

王新敏,栗晗,2020.多数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).

多数数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估*

王新敏^{1,2} 栗 晗^{1,2}

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

2 河南省气象台, 郑州 450003

提 要: 采用 FSS 评分(fractional skill score)和 CRA 方法(contiguous rain area)结合国家气象信息中心地面、卫星、雷达三源降水融合产品(CMPA_Hourly V2.1),对 SHANGHAI_HR(SH)、GRAPES_MESO(MESO)、ECMWF_HR(EC)、GRAPES_GFS(GFS)四个模式 2018 年 8 月三次登陆台风暴雨过程的降水预报进行了检验评估,对比分析了各模式的预报性能,得到结论如下:FSS 评分相较于传统 TS 评分能够更好地通过量化的方式反映出不同模式的预报能力差别,而 CRA 方法更全面详细地评估模式的误差来源;区域模式对于局地性强降水或大尺度降水的强中心预报相对于全球模式有一定优势,但全球模式对于较小量级降水的范围预报可参考性更好;对于“摩羯”、“温比亚”台风影响的两次过程,EC 模式的预报位移误差明显偏西,同样的特征也表现在 MESO 和 GFS 对于“温比亚”台风影响的降水的预报;GFS 模式对于降水范围、降水强度预报偏小、偏弱,EC 模式预报略好于 GFS 模式但对于降水极值估计仍存在不足。相对而言,区域模式对于极值估计优于全球模式,SH 模式对于极值的估计要优于 MESO 模式,但其预报降水存在范围、强度偏大的特征;大部分模式预报降水个体的误差主要来源于位移误差,强度误差和形态误差大致相当。

关键词: FSS 评分, CRA 方法, 空间检验, 登陆台风

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.003

Spatial Verification Evaluation of Typhoon Rainstorm by Multiple Numerical Models

WANG Xinmin^{1,2} LI Han^{1,2}

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: Precipitation forecast of three typhoon rainfall processes affecting Henan Area in August 2018 from four numerical models, SHANGHAI_HR(SH), GRAPES_MESO(MESO), ECMWF_HR(EC), GRAPES_GFS(GFS) were evaluated using FSS (fractional skill score) and CRA (contiguous rain area) methods based on CMA radar-satellite-gauge merged precipitation (CMPA_Hourly V2.1) in this paper. The difference of two methods and the performance of each numerical model were discussed. The results show that FSS method can better distinguish the performance of different models through quantitative scores compared with the traditional TS method, and CRA method can reflect error sources of models more comprehensively. For local heavy rainfall or intense center of large-scale precipitation, regional models are more superior to global models. However, global models still perform well in predicting small-scale precipitation. For the two precipitation processes of typhoons ‘Yagi’ and ‘Rumbia’, the displacement errors of EC are more westward than the observation, and the same characteristics are also found in the prediction of

* 河南省气象局重点项目(Z201601)、河南省科技攻关项目(172102310463)、河南省气象局面上项目(KM201904)共同资助

2019 年 2 月 26 日收稿; 2019 年 10 月 25 日收修定稿

第一作者:王新敏,主要从事天气预报技术和暴雨机理研究. Email:995378392@qq.com; hnwxm@cma.gov.cn

'Rumbia' precipitation by MESO and GFS. Precipitation scope and intensity tend to be underestimated by GFS model. The EC model can perform better a little, but still has some shortcomings in estimating precipitation extremes. Although regional models, especially SH, can forecast more intense precipitation centers, the scope and intensity can be easily overestimated. The displacement error for most models is main source of precipitation error, and intensity error and pattern error are roughly equivalent.

Key words: fractional skill score (FSS), contiguous rain area (CRA), spatial verification, landfall typhoon

引 言

近年来得益于全球数值模式的不断发展,模式对于大范围暴雨环流形势以及天气背景的预报性能不断提高,相应的我国暴雨的预报准确率也在不断提升。而以全球数值模式为背景场驱动的高分辨率区域模式相较于全球模式对于暴雨过程中所存在的中小尺度对流系统有更好的针对性。

2016年7月9日发生在河南省北部地区的特大暴雨过程(简称“7·9”),高分辨率区域模式和快速更新同化系统相较于目前作为重要业务参考的全球模式表现出了更好的预报能力(漆梁波和徐璐,2018)。类似的情况也出现在2016年7月19日豫北特大暴雨过程以及2018年8月13—14日“摩羯”台风登陆的预报中,高分辨率区域模式在强降水落区和强度的预报上都表现出明显的优势。但同时也有研究指出,区域模式对强降水过程的预报存在空报或强度偏大的问题(何光碧等,2014)。因此,更合理地评估区域数值模式对于不同强降水事件的预报能力,有利于预报员在业务工作中更好地理解和使用这些产品。

针对2018年8月三次影响较大的登陆台风降水过程,各模式性能表现出较大波动:台风云雀造成的降水局地性较强,全球模式漏报明显;由于路径预报偏差,对台风摩羯的模式预报造成降水落区与实况偏差较大;台风温比亚降水预报相对较好,但各模式对于降水量级的把握差异也较大。因此本文选择这三次台风过程作为研究对象,进而评估各模式对于登陆台风降水的预报性能。

基于两分类检验评分(TS、ETS评分等)检验高分辨率模式时存在“两难”的问题。这种两难在于虽然高分辨率模式更好地揭示了降水预报的空间结构,预报员主观上认为对于其更关注的强降水中心落区和强度预报效果较好,但实际的技巧评分确可能低于低分辨率模式(Ebert and McBride,2000)。

Gilleland et al(2009)总结了现有的空间检验技术并将其分为四个类别:邻域法、尺度分离法、基于对象的评估和场变形方法。前两类方法的主要特征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统计量,通过对比模式与实况降水场的统计量的差异对模式预报性能进行评估;其中常用的评分为FSS评分(fractional skill score),即通过比较不同尺度窗口(邻域)内降水发生概率来获取综合评估信息,认为模式预报发生概率与观测发生概率近似为有效预报(Mittermaier and Roberts,2010;潘留杰等,2015;赵滨和张博,2018)。后两类方法则是通过从模式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从而对模式进行检验。常用的方法包括SAL(structure amplitude location;Wernli et al,2009)、CRA(contiguous rain area;Ebert and Gallus,2009)、MODE(method for object-based diagnostic evaluation;Davis et al,2006;2009)、FQI(forecast quality index;Venugopal et al,2005)、FQM-DAS(forecast quality measure-displacement amplitude score;Keil and Craig,2007)等。国内学者基于以上面向对象的模式降水检验技术也展开了诸多研究。公颖(2010)基于SAL方法对2009年6月29日长江中下游的一次降水过程进行了检验分析,指出SAL方法适用于针对同一降水实况比较不同模式预报的优劣。基于MODE方法对高分辨率模式降水预报检验结果表明,该方法相较于传统TS、ETS等评分方法有较明显优势,其受气候概率影响较小,检验结果更加客观,同时也能有效地应用到区域模式对于雷达回波预报的检验中,但同时也指出MODE方法易受其卷积变换半径参数选取的影响(薛春芳和潘留杰,2016;李佳等,2016;潘留杰等,2017)。符娇兰和代刊(2016)利用CRA技术对西南地区东部强降水的EC模式预报进行了检验并依据检验结果对模式误差的来源进行了分析。

本文选择FSS和CRA两种不同类别的空间检验方法,从整体评分和误差来源两个方面对模式的

预报结果进行评估。综上所述,高分辨率区域模式产品在现代化业务中的应用已成为趋势,本文选择业务中最常使用的两个区域模式(SHANGHAI_HR、GRAPES_MESO)以及两个全球模式(ECMWF_HR、GRAPES_GFS)作为研究对象,基于 FSS 和 CRA 两种模式预报检验方法,对 2018 年登陆我国并深入内地的三次台风过程的区域数值模式降水预报进行检验,并与全球模式结果对比,以期帮助预报员在业务工作中更有效地发挥数值模式的业务效能。

1 资料和方法

1.1 资料

本文主要针对 2018 年登陆并深入内陆地区的三次台风(“云雀”“摩羯”“温比亚”)降水过程进行高分辨率区域中尺度模式的预报检验,选取 2018 年 8 月 2 日 08 时至 5 日 20 时(“云雀”)、8 月 11 日 20 时至 16 日 08 时(“摩羯”)、8 月 16 日 08 时至 21 日 08 时(“温比亚”)三次台风登陆后的主要降水时段作为研究对象。预报场选取 SHANGHAI_HR(简称 SH)、GRAPES_MESO(简称 MESO)两个区域高分辨率模式以及 ECMWF_HR(简称 EC)、GRAPES_GFS(简称 GFS)全球模式资料作为对比,由每日 08 时、20 时两个起报时次各 72 h 预报时效组成。实况降水资料选取国家气象信息中心地面、卫星、雷达三源降水融合产品(CMPA_Hourly V2.1),时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.05° 。潘咏等(2018)研究指出该三源融合降水产品在智能网格预报、气象灾害预警业务监测及产品检验、GRAPES 检验评估等业务中发挥了积极作用。以上模式及实况格点资料的分辨率均通过双线性插值变换为 0.1° 。

1.2 检验方法

1.2.1 邻域法

不同于传统降水评分的点对点的方式,邻域法采用邻域窗口的形式,通过选取检验格点附近一定范围内的点作为检验对象。如图 1 所示,检验格点观测有降水但预报无降水,采用点对点的检验方法则显示当前模式无降水技巧,但从 7×7 邻域窗的所有格点来看,两者的有降水格点数一致,均为 5/49。

因此,本文采用 Roberts and Lean(2008)提出的一种通过计算不同空间尺度内超过给定降水阈值格点数的评分方法 FSS,具体计算方法如下:

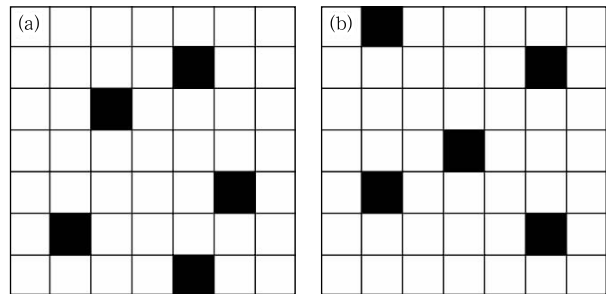


图 1 预报(a)和观测(b)降水格点分布

Fig. 1 Rainfall grids of (a) forecast and (b) observation

首先采用 Brier 评分的变形比较邻域范围内预报与观测的降水频率 FBS(fraction brier score):

$$FBS = \frac{1}{N} \sum (P_{\text{fct}} - P_{\text{obs}})^2 \quad (1)$$

式中: P_{fct} 和 P_{obs} 分别为每个邻域尺度内预报与观测降水发生概率, N 为邻域尺度内的网格点数量。基于方差技巧评分构建思路,建立正定的技巧评分(FSS):

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{\frac{1}{N} (\sum P_{\text{fct}}^2 + \sum P_{\text{obs}}^2)} \quad (2)$$

FSS 评分介于 $0 \sim 1$, 模式与观测降水完全匹配为 1, 完全不匹配为 0。基于本文的主要目的是检验对比不同区域模式对三次台风过程降水的预报效果,因此参考已有研究结果(潘留杰等, 2015; 赵滨和张博, 2018)选取 90 km 作为较强降水(25 mm 以上)评估的空间分析尺度。

1.2.2 CRA 方法

CRA 方法是由 Ebert and McBride(2000)提出的基于对象的空间检验方法,其检验对象为从模式和观测空间场中检测出来的单个降水目标而非整个降水场,因此能够帮助预报员更好地理解模式预报误差的来源,从而避免一部分由于模式预报中存在的落区和强度上的误差所导致的传统检验方法评分较低、甚至无技巧评分的现象。

CRA 检验方法对一定区域内的降水场进行识别和分离,在此基础上计算识别雨区范围内的模式和实况的各个统计量(如降水质心、降水面积、平均降水量、平均降水强度等)。并可对模式预报雨区进行平移,当平移后的预报雨区与实况雨区方差最小时得到平移后的预报雨区。定义原始预报雨区平均总方差减去平移后预报雨区的平均总方差为位移误差,平移后的模式平均降水强度减去实况强度的平方为强度误差,平移后的模式强度误差减去原始模

式强度误差为形态误差。通过对以上统计量的检验能够更合理地分析模式的误差来源。具体计算方法可见文献(Ebert and McBride, 2000; 符娇兰和代刊, 2016)。本文在应用 CRA 方法进行检验时, 对连续雨区识别的阈值略微进行了调整, 由于“云雀”台风过程强降水的范围较小, 因此对于模式与实况叠加场中连续雨区的范围定义为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 同时对于检验过程中对模式预报场进行平移的范围定义为 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 。

2 个例特征

从所选三次台风降水过程的累计降水量实况来看, “云雀”(图 2a)、“摩羯”(图 2b)、“温比亚”(图 2c) 台风所造成的降水范围和强度依次增大。“云雀”初登陆时在长三角地区造成了较强的降水, 深入内陆后则迅速减弱为低压环流, 并在影响山东地区之后又折向西南方向影响河南地区, 在深入内陆的过程中其造成的降水局地性更强, 强降水仅出现在安徽省北部、河南省西南部等小范围地区, 这也给全球模式的预报带来一定困难。“摩羯”台风的移动路径相对于“云雀”台风略偏东, 其经过并影响安徽北部地区之后折向北偏东方向移动, 并随后影响华北、东北南部地区, 其造成的主要降水区位于安徽省北部、华北地区东部及东北地区南部, 强降水范围及强度也明显大于“云雀”台风, 各模式对于此次过程预报的不确定性也较大, 特别是全球模式在降水落区的预报上出现了明显的偏差。“温比亚”在登陆后所造成的降水范围和强度均为三次登陆台风过程最强, 其移动路径与“摩羯”相似, 在移至河南南部境内后逐渐转折向北偏东方向移动, 主要影响华东地区北部、华北地区东部及东北地区南部部分地区, 过程最大降水量接近 400 mm, 各模式对于此次过程的降水落区把握相对较好, 但对于强降水中心的落区和量级预报偏差仍较大。

3 检验结果分析

针对本文所选的三次登陆台风的降水时段内每日 08、20 时两次起报时间的模式预报场, 采用 FSS 及 CRA 两种空间检验方法对各模式的预报性能进行了检验评估。第一部分给出了 FSS 方法的检验评分结果, 并与传统的 TS 评分结果进行了对比。

第二部分则采用 CRA 方法从预报降水的位置、范围、强度等多个方面对模式 36 h 时效预报场的偏差进行分析。FSS 及 TS 检验时效为 36、48、60、72 h, CRA 检验时效为 36 h, 检验区域范围均为 $25^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 125^{\circ} \text{E}$ 。

3.1 FSS 检验

首先对比 FSS 与传统 TS 评分的结果。从整体上来看, FSS 评分的数值均普遍大于 TS 评分, 这与其计算原理有关, FSS 考虑了格点邻域一定范围内的降水, 相当于对原来的分辨率较高的格点场进行了降尺度处理, 其对于同一个降水预报场得到的评分数值会相对增大。因此, 在对较低级别阈值的降水场进行检验时, FSS 相对于 TS 的优势并不大, 两者均能对模式的预报能力进行区分(图 3a)。但当对较大阈值的降水进行检验时, FSS 的优势逐渐显现出来, 以“云雀”为例, 在对 100 mm 以上降水进行检验时(图 3a₃), TS 评分显示四个模式的评分均接近 0, 从模式降水场来看(图略), 对于 36 h 时效的预报, 尽管 SH 模式预报的降水落区相较于实况略有偏差, 但其预报出了 100 mm 以上的降水中心, 这样的预报结果对于预报员来说是有一定指导意义的, 而该结果也能够从 SH 模式的 FSS 的检验评分中反映出来($FSS > 0.1$)。

对比不同模式的 FSS 结果来看, 对于“云雀”所造成的降水过程, 各模式对于 25 mm 以上降水均能够做出较好的预报(FSS 评分接近或大于 0.4), 其中 GFS 模式在 36 h 时效的评分大于其他三个模式; 对于 50 mm 以上降水, EC 模式的 FSS 评分为 0.34, 大于其他三个模式; 而对于 100 mm 以上的降水, 区域模式则具有一定的优势, 特别是 SH 模式在 36 h 时效的 FSS 评分达 0.15, 远大于另外三个模式, 而 GFS 则几乎没有预报出 100 mm 以上的降水。以上结果说明对于“云雀”造成的降水, 由于强降水较为局地, 区域模式对于 100 mm 以上降水预报能力要更优, 而全球模式特别是 EC 模式对于 25 或 50 mm 以上的降水仍然保持了较好的预报水平。对于“摩羯”, SH 和 EC 两个模式对于 25、50 mm 量级以上降水表现出了一定的优势, 两者 36 h 预报结果的 FSS 评分分别超过了 0.6 和 0.5, MESO 模式在各时效的评分则接近或略低于前者。GFS 模式虽然评分低于其他三个模式, 但其在部分时段也作出了较好的预报, 说明此次过程各模式对于整体降

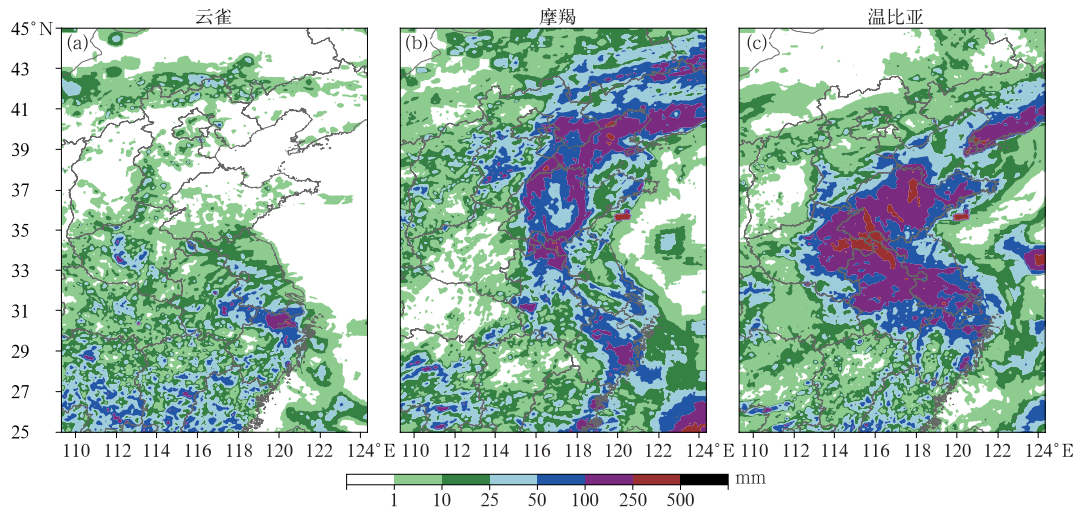


图 2 2018 年 8 月 2 日 08 时至 5 日 20 时“云雀”(a)、11 日 20 时至 16 日 08 时“摩羯”(b)、16 日 08 时至 21 日 08 时“温比亚”(c)过程累计降水实况

Fig. 2 Observed accumulated rainfall of ‘Jongdari’ from 08:00 BT 2 and 20:00 BT 5 (a), of ‘Yagi’ from 20:00 BT 11 to 08:00 BT 16 (b), and of ‘Rumbia’ from 08:00 BT 16 to 08:00 BT 21 (c) August 2018

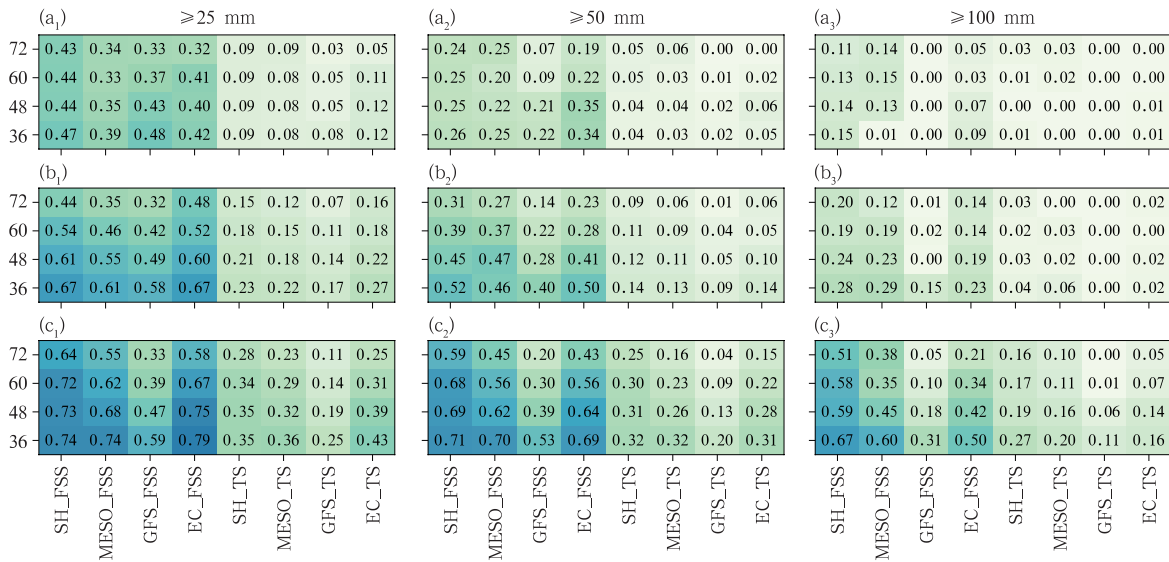


图 3 “云雀”(a)、“摩羯”(b)、“温比亚”(c)台风逐 24 h 累计降水不同时效 25 mm(a₁, b₁, c₁), 50 mm(a₂, b₂, c₂), 100 mm(a₃, b₃, c₃) 阈值条件下 SH、MESO、GFS 及 EC 模式的 FSS 及 TS 评分

Fig. 3 FSS and TS of SH, MESO, GFS and EC for each 24 h accumulated rainfall of ‘Jongdari’ (a), ‘Yagi’ (b) and ‘Rumbia’ (c) using 25 mm (a₁, b₁, c₁), 50 mm (a₂, b₂, c₂), 100 mm (a₃, b₃, c₃) thresholds with different lead time

水落区的把握还是较好的。对于 100 mm 以上的强降水中心,区域模式优势明显,大部分时效的预报结果 FSS 评分均高于全球模式。“温比亚”过程的降水强度和范围均为三次过程最大,从 FSS 评分结果来看,各模式对于 25 mm 以上降水均能够做出有效的预报,其中 EC 模式在 25 mm 以上量级的评分要

高于其他三个模式,GFS 模式评分则最低。随着阈值的增加,区域模式的评分依然维持较好的水平,而全球模式评分则下降较快,对于 50 mm 以上降水,EC 模式仍能够保持与区域模式接近的水平,而对于 100 mm 以上的降水,SH 和 MESO 两个模式的优势较明显。

综上所述,TS 评分在对较强量级降水进行评估时无法显著量化区分各模式的预报性能,而 FSS 评分则能够相对客观地反映出不同模式的预报能力。区域模式对于 100 mm 以上局地性强降水或大尺度降水的强降水中心预报相对于全球模式有一定优势,但全球模式对于较小量级降水的范围预报仍有一定参考价值。

3.2 CRA 检验

上述 TS 及 FSS 评分尽管能够快速直观比较各

个模式的预报能力,但在业务预报工作中还需要尽可能地掌握模式的预报偏差来源,如预报降水落区位置、降水范围大小、降水量级强弱等,从而对模式的误差进行有效订正。由于所选取的检验范围中包含了部分与三次台风无关的降水个体,本文对 CRA 检验结果采取人工检查并进行了删除,各模式各阈值下识别出的降水个体数目如表 1 所示。图 4 给出了 CRA 方法从各模式预报场中识别和分离出的主要降水目标个体示例。

从识别降水个体的数量上来看,对于 25 和

表 1 CRA 识别出的各模式不同阈值降水目标个体数量

Table 1 Numbers of forecast precipitation units of each model using different thresholds based on CRA

阈值/mm	模式			
	SH	MESO	GFS	EC
≥25	26	24	27	20
≥50	26	23	27	25
≥100	20	14	11	11

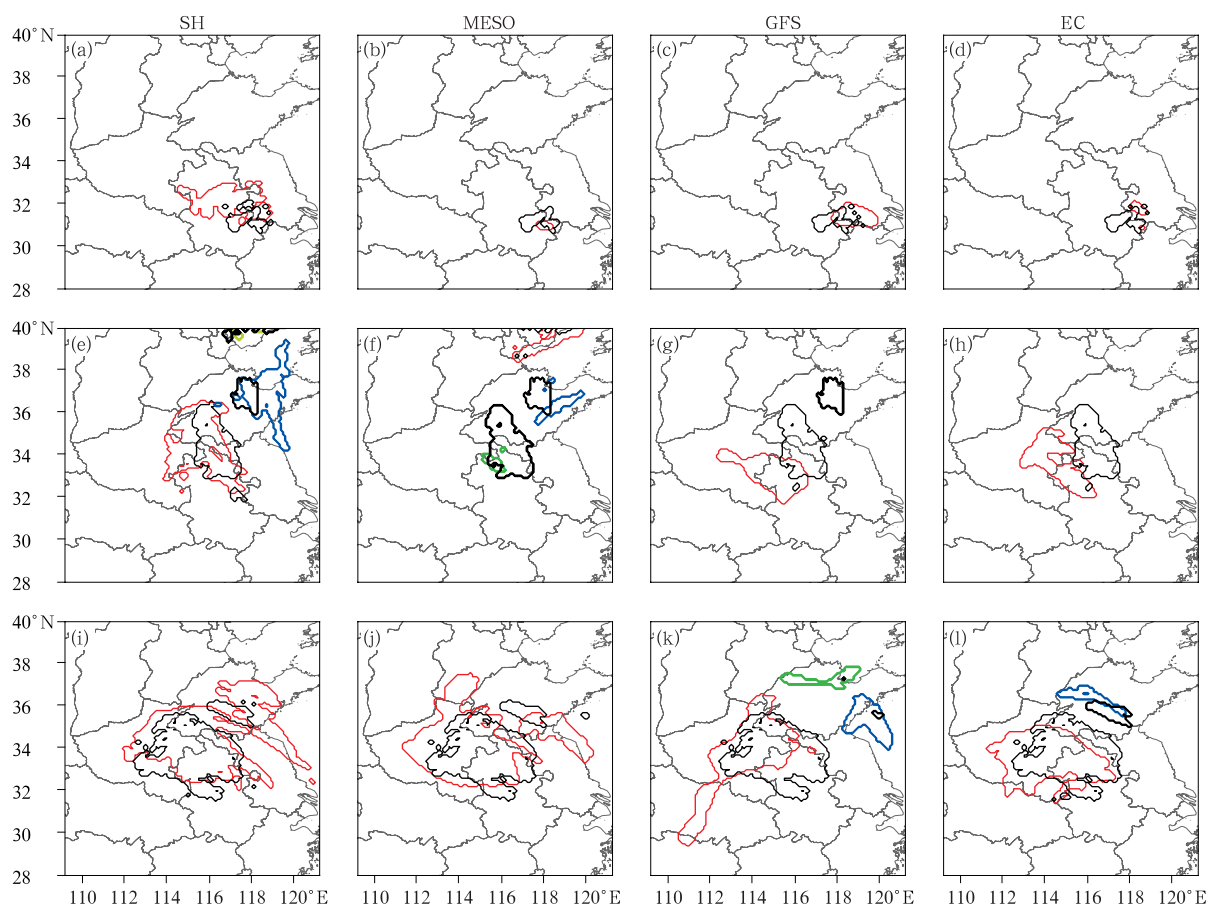


图 4 CRA 方法识别和分离各模式预报 2018 年 8 月“云雀”(a,b,c,d)、“摩羯”(e,f,g,h)、

“温比亚”(i,j,k,l)过程大于 50 mm 的降水目标

(图中黑色、红色/蓝色等值线分别为实况降水个体和模式 36 h 预报场中第一/第二降水个体)

Fig. 4 The precipitation more than 50 mm target identified and isolated by CRA of each model for ‘Jongdari’ (a, b, c, d), ‘Yagi’ (e, f, g, h) and ‘Rumbia’ (i, j, k, l) in August 2018 (Black and red/blue isolines are observation and the first/second rainfall unit of 36 h forecast)

50 mm 两个阈值来说,各模式识别出的降水个体数量差距不大,而对于 100 mm 以上的降水,全球模式识别出的降水个体明显要少于区域模式,而 SH 模式相较于 MESO 模式识别出了更多的降水个体。由于实况降水雨区是固定的,这在一定程度上也能够说明区域模式对于强降水预报的优势。对于个别降水过程,由于降水的范围较小、局地性较强,未能检测出目标个体,这也说明模式对于实况在此区域出现的对应量级降水的预报存在漏报、预报范围偏小或者落区偏差过大的问题。下面分别对各模式不同阈值 36 h 时预报降水个体相对于实况的位置、范围、强度、形态误差进行讨论。

从降水落区的位移误差情况来看(图 5),对于“云雀”台风登陆后造成的降水,MESO、GFS 和 EC 三个模式对于 25 mm 以上的降水个体预报大部分较实况偏东,而 SH 模式在纬向方向上没有明显的系统性偏差;对于 50 mm 以上的降水,各模式识别出的个体较少,MESO、EC 模式仍较实况偏东,而 SH 模式则有一致偏北的经向偏差;对于 100 mm 以上的降水,仅有 SH 模式识别出了一个降水个体,且

偏差相对较小。对于“摩羯”台风过程,从整体上来看,SH、MESO 和 GFS 模式在纬向方向上没有表现出方向一致的位移偏差特征,其中 MESO 和 GFS 两个模式在纬向方向的偏差不确定性明显要大于经向方向;EC 模式大多数降水个体则相较于实况明显偏西;而 SH 模式不同量级下的降水个体在经向和纬向两个方向上分布均匀,没有表现出系统性的位移偏差特征。对于“温比亚”台风过程,MESO、GFS 和 EC 三个模式中识别出的大多数降水个体均表现出了相对于实况明显偏西的位移偏差,其中 MESO 模式多数降水个体也表现出了向北偏移的特征;而 SH 模式各降水个体分布相对较接近实况,整体表现出略微偏北的位移偏差。

从以上结果来看,对于“云雀”台风,尽管 EC 模式的位移误差分布较集中,但其识别出的降水个体也较少,存在一定的漏报;SH 模式则能够识别出 100 mm 以上的降水目标个体,但其预报 25 mm 以上降水个体的位移偏差的纬向离散度也较大。同样的特征也出现在 SH、MESO、GFS 三个模式对于“摩羯”台风的预报中,这说明三者对于“摩羯”预报

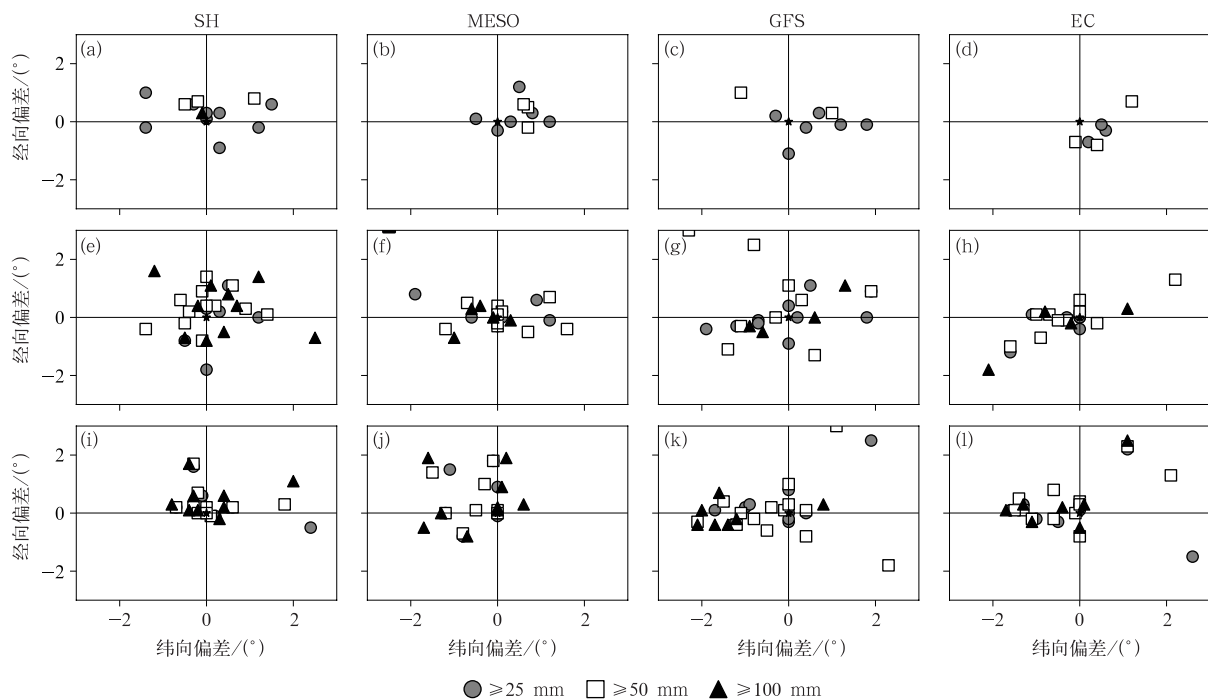


图 5 CRA 从各模式 36 h 时效预报场中识别出的大于对应阈值的降水个体相对于实况的经向和纬向位移偏差 (a, b, c, d)“云雀”,(e, f, g, h)“摩羯”,(i, j, k, l)“温比亚” (不同的图标代表不同的阈值;★:实况降水个体位置)

Fig. 5 Radial and zonal displacement errors of each model's 36 h forecast precipitation units identified by CRA of different thresholds for 'Jongdari' (a, b, c, d), 'Yagi' (e, f, g, h) and 'Rumbia' (i, j, k, l) (Different icons represent different thresholds; ★: the location of observed precipitation units)

路径在纬向方向上调整幅度较大,导致不同预报阶段降水落区位移偏差分布较分散。对于“摩羯”“温比亚”两次造成明显降水的登陆台风过程来说,EC模式的预报位移误差明显偏西,这可能是由于其对于台风登陆后西进的移动速度预报偏快或者对于其向北偏东方向转折时间的预报相对偏晚造成其预报降水落区偏西,同样的特征也表现在MESO和GFS模式对于“温比亚”降水的预报中。

CRA方法通过对识别降水个体的格点数进行统计从而得到模式预报降水范围相较于实况的偏差(图6),类似地也可以得到降水个体的平均降水量和最大降水量,从而评估模式预报的降水个体的降水强度的误差(图7,图8)。从三次过程的结果来看,对于25 mm以上的降水,各模式预报降水个体的范围大多数较实况偏大,其中对于“摩羯”,两个区域模式预报的降水范围相较全球模式更大(图6d),

这说明全球模式预报的降水范围要更加接近实况;随着降水阈值的增加,模式预报降水较实况偏小的比例逐渐增加,特别是全球模式,其中GFS模式对于“温比亚”台风100 mm以上降水个体范围预报偏小较明显(图6i);而区域模式依然保持预报范围偏大的特征,其中SH模式在三次台风过程的降水预报中几乎对于所有阈值下的降水个体预报范围均偏大。

对于此次过程中降水强度的预报,从平均降水量来看,SH模式对于三次过程所有阈值下的降水个体预报均偏强,MESO模式稍弱于SH模式,但多数较实况偏大;对于25 mm以上降水,两个全球模式预报的平均降水量要更接近实况(图7a,7d,7g)。随着降水阈值的增加,GFS模式预报的平均降水量逐渐弱于实况降水,EC模式则稍好于GFS模式。区域模式预报平均降水量仍较实况偏大,其中MESO

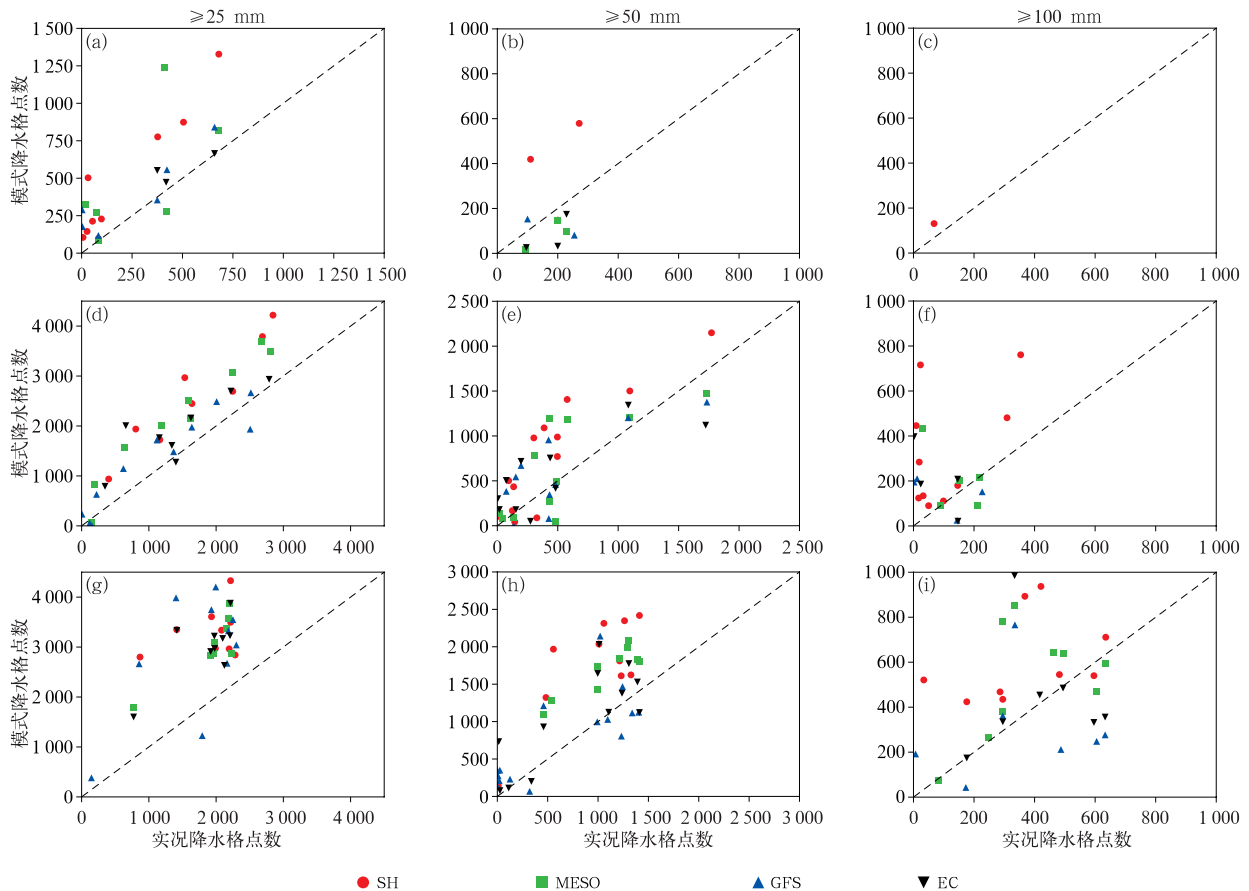


图6 CRA从各模式36 h时效预报场中识别出的大于对应阈值降水个体格点数与实况格点数对比(a,b,c,d)“云雀”,(e,f,g,h)“摩羯”,(i,j,k,l)“温比亚”

(不同的图标代表不同的模式)

Fig. 6 Grid numbers of each model's 36 h forecast precipitation units identified by CRA of different thresholds for typhoons 'Jongdari' (a, b, c, d), 'Yagi' (e, f, g, h) and 'Rumbia' (i, j, k, l)

(Different icons represent different models)

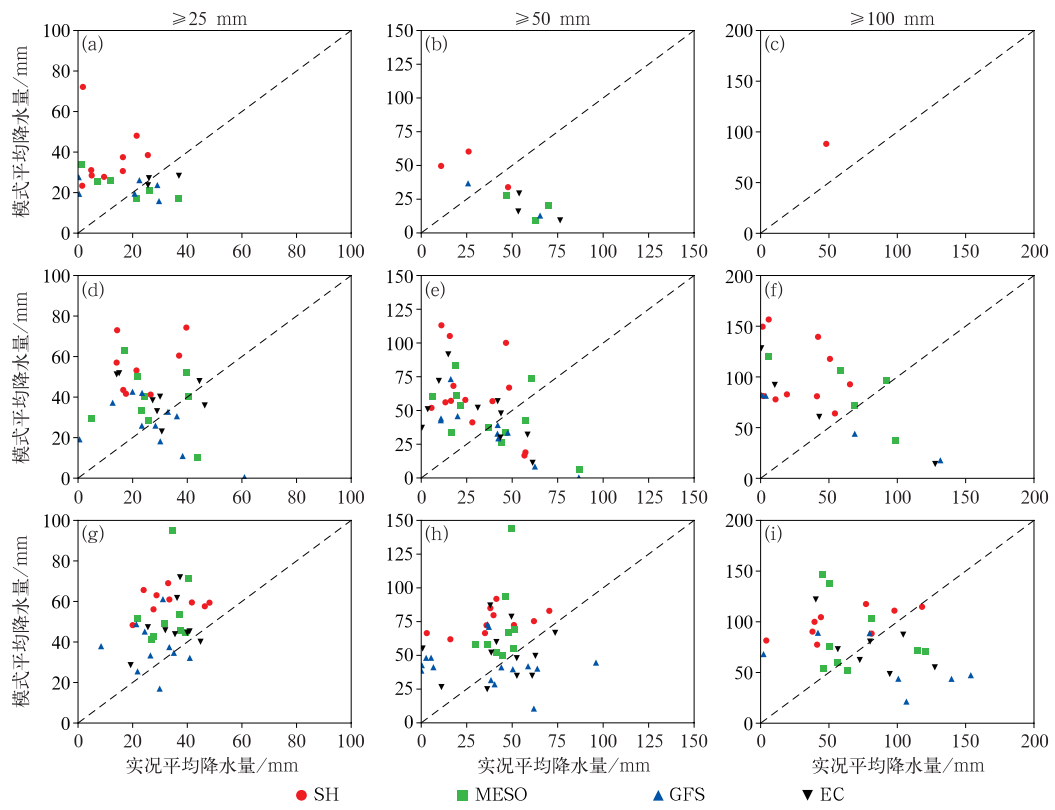


图 7 同图 6, 但为平均降水量
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for average rainfall

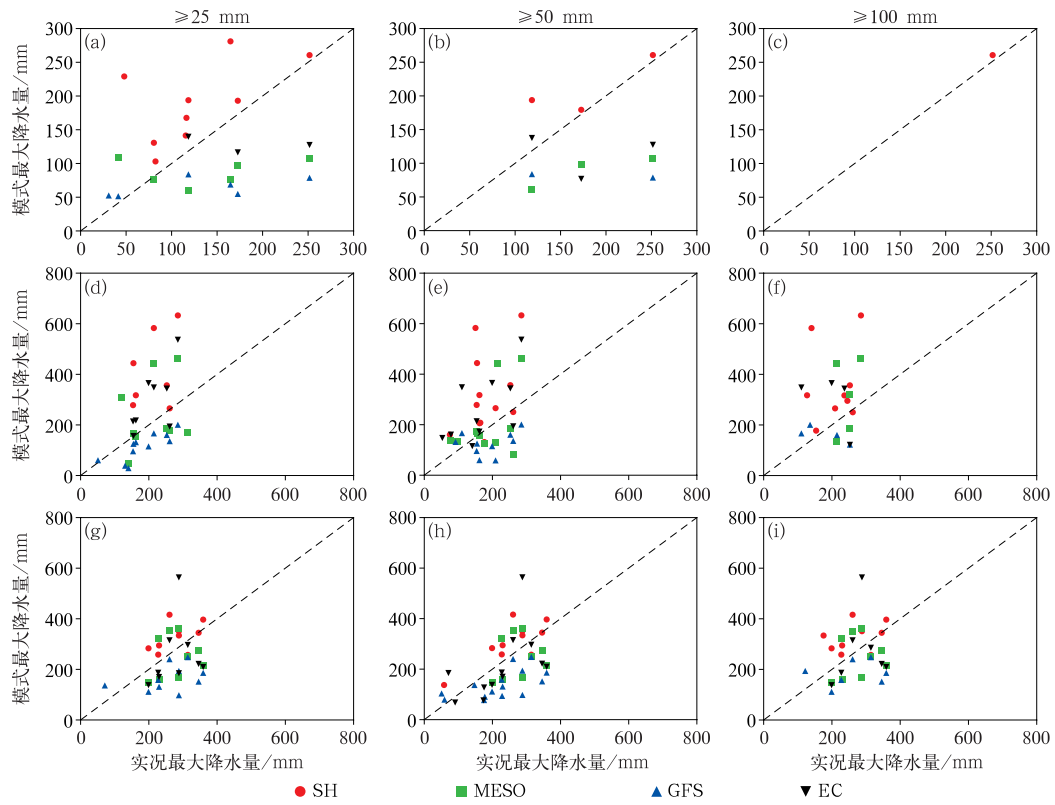


图 8 同图 6, 但为最大降水量
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for maximum rainfall

模式较 SH 模式更接近实况。从最大降水量的预报情况来看,全球模式预报相较于区域模式明显偏弱,SH 模式预报降水极值相较于实况仍偏强,其中对于“摩羯”台风预报偏强较明显(图 8d,8e,8f),而对于“温比亚”过程则优于其他三个模式(图 8g,8h,8i)。

综上,GFS 模式对于较强量级(50 mm 以上)降水范围、降水强度预报偏小、偏弱,EC 模式预报略好于 GFS 模式但对于降水极值估计仍存在不足。相对而言,区域模式对于极值估计优于全球模式,SH 模式对于极值的估计要优于 MESO 模式,但其预报降水存在范围、平均强度偏大的特征。

上述讨论给出了模式预报降水目标个体降水面

积(格点数)、强度、位移等误差的特征,除此之外 CRA 方法也能够给出模式预报降水个体的各类误差占比从而分析模式预报主要误差来源。图 9 给出了三次台风过程中 CRA 方法从各模式预报 36 h 时效预报场中所识别的所有降水个体的各部分误差平均占比。

整体来看,大部分模式预报降水个体的误差主要来源为位移误差,强度误差和形态误差大致相当。对于“云雀”台风 25 mm 以上的降水个体,EC 模式预报结果的强度误差占比非常小,结合图 7a 中 EC 模式的平均降水量和实况对比结果来看,其对于“云雀”这一次台风降水过程 25 mm 以上降水的强度预报相对较好。

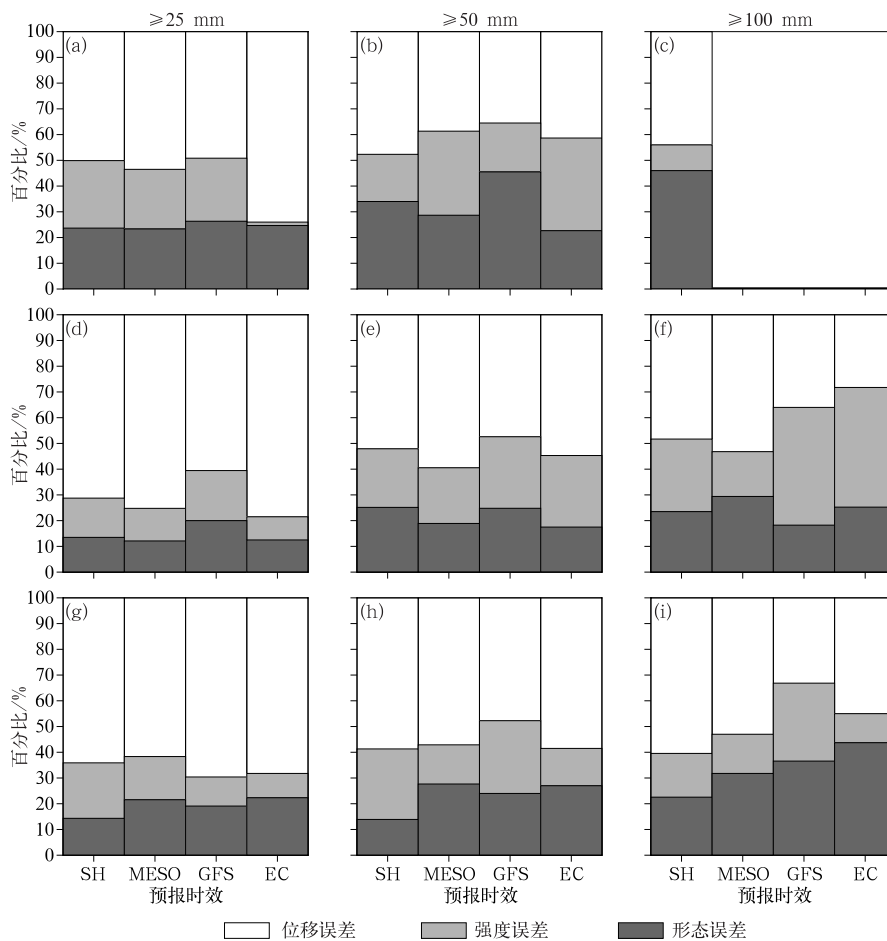


图 9 各模式 36 h 时效预报“云雀”(a,b,c)、“摩羯”(d,e,f)、“温比亚”(g,h,i) 大于对应阈值降水目标的位移误差、强度误差、形态误差占比

Fig. 9 Proportions of 36 h forecasts of each model for ‘Jongdari’ (a, b, c), ‘Yagi’ (d, e, f) and ‘Rumbia’ (g, h, i) greater than the displacement error, intensity error and pattern error of thresholds precipitation target

对比不同阈值的误差分布来看,多数模式对于低量级降水的预报误差更多来自于位移偏差,随着阈值的增加,位移误差的占比逐渐减小,形态误差占比略微增加,而强度误差占比随不同个例变化较大。对于“摩羯”台风,大部分模式的强度误差占比随阈值增加而增加,这说明各模式对于强降水的强度预报偏差较大,结合图6、图7对降水强度的偏差分析结果来看,区域模式特别是SH模式强度误差增加的主要原因来自于降水强度预报偏大,而全球模式则相反。对于“温比亚”台风,各模式强度误差占比随阈值的变化特征不明显,其中GFS模式的强度误差占比在50和100 mm两个阈值下相对较大,这可能是由于GFS模式对于强降水量级估计偏弱的原因。

4 结论与讨论

本文采用FSS和CRA方法结合国家气象信息中心地面、卫星、雷达三源降水融合产品(CMPA_Hourly V2.1),对SH、MESO、EC、GFS四个模式2018年8月登陆我国内陆地区的三次台风暴雨过程不同阈值下的降水预报进行了检验评估,从检验时段和区域的整体评分以及降水个体预报位移、范围、强度偏差等方面进行了分析。

对比不同的检验方法,FSS相较于传统TS评分在对较强量级降水进行评估时能够更好地区分各模式的预报性能,同时也能有效地通过量化评分的方式反映出不同模式的预报能力,而CRA则能够从降水落区位置、范围、平均强度、极值等方面更全面详细地评估模式的误差来源。

从FSS的结果来看,对于25 mm以上量级的降水,全球模式与区域模式评分差距不大,甚至对于“云雀”和“温比亚”台风36 h时效起报结果,GFS和EC模式分别表现出了一定的优势。而区域模式对于50 mm特别是100 mm以上强降水中心的预报相对于全球模式优势明显,其中SH模式表现相较于MESO模式更稳定,EC模式则要优于GFS模式。

从CRA的结果来看,除了“云雀”台风过程由于其所造成的强降水范围较小,局地性较强,各模式基于CRA识别出的降水个体数量均较少,其中SH模式要略多于其他三个模式,这也说明SH模式的漏报情况要稍好于其他模式,而对于降水范围和强

度较大的“摩羯”和“温比亚”两次过程,各模式识别出的降水个体数量差别不大。

对比区域模式和全球模式,从位移误差的特征来看,整体上各模式的位移偏差更多集中在纬向方向。对于“摩羯”、“温比亚”两次过程,EC模式的预报位移误差明显偏西,同样的特征也表现在MESO和GFS模式对于“温比亚”台风降水的预报。SH模式对于“温比亚”台风的预报位移偏差离散度相对较小,但没有表现出明显一致性的系统性偏差。

对于局地性强降水或大尺度降水的强中心的强度和范围预报,区域模式相对于全球模式有一定优势,GFS模式对于较强量级(50 mm以上)降水的范围、强度预报偏小、偏弱,EC模式预报略好于GFS模式但对于降水极值估计仍存在不足;SH模式对于极值的估计则要优于MESO模式。而对于较小量级降水(25 mm以上)的预报,区域模式特别是SH模式的降水范围和平均降水强度相较于实况偏大明显,因此,对于较小量级的降水,全球模式的预报降水范围和平均强度有一定参考价值。对比不同误差的占比情况,大部分模式预报降水个体的误差主要来源为位移误差,强度误差和形态误差大致相当。随着降水阈值的增加,多数模式的位移误差的占比逐渐减小,形态误差占比略微增加。

本文中的FSS方法在应用时所选择检验范围为矩形区域,在实际应用中所关注的台风暴雨并非区域内所有降水,下一步的工作中,考虑结合CRA的空间检验方法将检验区域内非台风造成的降水滤除,从而更准确地评估模式对于台风暴雨的预报性能。在应用CRA方法时,并没有对降水格点数据进行平滑,而数据平滑能够增加格点雨区的连续性。此外,尽管本文将所应用的CRA方法最小连续雨区的阈值调整为 $1^\circ \times 1^\circ$ 范围,但对于模式预报小范围强降水且未与实况雨区有重叠区域的情况,CRA方法无法有效检验评估,这也是由于CRA的原理所导致的。本文所得结论仅针对三次台风过程的检验讨论,未来还需要基于更多不同天气类型的降水过程进行检验评估,从而进一步分析各区域模式和全球模式的误差成因及其各自的局限性,为业务降水预报提供更科学的订正依据。

参考文献

- 符娇兰,代刊,2016. 基于CRA空间检验技术的西南地区东部强降水EC模式预报误差分析[J]. 气象,42(12):1456-1464. Fu J L,

- Dai K, 2016. The ECMWF model precipitation systematic error in the east of Southwest China based on the contiguous rain area method for spatial forecast verification [J]. *Meteor Mon*, 42 (12): 1456-1464 (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).
- 何光碧, 张利红, 屠妮妮, 2014. 区域中尺度模式对西南地区一次强降水过程的预报分析 [J]. *高原山地气象研究*, 34(2): 1-7. He G B, Zhang L H, Tu N N, 2014. Analyses on a heavy rainfall process prediction of regional numerical models [J]. *Plateau Mountain Meteor Res*, 34(2): 1-7 (in Chinese).
- 李佳, 陈葆德, 徐同, 2016. 目标检验方法在高分辨率数值天气预报检验中的应用 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 10(5): 1-9. Li J, Chen B D, Xu T, 2016. Application of the object-based verification method for high resolution NWP [J]. *Desert Oasis Meteor*, 10(5): 1-9 (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]. *Climatic Environ Res*, 22(1): 45-58 (in Chinese).
- 潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等, 2015. 基于邻域法的高分辨率模式降水的预报能力分析 [J]. *热带气象学报*, 31(5): 632-642. Pan L J, Zhang H F, Chen X T, et al, 2015. Neighborhood-based precipitation forecasting capability analysis of high-resolution models [J]. *J Trop Meteor*, 31(5): 632-642 (in Chinese).
- 潘旸, 谷军霞, 徐宾, 等, 2018. 多源降水数据融合研究及应用进展 [J]. *气象科技进展*, 8(1): 143-152. Pan Y, Gu J X, Xu B, et al, 2018. Advances in multi-source precipitation merging research [J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(1): 143-152 (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).
- 薛春芳, 潘留杰, 2016. 基于 MODE 方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析 [J]. *高原气象*, 35(2): 406-418. Xue C F, Pan L J, 2016. Diagnostic analysis of precipitation forecasting from Japan thin-grid model based on MODE [J]. *Plateau Meteor*, 35(2): 406-418 (in Chinese).
- 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 method on precipitation evaluation [J]. *Torr Rain Dis*, 37(1): 1-7 (in Chinese).
- Davis C, Brown B, Bullock R, 2006. 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, 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 E, Gallus Jr W A, 2009. Toward better understanding of the contiguous rain area (CRA) method for spatial forecast verification [J]. *Wea Forecasting*, 24(5): 1401-1415.
- Ebert E E, McBride J L, 2000. Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors [J]. *J Hydrol*, 239 (1-4): 179-202.
- Gilleland E, Ahijevych D, Brown B G, et al, 2009. Intercomparison of spatial forecast verification methods [J]. *Wea Forecasting*, 24 (5): 1416-1430.
- Keil C, Craig G C, 2007. A displacement-based error measure applied in a regional ensemble forecasting system [J]. *Mon Wea Rev*, 135(9): 3248-3259.
- Mittermaier M, Roberts N, 2010. Intercomparison of spatial forecast verification methods: identifying skillful spatial scales using the fractions skill score [J]. *Wea Forecasting*, 25(1): 343-354.
- 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.
- Venugopal V, Basu S, Foufoula-Georgiou E, 2005. A new metric for comparing precipitation patterns with an application to ensemble forecasts [J]. *J Geophys Res*, 110 (D8): D08111, doi: 10.1029/2004JD005395.
- Wernli H, Hofmann C, Zimmer M, 2009. Spatial forecast verification methods intercomparison project: application of the SAL technique [J]. *Wea Forecasting*, 24(6): 1472-1484.