

赵玉衡,王悦颖,陈丽娟,等,2024.2023年秋季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,50(4):499-513. Zhao Y H, Wang Y Y, Chen L J, et al, 2024. Features and possible causes of abnormal climate over China in autumn 2023[J]. Meteor Mon, 50(4):499-513(in Chinese).

2023 年秋季我国气候异常特征及成因分析^{*}

赵玉衡¹ 王悦颖² 陈丽娟^{1,2} 龚振淞¹

1 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

2 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要: 利用 NCEP/NCAR 再分析数据集和中国 2400 个站的气候观测数据,对 2023 年秋季我国气候异常特征及其成因进行分析。2023 年秋季全国平均气温为 1961 年以来历史同期最高;全国平均降水量接近常年同期,但空间分布不均且季节内变化明显。秋季欧亚中高纬环流呈“两槽一脊”型,造成我国气温显著偏高;9 月呈“两脊一槽”型,巴尔喀什湖低槽活动导致西北地区降水增多;10 月呈“两槽一脊”型,导致北方地区偏暖加强;11 月呈“西高东低”型,东路冷空气增强,东北地区气温偏低、降水偏多。西太平洋副热带高压总体较常年偏强、偏西,脊线 9 月异常偏北、10 月偏南、11 月接近常年。印缅槽 9 月显著偏强,10—11 月接近常年。9 月印缅槽偏强与副热带高压异常偏北共同导致了长江中下游以北至黄河下游地区多雨;10—11 月东部地区水汽条件整体偏差。9—10 月近海台风频繁活动,造成华南地区降水偏多。2023 年秋季我国气候受到大气季节内变化的显著作用,热带海温异常的影响不典型。

关键词: 秋季气候异常,降水季节内变化,中高纬大气环流,副热带高压脊线

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.022602

Features and Possible Causes of Abnormal Climate over China in Autumn 2023

ZHAO Yuheng¹ WANG Yueying² CHEN Lijuan^{1,2} GONG Zhensong¹

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

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and climate observations from 2400 stations of China, the characteristics of climatic anomalies over China in autumn 2023 and the possible causes are analyzed. The results denote that, in autumn 2023, the average temperature in China peaked the record in the same period since 1961, and the average precipitation was close to the climatic mean, but had uneven spatial distribution and significant intra-seasonal variability. The circulation in the mid-high latitudes of Eurasia showed a “negative-positive-negative” pattern on the seasonal mean scale, leading to the abnormal warming in China. In September, the circulation was in a “positive-negative-positive” pattern that caused the frequent activity of the trough near Balkhash Lake and the increase of precipitation in Northwest China; in October, the “negative-positive-negative” pattern of circulation caused further warming in northern China; and in November the circulation pattern of “positive in west and negative in east” formed, enhancing the

^{*} 国家自然科学基金项目(U2242206、42275030 和 41730964)、国家重点研发计划(2018YFC1506006)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022-J009)和中国长江电力股份有限公司项目(2423020054)共同资助

2024 年 1 月 24 日收稿; 2024 年 3 月 7 日收修定稿

第一作者:赵玉衡,主要从事气候诊断及预测研究. E-mail: zhaoyh@cma.gov.cn

通讯作者:陈丽娟,主要从事气候诊断及预测研究. E-mail: chenlj@cma.gov.cn

cold air in the east and causing the temperature in Northeast China to drop to below normal and precipitation to be more than normal. The Western Pacific subtropical high (WPSH) was stronger and more westward than usual overall, and its ridge line swung frequently in the meridional direction, that is, the ridge line was abnormally further north than usual in September, further south than usual in October and close to normal position in November. The India-Burma trough was significantly stronger in September and near normal during October-November. In September, the stronger Indo-Burma trough and the northerly WPSH jointly contributed to the heavy rainfall in the region between the middle and lower reaches of Yangtze River and the lower reaches of Yellow River. The basic water vapor transport condition in eastern China became negative from October to November. In addition, typhoon activities in southern coastal area of China were frequent in September and October, resulting in more precipitation in South China. These results reveal that the climate anomaly in autumn 2023 was significantly affected by the intra-seasonal variation of the atmosphere, and it did not match the typical responses to the tropical SST anomaly.

Key words: abnormal autumn climate, intra-seasonal variation of precipitation, mid-high latitude atmospheric circulation, subtropical high ridge

引 言

中国地处东亚季风区,具有典型的季风气候特征。秋季是东亚夏季风环流向冬季风环流转换的过渡阶段,影响我国的大气环流系统在此期间存在较大的季节性变化。随着东亚夏季风系统逐步减弱南撤,季风槽向南移动,西北太平洋副热带高压(以下简称副高)东移南退,低纬度地区向东亚地区的水汽输送发生季节性改变,而中高纬地区冷空气活动在进入秋季后开始趋于活跃。在季风环流系统的频繁调整过程中,来自低纬度的暖湿气流与来自中高纬的干冷空气间的相互作用复杂,往往造成我国秋季多变的区域性气候异常,易发生秋涝、秋旱、连阴雨、南方高温等气象灾害(湛芸和施能,2003;张顾炜等,2016;孙照渤等,2016;齐冬梅等,2020)。同时由于时值秋收秋种的重要阶段,秋季天气气候异常及气象灾害对我国粮食生产和人民生活安全具有重要影响。因此不断加强秋季气候异常诊断分析,深入理解和认识其背后的科学规律,对提高灾害性气候事件的预测能力和支撑国家防汛减灾、保障经济发展具有重要意义(贾小龙等,2008;竺夏英和宋文玲,2017;支蓉等,2018;赵俊虎和王永光,2019;孙林海和王永光,2020;杨明珠和陈丽娟,2021;李多和顾薇,2022;洪洁莉等,2023)。

20 世纪 90 年代以来,我国秋季气温整体呈上升趋势;降水呈现多时间尺度变化特征(Song et al, 2015; Wang and Zhou, 2019; Zhi et al, 2020)。秋季

气候一方面受海表温度异常、西太平洋暖池热含量、青藏高原热力条件等外强迫因子的影响(陈忠明等, 2001; 刘宣飞和袁慧珍, 2006a; 2006b; 顾薇等, 2012; 韩晋平等, 2013; 王春学等, 2015; 郑然等, 2018; 梁萍等, 2019), 另一方面也与中高纬度大气环流异常配置密切相关(白虎志和董文杰, 2004; 李多和顾薇, 2022), 因此既具有明显的年际变化波动, 也存在复杂的季节内变化特征。2023 年秋季(9—11 月), 全国平均气温为 11.3°C , 为 1961 年以来历史同期最高, 再次刷新 2022 年同期纪录。全国平均降水量为 126.8 mm, 较常年同期偏多 4.4%, 降水空间分布不均, 多雨区较为分散, 东北、长江中下游以北至黄河下游地区、华南、西北地区中部、新疆北部降水显著偏多; 降水季节内变化明显, 9 月东部地区自北向南呈“少—多—少—多”分布, 10 月“西多东少”, 11 月“北多南少”。本文从 2023 年秋季我国主要气候特征出发, 重点分析季节内变化特征, 通过诊断分析造成气候异常的大气环流及外强迫信号, 探讨造成 2023 年秋季气候异常的可能成因, 为今后的气候预测和服务提供参考。

1 资料与方法

本文使用 1961—2023 年中国逐日气温和降水观测资料, 数据源自国家气象信息中心整编的中国 2400 个台站观测气候数据集(任芝花等, 2012); 1961—2023 年美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$

水平分辨率的逐日和逐月大气环流再分析资料(Kalnay et al, 1996), 以及美国国家海洋大气局(NOAA)所提供的1982—2023年逐月海温资料(Reynolds et al, 2007)。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”及新一代气候监测预测分析系统(CIPAS3.1)。如无特别说明, 文中所用气候值为1991—2020年平均值。

2 2023年秋季我国主要气候异常特征

2.1 气温

2023年秋季(9—11月)全国平均气温为11.3℃, 较常年同期(10.3℃)偏高1.0℃(图1a), 继2022年秋季(11.2℃)再次刷新1961年以来秋季平均气温纪录, 达到历史同期最高。全国大部地区气温接近常年同期到偏高, 内蒙古大部、华北大部、西北大部、华东大部、华中南部、西南东部、西藏西部和新疆大部等地偏高1~2℃, 新疆北部和东部等地偏高达到2~4℃(图2a); 贵州、辽宁、四川、天津、新疆、云南、浙江平均气温均为1961年以来历史同期最高, 甘肃、河南、山东为次高。甘肃敦煌(37.4℃, 9月4日)、瓜州(36.8℃, 9月5日)等66个国家级气象观测站日最高气温突破或持平于当地秋季历史极值。在秋季平均气温明显偏高的背景下, 共有10次冷空气过程影响我国, 次数与常年同期持平, 有6次发生在11月, 较常年同期(4.3次)偏多1.7次, 其中11月6—7日和23—25日2次过程达到寒潮级别。11月3—7日, 冷空气和寒潮过程接连影响我国, 除西南地区东部、华南及江南南部外, 全国大部分地区气温下降8~16℃, 华北东部及山东中部、内蒙古中部及东北部、黑龙江西北部、辽宁中南部等地降温幅度超过16℃, 黑龙江五大连池日降温幅度(17℃, 11月3日)突破历史极值。

9月, 除新疆北部等地气温较常年同期略偏低外, 我国大部地区气温接近常年到偏高, 长江沿线地区及黄河以北地区平均气温普遍偏高超过1℃, 其中内蒙古中西部、甘肃中部、宁夏、浙江、贵州中南部、云南东北部等地偏高达2~4℃(图2b)。10月, 北方地区气温异常偏高, 较9月更为显著, 其中内蒙古、东北地区西部和北部、河北东部、山东、河南东北部、甘肃北部、新疆大部气温偏高2~4℃, 新疆东北

部偏高超过4℃; 长江以南地区气温偏高超过1℃的范围较9月明显减小, 主要位于湖北东部、湖南中部、贵州中南部、云南东部等地(图2c)。11月, 北方地区出现大范围气温偏低, 其中内蒙古中东部、东北大部、河北北部偏低1℃以上, 内蒙古东部、吉林西部、黑龙江中南部偏低2~4℃, 我国40°N以北地区平均气温距平呈现“西暖东冷”分布, 新疆大部、甘肃西部等地气温偏高超过1℃, 新疆北部偏高2~4℃; 在南方地区, 江西、湖南、广西北部、云南东部、贵州、重庆西南部、四川东部等地气温较常年同期偏高超过1℃, 贵州西部偏高2~4℃(图2d)。

2.2 降水

2023年秋季全国平均降水量为126.8 mm, 较常年同期(121.4 mm)偏多4.4%(图1b), 降水空间分布极度不均(图3a)。降水异常空间分布显示, 华南、长江中下游以北至黄河下游地区、西北地区中部、东北、新疆北部呈分散型多雨区, 其中华中地区中北部及陕西东南部、重庆东北部、广东大部、广西东南部、青海东部及新疆北部等地偏多5成至2倍, 广东降水量为历史同期最多, 青海为历史次多; 而华北大部、西南地区南部及四川西部、内蒙古中西部、新疆西部和东南部、西藏西部和南部等地降水偏少

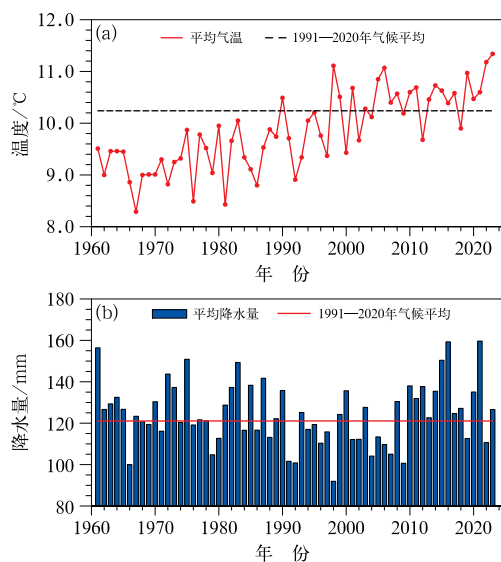


图1 1961—2023年秋季全国(a)平均气温及(b)平均降水量历年变化

Fig. 1 Time series of autumn (September, October, November, SON) mean (a) temperature and (b) precipitation in China during 1961–2023

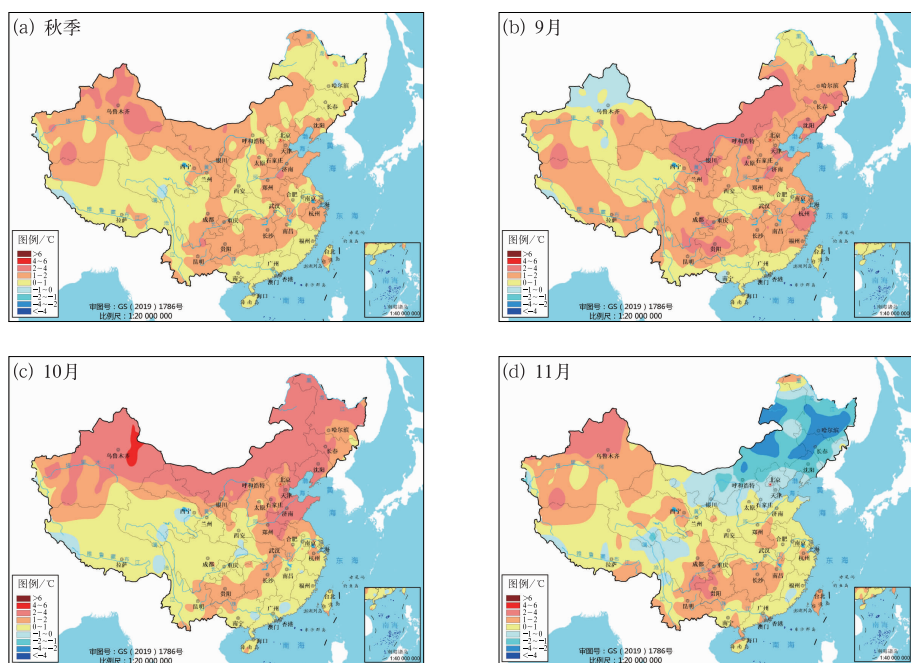


图 2 2023 年全国平均气温距平分布

Fig. 2 Distribution of mean temperature anomaly over China in 2023

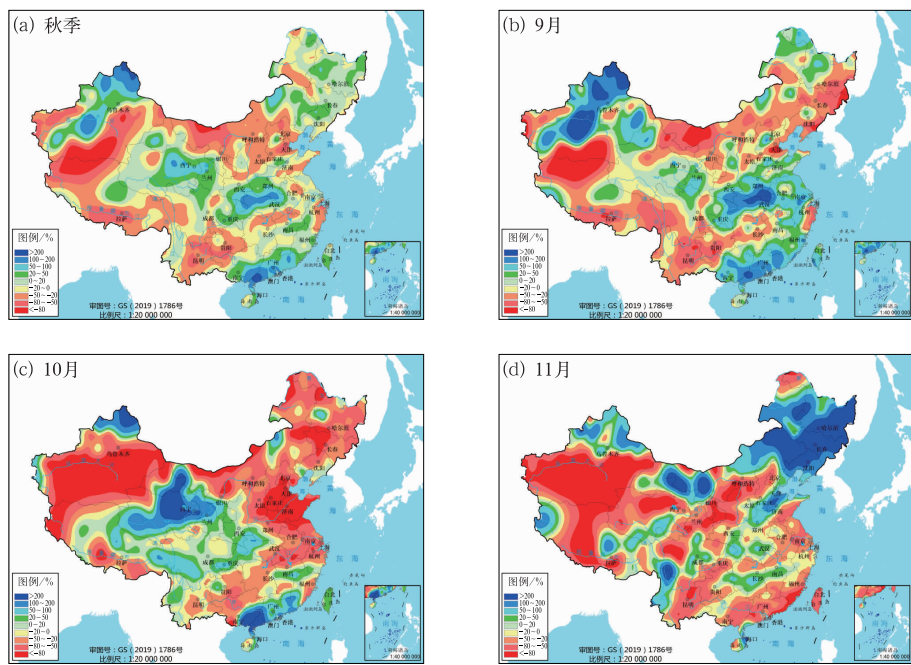


图 3 2023 年全国降水距平百分率分布

Fig. 3 Distribution of precipitation anomaly percentage over China in 2023

2 成以上,局地偏少 8 成以上。全国共有 56 个国家级气象观测站日降水量突破当地秋季历史极值,其中福建福州(395.9 mm, 9 月 6 日)、广东番禺(361.9 mm, 9 月 8 日)等 10 个站日降水量突破历史纪录。秋季共发生 9 次区域性暴雨过程,分别为

8 月 31 日至 9 月 3 日,9 月 3—13 日、8—9 日、12—15 日、17—20 日、23—28 日,10 月 4—11 日、17—22 日,11 月 9 日,其中 9 月 3—13 日暴雨过程强度达到特强。

2023 年秋季降水异常分布的季节内变率较强,

主要多雨区位置变化大。9 月,除西北地区中东部、新疆中北部、内蒙古东部和黑龙江西北部等地存在分散型降水量中心偏多外,我国东部地区呈现两条多雨带,分别位于华南至江南东南部以及长江中下游以北至黄河下游地区。其中河南南部、安徽大部、江苏、浙江西部、湖北大部、福建东南部、广东、广西、重庆大部、陕西南部、甘肃东南部和西部、新疆中北部等地降水量较常年同期偏多超过 5 成,局地偏多 2 倍以上;全国其余大部地区降水量接近常年同期到偏少,其中内蒙古西部、东北东部、河北东南部、浙江东部、贵州南部、云南中东部、四川西南部、西藏西北部和南部、新疆南部等地偏少 5 成以上(图 3b)。10 月,我国降水整体呈现“西多东少”分布,多雨区主要位于华南中东部、西藏东部、西南地区中部、西北地区中东部和江汉西部,其中广东西部、广西东部、甘肃中西部、青海东部等地降水量较常年同期偏多 1 倍以上,局地超过 2 倍;全国其余地区降水接近常年同期到偏少,其中内蒙古大部、东北大部、华北大部、黄淮、江淮、新疆大部等地较常年同期偏少 5 成以上,局地偏少 8 成以上(图 3c)。11 月,我国

降水整体呈现“北多南少”的分布,北方地区的内蒙古大部、东北大部、华北南部、黄淮北部、西北地区北部、新疆北部降水量较常年同期偏多,其中内蒙古东部、东北地区大部偏多超过 2 倍以上,黄河以南地区整体偏少,江汉、江南中东部、西南地区东部和西部等地存在分散型偏多区(图 3d)。

根据气象行业标准对华西秋雨监测的定义(中国气象局,2019),华西秋雨监测区全区平均秋雨量为 287.0 mm,较常年(198.5 mm)偏多 44.6%。其中,南区平均秋雨量 311.2 mm,较常年(189.5 mm)偏多 64.2%;北区平均秋雨量 198.1 mm,较常年(126.4 mm)偏多 56.7%。华西秋雨自 8 月 23 日开始,较常年(9 月 2 日)偏早 10 d;于 11 月 16 日结束,较常年(11 月 3 日)偏晚 13 d。其中南区秋雨于 8 月 24 日开始,较常年(9 月 9 日)偏早 16 d,于 11 月 16 日结束,较常年(11 月 2 日)偏晚 14 d。北区秋雨于 8 月 23 日开始,较常年(9 月 12 日)偏早 20 d,于 10 月 20 日结束,较常年(10 月 11 日)偏晚 9 d。全区、南区和北区的秋雨期均较常年明显偏长(表 1)。

表 1 2023 年华西秋雨指数特征

Table 1 Indexes of autumn rainfall in West China in 2023

华西地区	开始时间	结束时间	持续时间/d	秋雨量/mm
北区	8 月 23 日(9 月 12 日)	10 月 20 日(10 月 11 日)	58(29)	198.1(126.4)
南区	8 月 24 日(9 月 9 日)	11 月 16 日(11 月 2 日)	84(54)	311.2(189.5)
总体	8 月 23 日(9 月 2 日)	11 月 16 日(11 月 3 日)	85(62)	287.0(198.5)

注:括号内为其气候态。

2.3 台风活动及其影响

2023 年秋季,西北太平洋及南海生成 4 个台风,较常年同期(11 个)明显偏少。而 4 个台风全部登陆我国,较常年同期(2 个)偏多。相较历史同期,2023 年台风生成偏少,但登陆偏多,对我国南部沿海地区风雨影响较重,尤其是华南地区 9 月、10 月及秋季累计降水量显著多于常年同期,其中台风活动的贡献较大。

9 月 2 日,2023 年第 9 号台风苏拉在广东省珠海市南部沿海以强台风级(最大风力 14 级,45 m · s⁻¹)登陆,尺度较小,但强度强,超强台风级持续时间长。第 11 号台风海葵于 9 月 3—5 日先后在我国台湾省台东市沿海(强台风级)、福建省东山县沿海(热带风暴级)、广东省饶平县沿海(热带风暴级)登陆。9 月 3—13 日,受“海葵”及其残余环流影响,广

东南部、广西东部和南部、海南东部等地累计降水量 100~300 mm,其中广东西南部和广西东部局地 300~500 mm,广东阳春和广西博白超过 500 mm,广东番禺(361.9 mm)和广西博白(329.3 mm)日降水量突破历史极值。9 月“苏拉”和“海葵”接连影响华南地区,造成雨涝风险叠加,多条中小河流发生超警以上洪水,广东多地发生内涝、滑坡、道路中断等险情。

10 月,第 14 号台风小犬于 10 月 5 日以强台风级(最大风力 15 级,48 m · s⁻¹)在台湾省屏东县鹅銮鼻登陆,为 1949 年以来 10 月登陆我国台风历史第三强,影响时间长、累计降水量大。受其影响,10 月 5—11 日,广东 6 县(市、区)的累计降水量为 1961 年以来历史同期第三多。10 月 19—20 日,第 16 号台风三巴先后三次登陆海南和广东,广西、广东共 8 个国家级气象观测站降水量超过 10 月极值。

3 2023 年秋季气候异常的环流特征及成因分析

由上述特征分析可以看出,2023 年秋季我国气温总体显著偏高,为 1961 年以来历史同期最高值,季节内北方地区存在冷暖起伏,尤其是 11 月内蒙古东部和东北地区气温由 9—10 月的显著偏高转为偏低。秋季降水平均接近常年同期,但空间分布不均,内蒙古西部、西南地区中南部、新疆南部降水显著偏少,降水偏多区较为分散,在华南、西南地区东北部至江汉、西北地区中部分别存在 3 个较为集中的多雨中心,季节内我国多雨区位置变化大,其中江汉多雨区主要来自 9 月降水的贡献,西北多雨区主要来自 10 月降水的贡献。2023 年秋季气候异常的季节内变化较强,尤其降水季节内变化最为显著,大气环流异常是决定气候异常的直接影响因素,下文将从秋季不同阶段大气环流特征的变化入手分别解读 2023 年秋季气温和降水的异常原因。

3.1 秋季气温异常成因分析

季节平均的 500 hPa 位势高度距平场(图 4a)显示,2023 年秋季欧亚中高纬地区环流呈相对“两槽一脊”型分布,贝加尔湖(以下简称贝湖)至巴尔喀什湖(以下简称巴湖)北部高度场为显著正距平,乌拉

尔山(以下简称乌山)及鄂霍次克海高度场相对偏低,不利于冷空气活动。我国大部分地区上空为高度场正距平,配合贝湖附近高压脊的影响,整体不利于中高纬冷空气南下影响我国。在全球变暖背景下,我国秋季平均气温增暖趋势明显(图 1a),这一增暖趋势与 2023 年秋季大气环流条件的叠加作用造成我国大部地区尤其是北方地区秋季气温显著偏高。即使在 2023 年秋季显著偏暖背景下,秋季气温也存在较为明显的季节内起伏,其直接成因来自于欧亚中高纬地区大气环流异常的月际变化。

9 月,乌山附近为高压脊控制,巴湖至贝湖西南侧为负距平,东北亚至鄂霍次克海为正距平(图 4b),该环流形势有利于巴湖附近低槽频繁东移影响我国新疆及西北地区,从而造成 9 月新疆北部气温相对偏低。

10 月,乌山及其以西高度场为负距平控制,贝湖至东北亚位势高度场转为高压脊控制,日本及其以东洋面上空为槽区,但槽区位置偏东,欧亚中高纬环流呈“两槽一脊”型分布(图 4c),不利于中高纬冷空气向南扩张影响我国,使得 2023 年秋季我国黄河以北地区气温偏高特征在 10 月最为显著。

11 月,欧亚中高纬环流呈“西高东低”型分布,巴湖及其以北地区为高压脊,东北亚地区为宽广低槽区(图 4d),这种环流形势下我国西路冷空气活动偏弱而东路冷空气显著增强。11 月共发生 6 次冷空

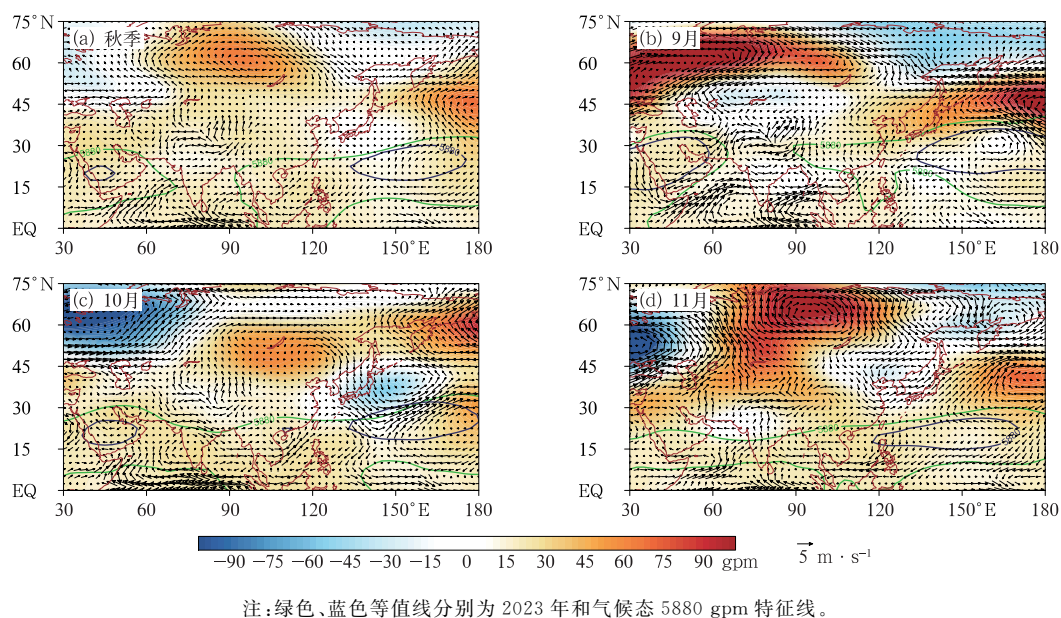


图 4 2023 年 500 hPa 位势高度场距平(填色)和 850 hPa 风场距平(风矢)

Fig. 4 The 500 hPa geopotential height anomaly (colored) and 850 hPa wind anomaly (wind vector) in 2023

气过程,较常年同期偏多,其中有2次寒潮过程,造成东北地区、内蒙古中东部气温显著偏低、雨雪天气频繁,黑龙江东部、吉林中部和南部、辽宁西北部和内蒙古东北部部分地区降雪日数较常年同期偏多5~10 d,黑龙江大部、吉林西部、辽宁西北部最大积雪深度达5~20 cm,黑龙江东部局地超过40 cm。

3.2 降水异常成因及其季节内变化特征分析

相较于气温特征,2023年秋季降水空间分布较为分散,季节内变化更为显著,其异常成因也较为复杂,大气环流因子及水汽输送阶段性变化的作用明显。秋季,西太副高相较气候态强度偏强,西伸脊点偏西,但由于其脊线在季节内南北位置变化较大(图5a),且9—10月近海台风对副高的扰动较强,

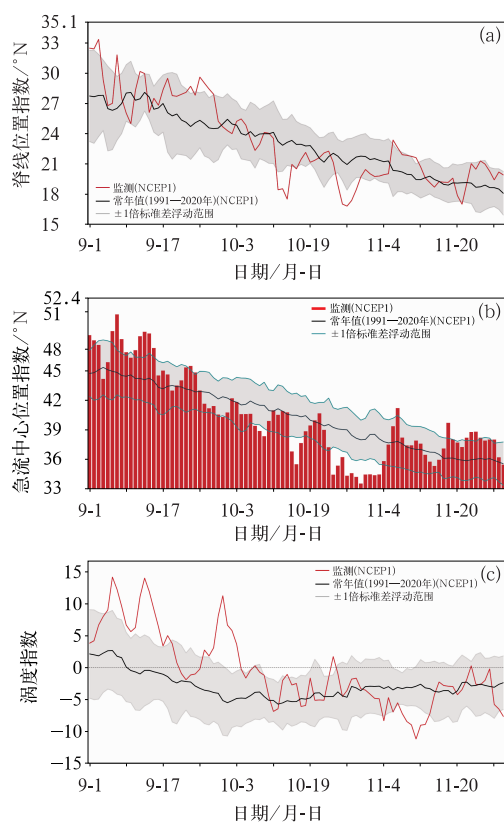


图5 2023年秋季关键环流指数逐日演变序列
(a)西太副高脊线位置指数,(b)东亚副热带西风急流中心位置指数,(c)印缅槽涡度指数
Fig. 5 Daily evolution series of the circulation indexes in autumn 2023

(a) West Pacific subtropical high ridge position index, (b) latitude center location index of East Asian subtropical westerly jet, (c) India-Burma trough vorticity index

西北太平洋低层风场异常与西太副高的季节平均特征不完全匹配。孟加拉湾至印度北部上空呈气旋式环流异常,表现为印缅槽偏强,15°N以南的热带北印度洋上空呈反气旋式环流异常,两者形成经向齿轮状“啮合”(图4a),加强北印度洋中部至中南半岛自西向东水汽输送(图6a);菲律宾以西低层风场呈明显反气旋式环流异常,与其西北侧异常东南风汇合,加强印度洋向我国南海地区的水汽输送;而在我国长江至华南地区上空低层风场亦存在反气旋式环流异常中心,使南海地区暖湿水汽发生偏转,沿异常反气旋外围气流输送至我国西南地区北部、西北地区东部及江汉地区,有利于上述地区降水偏多。

9月,印缅槽显著偏强(图5c),孟加拉湾至赤道“气旋-反气旋”式环流异常相互“啮合”加强印度洋向东水汽输送,配合菲律宾及其以西反气旋式环流异常(图4b),暖湿水汽向南海地区汇聚(图6b),加之9月华南地区先后受“苏拉”及“海葵”影响,造成降水偏多。此外,9月西太副高脊线显著偏北(图5a),副热带西风急流亦显著偏北(图5b),杭州湾以东洋面至江南、华南地区上空呈反气旋式环流异常(图4a),促使华南沿海地区水汽向北输送加强,致使水汽通量辐合区北移至西北地区东北部—江汉—江淮一线,在长江以北形成纬向多雨带。

10月,副高脊线由明显偏北转为明显偏南(图5a),东亚副热带西风急流转为偏南(图5b),我国东部地区水汽输送明显转弱。10月印缅槽相较于9月减弱至接近常年略偏强(图5c),但孟加拉湾北部及青藏高原西侧气旋式环流异常仍较为明显(图4c),造成我国华西地区受偏南风距平影响,水汽输送增强(图6c)。此外,受“小犬”和“三巴”的直接影响及其残留环流影响,华南地区出现强降水过程,造成降水偏多。

此外,9月巴湖附近受高度场负距平控制,10月巴湖东南侧高度场相对偏低,当巴湖附近低压槽加深时,通常我国西北路径冷空气活跃,低槽东移自西向东影响我国新疆及西北地区,形成有利于降水的形势。在位势高度场逐日演变中(图略),9月至10月上旬前期和10月中旬巴湖低槽多次东移,造成西北地区阶段性降水增多。

11月,副高脊线位置总体接近常年同期(图5a),副热带西风急流中心接近常年同期略偏北(图5b),印缅槽上旬偏弱,中下旬接近常年同期(图5c)。青藏高原东南侧呈气旋式环流异常,南海

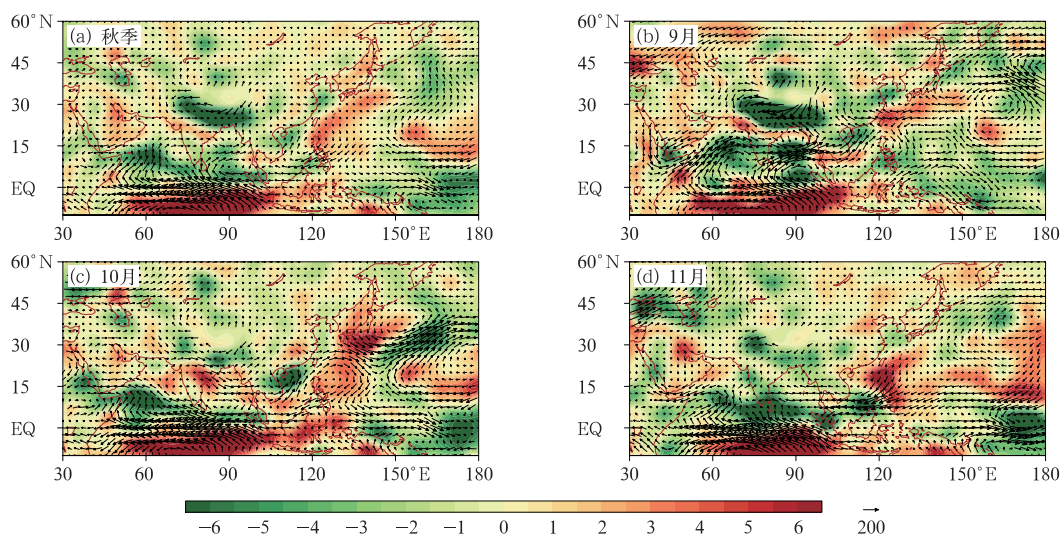


图 6 2023 年秋季 1000~300 hPa 对流层整层积分水汽输送距平(矢量,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
及水汽输送辐合辐散距平(填色,单位: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 6 Vertically integrated (1000–300 hPa) water vapor flux anomaly (vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
and moisture divergence anomaly (colored, unit: $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) in autumn 2023

至中南半岛呈反气旋式环流异常,两者共同造成我国西南地区西部受偏南风距平影响(图 4d),西藏东部、西南地区西部和北部水汽通量辐合增强(图 6d),导致降水偏多。11 月我国北方东路冷空气活跃,伴随的频繁雨雪天气造成了东北和内蒙古东部降水偏多。

为进一步探讨 2023 年秋季降水异常阶段性变化规律,本文针对 1979—2023 年中国 95°E 以东区域秋季逐月标准化降水距平百分率,参考陈烈庭等(2007)进行扩展经验正交函数展开分析(EEOF)。图 7 和图 8 分别给出了我国秋季(9—11 月)降水异常第一至第四空间演变模态及各模态对应的标准化时间系数,第一至第四模态解释方差分别为 10.4%、8.1%、7.2%、6.5%。

从 2023 年来看,第一至第四演变模态标准化时间系数分别为 0.8、-1.1、1.2 和 1.6(图 8),其中第四模态异常特征最为显著。虽然第二和第三演变模态时间系数绝对值也超过 1,但第二模态(图 7b)负位相对应于 9 月东北降水偏多,10 月华北降水偏多,第三模态(图 7c)正位相对应于 9—10 月北方大范围降水偏多,与 2023 年实际情况并不相符。第四模态(图 7d)正位相对应于 9 月华南沿海、长江中下游以北至黄河下游地区多雨,10 月西北地区中部至西南地区西北部多雨而东部大范围少雨,11 月黄河以北地区多雨而长江以南少雨,与 2023 年秋季降水

季节内演变吻合度最高。综合来看,2023 年秋季降水异常演变由第四演变模态所主导,属于较为罕见的个例。为考察该演变模态的异常成因及与 2023 年秋季气候异常的联系,计算了第四演变模态与秋季逐月同期 500 hPa 位势高度场的相关(图 9)。

第四演变模态所伴随的大气环流异常特征主要表现为:9 月自欧洲东部至西北太平洋间存在显著波列结构,在巴湖以东—巴湖至贝湖—东亚至日本—西北太平洋间呈“正—负—正—负”分布(图 9a),与 2023 年 9 月大气环流异常特征较为相似但偏东(图 4b),反映西太副高偏北,西北太平洋水汽输送偏北,贝湖低槽活跃,暖湿—冷干气团交汇区偏北,形成长江中下游以北至黄河下游地区多雨带。10 月主要反映在乌山—贝湖—西北太平洋间“负—正—负”的位势高度场异常配置(图 9b),与 2023 年 10 月特征相比,除西北太平洋位势高度场负距平区位置有一定差异外,整体结构也较为近似(图 4c);该环流形势下影响我国东部冷空气偏弱,菲律宾至日本南部易出现气旋式环流异常,我国东部地区水汽条件偏差,导致降水偏少。11 月位势高度场异常配置表现为巴湖和鄂霍次克海偏高而贝湖相对偏低,影响我国北方地区的冷空气活动较为频繁(图 9c),有利于黄河以北地区降水偏多;与之相比,2023 年 11 月实况场中(图 4d)3 个异常中心整体较为偏东,贝湖以东负距平区偏向于东北亚地区,

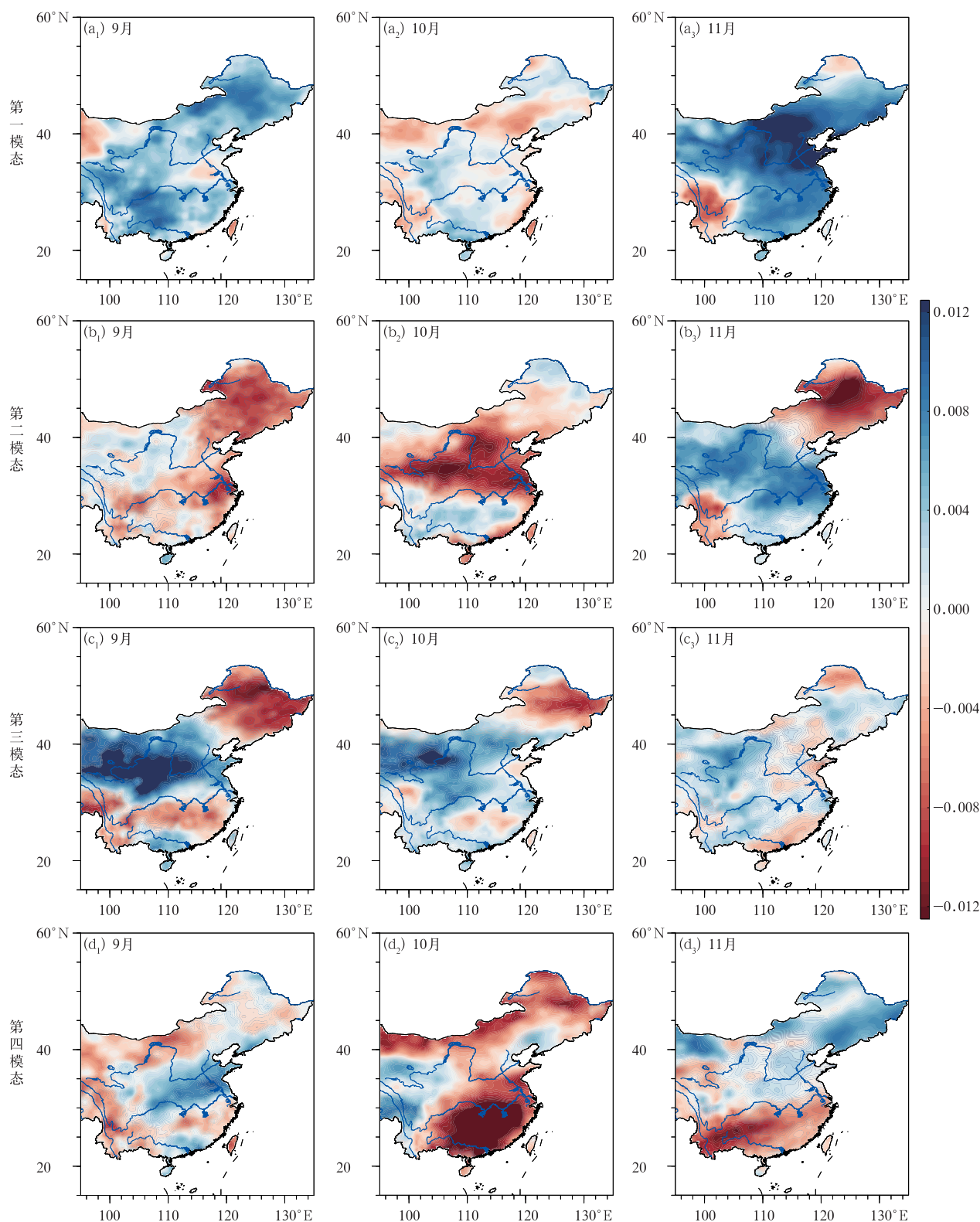


图7 1979—2023年秋季月标准化降水距平百分率 EEOF 分析前四模态的空间分布
 Fig. 7 Distribution of the 1st, 2nd, 3rd, and 4th dominant modes of EEOF analysis on the standardized precipitation anomaly percentage in September, October and November during 1979–2023

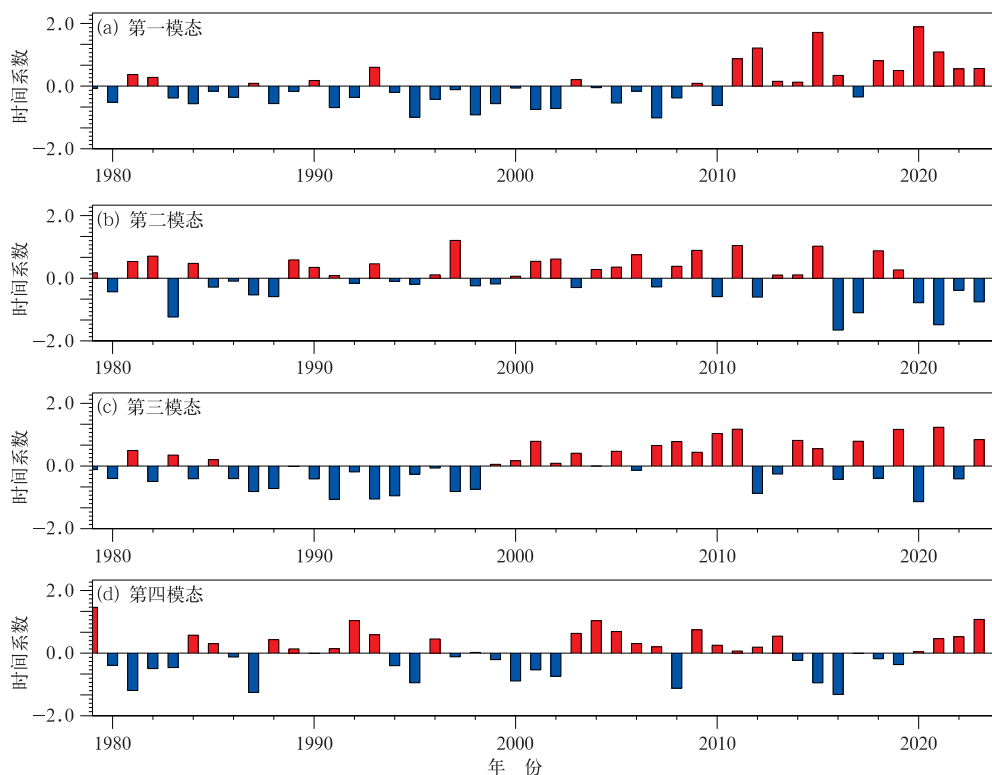


图 8 1979—2023 年秋季逐月降水距平百分率
EEOF 前四模态标准化时间系数

Fig. 8 Standardized time coefficients of the first four dominant modes of EEOF
for the monthly precipitation anomaly percentage in autumn 1979–2023

因此 11 月实况中的降水偏多区(图 4d)相较第四演变模态 11 月分量更偏北、偏东。2023 年秋季逐月降水异常演变与第四演变模态空间特征吻合度较高,实况中大气环流逐月特征也与演变模态的环流相关场较为一致。而从第四演变模态与同期海表温度异常(SSTA)相关场来看(图 10),该演变模态与热带海温相关性较弱,与海温年际变率最强的中东太平洋海温的关联也不明显,表明这一演变模态的降水空间分布季节内差异主要反映大气环流的内部变化,而受包括 ENSO 在内的海温调控作用有限。

4 海温的演变及可能影响

2023 年秋季 SSTA 实况场显示(图 11),赤道中东太平洋海温显著偏高,热带印度洋呈西暖东冷异常分布。国家气候中心监测显示,2021 年 10 月开始的 La Niña 事件于 2023 年 3 月结束,赤道中东太平洋海温持续升高,并于 2023 年 5 月进入 El Niño 状态,随后继续呈现快速增暖趋势;5—10 月 Niño3.4 区海温指数 3 个月滑动平均值连续 5 个月

超过 0.5°C ,达到 El Niño 事件标准,至 10 月正式形成一次中等强度的东部型 El Niño 事件。2023 年秋季 9—11 月 Niño3.4 区降温指数分别为 1.60、1.92、 2.02°C ,南方涛动指数(SOI)自 2023 年 7 月起持续维持负位相;秋季平均(图 12e)及逐月(图 12f~12h)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,日界线附近为异常上升、热带西太平洋上空为异常下沉的沃克环流异常结构较为稳定。此外,秋季 9—11 月热带印度洋全区一致海温模态指数(IOBW)分别为 0.53、0.48、 0.64°C ,热带印度洋偶极子海温指数(TIOD)分别为 0.97、1.42、 0.94°C 。大气及海洋特征均表明,2023 年秋季赤道太平洋海温处于 El Niño 发展成热期,热带大气对 El Niño 的响应已经存在,热带印度洋偶极子型海温异常特征显著。

以往研究表明,热带太平洋及印度洋海温异常对我国秋季降水存在重要影响(湛芸和施能,2003;刘宣飞和袁慧珍,2006a;2006b;Weng et al,2007;贾小龙等,2008;赵俊虎和王永光,2019;张玲等,2021;洪洁莉等,2023)。El Niño 年秋季我国东部

地区降水往往呈现“南多北少”的空间分布。蒲于莉等(2023)的研究表明,东部型 El Niño 事件的发展易引起秋季西太副高偏西,南海地区呈反气旋性环流异常,我国东部地区降水分布呈华南偏多而华中偏少。Gu et al(2015)指出,赤道太平洋“西冷东暖”海温异常纬向梯度结构显著时,菲律宾至我国南海地区为显著反气旋式环流,导致我国南方地区水汽输送偏强,西南地区东南部和长江以南地区降水增多。热带印度洋偶极子正位相年秋季,中南半岛至我国西南地区的西南气流偏强,往往造成我国西南地区东部至长江中游地区降水偏多(刘宣友和袁慧珍 2006a;2006b;张玲等,2021)。洪洁莉等(2023)计算的秋季 TIOD 与 Niño3.4 区海温指数与同期降水异常的关系显示,前者对应降水偏多区位于西南地区东部至江南西部,而后者则对应于江南至华南北部降水偏多。

2023 年秋季我国东部地区自北向南呈“华北偏少-长江中下游以北至黄河下游地区偏多-西南地区

东部至江南西部偏少-华南沿海偏多”的降水分布,与前述以往研究中 El Niño 和 TIOD 的典型影响并不相符。从环流特征看(图 4),虽然 9—10 月菲律

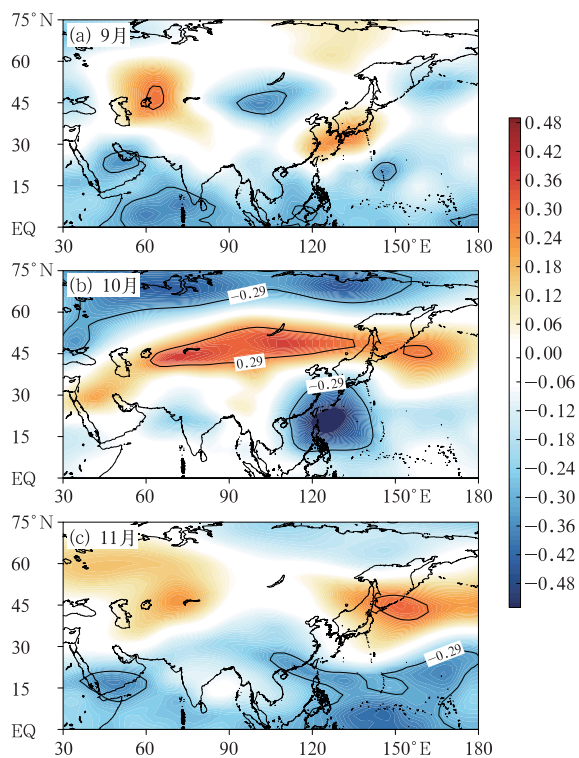


图 9 1979—2023 年秋季降水 EEOF 第四模态的标准化时间系数与同期 500 hPa 位势高度距平场相关的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of correlation between the standardized time coefficients of the 4th mode of precipitation EEOF and the 500 hPa geopotential height anomaly in autumn 1979–2023

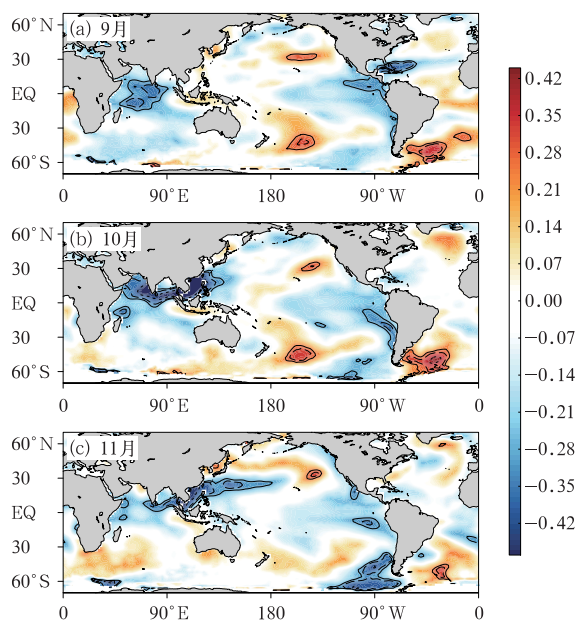


图 10 1979—2023 年秋季降水 EEOF 第四模态的标准化时间系数与同期海温距平相关的空间分布
Fig. 10 Spatial distribution of correlation between the standardized time coefficients of the 4th mode of precipitation EEOF and the SSTA in autumn 1979–2023

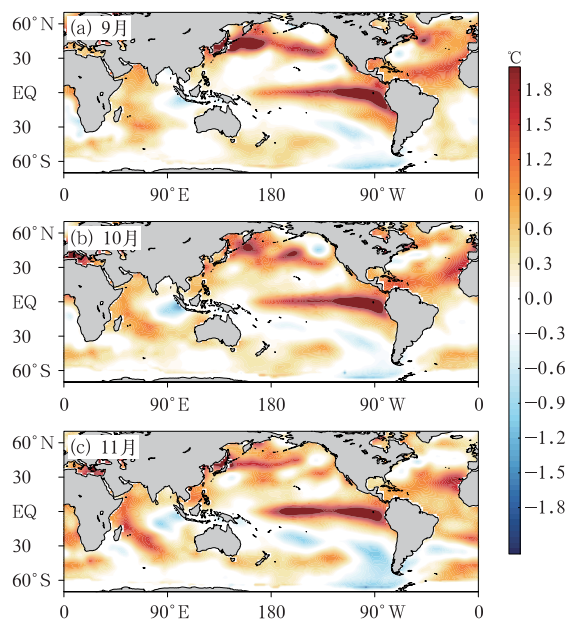


图 11 2023 年秋季实况海温距平分布
Fig. 11 Distribution of observed SSTA in autumn 2023

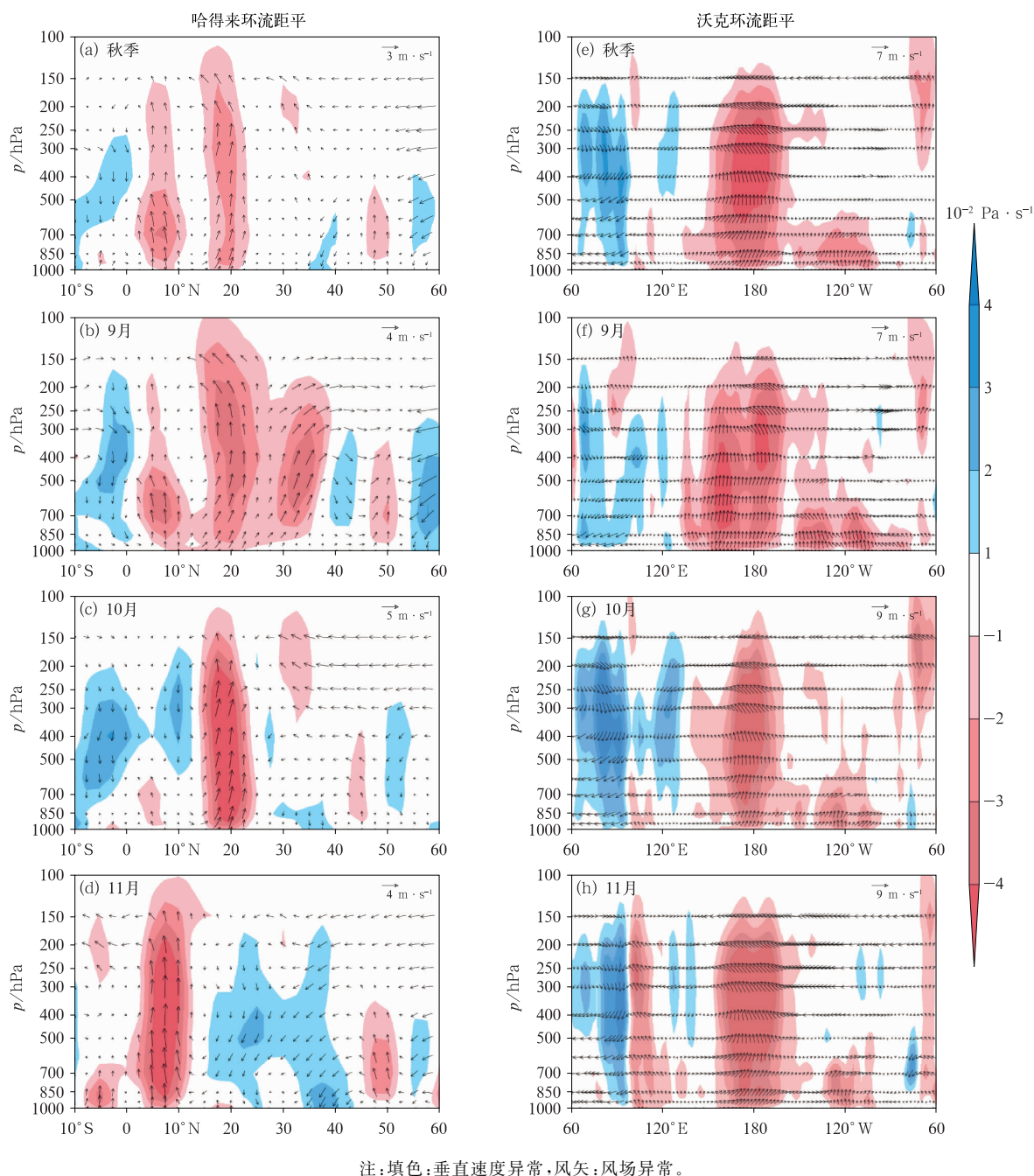


图 12 2023 年 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的哈得来环流距平和 $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ 平均的沃克环流距平

Fig. 12 The Hadley cell anomaly along $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ and the Walker circulation along $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$ in 2023

宾至中南半岛南部呈反气旋式环流异常,但位置偏南;9 月在其北侧也存在一个反气旋式环流异常,导致水汽输送更加偏北,在长江中下游以北至黄河下游地区形成多雨区;而 10 月南海地区近海呈气旋式环流异常,江南地区水汽输送偏弱。9—10 月华南沿海地区降水偏多很大程度上由台风活动引起,并非由稳定的反气旋式环流引起的水汽输送增强所导

致。11 月南海地区反气旋式环流异常特征与以往研究中的 El Niño 典型影响较为近似,但强度较弱。相较于热带地区沃克环流异常对 El Niño 的典型且较为稳定的响应(图 12e~12h),秋季西太平洋至我国东部的经向环流异常中的对流活跃区位置变化明显(图 12a~12d):9 月 20°N 和 30°N 北侧分别存在两个异常上升支(图 12b),分别对应于华南地区台

风活动及副高偏北引起的长江以北多雨带;10月 20°N 附近异常上升支主要与“小犬”和“三巴”活动有关(图12c);11月异常上升支移至 10°N 以南(图12d),对应于菲律宾以东异常反气旋南侧辐合带,而我国东部地区上空为异常下沉运动。上述分析表明,虽然2023年秋季热带大气对El Niño存在较为明显的响应,菲律宾以东也出现了与El Niño典型影响下近似的反气旋式环流异常特征,但我国东部降水分布主要受到季节内副高南北位置变化与近海台风活动以及西风带环流配置的影响。

5 结论与讨论

本文回顾了2023年秋季我国气候异常特征,并从大气环流季节内变化角度初步分析了可能成因,主要结论如下:

(1)2023年秋季,我国大部地区气温接近常年同期到偏高,全国平均气温为 11.3°C ,较常年同期偏高 1.0°C ,为1961年以来历史同期最高,东北地区“前暖后冷”特征明显;全国平均降水量较常年同期偏多 4.4% ,但降水空间分布不均,多雨区较为分散,东北、长江中下游以北至黄河下游地区、华南、西北地区中部、新疆北部降水偏多,而内蒙古中西部、华北、西南地区东南部、新疆南部降水显著偏少;降水季节内变化明显,9月东部地区自北向南呈“少—多—少—多”分布,10月“西多东少”,11月“北多南少”;西北太平洋及南海生成台风较常年同期明显偏少,但登陆偏多,对我国华南地区影响较重。

(2)大气环流异常及其季节内变化是造成2023年秋季气候异常的直接原因。秋季欧亚中高纬环流总体呈“两槽一脊”分布型,导致秋季气温显著偏高;其中,9月呈“两脊一槽”型,10月呈“两槽一脊”型,11月呈“西高东低”型。西太副高脊线9月异常偏北,10月偏南,11月接近常年。印缅槽9月显著偏强,10—11月总体接近常年。9月印缅槽偏强与副高异常偏北共同引导暖湿气流向我东部地区输送,造成长江中下游以北至黄河下游地区多雨;9—10月巴湖附近低槽活动引起了西北地区 and 西南地区阶段性降水偏多,4个近海台风活动则是造成华南地区降水偏多的主要原因;11月东北亚为宽广低槽区,东路冷空气显著增强,导致内蒙古至东北地区

气温偏低、降水偏多。

(3)根据 95°E 以东中国区域秋季逐月标准化降水距平百分率EEOF分析结果,第四模态是2023年秋季降水季节内变化的主导模态,该模态空间特征及与500 hPa位势高度相关场均与2023年秋季逐月实况特点相近。此外,该演变模态与热带海温相关性较弱,表明包括ENSO在内的海温调控作用有限。

2023年秋季赤道中东太平洋海温处于东部型El Niño事件状态,印度洋TIOD呈显著正位相,但我国降水空间分布与以往研究中El Niño及TIOD的影响差异较大。从大气环流及降水特征来看,2023年秋季我国气候异常与副高南北位置、中高纬环流配置、近海台风活动等大气季节内变化关联更密切,不属于对热带海温异常的典型响应。本文初步分析结果显示,2023年秋季我国气候异常成因复杂,尤其显示出季节内变率的重要影响,需进一步研究其发生的演变机理及其可预报性来源。

参考文献

- 白虎志,董文杰,2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象,23(6):884-889. Bai H Z, Dong W J, 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):884-889(in Chinese).
- 陈烈庭,宗海峰,张庆云,2007. 中国东部夏季风雨带季节内变异模式的研究[J]. 大气科学,31(6):1212-1222. Chen L T, Zong H F, Zhang Q Y, 2007. The dominant modes of intraseasonal variability of summer monsoon rain belt over eastern China[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6):1212-1222(in Chinese).
- 陈忠明,刘富明,赵平,等,2001. 青藏高原地表热状况与华西秋雨[J]. 高原气象,20(1):94-99. Chen Z M, Liu F M, Zhao P, et al, 2001. Relationship between the surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation of Southwest China in autumn[J]. Plateau Meteor, 20(1):94-99(in Chinese).
- 湛芸,施能,2003. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. 热带气象学报,19(2):137-146. Chen Y, Shi N, 2003. El Niño/ENSO and climatic anomaly in the autumn of China[J]. J Trop Meteor, 19(2):137-146(in Chinese).
- 顾薇,李维京,陈丽娟,等,2012. 我国秋季降水的年际变化及与热带太平洋海温异常分布的关系[J]. 气候与环境研究,17(4):467-480. Gu W, Li W J, Chen L J, et al, 2012. Interannual variations of autumn precipitation in China and their relations to the distribution of tropical Pacific sea surface temperature[J]. Climatic Environ Res, 17(4):467-480(in Chinese).
- 韩晋平,张人禾,苏京志,2013. 中国北方秋雨与热带中太平洋海表冷

- 却的关系[J]. 大气科学, 37(5):1059-1071. Han J P, Zhang R H, Su J Z, 2013. Relationship between cooling of tropical Pacific sea surface temperature and autumn precipitation in China[J]. Chin J Atmos Sci, 37(5):1059-1071(in Chinese).
- 洪洁莉, 陈丽娟, 王悦颖, 等, 2023. 2022 年秋季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象, 49(4):495-505. Hong J L, Chen L J, Wang Y Y, et al, 2023. Features and possible causes of abnormal climate over China in autumn 2022[J]. Meteor Mon, 49(4):495-505(in Chinese).
- 贾小龙, 张培群, 陈丽娟, 等, 2008. 2007 年我国秋季降水异常的成因分析[J]. 气象, 34(4):86-94. Jia X L, Zhang P Q, Chen L J, et al, 2008. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in China in 2007[J]. Meteor Mon, 34(4):86-94(in Chinese).
- 李多, 顾薇, 2022. 2021 年秋季我国北方地区降水异常偏多的特征及成因分析[J]. 气象, 48(4):494-503. Li D, Gu W, 2022. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over northern China in autumn 2021[J]. Meteor Mon, 48(4):494-503(in Chinese).
- 梁萍, 周兵, 马悦, 等, 2019. 2017 年秋季华西秋雨的多时间尺度变化特征及成因分析[J]. 气象, 45(8):1104-1112. Liang P, Zhou B, Ma Y, et al, 2019. Characteristics of variability on multiple time-scales and cause analysis of autumn rainfall in West China during 2017[J]. Meteor Mon, 45(8):1104-1112(in Chinese).
- 刘宣飞, 袁慧珍, 2006a. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系[J]. 南京气象学院学报, 29(5):644-649. Liu X F, Yuan H Z, 2006a. Relationship between the Indian Ocean dipole and autumn rainfall in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 29(5):644-649(in Chinese).
- 刘宣飞, 袁慧珍, 2006b. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响[J]. 南京气象学院学报, 29(6):762-768. Liu X F, Yuan H Z, 2006b. Effects of ENSO on the relationship between IOD and autumn rainfall in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 29(6):762-768(in Chinese).
- 蒲于莉, 冯娟, 李建平, 2023. 东部型 El Niño 事件发展期秋季对中国极端降水的影响[J]. 高原气象, 42(6):1457-1467. Pu Y L, Feng J, Li J P, 2023. Influence of developing phase of eastern Pacific El Niño events on the autumn extreme precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 42(6):1457-1467(in Chinese).
- 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等, 2020. 2017 年秋季四川阴雨寡照特征及成因分析[J]. 气象, 46(1):37-49. Qi D M, Zhou C Y, Li Y Q, et al, 2020. Analysis of autumn rainy and sunless characteristics and its mechanism in Sichuan in 2017[J]. Meteor Mon, 46(1):37-49(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, 王永光, 2020. 2019 年秋季我国气候异常及成因分析[J]. 气象, 46(4):566-574. Sun L H, Wang Y G, 2020. Features and possible causes of the climatic anomaly in China in autumn 2019[J]. Meteor Mon, 46(4):566-574(in Chinese).
- 孙照渤, 黄艳艳, 倪东鸿, 2016. 我国秋季连阴雨的气候特征及大气环流特征[J]. 大气科学学报, 39(4):480-489. Sun Z B, Huang Y Y, Ni D H, 2016. Climate and circulation characteristics of continuous autumn rain in China[J]. Trans Atmos Sci, 39(4):480-489(in Chinese).
- 王春学, 马振峰, 王佳津, 等, 2015. 华西秋雨准 4 年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J]. 大气科学, 39(3):643-652. Wang C X, Ma Z F, Wang J J, et al, 2015. The characteristics of Huaxi autumn rain and its relationship with sea surface temperatures over the equatorial Pacific[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3):643-652(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).
- 张顾炜, 曾刚, 倪东鸿, 等, 2016. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析[J]. 大气科学, 40(2):311-323. Zhang G W, Zeng G, Ni D H, et al, 2016. Decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2):311-323(in Chinese).
- 张玲, 马茜雅, 袁晓钰, 等, 2021. 热带印度洋-太平洋海温主模态对中国南部秋季降水异常的影响[J]. 大气科学学报, 44(6):954-964. Zhang L, Ma X Y, Yuan X Y, et al, 2021. Modulations of different SST patterns in tropical Indo-Pacific on autumn precipitation anomaly in southern China[J]. Trans Atmos Sci, 44(6):954-964(in Chinese).
- 赵俊虎, 王永光, 2019. 2018 年秋季我国气候异常及成因分析[J]. 气象, 45(4):565-576. Zhao J H, Wang Y G, 2019. Features and possible causes of the climatic anomaly in China in autumn 2018[J]. Meteor Mon, 45(4):565-576(in Chinese).
- 郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰, 2018. 夏季西太平洋暖池热含量对华西秋雨的影响及可能的物理机制[J]. 气象学报, 76(5):714-725. Zheng R, Liu J H M, Ma Z F, 2018. Impacts of the summertime warm pool in the West Pacific on Huaxi autumn rain and its possible physical mechanism[J]. Acta Meteor Sin, 76(5):714-725(in Chinese).
- 支蓉, 陈丽娟, 竺夏英, 2018. 2017 年秋季我国北方地区降水异常偏多成因分析[J]. 气象, 44(4):572-581. Zhi R, Chen L J, Zhu X Y, 2018. Analysis of characteristics and causes of precipitation anomalies over northern China in autumn 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):572-581(in Chinese).
- 中国气象局, 2019. 中国雨季监测指标 华西秋雨: QX/T 496—2019[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Monitoring Indices of Rainy Season in China-Autumn Rain of West China: QX/T 496—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 竺夏英, 宋文玲, 2017. 2016 年秋季中国气候特征及其可能成因[J].

- 气象,43(4):495-500. Zhu X Y, Song W L, 2017. Features of climatic anomalies in China during the fall of 2016 and the possible causes[J]. Meteor Mon, 43(4):495-500(in Chinese).
- Gu W, Wang L, Li W J, et al, 2015. Influence of the tropical Pacific east-west thermal contrast on the autumn precipitation in South China[J]. Int J Climatol, 35(7):1543-1555.
- 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.
- 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.
- Song S K, Li L H, Chen X, et al, 2015. The dominant role of heavy precipitation in precipitation change despite opposite trends in west and east of northern China[J]. Int J Climatol, 35(14):4329-4336.
- Wang Z Y, Zhou B T, 2019. Observed decadal transition in trend of autumn rainfall over Central China in the late 1990s[J]. J Climate, 32(5):1395-1409.
- Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al, 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer[J]. Climate Dyn, 29(2/3):113-129.
- Zhi R, Zhao J H, Zhou J, et al, 2020. Inter-decadal variation of autumn rain of West China and its relationship with atmospheric circulation and sea surface temperature anomalies[J]. Int J Climatol, 40(13):5700-5713.

(本文责编:张芳)