

支蓉,高辉,孙冷,2024. 2023 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象,50(3):377-386. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024. Overview of climate prediction for the summer 2023 in China and its precursors[J]. Meteor Mon, 50(3):377-386(in Chinese).

2023 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析*

支 蓉 高 辉 孙 冷

国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 2023 年夏季,我国整体表现为高温少雨的特征,旱涝分布不均。夏季台风虽然生成和登陆个数均较常年偏少,但破坏力极强。华北、西北等地阶段性高温事件异常突出,但长江流域的高温干旱强度明显弱于 2022 年同期。从预测效果来看,2023 年汛期预测较好把握了我国北方主雨带特征,对松花江流域、嫩江流域、海河流域可能出现的较重汛情做出了准确的预测预警。对夏季热带气旋的生成个数、主要路径、影响区域等的预测与实况较为相符。对夏季全国大部地区气温偏高的特征预测与实况一致,并明确指出,长江流域发生类似 2022 年夏季大范围持续性高温干旱事件的可能性低。汛期预测的不足之处主要在于对华南等地的降水预测与实况出现较大偏差,对华北、黄淮等地的高温过程极端性估计不足。针对 2023 年汛期降水的先兆信号及其预报性能进行了回顾和评估,无论是年代际尺度还是年际尺度外强迫信号,均对我国北方主雨带有较好的指示意义。同时,几乎所有先兆信号都对华南降水给出了一致的错误信息,是导致华南降水预报失败的主要原因。

关键词: 夏季降水,高温热浪,热带气旋,先兆信号

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.013001

Overview of Climate Prediction for the Summer 2023 in China and Its Precursors

ZHI Rong GAO Hui SUN Leng

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

Abstract: In the summer of 2023, China experienced a climate of higher temperature and less precipitation. Both the droughts and the floods showed remarkable spatial differences. Although the numbers of typhoons generated and landing in summer were both less than normal, the typhoons that formed were extremely destructive. In terms of temperature, persistent heat waves were the most prominent in North China and Northwest China since 1961, but the intensities of high temperature and drought were significantly weaker than those in the summer of 2022 across the Yangtze River Basin. The prediction effect has shown that the climate prediction successfully forecasted the characteristics of the rain belt in northern China, and made accurate prediction and early warning of the possible heavy floods in Songhua River Basin, Nenjiang River Basin and Haihe River Basin. The forecasted number, main track and affected area of tropical cyclones in summer were also consistent with the observation. Prediction skills of mean temperatures in most parts of China are higher than normal, especially the heat wave intensity in the Yangtze River Basin in 2023. The primary error of precipitation forecast in the rainy season mainly occurred in South China, and the extreme high temperature processes were underestimated for North China and Huanghuai Region. In addition, the precursors and their forecasting performance in summer 2023 are also reviewed and

* 国家自然科学基金重点项目(42130610)、国家重点研发计划(2017YFC1502300)和国家自然科学基金面上项目(41975088)共同资助

2024 年 1 月 9 日收稿; 2024 年 1 月 30 日收修定稿

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

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

diagnosed. The results indicate that both the interdecadal and interannual variations of external forcing had good indicative significances for the prediction of rain belt in northern China. However, almost all the precursors gave consistent wrong information about the precipitation in South China, which was the main reason for the failure of precipitation forecast in South China.

Key words: summer precipitation, heat wave, tropical cyclone, precursor

引 言

我国是全球气象灾害最为频发的国家之一(黄荣辉等,2006;郑国光,2019),短期气候预测的准确性直接关系到国家防灾减灾的重大决策部署等,具有非常重要的现实意义。我国从 1954 年开始正式发布相关预测产品,经过几十年坚持不懈地科学研究和业务实践相结合,在短期气候预测水平及服务等方面取得了显著提升,为保护人民生命财产安全及国家防灾减灾作出了重要贡献(李维京,2012)。

我国地处全球季风性气候特征最显著的区域之一,受东亚季风系统复杂性影响,短期气候预测难度极大。具体到夏季气候异常而言,前人的大量研究表明,其不仅影响因子众多,囊括从三大洋海温到积雪、极冰等诸多外强迫信号(Zhang et al,1999;张顺利和陶诗言,2001;陈丽娟等,2013;Han et al,2021),而且涉及的时间尺度复杂,在年代际信号的基础上还需考虑年际信号、次季节尺度信号等的叠加影响(朱益民和杨修群,2003;Lu et al,2006;Zhang et al,2018),因此导致预测实践中往往极难准确捕捉真正发挥决定性作用的先兆信号组合,而影响最终预测结果的准确性。面对该问题,气象工作者一方面从统计诊断角度不断探索,发掘外强迫信号等更准确的影响机理及指示意义,捕捉其多因子、多时间尺度影响特征;另一方面不断完善和提高动力模式预测水平(Krishnamurti et al,1999;吴统文等,2013;Wu et al,2021),依托不断提升的计算科技水平对复杂的海气过程等进行模拟和预测。

2023 年夏季,我国整体表现为高温少雨的特征,旱涝分布不均,且与传统意义上的几类雨型分布均不相符(赵振国,1999;孙林海等,2005),给预测带来极大困难。东北、华北等地暴雨过程频繁,引发严重洪涝灾害和流域汛情。夏季台风虽然生成和登陆个数均较常年偏少,但展现出极强的破坏力,引起社会广泛关注。气温方面,华北、西北等地区阶段性高温现象异常突出,但长江流域的高温干旱现象明显

弱于 2022 年同期(章大全等,2023)。本文首先回顾 2023 年夏季我国气候异常实况并与预测结果进行对比,总结预测成功与不足之处;重点回顾早期预测中对相关先兆信号的考虑及预测效果;最后针对预报误差产生的原因,总结需要进一步深入研究的若干科学问题。

1 资料和方法

本文使用的资料主要有:(1)中国气象局国家气象信息中心整编的“中国地面基本气象要素日值数据集(V3.0)”中的逐日气温和降水观测资料,该数据集包含了中国 2374 个基本、基准和一般气象站 1951 年 1 月以来气温、降水的日值数据(任芝花等,2012);(2)海温指数和积雪指数均下载自国家气候中心业务系统“气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)”。

本文采用张庆云等(2003)定义的指标判别东亚夏季风强弱;采用刘芸芸等(2012)定义的指标判别西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)的相关特征。文中部分图形来源于国家气候中心研发并在气候业务中长期应用的“气象灾害影响评估系统”和“气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)”。文中冬季为前一年 12 月至当年 2 月,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,气候态为 1991—2020 年平均。

2 2023 年夏季大气环流特征及气候预测效果评估

总体来说,2023 年汛期预测较好地把握了我国北方主雨带特征,对松花江流域、嫩江流域、海河流域可能出现的较重汛情做出了准确的预测预警。准确预测夏季和盛夏、“七下八上”等重点时段生成和登陆的热带气旋个数偏少、主要路径以西行和西北行为主、北上高影响台风可能性大等趋势。对夏季全国大部地区气温偏高的特征预测与实况一致,并明确指出,长江流域发生类似 2022 年大范围持续性高温干旱事件的可能性低。

2.1 大气环流

2023年夏季,东亚夏季风较常年同期偏强,有利于我国东部主雨带整体偏北(张庆云等,2003)。从夏季平均500 hPa位势高度距平场来看(图略),欧亚中高纬整体呈“两槽一脊”的高度场异常分布,环流向度较小,有利于我国大部气温偏高;尤其是我国北方地区,处于高压脊控制之下,气温偏高相对南方地区更为明显。季节平均西太副高较常年明显偏强,西伸脊点偏西、脊线略偏北,但在对流层低层850 hPa距平风场上,西太副高主体区域附近整体表现为气旋式环流异常,与对流层中层的位势高度正异常表现出明显的不匹配特征。在对流层低层气旋式环流异常影响下,我国东部地区,尤其是长江中下游以南地区水汽输送及辐合条件较差,不利于降水偏多(支蓉等,2024)。

3月底进行的全国汛期会商,准确预测了东亚夏季风较常年同期偏强,欧亚中高纬环流向度较小以及西太副高偏强、偏西、偏北等主要特征,因此对我国北方主雨带及全国整体以偏暖为主等气候异常特征把握较好;对环流预测的最大不足,在于对西太副高主体区域附近出现的对流层中、低层环流异常明显不匹配的现象未能作出准确的预判,进而导致对我国南方汛期降水的预测与实况出现较大偏差。

2.2 降水

2023年夏季,全国平均降水量为319.9 mm,较常年同期(331.5 mm)偏少3.5%。从空间分布特征来看(图1a),我国中东部降水整体呈“北多南少”的分布,降水明显偏多的区域主要集中在东北、华北

等地,大部地区降水偏多2成以上,局部偏多5成至1倍,中东部其余大部地区降水则较常年同期偏少约2成,部分地区偏少约5成;我国西部地区的降水异常空间分布特征与中东部地区近似相反,整体呈相对“北少南多”的形势,西藏东部及西南地区南部等地降水较常年同期偏多约2成左右,新疆及西北地区大部降水则较常年同期明显偏少,部分地区偏少达5~8成(支蓉等,2024)。

将降水实况(图1a)和3月底发布的降水预测(图1b)进行对比可以看出,2023年夏季预测准确把握了我国中东部地区的北方主雨带特征,并对松花江流域、嫩江流域、海河流域可能出现的较重汛情较早做出准确预警;对西部地区降水“北少南多”的形势预测也与实况一致。不足之处主要有两点,一是对华南中东部至江南东南部降水偏多的预测与实况相反;二是对长江流域中游降水偏少的预测与实况不符。

2023年6月底对盛夏(7—8月)降水的预测意见中(图2b),在夏季预测的基础上做了一定调整,将东部主雨带向南扩张,并使主雨带经向度有所加大,将东部沿海更大范围囊括入降水偏多的区域中。此外,对南方多雨带向西进行收缩,主要位于西南地区南部至华南,且强度较3月底发布的夏季预测(图1b)有所减弱。对比实况来看(图2a),在降水预测上做出的调整都与实况较为一致,取得了较好的预报效果。

2.3 我国东部季风和雨季进程

由于我国东部地区受季风影响明显,因此我国东部汛期雨带也随着季风自南向北推进而变化。2023年,对东亚夏季风及我国东部主要雨季进程的

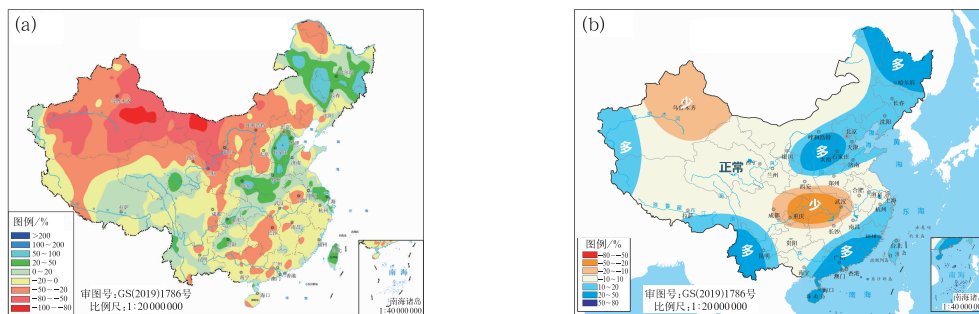


图1 2023年(a)夏季全国降水量距平百分率分布及(b)3月底发布的预测

Fig.1 (a) Distribution of precipitation anomaly percentage in summer and (b) corresponding prediction issued at the end of March 2023

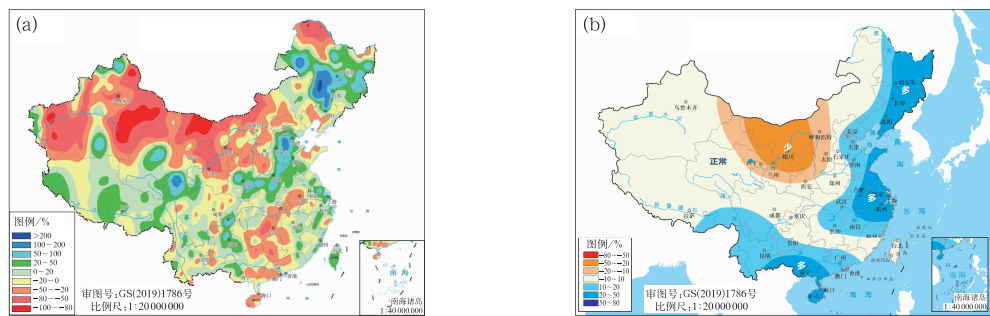


图 2 2023 年(a)盛夏(7—8 月)全国降水量距平百分率分布及(b)6 月底发布的预测

Fig. 2 (a) Distribution of precipitation anomaly percentage in mid-summer (July to August) and (b) corresponding prediction issued at the end of June 2023

预测结果与实况基本相符,具体情况如下:5 月初,预测南海夏季风将于 5 月 16 日爆发,爆发时间接近常年,实况为 5 月 14 日爆发,接近常年同期(5 月第 4 候)略偏早;在 6 月进行了梅雨预测会商,预测结论为江南梅雨和长江梅雨开始较常年偏晚,江淮梅雨开始时间接近常年,实况为江南梅雨、长江梅雨及江淮梅雨分别于 6 月 16 日、6 月 16 日及 6 月 25 日正式开始,均较常年偏晚,预测与实况基本一致;华北雨季于 7 月 22 日开始,较常年偏晚,在 7 月进行的相关会商中准确预测了华北雨季开始偏晚的特征。

2.4 热带气旋

2023 年夏季,在西北太平洋和南海地区共有 10 个热带气旋生成,生成个数接近常年同期;其中,有 2 个登陆我国,较常年同期明显偏少。热带气旋的活动路径整体以西行和西北行为主,主要影响我国华南和华东沿海;此外,热带气旋残余环流深入内陆并北上,对我国华北、东北等地造成了极为明显的影响。从强度上来看,编号的 10 个热带气旋中,有 8 个达到台风及以上级别,其中有 4 个达到超强台风级别,整体强度偏强(表 1)。

从对 2023 年夏季西北太平洋和南海地区热带

气旋活动情况的预测来看,基本把握了其生成个数接近常年同期的特征,但对登陆的热带气旋个数预测与实况存在一定偏差(预测登陆个数接近常年,实况则明显偏少)。对热带气旋的强度和主要活动路径的预测与实况较为一致。从影响上来看,预测主要影响区域为华南东部沿海及华东,与实况基本相符。此外,早在 3 月底的预测中就明确指出“发生北上高影响台风的可能性较常年大”,实况来看,7 月 28 日,2305 号超强台风杜苏芮先是以西北行路径进入南海,之后转向北上,以强台风强度登陆福建晋江,强度为 1949 年以来登陆福建第二强,此后“杜苏芮”一路北上,虽强度迅速减弱,但其残余环流在华北等地造成了极端强降水过程并导致海河流域出现严重汛情(支蓉等,2024)。2306 号超强台风卡努虽未直接登陆我国,但其早期先是与“杜苏芮”相配合,为华北等地极端强降水的发生提供了充沛的水汽输送条件,之后强度减弱为热带低压并登陆辽宁,带来的较强风雨叠加东北地区前期降水,导致松花江流域、嫩江流域等防汛抗洪压力进一步增大。因此,在热带气旋的可能影响,尤其是对我国北方地区降水的影响方面,预测与实况也是比较一致的,取得了较好的服务效果。

表 1 2023 年夏季西北太平洋热带气旋活动预测评估
Table 1 Evaluation of prediction for tropical cyclone activities over the Western North Pacific in summer 2023

预测对象	预测情况	实况	评估
生成数/个	10~13	10	趋势一致
登录数/个	4~6	2	趋势不一致
路径	西行和西北行	西行和西北行	趋势一致
影响区域	华南东部沿海、华东、北方	华南、华东沿海、华北、东北	趋势一致
强度	偏强	偏强	趋势一致

2.5 气温

2023年夏季,全国平均气温为 22.0°C ,较常年同期(21.2°C)偏高 0.8°C ,位列1961年以来历史第2位,仅次于2022年同期。从空间分布特征来看(图3a),全国大部地区气温接近常年同期或偏高,其中华北东部、内蒙古西部、西北地区北部、新疆大部等地偏高达 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,局部偏高达 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$,我国北方地区偏暖整体较南方地区更为明显。此外,华北、黄淮等地高温日数异常偏多、极端性强,引起了广泛关注(支蓉等,2024);相反,2023年夏季我国长江流域的高温干旱现象与2022年夏季相比,极端性明显下降(章大全等,2023)。

由2023年3月底发布的气温预测(图3b)与实况(图3a)的对比可以清楚地看到,2023年夏季气温预测准确把握了我国大部气温较常年同期偏高的趋势,并明确指出,长江流域发生类似2022年大范围持续性高温干旱事件的可能性低。不足之处主要是对华北、黄淮区域性高温过程的极端程度估计不足。预测华北、黄淮夏季平均气温较常年同期偏高 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$,实况则是上述区域气温较常年同期偏高达 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$;且6—7月华北、黄淮区域性高温过程持续期间,多个国家气象站日最高气温及高温日数达到或突破历史极值,表现出较强的极端性,早期预测时对其估计不足。

3 2023年汛期降水预测先兆信号及应用

3.1 年代际尺度先兆信号

我国东部汛期主雨带位置存在显著的年代际变

化特征,这可能与来自海洋的年代际外强迫信号密切相关。例如,太平洋年代际涛动(Pacific decadal oscillation, PDO)被认为与东亚大气环流和中国气候变率存在紧密关联,当其处于负位相时,中纬度北太平洋异常偏暖而热带中东太平洋异常偏冷,往往导致夏季北太平洋上空海平面气压正异常而东亚大陆上空负异常,在这样的情况下,东亚夏季风往往表现出偏强的特征,西太副高偏北,有利于我国华北等地降水偏多(朱益民和杨修群,2003)。此外,大西洋最重要的海温模态,即大西洋年代际振荡(Atlantic multi-decadal oscillation, AMO)也被认为对整个北半球气候有重要影响,尤其对东亚地区而言,AMO可以通过年代际全球环流遥相关型影响东亚气候异常,以北大西洋异常暖、南大西洋异常冷为特征的AMO正位相将导致东南亚和东亚夏季风的增强(Lu et al, 2006)。除此之外,来自不同大洋的年代际信号之间还存在协同作用。当PDO和AMO异相时,北太平洋和北大西洋出现同号的海表温度异常,并将在欧亚中高纬地区激发一个纬向的遥相关波列,该遥相关波列沿着亚洲西风急流从北大西洋传播到东亚北部,相应地,在中国东部地区将倾向于表现出降水异常的经向三极子模态;而当PDO和AMO同相时,北太平洋和北大西洋的海表温度异常符号相反,来自北大西洋的遥相关波列仅沿大圆路径传播到中亚西部,导致印度夏季季风降水(Indian summer monsoon precipitation, ISMP)异常,ISMP异常反过来与PDO和AMO引起的遥相关波列相互作用,导致中国东部降水异常呈现出经向偶极子模态(Zhu et al, 2016; Yang et al, 2017; Zhang et al, 2018)。

监测显示,自2020年以来,PDO处于较为持续的负位相状态(图4a),2023年3月,结合模式对全

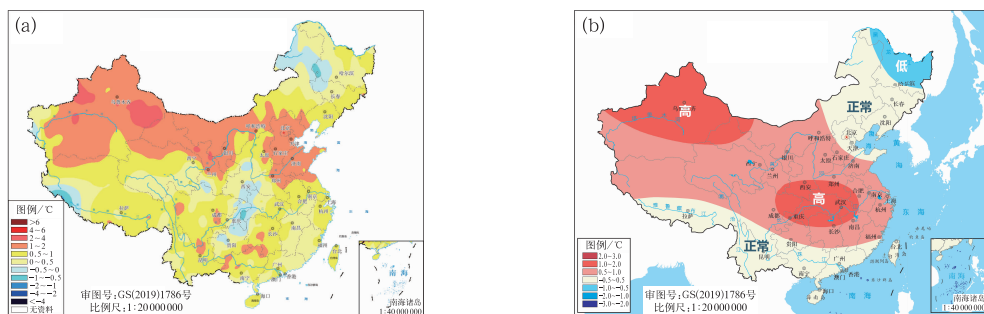


图3 2023年(a)夏季全国气温距平分布及(b)3月底发布的预测

Fig. 3 (a) Distribution of temperature anomaly in summer and (b) corresponding prediction issued at the end of March 2023

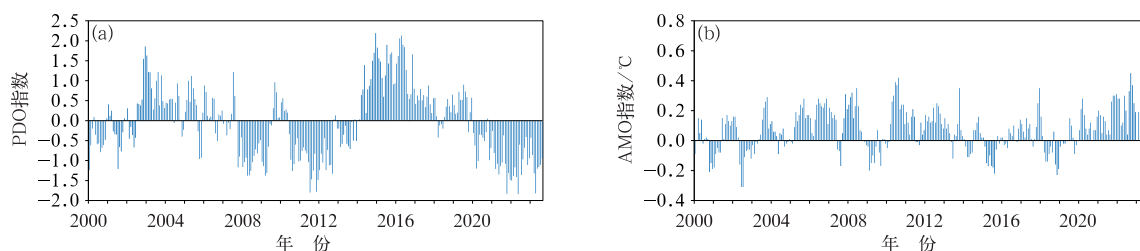


图 4 2000 年 1 月至 2023 年 8 月 (a)PDO 指数和 (b)AMO 指数逐月演变

Fig. 4 Monthly variation of (a) PDO and (b) AMO indices from January 2000 to August 2023

球海温的预测,并未发现 PDO 有明显的位相转折信号出现,再加上考虑到海温对大气的影响存在一定的滞后性,因此判断 2023 年夏季东亚气候异常受 PDO 负位相的影响概率较大。在这样的情况下,太平洋年代际海温外强迫信号将有利于东亚夏季风偏强,我国华北等地降水偏多,这一影响与 2023 年夏季实况相符。大西洋方面,AMO 自 2020 年以来维持较为持续的正位相特征(图 4b),同样有利于东亚夏季风偏强,我国东部汛期主雨带偏北。此外,即使同时考虑来自太平洋和大西洋的年代际海温异常信号的叠加影响,根据 Zhu et al(2016)、Yang et al(2017)及 Zhang et al(2018)的研究,在 PDO 负位相和 AMO 正位相同时出现的情况下,同样有利于我国北方地区降水偏多。但需要指出的是,在此情况下,我国东部夏季降水呈现出三极子型结构特征的概率较大,除了华北等地降水偏多外,长江中下游与华南分别更倾向于呈现降水偏少和偏多的特征,而这一统计特征与 2023 年夏季实况几乎相反,一方面说明各大洋海温影响叠加的复杂性,另一方面也可能与东亚夏季气候异常受不同尺度外强迫信号的综合影响有关。

3.2 年际尺度先兆信号

在我国短期气候预测中,主要考虑的年际尺度外强迫信号包括海温异常、积雪异常和极冰异常等。其中,对我国汛期降水预测而言,海温异常往往是最重要、最强的外强迫信号。

赤道中东太平洋于 2020 年 8 月至 2021 年 3 月经历了一次中等强度的拉尼娜事件,此后海温一直维持较常年同期偏冷的状态,并于 2021 年 9 月至 2023 年 1 月再次发生弱拉尼娜事件。作为年际气候变化中的最强信号,赤道中东太平洋延续 3 年左右的冷水状态引起了广泛关注,这种长期持续的拉尼娜通常被称为多年拉尼娜事件(Cole et al,2002),

其对全球气候异常的影响也被广泛探讨(Okumura et al,2017;Jong et al,2020;Huang et al,2022)。具体至对东亚夏季气候异常的影响,已有研究则表明,第一个夏季,我国南方降水正异常,但其显著程度较低;第二个夏季,我国南方降水则表现出较明显的以偏少为主的特征(Raj Deepak et al,2019;Huang et al,2022;赵俊虎等,2022;章大全等,2023)。由此可见,多年拉尼娜延续期间,其对每一个夏季东亚气候异常的影响可能存在显著差异,因此需要分别讨论。据此,国家气候中心在 2023 年汛期预测过程中,对持续拉尼娜事件中第一、第二和第三个夏季降水异常空间特征及差异进行了统计分析。从图 5a,5b 可以看出,第一个拉尼娜次年夏季,我国中东部降水整体表现出长江及其以北地区偏多、华南等地偏少的特征,主要降水落区集中在江淮附近;第二个拉尼娜次年夏季,我国东部雨带较第一个拉尼娜次年夏季有较明显的北抬,降水偏多的区域主要位于华北、东北等地。在进行预测的过程中,首先检验了 2021 年夏季和 2022 年夏季实况(图 5d,5e)与多年拉尼娜事件相关影响的统计特征之间的一致性,发现二者基本相符。由此认为,多年拉尼娜事件对夏季降水的不同影响确实存在,需要区分开进行讨论。因此对历史上类似的第三个拉尼娜次年夏季降水也做了典型年合成分析,并比较了其第一、第二个拉尼娜次年夏季降水的区别,对比图 5c 和图 5a,5b 可以发现,第三个拉尼娜次年夏季,我国东部地区降水呈现出较清晰的三极子型特征,华北至东北南部降水易偏多,但其强度较第一、第二个拉尼娜次年夏季有所减弱;与此同时,华南降水明显加强,其雨带强度甚至有超过北方雨带的可能,这也是将今年汛期降水预报图布局为以三极子型空间分布特征为主的重要原因。然而实况(图 5f)表明,2023 年夏季我国北方地区确实存在一条雨带,且强度弱于 2021 年和 2022 年夏季,似乎符合第三个拉尼娜次年夏季的降

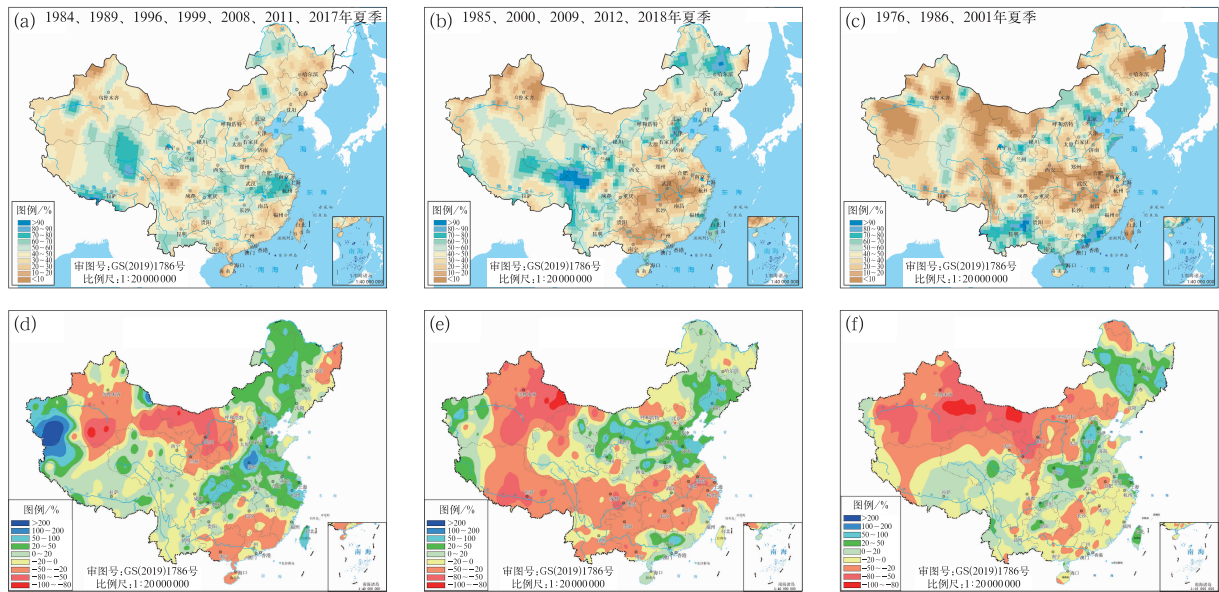


图5 (a)第一个、(b)第二个和(c)第三个拉尼娜次年夏季降水量正距平频次合成及(d)2021年、(e)2022年和(f)2023年夏季降水量距平百分率分布

Fig. 5 Composites of summer precipitation positive anomaly frequency in (a) the first, (b) the second and (c) the third La Niña decaying years and distribution of precipitation anomaly percentage in summer of (d) 2021, (e) 2022 and (f) 2023

水典型形态,但与此同时,华南地区降水却并未表现出明显偏多的特征,造成对华南等地降水预报的失败。使用夏季降水量距平百分率进行合成的结果(图略)与使用夏季降水量正距平频次进行合成的结果相似,图5a~5c中的极端大/小值区域与使用夏季降水量正距平频次进行合成时的高信度区域基本重合。

实际上,在2023年3月进行汛期预测时,不仅是太平洋海温异常信号指示夏季华南等地可能多雨,在对来自印度洋和大西洋的海温信号进行分析

时,也得到了类似的结论。

李崇银和穆明权(2001)研究表明,热带印度洋偶极子(tropical Indian Ocean dipole, TIOD)异常对东亚夏季气候异常有重要影响,模式对夏季海温的预测也在热带印度洋区域呈现出较清晰的正偶极子特征。考虑到印度洋偶极子和 ENSO 之间可能存在的相互影响(刘宣飞等,2008),对历史上的印度洋偶极子信号相似年进行了进一步细分,对 TIOD 正位相独立发生典型年进行了合成分析(图6a),结果表明, TIOD 正位相独立发生年有利于我国东部雨

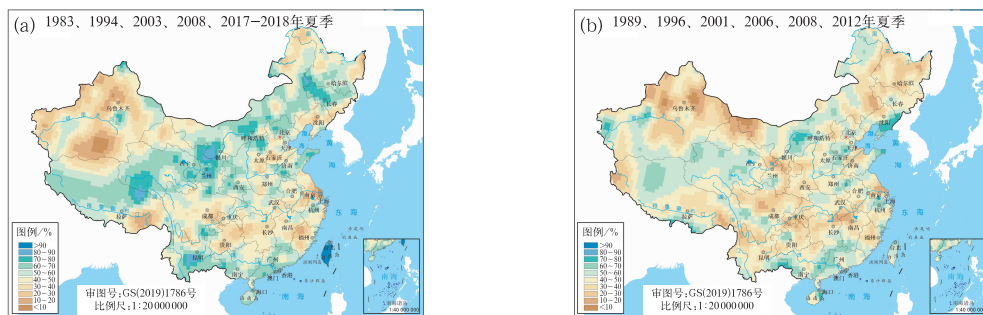


图6 (a)TIOD正位相年和(b)拉尼娜衰减且NAT为负位相年夏季降水量正距平频次合成

Fig. 6 Composites of summer precipitation positive anomaly frequency in years with (a) positive phase of TIOD and (b) decaying La Niña and negative phase of NAT

带出现三极子型特征,除了位于华北等地的北方雨带外,在华南也会出现一条比较明显的雨带。

北大西洋三极子(North Atlantic triple, NAT)也被认为是我国夏季降水预测的重要先兆信号来源(Zuo et al, 2013; Zhao et al, 2022),根据模式对大西洋区域夏季海温异常的预测结果,预计夏季 NAT 将呈现负位相为主的特征。由此,综合考虑拉尼娜次年及大西洋三极子负位相的综合影响,选取了历史相似典型年并进行了合成分析(图 6b),结果依然与根据赤道太平洋及热带印度洋海温异常先兆信号得到的结论类似,我国东部降水大体呈三极子型分布特征,除了华北附近有一条多雨带外,在华南也会有另外一条多雨带的存在。

除了来自海洋的外强迫信号,青藏高原的热力作用也被认为对东亚夏季气候异常存在较明显的影响。前期冬季高原积雪的多少被认为会通过下垫面热力效应影响下游东亚夏季风的强弱,进而对我国东部夏季降水产生影响(张顺利和陶诗言, 2001; Wang et al, 2017)。2022/2023 年冬季,青藏高原积雪面积较常年同期偏少,积雪日数更是位列 2010 年以来历史第三少。从前冬发生拉尼娜事件且青藏高原积雪明显偏少的角度挑选了历史相似年进行典型年合成分析(图 7),结果表明,夏季依然倾向于出现东部三极子型的降水异常,与从三大洋海温异常信号得出的指示意义相似。

3.3 华南降水预测失误原因分析

由上述分析可知,在 2023 年的汛期预测中,年际尺度常用的三大洋海温异常及青藏高原下垫面热力异常等先兆信号较为一致地指示夏季我国东部降水倾向于呈现三极子型特征,这些先兆信号对我国北方多雨的指示意义是正确的,是汛期预测能够准确抓住北方多雨带的重要原因;但与此同时,这些先兆信号对华南多雨带的指示意义则是一致且错误的。在汛期预测中,2023 年 3 月底预报“华东南部、华南中东部及西南地区南部降水偏多”,实况为上述区域降水整体较常年同期偏少约 1~2 成,尤其是华南降水预测偏差大。但若考虑 9 月上旬台风影响,用 6 月 1 日至 9 月 10 日降水代替夏季降水,则东南沿海降水偏多约 1~2 成,与预测的趋势一致。

造成华南降水预测失误的重要原因之一是大气

环流在对流层中层和低层的不匹配。支蓉等(2024)的分析指出,夏季平均西太副高较常年偏强、偏西,接近我国内陆。但同样的位置,对流层低层却呈现气旋式距平环流,这在历史上非常少见。从历史实况对比看,在西太副高偏强、偏西的年份往往低层为反气旋式距平风场,长江以南的华东、华南等地很难同时出现大面积少雨。但 2023 年这一低层气旋式距平环流西侧为北风距平分量,不利于热带水汽的向北输送,是 2023 年夏季南方沿海地区降水大面积偏少的最直接原因(图 8)。关于这一低层气旋式距平环流长时间维持的原因还需进一步分析。

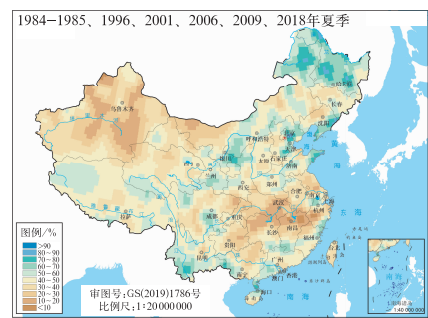
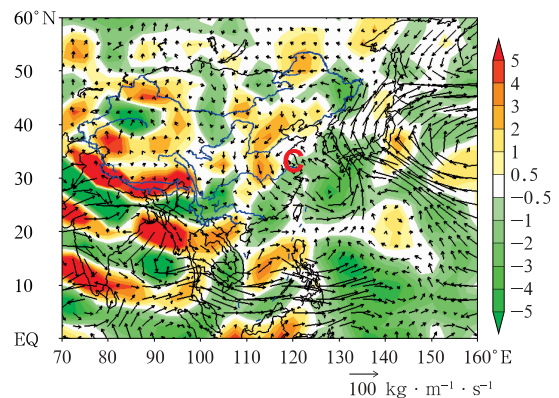


图 7 前冬发生拉尼娜且青藏高原积雪异常偏少年夏季降水量正距平频次合成

Fig. 7 Composites of summer precipitation positive anomaly frequency in years with the La Niña and less than normal snow cover in Tibetan Plateau in the previous winter



注:红色字母 C 表示气旋式距平环流中心。

图 8 2023 年夏季整层水汽通量(箭头)和水汽通量散度距平(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Vertically integrated water vapor flux (vector) and its corresponding divergence anomaly (colored, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in summer 2023

4 结论与讨论

2023年汛期预测较好地把握住了我国北方主雨带特征,对松花江流域、嫩江流域、海河流域可能出现的较重汛情做出了准确的预测预警。在台风预测方面,准确预测了夏季和盛夏、“七下八上”等重点时段生成和登陆的热带气旋个数偏少,主要路径以西行和西北行为主,同时北上高影响台风可能性大等趋势,取得了较好的服务效果。在气温预测方面,对夏季全国大部地区气温偏高的特征预测与实况一致,并明确指出,长江流域发生类似2022年大范围持续性高温干旱事件的可能性低。预测过程中,综合考虑了年代际尺度影响因子和年际尺度外强迫信号,包括海温、积雪等。从预测效果来看,无论是在年代际尺度还是年际尺度上,各先兆预报因子均能对我国东部地区的北方雨带有正确的指示意义。

2023年汛期预测依然存在不足之处,尤其是对华南等地降水偏多的预测与实况出现较大偏差。汛期后的复盘分析表明,所有的因子在南方降水异常的指示意义上给出了一致错误的信息,几个业务预测中技巧相对较高的模式及其多模式集合的预报结果也同样在南方降水预测上给出与诊断预测类似的偏差,最终导致对南方降水形势的判断与实况不符。

通常华南气候预测的技巧要高于北方,但如此多因子的先兆信号和模式均在该地区出现类似的指示意义错误极为少见。2023年夏季我国中东部地区雨型分布并不典型,与前人研究中提出的几类经典雨型(赵振国,1999;孙林海等,2005)均存在较大差异,这也给预测增加了极大的难度,其潜在原因和物理机制等还需在未来进一步深入探讨。此外,西太副高区域附近对流层中、低层环流场出现明显不匹配的原因以及动力模式对南方降水预测出现较大误差的来源等问题也需要在今后深入分析。

参考文献

陈丽娟,袁媛,杨明珠,等,2013.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, 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):521-532(in Chinese).

黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等,2006.我国旱涝气候灾害的年代际变化及

其与东亚气候系统变化的关系[J].大气科学,30(5):730-743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al, 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system[J]. Chin J Atmos Sci, 30(5):730-743(in Chinese).

李崇银,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).

李维京,2012.现代气候业务[M].北京:气象出版社. Li W J, 2012. Modern Climate Operation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

刘宣飞,袁慧珍,管兆勇,2008. ENSO对IOD与中国夏季降水关系的影响[J].热带气象学报,24(5):502-506. Liu X F, Yuan H Z, Guan Z Y, 2008. Effects of ENSO on the relationship between IOD and China summer rainfall[J]. J Trop Meteor, 24(5):502-506(in Chinese).

刘芸芸,李维京,艾税秀,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).

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,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).

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 Centre[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):533-543(in Chinese).

章大全,袁媛,韩荣青,2023.2022年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,49(1):110-121. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022[J]. Meteor Mon, 49(1):110-121(in Chinese).

张庆云,陶诗言,陈烈庭,2003.东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流[J].气象学报,61(4):559-568. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T, 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia[J]. Acta Meteor Sin, 61(4):559-568(in Chinese).

- 张顺利, 陶诗言, 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究[J]. 大气科学, 25(3): 372-390. Zhang S L, Tao S Y, 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 25(3): 372-390 (in Chinese).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 章大全, 2022. 2021 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 48(1): 107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1): 107-121 (in Chinese).
- 郑振国, 1999. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京: 气象出版社: 68-72. Zhao Z G, 1999. Summer Drought and Flood and Their Associated Circulation Anomalies over China[M]. Beijing: China Meteorological Press: 68-72 (in Chinese).
- 郑国光, 2019. 中国气候[M]. 北京: 气象出版社. Zheng G G, 2019. Climate in China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 支蓉, 高辉, 孙冷, 2024. 2023 年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 50(1): 115-125. Zhi R, Gao H, Sun L, 2024. Characteristics and possible causes of climate anomalies over China in summer 2023[J]. Meteor Mon, 50(1): 115-125 (in Chinese).
- 朱益民, 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).
- Cole J E, Overpeck J T, Cook E R, 2002. Multiyear La Niña events and persistent drought in the contiguous United States[J]. Geophys Res Lett, 29(13): 25-1-25-4.
- Han T T, Zhang M H, Zhu J W, et al, 2021. Impact of early spring sea ice in Barents Sea on midsummer rainfall distribution at Northeast China[J]. Climate Dyn, 57(3): 1023-1037.
- Huang G S, Wang R, Liu J P, et al, 2022. Seasonally evolving impacts of multiyear La Niña on precipitation in southern China[J]. Front Earth Sci, 10: 884604.
- Jong B T, Ting M F, Seager R, et al, 2020. ENSO teleconnections and impacts on U. S. summertime temperature during a multiyear La Niña life cycle[J]. J Climate, 33(14): 6009-6024.
- 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.
- 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.
- Okumura Y M, DiNezio P, Deser C, 2017. Evolving impacts of multiyear La Niña events on atmospheric circulation and U. S. drought[J]. Geophys Res Lett, 44(22): 11614-11623.
- 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.
- 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, 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.
- 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 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.
- 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.
- 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(3): 861-878.
- Zhu Y L, Wang T, Ma J H, 2016. Influence of internal decadal variability on the summer rainfall in eastern China as simulated by CCSM4[J]. Adv Atmos Sci, 33(6): 706-714.
- 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: 侯翠梅)