

党英娜. ECMWF 和华东 WARMS 模式对山东半岛汛期暴雨的预报能力检验[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 136-144.
Dang Yingna. Verification of the rainstorm forecast by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season in Shandong Peninsula[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 136-144. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.015. (in Chinese)

ECMWF 和华东 WARMS 模式对 山东半岛汛期暴雨的预报能力检验

党英娜

(烟台市气象局, 山东 烟台 264003)

摘要: 利用欧洲中期天气预报中心细网格模式(以下简称 ECMWF-Thin)产品和模式水平分辨率为 9 km 的华东区域气象中心中尺度数值预报模式 V1.0(以下简称 SMS-WARMS)产品,对山东半岛 2016—2017 年汛期 35 个暴雨日(26 次过程)的暴雨预报能力进行检验。结果表明:1)对于降水强度,ECMWF-Thin 预报偏弱导致暴雨和大暴雨漏报率偏高,大暴雨几乎全部漏报,当其预报有 50 mm 以上降水时出现暴雨的概率达 90%以上,SMS-WARMS 则预报降水量偏强、空报率较高,SMS-WARMS 降水强度量级预报总体优于 ECMWF-Thin,24 h 预报能力最佳;2)对于强降水开始时间的预报,两家模式均表现为偏晚为主,且偏晚 3 h 以内的概率较大,在参考其预报结论的基础上可适当提前 3 h;3)对于强降水落区,ECMWF-Thin 略优于 SMS-WARMS,SMS-WARMS 对台风暴雨的落区预报较为精准,而其他类型暴雨的落区 ECMWF-Thin 预报多偏南或偏向西南 1°以内,因此预报员需向偏东或东北 1°范围内的区域调整;4)对于强降水范围大小的预报,ECMWF-Thin 预报暴雨范围偏小的概率较大,而 SMS-WARMS 预报范围偏大的概率较大,因此需综合考虑两种数值预报结论进行折中预报。

关键词: ECMWF-Thin; SMS-WARMS; 汛期暴雨; 检验

中图分类号: P456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0136-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.015

Verification of the rainstorm forecast by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season in Shandong Peninsula

DANG Yingna

(Yantai Meteorological Bureau, Yantai 264003, China)

Abstract The verification of the rainstorm forecast by ECMWF thin grid model products (ECMWF-Thin for short) and SMS-WARMS V1.0 with the resolution of 9 km (SMS-WARMS for short) from East China Regional Meteorological Center for the 35 rainstorm days (26 processes) in the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017 is conducted. The results are listed as below. 1) For the precipitation intensity, the weak prediction by ECMWF-Thin leads to high omission rate of rainstorms and torrential rain processes and almost all the torrential rain processes are omitted. When the precipitation is predicted to be more than 50 mm, the probability of rainstorms is over 90%. SMS-WARMS predicts relatively strong precipitation and is of high vacancy rate. SMS-WARMS is generally superior to ECMWF-Thin in predicting the precipitation intensity and possesses the best 24-hour forecast ability. 2) For the beginning

收稿日期: 2018-06-19; 修订日期: 2018-07-04

基金项目: 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-043)

作者简介: 党英娜, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事短期天气预报与数值产品释用工作, 63393076@qq.com。

time of heavy precipitation, both models are generally predicting later, and the probability of three hours late is greater. Therefore, the precipitation can be suitably predicted to be three hours in advance referring to the conclusion. 3) For the heavy precipitation areas, ECMWF-Thin is slightly better than SMS-WARMS. The latter model is more accurate in forecasting typhoon rainstorm areas, but the areas of other types of rainstorms by the former model are generally to the south or southwest within 1° . Thus forecasters should adjust eastward or northeastward within 1° . 4) For the heavy precipitation range, it is more probable for ECMWF-Thin to forecast a smaller range and SMS-WARMS a larger range. Therefore, it is necessary to integrate two kinds of numerical predictions.

Key words ECMWF-Thin; SMS-WARMS; rainstorms in the flood season; verification

引言

随着数值预报技术的不断更新和预报精度及准确率的不断提高,数值预报产品已成为现代天气预报的重要参考依据。但由于数值预报结果受模式初始场、边界条件、物理过程、动力框架等诸多方面的影响,数值预报产品特别是对天气要素的预报在量级大小、出现时间和范围上都不可避免地存在一定的误差^[1-6]。正确认识数值预报产品的性能可以使预报员有根据地数值预报加以订正,从而取得更好的预报效果,因此开展数值产品的预报能力检验评估是必不可少的工作^[7-9]。张永婧等^[10]通过对 WRF 集合预报 24 h 确定性降水量检验,发现确定性预报 24 h 降水量达到 30 mm 以上,且天气形势和各物理量满足产生暴雨的条件时,可考虑预报暴雨。肖明静等^[11]对 2010 年山东汛期降水预报进行了检验,结果表明 T639 模式的预报效果最佳。梁寒等^[12]对 2013 年 8 月 16 日辽宁地区特大暴雨过程数值模式的预报产品进行检验和对比分析,发现暴雨预报平均准确率欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式略高于 T639 模式。张国华等^[13]根据天气分型对多种数值模式在河北地区做 TS 评分,发现 T639、MM5、T213 模式对大雨和暴雨的预报好于其他模式。

暴雨作为对人类生产生活影响最大的灾害性天气之一,形成机制较为复杂^[14-15],因此预报难度较大。对气象工作者来说,如何能够定时、定量、定点地作出准确的预报,具有很大的挑战,是天气预报的重点和难点之一。由于山东暴雨主要集中在汛期,因此采用目前预报业务中广泛使用的欧洲中期天气预报中心预报模式和华东区域气象中心中尺度数值预报模式产品对山东半岛 2016—2017 年汛期期间 35 个暴雨日(26 次过程)的暴雨

预报能力进行了客观检验,旨在分析两种数值模式对降水强度、强降水开始时间、强降水落区及范围大小的预报效果,通过检验了解这两种数值预报模式的预报能力及特点,以期为预报员在实际预报中如何释用数值模式产品提供参考,从而提高暴雨预报的准确率。

1 资料与检验方法

1.1 模式资料与暴雨过程的选取

参与检验的模式为欧洲中期天气预报中心 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率细网格模式(以下简称 ECMWF-Thin)产品以及水平模式分辨率为 9 km 的华东区域气象中心中尺度数值预报模式 V1.0(以下简称 SMS-WARMS)产品。参与检验的资料为 2016—2017 年山东半岛汛期(6—9 月)期间每日 20:00(北京时,下同)起报的逐 3 h 降水量以及 0~24 h、24~48 h 和 48~72 h 的 24 h 累计降水量预报。

暴雨过程选取山东半岛 296 个自动站在 2016—2017 年汛期期间 2 站以上 20:00—次日 20:00 降水量达到 50 mm 的 35 个暴雨日(26 次过程),详见表 1。由暴雨类型来看,35 个暴雨日中有 17 次暖区暴雨、9 次锋面暴雨、5 次先暖区后锋面暴雨和 4 次台风暴雨。

1.2 检验内容及方法

检验内容分为降水强度、强降水开始时间、强降水落区及范围大小四个方面。

对于降水强度的检验,因模式对暴雨落区预报有一定的偏差,所以如采取严格的点对点检验,将不能很好地刻画出模式对暴雨的预报能力,因此通过对比模式 24 h 累计降水量预报产品的强降水中心值与实况强降水中心值,对暴雨、大暴雨预报效果进行检验,相关检验指标如下。

表1 2016—2017年山东半岛汛期暴雨日(20:00—次日20:00)概况

Table 1 Overview of the rainstorm days during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017 (from 20:00 to 20:00 the next day)

序号	日期	暴雨类型	序号	日期	暴雨类型	序号	日期	暴雨类型
1	2016-06-14	先暖区后锋面	13	2016-08-13	锋面	25	2017-07-26	锋面
2	2016-06-20	暖区	14	2016-08-18	暖区	26	2017-07-29	暖区
3	2016-06-22	锋面	15	2016-08-19	先暖区后锋面	27	2017-08-02	台风
4	2016-07-14	先暖区后锋面	16	2017-06-22	暖区	28	2017-08-03	台风
5	2016-07-16	锋面	17	2017-06-23	暖区	29	2017-08-04	台风
6	2016-07-21	暖区	18	2017-06-24	锋面	30	2017-08-12	暖区
7	2016-07-22	暖区	19	2017-07-01	暖区	31	2017-08-13	暖区
8	2016-07-25	先暖区后锋面	20	2017-07-06	锋面	32	2017-08-16	暖区
9	2016-07-30	暖区	21	2017-07-15	暖区	33	2017-08-18	暖区
10	2016-07-31	锋面	22	2017-07-16	暖区	34	2017-08-23	锋面
11	2016-08-03	暖区	23	2017-07-19	暖区	35	2017-09-25	先暖区后锋面
12	2016-08-07	台风	24	2017-07-23	锋面			

$$\text{TS 评分: } S_{\text{TS}} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{空报率: } R_{\text{FA}} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{漏报率: } R_{\text{PO}} = \frac{N_C}{N_A + N_C} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{命中率: } R_{\text{POD}} = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (4)$$

式中,检验样本包括暴雨(大暴雨)实际发生个例数和数值模式暴雨(大暴雨)空报样本数; N_A 为检验时段及区域内暴雨(大暴雨)预报正确的次数; N_B 为预报空报的次数; N_C 为预报漏报的次数。

强降水开始时间的检验主要指模式预报的强降水开始时间与实况对比的偏早、偏晚或一致情况。将山东半岛行政区域内,实况开始出现 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上降水时所对应的时间定义为实况强降水开始时间;ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 的逐3 h 累计降水量产品出现 $20 \text{ mm} \cdot (3 \text{ h})^{-1}$ 以上降水时所对应的预报时间(当预报时段内没有达到 $20 \text{ mm} \cdot (3 \text{ h})^{-1}$ 的降水时则选取时段内3 h 最大降水出现的时间)定义为模式预报的强降水开始时间。

对于强降水落区的检验分偏离程度和偏离方向两部分。偏离程度指模式预报的强降水落区相对实况暴雨区偏离的经纬度,规定当偏离的经纬度均不超过 0.2° 视为强降水落区预报准确,当偏离的经度或纬度大于 0.2° 时视为强降水落区预报偏离,又将其细分为偏离 $0.2^\circ \sim 0.5^\circ$ 、 $0.5^\circ \sim 1^\circ$ 和 1° 以上;

偏离方向为模式预报的强降水落区相对实况暴雨区的偏离方向,分东、南、西、北、东北、东南、西南和西北8个方位。

强降水范围大小检验是指模式产品预报的强降水面积与实况暴雨区面积进行比较,分偏大、偏小和一致三类。

2 预报检验与分析

2.1 降水强度检验

2.1.1 两种模式逐24 h 累积降水的TS评分、空漏报率检验

由2016—2017年山东半岛汛期ECMWF-Thin和SMS-WARMS的24 h、48 h、72 h暴雨和大暴雨预报的TS评分(图1)可知:1)SMS-WARMS无论是暴雨还是大暴雨预报的TS评分都明显高于ECMWF-Thin,特别是对大暴雨的预报,差距更为明显;2)对于ECMWF-Thin来说,暴雨预报中,72 h预报能力最差,TS评分仅为22%,48 h的TS评分最高,为32.5%,略优于24 h的30.6%,而对大暴雨的预报,72 h的TS评分最高,却仅为9.1%,48 h评分最低为4.5%,24 h的TS评分居中,为5.0%;3)对于SMS-WARMS来说,TS评分随着预报时效的临近大幅提升,24 h暴雨预报的TS评分高达62.5%,大暴雨预报的TS评分为50%,在预报服务中有一定的参考价值。

由两种模式24 h、48 h、72 h暴雨、大暴雨预报的空报率(图2)可见,除ECMWF-Thin大暴雨预报的72 h空报率较48 h减小外,两种模式的空报率基本随着预报时效和降水量级的增大而增大,也就是

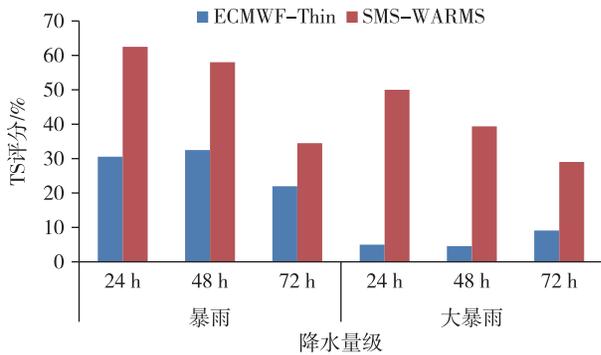


图 1 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 的 24 h、48 h、72 h 暴雨和大暴雨预报的 TS 评分

Fig. 1 Threat scores of the 24-hour, 48-hour, 72-hour forecast of rainstorms and torrential rain processes by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

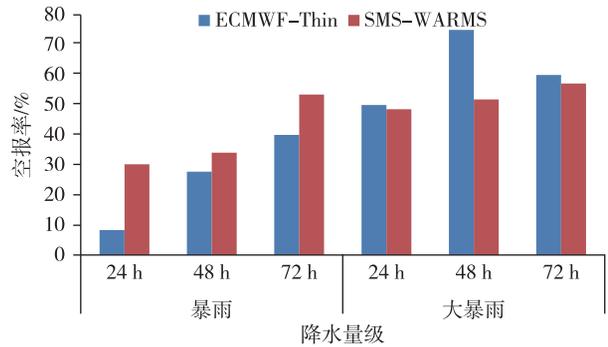


图 2 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 的 24 h、48 h、72 h 暴雨和大暴雨预报的空报率

Fig. 2 Vacancy rate of the 24-hour, 48-hour, 72-hour forecast of rainstorms and torrential rain processes by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

说,随着预报时效的临近,各数值产品暴雨和大暴雨的空报率逐渐降低,其中 24 h 暴雨和大暴雨预报空报率均最低,命中率均最高。对于暴雨预报而言,SMS-WARMS 的空报率远高于 ECMWF-Thin, ECMWF-Thin 的 24 h 空报率仅为 8.3%,即命中率高达 91.7%,意味着当 ECMWF-Thin 的 24 h 预报有暴雨时,实况出现暴雨的概率非常大;而 SMS-WARMS 的 24 h 空报率为 30.2%,即有接近 1/3 为空报的可能,可见 SMS-WARMS 模式预报量级偏强或强降水范围偏大;当两种数值产品均预报有暴雨时,出现暴雨的概率几乎为 100%。对于大暴雨而言,ECMWF-Thin 的空报率反而略高于 SMS-WARMS,ECMWF-Thin 的 24 h 的空报率为 50%,SMS-WARMS 的 24 h 的空报率为 48.6%,当 ECMWF-Thin 或 SMS-WARMS 预报有 100 mm 以上降水时,出现大暴雨的概率约为 50%,但出现暴雨的概率分别为 100%和 77%。

由两种模式 24 h、48 h、72 h 暴雨和大暴雨的漏报率(图 3)可见 ECMWF-Thin 无论是暴雨还是大暴雨的漏报率都远高于 SMS-WARMS,特别是对 24 h 大暴雨的预报,ECMWF-Thin 预报正确 1 次,漏报 18 次,几乎全部漏报,而 SMS-WARMS 恰好相反,几乎全部正确;SMS-WARMS 暴雨和大暴雨的漏报率均随预报时效的临近而大幅降低,究其原因随着预报时效的临近预报量级或暴雨范围有所增大,使得正确次数增加造成的;而对于 ECMWF-Thin,三个时次的暴雨漏报率均较高,大暴雨的漏报率更高且随着预报时效的临近而增多,仔细研究发现,与一般

降水漏报不同,ECMWF-Thin 对全部暴雨均做出了有降水预报,但降水量级明显偏小,其中 72 h 有 74.3%、48 h 有 62.9%、24 h 有 68.6%的降水预报值<50 mm。另外,35 个暴雨日中 17 次预报降水量从 48 h 到 24 h 进行了下调,其中 4 次由 48 h 预报暴雨到 24 h 调整到 50 mm 以下,仅 2 次从 48 h 预报 50 mm 以下降水到 24 h 调整为预报暴雨,导致 24 h 漏报率高于 48 h,可见预报量级的偏小是造成 ECMWF-Thin 暴雨漏报率偏高的主要原因,大暴雨的漏报率甚至达到 90%以上。

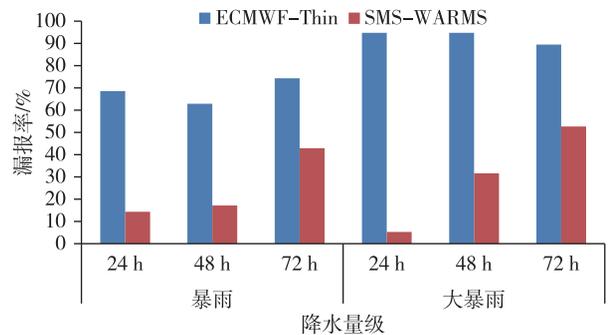


图 3 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 的 24 h、48 h、72 h 暴雨和大暴雨预报的漏报率

Fig. 3 Omission rate of the 24-hour, 48-hour, 72-hour forecast of rainstorms and torrential rain processes by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

综上所述,SMS-WARMS 对暴雨和大暴雨均具有较好的预报能力,特别是 24 h 预报能力最佳,但

其较高的 TS 评分是建立在较高的空报率基础上,存在预报量级偏强或强降水范围偏大的问题,且随着预报时效和预报量级的增大问题更加明显,当 24 h 预报有 50~100 mm 的降水时,出现暴雨的概率为 70%,预报有 100 mm 以上降水时,出现暴雨的概率为 77%,出现大暴雨的概率为 50%;ECMWF-Thin 模式预报产品由于预报量级偏小,对暴雨的漏报率较高,对大暴雨几乎全部漏报,但当其预报有 50 mm 以上降水时,出现暴雨的概率达 90% 以上,预报有 100 mm 以上降水时,出现暴雨的概率高达 100%,另外 ECMWF-Thin 存在随着预报时效的临近预报量级调小的情况,所以需要结合 24 h 和 48 h 预报结论进行分析判断。

2.1.2 两种模式产品对不同系统类型检验

数值模式产品对不同系统的暴雨预报能力不同,按暴雨类型对两种模式产品进行对比检验,能够进一步了解模式对不同系统暴雨的预报性能,从而更好地在业务中加以应用。此外,由 2.1.1 节分析可以看出,SMS-WARMS 的 24 h 预报产品暴雨及大暴雨的 TS 评分最高,且空、漏报率均最低,而 ECMWF-Thin 虽然 24 h 预报产品的暴雨 TS 评分和漏报率均略低于 48 h,但其 48 h 预报产品的空报率是 24 h 的三倍还多,同时 24 h 预报产品的大暴雨 TS 评分略高于 48 h,空报率远低于 48 h,漏报率持平,综合考虑得出,两种模式 24 h 产品预报能力最佳,故选取两种模式的 24 h 预报产品进行之后的各种检验。

通过对两种数值模式不同类型暴雨 24 h 预报正确、空报、漏报次数统计(表 2)发现,SMS-WARMS 在 4 种类型的暴雨和大暴雨预报中预报正确的个例数均明显多于 ECMWF-Thin,但同时其暴雨和大暴雨的空报次数也均明显多于 ECMWF-Thin。由 TS 评分对比可知,对暴雨的预报 ECMWF-Thin 的 TS 评分顺序为台风暴雨>先暖区后锋面暴雨>暖区暴雨>锋面暴雨,SMS-WARMS 的 TS 评分顺序为台风暴雨>暖区暴雨>锋面暴雨>先暖区后锋面暴雨,即四种暴雨类型中两种数值模式产品对台风暴雨的预报能力均最优;对大暴雨的预报,ECMWF-Thin 暖区大暴雨的 TS 评分仅为 9.1%,其他类型大暴雨 TS 评分均为 0,SMS-WARMS 的 TS 评分顺序为台风大暴雨>先暖区后锋面大暴雨>暖区大暴雨>锋面大暴雨,且均在 50% 以上,对台风暴雨和台风大暴雨的预报 TS 评分高达 100%。在空报率方面,ECMWF-Thin 仅有 1

次暖区暴雨和 1 次暖区大暴雨空报,其他三种类型暴雨的空报率均为 0,即命中率达 100%,故当 ECMWF-Thin 预报有 50 mm 以上降水时,这三类降水实况为暴雨的概率是 100%,暖区暴雨出现的概率为 83%;SMS-WARMS 暴雨和大暴雨的空报率顺序均为锋面暴雨>暖区暴雨>先暖区后锋面暴雨>台风暴雨,其中台风暴雨和台风大暴雨的空报率为 0,其他空报率在 25%~50% 之间,进一步研究发现 SMS-WARMS 对锋面暴雨和暖区暴雨预报偏大 1 个量级的概率为 35%(表略),这也是 SMS-WARMS 空报率较高的一个重要原因。对于漏报率而言,ECMWF-Thin 锋面暴雨的漏报率最高(77.8%),其次是暖区暴雨(70.6%),然后是先暖区后锋面暴雨(60%),台风暴雨的漏报率最低(50%),暖区大暴雨的漏报率为 90%,其他类型大暴雨的漏报率为 100%,究其原因,是 ECMWF-Thin 对各类暴雨的预报量级偏小造成的,特别是暖区暴雨,预报量级严重偏小,偏小 3 个量级的比例高达 41%,而锋面暴雨和先暖区后锋面暴雨的预报多偏小 1~2 个量级,台风暴雨偏小 1 个量级和偏小 3 个量级各占 50%(表略),对比预报和实况的降水量发现,当 ECMWF-Thin 预报有中雨以上量级时就要警惕是否会有暴雨甚至大暴雨发生;而 SMS-WARMS 先暖区后锋面暴雨的漏报率最高(40%),其次是暖区暴雨(11.8%),然后是锋面暴雨(11.1%),最后为台风暴雨(0),对于大暴雨预报,仅暖区大暴雨漏报率为 10%,其他类型大暴雨漏报率均为 0。

综上所述,在降水强度方面,SMS-WARMS 在四种类型暴雨预报中均明显优于 ECMWF-Thin,有较好的参考价值,特别是对台风暴雨的预报,TS 评分高达 100%,在预报业务中可直接应用,但其空报率也较高,特别是对锋面暴雨和暖区暴雨,预报偏大 1 个量级的概率在 1/3 左右,同时也存在一定的漏报情况,主要是针对先暖区后锋面暴雨的预报,预报偏小 1~2 个量级的概率为 40%;ECMWF-Thin 对四种类型暴雨的 TS 评分均较低,降水量级偏小造成漏报率较高,特别是对暖区暴雨,预报量级偏小的更多,当预报中雨及以上降水时,就要注意是否会有暴雨甚至大暴雨的发生,而其空报率也较低,特别是对锋面暴雨、先暖区后锋面暴雨和台风暴雨的空报率为 0,当预报 50 mm 以上降水时,暴雨命中率达 100%。

表 2 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 对不同暴雨类型 24 h 预报统计表

Table 2 24-hour forecast for different types of rainstorms by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

暴雨类型	ECMWF-Thin						SMS-WARMS					
	暴雨			大暴雨			暴雨			大暴雨		
	N_A	N_B	N_C	N_A	N_B	N_C	N_A	N_B	N_C	N_A	N_B	N_C
锋面	2	0	7	0	0	3	8	6	1	3	3	0
暖区	5	1	12	1	1	9	15	6	2	9	5	1
先暖区后锋面	2	0	3	0	0	2	3	1	2	2	1	0
台风	2	0	2	0	0	4	4	0	0	4	0	0

2.2 强降水开始时间检验

以 3 h 为间隔,统计了两个模式对上述 35 个暴雨日 24 h 以内预报时效的强降水开始时间偏差(表 3),显示 ECMWF 和 SMS-WARMS 的 24 h 预报强降水开始时间的偏晚次数均较多,35 次暴雨中,ECMWF-Thin 预报偏晚次数为 23 次,达 65.7%,SMS-WARMS 预报偏晚次数共 21 次,为 60%,且对

于不同类型的暴雨过程,除 SMS-WARMS 对台风暴雨的预报偏早偏晚各 2 次、对锋面暴雨偏晚比偏早少 1 次外,其他均是偏晚次数较多,而且由偏晚的时间来看,ECMWF 有 10 次偏晚 3 h 以上,而 SMS-WARMS 有 5 次偏晚 3 h 以上,可见在参考数值产品预报的强降水开始时间时应该适当提前。

表 3 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 对不同暴雨类型 24 h 强降水开始时间检验结果

Table 3 Verification of the beginning time of the 24-hour heavy precipitation forecast for different types of rainstorms by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

暴雨类型	ECMWF-Thin					SMS-WARMS				
	偏早		偏晚		一致	偏早		偏晚		一致
	3 h 内	3 h 外	3 h 内	3 h 外		3 h 内	3 h 外	3 h 内	3 h 外	
锋面	1	1	4	1	2	3	2	4	0	0
暖区	3	1	6	6	1	1	4	7	4	1
先暖区后锋面	1	0	3	0	1	1	0	4	0	0
台风	1	0	0	3	0	2	0	1	1	0
合计	6	2	13	10	4	7	6	16	5	1

具体分析发现,锋面暴雨和先暖区后锋面暴雨的降水过程偏晚时段几乎都在 3 h 以内,仅 ECMWF-Thin 预报有 1 次在 3 h 以外,若将强降水开始时间较预报结论提前 3 h,则这两类暴雨几乎全部被提前报出;对于暖区暴雨,虽同样是偏晚的概率较大,但 ECMWF-Thin 预报的偏晚 3 h 以内和以外的次数相同,而 SMS-WARMS 偏晚 3 h 以内的次数较多,同样将强降水开始时间提前 3 h,这样 ECMWF-Thin 预报中 65%、SMS-WARMS 预报中 76%的暖区暴雨可被提前预报出;对于台风暴雨,ECMWF-Thin 预报仅 1 次偏早,而 3 次偏晚 3 h 以上,SMS-WARMS 为 2 次偏早,偏晚 3 h 以内和 3 h 以外各 1 次,可见 SMS-WARMS 预报效果更好,将其

预报时间提前 3 h,这样 75%的台风暴雨将被提前报出。

对于强降水开始时间的预报,SMS-WARMS 模式预报略优于 ECMWF-Thin,可主要参考 SMS-WARMS 预报结论并将其提前 3 h,这样 100%的锋面暴雨和先暖区后锋面暴雨、76%的暖区暴雨和 75%的台风暴雨将被提前报出,便于有关决策部门对可能出现的强降水提前做出相应准备。

2.3 强降水落区检验

由两种模式产品 24 h 预报的强降水落区较实况的偏离程度(表 4)来看,35 个暴雨日中,ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 均有 13 次落区预报准确,而 ECMWF-Thin 预报有 10 次、SMS-WARMS 有 9 次偏

离程度在 $0.2^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$ 之间,可见在 0.5° 偏离以内两种模式产品预报能力相当;二者最大的差距在偏离 0.5° 以上的次数,ECMWF-Thin 有 11 次偏离程度在 $0.5^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间,仅 1 次在 1° 以上,而 SMS-WARMS 有 6 次在 $0.5^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 之间,7 次在 1° 以上,落区偏差较大。

总体来看,ECMWF-Thin 有 97% 而 SMS-WARMS 有 80% 的偏离程度在 1° 以内,ECMWF-Thin 对强降水落区的预报略优于 SMS-WARMS,有较好的参考价值。

表 4 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 对不同暴雨类型 24 h 强降水落区偏离程度检验

Table 4 Deviation degree verification of the 24-hour heavy precipitation area forecast for different types of rainstorms by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

暴雨类型	次数	ECMWF-Thin 预报强降水落区偏离程度				SMS-WARMS 预报强降水落区偏离程度			
		准确	$0.2^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$	$0.5^{\circ}\sim 1^{\circ}$	$>1^{\circ}$	准确	$0.2^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$	$0.5^{\circ}\sim 1^{\circ}$	$>1^{\circ}$
锋面	9	4	1	3	1	3	4	1	1
暖区	17	5	6	6	0	5	2	4	6
先暖区后锋面	5	1	3	1	0	1	3	1	0
台风	4	3	0	1	0	4	0	0	0
合计	35	13	10	11	1	13	9	6	7

针对不同暴雨类型分析发现,ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 对台风暴雨的落区预报最为准确,准确率分别为 75% 和 100%,尤其是 SMS-WARMS 的预报有更高的参考价值;其次是对锋面暴雨的落区预报,准确率分别为 44% 和 33%,ECMWF-Thin 模式略优于 SMS-WARMS 预报,其中偏差在 1° 以内的概率均为 89%;再次是对暖区暴雨的落区预报,准确率均为 29%,其中偏差在 1° 以内的概率分别为 100% 和 65%,可见二者准确率虽一致,但 SMS-WARMS 偏差 1° 以上的概率较高,综合来看仍是 ECMWF-Thin 略优于 SMS-WARMS 预报;最后是

对先暖区后锋面暴雨的落区预报,准确率均仅为 20%,但其偏差在 1° 以内的概率均为 100%,二者预报能力相当。

通过进一步对比分析两种模式产品 24 h 预报的强降水落区较实况的偏离方向(表 5)发现,ECMWF-Thin 除 13 次强降水落区预报准确外,有 16 次偏西南或偏南,其他方向的偏离仅 6 次,而 SMS-WARMS 模式除 13 次强降水落区预报准确外,在西、西南、南、北四个方向偏离次数均在 4 次以上,无明显规律,可见对于偏离方向的预报 ECMWF-Thin 也优于 SMS-WARMS。

表 5 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 对不同暴雨类型 24 h 强降水落区偏离方向检验

Table 5 Deviation direction verification of the 24-hour heavy precipitation area forecast for different types of rainstorms by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

模式	暴雨类型	准确	偏西	偏西南	偏南	偏东南	偏东	偏北	偏西北
ECMWF-Thin	锋面	4	0	3	1	0	0	0	1
	暖区	5	1	4	3	0	1	2	1
	先暖区后锋面	1	0	2	2	0	0	0	0
	台风	3	0	0	1	0	0	0	0
	合计	13	1	9	7	0	1	2	2
SMS-WARMS	锋面	3	0	0	3	1	0	2	0
	暖区	5	3	4	1	0	2	2	0
	先暖区后锋面	1	1	1	2	0	0	0	0
	台风	4	0	0	0	0	0	0	0
	合计	13	4	5	6	1	2	4	0

对不同类型的强降水落区偏离方向具体分析

发现,对于台风暴雨, SMS-WARMS 预报略优于

ECMWF-Thin 预报,强降水落区准确率为 100%;对于锋面暴雨,ECMWF-Thin 除 4 次预报准确外,60%的偏离方向为西南;对于暖区暴雨,ECMWF-Thin 除 5 次预报准确外,有 58%偏向西南或南;而对于先暖区后锋面暴雨,ECMWF-Thin 仅 1 次预报准确外,100%偏向西南或南。

综上所述,在预报强降水落区时,对于台风暴雨,可直接参考 SMS-WARMS 预报结论,而对于其他类型的暴雨则主要参考 ECMWF-Thin 预报结论,并需关注其偏东北或偏北 1°范围内的区域。

2.4 强降水范围大小检验

对比两种模式产品 24 h 预报的强降水范围及实况(表 6)发现,ECMWF-Thin 预报范围较实况一致 8 次、偏大 7 次、偏小 19 次,偏小概率达 54%,可见强降水预报范围偏小也是 ECMWF-Thin 漏报率较高的一个重要原因;而 SMS-WARMS 预报范围较实况一致 6 次、偏小 9 次、偏大 20 次,有 57%预报范围偏大,可见强降水预报范围偏大也是 SMS-WARMS 空报率较高的一个重要原因。

表 6 2016—2017 年山东半岛汛期 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 不同暴雨类型 24 h 强降水范围检验

Table 6 Range verification of the 24-hour heavy precipitation forecast for different types of rainstorms by ECMWF-Thin and SMS-WARMS during the flood season of Shandong Peninsula from 2016 to 2017

暴雨类型	次数	ECMWF 预报的强降水范围			SMS-WARMS 预报的强降水范围		
		偏大	偏小	一致	偏大	偏小	一致
锋面	9	1	6	2	5	3	1
暖区	17	3	11	3	9	5	3
先暖区后锋面	5	1	1	3	3	0	2
台风	4	2	2	0	3	1	0
合计	35	7	19	8	20	9	6

对不同类型暴雨的强降水范围分析可知,对锋面暴雨来说,ECMWF-Thin 偏小的概率为 67%,SMS-WARMS 预报偏大的概率为 56%;对暖区暴雨而言,ECMWF-Thin 预报偏小的概率为 65%,而 SMS-WARMS 预报偏大的概率为 53%;对于先暖区后锋面暴雨,ECMWF-Thin 预报与实况范围一致的概率为 60%,而 SMS-WARMS 偏大的概率为 60%;对台风暴雨,ECMWF-Thin 预报偏大、偏小各占 50%,而 SMS-WARMS 偏大的概率高达 75%。

通过以上分析能够看出,ECMWF-Thin 预报范围偏小的概率为 54%,是造成其漏报率较高的原因之一,且对锋面暴雨(67%)、暖区暴雨(65%)、台风暴雨(50%)的偏小概率均在 50%及以上,仅对先暖区后锋面暴雨的预报一致率为 60%;SMS-WARMS 预报范围偏大的概率为 57%,是造成其空报率较高的原因之一,且四种类型的暴雨预报偏大的概率均在 50%及以上,在实际应用中要加以注意。

3 结论

通过对 ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 产品在山东半岛 2016—2017 年汛期 35 个暴雨日(26 次过

程)的暴雨预报能力进行检验和分析发现,两种数值模式产品在降水强度、强降水开始时间、强降水落区及范围大小等四方面均有一定的参考价值并各具特点,主要体现在以下几点。

1)对于降水强度的预报:ECMWF-Thin 预报偏弱造成暴雨和大暴雨漏报率偏高,大暴雨几乎全部漏报,特别是对暖区暴雨,预报量级偏小的更多;72 h 暴雨预报的 TS 评分最低、空漏报率最高,从 48 h 到 24 h 存在预报量级调小的情况,需综合分析 24 h 和 48 h 预报结论;当 ECMWF-Thin 预报有中雨以上量级时就要警惕是否会有暴雨甚至大暴雨发生,当预报有 50 mm 以上降水时,出现暴雨的概率达 90%以上。SMS-WARMS 预报量级偏强、空报率较高,且随着预报时效和预报量级的增大问题更加明显;对锋面暴雨、暖区暴雨、先暖区后锋面暴雨和台风暴雨及大暴雨的降水强度量级预报均明显优于 ECMWF-Thin,特别是 24 h 预报能力最佳。

2)对于强降水开始时间的预报:ECMWF-Thin 和 SMS-WARMS 模式均表现为偏晚为主,且偏晚 3 h 以内的概率较大,SMS-WARMS 略优于 ECMWF-Thin,在参考其预报结论的基础上可适当提前 3 h。

3)对于强降水落区的预报:ECMWF-Thin 略优

于 SMS-WARMS; SMS-WARMS 对台风暴雨的落区预报较为精准,但对暖区暴雨的落区预报偏差 1° 以上的概率较高,在偏离方向上无明显规律可循; ECMWF-Thin 对台风暴雨落区预报有 1 次 $0.5^{\circ} \sim 1^{\circ}$ 向南的偏差,对其他类型暴雨的落区预报多偏南或偏向西南 1° 以内,因此预报员需向偏东或东北 1° 范围内的区域调整。

4) 对于强降水范围大小的预报: ECMWF-Thin 除对先暖区后锋面暴雨预报范围较实况一致的概率较高外,其他三种类型暴雨预报范围偏小的概率均较大,是其漏报率较高的重要原因之一;而 SMS-WARMS 对四种类型的暴雨预报范围偏大的概率均较大,是其空报率较高的重要原因之一。因此在预报强降水范围大小时需综合考虑两种数值预报结论折中预报。

参考文献:

- [1] 赵宁坤,万石云,杞明辉.3种数值模式对云南地区雨季降水预报的检验[J].气象与环境学报,2015,31(5):39-44.
- [2] 杨晓霞,夏凡,杨璐瑛.山东 WRF 集合概率预报对台风“麦德姆”逐 6 h 精细化预报检验[J].山东气象,2016,36(3):20-27.
- [3] 崔粉娥,王勇,李慧君.多家数值产品沿海大暴雨预报性能检验[J].气象科技,2013,41(4):696-702.
- [4] 肖红茹,王灿伟,周秋雪,等. 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,2013,33(1):80-85.
- [5] 曲巧娜,盛春岩,车军辉,等.山东省多模式强降水落区预报检验[J].气象科技,2016,44(3):392-399.
- [6] 孙素琴,郑婧,金米娜,等.基于多模式 2015 年江西省汛期区域性暴雨的检验[J].气象与环境学报,2017,33(2):1-7.
- [7] 翟振芳,魏春璇,邓斌,等.安徽省 ECMWF 数值模式降水预报性能的检验[J].气象与环境学报,2017,33(5):1-9.
- [8] 程立渤,崔宜少,仇彦辉. T639 降水预报产品的应用和检验[J].山东气象,2011,31(1):24-27.
- [9] 徐姝,魏琳,邓岩.4种数值降水预报产品在海河流域的应用检验[J].海河水利,2017(2):45-51.
- [10] 张永婧,荣艳敏,尹承美,等. WRF 集合预报对济南暴雨过程的检验与分析[J].山东气象,2016,36(2):10-14.
- [11] 肖明静,盛春岩,石春玲,等.2010 年汛期多模式对山东降水预报的检验[J].气象与环境学报,2013,29(2):27-33.
- [12] 梁寒,陈传雷,聂安祺,等.辽宁地区“8.16”特大暴雨过程数值预报产品检验[J].气象与环境学报,2016,32(6):1-9.
- [13] 张国华,张江涛,张南,等.基于河北区域天气分型的多模式降水检验评估[J].气象,2011,37(8):968-976.
- [14] 杨学斌,湛芸,代玉田.山东一次区域性暴雨中尺度特征分析[J].气象科技,2012,40(4):627-634.
- [15] 周黎明,王庆,龚佃利,等.山东一次暴雨过程的云降水微物理特征分析[J].气象,2015,41(2):192-199.