



基于S2S模式的长江中下游夏季降水次季节预报评估与诊断

朱寿鹏 吕阳 石承文 季焱 吉璐莹 智协飞 陈圣

Evaluation and diagnosis of subseasonal prediction of summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River by S2S models

ZHU Shoupeng, LYU Yang, SHI Chengwen, JI Yan, JI Luying, ZHI Xiefei, CHEN Shengjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-259>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

2024年2月初贵州东部及长江中下游低温雨雪冰冻天气的基本特征及成因

Characteristics and causes of low-temperature rainfall/snowfall and freezing weather event in eastern Guizhou and the middle and low reaches of the Yangtze River in early February 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 395–406 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-100>

2020年长江中下游梅汛期干冷空气演变特征及其作用分析

Evolution characteristics and effect on precipitation of dry cold air in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 2020 Meiyu period

暴雨灾害. 2021, 40(4): 342–351 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.002>

2020年梅雨期长江中下游地区雨滴谱垂直结构特征

Vertical structures of raindrop size distributions over the middle and lower reaches of Yangtze River during the Meiyu period in 2020

暴雨灾害. 2023, 42(4): 455–466 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-244>

湖南省夏季降水的日变化特征及形成原因分析

Analysis of diurnal variation characteristics and formation causes of summer precipitation in Hunan Province

暴雨灾害. 2026, 45(1): 130–141 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-012>

基于年际增量和EOF迭代法的长江流域汛期降水预测

Precipitation prediction during flood season in the Yangtze River Basin based on interannual increment and EOF iteration method

暴雨灾害. 2022, 41(6): 651–661 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-003>

基于集合降水预报的长江流域面雨量预报与应用

Prediction and application of area rainfall in the Yangtze River basin based on ensemble precipitation forecasting

暴雨灾害. 2022, 41(5): 571–579 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-029>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

朱寿鹏,吕阳,石承文,等. 2026. 基于 S2S 模式的长江中下游夏季降水次季节预报评估与诊断[J]. 暴雨灾害, 45(5):738–748. ZHU Shoupeng, LYU Yang, SHI Chengwen, et al. 2026. Evaluation and diagnosis of subseasonal prediction of summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River by S2S models [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(5):738–748 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025–259

基于 S2S 模式的长江中下游夏季降水次季节预报评估与诊断

朱寿鹏^{1, 2, 3}, 吕阳^{1, 4}, 石承文⁵, 季焱^{1, 4}, 吉璐莹^{2, 3}, 智协飞⁵, 陈圣劼^{3, 6}

(1. 全国暴雨研究中心, 武汉 430205; 2. 中国气象科学研究院-江苏省气象局 南京气象科技创新研究院, 南京 210041;
3. 中国气象局交通气象重点开放实验室/江苏省强对流灾害风险预警重点实验室, 南京 210041; 4. 无锡学院 大气与遥感学院, 无锡 214105; 5. 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/
气象灾害预报预警与评估协同创新中心/大气科学学院, 南京 210044; 6. 江苏省气象台, 南京 210041)

摘 要: 长江中下游是我国夏季降水最为集中的区域之一, 提高其次季节预报水平对防汛减灾具有重要意义。基于次季节至季节 (Subseasonal to Seasonal, S2S) 计划里中国气象局 (CMA)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)、英国气象局 (UKMO) 三套模式 (统称 S2S 模式) 预报资料, 系统评估了单模式及多模式集合 (MME) 对长江中下游夏季 1—6 候降水的预报技巧及误差时空结构特征, 进一步定量分析了各模式对夏季季节内振荡 (BSISO) 的预报能力及其与降水预报技巧之间的关系。结果表明: (1) 在确定性预报方面, 各模式均表现为集合平均优于控制预报, 预报技巧随时效延长逐渐衰减; ECMWF 整体最优、UKMO 次之、CMA 相对偏弱。MME 在第 3 候时效以后表现出更稳定且更高的技巧, 显示出较高的预报延伸潜力。 (2) 概率预报评估显示, ECMWF 在不同降水阈值下均表现最好, 且预报技巧随降水阈值升高呈现先增后减特征; MME 在所有时效和所有阈值下均显著优于气候态预报和单模式预报。Brier Score (BS) 评分分解诊断表明, 单模式对极端强降水较中部阈值降水表现出更高的可靠性但更低分辨能力, MME 相较于单模式在可靠性与分辨能力两方面均有明显改进。 (3) 各模式对 BSISO 信号的预报技巧与其降水预报技巧具有显著正相关, 相关系数达 0.9 以上, BSISO 活动是该区域次季节降水可预报性的关键来源之一。该研究结果有望为各模式在长江中下游夏季降水次季节预报业务中的应用以及预报订正提供参考。

关键词: S2S 模式; 长江中下游; 夏季降水; 次季节预报; 预报技巧

中图分类号: P456.7

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025–259

Evaluation and diagnosis of subseasonal prediction of summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River by S2S models

ZHU Shoupeng^{1, 2, 3}, LYU Yang^{1, 4}, SHI Chengwen⁵, JI Yan^{1, 4}, JI Luying^{2, 3}, ZHI Xiefei⁵, CHEN Shengjie^{3, 6}

(1. Heavy Rainfall Research Center of China, Wuhan 430205; 2. Nanjing Innovation Institute for Atmospheric Sciences, Chinese Academy of Meteorological Sciences–Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210041; 3. Jiangsu Key Laboratory of Severe Storm Disaster Risk / Key Laboratory of Transportation Meteorology of CMA, Nanjing 210041; 4. School of Atmospheric Sciences and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105; 5. State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 6. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210041)

Abstract: The middle and lower reaches of the Yangtze River represent one of the regions in China experiencing heavy summer precipitation. Improving subseasonal prediction skills in this region is therefore of great importance for flood prevention and disaster

收稿日期: 2025–12–04; 定稿日期: 2026–03–04

资助项目: 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Q17, BYKJ2025Q18, BYKJ2025Q25); 国家自然科学基金项目 (42205162, 42275164); 江苏省自然科学基金项目 (BK20231110)

第一作者: 朱寿鹏, 主要从事数值天气预报和应用气象研究。E-mail: zhusp@cma.gov.cn

通信作者: 吕阳, 主要从事次季节预测技术和人工智能在气象中的应用研究。E-mail: yanglv_bh@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

mitigation. This study systematically evaluates the forecasting skill and error characteristics of both single-model (ECMWF, CMA, and UKMO) and multi-model ensemble systems for summer precipitation in the middle and lower Yangtze River region from lead pentad 1 to 6. We further quantitatively analyze the model ability to forecast BSISO and its relationship with precipitation forecasting skill. The results indicate: (1) In deterministic forecasting, all models show that ensemble mean forecasts outperform control forecasts, with forecast skill gradually decreasing as lead time extends. ECMWF is the best overall, followed by UKMO and CMA. The multi-model ensemble shows the most stable and highest skill after the 3rd lead pentad, demonstrating greater forecast extension potential. (2) Probability evaluation shows that ECMWF performs the best across all precipitation thresholds, with forecast skill increasing at the beginning and then decreasing as the threshold rises. The multi-model ensemble significantly outperforms both the climate baseline and single-model forecasts across all lead times and thresholds. Brier score decomposition reveals that single-model forecasts for extreme high/low precipitation thresholds exhibit higher reliability but lower resolution compared to mid-range thresholds. In contrast, multi-model ensembles show significant improvements in both reliability and resolution. (3) The skill of models in forecasting BSISO signals is significantly positively correlated with their precipitation forecasting skill, showing correlation coefficients of greater than 0.9 and indicating that BSISO activity is a key source of subseasonal predictability for precipitation over this region. This study provides guidance for application of models in subseasonal precipitation forecasting over the middle and lower Yangtze River, and offers insights for forecast calibration.

Key words: S2S models; the middle and lower reaches of the Yangtze River; summer precipitation; subseasonal prediction; prediction diagnosis

引言

长江中下游位于东亚季风区核心地带,是我国夏季降水最为集中的区域之一,其降水异常往往与梅雨期长短、汛期强降水事件频发密切相关,对流域防汛减灾和区域经济社会发展具有重要影响(Ding and Chan, 2005; 张立凤, 2024)。同时,该区域夏季降水呈现显著的时空不均匀性,其不同时间尺度预报对于防汛抢险的气象保障需求具有重要现实意义(Ding et al., 2021; 杨梦兮等, 2025)。

近年来,世界气象组织(WMO)大力倡导无缝隙预报理念,强调在统一的物理框架下实现从短期天气预报到季节乃至更长时间尺度气候预测的连续过渡,以满足气象服务对多时间尺度的一体化需求。在这一体系中,次季节至季节(Subseasonal to Seasonal, S2S)预报被认为是连接天气预报与季节预测的关键桥梁,同时也是当前国际预报体系中的主要难题之一(Robertson et al., 2015; Vitart and Robertson, 2018; 池艳珍等, 2025)。在该时间尺度上,天气尺度扰动的不确定性仍然较强,也更易受海气相互作用、陆面过程及低频大尺度模态等缓变可预报信号的调制,是提升预报技巧的物理基础(章大全等, 2019; Zhu et al., 2021)。因此,识别并刻画控制东亚季风及中国东部降水季节内变化的关键低频信号,是提高区域S2S降水预报能力的重要切入点。

在众多低频信号中,Madden-Julian 振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)是热带最主要的季节内振荡信号,而北半球夏季季节内振荡(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)则是其在北半球夏季季风背景下的季节性演变形式(Kikuchi, 2021; 王

熙乔等, 2023)。随着东亚夏季风的爆发与北传,原本以东西传播为主的MJO逐渐发生形式转换,转变为具有显著东北传播特征的BSISO(Hsu et al., 2016; 任宏利和沈雨旸, 2016)。BSISO通过调制印度洋—西北太平洋对流活动、影响副热带急流和西太平洋副热带高压的位置和强度,在动力结构上呈现更强的斜压性和环流-对流耦合特征,引发长江中下游地区显著的降水异常转换(Lee et al., 2013; 许乐心等, 2017)。因此,相比强调赤道东传的MJO结构,BSISO在解释与表征东亚夏季风区域降水季节内变化方面更具针对性(Wu et al., 2023; Lyu et al., 2025),是影响长江中下游夏季降水次季节可预报性的核心信号来源之一。

随着世界天气研究计划(WWRP)和世界气候研究计划(WCRP)共同推动开展S2S预测计划,国际上主要业务中心开发了多套次季节集合预报系统,为评估不同模式的预报能力、理解其预报误差来源以及挖掘可预报性信号提供了数据基础(Vitart et al., 2017, 2025)。已有研究基于S2S数据对区域降水以及MJO、BSISO等关键低频模态的预报技巧进行了评估,结果表明不同模式在不同区域的降水S2S技巧差异显著,且对大尺度气候模态的预报能力通常优于降水本身,降水预报技巧与模式对低频振荡的模拟能力密切相关(Tian et al., 2017; Liang and Lin, 2018)。然而,现有研究多聚焦于单模式或更大空间尺度(孙可可和吴小飞, 2024; Guo et al., 2025; 孙晨等, 2025),对于长江中下游这一夏季降水集中且灾害频发的关键区域,针对性的、多模式的系统分析较少,特别是对其夏季降水S2S预报技巧与BSISO可预报性之间的定量关系,仍需深入研究。

基于上述背景,选取S2S计划里中国气象局

(CMA)、欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)、英国气象局 (UKMO) 三套模式 (统称 S2S 模式), 针对长江中下游地区开展 1—6 候夏季降水预报评估与诊断, 从确定性预报和概率预报两个维度分析不同模式及多模式集合系统的降水预报技巧及其空间分布特征, 并通过预报误差分解揭示模式误差的结构特征, 在此基础上进一步量化探讨区域降水预报技巧与 BSISO 信号之间的关系, 为各模式在长江中下游夏季降水次季节预报业务服务中的应用提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用预报资料为 WMO 组织实施的 S2S 模式的降水回报数据 (Vitart et al., 2017), 分别来源于 CMA、ECMWF、UKMO, 资料水平分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ 。三套模式相关信息如表 1 所示。降水观测资料选用中国气象局 CN05.1 格点化观测数据, 由吴佳和高学杰 (2013) 使用国家气象信息中心 2 400 余个国家级台站的逐日观测数据, 采用薄板样条插值法、角距权重法等分别插值, 得到水平分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的逐日观测数据。在对模式 BSISO 预报效果进行评估时, 将 NCEP/NCAR 提供的向外长波辐射 (Outgoing Long-wave Radiation, OLR) 和 850 hPa 纬向风场再分析资料作为观测对比数据 (Kanamitsu et al., 2002)。

表 1 S2S 模式资料相关信息

Table 1 Brief description of S2S data used in the study

数据中心	回报形式	更新频率/ (次·周 ⁻¹)	回报时段	集合成员 数量/个
CMA	动态	2	过去 15 a	4
ECMWF	动态	2	过去 20 a	11
UKMO	动态	1	1993—2016	7

本文研究区域主要覆盖长江中下游地区 (110° — 123°E , 27° — 34°N)。为保证所用数据的时空一致性, 预报时段取为 2006—2016 年的 5—9 月 (本文定义为夏季时段); 模式评估与诊断过程中, 将模式资料与观测资料统一插值为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率。此外, 由于三套模式的起报频率和起报日期均存在差异, 为保证样本一致性, 首先将 ECMWF 和 CMA 的预报结果插值到逐日时间分辨率, 然后仅选取与 UKMO 相同的起报日期作为统一起报样本, 再构建逐候预报产品用于评估。插值方法参考 Yang 等 (2018) 的工作, 已有研究表明该处理方式对预报技巧影响较小, 不会显著改变统计结论 (Wu et al., 2023)。

1.2 方法介绍

1.2.1 确定性预报检验评估指标

为了对原始单模式预报以及多模式集合平均预报等确定性预报进行量化验证, 本文采用的评估指标主要包括均方根误差 (RMSE)、时间相关系数 (TCC)、距平相关系数 (ACC) 等。其中, TCC 主要用于长江中下游区域平均降水时间序列的确定性预报评估, 以刻画模式对降水演变过程的整体预报能力; 而 ACC 则用于 BSISO 相关诊断, 重点评估模式对季节内振荡异常演变的再现能力。

在确定性预报中, 多模式集合 (Multi-Model Ensemble, MME) 指多模式集合平均预报, 具体来说, 就是先对每个模式求多成员集合平均, 再对三个模式的集合平均做等权平均。

1.2.2 概率预报检验评估指标

连续等级概率评分 (Continuous Ranked Probability Score, CRPS, 记为 C_{RPS}) 能够综合衡量预报分布与观测值之间的差异, 是概率预报中最常用、最重要的评分指标之一, 计算公式如下

$$C_{\text{RPS}} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \int [f(y_i) - H(y_i - x_i)]^2 dy \quad (1)$$

$$H(y_i - x_i) = \begin{cases} 1 & (y_i - x_i \geq 0) \\ 0 & (y_i - x_i < 0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, s 为预报样本总数, y_i 和 x_i 分别为第 i 个样本的预报值和观测值, $f(y_i)$ 表示预报值的概率密度函数 (PDF), H 为阶跃 (Heaviside) 函数。CRPS 值是非负的, 完美预报对应的 CRPS 值为 0, 越高的 CRPS 值表现出越不准确的概率预报结果。

对于特定阈值的概率预报, 利用 Brier Score (BS, 记为 B_s) 评分对二分类事件概率预报进行检验, 计算公式如下

$$B_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - o_i)^2 \quad (3)$$

式中, n 为预报事件总数, f_i 为预报中事件 i 发生的概率, o_i 为观测中事件 i 的发生情况, 若事件发生则观测 $o_i = 1$, 若事件不发生则观测 $o_i = 0$ 。因此, BS 评分分布于 $[0, 1]$, 完美预报对应的 BS 评分为 0, 越高的 BS 评分表现出越不准确的预报结果。对 BS 评分来说, 通常还会使用到其技巧评分 (Brier Skill Score, BSS, 记为 B_{SS})。

$$B_{\text{SS}} = \frac{B_{\text{S-eva}} - B_{\text{S-ref}}}{0 - B_{\text{S-ref}}} = 1 - \frac{B_{\text{S-eva}}}{B_{\text{S-ref}}} \quad (4)$$

其中, $B_{\text{S-eva}}$ 和 $B_{\text{S-ref}}$ 分别为所评估预报对象和参考预报

的BS评分。本文使用气候态预报作为参考预报。

BS评分还可以通过代数分解得到 (Murphy, 1973; Wilks, 2019)

$$B_S = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k (f_k - \bar{o}_k)^2 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m n_k (\bar{o}_k - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}) \quad (5)$$

其中, n 为预报事件总数, m 为概率阈值范围数量, n_k 为概率阈值范围 k 内的预报数量, f_k 为预报结果在阈值范围 k 内的概率, $\bar{o}_k$ 为相应的观测频率, $\bar{o}$ 为事件发生的气候概率。

该分解形式自左向右, 分别为BS评分的可靠性项 (B_{S1})、分辨能力项 (B_{S2} , 又称辨析度项) 和不确定性项 (B_{S3}), 即

$$B_S = B_{S1} - B_{S2} + B_{S3} \quad (6)$$

其中, B_{S1} 只依赖于样本气候的相对频率, 不受预报影响。由于一个更小的BS评分表征着一个更准确的预报系统, 因此需要 B_{S2} 尽可能小, B_{S3} 尽可能大。

在概率预报中, MME 通过将三个模式的所有成员视为等同, 形成大集合概率产品。本文概率预报评估针对的是基于样本分位数定义的阈值降水事件, 即以历史样本中降水量的不同百分位作为事件阈值, 所述极端降水主要用于刻画分布尾部的高(低)阈值降水情形, 并不对应于以固定雨量标准(如暴雨、特大暴雨)界定的灾害性极端降水事件。

1.2.3 夏季季节内振荡 (BSISO) 指数

本文采用 Lee 等 (2013) 提出的多变量 BSISO 指数方法构建 BSISO1 和 BSISO2 指数, 以诊断 BSISO 演变特征。具体做法是选取 1981—2010 年夏季东亚和南亚区域 (40° — 160° E, 10° S— 40° N) 的 OLR 和 850 hPa 纬向风作为诊断变量, 进行多变量 EOF 分

析, 其前两个主模态对应 BSISO 的主要传播结构, 第一和第二模态的时间系数分别定义为 BSISO1 和 BSISO2 指数。在模式预报评估中, 为保证与观测指数的可比性, 首先使用观测资料构建的 EOF 空间模态作为基向量, 然后将各模式预报的距平场投影到该基向量上, 得到对应的预报 BSISO1 和 BSISO2 指数时间序列。

2 预报结果总体评估

基于 S2S 模式的长江中下游夏季降水确定性预报开展总体评估, 评估对象包括各模式控制预报、集合平均以及 MME。图 1 给出 RMSE 和 TCC 第 1—6 候不同时效的变化。整体来看, 三套模式均表现出集合平均预报 (ENS) 优于控制预报 (CF), 且预报技巧均随时效延长逐步衰减的规律, 但不同模式技巧下降幅度和持续性存在明显差异。

从控制预报来看, 在第 1—3 候预报时效, ECMWF 保持有最低的 RMSE 及最高的 TCC (图 1), 说明其在中短期时效内对区域降水的刻画能力明显优于 CMA 和 UKMO; 而 CMA 与 UKMO 的 RMSE 和 TCC 两种指标优势不同, 其中 CMA 表现出较 UKMO 更低的 RMSE 但其 TCC 较低, 反映出其对降水事件阈值估计较好但时空一致性欠佳。随着预报时效延长至第 4—6 候, ECMWF 与 UKMO 控制预报表现相当, 而 CMA 控制预报技巧相对较低。在对各模式分别进行集合平均之后, 三套模式的 RMSE 均不同程度降低, TCC 提高, 尤其是 UKMO 表现改善最为显著, 且与控制预报结果不同的是, 无论从 RMSE 还是 TCC 来看, UKMO 集合平均预报均表现出较 CMA 更高的预报技巧。与 CMA 和 UKMO 相比, ECMWF

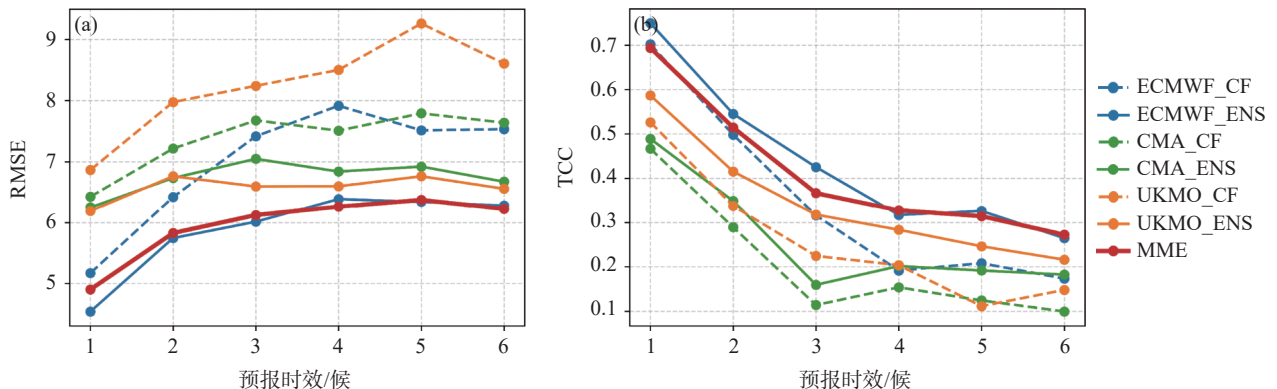


图 1 1981—2010 年 ECMWF、CMA 和 UKMO 控制预报 (CF, 虚线) 与集合平均预报 (ENS, 实线) 以及多模式集合 (MME) 平均预报 (红色实线) 对长江中下游夏季降水预报的 RMSE (a) 和 TCC (b) 第 1—6 候不同时效的变化

Fig. 1 Variations of (a) RMSE and (b) TCC of summer precipitation forecasts over the middle and lower reaches of the Yangtze River across lead pentads 1–6 for control forecasts (dashed lines) and ensemble-mean forecasts (solid lines) of ECMWF, CMA, and UKMO S2S models, as well as MME (red solid lines) during 1981–2010

不仅在初始阶段表现较高技巧,其技巧衰减速率也明显较缓,整体更高。总体来看,对于长江中下游夏季降水次季节预报,各模式集合平均不仅能够减小随机扰动带来的振荡误差,也在一定程度上提升了对降水信号的稳定识别能力。同时,MME 在前 3 候时效的预报技巧较 ECMWF 集合平均略低,后 3 候与 ECMWF 集合平均技巧接近。因此,本文后续分析不再对单模式控制预报开展详细讨论,仅主要针对三套模式集合平均以及 MME 展开。

图 2 进一步给出各模式集合平均以及 MME 概率预报的 CRPS 不同时效空间分布。由图可知,CRPS 值在第 1—2 候预报时效较低(图 2a—h),表明在短期内模式对降水概率分布刻画较准确。但随着预报时效延长,CRPS 逐渐上升,上升幅度在东南部地区较明显,至第 4 候时效时逐步稳定(图 2m—p)。模式间

对比发现,ECMWF 整体 CRPS 保持在最低水平,且表现为从东南向西北由高到低的分布特征。CMA 在三套模式中表现出最优的 CRPS, UKMO 则介于 ECMWF 与 CMA 之间。三套模式 CRPS 均表现出在东南部丘陵地区显著偏高的分布特征,该区域地形起伏显著,地形对低层水汽输送、抬升触发及对流发展具有重要调制作用,而较粗的模式分辨率难以显式解析这类中小尺度特征,其影响主要依赖于对流、云微物理及边界层等参数化方案间接体现,从而在复杂地形区导致更大的降水不确定性和更大的预报偏差(张铭明等, 2021; Fan et al., 2024)。相比于单个模式集合平均, MME 表现最佳,其低值 CRPS 区域在四种预报结果中覆盖最广,表明其在概率预报分布表征上的显著优势。

图 3 给出了各模式集合平均以及 MME 在 10%~

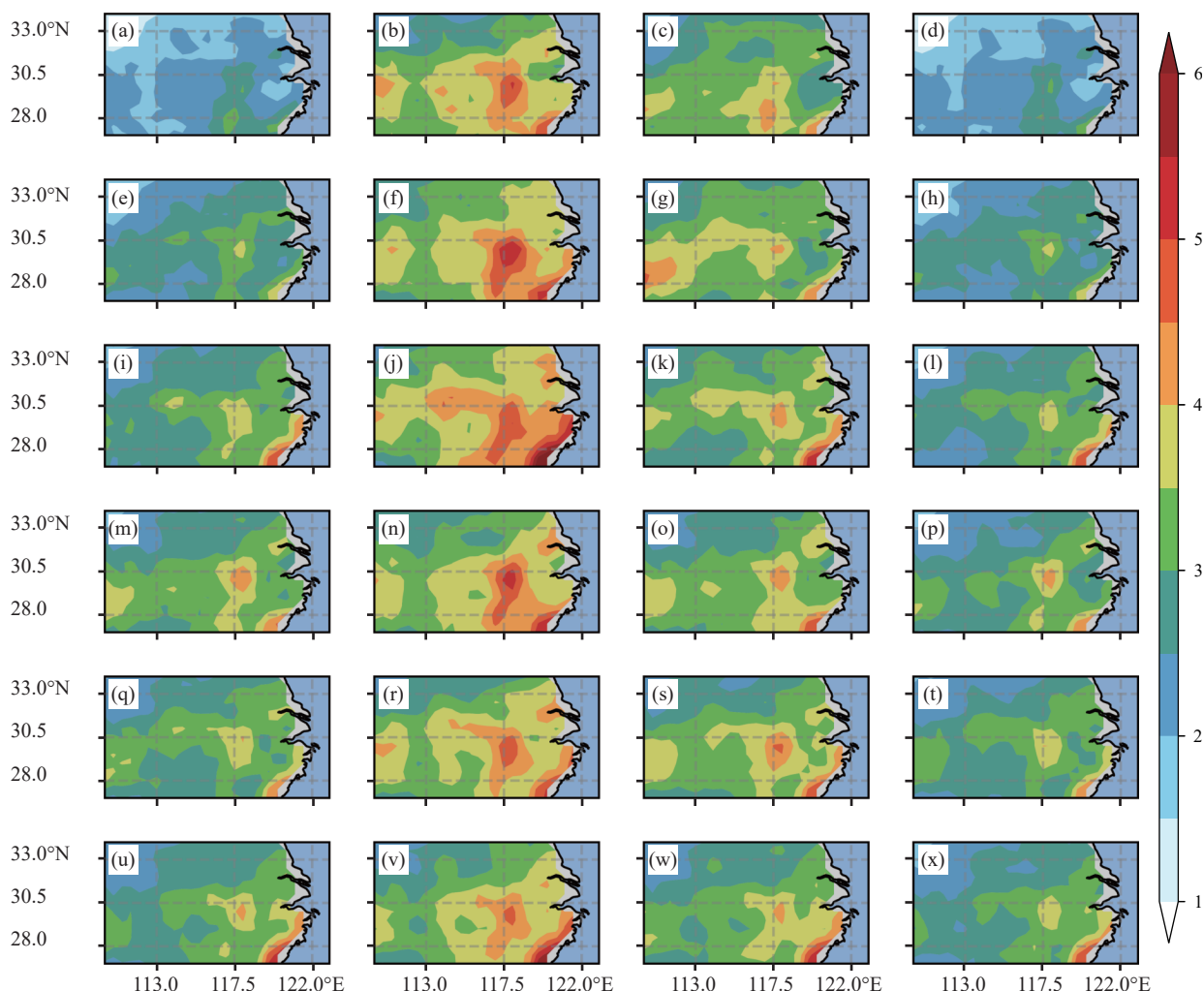


图 2 1981—2010 年 ECMWF (a, e, i, m, q, u)、CMA (b, f, j, n, r, v)、UKMO (c, g, k, o, s, w) 集合平均以及 MME (d, h, l, p, t, x) 对长江中下游夏季降水的第 1 (a—d)、2 (e—h)、3 (i—l)、4 (m—p)、5 (q—t)、6 (u—x) 候时效的概率预报 CRPS (填色) 空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of CRPS (shading) for ensemble forecasts of summer precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River at lead pentads (a—d) 1, (e—h) 2, (i—l) 3, (m—p) 4, (q—t) 5, (u—x) 6 for (a, e, i, m, q, u) ECMWF, (b, f, j, n, r, v) CMA, (c, g, k, o, s, w) UKMO, and (d, h, l, p, t, x) MME during 1981–2010

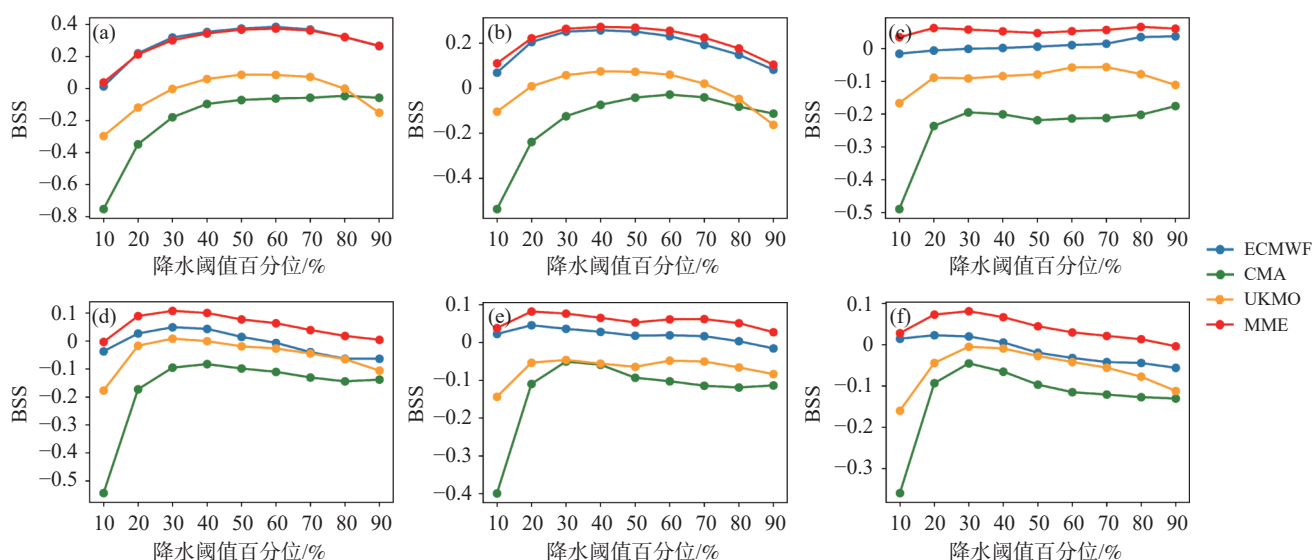


图3 1981—2010年不同降水阈值百分位下ECMWF、CMA、UKMO集合平均以及MME对长江中下游夏季降水的第1(a)、2(b)、3(c)、4(d)、5(e)、6(f)候时效的概率预报BSS评分

Fig. 3 Variations of BSS with different precipitation percentile thresholds for ensemble forecasts of ECMWF, CMA, UKMO, and MME for summer precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River at lead pentad (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5 and (f) 6 during 1981-2010

90%降水阈值百分位下相较于气候态预报的BSS评分随预报时效的变化。整体来看,在不同预报时效下,BSS大多表现出随降水阈值百分位的提高先增后减的特征。在第1候预报时效,MME与ECMWF对所有阈值的BSS十分一致,且始终大于0(图3a),表现出较气候态预报更高的技巧;UKMO的BSS则相对较低,仅在30%~80%阈值具有非负值。尽管CMA的BSS并未随降水阈值百分位增加而衰减,但依然表现为负值评分,即其预报技巧不及气候态预报结果。随着预报时效的延长,各模式集合平均的BSS呈下降趋势,且从第3候时效后逐步稳定。在第2—6候预报时效(图3b—f),三套单模式集合平均的BSS维持了ECMWF最优、UKMO其次、CMA略低的相对特征。但是,即使是最优的ECMWF模式,也会在某些或较多降水阈值百分位下表现出负值BSS;相比之下,MME的优势明显且稳定,其在所有时效、所有阈值均表现为非负BSS,即MME降水概率预报始终优于单模式预报或气候态预报,但依然表现出中等阈值降水预报较好、极端降水预报欠佳的特征。

需要指出的是,本文结果主要反映的是ECMWF、CMA和UKMO三套S2S模式集合平均在当前业务配置下的综合性能对比,三套模式在集合成员数量上存在明显差异,这可能在一定程度上影响各模式预报技巧。已有研究表明,较大的集合成员数有助于更充分地描述预报不确定性,从而在概率预报中提高概率分布估计的稳定性,并可能带来更优的

CRPS或BSS表现;而在集合平均预报中,成员数的增加也有助于降低随机误差,使集合平均场更加稳健(Buizza and Palmer, 1998; Ferro et al., 2008; Han et al., 2023)。然而,集合成员数并非决定预报技巧的唯一因素,模式的动力框架、物理过程参数化方案、初始扰动设计以及系统性偏差特征等,往往对集合预报性能具有更加重要的影响(Buizza et al., 1999; Palmer et al., 2004)。

3 概率预报误差诊断分析

为了剖析不同集合预报误差来源,本节对三套模式集合平均以及MME进行了概率预报BS评分分解诊断。由于不确定性项只依赖于观测,为变量本身固有属性,图4仅展示可靠性项和分辨能力两项随不同降水阈值百分位以及第3—6候不同预报时效的变化情况。需注意的是,正如1.2.2节中介绍,可靠性项为负向指标,分辨能力项为正向指标,即可靠性项越小表明可靠性越强,而分辨能力项越大表示分辨能力越强。

可以看到,对于可靠性(图4a—d),三套模式在不同预报时效均呈现出ECMWF优于UKMO优于CMA的特征,且可靠性随降水阈值百分位提高先减后增,最强可靠性通常分布在50%阈值及其前后;MME有效提高了BS可靠性,在不同时效、不同阈值均表现出优于单模式的可靠性结果,其分布特征与单模式类似,即对50%阈值降水预报的可靠性通常较低,而对更小或更大阈值的降水预报可靠性较

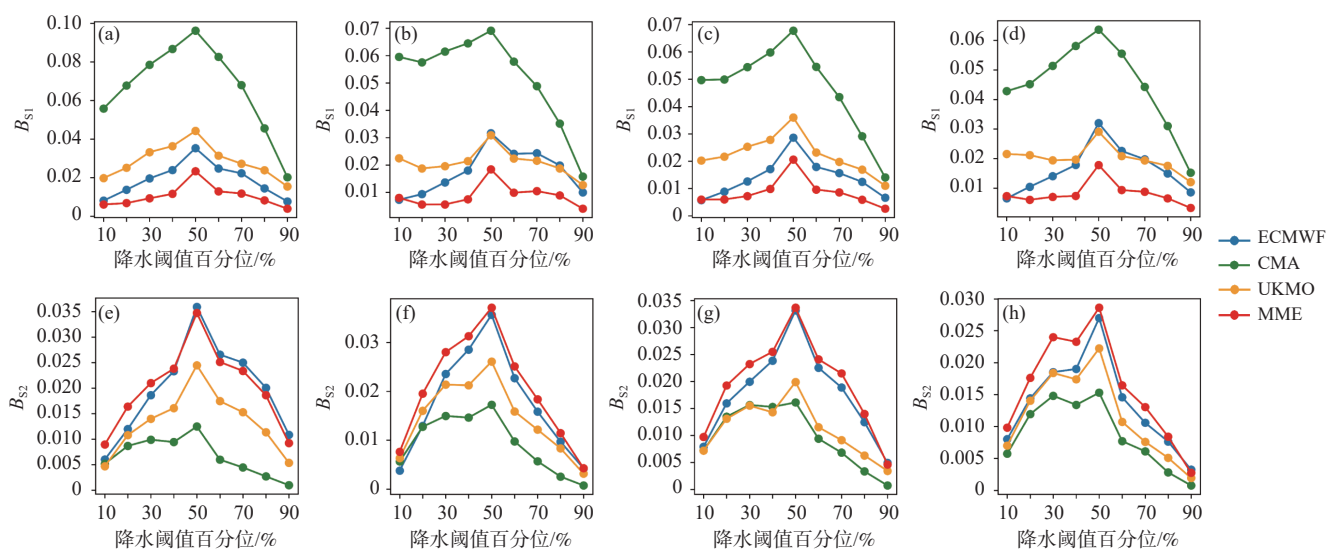


图 4 1981—2010 年 ECMWF、CMA、UKMO 集合平均以及 MME 对长江中下游夏季降水的第 3 (a, e)、4 (b, f)、5 (c, g)、6 (d, h) 候时效的概率预报评分可靠性项 B_{S1} (a—d) 和分辨能力项 B_{S2} (e—h) 随不同降水阈值百分位的变化

Fig. 4 Variations of the BS (a—d) reliability and (e—h) resolution terms with different precipitation percentile thresholds for ensemble forecasts of ECMWF, CMA, UKMO, and MME for summer precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River at lead pentad

(a, e) 3, (b, f) 4, (c, g) 5 and (d, h) 6 during 1981-2010

高。对于分辨能力 (图 4e—h), 三套模式相对劣特征不变, 并随降水阈值百分位提高先增后减; MME 在第 3 候预报时效的分辨能力与最优单模式 ECMWF 类似, 之后各个时效均优于三个单模式, 同时, 其分辨能力随着降水阈值百分位提高而增加至 50% 后迅速衰减。总结一下, MME 均始终优于单模式, 表现出更好的区域降水概率估计能力, 且随着降水阈值百分位提高至 50%, 可靠性降低、分辨能力增加, 50% 阈值之后可靠性增加、分辨能力降低, 即对极端更小或更大阈值的降水预报可靠性较高但分辨能力较低。

再以第 5 候预报时效为例, 图 5 和图 6 分别给出三套模式集合平均以及 MME 对 10%、30%、60%、90% 四种阈值降水的概率预报 BS 评分可靠性项和分辨能力项空间分布。整体来看, 各预报系统之间差异特征与图 4 分析一致。单模式集合平均预报可靠性误差分布较为零散, 且在浙江南部、江西北部及安徽山区等降水机制复杂地区更为明显; MME 的可靠性明显较高, 且对两端 (10% 和 90%) 阈值降水预报可靠性优于中部 (30% 和 60%) 阈值降水 (图 5)。另一方面, 对于分辨能力项, MME 同样表现出显著优于单模式的技巧, 且对中部 (30% 和 60%) 阈值降水预报提升尤为明显, 即对更小或更大阈值的降水预报分辨能力有限 (图 6)。同时, 对比两项空间分布可见, 无论是单模式集合系统还是多模式集合系统, 分辨能力较高 (分辨能力项较大) 区域往往对应着可靠性较强 (可靠性项较小) 的区域。

4 模式可预报性来源

前述对降水次季节预报的评估表明, 尽管三套模式在长江中下游夏季降水的第 1—2 候时效具有较高技巧, MME 也在一定程度上改善了预报性能, 但总体上, 预报技巧随时效延长仍然衰减显著, 且不同模式在技巧水平和空间分布上存在明显差异。正如引言所述, 考虑 BSISO 是北半球夏季的次季节尺度可预报性主要来源之一, 其位相演变不仅调制着东亚季风雨带的季节内振荡与南北摆动, 也直接影响长江中下游区域降水的时空变率。为此, 进一步从 BSISO1 和 BSISO2 两个模态出发, 系统评估三套模式以及 MME 的 BSISO 预报技巧, 并探讨其与降水预报技巧之间的联系, 以揭示区域降水预报技巧差异的潜在来源。

图 7 给出三套模式各自集合平均以及 MME 对 BSISO1 与 BSISO2 预报的 ACC 随时效变化特征。结果表明, 单模式集合平均对 BSISO1 的预报技巧通常在第 1 候时效保持较高水平且十分稳定, 之后随预报时效延长而逐渐降低 (图 7a)。三套模式中, ECMWF 对 BSISO1 始终有着最高的预报技巧, 在第 1 候时效 ACC 均达到 0.9 以上, 尽管随后不断降低, 其技巧依然能够维持到 4 候以上。相较之下, UKMO 和 CMA 略显不足, ACC>0.5 的技巧仅能维持到 3 候左右。对于 BSISO2 预报, 其模式间差异与 BSISO1 预报一致, 即 ECMWF 优于 UKMO、优于 CMA, 但 ACC 值较 BSISO1 结果略小、预报技巧略低 (图 7b)。另一方面, MME 在两个模态上均与最优

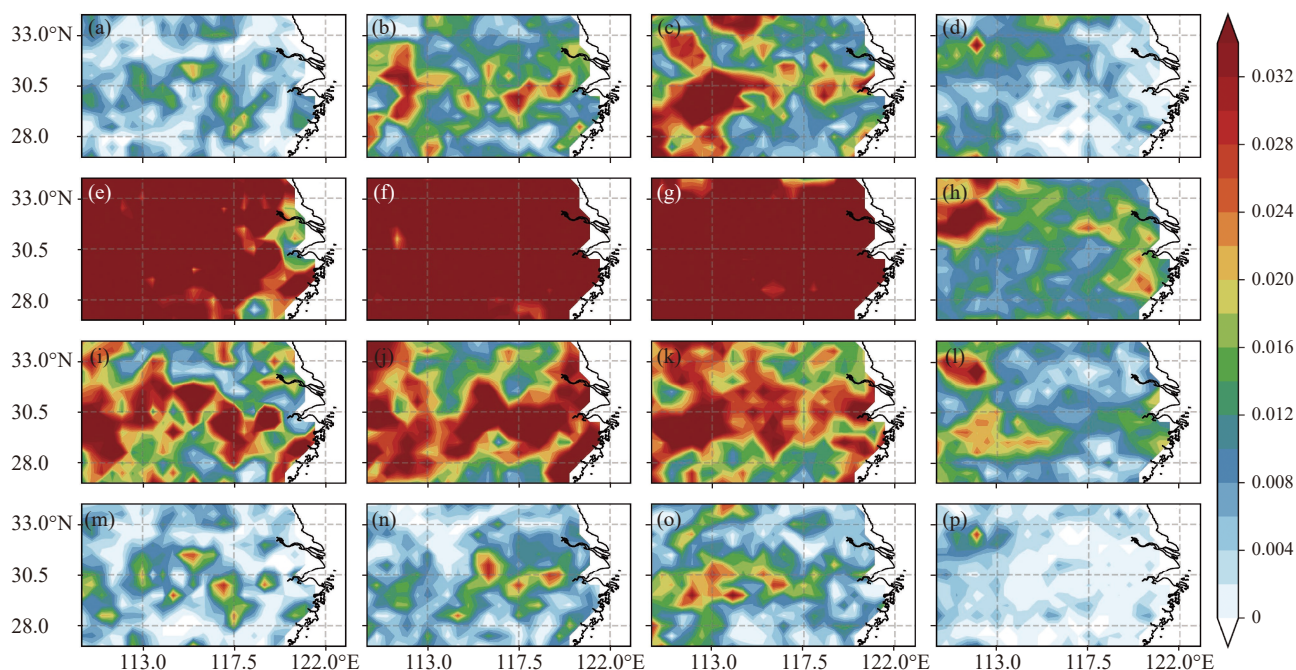


图 5 1981—2010 年 ECMWF (a—d)、CMA (e—h)、UKMO (i—l) 集合平均以及 MME (m—p) 对长江中下游夏季降水 10% (a, e, i, m)、30% (b, f, j, n)、60% (c, g, k, o) 和 90% (d, h, l, p) 阈值百分位在第 5 候时效的 B_{S1} 项空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of the BS reliability term for ensemble forecasts of (a—d) ECMWF, (e—h) CMA, (i—l) UKMO, and (m—p) MME at lead pentad 5, for summer precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River, under percentile thresholds of (a, e, i, m) 10%, (b, f, j, n) 30%, (c, g, k, o) 60%, and (d, h, l, p) 90% during 1981-2010

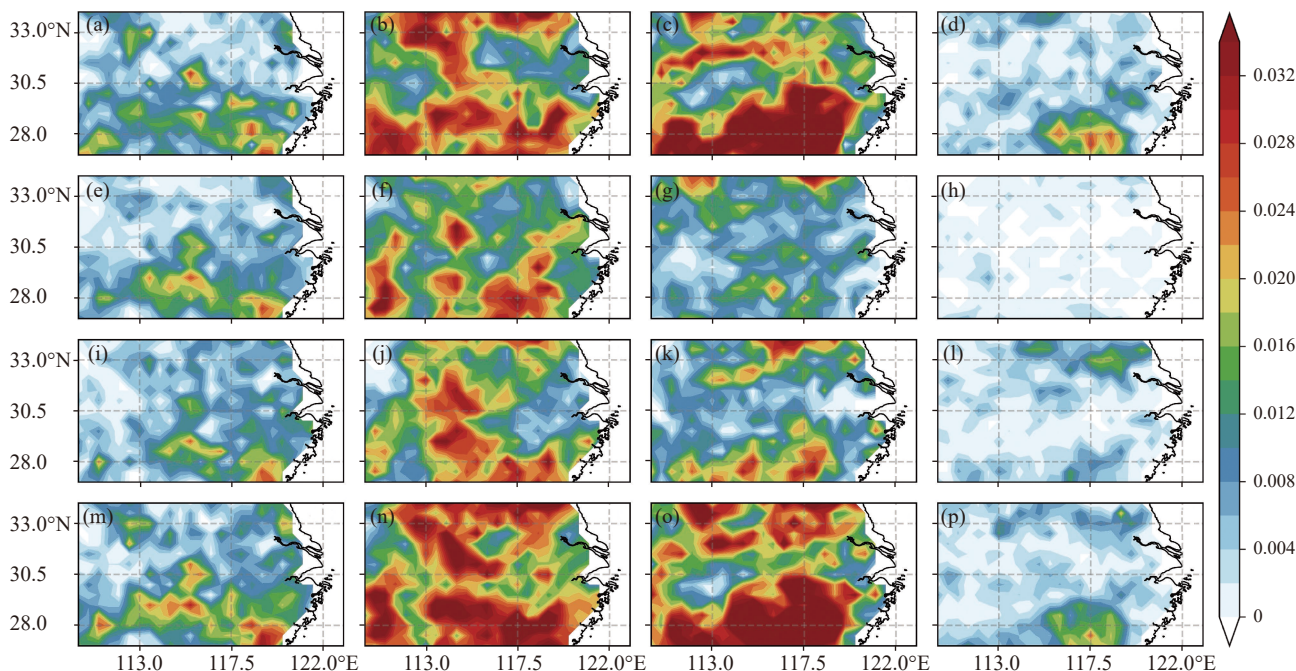


图 6 同图 5, 但为 B_{S2} 项空间分布

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the BS resolution term

模式 ECMWF 表现接近, 整体维持着较高的预报技巧, 表明其对此类低频振荡信号具有较强的捕捉能力。

分析图 7 可知, 各模式集合平均与 MME 对 BSISO 的预报技巧及其随时效变化的演变特征与长江中下游夏季降水次季节预报技巧表现具有高度一致

性。因此, 为进一步定量探讨模式对 BSISO 信号 (包括 BSISO1 和 BSISO2) 模拟能力与降水预报技巧之间的关系。图 8 基于所有模式成员的预报结果, 给出了 BSISO 预报 ACC 与降水预报 TCC 的散点关系图。从中可见, 无论是 BSISO1 还是 BSISO2, 其预报 ACC

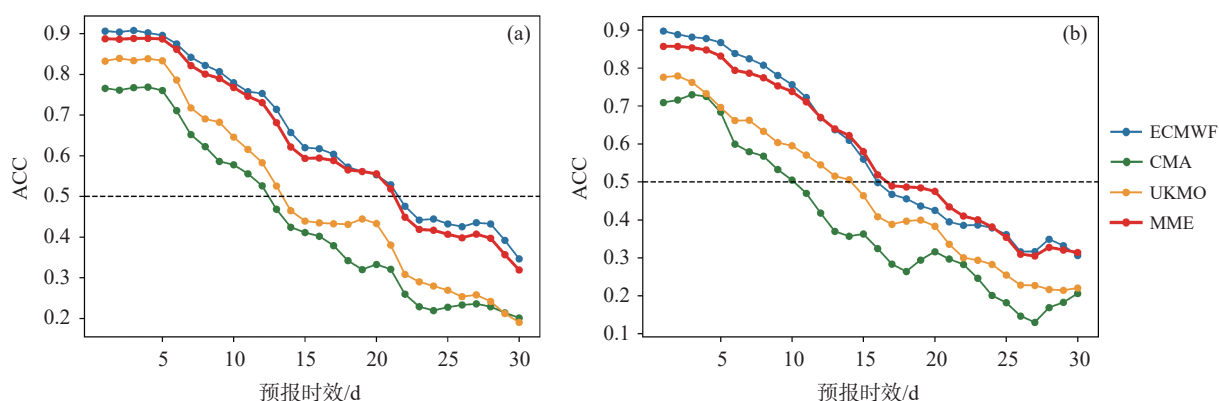


图 7 1981—2010 年 ECMWF、CMA、UKMO 集合平均以及 MME 对 BSISO1 (a) 和 BSISO2 (b) 预报的 ACC 在 1~30 d 时效的变化 (图中虚线表示 ACC 值为 0.5)

Fig. 7 Variations of ACC for (a) BSISO1 and (b) BSISO2 forecasts across forecast lead days 1~30 from ensemble-mean forecasts of ECMWF, CMA and UKMO, as well as MME during 1981-2010 (the dashed lines indicate 0.5 ACC)

与降水预报 TCC 之间均表现出显著的正相关关系, 相关系数分别达到 0.92 和 0.94 (均通过 99% 显著性水平检验), 对应的回归系数分别为 0.56 和 0.57, 说明模式对 BSISO 的模拟能力越强, 其对长江中下游次季节降水的预报技巧越高。这种线性关系表明, BSISO 信

号的可预报性在很大程度上为长江中下游夏季次季节降水可预报性提供了关键的物理基础。相比之下, BSISO2 与该区域降水技巧的相关关系略强于 BSISO1, 这在一定程度上表明 BSISO2 可能对区域降水的影响更为直接和敏感 (Zhu et al., 2024)。

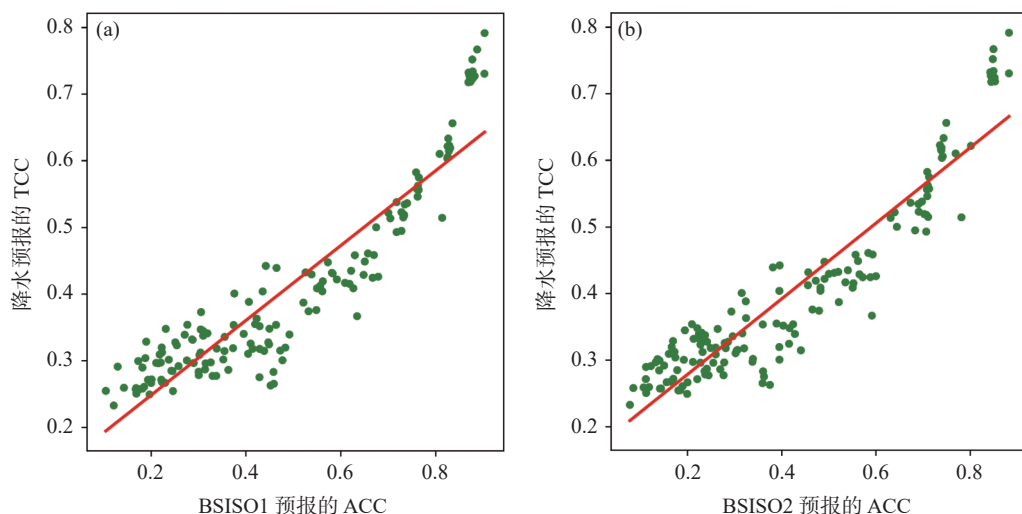


图 8 1981-2010 年各模式成员分别对 BSISO1 (a) 和 BSISO2 (b) 预报的 ACC 与相应长江中下游夏季降水预报 TCC 的散点图 (红色实线为二者线性回归拟合线)

Fig. 8 Scatter plots of ACC for (a) BSISO1 and (b) BSISO2 forecasts versus the corresponding TCC for summer precipitation forecasts over the middle and lower reaches of the Yangtze River based on individual model members during 1981-2010 (the solid red lines denote their linear regression fits)

5 结论与讨论

本文基于 S2S 计划中 ECMWF、CMA 和 UKMO 三套模式 2006—2016 年 5—9 月的预报资料, 结合 CN05.1 降水观测资料, 评估了单模式集合平均及 MME 对长江中下游夏季降水的次季节预报技巧, 从确定性预报、概率预报等维度揭示了误差特征及其空间分布规律, 并进一步从 BSISO1 与 BSISO2 两个模态出发, 诊断各模式及 MME 对 BSISO 信号的预报能力及其与降水预报技巧的对应关系, 探讨了

区域降水可预报性的主要来源。得出主要结论如下:

(1) 在确定性预报方面, 三套 S2S 模式均表现出集合平均优于控制预报、预报技巧随时效延长逐渐衰减的共性特征。其中, ECMWF 模式整体表现最佳, 尤其在第 1—3 候保持较高的 TCC 及较低的 RMSE, 且技巧衰减速率较缓; UKMO 次之, 其集合平均显著改善了控制预报的表现; CMA 模式预报技巧相对较弱。MME 在多数时效 (尤其第 3 候以后) 表现出稳定且较高的预报技巧, 表明 MME 在次季节尺

度降水预报中的潜在优势。

(2) 概率预报评估结果表明,ECMWF 表现最优,UKMO 次之,CMA 较弱,且预报技巧随降水阈值升高呈现先增后减的结构性特征。MME 在所有时效和所有阈值下均表现出非负的 BSS 评分,说明其概率预报能力始终优于气候态预报及任何单模式。BS 评分分解诊断进一步表明,对于不同降水阈值,各类预报往往对更小或更大阈值表现出较中部阈值更高的可靠性但更低分辨能力;对于不同区域特征,较高的分辨能力往往对应着较强的可靠性。相较于单模式,多模式集合系统在可靠性和分辨能力两个方面均具备显著优势。

(3) 模式对 BSISO 信号的预报能力与其降水预报技巧高度相关。ECMWF 在 BSISO1 与 BSISO2 的 ACC 均表现最优,可维持有效预报至 4 候以上;UKMO 预报技巧次之,CMA 明显偏弱。进一步定量分析发现,无论是 BSISO1 还是 BSISO2,其预报能力与降水预报技巧的相关系数均超过 0.90,表明 BSISO 信号是长江中下游夏季降水次季节尺度可预报性的重要来源。

综合来看,模式对 BSISO 信号的刻画能力在很大程度上决定了长江中下游夏季降水的次季节预报潜力。因此,提高模式对 BSISO 位相演变及相关大尺度环流响应的模拟,是未来提升该地区乃至中国东部次季节降水预报能力的关键方向。另一方面,MME 在融合多源动力特征后展现出对预报误差的抵消作用与对低频振荡信号的增强表征能力,这在一定程度上表明 MME 作为改进 S2S 模式降水预报的有效途径,但未来还可加强对动力与统计相结合的模式预报误差订正方法研究,如基于 BSISO 位相分类的降水预报订正方法等。实际上,根据概率预报验证理论,其分辨能力项取决于预报系统区分不同事件发生概率的能力(本质上受可预报信号影响),可靠性项则主要反映概率估计与真实发生频率之间的系统偏差。因此,前述关于 BSISO 信号刻画能力的强化与降水预报订正方法的构建,亦分别指向概率预报中的分辨能力与可靠性改进路径,为改进 S2S 模式动力结构及发展更高技巧的区域订正方法提供了潜在技术参考与理论支撑。

参考文献 (References):

池艳珍,鲍瑞娟,何芬,等.2025. WMO/S2S 模式对 2020 年中国东部持续极端高温事件预报评估[J]. *沙漠与绿洲气象*,19(6):71-79. Chi Y Z, Bao R J, He F, et al. 2025. Assessment of WMO/S2S in simulating persistent extreme heat events over Eastern China in 2020 [J]. *Desert*

and Oasis Meteorology,19(6):71-79 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.2097-6801.2406.21002

任宏利,沈雨畅.2016. MJO 对我国天气气候影响的新事实[J]. *气象科技进展*,6(3):97-105. Ren H L, Shen Y Y. 2016. A new look at impacts of MJO on weather and climate in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*,6(3):97-105 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.013

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]. *Meteorological Monthly*,51(6):724-734 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2025.011301

孙可可,吴小飞.2024. FGOALS-f2 气候预测系统对西南地区持续性极端降水的次季节预测评估[J]. *高原山地气象研究*,44(1):21-30. Sun K K, Wu X F. 2024. Sub-seasonal prediction of the regional persistent extreme precipitation in Southwest China by GOALS-f2 climate prediction system [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,44(1):21-30 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2024.01.003

王熙乔,李健颖,李双林.2023. 北半球夏季 30~60 天季节内振荡年代际变化及其对中国东部降水和气温的影响[J]. *大气科学*,47(6):1665-1679. Wang X Q, Li J Y, Li S L. 2023. Decadal variation of boreal summer 30-60-day intraseasonal oscillation and its influence on precipitation and temperature over Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,47(6):1665-1679 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21228

吴佳,高学杰.2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*,56(4):1102-1111. Wu J, Gao X J. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*,56(4):1102-1111 (in Chinese). doi:10.6038/cjg20130406

许乐心,张人禾,齐艳军.2017. 长江中游和下游夏季降水季节内振荡的差异[J]. *大气科学*,41(6):1125-1140. Xu L X, Zhang R H, Qi Y J. 2017. Differences in intraseasonal summer rainfall oscillation between the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,41(6):1125-1140 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.17112

杨梦兮,胡瑞金,刘梅,等.2025. 江苏梅雨期极端小时降水时空变化特征[J]. *暴雨灾害*,44(4):473-482. Yang M X, Hu R J, Liu M, et al. 2025. The spatiotemporal variation characteristics of extreme hourly precipitation during the Meiyu period in Jiangsu Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(4):473-482 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-033

章大全,郑志海,陈丽娟,等.2019. 10~30 d 延伸期可预报性与预报方法研究进展[J]. *应用气象学报*,30(4):416-430. Zhang D Q, Zheng Z H, Chen L J, et al. 2019. Advances on the predictability and prediction methods of 10-30 d extended range forecast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,30(4):416-430 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20190403

张立凤.2024. 暴雨数值预报若干关键技术发展的回顾与思考[J]. *暴雨灾害*,43(3):243-254. Zhang L F. 2024. Review and thinking on the development of several key technologies for heavy rainfall numerical weather prediction [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(3):243-254 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-230

- 张铭明,李建,甘玉婷,等. 2021. 基于 GWR 模型的中国中东部降水与海拔高度关系特征分析[J]. *暴雨灾害*, 40(1):1–11. Zhang M M, Li J, Gan Y T, et al. 2021. Analysis of the relationship between precipitation and altitude over central and eastern China based on the Geographically Weighted Regression Model [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 40(1):1–11 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2021.01.001
- Buizza R, Milleer M, Palmer T N. 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125:2887–2908. doi:10.1002/qj.49712556006
- Buizza R, Palmer T N. 1998. Impact of ensemble size on ensemble prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 126:2503–2518. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<2503:IOESOE>2.0.CO;2
- Ding Y, Chan J. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 89:117–142. doi:10.1007/s00703-005-0125-z
- Ding L, Li T, Sun Y. 2021. Subseasonal and synoptic variabilities of precipitation over the Yangtze River Basin in the summer of 2020 [J]. *Advances in atmospheric sciences*, 38:2108–2124. doi:10.1007/s00376-021-1133-8
- Fan Y, Lyu Y, Zhu S, et al. 2024. Monthly prediction on summer extreme precipitation with a deep learning approach: Experiments over the mid-to-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Earth and Space Science*, 11:e2024EA003926. doi:10.1029/2024EA003926
- Ferro C A T, Richardson D S, Weigel A P. 2008. On the effect of ensemble size on the discrete and continuous ranked probability scores [J]. *Meteorological Applications*, 15:19–24. doi:10.1002/met.45
- Guo L, Wu J, Li Q, et al. 2025. Advantages of the multimodel ensemble approach for subseasonal precipitation prediction in China and the driving factor of the MJO [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 42: 551–563. doi:10.1007/s00376-024-4107-9
- Han J Y, Kim S W, Park C H, et al. 2023. Ensemble size versus bias correction effects in subseasonal-to-seasonal (S2S) forecasts [J]. *Geoscience Letters*, 10:37. doi:10.1186/s40562-023-00292-9
- Hsu P C, Lee J Y, Ha K J. 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China [J]. *International Journal of Climatology*, 36:1403–1412. doi:10.1002/joc.4433
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83:1631–1644. doi:10.1175/BAMS-83-11-1631
- Kikuchi K. 2021. The boreal summer intraseasonal oscillation (BSISO): A review [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 99: 933–972. doi:10.2151/jmsj.2021-045
- Lee J Y, Wang B, Wheeler M C, et al. 2013. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region [J]. *Climate Dynamics*, 40:493–509. doi:10.1007/s00382-012-1544-4
- Liang P, Lin H. 2018. Sub-seasonal prediction over East Asia during boreal summer using the ECCO monthly forecasting system [J]. *Climate Dynamics*, 50:1007–1022. doi:10.1007/s00382-017-3658-1
- Lyu Y, Zhi X, Zhu S, et al. 2025. Subseasonal prediction of weekly precipitation anomalies over Southern China during early summer based on predictability analysis and machine learning [J]. *Atmospheric Research*, 315:107927. doi:10.1016/j.atmosres.2025.107927
- Murphy A H. 1973. A new vector partition of the probability score [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 12:595–600. doi:10.1175/1520-0450(1973)012<0595:ANVPOT>2.0.CO;2
- Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85:853–872. doi:10.1175/BAMS-85-6-853
- Robertson A W, Kumar A, Peña M, et al. 2015. Improving and promoting subseasonal to seasonal prediction [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96:ES49–ES53. doi:10.1175/BAMS-D-14-00139.1
- Tian D, Wood E F, Yuan X. 2017. CFSv2-based sub-seasonal precipitation and temperature forecast skill over the contiguous United States [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21:1477–1490. doi:10.5194/hess-21-1477-2017
- Vitart F, Ardilouze C, Bonet A, et al. 2017. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98:163–173. doi:10.1175/BAMS-D-16-0017.1
- Vitart F, Robertson A W. 2018. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1:3. doi:10.1038/s41612-018-0013-0
- Vitart F, Robertson A W, Brookshaw A, et al. 2025. The WWRP/WCRP S2S project and its achievements [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 106:E791–E808. doi:10.1175/BAMS-D-24-0047.1
- Wilks D S. 2019. Statistical methods in the atmospheric sciences [M]. 4rd Edition. Elsevier, ISBN: 978-0-12-815823-4.
- Wu J, Li J, Zhu Z, et al. 2023. Factors determining the subseasonal prediction skill of summer extreme rainfall over southern China [J]. *Climate Dynamics*, 60:443–460. doi:10.1007/s00382-022-06326-w
- Yang J, Zhu T, Gao M, et al. 2018. Late - July barrier for subseasonal forecast of summer daily maximum temperature over Yangtze River Basin [J]. *Geophysical Research Letters*, 45:12610–12615. doi:10.1029/2018GL080963
- Zhu S, Zhi X, Ge F, et al. 2021. Subseasonal forecast of surface air temperature using superensemble approaches: Experiments over North-east Asia for 2018 [J]. *Weather and Forecasting*, 36:39–51. doi:10.1175/WAF-D-20-0096.1
- Zhu Z, Wu J, Huang H. 2024. The influence of 10–30-day boreal summer intraseasonal oscillation on the extended-range forecast skill of extreme rainfall over southern China [J]. *Climate Dynamics*, 62:69–86. doi:10.1007/s00382-023-06900-w