

CMA-CPSv3 和 ECMWF-S2S 模式对安徽省夏季降水的次季节预测能力评估*

程 智¹ 孙 明¹ 罗连升¹ 汪栩加¹
张 杰² 徐 敏¹ 刘俊杰¹ 罗 悦¹

1 安徽省气候中心, 合肥 230031

2 铜陵市气象局, 安徽 铜陵 244061

提 要: 基于 CMA-CPSv3 和 ECMWF-S2S 模式数据, 综合多种评分方法, 评估了其在次季节时间尺度对安徽省夏季日降水量的气候态、逐候及梅雨关键期降水、降水过程的预测技巧, 并分析了其对关键环流系统的预测能力。结果表明: CMA-CPSv3 和 ECMWF-S2S 模式对安徽省夏季日降水量的气候态和无雨的占比均存在低估, 对小雨的占比均存在高估。两个模式对第 1~4 候降水的预测技巧随时效的增加而降低, 之后变化不大, CMA-CPSv3 模式对第 4~5 候降水的预测技巧总体低于 ECMWF-S2S 模式, 之后两个模式的预测技巧无明显差异; 在不同起报时间, 模式对梅雨关键期降水预测的评分存在波动, 多时次集合平均可以在一定程度上提高 CMA-CPSv3 模式的预测技巧。CMA-CPSv3 模式次季节逐日降水预测的 TS 评分总体低于 ECMWF-S2S 模式, 但在第 25 d 后, 其对明显降水的预测技巧下降不明显, TS 评分高于 EC 模式。CMA-CPSv3 模式对第 4~5 候降水的预测技巧总体低于 ECMWF-S2S, 可能源于对东亚-太平洋遥相关型、西太平洋副热带高压等关键环流系统的预测存在不足。

关键词: 次季节至季节, 气候预测, 模式评估, CMA-CPSv3 模式

中图分类号: P468 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.070601

Evaluation of the Sub-Seasonal Prediction Capabilities of CMA-CPSv3 and ECMWF-S2S Models for Summer Precipitation in Anhui Province

CHENG Zhi¹ SUN Ming¹ LUO Liansheng¹ WANG Xujia¹
ZHANG Jie² XU Min¹ LIU Junjie¹ LUO Yue¹

1 Anhui Climate Center, Hefei 230031

2 Tongling Meteorological Office of Anhui Province, Tongling 244061

Abstract: Based on the data from the CMA-CPSv3 and ECMWF-S2S models, this paper comprehensively evaluates their prediction skills for the climatological state, pentad precipitation,

*中国气象局数值预报统筹研发专项(TCYF2025QH004)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2026-056)和安徽省气象局创新发展专项(YJG202301)共同资助

2025 年 10 月 10 日收稿; 2026 年 7 月 6 日收修定稿

第一作者: 程智, 主要从事气候预测及模式解释应用研究. E-mail: 175222684@qq.com

precipitation during the critical period of Meiyu season, and precipitation processes of sub-seasonal daily precipitation in summer in Anhui Province with multiple scoring methods. Additionally, their prediction capabilities for key circulation systems are analyzed. The results reveal that the climatological state of the summer daily rainfall and the percentage of no-rain conditions are underestimated by both models, while the percentage of light rain is significantly overestimated. The prediction skills of the models for precipitation in the first four pentads are found to decrease with the increase in forecast lead time, and then change little. The prediction skills of CMA-CPSv3 model for precipitation in the 4th to 5th pentads are generally lower than those of ECMWF-S2S model, after which little differences are seen in prediction skills between the two models. The scores for precipitation forecasts during the critical period of the Meiyu season exhibit fluctuations with different initial forecast times, and multi-time ensemble averaging can enhance the forecasting skill of CMA-CPSv3 model to a certain extent. The threat score (TS) of daily subseasonal precipitation forecasts by the CMA-CPSv3 model is generally lower than that of the ECMWF-S2S model. However, after the 25th forecast day, its predictive skill for obvious precipitation decreases slightly, with a higher TS score than the ECMWF model. The overall lower prediction skills of the CMA-CPSv3 model for precipitation in the 4th to 5th pentads may be attributed to its deficiency in predicting the key circulation systems such as the East Asian-Pacific (EAP) teleconnection pattern and the subtropical high.

Key words: subseason to season, climate prediction, model evaluation, CMA-CPSv3 model

引 言

次季节气候预测的时间尺度介于天气预报（14 d之内）和季节气候预测（90 d以上）之间，是衔接天气预报和季节-年际气候预测的桥梁，对发展无缝隙天气气候预测有着关键的作用（Brunet et al, 2010）。发展次季节气候预测业务，可以延长灾害性、转折性天气过程的预见期，对提升气象防灾减灾效益具有重要意义（丁一汇和梁萍, 2010）。目前国家气候中心和各省级气候中心均滚动发布次季节、延伸期气候预测产品，主要预测对象包括次季节、延伸期时间尺度的降水和气温趋势，最高和最低气温，强降水、强降温、高温过程出现时段等。

次季节气候同时受大气初始条件和外强迫信号的影响，影响因子复杂，相比于天气预报，其可预测性较低，被称为预测沙漠（Vitart et al, 2017）。近年来，为深入认识次季节气候的可预测性来源，提高预测技巧，世界天气研究计划(WWRP)和世界气候研究计划(WCRP)联合组织制定了次季节至季节(sub-seasonal to seasonal,简称S2S)预测计划(Vitart and Robertson, 2018; 林倩等, 2019)。S2S计划的数据集包含中国气象局、欧洲中期天气预报中心等11家预报中心发布的近实时预测和回算数据。自2016年以来，国家气候中心不断对第二代气候预测模式系统进行改进，建立了一个包含海陆冰气系统、植被和碳循环的多圈层耦合的次季节-季节-年际尺度一体化的气候模式预测业务系统CMA-CPSv3，包括次季节和季节预测两个子系统，并于2020年底投入准业务运行。

目前针对 S2S 模式的评估工作已广泛开展，如区域降水(Liang and Lin, 2018)、高温热浪(Hudson et al, 2011)、夏季风(Jie et al, 2017; 贺铮等, 2018)、马登-朱利安振荡(Madden Julian Oscillation, MJO)和大气遥相关(Vitart and Robertson, 2018; 李帅等, 2021)、土壤湿度(Zhu et al, 2019)、台风(李慧等, 2020)的确定性预测的评估，以及针对北半球夏季风区降水概率预测的评估等(Vigaud et al, 2017)。林倩等(2019)研究表明，S2S 模式对次季节降水的预测能力随时效的增而降低，对热带区域的预测技巧高于热带外区域，其中 ECMWF、UKMO、KMA 和 CNR-ISAC 的降水产品在全球大部分区域的预测技巧更高。王晨和李建平(2022)针对中国区域，综合均方根误差(RMSE)、时间相关系数(TCC)等评分方法评估了 ECMWF-S2S、KWBC-S2S 和 CMA-S2S 模式的预测技巧，结果表明，ECMWF-S2S 模式的预测性能总体最佳，KWBC-S2S 和 CMA-S2S 模式相对较低，观测偏湿(干)时预报则倾向偏干(湿)。杨露等(2023)利用平均绝对误差、秩直方图和 Brier 评分等方法，评估了 CMA-CPSv3 和 ECMWF-S2S 模式对中国区域降水和气温的预测性能，结果表明，CMA-CPSv3 模式的预测性能整体高于上一代模式，但不及 ECMWF-S2S 模式，其中春季和秋季的预测效果整体优于夏季和冬季。孙晨等(2025)、庞轶舒等(2022)、刘绿柳等(2023)评估了多个模式对长江流域、四川省和河南省降水的预测技巧，结果表明，模式在次季节时间尺度对降水的预测技巧明显低于天气尺度，并且在实况降水整体偏少的情况下模式预测技巧整体高于降水偏多的情况，对中雨及以上量级降水的预测能力仍有较大改进空间。

以上研究为S2S模式产品的应用提供了有益参考，但相关评估工作仍有待深化与细化。一方面，应将评估方案进一步与次季节气候预测业务相结合，目前业务工作重点关注降水趋势和降水过程时段的预测，其中降水趋势常采用距平符号一致率(PC)、距平相关系数(ACC)等指标进行评估，降水过程时段则多使用威胁评分(TS)和过程事件预测评分(PPS)方法；另一方面，以往研究鲜有针对安徽省所在的江淮区域进行分析，尤其缺少在对次季节降水预测进行总体评估的基础上，对梅雨关键期以及关键环流系统的评估。本文基于中国气象局业务化运行的CMA-CPSv3模式和国际上广泛应用的ECMWF-S2S模式资料，综合多种降水趋势和降水过程预测检验方法，系统评估模式在次季节时间尺度对安徽省夏季逐候、逐日降水以及梅雨关键期降水的预测性能，分析模式对东亚-太平洋遥相关(East Asia Pacific Oscillation, 以下简称EAP遥相关)、西太平洋副热带高压(以下简称副高)的预测技巧，并将两个模式的预测性能进行对比，旨在为模式改进和次季节气候预测业务应用提供技术参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

降水观测资料来源于国家信息中心整编的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》(任芝花等, 2012), 选取安徽省77个国家级气象观测站的日降水量资料, 时段为2008—2024年。

CMA-CPSv3模式(以下简称CMA模式)为国家气候中心建立的次季节-季节-年际尺度一体化气候模式预测业务系统, 本研究评估其中的次季节气候预测系统, 其大气环流模式为北京气候中心大气高分辨率通用模式版本3, 水平分辨率约为45 km, 包含2008—2022年回算资料和2023—2024年实时预测资料, 发布频次为每日更新, 时效为60 d。ECMWF-S2S模式(以下简称EC模式)资料来自于S2S数据集, 水平分辨率为 $1.5^{\circ}\times 1.5^{\circ}$, 包含2004—2023年回算资料和2024年近实时预测资料, 发布频次为每周两次, 时效为45 d。为便于对比分析, 本文评估两个模式共同时段2008—2024年, 时效统一取45 d。本文所关注的评估区域为安徽省, 在开展降水预测检验评估时, 采用双线性插值方法将模式降水插值到安徽省77个台站; 所关注的预测时段为夏季。评估模式对逐候降水的预测能力时, 将模式对未来45 d的逐日降水预测每5 d求累计值, 即可得到未来9候降水预测, 并与实况这9候降水进行比较。评估关键环流系统时, 选用模式500 hPa高度场和风速场资料计算了EAP遥相关和副高指数。

环流实况资料来源于中国气象局自主开发的第一代全球大气再分析数据集(CRA)。该数据集不仅整合了常规地面观测数据, 还融合了探空数据和我国风云系列卫星观测资料, 目前已广泛应用于天气、气候领域的相关研究(Yu et al, 2021; Liu et al, 2023), 其时间范围与本文模式资料对应, 水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。选用其中的500 hPa高度场和风速场资料计算EAP遥相关和副高指数。

1.2 评估方法

本文首先比较了模式预测的多年平均次季节逐日降水量与实况的差异, 具体方法为: 对于夏季(共92 d)每日的降水, 在次季节时间尺度均有 n 个超前15~45 d的预测(不同模式的预测频次有差异, n 有所不同), 2008—2024年(以下简称气候平均)共有 $n\times 92\times 17$ 次预测, 将这些预测求平均, 即可得到模式在次季节时间尺度对气候平均夏季日降水量的预测, 并与气候平均夏季日降水量的实况(92 $\times$ 17个样本的平均)进行比较, 可以反映出模式对降水气候态的预测与实况的偏差。

为系统评估模式次季节降水预测效果, 本文参考世界气象组织推荐和目前气候预测业务

所使用的评分方法,采用 PC、ACC (李清泉等, 2004)、RMSE 和 TCC (魏凤英, 1999) 对次季节降水趋势预测进行定量评分。综合这 4 种评分方法,可客观准确地评估和比较模式对降水趋势的预测性能。

为进一步评估模式对次季节降水过程的预测能力,采用 TS 和 PPS 评分方法,其中 TS 评分在气象预报检验,特别是天气预报检验中被广为使用,侧重于命中率与假警报率的直接计算(庄照荣等, 2010)。考虑到次季节预测的时效较长,预测技巧相比于天气预报下降明显,且在实际应用中,降水过程预测比实况偏早或偏晚 1 ~ 2 d 也具有一定的参考价值,杜良敏和柯宗建(2013)改进了 TS 评分方法,通过扩展实况与预报序列的时空范围,引入临近预报正确的容错机制,并采用加权方式弱化空报对总评分的影响,研发的 PPS 评分方法较适合于次季节降水过程预测的检验。

为分析模式对影响安徽省次季节降水的关键环流系统的预测能力,本文评估了模式对 EAP 遥相关指数和副高面积、强度、脊线南北位置(以下简称脊线)、西伸脊点指数的预测能力,这些指数的计算方法参考黄荣辉和李维京(1988)、刘芸芸等(2012)。对环流指数的评估采用泰勒图分析方法,泰勒图是由模拟与观测场空间分布的相关系数、相对标准差及其 RMSE 组成的极坐标图(Taylor, 2001),其距原点的距离表示模式相对于实况的标准差,方位角的余弦代表模式与实况的相关系数,距参考点的距离反映模式相对于实况的 RMSE,可以直观对比不同模式、不同指标预测效果的差异。

2 气候态预测

本文计算了 CMA 和 EC 模式对未来 15~45 d 日降水量预测的气候平均,并与实况夏季平均日降水量进行了比较。经计算,安徽省气候平均夏季日降水量为 6.0 mm,而 CMA 和 EC 模式预测的分别为 4.8 mm 和 5.6 mm,较实况偏小 20%和 7%。图 1 为气候平均实况和模式预测的夏季日降水量的空间分布,可以看出,实况多年平均夏季日降水量的经向差异明显,大于 7 mm 的高值区位于江淮之间西部的大别山区、江南西部,小于 5 mm 的低值区位于北部和合肥附近。两个模式能够总体预测出安徽省夏季日降水量的经向差异,其中 CMA 模式预测出大别山区的多雨中心,但没有预测出江南西部的多雨中心;EC 模式能够预测出江南存在多雨中心,但没有预测出大别山区的多雨中心。通过计算,CMA、EC 两模式预测与实况日降水量的空间相关系数分别为 0.61 和 0.78。由图 1b, 1c 模式预测的日降水量相对实况百分比可以看出,CMA 模式在江淮之间中西部、江南局部接近实况(偏多或偏少 10%以内),其余大部地区偏少 10%~36%,即大部地区存在低估;EC 模式除了在江南、江淮之

间西部部分地区偏少 10%~28%，其余大部地区都接近实况。总体来看，两个模式对夏季日降水量的气候态均存在低估，其中 EC 模式预测的偏差更小，空间分布型与实况更为接近。

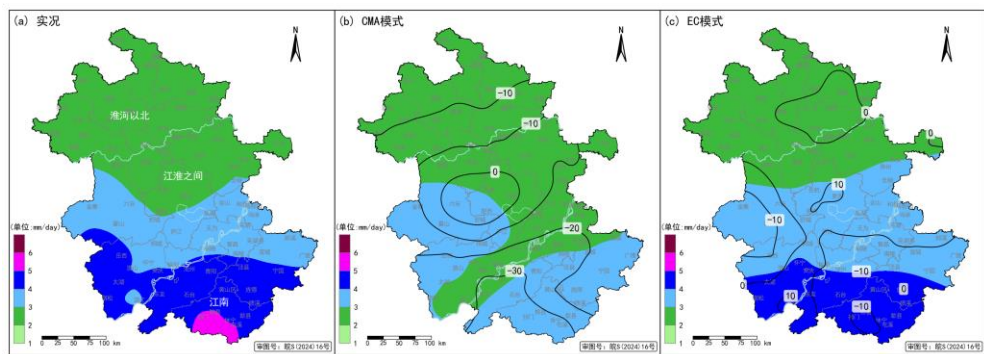


图 1 2008—2024 年(a)实况、(b)CMA 和(c)EC 模式预测的安徽省夏季日降水量(填色，单位：mm)的空间分布以及模式预测值相对实况的百分比（等值线，单位：%）

Fig.1 Spatial distributions of the summer daily precipitation (colored, unit: mm) from (a) observation, (b) CMA model and (c) EC model with lead time of 15–45 d, and (b,c) the percentages of predictions by (b) CMA model and (c) EC model relative to observations (contour, unit: %) in Anhui Province during 2008—2024

图 2 为在次季节时间尺度，CMA、EC 模式预测和实况夏季日降水不同强度等级占比的分布，可看出，实况无雨的占比最高，达到 60%，其次是小雨（24%），而中雨、大雨和暴雨的占比较低，仅在 3%~7%。两个模式的预测中，无雨占比均表现出明显低估，CMA 模式仅为 35%，EC 模式为 25%；小雨的占比存在明显高估，CMA、EC 模式分别达 55%、57%；对于中雨，CMA 模式预测的占比相对实况偏低，而 EC 模式相对偏高；对于大雨和暴雨，两个模式预测的占比均低于实况。这些结论与 Liu et al(2024)、屠妮妮等（2016）基本一致，即由于物理框架上仍存在不足，模式总是倾向于高估小雨的发生概率，而低估强降水的发生概率。总体来说，两个模式对中雨预测技巧的差异不显著；对于大雨，EC 模式预测的占比与实况差异较小；对于无雨、小雨和暴雨，CMA 模式预测的占比与实况都更加接近。

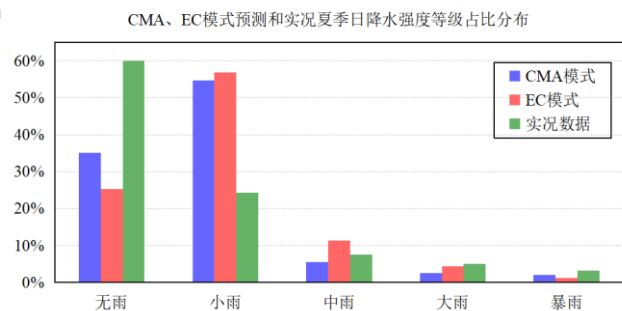


图 2 2008—2024 年 CMA、EC 模式预测和实况安徽省夏季日降水不同强度等级占比分布

Fig.2 Percentage distribution of different daily precipitation intensity grades in summer predicted by the CMA and EC models and observation in Anhui Province during 2008—2024

3 逐候降水预测

图 3 为 CMA 和 EC 模式对未来 9 候逐候降水预测的 PC 和 ACC 评分，可以看出，两模式对前 4 候降水预测的 PC 评分随时效的增加而减小，CMA 和 EC 模式第 1 候的 PC 分别可达 0.74 和 0.75，第 4 候下降至 0.56 和 0.58，之后变化不明显。两个模式比较来看，重点关注从第 4 候开始的次季节时间尺度，CMA 模式对第 4~5 候降水预测的 PC 评分与 EC 模式基本持平，其中第 4 候 EC 模式评分更高，第 5 候 CMA 模式评分更高，且从第 5 候开始，CMA 模式的 PC 评分均高于 EC 模式，即 CMA 模式在判断降水偏多或偏少趋势方面具有一定的优势。与 PC 评分结果类似，两个模式对前 4 候降水预测的 ACC 评分随时效的增加而减小，CMA 和 EC 模式分别由第 1 候的 0.32 和 0.39 下降至第 3 候的 0.04 和 0.05，CMA 模式在第 4~9 候的 ACC 总体为 0~0.02，而 EC 模式在第 4 候的 ACC 略高于第 3 候，之后逐渐下降至 0 附近。CMA 模式对第 4~5 候降水预测的 ACC 评分低于 EC 模式，但在第 6~9 候，两个模式预测的 ACC 评分基本持平。

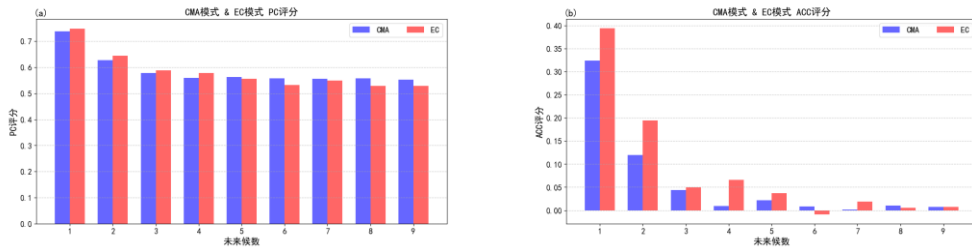


图 3 2008—2024 年 CMA 和 EC 模式对安徽省夏季逐候降水预测的 (a) PC 和 (b) ACC 评分

Fig.3 (a) PC and (b) ACC scores for pentad precipitation forecasts in summer by the CMA and EC models in Anhui Province during 2008—2024

图 4a 为 CMA 和 EC 模式对安徽省夏季候降水预测的 RMSE，可以看出，CMA 模式对前 4 候降水预测的 RMSE 随时效的增加而增大，之后稳定在 50 mm 左右，EC 模式对前 3 候降水预测的 RMSE 随时效的增加逐渐增加，之后稳定在 42~44 mm。比较来看，CMA 模式对第 4~9 候降水预测的 RMSE 均大于 EC 模式。由图 4b 可看出，CMA 和 EC 模式对前 4 候降水预测的技巧随时效的增加而减小，CMA 模式 TCC 由第 1 候的 0.50 下降到第 4 候的 0.02，EC 模式 TCC 由第 1 候的 0.58 下降到第 4 候的 0.05，两个模式的 TCC 在第 5 候均略有上升，之后维持在 0 附近。比较来看，CMA 模式对第 4~5 候降水预测的 TCC 评分均低于 EC 模式，之后无明显差异。

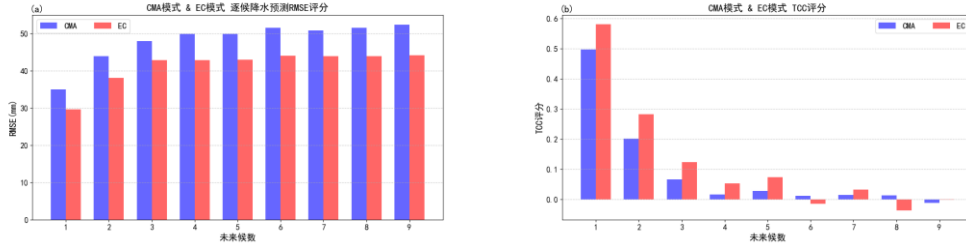


图4 2008—2024年CMA和EC模式对安徽省夏季逐候降水预测的(a)RMSE和(b)TCC评分

Fig.4 (a) RMSE and (b) TCC scores for pentad precipitation forecasts by the CMA and EC models in Anhui Province during 2008—2024

以上分析表明，在次季节时间尺度的第4~5候，CMA和EC模式对逐候降水预测的PC基本持平，但ACC、RMSE、TCC方面，EC模式都更具优势，综合4种评分方法来看，CMA模式的预测技巧总体低于EC模式；在第6~9候，两个模式的ACC、TCC基本持平，PC和RMSE各有优劣，即预测技巧无明显差异。

4 梅雨关键期降水预测

安徽省地处中国梅雨区，深受梅雨气候的影响，梅雨量的丰沛或匮乏，往往成为引发洪涝、干旱等气象灾害的关键因素。从提前数个月的季节尺度到次季节尺度，梅雨预测都是汛期滚动气候预测的重点。本研究从次季节尺度来评估模式对梅雨的预测能力，考虑到每年梅雨期的早晚和雨期长短存在差异，有些年份甚至空梅，选取气候平均时间进行分析。安徽省气候平均入、出梅时间分别为6月15日和7月12日，因此取6月中旬至7月上旬（6月11日至7月10日）作为梅雨关键期，评估模式从提前15d到提前1d对该时段降水的预测能力，其中CMA、EC模式起报时次分别为15个、5个（EC模式每周一、周四两次起报，发布频次低于CMA模式）。图5为CMA和EC模式对梅雨关键期降水预测的PC和ACC评分，可以看出，随着起报日的临近，两个模式的PC评分总体有所提升，但仍存在波动；ACC评分同样存在波动，但随起报日的临近，评分没有明显的提升。本研究计算了CMA和EC模式共同的5个起报时次预测评分的平均值，其中CMA、EC模式平均PC分别为0.53、0.54，平均ACC分别为0.04、0，总体来看两个模式的预测技巧相当。此外，计算了CMA模式15个起报时次预测的平均评分和15个起报时次集合平均预测评分，由图5可看出，不论是PC还是ACC，多时次集合平均预测的评分均高于这段时间预测评分的平均值，体现了集合预报的优势。由于初值的变化，模式预测结果往往会有波动，即使在最临近的时次，预测结果也不一定最准确，多时次集合平均可以减少预测的不确定性，在一定程度上提高次季节降水的预测能力。因此，在应用CMA模式进行预测时，不应仅关注最新的预测信息，要综合多个时次预测的结果进行判断。

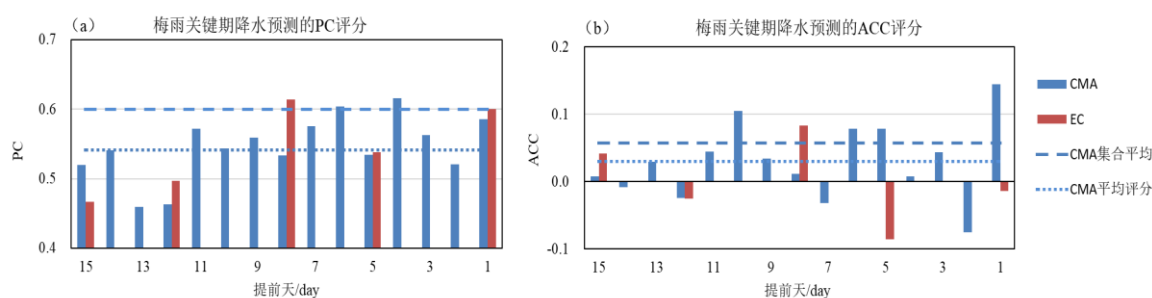


图5 2008—2024 年 CMA 和 EC 模式对安徽省梅雨关键期降水预测的(a)PC 和(b)ACC 评分

Fig.5 (a) PC and (b) ACC scores for precipitation forecasts during the critical period of the Meiyu season by the CMA and EC models in Anhui Province during 2008—2024

5 降水过程预测

对降水过程预测的检验目前主要借助于 TS 和 PPS 评分，其中 TS 评分可以对日降水预测的命中率、漏报率及空报率进行综合评定，并通过设定不同的降水阈值，能够针对性地评估模式对特定降水强度的捕捉能力。以 0.1 mm 作为阈值，TS 评分能够反映模式对晴雨预测的准确性；以 10 mm 作为阈值，在业务中往往被作为明显降水过程预测的一种评分指标。在这两种阈值条件下，CMA 与 EC 模式对未来 15~45 d 逐日降水量预测的 TS 评分如图 6a 所示，在 0.1 mm 阈值条件下，两个模式的 TS 评分随时效的增加变化不明显，相较而言，CMA 模式（0.52~0.55）在各个时效的预测评分均低于 EC 模式（0.63~0.65）。在 10 mm 阈值条件下（图 6b），两个模式的评分较 0.1 mm 阈值条件明显更低，其中 CMA 模式的评分在不同时效变化不大（0.07~0.08），而 EC 模式在第 15~30 d 随时效的增加评分逐渐下降（0.14~0.05），之后基本稳定；比较来看，在第 15~24 d，CMA 模式的评分低于 EC 模式，之后基本都高于 EC 模式。综合两种阈值条件可以看出，CMA 模式对于次季节降水预测的 TS 评分总体低于 EC 模式，但在第 25 d 后，其对明显降水的预测技巧下降不明显，TS 评分高于 EC 模式。

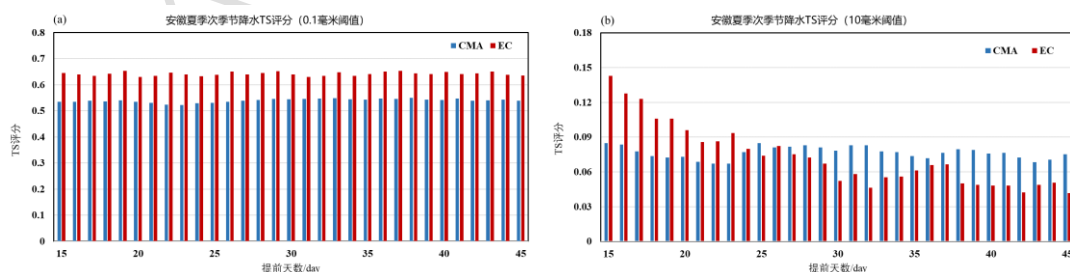


图6 2008—2024 年 CMA 和 EC 模式对未来 15~45 d 安徽省逐日降水量预测的 TS 评分

(a) 0.1 mm 阈值，(b) 10 mm 阈值

Fig.6 TS scores for daily precipitation forecasts with lead time of 15~45 d by the CMA and EC models with thresholds of (a) 0.1 mm and (b) 10 mm in Anhui Province during 2008—2024

模式对次季节降水过程预测的 PPS 评分、预测命中率、漏报率和空报率如图 7a 所示，可以看出，CMA 模式多年平均 PPS 评分为 31.4，略低于 EC 模式（35.1），这一差距主要来源于命中率和空报率这两项指标上。由图 7b,7c 可以看出，CMA 模式多年平均命中率为 0.12，略低于 EC 模式（0.14）；空报率为 0.43，略高于 EC 模式（0.42）；对于漏报率，两个模式的表现相当。此外，为了评估模式对典型异常年降水过程的预测技巧，选取了这些年份中夏季降水排名前 5 位的典型多雨年（2011 年、2015 年、2016 年、2020 年和 2021 年）以及排名后 5 位的典型少雨年（2012 年、2013 年、2019 年、2022 年和 2023 年），分别以这些年份的评分高于或低于多年平均值作为判断预测效果优劣的标准。可以看出，两模式在典型多雨年，PPS、命中率和漏报率均高于多年平均，空报率低于多年平均；在典型少雨年，PPS、命中率、漏报率均低于多年平均，空报率高于多年平均。与多年平均的情况类似，在多雨年和少雨年，CMA 模式的 PPS、命中率均略低于 EC 模式，空报率略高于 EC 模式，对于漏报率，多雨年 CMA 模式的评分略低于 EC 模式，少雨年 CMA 模式的评分略高于 EC 模式。总体来看，CMA 模式对降水过程 PPS、命中率和空报率方面略弱于 EC 模式，两个模式均在多雨年的预测效果更好，在少雨年的预测效果相对较差。



图 7 2008—2024 年 CMA 和 EC 模式对安徽省夏季次季节降水过程预测的(a)PPS 评分，(b)命中率，(c)空报率和(d)漏报率

Fig.7 (a) PPS score, (b) hit rate, (c) false alarm rate, and (d) miss rate for subseasonal precipitation forecasts in summer by the CMA and EC models in Anhui Province during 2008—2024

6 关键环流系统预测

Huang (1992)、黄刚和严中伟 (1999)、Huang and Yan (1999) 研究表明, 江淮地区夏季旱涝与 EAP 遥相关波列有着密切的关系, 当东亚夏季 500 hPa 位势高度场在经向上呈“+ - +”的波列配置, 有利于江淮地区洪涝的发生, 反之则有利于干旱的发生。除此之外, 副高的强度和位置也是引起夏季江淮降水异常的关键因子 (Ding and Sun, 2001; 李维京, 2012)。本文利用泰勒图分析方法, 评估 CMA 和 EC 模式在次季节时间尺度对 EAP 波列和副高的预测能力。图 8a、8b 显示了两个模式对第 15~30 d、31~45 d EAP 遥相关指数的预测能力, 可以看出, 在 15~30 d 时间尺度, CMA 和 EC 模式预测与实况的相关系数分别为 0.22 和 0.27, 均未通过 0.05 的显著性水平检验, 相对标准差和相对均方根误差这两项指标也是 EC 模式略优于 CMA 模式; 在 31~45 d 时间尺度, 相关系数相对于 15~30 d 有明显下降, 分别仅有 0.1 (CMA) 和 0.08 (EC), 相对标准差和相对均方根误差也有明显上升。

图 8c、8d 显示了两个模式对第 15~30 d、31~45 d 副高面积、强度、脊线位置和西伸脊点指数的预测能力, 可以看出, 在 15~30 d 时段, 两个模式对于副高面积、强度预测与实况的相关系数、相对标准差和相对均方根误差均较为接近, 但对于副高脊线 and 西伸脊点这两个影响中国夏季雨带分布的关键因子, CMA 模式的预测技巧总体弱于 EC 模式; 在 31~45 d 时段, 两个模式的预测技巧相较于 15~30 d 均存在明显下降, 对于副高面积、强度的预测, 两个模式的预测技巧基本相当, 对于副高脊线, CMA 模式预测与实况的相关系数与 EC 接近, 其他两项指标优于 EC 模式, 对于西伸脊点的预测, CMA 模式预测的相对标准差更小, 其他两项指标不如 EC 模式。

综合来看, 在 15~30 d 时段, EC 模式对 EAP 和副高的预测技巧均高于 CMA 模式, 但在 31~45 d 时段, CMA 模式对 EAP 遥相关波列的预测效果更好, 对副高的预测效果与 EC 模式相当。这一结论也在一定程度上解释了前述降水预测评估的结果, 即 CMA 模式对第 4~5 候降水的预测技巧总体低于 ECMWF-S2S, 可能源于对东亚-太平洋遥相关型、西太平洋副热带高压等关键环流系统的预测存在不足, 通过改进模式对大气环流及其与降水相互作用的预测能力, 有望缩小两个模式之间的差距。

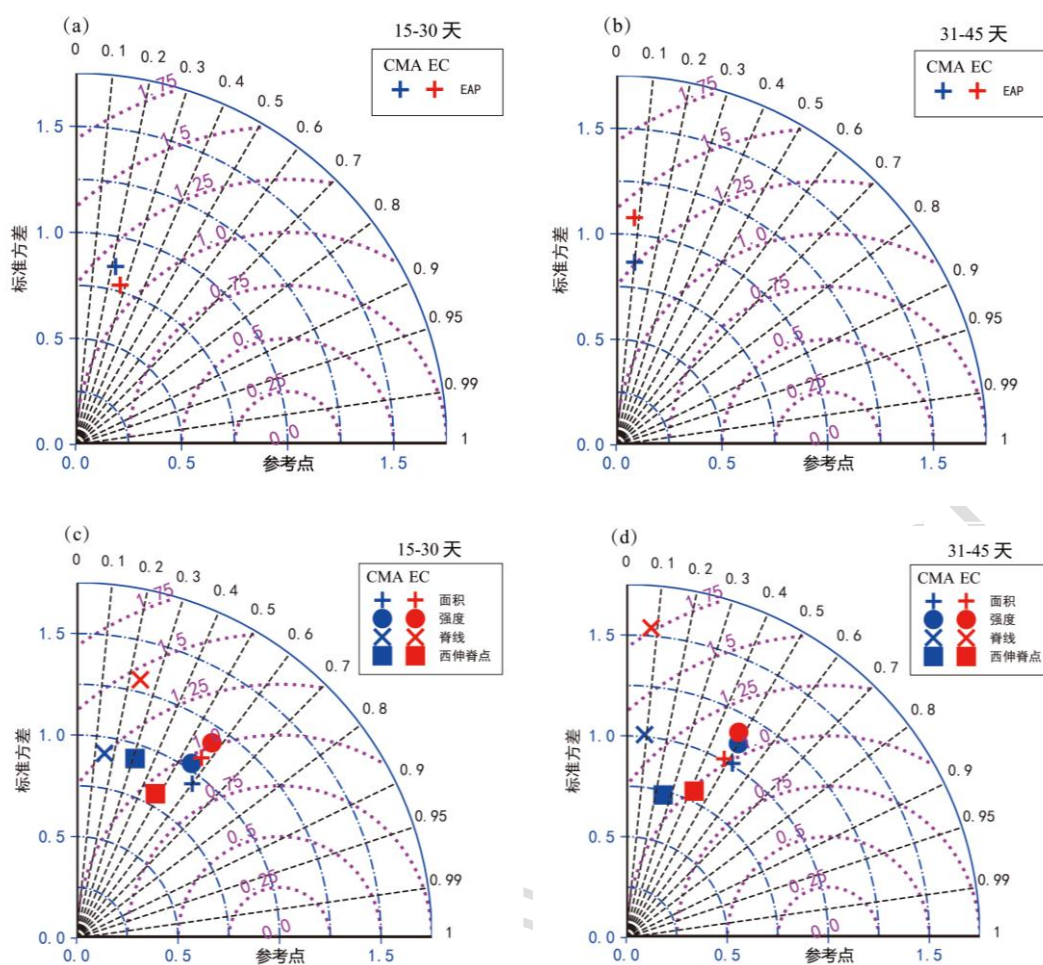


图8 2008—2024年CMA、EC模式在(a, c) 15~30 d和(b, d) 31~45 d时段对(a,b) EAP遥相关波列和(c,d)副高指数预测的泰勒评分图

Fig.8 Taylor diagrams of the forecast skill scores for (a,b) the EAP teleconnection pattern and (c,d) subtropical high index predicted by the CMA and EC models with lead times of (a,c) 15—30 d and (b,d) 31—45 d during 2008—2024

7 结论与讨论

本文基于CMA-CPSv3和ECMWF-S2S模式的降水和环流数据，综合多种评分方法，评估了其在次季节时间尺度对安徽省夏季日降水量的气候态、逐候及梅雨关键期降水、降水过程的预测技巧，并分析了其对关键环流系统的预测能力，结果表明：

(1) 两个模式对夏季日降水量气候态均存在一定程度的低估，其中EC模式预测的量级以及空间分布型与实况更接近；两个模式对小雨的占比均存在明显的高估，而对无雨的占比存在明显的低估，CMA模式预测的日降水不同强度等级的占比和实况更接近。

(2) 模式对前4候降水的预测技巧随时效的增加而降低，之后变化不大；在次季节时间尺度的第4~5候，两个模式对逐候降水预测的PC基本持平，ACC、RMSE、TCC方面，

CMA 模式的预测技巧均低于 EC 模式；第 6~9 候，两个模式的 ACC、TCC 基本持平，PC 和 RMSE 各有优劣，即预测技巧无明显差异。不同起报时间对梅雨关键期降水预测的评分存在波动，多时次集合平均可以在一定程度上提高 CMA 模式的预测技巧。

(3) 对次季节逐日降水预测的评估表明，CMA 模式次季节逐日降水预测的 TS 评分总体低于 ECMWF-S2S 模式，但在第 25 d 后，其对明显降水的预测技巧下降不明显，TS 评分高于 EC 模式；PPS 评分也是 EC 模式更优，两个模式均在多雨年的预测效果更好，在少雨年的预测效果相对较差。

(4) CMA 模式对第 4~5 候降水的预测技巧总体低于 EC 模式，可能源于对 EAP、副高等关键环流系统的预测存在不足，在第 15~30 d 时段，CMA 模式对 EAP 遥相关波列和副高指数的预测能力总体弱于 EC 模式，在第 31~45 d 时段，CMA 模式对 EAP 遥相关波列的预测效果更好，对副高的预测效果与 EC 模式相当。

本文从多个角度评估和比较了 CMA 和 EC 模式对安徽省夏季次季节降水的预测技巧，并初步分析了误差的来源，以期对次季节气候预测业务和改进国产模式提供参考。之后可以在此基础上开展误差订正和多模式、多方法最优集合，从应用的角度提高模式对次季节降水的预测能力。

参考文献

- 丁一汇,梁萍,2010.基于MJO的延伸预报[J].气象,36(7):111-122. Ding Y H, Liang P, 2010. Extended range forecast basing on MJO[J].Meteorol Mon,36(7):111-122(in Chinese).
- 杜良敏,柯宗建,2013.一种适用于延伸期过程事件预报的检验方法[J].应用气象学报,24(6):686-694. Du L M, Ke Z J, 2013. A verification approach for the assessment of extended-range process event prediction[J]. J Appl Meteor Sci, 24(6): 686-694 (in Chinese).
- 贺铮,徐邦琪,高迎侠,2018. BCC S2S模式对亚洲夏季风准双周振荡预报评估[J].应用气象学报,29(4):436-448. He Z, Hsu P C, Gao Y X, 2018. Evaluation of quasi-biweekly oscillation prediction in the Asian summer monsoon regions by BCC S2S model[J]. J Appl Meteor Sci, 29(4): 436-448 (in Chinese).
- 黄刚,严中伟,1999.东亚夏季风环流异常指数及其年际变化[J].科学通报,44(4):421-423. Huang G, Yan Z W, 1999. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations[J]. Chin Sci Bull, 44(14): 1325-1329.
- 黄荣辉,李维京,1988.夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制[J].大气科学,12(S1):107-116. Huang R H, Li W J, 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism[J]. Chin J Atmos Sci, 12(S1): 107-116 (in Chinese).
- 金荣花,马杰,任宏昌,等,2019.我国10~30天延伸期预报技术进展与发展对策[J].地球科学,34(8):814-825. Jin R H, Ma J, Ren H C, et al, 2019. Advances and development countermeasures of 10-30 days extended-range forecasting technology in China[J]. Adv Earth Sci,34(8):814-825(in Chinese).
- 李慧,王晓春,赵立清,等,2020.西北太平洋台风在S2S时间尺度预报效果评估[J].热带气象学报,36(1):51-59. Li H, Wang X C, Zhao L Q, et al, 2020. Evaluating northwestern pacific tropical storm forecasting with the subseasonal to seasonal prediction project database[J]. J Trop Meteor, 36(1): 51-59 (in Chinese).
- 李清泉,丁一汇,张培群,2004.一个全球海气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估[J].气象学报,62(6):740-751. Li Q Q, Ding Y H, Zhang P Q, 2004. Primary verification and assessment on the extra-seasonally predictive capability of a global

- atmospheric-oceanic coupled model in raining season[J]. *Acta Meteor Sin*, 62(6): 740-751 (in Chinese).
- 李帅, 杨杰, 龚志强, 等, 2021. 基于降水遥相关型的夏季降水模式预测改进研究[J]. *气候与环境研究*, 26(6): 678-690. Li S, Yang J, Gong Z Q, et al, 2021. Study on the improvement of summer precipitation model prediction based on precipitation teleconnection[J]. *Climatic Environ Res*, 26(6): 678-690 (in Chinese).
- 李维京, 2012. 现代气候业务[M]. 北京: 气象出版社: 479. Li W J, 2012. *Modern Climate Operation*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 479 (in Chinese).
- 林倩, 陈杰, 李威, 等, 2019. S2S次季节到季节预报对全球降水预报的性能评价[J]. *水资源研究*, 8(6): 547-556. Lin Q, Chen J, Li W, et al, 2019. Performance of sub-seasonal to seasonal (S2S) products for global precipitation forecasts[J]. *J Water Resour Res*, 8(6): 547-556 (in Chinese).
- 刘绿柳, 王国复, 肖潺, 2023. S2S气候模式产品在黄河流域径流预测中的应用[J]. *气象*, 49(11): 1396-1404. Liu L L, Wang G F, Xiao C, 2023. Application of S2S climate model products in runoff prediction in the Yellow River Basin[J]. *Meteor Mon*, 49(11): 1396-1404 (in Chinese).
- 刘芸芸, 李维京, 艾锐秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. *应用气象学报*, 23(4): 414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices[J]. *J Appl Meteor Sci*, 23(4): 414-423 (in Chinese).
- 庞轶舒, 马振峰, 郑然, 等, 2022. S2S模式对四川汛期候尺度降水预测技巧评估和误差订正[J]. *气象学报*, 80(6): 909-923. Pang Y S, Ma Z F, Zheng R, et al, 2022. Evaluation of forecast skills and error correction of S2S models for pentad precipitation anomaly in Sichuan Province during rainy season[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(6): 909-923 (in Chinese).
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等, 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. *应用气象学报*, 23(6): 739-747. Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al, 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. *J Appl Meteor Sci*, 23(6): 739-747 (in Chinese).
- 孙晨, 杨青青, 吴碧琼, 等, 2025. BCC-CPSv3次季节降水预测在长江流域汛期的检验评估[J]. *气象*, 51(6): 724-734. Sun C, Yang Q Q, Wu B Q, et al, 2025. Performance evaluation of BCC-CPSv3 subseasonal precipitation prediction in the flood season of the Yangtze River Basin[J]. *Meteor Mon*, 51(6): 724-734 (in Chinese).
- 屠妮妮, 何光碧, 衡志炜, 等, 2016. 基于MET系统对SWCWARMs及GRAPES模式在西南地区的站点检验分析[J]. *高原山地气象研究*, 36(2): 8-16. Tu N N, He G B, Heng Z W, et al, 2016. The station verification in Southwest China from SWCWARMs model and GRAPES model based on MET System[J]. *Plateau Mt Meteor Res*, 36(2): 8-16 (in Chinese).
- 王晨, 李建平, 2022. 基于次季节-季节(S2S)模式的中国东部夏季日降水预报评估[J]. *海洋气象学报*, 42(4): 22-36. Wang C, Li J P, 2022. Evaluation of summer daily precipitation forecast over eastern China based on the subseasonal to seasonal (S2S) model[J]. *J Mar Meteor*, 42(4): 22-36 (in Chinese).
- 魏凤英, 1999. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社: 274. Wei F Y, 1999. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 274 (in Chinese).
- 杨露, 陈杰, 孔若杉, 等, 2023. BCC-CPSv3-S2Sv2模式对中国区域降水和气温预测的性能评价[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 56(3): 281-295. Yang L, Chen J, Kong R S, et al, 2023. Performance evaluation of BCC-CPSv3-S2Sv2 for precipitation and temperature prediction over China[J]. *Eng J Wuhan Univ*, 56(3): 281-295 (in Chinese).
- 庄照荣, 薛纪善, 李兴良, 等, 2010. GRAPES 全球模式的模式误差估计[J]. *大气科学*, 34(3): 591-598. Zhuang Z R, Xue J S, Li X L, et al, 2010. Estimation of model error for the global GRAPES model[J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(3): 591-598 (in Chinese).
- Brunet G, Shapiro M, Hoskins B, et al, 2010. Collaboration of the weather and climate communities to advance subseasonal-to-seasonal prediction [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(10): 1397-1406.
- Ding Y H, Sun Y, 2001. A study on anomalous activities of East Asian summer monsoon during 1999[J]. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 79(6): 1119-1137.
- Huang G, Yan Z W, 1999. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations[J]. *Chin Sci Bull*, 44(14): 1325-1329.
- Huang R H, 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia[J]. *J Meteor Res*,

-
- 6(1): 25-37.
- Hudson D, Marshall A G, Alves O, 2011. Intraseasonal forecasting of the 2009 summer and winter Australian heat waves using POAMA[J]. *Wea Forecasting*, 26(3): 257-279.
- Jie W H, Vitart F, Wu T W, et al, 2017. Simulations of the Asian summer monsoon in the sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) database[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(706): 2282-2295.
- Liang P, Lin H, 2018. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system[J]. *Climate Dyn*, 50(3-4): 1007-1022.
- Liu H, Fung J C H, Lau A K H, et al, 2024. Enhancing quantitative precipitation estimation of NWP model with fundamental meteorological variables and transformer based deep learning model[J]. *Earth Space Sci*, 11: e2023EA003234.
- Liu Z Q, Jiang L P, Shi C X, et al, 2023. CRA-40/atmosphere—the first-generation Chinese atmospheric reanalysis (1979–2018): system description and performance evaluation[J]. *J Meteor Res*, 37(1): 1-19.
- Taylor K E, 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 106(D7): 7183-7192.
- Vigaud N, Robertson A W, Tippett M K, et al, 2017. Subseasonal predictability of boreal summer monsoon rainfall from ensemble forecasts[J]. *Front Environ Sci*, 5: 67.
- Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al, 2017. The subseasonal to sea-sonal (S2S) prediction project database[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(1): 163-173.
- Vitart F, Robertson A W, 2018. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events[J]. *npj Climate Atmos Sci*, 1(1): 3.
- Yu X J, Zhang L X, Zhou T J, et al, 2021. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: comparative assessment[J]. *J Meteor Res*, 35(1): 46-63.
- Zhu H C, Chen H S, Zhou Y, et al, 2019. Evaluation of the subseasonal forecast skill of surface soil moisture in the S2S database[J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 12(6): 467-474.