

张祖莲,毛炜峰,张山清,等,2022. 北疆春季气温和霜冻网格精细化预报订正及检验[J]. 气象,48(11):1460-1474. Zhang Z L, Mao W Y, Zhang S Q, et al, 2022. Correction and verification for grid refined forecast of temperature and frost in spring in northern Xinjiang[J]. Meteor Mon, 48(11):1460-1474(in Chinese).

北疆春季气温和霜冻网格精细化预报订正及检验^{*}

张祖莲^{1,2} 毛炜峰¹ 张山清² 王命全³ 唐 冶⁴

艾代吐力·木沙江² 吐尔公·玉素甫²

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

2 新疆兴农网信息中心/新疆农业气象台, 乌鲁木齐 830002

3 新疆教育管理信息中心, 乌鲁木齐 830049

4 新疆气象台, 乌鲁木齐 830002

提 要: 选用中国气象局下发的 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的气温格点预报指导产品和陆面数据同化系统(CLDAS)逐时气温实况数据资料, 设计了三种基于平均滤波的温度智能网格预报订正算法, 对 2019 年 4—5 月北疆平原地区逐日 20 时起报的未来 240 h 的逐 3 h 气温预报产品进行订正, 并对比分析检验三种订正后产品和下发的指导预报共四种产品的预报效果。结果表明: 经过三种滤波订正后, 气温和霜冻预报准确率及稳定性明显提高。在分时效检验结果中, 三种订正产品较原指导预报产品的气温均方根误差分别减小了 0.79、0.85、0.88℃, 气温预报准确率分别提高了 6.11%、6.38%、6.46%, 霜冻预报准确率分别提高了 3.00%、5.81%、7.31%, 霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差降低了 4.21、4.41、4.35 h。在分区域检验结果中, 三种订正产品较原指导预报产品的气温均方根误差分别降低了 0.66、0.71、0.90℃, 气温预报准确率分别提高了 5.7%、6.1%、6.1%, 霜冻预报准确率在准噶尔盆地东南部海拔高度 600~1200 m 区域提高明显, 分别提高了 2.5%、4.8%、5.4%, 其他霜冻区域提高不明显。霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差平均降低了 0.81、0.63、0.56 h。相较而言, 最优集成算法的订正预报效果最好。

关键词: 春季霜冻, 平均滤波, 格点预报, 检验, 北疆平原, 温度订正

中图分类号: P457.3, X43

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.042102

Correction and Verification for Grid Refined Forecast of Temperature and Frost in Spring in Northern Xinjiang

ZHANG Zulian^{1,2} MAO Weiyi¹ ZHANG Shanqing² WANG Mingquan³

TANG Ye⁴ AIDAITULI Mushajiang² TUERGONG Yusu²

1 Institute of Desert Meteorology, CMA, Urumqi 830002

2 Xinjiang Agriculture Network Information Center/Xinjiang Agro-Meteorological Observatory, Urumqi 830002

3 Xinjiang Education Management Information Center, Urumqi 830049

4 Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002

Abstract: Using the $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ temperature grid forecast guidance products issued by China Meteorological Administration and the hourly temperature data of land surface data assimilation system (CLDAS), this paper designs three intelligent grid temperature forecast correction algorithms based on the average filtering and corrects the 3 h temperature forecasts with 240 h lead time starting from 20:00 BT every day in the northern Xinjiang Plain from April to May 2019. Then the forecast effect of three kinds of revised

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1505602)和中国沙漠气象科学研究基金(IDM2021008)共同资助

2021 年 6 月 27 日收稿; 2022 年 4 月 21 日收修定稿

第一作者: 张祖莲, 主要从事应用气象研究与气象信息技术研究. E-mail: 1724593714@qq.com

通讯作者: 张山清, 主要从事农业气候区划和农业气象灾害风险评估研究. E-mail: zhangshanqing-66@163.com

products and guidance forecast products are compared and tested. The results show that the accuracy and stability of air temperature and frost forecast were obviously improved after the three filtering corrections. In the results of time-division test, compared with the original guide forecast product, the root mean square error (RMSE) of the three corrected products decreased by 0.79, 0.85 and 0.88 °C on average, the accuracy of temperature forecast increased by 6.11%, 6.38% and 6.46% on average, the accuracy of frost forecast increased by 3.00%, 5.81% and 7.31% on average, respectively. Moreover, the RMSE of 24 h frost forecast decreased by 4.21, 4.41 and 4.35 h, respectively. In the regional test results, the RMSE of the temperature of the three revised products decreased by 0.66, 0.71 and 0.90 °C, and the accuracy of the temperature forecast increased by 5.7%, 6.1% and 6.1%, respectively. The accuracy of frost forecast increased significantly in the area of 600—1200 m above sea level in the southeast of Junggar Basin, increasing by 2.5%, 4.8% and 5.4% respectively, but not obvious in other frost areas. The RMSE of 24 h frost duration forecast was reduced by 0.81, 0.63 and 0.56 h. In comparison, the effect of the revised forecasts by the optimal ensemble algorithm is the best.

Key words: spring frost, average filtering algorithm, grid forecast, test, northern Xinjiang, temperature correction

引 言

春季霜冻是指在农作物生长季节里,地面和植物表面温度短时间内下降到足以引起农作物遭受伤害或者死亡的低温(沙晓梅等,2021;翟颖佳等,2019),霜冻持续时间越长,农作物受害程度越严重。北疆春季霜冻频发,该地区种植的玉米、小麦、棉花、林果等对霜冻非常敏感(张磊等,2014)。

做好霜冻预报的前提是提高温度预报的准确率,合适的订正算法可以有效提高温度预报准确率。温度订正主要考虑全区域的订正效果,而霜冻预报主要考虑气温达到霜冻域值区域的预报准确率,通过对比预报产品的预报效果,进而选出对气温和霜冻预报效果最好的算法。国内众多学者对温度客观预报方法做了大量研究工作,戴翼等(2019)采用一元线性回归以及克里金插值对 ECMWF 细网格模式的温度预报进行订正,订正后温度预报能力有显著提升;曾晓青等(2019)采用全球模式 2 m 温度预报场资料,使用 8 种误差订正方案进行滚动订正预报试验,结果显示滑动误差回归模型的检验评分略好于全格点滑动双因子回归模型;王丹等(2019a; 2019b)采用一元线性回归法和基于 ECMWF 细网格递减平均法两种方法对气温预报误差进行订正,两种方法都显著地提高了日最高(低)气温的预报准确率;岳慧欣等(2021)对葡萄主产区春霜冻灾害发生日数、频率、站次比以及致灾危险性进行分析,为

灾害防御工作提供依据;陈豫英等(2019)和潘留杰等(2022)利用 Kalman 滤波的方法对最低气温和霜冻、降水预报产品进行检验;彭九慧等(2016)采用概率、指标、数值预报产品相结合的方法及概率区间取值法建立了分县区初霜预报模型;贾丽红等(2018)和韦青等(2020)采用递减平均订正法、集合平均法和加权集合平均法,结果表明加权集合平均法优于集合平均法,先订正后集合方案优于先集合后订正方案;张鑫等(2021)利用北疆 37 个地面气象站逐日最低气温观测资料,分析北疆地区初、终霜日和霜期的时空演变特征。上述这些温度预报方法均基于国家级观测站预报资料进行的研究。新疆总面积为 166.49 万 km²,占全国土地面积的六分之一,是我国面积最大的省份,且地形地貌复杂,气候类型多样。而全疆仅有 105 个固定国家基本气象站,显然传统的固定站点预报无法满足精细的时间和空间信息的气象农业服务需求,目前,无缝隙精细化网格气象预报已经成为国际主流趋势(金荣花等,2019),因此,智能格点霜冻预报是农用天气预报实际业务和服务中迫切需要的预报产品。2019 年 5 月 14—18 日,天山北坡局地出现寒潮和不同程度霜冻,对当地农业生产造成不利影响。本文利用智能网格预报的精细化技术优势,将准确的春季霜冻预报精确到田间地头,为农户及早安排防御措施提供技术保障。

农业生产中非常需要春季精确的中期霜冻预报,空间上可以精确到田间地头,时间上可以分析给出霜冻当天气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的持续小时数,能够更好地为

算值分别按式(2)计算更新偏差订正值。例如,对于 3 h 气温预报的订正,利用距起报日最近 6 d 的 3 h 气温预报结果与对应日期的实况进行误差分析,将 6 d 预报误差的平均值作为订正偏差。对未来 6 h 的最低气温订正的方法类似,选取距起报日最近 6 d 的 6 h 预报时效的气温预报结果与对应实况进行误差分析,确定偏差订正值,直到 240 h 的预报时效气温的订正均采用此方式处理。每天针对每个格点的不同预报时效的订正偏差均采用这种滑动方法计算更新偏差订正值。

方案 2(简称 KM2), $n=10$, 整体思路过程与 KM1 方案相同。

方案 3(简称 KM3), 称为集成订正算法, 基于 KM1 与 KM2 的订正结果, 以绝对误差为判据, 将 KM1 或 KM2 方案中误差较小的方案作为集合分析后的 KM3 方案订正值, 每个格点的每个预报时效内的订正偏差均以此过程来确定。

(3) 模式预报误差订正:

$$F_d = f_d - B_d \quad (3)$$

利用获得偏差估算值 B_d 对最新格点预报 f_d 进行误差订正。格点预报误差订正过程是针对不同预报时效和所有格点进行的。

1.3 霜冻逐日持续时间预报

霜冻逐 24 h 平均持续时间预报:

$$DF = \frac{N_F}{N_G} \times 3, sk = \frac{N_{Fsk}}{N_{Gsk}} \times 3 \quad (4)$$

霜冻逐 24 h 平均持续时间预报误差:

$$WC = DF - sk \quad (5)$$

式中: DF 为霜冻逐日持续时间预报值, N_F 为预报时效内预报达到霜冻指标的总次数, N_G 为预报时效内达到霜冻指标的格点(天)数, sk 为 CLDAS 数据中霜冻逐日持续时间, N_{Fsk} 为与预报时效相对应的实况达到霜冻指标的总次数, N_{Gsk} 为预报时效内对应的实况值达到霜冻指标的格点(天)数。

计算过程: ①在预报日期内逐日单个格点预报霜冻发生次数为 n_{t_i} 、实况霜冻次数为 $n_{fsk_{t_i}}$ 。②分时效统计中, 在预报日期内逐日全部格点霜冻总次数

为 $N_F = \sum_{t=1}^{t=N_G} n_{t_i}$ (N_G 表示预报格点数) 及实况总次数 $N_{Fsk} = \sum_{t=1}^{t=N_{Gsk}} n_{fsk_{t_i}}$ (N_{Gsk} 表示实况格点数), 全部格

点在预报日期内逐 24 h 霜冻预报持续平均次数为 N_F/N_G , 对应平均实况次数为 N_{Fsk}/N_{Gsk} 。③由于研究资料为逐 3 h 预报, 即霜冻逐 24 h 持续时间预报范围为 $\left(\frac{N_F}{N_G} - 1\right) \times 3 \leq DF \leq \left(\frac{N_F}{N_G}\right) \times 3$, 本文取 $\left(\frac{N_F}{N_G}\right) \times 3$ 作为判断指标, 其对应的实况平均持续时间为 $\left(\frac{N_{Fsk}}{N_{Gsk}}\right) \times 3$ 。④逐日霜冻平均持续时间预报误差为 $WC = DF - sk$ 。

在区域统计中, 计算过程①相同, ②单个格点在

预报日期内的霜冻持续总次数为 $N_F = \sum_{t=1}^{t=N_G} n_{t_i}$ (N_G 为天数) 及预报对应的实况总次数 $N_{Fsk} = \sum_{t=1}^{t=N_{Gsk}} n_{t_i sk_{t_i}}$ (N_{Gsk} 为实况天数), 单个格点在所有预报日期内霜冻持续时间平均次数为 N_F/N_G , 对应平均实况次数为 N_{Fsk}/N_{Gsk} 。③单个格点在所有预报日期内逐 24 h 霜冻平均持续预报时间 $DF = N_F/N_G \times 3$, 其对应的实况平均持续时间为 $sk = N_{Fsk}/N_{Gsk} \times 3$ 。④逐格点霜冻平均持续时间预报误差为 $WC = DF - sk$ 。

1.4 检验指标

采用均方根误差(RMSE)、订正技巧(SS)、气温预报准确率(TT)(温度预报绝对误差 $\leq 2^\circ\text{C}$) (薛湛彬等, 2019)、霜冻预报准确率(TS)(气温 $\leq 0^\circ\text{C}$) (陈豫英等, 2019)、霜冻逐 24 h 平均持续时间预报均方根误差来检验订正前后的预报效果。其中:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - a_i)^2}{N}} \quad (6)$$

式中: i 为滑动天数或格点数, N 为总天数或总格点数, f_i 为预报值, a_i 为实况值。

$$TT = \frac{N_A}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (7)$$

式中: N_A 为预报值绝对误差 $\leq 2^\circ\text{C}$ 的格点(次)数, N_B 为预报值绝对误差 $> 2^\circ\text{C}$ 的格点(次)数。

$$TS = \frac{N_C}{N_C + N_D + N_E} \times 100\% \quad (8)$$

式中: N_C 为霜冻预报正确的格点(次)数, N_D 为预报值达到霜冻指标而实况不是未达到的格点(次)

数, N_E 为预报值未到霜冻指标而实况已至霜冻指标的格点(次)数。

霜冻逐 24 h 平均持续时间预报均方根误差:

$$RMSE_{DF} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_h} (WC_j)^2}{N_h}} \quad (9)$$

式(9)利用式(4)和式(5)得出 WC 值,在分时效预报检验中, N_h 表示预报达到霜冻指标的天数,在区域预报检验中,则表示预报中达到霜冻指标的格点个数。

温度订正技巧均方根误差:

$$SS_{RMSE_{kmi}} = RMSE_{xj} - RMSE_{kmi} \quad (10)$$

温度订正技巧预报准确率:

$$SS_{TT_{kmi}} = TT_{kmi} - TT_{xj} \quad (11)$$

霜冻订正技巧预报准确率:

$$SS_{TS_{kmi}} = TS_{kmi} - TS_{xj} \quad (12)$$

霜冻订正技巧逐 24 h 持续时间预报均方根误差:

$$SS_{RMSEDF_{kmi}} = RMSE_{DF_{xj}} - RMSE_{DF_{kmi}} \quad (13)$$

式中:下标为 kmi 表示订正预报相关计算值, i 取值为 1、2、3,下标为 xj 表示中国气象局下发的温度原始格点预报计算值。

1.5 检验方法

分时效检验方法:分别计算并对比四种预报产品(XJ, KM1, KM2, KM3)的所有格点气温在 240 h

内逐 3 h 指标值。

分区域检验方法:分别计算并对比四种预报产品(XJ, KM1, KM2, KM3)在整个预报时效 240 h 的气温在每个格点的指标值。

2 分时效预报效果对比检验

对比检验 XJ、KM1、KM2、KM3 四种预报产品的均方根误差、气温预报准确率、霜冻预报准确率和霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差。KM1、KM2、KM3 相对于 XJ 的均方根误差、气温预报准确率、霜冻预报准确率和霜冻逐 24 h 持续时间预报的订正技巧。

2.1 均方根误差和气温预报准确率

四种预报产品(XJ、KM1、KM2、KM3)气温的均方根误差和气温预报准确率见图 2a、2b。总体上,四种产品的均方根误差随预报时效延长在波动中缓慢增长,气温预报准确率随着预报时效延长在波动中缓慢降低。三种滤波算法的误差订正技巧随着预报时效延长在波动中缓慢减小至 108 h 后震荡加剧出现正订正峰值,且变化趋势基本相似。具体数据对比如表 1。

三种滤波算法均对比原始格点预报均方根误差明显降低,气温预报准确率明显提升。三种预报产品(KM1、KM2、KM3)较 XJ 均方根误差平均减小了 0.79、0.85、0.88℃,气温预报准确率平均提高了

表 1 四种预报产品的均方根误差和气温预报准确率分时效对比
Table 1 Comparison of root mean square error and temperature forecast accuracy of four forecast products in different time periods

预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	108 h 之前平均值	108 h 之后平均值
RMSE_XJ/℃	3.37~7.60	4.90		4.00	5.64
RMSE_KM1/℃	2.53~6.56	4.41	0.79 ↓	3.13	4.91
RMSE_KM2/℃	2.43~6.29	4.05	0.85 ↓	3.10	4.82
RMSE_KM3/℃	2.48~6.25	4.02	0.88 ↓	3.11	4.77
TT_XJ/%	19.60~48.88	34.96		42.10	29.11
TT_KM1/%	22.73~59.31	41.10	6.11 ↑	50.91	33.01
TT_KM2/%	22.87~59.82	41.34	6.38 ↑	50.80	35.60
TT_KM3/%	23.24~59.59	41.42	6.46 ↑	51.20	33.42

6.11%、6.38%、6.46%,相比而言 KM3 略优。

原始预报产品在 108 h 后误差振荡加剧,每日 11 时和 23 时均方根误差处于波峰,同时气温预报

准确率处于波谷;每日的 08 时和 20 时均方根误差处于波谷,同时气温预报准确率处于波峰;相应的订正滤波也于每日 11 时和 23 时出现峰值、每日 08 时

和 20 时出现谷值。此现象和模式本身的误差关系最大,预报模式本身随着预报时间越长模式误差就越大,图 2a 和 2b 显示三种滤波均有效地降低模式误差。

2.2 逐 3 h 霜冻预报准确率

检验四种预报产品(XJ、KM1、KM2、KM3),霜冻预报准确率(图 2c)平均值分别为 54.70%、57.70%、60.51%、62.01%,后三种订正预报相对 XJ 预报产品的霜冻预报准确率平均分别提高了 3.00%、5.81%、7.31%。总体上,预报准确率随预报时效延长在波动中缓慢减小,原始格点预报中霜冻预报准确率和订正技巧成反向波动,预报准确率最高的时刻即为订正的负值波谷时刻,准确率最低的时刻即为订正的正值波峰时刻。三种滤波订正技巧波动基本一致,订正技巧正值区大于负值区,波峰的时刻集中在 23、11 和 02 时。谷值的时刻为 17 时

和 14 时,即每日温度较高时刻,其中预报时效在 108 h 以内的谷值出现在 17 时,108 h 以后的谷值出现在 14 时。

2.3 霜冻逐 24 h 持续时间预报

春季发生霜冻可造成对农作物损伤,霜冻持续时间越长对农作物伤害越大,霜冻持续时间是衡量发生霜冻等级和作物受灾程度的重要指标。当单个格点逐 24 h 时效内气温值达到霜冻指标次数>4 次,即该格点在该 24 h 时效内发生霜冻持续时数大于 12 h,说明此时期或该区域还未进行各项农事活动,此时的霜冻并不是农户所关注的时期。因此本文单独检验满足($1 \leq$ 单个格点逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数 ≤ 4)的格点区域定义为 DF_1,持续时间预报的霜冻在 240 h 逐 24 h 持续时间的均方根误差分时效对比。

表 2 四种预报产品的霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差分时效对比(单位:h)
Table 2 Comparison of root mean square error of 24 h frost forecast duration of four forecast products (unit: h)

预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	DF_1 平均值	168 h 的平均值	192 h 的平均值
RMSE_DF_XJ	6.11~14.99	8.21		2.76	-14.90	-15.45
RMSE_DF_KM1	2.37~7.43	4.00	4.21 ↓	1.57	-3.55	-3.83
RMSE_DF_KM2	2.13~7.09	3.80	4.41 ↓	1.53	-3.30	-3.58
RMSE_DF_KM3	2.20~7.50	3.86	4.35 ↓	1.53	-3.72	-4.10

三种滤波算法(KM1,KM2,KM3)均对比原始格点预报 XJ 霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差明显降低,平均减小了 4.21、4.41、4.35 h。其中四种预报产品中($1 \leq$ 格点逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数 ≤ 4)均方根误差平均值均分别降低了 1.19、1.23、1.23 h。

由图 2d 和 2e 可见,从 168 h 和 192 h 预报时效看出,原始格点预报产品均方根误差异常偏高。而当统计($1 \leq$ 所有格点逐日逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数 ≤ 4)的持续时间预报时,168 h 和 192 h 预报时效的霜冻持续时间预报在此时的均方根误差明显降低。说明在 168 h 和 192 h 霜冻持续时间预报的长短对误差值影响明显。经过分析霜冻逐 24 h 持续时间预报中持续时间越长,均方根误差相对越大。

3 区域预报效果检验

对比检验四种预报产品在整个预报时效内的均方根误差、气温预报准确率、霜冻预报准确率、霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差及其订正技巧的区域预报效果(见图 1、图 3、图 4、图 5)。平均值的计算:先逐格点平均整个预报时效内的值,再平均定义区域内所有格点值。

3.1 均方根误差和气温预报准确率

对研究区域内的格点指导预报产品(XJ)的均方根误差分析,分为三个区域(RMSE_I, RMSE_II, RMSE_III): $RMSE \leq 3^{\circ}C$ 所在区域为 RMSE_I,占总格点数的 35.1%,主要集中于海拔 800~1500 m 的北疆阿勒泰中部、塔城北部及东部、伊犁河谷两侧

以及北疆沿天山一带; $3^{\circ}\text{C}<\text{RMSE}\leq 4^{\circ}\text{C}$ 所在区域为 RMSE_{II} , 占总格点数的 47.55%, 主要集中于海拔 200~600 m 的准噶尔盆地及其周边区域; $\text{RMSE}>4^{\circ}\text{C}$ 所在区域为 RMSE_{III} , 占总格点数的 17.35%, 主要集中于裕民、托里以南的海拔 1500 m 以上的区域, 同时部分集中于海拔 600~800 m 的哈巴河、布尔

津以南、吉木乃北部以及东天山奇台、木垒、伊吾、巴里坤北部平原区。

格点预报产品没有精确的海拔高度, 此处采用格点指导预报产品(XJ)的均方根误差值作为指标来分类格点数并统计其均方根误差和气温预报准确率(TT)。具体数据如表 3。

表 3 四种预报产品的均方根误差和气温预报准确率分区域对比
Table 3 Regional comparison of root mean square error and temperature

forecast accuracy of four forecast products						
预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	RMSE_I 平均值	RMSE_II 平均值	RMSE_III 平均值
RMSE_XJ/ $^{\circ}\text{C}$	1.62~16.47	3.62		2.67	3.37	5.70
RMSE_KM1/ $^{\circ}\text{C}$	1.78~3.87	2.94	0.66 ↓	2.77	3.07	2.66
RMSE_KM2/ $^{\circ}\text{C}$	1.75~3.77	2.91	0.71 ↓	2.76	3.04	2.61
RMSE_KM3/ $^{\circ}\text{C}$	1.66~3.55	2.72	0.90 ↓	2.49	2.86	2.53
TT_XJ/%	0.07~51.62	34.00		40.90	34.72	18.03
TT_KM1/%	32.17~51.37	39.70	5.70 ↑	40.65	38.14	41.78
TT_KM2/%	31.95~51.59	40.10	6.10 ↑	40.86	38.63	42.55
TT_KM3/%	32.31~51.31	40.10	6.10 ↑	40.98	38.66	42.10

由表 3 可得出三种订正算法(KM1, KM2, KM3)相对 XJ 预报产品的均方根误差分别降低了 0.66、0.71、0.90 $^{\circ}\text{C}$, 在 $\text{RMSE}>4^{\circ}\text{C}$ 区域订正效果最明显, 分别降低了 3.04、3.09、3.17 $^{\circ}\text{C}$; $\text{RMSE}\leq 3^{\circ}\text{C}$ 区域订正效果最弱, 分别升高了 0.1、0.09、-0.18 $^{\circ}\text{C}$ 。气温预报准确率分别提高了 5.7%、6.1%、6.1%, $\text{RMSE}>4^{\circ}\text{C}$ 区域订正效果最明显, 分别提高了 23.75%、24.52%、20.07%; $\text{RMSE}\leq 3^{\circ}\text{C}$ 区域订正效果最弱, 分别降低了 0.25%、降低了 0.04%、升高了 0.08%。

图 3e~3g 中 RMSE 的订正技巧 $\text{SS_RMSEKM3}\geq 0$ 的格点占研究区域内格点总数的 94.5%; 图 3n~3p 中气温预报准确率的订正技巧 $\text{SS_TTKM3}\geq 0$ 的格点占研究区域内格点总数的 74.3%, $\text{SS_TTKM3}<0$ 主要集中在昌吉州地区海拔高度 200~600 m 区域。由图 3h~3i 和图 3q~3r 可得出三种订正算法中 KM3 最优。

3.2 霜冻预报准确率

对于 2019 年 4—5 月北疆平原地区出现霜冻的格点占总格点数的 51%, 出现霜冻的格点主要集中在阿勒泰地区、塔城北部、昌吉市、昌吉州东部、巴里坤区域, 见图 1 和图 4a~4d。

对 XJ 预报产品霜冻预报准确率分为三个区域(TS_I , TS_II , TS_III)分析: $\text{TS}\leq 20$ 格点所在区域为 TS_I , 占发生霜冻总格点数的 29.7%, 主要

集中分布在海拔高度 400~800 m 的哈巴河、富蕴、青河以及准噶尔盆地东北部周边区域; $20<\text{TS}\leq 40$ 格点所在区域为 TS_II , 占发生霜冻总格点数的 32%, 其主要集中分布于海拔高度 800~1200 m 的准噶尔盆地东部边缘及东南部区域; $\text{TS}>40$ 格点所在区域为 TS_III , 占发生霜冻总格点数的 38.3%, 其中一部分主要分布于海拔高度 1200~1500 m 的北塔山、木垒及和布克赛尔区域, 另一部分集中于海拔高度高于 1500 m 的裕民、托里以及南部巴尔鲁克山周边区域。

三种滤波算法(KM1, KM2, KM3)均比原始格点预报 XJ 霜冻预报准确率明显降低, 平均降低了 14.20%、12.50%、11.24%, 其中仅对($\text{TS}\leq 20$)所在区域的格点霜冻预报准确率有所提高, 分别提高 1.36%、3.02%、4.28%。由图 4 可以看到在研究日期内原始格点预报 XJ 在海拔高度高于 1500 m 的裕民、托里以及南部巴尔鲁克山周边区域的霜冻预报准确率 $\geq 90\%$, 主要原因是此区域均是山脉且冰雪覆盖, 并不合适农业活动。

由图 4e~4g 可得 TS 订正技巧 $\text{SS_TSKM3}\geq 0$ 的格点所在区域定义为 SSTS_I , 格点数据占发生霜冻总格点数的 37.6%, 霜冻预报准确率分别提高了 2.5%、4.8%、5.4%, 主要集中在海拔高度为 600~1200 m 的富蕴、青河以及准噶尔盆地东部边缘及东南部区域; 发生霜冻的其他区域为订正负值区域。由图 4h~4i 可得三种订正算法中 KM3 最优。

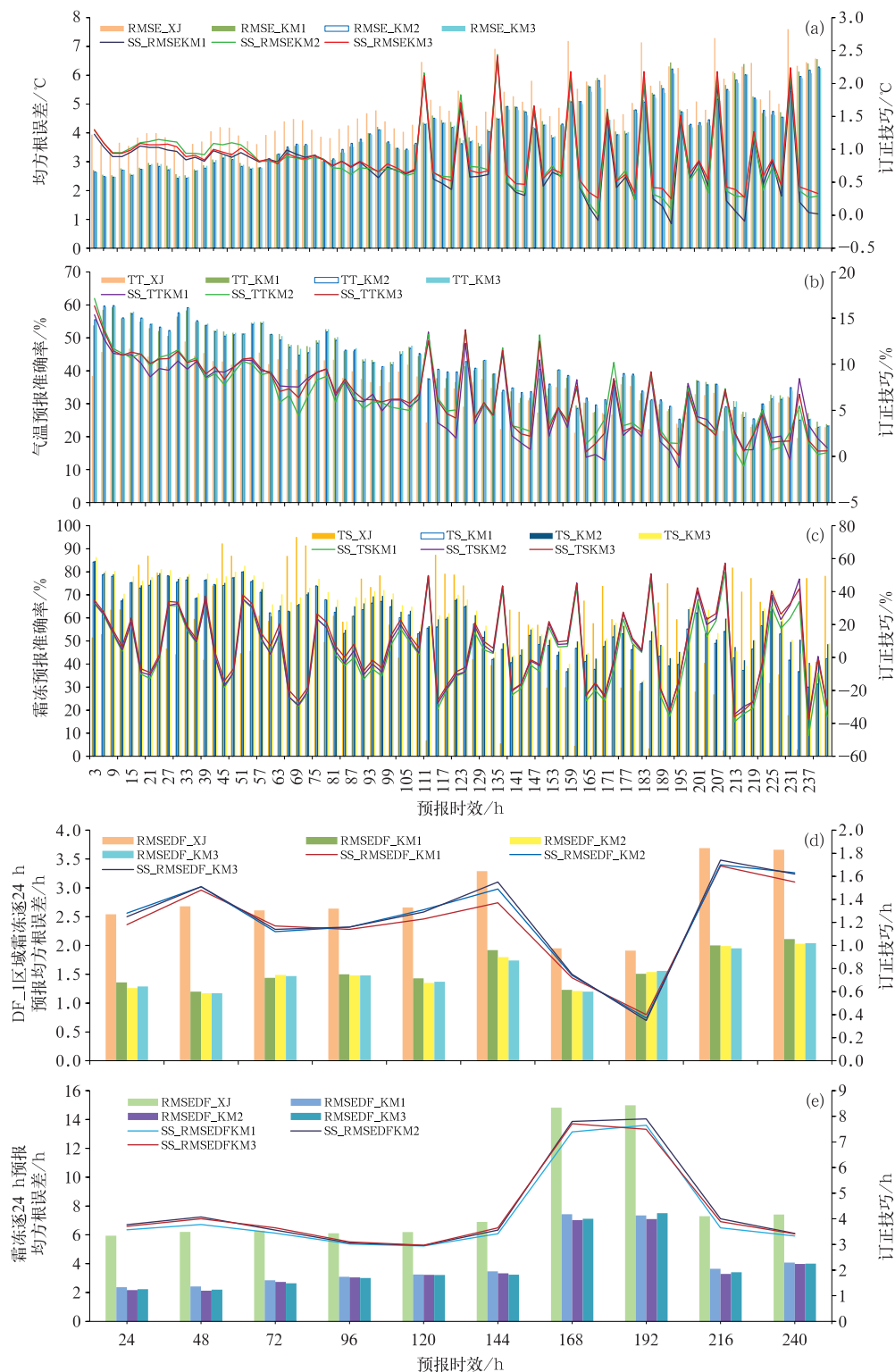


图 2 2019 年 4—5 月四种预报产品(XJ,KM1,KM2,KM3)(a)逐 3 h 均方根误差, (b)气温预报准确率,(c)霜冻预报准确率和(d)DF_1 区域霜冻逐 24 h 平均持续时间预报均方根误差及(e)三种滤波算法(KM1,KM2,KM3)相对于原始指导预报(XJ)的订正技巧对比

Fig. 2 Verification of the (a) root mean square error, (b) temperature forecast accuracy rate, (c) frost forecast accuracy rate and (d) the root mean square error of daily mean duration of frost forecast of the four forecast products (XJ, KM1, KM2, KM3) from April to May in 2019, and (e) test of correction techniques of three filtering algorithms (KM1, KM2, KM3) relative to XJ

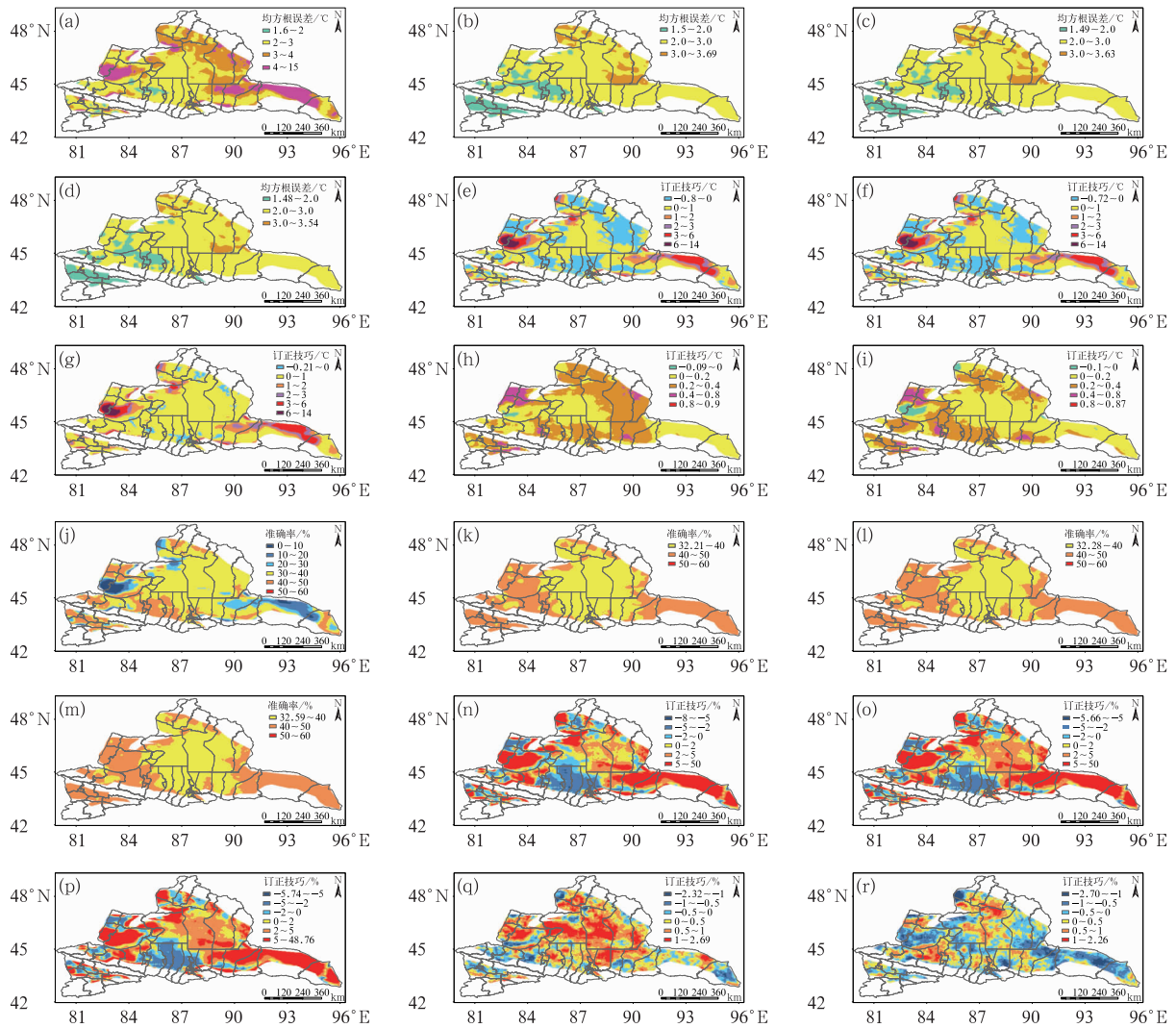


图 3 2019 年 4—5 月四种预报产品(XJ,KM1,KM2,KM3)对北疆平原地区 240 h 内(a~d)气温均方根误差、(e~g)三种方案(KM1,KM2,KM3)相对于 XJ 的订正技巧,(h,i)KM3 相对 KM1 和 KM2 的订正技巧、(j~m)气温预报准确率,(n~r)同 3e~3i,但为订正技巧预报效果检验

Fig. 3 Verification of regional forecast effect of four forecast products (XJ, KM1, KM2, KM3) on 240 h (a~d) root mean square error of temperature, (e~g) the three correction techniques (KM1, KM2, KM3) relative to XJ, (h,i) KM3 relevant to KM1 and KM2 (j~m) temperature forecast accuracy rate, and (n~r) same as Fig. 3e~3i, but for compared with the correction techniques of guiding forecast in northern Xinjiang plain from April to May 2019

表 4 四种预报产品的霜冻预报准确率及其订正技巧分区域对比(单位:%)

Table 4 Regional comparison of frost forecast accuracy of four forecast products and their correction techniques (unit: %)

预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	TS_I 平均值	TS_II 平均值	TS_III 平均值	SSTS_1 平均值
TS_XJ	0~100	38.50		12.43	28.84	67.97	
TS_KM1	0~98.04	23.83	14.20 ↓	13.79	20.21	34.65	2.50 ↑
TS_KM2	0~98.40	25.33	12.50 ↓	15.45	22.00	35.78	4.80 ↑
TS_KM3	0~98.43	26.82	11.24 ↓	16.71	23.5	37.43	5.40 ↑

3.3 霜冻逐 24 h 持续时间预报

2019 年 4—5 月,在北疆平原区域满足每个格点逐日的 240 h 中逐 24 h 预报时效中预报值达到

霜冻指标次数 >4 的格点出现至少 1 个 24 h 预报时效内,涉及到共 3603 个格点,主要集中在海拔高度大于 1200 m 的地区,分布于北塔山、木垒、布克赛尔区域、裕民、托里和南部巴尔鲁克山周边山脉区

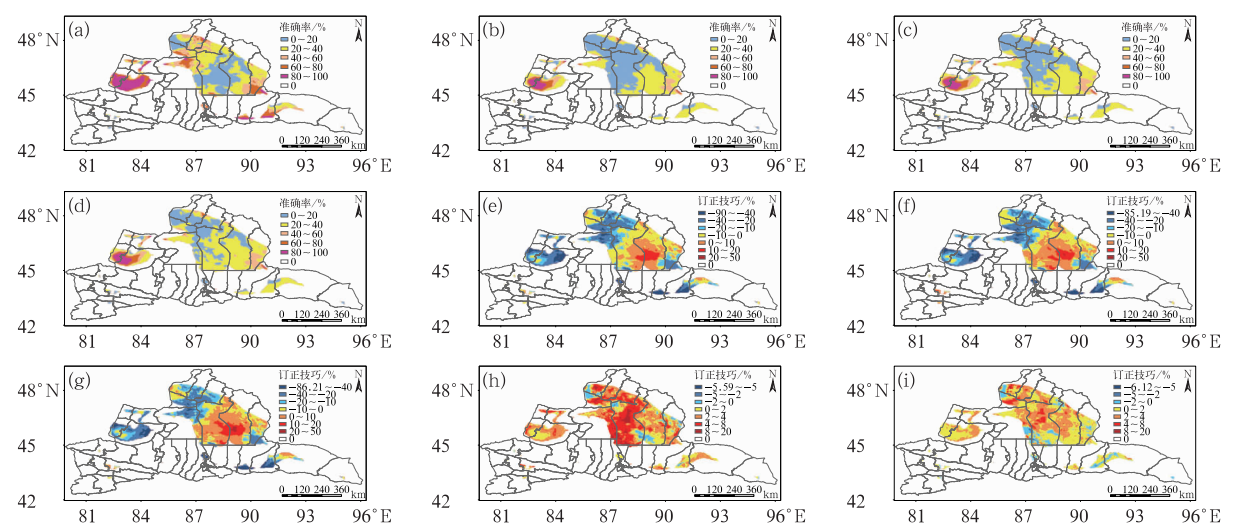


图 4 2019 年 4—5 月四种预报产品(XJ,KM1,KM2,KM3)在北疆平原区 240 h 内(a~d)霜冻预报准确率,(e~i)同图 3e~3i,但为相对于 XJ 预报产品的订正技巧区域预报效果检验
Fig. 4 Verification of regional forecast effect of four forecast products on 240 h (a—d) frost forecast accuracy and (e—i) same as Figs. 3e—3i, but for the regional forecast verifications of correction technique relative to XJ in northern Xinjiang Plain from April to May 2019

表 5 四种预报产品的霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差及其订正技巧分区域对比(单位:h)

Table 5 Regional comparison of root mean square error of daily frost forecast duration of for four forecast products and the correction techniques (unit: h)						
预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	DF_1 平均值	SSRMSEDF_1 平均值	SSRMSEDF_II 平均值
RMSE_DF_XJ	0~20.55	3.33		2.43	2.46	3.68
RMSE_DF_KM1	0~15.87	2.52	0.81 ↓	2.07	4.14	1.88
RMSE_DF_KM2	0~18.97	2.70	0.63 ↓	2.14	4.17	2.12
RMSE_DF_KM3	0~18.00	2.77	0.56 ↓	2.19	4.25	2.18

域。该区域农业活动较少,并不是农业用户关注重点。

三种滤波算法(KM1,KM2,KM3)对比 XJ 预报,霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差明显降低,分别减小了 0.81、0.63、0.56 h。其中四种预报产品中(1≤格点逐日逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数≤4)均方根误差平均值均明显降低。霜冻逐 24 h 持续时间预报中持续时间越长,均方根误差相对略大。

KM1 的订正技巧 SS_RMSEDFKM1<0 的格点所在区域定义为 SSRMSEDF_1,占发生霜冻总格点的 28.6%,主要集中哈巴河、布尔津、木垒区域,订正值均为负值域。SS_RMSEDFKM1≥0 的格点所在区域定义为 SSRMSEDF_II,占发生霜冻总格点的 71.4%,发生霜冻格点的剩下区域,订正产品预报均方根误差值基本≤3 h,三种订正预报(KM1、KM2、KM3)相比 XJ 均方根误差平均下降 0.80、

0.62、0.55 h。由图 5h~5i 可得三种订正算法中 KM1 略优。

4 应用实例

为检验算法的通用性及对转折性天气(温度陡降、陡升)的误差订正结果(张华龙等,2021)。选用北疆平原地区欧洲中期天气预报中心 ECMWF(简称 EC)细网格模式 2 m 温度预报产品,20 时起报的 240 h 逐 3/6 h 温度预报,其中 72 h 预报时效内为逐 3 h,72~240 h 预报时效内为逐 6 h 预报,水平分辨率为 0.125°×0.125°,共 2217 个格点,时效为 2021 年 4 月 21 日 14 时至 22 日 14 时。实况选用 CLDAS 实时产品数据集。采用双线性插值方法从研究区域内 0.05°×0.05°中的 CLDAS 格点实况资料,获取 EC 预报产品中格点所有预报时效对应的实况值。研究时间内北疆平原区平均温度降低

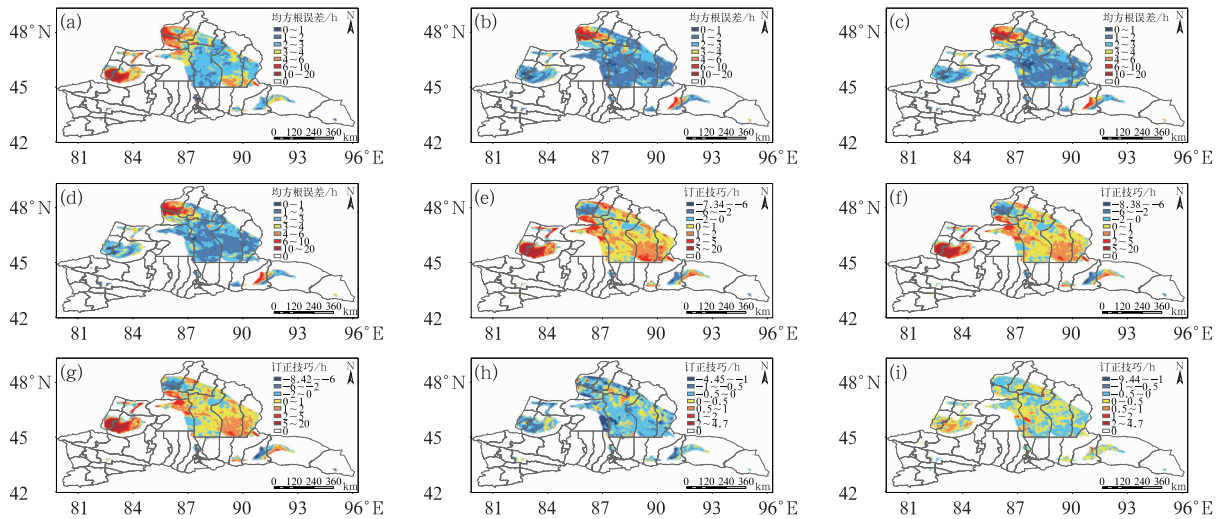


图 5 2019 年 4—5 月四种(XJ,KM1,KM2,KM3)预报产品在北疆平原区 240 h 内(a~d)霜冻预报逐 24 h 持续时间均方根误差,(e~i)同图 3e~3i,但为相对于指导预报的订正技巧区域预报效果检验
Fig. 5 Verification of regional forecast effect of four forecast products (XJ, KM1, KM2, KM3) on 240 h (a-d) root mean square error of daily frost forecast duration, (e-i) same as Figs. 3e-3i, but for the regional forecast verification relative to the correction techniques of guiding forecast in northern Xinjiang Plain from April to May 2019

13.1℃,发生霜冻的格点为 1106 个。分三个区域来分析:降温>20℃的格点所在区域为 CLDAS_I,占总格点数的 25.9%,分布在伊犁州东部、石河子市、乌鲁木齐市、昌吉州大部分;10℃<降温≤20℃的格点所在区域为 CLDAS_II,占总格点数的 47.4%,其中降温 15~20℃分布在伊犁州大部分、淖毛湖、伊吾、沙湾、玛纳斯、呼图壁、青河、温泉,降温 10~15℃分布在克拉玛依、炮台、莫索湾、富蕴、博州东部;降温≤10℃的格点所在区域为 CLDAS_III,占总格点数的 26.7%,分布在除上述区域之外的区域。根据上述三种方案进行订正,分别对气温预报准确率(TT)和霜冻预报准确率(TS)进行检验。

4.1 分时效检验

将 KM3 的订正技巧≥0 分布的预报时效定义为 SSKM3_0,其中 SS_TTKM3>0 共有 17 个预报时效,分别为预报时效 0~12 h 和 02、08、17 和 23 时。TT_KM3 较 KM1、KM2 的气温预报准确率平均提高 1.0%、1.3%。SS_TSKM3>0 共有 18 个预报时效,分别为预报时效 9~18 h 和预报时效预报到 08、11、14 和 17 时的时刻。TS_KM3 较 KM1、KM2 的霜冻预报准确率平均提高 1.8%、0.1% (图 6)。

表 6 四种预报产品的气温和霜冻预报准确率及其订正技巧分时效对比(单位:%)

Table 6 Comparison of temperature and frost prediction accuracy and correction techniques by time division of four prediction products (unit: %)

预报产品	范围	平均值	平均订正技巧	SSKM3_0 准确率	SSKM3_0 平均值
TT_EC	3.5~85.07	49.9		44.2	
TT_KM1	1.3~79.1	46.6	4.0 ↓	51.3	4.8 ↑
TT_KM2	1.3~78.6	46.3	4.3 ↓	49.9	3.5 ↑
TT_KM3	1.3~80.4	47.6	3.0 ↓	51.4	4.9 ↑
TS_EC	34.2~100	88.0		87.4	
TS_KM1	25.5~100	84.5	4.4 ↓	92.4	3.6 ↑
TS_KM2	25.5~100	86.2	2.7 ↓	93.4	4.8 ↑
TS_KM3	25.5~100	86.3	2.5 ↓	93.3	4.6 ↑

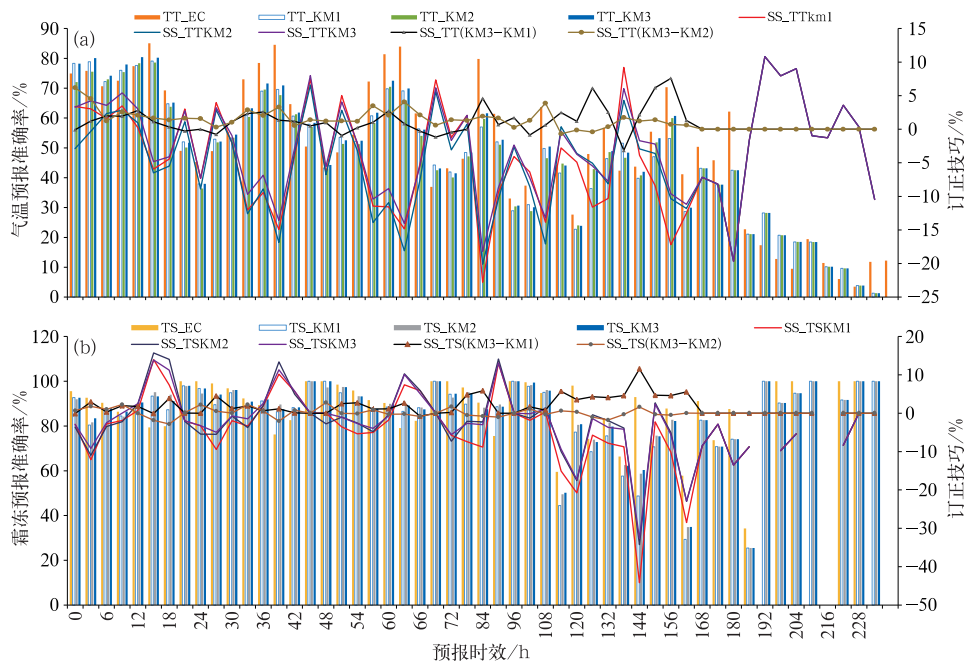


图 6 2021 年 4 月 21 日 14 时至 22 日 14 时四种预报产品 (EC,KM1,KM2,KM3)对北疆平原区
(a)24 h 内气温预报准确率及订正技巧,(b)霜冻预报准确率及其订正技巧预报效果分时效对比

Fig. 6 Comparison of (a) temperature and (b) frost prediction accuracy and correction techniques within 24 h by time division of four prediction products (EC, KM1, KM2, KM3) in the northern Xinjiang Plain from 14:00 BT 21 April to 14:00 BT 22 April 2021

4.2 分区域检验

研究时间 24 h 内实况温度最高降温 26.6℃,平均降温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的格点占全部格点数的 73.3%,部分农业生产区域内温度直接达到霜冻指标,没有提前的预警和防御,对农业生产会造成重要灾害。发生霜冻的区域分布在海拔 600~800 m 的塔城地区、托里以南的区域和海拔 600~1200 m 的阿勒泰大部区域以及温泉、木垒、昌吉以北的小部分区域。

KM3 的订正技巧 ≥ 0 分布的区域定义为 SSKM3_1,其中 SS_TTKM3 ≥ 0 的格点占总格点的 37.8%,主要分布在哈密以北、昌吉州大部、和布克赛尔、北塔山、阿勒泰南部。TT_KM3 较 TT_KM1、TT_KM2 平均提高 0.9%、1.2%。SS_TSKM3 ≥ 0 的格点占发生霜冻格点的 39.8%,主要分布在塔城地区、温泉、哈巴河以西、布尔津、昌吉以北的小部分区域。TS_KM3 较 TS_KM1、TS_KM2 平均提高 2.0%、0.2%(图 7)。

表 7 四种预报产品的气温和霜冻预报准确率及其订正技巧分区域对比(单位:%)

Table 7 Comparison of temperature and frost prediction accuracy and correction techniques by different regions of four prediction products (unit: %)

预报产品	范围	平均值	订正技巧	SSKM3_1 平均值	CLDAS_I 值	CLDAS_II 值	CLDAS_III 值
TT_EC	3.2~76.2	48.9		39.2	42.0	49.2	55.1
TT_KM1	1.6~73.0	44.7	4.2 ↓	50.6	45.8	44.9	43.4
TT_KM2	1.6~73.0	44.5	4.4 ↓	50.9	45.6	44.5	43.3
TT_KM3	1.6~74.6	45.6	3.3 ↓	51.3	46.2	45.8	44.8
TS_EC	7.1~100	88.6		87.1	91.9	87.4	88.3
TS_KM1	8~100	83.1	6.3 ↓	92.1	84.0	83.2	82.4
TS_KM2	9.1~100	84.8	4.4 ↓	94.1	86.8	84.6	83.8
TS_KM3	7.7~100	85.1	4.2 ↓	93.9	87.1	85.0	84.0

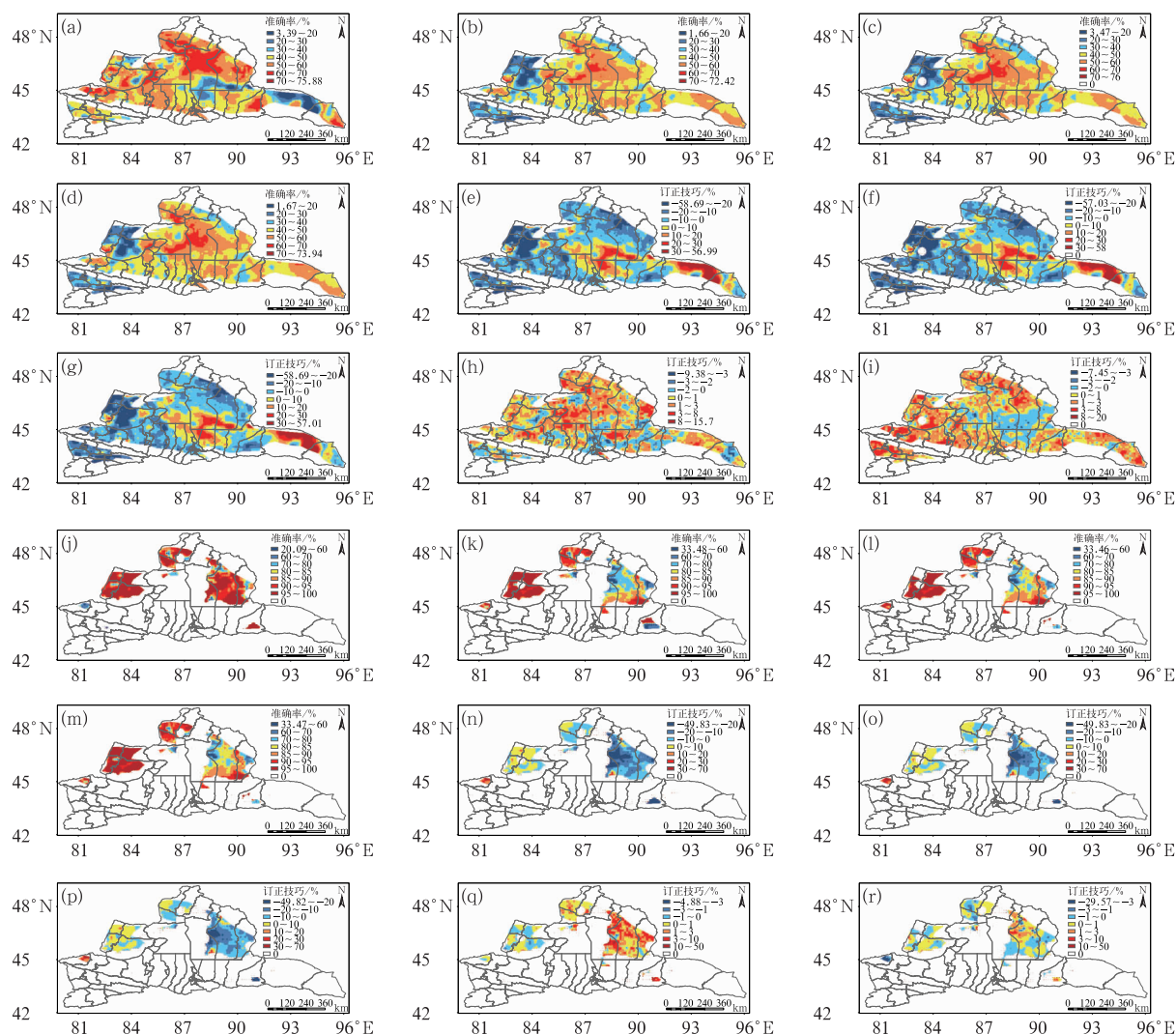


图 7 2021 年 4 月 21 日 14 时至 22 日 14 时四种预报产品 (EC, KM1, KM2, KM3) 对北疆平原区 24 h 内 (a~d) 气温预报准确率, (e~i) 同图 3e~3i; (j~m) 霜冻预报准确率, (n~r) 同图 3n~3r, 但为订正技巧预报效果分区域检验

Fig. 7 Verification of four forecast products (EC, KM1, KM2, KM3) on 24 h (a~d) temperature forecast accuracy, (e~i) same as Figs. 3e~3i; (j~m) frost forecast accuracy, (n~r) same as Figs. 3n~3r, but for regional forecast verification of correction techniques in the northern Xinjiang Plain from 14:00 BT 21 to 14:00 BT 22 April 2021

四种 (XJ, KM1, KM2, KM3) 预报产品气温预报准确率整体原始预报 EC 比订正预报略高, 在降温 $> 20^{\circ}\text{C}$ 的强降温区域, 三种订正预报 (KM1, KM2, KM3) 气温预报准确率均高于 EC, 分别提高了 3.8%、3.6%、4.2%。

四种预报产品 (EC, KM1, KM2, KM3) 霜冻预报正确的格点分别为 964、1034、1015、1021 个, 由表 7 和图 7 显示 EC 的霜冻预报准确率整体比订正预报产品略高, 预报发生霜冻格点正确格点个数少于订正预报产品, EC 霜冻预报中预报正确的格点

缺少了农业生产区域中昌吉以北小部分区域、木垒部分区域。

5 结论与讨论

本文使用三种滤波算法对北疆平原区春季 240 h 内逐 3 h 气温格点指导产品进行订正, 采用均方根误差、订正技巧、气温预报准确率、霜冻预报准确率和霜冻逐 24 h 平均持续时间预报均方根误差作为检验指标, 通过分时效和分区域检验方法对订正前

后的气温和霜冻预报效果进行了检验分析,得到的主要结论如下:

(1)在分时效检验中,三种订正预报产品(KM1、KM2、KM3)较原始格点预报产品 XJ:气温均方根误差平均降低了 0.79、0.85、0.88℃;气温预报准确率平均提高了 6.11%、6.38%、6.46%。逐 3 h 霜冻预报准确率平均提高了 3.00%、5.81%、7.31%,订正技巧谷值主要为 17 时和 14 时。霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差明显降低,平均降低了 4.21、4.41、4.35 h,其中订正预报产品中($1 \leq$ 格点逐日逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数 ≤ 4)均方根误差平均值降低了 1.19、1.23、1.23 h,在 168 h 和 192 h 霜冻持续时间预报的时长对误差值影响明显。

(2)分区域预报效果检验中,三种订正预报产品(KM1、KM2、KM3)相对原始预报产品 XJ:气温均方根误差分别降低 0.66、0.71、0.9℃,在 XJ 的误差值 $RMSE > 4^\circ C$ 区域订正效果明显,分别降低了 3.04、3.09、3.17℃;气温预报准确率分别提高了 5.7%、6.1%、6.1%,在 XJ 的误差值 $RMSE > 4^\circ C$ 区域订正效果明显,分别提高了 23.75%、24.52%、20.07%。霜冻预报准确率在富蕴、青河以及准噶尔盆地东部边缘及东南部海拔高度为 600~1200 m 区域,分别提高了 2.5%、4.8%、5.4%;其他区域提高不明显。霜冻逐 24 h 持续时间预报均方根误差平均减小了 0.81、0.63、0.56 h,其中订正预报产品中($1 \leq$ 单个格点逐日逐 24 h 预报值达到霜冻指标次数 ≤ 4)均方根误差平均值分别降低了 0.4、0.3、0.2 h。

(3)分时效检验中,原始预报产品 XJ 在 108 h 预报时效内波动变化平缓,均方根误差均较低,气温预报准确率均较高,在 108 h 预报时效后误差振荡加剧,相应订正技巧也随之加剧。原始预报产品 XJ 在 108 h 后,每天 11 时和 23 时出现均方根误差在波峰相应气温预报准确率在波谷,08 时和 20 时是均方根误差在波谷、气温预报准确率在波峰。出现这种情况和模式本身的误差关系最大,同时结果显示三种滤波均有效的降低模式误差。

(4)在区域统计中,2019 年 4—5 月原始格点预报在海拔高度高于 1500 m 的裕民、托里以及南部巴尔鲁克山周边区域,均方根误差 $> 4^\circ C$,气温预报准确率 $\leq 10\%$,霜冻预报准确率 $\geq 90\%$,此区域均是山脉且冰雪覆盖,并不合适农业活动。

(5)经过分析随着预报时效的延长均方根误差在波动中缓慢增加、气温和霜冻预报准确率在波动中缓慢减小。霜冻逐 24 h 持续时间预报中持续时间越长,其均方根误差相对越大,在 168~192 h 预报时效霜冻持续时间对误差值影响明显。区域中均方根误差较大区,高海拔高度偏高、气温预报准确率较低,其订正效果较好。逐 3 h 霜冻预报准确率订正技巧 ≥ 0 的格点数占发生霜冻总格点的 37.6%。霜冻逐 24 h 持续时间预报中订正技巧 ≥ 0 的格点数占发生霜冻总格点的 71.4%。

(6)2021 年 4 月 21—22 日北疆出现大范围强降温,应用本文的三种订正预报产品对 EC 预报产品进行订正,对比检验三种订正预报和 EC 预报在温度陡降的情况下气温和霜冻的预报效果。结果表明,分时效检验中,气温预报准确率在预报时效小于等于 12 h 和 02、08、17 和 23 时的时刻订正预报产品优于 EC;霜冻预报准确率在预报时效 9~18 h 和 08、11、14 和 17 时的时刻订正预报产品优于 EC。分区域检验中,EC 气温预报准确率整体比订正预报略高,在降温 $> 20^\circ C$ 强降温区域,三种订正预报产品准确率均高于 EC 预报;EC 霜冻预报准确率整体比三种订正预报产品略高,EC 预报发生霜冻格点正确格点个数少于订正预报产品,EC 预报正确的格点缺少了农业生产区域中昌吉以北小部分区域、木垒部分区域。三种预报产品的订正算法中,集成订正算法 KM3 略优。

从分析结果对比显示,三种预报产品的订正算法均优于原始格点指导预报产品。三种订正算法相比而言,集成订正算法 KM3 最优。2021 年春季以来,新疆农业气象台提取中国气象局下发的 240 h 逐 3 h 气温格点指导预报产品,并应用本文中的算法和指标进行订正和服务,每天逐 3 h 发布低温和霜冻预报预警,得到很好的效果。后期将对滤波算法订正其他模式的多种基本气象要素的预报产品检验,并进行优化改进不同区域的订正算法以期提高预报准确率。

参考文献

- 陈豫英,陈楠,杨银,等,2019. 贺兰山东麓春季最低气温和霜冻精细化格点预报产品的检验[J]. 自然灾害学报,28(1):198-206.
Chen Y Y, Chen N, Yang Y, et al. 2019. The refined gridded weather forecasting verification of the spring minimum air temperature and frost in the eastern region of Helan Mountain[J]. J Nat Disaster, 28(1):198-206(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).
- 贾丽红,张云惠,何耀龙,等,2018.基于多模式的新疆最高(低)气温预报误差订正及集成方法研究[J].干旱气象,36(2):310-318.
- Jia L H, Zhang Y H, He Y L, et al, 2018. Research on error correction and integration methods of maximum and minimum temperature forecast based on multi-model in Xinjiang[J]. J Arid Meteor, 36(2): 310-318 (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).
- 潘留杰,薛春芳,张宏芳,等,2022.基于卡尔曼动态频率的ECMWF降水预报订正[J].气象,48(1):73-83. Pan L J, Xue C F, Zhang H F, et al, 2022. ECMWF precipitation calibration based on the Kalman dynamic frequency matching method[J]. Meteor Mon, 48(1): 73-83 (in Chinese).
- 彭九慧,李树丛,陆倩,等,2016.承德初霜冻天气概念模型及其检验[J].沙漠与绿洲气象,10(3):15-20. Peng J H, Li S C, Lu Q, et al, 2016. The first-frost conceptual prediction model for Chengde and its test[J]. Desert Oasis Meteor, 10(3): 15-20 (in Chinese).
- 沙晓梅,李娟,帕提古力·阿不力孜,等,2021.低温胁迫对棉花种子萌发的影响[J].种子,40(2):80-85. Sha X M, Li J, Patiguli A B L Z, et al, 2021. Effects of low temperature stress on seed germination of cotton[J]. Seed, 40(2): 80-85 (in Chinese).
- 王丹,王建鹏,白庆梅,等,2019a.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, 2019a. 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).
- 王丹,王建鹏,娄盼星,等,2019b. 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,42(1):38-46. Wang D, Wang J P, Lou P X, et al, 2019b. Evaluation and correction of high temperature weather forecast in Shaanxi Province in July 2017 using ECMWF high-resolution model[J]. Arid Land Geogr, 42(1): 38-46 (in Chinese).
- 韦青,代刊,林建,等,2020.2016—2018年全国智能网格降水及温度预报检验评估[J].气象,46(10):1272-1285. Wei Q, Dai K, Lin J, et al, 2020. Evaluation on the 2016—2018 fine gridded precipitation and temperature forecasting[J]. Meteor Mon, 46(10): 1272-1285 (in Chinese).
- 肖瑶,杜明哲,徐鹏,2020.两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,38(6):1023-1030. Xiao Y, Du M Z, Xu P, 2020. Application of two correction methods in refined forecast of maximum and minimum temperature along the Henan Expressway[J]. J Arid Meteor, 38(6): 1023-1030 (in Chinese).
- 薛湛彬,陈炯,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).
- 尹珊,李勇,马杰,等,2020.延伸期温度预报误差订正技术初探[J].气象,46(3):412-419. Yin S, Li Y, Ma J, et al, 2020. Preliminary study on bias correction for the extended-range temperature forecast[J]. Meteor Mon, 46(3): 412-419 (in Chinese).
- 岳慧欣,何延波,姜建福,等,2021.葡萄主产区春霜冻风险分析[J].中国农业气象,42(3):221-229. Yue H X, He Y B, Jiang J F, et al, 2021. Risk analysis of spring frost in main grape producing areas[J]. Chin J Agrometeorol, 42(3): 221-229 (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).
- 张华龙,伍志方,肖柳斯,等,2021.基于因子分析的广东省短时强降水预报模型及其业务试验[J].气象学报,79(1):15-30. Zhang H L, Wu Z F, Xiao L S, et al, 2021. A probabilistic forecast model of short-time heavy rainfall in Guangdong Province based on factor analysis and its operational experiments[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 15-30 (in Chinese).
- 张磊,王静,张晓煜,等,2014.近50a宁夏初、终霜日基本特征及变化趋势[J].干旱区研究,31(6):1039-1045. Zhang L, Wang J, Zhang X Y, et al, 2014. Characteristics and change trend of the first and the last frost dates in Ningxia in recent 50 Years[J]. Arid Zone Res, 31(6): 1039-1045 (in Chinese).
- 张鑫,楼俊伟,王勇,等,2021.1961—2017年北疆初终霜日及霜期时空变化特征[J].干旱区地理,44(2):308-315. Zhang X, Lou J W, Wang Y, et al, 2021. Temporal and spatial variation characteristics of first and last frost day and frost period from 1961 to 2017 in northern Xinjiang[J]. Arid Land Geogr, 44(2): 308-315 (in Chinese).
- 张祖莲,张山清,毛炜峰,等,2021.基于平均滤波算法的北疆春季日最低气温格点预报产品订正分析[J].沙漠与绿洲气象,15(5):16-23. Zhang Z L, Zhang S Q, Mao W Y, et al, 2021. Correction analysis of minimum temperature grid forecast products of spring in northern Xinjiang based on average filter algorithm[J]. Desert Oasis Meteor, 15(5): 16-23 (in Chinese).
- 翟颖佳,陈豫英,张磊,等,2019.贺兰山东麓葡萄种植园区不同类型霜冻的形成条件分析[J].自然灾害学报,28(5):134-142. Zhai Y J, Chen Y Y, Zhang L, et al, 2019. Analysis on formation conditions of different types of frost in grape planting area of East Helan Mountain[J]. J Nat Disaster, 28(5): 134-142 (in Chinese).
- Kalman R E, 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Trans ASME-J Basic Eng, 82:35-45.

(本文责编:王婷波)