

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).

2016—2018 年全国智能网格降水及 温度预报检验评估^{*}

韦 青 代 刊 林 建 赵瑞霞

国家气象中心,北京 100081

提 要: 为综合评估智能网格预报业务的产品质量,基于站点观测和格点实况分析资料,开展了对 2016—2018 年国家级网格指导预报、省市级订正反馈网格预报的降水和温度要素的检验,并与 GRAPES 和 ECMWF 模式输出进行对比。分析结果表明:智能网格预报业务整体上实现了从数值模式系统、国家级指导产品到省市级订正反馈产品的逐级增加价值的业务链条;国家级指导产品的降水、温度在数值模式的基础上都有明显提升,相比于 ECMWF 模式,小雨 ETS 评分提升 9%~37%,暴雨 ETS 评分提升最大达 41%,日最高温的预报误差降幅可达 16%;省市级订正反馈产品的日最高/低温在国家级指导产品基础上进一步降低误差,能给出最优预报结果;国家级指导产品需进一步改进,重点要控制对于强降水预报的空报率,改善午后降水峰值预报显著提前的偏差,提高对空间精细化降水特征的表现能力,改进对于最低温的预报统计模型;省市级订正反馈产品在降水预报、整点温度预报方面未能对国家级指导预报进行很好订正,需要进一步加强;智能网格预报产品已能替代城镇天气预报,有利于流程的集约高效。

关键词: 网格预报,检验评估,数值模式,降水预报,温度预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.10.002

Evaluation on the 2016—2018 Fine Gridded Precipitation and Temperature Forecasting

WEI Qing DAI Kan LIN Jian ZHAO Ruixia

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: To comprehensively evaluate the fine gridded forecasts, based on site observation and grid-point analysis data, the verification of precipitation and temperature forecasts of the 2016—2018 national gridded guidance forecast, provincial and municipal revised feedback gridded forecasts were carried out, and compared with the GRAPES and ECMWF model outputs. The results show that the fine gridded forecast operation can realize the chain of increasing value step by step from numerical model system, national guidance forecast to provincial and municipal revised feedback product. The national guidance precipitation, daily high and low temperature forecasts have a significant improvement on the basis of the model forecast products. Compared to ECMWF model, light rain ETS score of the precipitation is increased by 9%—37%, the maximum increase of rain storm ETS score reaches 41% and the maximum decrease of daily high temperature RMSE reaches 16%. The daily high/low temperature of the provincial and municipal revised feedback products can further have the reduced error on the basis of the national guidance forecast, and the

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507205)、中国气象局预报关键项目[YBGJXM(2019)05-1]和国家气象中心预报员专项(Y201927)共同资助
2019 年 5 月 5 日收稿; 2020 年 8 月 29 日收修定稿

第一作者:韦青,主要从事业务产品质量检验和检验方法研究. E-mail: weiqing@cma.gov.cn

通讯作者:代刊,主要从事集合预报和定量降水预报研究. E-mail: daikan1998@163.com

optimal forecast results can be obtained. However, the national guidance products need to be further improved, with emphasis on controlling the false alarm rate of the heavy rain forecast, improving the significant advance deviation of the afternoon precipitation peak, improving the ability to characterize spatially refined precipitation, and improving the forecast statistical model for the lowest temperature. Besides, as the provincial and municipal revised feedback products have failed to correct the national guidance forecast well in the aspects of precipitation and hour temperature forecast, they need to be further strengthened. The fine gridded forecast products can replace the urban weather forecast, which is beneficial to the intensive and efficient forecasting process.

Key words: gridded forecast, verification and evaluation, numerical model, precipitation forecast, temperature forecast

引 言

发展智能网格天气预报业务,既是为适应社会大众和经济发展的需求,也是天气预报科学技术发展的必然趋势。当前,智能手机、户外显示屏、门户网站等成为公众途径获取气象信息的主要途径,需要定时定点的天气预报数据;农业、渔业、能源、交通、运输、建筑等行业的生产调度对天气预报的预报时效和要素种类提出了更多需求;山洪地质灾害、城市内涝、森林火险等气象灾害的防御对天气预报的及时性和准确率提出更高的要求。传统的固定城市乡镇单点预报或文字定性描述的落区预报已无法满足(赵声蓉,2015),需要发展无缝隙、全覆盖、精细化的网格天气预报产品。同时,数值天气模式快速发展,形成从全球到对流尺度、短时到中短期的完整体系,提供了多尺度、多种类的气象要素输出场,结合高时空分辨率的多源资料实况分析场,为构建智能网格天气预报业务提供了前提和基础(金荣花等,2019)。

21 世纪以来,多个发达国家的天气业务中心都开展了智能网格天气预报业务。美国国家气象局(NWS)最早从 2003 年开始研发国家数字预报数据库(National Digital Forecast Database, NDFD),建立以国家业务中心产品为指导,各地区业务部门在此基础上进行交互制作的数字化预报新流程(Glahn and Ruth, 2003)。NDFD 从 2006 年 8 月开始投入业务运行(Glahn et al, 2009),到目前提供逐 1 h 更新 2.5 km $\times$ 5 km 分辨率从 0 时刻到 45 d 的 84 种气象要素或天气的网格预报产品(https://www.weather.gov/mdl/ndfd_info)。此外,如奥地

利气象局研制了无缝隙概率预报系统(SAPHIR)提供空间分辨率达 1 km、逐 10 min 更新的 0~3 d 的概率预报产品(Kann et al, 2018);德国基于多模式统计后处理优化集成技术,提供逐 10 min 更新、2.5 km 分辨率的网格预报产品,预报时效最长达 30 d;澳大利亚采用多模式集成业务预报技术(Gridded Operational Consensus Forecast, GOCF)提供 5 km 分辨率的网格预报产品(Engel and Ebert, 2012)。

中国气象局智能网格预报业务从 2014 年开始,启动与城镇要素预报相协调的全国 10 km 格点指导预报产品研发;2016 年将空间分辨率提升到 5 km,并开始构建国家级下发指导产品,省市级业务单位进一步订正,最后上传拼接形成全国“一张网”的智能网格预报业务链条。2018 年智能网格预报进入单轨运行,城镇单点预报逐步停止;2019 年短时滚动、延伸期网格预报进入业务试运行,初步建立无缝隙网格天气预报产品体系(金荣花等, 2019)。智能网格预报业务的技术体系采取“分时施策、多源集成”的途径,即不同预报时效采用不同类型的模式数据和后处理方法,多种后处理方法同时发展并通过优选或权重进行集成。在国家级业务单位,对温度、风等常规要素,主要基于 T639 模式(至 2019 年转为以 GRAPES 模式为基础)采用格点化 MOS 方法(Glahn et al, 2009;赵声蓉等, 2012;赵声蓉, 2015)或区域建模技术(赵翠光和赵声蓉, 2011);对于降水格点预报,发展和采用了多模式降水相似分析集成方法(陈力强等, 2005;林建等, 2013),频率拟合订正算法(Zhu and Luo, 2015),集合最优百分位方法(代刊等, 2018),并研制主客观融合平台(唐健等, 2018),形成国家级的格点化定量降水预报业务

(代刊等,2016;曹勇等,2016)。在省市级业务单位,基于本地业务基础和天气特点,发展了多种后处理方法,如福建发展了最优 TS 评分订正算法(吴启树等,2017);陕西研发了动态交叉最优要素预报(Dynamic Cross Optimal Element Forecast,DCOEF)方法(王建鹏等,2018);黑龙江采用多模式集成客观预报方法(王承伟等,2018);上海市使用“递减平均”“择优选取”“要素分类”等技术(王海宾等,2016)。

智能网格预报产品的检验评估是保障智能网格预报技术发展和业务价值链形成的基础性工作。已有研究对网格预报产品开展综合检验评估,如:Huntemann et al(2015)以站点实况和格点实况分析为参照,对美国 NWS 的降水 BS 评分,温度、露点温度和风速等的平均误差(ME)和平均绝对误差(MAE)进行分析;Engel and Ebert(2012)对澳大利亚的 GOCF 温度网格预报进行了检验,并与 ECMWF、UK 等模式进行对比评估。国家气象中心建立了“国家级天气预报检验分析系统”(韦青等,2019),实现对各级网格预报产品的常规检验评估。到目前为止,还尚未对我国网格预报产品进行较为全面的检验评估。本文重点针对 2016—2018 年的中短期降水、温度网格要素,以站点实况和格点实况分析作为参照进行检验,并与 GRAPES 和 ECMWF 业务模式进行对比评估,以便分析我国网格预报产品质量以及在数值模式基础上的准确提升率。

1 检验数据及方法

本文检验 2016—2018 年智能网格预报数据。该数据分为国家级指导(简称 SCMOC)和省市级订正反馈(简称 SPCC)两种,其中 SCMOC 由国家气象中心制作下发,SPCC 为省市级业务单位在 SCMOC 基础上修改订正后上传拼接得到。SCMOC 和 SPCC 的空间分辨率为 5 km,范围为 0°~60°N、70°~140°E。需要说明,SPCC 的 3~7 d 降水、日最高/低温预报产品从 2017 年开始。作为对比的数值模式数据包括 GRAPES 全球数值模式(以下简称 GRAPES)(沈学顺等,2017)和 ECMWF 全球高分辨率数值模式(以下简称 EC)(Uppala et al,2005),空间分辨率分别为 0.5°(基于 0.25°跳点)和 0.125°。

由于 GRAPES 模式 2018 年 8 月之后才输出时段最高/低温,因此文中日最高/低温预报只与 ECMWF 模式对比。

作为实际真值的参照数据包括站点数据和格点实况分析数据两种。站点数据采用业务检验标准规定的 2401 个国家级观测站和 8060 个区域观测站,组成“国家站”(简称 2401 站)和“国家站+区域站”(简称 10461 站)。如图 1,与 2401 站相比,10461 站东部地区有更密集站点分布;观测站点的平均间距为 10~60 km,且大部分集中在 20~40 km;西部地区两者都显著偏少,表现了观测站分布的不均衡性。尽管站点观测更接近真值,但考虑到不均衡性,引入格点实况分析数据作对照,包括国家气象信息中心发布的 CMPA 三源融合降水(Shen et al,2014)和 CLDAS 陆面同化温度实况分析产品(韩帅等,2018)。由于格点实况分析业务从 2017 年开始,因此 2016 年不参与对照评估。

采用气象局发布的智能网格业务标准检验方法。以站点观测为真值,使用“邻近点替代”方案,即选择距离观测站点最近的格点预报作为该点预报值(有多个距离相等的格点,则优先选取东北方向格点)。以格点实况为真值,则采用双线性插值方法统一转换为 5 km 分辨率。降水检验采用累加降水 ETS (equitable threat score) 评分和 Bias (bias score) 评分:

$$ETS = \frac{N_A - R}{N_A + N_B + N_C - R}$$

$$Bias = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C}$$

其中:

$$R = \frac{(N_A + N_B)(N_A + N_C)}{(N_A + N_B + N_C + N_D)}$$

式中: N_A 为有降水预报正确站(次)数, N_B 为空报站(次)数, N_C 为漏报站(次)数, N_D 为无降水预报正确的站(次)数。温度检验采用均方根误差(RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{n}}$$

式中: F_i 为第 i 个格(站)点预报值, O_i 为第 i 个格(站)点实况值, n 为格(站)点总数。

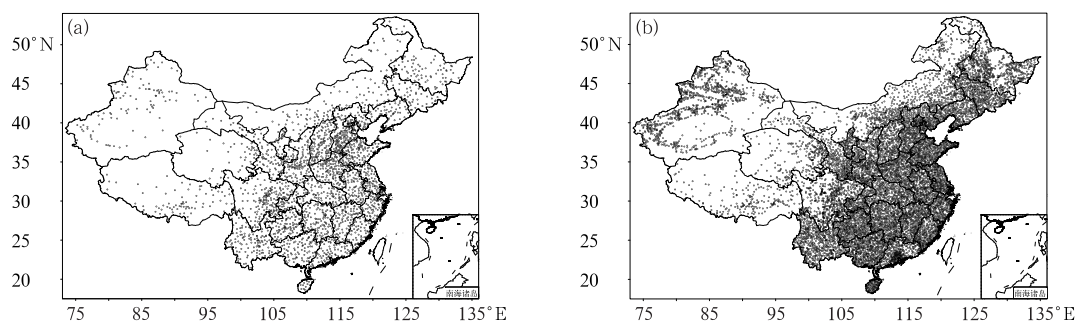


图 1 检验站点分布

(a)2401 站,(b)10461 站

Fig. 1 Distribution of the stations for forecast verification

(a) 2401 stations, (b) 10461 stations

2 检验结果分析

2.1 网格降水的空间分布及日变化特征对比检验

对比分析 2017—2018 年每日 08 时起报的 SC-MOC 降水 24 h 时效产品的年累积空间分布(图 2),总体上,SCMOC 降水预报与格点实况分析和站点观测分布较为一致。2017 年,1500 mm 以上降水主要分布在云南南部、重庆、湖北西部、湖南、江西以及华南等地,其中广西北部及南部沿海、海南东南部、云南南部强降水中心的预报与实况有较好的对应;需要注意,SCMOC 降水在藏南地区预报很强的降水,但由于该区基本无观测,因此在站点观测和实况分析中都没有体现;除藏南地区,站点观测最大值出现在广西防城港,降水量为 3713 mm,而格点预报最大值为 3116 mm,略低于实况,且预报位置(25.45°N 、 109.95°E)与实况接近。到 2018 年,1500 mm 以上降水主要出现在云南西南部、四川盆地西侧、广西北部 and 南部沿海、广东西部和南部沿海及福建、浙江的部分地区,SCMOC 降水预报的大值区范围覆盖了西南地区东部至长江以南大部分区域,预报范围和降水量都明显偏大。

对比 2017—2018 年每日 08 时起报,2401 站的 24 h 时效的逐 3 h 日变化特征(图 3),可见实况降水的日变化存在双峰特征,一个在清晨,一个在午后。02—11 时预报峰值出现在 05 时左右,预报和实况的趋势较为一致;午后峰值预报出现在 14 时,较实况偏早约 3 h。总体上,SCMOC 逐 3 h 降水量高于实况观测,尤其午后降水峰值存在明显高估;与 2017 年比较,2018 年 SCMOC 降水量偏强更显著;

2017 年 SCMOC 预报与实况更为接近,这与图 2 中空间分布表现一致。出现上述偏差的可能原因:02—11 时一般为稳定性降水,可预报性较高,误差相对较小;中午到傍晚易出现对流性短时强降水,SCMOC 为了捕捉强降水,常会提高空报率而导致预报量级偏大;此外,对午后降水预报峰值的偏差,主要来自与数值模式系统本身(图略),由于业务中主要以全球模式预报的日变化为基础对日降水总量预报进行拆分(曹勇等,2016),对于日变化峰值预报偏差没有很好订正。

2.2 基于站点实况的网格降水检验

2.2.1 基于 10461 站实况检验

图 4 给出 2016—2018 年基于 10461 站实况降水的检验结果。小雨量级(日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$)的 1~7 d 日降水量预报 ETS 评分结果(图 4a)表明:相对 2016 年,2017、2018 年数值模式预报在中期时效评分明显提高;GRAPES 和 EC 模式对比,除 2016 年 24 和 48 h 时效 GRAPES 评分较高外,EC 优势更明显;SCMOC 降水较 EC 模式的 ETS 评分提升 9%~37%;相对与国家级 SCMOC,省级订正反馈的 SPCC 没有表现出优势,尤其在 3~7 d 的中期时效,显著低于 SCMOC。

暴雨量级(日降水量 $\geq 50\text{ mm}$)日降水量的 ETS 评分(图 4b),随预报时效延长呈快速下降的趋势。相比 GRAPES 模式,EC 模式对暴雨预报的评分优势明显。大部分时效 SCMOC 在模式基础上显著改进,评分最高提升率达 41%;除 2016 年 24 和 48 h 时效及 2018 年 24 h 时效外,SPCC 预报评分低于 SCMOC 预报,说明省级订正反馈没有改进预报质量。

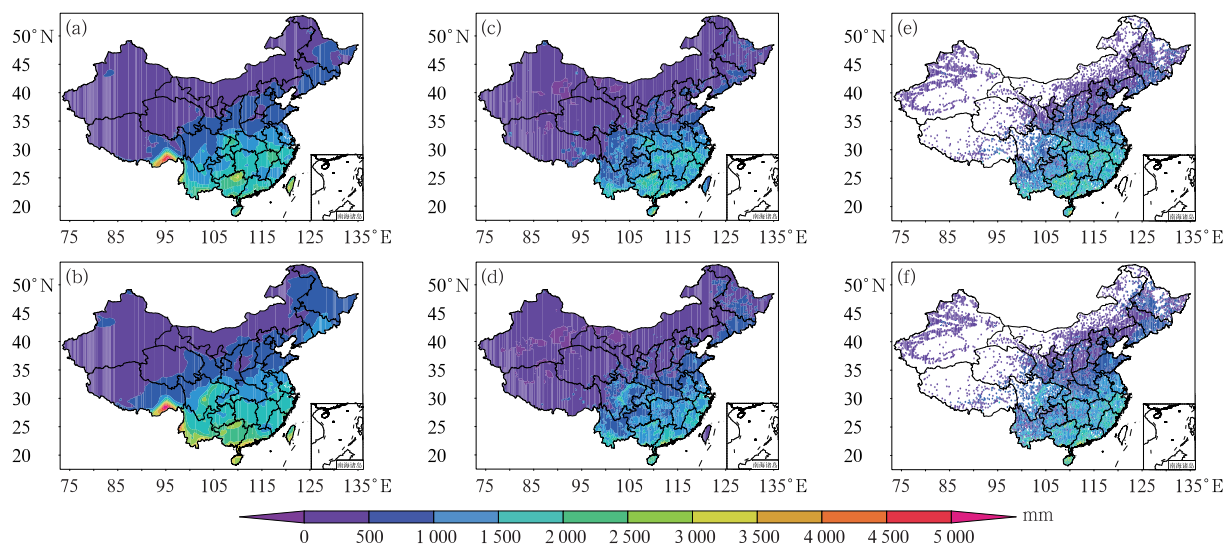


图 2 2017 年(a,c,e)和 2018 年(b,d,f)每日 08 时 24 h 时效降水的国家级指导预报(a,b)及格点实况(c,d)、站点实况(e,f)的年累积空间分布

Fig. 2 The annual cumulative spatial distribution pattern of daily 24 h fine national guidance precipitation forecast (a, b) and gridded observation (c, d) and station observation (e, f) at 08:00 BT of 2017 (a, c, e) and 2018 (b, d, f)

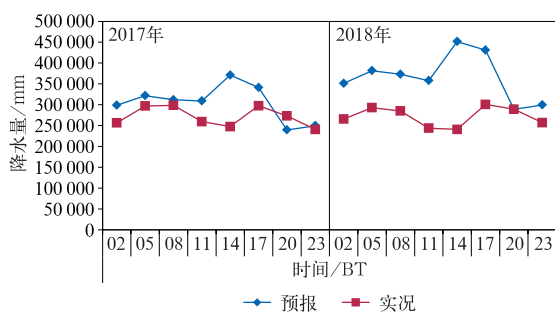


图 3 2017 年和 2018 年每日 08 时 24 h 时效逐 3 h 2401 站累积降水国家级指导预报和实况对比

Fig. 3 Comparison of 3 h precipitation national guidance forecast with 24 h lead time and observation of the precipitation sum of 2401 stations in 2017 and 2018

对于中雨(日降水量 ≥ 10 mm),2016—2018 年大部分时效 EC 模式 ETS 评分比 SCMOC 预报高,尤其是 2018 年所有时效均是 EC 模式较高;大雨(日降水量 ≥ 25 mm)的 SCMOC 预报评分略高于 EC 和 GRAPES 模式(图略)。

进一步分析降水预报的系统偏差,如图 4c 所示,EC 和 GRAPES 模式都呈现小于量级预报偏湿($Bias > 1$),大雨量级以上预报偏干($Bias < 1$)的系统偏差;SCMOC 和 SPCC 都对不同等级的降水偏

差进行了有效的订正,更趋近于 1;需注意的是,2017—2018 年省级反馈的 SPCC 对于特大暴雨量级(日降水量 ≥ 250 mm)预报较实况明显偏多。

为更好地说明 SCMOC 较 EC 和 GRAPES 模式的改进,图 5 给出了 2018 年 7 月 10 日降水预报与实况的对比。从 GRAPES 和 EC 模式的评分对比(表 1)可以看出,两家模式暴雨及以下等级的降水 TS 评分相近,但对大暴雨(日降水量 ≥ 100 mm)以上的降水 GRAPES 模式的空漏报率过高,TS 评分明显低于 EC 模式。与站点实况(图 5d)相比,GRAPES 模式对大量级降水预报范围和量值偏差较大,如对四川北部大暴雨带的预报强度和范围明显偏小,而对陕西北部大暴雨的预报范围则明显偏大(图 5c)。SCMOC 和 EC 模式与站点实况总体分布基本一致,四川北部、甘肃东南部至陕西北部的西南—东北向的雨带位置、范围及量级与实况相似。此外,SCMOC 较 GRAPES 和 EC 模式对小雨预报的消空效果明显,使得 TS 评分从 0.525、0.524 增大至 0.634(表 1)。对暴雨等级,SCMOC 较 GRAPES 和 EC 模式,对四川北部、甘肃东部到陕西北部雨带强度和范围改进明显,减少了空报和漏报率,TS 评分从 0.344、0.300 增大至 0.526;不足之处在于,SCMOC 对大暴雨预报的范围偏大($Bias > 2$),空报率较高,评分高于 GRAPES 模式但不如 EC(表 1)。

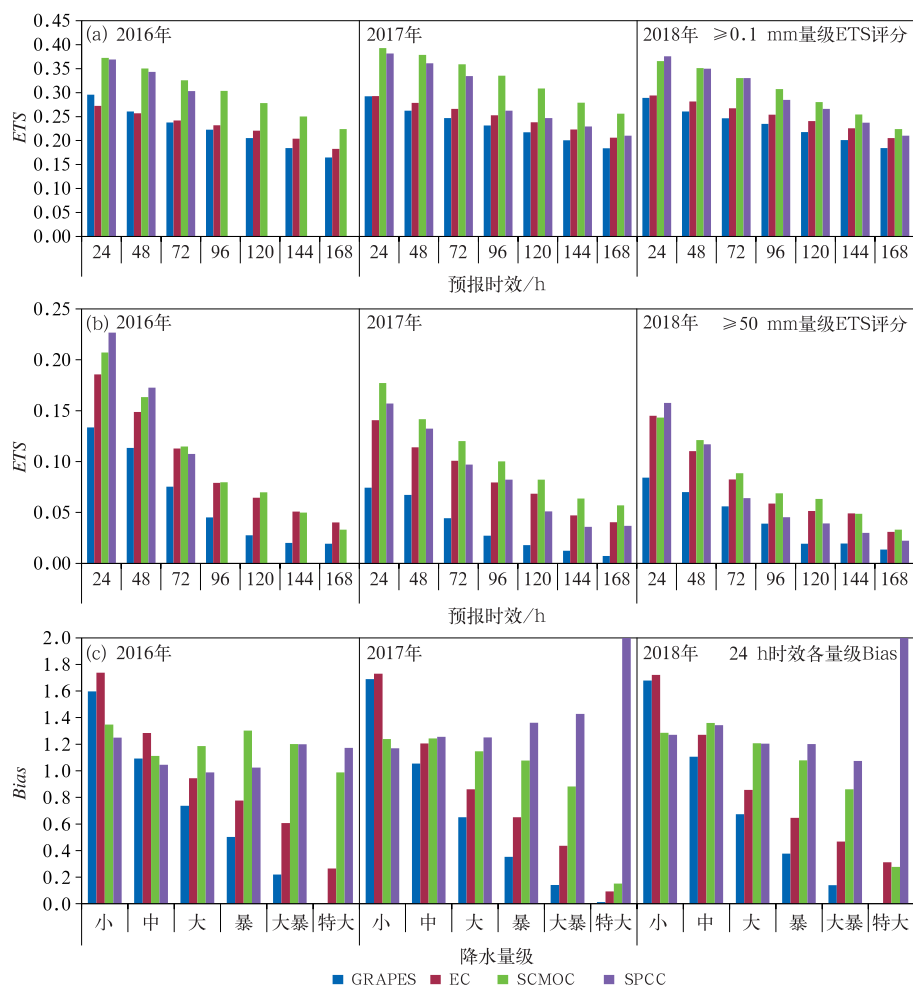


图 4 2016—2018 年基于 10461 站降水实况的降水国家级指导预报检验结果

(a) 1~7 天 ≥ 0.1 mm 量级 ETS 评分, (b) 1~7 天 ≥ 50 mm 量级 ETS 评分,
(c) 24 h 时效各降水量级的 Bias

Fig. 4 The verification result of precipitation national guidance forecast at 10461 stations from 2016 to 2018

(a) ETS score of ≥ 0.1 mm in 1-7 d, (b) ETS score of ≥ 50 mm in 1-7 d,
(c) Bias of all precipitation categories on 1st day

2.2.2 基于 10461 站和 2401 站实况检验对比

为分析不同分辨率条件下网格预报的误差特征,对比以 10461 站和 2401 站观测数据为真值的检验评估结果。如图 6 所示,采用 10461 站和 2401 站计算得到的 SCMOC 降水预报,都表现出随时效延长和量级增大而减小的趋势(图 6a~6c);暴雨及以下等级的降水,10461 站算得的 ETS 评分低于 2401 站,这主要是由于分辨率的提高,引入了可预报性较低的精细结构,加上传统评分带来的“双惩罚”影响,而使得评分降低;大暴雨以上等级的 10461 站算得的 ETS 评分略高,表明 SCMOC 对极端强降水具有较好的预报能力。从 Bias 评分对比(图 6d~6f)也可以看

出 SCMOC 在不同分辨率条件下,体现了相似的预报偏差;对于大暴雨等级以上的降水,24 h 时效 10461 站算得的 Bias 评分更接近于 1,表明 SCMOC 对极端强降水的预报具有更高的分辨率;72 h 以上的时效,10461 站算得的 Bias 评分稍低,但 ETS 评分更高,这反映 SCMOC 在高分辨率条件下对极端强降水的捕捉能力较强。

2.3 基于格点实况的网格降水检验

考虑到观测站点分布的不均衡性,采用格点实况分析作为真值以验证检验结果。总体上,基于格点实况的检验结果(图 7)与基于站点实况的结果类

似(图 4)。如图 7a,7d 所示,SCMOC 的小雨等级较 GRAPES 和 EC 模式提升更明显,幅度最高达 88%;国家级的 SCMOC 仍普遍好于省市级订正的 SPCC;由于格点实况反映了更多高分辨率精细化特征,数值模式的 ETS 评分较站点检验结果偏低;2018 年的模式和网格预报较 2017 年有显著提升。如图 7b,7e 所示,暴雨的 ETS 评分也与基于站点实况的结果

(图 4b)基本一致;2017 年 SCMOC 在不同时效上都表现最好,但到 2018 年,其 1~3 d 预报不如 EC 模式,初步分析这与 2018 年分散性对流降水偏低的有关。Bias 检验结果(图 7c,7f)表明,数值模式小雨预报偏湿的状况,在 SCMOC 和 SPCC 预报中都得到有效控制;但对于暴雨预报,SCMOC 和 SPCC 预报都表现出更高的空报率,尤其是 SPCC 预报,这体现

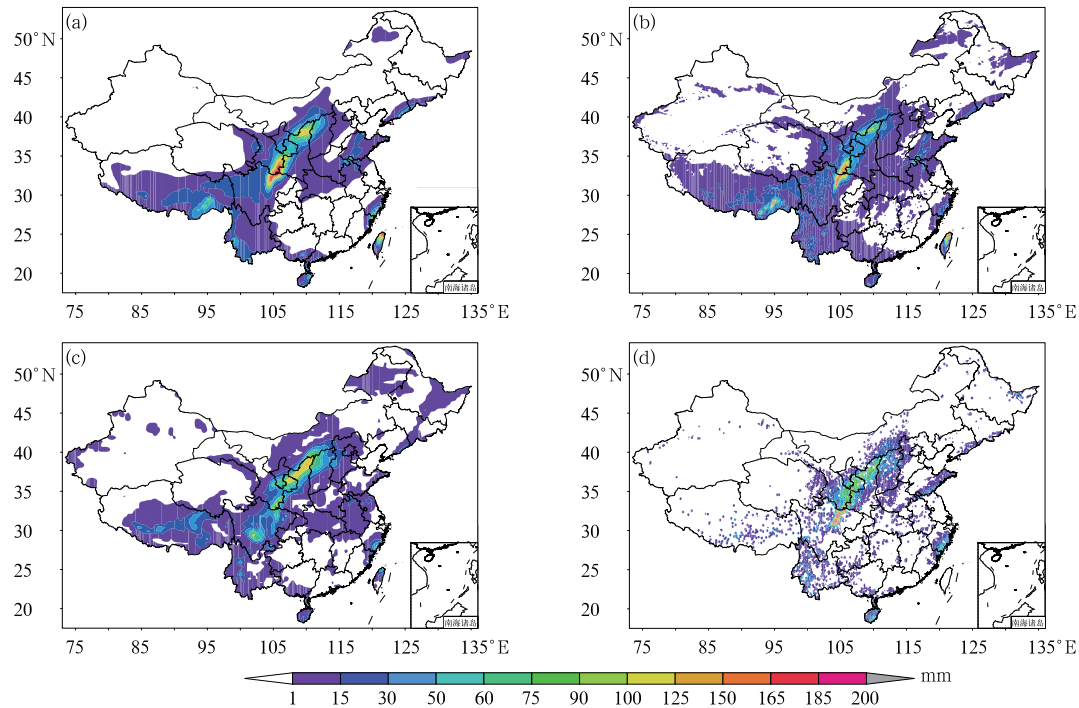


图 5 2018 年 7 月 10 日 08 时 24 h 时效降水国家级指导预报(a)、EC 模式预报(b)和 GRAPES 模式预报(c)及实况(d)对比

Fig. 5 The 24 h precipitation forecast of national guidance forecast (a), EC model (b), GRAPES model (c) forecasts, and observation (d) at 08:00 BT 10 July 2018

表 1 2018 年 7 月 10 日 08 时 24 h 时效模式和国家级指导预报的 TS 评分、空报率、漏报率和 Bias 对比

Table 1 TS score, false alarm rate, missing ratio and Bias of 24 h precipitation national guidance forecasts at 08:00 BT 10 July 2018

		≥0.1 mm	≥10 mm	≥25 mm	≥50 mm	≥100 mm
TS 评分	指导预报	0.634	0.460	0.444	0.526	0.2
	EC 模式	0.524	0.448	0.378	0.300	0.289
	GRAPES 模式	0.525	0.452	0.395	0.344	0.025
空报率/%	指导预报	29.75	45.60	42.49	33.44	75.79
	EC 模式	46.48	44.61	39.96	28.97	60.0
	GRAPES 模式	45.53	42.00	46.98	49.01	95.0
漏报率/%	指导预报	13.26	25.22	34.02	28.57	46.51
	EC 模式	3.85	29.95	49.56	65.78	48.84
	GRAPES 模式	6.45	32.88	39.18	48.51	95.35
Bias	指导预报	1.235	1.375	1.147	1.073	2.209
	EC 模式	1.797	1.265	0.840	0.482	1.279
	GRAPES 模式	1.717	1.157	1.147	1.010	0.930

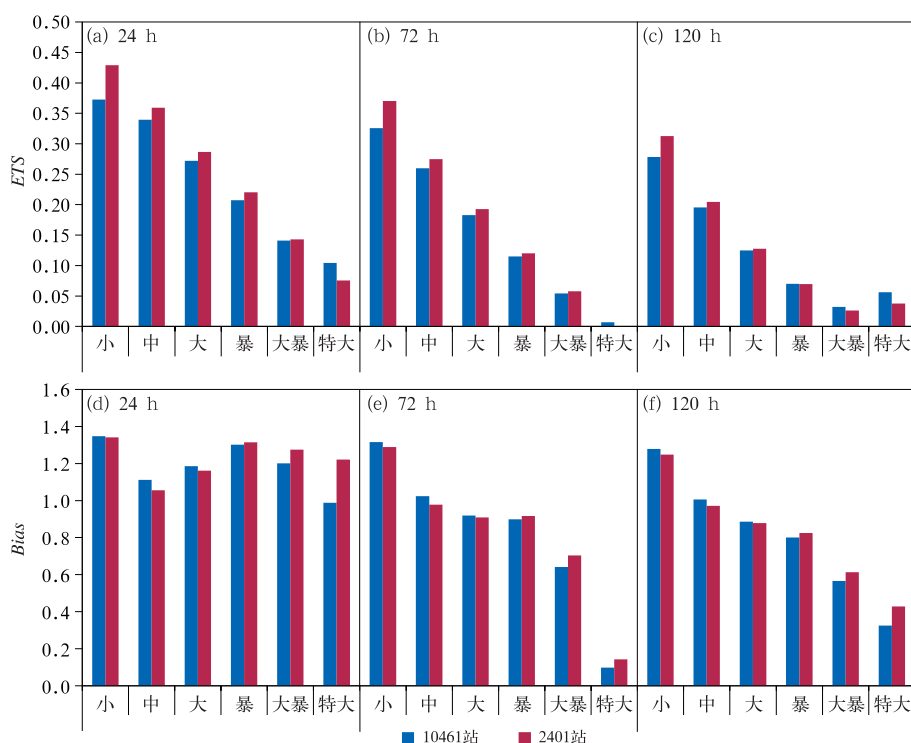


图 6 2016 年基于 10461 和 2401 站实况的降水国家级指导预报检验结果对比
(a, b, c) ETS 评分, (d, e, f) Bias 评分

Fig. 6 Comparison of precipitation national guidance forecast verification
at 10461 and 2401 stations in 2016
(a, b, c) ETS score, (d, e, f) Bias

了国家级和省市级网格产品都倾向于适当增加空报来捕捉强降水的行为。

2.4 网格温度的空间分布及日变化特征对比检验

以 2018 年的最高温预报为例,对比每日 08 时起报的 24 h 时效 SCMOC 预报与格点、站点实况的年平均空间分布(图 8)。总体上,SCMOC 预报与格点实况、站点实况的空间分布基本一致;进一步分析发现,SCMOC 预报存在最高温明显偏低(图 8)、最低温偏高(图略)的现象,如在华南地区,站点实况大于 25℃ 的范围大于 SCMOC 预报;在塔里木盆地边缘,站点实况温度在 20~25℃,而 SCMOC 较少超过 20℃。同时,也注意到与站点实况相比,格点实况分析场也存在类似的偏差,因此后文中最高/低温检验主要以站点实况为参照。

对比分析逐 3 h 整点温度预报的 RMSE 日变化特征(图 9)。由图可见,数值模式和网格预报的 RMSE 都存在双峰结构的日变化特征,即在 14—17 时、02—05 时出现误差峰值。上述时段大致对应一

天中最高、最低温的出现时间,温度起伏较大,导致预报误差增加。从 2016—2018 年的误差变化看,SCMOC 的 RMSE 在逐年降低,至 2018 年超越 EC 模式;SPCC 的 RMSE 也在逐年降低,至 2018 年与 EC 模式接近,但仍不如 SCMOC 的预报质量;GRAPES 模式的逐 3 h 温度预报误差较大。形成上述误差逐年变化的原因是:2016 年 SCMOC 的逐 3 h 温度预报以 T639 数值模式直接输出为基础,仅对高低温进行约束,至 2017 年构建了逐 3 h 温度预报统计模式,这使得 SCMOC 温度预报质量得到快速改善;各省市也在逐步研发本地的网格预报产品,使得 2018 年预报误差较 2017 年有大幅度下降。

2.5 基于站点实况的网格日最高/低温检验

以 10461 站实况作为真值,检验 EC 模式、国家级网格预报 SCMOC 和省市级订正 SPCC 的日最高/低温 RMSE(图 10)。由图可见,EC 模式日最高温 RMSE 明显高于日最低温,且日最高/低温的逐年误差变化不明显;SCMOC 日最高温网格预报在

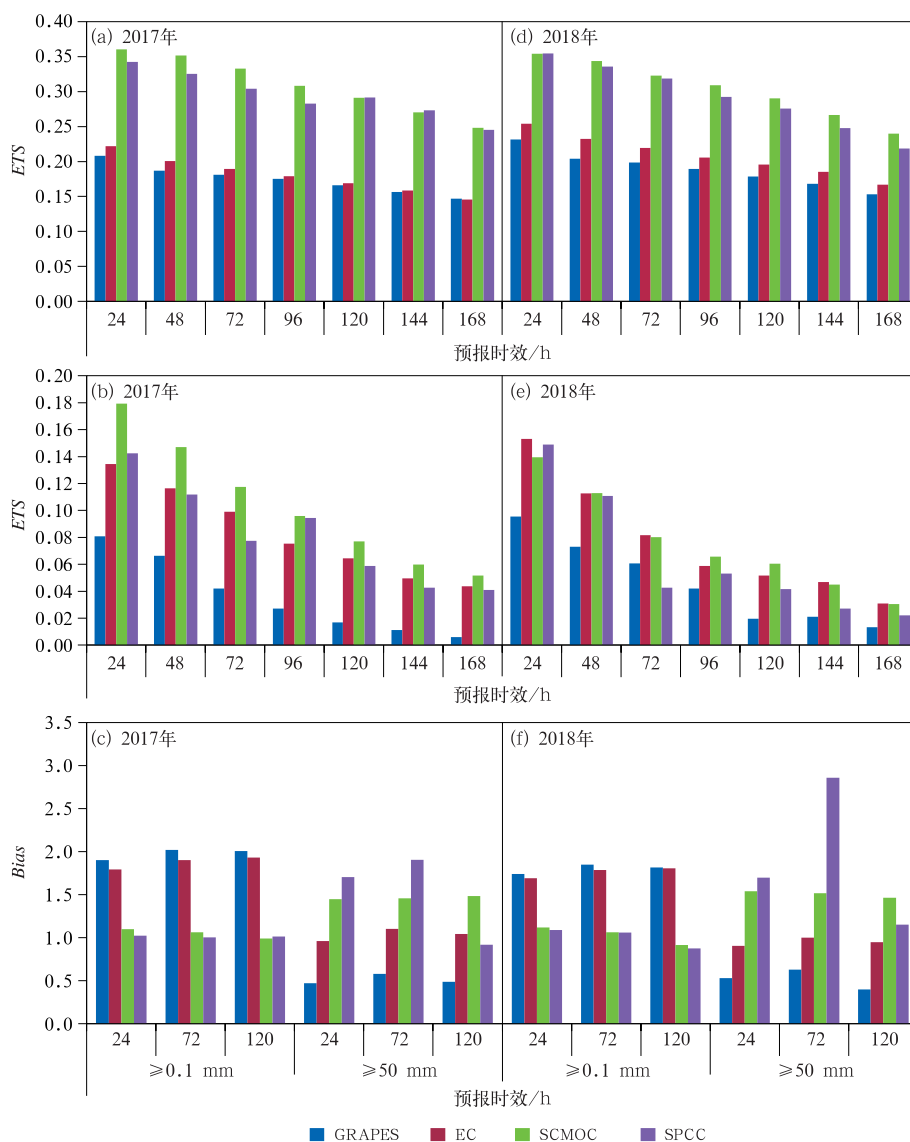


图 7 2017 年(a,b,c)和 2018 年(d,e,f)基于格点实况的数值模式、国家级指导和省市级订正预报的降水检验结果
(a,d)1~7 d ≥ 0.1 mm 量级 ETS 评分,(b,e)1~7 d ≥ 50 mm 量级 ETS 评分,
(c,f)1、3、5 d ≥ 0.1 mm 和 ≥ 50 mm 量级的 Bias

Fig. 7 The verification results of precipitation models, national guidance forecast and provincial and municipal revised forecast at gridded point from 2017 (a, b, c) to 2018 (d, e, f)
(a, d) ETS score of ≥ 0.1 mm in 1–7 d, (b, e) ETS score of ≥ 50 mm in 1–7 d,
(c, f) Bias of all precipitation categories in 1st/3th/5th day

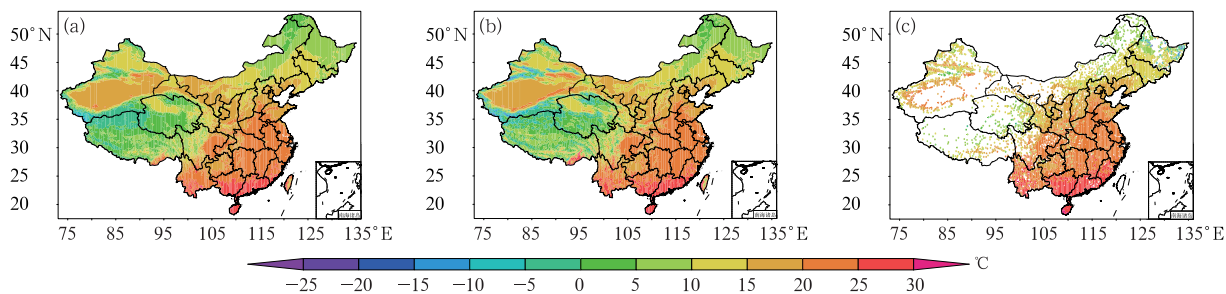


图 8 2018 年 08 时 24 h 最高温国家级指导预报及实况平均值空间分布
(a)指导预报,(b)格点实况,(c)站点实况

Fig. 8 Distribution pattern of 24 h national guidance $T_{\max}$ forecast and observation average at 08:00 BT of 2018
(a) guidance forecast, (b) gridded observation, (c) station observation

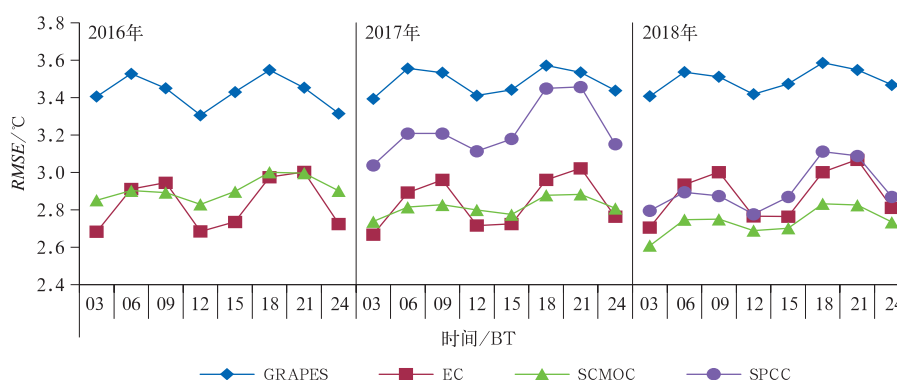


图 9 2016—2018 年 10461 站 24 h 内逐 3 h 温度模式预报、
国家级指导预报和省市级订正预报 RMSE 对比

Fig. 9 The RMSE of 3 h temperature model, national guidance forecast and provincial and municipal revised forecast in 24 h at 10461 stations from 2016 to 2018

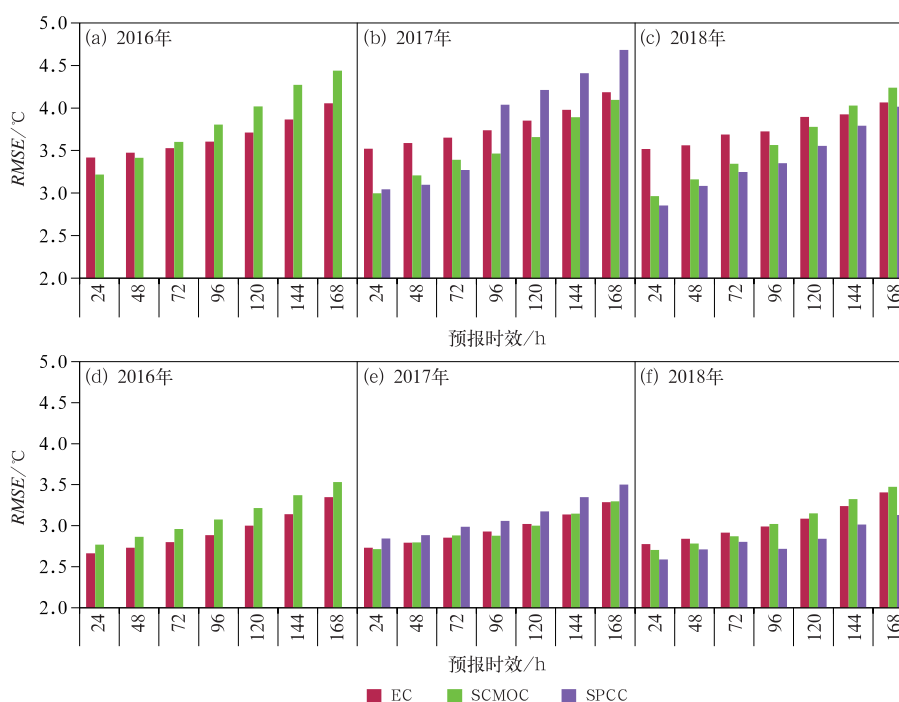


图 10 2016—2018 年 1~7 d 的 10461 站最高温和最低温模式预报、国家级指导预报
和省市级订正预报 RMSE 对比

(a, b, c) 日最高温, (d, e, f) 日最低温

Fig. 10 The RMSE of $T_{\max}/T_{\min}$ model, national guidance forecast and provincial and municipal revised forecast at 10461 stations in 1—7 d from 2016 to 2018

(a, b, c) $T_{\max}$, (d, e, f) $T_{\min}$

2016 年 3 d 及以上时效预报误差高于 EC 模式,到 2017—2018 年大部分时效预报误差都低于 EC 模式,如在 2018 年 RMSE 较 EC 模式最大降低达 16%;SCMOC 日最低温网格预报 1~3 d 的 RMSE 要略低于 EC 模式,4~7 d 的中期时效则略偏高;SPCC 省市级

订正预报在 2017 年发布时,没有显示出显著优势,特别在中期时效,至 2018 年则质量明显改进,日最高/低温 RMSE 低于 EC 模式和 SCMOC。

以 2018 年 11 月 1 日为例,SCMOC 与 EC 模式日最高温预报对比(图 11)显示,SCMOC 较 EC 模式

更接近站点实况分布,如:EC 模式在青藏高原中部偏东预报显著的低值区,SCMOC 较好地修正该偏差;EC 模式对华南地区的高值区预报偏弱,SCMOC 更接近实况,但也注意到,在湖北、湖南、重庆等地,SCMOC 的日最高温预报也偏低。

对比检验采用不同分辨率实况真值对检验结果带来的影响,图 12 给出 2016 年 SCMOC 日最高/低温的 10461 站和 2401 站检验结果,表明:日最低温的 RMSE 比日最高温明显偏向的特征不变;1~7 d 时效,SCMOC 日最高/低温的 2401 站算得的 RMSE 低于 10461 站,这也是由于 10461 站引入了可预报性较低的精细化温度空间分布结构特征,而导致预报误差增长。2017—2018 年具有相似的检

验结论。

2.6 城镇天气预报与智能网格预报对比

2018 年之前,城镇天气预报和智能网格预报两套业务系统同时运行。为使业务流程更加集约高效,2018 年开始将城镇天气预报融入智能网格预报,实现单轨运行。为评估智能网格预报能否在不降低预报质量的前提下替代城镇天气预报,对 2017—2018 年的城镇天气预报和智能网格预报的晴雨、日最高温、日最低温进行对比检验(图 13)。如图所示,对于晴雨预报,智能网格预报与城镇天气预报质量相当,尤其从 2017 年 10 月开始,两者基本一致;对于日最高温,2017 年 7—10 月智能网格预

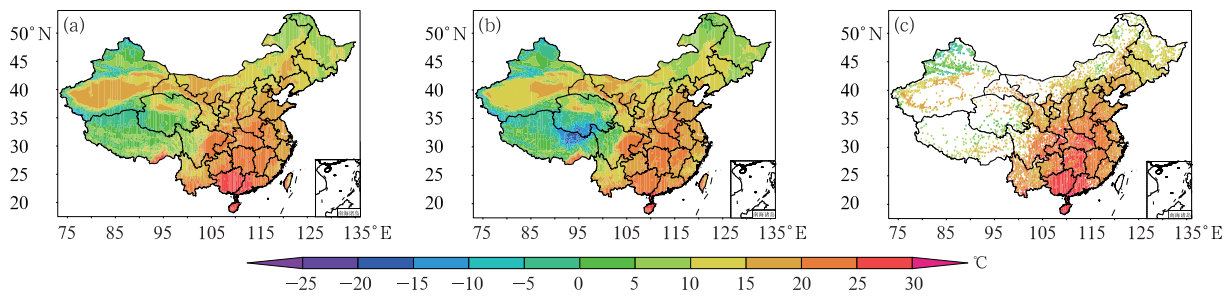


图 11 2018 年 11 月 1 日 08 时起报 24 h 时效国家级指导预报、数值模式的日最高温预报及实况

(a) 国家级指导预报, (b) EC 模式, (c) 站点实况

Fig. 11 The 24 h $T_{\max}$ forecast of national guidance forecast, model forecast and observation at 08:00 BT 1 November 2018

(a) national guidance forecast, (b) EC, (c) station observation

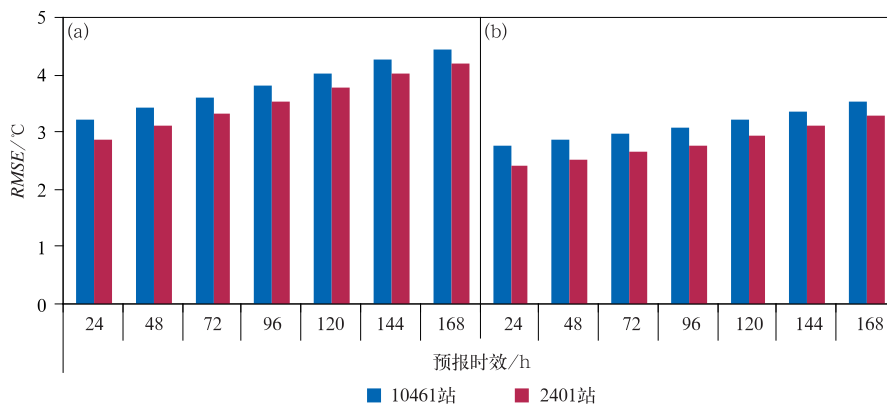


图 12 2016 年基于 10461 和 2401 站国家级指导预报日最高温(a)和最低温(b)RMSE 对比

Fig. 12 Comparison of national guidance forecast $T_{\max}$ (a) and $T_{\min}$ (b) RMSE at 10461 and 2401 stations in 2016

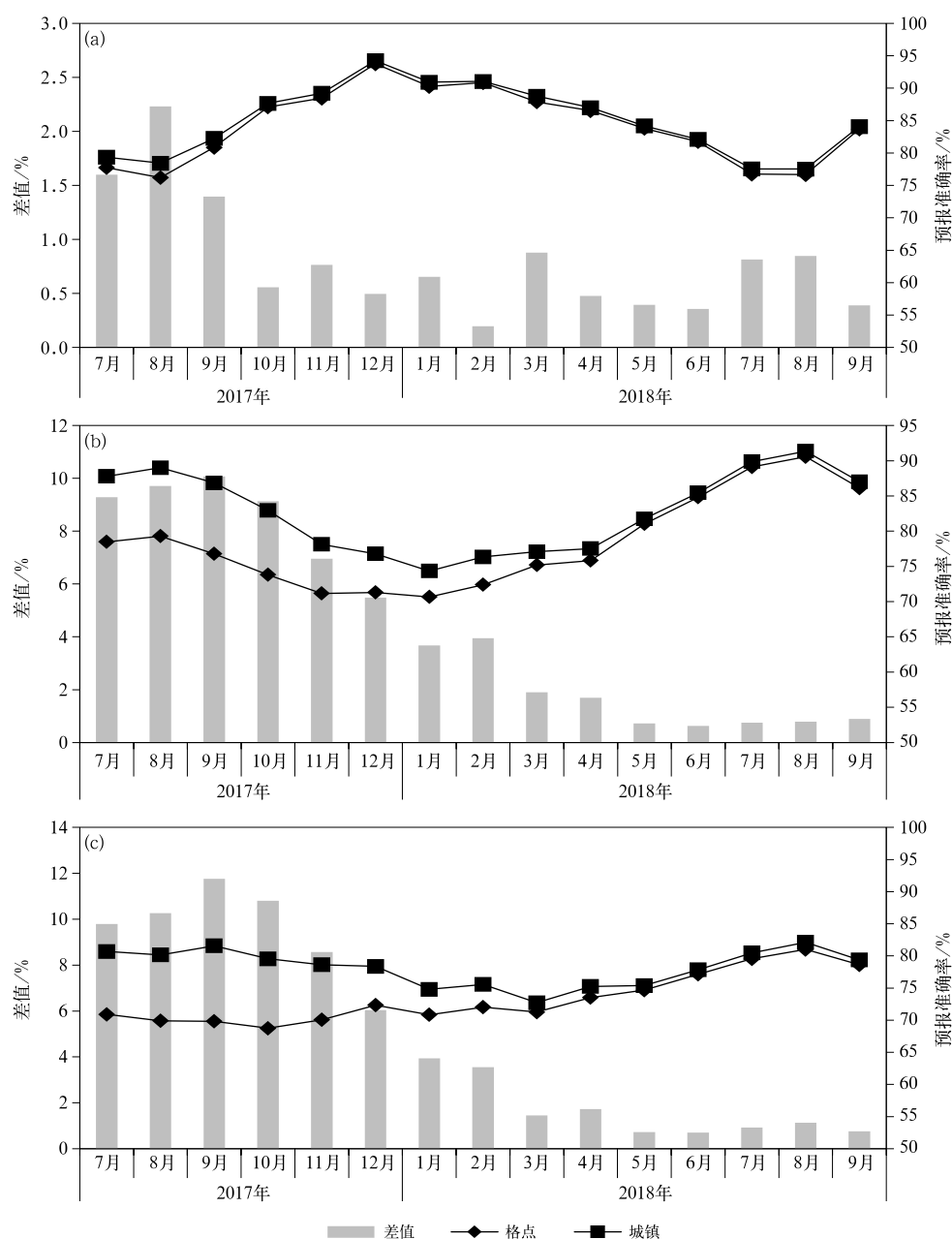


图 13 2017 年 7 月至 2018 年 9 月智能网格预报与
全国城镇天气预报检验差值逐月演变
(a) 晴雨, (b) 最高温, (c) 最低温

Fig. 13 Monthly PC difference between fine gridded forecast and
urban weather forecast in China from July 2017 to September 2018
(a) rain or not, (b) T_{max} , (c) T_{min}

报准确率比城镇天气预报低 9%~10%，之后两者差距逐渐缩小，至 2018 年 5 月两者基本一致。对于日最低温，2017 年 7—10 月，智能网格预报准确率比城镇天气预报低 10%~12%，至 2018 年 5 月两者趋于一致。上述分析表明，智能网格预报业务产品已能替代城镇天气预报，提供相同质量的预报产品。

3 结论与展望

本文基于站点和格点分析实况资料，对 2016—2018 年国家级指导网格预报 SCMOC、省市级订正反馈网格预报 SPCC 的降水、温度要素进行综合检

验评估,并与 GRAPES 和 EC 全球模式进行对比,得到一下主要结论:

(1) SCMOC 降水预报的空间分布与实况分布较一致,且对于降水极值点也能较好的表现。SCMOC 基本能够表现降水日变化的双峰特征,但对于午后降水峰值预报时间显著提前,未能很好地订正日变化偏差。此外,SCMOC 总体上高估了降水总量,尤其在 2018 年强降水可预报性较低时,大部分时段,SCMOC 倾向于增加降水量级以捕捉强降水事件。

(2) 对不同等级降水预报的统计和个例检验显示,SCMOC 小雨和暴雨量级都在数值模式的基础上显著提升,小雨量级 ETS 评分提升 9%~37%,暴雨量级最高提升率达 41%。值得注意的是,除 24 h 时效,SPCC 预报质量不如 SCMOC,这表明对 2 d 及以上的降水预报,省市级订正未能起到应有的作用,需要加强推进。

(3) 对比分析基于 2401 站、10461 站和格点实况分析的 SCMOC 降水预报检验结果,显示随着检验真值分辨率的提升,SCMOC 降水预报评分下降,这一方面表明 SCMOC 对降水精细结构预报能力还有待提升,另一方面也说明传统评分不能较好地反映精细化网格预报带来的价值。

(4) SCMOC 整点温度预报的空间分布与实况分布基本一致,但也存在最高温明显偏低、最低温偏高的现象。模式预报和网格预报的 RMSE 日变化都呈现午后和清晨的双峰特征。SCMOC 与 SPCC 的整点温度预报质量从 2016—2018 年快速得到改善,在 SCMOC 建立新的统计模型后,已经超过 EC 和 GRAPES 模式,预报误差最小。SPCC 的整点温度预报到 2018 年接近 EC 模式,但未能优于 SCMOC。

(5) 总体上,模式预报和网格预报的日最高温误差大于日最低温误差。SCMOC 的日最高温预报整体上优于 EC 模式,特别是 3 d 以内时效,大幅降低 RMSE;到 2018 年,SPCC 的日最高温预报在所有时效优于 SCMOC,体现了省市级的订正值。SCMOC 的日最低温预报相对 EC 模式没有体现出优势,尤其是 4 d 及以上的中期时效,但到 2018 年 SPCC 能够显著降低 RMSE,达到最优预报效果。

(6) 对 2017—2018 年的城镇天气预报和智能网格预报的晴雨、日最高温、日最低温进行对比检验,结果表明开始智能网格预报准确率比城镇天气

预报低,但之后逐步缩小差距,至 2018 年 5 月及以后,两者基本一致,表明智能网格预报业务产品可替代城镇天气预报。

本文只对智能网格预报产品的两个要素进行综合性检验评估。未来需要进一步开展更精细化的评估检验,以挖掘更多的时空误差信息,并分析背后存在的可能原因。需要对精细化网格预报开展分区域、分季节及不同天气类型的检验,应用空间检验方法,如模糊检验、目标对象检验和尺度分离法等,从不同角度开展检验评估,以便全面反映高分辨率带来的预报价值。

参考文献

- 曹勇,刘凑华,宗志平,等,2016. 国家级格点化定量降水预报系统[J]. 气象,42(12):1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al, 2016. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system[J]. Meteor Mon, 42(12):1476-1482(in Chinese).
- 陈力强,周小珊,杨森,2005. 短期集合预报中定量降水预报集合方法初探[J]. 南京气象学院学报,28(4):543-548. Chen L Q, Zhou X S, Yang S, 2005. A quantitative precipitation forecasts method for short-range ensemble forecasting[J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(4):543-548(in Chinese).
- 代刊,曹勇,钱奇峰,等,2016. 中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J]. 气象,42(12):1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short- and medium-range weather forecast[J]. Meteor Mon, 42(12):1445-1455(in Chinese).
- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J]. 气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 韩帅,师春香,姜志伟,等,2018. CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J]. 气象科技进展,8(1):102-116. Han S, Shi C X, Jiang Z W, et al, 2018. Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):102-116(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).
- 林建,宗志平,蒋星,2013. 2010—2011 年多模式集成定量降水预报产品检验报告[J]. 天气预报,5(1):67-74. Lin J, Zong Z P, Jiang X, 2013. The verification report of multi-model integrated QPF products from 2010—2011[J]. Wea Forecast Rev, 5(1):67-74(in Chinese).
- 沈学顺,苏勇,胡江林,等,2017. GRAPES GFS 全球中期预报系统的

- 研发和业务化[J]. 应用气象学报, 28(1):1-10. Shen X S, Su Y, Hu J L, et al, 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1):1-10(in Chinese).
- 唐健, 代刊, 宗志平, 等, 2018. 主客观融合定量降水预报方法及平台实现[J]. 气象, 44(8):1020-1032. Tang J, Dai K, Zong Z P, et al, 2018. Methods and platform realization of the national QPF master blender[J]. Meteor Mon, 44(8):1020-1032 (in Chinese).
- 王承伟, 刘松涛, 刘长城, 2018. 黑龙江省智能网格客观预报方法评估[J]. 黑龙江气象, 35(3):9-11. Wang C W, Liu S T, Liu C C, 2018. Evaluation of objective prediction method of intelligent grid in Heilongjiang[J]. Heilongjiang Meteor, 35(3):9-11(in Chinese).
- 王海宾, 杨引明, 范旭亮, 等, 2016. 上海精细化格点预报业务进展与思考[J]. 气象科技进展, 6(4):18-23. Wang H B, Yang Y M, Fan X L, et al, 2016. Development of fine gridded weather forecasting system in Shanghai[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(4):18-23(in Chinese).
- 王建鹏, 薛春芳, 潘留杰, 等, 2018. 陕西省精细化网格预报业务系统技术方法[J]. 气象科技, 46(5):910-918. Wang J P, Xue C F, Pan L J, et al, 2018. Operation system of fine grid forecast in Shaanxi Province: technical methods[J]. Meteor Sci Technol, 46(5):910-918(in Chinese).
- 韦青, 李伟, 彭颂, 等, 2019. 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, 30(2):245-256. Wei Q, Li W, Peng S, et al, 2019. Development and application of national verification system in CMA[J]. J Appl Meteor Sci, 30(2):245-256(in Chinese).
- 吴启树, 韩美, 刘铭, 等, 2017. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. 应用气象学报, 28(3):306-317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al, 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 28(3):306-317(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, 2015. 5KM 格点化气象要素预报产品业务化运行技术报告[R]. Zhao S R, 2015. 5 km technical report on operational products of fine gridded forecast[R](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).
- Engel C, Ebert E E, 2012. Gridded operational consensus forecasts of 2-m temperature over Australia[J]. Wea Forecasting, 27(2):301-322.
- Glahn B, Gilbert K, Cosgrove R, et al, 2009. The gridding of MOS[J]. Wea Forecasting, 24(2):520-529.
- Glahn H R, Ruth D P, 2003. The new digital forecast database of the national weather service[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(2):195-202.
- Huntemann T L, Rudack D E, Ruth D P, 2015. Forty years of NWS forecasts: past performance and future advances[C]// Harry R. Glahn Symposium. Phoenix: NOAA/National Weather Service.
- Kann A, Wang Y, Atencia A, et al, 2018. Seamless probabilistic analysis and forecasting: from minutes to days ahead[C]// Proceedings of the 20th EGU General Assembly. Vienna: EGU.
- Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al, 2014. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. J Geophys Res Atmos, 119(6):3063-3075.
- Uppala S M, K  llberg P W, Simmons A J, et al, 2005. The ERA-40 re-analysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 131(612):2961-3012.
- Zhu Y J, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. Wea Forecasting, 30(5):1109-1124.