

张海鹏, 智协飞, 吉璐莹. 中国区域降水偏差订正的初步研究. 气象科学, 2020, 40(4): 467-474.

ZHANG Haipeng, ZHI Xiefei, JI Luying. A preliminary study on calibration in precipitation forecast over China. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(4): 467-474.

中国区域降水偏差订正的初步研究

张海鹏¹ 智协飞^{1,2} 吉璐莹¹

(1 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;

2 南京大气科学联合研究中心, 南京 210008)

摘要 基于中国气象局公共气象服务中心提供的降水预报资料, 利用频率匹配法和阈值法对2015年全年的降水预报进行偏差订正并对订正后的结果进行检验。结果表明: (1) 偏差订正可显著减少集成系统降水预报的小雨空报现象, 改善“有雨或无雨”的定性预报性能, 提高集成系统的晴雨预报准确率。(2) 订正后降水量级大小更接近实况降水, 并且集成系统预报的平均绝对误差和面积偏差(干偏差或湿偏差)均有所降低。(3) 偏差订正对降水预报的改善程度与系统本身预报性能有关, 系统本身预报误差越大, 订正效果越好。

关键词 偏差订正; 降水预报; 频率匹配法; 阈值法; 降水检验

分类号: P456

doi: 10.3969/2019jms.0022

文献标识码: A

A preliminary study on calibration in precipitation forecast over China

ZHANG Haipeng¹ ZHI Xiefei^{1,2} JI Luying¹

(1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2 Nanjing Joint Center for Atmospheric Research, Nanjing 210008, China)

Abstract Based on the rainfall data taken from the Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration (CMA), the calibration of the precipitation forecast is performed by using Frequency Matching Method (FMM) and the threshold method. Then the performance of calibration is evaluated by Mean Absolute Error (MAE), Test Score (TS), etc. The results in the whole 2015 show that: (1) the calibration can significantly reduce the occurrence of false alarms of light rain and improve the qualitative forecast for a “rain or no rain” event. (2) The calibrated precipitation forecasts are much closer to the observation, and the MAE and area bias (dry bias or wet bias) of the ensemble system are also greatly reduced. (3) The improvement by the calibration method is related to the forecasting performance of the ensemble system itself. The greater the forecast errors, the better the calibrated forecast skill.

Key words calibration; precipitation forecast; frequency matching method; threshold; precipitation verification

引言

随着数值天气预报的不断发展, 数值预报产品

在预报业务中越来越重要^[1]。然而由于初始场及数值模式本身具有不确定性, 数值预报产品也不可避免地存在误差。因此, 通常会使用一些统计后处

收稿日期(Received): 2019-01-04; 修改稿日期(Revised): 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41575104); NJCAR 重点项目(NJCAR2016ZD04)

通信作者(Corresponding author): 智协飞(ZHI Xiefei). zhi@nuist.edu.cn

理技术对数值预报产品进行偏差订正,得到预报技巧更高的产品。数值预报技术的不断发展推动了释用技术的改良发展,动力—统计预报方法如经典回归、完全预报法(Perfect Prognostic, PP)和模式统计输出法(Model Output Statistics, MOS)等应用最为广泛。诸多国内学者对统计释用技术进行了研究,显著提高了数值预报产品的预报技巧^[2-41]。降水预报对预防、减轻气象灾害以及管理水资源至关重要,因此针对降水的数值预报释用技术得到了极大发展^[12-15]。Ebert^[16]提出“频率匹配”方法来改善集合平均导致的小量级降水区扩大和大量级降水区缩小的问题。在此基础上,国内外学者对此方法进行了广泛应用和改良,李莉等^[17]利用频率匹配法对T213模式的降水预报产品进行订正,明显改善了T213模式的降水预报性能。FANG, et al^[18]针对台风引起的台湾地区降水开展频率匹配订正研究,显著地减小了模式的降水预报偏差。ZHU, et al^[19]基于频率匹配思想改进了美国国家环境预报中心(NCEP)全球集合预报系统(Global Ensemble Forecasting System, GEFS)的降水预报。李俊等^[20]针对AREM模式降水开展了偏差订正试验,订正后的降水预报与实况降水更接近。李俊等^[21]采用频率匹配法针对降水的集合预报进行订正,改善集合平均预报中小量级降水偏多的问题,同时也能提高大量级降水的强度。CHENG, et al^[22]对水电行业的降水预报开展了统计降尺度研究,利用频率匹配法提高了中期降水预报的预报技巧,大大减少了小雨的空报率与大雨及大雨以上的漏报率。智协飞等^[23]利用阈值法对降水的统计降尺度预报结果进行二次订正,减少了小雨的空报现象。由于在各个空间格点上对降水进行单独订正,有可能破坏降水场的空间相关性和时间连续性,王姝苏等^[24]利用Schaake Shuffle方法对经过订正的降水场的空间相关性和时间连续性进行重建,取得了明显的改进效果。其他一些统计后处理方法也被成功应用来提高降水预报的准确性,例如Hamill, et al^[25]和Greybush, et al^[26]对不同降水类型和天气形势分别进行订正,提高了降水落区预报的准确性。YUAN, et al^[27]针对天气形势的系统预报误差改进了降水订正方法,使得降水落区预报和实况更加接近。Hamill, et al^[28]通过集合降水的相对频率生成降水概率,提高了降水的预报准确率。

中国气象局公共气象服务中心的降水预报产品中小雨空报现象十分严重,尤其是在降水较少的

北方冬季,小雨空报更为明显,严重影响了晴雨预报性能。以往的研究多基于模式格点降水开展,针对站点降水的订正研究较少,本文将基于我国范围内的站点对降水进行偏差订正。

1 资料和方法

1.1 资料和模式偏差

基于中国气象局公共气象服务中心提供的多模式集成预报产品,此产品集成了美国国家环境预报中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)、日本气象厅全球谱模式(Japan Meteorological Agency-Global Spectral Model, JMA-GSM)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)和中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)的GRAPES、T639等模式预报资料,包括地表气温、最高气温、最低气温、降水、风速、风向、云量、天气现象和相对湿度等要素的站点预报。

本文选取2015年1月1日—12月16日集成系统每日00时(世界时,下同)起报的中国2603个站点1~7 d(24~168 h)日降水预报资料,同时以这些站点的实况降水作为对照,时间长度为2015年1月2日—12月31日。以下的偏差订正工作均基于站点进行。

图1给出了24 h各量级降水预报和实况累积频率,可以看出,各量级降水频率均高于实况,湿偏差较大,不仅存在较多空报的小量级降水,而且大量级降水也有一定程度的湿偏差,降水预报的准确性较低。

1.2 偏差订正方法

偏差订正分为两步,首先对原始预报进行频率匹配订正,再对频率匹配后的结果采用阈值法进行二次订正,得到最后的偏差订正结果。

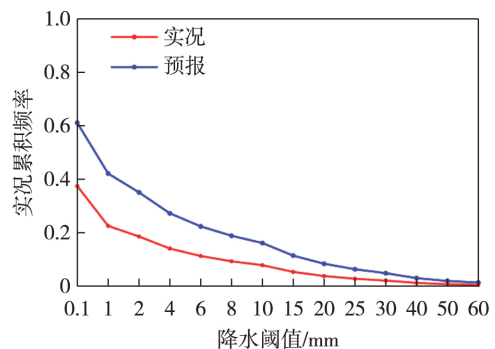


图1 24 h 预报时效不同降水阈值的预报和实况累积频率
Fig.1 Precipitation cumulative frequencies over different precipitation thresholds with the lead time of 24 h

1.2.1 频率匹配法

频率匹配法的原理是调整各量级降水的预报频率与实况频率相当,即计算不同阈值降水的订正系数进行偏差订正。在训练期对某个区域前期的预报和实况降水频率进行计算,累积频率会随不同预报时效和不同降水量级而变化,因此本文对 24~168 h 预报的不同降水阈值分别进行偏差订正。预报和实况降水的频率由公式(1)计算得到:

$$F_{re} = \frac{\sum_{i=1}^{20} B_i}{\sum_{i=1}^{20} N_i} \quad (1)$$

式中: F_{re} 是达到某个阈值的降水在训练期出现的频率; B_i 是达到某个阈值的降水在训练期每天出现的总站数; N_i 是训练期每天的有效总站数。为了得到充足的样本数,选取过去 20 d 作为计算降水频率的训练期长度。考虑到不同地区降水特征差别较大,临近地区降水特征较为一致。参照文献[29]将我国分为 6 个子区域,分别为西北(NW)、西南(SW)、东北(NE)、华北(NC)、长江中下游(YZ)和东南(SE),如图 2 所示。在每个子区域中分别计算 0.1、1、2、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60 mm 共 14 个量级降水的预报和累积观测频率,将观测频率作为参考频率计算得到订正系数。

本文采用一种简化的频率匹配方案,将实况频率与预报频率的比值作为不同量级降水的订正系数,通过线性插值得到所有降水量的订正系数,将所有站点的降水预报乘以相对应的订正系数,就可完成频率匹配订正。

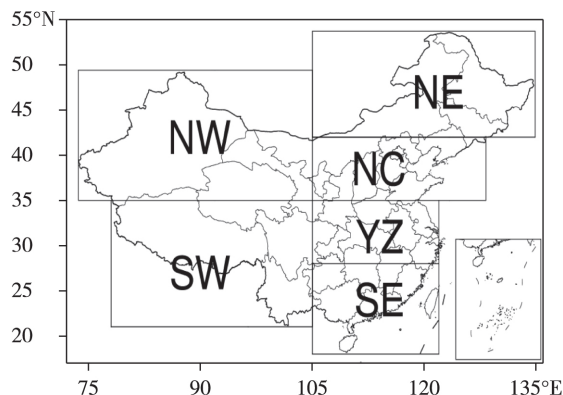


图 2 利用频率匹配法对降水订正的分区

Fig.2 Area partition for the precipitation calibration using frequency matching method

1.2.2 基于“最优 TS 评分”的阈值法

$$F = 0, \text{ 当 } F < F_0 \quad (2)$$

智协飞等^[23]对 TIGGE 资料集 4 个中心 2011—2013 年夏季日降水量集合预报资料进行分级回归统计降尺度研究,并且对降尺度预报结果利用阈值

法进行二次订正,能大大减少小雨的空报现象。本文对频率匹配处理后的结果再通过阈值法进行二次订正,进一步消除小雨空报现象,原理如公式(2)。在训练期 F 为预报降水, F_0 为 0.1~2 mm 间隔 0.1 mm 的一组阈值,对训练期内全国站点分别基于不同阈值进行消空处理,并计算 0.1 mm 及以上降水的 TS 评分得到一组阈值—评分序列,当 TS 评分达到最高时,取该阈值作为预报期的消空阈值 F_0 。在预报期,当降水预报数值小于 F_0 时,将该预报值修正为 0。如图 3 所示,当 F_0 取 0.7 mm 时,训练期整体 TS 评分达到最大值,那么在预报期采用 0.7 mm 作为消空阈值进行消空处理。

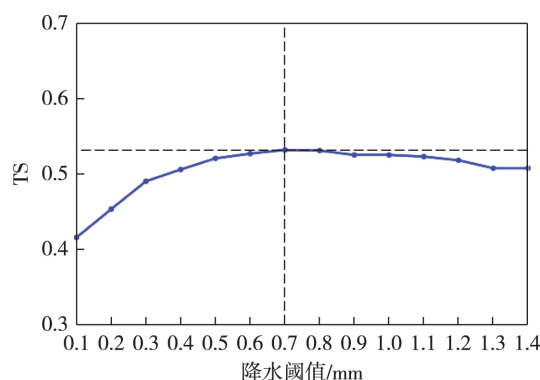


图 3 训练期各消空阈值对应的 TS 评分

Fig.3 The TS score corresponding to each of the elimination thresholds in the training period

1.3 评估检验方法

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \quad (3)$$

$$\text{空报率} = \frac{NB}{NA + NB} \quad (4)$$

$$\text{漏报率} = \frac{NC}{NA + NC} \quad (5)$$

$$\text{晴雨预报准确率} = \frac{NA + ND}{NA + NB + NC + ND} \quad (6)$$

其中: NA 代表降水预报正确的站点数,即预报和实况均出现达到某量级的降水; NB 为空报站点数,即预报出现达到某量级降水而实况没有出现; NC 为漏报站点数,即实况出现达到某量级降水而预报没有出现; ND 为预报和实况均无降水的站点数。TS 评分和晴雨预报准确率越高表示预报效果越好。

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i - O_i| \quad (7)$$

其中: MAE: 直观地反映预报值与实况值之间的偏离情况; n 为站点数; F_i 和 O_i 分别为第 i 个站点降

水的预报值和实况值。

$$\text{面积偏差} = \frac{F}{O} - 1. \quad (8)$$

其中: F 和 O 分别为预报和观测达到某量级降水的站点数, 面积偏差 >0 , $=0$, <0 分别表示湿偏差, 无偏差和干偏差。

2 降水预报偏差订正试验

利用以上偏差订正方法对全国 2 603 个站点 24~168 h 降水预报进行逐时效订正, 采用滑动训练期, 即将固定长度为 20 d 的训练期逐日向后滑动, 每次只对距离训练期最近的 1 d 进行预报。对预报期 330 d 整体的订正结果进行评估分析。

选取夏季和秋季各一个月的结果作为分析样本, 图 4a、b 给出了全国所有站点预报和实况平均日降水量的逐日演变, 二者变化趋势较为一致, 即集成预报可以正确反映降水过程的变化。6 月的日降水量普遍高于 11 月(图 4a、b), 因为夏季引发强降水的天气系统相比秋末更活跃, 从而导致大雨甚至暴雨次数增多。同时 6 月的 24 h 降水预报平均绝对误差范围为 4.9~12.1 mm, 在大多数时间内比 11

月误差高, 因为大量级降水出现次数增加并且预报难度增大, 预报误差也随之增大(图 4c、d)。

偏差订正显著改善了 6 月和 11 月的降水强度, 并且降低了预报误差。偏差订正后 6 月和 11 月平均日降水量显著减小, 均更接近实况降水(图 4a、b)。11 月平均日降水量降低幅度不如 6 月, 但订正后预报较 6 月更接近实况。偏差订正后 6 月和 11 月的日平均绝对误差均有所改善, 6 月改善效果好于 11 月, 6 月最高可减小 3.3 mm, 11 月最高可减小 1.9 mm。并且偏差订正对于预报平均绝对误差越高的日期改善效果越好, 如 11 月 3—6 日, 11 月 25 日和 11 月 28 日, 而预报平均绝对误差较低的日期, 偏差订正效果则没有那么明显。

24~168 h 预报订正前后的小雨、中雨、大雨和暴雨 TS 评分对比如图 5 所示, 小雨量级的改善效果最好, 24 h 预报 TS 评分提高最大, 达 0.05, 中雨量级 TS 评分在 96 h、120 h 和 168 h 预报订正后比订正前略有降低, 中雨和小雨量级的 TS 评分增长幅度随预报时效的增加而减小。7 个时效预报订正后大雨量级 TS 评分提高幅度基本一致, 约为 0.01, 暴雨量级则是在后 4 个预报时效改善效果好于前 3 个

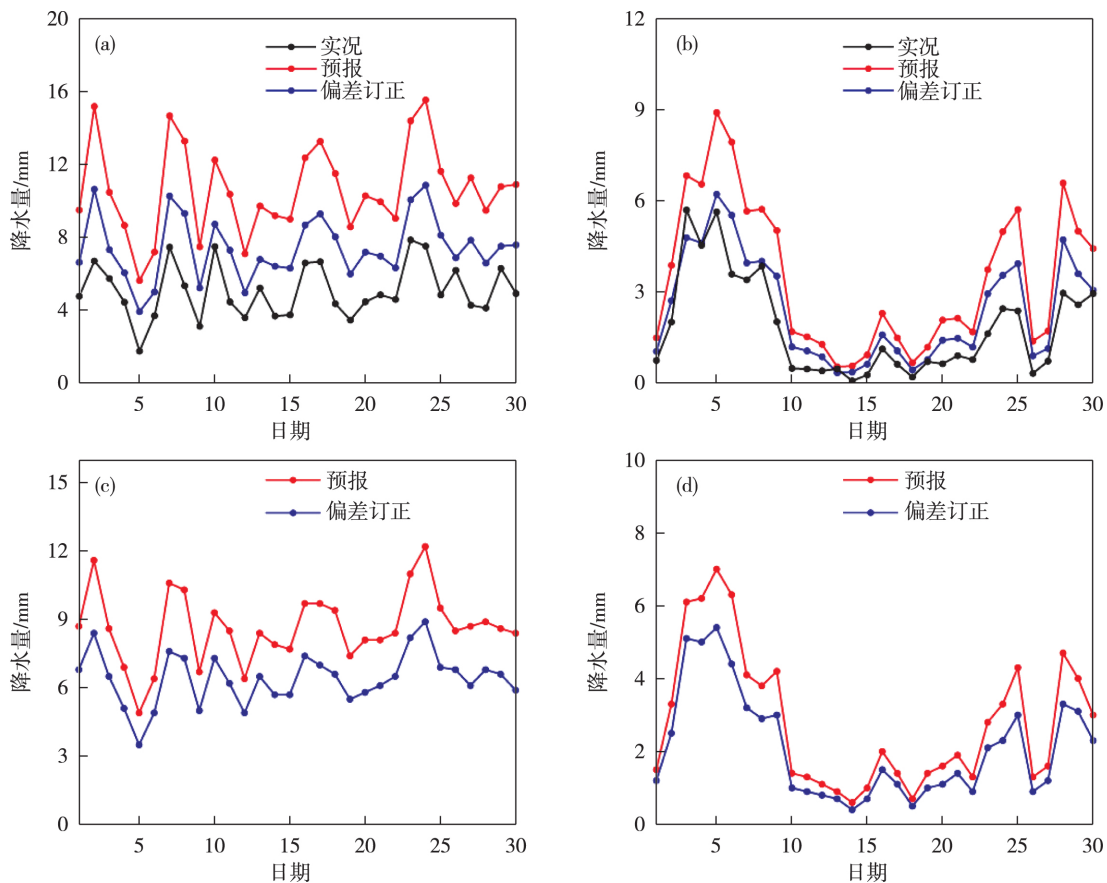


图 4 24 h 预报订正前后的日降水量和平均绝对误差随时间的变化: (a、c) 6 月; (b、d) 11 月
Fig.4 The daily precipitation intensity and MAE of 24 h forecast with and without calibration: (a、c) June; (b、d) November

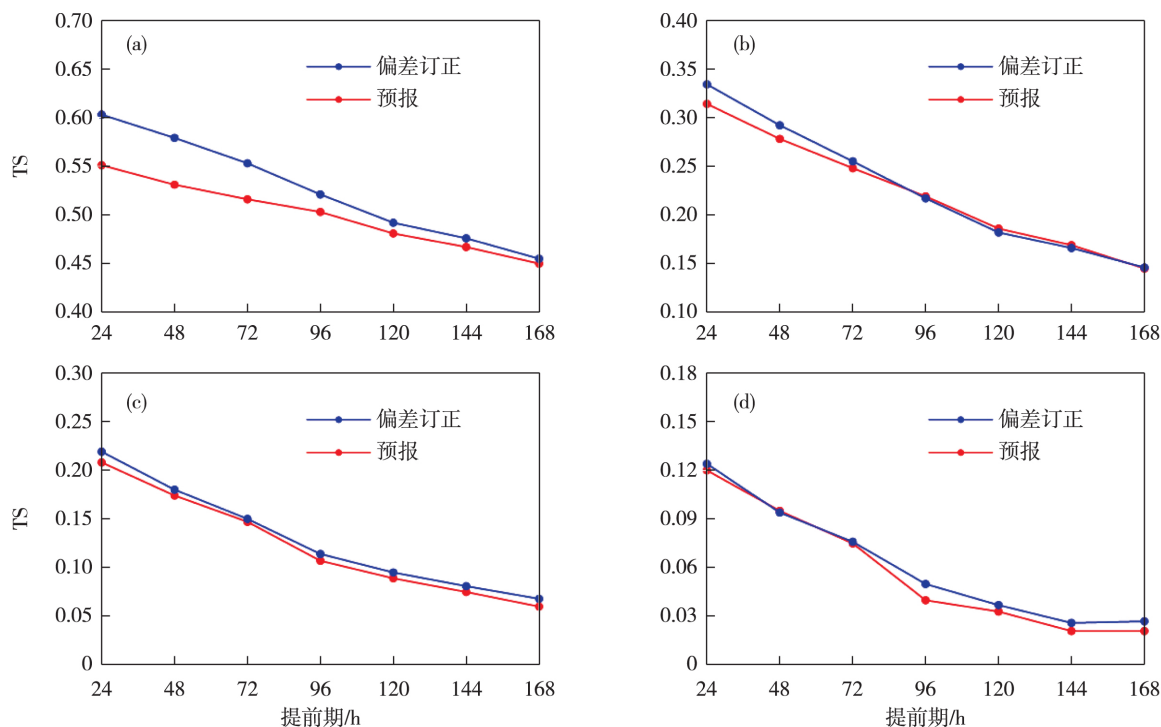


图5 24~168 h 预报偏差订正前后各量级降水 TS 评分:

(a) 小雨; (b) 中雨; (c) 大雨; (d) 暴雨

Fig.5 TS of various precipitation thresholds of 24—168 h forecasts with and without calibration:

(a) light rain; (b) moderate rain; (c) heavy rain; (d) rainstorm

预报时效。

晴雨预报准确率是衡量模式预报有无降水是否准确的可靠指标,与小雨空报现象密切相关。偏差订正后 24~168 h 预报的小雨空报率都有显著降低,24 h 预报降低最大达 12.4%,并且空报的改善幅度随预报时效而减小(图 6a)。在小雨空报率明显降低的基础上,图 6b 表明各个预报时效的晴雨预报准确率也有大幅度的提高,提高了 4%~8.6%,很大程度上提高了集成预报的预报性能,而提高降水预报的晴雨预报准确率对气象台站的业务预报很

有意义。

选取单站预报进一步说明偏差订正对小雨空报的消除作用,图 7 给出了位于东北地区(40.7°N, 124.8°E)的站点在 11 月的 24 h 日降水量预报随时间变化,订正前预报降水较实况降水均偏大,系统预报湿偏差较严重,尤其在 11 月 11—15 日集成系统均预报了小雨,而实况则是无雨,虽然预报误差很小,但空报的降水严重影响了晴雨预报准确率,降低了集成系统的预报性能。订正后的降水预报不但在量级上更接近实况,如 11 月 7 日、16 日和 29

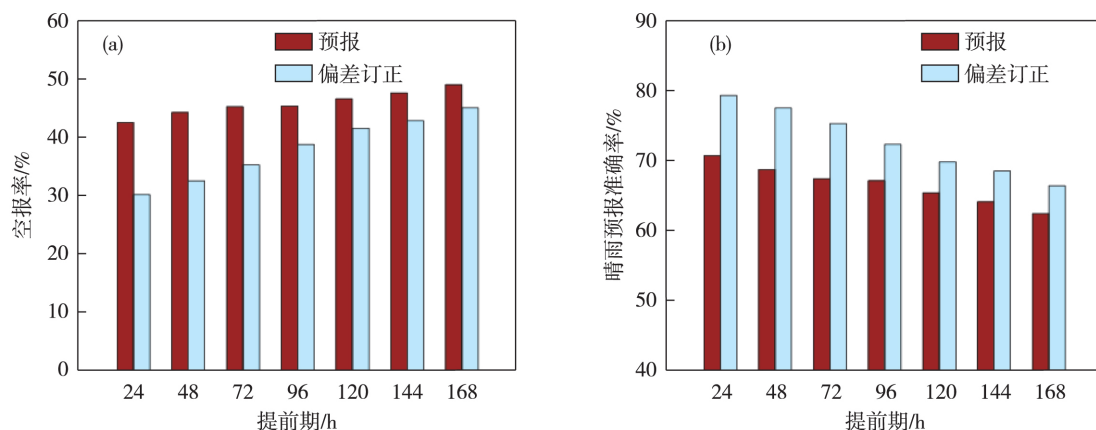


图6 偏差订正对晴雨预报性能的影响: (a) 小雨空报率; (b) 晴雨预报准确率

Fig.6 The impact of the precipitation calibration on the forecast skill: (a) false alarm rate of light rain; (b) event or none-event forecast accuracy

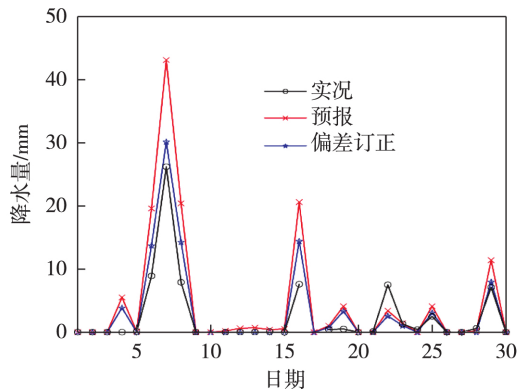


图7 东北某站点(40.7°N, 124.8°E)在11月的日降水量随时间演变

Fig.7 The daily precipitation at a station (40.7°N, 124.8°E) in Northeast China in November

日的预报,而且能明显减少空报现象,11月11—15日的预报经过订正后均消去了空报的降水量。

图8给出了24~168 h预报订正前后各量级降水的面积偏差变化,24~72 h预报的小雨、中雨、大雨和暴雨量级降水均为湿偏差,且偏差较大,并且量级越大,湿偏差越大。偏差订正之后,4个量级降水湿偏差均显著减小,25 mm及以上的降水改善效果要好于25 mm以下的降水。而96~168 h预报的面积偏差与24~72 h预报相比整体较小,并且25 mm及以上的降水为干偏差,偏差订正使得小量级降水的湿偏差减小,25 mm及以上的降水干偏差也有所降低,有效减少了大量级降水的漏报现象。偏

差订正就是通过调整不同量级降水的频率来减少小量级降水的面积,增大大量级降水的面积,从而达到改善预报的效果。

另外,对比6个区域各自的预报效果可知偏差订正在各区域均有较好的改进作用,在每个区域中通过实际的降水频率来订正预报,而不是在整个中国区域计算实况降水频率,避免了全国的降水频率在各区域内不适用的问题。在西北和西南地区,观测站点较稀疏,同时降水的次数较少,导致偏差订正前后无明显差异,这是客观存在的难点。而在其他地区,改进效果较为稳定。整体来看,基于频率匹配法和阈值法的偏差订正可以显著改善24~168 h降水的预报技巧。

3 结论

本文重点阐述了针对站点降水预报的频率匹配法和阈值法基本原理,并对中国气象局公共气象服务中心的降水预报开展偏差订正工作,评估和分析订正后的预报效果,得到如下结论:

(1) 基于频率匹配法和阈值法的降水偏差订正方法可以显著减少小雨的空报现象,并且提高降水预报的晴雨预报准确率,同时能改善24~168 h预报各个量级降水的TS评分。

(2) 频率匹配法通过调整雨量大小来订正降水面积的系统偏差,并使得各量级降水的空报率和漏

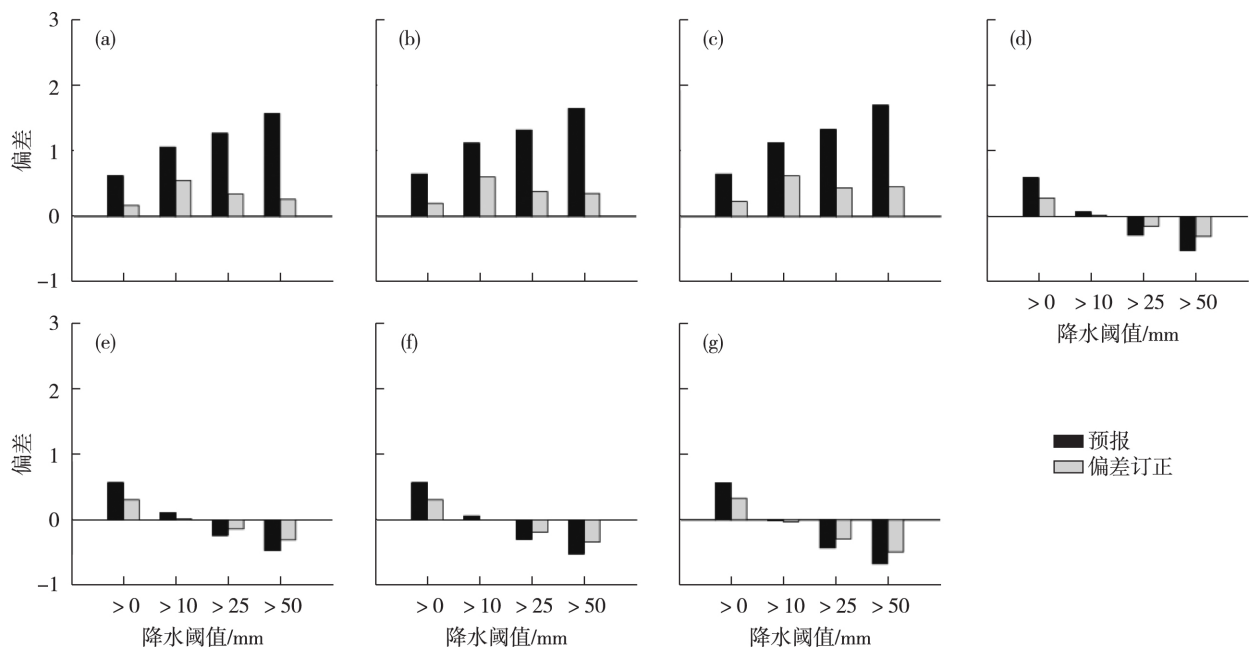


图8 偏差订正对降水预报面积偏差的影响:

(a) 24 h; (b) 48 h; (c) 72 h; (d) 96 h; (e) 120 h; (f) 144 h; (g) 168 h

Fig.8 The impact of the precipitation calibration on the area bias of the precipitation forecast:

(a) 24 h; (b) 48 h; (c) 72 h; (d) 96 h; (e) 120 h; (f) 144 h; (g) 168 h

报率相对均衡。订正后 2015 年 6 月和 11 月的平均日降水量更接近实况,平均绝对误差相比原始预报更小,各量级降水面积偏差更小。单站降水预报的订正结果可以突出体现对小雨空报现象的改善。

(3) 不同时段降水预报经过偏差订正有不同程度的改善,并且改善程度与集成系统本身的预报效果有关。系统本身预报较准确,偏差订正起到的作用就相对较小;反之,系统本身空报现象越严重,偏差订正对预报的改进效果就越明显。

选取固定训练期长度为 20 d,分别计算全国 6 个子区域的订正系数,但未针对每个子区域进行最优训练期调试。本文虽然选取了较长时段的降水资料进行偏差订正试验,但所取样本长度仍然有限,不能保证对于所有时间的预报都能起到较好的订正效果,后续研究将利用更多的资料进行批量试验和评估。

参 考 文 献

- [1] 杜钧,康志明. 天气预报中不确定性问题的调查分析. 气象科技进展, 2014, 4(1): 58-67.
DU Jun, KANG Zhiming. A survey on forecasters' view about uncertainty in weather forecasts. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2014, 4(1): 58-67.
- [2] 任宏利,丑纪范. 统计-动力相结合的相似误差订正法. 气象学报, 2005, 63(6): 988-993.
REN Hongli, CHOU Jifan. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2005, 63(6): 988-993.
- [3] 马清,龚建东,李莉,等. 超级集合预报的误差订正与集成研究. 气象, 2008, 34(3): 42-48.
MA Qing, GONG Jiandong, LI Li, et al. Study of bias-correction and consensus in regional multi-model super-ensemble forecast. Meteorological Monthly (in Chinese), 2008, 34(3): 42-48.
- [4] 林春泽,智协飞,韩艳,等. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报. 应用气象学报, 2009, 20(6): 706-712.
LIN Chunze, ZHI Xefei, HAN Yan, et al. Multi-model superensemble forecasts of the surface temperature using the TIGGE data. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2009, 20(6): 706-712.
- [5] 智协飞,林春泽,白永清,等. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报. 气象科学, 2009, 29(5): 569-574.
ZHI Xefei, LIN Chunze, BAI Yongqing, et al. Superensemble forecasts of the surface temperature in Northern Hemisphere middle latitudes. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2009, 29(5): 569-574.
- [6] 陈朝平,冯汉中,陈静. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用. 气象, 2010, 36(5): 32-39.
CHEN Chaoping, FENG Hanzhong, CHEN Jing. Application of Sichuan heavy rainfall ensemble prediction probability products based on Bayesian method. Meteorological Monthly (in Chinese), 2010, 36(5): 32-39.
- [7] 陈法敬,矫梅燕,陈静. 一种温度集合预报产品释用方法的初步研究. 气象, 2011, 37(1): 14-20.
CHEN Fajing, JIAO Haiyan, CHEN Jing. A new scheme of calibration of ensemble forecast products based on Bayesian processor of output and its study results for temperature prediction. Meteorological Monthly (in Chinese), 2011, 37(1): 14-20.
- [8] 李莉,李应林,田华,等. T213 全球集合预报系统性误差订正研究. 气象, 2011, 37(1): 31-38.
LI Li, LI Yinglin, TIAN Hua, et al. Study of bias-correction in T213 global ensemble forecast. Meteorological Monthly (in Chinese), 2011, 37(1): 31-38.
- [9] 陈良吕,陈静,陈德辉,等. 基于 T213 集合预报的延伸期产品释用方法及初步试验. 气象, 2014, 40(11): 1293-1301.
CHEN Liangyu, CHEN Jing, CHEN Dehui, et al. Interpretation method of extended range forecast product based on T213 EPS and the preliminary experiment. Meteorological Monthly (in Chinese), 2014, 40(11): 1293-1301.
- [10] 智协飞,季晓东,张璟,等. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报. 大气科学学报, 2013, 36(3): 257-266.
ZHI Xefei, JI Xiaodong, ZHANG Jing, et al. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2013, 36(3): 257-266.
- [11] 智协飞,孙晶,周文友. 2009 年夏季西太平洋台风的集合预报和多模式集成预报试验. 大气科学学报, 2015, 38(5): 633-640.
ZHI Xefei, SUN Jing, ZHOU Wenyue. Ensemble and multimodel ensemble forecasts of western pacific typhoons during summer 2009. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2015, 38(5): 633-640.
- [12] Mascaro G, Vivoni E R, Deidda R. Implications of ensemble quantitative precipitation forecast errors on distributed stream flow forecasting. J. Hydrometeorol., 2010, 11(1): 69-86.
- [13] Brown J D, Seo D J, DU J. Verification of precipitation forecasts from NCEP's short-range ensemble forecast (SREF) system with reference to ensemble streamflow prediction using lumped hydrologic models. J. Hydrometeorol., 2012, 13(3): 808-836.
- [14] Marty R, Zin I, Obled C. Sensitivity of hydrological ensemble forecasts to different sources and temporal resolutions of probabilistic quantitative precipitation forecasts: flash flood case studies in the Cévennes-Vivarais region (Southern France). Hydrol. Proc., 2013, 27(1): 33-44.
- [15] Demargne J, WU L, Regonda S K, et al. The science of NOAA's operational hydrologic ensemble forecast service. Bull. Am. Meteor. Soc., 2015, 95(1): 79-98.
- [16] Ebert E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Mon. Wea. Rev.,

- 2001, 129(10): 2461-2479.
- [17] 李莉, 朱跃建. T213 降水预报订正系统的建立与研究. 应用气象学报, 2006, 17(S1): 130-134.
- LI Li, ZHU Yuejian. The establishment and research of T213 precipitation calibration system. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 2006, 17(S1): 130-134.
- [18] FANG Xingqin, KUO Y H. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique. Mon. Wea. Rev., 2013, 141(11): 3908-3932.
- [19] ZHU Yuejian, LUO Yan. Precipitation calibration based on the frequency-matching method. Wea. Forecasting, 2015, 30(5): 1109-1124.
- [20] 李俊, 杜钧, 陈超君. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析. 气象, 2014, 40(5): 580-588.
- LI Jun, DU Jun, CHEN Chaojun. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction. Meteorological Monthly (in Chinese), 2014, 40(5): 580-588.
- [21] 李俊, 杜钧, 陈超君. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 2015, 41(6): 674-684.
- LI Jun, DU Jun, CHEN Chaojun. Applications of “Frequency-Matching” method to ensemble precipitation forecasts. Meteorological Monthly (in Chinese), 2015, 41(6): 674-684.
- [22] CHENG Xu, CHEN Weidong, ZHI Xiefei, et al. Statistical downscaling precipitation forecast for hydropower industry and its calibration using frequency matching method//Proceedings of 2018 3rd International Conference on Computational Modeling, Simulation and Applied Mathematics, Wuhan 2018.
- [23] 智协飞, 王姝苏, 周红梅, 等. 我国地面降水的分级回归统计降尺度预报研究. 大气科学学报, 2016, 39(3): 329-338.
- ZHI Xiefei, WANG Shusu, ZHOU Hongmei, et al. Statistical downscaling of precipitation forecasting using categorized rainfall regression. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2016, 39(3): 329-338.
- [24] 王姝苏, 智协飞, 俞剑蔚, 等. 降水的统计降尺度预报及其空间相关性和时间连续性重建. 大气科学学报, 2018, 41(1): 36-45.
- WANG Shusu, ZHI Xiefei, YU Jianwei, et al. Statistical downscaling forecast and reconstruction of spatial and temporal correlation of the precipitation. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2018, 41(1): 36-45.
- [25] Hamill T M, Whitaker J S, Mullen S L. Reforecasts: an important dataset for improving weather predictions. Bull. Am. Meteor. Soc., 2006, 87(1): 33-46.
- [26] Greybush S J, Haupt S E, Young G S. The regime dependence of optimally weighted ensemble model consensus forecasts of surface temperature. Wea. Forecasting, 2008, 23(6): 1146-1161.
- [27] YUAN Huiling, GAO Xiaogang, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. Wea. Forecasting, 2007, 22(6): 1287-1303.
- [28] Hamill T M, Engle E, Myrick D, et al. The U. S. national blend of models for statistical postprocessing of probability of precipitation and deterministic precipitation amount. Mon. Wea. Rev., 2017, 145(9): 3441-3463.
- [29] ZOU Liwei, ZHOU Tianjun. Near future (2016-40) summer precipitation changes over China as projected by a Regional Climate Model (RCM) under the RCP8.5 emissions scenario: comparison between RCM downscaling and the driving GCM. Adv. Atmos. Sci., 2013, 30(3): 806-818.