

华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系

崔童¹ 张若楠² 郝立生³ 孙丞虎⁴

1 国家气候中心, 北京 100081

2 复旦大学大气科学研究所, 上海 200433

3 天津气候中心, 天津 300074

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室及气候与气候变化研究所, 北京 100081

摘要 本文基于 1961~2018 年华北地区均一化逐日降水资料和 ECMWF (欧洲中期天气预报中心) ERA5 全球再分析环流资料, 采用一种综合考虑降水量和西太平洋副热带高压脊线影响的雨季监测标准, 计算了华北雨季起讫日期和降水量, 在此基础上讨论了华北雨季节内进程的水汽输送特征。重点分析了降水量与水汽收支的年代际变化关系, 揭示了水汽输送的时空变化规律及其对华北雨季降水的影响。研究结果表明: (1) 华北雨季每年的起讫日期不同, 从而每年雨季发生时段和季节内进程不同。(2) 降水的形成与水汽输送及其辐合密切相关, 有四个水汽通道维持华北雨季降水, 即印度季风水汽、东亚季风水汽、110°E~120°E 之间越赤道气流向北的水汽输送和 40°N 附近中纬度西风带水汽。(3) 华北雨季降水和净水汽收支具有相似的年代际变化特征, 分别在 1977、1987、1999 年发生突变, 总体呈现“减-增-减”的阶段性变化趋势, 两者位相转变相关性很强。(4) 水汽输送的强弱和到达华北时间的早晚均对雨季降水多寡有重要影响。华北多雨年代与少雨年代水汽通量有明显的差异, 主要表现在: 在多雨年代, 西北太平洋为反气旋式环流异常, 偏南水汽强盛, 并且与中高纬西风带异常偏西水汽汇聚于华北, 华北地区水汽辐合偏强; 考虑季节内进程, 水汽到达华北的时间早、强度大, 停留时间长、辐合强, 减弱的时间晚; 而在少雨年代, 我国东北地区、朝鲜半岛及日本海附近为气旋式环流异常, 华北地区由南向北的水汽输送偏弱, 水汽辐散明显加强; 季节内进程表现出与多雨年代相反的特征。(5) 考虑华北地区四个边界的水汽收支, 南边界和西边界有最大、次大水汽输入, 二者的年代际变化是影响雨季降水年代际变化的重要因素。在多雨年代, 南边界和西边界水汽净输入很强, 但北边界的输出也很强; 在少雨年代, 南边界和西边界水汽净输入很弱, 但北边界转为输入, 这是区别于多雨年代的重要特征。

关键词 华北雨季 水汽输送 水汽收支 年代际变化

文章编号 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2107.21059

The Relationship between Interdecadal Variation of Rainy Season Precipitation and Water-Vapor Transport in North China

CUI Tong¹, ZHANG Ruonan², HAO Lisheng³, SUN Chenghu⁴

¹National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

²Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433

³Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

⁴State Key Laboratory of Severe Weather and Institute of Climate System, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Based on the homogenized daily precipitation in North China and ECMWF-ERA5 reanalysis data for 1961-2018, and a new monitoring standard that takes precipitation and the position of the Western Pacific subtropical high ridge into consideration, we calculated the rainy season precipitation in North China (RSPNC) and onset/ending date with the new monitoring method, and discussed the climatic characteristics of the water-vapor transport and associated interdecadal variations in precipitation and moisture budget. The temporal and spatial variations in water-vapor transport and associated impact on RSPNC were further investigated. The main results can be summarized as follows: (1) The onset/ending dates of the rainy season in North China are distinct in each year, so as the periods of occurrence of the rainy season and the intraseasonal variation. (2) Precipitation is determined by large-scale atmospheric moisture transport and associated convergence. The critical four water-vapor pathways maintained the RSPNC including Indian monsoon, East Asian monsoon, trans-equatorial airflow between 110°E and 120°E, and mid-latitude westerlies near 40°N. (3) The RSPNC and water-vapor budget displays similar interdecadal variations, and abrupt climate changes occurred in 1977, 1987 and 1999, respectively, featuring a "reduction-increase-reduction" phase. The RSPNC is strongly correlated with the net water-vapor

收稿日期 2021-04-10 网络预出版日期

作者简介 崔童, 男, 1990 年出生, 助理研究员, 主要从事气候监测诊断及气候变化研究。E-mail: cuitong@cma.gov.cn

通讯作者 张若楠, E-mail: m_zhang@fudan.edu.cn

资助项目 “十三五” 国家重点研发计划 (2016YFA0601501)

Funded by National Key Research and Development Project (2016YFA0601501)

budget within the domain of North China. (4) The intensity of water-vapor flux and the arriving timing exert significant impacts on the amount of precipitation. The distribution patterns of water-vapor flux anomalies in rainy decades and rainless decades are distinct: in the rainy decades, the anomalous anticyclonic circulation dominates the Northwest Pacific, and the northward water-vapor transport is strong, which converges with the eastward water-vapor transport over mid-high latitude westerlies in North China, and the water-vapor diverges more strongly than that in normal years. In terms of intraseasonal process, water-vapor fluxes are stronger in amplitude, reach North China earlier, weaken later, converge stronger, and have a longer lifetime. While in the rainless decades, the anomalous cyclonic circulation dominates the Northeastern China, Korean Peninsula, and the area around the Sea of Japan, and it turns into a weaker-than-usual northward water-vapor transport, and the water-vapor divergence is obviously strengthened; accordingly, the intraseasonal process shows the opposite characteristics. (5) Considering the four boundaries of water vapor transport, the southern and western boundary water-vapor inputs are the largest and the second-largest, respectively. Their interdecadal variations are critical for the interdecadal variation of the RSPNC. In rainy decades, there are stronger inputs of water-vapor from the southern and western boundary, but strong output from the north boundary; however in rainless decades, water-vapor inputs are weak from the southern and western boundaries, and the output swithes to input from northern boundary, which is essentially distinct from that in the rainy decades.

Keywords Rainy season in North China, Water-vapor transport, Water-vapor budget, Interdecadal variation

1 引言

华北地区位于我国北部，是我国政治、经济和文化中心，人口密度大，土地、矿产资源丰富，也是我国工农业生产的主要基地。在全球变暖背景下，华北地区干旱化趋势加重，区域性极端干旱事件频次显著增加，随之而来的水资源短缺和生态问题愈发突显（符淙斌和马柱国，2008；任福民等，2015）。2014年，“南水北调工程”中线黄河以北总干渠开始充水试验，同年丹江口水库江水正式进入华北以供生产生活。虽然南水北调生态补水成效显著，地下水位明显回升，但是仅仅依靠水利工程并不能完全解决华北缺水问题（刘宪亮，2020），因此更应关注云水资源的补充。华北雨季的降水多寡能直接影响该地区的农业灌溉、土壤墒情、城市居民用水和生态环境恢复等。因此，雨季降水也是弥补水缺口的重要途径之一，对华北雨季降水变化的研究具有十分重要的意义。

每年夏季华北地区降水最集中的时段称为华北雨季，降水量约占全年的60%以上（陈兴芳和赵振国，2000；郝立生和丁一汇，2012）。华北雨季降水性质与南方地区有所不同，如长江中下游地区的梅雨季多持续性准静止锋面降水，而华北地区雨季多间歇性的雷暴雨，如用逐日降水资料来划定雨季起止期，往往比较难以确定。赵汉光（1994）最早采用旬降水量定义的华北雨季开始期主要集中在7月中旬左右，结束期主要集中在8月中旬左右，其中雨季开始期比结束期在时间上相对地要集中。这些结果在1990年代被应用于国家级气候监测业务中，但这种方法只用到华北地区7个代表站，有明显的局限性。此外，以往研究大多关注华北夏季平均或7-8月平均降水，对华北雨季的季节进程研究相对不足。本文拟研究华北雨季的季节进程特征，这就需要对雨季的起讫日期有准确的识别，仅仅考察逐旬降水量是不够的。随着对监测精度要求的提高，采用逐候或逐日降水量划分雨季，显著提高了雨季划分的精确性以及时间分辨率（刘海文和丁一汇，2008；王遵娅和丁一汇，2008），但这些指标也仅仅以降水量为标准，并没有参考环流状况。2019年，《中国雨季监测指标 华北雨季》气象行业标准发布（中国气象局，2019），该标准基于自然季节进程的客观识别方法，不仅考虑了降水量，还以西北太平洋副热带高压的南北位置等指标加以约束，能够有效剔除初夏华北冷涡系统带来的非季风性降水（符娇兰等，2019），对华北雨季起讫日期的判定效果更好。因此，本文采用该最新指标来系统考察华北雨季的季节进程及其水汽输送和降水特征。

华北雨季降水具有显著的年际和年代际变化特征，降水的形成与水汽输送及其辐合密切相关，后者受大尺度环流调控。因此，华北雨季降水受到包括东亚夏季风在内的多种因子影响，这些变化与水汽输送变化有着密切的内在联系，进而直接影响大尺度降水异常分布格局（Webster, 1994；陈烈庭，1999；谭桂荣和孙照渤，2004；杨修群等，2005；宋燕等，2011；林大伟等，2016，2018）。近年来，围绕我国东部降水的水汽输送源地、路径、年代际变化等开展了一些研究。一般认为，我国东部夏季降水的水汽主要来源于孟加拉湾、南海和热带西太平洋（黄荣辉和陈际龙，2010）。Zhou等人（2005）研究了与中国东部大尺度降水异常模态相关的水汽输送特征，指出西太平洋副热带高压的位置通过影响水汽输送路径，进而主导雨带

的南北位置。申乐琳等（2010）讨论了影响我国东部夏季降水变化的可能机制，强调对于华北旱涝的形成，应该重点关注来自西北太平洋副热带高压西侧的异常西南季风性水汽输送。周晓霞等（2008a）研究指出，我国水汽主要由南海北部边界输入，东亚水汽输送的北进同我国雨带的北进时间一致，两者之间相互协调。且华北雨季水汽不仅源于东亚季风输送，还与西风带有关。在 1970 年代末之后，伴随西南风的减弱，中国东部自南向北的水汽输送明显减弱，到达华北的水汽减少，这可能是华北干旱频率增加的主要因素之一（周晓霞等，2008b；Zhang et al., 2009）。这种年代际的变化具体表现为多雨年代的异常南风水汽输送及异常水汽辐合，改变为少雨年代的异常偏北风水汽输送及异常辐散（刘海文和丁一汇，2011；郝立生等，2016；杨柳等，2018）。此外，热带大气季节内振荡（Madden-Julian Oscillation，简称 MJO）对华北夏季降水也存在影响，通过 MJO 对流区的气旋性异常在其北侧激发反气旋环流，形成“气旋-反气旋对”，反气旋西侧的偏南气流会加强向华北的水汽输送，即可以通过 850 hPa 风场异常造成华北夏季偏南风水汽输送加强，从而有利于雨季降水形成（郝立生等，2020）。本文根据雨季起讫时间针对性的考察雨季季节进程及其活动期内水汽输送特征，进而探讨水汽输送的年代际变化，更能体现大尺度环流系统的影响，这也是应用新的华北雨季客观监测标准的优势。

以往对华北雨季及水汽输送变化的相关研究存在三个问题：一是华北雨季多阵性降水，其监测本身存在一定难度，一直以来对华北雨季的定义没有统一标准，监测方法和结果差异较大。二是为了简化计算，往往针对整个夏季（6~8 月）来考察华北的水汽特征及其与降水的关系，而并没有考虑雨季的季节进程，这是本文的研究重点，也是创新点。实际情况是华北雨季历年雨量变化大、雨季起讫时间和雨季长度差异大，存在显著的年际变化，所以要想考察雨季的季节进程，需要首先确定历年雨季的起讫日期等指标。三是以往研究往往针对雨季平均的降水和环流特征进行分析，没有对雨季季节进程的各个阶段进行独立分析。因此，依据以往研究的不足，本文依据新的监测标准判定华北雨季起讫日期和季节进程，重点分析雨季季节进程内的水汽输送和大气环流特征，并将雨季划分为开始、峰值、结束三个阶段进行独立分析，最后深入分析了其年代际变化特征和差异。文章还讨论了海温可能对雨季水汽输送的强迫作用，以期对华北地区的雨季监测及预测提供一些参考。

2 资料和方法

本文所用的资料包括：（1）欧洲中期天气预报中心（ECMWF）制作的 ERA5 全球再分析资料（Hersbach et al., 2020），由哥白尼气候数据中心官方网站下载 <https://cds.climate.copernicus.eu> [2021-01-26]，选取时段为 1961~2018 年 5~9 月的逐日四个时次资料，水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，要素包括纬向风分量 u 、经向风分量 v 、比湿 q ，其垂直层次分别为 1000、925、850、700、600、500、400 和 300 hPa 等压面，以及地面气压场 p_s 和 500 hPa 位势高度场；此外还用到月平均的 850 hPa 风场资料。（2）月平均海温资料来自美国国家海洋大气局（NOAA）提供的扩展重建海表温度资料 ERSST (v4)，空间分辨率 $2^\circ \times 2^\circ$ （Huang et al., 2014）。

（3）日降水资料采用中国国家级地面气象站均一化降水数据集，其基础资料源自中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0），采用标准正态检验方法结合台站元数据信息与人工核查的方式对台站降水资料进行了均一性检验，以保证数据完整性和可靠性（杨溯和李庆祥，2014）。根据标准（中国气象局，2019），选出 236 个气象台站用于华北雨季监测，资料时段为 1961~2018 年 7~9 月逐日降水量。

本文所用主要方法包括：（1）文中计算常年平均值的时段均为 1961~2018 年，即气候态选取时段。（2）水汽通量。计算方法参考黄荣辉等人（2011）的研究，单位面积气柱整层大气水汽通量 Q （单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）计算方法如下：

$$Q = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} \mathbf{V} q dp = Q_\lambda + Q_\varphi$$

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} u q dp$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} v q dp$$

其中： u 、 v 分别表示纬向风和经向风分量， Q_λ 、 Q_φ 分别表示纬向和经向水汽通量， g 为重力加速度，取 9.80665 m s^{-2} ， p_s 为下边界气压， p_t 为上边界气压，真实大气中 300 hPa 以上水汽含量极少，故计算整层

积分水汽通量时取 p_t 为 300 hPa。此外对垂直大气分三个层次，其中低层为地面至 700 hPa、中层为 700 hPa~400 hPa、高层为 400 hPa~300 hPa。 \mathbf{V} 表示各等压面大气风速矢量， q 为比湿。(3) 水汽收支。所考察的华北地区各边界上的水汽收支（单位： kg s^{-1} ）计算方法（Sun et al., 2011）如下：

南边界：

$$Q_S = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_S} R_e \cos \varphi_S d\lambda$$

北边界：

$$Q_N = - \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_{\varphi_N} R_e \cos \varphi_N d\lambda$$

西边界：

$$Q_W = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_W} R_e d\varphi$$

东边界：

$$Q_E = - \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_{\lambda_E} R_e d\varphi$$

$$S_q = Q_S + Q_N + Q_W + Q_E$$

其中： λ_W 表示西边界所在经度， λ_E 表示东边界所在经度， φ_S 表示南边界所在纬度， φ_N 表示北边界所在纬度。 φ 为纬度； λ 为经度。 Q_{λ_W} 、 Q_{λ_E} 分别为通过西边界和东边界的纬向水汽通量， Q_{φ_S} 、 Q_{φ_N} 分别为通过南边界和北边界的经向水汽通量。 R_e 为地球平均半径，取 $6.37 \times 10^6 \text{ m}$ 。 S_q 表示所考察区域水汽输送净收支，其正值表示水汽盈余，负值表示水汽亏损。本文所研究的华北地区四个边界（图 1a）分别为：东边界（35°N~42.5°N；120°E）、西边界（35°N~42.5°N；110°E）、南边界（110°E~120°E；35°N）、北边界（110°E~120°E；42.5°N）。经向水汽收支为南北边界之和，纬向水汽收支为东西边界之和。(4) 水汽通量散度 D （单位： $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）表征水汽汇聚或辐散，水汽水平辐散地区散度为正值，辐合地区散度为负值，其计算如下：

$$D = \nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{\partial}{\partial x} Q_\lambda + \frac{\partial}{\partial y} Q_\varphi$$

本文使用的华北雨季行业标准中规定，华北雨季起讫日期主要由 4 个要素来确定：华北地区 236 个台站逐日降水量、5 天滑动累计降水量、5 天平均的西太平洋副热带高压脊线位置及达到条件的站点比率阈值。当某日 5 天平均的西太平洋副热带高压脊线位置在 25°N 以北，且单站日降水量和 5 天滑动累计降水量达到或超过一定阈值时，则此日期为该站雨季开始日；雨季开始后，某站截至某日，连续 10 天中 5 天滑动累计降水量均不大于一定阈值，则将此日定为此站雨季结束日。最后，当某日满足开始或结束条件的站点达到一定站点比例时，既可以判定出华北雨季的起讫日期。该标准基于自然季节进程的客观识别方法，首先识别了华北雨季的影响区域，进而在自然季节进程变化的基础上不仅考虑了降水量，还考虑了西北太平洋副热带高压的南北位置。该方法的优势在于，一方面能精确监测华北雨季的变化特征，剔除了雨季时段外的降水和环流，进而精准分析水汽输送对华北雨季降水的不同影响；另一方面可以依据季节进程划分雨季期，更加真实体现了雨季活动期内水汽输送的具体特征，与雨带变化的联系更为紧密。从近几年的雨季实际监测业务中也验证了其科学性与及时性等优点。

3 华北雨季水汽输送气候特征

3.1 水汽输送通道

华北雨季降水是指根据雨季起讫日期计算的累积降水量。图 1a 展示的是 1961~2018 年华北雨季降水量气候值的分布，华北雨季期间，各站普遍降水量达 100~250 mm，呈现东部多西部少的分布格局，同时华南地区存在降水大值中心。雨季降水的形成受大气中充足的水汽及水汽输送的影响。图 1b 展示的是 1961~2018 年华北雨季水汽通量及其散度气候场，可以看出，维持华北雨季降水的水汽输送通道主要有四个。其一是印度季风水汽，源于索马里以东的越赤道气流，夹带来自阿拉伯海及孟加拉湾的强盛水汽经中南半岛及南海转向我国中东部，水汽源于印度洋；其二是来自西太平洋的东亚夏季风水汽，这支水汽与西太平洋

副热带高压西侧的西南风水汽相联系；其三是 100 E~120 E 之间的越赤道气流，在南海和热带西太平洋汇入印度季风和东亚季风水汽，相对较为微弱。这三个水汽通道均为明显的经向水汽输送，这是我国东部夏季降水水汽输送的重要特征（缪启龙等，2010）。值得注意的是，在 40 N 及其以北附近中纬度西风带存在一支水汽，对华北北部有影响，这支水汽可能源于大西洋或北冰洋。

从水汽通量散度场来看（图 1b），雨季期间我国东部大陆以水汽辐合为主，华北地区明显为水汽汇，同雨季降水对应。最主要的水汽辐散地区为南半球印度洋以及阿拉伯海，季风将水汽输送至南亚地区再经孟加拉湾向东输送，由于青藏高原地形屏障作用导致印度季风带来的水汽在 100 E 以东转向，进而向北输送影响华北。华北上游 40 N 及其以北地区也是水汽辐散区，虽强度偏弱但为西风带水汽通道的区域，同样是华北雨季降水形成的水汽来源。

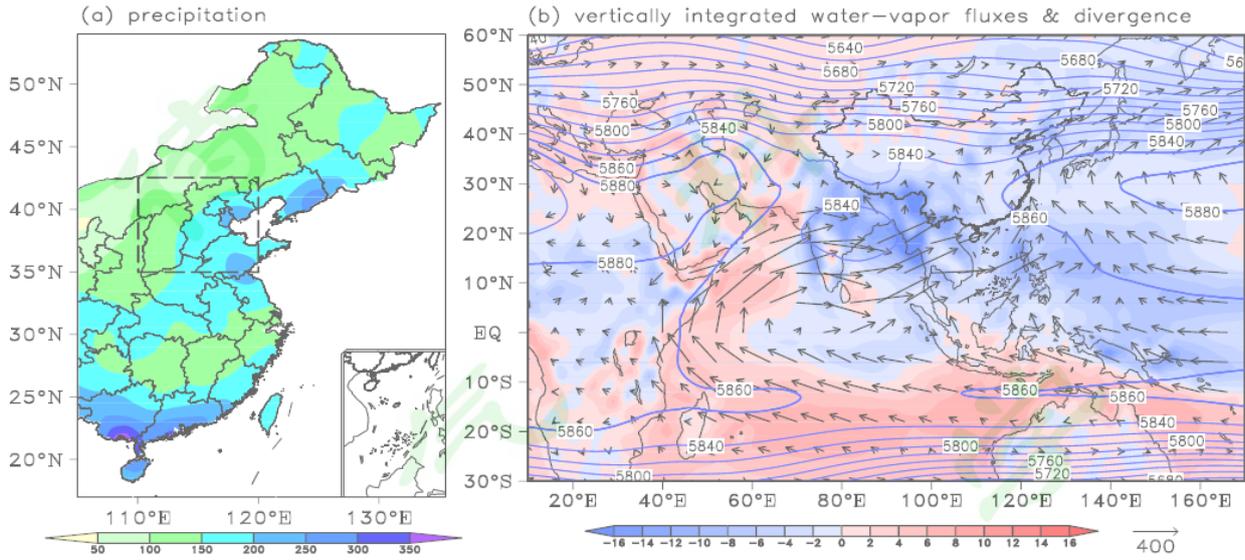


图 1 1961~2018 年华北雨季 (a) 降水量气候场 (单位: mm), (b) 整层积分水汽通量 (箭头; 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及其散度 (填色; 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、500 hPa 位势高度 (蓝色实线; 单位: gpm) 气候场。虚线框表示华北区域

Fig.1 Climatologically averaged (a) precipitation (units: mm), (b) vertically integrated water-vapor fluxes (arrows; units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and associated divergence (shadings; units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and 500 hPa geopotential height (blue isolines; units: gpm) during rainy season of North China. The dashed box indicates the geographical locations of North China

3.2 水汽输送季节演变

由于华北雨季每年起始日期不同，最早开始于 7 月 6 日，因此我们计算了 7 月 6 日以来气候平均的雨季降水和环流的逐日演变，雨季以外的降水和环流没有计算在内。图 2 给出了各纬度上沿 110 E~120 E 平均的整层积分水汽通量及其散度、降水量及 850 hPa 矢量风场逐日演变，以考察中东部水汽输送演变规律及其对华北雨季降水的影响。进入 7 月之后，伴随夏季风推进到华北，北方雨带逐步建立。整个雨季大范围降水分为 5 个阶段：第一阶段，7 月上旬末至中旬初，我国东部地区大气低层稳定的西南风建立，水汽由南向北输送， $225 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 水汽通量等值线北进到 35 N 以北，华北大部地区水汽通量维持在 $100 \sim 225 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，水汽辐合中心与首次大范围降水中心对应，华北各地雨季相继开始。第二阶段，7 月中旬末至下旬初，随着西南风加强，华北中北部地区 (37 N~42.5 N) 水汽通量增大，大范围降水再次出现，与首个雨期相比持续时间更长、降水大值中心更偏北。第三阶段，7 月下旬末至 8 月上旬中，华北在经历了短暂的少雨期后再度出现大范围降水，此时段江淮、江南北部 (30 N~35 N) 等地水汽输送较前期明显减弱，进而导致到达华北的水汽减少，水汽辐合强度减弱，对应雨季降水强度减弱。第四阶段，在 8 月上旬末到中旬左右，华北出现第四个雨期，前期降水大值中心偏北、强度较弱；后期降水中心偏南、强度较强，此时段内水汽通量减弱，水汽通量南北梯度变小，低层风场由前期的西南风转为东南风，这体现了西太平洋副热带高压向北移动的特征，表明这一阶段的水汽可能主要由副高西侧的东南风输送。第五阶段，8 月中旬末至下旬初，华北北部降水增多，雨带位置更加偏北，低层风场转以西风为主，径向水汽通量较小，纬向水汽输送起主要作用（图略）。8 月下旬后期，伴随东亚夏季风南撤，华北地区水汽通量和降水减弱。

综上所述，华北雨季内，到达华北的水汽通量波动较大，表现出明显“阶段式”的变化，雨季开始到盛期径向水汽输送强，纬向弱；雨季结束阶段纬向输送相对偏强。雨季内水汽通量南北梯度差异大，由开始到结束阶段梯度逐渐减小。雨季降水和水汽通量北边缘以及散度的时空对应关系较好，反映出水汽输送变化对华北雨季降水有较大影响。

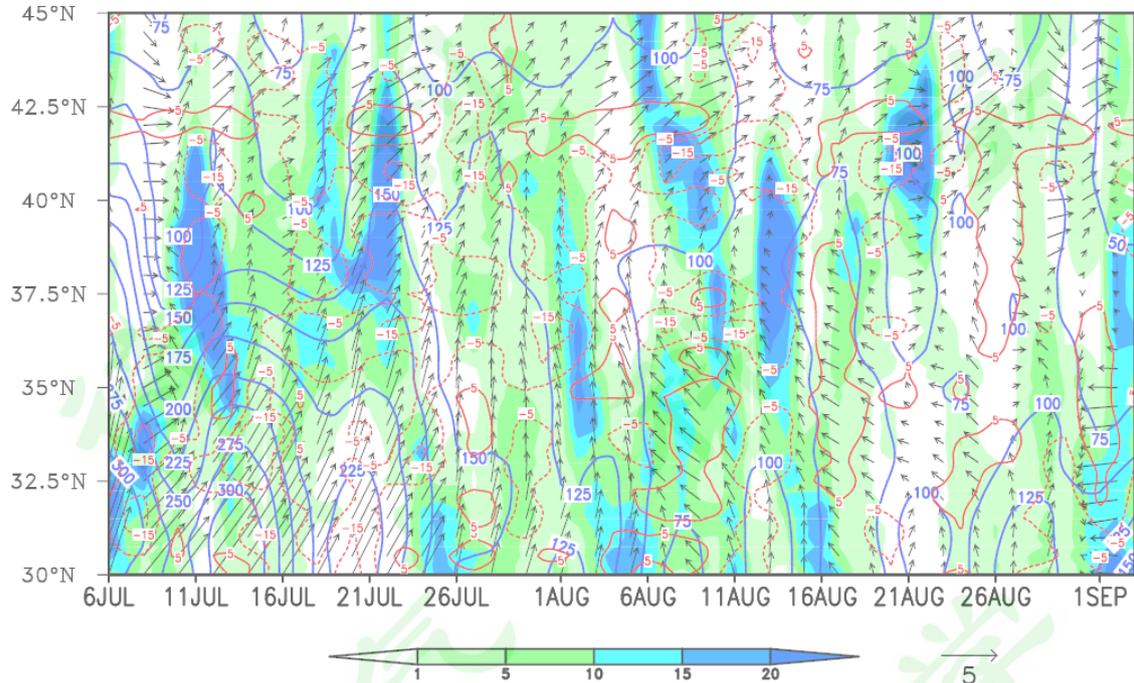


图2 1961~2018年平均华北雨季整层积分经向水汽通量(蓝色曲线;单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)、散度(红色曲线;单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、降水量(填色;单位: mm)、850 hPa 矢量风(箭头;单位: m s^{-1})的纬度-时间逐日演变。沿 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均

Fig.2 Time-latitude section along $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ averaged meridional vertically integrated water-vapor fluxes (blue curve; units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), divergence (red curve; units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), RSPNC (shadings; units: mm) and 850 hPa wind vector (arrows; units: m s^{-1}) in 1961~2018

3.3 雨季不同阶段水汽输送特征

在夏季，东亚地区水汽输送通量场表现出与低层风场相似的特征(丁一汇等, 2018)。以对流层 850 hPa 的水汽通量和风速为例，我们分析了华北雨季历年开始日、峰值日及结束日的水汽输送气候特征。如图 3a，在华北雨季开始日，随着夏季风北进，西太平洋副高平均脊线位置越过 25°N ，平均水汽通量高值区位于华南西北部经江南中西部至黄淮一带，从华南至黄淮地区呈现西南至东北向分布，最大值区超过 $130 \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ ，基本与大于 5m s^{-1} 风速区重叠。华北地区 850 hPa 水汽通量普遍有 $30\sim 110 \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ ，此时到达华北地区的水汽主要来源于印度季风水汽在中南半岛及南海地区的转向气流，累积的水汽沿着西太平洋副高外围向长江流域及华北输送。由 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的水汽通量纬度-高度分布来看，水汽通量的垂直分布自低层到高层向北倾斜，水汽在低层开始堆积并垂直抬升，在中高层形成“倒 V 型”结构(图 3b)，水汽通量大值中心出现在江淮地区的 $925 \text{hPa}\sim 850 \text{hPa}$ 附近，华北地区上空水汽通量等值线较密集，垂直梯度大，且向北逐渐减小。

华北雨季开始后至结束前，逐年选取雨季时段中最大降水量所在当日为峰值日。在峰值日，副高再度北抬，华北地区处于副高的西北侧，水汽输送高值区中心到达华北南部至黄淮东部一带(图 3c)，由华北地区峰值日与开始日 850 hPa 风场和水汽通量差值场对比看(图略)，伴随华北以南地区偏南风加强，同时华北北部出现偏北风，风场在华北低层辐合，中低层水汽通量进一步增强。从垂直分布看，中高层“倒 V 型”垂直结构更加明显(图 3d)，低层水汽辐合抬升向中高层入侵，抬升作用更有利于形成降水，此时华北上空主要由偏南风带来的水汽量达到最高峰。

在结束日，副高南落且强度减弱，华北地区 850 hPa 风速明显减小，水汽通量减弱到 $70 \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ 以下，水汽通量高值中心南撤至华南一带，华北中高层“倒 V 型”垂直结构被破坏，低层水汽由盛转衰(图 3e、f)，伴随季风的低频振荡水汽南撤，华北降水减少，雨季结束。由此可见，在雨季进程中的不同阶段，水汽输送及环流特征明显发生变化，而且降水和水汽输送总体协同一致，两者的变化联系紧密。

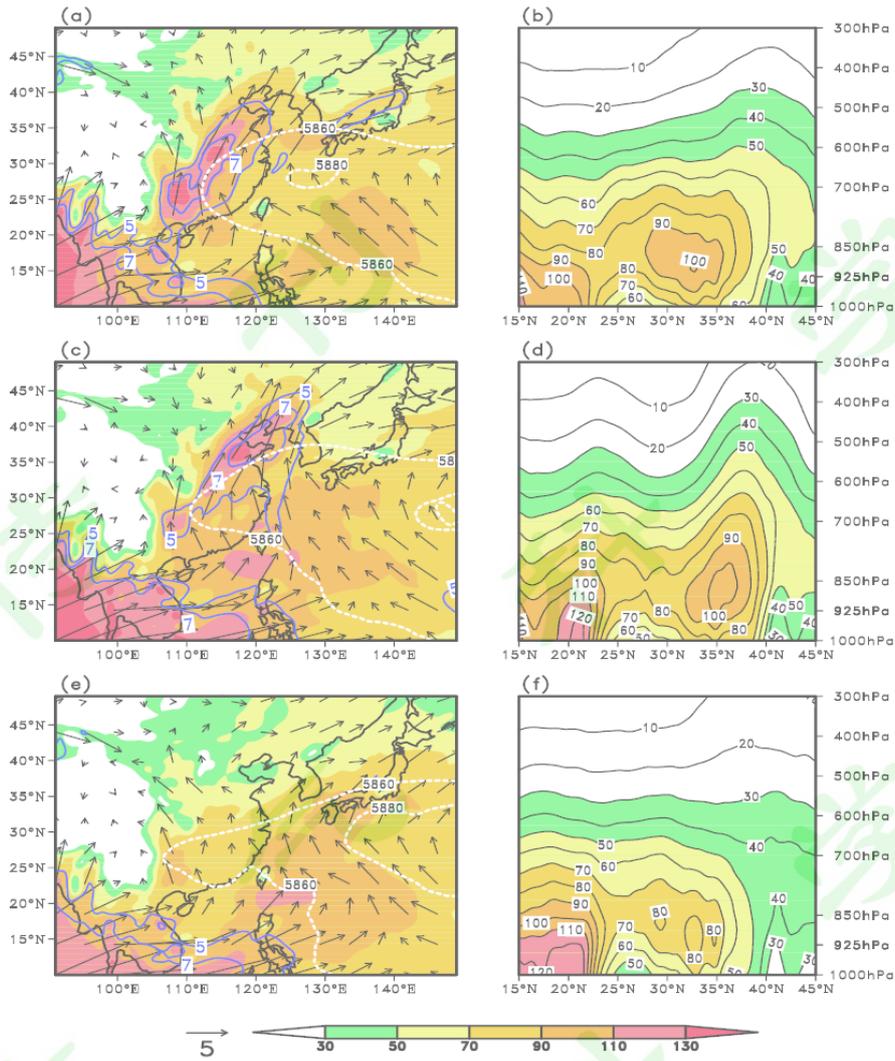


图3 华北雨季开始日(a,b)、峰值日(c,d)、结束日(e,f)平均850 hPa 风场(箭头)、风速(蓝色实线; 单位: m s^{-1})、5860、5880 gpm 等高线范围(白色虚线), 水汽通量(填色和等值线; 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) 及其纬度-高度分布(沿 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均)

Fig.3 850hPa wind vector (arrows), wind velocity (blue curves; units: m s^{-1}), the climatological extent of the 5860 and 5880 gpm (white dashed curves), water-vapor fluxes (shadings and contour lines; units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) and latitude-altitude cross-section of $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ averaged moisture fluxes (curves and shadings; units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) on onset date (a,b), peak date (c,d) and ending date (e,f)

4 华北雨季降水和水汽输送年代际变化

4.1 降水年代际变化

1961~2018 年华北雨季历年开始日期在 7 月 6 日至 8 月 10 日之间, 常年平均开始日为 7 月 17 日, 雨季开始日有渐晚趋势, 平均为 $0.5 \text{ d}/10 \text{ a}$; 历年结束日期在 7 月 25 日至 9 月 3 日之间, 常年平均结束日期为 8 月 18 日, 雨季结束日有渐早趋势, 平均为 $1.1 \text{ d}/10 \text{ a}$; 历年雨季长度在 16~60 天之间, 常年平均值为 32.5 天, 雨季长度有明显变短趋势, 平均为 $1.7 \text{ d}/10 \text{ a}$, 超过 95% 显著性水平(图 4a)。华北雨季历年降水量在 41.2~311.9 mm 之间, 常年平均值为 143.1 mm(图 4b)。从长期变化看, 1961~2018 年华北雨季降水量呈现出减少趋势, 平均为 $0.7 \text{ mm}/\text{a}$ 。整个华北地区 7~8 月降水量均呈现出减少的变化趋势, 其中北京及周边的河北中北部地区减少趋势显著, 超过 $2.5 \text{ mm}/\text{a}$ (图略)。通过计算雨季开始日期、结束日期早晚与降水距平的相关系数发现, 历年雨季开始早晚与降水距平相关系数为 -0.52 , 超过 99% 的显著性水平, 表明雨季开始早晚与降水量多寡存在显著的负相关关系, 雨季开始早, 降水量易偏多, 雨季开始晚, 降水量易偏少; 雨季结束早晚与降水量距平相关系数为 0.43 , 超过 99% 的显著性水平, 表明雨季结束早晚与降水量多寡存在显著的正相关关系, 雨季结束早, 降水量易偏少, 雨季结束晚, 降水量易偏多。雨季长度与降水量距平相关系数为 0.81 , 超过 99% 的显著性水平, 表明雨季偏长的大多年份降水多, 雨季偏短的大多年份降水少。

以往研究表明，华北地区夏季降水在 20 世纪 70 年代中后期发生了一次明显的跃变，此后华北地区降水较前期显著减少（周连童和黄荣辉，2003；丁一汇和张莉，2008）。荣艳淑（2013）指出，华北夏季降水量在 1977 年前后发生突变而减少，1980 年代末至 1990 年代末，降水有所增加，而 21 世纪以来再次减为最少的时期。由图 4b 可知，1961 年以来华北雨季降水量年代际波动较大，总体呈现“减-增-减”阶段式变化特征，1977 年后雨季降水量明显减少。同时，对华北雨季降水量滑动 T 检验分析表明，1986 年、1999 年前后两处存在突变，且都超过了 95% 显著性检验（图略）。因此，结合前人的研究以及降水量 11 年滑动平均曲线的变化，我们选择以 1977 年、1987 年和 1999 年把降水量划分出四个时期：分别为 1961~1976 年（P1）、1977~1986 年（P2）、1987~1998 年（P3）和 1999~2018 年（P4）。P1 降水偏多 15.1%；P2 降水偏少 16.4%，为四个时期中最少的时段；P3 降水再次转多，较常年偏多 20.2%，为四个时期中最大的时段；P4 降水量再次减少，较常年偏少 16.0%。这里我们选择雨季降水量偏多超过一倍标准差的所有年份代表多雨年，有 1963、1964、1973、1988、1995、1996 和 2012 年共 7 年，其中除 2012 年外，其余 6 年均处在降水量偏多的 P1 和 P3 两个多雨年代；同理，雨季降水量偏少一倍标准差的年份代表少雨年，有 1965、1971、1980、1986、2000、2001、2002、2014 和 2015 年共 9 年，其中除 1965 和 1971 年外，其余 7 年均处在 P2 和 P4 两个少雨年代中。9 个华北少雨年夏季均出现了不同程度的气象干旱，其中 1965、1980、2000 和 2001 年华北地区均有极端干旱事件发生（毕慕莹和丁一汇，1992；安莉娟等，2014；中国气象局，2010，2015）。由图 5 可以看到，在多雨年代，华北大部地区雨季降水量较常年偏多 20%~100%，其中在华北中部局部地区偏多一倍以上，同时东北地区和江南地区降水相对偏少；在少雨年代，华北大部地区雨季降水量较常年偏少 30%~60%，华北北部部分地区偏少 60% 以上，而广大的南方地区和东北东部地区降水相对偏多，为典型的“南涝北旱”式降水分布。

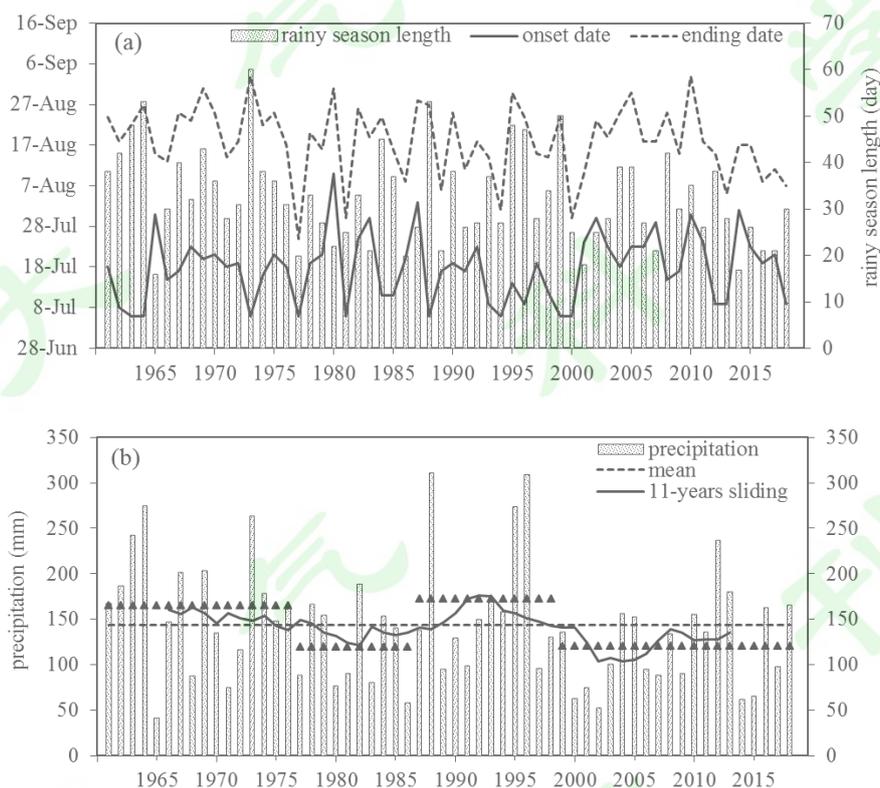


图 4 1961~2018 年华北雨季 (a) 历年开始日期 (实线)、结束日期 (虚线) 及雨季长度 (直方图; 单位: 天), (b) 降水量历年值 (直方图)、多年平均值 (虚线)、11 年滑动平均值 (实线) 及四个时期的降水量平均值 (三角)。单位: mm

Fig.4 (a) Onset date (solid curve), ending date (dashed curve) and length (histogram; units: day), (b) precipitations (histogram), climatological precipitation (dashed line), 11-year running average (solid curve) and mean precipitation in the four periods (triangle) of rainy season in North China during 1961-2018. units: mm

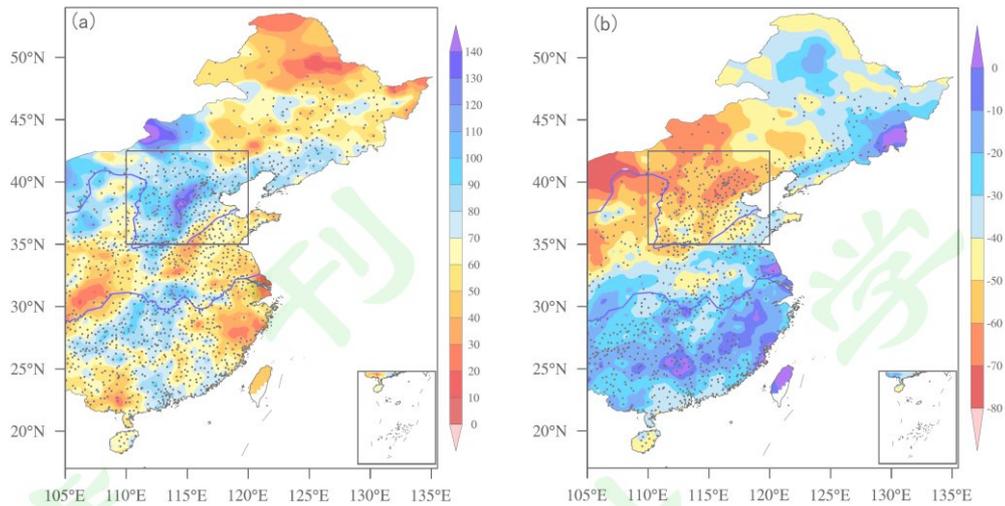


图 5 华北雨季多雨年代 (a) 和少雨年代 (b) 合成的降水距平百分率 (单位: %) 分布。黑点表示通过 99% 水平的显著性检验, 黑色线框表示华北区域

Fig.5 Distribution of the precipitation anomaly percentage (shadings; units:%) in rainy decades (a) and rainless decades (b) during rainy season. The dark stipplings indicate values exceeding 99% confidence levels, and the black box indicates the geographical locations of North China.

4.2 水汽收支年代际变化

东亚地区夏季大尺度降水的形成依赖于充足的水汽来源, 配合地形或有利的动力抬升条件形成大范围降水。因此, 我们考察了 1961~2018 年华北雨季水汽收支变化及其与降水量的联系。结果表明, 华北雨季降水量与区域内净水汽收支关系密切并表现出同位相变化, 二者时间相关系数为 0.82, 超过 99% 显著性水平 (图 6a)。一方面表明雨季降水量同水汽净收支具有较好的对应关系, 另一方面说明华北雨季降水所需水汽主要来自于外界的输入。

由华北地区四个边界多年平均的水汽收支来看, 经向水汽输送收支盈余, 纬向亏损。整体而言, 南边界和西边界分别有最大、次大水汽输入量, 分别占水汽总输入的 64.7% 和 35.3%, 与区域内水汽净收支相关系数分别为 0.81 和 0.59, 表明南边界的水汽输入对华北雨季水汽收支和降水有主导作用 (图 6b、c)。东边界和北边界为水汽输出, 分别占水汽总输出的 83.5% 和 16.5%, 与区域内水汽净收支相关分别为 -0.68 和 -0.4, 表明两边界的水汽流出状况与华北雨季水汽收支负相关关系显著, 若流出多, 净收支少 (图 6d、e)。从长期趋势来看, 四个边界的水汽收支均表现为统计显著的减少趋势, 这与降水的减少趋势相对应。

从年代际变化来看, 各边界的水汽收支与雨季降水量的变化存在较好的对应关系 (图 6; 表 1)。其中, 南边界水汽输入在 P1 阶段偏强, 但有减弱趋势; P2 阶段水汽输入偏弱, 随后在 P3 阶段水汽输入转强, 但 1999 年以来再次减弱为四个时期中最小。西边界水汽收支的年代际变化与南边界的特征类似, 但强度在四个时期均偏弱, 表明南边界是华北雨季降水最主要水汽路径, 西边界次要的水汽路径。东边界的水汽输出表现出与降水量类似的“减-增-减”式年代际演变。北边界水汽流出的年代际变化略有不同, 大致为先强后弱, P1~P3 阶段水汽流出总体偏强, P4 阶段流出转弱, 甚至转为流入。值得注意的是, 1961~2018 年中有 12 年北边界由水汽输出转变为水汽输入, 其中 11 年均均为雨季降水异常偏少年, 这种转变是否为少雨年代特有的? 与其相联系的大尺度水汽通量输送发生了哪些变化? 将在下一节讨论。

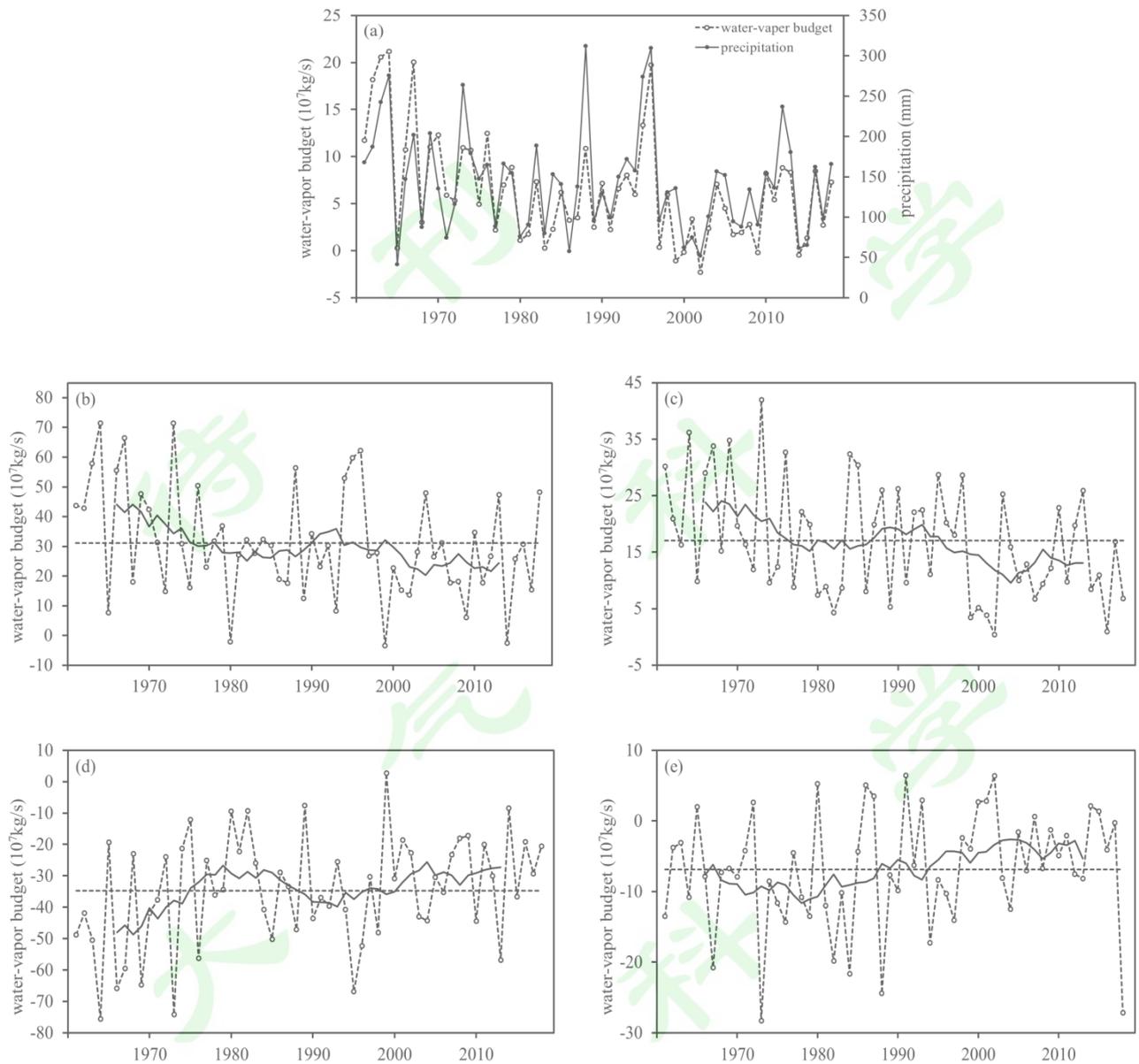


图6 1961~2018年华北雨季水汽收支历年变化(虚折线)、11年滑动平均值(实线)及平均值(虚直线), (a)区域净收支及降水量(单位: mm); (b)南边界; (c)西边界; (d)东边界; (e)北边界。单位: 10^7 kg s^{-1}

Fig.6 Interannual variation (dashed curve), 11 year running average (solid curve) and climatic value (dashed line) of water-vapor budget on each boundary during 1961~2018, (a) whole region budget and precipitation (units: mm); (b) southern boundary; (c) western boundary; (d) eastern boundary; (e) northern boundary. (units: 10^7 kg s^{-1})

表1 四个不同时期的华北雨季降水量(单位: mm)、各边界上和区域净水汽收支(单位: 10^7 kg s^{-1})及其距平百分率(单位: %)

Table.1 Precipitation (units: mm), water-vapor budget (units: 10^7 kg s^{-1}) and percentage anomalies (%) relative to 1961~2018 climatology for each boundary during the four different periods of rainy season in North China

	P1(1961~1976)		P2(1977~1986)		P3(1987~1998)		P4(1999~2018)	
降水量	164.7	+15.1%	119.6	-16.4%	172.0	+20.2%	120.2	-16.0%
净水汽收支	11.21	+72.8%	4.03	-37.9%	7.20	+11.0%	3.51	-45.9%
南边界	41.81	+34.1%	25.81	-17.2%	34.35	+10.2%	23.43	-24.8%
西边界	23.20	+36.2%	15.11	-11.3%	19.85	+16.9%	11.37	-33.2%
东边界	-44.79	+28.8%	-28.24	-18.8%	-39.34	+13.1%	-27.31	-21.5%
北边界	-9.01	+29.9%	-8.65	+24.8%	-7.67	+10.6%	-3.97	-42.7%

4.3 多雨年代与少雨年代的水汽输送差异

多雨年代、少雨年代华北雨季降水量的多寡同水汽输送联系如何？可从大尺度水汽输送时空分布差异来考虑其对降水量的影响。

我们分别计算了华北雨季多雨、少雨年代整层积分水汽输送通量距平及散度距平分布。如图 7a 所示，在多雨年代，西北太平洋为反气旋式异常水汽输送，我国东部地区受异常偏南水汽控制，延伸至华北北部。来自南海及西太平洋偏南水汽输送异常偏强，与中高纬西风带异常偏西水汽汇聚于华北，虽然西风带水汽通量相对偏弱，但其对华北雨季降水起到补充作用。梁萍等人（2007）的研究指出这种异常水汽输送对华北暴雨的产生具有重要作用，华北地区水汽辐合异常偏强易造成雨季偏强，强降水日偏多。而在少雨年代（图 7b），我国江南东部经东海至西北太平洋、巴尔喀什湖到蒙古国中东部均为反气旋式异常水汽通量，中心分别位于琉球群岛附近及蒙古国西部；而我国东北地区及朝鲜半岛、日本海附近为气旋式异常水汽通量，中心位于我国东北北部，华北地区主要受异常偏北水汽影响，来自鄂霍茨克海及中高纬西风带来的水汽加强，来自南海和西太平洋的偏南水汽减弱，不仅如此，华北地区水汽辐散异常偏强，通过了 95% 水平的显著性检验，少雨年代雨季这种水汽异常分布的特征，区别于多雨年代水汽输送，可能是造成雨季降水偏少的重要因素。

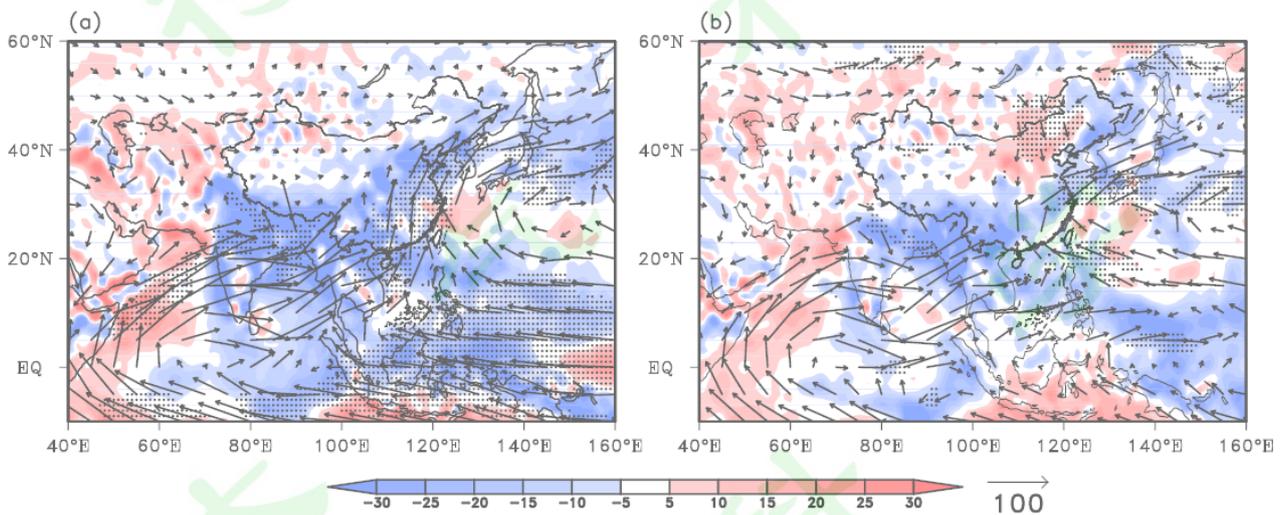


图 7 华北雨季多雨年代 (a) 和少雨年代 (b) 合成的整层积分水汽通量距平 (箭头; 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及散度距平 (填色; 单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 分布 (黑点表示通过 95% 水平的显著性检验)

Fig.7 Distribution of the water-vapor fluxes vector anomaly (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), divergence (shadings; units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in rainy decades (a) and rainless decades (b) during rainy season. Dark stipplings indicate values exceeding 95% confidence levels

图 8a、b 分别为华北雨季多雨年代、少雨年代沿 $110^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 水汽通量逐日演变，不同年代水汽输送时间变化特征差异明显。在多雨年代，水汽到达华北地区的时间早，减弱的时间晚，停留时间长；7 月上旬起华北南部水汽通量稳定维持在 $30 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ 以上，7 月中旬前后，水汽持续向北推进到华北以北地区；在少雨年代，7 月上中旬华北地区水汽通量波动明显，不稳定在 $10 \sim 30 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ 。整体来看，7 月中旬至 8 月中旬 35°N 以北大部分地区水汽通量多雨年代明显强于少雨年代（图 8c），差值中心位于 $37 \sim 42^{\circ}\text{N}$ 之间，分别出现在 7 月中旬、7 月下旬和 8 月上中旬，其中最大差值超过 $30 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ ，出现在 8 月上旬。此外，7~8 月华北地区多雨年代相比少雨年代大多数时间水汽辐合偏强（图 8d），特别在 8 月上中旬，华北中部及南部低层水汽汇聚偏强。

以上分析表明，水汽通量的强弱、到达华北的时间早晚是雨季降水量多寡的重要决定因素。一般而言，季风向北推进偏早（晚）有（不）利于水汽向北输送，华北雨季开始偏早（晚），水汽辐合偏强（弱）从而导致降水易偏多（少）。这可能与副热带高压及东亚夏季风各层环流系统的演变有关（于晓澄等，2019）。

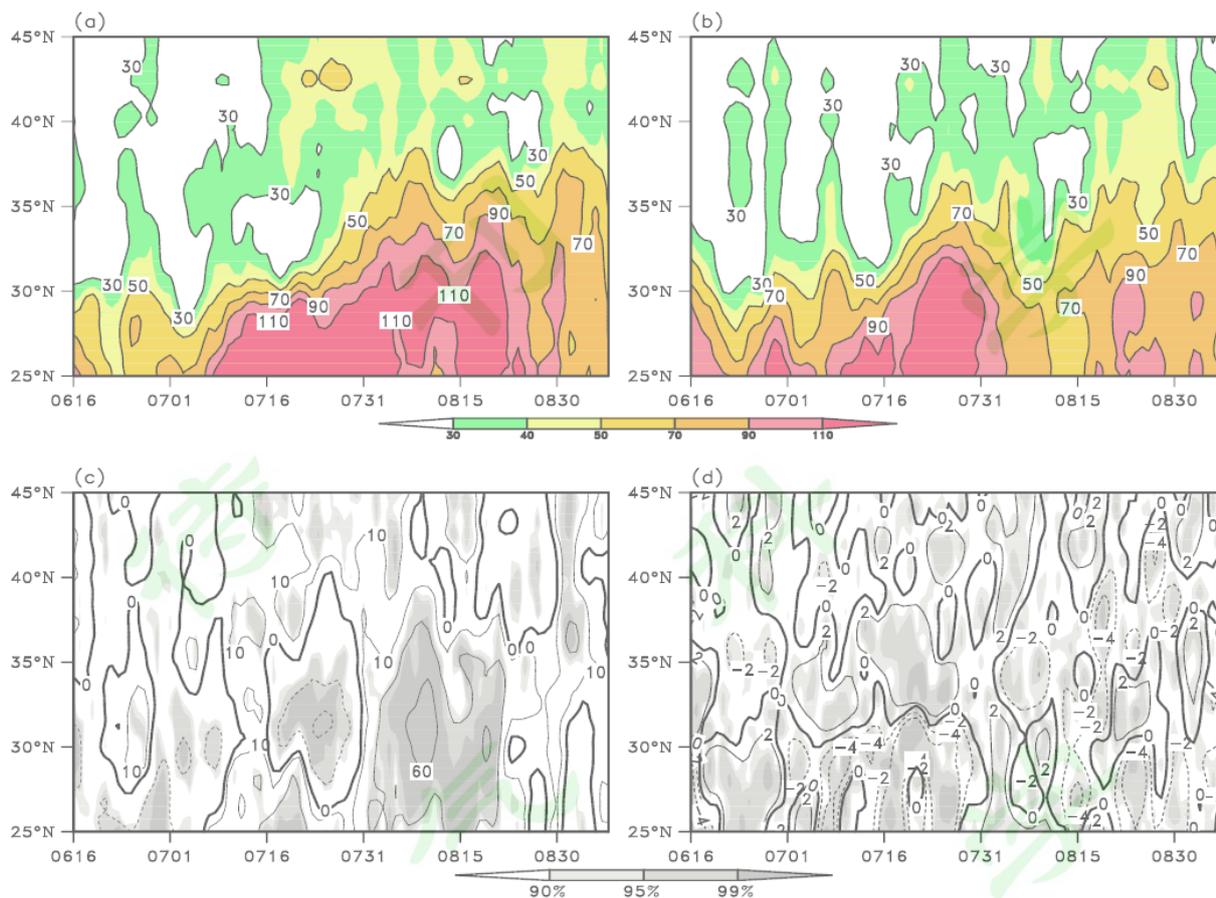


图8 华北雨季多雨年代 (a)、少雨年代 (b) 合成的 850 hPa 水汽通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) 及其差值场 (c)、水汽通量散度 (单位: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) 差值场 (d) 的时间-纬度分布。沿 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均, c、d 中阴影表示通过 90%、95% 或 99% 的显著性检验

Fig.8 Time-latitude section along $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ averaged of 850hPa water-vapor fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) in rainy decades (a), rainless decades (b), the differences in water-vapor fluxes (c) and divergence(d), (units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) between rainy and rainless decades. The shadings indicate values exceeding 90%, 95% or 99% confidence levels in c and d

前文提到, 华北雨季开始日和峰值日气候平均水汽通量自低层到高层向北倾斜, 水汽在低层堆积并垂直抬升, 到对流层中高层形成“倒 V 型”结构。那么多雨年代以及少雨年代的差异如何? 如图 9 所示, 多雨年代雨季开始时低层水汽通量已十分强盛, 中高层水汽的“倒 V 型”结构完全建立, 水汽大值区范围由江淮至华北南部, 异常南风输送及水汽辐合使华北地区上空得以维持深厚的水汽, 利于降水形成; 雨季盛期时华北地区水汽更加强盛; 结束时水汽快速减弱。而少雨年代雨季开始时, 低层水汽势力弱, 水汽在中高层尚未建立“倒 V 型”垂直结构, 水汽大值中心位于华南, 临近峰值日“倒 V 型”显现, 但其水汽通量强度及垂直梯度均不及多雨年代; 结束时与多雨年代差别不大。由此可以看出, 这种水汽分布差异和雨季降水量多寡联系紧密。

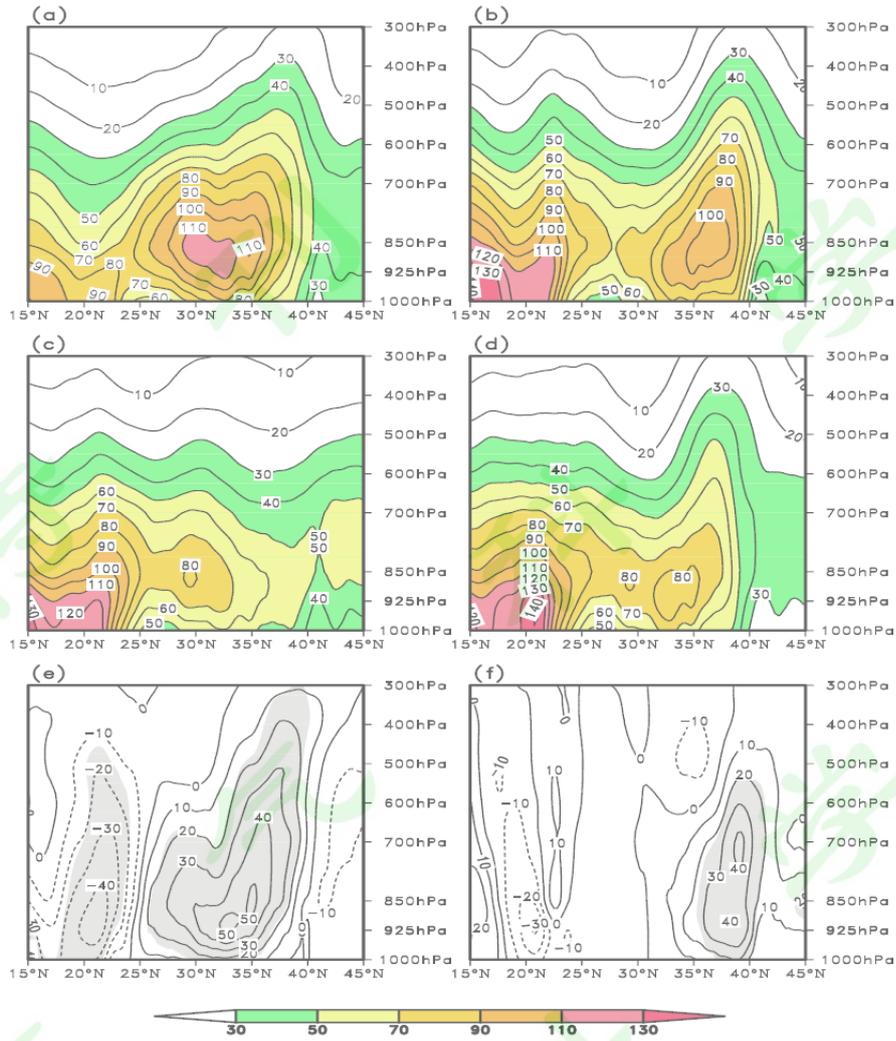


图9 华北雨季多雨年代 (a,b)、少雨年代 (c,d) 合成的水汽通量纬度-高度分布及其差值场 (e,f)。沿 110°E~120°E 平均, a、c、e 为开始日, b、d、f 为峰值日, e、f 中阴影表示通过 95% 的显著性检验。(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$)

Fig.9 Latitude-altitude section along 110°E~120°E averaged of water-vapor fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$) in rainy decades (a,b), rainless decades (c,d) and the differences (e,f) between rainy and rainless decades. (a, c, e are the onset date; b, d, and f are the peak date. The shadings indicate values exceeding 95% confidence levels in e and f.)

为了揭示华北雨季多雨年代和少雨年代水汽收支状况的差异, 图 10 给出了雨季期各边界水汽收支, 可以看出不论多雨年代还是少雨年代, 华北地区大气有净水汽收入以供产生降水, 水汽最大输入在南边界, 多雨年代是少雨年代的近 4 倍, 西边界有次大水汽输入, 南边界、西边界水汽输入量的变化同雨季降水多寡联系密切, 其中南边界的水汽输入量起主要作用。一般而言华北地区东边界、北边界为负水汽收支既水汽输出, 东边界水汽输出大于北边界。值得注意的是, 在少雨年代, 北边界表现为水汽净收入, 这区别于多雨年代。前文提到, 在少雨年代我国华北地区受到异常偏北水汽通量的影响, 这支异常水汽由蒙古反气旋式异常水汽通量的右支和我国东北地区及朝鲜半岛附近的气旋式异常水汽通量左支汇合而成, 说明这种异常水汽配置在少雨年代对降水的水汽来源起到了补偿作用。更进一步研究表明, 不论气候平均、多雨年代或少雨年代 (表 2), 南边界有最大水汽收入, 主要集中在低层, 是中层和高层总输送量的 2~4 倍。南边界的水汽汇入体现出东亚夏季风经向水汽输送的特点; 西边界有次大水汽收入, 集中在中高层, 而低层很小, 表明西边界的水汽输入主要发生在对流层中层到高层, 与西风带水汽输送通道联系密切; 东边界有最大的水汽输出, 低层和中层量值相差不大, 高层较小。北边界在多年平均和多雨年代的不同高度上均表现为水汽输出, 且由低层向高层递减; 但在少雨年代, 北边界水汽由输出转为输入, 且大多出现在 1979 年后, 这可能是受到东亚夏季风在 1970 年代末之后强度和辐合作用减弱的影响, 华北地区降水水分供应不足, 我国东部雨带南移进而华北出现少雨期 (Ding et al., 2008)。

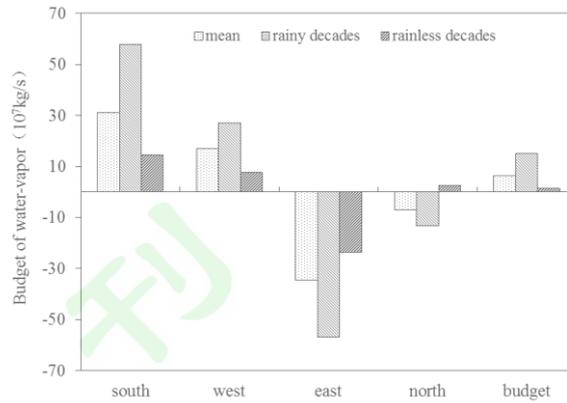


图 10 华北地区各边界多年平均、多雨年代和少雨年代水汽收支柱状图 (单位: 10^7 kg s^{-1})

Fig.10 The water-vapor budget at each boundary of North China for 1961~2018 climatology, rainy decades and rainless decades (units: 10^7 kg s^{-1})

表 2 华北雨季多年平均、多雨年代和少雨年代各边界不同层次的水汽收支表 (单位: 10^7 kg s^{-1})

Table.2 The averaged water-vapor budget with different layers at each boundary in climatology (1961~2018), rainy and rainless decades (units: 10^7 kg s^{-1})

	多年平均			多雨年代			少雨年代		
	低层	中层	高层	低层	中层	高层	低层	中层	高层
南	22.09	6.71	2.37	39.85	13.47	4.66	11.14	2.31	1.11
西	0.95	9.07	7.02	0.95	14.76	11.32	-0.01	4.20	3.62
东	-13.73	-13.06	-7.99	-21.45	-22.07	-13.18	-10.66	-7.92	-5.03
北	-4.30	-1.17	-1.47	-7.32	-3.02	-2.91	0.48	1.80	0.33
水汽收支	5.02	1.54	-0.07	12.03	3.14	-0.11	0.94	0.39	0.05

5 讨论

本文从大尺度大气环流角度,重点研究了华北地区东、西、南、北四个边界水汽输送对华北雨季降水的影响。由于华北地区主要水汽源地为海洋,因此我们又进一步讨论了水汽输送对热带太平洋海温、印度洋海温等外强迫变化的响应机理。图 11 给出了华北地区四个边界水汽收支与前冬至夏季的海温以及 850 hPa 风场的相关系数空间分布。夏季,西、南边界水汽输入与西北太平洋和印度洋海温存在显著的负相关,与赤道中东太平洋海温也存在显著的负相关,中国东部地区对流层低层呈现反气旋性环流异常,对应西北太平洋副热带高压偏强。这说明西北太平洋和印度洋低海温的强迫作用可能是造成东亚东部夏季低层环流强弱变化的原因之一 (Zhang et al.,1996; Zhang, 2001),进而影响华北雨季水汽输入量。由于东边界和北边界为水汽输出,海温场和风场相关分布特征与西边界、南边界相反。总体来看,西北太平洋和印度洋低海温低(高)时,西北太平洋副热带高压偏强(弱),中国东部低层西南风强(弱),到达华北地区水汽收支多(少),造成降水偏多(少)。

从短期气候预测角度而言,我们更加关注前期信号对华北雨季降水异常的影响,从图 11 可以看到,雨季年冬季(前年 12 月至当年 2 月)到夏季,西、南边界水汽收支与西北太平洋和印度洋地区海温为持续负相关,而与赤道中东太平洋海温的相关系数由正向负演变,这意味 El Niño 位相与 La Niña 位相的转换。以往研究指出不同模态和类型的 ENSO 季节变化过程我国东部降水异常分布和强度都有明显差异,一般在冬季 El Niño 转盛夏 La Niña 时,东亚夏季风雨带迅速北跳到华北至东北南部一带,降水异常偏多;而 La Niña 转 El Niño 的情况基本相反(宗海锋, 2017)。赵树云等(2017)更进一步发现华北雨季降水异常偏多年通常发生在 El Niño 结束且当年转为 La Niña 的年份,而降水异常偏少年通常发生在赤道中东太平洋冷水位相结束且当年发展成 El Niño 事件的年份。我们的研究结果与以往研究基本一致。由此可见,赤道中东太平洋大范围海温的季节演变,联合西北太平洋和印度洋海温持续异常,可能是影响华北雨季降水水汽收支的重

要因子，在 El Niño 转 La Niña 的夏季，华北雨季水汽收支多，降水量多；在 La Niña 转 El Niño 的夏季，华北雨季水汽收支少，降水量少。

但需要指出的是，这一结论建立在相关统计结果之上，有的统计值并未通过显著性检验，例如冬季的净水汽收支和北边界水汽输送与赤道中东太平洋海温的正相关并不显著，这说明 ENSO 的季节演变对东、南、西边界的水汽收支的影响比北边界大。北边界水汽输送主要受到中高纬度环流系统 (Zhang et al., 2017; 张若楠等, 2018) 等因素的调制，还需未来做进一步讨论。

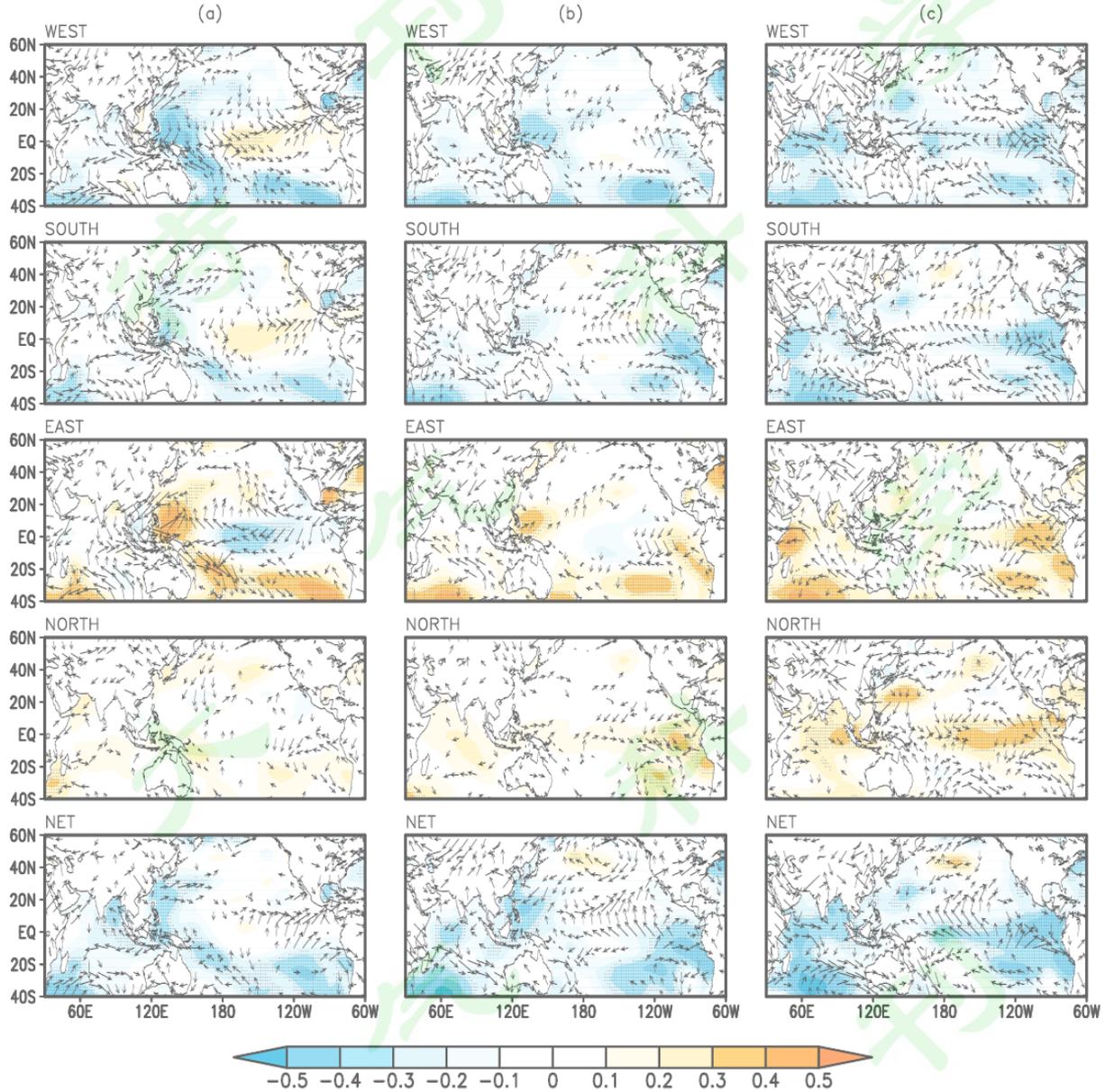


图 11 华北地区各边界水汽收支与前冬 (a)、春季 (b)、夏季 (c) 海温 (填色) 及 850 hPa 风矢量 (箭头) 相关分布。图中黑点表示海温相关系数通过 95% 水平的显著性检验，风场矢量仅给出相关系数大于 0.15 的格点

Fig.11 The spatial pattern of correlation coefficients between Pacific and Indian Ocean sea surface temperature (shadings), 850 hPa wind vector (arrow) and water-vapor budget at each boundary of North China in the previous winter (a), previous spring (b), and concurrent summer (c). Dark stipplings indicate values exceeding 95% confidence level. Wind vectors only show the correlation coefficients larger than 0.15

6 结论

本文利用国家气象信息中心的 1961~2018 年逐日历史整编均一化降水资料和欧洲中期天气预报中心 ERA5 全球再分析等资料，采用新的华北雨季监测气象行业标准，系统研究了华北雨季的季节进程的水汽输送和降水特征，并在年代际尺度上明确了水汽输送时空变化对降水的不同影响，并浅析了热带太平洋海温、

印度洋海温等水汽源地的影响机理，得出结论如下：

(1) 华北雨季降水的形成与水汽输送及其辐合密切相关。从气候特征来看，维持华北雨季降水的水汽通道主要有四个：印度季风水汽、西太平洋的东亚季风水汽、 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 之间的越赤道气流为最主要的水汽源，华北上游 40°N 及其以北地区的水汽辐散虽然强度偏弱，但也从西风带带来了水汽，这四条水汽汇入华北地区，以维持雨季大范围降水。这与以往的认识基本一致。

(2) 本文在新的华北雨季指标基础上，深入研究了华北雨季的季节进程特征，获得了一些新的认识。依据新指标划分的每年雨季起讫时间均有不同，我们首先识别了每年雨季平均的降水和环流特征，进而将华北雨季分为开始、峰值和结束三个阶段来考察雨季降水和水汽输送的季节内进程：从雨季开始到盛期，径向水汽输送强，纬向较弱，水汽通量南北梯度大，对流层中低层垂直梯度大，水汽通量大值区自低层到高层向北倾斜，在中高层形成“倒 V 型”垂直结构，华北地区上空得以维持深厚的水汽；而雨季结束阶段，纬向输送相对偏强，水汽通量南北梯度减小，“倒 V 型”垂直结构破坏，水汽通量大值中心南撤至华南一带，低层水汽由盛转衰，华北雨季结束。

(3) 华北雨季降水量有显著的年代际变化，分别在 1977、1987、1999 年发生年代际突变，雨季降水和水汽收支均呈现“减-增-减”的阶段变化趋势，并且降水和水汽收支存在显著的相关性。水汽通量的强弱及到达华北的时间早晚对雨季降水多寡有重要影响，华北雨季多雨年代和少雨年代水汽通量差异主要表现在：多雨年代，西北太平洋为反气旋式异常水汽通量，我国东部地区受异常偏南水汽控制。来自南海及西太平洋偏南水汽输送异常偏强，与中高纬西风带异常偏西水汽汇聚于华北，华北水汽辐合偏强。虽然西风带水汽通量相对偏弱，但其对华北雨季降水起到加强作用，二者共同造成华北雨季偏强；少雨年代，我国东北地区及朝鲜半岛、日本海附近为气旋式异常水汽通量，中心位于东北北部，华北地区主要受偏北水汽影响，水汽辐散异常偏强显著。另外，多（少）雨年代水汽到达华北地区的时间早（晚）、强度大（小），减弱的时间晚（早），停留时间长（短），这也对雨季降水多寡产生重要影响。从四个边界来看华北雨季水汽收支，南边界和西边界对雨季水汽收支有主导作用，这两个边界水汽收支的年代际变化是导致华北雨季降水发生年代际变化的直接原因。在多雨年代，南边界和西边界水汽净输入很强，北边界的输出也很强，但区域净收支很大；在少雨年代，南边界和西边界水汽净输入很弱，但北边界水汽输出转为输入，对降水的水汽来源起到一定的补偿作用，这是区别于多雨年代的重要特征。

参考文献 (References)

- 安莉娟, 任福民, 李韵婕, 等. 2014. 近 50 年华北区域性气象干旱事件的特征分析 [J]. 气象, 40(9): 1097-1105. An Lijuan, Ren Fumin, Li Yunjie, et al. 2014. Study on Characteristics of Regional Drought Events over North China During the Past 50 Years [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40(9): 1097-1105. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.007.
- 毕慕莹, 丁一汇. 1992. 1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析 [J]. 应用气象学报, 3(2): 145-156. Bi Muying, Ding Yihui. 1992. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980 [J]. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 3(2): 145-156.
- 陈烈庭. 1999. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征 [J]. 高原气象, 18(4): 477-485. Chen Lieting. 1999. Regional features of inter-annual and inter-decadal variations in summer precipitation anomalies over north china [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18(4): 477-485.
- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用 [M]. 北京:气象出版社, 153-157. Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. 2000. A study of precipitation prediction in flood season over China and application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 153-157.
- 丁一汇, 张莉. 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较 [J]. 大气科学, 32(4): 794-805. Ding Yihui, Zhang Li. 2008. Intercomparison of the Time for Climate Abrupt Change between the Tibetan Plateau and Other Regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 794-805. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.08.
- 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化 [J]. 大气科学, 42(3): 533-558. Ding Yihui, Si Dong, Liu Yanju, et al. 2018. On the Characteristics, Driving Forces and Inter-decadal Variability of the East Asian Summer Monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 533-558. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261.
- Ding Yihui, Wang Zunya, Sun Ying. 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.
- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 32(4): 752-760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global Change and Regional Aridification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(4): 752-760. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.05.

- 符娇兰, 陈双, 沈晓琳, 等. 2019. 两次华北冷涡降水成因及预报偏差对比分析[J]. 气象, 45(5):606–620. Fu Jiaolan, Chen Shuang, Shen Xiaolin, et al. 2019. Comparative Study of the Cause of Rainfall and Its Forecast Biases of Two Cold Vortex Rainfall Events in North China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(5): 606–620. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.002.
- 郝立生, 丁一汇. 2012. 华北降水变化研究进展 [J]. 地理科学进展, 31(5): 593–601. Hao Lisheng, Ding Yihui. 2012. Progress of precipitation research in North China [J]. Progress in Geography (in Chinese), 31(5): 593–601. doi:10.11820/dlkxjz.2012.05.007.
- 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, Dign Yihui, Min Jinzhong. 2016. Relationship between Summer Monsoon Changes 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.
- 郝立生, LI Tim, 马宁, 等. 2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 44(3): 639–656. Hao Lisheng, LI Tim, Ma Ning, et al. 2020. Influence of MJO on Summer Precipitation in North China in 2018 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(3): 639–656. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19217.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Q. J. R. Meteorol. Soc., 146(730): 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803.
- 黄荣辉, 陈际龙. 2010. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异 [J]. 大气科学, 34(6): 1035–1045. Huang Ronghui, Chen Jilong. 2010. Characteristics of the Summertime Water Vapor Transports over the Eastern Part of China and Those over the Western Part of China and Their Difference [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(6): 1035–1045. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.01.
- 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. Inter-decadal Variation of the Leading Modes of Summertime Precipitation Anomalies over Eastern China and Its Association with Water Vapor Transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(4): 589–606. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01.
- Huang, B., V.F. Banzon, E. Freeman, et al. 2014. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4 (ERSST.v4): Part I. Upgrades and intercomparisons [J]. Journal of Climate, 28(3): 911–930. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00006.1.
- 梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等. 2007. 华北夏季强降水的水汽来源 [J]. 高原气象, 26(3): 460–465. Liang Ping, He Jinhai, Chen Longxun, et al. 2007. Anomalous Moisture Sources for the Severe Precipitation over North China during Summer [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26(3): 460–465.
- 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威. 2016. 夏季中国华北与印度降水之间的关联及其成因分析 [J]. 大气科学, 40(1): 201–214. Lin Dawei, Bueh Cholaw, Xie Zuowei. 2016. Relationship between summer rainfall over North China and India and its genesis analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 201–214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14339.
- 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威. 2018. 夏季中国华北降水、印度降水与太平洋海表面温度的耦合关系 [J]. 大气科学, 42(6): 1175–1190. Lin Dawei, Bueh Cholaw, Xie Zuowei. 2018. A study on the coupling relationships among Pacific sea surface temperature and summer rainfalls over North China and India [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1175–1190, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17183.
- 刘海文, 丁一汇. 2008. 华北汛期的起讫及其气候学分析 [J]. 应用气象学报, 19(6): 688–696. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2008. Identification on the beginning date and end date of rainy season over North China and their climatology [J]. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 19(6): 688–696.
- 刘海文, 丁一汇. 2011. 华北汛期大尺度降水条件的年代际变化 [J]. 大气科学学报, 34(2): 146–152. Liu Haiwen, Ding Yihui. 2011. Interdecadal variability of large-scale precipitation conditions over North China during rainy seasons [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 34(2): 146–152.
- 刘宪亮. 2020. 南水北调中线工程在华北地下水超采综合治理中的作用及建议 [J]. 中国水利, 2020(13): 31–32. Liu Xianliang. 2020. Role and Suggestions of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion Project in the Comprehensive Control of Groundwater Overdrawing in North China [J]. China Water Resources (in Chinese), 2020(13): 31–32.
- 缪启龙, 江志红, 陈海山. 2010. 现代气候学 [M], 北京: 气象出版社, 78–82. Miao Qilong, Jiang Zhihong, Chen Haishan, 2010. Modern Climatology [M]. Beijing: Meteorological Press, 78–82.
- 任福民, 龚志强, 王艳姣, 等. 2015. 中国干旱、强降水、高温和低温区域性极端事件 [M]. 北京: 气象出版社, 75–79. Ren Fumin, Gong Zhiqiang, Wang Yanjiao, et al. 2015. Regional extreme events of drought, heavy precipitation, high temperature and low temperature in China [M]. Beijing: Meteorological Press, 75–79.
- 荣艳淑. 2013. 华北干旱 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 25–32. Rong Yanshu. 2013. Drought in North China [M]. Beijing: China Water&Power Press, 25–32.
- 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 2010. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. 气象学报, 68(6): 918–931. Shen Lelin, He Jinhai, Zhou Xiujie, et al. 2010. The regional variabilities of the summer rainfall in China and its relation with anomalous moisture transport during the recent 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(6): 918–931. doi:10.11676/qxxb2010.087.
- 宋燕, 张菁, 李智才. 2011. 青藏高原冬季积雪年代际变化及对中国夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 30(4): 843–851. Song Yan, Zhang Jing, Li Zhicai. 2011.

- Interdecadal Change of Winter Snow Depth on Tibetan Plateau and Its Effect on Summer Precipitation in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30(4): 843–851.
- Sun Bo, Zhu Yali, Wang Huijun. 2011. The recent inter-decadal and inter-annual variation of water vapor transport over Eastern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(5): 1039–1048. doi: 10.1007/s00376-010-0093-1.
- 谭桂容, 孙照渤. 2004. 西太平洋副高与华北旱涝的关系 [J]. *热带气象学报*, 20(2): 206–211. Tan Guirong, Sun Zhaobo. 2004. Relationship of the Subtropical high and Summertime Floods/Droughts over North China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 20(2): 206–211.
- 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 Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic Characteristics of Rainy Seasons in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(1): 1–13. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01.
- Webster P. J. 1994. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions [J]. *Reviews of Geophysics*, 32(4): 427–476.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4) : 789–797. Yang Xiuqun , Xie Qian , Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal to interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)* , 48(4) : 789–797.
- 杨溯, 李庆祥. 2014. 中国降水量序列均一性分析及数据集更新完善 [J]. *气候变化研究进展*, 10(4): 276–281. Yang Su, Li Qingxiang. 2014. Improvement in Homogeneity Analysis Method and Update of China Precipitation Data [J]. *Advance in Climate Change Research*, 10(4): 276–281. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.04.008.
- 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.
- 赵汉光. 1994. 华北的雨季 [J]. *气象*, 20(6): 3–8. Zhao Hanguang. 1994. Rainy Season in North China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 20(6): 3–8.
- 赵树云, 陈丽娟, 崔童. 2017. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响 [J]. *大气科学*, 41(4): 857–868. Zhao Shuyun, Chen Lijuan, Cui Tong. 2017. Effects of ENSO phase-switching on rainy-season precipitation in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(4): 857–868. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16226.
- 张若楠, 孙丞虎, 李维京. 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响[J]. *地球物理学报*, 61(1): 91–105. Zhang Ruonan, Sun Chenghu, Li Weijing. 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer precipitation over China [J]. *Chinese Journal Of Geophysics (in Chinese)*, 61(1): 91–105. doi: 10.6038/cjg2018K0755.
- Zhang Renhe, Akimasa Sumi, Masahide Kimoto. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon: A Diagnostic Study of the '86/87 and '91/92 Events [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 74(1): 49–62. doi: 10.2151/jmsj1965.74.1_49.
- Zhang Renhe. 2001. Relations of Water Vapor Transport from Indian Monsoon with That over East Asia and the Summer Rainfall in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(5): 1005–1017. doi: 10.1007/BF03403519.
- Zhang Q., Xu C., Zhang Z., et al. 2009. Spatial and temporal variability of precipitation over China, 1951–2005 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1): 53–68. doi:10.1007/s00704-007-0375-4.
- Zhang R N, Zuo Z Y. 2017. Impact of Eurasian spring snow decrement on East Asian summer precipitation [J]. *Journal of Climate*, 30, 3421–3437. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0214.1.
- 中国气象局. 2010. 中国气象干旱图集 [M], 北京:气象出版社, 20–92. China Meteorological Administration. 2010. Atlas of Meteorological drought in China [M]. Beijing: Meteorological Press, 20–92.
- 中国气象局. 2015. 中国气象灾害年鉴 [M], 北京:气象出版社, 10–20. China Meteorological Administration. 2015. China Meteorological Disaster Yearbook [M]. Beijing: Meteorological Press, 10–20.
- 中国气象局. 2019. 中国雨季监测指标 华北雨季 [S], QX/T 495–2019, 北京:气象出版社, 1–9. China Meteorological Administration. 2019. Monitoring indices of rainy season in China-Rainy season in North China [S], QX/T 495–2019. Beijing: Meteorological Press, 1–9.
- 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): 345–356. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 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, Wang Panxing. 2008b. Moisture transport in Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in*

Chinese), 66(1): 59–70. doi:10.11676/qxxb2008.006.

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: 10.3878/j.issn.1006-9585.2003.03.03.

Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110, D08104. doi:10.1029/2004JD005413.

宗海锋. 2017. 两个典型 ENSO 季节演变模式及其与我国东部降水的联系 [J]. 大气科学, 41 (6): 1264–1283. Zong Haifeng. 2017. Two typical ENSO seasonal evolution modes and their relations with rainfall over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1264–1283. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16279.

大气科学
季刊