

王丹,王建鹏,党超琪,等,2023. CLDAS 实况产品在陕西气温网格预报检验与订正中的应用[J]. 气象,49(8):946-957. Wang D, Wang J P, Dang C Q, et al, 2023. Application of CLDAS in test and correction of grid temperature forecast in Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 49(8):946-957(in Chinese).

CLDAS 实况产品在陕西气温网格 预报检验与订正中的应用^{*}

王 丹^{1,3} 王建鹏^{2,3} 党超琪¹ 娄盼星^{2,3} 黄少妮⁴ 蔡新玲⁵

1 陕西省气象服务中心, 西安 710014

2 西安市气象局, 西安 710016

3 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 710016

4 陕西省气象台, 西安 710014

5 陕西省气候中心, 西安 710014

提 要: 利用陕西地区自动气象站的气温观测资料, 采用滑动训练期和一元线性回归方法, 先在站点上对中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)气温进行检验和订正, 再将订正系数传递到格点上订正 CLDAS 气温格点场, 最后利用站点观测气温和订正前、后的 CLDAS 气温分别对 ECMWF 气温预报的格点场进行订正, 并做非独立和独立检验。结果表明, CLDAS 气温的空间分布特征与站点观测基本一致, 但是存在一定误差, 订正后误差减小, 其中, 订正前秦岭和大巴山区的平均绝对误差较其他地区偏大, 绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别低于 20%和 30%, 订正后均提高了 40%以上。利用订正后的 CLDAS 气温对 ECMWF 气温预报进行订正, 提高了模式的预报准确率, 例如, 陕西地区 24 h 日和最高气温预报的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别从订正前的 46%和 66%提高到订正后的 63%和 74%, 优于利用站点观测气温和订正前的 CLDAS 气温对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)气温预报的订正结果, 一定程度上改进了模式在站点稀少地区的气温预报质量, 用于高分辨率气象格点预报业务效果更好。

关键词: 气温, 中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS), 检验, 误差订正

中图分类号: P413, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.052601

Application of CLDAS in Test and Correction of Grid Temperature Forecast in Shaanxi Province

WANG Dan^{1,3} WANG Jianpeng^{2,3} DANG Chaoqi¹ LOU Panxing^{2,3} HUANG Shaoni⁴ CAI Xinling⁵

1 Shaanxi Meteorological Service Center, Xi'an 710014

2 Xi'an Meteorological Bureau, Xi'an 710016

3 Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for The Qinling Mountains and Loess Plateau,
Shaanxi Meteorological Service, Xi'an 710016

4 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014

5 Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014

Abstract: Based on air temperature observation data of automatic weather stations in Shaanxi Province, by using sliding training period and unitary linear regression methods, air temperature from CMA Land Data Assimilation System (CLDAS) is tested and corrected at stations, then the correction coefficient is interpolated

^{*} 陕西省重点研发计划(2021SF-476, 2023-YBSF-235)和陕西省气象局精细化气象格点预报攻关团队共同资助

2022年3月16日收稿; 2023年6月9日收修定稿

第一作者: 王丹, 主要从事数值预报应用研究和气象服务工作. E-mail: dandan-w@live.cn

通讯作者: 王建鹏, 主要从事天气预报与研究工作. E-mail: xawjp@163.com

to grid point to revise CLDAS temperature at the grid. Finally, temperature forecast from European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF) is corrected by respectively using the air temperature data from observation and CLDAS before and after correcting, which is tested by non-independent and independent validations. The results show that spatial distribution characteristics of temperature from CLDAS are basically consistent with those from station observations, but there are some errors between them, which can be reduced by correcting with observation data. The accuracies of absolute error less than 1°C or 2°C of CLDAS temperature before correcting are respectively less than 20% and 30% in Qinling and Daba Mountains, where accuracies are smaller than in other areas and are improved by more than 40% after correction. The CLDAS grid temperature data after correcting are used to correct the temperature prediction of ECMWF improving the accuracy of the model forecasts. It also improves the temperature forecast quality of ECMWF in the areas with few weather stations, and is suitable for high resolution meteorological grid forecast. The accuracies of absolute error less than 2°C for daily maximum and minimum temperatures with 24 h lead time are increased from 46% and 66% before correcting to 63% and 74% after correcting in Shaanxi Province. These correction effects are higher than accuracies of the temperature forecast corrected by using air temperature data from observation and unrevised CLDAS.

Key words: air temperature, CLDAS, verification, error correction

引言

随着计算机技术、信息技术和气象资料加密观测的发展,高分辨率数值模式迅猛发展,天气预报和气候预测更加精细、精准,提高了对灾害天气的防控能力(王启光和丑纪范,2021)。目前,无缝隙、全覆盖、客观定量的精细化智能网格预报已成为中国气象局现代天气预报业务的重要支撑(金荣花等,2019;胡争光等,2020)。而智能网格预报业务的发展,不仅依赖于高分辨率的模式预报能力的提升,还依赖于模式产品释用技术的发展。

近年来,我国气象工作者在模式产品释用技术研究方面取得了明显进展(赵声蓉等,2012;金荣花等,2019),其中,一些统计后处理的误差订正方法是减小模式预报误差的重要途径之一,例如,岭回归、随机森林、深度学习(门晓磊等,2019;陈鹤等,2022)、人工神经网络(熊敏詮等,2020;陈昱文等2020;赵琳娜等,2022)和递减平均、一元或多元线性回归、逐步回归(王丹等,2019;吕游,2019;蔡凝昊和俞剑蔚,2019;曾晓青等,2019;陈迪等,2019)以及最优滑动周期平均误差订正(金巍等,2020)等方法,都在一定程度上提高了模式的预报性能。熊敏詮等(2020)使用回归法和BP神经网络自忆法对欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的集合预报进行订正,明显降低了预报绝对误差。尹姗等(2020)

使用历史偏差订正方法对ECMWF延伸期第16~30天的日最高气温预报进行订正,订正后的预报准确率提升了15%~19%。刘新伟等(2020)基于小波分析的最优融合预报方法研发的甘肃省气温客观预报已经初步具备了替代主观预报的能力。李欣(2020)应用随机森林法改进了Climate extension of WRF模式的气温模拟结果。

我国智能网格预报业务发展初期主要采用站点实况对模式的格点预报进行订正,即先将格点预报插值到站点上进行订正,再通过“站点订正系数向格点场传递”的思路对格点预报进行订正(吴乃庚等,2017;潘留杰等,2017),或者直接将站点订正结果插值到格点上(戴翼等,2019),但是这种方法容易造成高分辨率模式信息的浪费,并且存在站点分布不难以匹配高分辨率格点空间的问题。中国气象局陆面数据同化系统(CMA Land Data Assimilation System, CLDAS)利用融合与同化技术,对地面观测、卫星观测、数值模式产品等多种来源数据进行融合,输出高时空分辨率的网格实况分析产品(师春香等,2019),为精细化网格预报业务发展提供了技术支撑。齐铎等(2020)直接利用CLDAS气温数据对ECMWF模式在中国东北中北部的气温预报进行检验和订正。然而,CLDAS气温数据与站点实况存在一定偏差(杨富燕等,2023),一方面与格点数据代表某个区域气象要素的平均值,而站点观测是单点观测,两者在空间上必然存在一定误差有关(俞剑蔚等,2019),另一方面与实时业务中部分站点观测

资料未能及时上传,没有融合到 CLDAS 产品中有关。刘莹等(2021)将中国划分为 8 个区域评估 CLDAS 气温数据质量,发现存在高温偏低、低温偏高的现象,其中东北地区的偏差最小,西北、西南地区的偏差大于其他地区。董春卿等(2021)评估了其在山西省的适用性,并对其进行系统偏差订正后应用到山西省 SCMOC 温度预报的订正工作中,订正后的短期温度预报质量优于预报员主观预报。

目前,关于 CLDAS 气温产品在陕西地区精细化格点预报中的应用研究并不多。本文先对 CLDAS 气温在陕西地区的质量进行评估,然后利用气象站观测资料对 CLDAS 气温进行订正,使其更接近站点实况,之后利用订正前、后的 CLDAS 气温和站点观测气温对 ECMWF 气温预报进行对比订正,研究基于 CLDAS 的格点温度数值预报释用方法。

1 资料和方法

1.1 资料

研究资料包括:(1)2017 年 10 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日 CLDAS 网格融合实时分析产品的逐 1 h 气温和 09 时至次日 08 时(北京时,下同)时段的日最高、最低气温,水平分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。(2)2019 年 5 月 1 日至 12 月 31 日 ECMWF 模式的 0~240 h 最高、最低气温预报,水平分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$,时间分辨率为 0~144 h 逐 3 h 间隔,150~240 h 逐 6 h 间隔。(3)2017 年 10 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日陕西省 99 个国家气象站、1364 个区域气象站和 4 个公路交通气象站(汉城收费站、渭河大桥北桥头站、机场收费站和秦岭隧道站)的逐 1 h 观测资料,观测要素包括定时气温和最高、最低气温,日最高(低)气温取 09 时至次日 08 时的逐 1 h 最高(低)气温的最大(小)值,日平均气温取该时段逐 1 h 定时气温的平均值。

以上 99 个国家气象站和 1364 个区域气象站(以下简称为 1463 个气象站)均为考核站,观测数据质量可靠,参与了 CLDAS 实况产品的制作。交通气象站为非考核站,在使用前先进行质量控制,即利用距离交通气象站 10 km 范围内最近的气象考核站对其进行气候极值、时间一致性和空间一致性检验(王丹等,2015),剔除可疑和错误数据。为了保证各交通气象站资料在样本长度方面的一致性,仅保留质量控制后 4 个交通气象站都有有效观测数据的

日期的资料作为研究数据。

1.2 方法

1.2.1 一元线性回归方法

以预报日前 1 d 之前的 30 d 作为滑动训练期,使用训练期预报对象(y)和预报因子(x)的历史资料做一元线性回归分析,在每一个站点/格点上,逐日滑动建立一元线性回归方程:

$$y = ax + b$$

式中: a 和 b 通过最小二乘法计算得到,在接下来的气温产品订正中将作为订正系数。

1.2.2 “站点订正系数向格点场传递”方法

“站点订正系数向格点场传递”分为四步:(1)采用双线性插值方法(龙柯吉等,2019)将格点上的 CLDAS(或者 ECMWF)气温产品插值到站点上;(2)逐站点建立订正 CLDAS(或者 ECMWF)气温的一元线性回归方程,得到站点上的订正系数 a 和 b ;(3)通过反距离权重插值方法(潘留杰等,2017),将站点上的订正系数 a 和 b 分配到水平分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的格点上;(4)利用订正系数的格点场对 CLDAS(或者 ECMWF)气温的格点场进行订正。

1.2.3 CLDAS 气温的订正和检验方法

将 CLDAS 气温作为某种意义上的预报场,以 1463 个气象站的气温观测值作为“真值”,采用一元线性回归方法,对 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的 CLDAS 气温(通过双线性插值方法插值到站点上)进行订正。然后分别利用 1463 个气象站和 4 个交通气象站的观测资料对订正后的 CLDAS 气温进行非独立和独立检验,检验指标包括平均绝对误差(MAE)、正误差比例(NP)和准确率(TS),公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{fi} - y_{oi}|$$

$$NP = \frac{n^+}{n} \times 100\%$$

$$TS = \frac{n_r}{n} \times 100\%$$

式中: n 是预报的总站(次)数, y_{fi} 和 y_{oi} 分别是第 i 站(次)的预报值和观测值, n^+ 是 $y_{fi} - y_{oi} > 0^\circ\text{C}$ 的预报站(次)数, n_r 是 $|y_{fi} - y_{oi}| \leq 1^\circ\text{C}$ 或者 $|y_{fi} - y_{oi}| \leq 2^\circ\text{C}$ 的预报站(次)数。

此外,采用“站点订正系数向格点场传递”的方法对 CLDAS 气温格点场进行订正,订正结果参与到对 ECMWF 气温格点预报的订正工作中。

1.2.4 ECMWF 气温预报的订正和检验方法

以 08 时起报的日最高(低)气温作为订正对象,由于 ECMWF 数据传输至业务系统的时间滞后于起报时间,因此将 ECMWF 前一日 20 时起报的 12~228 h 气温作为当日 08 时起报的 0~216 h 气温,将 24 h 间隔的定时最高(低)气温预报的最大(小)值作为日最高(低)气温预报值。为了使模式的气温预报值分别与站点上的观测值和格点上的 CLDAS 气温分析值相匹配,采用双线性插值方法,一方面将 ECMWF 气温预报插值到站点上,另一方面将 ECMWF 在 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 格点上的气温预报插值到 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 格点上。

设计了 3 个方案,逐预报时效(0~216 h,逐 24 h 间隔)建立每一个格点/站点上的一元线性回归方程,对 2019 年 7 月 1 日至 12 月 31 日 08 时起报的 ECMWF 0~216 h 日最高(低)气温预报进行订正。其中:方案 1 和方案 2 分别利用订正前和订正后的 CLDAS 气温格点场对 ECMWF 气温预报

进行格点-格点的订正,方案 3 利用 1463 个气象站的气温观测资料,采用“站点订正系数向格点场传递”的思路对 ECMWF 气温预报格点场进行订正。最后,利用 1463 个气象站和 4 个交通气象站的观测资料对方案 1~3 的订正结果(格点上的订正结果通过双线性插值方法插值到站点上)进行非独立和独立检验,检验指标包括平均绝对误差(MAE)和准确率(TS)。

2 结果分析

2.1 订正前 CLDAS 气温的质量分析

从 2018 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日平均的 1463 个气象站的日最高、日最低、日平均气温的观测值和 CLDAS 分析值的空间分布(图 1)来看,CLDAS 气温的空间分布特征与站点观测基本一致,一方面受纬度影响,气温由高纬度向低纬度地区

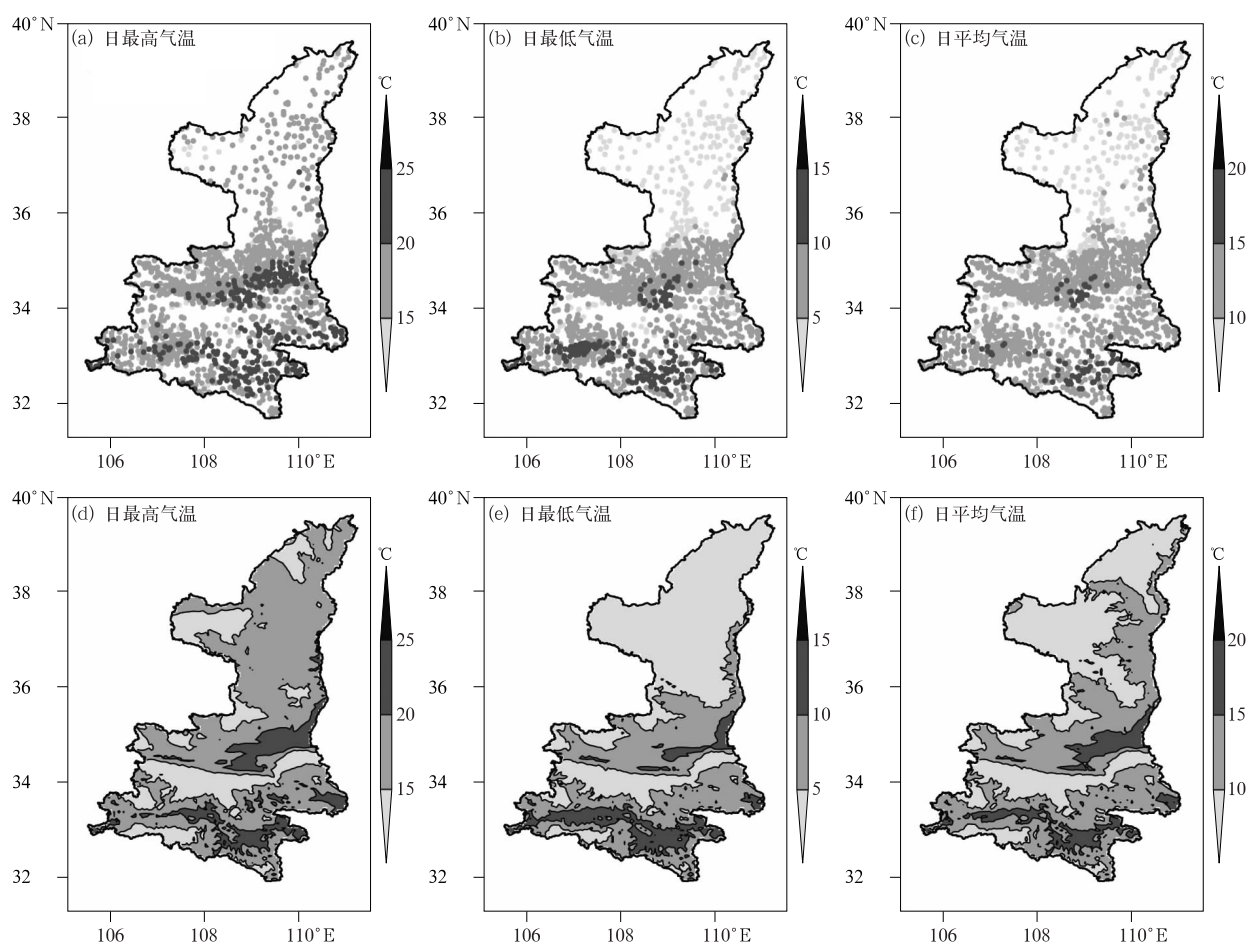


图 1 2018—2019 年陕西地区气温的(a~c)观测值和(d~f)CLDAS 分析值

Fig. 1 (a—c) Observation and (d—f) CLDAS analysis of air temperature in Shaanxi Province from 2018 to 2019

逐渐升高,另一方面受地形(图 2)影响,低海拔地区气温高,高海拔地区气温低,关中盆地和陕南浅山河谷地区为全省较暖的地区,秦岭和大巴山区的气温较周边地区偏冷。比较而言,秦岭山脉附近日最高、日最低和日平均气温的 CLDAS 分析值较观测明显偏低,关中盆地东部日最低和日平均气温的 CLDAS 分析值较观测偏高。

从非独立检验结果来看(图 3),CLDAS 气温的平均绝对误差有明显的地域差异(图 3a~3c),例如,关中盆地和陕南浅山河谷的大部分地区的平均绝对误差较小($<1.5^{\circ}\text{C}$),秦岭和大巴山区的平均绝对误差较大($\geq 1.5^{\circ}\text{C}$)。从图 3d~3f 来看,CLDAS 日最高气温在陕西大部分地区小于观测的频次偏多(正误差比例小于 25%);CLDAS 日最低和日平均气温在秦岭和大巴山区小于观测的频次偏多(正误差比例小于 25%),在关中盆地、陕南浅山河谷和陕北部分地区大于观测的频次偏多(正误差比例大于 50%),这与董春卿等(2021)研究发现山西地区 CLDAS 日最低气温在高海拔地区偏低、低海拔地区偏高的结论相似。从图 3g~3l 来看,对于 CLDAS 的日最高、日最低和日平均气温,关中盆地和陕南浅山河谷的大部分地区的绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别在 50%~90%和 70%~100%,可见这些地区 CLDAS 气温的绝对误差主要在 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$;秦岭和大巴山区的部分地区绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别低于 20%和 30%,可见这些地区 CLDAS 气温的绝对误差 $>2^{\circ}\text{C}$ 的频次偏多;另外,陕西大部分地区 CLDAS 的日最高气温准确率低于日最低气温准确率,这与陕西大部分地区 CLDAS 逐 1 h 气温

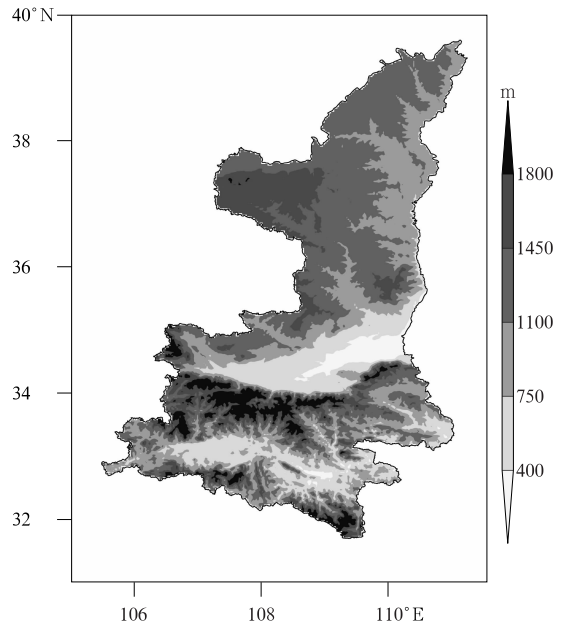


图 2 陕西地区海拔高度

Fig. 2 Altitude of Shaanxi Province

的准确率在 15—17 时(日最高气温多出现在该时段)偏低、在 05—08 时(日最低气温多出现在该时段)偏高一致(图略)。

从对 CLDAS 气温的独立检验结果来看(表 1),秦岭隧道站的误差最大,平均绝对误差大于 7.7°C ,绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别低于 2%和 4%,正误差比例小于 2%(即 CLDAS 分析值小于观测值的频次明显偏多);其他 3 个交通气象站的平均绝对误差小于 3.7°C ,绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别在 16%~61%和 33%~89%;另外,4 个交通气象站的日最高气温都比日最低气温的平均绝对误差(准确率)偏大(偏低)。该独立检验结果与前

表 1 2018—2019 年陕西 4 个交通气象站 CLDAS 气温的误差

Table 1 Error analysis of CLDAS temperature data based on observation data from four traffic weather stations of Shaanxi Province from 2018 to 2019

检验指标	要素	汉城收费站		渭河大桥北桥头站		机场收费站		秦岭隧道站	
		订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
平均绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	日平均气温	1.4	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	8.1	1.6
	日最高气温	3.7	3.5	3.3	3.5	3.4	3.4	9.0	3.5
	日最低气温	2.2	1.9	2.3	2.3	1.8	1.8	7.7	2.0
正误差比例/%	日平均气温	24	36	68	68	61	63	0	29
	日最高气温	31	38	55	63	44	53	2	35
	日最低气温	30	44	67	67	63	65	0	40
绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 的准确率/%	日平均气温	40	50	53	51	61	60	0	41
	日最高气温	16	20	24	22	21	20	2	16
	日最低气温	27	35	33	34	44	42	1	36
绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率/%	日平均气温	78	85	83	83	89	86	0	72
	日最高气温	33	40	43	40	38	40	4	35
	日最低气温	52	63	59	60	69	68	2	59

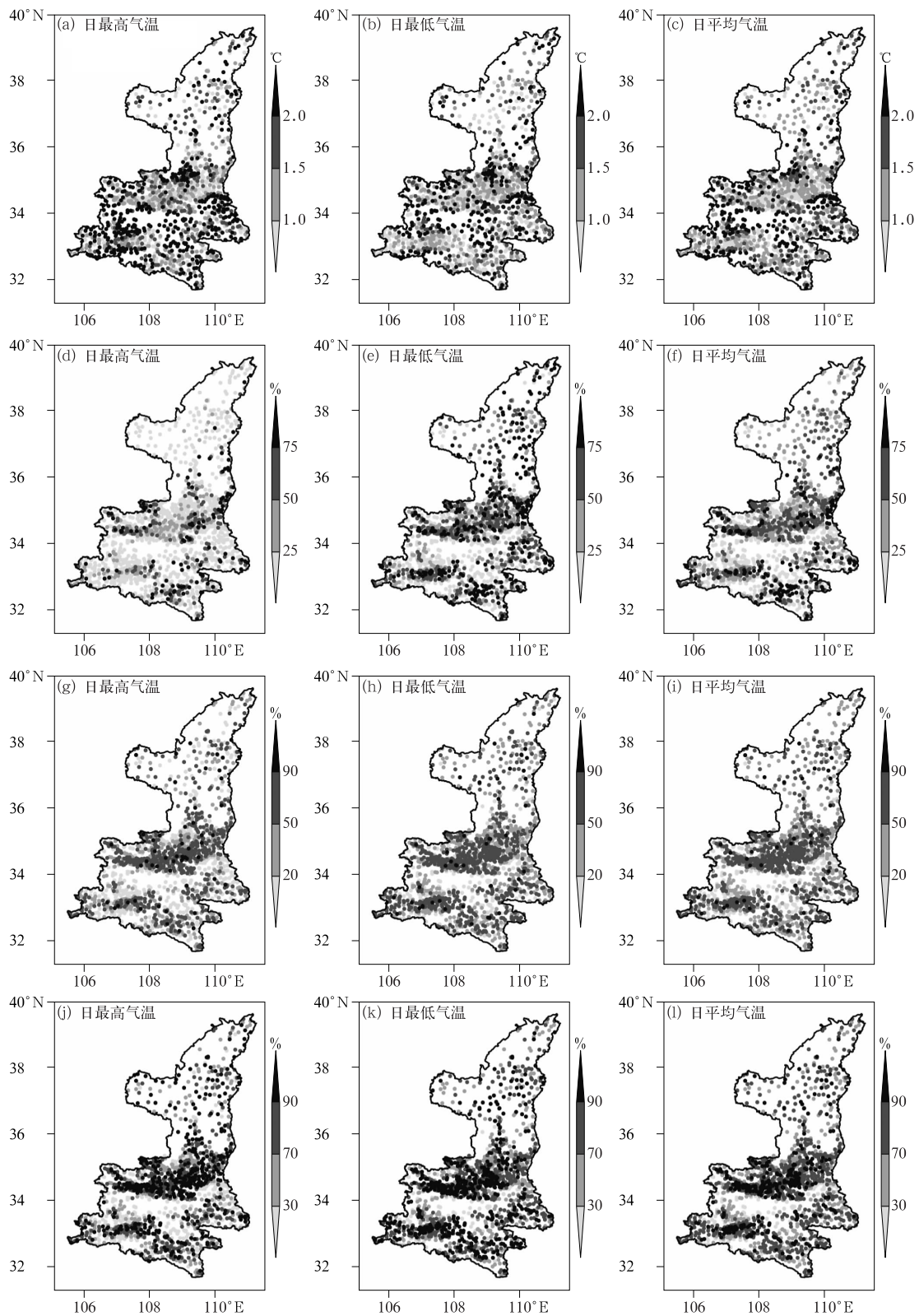


图 3 2018—2019 年陕西 1463 个气象站 CLDAS 气温的(a~c)平均绝对误差,

(d~f)正误差比例,(g~i)绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和(j~l)绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率

Fig. 3 (a-c) Mean absolute error, (d-f) proportion of positive error, (g-i) accuracy of absolute error less than (g-i) 1°C or (j-l) 2°C of air temperature from CLDAS at 1463 automatic weather stations of Shaanxi Province from 2018 to 2019

面非独立检验认为 CLDAS 日最高气温准确率低于日最低气温准确率,秦岭和大巴山区 CLDAS 分析值小于观测值的频次偏多,误差较大等结论一致。

从以上分析来看,地形对 CLDAS 气温质量有一定影响,关中盆地和陕南浅山河谷地区的平均绝对误差较小、准确率较高,秦岭和大巴山区的平均绝对误差较大、准确率较低,这与俞剑蔚等(2019)对 CLDAS 气温在江苏的适用性评估结论相似,由于陕西地形复杂,由高原、山地、平原和盆地等多种地貌构成,而江苏以平原为主,因此 CLDAS 气温在陕

西地区的数据质量不及江苏。

2.2 CLDAS 气温的订正效果分析

通过订正,可以使 CLDAS 气温更接近观测,改善订正前秦岭山脉附近 CLDAS 气温较观测偏低的现象。从对订正后 CLDAS 气温的非独立检验及其与订正前的比较来看(图 4),订正后,陕西大部分地区 CLDAS 日最高、日最低和日平均气温的平均绝对误差小于订正前,绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率均显著提高,其中秦岭和大巴山区的准确率提高

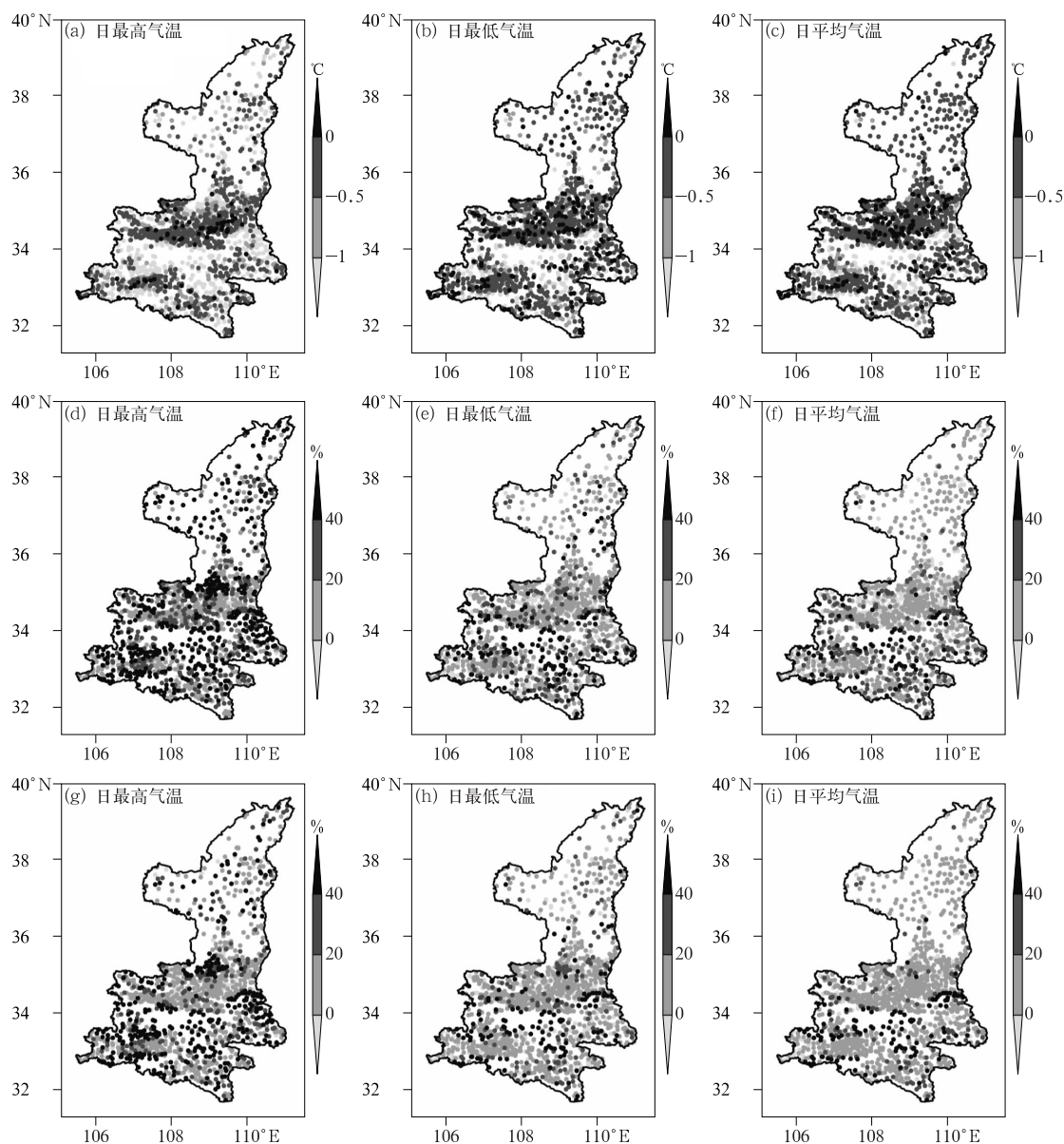


图 4 2018—2019 年陕西 1463 个气象站 CLDAS 气温订正后的(a~c)平均绝对误差减小幅度, (d~f)绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和(g~i)绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率提高幅度

Fig. 4 (a~c) Decrease amplitude of mean absolute error, (d~f) increase amplitude of accuracy of absolute error less than (d~f) 1°C or (g~i) 2°C of corrected CLDAS temperature at 1463 automatic weather stations of Shaanxi Province from 2018 to 2019

幅度最大(提高幅度 $\geq 40\%$),但是关中盆地和陕南浅山河谷等的局部地区的准确率略低于订正前(降低幅度 $< 5\%$)。订正后,陕西大部分地区 CLDAS 日最高、日最低和日平均气温的平均绝对误差在 $0.5 \sim 1.5^{\circ}\text{C}$,绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率 $\geq 95\%$ (图略),正误差比例在 50% 左右(图略),改善了 CLDAS 气温较观测偏大或偏小的现象。比较而言,对 CLDAS 日最高气温的订正效果最显著,这与陕西大部分地区 CLDAS 的日最高气温准确率小于日最低气温准确率有关。

从对订正后 CLDAS 气温的独立检验结果来看(表 1),订正前,CLDAS 气温在秦岭隧道站和汉城收费站的准确率较低,订正后,秦岭隧道站的平均绝对误差减小了 5°C 以上,日平均、日最高和日最低气温的绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ($\leq 2^{\circ}\text{C}$)的准确依次提高了 41% (72%)、 14% (31%)和 35% (57%),汉城收费站的日平均、日最高和日最低气温的绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ($\leq 2^{\circ}\text{C}$)的准确率依次提高了 10% (7%)、 4% (7%)和 8% (11%)。

一元线性回归方法对 CLDAS 气温的订正能力与数据本身的质量有关,以绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 的准确率为例,日最高、日最低和日平均气温订正后的准确率变化幅度与订正前的准确率的相关系数分别为 -0.87 、 -0.75 和 -0.75 ,通过了 0.01 的显著性水平检验,即在订正前准确率较低的站,订正后的准确率提高幅度较大,在订正前准确率较高的站,订正后的准确率提高幅度较小,甚至会出现订正后的准确

率低于订正前的现象。对于订正前 CLDAS 气温误差较小的地区,想要进一步减小误差比较困难,是否有必要对这些地区的 CLDAS 气温做订正有待进一步研究。

2.3 ECMWF 模式气温预报的订正结果分析

对 2019 年 7 月 1 日至 12 月 31 日方案 1~3 订正后的 ECMWF $0 \sim 216\text{ h}$ 日最高、日最低气温预报进行非独立检验,并与订正前做比较(表 2)。结果表明,方案 2 和方案 3 订正后的 ECMWF 日最高、日最低气温预报的准确率(平均绝对误差)较订正前明显提高(减小),预报时效越短,订正效果越好,方案 2 的准确率最高,其次是方案 3,方案 1 的准确率最低。例如,24 h 日最高(低)气温预报的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率在订正前为 46% (66%),方案 1、方案 2 和方案 3 订正后依次为 52% (67%)、 63% (74%)和 59% (69%)。从 1463 个气象站逐站检验来看(图 5),方案 2 和方案 3 都提高了 ECMWF 在大部分站点上的日最高(低)气温预报准确率,其中,秦岭和大巴山区的提高幅度最大,部分站点的日最高气温预报绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率从订正前的 $< 20\%$ 提高到订正后的 $\geq 50\%$,而方案 1 在秦岭和大巴山区的准确率提高幅度不明显甚至出现了准确率降低现象,这与订正前的 CLDAS 气温在秦岭和大巴山区的误差较大有关。将订正前、方案 2 和方案 3 订正后的 24 h 日最高(低)气温的预报值与 1463 个气象站的观测值进行比较(图 6),结果表明,

表 2 2019 年 7—12 月陕西 1463 个气象站订正前、后的 ECMWF 日最高(低)气温预报的误差
Table 2 Error analysis of daily maximum and minimum temperature forecasts from ECMWF before and after correcting at 1463 automatic weather stations of Shaanxi Province from July to December 2019

检验指标	方案	预报时效/h								
		24	48	72	96	120	144	168	192	216
日最低气温的平均绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	订正前	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.0	2.2	2.3	2.4
	方案 1 订正后	1.7	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2	2.5	2.6
	方案 2 订正后	1.5	1.5	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.4	2.5
	方案 3 订正后	1.4	1.4	1.6	1.6	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4
日最高气温的平均绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$	订正前	2.6	2.8	2.9	3.0	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7
	方案 1 订正后	2.4	2.6	2.7	2.9	3.2	3.2	3.4	3.6	3.7
	方案 2 订正后	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	2.9	3.1	3.3	3.4
	方案 3 订正后	2.0	2.2	2.4	2.8	2.9	3.1	3.5	3.7	3.8
日最低气温的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率/ $\%$	订正前	66	65	63	61	60	58	55	54	51
	方案 1 订正后	67	65	63	61	60	58	54	50	46
	方案 2 订正后	74	71	67	65	63	61	56	50	47
	方案 3 订正后	69	67	65	60	58	58	54	45	44
日最高气温的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率/ $\%$	订正前	46	43	41	39	37	36	35	34	33
	方案 1 订正后	52	48	46	43	39	37	36	34	34
	方案 2 订正后	63	58	54	49	44	42	40	37	36
	方案 3 订正后	59	54	50	46	45	41	36	34	34

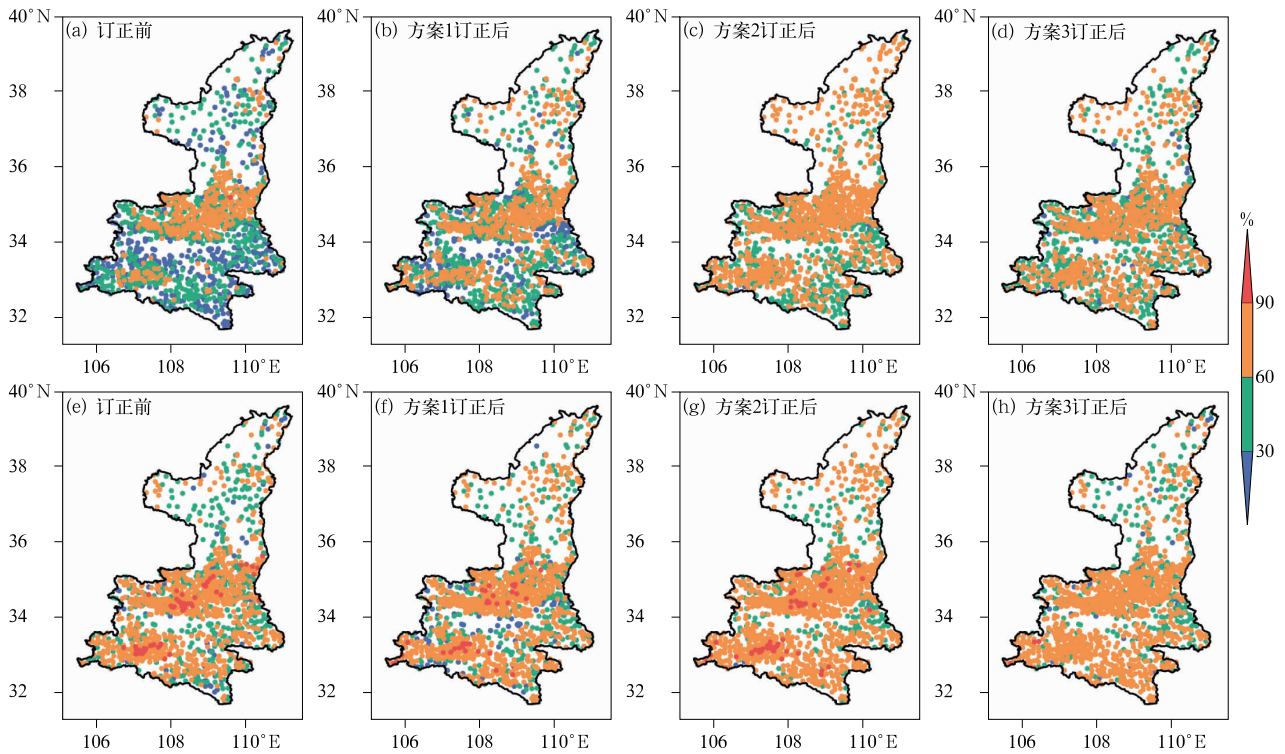


图 5 2019 年 7—12 月陕西 1463 个气象站订正前、后的 ECMWF 24 h(a~d)日最高气温, (e~h)日最低气温预报的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率

Fig. 5 Accuracy of absolute error less than 2°C of daily (a—d) maximum and (e—h) minimum temperature forecasts with 24 h lead time from ECMWF before and after correcting at 1463 automatic weather stations of Shaanxi Province from July to December 2019

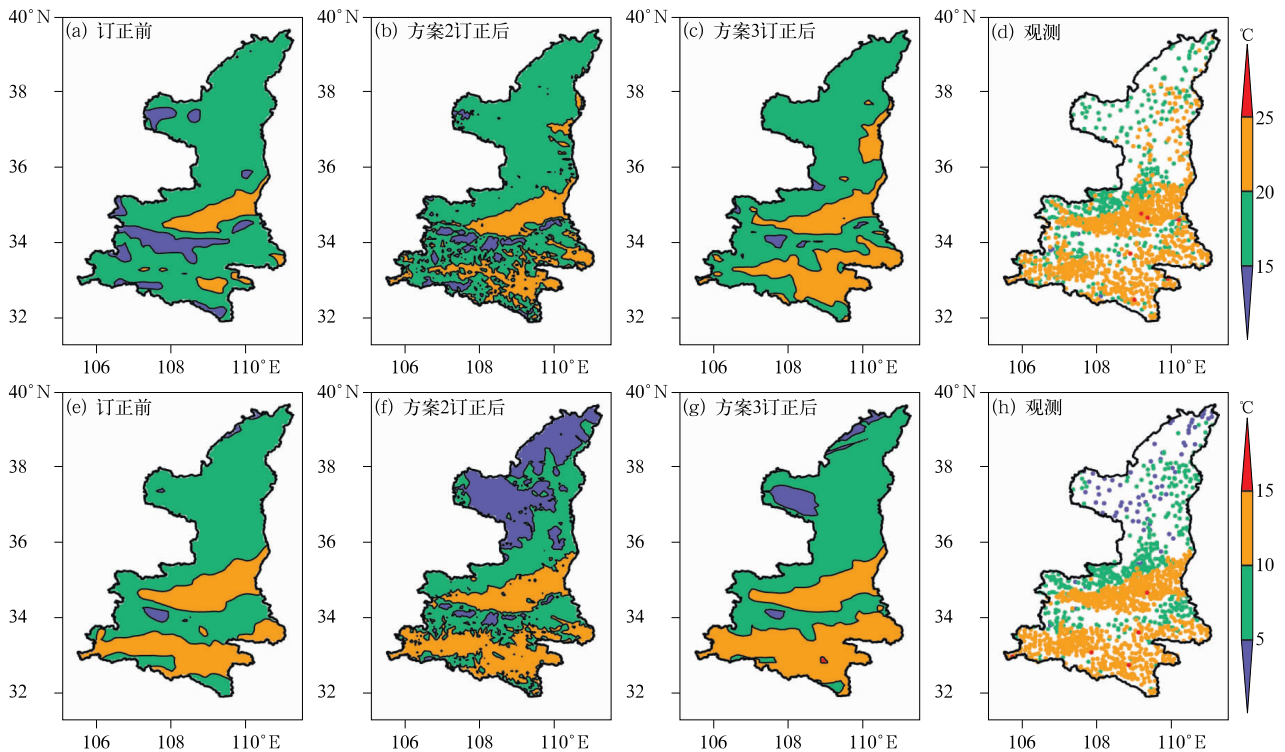


图 6 2019 年 7—12 月陕西地区 ECMWF 24 h(a~d)日最高气温, (e~h)日最低气温的预报值与观测值的比较
Fig. 6 Comparison of daily (a—d) maximum and (e—h) minimum temperatures between forecast with 24 h lead time from ECMWF and observation in Shaanxi Province from July to December 2019

方案2和方案3都提高了ECMWF气温预报值与观测值的一致性,比较而言,方案2对陕北地区日最低气温预报的订正结果较方案3更接近观测。

进一步利用4个交通气象站的观测资料对方案2和方案3订正后,气温预报进行独立检验。结果表明(表略),在汉城收费站、渭河大桥北桥头站和机场收费站,方案2和方案3订正后的ECMWF气温预报的准确率提高幅度不大,但是在秦岭隧道站的准确率提高幅度较大,订正前24 h日最高(低)气温预报的绝对误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率为10%(6%),方案2和方案3订正后分别提高到38%(22%)和20%(11%)。

综合以上分析,方案2优于方案3,用于高分辨率气象格点预报业务效果更好,这是因为方案2采用订正后的CLDAS气温作为训练样本,克服了气象观测站分布不均、在山陵地区分布稀疏的缺陷,一定程度上改进了模式在山陵地区的气温预报质量。

2.4 讨论

本文对ECMWF 0~216 h日最高(低)气温预报进行订正时,采用了逐预报时次建立订正方程的方法,这与ECMWF日最高(低)气温预报值与观测值的相关系数随着预报时次的延长而减小有关。但是在对逐1 h的CLDAS气温进行订正时,采用了不分时刻建立订正方程的方法,这是因为CLDAS气温与站点观测气温在不同时刻的相关系数都比较显著,根据试验结果,不分时刻建立订正方程的效果优于分时刻建立。由于资料限制,本文仅利用1463个气象站的气温观测数据订正CLDAS气温产品,实际业务中可以通过增加其他区域气象站和陕西特色气象站的观测资料来进一步提高订正效果。另外,本研究以预报日前1天之前的30 d作为滑动训练期,采用一元线性回归方法对CLDAS气温分析产品和ECMWF气温预报进行订正,下一步可以通过改进训练期方案或者采用其他客观订正方法进一步提高订正效果。

3 结论

本文利用气温观测资料,先对CLDAS气温在陕西地区的质量进行检验,再对CLDAS气温进行订正,分别利用订正前、后的CLDAS气温和气象站的观测气温,对以ECMWF为代表的气温网格预报

进行对比订正,并作非独立和独立检验。主要结论如下。

(1)CLDAS气温的空间分布特征与站点观测基本一致,但是存在一定误差,并且误差分布与地形有关,关中盆地和陕南浅山河谷地区的平均绝对误差较小($<1.5^{\circ}\text{C}$),绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别在50%~90%和70%~100%,秦岭和大巴山区的平均绝对误差较大($\geq 1.5^{\circ}\text{C}$),绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别低于20%和30%。

(2)订正后的CLDAS气温更接近站点观测,改善了CLDAS气温较观测偏大或偏小的现象,其中,秦岭和大巴山区日最高、日最低和日平均气温的绝对误差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ 和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率都提高了40%以上,日最高气温的准确率提高幅度最大。

(3)订正前的CLDAS气温对ECMWF气温预报的订正效果不理想,而利用订正后的CLDAS气温和气象站观测气温分别对ECMWF气温预报进行订正,可以显著提高ECMWF在陕西大部分地区(特别是秦岭和大巴山区)的预报准确率,比较而言,前者订正后的气温预报准确率更高,克服了气象观测站分布不均、在山陵地区分布稀疏的缺陷,一定程度上改进了模式在站点稀少地区的气温预报质量,用于目前的高分辨率格点预报业务效果更好。

致谢:感谢国家气象信息中心的谷军霞、韩帅和朱智等专家在本文修改过程中提出的宝贵建议。

参考文献

- 蔡凝昊,俞剑蔚,2019.基于数值模式误差分析的气温预报方法[J].大气科学学报,42(6):864-873. Cai N H, Yu J W, 2019. Temperature forecasting method based on numerical model bias analysis[J]. Trans Atmos Sci, 42(6):864-873(in Chinese).
- 陈迪,陈豫英,马金仁,等,2019.不同时间尺度的MOS方法对宁夏气温预报的影响[J].干旱区地理,42(1):94-102. Chen D, Chen Y Y, Ma J R, et al, 2019. Influence of MOS methods of different time scale on temperature forecast in Ningxia[J]. Arid Land Geogra, 42(1):94-102(in Chinese).
- 陈鹤,蔡荣辉,陈静静,等,2022.基于深度学习方法的气温预报技术应用与评估[J].气象,48(11):1373-1383. Chen H, Cai R H, Chen J J, et al, 2022. Application and evaluation of temperature forecast based on deep learning method[J]. Meteor Mon, 48(11):1373-1383(in Chinese).
- 陈昱文,黄小猛,李熠,等,2020.基于ECMWF产品的站点气温预报集成学习误差订正[J].应用气象学报,31(4):494-503. Chen Y W, Huang X M, Li Y, et al, 2020. Ensemble learning for bias correction of station temperature forecast based on ECMWF products[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4):494-503(in Chinese).

- 戴翼,何娜,付宗钰,等,2019.北京智能网格温度客观预报方法(BJTM)及预报效果检验[J].干旱气象,37(2):339-344,350.
- Dai Y, He N, Fu Z Y, et al, 2019. Beijing intelligent grid temperature objective prediction method (BJTM) and verification of forecast result[J]. J. Arid Meteor, 37(2): 339-344, 350 (in Chinese).
- 董春卿,郭媛媛,张磊,等,2021.基于CLDAS的格点温度预报偏差订正方法[J].干旱气象,39(5):847-856. Dong C Q, Guo Y Y, Zhang L, et al, 2021. Deviation correction method of grid temperature prediction based on CLDAS data[J]. J. Arid Meteor, 39(5): 847-856 (in Chinese).
- 胡争光,薛峰,金荣花,等,2020.智能网格预报应用分析平台设计与实现[J].气象,46(10):1340-1350. Hu Z G, Xue F, Jin R H, et al, 2020. Design and implementation of gridded forecast application analysis platform[J]. Meteor Mon, 46(10): 1340-1350 (in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019.我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J].气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4): 445-457 (in Chinese).
- 金巍,刘卫华,高凌峰,等,2020.辽宁地区ECMWF模式气温预报检验及误差订正研究[J].气象与环境学报,36(6):50-57. Jin W, Liu W H, Gao L F, et al, 2020. Research on the test and error correction in temperature forecasted by the ECMWF model in Liaoning Province[J]. J. Meteor Environ, 36(6): 50-57 (in Chinese).
- 李欣,2020.基于CWRf模式的中国区域极端温度和降水高分辨率模拟结果评估及订正[D].南京:南京信息工程大学. Li X, 2020. Evaluation and calibration of high-resolution simulation of extreme temperature and precipitation in China based on CWRf model[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 刘新伟,段伯隆,黄武斌,等,2020.基于小波分析的客观预报方法在智能网格高低温预报中的应用[J].大气科学学报,43(3):577-584. Liu X W, Duan B L, Huang W B, et al, 2020. Application of objective prediction method based on wavelet analysis in intelligent grid high and low temperature prediction[J]. Trans Atmos Sci, 43(3): 577-584 (in Chinese).
- 刘莹,师春香,王海军,等,2021.CLDAS气温数据在中国区域的适用性评估[J].大气科学学报,44(4):540-548. Liu Y, Shi C X, Wang H J, et al, 2021. Applicability assessment of CLDAS temperature data in China[J]. Trans Atmos Sci, 44(4): 540-548 (in Chinese).
- 龙柯吉,师春香,韩帅,等,2019.中国区域高分辨率温度实况融合格点分析产品质量评估[J].高原山地气象研究,39(3):67-74. Long K J, Shi C X, Han S, et al, 2019. Quality assessment of high resolution temperature merged grid analysis product in China[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 39(3): 67-74 (in Chinese).
- 吕游,2019.中国降水、风速与地面气温的统计降尺度预报及订正研究[D].南京:南京信息工程大学. Lv Y, 2019. Statistical down-scaling and calibration of precipitation, wind speed and surface temperature forecast in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 门晓磊,焦瑞莉,王鼎,等,2019.基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法[J].气候与环境研究,24(1):116-124. Men X L, Jiao R L, Wang D, et al, 2019. A temperature correction method for multi-model ensemble forecast in North China based on machine learning[J]. Climatic Environ Res, 24(1): 116-124 (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).
- 齐铎,刘松涛,张天华,等,2020.基于格点的中国东北中北部2 m温度数值预报检验及偏差订正[J].干旱气象,38(1):81-88. Qi D, Liu S T, Zhang T H, et al, 2020. Grid temperature numerical forecast verification and correction over central and north region of Northeast China[J]. J. Arid Meteor, 38(1): 81-88 (in Chinese).
- 师春香,潘畅,谷军霞,等,2019.多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J].气象学报,77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 774-783 (in Chinese).
- 王丹,高红燕,马磊,等,2015.西汉和机场高速公路气象站资料质量评估[J].陕西气象,(6):18-21. Wang D, Gao H Y, Ma L, et al, 2015. Quality assessment of data observed from weather stations constructed on expressways from Xi'an to Hanzhong and Xi'an to Xianyang International Airport[J]. J. Shaanxi Meteor, (6): 18-21 (in Chinese).
- 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).
- 王启光,丑纪范,2021.浅谈大气科学的发展脉络[J].气象科技进展,11(3):8-10. Wang Q G, Chou J F, 2021. Discussion on the development of atmospheric science[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(3): 8-10 (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).
- 熊敏谔,代刊,唐健,2020.春季中国日最高气温延伸期预报误差分析及订正[J].热带气象学报,36(6):795-804. Xiong M Q, Dai K, Tang J, 2020. Analyzing and calibrating extended-range forecast of China's daily maximum temperature in spring[J]. J. Trop Meteor, 36(6): 795-804 (in Chinese).

- 杨富燕,彭芳,于飞,等,2023. CLDAS 温湿产品在贵州的适用性评估及订正[J]. 高原气象,42(2):472-482. Yang F Y, Peng F, Yu F, et al, 2023. Evaluation of applicability and correction for the CLDAS temperature and relative humidity products in Guizhou Province[J]. Plateau Meteor, 42(2):472-482(in Chinese).
- 尹姗,马杰,张恒德,等,2020. ECMWF 模式的延伸期日最高气温预报偏差估计及订正分析[J]. 沙漠与绿洲气象,14(6):77-84. Yin S, Ma J, Zhang H D, et al, 2020. Error estimation and correction of the extended-range daily maximum temperature in the ECMWF model[J]. Desert Oasis Meteor, 14(6):77-84(in Chinese).
- 俞剑蔚,李聪,蔡凝昊,等,2019. 国家级格点实况分析产品在江苏地区的适用性评估分析[J]. 气象,45(9):1288-1298. Yu J W, Li C, Cai N H, et al, 2019. Applicability evaluation of the national gridded real-time observation datasets in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 45(9):1288-1298(in Chinese).
- 曾晓青,薛峰,赵瑞霞,等,2019. 几种格点化温度滚动订正预报方案对比研究[J]. 气象,45(7):1009-1018. Zeng X Q, Xue F, Zhao R X, et al, 2019. Comparison study on several grid temperature rolling correction forecasting schemes[J]. Meteor Mon, 45(7):1009-1018(in Chinese).
- 赵琳娜,卢姝,齐丹,等,2022. 基于全连接神经网络方法的日最高气温预报[J]. 应用气象学报,33(3):257-269. Zhao L N, Lu S, Qi D, et al, 2022. Daily maximum air temperature forecast based on fully connected neural network[J]. J Appl Meteor Sci, 33(3):257-269(in Chinese).
- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012. 我国精细化客观气象要素预报进展[J]. 气象科技进展,2(5):12-21. Zhao S R, Zhao C G, Zhao R X, et al, 2012. The development of objective meteorological element forecast in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 2(5):12-21(in Chinese).

(本文责编:戴洋)