

吕卓卓,赵俊虎,贾小龙,等,2024.2024 年春季中国东部降水季节内异常特征及成因分析[J].气象,50(10):1268-1280. Lyu Z Z,Zhao J H,Jia X L,et al,2024. Features and possible causes of intraseasonal precipitation anomalies over eastern China in spring 2024[J]. Meteor Mon,50(10):1268-1280(in Chinese).

2024 年春季中国东部降水季节内 异常特征及成因分析*

吕卓卓 赵俊虎 贾小龙 柯宗建

中国气象局气候预测研究重点开放实验室,国家气候中心,北京 100081

提 要: 2024 年春季(3—5 月)我国平均降水量为 163 mm,为 1961 年以来历史同期第六多,4—5 月东部地区旱涝灾害并重,华南和江南大部降水较常年同期偏多,尤其是华南大部降水偏多 5 成以上,多次暴雨过程造成部分地区发生洪涝;而黄淮、江淮北部降水显著偏少,春季后期干旱迅速发展。春季“华南涝、黄淮旱”的形成与东亚大气环流关键系统异常及其季节内阶段性变化密切相关。4 月异常偏强、偏南的西北太平洋副热带高压和低层 850 hPa 偏强的西北太平洋反气旋为华南和江南提供了有利的水汽输送条件,导致南方地区发生多次强降水过程;而黄淮干旱主要受 4—5 月持续偏强的朝鲜半岛-日本海高压(小笠原高压)和偏南的西北太平洋副热带高压共同影响。此外,春季 El Niño 衰减和热带印度洋海温异常偏暖有助于激发异常偏强的西北太平洋反气旋,是我国南方强降水发生的重要海洋外强迫背景。

关键词: 春季气候异常,东部降水,西北太平洋反气旋,小笠原高压,El Niño,热带印度洋

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.081601

Features and Possible Causes of Intraseasonal Precipitation Anomalies over Eastern China in Spring 2024

LYU Zhuozhuo ZHAO Junhu JIA Xiaolong KE Zongjian

National Climate Centre, CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, Beijing 100081

Abstract: In the springtime (March—May, MAM) of 2024, the average precipitation in China was 163 mm, ranking the sixth most precipitation since 1961. During April—May, eastern region of China experienced both severe droughts and floods. South China and most of Jiangnan Region experienced significantly above-average rainfall, with most parts of South China receiving rainfall more than normal by over 50%. Thus, multiple times of torrential rain events led to flood disasters in some areas. Conversely, northern Jianghuai and Huanghuai regions had notably below-average precipitation, which caused the rapid development of drought in later spring. The phenomenon of “floods in South China and droughts in Huanghuai Region” was mainly influenced by atmospheric circulation anomalies in East Asia and their intraseasonal variation. The abnormally strong and southward western North Pacific subtropical high (WPSH) and extremely strong anomalous western North Pacific anticyclone (WNPAC) in April provided favorable conditions for moisture transport, leading to frequent occurrence of intense precipitation events in southern China. The drought

* 国家重点研发计划(2023YFC3007700)、国家自然科学基金项目(42075017)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J002、CXFZ2023J010)、中国气象局重点创新团队(CMA2023ZD03)、国家气候中心创新团队(NCCCXTD003)和国家电网有限公司重点科技项目(5200-202323473A-3-2-ZN)共同资助

2024 年 7 月 13 日收稿; 2024 年 8 月 16 日收修定稿

第一作者:吕卓卓,主要从事短期气候预测研究. E-mail:lvzhuozhuo_xy@163.com

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

over Huanghuai Region was primarily dominated by persistent strong high pressure system near the Korean Peninsula-Japan Sea (Bonin high) in April–May, along with a southward shift of the WPSH. Additionally, the attenuation of El Niño and abnormally warm sea surface temperature in the tropical Indian Ocean contributed to the activation of abnormally strong WNPAC, which built the important oceanic external forcing background for heavy rainfall in southern China.

Key words: abnormal spring climate, precipitation in eastern China, western North Pacific anticyclone (WNPAC), Bonin high, El Niño, tropical Indian Ocean

引 言

2024 年春季,我国气温大范围偏高,降水时空分布不均,4—5 月东部地区旱涝灾害频发。一方面,华南地区强降水过程偏多、程度偏重。据应急管理部统计,4 月、5 月南方强降水及其引发的洪涝和地质灾害分别造成 159.8 万、91.1 万人不同程度受灾,直接导致的经济损失达 131.8 亿元,其中 4 月的灾害损失为近 10 年同期最重(https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/t20240517_488741.shtml)。另一方面,春季后期黄淮至江淮北部一带降水持续偏少,干旱程度持续加重,土壤墒情不足,给农业生产带来极其不利的影响。因此,有必要对今年春季的气候特征和旱涝异常成因开展复盘总结研究,可为今后的春季气候预测提供参考依据,助力防灾减灾气象服务和社会经济发展。

已有众多学者对我国春、夏季降水变率与东亚季风、西北太平洋副热带高压(以下简称西太副高)、厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-southern oscillation, ENSO)、印度洋和大西洋海温等的关系进行了广泛研究(王会军等,2002;Wang and Zhang,2002;温之平等,2007;Xiang et al,2013;刘芸芸和高辉,2021)。ENSO 能够通过对流耦合的罗斯贝波和西北太平洋海温负异常之间的热动力正反馈过程,调节西太副高和西北太平洋反气旋(以下简称西太反气旋)的强度和位置,进而影响我国降水(Wang et al,2000;Huang et al,2012)。刘屹岷等(2016)指出,在 El Niño 衰减年春季,El Niño 可以通过沃克环流和印度洋东风开尔文波,增强江南地区西南气流,造成江南春雨总量异常偏多。Zhang and Sun (2023)指出,ENSO 相关的热带太平洋春季海温异常强度的年代际减弱能够导致北太平洋西部反气旋强度减弱、位置南移,进而导致我国东部春季雨带异常的年代际迁移。Zhang et al(2018)的研究表明,

我国北方持续性干旱的形成同样与 ENSO 的影响密切相关,其中中纬度北大西洋的低层气旋式环流与高层西风急流的配合起到关键的桥梁作用。此外,热带大气季节内振荡、高原热力条件、中高纬大气环流模态的变化等都可能影响到季风进程和强弱,进而影响我国春季降水异常的时空分布(Wang et al,2024;Jia et al,2021;Zhang et al,2021;李多和刘芸芸,2022)。由此可见,导致我国春季旱涝异常的因素及其影响机制较为复杂。

本文将在分析 2024 年春季我国气候特征的基础上,重点研究 4—5 月“华南涝、黄淮旱”的可能成因,旨在回答以下科学问题:(1)2024 年春季我国东部旱涝异常及其季节内变化的直接原因是什么?即影响降水的关键环流系统及其配置、异常程度和季节内变化如何?(2)2024 年春季处于 El Niño 事件的衰减期,且冬、春季热带印度洋和热带北大西洋海温异常偏暖,热带三大洋海温的异常对我国东部旱涝异常的形成是否具有显著影响?

1 资料和方法

本文所使用的数据资料包括:

(1)国家气象信息中心提供的“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)”,该数据集进行了较为严格的质量控制,改善了国-省存档资料的不一致性问题,数据质量和台站数量与以往的降水观测数据相比有了显著提高(任芝花等,2012;2015)。本研究选取中国 2474 个台站的逐日气温和降水观测资料,数据时段为 1961 年 1 月 1 日至 2024 年 5 月 31 日。

(2)美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)联合提供的全球逐日再分析资料(Kalnay et al,1996),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(3)美国国家海洋和大气管理局提供的高精度最优插值全球海温逐月资料(NOAA_OISSTv2,

highres; Reynolds et al, 2007), 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时段为 1981 年 12 月至 2024 年 5 月。

本文用到的环流指数和定义包括:

(1) 由国家气候中心提供的西太副高强度(WPSHI)指数和西段脊线位置(WPSHWR)指数, 其中 WPSHI 指数定义为在 $10^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $110^\circ \sim 180^\circ \text{E}$ 范围内, 500 hPa 高度场上所有大于或等于 5880 gpm 的格点所围成的面积与该格点位势高度值减去 5870 gpm 差值的乘积的总和; WPSHWR 指数定义为在 $10^\circ \sim 50^\circ \text{N}$ 、 $110^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ 范围内, 5880 gpm 等值线所包围的副热带高压体内纬向风为零, 且纬向风经向梯度大于零的特征线所在纬度位置的平均值(刘芸芸等, 2012)。

(2) 西北太平洋异常反气旋强度(WNPAC)指数, 为 $5^\circ \sim 25^\circ \text{N}$ 、 $115^\circ \sim 150^\circ \text{E}$ 区域平均的 850 hPa 流函数(Zuo et al, 2019)。

(3) 小笠原高压(BH)指数, 为 $32^\circ \sim 48^\circ \text{N}$ 、 $120^\circ \sim 150^\circ \text{E}$ 区域平均的 500 hPa 位势高度(Enomoto et al, 2003)。

本文部分图形、环流和海温指数出自国家气候中心的“气象灾害影响评估系统”和“新一代气候监测预测分析系统(CIPAS 3.0)”, 春季主要天气气候事件部分内容来自国家气候中心《全国气候影响评价》(国家气候中心, 2024a; 2024b; 2024c)。

本文用到的分析方法主要有线性相关、回归分析、合成分析等, 显著性水平检验方法为 t 检验(黄嘉佑, 2000)。文中春季指北半球春季(3—5 月), 各要素的气候平均态定义为 1991—2020 年平均值。

2 2024 年春季我国气候特征

2.1 气温

2024 年春季, 全国平均气温为 12.3°C , 较常年同期(10.9°C)偏高 1.4°C , 为 1961 年以来历史同期最高(图 1a)。从空间分布来看, 全国大部地区气温较常年同期偏高 0.5°C 以上, 其中东北南部、内蒙古大部、华北、华东大部、华中大部、华南西部、西南地区东部、西北地区大部、新疆大部、西藏北部等地气温偏高 $1 \sim 2^\circ \text{C}$, 内蒙古中西部、华北西部、黄淮大部、西北地区北部、新疆东部部分地区偏高 2°C 以上

(图 1b)。

春季各月气温均较常年偏高, 气温季内变化幅度较小。3 月和 4 月, 我国大部分地区气温偏高, 尤其是 4 月为 1961 年以来历史同期第一; 5 月, 我国中东部气温距平呈现“北暖南冷”的空间分布, 长江以北大部地区偏暖, 华南大部、西南地区南部、东北大部等地气温较常年同期偏低(图略)。在春季平均气温明显偏高的背景下, 共有 12 次冷空气过程影响我国, 较历史同期偏多 3.3 次, 但强度偏弱, 总体降温幅度不大, 气温季内变化幅度较小(图 1c)。

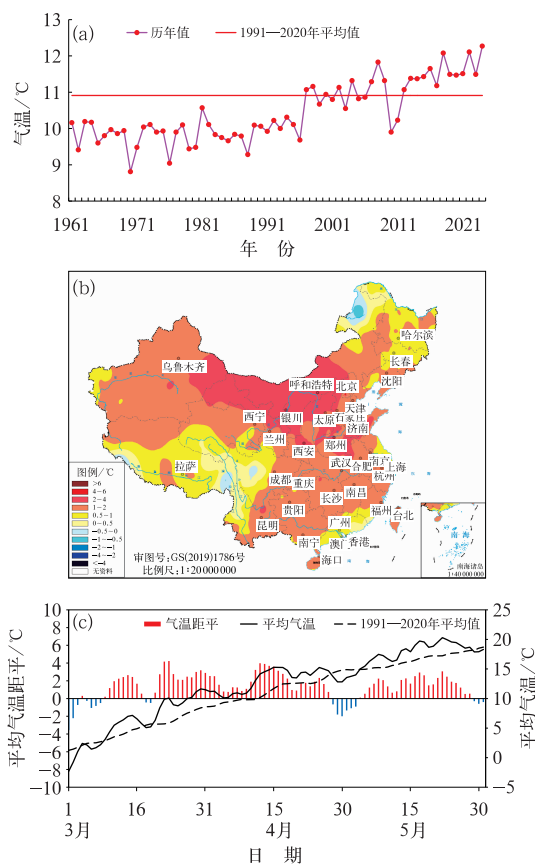


图 1 (a) 1961—2024 年春季全国平均气温历年变化, (b, c) 2024 年春季全国 (b) 平均气温距平分布, (c) 平均的逐日气温、气温气候态和气温距平序列

Fig. 1 (a) Time series of mean air temperature over China in spring (March–May, MAM) during 1961–2024, (b) distribution of air temperature anomaly over China in MAM 2024, (c) daily time series of air temperature and its anomaly and climatology averaged over China in MAM 2024

2.2 降 水

2024 年春季,全国平均降水量为 163 mm,较常年同期偏多 13.3%,为 1961 年以来历史同期第六多(图 2a)。从空间分布看,呈现南北两条多雨带,北方多雨带位于西北地区中东部经华北中北部至东北,南方多雨带位于西南地区东部、江南大部和华南,其中东北地区中南部、内蒙古东部、华北地区西部、华南大部、西藏中部、西南地区东部、西北地区东部等地降水量偏多 5 成至 1 倍,局部偏多 1 倍以上,黄淮、江淮北部、江汉、云南中东部、内蒙古中西部、西北地区西部等地降水普遍偏少 2~8 成,局部偏少 8 成以上(图 2b)。取黄淮主要降水偏少区降水距平百分率的区域平均定义黄淮降水指数(范围:32.5°~36.5°N、112°~120°E;图 2b 黑色矩形框内),同时取广东、广西两地平均降水距平百分率定义华南降水指数。除图 2c 以外,下文其余分析对黄淮降水指数进行了反号处理,因此华南(黄淮)降水指数的正值表征降水偏多(偏少),负值表示降水偏少(偏多)。图 2c 给出了两个标准化降水指数的历年变化序列。2024 年春季,黄淮降水偏少超过一个标准差,而华南降水偏多超过两倍标准差,广东、广西两地累计降水量达 718.5 mm,为 1961 年以来历史同期最高值。

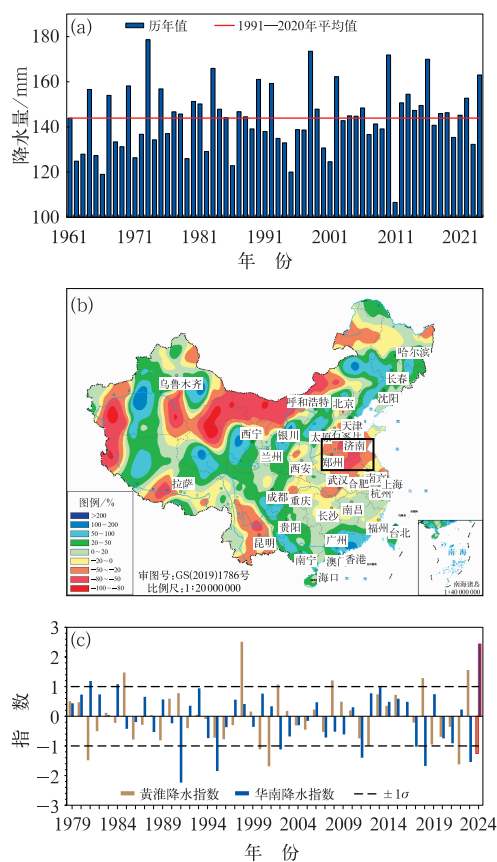
春季逐月降水的空间分布显示,降水具有明显的季内变化特征。3 月、4 月和 5 月的全国平均降水距平百分率分别为 -18.3%、65.0% 和 -1.0%。3 月,我国降水整体偏少,中东部降水格局呈现“北多南少”的分布特点,长江流域以北大部地区降水偏多,以南大部地区降水偏少。其中,内蒙古东北部、东北西部、华北西南部、黄淮西部、江淮、西北中东部、新疆东部等地降水较常年同期偏多 2 成至 1 倍,部分地区偏多 1 倍以上;内蒙古中西部、江南、华南北部、西南地区中部和南部、西藏中西部、新疆西部等地偏少 2 成以上,局部偏少 8 成以上(图 3a)。4 月,我国降水整体偏多,降水量达到 1961 年以来历史同期第二位,除了内蒙古东部、黑龙江南部、黄淮中东部、江淮、云南、新疆南部等地降水偏少以外,全国其余大部地区降水偏多。其中,内蒙古中部、东北地区南部、华北西部和北部、江南大部、华南北部和东部、西南地区北部和东部、西藏大部、西北地区中东部、新疆北部等地降水偏多 5 成以上,广东东部等地偏多 2 倍以上(图 3b)。5 月,我国中东部大部地

区降水转为偏少,黄淮和江淮持续偏少,而广东南部、广西北部和贵州西部等地持续偏多(图 3c)。

2.3 主要天气气候事件

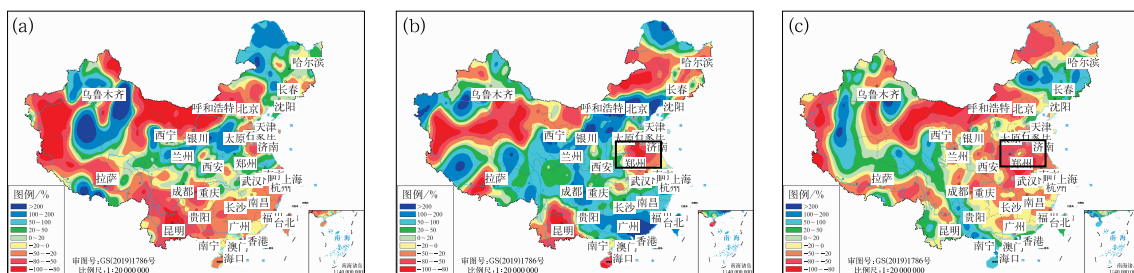
2024 年华南前汛期于 4 月 4 日在福建首先开始,较常年(4 月 9 日)偏早 5 d,4 月 4 日至 5 月 31 日,华南地区平均降水量为 586.5 mm,较常年同期偏多 60.7%。南海夏季风于 5 月第 6 候爆发,爆发日期较常年(5 月第 4 候)偏晚 2 候。

春季我国共发生 14 次区域暴雨过程,较常年同期偏多 3.8 次。其中,4 月发生 8 次区域暴雨过程,有 7 次发生在南方,较常年同期(3.3 次)偏多 3.7 次。



注:图 b 黑色矩形框为 32.5°~36.5°N、112°~120°E 范围。

图 2 (a)1961—2024 年春季全国平均降水量历年变化,(b)2024 年春季全国降水距平百分率分布,(c)标准化的 1979—2024 年春季黄淮降水指数和华南降水指数历年变化
Fig. 2 (a) Time series of mean precipitation over China in MAM during 1961—2024, (b) distribution of precipitation anomaly percentage over China in MAM 2024, (c) standardized time series of mean precipitation indices over Huanghuai Region and South China in MAM during 1979—2024



注:图 b,c 黑色矩形框为 $32.5^{\circ}\sim 36.5^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围。

图 3 2024 年(a)3 月,(b)4 月,(c)5 月全国平均降水量距平百分率分布

Fig. 3 Distribution of mean precipitation anomaly percentage over China in (a) March, (b) April and (c) May 2024

4 月 2—7 日,江南南部、华南东部等地遭遇持续性强降水天气,累计降水量普遍超过 100 mm,本次暴雨过程为 1961 年以来同期第八强。4 月 19—21 日,华南大部遭遇较强暴雨过程,综合强度位列近 10 年同期(3—4 月)第二,仅次于 4 月 2—7 日的暴雨过程。5 月,我国出现 5 次暴雨过程,均发生在南方,接近南方常年同期(5.1 次)。

春季南方强对流天气频发,局地影响较重。全国共出现 16 次强对流天气过程,其中 12 次为风雹降水混合型,具有点多面广、突发性和极端性强的特

点,湖南、福建、广东、广西、贵州、四川等地灾害影响较重。其中 4 月 1—4 日和 4 月 29 日至 5 月 1 日的两次强对流过程达橙色预警。

春季我国区域性、阶段性气象干旱明显(图 4)。3 月,西南地区冬春连旱持续,云南东北部和贵州西北部的部分地区达到重旱级别(图 4a)。4 月,云南干旱持续发展,至 4 月 17 日重旱及以上、特旱面积均达到峰值,分别为 32.6 万 km^2 、13.0 万 km^2 (图 4b)。4 月中旬末期开始,受降雨过程影响,西南部分地区气象干旱明显缓解。同时,黄淮地区的

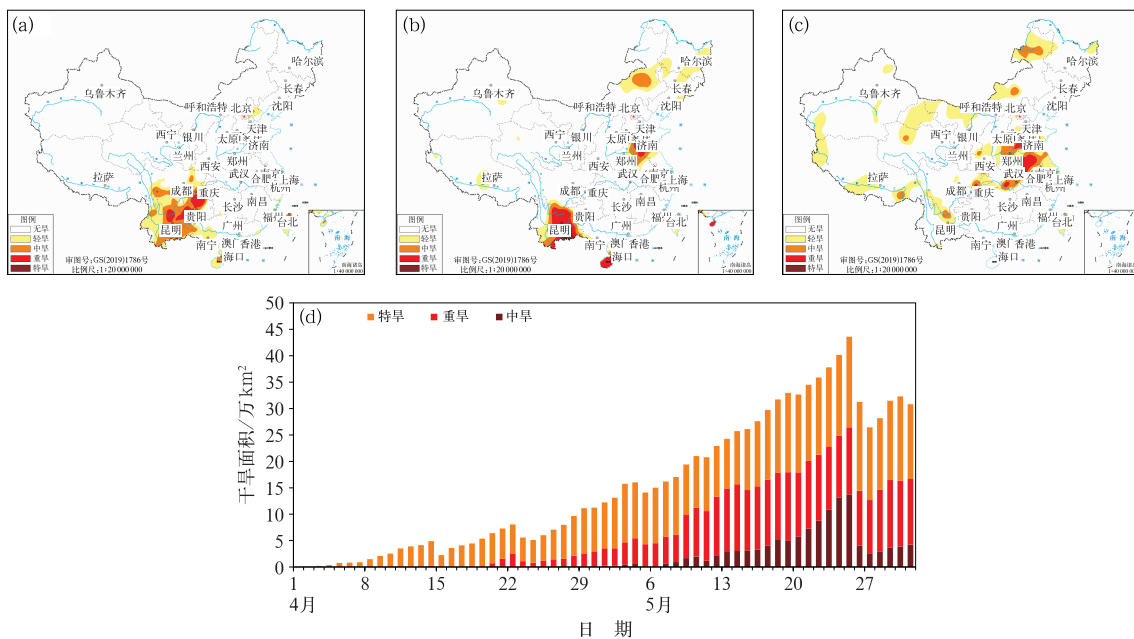


图 4 2024 年(a)3 月 31 日,(b)4 月 30 日,(c)5 月 31 日的全国气象干旱综合监测和 (d)4 月 1 日至 5 月 31 日鲁豫皖苏鄂干旱面积变化

Fig. 4 Distribution of meteorological drought condition over China on (a) 31 March, (b) 30 April, (c) 31 May, and (d) variation of meteorological drought areas in Shandong, Henan, Anhui, Jiangsu and Hubei provinces from 1 April to 31 May 2024

旱情开始露头并发展。5 月,鲁豫皖苏鄂等地气象干旱持续加剧(图 4c),5 月 25 日,上述省份干旱面积达到本次干旱过程的峰值,其中中旱及以上面积为 43.6 万 km^2 ,特旱面积达 13.7 万 km^2 (图 4d)。

综上可见,2024 年春季我国降水的季内时空变化非常显著,由此引发的气象灾害也具有明显的阶段性、区域性特征,这与春季大气环流的季节内变化和调整密不可分。下文将从大气环流的阶段性变化和可能的外强迫因子入手,对 2024 年春季“华南涝、黄淮旱”的成因进行分析。

3 东亚大气环流异常特征及其对旱涝异常的影响

3.1 华南降水异常偏多的关键影响环流及成因分析

2024 年春季平均 500 hPa 位势高度距平场(图 5a)显示,欧亚中高纬地区环流呈“西低东高”型分布,乌拉尔山以东至贝加尔湖以西位势高度相对偏低,贝加尔湖以东的东北亚和东亚区域位势高度为正距平,我国北方地区位势高度正异常明显,中东部以偏南风异常为主。在亚洲中低纬度,西太副高的范围较气候态明显加强西伸,其面积和强度均远高于气候态同期水平。与 500 hPa 高度场异常相对

应,由 850 hPa 的水平风距平场上可以看出,西太反气旋异常偏强,其西南侧外围偏西南风气流的位置位于我国华南至江南南部一带,为春季我国南方雨带的形成提供了重要的水汽输送条件。这种环流形势总体上有利于我国春季气温偏高、降水偏多,即“暖湿”型气候异常(图 1b 和图 2b)。

前文提到,春季我国降水的阶段性变化特征异常突出,这与大气环流的月际变化密切相关。3 月,西太副高偏强,西太反气旋中心主体位置位于洋面,我国南方盛行偏西风;孟加拉湾(以下简称孟湾)北部存在东风异常(图 5b),使得南海和孟湾向我国南方地区的水汽输送条件偏差,因此 3 月我国江南和西南地区的降水较常年同期明显偏少(图 3a)。4 月,西太副高面积持续偏大、强度持续偏强,西太反气旋加强、中心向北移动,其西北侧的偏西南风异常,随之移至华南上空(图 5c),强盛的南海水汽输送通道在我国华南东部到江南南部一带建立。此外,孟湾北部至印度半岛东部的反气旋环流在 4 月发展加强,其北侧的西风异常有助于向东的水汽输送通道建立,使得孟湾向我国南方的水汽输送加强,造成我国南方发生多次强降水过程,降水较常年同期明显偏多。5 月,西太副高位置异常偏南,西太反气旋强度消减(图 5d),反气旋位置和强度的变化使得前期有利于我国中东部降水的水汽输送条件不再维持,并且孟湾北侧被东风异常控制,不利于孟湾水

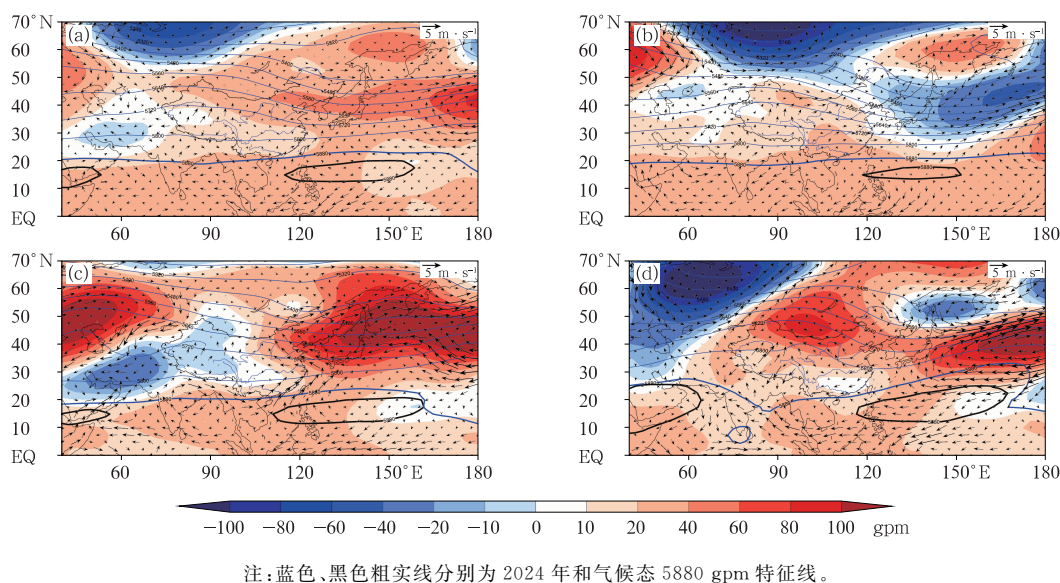


图 5 2024 年(a)春季,(b)3 月,(c)4 月和(d)5 月的 500 hPa 位势高度(等值线,单位:gpm)及其距平(填色)和 850 hPa 风场距平(风矢)

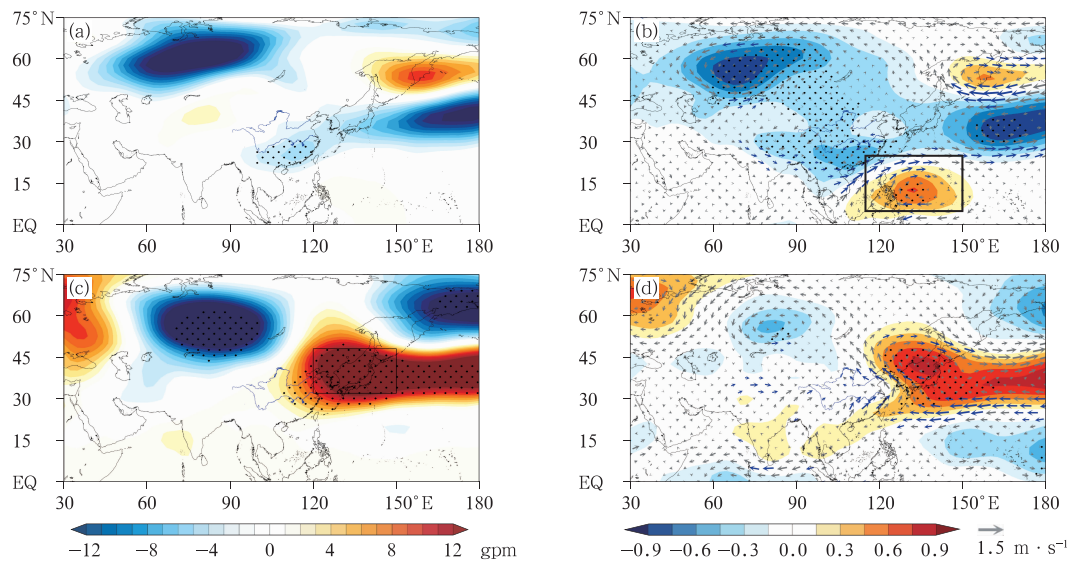
Fig. 5 The 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and its anomaly (colored), and 850 hPa wind anomaly (wind vector) in (a) MAM, (b) March, (c) April and (d) May 2024

汽北上输送至我国,因此降水范围较 4 月明显缩小、强度减弱(图 3c)。

为了明晰影响降水异常的关键环流因子,图 6a,6b 给出了 4—5 月华南降水指数回归的同期环流异常场。结果表明,位于江南至华南上空偏弱的高度异常对应华南降水异常偏多(图 6a),华南降水主要受到西太反气旋的显著影响,降水指数与反气旋外围西南风异常存在显著正相关关系(图 6b)。由前文分析可知,2024 年 4—5 月西太副高和西太反气旋的中心位置、强度等特征与回归场非常吻合,有助于为我国南方地区提供充沛的水汽。基于回归的西太反气旋显著异常区域定义 WNPAC 指数,并采用 WPSHWR 指数、WPSHI 指数分别表征西太副高的西段脊线位置和强度,表 1 给出了春季平均

和各月的降水指数与关键环流指数的相关系数。结果表明,4 月华南降水指数与 WNPAC 指数的相关性较好,西太反气旋强度的增强会导致 4 月华南降水的显著增加。对于整季华南降水,相关系数最显著的是 WPSHWR 指数,二者的相关系数在春季和各月都达到了 0.05 显著性水平,3—5 月平均和 3 月、4 月的相关系数均在 0.40 以上(显著性水平超过 0.01);而华南降水指数与 WPSHI 指数仅呈弱的正相关,但不显著。这表明相比高压体的绝对强度,副高西段脊线的南北位置摆动才是影响华南春季降水异常的关键因素。

结合环流与降水的相关关系和关键环流指数的季内变化(图 7),可以更加清晰地理解 2024 年春季我国华南降水异常的阶段性变化。图 7a,7b 给出了



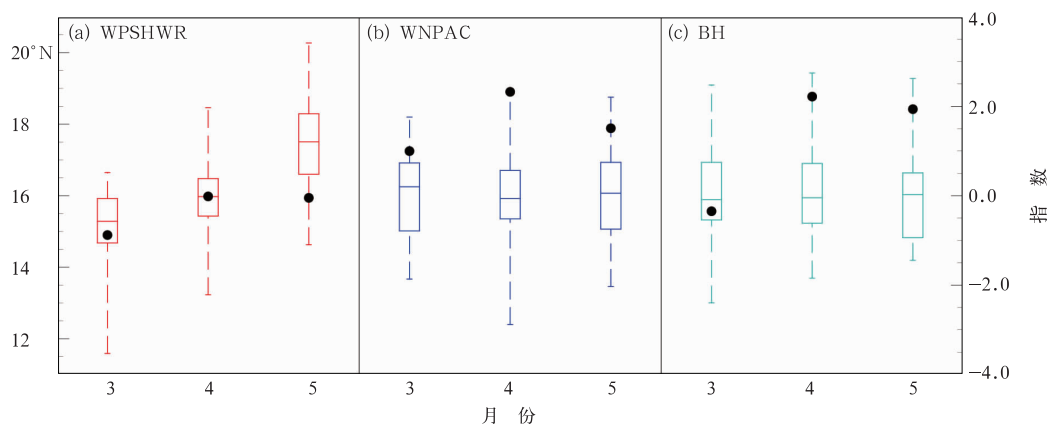
注:打点区域和蓝色粗箭头表示通过了 0.05 显著性水平检验;图 b,c 黑色矩形框范围分别为 5°~25°N、115°~150°E,32°~48°N、120°~150°E。

图 6 2024 年 4—5 月(a,b)华南降水指数和(c,d)黄淮降水指数($\times -1$)回归的同期
(a,c)500 hPa 位势高度异常,(b,d)850 hPa 水平风场异常(风矢)和流函数异常(填色,单位: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 6 Regressed (a, c) 500 hPa geopotential height anomaly and (b, d) 850 hPa wind anomaly (wind vector) and stream function anomaly (colored, unit: $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) of (a, b) South China precipitation index, (c, d) Huanghuai precipitation index (multiplied by -1) in April–May 2024

表 1 1979—2024 年春季降水指数与同期环流指数的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between the monthly and averaged precipitation indices and the circulation indices in MAM during 1979–2024

月份	WPSHI 指数		WPSHWR 指数		WNPAC 指数		BH 指数	
	黄淮降水指数	华南降水指数	黄淮降水指数	华南降水指数	黄淮降水指数	华南降水指数	黄淮降水指数	华南降水指数
3—5 月	0.05	0.24	0.15	−0.53**	−0.09	0.28	0.59**	−0.13
3 月	0.09	0.21	0.13	−0.50**	−0.05	0.11	0.37*	0.06
4 月	0.06	0.23	0.18	−0.40**	−0.09	0.33*	0.31*	−0.07
5 月	−0.02	0.07	0.33*	−0.35*	0.12	0.11	0.39**	−0.05

注:*(**)表示通过了 0.05(0.01)显著性水平检验。



注:黑色圆点代表 2024 年的指数值;箱体上、下底分别代表 75% 和 25% 分位数,箱体中间的横线表示中位数,上、下边缘分别是 100% 和 0%。

图 7 1979—2024 年 3 月、4 月和 5 月 (a) 西太副高西段脊线位置 (WPSHWR) 指数 (左侧坐标), (b) 西北太平洋异常反气旋强度 (WNPAC) 标准化指数 (右侧坐标) 和 (c) 小笠原高压 (BH) 标准化指数箱线图 (右侧坐标)

Fig. 7 Box plots of monthly indices of (a) western ridge line of western Pacific subtropical high (WPSHWR, left coordinate), (b) standardized western North Pacific anomalous anticyclone (WNPAC, right coordinate) intensity and (c) standardized Bonin high (BH, right coordinate) in MAM during 1979—2024

1979—2024 年 3—5 月 WPSHWR 指数和 WNPAC 指数的年际变化箱线图。2024 年春季,西太副高西段脊线位置整体偏南,有利于华南降水在春季总体偏多。同时 WPSHWR 也存在一定的季节内变化 (图 7a),在华南降水显著偏多的 4 月,西段脊线位置接近常年,而西太反气旋强度达到了 1979 年以来的同期最高值 (图 7b)。这表明尽管西段脊线偏南是整个春季华南降水偏多的有利环流背景,但 4 月的极端强降水主要是由月内异常偏强的西太反气旋所导致。

3.2 黄淮降水异常偏少的关键影响环流及成因分析

春季后期黄淮地区持续性的“温高雨少”同样与大气环流的阶段性变化密切相关。2024 年 4 月,随着亚洲中高纬位势高度场向“西低东高”分布型的调整,高压异常控制了我国东北至日界线以西的西北太平洋区域 (图 5c)。5 月,贝加尔湖高压发展加强,并与西北太平洋上空的高压脊贯通,我国内蒙古至黄淮一带都处于大范围高压异常的控制之下 (图 5d),下沉增温效应导致区域内温度异常偏高,为干旱的发展提供了有利的高温背景。

为了更清楚地识别影响黄淮降水异常的关键环流因子,图 6c, 6d 给出了 4—5 月黄淮降水指数回归的环流异常场。可以看到,黄淮降水与沿朝鲜半岛至日本海一带纬向延伸的正位势高度场异常显著相关 (图 6c),同时对流层低层 850 hPa 存在显著的反气旋环流和流函数正异常信号 (图 6d)。这种异常

高压系统通常源于副热带高压带被割裂的一个单体,日本学者将其称作小笠原高压 (Enomoto et al., 2003),也有学者将其视为夏威夷高压或北太平洋高压的组成部分 (周盛, 2009)。本文将该区域 ($32^{\circ} \sim 48^{\circ} \text{N}$, $120^{\circ} \sim 150^{\circ} \text{E}$; 图 6c 黑色矩形框内) 平均的 500 hPa 位势高度场定义为小笠原高压 (BH) 指数。BH 是中高纬度和低纬度大气环流相互作用的重要纽带,其强度和位置调整可以影响夏季风系统的活动,进而影响到我国季风区的降水异常。在低纬度西太副高和反气旋环流的作用下,水汽从海洋向我国东部输送,如果 BH 势力过于强大,高压外围气流运动速度过快,不利于水汽在上岸陆地区域的停留 (Ninomiya and Akiyama, 1992; Enomoto, 2004)。这种环流影响与 2024 年 4—5 月的环流特点较为一致,黄淮至江淮大部一带处于反气旋外围,低层水平风场运动速度快,同时北方南下的冷空气偏弱,暖湿气流与冷空气交汇往往出现在华北北部至内蒙古中部一带。因此,持续不利的动力和水汽条件导致春季后期黄淮大部地区降水异常偏少。

由表 1 给出的黄淮降水指数与各关键环流指数的相关系数可见,无论在季节平均尺度上还是在春季各月,黄淮降水指数与 BH 指数的相关系数均达到了 0.05 的显著性水平,对于 3—5 月月平均和 5 月,相关系数更是分别达到了 0.59 和 0.39 (显著性水平超过 0.01)。5 月黄淮降水指数与 WPSHWR 指数存在着显著的相关,表明西太副高西段脊线位置偏南与黄淮降水偏少的关系密切;而 WPSHI 和 WNPAC 与黄淮降水的相关性不显著。由图 7c 给

出的 BH 指数各月强度变化可见, BH 在 3 月强度略弱,而在 4—5 月转为异常偏强,强度接近历史同期的最大值,从而导致黄淮干旱在春季后期加剧(图 4b,4c)。

4 热带海温异常特征及其对旱涝异常的可能影响

调制大气环流变化的重要外强迫因子之一是热带海温的异常。在月-季节尺度上,海温的变化可以通过海气相互作用和大气遥相关等途径影响大气环流和气候异常(Matsuno, 1966; Gill, 1980; Wang et al, 2000; Xiang et al, 2013; Zhang and Sun, 2023)。国家气候中心的监测表明,形成于 2023 年 10 月的 El Niño 事件于 2023 年 12 月达到峰值, Niño3.4 指数峰值大小为 2.0°C ,是一次中等强度的东部型 El Niño 事件,自 2024 年 1 月之后进入衰减阶段。图 8 给出了 2023/2024 年冬季、2024 年春季的海温距平以及二者的差值分布。2024 年春季,赤道中东太平洋暖海温依旧维持,但衰减趋势明显,在东太平洋赤道沿线降幅超过 1.2°C (图 8c);同时热带西南太平洋暖海温异常加强。在热带北印度洋

和热带北大西洋区域,暖海温异常持续维持(图 8b),热带印度洋全区一致海温模态(IOBW)异常偏强,IOBW 指数位列 1982 年以来历史同期第二高;热带北大西洋海温(NTASST)指数也达到了 1982 年以来春季的历史同期最高值(图 9)。这种海温演变体现了 El Niño 持续“放电”和热带印度洋、热带北大西洋的“充电”效应(Yang et al, 2007; Xie et al, 2009)。沿赤道($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$)平均的垂直纬向环流距平场上,热带印度洋至热带西太平洋上空异常上升的垂直结构较为稳定(图 10a),反映出热带大气对 El Niño 事件演变的响应。

西太反气旋和西太副高的异常偏强与热带关键区海温异常密切相关。图 11a 给出了 El Niño 衰减年份(春季 Niño3.4 指数低于前期冬季)环流异常的合成结果。结果表明,在 El Niño 衰减年份西太反气旋显著偏强(图 11a),我国南方大部地区降水正距平频次偏多(图 11b)。El Niño 事件能够通过沃克环流异常变化在热带印度洋激发出海温一致模态,这种海温一致型具有很好的季节持续性,能够触发暖性开尔文波东传并通过埃克曼抽吸作用在春夏季激发出西太反气旋异常(Xie et al, 2009; 2016; 袁媛等, 2016; 赵俊虎等, 2021)。从 2024 年春季的大

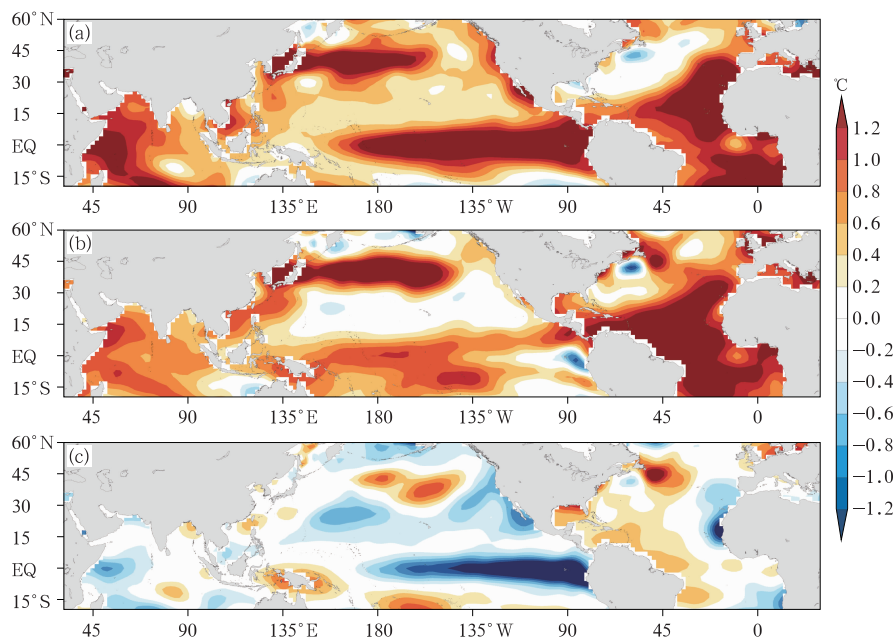


图 8 (a)2023/2024 年冬季,(b)2024 年春季的海温距平和
(c)2024 年春季与 2023/2024 年冬季海温的差值

Fig. 8 Sea surface temperature (SST) anomaly in (a) winter 2023/2024,
(b) spring 2024 and (c) the SST difference between
spring 2024 and winter 2023/2024

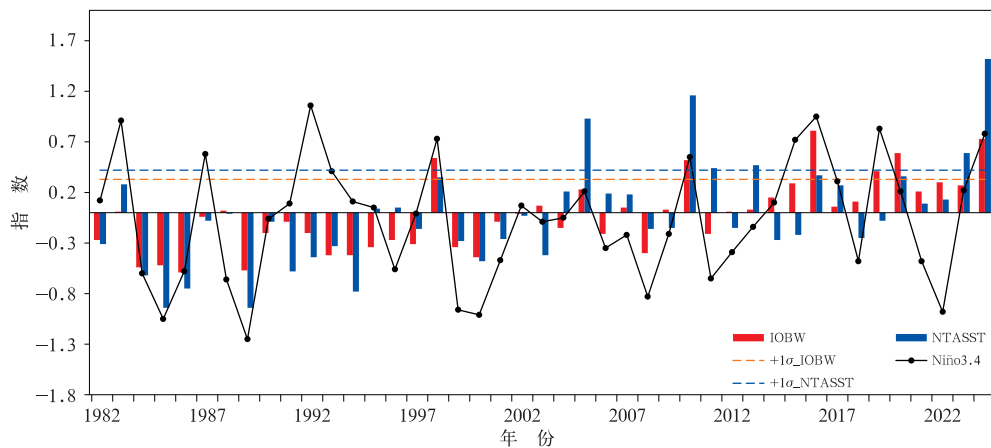


图 9 1982—2024 年春季 IOBW 指数、NTASST 指数和 Niño3.4 指数历年变化

Fig. 9 Time series of IOBW index, NTASST index and Niño3.4 index in spring during 1982–2024

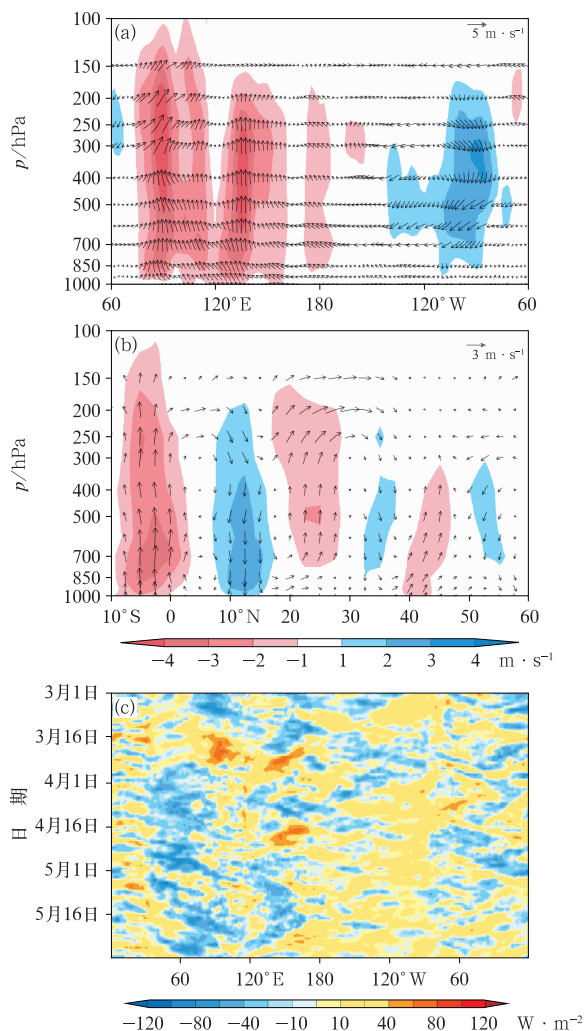


图 10 2024 年春季(a)5°S~5°N 平均的沃克环流距平(填色,风矢)和(b)110°~120°E 平均的哈得来环流距平(填色,风矢), (c)5°S~5°N 平均向外长波辐射的时间-经度剖面

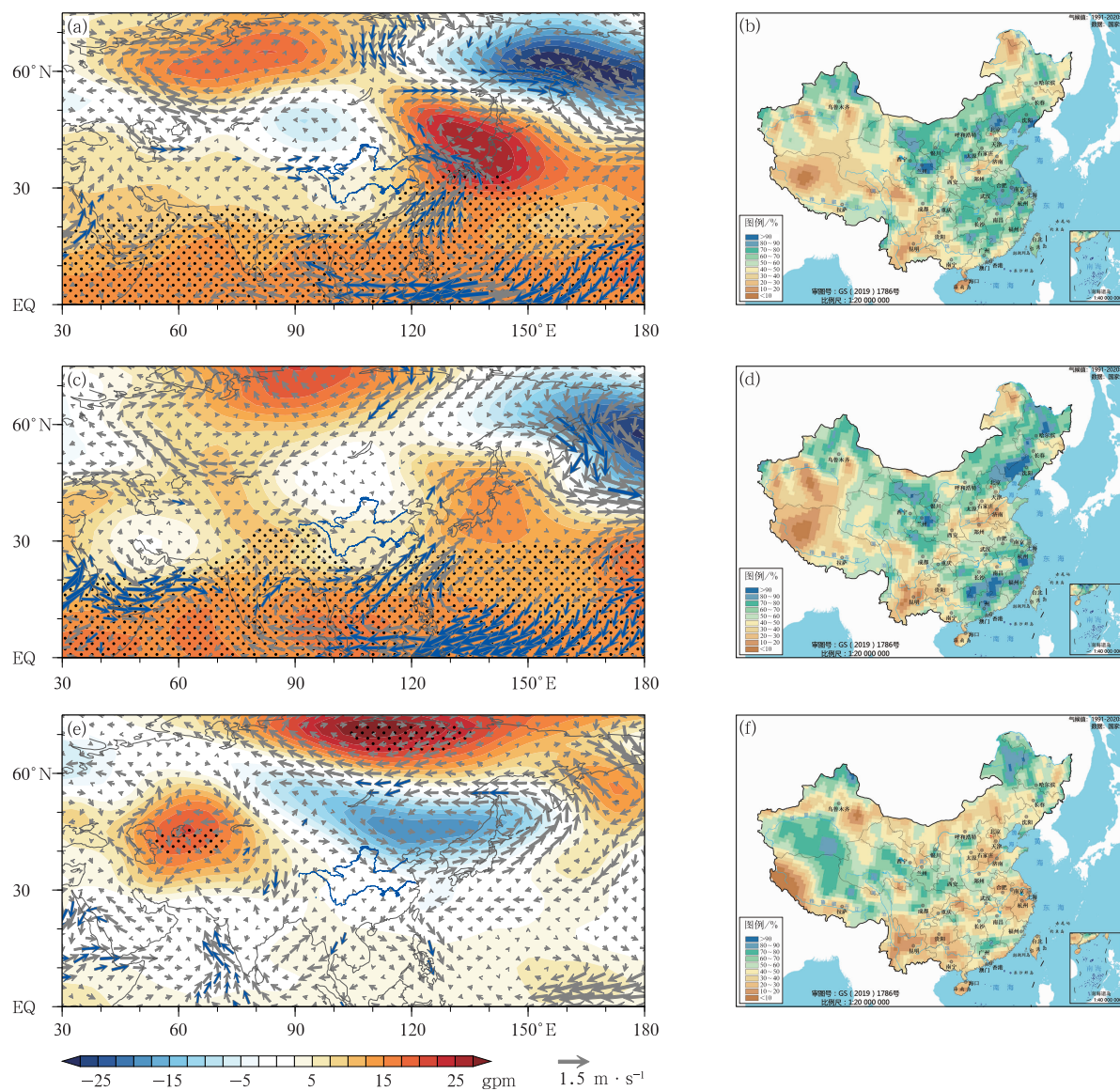
Fig. 10 (a) The Walker circulation anomaly along 5°S–5°N, (b) the Hadley circulation anomaly along 110°–120°E, (c) time-longitude profile of outgoing longwave radiation averaged over 5°S–5°N in spring 2024

气响应来看,印度洋上空环流异常与 El Niño 典型影响较为相似,尤其在 4—5 月,印度洋上空对流活动明显加强(图 10c),而我国东部经向环流异常的下沉支位置更偏北,中心位于 10°N 北侧(图 10b),对应于偏强的西太副高系统和西太反气旋;而在 20°N 偏北存在异常上升支,活跃的对流活动对应我国南方的多雨带。图 11c 进一步给出了 IOBW 指数偏高(超过 1.0 倍标准差)年份的环流合成结果。在 IOBW 异常偏暖的春季,西太反气旋显著加强,位于华南东部上空的反气旋外围西南气流对增强华南地区降水起到关键作用(图 11d)。因此,热带印度洋暖海温在激发 2024 年春季异常偏强的 WNPAC 方面发挥了至关重要的“接力”作用。

除了对热带和副热带环流的影响外,关键区海温变化对于中纬度大气环流的异常同样能够起到显著调制作用。由图 11a 合成结果可见,在 El Niño 衰减年份,BH 异常偏强,其外围 850 hPa 风场存在显著的东南风异常,对应黄河下游一带的降水偏少(图 11b)。一方面,El Niño 可以通过激发沿大圆路径向西传播的大气遥相关波列,改变东亚中纬度对流层高度场的异常分布(Xie et al, 2016);另一方面,西太反气旋的加强能够与中纬度西风环流联动,引发冷水在中纬度海域的输送,造成黑潮暖流及其延续流海域的海温升高和北太平洋高、低纬度海温的降低,这与 2024 年春季太平洋的海温演变一致(图 8b,8c),这种海温变化有助于包含 BH 在内的北太平洋高压系统的维持和加强(李忠贤等,2009)。因此,BH 的异常偏强是热带、副热带和中纬度海温与大气相互作用的综合结果。

热带北大西洋暖海温同样可以作为“电容器”延长 ENSO 事件对西北太平洋大气环流异常的影响,但其影响具有一定的滞后性,通常在夏季体现,例如能够导致我国夏季强降水 and 高温事件的发生及诱发冬季拉尼娜事件形成等(Ham et al, 2013; 王惠美,

2018; 徐集云等, 2019)。图 11e, 11f 为 NTASST 指数偏高年份的环流合成结果, 相比印度洋暖海温对环流和降水的显著影响, 热带北大西洋暖海温没有激发出显著的环流异常, 表明其影响在春季尚未充分形成。



注:打点区域和蓝色箭头表示通过了 0.05 显著性水平检验。

图 11 (a,b)春季 El Niño 衰减年份合成的,(c,d)印度洋海温偏暖年份(IOBW 超过+1.0 倍标准差)合成的,以及(e,f)热带北大西洋海温偏暖年份(NTASST 超过+1.0 倍标准差)合成的结果:

(a,c,e)850 hPa 水平风场异常(风矢)和 500 hPa 位势高度异常(填色),(b,d,f)降水正距平频率

Fig. 11 Composite results of (a, c, e) 850 hPa wind anomaly (wind vector) and 500 hPa geopotential height anomaly (colored) and (b, d, f) positive anomaly frequency of precipitation with

(a, b) El Niño decaying in spring, (c, d) IOBW exceeding +1.0 standard deviation,

(e, f) NTASST exceeding +1.0 standard deviation in those years in spring

5 结论与讨论

本文基于中国气温和降水站点观测资料、NCEP/NCAR 大气再分析资料和海温数据,总结了 2024 年我国春季气候特征,并对春季我国降水异常成因进行了诊断研究,得到以下主要结论:

(1)2024 年春季,全国平均气温为 12.3°C ,较常年同期偏高 1.4°C ,为 1961 年以来历史同期最高;春季各月气温均较常年偏高,气温季内变化幅度较小。全国平均降水量为 163 mm,较常年同期偏多 13.3%,为 1961 年以来历史同期第六多,呈现南北两条多雨带,季内各月降水分布差异明显。降水时空分布不均导致我国旱涝灾害并重,华南区域性暴雨过程频发,4—5 月持续的高温少雨导致黄淮、江淮干旱发展加强。

(2)东亚大气环流系统的季节内阶段性变化是我国春季旱涝异常的直接成因。春季西太副高整体偏强偏西、西段脊线偏南、西太反气旋异常偏强的特征基本决定了南方降水异常偏多的分布型。在月平均尺度上,导致华南降水偏多、黄淮降水偏少的关键环流因子不同:4 月异常偏强的西太反气旋是造成华南和江南极端强降水的关键环流系统,而 4—5 月持续偏强的小笠原高压导致了黄淮干旱的发展加剧。

(3)El Niño 事件的衰减为我国春季降水异常的形成提供了重要的海温外强迫背景。2024 年春季,在前期冬季达到峰值的 El Niño 事件出现了明显的衰减,热带印度洋海温冬春季持续异常偏暖。El Niño 衰减年春季,热带印度洋暖海温作为“电容器”,对东亚环流异常起到关键的“接力”作用,有助于激发异常偏强的西太反气旋,为我国南方强降水的发生提供有利的环流和水汽输送条件。

需要指出的是,本文重点从大气环流阶段性变化和 El Niño 衰减的海温外强迫作用两方面分析了我国春季旱涝异常成因。但影响我国春季降水的因素比较复杂,关键环流异常形成的深层次机制有待进一步研究。此外,2024 年春季我国高影响极端气候事件频发,例如云南冬春连旱、东北地区春季后期的低温雨雪等,这些事件的成因和机理尚需在后续工作中揭示。

参考文献

国家气候中心,2024a. 2024 年 3 月中国气候影响评价[EB/OL].
http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php. National

Climate Centre,2024a. Assessment of climate impact over China in March 2024[EB/OL]. http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php(in Chinese).

国家气候中心,2024b. 2024 年 4 月中国气候影响评价[EB/OL].
http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php. National Climate Centre,2024b. Assessment of climate impact over China in April 2024[EB/OL]. http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php(in Chinese).

国家气候中心,2024c. 2024 年 5 月中国气候影响评价[EB/OL].
http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php. National Climate Centre,2024c. Assessment of climate impact over China in May 2024[EB/OL]. http://cmdp.ncc-cma.net/influ/moni_china.php(in Chinese).

黄嘉佑,2000. 气象统计分析与预报方法:第 2 版[M]. 北京:气象出版社. Huang J Y,2000. Statistic Analysis and Forecast Methods in Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese).

李多,刘芸芸,2022. 2022 年春季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象,48(10):1343-1353. Li D, Liu Y Y, 2022. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2022[J]. Meteor Mon,48(10):1343-1353(in Chinese).

李忠贤,孙渤潮,倪东鸿,等,2009. 北太平洋海平面气压场变化与海温的关系[J]. 大气科学学报,32(5):637-644. Li Z X, Sun Z B, Ni D H, et al, 2009. Relationships between sea level pressure and sea surface temperature anomalies over the North Pacific [J]. Trans Atmos Sci,32(5):637-644(in Chinese).

刘屹岷,刘伯奇,任荣彩,等,2016. 当前重大厄尔尼诺事件对我国春夏气候的影响[J]. 中国科学院院刊,31(2):241-250. Liu Y M, Liu B Q, Ren R C, et al, 2016. Current super El Niño event and its impacts on climate in China in spring and summer[J]. Bull Chin Acad Sci,31(2):241-250(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):1277-1288. Liu Y Y, Gao H, 2021. Features and possible causes of climate anomalies in China in spring 2021 [J]. Meteor Mon,47(10):1277-1288(in Chinese).

刘芸芸,李维吉,艾锐秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报,23(4):414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly Western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci,23(4):414-423(in Chinese).

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).

任芝花,张志富,孙超,等,2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制[J]. 气象,41(10):1268-1277. Ren Z H, Zhang Z F, Sun C, et al, 2015. Development of three-step quality control system of real-time observation data from AWS in China [J]. Meteor Mon,41(10):1268-1277(in Chinese).

王会军,薛峰,周广庆,2002. 中国华南春季季风及其与大尺度环流特征的关系[J]. 大气科学进展(英文版),19(4):651-664. Wang H J, Xue F, Zhou G Q, 2002. The spring monsoon in South China

- and its relationship to large-scale circulation features[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19(4):651-664(in Chinese).
- 王惠美, 2018. 热带大西洋热力异常对我国南方夏季高温的影响及机制研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Wang H M, 2018. Contribution of the tropical Atlantic thermal conditions to high temperature in summer over the South China [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(in Chinese).
- 温之平, 吴乃庚, 冯业荣, 等, 2007. 定量诊断华南春旱的形成机理[J]. *大气科学*, 31(6):1223-1236. Wen Z P, Wu N G, Feng Y R, et al, 2007. A quantitative diagnosis for the mechanisms of spring droughts in South China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(6):1223-1236(in Chinese).
- 徐集云, 霍利微, 宋超辉, 等, 2019. 热带北大西洋海温异常对南海夏季季风的影响及其机理[J]. *大气科学学报*, 42(2):293-302. Xu J Y, Huo L W, Song C H, et al, 2019. Influence of northern tropical Atlantic SST anomaly on South China Sea summer monsoon and its mechanism[J]. *Trans Atmos Sci*, 42(2):293-302(in Chinese).
- 袁媛, 高辉, 贾小龙, 等, 2016. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. *气象*, 42(5):532-539. Yuan Y, Gao H, Jia X L, et al, 2016. Influences of the 2014—2016 super El Niño event on climate[J]. *Meteor Mon*, 42(5):532-539(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 River Basin in the Meiyu period of 2020? [J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6):1433-1450(in Chinese).
- 周盛, 2009. 夏季西太副高与南亚高压和东北太平洋高压关系的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Zhou S, 2009. Study on the relationship between the West Pacific subtropical high and the South Asian high and the Northeast Pacific high in summer[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 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.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y, 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(587):157-178.
- Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 106(449):447-462.
- Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al, 2013. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events[J]. *Nat Geosci*, 6(2):112-116.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al, 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system[J]. *Adv Atmos Sci*, 29(5):910-942.
- Jia X J, Zhang C, Wu R G, et al, 2021. Influence of Tibetan Plateau autumn snow cover on interannual variations in spring precipitation over southern China[J]. *Climate Dyn*, 56(3):767-782.
- 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.
- Matsuno T, 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *J Meteor Soc Japan*, 44(1):25-43.
- Ninomiya K, Akiyama T, 1992. Multi-scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia[J]. *J Meteor Soc Japan*, 70(1B):467-495.
- 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.
- Wang B, Dai L, Cheng T F, et al, 2024. Climatological Madden-Julian oscillation during boreal spring leads to abrupt Australian monsoon retreat and Asian monsoon onsets[J]. *Npj Clim Atmos Sci*, 7(1):40.
- 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.
- 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.
- 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.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al, 2016. Indo-Western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in Post-ENSO summer: a review[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(4):411-432.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al, 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys Res Lett*, 34(2):L02708.
- Zhang L X, Wu P L, Zhou T J, et al, 2018. ENSO transition from La Niña to El Niño drives prolonged spring-summer drought over North China[J]. *J Climate*, 31(9):3509-3523.
- Zhang M O, Sun J Q, 2023. Increased persistence in winter-to-spring precipitation anomalies over South China since the late 1990s and the possible mechanisms[J]. *J Climate*, 36(20):7179-7198.
- Zhang P, Wu Z W, Jin R, 2021. How can the winter North Atlantic Oscillation influence the early summer precipitation in Northeast Asia: effect of the Arctic sea ice[J]. *Climate Dyn*, 56(5):1989-2005.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al, 2019. Remote forcing of the northern tropical Atlantic SST anomalies on the western North Pacific anomalous anticyclone[J]. *Climate Dyn*, 52(5):2837-2853.

(本文责编:王婷波)