大气科学学报　2020 年　第 43 卷　第 4 期: 673-686

论 著

http: //dqkxxb.cnjournals.org

基于小波分析的西北区智能网格气温客观预报方法的检验评估

刘新伟①，刘娜①*，段明铿②，段伯隆①，牟静③

① 兰州中心气象台，甘肃 兰州 730020;

② 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/气候与环境变化国际合作联合实验室，江苏 南京 210044;

③ 通渭县华家岭气象站，甘肃 定西 743305

* 联系人，E-mail: liunavip666@ 163.com

2020-04-26 收稿，2020-05-10 接受

国家重点研发计划项目(2017YFC1502002) ; 国家自然科学基金资助项目(41675056) ; 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2019-122) ; 甘肃对流性暴雨预报预警关键技术创新团队(GSQXCXTD-2020-01) ; 甘肃省气象局十人计划(GSMArc2019-04)

摘要　基于中国气象局(China Meterological Administration，CMA) 高分辨率数值预报产品、欧洲中期数值预报中心(the European Center for Medium-range Weather Forecast，ECMWF) 精细化数值预报产品和国家级地面观测站数据，采用小波分析方法及滑动训练、最优融合等技术对模式误差序列进行时频处理，实现了对模式系统误差和局地误差的订正，发展了西北区智能网格气温客观预报方法(northwest intelligent grid temperature objective prediction method，NWTM) 。以 2017 年 3 月—2018 年 2 月数据作为训练样本，对 2018 年 3 月—2019 年 1 月西北区 239 个国家基本站进行检验。结果表明: 1) NWTM 对 CMA 和 ECMWF 两种模式产品的气温预报能力有显著的提升; 随着预报时效增长，两种模式订正产品的误差增大。2) NWTM 对 ECMWF 西北区最高气温的订正效果要明显优于 CMA，但就最低气温而言，NWTM 对 CMA 的订正效果更为显著。其中，就 24 h 最高气温而言，ECMWF 在宁夏的订正效果最好，CMA 在青海的订正效果最好; 而对于 24 h 最低气温的预报，CMA 在西北 4 省的订正效果相差不大，ECMWF 在陕西的订正效果最好。3) 空间误差检验表明: 针对最高气温的预报，ECMWF 订正产品的订正能力明显优于 CMA，特别是在甘肃河西走廊和中东部、陕西北部和南部、宁夏中南部及青海大部。就最低气温的预报而言，ECMWF 和 CMA 对甘肃河东和陕西南部的订正能力较好; ECMWF 订正产品在宁夏中南部及青海南部的订正能力高于 CMA，而 CMA 订正产品在陕西中部的订正能力更优。

关键词

智能网格;

小波分析;

气温预报

气温是天气预报中的基本气象要素之一，其变化既与纬度、海拔高度、太阳高度角有关，又受天空状况、天气现象、日照、风、地表状况等因子的影响。作为天气预报的重要组成部分，其重要性不言而喻。气温不但对于干旱、霜冻、大雾等灾害性天气的发生发展起着重要的作用，也是农林牧渔等部门判断灾害状况的重要指标，而且对于高低温的预警、舒适度等各种公共预报服务项目，均需要精细化的气温预报作为基础(盛裴轩等，2003; 罗聪等，2012) 。

所谓精细化，就是天气预报的准确和细致，预报的气象要素更加细分、时空分辨率更高、预报更加适应个性化的需求。因此，现代天气业务是以天气预

引用格式: 刘新伟，刘娜，段明铿，等，2020. 基于小波分析的西北区智能网格气温客观预报方法的检验评估 [J] . 大气科学学报，43(4) : 673-686.

Liu X W，Liu N，Duan M K，et al.，2020. Test and evaluation of Northwest Intelligent Grid Temperature Objective Prediction Method based on wavelet analysis [J] . Trans Atmos Sci，43(4) : 673-686. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20200426002. (in Chinese) .

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

报的精细化发展为基本特征，以提高精细化预报准确率为根本要求（矫海燕，2010）。高时空分辨率的精细化智能网格预报是区别于以往的人工主观预报的，是完全基于客观定量化的预报。这种智能网格预报的准确率不仅取决于高分辨率数值模式预报能力的提高，还取决于对模式产品的合理释用。因此，在模式预报性能基本稳定的前提下，加强对高分辨率模式产品的解释应用能力就成为提高个点要素预报能力的关键问题（卫捷等，2005）。

由于气温的预报具有连续性，方便展开精细化业务预报，成为智能网格预报探索的重要方向。目前国内外学者针对确定性预报模式和集合预报气温预报方法开展了很多订正方法方面的研究，应用统计及物理方法来减小日最高、最低气温预报的偏差，是数值预报后处理的重要研究方向之一（智协飞和陈雯，2010；智协飞等，2013；Krishnamurti et al.，2016）。其中，国内针对气温的数值预报产品的释用提出了统计分析方法（如 PP 法、MOS 方法（陈豫英等，2005）、线性回归法、卡尔曼滤波方法）、非线性方法（如 BP 神经网络（熊世为等，2017）、支持向量机方法）、相似预报理论和集合预报等预报方法（薛志磊和张书余，2012）。在此基础上，国内对于 ECMWF 精细化数值预报模式、GRAPES 高分辨率数值预报模式以及 CMA 高分辨率数值预报模式的精准释用进行了一系列研究，包括两种：单一模式的释用研究和多模式的对比与集成研究。通过不同的方法对这三种模式产品的释用单独进行分析后发现，单一模式的订正产品对所研究区域的气温预报能力均有一定的提升或正的订正效果（吴爱敏等，2009；李佰平和智协飞，2012；赵滨和张博，2018；蔡凝昊和俞剑蔚，2019；戴翼等，2019）。相比于单个模式，多模式动态集成网格释用技术方案较明显提升了最高气温的预报技巧，最低气温提升幅度较小（吴乃庚等，2017）；此外，多种模式的对比研究结果表明 CMA 数值预报产品对宁夏地区的预报除晴雨准确率外，其他要素的预报准确率大多较差（张成军等，2017），而“站点订正差值向格点传递”方法能够很好地订正了 ECMWF 和 CMA 模式格点温度预报的系统性误差（潘留杰等，2017）。

以上研究在不同程度上均依赖于 ECMWF 精细化数值预报产品，但在业务运行中更多地应用了 CMA 高分辨率数值预报产品的结果。目前，针对这两种模式的高分辨率温度预报产品应用于西北区的误差分析及其订正产品的相关研究较少，本文针对此问题进行进一步的探索，以期对业务中常用的两种模式气温预报产品的精准释用提供一定的技术支撑和理论依据，并进一步加强西北区 239 个国家级基本站的最高、最低气温的预报服务能力。

1　资料和方法

1.1　资料

所用的实况资料为西北区（甘肃、青海、宁夏、陕西）共 239 个国家气象观测站（以下简称“国家站”）的地面最高和最低气温数据（图 1）。同时，用于订正的精细化格点预报数据有两种：一种是中国气象局（China Meterological Administration，CMA）高分辨率数值预报产品提供的智能网格指导预报产品；另一种是欧洲中期天气预报中心（the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）提供的精细化数值预报产品。水平分辨率为 0.125°×0.125°，起报时次均为每日的 08 时和 20 时（北京时，下同），预报时效为 0～240 h，逐 24 h 最高、最低气温格点资料。

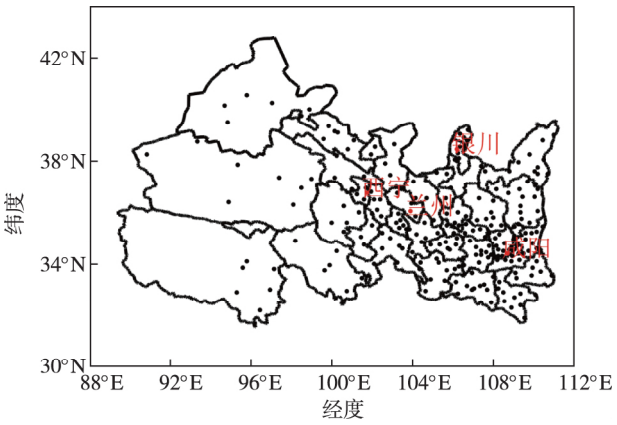

图 1　西北区 239 个国家气象观测站分布（红色圆点为西北区的四个代表站）

Fig.1　Distribution of 239 national meteorological stations in Northwest China（The red dotts are the four representative stations in Northwest China）

采用 2017 年 3 月 1 日—2018 年 2 月 28 日的预报及观测产品作为训练样本，选取 2018 年 3 月 1 日—2019 年 1 月 31 日的数据为测试样本。为保证数据的完整性和预报结果的精确度，所用到的智能网格预报数据（CMA 和 ECMWF）的起报时次均为 20 时，预报时效选择 24、48 和 72 h。

1.2　方法

1.2.1　小波分析法

利用 Morlet 小波变换法（王蕊等，2009）分析 239 个站点的最高、最低气温周期，如式（1）所示，其中 c 为常数（设定为 6.2）、i 表示虚数。

$$\Psi(t) = e^{ict}e^{-t^2/2}。\qquad (1)$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Morlet 小波变化在时频两域都具有表征信号局部特征的能力，其通过将时间系列分解到时间频率域内，从而得出时间系列的显著波动模式，即周期变化动态，以及周期变化动态的时间格局。

1.2.2　滑动训练方法

1）采取邻域法（师春香等，2018）来对应 CMA 和 ECMWF 的网格点预报产品与西北区 239 个国家站的实况数据。即选择距离某一站点最邻近的网格点预报作为该站点的预报值，若存在多个距离相等的格点，则取东北角格点作为最邻近的点。由此筛选出 239 个站点对应的格点预报值，并与对应日期的实况数据作差，得到西北区 239 个国家站 3 个预报时次（24、48、72 h）的最高、最低气温差值时间序列。

2）针对这 3 个预报时效的最高、最低气温差值时间序列，采用 Morlet 小波分析方法，分析每个站点不同预报时次的最高、最低气温的周期特征。以甘肃省兰州站 CMA 24 h 最高气温为例，对其进行小波分析后发现，小波变换的时频分布和功率谱分布均表明该站 24 h 最高气温的小波周期为 27 d（图 2）。同理即可得出西北区其他 238 个国家站的最高、最低气温的主要周期。

3）对西北区 239 个国家站的最高、最低气温周期进行滑动训练订正，以甘肃省兰州站 24 h 最高气温（滑动周期为 t）为例，具体步骤如下：

所选日期向前滑动 t 天，将前 t 天的预报值与对应日期的实况值作差后进行平均，所得的平均值称为兰州站 24 h 最高气温预报的滑动订正系数；

将滑动订正系数与对应站点的格点预报值相加，可得出兰州站 24 h 最高气温的滑动训练订正值。

1.2.3　最优融合方法

目前，滑动训练方法只能订正数值模式产品的系统性误差，而不能订正由于地形、海拔等造成的其他误差。因此，对 CMA 指导产品和 ECMWF 格点预报产品与上述滑动订正的结果进行融合得到一个最优融合订正值，具体步骤如下：

1）确定最优融合的订正周期。

计算前 t 天（t 从 1 d 至 30 d 依次递增）CMA 指导产品与滑动训练订正值的预报准确率进行对比发现：1～30 d 的预报准确率相差较小（<0.5），不易区分；进一步对这 30 d 的预报准确率进行滤波分析（图略），结果表明 24 h、48 h 和 72 h 的高低温产品分别取 9 d、13 d 和 10 d 作为最优融合的订正周期，其订正结果较为显著。另根据业务需要，在统计结果的基础上结合西北区本地预报经验，最终选取 15 d 作为计算最优融合结果的订正周期。

2）将所选日期向前取 15 d 的 CMA 指导产品及滑动订正产品，计算二者的预报准确率求平均，保留平均准确率高的产品，即为最优融合产品。

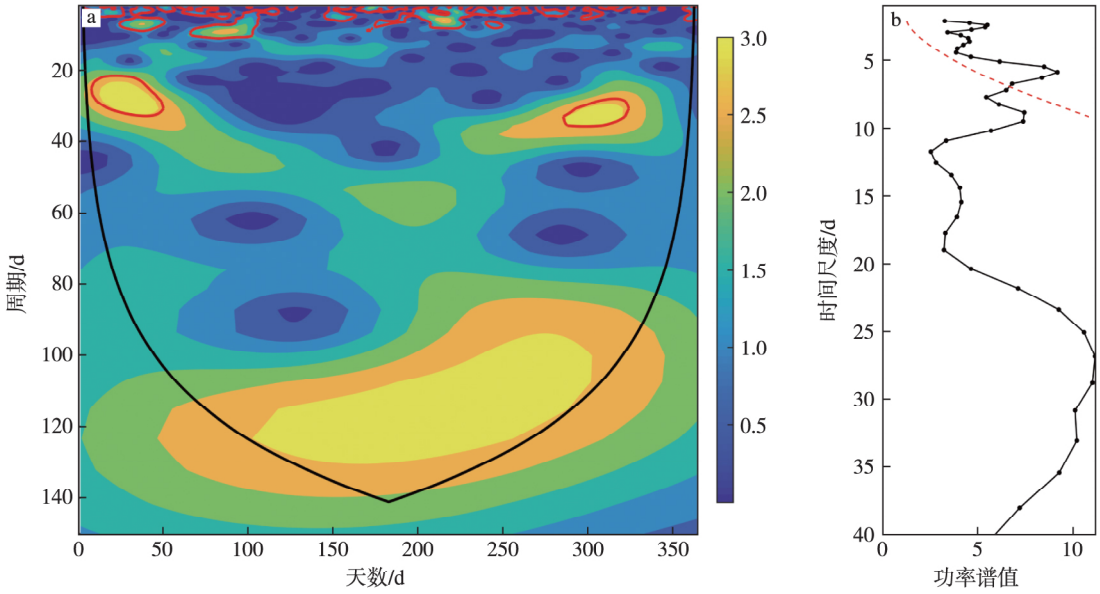

图 2　甘肃省兰州站 CMA 24 h 最高气温差值的小波能量谱（a　“V”型实线包围区域为小波边界效应影响区域；实线区域表示通过 0.05 信度的显著性检验）和全局小波谱随时间变化（b；红色虚线为 0.05 信度的红噪声标准谱）

Fig.2　(a) Wavelet spectrum power of the maximum temperature difference of CMA 24 h in Lanzhou station (The area surrounded by V-shaped solid line is the influence area of wavelet boundary effect; the solid line area indicates that it has passed the significance test of 95% confidence), Gansu Province and (b) the global wavelet spectrum change with time (the red dotted line is the standard spectrum of red noise with 95% confidence)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2.4　检验方法

采用最高、最低气温的预报准确率、绝对误差和预报技巧评分三个指标对预报结果进行检验，其定义如下：

1) 预报准确率

$$F_2=\frac{n_2}{n}\times 100\%。\tag{2}$$

其中：F_2 为气温预报值与实况值误差不超过 2 ℃的百分率；n_2 为误差不超过 2 ℃的样本量；n 为样本总量。

2) 平均绝对误差

$$S_{\mathrm{BIAS}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\mid I_{\mathrm{obs}i}-I_{\mathrm{pre}i}\mid。\tag{3}$$

其中：S_{BIAS} 为平均绝对误差；N 为观测次数；$I_{\mathrm{obs}i}$ 为第 i 个点的观测值；$I_{\mathrm{pre}i}$ 为第 i 个点的预报值。

3) 预报技巧评分

$$T_{\mathrm{ss}}=\frac{(T_{\mathrm{MEAN}}-T_{\mathrm{MEAF}})}{T_{\mathrm{MEAN}}}\times 100\%\tag{4}$$

其中：T_{ss} 为预报技巧评分；T_{MEAN} 为 CMA 或 ECMWF 的最高、最低气温的平均误差；T_{MEAF} 为对应的滑动训练或最优融合的最高、最低气温的平均误差。

2　结果分析

2.1　滑动训练周期分析

利用小波分析计算了西北区 239 个国家基本站 3 个预报时次(24、48、72 h) 最高、最低气温的最佳滑动训练周期。下面以甘肃兰州、陕西咸阳、宁夏银川、青海西宁 4 个站点为例(表 1) 进行简要说明：对于 CMA 气温预报产品来说，24 h 的平均最佳滑动训练周期(14.25 d) 要小于 48 h(18.25 d) 和 72 h(16.5 d)，而 ECMWF 48 h 气温预报产品的平均最佳滑动训练周期(12.625 d) 要小于 24 h(17.125 d) 和 72 h(15.875 d)。

此外，利用小波分析方法得出其余 238 个国家基本站 3 个预报时次的最高、低温度最佳滑动训练周期。整体来说，CMA 和 ECMWF 最高、最低气温预报产品的最佳滑动训练周期集中在 5～27 d 左右，个别站点的滑动周期超过 27 d；24 h 以内的滑动周期多集中在 5～23 d，而 48 h、72 h 的滑动周期更多的集中在 8～27 d。

2.2　预报效果检验

基于以上的最佳滑动训练周期结果，针对 2018 年 3 月 1 日—2019 年 1 月 31 日西北区的 CMA 和 ECMWF 两种模式的网格气温预报产品进行订正和检验。利用滑动训练方法和最优融合方法对 CMA 和 ECMWF 的最高、最低气温预报产品分别进行订正，共得到 6 种预报产品：CMA 预报产品(CMA，下同)、CMA 滑动训练产品(CMA_HD，下同)、CMA 最优融合产品(CMA_RH，下同)、ECMWF 预报产品(EC，下同)、ECMWF 滑动训练产品(EC_HD，下同)、ECMWF 最优融合产品(EC_RH，下同)。进一步分析这 6 种产品不同时次(24、48、72 h) 的平均绝对误差、TS 技巧评分和预报准确率并进行比较，以期对未来业务中的气温预报有一定的指导意义。

计算了 CMA 和 ECMWF 两种数值预报产品及其订正产品的 3 个时次气温预报的平均绝对误差与 TS 技巧评分，得出以下结论：1) CMA 高分辨率数值预报产品的平均绝对误差要小于 ECMWF 精细化网格订正产品的，但 ECMWF 订正产品对最高气温的预报能力要优于最低气温。2) ECMWF 精细化网格订正产品的预报能力(预报误差范围为 1.3～1.7 ℃) 优于 CMA 高分辨率数值预报订正产品(预报误差范围为 1.4～2.1 ℃)，而两种模式本身的预

表 1　西北区四个代表站 3 个时次(24、48、72 h) 最高、最低气温的最佳滑动训练周期

Table 1　The best sliding training cycle of maximum and minimum temperatures of four representative stations in Northwest China at three times (24, 48 and 72 h)　℃

预报产品		兰州(52889)		咸阳(57048)		银川(53614)		西宁(52866)	
		$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$T_{\min}$
CMA	24 h	27	27	23	15	6	5	6	5
	48 h	22	25	8	13	9	20	29	20
	72 h	12	11	27	13	7	6	29	27
ECMWF	24 h	13	23	11	25	23	7	17	18
	48 h	7	12	11	25	5	7	17	17
	72 h	17	10	8	25	27	8	15	17

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

报误差范围分别是 1.7~2.3 ℃(CMA)、2.1~3.0 ℃(ECMWF),意味着四种预报订正产品均有一定的订正能力。3) 随着预报时效的增长,CMA 数值预报和 ECMWF 细网格预报订正产品的误差范围增大。4) 针对最高气温客观预报的最优融合订正,ECMWF 的订正效果明显优于 CMA;但对于最低气温客观预报的最优融合订正,二者的订正能力几乎相当。

在表 2 的基础上,进一步计算两种模式订正产品的预报准确率(图 3)可以发现,CMA 数值预报和 ECMWF 细网格预报的滑动训练产品和最优融合产品预报准确率均高于这两种模式产品的预报准确率,且 ECMWF 细网格最高气温预报订正产品的预报准确率明显高于 CMA,但 CMA 订正产品对于最低气温的预报准确率却略高于 ECMWF。此外,随着预报时效的延长,两种模式的预报准确率也依次降低,但下降幅度较小。

由于本文所研究的西北区覆盖面积较大,地形复杂多样,不同区域之间影响气温预报的因子也存在较大差异。因此,将西北区按照省份的划分,分别对甘肃、陕西、宁夏以及青海四个省份计算几种客观预报产品的预报准确率(图 4)可以得出以下结论:对于 24 h 最高气温客观预报的预报准确率而言,ECMWF 细网格订正产品对宁夏订正效果最好,甘肃、青海次之,陕西最差;而 CMA 数值预报订正产品对青海订正效果最好,甘肃、宁夏次之,陕西最差。针对 24 h 最低气温客观预报的预报准确率,CMA 数值预报订正产品对西北区四省的预报准确率相差不大,ECMWF 细网格订正产品对陕西的预报最好,甘肃、宁夏次之,青海最差。

表 2 CMA 和 EC 预报产品 24、48、72 h 最高、最低气温的绝对误差与订正技巧

Table 2 Absolute errors and correction skills of maximum and minimum temperatures from CMA and EC forecast products at three times (24,48 and 72 h)

预报时效	方法	T_{max} 绝对误差/℃	T_{min} 绝对误差/℃	T_{max} 预报技巧/%	T_{min} 预报技巧/%	预报时效	方法	T_{max} 绝对误差/℃	T_{min} 绝对误差/℃	T_{max} 预报技巧/%	T_{min} 预报技巧/%
	CMA	1.992	1.751				EC	2.815	2.124		
24 h	CMA_HD	1.765	1.490	11.4	14.91	24 h	EC_HD	1.321	1.494	53.07	29.66
	CMA_RH	1.765	1.496	11.4	14.56		EC_RH	1.334	1.517	52.61	28.58
	CMA	2.170	1.840				EC	2.880	2.163		
48 h	CMA_HD	1.954	1.607	9.95	12.66	48 h	EC_HD	1.510	1.556	47.57	28.06
	CMA_RH	1.958	1.612	9.77	12.39		EC_RH	1.527	1.58	46.98	26.95
	CMA	2.300	1.945				EC	2.962	2.193		
72 h	CMA_HD	2.086	1.721	9.30	11.52	72 h	EC_HD	1.666	1.602	43.75	26.95
	CMA_RH	2.092	1.728	9.04	11.16		EC_RH	1.690	1.627	42.94	25.81

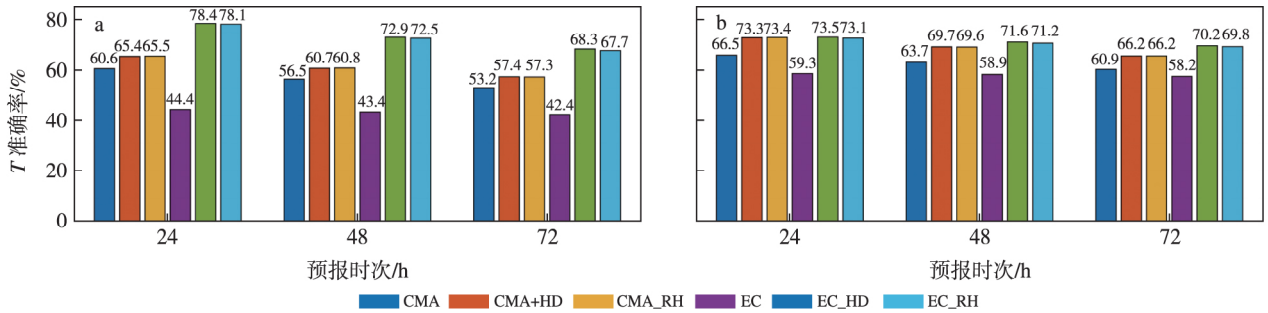

图 3 西北区 CMA 和 ECMWF 及其订正产品最高气温(a)、最低气温(b)的预报准确率(单位:%)

Fig.3 Prediction accuracies of CMA,ECMWF and their revised products for (a) maximum temperature and (b) minimum temperature in Northwest China(units: %)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

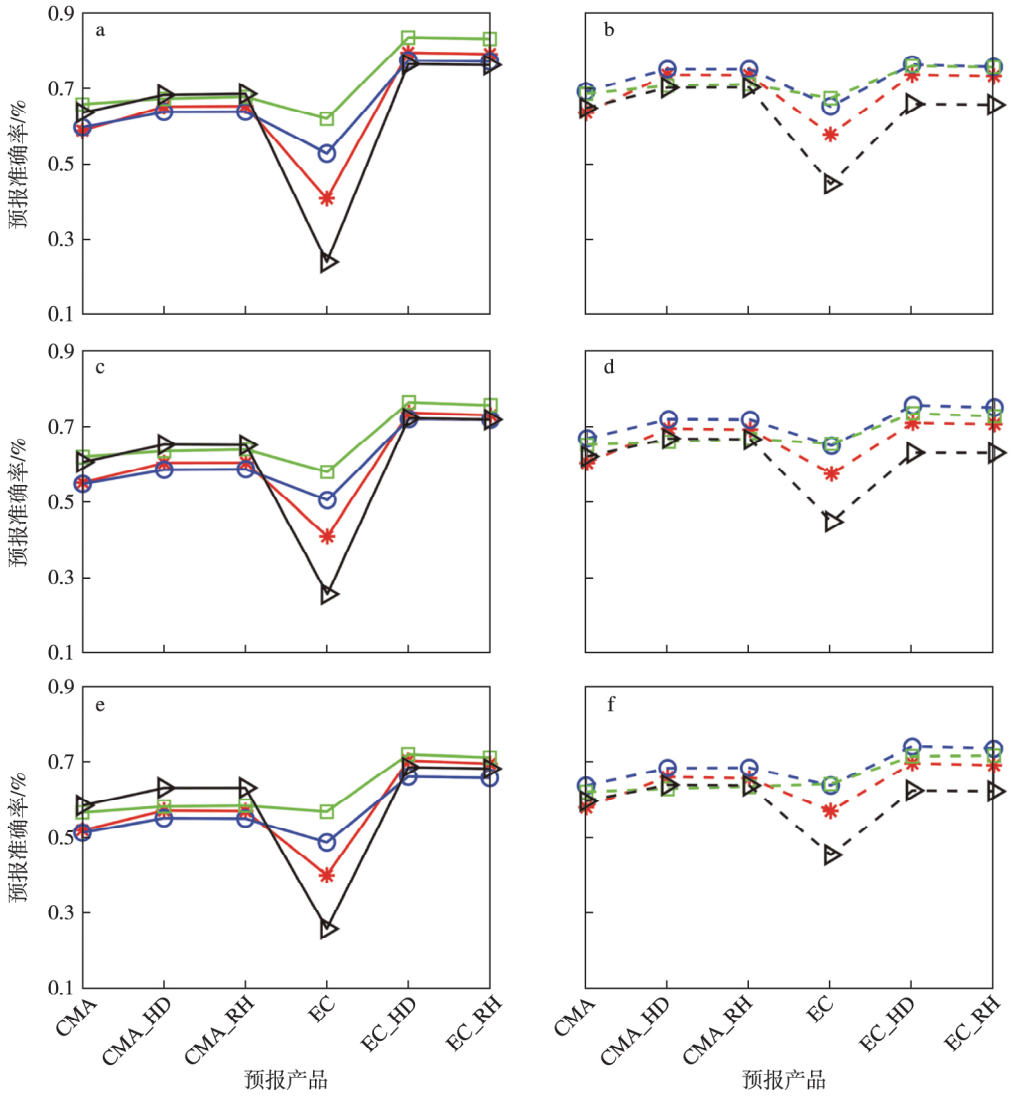

图 4　西北(红、蓝、绿、黑线分别为甘肃、陕西、宁夏、青海)不同预报产品 24 h(a、b)、48 h(c、d)、72 h(e、f)最高气温(a、c、e)、最低气温(b、d、f)的预报准确率

Fig.4　Prediction accuracies of different forecast products for (a,c,e) maximum temperature and (b,d,f) minimum temperature in four northwest provinces at (a,b) 24 h,(c,d) 48 h,(e,f) 72 h (Red,blue,green and black lines are Gansu,Shaanxi,Ningxia and Qinghai,respectively)

综上所述,CMA 高分辨率数值预报产品和 ECMWF 细网格模式产品的气温预报订正能力比其模式本身均有一定提升,24 h 最高气温预报准确率分别提高 4.9%、34.03%,24 h 最低气温预报准确率分别提高 6.83%、14.26%,48 h 和 72 h 也均有提升,但提升幅度略低于 24 h。此外,ECMWF 细网格模式产品对于西北区 239 个国家基本站的最高气温客观预报订正效果要明显优于 CMA 的,但就最低气温客观预报订正效果而言,CMA 的订正效果更为显著。就西北四省的 24 h 最高气温客观预报订正而言,宁夏 ECMWF(青海 CMA)订正效果最好,甘肃、青海(甘肃、宁夏)次之,陕西最差;而对于 24 h 最低气温,四省 CMA 订正效果相差不大,陕西 ECMWF 订正效果最好,甘肃、宁夏次之,青海最差。

2.3　空间误差检验

对于 CMA 和 ECMWF 两种模式及其订正产品(CMA、CMA_HD、CMA_RH、EC、EC_HD、EC_RH)而言,相比于 48 h 和 72 h,CMA 高分辨率数值预报产品和 ECMWF 精细化网格模式产品的 24 h 气温预报订正产品对西北区最高、最低气温的预报效果最好(表 2 和图 3)。因此,以 24 h 的结果为例,进一步分析两种模式订正产品对西北区气温的客观预报能力(图 5、6)。

进一步分析 CMA 高分辨率数值预报产品及其

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

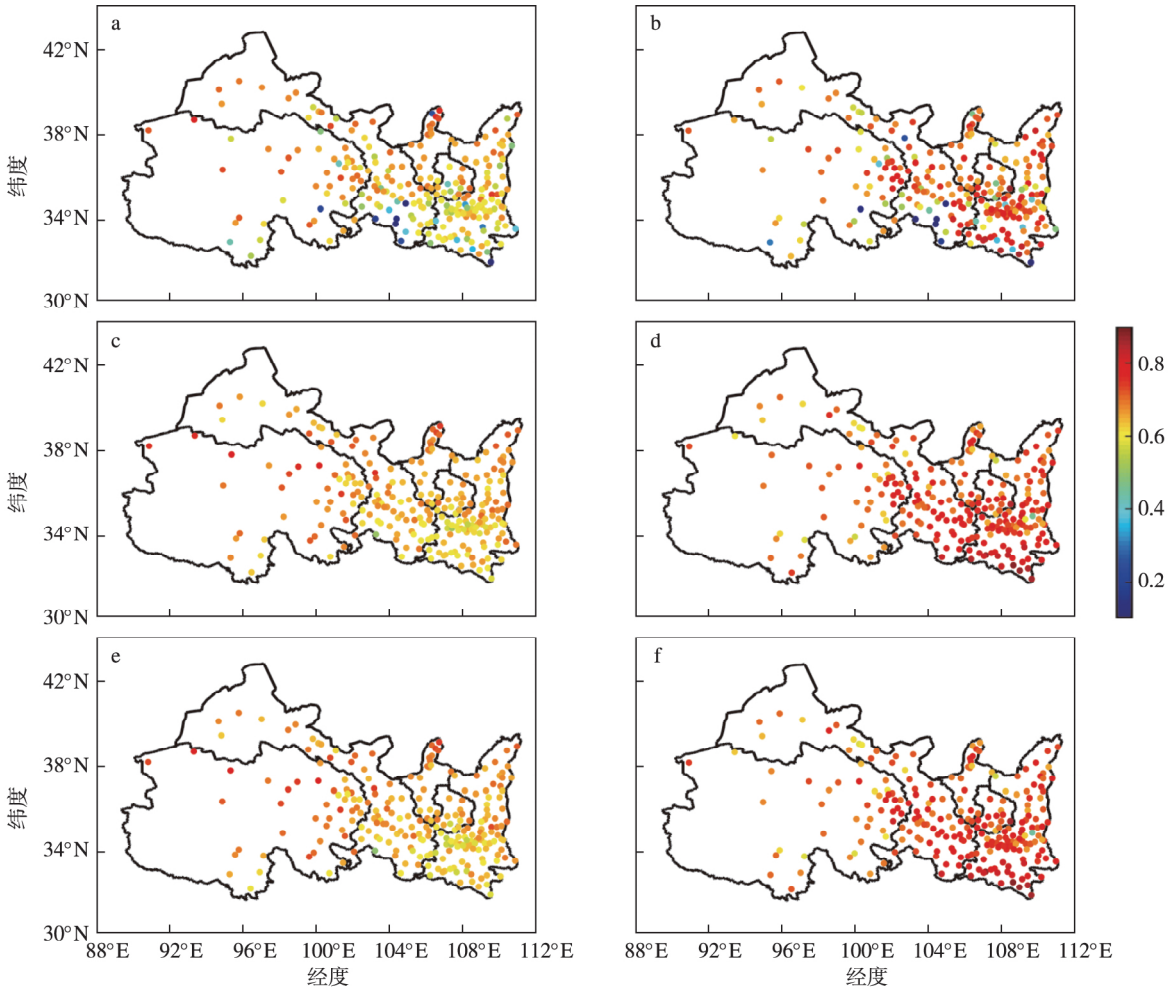

图 5 西北区 CMA 及其订正产品 24 h 最高气温(a、c、e)、最低气温(b、d、f)预报准确率的空间分布: (a,b) CMA; (c,d) CMA_HD; (e,f) CMA_RH

Fig.5 Spatial distributions of prediction accuracies of CMA and its revised products for 24 h (a,c,e) maximum temperature and (b,d,f) minimum temperature in Northwest China: (a,b) CMA; (c,d) CMA_HD; (e,f) CMA_RH

订正产品对西北区最高、最低气温预报准确率的空间分布(图 5),结果表明: 整体来说,与 CMA 模式本身的预报产品相比,其订正产品对西北区气温的预报能力均有一定的提升; 同时,在西北区大部分地方该订正产品对最低气温的预报准确率要高于最高气温。其中最高气温预报准确率在甘肃河西和中部、宁夏、陕西中北及青海东部较高,而在甘肃陇东南、陕西南部的预报能力却较低; 最低气温的预报准确率在甘肃中部和陇东南、宁夏及陕西中南部的预报准确率较高,而在西北区其他地方的预报准确率偏低。

同样,分析了 ECMWF 精细化网格预报及其订正产品对西北区最高、最低气温预报准确率的空间分布(图 6),可以发现: ECMWF 精细化网格订正产品对西北区气温的预报能力明显优于其模式本身,且该订正产品对于最高气温的预报准确率比最低气温的预报准确率要高。具体来说,最高气温的预报准确率除了陕西南部及青海南部,其余地方的预报能力均有了较为显著的改善; 最低气温的预报准确率在陕西中南部、甘肃东南部及宁夏中南部的预报准确率较高,而在其他地方的预报能力较差。

基于以上的分析,可以发现西北区最高、最低气温的预报准确率受地形及下垫面的影响较大。现进一步分析 CMA 高分辨率数值预报及其订正产品对甘肃、陕西、宁夏以及青海四省气温的预报能力,其预报准确率空间(图 7、8)分布表明: 相比于 CMA 数值预报产品本身,四个省的最低气温预报能力均有了显著的改善,特别是甘肃河东及中部、陕西中南部、宁夏中北部及青海东部; 而最高气温的预报准确率仅在陕西南部、甘肃陇东南及青海东部一定的提

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

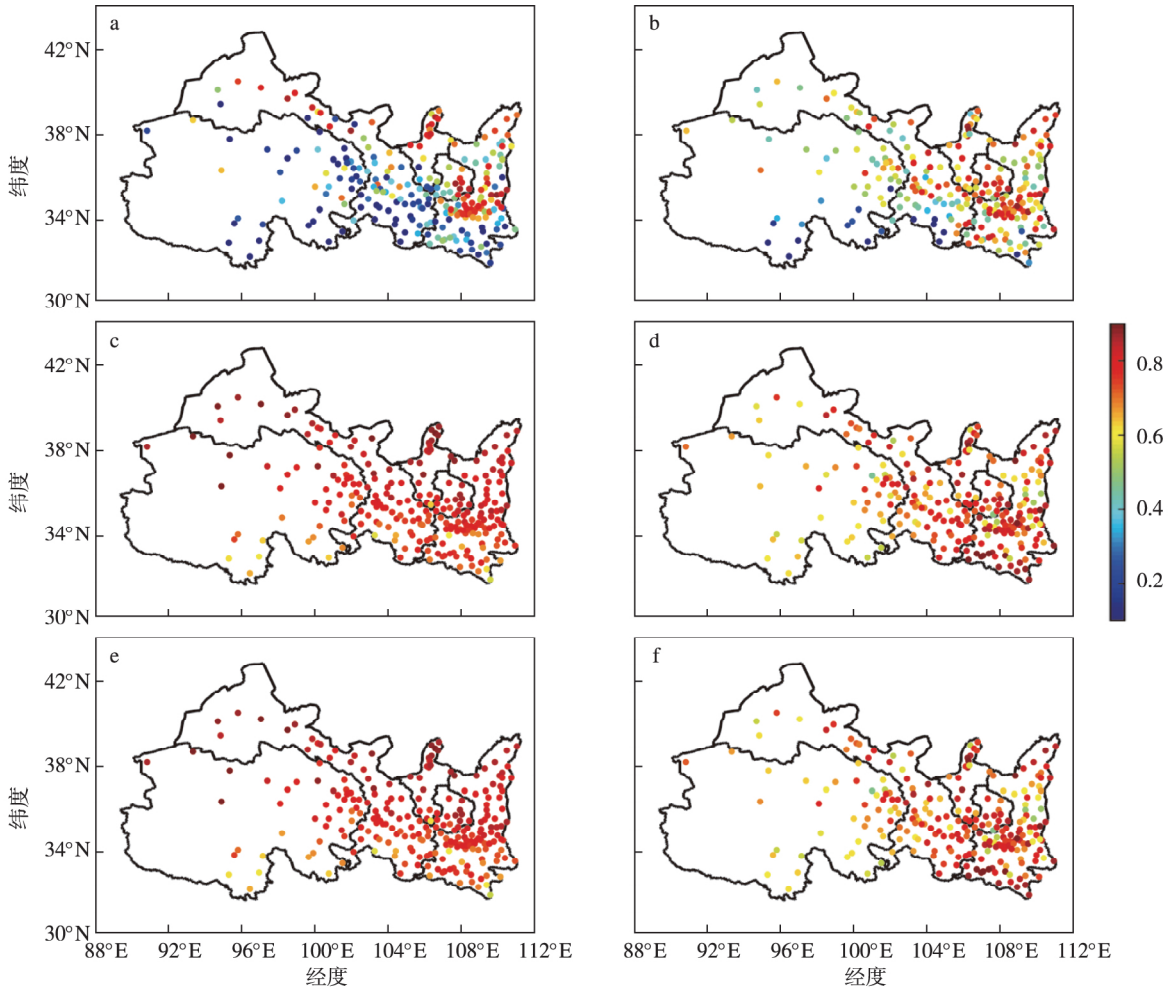

图 6　西北区 ECMWF 及其订正产品 24 h 最高气温(a、c、e)、最低气温(b、d、f)预报准确率的空间分布:(a,b) EC;(c,d) EC_HD;(e,f) EC_RH

Fig.6　Spatial distributions of prediction accuracies of ECMWF and its revised products for 24 h (a,c,e) maximum temperature and (b,d,f) minimum temperature in Northwest China: (a,b) EC; (c,d) EC_HD; (e,f) EC_RH

高,其余地方的订正效果并不明显。

相比于 ECMWF 精细化网格模式产品,该模式滑动训练产品和最优融合产品的预报准确率空间分布结果(图 9、10)表明:四个省的最高气温预报能力均有了显著提高,除了陕西中部及宁夏北部的预报准确率提高幅度较小外,其余地方预报能力均有明显改善;而最低气温的预报准确率在甘肃河西走廊及东部、陕西南部及青海大部分地区提升较多,其余地方的订正效果并不明显。

综上所述,CMA 高分率数值模式和 ECMWF 精细化网格模式的 24 h 气温预报订正产品对西北区最高、最低气温的预报准确率均有一定的提高。针对最高气温的预报,ECMWF 滑动训练和最优融合产品的订正能力要明显优于 CMA 的,特别是在甘肃河西走廊和中东部、陕西北部和南部、宁夏中南部及青海大部,而在陕西中部及宁夏北部的订正能力却较差。就最低气温的预报而言,CMA 和 ECMWF 订正产品对甘肃河东和陕西南部的订正能力较好;但 ECMWF 模式订正产品在宁夏中南部及青海南部的订正能力高于 CMA 数值预报订正产品,而 CMA 数值预报订正产品在陕西中部的订正能力更优。

3　讨论和结论

针对智能网格预报业务开展以来所面对的客观化预报的问题,提出基于中国气象局现行的 CMA 高分辨率数值预报产品和欧洲中心的 ECMWF 精细化网格数值预报产品,通过小波分析法以及滑动训练、最优融合等技术,研发出西北区最高、最低气温的客观订正方法并进行对比,结果表明两者均能

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

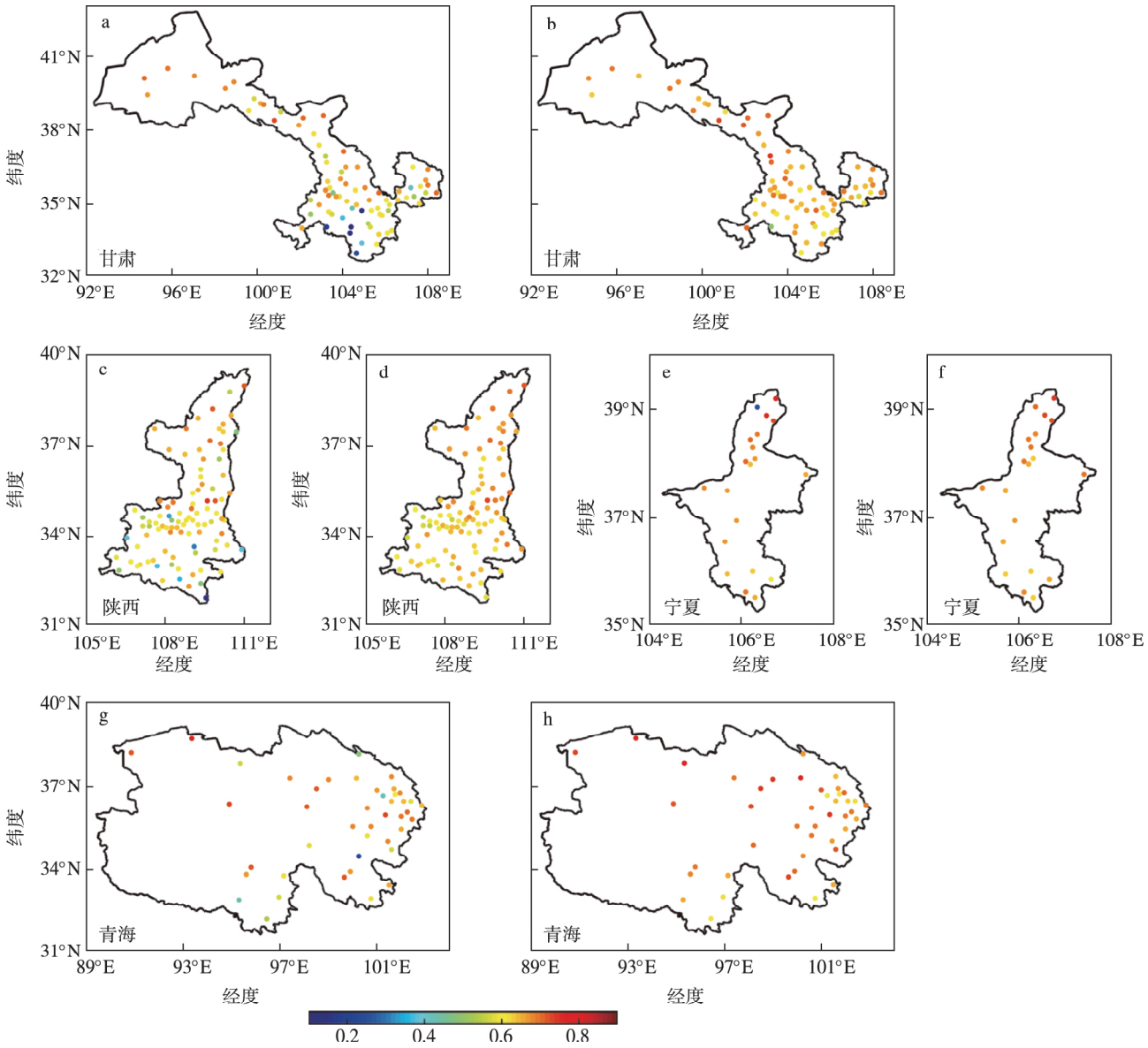

图 7 甘肃(a、b)、陕西(c、d)、宁夏(e、f)、青海(g、h) CMA 及其订正产品 24 h 最高气温预报准确率的空间分布:(a,c,e,g) CMA;(b,d,f,h) CMA_RH

Fig.7 Spatial distributions of prediction accuracies of CMA and its revised products for 24 h maximum temperature in (a,b) Gansu,(c,d) Shaanxi,(e,f) Ningxia and (g,h) Qinghai: (a,c,e,g) CMA; (b,d,f,h) CMA_RH

有效地提升客观预报的准确率,主要结论如下:

1) NWTM 对 CMA 高分辨率数值预报产品和 ECMWF 精细化网格模式产品的气温预报能力有显著的提升; 随着预报时效的增长,CMA 数值预报和 ECMWF 细网格预报订正产品的误差范围增大。

2) ECMWF 精细化网格模式产品对于西北区 239 个国家基本站的最高气温客观预报订正效果要明显优于 CMA 的,但就最低气温客观预报订正效果而言,CMA 的订正效果更为显著。

3) 就西北四省的 24 h 最高气温客观预报订正而言,宁夏 ECMWF(青海 CMA) 订正效果最好,甘肃、青海(甘肃、宁夏) 次之,陕西最差; 而对于 24 h 最低气温,四省 CMA 订正效果相差不大,陕西 ECMWF 订正效果最好,甘肃、宁夏次之,青海最差。

4) 空间误差检验表明: 针对最高气温的预报,ECMWF 滑动训练和最优融合产品的订正能力要明显优于 CMA 的,特别是在甘肃河西走廊和中东部、陕西北部和南部、宁夏中南部及青海大部,而在陕西中部及宁夏北部的订正能力却较差。就最低气温的预报而言,CMA 和 ECMWF 订正产品对甘肃河东和陕西南部的订正能力较好; 但 ECMWF 模式订正产品在宁夏中南部及青海南部的订正能力高于

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

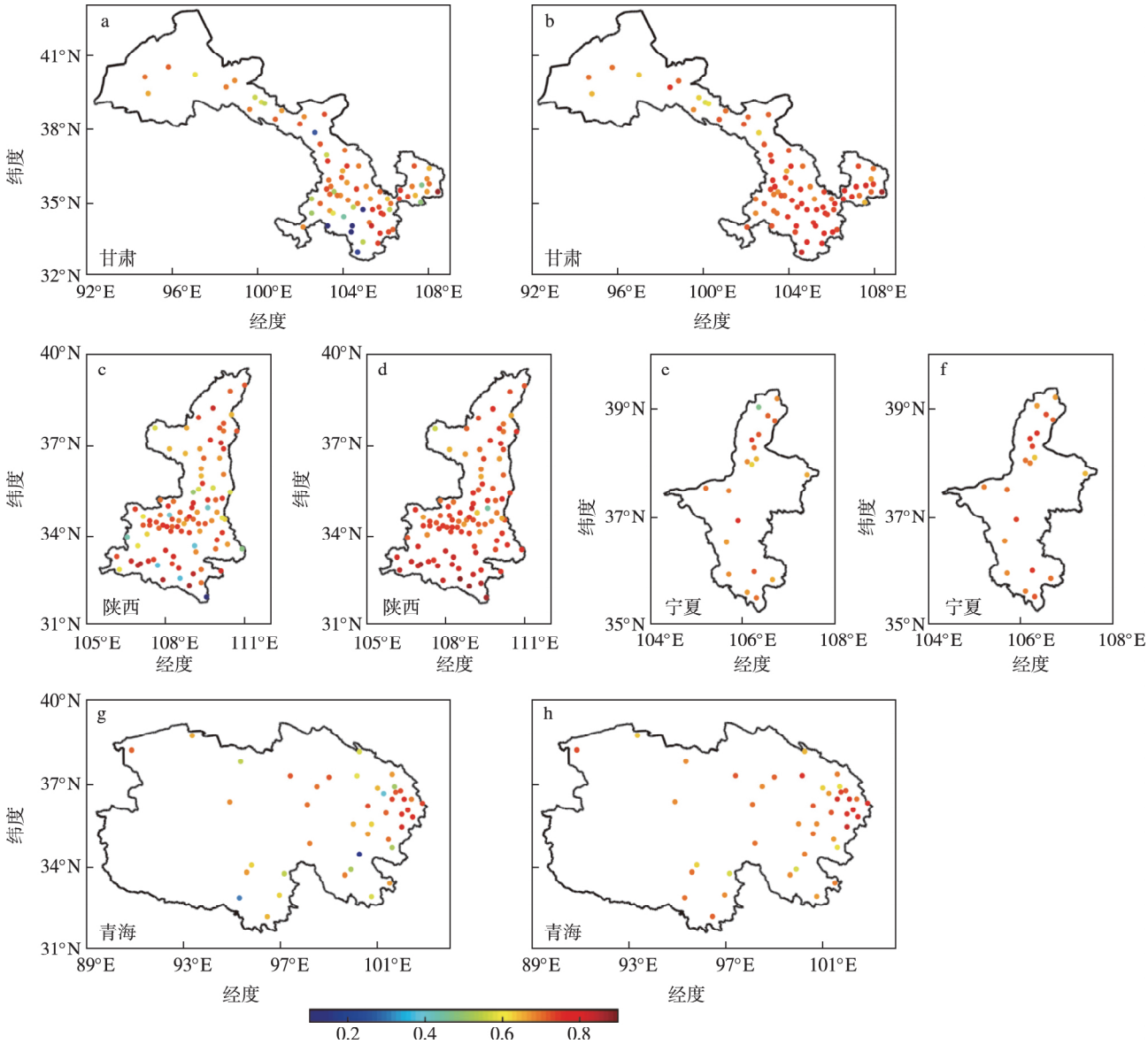

图 8　甘肃(a、b)、陕西(c、d)、宁夏(e、f)、青海(g、h) CMA 及其订正产品 24 h 最低气温预报准确率的空间分布:(a,c,e,g) CMA;(b,d,f,h) CMA_RH

Fig.8　Spatial distributions of prediction accuracies of CMA and its revised products for 24 h minimum temperature in (a,b) Gansu,(c,d) Shaanxi,(e,f) Ningxia and (g,h) Qinghai:(a,c,e,g) CMA;(b,d,f,h) CMA_RH

CMA 数值预报订正产品,而 CMA 数值预报订正产品在陕西中部的订正能力更优。

本文仅针对 CMA 高分辨数值预报产品和欧洲中心的 ECMWF 精细化网格模式产品开展了相关的订正改进,发现二者在最高、最低气温的预报上各有优势,但并未采取权重动态取优方式集成这两种模式的气温预报结果,生成综合分析产品,以期进一步提高西北区气温预报的准确率。同时,本文仅针对西北区国家气象观测站的气温预报进行了订正检验,还未对业务中更为需要的乡镇站点的气温预报进行深入研究。最后,气温受地形(Sun and Zhang,2016;智协飞等,2019)等下垫面的影响较大,尤其是在四季分明和地形地貌复杂的西北区,分季节、分区域进行气温预报的客观订正显得尤为必要。

参考文献(References)

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).

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

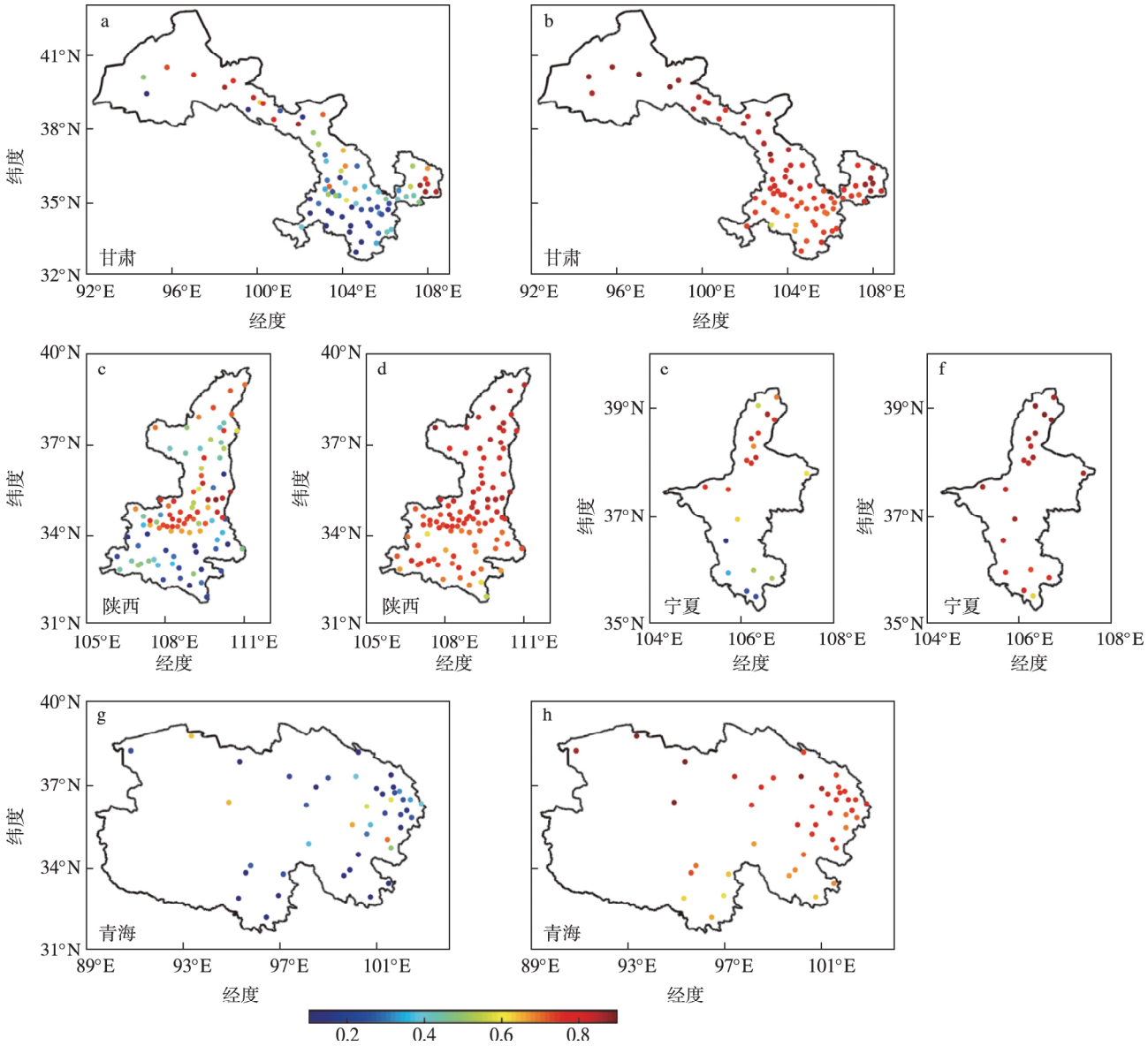

图 9 甘肃(a、b) 、陕西(c、d) 、宁夏(e、f) 、青海(g、h) ECMWF 及其订正产品 24 h 最高气温预报准确率的空间分布: (a,c,e,g) EC; (b,d,f,h) EC_RH

Fig.9 Spatial distributions of prediction accuracies of ECMWF and its revised products for 24 h maximum temperature in (a,b) Gansu,(c,d) Shaanxi,(e,f) Ningxia and (g,h) Qinghai: (a,c,e,g) EC; (b,d,f,h) EC_RH

陈豫英,陈晓光,马金仁,等,2005.**基于 MM5 模式的精细化 MOS 温度预报** [J] .**干旱气象,**23(4) : 52-56. Chen Y Y,Chen X G,Ma J R,et al.,2005.Fine MOS temperature forecast based on MM5 [J] .Arid Meteor,23(4) : 52-56.(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) .

矫梅燕,2010.**天气业务的现代化发展** [J] .**气象,**36(7) : 1-4. Jiao M Y,2010.Modernization process of weather forecast [J] .Meteor Mon,36(7) : 1-4.(in Chinese) .

Krishnamurti T N,Kumar V,Simon A,et al.,2016.A review of multimodel superensemble forecasting for weather,seasonal climate,and hurricanes [J] . Rev Geophys,54(2) : 336-377.

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) .

罗聪,曾沁,高亭亭,等,2012.**精细化逐时滚动温度预报方法及检验** [J] .**热带气象学报,**28(4) : 552-556. Luo C,Zeng Q,Gao T T,et al.,2012. Research of seamless hourly updated forecast of temperature and verification [J] .J Trop Meteor,28(4) : 552-556.(in Chinese) .

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

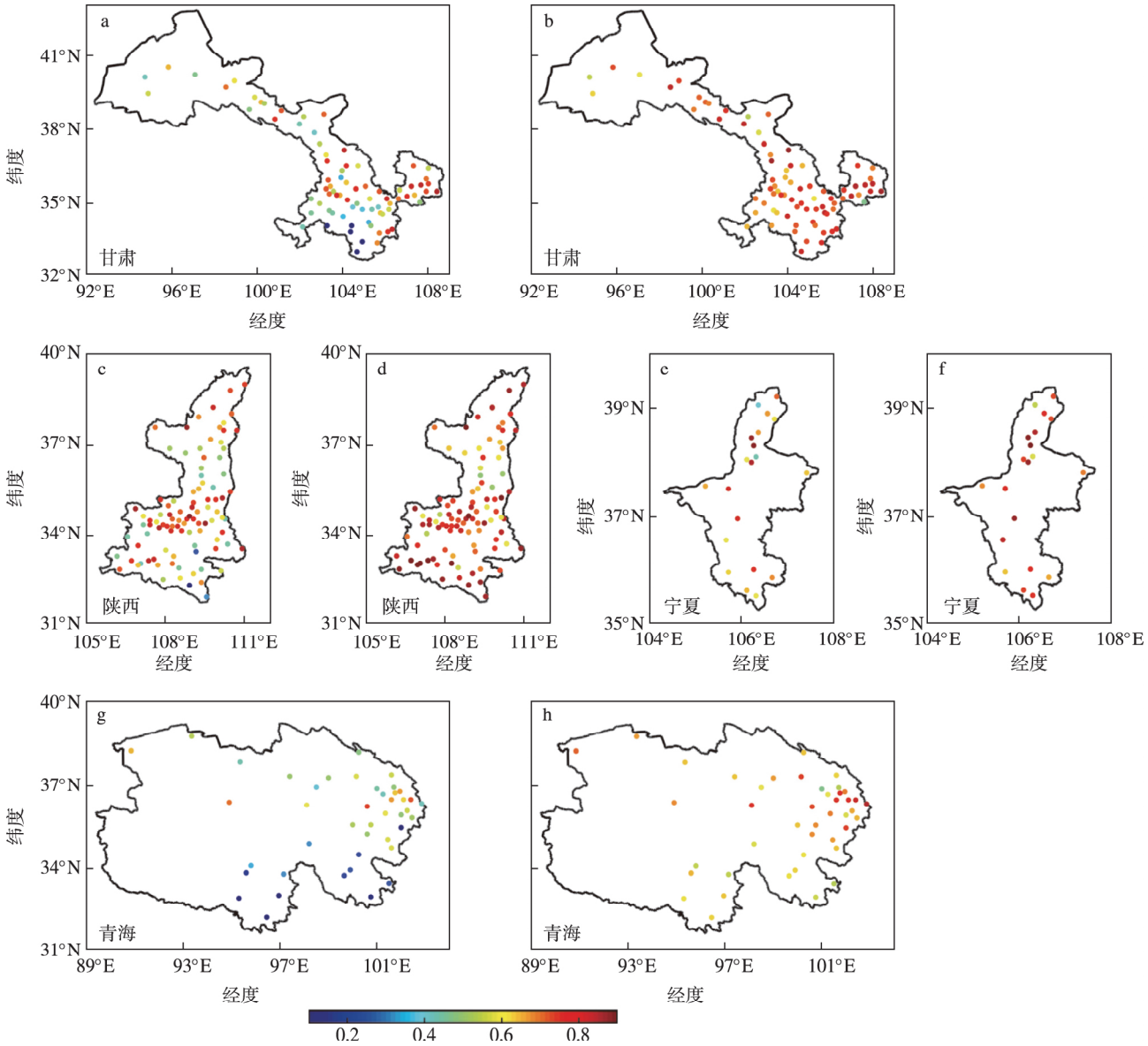

图 10　甘肃(a、b)、陕西(c、d)、宁夏(e、f)、青海(g、h) ECMWF 及其订正产品 24 h 最低气温预报准确率的空间分布:(a,c,e,g) EC;(b,d,f,h) EC_RH

Fig.10　Spatial distributions of prediction accuracies of ECMWF and its revised products for 24 h minimum temperature in (a,b) Gansu,(c,d) Shaanxi,(e,f) Ningxia and (g,h) Qinghai:(a,c,e,g) EC;(b,d,f,h) EC_RH

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).

盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2003.**大气物理学** [M].**北京:北京大学出版社:** 122-154.　Sheng P X,Mao J T,Li J G,et al.,2003.Atmospheric physics [M].Beijing:Peking University Press:122-154.(in Chinese).

师春香,谷军霞,韩帅,等,2018.**全国智能网格实况融合分析产品进展** [C]//**第** 35 **届中国气象学会年会** S20 **深度信息化:应用支持与智能发展.合肥.**　Shi C X,Gu J X,Han S,2018.Progress of national intelligent grid live fusion analysis products [C]//S20 in depth informatization of the 35th annual meeting of China Meteorological Society:application support and intelligent development.Hefei.(in Chinese).

Sun R H,Zhang B P,2016.Topographic effects on spatial pattern of surface air temperature in complex mountain environment [J].Environ Earth Sci,75(7):1-12.

王蕊,王盘兴,吴洪宝,等,2009.**小波功率谱** Monte Carlo **显著性检验的一个简易方案** [J].**南京气象学院学报,**32(1):140-144.　Wang R,Wang P X,Wu H B,et al.,2009.A simple scheme of Monte Carlo significance test for wavelet power spectrum [J].J Nanjing Inst Meteor,32(1):140-144.(in Chinese).

卫捷,张庆云,陶诗言,2005.2004 **年夏季短期气候集成预测及检验** [J].**气候与环境研究,**10(1):19-31.　Wei J,Zhang Q Y,Tao S Y,2005.The

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ensemble seasonal climate prediction for 2004 summer and its verification [J].Clim Environ Res,10(1):19-31.(in Chinese).

吴爱敏,路亚奇,李祥科,等,2009.利用ECMWF产品对庆阳极端气温释用效果分析[J].干旱气象,27(3):288-293. Wu A M,Lu Y Q,Li X K,et al.,2009.Effect analysis on interpretation of extreme temperature by ECMWF products in Qingyang [J].Arid Meteor,27(3):288-293.(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).

熊世为,郁凌华,胡姗姗,等,2017.基于ECMWF细网格产品的一种优化BP-MOS气温预报方法[J].干旱气象,35(4):668-673. Xiong S W,Yu L H,Hu S S,et al.,2017.An optimized BP-MOS temperature forecast method based on the fine-mesh products of ECMWF [J].J Arid Meteor,35(4):668-673.(in Chinese).

薛志磊,张书余,2012.气温预报方法研究及其应用进展综述[J].干旱气象,30(3):451-464. Xue Z L,Zhang S Y,2012.Advance in research and application about temperature forecast method [J].J Arid Meteor,30(3):451-464.(in Chinese).

张成军,纪晓玲,马金仁,等,2017.多种数值预报及其释用产品在宁夏天气预报业务中的检验评估[J].干旱气象,35(1):148-156. Zhang C J,Ji X L,Ma J R,et al.,2017.Verification of numerical forecast and its application products in weather forecast in ningxia [J].J Arid Meteor,35(1):148-156.(in Chinese).

赵滨,张博,2018.一种2 m温度误差订正方法在复杂地形区数值预报中的应用[J].大气科学学报,41(5):657-667. Zhao B,Zhang B,2018.Application of a bias correction scheme for 2-meter temperature levels over complex terrain [J].Trans Atmos Sci,41(5):657-667.(in Chinese).

智协飞,陈雯,2010.THORPEX国际科学研究新进展[J].大气科学学报,33(4):504-511. Zhi X F,Chen W,2010.New achievements of international atmospheric research in THORPEX program [J].Trans Atmos Sci,33(4):504-511.(in Chinese).

智协飞,季晓东,张璟,等,2013.基于TIGGE资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J].大气科学学报,36(3):257-266. Zhi X F,Ji X D,Zhang J,et al.,2013.Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets [J].Trans Atmos Sci,36(3):257-266.(in Chinese).

智协飞,吴佩,俞剑蔚,等,2019.GFS模式地形高度偏差对地面2 m气温预报的影响[J].大气科学学报,42(5):652-659. Zhi X F,Wu P,Yu J W,et al.,2019.Impact of topographic altitude bias of the GFS model on the 2 m air temperature forecast [J].Trans Atmos Sci,36(3):257-266.(in Chinese).

Test and evaluation of Northwest Intelligent Grid Temperature Objective Prediction Method based on wavelet analysis

LIU Xinwei[1],LIU Na[1],DUAN Mingkeng[2],DUAN Bolong[1],MOU Jing[3]

[1]*Lanzhou Central Meteorological Observatory,Lanzhou* 730020,*China*;

[2]*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) /Key Laboratory of Meteorological Disaster,Ministry of Education (KLME) /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC),Nanjing University of Information Science & Technology,Nanjing* 210044,*China*;

[3]*Huajialing Weather Station of Tongwei County,Dingxi* 743305,*China*

Based on the high resolution numerical prediction products of China Meteorological Administration (CMA),the refined numerical prediction products of European Centre of Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) and the data from national ground observation stations in China,the Northwest Intelligent Grid Temperature Objective Prediction Method (NWTM) has been developed by using wavelet analysis,sliding training,optimal fusion and other technologies,which can be used to deal with the time-frequency of the model error sequence and realize the correction of the model system error and local error.In order to test the forecast ability of the two model data,the data from March 2017 to February 2018 were used as training samples,the data of 239 national basic stations in Northwest China from March 2018 to January 2019 were tested.Results show that:(1) NETM can significantly improve the temperature forecast ability of CMA and ECMWF models.With the increase of forecast time,the errors of correction products of the two models increase.(2) Using the NWTM,the correction effect of ECMWF products on maximum temperature in Northwest China is obviously better than that of CMA,but the

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

correction effect of CMA products on minimum temperature is more significant. Among them, for the 24 h maximum temperature, the correction effect of ECMWF in Ningxia is the best, and that of CMA in Qinghai is the best; for the forecast of 24 h minimum temperature, the correction effect of CMA in the four provinces of Northwest China is similar, and that of ECMWF in Shaanxi is the best. (3) The spatial error tests show that the correction ability of ECMWF correction products for the forecast of maximum temperature is obviously better than that of CMA, especially in the Hexi Corridor and the east-central region of Gansu, the north and south of Shaanxi, the south and central region of Ningxia, and most of Qinghai. In terms of the forecast of minimum temperature, CMA and ECMWF have better ability to correct the forecast of minimum temperature in Hedong region of Gansu and the south of Shaanxi. However, the correction ability of ECMWF correction products in the south-central region of Ningxia and the south of Qinghai is higher than that of CMA, while the correction ability of CMA correction products in the central region of Shaanxi is better.

intelligent grid; wavelet analysis; temperature prediction

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20200426002

(责任编辑: 张福颖)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net