

赵俊虎,高辉,2026.2025年夏季中国气候异常特征及成因分析[J].气象,52(1):105-118.Zhao J H,Gao H,2026.Characteristics and causes of climate anomalies over China in summer 2025[J]. Meteor Mon,52(1):105-118(in Chinese).

2025 年夏季中国气候异常特征及成因分析^{*}

赵俊虎¹ 高 辉^{1,2}

1 国家气候中心,中国气象局气候预测研究重点开放实验室,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 年夏季中国中东部地区主雨带位于北方,华北中北部、内蒙古中南部、陕西北部等地降水较常年同期偏多 5 成至 2 倍,汛情灾情重。东部地区雨季进程呈现前期偏晚、后期偏早的特征,华北雨季开始之早、雨季之长、降水量之多均为历史之最。夏季西太平洋副热带高压(以下简称副高)异常偏北和东亚夏季风偏强,是北方多雨的直接原因。此外,东亚大气环流季节内变化对夏季逐月降水异常空间分布的影响较大,而热带大气季节内振荡(MJO)异常活动是导致东亚大气环流季节内变化的重要原因之一。6 月,东北冷涡活动频繁,与偏强、偏北的副高相配合,导致江淮流域入梅偏早、梅雨持续性强,梅雨区降水显著偏多。7 月,MJO 长时间活动在海洋性大陆至西太平洋副热带地区,促使西北太平洋副热带地区台风异常活跃、副高异常偏北,导致主雨带位于华北北部至河套地区、华南南部和东南沿海出现严重的台风雨涝。8 月,MJO 在非洲至印度洋区域活动,有利于副高加强西伸、南落,导致长江流域以北大范围降水偏多。

关键词: 华北雨季,西太平洋副热带高压,东亚夏季风,热带大气季节内振荡,台风

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j. issn. 1000-0526. 2025. 120901

Characteristics and Causes of Climate Anomalies over China in Summer 2025

ZHAO Junhu¹ GAO Hui^{1,2}

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: During the summer of 2025, the rainfall belt in the central and eastern regions of China was mainly situated in the northern part. Precipitation across north-central North China, central and southern Inner Mongolia, and northern Shaanxi exceeded the climatological mean amount by 50% to 200%, resulting in severe flooding and related disasters. The rainy season in eastern China exhibited a delayed onset, followed by an early withdrawal. In North China, the onset timing, duration, and accumulated precipitation of the rainy season all broke historical records. The excessive precipitation was primarily driven by the pronounced northward displacement of western Pacific subtropical high (WPSH) and the more strengthened East Asian summer monsoon. In addition, intraseasonal variations in the East Asian atmospheric circulation substantially modulated the spatial pattern of monthly precipitation anomalies. Among these influences, anomalous Madden-Julian oscillation (MJO) activity served as a key regulator of intraseasonal circulation variability. In June, frequent Northeast cold vortex activity, combined with a stronger and

* 国家重点研发计划(2024YFC3013100)、国家自然科学基金气象联合基金项目(U2442207、U2342211)、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)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2025J025)和国家自然科学基金项目(42075017、41875093)共同资助

2025 年 10 月 11 日收稿; 2025 年 12 月 9 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: gaoxh@cma.gov.cn

northward-migrating WPSH, triggered an earlier onset and prolonged duration of the Meiyu season in the Yangtze River and Huaihe River (Jianghuai) Basin, leading to significantly above-normal precipitation in the Meiyu region. In July, persistent MJO convection from the Maritime Continent to the western Pacific subtropical region promoted anomalous typhoon genesis and further northward shift of the WPSH over the northwestern Pacific. As a result, the main rainfall belt was located in the northern part of North China to Hetao Region, the southern part of South China and the southeast coast, resulting in severe typhoon rain and floods. In August, the MJO activity was enhanced in the African-Indian Ocean Region, favoring the even stronger, westward-extending and southward-moving WPSH, further increasing the rainfall amount in the areas north of the Yangtze River Basin.

Key words: North China rainy season, western Pacific subtropical high (WPSH), East Asian summer monsoon, Madden-Julian oscillation (MJO), typhoon

引言

中国作为全球季风气候特征最为显著的国家之一,其复杂多变的气候受到东亚季风系统多尺度相互作用的深刻影响(张庆云等,2003;丁一汇,2013)。在全球变暖背景下,中国极端气候事件频发,旱涝灾害造成的经济损失占自然灾害总损失的70%以上(黄荣辉等,2006)。每年夏季(6—8月)是中国的主汛期,极端旱涝灾害频发且影响较大,因此也是防汛抗旱的关键时段。如2020年6—7月长江流域发生超强梅雨(刘芸芸和丁一汇,2020;赵俊虎等,2021),2021年7月中下旬河南发生特大暴雨(杨浩等,2022;赵俊虎等,2022)以及2022年盛夏长江流域发生了破纪录的持续性高温热浪和重大干旱(章大全等,2023;Lyu et al, 2023),2023年7月底至8月初京津冀出现特大暴雨(支蓉等,2024)等,这些事件凸显了气候异常成因研究的紧迫性。深入理解气候异常的形成机制,不仅是防灾减灾的迫切需求,也是提升短期气候预测准确率、服务国家战略的重要科学命题。

近年来,气象学者们在中国气候异常成因研究方面取得显著进展。多尺度分析表明,气候异常往往是外强迫因子与大气内部变率共同作用的结果(Chen et al, 2019;陈丽娟等,2019;丁婷和高辉,2020)。在年际尺度上,ENSO事件的模态多样性及其与印度洋、大西洋海温的协同作用是全球气候异常的关键驱动因素,三大洋海温异常通过海气相互作用影响西太平洋副热带高压(以下简称副高)的强度和位置,进而影响中国的气候异常(Wang et al, 2000;Xie et al, 2009;Yuan and Yang, 2012;Zuo et al, 2013;2019;Zhao et al, 2022;2023;陈丽娟等,

2024)。在季节内尺度上,副高的北跳、季风涌动、中高纬阻塞活动、热带大气季节内振荡(MJO)等系统的配置与演变,对雨带位置和极端气候事件具有重要调控作用(Ye et al, 2014;吴捷等,2018;Li et al, 2019)。此外,青藏高原热力强迫、北极海冰异常等陆-气-冰相互作用也被证实对中国东部降水分布具有显著影响(张顺利和陶诗言,2001;朱玉祥和丁一汇,2007;Wu et al, 2009;Shen et al, 2020)。值得注意的是,随着全球变暖加剧,传统海温-环流响应关系呈现年代际变化特征(Zhou and Xia, 2012;Hong et al, 2014),这为气候异常诊断带来新的挑战。国家气候中心近年来持续开展汛期气候异常成因的实时诊断工作,为理解多因子、多尺度气候变率的机理提供了丰富的案例支撑(郑志海和王永光,2018;顾薇和陈丽娟,2019;丁婷和高辉,2020;刘芸芸等,2021;赵俊虎等,2022;支蓉等,2024;李想和郑志海,2025)。

2025年夏季,中国气候异常表现突出,呈现出“北方涝、江南旱”的典型特征。全国共发生20次区域性暴雨过程,降水点强面广,局地极端性强,“七下八上”期间北方汛情灾情较重。7月23—29日,华北、东北地区以及内蒙古遭遇强降水过程,多地日降水量和累计降水量破纪录,北京密云水库入库流量创新高,滦河出现大江大河1号洪水(也是2025年大江大河首次编号洪水),河北阜平、滦平和北京密云等地强降水引发泥石流和山体滑坡。8月7—8日,甘肃榆中遭遇连续强降水引发山洪灾害。南方则出现持续性高温天气,多地最高气温突破历史极值。此外,台风活动也表现出生成晚、数量多、登陆早、风雨影响强的特点。此类异常气候事件的发生,再次凸显了在全球变暖背景下中国气候的复杂性和极端性。

为此,本文基于多源观测和再分析资料,梳理了2025年夏季中国气候异常的主要特征,并从大气环流的季节与季节内演变、海温外强迫响应等方面分析2025年气候异常的成因,旨在深化对极端气候事件形成机理的理解,为未来汛期气候预测提供参考。

1 资料和方法

本文使用的资料包括: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、基准、一般气象站自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),水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$;美国国家海洋与大气局(NOAA)发布的全球逐月海温资料(Reynolds et al,2007),水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$;大气环流和海表温度(SST)资料长度均为1948年1月至2025年8月。MJO资料来自加拿大气象局(<http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>)。

本文选用的东亚夏季风指数包括:施能等(1996)利用东亚和西北太平洋的海平面气压差定义的东亚夏季风的标准化指数;张庆云等(2003)利用东亚热带季风槽区($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)与东亚副热带地区($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)平均850 hPa纬向风的距平差定义的东亚夏季风指数。副高各指数采用刘芸芸等(2024)定义的方法计算。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(CIPAS3.0)”;部分气候特征和评估数据取自国家气候中心逐月气候影响评价公报(https://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php);台风信息来自中央气象台。文中冬季指上一年12月至当年2月,春季为当年3—5月,夏季为当年6—8月。气候常年值为1991—2020年的平均值。在分析海温因子对夏季环流的影响时,使用线性回归的方法。文中所用时间均为北京时。

2 2025年夏季中国气候异常特征

2.1 降水异常和旱涝灾害

2025年夏季,中国平均降水量为336.2 mm,较常年同期偏多1.3%。旱涝分布有明显的空间差

异,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,华北中北部、内蒙古中南部、陕西北部等地降水较常年同期偏多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)。北京和内蒙古降水量均为1961年以来历史同期最多,新疆为历史同期次少。从各大流域来看,海河流域、辽河流域、太湖流域、珠江流域和黄河流域分别偏多31.6%、17.8%、17.8%、9.4%和7.7%;淮河流域、长江流域和松花江流域分别偏少10.9%、7.5%和1.2%。

降水日数距平空间分布(图1b)与降水距平百分率总体一致,也呈“南北多、中间少”分布,其中华北中北部、内蒙古中南部、华南东部和西南部、西藏西部等地降水日数较常年同期偏多4 d以上;黄淮南部、湖北东北部、江南中部、西南地区中北部、云南西南部、西藏东部、新疆北部降水日数偏少4 d以上。

夏季降水极端性显著,全国有195个站日降水量达到极端阈值,主要分布在内蒙古中部、华北、西北地区中东部、西南地区、长江下游等地,其中内蒙古东胜(192.2 mm)、河北易县(351.7 mm)、贵州织金(279.7 mm)等31个国家级气象观测站日降水量突破历史极值(图1c)。

从夏季雨涝等级评估空间分布(图1d)可见,519个站发生洪涝,主要分布在以下三个区域:西北地区东北部至东北地区南部、长江中下游、西南地区南部至华南,其中内蒙古中部、华北北部、广东、西南地区南部等地225个站点发生严重洪涝。

2025年夏季中国降水存在明显的季节内变化特征。6月,中东部多雨区较广,总体呈“南北少、中间多”分布,主要多雨带位于江淮流域,降水偏多2成至1倍,此外内蒙古东南部、东北北部、华南南部和西部、西南地区南部和东部、西北地区中东部等地降水也偏多,内蒙古大部、江南南部、西南地区中部、西藏大部和新疆大部等地降水偏少(图2a)。7月,中东部降水发生明显转变,转为“南北多、中间少”分布,主雨带位于河套地区—华北中北部—内蒙古中东部一带地区,河套至华北北部偏多1倍以上,西南地区南部—华南南部—江南东部一带降水也偏多,华北南部至华南西北部大部地区降水偏少,江淮大部偏少5成以上(图2b)。8月,北方多雨区范围扩大,长江流域以北大部地区降水偏多,中心仍位于华北地区,华北北部偏多5成以上,华北北部偏多1倍以上。此外,西北地区大部、华南大部、西南部分

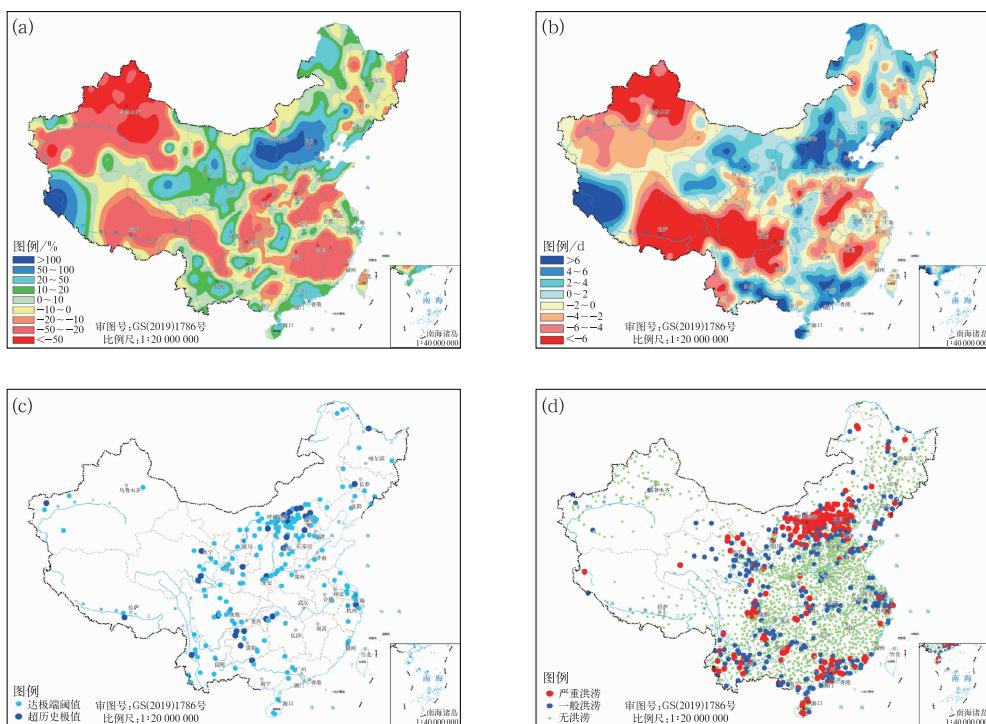


图 1 2025 年夏季中国降水异常特征分布

(a) 降水量距平百分率, (b) 降水日数距平, (c) 极端日降水量事件, (d) 雨涝等级评估

Fig. 1 Distribution of abnormal precipitation characteristics in China in the summer of 2025

(a) precipitation anomaly percentage, (b) anomaly of rainfall days,

(c) extreme daily precipitation events, (d) rain-flood severity assessment

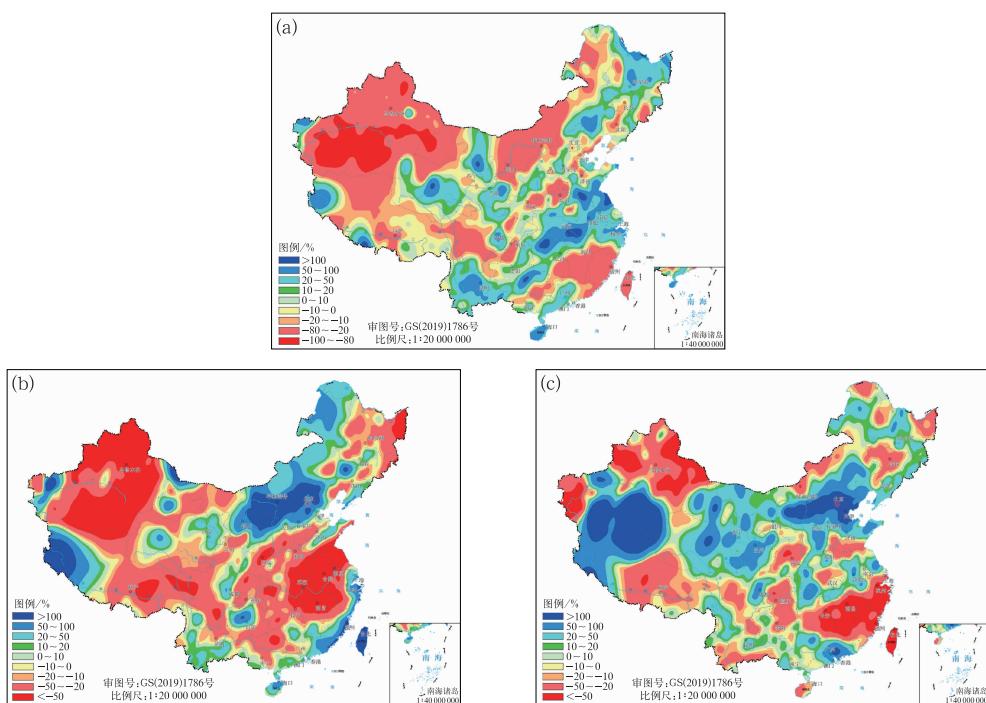


图 2 2025 年(a)6月,(b)7月和(c)8月中国降水量距平百分率分布

Fig. 2 Distribution of precipitation anomaly percentage over China in

(a) June, (b) July and (c) August 2025

地区、西藏西部和新疆南部等地区降水也偏多,江南、西南地区东部、西藏东部和新疆北部等地降水偏少2成以上(图2c)。

2.2 东部汛期雨季进程

2025年,印度夏季风于5月24日爆发,较常年同期偏早8d,是2009年以来爆发最早年;而南海夏季风于5月第6候爆发,较常年偏晚2候。东亚夏季风阶段性偏强,中国东部雨季进程呈现阶段性和转折性变化特征,总体表现为前期偏晚、后期偏早,强度为前弱后强。表1给出了雨季的主要监测指标。其中华北雨季持续时长59d,较常年(30d)偏长29d,与1973年和2021年并列为1961年以来历史最长;累计降水量为356.6mm,较常年(136.6mm)偏多161.1%,创1961年以来历史新高。

图3为2025年夏季中国东部地区($110^{\circ}\sim120^{\circ}$ E)平均降水量纬向演变,可见江南、长江中下游地区和江淮地区的梅雨开始总体偏早,梅雨期降水持续性强、强度偏强,其中6月19—23日为最强降水期,但梅雨期明显偏短;6月下旬后期雨带北移,华北雨季

开始偏早、持续性和强度明显偏强,其中7月23—29日为最强降水期,华北、东北地区以及内蒙古遭遇强降水过程,河北阜平、滦平和北京密云等地强降水引发泥石流和山体滑坡;华南地区自6月中旬开始,先后受到“蝴蝶”“丹娜丝”“韦帕”“竹节草”等7个台风的影响。

伴随着降水异常的季节内变化,中国西北地区东部、黄淮、江南等地气象干旱阶段性发展。6月上旬,西北地区东部干旱持续,黄淮大部干旱发展(图4a),6月17日中旱以上的面积达到最大,为 183.9万km^2 。下旬,受多轮降水过程影响,黄淮地区气象干旱基本缓和或缓解(图4b)。7月,受多轮降水过程影响,除陕西东南部等地外,北方大部地区气象干旱已缓解;但由于出梅偏早,江淮、黄淮地区气象干旱发展,至7月底,河南东南部、安徽北部、江苏北部、陕西东南部等地发展至重旱,局地特旱(图4c)。8月上旬之后,受台风“竹节草”及降水过程影响,黄淮、江淮地区的阶段性干旱明显缓解;中旬,江南干旱开始发展,至8月底,江西等地发展至重旱(图4d)。

表1 2025年中国东部雨季进程

Table 1 The process of rainy season in eastern China in 2025

雨季名称	开始时间(早晚异常)	结束时间(早晚异常)	雨季长度(距平)	降水量(距平百分率)
华南前汛期	4月24日(偏晚15d)	7月2日(偏早2d)	69 d(-17 d)	594.2 mm(-17.4%)
江南梅雨	6月7日(偏早2d)	6月30日(偏早10d)	23 d(-8 d)	256.4 mm(-35.1%)
长江中下游梅雨	6月7日(偏早7d)	6月30日(偏早16d)	23 d(-9 d)	281.1 mm(-11.7%)
江淮梅雨	6月19日(偏早4d)	7月1日(偏早13d)	12 d(-9 d)	156.8 mm(-39.0%)
华北雨季	7月5日(偏早13d)	9月2日(偏晚16d)	59 d(+29 d)	356.6 mm(+161.1%)

2.3 台风活动和影响

2025年夏季,西北太平洋及南海台风生成晚、

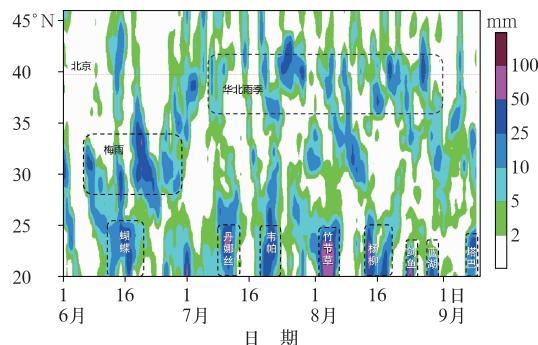


图3 2025年6月1日至9月8日中国东部($110^{\circ}\sim120^{\circ}$ E)平均降水量的纬度变化

Fig. 3 Latitudinal variation of the precipitation averaged over eastern of China ($110^{\circ}\sim120^{\circ}$ E) from 1 June to 8 September 2025

数量多、登陆早、风雨影响大。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(表2),接近常年同期(4.7个)。首个台风“蝴蝶”生成时间(6月11日)较常年(3月25日)显著偏晚,6月13日以强热带风暴级在海南登陆,登陆时间较常年(6月27日)偏早(14d);受“蝴蝶”影响,11—16日,海南、广东西部、浙江等地累计降水量达100mm,局地超过250mm。第4号台风“丹娜丝”路径曲折、强降水范围广、降水量大,主要影响华南和华东沿海。第6号台风“韦帕”登陆地点多、紧沿华南海岸线移动、降水量大。第8号台风“竹节草”经历停编又“复活”过程,登陆上海之后在江苏和安徽一带回旋,给华东地区带来强风雨。第11号台风“杨柳”为今年以来登陆中国的最强台风,以强台风级在台湾台东登陆,在福建漳浦再次登陆

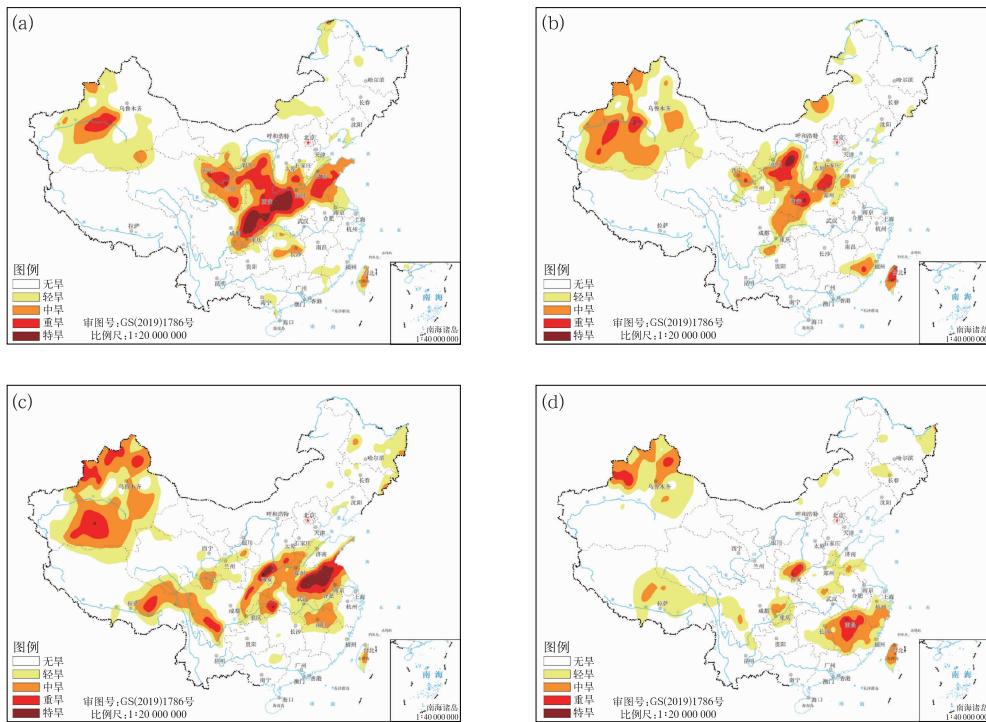


图 4 2025 年夏季中国气象干旱综合监测

(a) 6月 6 日, (b) 6月 25 日, (c) 7月 31 日, (d) 8月 31 日

Fig. 4 Evolution of meteorological drought conditions across China on

(a) 6 June, (b) 25 June, (c) 31 July and (d) 31 August 2025

表 2 2025 年夏季影响中国的台风纪要表

Table 2 Information on typhoons affecting China in the summer of 2025

编号	名称	生命史(BT)	持续时间/h	首次登陆时间和地点
2501	蝴蝶	6月 11 日 08:00 至 15 日 20:00	108	6月 13 日, 海南东方
2504	丹娜丝	7月 4 日 08:00 至 9 日 23:00	134	7月 7 日, 台湾嘉义
2506	韦帕	7月 18 日 02:00 至 22 日 20:00	90	7月 20 日, 广东台山
2508	竹节草	7月 23 日 20:00 至 8 月 1 日 20:00	240	7月 30 日, 浙江舟山
2511	杨柳	8月 8 日 05:00 至 15 日 02:00	165	8月 13 日, 台湾台东
2513	剑鱼	8月 22 日 08:00 至 26 日 14:00	102	未登陆
2514	蓝湖	8月 28 日 14:00 至 31 日 02:00	60	未登陆

后快速稳定西行深入内陆，影响沿途多个省份。13号台风“剑鱼”虽未登陆，但擦过海南岛南部沿海，强风暴雨影响大。14号台风“蓝湖”经过海南南部近海，给华南南部带来较强风雨天气。

2.4 平均气温和高温

2025 年夏季，全国平均气温 22.3°C ，较常年同期 (21.2°C) 偏高 1.1°C ，与 2024 年夏季并列为 1961 年以来历史同期最高(图 5a)。空间分布上，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，全国其余大部地区气温偏高 $0.5\sim2^{\circ}\text{C}$ ，山东

大部、河南大部、安徽北部、江苏中北部等地偏高 $2\sim4^{\circ}\text{C}$ (图 5b)。有 16 个省(自治区、直辖市)气温为历史同期前三高，其中新疆、陕西、山西、山东、河南均为历史同期最高。全国夏季平均高温日数 (13.7 d)，较常年同期偏多 5.7 d，为历史同期第二多(第一为 2022 年夏季，14.3 d)。江南北部至华北南部、四川盆地东部、新疆南部偏多 10 d 以上，其中淮河流域部分地区偏多 30 d 以上(图 5c)。新疆吐鲁番东坎(48.7°C)、重庆巫溪(44.2°C)等 57 个国家级气象观测站日最高气温达到或突破历史极值(图 5d)。

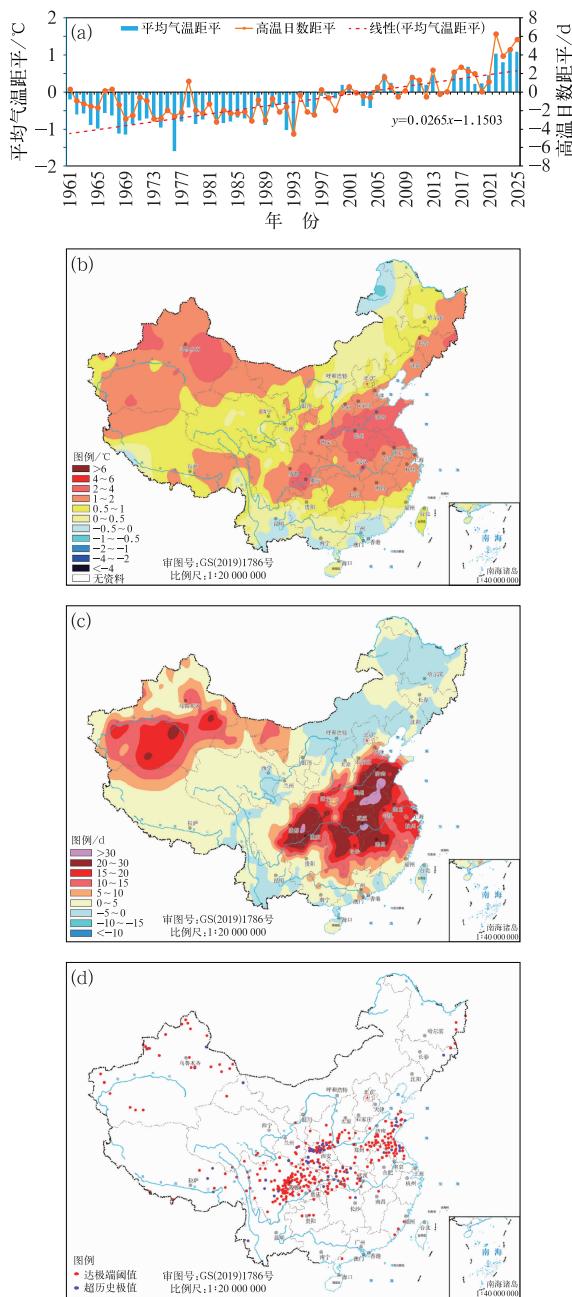


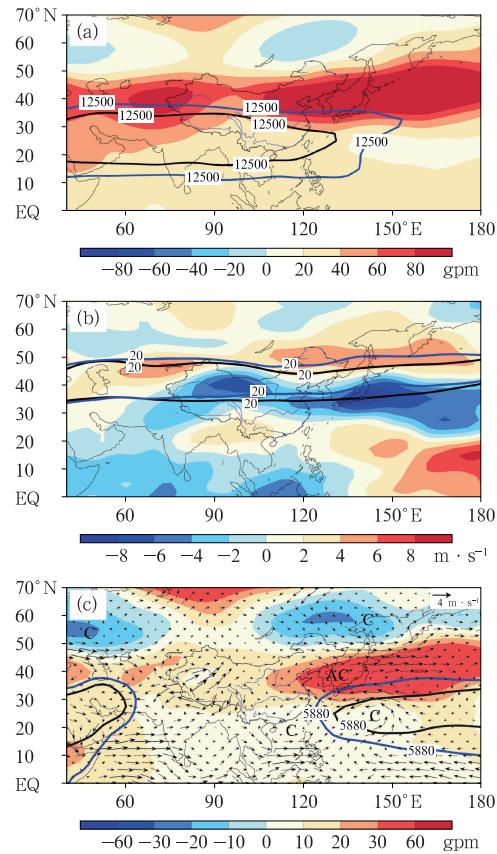
图5 (a)1961—2025年夏季中国平均气温距平和高温日数距平序列,以及(b~d)2025年夏季中国(b)气温距平,(c)高温日数距平,(d)极端高温事件分布

Fig. 5 Abnormal temperature characteristics in China in the summer of 2025
 (a) Time series of national mean temperature anomaly and high-temperature day anomaly from 1961 to 2025, and (b-d) distributions of (b) temperature anomaly,
 (c) high-temperature day anomaly and
 (d) extreme high-temperature events in 2025

3 夏季降水异常成因分析

3.1 季节平均的大尺度环流背景

2025年夏季,南亚高压较常年同期面积偏大、强度偏强、东部脊点偏东、北界偏北(图6a)。从200 hPa



注:图a~c中等值线分别为南亚高压、西风急流和副高,蓝色、黑色等值线分别表示2025年值和气候平均值;图c中AC和C分别表示反气旋和气旋环流异常,下同。

图6 2025年夏季东亚大气环流异常特征

- (a)200 hPa位势高度距平场(填色),
- (b)200 hPa纬向风距平场(填色),
- (c)500 hPa位势高度距平场(填色)

Fig. 6 Atmospheric circulation anomalies over

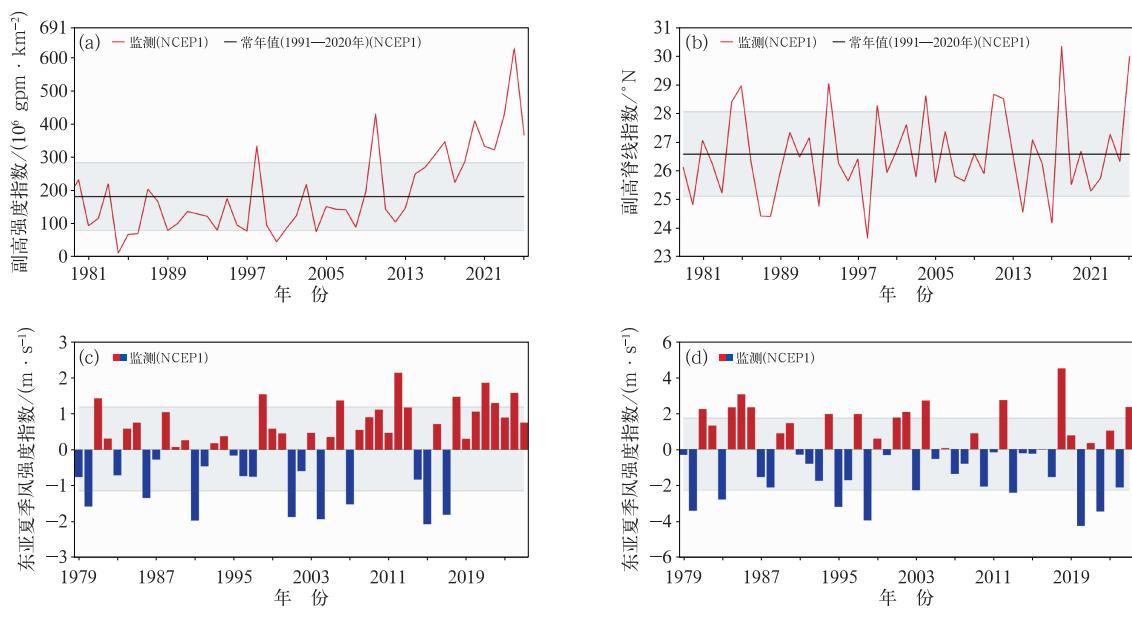
East Asia in the summer of 2025
 (a) geopotential height anomaly at 200 hPa (colored), (b) zonal wind anomaly at 200 hPa (colored), (c) geopotential height anomaly at 500 hPa (colored) as well as wind anomaly field at 850 hPa (wind vector)

纬向风场和距平场可见(图 6b),东亚副热带西风急流(以下简称西风急流)东段($110^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)位置明显偏北。以往研究表明,对流层高层的南亚高压和西风急流的偏北有利于对流层中层副高偏北(Wei et al, 2017; 张庆云等, 2018)。在 500 hPa 高度距平场上,欧亚中高纬度地区呈现“两槽一脊”的高度场异常分布,乌拉尔山和鄂霍次克海阻塞高压活动偏弱,欧亚中高纬度以纬向环流为主;中亚至西北太平洋中纬度($30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$)为高度场正距平,中国受高度场正距平控制(图 6c),气温偏高。副高强度异常偏强(1961 年以来历史第四,图 7a)、西伸脊点偏西(111.6°E ,较常年偏西 12.2 个经度)、脊线异常偏北(30°N ,较常年同期偏北 3.4 个纬度,仅次于 2018 年;图 7b)。850 hPa 风场距平显示,西太平洋副热带($10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)、中纬度($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$)和东北亚地区($50^{\circ}\sim 65^{\circ}\text{N}$)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,有利于水汽向中国北方地区输送。施能等(1996)定义的东亚夏季风指数显示 2025 年东亚夏季风明显偏强(指数为 0.75,接近 1 倍标准差;图 7c);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

$2.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,超过 1 倍标准差,为 2018 年之后最强年;图 7d)。从夏季逐月降水及环流异常变化来看,逐月降水异常与环流系统均呈现显著的差异,因此下文针对逐月降水异常特征进行成因分析。

3.2 季节内降水异常成因

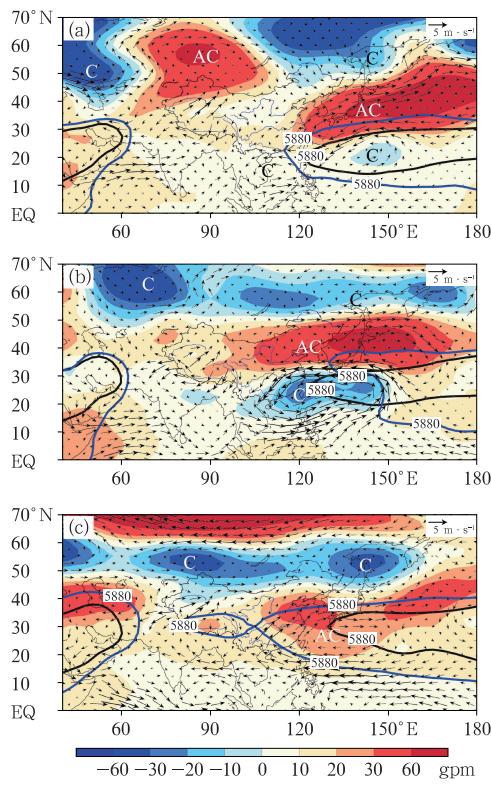
6 月,欧亚中高纬度环流呈“两槽一脊”型(图 8a),乌拉尔山和东北亚分别为低压槽,巴尔喀什湖至贝加尔湖西部为高压脊。东北地区处于低压中心控制之下,冷涡活动较为活跃。国家气候中心监测 6 月东北冷涡活动日数达 15 d。副高强度明显偏强、位置偏西,脊线较常年平均偏北 2.4 个纬度(图 8a, 图 9a)。在西北太平洋至东亚地区,500 hPa 位势高度距平自南向北呈现“—十一”的分布特征,即西北太平洋-东亚遥相关型(EAP)负位相,EAP 标准化指数接近 2 倍标准差(图 9b)。一方面西北太平洋副热带地区($10^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$)对流层低层为气旋性环流异常,而中国江南地区至西北太平洋中纬度地区($25^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$)为西南—东北走向的大范围反气旋性环流异常,此中心位于日本上空,反气旋性环流异常将来自西北太平洋的水汽输送至江淮流域。频繁的冷涡活动一方面造成东北地区北部降水异常偏



注:灰色等值线表示 1 倍标准差。

图 7 1979—2025 年夏季副高(a)强度指数和(b)脊线指数,(c)施能等(1996)和(d)张庆云等(2003)定义的东亚夏季风强度指数

Fig. 7 (a) Intensity index and (b) ridge line index of western Pacific subtropical high in summer, and (c, d) intensity index of East Asian summer monsoon as defined by (c) Shi et al (1996) and (d) Zhang et al (2003) from 1979 to 2025



注:等值线为副高,蓝色、黑色等值线分别

表示2025年值和气候平均值。

图8 2025年500 hPa位势高度距平场(填色)和850 hPa风场距平(风矢)
(a)6月,(b)7月,(c)8月

Fig. 8 Geopotential height anomaly at 500 hPa (colored), and wind anomaly field at 850 hPa (wind vector) in (a) June, (b) July and (c) August 2025

多;另一方面引导冷空气南下,与偏北、偏强的副高相配合,在江淮流域形成水汽辐合,致使江南至江淮地区入梅偏早、梅雨持续性强,梅雨区降水显著偏多。

东北冷涡是初夏东亚中高纬地区重要的天气系统,频繁的东北冷涡活动具有显著的“气候效应”,其不仅会影响东北地区的气候,而且影响梅雨期降水特征(何金海等,2006;He et al,2006)。东北冷涡活动的异常与北大西洋三极子(NAT)位相有密切的联系,研究显示当春季至初夏NAT处于正位相(北大西洋海温从低纬至高纬呈“—十一”的距平分布)时,可激发欧亚中高纬度遥相关波列,造成初夏中国东北地区及其周围为低压中心,导致东北冷涡活跃(Fang et al,2018)。2025年4—5月NAT处于弱的正位相,6月正位相明显加强,指数达到0.56,为2022年11月之后最强(图10a)。从6月NAT指数回归的同期500 hPa位势高度距平场可见,欧亚中高纬从北大西洋北部向东至中国东北地区呈现“—十一—”的遥相关波列,东北地区至鄂霍次克海为显著的负高度距平(图10b),有利于东北冷涡活跃。

7月,欧亚环流形势有明显的调整。中高纬500 hPa位势高度距平为负距平,乌拉尔山以东、贝加尔湖和鄂霍次克海均为低压槽,且位置偏北,环流经向度较6月减小,不利于冷空气南下。7月东北冷涡活动日数为10 d,主要位于俄罗斯东南部。相较6月,7月副高强度明显减弱,位置偏东、偏北,脊

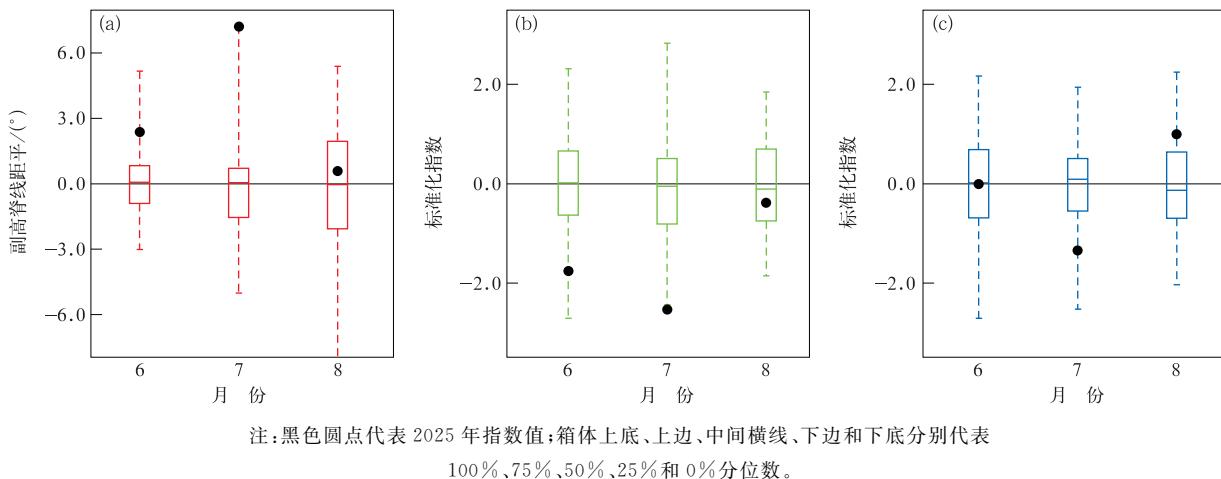
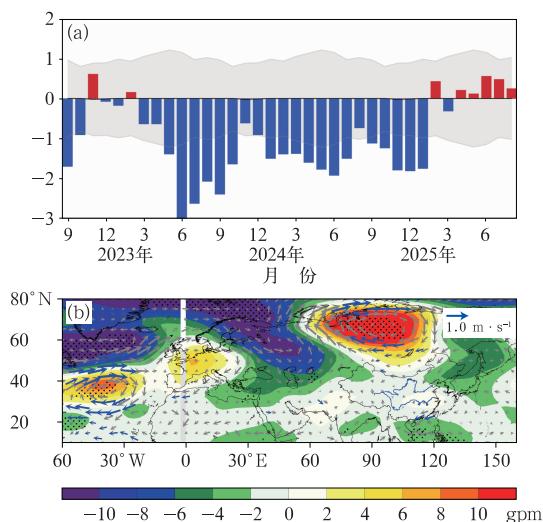
图9 1979—2025年6—8月的(a)副高脊线距平,(b)西北太平洋-东亚遥相关型
标准化指数和(c)西北太平洋反气旋强度标准化指数的箱线图

Fig. 9 Boxplots of (a) western Pacific subtropical high ridge position anomaly, (b) standardized index of East Asia-Northwest Pacific teleconnection pattern, and (c) standardized intensity index of Northwest Pacific anticyclone in June—August from 1979 to 2025



注:图 a 中灰色等值线表示 1 倍标准差,
图 b 中黑点和蓝色风矢分别表示高度距平和
风场距平通过了 0.05 的显著性水平检验。

图 10 (a)2022 年 9 月至 2025 年 8 月
北大西洋三极子(NAT)指数月变化,
(b)1982—2025 年 6 月 NAT 指数回归
的同期 500 hPa 位势高度距平(填色)
和 850 hPa 风场距平(风矢)

Fig. 10 (a) Monthly variation of North Atlantic Triple (NAT) index from September 2022 to August 2025, (b) regressions of 500 hPa geopotential height anomalies (colored) and horizontal wind anomalies (wind vector) at 850 hPa in June against the June NAT index from 1982 to 2025

线较常年平均偏北 7.2 个纬度,为 1961 年以来 7 月副高最北年(图 8b, 图 9a)。EAP 呈现显著的负位相,EAP 标准化指数超过 2 倍标准差,为 1961 年以来同期最强负位相(图 9b)。西北太平洋副热带地区($10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$)对流层低层为异常偏强的大范围气旋性环流异常(图 8b, 图 9c),而中国北方地区至西北太平洋中高纬度地区($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$)为纬向的大范围反气旋性环流异常,中心位于日本上空。异常偏北的反气旋性环流将来自西北太平洋副热带的水汽输送至中国北方地区,造成北方降水异常偏多;西北太平洋台风活跃(7 个编号台风,1961 年以来 7 月最多),导致华南南部和江南东部沿海地区台风雨涝严重;江淮流域位于西北太平洋副热带气旋性环流的北部,上空受异常偏强的偏东风异常控制,不利于水汽辐合,导致降水异常偏少(图 2b)。

8 月,欧亚中高纬环流调整比较弱,500 hPa 位势高度距平仍为负距平,巴尔喀什湖以北和鄂霍次克海均为低压槽,但西北太平洋至东亚地区环流异常较 7 月出现显著转折,500 hPa 位势高度距平转为“南正北负”,EAP 负位相明显减弱,副高面积明显增大、强度明显增强、位置异常偏西,5880 gpm 等值线抵达中国西南地区,脊线较常年平均略偏北 0.6 个纬度(图 8c, 图 9a)。西北太平洋副热带地区对流层低层转为大范围的反气旋性环流异常,反气旋北扩至华北南部—日本岛一带(图 8c, 图 9c),中国中东部大部地区受西南风异常控制,东亚夏季风明显增强,将来自西北太平洋的水汽输送至长江流域及其以北地区,造成长江流域以北大部地区降水异常偏多。

8 月东亚季风环流形势为何发生突然转折?从 2025 年夏季逐月 SST 距平场和 OLR 距平场演变(图 11)可见,热带中东太平洋和热带北大西洋 SST 异常不明显,SST 距平基本在 $-0.5\sim 0.5^{\circ}\text{C}$,这两个区域的对流活动异常也不明显,即海气相互作用较弱。6 月,印度洋东北部至西北太平洋副热带地区($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}, 90^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)对流活跃,西北太平洋中纬度地区($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)对流受到抑制(图 11a),有利于副高北跳偏早;7 月,印度洋—太平洋地区的对流活动与 6 月相似,但西北太平洋副热带地区的对流明显加强并北扩接近 30°N ,在西北太平洋中纬度地区($30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$)形成较强的下沉运动(图 11b),有利于副高异常偏北;而 8 月,印度洋—太平洋地区的对流活动发生明显的转变,西北太平洋副热带地区的对流明显减弱,西北太平洋中纬度地区 OLR 正距平也减弱(图 11c),不利于副高继续维持异常偏北。

印太地区对流活动的季节内异常变化与热带季节内振荡(MJO)活动密切相关(图 12a)。监测显示,6 月 MJO 总体不活跃,月初在西太平洋活动(第 6~7 位相);7 月 MJO 较活跃,主要在海洋性大陆至西太平洋区域活动(第 4~7 位相),且活动日数高达 27 d,超过气候平均值(13 d)14 d,和 2018 年并列为 1979 年以来历史第三位,仅次于 2014 年(29 d)和 1994 年(28 d)(图 12a, 12b)。MJO 在海洋性大陆至西太平洋区域活跃,有利于西北太平洋副热带地区热带气旋生成,7 月共有 7 个台风生成和 1 个热带低压活动,进而导致副高位置异常偏北。8 月 MJO 主要在非洲至印度洋区域活动(第 1~3 位

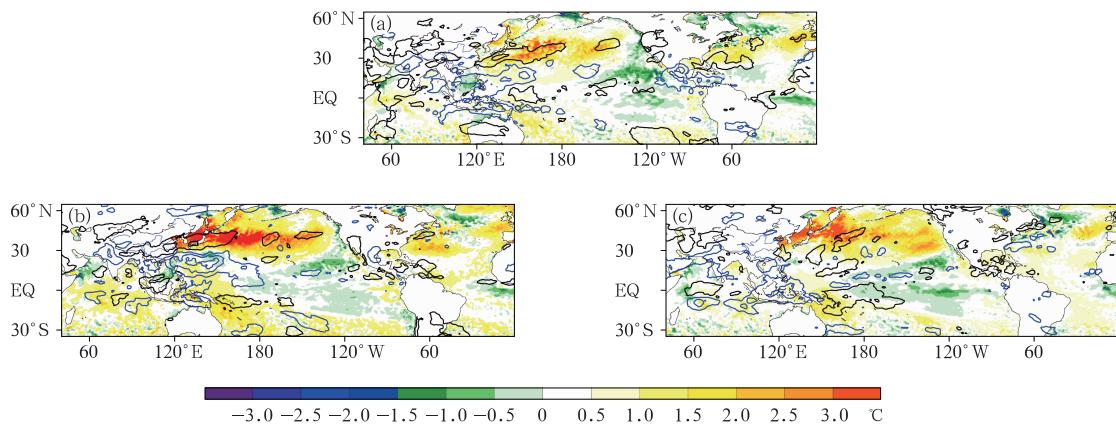


图 11 2025 年夏季逐月 SST 距平场(填色)和 OLR 距平场(等值线; $-50 \sim 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 间隔为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)
(a) 6 月,(b) 7 月,(c) 8 月

Fig. 11 Monthly sea surface temperature anomalies (colored) and OLR anomalies (contour; $-50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ to $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, interval $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) in (a) June, (b) July and (c) August 2025

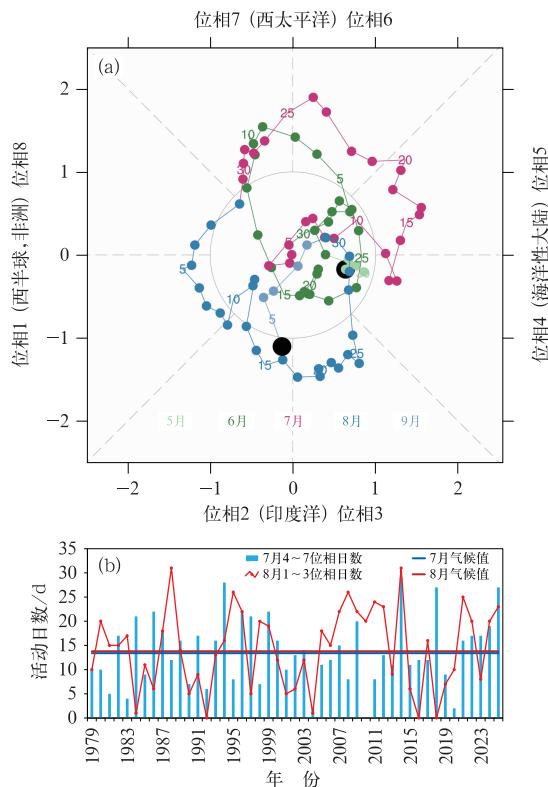


图 12 (a)2025 年 5 月 25 日至 9 月 5 日
MJO 指数位相图,(b)1979—2025 年 MJO
7 月处于第 4~7 位相的日数及其气候平均值、
8 月处于第 1~3 位相的日数及其气候平均值
Fig. 12 (a) MJO phase diagram from 25 May to
5 September 2025, (b) the number of days in
MJO phases 4—7 in July and the climatological
mean, and the number of days in
MJO phases 1—3 in August and the
climatological mean from 1979 to 2025

相),活动日数达 23 d,超过气候平均值(14 d)9 d。MJO 在第 1~3 位相活跃,有利于副高的加强、西伸。因此,MJO 活动异常是导致 2025 年夏季副高季节内异常变化的一个重要原因。

4 结论和讨论

2025 年夏季,中国平均气温与 2024 年夏季并列为 1961 年以来历史同期最高,平均高温日数为历史同期第二多;全国平均降水量接近常年同期,旱涝分布有明显的空间差异,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,华北中北部、内蒙古中南部、陕西北部等地降水较常年同期偏多 5 成至 2 倍,北京和内蒙古降水量均为 1961 年以来历史同期最多。“七下八上”期间北方汛情灾情重,北京密云、甘肃兰州等地灾情极为严重。东部雨季进程总体表现出前期偏晚、后期偏早,华北雨季开始之早、雨季之长、降水量之多均为历史之最。

2025 年夏季,对流层高层南亚高压偏强、东部脊点偏东、北界偏北,西风急流东段位置明显偏北,对流层中层欧亚中高纬整体呈“两槽一脊”的分布型,环流经向度较小,东北冷涡阶段性活跃。副高偏强、偏西,6—8 月脊线分别较常年偏北 2.4、7.2 和 0.6 个纬度,其中 7 月偏北显著,为 1961 年以来最北。异常偏北的副高和明显偏强的东亚夏季风,有利于水汽向中国北方地区输送,与弱冷空气辐合,导致主雨带位于中国北方地区,中心位于华北北部至河套地区。此外,西北太平洋及南海台风生成数量

多、登陆数略偏多,导致广东和江南东部沿海台风雨涝严重。夏季北方多雨的直接原因是副高偏北,而对流层高层南亚高压和西风急流偏北,以及对流层低层 MJO 阶段性东传至海洋性大陆至西太平洋区域,是副高偏北的主要原因。

此外,夏季东亚大气环流季节内的明显变化引起了降水空间分布的变化。6月,东北冷涡活动频繁,与偏强、偏北的副高相配合,导致江淮流域入梅偏早、梅雨持续性强,梅雨区降水显著偏多。东北冷涡活动的异常主要与春末夏初 NAT 正位相增强有关。7月,MJO 东传,长时间活动在海洋性大陆至西太平洋区域,促使西北太平洋台风异常活跃、副高异常偏北,导致主雨带位于华北北部至河套地区。8月,MJO 在非洲至印度洋区域活动,有利于副高加强、西伸和南落,导致长江流域以北大范围降水偏多。

ENSO 是全球季节到年际尺度气候异常的显著信号,也是中国汛期气候异常重要的可预报性来源。2024 年 5 月 ENSO 进入中性位相,12 月至 2025 年 1 月转入拉尼娜状态,2 月开始再次转入中性状态,3—8 月 Nino3.4 指数位于 $-0.15 \sim 0.12^{\circ}\text{C}$,为近 10 年来最弱的 ENSO 信号;此外热带北大西洋春夏季海温异常不显著,导致 2025 年夏季热带中东太平洋和热带北大西洋的海气相互作用较弱。但 2025 年海温的年代际信号相对较强,西太平洋年代际振荡(PDO)和大西洋年代际振荡(AMO)分别处于较强的负位相和正位相,研究表明二者协同容易导致东亚夏季风偏强、中国北方降水偏多(Yang et al., 2017; Sun et al., 2017)。即 2025 年夏季中国北方降水异常偏多是多尺度、多因子协同影响所致。此外,从东亚夏季风环流异常特征、中国夏季降水异常分布、ENSO 演变等对比发现,2025 年与 2012 年、2018 年较为相似。由于篇幅有限,2025 年夏季降水异常的前兆信号和客观预测方法评估将在另文分析。

参考文献

陈丽娟,顾薇,龚振淞,等,2019. 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. 2019. 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,王悦颖,李维京,等,2024. 海温异常对中国汛期降水的影响及预测应用[J]. 应用气象学报,35(2):129-141. Chen L J, Wang

Y Y, Li W J, et al, 2024. Review of the influence and application of SST anomaly to flood season precipitation in China[J]. J Appl Meteor Sci, 35(2):129-141(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).

丁一汇,2013. 中国气候[M]. 北京:科学出版社:576. Ding Y H, 2013. Chinese Climate[M]. Beijing: Science Press: 576 (in Chinese).

顾薇,陈丽娟,2019. 2018 年夏季海洋大气特征及对我国气候的影响[J]. 气象,45(1):126-134. Gu W, Chen L J, 2019. Characteristics of atmospheric and oceanic condition and their influences on summer climate of China in 2018[J]. Meteor Mon, 45(1):126-134(in Chinese).

何金海,吴志伟,江志红,等,2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报,51(23):2803-2809. He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2006. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 51(23): 2803-2809(in Chinese).

黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等,2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学,30(5):730-743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al, 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system[J]. Chin J Atmos Sci, 30(5):730-743(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).

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,王永光,柯宗建,2021. 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, 2021. 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).

施能,朱乾根,吴彬贵,1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常[J]. 大气科学,20(5):575-583. Shi N, Zhu Q G,

- Wu B G, 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years[J]. Chin J Atmos Sci, 20(5): 575-583(in Chinese).
- 吴捷,任宏利,许小峰,等,2018. MJO对我国降水影响的季节调制和动力-统计降尺度预测[J]. 气象, 44(6): 737-751. Wu J, Ren H L, Xu X F, et al, 2018. Seasonal modulation of MJO's impact on precipitation in China and its dynamical-statistical downscaling prediction[J]. Meteor Mon, 44(6): 737-751(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022.“21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 48(5): 571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21 · 7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5): 571-579(in Chinese).
- 章大全,袁媛,韩荣青,2023. 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, 2023. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022[J]. Meteor Mon, 49(1): 110-121(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): 559-569. 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): 559-569(in Chinese).
- 张庆云,宣守丽,孙淑清,2018. 夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号[J]. 大气科学, 42(4): 935-950. Zhang Q Y, Xuan S L, Sun S Q, 2018. Anomalous circulation characteristics of intraseasonal variation of East Asian subtropical westerly jet in summer and precursory signals[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 935-950(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,2022. 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, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1): 107-121(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 Valley in Meiyu periods of 2020? [J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1433-1450(in Chinese).
- 郑志海,王永光,2018. 2017年夏季北半球大气环流特征及对我国天气气候的影响[J]. 气象, 44(1): 199-205. Zheng Z H, Wang Y G, 2018. Northern hemisphere atmospheric circulation characteristics in summer 2017 and its impact on weather and climate in China[J]. Meteor Mon, 44(1): 199-205(in Chinese).
- 支蓉,高辉,孙冷,2024. 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, 2024. Characteristics and possible causes of climate anomalies over China in summer 2023[J]. Meteor Mon, 50(1): 115-125(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 J, Gu W, Li W J, 2019. Why is the East Asian summer monsoon extremely strong in 2018? —Collaborative effects of SST and snow cover anomalies[J]. J Meteor Res, 33(4): 593-608.
- Fang Y H, Chen K Q, Chen H S, et al, 2018. The remote responses of early summer cold vortex precipitation in northeastern China compared with the previous sea surface temperatures[J]. Atmos Res, 214: 399-409.
- He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al, 2007. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chin Sci Bull, 52(5): 671-679.
- Hong C C, Chang T C, Hsu H H, 2014. Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s[J]. J Geophys Res Atmos, 119(7): 3715-3722.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-470.
- Li J P, Zheng F, Sun C, et al, 2019. Pathways of influence of the Northern Hemisphere mid-high latitudes on East Asian climate: a review[J]. Adv Atmos Sci, 36(9): 902-921.
- Lyu Z Z, Gao H, Gao R, et al, 2023. Extreme characteristics and causes of the drought event in the whole Yangtze River Basin in the midsummer of 2022[J]. Adv Clim Change Res, 14(5): 642-650.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al, 2007. Daily high-resolution blended analysis for sea surface temperature[J]. J Climate, 20 (22): 5473-5496.
- Shen H B, Li F, He S P, et al, 2020. Impact of late spring Siberian snow on summer rainfall in South-Central China[J]. Clim Dyn, 54: 3803-3818.
- 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 Clim, 13(9): 1517-1536.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al, 2017. Relationship between the Asian westerly jet stream and summer rainfall over central Asia and North China: roles of the Indian monsoon and the South Asian high[J]. J Clim, 30(2): 537-552.
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al, 2009. On the association between spring Arctic Sea ice concentration and Chinese summer rainfall [J]. Geophys Res Lett, 36(9): L09501.
- Xie S P, Hu K, Hafner J, et al, 2009. Indian Ocean capacitor effect on

- Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J Clim*, 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 Clim*, 30(17):7017-7033.
- Ye T S, Zhi R, Zhao J H, et al, 2014. The two annual northward jumps of the West Pacific subtropical high and their relationship with summer rainfall in eastern China under global warming[J]. *Chin Phys B*, 23(6):069203-1-10.
- Yuan Y, Yang S, 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: focus on ENSO cycles[J]. *J Clim*, 25(21): 7702-7722.
- Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al, 2022. Oceanic drivers and empirical prediction of late summer rainfall variability over Northeast China[J]. *Clim Dyn*, 58(3/4):861-878.
- 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]. *Clim Dyn*, 61(5/6):2581-2598.
- Zhou B T, Xia D D, 2012. Interdecadal change of the connection between winter North Pacific Oscillation and summer precipitation in the Huaihe River Valley[J]. *Sci China; Earth Sci*, 55 (12):2049-2057.
- 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]. *Clim Dyn*, 52:2837-2853.

(本文责编:王婷波)