

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).

多区域高分辨率模式强降水预报检验分析^{*}

刘 静^{1,2,3} 任 川⁴ 赵梓淇² 陈传雷¹ 王 瀛¹ 才奎志¹

1 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

3 沈阳市气象局, 沈阳 110166

4 辽宁省气象信息中心, 沈阳 110166

提 要: 利用气象大数据云平台中逐小时降水资料, 基于目标对象检验法和邻域法, 评估 2019—2020 年辽宁主汛期降水过程中中国气象局上海数值预报模式系统(CMA-SH9)、中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)、中国气象局睿图东北数值预报模式系统(CMA-DB)的预报性能。结果表明: 千米尺度或接近千米尺度的上述三个模式, 在 36 h 时效内, 对于累积强降水(12 h 降水量 ≥ 50 mm)落区形态预报与实况有相似性, 落区质心预报偏差一般在 20 km 左右。然而, 预报落区与实况重叠的面积一般都在 10% 以下, 个别情形下(如 CMA-MESO 对于气旋型降水过程)累积强降水落区预报与实况重叠度能够接近 20%; 位置偏离的直接结果是导致漏报率高(一般在 75% 左右, CMA-MESO 模式漏报率略低, 为 10%~20%), 其中高压后部型降水过程中累积强降水的漏报率超过 80%, 位置偏离也造成较高空报率。对于短时强降水(1 h 降水量 ≥ 20 mm)预报, 在方圆 40 km 内不计偏差情况下, 各模式预报命中率平均在 10% 以下(最大值为 9.2%), 空报率平均为 58.7%; 三种降水类型中, 模式对台风型降水过程的短时强降水预报性能最低。

关键词: 多区域模式, 空间检验, 目标对象检验法, 邻域法, 降水分型

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.050502

Comparative Analysis on Verification of Heavy Rainfall Forecasts in Different Regional Models

LIU Jing^{1,2,3} REN Chuan⁴ ZHAO Ziqi² CHEN Chuanlei¹ WANG Ying¹ CAI Kuizhi¹

1 Liaoning Warning Center of Meteorological Disaster Monitoring, Shenyang 110166

2 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

3 Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110166

4 Liaoning Meteorological Information Center, Shenyang 110166

Abstract: In this study, based on the methods for object-based verification and neighborhood, the hourly precipitation data from the CMADaas (China Meteorological Administration Data as a server), the forecast performances of three numerical models during the main flood seasons from 2019 to 2020 in Liaoning Province are investigated. The three models are the Shanghai Numerical Prediction Model of China Meteorological Administration (CMA-SH9), the Mesoscale Weather Numerical Prediction System of China Meteorological

^{*} 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-025)、中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡研究重点开放实验室联合开放基金课题(2020SYIAE05)、中国气象局数值预报发展专项“2020 年多模式降水及雷达回波检验评估”和“2021 年短时强降雨和雷暴大风检验评估”共同资助

2021 年 6 月 7 日收稿; 2022 年 6 月 21 日收修定稿

第一作者: 刘静, 主要从事数值预报检验评估研究. E-mail: liujing-syau@163.com

通讯作者: 陈传雷, 主要从事短时临近预报预警研究. E-mail: ln_ccl@163.com

Administration (CMA-MESO) and the Rapid-Refresh Multi-Scale Analysis and Prediction System-North-east China Model of China Meteorological Administration (CMA-DB). The results show that even for the kilometer-scale or near-kilometer-scale models, there are still obvious deviations in the forecast of the heavy rainfall area (12 h cumulative rainfall ≥ 50 mm) within the 36 h lead time. The ratio of overlapping area between the forecasted and observed heavy rainfall areas is generally less than 10% of the total area, and in individual cases the value is close to 20%, such as the forecast of CMA-MESO on cyclone-type precipitation processes. The deviation of rainfall area results in a high missing alarm rate (MAR) (generally around 75%, and the MAR of the CMA-MESO is 10%–20% lower than that). The MAR of heavy precipitation forecast for the rear of high-pressure type precipitation exceeds 80%. Besides, the deviation of heavy rainfall area also results in a higher false alarm rate (FAR). For the forecast of short-term heavy rainfall (1 h rainfall ≥ 20 mm), by analyzing the mean values of the statistical indexes within 12 h forecast lead time, we find that the average percentage of detection is below 10%, with the maximum value being only 9.2%. The average FAR is 58.7%. Among the three types of rainfall processes, the model has the poorest performance in the forecast of short-term heavy rainfall in typhoon-type rainfall processes.

Key words: regional model, spatial forecast verification, object-based verification, neighborhood method, precipitation pattern classification

引 言

辽宁省暴雨具有频发性、历时短、致灾重等特点(孙欣等,2016)。受稳定的副热带高压(以下简称副高)影响,低层暖湿空气和中高纬西风带高空槽为重要的暴雨影响系统(陈传雷和杨青,2018)。暴雨多发生在中尺度系统触发下(刘静等,2016),区域模式预报和全球模式相比,对中尺度系统诱发的暴雨表现出较好的预报能力(漆梁波和徐珺,2018),因此加深对区域模式的了解,有助于制作暴雨预报和发布暴雨红色预警信号(刘静等,2021),检验评估是提升对区域模式的认知水平和应用能力的有效途径(Gofa et al,2018;Chakraborty,2010)。

在检验技术方面,全国防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345)(2017)给出了误差检验等常规方法,这些方法虽然可以评价预报正确与否或准确程度,却往往忽略了预报中一些积极的信息(戴建华等,2013)。目前对高分辨率区域模式的检验评估,多应用空间检验技术。Gilleland et al(2009)将现有的空间检验技术归纳为两类:一类是通过空间滤波的方式对原始场进行处理进而统计各个检验物理量,通过对比模式与实况降水场的统计量差异对模式预报性能进行评估,以邻域法(模糊检验法)为代表;另一类是通过从预报场和实况场中识别目标个体,在相互匹配的过程中计算两者之间的空间位移

形变统计量,以基于目标对象检验法(method of object-based diagnostic evaluation, MODE)为代表。李佰平等(2016)认为邻域法能够在不同尺度和评价策略上给出与预报有关的更多信息。邻域法通常采用分数技巧评分(fractional skill score, FSS)作为评价指标,王新敏和栗晗(2020)研究指出, FSS 评分相对于传统的 TS 评分能够更好地通过量化方式反映出不同模式的预报能力差别。刘静等(2019)应用邻域法对辽宁地区的雷达回波组合反射率因子进行检验,得出在 11 km 的邻域半径下 FSS 评分较高。在邻域法应用技术上,潘留杰等(2017)根据不同空间尺度和邻域半径评估数值模式降水预报的 CSI 评分表现,唐文苑等(2017)应用固定邻域半径(40 km)对强对流天气进行检验,得出空报率、漏报率等检验评分。马申佳等(2018)认为,改良后的邻域概率法可以在时空尺度上综合评估对流尺度降雨的特征。美国 NCAR 中心研发了 MODE,可以客观地对比分析预报和实况的位置、形状、方向和尺寸等相关属性(Davis et al,2006a;2006b)。茅懋等(2016)设计了和 MODE 类似的目标对象检验方法,量化评价预报对象的面积、强度等要素的吻合程度及对应的偏差,给出常规检验 TS 评分偏低的原因。在预报检验的时间尺度方面,Duc et al(2013)在高分辨率模式检验中引入了时间维度并进行了初步分析。

在检验结果方面,全球模式对中到大雨的预报

能力有限,空报和漏报都很明显(王晓峰和周荣卫, 2021)。多区域中心数值模式的对比结果显示,北京、沈阳、上海、广州区域模式的预报稳定性较好(Chen et al, 2013)。华东区域数值模式预报系统 SMS-WARR(9 km), (现为 CMA-SH9) 经过版本的更新,提升了对降水的预报性能(徐同等, 2016), 对西南涡诱发的暴雨过程能够指示出强降水空间落区,但强度有偏差(徐同等, 2019)。CMA-SH9 对台风快速移动过程的预报能力偏弱(薛文博等, 2020)。罗月琳等(2021)对 GRAPES-GEPS(现为 CMA-GEPS)环流集合预报的分类释用方法进行研究检验,划分环流形势类型,从而为天气预报提供参考依据,GRAPES 区域集合预报系统对中国汛期降水具有很好的预报能力(王婧卓等, 2021)。与华东模式、华南模式相比,中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)对于云南地区 24 h 降水量 ≥ 50 mm 的降水预报效果较好(赵宁坤等, 2021)。何爽爽等(2018)通过研究指出,中国气象局睿图东北数值预报模式系统(CMA-DB)对降水的分布特征有所体现,但对于降水中心位置和强度预报偏差较大。区域模式对暴雨的预报空报率较高(苏翔等, 2022)。

多方位评估可以挖掘多区域模式的附加值,为预报员提供更加全面和客观的参考信息。目前,应用空间检验法对多区域高分辨率模式进行检验的研究尚不多见,对辽宁省 12 h 累积强降水预报检验研究较少,尤其是对短时强降水预报的检验分析。为综合评估多区域高分辨率模式在辽宁汛期暴雨过程中的预报表现,对 2019—2020 年发生在辽宁省内的 16 次天气过程(共计 408 个时次的暴雨实况)进行累积强降水目标对象识别和短时强降水邻域法检验,从短时预报效果分析 CMA-SH9、CMA-MESO

和 CMA-DB 的表现,对高压后部型、气旋型、台风型天气过程的降水量进行评估,得出不同模式预报性能优势和偏差特征。

1 资料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 实况资料

实况资料来自气象大数据云平台“天擎”。采用辽宁省 1282 个观测站逐小时降水资料,去除异常值确保降水数据连续准确。

1.1.2 预报资料

预报数据来自业务化的多区域高分辨率模式,包括 CMA-SH9、CMA-MESO 及 CMA-DB 三个区域模式的初始场均为 NCEP-GFS 模式,其中 CMA-SH9 的空间分辨率为 9 km(没有选用 3 km 空间分辨率的 CMA-SH3 模式是因为其预报范围不能涵盖所有辽宁站点),其他两种区域模式分辨率均为 3 km。

1.2 研究方法

1.2.1 天气学分型

孙欣等(2016)分析了 1960—2013 年发生在辽宁地区的 60 次大暴雨过程,指出辽宁强降水的主要影响系统包括副高后部、气旋(河套气旋、江淮气旋、蒙古气旋等)影响及台风北上等。本文挑选 2019—2020 年发生在辽宁省内的 16 次强降水过程,共计 408 个时次进行多区域高分辨率模式降水预报检验分析,降水分型分别简称为高压后部型、气旋型和台风型降水。具体分型时段详见表 1。

表 1 不同影响天气系统下的个例时段

Table 1 Occurrence time interval of cases under different weather systems

高压后部型降水	气旋型降水	台风型降水
2019 年 7 月 29 日 08 时至 30 日 20 时	2019 年 5 月 26 日 20 时至 27 日 08 时	2019 年 8 月 11 日 08 时至 14 日 20 时
2019 年 8 月 2 日 08 时至 4 日 08 时	2019 年 8 月 16 日 08 时至 17 日 08 时	2019 年 9 月 7 日 08 时至 8 日 08 时
2020 年 8 月 13 日 08—20 时	2019 年 8 月 28 日 08—20 时	2020 年 8 月 26 日 08 时至 27 日 08 时
2020 年 8 月 18 日 08 时至 19 日 20 时	2020 年 6 月 25 日 20 时至 26 日 08 时	2020 年 9 月 2 日 20 时至 3 日 20 时
2020 年 8 月 31 日 08 时至 9 月 1 日 08 时	2020 年 7 月 19 日 08—20 时	2020 年 9 月 7 日 20 时至 8 日 08 时
	2020 年 8 月 24 日 08—20 时	

1.2.2 不同时间定义

文中时间表述定义如下:

“08 时和 20 时起报”表示模式起报时刻,均为

北京时。“24 h 和 36 h”表示预报时效。由于区域模式数据延时、本地化解析处理等问题,区域模式资料的前 12 h 业务应用价值不大,因此本文选用预报

时效 13~36 h 的结果开展工作,针对不同检验方法,分别对 13~24 h(以下简称 24 h)累积降水量、25~36 h(以下简称 36 h)累积降水量及逐小时降水量进行检验。“1 h 和 12 h”表示累计时间。

1.2.3 强降水定义

1.2.3.1 累积强降水

在累积强降水预报检验中,对多区域高分辨率模式的 12 h 累积降水量预报进行检验评估。本研究针对 12 h 累积降水量 ≥ 50 mm 的降水展开检验,表述为“12 h 累积强降水”(以下简称为累积强降水)。

1.2.3.2 短时强降水

在短时强降水预报检验中,对多区域高分辨率模式的 1 h 降水量预报进行检验评估。根据中国气象局 2020 年 6 月印发的《智能预报技术方法竞赛检验方案》(以下简称《检验方案》)规定,在辽宁地区定义 1 h 降水量 ≥ 20 mm 的降水为短时强降水。

1.2.4 检验方法

区域模式网格预报采用邻近点插值方法插值到检验站点后和对应的实况检验站点观测进行对比检验。

有研究表明,模式空间分辨率改变并不是对所有的降水个例都有显著影响(于翥等,2018),因此本文尝试对不同空间分辨率的多区域模式进行对比分析,指出各区域模式性能优势和偏差特征。

1.2.4.1 累积强降水预报目标对象检验

基于 MODE,对表 1 中所有个例进行检验,评估多区域高分辨率模式对累积强降水的预报效果,其结果是对各模式 08 时和 20 时起报的产品进行的整合检验。

MODE(Davis et al,2009)可以辨识预报二维场的空间特征,它除了给出临界成功指数(critical success index,CSI)评分等传统的检验指标外,还可以确定空间特征在不同场中的相似程度,进而开展相似性统计。MODE 主要步骤包括:卷积处理、去背景、确定对象及对象属性等(尤凤春等,2011;茅懋等,2016)。

本文应用 MODE 检验方法对累积强降水预报进行空间分布特征分析,检验区域选为 $38^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$ 、 $118^{\circ}\sim 126^{\circ}\text{E}$,降水量阈值设定为 12 h 降水量 ≥ 50 mm,采用预报和实况目标对的位置评价、纵横比、面积比、质心距离、重叠面积与联合面积比、CSI 评分、漏报率、总评分等属性来评价多区域模式的预报技巧。

MODE 包涵的六类评分指标的具体含义及算法:

(1)位置评价。预报目标相对于实况目标的位置信息、质心距离。

(2)纵横比。对于某个检验目标对象,提取边界点信息,通过中心的最长两个边界点连线即为长轴,通过重心且垂直于长轴的最短两个边界点连线即为短轴,短轴和长轴的比值为纵横比。纵横比在 $0\sim 1$,值越小,说明强降水预报落区带状分布明显。

(3)面积比。实况面积和预报面积的比值。

(4)重叠面积/联合面积。在格点场中,实况场和预报场交叉的面积与二者联合面积的比值。

(5)评分指标。包括 CSI 评分、漏报率、总评分三个指标。

CSI、漏报率计算方法如式(1)、式(2)所示。

$$CSI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n (A_i + B_i + C_i)} \quad (1)$$

$$\text{漏报率} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^n (A_i + C_i)} \quad (2)$$

式中: n 为参与平均的样本数, A 、 B 、 C 的定义参见表 2。

总评分是通过对所有属性的计算,得出的总体评价指标。

表 2 降雨检验分类表

Table 2 Classification for precipitation verification

实况	预报	
	有	无
有	A	C
无	B	D

1.2.4.2 短时强降水预报邻域检验

本文采用邻域法对短时强降水预报进行空间邻域检验。短时强降水时空尺度小、局地性强,常规的地面观测站很难完全观测到,采用传统的“点对点”检验方法难以客观准确地反映区域模式预报质量。空间检验法在强对流天气预报检验中应用较为广泛(郑永光等,2015)。短时强降水检验多采用美国 SPC 的“点对面”空间检验办法,即对于每一个区域站点上的短时强降水预报正确与否,是用以该站点为圆心,40 km 为半径的圆面上是否出现了短时强

降水来判别(唐文苑等,2017),本文参考该方法对短时强降水进行检验。

《检验方案》规定短时强降水检验指标为命中率和空报率,本文采用这两个指标对多区域模式的预报效果进行分析。

命中率(POD)、空报率(FAR)计算方法分别如式(3)、式(4)所示。

$$POD = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\sum_{i=1}^n (A_i + C_i)} \quad (3)$$

$$FAR = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{\sum_{i=1}^n (A_i + B_i)} \quad (4)$$

表 3 高压后部型降水过程中累积强降水预报目标对象检验结果

Table 3 Object-based verification of heavy rainfall of high-pressure type precipitation

检验项目	区域模式	检验结果
位置评价	CMA-SH9	预报位置偏西、偏北,质心距离为 20.12 km
	CMA-MESO	预报位置偏西、偏北,质心距离为 18.52 km
	CMA-DB	预报位置偏西、偏北,质心距离为 18.58 km
纵横比 (短轴/长轴)	CMA-SH9	预报:0.334,实况:0.445
	CMA-MESO	预报:0.250,实况:0.502
	CMA-DB	预报:0.469,实况:0.483
面积比 (实况面积/预报面积)	CMA-SH9	0.323
	CMA-MESO	0.466
	CMA-DB	0.274
重叠面积/联合面积	CMA-SH9	0.052
	CMA-MESO	0.047
	CMA-DB	0.040
评分指标	CMA-SH9	CSI:0.131,漏报率:0.831,总评分:0.643
	CMA-MESO	CSI:0.116,漏报率:0.832,总评分:0.592
	CMA-DB	CSI:0.123,漏报率:0.837,总评分:0.477

难理解为何模式预报的漏报率那么高,都在 83%左右(模式空报率也很大,因为面积比显示实况面积比预报面积小得多),CSI 评分只有 11.6%~13.1%。

综合得到评价结果:在高压后部型降水过程中,三个模式的位置偏差接近,质心距离在 18~21 km,属带状目标;CMA-MESO 预报形态偏差最大,过高估计了累积强降水落区的带状分布;CMA-DB 预报累积强降水落区偏大,漏报率高;CMA-SH9 的面积比和纵横比均表现较好,漏报率低,因此获得较高的 CSI 和总评分。MODE 能较好地判断累积强降水目标的形态,为预报员提供直观的参考信息。

2.1.2 短时强降水预报邻域检验

在高压后部型降雨过程中,基于邻域法,对短时

2 结果分析

2.1 多区域模式对高压后部型降水预报检验结果

2.1.1 累积强降水预报目标对象检验

在高压后部型降水过程中,使用区域模式和观测数据分别做为预报场和实况场,通过 MODE 进行分析。

由表 3 可见重叠面积/联合面积为 0.040~0.052(即 4.0%~5.2%),结合面积比(实况面积/预报面积)的 0.274~0.466(即 27.4%~46.6%),可以分析出,三个模式预报累积强降水的落区大部分(80%~86%)落在实际强降水发生区之外,这也就不

强降水预报进行命中率、空报率评分检验。

为了分析不同预报时效多区域高分辨率模式短时强降水预报性能差异,将各模式 08 时和 20 时起报的产品进行整合检验(图 1),对 24 h、36 h 时效内的短时强降水预报命中率、空报率评分进行分析,结果显示:在高压后部型降水过程中,三个模式所有时效的预报命中率评分都低于 12%,最高值为 11.6%;分析 12 h 短时强降水预报检验平均值(Avg_12)得出,在方圆 40 km 内不计偏差情况下,模式预报命中率平均在 4%以下,最大值达 3.8%,CMA-MESO 在 36 h 时效内的预报命中率高于 24 h,CMA-SH9 则相反;空报率平均值为 61%,三个模式均表现为临近时刻短时强降水预报空报率高

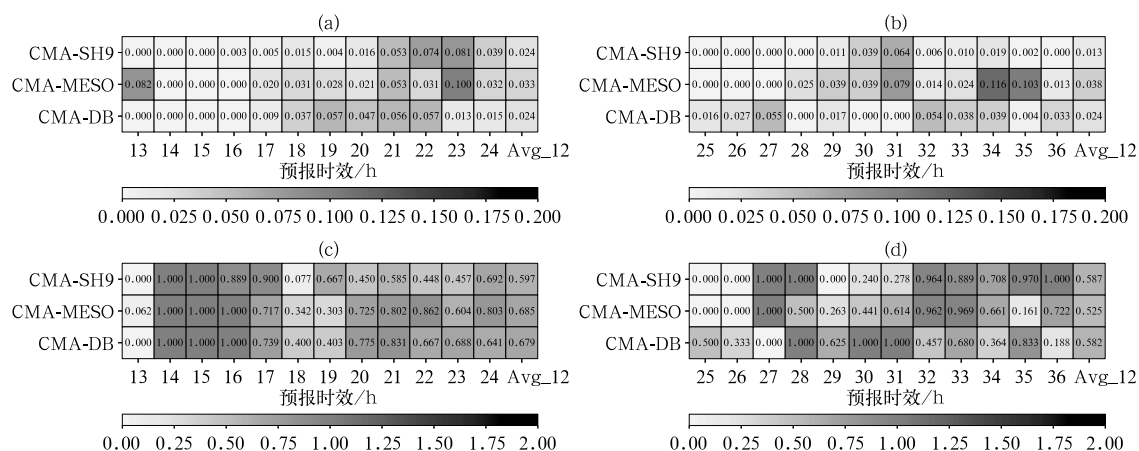


图 1 高压后部型降水过程中多区域模式(a,c)24 h和(b,d)36 h的短时强降水预报检验评分(数字,阴影)

(a,b)命中率,(c,d)空报率

[Avg_12:12 h 短时强降水预报检验平均值,样本量为 60 个时段(12 时×5 次)]

Fig. 1 The verification scores of results of (a, c) 24 h forecasts and (b, d) 36 h forecasts of short-term heavy rainfall forecasts simulated (number, shaded) by the three regional models for the rear of high-pressure type precipitation (a, b) hit ratio, (c, d) false alarm ratio

[Avg_12 stands for the mean values of 12 h short-time heavy rainfall

forecast test, the number of samples is 60 (12×5)]

(24 h 预报空报率大于 36 h)。

以上结果表明:CMA-MESO 在 36 h 的预报效果好于其他两个区域模式(命中率高、空报率低);CMA-SH9 在 24 h 的预报性能高于 36 h;CMA-DB 的 24 h、36 h 预报效果持平。多区域高分辨率模式短时强降水预报命中率较低、空报率较高的可能原因包括:辽宁(北方)地区短时强降水发生概率和频次低于南方地区,因此预报检验评分低于全国(唐文苑等,2017);模式本身存在一定误差;空间分辨率决定三个模式均对产生短时强降水的中小尺度系统预报能力有限。

为了分析不同起报时刻多区域模式预报性能差异,分别对 08 时和 20 时起报的短时强降水预报的命中率、空报率评分进行单独分析(图略),结果显示:与 20 时相比,CMA-SH9 在 08 时起报的短时强降水命中率低、空报率高;CMA-MESO 表现为 08 时的命中率和空报率均较高;CMA-DB 与 CMA-MESO 相反。

CMA-DB 模式的短时强降水预报检验结果显示:预报命中率在起报时间后的 13~24 h,其中间预报效果好于两端,这与区域模式雷达回波逐小时预报效果随时间的变化表现一致(刘静等,2019)。

2.2 多区域模式对气旋型降水预报检验结果

当辽宁省受气旋影响时,通常为偏北风和东南风辐合,冷空气和暖湿空气结合后,促进中尺度对流系统在地面锋前暖区发展,产生累积强降水(孙欣等,2016)。

2.2.1 累积强降水预报目标对象检验

由表 4 可见重叠面积/联合面积值为 0.002~0.186(即 0.2%~18.6%),结合面积比(实况面积/预报面积)值的 0.146~0.301(即 14.6%~30.1%),可以计算出,CMA-SH9、CMA-DB 两个模式预报的累积强降水落区大部分(81%~98%,而 CMA-MESO 仅有 25%)落在实际强降水发生区之外,因此 CMA-SH9 和 CMA-DB 两个模式预报的漏报率均很高,在 66.8%~72.1%,而 CMA-MESO 模式的漏报率比其他两个模式小得多,漏报率低于 37%;模式空报率也很大,因为面积比指标显示预报面积比实况面积大得多,因此 CMA-SH9 和 CMA-DB 两个模式的 CSI 评分只有 21.7%~30.6%。

综合得到评价结果:在气旋型降水过程中,三个区域模式的质心距离均在 17~22 km,属带状目标;CMA-MESO 预报的质心距离最近,但预报纵横比

和实况相差较多,对累积强降水落区的形态描述狭长,优势在于预报与实况重叠面积大,因此获得较高的 CSI 评分和总评分。

2.2.2 短时强降水预报邻域检验

在气旋型降水过程中,将各模式 08 时和 20 时起报的产品进行整合检验(图 2),对 24 h、36 h 的短时强降水预报命中率、空报率评分进行分析,结果显示:在气旋型降水过程中,三个模式所有时次的预报命中率评分都低于 20%,最高值为 19.7%;分析 12 h 短时强降水预报检验平均值(Avg_12)得出,在方圆 40 km 内不计偏差情况下,模式预报命中率平均在 10%以下,最大值达 9.2%;在 24 h 预报时效

内,CMA-MESO 预报命中率为 CMA-SH9 的两倍;CMA-SH9 在 36 h 时效内的预报命中率高 于 24 h,CMA-DB 则相反;空报率平均值为 41%,CMA-SH9 在 24 h 时效内的预报空报率大于 36 h,其他两个模式则相反。

以上结果表明:CMA-MESO 的命中率大于其他两个区域模式;CMA-SH9 在 24 h 的预报效果差,即命中率(空报率)低(高),CMA-DB 则相反。

在起报时刻后的第 32 个时次,CMA-SH9 呈现出预报命中率接近空报率的特征,这与 CMA-SH9 对西南地区的累积强降水预报检验结论一致(徐同等,2019)。

表 4 同表 3,但为气旋型降水过程

Table 4 Same as Table 3, but for cyclone type

检验项目	多区域模式	预报目标和实况目标
位置评价	CMA-SH9	预报位置偏东、偏南,质心距离为 21.359 km
	CMA-MESO	预报位置偏西、偏北,质心距离为 17.164 km
	CMA-DB	预报位置偏西、偏南,质心距离为 20.817 km
纵横比 (短轴/长轴)	CMA-SH9	预报:0.286,实况:0.549
	CMA-MESO	预报:0.303,实况:0.575
	CMA-DB	预报:0.445,实况:0.440
面积比 (实况面积/预报面积)	CMA-SH9	0.146
	CMA-MESO	0.264
	CMA-DB	0.301
重叠面积/联合面积	CMA-SH9	0.002
	CMA-MESO	0.186
	CMA-DB	0.046
评分指标	CMA-SH9	CSI:0.217,漏报率:0.721,总评分:0.421
	CMA-MESO	CSI:0.496,漏报率:0.367,总评分:0.563
	CMA-DB	CSI:0.306,漏报率:0.668,总评分:0.447

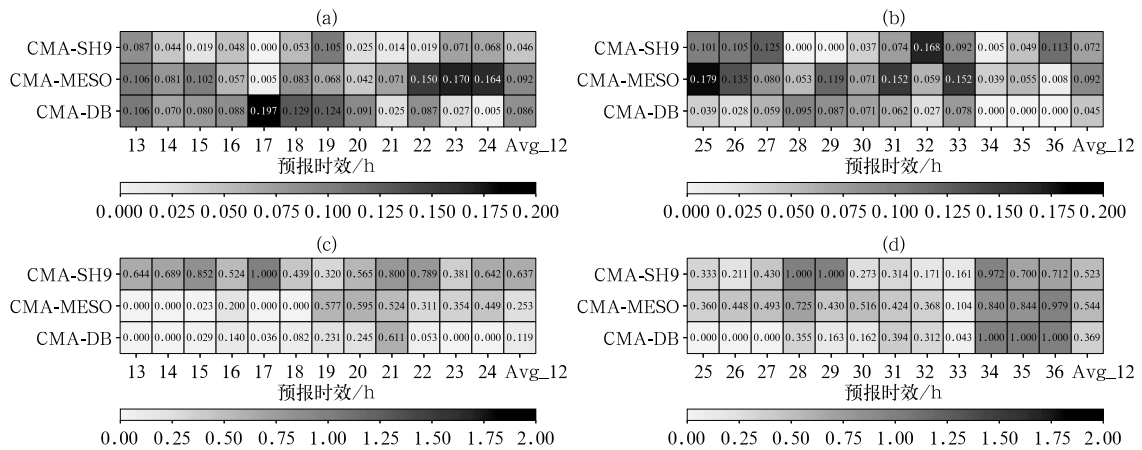


图 2 同图 1,但降水类型为气旋型降水

[样本量为 72 个时次(12 时×6 次)]

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for rainstorm processes of the cyclone type

[The number of samples is 72 (12×6)]

三个区域高分辨率模式在气旋型降水中的短时强降水预报命中率高于高压后部型降水,客观上表明多区域模式对气旋型降水过程中的短时强降水预报效果较好。

为了分析不同起报时刻多区域高分辨率模式短时强降水预报性能差异,分别对 08 时和 20 时起报的短时强降水预报命中率、空报率评分进行单独分析(图略),结果显示:与 20 时相比,CMA-SH9 表现为 08 时起报的短时强降水命中率和空报率均较低,CMA-MESO 和 CMA-SH9 预报表现相反;CMA-DB 表现命中率低,空报率高。

2.3 多区域模式对台风型降水预报检验结果

辽宁省台风型降水多受台风倒槽影响,锋生次级环流与风场辐合作用增强了动力抬升,水汽达到

暴雨阈值,不稳定能量释放产生大暴雨(阎琦等,2019)。

2.3.1 累积强降水预报目标对象检验

由表 5 可见重叠面积/联合面积值为 0.084~0.122(即 8.4%~12.2%),结合面积比(实况面积/预报面积)的 0.369~0.581(即 36.9%~58.1%),可以总结出,三个模式预报的累积强降水落区几乎(60%~76%)落在实际强降水发生区之外,这就可以合理解释模式预报的漏报率为何那么高,均值在 67%左右(模式空报率也很大,因为面积比指标显示实况面积比预报面积小得多),CSI 评分只有 9.9%~12.4%。

由于预报面积偏小、落区形态差异等问题,三个区域模式在台风型累积强降水过程中的 CSI 评分偏低,为预报员提供参考信息的能力不足。

表 5 同表 3,但为台风型降水过程
Table 5 Same as Table 3, but for typhoon type

检验项目	多区域模式	预报目标和实况目标
位置评价	CMA-SH9	预报位置偏东、偏南,质心距离为 17.081 km
	CMA-MESO	预报位置偏东、偏南,质心距离为 20.211 km
	CMA-DB	预报位置偏东、偏南,质心距离为 17.996 km
纵横比 (短轴/长轴)	CMA-SH9	预报:0.597,实况:0.531
	CMA-MESO	预报:0.704,实况:0.646
	CMA-DB	预报:0.595,实况:0.659
面积比 (实况面积/预报面积)	CMA-SH9	0.369
	CMA-MESO	0.384
	CMA-DB	0.581
重叠面积/联合面积	CMA-SH9	0.122
	CMA-MESO	0.084
	CMA-DB	0.098
评分指标	CMA-SH9	CSI:0.124,漏报率:0.704,总评分:0.601
	CMA-MESO	CSI:0.119,漏报率:0.570,总评分:0.567
	CMA-DB	CSI:0.099,漏报率:0.746,总评分:0.620

2.3.2 短时强降水预报检验

在台风型降水类型中,为了分析不同预报时效多区域高分辨率模式短时强降水预报性能差异,将各模式 08 时和 20 时起报的产品进行整合检验(图 3),对 24 h、36 h 时效内的短时强降水预报命中率、空报率评分进行分析,结果显示:三个模式所有时次的预报命中率评分都低于 0.11(11%);分析 12 h 短时强降水预报检验平均值(Avg_12)得出,在方圆 40 km 内不计偏差情况下,模式预报命中率最大值仅为 3%,CMA-MESO 在 36 h 时效内的预报命中率好于 24 h,CMA-SH9 和 CMA-DB 则相反;空报率平均值为 75%,CMA-DB 在 24 h 时效内的预报空报率高于 36 h,其他两个模式相反。

以上结果表明:在 24 h 和 36 h 的整体时效内,CMA-SH9 的命中率大于其他两个区域模式,但空报率表现为三个区域模式最高值,平均值达 75%,这与王新敏和栗晗(2020)研究结论一致,CMA-SH9 模式对台风暴雨的降水范围和强度比实况大得多,空报也较多;所有模式 12 h 短时强降水预报命中率均值小于 2.1%。综合考虑命中率和空报率,多区域高分辨率模式在台风型降水过程中的预报效果显著低于高压后部型和气旋型降雨,这可能是由于,区域模式在长时效内预报台风路径的能力有限,对于台风系统影响陆上降水预报的稳定性和准确性均表现欠佳(宫宇等,2018),也有可能因为区域模式对台风快速增强的预报能力较弱(薛文博等,2020)。

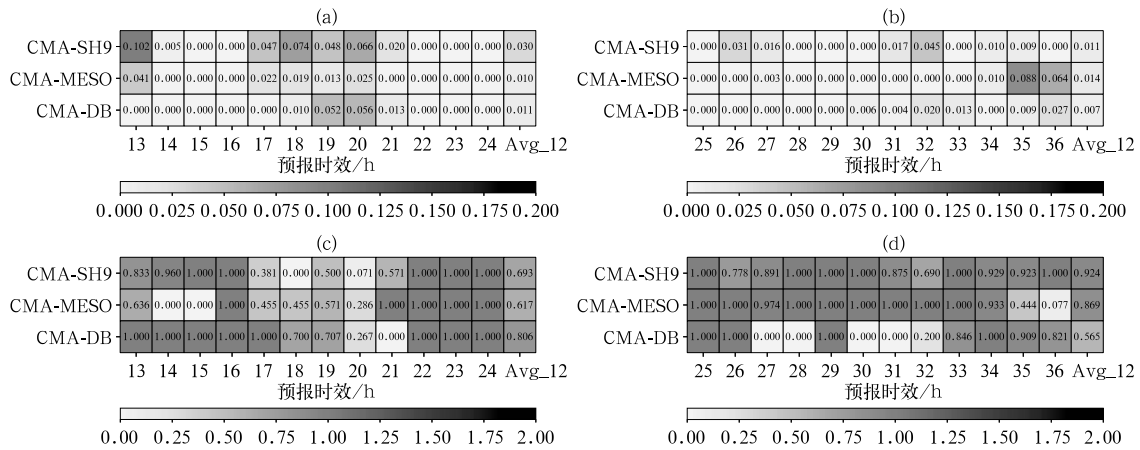


图 3 同图 1, 但降水类型为台风型降水

[样本量为 60 个时次(12 时×5 次)]

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for rainstorm processes of the typhoon type

[The number of samples is 60 (12×5)]

为了分析不同起报时刻多区域模式短时强降水预报性能差异,分别对 08 时和 20 时起报的短时强降水预报命中率、空报率评分进行单独分析(图略),结果显示:与 20 时相比,CMA-SH9、CMA-MESO 和 CMA-DB 均表现为 08 时起报的短时强降水预报效果好,即命中率(空报率)高(低)。

3 结论与讨论

目前,天气预报业务和多区域高分辨率模式研究常用长时效基于点对点的检验方法,面向多区域高分辨率模式,基于短时效和逐小时的强降水检验尚不多见。本文综合已有的研究,对东北地区业务常用多区域高分辨率模式进行累积强降水目标对象检验和短时强降水邻域法检验,从不同角度挖掘区域模式附加信息,为预报员决策提供参考。

(1)千米尺度或接近千米尺度的三个模式,在 36 h 时效内,对于累积强降水落区的形态预报与实况有相似性,落区质心预报偏差一般在 20 km 左右。然而,强降水预报落区与实况重叠的面积一般都在 10% 以下,个别情形下(如 CMA-MESO 对于气旋型降水过程),累积强降水落区预报与实况重叠度能够接近 20%;位置偏离的直接结果是导致漏报率高(一般在 75% 左右,CMA-MESO 漏报率略低,为 10%~20%),其中高压后部型降水过程中累积强降水的漏报率超过 80%,位置偏离也造成较高空报率。

(2)对短时强降水预报,在方圆 40 km 内不计

偏差情况下,模式预报命中率平均在 10% 以下、最大值为 9.2%,气旋型降水过程的命中率评分高于高压后部型和台风型;空报率平均值为 58.7%,台风型降水过程中空报率最高,达到 74.6%;三种天气型中,区域模式对台风型降水过程的短时强降水预报性能最低。

(3)从累积强降水目标对象检验得出:重叠面积与联合面积比与 CSI 评分有很好的正相关,预报的纵横比小(高估累积强降水落区带状分布)、重叠面积与联合面积比小、位置偏差大、漏报率高等因素均易造成 CSI 评分偏低;CMA-SH9 对累积强降水落区形态带状分布估计过高,CMA-MESO 累积强降水落区预报偏北,CMA-DB 与实况目标匹配的预报目标个数最多。

(4)在高压后部型降水过程中,应充分考虑南侧的累积强降水落区;在气旋型降水过程中,可以结合气旋系统强弱,调整累积强降水落区的带状分布形态;在台风型降水过程中,应结合全球模式预报结论,预估多区域模式短时强降水预报面积,判断累积强降水预报的形态和落区。

受时间尺度和降水日期数量的限制,检验结果不能完全准确地描述区域高分辨率模式预报的能力。不同区域模式在辽宁地区降水过程中预报表现差异较大,具体是由哪些因素导致了不同的预报效果有待进一步研究。

致谢:本文在撰写过程中,得到上海市气象台戴建华研究员、陕西省气象台潘留杰研究员的悉心指导和帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献

- 陈传雷,杨青,2018.辽宁省区域性大暴雨特征及预报技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社:15-16. Chen C L, Yang Q, 2018. Characteristics and Forecast Technology of Regional Heavy Rainstorm in Liaoning Province[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press:15-16(in Chinese).
- 戴建华,茅懋,邵玲玲,等,2013.强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试[J].气象科技进展,3(3):40-45. Dai J H, Mao M, Shao L L, et al, 2013. Applications of a new verification method for severe convection forecasting and nowcasting in Shanghai [J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(3):40-45(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).
- 何爽爽,汪君,王会军,2018. 基于卫星降水和 WRF 预报降水的“6.18”门头沟泥石流事件的回报检验研究[J].大气科学,42(3):590-606. He S S, Wang J, Wang H J, 2018. Hindcast study of “6.18” Mentougou debris-flow event based on satellite rainfall and WRF forecasted rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):590-606(in Chinese).
- 李佰平,戴建华,张欣,等,2016. 三类强对流天气临近预报的模糊检验试验与对比[J].气象,42(2):129-143. Li B P, Dai J H, Zhang X, et al, 2016. Fuzzy verification test and comparison of three types of severe convective weather nowcasting[J]. Meteor Mon, 42(2):129-143(in Chinese).
- 刘静,才奎志,谭政华,2019. 高分辨率模式雷达回波预报能力分析[J].气象,45(12):1710-1717. Liu J, Cai K Z, Tan Z H, 2019. Analysis of radar echo forecasting capability of different high-resolution models[J]. Meteor Mon, 45(12):1710-1717(in Chinese).
- 刘静,陈传雷,严俊,等,2021. 2015—2019 年辽宁省暴雨红色预警信号分布及其特征[J].气象与环境学报,37(1):100-105. Liu J, Chen C L, Yan J, et al, 2021. Characteristic analysis of red rainstorm warning signals from 2015 to 2019 in Liaoning Province [J]. J Meteor Environ, 37(1):100-105(in Chinese).
- 刘静,任川,董巍,等,2016. 辽宁地区一次强降水过程诊断分析[J].气象与环境学报,32(2):18-27. Liu J, Ren C, Dong W, et al, 2016. Diagnostic analysis of a strong precipitation in Liaoning Province[J]. J Meteor Environ, 32(2):18-27(in Chinese).
- 罗月琳,高丽,陈权亮,等,2021. GRAPES-GEPS 环流集合预报的分类释用方法研究与检验[J].气象学报,79(4):646-658. Luo Y L, Gao L, Chen Q L, et al, 2021. Classification interpretation method and verification of circulation ensemble forecasts in GRAPES-GEPS[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):646-658(in Chinese).
- 马申佳,陈超辉,智协飞,等,2018. 基于时空不确定性的对流尺度集合预报效果评估检验[J].气象学报,76(4):578-589. Ma S J, Chen C H, Zhi X F, et al, 2018. The assessment and verification of convection-allowing ensemble forecast based on spatial-temporal uncertainties[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):578-589(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).
- 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]. Clim Environ Res, 22(1):45-58(in Chinese).
- 全国防灾减灾标准化技术委员会(SAC/TC 345),2017. 数值天气预报产品检验规范:GB/T 34303—2017[S].北京:中国标准出版社. National Technical Committee 345 on Disaster Reduction and Relief of Standardization Administration of China, 2017. Specifications of numerical weather predication products verification:GB/T 34303-2017[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 漆梁波,徐珺,2018. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J].气象,44(1):1-14. Qi L B, Xu J, 2018. Rethink on short-range forecast of the 9 July severe rainstorm in northern Henan [J]. Meteor Mon, 44(1):1-14(in Chinese).
- 苏翔,刘梅,康志明,等,2022. 2020 年江苏主汛期短期暴雨预报检验[J].气象,48(3):357-371. Su X, Liu M, Kang Z M, et al, 2022. Verification of short-range torrential rain forecast during the 2020 Jiangsu main flood season[J]. Meteor Mon, 48(3):357-371(in Chinese).
- 孙欣,陈传雷,梁寒,等,2016. 辽宁地区大暴雨环境场和物理量场合成分析[J].气象与环境学报,32(5):40-46. Sun X, Chen C L, Liang H, et al, 2016. Composite analysis of environmental and physical quantity fields of heavy rainstorm in Liaoning Province [J]. J Meteor Environ, 32(5):40-46(in Chinese).
- 唐文苑,周庆亮,刘鑫华,等,2017. 国家级强对流天气分类预报检验分析[J].气象,43(1):67-76. Tang W Y, Zhou Q L, Liu X H, et al, 2017. Analysis on verification of national severe convective weather categorical forecasts[J]. Meteor Mon, 43(1):67-76(in Chinese).
- 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]. Chin J Atmos Sci, 45(3):664-682(in Chinese).
- 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 global precipitation forecast over Yalong River Basin in flood season[J]. Meteor Mon, 47(10):1193-1205(in Chinese).
- 王新敏,栗哈,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]. Meteor Mon, 46(6):753-764(in Chinese).
- 徐同, 李佳, 杨玉华, 等, 2016. SMS-WARMS V2.0 模式预报效果检验[J]. 气象, 42(10):1176-1183. Xu T, Li J, Yang Y H, et al, 2016. Verification of SMS-WARMS V2.0 model forecast results [J]. Meteor Mon, 42(10):1176-1183(in Chinese).
- 徐同, 杨玉华, 李佳, 等, 2019. SMS-WARMS V2.0 模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验[J]. 气象, 45(8):1065-1074. Xu T, Yang Y H, Li J, et al, 2019. An objective verification of forecasting ability of SMS-WARMS V2.0 model precipitation in Southwest China[J]. Meteor Mon, 45(8):1065-1074(in Chinese).
- 薛文博, 余晖, 汤胜茗, 等, 2020. 上海快速更新同化数值预报系统(SMS-WARR)的近地面风速预报检验评估[J]. 气象, 46(12):1529-1542. Xue W B, Yu H, Tang S M, et al, 2020. Verification on surface wind speed forecast of Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System (SMS-WARR)[J]. Meteor Mon, 46(12):1529-1542(in Chinese).
- 阎琦, 赵梓淇, 李爽, 等, 2019. 2018 年辽宁两次致灾台风暴雨动力机制对比分析[J]. 灾害学, 34(3):76-84. Yan Q, Zhao Z Q, Li S, et al, 2019. Comparative analysis of dynamic mechanism of two severe torrential rain of typhoon in 2018 in Liaoning [J]. Catastrophology, 34(3):76-84(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 37(12):1498-1503(in Chinese).
- 于翡, 黄丽萍, 邓莲堂, 2018. GRAPES-MESO 模式不同空间分辨率对中国夏季降水预报的影响分析[J]. 大气科学, 42(5):1146-1156. Yu F, Huang L P, Deng L T, 2018. Impacts of different GRAPES-MESO model spatial resolutions on summer rainfall forecast in China [J]. Chin J Atmos Sci, 42(5):1146-1156(in Chinese).
- 赵宁坤, 张秀年, 孙俊奎, 等, 2021. 高分辨率区域模式降水预报在云南的检验[J]. 暴雨灾害, 40(1):78-86. Zhao N K, Zhang X N, Sun J K, et al, 2021. Verifications of high-resolution regional numerical model precipitation forecast in Yunnan Province [J]. Torr Rain Dis, 40(1):78-86(in Chinese).
- 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等, 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 26(6):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather [J]. J Appl Meteor Sci, 26(6):641-657(in Chinese).
- Chakraborty A, 2010. The skill of ECMWF medium-range forecasts during the year of tropical convection 2008[J]. Mon Wea Rev, 138(10):3787-3805.
- Chen J, Wang Y, Li L, et al, 2013. A unified verification system for operational models from regional meteorological centres of China Meteorological Administration [J]. Meteor Appl, 20(2):140-149.
- Davis C, Brown B, 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, Brown B, Bullock R, 2006b. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems [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.
- Duc L, Saito K, Seko H, 2013. Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts [J]. Tellus A Dyn Meteor Oceanogr, 65(1):18171.
- Gilleland E, Ahijevych D, Brown B G, et al, 2009. Intercomparison of spatial forecast verification methods [J]. Wea Forecasting, 24(5):1416-1430.
- Gofa F, Boucouvala D, Louka P, et al, 2018. Spatial verification approaches as a tool to evaluate the performance of high resolution precipitation forecasts [J]. Atmos Res, 208:78-87.

(本文责编:何晓欢)