

王丹,王建鹏,白庆梅,等,2019. 递减平均法与一元线性回归法对 ECMWF 温度预报订正能力对比[J]. 气象,45(9):1310-1321. Wang D, Wang J P, Bai Q M, et al, 2019. Comparative correction of air temperature forecast from ECMWF Model by the decaying averaging and the simple linear regression methods[J]. Meteor Mon, 45(9):1310-1321(in Chinese).

递减平均法与一元线性回归法对 ECMWF 温度预报订正能力对比*

王 丹¹ 王建鹏² 白庆梅³ 高红燕¹

1 陕西省气象服务中心, 西安 710014

2 陕西省气象台, 西安 710014

3 西安市气象台, 西安 710014

提 要: 基于 ECMWF 细网格模式的定时最高(低)气温预报产品, 针对 2017 年陕西 99 个国家级气象站的日最高(低)气温预报, 检验和比较了递减平均法和一元线性回归法两种方法对气温预报误差的订正效果。结果表明, 两种方法都显著地提高了日最高(低)气温的预报准确率, 随着预报时效的延长, 订正能力逐渐减弱。技巧评分与模式对气温的预报能力有显著的负相关关系, 秦岭及其以南地区的日最高气温预报和秦岭以北地区的日最低气温预报的准确率偏低, 其技巧评分一般超过 40%, 极大值超过 70%。两种方法都有效降低了系统误差, 较小误差范围的站次增多, 较大误差范围的站次减少, 对日最高气温在预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 误差范围的订正能力较为突出, 对日最低气温在预报绝对误差 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 误差范围的订正更有优势。一元线性回归法对日最高气温预报的订正能力略优于递减平均法, 对日最低气温预报的订正能力不及递减平均法, 利用这两种方法对气温预报进行混合订正的效果更佳。

关键词: ECMWF 模式, 日最高(低)气温预报, 误差订正, 递减平均, 一元线性回归

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.011

Comparative Correction of Air Temperature Forecast from ECMWF Model by the Decaying Averaging and the Simple Linear Regression Methods

WANG Dan¹ WANG Jianpeng² BAI Qingmei³ GAO Hongyan¹

1 Shaanxi Meteorological Service Center, Xi'an 710014

2 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

3 Xi'an Meteorological Observatory, Xi'an 710014

Abstract: The decaying averaging and the simple linear regression methods were used to correct air temperature forecast in a fine-mesh grid point forecast system of Shaanxi Meteorological Service. Based on the dataset of daily 2 m maximum and minimum air temperature forecasts of 99 national meteorological stations in Shaanxi Province from ECMWF high resolution model in 2017, the abilities of the two methods to correct temperature prediction errors were analyzed and compared. The results showed that the prediction accuracies of daily 2 m maximum and minimum air temperatures are improved significantly by the two methods, whose correction abilities are gradually weakened with the extension of prediction time. There is a signifi-

* 陕西省自然科学基金项目(2019JM-342)、中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2019-117)和陕西省气象局精细化气象格点预报攻关团队共同资助

2018 年 6 月 13 日收稿; 2019 年 6 月 18 日收修定稿

第一作者: 王丹, 主要从事数值天气预报产品解释应用和气象服务工作. Email: dandan-w@live.cn

通信作者: 王建鹏, 主要从事天气预报与研究. Email: xawjp@163.com

cant negative correlation between accuracy of the temperature forecast and skill-score of the two methods. The accuracies are all low for the daily 2 m maximum air temperature in Qinling Mountains and the area south to it and daily 2 m minimum air temperature in the north to Qinling Mountains, in which the skill-score is usually more than 40% and its maximum value is even larger than 70%. The systematic deficiencies of daily 2 m maximum and minimum air temperature forecasts are effectively reduced. As a result, the frequency with a smaller error range is increased, while the frequency with a larger error range is decreased. More advantages of the two methods are attained when the absolute errors are less than 2°C for daily 2 m maximum air temperature forecast and more than 3°C for daily 2 m minimum air temperature forecast. The ability of the simple linear regression method to correct daily 2 m maximum air temperature forecast is slightly better than that of the decaying averaging method, whose ability to correct daily 2 m minimum air temperature forecast is better than the simple linear regression method. The mixed correction of temperature forecast by the two methods is more effective.

Key words: ECMWF model, daily 2 m maximum (minimum) air temperature forecasts, error correction, decaying averaging, simple linear regression

引言

目前,数值天气预报模式逐渐成为各国气象预报业务机构最重要的技术支撑,并不断向着高时空分辨率方向发展,无论是在时间精度还是空间精度上都有较大提高(陈德辉和薛纪善,2004)。然而无论何等精细的模式,误差总是不可避免,为了提高模式预报对天气预报的指导意义,在使用模式预报结果之前进行适当的误差订正是非常必要的(于海鹏等,2014)。

近年来,国内外学者先后使用递减平均法对模式气温预报误差进行订正,取得了显著效果。递减平均法是通过滞后平均降低误差尺度的自适应(卡尔曼滤波类型)误差订正方法,具有计算量小、自适应等优势,且订正方法不受预报模式、同化系统频繁升级的影响,适合气象业务的实际应用(马旭林等,2015)。该方法被业务化到NCEP全球集合预报系统中,订正效果明显且稳定(Cui et al, 2004), Cui et al (2012)还利用该方法对北美集合预报系统的输出值做统计后处理,获得5 km×5 km的精细化预报产品,并在NCEP的精细化预报中实现业务化。李莉等(2011)、邱学兴等(2012)、马清等(2008)和王丹等(2016)分别利用该方法对国家气象中心的T213集合预报产品、T639集合预报产品、NMCC中尺度集合预报产品和SCMOC指导预报产品进行误差订正研究,订正后各要素预报的系统偏差得到不同程度的改善,对2 m温度预报的订正效果尤其

显著。马旭林等(2015)利用该方法针对集合预报存在的偏差和集合离散度通常偏小的问题进行订正,订正后集合预报的质量、可信度和区分不同天气事件能力的可辨识度都得到了提高。许凤雯等(2016)利用该方法对国家气象中心的定量降水估测产品(QPE)进行订正,订正后的QPE在降水的连续性和量值分布上都较订正前有明显的提高。

一元线性回归法是一种常用的气温序列订正方法(王莹等,2012;王凯等,2015),也被用于模式预报的偏差订正工作(李佰平和智协飞,2012;杨关盈等,2017),具有所需资料少、订正误差小,计算过程简便而又满足业务需求等特点。基于一元线性回归法,吴启树等(2016)以ECMWF模式地面气温为预报因子,设计了多个训练期方案对日最高(低)气温进行预报,显著提高了预报质量。目前,福建、北京、天津、重庆、陕西等多个省(市)的气象部门都采用一元线性回归法对模式的气温预报进行订正,效果显著。

未来几年,从传统的站点预报向格点预报转变是我国天气预报业务改革发展的重要方向(代刊等,2016),面对大量精细格点预报,有必要加强对高分辨率数值模式的格点释用订正技术研究。有关格点预报释用,目前的研究仍然较少。吴乃庚等(2017)和潘留杰等(2017)都利用“站点订正值向格点场传递”的思路对格点预报进行订正,两者的具体技术路线虽然不同,但是都较好地订正了模式的系统误差,前者根据气候分区、地形特点和站点距离等,设计了一套站点向格点映射的方案,将站点上计算的平均误差、平均绝对误差映射到格点上,对格点预报进行

订正;后者将格点上的预报值采用邻近插值法插值到站点上进行订正,再将订正差值通过反距离权重法返回到格点上来订正格点场。可见,实践中站点上的模式预报偏差订正技术研究可以做为格点预报偏差订正技术研究的基础。陕西省气象局精细化格点预报业务系统,采用潘留杰等(2017)的技术路线对格点预报进行订正,其中,气温预报的偏差订正采用递减平均法和一元线性回归法等。本文对这两种方法的气温预报订正能力进行评估和比较,一方面检验这两种方法对陕西地区模式气温预报偏差的订正能力,另一方面为陕西省精细化格点预报业务系统中,如何合理利用这两种方法的气温预报订正产品提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

为了确保观测资料的可靠性,本文测试检验站点为陕西省 99 个国家级气象站。模式数据采用中国气象局下发的 2016 年 11 月 18 日至 2017 年 12 月 31 日 ECMWF 细网格模式的整点地面最高气温和最低气温产品(T_{\max} 和 T_{\min}),每日 08 和 20 时(北京时间)两次,水平分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$,预报时效为 0~144 h 逐 3 h 间隔(过去 3 h 预报)、150~240 h 逐 6 h 间隔(过去 6 h 预报)。08 和 20 时起报的日最高(低)气温预报值分别取 08 时至次日 08 和 20 时至次日 20 时时段内 T_{\max} (T_{\min})的最高(低)值。观测资料采用 2016 年 11 月 18 日至 2017 年 12 月 31 日的 08 时至次日 08 时和 20 时至次日 20 时时段内的日最高(低)气温观测值。先基于以上资料和方法得到日最高(低)气温的预报值和观测值,再利用递减平均法和一元线性回归法对其进行客观订正。

1.2 方法

采用滚动建模方式进行实时训练和预报,训练期为预报日之前 35 d。例如,当要进行 2017 年 1 月 1 日 08 时的 24 h 预报,就以 2016 年 11 月 27 日至 12 月 31 日的预报产品为训练样本建模,而 2017 年 1 月 1 日 08 时的 240 h 预报,其训练样本则为 2016 年 11 月 18 日至 12 月 22 日,依此类推。订正方法包括递减平均法和一元线性回归法,主要针对 2017 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的日最高(低)气温预报进

行订正,并对比检验订正效果。

1.2.1 递减平均法

在一个给定站点上,对于某一预报时效的日最高(低)气温预报,递减平均法的订正原理如下:

$$B(t) = (1 - \omega) \times B(t-1) + \omega \times (F - a) \quad (1)$$

式中, $B(t)$ 表示 08 或者 20 时起报的任意一个站点气温预报(利用双线性插值算法将格点预报值插值到站点)的滞后平均误差, $B(t-1)$ 表示前一日滞后平均误差, ω 表示权重系数, a 、 F 分别表示当日该站点的观测值和预报值, $B(t)$ 和 ω 每日更新两次(08 和 20 时)。

权重系数 ω 决定了近期多长时间段的样本将对当天的预报订正产生影响,直接影响最后的订正结果。前人对 ω 的取值进行了一系列敏感性对比试验,并不断改进,Cui et al(2004)和马清等(2008)选取的 ω 为常值,李莉等(2011)确定的 ω 取值有季节变化,佟华等(2014)分季节和预报时效确定各个观测站的 ω 值。本文采用逐日滚动更新的方式,分预报时效确定各个观测站的 ω 值,即,在一个给定站点上,对于某一预报时效,计算训练期内不同 ω 取值(ω 的取值范围在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^1$,步长间隔为 1×10^{-4})下的平均预报均方根误差,平均预报均方根误差最小值对应的 ω 值即为最优权重系数,不同预报日和不同预报时效的各个观测站存在不同的最优权重系数。

气温预报订正的步骤如下:(1)当 $t=1$ 时实行冷启动,即 $B(t-1)=0$;(2)计算训练期的最优权重系数 ω ;(3)按照式(1)计算滞后平均误差 $B(T)$;(4)重复步骤(3),经过训练期的迭代累加之后,得到的误差已经趋于稳定,并能在一定程度上表征系统误差的情况;(5)当前预报减去最新的滞后平均误差 $B(T)$,得到订正后的预报值。

1.2.2 一元线性回归法

在一个给定站点上,对于某一预报时效的日最高(低)气温预报,通过一元线性回归法在训练期建立如下方程:

$$Y = aX + b \quad (2)$$

式中, X 和 Y 分别为预报值和一元线性回归订正值, a 和 b 分别为回归系数和常数项,通过最小二乘法计算 a 和 b ,每日更新两次(08 和 20 时)。

1.2.3 检验方法

在预报效果检验方面,使用预报误差、平均绝对误差、准确率和预报技巧评分等,具体如下:误差 T_E

$= F_i - O_i$, 平均绝对误差 $T_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|$, 预报准确率 $TT = \frac{N_r}{N} \times 100\%$, 式中 N 是预报的总站(次)数, F_i 是第 i 站(次)的预报值, O_i 是第 i 站(次)的观测值, N_r 是 $|F_i - O_i| \leq 2^\circ\text{C}$ 或者 $|F_i - O_i| \leq 1^\circ\text{C}$ 的预报站(次)数。技巧评分 $SST = \frac{T_{MAEN} - T_{MAEF}}{T_{MAEN}} \times 100\%$, T_{MAEN} 是订正前的日最高(低)气温预报平均绝对误差, T_{MAEF} 是订正后的日最高(低)气温预报平均绝对误差。 $T_{MAEN} - T_{MAEF} > 0$ 表明订正效果为“正效应”, $T_{MAEN} - T_{MAEF} < 0$ 表明订正效果为“负效应”, 将“正效应”中的各单站预报绝对误差降低值求和后取平均, 即得“正效应”产生的预报误差减少值, 同理, 得到“负效应”增加的误差值。“正(负)效应”的预报站(次)数与预报总站(次)数的比值即为正(负)技巧比例, 针对“正(负)效应”的各站(次)预报计算的技巧评分即为相应的平均正(负)技巧评分。

预报技巧评分可以较好地反映预报订正方法的优劣, 但是预报技巧评分是根据所有预报绝对误差的总和计算的, 某个较大的预报误差可能导致整个预报评分大幅的变化, 因此, 笼统地给出所有预报误差的技巧评分难以全面反映方法的优劣(熊敏途, 2017)。为了保证检验结果的可靠性, 在以上检验方

法的基础上, 增加了以准确率为基准, 计算 $T_{MAE} \leq 2^\circ\text{C}$ (1°C) 的正、负技巧比例, 即计算预报绝对误差 $T_{MAE} \leq 2^\circ\text{C}$ (1°C) 的准确率呈上升或下降趋势的站点数比率。具体通过公式 $SSTT_+ = \frac{N_{r+}}{N} \times 100\%$ 和 $SSTT_- = \frac{N_{r-}}{N} \times 100\%$ 来实现。式中: $SSTT_+$ 、 $SSTT_-$ 分别指 $T_{MAE} \leq 2^\circ\text{C}$ (1°C) 的正、负技巧比例, N_{r+} 指订正后的 $T_{MAE} \leq 2^\circ\text{C}$ (1°C) 的准确率呈上升趋势的预报站点数, N_{r-} 指订正后的 $T_{MAE} \leq 2^\circ\text{C}$ (1°C) 的准确率呈下降趋势的预报站点数, N 指预报总站数(99 站)。

2 结果分析

2.1 正(负)订正效果的比较

图 1 给出递减平均法和一元线性回归法对 1~10 d 日最高(低)气温预报的正(负)订正效果。对于日最高气温预报(图 1a~1c), 整体上讲, “正效应”次数(及其引起的绝对误差减少值)大于“负效应”次数(及其引起的绝对误差增加值), 随着预报时效的延长, 两者数值相差逐渐减小, 预报准确率提高幅度逐渐下降; 第 10 d 预报中, “正效应”引起的绝对误

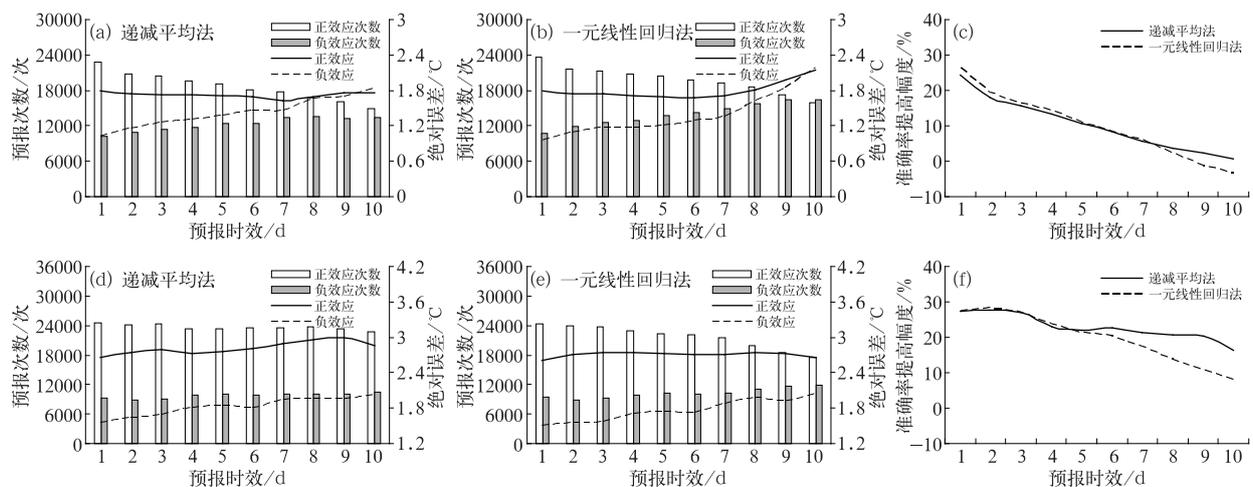


图 1 日最高气温(a, b, c), 日最低气温(d, e, f)递减平均法(a, d)和一元线性回归法(b, e)的“正(负)效应”预报次数、误差增减值以及预报绝对误差 $\leq 2^\circ\text{C}$ 的准确率提高幅度(c, f)

Fig. 1 Frequency, increment and decrement to forecast errors of positive and negative effects for the decaying averaging method (a, d) and the simple linear regression method (b, e) and increment of accuracy with absolute error less than 2°C (c, f) (a, b, c) daily 2 m maximum air temperature, (d, e, f) daily 2 m minimum air temperature

差减少值小于“负效应”引起的绝对误差增加值,一元线性回归法订正后的预报准确率较订正前降低,而递减平均法订正后的预报准确率略高于订正前。对于日最低气温预报(图 1d~1f),在 1~10 d 的预报中,“正效应”次数(及其引起的绝对误差减少值)始终大于“负效应”次数(及其引起的绝对误差增加值),随着预报时效的延长,两者数值相差逐渐减小,预报准确率提高幅度逐渐下降,其中,在第 5~10 d 预报时效一元线性回归法的准确率提高幅度明显低于递减平均法。

整体上讲,递减平均法和一元线性回归法对日最高(低)气温预报有明显的正订正效果(“正效应”次数大于“负效应”次数,预报准确率提高幅度 > 0%),对日最低气温预报的正订正效果比日最高气温预报更突出。比较而言,一元线性回归法对日最高气温预报的订正能力略优于递减平均法,对日最低气温预报的订正能力不及递减平均法。两种方法的订正能力都随着预报时效的延长而减弱,这可能与随着预报时效的延长,模式的预报误差增大,不同预报时效的离散度增加有关(李佰平和智协飞,2012)。

2.2 绝对误差、准确率和技巧评分空间分布

日最高气温未来 1~7 d 的预报中,订正前,秦岭以北大部分地区 $T_{MAE} \leq 3^{\circ}\text{C}$,秦岭及其以南地区 $T_{MAE} \geq 3^{\circ}\text{C}$ (局地 $\geq 5^{\circ}\text{C}$),当预报时效延长至 8~10 d, $T_{MAE} \geq 3^{\circ}\text{C}$ 的面积逐渐扩大到陕西大部分地区;递减平均法和一元线性回归法订正后,明显降低了日最高气温的预报误差,特别是秦岭及其以南地区的 T_{MAE} 较订正前显著减小,在第 1~4 d 预报时效,陕西大部分地区的 $T_{MAE} \leq 2^{\circ}\text{C}$,比较而言,一元线性回归法订正后的 T_{MAE} 略小于递减平均法。从预报技巧来看(图 2),在第 1~4 d 预报时效,递减平均法和一元线性回归法对陕西大部分地区的日最高气温预报为正技巧,其中秦岭及其以南大部分地区的技巧评分一般超过 40%,极大值超过 70%,而在关中部分地区呈现出一 20%~0% 的负技巧,随着预报时效的延长,负技巧面积逐渐扩大,到第 10 d 预报时效,除秦岭山脉周边地区外,陕西大部分地区出现负技巧。

日最低气温预报的 T_{MAE} 与日最高气温预报有较大差异,以秦岭为界,呈现“北高南低”的空间分布。订正前,秦岭以北大部分地区 $T_{MAE} \geq 3^{\circ}\text{C}$,陕北部分地区 $T_{MAE} \geq 5^{\circ}\text{C}$,秦岭及其以南地区 $T_{MAE} \leq$

3°C ;递减平均法和一元线性回归法订正后,明显降低了日最低气温的预报误差,特别是秦岭以北地区的 T_{MAE} 较订正前显著减小,比较而言,一元线性回归法订正后的 T_{MAE} 大于递减平均法。从技巧评分来看(图 3),递减平均法和一元线性回归法对陕西大部分地区的日最低气温预报为正技巧,其中秦岭以北地区为 40%~70% 的正技巧,秦岭及其以南的大部分地区为 40% 以内的正技巧,另外在秦岭及其以南的局部地区呈现出一 20%~0% 的负技巧,随着预报时效的延长,陕西大部分地区的正技巧评分逐渐降低到 50% 以内,但是负技巧面积没有明显扩大。

整体上讲,技巧评分与模式对气温的预报能力有显著的负相关关系,各预报时效日最高(低)气温预报技巧评分与准确率的相关系数在 -0.97~-0.79,通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验。显著正技巧评分出现在预报准确率比较低的地方,负技巧评分出现在预报准确率比较高的地方,对于模式气温预报准确率较高、预报偏差较小的站,如何进一步提高准确率还需要深入的研究。比较而言,一元线性回归法对未来 1~8 d 日最高气温预报的技巧评分略高于递减平均法,对未来 1~10 d 日最低气温预报的技巧评分不及递减平均法。

2.3 不同误差范围准确率的变化特点

图 4 给出了各预报时效中,日最高气温和日最低气温的预报评分正(负)技巧比例、绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C) 的正(负)技巧比例和平均正(负)技巧评分。

日最高气温预报中(图 4a~4d),随着预报时效的延长,递减平均法的预报评分正技巧比例和平均正技巧评分逐渐下降,负技巧比例逐渐上升。递减平均法的正(负)技巧比例为 34%~88% (12%~66%),平均正(负)技巧评分为 10%~35% (-8%~-3%),预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C) 的正技巧比例为 37%~88% (40%~91%),预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C) 的负技巧比例为 8%~60% (9%~54%)。比较而言,预报绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 的正(负)技巧比例较预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的偏高(偏低),并且预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C) 的正技巧比例高于总体评价,说明递减平均法对日最高气温的订正能力在较小误差范围内更突出,特别是在人们关注的预报误差范围内有良好表现。对于一元线性回归法也有相似的特点,而且其正(负)技巧的评分和比例略高(低)于递减平均法。

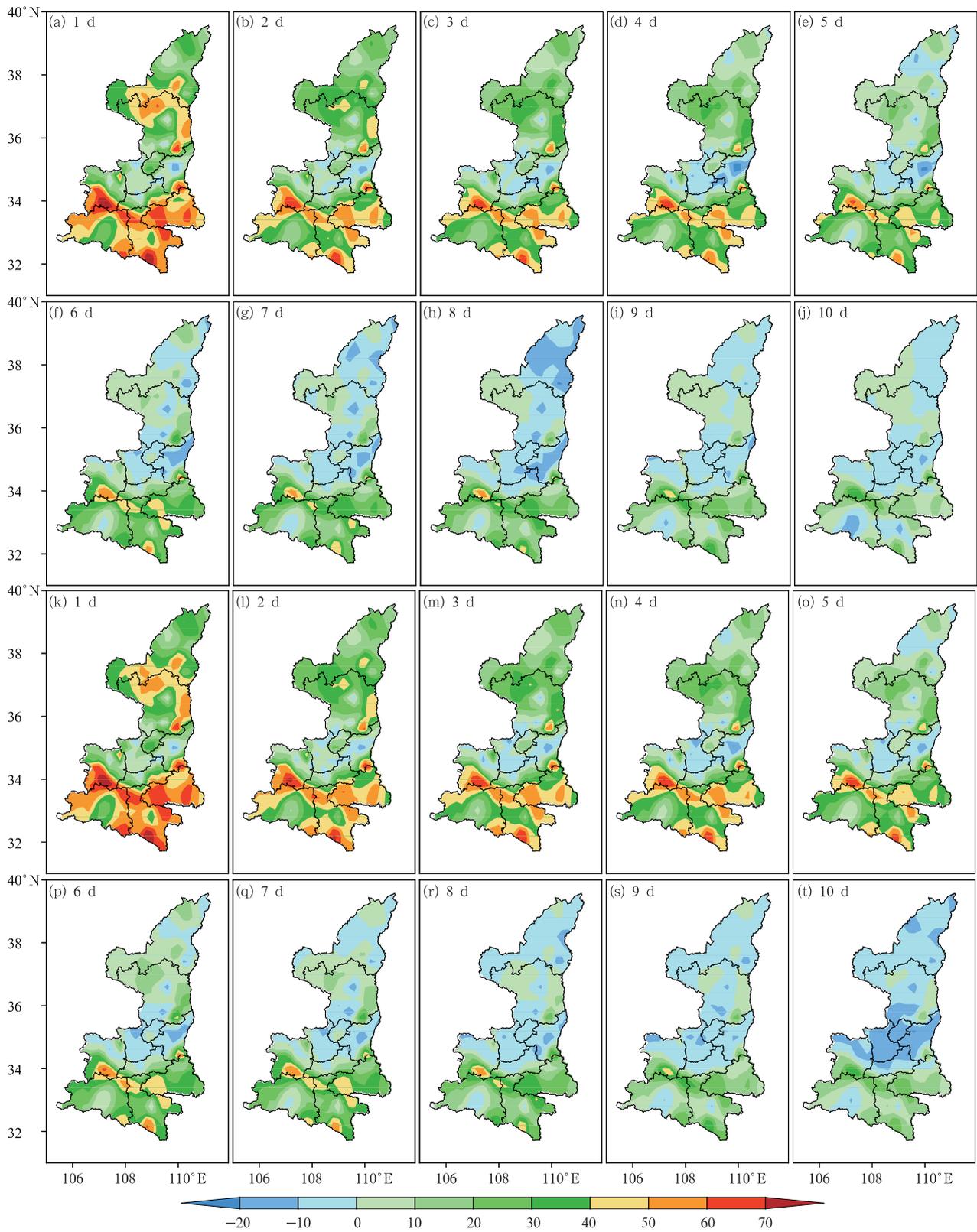


图 2 递减平均法(a~j)和一元线性回归法(k~t)在 1~10 d 日最高气温预报的技巧评分(单位:%)

Fig. 2 Skill-scores of daily 2 m maximum air temperature forecast for the decaying averaging method (a~j) and the simple linear regression method (k~t) during the forecast time of 1-10 days (unit: %)



图 3 同图 2, 但为日最低气温预报的技巧评分

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for skill-scores of daily 2 m minimum air temperature forecast

日最低气温预报(图 4e~4h)在不同误差范围的技巧评分与日最高气温有较大不同, 随着预报时

效的延长, 递减平均法的预报评分正(负)技巧比例整体呈缓慢上升(下降)趋势, 一元线性回归法的预

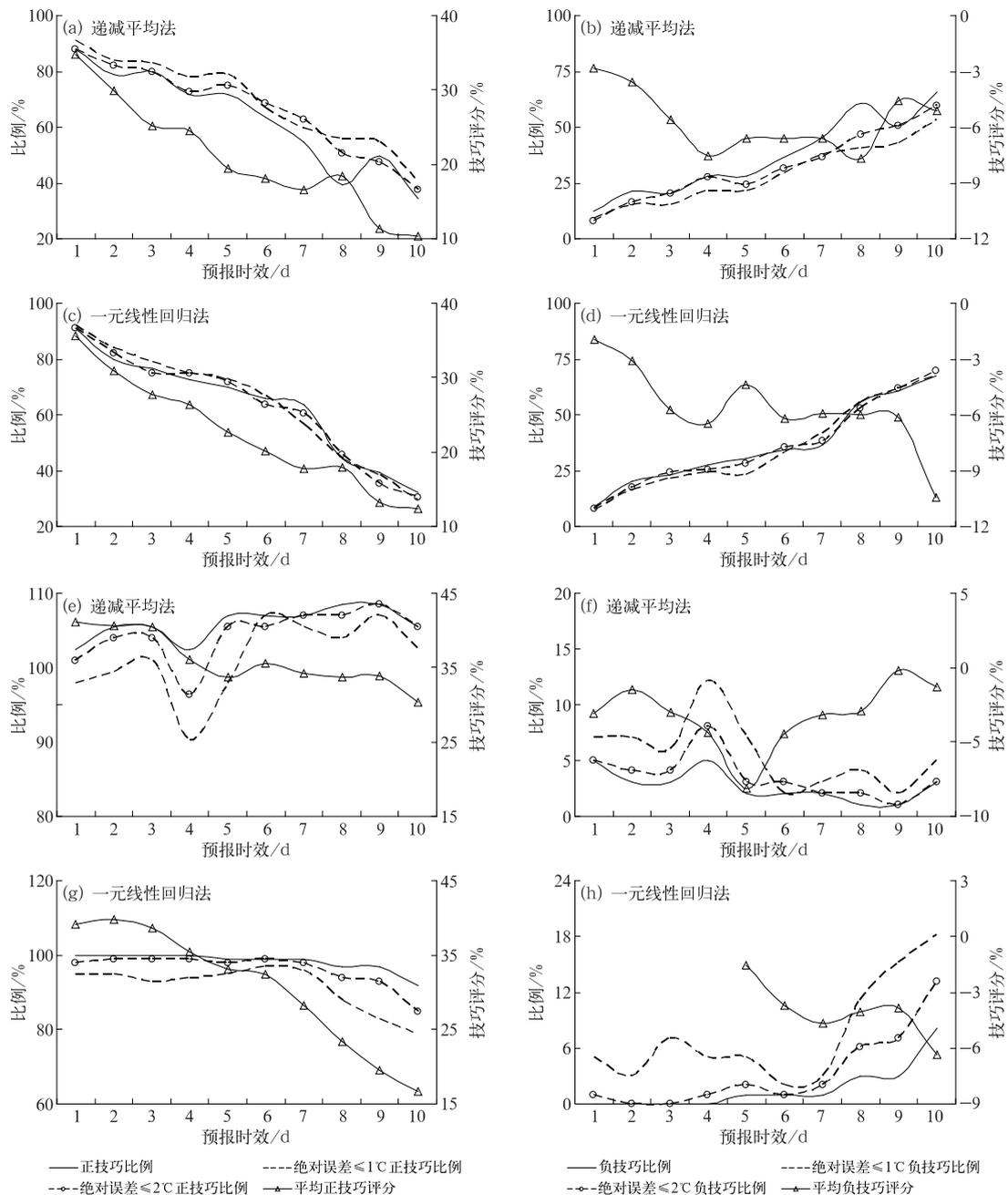


图 4 递减平均法(a,b,e,f)和一元线性回归法(c,d,g,h)在不同误差范围的技巧评分
(a,b,c,d)日最高气温,(e,f,g,h)日最低气温

Fig. 4 Comparisons of skill-scores in different error ranges for the decaying averaging method (a, b, e, f) and the simple linear regression method (c, d, g, h)

(a, b, c, d) daily 2 m maximum air temperature, (e, f, g, h) daily 2 m minimum air temperature

报评分正(负)技巧比例在第 1~4 d 稳定保持在 100%(0%),在第 5 d 之后逐渐下降(上升);两种方法的平均正技巧评分均呈下降趋势,其中递减平均法的走势较平缓,一元线性回归法的走势相对陡峭,特别是在第 8~10 d 预报时效,一元线性回归法对日最低气温预报在较小误差范围的订正能力明显降低。递减平均法和一元线性回归法的正(负)技巧比

例分别为 95%~99%(1%~5%)和 92%~100%(0%~8%),平均正(负)技巧评分分别为 30%~41%(-8%~0%)和 17%~40%(-6%~-2%),预报绝对误差≤2℃(1℃)的正技巧比例分别为 91%~99%(87%~98%)和 85%~99%(79%~97%),预报绝对误差≤2℃(1℃)的负技巧比例分别为 1%~8%(2%~12%)和 0%~13%(2%~

18%)。从以上数据来看,递减平均法的预报评分正技巧比例低于一元线性回归法,但是其正技巧评分高于一元线性回归法,这与预报技巧评分是根据所有预报绝对误差的总和计算的,某个较大的预报误差可能导致整个预报评分大幅的变化有关(熊敏途, 2017),也是本节以准确率为基准,利用绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C)准确率不同变化方向的站点数比率来评价方法优劣的原因。预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的正(负)技巧比例较预报绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 时偏高(偏低),并且预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ (1°C)的正技巧比例低于总体评价,可见递减平均法和一元线性回归法对日最低气温的订正能力在较大误差范围内更突出,在人们关注的误差范围内的表现并不理想,这可能与模式日最低气温预报的绝对误差较大有关。

2.4 系统偏差比较

预报误差(T_E)可以反映模式预报偏差的方向,当气温预报值大(小)于观测值, $T_E > 0^{\circ}\text{C}$ ($T_E < 0^{\circ}\text{C}$),预报偏暖(冷)。为了对日最高(低)气温预报的系统偏差进行分析,逐站统计了2017年全年日最高气温和日最低气温的偏暖(冷)预报次数占总预报次数的百分比,即偏暖(冷)预报比例。对于日最高

气温,陕西大部分地区的预报偏冷,其中陕北和陕南地区的偏冷预报比例明显偏高,分别在60%和70%以上,极大值达到98%。对于日最低气温,陕西大部分地区的预报偏暖,陕北、关中地区的偏暖预报比例 $> 80\%$,极大值达到100%,陕南大部分地区的偏暖比例 $> 60\%$ 。日最高(低)气温在订正前的偏冷(暖)预报比例的区域分布,与递减平均法和一元线性回归法的技巧评分有很好的对应关系,在偏冷(暖)预报比例较大的地区,技巧评分较高。递减平均法和一元线性回归法订正后,日最高(低)气温的偏冷(暖)预报现象得到了有效校正,陕西大部分地区的偏冷(暖)预报比例在50%左右,比较而言,一元线性回归法订正后的日最低气温,在陕北和关中北部地区的偏暖预报现象仍然较明显,偏暖预报比例在60%~70%。

预报-实况散点图能够直观地展示预报的系统偏差,各数值点围绕在对称轴($y=x$)附近,不同颜色代表不同误差范围,数值点离对称轴越远,代表的预报误差越大,当数值点大多位于对称轴上(下)方时,说明预报值较观测值偏高(低)的站次较多,即偏暖(冷)预报比例较大。以第2 d 预报为例,利用预报-实况散点图(图5)对日最高(低)气温预报的系

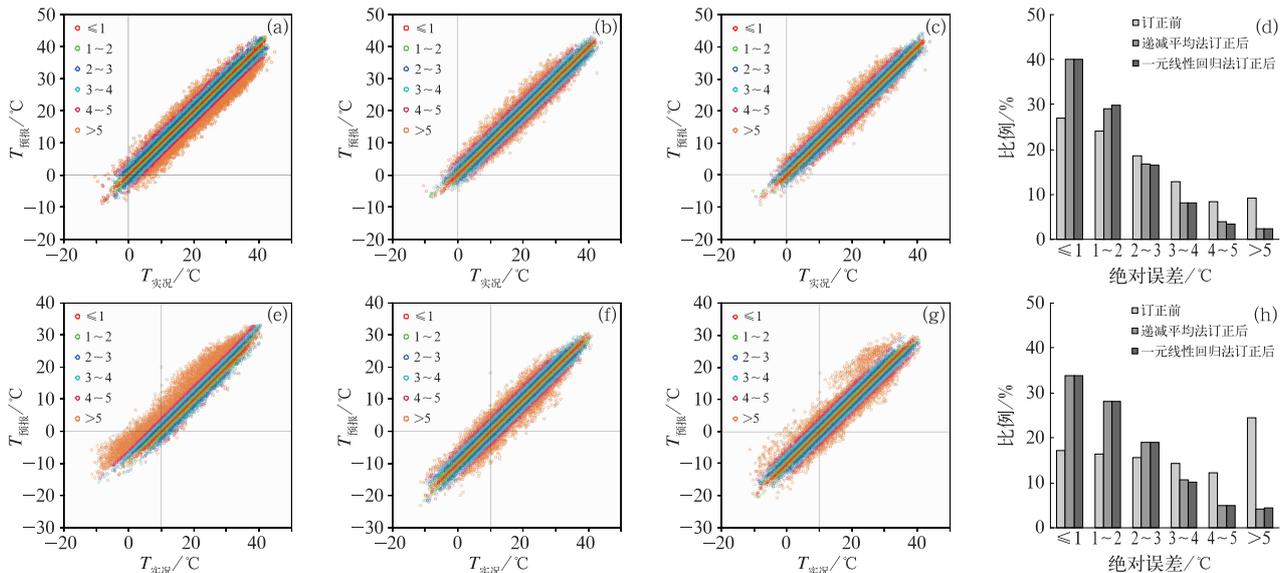


图5 日最高气温(a,b,c,d)和日最低气温(e,f,g,h)的第2 d 预报-实况散点图(a,b,c,d,e,f,g)和不同预报绝对误差范围的站次比例(d,h)对比

(a,e)订正前,(b,f)递减平均法订正后,(c,g)一元线性回归法订正后,
(d,h)原始预报与递减平均法、一元线性回归法的订正预报的比较

Fig. 5 Forecast-observation scatter plots (a, b, c, d, e, f, g) and frequencies of different error ranges (d, h) for daily 2 m maximum (a, b, c, d) and minimum (e, f, g, h) air temperature forecasts at 2 d forecast time (a, e) original forecast, (b, f) forecast corrected by decaying averaging method, (c, g) forecast corrected by simple linear regression method, (d, h) comparison between original forecast and forecast corrected by the decaying averaging and simple linear regression methods

统偏差进行分析,订正前,日最高(低)气温的预报值较观测值偏低(高)的站次较多,即偏冷(暖)预报比例较大,订正后,日最高(低)气温的预报值较观测值偏低(高)的现象得到了有效校正,与前面的研究结论一致。

绝对误差可以较好地评价预报误差的幅度。对于日最高气温(图 5d),订正前,绝对误差在 0~1℃和 1~2℃的站次比例分别为 27%和 24%,高于在其他误差范围的比例,但是仍有 9%的站次的预报绝对误差>5℃;递减平均法(一元线性回归法)订正后,绝对误差在 0~1℃和 1~2℃的站次比例分别增加至 40%(40%)和 29%(30%),绝对误差>5℃的站次比例降至 2%(2%)。对于日最低气温(图 5b),订正前,绝对误差在 0~1℃和 1~2℃的站次比例分别为 17%和 16%,绝对误差>5℃的站次比例高达 24%;递减平均法(一元线性回归法)订正后,绝对误差在 0~1℃和 1~2℃的站次比例分别增加至 34%(34%)和 28%(28%),绝对误差>5℃的站次比例降至 4%(5%)。可见,递减平均法和一元线性回归法能够较好地订正日最高(低)气温预报的系统偏差,数值点分布也更收敛、对称,使较小误差范围的站次增多,较大误差范围的站次减少。

3 两种方法的混合订正试验

整体上讲,递减平均法和一元线性回归法都显著地提高了日最高(低)气温的预报准确率,其中,一元线性回归法对日最高气温预报的订正能力略优于递减平均法,对日最低气温预报的订正能力不及递减平均法,有必要利用这两种方法对气温预报进行

混合订正,以提高订正效果。

本文以 2017 年 1 月 1 日至 12 月 31 日日最高(低)气温预报绝对误差≤2℃的准确率作为判断依据,逐站、逐预报时效从两种方法中选择最优方法,对日最高(低)气温预报进行混合订正,并检验订正效果。混合订正方案 1:在一个给定站点上,对于某一预报时效的日最高(低)气温预报,当递减平均法订正后的预报准确率高于一元线性回归法时,采用递减平均法进行订正,反之,则采用一元线性回归法进行订正;当两种方法订正后的预报准确率相等时,采用一元线性回归法进行订正(因为一元线性回归法的计算量小于递减平均法)。前面的研究中发现,这两种方法在日最高(低)气温预报准确率比较高的站可能出现负订正技巧,那么对出现负订正技巧的站的气温预报不做订正是否更好?因此,设计了混合订正方案 2:在一个给定站点上,对于某一预报时效的日最高和最低气温预报,当两种方法订正后的预报准确率都低于订正前时,则不做订正;当递减平均法(一元线性回归法)订正后的预报准确率高于订正前,且高于一元线性回归法(递减平均法)时,采用递减平均法(一元线性回归法)进行订正;当两种方法订正后的预报准确率相等,且都高于订正前时,采用一元线性回归法进行订正。图 6 给出了混合订正方案 1 和方案 2 订正后的日最高(低)气温预报的准确率提高幅度,并与递减平均法和一元线性回归法做比较。结果表明,对于日最高(低)气温预报,基于递减平均法和一元线性回归法的混合订正效果,明显优于利用这两种方法单独进行订正的效果,并且对于出现负技巧的站不做订正,效果更佳。混合订正方案 2 的日最高气温预报的准确率提高幅度明显

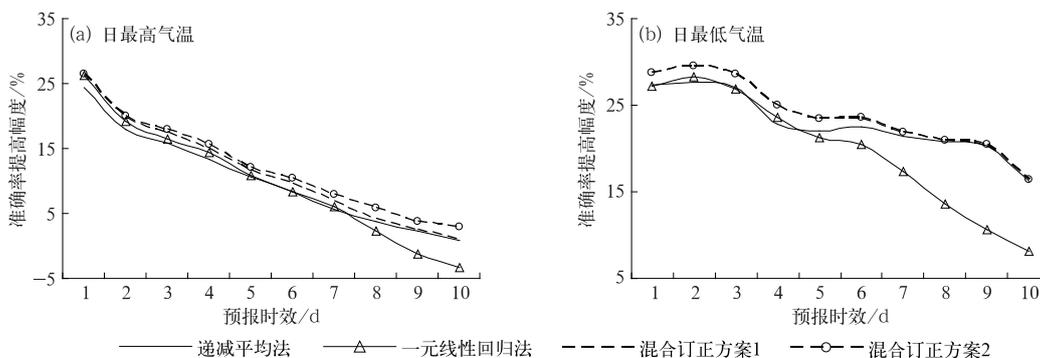


图 6 订正后日最高气温(a)和日最低气温(b)的预报绝对误差≤2℃的准确率提高幅度
 Fig. 6 Increment of accuracy with absolute error less than 2℃ of the daily 2 m maximum (a) and minimum (b) air temperatures after correction

高于方案 1, 但是其日最低气温预报的准确率提高幅度与方案 1 的几乎重合, 这与单独利用递减平均法(或者一元线性回归法)对日最高气温、日最低气温预报进行订正时, 对日最高气温预报出现负订正技巧的站较多, 而对日最低气温预报进行订正时, 出现负技巧的站较少(仅 1 站)有关。

以上研究是利用递减平均法和一元线性回归法进行气温预报混合订正的初步试验, 证明了该研究思路的可行性和必要性, 下一步还需要对基于多种方法的混合订正方案做进一步完善。例如, 在混合订正方案 1 和方案 2 中, 某一个站点在某一预报时效的订正方法的选择, 是利用 2017 年 1 月 1 日至 12 月 31 日这一固定训练期的预报来研究的, 如果采用逐日滚动的方式, 利用预报日之前一段时期的预报进行实时训练, 效果是否更佳, 有待下一步做详细研究。

4 结论与讨论

陕西省气象局精细化格点预报业务系统采用递减平均法和一元线性回归法对气温预报进行订正, 本文基于 ECMWF 细网格模式的定时最高(低)气温预报产品, 针对 2017 年 1 月 1 日至 12 月 31 日陕西 99 个国家级气象站的日最高(低)气温预报, 检验和比较了这两种方法对气温预报误差的订正效果, 主要结论如下:

(1) 递减平均法和一元线性回归法都显著地提高了日最高(低)气温的预报准确率, 对日最低气温预报的正订正效果比日最高气温预报更突出, 随着预报时效的延长, 正订正效果减弱。比较而言, 一元线性回归法对日最高气温预报的订正能力略优于递减平均法, 对日最低气温预报的订正能力不及递减平均法, 利用这两种方法对气温预报进行混合订正的效果更佳。

(2) 技巧评分与模式对气温的预报能力有显著的负相关关系, 秦岭及其以南地区的日最高气温预报和秦岭以北地区的日最低气温预报的准确率偏低, 其技巧评分一般超过 40%, 极大值超过 70%, 负技巧通常出现在预报准确率较高的部分地区, 技巧分值在 -20%~0%。

(3) 递减平均法和一元线性回归法对日最高气温预报的订正能力在绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 范围内有较大优势, 但是对日最低气温预报的订正能力在较大误

差范围内(绝对误差 $> 2^{\circ}\text{C}$)更突出, 这可能与日最低气温预报的绝对误差较大($\geq 3^{\circ}\text{C}$)有关。

(4) 日最高(低)气温的偏冷(暖)预报比例较高, 递减平均法和一元线性回归法能够较好地订正日最高(低)气温预报的系统偏差和偏冷(暖)预报现象, 数值点也更收敛、对称地分布, 使较小误差范围的站次增多, 较大误差范围的站次减少, 在偏冷(暖)预报比例较大的地区, 技巧评分较高。

根据以上结论, 递减平均法和一元线性回归法订正后的气温预报质量优于订正前, 但是在较长预报时效的订正效果还不太理想, 并且在部分地区为负订正效果, 下一步拟参考李佰平和智协飞(2012)的多时效的多元集成预报方法和吴启树等(2016)的准对称混合滑动训练期方案进行改进。这两种方法还将进一步用于对整点最高(低)气温预报的客观订正, ECMWF 模式在 3~144 h 预报时效有逐 6 h 和逐 3 h 间隔的最高(低)气温预报, 时间间隔是否会对预报订正结果产生影响, 以及先对整点最高(低)气温预报进行订正, 再统计得到的日最高(低)气温预报值, 与先统计得到日最高(低)气温预报值, 再进行客观订正的结果是否一致, 都有待进一步研究。

以上是关于递减平均法和一元线性回归法对 ECMWF 气温预报订正能力对比的研究结论, 仅适用于本文的订正方案, 随着下一步对两种方法的订正方案进行改进, 有可能得到不同的研究结论。

参考文献

- 陈德辉, 薛纪善, 2004. 数值天气预报业务模式现状与展望[J]. 气象学报, 62(5): 623-633. Chen D H, Xue J S, 2004. An overview on recent progresses of the operational numerical weather prediction models[J]. Acta Meteor Sin, 62(5): 623-633(in Chinese).
- 代刊, 曹勇, 钱奇峰, 等, 2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J]. 气象, 42(12): 1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short and medium range weather forecast[J]. Meteor Mon, 42(12): 1445-1455(in Chinese).
- 李佰平, 智协飞, 2012. ECMWF 模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究[J]. 气象, 38(8): 897-902. Li B P, Zhi X F, 2012. Comparative study of four correction schemes of the ECMWF surface temperature forecasts[J]. Meteor Mon, 38(8): 897-902(in Chinese).
- 李莉, 李应林, 田华, 等, 2011. T213 全球集合预报系统性误差订正研究[J]. 气象, 37(1): 31-38. Li L, Li Y L, Tian H, et al, 2011. Study of bias-correction in T213 global ensemble forecast[J]. Meteor Mon, 37(1): 31-38(in Chinese).
- 马清, 龚建东, 李莉, 等, 2008. 中尺度集合预报的二阶距离散度订正

- 研究[J]. 气象, 34(11): 15-21. Ma Q, Gong J D, Li L, et al, 2008. Study on the 2nd moment spread-correction of mesoscale ensemble forecast system[J]. Meteor Mon, 34(11): 15-21 (in Chinese).
- 马旭林, 时洋, 和杰, 等, 2015. 基于卡尔曼滤波递减平均算法的集合预报综合偏差订正[J]. 气象学报, 73(5): 952-964. Ma X L, Shi Y, He J, et al, 2015. The combined descending averaging bias correction based on the Kalman filter for ensemble forecast[J]. Acta Meteor Sin, 73(5): 952-964 (in Chinese).
- 潘留杰, 薛春芳, 王建鹏, 等, 2017. 一个简单的格点温度预报订正方法[J]. 气象, 43(12): 1584-1593. Pan L J, Xue C F, Wang J P, et al, 2017. A simple grid temperature forecast correction method[J]. Meteor Mon, 43(12): 1584-1593 (in Chinese).
- 邱学兴, 王东勇, 陈宝峰, 2012. T639 模式预报系统误差统计和订正方法研究[J]. 气象, 38(5): 526-532. Qiu X X, Wang D Y, Chen B F, 2012. The statistics and correction of T639 model forecast system errors[J]. Meteor Mon, 38(5): 526-532 (in Chinese).
- 佟华, 郭品文, 朱跃建, 等, 2014. 基于大尺度模式产品的误差订正与统计降尺度气象要素预报技术[J]. 气象, 40(1): 66-75. Tong H, Guo P W, Zhu Y J, et al, 2014. Bias correction and statistical downscaling meteorological parameters forecast technique based on large-scale numerical model products[J]. Meteor Mon, 40(1): 66-75 (in Chinese).
- 王丹, 黄少妮, 高红燕, 等, 2016. 递减平均法对陕西 SCMOC 精细化温度预报的订正效果[J]. 干旱气象, 34(3): 575-583. Wang D, Huang S N, Gao H Y, et al, 2016. Analysis on errors of SCMOC refined guidance temperature prediction corrected by the decaying averaging method in Shaanxi Province[J]. J Arid Meteor, 34(3): 575-583 (in Chinese).
- 王凯, 周月华, 高媛, 2015. 湖北省冬季平均气温序列订正及其气候评价应用[J]. 气象科技, 43(4): 697-703. Wang K, Zhou Y H, Gao Y, 2015. Adjustment of monthly winter mean air temperature series and its application in climate impact assessment[J]. Meteor Sci Technol, 43(4): 697-703 (in Chinese).
- 王莹, 苏永秀, 李政, 2012. 广西北部山区日最低气温短序列订正方法[J]. 山地学报, 30(2): 186-194. Wang Y, Su Y X, Li Z, 2012. Adjusting methods for daily minimum temperature series in high altitude mountainous areas of western Guangxi[J]. J Mountain Sci, 30(2): 186-194 (in Chinese).
- 吴乃庚, 曾沁, 刘段灵, 等, 2017. 日极端气温的主客观预报能力评估及多模式集成网格释用[J]. 气象, 43(5): 581-590. Wu N G, Zeng Q, Liu D L, et al, 2017. Evaluation on subjective and objective diurnal extreme temperature forecasts and multi model consensus gridded forecast application[J]. Meteor Mon, 43(5): 581-590 (in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 郭弘, 等, 2016. MOS 温度预报中最优训练期方案[J]. 应用气象学报, 27(4): 426-434. Wu Q S, Han M, Guo H, et al, 2016. The optimal training period scheme of MOS temperature forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 27(4): 426-434 (in Chinese).
- 熊敏谄, 2017. 基于集合预报系统的日最高和最低气温预报[J]. 气象学报, 75(2): 211-222. Xiong M Q, 2017. Calibrating daily 2 m maximum and minimum air temperature forecasts in the ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 75(2): 211-222 (in Chinese).
- 许凤雯, 王志, 狄靖月, 等, 2016. 面向流域的定量降水估测产品检验订正[J]. 气象, 42(10): 1245-1255. Xu F W, Wang Z, Di J Y, et al, 2016. Verification and correction of quantitative precipitation estimation for river basins[J]. Meteor Mon, 42(10): 1245-1255 (in Chinese).
- 杨关盈, 邓学良, 王磊, 等, 2017. 基于 CUACE 模式产品的订正方法比较研究[J]. 气象科学, 37(6): 839-844. Yang G Y, Deng X L, Wang L, et al, 2017. Comparative study of three correction methods for the CUACE model product[J]. J Meteor Sci, 37(6): 839-844 (in Chinese).
- 于海鹏, 黄建平, 李维京, 等, 2014. 数值预报误差订正技术中相似-动力方法的发展[J]. 气象学报, 72(5): 1012-1022. Yu H P, Huang J P, Li W J, et al, 2014. Development of the analogue-dynamical method for error correction of numerical forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 1012-1022 (in Chinese).
- Cui B, Toth Z, Zhu Y J, et al, 2004. The trade-off in bias correction between using the latest analysis/modeling system with a short, versus an older system with a long archive [C]//The First THORPEX International Science Symposium, Montréal, Canada: World Meteorological Organization, 281-284.
- Cui B, Toth Z, Zhu Y J, et al, 2012. Bias correction for global ensemble forecast[J]. Wea Forecasting, 27(2): 396-410.