

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).

2021 年秋季我国北方地区降水异常偏多的特征及成因分析^{*}

李 多 顾 薇

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: 2021 年秋季, 我国气候总体呈现气温偏高、降水偏多的特点。季内降水总体表现出“北多南少”的空间分布特征, 华西秋雨异常偏强。对北方地区降水阶段性异常偏强的成因分析表明, 9 月至 10 月上旬, 欧亚中高纬度环流呈“西低东高”型分布, 贝加尔湖—巴尔喀什湖为显著低槽区, 西太平洋副热带高压持续偏强、偏大、西伸明显, 秋季前期异常偏北, 有利于华西秋雨偏强。同期, 850 hPa 距平风场上日本海以西存在的异常反气旋式环流有利于引导偏东路径的冷湿气流输送至黄河与长江之间的地区, 与来自孟加拉湾和南海的暖湿气流交汇, 形成水汽通量异常辐合区, 造成北方地区降水异常偏多。此外, MJO 位于第 3~5 位相的日数异常偏多也是北方降水的有利因素之一。进一步诊断表明热带中东太平洋海温秋季再次进入拉尼娜状态, 双峰型拉尼娜的海温条件有利于西太平洋副热带高压偏强西伸偏北。因此, 海温外强迫信号的影响加上低纬和中高纬度环流异常的共同作用造成 9 月至 10 月上旬东亚环流型异常特征, 并进一步导致我国北方地区降水异常偏多。

关键词: 秋季北方强降水, 季节内转折, 成因分析, 拉尼娜

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2022. 032101

Analysis of Characteristics and Causes of Precipitation Anomalies over Northern China in Autumn 2021

LI Duo GU Wei

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

Abstract: During the autumn of 2021 the climate of China featured higher temperature and more rainfall in general. The distribution of precipitation in China showed “more in the north and less in the south”. The autumn precipitation in West China is extremely heavy. The analysis of the causes of the unusually heavy precipitation in the northern region of China shows that from September to early October, the circulation in the middle and high latitudes of Europe and Asia was distributed in a pattern of “low in the west and high in the east”, the area between Baikal Lake and Balkhash Lake was under a significantly low trough, and the West Pacific subtropical high (WPSH) was stronger, stretching more westward and northward than normal, which was favorable for the intensive autumn rainfall in West China. Meanwhile, anticyclonic circulation anomaly over the western Sea of Japan was conducive to guiding the cold and wet airflow to the area between the Yellow River and the Yangtze River, and met with the warm and wet airflow from the Bay of Bengal and the South China Sea, forming an abnormal convergence area of water vapor flux and resulting in abnormal precipitation in the northern region. In addition, the abnormal more days with MJO is

国家自然科学基金联合基金项目(U2142207)和国家自然科学基金项目(41805067)共同资助

2022 年 1 月 17 日收稿; 2022 年 3 月 21 日收修定稿

第一作者: 李多, 主要从事气候预测研究. E-mail: liduo@cma. gov. cn

in the 3rd to 5th phases was also one of the favorable factors for precipitation in northern China. Further diagnosis shows that the SST in the tropical middle-east Pacific Ocean entered La Niña state again in autumn, and the SST condition of double-dip La Niña was favorable for the WPSH to be stronger and extend westward to the north. Therefore, the influence of the external forcing signal of SST combined with the circulation anomaly in the low and mid-high latitudes led to more precipitation in northern China during September to early October.

Key words: autumn heavy precipitation in northern China, intraseasonal change, possible cause, La Niña

引 言

中国地处欧亚大陆东南部,气候特征表现为显著的季风特色。秋季处于夏季风系统逐渐南撤减弱,而冬季风环流开始发展加强的过渡时期。在这一时段,亚洲大陆上空环流发生了季节性转变:东亚夏季风南撤、季风槽南移、西太平洋副热带高压(以下简称副高)东撤南退,中高纬冷空气开始活跃。这一时期我国主要降水区出现在西北地区东南部、西南地区东部和华中地区西部,被称为华西秋雨(高由禧,1958;高由禧和郭其蕴,1958;中国气象局,2019)。秋季是农作物成熟收获以及冬季农作物播种、移栽的重要季节,这一时期的气候不仅会直接影响到当年农作物的产量,也将影响次年农作物的生长生产,因此华西秋雨等秋季天气气候现象的异常对保障国家粮食生产安全和民生民计有重大意义。做好对秋季气候异常的监测预测和诊断分析不仅有助于正确认识和把握华西秋雨等气候事件的变化规律,提高短期气候预测准确率,同时也对减轻自然灾害影响具有重要的理论指导意义和现实应用价值(白虎志和董文杰,2004;郁淑华,2004;贾小龙等,2008;薛春芳等,2012;侯威等,2015;王春学等,2015;柳龙生和高拴柱,2018)。

我国秋季降水和气温都表现出明显的年际变率(王春学等,2015;Zhi et al, 2020;杨明珠和陈丽娟,2021)。已有研究显示,秋季气候的异常往往是多因子综合作用的结果,不仅受到热带海温、西太平洋暖池热状态和青藏高原热源等下垫面因子的影响(李跃清,1994;陈少勇等,2011;顾薇等,2012;韩晋平等,2013;刘佳等,2015;Gu et al, 2015;郑然等,2018),同时也受到中高纬度大气环流等大气内部动力过程的影响(周游等,2016;Wang and Zhou, 2019)。2021年秋季,我国降水表现出“北多南少”的分布特征,华北和西北地区降水均为1961年以来

历史同期最多,华西秋雨显著偏多;全国大部地区气温接近常年或偏高,南方地区高温天气明显。本文将在总结和归纳2021年秋季主要气候异常特征的基础上,重点分析和探讨造成气候异常的大气环流因子及可能的外强迫因子,为今后的气候预测和服务提供参考。

1 资料和方法

本文使用由国家气象信息中心整编的1961—2021年中国地区2400个台站的逐日气温和降水观测资料数据集。大气环流和海温资料分别使用了1961—2021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 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 水平分辨率的环流变量要素(主要包括位势高度场、经向风场、纬向风场、相对湿度场等)的逐日/逐月再分析资料(Kalnay et al, 1996)、美国国家海洋大气局(NOAA)提供的1982—2021年逐月海表温度资料(Reynolds et al, 2007)。此外,文中所用的副高指数(刘芸芸等,2012)及Niño3.4区指数(Ren et al, 2018)均来自国家气候中心。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”“气候与气候变化监测系统”“大气环流交互诊断系统”。如无特别说明,文中的气候常年值为1981—2010年的平均值。

2 2021年秋季我国主要气候特征

2021年秋季(9—11月),全国平均降水量为159.7 mm,较常年同期(119.8 mm)偏多33.3%。降水量距平百分率的空间分布总体呈现“北多南少”的分布特征:华北、东北、内蒙古中东部、黄淮、江汉西部、华南中西部、西南地区东北部、西北地区大部、新疆东部和西藏西南部降水偏多2~5成,其中华北东部和南部、东北西南部、内蒙古中东部局部、黄淮

大部、西南地区东北部部分地区、西北地区东部和西藏西南部偏多 1 倍以上,华北南部、东北南部、黄淮北部和西北地区东部局部偏多 2 倍以上(图 1a)。华北地区平均降水较常年同期偏多 160.4%,西北地区偏多 67.8%,均为 1961 年以来历史同期最多,东北为 1961 年以来次多。江淮大部、江汉东部、江南南部、华南东北部、西南地区南部及北部、新疆西部和西藏东部降水较常年同期偏少 2 成以上。

2021 年秋季降水表现出明显的季节内变化特征。秋季前期(9 月 1 日至 10 月 10 日)主雨带位于长江以北地区,华北大部、东北中部和南部、黄淮、江汉、西南地区东北部、西北地区东南部等地降水偏多

1 倍以上,上述地区在此期间共出现 7 次区域性暴雨过程(9 月 4 日、9 月 6 日、9 月 16—20 日、9 月 24—26 日、9 月 28 日、10 月 3—7 日、10 月 8—10 日),四川、重庆、贵州、陕西、云南等多地遭受暴雨洪涝灾害,部分河流发生超警及超历史洪水;同时期江淮、江南、华南东部、云南等地区降水明显偏少、气温偏高,出现了较明显的气象干旱和高温天气过程(图 1b)。秋季后期(10 月 11 日至 11 月 30 日),北方地区降水明显减弱、多雨区向北收缩至华北北部和东北地区,而江南南部、华南西部和云南南部降水也较常年同期偏多,因此南方多地的旱情和高温明显缓和(图 1c)。

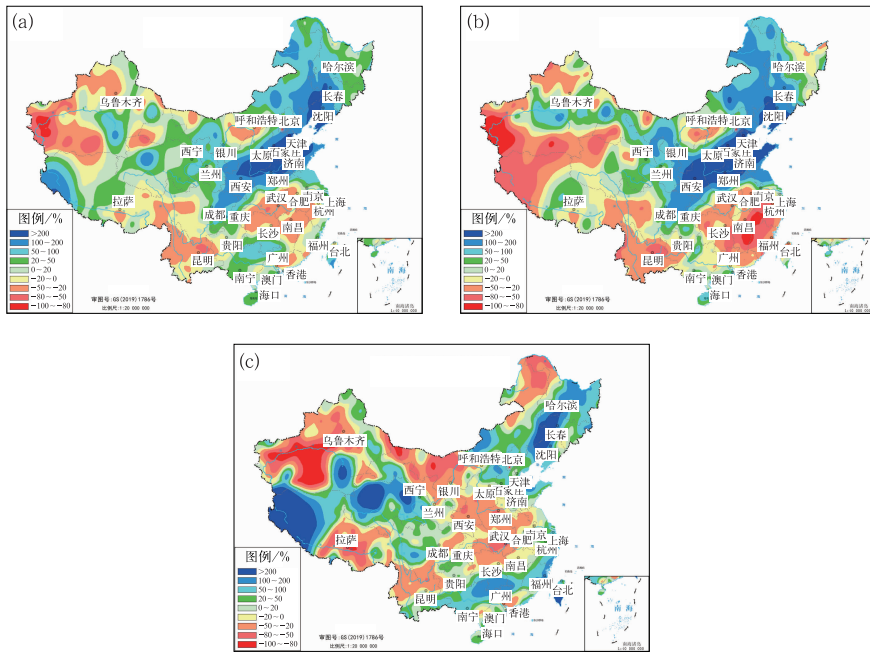


图 1 2021 年秋季(a)、9 月 1 日至 10 月 10 日(b)、10 月 11 日至 11 月 30 日(c)降水距平百分率分布

Fig. 1 Distribution of precipitation anomaly percentage over China in Autumn (a), from 1 September to 10 October (b), from 11 October to 30 November (c) in 2021

根据行业标准对华西秋雨监测的定义(中国气象局,2019),2021 年华西秋雨于 8 月 23 日开始,11 月 8 日结束,累计降水量为 379.9 mm;与常年相比,开始偏早 8 d,结束偏晚 7 d,降水量偏多 87.3%。其中华西秋雨北区(包括陕西南部大部、宁夏南部和甘肃南部)的降水异常尤为突出:秋雨开始日期为 8 月 30 日,较常年偏早 9 d;结束日期为 10 月 16 日,较常年偏晚 3 d;累计降水量达 388.6 mm,较常年偏多近 2 倍,为 1961 年以来最多(图 2)。

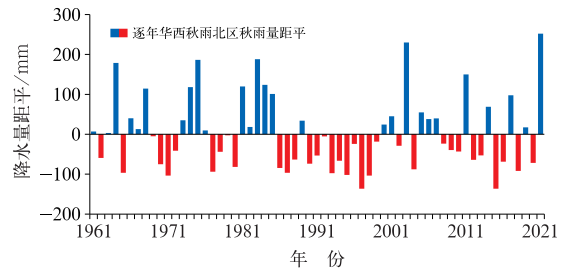


图 2 1961—2021 年华西秋雨北区秋降水量距平序列
Fig. 2 Time series of anomalies of autumn rainfall in the northern part of West China during 1961—2021

2021年秋季,全国平均气温为 10.6°C ,较常年同期(9.9°C)偏高 0.7°C (图3a)。从气温距平的空间看,除新疆大部、甘肃西部和四川东北部气温较常年同期偏低 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ (新疆西北部和东南部局部可偏低 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$)外,全国其余地区气温以接近常年同期到偏高为主,其中东北北部和东部、内蒙古中东部、黄淮南部、江淮、江汉东部、江南大部、西南地区北部和西藏大部气温偏高 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ (图3b)。南方地区共出现4次阶段性区域高温过程,平均高温日数为6.9 d,较常年偏多5.7 d,为1961年以来历史同期最多。湖南、福建、江西、广西、广东高温日数均为历史同期最多。

3 2021年9月至10月上旬我国北方降水异常偏多成因分析

由上述可见,2021年秋季我国气候异常最明显的特征是降水呈“北多南少”,包括华西地区在内的北方地区降水异常偏强,并且这种异常特征在秋季前期(9月至10月上旬)非常明显,而秋季后期北方地区强降水和南方高温都明显减弱,秋季气候异常表现出明显的季节内变化。下文将首先针对大气环

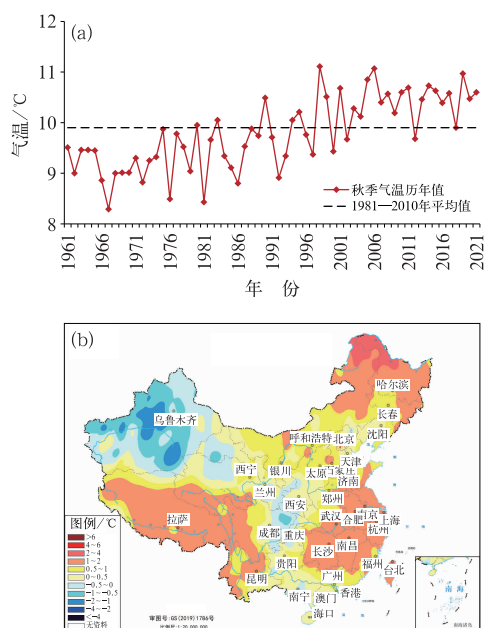


图3 1961—2021年秋季全国平均气温历年变化(a)及2021年秋季平均气温距平分布(b)

Fig. 3 The autumn mean temperature in China during 1961—2021 (a) and distribution of temperature anomalies in autumn 2021 (b)

流进行分析,揭示导致上述气候异常及季内变率的环流成因,再分析海温这一外强迫因子的可能影响。

3.1 大气环流异常特征

2021年9月1日至10月10日:欧亚大陆上空位势高度距平自北向南呈现“高低高”型分布,自西向东呈“西低东高”型分布,从巴尔喀什湖至贝加尔湖存在宽广低槽区,而东亚上空为高压脊控制,有利于冷空气的向南扩散(图4a);同时,副高在这一时

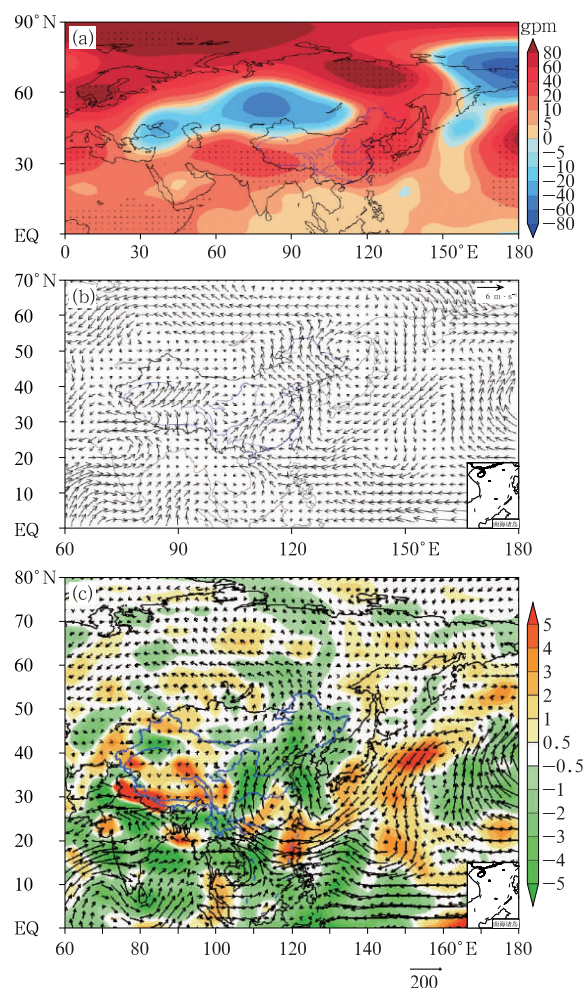


图4 2021年9月1日至10月10日平均大气环流距平场 (a)500 hPa位势高度距平场(黑点为通过0.10显著性水平检验区域), (b)850 hPa距平风场, (c)对流层整层积分水汽通量距平(箭头,单位: $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)及水汽输送通量散度距平(填色,单位: $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig. 4 Averaged atmospheric circulation anomalies from 1 September to 10 October 2021

(a) 500 hPa geopotential anomalies (black dotted area has passed the significance test at 0.10 level),

(b) 850 hPa wind anomalies,

(c) anomalies of moisture flux integrated from 1000 hPa to 300 hPa (vector, unit: $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) and its divergence (colored, unit: $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)

期总体呈现面积偏大,强度偏强,西伸脊点偏西,特别是脊线异常偏北的特点(为 1961 年以来同期最偏北的年份),这样的特征有利于引导低纬水汽向北输送(图 5)。这与前人工作中指出的有利华西秋雨偏强的环流模式,即贝加尔湖—巴尔喀什湖地区低压槽偏强造成冷空气的分裂东移,同时配合偏强西伸的副高外围暖湿气流有利于秋雨偏强(鲍媛媛等, 2003;王遵娅和丁一汇, 2008;袁旭和刘宣飞, 2013; Zhi et al, 2020)相匹配,因此环流因素是导致 2021 年秋季华西地区降水偏强的直接因素。同一时段, 850 hPa 矢量风距平场显示(图 4b),日本海以西存在的异常反气旋环流底部偏南/东南气流可引导来自东北亚及日本海上的冷湿气流向我国东北、华北、黄淮等地输送,副高外围的东南引导气流与来自孟加拉湾和南海北上的西南气流交汇于西南南部至华西秋雨地区并继续向北输送,并最终与上述东北亚—日本海冷湿气流在长江以北地区会合,使得该地区成为水汽通量异常辐合区(图 4c),造成华北、东北、黄淮、江汉、西南东北部、西北东南部等地降水显著偏多;同时副高控制了江淮—江南地区,使得异

常反气旋控制了长江以南大部分地区,盛行的下沉气流使得水汽辐散(图 4c),降水偏少、气温偏高。

3.2 MJO 对秋季前期北方地区降水偏多的可能影响

MJO(Madden-Julian oscillation)是热带大气季节内变率(intraseasonal variability, ISV)的主要模态(Madden and Julian, 1971; 1972),其主要表现为对流活动从热带西印度洋的向东传播,并具有缓慢东传和北传的特征(Chen and Wang, 2018)。目前,关于 MJO 对我国降水的研究多集中在西南、华南、长江中下游等南方地区,研究时段多为夏冬两季(Zhang et al, 2009; 李崇银等, 2013; Yao et al, 2015; 袁媛等, 2017; 吴捷等, 2018)。而秋季 MJO 活动对我国降水影响的研究相对较少。

从监测实况来看(图 6a):2021 年 9 月至 10 月上旬, MJO 主要位于第 3~5 位相(对流中心位于东印度洋—海洋性大陆),并且在 9 月 10—20 日,以及 9 月 26 日至 10 月 10 日出现明显活跃阶段。这两个时段与前文提到的几次北方地区发生强降水过程的时间基本吻合。本文计算了 1981—2021 年逐年秋季 MJO 位于第 3~5 位相的日数,发现 2021 年的日数(40 d)较常年同期(19.2 d)偏多 1 倍以上,居历史排名第三多(仅次于 2020 年的 42 d 和 2009 年的 41 d)(图 6b);进一步地,将这 41 年秋季 MJO 位于第 3~5 位相的日数超过常年平均值 1 倍标准的年份作为异常偏多年,并将其 9 月至 10 月上旬的降水和低层风场(850 hPa)进行合成分析,结果表明:秋季,当 MJO 位于第 3~5 位相的日数较多时,我国长江以北地区降水总体偏多,特别是黄淮、华北、东北等地降水偏多显著(图 6c);而同期低层风场显示低纬有两支水汽输送通道,分别是经孟加拉湾北上的西南气流,以及由南海—西太平洋异常气旋输送的东南气流,二者交汇后持续向长江以北地区输送,为上述地区的降水带来有利条件。这也说明 2021 年秋季 MJO 位于第 3~5 位相的日数异常偏多可能是有利于北方降水偏多的因素之一。但 MJO 影响北方地区秋季降水的具体影响机制还有待将来深入探讨。

3.3 海温异常及演变的可能影响

2020 年 8 月开始的拉尼娜事件于 2021 年 3 月结束后,赤道中东太平洋海温缓慢回升但仍保持中

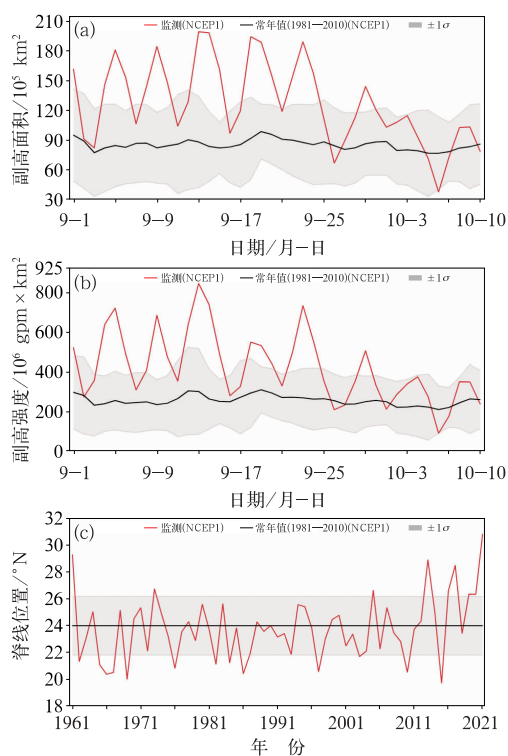


图 5 2021 年秋季副高特征指数序列

(a)副高面积,(b)副高强度,(c)脊线位置

Fig. 5 Time series of WPSH indices in autumn 2021

(a) area, (b) intensity, (c) ridge line

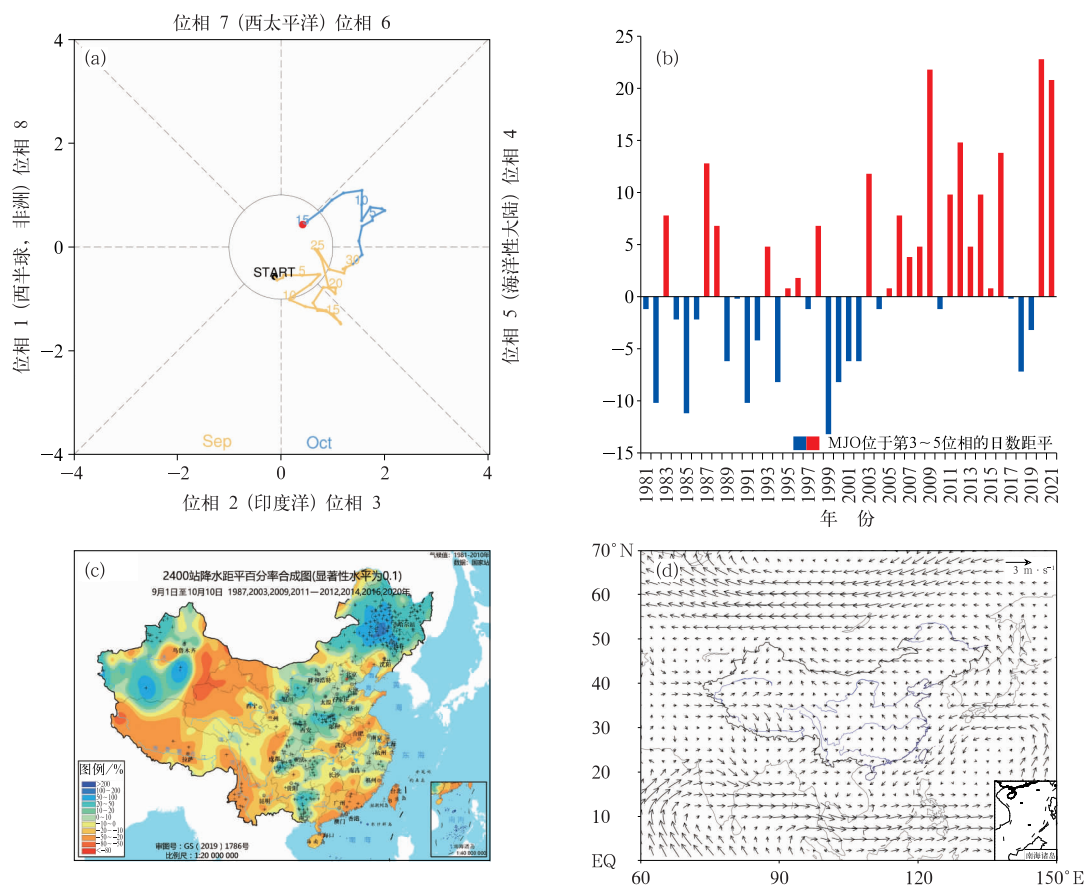


图6 2021年9月1日至10月15日MJO位相监测(a), 1981—2021年秋季MJO位于第3~5位相的日数距平序列(b), 秋季MJO位于第3~5位相的日数异常偏多年的9月至10月上旬降水距平百分率(c), 及偏多年合成的9月1日至10月10日850 hPa距平风场合成(d)

Fig. 6 MJO phase space from 1 September to 15 October 2021 (a), time series of days number anomaly of MJO in 3rd to 5th phases in autumns of 1981—2021 (b), precipitation anomaly percentage from September to early October in those years with more days of MJO in the 3rd to 5th phases in autumn (c), 850 hPa wind anomaly fields (d)

性偏冷状态, 2021年7月之后加强向偏冷状态发展, 8—10月的3个月Niño3.4区滑动平均值为 -0.52°C , 根据Ren et al(2018), 赤道中东太平洋海温已再次进入拉尼娜状态, 热带大气也表现出对中东太平洋冷海温状态的响应, 南方涛动指数(SOI)自6月以来持续保持在较强正位相(图7a)。从2021年秋季海表温度距平的空间分布可见(图7b), 2021年9—11月, 沿赤道及其以南的热带中东太平洋大部海表温度较常年同期偏低 0.5°C 或以上, 南美沿岸及东太平洋部分海区的海温较常年同期偏低 $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$; 而日界线以西的赤道太平洋海温较常年同期偏高 0.5°C 或以上; 赤道太平洋海温“西暖东冷”的分布体现出典型的拉尼娜事件特征。

作为在热带气候系统中季节到年际变化的主导模态, 厄尔尼诺-南方涛动(简称ENSO)对全球天气有着重大影响(Glantz, 2001)。对我国秋季气候而言, 热带太平洋的海温状况是重要外强迫因子之一(湛芸和施能, 2003; 刘宣飞和袁慧珍, 2006; 顾薇等, 2012; 柳艳菊等, 2013; 何珊珊等, 2015; 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)。总体而言, 在拉尼娜年的秋季, 副高位置偏北、巴尔喀什湖附近容易低槽活跃, 我国降水易出现“北多南少”的异常分布特征。

2021年秋季赤道中东太平洋海温的一个显著特点是处于双峰型拉尼娜次年, 即连续两年都发生

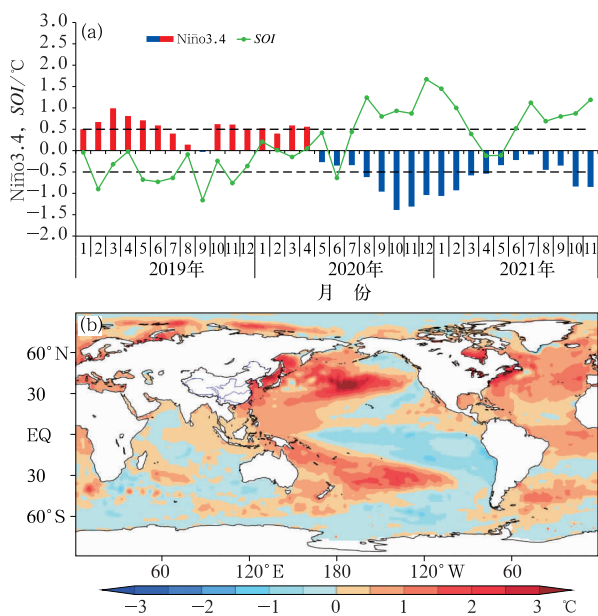


图 7 2019—2021 年 Niño3.4 指数和 SOI 指数(a),

2021 年秋季海表温度距平(b)

Fig. 7 Monthly Niño3.4 index and

SOI index during 2019—2021 (a),

the average SST anomaly in autumn 2021 (b)

了拉尼娜事件的第二年。选取 1981 年以来同样为双峰型拉尼娜次年的秋季(1984、1999、2000、2011 和 2017 年)降水及环流进行合成,结果表明:在双峰型拉尼娜次年秋季,亚洲中高纬地区环流呈现“西低东高”型分布,巴尔喀什湖至贝加尔湖以西为异常低槽区,副高异常偏强、偏西、偏北(图 8a);低层风场上,中心位于渤海上空的异常反气旋环流西侧的异常偏东/东南气流将海洋上的水汽向华北、黄淮、江淮、西北地区东部等地区输送,并与低纬北上的暖湿气流交汇于长江以北(图 8b);最终导致这些地区降水的异常偏多(图 8c)。这些环流特征在 2021 年的环流场(图 4)中都有较明显的体现,进一步说明双峰型拉尼娜事件次年赤道中东太平洋冷海温对于 2021 年秋季气候异常起到了比较明显的作用。

4 结论与讨论

本文结合台站观测资料、再分析资料和海温资料,详细揭示了 2021 年秋季我国气候异常的主要特征,在此基础上分析了造成该异常的环流特征和外强迫信号,结论如下:

(1)2021 年秋季,我国降水呈现“北多南少”的分布特征,华北和西北地区降水均为 1961 年以来历

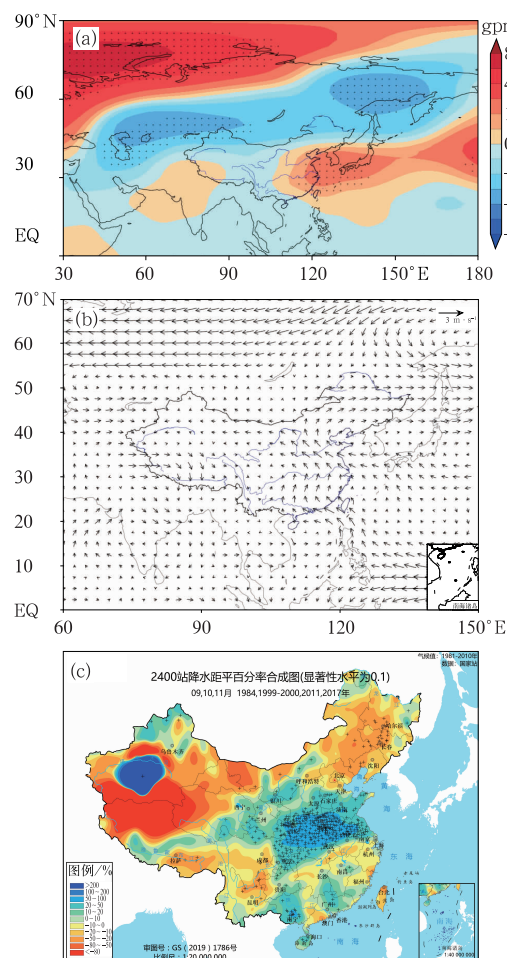


图 8 海温相似年秋季合成分析

(a)500 hPa 位势高度距平场(黑点为通过

0.10 显著性水平检验区域),

(b)850 hPa 距平风场分布,

(c)降水量距平百分率

Fig. 8 Composite analysis of SST distribution in autumn over similar years of “double-dip” La Niña

(a) 500 hPa geopotential height (Black dotted area

has passed the significance test at 0.10 level),

(b) 850 hPa wind anomaly fields,

(c) precipitation anomaly percentage

史同期最多,东北为 1961 年以来第二多。华西秋雨开始偏早、结束偏晚、秋雨量显著偏多,其中华西秋雨北区雨量是 1961 年以来最多,南区降水量也较常年偏多近 1 倍。同时,南方地区总体表现出“温高雨少”的特征,高温日数为 1961 年以来同期最多,华南等地区阶段性气象干旱明显。

(2)大气环流和水汽输送异常是造成 2021 年我国秋季前期(9 月至 10 月上旬)北方地区降水异常偏多的直接原因。在对流层中上层(500 hPa),欧亚

中高纬总体呈现“两脊一槽”的环流特征,中纬度在贝加尔湖至巴尔喀什湖地区存在显著的低槽区,低纬度地区副高偏强偏西、脊线位置在秋季前期异常偏北,有利于西北太平洋上的水汽向北方地区输送;低层风场上(850 hPa),日本海以西存在的异常反气旋环流引导来自东北亚及日本海上的冷湿气流向我黄淮以北地区输送,并与来自孟加拉湾和南海北上的西南气流在长江以北地区会合,使得北方成为水汽通量异常辐合区,从而造成我国北方地区降水异常偏多。另外,MJO在秋季前期位于第3~5位相也有利于北方地区降水的偏多。

(3)2021年春季上一次拉尼娜事件结束之后,秋季赤道中东太平洋冷水再次加强发展并进入拉尼娜状态,使得2021年秋季处于双峰型拉尼娜次年。已有研究和本文的合成分析均显示,双峰型拉尼娜事件次年的赤道中东太平洋冷水效应有利于副高位置偏北、巴尔喀什湖附近低槽活跃,从而有利于更多的水汽在我国北方地区辐合,导致我国降水出现“北多南少”的分布特征。2021年秋季东亚大气环流和我国降水也表现出类似的特征,说明双峰型拉尼娜事件对于我国气候异常产生了较为明显的影响。

值得注意的是,2021年秋季东亚地区大气环流和我国气候异常都表现出非常明显的季节内变化特征。副高在秋季前期(9月1日至10月10日)持续偏北,后期(10月11日至11月30日)则主要表现出偏南的特征;相应的,北方地区的强降水过程和南方地区的高温天气过程主要也都出现在秋季前期。对于这种季节内变化特征,持续性较好的海温异常显然是无法解释的,这也说明2021年秋季气候异常一定还受到其他因子的影响,是多因子综合作用的结果。比如,前文已经提到秋季的这种季节内变化特征可能与MJO所处的位相有着较为紧密的联系。但有关MJO及其他的潜在因子对2021年秋季气候异常的影响仍有待于进一步的深入研究。

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).

鲍媛媛,阿不力米提,李峰,等,2003. 2001年华西秋雨时空分布特点及其成因分析[J]. 应用气象学报,14(2):215-222. Bao Y Y, Abulimiti, Li F, et al, 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001[J]. J Appl

Meteor Sci, 14(2):215-222(in Chinese).

陈少勇,乔立,林纾,等,2011. 中国西部 OLR 与秋季降水的关系[J]. 干旱气象,29(1):1-9. Chen S Y, Qiao L, Lin S, et al, 2011. Relationship between OLR and autumn precipitation in West China[J]. J Arid Meteor, 29(1):1-9(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).

高由禧,1958. 东亚的秋高气爽[J]. 气象学报,29(2):83-92. Kao Y S, 1958. On the high autumn clear weather in China[J]. Acta Meteor Sin, 29(2):83-92(in Chinese).

高由禧,郭其蕴,1958. 我国的秋雨现象[J]. 气象学报,29(4):264-273. Kao Y S, Kuo C Y, 1958. On the autumn raining area in China[J]. Acta Meteor Sin, 29(4):264-273(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).

何珊珊,张文君,祁莉,等,2015. 两类厄尔尼诺事件发展年秋季印度洋海温异常特征对比[J]. 气象学报,73(3):515-528. He S S, Zhang W J, Qi L, et al, 2015. Contrasting SST anomalies over the Indian Ocean between the two types of El Nino events during boreal autumn[J]. Acta Meteor Sin, 73(3):515-528(in Chinese).

侯威,邹旭凯,王朋岭,等,2015. 2014年中国气候概况[J]. 气象,41(4):480-488. Hou W, Zou X K, Wang P L, et al, 2015. Climatic characteristics over China in 2014[J]. Meteor Mon, 41(4):480-488(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).

李崇银,潘静,宋洁,2013. MJO 研究新进展[J]. 大气科学,37(2):229-252. Li C Y, Pan J, Song J, 2013. Progress on the MJO research in recent years[J]. Chin J Atmos Sci, 37(2):229-252(in Chinese).

李跃清,1994. 四川盆地秋雨异常的热力分析[J]. 四川气象,(1):8-9. Li Y Q, 1994. The thermal analysis of autumn rain anomaly in the Sichuan Basin[J]. Sichuan Meteor, (1):8-9, 29(in Chinese).

柳龙生,高栓柱,2018. 2018年9月大气环流和天气分析[J]. 气象,44(12):1635-1640. Liu L S, Gao S Z, 2018. Analysis of the September 2018 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor

- Mon, 44(12):1635-1640(in Chinese).
- 柳艳菊,王艳皎,司东,等,2013.2012年秋季我国气候异常及成因分析[J].气象,39(4):526-530. Liu Y J, Wang Y J, Si D, et al, 2013. Features and possible causes for the climatic anomaly in China in autumn 2012[J]. Meteor Mon, 39(4):526-530(in Chinese).
- 刘佳,马振峰,杨淑群,等,2015.印度洋偶极子和华西秋雨的关系[J].高原气象,34(4):950-962. Liu J, Ma Z F, Yang S Q, et al, 2015. Relationship between Indian Ocean dipole and autumn rainfall in West China[J]. Plateau Meteor, 34(4):950-962(in Chinese).
- 刘宣飞,袁慧珍,2006. 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, 2006. Effects of ENSO on the relationship between IOD and autumn rainfall in China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 29(6):762-768(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾琬秀,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).
- 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).
- 王春学,马振峰,邵鹏程,等,2015.我国华西秋雨的气候变化规律及其影响因子[J].干旱区研究,32(6):1113-1121. Wang C X, Ma Z F, Shao P C, et al, 2015. Climate variation of Huaxi autumn rain and the impact factors influencing it[J]. Arid Zone Res, 32(6):1113-1121(in Chinese).
- 王遵娅,丁一汇,2008.中国雨季的气候学特征[J].大气科学,32(1):1-13. Wang Z Y, Ding Y H, 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(1):1-13(in Chinese).
- 吴捷,任宏利,许小峰,等,2018. MJO对我国降水影响的季节调制和动力-统计降尺度预测[J].气象,44(6):737-751. Wu J, Ren H L, Xu X F, et al, 2018. Seasonal modulation of MJO's impact on precipitation in China and its dynamical-statistical downscaling prediction[J]. Meteor Mon, 44(6):737-751(in Chinese).
- 薛春芳,董文杰,李青,等,2012.近50年渭河流域秋雨的特征与成因分析[J].高原气象,31(2):409-417. Xue C F, Dong W J, Li Q, et al, 2012. Climate characteristic and formative cause of autumn rain in Weihe River Basin in recent 50 years[J]. Plateau Meteor, 31(2):409-417(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).
- 郁淑华,2004.一次华西秋季大暴雨的水汽分析[J].高原气象,23(5):689-696. Yu S H, 2004. Vapour analysis of a heavy rain in west of China in autumn[J]. Plateau Meteor, 23(5):689-696(in Chinese).
- 袁旭,刘宣飞,2013.华西秋雨起止与秋冬季节大气环流转换[J].气象学报,71(5):913-924. Yuan X, Liu X F, 2013. Onset-withdrawal dates of autumn persistent rains over western China and the associated autumn to winter evolution of the atmospheric circulation[J]. Acta Meteor Sin, 71(5):913-924(in Chinese).
- 袁媛,高辉,李维京,等,2017.2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J].气象学报,75(1):19-38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al, 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):19-38(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).
- 周游,管兆勇,张茜,等,2016.秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动年际变化不同位相配置及其对中国气温异常的影响[J].气象学报,74(3):367-379. Zhou Y, Guan Z Y, Zhang Q, et al, 2016. Circulation anomalies and their impacts on autumn temperature variations over China in association with different phase combinations of atmospheric mass migration between lands and oceans and inter-hemispheric oscillations[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):367-379(in Chinese).
- Chen G S, Wang B, 2018. Does the MJO have a westward group velocity? [J]. J Climate, 31(6):2435-2443.
- Glantz M H, 2001. Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Madden R A, Julian P R, 1971. Detection of a 40—50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific[J]. *J Atmos Sci*, 28(5): 702-708.
- Madden R A, Julian P R, 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period[J]. *J Atmos Sci*, 29(6): 1109-1123.
- Ren H L, Lu B, Wan J H, et al, 2018. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction in China[J]. *J Meteor Res*, 32(6): 923-936.
- 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 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: 1395-1409.
- Yao Y H, Lin H, Wu Q G, 2015. Subseasonal variability of precipitation in China during boreal winter[J]. *J Climate*, 28(16): 6548-6559.
- Zhang L N, Wang B Z, Zeng C Q, 2009. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in Southeast China[J]. *J Climate*, 22(2): 201-216.
- 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: 5700-5713.

(本文责编:王婷波)