差,这使得其累积降水强度比较接近实际

观测。对于降水量超过 80 mm 的 2~3 个锋面暴雨对象,模式基本比实况偏弱 10 mm 以上。ECMWF 模式对于各个量级的降水预报均表现出比较明显的偏弱现象。

除了暴雨降水量中位数外,最严重的洪涝灾害往往与暴雨降水量极值密切相关,因此对于极端“龙舟水”来说,进一步考察 TRAMS 和 ECMWF 模式对暴雨降水量极值的预报性能也是很有实际意义的。从降水量极值的评估结果(图 9e~9h)来看,两种模式对锋面暴雨和暖区暴雨都存在明显的低估现象,并且这种极值预报低估的现象随着降水强度的加强而更加明显。与 ECMWF 模式相比,TRAMS

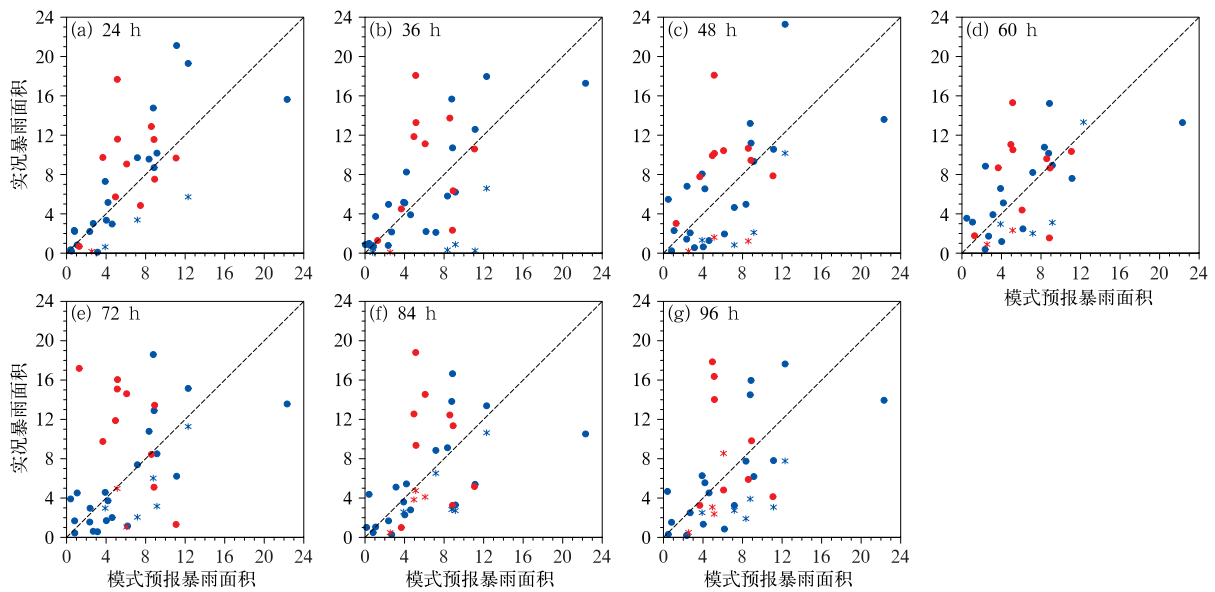


图 8 2022 年“龙舟水”期间不同预报时效下 TRAMS(圆点)和 ECMWF(星号)模式对锋面暴雨(蓝色)和暖区暴雨(红色)面积预报与实况的散点图(单位: $4 \times 10^4 \text{ km}^2$)

Fig. 8 Scatter plot of area forecasts with different lead times by TRAMS (dot) and ECMWF (star) models from the observation for front-zone (blue) and warm-sector (red) torrential rains (unit: $4 \times 10^4 \text{ km}^2$) during the dragon-boat precipitation in 2022

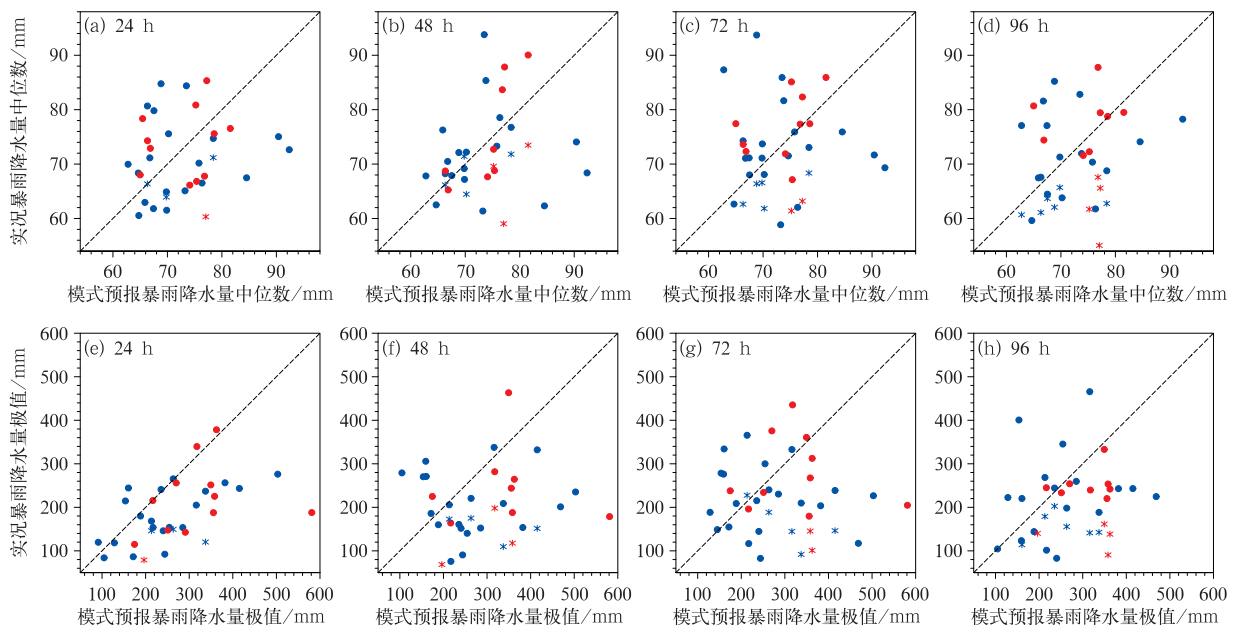


图 9 2022 年“龙舟水”期间不同预报时效下 TRAMS(圆点)和 ECMWF(星号)模式对锋面暴雨(蓝色)和暖区暴雨(红色)的降水量预报与实况的散点图

(a~d)中位数,(e~h)极值

Fig. 9 Scatter plot of (a-d) median and (e-h) extreme value forecasts with different lead times by TRAMS (dot) and ECMWF (star) models from the observation for front-zone (blue) and warm-sector (red) torrential rains during the dragon-boat precipitation in 2022

模式在 300~400 mm 降水量区间对降水量极值的低估程度相对更小,这体现了高分辨率模式在局地

强对流预报方面的优势。总体而言,现有的业务数值预报模式对于强降水中心极值的预报能力仍然明

显不足,虽然提高模式分辨率会有一定程度的改进,但是资料同化、模式动力框架计算精度、云微物理参数化方案和边界层参数化方案等相关因素都有可能对降水强度产生显著影响,因此有必要开展更加深入的误差来源诊断和技术改进研究。

4 结论和讨论

本文利用 MODE 方法对 TRAMS 和 ECMWF 模式在 2022 年“龙舟水”期间的锋面暴雨过程和暖区暴雨过程进行了检验和评估,主要结论如下:

(1)根据 MODE 方法和传统的点对点评估方法计算得到的 ETS 评分和 POD 都能体现出 TRAMS 模式对于 2022 年“龙舟水”的预报优势,但是后者容易受到降水位置预报偏差的影响,导致 TRAMS 模式在 FAR 方面高于 ECMWF 模式,而前者可以较好地避免“双重惩罚”对 FAR 造成的影响。

(2)TRAMS 模式的暴雨识别和匹配能力优于 ECMWF 模式,其中 TRAMS 模式存在少量空报的情况,ECMWF 模式则存在比较严重的漏报。

(3)TRAMS 模式的暖区降水位置预报整体偏东,ECMWF 模式的锋面降水位置总体性偏北,降水位置偏差特征与不同模式对低空偏南气流的预报误差密切相关。

(4)TRAMS 模式对锋面降水的面积预报相对较准确,但是对暖区暴雨的面积预报偏大;ECMWF 模式则对两种类型的暴雨面积都存在低估;降水强度方面,TRAMS 模式的预报性能略优于 ECMWF 模式,但是在强降水阶段仍然存在比较明显的低估现象,特别是对于 $400 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上的降水极值预报。

总的来说,分辨率更高的本地化区域模式 TRAMS 对于华南“龙舟水”表现出了较好的预报性能,但是在暴雨位置、面积和强度方面仍然有较大的改进空间。在后续的研究中,有必要进一步从低空风场和云降水等方面开展更加细致的评估和误差来源诊断研究,从而为 TRAMS 模式的改进提供参考依据,进一步提高其对极端“龙舟水”的预报能力。

值得注意的是,过去对华南前汛期的评估结论普遍认为锋面暴雨的预报技巧会高于弱强迫天气背景下的暖区暴雨(陈涛等,2020;吴乃庚等,2020),而在本次极端“龙舟水”过程中 TRAMS 模式对于锋面和暖区暴雨的预报都表现出了较高的预报性能。

2022 年极端“龙舟水”的暖区暴雨主要发生在粤北地区,高分辨率 TRAMS 模式对于这种大尺度地形强迫造成的暴雨过程具有较好的预报能力,因此暖区暴雨的预报评分整体较高。需要指出 TRAMS 模式的一个明显缺陷在于其基本完全漏报了粤西沿海的暖区暴雨,这可能与该类型暴雨触发条件的局地性更强有关。尽管过去针对 TRAMS 模式在粤西沿海暖区暴雨的一些预报失败案例进行了诊断和改进(例如:徐道生等,2015;Xu et al,2023),但是显然还需要开展更加深入的研究和总结。

参考文献

- 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]. Meteor Mon, 46(9):1129-1142(in Chinese).
- 高守亭,周玉淑,冉令坤,2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学,42(4):833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K, 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4):833-846(in Chinese).
- 胡榕,谢蜀剑,竺婧,等,2024. 2022 年“龙舟水”模式集合预报偏差及不确定性分析[J]. 广东气象,46(2):38-41. Hu R, Xie S J, Zhu J, et al, 2024. Error and uncertainty analysis of model ensemble forecast for the dragon-boat precipitation in 2022[J]. Guangdong Meteor, 46(2):38-41(in Chinese).
- 黄士松,李真光,包澄澜,等,1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社:55-100. Huang S S, Li Z G, Bao C L, et al, 1986. Rainstorms during Pre-Rainy Season in South China [M]. Guangzhou:Guangdong Science and Technology Press:55-100(in Chinese).
- 李晓兰,符娇兰,2021. 基于 CRA 技术的华南前汛期强降水 EC 模式预报误差分析[J]. 热带气象学报,37(2):194-206. Li X L, Fu J L, 2021. Forecast error analysis of EC model for heavy rainfall during annually first rainy season in South China based on CRA method[J]. J Trop Meteor, 37(2):194-206(in Chinese).
- 李晓霞,冯业荣,陈子通,等,2021. 华南区域高分辨率数值模式前汛期预报初步评估[J]. 热带气象学报,37(4):656-668. Lin X X, Feng Y R, Chen Z T, et al, 2021. Preliminary evaluation of forecast skill of GRAPES Guangzhou regional modeling system[J]. J Trop Meteor, 37(4):656-668(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).
- 刘文君,肖柳斯,李立,等,2023. CMA-GD(R1/R3)对2021年汛期降水过程的分类评估[J].广东气象,45(3):62-67. Liu W J, Xiao L S, Li L, et al, 2023. Evaluation of precipitation processes during the 2021 flood season by CMA-GD(R1/R3)[J]. Guangdong Meteor, 45(3): 62-67(in Chinese).
- 马杰,尹姗,金荣花,等,2021.一次梅汛期极端降雨过程雨带位置模式预报性能对比分析[J].大气科学,45(3):487-498. Ma J, Yin S, Jin R H, et al, 2021. Comparative analysis of forecast evaluation for rain band position in an extreme Meiyu rainfall event[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3): 487-498(in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,刘嘉慧敏,等,2024. MODE检验在天气预报中的应用研究进展[J].地球科学进展,39(2):193-206. Pan L J, Zhang H F, Liu J H M, et al, 2024. Advancements in study on the application of MODE verification method in weather forecasting[J]. Adv Earth Sci, 39(2): 193-206(in Chinese).
- 潘留杰,张宏芳,王建鹏,2014.数值天气预报检验方法研究进展[J].地球科学进展,29(3):327-335. Pan L J, Zhang H F, Wang J P, 2014. Progress on verification methods of numerical weather prediction[J]. Adv Earth Sci, 29(3): 327-335(in Chinese).
- 潘响,沈艳,宇婧婧,等,2015.基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J].气象学报,73(1):177-186. Pan Y, Shen Y, Yu J J, et al, 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method[J]. Acta Meteor Sin, 73(1): 177-186(in Chinese).
- 钱光明,2008.广东省气候业务技术手册[M].北京:气象出版社:65-83. Qian G M, 2008. Technical Manual for Climate Operation in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 65-83(in Chinese).
- 苏翔,康志明,2020.基于对象诊断的超强台风“利奇马”(1909)模式强降水预报检验[J].气象科学,40(1):30-40. Su X, Kang Z M, 2020. Verification of heavy precipitation forecast based on object diagnosis for Typhoon “Lekima” model (1909)[J]. Sci Meteor Sin, 40(1): 30-40(in Chinese).
- 苏翔,康志明,庄潇然,等,2021.2020年梅雨期暴雨雨带预报不确定性分析[J].气象,47(11):1336-1346. Su X, Kang Z M, Zhuang X R, et al, 2021. Uncertainty analysis of heavy rain belt forecast during the 2020 Meiyu period[J]. Meteor Mon, 47(11): 1336-1346(in Chinese).
- 唐思瑜,沙天阳,涂静,等,2022.全球和区域模式在2022年广东龙舟水期间的评估[J].广东气象,44(4):35-37. Tang S Y, Sha T Y, Tu J, et al, 2022. Evaluation of global and regional models for the 2022 dragon-boat precipitation in Guangdong[J]. Guangdong Meteor, 44(4): 35-37(in Chinese).
- 王丹丹,2022.今年6月以来广东省暴雨洪涝灾害应对过程分析[J].中国减灾,(19):40-43. Wang D D, 2022. Analysis on the response process of rainstorm and flood disasters in Guangdong Province since June this year[J]. Disa Reduc China, (19): 40-43(in Chinese).
- 伍红雨,吴遥,郑璟,2024.2022年华南极端“龙舟水”与大气环流和海温异常的关系[J].大气科学学报,47(3):450-459. Wu H Y, Wu Y, Zheng J, 2024. The relationship between the extreme dragon-boat precipitation and the atmospheric circulation and SST anomaly in South China in 2022[J]. Trans Atmos Sci, 47(3): 450-459(in Chinese).
- 吴乃庚,温之平,邓文剑,等,2020.华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J].气象科学,40(5):605-616. Wu N G, Wen Z P, Deng W J, et al, 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China[J]. J Meteor Sci, 40(5): 605-616(in Chinese).
- 吴俞,冯箫,李勋,等,2021. GRAPES_GZ 3 km模式对2019年海南岛暖季非台风降水预报的时空检验[J].热带气象学报,37(4):633-646. Wu Y, Feng X, Li X, et al, 2021. Evaluation of spatio-temporal parameters of forecasts from GRAPES_GZ 3 km model; with specific reference to non-typhoon precipitation during the warm season in 2019 in Hainan Island[J]. J Trop Meteor, 37(4): 633-646(in Chinese).
- 吴俞,李玉梅,李勋,等,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 Y, Li Y M, Li X, et al, 2023. Verification of precipitation refinement forecast of regional numerical models in the warm season of Hainan Island[J]. Meteor Mon, 49(2): 235-248(in Chinese).
- 徐道生,张艳霞,王刚,等,2015. meso-SAS对流参数化方案的改进及其在9 km分辨率模式中的应用[J].热带气象学报,31(5):608-618. Xu D S, Zhang Y X, Wang G, et al, 2015. Improvement of meso-SAS cumulus parameterization scheme and its application in a model of 9 km resolution[J]. J Trop Meteor, 31(5): 608-618(in Chinese).
- 徐道生,张艳霞,张诚忠,等,2016.华南区域高分辨率模式中不同雷达回波反演技术方案的比较试验[J].热带气象学报,32(1):9-18. Xu D S, Zhang Y X, Zhang C Z, et al, 2016. Comparison of different retrieval schemes for radar reflectivity in the high-resolution regional model in South China[J]. J Trop Meteor, 32(1): 9-18(in Chinese).
- 庄潇然,康志明,徐渊,等,2022.2021年7月17日长江中下游地区 β 中尺度低涡及其模式预报不确定性分析[J].热带气象学报,38(5):680-693. Zhuang X R, Kang Z M, Xu Y, et al, 2022. Forecast uncertainty of a meso- β scale vortex on July 17, 2021 in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. J Trop Meteor, 38(5): 680-693(in Chinese).
- Brill K F, Mesinger F, 2009. Applying a general analytic method for assessing bias sensitivity to bias-adjusted threat and equitable threat scores[J]. Wea Forecasting, 24(6): 1748-1754.

- Casati D B, Wilson L J, Stephenson D B, et al, 2008. Forecast verification: current status and future directions[J]. *Meteor Appl*, 15(1): 3-18.
- Davis C A, Brown B G, Bullock R, 2006a. Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: methodology and application to mesoscale rain areas[J]. *Mon Wea Rev*, 134(7): 1772-1784.
- Davis C A, Brown B G, Bullock R, 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain system[J]. *Mon Wea Rev*, 134(7): 1785-1795.
- 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 spring program[J]. *Wea Forecasting*, 24(5): 1252-1267.
- Ebert E, Wilson L, Weigel A, et al, 2013. Progress and challenges in forecast verification[J]. *Meteor Appl*, 20(2): 130-139.
- ECMWF, 2019. Changes in ECMWF model[Z]. Retrieved from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model>.
- Gilleland E, Lee T C M, Gotway J H, et al, 2008. Computationally efficient spatial forecast verification using Baddeley's delta image metric[J]. *Mon Wea Rev*, 136(5): 1747-1757.
- Marzban C, Sandgathe S, 2006. Cluster analysis for verification of precipitation fields[J]. *Wea Forecasting*, 21(5): 824-838.
- Mass C F, Ovens D, Westrick K, et al, 2002. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(3): 407-430.
- Roberts N M, Lean H W, 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. *Mon Wea Rev*, 136(1): 78-97.
- Schaefer J T, 1990. The critical success index as an indicator of warning skill[J]. *Wea Forecasting*, 5(4): 570-575.
- Wu N G, Zhuang X R, Min J Z, et al, 2020. Practical and intrinsic predictability of a warm-sector torrential rainfall event in the South China monsoon region [J]. *J Geophys Res Atmos*, 125(4): e2019JD031313.
- WWRP/WGNE Joint Working Group on Verification, 2008. Recommendations for the verification and intercomparison of QPFs and P QPFs from Operational NWP Models [R]. Geneva: World Meteorological Organization: 1-37.
- Xu D S, Chen H W, Leung J C, et al, 2023. Sensitivity of nocturnal warm sector rainfall simulation to the configuration of initial and lateral boundary conditions: a case study in Southern China based on the operational TRAMS model [J]. *J Geophys Res Atmos*, 128(12): e2022JD038452.
- Zhang L, Ren P F, Xu D S, et al, 2023. FSS-based evaluation on monsoon precipitation forecasts in South China from regional models with different resolution [J]. *J Trop Meteor*, 29(3): 301-311.

(本文责编:王婷波)