

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).

2024 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析^{*}

李 想 郑志海 韩荣青

国家气候中心, 北京 100081

提 要: 2024 年汛期, 国家气候中心准确预测了我国夏季气候状况总体偏差、涝重于旱的特征, 对东部季风区降水偏多的预测与实况高度一致。同时, 准确预测了汛情的阶段性特征: 7 月中旬前长江中下游、淮河流域、太湖流域汛情重, 7 月中旬后松辽流域、海河流域汛情重。对“夏季全国气温偏高, 初夏华北、黄淮等地高温过程多以及盛夏南方地区高温过程多”的预测与实况相符。预测的不足之处在于对台风偏少背景下影响华南降水的极端性估计不足。动力气候模式对热带和副热带地区的环流形势预测与实况比较一致, 对我国东部大范围降水偏多、全国气温偏高的趋势预测也与实况基本相符。文章从年代际和年际等时间尺度, 对 2024 年汛期气候预测的先兆信号进行分析和评估, 2023/2024 年冬季赤道中东太平洋、热带印度洋和热带大西洋的海温异常均非常显著, 而积雪和极冰的异常程度相对较弱, 因此重点考虑三大洋海温的分布对汛期气候的影响。实况表明, 三大洋的海温异常有利于增强西太平洋副热带高压, 使得我国东部季风区降水大范围偏多。

关键词: 夏季降水, 高温, 西太平洋副热带高压, 先兆信号

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022501

Overview of Climate Prediction for the Summer 2024 in China and Its Precursors

LI Xiang ZHENG Zhihai HAN Rongqing

National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: The main characteristics of climate in the flood season 2024 were accurately predicted by the National Climate Centre, including that the overall climate condition was unfavorable and the flood disasters had more serious impact than drought. The prediction of excessive precipitation in the eastern monsoon region was highly consistent with observations. At the same time, the stage characteristics of flood situation were accurately predicted, that is, the flood situation was serious first in the middle and lower reaches of the Yangtze River, the Huaihe River Basin and the Taihu Lake Basin before mid-July and then in the Songhua River Basin, the Liaohe River Basin and the Haihe River Basin after mid-July. The prediction of “overall high temperature nationwide in summer, multiple high temperature processes in North China, Huanghuai Region and other places in early summer, and multiple high temperature processes in the south of China in mid-summer” was in line with observations. The shortcoming of the flood season prediction was that the impact of typhoons on extreme precipitation in South China under the background of fewer typhoons was underestimated. The predictions of circulation situation from multiple dynamic

^{*} 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2142207、U2342205)、国家自然科学基金面上项目(42175078)、国家气候中心能源气候服务团队建设项目(NCCCXTD003)和中国长江电力股份有限公司项目(2423020054)共同资助

2025 年 1 月 15 日收稿; 2025 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者: 李想, 主要从事短期气候预测业务与研究. E-mail: lxiang@cma.gov.cn

通讯作者: 郑志海, 主要从事短期气候预测业务与研究. E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

climate models for the tropical and subtropical regions were in a relatively good agreement with observations. The models' predictions of large range of excessive precipitation in eastern China and national temperatures higher than normal were basically consistent with observations as well. In addition, this article analyzes and assesses the precursor signals for the flood season 2024 climate prediction from interdecadal and interannual time scales. The sea surface temperature (SST) anomalies in the equatorial eastern and central Pacific, tropical Indian Ocean, and tropical Atlantic during the 2023/2024 winter were all remarkable, while the anomalies of the snow cover and polar ice were relatively weak. Therefore, the study focus is on the impact of the SST distribution in the three oceans on the flood season climate of China. Observations also show that the SST anomalies from the three oceans were conducive to strengthening the western Pacific subtropical high, leading to the widespread excessive precipitation in the eastern monsoon region of China.

Key words: summer precipitation, high temperature, western Pacific subtropical high, precursor

引 言

中国位于东亚季风区,气候年际变率大(黄荣辉等,1998),是全球天气气候灾害最为频发的国家之一(郑国光,2019)。同时以全球变暖为背景,极端天气气候事件的发生频次和强度均表现出增多增强的趋势(IPCC,2023),给中国社会可持续发展带来了严重影响(张庆云等,2008)。夏季的6—8月是中国的主汛期,也是台风、洪涝、高温等自然灾害发生最频繁的季节,是全国防汛抗旱的关键阶段。受东亚季风系统复杂性影响(Tao and Chen,1987),中国夏季气候受到多因子的影响和控制,既受到全球海温异常、中高纬度积雪分布、青藏高原热力状况、极冰等下垫面信号的影响,也与南亚高压、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)、欧亚中高纬度槽脊活动、副热带西风急流等大气环流密切相关(张庆云和陶诗言,1999;Wu et al,2009;闵锦忠等,2016;李延等,2023;武炳义,2024),使得夏季气候预测的难度较大。在众多影响夏季气候的因子中,ENSO(El Niño-Southern Oscillation)被广泛认为是年际变化最重要的信号来源,其演变特征对东亚的气候有着显著的影响(陈文等,2018;黄刚等,2024),赤道东太平洋 El Niño 事件发生时,东亚夏季风往往偏弱,西太副高增强,中国夏季主要雨带位置南移(任宏利等,2024)。然而,在全球变暖背景下,ENSO 的分布形态、强度和演变特征均发生了显著变化(Hu et al,2020;Ding et al,2022),其对东亚气候的影响也与之有了明显不同。除了 ENSO 外,印度洋和大西洋对东亚夏季气候的影响也受到越来越多的关

注(Liu et al,2019;Feng et al,2021)。因此,开展气候异常诊断分析和预测技术的复盘总结,不断加深先兆信号对汛期预测影响的认识,对做好汛期预测有非常重要的意义。每年汛期结束后,国家气候中心都会及时诊断汛期气候异常成因(丁婷和高辉,2020;刘芸芸等,2021b;赵俊虎等,2022a;章大全等,2023a;支蓉等,2024a;李想和郑志海,2025),并对汛期预测效果进行评估,重点归纳总结先兆信号的影响(丁婷等,2020;刘芸芸等,2021a;赵俊虎等,2022b;章大全等,2023b;支蓉等,2024b),以期更深入地揭示中国汛期气候异常的机理,进而提高短期气候预测的科学水平和预测准确率。

2024 年夏季,中国气候状况总体偏差,降水空间分布呈现东部降水偏多、西部降水偏少的特征,东部地区洪涝影响范围广、灾害重,长江、淮河、太湖、辽河、海河等多个流域出现阶段性明显汛情;夏季台风生成和登陆数均偏少;大部分地区气温偏高,全国平均气温 22.3℃,是 1961 年以来历史同期最高。本文在回顾 2024 年夏季中国气候异常基本特征的基础上,将实况与预测结果进行对比分析,对 2024 年汛期气候预测的成功和不足进行总结,重点分析了年代际和年际时间尺度先兆信号的预测效果,并在此基础上对提升汛期预测水平和需要深入研究的科学问题进行分析 and 讨论。

1 资料和方法

本文分析过程中使用了以下几种资料:(1)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),该数据集包含中国 2374 个气象观

测站 1951 年 1 月以来降水和气温的日值数据(任芝花等,2012);(2)预测分析中采用的海温指数和积雪指数来自国家气候中心的气候监测预测分析系统(CIPAS3.1;Ren et al,2018),其中积雪资料下载自美国罗格斯大学官网(<http://climate.rutgers.edu/snowcover>);(3)全球逐月海温资料 and 高度场、风场再分析资料采用美国国家海洋与大气局发布的再分析资料(Reynolds et al,2007),逐月海温资料水平分辨为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$,大气再分析资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。采用刘芸芸等(2012)关于西太副高指标的定义方法。

文中的气候态为 1991—2020 年平均,春季和夏季分别为 3—5 月和 6—8 月,冬季为前一年 12 月至当年 2 月。本文分析用图来自国家气候中心气候监测预测业务中应用的 CIPAS3.1 和气象灾害影响评估系统。

汛期气候预测业务中应用的短期气候预测模式包括:(1)中国气象局第二代气候预测模式(BCC_CSM1.1;吴统文等,2013)和第三代气候预测模式(CMA-CPSv3;Wu et al,2021);(2)日本气象厅耦合预测系统(MRI-CPS2;Takaya et al,2018);(3)欧洲中期天气预报中心耦合模式(ECMWF4;Kim et al,2012);(4)美国国家环境预报中心(NCEP)第二代气候预测系统模式(CFSv2;Saha et al,2014);(5)中国多模式集合预测系统(CMME2.0;Wu et al,2024)。

2 2024 年夏季气候预测效果评估

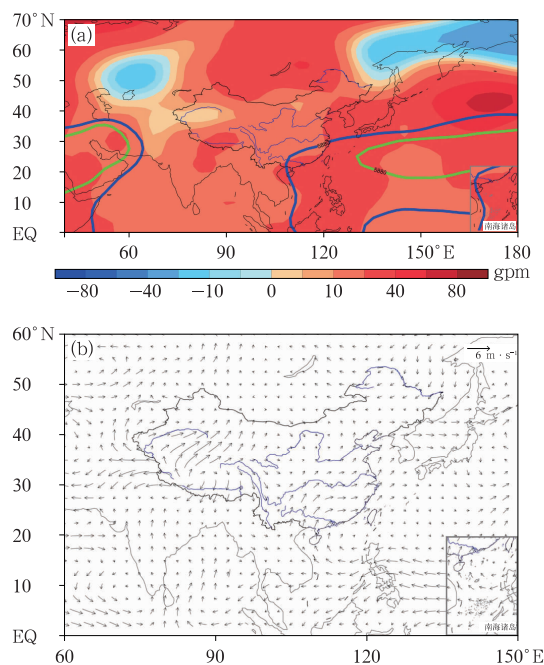
2024 年汛期预测准确把握了我国气候状况总体偏差、涝重于旱的特征,预测的东部季风区降水偏多与实况高度一致。对流域汛情的预测结论与实况相符,准确预测了 7 月中旬前长江中下游、淮河流域、太湖流域汛情重,7 月中旬后松辽流域、海河流域汛情重的阶段性特征。对夏季台风生成和登陆数均偏少情况的预测与实况一致。预测的全国气温偏高特征与实况相符,并且准确预测了初夏华北、黄淮等地高温过程多以及盛夏南方高温过程多的阶段性变化特征。

2.1 东亚夏季大气环流

2024 年夏季,东亚夏季风强度较常年偏弱,亚洲 100 hPa 高度场上均为高度场正距平控制(图略),南

亚高压偏强,面积偏大,且范围显著向东扩展。在 500 hPa 高度场上(图 1a),欧亚中高纬度贝加尔湖地区为高度场正距平,而巴尔喀什湖以西及鄂霍次克海地区为高度场负距平。对比表征西太副高的 5880 gpm 位势高度线的实况和气候态可以看出,西太副高强度偏强、面积偏大,西伸脊点偏西、北界偏北。对流层低层的 850 hPa 风场距平(图 1b)显示,西太平洋为反气旋式风场距平,菲律宾、南海上空为东南风距平,我国东部地区大部为西南风距平控制,有利于水汽向季风区输送,1000~300 hPa 整层水汽辐合辐散场(图略)表明,我国东部大部分地区水汽表现为辐合。

2024 年 3 月底进行的中国汛期气候预测会商,准确预测了东亚夏季风强度偏弱和夏季西太副高强度偏强、面积偏大、西伸脊点偏西的分布形态,预测我国东部季风区低层 850 hPa 风场为西南风距平控制也与实况相符。对环流预测的最大差异是对于中高纬度的槽脊位置预测与实况有所差异,大部分动



注:图 a 中,绿色等值线:气候平均 5880 gpm 特征线;
蓝色等值线:2024 年夏季平均 5880 gpm 特征线。

图 1 2024 年夏季(a)500 hPa 位势高度距平场(填色),(b)850 hPa 风场距平(风矢)

Fig. 1 (a) The 500 hPa geopotential height anomaly (colored) and (b) 850 hPa wind anomaly (vector) in the summer of 2024

力气候预测模式预测夏季乌拉尔山地区阻塞高压活跃,实况是乌拉尔山地区的500 hPa高度场为负距平控制。总体来说,2024年夏季,大气环流配置对我国东部地区的水汽输送有利,对热带和副热带地区环流形势的预测也与实况更为接近。

2.2 降水

2024年夏季全国降水空间上总体呈“东多西少”分布,东北南部、内蒙古中东部、华北东部、华东东北部、华中北部和南部、新疆西部等地降水偏多5成至1倍;西部大部地区降水偏少,其中华南南部、西南地区东南部、西藏中北部和东部、西北地区西北部及内蒙古西部、新疆东南部等地降水偏少2~5成,部分地区偏少5成以上(图2a)。

国家气候中心2024年3月底发布的预测意见,准确预测了2024年夏季中国降水“东多西少”的分布形态,对东部季风区大范围降水异常偏多趋势及流域汛情的预测与实况一致(图2b)。在降水的阶段性方面,准确预测了初夏长江中下游、淮河流域、太湖流域汛情重,7月中旬之后松辽流域、海河流域汛情重的阶段性特征,取得了较好的服务效果。汛

期预测的不足之处主要表现为对台风偏少背景下华南降水异常的极端性估计不足。2024年夏季台风生成和登陆数均偏少,预测与实况一致,但台风对华南地区的降水影响大,第3号台风格美和第4号台风派比安均造成江南和华南地区出现暴雨过程,多个国家级气象站日降水量突破历史极值;此外,8月下半月季风槽稳定维持在华南地区,导致华南地区出现持续性强降水过程,台风活动对华南影响的复杂性导致预测产生了一定的偏差。

在2024年6月底发布的盛夏(7—8月)降水量距平百分率预测意见中,延续了中国降水“东多西少”的分布格局,预测中国东部季风区大范围多雨,并将长江以北地区作为主要多雨区,同时增大了降水量异常偏多2~5成的区域范围(图3b)。与实况(图3a)对比可以发现,对盛夏北方地区大范围多雨的预测与实况相符,与实况差别较大的地区主要集中在江南北部、华南地区东部、西藏西南部和新疆大部。

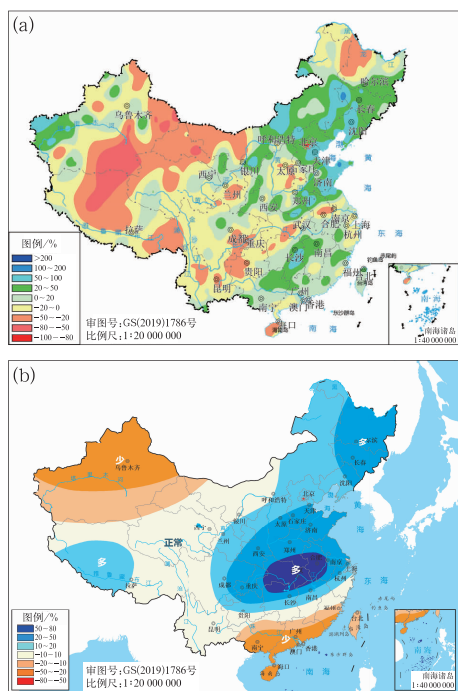


图2 2024年(a)夏季全国降水量距平百分率分布及(b)3月底发布的预测结果

Fig. 2 (a) Distribution of precipitation anomaly percentage in China in summer and (b) corresponding prediction issued at the end of March in 2024

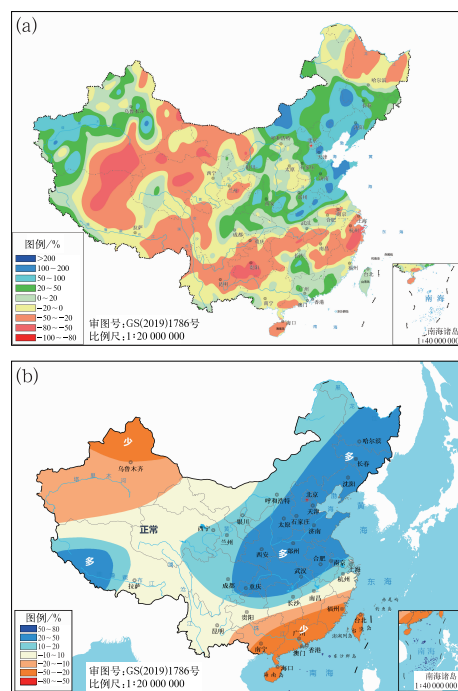


图3 2024年(a)盛夏(7—8月)全国降水量距平百分率分布及(b)6月底发布的预测结果

Fig. 3 (a) Distribution of precipitation anomaly percentage in China in mid-summer (July to August) and (b) corresponding prediction issued at the end of June in 2024

2.3 中国东部季风和雨季进程

中国东部地区受季风气候控制,每年季风雨带由南向北逐步推进,因此对季风雨带的预测也至关重要。季风雨带进程及强度不但受到来自海洋、陆地等异常信号的影响(Liu et al, 2020; 赵俊虎等, 2021),同时也可能受到多时间尺度环流因子的影响(刘芸芸和丁一汇, 2020; Ding et al, 2021; Qiao et al,

2021)。在对 2024 年汛期雨带预测过程中,既综合考虑了 2023 年 5 月开始的 El Niño 事件和其他先兆信号的共同作用,同时也分析了动力气候模式临近的预测结果,较为准确地预测了中国东部雨季开始日期的早晚和强度。对华南前汛期、梅雨和华北雨季异常偏多的预测与实况完全一致(表 1),对汛期防灾减灾具有重要参考意义。

表 1 2024 年汛期中国东部季风雨带进程和强度的预测与实况
Table 1 Predicted and observed monsoon rain processes and intensities in eastern China in the flood season of 2024

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 4 日(偏早 5 d)	7 月 3 日(偏早 1 d)	1005.9(偏多 40%)	开始偏早	雨量偏多
江南梅雨	6 月 10 日(偏晚 1 d)	7 月 3 日(偏早 7 d)	437.8(偏多 11%)	接近常年	雨量偏多
长江中下游梅雨	6 月 17 日(偏晚 3 d)	7 月 15 日(偏早 1 d)	480.7(偏多 51%)	接近常年	雨量偏多
江淮梅雨	6 月 19 日(偏早 4 d)	7 月 21 日(偏晚 7 d)	406.6(偏多 58%)	开始偏早	雨量偏多
华北雨季	7 月 22 日(偏晚 4 d)	8 月 31 日(偏晚 14 d)	249.7(偏多 83%)	开始偏晚	雨量偏多

2.4 热带气旋

2024 年夏季,共有 8 个台风在西北太平洋及南海生成,较常年同期偏少 3 个。登陆我国的台风有 3 个,较常年同期偏少 1.7 个。

在 5 月底的滚动会商预测中,预测 2024 年夏季(6—8 月)西北太平洋和南海热带气旋生成数为 7~9 个,较常年同期(11 个)偏少;登陆我国的热带气旋数为 3~4 个,较常年同期(4.7 个)偏少,主要影响广东、福建等沿海地区,盛夏可能有较强台风北上影响东北地区,台风活动路径以西行和西北行为主。对夏季台风生成和登陆数的预测与实况一致,台风活动路径和影响区域与实况也基本相符。

2.5 气 温

2024 年夏季,全国大部地区气温较常年同期偏高,东北东部、华北大部、江淮、江南北部、江汉、西南地区东部、西北、新疆气温偏高 1℃ 以上(图 4a)。

2024 年 3 月底发布的 2024 年夏季平均气温距平预测(图 4b)与实况一致,准确预测了内蒙古中西部、华北、西北、新疆等地气温异常偏高的趋势。在对汛期季节进程把握较好的基础上,预测了初夏华北、黄淮等地高温过程多以及盛夏南方高温过程多的阶段性变化特征。从实况来看,高温过程开始时间较常年偏早,6 月 9—15 日在华北、黄淮出现首次区域性高温过程,盛夏之后,在南方地区发生了大范

围高温过程,其综合强度为 1961 年以来历史同期第二强,对高温过程的阶段性变化预测与实况基本一致。但对南方地区的高温过程持续时间的极端程度估计不足,主要原因是考虑到长江中下游地区在梅

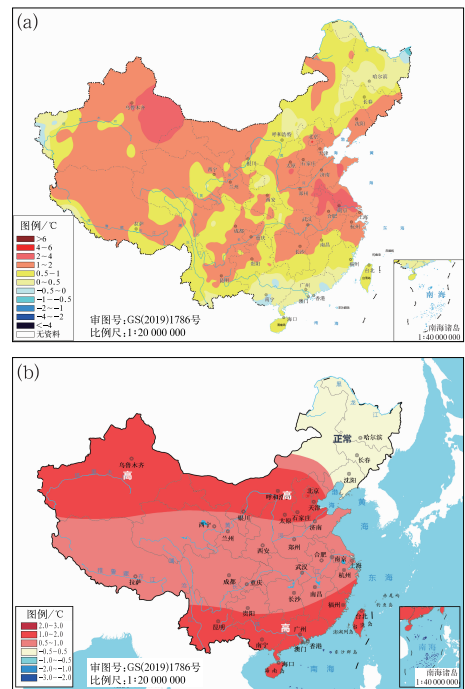


图 4 2024 年(a)夏季全国气温距平分布及(b)3 月底发布的预测结果
Fig. 4 (a) Distribution of temperature anomaly in China in summer and (b) corresponding prediction issued at the end of March in 2024

雨期降水偏多,气温出现阶段性偏低,因此低估了长江中下游的气温偏高程度。实况显示 2024 年夏季全国平均气温为 1961 年以来最高,全国高温日数为 1961 年以来历史同期第二多,且盛夏发生在南方地区大范围高温过程,综合强度为 1961 年以来历史同期第二强。

3 2024 年汛期气候预测先兆信号及应用

2024 年汛期气候预测梳理了先兆信号对气候系统的影响,评估了气候模式的预测技巧,并在此基础上加强了客观化、智能化产品的应用,构建了融合人工智能订正集成和物理诊断分析相结合的技术路线,以期提高汛期气候预测的智能化水平。夏季降水是多尺度影响因子综合作用的结果,本文对年代际、年际、次季节等多个时间尺度的重要先兆信号进行梳理和筛选。

3.1 年代际信号

我国汛期主雨带的位置分布具有显著的年代际变化特点,太平洋年代际涛动(PDO)是影响东亚大气环流和中国气候年代际变化的重要信号之一。朱益民和杨修群(2003)、李刚等(2020)研究表明,当 PDO 为负位相时,北太平洋中纬度地区偏暖,热带中东太平洋偏冷,导致北太平洋夏季海平面气压正距平、东亚大陆上空负距平,东亚夏季风表现为偏强特征,我国北方地区降水容易偏多。2020—2024 年,

逐月 PDO 指数均为负值(图 5),2020 年以来,我国北方地区夏季有一条明显的多雨带维持,体现出在本次 PDO 负位相阶段,年代际尺度的信号对年际变化有一定的调制作用。

另外,夏季高温变化受年代际信号影响亦比较显著。在全球气候变暖背景下,高温事件的发生强度和频率均呈增加趋势,近年来,我国平均气温屡创新高,极端高温事件的发生愈加频繁(Jia et al, 2023; Zhang et al, 2023; 蔡子怡等, 2024)。21 世纪以来,我国夏季高温天气过程的分布形势及影响时段和区域都较 2000 年之前呈现出显著的年代际变化特征(Ding et al, 2018; 2024),因此在 2024 年夏季针对高温及其影响的预测时,除了考虑大范围气温偏高外,重点考虑了夏季高温过程的次季节变化特征,同时结合模式预测信息,准确预测了初夏华北、黄淮等地高温过程多,以及盛夏南方高温过程多的阶段性变化特征。

3.2 年际信号

2023/2024 年冬季赤道中东太平洋、热带印度洋和热带大西洋的海温异常均非常显著,而积雪和极冰的异常程度相对较弱,因此重点考虑了三大洋海温的分布对汛期气候的影响。作为全球气候系统年际异常最主要的影响因子,ENSO 被广泛认为是年际变化最重要的信号来源,ENSO 事件的类型、强度和演变等特征都可能导致东亚夏季风的强弱变化,并导致夏季季风雨带位置和强度发生变化。赤道中东太平洋从 2023 年 5 月至 2024 年 4 月经历了

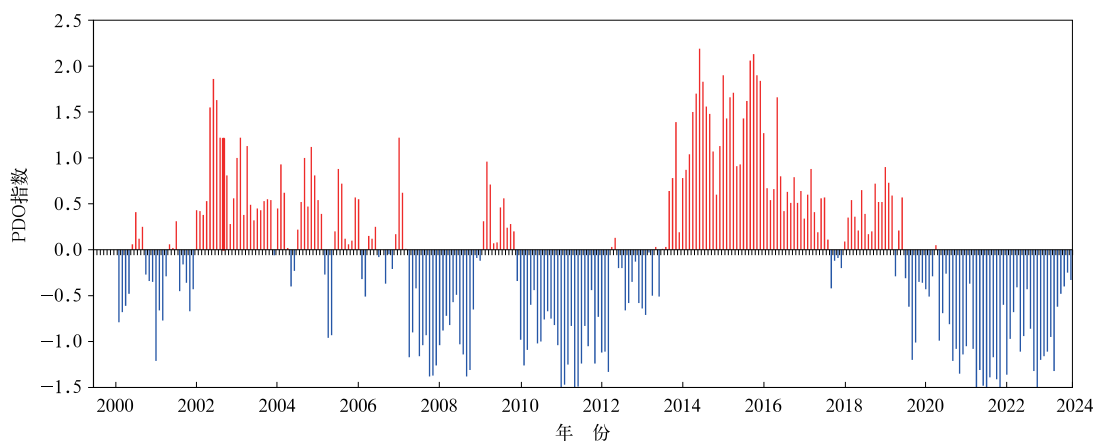


图5 2000 年 1 月至 2024 年 2 月 PDO 指数逐月演变

Fig. 5 Evolution of monthly PDO index from January 2000 to February 2024

一次 El Niño 事件(图 6),其强度为 1961 年以来的第五位。回顾近年来发生的强 El Niño 事件,均对我国气候造成了比较显著的影响,例如,1998 年夏季我国长江发生全流域性大洪水(李维京,1999;王钦等,2012);2016 年夏季长江流域降水明显偏多,中下游地区出现严重洪涝灾害(袁媛等,2017);2020 年夏季我国东部大部地区降水偏多,长江流域梅雨期长度和强度均远超历史平均水平(孙思远和管兆勇,2022)。研究还发现,El Niño 发展年的秋冬季,通过 Rossby 波遥相关作用在菲律宾及南海地区激发异常反气旋环流,该反气旋也被认为是 El Niño 影响中国气候异常的重要纽带。2015/2016 年、1997/1998 年和 2019/2020 年冬季西太副高均表现出显著偏强的特征,2023/2024 年冬季西太副高表现出持续偏强、偏西的特征,体现了 El Niño 的显著

影响。因此在汛期预测中,针对年际时间尺度的先兆信号重点考虑了 El Niño 事件衰减对我国夏季降水的可能影响,同时结合模式对海温未来发展趋势的预测信息,综合考虑前冬至夏季赤道中东太平洋海温由暖向冷转变的情况下我国夏季降水的异常特征,共选取 1988 年、1998 年、2007 年、2010 年、2016 年、2020 年 6 个相似年份。对 6 个海温相似年份进行合成,环流的合成结果(图略)表明:500 hPa 高度场上西太副高偏强、偏西;850 hPa 距平风场上菲律宾反气旋式环流,对应我国东部大部分地区为南风距平控制。而降水量正距平百分率合成图(图 7)显示,华北地区、华中北部、华东北部、西北地区、西南地区东部和北部、新疆等地降水偏多,其余地区降水偏少,合成的降水分布较好地体现了长江流域和华北地区降水偏多的特征。

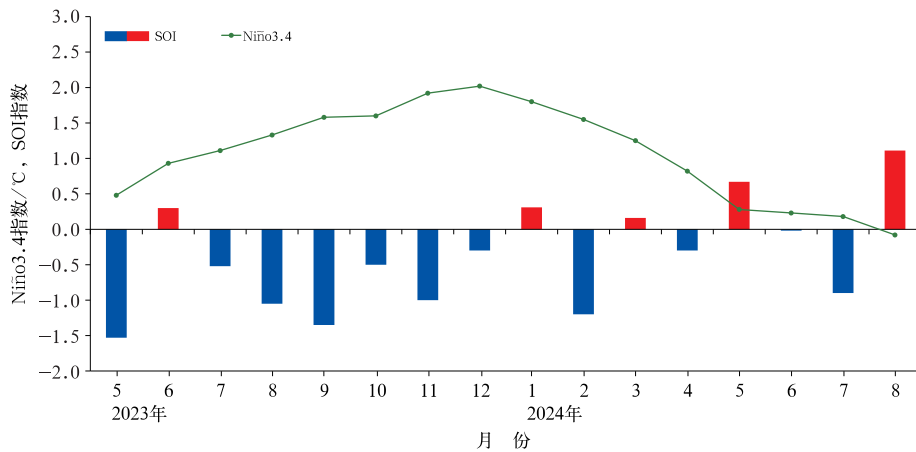


图 6 2023 年 5 月至 2024 年 8 月 Niño3.4 指数和南方涛动(SOI)指数逐月演变

Fig. 6 Variations of monthly Niño3.4 index and SOI index from May 2023 to August 2024

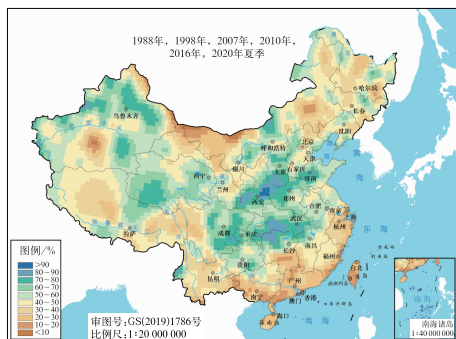


图 7 El Niño 事件衰减年夏季
降水量正距平百分率合成图

Fig. 7 Composite graph of summer precipitation
positive anomaly percentage in
El Niño attenuation years

在赤道太平洋海温异常偏高的同时,2023/2024 年冬季热带北大西洋和热带印度洋的海温均显著偏高,且各自排名历史同期第一。国内外大量研究发现,El Niño 事件会通过电容器效应、遥相关效应等机制使得热带印度洋和北大西洋海温升高(Cai et al,2019;Wang,2019)。印度洋暖海温异常相似年的降水合成(图略)则反映出有利于夏季江淮流域降水显著偏多,这与 2024 年夏季的环流和降水实况更为接近。而从最新的夏季降水成因分析中也发现,热带印度洋显著偏暖的先兆信号是我国乃至东亚地区夏季降水显著偏多的主要原因之一。北大西洋海温异常可能通过热带和热带外两条路径影响亚洲大气环流形势,进而影响我国汛期降水(Yang

et al, 2023)。2024年三大洋海温异常偏高的特征,均有利于增强西太副高,有利于充沛的太平洋和印度洋水汽输送至我国东部,使得东部季风区降水大范围偏多,强降水过程多。

3.3 动力气候模式预测

2024年汛期气候预测过程中,除了物理诊断外,在科学评估模式的预测技巧的基础上,加强了客观化、智能化产品的应用,对提升汛期气候预测的智能化水平起到了重要作用。3月起报的BCC_CSM1.1、CMA-CPSv3、ECMWF4和CFSv2均预测夏季500 hPa位势高度距平场上,我国上空为位势高度正距平,西太副高强度偏强、面积偏大、西伸脊点偏西,即气候模式均较明显地体现了El Niño事件衰减的影响。模式对亚洲中高纬度的位势高度距平的预测结果明显不同,其中CMA-CPSv3、ECMWF4和CFSv2均预测巴尔喀什湖及以西地区为高度场负距平,这与实况更为接近。

针对我国夏季降水的预测,BCC_CSM1.1、CMA-CPSv3、ECMWF4和CFSv2均预测夏季我国东部大范围多雨,模式对降水偏多的异常级和多雨中心的预测结果有所差异,CMME2.0预测夏季长江以北地区为异常偏多的多雨中心,与实况较为接近。尽管绝大部分模式均预测的中国东部大范围降水偏多与实况相符,但也存在预测的降水偏多范围较实况偏大,对江淮西部、江汉、西南地区的降水偏多为空报。模式预测的汛期全国气温偏高与实况相符,但偏高的中心和异常程度与实况存在差异。

3.4 华南东部降水预测失误原因分析

2024年前冬至春季三大洋海温异常偏暖的特征,均有利于增强西太副高,使得西太副高异常强盛,将充沛的太平洋和印度洋水汽输送到我国东部,但从海温异常的汛期降水合成结果来看,我国东部地区降水偏多的区域主要位于长江及以北地区,而华南则降水偏少。实况则显示2024年夏季华南降水偏多,原因主要有两个:一是受台风格美和台风派比安的影响,华南东部出现暴雨过程,多个国家级气象观测站日降水量突破历史极值,其中台风格美影响期间,华南中部和东部降水量偏多2倍以上(图8);二是8月下半月,西太副高偏强但位置偏北,850 hPa风

场距平场上南海地区为异常反气旋式环流控制,季风槽稳定维持在华南地区,导致华南东部出现持续性强降水过程(图9)。

对华南东部降水预测失误的主要原因在于对台风偏少背景下影响华南降水异常的极端性估计不足。尽管夏季台风生成和登陆数偏少,但台风对华南地区的降水影响大,在台风格美和台风派比安影响下华南东部出现多次强暴雨过程。此外,8月下半月季风槽稳定维持在华南地区,受其影响,华南在8月下半月出现持续性强降水,而汛期预测中关于台风对华南的影响和季风槽位置估计不足,与实况产生了一定的偏差。

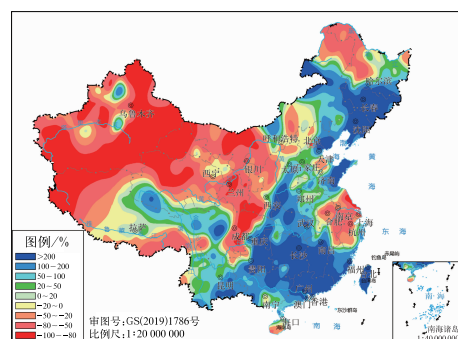


图8 2024年7月26—31日全国降水量距平百分率分布

Fig. 8 Distribution of precipitation anomaly percentage in China from 26 to 31 July 2024

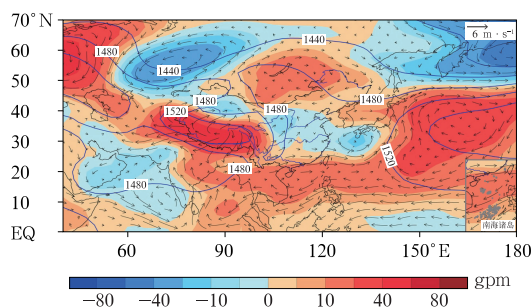


图9 2024年8月15—31日850 hPa位势高度场(等值线,单位:gpm)及其距平(填色)和风场距平(风矢)

Fig. 9 The geopotential height field (contour, unit: gpm) and its anomaly (colored), wind anomaly (vector) at 850 hPa from 15 to 31 August 2024

4 结论和讨论

2024 年汛期,国家气候中心准确预测了我国夏季气候偏差、涝重于旱的特征,预测的东部季风区降水偏多与实况高度一致。对流域汛情的预测结论与实况相符,并准确预测了 7 月中旬前淮河流域、长江中下游、太湖流域汛情重,7 月中旬后松辽流域、海河流域汛情重的阶段性特征。对夏季全国气温偏高的预测与实况一致,准确预测了初夏华北、黄淮等地高温过程多,以及盛夏南方高温过程多的阶段性变化特征。2024 年汛期气候预测加强了客观化、智能化产品的应用,重点考虑了年代际信号和 El Niño 事件的影响,从预测效果上看,较好地抓住了夏季我国东部季风区降水整体偏多的特征。

汛期预测的不足之处在于对台风偏少背景下影响华南降水异常的极端性估计不足。尽管 2024 年夏季台风的生成和登陆数均预测正确,但台风对华南地区产生极端降水的程度估计不足,尤其第 3 号台风格美和第 4 号台风派比安均给华南地区带来多次暴雨过程,此外,8 月下半月季风槽稳定维持且位置偏北,对华南出现持续性强降水过程起了重要作用,造成降水预测的偏差。导致华南降水偏多的两个原因的可预报时效还需进一步分析。

多家动力气候模式对 2024 年汛期热带和副热带的环流形势预测与实况比较一致,尤其准确预测了西太副高偏强、偏西和菲律宾反气旋式环流异常。尽管多数模式预测的中国东部大范围降水偏多与实况相符,但预测的降水偏多范围较实况偏大,且江淮西部、江汉、西南地区的降水偏多属于空报。模式预测的全国气温偏高与实况相符,但气温偏高的中心和幅度与实况相比仍存在差异,模式预测的气温异常偏高的量级与实况不符。模式对中高纬度大气环流、夏季季节内逐月环流和降水气温等要素的预测与实况差别较大,表明模式对季节内尺度的预测技巧不高,在应用气候动力模式相关的预测信息时仍需要订正。

参考文献

蔡子怡,游庆龙,吴芳营,等,2024. 全球碳中和背景下中国气候与极端气候变化[J]. 科技导报,42(19):73-84. Cai Z Y, You Q L, Wu F Y, et al, 2024. China's climate and extreme climate changes under the global carbon neutrality scenario[J]. Sci Technol Rev, 42(19):73-84(in Chinese).

陈文,丁硕毅,冯娟,等,2018. 不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展[J]. 大气科学,42(3):640-655. Chen W, Ding S Y, Feng J, et al, 2018. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms[J]. Chin J Atmos Sci, 42(3):640-655(in Chinese).

丁婷,高辉,2020. 2019 年夏季东亚大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象,46(1):129-137. Ding T, Gao H, 2020. Atmospheric circulation in East Asia in summer 2019 and its influence on climate of China[J]. Meteor Mon, 46(1):129-137(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).

黄刚,胡开明,唐颖苏,等,2024. 从能量学角度理解气候背景场对 ENSO 热带和热带外遥相关的影响[J]. 大气科学,48(1):218-227. Huang G, Hu K M, Tang H S, et al, 2024. Understanding the influence of background mean-state field on ENSO tropical and extratropical teleconnection from an energetic perspective [J]. Chin J Atmos Sci, 48(1):218-227(in Chinese).

黄荣辉,张振洲,黄刚,等,1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学,22(4):460-469. Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al, 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Sci Atmos Sin, 22(4):460-469(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).

李维京,1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象,25(4):20-25. Li W J, 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China[J]. Meteor Mon, 25(4):20-25(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).

李延,陈斌,徐祥德,2023. 青藏高原冬春积雪异常对中国东部夏季降水频次和强度变化的影响[J]. 大气科学,47(4):1231-1246. Li Y, Chen B, Xu X D, 2023. Impacts of winter and spring snow anomalies over the Tibetan Plateau on summer precipitation frequency and intensity in eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 47(4):1231-1246(in Chinese).

刘芸芸,丁一汇,2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象,46(11):1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1393-1404(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).
- 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).
- 闵锦忠,赵悦晨,郝立生,2016. 华北雨季监测及对应环流变化特征[J]. 干旱区地理, 39(3): 539-547. Min J Z, Zhao Y C, Hao L S, 2016. Monitoring of rainy season and characteristics of corresponding circulation changes in North China[J]. Arid Land Geogr, 39(3): 539-547(in Chinese).
- 任宏利,刘芊仪,刘明斌,等,2024. 基于时空综合分型的 El Niño 事件对中国东部降水的影响差异[J]. 大气科学学报, 47(4): 521-532. Ren H L, Liu Q Y, Liu M H, et al, 2024. Different impacts of two types of El Niño events on precipitation in eastern China based on spatiotemporal diversity[J]. Trans Atmos Sci, 47(4): 521-532(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).
- 孙思远,管兆勇,2022. 2020年长江中下游地区梅汛期强降水特征及其与对流层上层斜压 Rossby 波的关系[J]. 大气科学, 46(5): 1041-1054. Sun S Y, Guan Z Y, 2022. Heavy precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River during the 2020 Meiyu period: features and relationship with baroclinic Rossby wave in the upper troposphere[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1041-1054(in Chinese).
- 王钦,李双林,付建建,等,2012. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析:兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响[J]. 气象学报, 70(6): 1207-1222. Wang Q, Li S L, Fu J J, et al, 2012. On the formation of anomalous summer precipitation in the years of 2010 and 1998: a comparison of the El Niño's impact between Modoki and typical El Niño cases[J]. Acta Meteor Sin, 70(6): 1207-1222(in Chinese).
- 武炳义,2024. 北极-中纬度联系与北极海冰变化的关系研究新进展[J]. 大气科学, 48(1): 108-120. Wu B Y, 2024. Recent progresses in the study of the Arctic midlatitude connection and its association with Arctic sea ice loss[J]. Chin J Atmos Sci, 48(1): 108-120(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 China National Climate Center[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 533-543(in Chinese).
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017. 2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. 气象, 43(1): 115-121. Yuan Y, Gao H, Liu Y J, 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016[J]. Meteor Mon, 43(1): 115-121(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,陶诗言,1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究[J]. 气象学报, 57(5): 539-548. Zhang Q Y, Tao S Y, 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific[J]. Acta Meteor Sin, 57(5): 539-548(in Chinese).
- 张庆云,陶诗言,彭京备,2008. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J]. 大气科学, 32(4): 815-825. Zhang Q Y, Tao S Y, Peng J B, 2008. The studies of meteorological disasters over China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 815-825(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 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).
- 郑国光,2019. 中国气候[M]. 北京:气象出版社. Zheng G G, 2019. Climate in China [M]. Beijing: China Meteorological Press (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 possible 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 prediction for the summer 2023 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 50(3):377-386(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).
- Cai W J, Wu L X, Lengaigne M, et al, 2019. Pantropical climate interactions[J]. Science, 363(6430):eaav4236.
- Ding R Q, Tseng Y H, Di Lorenzo E, et al, 2022. Multi-year El Niño events tied to the North Pacific oscillation[J]. Nat Commun, 13(1):3871.
- Ding T, Gao H, Li W J, 2018. Extreme high-temperature event in southern China in 2016 and the possible role of cross-equatorial flows[J]. Int J Climatol, 38(9):3579-3594.
- Ding T, Gao H, Xie T J, 2024. Obvious difference of dominant circulation patterns between dry-type and humid-type heatwaves in North China[J]. Int J Climatol, 44(13):4710-4724.
- Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z, 2021. The record-breaking Mei-Yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies[J]. Adv Atmos Sci, 38(12):1980-1993.
- Feng J Q, Wang F J, Yu L J, et al, 2021. Revisiting the relationship between Indo-Pacific heat content and South China Sea summer monsoon onset during 1980—2020[J]. Int J Climatol, 41(3):1998-2016.
- Hu Z Z, Kumar A, Huang B H, et al, 2020. The interdecadal shift of ENSO properties in 1999/2000: a review[J]. J Climate, 33(11):4441-4462.
- IPCC, 2023. Summary for policymakers[M]//IPCC. Climate Change 2021-The Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press:1-2.
- Jia Z K, Zheng Z H, Zhu Y F, et al, 2023. Predictable patterns of mid-summer surface air temperature over Eastern China and their corresponding signal sources in ECMWF subseasonal forecasts[J]. Climate Dyn, 60(9):3005-3022.
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, et al, 2012. Asian summer monsoon prediction in ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective seasonal forecasts[J]. Climate Dyn, 39(12):2975-2991.
- Liu B Q, Yan Y H, Zhu C W, et al, 2020. Record-breaking Meiyu rainfall around the Yangtze River in 2020 regulated by the subseasonal phase transition of the North Atlantic oscillation[J]. Geophys Res Lett, 47(22):e2020GL090342.
- Liu J P, Ren H L, Li W J, et al, 2019. Diagnosing the leading mode of interdecadal covariability between the Indian Ocean sea surface temperature and summer precipitation in southern China[J]. Theor Appl Climatol, 135(3):1295-1306.
- Qiao S B, Chen D, Wang B, et al, 2021. The longest 2020 Meiyu season over the past 60 years: subseasonal perspective and its predictions[J]. Geophys Res Lett, 48(9):e2021GL093596.
- Ren H L, Lu B, Wan J H, et al, 2018. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction in China[J]. J Meteor Res, 32(6):923-936.
- 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.
- Takaya Y, Hirahara S, Yasuda T, et al, 2018. Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting[J]. Climate Dyn, 50(3-4):751-765.
- Tao S Y, Chen L X, 1987. A review of recent research on the East Asia summer monsoon in China[M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology, New York: Oxford University Press:60-92.
- Wang C Z, 2019. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective[J]. Climate Dyn, 53(7-8):5119-5136.
- Wu B, Zhou T J, Li T, et al, 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate[J]. J Climate, 22(11):2992-3005.
- Wu J, Ren H L, Wang 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]. Geo Sci Model Dev, 14(5):2977-3006.
- Yang Y, Zhu Z W, Shen X Y, et al, 2023. The influences of Atlantic sea surface temperature anomalies on the ENSO-independent interannual variability of East Asian summer monsoon rainfall[J]. J Climate, 36(2):677-692.
- Zhang L X, Yu X J, Zhou T J, et al, 2023. Understanding and attribution of extreme heat and drought events in 2022: current situation and future challenges[J]. Adv Atmos Sci, 40(11):1941-1951.

(本文责编:侯翠梅)