

一种订正格点温度资料的途径

李天江, 钱 莉, 张春燕

甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威

收稿日期: 2021年10月25日; 录用日期: 2021年11月23日; 发布日期: 2021年11月30日

摘 要

基于欧洲中期天气预报中心ECMWF高分辨率模式24 h预报场资料, 从2016年6月1日~2019年9月30日2 m逐3 h最高、最低温度资料中提取日最高、最低温度格点预报值, 选取模式网格产品中最靠近武威市区域内6个站点的格点值代替站点的最高、最低温度预报值。检验评估了模式产品输出和回归模型预报订正能力, 发现模式输出的最高、最低温度预报准确率川区优于山区, 特别是最低温度预报准确率山区误差较大; 经过回归模型订正后, 区域内6个站点的最高温度预报准确率均 $\geq 75.1\%$, 川区和浅山区站点的最低温度预报准确率 $\geq 71\%$, 提高幅度较大, 但深山区的天祝、乌鞘岭的最低温度预报准确率仅为65.1%、55.2%, 订正效果不显著。深入分析误差产生的原因, 从局地温度变化影响因子出发, 构造时空误差订正方法, 有效提高了高海拔地区最低温度的预报订正能力, 深山区站点的最低温度预报准确率平均提高8.8%~12%, 预报绝对误差平均减小了0.5℃; 业务试运行中各站最低温度预报准确率达71.7%~85.2%。构造的时空误差订正方法, 按照温度年变化分上升区间、下降区间建立预报模型, 使建立的预报模型更为客观; 在温度订正方法上加入了温度个别变化对局地温度变化影响因素, 使得构造的温度订正模型更趋合理; 该方法计算简单, 便于在格点极端温度预报订正上开展释用, 为格点极端温度预报订正提供了一种新的思路和方法。

关键词

气温预报, 误差分析, 时空误差订正

A Method for Correcting Grid Temperature Data

Tianjiang Li, Li Qian, Chunyan Zhang

Wuwei Meteorological Bureau, Wuwei Gansu

Received: Oct. 25th, 2021; accepted: Nov. 23rd, 2021; published: Nov. 30th, 2021

Abstract

Based on the 24 h forecast field data of the ECMWF high resolution model of the European Centre

for Medium-Range Weather Forecasts, the daily maximum and minimum temperature grid point forecast values are extracted from the 2 m every three hour maximum and minimum temperature data from June 1, 2016 to September 30, 2019. The maximum and minimum temperature of grid points closet to the stations in Wuwei City were selected as the value of the stations. By testing and evaluating the forecast correcting capability between the model product output and the regression method, it was found that maximum and minimum temperature forecast accuracy rate of the model output in plain area was better than that in the mountainous area, especially the error of minimum temperature in the mountainous area was larger; after the regression model correcting, the maximum temperature forecast accuracy rate of the 6 stations in the region was all $\geq 75.1\%$, and the minimum temperature forecast accuracy rate of the stations in plain areas and shallow mountainous areas was $\geq 71\%$, which is a significant increase, but the minimum temperature forecast accuracy rate of Tianzhu and Wushaoling in the deep mountainous area was only 65.1%, 55.2%, respectively, the correction effect is not significant. In-depth analysis of the causes of errors, starting from the local temperature change influencing factors, constructing a spatio-temporal error projection correction method, effectively improved the forecast correction ability of the minimum temperature in high-altitude areas, and the minimum temperature accuracy rate of the stations in deep mountainous areas increased by an average of 8.8%~12%, the absolute forecast error has been reduced by 0.5°C on average; the minimum temperature forecast accuracy rate of each station in the operational trial operation reached 71.7%~85.2%. Spatio-temporal error correction method is established according to the rising and falling intervals of annual temperature change, which makes the prediction model more objective. The influence factors of individual temperature changes on local temperature changes are added to the temperature correction method, which makes the constructed temperature correction model more reasonable. The method is simple in calculation and easy to be applied in the prediction and correction of extreme temperature in grid, which provides a new idea and method for the prediction of extreme temperature in grid.

Keywords

Temperature Forecast, Error Analysis, Spatio-Temporal Error Correction

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

以数值预报产品释用技术和预报员经验为依托,发展精细化气象要素短期预报业务,是现代天气预报业务的一个重要发展方向。发展高密度数值预报模式产品释用与交互式订正方法相结合的格点、站点方式的精细化气象要素预报订正系统,是提高气象要素预报准确率的有效手段。随着数值预报技术的水平日益提高,数值预报的环流形势预报质量已超过了预报员的预报水平,但要素预报的水平则相对较低。从目前情况来看,由于客观条件的限制,数值预报模式本身要在要素预报上面有大幅提高是不可能的[1]。这就需要通过数值预报产品解释应用技术,来综合有用的信息,特别是利用数值预报模式环流形势预报的优势信息,得到比较好的客观气象要素预报。传统的数值预报释用方法为 MOS 方法和 PP 法,后来又发展了 KLM 滤波、BP 神经网络、SVM 支持向量机和集成实用技术(OCF)等方法,这些方法研究不仅为模式温度释用提供了技术支撑,而且提高了温度预报准确率。马清等[2]利用类似 KLM 滤波的自适应订正法对 2 m 温度预报进行订正,订正后温度预报误差明显减小;漆梁波等

[3]分别采用卡尔曼滤波释用(KLM)和最优化集成释用(OCF)的方法进行要素客观预报释用,发现OCF方法的预报性能较KLM方法略有提高;王敏等[4]采用非齐次高斯回归技术对2 m温度预报结果开展一阶偏差和二阶离散度校准研究,校准后的2 m温度预报评分有一定提高;薛谔彬等[5]采用滑动双权重平均订正法结合空间误差逐步订正法的综合订正技术,较好地订正了模式误差,且误差在空间分布上较均匀。刘新伟等[6]利用小波分析、滑动训练、最优融合等技术,发现滑动训练订正产品和最优融合产品对CMA预报均有订正能力;郝翠等[7]采用的最优集合预报订正方法在改善数值模式预报的固有偏差效果显著。

武威市地处青藏高原北坡的中纬度地带,南靠祁连山脉,北邻腾格里沙漠,东接黄土高原西缘,西为走廊平川,境内山地、高山、平原、沙漠、戈壁和冰川等交错分布,海拔从1200米到4600米,地形地貌极为复杂。它是季风性气候与大陆性气候,高原气候与沙漠气候等的共同影响区,是一较典型的气候过渡带和气候变化的敏感区。复杂的地形地貌和气候敏感性使得本区域精细化气象要素预报工作对数值预报产品的释用技术提出了更高的要求。钱莉等[8][9][10]利用ECMWF粗网格、T639数值预报产品,采用最优子集回归、KLM滤波、BP神经网络等方法建立逐日极端温度和降水预报模型,在数值预报释用初期极大地提高了预报准确率。由于温度预报的准确率一方面取决于高分辨率数值模式预报能力的提高,另一方面依赖于对模式产品的合理释用[11][12][13][14]。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,尹姗[15]对国内T639、ECMWF和日本高分辨率模式预报性能对比后发现,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。武威市从南向北地形垂直落差大,ECMWF高分辨率模式产品的要素预报在平原地区2 m温度预报具有较高的精度,但在青藏高原边坡地带沿山区和山区往往比其它地区误差大、预报准确率评分低。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预报产品的解释应用能力就成为提高要素预报能力的关键问题。在使用ECMWF高分辨率2 m温度开展对日极端温度释用的过程中,尝试多种温度释用方法,遇到了高原边坡山区格点预报产品与实况相关性好,但建立的预报模型拟合率和预报效果差的瓶颈。本文尝试对ECMWF高分辨率模式2 m极端温度预报产品进行时空误差订正方法研究,以期提高日极端温度预报的释用效果,为精细化气象要素客观预报质量提高提供技术支撑,进而为智能网格温度预报的订正提供一种新思路和方法。

2. 格点温度订正模型设计

2.1. 影响温度变化的因子构造

温度的局地变化[16]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{dT}{dt} - \mathbf{V} \cdot \nabla_h T - \omega \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

式中 $-\mathbf{V} \cdot \nabla_h T$ 是温度平流变化,对于某一特定的站点数值预报产品输出的温度变化是由天气系统变化引起的,可看作是温度平流变化; $-\omega \frac{\partial T}{\partial z}$ 为对流变化,对于某一特定的站点这项表征地形地貌差异对温度变化的影响; $\frac{dT}{dt}$ 为温度的个别变化,指太阳高度角变化引起的加热或冷却,也就是时间变化对温度的影响,而在以往的温度释用方法构造中,这项常被忽略。

因此,某地的日最高温度、日最低温度的计算公式可以写成:

$$T(i) = T'(i) + \Delta T_h(i) + \Delta T_t(i) + \varepsilon \quad (2)$$

模式预报 空间误差订正 时间误差订正

其中, $T(i)$ 为最高温度或最低温度的预报值; $T'(i)$ 为最高温度或最低温度的模式产品输出值; $\Delta T_h(i)$ 为地形地貌造成的空间温度误差; $\Delta T_t(i)$ 为太阳高度角变化造成的时间温度误差, i 为样本数; ε 为模式产品的系统误差。

由于 $T'(i)$ 与实况 $y(i)$ 有良好的相关性, 假设 $\Delta T(i)$ 主要是由于地形地貌差异造成的。

因此, $\Delta T(i) \approx \Delta T_h(i)$ 。

利用 $T'(i)$ 与 $y(i)$ 建立线性回归方程, 由线性回归方程可以求得 $T'(i)$ 空间订正值。

$$T'(i) + \Delta T_h(i) \approx a \cdot T'(i) + b \quad (3)$$

$$T(i) = a \cdot T'(i) + b + \Delta T_t(i) \quad (4)$$

其中, a 为回归方程的斜率, b 为回归方程的截距。

2.2. 时间误差订正设计

由于受地球公转作用, 年复一年出现冬寒、春暖、夏热、秋凉四季交替现象。统计分析最高、最低温度的年变化规律, 存在明显的周期性(图略)。一年中日最高、最低温度均存在一个最大值、一个最小值。日最高、最低温度从极大值到极小值, 为单调下降趋势; 日最高、最低温度从极小值到极大值, 为单调上升趋势。因此, 可以把日最高、最低温度的实况分为两个区间, 一个是单调上升区间, 一个是单调下降区间。

在单调上升区间, 将最高、最低温度极小值出现的平均日期记为开始日期, 极大值出现日期为终止日期, 建立时间序列($t_1 = 1, 2, 3, \dots, n_1$); 在单调下降区间, 将最高、最低温度极大值出现的平均日期记为开始日期, 极小值出现日期为终止日期, 建立时间序列($t_2 = 1, 2, 3, \dots, n_2$); 与对应日期的最高、最低温度的实况建立回归方程, 得到:

$$T_t(i) = a_1 \cdot t(i) + b_1 \quad (5)$$

其中, a_1 为回归方程的斜率, b_1 为回归方程的截距。则:

$$\Delta T_t(i) = T_t(i) - y(i) = a_1 \cdot t(i) + b_1 - y(i) \quad (6)$$

其中 $y(i)$ 为实况, 在具体业务中当天的最高、最低温度实况无法获取, 由于预报资料样本足够长, 可以认为 $\Delta T_t(i) \approx \Delta T_t(i-1)$

$$\Delta T_t(i-1) = a_1 \cdot t(i-1) + b_1 - y(i-1) \quad (7)$$

其中, 式中 i 的日期与 $t(i)$ 的日期为同一天。

将公式(9)带入公式(6)完成温度时空误差订正计算。

2.3. 计算步骤

1) 利用模式格点靠近站点的最高、最低预报值, 与实况建立一元线性回归 $y = ax + b$, 订正获得最高、最低温度站点基于空间订正后的预报值。

2) 统计不同站点近 30 年最高、最低温度极大值、极小值出现的平均日期; 划分温度单调上升区间和单调下降区间。

3) 以最高温度、最低温度极小值平均出现日期为起始日期, 极大值平均出现日期为终止日期, 建立单调上升区间时间序列 $t_1(1, 2, \dots, n_1)$, 用最高、最低实况与日期函数建立上升区间一元回归方程 $y = a_1 t_1 + b_1$ 。同理, 以最高温度、最低温度极大值平均出现日期为起始日期, 极小值平均出现日期为终止日期, 建立单调下降区间时间序列 $t_2(1, 2, \dots, n_2)$, 用最高、最低实况与日期函数建立下降区间一元回

归方程 $y = a_2 t_2 + b_2$ 。

4) 用最高、最低温度预报日前一日的实况减去基于时间变化的最高、最低预报值，得到最高、最低温度的时间误差。

5) 将最高、最低温度时间误差代入基于地形地貌订正后的站点预报值 $T(i) = a \cdot T'(i) + b + \Delta T_i(i)$ ，即完成计算。

3. ECMWF 高分辨率 2 m 极端温度预报订正应用

3.1. 研究区和资料

研究区域选择为覆盖武威市的周边区域(36.5°N~39.5°N, 101°E~104°E)，共 6 个县、区的气象站点。其中，有 4 站位于青藏高原北边坡的山区，浅山区分别是永昌、古浪，深山区分别是天祝、乌鞘岭，海拔高度分别为 1977 m、2073 m、2485 m、3044 m；有 2 站位于河西走廊平川，分别是凉州、民勤，海拔高度分别为 1532 m、1367 m (见图 1)。模式资料选取欧洲中期天气预报中心 ECMWF 高分辨率 2016 年 6 月 1 日至 2019 年 9 月 30 日的 2 m 最高、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)，预报时效为 24 h。其中，2016 年 6 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日资料用于建模，2019 年 1 月 1 日至 2019 年 9 月 30 日资料用于业务试报。从模式产品中逐 3 小时最高、最低温度中提取日最高、最低温度，这种取值方法避免了因天气过程对最高、最低温度取值的影响。站点模式预报资料用网格产品中最靠近站点的格点值代替。实况资料选取与模式资料同步的武威市 6 个地面自动观测站的日最高、最低温度观测记录。最高、最低温度检验量为平均绝对误差(e)和准确率(TT)。

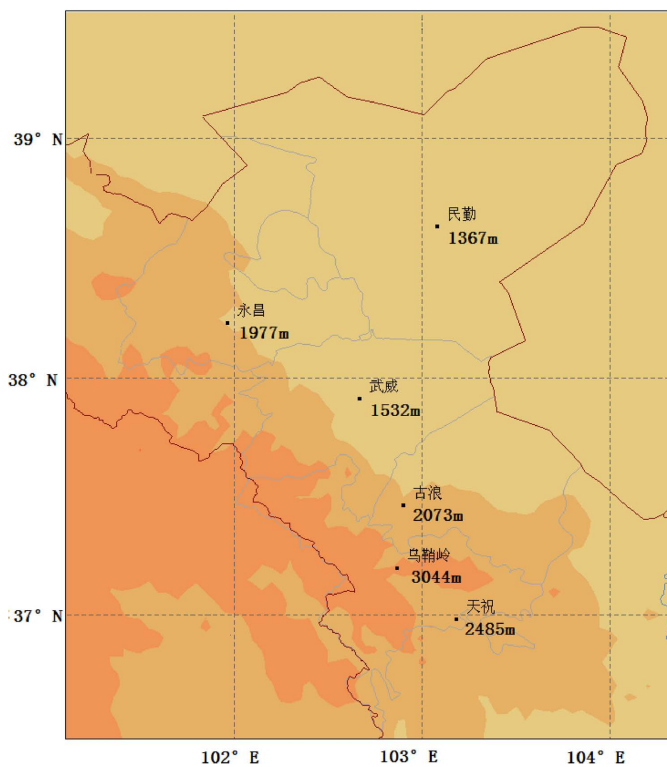


Figure 1. Distribution of stations in Wuwei City

图 1. 武威市站点分布图

绝对误差:

$$e_i = |F_i - O_i| \quad (8)$$

平均绝对误差:

$$e = \frac{1}{Nf} \times \sum_{i=1}^{Nf} e_i \quad (9)$$

其中, F_i 为第 i 日的温度预报, O_i 为第 i 日的温度实况, Nf 为预报的总次数。

预报准确率:

$$TT = \frac{Nr}{Nf} \quad (10)$$

其中, Nr 为温度预报与实况绝对误差 $\leq 2^\circ\text{C}$ 的站(次)数, Nf 为预报的总站(次)数。

3.2. 数值模式产品检验

传统数值预报产品释用, 都存在以下几种误差: 1) 模式初值的误差; 由于模式初值需要进行同化和差值处理, 模式要素的初值与台站实际观测值不一定完全一致, 必然会产生误差。2) 数值产品的插值误差, 无论是将数值预报输出的网格点产品插值到气象站点, 还是用气象站点最近的格点数值产品替代, 必然存在误差。3) 数值模式地形与台站实际地形误差而导致的气象要素误差。4) 太阳高度角的变化对气象要素变化产生的误差。

利用 ECMWF 高分辨率 2016 年 6 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日的 2 m 最高、最低温度 24 小时逐日站点预报值, 与逐日最高、最低温度实况计算平均绝对误差(e)及预报准确率(TT) (见表 2), 区域内 6 个站点模式直接输出的最高温度的 e : 全市平均为 1.8°C , 其中川区为 1.7°C 、山区为 1.9°C ; 最低温度的 e : 全市平均为 2.0°C , 其中川区为 1.6°C 、山区为 2.3°C 。区域内 6 个站点模式直接输出的最高温度的平均 TT : 全市平均为 62.4%, 其中川区平均为 69.4%、山区平均为 59.0%; 最低温度的 TT : 全市平均为 59.5%, 其中川区为 70.9%、山区为 53.8%。

由此可见, 模式直接输出的预报产品, 区域内 e 和 TT 表现为最高温度优于最低温度, 川区优于山区。特别是最低温度山区 e 均 $> 2.0^\circ\text{C}$ 、准确率在 41%~62%; 最高温度 e 山区天祝站为 3.3°C , TT 山区古浪站为 59.5%、天祝站为 23.3%, 预报准确率低。

3.3. 空间订正回归模型及检验

3.3.1. 空间订正回归模型

利用 ECMWF 高分辨率 2 m 最高、最低温度 24 小时逐日站点预报值, 假设地形差异是造成模式最高、最低温度误差的主要原因, 计算区域内 6 站最高、最低温度模式预报值与实况的相关系数(R) (见表 1), 相关系数均 > 0.952 , 显著性检验通过了 $\alpha = 0.001$ 的信度检验, 说明模式最高、最低温度与同期最高、最低温度实况变化存在良好的线性关系; 建立 6 站最高、最低温度的一元回归方程 $y = ax + b$ (见表 1), 显著性检验均通过了 $\alpha = 0.01$ 的信度检验。

Table 1. Regression equation and significance test parameter table

表 1. 回归方程及显著性检验参数表

站名	要素	相关系数(R)	回归方程($y = ax + b$)	相关系数检验(α)	方程检验(α)
凉州	最高温度	0.985	$y = 0.981x + 1.599$	0.001	0.01
	最低温度	0.981	$y = 1.05x + 0.259$	0.001	0.01

Continued

民勤	最高温度	0.989	$y = 0.979x + 1.201$	0.001	0.01
	最低温度	0.984	$y = 1.018x - 0.155$	0.001	0.01
永昌	最高温度	0.987	$y = 0.957x + 0.421$	0.001	0.01
	最低温度	0.987	$y = 1.071x - 2.809$	0.001	0.01
古浪	最高温度	0.985	$y = 0.992x + 1.572$	0.001	0.01
	最低温度	0.977	$y = 0.981x + 1.762$	0.001	0.01
天祝	最高温度	0.978	$y = 0.973x + 3.44$	0.001	0.01
	最低温度	0.967	$y = 1.06x + 0.053$	0.001	0.01
乌鞘岭	最高温度	0.979	$y = 0.977x + 0.005$	0.001	0.01
	最低温度	0.952	$y = 0.954x + 1.058$	0.001	0.01

3.3.2. 绝对误差及预报准确率评估

分析一元回归方程计算出的逐日最高、最低温度订正预报值与同期最高、最低温度实况计算 e 和 TT (见表 2), 区域内 6 个站点订正后的最高温度的平均 e : 全市平均为 1.3°C , 川区和山区均为 1.3°C ; 最低温度的平均 e : 全市平均为 1.7°C , 其中川区为 1.6°C 、山区为 1.8°C 。区域内 6 个站点回归模型订正后的最高温度 TT : 全市平均为 80.0%, 其中川区平均为 78.5%、山区平均为 80.6%; 最低温度的 TT : 全市平均为 69.2%, 其中川区平均为 71.6%、山区平均为 68%。

与模式直接输出相比, 最高温度 e 平均减小了 0.5°C 、最低温度 e 平均减小了 0.3°C 。其中, 川区最高温度的 e 减小了 0.4°C 、最低温度的 e 不变; 山区最高温度的 e 减小了 0.6°C 、最低温度的 e 减小了 0.5°C 。与模式直接输出相比, 最高温度 TT 平均提高了 17.6%、最低温度 TT 平均提高了 9.7%。其中, 川区最高温度 TT 提高 9.1%、最低温度 TT 提高 0.7%; 山区最高温度 TT 提高了 21.6%、最低温度 TT 提高了 14.2%。

由此可见, 经过回归模型订正后, 最高、最低温度 TT 除凉州最低温度略有降低外, 其余均有所提高。其中, 最高温度 6 站 TT 除永昌本身模式预报准确率较高(81.4%)提高幅度较小(提高 1.4%)外, 其余 5 站提高幅度均较大, 凉州、民勤、乌鞘岭、古浪、天祝分别提高了 11.9%、6.2%、9.2%、23.0%、53.0%; 最低温度 TT 除浅山区的永昌、古浪的提高了 39.4%、14%, 提高幅度较大外, 其余 4 站持平或略有提高。最高温度: 订正后区域内 6 个站点的 $e \leq 1.4^{\circ}\text{C}$ 、 $TT \geq 75.1\%$; 最低温度: 川区和浅山区站点(凉州、民勤、永昌、古浪)的 $e \leq 1.6^{\circ}\text{C}$ 、 $TT \geq 71\%$; 但深山区的天祝、乌鞘岭的最低温度 e 为 2.2°C 、 1.9°C , TT 为 65.1%、55.2%, 预报准确率低, 订正效果不明显, 不能满足预报业务需求。

Table 2. The absolute error and the forecast accuracy rate of $\leq 2^{\circ}\text{C}$ of extreme temperature of model forecast output and forecast equation in weather stations of Wuwei City

表 2. 武威市气象站点极端温度模式输出、预报方程值绝对误差和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 预报准确率

站名\要素	模式输出		线性回归预报方程		
	绝对误差 $^{\circ}\text{C}$	准确率%	绝对误差 $^{\circ}\text{C}$	准确率%	
永昌	最高温度	1.2	81.4	1.2	82.8
	最低温度	2.6	41.1	1.3	80.5
凉州	最高温度	1.8	63.2	1.4	75.1
	最低温度	1.6	71.1	1.5	71.0

Continued

民勤	最高温度	1.5	75.6	1.2	81.8
	最低温度	1.6	70.8	1.6	72.1
古浪	最高温度	1.9	59.5	1.3	82.5
	最低温度	2.1	57.2	1.6	71.2
天祝	最高温度	3.3	23.3	1.3	76.3
	最低温度	2.0	62.1	2.2	65.1
乌鞘岭	最高温度	1.3	71.6	1.4	80.8
	最低温度	2.3	54.8	1.9	55.2

3.4. 时间订正回归模型及检验

3.4.1. 时间订正回归模型

利用区域内 6 个站点近 30 年极端最高、最低温度的年极大值、极小值出现日期, 计算平均极大值、极小值出现日期, 从而确定出区域内 6 站的上升、下降区间(见表 3)。

Table 3. The annual average of occurrence date for maximums and minimums of the extreme temperature in weather stations of Wuwei City

表 3. 武威市各站点极端温度最大值、最小值年平均出现日期

站名\项目	极端最低温度		极端最高温度	
	极小值平均出现日期	极大值平均出现日期	极大值平均出现日期	极大值平均出现日期
凉州	1 月 23 日	8 月 3 日	1 月 22 日	7 月 24 日
民勤	1 月 23 日	8 月 3 日	1 月 22 日	7 月 24 日
永昌	1 月 23 日	7 月 18 日	1 月 23 日	7 月 24 日
古浪	1 月 23 日	7 月 25 日	1 月 23 日	7 月 24 日
天祝	1 月 21 日	7 月 31 日	1 月 20 日	7 月 29 日
乌鞘岭	1 月 23 日	7 月 24 日	1 月 22 日	7 月 24 日

选取乌鞘岭 2017 年 1 月 14 日到 2018 年 1 月 10 日逐日最低温度, 根据划分的上升区间与下降区间, 制作最低温度随日期函数变化散点图可以看出(见图 2), 其线性方程的复相关系数达到 0.87% 以上, 说明上升、下降区间温度随日期函数变化均具有线性特征。

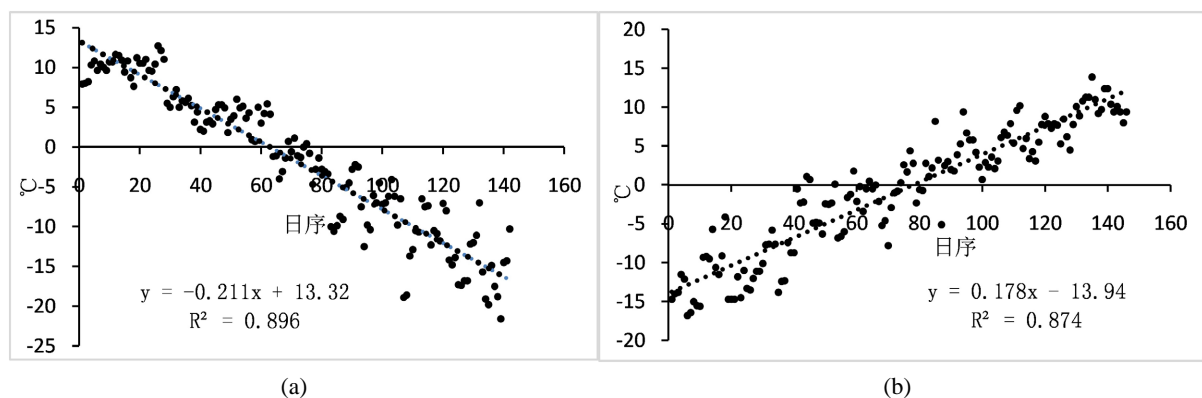


Figure 2. The linear trend of Minimum temperature and date function in Wushao Ling: (a) Descending range, (b) Ascending range
图 2. 乌鞘岭最低温度与日期函数变化线性趋势: (a) 下降区间; (b) 上升区间

选取 2016 年 6 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日区域内 6 站逐日最高、最低温度实况，根据上升区间、下降区间中对应的日期函数，分别建立数据集。其中，上升区间起始日期记为 $t_1 = 1$ ，区间长度为 n_1 ，建立日期序列 $t_1(1, 2, \dots, n_1)$ ；下降区间起始日期记为 $t_2 = 1$ ，区间长度为 n_2 ，建立时间序列 $t_2(1, 2, \dots, n_2)$ 。分别用上升、下降区间对应日期的最高、最低温度的实况与日期函数建立线性回归方程(见公式(5))，区域内 6 站 $T_i(i)$ 回归方程见表 4，其相关系数和回归方程均通过了信度 $\alpha = 0.001$ 的检验。读取预报日前一最高、最低温度实况，利用公式(7)可求得逐日的 $\Delta T_i(i)$ ，带入公式(4)，即可得每日 24 小时最高、最低温度的预报值。

Table 4. The coefficient of the regression equations for the time between the maximum and minimum temperature monotonous rise and fall in each station in Wuwei City

表 4. 武威市各站最高、最低温度单调上升、下降区间时间回归方程系数

站名\项目	最低温度		最高温度	
	下降区间	上升区间	下降区间	上升区间
凉州	$T_i(i) = 0.0133 \cdot t(i) - 0.910$	$T_i(i) = -0.009 \cdot t(i) - 0.218$	$T_i(i) = 0.005 \cdot t(i) - 1.941$	$T_i(i) = 0.005 \cdot t(i) - 1.329$
民勤	$T_i(i) = 0.008 \cdot t(i) - 0.1615$	$T_i(i) = -0.006 \cdot t(i) + 0.463$	$T_i(i) = 0.002 \cdot t(i) - 1.238$	$T_i(i) = 0.001 \cdot t(i) - 0.566$
永昌	$T_i(i) = 0.017 \cdot t(i) + 1.176$	$T_i(i) = -0.011 \cdot t(i) + 3.421$	$T_i(i) = -0.003 \cdot t(i) + 0.101$	$T_i(i) = 0.004 \cdot t(i) + 0.201$
古浪	$T_i(i) = 0.002 \cdot t(i) - 1.599$	$T_i(i) = 0.003 \cdot t(i) - 2.378$	$T_i(i) = 0.004 \cdot t(i) - 2.071$	$T_i(i) = 0.001 \cdot t(i) - 1.328$
天祝	$T_i(i) = 0.025 \cdot t(i) - 0.978$	$T_i(i) = -0.008 \cdot t(i) - 0.006$	$T_i(i) = -0.005 \cdot t(i) - 3.008$	$T_i(i) = 0.006 \cdot t(i) - 3.882$
乌鞘岭	$T_i(i) = 0.003 \cdot t(i) - 0.963$	$T_i(i) = -0.0004 \cdot t(i) - 1.854$	$T_i(i) = 0.0005 \cdot t(i) + 0.079$	$T_i(i) = 0.006 \cdot t(i) - 0.4880$

3.5. 预报能力评估

经过空间线性回归模型订正后，区域内 6 个站点的最高温度 $e \leq 1.4^\circ\text{C}$ 、 $TT \geq 75.1\%$ ，具备较高的预报水平，再进行时间误差订正，提高幅度不大。所以本文只给出区域内 6 个站点最低温度经过空间和时间订正后的预报结果检验，检验资料样本分上升区间、下降区间。

3.5.1. 预报准确率检验评估

从图 3(a)可以看出，上升区间内，最低温度在空间回归模型订正的基础上，再进行时间回归模型订正，发现区域内 6 个站点经过二次订正后相对于仅用空间回归模型订正，预报准确率凉州、民勤、永昌、古浪、天祝、乌鞘岭分别提高了 1.5%、2.3%、2.3%、1.7%、7.9%、12.0%。

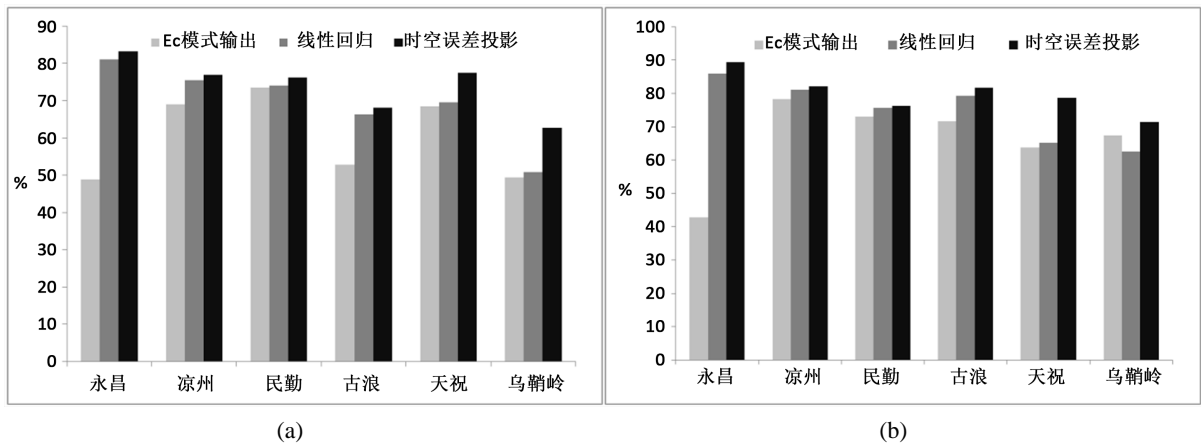


Figure 3. The output of the minimum temperature model of 6 stations in Wuwei City and the forecast accuracy rate of $\leq 2^\circ\text{C}$ after correction by various methods: (a) rising interval; (b) falling interval

图 3. 武威市 6 站最低温度模式输出和各种方法订正后 $\leq 2^\circ\text{C}$ 预报准确率：(a) 上升区间；(b) 下降区间

从图 3(b)可以看出, 下降区间内, 最低温度在空间回归模型订正的基础上, 再进行时间回归模型订正, 发现区域内 6 个站点经过二次订正后相对于仅用空间回归模型订正, 预报准确率凉州、民勤、永昌、古浪分别提高了 1.0%、0.5%、3.5%、2.4%、13.5%、8.9%。

由此可见, 经过空间和时间回归模型二次订正后, 上升区间和下降区间预报准确率均有不同程度提高, 只是平川区和浅山区经过空间线性回归模型订正后已具备较高的预报准确率, 再往上提升空间较小、难度大, 而对高海拔地区站点预报准确率提升效果显著。

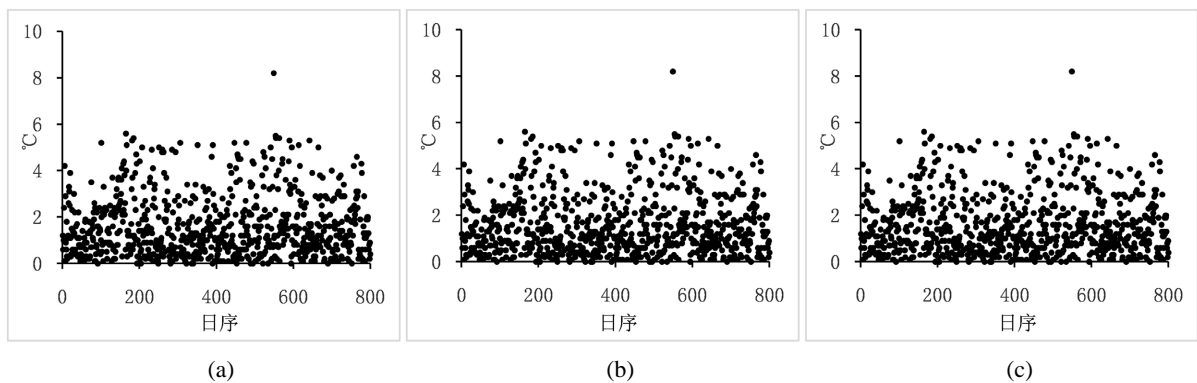
3.5.2. 绝对误差检验评估

从表 5 可以看出, 上升和下降区间在经过空间线性回归模型订正后, 再进行时间回归模型二次订正, 发现区域内 6 个站点绝对误差相对于仅用空间回归模型订正预报绝对误差精度提高了 $0^{\circ}\text{C}\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 。选取民勤、永昌、乌鞘岭三站作为平川区、浅山区、深山区的代表站分析绝对误差的散点图(见图 4), 可以看出, 经过二次订正后, 平均绝对误差减小、最大绝对误差明显减小, 民勤最大绝对误差由 8.2°C 减小到 6.9°C 、永昌最大绝对误差由 8.6°C 减小到 5.6°C 、乌鞘岭最大绝对误差由 11.5°C 减小到 8.8°C , 各代表站的绝对误差值明显收敛减小。

Table 5. The absolute error and the forecast accuracy rate of $\leq 2^{\circ}\text{C}$ after the correction of the spatio-time error of the minimum temperature in weather stations of Wuwei City

表 5. 武威市站点最低温度时空误差订正后绝对误差和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 预报准确率

	上升区间						下降区间					
	Ec 模式输出		线性回归		时空误差投影		Ec 模式输出		线性回归		时空误差投影	
	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)	绝对误差 ($^{\circ}\text{C}$)	准确率 (%)
永昌	2.5	48.9	1.4	81.0	1.3	83.3	2.7	42.7	1.2	85.9	1.2	89.4
凉州	1.8	69.1	1.6	75.5	1.5	77.0	1.4	78.3	1.4	81.0	1.3	82.0
民勤	1.7	73.5	1.7	74.0	1.6	76.3	1.6	73.1	1.5	75.7	1.5	76.2
古浪	2.5	52.8	1.9	66.4	1.9	68.1	1.8	71.7	1.4	79.3	1.3	81.7
天祝	1.9	68.5	1.8	69.6	1.7	77.5	2.0	63.8	1.9	65.2	1.6	78.7
乌鞘岭	2.8	49.4	2.5	50.8	2.1	62.8	1.9	67.3	2.0	62.6	1.7	71.5



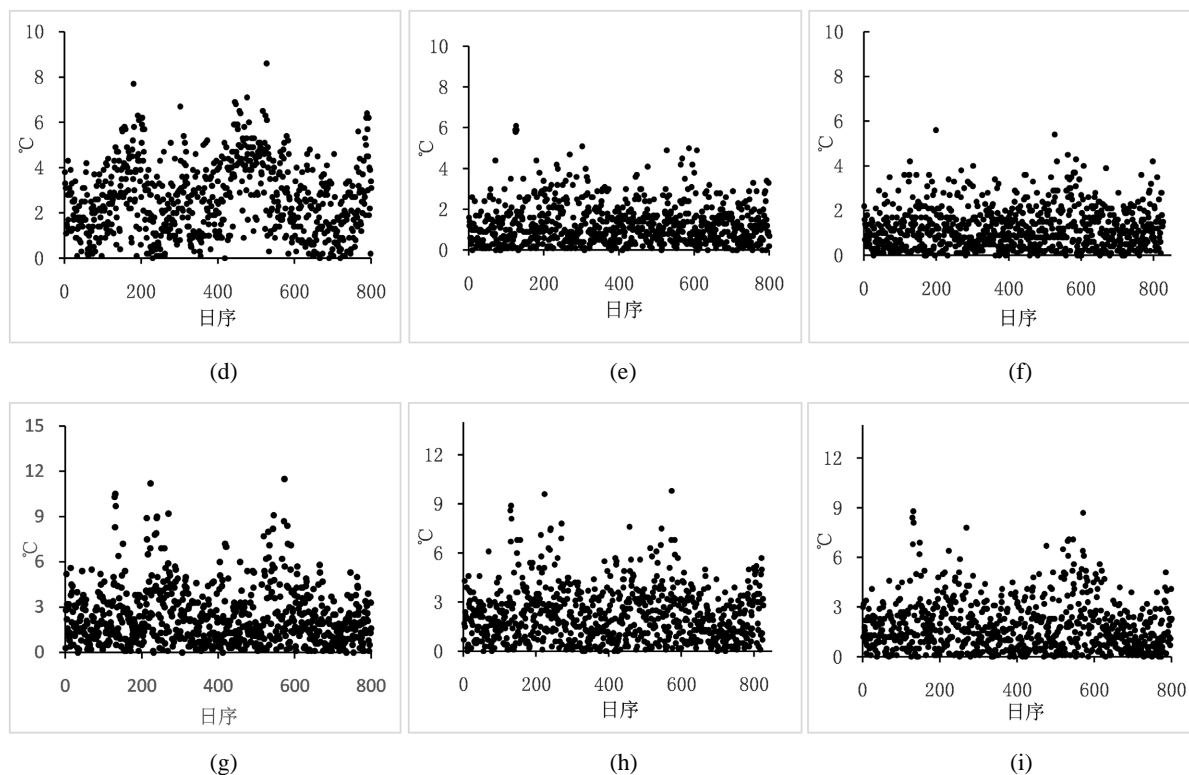


Figure 4. The absolute error scatter plot of the corrected minimum temperature of representative stations in Wuwei City of ECMWF direct output, linear regression model and spatio-temporal error correction ((a) (b) (c) are the absolute error scatter plots of Minqin ECMWF direct output, linear regression model, and spatio-temporal error correction; (d) (e) (f) are the absolute error scatter plots of Yongchang ECMWF direct output, linear regression model, and spatio-temporal error correction; (g) (h) (i) are the absolute error scatter plot of Wushaoling ECMWF direct output, linear regression model, and spatio-temporal error correction)

图 4. 武威市代表站 ECMWF 直接输出、线性回归模型、时空误差订正的最低温度绝对误差散点图((a)、(b)、(c)分别为民勤 ECMWF 直接输出、线性回归模型、时空误差订正的绝对误差散点图; (d)、(e)、(f)分别为永昌 ECMWF 直接输出、线性回归模型、时空误差订正后的绝对误差; (g)、(h)、(i)分别为乌鞘岭 ECMWF 直接输出、线性回归模型、时空误差订正后的绝对误差散点图)

3.6. 业务试报

利用 2019 年 1 月 1 日~2019 年 9 月 30 日 ECMWF 细网格实时预报产品, 进行时空误差订正模型业务试运行, 对预报能力进行检验(见表 6), 发现该方法对区域内 6 站最低温度平均预报准确率为 80.1%、平均绝对误差为 1.4°C, 具有较强的预报订正能力。上升区间预报准确率最高的为浅山区的永昌, 达 83.5%; 下降区间预报准确率最高的为古浪, 达 92.9% 效果最佳。

Table 6. The absolute error and the forecast accuracy rate of $\leq 2^{\circ}\text{C}$ after the correction of the spatio-time error correction of the minimum temperature in weather stations of Wuwei City

表 6. 武威市站点最低温度时空误差订正后绝对误差和 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 预报准确率

	上升区间		下降区间		平均	
	绝对误差(°C)	准确率(%)	绝对误差(°C)	准确率(%)	绝对误差(°C)	准确率(%)
永昌	1.3	83.5	1.3	86.8	1.3	85.2
凉州	1.6	74.7	1.2	84.2	1.4	79.5
民勤	1.5	78.9	1.3	80.2	1.4	79.6

Continued

古浪	1.5	77.1	1.0	92.9	1.3	85.0
天祝	1.4	80.9	1.1	84.8	1.3	82.9
乌鞘岭	1.8	67.1	1.7	76.2	1.8	71.7

4. 小结

精细化格点预报是中国气象局目前主推的业务和未来天气预报的发展方向。本文利用 ECMWF 高分辨率温度资料, 获得武威市区域内 6 个站点的最高、最低温度预报值, 在评估模式产品输出和回归模型预报订正能力的基础上, 深入分析误差产生的原因, 构造温度随时间函数的二次订正方法, 并检验预报质量, 主要结论如下:

1) 统计分析发现模式直接输出的预报产品, 区域内最低温度绝对误差大, 预报准确率低。经过回归模型订正后, 川区和浅山区的最低温度预报绝对误差精度和预报准确率显著提高; 但地处深山区的天祝、乌鞘岭的最低温度绝对误差仍较大, 为 2.2℃、1.9℃, 预报准确率为 65.1%、55.2%, 订正能力弱。

2) 在回归模型订正的基础上, 引入太阳高度角变化对温度的影响, 构造了时间变化对温度影响的二次订正方法, 使得温度订正模型更趋合理。通过检验发现, 经过时空误差二次订正, 高海拔站点的最低温度 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 预报准确率平均提高 8.8%~12%, 预报绝对误差平均减小了 0.5℃, 最大误差也明显减小。

3) 在因子选取上从模式产品逐三小时的最高、最低温度中, 提取日最高、最低温度, 克服了天气过程对最高、最低温度的取值影响。

4) 在构造时间误差二次订正模型的区间设计上, 根据各站多年平均年最高、最低温度极值出现的日期, 将温度的年变化划分为上升区间、下降区间, 这种划分克服了按月、季、年划分区间建立预报模型的人为主观性, 使建立的预报模型更为客观。

5) 时空误差订正方法计算简单, 便于在格点极端温度预报订正上开展释用, 为格点极端温度预报订正提供了一种新的思路和方法。

基金项目

干旱基金: 西北区域数值预报业务试验系统 NW-MNPS 在河西短时强降水预报中的应用(IAM201713)。

参考文献

- [1] 薛纪善. 和预报员谈数值预报[J]. 气象, 2007, 33(8): 3-11.
- [2] 马清, 龚建东, 李莉, 等. 超级集合预报的误差订正与集成研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 42-48.
- [3] 漆梁波, 曹晓岗, 夏立, 等. 上海区域要素客观预报方法效果检验[J]. 气象, 2014, 40(4): 433-439.
- [4] 王敏, 李晓莉, 范广洲, 等. 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, 2012, 23(4): 395-401.
- [5] 薛谔彬, 陈娴, 张瑛, 等. ECMWF 高分辨率模式 2 m 温度预报误差订正方法研究[J]. 气象, 2019, 45(6): 831-842.
- [6] 刘新伟, 段伯隆, 黄武斌, 等. 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, 2020, 43(3): 577-584.
- [7] 郝翠, 张迎新, 王在文, 等. 最优集合预报订正方法在客观温度预报中的应用[J]. 气象, 2019, 45(8): 1085-1092.
- [8] 钱莉, 兰晓波, 杨永龙. 最优子集神经网络在武威气温客观预报中的应用[J]. 气象, 2010, 36(5): 102-107.
- [9] 钱莉, 杨晓玲, 殷玉春, 等. 最优子集回归在武威市降水预报中的应用[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6): 895-900.
- [10] 李玲萍, 尚可政, 钱莉, 等. 最优子集神经网络高温预报模型[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 67-72.

-
- [11] 陈百炼. 降水温度分县客观预报方法研究[J]. 气象, 2003, 29(8): 48-51.
 - [12] 曾晓青, 薛峰, 赵瑞霞, 等. 几种格点化温度滚动订正预报方案对比研究[J]. 气象, 2019, 45(7): 1009-1018.
 - [13] 王丹, 王建鹏, 娄盼星, 等. ECMWF 高分辨率模式对陕西 2017 年 7 月高温预报的检验及订正[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 38-46.
 - [14] 陈迪, 陈豫英, 马金仁, 等. 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, 2019, 42(1): 94-102.
 - [15] 尹姗. 2015 年 12 月至 2016 年 2 月 T639、ECMWF 及日本模式中后期预报性能检验[J]. 气象, 2016, 42(5): 637-642.
 - [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 10-11.