

薛湛彬,陈娴,张瑛,等,2019. ECMWF 高分辨率模式 2 m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象, 45(6):831-842. Xue C B, Chen X, Zhang Y, et al, 2019. Bias correction method for the 2 m temperature forecast of ECMWF high resolution model[J]. Meteor Mon, 45(6):831-842(in Chinese).

ECMWF 高分辨率模式 2 m 温度预报误差 订正方法研究*

薛湛彬¹ 陈 娴^{2,3,4} 张 瑛¹ 郑 婧¹ 马晓华⁵ 张雅斌⁶ 潘留杰⁵

1 江西省气象台,南昌 330096

2 江西省基础地理信息中心,南昌 330029

3 江西省测绘地理信息工程技术研究中心,南昌 330029

4 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室,南昌 330029

5 陕西省气象台,西安 710016

6 陕西省西安市气象台,西安 710016

提 要: 文章提出了一种结合滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法的综合订正技术,并对 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日期间 24~168 h 预报时效内欧洲中期天气预报中心(ECMWF)高分辨率模式的 2 m 最高和最低温度进行偏差订正和误差分析,主要结论如下:(1)ECMWF 模式在江西省的温度预报整体上比实况偏低,最高温度尤为明显,模式温度的空间分布表现出显著的系统性偏差,且偏差在不同预报时效是稳定的,订正 ECMWF 模式温度具有可行性。(2)滑动双权重平均订正法中较长的滑动订正周期对模式温度预报有更好的订正效果,采用滑动订正周期 20 d 是比较理想的。滑动双权重平均订正法具有持续的订正能力,但在季节过渡期间订正效果可能并不理想,而空间误差逐步订正法能进一步提高滑动双权重平均订正法的预报订正质量。(3)温度预报准确率表明,滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法综合订正技术较好地改善了站点温度的预报质量。经过订正后,模式最高温度 24、48、72 h 预报误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率分别从 0.59、0.55、0.52 提高到 0.75、0.68、0.62,模式最低温度 24、48、72 h 预报准确率分别从 0.84、0.83、0.82 提高到 0.89、0.87、0.85。订正后 72 h 最高和最低温度的预报准确率都大于订正前模式 24 h 的准确率。总体而言,该综合订正技术较好地订正了模式误差,且误差在空间分布上较均匀。(4)对于高山站而言,经过订正后的最高和最低温度与实况基本吻合。空间误差逐步订正法的订正量在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 之内,与滑动双权重平均订正后的偏差呈现一定的负相关,有正的订正效果。该综合订正法已成功运用于江西省精细化气象要素客观预报业务系统中。

关键词: ECMWF, 温度预报, 误差订正, 滑动平均, 逐步订正, 综合订正

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.06.009

Bias Correction Method for the 2 m Temperature Forecast of ECMWF High Resolution Model

XUE Chenbin¹ CHEN Xian^{2,3,4} ZHANG Ying¹ ZHENG Jing¹

MA Xiaohua⁵ ZHANG Yabin⁶ PAN Liujie⁵

1 Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096

2 Jiangxi Geomatics Center, Nanchang 330029

3 Jiangxi Engineering Research Center of Surveying, Mapping and Geoinformation, Nanchang 330029

* 气象预报业务关键技术发展专项(YBGJXM(2017)03-07),中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-040),公益性行业(测绘)科研专项(GYHY201512026),高分专项省域产业化应用项目(78-Y-40G17-9001-15/18),江西省气象局重点项目“江西城镇气象要素预报技术研究”,江西省气象局面上项目“省际雷达资料质量控制和三维组网技术应用研究”共同资助

2017 年 11 月 28 日收稿; 2019 年 3 月 26 日收修定稿

第一作者:薛湛彬,主要从事天气预报与研究工作. Email: xuechenbin85@163.com

4 Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Nanchang 330029

5 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710016

6 Xi'an Meteorological Observatory of Shaanxi Province, Xi'an 710016

Abstract: In this paper, a comprehensive correction technique by combining moving-biweight correction method with successive correction method for spatial error is proposed to correct and analyze the bias of 2 m maximum and minimum temperature forecast of ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) high resolution model within 24–168 h forecast time lengths during the period from 1 May 2016 to 1 May 2017. The main conclusions are as follows. (1) The 2 m maximum and minimum temperature forecasts of ECMWF model are obviously lower, on average, than the observation in Jiangxi Province. It is feasible to correct the bias of model temperature considering that the spatial distribution of ECMWF model temperature shows a significant systematic deviation which is stable at different forecast times. (2) The moving-biweight correction method having longer moving correction period has a better effect on the model temperature, which is ideal for the 20 d forecast. By combining the successive correction method for spatial error, the quality of temperature forecasting with the moving-biweight correction method could be further improved, even though the effect of moving-biweight correction method might not be satisfactory during the seasonal transition period. (3) The temperature accuracy shows that the quality of temperature forecasting has been significantly improved after bias correction conducted by the comprehensive correction technique by combining moving-biweight correction method with successive correction method for spatial error. After bias correction, the maximum temperature accuracies of forecast errors $\leq 2^{\circ}\text{C}$ in 24, 48, 72 h forecasts are greatly increased from 0.59, 0.55, 0.52 to 0.75, 0.68, 0.62, respectively, and the minimum temperature accuracies are increased from 0.84, 0.83, 0.82 to 0.89, 0.87, 0.85, respectively. After bias correction, the maximum and minimum temperature accuracies of the 72 h forecast are even greater than that of the 24 h forecast before correction. In general, the deviation of the temperature forecasting is effectively reduced by this proposed comprehensive correction technique, even with a more uniform spatial distribution. (4) For the alpine station, the maximum and minimum temperatures after correction are basically consistent with the observation. In addition, the successive correction method for spatial error has a positive correction effect on temperature correction for the reason that the deviation is within $\pm 1^{\circ}\text{C}$, but shows a certain negative correlation with that of moving-biweight correction method. This comprehensive correction technique has been successfully applied to the objective forecasting operational system of fine meteorological elements in Jiangxi Province.

Key words: ECMWF, temperature forecast, bias correction, moving average, successive correction, comprehensive correction

引 言

随着社会经济的发展和科技的不断进步,人民群众对天气预报的准确率和精细化程度提出了越来越高的要求。2 m 温度是天气预报中最重要的气象要素之一,提高其预报准确率也是天气预报的重要工作之一。尽管高分辨率数值预报技术的快速发展对中小尺度天气的预报能力不断提高,也为天气预

报提供了丰富的客观预报产品,但是由于数值模式的初始场存在误差、模式物理过程的不完美以及大气的混沌性,数值预报存在不可避免的系统性误差。为了减小模式误差和提高预报准确率,一方面可以通过资料同化来改善初始场(王学忠等,2003;托亚等,2003;盛春岩等,2006;官元红等,2014;薛湛彬等,2017),优化模式的辐射过程、微物理过程、边界层方案、积云对流过程、陆面过程等物理过程参数化方案(陈德辉等,1996;刘还珠等,1998;陈静等,

2003;黄安宁等,2008;徐道生等,2014;陈海山和孙照渤,2004a;2004b;2005)等途径来提高数值模式的准确度;另一方面可以利用误差订正技术对数值预报产品进行解释应用(杨松等,2003;赵声蓉,2006;段文广等,2012;王敏等,2012;王丹等,2016;吴启树等,2016),以降低高分辨率模式中的相对误差可能导致的模式低命中率和高虚假预警率(Mass et al, 2002)。前者需要深入研究数值模式和大气物理过程,难度较高;后者采用数理统计的方法,相对而言简单些。国内学者在模式误差订正方面做了很多相关工作。马清等(2008)利用滞后平均降低误差尺度的自适应误差订正法(类似卡尔曼滤波)对多个国家的区域集合预报模式 2 m 温度预报做订正,订正后温度预报的各项检验指标都显示出不同程度的改善,对短期预报订正效果较好。李佰平和智协飞(2012)采用一元线性回归、多元线性回归、单时效消除偏差和多时效消除偏差平均的订正方法,对 ECMWF 模式地面气温预报进行订正。结果表明,四种订正方法都能有效地减小地面气温多个时效预报的误差,改进幅度约为 1℃。马旭林等(2015)针对集合预报存在的偏差和集合离散度通常偏小的问题,在卡尔曼滤波递减平均的一阶矩和二阶矩偏差订正方案的基础上发展了综合偏差订正方案,有效地融合了一阶矩和二阶矩订正的优势,对集合平均偏差和离散度具有良好的订正效果,能够改善集合预报的整体质量。王婧等(2015)采用平均法、双权重平均法、滑动平均法和滑动双权重平均法分别对 GRAPES_RAFS 系统的 2 m 温度预报产品进行偏差订正,订正后的平均误差大部地区减小到 -1~1℃,均方根误差大部地区降低到 2.5℃ 以内,其中订正效果最好的是滑动双权重平均法,全国平均误差大部分在 -0.5~0.5℃,不超过 -1~1℃ 的范围。

ECMWF 是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)的中期天气预报数值模式,国内对 T639、ECMWF 和日本高分辨率模式预报性能对比后发现(尹姗,2016;张峰,2016;张夏琨,2017),ECMWF 对亚洲中高纬环流形势、西太平洋副热带高压、850 hPa 温度变化趋势预报具有较高的预报水平,对中短期天气预报具有重要的指导意义。目前,国内科研业务工作者在数值模式检验评估方面做过很多研究,但是对 ECMWF 高分辨率模式的 2 m 温度预报误差订正工作开展较少。为了减小高分辨率数值模式的预报

误差,提高模式的释用能力,本文在 Xu et al (2013)、王婧等(2015)等工作基础上,进一步采用动态滑动双权重平均法和空间误差逐步订正法,对 ECMWF 高分辨率模式的 2 m 最高和最低温度预报进行误差分析和订正,并对订正前后的结果进行检验和对比,从而确定最佳订正方案以改善 ECMWF 高分辨率模式的 2 m 温度预报,以期能为模式温度预报释用和精细化气象要素客观预报提供技术支持。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用的资料是 ECMWF 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日的 2 m 最高和最低温度预报产品,分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$,模式预报起始时间为每天 12 时(世界时,下同),对预报时效为 24、48、72、96、120、144 和 168 h 内的 2 m 温度进行检验。实况资料为江西省 91 个县级站(图 1)对应的同时期最高和最低温度观测资料。江西省地形较为复杂,除北部较为平坦外,东西南部三面环山,中部丘陵起伏,全省成为一个整体向鄱阳湖倾斜而往北开口的巨大盆地,如图 1 所示。ECMWF 高分辨率模式预报具有稳定的预报质量和较高的预报准确率,为了尽量减小地形的影响,本文采用双线性插值方法将模式输出的 2 m 温度格点预报场插值到站点,以此来订正站点温度预报,并与站点的观测值进行对比,统计分析温度的预报误差。

1.2 订正和检验方法

1.2.1 动态滑动双权重平均订正法

本文采用的滑动双权重平均订正与 Xu et al (2013)的方法类似,不同之处在于本文的滑动订正周期是动态调整的,而不是固定不变的。订正方法公式如下:

$$T_{i,t}^a = T_{i,t}^b + T_{i,t}^{v-b} \quad (1)$$

$$T_{i,t}^{v-b} = M_{i,t}^{v-b} + \frac{\sum_{j=1}^n [(T_{i,j,t}^v - T_{i,j,t}^b) - M_{i,t}^{v-b}][1 - (\omega_{i,j,t}^{v-b})^2]^2}{\sum_{j=1}^n [1 - (\omega_{i,j,t}^{v-b})^2]^2} \quad (2)$$

式中, $T_{i,t}^a$ 为第 i 个测站在预报时效 t ($t=24, 48, 72, 96, 120, 144, 168$ h) 订正后的温度, $T_{i,t}^b$ 为模式插值到测站的温度, $T_{i,t}^o$ 为测站的观测温度, $T_{i,t}^{o-b}$ 为订正项, 是两个权重之和, $M_{i,t}^{o-b}$ 为第 i 个测站 ($T_{i,j,t}^o - T_{i,j,t}^b$) 的中位数, n 为滑动订正周期 ($n=3, 4, 5, \dots, 20$ d)。 $\omega_{i,j,t}^{o-b}$ 为权重项:

$$\omega_{i,j,t}^{o-b} = \frac{(T_{i,j,t}^o - T_{i,j,t}^b) - M_{i,t}^{o-b}}{7.5 \times D_{i,t}^{o-b}} \quad (3)$$

式中, $D_{i,t}^{o-b}$ 是 $|(T_{i,j,t}^o - T_{i,j,t}^b) - M_{i,t}^{o-b}|$ 的中位数。当 $\omega_{i,j,t}^{o-b} > 1$ 时, 取 $\omega_{i,j,t}^{o-b} = 1$; 当 $\omega_{i,j,t}^{o-b} < -1$ 时, 取 $\omega_{i,j,t}^{o-b} = -1$ 。

动态滑动双权重平均订正法的滑动订正周期 n 是不固定的, 订正时首先根据前 n 天的模式预报和观测值计算出订正量, 然后对当前预报场进行订正, 以此类推, 计算出 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日订正后的预报场, 本文将分别对用不同滑动周期订正后的温度预报进行误差分析, 以确定最佳的滑动订正周期。

1.2.2 空间误差逐步订正法

考虑到上述动态滑动双权重平均订正是对每个测站分别进行的, 订正后的温度在空间分布上可能会出现差异较大的情况, 比如, 高山站观测到的气温经常比周围测站的要明显低, 因此, 本文又提出了空间误差逐步订正法来消除这种空间上的不连续性。首先考虑预报时效 t 时刻, 在目标测站 i 附近搜索最邻近的 m 个测站 (本文取 $m=5$), 根据这 m 个测站与目标测站 i 的空间位置关系, 将这 m 个测站的温度值用 Cressman 插值方法 (Cressman, 1959) 得到参考温度 $T_{i,t}^p$, 公式如下:

$$T_{i,t}^p = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_j T_{i,j,t}}{\sum_{j=1}^m \omega_j} \quad (4)$$

式中 ω_j 为权重项:

$$\omega_j = \begin{cases} \frac{R_j^2 - D_j^2}{R_j^2 + D_j^2}, & D_j < R_j \\ 0, & D_j \geq R_j \end{cases} \quad (5)$$

式中, R_j 是影响半径, D_j 是周围测站与目标测站的距离。

在滑动订正周期 n 内每个测站的实况温度与周围 m 个测站插值到站点的参考温度偏差的平均值记为 $\bar{T}_{i,t}^o$:

$$\bar{T}_{i,t}^o = \sum_{j=1}^n (T_{i,j,t}^o - T_{i,j,t}^{op}) \quad (6)$$

式中 $T_{i,j,t}^{op}$ 是将实况温度 $T_{i,j,t}^o$ 代入到式 (4) 得到的温度。那么, 考虑了空间误差的温度订正值可以写成以下形式:

$$T_{i,t}^a = (1 - \alpha) T_{i,t}^b + \alpha (T_{i,t}^{op} + \bar{T}_{i,t}^o) \quad (7)$$

式中, $T_{i,j,t}^{op}$ 是将预报温度 $T_{i,j,t}^b$ 代入到式 (4) 得到的温度, α 为订正系数, 本文取 $\alpha=0.2$ 。式 (7) 的目的是将预报温度在空间上的误差逐步向观测误差靠近, 采用迭代方法逐步逼近空间观测误差 $T_{i,t}^o$ 就能得到订正后的温度值。具体计算过程中, 先由式 (7) 计算得到 $T_{i,t}^{a(1)}$, 判断是否收敛, 如果不收敛, 将 $T_{i,t}^{a(1)}$ 作为模式预报值代入式 (7) 再次计算得到 $T_{i,t}^{a(2)}$, 直到收敛为止。收敛条件为:

$$\max |T_{i,t}^{a(k)} - T_{i,t}^{a(k-1)}| < \epsilon \quad (8)$$

本文取 $\epsilon=0.1^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 误差分析方法

本文采用平均误差 (ADEV)、均方根误差 (RMSE) 和预报准确率 (ACC) 来进行检验分析。公式如下所示:

$$ADEV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i^a - T_i^o) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i^a - T_i^o)^2} \quad (10)$$

$$ACC = \frac{N_c}{N_t} \quad (11)$$

式中, N_c 和 N_t 分别为预报误差的绝对值 $\leq 2^\circ\text{C}$ 的站数和预报总站数。

2 模式温度误差与订正方案

2.1 模式温度预报误差分析

本文首先通过对 ECMWF 高分辨率 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日的预报时效分别为 24、48、72、96、120、144 和 168 h 内的 2 m 最高和最低温度预报产品和江西省 91 个县级站对应的最高和最低温度观测值进行检验评估, 分析了模式 2 m 温度的预报性能和相对于实况的空间分布 (图 2)。结合图 1 的地形和观测站地理分布可以发现, ECMWF 模式的最高、最低温度能够很好地表现出温度随地形分布的特征。相对于实况而言, 模式温度的空间分布表现出显著的系统性偏差, 以 24 h 预报为例 (图 2a₁), 江西西北部的最高温度仅在 21°C 左右,

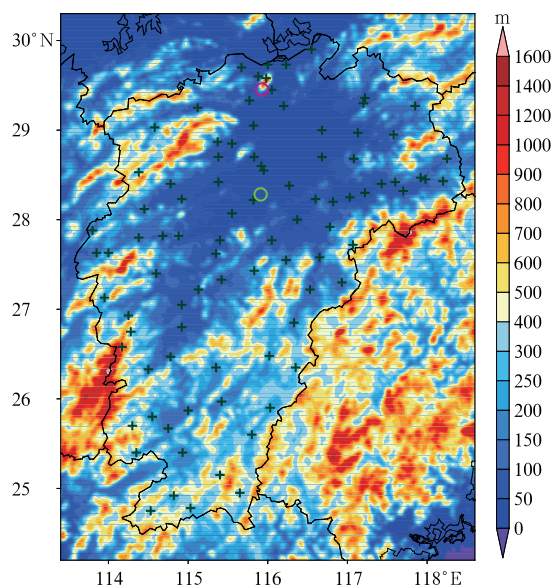


图1 江西省地形(填色)和91个县级观测站(深绿色十字形)分布图

(紫色和浅绿色圆圈所示站点分别为庐山站和南昌县站)

Fig. 1 Geography (shaded area) of Jiangxi Province and distribution of 91 county stations (dark green cross)
(The purple and light green circles indicate Lushan Station and Nanchang County Station, respectively)

而实况在 23°C 左右;江西南部最高温度在 23.5°C 左右,而实况在 25°C 左右;其他地方的最高温度较实况也偏低。随着预报时效的延长(图 $2a_2, 2a_3$),偏低的程度有所改善。整体而言,ECMWF 模式的最高温度较实况偏低。模式最低温度也有类似的结果,江西北部和中部的最低温度和实况较接近,而南部的最低温度在 16°C 左右,而实况在 17°C 左右。

为了进一步印证上述分析,本文通过计算模式 24~168 h 不同预报时效的 2 m 温度预报与实况的 ADEV 和 RMSE 后发现(表 1),模式所有预报时效的最高和最低温度整体上比实况低,最高温度较明显,24 h 的 ADEV 达 -1.02°C 。最高和最低温度的 RMSE 随着预报时效的增加而增加,两者在 168 h 达到最大值,分别为 3.39 和 2.24°C 。通过对比还可以发现,最低温度 RMSE 的最大值比最高温度 RMSE 的最小值还要低。由此可见,模式的最低温度预报比最高温度要可靠,这是符合常理的。因此,总体而言,ECMWF 模式对江西地区的 2 m 温度预报误差是具有系统性的,可以通过误差订正方法来进行调整改善以满足业务需求。

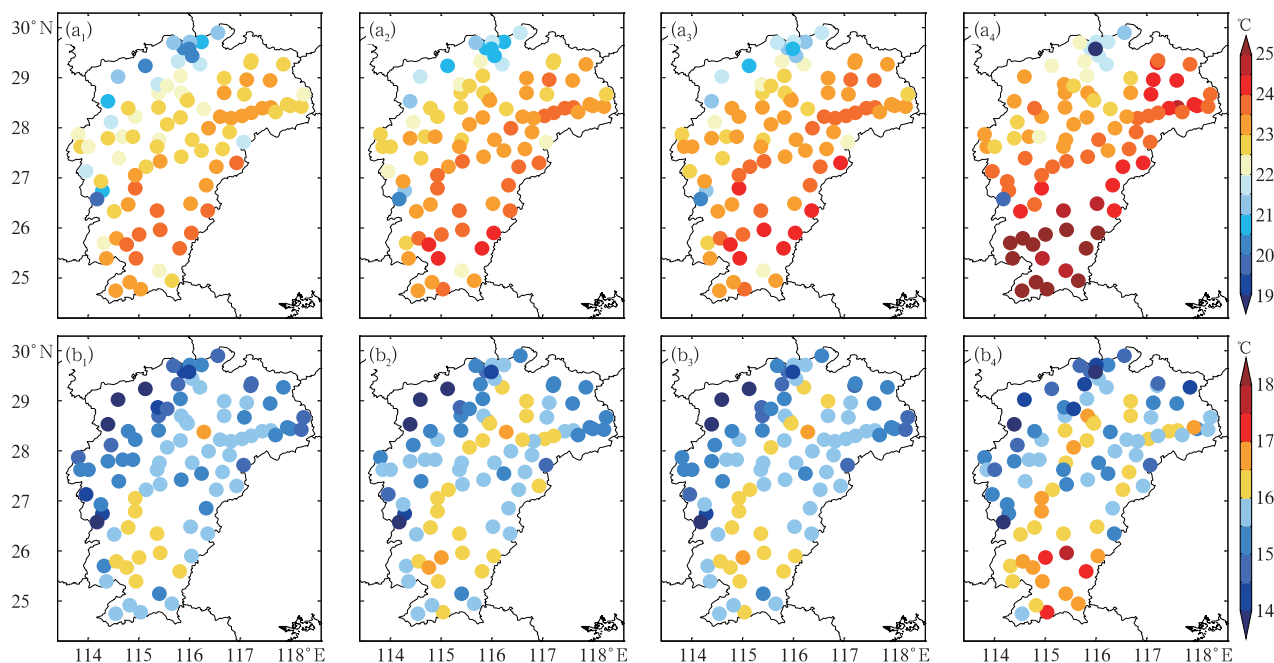


图2 2016年5月1日至2017年5月1日 ECMWF 模式(a_1, b_1)24 h, (a_2, b_2)96 h, (a_3, b_3)168 h 预报时效和实况(a_4, b_4)的平均最高温度(a)和最低温度(b)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average maximum (a) and minimum (b) temperatures of ECMWF forecast ($a_1, b_1, 24$ h; $a_2, b_2, 96$ h; $a_3, b_3, 168$ h) and observation (a_4, b_4) from 1 May 2016 to 1 May 2017

表 1 ECMWF 模式 2 m 最高和最低温度
的 ADEV 和 RMSE

Table 1 Mean error and root mean square error
of 2 m maximum and minimum temperatures
of ECMWF model

预报时 效/h	最高温度		最低温度	
	ADEV/℃	RMSE/℃	ADEV/℃	RMSE/℃
24	-1.02	2.26	-0.31	1.49
48	-0.96	2.45	-0.24	1.54
72	-0.80	2.61	-0.09	1.60
96	-0.70	2.84	-0.06	1.68
120	-0.59	3.02	-0.08	1.80
144	-0.45	3.23	-0.07	1.98
168	-0.51	3.39	-0.06	2.24

2.2 订正试验方案

为了检验和评估 1.2 节所述的动态滑动双权重平均订正和空间误差逐步订正方法对温度预报的订正效果,本文设计了六组订正试验方案:(1)cntl:不订正,ECMWF 模式直接输出;(2)mbw05:滑动双权重平均订正,滑动订正周期为 5 d;(3)mbw10:滑动双权重平均订正,滑动订正周期为 10 d;(4)mbw15:滑动双权重平均订正,滑动订正周期为 15 d;(5)mbw20:滑动双权重平均订正,滑动订正周期为 20 d;(6)final:在试验(5)的基础上,再用空间误差逐步订正法订正。试验(2)~(5)的目的是考察不同滑动订正周期 n 对温度预报订正的影响,以确定最佳滑动订正周期 n ,试验(6)的目的是考察在进行滑动双权重平均订正后,空间误差逐步订正法的进一步订正效果。

3 订正结果分析

图 3 为订正前后 ECMWF 高分辨率模式 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日期间 2 m 最高和最低温度 24~168 h 预报时效年平均的 ADEV 和 RMSE、24 h 预报时效月平均的 ADEV 和 RMSE 分布。对于最高温度(图 3a, 3b, 3e, 3f),订正前的 2 m 最高温度年 ADEV 普遍为负值,24 h 达 -1.02℃,而经过订正后的误差明显减小,24~168 h 预报时效内控制在 0.2℃以内,24~72 h 预报时效内控制在 0.1℃以内(图 3a)。RMSE 分布表明,滑动双权重平均订正法在 24~72 h 预报时效内 RMSE 都比订正前的小,订正效果较好,24 和 48 h 分别控制在 1.9 和 2.3℃以内,而 72 h 以后滑动订

正周期为 5、10、15 d 订正方法的 RMSE 逐渐大于订正前的,订正效果变差,而滑动订正周期为 20 d 和考虑了空间误差的逐步订正法在 168 h 预报时效依然比订正前的小,但订正幅度越来越小(图 3b)。这表明:(1)较长的滑动订正周期对模式温度预报有更好的订正效果,采用滑动订正周期 20 d 是比较理想的;(2)空间误差逐步订正法能进一步提高滑动双权重平均订正法的预报订正质量。试验 final 的 RMSE 在所有试验中是最小的,24、48、72 h 的 RMSE 分别从订正前的 2.26、2.45、2.61 降低到 1.81、2.12、2.36,减小幅度为 0.45、0.33、0.25,误差相对于订正前减小 19.9%、13.5%、9.6%,且 48 h 的 RMSE 低于订正前模式 24 h 的预报,72 h 的 RMSE 低于订正前模式 48 h 的预报。2 m 最低温度的 ADEV(图 3c)和 RMSE(图 3d)也有类似的结果,24~168 h 预报时效内经过各误差订正方法订正后的 ADEV 控制在 -0.2~0℃,效果较好。误差订正方法对于 RMSE 也有改进,试验 final 的改进幅度最大,24、48、72 h 的 RMSE 分别从订正前的 1.49、1.54、1.60 降低到 1.29、1.37、1.48,减小幅度为 0.20、0.17、0.12,误差相对于订正前减小 13.4%、11.0%、7.5%,略低于对最高温度的订正效果。同时注意到 72 h 的 2 m 最低温度 RMSE 低于订正前模式 24 h 的预报,96 h 的 RMSE 低于订正前模式 72 h 的预报。总的来说,采用滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法的综合订正技术(试验 final)能较好地订正模式 2 m 最高和最低温度的系统性误差。

逐月平均的 24 h 预报时效最高温度 ADEV(图 3e)显示,在 6—9 月 ECMWF 模式的最高温度比实况偏低幅度较大,其中 8 月的误差达 -1.9℃,RMSE 在 6—9 月也较大,达到 2.5℃。经过订正后的 ADEV 明显减小,误差订正方法对 6—9 月 ECMWF 模式最高温度有持续订正能力,对应的 RMSE(图 3f)也是逐月减小的,8 月的 RMSE 几乎是全年最低的,仅 1.5℃。值得注意的是,由于滑动双权重平均订正法是根据前 n 天的模式预报和观测值计算出订正量对当前预报场进行的订正,因此一定程度上存在滞后性,9 月 ECMWF 模式最高温度与实况的偏差约为 -1.5℃,而在 10 月,ECMWF 模式预报比实况偏低幅度明显减小(图 3e),偏差为 -0.7℃,因此滑动双权重平均订正法对于 10 月的温度订正可能过度,经过滑动订正周期为 5、10、

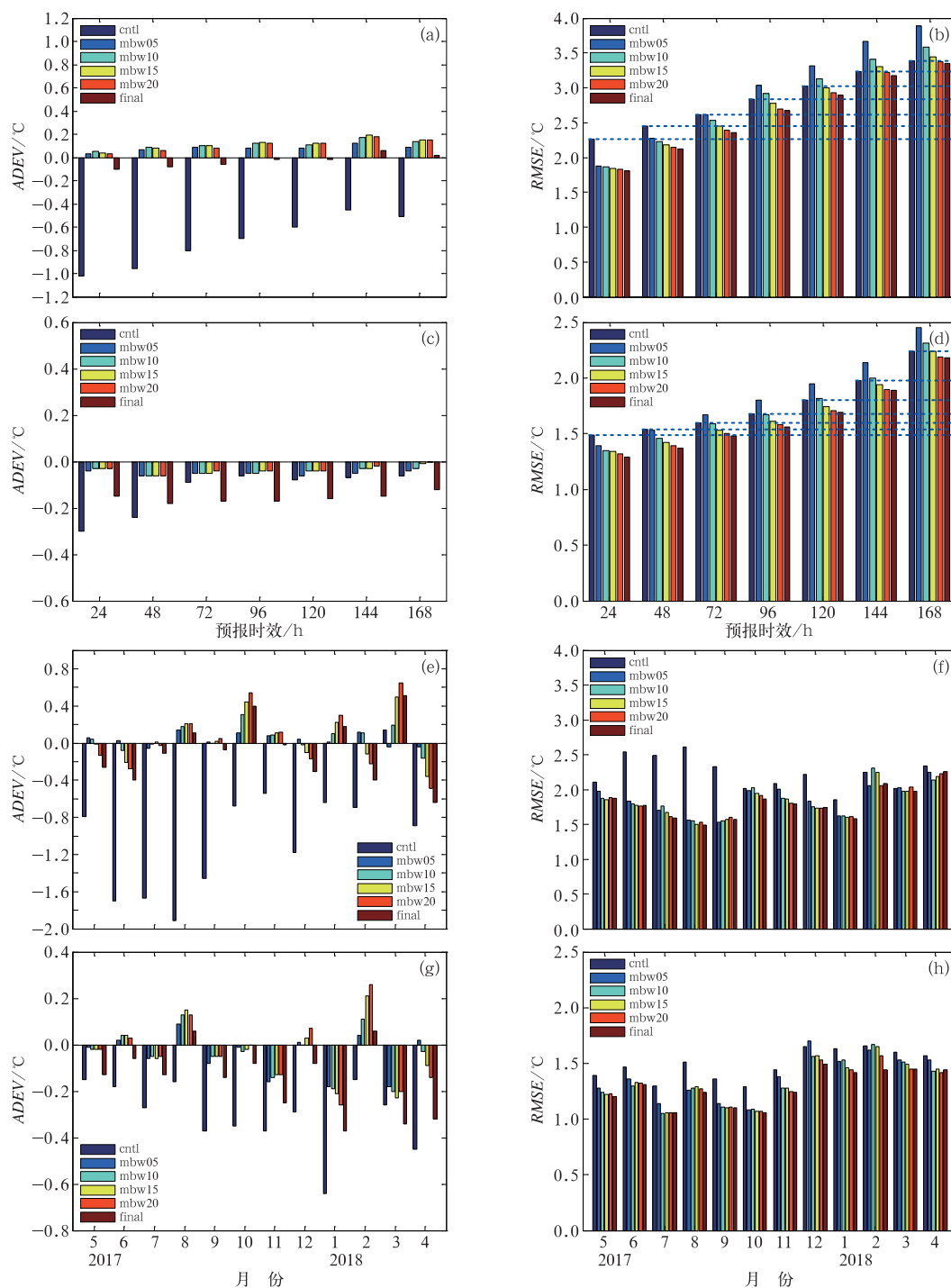


图3 2 m 最高温度(a,b,e,f)和最低温度(c,d,g,h)的 ADEV(a,c,e,g)和 RMSE(b,d,f,h)分布
(a,b,c,d)24~168 h 预报时效年平均,(e,f,g,h)24 h 预报时效月平均

Fig.3 Annual (a, b, c, d) and monthly (e, f, g, h) mean error (a, c, e, g) and root mean square error (b, d, f, h) of 2 m maximum (a, b, e, f) and minimum (c, d, g, h) temperatures

15、20 d 的订正后,ADEV(图 3e)呈现出递增的趋势,试验 mbw20 的误差最大,而经过空间误差逐步订正后误差减小,同样,在 RMSE 图上(图 3f),10 月的仅采用滑动双权重平均订正法订正后的

RMSE 与订正前的非常接近,订正效果不太好,在经过空间误差逐步订正后,RMSE 减小,因此空间误差逐步订正法能一定程度地改善订正效果。2 月和 3 月也有类似的结果,这可能跟季节过渡期间温

度日变化偏大和冬季冷空气降温天气过程有关。对于逐月平均的 24 h 预报时效最低温度(图 3g),ECMWF 模式的预报偏差较小,仅 1 月的偏差在 -0.65°C ,其他月份都在 $-0.5 \sim 0^{\circ}\text{C}$;RMSE(图 3h),夏、秋两季的明显比冬、春两季的小,经过订正后,7 月的 RMSE 最小,约 1°C 。值得一提的是,图 3g 中,2 月滑动双权重平均订正法的订正效果并不理想,而空间误差逐步订正法的订正幅度最大,订正效果较明显。

为了检验和评估上述订正方法在业务中的实际应用效果,本文进一步计算了六组试验预报误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率(图 4)以评估误差订正方法的订正技巧,发现经过误差订正方法订正后的预报准确率整体上优于订正前。对于最高温度(图 4a)而言,几乎所有订正方法的预报准确率比 ECMWF 模式的高,有显著正的订正技巧,24 h 的预报准确率最高为 0.75,随着预报时效的增加逐渐减小,72 h 仍在 0.6 以上,试验 mbw05、mbw10、mbw15 和 mbw20 的结果表明,预报准确率随着滑动订正周期 n 的增加而增加,但增加的幅度越来越有限, n 为 20 d 时预报准确率是比较满意的,同时可以兼顾业务运行效率,试验 final 的结果和试验 mbw20 非常接近,预报准确率最高,相对原 ECMWF 预报,24、48、72、96 h 预报准确率分别从 0.59、0.55、0.52、0.49 提高到 0.75、0.68、0.62、0.57,提高幅度为 0.16、0.13、0.10、0.08,大幅度提高了预报准确率,且订正后 72 h 的准确率大于订正前模式 24 h 的准确率。对于最低温度(图 4b)而言,由于 ECMWF 模式对最低温度的系统性误差较小,具有较高的预报质量,

24 h 预报准确率达 0.84,48~168 h 预报时效的预报准确率在 0.7 以上,所以订正方法的预报准确率提高相对有限,甚至试验 mbw05 和 mbw10 在 72 h 以后是负的订正技巧,但预报准确率随滑动订正周期的变化趋势和最高温度的是一致的,滑动订正周期为 20 d 时为最佳,而考虑了空间误差的逐步订正(试验 final)能够进一步提升最低温度的预报质量,相对于 ECMWF 预报,24、48、72、96 h 最低温度预报准确率分别从 0.84、0.83、0.82、0.79 提高到 0.89、0.87、0.85、0.81,提高幅度为 0.05、0.04、0.03、0.02,与最高温度类似的结果是订正后 72 h 的准确率大于订正前模式 24 h 的准确率,较好地订正了模式误差,在六组试验里是最优的。因此,综合考虑这六组试验方案对模式最高温度和最低温度的订正效果,本文最终采用试验 final 的方案作为最佳试验方案,即综合了滑动双权重平均订正法($n=20$ d)和空间误差逐步订正法的订正技巧。

图 5 给出了采用试验 final 方案订正前后 2 m 最高温度在 24~168 h 预报时效的 ADEV 和 RMSE 空间分布。可以发现,订正前江西西北部和南部的最高温度平均偏差普遍在 -2°C 左右,其他地区在 $-1.5 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ (图 5a₁~5a₇),山区和丘陵地区平均偏差明显高于平原地区,订正后的所有站点对平均偏差控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 之内(图 5b₁~5b₇),与观测更为接近。RMSE(图 5c₁~5c₇),订正后与订正前的偏差在 24~96 h 预报时效内大部分在 $-1.0 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$,江西西北部和南部部分海拔较高的站点在 $-2.0 \sim -1.5^{\circ}\text{C}$,误差有较明显改善,120 h 预报时效以后订正效果不太明显,但对于高山站(例如庐山

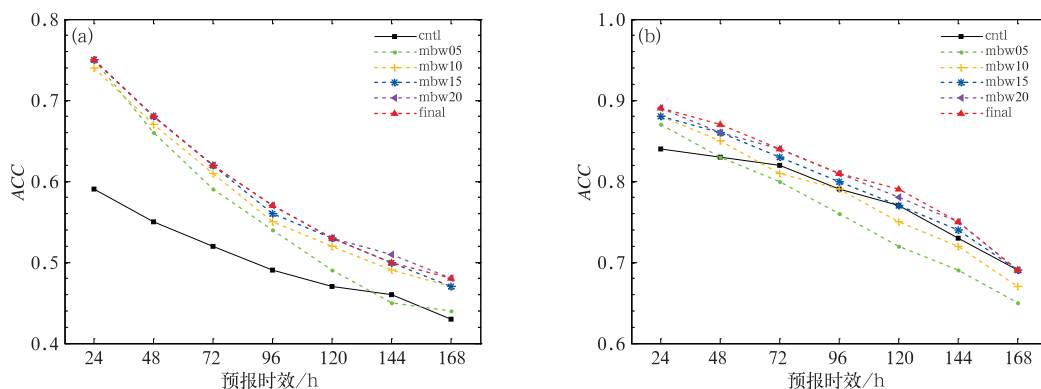


图 4 2 m 最高温度(a)和最低温度(b)在不同预报时效的预报误差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的准确率

Fig. 4 2 m maximum (a) and minimum (b) temperature accuracies of forecast error $\leq 2^{\circ}\text{C}$ in different forecast time lengths

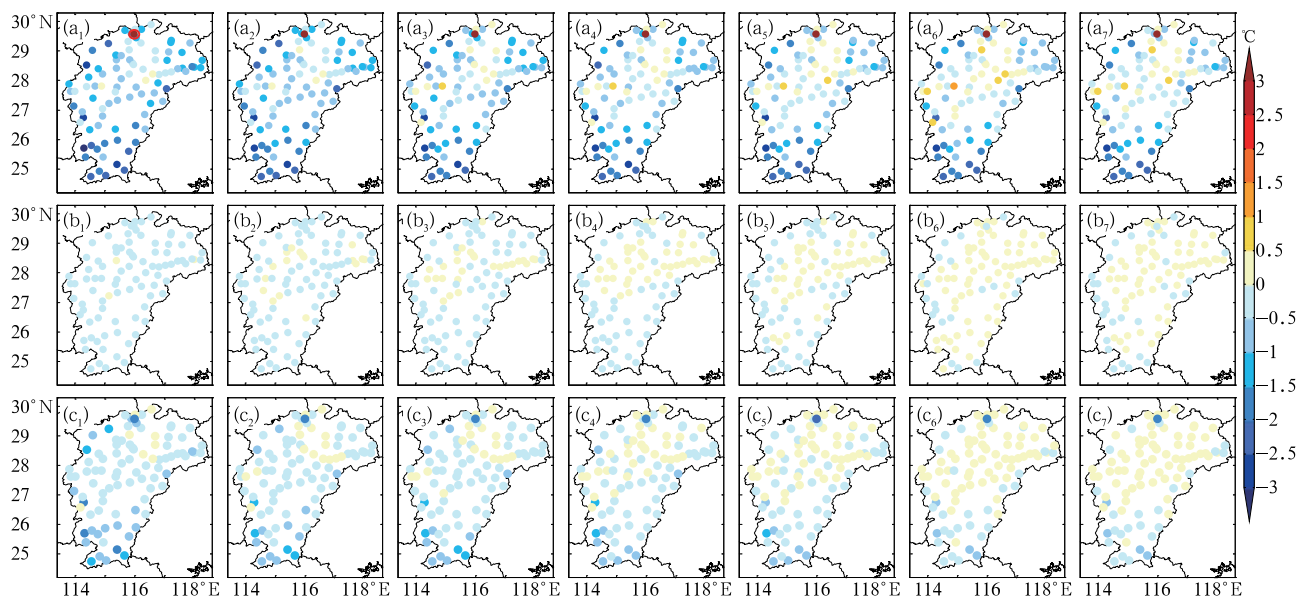


图5 订正前(a)和订正后(b)2 m 最高温度不同预报时效的 ADEV 和(c)订正后的 RMSE

相对于订正前的差值的空间分布

(a_1, b_1, c_1) 24 h, (a_2, b_2, c_2) 48 h, (a_3, b_3, c_3) 72 h, (a_4, b_4, c_4) 96 h, (a_5, b_5, c_5) 120 h,

(a_6, b_6, c_6) 144 h, (a_7, b_7, c_7) 168 h

(图 5a₁ 中红色圆圈所示站点为庐山站)

Fig. 5 Spatial distribution of mean errors of (a) before bias correction, (b) after bias correction and (c) root mean square error of 2 m maximum temperature before and after bias correction in different forecast time lengths

(a_1, b_1, c_1) 24 h, (a_2, b_2, c_2) 48 h, (a_3, b_3, c_3) 72 h, (a_4, b_4, c_4) 96 h, (a_5, b_5, c_5) 120 h,

(a_6, b_6, c_6) 144 h, (a_7, b_7, c_7) 168 h

(The red circle in Fig. 5a₁ indicates the location of Lushan Station)

站)而言,24~120 h 预报时效内订正后的 RMSE 始终是减小的。整体而言,订正后的误差在空间分布上是较均匀的,并没有因为地形和南北纬度差异影响出现分布不均的现象。2 m 最低温度订正前后的误差空间分布也有类似的特征(图略)。结果总体上表明,经过滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法综合订正后,很好地改善了站点温度的预报质量。

上述分析了滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法对模式温度预报的平均订正效果,并不能代表单站的订正作用,尤其是那些受地形作用影响较大的高山站,因此,本文选取具有代表性的高山站——庐山站(位置在图 1 中的紫色圆圈标注,观测站高度 1164.5 m)和平原站——南昌县站(位置在图 1 中的浅绿色圆圈标注)24 h 预报时效最高和最低温度订正前后与实况进行对比(图 6),以进一步分析订正方法对高山站和平原站的订正效果,其中订正后的数据来自于试验 mbw20 和试验 final,试

验 final—试验 mbw20 表示空间误差逐步订正法的订正量。对于庐山站(图 6a, 6b),模式的最高和最低温度存在普遍偏高的现象,在夏季 6—9 月尤为明显,最高和最低温度偏差普遍在 3~6℃,最高偏差可达 9℃,并且这种偏差在其他预报时效(图略)变化很小,一方面说明 ECMWF 模式的稳定性较高,另一方面说明模式存在的系统性也是稳定的,可以通过偏差订正消除。经过订正后(红色线),最高和最低温度与实况的偏差曲线在 0 线附近振荡,特别是在 7—9 月偏差较小,大部分在 2℃ 以内,跟实况有很好的—致性。空间误差逐步订正法的订正量(蓝色线)在 ±1℃ 之内,跟订正后的偏差(红色线)呈现一定的负相关,表明有正的订正效果。注意到,订正前后温度偏差的离散程度在 5—9 月较小,而在其他月份较大,表明该综合订正方法可能无法改变模式预报误差的离散程度,因此具有一定的局限性,需要今后做进一步研究。对于南昌县站(图 6c, 6d),平原站的温度预报相对于高山站的平稳很多,订正

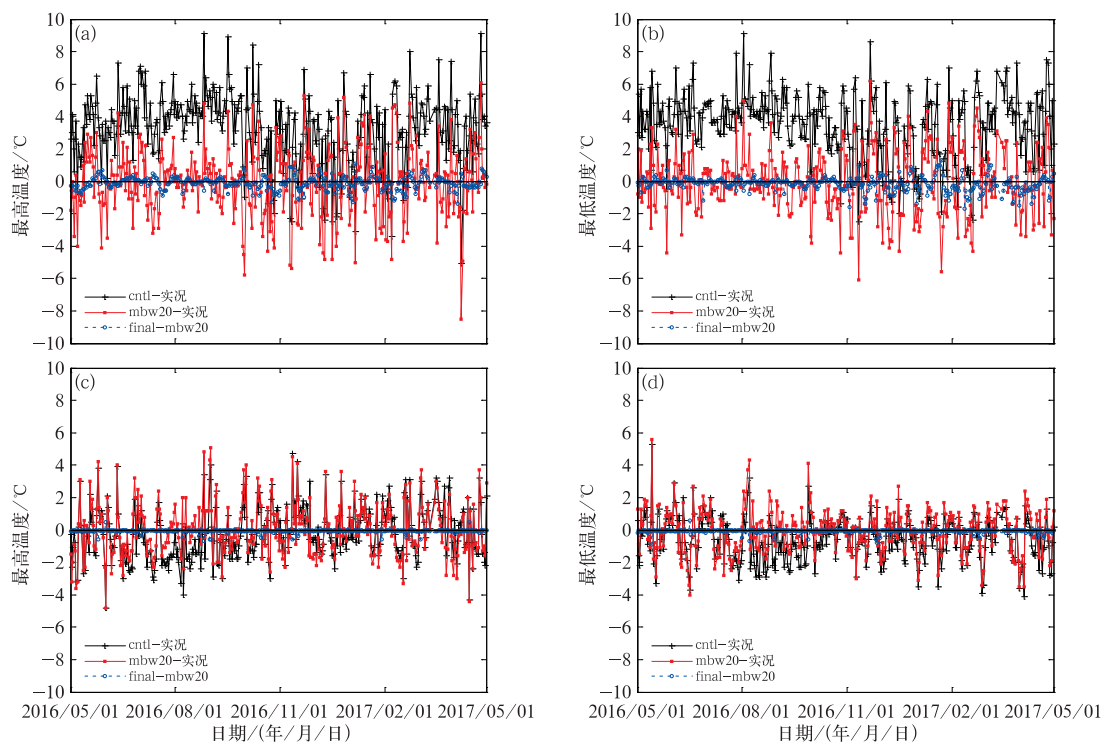


图 6 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日庐山站(a,b)和南昌县站(c,d)24 h 预报时效的 2 m 最高温度(a,c)和最低温度(b,d)订正前后与实况的偏差

Fig. 6 Variation curves of 2 m maximum (a, c) and minimum (b, d) temperature bias of 24 h forecast before and after bias correction at Lushan Station (a, b) and Nanchang County Station (c, d) from 1 May 2016 to 1 May 2017

后的最高、最低温度偏差大部分在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内。该测站在 7—10 月 ECMWF 模式存在较明显的系统误差,模式最高和最低温度比实况偏低 2°C 左右,经过滑动双权重平均订正法后偏差得到较好地订正。空间误差逐步订正法对偏差较大的预报有一定的订正,但总体上订正量较小,基本上在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内,大部分时间接近于 0°C ,表明该方法对平原站的订正作用较小。

4 结论和讨论

本文通过对 ECMWF 高分辨率 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 5 月 1 日 24~168 h 预报时效内的 2 m 最高和最低温度预报产品和江西省 91 个县级站相应观测值进行检验评估,分析了 ECMWF 模式 2 m 温度的预报性能和相对于实况的空间分布。然后采用滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法对模式温度预报进行偏差订正,并对订正前后的结果进行检验分析,主要结论如下:

(1) 结合江西省地形和观测站地理分布发现,ECMWF 模式的最高、最低温度能够很好地表现出温度随地形分布的特征。整体而言,ECMWF 模式在江西省的温度预报比实况偏低,最高温度尤为明显,模式温度的空间分布表现出显著的系统性偏差,且偏差在不同预报时效是稳定的,订正 ECMWF 模式温度具有可行性。

(2) RMSE 分布表明,滑动双权重平均订正法中较长的滑动订正周期对模式温度预报有更好的订正效果,采用滑动订正周期 20 d 是比较理想的。空间误差逐步订正法能进一步提高滑动双权重平均订正法的预报订正质量,RMSE 在所有试验中最小,24、48、72 h 最高温度的 RMSE 相对于订正前分别减小 19.9%、13.5%、9.6%,且 48 h 的 RMSE 低于订正前模式 24 h 的预报,72 h 的 RMSE 低于订正前模式 48 h 的预报;24、48、72 h 最低温度的 RMSE 相对于订正前分别减小 13.4%、11.0%、7.5%,且 72 h 的 RMSE 低于订正前模式 24 h 的预报,96 h 的 RMSE 低于订正前模式 72 h 的预报。滑动双权

重平均订正法具有持续的订正能力,但在季节过渡期间订正效果可能并不理想,经过空间误差逐步订正后订正幅度较大,效果较明显,因此结合空间误差逐步订正法能一定程度地提高订正作用。总的来说,采用滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法的综合订正技术能较好地订正模式 2 m 最高温度和最低温度的系统性误差。

(3) 温度的预报准确率总体上表明,经过综合订正技术后,很好地改善了站点温度的预报质量,在 6 组试验里是最优的。模式最高温度经过订正后,相对原 ECMWF 预报,24、48、72、96 h 预报准确率分别从 0.59、0.55、0.52、0.49 提高到 0.75、0.68、0.62、0.57,提高幅度为 0.16、0.13、0.10、0.08,大幅度提高了预报准确率。对模式最低温度的订正相对有限,24、48、72、96 h 预报准确率分别从 0.84、0.83、0.82、0.79 提高到 0.89、0.87、0.85、0.81,提高幅度为 0.05、0.04、0.03、0.02。订正后 72 h 最高温度和最低温度的预报准确率都大于订正前模式 24 h 的准确率。24~168 h 预报时效的 ADEV 和 RMSE 空间分布同样表明经过综合订正技术订正后江西西北部和南部山区和丘陵地区的误差有明显改善,且误差在空间分布上是较均匀的,并没有因为地形和南北纬度差异影响出现分布不均的现象。

(4) 对于高山站而言,经过订正后的最高和最低温度基本和实况吻合,特别是在 7—9 月偏差较小,大部分在 2℃ 以内,跟实况有很好的一致性。空间误差逐步订正法的订正量在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 之内,与滑动双权重平均订正后的偏差呈现一定的负相关,表明有正的订正效果。对于平原站而言,平原站的温度预报相对于高山站的平稳很多,订正后的最高、最低温度偏差大部分在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内,空间误差逐步订正法对偏差较大的预报有一定的订正,但总体上订正量较小,对平原站的订正作用较小。另外,从偏差的离散度来看,该综合订正方法可能无法改变模式预报误差的离散程度,因此具有一定的局限性,需要今后做进一步研究。

参考文献

陈德辉,王诗文,汪厚君,1996. 改进的物理过程参数化对台风路径数值预报的影响[J]. 应用气象学报,7(1):1-8. Chen D H, Wang S W, Wang H J, 1996. Performance of parameterization of sub-scale physical processes in numerical model and its effects on typhoon track forecastings[J]. J Appl Meteor Sci, 7(1):1-8 (in Chinese).

陈海山,孙照渤,2004a. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 I. 模式设计[J]. 大气科学,28(6):801-819. Chen H S, Sun Z B, 2004a. Design of a comprehensive land surface model and its validation Part I. model description[J]. Chin J Atmos Sci, 28(6):801-819 (in Chinese).

陈海山,孙照渤,2004b. 积雪季节变化特征的数值模拟及其敏感性试验[J]. 气象学报,62(3):269-284. Chen H S, Sun Z B, 2004b. Numerical simulation of the evolution of snow cover and its sensitivity experiments[J]. Acta Meteor Sin, 62(3):269-284 (in Chinese).

陈海山,孙照渤,2005. 陆面模式 CLSM 的设计及性能检验 II. 模式检验[J]. 大气科学,29(2):272-282. Chen H S, Sun Z B, 2005. Design of a comprehensive land surface model and its validation Part II. model validation[J]. Chin J Atmos Sci, 29(2):272-282 (in Chinese).

陈静,薛纪善,颜宏,2003. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究[J]. 气象学报,61(2):203-218. Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation[J]. Acta Meteor Sin, 61(2):203-218 (in Chinese).

段文广,周晓军,石永炜,2012. 数据挖掘技术在精细化温度预报中的应用[J]. 干旱气象,30(1):130-135. Duan W G, Zhou X J, Shi Y W, 2012. Application of data mining technique on refined temperature forecast[J]. Arid Meteor, 30(1):130-135 (in Chinese).

官元红,周广庆,陆其峰,等,2014. 大气初始场对短期气候数值预测的影响[J]. 大气科学学报,37(5):631-641. Guan Y H, Zhou G Q, Lu Q F, et al, 2014. Influence of initial atmospheric conditions on short-term climate numerical prediction[J]. Trans Atmos Sci, 37(5):631-641 (in Chinese).

黄安宁,张耀存,朱坚,2008. 物理过程参数化方案对中国夏季降水日变化模拟的影响[J]. 地球科学进展,23(11):1174-1184. Huang A N, Zhang Y C, Zhu J, 2008. Impacts of physical process parameterizations on simulation of the diurnal variations of summer precipitation over China[J]. Adv Earth Sci, 23(11):1174-1184 (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).

刘还珠,陈德辉,滕俏彬,1998. 不同物理过程参数化对模式台风的影响及其动力结构的研究[J]. 应用气象学报,9(2):141-150. Liu H Z, Chen D H, Teng Q B, 1998. Researches on the influence of parameterization of physical process on modeling typhoon and its dynamical structure[J]. J Appl Meteor Sci, 9(2):141-150 (in Chinese).

马清,龚建东,李莉,等,2008. 超级集合预报的误差订正与集成研究[J]. 气象,34(3):42-48. Ma Q, Gong J D, Li L, et al, 2008. Study of bias correction and consensus in regional multi model super ensemble forecast[J]. Meteor Mon, 34(3):42-48 (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).
- 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等, 2006. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验[J]. 气象学报, 64(3): 293-307. Sheng C Y, Xue D Q, Lei T, et al, 2006. Comparative experiments between effects of doppler radar data assimilation and increasing horizontal resolution on short range prediction[J]. Acta Meteor Sin, 64(3): 293-307(in Chinese).
- 托亚, 梁海河, 马淑芬, 等, 2003. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究[J]. 大气科学学报, 26(5): 661-667. Tuo Y, Liang H H, Ma S F, et al, 2003. A Preliminary research on improving MM5 initial fields using radar data[J]. Trans Atmos Sci, 26(5): 661-667(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]. Arid Meteor, 34(3): 575-583(in Chinese).
- 王婧, 徐枝芳, 范广洲, 等, 2015. GRAPES_RAFS 系统 2 m 温度偏差订正方法研究[J]. 气象, 41(6): 719-726. Wang J, Xu Z F, Fan G Z, et al, 2015. Study on bias correction for the 2 m temperature forecast of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 41(6): 719-726(in Chinese).
- 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 M, Li X L, Fan G Z, et al, 2012. Calibrating 2 m temperature forecast for the regional ensemble prediction system at NMC[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 395-401(in Chinese).
- 王学忠, 沙文钰, 端义宏, 2003. 利用卫星云图变分同化初始场对热带气旋路径影响的数值试验[J]. 热带气象学报, 19(1): 107-112. Wang X Z, Sha W Y, Duan Y H, 2003. A numerical study of tropical cyclone forecasting based on satellite images variational assimilation initial field[J]. J Trop Meteor, 19(1): 107-112(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).
- 徐道生, 陈子通, 钟水新, 等, 2014. 对流参数化与微物理过程的耦合及其对台风预报的影响研究[J]. 气象学报, 72(2): 337-349. Xu D S, Chen Z T, Zhong S X, et al, 2014. Study of the coupling of cumulus convection parameterization with cloud microphysics and its influence on forecast of typhoon[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 337-349(in Chinese).
- 薛湛彬, 陈炯, 吴俞, 等, 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用[J]. 大气科学, 41(4): 673-690. Xue C B, Chen X, Wu Y, et al, 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4): 673-690(in Chinese).
- 杨松, 杞明辉, 姚德宽, 2003. 误差订正在预报集成中的应用研究[J]. 气象, 29(12): 22-25. Yang S, Qi M H, Yao D K, 2003. Application of error correction in forecast ensemble[J]. Meteor Mon, 29(12): 22-25(in Chinese).
- 尹姗, 2016. 2015 年 12 月至 2016 年 2 月 T639、ECMWF 及日本模式中中期预报性能检验[J]. 气象, 42(5): 637-642. Yin S, 2016. Performance verification of medium range forecasting by T639 and ECMWF and Japan model from December 2015 to February 2016[J]. Meteor Mon, 42(5): 637-642(in Chinese).
- 张峰, 2016. 2016 年 3—5 月 T639、ECMWF 及日本模式中中期预报性能检验[J]. 气象, 42(8): 1020-1025. Zhang F, 2016. Performance verification of medium range forecasts by T639, ECMWF and Japan models from March to May 2016[J]. Meteor Mon, 42(8): 1020-1025(in Chinese).
- 张夏琨, 2017. 2016 年 9—11 月 T639、ECMWF 及日本模式中中期预报性能检验[J]. 气象, 43(2): 240-248. Zhang X K, 2017. Performance verification of medium range forecasts by T639, ECMWF and Japan models from September to November 2016[J]. Meteor Mon, 43(2): 240-248(in Chinese).
- 赵声蓉, 2006. 多模式温度集成预报[J]. 应用气象学报, 17(1): 52-58. Zhao S R, 2006. Multi-model consensus forecast for temperature[J]. J Appl Meteor Sci, 17(1): 52-58(in Chinese).
- Cressman G P, 1959. An operational objective analysis system[J]. Mon Wea Rev, 87(10): 367-374.
- Mass C F, Ovens D, Westrick K, et al, 2002. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? [J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(3): 407-430.
- Xu Z F, Wang Y, Fan G Z, 2013. A two-stage quality control method for 2-m temperature observations using biweight means and a progressive EOF analysis[J]. Mon Wea Rev, 141(2): 798-808.