

基于类卡尔曼滤波的哈尔滨智能网格气温 预报检验及偏差订正

张鑫¹, 张鑫², 王一达³, 韩基良¹, 潘菁¹, 张洪梅⁴, 刘帅⁵

- (1. 哈尔滨市公共气象服务中心, 黑龙江 哈尔滨 150028;
2. 中国联合网络通信有限公司哈尔滨软件研究院, 黑龙江 哈尔滨 150028;
3. 哈尔滨市气象台, 黑龙江 哈尔滨 150028;
4. 哈尔滨市气象综合保障中心, 黑龙江 哈尔滨 150028;
5. 哈尔滨市防灾减灾气象服务中心, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要:应用滑动平均(5 d、7 d)、类卡尔曼滤波递减平均两种订正方法对哈尔滨地区国家级指导预报最高(最低)气温产品进行预报能力初步检验及偏差订正。结果表明:两种订正方法对最高气温与最低气温预报产品 24–240 h 预报时效大部分时段均有正的订正效果,最高(最低)气温预报准确率提高 1–2%,平均绝对误差 0.1–0.2 °C,其中 24–96 h 预报时效预报能力稍好,120 h 之后预报能力较差,订正后预报准确率也不足 60%。气温预报偏差还表现为明显的季节变化特征,7–9 月最高气温的预报效果优于冬春季,冬半年的订正幅度较夏季稍大。另外,不同天气状况下降水天气对气温预报有一定的影响,如果能进一步改进模式预报中降水带来的偏差,将进一步提高模式订正效果。

关键词:时间持续偏差;递减平均法;类卡尔曼滤波;偏差订正;最高、最低气温

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

DOI: 10.14021/j.cnki.hljqx.2023.02.012

1 引言

近年来随着智能网格预报的发展,基于智能网格预报生成的专业气象服务产品在社会服务中发挥着重要作用,在业务发展中网格预报“一张网”的模式逐渐成熟^[1–2]。虽然智能网格预报产品的准确率、分辨率和精细化程度不断提高,但在实际业务应用中由于其预报模式本身的系统性误差、地理地形原因和其他非系统性误差的存在,实况预报、服务效果和模式预报值有一定的差距^[3–4],模式预报产品的检验与订正以及优化与改进对提高预报准确率十分重要,同时对业务中预报能力的提升和衡量预报业务水平也起着关键作用。被认为具有较好拟合性的卡尔曼滤波方法被广泛应用于模式订正、资料同化等领域,在数值预报订正方面是目前常用的处理方法之一^[5–7]。模式预报订正对样本数量有一定要求,卡尔

曼滤波方法在样本数量少的情况下也同样可以使用,模式预报产品不断更新并且针对不同时段的模式预报加权平均得到订正偏差值,众多气象学者通过使用递减平均法在模式预报气温误差订正方面取得了不错的效果^[8]。SCMOC 是国家气象中心以 ME-OFIS 为技术支撑提供的气象要素精细化预报指导产品^[9],在实际天气预报业务和专业气象服务中是重要参考模式预报产品之一且具有较好的指示意义。王秀娟、佟华等^[10–12]应用卡尔曼滤波方法对气温进行误差修正后有一定的订正效果。肖瑶等^[13]在使用适应卡尔曼滤波方法对气温、风速等预报产品进行偏差订正时均建立了包含天气过程和空间信息的递减平均参数 w 函数。孔德璇等^[14–16]对 SCMOC 温度预报产品进行本地化检验、客观订正算法评估,对提高预报准确率和本地化客观气温系统偏差订正有一定效果且

收稿日期: 2023–3–1

第一作者简介:张鑫(1985–),女,黑龙江省哈尔滨市人,成都信息工程大学,硕士生,高级工程师。

能在行业气象服务中具有应用价值。位于东北地区北部的黑龙江省地处中高纬度地区具有纬度高、早晚温差大等气候特点,气温预报是业务预报服务中的难点特别是季节转换、降水天气、冷空气侵入时预报系统偏差较大,齐铎等^[17]对 EC 气温预报产品在黑龙江地区的使用进行了初步检验以及系统性偏差订正,但目前针对 SCMOC 温度订正预报方法在东北地区大范围本地化订正研究方法还较少。本文旨在寻找适用于黑龙江中部哈尔滨地区的 SCMOC 温度预报客观化订正释用方法,建立起本地化的温度客观订正算法,基于时间持续偏差和类卡尔曼滤波两种方法初步构建哈尔滨地区气温预报客观订正算法方法,对 SCMOC 最高、最低气温预报进行试验性预报和检验对比分析,以期能够建立起具有一定参考价值的温度预报本地化客观订正算法模型。

2 资料和方法

2.1 资料

预报资料:本文选取 2020 年智能网格预报国家级指导预报产品(以下简称 SCMOC)中的最高气温和最低气温两种预报产品,预报时效为 24~240 h,预报间隔为 24 h,起报时间为每日 08 时(北京时)。

观测资料:哈尔滨市 13 个国家气象观测站日观测值,时段为 2020 年 1 月 1 日~12 月 31 日。

资料缺测处理方法:预报资料采用插值方法补缺,观测资料以临近站点的同期数据进行补缺,如果预报资料与观测资料同时缺测则剔除当日数据,默认无需进行偏差订正。

2.2 预报方法

2.2.1 滑动平均法

滑动平均是一种通过统计模式预报的持续系统性偏差来计算 SCMOC 在过去 n 天气温预报误差的方法。

计算公式如下:

$$B_t = T_{fc} + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n T_{fc}(k) - T_{ob}(k) \quad (1)$$

$T_{fc}(k)$ 和 $T_{ob}(k)$ 分别是第 k 日最高(最低)气温预报值和观测值, B_t 即为对应的 SCMOC 预报偏差订正值。

2.2.2 类卡尔曼滤波法

类卡尔曼滤波法(递减平均法)是一种通过滞后

平均来降低误差尺度的自适应误差订正方法,具体的递减平均降尺度统计构建函数见公式,在某一站点上对于某一预报时效的日最高(低)气温模式预报递减平均法的订正原理如下:

$$B(t) = (1-w) \times B(t-1) + w \times (FC - OB) \quad (2)$$

$$F'(t) = F(t) - B(t) \quad (3)$$

式中: $B(t)$ 表示任意一个站点气温预报(格点预报值插值到站点)的滞后平均误差, $B(t-1)$ 表示前一日的滞后平均误差,模式订正预报 $F'(t)$ 由模式预报 $F(t)$ 减去最优权重系数 w 下训练出的迭代累加滞后平均误差。

以最高气温预报订正为例具体步骤如下:(1)根据业务需要以预报日前一天之前的 60 d 作为训练期计算其最优权重系数 w ;(2)在训练期迭代累加计算滞后平均误差 $B(t)$;(3)逐站点、逐预报时效对最高气温进行订正,用最新时次预报值减去最优 w 下迭代累加滞后平均误差得到订正后的最高气温预报值。

2.3 检验方法

为综合衡量 SCMOC 模式气温的预报能力和订正预报的效果,通过不同的检验手段从不同角度对其进行分析,这里将应用平均绝对误差、预报准确率和均方根误差进行评估。

$$\text{平均绝对误差(MAE)} \quad MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |T_{fc}(k) - T_{ob}(k)| \quad (4)$$

$$\text{预报准确率(TT)}: TT = \frac{T_{NR}}{T_{NF}} \quad (5)$$

均方根误差(RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_{fc}(k) - T_{ob}(k))^2} \quad (6)$$

式中: RMSE 为均方根误差; T_{fc} 为预报值; T_{ob} 为观测值; TT 为预报准确率, T_{NR} 为预报正确的次数, T_{NF} 为预报的总次数,以预报值与观测值的绝对误差 ≤ 2.0 °C 作为气温预报准确率检验阈值标准。

3 滑动平均订正方案及效果评估

SCMOC 滑动平均滚动订正方案:在相同的预报时效、相同站点下分别以 $n=5$ d 和 $n=7$ d 作为滑动训练时间周期计算滑动平均误差值,用 SCMOC 预报值减去计算得到的滑动平均误差值即可得到订正后的最新预报值。

使用上述时间持续偏差订正方案对最高(最低)气温进行订正,在不同滑动训练期下使用平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 及预报准确率 TT 进行订正前后对比分析。不同训练期下两种滑动平均方案的订正能力相差不大,总体都是最高气温比最低气温的模式预报误差稍小,准确率稍高,随着预报时效的增加,模式与实况的预报误差增加,准确率降低。除个别站点外大多数站点不同的训练期下都是正订正,但表现不够理想。

4 类卡尔曼滤波订正方案及效果评估

采用类似卡尔曼滤波方法进行模式预报订正开始之前需要对权重系数 w 参数做本地化敏感性试

验。不同的权重系数 w 将直接影响到预报偏差值 $B(t)$ 进而影响订正结果,所以 w 取值十分重要。初步设定方案是针对某一站点某一预报时效进行分组计算训练期内不同 w 取值,常值参数 w 以 0.05 为步长间隔、0-1 为取值范围,计算前一时次预报偏差时本文采用“热启动”方式,递减平均统计降尺度偏差训练期为 60 d。这里计算后得到 w 在 0.3 附近时,平均绝对误差 MAE、均方根误差 RMSE 和预报准确率综合考虑来说误差较小、准确率较高,故将 w 按照 0.3 来构建哈尔滨地区气温订正方案对 2020 年 1-12 月 SCMOC 进行订正。

4.1 时间分布

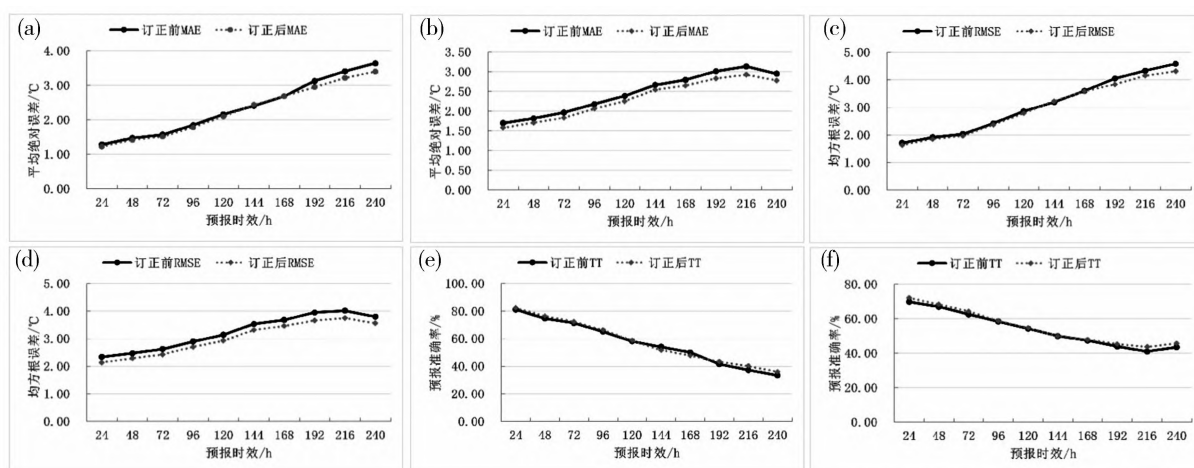


图1 2020年哈尔滨地区递减平均统计降尺度订正预报与原始 SCMOC 模式最高气温和最低气温的(a,b)平均绝对误差 MAE、(c,d)均方根误差 RMSE(单位:°C)及(e,f)预报准确率 TT(单位:%)

从预报时效来看,24-96 h 预报时效的最高气温无论订正前后,平均绝对误差和均方根误差都高于最低气温,预报准确率高于最低气温,预报效果更理

想,96 h 之后的预报时效,最高气温和最低气温预报效果不太理想,预报准确率<60%,订正稍有提高。但无论是订正前预报还是订正后预报,随着预报时效

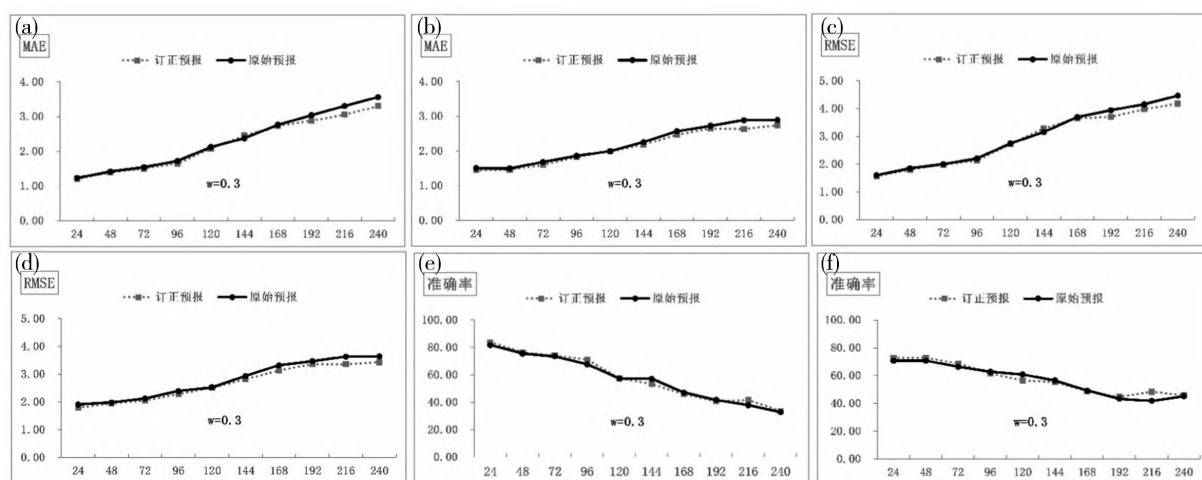


图2 哈尔滨主城区递减平均统计降尺度订正预报与原始 SCMOC 模式最高气温和最低气温的(a,b)平均绝对误差 MAE (c,d)均方根误差 RMSE (单位:°C)及(e,f)预报准确率 TT (单位:%)

的增加,平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSE 都呈现出波动式增长趋势,预报准确率呈现出波动式降低趋势(图 1)。

从预报准确率来看,递减平均统计降尺度订正方法有一定的订正效果,但优势不明显,从误差分析来看,最低气温正订正效果表现更好,各预报时效均表现为正订正,最高气温则个别时效存在负订正效果。

使用递减平均统计降尺度订正方法在得到哈尔滨地区最高(最低)气温平均绝对误差、均方根误差及预报准确率的基础上,进一步将哈尔滨主城区的订正效果与全市平均值对比分析(图 2),得到哈尔滨主城区订正效果好于全市平均值,东部山区预报准确率不够理想,订正效果低于平均值。

进一步分析 2020 年哈尔滨主城区最高气温和最低气温 24–72 h 预报时效的平均绝对误差、均方根误差及预报准确率逐月的变化。

总体而言,7–9 月最高气温的预报效果优于冬春季,冬半年的订正幅度较夏季稍大,24 h 预报时效预报误差波动较小,订正后的平均绝对误差和均方根误差都在 2 °C 以下,48–72 h 预报时效 5–6 月份存在明显的误差峰值,除了该波动外,其他月份订正后的

平均绝对误差和均方根误差都在 2 °C 以下(达到或超过预报员主观预报效果),这种气温预报效果可能和季节转换有关。

相对于最高气温,最低气温整体预报效果稍差,特别是冬半年,同样 7–9 月最低气温的预报效果优于冬春季,但是误差波动幅度比最高气温明显。这种气温预报效果的季节性差异可能由于东北地区冬半年常有冷空气滑过伴随发生寒潮等剧烈降温天气,频繁活动的冷空气使气温起伏变化明显,历史信息的不稳定即温度的剧烈波动使统计的偏差不能较好地反映当前的系统性偏差,从而导致冬半年的预报准确率稍低。

5 降水天气订正分析

通过对不同天气状况(晴、雨)下 72 h 逐日最高、最低气温预报的订正差异分析可知,由表 1 可见,当出现降水时(日降水量 ≥ 0.1 mm),SCMOC 模式最高气温平均绝对误差 1.61 °C,均方根误差 2.10 °C,预报准确率 70.4%;最低气温平均绝对误差 1.57 °C,均方根误差 2.19 °C,预报准确率 72.6%。当未出现降水时,SCMOC 模式最高气温平均绝对误差 1.26 °C,均方根误差 1.64 °C,预报准确率 80.8%;最低气温平均绝对误差 1.74 °C,均方根误差

表 1 不同天气状况下 2020 年最高气温和最低气温预报订正检验对比

时效	气温	天空状况	平均绝对误差/°C	均方根误差/°C	预报准确率/%
72h 平均	日最高气温	无降水	1.26	1.64	80.8
		有降水	1.61	2.10	70.4
		不区分降水	1.39	1.82	76.9
	日最低气温	无降水	1.74	2.27	66.9
		有降水	1.57	2.19	72.6
		不区分降水	1.69	2.27	68.7
120h 平均	日最高气温	无降水	1.44	1.89	75.4
		有降水	1.89	2.48	64.0
		不区分降水	1.61	2.13	71.2
	日最低气温	无降水	1.88	2.44	62.9
		有降水	1.72	2.36	68.5
		不区分降水	1.85	2.45	64.5

2.27 °C,预报准确率 66.9%。

120 h 平均结果比 72 h 效果稍差,趋势与 72 h 基本一致。模式最高气温预报准确率高于最低气温,无降水出现时最高气温的平均绝对误差和平均均方根误差均低于有降水出现时,这说明,降水天气对气

温预报有一定的影响,如果能进一步改进模式预报中降水带来的偏差,将进一步提高模式订正效果。

6 总结

(1)对哈尔滨地区国家级指导预报 SCMOC 日最高、最低气温采用不同周期的滑动平均法和类卡尔

曼滤波递减平均统计降尺度方法进行误差订正,其中从预报准确率来看,递减平均法比滑动平均方法效果更好些,但优势不明显,特别是120 h之后预报准确率基本<60%。

(2)基于类卡尔曼滤波方法建立了哈尔滨地区本地化的模式数值预报温度的客观订正模型,虽然订正效果一般,但前96 h基本上都是正订正,进一步改进订正方案后可以尝试业务化运行。总体来说使用类卡尔曼滤波递减平均统计降尺度方法对观测数据进行滤波,寻找出观测资料和预报资料的系统偏差可以在实际业务中应用。通过对权重系数 w 参数做敏感性试验得到 w 在0.3附近时误差较小、准确率较高,故将 w 按照0.3取值来构建哈尔滨主城区气温订正方案,但无论是订正前预报还是订正后预报,随着预报时效的增加,平均绝对误差MAE和均方根误差RMSE都呈现出波动式增长趋势,预报准确率呈现出波动式降低趋势。

(3)日最高气温和最低气温预报准确率具有一定的季节变化特征,总体而言,7-9月最高气温的预报效果优于冬春季,冬半年的订正幅度较夏季稍大,对于最低气温而言整体预报效果低于最高气温,特别是冬半年更明显,这种气温预报效果的季节性差异可能由于东北地区冬半年常有不同强弱的冷空气经过,频繁活动的冷空气使气温起伏变化明显。

(4)不同天气状况下晴雨天气对预报订正有一定的影响。无降水出现时的平均绝对误差和平均均方根误差均低于有降水出现时,以最高气温为例,无降水出现时比有降水出现时预报准确率高10%左右,下一步可以考虑通过降水天气订正的方法进一步提高预报订正效果。

参考文献

- [1]韦青,李伟,彭颂,等.国家级天气预报检验分析系统建设与应用[J].应用气象学报,2019,30(2):245-256.
- [2]韦青,代刊,林建,等.2016—2018年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J].气象,2020,46(10):1272-1285.
- [3]张兰慧,尚可政,程一帆,等.数值预报产品的误差订正方法[J].兰州大学学报(自然科学版),2011,47(3):44-49.
- [4]陈法敬,矫梅燕,陈静.一种温度集合预报产品释用方法的初步研究[J].气象,2011,37(1):14-20.
- [5]智协飞,黄闻.基于卡尔曼滤波的中国区域气温和降水的多模式集成预报[J].大气科学学报,2019,42(2):197-206.
- [6]何成飞.基于卡尔曼滤波的地面与500 hPa多模式集成预报对比研究[D].2016,南京:南京信息工程大学.
- [7]肖瑶,杜明哲,徐鹏.两种订正方法在河南高速公路沿线气温精细化预报中的应用[J].干旱气象,2020,38(6):1023-1030.
- [8]刘成思,薛纪善.关于集合Kalman滤波的理论和方法的发展[J].热带气象学报,2005,21(6):628-633.
- [9]赵建峰.精细化气象要素预报用户支持系统(FUSE)研究[J].科技情报开发与经济,2012,22(4):92-94.
- [10]王秀娟,陈长胜,冯旭,等.一阶卡尔曼滤波方法对EC集合预报气温的订正[J].气象灾害防御,2019,26(1):34-38.
- [11]马清,龚建东,李莉,等.中尺度集合预报的二阶矩离散度订正研究[J].气象,2008,34(3):42-48.
- [12]佟华,郭品文,朱跃建,等.基于大尺度模式产品的误差订正与统计降尺度气象要素预报技术.气象,2014,40(1):66-75.
- [13]肖瑶,史一丛,王耸,等.中国地区集合预报产品自适应递减平均偏差订正法的改进研究[J].气象与环境学报,2019,35(2):09-14.
- [14]王丹,高红燕,马磊,等.SCMOC温度精细化指导预报在陕西区域的质量检验[J].气象科技,2014,42(5):839-846.
- [15]王丹,黄少妮,高红燕,等.递减平均法对陕西SC-MOC精细化温度预报的订正效果[J].干旱气象,2016,34(3):575-583.
- [16]孔德璇,杨春艳,朱文达,等.贵州省本地化温度客观订正算法探究[J].中低纬山地气象,2021,45(3):33-39.
- [17]齐铎,刘松涛,张天华,等.基于格点的中国东北中北部2m温度数值预报检验及偏差订正[J].干旱气象,2020,38(1):81-88.