

潘留杰,薛春芳,张宏芳,等,2021. 基于多模式和网格预报产品融合的降水预报释用方法[J]. 气象,47(5):550-560. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al, 2021. Interpretation method of fusion grid precipitation forecast based on various precipitation forecast products[J]. Meteor Mon, 47(5):550-560(in Chinese).

基于多模式和网格预报产品融合的 降水预报释用方法^{*}

潘留杰^{1,2} 薛春芳³ 张宏芳⁴ 高星星^{1,2} 梁 绵^{1,2} 王建鹏¹ 刘嘉慧敏^{1,2}

1 陕西省气象台, 西安 710014

2 陕西省气象局·秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710014

3 陕西省气象局, 西安 710014

4 陕西省气象服务中心, 西安 710014

提 要: 网格降水的预报准确率是精细化天气预报业务的核心问题。利用多家数值模式和国家气象中心逐 3 h 网格降水预报指导产品,以格点降水实况分析资料为参照,在客观评估模式表现的基础上,提出多模式和网格降水预报产品融合的降水预报释用方法。研究表明:给定降水阈值,不同降水产品的预报性能有显著差异,存在预报表现好的降水产品漏报,而其他降水产品命中的情况;对确定性单模式来说,在降水检验阈值给定的条件下,预报降水量超出阈值越大,其空报的可能性越低。检验三种降水产品 72 h 时效内逐 3 h 降水量,晴雨预报的降水漏报次数明显低于空报次数,基于该特性,可以利用不同模式未预报降水的格点来消除空报。以检验为基础,选用前期表现好的降水预报为背景场,使用高阈值融合满足条件的其他强降水预报产品,使用低阈值消除弱降水空报。回算表明,相对背景场,该方法可以同时提高强降水的 TS 评分和晴雨预报准确率。

关键词: 网格降水,多种降水预报产品,高阈值融合,低阈值消除空报,预报评分

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.004

Interpretation Method of Fusion Grid Precipitation Forecast Based on Various Precipitation Forecast Products

PAN Liujie^{1,2} XUE Chunfang³ ZHANG Hongfang⁴ GAO Xingxing^{1,2}

LIANG Mian^{1,2} WANG Jianpeng¹ LIU Jiahumin^{1,2}

1 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

2 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology, Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Meteorological Service, Xi'an 710014

3 Shaanxi Meteorological Service, Xi'an 710014

4 Shaanxi Meteorological Service Centre, Xi'an 710014

Abstract: Improving the accuracy of grid precipitation forecasting is an important direction for refined weather forecasting. This paper uses the precipitation grid reanalysis data as a reference to objectively evaluate the precipitation forecast of different numerical models and the forecast performance of the National Meteorological Centre's grid precipitation guidance products. Based on the verification results, a precipitation

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507901),秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室重点项目(2020K-2)和陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ-976)共同资助

2020 年 1 月 23 日收稿; 2021 年 3 月 31 日收修定稿

第一作者:潘留杰,主要从事天气预报与研究工作. E-mail:781483047@qq.com.

forecast interpretation method is proposed which fuses various precipitation forecast products. The main conclusions are as follows. Under the same precipitation threshold, the forecast performance of different precipitation products is significantly different, and there are cases in which the precipitation products with good forecast performance are missed, while other precipitation products are obtained. For the deterministic single model, the greater the forecast precipitation exceeds the verified threshold, the lower the possibility of an false alarm is. Verify the 3 h precipitation forecast for the three products with a valid time of 72 hours, for sunny or rainy day forecast, the number of omission of precipitation is significantly lower than the number of false alarms, which can be used to eliminate weak precipitation. On the basis of the verification, we select a model forecast that performed well in the previous period as the background field, and use a high threshold to fuse heavy precipitation, and use a low threshold to eliminate false alarm of weak precipitation. The results show that the forecast performance of fused precipitation can be improved.

Key words: grid precipitation, various precipitation forecast products, high threshold fusion, low threshold to eliminate false alarm, forecast score

引 言

数值预报是现代天气预报业务的基础,然而由于模式动力框架、物理过程还不能完全描述大气的真实状态,观测和计算等误差往往导致模式预报与理想值发生偏离,模式结果特别是降水还不能直接为预报业务所使用。

针对模式降水预报释用,宏观上来说,包括预报员主观分析和模式输出统计后处理(MOS)两种方法。已有的模式输出统计后处理研究工作中,根据采用模式预报产品的数量可以分为单模式降水释用和集合预报或多模式降水集成(陈圣劼等,2019;罗玲等,2019)。集成方式可以是基于一个集合预报系统采用不同扰动方法获得的成员预报,也可以是不同模式的确定性预报产品。以往的单模式释用研究工作中,张宏芳等(2014;2017)通过调整阈值研究了能够提高ECMWF、日本模式降水预报评分的订正方法;李俊等(2014)针对AREM模式降水预报,开展了基于面积匹配的降水偏差订正试验;李莉和朱跃建(2006)采用频率匹配方法对T213模式进行降水预报订正;其他方面还包括分等级降水偏差订正(孙靖等,2015)和最优降水评分(吴启树等,2017)等研究。在集合或多模式降水集成方面,发展了超级集合变权集成方法(严明良等,2008)、滑动训练期消除偏差集合平均(智协飞等,2013)、集合动力因子暴雨实验(高守亭等,2013)、预报分量多个模式误差订正后再集合(郑志海等,2012)、贝叶斯集合降水概率预报(韩焱红等,2013)、时间滞后集合订正技术(唐

文苑和郑永光,2019)等一系列客观方法。这些方法在消除模式系统性偏差、提高降水预报表现方面贡献显著。

精细化网格预报是目前天气预报的主推业务和发展方向,而降水在精细化网格预报产品中最为重要。与传统站点预报不同,精细化网格预报时空分辨率高、计算量巨大,以往的单模式客观降水释用方法无法获得其他模式的优点,释用技巧受模式本身预报性能的瓶颈限制。传统多模式集成或集合有可能平滑掉天气过程中的异常信号,特别是在成员过多的情况下,确定每个格点上成员的权重系数变得十分复杂。正是由于这些原因,本文提出多模式和网格降水预报产品(以下简称多种降水预报产品)的网格降水预报融合释用方法(以下简称融合方法)。从原理上来说,凡是使用了多个模式或集合成员得到的确定性降水预报都可以称之为集成预报。本文将其称之为多种降水产品融合的网格降水预报释用方法,一方面是因为与传统集成不同,这种方法不涉及复杂的权重计算,另一方面,该方法从海量模式产品中获取可能正确的预报结果,所用的降水产品的个数越多越有利于提高降水预报质量。

1 数据资料

实况采用国家气象信息中心降水格点分析场,有研究表明该资料能够很好地表现观测降水的实际分布(沈艳等,2013)。资料时段为2018年5月1日00 UTC至2019年10月31日00 UTC,时间分辨率为逐小时,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。模式数

据为同时期每日 00 UTC 下发的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)高分辨率降水预报、中国气象局自主研发的 GRAPES-Meso 和美国国家环境预报中心(NCEP)降水预报。同时使用了国家气象中心精细化网格降水预报指导产品(SCMOCG)。预报资料选取的时效为前 72 h,为了计算方便,空间分辨率统一插值成与格点分析场一致。研究范围选定为秦岭及周边区域,经纬度为 $31^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $103^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 。文中所有时间均采用世界时。

2 方法的导出

2.1 模式检验事实

数值模式是天气预报业务的支撑产品,对大多数业务用户来说,了解模式的物理过程或参数化方案,进而对模式本身提出改进,往往难以企及,特别是针对国外的一些数值模式时更是如此。但通过应用或者检验,用户可以把握模式的预报性能或者系统性规律(潘留杰等,2017)。事实上,检验是认知模式最直接也最有效的方法。因此,本文首先给出模式检验的一些基本事实,使用惯常的检验评分,包括预报准确率 ACC(accuracy)、TS(Threat Score)评分,公式如下:

$$ACC = \frac{A + D}{A + B + C + D} \quad (1)$$

$$TS = \frac{A}{A + B + C} \quad (2)$$

此外,将空报的次数与观测超过阈值次数的比值定义为失败率 FR(Fail Ratio):

$$FR = \frac{C}{A + B} \quad (3)$$

式中: A 为正确预报超过阈值的降水次数; B 为漏报的次数; C 为空报的次数; D 为正确预报降水未超过阈值的次数。

文中统一用“F”代表预报,“O”代表观测, F_e 、 F_n 、 F_g 、 F_s 、 F_f 分别表示 ECMWF、NCEP、GRAPES-Meso、指导预报 SCMOCG 和融合方法的降水预报,无特别交代,均表示 3 h 降水。为了便于说明模式检验中的问题,假定漏报 $F \geq 2.0 \text{ mm}$ 的降水会对公众产生较大影响,将强降水阈值设定为 $F \geq 2.0 \text{ mm}$,晴雨检验中降雨的标准设定为 $F \geq 0.1 \text{ mm}$ 。实际业务计算时采用的阈值可以根据需求和检验结果设定。需要说明的是,检验结果为研究时段内每

日 00 UTC 起报的未来 72 h 内的逐 3 h 预报评分。图 1 给出了 ECMWF 和 NCEP 预报 $F \geq 2.0 \text{ mm}$ 的命中和漏报次数,其定义分别为,命中: $F \geq 2.0 \text{ mm}$, $O \geq 2.0 \text{ mm}$ 的次数;漏报: $F < 2.0 \text{ mm}$, $O \geq 2.0 \text{ mm}$ 的次数。从命中次数来看,ECMWF(图 1a)和 NCEP(图 1b)命中大值区的空间分布基本一致,但 ECMWF 的命中次数远高于 NCEP,在整个研究区域内,ECMWF 和 NCEP 的平均命中次数分别为 23.8 次和 13.1 次,网格点上的命中次数差值最大达 52 次。分析一家模式命中另一家模式漏报的情况,发现当 ECMWF 命中时,NCEP 存在大量的漏报(图 1c),特别是在研究区域的西南角——陕西与四川交界处,网格点上漏报次数最大达 87 次;相反,尽管 NCEP 模式的命中次数表现相对较差(图 1b),但当 NCEP 命中时,ECMWF 也存在漏报(图 1d),最大漏报次数超过 35 次,且漏报次数大值区相对分散,分布规律性差。

检验预报和观测降水量阈值不一致的情况,可以发现当 $F_e \geq 3.0 \text{ mm}$, $O \geq 2.0 \text{ mm}$ 时(图 1e),空间平均失败率为 0.841。改变阈值,当 $F_e \geq 5.0 \text{ mm}$, $O \geq 2.0 \text{ mm}$ 时(图 1f),失败率大幅度降低,平均值为 0.371,较 $F_e \geq 3.0 \text{ mm}$ 时减少 55.9%。分析发现降水量超出检验阈值越大,降水空报降低越明显,失败率越低,这种情况不仅在 ECMWF 模式中存在,而且在本文所涉及到的 NCEP、GRAPES-Meso 模式和 SCMOCG 指导产品都有这种现象。

图 2 给出了限定条件下 ECMWF 模式的降水预报表现。以 ECMWF 模式为比较对象,是由于普遍认为其预报较好(孙靖等,2015)。图中显示,ECMWF 对弱降水存在显著的空报,而 NCEP 和 SCMOCG 对空报有显著的抑制作用,当 $0.1 \text{ mm} \leq F_e < 2.0 \text{ mm}$ 时,NCEP 消除 ECMWF 空报的次数区域平均为 156.2 次,网格点上的最大次数为 621 次(图 2a);SCMOCG 消除 ECMWF 空报次数网格点上最大为 431 次,平均为 133.7 次(图 2b),与 NCEP 模式相比,两者消除空报(以下简称为消空)次数大值区的整体形态一致,但在具体的某次降水过程中,消空的情况存在较大差异,在 NCEP 或 SCMOCG 降水量 $F < 0.1 \text{ mm}$ 的条件下(图 2c),消空的次数并不是图 2a 和 2b 中网格点上最大值,而是更高。事实上,NCEP 和 SCMOCG 两者同时消空的次数空间平均上只有 93.7 次(图 2d),远小于 NCEP 或 SCMOCG $F < 0.1 \text{ mm}$ 情况下的 196.2 次,可能的

原因是两种产品同时预报无降水的重叠网格点较少,其他格点上预报结论不一致,这也是通过检验再次判别,开展多种降水产品融合订正的一个出发点。

NCEP 或 SCMOCG 在消除 ECMWF 模式空报的同时,也可能减少 ECMWF 模式原本正确预报的次数,而使 ECMWF 出现漏报。从漏报的次数来看,当 NCEP 或 SCMOCG 降水量 $F < 0.1 \text{ mm}$ 时(图 2e), $0.1 \text{ mm} \leq F_e < 2.0 \text{ mm}$ 漏报次数空间平均为 61 次,远小于其消空的次数(图 2c),而且利用 NCEP 和 SCMOCG 降水量同时小于 0.1 mm 限时(图 2f),出现漏报的次数就会更少。整体表明,ECMWF 模式预报降水量在 $0.1 \sim 2.0 \text{ mm}$ 时,如果其他降水产品未预报降水,则认定为无降水,可以提高晴雨预报准确率。

2.2 方法原理

从上节检验结果中,可以发现三个基本的事实:

(1)不同降水产品的预报性能存在差异,即使是检验评分较好的预报,相对其他产品,也可能在某些情况下出现空报或者漏报,一般来说,弱降水以空报为主,而强降水的空报和漏报同时存在。(2)同一个降水产品,给定检验阈值,当预报的降水量超过阈值越大,则空报的可能性越小,失败率越低。(3)利用其他产品对前期检验评分较好的降水产品中的弱降水进行消空,可以在牺牲较小漏报的情况下,大大减少空报,提高晴雨预报准确率。

基于检验基本事实,图3给出了多种降水产品

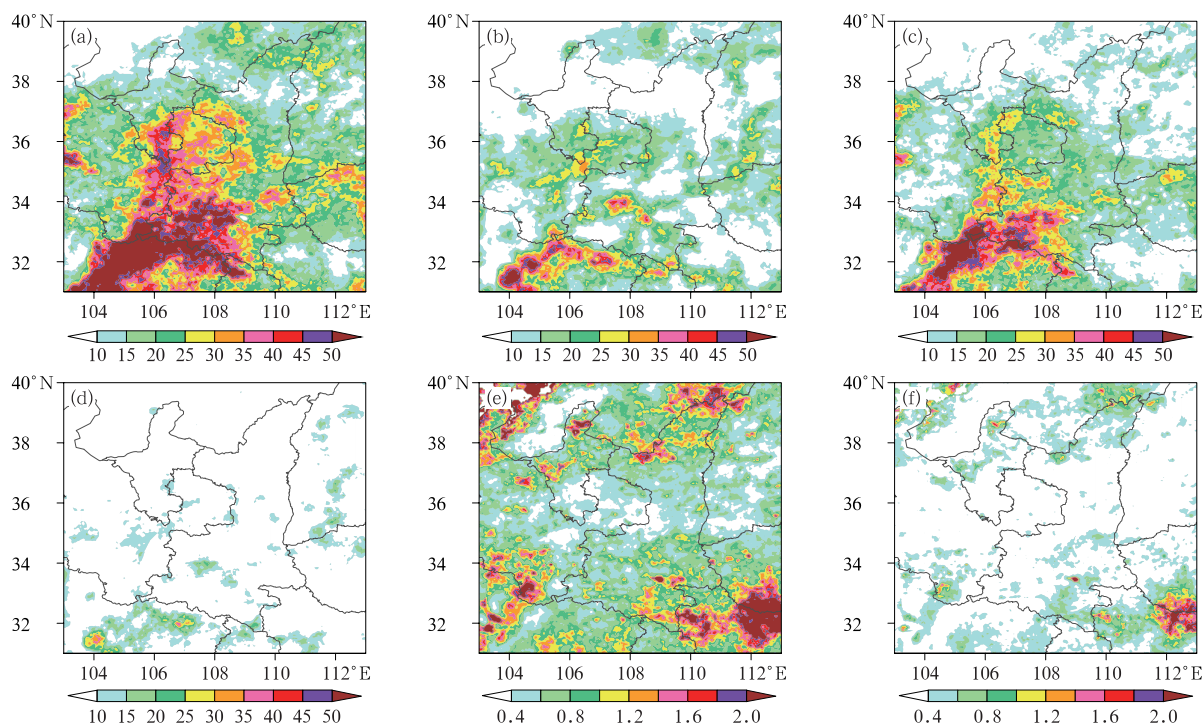


图1 2018年5月1日至2019年10月31日 ECMWF 和 NCEP 模式的 3 h 降水量的预报表现

(a) $F_e \geq 2.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, ECMWF 的命中次数;

(b) 同图 1a, 但为 NCEP 模式; (c) $F_e \geq 2.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, 但 NCEP 漏报的次数;

(d) $F_n \geq 2.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, 但 ECMWF 漏报的次数; (e) $F_e \geq 3.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$,

ECMWF 的失败率; (f) $F_e \geq 5.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, ECMWF 的失败率

Fig. 1 The forecast performance of 3 h accumulated precipitation of ECMWF and NCEP models from 1 May 2018 to 31 October 2019

(a) $F_e \geq 2.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, the number of hits of ECMWF model;

(b) same as Fig. 1a, but for NCEP model; (c) $F_e \geq 2.0 \text{ mm},$

$O \geq 2.0 \text{ mm}$, the number of ECMWF hits but NCEP misses;

(d) $F_n \geq 2.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, the number of NCEP hits but ECMWF misses;

(e) $F_e \geq 3.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, the FR of ECMWF model;

(f) $F_e \geq 5.0 \text{ mm}, O \geq 2.0 \text{ mm}$, the FR of ECMWF model

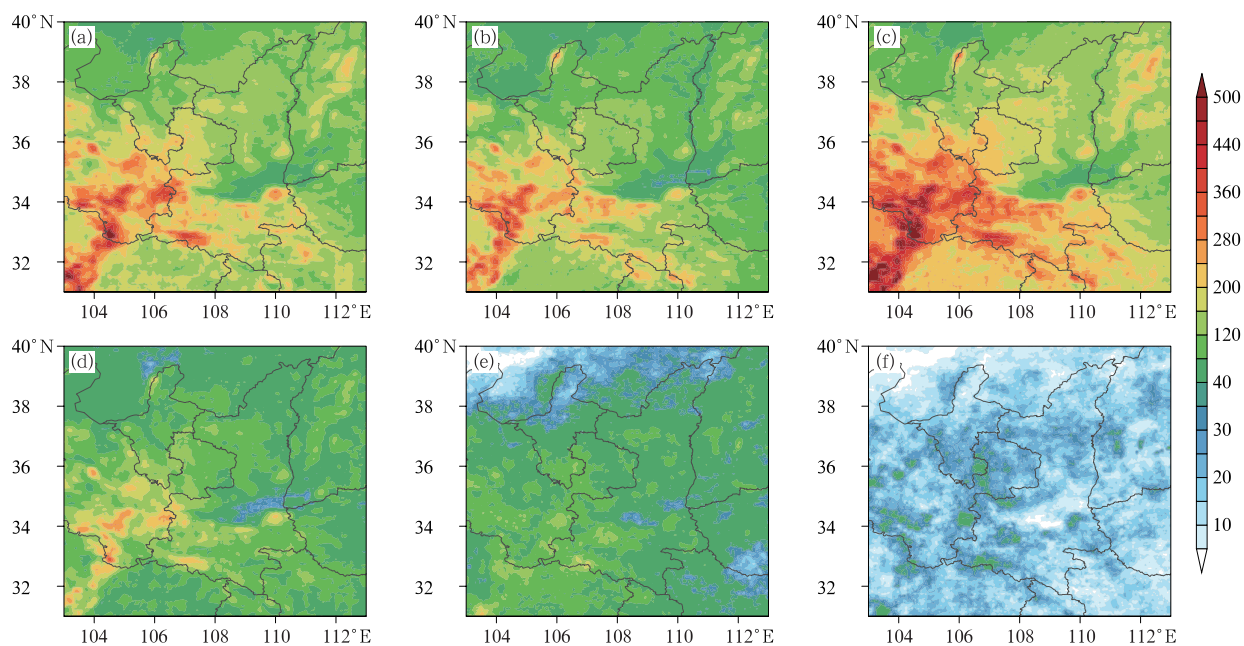


图 2 不同限定条件下 ECMWF 的弱降水($0.1 \text{ mm} \leq F_e < 2.0 \text{ mm}$)预报次数

(a) $F_n < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$; (b) $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$;

(c) F_n 或 $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$; (d) F_n 和 $F_s < 0.1 \text{ mm}$,

$O < 0.1 \text{ mm}$; (e) F_n 或 $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O \geq 0.1 \text{ mm}$; (f) F_n 和 $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O \geq 0.1 \text{ mm}$

Fig. 2 The times of ECMWF $0.1 \leq F_e < 2.0 \text{ mm}$ precipitation forecast under specified conditions

(a) $F_n < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$; (b) $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$; (c) F_n or $F_s < 0.1 \text{ mm}$,

$O < 0.1 \text{ mm}$; (d) F_n and $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O < 0.1 \text{ mm}$; (e) F_n or $F_s < 0.1 \text{ mm}$,

$O \geq 0.1 \text{ mm}$; (f) F_n and $F_s < 0.1 \text{ mm}$, $O \geq 0.1 \text{ mm}$

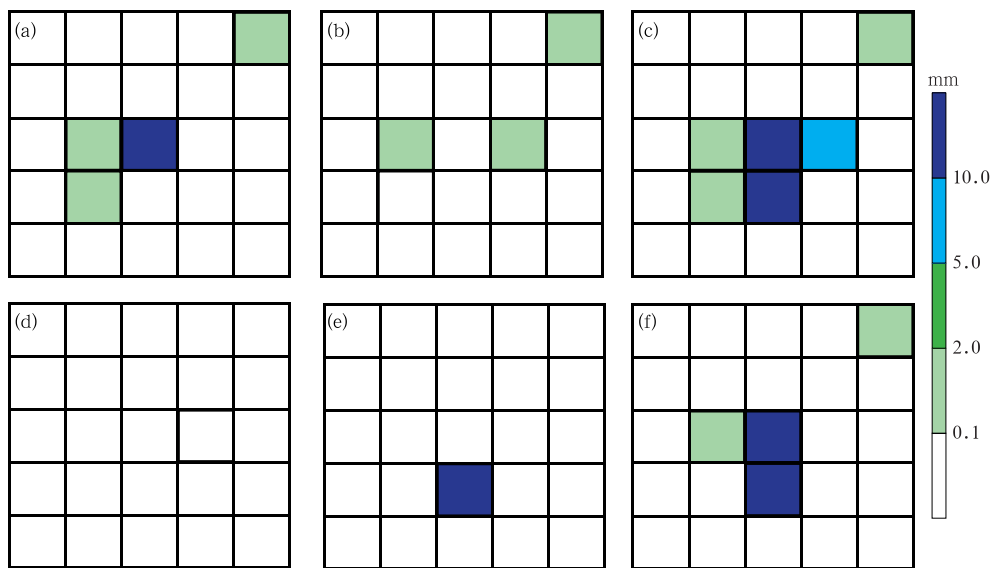


图 3 多种降水产品融合的网格降水预报释用方法概念示意图(填色代表降水量)

(a) ECMWF; (b) NCEP; (c) SCMOG; (d) $F_n \geq 11.0 \text{ mm}$, 且满足失败率小于 0.2 的格点降水;

(e) $F_s \geq 9.0 \text{ mm}$, 且满足 $FR < 0.2$ 的格点降水; (f) 融合方法预报结果

Fig. 3 Schematic diagram of grid precipitation forecast based on fusion multi precipitation products

(color filling represents precipitation amount)

(a) ECMWF; (b) NCEP; (c) SCMOG; (d) $F_n \geq 11.0 \text{ mm}$, $FR < 0.2$;

(e) $F_s \geq 9.0 \text{ mm}$, $FR < 0.2$; (f) prediction result of the fusion method

融合的网格降水预报释用方法概念示意图。格点降水量以 $F_{i,j}$ 来表示, i 表示横坐标, j 表示纵坐标。假定 ECMWF 模式的降水预报为通过前期检验的最优预报(图 3a), 则选择其为背景场, 当 NCEP(图 3b)和 SCMOCG(图 3c)与背景场出现分歧, 背景场某个网格点上 $F < 5.0$ mm, 而 F_n 或 $F_s \geq 5.0$ mm, 进行高阈值融合。具体做法为: 根据前期检验结果对 NCEP 和 SCMOCG 设定一个降水量高阈值(假定其分别为 $F_n \geq 11.0$ mm, $F_s \geq 9.0$ mm), 在高阈值条件下, NCEP 或 SCMOCG 的预报失败率低于 0.2 或更低, 则以 5.0 mm 将其融合到背景场中。示意图中 NCEP 在高阈值融合条件下没有符合条件的格点(图 3d), SCMOCG 预报 $F_{3,2}$ 达到标准, $F_{3,3}$ 未达到标准(图 3e), 则只需融合 $F_{3,2}$ 格点。完成高阈值融合之后, 针对背景场预报的弱降水, 进行低阈值消空。假定消空的标准为 0.5 mm, 当背景场降水量小于 0.5 mm, 其他产品未预报降水, 且该产品在给定格点上的晴雨预报准确率高于 80%, 将其消空, 不预报降水。图 3a 中 $F_{2,2}$ 格点降水量为 0.5 mm, NCEP 在 $F_{2,2}$ 格点未预报降水, 满足消空条件, 根据算法去掉背景场中网格点 $F_{2,2}$ 的降水, 最

终结果为图 3f。

通过高阈值融合和低阈值消空形成预报产品, 纳入逐日检验, 如果评分降低, 则根据检验结果重新调整高、低阈值。

3 效果检验

3.1 3 h 统计回算

回算 2018 年 5 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日整个研究时段融合方法的预报表现, 结果如图 4 所示。需要说明的是, 就融合方法来说, 加入的降水产品越多, 越有利提高预报性能, 但为了表述方便, 仍选取 ECMWF、NCEP 和 SCMOCG 三种降水产品。高阈值融合、低阈值消空分别设为 $F \geq 2.0$ mm 和 $F \leq 0.5$ mm。事实上, 不同的模式其阈值可能会有一些差异, 实际业务中通过动态检验不同模式的预报表现, 得出不同模式的融合阈值, 会更有利于提高方法的释用效果。

图中显示, ECMWF(图 4a)在陕西南部、甘肃中南部、四川北部、内蒙古中部有较好的表现,

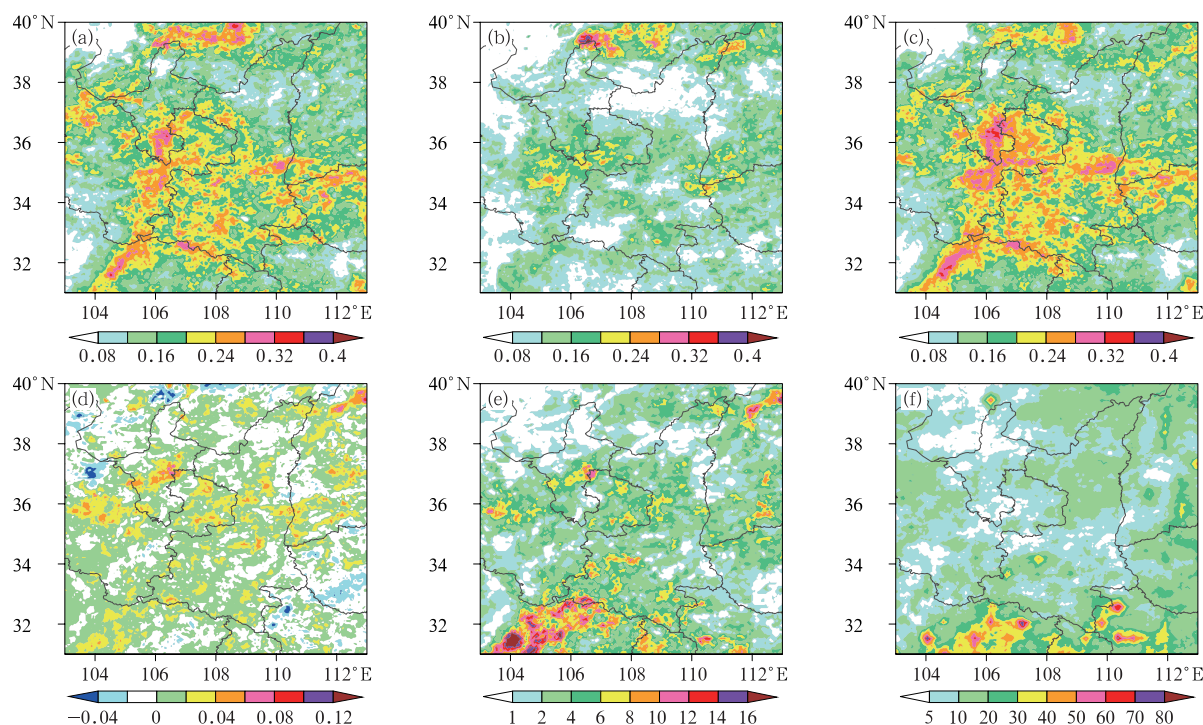


图 4 2018 年 5 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日不同降水产品和融合方法的强降水($F \geq 2.0$ mm)预报检验
(a)ECMWF, (b)NCEP, (c)SCMOCG 的预报 TS 评分; (d, e, f)融合方法和 ECMWF 预报的

(d)TS 评分、(e)命中次数、(f)空报次数的差值

Fig. 4 The verified scores of precipitation ($F \geq 2.0$ mm) by different forecast products and the fusion method from 1 May 2018 to 31 October 2019

(a, b, c) TS scores of ECMWF (a), NCEP (b) and SCMOCG (c); (d, e, f) the differences of (d) TS scores, (e) hits times, (f) false alarm times between the fusion method and ECMWF model

$F \geq 2.0$ mm 单个格点最大 TS 评分为 0.358, 区域内平均 TS 评分为 0.169; NCEP(图 4b) 在宁夏北部与内蒙古交界处的 TS 评分达到 0.44, 单个格点上的 TS 评分表现最高, 但在其他区域表现较差, 特别是在陕西西南部 ECMWF 评分较好的情况下, NCEP 的 TS 评分接近 0, 区域平均 TS 评分仅为 0.117。而 SCMOCG 降水的 TS 评分(图 4c) 大值区的空间分布整体和 ECMWF 一致, 在陕西中南部、甘肃南部和四川西北部的 TS 评分略高于 ECMWF, 但区域平均和单个格点最大值分别为 0.161 和 0.357, 整体低于 ECMWF。

为了方便比较, 图 4d 给出了 $F_i \geq 2.0$ mm 的 TS 评分与 ECMWF 评分的差值, 可以看到, 融合方法在大部分地方的 TS 评分相对于模式和指导预报产品都有提高, 在整个区域的 TS 评分为 0.173, 相对于 ECMWF、SCMOCG 和 NCEP 分别提高 0.01、0.012 和 0.056, 正效果明显。考察 $F_i \geq 2.0$ mm 的命中次数(图 4e) 和空报次数(图 4f) 与 ECMWF 模式的差值, 可以看到融合方法在整个研究区域内的命中次数都是增加的, 特别是在四川西北部, 增加非常显著, 但在四川境内也同时增大了空报的次数(图

4f)。分析发现, 陕西中部、甘肃中南部、宁夏中部等的 TS 评分增加明显, 与命中次数明显增加、空报次数增加相对较小的区域有很好的对应关系, 而对诸如四川等地空报次数增加较多的区域, 可以提高高阈值, 从而减少空报。

晴雨预报准确率对比检验结果如图 5 所示。ECMWF(图 5a)、NCEP(图 5b) 和 SCMOCG(图 5c) 均表现出研究区域西南部预报准确率低, 中北部准确率高, 西南部部分地方准确率小于 68%。从区域平均来看, SCMOCG 表现最好, 预报准确率达到 81.2%, NCEP 次之(80.4%), ECMWF 最差(77.4%), 表明 ECMWF 有大量的空报。但 SCMOCG 没有完全吸收 ECMWF 和 NCEP 的优点, ECMWF 和 NCEP 在陕西中部与山西、河南交界处均为一致的晴雨预报准确率高值区, 最大超过 88%, 而 SCMOCG 在该区域的准确率相对较低。融合方法的晴雨预报准确率(图 5d) 不仅在西南部有明显改善, 而且在西北部晴雨预报准确率也有提高, 区域平均为 86.8%, 单点最大达到 97.9%, 增幅十分明显。从空报和漏报的次数来看, 融合方法相对于晴雨表现最好的 SCMOCG 出现了漏报(图 5e), 特别是在四川北部、陕

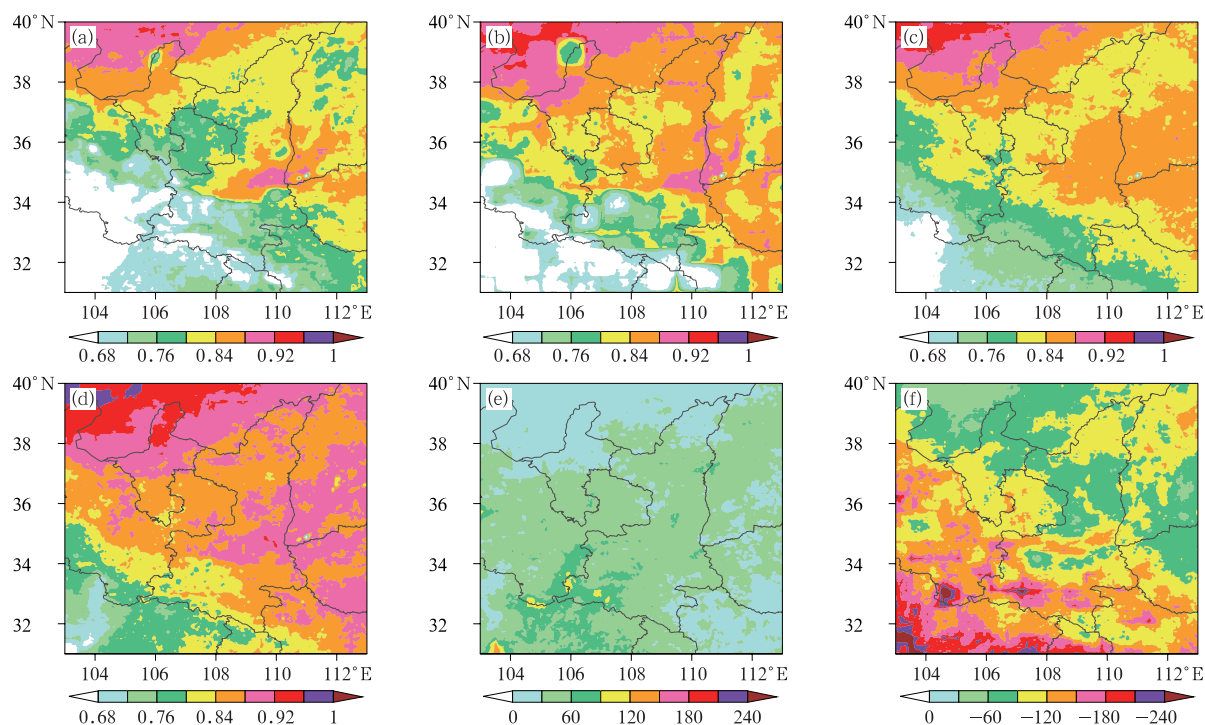


图 5 2018 年 5 月 1 日至 2019 年 10 月 31 日不同降水预报产品和融合方法的晴雨预报检验

(a) ECMWF, (b) NCEP, (c) SCMOCG, (d) 融合方法;

(e, f) 融合方法与 SCMOCG 的 (e) 漏报次数、(f) 空报次数的差值

Fig. 5 The verifications of different precipitation forecast products and the sunny or rainy day forecast by the fusion method from 1 May 2018 to 31 October 2019

(a, b, c, d) ACC of (a) ECMWF, (b) NCEP, (c) SCMOCG and (d) the fusion method;

(e, f) differences of (e) missed times, (f) false alarm times between the fusion method and SCMOCG

西西南部漏报次数明显,最大超过 90 次,但就整个区域来说,显著地减少了空报,最大减少 240 次,提高了晴雨预报准确率。而且由于采用的是低阈值消空,当 $F \leq 0.5 \text{ mm}$ 时才进行处理,不会因消空而漏报大量级降水,总体来说收益非常明显。

3.2 24 h 预报效果检验

回算表明在 3 h 时段上显著提高了大降水的 TS 评分和晴雨预报准确率。2019 年 5—9 月不同分段

预报时效上的检验结果如表 1 所示,可以看到,融合方法的晴雨预报准确率较不同模式的降水都有明显提高,相对指导预报 SCMOCG 也有明显的正效果。

实际业务中 3 h 和 24 h 降水检验评估阈值有差异,为了清楚了解分段订正结果的累计降水预报表现,给出 2019 年 5—9 月基于多产品融合方法的 24 h 累计降水检验评分的空间表现(图 6)以及暴雨预报个例(图 7)。需要说明的是,考虑到模式数据在实际业务中的可用性,检验的是 ECMWF、NCEP

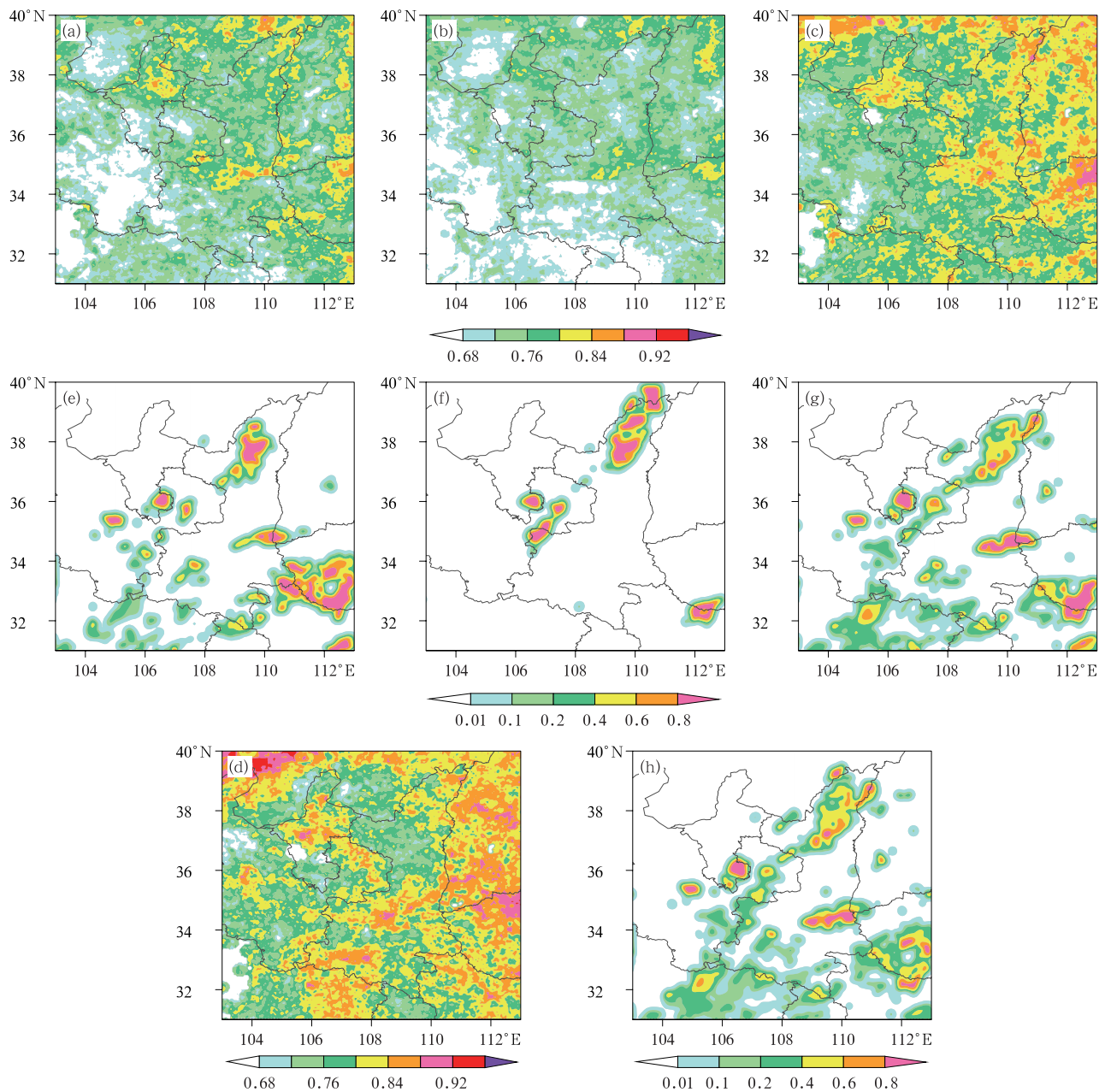


图 6 2019 年 5—9 月 (a, e) ECMWF、(b, f) NCEP、(c, g) SCMOCG 和 (d, h) 融合方法的 (a~d) 晴雨预报准确率和 (e~h) 暴雨预报 TS 评分

Fig. 6 Precipitation forecast verified scores of (a, e) ECMWF, (b, f) NCEP, (c, g) SCMOCG and (d, h) fusion method from May to September 2019
(a—d) accuracy rate of sunny or rainy day forecast, (e—h) TS score of torrential rain

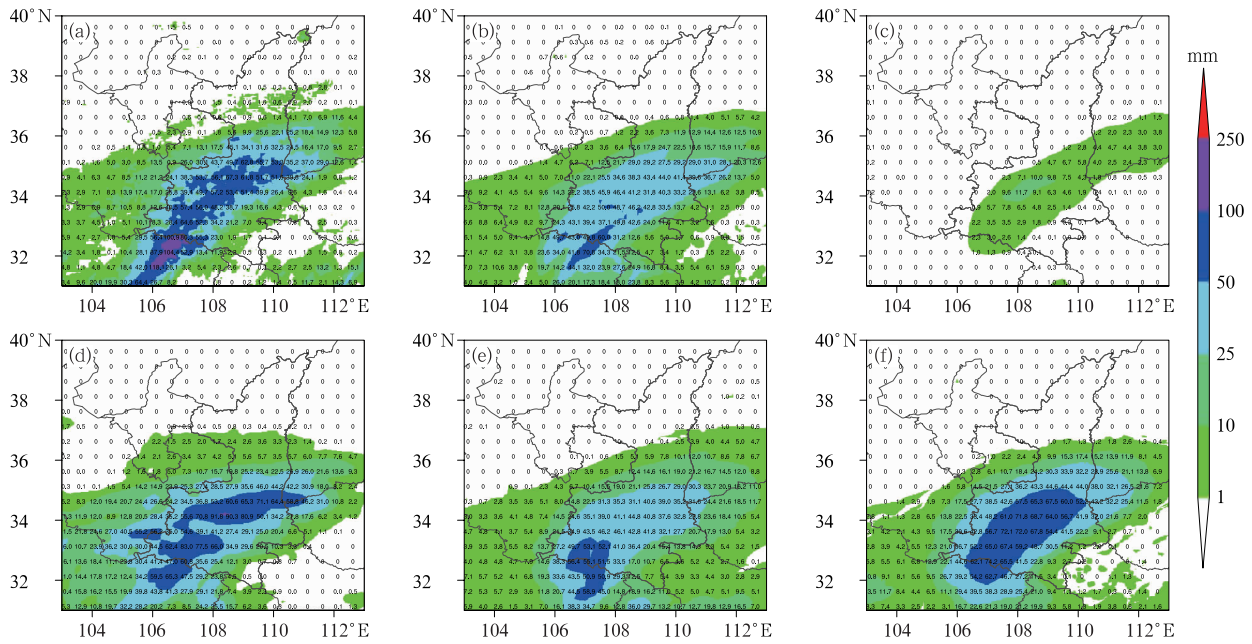


图 7 2019 年 9 月 13 日 12 时至 14 日 12 时降水预报个例的(a)观测值,(b)ECMWF、(c)NCEP、(d) GRAPES-Meso 与观测时段对应的预报(13 日 00 UTC 起报), (e) SCMOCG 指导降水预报,(f)融合方法预报
Fig. 7 The case of precipitation forecast from 1200 UTC 13 to 1200 UTC 14 September 2019
(a) observation; (b) ECMWF forecast with an initial time of 0000 UTC on 13 September, and the time period is consistent with the observed precipitation; (c) same as Fig. 7b, but for NCEP; (d) same as Fig. 7b, but for GRAPES-Meso model; (e) SCMOCG forecast; (f) forecast by fusion method

表 1 不同分段上的平均预报评分

降水预报	晴雨预报准确率/%				暴雨 TS 评分	
	3 h	6 h	12 h	24 h	12 h	24 h
ECMWF	80.2	78.1	75.6	72.9	0.078	0.072
NCEP	80.4	78.2	74.6	71.3	0.060	0.056
SCMOCG	83.7	82.6	81.3	80.5	0.950	0.100
融合方法	86.8	85.7	82.3	80.9	0.103	0.106

模式 00 UTC 起报的 12~36 h 分段降水预报结果。SCMOCG 产品可用时效与实际一致,为 00 UTC 起报的未来 24 h 降水预报。可以看出,ECMWF 模式 24 h 晴雨预报准确率(图 6a)与 3 h(图 5a)整体空间分布一致,西南部偏低,东北部偏高,北部单点上最大为 0.904,空间平均 ACC 为 0.738,显著低于其 3 h 晴雨预报准确率。NCEP 模式的空间平均晴雨预报准确率为 0.713(图 6b),表现最差。对比来看,SCMOCG 的晴雨预报准确率(图 6c)高于 ECMWF 和 NCEP 模式,整个研究区域空间平均为 0.785,东部的河南境内单点最大准确率为 0.925,晴雨预报表现较好。融合方法(图 6d)晴雨预报准确率空间平均为 0.801,高于 SCMOCG 1.6% 以上,从空间分布上来看,研究区域东部和西南部的四川境内以及西

北部宁夏、内蒙古交界处,预报准确率都有明显的提高,但是在陕西北部的延安、榆林境内,晴雨预报准确率有所下降,这可能与整个区域采用同一个阈值有关。

图 6 还给出了暴雨的 TS 评分,为了表述方便,图中 TS 评分低于 0.01 时统一用白色填充,这里面包括两种情况:(1)该点上实际 TS 评分低于 0.01; (2)该点上无空报、漏报和命中,TS 评分无计算值。对比来看 ECMWF、NCEP、SCMOCG 和融合方法的 TS 分别为 0.134、0.080、0.137 和 0.147,融合方法相对 SCMOCG 整体提高 1%,但空间分布上和晴雨预报准确率存在同样的问题,整体 TS 评分提高的同时,局地还有所下降,在陕西北部榆林地区的暴雨评分低于 ECMWF 或 NCEP。针对不同区域采

用不同的阈值来进行融合订正可能会有更好的效果,这也是未来改进的一个方向。

图7为2019年9月陕西一次强秋雨的模式降水预报和融合方法订正结果,可以看到9月13日12时至14日12时,观测降水的暴雨区主要在关中和陕南的中西部(图7a),站点统计有695个站24 h降水量超过50 mm,12个站超过100 mm,最大为汉中市南郑县法镇(147.8 mm)。ECMWF前24 h的降水预报基本没有预报出暴雨区,前12 h起报的降水大雨区和观测整体一致(图7b),但暴雨范围明显偏小,面积不足观测的1/5。NCEP预报(图7c)降水不仅范围明显偏小,而且量级偏弱,区域内仅预报出了中雨,对暴雨的预报指示意义较小。GRAPES-Meso模式(图7d)在临近时刻预报效果最好,暴雨区的范围和量级与观测基本一致,但在长期业务检验中,GRAPES-Meso模式降水预报评分整体低于ECMWF,因此如果从业务角度选择,选中GRAPES-Meso模式产品作为实际业务降水预报的可能性较小。指导产品SCMOCG预报在陕西南部略优于ECMWF,但在陕西中部预报较ECMWF差,而融合方法预报(图7f)无论暴雨区形态,还是面积都与观测更加吻合。从暴雨预报TS评分来看,ECMWF前12 h为0.13,NCEP、GRAPES、SCMOCG的降水预报的TS评分分别为0.000、0.534、0.426,融合方法的预报评分为0.691,订正效果非常好。

4 结论与讨论

利用国家气象信息中心的降水格点分析资料,检验多种降水预报产品的客观表现,提出一个多种降水预报产品融合的网格降水预报释用方法,主要结论如下:

(1)不同模式的降水预报性能有较大差异,存在整体预报表现好的降水产品漏报,而其他降水产品命中的情况;对晴雨预报来说,ECMWF、NCEP和SCMOCG三种产品降水的漏报次数明显低于空报次数,基于该特性,可以利用不同模式对未预报降水的格点来进行消空。对同一模式来说,预报降水超出检验阈值越大,空报的可能性越小。

(2)根据检验结果,提出基于多种降水产品融合的网格降水释用方法,即选用一个检验评分最好的模式降水做为背景场,针对有显著影响的强降水和

弱降水分别采用高阈值融合和低阈值消空,将其他模式的降水预报产品融合到背景场网格降水预报中。高阈值融合主要的做法是,设定一个高阈值,检验除背景场以外的模式,当高阈值条件下降水预报失败率低于20%或更低,则将这个模式的网格降水融合进背景场。对晴雨预报来说,当背景场网格点预报有弱降水,其他模式网格点未报降水的情况下,且其他模式的历史晴雨预报准确率高于80%,则将降水背景场中的弱降水剔除,不报降水。

(3)历史回算表明,整个区域 $F_t \geq 2.0$ mm的TS评分为0.173,相对于ECMWF、SCMOCG和NCEP的0.169、0.117和0.161分别提高了0.04、0.056和0.012。晴雨预报准确率86.8%,相对于SCMOCG的81.2%、NCEP的80.4%、ECMWF的77.4%,分别提高了5.6%、6.4%和9.4%。

与常规集成方法不同,多种降水产品融合的网格降水预报释用方法根据检验结果,从不同降水产品中直接选取可能正确的预报,回算和实际业务均表明,该方法能够提高晴雨预报的准确率和暴雨预报TS评分,但也存在强降水预报频次偏多问题,因此在业务中对背景场以外的降水预报产品采用高阈值融合时,实时调整阈值,会有更好的预报效果。

参考文献

- 陈圣劼,刘梅,张涵斌,等,2019.集合预报产品在江苏省暴雨预报中的应用评估[J].气象,45(7):893-907. Chen S J, Liu M, Zhang H B, et al, 2019. Evaluation on forecasting heavy rainfall over Jiangsu Region using ensemble forecast techniques and products [J]. Meteor Mon, 45(7):893-907(in Chinese).
- 高守亭,冉令坤,李娜,等,2013.集合动力因子暴雨预报方法研究[J].暴雨灾害,32(4):289-302. Gao S T, Ran L K, Li N, et al, 2013. The "ensemble dynamic factors" approach to predict rainstorm [J]. Torr Rain Disasters, 32(4):289-302(in Chinese).
- 韩焱红,矫梅燕,陈静,等,2013.基于贝叶斯理论的集合降水概率预报方法研究[J].气象,39(1):1-10. Han Y H, Jiao M Y, Chen J, et al, 2013. Study on the method of rainfall ensemble probability forecast based on Bayesian theory and its preliminary experiments [J]. Meteor Mon, 39(1):1-10(in Chinese).
- 李俊,杜钧,陈超君,2014.降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J].气象,40(5):580-588. Li J, Du J, Chen C J, 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction [J]. Meteor Mon, 40(5):580-588(in Chinese).
- 李莉,朱跃建,2006. T213降水预报订正系统的建立与研究[J].应用气象学报,17(s1):130-134. Li L, Zhu Y J. 2006. The establishment and research of t213 precipitation calibration system. J

- Appl Meteor Sci, 17(s1):130-134(in Chinese).
- 罗玲, 娄小芬, 傅良, 等, 2019. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. 气象, 45(10):1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in typhoon rainstorm in East China [J]. Meteor Mon, 45(10):1382-1391(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).
- 沈艳, 潘畅, 宇婧婧, 等, 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 36(1):37-46. Shen Y, Pan Y, Yu J J, et al, 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China[J]. Trans Atmos Sci, 36(1):37-46(in Chinese).
- 孙靖, 程光光, 张小玲, 2015. 一种改进的数值预报降水偏差订正方法及应用[J]. 应用气象学报, 26(2):173-184. Sun J, Cheng G G, Zhang X L, 2015. An improved bias removed method for precipitation prediction and its application[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):173-184(in Chinese).
- 唐文苑, 郑永光, 2019. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J]. 气象, 45(3):305-317. Tang W Y, Zheng Y G, 2019. Improvement of hourly precipitation forecast using a time lagged ensemble based on rapid refresh assimilation and forecast[J]. Meteor Mon, 45(3):305-317(in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等, 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报, 28(3):306-317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al, 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3):306-317(in Chinese).
- 严明良, 王猛, 于波, 等, 2008. 基于模糊聚类类型的数值产品暴雨预报释用方法[J]. 气象科学, 28(5):581-585. Yan M L, Wang M, Yu B, et al, 2008. A heavy rainfall forecast method based on fuzzy cluster typing by using application and interpretation of NWP[J]. Sci Meteor Sin, 28(5):581-585(in Chinese).
- 张宏芳, 潘留杰, 卢珊, 等, 2017. ECMWF 集合预报系统对秦岭周边地区降水确定性预报的性能分析[J]. 气候与环境研究, 22(5):551-562. Zhang H F, Pan L J, Lu S, et al, 2017. Performance analysis on deterministic precipitation forecasting in surrounding areas of Qinling Mountains by ECMWF ensemble prediction system[J]. Climatic Environ Res, 22(5):551-562(in Chinese).
- 张宏芳, 潘留杰, 杨新, 2014. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力的对比分析[J]. 气象, 40(4):424-432. Zhang H F, Pan L J, Yang X, 2014. Comparative analysis of precipitation forecasting capabilities of ECMWF and Japan high resolution models[J]. Meteor Mon, 40(4):424-432(in Chinese).
- 郑志海, 封国林, 黄建平, 等, 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验[J]. 物理学报, 61(19):199203. Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, et al, 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. Acta Phys Sin, 61(19):199203(in Chinese).
- 智协飞, 季晓东, 张璟, 等, 2013. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 36(3):257-266. Zhi X F, Ji X D, Zhang J, et al, 2013. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets [J]. Trans Atmos Sci, 36(3):257-266(in Chinese).