

盛春岩,范苏丹,荣艳敏,等,2020.几种气温客观预报方法对比及最优集成预报研究[J].气象,46(10):1351-1361. Sheng C Y, Fan S D, Rong Y M, et al, 2020. Comparison of several objective methods and optimal consensus forecast study of temperature [J]. Meteor Mon, 46(10):1351-1361(in Chinese).

## 几种气温客观预报方法对比及最优集成预报研究<sup>\*</sup>

盛春岩 范苏丹 荣艳敏 孙文奇

山东省气象科学研究所, 济南 250031

**提 要:** 由于模式本身的误差以及地形等影响,对模式产品进行订正释用是提高气温客观预报准确率的重要手段。基于 ECMWF 细网格预报产品研发了气温偏差订正和准对称混合滑动训练期 MOS 预报系统,在此基础上,设计了一种气温最优集成预报方法。对不同模式和不同客观方法的日最高、最低气温预报准确率进行了对比分析,结果表明:通过 10~30 d 的偏差滑动订正可以较好提高 ECMWF 细网格模式日最高、最低气温预报准确率。偏差滑动订正在短期内订正效果较显著,对考核站和鲁中山区订正效果尤其明显,对最低气温预报订正效果好于最高气温。MOS 客观预报对日最高、最低气温预报也有较好的订正效果,但 ECMWF 细网格、偏差订正、MOS 客观预报产品在不同地区、不同季节预报准确率有所不同,采用动态最优集成的方法进行最优集成预报,可以集成不同客观方法的预报优势,在多种客观预报产品的基础上再次提高预报准确率,达到最优集成的目的。

**关键词:** 气温预报,偏差订正,MOS 预报,最优集成,准确率

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.009

### Comparison of Several Objective Methods and Optimal Consensus Forecast Study of Temperature

SHENG Chunyan FAN Sudan RONG Yanmin SUN Wenqi

Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031

**Abstract:** Correcting and interpreting the model's temperature forecast is an important means of improve the accuracy rate of objective temperature forecast in the context of model's system error and impact of terrain. In this paper bias correction and the quasi-symmetrical mixed running training period MOS forecast systems are developed based on ECMWF fine-resolution model products. With the different methods an optimal consensus forecast method of temperature is designed. The accuracy rates of different models and different objective methods of daily maximum and minimum temperatures are compared. The results show that bias running correction of daily maximum and minimum temperature forecast in 10 to 30 days can improve the ECMWF fine-resolution model's temperature forecast. Bias running correction can significantly improve the daily maximum and minimum temperature forecasts of the models in short range, especially for the central mountainous area and check stations of Shandong Province. Bias running correction of daily minimum temperature can give higher improvement of the model's forecast than that of daily maximum temperature. The MOS system can improve the daily maximum and minimum temperature forecasts too, while the accuracy rates of ECMWF fine-resolution model, bias correction and MOS temperature

<sup>\*</sup> 山东省重点研发计划项目(2016GSF120017)、“十三五”山东现代农业气象服务保障工程(鲁发改农经[2017]97号)和中国气象局省级气象研究所科技创新发展项目(ssfz201714)共同资助

2020年3月13日收稿; 2020年8月3日收修定稿

第一作者:盛春岩,主要从事数值预报和天气预报技术开发工作. E-mail:sdqxscy@126.com

objective forecast are different for different regions and different seasons in Shandong Province. Running optimal consensus forecast method can give further improvement of daily maximum and minimum temperature forecasts by integrating the advantages of different objective methods.

**Key words:** temperature forecast, bias correction, MOS, optimal consensus forecast, accuracy rate

## 引 言

随着数值预报和资料同化技术的发展,数值预报准确率越来越高,在天气预报业务中发挥着越来越重要的作用。但由于模式自身的系统误差以及特殊地形和下垫面等的影响,对数值预报产品进行订正释用一直是提高天气预报准确率的重要手段。多年来,气象学家围绕数值预报产品释用技术开展了大量研究,MOS、BP神经网络、卡尔曼滤波等多种技术已得到较好应用(吴君等,2007;漆梁波等,2007;杞明辉等,2003;张华和叶燕华,2003;赵翠光和赵声蓉,2011;闵晶晶等,2010;邱学兴等,2013;李佰平和智协飞,2012)。2001年以来MOS预报方法在业务应用、综合集成预报等方面取得显著进展(刘还珠等,2004;赵声蓉和裴海瑛,2007;李莉和朱跃建,2006;赵声蓉等,2012),气温、降水等释用产品均在业务中发挥了作用。

结合各地天气气候特点,特别是智能网格预报业务的发展,气温客观预报方法得到了持续改进发展。车钦等(2011)针对极端温度MOS预报中的季节划分问题,通过聚类分析方法以华北地区为例进行试验,提出了一种新的MOS温度预报方程季节分类方式,检验结果表明利用新分类方法制作的极端温度预报的整体效果好于传统的季节划分得到的极端温度预报效果。罗菊英等(2014)将天空状况进行分型后建立地方气温MOS预报模型,结合客观数值模式产品、上级业务部门指导产品以及天气学和诊断进行综合MOS预报,提高了本地天气预报准确率。吴启树等(2016)采用多种训练期方案,对1~7d的日最高、最低气温进行MOS预报,对比试验结果表明,准对称混合滑动训练期方案优于滑动训练期方案 and 传统季节固定期分类方案,且2年期优于1年期。该方法显著提高了ECMWF细网格日最高、最低气温预报准确率,有较好的应用参考价值。王婧等(2015)通过四种方法对GRAPES-RAFS的2m温度预报进行偏差订正,总体都取得

较好效果。曾晓青等(2019)采用简单订正和回归相结合的方法进行格点化温度滚动订正预报,订正后温度预报都取得正技巧。薛谌彬等(2019)提出了一种结合滑动双权重平均订正法和空间误差逐步订正法的综合订正技术,通过在江西的试验发现,滑动双权重平均订正法能有效订正ECMWF模式的温度预报,空间误差逐步订正法能进一步提高滑动双权重平均订正法的预报订正质量。

由于数值预报产品的不断增加,多模式集成技术也备受关注且取得较好进展。赵声蓉(2006)利用BP神经网络方法建立了我国600多个站的温度集成预报系统,结果表明,集成的温度预报结果明显优于3个模式单独的预报结果,但在不同地区误差不同。漆梁波等(2007)研究表明,集成多种气温预报的集合预报产品集成好于卡尔曼滤波预报效果。吴振玲等(2014)采用权重分配方法开展基于混合演化算法的多模式气温集成预报方法研究,通过逐日滚动建立集成预报模型,提高了天津市气温预报准确率。智协飞等(2009;2013;2016)对地面气温进行多模式集成预报研究表明,滑动训练期超级集合预报效果好于固定训练期超级集合,多模式集成的回报效果优于单模式,超级集合极大改善了地面气温的回报效果。林春泽等(2009)基于TIGGE资料,利用超级集合、多模式集合平均和消除偏差集合平均3种方法进行地面气温集成,对2007年进行预报试验表明,超级集合和消除偏差集合平均预报效果好于单个模式和多模式集合平均。对于较长预报时效,消除偏差集合平均预报性能更好。郝翠等(2019)采用最优集合订正方法,通过寻找过去一段时间内的相似个例集合,并对这些个例进行加权平均来实现对误差的订正,提高了北京市日最高、最低气温预报准确率,基本达到预报员主观预报水平。

为支撑智能网格预报业务,近年来山东省气象局先后研发了气温偏差订正、准对称混合滑动训练期MOS预报等系统,2018年开始投入业务运行。为集成不同预报产品的优势,设计提出了一种最优集成预报方法,通过对数值模式气温预报进行订正

释用和最优集成,提高气温预报准确率,基本实现了气温预报的客观自动化。本文将对比分析各种方法的预报效果差异,为气温客观预报提供参考。

## 1 资 料

本文使用的资料包括 2017—2019 年 ECMWF 细网格模式地面气温整点预报资料及 6 h 内最高、最低气温资料,产品分辨率为  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ,每日 08 时和 20 时(北京时,下同)提供预报产品,预报时效为 240 h。72 h 内时间分辨率为 3 h,72~240 h 为 6 h,由逐 6 h 最高、最低气温计算得到模式日最高、最低气温预报。山东 WRF 中尺度模式 2017 年 72 h 内日最高、最低气温预报资料参与对比试验。

实况资料为 24 h 地面 2 m 的日最高、最低气温观测资料。参与对比检验的站点包括山东省 123 个国家级气象观测站,以及 298 个考核站,参与检验的沿海站为根据山东省海洋气象预报业务划分的 12 个精细化海区代表站(荣艳敏等,2015;曲巧娜等,2016)。

由于 ECMWF 细网格模式预报产品数据在到达预报平台时大概滞后 6~7 h,为满足预报员业务应用需求,各方法在做实时业务预报时均基于 ECMWF 细网格滞后 12 h 的预报产品进行订正释用,即 08 时客观预报采用 ECMWF 细网格 20 时的模式预报产品,20 时的客观预报采用 ECMWF 细网格 08 时的模式预报产品,实际产品预报时效为 9 d。

## 2 方 法

### 2.1 偏差订正

偏差订正的主要目的是对近期一段时间模式预报的系统误差进行滑动统计,通过对比检验找出最佳滑动训练期,统计训练期内模式预报误差,对模式日最高、最低气温预报进行偏差滑动订正,达到模式日最高、最低气温预报订正的目的。

以山东省 1 200 个质量较好的地面站为基础,首先采用邻域法获得 ECMWF 细网格模式站点日最高、最低气温预报产品,采用滑动统计的方法逐日进行气温偏差订正,获得站点气温订正值,再采用邻域法,将站点订正值反馈到周围网格点上,生成山东区域日最高、最低气温智能网格预报产品。

### 2.2 准对称混合滑动训练期 MOS 预报

采用吴启树等(2016)提出的准对称混合滑动训练期方法,以山东省 1 200 个质量较好的地面站为基础,基于 ECMWF 细网格气温预报产品建立了山东省日最高、最低气温 MOS 预报方程(以下简称 MOS 预报),进行站点日最高、最低气温的 1~9 d 预报。通过邻域法将站点气温预报值反馈到周围网格点上,生成山东区域 1~9 d 的日最高、最低气温智能网格预报产品。

### 2.3 最优集成

在分析不同方法气温预报准确率的基础上,对过去一段时间不同客观预报产品准确率进行滑动统计,采用预报准确率最优方法进行最优集成预报,建立了气温智能网格最优集成预报系统。通过滑动最优集成,选取预报效果最好的产品,达到最优集成的目的。

### 2.4 检验方法

为便于和中国气象局气温预报业务考核办法相统一,采用 2005 年中国气象局下发的中短期天气预报质量检验办法(试行)(气发[2005]109 号)进行气温预报准确率、平均绝对误差检验。其中,气温预报准确率为预报绝对误差  $\leq 2^{\circ}\text{C}$  的日最高(最低)气温预报准确率评分。

## 3 偏差订正试验及预报效果

### 3.1 ECMWF 与 WRF 中尺度模式气温预报产品准确率对比

首先,以 2017 年 ECMWF 细网格和山东 WRF 中尺度模式气温预报产品为基础,对 ECMWF 细网格和 WRF 中尺度模式的日最高、最低气温预报准确率进行了对比检验和偏差订正试验。山东 WRF 中尺度模式系统基于 Hybrid-3DVAR 混合同化系统(盛春岩等,2016;曲巧娜等,2019),每日 08 时和 20 时起报两次,预报时效为 72 h。选取 15 d 作为滑动训练期,分别对 ECMWF 细网格、山东 WRF 中尺度模式的日最高、最低气温预报进行偏差滑动订正对比试验。由图 1 可以发现,无论是 ECMWF 细网格还是山东 WRF 中尺度模式,偏差订正后气温

预报准确率均得到提高,ECMWF 细网格 24 h 最高气温偏差订正后预报准确率接近 90 分,说明 ECMWF 细网格气温预报存在一定的系统偏差。同时也发现,山东 WRF 中尺度模式气温偏差订正后准确率也得到较好提高,24 h 最低气温订正后预报准确率接近 ECMWF 细网格预报,但总体上 WRF 中尺度模式订正后的日最高、最低气温预报准确率仍然低于 ECMWF 细网格预报。为此,仅基于 ECMWF 细网格气温预报,建立了日最高、最低气温偏差滑动订正预报系统,自 2018 年投入业务运行。为保证预报产品的及时性,实时预报系统均采用 ECMWF 滞后 12 h 的预报产品进行偏差订正预报。

### 3.2 偏差订正最优滑动训练期试验

为进一步分析偏差订正对模式气温预报的改进效果,以 2017 年 ECMWF 细网格模式预报为基础,进行偏差订正最优滑动训练期试验。分别取过去 3、7、10、15、20、25、30、35、40 和 45 d 作为滑动训练期,逐日滑动统计模式的日最高、最低气温预报偏差,进行偏差滑动订正。

由图 2 可见,山东省的 123 个国家气象观测站(图 2a,2b),不同的滑动训练期对 ECMWF 细网格模式的日最高、最低气温预报准确率均有显著提高,好于 ECMWF 细网格模式预报。其中,10 d 以内的

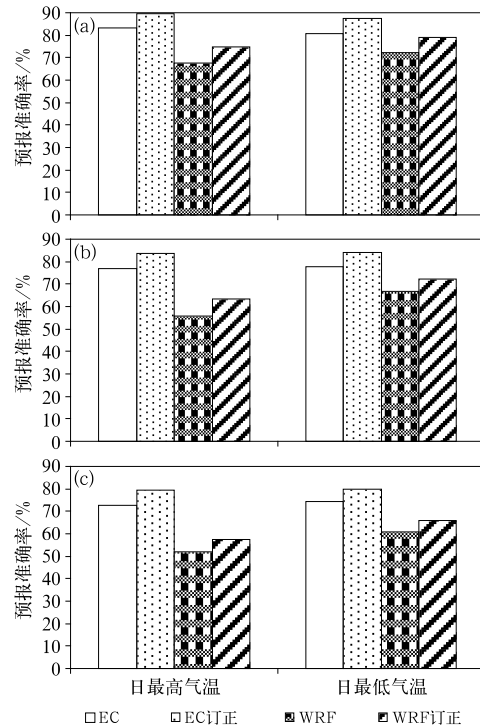


图 1 2017 年山东省 123 个国家气象观测站不同时效的 ECMWF 细网格和山东 WRF 中尺度模式偏差订正前后的日最高、最低气温预报产品准确率对比 (a)24 h, (b)48 h, (c)72 h

Fig. 1 The accuracy rate of ECMWF (EC, the same below), WRF models and the bias corrected daily maximum and minimum temperature forecasts at 123 national stations in Shandong in 2017 (a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h

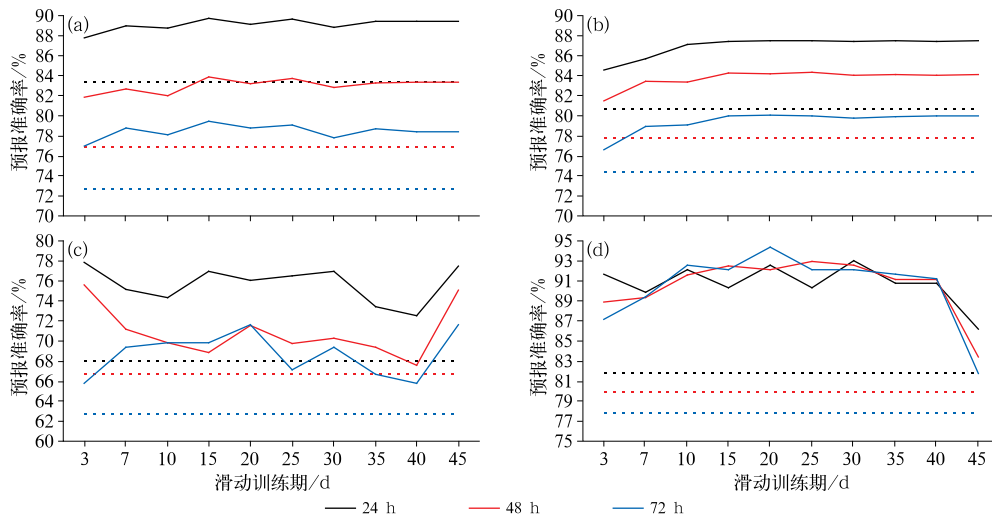


图 2 2017 年山东省 123 个国家气象观测站(a,b)和山东省沿海(c,d)的 ECMWF 细网格预报产品(虚线)和经不同滑动训练期偏差订正(实线)的 24、48、72 h 日最高气温(a,c)、日最低气温(b,d)预报准确率对比

Fig. 2 Accuracy rates of the 24 h, 48 h, 72 h daily maximum temperature (a, c) and minimum temperature (b, d) forecasts from ECMWF (dashed line) and bias correction forecast (solid line) with different running training days in 2017 at 123 national stations (a, b) and coast regions (c, d) in Shandong Province

训练期偏差订正预报准确率略低,10 d 以上的滑动训练期偏差订正预报准确率相差不大,均较高。

在沿海地区(图 2c,2d),偏差订正效果更显著,特别是最低气温预报准确率提高明显。总体而言,3 d 的滑动训练期就能有效提高沿海站日最高、最低气温预报的准确率,但是不同的滑动训练期对山东沿海日最高、最低气温预报订正效果存在波动。对沿海最低气温,超过 40 d 滑动训练期订正效果反而变差。综合山东省和山东沿海预报准确率对比,10~30 d 滑动训练期偏差订正效果较好。

### 4 不同客观方法预报效果对比

#### 4.1 偏差订正与 MOS 预报对比

为分析不同客观预报方法对数值预报订正能力,对 ECMWF 细网格预报、偏差订正、MOS 预报三种产品 2018—2019 年的日最高、最低气温预报准确率进行了对比分析。由图 3 可以发现,偏差订正和 MOS 预报较 ECMWF 细网格预报产品准确率均有提高,但不同年份效果不同。总体而言,4 d 内预报订正效果较好,5~9 d 准确率提高不明显。其中,MOS 预报在 2018 年预报准确率最高,好于偏差订正和 ECMWF 细网格预报,但 2019 年 MOS 预报未更新方程,准确率下降,总体略高于 ECMWF 细

网格预报,低于偏差订正预报。可见,虽然是同样的方法基于同样的模式进行释用,但不同年份预报准确率有变化。在短期预报时段内,客观预报均表现出较好的订正效果。

图 4 为泰山站情况,2018 年 MOS 预报和偏差订正对泰山站日最高、最低气温预报准确率评分大致相当,均显著好于 ECMWF 细网格预报。2019 年,偏差订正依然有较高的准确率评分,MOS 预报因未及时重建方程准确率显著下降,虽然好于 ECMWF 细网格预报,但准确率较 2018 年明显降低。

上述分析表明,不同的客观预报产品对不同地区、不同时间段的预报准确率是有差异的。为进一步分析各产品预报准确率差异,下面将对 ECMWF 细网格、MOS 预报、偏差订正三种预报在山东省不同地区的预报情况进行对比分析。

#### 4.2 不同地区最优预报产品对比分析

为进一步分析不同预报产品的准确率,以山东省 123 个国家气象观测站(含泰山站)20 时日最高、最低气温预报为基础,对 ECMWF 细网格、MOS 预报、偏差订正三种客观预报产品 72 h 内的日最高、最低气温最优预报站次数进行了统计。最优站次统计包括预报准确率和预报误差最小率,正确站次数的百分比为预报准确率,绝对预报误差最小站次数百分比为预报误差最小率,分别统计三种预报产品

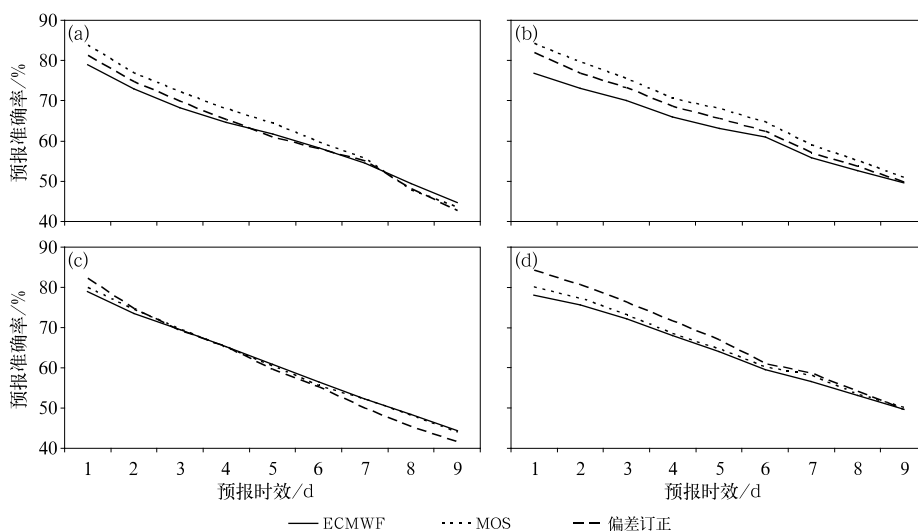


图 3 2018 年(a,b)和 2019 年(c,d)ECMWF 细网格、MOS、偏差订正对山东省 123 个国家气象观测站 1~9 d 的日最高气温(a,c)、日最低气温(b,d)预报准确率  
Fig. 3 Accuracy rates of the 1~9 d daily maximum temperature (a, c) and minimum temperature (b, d) forecasts from ECMWF, MOS and bias correction forecast at 123 national stations in Shandong Province in 2018 (a, b) and 2019 (c, d)

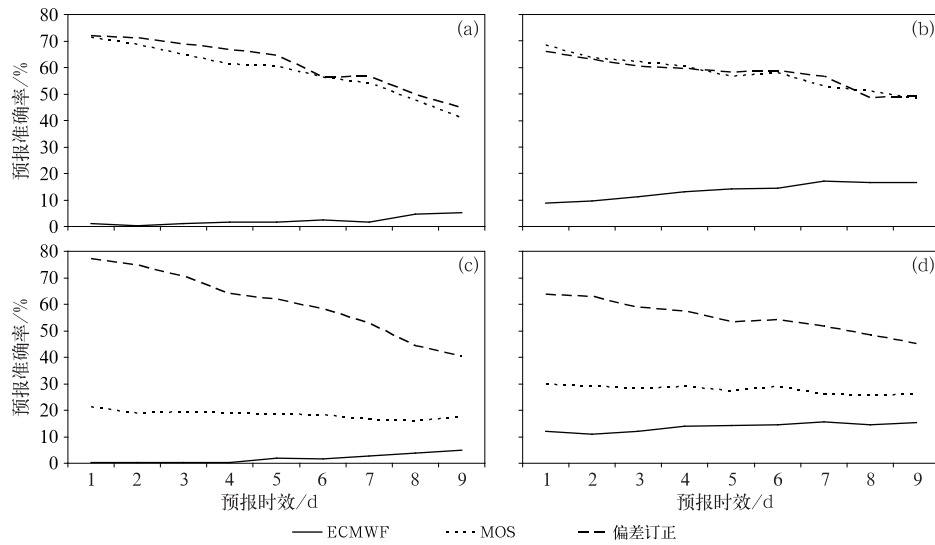


图 4 同图 3, 但为泰山站  
Fig. 4 Same as Fig. 3, but at Taishan Mountain Station

表 1 2018 年不同方法 20 时起报的 72 h 的山东省日最高气温、日最低气温预报准确率及预报误差最小率(单位: %)

Table 1 Accuracy rates and minimum forecast error rates of the 24–72 h daily maximum and minimum temperature forecasts starting from 20:00 BT by different methods in Shandong in 2018 (unit: %)

要素	统计量	客观产品	预报时效		
			24 h	48 h	72 h
日最高气温	准确率	ECMWF	77.11	71.96	67.01
		MOS	80.63	75.44	70.89
		偏差订正	80.06	75.06	69.75
	预报误差最小率	ECMWF	31.95	31.49	31.90
		MOS	35.51	35.89	35.86
		偏差订正	33.26	33.24	32.90
日最低气温	准确率	ECMWF	77.47	73.70	70.62
		MOS	84.43	80.05	75.68
		偏差订正	82.60	77.72	74.07
	预报误差最小率	ECMWF	30.44	31.13	30.89
		MOS	37.85	37.96	38.05
		偏差订正	32.45	31.61	31.76

表 2 同表 1, 但为 2019 年(单位: %)

Table 2 Same as Table 1, but in 2019 (unit: %)

要素	统计量	客观产品	预报时效		
			24 h	48 h	72 h
日最高气温	准确率	ECMWF	77.19	71.69	68.70
		MOS	77.24	72.15	67.62
		偏差订正	80.20	72.59	68.92
	预报误差最小率	ECMWF	21.91	30.71	32.26
		MOS	31.83	35.24	33.96
		偏差订正	44.17	40.06	40.48
日最低气温	准确率	ECMWF	77.71	75.61	72.53
		MOS	79.06	76.31	72.41
		偏差订正	84.10	80.64	76.55
	预报误差最小率	ECMWF	27.80	29.24	30.13
		MOS	32.07	33.20	33.78
		偏差订正	45.60	43.75	42.66

在山东省 123 个国家气象观测站预报准确率及预报误差最小率。由表 1、表 2 可见,三种客观预报产品准确率均在 70%以上,按照预报误差最小率,2018 年日最高、最低气温预报较好的为 MOS 和偏差订正,均高于 ECMWF 细网格预报。2019 年日最高、最低气温预报最优的产品为偏差订正,明显高于其他两种产品,其次为 MOS 预报,略好于 ECMWF 细网格预报。同时可以发现,虽然 ECMWF 细网格模式气温预报产品准确率相对较低,但其预报误差最小率仍然占 21%~33%,也就是说,有 21%~33%的预报是 ECMWF 细网格预报误差最小。这一结果表明,三种客观预报产品准确率虽然各有高低,但每种预报产品都有预报最优的情况,没有哪一种产品具有绝对预报优势。

为进一步分析不同地区不同客观产品预报准确率,分别对 2018 年和 2019 年山东省 123 个国家气象观测站站的日最高、最低气温预报准确率最优产品分布进行统计,由图 5 和图 6 可见,虽然采用了不同的客观释用方法,对日最高气温预报 ECMWF 细网格仍有较好的预报效果,表现在 24~48 h 鲁西北和鲁西南平原、半岛内陆等地日最高气温预报准确率最优产品均为 ECMWF 细网格,2018 年鲁中山区以偏差订正预报较好,其次为 MOS 预报。2019 年,ECMWF 细网格对日最高气温预报最优的地域与 2018 年类似,72 h ECMWF 细网格产品预报最优的范围进一步扩展到鲁中部分地区,可以认为,除泰山大地形附近,大部分地区日最高气温预报准确率最高的产品为 ECMWF 细网格,偏差订正预报在鲁中

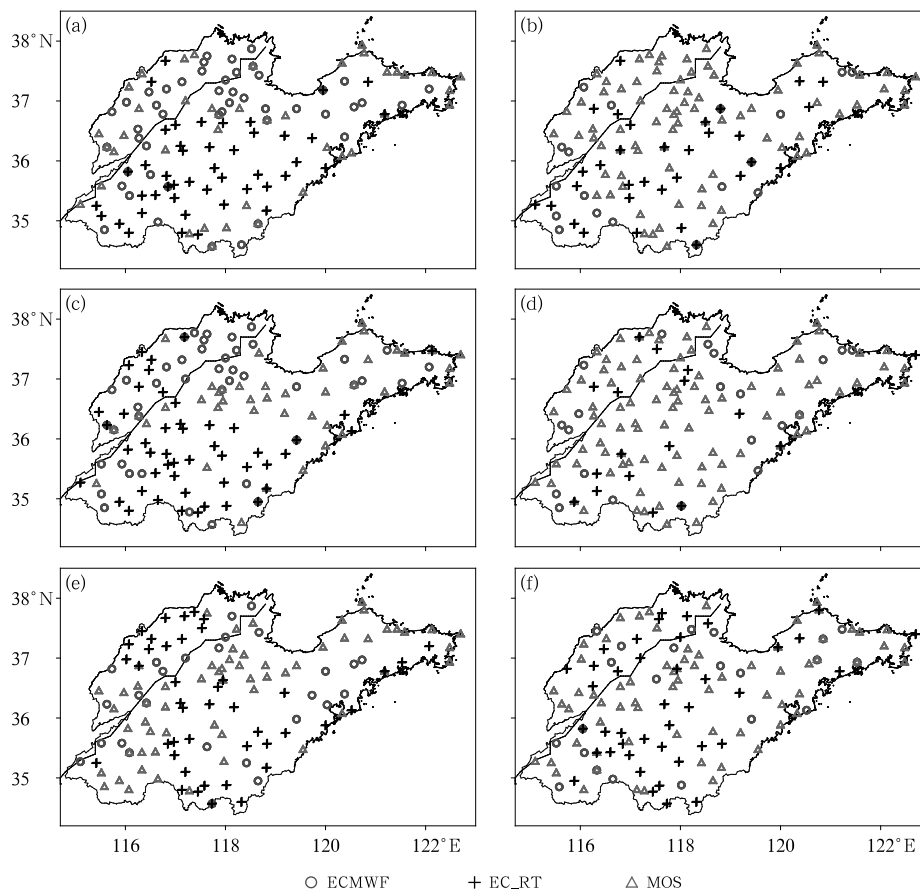


图 5 2018 年三种客观预报产品 20 时起报的 24 h(a,b)、48 h(c,d)、72 h(e,f) 山东省 123 个国家气象观测站日最高气温(a,c,e)、日最低气温(b,d,f)预报准确率最优产品分布 (EC\_RT:基于 ECMWF 的偏差订正预报)

Fig. 5 Distribution graphs of the optimal products of daily maximum temperature (a, c, e) and minimum temperature (b, d, f) starting from 20:00 BT of (a, b) 24 h, (c, d) 48 h, (e, f) 72 h from ECMWF, bias correction forecast of ECMWF (EC\_RT) and MOS Shandong in 2018

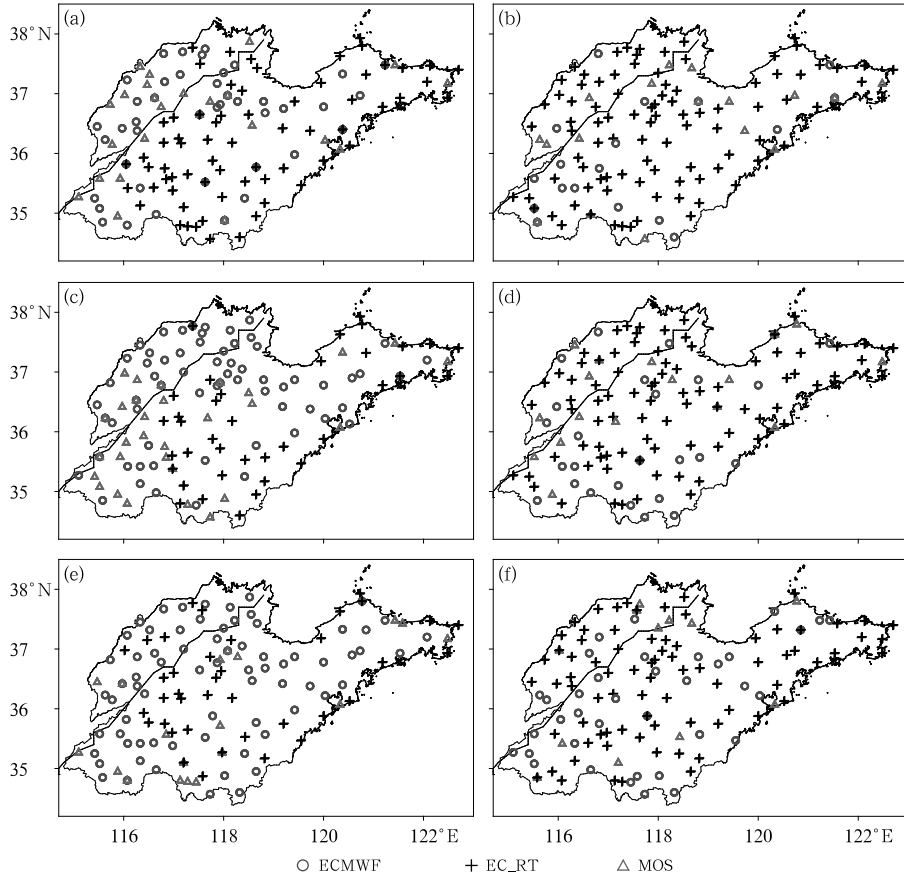


图 6 同图 5, 但为 2019 年

Fig. 6 Same as Fig. 5, but in 2019

和鲁南部分地区预报最好。

对日最低气温预报, ECMWF 细网格预报最优的站次数明显减少, 2018 年大部分地区日最低气温预报最优产品为 MOS 预报, 2019 年 24~48 h 日最低气温预报最优的产品主要为偏差订正, 鲁南少部分地区最优预报产品为 ECMWF 细网格, 72 h ECMWF 细网格产品预报最优的站数有所增加。这一结果表明, 不同年份 ECMWF 细网格模式自身的预报准确率也在变化, 2019 年 ECMWF 细网格在 72 h 的气温预报能力明显增强。

由此可见, 不同地区、不同年份适合的客观预报产品不同。鉴于不同预报产品各有优势, 为此设计提出了一种最优集成预报方案, 以期动态获取最优预报产品, 实现对多种客观预报产品的最优集成预报。

## 5 最优集成及效果检验

本文设计提出的最优集成预报方法主要是基于

不同的客观预报产品进行动态预报选优, 根据不同客观产品在近期的预报表现选择适合每个站当前气候背景的预报产品, 达到集成不同客观预报产品优势的目的。基于 ECMWF 细网格、MOS 预报、偏差订正三种客观预报产品日最高、最低气温预报, 逐日逐站滚动统计过去一段时间 (7~30 d) 预报准确率最优的产品, 选取预报最优产品进行最优集成预报。图 7 给出了 2018 年和 2019 年三种客观预报产品最优集成预报准确率评分, 可以发现, 对于 1~9 d 的日最高、最低气温预报, 无论 MOS 预报最高, 还是偏差订正最高, 经最优集成后, 最优集成的预报准确率均能达到最高。

为进一步分析最优集成的效果, 我们对三种客观预报产品及最优集成产品对山东省 298 个考核站日最高、最低气温预报准确率进行统计分析。由图 8 可以发现, ECMWF 细网格产品对 298 个考核站日最高、最低气温预报准确率明显低于国家站。2018 年, MOS 和偏差订正对 ECMWF 细网格产品预报订正能力较好, 预报准确率显著高于 ECMWF



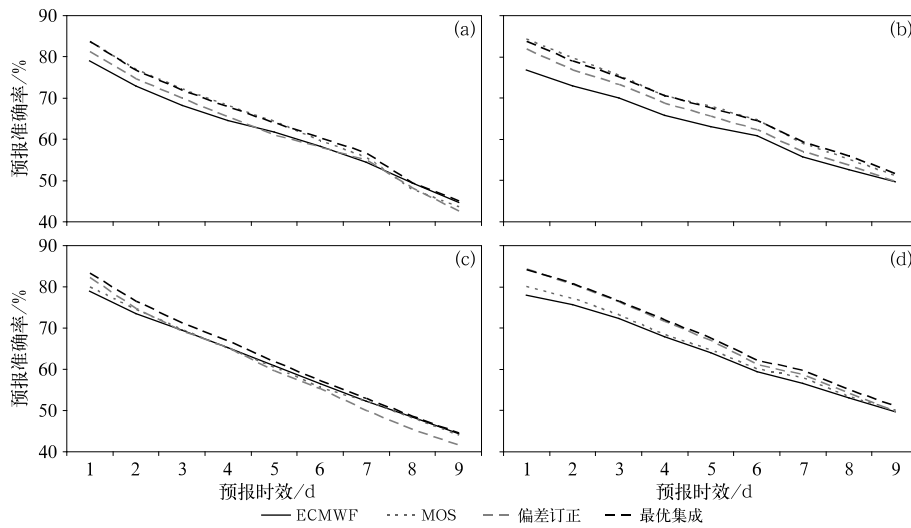


图 7 2018 年(a,b)和 2019 年(c,d)山东省 123 个国家气象观测站不同客观预报产品 1~9 d 日最高气温(a,c)、日最低气温(b,d)预报准确率

Fig. 7 Accuracy rate comparison of the 1—9 d daily maximum temperature (a, c) and minimum temperature (b, d) forecasts with different objective products at 123 national stations in Shandong in 2018 (a, b) and 2019 (c, d)

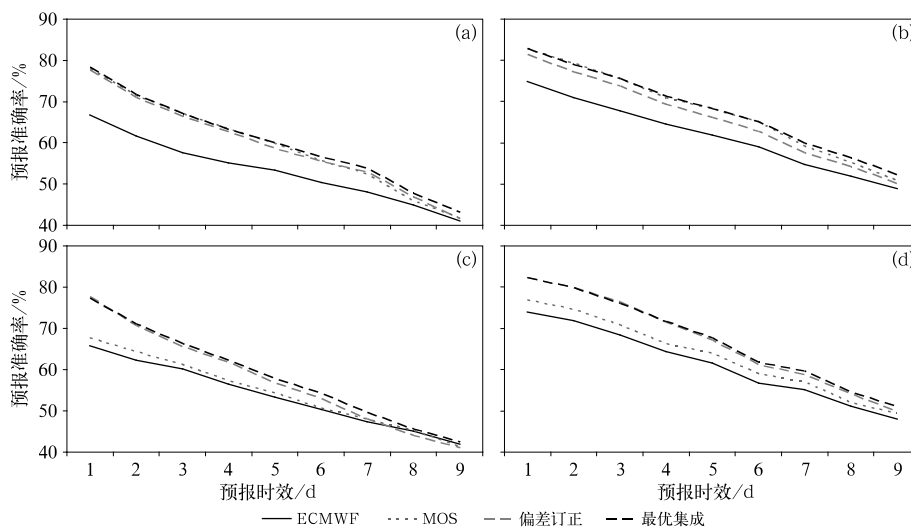


图 8 同图 7, 但为 298 个考核站

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 298 check stations

细网格产品。2019 年,偏差订正预报准确率显著高于 ECMWF 细网格和 MOS 预报,MOS 预报准确率略高于 ECMWF 细网格预报。经过最优集成后,1~9 d 的日最高、最低气温的最优集成预报准确率均达到最高,好于单个客观预报产品,表明该集成方法可以较好地综合不同客观预报产品的优势,达到最优集成的目的。

## 6 结 论

基于 ECMWF 细网格模式预报产品,采用气温预报偏差订正、准对称混合滑动训练期 MOS 预报和最优集成预报相结合的方法,建立了山东省气象局气温智能网格客观预报系统,通过对不同模式和

不同客观方法预报准确率对比分析,可以得出以下结论:

(1)ECMWF 细网格模式对山东省日最高、最低气温预报准确率较高,好于山东 WRF 中尺度模式预报,且 ECMWF 细网格气温预报存在一定的系统偏差,通过 10~30 d 的偏差滑动订正可以较好提高模式短期气温预报准确率。

(2)基于 ECMWF 细网格的日最高、最低气温偏差滑动订正在短期内订正效果较显著,对考核站和鲁中山区订正效果尤其明显,对最低气温订正效果好于最高气温。采用准对称混合滑动训练期 MOS 预报方法可以显著提高气温预报准确率,但不同的客观预报方法预报效果不尽相同。

(3)基于不同的客观预报产品在不同地区、不同季节预报准确率的差异,采用动态最优集成的方法进行最优集成预报,可以集成不同客观方法的预报优势,在多种客观预报产品的基础上再次提高预报准确率,达到最优集成的目的。

## 参考文献

- 车钦,赵声蓉,范广洲,2011. 华北地区极端温度 MOS 预报的季节划分[J]. 应用气象学报,22(4):429-436. Che Q, Zhao S R, Fan G Z, 2011. Seasonal partition problem of MOS forecast for extreme temperature in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 22(4):429-436(in Chinese).
- 郝翠,张迎新,王在文,等,2019. 最优集合预报订正方法在客观温度预报中的应用[J]. 气象,45(8):1085-1092. Hao C, Zhang Y X, Wang Z W, et al, 2019. Application of analog ensemble rectifying method in objective temperature prediction[J]. Meteor Mon, 45(8):1085-1092(in Chinese).
- 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).
- 李莉,朱跃建,2006. T213 降水预报订正系统的建立与研究[J]. 应用气象学报,17(s1):130-134. Li L, Zhu Y J, 2006. The establishment and research of T213 precipitation calibration system[J]. J Appl Meteor Sci, 17(s1):130-134(in Chinese).
- 林春泽,智协飞,韩艳,等,2009. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报[J]. 应用气象学报,20(6):706-712. Lin C Z, Zhi X F, Han Y, et al, 2009. Multi-model superensemble forecasts of the surface temperature using the TIGGE data[J]. J Appl Meteor Sci, 20(6):706-712(in Chinese).
- 刘还珠,赵声蓉,陆志善,等,2004. 国家气象中心气象要素的客观预报——MOS 系统[J]. 应用气象学报,15(2):181-191. Liu H Z, Zhao S R, Lu Z S, et al, 2004. Objective element forecasts at NMC—a MOS system[J]. J Appl Meteor Sci, 15(2):181-191(in Chinese).
- 罗菊英,周建山,闫永财,2014. 基于数值预报及上级指导产品的本地气温 MOS 预报方法[J]. 气象科技,42(3):443-450. Luo J Y, Zhou J S, Yan Y C, 2014. Local temperature MOS forecast method based on numerical forecast products and superior guidance[J]. Meteor Sci Technol, 42(3):443-450(in Chinese).
- 闵晶晶,孙景荣,刘还珠,等,2010. 一种改进的 BP 算法及在降水预报中的应用[J]. 应用气象学报,21(1):55-62. Min J J, Sun J R, Liu H Z, et al, 2010. An improved BP algorithm and its application to precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 21(1):55-62(in Chinese).
- 漆梁波,曹晓岗,夏立,等,2007. 上海区域要素客观预报方法效果检验[J]. 气象,33(9):9-18. Qi L B, Cao X G, Xia L, et al, 2007. Verification of weather elements objective forecast in Shanghai Regional Meteorological Center[J]. Meteor Mon, 33(9):9-18(in Chinese).
- 杞明辉,肖子牛,宴红明,2003. 一种改进的考虑环流特征的 MOS 预报方法[J]. 高原气象,22(4):405-409. Qi M H, Xiao Z N, Yan H M, 2003. An improved method MOS forecast based on circulation characteristics[J]. Plateau Meteor, 22(4):405-409(in Chinese).
- 邱学兴,王东勇,朱红芳,2013. 乡镇精细化最高最低气温预报方法研究[J]. 气象与环境学报,29(3):92-96. Qiu X X, Wang D Y, Zhu H F, 2013. A refined forecast method of township minimum and maximum air temperature[J]. J Meteor Environ, 29(3):92-96(in Chinese).
- 曲巧娜,盛春岩,范苏丹,等,2019. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象,45(7):908-919. Qu Q N, Sheng C Y, Fan S D, et al, 2019. Comparison of the multi model forecasts for severe precipitation based on the object verification[J]. Meteor Mon, 45(7):908-919(in Chinese).
- 曲巧娜,盛春岩,阎丽凤,2016. 山东省沿海冬春季海陆大风对比分析[J]. 气象科学,36(3):418-424. Qu Q N, Sheng C Y, Yan L F, 2016. Comparative analysis on land-sea gale over coastal areas of Shandong Province in winter and spring[J]. J Meteor Sci, 36(3):418-424(in Chinese).
- 荣艳敏,阎丽凤,盛春岩,等,2015. 山东精细化海区风的 MOS 预报方法研究[J]. 海洋预报,32(3):59-67. Rong Y M, Yan L F, Sheng C Y, et al, 2015. A study on MOS forecasting method of gale wind in Shandong coast[J]. Mar Forecasts, 32(3):59-67(in Chinese).
- 盛春岩,范苏丹,刘诗军,等,2016. 山东 WRF 集合预报系统对“麦德姆”台风预报检验[J]. 山东气象,36(1):1-7. Sheng C Y, Fan S D, Liu S J, et al, 2016. Forecast verification of Typhoon Maide-mu by Shandong WRF ensemble system[J]. Shandong Meteor, 36(1):1-7(in Chinese).
- 王婧,徐枝芳,范广洲,等,2015. GRAPES\_RAFS 系统 2 m 温度偏差订正方法研究[J]. 气象,41(6):719-726. Wang J, Xu Z F, Fan G Z, et al, 2015. Study on bias correction for the 2 m temperature forecast of GRAPES\_RAFS[J]. Meteor Mon, 41(6):719-726

- (in Chinese).
- 吴君,裴洪芹,石莹,等,2007. 基于数值预报产品的地面气温 BP-MOS 预报方法[J]. 气象科学,27(4):430-435. Wu J, Pei H Q, Shi Y, et al, 2007. The forecasting of surface air temperature using BP-MOS method based on the numerical forecasting results[J]. *Sci Meteor Sin*, 27(4):430-435(in Chinese).
- 吴启树,韩美,郭弘,等,2016. MOS 温度预报中最优训练期方案[J]. 应用气象学报,27(4):426-434. Wu Q S, Han M, Guo H, et al, 2016. The optimal training period scheme of MOS temperature forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 27(4):426-434(in Chinese).
- 吴振玲,潘璇,董昊,等,2014. 天津市多模式气温集成预报方法[J]. 应用气象学报,25(3):293-301. Wu Z L, Pan X, Dong H, et al, 2014. Forecast method of multi-model air temperature consensus in Tianjin[J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(3):293-301(in Chinese).
- 薛谌彬,陈娴,张瑛,等,2019. ECMWF 高分辨率模式 2m 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).
- 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,叶燕华,2003. 利用最近资料改进 MOS 预报的方法[J]. 高原气象,22(2):127-131. Zhang H, Ye Y H, 2003. A new way for improving MOS forecast with the latest real observational data [J]. *Plateau Meteor*, 22(2):127-131(in Chinese).
- 赵翠光,赵声蓉,2011. 华北及周边地区夏季分区客观降水预报[J]. 应用气象学报,22(5):558-566. Zhao C G, Zhao S R, 2011. The regional objective precipitation forecast in North China and adjacent areas in summer[J]. *J Appl Meteor Sci*, 22(5):558-566(in Chinese).
- 赵声蓉,2006. 多模式温度集成预报[J]. 应用气象学报,17(1):52-58. Zhao S R, 2006. Multi-model consensus forecast for temperature[J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(1):52-58(in Chinese).
- 赵声蓉,裴海瑛,2007. 客观定量预报中降水的预处理[J]. 应用气象学报,18(1):21-28. Zhao S R, Pei H Y, 2007. Preprocessing precipitation in objective quantitative forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 18(1):21-28(in Chinese).
- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012. 我国精细化客观气象要素预报进展[J]. 气象科技进展,2(5):12-21. Zhao S R, Zhao C G, Zhao R X, et al, 2012. The development of objective meteorological element forecast in China[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 2(5):12-21(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,林春泽,白永清,等,2009. 北半球中纬度地区地面气温的超级集合预报[J]. 气象科学,29(5):569-574. Zhi X F, Lin C Z, Bai Y Q, et al, 2009. Superensemble forecasts of the surface temperature in Northern Hemisphere middle latitudes[J]. *Sci Meteor Sin*, 29(5):569-574(in Chinese).
- 智协飞,赵欢,朱寿鹏,等,2016. 基于 CMIP5 多模式回报资料的地面气温超级集合研究[J]. 大气科学学报,39(1):64-71. Zhi X F, Zhao H, Zhu S P, et al, 2016. Superensemble hindcast of surface air temperature using CMIP5 multimodel data[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(1):64-71(in Chinese).