

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

## 2022 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析\*

章大全<sup>1,2</sup> 袁媛<sup>1</sup> 韩荣青<sup>1</sup>

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:** 2022 年汛期,国家气候中心准确预测了“全国气候年景总体偏差,区域性、阶段性旱涝灾害明显,降水空间差异显著,主要多雨区在我国北方”的总趋势,较好、较早把握了汛期主雨带位置和全国旱涝分布。对东亚夏季风和雨季季节进程“南海夏季风 5 月第 3 候爆发,长江中下游入梅偏早,梅雨量偏少,以及华北雨季开始偏早,雨量偏多”的预测与实况一致。对夏季台风生成个数较常年偏少,盛夏出现北上台风可能性大的预测与实况基本吻合。准确预测了全国平均气温趋势和高温异常特征。对“夏季我国中东部大部气温偏高,华东、华中、新疆等地高温日数较常年同期偏多,可能出现阶段性高温热浪”的预测与实况一致。主要不足之处是对长江中下游和川渝地区高温干旱的范围和极端程度估计不足。2022 年汛期预测重点考虑连续 La Niña 事件和印度洋偶极子负位相对东亚夏季风环流的影响,夏季西太平洋副热带高压强度偏强,脊线位置偏北,东亚夏季风偏强,初夏东北冷涡活跃,导致汛期主雨带位于东北、华北和西北地区东部等地。

**关键词:** 气候预测,先兆信号,东亚夏季风,雨带,连续 La Niña 事件

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.012901

## Overview of Climate Prediction for the Summer 2022 in China and Its Precursors

ZHANG Daquan<sup>1,2</sup> YUAN Yuan<sup>1</sup> HAN Rongqing<sup>1</sup>

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

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD),  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The main characteristics of climate in summer 2022 were accurately predicted by National Climate Centre (NCC), including “the overall climate condition is unfavorable, with regional and phased floods and droughts, significantly uneven spatial distribution of rainfall, and the main anomalous-rainfall belt located in northern China”. The position of main anomalous-rainfall belt and spatial distribution of floods and droughts in China was well predicted in advance at the end of March 2022. The prediction of seasonal progress of East Asian summer monsoon and rainy season was also consistent with observations. For example, the onset date of South China Sea summer monsoon was in the 3rd pentad of May, earlier and less Meiyu occurred over the middle and lower reaches of the Yangtze River, the rainy season of North China started earlier than the climatology with above-normal precipitation, etc. The predicted less-generated tropical cyclones over western North Pacific and high probability of northward-moving typhoons in the

\* 国家自然科学基金项目(41975091、42175047、41605078、41776039)、国家自然科学基金委员会-云南省人民政府联合基金项目(U1902209)和中国长江三峡集团有限公司项目(0704181)共同资助

2022 年 11 月 28 日收稿; 2023 年 2 月 10 日收修定稿

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

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

summer were basically in line with the observations. The hot summer in 2022 and the spatial pattern of temperature anomalies in China were well captured. The prediction of “the temperature in most part of central and eastern China and Xinjiang is above normal, with more high temperature days and heat waves” was in good agreement with the observations. The main deficiency of the prediction was the underestimation of the spatial coverage and extremity of the record-breaking heat wave and drought in the Middle and lower reaches of the Yangtze River and the Sichuan and Chongqing regions. The prediction of flood season in 2022 was mainly based on the impact of multiyear La Niña event and the tropical Indian Ocean dipole mode on the summer monsoon circulation over East Asia. The intensity of western Pacific subtropical high was abnormally strong with northward displacement of the ridge line. With the intensified East Asian summer monsoon, and active northeast cold vortex in early summer, the above factors synergistically contributed to the formation of main anomalous-rainfall belt in Northeast China, North China, and eastern part of Northwest China.

**Key words:** climate prediction, precursor, East Asian summer monsoon, rain belt, multiyear La Niña

## 引 言

经过六十多年的发展,我国短期气候预测技术已经由经验统计、物理统计发展到动力统计相结合的阶段(贾小龙等,2013)。一方面,中国气象局于2005年启动了多圈层耦合的气候系统模式研究工作(吴统文等,2013),先后建成耦合大气、陆面、海洋、海冰分量的不同版本的气候系统模式,目前已经更新至第三代(Wu et al, 2014; 2019; 2020; 2021)。另一方面,动力数值模式和物理统计预报相结合的思路被广泛应用(顾震潮,1958;丑纪范,1974),发展了一系列独具特色的预测技术和系统(邱崇践和丑纪范,1989;黄建平和王绍武,1991;任宏利和丑纪范,2005;封国林等,2013;李维京等,2013;于海鹏等,2014)。同时,由于目前数值模式对气候系统的模拟和预测还存在较大的不确定性,以海陆下垫面异常影响东亚大气环流和我国气候异常的机理为基础的物理统计预测(朱玉祥等,2016),仍然在我国短期气候预测业务中发挥着重要作用。

我国地处东亚季风区,气候复杂多变,是世界上自然灾害最严重的国家之一。每年汛期旱涝受到多时间尺度多因子的复杂影响,预测难度很大,对其异常机理的认识仍然不够全面深入,业务预测水平和服务需求之间还存在较大差距。以全球变暖为背景,极端天气气候事件有增多增强的趋势。如何在气候趋势预测的基础上,进一步提升极端气候事件的预测技巧,成为提升短期气候预测能力和服务水平的重要挑战。为此,国家气候中心每年及时针对

汛期气候预测进行复盘(王永光和郑志海,2018;陈丽娟等,2019;丁婷等,2020;刘芸芸等,2021;赵俊虎等,2022),分析气候异常的形成机制,总结预测成败,以期加深对汛期气候异常机理的认识,进一步提升预测技巧和服务能力。

2022年夏季,我国气候总体温高雨少,全国平均气温为1961年以来历史同期最高,全国平均降水量为历史同期第二少。降水空间差异明显,主要多雨区在我国北方,辽河和海河流域降水量明显偏多,而太湖和长江流域明显偏少。汛期雨季进程总体较常年偏早。夏季高温极端性显著,366个国家气象站(占全国总站数15.1%)日最高气温持平或突破历史极值。在2022年3月国家气候中心组织的全国汛期会商中,较早较好地把握了汛期主雨带位置和全国旱涝分布,准确预测了全国平均气温趋势和高温异常特征,但对长江中下游和川渝等地高温的极端性及其与干旱的复合影响估计不足。此外,对华南前汛期降水趋势预测与实况存在偏差。因此,本文回顾了2022年汛期降水、气温、热带气旋和夏季风季节进程的预测效果,对汛期预测中重点考虑的不同时间尺度先兆信号和应用效果进行复盘分析,最后对提升汛期预测服务水平及需要进一步研究的若干科学问题进行总结和讨论。

## 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“中国地面气象要素日值数据集(V3.0)”,包括中国2374个基本气象站、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)发布的全球最优插值逐月海温资料(Reynolds et al,2002),水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 。大气环流资料长度为1948年1月至2022年8月,海温资料长度为1981年12月至2022年8月。

本文中西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)各指数采用刘芸芸等(2012)定义的指标。文中部分图形和环流、海温指数由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”生成。本文中冬季指上一年12月至当年2月,春季为3—5月,夏季为6—8月。气候常年值为1991—2020年的平均值。

动力模式资料包括目前业务常用的国内外短期气候预测模式:(1)中国气象局第二代(BCC\_CSM1.1;吴统文等,2013)和第三代气候预测模式(CMA-CPSv3;Wu et al,2021);(2)NCEP第二代气候预测系统模式(CFSv2;Saha et al,2014);(3)欧洲中心天气预报中心第四代耦合模式(ECMWF4;Kim et al,2012);(4)日本气象厅第二代耦合预测系统(MRI-CPS2;Takaya et al,2018);(5)中国科学院大气物理研究所全球海洋-大气-陆面气候系统模式(FGOALS-f2;Zhou et al,2018)。积雪资料下载自美国罗格斯大学(<http://climate.rutgers.edu/snowcover>)。

## 2 2022年夏季气候预测效果评估

2022年汛期较好较早把握了主雨带位置和全国旱涝分布,准确预测全国平均气温趋势和高温异常特征,取得了近些年的较好成绩。准确预测了“我国气候状况总体为一般到偏差,区域性、阶段性的旱涝灾害明显,极端天气气候事件偏多,主要多雨区在我国北方,中东部大部气温偏高”的总体趋势。较为准确预测了我国东部雨季季节进程、气温和台风活动趋势。

### 2.1 降水

2022年夏季全国平均降水量为290.6 mm,较常年同期(331.5 mm)偏少12.3%,为1961年以来同期第二少(仅多于1972年的269.1 mm)。主要

多雨区在我国北方,中东部降水总体呈“南北多、中间少”分布(章大全等,2023)。其中内蒙古东部和南部、东北中部和南部、华北中部、黄淮东部、西北地区东部、华南北部、新疆西部、西藏西部等地偏多2成至1倍;江淮大部、江南大部、江汉大部、西南大部、华南西部、西北地区西部、新疆中东部、西藏中东部偏少2成以上(图1a)。

对比实况(图1a)和3月底发布的预报(图1b),2022年夏季准确预测了“中东部降水整体呈‘南北多、中间少’分布,主要多雨区在我国北方”的特征。内蒙古东部、东北大部、华北大部、黄淮、西北地区东部、华南南部等地降水偏多,而江南南部、华南北部、西南地区东南部和西北西部、新疆等地降水偏少与实况一致。准确预测了黄河流域中下游、海河流域、辽河流域降水较常年同期明显偏多,暴雨过程多,可能有较重汛情。不足之处有两点:一是对长江流域高温干旱的极端程度估计偏弱。预测“贵州东部、湖南中部和南部、广西北部、江西西部、新疆、甘肃西部等地偏少2~5成,上述地区发生区域性干旱的可能性大”,实况为长江流域降水总体偏少2~5成,并且我国中东部地区出现自1961年以来综合强度最强的区域性高温事件。二是对华南和西南南部降水异

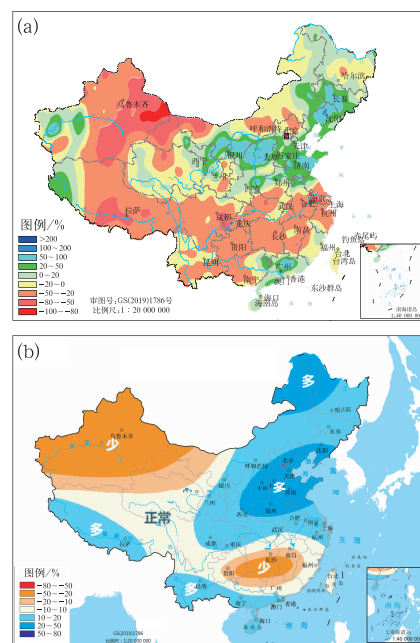


图1 2022年汛期(6—8月)降水量(a)距平百分率实况和(b)3月底发布的季节预测

Fig. 1 (a) Observed precipitation anomaly percentages in the flood season (June to August) of 2022 and (b) corresponding seasonal prediction issued at the end of March of 2022

常程度和范围与实况存在偏差,预测华南南部和西南南部降水偏多 1~2 成。实况西南南部降水偏少,华南地区降水呈“东多西少”分布,其中华南东北部局部降水偏多 5 成至 1 倍。对华南地区降水预测出现偏差的主要原因在于对前汛期趋势预测错误,3 月底预测珠江流域前汛期雨量较常年同期偏少,但实况 5 月至 6 月中旬华南大部出现了破纪录的“龙舟水”。

6 月底对盛夏(7—8 月)的预测意见中维持了中东部南北两条雨带格局,长江中下游和新疆等地降水偏少(图 2b)。实况除华南东南部部分地区外,我国南方大部降水异常偏少(图 2a)。对华南大部和西南南部的预测与实况偏差较大,对旱情估计不足。

## 2.2 我国东部季风和雨季进程

我国东部地区主雨带随夏季风进程自南向北推进。主要雨季的开始、结束时间及强度受 ENSO、大气季节内振荡等不同时间尺度气候因子的影响(Zhou and Chan, 2007; 陈丽娟等, 2019; Liu et al, 2020),因此在汛期预测的不同阶段采取不同的预测技术。每年 3 月汛期会商时较多考虑季节和年际尺

度因子的影响,而在滚动订正预测中则密切关注次季节尺度信号的作用,以及数值模式临近的预测信息。2022 年,对东亚夏季风和中东部主要雨季进程的预测与实况基本一致。南海夏季风于 5 月第 3 候爆发,爆发时间较常年(5 月第 4 候)略偏早,预测 5 月第 3 候爆发,与实况一致。汛期预测准确把握了主要雨季开始较常年提前的总体特征,对梅雨偏弱、华北雨季偏强的趋势预测与实况一致(表 1)。3 月 22—24 日,受高空槽、切变线和冷空气的共同影响,广东出现强降水过程,华南提前入汛。此次降水过程 4 月底结束,华南降水明显偏少,至 5 月和 6 月上旬降水转为异常偏多。雨季的开始往往取决于某一次天气过程,这种情况下气候尺度意义上的预测不确定性较大。

## 2.3 热带气旋

表 2 给出了 2022 年夏季(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,2022 年夏季西北太平洋和南海海域热带气旋编号数和登陆数分别为 9 个和 3 个,均较常年同期(11.1 个和 4.8 个)偏少。编号台风路径以西北行和北上为主,其中 3 个登陆台风登陆点均在广东西南部。生成台风总体强度为中等到偏弱,其中有 4 个达到台风或以上级别,其余 5 个为热带风暴级别。

2022 年 3 月底预测 2022 年夏季西北太平洋和南海热带气旋生成数为 7~10 个,较常年(11.1 个)偏少;登陆我国的热带气旋频数为 4~5 个,接近常年(4.8 个);台风总体强度偏弱,台风活动路径以西北行为主,盛夏发生北上登陆台风的可能性较大。

预测准确把握了夏季台风活动受到抑制,台风生成偏少,总体强度偏弱,有台风北上并影响我国,与实况一致。2022 年第 3 号台风暹芭于 7 月 2 日登陆广东西南部,之后一路北上,至 3 日行至广西北部减弱为热带低压,并以热带低压继续北上,直到 5 日北上至湖南东北部、长江南侧停止编号,在 4—6 日期间,“暹芭”及其外围云系给我国南方和长江以北直至东北地区带来了一条显著的经向条状强降水区。对热带气旋预测的不足之处主要是预测登陆数较实况偏多,与实况有一定偏差。

预测成功的主要依据是较早地准确判断出前冬 La Niña 事件将再次加强并持续通过夏季,由此,根据海温异常外源强迫理论“Matsuno-Gill 效应”

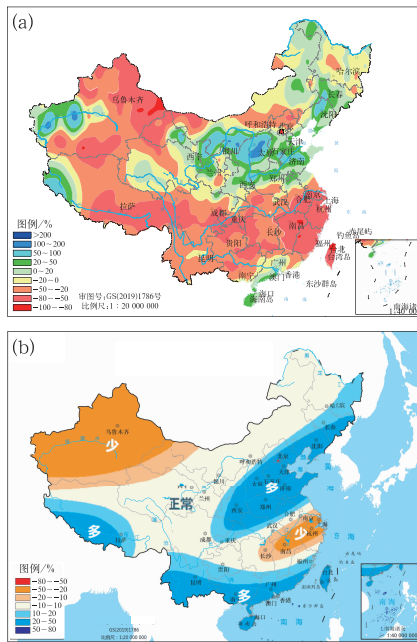


图 2 2022 年盛夏(7—8 月)降水量(a)距平百分率实况和(b)6 月底发布的盛夏预测

Fig. 2 (a) Observed precipitation anomaly percentages in the mid-summer (July to August) of 2022 and (b) corresponding prediction issued at the end of June of 2022

表 1 2022 年汛期主要雨季的预测与实况对比

Table 1 Comparison between predictions and observation in main rainy season of 2022 in eastern China

雨季名称	开始时间	结束时间	雨季长度	降水量	预测时间	预测强度
华南前汛期	3 月 24 日(偏早 16 d)	6 月 22 日(偏早 12 d)	90 d(偏长 4 d)	856.0 mm(偏多 19.1%)	开始偏晚	雨量偏少
江南梅雨	5 月 29 日(偏早 11 d)	7 月 8 日(偏早 2 d)	40 d(偏长 9 d)	426.1 mm(偏多 7.9%)	开始偏早	雨量偏少
长江中下游梅雨	5 月 29 日(偏早 16 d)	7 月 8 日(偏早 8 d)	40 d(偏长 8 d)	258.3 mm(偏少 18.8%)	开始偏早	雨量偏少
江淮梅雨	7 月 4 日(偏晚 11 d)	7 月 31 日(偏晚 17 d)	27 d(偏长 6 d)	179.6 mm(偏少 30.2%)	开始偏早	雨量偏少
华北雨季	7 月 13 日(偏早 5 d)	9 月 4 日(偏晚 18 d)	53 d(偏长 23 d)	214.7 mm(偏多 57.2%)	开始偏早	雨量偏多

注:第二至第五列括号外数据为 2022 年雨季监测结果,括号内数据为监测实况与气候态(1991—2020 年平均)的差异。

表 2 2022 年夏季西北太平洋热带气旋活动预测评估

Table 2 Evaluation of the forecast for the tropical cyclone activities over the western North Pacific during the summer of 2022

预测对象	预测	实况	评估
生成数	7~10 个	9 个	趋势一致
登陆数	4~5 个	3 个	趋势不一致
路径	西北行为主,可能有北上台风	西北行和北上为主	趋势一致
影响区域	华南东部和华东沿海地区	华南沿海、华东和华北等地	趋势一致
强度	偏弱	中等到偏弱	趋势一致

(Matsuno, 1966; Gill, 1980), 正确判断出春夏季台风主要生成源地(菲律宾海盆)将长期维持反气旋式环流异常,表现出对持续 La Niña 事件的响应,这不利于台风生成。进一步,根据 La Niña 事件在发展年台风北上登陆概率较大,因此正确预测了夏季台风以西北路径为主,台风盛行季节有北上登陆台风影响我国。预测登陆台风数接近常年,而实况偏少,预测失误的原因是没有充分考虑在 La Niña 事件持续发展的背景下,同时在热带东印度洋至西太平洋海温偏暖的配合影响下,西太副高异常西伸且强度偏强,长期占据大陆,不利于热带气旋登陆。

### 2.4 气温

2022 年夏季,全国平均气温为 22.3℃,较常年同期偏高 1.1℃,为 1961 年有完整气象观测记录以来历史同期最高。除内蒙古东部、东北东部和南部、华北北部局部等地气温较常年偏低外,全国其余大部地区气温接近常年同期到偏高,其中华东中部、华中中部、西南地区东北部、西北地区中部等地偏高 2~4℃(图 3a)。6 月 13 日至 8 月 30 日,我国中东部地区出现了大范围持续高温天气过程。此次高温事件持续时间长、覆盖范围广、极端性强。评估结果显示,此次高温事件综合强度为 1961 年有完整气象观测记录以来最强。

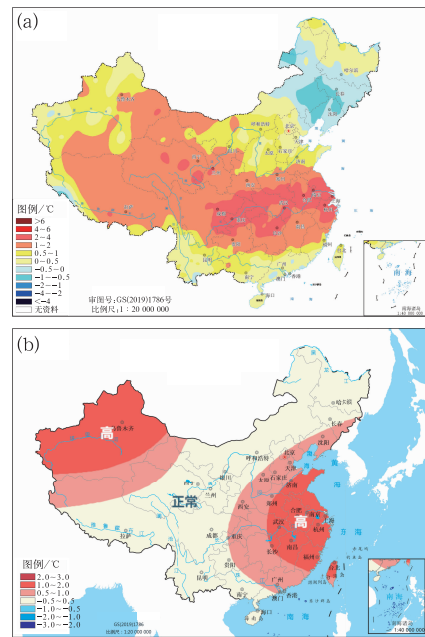


图 3 同图 1, 但为气温距平

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

2022 年 3 月底发布预测指出“夏季我国中东部大部气温偏高,华东、华中、新疆等地高温日数较常年同期偏多,可能出现阶段性高温热浪”与实况一致(图 3b)。在 5 月底的滚动预测中明确指出“7—8 月南方高温伏旱影响重,主要发生在华东、华中等地,可能出现高温过程长的情况,应注意对高温热浪对

人体健康的不利影响,做好防暑降温,要应对长时间高温天气带来能源电力供应紧张状况,做好应急准备工作”。预测较好地把握了全国大部气温偏高的总体趋势和高温异常分布,不足之处是对破纪录高温事件的极端性估计不足,特别是对川渝地区高温热浪的预测与实况存在偏差。

### 3 2022 年汛期预测先兆信号及应用

我国汛期气候异常是多时间尺度、多因子协同作用的结果,且不同气候背景和不同年份的主导因子也不相同。由于大部分气候因子及其影响存在显著的年代际变化,因此无论是诊断归因还是预测,首先需要针对年代际气候背景和信号进行分析。其次,在考虑年代际气候背景的前提下,根据不同外强迫信号的强弱和配置关系,对年际和季节尺度先兆信号的气候影响进行研判。在随后的滚动订正预测中,结合气候系统的实际演变趋势,对预测思路和结论及时进行调整,并关注次季节尺度信号的影响。另外,基于模式历史检验结果,提取不同气候背景和超前时间的模式有效预报信息,并且结合不同时间尺度先兆信号的诊断分析,给出汛期气候趋势和气候事件过程(开始、结束时间及强度等)的预测结论。

#### 3.1 年代际尺度先兆信号

东亚夏季风和我国汛期主雨带位置有显著的年代际变化特征,这与全球海温的年代际变率有密切联系(Si et al, 2016; Yang et al, 2017)。太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO; Mantua et al, 1997)指数定义为  $20^{\circ}\text{N}$  以北太平洋海面温度经验模态分解第一模态的时间系数,当 PDO 指数处于冷位相时期,东亚夏季风偏强,西太副高偏北,华北地区降水偏多(朱益民和杨修群, 2003)。大西洋多年代际振荡(Atlantic multi-decadal oscillation, AMO; Kerr, 2000)指数定义为北大西洋区域( $0^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$ )海面温度距平的区域平均值并去除线性趋势。当 AMO 指数处于正位相时期,东亚夏季风偏强(Lu et al, 2006)。同时,当 PDO 和 AMO 位相不同步时,我国东部降水呈三极子模态,反之呈南北偶极子模态(邓伟涛等, 2009; Zhang et al, 2018)。

监测显示,2022 年 PDO 处于冷位相,而 AMO

自 20 世纪 90 年代末以来一直处于正位相(图 4),同时我国东部地区以南北两条雨带为主要分布特征。结合数值模式对全球海温的预测,预计 2022 年 PDO 持续负位相,AMO 维持正位相,有利于东亚夏季风偏强,主要多雨区位于我国北方。

#### 3.2 年际尺度先兆信号

ENSO 是季节到年际尺度热带海气系统中的最强信号,对东亚季风环流和我国汛期气候异常有显著的影响(Wang et al, 2000; Ren et al, 2020)。2021 年 10 月开始,赤道中东太平洋进入 La Niña 状态。截至 2022 年 8 月,此次 La Niña 事件仍在持续,强度偏弱(图 5a)。2021/2022 年冬季,赤道东太平洋海温异常偏低,呈东部型 La Niña 空间分布特征(图 5c)。2021/2022 年冬季至 2022 年夏季,赤道东太平洋海温逐步回升,而中太平洋海温持续下降,海温空间分布向中部型 La Niña 事件特征转变(图 5d)(Ren and Jin, 2011)。2022 年盛夏,持续的 La Niña 事件在西北太平洋激发异常反气旋环流,是导致西太副高持续偏强的重要原因(Wang et al, 2013; Xiang et al, 2013; Li et al, 2017; Yang et al, 2022)。另外,西太平洋暖池海温偏高、对流活跃,由此激发的局地哈得来环流在东亚副热带地区引起异常下沉运动,也有利于西太副高偏强、偏西(Chen et al, 2019)。2022 年夏季,北太平洋海域,特别是黑潮和西风漂流区海温异常偏高,这有利于西太副高向北扩展(Ding et al, 2019)。

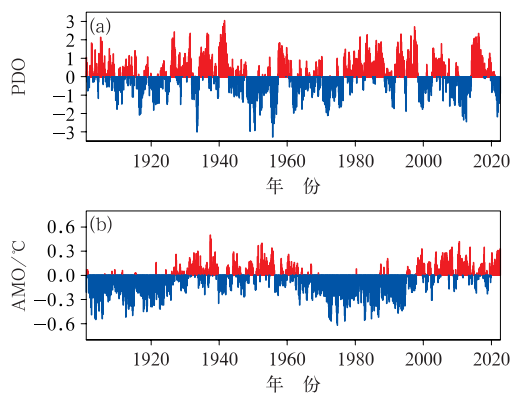


图 4 1901 年 1 月至 2022 年 8 月 (a)PDO 指数和 (b)AMO 指数逐月演变

Fig. 4 Monthly (a) PDO and (b) AMO indices from January 1901 to August 2022

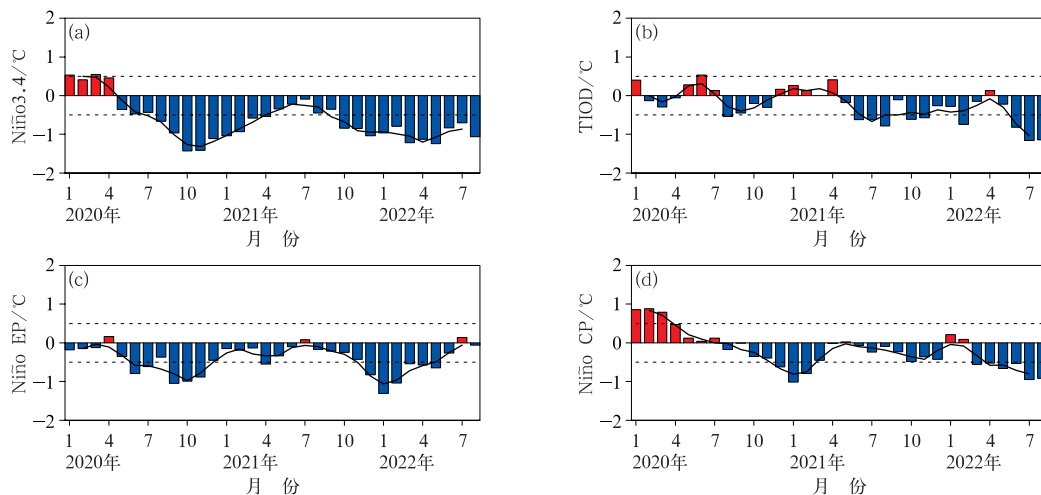


图 5 2020 年 1 月至 2022 年 8 月逐月 (a) Niño3.4, (b) TIOD, (c) ENSO 东部型指数 (Niño EP) 和 (d) 中部型指数 (Niño CP) (黑粗线: 3 个月滑动平均)

Fig. 5 The monthly variations of (a) Niño3.4, (b) TIOD, (c) Niño EP and (d) Niño CP indices from January 2020 to August 2022 (black thick line: 3-month moving average)

除太平洋海温异常外,2022 年夏季热带印度洋偶极型海温模态 (tropical Indian Ocean dipole, TIOD; Saji et al, 1999) 的异常发展也有重要作用 (图 5b)。TIOD 指数定义为热带西印度洋 ( $0^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$ ) 和东印度洋 ( $10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}$ 、 $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ ) 区域平均海面温度的差值。2022 年夏季热带印度洋海表温度异常呈“西冷东暖”分布,为偶极子负位相,其强度达到 1981 年以来最强。TIOD 负位相有利于南亚高压偏强、西太副高偏强 (李崇银和穆明权, 2001)。同时,赤道印度洋上空垂直纬向环流异常与太平洋上空沃克环流异常形成耦合 (吴国雄和孟文, 1998), 也进一步加强了西太暖池对流活动和局地哈得来环流异常。

在 2022 年 3 月底的汛期会商中,国内外主流数值预报中心对 ENSO 未来发展趋势预测存在较大分歧。中国气象局 CMA-CPSv3 和美国 CFSv2 模式预测春夏季 La Niña 状态持续,同时不排除秋冬季再次向冷水发展的可能性,其余多数模式均预测赤道中东太平洋海温在振荡中回升,La Niña 事件在春季结束,夏季海温进入中性状态 (图 6)。国家气候中心的汛期预测重点考虑了 La Niña 事件次年海温不同发展趋势对汛期降水影响的差异,3 月底研判以北方雨带为主,长江及以南地区降水偏少。另一方面,预测考虑了连续 La Niña 事件对大气环流和降水的不同影响。2020 年 8 月至 2021 年 4 月,赤道中东太平洋发生了一次中等强度的 La Niña 事件。Niño3.4 区海温在维持了 5 个月中性偏冷状态

后,2021 年 10 月起再次进入 La Niña 状态并持续至 2022 年夏季。合成分析结果显示,第一个 La Niña 事件次年夏季,主雨带位于长江和黄河之间 (图 7a);而第二个 La Niña 事件次年,东北、华北、西北地区东部、西南西部等地降水偏多,但长江中下游地区降水异常偏少。汛期预测中重点考虑了第二个 La Niña 事件次年降水异常分布 (图 7b)。此外,预测考虑了 La Niña 与印度洋偶极子的协同影响,在印度洋偶极子负位相发展的背景下,我国东部降水仍然呈现出“北多南少”的分布格局。

2021/2022 年冬季青藏高原积雪面积偏大、日数偏多,特别是在高原西部 (图 8a)。已有研究表明,冬春高原积雪偏多,有利于东亚夏季风偏弱,初夏长江流域降水偏多 (陈兴芳和宋文玲, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; 竺夏英等, 2013); 另外,高原积雪异常的空间分布对夏季雨带位置也有显著影响。数值试验结果显示,高原西部积雪偏多,有利于华北和黄淮地区夏季降水偏多 (Wang et al, 2017)。在 3 月底汛期会商中,主要考虑了高原西部积雪偏多的影响,支持主雨带位于我国北方地区的预判。进入春季,受气温异常偏暖的影响,高原积雪迅速减少,由前期冬季较常年明显偏多转为春季较常年偏少 (图 8b), 这表明高原感热加热偏强,东亚夏季风环流和降水异常更多体现为前期冬季积雪偏少年的特征。青藏高原积雪作为汛期预测考虑的重要因子,由冬到夏表现出显著的阶段性变化特征,其对汛期降水影响的不确定性还需要进一步研究 (丁婷等, 2020)。

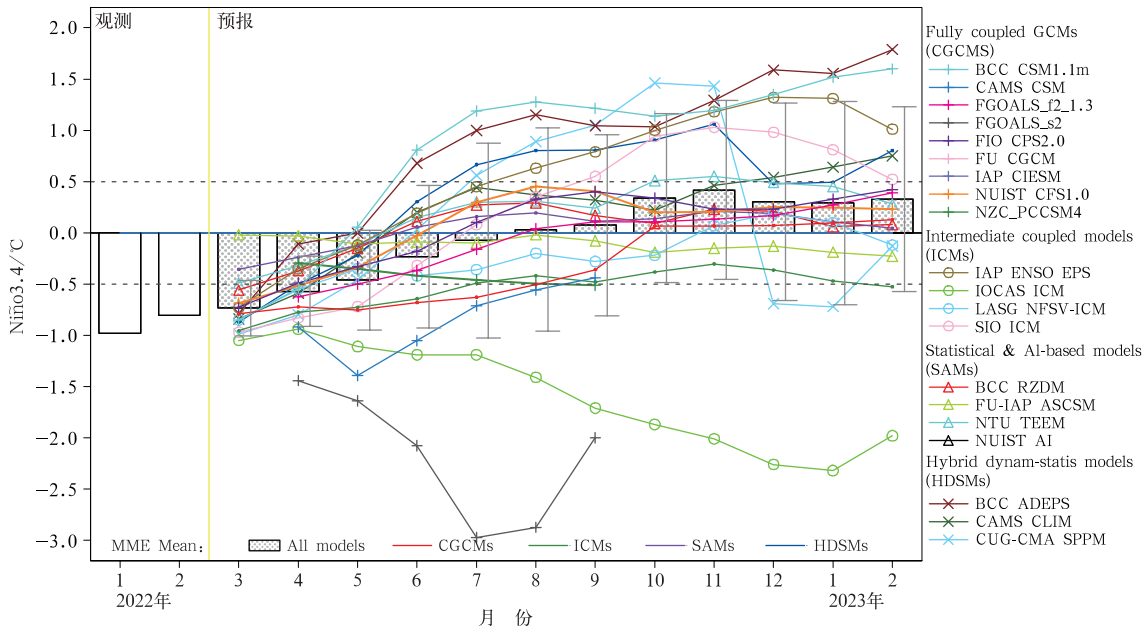


图 6 中国多模式集合系统 2022 年 3 月起报的逐月 Niño3.4 指数

Fig. 6 Multi-model prediction of monthly Niño3.4 index initiated in March 2022

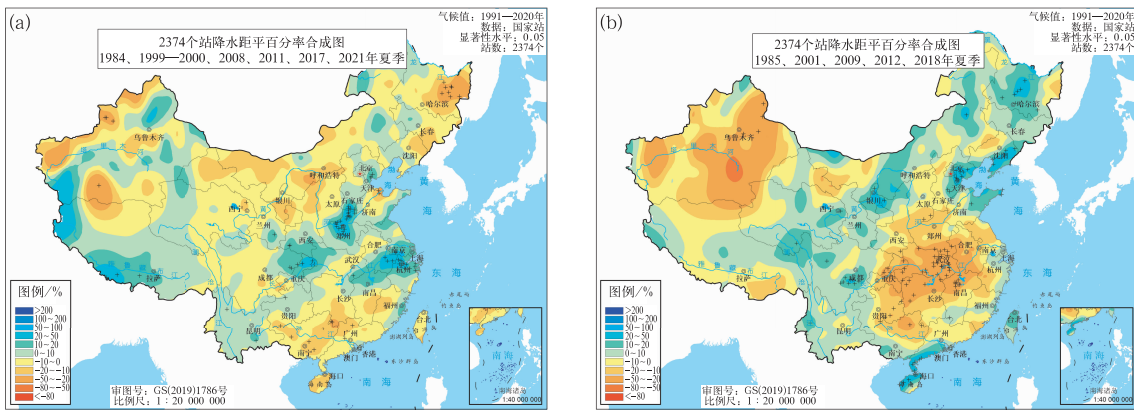


图 7 (a)第一个和(b)第二个 La Niña 事件次年夏季降水量距平百分率合成图

(打十字区域:通过 0.05 显著性水平检验区域)

Fig. 7 Composites of summer precipitation anomaly percentage for

(a) the first and (b) second La Niña decaying years

(cross: region having passed the significance test at 0.05 level)

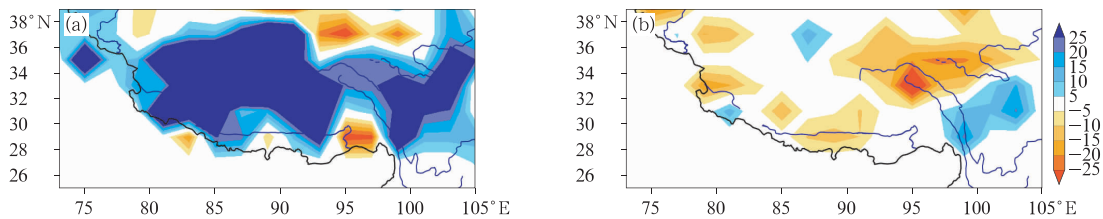


图 8 (a)2021/2022 年冬季和(b)2022 年春季青藏高原积雪日数距平场(单位:d)

Fig. 8 Distribution of anomalous days of snow cover on Tibetan Plateau

for (a) the 2021/2022 winter and (b) the 2022 spring (unit: d)



### 3.3 动力气候模式的预测

除了物理诊断外,动力模式是汛期预测的重要参考依据。2022 年 3 月底起报的中国气象局 BCC\_CSM1.1 模式预测 2022 年夏季欧亚中高纬度以纬向环流为主,鄂霍次克海上空 500 hPa 位势高度场偏高;西太副高强度偏强,西伸脊点偏西,南亚高压强度偏强。美国 CFSv2 模式、欧洲 ECMWF5 模式对欧亚环流形势预测与 BCC\_CSM1.1 模式较为一致。在低层风场方面,BCC\_CSM1.1 模式预测 2022 年春季菲律宾和南海上空均盛行气旋式环流异常,但夏季气旋式异常强度弱于春季,同时东北亚上空呈反气旋式环流异常,与实况存在较大差异(图 9)。日本气象厅 MRI-CPS2 模式预测春季菲律宾附近为气旋式异常,夏季转为反气旋式环流异常。中国科学院大气物理研究所 FGOALS-f2 模式预测菲律宾附近夏季为反气旋式环流异常,与实况基本一致。

需要指出的是,虽然多数动力模式对 2022 夏季

环流形势和气象要素的总体特征把握较好,但是对夏季内逐月环流和要素的预测技巧相对较低。模式对 6 月西太副高和菲律宾反气旋位置的预测较实况偏北,主雨带位置偏北;7—8 月对南方的降水预测较实况明显偏强。对国内外主要气候模式次季节到季节尺度预测检验评估显示,气候模式普遍存在夏季主雨带北抬的时间偏早,西太副高脊线位置偏北的系统性误差,在应用模式预测信息时需要特别注意(Liu et al,2019;2021;Zhang et al,2020)。

### 3.4 盛夏长江流域高温伏旱估计不足的原因分析

对 2022 年盛夏长江流域高温伏旱估计不足与对环流形势预测的偏差有紧密关系。尽管 2022 年汛期对“西太平洋副热带高压强度略偏强、脊线位置偏北、西伸脊点偏西”的趋势预测正确,但是对西太副高偏强偏西的极端异常程度估计不足。受海温和青藏高原热力异常以及大气内部过程影响,2022 年盛夏西太副高异常偏强西伸,并且多次与其西侧的伊朗高压打通形成副热带高压带(图 10a)。在强大

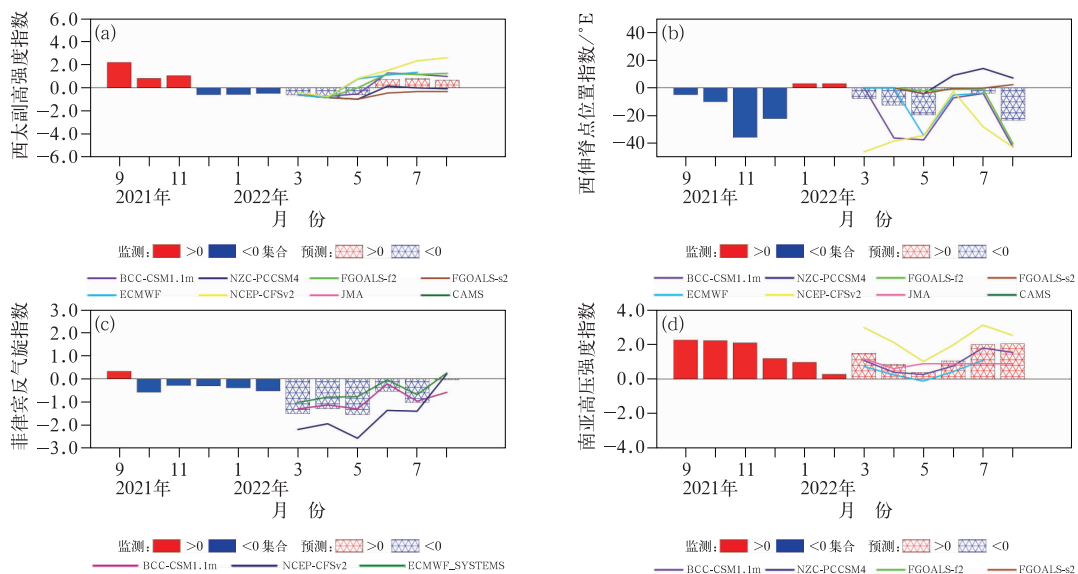


图 9 多模式集合 2022 年 3 月起报逐月(a)西太副高强度指数(刘芸芸等,2012)、(b)西伸脊点位置指数(刘芸芸等,2012)、(c)菲律宾反气旋指数(Wang et al,2000)和(d)南亚高压强度指数(张琼等,2000)(实线:单模式结果,填色柱:实况监测,色斑柱:多模式集合平均结果)

Fig. 9 Multi-model ensemble prediction of monthly indices of (a) western North Pacific subtropical high intensity (Liu et al, 2012), (b) position of western ridge point (Liu et al, 2012), (c) Philippine anticyclone (Wang et al, 2000) and (d) South Asian high intensity (Zhang et al, 2000) (thick line; single model output, colored bar; monitoring, patterned bar; ensemble mean results)

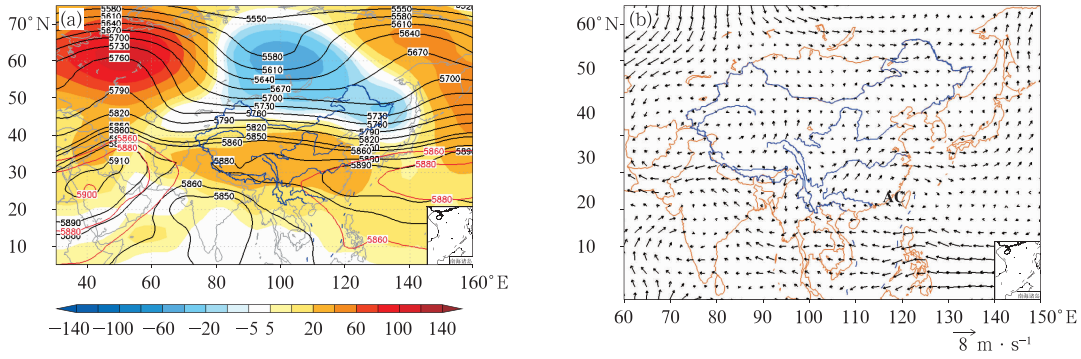


图 10 2022 年 7—8 月 (a)500 hPa 环流形势(等值线:原始场,填色:距平场,单位:gpm; 红线:5880 gpm 副高特征线)和(b)850 hPa 距平风场

Fig. 10 (a) The 500 hPa circulation (contour: initial field, colored: anomaly field, unit: gpm; red line: 5880 gpm subtropical high line) and (b) 850 hPa anomalous wind field from July to August 2022

的西太副高的持续控制之下,长江流域上空盛行下沉气流,有利于地面增温,同时晴空少云,太阳辐射偏强,导致出现破纪录的高温天气。与此同时,孟加拉湾、中南半岛、南中国海以及热带西太平洋上空盛行异常东风(图 10b),贯通的副热带高压带一定程度上阻断了其西南侧的季风水汽输送通道。此外,菲律宾附近盛行反气旋式环流异常,西太副高持续偏强也不利于西太平洋和南海的台风生成和登陆,多因素共同作用导致长江流域降水异常偏少。汛期预测中综合外强迫信号和模式信息,对西太副高等关键环流系统异常趋势的把握正确,但对多因子协同作用下极端事件的预测能力仍然较为薄弱。

另一方面,2022 年盛夏长江流域高温伏旱呈现显著的阶段性变化特征。7 月长江流域大部平均气温偏高 1~2℃,江南东部和川渝部分地区偏高 2℃ 以上(图 11a)。8 月高温异常程度明显增加,长江流域大部平均气温偏高 2~4℃,川东和重庆部分地区偏高 4℃ 以上(图 11b)。诊断分析表明,在 La Niña 持续的背景下,赤道中太平洋冷海温异常发展,西太平洋海温偏暖,海洋性大陆上空对流活跃,菲律宾附近对流层低层异常反气旋环流在 8 月明显增强(Xiang et al, 2013)。另外,8 月对流层上层南亚高压中心位置偏东,有利于西太副高加强、西伸和北抬(陶诗言和朱福康, 1964; 魏维等, 2012)。南亚高压东段和西太副高西段叠加,形成稳定的准正压结构,中心位于川渝等地上空(林纾等, 2022)。同时,欧亚中高纬度出现沿西风急流传播的“丝绸之路”型遥相

关波列(Lu et al, 2002; Enomoto, 2004)。热带海气系统和 中 高 纬 度 环 流 异 常 的 共 同 作 用, 导 致 长 江 流 域 特 别 是 川 渝 等 地 的 高 温 伏 旱 在 8 月 异 常 增 强(孙昭萱等, 2022; 章大全等, 2023)。目前数值模式和诊断分析对季节平均气候特征有一定的预测技巧,但是对季节内变率特别是夏末气候异常的预测能力相对较低,需要进一步加强次季节尺度气候异常机理研究和预测技术研发。

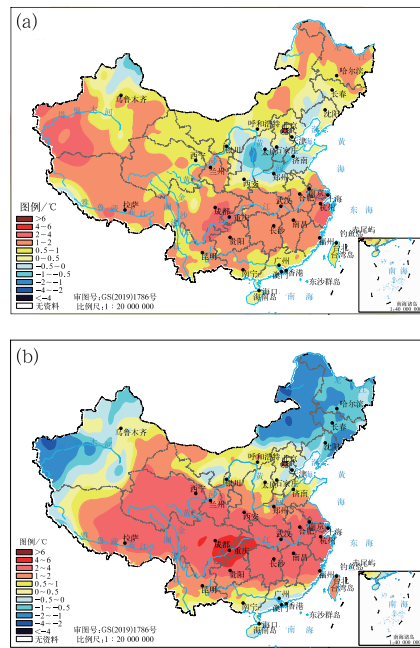


图 11 2022 年(a)7 月和(b)8 月 全国平均气温距平分布

Fig. 11 Distribution of monthly temperature anomalies in (a) July and (b) August of 2022

## 4 结论与讨论

2022年汛期,国家气候中心准确预测了“我国气候状况总体为一般到偏差,降水整体呈‘南北多、中间少’的异常分布特征,旱涝并重,区域性、阶段性旱涝灾害明显,高温日数偏多”的总趋势;准确预测黄河流域中下游、海河流域、辽河流域的较重汛情,以及南海夏季风爆发偏早,西南雨季开始偏早,梅雨总体开始偏早、强度弱,华北雨季开始偏早、强度强等季节进程;准确预测全国平均气温趋势和高温异常分布,明确指出盛夏南方可能发生较长时间的高温伏旱;较为准确地把握西北太平洋和南海的台风活动趋势,对台风生成频数、盛行路径、影响范围和强度的预测与实况一致。汛期预测不足之处主要是对长江流域高温干旱的范围和极端性估计不足,对华南前汛期降水异常趋势预测错误,对登陆我国的台风个数预测与实况存在偏差。

2022年的汛期预测综合考虑了诊断分析和动力模式预测结果。在PDO负位相的背景下,重点考虑了La Niña事件持续发展、印度洋偶极子负位相、青藏高原西部积雪偏多等外强迫因子的协同作用。由此预测东亚夏季风总体偏强,主要多雨区位于我国北方。国内外主要动力模式对大尺度环流背景和降水空间分布的预测较好,但是对环流和要素的季节内变化预测技巧相对较低,特别是对极端事件的预测能力仍然不足。

通过对2022年汛期预测的分析,结合近几年的气候预测尤其是汛期旱涝预测,提出以下需要重点解决的科学和技术问题。

(1)随着全球快速变暖,ENSO事件的演变特征及其对东亚季风区气候的影响发生了显著变化,这给认识其发生发展规律和气候影响提出了新的挑战。其中一个重要变化是,21世纪以来连续两年的La Niña事件频繁发生。研究表明,在连续La Niña事件中,第一个和第二个La Niña有着截然不同的触发机制、海温分布形态、演变规律和气候影响(Hu et al, 2014; DiNezio et al, 2017; Okumura et al, 2017; Raj Deepak et al, 2019)。以往的研究和业务往往聚焦于单一峰值的El Niño/La Niña事件对我国汛期气候异常的影响,忽视了连续ENSO事件对我国气候影响的特征和机理的差异。

在2022年汛期预测中,及时关注到连续La

Niña事件对我国汛期气候异常和季节进程的不同影响,并且在汛期预测中考虑了这一因素。但总体而言,连续La Niña事件对我国气候影响的差异及其物理机制尚未得到充分研究。在全球变暖背景下,持续多年的ENSO事件可能发生得更加频繁(Power and Delage, 2018; Berner et al, 2020; Fredriksen et al, 2020)。因此需针对连续ENSO事件的发生频次、演变特征及其对我国汛期气候异常的影响机理开展研究,以加深对ENSO影响东亚气候复杂性的认识,提高气候预测的准确率。

(2)2022年汛期预测准确把握了全国大范围偏暖的总体趋势,但是对长江中下游和川渝等地高温的极端性估计不足。盛夏长江流域的极端高温事件与干旱事件复合,相互作用导致灾害链延伸,连锁、放大效应突出,对人民生活和社会经济造成了严重的影响。目前汛期预测中对特定地区气候异常的极端性及可能造成的气象灾害的预测水平与服务需求还有较大差距,亟需加强复合型极端事件客观预测能力以及影响评估技术研发。

(3)我国季节内气候异常转折和持续与西太副高的次季节变率密切联系,西太副高的阶段性北跳与我国东部季风区的雨季起止时间、雨带位置以及高温伏旱等直接相关。与此同时,全球变暖背景下西太副高极端增强事件频繁发生。较之季节平均,目前对于次季节尺度气候异常和转折的预测技巧相对较低,预测服务能力仍然相对薄弱,亟需加强对东亚夏季风季节进程中,西太副高异常进退和稳定维持的主导因子、影响机理以及预测技术研究,为提升次季节尺度预测水平提供科技支撑。

## 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,1974.天气数值预报中使用过去资料的问题[J].中国科学,4(6):635-644. Chou J F, 1974. On the using of past data in numerical weather forecasting[J]. Sci China, 4(6):635-644(in Chinese).

- 邓伟涛,孙照渤,曾刚,等,2009.中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系[J].大气科学,33(4):835-846.
- Deng W T, Sun Z B, Zeng G, et al, 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST[J]. Chin J Atmos Sci, 33(4):835-846(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).
- 封国林,赵俊虎,支蓉,等,2013.动力-统计客观定量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).
- 顾震潮,1958.天气数值预报中过去资料的使用问题[J].气象学报,29(3):176-184.
- Koo C C, 1958. On the utilization of past data in numerical weather forecasting[J]. Acta Meteor Sin, 29(3):176-184(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).
- 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).
- 李崇银,穆明权,2001.赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J].大气科学,25(4):433-443.
- Li C Y, Mu M Q, 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate[J]. Chin J Atmos Sci, 25(4):433-443(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).
- 林纾,李红英,黄鹏程,等,2022.2022年夏季我国高温干旱特征及其环流形势分析[J].干旱气象,40(5):748-763.
- Lin S, Li H Y, Huang P C, et al, 2022. Characteristics of high temperature, drought and circulation situation in summer 2022 in China[J]. J Arid Meteor, 40(5):748-763(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,2021.2020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, 2021. Precursory signals of the 2020 summer climate in China and evaluation of real-time prediction[J]. Meteor Mon, 47(4):488-498(in Chinese).
- 邱崇践,丑纪范,1989.天气预报的相似-动力方法[J].大气科学,13(1):22-28.
- Qiu C J, Chou J F, 1989. The analogic-dynamical method of forecasting weather[J]. Sci Atmos Sin, 13(1):22-28(in Chinese).
- 任宏利,丑纪范,2005.统计-动力相结合的相似误差订正法[J].气象学报,63(6):988-993.
- Ren H L, Chou J F, 2005. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together[J]. Acta Meteor Sin, 63(6):988-993(in Chinese).
- 任芝花,余予,邹凤玲,等,2012.部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J].应用气象学报,23(6):739-747.
- Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al, 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6):739-747(in Chinese).
- 孙昭萱,张强,孙蕊,等,2022.2022年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响[J].干旱气象,40(5):764-770.
- Sun Z X, Zhang Q, Sun R, et al, 2022. Characteristics of the extreme high temperature and drought and their main impacts in southwestern China of 2022[J]. J Arid Meteor, 40(5):764-770(in Chinese).
- 陶诗言,朱福康,1964.夏季亚洲南部100毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系[J].气象学报,34(4):385-396.
- Dao S Y, Chu F K, 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East[J]. Acta Meteor Sin, 34(4):385-396(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).
- 魏维,张人禾,温敏,2012.南亚高压的南北偏移与我国夏季降水的关系[J].应用气象学报,23(6):650-659.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, 2012. Meridional variation of South Asian high and its relationship with the summer precipitation over China[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6):650-659(in Chinese).
- 吴国雄,孟文,1998.赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和ENSO事件I.资料分析[J].大气科学,22(4):470-480.
- Wu G X, Meng W, 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: data analyses[J]. Sci Atmos Sin, 22(4):470-480(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).
- 于海鹏,黄建平,李维京,等,2014.数值预报误差订正技术中相似-动力方法的发展[J].气象学报,72(5):1012-1022.
- Yu H P, Huang J P, Li W J, et al, 2014. Development of the analogue-dynamical method for error correction of numerical forecasts[J]. Acta

- Meteor Sin, 72(5):1012-1022(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).
- 张琼,钱永甫,张学洪,2000. 南亚高压的年际和年代际变化[J]. 大气科学, 24(1):67-78. Zhang Q, Qian Y F, Zhang X H, 2000. Interannual and interdecadal variations of the South Asia high[J]. Chin J Atmos Sci, 24(1):67-78(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).
- 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,黄嘉佑,丁一汇,2016. 统计方法在数值模式中应用的若干新进展[J]. 气象, 42(4):456-465. Zhu Y X, Huang J Y, Ding Y H, 2016. Some new advances in application of statistical methods to numerical models[J]. Meteor Mon, 42(4):456-465(in Chinese).
- 竺夏英,陈丽娟,李想,2013. 2012年冬春季高原积雪异常对亚洲夏季风的影响[J]. 气象, 39(9):1111-1118. Zhu X Y, Chen L J, Li X, 2013. Impact of Tibetan Plateau snow cover anomaly on Asian summer monsoon in 2012[J]. Meteor Mon, 39(9):1111-1118(in Chinese).
- Berner J, Christensen H M, Sardeshmukh P D, 2020. Does ENSO regularity increase in a warming climate? [J]. J Climate, 33(4):1247-1259.
- Chen R, Wen Z, Lu R, et al, 2019. Causes of the extreme hot mid-summer in Central and South China during 2017: role of the western tropical Pacific warming[J]. Adv Atmos Sci, 36(5):465-478.
- DiNezio P N, Deser C, Okumura Y, et al, 2017. Predictability of 2-year La Niña events in a coupled general circulation model[J]. Climate Dyn, 49(11):4237-4261.
- Ding T, Yuan Y, Zhang J M, et al, 2019. 2018: the hottest summer in China and possible causes[J]. J Meteor Res, 33(4):577-592.
- Enomoto T, 2004. Interannual variability of the Bonin high associated with the propagation of Rossby waves along the Asian jet[J]. J Meteor Soc Japan, 82(4):1019-1034.
- Fredriksen H B, Berner J, Subramanian A C, et al, 2020. How does El Niño-Southern Oscillation change under global warming—a first look at CMIP6[J]. Geophys Res Lett, 47(22):e2020GL090640.
- Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 106(449):447-462.
- Hu Z Z, Kumar A, Xue Y, et al, 2014. Why were some La Niñas followed by another La Niña? [J]. Climate Dyn, 42(3-4):1029-1042.
- 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.
- Kerr R A, 2000. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries[J]. Science, 288(5473):1984-1985.
- 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.
- Li T M, Wang B, Wu B, et al, 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: a review[J]. J Meteor Res, 31(6):987-1006.
- 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, Hu Z Z, Wu R G, et al, 2021. Subseasonal prediction and predictability of summer rainfall over eastern China in BCC\_AGCM2. 2[J]. Climate Dyn, 56(7/8):2057-2069.
- Liu Y Y, Ke Z J, Ding Y H, 2019. Predictability of East Asian summer monsoon in seasonal climate forecast models[J]. Int J Climatol, 39(15):5688-5701.
- Lu R Y, Dong B W, Ding H, 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 33(24):L24701.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J, 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer[J]. Tellus A, 54(1):44-55.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al, 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(6):1069-1079.
- Matsuno T, 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. J Meteor Soc Japan, 44(1):25-43.
- Okumura Y M, DiNezio P, Deser C, 2017. Evolving impacts of multi-year La Niña events on atmospheric circulation and U. S. drought[J]. Geophys Res Lett, 44(22):11614-11623.
- Power S B, Delage F P D, 2018. El Niño-Southern Oscillation and associated climatic conditions around the world during the latter half of the Twenty-First Century[J]. J Climate, 31(15):6189-6207.
- Raj Deepak S N, Chowdary J S, Dandi A R, et al, 2019. Impact of multiyear La Niña events on the South and East Asian summer monsoon rainfall in observations and CMIP5 models[J]. Climate Dyn, 52(11):6989-7011.
- Ren H L, Jin F F, 2011. Niño indices for two types of ENSO[J]. Geophys Res Lett, 38(4):L04704.

- Ren H L, Zheng F, Luo J J, et al, 2020. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China[J]. *J Meteor Res*, 34(1):43-62.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al, 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate[J]. *J Climate*, 15(13):1609-1625.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al, 2014. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *J Climate*, 27(6):2185-2208.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al, 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean[J]. *Nature*, 401(6751):360-363.
- Si D, Hu Z Z, Kumar A, et al, 2016. Is the interdecadal variation of the summer rainfall over eastern China associated with SST? [J]. *Climate Dyn*, 46(1/2):135-146.
- Takaya Y, Hirahara S, Yasuda T, et al, 2018. Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2 (JMA/MRI-CPS2): atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting[J]. *Climate Dyn*, 50(1-2):751-765.
- 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, Xiang B Q, Lee J Y, 2013. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(8):2718-2722.
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al, 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China[J]. *J Climate*, 30(3):885-903.
- Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al, 2019. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6[J]. *Geosci Model Dev*, 12(4):1573-1600.
- Wu T W, Song L C, Li W P, et al, 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies[J]. *J Meteor Res*, 28(1):34-56.
- Wu T W, Yu R C, Lu Y X, et al, 2021. BCC-CSM2-HR: a high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model[J]. *Geosci Model Dev*, 14(5):2977-3006.
- Wu T W, Zhang F, Zhang J, et al, 2020. Beijing Climate Center Earth System Model version 1 (BCC-ESM1): model description and evaluation of aerosol simulations[J]. *Geosci Model Dev*, 13(3):977-1005.
- Xiang B Q, Wang B, Yu W D, et al, 2013. How can anomalous western North Pacific subtropical high intensify in late summer? [J]. *Geophys Res Lett*, 40(10):2349-2354.
- Yang K, Cai W J, Huang G, et al, 2022. Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 119(23):e2120335119.
- Yang Q, Ma Z G, Fan X G, et al, 2017. Decadal modulation of precipitation patterns over eastern China by sea surface temperature anomalies[J]. *J Climate*, 30(17):7017-7033.
- Zhang D Q, Martin G M, Rodriguez J M, et al, 2020. Predictability of the western North Pacific subtropical high associated with different ENSO phases in GloSea5[J]. *J Meteor Res*, 34(5):926-940.
- Zhang Z Q, Sun X G, Yang X Q, 2018. Understanding the interdecadal variability of East Asian summer monsoon precipitation: joint influence of three oceanic signals[J]. *J Climate*, 31(14):5485-5506.
- Zhou T J, Wang B, Yu Y Q, et al, 2018. The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting climate sciences: an overview[J]. *Earth Planet Phys*, 2(4):276-291.
- Zhou W, Chan J C L, 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset[J]. *Int J Climatol*, 27(2):157-167.

(本文责编:何晓欢)