

曲巧娜, 盛春岩, 范苏丹, 等, 2019. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象, 45(7): 908-919. Qu Q N, Sheng C Y, Fan S D, et al, 2019. Comparison of the multi-model forecasts for severe precipitation based on the object verification [J]. Meteor Mon, 45(7): 908-919(in Chinese).

## 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较\*

曲巧娜 盛春岩 范苏丹 荣艳敏

山东省气象科学研究所, 济南 250031

**提 要:** 针对传统 TS 检验方法的不足, 引入了目标对象检验方法, 通过对降水落区的面积、位置、形状和强度进行匹配, 可获取空间场潜在的预报信息。以欧洲中心细网格、T639、山东 WRF 集合模式和华东区域中尺度模式(BCSH)为例, 采用强降水过程模式预报最优次数及要素箱线图统计方法, 得到模式及集合预报产品的性能特征, 根据环流形势及影响系统对强降水分型, 结果表明: 热带气旋与中低纬度系统相互作用的强降水过程模式预报效果最好, 最具参考性; 低涡和切变线相伴随的强降水过程效果次之, 且以 BCSH 和山东 WRF 集合最大值预报效果更好, 各模式对低槽系统强降水预报能力一般, 对温带气旋类型强降水过程模式预报效果差的概率最大。

**关键词:** 目标对象, 数值模式, 降水预报, 检验

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.002

### Comparison of the Multi-Model Forecasts for Severe Precipitation Based on the Object Verification

QU Qiaona SHENG Chunyan FAN Sudan RONG Yanmin

Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031

**Abstract:** Aiming at the poor performance of the TS verification method, object-based verification method is introduced, by which the objects in the two datasets are matched in area, position, morphology and intensity to get potential forecast information of spatial field. Taking EC\_THIN, T639, ensemble forecast of WRF and BCSH for example, for the purpose of integrating the characteristics of multi-model, the optimal times about the forecast of each severe precipitation are selected and the box-and-whisker plots are used. The circulation patterns and influence systems of severe precipitation are typed. The results show that the score is the best about the forecast of heavy rainfall caused by tropical cyclone with mid-low latitude circulation. The score of low-pressure vortex and shear line of heavy rainfall processes is better, of which the best forecast of model is BCSH and EnMAX. The forecasts of 12 models for pressure trough are ordinary. When the system is extratropical cyclone with heavy rainfall, the score is the worst.

**Key words:** object, numerical model, precipitation forecast, verification

\* 精细化集合数值天气预报平台(2011YD01106)、山东省重点研发计划项目(2016GSF120017)、十三五“山东现代农业气象服务保障工程”及山东省气象科学研究所开放基金课题(SDQXKF2015M07 和 SDQXKF2014Z02)共同资助

2018 年 2 月 18 日收稿; 2018 年 9 月 28 日收修定稿

第一作者: 曲巧娜, 主要从事天气预报及模式释用工作. Email: quqiaona77@163.com

## 引言

TS评分由于遵循严格的点对点检验,往往会漏掉预报中一些积极的对预报员有价值的空间信息特征(戴建华等,2013)。近年来针对空间诊断开展了一系列的工作,主要有两类,一类是模糊检验方法(Ebert,2008;李佰平等,2016),通过对空间进行尺度变换处理,获得预报在不同空间尺度上的评价信息,另一类是基于降水落区和强度等目标对象,其研究进展主要有以下几个方面:一是运用天气学和主观检验方法,从量级、雨带落区和移速(肖红茹等,2013),系统生成时间、中心强度、槽线位置和移动速度等(贾丽红等,2012),以及曲巧娜等(2016)以降水落区和强度为着眼点,制定了强降水落区偏离程度的检验方法,检验的指标有“偏离程度”(模式相对实况偏离经纬度 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $>2^\circ$ 、准确,共4项)、“偏离方向”、模式“漏报”和“有指示意义”等,取得了有益于了解模式性能特征的结论,但由于采用的是主观检验,检验的结果不够精细;二是公颖(2010)引入了Wernli et al(2008)关于SAL检验方法,对雨带的预报从强度(A)、位置(L)和结构(S)三方面进行评估,L值对预报效果最有指示意义,A值其次,S值再次;三是尤凤春等(2011)使用WRF模式MET检验包中MODE方法对整体雨区的轴角差、重合面积、面积比率等进行检验;四是面向对象法(熊秋芬,2011;刘凑华和牛若芸,2013;符娇兰等,2014;茅懋等,2016),首先识别降水落区,而后对识别的对象进行预报与实况的对比,其中茅懋等(2016)除了给出定量的分析还提供了对各要素评价,能够更细致地深入剖析模式的性能特征。

目前预报业务中模式种类不断趋于多样化,从大尺度到中尺度模式再发展到集合预报模式,各模式在不同地域的预报效果不一,加之预报的时效性所限,亟需快速有效地获取模式的预报特征。因此本文采用目标对象检验方法,通过综合预报与实况对应目标对象的面积、位置、形状和强度评分,对多种模式和集合预报成员进行评价,为预报员提供不同影响系统模式预报性能的差异特征。

## 1 资料和检验方法

### 1.1 资料以及强降水过程的选取

参与检验的模式主要有:2013年3月投入业务化试运行的山东WRF确定性预报(分辨率分别为12和4 km,以下简称EnWRF\_12 km、EnWRF\_4 km),属区域模式;山东WRF集合预报系统的不同分位数(分辨率为12 km,总成员数为24个),以下分别简称集合最小值(EnMIN)、En10%、En25%、En50%、En75%、En90%、集合最大值(EnMAX),属区域模式;ECMWF模式细网格(以下简称EC\_THIN)属全球模式,业务中产品分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ;T639模式属于全球模式,业务中产品分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ;华东区域中尺度模式(以下简称BCSH),属于区域模式,水平分辨率为9 km。

参与检验的资料为2014—2016年6—8月降水实况,模式资料为与实况对应的每日20时(北京时,下同)预报的0~24 h累计降水量。根据山东省近3年的降水特征,从2014、2015和2016年6—8月中选取降水范围大、雨量强的过程进行检验,共41次强降水过程日(表1)。

表1 2014—2016年6—8月山东省41次强降水过程日期及影响系统

Table 1 The data and influence systems of 41 severe precipitation processes in Shandong in June—August 2014—2016

强降水过程日期及系统类型(年-月-日-影响系统)			
14-06-01-江淮气旋	14-06-20-切变线	14-07-04-切变线	14-07-15-横槽转竖
14-07-23-副热带高压(以下简称副高)边缘切变线	14-07-25-台风外围和西风槽	14-07-30-切变线	14-08-06-切变线
14-08-14-西风槽和切变线	14-08-17-低涡、切变线	14-08-24-西风槽和切变线	15-06-24-切变线
15-07-12-台风	15-07-16-切变线	15-07-18-低槽	15-07-23-冷涡
15-07-31-切变线	15-08-03-高空冷涡和副高边缘暖湿气流	15-08-07-副高边缘切变线	15-08-15-低槽
15-08-23-西风槽	15-08-26-台风外围	16-06-14-低涡、切变线	16-06-21-低槽
16-06-23-高空槽和低涡切变线	16-07-01-低槽和地面倒槽	16-07-13-切变线	16-07-15-江淮气旋
16-07-20-黄淮气旋	16-07-22-切变线	16-07-26-副高边缘切变线	16-07-28-切变线
16-07-31-副高边缘切变线	16-08-01-切变线	16-08-03-切变线	16-08-06-低涡
16-08-08-低槽	16-08-14-副高边缘切变线	16-08-17-切变线	16-08-20-切变线
16-08-25-低槽冷锋			

## 1.2 检验方法

检验方法是参考茅懋等(2016)使用的目标对象检验法,与其相比主要有两个方面不同。一是茅懋等(2016)中采用的是格点资料,本文选用的是 147 个站点资料(图 1a,包括山东省 123 个国家级地面气象观测站和 24 个山东省沿海自动气象观测站),由于站点分布不规则,识别目标对象有一定的困难。格点资料中目标对象的选取方法为将任一格点与其周围 8 个格点视为一个整体,当周围 8 个格点均无大于阈值的降水产生时,便将整个区域不同降水落区区别开来。参照格点选取目标对象的方法,最初的方案为将任一站点周围 30 km 内最近的 8 个站点定为一组,结果周围最近站点数达到 8 个站的很少并且甄别对象大多是零碎的,主要原因是相邻两站间距较大,不宜将范围选取得过小,经过多次试验对比,发现选取任一站点周围 80 km 范围内最近的 11 个站点为一个组合甄别目标效果最好。二是茅懋等(2016)采用的是降水分级检验,但是在实际预报中常有图 1b 中类似情况发生,即预报场雨区形状和强降水中心位置均预报得较好,当实况场强降水中心达 59 mm,预报场降水中心为 49 mm 时,若进行暴雨及以上分级检验时,预报场的评分为 0.00,实际上此预报场对预报员有很大的参考意义。

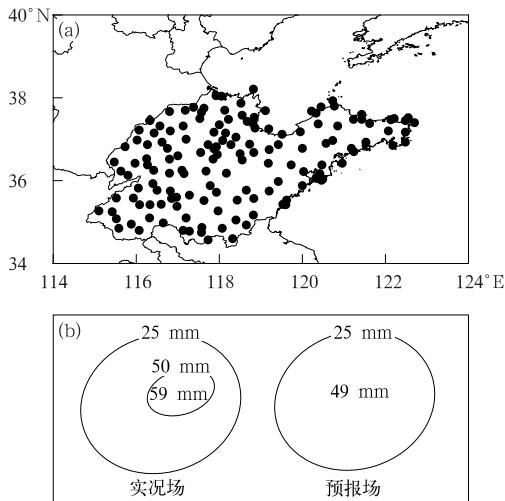


图 1 参与检验的站点分布(a)和强降水实况及预报示意图(b)

Fig.1 Sketch map of the stations with verification (a) and observations and forecasting of severe precipitation (b)

### 1.2.1 检验流程

检验流程分为两个部分,一是识别匹配,二是检验评价。

识别匹配部分,首先从实况中筛选出大于一定强度量级的降水目标并进行编码,然后对预报识别对象进行搜索匹配,分别计算每个目标对象的面积、重心位置、形状和强度参数,最后运用加权法综合四项评分。检验评价是对检验的结果在面积、位置、形状和强度四方面进行定量评价,本文中增加了对降水中心强度的评分和评价,除了对降水落区形状有直观的认识外,降水强度评分在实际预报中同样重要。

### 1.2.2 评分方法

#### (1) 面积评分

$$S_{Area} = \left( 2 \cdot \left| \frac{A_{mod} - A_{obs}}{A_{obs}} \right| + 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

式中,  $S_{Area}$  为面积评分,  $A_{mod}$  为预报目标对象面积,  $A_{obs}$  为实况目标对象面积。

#### (2) 重心位置评分

$$S_{GC} = 1 - \frac{L - L_{min}}{L_{max} - L_{min}} \quad (2)$$

式中,  $S_{GC}$  为重心评分,  $L_{max}$  为最大容忍距离,  $L_{min}$  为最佳距离,在山东省应用时,考虑到山东省东西向范围约 700 km 左右,南北向约 420 km,针对短期预报容忍最大偏差东西向  $L_{max}$  取 350 km,相应最小偏差  $L_{min}$  取 35 km,南北向  $L_{max}$  取 210 km,  $L_{min}$  取 21 km。

当预报对象与实况对象的重心距离  $L \geq L_{max}$  时,  $S_{GC} = 0$ ; 当  $L_{min} < L < L_{max}$  时,  $S_{GC} = 1 - (L - L_{min}) / (L_{max} - L_{min})$ ; 当  $L \leq L_{min}$  时,  $S_{GC} = 1$ 。

#### (3) 形状评分

$$S_{Axial} = \begin{cases} 0 & D_{AxA} \geq 90^\circ \\ \frac{90 - D_{AxA}}{90 - 10} & 10^\circ \leq D_{AxA} < 90^\circ \\ 1 & D_{AxA} < 10^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $S_{Axial}$  为轴向角评分,  $D_{AxA}$  为预报与实况对象的轴向角差。

$$S_{Ellip} = \begin{cases} 0 & D_{Ellip} \geq 0.5 \\ \frac{0.5 - D_{Ellip}}{0.5 - 0.1} & 0.1 \leq D_{Ellip} < 0.5 \\ 1 & D_{Ellip} < 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S_{Ellip}$  为椭圆率评分,  $D_{Ellip}$  为预报与实况对象的椭圆率差。

#### (4) 降水中心强度评分

降水可分为 6 个等级,分别为小雨、中雨、大雨、

暴雨、大暴雨和特大暴雨,重点关注 24 h 累计降水达大雨及以上量级的强降水。

降水中心强度评分定义为:以实况降水等级为基准,模式与实况强降水中心等级一致,或模式与实况强降水中心差值的绝对值≤10 mm,以上两种情况评分均为 1;当模式与实况强降水中心相差 1 个等级,则评分为 0.50;相差 1 个等级以上,则评分为 0.00。模式与实况强降水中心差值评分主要考虑的是图 1b 中的情况,结合曲巧娜等(2016)得出的 EC\_THIN 等预报的大部分过程降水最大值中心偏小,并咨询山东省气象台预报员对于强降水过程模式预报降水极值的容忍度不超过 1 个等级或 20 mm 且差值≤10 mm 为最好。

1.2.3 总体检验评分

$$S_{1q} = R_1 S_{Area} + R_2 S_{GC} + R_3 (S_{Axial} + S_{Ellip}) \quad (5)$$

式中,  $S_{1q}$  为落区检验评分,  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  分别为面积、位置和形状三项的权重系数。

Wernli et al (2008)、公颖 (2010) 和茅懋等 (2016) 提到对降水预报效果指示意义最大的是位置,关注的重点依次是位置、面积和形状,因此本文降水落区的三项权重系数分别选取 0.3、0.5 和 0.2。

在落区检验的基础上,考虑降水强度评分后,总体检验评分公式为:

$$S = R_4 S_{1q} + R_5 S_{int} \quad (6)$$

式中,  $S$  为总体检验评分,  $S_{int}$  为强度评分,  $R_4$ 、 $R_5$  分别为落区和强度的权重系数,根据预报员的重视程度,分别取 0.8 和 0.2。

为了评价总体评分的好/差,将总评分≥80% 定义为“Ⅰ级评分”,总体评分在 [60%, 80%) 定义为“Ⅱ级评分”,总体评分 < 60% 定义为“Ⅲ级评分”。值得注意的是,当实况站点数 < 2 站时,无面积和形状评分,总评分为 0.60;当实况站点数为 3 时,无形状评分,总评分为 0.84;当实况站点数 ≥ 4 时,总评分为 1.00。

2 基于目标对象检验法的检验评价个例

以 2014 年 7 月 22 日强降水过程日为例,给出目标对象识别、检验和评价情况分析。

图 2 为 2014 年 7 月 21—22 日 ≥ 25 mm 实况累积降水量及其目标识别图和 EC\_THIN、T639、EnWRF\_12 km 21 日预报的 24 h 累计降水量目标识别图。图 2a、2b 给出了 24 h 大雨及以上累计降水量实况图,降水落区(图 2a)主要分布在鲁西北的西部和山东半岛的北部地区,通过目标对象法识别出

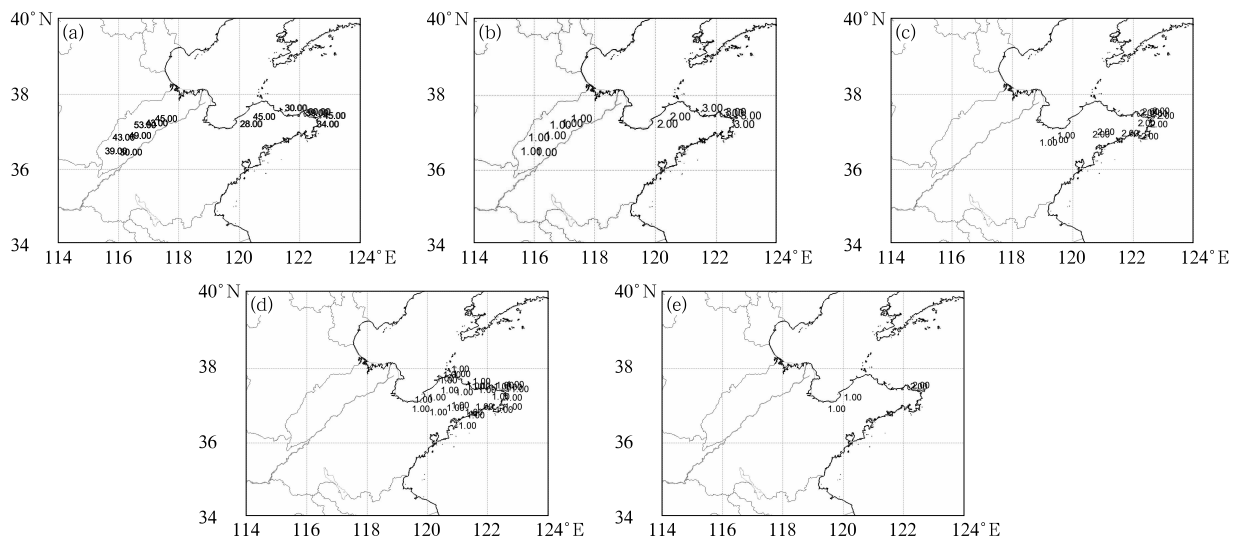


图 2 2014 年 7 月 21—22 日 ≥ 25 mm 实况累积降水量(a,单位:mm)、实况目标识别图(b),以及 EC\_THIN(c)、T639(d)、EnWRF\_12 km(e)21 日预报的 24 h 累计降水量目标识别图 (图 2b~2e 中数字为降水落区代码)

Fig. 2 The ≥25 mm accumulated precipitation (a, unit: mm) and object identified (b) of observations from 21 to 22 July 2014 and the object identified of EC\_THIN (c), T639 (d), EnWRF\_12 km (e) forecasted on 21 July 2014 (Numbers in Figs. 2b—2e represent the precipitation area)

与实况降水落区完全一致的 3 个目标对象(图 2b)。图 2c~2e 分别为 EC\_THIN、T639、EnWRF\_12 km 预报的降水落区,EC\_THIN(图 2c)识别出 2 个目标对象,分布在鲁中的东部和山东半岛地区,T639(图 2d)识别出 1 个目标对象分布于山东半岛地区,EnWRF\_12km(图 2e)识别出 2 个目标对象,位于鲁

中的东部和山东半岛的东北部地区,从主观分析来看,3 个模式均未预报出鲁西北西部的降水落区,但对山东半岛降水落区均有预报结果,下面通过目标对象检验评分和评价(表 2),得出模式具体预报的优劣。

表 2 2014 年 7 月 21 日 EC\_THIN、T639、EnWRF\_12 km 目标对象检验结果

Table 2 Object-based verification about EC\_THIN, T639, EnWRF\_12 km forecasted on 21 July 2014

检验项目	EC_THIN			T639			EnWRF_12 km		
	实况目标 1 暴雨和预 报目标 1	实况目标 2 大雨和预 报目标 1	实况目标 3 暴雨和预 报目标 2	实况目标 1 暴雨和预 报目标 1	实况目标 2 大雨和预 报目标 1	实况目标 3 暴雨和预 报目标 1	实况目标 1 暴雨和预 报目标 1	实况目标 2 大雨和预 报目标 1	实况目标 3 暴雨和预 报目标 2
面积评分	0.35	0.00	0.10	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
位置评分	0.43	0.81	1.00	0.00	0.82	0.91	0.27	0.99	1.00
轴向角 形状评分	0.00	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
椭圆率 评分	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
强度评分	0.50	1.00	0.50	0.50	0.00	0.50	1.00	0.50	0.50
检验总评分	0.35	0.52	0.52	0.18	0.33	0.48	0.31	0.50	0.50
面积评价	预报目标 偏小 94%	实况站点数 <3,无面积	预报目标 偏大 439%	预报目标偏 大 885.28%	实况站点数 <3,无面积	预报目标偏 大 2305%	预报站点数 <3,无面积	实况站点数 <3,无面积	预报站点数 <3,无面积
位置评价	预报重心 偏东 250.34 km, 偏南 19.6 km	预报重心 偏西 93.25 km, 偏南 59.12 km	无偏离	重心评分 为 0,不 做评价	预报重心 偏东 106.94 km, 偏南 2.26 km	预报重心 偏西 58.06 km, 偏南 20.04 km	预报重心 偏东 307.89 km, 偏北 18.23 km	预报重心 偏西 37.88 km, 偏南 24.32 km	无偏离
形状评价	预报格点 数<4,无 椭圆	实况站点 数<4,无 椭圆	预报目标 椭圆率偏 大 32.5%, 长轴偏长 66.31%, 预报雨带 东西走向, 线状目标	预报目标 椭圆率偏 大 109.65%, 长轴偏长 67.64%,预 报雨带东 西走向, 带状目标	实况站点 数<4,无 椭圆	预报目标 椭圆率偏 小 50.6%, 长轴偏长 152.56%, 预报雨带 东西走向, 带状目标	预报站点 数<4,无 椭圆	实况站点 数<4,无 椭圆	预报站点 数<4,无 椭圆
强降水中心评价	预报中心偏 小 21.3 mm	预报中心偏 小 13.4 mm	预报中心偏 小 26.6 mm	预报中心偏 大 47 mm	预报中心偏 大 54.9 mm	预报中心偏 大 40.4 mm	预报中心偏 大 3.8 mm	预报中心偏 大 11.7 mm	预报中心偏 小 27.6 mm

从评分结果来看,对于实况目标 1 评分最高的模式是 EC\_THIN 的预报目标 1,面积评分为 0.35,位置评分为 0.43,形状评分为 0.00,强度评分为 0.50,总评分为 0.35。但是预报目标 1 比实况目标 1 重心位置偏东 250.34 km,偏南 19.6 km,虽然评分尚可,由于重心位置偏离距离过大,这一预报结果对预报员无太大的参考价值。

实况目标 2 的预报,EC\_THIN、T639、EnWRF\_12 km 检验评分分别为 0.52、0.33 和 0.50。模式 EC\_THIN 和 EnWRF\_12 km 预报目标 1 均对实况目标 2 有较好的预报效果,无面积和形状评分(实况站点数<3),EC\_THIN 位置评分为 0.81,预报重心

位置偏西 93.25 km,偏南 59.12 km,预报中心强度评分为 1.00,降水中心强度与实况为同一等级(偏小 13.4 mm)。EnWRF\_12 km 位置评分为 0.99,预报重心位置偏西 37.88 km,偏南 24.32 km,预报中心强度评分为 0.50,极值偏差最小,仅偏大 11.7 mm。可见,EC\_THIN、EnWRF\_12 km 虽评分均较高,但预报优势略有不同,对预报员均有极好的参考价值。另外,EnWRF\_12km 的强度评分(0.50)较评分方案——实况与模式差值的绝对值 $\leq 20$  mm 的评分结果(1.00)略有下降,但对整体结果的影响不大,弥补了分级检验的缺陷,若分级检验,EnWRF\_12 km 降水重心位置偏离最小并且降水极值偏差最小的信

息将直接被遗漏。

对于实况目标 3 的预报,3 个模式预报水平均较高,图 2c~2e 清楚地刻画出降水落区,其中 EC\_THIN 的预报目标 2 评分最高,预报的优越性在于位置评分 1.0(无偏离)、形状评分的轴向角评分 0.85,强度评分 0.5,预报的降水中心极值偏差最小,偏小 26.6 mm,另外 EnWRF\_12 km 偏小 27.6 mm,T639 偏大 40.4 mm。

曲巧娜等(2016)采用主观检验方法指出此次过程 EnWRF\_12 km 无指示意义,但是运用目标对象检验方法,EnWRF\_12 km 对实况目标 2 和 3 均有预报价值。主要原因是图 2c 中 EnWRF\_12 km 预报目标 1 区为 2 个站点超过大雨量级,主观检验中按照等值线区域进行对比,极易忽略这个细节。目标对象检验方法不仅给出了面积、位置、形状和降水中心极值的评价,从降水落区和降水强度方面剖析强降水预报性能,为预报员提供了科学的计算检验结果,并且可以从失败的预报案例中挖掘出更多有价值的信息。

### 3 基于目标对象检验法的模式预报性能对比

随着集合预报产品的加入,模式种类多样而繁杂,如何快速提取有价值的信息并完成高质量的预报成为预报员尤为关注的问题。运用目标对象检验的方法,对强降水过程各模式预报最优次数及面积、位置、形状和强度等要素评分进行分析,能够帮助预报员快速有效地掌握产品的详细性能。

#### 3.1 暴雨及以上降水过程最优次数对比

选取统计时段内暴雨及以上降水过程日共 41 d,每个个例甄别的目标对象由于降水落区位置、面积的不同,导致目标对象个数不同,大多数个例目标对象落区为 1~2 个,部分个例最长达 4 个,因此目标识别共 91 个降水落区。图 3a 为 41 次强降水过程/91 个降水落区 EnWRF\_12 km、EnWRF\_4 km、EC\_THIN、T639、BCSH 以及山东 WRF 集合不同分位数成员等模式预报的目标对象检验有评分结果和无评分结果次数统计。BCSH 预报了 76 个(次)降水落区,仅有 15 个(次)降水落区未报出,其次是 WRF 集合最大值(EnMAX),对 60 个(次)降水落区有预报指征,31 个(次)降水落区未报出,结合过

程最优次数(图 3b)即统计 12 个参与检验的模式及成员中每次过程/落区最高评分模式的总次数,能够得出 91 个(次)降水落区中模式预报了 86 个(次)落区,仅 5 个(次)实况强降水落区 12 个模式及成员均未预报,BCSH 预报的最优总次数最多为 26 个(次),WRF 集合最大值次之为 16 个(次),EC\_THIH 最优总次数为 12 个(次),WRF 集合 90%分位数(En90%)和 T639 均为 11 个(次),集合 75%分位数(En75%)及以下成员基本为 0 个(次)。可见,12 种模式对暴雨及以上强降水落区的可预报率为 94.5%,EC\_THIH 预报的降水落区和过程最优次数均最多,其次是 EnMAX,En75%以下成员有预报结果的次数最少并且最优次数基本为 0 个(次),因此强降水预报中,En75%及以下成员可不作参考。

#### 3.2 暴雨及以上强降水过程各项检验指标对比

3.1 节中的最优次数表征了模式的整体预报分布情况,而面积、重心、强度等具体参数指标预报特征需进一步研究,采用箱线图进行分析(图 4)。从

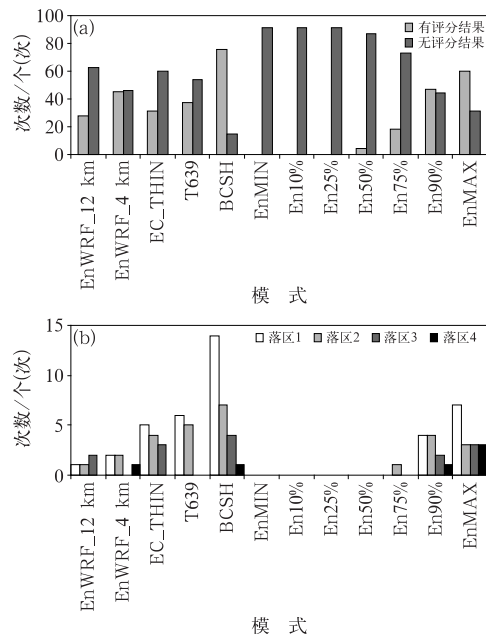


图 3 2014—2016 年 6—8 月  $\geq 50$  mm 多种模式目标对象检验 0~24 h 累计降水量预报有/无评分结果的次数(a)及过程最优次数对比(b)

Fig. 3 The comparison of  $\geq 50$  mm accumulated precipitation of 24 h forecasts by multi-models with/without score (a) and optimization results (b) in June—August 2014—2016

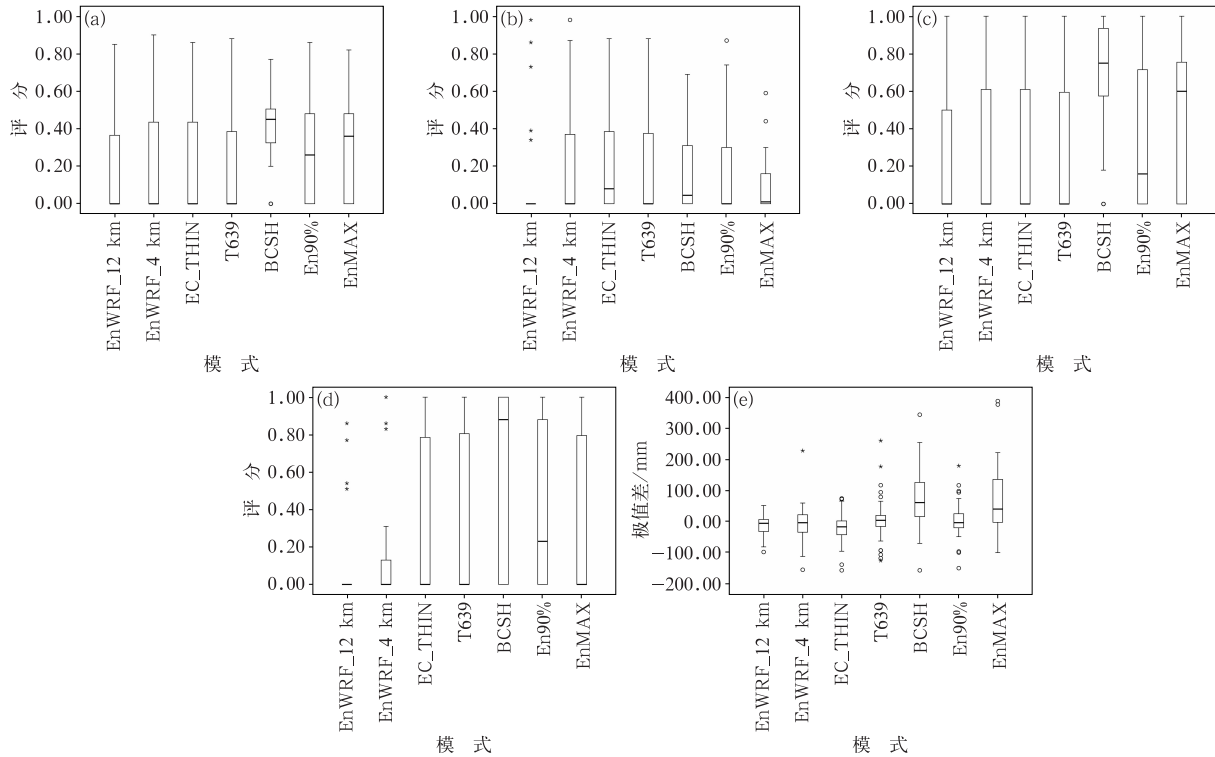


图 4 2014—2016 年 6—8 月强降水过程多种模式 0~24 h 预报综合评分(a)、面积评分(b)、重心评分(c)、轴向角评分(d)和预报与实况降水中心差值(e)箱线图

Fig. 4 The box-and-whisker plots of total score (a), area score (b), barycenter score (c), axial angle score (d), the difference-value of forecasting from observation (e) of 24 h forecasts by multi-models for the severe precipitation in June—August 2014—2016

图 4a 强降水预报综合评分分布能够看出,最高总评分的 25%分位数 BCSH 评分为 0.32,其他模式均为 0.00。最高总评分的 50%分位数,BCSH 最高为 0.45,之后依次是 EnMAX(0.36)、En90%(0.26)。总评分的 75%分位数,BCSH(0.51)、EnMAX(0.48)和 En90%(0.48)评分较好,EC\_THIN 和 EnWRF\_4 km 评分均为 0.44,T639 评分为 0.39,EnWRF\_12 km 评分最低为 0.37。总评分的 95%分位数,EC\_THIN 评分最高为 0.72,其次是 T639 为 0.69,En90%为 0.68,BCSH 为 0.67,EnMAX 评分较小为 0.60。综合以上分析,最高总评分误差线取 50%~95%分位数为最佳,BCSH(0.45~0.67)、En90%(0.26~0.68)和 EnMAX(0.36~0.60)评分最好,预报效果最为突出。

以下从面积、位置、轴向角和降水中心极值等方面进一步分析各模式的预报特征,面积评分(图 4b) 50%分位数及以下基本为 0.00,误差线最优选择为 75%~95%,面积评分 50%分位数各模式及成员评分均不高,其中 EC\_THIN(0.08)、BCSH(0.05)、

EnMAX(0.01)有微小评分结果,其他模式均为 0.00。面积评分 75%分位数评分较好的是 EC\_THIN(0.39)、EnWRF\_4 km(0.38)和 T639(0.38),其次是 En90%(0.32)、BCSH(0.31)、EnMAX(0.17),EnWRF\_12 km 最小(0.00)。面积评分 95%分位数各模式评分区间为 0.55~0.95,其中,EnWRF\_4 km 和 EnWRF\_12 km 均高达 0.95,其次是 EC\_THIN 和 T639 均为 0.85,En90%为 0.84,BCSH(0.64)和 EnMAX(0.55)较小。EnWRF\_4 km(0.38~0.95)对于强降水落区的面积预报效果最好,EC\_THIN(0.39~0.85)和 T639(0.38~0.86)均能较好地刻画出雨区面积。

强降水重心评分(图 4c)是所有要素的重中之重,以 BCSH 模式预报效果最为突出,位置评分 25%分位数为 0.57(其他模式均为 0.00),重心评分 50%分位数为 0.75,重心评分 90%分位数及以上均为 1.00。其次是 EnMAX 和 En90%预报效果较好,误差线为 50%~95%分位数最佳,EnMAX 重心评分为 0.60~0.99,En90%为 0.16~1.00。其

他模式和成员重心评分相差不大,能力相对较弱。

形状评分中的椭圆率评分结果很差,轴向角评分(图4d)略好,轴向角评分主要考虑预报的雨带与实况的偏离程度,从评分结果来看,轴向角评分50%分位数以下基本为0.00,误差线最优选择50%~90%分位数。轴向角评分的50%分位数BCSH模式评分最高(0.88),其次是En90%分位数为0.23,其他模式评分为0.00,轴向角评分的90%分位数BCSH、En90%、EnMAX和EC\_THIN均为1.00,T639为0.97,EnWRF\_4 km(0.86)和EnWRF\_12 km(0.77)评分较低,因此轴向角评分中BCSH(0.88~1.00)和En90%分位数(0.23~1.00)评分最高。

图4e为模式预报强降水中心与实况差值的箱线图,越接近0 mm说明预报值越接近实况,误差线最优选择25%~75%分位数。25%分位数预报降水中心极值最接近0.00 mm的是EnMAX(-1.10 mm),BCSH模式偏大(16.78 mm),其他模式及成员均偏小,区间范围为-33.41~-1.10 mm。强降水75%分位数各模式均偏大,偏离范围为8.00~137.80 mm,EC\_THIN(8.00 mm)和EnWRF\_12 km(9.73 mm)偏差最小,EnMAX(137.80 mm)和BCSH(130.25 mm)偏差最大。总体来说,EnWRF\_12 km(-29.43~89.73 mm)和EC\_THIN(-40.10~8.00 mm)偏差较小,EnMAX(-1.10~137.80 mm)和BCSH(16.78~130.25 mm)偏差较大,其中EC\_THIN基本以偏小为主,BCSH基本预报的比实况偏大。

降水落区有一定的偏差,那么偏离方向如何?将7个模式及成员41次强降水过程/91个降水落区预报的偏离方向次数进行统计(图5),整体上各模式较实况偏离东北方向的次数最多,之后依次是东南方向、西南方向、无偏离和西北方向。预报无偏离次数最多为BCSH模式,偏离东北和东南方向最多为EnMAX,偏离西南和西北方向最多为BCSH。预报效果最好的BCSH模式偏离西南方向次数最多,其他方向次数相差不大。预报较好的EnMAX模式偏离东北方向次数最多,西北方向和无偏离的次数最少。

#### 4 不同影响系统下模式预报强降水的差异

由上可知,多种模式对于强降水预报性能各有

不同,那么不同影响系统下模式的预报特征如何,是否具有一定的规律性为预报员提供参考依据呢?

影响山东暴雨的天气系统主要有四类:低槽冷锋、温带气旋、低涡与切变线和热带气旋与中低纬度系统(阎丽凤和杨成芳,2014),2014—2016年41次过程/91个落区中28次过程/61个落区影响系统为低涡与切变线,7次过程/19个落区为低槽,3次过程/7个落区为温带气旋,3次过程/4个落区为热带气旋与中低纬系统相互作用(图6)。其中低涡切变线类型强降水过程目标对象检验I级结果为23次过程/41个落区,II级、III级结果分别为14次过程/16个落区、2次过程/3个落区;低槽系统类型强降水过程目标对象检验结果为I级评分为6次过程/10个降水落区,II级、III级评分分别为7次过程/9个落区、1次过程/1个降水落区;温带气旋系统类型强降水过程I级评分结果为2次过程/2个降水落区,II级、III级评分结果分别为2次过程/3个落区、1次过程/2个落区;当热带气旋与中纬度系统相互作用时,I级评分结果为3次过程/4个降水落区,无II、III级评分。

因此,热带气旋与中低纬度系统相互作用类型的强降水过程评分结果最好,均为I级。其他3种系统类型强降水过程I级评分次数统计中,低涡、切变线占总次数的67%,低槽系统占52%,温带气旋占28%,显然低涡、切变线影响时模式的预报更具参考价值,低槽系统为II级结果所占比例较大,温带气旋为3个评分等级模式预报次数相差不大。

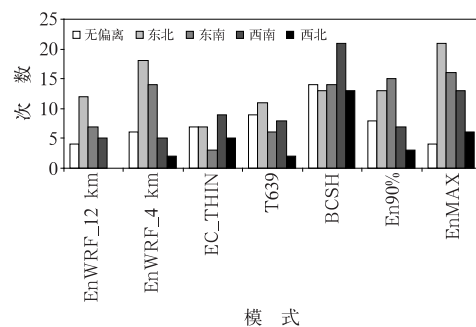


图5 2014—2016年6—8月强降水过程多种模式0~24 h预报与实况降水重心位置偏离方向次数统计

Fig. 5 The times of precipitation center position deviation of multi-model 24 h precipitation forecasts and observation in June—August 2014—2016



图 7 给出了 4 类强降水过程各个模式预报的 I、II、III 级评分次数统计,低涡、切变线相伴的强降水过程 BCSH I 级评分次数最多为 11 次,其次为

EnMAX(9 次),En90%为 7 次,EC\_THIN 和 T639 均为 5 次,II 级评分最多的仍是 EnMAX(6 次),EnMAX 和 EC\_THIN 次之,均为 3 次。低槽形势

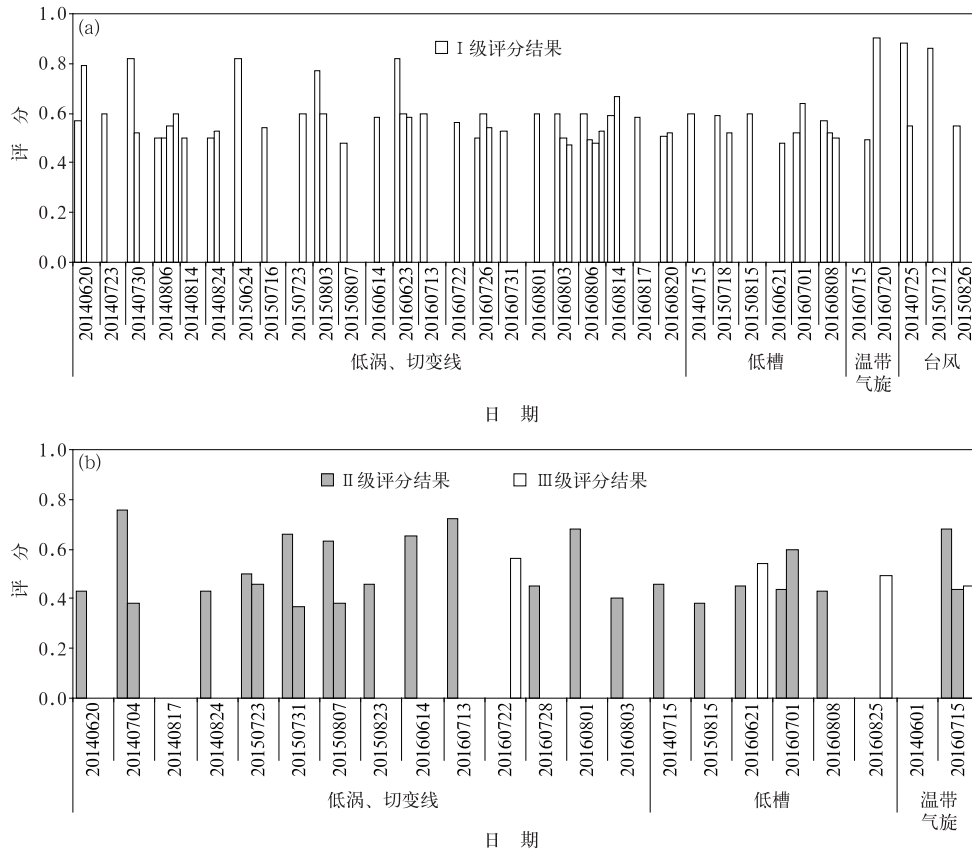


图 6 2014—2016 年 6—8 月 41 次强降水过程/落区的多种模式 0~24 h 预报最高评分 (a) I 级评分, (b) II、III 级评分

Fig. 6 The highest score of 24 h forecasts of multi-model for 41 severe precipitation processes/rainfall area in June—August 2014—2016 (a) Grad I, (b) Grades II and III

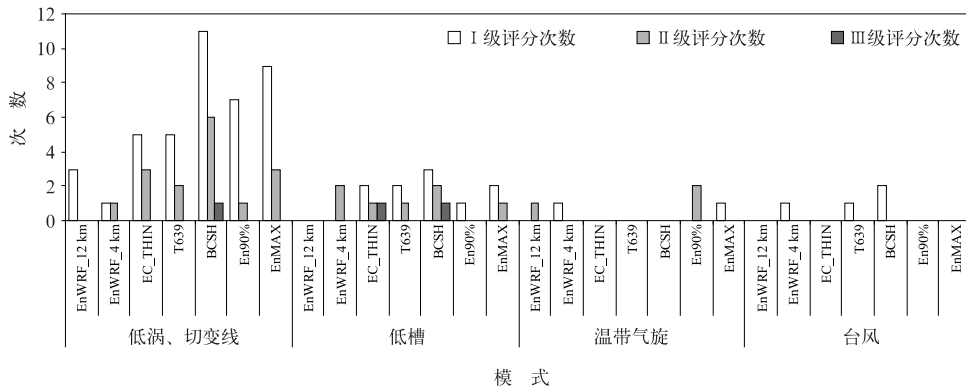


图 7 2014—2016 年 6—8 月 41 次强降水过程多种模式 0~24 h 预报 I、II、III 级评分次数 Fig. 7 The times about Grades I, II and III of 24 h forecasts by multi-model for 41 severe precipitation processes in June—August 2014—2016

的强降水过程中 I 级评分最多为 EnMAX(3 次), EnMAX、EC\_THIN 和 T639 均为 2 次, II 级评分各模式相差不大。温带气旋 I 级评分为 EnWRF\_4 km 和 EnMAX 均为 1 次, II 级评分为 En90%

(2 次),其他模式无评分。在热带气旋与中低纬度系统相互作用相伴随的强降水过程中,BSCH、EnWRF\_4 km、T639 均有贡献且为 I 级评分。

表 3 2014—2016 年四类强降水过程最优总次数模式的整体评价  
Table 3 Overall evaluation on models with optimal total number during the four types of severe precipitation processes from 2014 to 2016

评分	系统类型	模式	最优总次数/模式最优次数			面积评价	重心位置评价	形状评价		强度评价
			总次数	含面积次数	含形状次数			椭圆率评价	轴向角评价	
I 级评分结果	低涡、切变线	BCSH	41/11	6/1	5/1	预报偏小 65.52%	5 次无偏离;偏东 14.92~141.92 km; 偏南 44.00~ 127.31 km,偏北 44.52~112.12 km	椭圆率偏大 35.34%,预报 与实况雨带 均为线状	模式预报雨带 走向与实况一 致,均为东北 —西南向	7 次评分为 1.00; 偏小 0.9~ 67.3 mm,偏大 6.5~176.9 mm
	低涡、切变线	EnMAX	41/9	6/2	5/1	预报偏大 34.60% ~ 63.76%	2 次无偏离;偏东 42.67~99.71 km, 偏西 19.31~ 39.03~104.39 km, 偏北 9.23~43.22 km	无评分	模式预报雨带 走向与实况一 致,均为东西向	9 次均为 1.00;偏小 9.6~22.3 mm, 偏大 21.7~42.4 mm
	低槽	BCSH	10/3	—	—	—	1 次无偏离;偏西 50.47~63.02 km, 偏北 2.32~39.36 km	—	—	1 次评分为 1.00; 偏小 34.9 mm, 偏大 33.3~68.4 mm
	温带气旋	EnWRF_4 km	2/1	1/1	1/1	预报偏小 1.17%	偏东 40.23 km, 偏北 9.21 km	椭圆率偏大 75.72%,预报 形状比实况 更细长	实况雨带东北 —西南走向, 模式雨带西北 —东南走向	1 次评分为 1.00; 偏小 60.9 mm
	台风	BCSH	4/2	—	—	—	偏西 78.7 km, 偏东 18.21 km; 偏南 29.56~ 83.9 km	—	—	2 次评分均为 1.00; 偏大 3.6 mm, 偏小 17.1 mm
II 级评分结果	低涡、切变线	BCSH	16/6	7/2	6/1	1 次面积 评分为 0.00, 1 次 偏大 63.49%	1 次无偏离; 偏西 31.72~179.91 km; 偏北 70.26 km, 偏南 31.94~163.27 km	椭圆率偏大 145.4%,实况 为块状,预报 为带状	实况雨带为 东西方向,模式雨 带为东北— 西南走向	3 次评分 1.00; 偏大 3.6~121.3 mm
	低槽	EnWRF_4 km	7/2	2/1	2/1	无评分	1 次无偏离;1 次 偏东 117.19 km, 偏北 124.3 mm	无评分	无评分	2 次评分均为 1.00;偏小 25.2~37.4 mm
	温带气旋	En90%	3/2	1/1	1/1	预报偏大 72.54%	1 次偏东 48.95 km, 偏北 31.62 km; 1 次偏西 148.35 km, 偏南 107.72 km	椭圆率偏大 3.28%, 均为带状	实况雨带为东 西走向,预报为 西北—东南 走向	1 次评分为 1.00; 偏小 21.0 mm, 偏大 44.2 mm

下面着重分析不同类型强降水过程最优总次数较多模式的面积、重心位置、形状和强度等要素的评价结果(表 3)。I 级评分:低涡、切变线类型 BCSH 和 EnMAX 效果最好,BCSH 重心预报优势最突出,近 1/2 过程无偏离,其他过程以偏东为主,南北方向偏离方向不定,强度预报大部分过程以偏强为主(6.5~176.9 mm),EnMAX 与 BCSH 相比,强度(偏小范围 9.6~22.3 mm,偏大范围 21.7~42.4 mm)和面积评分略优异,重心位置评分比 BCSH 略低;低槽系统 BCSH 最优次数最多,重心偏离方向以西北为主(偏西 50.47~63.02 km,偏北 2.32~39.36 km),强度偏强、偏弱均有发生(偏小 34.9 mm,偏大范围 33.3~68.4 mm);温带气旋和热带气旋与中低纬度系统相互作用类型过程次数较少,分别以 EnWRF\_4 km 和 BCSH 为例给予说明,温带气旋影响时,预报较好的 EnWRF\_4 km 偏东北为主,重心评分为 1.00,预报的降水中心强度偏小 60.9 mm,面积基本与实况一致,雨带形状比实况更细长,雨带走向与实况不一致;受热带气旋与中低纬度系统相互作用影响时,BCSH 预报略有优势,以偏南为主,偏离东、西方向不定,强度预报较好,评分均为 1.00,与实况相差不大。

总体来说,运用目标对象检验法得出的强降水过程检验结果,II 级评分相对 I 级评分略低主要表现在重心位置偏离距离明显偏大和降水强度中心差值略大两个方面,由于 II 级评分的定义为总评分的 60%~80%,评分结果仍具参考性。在 III 级评分结果中,预报员最关注的重心位置预报较差或者未报出强降水,因此 III 级评分结果可不做参考。

## 5 结论与讨论

由于常规的 TS 评分遵循严格的点对点检验,易损失一些有用的预报信息,存在不足;此外,随着集合预报产品的广泛应用,模式产品种类繁多,预报员亟需了解各模式的预报特征。本文引入了目标对象检验方法,该方法通过对山东主汛期强降水过程落区的面积、位置、形状和强度进行匹配,可获取空间场潜在的预报信息,相比降水落区主观检验方法,检验结果更加精确和多样化。

(1) 以 BCSH、ECMWF 细网格、T639、山东 WRF 确定性预报和集合预报系统为例,通过采用过程最优模式次数统计得到模式及集合预报产品的

性能特征,暴雨及以上量级强降水为华东区域模式过程最优次数最多,其次是 WRF 集合最大值预报效果较好。

(2) 41 次暴雨及以上强降水过程箱线图表明,多种模式及集合预报产品对重心位置评分最好,其次是面积评分,形状评分中的轴向角评分可用,椭圆率评分效果最差。BCSH、WRF 集合 90%分位数和 WRF 集合最大值总评分最高,重心位置、降水中心强度和轴向角评分三要素预报评分较好,面积预报优势不显,需较多参考 WRF 确定性预报 4 km 和欧洲中心细网格模式。BCSH 无偏离次数最多,各模式预报多偏向东北方向。

(3) 根据环流形势及影响系统对强降水分型得出,热带气旋与中纬度系统相互作用评分最好,其次为低涡、切变线预报较好的过程/落区占比较高,以 BCSH 和 WRF 集合最大值预报效果最好,其重心位置和强度评分尤为突出,各模式对低槽系统预报效果一般、温带气旋系统预报最差。

需要说明的是,由于采用的是站点资料,分布不规则且较为疏散,加之山东省近 3 年强降水过程偏少,分散性强降水占比较大,基于以上原因,检验结果具有一定的局限性。强降水极值要素评分中,对比预报与实况差值 $\leq 20$  mm 和 $\leq 10$  mm 两种阈值,阈值为 10 mm 时评分略有下降,但对最终结果影响不大。各要素评分阈值和权重系数均为开放式接口,预报员可根据自己的需求设定。在未来工作中,将收集大范围强降水过程及温带气旋等不同类型强降水,并将站点检验与格点检验进行对比,使得检验结果更具普适性。

## 参考文献

- 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).
- 符娇兰,宗志平,代刊,等,2014.一种定量降水预报误差检验技术及其应用[J].气象,40(7):796-805. Fu J L, Zong Z P, Dai K, et al. 2014. Application of a verification method on bias analysis of quantitative precipitation forecasts[J]. Meteor Mon, 40(7):796-805(in Chinese).
- 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]. Torr Rain Dis, 29(2):153-159(in Chinese).

- 贾丽红,张慧岚,肖开提·多莱特,等,2012. T639数值产品对影响新疆主要系统的预报检验评估[J]. 气象,38(8):971-976. Jia L H, Zhang H L, Xiao K T, et al, 2012. Verification and assessment of the forecasting of influence system in Xinjiang by T639 model products[J]. Meteor Mon, 38(8):971-976(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).
- 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).
- 曲巧娜,盛春岩,车军辉,等,2016. 山东省多模式强降水落区预报检验[J]. 气象科技,44(3):392-399. Qu Q N, Sheng C Y, Che J H, et al, 2016. Verification of multi-model forecasting of severe precipitation areas in Shandong from May to September in 2014 and 2015[J]. Meteor Sci Technol, 44(3):392-399(in Chinese).
- 肖红茹,王灿伟,周秋雪,等,2013. T639、ECMWF 细网格模式对2012年5—8月四川盆地降水预报的天气学检验[J]. 高原山地气象研究,33(1):80-85. Xiao H R, Wang C W, Zhou Q X, et al, 2013. Synoptic meteorology verification of precipitation forecast for T639、ECMWF fine grid models from May to August 2012 in Sichuan Basin[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 33(1):80-85(in Chinese).
- 熊秋芬,2011. GRAPES\_Meso模式的降水格点检验和站点检验分析[J]. 气象,37(2):185-193. Xiong Q F, 2011. Verification of GRAPES\_Meso precipitation forecasts based on fine-mesh and station datasets[J]. Meteor Mon, 37(2):185-193(in Chinese).
- 阎丽凤,杨成芳,2014. 山东省灾害性天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社:29-109. Yan L F, Yang C F, 2014. Book of Disaster Weather Forecasting Fechnology in Shandong Province [M]. Beijing:China Meteorological Press:29-109(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).
- Ebert E E, 2008. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework[J]. Meteor Appl, 15(1):51-64.
- Wernli H, Marcus P, Hagen M, et al, 2008. SAL-a novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts[J]. Mon Wea Rev, 136(11):4470-4487.