赵俊虎，高辉，丁婷，等，2026. 2025 年汛期气候预测效果及动力-统计融合预测技术分析[J]. 气象，52(2)：231-246. Zhao J H，Gao H，Ding T，et al，2026. Climate prediction performance for the 2025 flood season and dynamical-statistical fusion predicting technique[J]. Meteor Mon，52(2)：231-246(in Chinese).

2025 年汛期气候预测效果及动力-统计融合预测技术分析*

赵俊虎[1] 高 辉[1,2] 丁 婷[1,2] 章大全[1]

1 中国气象局气候预测研究重点开放实验室，国家气候中心，北京 100081

2 国家气候中心气候系统预测与变化应对全国重点实验室，北京 100081

提 要：2025 年汛期，国家气候中心准确预测了夏季(6—8 月)中国中东部地区主雨带位于北方、江南降水偏少的旱涝分布特征，对季风和雨季进程的预测与实况高度一致，尤其是准确预测了华北雨季开始偏早、雨季偏长、雨量明显偏多的特征，并准确预测了海河流域、黄河流域中下游有较重汛情。对夏季降水预测不足之处为：一是对华北北部降水的极端性预测不足，二是对淮河流域降水预测与实况不符。2025 年 6 月发布的盛夏(7—8 月)预测：中东部降水呈“南北多、中间少”分布，北方主雨带向西扩大、向北收缩，华南次雨带向北、向西扩大，江淮流域降水偏少，同时加强了异常级预测，与实况更吻合。2025 年 3 月制作汛期预测时，以动力模式和多模式集合等客观方法为基础，基于其近十年的预测技巧开展解释应用，同时分析了年代际尺度和年际尺度上多个先兆信号对东亚夏季风和中国夏季降水的综合影响，并预测了 2025 年东亚夏季风偏强和北方主雨带。盛夏降水预测中，补充考虑了春季欧亚积雪的影响。最后，探讨了汛期预测需重点解决的科学和技术问题。

关键词：汛期预测，华北极端降水，东亚夏季风，客观方法，先兆信号

中图分类号：P461 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2026.011601

Climate Prediction Performance for the 2025 Flood Season and Dynamical-Statistical Fusion Predicting Technique

ZHAO Junhu[1] GAO Hui[1,2] DING Ting[1,2] ZHANG Daquan[1]

1 CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management, National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: The National Climate Centre has made accurate predictions for the flood season in 2025, that is, the principal rain belt in central and eastern China would mainly dwell over the northern regions during the summer months (June to August), with below-normal precipitation in the part south of the Yangtze River. The predictions regarding the monsoon behavior and the progression of rainy season aligned closely with observations. Notably, the prediction correctly indicates an earlier onset, extended duration, exceptionally heavy rainfall during the rainy season in North China, and the relatively severe flooding in the Haihe River Basin and the middle-lower reaches of Yellow River Basin. However, certain shortcomings still existed in the summer precipitation prediction. Firstly, the extremity of precipitation in the northern part of North

* 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2442207、U2342211)、中国气象局预测复盘专项、山西省基础研究计划联合资助项目(气象)(202403011232004)、中国气象局气候预测重点创新团队(CMA2023ZD03)和创新发展专项(CXFZ2025J025)及国家自然科学基金项目(42075017、41875093)共同资助

2025 年 12 月 8 日收稿； 2026 年 1 月 16 日收修定稿

第一作者：赵俊虎，主要从事短期气候预测研究. E-mail：zhaojh@cma.gov.cn

通讯作者：高辉，主要从事短期气候预测研究. E-mail：gaoh@cma.gov.cn

China was underestimated. Secondly, the precipitation prediction for the Huaihe River Basin deviated from observations. In the updated midsummer (July to August) prediction issued in June 2025, precipitation in central and eastern China was predicted to follow an "above normal over both North and South China, below normal over the Yangtze River Basin" pattern. This prediction anticipated a westward expansion and northward contraction of the primary rain belt in northern China and a northward and westward extension of the secondary rain belt in South China. It also highlighted a reduction of precipitation in the Yangtze River and Huaihe River (Jianghuai) basins and emphasized the likelihood of anomalous conditions at the same time, which was proved to match with the observations. In March 2025, the flood season prediction was made based on objective methods including dynamical models and multi-model ensembles, etc. The application of these methods was guided by evaluating their predictive skills over the past decade. Meanwhile, the combined influence of multiple precursor signals at interdecadal and interannual scales on the East Asian summer monsoon and summer precipitation in China was comprehensively considered and analyzed. As a result, the prediction of the intensified East Asian summer monsoon and the primary rain belt located over northern China in 2025 was successfully worked out. For the midsummer precipitation prediction, the influence of spring Eurasian snow cover was additionally incorporated. In addition to the above analyses, key scientific and technical challenges in flood season prediction are discussed in this paper, along with potential directions for our future efforts.

Key words: flood season prediction, extreme precipitation in North China, East Asian summer monsoon, objective method, precursor signal

引 言

《中国气候变化蓝皮书(2025)》指出,在全球变暖持续加剧的背景下,中国洪涝、干旱、高温等灾害性气候事件强度与频率显著上升,造成巨大经济损失与社会影响(中国气象局气候变化中心,2025)。例如,2020年江淮流域严重洪涝(刘芸芸等,2021b;赵俊虎等,2021);2021年7月中下旬河南特大暴雨,8月长江流域"倒黄梅"(赵俊虎等,2022a);2022年盛夏(7—8月)长江流域高温干旱,遭遇罕见的"汛期反枯"(章大全等,2023a);2023年,华北、黄淮等地遭遇极端高温热浪,同时台风"杜苏芮"北上引发海河流域特大暴雨洪涝(支蓉等,2024a);2024年淮河、海河等多流域出现严重汛情(李想和郑志海,2025)。此类极端事件对社会经济高质量发展构成严峻挑战,发展精准、可靠的气候预测体系已成为国家防灾减灾与可持续发展的迫切需求。

中国作为全球短期气候预测研究与实践起步较早的国家,目前已形成物理机制分析、多模式集合和动力-统计深度融合的综合预测体系(曾庆存等,1990;丁一汇等,2004;任宏利和丑纪范,2005;贾小龙等,2013;封国林等,2013;2015;李维京等,2013;刘长征等,2013)。在前兆信号及机理认识方面,太平洋年代际振荡(PDO)和大西洋多年代际振荡(AMO)是影响中国气候最主要的年代际信号,二者对东亚夏季风的年代际变率及中国东部旱涝转换具有重要调控作用(朱益民和杨修群,2003;Yang et al,2017)。厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是影响全球气候的最强年际信号,通过激发太平洋-东亚遥相关型,直接影响西太平洋副热带高压(以下简称副高)的强度与位置,进而调制中国东部主雨带位置(Wang et al,2000;高辉和王永光,2007;袁媛等,2012)。热带印度洋海温异常可通过"电容器效应"延滞并调节ENSO对东亚气候的影响(Xie et al,2009;黄刚等,2016)。21世纪以来北大西洋海温异常对全球气候的影响明显增强,其通过激发开尔文波和热带大西洋-中太平洋经圈环流异常影响西北太平洋副热带反气旋环流异常,激发中高纬欧亚遥相关波列等途径影响东亚气候(Zuo et al,2019;赵俊虎等,2021;Zhao et al,2022;2023);此外,青藏高原冬春季积雪等陆面因子也是重要的前兆信号(张顺利和陶诗言,2001;朱玉祥和丁一汇,2007)。近年来,随着中国气象局气候系统模式(BCC-CSM)和第三代次季节-年际气候预测系统(CMA-CPS v3)的不断升级(吴统文等,2013;Wu et al,2020;2021),

以及多模式集合(CMME;Ren et al,2019;Wu et al,2024)和人工智能订正等客观化技术的深入应用(Jin et al,2022;Chen et al,2024),中国的短期气候预测在机理认识、技术方法和业务能力等方面均取得长足进步,这些发展为支撑国家防汛抗旱、推动气象现代化奠定了科技基础(李维京,2012;贾小龙等,2013)。

中国汛期旱涝受多时间尺度、多因子的复杂影响,每年的预测信号强弱不同造成可预测性有较大差异,而目前动力气候模式对东亚夏季风和降水的刻画仍不够完善,导致预测技巧稳定性不足。因此,2012 年以来,国家气候中心每年组织开展汛期预测复盘总结,及时分析汛期气候异常的成因、评述预测效果、检验模式效果和总结预测前兆信号等(陈丽娟等,2013;2016;2019a;柯宗建等,2014;孙林海等,2015;高辉等,2017;王永光和郑志海,2018;丁婷等,2020;刘芸芸等,2021a;赵俊虎等,2022b;章大全等,2023b;支蓉等,2024b;李想等,2025),以期逐步积累认知,提高预测水平和服务能力。

2025 年夏季,中国气候异常特征显著,主雨带偏北,华北北部、河套等地降水极端性突出,部分地区降水量突破历史纪录,而黄淮、江南等地降水偏少。同时,气候背景尤为特殊,前冬 La Niña 状态衰减后,热带太平洋在春、夏季处于中性状态,成为近十年来最弱的年际信号,这极大地增加了预测的不确定性。在此背景下,年代际信号(如 PDO 冷位相和 AMO 暖位相)以及春季欧亚积雪状况等因子的指示作用更为凸显。国家气候中心在 2025 年 3 月发布的汛期预测中准确捕捉了北方主雨带整体位置,但在华北降水极端性及淮河流域旱情方面的预测存在偏差。6 月的预测中考虑了春季海温和欧亚积雪的影响,优化了雨带结构。本文系统评述 2025 年汛期预测效果和主要的预测技术,并提出目前业务中存在的科学和技术问题,以期为今后的汛期预测提供参考。

1　资料和方法

观测和再分析资料包括:国家气象信息中心整编发布的中国地面基本气象要素日值数据集(v3.0),包含中国 2374 个基本气象站、基准气象站、一般气象站 1961 年 1 月以来逐日气温和降水量观测资料(任芝花等,2012);美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)发布的大气环流再分析资料(Kalnay et al,1996),其水平分辨率为 2.5°×2.5°;美国国家海洋大气管理局(NOAA)提供的全球逐月海温资料(Reynolds et al,2007),水平分辨率为 2°×2°;大气环流和海温资料长度均为 1948 年 1 月至 2025 年 8 月。选用张庆云等(2003)定义的东亚夏季风指数、刘芸芸等(2024)定义的副高各指数。文中部分图形和海温指数出自国家气候中心开发的新一代气候监测预测分析系统(CIPAS 3.0),台风信息来自中央气象台。

动力气候模式资料包括:CMA-CPS v3(Wu et al,2020;2021),欧洲中期天气预报中心第五代耦合模式(ECMWF-S5;Johnson et al,2019),美国国家环境预测中心的第二代气候预测系统(NCEP-CFS v2;Saha et al,2014)。

动力-统计相结合的客观预测数据包括:国家气候中心多模式集合预测系统(NCC-CMME)的预测数据,包含 CMME 1.0(Ren et al,2019)和 CMME 2.0(Wu et al,2024)分别实际预测的 2019—2020、2021—2025 年中国夏季降水量距平百分率;国家气候中心动力-统计集成的季节气候预测系统(NCC-FODAS;封国林等,2013;2015;Feng et al,2020)提供的 2015—2024 年中国夏季降水量距平百分率实际预测数据;清华大学季节深度学习预测系统(THU-SEDES;Jin et al,2022)提供的中国夏季降水量距平百分率预测数据,其中 2021—2024 年为实际预测,2015—2020 年为模型迁移学习阶段的预测结果。

前冬指上一年 12 月至 2 月,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月;观测和模式均选取 1991—2020 年平均值作为气候平均值。将动力模式等方法 3 月初起报的夏季降水数据,利用双线性插值到中国 2374 个站点。检验指标包括预测评分(PS)、空间距平相关系数(ACC)、距平同号率(ASCR)等。采用傅里叶分解的滤波方法,提取周期大于 11 a 的低频部分作为年代际分量。

2　2025 年夏季气候预测效果评估

2.1　降　水

2025 年夏季,全国平均降水量(336.2 mm)较常年同期偏多 1.3%,中东部地区降水总体呈“南北

多、中间少”分布，主要多雨带位于北方（中心在华北中北部至河套地区），华北中北部、内蒙古中南部、陕西北部、西藏西部等地降水量较常年同期偏多 5 成至 2 倍；黄淮南部、江南大部、陕西南部、四川东部和西南部、西藏东部、新疆大部等地偏少 2～8 成（图 1a）。

对比实况（图 1a）与 3 月底发布的预测（图 1b）可见，准确预测了 2025 年夏季中东部地区“主雨带位于北方、江南降水偏少、华南次雨带”的旱涝分布，对西部地区“新疆降水偏少、西藏西部偏多”的预测与实况一致，PS 评分为 75，ACC 为 0.31。对夏季降水预测不足之处为：一是对华北北部降水的极端性预测不足，虽然汛期预测主雨带中心位于上述地区，预测较常年偏多 2～5 成，但实况是部分地区偏多 8 成至 2 倍，北京和内蒙古降水打破历史纪录；二是对淮河流域降水预测与实况不符，预测淮河流域降水量较常年偏多 1～2 成，实况是偏少 2～5 成。

在 6 月底对盛夏（7—8 月）的滚动预测中做了及时订正，预测中东部降水呈“南北多、中间少”分布，北方主雨带向西扩大、向北收缩，华南次雨带向北、向西扩大，江淮流域降水偏少，同时加强了异常级预报，与实况更吻合（图 2），PS 评分为 79，ACC 为 0.43。

2.2 东部汛期雨季进程

中国东部地区雨带随着东亚夏季风进程自南向北推进，而夏季风进程明显受到热带海洋、陆面积雪等外强迫异常信号的影响（陈丽娟等，2019b），同时还受到大气季节内变率（如低频振荡）的作用（Li et al，2003；祝从文等，2019）。因此，在 2025 年的汛期预测和服务时，不仅考虑了前冬赤道中东太平洋 La Niña 状态的滞后影响和其他多因子先兆信号的共同作用，还在滚动预测中参考热带大气季节内振荡（MJO）等次季节信号的影响和动力气候模式临近的预测信息，从而准确预测了华南前汛期开始偏晚、雨量偏少，梅雨开始偏早、雨量偏少，华北雨季开始偏早、雨量偏多等雨季进程（表 1）。

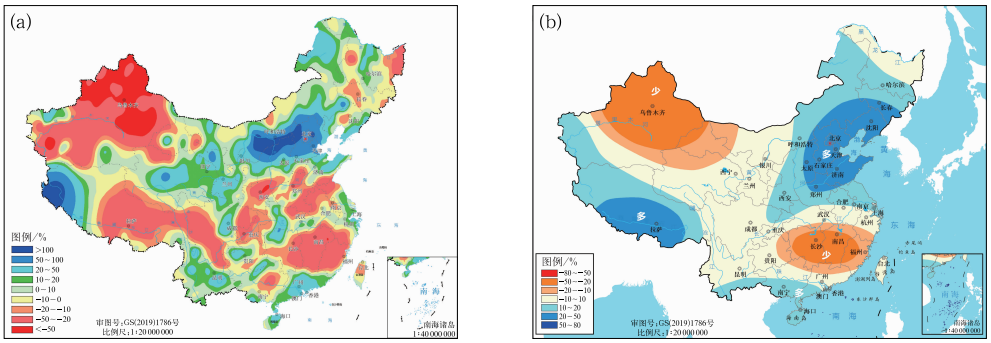


图 1 2025 年(a)夏季中国降水量距平百分率分布及(b)3 月底发布的预测结果

Fig. 1 (a) Distribution of precipitation anomaly percentages in China in summer and (b) corresponding prediction issued at the end of March in 2025

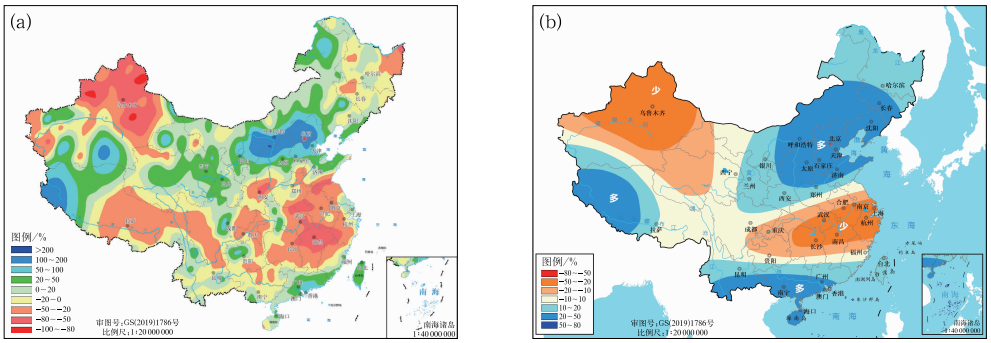


图 2 2025 年(a)盛夏中国降水量距平百分率分布及(b)6 月底发布的预测结果

Fig. 2 (a) Distribution of precipitation anomaly percentages in China in mid-summer and (b) corresponding prediction isssued at the end of June in 2025

表 1　2025 年汛期中国东部雨季进程的预测与实况对比

Table 1　Comparison of predicted and observed rain season processes in eastern China in the 2025 flood season

雨季名称	开始时间	结束时间	降水量/mm	预测时间	预测强度
华南前汛期	4 月 24 日(晚 15 d)	7 月 2 日(早 2 d)	594.2(少 17.4%)	开始偏晚	雨量偏少
江南梅雨	6 月 7 日(早 2 d)	6 月 30 日(早 10 d)	256.4(少 35.1%)	开始偏早	雨量偏少
长江中下游梅雨	6 月 7 日(早 7 d)	6 月 30 日(早 16 d)	281.1(少 11.7%)	开始偏早	雨量偏少
江淮梅雨	6 月 19 日(早 4 d)	7 月 1 日(早 13 d)	156.8(少 39.0%)	开始偏早	雨量偏少
华北雨季	7 月 5 日(早 13 d)	9 月 2 日(晚 16 d)	356.6(多 161.6%)	开始偏早	雨量偏多

注:括号外数据为监测结果,括号内数据为监测实况与气候态的差异。

2.3　热带气旋

表 2 给出了 2025 年汛期西北太平洋和南海地区的热带气旋各特征量的实况与预测结果。实况显示,2025 年夏季西北太平洋及南海有 14 个台风生成,较常年同期(11.1 个)偏多,其中有 5 个登陆中国,接近常年同期(4.7 个)。首个台风“蝴蝶”生成时间为 6 月 11 日,登陆时间(6 月 13 日)较常年偏早 14 d。国家气候中心 3 月准确预测了夏季台风强度趋势和盛行路径,尤其是预测台风活动路径以西行和西北行为主,主要影响华南等沿海地区,与实况一致。2025 年台风预测不足之处是对生成和登陆数量的预测偏少,而实况生成偏多,登陆数量接近常年。预测时重点考虑了近十年台风生成和登陆数量均减少的年代际背景,赤道中东太平洋海温异常信号较弱,但春、夏季印度洋海温异常偏暖,纬向风垂直切变偏大,副高加强西伸,不利于台风活动。实际情况是 6 月台风生成和登陆数量接近常年同期;7 月南海至菲律宾以东为气旋性距平环流,有 7 个台风生成,较常年同期(3.8 个)偏多,3 个登陆(常年同期 1.8 个),尤其是 7 月下旬 MJO 在海洋性大陆附近异常活跃,利于台风活动;8 月副高异常偏强西伸,台风不活跃,西北太平洋和南海海域共生成台风 5 个(常年 5.7 个),其中 1 个登陆中国(常年 2.3 个)。

表 2　2025 年汛期西北太平洋和南海地区热带气旋的预测与实况对比

Table 2　Comparison of predicted and observed tropical cyclones in Northwest Pacific and the South China Sea in the 2025 flood season

预测对象	预测	实况	评估
生成	8～10 个	14 个	趋势不一致
登陆	3～4 个	5 个	趋势不一致
路径	西行和西北行为主	西行和西北行	趋势一致
影响区域	华南、华东为主,华北和东北	华南、华东为主	趋势一致
强度	中等	中等	趋势一致

2.4　气温和高温

2025 年夏季,全国平均气温较常年同期偏高 1.1℃,与 2024 年夏季并列为 1961 年以来历史同期最高。除内蒙古东部、云南、广东、广西部分地区气温接近常年同期外,其余大部地区气温偏高 0.5～2℃,山东大部、河南大部、安徽北部、江苏中北部等地偏高 2～4℃(图 3a)。2025 年 3 月底发布预测指出:全国大部地区气温较常年同期偏高,其中江南、江淮、西南地区东部、内蒙古西部、新疆、西北西部等地偏高 1～2℃(图 3b)。全国气温偏高及异常偏高区域的预测与实况一致。PS 评分为 96,ACC 为 0.3。

2025 年夏季,全国平均高温日数(13.7 d)较常年同期偏多 5.7 d,为 1961 年以来历史同期第二多。三次大范围高温过程分别出现在 6 月 4—18 日、6 月 21—25 日、6 月 30 日至 9 月初。6 月高温主要发生在华北南部、黄淮、四川盆地东部和新疆;盛夏的高温主要发生在江南至黄淮、四川盆地东部。与 3 月预测的“华北至黄淮、新疆等地初夏高温热浪明显,长江中下游地区盛夏高温伏旱显著”相吻合。

3　2025 年汛期预测技术

3.1　客观方法预测

动力模式和多模式集合预测是短期气候预测最主要的参考依据。2025 年汛期预测中,国家气候中心汛期预测团队整理了国内外主要的气候预测业务

模式和多模式集合等客观方法的历史数据和实时预测数据，考虑到模式的更新和年代际变化等因素，重点评估了近十年的预测技巧，开展解释应用。

2025 年夏季，欧亚中高纬度地区呈“两槽一脊”，乌拉尔山和鄂霍次克海阻塞高压活动偏弱，以纬向环流为主；副高异常偏强、偏西、偏北；西太平洋副热带、中纬度和东北亚地区对流层低层分别为气旋式、反气旋式和气旋式环流异常，江南上空为东南风距平，黄淮至华北为南风距平控制（图 4a），有利于水汽向中国北方地区输送，且使西北太平洋台风活跃。张庆云等（2003）定义的东亚夏季风指数显示 2025 年东亚夏季风异常偏强（指数为 2.33，超过 1 倍标准差，为 2018 年之后最强年），有利于中国中东部地区主雨带整体偏北。

图 4b～4d 给出了国内外三个主要动力气候模式 2025 年 3 月起报的夏季环流。CMA-CPS v3 预测欧亚中高纬度为较强的正位势高度距平，副高偏北，西北太平洋副热带地区为气旋性环流异常，西北

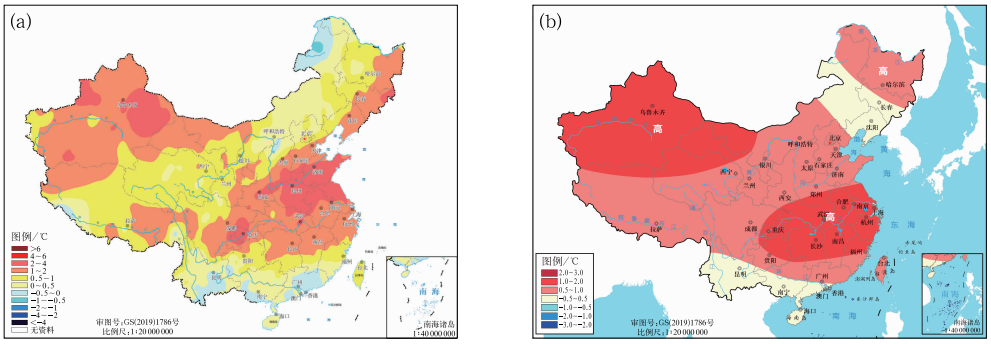
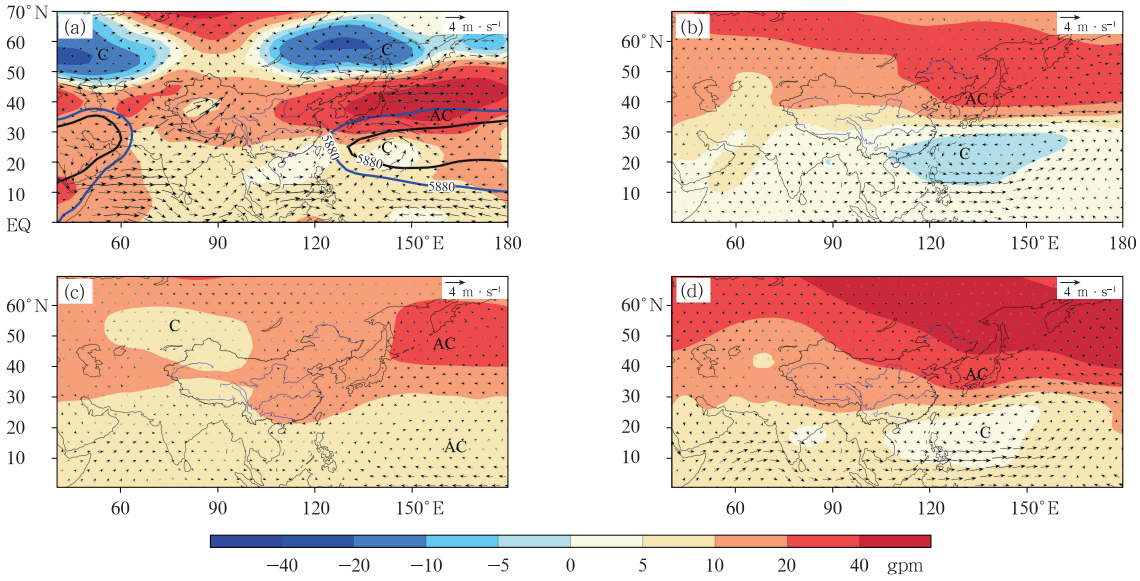


图 3 2025 年(a)夏季中国气温距平分布及(b)3 月底发布的预测

Fig. 3 (a) Distribution of temperature anomalies in China in summer and (b) corresponding prediction isssued at the end of March in 2025



注：图 a 中 5880 gpm 等值线表示副高，蓝色表示 2025 年，黑色表示气候平均；AC 和 C 分别表示反气旋和气旋环流异常。

图 4 2025 年夏季 500 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm）及其距平场（填色）和 850 hPa 风场距平（风矢）

（a）观测，（b）CMA-CPS v3，（c）ECMWF-S5，（d）NCEP-CFS v2

Fig. 4 Geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomaly field (colored) at 500 hPa, and wind anomalies (vector) at 850 hPa in summer of 2025

(a) observation, (b) CMA-CPS v3, (c) ECMWF-S5, (d) NCEP-CFS v2

太平洋中纬度地区为反气旋性环流异常(图 4b)。ECMWF-S5 预测副高偏北、中高纬纬向性环流、西北太平洋副热带地区和中高纬度地区均为反气旋性环流异常,中国北方地区为偏南风异常(图 4c)。NCEP-CFS v2 预测结果(图 4d)与 CMA-CPS v3 相似。对比实况(图 4a)可见,上述模式较准确地预测出了中国北方地区至西北太平洋北部一带较强的正位势高度距平,及西北太平洋副热带位势高度距平相对偏小的特点,但均未能预测出乌拉尔山以北地区和东北亚地区的负距平。CMA-CPS v3 和 NCEP-CFS v2 准确预测了西北太平洋副热带地区的气旋性距平环流和以日本岛为中心的反气旋性距平环流,三个模式均准确预测江淮地区以北为南风距平。ECMWF-S5 预测的西北太平洋副热带地区反气旋性距平环流与实况相反。

结合以上模式信息可知,模式准确预测了东亚夏季风偏强,副高偏强、偏西、偏北,及西北太平洋为气旋性环流异常、日本海为反气旋距平环流异常等主要特征,因此对中国北方主雨带及全国气温偏高等气候异常特征把握较好。对环流预测不足之处为:一是未能准确预测欧亚中高纬度地区“两槽一脊”的纬向性环流特点,二是对副高偏北的异常程度估计不足,导致对淮河流域夏季降水的预测与实况出现较大偏差。

从动力模式等客观方法 3 月起报的 2025 年夏季降水量距平百分率(图 5)可见,六种预测方法均预测北方地区(新疆除外)、西藏和云南降水偏多,但也存在多方面的分歧:一是北方地区降水的范围不同,CMA-CPS v3(图 5a)、NCEP-CFS v2(图 5c)和 NCC-CMME(图 5d)预测的范围相对较小,多雨区在黄河及其以北地区,而 ECMWF-S5(图 5b)、NCC-FODAS(图 5e)和 THU-SEDES(图 5f)预测的范围相对较大,多雨区在长江及其以北地区;二是北方地区降水的异常程度不同,ECMWF-S5、NCC-CMME 和 NCC-FODAS 预测的异常幅度较大,大部分地区偏多 5 成以上,而其他三种方法预测的异常幅度较小,偏多 5 成以上的范围较少;三是南方差异较大,CMA-CPS v3 预测华南和江南大部降水偏多,偏多中心位于华南,ECMWF-S5、NCEP-CFS v2 和 NCC-CMME 也预测南方有一条次雨带,ECMWF-S5 预测范围较小,中心在华南西部,NCEP-CFS v2、NCC-CMME 的中心分别在江南东部和华南南部,而 NCC-FODAS 和 THU-SEDES 预测江南和华南降水大范围偏少。此外,国家超级计算无锡中心提供了分别基于 AI 模型和机器学习的 2025 年汛期降水预测,前者预测中国东部偏多、中部偏少,后者预测中国东部呈“北多南少”分布(图略)。

由此可见,客观方法在多方面存在较大分歧,给

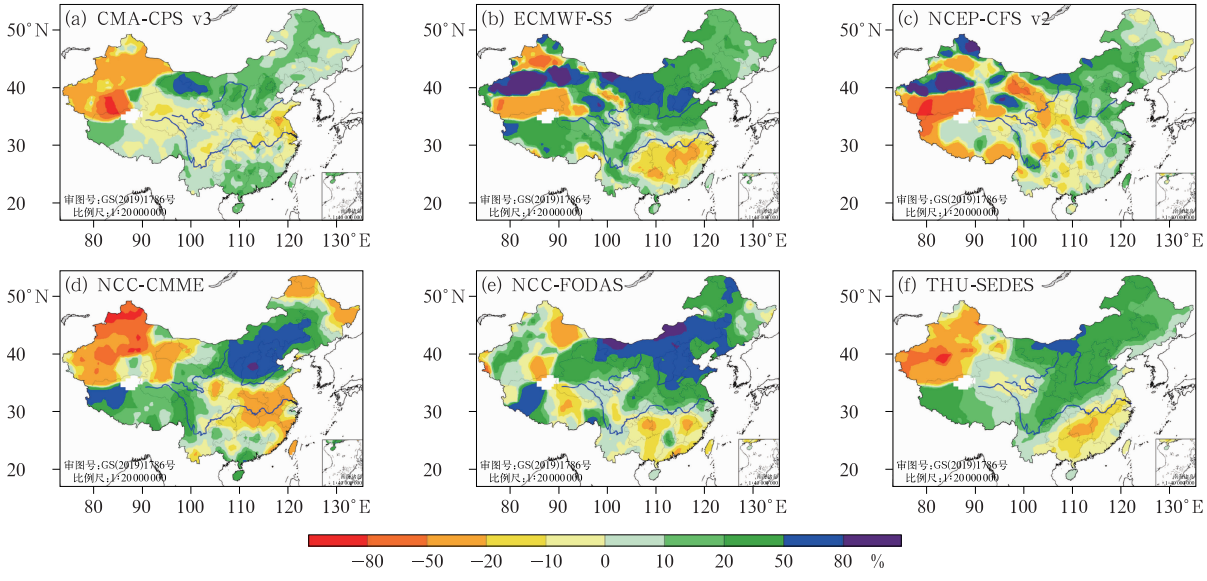


图 5　六种客观方法 2025 年 3 月起报的 2025 年夏季降水量距平百分率分布

Fig. 5　Predicted summer precipitation anomaly percentage in 2025 by six objective methods initialized in March 2025

2025 年汛期预测带来较大的不确定性。因此，需结合各方法的预测技巧，提取确定性较大的预测信息。图 6 给出了六种客观方法在 2015—2024 年 3 月起报的当年夏季降水量距平同号率的空间分布，六种方法在华北、东北、江南地区的同号率总体在 60% 以上，其中 NCC-CMME（图 6d）在上述地区的技巧明显优于其他方法，而大部分方法在西南地区东部和南部、青藏高原东部、华南南部等地的预测技巧较低。

从以上预测信息可见，2025 年东亚夏季风偏强、副高偏北、中国北方多雨和江南少雨的确定性较大，但对黄淮、华南、西北地区东部等地的预测仍存在较大不确定性。与实况相比，上述预测结果与实况均有不一致的地方，说明动力模式预测能力有一定的局限性。

3.2 年代际尺度先兆信号

中国汛期主雨带有明显的年代际变化特征（张庆云等，2007）。图 7 为 1961 年以来中国夏季降水量距平百分率的年代际合成，可见 20 世纪 60—70 年代主雨带位于华北地区，长江中下游地区降水偏少，即“北涝南旱”型；20 世纪 80 年代主雨带南落至西北地区东南部至长江中游，江南、华南和黄淮等地降水年代际偏少；90 年代中东部地区转为“＋－＋”空间型；21 世纪以来主雨带逐步北移，00 年代中心位于淮河流域，长江中下游、华北北部至东北等地降水年代际偏少；2016 年以来主雨带进一步北移，中心位于黄淮—华北及东北地区。

研究表明，中国东部主雨带的年代际变化与 PDO、AMO 的位相变化密切相关。在 PDO 冷位相期，东亚夏季风偏强，副高偏北，华北地区降水异常偏多（朱益民和杨修群，2003；李刚等，2020）。AMO 是西太平洋年代际气候变化的关键驱动器，其暖海温异常削弱了阿留申低压和北太平洋副热带西风，通过风-蒸发-海温效应导致北太平洋副热带海温升高，进而导致西热带太平洋地区出现异常气旋环流和低气压（Sun et al，2017）。PDO 冷位相和 AMO 暖位相协同驱动夏季副高偏北，东亚夏季风偏强，中国北涝南旱（Yang et al，2017）。

监测显示，2017 年 PDO 指数由正转负，并持续至 2025 年 3 月；20 世纪末 AMO 指数由负转正。由 2017 年 1 月至 2025 年 3 月海温距平场（图 8a）可见，北太平洋海温大范围偏高，西风漂流带偏高 0.8℃以上，而东南太平洋海温偏低；北大西洋全区海温偏高，0～40°N 大范围偏高 0.4℃以上。PDO 目前处于 1961 年以来最强的冷位相时期，而 AMO 则

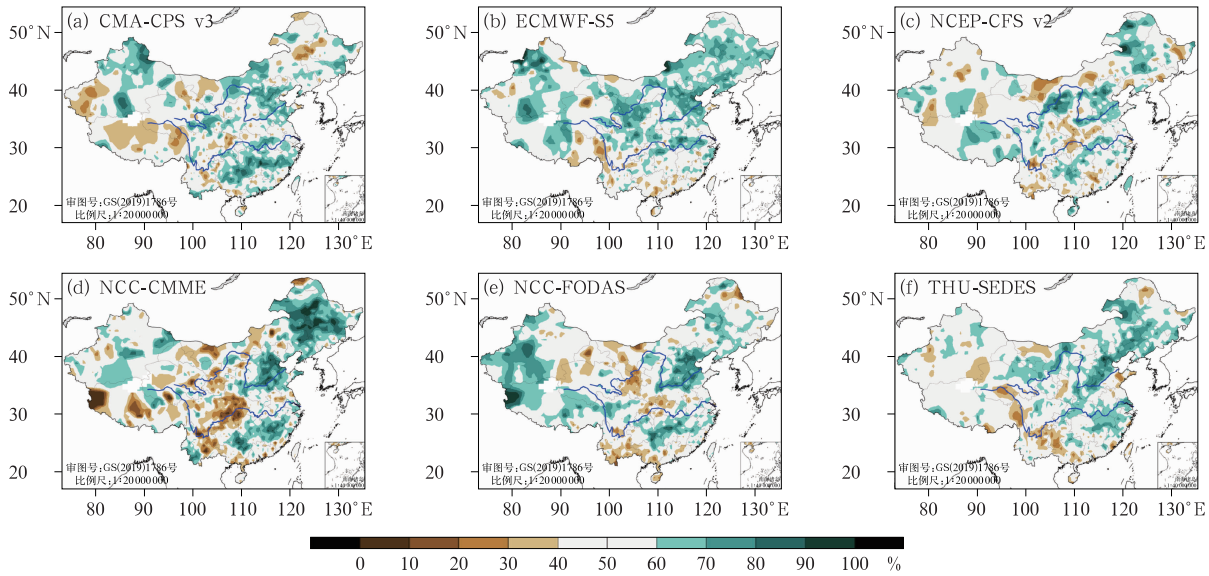
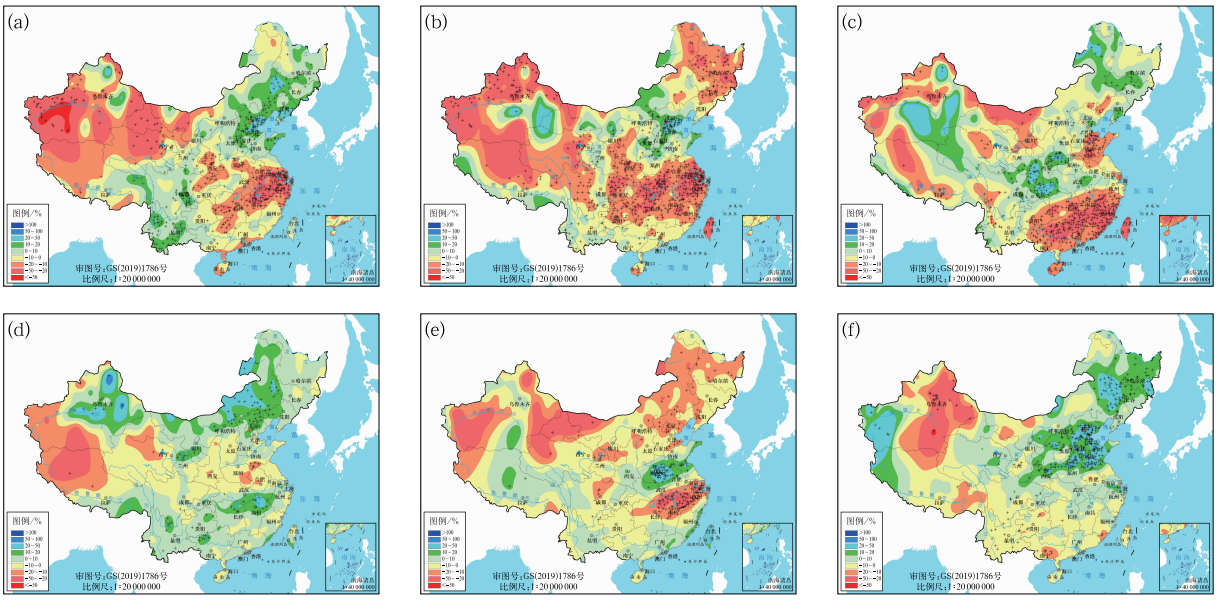


图 6 六种客观方法在 2015—2024 年 3 月起报的当年夏季降水量距平同号率

Fig. 6 Anomaly sign consistency rate of summer precipitation predicted by six objective methods initialized in March during 2015－2024



注:+表示通过 0.05 显著性水平检验。

图 7　中国夏季降水量距平百分率的年代际合成

(a)1960—1969 年,(b)1970—1979 年,(c)1980—1989 年,(d)1990—1999 年,

(e)2000—2009 年,(f)2016—2024 年

Fig. 7　Interdecadal composition of summer precipitation anomaly percentage in China

(a) 1960－1969, (b) 1970－1979, (c) 1980－1989, (d) 1990－1999, (e) 2000－2009, (f) 2016－2024

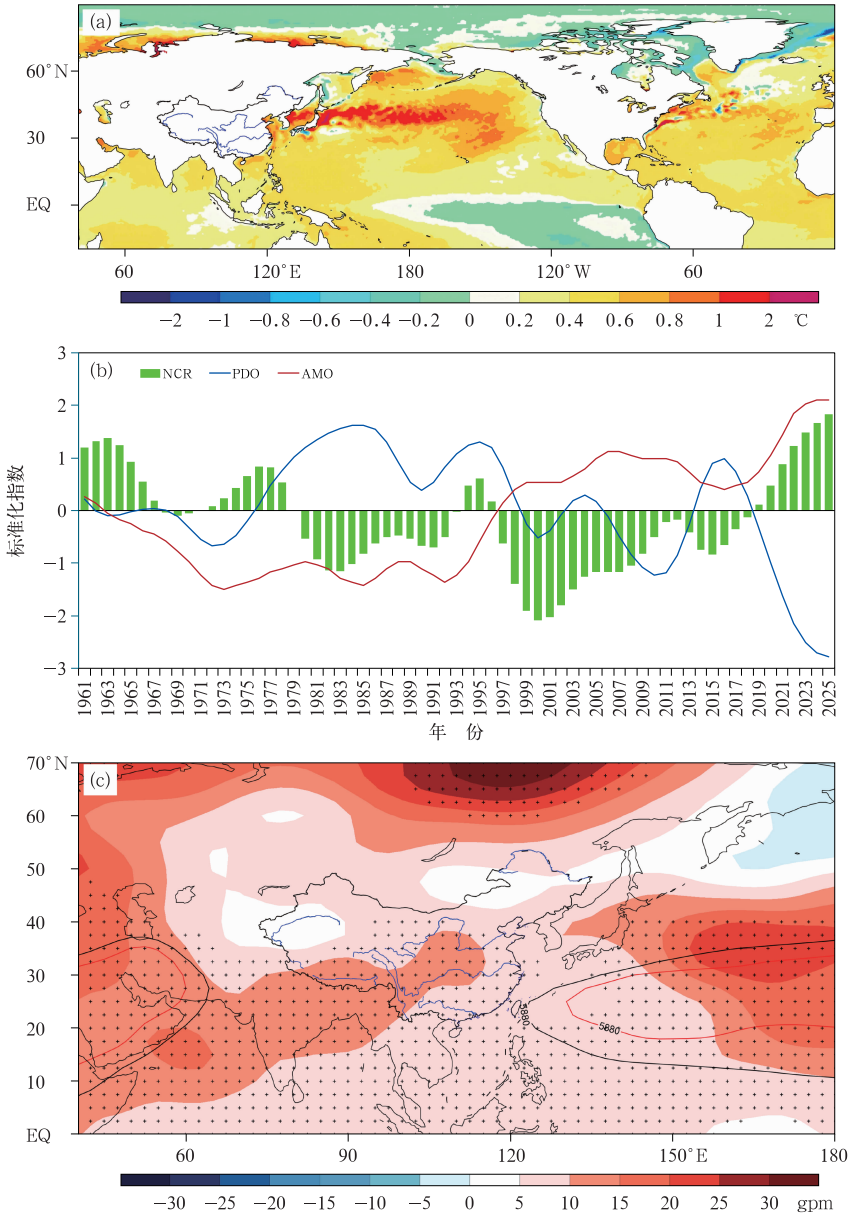
处于 20 世纪以来最强的暖位相时期(图 8b)。从华北(36°～42°N、108°～125°E)夏季降水量(NCR)、年平均的 PDO 指数和 AMO 指数的年代际分量演变(图 8b)清晰可见,2017 年以来,随着 PDO 位相由暖转冷、AMO 暖位相持续增强,华北降水转入年代际偏多。由 2017—2024 年夏季 500 hPa 位势高度距平可见,这一时期,副高偏强、偏西、北界偏北,日本岛及其以东为较强正位势高度距平(图 8c),有利于小笠原高压和东亚夏季风偏强。因此,PDO 和 AMO 是 2025 年汛期降水预测年代际尺度的主导信号,有利于主雨带持续位于中国北方地区。

3.3　年际尺度先兆信号

三大洋海温和欧亚积雪异常是中国汛期气候预测的主要年际信号,2024 年 8 月,赤道中东太平洋转为冷海温,冬季冷海温范围扩大,冷中心达到－1.0℃,热带印度洋呈西冷东暖,北大西洋大部海温偏高(图 9a)。2024 年 12 月和 2025 年 1 月 Niño3.4 指数分别为－0.66℃和－0.76℃,达到了 La Niña 状态,2 月转入中性状态(图 9b)。2025 年 3 月,国内外动力气候模式对春、夏季 ENSO 的预测存在较大分歧,中国科学院大气物理研究所 FGOALS-f2 和自然资源部第一海洋研究所 FIOCPS v2 预测 El Niño 发展,而中国气象科学研究院 CAMS 和 CMA-CPS v3 预测 La Niña 发展,ECMWF-S5、NCEP-CFS v2 和 NCC-CMME 预测维持中性状态(图 9b),ENSO 专题会商的结论是春、夏季维持中性状态。

2024/2025 年冬季热带大气和东亚环流、中国东部地区降水对 La Niña 状态的响应较为显著,对流层低层菲律宾为气旋式环流异常,中国南方降水异常偏少(赵玉衡和丁婷,2025)。与 2025 年的 ENSO 演变相似年份的夏季降水量距平百分率合成如图 10a 所示,可见中国北方降水偏多,中心位于河套地区至华北北部,长江中下游显著偏少,云南至华南南部有一条次雨带;进一步考虑 PDO 冷位相对年际信号的调制作用,结果显示主雨带位于中国北方地区,中心位于华北南部,西南地区东部和江南北部显著偏少(图 10b)。监测实况显示,ENSO 专题会商准确预测了 2025 年春、夏季 ENSO 维持中性状态,夏季南方涛动、Walker 环流和 6—7 月对流层低层西北太平洋气旋性环流异常体现了对 La Niña 状态的滞后响应。

2024 年前冬至 11 月,热带印度洋海温异常偏



注：图 c 中黑色和红色等值线分别表示 2017—2024 年夏季平均和气候平均的 5880 gpm 等值线，
＋表示通过 0.05 显著性水平检验。

图 8 (a)2017 年 1 月至 2025 年 3 月海温距平场，(b)1961—2025 年华北夏季降水量、
年平均的 PDO 指数和 AMO 指数的年代际分量的标准化指数和
(c)2017—2024 年夏季 500 hPa 位势高度距平合成

Fig. 8 (a) Sea surface temperature anomalies from January 2017 to March 2025, (b) normalized index of interdecadal components of the summer precipitation in North China, annual average PDO and AMO indices during 1961−2025, and (c) composition of geopotential height anomalies at 500 hPa in summer during 2017−2024

高，全区一致海温模态（IOBM）距平指数维持在 0.7℃以上，12 月之后明显减弱，12 月至 2025 年 2 月维持在 0.2～0.4℃（图 9c），说明印度洋海温对这次 La Niña 状态表现出一定程度的响应。此外，NCC-CMME 预测 2025 年春、夏季热带印度洋海温偏高，IOBM 距平指数维持在 0.3～0.5℃（图 9c）。研究表明，年际尺度上，春季印度洋海温偏高对东亚大气环流有显著的滞后影响，有利于 7—10 月副高偏北、东亚夏季风偏强（Zhao et al，2019），即 2025 年印度洋春、夏季的海温偏高也有利于华北和东北等地盛

夏降水偏多。

春、夏季热带北大西洋海温(TNA)异常可以通过激发大气 Kelvin 波进入太平洋,或在热带大西洋和中太平洋上空形成逆时针的 Walker 环流,导致西北太平洋副热带异常反气旋的形成(Lu and Dong,2005;Zuo et al,2019);春末夏初北大西洋海温三极子(NAT)通过激发中高纬欧亚遥相关,影响夏季东北冷涡和中国气候(Zuo et al,2013;Fang et al,2018)。从 TNA 和 NAT 的监测和预测看,2024 年至 2025 年 2 月,TNA 距平指数维持在 0.6℃ 以上,NAT 距平指数维持在 −1.0℃ 以下;NCC-CMME 预测 2025 年春、夏季热带北大西洋暖海温快速减弱,TNA 距平指数维持在 0.3℃ 以下,NAT 距平指数维持在 −0.3～−0.1℃(图略),表明热带北大西洋海温异常不显著,可能对夏季气候的影响有限。

监测实况显示,2025 年春、夏季热带印度洋偏暖,逐月 IOBM 距平指数维持在 0.4～0.5℃,TNA 距平指数维持在 0.2～0.4℃,表明 NCC-CMME 的预测是正确的。4—5 月 NAT 距平指数为 −0.83℃ 和 −0.44℃,6—8 月为 0.03、0.44 和 1.01℃,即 NCC-CMME 未能准确预测其在夏季转为较强的正位相。

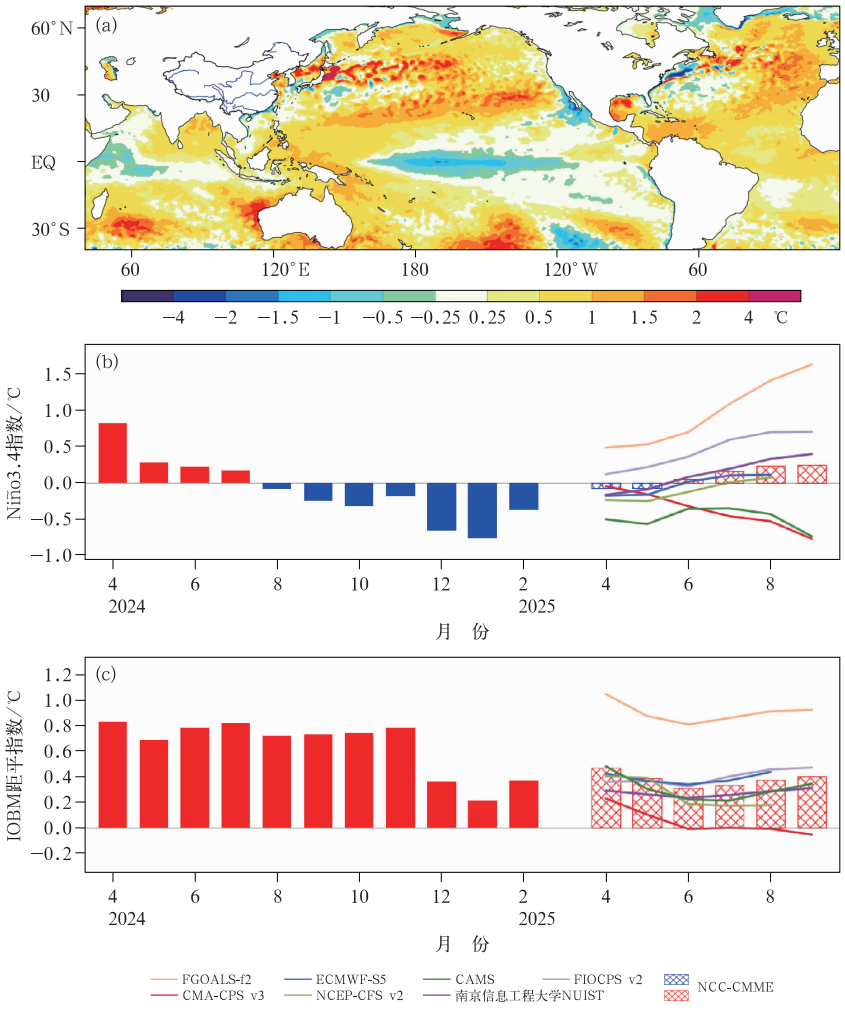
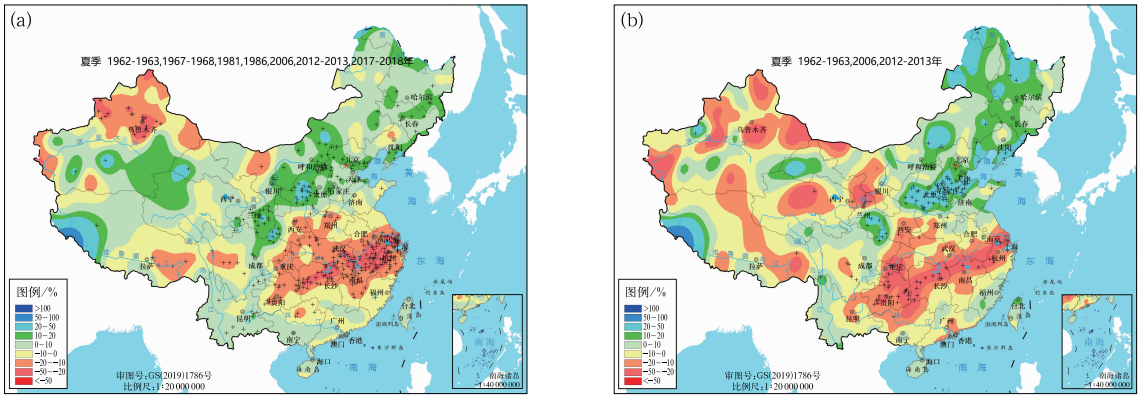


图 9　(a)2025 年前冬海温距平以及(b,c)2024 年 4 月至 2025 年 2 月逐月实况指数(填色柱形)和 2025 年 3 月起报的 4—9 月(b)Niño3.4 指数和(c)IOBM 距平指数

Fig. 9　(a) Sea surface temperature anomaly in pre-winter of 2025, and (b, c) monthly observation indices (colored bar) from April 2024 to February 2025 and prediction initialized in March 2025 for (b) Niño3.4 index and (c) IOBM anomaly index from April to September



注:+表示通过 0.05 显著性水平检验。

图 10 (a)所有相似年和(b)PDO 负位相背景下的相似年与
2025 年 ENSO 演变相似年份的夏季降水量距平百分率合成

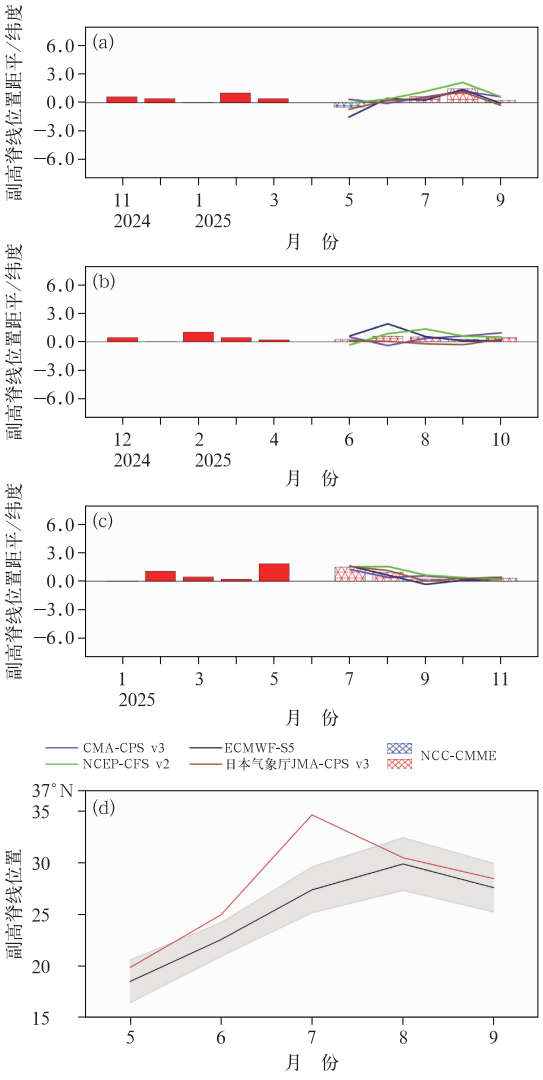
Fig. 10 Composition of the summer precipitation anomaly percentage in (a) all analogous years and (b) analogous years under the PDO negative phase with the ENSO evolution in 2025

除海温外,冬、春季青藏高原和欧亚关键区积雪异常是中国汛期降水主要的陆面先兆信号,通过动力和热力作用对全球大气环流和气候产生影响(张顺利和陶诗言,2001;朱玉祥和丁一汇,2007)。2025 年前冬青藏高原积雪面积距平指数为-0.04 百万 km^2(1 倍标准差为 0.24 百万 km^2),接近常年,信号较弱,因此对夏季气候异常的影响也有限。Zhang et al(2021;2025)研究指出,欧亚大陆春季积雪覆盖率的异常对亚洲夏季风降水的影响更强,20 世纪 90 年代以来,西欧亚大陆春季积雪与中国东部旱涝空间分布存在密切关联:积雪偏多时,中国东部易呈现“北涝南旱”型降水分布,反之亦然(Zhang et al,2021)。因此,在 5 月底的滚动预测和 6 月的盛夏预测时,除了分析和夏季相同的年代际、年际信号外,还充分考虑了春季欧亚关键区积雪的异常及影响:2025 年春季西欧亚大陆积雪异常偏多,指示夏季中国东部将出现“北涝南旱”。而次季节模式、NCC-CMME 等客观方法预测中国东部有南北两条主要多雨带,长江中下游地区出梅偏早、华北雨季开始偏早;此外,次季节模式预测 7 月 MJO 将向东传播,在海洋性大陆活跃,有利于台风活动和副高北跳。基于以上信息,预测盛夏中东部降水呈“南北多、中间少”分布,北方主雨带向西扩大、向北收缩,华南次雨带向北、向西扩大,江淮流域降水偏少,同时加强了异常级预报,预测与实况基本一致。

综上所述,在 3 月底的汛期气候预测中,在动力气候模式、多模式集合和人工智能预测方法的解释应用基础上,重点研判了年代际和年际先兆信号的特征和影响,二者均支持 2025 年东亚夏季风偏强、主雨带位于中国北方,这是 2025 年汛期降水趋势预测成功的主要依据。

3.4 夏季降水预测不足的原因分析

2025 年夏季降水预测的不足之处包括:一是华北降水的极端性突出,而在提前 3~4 个月通过动力气候模式、多模式集合和物理诊断很难准确获得极端性信息,且 2025 年年际信号总体较弱,尤其是预计春、夏季 ENSO 是中性状态,不支持预测极端偏强的东亚夏季风和华北极端强降水;二是对淮河流域降水预测与实况不符,主要原因是对 7 月初副高快速北跳并持续偏北考虑不足。动力气候模式对夏季副高脊线预测有一定技巧,但提前 3~4 个月的预测还是有限。动力气候模式和 NCC-CMME 预测 6 月和 7 月副高脊线略偏北、8 月明显偏北(接近 2 个纬度),与实况有较大差异(图 11a),实况为 6 月明显偏北(偏北 2.4 个纬度)、7 月异常偏北(偏北 7.2 个纬度,为 1961 年以来 7 月副高最北年),8 月略偏北(图 11d)。即使是 5 月和 6 月临近的预测结果,无论是单模式还是 NCC-CMME,均未能预测 6—7 月副高的异常偏北(图 11b,11c)。此外,六种客观预测方法中,除了 CMA-CPS v3 和 NCC-CMME 外,其他四种方法均预测淮河流域降水偏多(图 6),而六种方法对淮河流域降水的预测技巧明显偏低,近十年预测结果与实况的距平符号一致率基本在 60%以下,部分地区甚至低于 40%(图 7),显示了淮河流域降水的复杂性和可预测性偏低的现实。



注:图 a～c 中前 5 个月为监测实况;图 d 中红色线表示 2025 年,黑色线表示气候平均,灰色阴影表示正负 1 倍标准差。

图 11　2025 年(a)3 月,(b)5 月和(c)6 月起报未来 6 个月的副高脊线位置距平以及(d)观测的 5—9 月逐月副高脊线位置

Fig. 11　6-month prediction of the subtropical high ridge line position anomaly initialized in (a) March, (b) May, and (c) June, and (d) observed monthly subtropical high ridge line position from May to September 2025

4　结论和讨论

2025 年汛期预测,国家气候中心应用动力-统计融合预测技术,在科学评估国内外多种客观方法近十年预测技巧的基础上,加强了客观化、智能化产品的解释应用,同时考虑了年代际信号对汛期主雨带的调制作用,在 ENSO 等年际信号极弱的背景下,成功预测了夏季主雨带位于北方、华北雨季降水异常偏多的特征。通过对 2025 年汛期预测的复盘总结,结合近几年汛期旱涝异常及预测检验,总结了三方面亟需解决的问题。

(1)需深入理解多尺度、多因子对东亚气候影响的复杂性,加强弱 ENSO 背景下中国气候异常的机理研究。2025 年为近十年来 ENSO 信号最弱的一年,热带印度洋和热带北大西洋春夏季海温、前冬青藏高原积雪等信号均不显著,导致 2025 年汛期外强迫年际信号极弱,预测的不确定性和难度加大。但海温的年代际信号相对较强,PDO 和 AMO 分别处于较强的冷位相和暖位相,二者协同易导致东亚夏季风偏强、华北降水偏多。因此,需要加强多尺度、多因子对东亚气候的综合影响机理研究,这是进一步提升汛期预测能力的关键。

(2)需加强致灾性极端天气过程的预测技术研发。2025 年汛期暴雨过程频繁,南北方影响并重,全国共发生 30 次区域性暴雨过程,尤其是“七下八上”期间,北京密云等地多次暴雨过程落区重叠度高,造成重大灾害损失。6 月 30 日至 9 月 6 日南方的高温过程影响范围广、极端性强。面对气象高质量发展需求,需延长此类致灾性极端天气过程的预报时效。然而,受到可预报性等因素的限制,目前提前 1 个月以上预测致灾性极端天气过程的水平仍很低。因此,亟需加强致灾性极端天气过程的机理研究,评估并改进模式的预测能力,建立有针对性的预测新技术,从而提高预测的精细化和服务的精准性。

(3)需继续加强客观化预测技术研发。2025 年汛期气候预测以动力模式等客观方法为基础,将人工智能订正集成与物理诊断分析订正相结合,提高汛期预测的客观化、智能化水平,取得了较好的预测效果。其中不断完善发展的 NCC-CMME、注入人工智能内核的 NCC-FODAS、基于深度学习方法建立的 THU-SESES 以及 AI 大模型预测结果的试用,对汛期气候预测起到了重要的作用。今后还需剖析上述方法存在的问题,并加以改进,以期进一步提高气候预测的准确率和稳定性。

参考文献

陈丽娟,高辉,龚振淞,等,2013. 2012 年汛期气候预测的先兆信号和应用[J]. 气象,39(9):1103-1110. Chen L J, Gao H, Gong Z S,

et al,2013. Overview of precursory signals of seasonal climate prediction and its application in summer 2012[J]. Meteor Mon,39(9):1103-1110(in Chinese).

陈丽娟,顾薇,丁婷,等,2016. 2015年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象,42(4):496-506. Chen L J,Gu W,Ding T,et al,2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015[J]. Meteor Mon,42(4):496-506(in Chinese).

陈丽娟,顾薇,龚振淞,等,2019a. 影响2018年汛期气候的先兆信号及预测效果评估[J]. 气象,45(4):553-564. Chen L J,Gu W,Gong Z S,et al,2019a. Precursory signals of the 2018 summer climate in China and evaluation of real-time prediction[J]. Meteor Mon,45(4):553-564(in Chinese).

陈丽娟,赵俊虎,顾薇,等,2019b. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报,30(4):385-400. Chen L J,Zhao J H,Gu W,et al,2019b. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. J Appl Meteor Sci,30(4):385-400(in Chinese).

丁婷,韩荣青,高辉,2020. 2019年汛期气候预测效果评述及降水预测先兆信号分析[J]. 气象,46(4):556-565. Ding T,Han R Q,Gao H,2020. Overview of climate prediction for the summer 2019 and the precursory signals[J]. Meteor Mon,46(4):556-565(in Chinese).

丁一汇,李清泉,李维京,等,2004. 中国业务动力季节预报的进展[J]. 气象学报,62(5):598-612. Ding Y H,Li Q Q,Li W J,et al,2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China[J]. Acta Meteor Sin,62(5):598-612(in Chinese).

封国林,赵俊虎,杨杰,等,2015. 中国汛期降水动力-统计预测研究[M]. 北京:科学出版社. Feng G L,Zhao J H,Yang J,et al,2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China[M]. Beijing:Science Press(in Chinese).

封国林,赵俊虎,支蓉,等,2013. 动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展[J]. 应用气象学报,24(6):656-665. Feng G L,Zhao J H,Zhi R,et al,2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method[J]. J Appl Meteor Sci,24(6):656-665(in Chinese).

高辉,王永光,2007. ENSO对中国夏季降水可预测性变化的研究[J]. 气象学报,65(1):131-137. Gao H,Wang Y G,2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO[J]. Acta Meteor Sin,65(1):131-137(in Chinese).

高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017. 2016年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J]. 气象,43(4):486-494. Gao H,Yuan Y,Hong J L,et al,2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon,43(4):486-494(in Chinese).

黄刚,胡开明,屈侠,等,2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾[J]. 大气科学,40(1):121-130. Huang G,Hu K M,Qu X,et al,2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate[J]. Chin J Atmos Sci,40(1):121-130(in Chinese).

贾小龙,陈丽娟,高辉,等,2013. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报,24(6):641-655. Jia X L,Chen L J,Gao H,et al,2013. Advances of the short-range climate prediction in China[J]. J Appl Meteor Sci,24(6):641-655(in Chinese).

柯宗建,王永光,龚振淞,2014. 2013年汛期气候预测的先兆信号及其应用[J]. 气象,40(4):502-509. Ke Z J,Wang Y G,Gong Z S,2014. Review of the precursor and its application in summer climate prediction in 2013[J]. Meteor Mon,40(4):502-509(in Chinese).

李刚,李崇银,晏红明,等,2020. 南太平洋和北太平洋年代际振荡与华北盛夏降水的关系及可能物理机制[J]. 地球物理学报,63(11):3952-3966. Li G,Li C Y,Yan H M,et al,2020. The relationships of mid-summer rainfall over North China with North Pacific decadal oscillation and South Pacific decadal oscillation and their possible physical mechanisms[J]. Chin J Geophys,63(11):3952-3966(in Chinese).

李维京,2012. 现代气候业务[M]. 北京:气象出版社. Li W J,2012. Modern Climate Service[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).

李维京,郑志海,孙丞虎,2013. 近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展[J]. 大气科学,37(2):341-350. Li W J,Zheng Z H,Sun C H,2013. Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China[J]. Chin J Atmos Sci,37(2):341-350(in Chinese).

李想,郑志海,2025. 2024年夏季中国气候异常特征及成因分析[J]. 气象,51(1):110-121. Li X,Zheng Z H,2025. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2024[J]. Meteor Mon,51(1):110-121(in Chinese).

李想,郑志海,韩荣青,2025. 2024年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象,51(3):358-368. Li X,Zheng Z H,Han R Q,2025. Overview of climate prediction for the summer 2024 in China and its precursors[J]. Meteor Mon,51(3):358-368(in Chinese).

刘长征,杜良敏,柯宗建,等,2013. 国家气候中心多模式解释应用集成预测[J]. 应用气象学报,24(6):677-685. Liu C Z,Du L M,Ke Z J,et al,2013. Multi-model downscaling ensemble prediction in National Climate Centre[J]. J Appl Meteor Sci,24(6):677-685(in Chinese).

刘芸芸,王永光,龚振淞,等,2021a. 2020年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象,47(4):488-498. Liu Y Y,Wang Y G,Gong Z S,et al,2021a. Precursory signals of the 2020 summer climate in China and evaluation of real-time prediction[J]. Meteor Mon,47(4):488-498(in Chinese).

刘芸芸,王永光,柯宗建,2021b. 2020年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象,47(1):117-126. Liu Y Y,Wang Y G,Ke Z J,2021b. Characteristics and possible causes for the climate anomalies over China in summer 2020[J]. Meteor Mon,47(1):117-126(in Chinese).

刘芸芸,章大全,宋连春,等,2024. 西太平洋副热带高压指数的修订与应用[J]. 气象学报,82(6):801-815. Liu Y Y,Zhang D Q,

Song L C, et al, 2024. Revision and application of the western Pacific subtropical high indices[J]. Acta Meteor Sin, 82(6): 801-815(in Chinese).

任宏利，丑纪范，2005. 统计-动力相结合的相似误差订正法[J]. 气象学报，63(6)：988-993. Ren H L, Chou J F, 2005. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together[J]. Acta Meteor Sin, 63(6): 988-993 (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).

孙林海，宋文玲，龚振淞，2015. 2014 年汛期气候预测先兆信号应用及其复杂性初探[J]. 气象，41(5)：639-648. Sun L H, Song W L, Gong Z S, 2015. Preliminary study of precursor and its application in summer climate prediction and its complexity in 2014 [J]. Meteor Mon, 41(5): 639-648(in Chinese).

王永光，郑志海，2018. 2017 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象，44(4)：565-571. Wang Y G, Zheng Z H, 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 565-571(in Chinese).

吴统文，宋连春，刘向文，等，2013. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. 应用气象学报，24(5)：533-543. Wu T W, Song L C, Liu X W, et al, 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of National Climate Centre [J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 533-543(in Chinese).

袁媛，杨辉，李崇银，2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. 气象学报，70(3)：467-478. Yuan Y, Yang H, Li C Y, 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 467-478(in Chinese).

曾庆存，袁重光，王万秋，等，1990. 跨季度气候距平数值预测试验[J]. 大气科学，14(1)：10-25. Zeng Q C, Yuan C G, Wang W Q, et al, 1990. Experiments in numerical extraseasonal prediction of climate anomalies[J]. Sci Atmos Sin, 14(1): 10-25(in Chinese).

章大全，袁媛，韩荣青，2023a. 2022 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象，49(1)：110-121. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023a. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022[J]. Meteor Mon, 49(1): 110-121(in Chinese).

章大全，袁媛，韩荣青，2023b. 2022 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象，49(3)：365-378. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023b. Overview of climate prediction for the summer 2022 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 49(3): 365-378(in Chinese).

张庆云，吕俊梅，杨莲梅，等，2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系[J]. 大气科学，31(6)：1290-1300. Zhang Q Y, Lü J M, Yang L M, et al, 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6): 1290-1300(in Chinese).

张庆云，陶诗言，陈烈庭，2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J]. 气象学报，61(5)：559-568. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T, 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia[J]. Acta Meteor Sin, 61(5): 559-568(in Chinese).

张顺利，陶诗言，2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究[J]. 大气科学，25(3)：372-390. Zhang S L, Tao S Y, 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 25(3): 372-390 (in Chinese).

赵俊虎，陈丽娟，章大全，2022a. 2021 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象，48(1)：107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022a. Characteristics and possible causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1): 107-121(in Chinese).

赵俊虎，陈丽娟，章大全，2022b. 2021 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象，48(4)：479-493. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022b. Overview of climate prediction for the summer 2021 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 48(4): 479-493(in Chinese).

赵俊虎，张涵，左金清，等，2021. 2020 年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J]. 大气科学，45(6)：1433-1450. Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al, 2021. What drives the super strong precipitation over the Yangtze-Huaihe River Basin in the Meiyu period of 2020?[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1433-1450(in Chinese).

赵玉衡，丁婷，2025. 2024/2025 年冬季北半球大气环流及对中国冬季气候异常的影响[J]. 气象，51(7)：876-890. Zhao Y H, Ding T, 2025. The northern hemisphere atmospheric circulation in the 2024/2025 winter and its impact on the winter climate anomalies in China[J]. Meteor Mon, 51(7): 876-890(in Chinese).

支蓉，高辉，孙冷，2024a. 2023 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象，50(1)：115-125. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024a. Characteristics and causes of climate anomalies over China in summer 2023[J]. Meteor Mon, 50(1): 115-125(in Chinese).

支蓉，高辉，孙冷，2024b. 2023 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象，50(3)：377-386. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024b. Overview of climate predicition for the summer 2023 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 50(3): 377-386(in Chinese).

中国气象局气候变化中心，2025. 中国气候变化蓝皮书(2025)[M]. 北京：科学出版社：1-120. China Meteorological Administration Climate Change Center, 2025. Blue Book on Climate Change(in China 2025) [M]. Beijing: Science Press: 1-120(in Chinese).

祝从文，刘伯奇，左志燕，等，2019. 东亚夏季风次季节变化研究进展[J]. 应用气象学报，30(4)：401-415. Zhu C W, Liu B Q, Zuo Z Y, et al, 2019. Recent advances on sub-seasonal variability of East Asian summer monsoon[J]. J Appl Meteor Sci, 30(4): 401-415(in Chinese).

朱益民,杨修群,2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报,61(6):641-654. Zhu Y M,Yang X Q,2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China[J]. Acta Meteor Sin,61(6):641-654 (in Chinese).

朱玉祥,丁一汇,2007. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题[J]. 气象科技,35(1):1-8. Zhu Y X,Ding Y H,2007. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate:advances and problems[J]. Meteor Sci Technol,35(1):1-8(in Chinese).

Chen L,Zhong X H,Li H,et al,2024. A machine learning model that outperforms conventional global subseasonal forecast models [J]. Nat Commun,15:6425.

Fang Y H,Chen K Q,Chen H S,et al,2018. The remote responses of early summer cold vortex precipitation in northeastern China to the precedent sea surface temperatures[J]. Atmos Res,214:399-409.

Feng G L,Yang J,Zhi R,et al,2020. Improved prediction model for flood-season rainfall based on a nonlinear dynamics-statistic combined method[J]. Chaos Solito Fract,140:110160.

Jin W X,Luo Y,Wu T W,et al,2022. Deep learning for seasonal precipitation prediction over China[J]. J Meteor Res,36(2):271-281.

Johnson S J,Stockdale T N,Ferranti L,et al,2019. SEAS5:the new ECMWF seasonal forecast system[J]. Geosci Model Dev,12(3):1087-1117.

Kalnay E,Kanamitsu M,Kistler R,et al,1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc,77(3):437-472.

Li C Y,Mu M Q,Long Z X,2003. Influence of intraseasonal oscillation on East-Asian summer monsoon[J]. J Meteor Res,17(S1):130-142.

Lu R Y,Dong B W,2005. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997—1998[J]. J Geophys Res Atmos,110(D16):D16102.

Ren H L,Wu Y J,Bao Q,et al,2019. The China multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018[J]. J Meteor Res,33(3):540-552.

Reynolds R W,Smith T M,Liu C Y,et al,2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. J Climate,20(22):5473-5496.

Saha S,Moorthi S,Wu X R,et al,2014. The NCEP climate forecast system version 2[J]. J Climate,27(6):2185-2208.

Sun C,Kucharski F,Li J P,et al,2017. Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. Nat Commun,8:15998.

Wang B,Wu R G,Fu X H,2000. Pacific-East Asian teleconnection:How does ENSO affect East Asian climate?[J]. J Climate,13(9):1517-1536.

Wu J,Ren H L,Wan J H,et al,2024. Verification of seasonal prediction by the upgraded China multi-model ensemble prediction system (CMMEv2.0)[J]. J Meteor Res,38(5):880-900.

Wu T W,Yu R C,Lu Y X,et al,2021. BCC-CSM2-HR:a high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model[J]. Geosci Model Dev,14(5):2977-3006.

Wu T W,Zhang F,Zhang J,et al,2020. Beijing Climate Center Earth System Model version 1 (BCC-ESM1):Model description and evaluation of aerosol simulations[J]. Geosci Model Dev,13(3):977-1005.

Xie S P,Hu K M,Hafner J,et al,2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate,22(3):730-747.

Yang Q,Ma Z G,Fan X G,et al,2017. Decadal modulation of precipitation patterns over eastern China by sea surface temperature anomalies[J]. J Climate,30(17):7017-7033.

Zhang T T,Wang T,Feng Y Y,et al,2021. An emerging impact of Eurasian spring snow cover on summer rainfall in eastern China [J]. Environ Res Lett,16(5):054012.

Zhang T T,Wang X Y,Song Y M,et al,2025. Impact of spring snow cover anomaly over the Russian Far East on the early summer precipitation variability in Northeast China[J]. J Geophy Res:Atmos,130(2):e2024JD042118.

Zhao J H,Zhang H,Zuo J Q,et al,2022. Oceanic drivers and empirical prediction of interannual rainfall variability in late summer over Northeast China[J]. Climate Dyn,58(3-4):861-878.

Zhao J H,Zhou J,Xiong K G,et al,2019. Relationship between tropical Indian ocean SSTA in spring and precipitation of Northeast China in late summer[J]. J Meteor Res,33(6):1060-1074.

Zhao J H,Zuo J Q,Zhang H,et al,2023. Extreme precipitation driven by the rapid tropical Atlantic warming and the second developing La Niña over the Yangtze-Huaihe River Basin in August 2021[J]. Climate Dyn,61(5):2581-2598.

Zuo J Q,Li W J,Sun C H,et al,2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci,30(4):1173-1186.

Zuo J Q,Li W J,Sun C H,et al,2019. Remote forcing of the northern tropical Atlantic SST anomalies on the western North Pacific anomalous anticyclone[J]. Climate Dyn,52(5/6):2837-2853.

(本文责编:侯翠梅)