

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).

2021 年夏季我国气候异常特征及成因分析*

赵俊虎¹ 陈丽娟^{1,2} 章大全¹

1 国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

提 要: 2021 年夏季我国天气气候异常特征突出,极端天气气候事件多,东部主要多雨区在我国北方,降水的季节内变化显著,华南前汛期开始偏晚、江淮流域梅雨和华北雨季开始偏早。东亚大气环流季节内变化对降水异常的空间分布影响较大。6 月,东北冷涡活动频繁,导致东北及邻近区域降水异常偏多,黑龙江、嫩江流域发生严重汛情;东北冷涡的异常活跃可能受到前期北大西洋三极子海温持续正位相的影响。7 月,长江下游至内蒙古东部的经向型多雨带及河南特大暴雨,主要受到台风烟花长时间维持和北上、偏强的大陆高压和偏东偏北的西太平洋副热带高压的综合影响;副热带大气环流表现出对前期 La Niña 事件衰减的滞后响应可能是重要原因。8 月,副热带高压异常偏强、偏南,水汽输送异常辐合区位于我国长江流域,导致持续时间长的“倒黄梅”天气;8 月热带大气低频振荡处于印度洋达 22 d,平均强度偏强,可能是导致副热带大气环流季节内转折的重要原因。

关键词: 气候异常,季节内变化,东北冷涡,河南特大暴雨,台风烟花,“倒黄梅”

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.120201

Characteristics and Causes for the Climate Anomalies over China in Summer 2021

ZHAO Junhu¹ CHEN Lijuan^{1,2} ZHANG Daquan¹

1 Laboratory of Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: The anomaly characteristics of the weather and climate in China were outstanding in the summer of 2021. During this summer, many extreme weather and climate events took place with much more precipitation in North China. The intraseasonal variation of summer climate was significant. The pre-monsoonal rainfall season in South China started later, and the Meiyu in Yangtze-Huaihe River Valley and the North China rainy season started earlier than normal. The spatial distribution of monthly precipitation anomaly and its possible causes varied greatly in the summer of 2021. In June, the Northeast China cold vortex activity was very frequent, bringing more precipitation in North China and Northeast China. Severe floods occurred in Heilongjiang and Nenjiang River basins. The anomalous activity of the Northeast China cold vortex was mainly influenced by the positive phase of the North Atlantic triple from spring to June 2021. In July, the longitudinal rainy belt from the lower reaches of the Yangtze River to the eastern part of Inner

* 国家重点研发计划(2018YFA0606301)、国家自然科学基金项目(42075017、41875093、42175047、41975098)和 2021 年中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z011、CXFZ2021J028)共同资助

2021 年 9 月 29 日收稿; 2021 年 12 月 2 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:陈丽娟,主要从事短期气候预测研究. E-mail: chenlj@cma.gov.cn

Mongolia and the extremely severe rainfall in Henan were mainly affected by the long-term activity of the strong Typhoon In-Fa, the strong continental high and the Western Pacific subtropical high (WPSH). La Niña was an important external forcing factor for the above circulation anomalies. In August, the WPSH was much stronger and more southward. The associated anomalous low-level northwestern Pacific anticyclone resulted in anomalous convergence of moisture flux over the Yangtze River and “reoccurrence of Meiyu” weather. Further analysis indicates that the unusually active Madden-Julian Oscillation (MJO) in August was the critical cause for the significant turning of the tropical and subtropical circulations. MJO located in the Indian Ocean (Phase 2) lasted for 22 days with stronger average intensity, which was rare in history.

Key words: climate anomaly, intraseasonal variation, Northeast China cold vortex, extremely severe torrential rain in Henan Province, Typhoon In-Fa, reoccurrence of Meiyu

引 言

中国地处亚澳季风区,在亚澳季风系统多个成员的共同影响下,气候年际变率较大,汛期气候异常往往会导致严重的旱涝灾害,给我国经济发展、人民生活造成严重损失(张庆云等,2003a;2003b;黄荣辉等,2006;丁一汇,2013),如1998年、1999年、2016年和2020年长江流域的特大洪涝灾害(陶诗言等,1998;李维京,1999;范梅珠和江吉喜,2001;袁媛等,2017;赵俊虎等,2018;2021),2003年和2007年淮河流域的严重洪涝灾害(康志明,2004;王维国等,2008;高辉和王永光,2008),2006年、2009—2010年西南地区发生严重干旱(李永华等,2009;黄荣辉等,2012),等等。在全球变暖的背景下,气候异常和极端天气气候事件发生的可能性增加(IPCC, 2021)。

近几十年来的科学研究和业务实践表明,影响我国夏季气候异常的因子非常复杂,既有太平洋、印度洋、大西洋海温异常和欧亚、青藏高原积雪异常等外强迫因子,还有西太平洋副热带高压(以下简称副高)、台风和欧亚中高纬槽脊分布等大气环流因子。不同年份的主导影响因子也不完全不同,且因子间的影响往往是相互的、非线性的。另外,夏季气候异常是多种时间尺度叠加的结果,既有天气、季节内和季节尺度的影响,还有年际、年代际和气候变化尺度的贡献,给短期气候预测带来了困难和挑战。诊断分析夏季气候异常尤其是降水异常的成因,深入认识旱涝致灾机理,对提高预测水平有重要的作用。为此,国家气候中心近年来加强了当年汛期气候异常成因分析和预测总结(陈丽娟等,2013a;2013b;

2016;2019;孙林海等,2015;封国林等,2015;袁媛等,2017;郑志海和王永光,2018;顾薇和陈丽娟,2019;Chen et al,2019;丁婷和高辉,2020;刘芸芸等,2021)。

2021年夏季,全球高影响天气气候事件频发,北美地区6月下旬到7月上旬出现极端高温热浪天气,7月上中旬德国等地发生严重洪涝灾害。我国的天气气候也出现了明显区域性、阶段性和极端性特征,其中6月黑龙江流域发生严重汛情;7月17—23日,河南发生特大暴雨洪涝灾害;7月25—30日,台风烟花两次在浙江登陆,北上影响华东、华北和东北等地9个省(直辖市),且移动速度慢,为1949年以来在我国陆上滞留时间最长的台风,累计雨量大;8月长江中下游地区出现强降水集中期,形成持续时间较长的“倒黄梅”天气。为进一步探讨2021年我国汛期气候异常的独特性和可能原因,本文首先回顾了2021年汛期气候异常特征,包括降水、洪涝灾害、台风、东部雨季季节进程和气温等,并重点从汛期大尺度环流的季节、季节内尺度演变特征,以及海温等外强迫的可能影响等方面进行成因分析,以期加深对2021年夏季气候异常成因的认识,为今后的汛期气候预测提供更多的参考。

1 资料与方法

本文使用的资料包括:中国气象局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2474个基本、基准气象站、一般气象站1951年1月以来的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 NOAA 提供的全球逐月海温资料(Reynolds et al,2007),水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$;大气环流和海温资料长度均为 1948 年 1 月至 2021 年 8 月。

本文选用的东亚夏季风指数包括:张庆云等(2003a)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;Wang and Fan(1999)利用区域($5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)与区域($22.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)850 hPa 纬向风之差定义的东亚夏季风指数;祝从文等(2000)将东西向海平面气压差与低纬度高、低层纬向风切变相结合定义的东亚夏季风指数。副高各指数采用刘芸芸等(2012)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“气象灾害影响评估系统”和“气候与气候变化监测预测系统”、及国家气象中心的“中长期天气预报”平台。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 1981—2010 年的平均值。在分析海温对夏季环流的可能影响时,使用线性回归的方法,回归时段选取 1981—2020 年。

2 2021 年夏季我国气候异常特征

2.1 降水异常和旱涝灾害

2021 年夏季,全国平均降水量为 334.1 mm,较常年同期(325.2 mm)偏多 2.7%(图 1a)。但旱涝分布有明显的空间差异,主要多雨区在我国北方,我国东部降水异常呈现长江中下游及其以北大部地区偏多、以南偏少的“北涝南旱”型分布(图 1b)。其中内蒙古中东部、东北西部、华北东部、黄淮、江淮、江汉、江南东部、西南地区东北部、新疆西南部等地降水偏多 2 成至 1 倍。2021 年夏季雨型的分布与预测业务上常用的四类雨型明显不同(孙林海等,2005),同时具有北方型、淮河型和长江型这三种雨型特点。

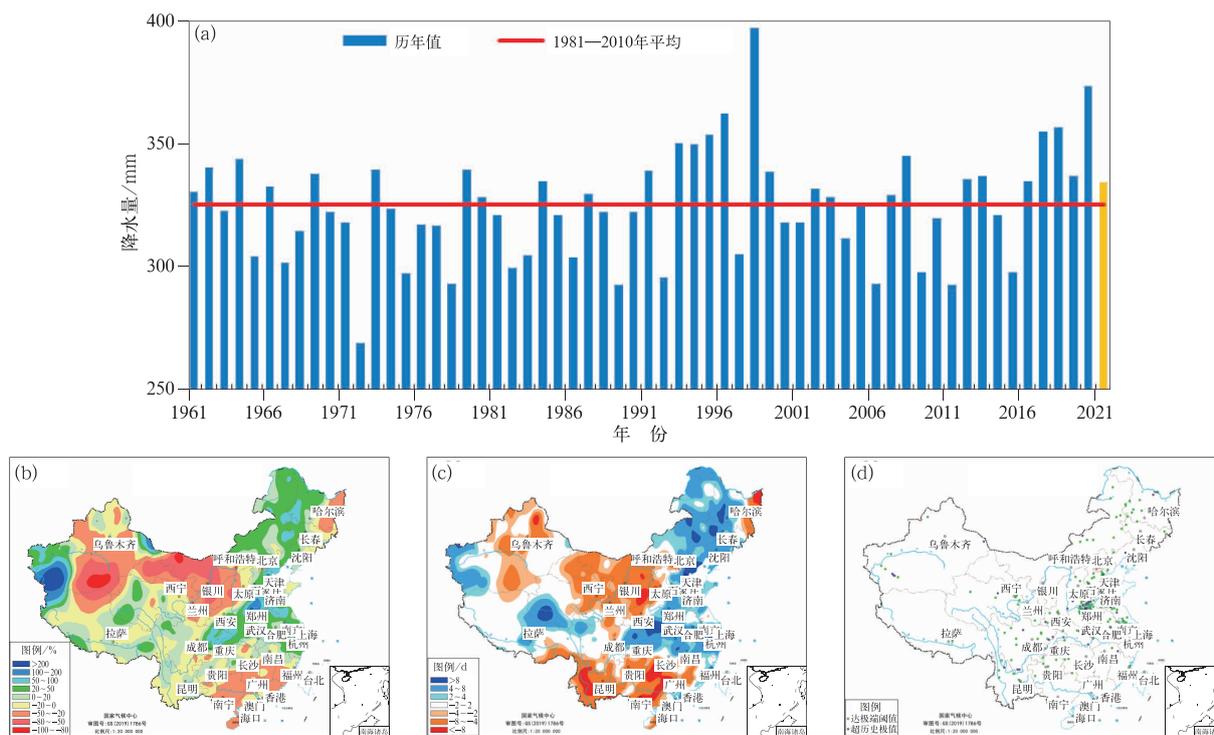


图 1 1961—2021 年夏季(6—8 月)全国平均降水量历年序列(a,黄色柱为 2021 年),2021 年夏季全国降水量距平百分率分布(b),全国降水日数距平(c),全国极端日降水量事件站点分布(d)
Fig. 1 (a) Time series of the summer (June—July—August) precipitation averaged in China during 1961—2021 (yellow bar; 2021); distribution of (b) precipitation anomaly percentage, (c) rain day anomaly and (d) extreme daily precipitation stations in China in summer 2021

就分省而言,河南偏多 62.2%,浙江偏多 45.8%,均为 1961 年以来同期最多;北京偏多 65.2%,为 1961 年以来第三位;天津偏多 56%,为 1961 年以来第六位。宁夏降水偏少 88.9%,1961 年以来同期最少;甘肃、内蒙古西部、陕西中北部、广西和广东降水偏少 3 成左右,气象干旱长时间持续发展。

从夏季降水日数距平(图 1c)来看,长江中下游、黄淮北部、华北东部、东北西部和内蒙古东部等地降水日偏多 4~8 d,部分地区偏多 8 d 以上;西北大部、内蒙古西部、西南南部、江南西南部和华南西部降水日较常年同期偏少 2 d 以上,陕北局部、云南西部、广西东部和北部等地偏少 8 d 以上。

夏季降水极端性显著,全国有 240 个站出现极端日降水量事件,主要分布在西南地区东部、长江中下游、黄淮、华北、内蒙古东部和东北西部地区,其中河南郑州(552.5 mm)、四川渠县(334.0 mm)、江苏泗阳(322.3 mm)、湖北宜城(312.9 mm)等 60 个站突破历史极值(图 1d)。有 332 个国家气象观测站连续降水日数达到极端事件标准,其中四川盐源(41 d)、内蒙古富河(40 d)等 56 个站突破历史极值;有 284 个国家气象观测站连续降水量达到极端事件标准,其中河南郑州(852.0 mm)、福建长乐(558.3 mm)、浙江绍兴(507.4 mm)等 58 个站突破历史极值。尤其是 7 月 17—22 日,河南发生特大暴雨和洪涝灾害。河南中北部局地连续 4 天出现大暴雨,郑州和新乡连续 2 天出现特大暴雨,强降水中心位于郑州、鹤壁、新乡和安阳,最强时段为 19—21 日。河南省中北部大部分地区累计降水量超过 500 mm,其中郑州白寨观测站为 993.1 mm,鹤壁科创中心观测站为 1122.6 mm。河南全省近一半气象观测站点单日降水量超过 100 mm,近 1/6 国家级气象站日降水量突破建站以来历史极值。本次强降水过程呈现出范围广、累计降水量大、持续时间

长、短时降水极强、极端性突出等特点。极端强降水及次生灾害导致郑州等城市发生严重内涝,中小河流出现超警洪水。

夏季降水存在明显的季节内变化特征。2021 年 6 月,我国东部降水总体呈现“北多南少”分布,但多雨区较为分散,主要在内蒙东部、东北大部、华北西部和东部局部、黄淮东部,而黄淮西部、江淮、江汉、江南西部和华南大部等地降水偏少(图 2a)。7 月,东部降水仍呈“北多南少”分布,但多雨带较为连续,内蒙古中东部向南经华北东部至长江中下游降水呈现经向型异常偏多特征,其中内蒙古中东部局部、华北东部、黄淮西部、江淮东部、江南东北部等地偏多 5 成以上,河南北部偏多 2 倍以上,西北地区东部至华北西部、东北东部、江南南部和华南等地偏少 2 成以上(图 2b)。8 月,我国东部降水异常分布发生明显转变,降水偏多区域主要在我国中部地区和东北西部地区,黄淮大部、江汉、江南北部、西南地区东部、东北西部局部、新疆东北部等地降水较常年偏多 5 成以上,西北地区中东部大部、内蒙古中西部、西藏西部、华北西部、华南西部等地降水偏少 2 成以上(图 2c)。可见 7 月的降水异常型基本决定了夏季的降水异常。6 月和 8 月对夏季的降水异常贡献主要是东北西部和长江中下游地区。

2.2 我国东部汛期雨季进程

2021 年,亚洲夏季风爆发时间总体偏晚,其中南海夏季风于 5 月第 6 候爆发,爆发时间较常年(5 月第 5 候)略偏晚。东亚夏季风阶段性偏强。我国东部雨季进程呈现阶段性和转折性变化特征,总体表现出前期偏晚、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。华南前汛期于 4 月 26 日开始,较常年(4 月 6 日)偏晚 20 d,为 1981 年以来第 7 偏晚年;7 月 2 日结束,较常年(7 月 6 日)偏

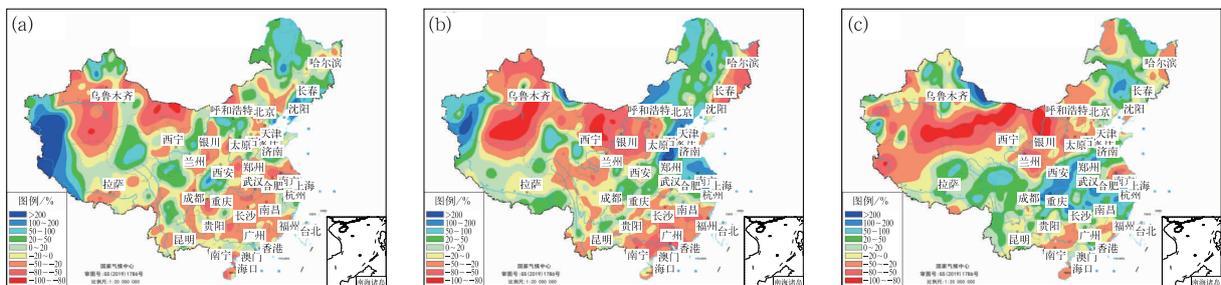


图 2 2021 年 6 月(a),7 月(b)和 8 月(c)全国降水量距平百分率分布

Fig. 2 Distribution of precipitation anomaly percentage in (a) June, (b) July, and (c) August in 2021

表 1 2021 年中国东部雨季进程

Table 1 The process of rainy season in eastern China in 2021

雨季名称	开始时间(气候平均)	结束时间(气候平均)	雨季长度(气候平均)/d	降水量(气候平均)/mm
华南前汛期	4月26日(4月6日)	7月2日(7月6日)	67(91)	494.6(718.2)
江南梅雨	6月9日(6月8日)	7月11日(7月8日)	32(30)	309.1(365.4)
长江中下游梅雨	6月10日(6月14日)	7月11日(7月13日)	31(29)	259.4(281.0)
江淮梅雨	6月13日(6月21日)	7月11日(7月15日)	28(24)	227.3(264.4)
华北雨季	7月12日(7月18日)	9月9日(8月18日)	59(32)	276.4(135.7)

早 4 d; 雨量为 494.6 mm, 较常年偏少 31.1%。江南地区于 6 月 9 日入梅, 较常年偏晚 1 d; 于 7 月 11 日出梅, 较常年偏晚 3 d; 梅雨量为 309.1 mm, 较常年偏少 15.4%。长江中下游地区于 6 月 10 日入梅, 较常年偏早 4 d; 于 7 月 11 日出梅, 较常年偏早 2 d; 梅雨量为 259.4 mm, 较常年偏少 7.7%。江淮地区于 6 月 13 日入梅, 较常年偏早 8 d; 于 7 月 11 日出梅, 较常年偏早 4 d; 梅雨量为 227.3 mm, 较常年偏少 14.0%。华北雨季于 7 月 12 日开始, 较常年偏早 6 d; 于 9 月 9 日结束, 较常年偏晚 22 d, 雨季长达 59 d, 为 1961 年以来第二长(仅次于 1973 年的 60 d)。2021 年华北雨季期间, 平均降水量为 276.4 mm, 较常年偏多 103.7%, 为 1961 年以来第三多。

图 3 为 2021 年汛期(4—8 月)我国东部 110°~120°E 平均降水纬度-时间剖面, 可见华南前汛期降水开始偏晚、强度弱, 主要降水过程在 6 月; 梅雨期降水开始总体偏早, 梅雨期降水前期(6 月 9—26 日)持续性差、有明显的间歇期、强度偏弱, 后期

(6 月 27 日至 7 月 4 日)偏强。北方雨季开始时间偏早、强度明显偏强, 期间发生河南特大暴雨和台风烟花北上带来的强降水过程。8 月中下旬, 长江中下游地区发生持续的“倒黄梅”天气, 强度异常偏强。

伴随着降水异常的季节内变化, 我国西南地区东部、华南地区、西北地区东部等地气象干旱阶段性发展。初夏西南地区东部气象干旱明显, 盛夏西北地区和华南地区的气象干旱最重。而华北、黄淮、江汉等地遭受严重暴雨洪涝灾害。全国呈现旱涝并重的特征。

2.3 台风活动和强台风烟花的影响

2021 年夏季, 西北太平洋及南海共有 9 个编号台风(常年同期为 11.2 个), 有 3 个台风(2106 号台风烟花、2107 号台风查帕卡、2109 号台风卢碧)登陆我国(常年同期为 4.6 个), 均较常年偏少。其中第 6 号台风烟花对我国的影响最大, 造成多地出现极端降水。“烟花”于 7 月 18 日编号, 分别于 7 月 25 日

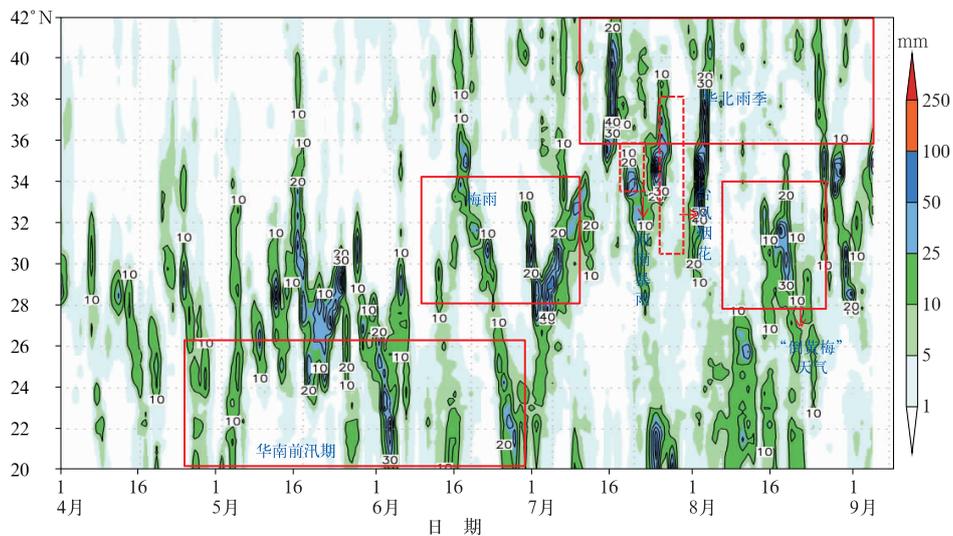


图 3 2021 年 4—8 月我国东部 110°~120°E 平均降水 5 天滑动的纬度-时间剖面
Fig. 3 Time-latitude cross-section of the 5 d running-mean precipitation averaged over 110°–120°E from 1 April to 31 August 2021

和 26 日在浙江舟山和平湖登陆,成为 1949 年以来首个在浙江省内两次登陆的台风,登陆后北上,先后给浙江、上海、江苏、安徽、山东、河南、河北、天津、辽宁等省(直辖市)带来强风雨影响,最后在渤海湾减弱为热带低压,7 月 30 日停编(图 4a)。该台风具有移动速度慢、对我国的影响范围广、时间长(长达 15 d 左右,其中陆上滞留时间为 1949 年以来最长)、累计降水量大的特点。影响期间,江浙沪、黄淮、华北南部等地降水量超过 100 mm,浙江东部、江苏西部和河南等地超过 250 mm(图 4b)。“烟花”未登陆之前,和副高配合形成超强水汽输送通道,对 7 月 17—22 日河南特大暴雨洪涝灾害起到了关键作用,河南大部 and 河北西南部降水量达 100 mm 以上,河南北部部分地区降水量高达 400 mm 以上(图 4c)。25 日登陆之后北上,给华东、黄淮东部、华北东部和东北西部等地带来强降水,大部分地区降水量达 100 mm 以上,浙江东部和江苏南部达 250 mm 以上,浙江余姚累积降水量达 1022 mm,突破历史极值(图 4d)。上述地区较常年同期偏多 5 成以上,浙江北部、江苏南部、河南中部和北部、河北西南部偏多 2 倍以上(图略)。

2.4 气温

2021 年夏季,全国平均气温为 21.7℃(图 5a),较常年同期(20.9℃)偏高 0.8℃,为 1961 年以来第 6 位。除河北东北部和辽宁西部部分地区气温偏低 0.5~1℃外,全国其余大部分地区气温接近常年同

期或偏高,其中黑龙江东部、西藏大部、青海南部、甘肃大部、宁夏大部、云南北部、广西东北部、湖南南部等地偏高 1~2℃(图 5b)。全国平均高温日数有 9.1 d,较常年同期(6.9 d)偏多 2.2 d。黄淮中西部、江南中南部、华南、西北地区东部和西南部等地高温日数偏多 3~5 d,黄淮西部、江南西南部、华南大部偏多达 5~10 d,华南中部和南部及湖南南部、江西南部等地超过 10 d(图 5c)。夏季我国中东部出现 7 次阶段性区域高温天气过程:其中,7 月 3—18 日江南、华南、新疆等地出现持续高温,7 月 20 日至 8 月 9 日,新疆东部持续高温,南方高温区西移至广西、湖南、江西、广东西北部、四川东部及重庆等地。全国共有 303 个国家气象观测站发生极端高温事件,其中有 50 个站日最高气温突破历史极值。

根据上述特征,2021 年夏季天气气候极为异常,尤其是降水的阶段性特征显著且极端性强。6 月,主要多雨区在东北和华北北部地区;7 月,主要多雨带在黄淮、华北大部、内蒙古中东部和东北西部;8 月,主要多雨带在长江流域。孙林海等(2005)、Yang et al(2017)结合业务需求,对中国东部季风区夏季降水进行了客观分型,在空间上能够将逐年的夏季降水异常空间分布分别归为北方型、淮河型、长江型和华南型四类雨型。然而 2021 年夏季北方、淮河和长江中下游降水均显著偏多,是前三种雨型的混合型。夏季环流季节内异常的持续使得降水的极端性很突出:6 月,东北冷涡活跃,造成东北和相邻的俄罗斯等地降水异常偏多,黑龙江、嫩江

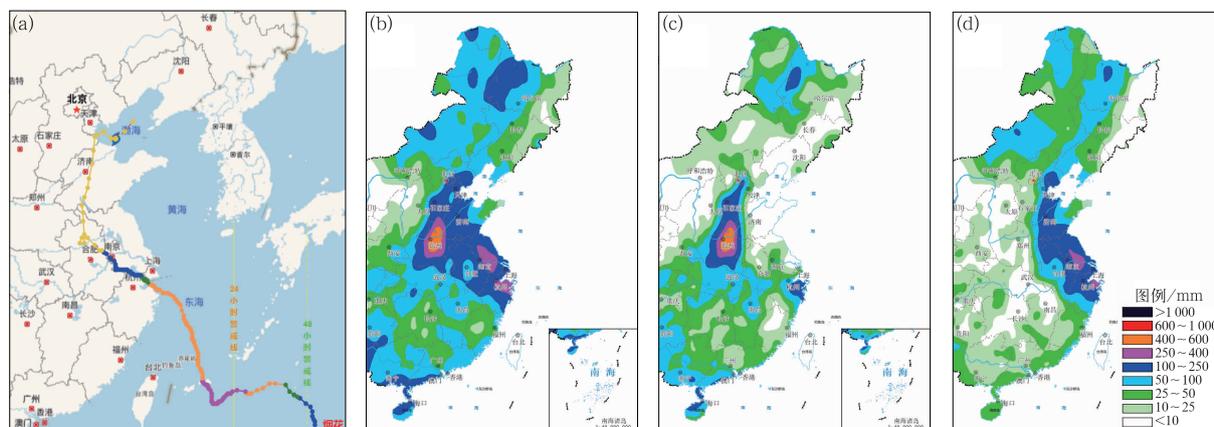


图 4 2021 年台风烟花活动路径和影响期间累计降水量

(a) 路径, (b) 生命期(7 月 18—30 日), (c) 登陆前(18—25 日), (d) 登陆后(25—30 日)

Fig. 4 The track of Typhoon In-Fa and cumulative precipitation in eastern China during different periods in 2021

(a) track, (b) 18 to 30 July, (c) 18 to 25 July, (d) 25 to 30 July

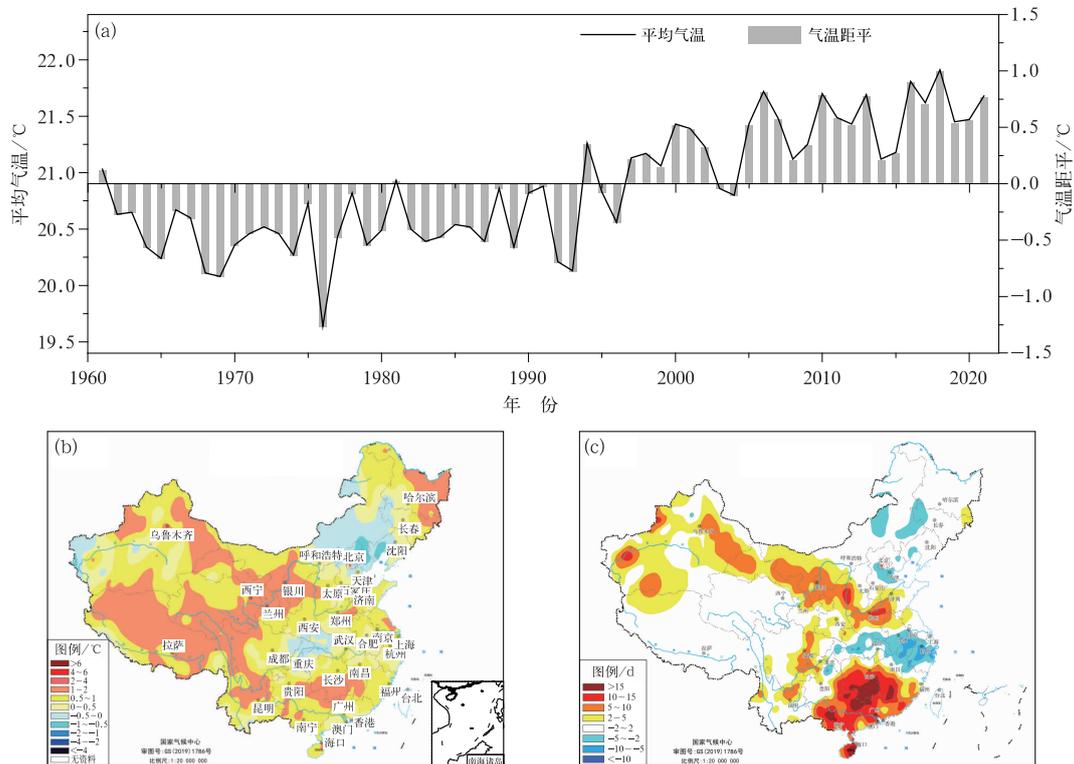


图 5 1961—2021 年夏季全国平均气温及距平历年序列(a),
2021 年夏季气温距平(b)和高温日数距平(c)

Fig. 5 (a) Time series of averaged summer temperature and anomaly in China during 1961–2021,
(b) distribution of temperature anomaly and (c) hot wave day anomaly in summer 2021

出现严重汛情;7月,副高北跳和台风烟花活动造成河南发生特大暴雨洪涝灾害;8月,副高南落,长江中下游地区发生长时间的“倒黄梅”天气。针对2021年夏季降水阶段性和极端性变化特征,下面从大气环流特征和海温的可能影响角度做初步成因分析。

3 夏季降水异常成因分析

2021年夏季,欧亚中高纬度为“两脊一槽”型环流,副高强度异常偏强(1961年以来历史第三,仅次于2010年和2020年)、西伸脊点略偏西(121.9°E ,较常年偏西 6.7°)、脊线略偏南(25.2°N ,较常年同期偏南 0.3°)。850 hPa距平风场显示,西北太平洋 35°N 以南为明显的气旋性距平环流,日本岛及其以东地区为反气旋性距平环流,我国长江流域以北地区为南风距平(图略)。张庆云等(2003a)定义的东亚夏季风指数2021年为0.34,反映了东亚夏季风强度总体偏强。从夏季逐月降水及环流异常变化来

看,6月、7月、8月降水异常与环流系统均呈现显著的差异,因此下面分别针对逐月降水异常特征进行成因分析。

3.1 6月降水异常成因

2021年6月,欧亚中高纬环流呈“两脊两槽”型(图6a),乌拉尔山高压脊和东北亚高压脊明显偏强,巴尔喀什湖至我国东北上空和勘察加半岛以东为低压槽区,东北上空为低压中心之一,冷涡异常活跃。副高较常年明显偏强、略偏西,脊线位置较常年平均偏南 1.7° 。月内副高大部分日数强度明显偏强(图7a),脊线位置却波动较大,上半月偏北,下半月偏南(图7b)。日本以南的西北太平洋对流层低层为异常气旋性环流,日本上空为异常反气旋性环流(图6b),来自西北太平洋北部的东南水汽输送偏强,与东北冷涡配合,造成我国北方地区为水汽通量异常辐合区(图6c),降水偏多(图2a)。从东亚夏季风的监测可见,Wang and Fan(1999)定义的指数显示6月6—13日偏强,月内其他时段强度接近常年

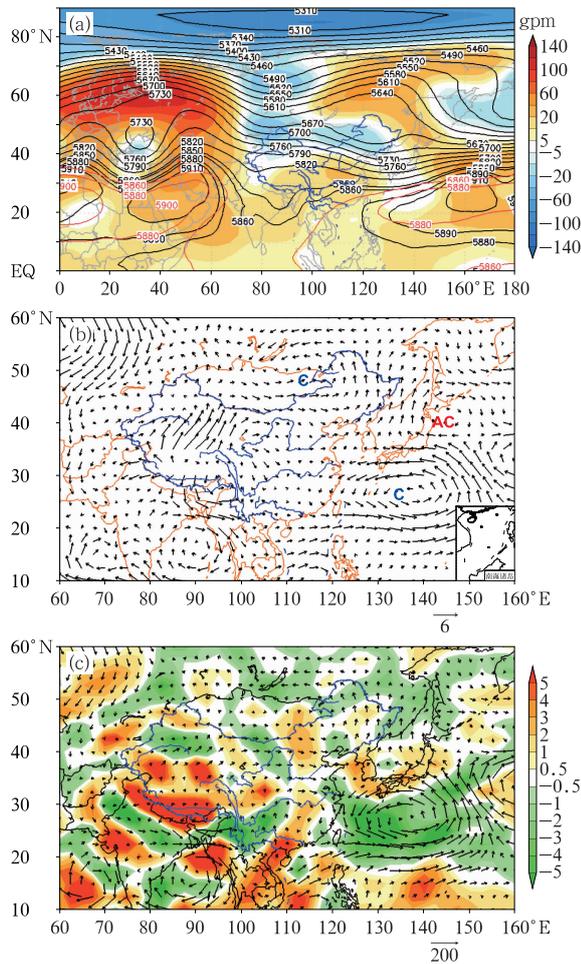


图 6 2021 年 6 月大气环流距平场

(a) 500 hPa 高度场(等值线)和距平场(填色)

(红色等值线表示气候平均 5880 和 5860 gpm),

(b) 850 hPa 风场距平(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, AC 和 C 分别表示

反气旋和气旋), (c) 对流层整层积分水汽通量(矢量,

单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 及水汽通量散度(填色,

单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 距平场

Fig. 6 Atmospheric circulation anomalies in June 2021

(a) 500 hPa geopotential height (contour) and

anomalies (colored) (red contour: the climatological 5880 and 5860 gpm contours),

(b) 850 hPa wind anomalies (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

AC: anticyclonic anomaly, C: cyclonic anomaly),

(c) anomalous moisture flux integrated

from 1000 hPa to 300 hPa (vectors, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

and divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

至略偏弱(图 7c);根据祝从文等(2000)定义的东亚夏季风强度指数,月内总体大于气候值(图 7d)。表明东亚夏季风为偏强的特征。此外,巴尔喀什湖低压槽阶段性偏强,导致新疆西南部和西藏西部发生

极端强降水,降水异常偏多 2 倍以上(图 2a)。

根据国家气候中心对东北冷涡活动的监测,2021 年 5 月和 6 月,东北冷涡活动日数分别为 20 d 和 15 d。东北冷涡活动频繁,一方面导致内蒙古东部、东北大部地区降水异常偏多,黑龙江和嫩江等河流出现洪水和严重汛期;另一方面引导大量冷空气南下,与 5 月偏南的副高配合,导致长江中下游大部分地区降水偏多,与 6 月中下旬偏南的副高配合,造成江南东部降水偏多。众多研究表明,东北冷涡是东亚中高纬地区重要的天气系统,尽管其时间尺度为天气尺度,但是频繁的东北冷涡活动具有显著的“气候效应”,这种“气候效应”不仅会影响东北地区的气候,而且影响梅雨期降水特征(He et al, 2007; Hu et al, 2010; Shen et al, 2011; Zhao et al, 2018)。而东北冷涡活动的异常可能与北大西洋三极子(NAT)位相有密切的联系,研究显示当春季 NAT 处于正位相(北大西洋海温从低纬至高纬呈“— + —”的距平分布)时,通过激发欧亚中高纬度遥相关波列,造成春末夏初(5—6 月)我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; 2020)。2021 年春季 NAT 处于典型的正位相(图 8a),且这种正位相一直维持到 6 月(图 8b)。图 8c 给出了 1981—2021 年 4—6 月平均的 NAT 指数序列,其中 2021 年为 0.81,列 1995 年以来的第 8 位。从 4—6 月平均的 NAT 指数回归的 6 月 500 hPa 高度场可见,欧亚中高纬从北大西洋北部向东至我国东北地区呈现“— + — + —”的遥相关波列,东北地区至日本岛为显著的负高度距平(图 8d),有利于东北冷涡活跃。

3.2 7 月降水异常成因

2021 年 7 月,欧亚环流形势有明显的调整。欧亚中高纬呈“两脊一槽”型,两个高压脊分别位于欧洲和贝加尔湖至鄂霍次克海地区,乌拉尔山北部为低压槽,贝加尔湖至我国北方的大陆高压偏强,中高纬度环流经向度较 6 月减小。副高接近常年略偏强,西伸脊点较常年平均偏东 10.5° ,脊线位置较常年平均偏北 1.2° (图 9a)。副高上半月偏强、脊线接近常年,下半月强度减弱、脊线异常偏北(图 7a 和 7b)。台湾岛以东的对流层低层为异常气旋环流,日本列岛以北为异常反气旋环流(图 9b),该气旋和反气旋中心相比 6 月均西移。东亚夏季风监测表明,7 月下半月夏季风强度异常偏强(图 7c 和 7d)。

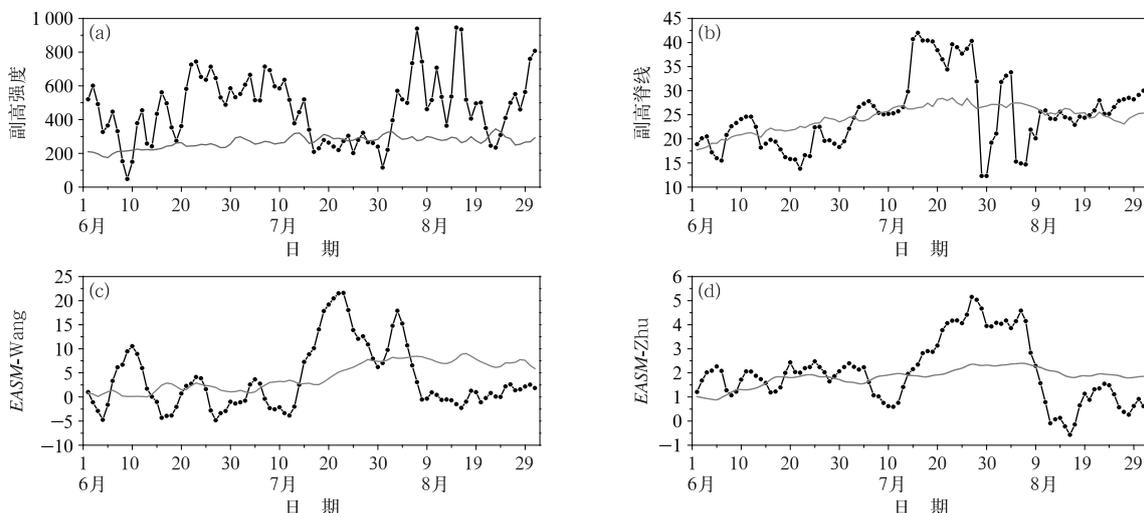


图 7 2021 年夏季关键环流指数的逐日变化
 (a)副高强度指数,(b)副高西段(110°~130°E)脊线指数,(c)Wang and Fan(1999)和
 (d)祝从文等(2000)定义的东亚夏季风强度指数
 (灰线:气候平均,点线:2021 年)

Fig. 7 Daily variation of indexes in summer 2021
 (a) intensity index and (b) ridge line position index of western part of WPSH (110°-130°E), (c, d) the EASM index defined by (c) Wang and Fan (1999) and (d) Zhu et al (2000)
 (grey line: climate average, dotted line: 2021)

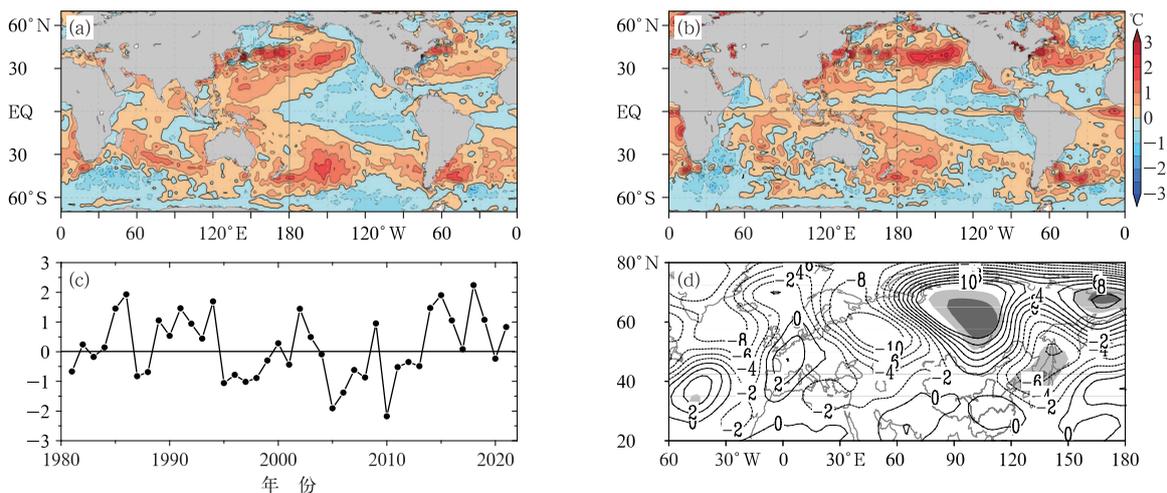


图 8 2021 年(a)春季和(b)6 月海温距平分布,(c)1981—2021 年 4—6 月平均的北大西洋三极子指数,
 (d)1981—2020 年 4—6 月平均的北大西洋三极子指数回归的 6 月 500 hPa 位势高度场(单位: gpm)
 (图 8d 中浅灰和深灰阴影分别表示通过 0.10 和 0.05 显著性水平检验)

Fig. 8 Distribution of sea surface temperature anomalies in (a) spring and (b) June of 2021,
 (c) April—May—June averaged North Atlantic triple (NAT) index during 1981—2021 and (d) regressions of the 500 hPa geopotential height anomalies (unit: gpm) in June against the April—May—June averaged NAT index during 1981—2020
 (Light and dark shadows indicate passing the 0.10 and 0.05 significant level tests in Fig. 8d, respectively)

副高和东亚夏季风月内的变化与台风烟花密切相关,“烟花”于 7 月 18 日编号,30 日停编,生命期长达 13 d,长时间盘踞在西北太平洋副热带地区,导致

副高偏东、偏北,东亚夏季风偏强。同时,“烟花”发挥了巨型“水泵”的作用,将西北太平洋的暖湿水汽源源不断地输送向我国,受偏强的大陆高压、偏东偏

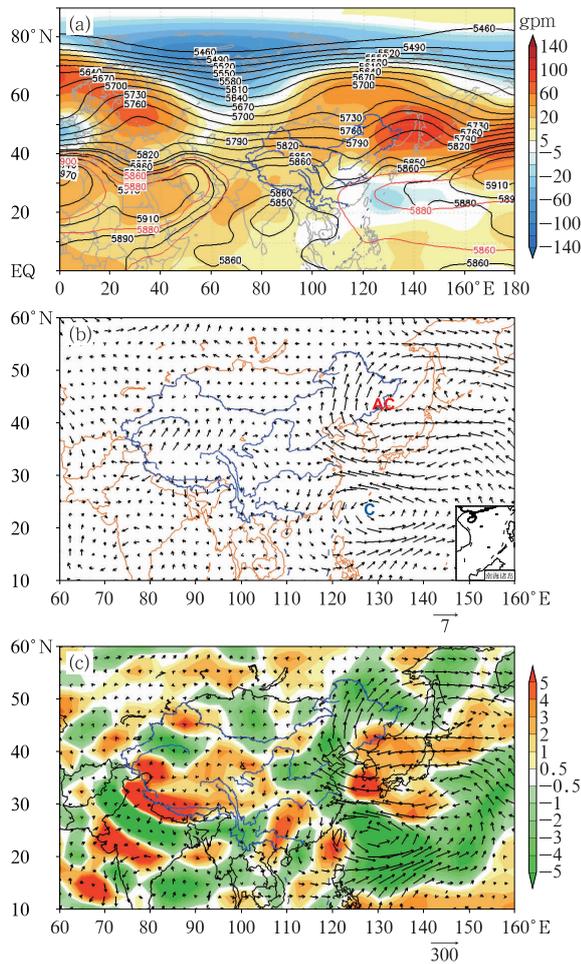


图 9 同图 6, 但为 2021 年 7 月

Fig. 9 Same as Fig. 6, but for July 2021

北的副高及太行山、伏牛山等地形的共同作用,水汽在我国长江以北至内蒙古东部地区辐合(图 9c),导致东北、华北、黄淮等地区降水异常偏多(图 2b)。因此,7 月长江中下游至内蒙古东部的经向型多雨带,主要是台风烟花长时间活动、大陆高压偏强和副高偏东偏北的综合作用造成。

ENSO 作为年际尺度上热带海气系统的最强信号,对东亚夏季风有重要的影响(Wang et al, 2000; 陈丽娟等, 2013b; Li et al, 2019)。2020 年 8 月至 2021 年 3 月,赤道中东太平洋发生了一次中等强度的 La Niña 事件,峰值出现在 2020 年 10 月(Niño3.4 指数为 -1.39°C),事件于 2021 年 4 月结束。2021 年春季赤道中东太平洋海温为大范围的负距平(图 8a),6 月赤道中东太平洋南北两侧海温仍为大范围负距平,但赤道上海温出现了正距平(图 8b),Niño3.4 指数衰减至 -0.11°C (图 10a)。从南方涛动(SOI)

的响应来看,2020 年 7 月至 2021 年 7 月(除了 2021 年 4 月)SOI 持续为正指数,即热带大气对冷水状态表现出持续的响应,尤其是 2020 年秋季和冬季(韩荣青等, 2021)响应最为显著。此外,2021 年 7 月 SOI 指数是 2—7 月的最大值,即春季以来,7 月热带大气对前期 La Niña 事件结束的滞后响应最为强烈(图 10a)。此外,2021 年 7 月的东亚大气环流异常也与 La Niña 的衰减密切相关。图 10b 和 10c 分别给出了 1981—2020 年冬季和春季 Niño3.4 指数回归的 7 月 500 hPa 位势高度距平场。由图可见,从冬季到春季的回归均显示副热带地区的空间型分布与 2021 年 7 月的 500 hPa 高度距平场(图 9a)相似。即 La Niña 衰减年的 7 月,西太平洋副热带地区高度场偏低,西太副高位置明显偏北。

3.3 8 月降水异常成因

2021 年 8 月,欧亚环流形势较 7 月出现显著转折。500 hPa 高度场上,欧亚中高纬位势高度呈“北高南低”异常分布,即北极涛动(AO)为负位相,乌拉尔山和鄂霍次克海上空为强高压脊,我国北方地区上空为负距平,我国华北至东北地区为低压槽,东北冷涡活跃,即西风带环流的经向度明显增大。东亚地区从南至北呈“+ - +”EAP 负位相分布(图 11a)。副高强度异常偏强,为 1961 年以来第 2 位(仅次于 2010 年);副高西伸脊点达 109.1°E ,可西伸至我国江南地区,较常年平均偏西 23.8 个经度,为 1961 年以来第 6 位;脊线位于 28.2°N ,较常年平均偏南 0.6° 。对流层低层,台湾岛以东为异常反气旋性环流(图 11b),副高引导的南海和西北太平洋水汽输送明显偏强,造成我国长江流域为水汽通量异常辐合区(图 11c),导致长江中下游出现持续的“倒黄梅”天气,降水异常偏多(图 2c)。此外,我国内蒙古东部和东北为异常气旋性环流,鄂霍次克海为异常反气旋环流控制,东北为偏南风异常,受东北冷涡和 EAP 负位相的共同影响,内蒙古东部和东北大部降水偏多(图 2c)。

8 月东亚季风环流形势为何发生突然转折? 监测显示,2021 年 8 月,西北太平洋热带气旋不活跃,共有 4 个台风生成,且强度偏弱,其中只有 1 个登陆我国,这是导致华南地区降水异常偏少的主要原因。同时热带低频振荡(MJO)主要在印度洋区域活动

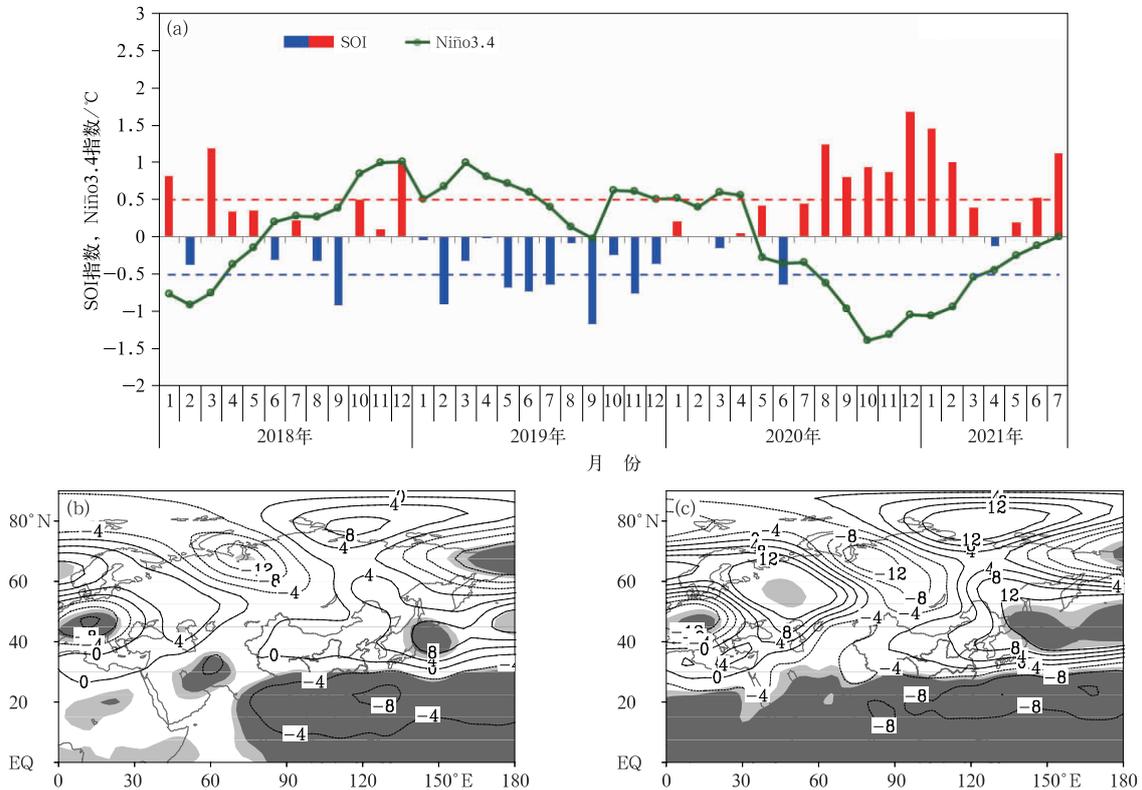


图 10 2018 年 1 月至 2021 年 8 月 Niño3.4 指数和 SOI 指数(a)以及 1981—2020 年冬季(b)和春季(c)Niño3.4 指数(乘以-1)回归的 7 月 500 hPa 位势高度距平场(单位:gpm)

(图 10b 和 10c 中浅灰、深灰阴影分别表示通过 0.10 和 0.05 显著性水平检验)

Fig. 10 (a) Monthly Niño3.4 index and standardized southern oscillation index (SOI) from January 2018 to August 2021, regressions of the 500 hPa geopotential height anomalies (unit: gpm) in July against the (b) winter and (c) spring Niño3.4 index (multiplied by -1.0) during the period of 1981—2020

(Light and dark shadows indicate passing the 0.10 and 0.05 significant level tests, respectively in Figs. 10b and 10c)

(第 2 位相,图 12a),且持续在第 2 位相达 22 d,超过气候平均值(5.7 d)16 d,为 1979 年以来历史第 2 位,仅次于 2008 年(26 d)。2021 年 8 月 MJO 处于第 2 位相的平均强度也较气候平均偏强,为 1979 年以来历史第 7 强(图 12b)。MJO 在印度洋区域(2~3 位相)活跃有利于西太副高的加强西伸(李崇银等,2013)。因此,MJO 活动异常可能是导致西太副高在 8 月异常偏强且台风不活跃的重要原因。

4 结论与讨论

2021 年夏季,我国东部地区降水以北方偏多为主,多雨带呈经向型分布,长江中下游、黄淮、华北和东北大部降水均较常年同期明显偏多。此外,降水表现出了显著的季节内变化特征,华南前汛期开始偏晚、江淮流域梅雨和华北雨季开始偏早。逐月降

水异常成因明显不同,初步结论如下:

(1)6 月,东部降水总体呈现“北多南少”分布,东北和华北北部降水偏多主要受到东北冷涡活动频繁的影响,而东北冷涡的异常活跃可能与春季以来 NAT 维持正位相有关(图 13)。

(2)7 月,东部降水仍呈“北多南少”分布,长江下游至内蒙古东部的经向型多雨带及河南特大暴雨,主要受到台风烟花长时间活动,以及偏强的大陆高压、偏东偏北的副高和异常偏强的东亚夏季风的共同作用,而副热带大气对 La Niña 衰减的滞后响应可能是副高偏东偏北、东亚夏季风异常偏强的原因之一(图 13)。

(3)8 月,我国东部降水异常分布发生明显转变,降水偏多区域主要在长江流域,副高异常偏强、偏南,西北太平洋对流层低层由 6—7 月的气旋性环流反转为异常反气旋性环流,水汽输送异常辐合区

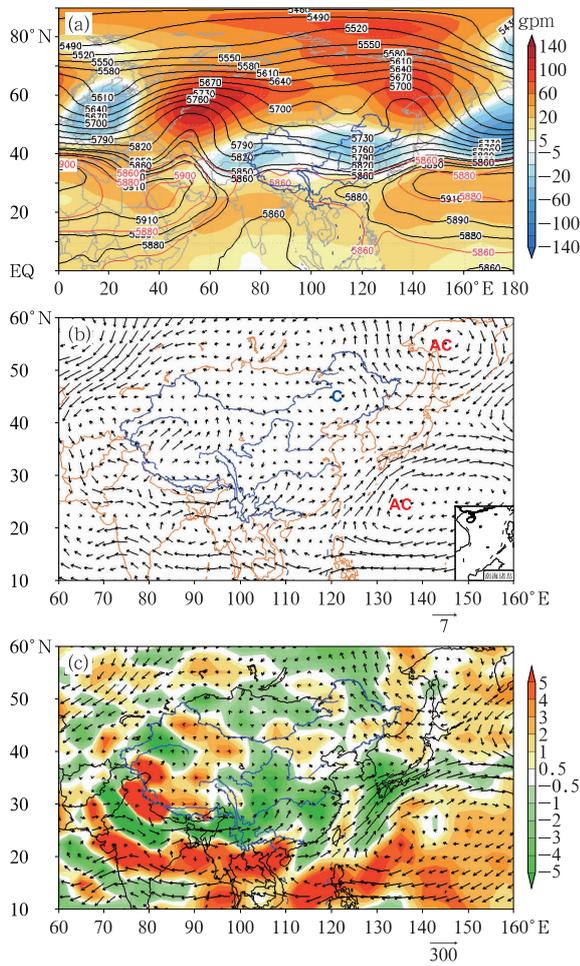


图 11 同图 6, 但为 2021 年 8 月
Fig. 11 Same as Fig. 6, but for August 2021

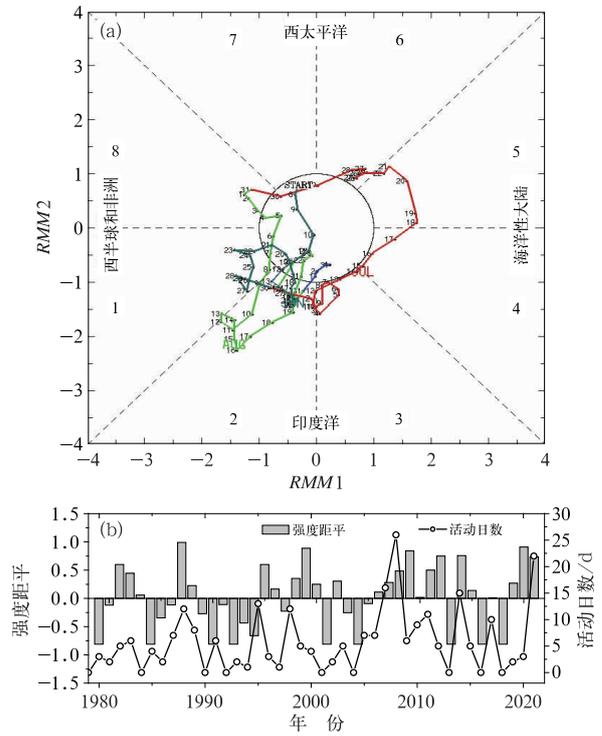


图 12 2021 年 7—9 月 MJO 指数位相图 (a) (引自加拿大气象局 <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>, 绿色为 8 月指数), (b) 1979—2021 年 8 月 MJO 处于第 2 位相的日数和平均强度距平
Fig. 12 (a) Phase diagram of MJO index during July—September 2021 (cited from Bureau of Meteorology, <http://www.bom.gov.au/climate/mjo/>, with green for the August index), and (b) time series of activity days and intensity anomalies of MJO in Phase 2 in August during 1979—2021

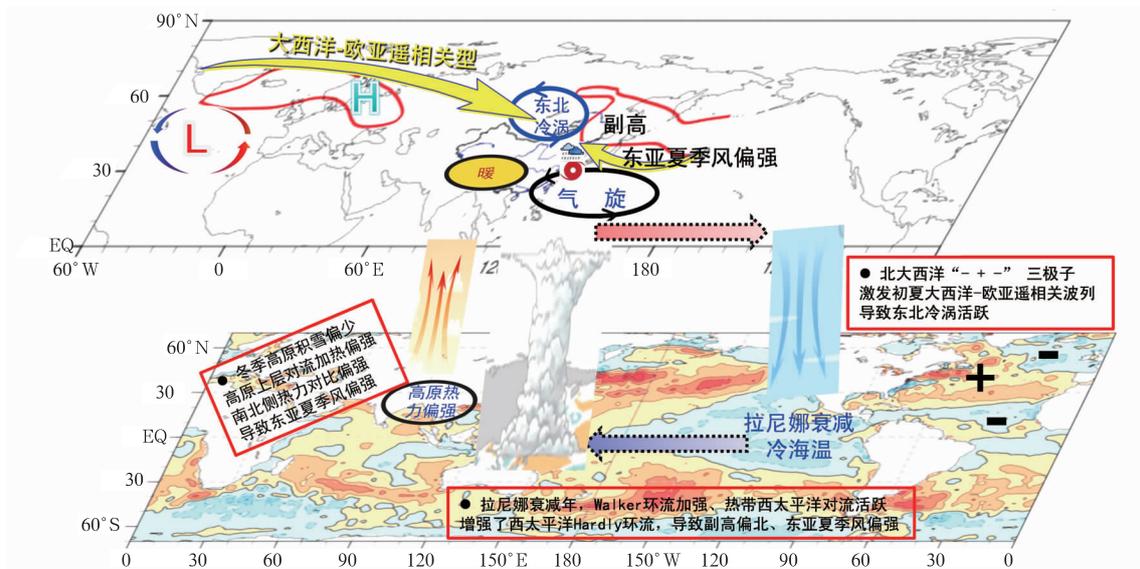


图 13 2021 年 6—7 月中国北方降水偏多形成的驱动因子及物理过程示意图
Fig. 13 Schematic diagram describing what drives the super strong precipitation over the North China in June—July 2021

位于长江流域,形成长时间的“倒黄梅”天气,导致降水异常偏多。8 月 MJO 长时间活跃于印度洋区域,且强度偏强,可能导致副热带大气环流发生转折,副高异常偏强西伸。

2021 年前冬青藏高原积雪异常偏少,有利于高原上层对流加热偏强、高原南北侧热力对比偏强,可能对 7 月东亚夏季风异常偏强有一定贡献(图 13),影响具体途径、时段及程度还需要深入研究。从外强迫来看,2021 年夏季处于 La Niña 事件的衰减年,春季以来印度洋海温偏暖异常不明显,NAT 为典型的正位相,同时冬春季青藏高原积雪异常偏少,这些下垫面特征与 2020 年(刘芸芸等,2021;赵俊虎等,2021)完全相反,但 2021 年夏季长江流域降水也异常偏多。即相反的外强迫背景下出现了长江流域相似的降水偏多特征。2020 年长江流域是 6—7 月的梅雨期降水异常偏强,而 2021 年是 8 月的“倒黄梅”天气导致长江流域夏季降水偏强。由此可见,2020 年和 2021 年导致长江流域降水异常偏多的季节内变化有很大的差异。本文仅从 MJO 的角度分析了 2021 年 8 月副高异常偏强的原因,夏季三大洋海温异常的演变及其对 8 月副高有何影响? 2021 年夏季降水异常呈现显著的极端性特征,不同时间尺度的天气气候异常对极端性降水的贡献如何? 上述问题均需深入研究。

参考文献

陈丽娟,高辉,龚振淞,等,2013a. 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, 2013a. 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,袁媛,杨明珠,等,2013b. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J]. 应用气象学报,24(5):521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al, 2013b. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):521-532(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,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).

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).

范梅珠,江吉喜,2001. 1999、1998 年长江流域暴雨成因对比分析[J]. 气象,27(4):38-41. Fan M Z, Jiang J X, 2001. Study of heavy rainfall causes contrasting 1999 to 1998 summer over Changjiang River Basin[J]. Meteor Mon, 27(4):38-41(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,1-330. 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, 1-330(in Chinese).

高辉,王永光,2008. 2007 年海温和大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象,34(4):107-112. Gao H, Wang Y G, 2008. Sea surface temperature and the general circulation in 2007 and their influences on the climate of China[J]. Meteor Mon, 34(4):107-112(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).

韩荣青,石柳,袁媛,2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气象,47(7):880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y, 2021. Analysis on the causes of cold and warm transition in China during the winter of 2020/2021[J]. Meteor Mon, 47(7):880-892(in Chinese).

黄荣辉,蔡裕硕,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).

黄荣辉,刘永,王林,等,2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学,36(3):443-457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al, 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. Chin J Atmos Sci, 36(3):443-457(in Chinese).

康志明,2004. 2003 年淮河流域持续性大暴雨的水汽输送分析[J]. 气象,30(2):20-24. Kang Z M, 2004. Analysis of moisture transfer associated with sustained heavy rain in 2003 over Jianghuai Valley[J]. Meteor Mon, 30(2):20-24(in Chinese).

李崇银,潘静,宋洁,2013. MJO 研究新进展[J]. 大气科学,37(2):229-252. Li C Y, Pan J, Song J, 2013. Progress on the MJO research in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2):229-252(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).
- 李永华, 徐海明, 刘德, 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J]. 气象学报, 67(1): 122-132. Li Y H, Xu H M, Liu D, 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006[J]. Acta Meteor Sin, 67(1): 122-132 (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, 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).
- 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).
- 孙林海, 赵振国, 许力, 等, 2005. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析[J]. 应用气象学报, 16(S1): 56-62. Sun L H, Zhao Z G, Xu L, et al, 2005. Study of summer rain pattern in monsoon region of East China and its circulation cause[J]. J Appl Meteor Sci, 16(S1): 56-62 (in Chinese).
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利, 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件[J]. 气候与环境研究, 3(4): 290-299. Tao S Y, Zhang Q Y, Zhang S L, 1998. The great floods in the Changjiang River Valley in 1998[J]. Climatic Environ Res, 3(4): 290-299 (in Chinese).
- 王维国, 章建成, 李想, 2008. 2007 年淮河流域大洪水的雨情、水情分析[J]. 气象, 34(7): 68-74. Wang W G, Zhang J C, Li X, 2008. An analysis of precipitation and river flow in Huaihe River Basin during summer of 2007[J]. Meteor Mon, 34(7): 68-74 (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).
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭, 2003a. 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, 2003a. 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).
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利, 2003b. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. 大气科学, 27(6): 1018-1030. Zhang Q Y, Tao S Y, Zhang S L, 2003b. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River Valley and its associations with the circulations over East Asian during summer[J]. Chin J Atmos Sci, 27(6): 1018-1030 (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).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡, 2018. 2016 年我国梅雨异常特征及成因分析[J]. 大气科学, 42(5): 1055-1066. Zhao J H, Chen L J, Wang D Q, 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1055-1066 (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).
- 祝从文, 何金海, 吴国雄, 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系[J]. 气象学报, 58(4): 391-402. Zhu C W, He J H, Wu G X, 2000. East Asian monsoon index and its inter-annual relationship with largescale thermal dynamic circulation[J]. Acta Meteor Sin, 58(4): 391-402 (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 to the precedent sea surface temperatures[J]. Atmos Res, 214: 399-409.
- Fang Y H, Lin Y T, Ren H L, et al, 2020. Possible relationships between the interannual anomalies of the south-north positions of the northeastern China cold vortexes and the sea surface temperatures (SSTs) during the early summer periods[J]. Front Earth Sci, 8: 557014.
- 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.
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H, 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. Meteor Atmos Phys, 106(1-2): 37-48.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers[M]// IPCC. Climate Change

- 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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 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.
- 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.
- Shen B Z, Lin Z D, Lu R Y, et al, 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China[J]. *Sci China Earth Sci*, 54(7): 1095-1104.
- Wang B, Fan Z, 1999. Choice of South Asian summer monsoon indices[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(4): 629-638.
- 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.
- Yang L, Zhao J H, Feng G L, 2017. Classification of typical summer rainfall patterns in the East China monsoon region and their association with the East Asian summer monsoon[J]. *Theor Appl Climatol*, 129(3): 1201-1209.
- Zhao J H, Zhou J, Yang L, et al, 2018. Inter-annual and inter-decadal variability of early- and late-summer precipitation over Northeast China and their background circulation[J]. *Int J Climatol*, 38(6): 2880-2888.

(本文责编:俞卫平)