

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 Hongfang, Pan Liujie, Lu Shan, et al. 2017. Performance analysis on deterministic precipitation forecasting in surrounding areas of Qinling Mountains by ECMWF ensemble prediction system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (5): 551-562, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16150.

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

张宏芳¹ 潘留杰² 卢珊¹ 巨晓璇¹

¹ 陕西省气象服务中心, 西安 710014

² 陕西省气象台, 西安 710014

摘要 尽管确定性预报不是集合预报系统 (EPS) 的主要目的和应用方向, 但其每一个成员的预报表现决定了集合预报系统的预报性能, 集合平均也是实际预报业务的一个重要参考指标。为此, 利用 2013~2015 年 5~10 月的欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 集合预报系统的降水预报资料, CMORPH (NOAA Climate Prediction Center Morphing Method) 卫星与全国 3×10^4 余个自动气象观测站的逐小时降水量融合资料, 研究 ECMWF 集合预报系统对秦岭周边地区逐日降水的控制预报、成员预报、集合平均的预报能力, 并探索提高降水集合平均预报性能的有效方法。主要结论如下: (1) 无论是集合平均还是控制预报, 整体上都较好的刻画了秦岭周边地区降水的空间形态, 比较而言, 控制预报能够更好的表现了降水的方差变化。(2) 泰勒分析表明, 集合平均的降水方差随预报时效增加单调减小, 控制预报的方差变化随预报时效的增长振荡较小, 其相关系数略优于集合平均。(3) 技巧评分表明, 集合平均使小雨 (降水发生频次) 的预报偏差显著增加, 增大了空报率; 使大雨以上的降水预报偏差减小, 增大了漏报率, 从而使得大多数情况下, 集合平均 TS (Threat Score)、ETS (Equitable Threat Score) 评分低于控制及扰动成员预报。分析认为这主要是由于降水这一要素的偏态分布特性引起的。(4) 集合平均的显著贡献在于能够较好的指示可能发生降水的空间位置。通过阈值限定, 调整预报偏差, 减少 (增大) 其对小雨 (暴雨) 的预报频率, 能够使集合平均的 TS、ETS 评分大幅度提升, 预报技巧显著优于成员预报和控制预报。目前, 预报偏差 Bias 订正方法已成功应用于陕西省精细化格点预报系统中。

关键词 ECMWF 集合预报 确定性预报 技巧评分 泰勒图

文章编号 1006-9585 (2017) 05-0551-12

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16150

Performance Analysis on Deterministic Precipitation Forecasting in Surrounding Areas of Qinling Mountains by ECMWF Ensemble Prediction System

ZHANG Hongfang¹, PAN Liujie², LU Shan¹, and JU Xiaoxuan¹

¹ Shaanxi Meteorological Service Centre, Xi'an 710014

² Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

Abstract Although deterministic forecasting is not the main purpose and application of ensemble prediction system

收稿日期 2016-08-04; 网络预出版日期 2017-04-09

作者简介 张宏芳, 女, 1981年出生, 高级工程师, 主要从事气象服务与应用气象研究工作。E-mail:hongfanglj@sohu.com

通讯作者 潘留杰, E-mail:pljmtgh57245@sina.com

资助项目 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 2016JM4020, 陕西省气象局重点科研项目 2016Z-1

Funded by Shaanxi Province Natural Science Foundation Research Project (Grant 2016JM4020), Shaanxi Meteorological Bureau Key Research Project (Grant 2016Z-1)

(EPS), the forecasting performance of each individual member determines the capability of the entire EPS and the ensemble mean is also an important reference index for the actual forecasting application. Therefore, using the EPS precipitation forecast data from 2013 to 2015 (from May to October every year) from the European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF) and hourly precipitation data from CMORPH (NOAA Climate Prediction Center Morphing Method) in combination with observations collected at more than thirty thousands of automatic weather stations in China, the performance of control forecast, member forecast, and ensemble mean of ECMWF ensemble prediction system on daily precipitation in the surrounding areas of Qinling Mountains are analyzed. The effective method to improve the performance of the ensemble mean of precipitation forecast is explored. Major conclusions are as follows. (1) The spatial pattern of precipitation in the surrounding areas of Qinling Mountains is well described by the ensemble mean and the control forecast. Comparatively, the control forecast can better represent the variance of precipitation. (2) Taylor analysis shows that the precipitation variance of the ensemble mean decreases monotonously with increases in the valid period of forecast, while the variance of control forecast shows less oscillations than that of the ensemble mean and the correlation coefficient improves slightly. (3) The forecast skill scores indicate that the ensemble mean yields significantly large bias (precipitation frequency) in light rain forecast, which indicates large false alarm rate for light precipitation; meanwhile, ensemble mean decreases the bias (precipitation frequency) in heavy rain forecast, suggesting that the missing rate for heavy precipitation forecast is high. As a result, TS and ETS scores of the ensemble mean tend to be lower than those of the control forecast and disturbed member prediction, which is attributed to the skewness distribution of precipitation. (4) The significant contribution of the ensemble mean lies in its ability to well predict the spatial location of possible precipitation. By limiting the threshold, adjusting the forecast bias, decreasing (increasing) the forecast frequency on light (heavy) rain, TS, and ETS scores of the ensemble mean can be improved obviously and the ensemble forecast skill would be superior to that of the member forecast and control forecast. At present, the forecast bias correction method has been successfully applied to the fine-resolution forecast system in Shaanxi.

Keywords ECMWF, Ensemble forecasting, Certain forecasting, Skill score, Taylor diagram

1 引言

从单一确定论到多值概率论的集合预报被称之为天气预报史上的第三次跃进,其主要思想是通过量化或简化各种不确定因素来提高天气的可预报性和降低预报的不确定性(杜钧和钱维宏, 2014)。集合预报不仅可以取得比单一确定性预报更好的预报结果,而且可凭借其多成员的优势提供更为合理的概率预报,从而提高预报的可靠性和可预报性(唐晓等, 2010; 段明铿等, 2012)。正因为如此,早在 20 世纪 90 年代,欧洲、美国、加拿大等国家就构建了集合预报系统(EPS)(Toth and Kalnay, 1993; Houtekamer et al., 1996; Molteni et al., 1996),随后中国、日本等国家也相继建立了集合预报系统(皇甫雪官, 2002)。在研究方面,形成了以初值不确定性、模式不确定性以及集合预报产品释用的三条主线(熊春晖等, 2013)。在模式整体性能没有质变性的改善条件下,加强对预报产品的释用能力,就成为提高天气预报水平的关键因素(王辉等, 2014; 潘留杰等, 2014)。

尽管确定性预报不是集合预报系统的主要目

的和应用方向,但事实上,通过加初始扰动给出的控制预报及成员预报却是单一的确定性结果。集合预报后处理系统产生的统计概率预报和诸如分位数、集合平均等二次确定性预报,其性能也总体依赖于每个成员的具体预报表现。另外,就实际天气预报的业务需求来说,不仅希望有较好的概率预报产品,还希望获得确定性的预报结论,因此,了解 EPS 的确定性预报表现并对其进行合理的释用,也具有重要的现实意义。以往关于集合预报释用的一些研究,主要集中在两个方面,一是开展概率预报的性能分析及再加工,郑飞等(2007)讨论了 ENSO 集合预报系统的确定性预报和概率预报检验问题;刘永和等(2013)利用全球多模式集合预报(TIGGE)资料评估了模式在沂沭河流域的 6 h 降水预报性能;王敏等(2012)对国家气象中心区域集合预报系统的 2 m 温度预报结果开展了一阶偏差和二阶离散度的校准研究,并检验了其预报效果;赵琳娜等(2010)利用 2008 年 7 月 1 日至 8 月 6 日 TIGGE 集合预报资料评估了欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)和中国气象局(CMA)三家模式对淮河流域上游 19 个自动气象观测站的降水预报性能。二是为了改

善或了解确定性预报的性能,一些学者对包括气候模式在内的初值问题(成印河等,2013)、回归预报方程的建立(陈超辉等,2010)等方面做了大量卓有成效的探索。针对集合平均,随机强迫对预报效果的影响、气象要素在不同区域和时段的预报表现等方面的研究工作开展最为活跃(陈超辉等,2013;刘永和等,2013),此外作为天气预报业务的一个重要参考依据,通过 EPS 形成的集合平均还广泛应用于各级气象台站的天气预报业务。但降水本身呈偏态分布,直接应用集合平均会导致预报技巧降低,本文提出一个简单的降水偏差订正方法,在克服集合平均不足的情况下,充分利用其对降水空间定位的优势,大大的提高了降水集合平均的准确率。

ECMWF 集合预报是近两年广泛应用于各级气象台站的新产品。EPS 降水的控制预报、集合平均等产品为预报员提供具体的参考量级,概率预报客观上为用户提供了降水发生可能性的大小及其量级的振荡范围,为日常降水预报提供了客观依据。但一方面由于应用时间相对较短,模式的预报性能不十分清楚;另一方面 ECMWF 集合预报资料量非常庞大,其原始压缩码资料每日存储量达 20.4 GB,处理起来十分困难。因此,目前国内还鲜有针对长期 ECMWF 降水集合预报性能的客观评估。本文以国家气象信息中心的 CMORPH (NOAA Climate Prediction Center Morphing Method) 卫星与自动气象观测站的逐小时降水量融合产品为参照,客观分

析 ECMWF 集合预报系统确定性预报的预报能力,并给出提高降水集合平均预报性能的简单有效方法,以期为预报业务提供参考。

2 资料与方法

观测资料采用中国气象科学数据信息网 CMORPH (NOAA Climate Prediction Center Morphing Method) 卫星与全国 3×10^4 多个自动观测站的逐时降水量融合产品 (<http://www.escience.gov.cn/metdata/page/index.html> [2014-12-01]), 时段为 2013~2015 年 5~10 月,空间分辨率 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度)。潘旻等(2012)、沈艳等(2013)研究表明,CMORPH 卫星与自动站降水融合资料在我国夏季 24 h 累计降水平均偏差为 -0.035 mm,相关系数达 0.908,能够真实的表现实际降水分布,可以作为参照物来评估模式的预报性能。

模式数据为同时期每日 12:00 (协调世界时)起报的 ECMWF 降水集合预报产品,集合成员数 51 个,原始压码数据中编号为 0~50,其中 0 号成员为控制预报。模式分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度),为了方便处理,插值成与观测一致的 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度)。研究区域设为我国中部秦岭周边地区 ($28^\circ\text{N} \sim 41^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E} \sim 118^\circ\text{E}$),具体范围如图 1 所示。

采用泰勒图方法评估降水预报的综合表现,在泰勒图中表现的 3 个量分别为:距平相关系数

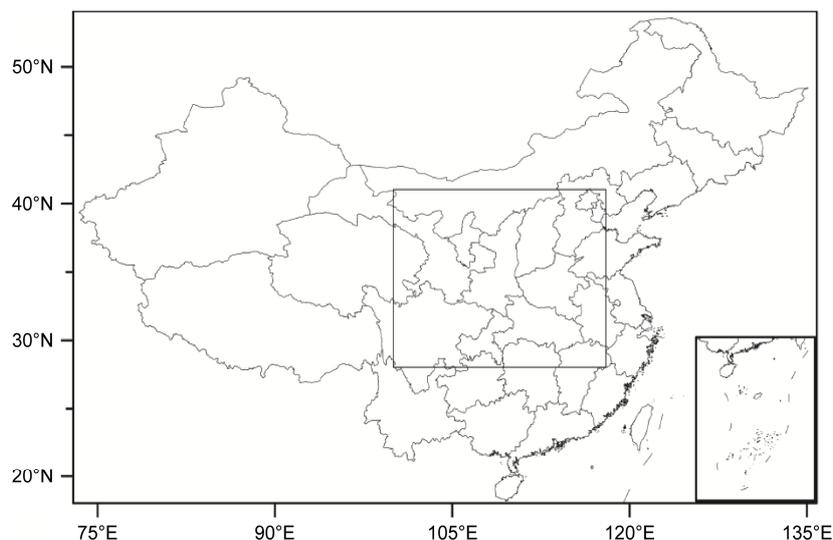


图 1 本文研究区域(黑色细线方框)

Fig. 1 Research area of this study (solid black box)

(A_{CC})、均方根误差 (R_{MSE})、预报相对与观测的标准差比值 σ (Taylor, 2001; 潘留杰等, 2013)。具体计算公式如下:

$$A_{CC} = \frac{\sum_i (y_i^p - \overline{y_i^p})(y_i^o - \overline{y_i^o})}{N \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_i^p - \overline{y_i^p})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_i^o - \overline{y_i^o})^2}}, \quad (1)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (y_i^p - y_i^o)^2}, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^p - \overline{y_i^p})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^o - \overline{y_i^o})^2}}, \quad (3)$$

其中, N 表示有效格点的样本数量, y_i^p 为预报格点 i 上的预报值, y_i^o 表示相应格点上的分析值, $\overline{y_i^p}$ 、 $\overline{y_i^o}$ 分别表示第 i 个格点上预报和分析的平均值, $\overline{y^p}$ 、 $\overline{y^o}$ 分别为预报场和分析场的平均值。式 (3) 中分子、分母分别表示预报和观测的标准差。

计算的预报技巧评分主要包括: 反映预报与观测事件发生次数比率的预报偏差 Bias (Brier, 1950); 表示正确预报次数与事件发生总次数比率的 TS (Threat Score) 评分 T_s (Schaefer, 1990); 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的比率的 ETS (Equitable Threat Score) 评分 E_{TS} (Black, 1994)。公式为

$$B_{ias} = \frac{A + C}{A + B}, \quad (4)$$

$$T_s = \frac{A}{A + B + C}, \quad (5)$$

$$E_{TS} = \frac{A - H_{random}}{A + B + C - H_{random}}, \quad (6)$$

其中, A 为成功预报降水的次数, B 为漏报的次数, C 为空报的次数, H_{random} 表示随机情况下可能正确预报的次数。使用 ETS 评分的主要原因在于 TS 评分依赖于气候概率, 对发生概率为 50%左右的事件不适用, 而 ETS 对事件发生的气候概率依赖性小, 对小概率、概率为 50%左右以及大概率事件都具有较好的适用性。

3 结果分析

3.1 总体表现

在给出具体的降水预报技巧评分之前, 首先分析 EPS 控制预报、集合平均降水的整体表现。由图

2a 可见, 暖季, 研究区域西南部是发生降水的大值区, 陕西南部、四川西部日降水量达 5.0 mm 以上。降水低值中心分别位于宁夏北部的内蒙地区和河北、河南、山东的交界处, 其日降水量小于 0.5 mm。控制预报 (图 2b) 和集合平均 (图 2c) 均较好重现了实际日平均降水的空间形态, 两者不足均表现为南部降水预报偏大, 宁夏北部降水预报偏低, 其中四川境内日平均降水量预报偏大 2.0 mm 以上。与控制预报 (图 2b) 相比, 集合平均 (图 2c) 对河北、河南、山东三省交界处的降水低值中心刻画能力较弱。

观测降水标准差日变化大值中心出现在陕西南部, 日最大超过 12.0 mm, 两个降水低值中心日平均降水标准差小于 4.0 mm。控制预报和集合平均的日平均降水量标准差与观测总体形态基本一致, 但变化幅度显著偏小, 其中集合平均 (图 2c) 偏小更为明显, 其日标准差最大仅为 9.0 mm。此外, 控制预报 (图 2b) 在陕西南部、重庆东南部等地的高低值中心均与观测对应较好, 集合平均也基本上能刻画出日降水标准差高低值的中心位置, 但在上述两个大值中心没有出现闭合的等值线 (图 2c), 在降水低值中心也与观测、控制预报存在一定的偏差。

为了进一步反映模式的客观表现, 利用泰勒图综合刻画预报降水与观测的相关系数、标准差比值和均方根误差。从图 3 来看, 随着预报时效的增加, 相关系数整体呈下降趋势。控制预报 (图 3a)、集合平均 (图 3b) 与观测降水的相关系数分布范围分别为 0.728~0.572 和 0.681~0.543, 控制预报略优于集合平均。从预报的离散度来看, 除第 11、15 天控制预报外, 大部分时效的控制预报和集合平均的标准差比值小于 1.0, 表明预报降水的振幅偏小。关于第 11 天的异常变化, 分析发现是由于 EPS 调整了集合成员分布函数的结果, 在此不做讨论。非常有意思的是, 初始时刻控制预报和集合平均的标准差比值比较接近, 随着预报时效的增长两者呈现出了相反的变化趋势, 控制预报标准差比值增大, 而集合平均标准差比值减小。到第 15 天控制预报标准差比值为 1.11, 接近于理想值, 而集合平均为 0.315, 远低于观测, 已经不能反映实际降水的振幅变化。从预报与观测的误差来看, 控制预报在前 6 日均方根误差小于集合平均, 第 7 天之后集合平均表现相对较好。

图 4 给出了 ECMWF 模式 50 个预报成员 (扰动成员) 及其对应的控制预报、集合平均在其预报时

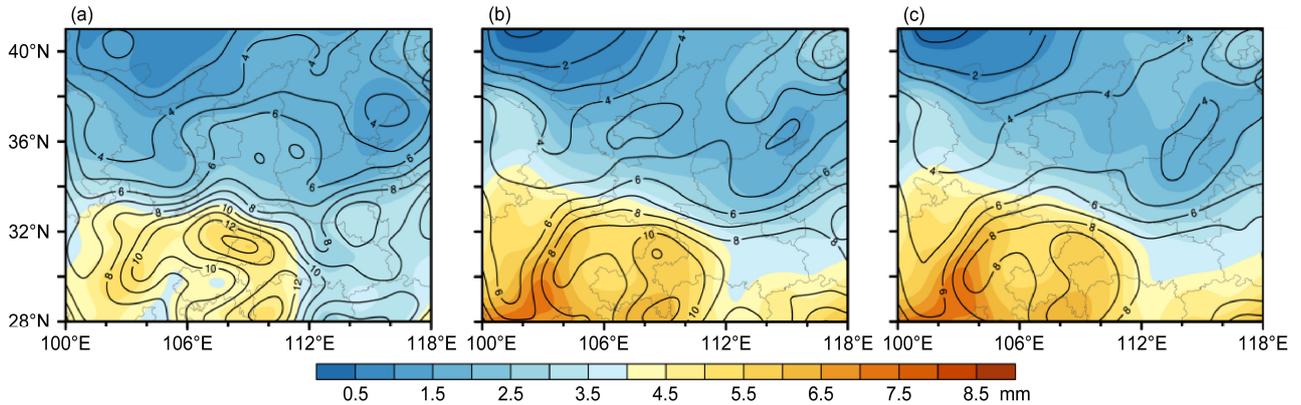


图 2 2013~2015 年 5~10 月的日平均降水量 (填色) 及其标准差 (等值线, 单位: mm): (a) 观测降水; (b) 控制预报; (c) 集合平均
 Fig. 2 Daily mean precipitation (colored) and its standard deviation (contours, units: mm) from May to October during 2013-2015: (a) Observations; (b) control forecast; (c) ensemble mean

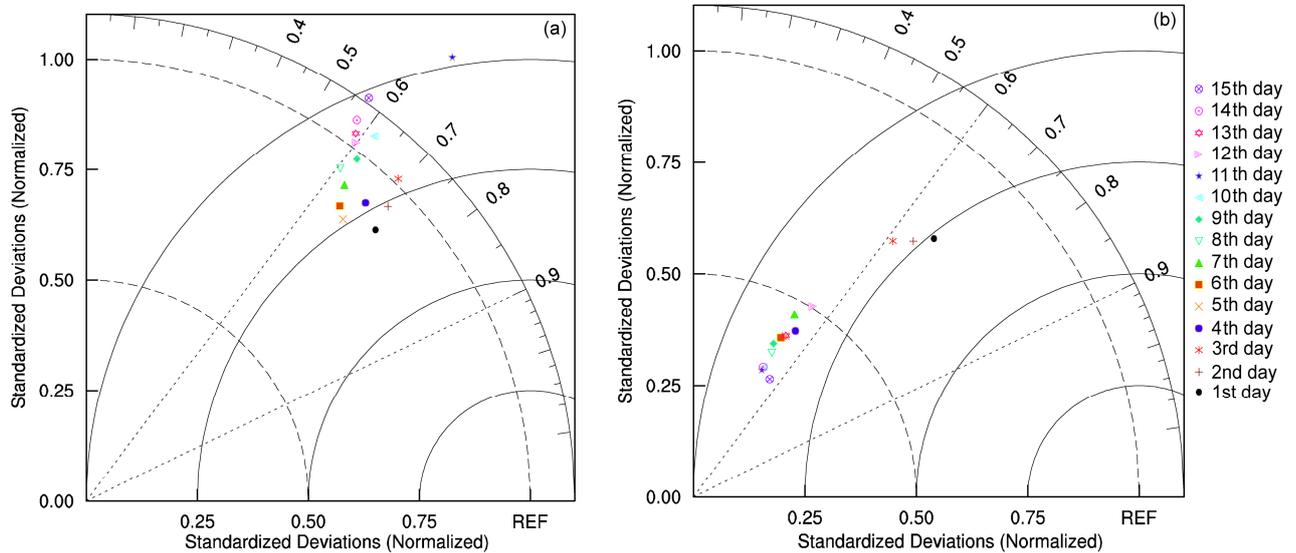


图 3 ECMWF 集合预报系统预报时效为 1~15 d 的降水预报的泰勒图: (a) 控制预报; (b) 集合平均。图中参考点 REF 为观测场, 预报场到原点的距离代表其相对于 REF 的标准差; 预报场在图中方位角的余弦代表其与观测的相关系数; 预报相对与 REF 的距离代表其相对与 REF 的均方根误差
 Fig. 3 Taylor diagram of ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecast) ensemble prediction for 15 d: (a) Control forecast; (b) ensemble mean. REF means observations; the distance between the forecast and the origin represents standard deviation to REF. Cosine of the azimuth of forecast stands for its correlation coefficient with REF; the distance between forecast and REF represents its root mean square error

效上的平均降水量和标准差变化。图 4a 中显示, 无论是扰动成员或控制预报的降水量级预报都整体偏大, 且控制预报表现更加显著, 观测降水的振幅为 2.66~3.02 mm, 而控制预报最小为 3.18 mm, 平均在 3.6 mm 附近震荡, 比 87% 的扰动成员预报偏强。集合平均则位于扰动成员中间的位置, 第 10 天后与观测降水的趋势变化基本一致。相对与 50% 左右的扰动成员和控制预报而言, 集合平均的区域总降水量量级表现较好, 但其标准差变化显著低于观测且随着预报时效的增长快速减小 (图 4b)。图

中显示, 观测降水的标准差稳定维持在 7.0 mm 附近, 而集合平均的标准差从第 1 天的 5.3 mm 减小到第 15 天的 2.6 mm。因此在某种程度上来说, 集合平均仅仅反映了各预报成员的平均状态, 在表现实际降水的异常分布上存在一定的局限。相比而言, 控制预报标准差变化维持在 6.0 mm 和 7.1 mm 之间, 略小于观测, 但其变化趋势基本一致且稳定, 因此能够较好的刻画降水的振荡范围。当然对于第 11 天而言, 所有成员和控制预报标准差均出现较大的跃变, 这是集合预报系统本身的问题, 在此以及

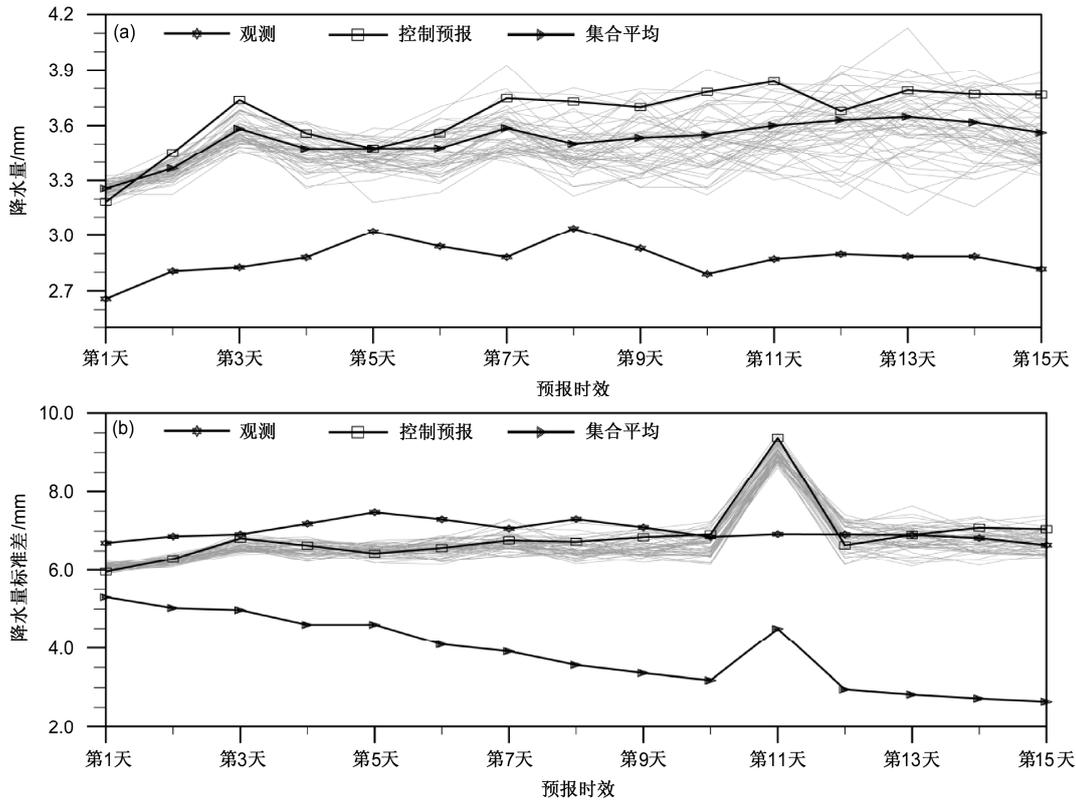


图4 与模式预报时效对应的 ECMWF 集合预报系统 50 个预报成员 (扰动成员)、控制预报和观测的 (a) 平均降水量和 (b) 降水量标准差。图中灰色曲线为 50 个扰动成员

Fig. 4 50 perturbation members of ECMWF, control forecast, and observations corresponds to model's forecast period (grey curves denote 50 perturbation members): (a) Average rainfall; (b) standard deviation of precipitation

后续章节中均不做详细讨论。

3.2 技巧评分

技巧评分不仅能够反映模式预报性能在不同方面的优劣,而且还直接应用于实际气象业务,给出客观的预报技巧评分对模式改进和释用都是非常重要的。为此,选用应用广泛、物理意义清晰的 3 个技巧评分来分析集合成员及其控制预报、集合平均的预报表现。需要说明的是,模式对暴雨及以上量级的降水预报性能很不理想,以至于在空间上无法表达,因此这里主要分析小雨、大雨两个量级降水的技巧评分,计算时采用单向阈值控制,即小雨和大雨分别定义为 24 h 降水量大于 0.0 mm 和 25.0 mm 以上量级的降水事件。

从预报偏差 Bias 来看,所有扰动成员小雨的预报频次均高于观测(图 5a),预报时效为 1 d 时,最接近于理想值,且随着预报时效的增加逐渐增大。控制预报 Bias 的大小、变化趋势和集合成员基本一致,但集合平均的 Bias 远高于观测及扰动成员。由预报偏差定义可知, Bias 偏大,降水空报率

增大,使得集合平均小雨预报 TS 评分(图 5c)在绝大部分时段内低于控制及扰动成员预报。时效为 1 d 时,控制预报 TS 评分达到 0.568,高于所有扰动预报,集合平均为 0.539,低于扰动预报,截止到第 11 天前,控制预报基本上均优于所有扰动预报与集合平均。但到第 15 天,集合平均和控制预报 TS 则基本达到一致,两者都低于大部分扰动预报。集合平均的 ETS 评分表现基本和 TS 评分类似(图 5e),技巧评分低于控制、扰动预报 5% 以上。值得注意的是,第 11 天集合平均的 TS 评分下降较少,高于所有的扰动成员和控制预报,这可能是 EPS 系统扰动成员调整后,其集合平均相对稳定,受影响较小。

大雨以上量级控制、扰动预报的预报偏差最低高于观测一倍以上(图 5b),这对强降水预报是合适的,因为强降水往往造成较大的气象灾害,预报中往往采用“宁空勿漏”的原则。前 4 天控制和扰动预报的 Bias 相差不多,但集合平均 Bias 显著小于观测,随着预报时效的增长,控制预报缓慢增长,

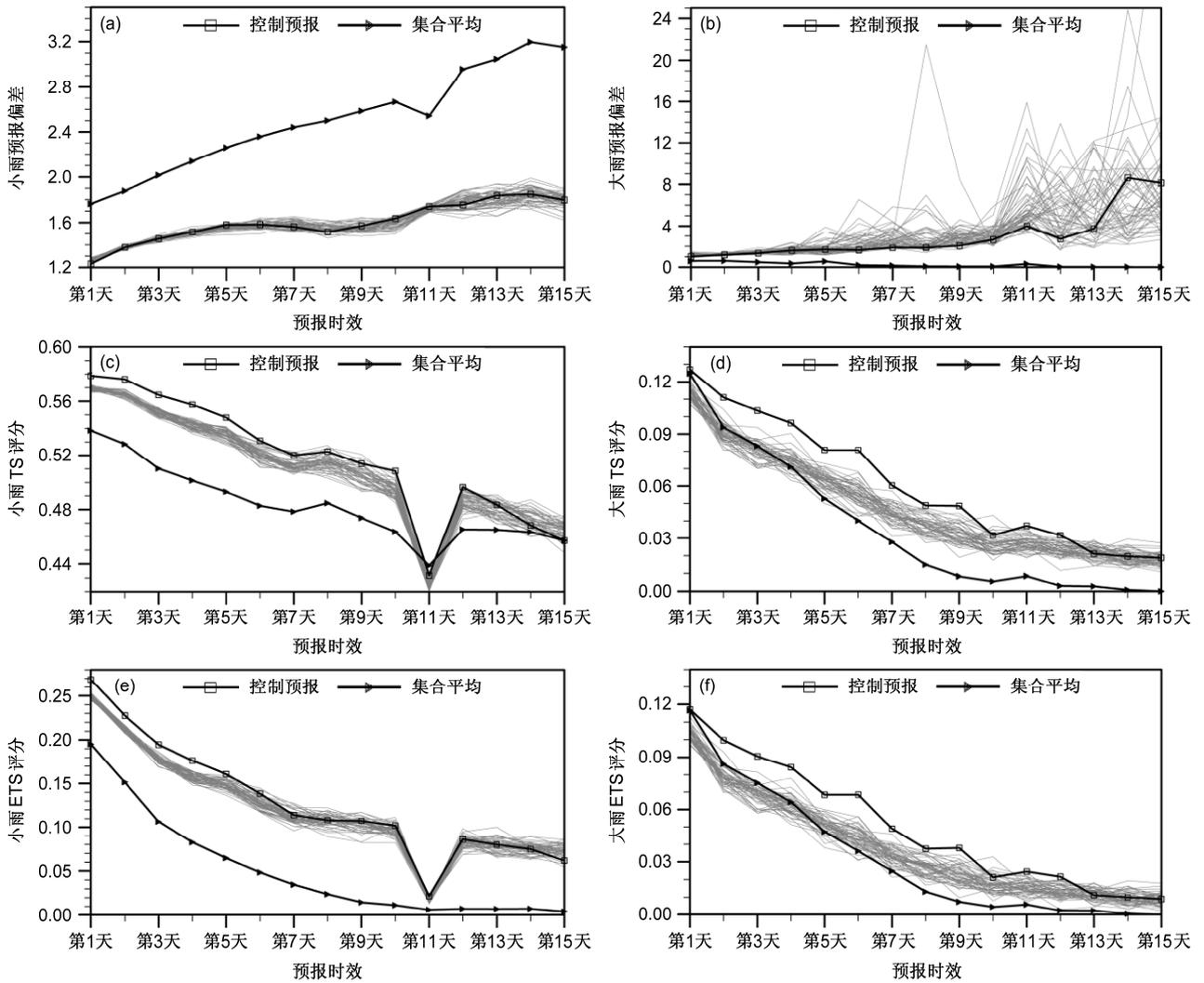


图5 ECMWF 集合预报系统 50 个扰动成员及控制预报、集合平均的降水预报技巧评分：(a) 小雨预报偏差；(b) 大雨预报偏差；(c) 小雨 TS 评分；(d) 大雨 TS 评分；(e) 小雨 ETS 评分；(f) 大雨 ETS 评分。图中灰色曲线为 50 个扰动成员
 Fig. 5 Verification of 50 perturbation members, control forecast, and ensemble mean of precipitation forecast (grey curves denote 50 perturbation members): (a) Forecast bias of light rain; (b) forecast bias of heavy rain; (c) TS (Threat Score) score of light rain; (d) TS of heavy rain; (e) ETS (Equitable Threat Score) of light rain; (f) ETS score of heavy rain

扰动预报则出现较大振荡，个别成员最大高于观测 24 倍以上。集合平均的 Bias 总体偏低，预报时效超过 5 d，Bias 则小于 0.1，不能表现大雨的发生频次，从而导致强降水的漏报。TS 评分随着预报时效的增加逐渐减小（图 5d），第 1 天，控制预报和集合平均预报技巧相当，随后集合平均和控制预报的差异加剧。虽然集合平均预报大雨以上量级的 TS 评分总体小于控制预报，但在前 3 天，其预报效果高于大部分扰动成员，这在 ETS 评分（图 5f）中也有类似表现。归纳起来，无论是小雨或大雨，前 11 天控制预报表现最好，优于扰动成员及集合平均，

11 d 后控制预报略低于部分扰动成员。集合平均的小雨以上量级降水的预报表现较差，大雨预报的评分技巧上，集合平均在前 3 天优于大部分扰动成员，但整体不如控制预报。

图 6 给出了时效为 4 d（第 96 小时），24 h 累计降水预报技巧的空间分布，从图中可以看出，控制预报中的小雨发生频次除宁夏、甘肃北部的内蒙地区 Bias 低于 1.0 外，其它区域一致偏高（图 6a），高值中心分别位于山西、河北以及湖北、湖南交界处，在甘肃南部、陕西西部为第二大值中心。中心值 Bias 大于观测 1.6 倍以上，而低值中心降水 Bias

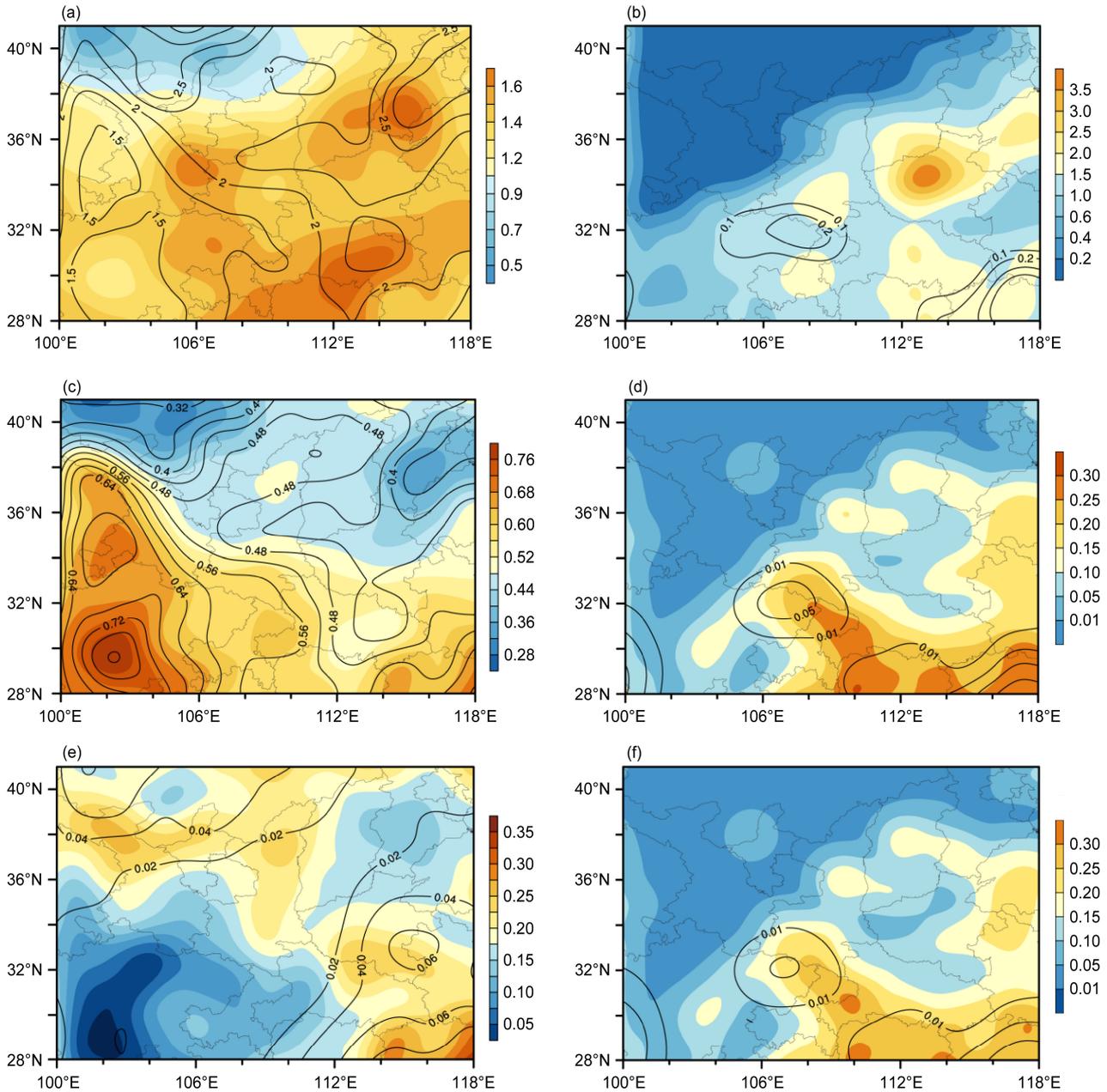


图 6 ECMWF 集合预报系统预报时效为 4 d 的控制预报 (填色)、集合平均 (等值线) 的降水预报技巧评分的空间分布: (a) 小雨预报偏差; (b) 大雨预报偏差; (c) 小雨 TS 评分; (d) 大雨 TS 评分; (e) 小雨 ETS 评分; (f) 大雨 ETS 评分
 Fig. 6 Spatial distribution of precipitation forecast skill scores of ECMWF control forecast (colored) and ensemble mean forecast (contour) (prediction for 4 d): (a) Forecast bias of light rain; (b) Forecast bias of heavy rain; (c) TS of light rain; (d) TS of heavy rain; (e) ETS of light rain; (f) ETS of heavy rain

比观测低 0.5 倍或更多。相比之下, 集合平均降水 Bias 偏高更加明显, 平均大于观测 2.0 倍以上。对大雨而言 (图 6b), 控制预报 Bias 在研究区域的东南部较观测偏大, 西北部显著偏小, 最大值高于观测 3.5 倍以上, 而最低值仅为观测 20% 或以下。而集合平均的 Bias 表现较不理想, 仅在陕西南部、四川等地以及研究区域的东北角 Bias 大于 0.1, 其余

等地不足观测的 10%。因此, 从 Bias 的空间分布来看, 集合平均在小雨、大雨中预报频次都不如控制预报。

对小雨来说 (图 6c), 无论是控制预报, 还是集合平均, 西南部的 TS 评分都具有较好的表现, 最大达到 0.76 以上, 比较而言控制预报在北部一些地区的表现不如集合平均, 在宁夏、甘肃北部, 集

合平均和控制预报 TS 评分分别为 0.36 和 0.28 以下, 集合平均表现相对较好。控制预报的大雨以上量级的 TS 评分则在研究区域的东南部表现较好, 部分地区 TS 评分达到 0.25 以上。对集合平均而言, 整个区域 TS 评分低于 0.10, 且其在大部分地区预报能力较差, 不如控制预报的 TS 评分。

从除去随机性预报技巧后的小雨预报 ETS 评分来看 (图 6e), 模式对研究区域的东北部具有稳定的预报技巧。尽管西南部 TS 评分较高, 但 ETS 评分却较低, 反而在东南部预报较好。集合平均在 ETS 评分上整体表现较差, 其 ETS 最大值仅和控制

预报的最小值相当。大雨 ETS 评分的空间分布总体与 TS 评分是一致的, 均表现为东北较好, 西北差, 控制预报优于集合平均。

4 集合平均偏差订正

考虑集合平均对可能发生降水的空间位置有较好的指示意义, 但对小雨的预报频率较实际偏高 ($Bias > 1$), 对大雨的预报频率较实际偏少 ($Bias < 1$), 若减小集合平均对小雨预报的频率, 增加大雨预报频率, 可能会提高评分技巧。因此调整集合

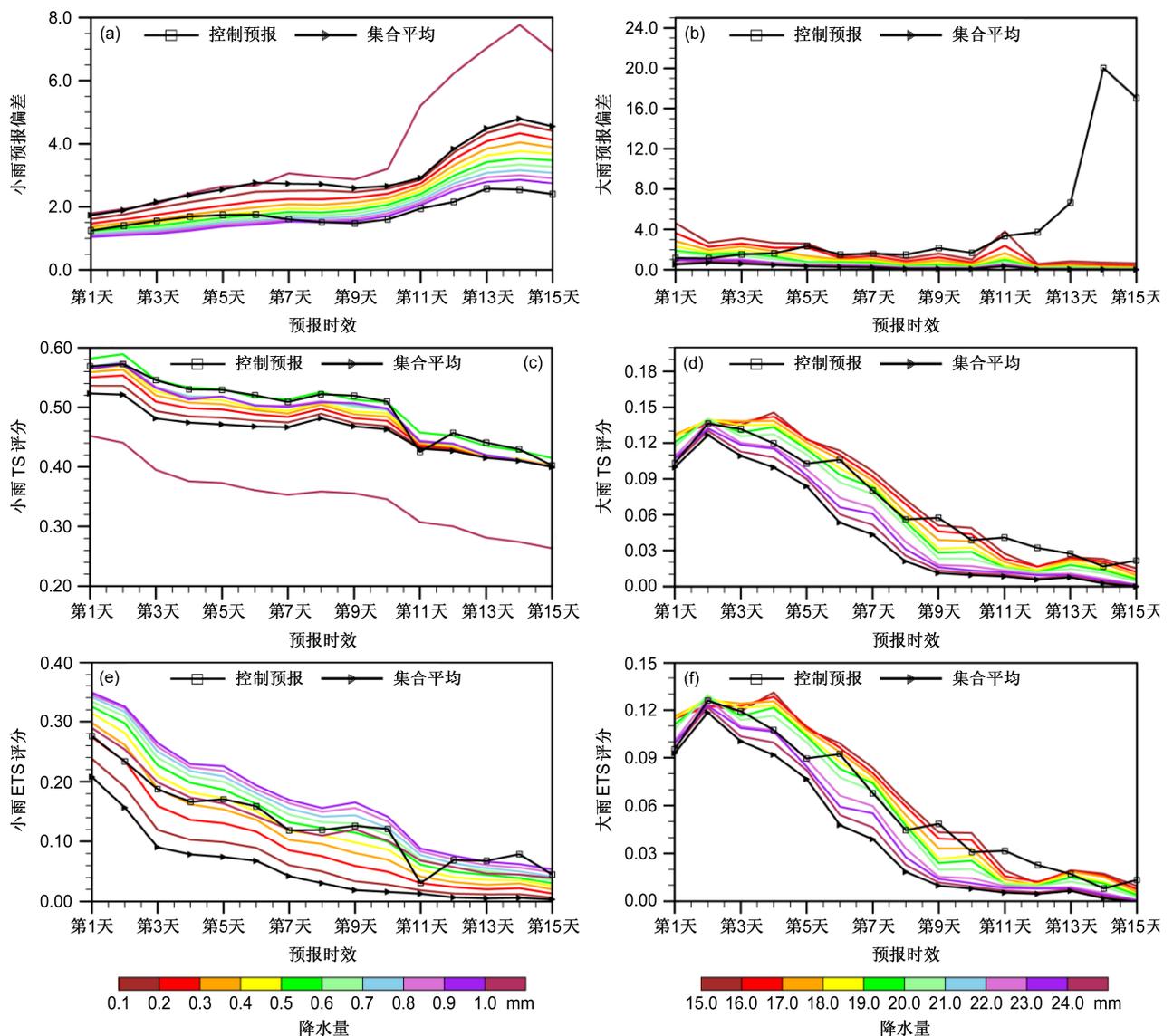


图 7 采用不同阈值的集合平均的降水预报技巧评分: (a) 小雨预报偏差; (b) 大雨预报偏差; (c) 小雨 TS 评分; (d) 大雨 TS 评分; (e) 小雨 ETS 评分; (f) 大雨 ETS 评分

Fig. 7 Forecast skill scores of ensemble mean forecast after adjusting the thresholds: (a) Forecast bias of light rain; (b) forecast bias of heavy rain; (c) TS of light rain; (d) TS of heavy rain; (e) ETS of light rain; (f) ETS of heavy rain

平均对降水的预报频率,图7分别为小雨以0.1 mm步长,假定模式预报从0.1 mm到1.0 mm来预报观测大于0.0 mm的降水发生;大雨以1 mm为步长,假定模式预报从15 mm到25 mm,来预报观测大于25 mm降水的发生。结果显示,随着预报阈值从0.1 mm到0.9 mm时,预报偏差在逐渐接近于1,小雨预报频率偏多的情况得到显著改善(图7a),但当预报阈值调整到1.0 mm时,预报偏差突然变大,比调整前更偏大,而且TS评分、ETS评分也降低了,说明阈值调整到大于等于1.0 mm已经不适合。随着阈值的调整,模式的TS评分(图7c)、ETS评分(图7e)指数均大幅度提高,除了1.0 mm的阈值外,其它阈值的TS评分均大于调整前,且当预报阈值为0.5 mm和0.6 mm时,TS评分达到最高,超过了控制预报,48 h TS评分达到了0.58,较调整前提高了0.06。与TS评分不同的是,当预报阈值从0.1 mm调整到0.9 mm时,ETS评分是随着阈值增大,逐渐提高,当预报阈值为0.9 mm时达到最优。在预报的前8天,当集合平均的预报阈值

调整为0.5 mm到0.9 mm之间时,他们的ETS评分都显著优于控制预报。值得注意的是,控制预报在第11天的预报表现相对较差,阈值调整后的集合平均却相对稳定。与小雨情况类似,调整后的大雨预报评分也有一定提高,且模式预报阈值为17~20 mm时,评分达到最优,在前7天,超过控制预报,在第10天到15天,仍然是控制预报表现较好。

从采用阈值模式预报24 h降水量 $F > 0.6$ mm,观测24 h降水量 $O > 0.0$ mm来计算模式24 h小雨预报的评分与调整前集合平均技巧评分差值的空间分布图来看(图8),研究区域的大部分区域,TS评分和ETS评分都有提高,TS评分提高最大的在河北、山东地区,最高达到了0.186。ETS评分也平均提高0.05左右。而大雨评分整体提高较小,空间上无法表达。

5 结论和讨论

本文通过对ECMWF集合预报系统50个预报成

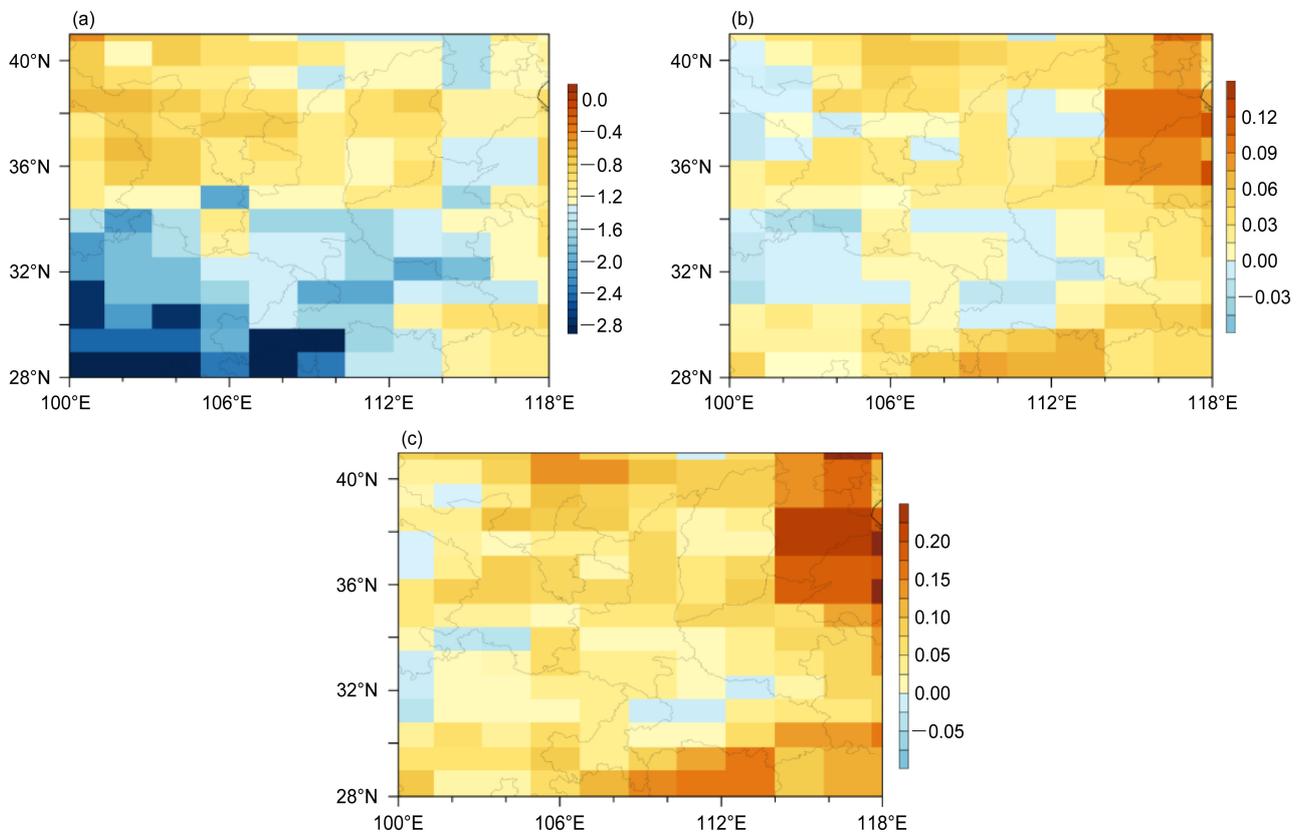


图8 调整集合平均降水阈值, $F > 0.6$ mm、 $O > 0.0$ mm与调整前 $F > 0.0$ mm、 $O > 0.0$ mm 24 h小雨预报的技巧评分差值:(a) 预报偏差 Bias;(b) TS评分;(c) ETS评分

Fig. 8 Difference in the 24-h forecast skill scores for light rain between adjusting thresholds using simulated 24-h precipitation $F > 0.6$ mm, observed 24-h precipitation $O > 0.0$ mm and $F > 0.0$ mm, $O > 0.0$ mm: (a) Forecast bias; (b) TS; (c) ETS

员及控制预报、集合平均对秦岭周边地区的降水预报性能展开讨论, 并采用阈值调整的方法, 探索提高集合平均降水预报性能的有效方法, 得出以下结论:

(1) 控制预报和集合平均均能较好的重现实际日平均降水量及其标准差的空形态。无论是扰动成员或控制预报的降水量级预报都整体偏大, 且控制预报表现更加显著, 比 87% 的成员预报偏强, 集合平均则位于扰动成员中间的位置。相对与 50% 左右的预报成员和控制预报而言, 集合平均的区域总降水量量级表现较好。

(2) 无论是小雨还是大雨的预报, 所有扰动成员、控制预报的预报频次均高于观测。而集合平均对小雨的预报频次高于理想值, 同时高于所有扰动成员, 在理论上增大了空报率, 相反, 对大雨的预报频次显著小于观测, 增大了漏报率。因此, 集合平均的 TS 评分和 ETS 评分不仅低于控制预报, 而且在大多数情况下还低于扰动预报。所有扰动成员、控制预报对小雨的预报, 在第 11 天出现跳跃性变化, 预报技巧大幅降低。

(3) 空间上, 无论是控制预报还是集合平均的 TS 评分都是南部优于北部。对小雨来说, 两者均在西南部的 TS 评分有较好的表现, 而大雨 TS 评分最高出现在东南部。

(4) 考虑集合平均对可能发生降水的空间位置预报较好, 但对小雨的预报频率偏高, 对大雨的预报频率偏少, 调整集合平均降水的预报阈值, 预报技巧评分有不同程度提高。

综上所述, 通过偏差订正方法来调整降水预报阈值, 能有效的提高降水预报技巧, 可以在实际业务中运用。但对于强降水预报, 集合平均具有一定的局限性。另外, 本文仅对降水预报进行了讨论, 但对于其它要素诸如温度、风向、风速等影响人们生产生活的许多气象要素的预报效果, 还需要在今后的工作中进行单独研究。

参考文献 (References)

- Black T L. 1994. The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples [J]. *Wea. Forecasting*, 9 (2): 265–278, doi: 10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNMEM>2.0.CO;2.
- Brier G W. 1950. Verification of forecasts expressed in terms of probability [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 78 (1): 1–3, doi: 10.1175/1520-0493(1950)078<0001:VOFEIT>2.0.CO;2.
- 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 2010. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究 [J]. *气象学报*, 68 (4): 464–476. Chen Chaohui, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2010. Research of the multi-model super-ensemble prediction based on cross-validation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (4): 464–476, doi: 10.11676/qxxb2010.045.
- 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 2013. 随机强迫对集合预报效果的影响研究 [J]. *气象学报*, 71 (3): 505–516. Chen Chaohui, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2013. Study of the drift of ensemble forecast effects caused by stochastic forcing [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71 (3): 505–516, doi:10.11676/qxxb2013.040.
- 成印河, 周生启, 王东晓. 2013. 海上大气波导研究进展 [J]. *地球科学进展*, 28 (3): 318–326. Cheng Yinhe, Zhou Shengqi, Wang Dongxiao. 2013. Review of the study of atmospheric ducts over the sea [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 28 (3): 318–326, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2013.03.0318.
- 杜钧, 钱维宏. 2014. 天气预报的三次跃进 [J]. *气象科技进展*, 4 (6): 13–26. Du Jun, Qian Weihong. 2014. Three revolutions in weather forecasting [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 4 (6): 13–26.
- 段明铿, 王盘兴, 李驰钦. 2012. NCEP 集合预报系统在亚欧和北美区域的预报效果对比 [J]. *大气科学学报*, 35 (6): 641–651. Duan Mingkeng, Wang Panxing, Li Chiqin. 2012. Comparisons on forecast performance of NCEP ensemble prediction system between Eurasia and North America regions [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 641–651.
- Houtekamer L, Lefaiivre L, Derome J, et al. 1996. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124 (6): 1225–1242, doi: 10.1175/1520-0493(1996)124<1225:ASSATE>2.0.CO;2.
- 皇甫雪官. 2002. 国家气象中心集合数值预报检验评价 [J]. *应用气象学报*, 13 (1): 29–36. Huangfu Xueguan. 2002. The verification for ensemble prediction system of national meteorological center [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (1): 29–36.
- 刘永和, 严中伟, 冯锦明, 等. 2013. 基于 TIGGE 资料的沂沭河流域 6 小时降水集合预报能力分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 539–551. Liu Yonghe, Yan Zhongwei, Feng Jinming, et al. 2013. Predictability of 6-hour precipitation in the Yishu River basin based on TIGGE data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 539–551, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11078.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (529): 73–119, doi: 10.1002/qj.49712252905.
- 潘留杰, 张宏芳, 朱伟军, 等. 2013. ECMWF 模式对东北半球气象要素场预报能力的检验 [J]. *气候与环境研究*, 18 (1): 111–123. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Zhu Weijun, et al. 2013. Forecast performance verification of the ECMWF model over the Northeast Hemisphere [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (1): 111–123, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11097.
- 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 2014. 数值天气预报检验方法研究进展 [J]. *地球科学进展*, 29 (3): 327–335. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Wang Jianpeng. 2014. Progress on verification methods of numerical weather prediction [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 29 (3): 327–335, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.03.0327.
- 潘涛, 沈艳, 宇婧婧, 等. 2012. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验 [J]. *气象学报*, 70 (6): 1381–1389.

- Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2012. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (6): 1381–1389, doi:10.11676/qxxb2012.116.
- Schaefer J T. 1990. The critical success index as an indicator of warning skill [J]. *Wea. Forecasting*, 5 (4): 570–575, doi: 10.1175/1520-0434(1990)005<0570:TCSIAA>2.0.CO;2.
- 沈艳, 潘阳, 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 Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality assessment of hourly merged precipitation product over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 37–46.
- 唐晓, 王自发, 朱江, 等. 2010. 北京地面 O₃ 的集合预报试验 [J]. *气候与环境研究*, 15 (5): 677–684. Tang Xiao, Wang Zifa, Zhu Jiang, et al. 2010. Ensemble-based surface O₃ forecast over Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (5): 677–684, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.05.18.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7183–7192, doi: 10.1029/2000JD900719.
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (12): 2317–2330, doi: 10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.
- 王辉, 刘娜, 李本霞, 等. 2014. 海洋可预报性和集合预报研究综述 [J]. *地球科学进展*, 29 (11): 1212–1225. Wang Hui, Liu Na, Li Benxia, et al. 2014. An overview of ocean predictability and ocean ensemble forecast [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 29 (11): 1212–1225, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.11.1212.
- 王敏, 李晓莉, 范广洲, 等. 2012. 区域集合预报系统 2 m 温度预报的校准技术 [J]. *应用气象学报*, 23 (4): 395–401. Wang Min, Li Xiaoli, Fan Guangzhou, et al. 2012. Calibrating 2 m temperature forecast for the regional ensemble prediction system at NMC [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 23 (4): 395–401.
- 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 2013. 集合—变分数据同化方法的发展与应用 [J]. *地球科学进展*, 28 (6): 648–656. Xiong Chunhui, Zhang Lifeng, Guan Jiping, et al. 2013. Development and application of ensemble-variational data assimilation methods [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 28 (6): 648–656, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2013.06.0648.
- 赵琳娜, 吴昊, 田付友, 等. 2010. 基于 TIGGE 资料的流域概率性降水预报评估 [J]. *气象*, 36 (7): 133–142. Zhao Linna, Wu Hao, Tian Fuyou, et al. 2010. Assessment of probabilistic precipitation forecasts for the Huaihe basin using TIGGE data [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 36 (7): 133–142.
- 郑飞, 朱江, 王慧. 2007. ENSO 集合预报系统的检验评价 [J]. *气候与环境研究*, 12 (5): 587–594. Zheng Fei, Zhu Jiang, Wang Hui. 2007. The verifications for ENSO ensemble prediction system [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (5): 587–594, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2007.05.001.