

东亚副热带季风季节循环年际变化对华北夏季降水的影响

孙婉怡 祝从文

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 由于受到东亚副热带夏季风复杂变化的影响, 华北夏季降水的年际变化预测一直是我国季节气候预测的难点。本文采用 1979-2020 年中国站点日降水数据和 CRA-40 大气再分析资料, 通过谐波分解、MV-EOF 分析等统计方法, 研究了东亚副热带季风季节循环年际变化对华北夏季降水的影响。结果表明: 在气候态上, 华北降水相关的季节循环在 850hPa 风场上主要表现为东南风和西南风主导两种模态, 其中, 西南风主导的降水在 7 月初达到峰值, 而东南风主导的降水在 7 月底达到峰值。在年际尺度上, 季节循环前两个主模态中的华北降水虽然表现为区域一致性变化特点, 但在夏季先后受到西南风和东南风的影响。通过对季节循环华北夏季风雨季的开始时间 (P1)、峰值时间 (P2)、结束时间 (P3)、持续时间 (D) 和振幅 (A) 与夏季 (6-8 月) 降水年际变化分析, 我们发现东南风主导的季节循环的开始时间、结束时间、振幅与华北夏季降水异常呈显著正相关, 而峰值时间和持续时间与华北夏季降水异常呈负相关。西南风主导的季节循环的峰值时间、结束时间和振幅与华北夏季降水异常均呈显著正相关。其中, 东南风季节循环的位相 (P1、P2、P3) 变化与夏季西南风的强度有关, 而其幅度 (A) 变化主要取决于东南风的强度。由于东南风主导的夏季降水开始于每年的 4-5 月份, 其建立的早晚为 6-8 月夏季降水的季节预测提供了一个新的参考指标。

关键词 东亚副热带夏季风 季节循环 年际变化 华北夏季降水

文章编号 2021184B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21184

收稿日期 2022-01-18

网络预出版日期

作者简介 孙婉怡, 女, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事东亚季风和华北降水研究。E-mail: tjsunwanyi@163.com

通讯作者 祝从文, E-mail: zhucw@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金(41830969), 中国气象科学研究院科技发展基金(2020KJ012)

Funded by National Natural Science Foundation of China (41830969), S&T Development Fund of CAMS (2020KJ012).

The interannual variation of Annual Cycle of the East Asian Subtropical Monsoon and its Impact on Summer Rainfall in North China

Sun Wanyi and Zhu Congwen

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Owing to the complicated change of East Asian summer monsoon and chaotic influence, the accurate forecast of summer rainfall anomalies in North China is a great challenge. To understand the origin of summer rainfall anomalies in this region, we applied the daily observed rainfall with CRA-40 atmospheric reanalysis, harmonic and MV-EOF analysis to examine the impact of annual cycle of East Asian subtropical summer monsoon (EASSM) on the summer rainfall anomalies in North China during 1979-2020. Our results show that, in climatology, the rainfall related seasonal cycle of winds at 850hPa in North China exhibits two dominant modes, characterized by the southwesterly and southeasterly, which reaches their peak in early and late July, respectively. Although the rainfall in North China revealed by the first two modes exhibits consistent changes on interannual scale, it is successively affected by southwesterly wind and southeasterly wind anomalies. Based on the analysis of the onset date (P1), peak date (P2), retreat date (P3), duration (D) and amplitude (A) of the annual cycle modes during the rainy season and the summer monsoon rainfall (from June to August) anomalies in North China, We found that the onset and retreat date, and the amplitude of annual cycle modes dominated by southeast wind are significantly positively correlated with the summer rainfall anomalies in North China, while the peak date and duration are negatively correlated with the summer rainfall anomalies in North China. Its phases (P1, P2, P3) variation are related to the intensity of southwest wind in summer, while the amplitude (A) variation mainly depends on the intensity of southeast wind. The peak date, retreat date and amplitude of the second annual cycle mode, dominated by southwesterly wind shows a significantly positive correlations with summer rainfall anomaly in North China. Since the summer rainfall dominated by the southeast wind starts from April to May, the establishment of the EASSM related to the rainfall in North China provides a new index for the seasonal forecast of summer rainfall in North China.

Keywords East Asian subtropical summer monsoon, Annual cycle, Interannual variation, summer rainfall anomalies in North China.

1. 引言

东亚季风表现为显著的季节变化,受此影响,我国东部冬季寒冷干燥,夏季炎热湿润。东亚夏季风是我国重要的水资源来源,伴随夏季风由南向北推进,影响我国的雨带和降水呈现出由南向北移动和增强的特征。先后经历了江南春雨、华南前汛期、长江梅雨以及华北和东北雨季。华北降水在7月下旬至8月上旬达到全年最强,预示着东亚夏季风达到峰值(Wang and Lin, 2001; Ding and Chan, 2005; 祝从文等, 2011; He and Liu, 2016)。华北人口密度较大,是我国经济、政治、文化中心,同时华北平原是我国的三大平原之一,低平的地形有利于农作物种植。夏季风降水在人们的日常出行、经济发展、农业生产等方面有着重要影响,准确的降水预报也有利于制定合理的防灾减灾措施。

华北夏季降水的主要水汽来源有中纬度西风带水汽输送,印度夏季风水汽输送,以及东亚副热带夏季风水汽输送(周晓霞, 2008a; Jiang et al., 2017; 杨柳等, 2018; 孙博等, 2020; 施逸等, 2021)。其中,来自南海和菲律宾海的水汽是重要的水汽来源(郝立生等, 2012; 丁一汇等, 2020)。华北夏季降水属于锋面副热带夏季风性质,受到西北太平洋副热带高压和中高纬度西风带波动的共同影响(孙安建和高波, 2000; 梁平德等, 2006; 杜银等, 2009; Liang et al., 2011; 金炜昕等, 2014; 赵思雄等, 2018; 于晓澄等, 2019),东亚副热带季风的长期变化趋势和年际波动对华北夏季降水具有重要的影响。伴随全球的变暖,自上世纪70年代之后东亚夏季风由强转弱,导致了我国的南涝北旱现象(黄荣辉等, 1999; 周连童和黄荣辉, 2003; 徐桂玉等, 2005; 马柱国和符淙斌, 2006; 徐康等, 2011a, 2011b; Zhu et al., 2012; 张书萍等, 2014)。东亚夏季风的持续性减弱所导致的来自南海和华南地区向北的水汽输送减弱,是造成华北夏季降水持续性减少的直接原因(周晓霞等, 2008b; 施小英等, 2009; 黄荣辉等, 2011; 郝立生等, 2012; Li et al., 2012; 郭志荣等, 2014)。此外,华北夏季降水表现出显著的年际变化。东亚夏季风向北推进早晚和强度的年际变化是影响华北夏季降水量的重要因子。当东亚夏季风向北推进偏早时,华北雨季开始的时间也偏早(于晓澄等, 2019)。在夏季风偏强(弱)的年份,向华北地区输送的水汽较多(少),造成华北夏季降水偏多(少)(孙安建和高波, 2000; 赵声蓉等, 2002; 张天宇等, 2007; Ding et al., 2008; 马京津等, 2008; 郝立生等, 2016; 黄思洁等, 2019)。

夏季华北降水是东亚季风季节循环的关键环节之一，东亚季风的季节循环主要表现为春分和夏至两个模态，夏季风的季节进程表现为春分模态向夏至模态的过度（Jiang et al., 2020）。其中，春分模态季节进程早晚的年际变化异常导致华北地区春秋季节降水的反向变化，可以用于华北降水的跨季节气候预测。然而，有关华北夏季降水与季节循环年际变化之间的关系依然不够清楚。为此，本文将从东亚副热带夏季风的季节循环出发，通过揭示其季节循环主要模态和年际变化，探究东亚副热带夏季风年际变化对华北夏季降水的影响，为提高华北地区降水预报准确率提供一定的理论依据。

2. 资料和方法

本文用到的中国站点逐日降水数据取自中国气象局国家气象信息中心，选取的华北地区台站 320 个（图 1），分析时段为 1979-2020 年。大气环流场数据取自中国全球大气再分析资料 CRA-40，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，垂直高度上共 64 层，用到的变量有 200hPa、500hPa、850hPa 风场，选取时段为 1979-2020 年。CRA-40 是我国第一代全球大气再分析资料，该资料同化了地面观测，无线电探空和卫星数据等（Zhao et al., 2019; Zhao et al., 2021）。由于优先（相对于 CFSR 再分析产品的公开发布的输入数据和美国 NCEP 全球预报系统全球数据同化系统（GDAS）同化输入观测数据）和大量使用了重处理卫星数据，观测数更多，偏差和均方根误差更小，且时间序列更稳定，数据的完整性和质量明显提高（王旻燕等，2018）。此外，该再分析产品同化了全球综合飞机观测气象资料，并进行严格的质量控制，数据具有更高的准确性和稳定性（Liao et al., 2021）。评估表明，CRA 大气再分析产品达到了国际第三代再分析产品水平（王旻燕等，2018; Zhao et al., 2019; Li et al., 2020; Liang et al., 2020; Liao et al., 2021; 刘梦杰等，2021; Yu et al., 2021; Zhao et al., 2021）。其中，CRA-40 在反映亚洲副热带西风急流、降水、气温、地表温度、土壤湿度等方面与现有再分析资料质量相当或优于现有再分析资料。

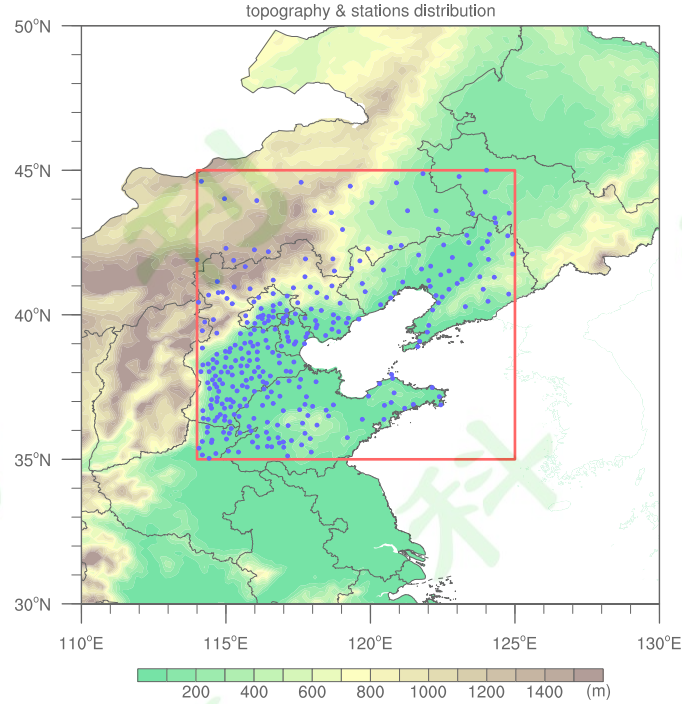


图 1 华北地区地形（填色，单位：m）及本文使用的降水台站（蓝色圆点）分布。红色矩形为夏季降水研究的关键区。

Fig. 1 Topography (shading, units: m) and distribution of in-site stations (blue dots) used in this paper in North China. The red rectangle indicates the target area in current study.

本文主要关注降水和环流的季节循环分量的年际变化，采用谐波分析方法提取降水和环流的季节循环分量（Song et al., 2016）。我们针对每一年的气象要素，采用如下公式将原始变量分解为 4 个分量：

$$F(t) = AM + AC(t) + ISO(t) + R(t)$$

其中，F 为变量的原始数据；AM（Annual Mean）为年平均分量；AC（Annual Cycle）为年循环（季节循环）分量，即前三个谐波之和；ISO（Intraseasonal Oscillation）为次季节分量，即 4-36 谐波之和；R 为残差项，即周期小于 10 天的谐波之和。本文主要分析季节循环分量的气候特征和年际变化特征，及其对华北夏季降水的影响，其中气候态定义为 1981-2010 年的平均值。

3. 华北降水和环流季节循环气候特征

华北地区处于东亚夏季风影响的北边缘（汤绪等, 2006, 2009; 胡豪然和钱维宏, 2007），最北边缘位置为 44°N，最南位置为 33°N，东亚夏季风边缘带集中反映了我国北方（35°N 以北）夏季降水的变化特征（胡豪然和钱维宏, 2007）。同

时考虑到华北地区复杂的海陆地形分布, 本文选取 35° - 45° N, 114° - 125° E 为研究关键区 (见图 1 中红色矩形区域), 讨论华北降水和环流的季节循环变化特征。

图 2 表示的是气候平均华北区域降水、东亚季风指数 (祝从文等, 2000)、850hPa 纬向风和经向风在年平均基础上的季节循环 (AC) 和次季节分量 (ISO) 的时间变化。如图所示, 华北区域降水超过 4mm/day 的时段主要集中在 7、8 月份, 时间上对应降水 AC 分量的峰值阶段。东亚季风指数显示, 东亚季风季节循环在 5 月初全面完成了冬季风向夏季风的过度, 并在 8 月达到了夏季最强, 与华北降水达到峰值的时间相对应。在由冬向夏的季节转换过程中, 850hPa 风场在华北地区主要表现为纬向西风减弱以及经向北风向南风的转换, 在 7、8 月, 偏西风达到最小值, 而偏南风达到全年峰值。对 114 - 125° E 平均的 850hPa、500hPa 和 200hPa 的风场经向剖面季节循环分析可以发现 (图略), 华北 500hPa 以上全年盛行偏西风, 冬强夏弱; AC 分量则表现为西北风与东南风之间的交替。在 850hPa 高度上, 华北风场表现为偏西风和西南风之间的转换, 西南风在 7 月达到峰值; 而 AC 分量则表现为西北风与东南风之间的转换, 当东南风在 8 月份达到峰值时, 华北降水达到峰值。

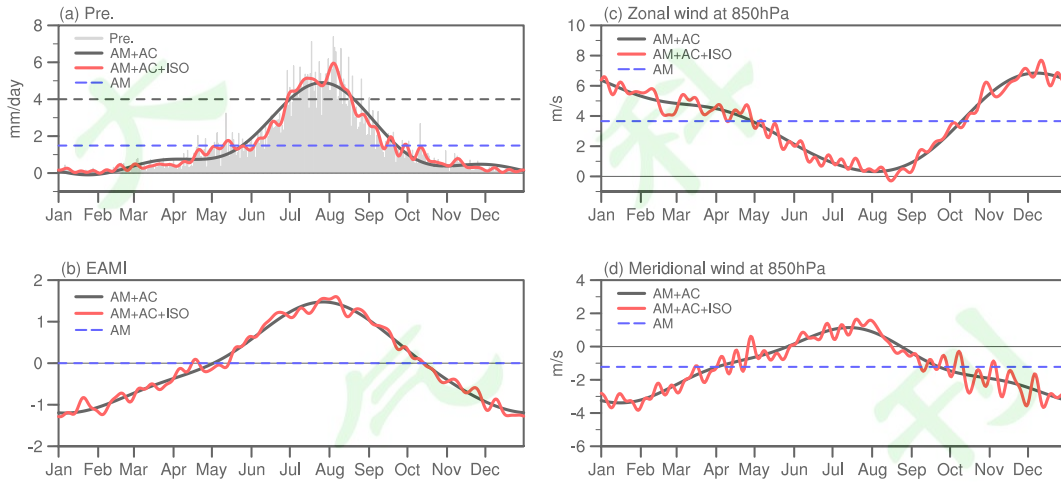


图 2 气候态 (a) 降水 (单位: mm day^{-1})、(b) 东亚季风指数 (EAMI)、(c) 850hPa 纬向风 (单位: m s^{-1})、(d) 850hPa 经向风 (单位: m s^{-1}) 的时间序列。灰色柱代表原始数据, 蓝色虚线代表年平均分量 (AM), 黑色实线代表年平均、季节循环分量之和 (AM+AC), 红色实线代表年平均、季节循环、次季节分量之和 (AM+AC+ISO)。降水、风场为华北区域平均。

Fig. 2 Time series of climatic (a) precipitation (units: mm day^{-1}), (b) East Asian Monsoon Index (EAMI), (c) zonal wind at 850hPa (units: m s^{-1}), (d) meridional wind at 850hPa (units: m s^{-1}). Grey

bars represent the original data; blue dashed lines represent the annual mean (AM) component; black solid lines represent the sum of annual mean (AM) and annual cycle (AC) component; red solid lines represent the sum of annual mean (AM), annual cycle (AC) and intraseasonal (ISO) component. Precipitation and winds are the average of North China.

研究指出, 大气中 80% 以上的水汽集中在 500hPa 以下, 在 850hPa 等压面上水汽通量最大 (马京津等, 2008)。从风场的季节循环来看, 850hPa 风场的冬夏季风环流差异更加明显。因此, 为揭示华北降水相关的环流季节循环变化特征, 我们对华北台站降水与 850hPa 风场的季节循环分量进行了主模态分析。图 3 表示的是气候态华北降水和 850hPa 风场 AC 分量的 MV-EOF 分析结果。其中, 第一模态的解释方差为 76.77%。华北降水在空间上表现为一致性变化特征, 6-8 月是夏季降水和东南风盛行期, 降水在 7 月底达到峰值。风场上表现为西北风和东南风之间的转换。上述结果与 Wang and Lin (2002) 揭示的东亚季风区低层风场为西北风和东南风的冬夏转换结果一致。第二模态的解释方差为 9.32%, 降水在空间分布上符号一致, 量值北部大于南部, 该模态在 7 月初达到峰值。在 850hPa 风场上, 夏季主要表现为气旋性环流, 华北以南盛行西南风。对比两个模态的时间系数可以发现, 第二模态在夏季达到峰值时间要早于第一模态, 说明初夏时华北北部降水增加速率大于南部, 随后华北全域降水快速增多; 而从风场来看, 华北夏季期间, 前期的水汽更多的来源于南方江淮流域, 后期的水汽主要来源于西北太平洋。因此, 来自南方和西北太平洋水汽的交替输送导致了华北夏季降水主要出现在 7 月下旬至 8 月上旬。

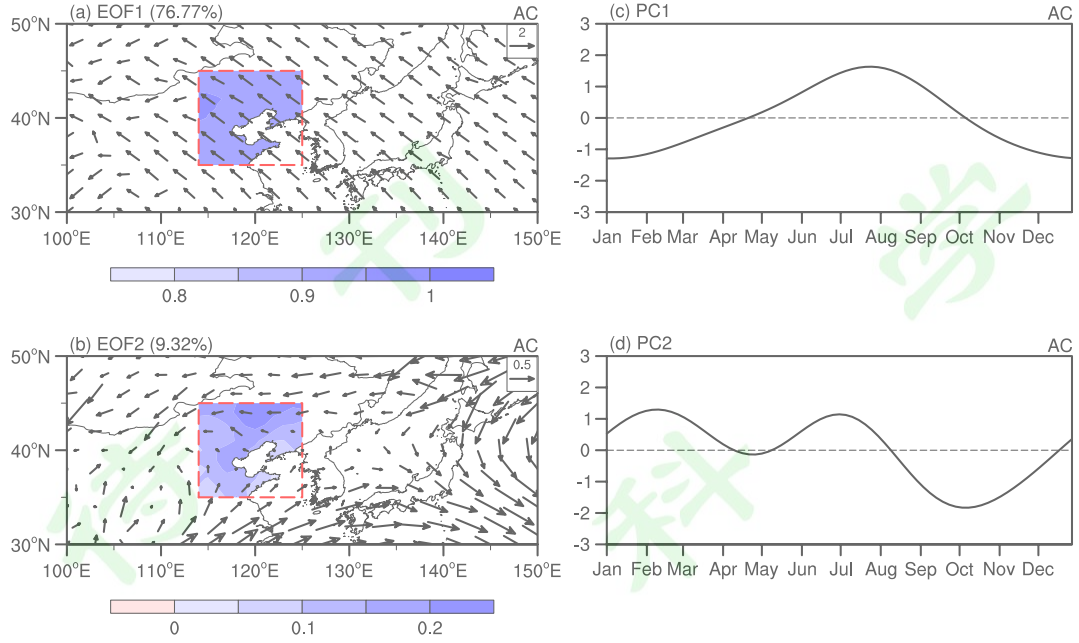


图3 气候态降水和850hPa风场季节循环分量(AC)MV-EOF分析结果。(a-b)为前两个模态的空间分布(填色为降水,矢量为风场);(c-d)为前两个模态的时间序列。

Fig. 3 MV-EOF analysis of the annual cycle (AC) component of climatic precipitation in North China and winds at 850hPa. (a-b) spatial patterns of the first two modes (shading and vector indicate the precipitation and winds, respectively). (c-d) time series of the first two modes.

4. 季节循环年际变化对华北夏季降水的影响

4.1 季节循环年际变化特征

华北降水的季节循环存在显著的年际差异,夏季(6-8月)季节循环分量的年际变化与夏季降水异常之间存在高度的相关。由1979-2020年华北夏季降水年平均、季节循环和次季节分量的异常变化对夏季季节、月和候平均降水距平方差贡献率可以发现(图4a),在季节平均尺度上,季节循环分量的方差贡献最大,超过60%;在月平均尺度上,季节循环分量也有较大的方差贡献(40%左右);而在候平均尺度上,华北降水的主要贡献来自次季节分量的变化。通过对比各分量与夏季季节、月和候平均降水的相关系数也可以看出(图4b),季节循环分量与季节和月平均尺度的降水均有着最高的相关性,相关系数分别超过0.95和0.75。因此,夏季华北降水的年际变化主要来自季节循环年际变化的影响。

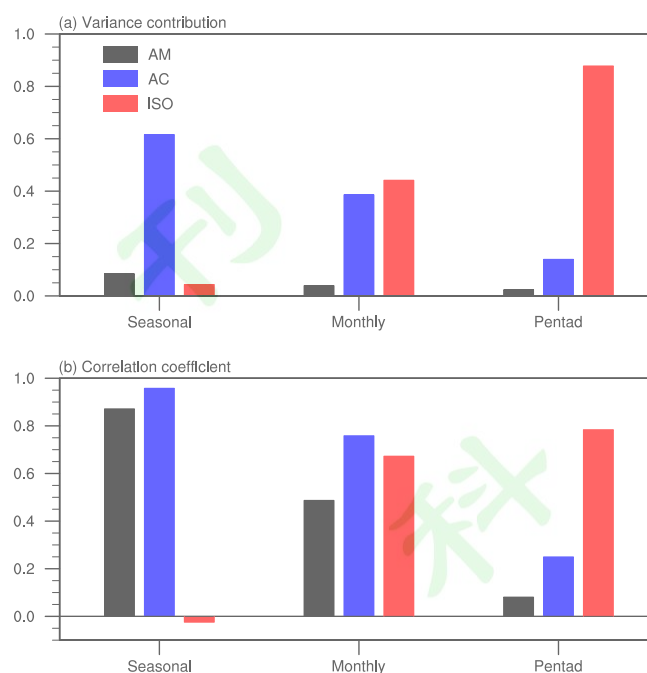


图 4 华北夏季降水年平均 (AM, 黑色柱)、季节循环 (AC, 蓝色柱)、次季节 (ISO, 红色柱) 分量的异常对/与夏季季节、月、候平均降水异常的 (a) 方差贡献率和 (b) 相关系数。

Fig. 4 (a) Variance contribution, (b) correlation coefficient of the annual mean (AM, black bars), annual cycle (AC, blue bars) and intraseasonal (ISO, red bars) component anomalies of rainfall to/and total rainfall anomalies on seasonal, monthly, pentad time scale in summer in North China.

Wang et al. (2008) 采用降水和风场 MV-EOF 第一模态时间系数定义了夏季风强度, 并指出该定义方法适用于研究东亚夏季风的年际变化。为突出华北地区降水相关的季节循环年际变化, 本文将 1979-2020 年期间的华北台站降水与 850hPa 的风场的季节循环分量进行了 MV-EOF 分析 (图 5)。前两个主模态的解释方差分别为 55.56% 和 10.32%, 反映的是与气候场类似的季节循环特征 (图 3)。华北降水在空间上均表现出一致性变化特征, 夏季风期间降水对应的环流分别以东南风和西南风为主。第二模态中降水对应的环流特征主要表现为西南风与华北盛行的气旋性环流之间的相互作用。华北降水及其相关环流的季节循环年际变化主要反映为时间系数的年际变率。对比两个模态的时间系数可以看出, 第二模态夏季峰值时间早于第一模态, 且年际变率明显大于第一模态。

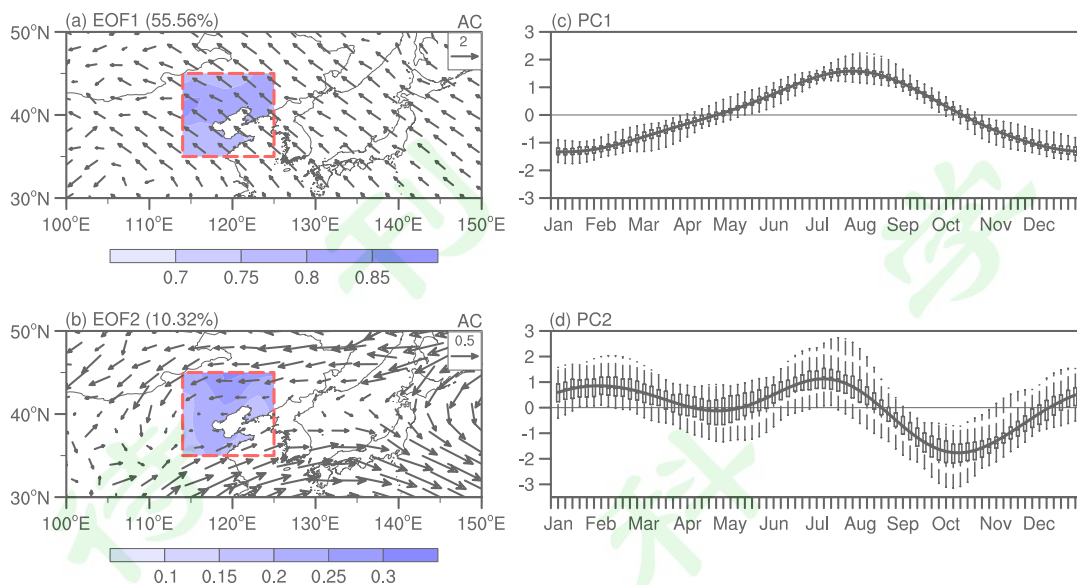


图 5 1979-2020 年降水和 850hPa 风场 AC 分量的 MV-EOF 分析。（a-b）为前两个模态的空间分布（填色为降水，矢量为风场）；（c-d）为前两个模态的时间序列。盒须图中矩形的上下边界分别为上下四分位点，矩形中间的横线为中位数位置，虚线的上下边界分别为最大值和最小值，黑色实线为 1979-2020 年的平均值。

Fig. 5 MV-EOF analysis of the annual cycle component of precipitation in North China and winds at 850hPa from 1979 to 2020. (a-b) spatial patterns of the first two modes (shading and vector indicate the precipitation and winds, respectively). (c-d) time series of the first two modes. The box and whiskers plots indicate the 25th, 50th, and 75th percentile, as well as minimum and maximum values, respectively. The thick black line is the mean of 1979-2020.

为了进一步定量揭示华北降水和风场季节循环的年际变化特征，我们根据图 5 中的时间系数定义如下几个参数来描述其季节循环的年际变化（见图 6）。其中，P1 为开始时间，即时间系数由负转正的时间；P2 为峰值时间，即时间系数达到最大值的时间；P3 为结束时间，即时间系数由正转负的时间；D 为持续时间，即 P3-P1；A 为振幅，即时间系数的最大值。由于第二模态对应的时间系数无法确定开始时间，因此我们主要针对 5-10 月的峰值时间(P2)、结束时间(P3)、振幅（A）进行分析。

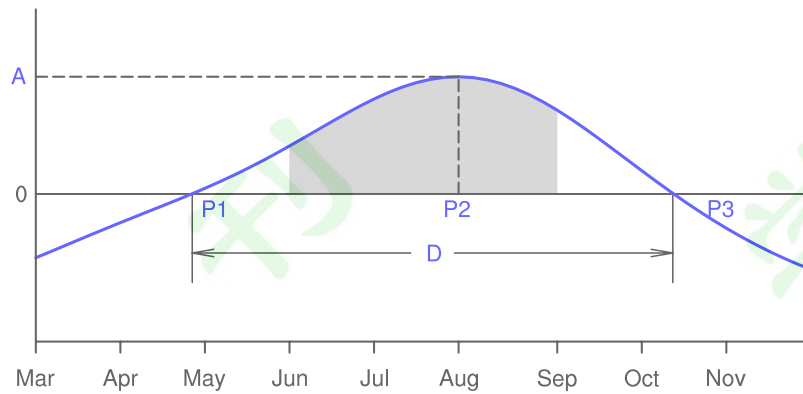


图 6 华北降水相关环流季节循环的 5 个参数定义示意图。P1 为开始时间，P2 为峰值时间，P3 为结束时间，D 为持续时间，A 为振幅，阴影区域为华北汛期（6-8 月）时段。

Fig. 6 The schematic of parameters about seasonal cycle of circulation related to precipitation in North China. P1 represents the onset date. P2 represents the peak date. P3 represents the retreat date. D represents the duration. A represents the amplitude. The shaded area indicates the flood season (June-July-August) of North China.

4.2 季节循环年际变化对华北夏季降水异常影响

图 7 表示的是基于季节循环第一模态（东南风模态）、第二模态（西南风模态）时间系数定义的季节循环各参数标准化后的时间序列及华北夏季降水距平前两个 EOF 模态时间系数的年际变化。图 8 表示的是前两个模态各参数之间的相关系数。其中，左下象限为第一模态各参数之间的相关系数。可以发现，华北夏季降水开始时间的早晚与持续时间呈显著的负相关关系，而与结束时间呈正相关；振幅与持续时间和结束时间均呈负相关；夏季降水异常强度与振幅呈正相关。右上象限为第二模态对应的季节循环各参数之间的关系。第二模态的峰值时间与振幅和结束时间均呈显著正相关。左上和右下象限表示的是前两个季节循环模态之间的年际变化关系。可以发现，前两个模态对应的峰值时间在年际变化上表现为显著的负相关，两者的结束时间则呈正相关。第一模态的振幅和第二模态结束时间呈负相关，华北夏季降水异常第一模态的时间变化与季节循环的第二模态的振幅呈正相关。华北夏季降水异常的第二模态在空间上表现为北正南负，其年际变化与季节循环第一模态的夏季风降水开始时间呈显著的负相关。

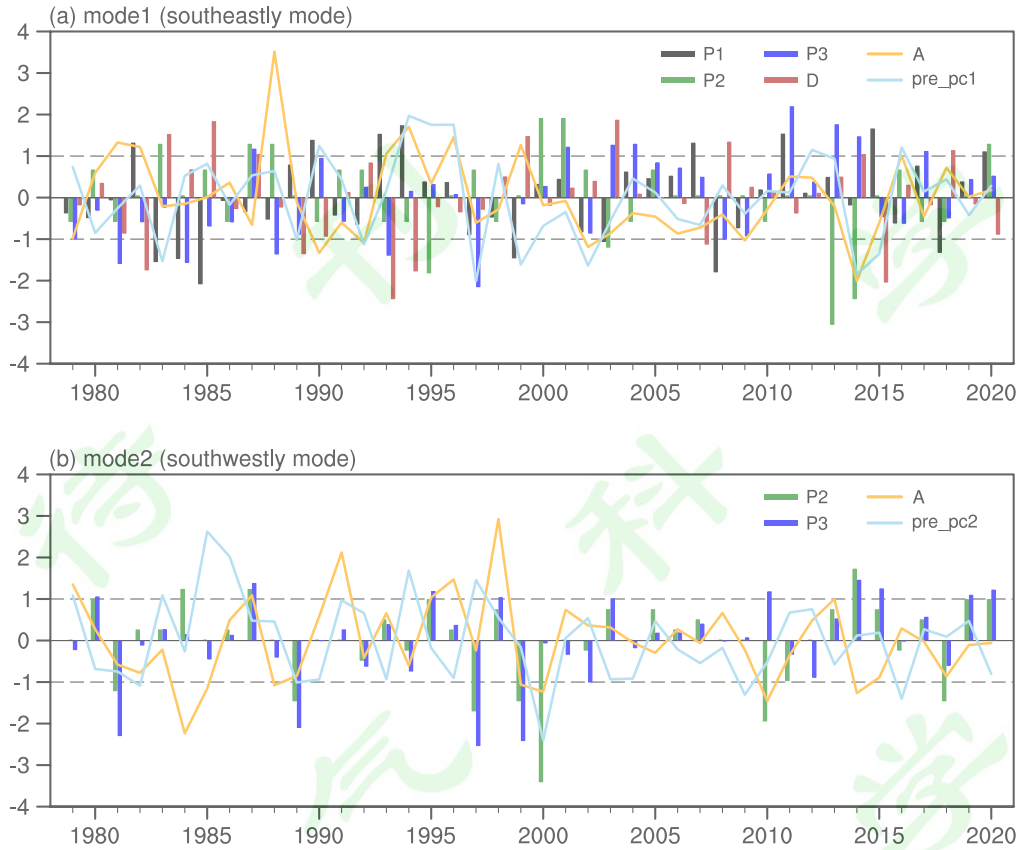


图 7 (a) 第一模态 (东南风模态)、(b) 第二模态 (西南风模态) 各参数的标准化时间序列。pre_pc1 和 pre_pc2 为 1979-2020 年华北夏季平均降水 EOF 分析前两个模态的时间系数。黑色虚线所示位置为一个标准差。

Fig. 7 Standardized time series of parameters of the (a) first mode (southeastly mode), (b) second mode (southwestly mode). Pre_pc1 and pre_pc2 indicate the time series of the first two EOF analysis of summer rainfall in North China from 1979 to 2020. The black dashed lines represent one standard deviation.

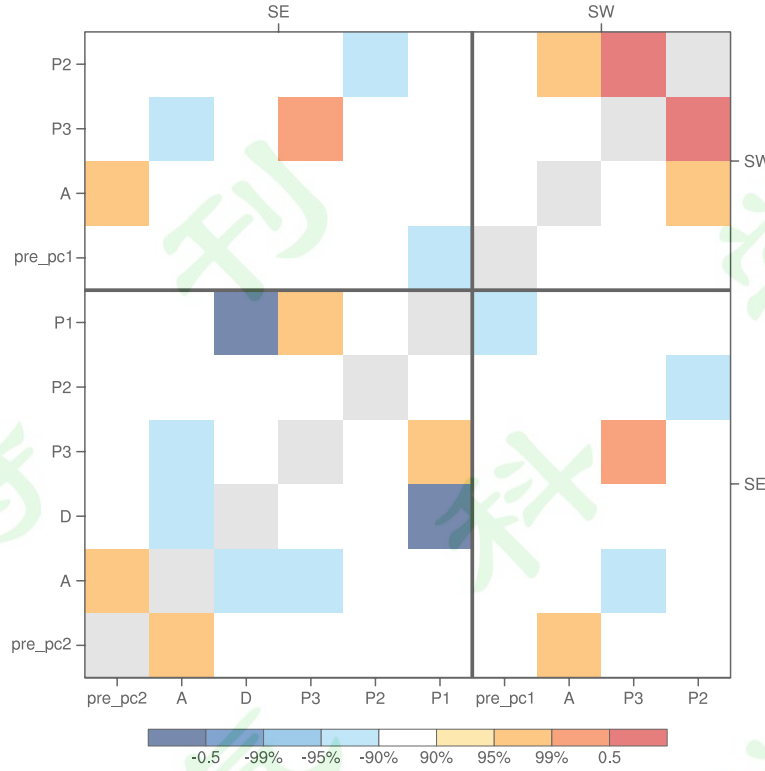


图 8 东南风、西南风模态的季节循环参数年际变化及华北夏季降水 EOF 分析时间系数之间的统计相关关系。对角线上的灰色块表示该参数与其自身的相关关系。

Fig. 8 Statistical correlation of the interannual variation between parameters of the southeasterly and southwesterly mode and time series of EOF analysis of summer rainfall in North China. The correlation coefficients between the same variable on the diagonal are shown as grey squares.

为进一步揭示季节循环对华北夏季降水的年际变化的影响，我们将定义的季节循环各参数年际变化回归到华北夏季降水和 850hPa 风场距平（图 9）。对于东南风模态的季节循环，其开始时间与华北南部夏季降水异常存在较好的正相关关系（图 9a）。东南风建立时间偏晚（早）的年份，华北以南风场表现为西南风（东北风）异常，华北南部夏季降水偏多（少）。季节循环的峰值时间与华北夏季降水异常呈负相关（图 9b），季节循环达到峰值的时间偏晚（早）的年份，影响华北的风场主要表现为东北风（西南风），夏季降水偏少（多）。季节循环结束时间与山东地区的夏季降水呈显著正相关（图 9c），即夏季华北以南为西南风（东北风）异常时，东南风结束时间偏晚（早），夏季降水偏多（少）。比较而言，华北西南部夏季降水异常与东南风持续时间呈负相关，而夏季平均风场受其影响较小（图 9d），即东南风持续时间越长（短），华北西南部夏季降水越少（多）。季节循环的振幅与华北夏季降水异常呈显著正相关（图 9e）。振幅大

(小) 的年份, 华北夏季为偏南风 (偏北风) 异常, 降水偏多 (少)。我们对西南风模态的季节循环参数进行类似的分析 (图 10), 结果表明华北夏季降水异常与西南风峰值时间、结束时间、振幅均呈显著的正相关, 影响华北的环流主要表现为西北风与偏南风之间的相互作用。即西南风峰值时间偏晚 (早)、结束时间偏晚 (早)、强度偏强 (弱) 时, 低层为气旋性 (反气旋性) 异常, 有利于水汽辐合 (辐散), 华北夏季降水偏多 (少)。

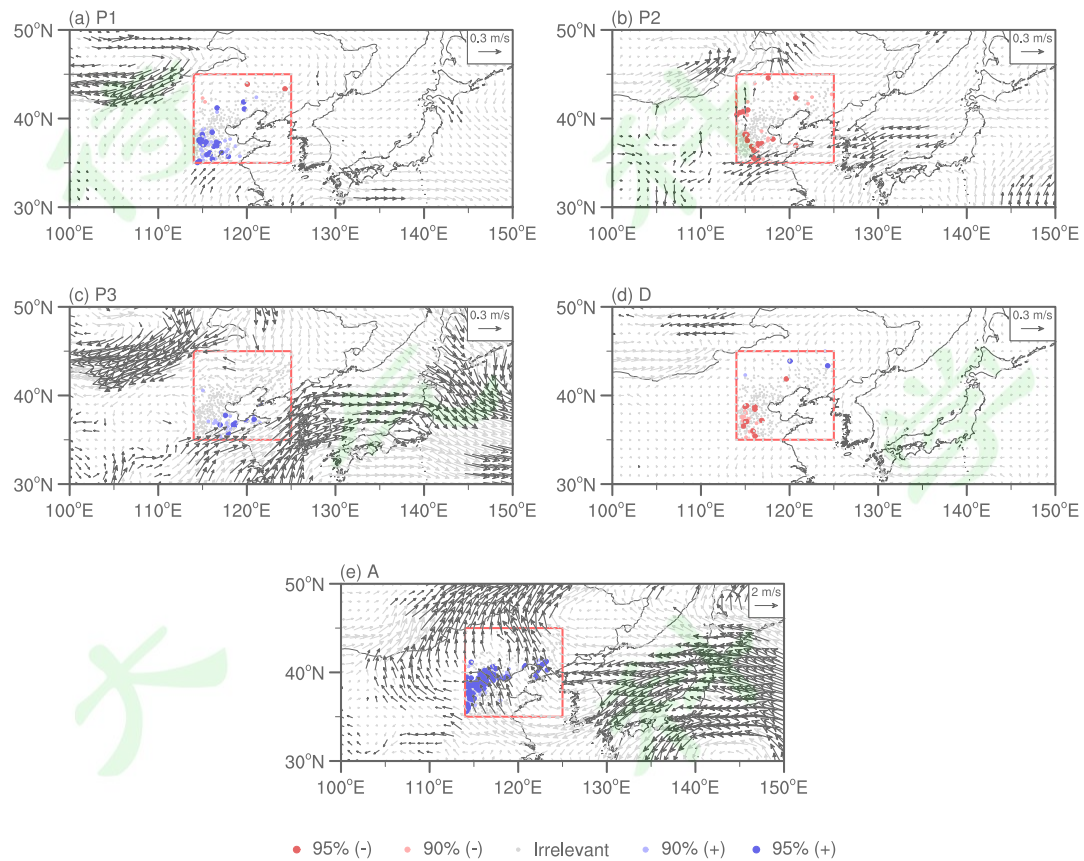


图 9 东南风模态季节循环参数回归的夏季降水场 (圆点) 和 850hPa 风场 (矢量箭头, 单位: m s^{-1}) 距平。彩色点表示降水具有 90% 以上信度的站点, 黑色矢量箭头表示风场至少一个方向具有 90% 信度的区域。

Fig. 9 Parameters of the southeastly mode regressed precipitation (dots) and winds at 850hPa (vector, units: m s^{-1}) anomalies in summer. The colored dots indicate the stations that is statistically significant above the 90% confidence level, the black vectors indicate the region that the winds are at the 90% confidence level in at least one direction.

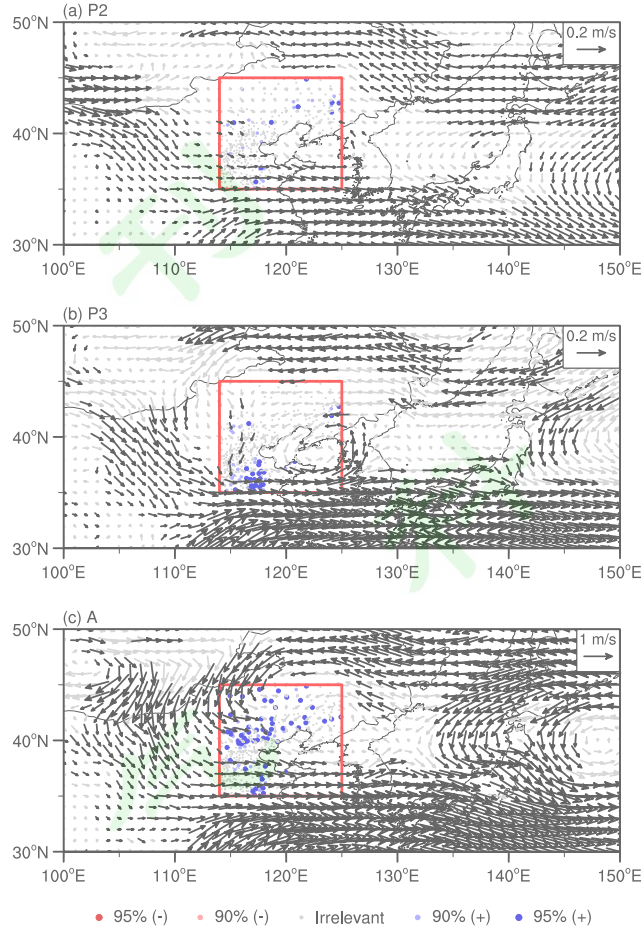


图 10 同图 9，但为西南风模态参数。

Fig. 10 Same as in fig. 9, but for parameters of the southwesterly mode.

本文将标准化的季节循环参数超过一个标准差的年份定义为极端年份（图 7 中超过两条虚线的年份），各参数对应的极端年份见表 1。我们对这些极端年份的华北台站夏季降水和 850hPa 风场进行合成分析，进一步检验上述统计关系在极端年份的效果。图 11 和 12 分别表示的是东南风、西南风模态季节循环参数对应的极端年份华北夏季降水和环流距平。比较发现，东南风建立时间极端偏早的年份，华北北部降水偏多，相反则南部和西部降水偏多（图 11a、b）；东南风峰值时间极端偏早的年份，西北部降水偏多，相反则华北大部降水偏少（图 11c、d）；东南风结束时间极端偏早和偏晚的年份在华北的北部和南部差异显著，其他地方不明显（图 11e、f）；持续时间偏短和偏长年份，夏季降水在华北北部表现为偏少和偏多（图 11g、h）；振幅极端偏弱和偏强的年份，降水的差异主要体现在西部，偏弱年份，华北夏季降水普遍偏少，而偏强的年份则表现为西部偏多，东部偏少（图 11i、j）。总体来看，对极端年份的合成结果与多年的统计相关分

表 1 前两个季节循环模态的主要参数年际变化对应的极端年份统计表。

Table 1 Extreme years corresponding to the interannual variation of five parameters of the first two annual cycle modes.

		P1	P2	P3	D	A
东南风模态	极端大值年份	1982, 1990, 1993, 1994, 2007, 2011, 2015, 2020	1983, 1987, 1988, 2000, 2001, 2020	1987, 2001, 2003, 2004, 2011, 2013, 2014, 2017	1983, 1985, 1987, 1999, 2003, 2008, 2014, 2018	1981, 1982, 1988, 1993, 1994, 1996, 1999, 2016
	极端小值年份	1983, 1984, 1985, 1999, 2003, 2008, 2018	1995, 2003, 2013, 2014	1981, 1984, 1988, 1993, 1997, 2008	1982, 1989, 1993, 1994, 2007, 2015	1990, 1992, 2002, 2009, 2014
西南风模态	极端大值年份	/	1984, 1987, 2014	1980, 1987, 1995, 1998, 2003, 2010, 2014, 2015, 2019, 2020	/	1979, 1987, 1991, 1995, 1996, 1998
	极端小值年份	/	1981, 1989, 1997, 1999, 2000, 2010, 2018	1981, 1989, 1997, 1999	/	1984, 1985, 1988, 1999, 2000, 2010, 2014

析结果比较一致。但是针对大尺度夏季风季节循环的年际变化，华北夏季降水存在区域差异。对西南风模态各参数极端年份比较可以发现（图 12），在夏季峰值时间、结束时间偏早和振幅偏弱的年份，华北夏季降水几乎均表现出一致偏少的特征，而对于峰值和结束时间偏晚的年份，华北夏季降水除了北部和东南部地区的降水偏多，其他地区的降水依然表现为偏少特征。相对而言，振幅的强弱对降水的影响更大，西南风极端偏强的年份，华北夏季降水表现为一致偏多的特征。

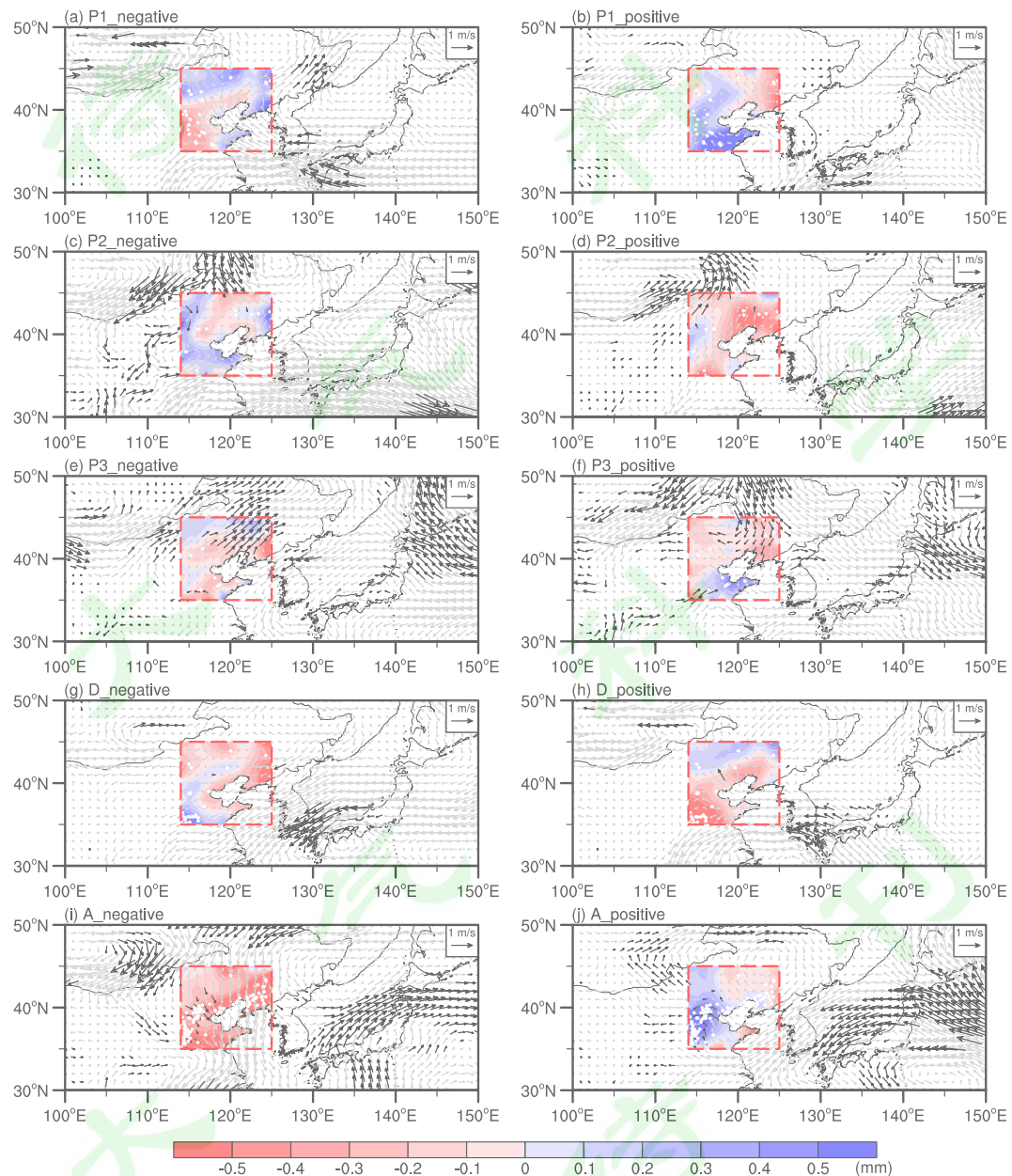


图 11 东南风季节循环参数极端年份合成的夏季降水（填色，单位： mm day^{-1} ）和 850hPa 风场（矢量箭头，单位： m s^{-1} ）距平。左列为极端小值年份，右列为极端大值年份。白色点表示降水具有 90%信度的站点，黑色矢量箭头表示风场至少一个方向具有 90%信度的区域。

Fig. 11 Composite summer rainfall (shading, units: mm day^{-1}) and winds at 850hPa (vector, units: m s^{-1}) anomaly for extreme years of parameters of the southeastly mode. The left row shows the negative years, the right row shows the positive years. Precipitation stations are stippled by white dots when the values are significant at the 90% confidence level, and vectors are shown in black when the values are significant at the 90% confidence level in at least one direction.

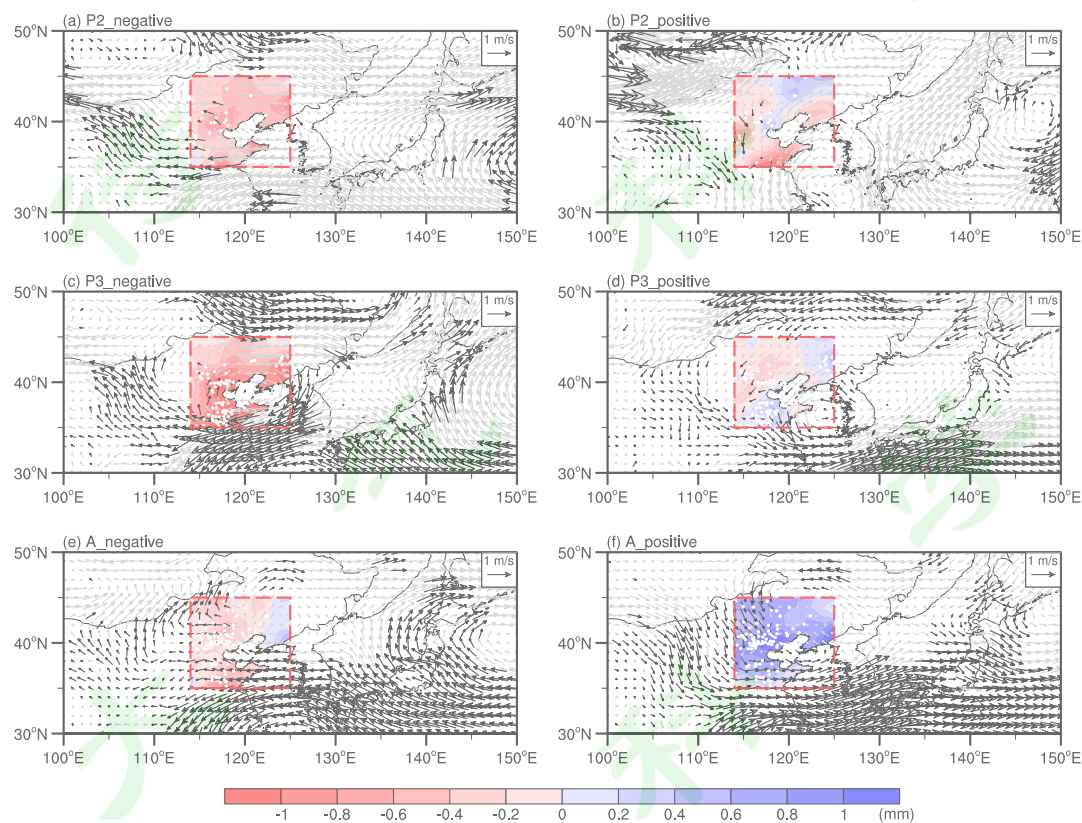


图 12 同图 11，但为西南风模态参数的极端年份。

Fig. 12 Same as in fig. 11, but for extreme years of parameters of southwestly mode.

总体来看，季节循环的振幅（强弱）的年际变化对华北夏季降水的季节异常起到了关键的作用，当夏季西南风和东南风偏弱的时候，华北夏季降水普遍偏少。由于华北夏季降水的水汽来源主要来自西南和东南风的影响，因此从夏季风水汽输送角度很容易理解这种关系。但是，我们也发现，当东南风偏强的年份，华北夏季降水偏多的区域主要位于西部，而西南风偏强的年份，则华北夏季降水普遍偏多，导致这种差异的原因很可能与 7-8 月西北太平洋副热带高压的东西向位置有关。从季节循环角度来看，4-5 月是华北夏半年降水的开始时间。夏季风建立的早晚对华北夏季降水的季节变化有一定的预测指示意义。我们从季节循环的第

一模态的年际变化分析，当东南风建立偏早和偏晚的年份，华北夏季降水异常在空间分布上存在显著差异，为夏季降水预测提供了一个新的参考指标。

5. 结论和讨论

本文利用 1979-2020 年我国的华北台站逐日观测降水和中国的再分析资料（CRA-40），基于谐波和多变量 MV-EOF 统计分析，揭示了华北降水相关的环流场季节循环模态的气候场和年际变化特征，并在此基础上，重点探讨了季节循环模态的年际变化对华北夏季降水异常的影响，得到的主要结论如下：

- (1) 华北降水及其相关的环流场表现出显著的季节循环特征，气候场分析发现，在由冬季向夏季的季节转换中，季风环流在 850hPa 上主要表现为西北风向东南风转换，以及东北风向西南风转换两种模态。4-5 月是华北夏半年降水的开始时间，北部降水先快速增加，区域降水在 7 月底达到峰值，9 月结束。降水在 7 月初和 7 月底出现两个峰值，分别受到西南风和东南风的增强的影响，表明 7-8 月主汛期水汽先后来自南方和西北太平洋。其中，7 月底降水峰值的水汽主要来自西北太平洋。
- (2) 华北降水相关的季风季节循环表现出显著的年际变化，针对 1979-2020 年的华北降水与 850hPa 风场的季节循环分量的年际变化模态分析发现，虽然前两个模态的降水表现出一致性变化特征，但其夏季环流场分别表现为东南风的加强和西南风与气旋性环流之间的相互作用。其中，第二模态，即夏季西南风主导的降水模态的年际波动较大。
- (3) 本文定义了华北夏季风降水的开始时间、峰值时间、结束时间、持续时间和最大振幅来描述季节循环的年际变化。我们发现，季节循环的第一模态（东南风模态）夏季风降水开始时间与持续时间呈显著负相关，与结束时间呈正相关；振幅与持续时间和结束时间呈显著负相关。季节循环第二模态（西南风模态）的峰值时间与结束时间和振幅均呈显著的正相关。两个模态的峰值时间年际变化呈显著的负相关，结束时间年际变化比较一致。
- (4) 季节循环年际变化对华北 6-8 月降水的异常具有重要的影响。第一模态表示的夏季东南风开始时间、结束时间、振幅与华北夏季降水异常之间呈显著的正相关，峰值时间和持续时间与华北夏季降水异常呈负相关。东南风季节循环的位相（P1、P2、P3）变化与夏季西南风异常有关，而幅度（A）

变化主要取决于东南风的强度。第二模态，即西南风的峰值时间、结束时间和振幅与华北夏季降水年际变化之间均呈正相关，即低层为西南风与气旋性环流主导的年份，华北夏季降水明显偏多。

我们注意到，在全球变暖的背景下，年平均降水在华北北部呈减少趋势，南部呈增加趋势（图略），这种变化趋势与季节循环之间的关系不够清楚，需要进一步讨论。东亚季风季节循环的年际变率受到大气、海洋以及陆面过程的影响（Lee et al., 2004; Huang et al., 2007; Zuo and Zhang, 2007）。例如，印度洋增暖会抑制与西太平洋副热带高压发展有关的对流，并通过遥相关导致华北夏季降水增多（Lee et al., 2004）。华北-长江中下游地区土壤湿度越大，东亚夏季风越弱，进而导致华北降水偏少（Zuo and Zhang, 2007）。本文重点关注季风季节循环对华北夏季降水的影响，对于季节循环年际变化的成因需要进一步深入讨论。此外，我们注意到，对于夏季华北月平均尺度降水而言，次季节尺度变率有重要的贡献（图 4），有关华北夏季风期间是否存在次季节尺度模态，其年际变化与季节循环变化之间的关系，以及对华北降水次季节尺度降水的影响需要进一步研究。

参考文献 (References)

- Ding Y H, Chan J. 2005. The East Asian summer monsoon: an overview [J]. Meteor. Atmos. Phys., 89: 117-142. doi: 10.1007/s00703-005-0125-z
- 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 2020. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响 [J]. 水科学进展, 31(5): 629-643. Ding Yihui, Liu Yanju, Song Yafang. 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 31(5): 629-643. doi: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.001
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. Int. J. Climatol., 28(9): 1139-1161. doi: 10.1002/joc.1615
- 杜银, 张耀存, 谢志清. 2009. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响 [J]. 大气科学. 33(3): 581-592. Du Yin, Zhang Yaocun, Xie Zhiqing. 2009. Location variation of the East China subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 33(3): 581-592.
- 郭志荣, 陈旭红, 江燕如, 等. 2014. 中国东部夏季水汽输送的年代际变化特征 [J]. 大气科学学报, 37(5): 568-574. Guo Zhirong, Chen Xuhong, Jiang Yanru, et al. 2014. Interdecadal variation characteristics of water vapor transfer over Eastern China in summer [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 568-574. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠. 2012. 东亚季风环流演变的主要模态及其与中国东部降水异常的联系 [J]. 高原气象, 31(4): 1007-1018. Hao Lisheng, Ding Yihui, Min Jinzhong. 2012. Main modes in East Asian monsoon circulation evolution and its relationship with precipitation anomaly in Eastern China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31(4): 1007-1018.
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠. 2016. 东亚夏季风变化与华北夏季降水异常的关系 [J]. 高原气象, 35(5): 1280-1289. Hao Lisheng, Ding Yihui, Min Jinzhong. 2016. Relationship between summer monsoon changes in East Asia and abnormal summer

- rainfall in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35(5): 1280-1289. doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00085
- He J H, Liu B Q. 2016. The East Asian subtropical summer monsoon: Recent progress [J]. J. Meteor. Res., 30(2): 135-155. doi: 10.1007/s13351-016-5222-z
- 胡豪然, 钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. 自然科学进展, 17(1): 57-65. Hu H R, Qian W H. 2007. Confirmation of northern edge of the East Asian summer monsoon [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 17(1): 57-65. doi: 10.3321/j.issn:1002-008X.2007.01.009
- Huang R H, Chen J L, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24(6): 57-87. doi: 10.1007/s00376-007-0993-x
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35(4): 589-606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over Eastern China and its association with water vapor transport over East China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(4): 589-606. doi: CNKI:SUN:DQXK.0.2011-04-001
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18(4): 465-476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18(4): 465-476. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.1999-04-000
- 黄思洁, 李秀珍, 温之平. 2019. 中国东部夏季风北界年际变化的东西差异及其影响因子 [J]. 大气科学, 43(5): 1068-1080. Huang Sijie, Li Xiuzhen, Wen Zhiping. 2019. Interannual variation of northern edge of summer monsoon in Eastern China: zonal discrepancies and impact factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(5): 1068-1080. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18173
- Jiang S, Zhu C W, Jiang N. 2020. Variations in the annual cycle of the East Asian monsoon and its phase-induced interseasonal rainfall anomalies in China [J].

- Atmospheric and Oceanic Science Letters, 13(4): 1-7. doi: 10.1080/16742834.2020.1754728
- Jiang Z H, Jiang S, Shi Y, et al. 2017. Impact of moisture source variation on decadal-scale changes of precipitation in North China from 1951 to 2010 [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122(2): 600–613. doi: 10.1002/2016JD025795.
- 金炜昕, 孙丞虎, 李维京. 2014. 2012 年 7 月华北降水异常成因分析 [J]. *气象*, 40(5): 541-548. Jin Weixin, Sun Chenghu, Li Weijing. 2014. Cause analysis on the precipitation anomalies in North China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40(5): 541-548. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.003
- Lee E J, Jhun J G, Park C K. 2004. Remote connection of the northeast Asian summer rainfall variation revealed by a newly defined monsoon index [J]. *J. Climate*, 18(21): 4381-4393. doi: 10.1175/JCLI3545.1
- Li C X, Zhao T B, Shi C X, et al. 2020. Evaluation of daily precipitation product in China from the CMA global atmospheric interim reanalysis [J]. *J. Meteor. Res.*, 34(1): 117–136. doi: 10.1007/s13351-020-8196-9
- Li X Z, Wen Z P, Zhou W, et al. 2012. Atmospheric water vapor transport associated with two decadal rainfall shifts over East China [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90(5): 587-602. doi: 10.2151/jmsj.2012-501
- Liang F, Tao S Y, Wei J, et al. 2011. Variation in summer rainfall in North China during the period 1956–2007 and links with atmospheric circulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(2): 363-374. doi: 10.1007/s00376-010-9220-2
- 梁平德, 段丽瑶, 周鸣盛, 等. 2006. 华北盛夏旱涝的环流型特征及其在初夏的预兆 [J]. *气象学报*, 64(3): 385-391. Liang Pingde, Duan Liyao, Zhou Mingsheng, et al. 2006. Circulation patterns for mid-summer drought/flood in north China and their early-summer precursors [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64(3): 385-391. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2006.03.013
- Liang X, Jiang L P, Pan Y, et al. 2020. A 10-yr global land surface reanalysis interim dataset (CRAInterim/Land): Implementation and preliminary evaluation [J]. *J. Meteor. Res.*, 34(1): 101–116. doi: 10.1007/s13351-020-9083-0

- Liao J, Wang H Y, Zhou Z J, et al. 2021. Integration, quality assurance, and usage of global aircraft observations in CRA [J]. *J. Meteor. Res.*, 35(1): 1–16, doi: 10.1007/s13351-021-0093-3.
- 刘梦杰, 张卫星, 张镇驿, 等. 2021. CRA40 在中国地区 GNSS 水汽反演中的适用性评估与分析 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 13(2): 138-144. Liu Mengjie, Zhang Weixing, Zhang Zhenyi, et al. 2021. On the applicability of CRA40 in GNSS precipitable water vapor retrieval over China [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 13(2): 138-144.
- 马京津, 于波, 高晓清, 等. 2008. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响 [J]. *高原气象*, 27(3): 517-523. Ma Jingjin, Yu Bo, Gao Xiaoqing. et al. 2008. Change of large-scale circulation and its impact on the water vapor over North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27(3): 517-523.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51(20): 2429-2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. 1951-2004 basic fact of drought in northern China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 51(20): 2429-2439. doi: 10.1360/csb2006-51-20-2429
- 施小英, 施晓晖, 毛嘉富. 2009. 夏季东亚地区水汽输送年代际变化特征及其对中国东部降水的影响 [J]. *地理学报*, 64(7): 861-870. Shi Xiaoying, Shi Xiaohui, Mao Jiafu. 2009. Interdecadal variation of water vapor transport over East Asia and its impacts on rainfall over Eastern China in summer [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 64(7): 861-870. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.07.010
- 施逸, 江志红, 李肇新, 2021. 基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征 [J]. *大气科学*. Shi Yi, Jiang Zhihong, Li Laurent, 2021. Vertical characteristics of water vapor transport in rainy season in eastern China based on Lagrangian method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20236
- Song Z H, Zhu C W, Su J Z, et al. 2016. Coupling Modes of Climatological Intraseasonal Oscillation in the East Asian Summer Monsoon [J]. *J. Climate*, 29(17): 6363-6382. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0794.1

- 孙安健, 高波. 2000. 华北平原地区夏季严重旱涝特征诊断分析 [J]. 大气科学, 24(3): 393-402. Sun Anjian, Gao Bo. 2000. A diagnostic analyses of serious flood/drought during summer season in the North China plane [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24(3): 393-402. doi: 10.1007/s10011-000-0335-3
- 孙博, 王会军, 周波涛, 等. 2002. 中国水汽输送年际和年代际变化研究进展 [J]. 水科学进展, 31(5): 644-653. Sun Bo, Wang Huijun, Zhou Botao, et al. 2020. A review on the interannual and interdecadal variations of water vapor transport over China during past decades [J]. Advances in Water Science (in Chinese), 31(5): 644-653. doi: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.002
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季风边缘带的气候特征 [J]. 高原气象, 25(3): 375-381. Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping, Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(3): 375-381. doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.003
- 汤绪, 陈葆德, 梁萍, 等. 2009. 有关东亚夏季风北边缘的定义及其特征 [J]. 气象学报, 67(1): 83-89. Tang Xu, Chen Baode, Liang Ping, et al. 2009. Definition and features of the north edge of Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(1): 83-89. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2009.01.009
- Wang B, LinHo. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon [J]. J. Climate, 15: 386-398.
- 王旻燕, 姚爽, 姜立鹏, 等. 2018. 我国全球大气再分析(CRA-40)卫星遥感资料的收集和预处理 [J]. 气象科技进展, 8(1): 158-163. Wang Minyan, Yao Shuang, Jiang Lipeng, et al. 2018. Collection and pre-processing of satellite remote-sensing data in CRA-40 (CMA's Global Atmospheric ReAnalysis) [J]. Advances in Met S&T (in Chinese), 8(01): 158-163. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.01.021
- 徐桂玉, 杨修群, 孙旭光. 2005. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系 [J]. 地球物理学报, 48(3):511-518. Xu Guiyu, Yang Xiuqun, Sun Xuguang. 2005. Interdecadal and interannual variation characteristics of rainfall in north china and its relation with the northern hemisphere atmospheric circulations

- [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48(3): 511-518. doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.03.007
- 徐康, 何金海, 祝从文. 2011a. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系 [J]. 气象学报, 69(4): 570-580. Xu Kang, He Jinhai, Zhu Congwen. 2011a. The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikal in the past 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69(4): 570-580. doi: CNKI:SUN:QXXB.0.2011-04-001
- 徐康, 祝从文, 何金海. 2011b. 近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理 [J]. 高原气象, 30(2): 309-317. Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2011b. Impact of the surface air temperature warming around lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(2): 309-317. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2011-02-006
- 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及差异 [J]. 大气科学, 42(1): 81-95. Yang Liu, Zhao Junhu, Feng Guolin. 2018. Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with four rainfall patterns over eastern China monsoon region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 81-95, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16273.
- 于晓澄, 赵俊虎, 杨柳, 等. 2019. 华北雨季开始早晚与大气环流和海表温度异常的关系 [J]. 大气科学, 43(1): 107-118. Yu Xiaocheng, Zhao Junhu, Yang Liu, et al. 2019. The relationship between the onset date of the rainy season in North China and the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1): 107-118. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17242.
- Yu X J, Zhang L X, Zhou T J, et al. 2021. The Asian subtropical westerly jet stream in CRA-40, ERA5, and CFSR reanalysis data: Comparative assessment [J]. J. Meteor. Res., 35(1): 46-63. doi: 10.1007/s13351-021-0107-1
- 张书萍, 祝从文, 周秀骥. 2014. 华北水资源年代际变化及其与全球变暖之间的关联 [J]. 大气科学, 38(5): 1005-1016. Zhang Shuping, Zhu Congwen, Zhou Xiuji. 2014. Decadal variability of water resources in North China and its linkage to

- the global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(5): 1005–1016. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13231.
- 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 2007. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征 [J]. 高原气象, 26(4): 843-853. Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Wang Jifang, et al. 2007. Temporal and spatial change characteristics of precipitation concentration degree (PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over North China in rainy reason [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(4): 843-853. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.2007-04-022
- Zhao B, Zhang B, Shi C X, et al. 2019. Comparison of the global energy cycle between Chinese reanalysis interim and ECMWF reanalysis [J]. J. Meteor. Res., 33(3): 563-575. doi: 10.1007/s13351-019-8129-7
- Zhao D, Zhang L X, Zhou T J, et al. 2021. Contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East China precipitation estimated from CRA-40 reanalysis [J]. J. Meteor. Res., 35(1): 32-45. doi: 10.1007/s13351-021-0083-5
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2002. 华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究 [J]. 气象学报, 60(1): 68-75. Zhao Shengrong, Song Zhengshan, Ji Liren. 2002. Study on the relationship between the anomalies of rainfall over North China and the Asian monsoon anomalies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60(1): 68-75. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2002.01.008
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等. 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析 [J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Lu Rong, et al. 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(3): 351-360. doi: CNKI:SUN:QXXX.0.2018-03-002
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8(3): 274-290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8(3): 274-290. doi: CNKI:SUN:QHYH.0.2003-03-002

- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008a. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. 大气科学, 32(2): 345-357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, WangPanxing. 2008a. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July – August [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(2): 345-357. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.13
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008b. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响 [J]. 气象学报, 66(1): 59-70. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, WangPanxing. 2008b. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(1): 59-70. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.01.006
- 祝从文, 何金海, 周秀骥. 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系 [J]. 气象学报, 58(4): 391-402. Zhu Congwen, He Jinhai, Zhou Xiuji. 2000. East Asian monsoon index and its inter-annual relationship with largescale thermal dynamic circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58(4): 391-402. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2000.04.002
- Zhu C W, Wang B, Qian W H, et al. 2012. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 39: L09701, doi: 10.1029/2012GL051155.
- 祝从文, 周秀骥, 赵平, 等. 2011. 东亚副热带夏季风建立与中国汛期开始时间 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1172-1181. Zhu Congwen, Zhou Xiuji, Zhao Ping, et al. 2011. Onset of East Asian sub-tropical summer monsoon and rainy season in China [J]. Sci China Earth Sci (in Chinese), 41(8): 1172-1181. doi: 10.1007/s11430-011-4284-0
- Zuo Z Y, Zhang R H. 2007. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China [J]. Chinese Science Bulletin, 52(23): 3310-3312. doi: 10.1007/s11434-007-0442-3