

闫慧,赵桂香,董春卿,等.集合预报方法在山西暴雨预报中的应用试验[J].干旱气象,2017,35(2):321-329, [ YAN Hui, ZHAO Guixiang, DONG Chunqing, et al. Application Test of Ensemble Forecast Methodology to Rainstorm Forecast in Shanxi Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(2):321-329 ], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0321

# 集合预报方法在山西暴雨预报中的应用试验

闫慧,赵桂香,董春卿,王洪霞,李娟

(山西省气象台,山西 太原 030006)

**摘要:**利用ECMWF高分辨率确定性预报和大气模式集合预报产品,采用本地统计量融合方法和联合概率方法,对2014年山西省9次暴雨天气过程的降水预报进行检验分析。结果表明:(1)2014年山西省9次暴雨过程影响系统差异较大,强降水多集中在山西中南部地区,暴雨落区表现为区域性、局地性或大范围分散性特征;(2)本地统计量融合方法对于大雨落区的预报与实况较为接近,而联合概率预报方法的大概率范围对于暴雨落区预报具有较好的指示意义;(3)TS评分检验表明,对于区域性或局地性暴雨天气过程,可更多参考本地统计量融合方法,而对于大范围分散性的暴雨天气过程,本地统计量融合方法空报较多,ECMWF确定性预报更具参考价值。

**关键词:**集合预报;暴雨;统计量融合;联合概率

**文章编号:**1006-7639(2017)-02-0321-09 **DOI:**10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0321

**中图分类号:**P456

**文献标识码:**A

## 引言

暴雨是影响山西省的主要灾害性天气之一,降水分布极不均匀,且突发性强,常诱发山洪、泥石流等严重山地灾害,多年来,一直是预报重点和难点<sup>[1-2]</sup>。集合预报能提供预报不确定性信息,其多值预报在暴雨等灾害性天气预警中给出最可能、更稳定的预报结论方面更有优势,是现代数值预报发展的方向<sup>[3-5]</sup>。

在业务应用中,一方面可将集合预报数据应用于传统的定量降水预报(QPF)中,即通过定量降水系统偏差订正、最优集合统计量融合等技术,形成单值预报,提高QPF的准确率;另一方面可基于集合预报数据开发概率定量降水预报(PQPF),集合预报估计数值预报中不确定性的一种方法就是将单一的确定性预报转变为概率预报。概率天气预报,能够最大程度地包含实际大气可能发生的各种情况,随着数值预报技术水平的不断提高,概率天气预报不断得到发展和应用。集合预报由于能够充分发挥概率预报的优势,已经逐渐成为世界各主要天气预报业务中心提高预报能力和技巧的有效途径。20世

纪90年代,美国国家气象中心试验并运行了模式输出统计(Model Output Statistics, MOS)概率预报,把天气预报产品转化为具有动力学意义的基于集合预报的概率预报;日本气象厅也一直用MOS预报方法制作各种概率天气预报;加拿大、法国等国家分别以细网格谱模式为基础,采用多元判别分析、马尔可夫过程以及贝叶斯模式制作MOS和PP(Perfect Prog)概率预报<sup>[6]</sup>。可见,集合预报技术的发展推动了概率预报的发展和使用。

为了能使预报的不确定性尽可能最小化,以及充分利用各种资料提高预报精度,让概率预报更能反映出集合预报中所表达的不确定性,近年来气象学者利用多变量、多参数及多模式集成技术制作概率预报,根据不同天气对气象因子的依赖程度而选用不同的产品,取得了一定的成效,如回归技术<sup>[7]</sup>、相似技术<sup>[8]</sup>、投资组合理论、贝叶斯方法<sup>[9-11]</sup>、概率匹配法<sup>[12-13]</sup>、联合概率及集合平均<sup>[14]</sup>等。研究表明,多变量、多分析集合预报技术的应用皆优于单因子预报的效果。其中,基于贝叶斯方法的概率预报研究较多,该方法采用数值模式产品提供的有效预

收稿日期:2016-10-24;改回日期:2017-03-08

基金项目:国家自然科学基金“黄河中游地区突发性大暴雨MCC结构特征研究”(41475050)、中国气象局小型基建项目“全国集合预报业务系统建设(一期)”和山西省气象局科学技术研究课题“山西暴雨集合概率预报方法研究”(SXKMSTQ20165210)共同资助

作者简介:闫慧,女,硕士,工程师,主要从事数值模拟和天气预报技术研究。E-mail:yanhui8796@163.com

报信息对预报量的气候(先验)概率进行修订,得到模式预报信息与气候信息最佳融合的概率预报,从而提高预报准确性<sup>[10]</sup>。此外,多模式集成预报方法也可明显改进地面气温和降水的预报技巧<sup>[14-16]</sup>。然而,集合预报产品的释用多依赖于区域气候背景和天气环境场,面对海量集合数据,在业务中如何挖掘有效预报信息?预报员如何在有限时间内对集合产品进行分析应用,综合集成多个集合成员的优势,得到适合本区域的最优确定性预报,是实际业务中需要深入探讨的问题。

本文基于 ECMWF 集合预报产品,采用本地统计量融合方法和联合概率预报方法,探索从集合预报提供的统计量和概率预报产品中,提取能够更好体现适合山西地区气候环境暴雨概率预报价值的信息,为山西暴雨预报提供参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料

所用资料为 2013 年 10 次、2014 年 9 次暴雨天气过程山西省 109 个国家站逐日降水资料和气象常规观测资料,以及 2014 年 9 次暴雨过程的 ECMWF 高分辨率 20:00 起报 36—48 h 时效逐日累积降水数值预报产品和大气模式逐 12 h 集合预报产品 GRIB1 格式资料,共 51 个集合成员,其中地面要素分辨率为  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,高空要素分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

根据暴雨落区分布特征差异,将 2014 年 9 次暴雨天气过程分为 3 种类型。一类是区域性暴雨过程,此类过程达暴雨量级的县站  $\geq 9$  个,且分布较为集中,所在地市  $\leq 4$  个,包括 5 月 9—11 日、8 月 5—7 日和 9 月 10—11 日,以下分别简称个例 1、2、3;第二类是局地性暴雨过程,此类过程达暴雨量级的县站  $\leq 4$  个,且分布具有局地性,所在地市  $\leq 2$  个,包括 6 月 18—20 日、6 月 28—29 日、8 月 12—13 日和 7 月 21—

23 日(以下分别简称个例 4、5、6、7);第三类是大范围分散性暴雨过程,此类过程达暴雨量级的县站  $\geq 14$  个,且分布较分散,所在地市  $\geq 4$  个,包括 7 月 7—10 日和 9 月 16—17 日(以下分别简称个例 8 和 9)。

### 1.2 方法

#### (1) 本地统计量融合方法

该方法基于历史集合预报数据,利用常规 TS 评分<sup>[17]</sup>对集合平均、控制预报、融合产品、概率匹配平均、Mode 值、最大值以及分位数等多种统计量产品进行检验,其中融合产品是基于不同集合统计量产品(包括最大值、最小值和多种分位数产品)与观测数据的频率分布的检验评估结果,设计多种统计量融合技术<sup>[12]</sup>计算而得,分析以上 9 种统计量产品对各量级降水的预报性能,确定预报效果总体较好的统计量产品为基础产品,采用赋予不同权重的方法,建立预报方程,生成降水预报产品。

TS 评分可表示为:

$$TS = \frac{N_A}{(N_A + N_B + N_C)} \quad (1)$$

式(1)中的变量  $N_A$ 、 $N_B$ 、 $N_C$  分别表示为预报正确、漏报、空报。

分析 2013 年 10 次暴雨过程的 TS 评分结果,整体而言,24 h 预报时效内各统计量产品预报效果较好,随着预报时效(48—72 h)的延长,预报性能呈减弱趋势。对于  $\geq 25.0$  mm(大雨以上量级)(图 1a)的降水预报,24—72 h 预报时效内,控制预报、最大值、90% 和 75% 分位数产品预报效果较好,最大值产品预报性能较稳定,Mode 值产品在各时效 TS 评分均最低;对于  $\geq 50.0$  mm(暴雨以上量级)(图 1b)的降水预报,集合平均、Mode 值、最大值、75% 分位数产品预报效果较好,概率匹配平均、最大值和 75% 分位数产品预报性能较稳定。

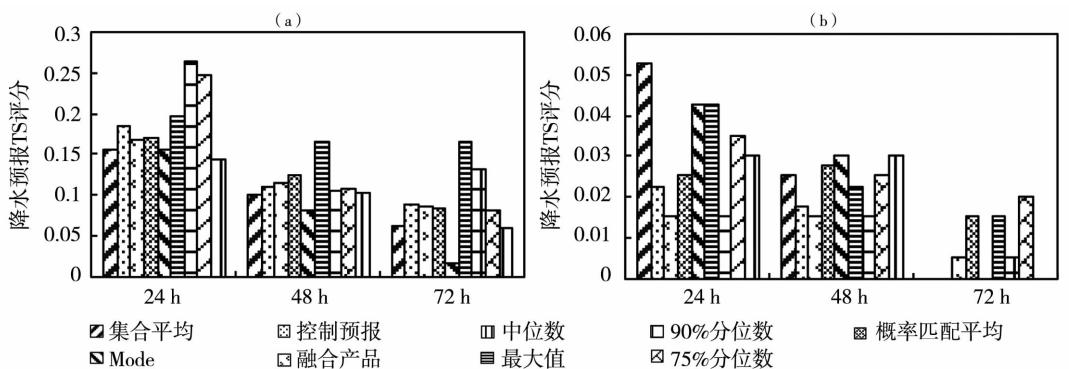


图 1 2013 年 10 次暴雨过程  $\geq 25.0$  mm(a) 和  $\geq 50.0$  mm(b) 不同时效的累积降水预报平均 TS 评分

Fig. 1 The average TS scores of accumulate precipitation more than 25.0 mm (a) and 50.0 mm (b) in the 10 rainstorm processes of 2013 for different forecast periods

通过上述各集合统计量产品的降水预报 TS 评分分析,选取集合平均、控制预报、概率匹配平均、75% 分位数、90% 分位数以及最大值等共 6 种产品作为预报因子,根据各个因子在 2013 年 10 次降水过程中的预报效果赋予相应的权重大小,建立预报方程,并在 2014 年 9 次暴雨过程中对其进行回报检验。预报方程如下:

$$r = \sum_{i=1}^6 (f_i \times a_i) \quad (2)$$

式(2)中,  $r$  为预报的 24 h 累积降水量,  $f_i$  为以上 6 种统计量产品预报的 24 h 累积降水量,  $a_i$  为其相应的权重系数。

### (2) 联合概率方法

联合概率方法是一种基于参数的概率方法,在“配料法”<sup>[18]</sup>思想的指导下,可按照某种天气发生的要素条件同时考虑若干个重要参数,是确定关键(最有可能发生)区域的一种有效方法,当联合的参数个数越多时,各因子之间的内部依赖性增加。

从影响强降水发生的水汽、动力和不稳定条件

等方面综合考虑,分别选取能够表征山西省暴雨天气发生、发展情况的物理量作为预报因子,先通过历史上暴雨天气过程的比较分析,提炼物理量阈值,再根据各自的阈值建立预报方程,从而计算生成暴雨落区预报产品,并对其进行检验。预报方程如下:

$$p = \left( \prod_{j=1}^N p_j \right) \times 100\% \quad (3)$$

其中,

$$p_j = \left( \sum_{i=1}^{51} f_j(i) \right) / 51.0 \quad (4)$$

式中,  $p$  为某一时效的概率预报产品,  $p_j$  为第  $j$  个预报因子的预报概率,  $N$  为预报因子的个数,  $f_j(i)$  为第  $j$  个预报因子中第  $i$  个集合成员的预报判别值, 若满足阈值条件则为 1, 否则为 0。

根据历史暴雨天气过程个例分析,选取表征水汽的因子为 850 hPa 比湿、700 hPa 和 850 hPa 水汽通量, 动力因子为 700 hPa 垂直速度, 不稳定条件因子为  $K$  指数和 850 hPa 假相当位温。各物理量阈值如表 1。

表 1 物理量因子及其阈值

Tab. 1 The physical quantities and their thresholds

物理量	水汽因子			动力因子		不稳定条件
	850 hPa 比湿/ $g \cdot kg^{-1}$	700 hPa 水汽通量/ $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$	850 hPa 水汽通量/ $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$	700 hPa 垂直速度/ $Pa \cdot s^{-1}$	$K$ 指数/ $^{\circ}C$	
阈值	$\geq 8$	$\geq 6$	$\geq 4$	$\leq 0$	$\geq 26$	$\geq 324$

## 2 试验结果分析

集合预报产品释用是集合预报系统必不可少的一部分,是实现模式结果实际应用价值的重要过程。下面对 2014 年山西省 9 次暴雨过程的影响系统、降水落区以及大雨及其以上量级的 24 h 累积降水预报效果进行对比检验和分析。各类型中每个天气过程又因影响系统不同,故预报效果也不尽相同。其中,强降水的概率预报起始时间为强降水时段的起始时间。

### 2.1 预报效果对比

#### 2.1.1 区域性暴雨过程

2014 年 5 月 9—11 日(个例 1),受 500 hPa 低涡东移、高空槽、低层切变线及地面倒槽共同影响,山西省出现一次明显降水天气过程,主要降水时段出现在 9 日 20:00—10 日 20:00,强降水主要发生在山西西南部地区,共 11 站出现暴雨(图 2a)。将 2014 年 5 月 8 日 20:00(14050812)起报的 48 h

ECMWF 高分辨率确定性预报(以下简称 EC\_f)(图 2b)和本地统计量融合方法预报(以下简称 SF\_f)(图 2c)以及 7 日 20:00(14050712)起报的 48 h 联合概率预报(以下简称 JP\_f)(图 2d)与实况(图 2a)对比发现,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 的预报范围在山西中北部都明显偏大,而 EC\_f 对山西西南部的预报范围偏小,SF\_f 预报与实况更加吻合;对于暴雨预报,EC\_f 和 SF\_f 预报均存在明显漏报,前者预报的暴雨落区位置偏北且范围较小,后者却没有预报出暴雨量级的降水,而 JP\_f 预报概率  $> 10\%$  的范围基本覆盖了实况暴雨落区,对暴雨预报具有一定指示意义。

2014 年 8 月 5—7 日(个例 2),受 500 hPa 高空槽和低层切变线共同影响,山西省中南部出现大范围降水,主要降水时段发生在 5 日 20:00—6 日 20:00,强降水主要集中在山西西南部地区,共有 11 站出现暴雨。将 2014 年 8 月 4 日 20:00(14080412)起报的

48 h EC\_f 和 SF\_f 预报以及 24 h JP\_f 预报与实况进行比较(图略),可以看出,对于大雨及其以上量级的降水预报,EC\_f 和 SF\_f 预报的落区均偏小,对暴雨明显漏报,同样存在 EC\_f 预报的暴雨落区位置偏北且范围偏小,SF\_f 没有预报出暴雨量级的降水,而 JP\_f 预报概率>10% 的范围与大雨落区更接近,概率>20% 的范围与暴雨落区更接近,可见概率预报对强降水的预报有很好的指示意义。

2014 年 9 月 10—17 日(个例 3),受 500 hPa 高空槽、低层切变线和副热带高压共同影响,山西省出

现大范围的降水天气,过程雨量为 11.8~198.2 mm,南部出现连阴雨天气。其中,16 日 08:00—17 日 08:00,全省大部地区出现降水,其东南部地区有 11 站出现暴雨。将 2014 年 9 月 15 日 20:00(14091512)起报的 36 h EC\_f 和 SF\_f 预报以及 12 h JP\_f 预报与实况进行对比(图略),可以看出,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 预报均与实况较吻合,但二者对暴雨落区预报均偏西,而 JP\_f 预报概率>0% 的范围对于山西东南部的暴雨落区具有一定指示意义。

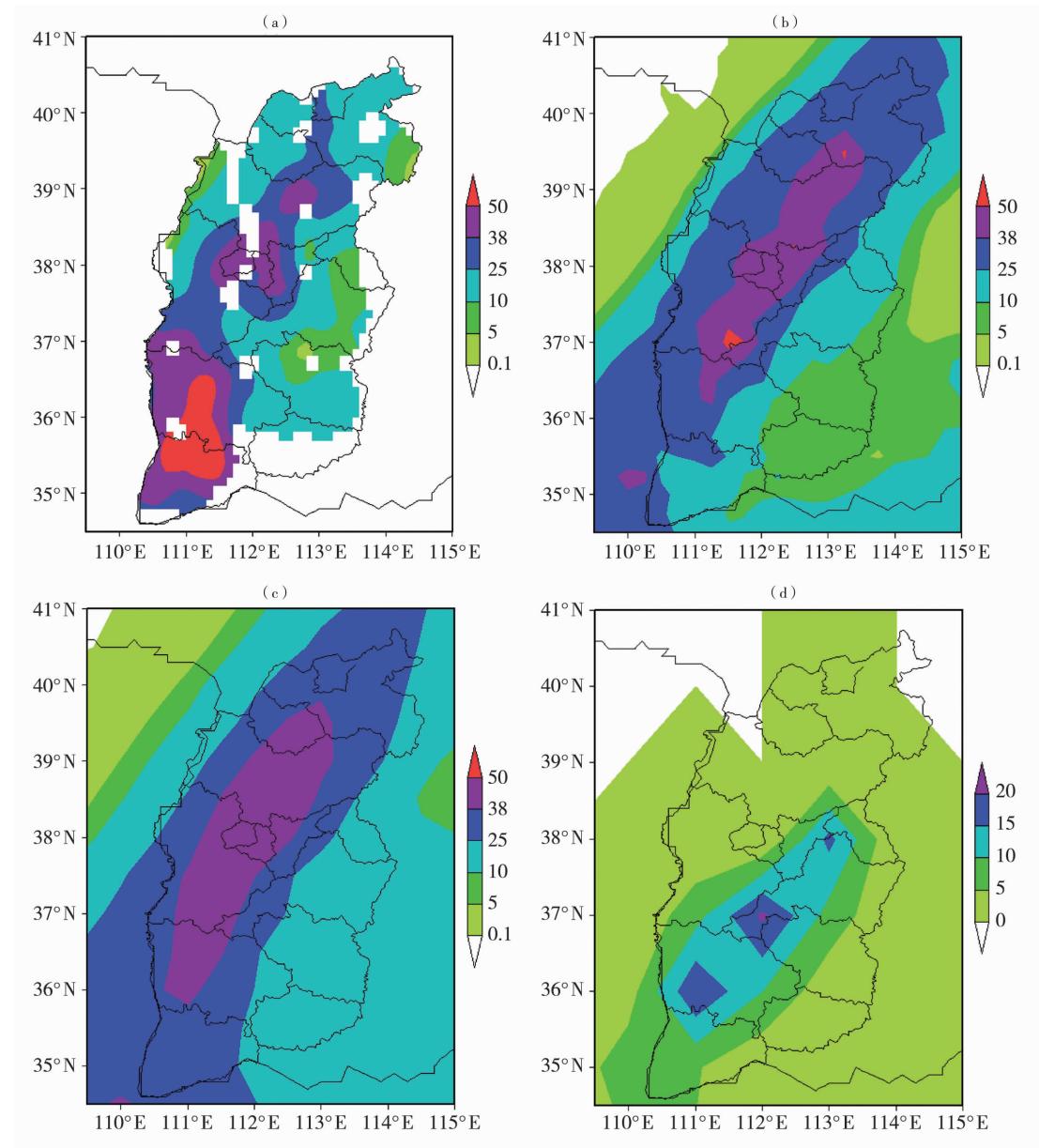


图 2 2014 年 5 月 9 日 20:00—10 日 20:00 累积降水实况(a, 单位:mm)及 EC 确定性预报(b, 单位:mm)、本地统计量融合方法预报(c, 单位:mm)和联合概率方法预报(d, 单位:%)

Fig. 2 The observed 24 h accumulative precipitation (a, Unit:mm) and the forecasted values by ECMWF (b, Unit:mm), statistics quantities fusion method (c, Unit:mm), joint probability method (d, Unit:%) from 20:00 on 9 to 20:00 on 10 May 2014

可见,对于区域性强降水天气过程,本地统计量融合方法(SF\_f)对于大雨落区预报均与实况更加吻合;对暴雨而言,SF\_f和ECMWF确定性预报(EC\_f)的预报范围和量级均偏小,且位置也有一定偏差,而联合概率预报方法(JP\_f)对暴雨落区预报均有很好的指示意义。

### 2.1.2 局地性暴雨过程

2014年6月18—20日(个例4),受500 hPa高空槽、低层切变线以及地面倒槽共同影响,山西省忻

州市及其以南大部分地区出现降雨,主要降水时段集中在18日20:00—19日20:00,强降水主要位于山西省中南部地区,中部的中阳、石楼2站达暴雨(图3a)。将2014年6月17日20:00(14061712)起报的48 h EC\_f(图3b)和SF\_f(图3c)预报以及24 h JP\_f预报(图3d)与实况(图3a)进行对比看出,对于大雨预报,EC\_f和SF\_f的预报范围都明显偏大;对于暴雨预报,EC\_f的预报位置偏东,SF\_f空报较多,暴雨落区位于JP\_f预报概率>10%的范围

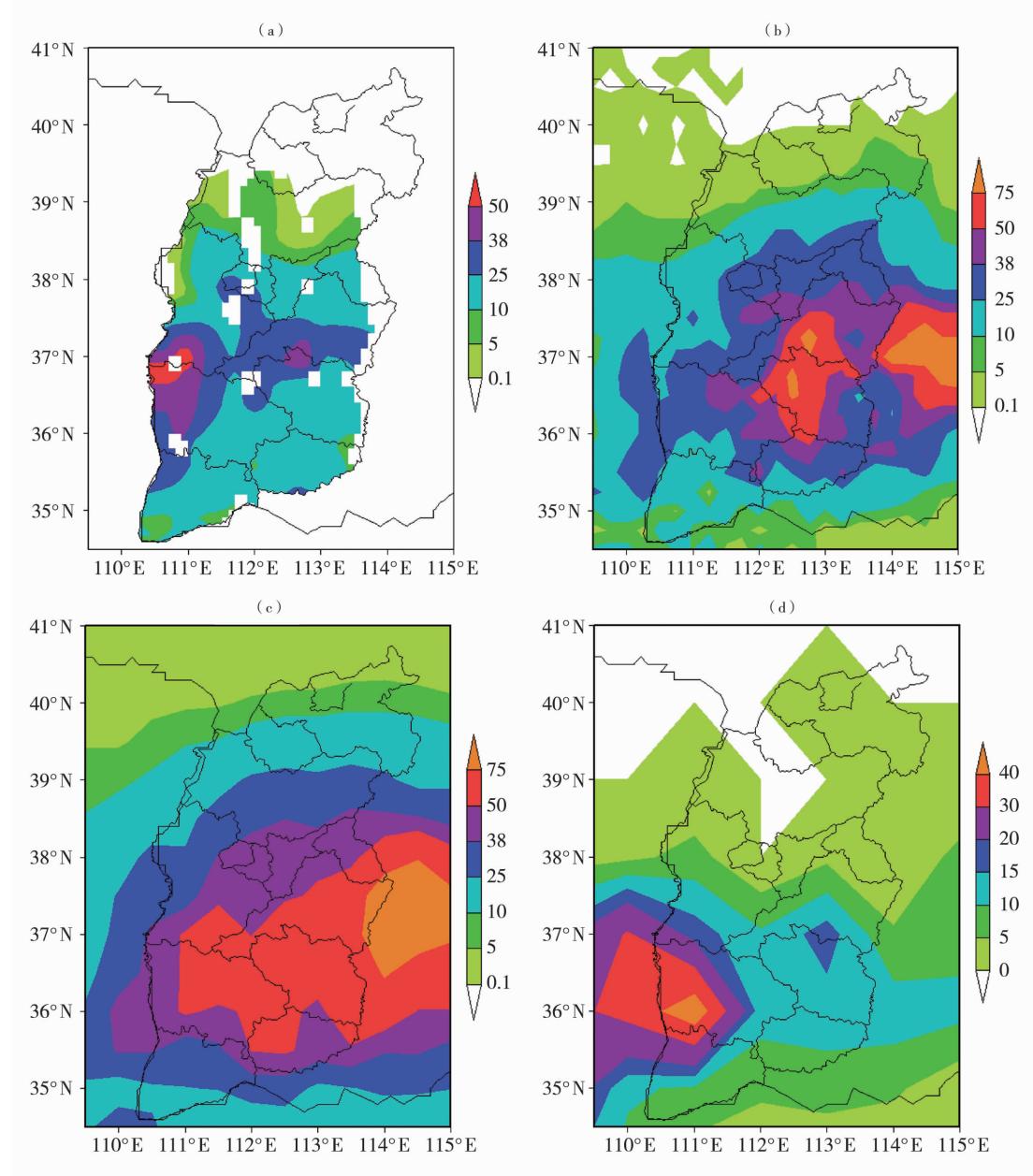


图3 2014年6月18日20:00—19日20:00降水实况(a,单位:mm)及EC确定性预报(b,单位:mm)、统计量融合方法预报(c,单位:mm)和联合概率方法预报(d,单位:%)

Fig. 3 The observed accumulative precipitation (a, Unit:mm) and the forecasted values by ECMWF (b, Unit:mm), statistics quantities fusion method (c, Unit:mm), joint probability method (d, Unit:%) from 20:00 on 18 to 20:00 on 19 June 2014

内,但概率 $>40\%$ 的范围则相对暴雨站点位置略偏南,可见联合概率预报产品对于较强降水(大雨及其以上量级的降水)落区的预报位置偏南。

2014年6月28日08:00—29日08:00(个例5),受500 hPa东北冷涡和高空槽、低层切变线以及地面气旋共同影响,山西中南部大部、北部局部出现降雨,南部部分地区伴有雷暴和瞬时大风天气,24 h降水量0.1~103.0 mm,永济降大暴雨,夏县、垣曲、长治县降暴雨;2014年8月12日08:00—13日08:00(个例6),受500 hPa东北冷涡和高空槽及低层切变线共同影响,山西省出现大范围降水天气过程,暴雨出现在沁源、五台和五台山;2014年7月21—23日(个例7),受高空槽和副热带高压影响,山西省出现大范围降水,并伴有雷暴等强对流天气,主要降水时段集中在22日08:00—23日08:00,24 h降雨量0.1~76.5 mm,强降水区位于山西南部地区,暴雨出现在盐湖区、夏县、沁源。分别将2014年6月27日20:00(14062712)、8月11日20:00(14081112)、7月21日20:00(14072112)起报的36 h EC\_f 和 SF\_f 预报以及12 h JP\_f 预报与实况进行对比分析(图略)。

个例5,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 的预报范围都明显偏大,但前者对于山西南部边缘和东南部的强降水预报有漏报,后者预报范围偏大,空报较多,而JP\_f 预报的大雨落区位于概率 $>30\%$ 的范围内;对于暴雨预报,EC\_f 预报位置偏北,SF\_f 预报位置偏东,而JP\_f 预报概率 $>60\%$ 的范围对于暴雨范围偏小,但位置与实况更接近,JP\_f 对于较强降水的落区预报有一定的指示作用。

个例6,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 预报明显漏报,但后者预报出了山西西南部部分强降水;对暴雨预报,EC\_f 和 SF\_f 均漏报,JP\_f 预报的概率 $>20\%$ 的范围对于山西北部的暴雨落区(五台和五台山站)位置偏南,较南部的暴雨落区(沁源站)位置也偏南。

个例7,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 均有一定程度的空报和漏报,但后者预报与实况更接近;对于暴雨预报,对沁源站的预报,EC\_f 预报位置略偏东偏北,SF\_f 漏报,对运城和夏县站的预报,前者预报为小雨量级,后者预报为中雨量级,而JP\_f 预报的概率范围与实况降水大值区位置有一定偏差。

上述分析可见,对于局地性暴雨天气过程,不同的影响系统,预报效果不同。对于受冷涡、高空槽和地面倒槽或气旋共同影响下的过程,本地统计量融合方法预报大雨范围明显偏大,但较欧洲中心细网

格的预报效果好;对于受高空槽或副热带高压影响的局地暴雨天气过程,本地统计量融合方法对大雨量级的降水预报均有不同程度的空报、漏报,而对暴雨多漏报;联合概率预报的概率范围对暴雨预报均有一定指示意义,但也存在位置偏差。

### 2.1.3 大范围分散性暴雨过程

2014年7月7—10日(个例8),受500 hPa冷涡东移及台风“浣熊”外围水汽共同影响,山西省出现一次强降水天气过程,主要降水时段发生在8日20:00—9日20:00,强降水主要集中在山西中部地区,共有15站出现暴雨(图4a)。将2014年7月7日20:00(14070712)起报的48 h EC\_f(图4b)和SF\_f(图4c)预报以及24 h JP\_f 预报(图4d)与实况(图4a)进行对比。可以看出,对于大雨预报,EC\_f 和 SF\_f 的预报范围与实况都比较接近;对于暴雨预报,EC\_f 和 SF\_f 预报均有不同程度的漏报,但前者漏报更多,后者暴雨预报范围更大一些,而JP\_f 预报概率 $>20\%$ 的范围与大雨范围接近,且基本覆盖了暴雨落区,可见联合概率预报对于较强降水的预报有一定的指示作用。

2014年9月10—17日(个例9),在山西南部地区出现连阴雨天气过程中,10日20:00—11日20:00,全省出现明显降水,山西西南部地区有14站出现暴雨。将2014年9月9日20:00(14090912)起报的48 h EC\_f 和 SF\_f 预报以及24 h JP\_f 预报与实况(图略)对比可得,对于大雨落区,前两种方法预报均与实况较吻合;对于暴雨落区,EC\_f 预报漏报多于SF\_f,而JP\_f 预报的概率范围较实况强降水位置整体偏南,范围偏小。

可见,针对大范围分散性暴雨天气过程,本地统计量融合方法对于大雨及其以上量级的降水落区预报均与实况较吻合;在冷涡和台风共同影响下,联合概率预报的概率范围对暴雨预报有很好的指示作用,若仅在高空槽影响下,概率范围对暴雨预报的位置偏南,范围偏小。

综上所述,本地统计量融合方法对于大雨量级的降水预报,若是区域性或大范围分散性暴雨天气,均与实况较吻合,若是局地性暴雨天气,则表现出不同程度的空报和漏报;对于暴雨量级的降水预报,该方法由于对预报信息进行了部分平滑和过滤,因而出现漏报情况较多,但仍较欧洲中心确定性预报效果好。其中,对于区域性暴雨天气,预报落区范围和量级均偏小,位置也有一定偏差;对于大范围分散性暴雨天气预报效果较好;而对于局地性暴雨天气,受冷涡底部高空槽和地面倒槽共同影响时,暴雨范围

偏大,当山西位于东北冷涡后部,地面受黄河气旋影响时,暴雨范围反而偏小,当系统受副热带高压影响时,对强降水的预报效果在量级、范围上都更好一些。

联合概率预报的大概率范围对暴雨预报有很好的指示作用。对于区域性和大范围分散性暴雨天气,通常选取0%~20%的分位数产品,大范围分散性暴雨天气若仅在高空槽影响下,较高的概率范围相对实况暴雨落区位置偏南,范围偏小;对于局地性

暴雨天气,通常选取20%~40%的分位数产品,暴雨落区多存在位置偏南的误差。在实际应用中,应结合ECMWF高分辨率确定性预报和本地统计量融合方法的大雨和暴雨落区,参考较高分位数的概率阈值范围制定预报。

## 2.2 预报降水评分

对ECMWF高分辨率确定性预报和本地统计量融合方法预报在2014年9次暴雨过程中大雨及暴雨以上量级的累积降水进行TS评分检验(表2),可

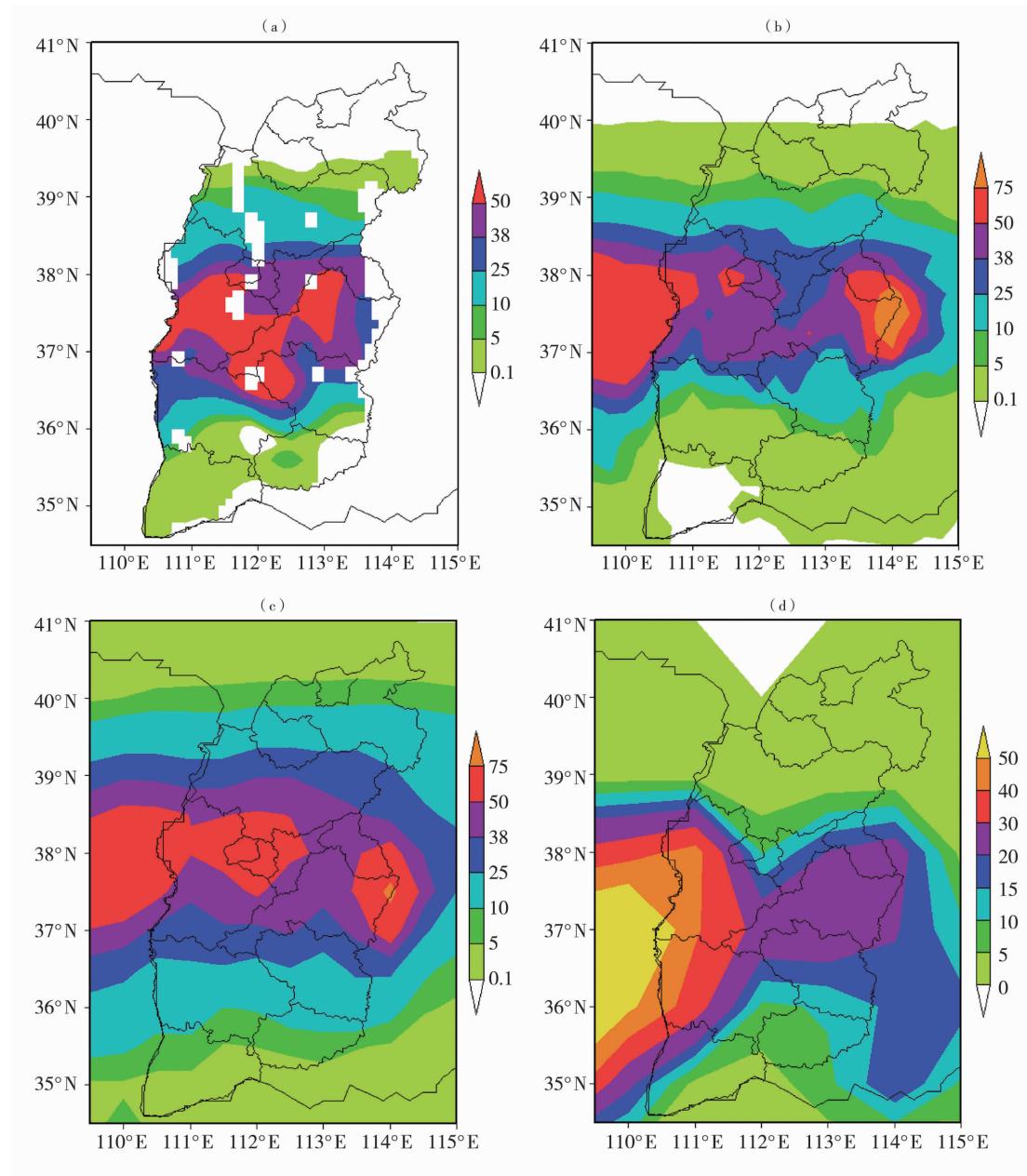


图4 2014年7月8日20:00—9日20:00降水实况(a, 单位:mm)及EC确定性预报(b, 单位:mm)、统计量融合方法预报(c, 单位:mm)和联合概率方法预报(d, 单位:%)

Fig. 4 The observed accumulative precipitation (a, Unit:mm) and the forecasted values by ECMWF (b, Unit:mm), statistics quantities fusion method (c, Unit:mm), joint probability method (d, Unit:%) from 20:00 on 8 to 20:00 on 9 July 2014

表 2 2014 年 9 次暴雨过程 ECMWF 确定性预报和本地统计量融合方法

预报累积降水  $\geq 25.0 \text{ mm}$  和  $\geq 50.0 \text{ mm}$  的 TS 评分

Tab. 2 TS scores for the accumulate precipitation more than 25.0 mm and 50.0 mm of ECMWF forecast and statistics quantities fusion forecast during the 9 rainstorm processes of 2014

模式	预报	$\geq 25.0 \text{ mm}$									$\geq 50.0 \text{ mm}$	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	8	9
EC_f	空报	0.39	0.1	0.29	0.6	0.9	0	1	0.08	0.34	0	0.5
	漏报	0.21	0.59	0.12	0.28	0.67	1	1	0.19	0.09	0.89	0.36
	TS	0.52	0.39	0.65	0.35	0.09	0	0	0.76	0.64	0.11	0.39
SF_f	空报	0.34	0.27	0.14	0.64	0.85	0.38	0.48	0.29	0.45	0.88	0.5
	漏报	0	0.32	0	0	0.11	0.95	0.94	0.19	0	0.94	0.07
	TS	0.66	0.55	0.86	0.36	0.15	0.04	0.01	0.61	0.55	0.04	0.48

得:就大雨以上量级的降水预报,对于区域性和局地性暴雨天气,本地统计量融合方法的 TS 评分都明显高于 ECMWF,且空报和漏报也较少;对于分散性暴雨天气,ECMWF 的评分高于本地统计量融合方法,其原因在于该方法空报较多。就暴雨以上量级的降水预报,对于区域性和局地性暴雨天气,EC\_f 和 SF\_f 全部漏报,这可能与评分站点较少及格点插值方法有关;对于大范围分散性暴雨天气,在冷涡和台风影响下,SF\_f 方法空、漏报均较多,ECMWF 评分高于 SF\_f,在高空槽影响下,SF\_f 漏报较少,ECMWF 评分低于 SF\_f。

综上可见,对于区域性或局地性暴雨天气预报,可更多参考本地统计量融合方法,而对于大范围分散性暴雨天气预报,本地统计量融合方法因其空报较多,ECMWF 细网格预报效果更好一些。另外,比较 ECMWF 高分辨率预报、本地统计量融合方法和选作预报因子的集合平均、控制预报、概率匹配平均、75% 分位数、90% 分位数以及最大值产品的预报 TS 评分,对于大雨以上量级的降水预报,本地统计量融合方法预报性能大都好于以上各基础统计量产品,特别在局地性和大范围分散性的暴雨过程中对暴雨以上量级的降水预报优势更明显。

### 3 结论和讨论

2014 年山西省 9 次暴雨过程受不同系统影响,强降水落区差异较大,暴雨落区表现为区域性、局地性或大范围分散性等特征,通过 ECMWF 高分辨率确定性预报和 2 种集合预报方法的对比检验得出以下结论:

(1) 受西风槽和低层切变线共同影响,可能出现区域性暴雨天气;受冷涡影响,多为局地性暴雨天

气。不同影响系统下,各种方法的预报效果不同。总体上,本地统计量融合方法对于大雨落区的范围与实况较为接近,联合概率预报方法的概率范围对于暴雨落区预报具有很好的指示意义,但位置有时偏南,具体预报时可结合 ECMWF 确定性预报和本地统计量融合方法预报的大雨和暴雨落区来选取较大百分位的概率阈值;

(2) 通过 TS 评分检验,对较强降水的预报,可更多参考本地统计量融合方法;若为大范围分散性暴雨天气,本地统计量融合方法因其空报较多,ECMWF 高分辨率确定性预报效果更好一些。

由于集合预报技术在短期灾害性天气预报中的应用起步较晚,存储的历史资料较短,采用本地统计量融合和联合概率预报方法对暴雨预报的释用研究还需在今后的实践工作中不断进行分析检验和偏差订正,完善预报方程。由于每次过程的影响系统不尽相同,水汽、动力、热力等因子在过程中的贡献差异较大,需通过更多个例系统地研究不同因子在各类暴雨过程中的贡献,以调整权重系数,得到更有针对性的暴雨预报指标,为预报服务提供更有价值的参考信息。

### 参考文献

- [1] 薄燕青, 闵锦忠, 赵桂香. 黄河中下游地区一次暴雨过程的数值模拟和诊断 [J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 60–69.
- [2] 张秉祥, 陈静, 韩军彩, 等. 石家庄市城区暴雨强度公式修正方法对比分析 [J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 671–676.
- [3] 吴志鹏, 陈静, 张涵斌, 等. 基于集合预报的持续性强降水可预报性评估方法研究 [J]. 暴雨灾害, 2014, 33(2): 97–105.
- [4] 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. GRAPES 区域集合预报系统应用研究 [J]. 气象, 2014, 40(9): 1076–1087.
- [5] Wang J, Zhi X F, Chen Y W. Probabilistic multimodel ensemble prediction of decadal variability of East Asian surface air temperature

- based on IPCC – AR5 near – term climate simulations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(4):1129 – 1142.
- [6] 智协飞,彭婷,李刚,等. 多模式集成的概率天气预报和气候预测研究进展[J]. *大气科学学报*,2014,37(2):248 – 256.
- [7] 孔德兵,尚可政,王式功,等. 基于逐步回归分析的西北地区东部雷暴概率预报方法研究[J]. *干旱气象*,2016,34(1):181 – 187.
- [8] 李旭,王式功,尚可政,等. 基于地面气象要素的延伸期相似预报方法初步研究[J]. *干旱气象*,2015,33(2):324 – 331.
- [9] 张宇彤,矫梅燕,陈静. 基于模式先验信息的贝叶斯集合降水概率预报试验[J]. *气象*,2013,39(10):1233 – 1246.
- [10] 韩焱红,矫梅燕,陈静,等. 基于贝叶斯理论的集合降水概率预报方法研究[J]. *气象*,2013,39(1):1 – 10.
- [11] 龙柯吉,陈朝平,郭旭,等. 基于 ECMWF 极端降水天气指数的四川盆地暴雨预报研究[J]. *高原山地气象研究*,2016,36(2):30 – 35.
- [12] 陈博宇,代刊,郭云谦. 2013 年汛期 ECMWF 集合统计量产品的降水预报检验与分析[J]. *暴雨灾害*,2015,34(1):64 – 73.
- [13] 周迪,陈静,陈朝平,等. 暴雨集合预报 – 观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究[J]. *暴雨灾害*,2015,34(2):97 – 104.
- [14] 毕潇潇,智协飞,林春泽. 基于 TIGGE 资料的集合成员优选方法[J]. *大气科学学报*,2015,38(3):414 – 420.
- [15] Zhi X F, Qi H X, Bai Y Q, et al. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(1):41 – 51.
- [16] 林春泽,祁海霞,智协飞,等. 中国夏季降水多模式集成概率预报研究[J]. *暴雨灾害*,2013,32(4):354 – 359.
- [17] 陈圣勤,孙燕,刘安宁,等. 江苏暴雨概率预报及其业务应用[J]. *气象科学*,2016,36(2):269 – 274.
- [18] 刘勇,郭大梅,姚静,等. 配料法在暴雨精细化预报中的应用[J]. *干旱气象*,2015,33(3):514 – 520.

## Application Test of Ensemble Forecast Methodology to Rainstorm Forecast in Shanxi Province

YAN Hui, ZHAO Guixiang, DONG Chunqing, WANG Hongxia, LI Juan

(*Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006, China*)

**Abstract:** Based on the products of ECMWF high resolution deterministic forecast and ensemble forecast, the rainfall forecasts of 9 rainstorm processes in 2014 in Shanxi Province were tested and analyzed by using the local statistics quantities fusion and joint probability forecast method. The results indicated that the major influence systems of the 9 rainstorm processes were significantly different. The strong precipitations were concentrated in the central and southern regions of Shanxi Province, which presented regional, local or large – range dispersion characteristics. The heavy rainfall areas forecasted by the local statistics quantities fusion method were more closed to the observation, while the greater probability range of joint probability forecast had a good indication to the rainstorm area. TS scores showed that for the regional and local rainstorm weather, we should be more referred to the statistics quantities fusion forecast, while for the large – range dispersion rainstorm process, ECMWF deterministic forecast was more significant than that of the local statistics quantities fusion forecast with higher false prediction rate.

**Key words:** ensemble forecast; rainstorm; statistics quantities fusion; joint probability