

赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022. 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, 2022. Overview of climate prediction for the summer 2021 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 48(4):479-493(in Chinese).

2021 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析^{*}

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 年较准确预测了我国汛期(5—9 月)“气候状况总体为一般到偏差,旱涝并重,区域性、阶段性旱涝灾害明显,极端天气气候事件偏多,主要多雨区在我国北方”的总趋势。准确预测了海河流域局部、松花江流域、长江上游和下游可能有较重汛情。对夏季(6—8 月)降水预测不足包括:预测的北方多雨的异常程度与实况存在偏差,即对降水极端性的预测能力有限;预测的西北地区东部和华南东部降水偏多、长江中游偏少与实况相反,对旱情预估不足。6 月发布的盛夏(7—8 月)预测,扩大了北方多雨区范围,预测长江中下游及其以北地区大范围降水偏多,与实况更吻合。在 2021 年 3 月发布汛期预测前,重点考虑了太平洋十年际振荡冷位相、La Niña 事件衰减、冬季青藏高原积雪异常偏少和北大西洋三极子正位相等多个先兆信号对东亚夏季风的综合影响,结合动力模式对夏季东亚大气环流的预测信息,成功预测出东亚夏季风偏强和主要多雨区在我国北方地区。而对东亚夏季风环流季节内变化和区域降水极端性的预测有较大偏差,外强迫信号和国内外主要动力气候模式对此的预测能力均有限。最后,将 2021 年外强迫信号及大气环流与 2020 年做了对比,指出影响汛期降水因素的复杂性,还需深入开展相关研究。

关键词: 气候预测,夏季降水,先兆信号,La Niña 事件

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.110501

Overview of Climate Prediction for the Summer 2021 in China and Its Precursors

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 spatial-temporal characteristics were well predicted for flood season in 2021, including typical features such as “normal to poor climatic conditions nationwide, concurrent drought and flood disasters in different regions and stages, more frequently extreme weather and climate events, main rainfall belt located in northern China”. We further successfully predicted that heavy floods might occur in parts of Haihe River Basin, Songhuajiang River Basin, and the upper and lower reaches of Yangtze River. The issued operational forecasts well captured the main features of summer climate except two shortcomings. Firstly, the intensity of abnormal heavy rainfall in northern China was underestimated, partly due to the predictability limits of extreme events. Secondly, the inconsistency of drought tendency existed between the

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506006)、国家自然科学基金项目(42075017、41975091、41875093、42175047)和 2021 年中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J009、CXFZ2021Z011、CXFZ2021J028)共同资助

2021 年 10 月 8 日收稿; 2022 年 2 月 15 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

forecast and observation over the eastern part of Northwest China, the middle reaches of the Yangtze River and the eastern part of South China. The mid-summer issued forecast in late June predicted there would be heavy precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River and most of northern China, which was more consistent with the observation. The possible impacts of several key predictors on the East Asian summer monsoon (EASM) in 2021 were analyzed comprehensively in March including the cold phase of the Pacific decadal oscillation (PDO), decaying La Niña event, less snow cover over the Tibetan Plateau in pre-winter, and the positive phase of the North Atlantic tripole mode. These predictors and dynamic models all forecasted the EASM in 2021 would be stronger than normal and might lead to more rainfall in northern China in summer. However, both the precursory signals and dynamic models cannot predict the intraseasonal variations of EASM three months in advance. Finally, the external forcing signals and circulation in 2021 are compared with that in 2020. It should be note that the factors affecting precipitation in flood season are complicated and need further studying.

Key words: climate prediction, summer precipitation, precursory signal, La Niña

引 言

在全球气候变暖背景下,灾害性天气气候事件频繁发生,在缺乏有效防灾减灾措施下,气象灾害造成的损失将越来越严重(张庆云等,2008;IPCC, 2021)。2020年10月12日,联合国防灾减灾署(UNDRR)为纪念“国际减灾日”(10月13日),发布了《2000—2019年灾害造成的人类损失》报告,报告指出,全球自然灾害总数在21世纪前20年大幅攀升,特别是气候相关灾害数量出现惊人的增长,1980—1999年,全球与气候相关的灾害有3656起,而2000—2019年增至6681起,极端天气气候事件在21世纪主导着灾害的格局。其中,洪水和风暴仍是最高频发生的灾害事件(UNDRR/CRED, 2020)。

我国是全球天气气候灾害最为频发的国家之一。据统计,每年气候灾害所造成的损失占我国国民生产总值的2.7%左右(黄荣辉等,2006)。2020年长江流域和淮河流域发生严重洪涝,气象灾害造成的农作物受灾面积达1996万 hm^2 ,直接经济损失达3681亿元,其损失较近10年(2010—2019年)平均值偏多(中国气象局,2021)。面对严峻的现实,若能对这些旱涝事件做出较准确的预测,就可以尽早地采取应对措施,减轻旱涝等气候灾害带来的损失。由于夏季是我国多数地区的主要雨季,因此夏季旱涝的预测对我国的防灾减灾具有重要意义。同时如何提高对旱涝灾害机理的认识和预测准确率,也是我国大气科学界永恒的重要研究课题之一(Chou and

Xu, 2001; 丁一汇, 2011)。

我国是全球开展短期气候预测研究和业务工作最早的国家之一。从1954年开始正式发布相关的预测产品,经过几十年的科学研究和业务实践,预测理论和预测方法均有显著的提高:从传统的经验统计分析,到以数值模式为基础的动力学预报(曾庆存等,1990;丁一汇等,2004;吴统文等,2013),到多模式集合预测(Krishnamurti et al, 1999; Wang et al, 2009; 康红文等, 2012; 刘长征等, 2013),以及动力与统计相结合的预测理论和方法(丑纪范, 1986; 黄建平和王绍武, 1991; 李维京和陈丽娟, 1999; 陈丽娟等, 2003; 任宏利和丑纪范, 2005; 王会军等, 2008; 郑志海等, 2009; 顾伟宗等, 2009; 封国林等, 2013; 2015; 李维京等, 2013; 赵俊虎等, 2015)。我国短期气候预测的科技水平、业务能力和现代化程度都有了显著提升,为国家和政府部门的防汛抗旱和防灾减灾提供了科技支撑(李维京, 2012; 宋连春等, 2013; 贾小龙等, 2013)。

受东亚夏季风系统复杂性的影响,我国是短期气候预测难度最大的国家之一。夏季旱涝受到多因子、多时间尺度的复杂影响,每年的预测信号强弱不同造成可预报性有差异,且目前动力气候模式对东亚夏季风和降水的刻画仍不够完善,导致预测技巧稳定性有限。因此,加强气候异常成因机理的研究和预测技术的总结分析,对提高短期气候预测水平,增强我国防灾减灾能力有重要的理论意义和应用价值。近年来,国家气候中心每年都组织汛期预测团队,及时分析汛期气候异常的成因(司东等, 2016; 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,2021b),并加强预测效果评估和预测信号总结(陈丽娟等,2013;2016;2019a;柯宗建等,2014;孙林海等,2015;高辉等,2017;王永光和郑志海,2018;丁婷和高辉,2020;刘芸芸等,2021a)。以期逐步积累认知,提高短期气候预测水平和服务能力。

2021年夏季我国天气气候极为异常,虽然全国平均降水量接近常年同期并略偏多,但旱涝空间分布差异很大,主要多雨区在我国北方,长江中下游及其以北大部分地区降水偏多,雨型分布不是传统认识上的四类雨型(孙林海等,2005)。3月发布夏季预报强调主要多雨区在我国北方,但是未能准确预测长江中游降水偏多。这与当时对异常先兆信号的分析 and 认识有关。6月订正时扩大了北方多雨区范围,预测长江及其以北地区大范围偏多。此外,夏季降水的季节内变率大,极端性降水和高温事件频发,台风强度总体为中等到偏弱(赵俊虎等,2022)。本文首先回顾了对2021年汛期降水、东部雨季进程、热带气旋、气温等主要变量的预测效果,然后总结了发布汛期预测前重点考虑的多时间尺度先兆信号以及这些信号的实际应用情况,最后就季节气候预测的可预报性和今后需要深入研究的问题进行了讨论。

1 资 料

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个基本气象站、基准气象站、一般气象站1951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时间长度均为1948年1月至2021年8月。文中前冬指上一年12月至当年2月,春季为当年3—5月,夏季为当年6—8月。气候常数值为1981—2010年的平均值。

动力气候模式资料包括目前短期气候预测业务

上常用的国内外三个短期气候预测模式:(1)国家气候中心第二代季节预测模式系统BCC-CSM1.1m模式(吴统文等,2013),垂直方向为26层,气候态为1991—2010年;(2)NCEP第二代气候预测系统模式(以下简称CFSv2;Saha et al,2014),模式分辨率为 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$,气候态为1982—2010年;(3)欧洲中期天气预报中心第四代耦合模式(以下简称ECM-WF4;Kim et al,2012),模式分辨率为 $1.5^{\circ}\times 1.5^{\circ}$,气候态为1981—2010年。本文选用张庆云等(2003)定义的东亚夏季风指数,Wang et al(2000)定义的菲律宾反气旋指数。西北太平洋副热带高压(以下简称副高)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”。积雪面积资料源自美国Rutgers大学(<http://climate.rutgers.edu/snowcover/>)。

2 2021年夏季气候预测效果评估

2021年的汛期气候预测比较成功,较准确预测了汛期(5—9月)“我国气候状况总体为一般到偏差,旱涝并重,区域性、阶段性旱涝灾害明显,极端天气气候事件偏多,主要多雨区在我国北方”的总趋势;准确预测了我国东部雨季进程(华南前汛期、梅雨和华北雨季的开始时间及强度)、气温和台风活动的趋势。

2.1 降 水

2021年夏季(6—8月),全国的平均降水量为334.1 mm,较常年同期偏多2.7%。但旱涝分布有明显的空间差异,我国东部降水异常主要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。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;华南大部、江南南部、新疆、西北地区东北部偏少2成以上(图1a)。

对比实况(图1a)与3月底发布的预报(图1b)可见,2021年夏季预报准确预测了“我国北方降水偏多”的特征。内蒙古、东北大部、华北大部、黄淮北部、江南东部、西南西部等地降水偏多,而西北大部、江南西部降水偏少与实况一致;并准确预测了海河

流域局部、松花江流域、长江上游和下游可能有较重汛情。不足之处有两点:一是对北方多雨的异常程度预测与实况偏差较大。预测华北和东北等地降水偏多1~2成,局部地区偏多2~5成;而实况北方降水偏多区域普遍偏多2成至1倍,其中河南北部、新疆西部等地偏多1~2倍,局地偏多2倍以上,即对降水的极端性估计不足。二是对西北地区东部、华南东部、长江中游的预测和实况相反,由于北方雨季的延迟,9月西北地区东部的降水明显增强,因此对汛期整体而言,主要是对华南的干旱估计不足。长江中下游梅雨期降水强度偏弱,8月出现罕见的“倒黄梅”天气,导致长江中下游地区降水异常偏多。在6月底对盛夏(7—8月)的滚动预报中做了及时订正,扩大了北方多雨区范围,预测长江中下游及其以北地区大范围降水偏多,新疆中东部、华南北部至江南南部降水偏少(图2b),与实况较一致(图2a);但是对华南南部的预测仍与实况偏差较大,旱情估计不足。

2.2 我国东部汛期雨季进程

我国东部地区雨带随着东亚夏季风进程自南向北推进,而夏季风进程明显受到热带海洋、陆面积雪等外强迫异常信号的影响(Zhou and Chan, 2007; Liu and Ding, 2008; 陈丽娟等, 2019b; 赵俊虎等, 2018a; 2018b; 2021),同时还受到大气季节内变率(如低频振荡)的作用(陆尔和丁一汇, 1996; Liu et al, 2020; Qiao et al, 2021)。因此,在2021年的汛期预测和服务时,不仅考虑了2020年8月至2021年4月发生的La Niña事件的滞后影响和其他多因子先兆信号的共同作用,而且还在滚动预测中参考热带低频振荡的影响和临近动力气候模式的预测信息,从而准确预测了华南前汛期开始偏晚强度偏弱、梅雨开始偏早强度偏弱、华北雨季开始偏早强度偏强等雨季进程(表1)。

2.3 热带气旋

表2给出了2021年6—8月在西北太平洋和南海地区的热带气旋(台风)各特征量的实况与预测结果。实况显示,2021年夏季西北太平洋编号及登陆我国台风个数(9个,3个)均比常年同期(11.2个,4.6个)偏少。登陆台风路径以西行和北上为主。

生成台风中有3个强度达到台风级别,另外6个为热带风暴,平均强度总体为中等到偏弱。

准确预测了夏季台风强度趋势和盛行路径,尤其是预测“盛夏可能有北上台风明显影响我国”,与实况一致。2021年第6号强台风烟花于7月18日编号,登陆前为河南特大暴雨提供了充足的水汽;分别于7月25日和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,登陆后一路北上,先后给华东、华北和东北西南部带来大风和强降水,最后在渤海湾减弱为热带低压,7月30日停止编号。

2021年台风预测的不足之处是对生成和登陆数量的预测偏多,而实况偏少。预测时重点考虑了La Niña事件衰减年的可能特征,菲律宾附近为气旋性环流,有利于西北太平洋季风槽活跃,生成偏多。实际情况是6—7月菲律宾以东为气旋性距平环流,同期台风活动接近常年;而8月转折为反气旋性距平环流,副高异常偏强西伸,台风不活跃,导致生成和登陆台风总数均较常年偏少。

2.4 气温

2021年夏季,全国平均气温较常年同期偏高0.8℃,为1961年以来第六高。除内蒙古中部局部、华北北部、东北西南部等地气温较常年略偏低外,全国其余大部地区气温接近常年同期或偏高,其中东北东部、西北中东部、西藏大部、西南西部、江南西部等地偏高1~2℃(图3a)。我国中东部出现7次阶段性区域高温天气过程,导致高温区域发生的阶段性变化明显,而季节平均特征不突出。

2021年3月底发布预测指出“夏季全国大部地区气温偏高,黄淮、江淮、江汉、江南大部、新疆北部等地区高温($\geq 35^{\circ}\text{C}$)日数较常年同期偏多,可能出现阶段性高温热浪,东北地区出现持续性低温的可能性较小”,见图3b夏季的气温预测体现出全国气温偏高以及我国南方和新疆高温日数偏多等主要趋势特征,与实况一致。不足之处是对华北北部和川渝局部地区气温预测与实况有偏差。

3 2021年汛期预测先兆信号及应用

2021年发布汛期预测前对气候系统先兆信号

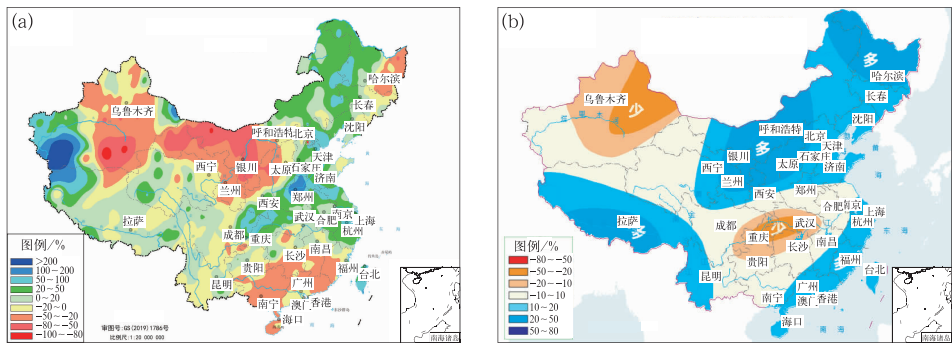


图 1 2021 年汛期(6—8 月)降水距平百分率实况(a)和 3 月底发布的季节预报(b)

Fig. 1 Observed precipitation anomaly percentages in the flood season (June—August) of 2021 (a) and corresponding seasonal predictions issued at the ends of March in 2021 (b)

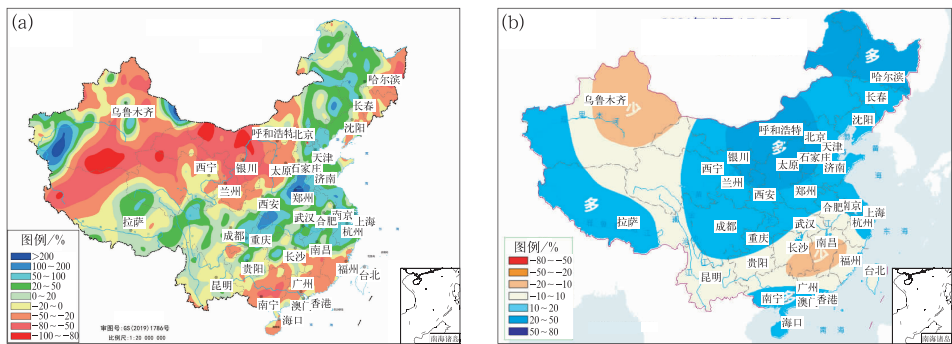


图 2 2021 年盛夏(7—8 月)降水距平百分率实况(a)和 6 月底发布的预报(b)

Fig. 2 Observed precipitation anomaly percentages in the mid-summer (July—August) of 2021 (a) and corresponding seasonal predictions issued at the ends of June in 2021 (b)

表 1 2021 年汛期中国东部雨季进程的预测与实况

Table 1 Prediction and observation of the process of rainy season in eastern China in the flood season of 2021

雨季名称	开始时间	结束时间	雨量	预测时间	预测强度
华南前汛期	4 月 26 日(晚 20 d)	7 月 2 日(早 4 d)	494.6 mm(少 31.1%)	开始偏晚	雨量偏少
江南梅雨	6 月 9 日(晚 1 d)	7 月 11 日(晚 3 d)	309.1 mm(少 15.4%)	开始偏早	雨量偏少
长江中下游梅雨	6 月 10 日(早 4 d)	7 月 11 日(早 2 d)	259.4 mm(少 7.7%)	开始偏早	雨量偏少
江淮梅雨	6 月 13 日(早 8 d)	7 月 11 日(早 4 d)	227.3 mm(少 14.0%)	开始偏早	雨量偏少
华北雨季	7 月 12 日(早 6 d)	9 月 9 日(晚 22 d)	276.4 mm(多 103.7%)	开始偏早	雨量偏多

注:第二至第四列,括号外数据为 2021 年的雨季监测结果,括号内数据为监测实况与气候态(1981—2010 年平均)的差异。
Note: In columns 2—4, the data outside the brackets are the monitoring results of rainy season 2021, and the data inside the brackets are the differences between the monitoring and the climate state (1981—2010 average).

表 2 2021 年汛期热带气旋的预测与实况

Table 2 Prediction and observation of tropical cyclone features over the Western North Pacific and the South China Sea in the flood season of 2021

预测对象	预测	实况	评估
生成	8~12 个	9 个	趋势不一致
登陆	4~5 个	3 个	趋势不一致
路径	西行和西北行,可能有北上台风	西行和北上	趋势一致
影响区域	华东和华南沿海	华南沿海、华东和华北等	趋势一致
强度	中等到偏弱	中等到偏弱	趋势一致

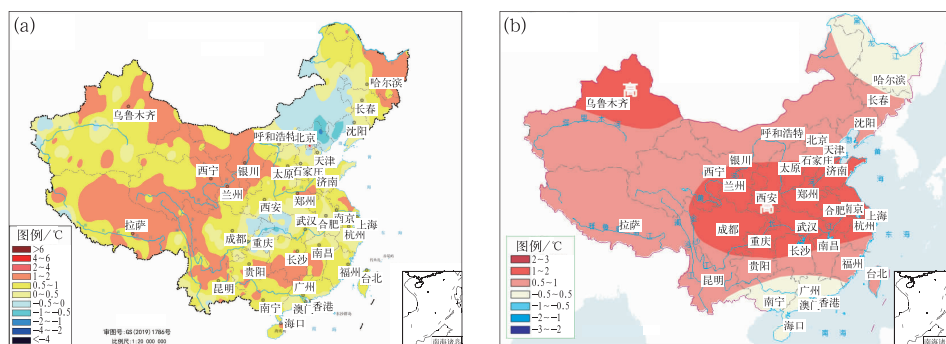


图 3 同图 1, 但为气温距平

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for air temperature anomaly

进行了全面梳理,并对动力气候模式预测技巧进行了评估,提取了部分有效信息。首先分析了预报对象和预报因子的多时间尺度特征及联系,从年代际尺度、年际尺度和次季节尺度等多方面进行诊断,并在不同超前时段提供详略不同的预测信息;2月至3月底给出汛期气候趋势展望;4—6月,根据亚洲夏季风的季节推进特征,对汛期气候趋势进行订正,同时提供雨季进程特征预测。

3.1 年代际尺度先兆信号

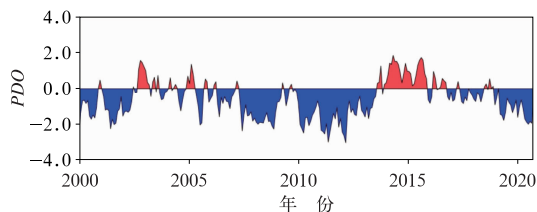
预报对象和预报因子的年代际尺度特征是预报员进行气候预测时首先关注的内容。我国汛期主雨带有明显的年代际变化特征(陈丽娟等,2013),这与北太平洋十年际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)冷暖位相的变化有密切的联系。在 PDO 冷位相期,东亚夏季风偏强,副高偏北,华北地区降水异常偏多(朱益民和杨修群,2003;李刚等,2020)。监测显示 2017 年 7 月, PDO 指数由正转负,至 2021 年 2 月期间,大部分月份为明显的负值(图 4),即 PDO 处于冷位相。2017—2020 年,我国北方有一

条明显的多雨带,与 PDO 的冷位相特征吻合(王永光和郑志海,2018;陈丽娟等,2019a;丁婷等,2020;刘芸芸等,2021b)。2021 年 3 月 PDO 指数为 -1.67,结合动力气候模式对全球海温的预测,预计 2021 年全年 PDO 将维持明显的冷位相,即 PDO 冷位相的影响将持续或加强,可以作为年代际尺度的主导信号,可能对年际变化有明显的调制作用。后期 PDO 指数的监测显示,至 2021 年 8 月, PDO 指数一直维持在 -1.0 以下,证明当初的判断是正确的。而华北大部降水明显偏多,其中可能有年代际尺度信号的贡献。

3.2 年际尺度先兆信号

三大洋海温异常和青藏高原积雪异常是我国夏季气候预测的主要外强迫先兆信号,其中 ENSO 是全球大气环流和气候的异常的最强信号(Wang, 1995; Wu et al, 2003; Li et al, 2019)。El Niño 主要是通过西北太平洋反气旋异常来影响东亚气候(Zhang et al, 1999; Wang and Zhang, 2002)。而 La Niña 对东亚夏季风和我国夏季雨带的影响与 El Niño 大致相反,但没有 El Niño 显著,显示出与 El Niño 影响的不对称性(黄荣辉等, 2003; Karori et al, 2013)。

2020 年 8 月,赤道中东太平洋经历了一次中等强度的 La Niña 事件,峰值出现在 2020 年 10 月, Niño3.4 指数为 -1.39 °C(图 5a)。在 2021 年 3 月,国内外多数动力气候模式预测此次 La Niña 事件将在春季结束,赤道中东太平洋海温在夏季进入中性状态(图 5b)。那么,此次 La Niña 事件能否成为影响我国夏季气候的主导信号呢?为准确把握这次

图 4 2000 年 1 月至 2021 年 8 月
PDO 指数逐月演变Fig. 4 Monthly PDO indices from
January 2000 to August 2021

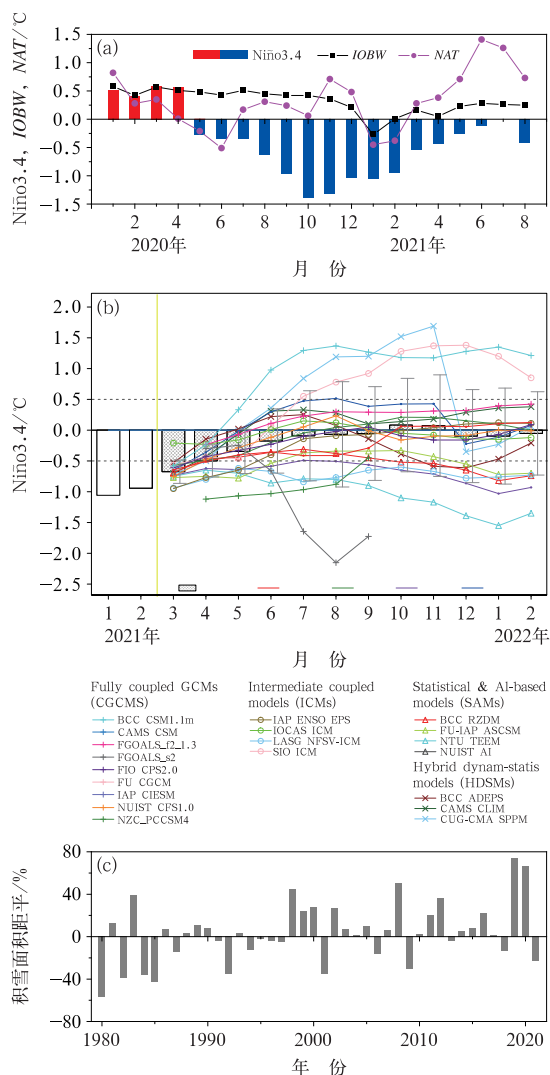


图5 2020年1月至2021年8月逐月海温指数(a), 2021年3月多模式起报的逐月 Niño3.4 指数(b), 1981—2021年前冬青藏高原积雪面积距平百分率(c)

Fig. 5 The monthly variation of SST index from January 2020 to August 2021 (a), multi-model prediction of monthly Niño3.4 indices (b), and percentage of the Tibetan Plateau snow cover area anomaly in pre-winter from 1981 to 2021 (c)

La Niña 事件对我国汛期气候的影响,进一步监测诊断了热带和副热带大气的特征。结果表明,2020年10—11月、2020/2021年冬季和2021年3—4月的热带大气和东亚环流对 La Niña 表现出显著的响应(杨明珠和陈丽娟,2021;韩荣青等,2021;刘芸芸和高辉,2021),对流层低层菲律宾附近为异常气旋式环流,我国南方降水异常偏少。监测实况显示,国

内外动力气候模式成功预测了此次 La Niña 事件于2021年4月结束,春季至夏季维持中性状态(图 5a, 5b)。

而 La Niña 衰减年我国夏季降水异常分布(雨型)存在多种可能性。1981年以来的 La Niña 衰减年,我国夏季降水异常空间分布大体上可以分为以下四种类型:一是北方型,例如1984、1985、2012和2018年,主要多雨区位于黄河流域及其以北地区(图 6a);二是中间型,例如1989、2000和2009年,主要多雨区位于淮河流域(图 6b);三是南方型,例如1999、2001、2006和2017年,主要多雨区位于长江流域以南地区(图 6c);四是全国多雨型,例如1996和2008年,我国大部分地区降水偏多(图 6d)。因此还需要增加其他先兆信号来进一步确定2021年夏季我国降水的可能分布。

印度洋海温异常也是亚印太地区及我国气候异常的重要外强迫因子(Xie et al, 2009; 袁媛等, 2017; 刘芸芸等, 2021a; 赵俊虎等, 2021)。热带印度洋全区一致海温模态(Indian Ocean basin-wide, IOBW)在2014年春季以来至2020年12月总体为较强的正值,即热带印度洋处于年代际偏暖的背景下。进入2021年,IOBW明显减弱,1月为-0.27,2月和3月也相对较弱(图 5a),说明印度洋海温对这次 La Niña 事件表现出一定程度的滞后响应。3月国内外多数动力气候模式预测2021年春、夏季印度洋海温接近常年到略偏暖状态,表明印度洋海温可能对夏季气候的影响“有限”。实况显示,2021年春、夏季热带印度洋处于弱暖状态,明显低于2020年同期(图 5a),动力气候模式的预测是正确的。IOBW为弱暖状态时,则其他因子对东亚气候的影响可能起到更重要的作用。

此外,北大西洋三极子(North Atlantic triple, NAT)也是我国夏季降水预测的重要先兆信号之一(Wu et al, 2009; Hu et al, 2010; Fang et al, 2018)。从NAT的监测和预测看,2021年1—2月NAT处于负位相(图 5a),3月转为正位相,动力气候模式预测2021年春季和夏季NAT仍将维持较强的正位相,监测实况表明动力气候模式的预测是准确的(图 5a)。而NAT春季持续正位相,有利于东亚夏季风偏强(Wu et al, 2009; Zuo et al, 2013; Zhao et al, 2022)。为分析La Niña和NAT对东亚气候

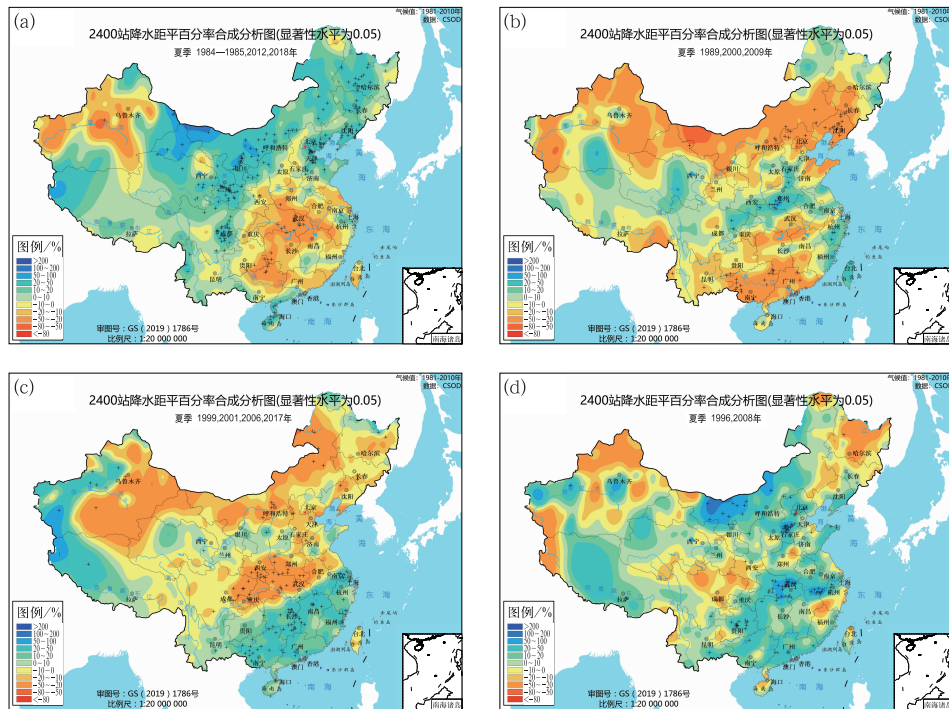


图 6 La Niña 衰减年我国夏季 2400 个站降水距平百分率合成图

(a)北方型,(b)中间型,(c)南方型,(d)全国多雨型

(打十字区域通过了 0.05 显著性水平检验)

Fig. 6 The summer precipitation anomaly percentage compositions of La Niña decaying years

(a) northern China rainfall pattern years, (b) intermediate rainfall pattern years,

(c) southern China rainfall pattern years, (d) wetter rainfall pattern years

(Cross represents those having passed the significance test at 0.05 level)

的共同作用,图 7a 给出了 La Niña 衰减且春季 NAT 正位相年的 850 hPa 风场距平合成图。由图可见,西北太平洋副热带地区为气旋性距平环流,日本岛及其周围为反气旋性距平环流,我国华北和东北地区为西南风异常,即东亚夏季风偏强。

除海温外,青藏高原的动力和热力作用对全球大气环流和气候变化也有明显的影响。而前期高原积雪面积的多少会直接影响夏季高原的热力效应,可以通过改变自身上空大气环流异常进而影响下游的东亚夏季风强弱特征(陈兴芳和宋文玲,2000;朱玉祥和丁一汇,2007;段安民等,2018)。2020/2021 年冬季青藏高原积雪面积较常年偏少—23.1%,位列 1979/1980 年冬季以来第八偏少年(图 5c)。冬季青藏高原积雪偏少,有利于次年东亚夏季风偏强,我国北方多雨(陈兴芳和宋文玲,2000;张顺利和陶诗言,2001)。同样为分析 La Niña 和积雪对东亚气候的共同影响,图 7b 给出了 La Niña 衰减且前冬青藏高原积雪偏少年的 850 hPa 风场距平合成图。结果与图 7a 相似,西北太平洋副热带地区为气旋性距

平环流,日本岛及其周围为反气旋性距平环流,距平中心较图 7a 偏西,我国华北和东北地区为明显的西南风异常,即东亚夏季风偏强,有利于主要多雨区在我国北方。图 7a 和 7b 的合成结果与 2021 年夏季的实况较为一致(图 7c)。

3.3 动力气候模式的预测

汛期预测中除物理诊断外,还重点参考了国内外主流动力气候模式 3 月起报的夏季预测结果。国家气候中心 BCC_CSM1.1m 模式预测 2021 年夏季 500 hPa 东北半球高度场均为正距平分布,北半球极涡较常年同期偏弱,欧亚中纬度高度场为显著的正距平,中心位于乌拉尔山和鄂霍次克海地区,有利于阻塞高压偏强,副热带西北太平洋地区高度场为正值,但是略强于气候态,有利于副高强度略偏强、位置偏北(图 8b)。美国 CFSv2 模式(图 8c)和欧洲 ECMWF5 模式(图 8d)对东北半球环流的预测与国家气候中心类似。与实况(图 8a)对比可见,上述动力模式预测的夏季平均的 500 hPa 高度场距平,除

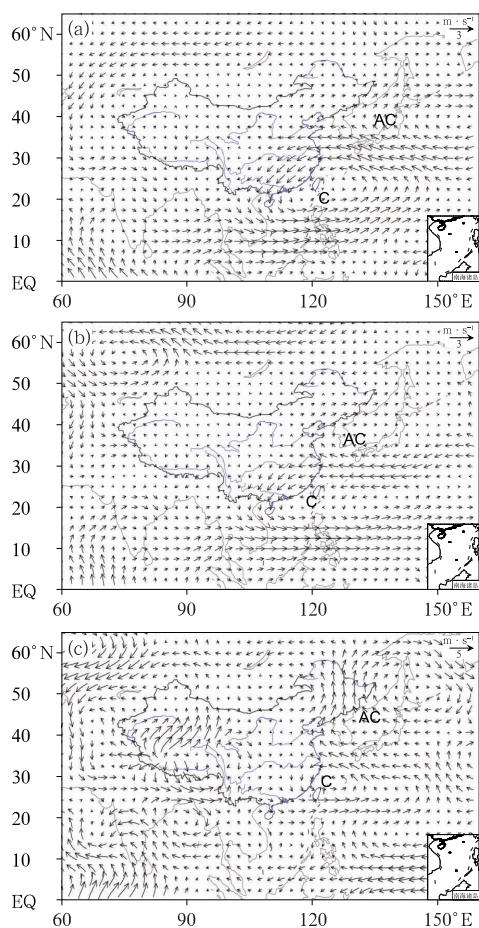


图7 La Niña衰减且春季NAT为正位相年(a)、La Niña衰减且前冬青藏高原积雪偏少年(b)的夏季850 hPa风场距平合成图,以及2021年夏季850 hPa风场距平实况(c)
(C:气旋,AC:反旋)

Fig. 7 Composites of summer 850 hPa wind anomalies in years of La Niña decaying with positive phase of NAT in spring (a) and La Niña decaying with the less snow in pre-winter in Tibetan Plateau (b), observed summer 850 hPa wind anomaly in summer 2021 (c)
(C: cyclone, AC: anticyclone)

了极区趋势与实况相反外,其余大部分地区与实况较为一致。BCC_CSM1.1m模式预测2021年夏季西北太平洋副热带地区为气旋性距平环流,我国长江中下游地区及其以北为东南风距平(图略)。CFSv2模式预测西北太平洋副热带地区为明显的气旋性距平环流,日本岛及其以北为反气旋性距平环流(图略)。ECMWF5模式与CFSv2模式预测结果相似,但西北太平洋副热带地区的气旋性距平环流及以北地区的反气旋性距平环流位置相对偏南,

我国长江中下游地区及其以北为东南风距平(图略),与观测风场最为接近。

通过对PDO、海温和积雪等主要先兆信号的综合分析,并结合国内外主动力气候模式的预测结果,预测2021年东亚夏季风偏强,副高偏北,有利于多雨区位于我国北方地区。这是支持2021年汛期降水趋势预测成功的主要依据。

3.4 夏季降水预测不足的原因分析

基于外强迫先兆信号和动力气候模式在3月起报的夏季环流信息,有利于预测东亚夏季风偏强和我国北方降水偏多的特征。但是预测也有不足之处:首先是今年夏季降水的极端性突出,而在提前2~3个月通过海温、积雪等特征以及动力气候模式很难准确获得极端性信息。如何进一步提取季节尺度中的极端性特征、分析可预报性,并提供相应的预测服务是需要深入研究的内容。其次是对西北地区东部、华南东部、长江中游的预测和实况相反,主要原因是受到夏季风季节内变率的影响。由于北方雨期的延长,西北地区东部的降水在6—8月偏少,但是9—10月明显增强。长江中下游梅雨期降水强度偏弱,但是8月出现罕见的“倒黄梅”天气,导致长江中下游地区降水异常增多,整个夏季的降水异常较气候值偏多。而华南的干旱也是与后汛期降水不足有关,尤其是8月台风不活跃,导致前汛期的干旱持续到后汛期。

动力气候模式对于夏季风季节内变率的预测有一定的技巧,但是在提前2~3个月的预测还是有限。国内外多个模式3月起报的集合预测结果显示:2021年6—8月各月副高强度接近常年(图9a),各月副高脊线均偏北,其中8月偏北近2个纬度(图9b),各月菲律宾反气旋指数均为负值(图9c),各月东亚夏季风均偏强(图9d)。即模式预测季节内环流主要特征没有明显的转折。而实况显示8月副高强度异常偏强偏南、菲律宾反气旋偏强、东亚夏季风偏弱,这是导致长江流域降水异常偏多、华南降水持续偏少的重要原因(赵俊虎等,2022)。与实况相比,动力气候模式在东亚夏季风季节进程上的预测偏差较大,尤其是8月预测与实况完全相反,从而导致根据季节和逐月的环流特征低估了长江中下游地区的降水强度和华南的旱情程度。

此外,动力气候模式直接预测的夏季降水距平百分率(图10)也显示了“长江以北多,东南沿海多”

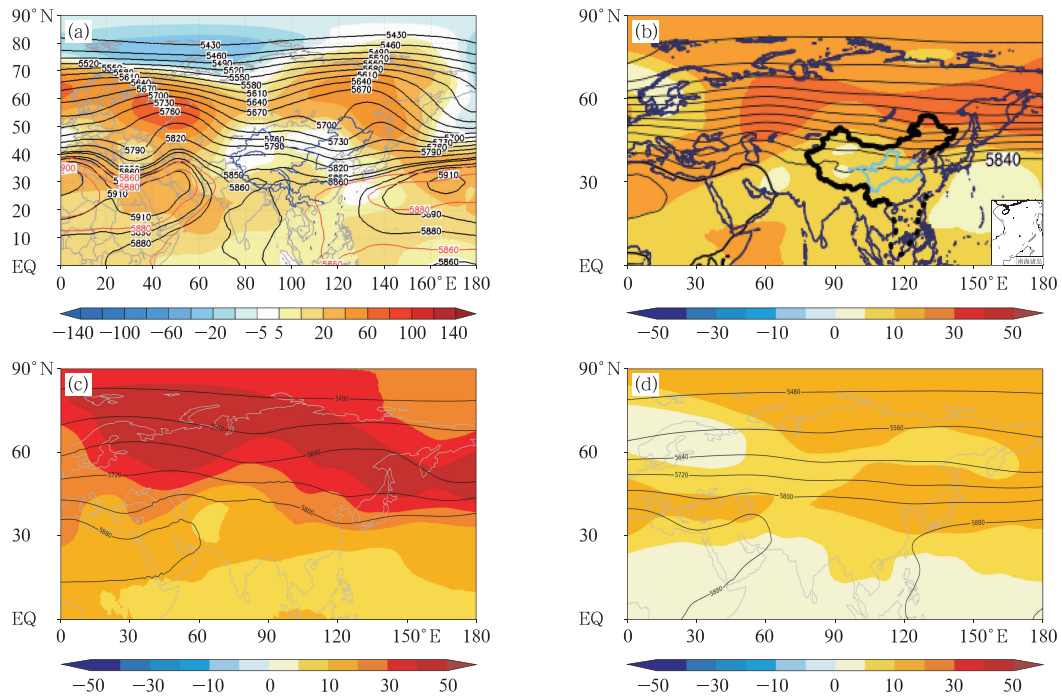


图 8 2021 年夏季 500 hPa 位势高度场和 3 月多模式预测场

(a) 实况, (b) BCC_CSM1.1m 模式, (c) CFSv2 模式, (d) ECMWF5 模式

(等值线: 位势高度, 填色: 位势高度距平, 单位: gpm)

Fig. 8 Observed 500 hPa geopotential height and its anomaly in summer 2021 (a)

and seasonal prediction field initiated from March 2021 by BCC_CSM1.1m (b),

CFSv2 (c) and ECMWF5 (d), respectively

(solid line: geopotential height, colored: anomaly, unit: gpm)

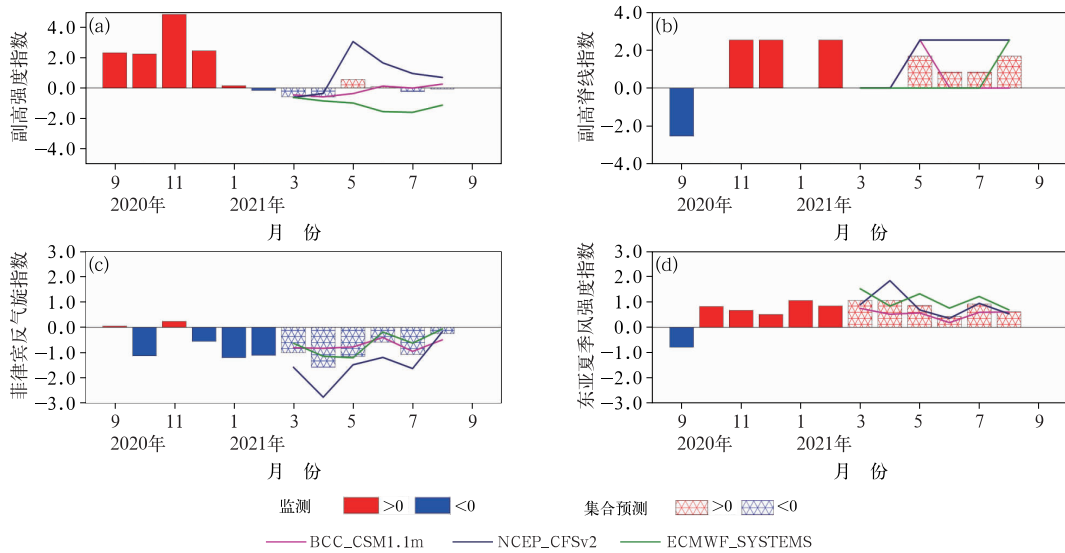


图 9 2021 年 3 月起报的逐月副高强度指数(a)、副高脊线指数(b)、

菲律宾反气旋指数(c)和东亚夏季风强度指数(d; 张庆云等, 2003)

Fig. 9 The multi-model prediction of monthly atmospheric circulation indices initiated

from March 2021, including intensity (a) and ridge line (b) indices of western Pacific

subtropical high, the Philippine Sea anomalous anticyclone index (c)

and the intensity index of East Asian summer monsoon (d; Zhang et al, 2003)

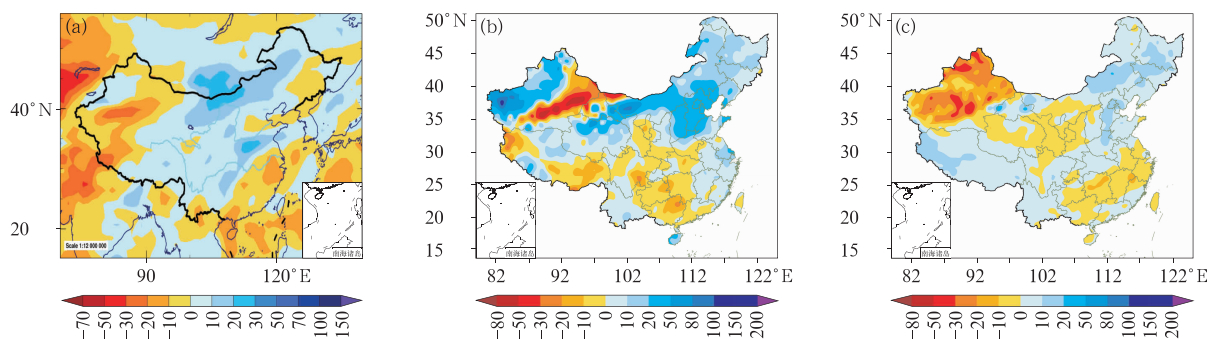


图 10 BCC_CSM1.1m 模式(a),CFSv2 模式(b)和 ECMWF5 模式(c)

于 2021 年 3 月起报的 2021 年夏季降水距平百分率(单位: %)

Fig. 10 Prediction of precipitation anomaly percentage in summer 2021 by BCC_CSM1.1m (a), CFSv2 (b) and ECMWF5 (c) initiated from March 2021(unit: %)

的降水异常特征,BCC_CSM1.1m 模式预测我国西北地区中东部降水偏多、长江下游降水偏少(图 10a),CFSv2 模式预测西北地区中东部降水偏多、长江中游降水偏少(图 10b),ECMWF5 模式预测长江下游降水偏少、华南南部降水偏多(图 10c),上述预测结果与实况均有不一致的地方,显示了动力模式预测的有限性。而在 6 月对盛夏进行滚动预测时,有利于长江流域降水偏多的信号有所显示(图略),因此对季节内变率的预测显示了初值的重要性。

4 结论与讨论

2021 年汛期较准确预测了“我国气候状况总体为一般到偏差,旱涝并重,区域性、阶段性旱涝灾害明显,极端天气气候事件偏多,主要多雨区在我国北方”的总趋势。准确预测了海河流域局部、松花江流域、长江上游和下游可能有较重汛情,及华南前汛期开始时间较常年偏晚、强度弱,梅雨开始偏早、强度弱,华北雨季开始偏早、强度强等季节进程。对全国气温偏高趋势以及高温热浪发生区域、台风强度和路径等主要特征的预测与实况一致。汛期预测的不足之处主要是对北方多雨的异常程度、极端性估计不足;对华南大部的预测和实况相反,旱情估计不足。6 月发布的盛夏预测及时做了订正,扩大了北方多雨区范围,预测长江中下游及其以北地区大范围降水偏多,与实况较一致。

在 2021 年汛期预测中,将诊断分析和国内外动力模式结果相结合。分析先兆信号时,考虑了年代际信号的影响,同时重点考虑了 La Niña 事件衰减、

冬春季青藏高原积雪异常偏少、北大西洋三极子正位相等重要外强迫的综合影响,均有利于东亚夏季风偏强、主雨带偏北。国内外主要动力气候模式对夏季平均的环流预测和我国降水空间分布的特征有一定的技巧,但对东亚夏季风的季节内变化预测与实况偏差较大,尤其是未能准确预测 8 月东亚夏季风偏弱、副高异常偏强偏南、菲律宾反气旋异常偏强、长江流域降水异常偏多这一显著转折特征。

通过对 2021 年汛期预测分析,并结合近几年汛期旱涝异常及预测检验,还有很多亟待解决的科学问题:

(1)需加强对我国汛期降水季节内进程异常的研究。与 2020 年夏季相比,2021 年长江流域降水偏多的外强迫背景、环流系统、季节内变化特征均有本质差别。2020 年夏季是 El Niño 事件次年,青藏高原冬春季积雪异常偏多,副高异常偏强、6—7 月脊线位置总体稳定在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$,东亚夏季风强度也为历史最弱,这样的环流有利于引导水汽持续输送至长江流域,导致长江流域梅雨期降水明显偏多,这与已有研究中夏季风偏弱有利于长江流域偏涝的认识相一致。但 2021 年夏季,是 La Niña 事件次年,青藏高原冬春季积雪异常偏少,副高略偏强,脊线位置在季节内南北摆动幅度较大,夏季风在盛夏期偏强,这种环流形势一般不利于长江流域多雨,这也是 2—5 月预测长江中下游夏季降水总体偏少的主要依据之一。然而,实际结果是 6—7 月的梅雨期降水强度弱,而 8 月出现持续的“倒黄梅”天气,导致长江流域多雨。因此,还需加强汛期降水和传统影响因子不匹配、非对称的机理研究,加强我国汛期季节内进程异常的复杂性研究。

(2)需科学评估全球变暖背景下极端天气气候事件发生的规律及对季节尺度气候异常的可能影响。气候变暖对今年汛期降水异常性的贡献还需要深入研究,但在全球变暖的大背景下,全球极端天气气候事件有增多增强趋势,其影响越来越显著。2021年夏季,全球多次出现极端天气气候事件,北美西部于6月下旬到7月上旬发生了极端高温热浪天气,西欧于7月上中旬发生严重洪涝灾害。我国夏季气候也出现了明显的阶段性、区域性、极端性等特征:6月至7月初,东北冷涡异常活跃,导致内蒙古东部和黑龙江降水异常偏多,黑龙江流域出现严重汛情;7月17—22日,河南发生特大暴雨洪涝灾害;25日强台风烟花在浙江登陆并北上,给我国东部地区带来较大的风雨灾害;而8月长江中下游地区则出现了强度较强、持续时间较长的“倒黄梅”天气。因此,在未来的汛期预测中,需要及时组织开展次季节尺度的灾害性极端天气气候事件预测及可能的影响,科学评估并提供滚动预测,以更好地满足气候预测服务需求。

参考文献

- 陈丽娟,高辉,龚振淞,等,2013. 2012年汛期气候预测的先兆信号和应用[J]. 气象,39(9):1103-1110. Chen L J, Gao H, Gong Z S, et al, 2013. Overview of precursory signals of seasonal climate prediction and its application in summer 2012[J]. Meteor Mon, 39(9):1103-1110(in Chinese).
- 陈丽娟,顾薇,丁婷,等,2016. 2015年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象,42(4):496-506. Chen L J, Gu W, Ding T, et al, 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015[J]. Meteor Mon, 42(4):496-506(in Chinese).
- 陈丽娟,顾薇,龚振淞,等,2019a. 影响2018年汛期气候的先兆信号及预测效果评估[J]. 气象,45(4):553-564. Chen L J, Gu W, Gong Z S, et al, 2019a. Precursory signals of the 2018 summer climate in China and evaluation of real-time prediction[J]. Meteor Mon, 45(4):553-564(in Chinese).
- 陈丽娟,赵俊虎,顾薇,等,2019b. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J]. 应用气象学报,30(4):385-400. Chen L J, Zhao J H, Gu W, et al, 2019b. Advances of research and application on major rainy seasons in China[J]. J Appl Meteor Sci, 30(4):385-400(in Chinese).
- 陈丽娟,李维京,张培群,等,2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用[J]. 应用气象学报,14(6):648-655. Chen L J, Li W J, Zhang P Q, et al, 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 14(6):648-655(in Chinese).
- 陈兴芳,宋文玲,2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用[J]. 高原气象,19(2):214-223. Chen X F, Song W L, 2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction[J]. Plateau Meteor, 19(2):214-223(in Chinese).
- 丑纪范,1986. 为什么要动力-统计相结合?—兼论如何结合[J]. 高原气象,5(4):367-372. Chou J F, 1986. Why to combine dynamical and statistical methods together?—Also discuss how to combine [J]. Plateau Meteor, 5(4):367-372(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).
- 丁一汇,2011. 季节气候预测的进展和前景[J]. 气象科技进展,1(3):14-27. Ding Y H, 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 1(3):14-27(in Chinese).
- 丁一汇,李清泉,李维京,等,2004. 中国业务动力季节预报的进展[J]. 气象学报,62(5):598-612. Ding Y H, Li Q Q, Li W J, et al, 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):598-612(in Chinese).
- 段安民,肖志祥,王子谦,2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展[J]. 大气科学,42(4):755-766. Duan A M, Xiao Z X, Wang Z Q, 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: a review[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4):755-766(in Chinese).
- 封国林,赵俊虎,杨杰,等,2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究[M]. 北京:科学出版社. Feng G L, Zhao J H, Yang J, et al, 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 封国林,赵俊虎,支蓉,等,2013. 动力-统计客观量化汛期降水预测研究新进展[J]. 应用气象学报,24(6):656-665. Feng G L, Zhao J H, Zhi R, et al, 2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method[J]. J Appl Meteor Sci, 24(6):656-665(in Chinese).
- 高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017. 2016年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J]. 气象,43(4):486-494. Gao H, Yuan Y, Hong J L, et al, 2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon, 43(4):486-494(in Chinese).
- 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).
- 顾伟宗,陈丽娟,张培群,等,2009. 基于月动力延伸预报最优信息的中国降水降尺度预测模型[J]. 气象学报, 67(2):280-287. Gu W Z, Chen L J, Zhang P Q, et al, 2009. Downscaling precipitation prediction in China based on optimization information extracted from monthly dynamic extended range forecast[J]. Acta Meteor Sin, 67(2):280-287(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).
- 黄建平,王绍武,1991. 相似-动力模式的季节预报试验[J]. 中国科学B辑, 21(2):216-224. Huang J P, Wang S W, 1991. The experiments of seasonal prediction using the analogy-dynamical model[J]. Sci China Ser B, 21(2):216-224(in Chinese).
- 黄荣辉,陈文,丁一汇,等,2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究[J]. 大气科学, 27(4):484-502. Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al, 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle[J]. Chin J Atmos Sci, 27(4):484-502(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).
- 贾小龙,陈丽娟,高辉,等,2013. 我国短期气候预测技术进展[J]. 应用气象学报, 24(6):641-655. Jia X L, Chen L J, Gao H, et al, 2013. Advances of the short-range climate prediction in China[J]. J Appl Meteor Sci, 24(6):641-655(in Chinese).
- 康红文,祝从文,左志燕,等,2012. 多模式集合预报及其降尺度技术在东亚夏季降水预测中的应用[J]. 气象学报, 70(2):192-201. Kang H W, Zhu C W, Zuo Z Y, et al, 2012. Statistical downscaling of pattern projection using multi-model output variables as predictors[J]. Acta Meteor Sin, 70(2):192-201(in Chinese).
- 柯宗建,王永光,龚振淞,2014. 2013年汛期气候预测的先兆信号及其应用[J]. 气象, 40(4):502-509. Ke Z J, Wang Y G, Gong Z S, 2014. Review of the precursor and its application in summer climate prediction in 2013[J]. Meteor Mon, 40(4):502-509(in Chinese).
- 李刚,李崇银,晏红明,等,2020. 南太平洋和北太平洋年代际振荡与华北盛夏降水的关系及可能物理机制[J]. 地球物理学报, 63(11):3952-3966. Li G, Li C Y, Yan H M, et al, 2020. The relationships of mid-summer rainfall over North China with North Pacific decadal oscillation and South Pacific decadal oscillation and their possible physical mechanisms[J]. Chin J Geophys, 63(11):3952-3966(in Chinese).
- 李维京,2012. 现代气候业务[M]. 北京:气象出版社. Li W J, 2012. Modern Climate Service [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 李维京,陈丽娟,1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究[J]. 气象学报, 57(3):338-345. Li W J, Chen L J, 1999. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products[J]. Acta Meteor Sin, 57(3):338-345(in Chinese).
- 李维京,郑志海,孙丞虎,2013. 近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展[J]. 大气科学, 37(2):341-350. Li W J, Zheng Z H, Sun C H, 2013. Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2):341-350(in Chinese).
- 刘长征,杜良敏,柯宗建,等,2013. 国家气候中心多模式解释应用集成预测[J]. 应用气象学报, 24(6):677-685. Liu C Z, Du L M, Ke Z J, et al, 2013. Multi-model downscaling ensemble prediction in National Climate Center[J]. J Appl Meteor Sci, 24(6):677-685(in Chinese).
- 刘芸芸,高辉,2021. 2021年春季我国气候异常特征及可能成因分析[J]. 气象, 47(10):1320-1332. Liu Y Y, Gao H, 2021. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2021[J]. Meteor Mon, 47(10):1320-1332(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾祝秀,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).
- 陆尔,丁一汇,1996. 1991年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. 气象学报, 54(6):730-736. Lu E, Ding Y H, 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang-Huaihe River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 54(6):730-736(in Chinese).
- 任宏利,丑纪范,2005. 统计-动力相结合的相似误差订正法[J]. 气象学报, 63(6):988-993. Ren H L, Chou J F, 2005. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together[J]. Acta Meteor Sin, 63(6):988-993(in Chinese).
- 任芝花,余予,邹凤玲,等,2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. 应用气象学报, 23(6):739-747. Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al, 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6):739-747(in Chinese).
- 司东,柳艳菊,邵懿,等,2016. 2015年海洋和大气环流异常及对中国

- 气候的影响[J]. 气象, 42(4): 481-488. Si D, Liu Y J, Shao X, et al, 2016. Anomalies of oceanic and atmospheric circulation in 2015 and their impacts on climate in China[J]. Meteor Mon, 42(4): 481-488(in Chinese).
- 宋连春, 肖风劲, 李威, 2013. 我国现代气候业务现状及未来发展趋势[J]. 应用气象学报, 24(5): 513-520. Song L C, Xiao F J, Li W, 2013. The current status and future development of modern climate operation in China[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 513-520(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).
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等, 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果[J]. 大气科学, 32(4): 806-814. Wang H J, Sun J Q, Lang X M, et al, 2008. Some new results in the research of the interannual climate variability and short-term climate prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 806-814(in Chinese).
- 王永光, 郑志海, 2018. 2017 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象, 44(4): 565-571. Wang Y G, Zheng Z H, 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 565-571(in Chinese).
- 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等, 2013. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展[J]. 应用气象学报, 24(5): 533-543. Wu T W, Song L C, Liu X W, et al, 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China National Climate Center[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5): 533-543(in Chinese).
- 杨明珠, 陈丽娟, 2021. 2020 年秋季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 47(4): 499-509. Yang M Z, Chen L J, 2021. Features and possible causes of abnormal climate over China in autumn 2020[J]. Meteor Mon, 47(4): 499-509(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).
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等, 1990. 跨季度气候距平数值预测试验[J]. 大气科学, 14(1): 10-25. Zeng Q C, Yuan C G, Wang W Q, et al, 1990. Experiments in numerical extraseasonal prediction of climate anomalies[J]. Sci Atmos Sin, 14(1): 10-25(in Chinese).
- 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).
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利, 2003. 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, 2003. 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).
- 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, 王东阡, 2018a. 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, 2018a. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1055-1066(in Chinese).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 熊开国, 2018b. 基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析[J]. 气象学报, 76(5): 680-698. Zhao J H, Chen L J, Xiong K G, 2018b. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules[J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 680-698(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 possible causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1): 107-121(in Chinese).
- 赵俊虎, 杨杰, 龚志强, 等, 2015. 2013 年中国夏季降水动力-统计气候预测及检验分析探讨[J]. 气象科技进展, 5(2): 24-28. Zhao J H, Yang J, Gong Z Q, et al, 2015. Analysis of and discussion about dynamic-statistical climate prediction for summer rainfall of 2013 in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(2): 24-28(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, 任宏利, 黄建平, 2009. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验[J]. 物理学报, 58(10): 7359-7367. Zheng Z H, Ren H L, Huang J P, 2009. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments[J]. Acta Phys Sin, 58(10): 7359-7367(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).
- 中国气象局, 2021. 《2020 年中国气候公报》速览[N]. 2021-02-10(003). 中国气象报. China Meteorological Administration, 2021.

- Overview of China Climate Bulletin in 2020[N]. 2021-02-10 (003). China Meteorological News(in Chinese).
- 朱益民,杨修群,2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报,61(6):641-654. Zhu Y M, Yang X Q, 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China[J]. Acta Meteor Sin, 61(6):641-654 (in Chinese).
- 朱玉祥,丁一汇,2007. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题[J]. 气象科技,35(1):1-8. Zhu Y X, Ding Y H, 2007. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: advances and problems[J]. Meteor Sci Technol, 35(1):1-8(in Chinese).
- Chen L 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.
- Chou J F, Xu M, 2001. Advancement and prospect of short-term numerical climate prediction[J]. Chin Sci Bull, 46(18):1497-1502.
- 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.
- 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):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.
- Karori M A, Li J P, Jin F F, 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over Southeast China[J]. J Climate, 26(13):4567-4582.
- 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.
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T E, et al, 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble[J]. Science, 285(5433):1548-1550.
- 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.
- 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 sub-seasonal phase transition of the North Atlantic Oscillation[J]. Geophys Res Lett, 47(22):e2020GL090342.
- Liu Y Y, Ding Y H, 2008. Teleconnection between the Indian summer monsoon onset and the Meiyu over the Yangtze River Valley[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 51(7):1021-1035.
- 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.
- 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.
- UNDRR/CRED, 2020. The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000—2019)[R/OL]. (2021-10-08). <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>.
- Wang B, 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades[J]. J Climate, 8(2):267-285.
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al, 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CliPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980—2004)[J]. Climate Dyn, 33(1):93-117.
- 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.
- Wang B, Zhang Q, 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development[J]. J Climate, 15(22):3252-3265.
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P, 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia[J]. J Climate, 16(22):3742-3758.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al, 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO[J]. J Geophys Res, 114(D18):D18120.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al, 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate, 22(3):730-747.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. Adv Atmos Sci, 16(2):229-241.
- Zhao J H, Zhang H, Zuo J Q, et al, 2022. Oceanic drivers and empirical prediction of interannual rainfall variability in late summer over Northeast China[J]. Climate Dyn, 58:861-878.
- Zhou W, Chan J C L, 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset[J]. Int J Climatol, 27(2):157-167.
- 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.

(本文责编:何晓欢)