

华东区域数值预报系统对极端降水预报能力的评估

王晓峰^{1,2} 许晓林^{2,3} 徐同^{2,3} 杨玉华^{2,3} 张贇程^{1,2}

(1 上海市气象科学研究所, 上海 200030;

2 中国气象局台风数值预报重点实验室, 上海 200030; 3 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: 对SMS-WARMSV2.0业务系统、欧洲中期天气预报中心全球模式(EC模式)及全球预报系统模式(GFS模式)2016年1—12月降水预报结果进行统计检验,并对2016年我国多个极端降水案例进行对比检验。结果表明:技巧评分(TS)、公平技巧评分(ETS)、真实技巧评分(TSS)和击中率(PODY)多种统计检验指标证实华东区域数值预报系统对小雨、暴雨和大暴雨的预报技巧优于EC和GFS全球模式,在暴雨以上量级优势更为显著。多个极端降水案例检验表明,区域模式相对于全球模式对极端降水具备更强的预报能力。

关键词: SMS-WARMSV2.0, 极端降水, 评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.008

Verification of the Extreme Precipitation Forecast from SMS-WARMSV2.0

Wang Xiaofeng^{1,2}, Xu Xiaolin^{2,3}, Xu Tong^{2,3}, Yang Yuhua^{2,3}, Zhang Yuncheng^{1,2}

(1 Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030

2 Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, Shanghai 200030

3 Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030)

Abstract: The precipitation forecasts from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), The Global Forecast System (GFS), and Shanghai Meteorological Service WRF ADAS Real-Time Modeling System 2 (SMS-WARMSV2.0) models were compared by using statistical verification methods for year 2016. In addition to routine daily evaluation, some extreme rainfall events were also included in the comparisons. On multiple statistical scores of the ETS, TS, TSS, and PODY, the SMS-WARMSV2.0 shows better skill in the prediction of light and heavy rainfalls compared to ECMWF and GFS. The advantage of SMS-WARMSV2.0 over other two global models is especially true for heavy and extreme rainfall events. This suggests the regional model has improved skill in the prediction of extreme rainfalls comparing to global models.

Keywords: numerical forecast, precipitation, evaluation

0 引言

SMS-WARMSV2.0是新一代上海区域中尺度模式,其水平分辨率为9 km,以全球预报系统(global forecast system, GFS)分析场为初始场,分别在每日00和12 UTC(对应北京时08和20时)起报,预报时效为72 h。该系统在原区域中尺度模式基础上升级而成,于2014年6月开始进行业务试运行。SMS-WARMSV2.0相比第一代业务系统做了诸多改进。在

空间分辨率方面仍保持9 km,但预报范围扩大到全国,水平格点数为760×600,垂直层次增加至51层。GFS自2013年使用Hybrid同化技术后,背景场误差有所减少,因此新业务模式的同化系统增加了模式背景场权重,并对模式背景场协方差进行了更新。在物理初始化方面,新版业务模式的云分析,对云水物质的处理进行了调整,以使从观测资料得到的云水物质与模式的微物理方案相匹配。在物理过程方面,长短波辐射仍使用RRTMG方案;考虑了浅对流过程,并对微物理方案进行了调整,如雨滴末端速度、我国区域气溶胶分布情况等。

通过上述的改进,使得SMS-WARMSV2.0在有无降水和极端降水预报准确率方面有了显著的提高。在

收稿日期:2017年9月4日;修回日期:2017年11月2日
第一作者:王晓峰(1975—),Email:wangxf@typhoon.org.cn
资助信息:上海市科委重点基金项目(13231203300, 17DZ1205300)

诸多极端降水个例中，SMS-WARMSV2.0都表现出优异的预报能力。刘飞等^[1]通过对上海地区两次强对流天气过程进行分析，指出ECMWF模式和WARMS模式对低涡中心的预报结果相近，但是对上海沿海地区的风速预报差异较大。ECMWF预报的风速明显偏小，WARMS模式相比实况则略有偏强。张赞程等^[2]依托SMS-WARMSV2.0模式分析上海的城市化对极端降水的作用。在此个例中，SMS-WARMSV2.0模式很好地再现了“913”降水过程由北向南的推进过程。其中对海陆风的触发作用以及出流边界的推进作用SMS-WARMSV2.0模式都能很好的再现。

然而个例的分析针对的只是一个独立的过程，并不能全面地评估SMS-WARMSV2.0对极端降水的预报效果。毛冬艳等^[3]指出模式的检验工作一直受到广大气象学者的重视，尤其是针对模式基本气象要素和降水预报的定量化统计检验。模式检验不仅能够了解模式的能力，还能为模式改进提供参考依据。王雨等^[4]曾对区域业务模式6 h降水预报进行了检验，指出上海区域中尺度模式与国家数值预报中心模式相比，6 h降水预报能力处于相对领先地位。但是，这些结论都是在对WARMSV1.0预报结果评估上得到的。徐同等^[5]则对SMS-WARMSV2.0模式和原区域中尺度模式2014年6—12月的试运行结果进行检验，检验量包括降水、2 m温度场、10 m风速、500 hPa位势高度场。分析2 m温度场的均方根误差及预报准确率发现新版业务模式的2 m温度场预报优于原业务模式；此外新业务模式的10 m风速预报的均方根误差的逐月和多月平均值都低于原业务模式；高空形势场检验结果显示，新业务模式对500 hPa位势高度场和850 hPa温度场的预报都优于原业务模式。本文分析评估了SMS-WARMSV2.0系统对2016年实际业务的预报情况，以期为模式研发人员和预报人员提供基本信息，从而为该模式更好地在全国业务部门应用提供参考依据。

1 资料

用于检验的模式预报资料为2016年1—12月SMS-WARMSV2.0系统降水预报资料。观测资料为2016年1—12月中国2401个台站逐6 h降水量观测数据，并将4个6 h间隔时次的资料进行累加得到24 h累计降水。

2 降水检验方法

检验方法采用2×2列联表计算模式降水的四种评分指数（表1）^[6-9]。四种评分指数分别为：（1）命中率 $POD = \frac{A}{A+C}$ ，表示天气事件被正确预报的比例。（2）临界成功指数 $CSI = \frac{A}{A+B+C}$ ，通常也称之

为TS评分。（3）公平技巧评分， $ETS = \frac{A-C1}{A+B+C-C1}$ ， $C1 = \frac{(A+B)(A+C)}{A+B+C+D}$ ；C1表示随机预报的值；ETS表示除去随机偶然事件后，事件发生且预报正确的次数与事件发生总次数（预报或者观测）的比率，阈值范围为 $-\frac{1}{3} \sim 1$ ，ETS=0表示无预报技巧，理想情况下ETS=1。（4）TSS评分， $TSS = \frac{AD-BC}{(A+C)(B+D)}$ ，TSS反映了成功预报与空报的差异，阈值范围-1~1，理想的预报TSS=1，TSS=0表示无预报技巧。

表1 降水检验列联表

Table1 The contingency table for scoring rainfall forecasts

预报事件	观测事件	
	发生	未发生
发生	A	B
未发生	C	D

3 检验结果分析

3.1 降水统计检验

图1为SMS-WARMSV2.0系统、欧洲中期天气预报中心全球模式（EC模式）和GFS模式2016年1—12月降水预报分级检验结果，分别给出模式的TS技巧评分、ETS评分、TSS评分和POD。由图1a可以看出TS评分与预报量级及预报时效的关系。从预报时效来看，预报时效越短，TS评分越高；时效越长，TS评分则越低。从预报量级来看，随着预报量级增大，技巧评分有所降低，预报量级越大，TS评分越低；预报量级越小，TS评分越高。总体而言，SMS-WARMSV2.0系统的降水预报TS评分显示出较高的预报技巧，优于EC和GFS模式，尤其是暴雨以上量级预报优势明显，例如24，48和72 h的大暴雨TS评分分别达到0.08，0.04和0.03，EC为0.06，0.02和0，GFS为0.03，0.03和0。此外，可以看出区域模式在72 h以内的预报性能比较稳定，预报技巧差异不显著。图1b为ETS评分情况，可以看出，在去除掉偶然预报正确项之后，SMS-WARMSV2.0仍然具有较高预报技巧性，优于EC和GFS模式。TSS评分反映了成功预报与空报的差异，如图1c所示，TSS评分随着降水阈值的增加（小雨到大暴雨）有逐渐降低的趋势，说明随着降水量级的增加，模式正确预报率和空报率越来越接近，区域模式的降水预报技巧总体呈现出预报成功率高于空报率的特征，对比EC和GFS模式，区域模式预报成功率更高。POD主要反映模式对天气事件发生的成功预报比率，如图1d所示，区域模式的预报命中率在暴雨和大暴雨量级要明显优于EC和GFS模式，例如24，48和72

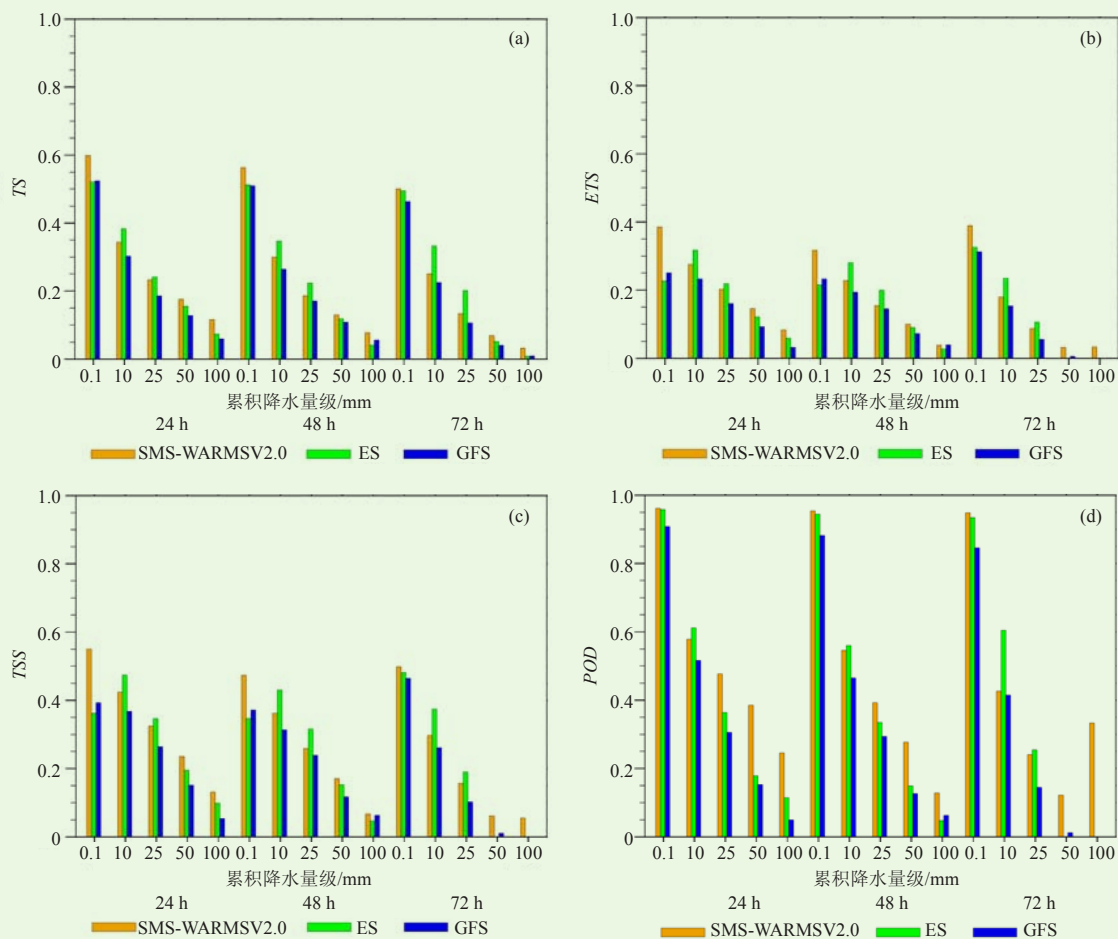


图1 SMS-WARMSV2.0系统、EC模式、GFS模式对不同强度降水24, 48和72 h预报的TS评分 (a)、ETS评分 (b)、TSS评分 (c) 和POD (d)

Fig. 1 (a) Threat score, (b) Equitable threat score, (c) True skill statistic, (d) PODY in different rainfall thresholds for the 24 h,48 h and 72 h prediction from the SMS-WARMSV2.0, EC and GFS model

h的大暴雨的POD分别达到0.25, 0.12和0.33, EC模式为0.11, 0.04和0, GFS模式为0.04, 0.06和0。

3.2 极端降水案例检验

3.2.1 2016年5月20—21日广东特大暴雨

2016年5月20—21日, 受切变线影响, 强暴雨袭击广东(图2b), 广东北部地区、东部沿海和西部地区均出现大暴雨天气, 其中信宜市出现特大暴雨, 刷新了日雨量历史极值, 6 h雨量达429.5 mm, 为200年一遇的极端案例。从SMS-WARMSV2.0系统2016年5月20日08时的24 h降水预报(图2a)可见, 系统预报广东西部和中北部以及沿海均有大暴雨, 对本次强降水的落区和强度都有较好的预报。

图3为SMS-WARMSV2.0预报系统2016年5月20日08时起报的20时形势场(图3a)与分析场(图3b)对比显示, 850 hPa风场预报的低涡中心位于江西北部, 与分析场基本一致; 强降水产生的区域位于低涡切变

线的南侧, 配合有西南急流输送水汽, 同时700 hPa的相对湿度更是达到了90%以上。通过预报与分析场的对比可以看出, SMS-WARMSV2.0预报系统对此次切变线降水的形势预报把握较好。

图4为SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式预报对广东地区2016年5月20日08时—21日08时累计降水技巧评分, 如图所示, 从TS评分分析, SMS-WARMSV2.0系统24和48 h小雨、暴雨和大暴雨预报TS评分均明显优于EC和GFS模式。ETS评分的结果与TS评分一致, 在去除随机POD之后, 区域模式对暴雨以上量级的降水预报技巧评分明显优于全球模式。例如区域模式对大暴雨量级的24和48 h的ETS评分分别为0.05和0.21, EC为0.02和0, GFS为0.04和0。

3.2.2 2016年安徽6月19—20日暖切暴雨

2016年6月19—20日, 受切变线影响, 安徽东南部出现暴雨和大暴雨天气(图5)。如图5b所示, 暴

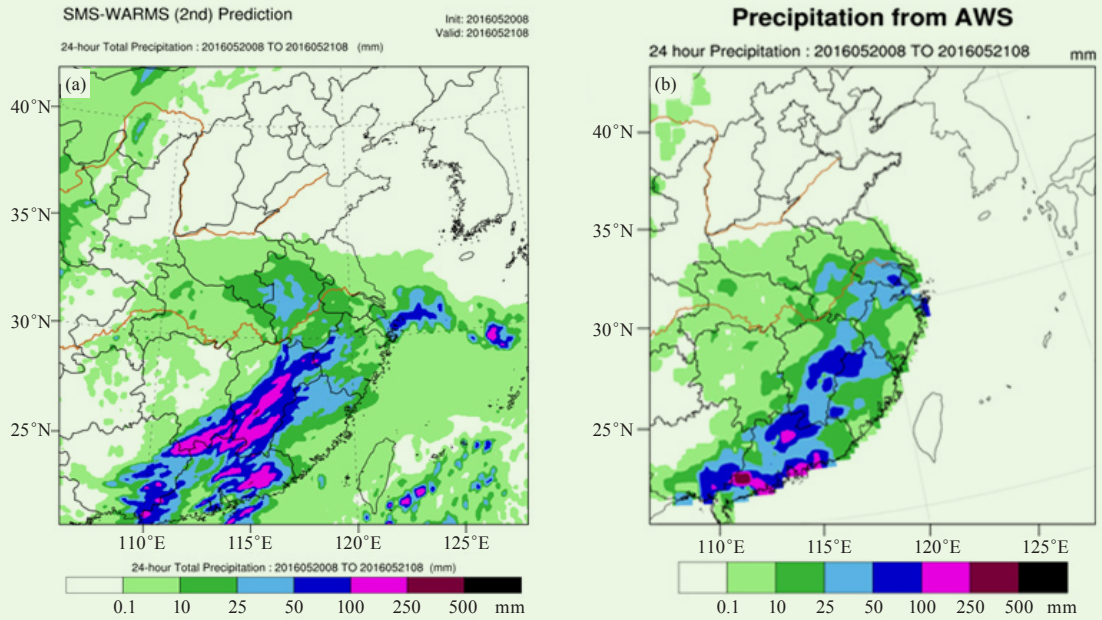


图2 2016年5月20日08时预报24 h累计降水 (a) 和实况降水 (b)
Fig. 2 Accumulated 24 h rainfall forecasted by SMS-WARMSV2.0 with initial time at 08 BT 20 May 2016 (a) and the corresponding observed rainfall (b)

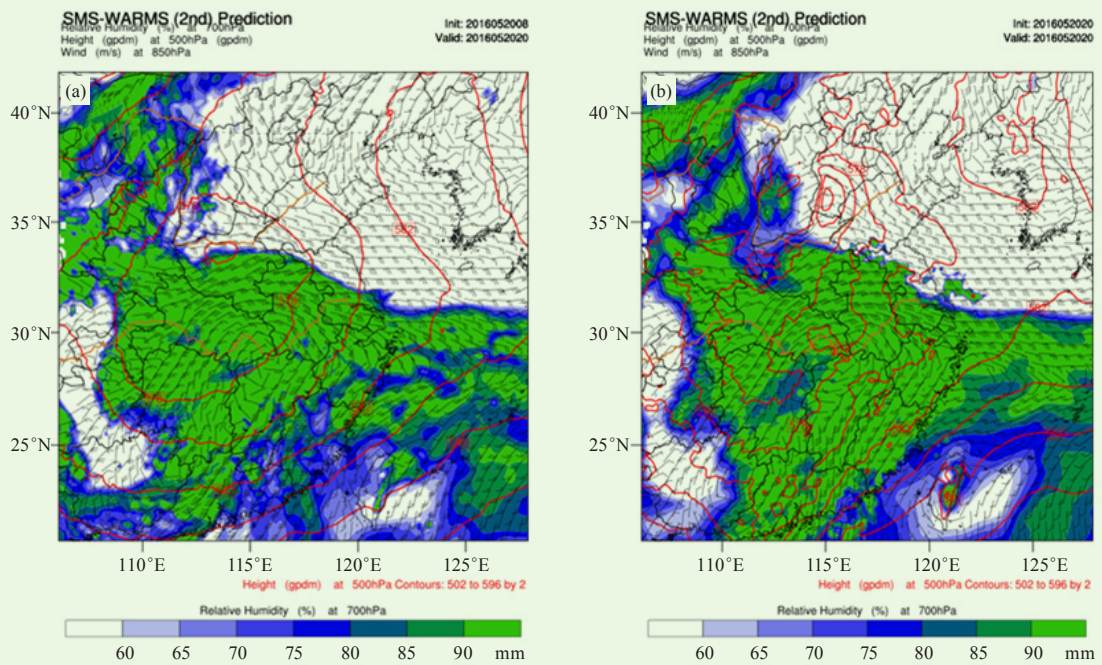


图3 SMS-WARMSV2.0系统2016年5月20日08时预报形势场(a)对与分析场(b)
Fig. 3 The chart forecasted by SMS-WARMSV2.0 with initial time at 08 BT 20 May, 2016 (a) and observation (b)

雨带主要位于湖北、安徽、江西交接处，其中安徽南部局地有大暴雨，19日08时—20日08时，安徽南部和东部出现暴雨，局地为大暴雨天气，其中宣城市24 h 累计雨量达到267.5 mm，达到特大暴雨级别。从SMS-WARMSV2.0系统2016年5月20日08时的24 h降水预报

(图5a)可见，系统预报安徽南部有大暴雨，局地特大暴雨，对强降水的强度和落区预报准确。

图6为SMS-WARMSV2.0预报系统2016年6月19日08时起报的20时形势场(图6a)与分析场(图6b)对比显示，500 hPa形势场预报安徽南部位于副热带高压

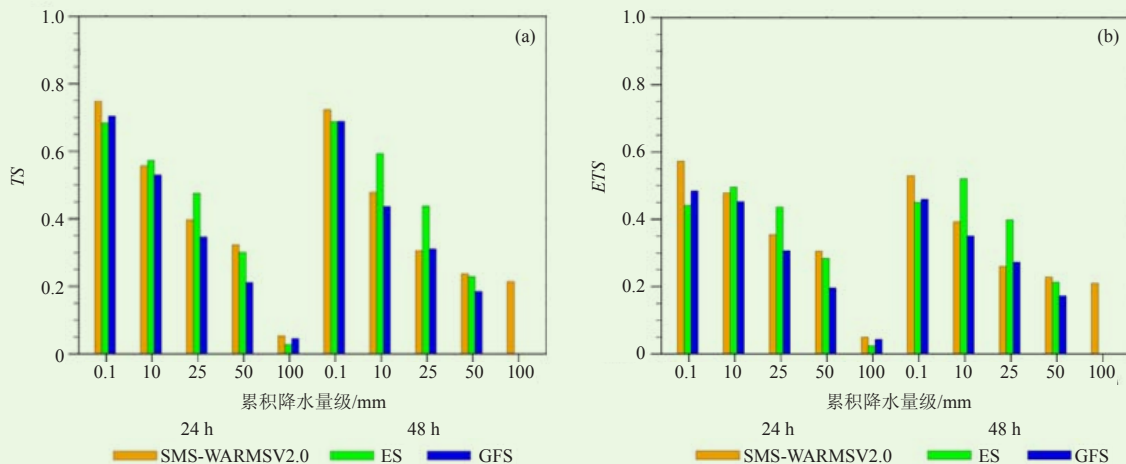


图4 2016年5月20日08时—21日08时SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式预报的累计降水TS评分 (a) 和ETS评分 (b)

Fig. 4 Treat score (a) and equitable treat score (b) on accumulated 24 h rainfall from 08 BT 20 May, 2016 to 08 BT 21 May, 2016 forecasted by SMS-WARMSV2.0, EC and GFS model

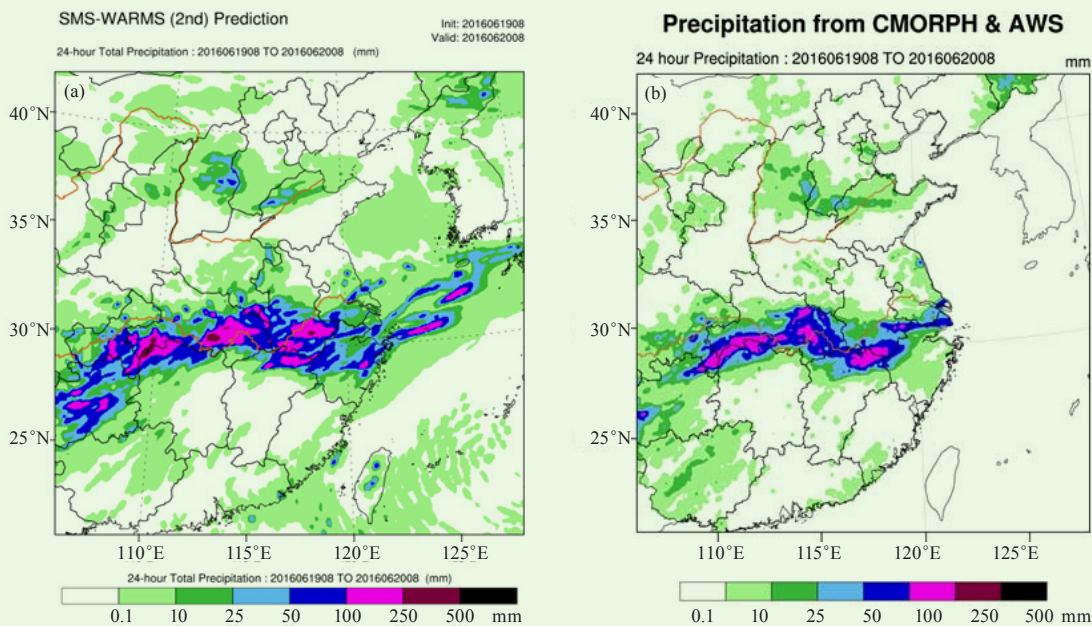


图5 同图2，但为2016年6月19日08时
Fig. 5 Same as Fig.2, but at 08 BT 19 June 2016

的边缘，与分析场一致；850 hPa的暖式切变线位于安徽中南部，安徽与江西交界处的强降水区域位于切变线南侧，700 hPa上的相对湿度达到了90%以上。此次过程为典型的副热带高压边缘、低空切变线南侧爆发的暖区雷暴，局地的降水效率非常高。SMS-WARMSV2.0预报系统对高低空形势预报把握较准确。

图7为SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式预报对安徽地区2016年6月18日08时—19日08时累计降水技巧评分，如图所示，从TS评分分析，SMS-

WARMSV2.0对24 h降水的小雨至大暴雨各量级预报TS评分均高于EC模式，小雨、中雨、大雨和暴雨预报TS评分高于GFS模式；对48 h降水的小雨、中雨、大雨预报TS评分高于EC模式，小雨至暴雨的TS评分高于GFS模式。ETS评分的结果与TS评分一致，在去除随机POD之后，SMS-WARMSV2.0对24和48h降水的中雨、中雨和大雨预报均明显优于EC和GFS模式，24 h暴雨优于EC和GFS模式，48 h暴雨优于GFS模式。

图8为SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式预报对安徽地区2016年6月19日08时—20日08时累

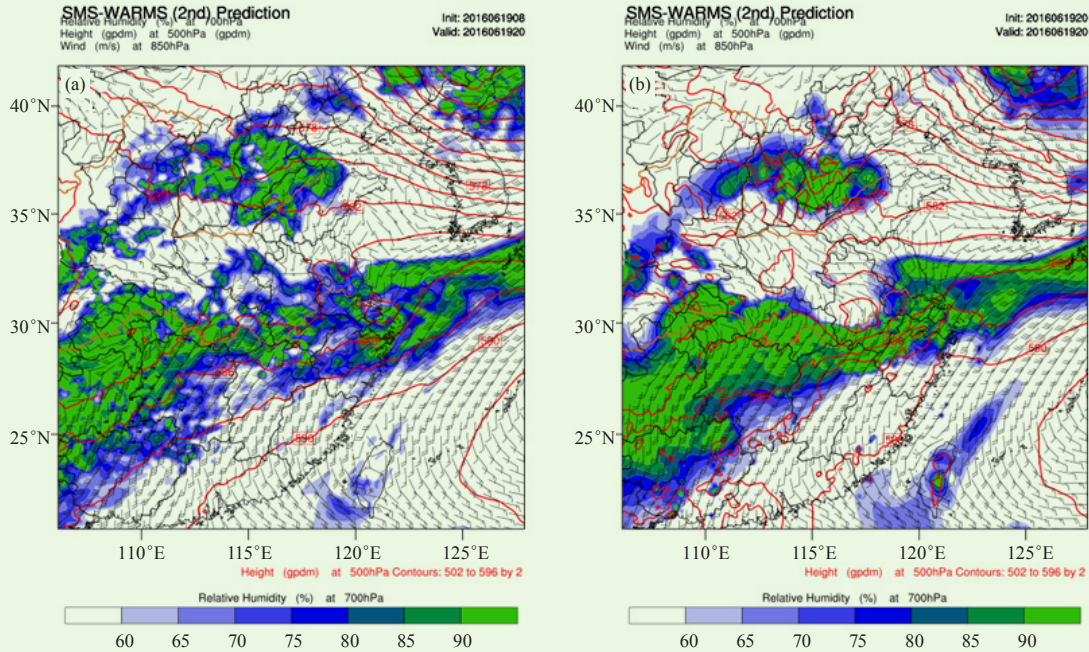


图6 同图3, 但为2016年6月19日08时
Fig. 6 Same as Fig. 3, but at 08 BT 19 June 2016

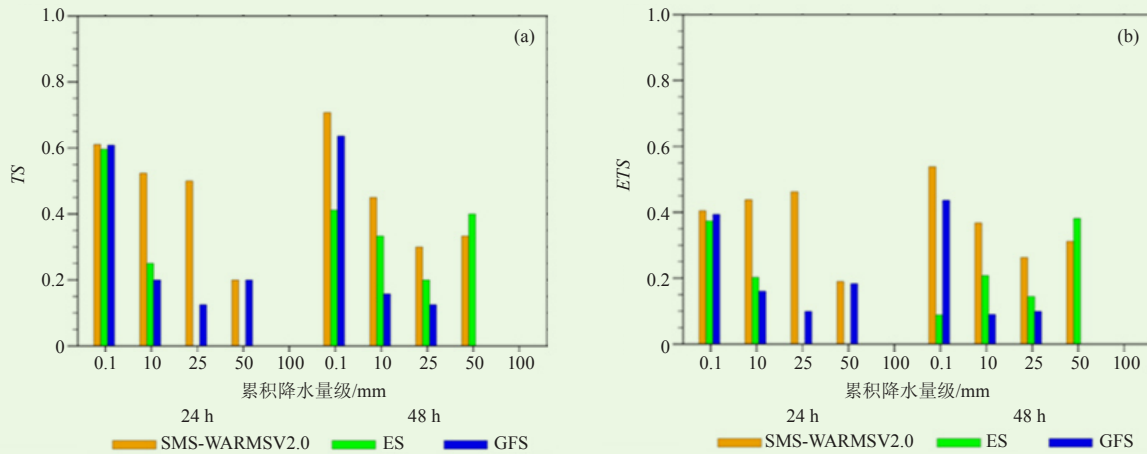


图7 同图4, 但为2016年6月18日08时—19日08时
Fig. 7 Same as Fig. 4, but for 08 BT 18 June–08 BT 19 June 2016

计降水技巧评分, 如图所示, 从TS评分分析, SMS-WARMSV2.0对24和48 h降水的小雨至大暴雨各量级预报TS评分均高于EC模式和GFS模式。在去除随机POD之后, ETS评分结果与TS评分一致。

3.2.3 2016年7月5日武汉大暴雨

2016年7月5—7日, 受梅雨静止锋影响, 湖北武汉遭遇持续强降雨过程(图9b), 中心城区普降今年最大暴雨, 部分地区降雨达到大暴雨等级, 武汉中心城区降雨量达180 mm, 远城区蔡甸区降雨206 mm。全市因暴雨受灾人口25万人, 经济损失约2.5亿元。

对比预报(图9a)可见, 模式预报湖北中东部有大暴雨, 与实况的落区和强度很好的吻合。

图10为SMS-WARMSV2.0预报系统2016年7月5日08时起报的20时形势场(图10a)与分析场(图10b)对比显示, 武汉位于500 hPa高空槽前, 700 hPa相对湿度达到90%以上, 850 hPa的切变线与降水落区基本吻合, 所以产生此次的强降水天气。预报与分析的形势场相似度较高。

图11为SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式预报2016年7月5日08时—6日08时累计降水TS和

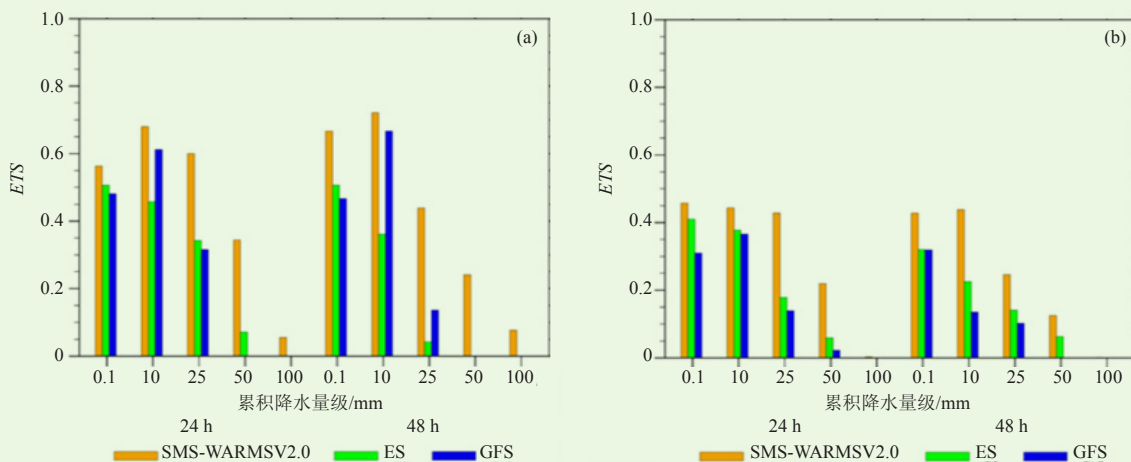


图8 同图4, 但为2016年6月19日08时—20日08时
Fig. 8 Same as Fig. 4, but for 08 BT 19 June–08 BT 20 June 2016

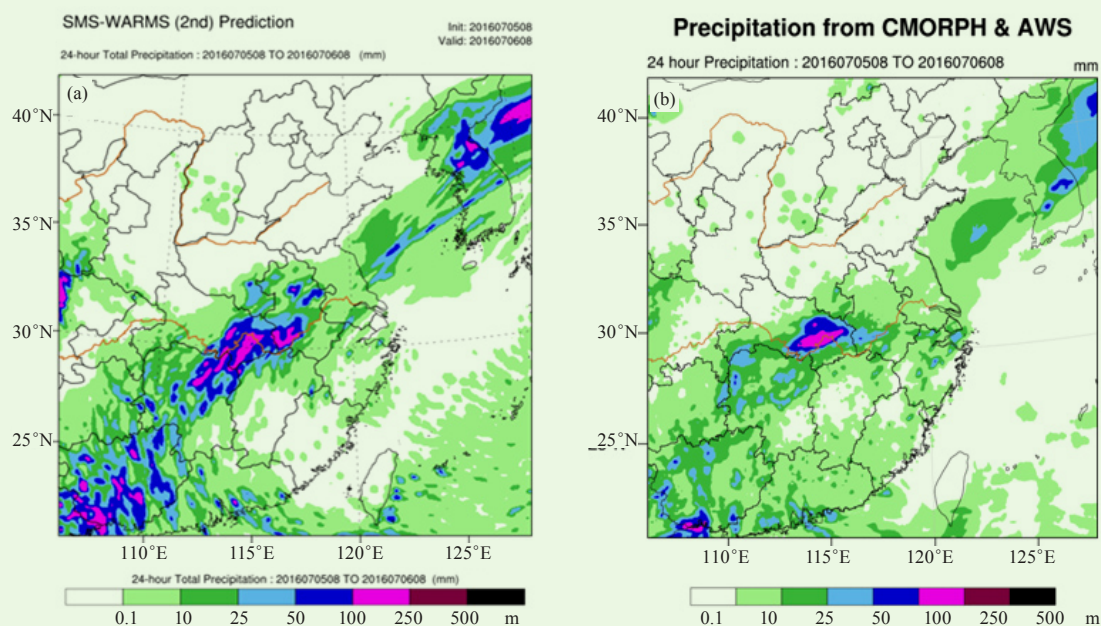


图9 同图2, 但为2016年7月5日08时
Fig. 9 Same as Fig. 2, but at 08 BT July 5 2016

ETS技巧评分, 如图11a所示, 区域模式预报24 h小雨、暴雨和大暴雨TS评分均高于EC和GFS模式, 48与24 h类似, 区域模式在暴雨以上量级预报优势更为明显。ETS评分结果与TS相同, 说明区域模式对武汉强降水的预报技巧优于EC和GFS全球模式。

4 结论和讨论

对2016年1—12月SMS-WARMSV2.0系统、EC模式和GFS模式降水预报结果进行统计检验, 并选择2016年多个极端降水案例进行对比检验, 得出以下主要结论:

1) SMS-WARMSV2.0系统降水预报评分体现出

较高的预报技巧, 尤其是暴雨以上量级预报优势明显, 即便在去除掉偶然预报正确项之后, 区域模式对小雨、暴雨和大暴雨的预报技巧仍优于EC和GFS全球模式。

2) TSS评分和POD检验表明, SMS-WARMSV2.0系统对降水事件具有较高的预报成功率和POD, 呈现出预报成功率高于空报率的特征, 对小雨、暴雨和大暴雨的预报POD明显优于EC和GFS全球模式。

3) 对2016年5月广东华南暖区特大暴雨、6月安徽暖切暴雨及7月武汉梅雨锋大暴雨的多模式对比检验显示, SMS-WARMSV2.0系统对2016年我国多个极

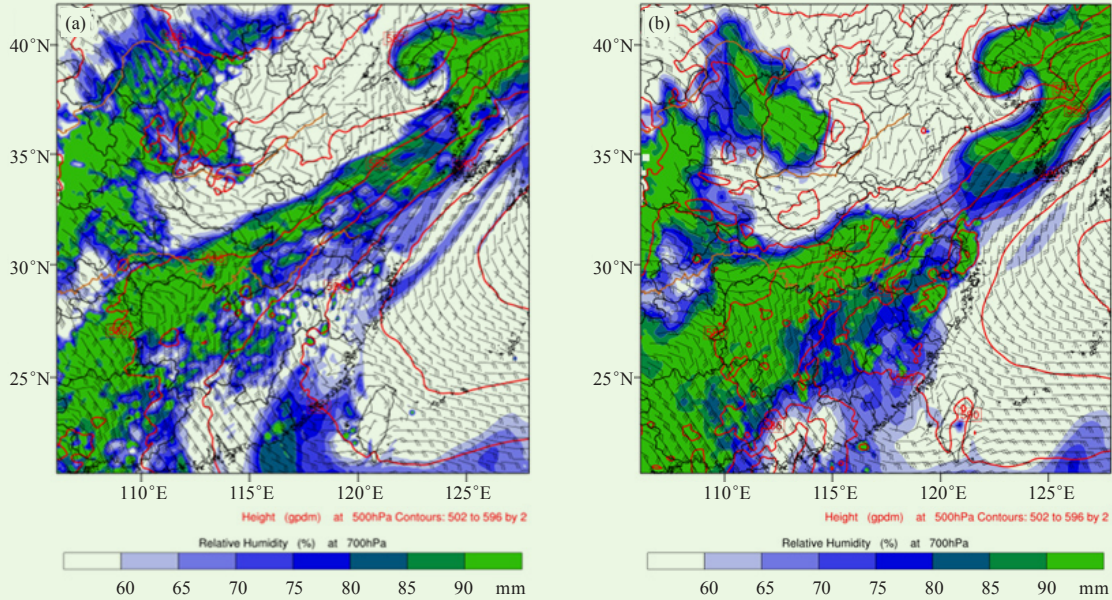


图10 同图3, 但为2016年7月5日08时
Fig. 10 Same as Fig. 3, but at 08 BT 5 July 2016

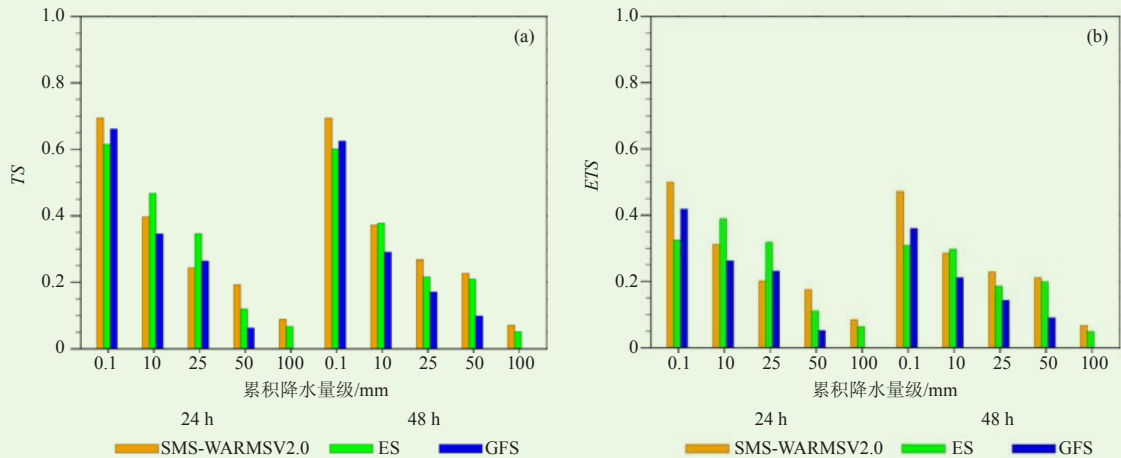


图11 同图4, 但为2016年7月5日08时—6日08时
Fig. 11 Same as Fig. 4, but for 08 BT 5 July—08 BT 6 July 2016

端降水案例的预报相对于全球模式有更好的预报技巧, 对暴雨以上的预报TS评分和ETS评分优于EC和GFS全球模式。

参考文献

[1] 刘飞, 肖鹏, 黄宁立, 等. 上海地区两次强对流天气过程灾害成因及预警研究. 气象与环境学报, 2017, 33(2): 28-36.
[2] 张赟程, 王晓峰, 张蕾, 等. 海风与热岛耦合对上海强对流天气影响的数值模拟. 高原气象, 2017, 36(3): 705-717.
[3] 毛冬艳, 朱文剑, 樊利强, 等. GRAPES_MESOV3.3模式强天气预报性能的初步检验. 气象, 2014, 40(12): 1429-1438.

[4] 王雨, 公颖, 陈法敬, 等. 区域业务模式6 h降水预报检验方案比较. 应用气象学报, 2013, 24(2): 171-178.
[5] 徐同, 李佳, 杨玉华, 等. SMS-WARMSV2.0系统预报效果检验. 气象, 2016, 42(10): 1191-1199.
[6] Gilbert G F. Finley's tornado predictions. Amer Meteorol J, 1984, 1: 166-172.
[7] Murphy A H, Winkler R L. A general framework for forecast verification. Mon Wea Rev, 1986, 115: 1330-1338.
[8] Murphy A H. The Finley Affair: a signal event in the history of forecast verification. Wea Forecasting, 1996, 11(1): 3-20.
[9] 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 数值天气预报检验方法研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(3): 327-335.