

陶亦为,张恒德,代刊,等,2023. 基于集合预报的异常温度预报产品在中国的应用分析[J]. 气象,49(12):1532-1541. Tao Y W,Zhang H D,Dai K,et al,2023. Application research on abnormal temperature forecast products in China based on ensemble forecast[J]. Meteor Mon,49(12):1532-1541(in Chinese).

基于集合预报的异常温度预报产品 在中国的应用分析^{*}

陶亦为¹ 张恒德¹ 代刊¹ 董全¹ 周军¹ 刘珺²

¹ 国家气象中心,北京 100081

² 中国气象局华风气象传媒集团,北京 100081

提 要: 基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代全球再分析资料(ERA5)构建模式气候,应用 ECMWF 集合预报,采用“集合预报标准化异常预报法”,针对最高和最低气温构建中国地区集合平均异常温度预报和异常温度概率预报产品,并与极端预报指数(extreme forecast index,EFI)开展检验和对比分析预报性能,并基于“异常温度影响矩阵”,构建了异常温度影响程度预报指数,通过异常温度事件个例探讨相关产品的预报应用。结果表明:基于 ECMWF 的 ERA5 和集合预报构建的集合平均异常温度预报产品对我国夏季和冬季异常温度事件均有比较好的预报效果,预报性能好于或接近 EFI,可作为业务上对异常温度事件预报的支撑产品。异常温度概率预报产品可以体现集合成员中的预报异常温度事件的信息,在中期预报时效对发现早期异常温度事件信号有优势,并可反映对异常天气预报的不确定性信息。异常温度影响程度预报指数结合了异常天气概率预报信息和异常程度预报信息,可对异常温度时间给出客观定量的预报结果,对一次异常低温事件的个例预报证明该指数有比较好的预报效果,对异常温度事件的预报和早期科学预警有一定指示意义和业务应用前景。

关键词: 集合预报,异常天气事件,极端预报指数,异常温度预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.101101

Application Research on Abnormal Temperature Forecast Products in China Based on Ensemble Forecast

TAO Yiwei¹ ZHANG Hengde¹ DAI Kan¹ DONG Quan¹ ZHOU Jun¹ LIU Jun²

¹ National Meteorological Centre, Beijing 100081

² Huafeng Meteorological Media Group Co., Ltd., Beijing 100081

Abstract: Based on the fifth generation global reanalysis data (ERA5) of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the model climate is constructed. The ensemble mean abnormal temperature forecast and abnormal temperature probability forecast products for China are constructed according to the maximum and minimum temperatures by using ECMWF ensemble forecast and standardized anomaly forecast method. The forecast performance was tested and compared with the extreme forecast index (EFI). Furthermore, based on “abnormal temperature impact matrix”, forecast index of impact degree of abnormal temperature event was constructed. The forecast application of related products was discussed through the cases of abnormal temperature events. The results show that the ensemble mean abnormal temperature forecast product based on ERA5 and ECMWF ensemble forecast has a good forecasting

^{*} 国家重点研发计划(2018YFF0300104,2017YFC1502004)共同资助

2022 年 11 月 13 日收稿; 2023 年 10 月 30 日收修定稿

第一作者:陶亦为,主要从事灾害性天气预报技术和集合预报应用研究. E-mail:Taoyw@cma.gov.cn

通讯作者:张恒德,主要从事短期预报技术和环境气象预报技术研究. E-mail:Zhanghengde1977@163.com

effect for both summer and winter abnormal temperature events in China, and the forecast performance is better than or close to EFI through comparative verification. The product can be used as a supporting product for forecasting abnormal temperature events. Abnormal temperature probability forecast products can reflect the information of abnormal temperature events predicted in the ensemble members of the set, have advantages in finding early abnormal temperature event signals in medium-range forecast, and can reflect the uncertainty information of abnormal weather forecast. The forecast index of impact degree of abnormal temperature event combines the prediction information of the probability of abnormal weather and the prediction information of the anomaly of abnormal weather. It can give the objective and quantitative prediction results of the abnormal temperature time in one product. The prediction of the abnormal low temperature event caused by a cold surge weather process proves that this index has a relatively good prediction effect. It has certain indicative significance and application prospect for the prediction and early warning of abnormal temperature events.

Key words: ensemble forecast, abnormal weather event, extreme forecast index (EFI), abnormal temperature forecast

引 言

随着全球气候变暖,极端温度事件呈现上升趋势,如 2021 年 1 月 4—7 日受强冷空气影响,华北、黄淮等地 60 个气象站最低气温突破历史极值(徐冉等,2021),同年 2 月 18—21 日我国中东部地区出现异常升温天气,618 个国家级气象站日最高气温突破 2 月历史同期极值(胡艺和董全,2021),短时间内出现异常偏冷和偏暖天气事件对社会生活和经济发展产生严重影响。近年来极端天气事件越来越受到学者们关注(罗玲等,2019;张芳华等,2020;官晓军等,2021;车少静等,2022),但极端天气是小概率事件,对其预报能力十分有限(翟盘茂等,2016)。随着集合预报系统近二十年的快速发展,极大地提高了对极端天气事件不确定性的预报能力(Buizza et al, 2007),尤其是近十年基于集合预报系统发展的针对极端天气的预报技术。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发展了极端预报指数(extreme forecast index, EFI),通过计算集合预报与模式气候累计分布函数之间的差异,取值范围为 $-1 \sim 1$,差异越大代表极端事件程度越大且可能性越高(Lalaurette, 2003; Zsótér, 2006)。有研究表明在应用时取较低的 EFI 阈值,虽然可提高对极端事件预报的命中率但也会产生较高的空报情况(Boisserie et al, 2016),因此应用中需要平衡命中和空报,选取最优阈值(Petroliagis and Pinson, 2014)。但 EFI 最优阈值在不同季节、不同地点、不同预报时效是不一样的

(董全等,2017),使用者如果缺乏相关了解则无法释用好 EFI 产品。

Hart and Grumm(2001)提出“标准化异常度”方法,用来评估实况天气的异常程度。Grumm and Hart(2001)基于 NCEP 再分析数据和全球谱模式,把“标准化异常度”方法用于对异常天气事件的预报上,成功预报出北美地区异常天气事件。基于集合预报对小概率异常天气事件的预报优势,美国 2007 年开始在业务上应用 NCEP 再分析数据和 NCEP 全球集合预报系统,发展基于集合预报的标准化异常预报方法,在北美极端高温和寒潮等异常天气事件预报方面得到业务应用(Graham and Grumm, 2010; Grumm, 2011)。Guan and Zhu(2017)研究认为基于集合预报的标准化异常预报方法是一种对极端天气事件更为合理的预报方法,用户更容易判别极端天气事件。杜钧等(2014)在对北京“7·21”极端暴雨研究中发现该方法可提高对罕见极端天气事件预报的可靠性,对小概率的极端天气事件的预报更有优势,并结合异常天气的影响度(异常程度)和预报的可信度(预报概率),提出“社会影响矩阵”概念,可定量判断极端天气事件的综合影响。

当前国内外学者们对 EFI 的应用研究较多(吴剑坤等, 2015; 董全等, 2016; Tsonevsky et al, 2018),但对基于集合预报的标准化异常预报方法开展的相关研究较少,且均是基于 NCEP 产品对国外极端天气事件的应用研究。本文拟基于 ECMWF 集合预报数据,应用基于集合预报的标准化异常预报方法,开展对我国异常温度事件的预报应用评估。

另外,目前还缺乏对杜钧等(2014)提出的“社会影响矩阵”概念的具体研究,本文拟进一步基于“异常温度影响矩阵”,构建异常温度影响程度预报指数,探讨对我国异常温度事件的预报应用。

1 资料和方法

本文使用数据包括:国家气象信息中心 1981—2010 年和 2015 年 1 月至 2020 年 4 月实况日最高(低)气温,ECMWF 的 1981—2010 年 ERA5 逐小时 2 m 气温以及 2015 年 1 月至 2020 年 4 月逐日 08 时(北京时,下同)起报最高(低)气温集合预报产品和 EFI 产品(预报时效:0~168 h)。

EFI 产品模式气候是基于 ECMWF 再预报数据,通过构建某日前后 9 个再预报数据计算日(再预报数据每周周一和周四计算,滑动日期范围约为 1 个月)和 20 年回算以及 11 个成员得到(Tsonnevsky, 2015)。为方便对比,本文也参照 1 个月的滑动日期范围,即在构建实况气候样本和模式气候样本的滑动日期范围设定为某日前后 15 天共计 31 天 $\times$ 30 年(气候标准值:1981—2010 年)的 930 个样本。对实况异常天气分析参照 Hart and Grumm(2001)“标准化异常度”方法:

$$SA = \frac{O - \bar{H}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}} \quad (1)$$

式中:SA 为标准化异常度, O 为实况观测, H 和 $\bar{H}$ 分别为气候样本和气候均值, n 为气候样本集样本数。

参照杜钧等(2014)提出的“集合预报标准化异常预报法”[式(2)],基于 ERA5 建立模式气候样本集,计算其均值和方差,分别计算集合预报 51 个成员 1~7 d 预报时效逐日的最高和最低气温的标准化异常度,再通过计算集合平均标准化异常度[式(3)],构建集合平均异常温度预报(ensemble mean of anomaly temperature forecast, EMATF)产品。Grumm and Hart(2001)指出 $+2(-2)$ 个标准

差(σ)相当于正态分布 95%(5%),本文定义标准化异常度 $\geq 2\sigma(\leq -2\sigma)$ 为异常高温(低温)温度事件。异常温度概率预报产品为通过计算集合预报成员达到异常高温(低温)事件的比例。

$$EATF(x) = \frac{E(x) - \bar{d}}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (d_i - \bar{d})^2}} \quad (2)$$

$$EMATF = \frac{1}{51} \sum_{x=1}^{51} EATF(x) \quad (3)$$

式中: $EATF(x)$ 为集合成员异常温度预报, $EMATF(x)$ 为集合平均异常温度预报, d 和 $\bar{d}$ 为构建的 ERA5 气温的模式气候样本集和气候均值, $E(x)$ 为 ECMWF 集合预报 51 个成员气温预报, m 为模式气候样本集样本数。

基于杜钧等(2014)提出的“社会影响矩阵”概念,本文构建了“异常温度影响矩阵”。矩阵的横、纵坐标各设定 11 个等级,其中纵坐标为异常温度概率预报等级,异常温度概率预报从 0~100% 逐 10% 对应 11 个等级;横坐标为异常温度影响程度等级,可认为异常温度事件越异常所造成的社会影响程度越大,因此对异常高温(低温)温度事件从气候百分位 50%~100%(50%~0%)分为 11 个等级,事件越异常不同等级的气候百分位值间隔越小(表 1)。通过计算横坐标不同等级气候百分位所对应的实况标准化异常度值,确定各等级所对应的标准化异常度阈值;再通过集合平均异常温度预报值与横坐标各等级的标准化异常度阈值比较,确定预报所对应的横坐标等级。

异常温度影响程度预报指数为横、纵坐标所对应的等级值相乘而得,范围为 0~100(图 1),能定量综合反映预报的异常温度事件的概率信息及异常程度信息。当指数 <40 时,表明预报的异常温度事件概率很低或异常程度较小,对社会产生影响较小;当指数 ≥ 60 时,表明预报的异常温度事件的概率较高和异常程度较强,需注意对社会产生的影响;当指数 ≥ 80 时,说明预报的异常温度事件的概率很高且异常程度很强,会对社会造成较大影响。

表 1 异常温度影响矩阵对应关系表

Table 1 Corresponding relation table of abnormal temperature impact matrix

横(纵)坐标等级	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
异常温度事件预报概率/%	<10	≥ 10	≥ 20	≥ 30	≥ 40	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 80	≥ 90	$=100$
异常高温事件气候百分位/%	<50	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 80	≥ 85	≥ 90	≥ 95	≥ 97.5	≥ 99	≥ 99.5
异常低温事件气候百分位/%	>50	≤ 50	≤ 40	≤ 30	≤ 20	≤ 15	≤ 10	≤ 5	≤ 2.5	≤ 1	≤ 0.5

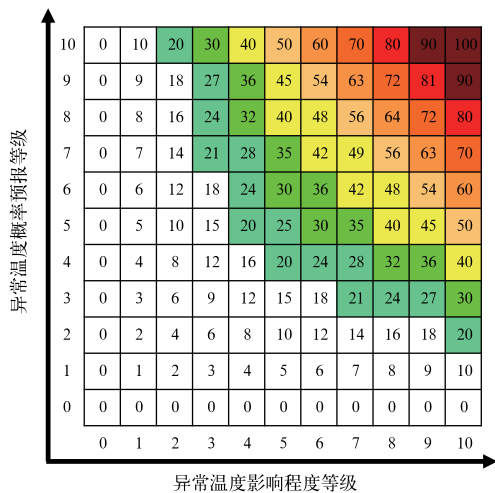


图 1 异常温度影响矩阵

Fig. 1 Abnormal temperature impact matrix

本文应用两分类预报统计检验方法对产品进行检验,采用 TS 评分、预报偏差(Bias)、命中率(H)、空报率(F)进行检验评估(Jolliffe and Stephenson, 2016)。对异常温度事件的检验还采用对称极端依赖指数(symmetric extremal dependence index, SEDI):

$$SEDI = \frac{\log F - \log H - \log(1 - F) + \log(1 - H)}{\log F + \log H + \log(1 - F) + \log(1 - H)} \quad (4)$$

SEDI 取值区间为 $-1 \sim 1$,越接近 1 代表预报越接近完美预报(Ferro and Stephenson, 2011),该方法广泛应用于对异常天气事件的检验(Mandal et al, 2019)。

2 集合平均异常温度预报(EMATF)产品评估分析

2015—2019 年夏季(6—8 月)和 2015—2020 年冬季(12 月至次年 2 月),全国有 22689 站次(11960 站次)出现异常高温(低温)事件,对夏季最高气温和冬季最低气温 EMATF 开展 TS、Bias、SEDI 定量检验(表 2)。发现,夏季短期预报时效($0 \sim 72$ h) $TS \geq 0.24$ 、 $SEDI \geq 0.65$,中期预报时效($96 \sim 168$ h) $TS \geq 0.13$ 、 $SEDI \geq 0.48$;冬季,短期预报时效 $TS \geq 0.22$ 、 $SEDI \geq 0.70$,中期预报时效 $TS \geq 0.16$ 、 $SEDI \geq 0.62$;即,EMATF 对夏季和冬季的异常温度事件短中期预报时效均有比较好的预报效果。

表 2 0~168 h 预报时效 EMATF 产品与 EFI 产品对中国夏季(2015—2019 年)异常高温事件和冬季(2015—2020 年)异常低温事件检验结果

Table 2 Verification result of 0—168 h lead-time EMATF and EFI for abnormal high-temperature events of China in summer (2015—2019) and abnormal low-temperature events of China in winter (2015—2020)

季节	产品	检验参数	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
夏季	EMATF	TS	0.28	0.25	0.24	0.22	0.19	0.16	0.13
		Bias	0.85	0.81	0.78	0.74	0.69	0.64	0.53
		SEDI	0.70	0.66	0.65	0.62	0.58	0.54	0.48
	EFI	TS	0.22	0.20	0.17	0.14	0.10	0.08	0.05
		Bias	0.60	0.57	0.54	0.50	0.46	0.43	0.37
		SEDI	0.62	0.58	0.55	0.51	0.47	0.43	0.37
冬季	EMATF	TS	0.24	0.23	0.22	0.20	0.20	0.18	0.16
		Bias	1.16	1.32	1.37	1.44	1.47	1.52	1.46
		SEDI	0.71	0.71	0.70	0.68	0.68	0.66	0.62
	EFI	TS	0.23	0.21	0.21	0.21	0.20	0.18	0.15
		Bias	1.24	1.18	1.16	1.17	1.17	1.11	0.90
		SEDI	0.71	0.68	0.67	0.66	0.66	0.63	0.54

注:粗体字为二者中较好评分。

EMATF 经过集合平均后能反映产品整体性能,但也因集合平均被平滑掉集合成员对异常天气事件的预报信息。对此,考虑有集合预报成员预报出异常高(低)温事件就认为发现了异常高(低)温信号,即异常温度概率预报产品 >0 ,但这同时也会增加空报,因此主要对命中率、空报率和 SEDI 开展检验。夏季异常高温事件, $0 \sim 72$ h 预报时效 SEDI 可

达到 0.82 以上,168 h 预报时效在 0.73;冬季异常低温事件, $0 \sim 168$ h 预报时效 SEDI 评分在 0.78 及以上(表 3)。但无论夏季还是冬季,随着预报时效延长,命中率和空报率均呈现增加趋势,这与集合预报随预报时效延长离散度增加有关,因此虽然命中增加,但同时也会显著增加空报。此外,异常温度概率预报产品 SEDI 评分要好于 EMATF,在中期预

报时效更为明显,说明在中期预报时效该产品对异常天气信号的发现更有优势,在业务中建议两种产品宜结合使用。

表 3 0~168 h 预报时效集合异常温度概率预报产品(预报概率>0)对中国夏季(2015—2019 年)异常高温事件和冬季(2015—2020 年)异常低温事件的预报检验

Table 3 Verification result of 0—168 h lead-time ensemble abnormal temperature probability forecast products (forecast probability>0) for abnormal high-temperature events of China in summer (2015—2019) and abnormal low-temperature events of China in winter (2015—2020)

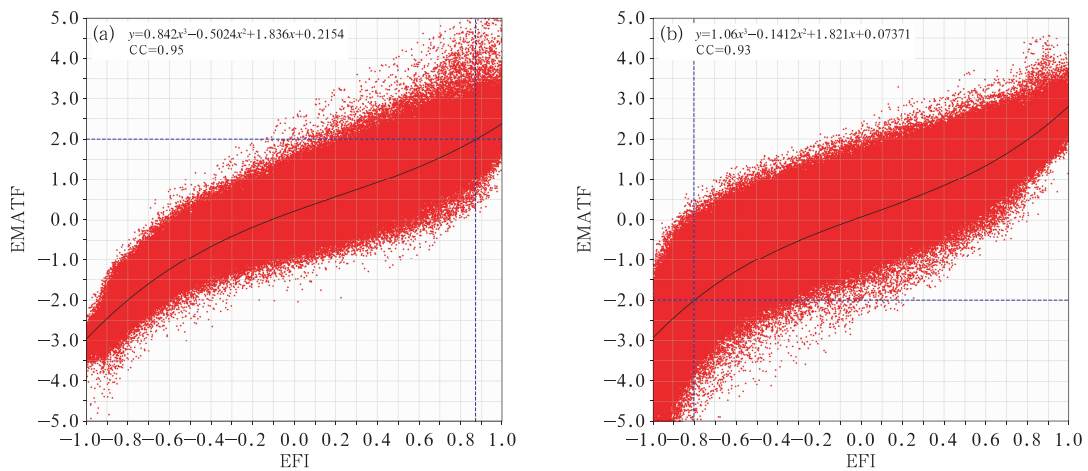
季节	检验参数	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h
夏季	命中率	0.74	0.74	0.75	0.77	0.78	0.78	0.77
	空报率	0.06	0.08	0.09	0.11	0.14	0.17	0.21
	SEDI	0.84	0.82	0.82	0.81	0.79	0.76	0.73
冬季	命中率	0.61	0.65	0.67	0.69	0.73	0.75	0.76
	空报率	0.03	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.13
	SEDI	0.78	0.79	0.79	0.79	0.80	0.81	0.79

3 EMATF 产品与 EFI 产品的对比分析

目前业务上对异常温度事件的预报主要应用 EFI 产品,本节主要分析 EMATF 与 EFI 对异常温度事件的预报性能。为方便开展对比分析,将二者逐日夏季(2015—2019 年)最高气温和冬季(2015—2020 年)最低气温的 0~168 h 预报时效预报产品分别进行 3 阶多项式拟合和相关性分析,用来确定二者对应关系(图 2)。当 EMATF 在夏季为 2σ 时

对应的 EFI 值为 0.87,二者相关系数为 0.95,当 EMATF 在冬季为 -2σ 时对应 EFI 值为 -0.80 ,二者相关系数为 0.93;即无论在夏季还是冬季,二者的相关性均较好。

通过比较 EMATF 与 EFI 对夏季和冬季异常温度事件的检验结果(表 2),发现无论是对于夏季还是冬季的异常温度事件,EMATF 在各预报时效的 TS、SEDI 均优于或接近 EFI,尤其是对夏季异常高温事件更为明显。同时发现,EFI 对夏季异常高温事件在 96 h 预报时效以后评分出现明显下降,陶亦为等(2017)也发现 EFI 随着预报时效的延长对异



注:黑实线为 3 阶多项式拟合曲线,蓝色虚线交叉点为 EMATF 等于 $2\sigma(-2\sigma)$ 所对应的 EFI 相应数值。

图 2 0~168 h 预报时效 EMATF 产品和 EFI 产品逐日(a)夏季最高气温和(b)冬季最低气温预报关系散点图

Fig. 2 Scatter diagram of the forecast relationship between the 0—168 h lead-time EMATF and the EFI daily (a) maximum temperature in summer and (b) minimum temperature in winter

常温度事件预报所对应的最优 TS 的 EFI 值呈现下降趋势。造成这样的原因可能是 EFI 产品模式气候是基于 ECMWF 再预报数据构建,再预报数据是基于当前版本集合预报系统回算过去 20 年的集合预报数据,虽有利于消除系统误差,但随着预报时效延长再预报数据和集合预报产品的离散度均增加,可能导致二者之间的概率分布差异有所减小。

下面分别选取夏季和冬季两次异常温度事件进一步开展对比分析。2018 年 7 月底至 8 月初东北地区发生异常高温事件,7 月 30 日达到最强,东北地区中南部出现大范围异常高温(Tao and Zhang, 2019)。对比 EMATF 和 EFI 产品 29 日 08 时起报的对 30 日异常高温事件的预报(图 3),二者都预报出东北地区中南部将出现异常高温,其中 EFI 预报异常高温范围偏东,而 EMATF 对异常高温事件预报的范围与实况更为接近,并且预报出辽宁中西部和内蒙古东部偏南地区有异常高温(实况表明,上述

地区均出现 $36\sim 38^{\circ}\text{C}$ 的高温)。通过 TS 和 Bias 检验可以看到,EMATF 各时效评分均好于 EFI (图 4),120 h 预报时效以前 TS 大于 0.6。此外,EMATF 在短期时效内 Bias 评分在 0.8 左右,而 EFI 则在 $0.5\sim 0.7$,存在一定的漏报现象,在中期时效 EMATF 的 Bias 评分明显更好。

2018 年 1 月 28—29 日发生了一次全国范围的强冷空气过程,华北中西部、西北地区东部以及江淮、江南、华南等地气温下降 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$,局地超 10°C (刘超等,2018),在 29 日低温达到最强,共 351 个国家级气象站达到异常低温事件。EMATF 和 EFI 于 28 日 08 时起报的对 29 日异常低温事件的预报,范围与实况均比较接近(图 5),其中 EFI 在西北地区东部存在一定漏报,在湖南南部存在一定空报,而 EMATF 对上述地区预报把握更好,预报出了陕西中南部大范围异常低温事件。定量检验显示(图 6),EMATF 与 EFI 在短期预报时效 TS 评分接近,超

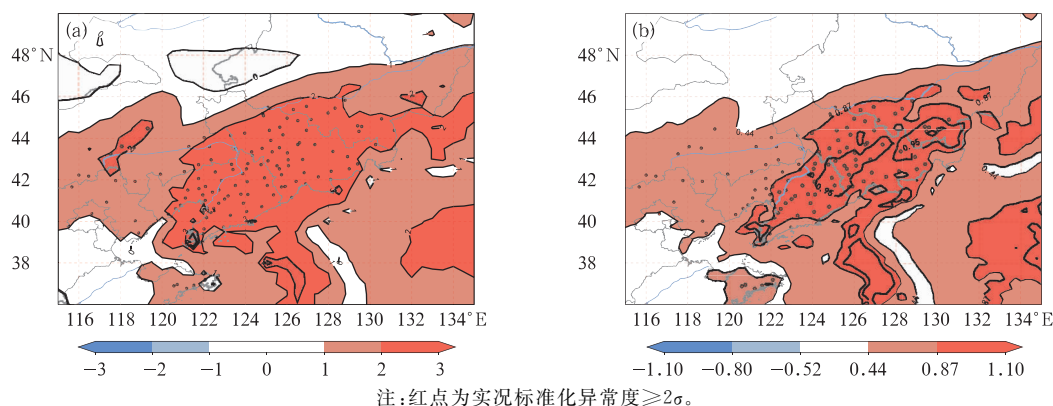


图 3 (a)EMATF 产品和(b)EFI 产品 2018 年 7 月 29 日 08 时起报的 7 月 30 日异常高温事件的异常度预报(填色和等值线)

Fig. 3 The anomaly forecasts of (a) EMATF and (b) EFI for the abnormal high-temperature event on 30 July 2018 initiated from 08:00 BT 29 July 2018 (colored and contour)

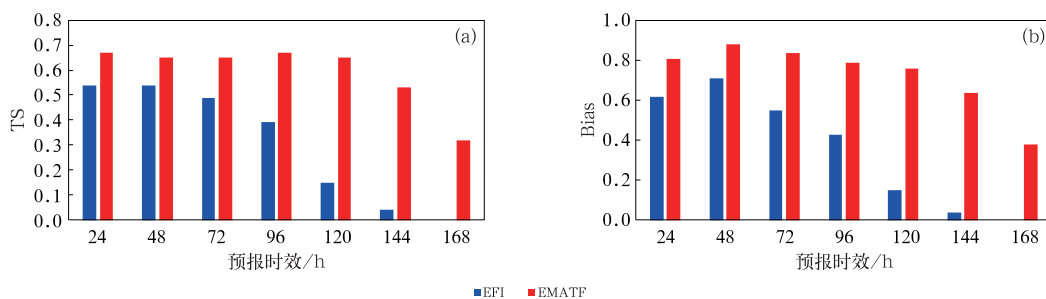


图 4 0~168 h 预报时效 EFI 产品与 EMATF 产品对 2018 年 7 月 30 日异常高温事件预报检验 (a) TS, (b) Bias

Fig. 4 Verification of the EFI and EMATF forecasts with 0—168 h lead time to the abnormal high-temperature event on 30 July 2018 (a) TS, (b) Bias

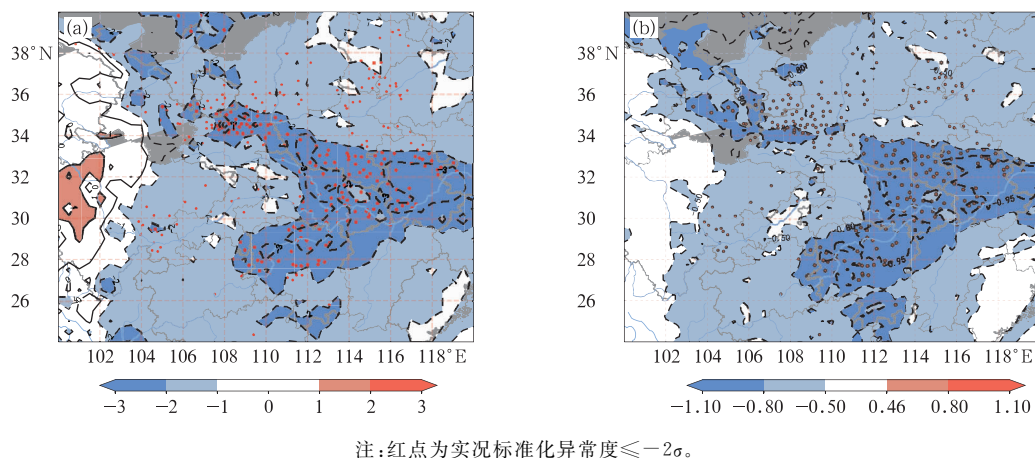


图 5 (a)EMATF 产品和(b)EFI 产品 2018 年 1 月 28 日 08 时起报的
1 月 29 日异常低温事件的异常度预报(填色和等值线)

Fig. 5 The abnormality forecasts of (a) EMATF and (b) EFI for the abnormal low-temperature event on 29 January 2018 initiated from 08:00 BT 28 January 2018 (colored and contour)

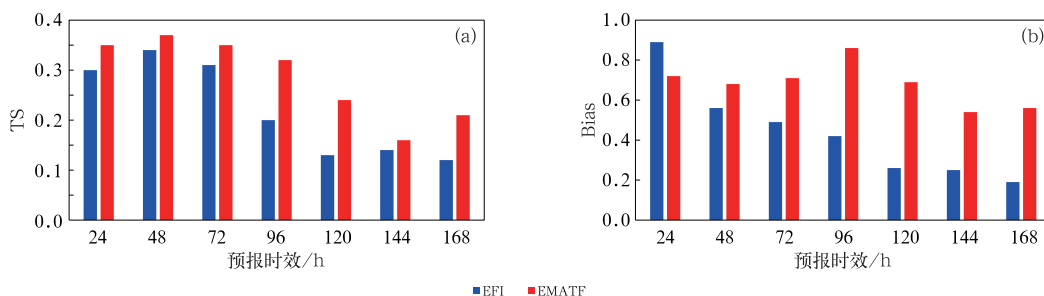


图 6 0~168 h 预报时效 EFI 产品与 EMATF 产品对 2018 年 1 月 29 日异常低温事件预报检验
(a)TS, (b)Bias

Fig. 6 Verification of the EFI and EMATF forecasts with 0—168 h lead time to
the abnormal low-temperature event on 29 January 2018

(a) TS, (b) Bias

过 72 h 预报时效后 EMATF 表现更好,超过 24 h 预报时效后 EMATF 的 Bias 优于 EFI,且在中期预报时效明显优于 EFI。与夏季异常高温事件相同,随着预报时效的延长,EMATF 的 TS 和 Bias 评分均表现比 EFI 更好、更稳定。

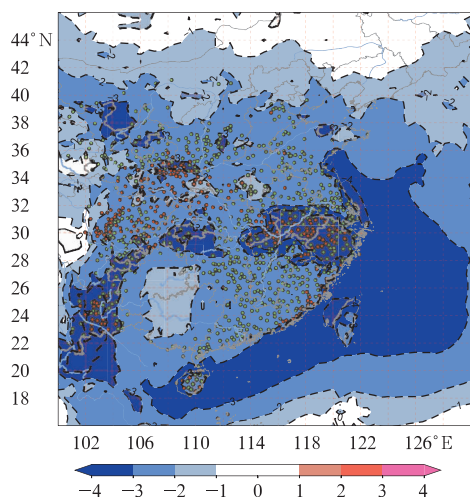
4 对异常温度事件预报的业务应用探讨

从前文对相关产品的检验分析可以看出,EMATF 对于夏季异常高温事件和冬季异常低温事件预报比 EFI 更好。本节以一次极端强寒潮天气为例,具体探讨相关产品在业务上的应用。

2016 年 1 月 21—25 日我国中东部地区爆发一

次强寒潮天气过程,出现大范围极端低温,25 日中东部多站最低气温突破历史极值(江琪等,2016)。EMATF 提前 6 天预报出 25 日我国中东部大部将出现异常低温事件,预报长江中下游地区、西北地区东南部、云南中东部、福建沿海、重庆南部和东部等地将出现标准化异常度 $\leq -3\sigma$ 的低温事件(图 7),TS 评分为 0.23,体现该产品对更异常低温事件在中期预报时段也有较好的预报效果。

异常温度概率预报产品预报中东部大部地区会出现异常低温事件的概率超过 90%(图 8a),其中预报的江南东北部、江淮、云南中东部最低气温标准化异常度 $\leq -3\sigma$ 的概率超过 90%(图 8b),可预报性较高,通过实况对比也可看到异常温度概率预报提前 6 天预报最低气温标准化异常度 $\leq -3\sigma$ 的概率的区



注:绿点和红点分别为实况标准化异常度 $\leq -2\sigma$ 和 $\leq -3\sigma$ 。

图 7 EMATF 产品 2016 年 1 月 19 日 08 时起报的 1 月 25 日异常低温事件的异常度预报(填色和等值线)

Fig. 7 The anomaly forecast of EMATF for the abnormal low-temperature event on 25 January 2016 initiated from 08:00 BT 19 January 2016 (colored and contour)

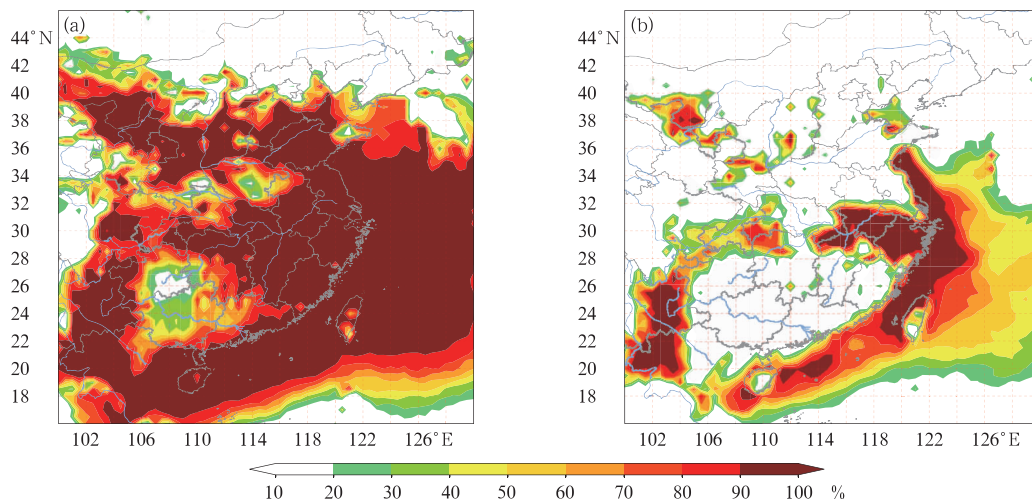


图 8 异常温度概率预报产品 2016 年 1 月 19 日 08 时起报的 1 月 25 日最低气温的标准化异常度 (a) $\leq -2\sigma$ 和 (b) $\leq -3\sigma$ 的概率预报

Fig. 8 Abnormal temperature probability forecast product for the abnormal minimum temperature of standardized anomaly (a) $\leq -2\sigma$ and (b) $\leq -3\sigma$ on 25 January 2016 initiated from 08:00 BT 19 January 2016

预报产品中的可预报性信息,可以在一个产品上给出对异常温度事件更为直观定量的预报结果,当指数越大时代表预报的异常温度事件对社会造成的影响越大。无论是事件的异常程度预报没有达到最强,但所有集合成员均预报出异常低温事件的发生

域与实况比较一致。另外,对于四川盆地西部出现的最低气温标准化异常度 $\leq -3\sigma$ 的低温事件,虽然 EMATF 对上述地区预报偏弱,但异常温度概率预报产品也有一定体现。这也进一步说明,业务上对异常天气事件的预报应结合异常温度概率预报产品,尤其是对更异常的天气事件进行判断和评估预报不确定性信息时。

从最低气温异常温度影响程度预报指数来看(图 9),在贵州和广西指数小于 40,反映此次强寒潮天气过程在上述地区异常低温事件概率很低且异常性不强,所造成的社会影响较小,同时在江淮、江汉、江南、四川盆地、云南东部、西北地区东部等地指数预报均超过 80。对照表 1 可知,当异常温度事件预报概率至少达到 80%(纵坐标等级为 8)且异常低温事件气候百分位至少 $\leq 0.5\%$ (横坐标等级为 10),或异常温度事件预报概率为 100%(纵坐标等级为 10)且异常低温事件气候百分位至少 $\leq 2.5\%$ (横坐标等级为 8),预报指数才能达到 80 以上。异常温度影响程度预报指数结合了集合平均异常温度预报产品中的温度异常程度的预报信息和异常温度概率

(概率较大);或者,尽管并非所有集合成员均预报出异常低温事件的发生,但集合平均异常温度预报产品所预报结果接近历史最强;这两种预报得到的异常温度事件均会对社会产生较大影响,均需要在预报预警上有所行动。对比实况发现,异常温度影响

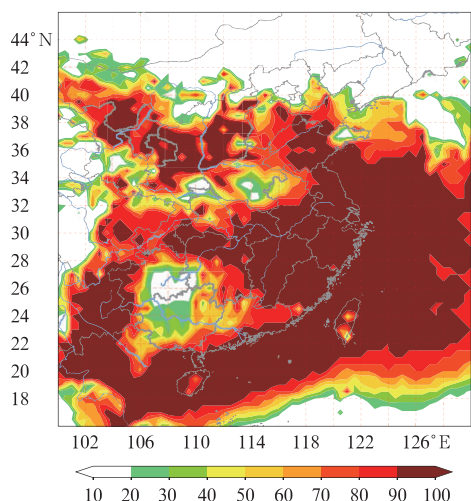


图 9 2016 年 1 月 19 日 08 时起报的 1 月 25 日
最低气温异常温度影响程度预报指数

Fig. 9 The forecast index of impact degree of
minimum temperature anomaly on 25 January
2016 initiated from 08:00 BT 19 January 2016

程度预报指数超过 80 的区域基本覆盖实况最低气温标准化异常度 $\leq -2\sigma$ 的区域,说明对此次强寒潮天气过程出现的异常温度偏低事件有比较好的预报效果。本文构建的“异常温度影响矩阵”方法对异常温度事件的预报和早期预警有较好的指示意义,可以在异常天气事件的预报业务中开展深入应用。

5 结 论

基于 ERA5 构建模式气候,应用 ECMWF 集合预报,采用“集合预报标准化异常预报法”构建集合平均异常温度预报和异常温度概率预报产品,并建立“异常温度影响矩阵”,开发异常温度影响程度预报指数。分析了相关产品预报性能,并与 EFI 进行了对比,进一步分析相关产品在异常温度事件上的应用。主要结论如下:

(1) 本文基于 ECMWF 的 ERA5 和集合预报所构建的集合平均异常温度预报产品,可以反映出我国夏季(冬季)异常温度事件,在中短期预报时效均有比较好的预报效果,对于更极端的异常温度事件也有一定的预报能力,但集合平均后也会平滑掉集合成员的信息。异常温度概率预报产品可以体现集合成员的异常信息,尤其是在中期预报时效,对发现异常温度事件的信号更有优势,并可以反映对异常温度事件可预报性的信息,在业务中建议两种产品

结合在一起使用。

(2) 通过定量检验和个例对比,均反映出集合平均异常温度预报产品在短中期预报时效对夏季异常高温事件和冬季异常低温事件的预报性能均优于或接近 EFI,尤其在中期预报时效的优势更为明显。集合平均异常温度预报产品相较于 EFI 原理简单,另外 EFI 取值范围存在上限和下限($-1 \sim 1$),而前者不存在上下限,可直观地反映出异常温度事件的异常程度,使用者也更容易理解其意义,在业务上可作为对异常温度事件预报的补充产品。

(3) 本文基于“异常温度影响矩阵”开发的异常温度影响程度预报指数,结合了异常温度事件的概率预报信息和异常程度预报信息,并转变为更为直观的定量预报结果。通过一次强寒潮天气个例证明该指数对异常温度事件有比较好的预报效果,有较好的业务应用效果,对异常温度事件预报和早期科学预警有比较好的指示意义。本文研究结果尚不能说明该方法对风、降水等其他要素的预报能力,这值得进一步研究。另外,本文在构建“异常温度影响矩阵”过程中只考虑了异常温度事件异常程度的影响,后面可以探讨融入社会信息如人口、城市、经济等,以进一步增强产品的科学性和实用性。

参考文献

- 车少静,王冀,李晓帆,等,2022. 京津冀后冬极端低温与北极涛动相关性年代际减弱[J]. 气象,48(4):418-427. Che S J, Wang J, Li X F, et al, 2022. Interdecadal weakening in the relationship between extreme low temperature and Arctic oscillation in Beijing-Tianjin-Hebei Region in late winter[J]. Meteor Mon, 48(4): 418-427(in Chinese).
- 董全,代刊,陶亦为,等,2017. 基于 ECMWF 集合预报的极端天气预报产品应用和检验[J]. 气象,43(9):1095-1109. Dong Q, Dai K, Tao Y W, et al, 2017. Application and verification of extreme weather forecast products of ECMWF ensemble prediction system[J]. Meteor Mon, 43(9):1095-1109(in Chinese).
- 董全,金荣花,代刊,等,2016. ECMWF 集合预报和确定性预报对淮河流域暴雨预报的对比分析[J]. 气象,42(9):1146-1153. Dong Q, Jin R H, Dai K, et al, 2016. Comparison between ECMWF ensemble and deterministic forecast for heavy rainfall in the Huaihe River Basin of China[J]. Meteor Mon, 42(9):1146-1153(in Chinese).
- 杜钧,Grumm R H,邓国,2014. 预报异常极端高影响天气的“集合异常预报法”:以北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨为例[J]. 大气科学,38(4):685-699. Du J, Grumm R H, Deng G, 2014. Ensemble anomaly forecasting approach to predicting extreme weather demonstrated by extremely heavy rain event in Beijing[J]. Chin

- J Atmos Sci, 38(4): 685-699(in Chinese).
- 官晓军, 潘宁, 黄待静, 等, 2021. 基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究[J]. 气象学报, 79(3): 414-427. Guan X J, Pan N, Huang D J, et al, 2021. A study of typhoon extreme precipitation forecast in Fujian based on precipitation extreme forecast index[J]. Acta Meteor Sin, 79(3): 414-427(in Chinese).
- 胡艺, 董全, 2021. 2021年2月大气环流和天气分析[J]. 气象, 47(5): 638-644. Hu Y, Dong Q, 2021. Analysis of the February 2021 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 47(5): 638-644(in Chinese).
- 江琪, 马学款, 王飞, 2016. 2016年1月大气环流和天气分析[J]. 气象, 42(4): 514-520. Jiang Q, Ma X K, Wang F, 2016. Analysis of the January 2016 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 42(4): 514-520(in Chinese).
- 刘超, 江琪, 桂海林, 2018. 2018年1月大气环流和天气分析[J]. 气象, 44(4): 590-596. Liu C, Jiang Q, Gui H L, 2018. Analysis of the January 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 44(4): 590-596(in Chinese).
- 罗玲, 娄小芬, 傅良, 等, 2019. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. 气象, 45(10): 1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in typhoon rainstorm in East China[J]. Meteor Mon, 45(10): 1382-1391(in Chinese).
- 陶亦为, 代刊, 董全, 2017. 2016年1月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. 气象, 43(10): 1176-1185. Tao Y W, Dai K, Dong Q, 2017. Extreme analysis and ensemble prediction verification on cold wave process in January 2016[J]. Meteor Mon, 43(10): 1176-1185(in Chinese).
- 吴剑坤, 高丽, 乔林, 等, 2015. 基于 T213 集合预报的中国极端温度预报方法研究[J]. 气象科学, 35(4): 438-444. Wu J K, Gao L, Qiao L, et al, 2015. Research on Chinese extreme temperature forecasting method based on T213 ensemble forecast[J]. J Meteor Sci, 35(4): 438-444(in Chinese).
- 徐冉, 江琪, 桂海林, 等, 2021. 2021年1月大气环流和天气分析[J]. 气象, 47(4): 510-516. Xu R, Jiang Q, Gui H L, et al, 2021. Analysis of the January 2021 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 47(4): 510-516(in Chinese).
- 翟盘茂, 李蕾, 周伯铨, 等, 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al, 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 631-640(in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11): 1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1405-1414(in Chinese).
- Jolliffe I T, Stephenson D B, 2016. 预报检验——大气科学从业者指南: 第2版[M]. 李应林, 等, 译. 北京: 气象出版社: 29-54. Jolliffe I T, Stephenson D B, 2016. Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science[M]. 2nd ed. Li Y L, et al, trans. Beijing: China Meteorological Press: 29-54(in Chinese).
- Boisserie M, Descamps L, Arbogast P, 2016. Calibrated forecasts of extreme windstorms using the extreme forecast index (EFI) and shift of tails(SOT)[J]. Wea Forecasting, 31(5): 1573-1589.
- Buizza R, Bidlot J R, Wedi N, et al, 2007. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System) [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 133(624): 681-695.
- Ferro C A T, Stephenson D B, 2011. Extremal dependence indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events[J]. Wea Forecasting, 26(5): 699-713.
- Graham R A, Grumm R H, 2010. Utilizing normalized anomalies to assess synoptic-scale weather events in the Western United States[J]. Wea Forecasting, 25(2): 428-445.
- Grumm R H, 2011. The central European and Russian heat event of July—August 2010[J]. Bull Amer Meteor Soc, 92(10): 1285-1296.
- Grumm R H, Hart R, 2001. Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: preliminary findings[J]. Wea Forecasting, 16(6): 736-754.
- Guan H, Zhu Y J, 2017. Development of verification methodology for extreme weather forecasts[J]. Wea Forecasting, 32(2): 479-491.
- Hart R E, Grumm R H, 2001. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic-scale events objectively[J]. Mon Wea Rev, 129(9): 2426-2442.
- Lalaurette F, 2003. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 129(594): 3037-3057.
- Mandal R, Joseph S, Sahai A K, et al, 2019. Real time extended range prediction of heat waves over India[J]. Sci Rep, 9(1): 9008.
- Petroliagis T, Pinson P, 2014. Early warnings of extreme winds using the ECMWF extreme forecast index[J]. Meteor Appl, 21(2): 171-185.
- Tao P H, Zhang Y C, 2019. Large-scale circulation features associated with the heat wave over Northeast China in summer 2018[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 12(4): 254-260.
- Tsonevsky I, 2015. New EFI parameters for forecasting severe convection[J]. ECMWF Newsl, (144): 27-32.
- Tsonevsky I, Doswell III C A, Brooks H E, 2018. Early warnings of severe convection using the ECMWF extreme forecast index[J]. Wea Forecasting, 33(3): 857-871.
- Zsótér E, 2006. Recent developments in extreme weather forecasting [J]. ECMWF Newsl, (107): 8-17.

(本文责编:戴洋)