

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.

华北雨季开始早晚与大气环流和海表温度异常的关系

于晓澄^{1,2} 赵俊虎² 杨柳¹ 支蓉² 封国林^{1,2}

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 本文利用国家气候中心的 1961~2016 年华北雨季监测资料、美国国家环境预报中心/大气研究中心 (NCEP/NCAR) 的大气再分析资料、NOAA 海表温度资料, 分析了华北雨季开始早晚的气候特征, 然后利用合成分析、回归分析等方法, 研究了华北雨季开始早晚与大气环流系统和关键区域海表温度的关系。结果表明, 56 a 来华北雨季开始最早在 7 月 6 日, 最晚在 8 月 10 日, 1961~2016 年华北雨季开始平均日期是 7 月 18 日。华北雨季开始时间具有显著的年际变化, 但雨季发生早晚的长期变化趋势不太明显。华北雨季开始早晚与西太平洋副热带高压 (简称副高)、东亚副热带西风急流、东亚夏季风等环流系统的活动关系密切, 当对流层高层副热带西风急流建立偏早偏强, 中层西太平洋副高第二次北跳偏早, 低层东亚夏季风北进提前时, 华北雨季开始偏早, 反之华北雨季开始偏晚。华北雨季开始早晚与春、夏季热带印度洋、赤道中东太平洋海表温度关系显著且稳定, 当 Niño3.4 指数和热带印度洋全区海表温度一致模态 (IOBW) 为正值时, 贝加尔湖大陆高压偏强, 副高偏强偏南, 东亚夏季风偏弱, 导致华北雨季开始偏晚; 当海表温度指数为负值时, 则华北雨季开始偏早。

关键词 华北雨季开始 大气环流 赤道东太平洋 印度洋海表温度

文章编号 1006-9895(2019)01-0107-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17242

The Relationship between the Onset Date of the Rainy Season in North China and the Atmospheric Circulation and SST

YU Xiaocheng^{1,2}, ZHAO Junhu², YANG Liu¹, ZHI Rong², and FENG Guolin^{1,2}

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Using atmospheric data of NCEP / NCAR re-analysis, NOAA Sea Surface Temperature (SST) data, and monitoring data of the rainy season in North China from 1961-2016, the climatic characteristics of the onset date of rainy season in North China (OSDRS_NC) is analyzed. Through synthetic analysis and regression analysis, the relationship between OSDRS_NC and the atmospheric circulation system as well as SST anomalies (SSTA) is analyzed. The results show that the mean OSDRS_NC was July 18 in the past 56 years. The earliest OSDRS_NC was July 6, and the latest was

收稿日期 2017-09-20; 网络预出版日期 2018-01-31

作者简介 于晓澄, 女, 1994 年出生, 硕士, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: 437865922@qq.com

通讯作者 赵俊虎, E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1502303、2018YFA0606301, 国家自然科学基金项目 41875093、41530531、41505061

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC1502303, 2018YFA0606301), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875093, 41530531, 41505061)

August 10. The OSDRS_NC shows significant inter-annual variation, and its long-term variation trend is not obvious. The OSDRS_NC is closely linked to the activities of the western Pacific subtropical high (WPSH), the East Asian westerly jet stream (EAWJS) and the East Asian summer monsoon (EASM). When the establishment of the EAWJS, the second northward jump of the WPSH, and the northward movement of the EASM are earlier than normal, the OSDRS_NC is earlier than normal, and vice versa. The relationship between the OSDRS_NC and the SST over the Tropical Indian Ocean and the equatorial central and eastern Pacific is significant and stable in the spring and summer. When the Niño3.4 index and the Indian Ocean Basin-wide Warming (IOBW) display positive (negative) anomalies, the WPSH enhances (weakens) and shifts to the south, the Lake Baikal high enhances (weakens) and the EASM weakens (enhances). These anomalies lead to late (early) onset of the rainy season in North China.

Keywords Rainy season onset in North China, Atmospheric circulation, Equatorial East Pacific SST, Indian Ocean SST

1 引言

华北雨季指的是每年7月中下旬至8月中上旬在中国华北地区出现的以持续多雨为主要特征的气候现象,雨季的长短和雨量多寡,都与夏季风雨带的进退、移动和停滞有关(竺可桢, 1934; 赵汉光, 1994; 施能等, 1996; 张庆云等, 2003),雨季平均降水量一般达到夏季总降水量的50%(赵振国, 1999)。华北雨季是东亚夏季风季节性北推过程中的重要阶段,这一时期中国东部雨带主要徘徊在淮河以北,并往往伴随着持续性暴雨、洪涝灾害的发生,给国家和人民的生命财产等带来巨大损失。因此,揭示华北雨季的变化规律及其异常成因,具有重要的科学意义,对防灾、减灾也具有十分重要的指导意义。

过去几十年,国内外气象学者对华北地区的天气和气候开展了大量的研究。但这些研究多数是针对华北夏季的旱涝,而对华北雨季的研究较少。例如张庆云(1999)通过分析1880年以来华北地区的降水变化,发现1883~1997年华北地区降水存在丰沛或偏少的年代际变化。张利平等(2008)分析发现,华北地区降水存在明显的季节变化、准2 a震荡和准19 a周期变化特征,且具有明显的阶段性。郭彦和李建平(2012)研究指出华北汛期(7~8月)降水具有年际变率和年代际变率,并以华北汛期降水为例,利用分离时间尺度的统计降尺度模型开展了预测研究。丁一汇和刘芸芸(2008)提到与华北雨季相关的两个系统是印度夏季风系统和西北太平洋夏季风系统,印度夏季风强(弱)时,华北地区容易出现降水偏多(少)的天气,华北地区降水偏多(少)时,印度夏季风偏强(弱)的机率却低一些。华北地区降水还间接受到热带太平洋海表温度、印度洋海表温度、北大西洋海表温度、南海海表温

度等因素的影响。吴志伟等(2006)发现华北雨季降水年代际变化显著,与西太平洋暖池、大西洋西部和北太平洋的海表温度有着显著的相关关系。陈文等(2006)研究发现,我国华北地区的降水异常跟热带中、东太平洋海表温度变化显著相关,并且从比较长的时间尺度来看,华北地区的降水从1965年左右开始减少,特别是大约1976年后有显著的减少,而与这种异常现象显著关联的海表温度异常关键区包括太平洋、印度洋以及热带和南大西洋。

此外,张天宇等(2007)研究了华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征,发现华北东部地区的降水较西部更为集中,且华北地区雨季集中期和雨季降水量与东亚夏季风具有较好的正相关关系,华北北部地区为集中期与东亚夏季风的显著相关区。闵锦忠等(2016)指出在华北雨季开始前后,最显著的变化特征是蒙古低压的建立和西伯利亚地区、菲律宾海环流的变化。近来,赵树云等(2017)利用国家气候中心发布的华北雨季新监测标准,分析了ENSO位相转换对华北雨季降水的影响,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,而华北雨季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。

综上所述,大气环流的变化和海表温度异常对华北地区降水有重要影响,以往大部分关于华北降水的研究主要是聚焦到华北夏季降水的年际、年代际变化及其影响系统,而对于华北雨季开始早晚的研究极少。由于华北夏季降水主要集中在华北雨季,而雨季开始早晚年际差异较大,会给防汛和抗旱工作带来较大的影响。雨季开始早晚的年际变化,对华北雨季降水量也有一定影响,那么雨季开始早晚与大气环流的是否密切相关?与海表温度异常是否存在显著关系?是否与华北地区旱涝变

化, 华北暴雨的发生频率有关? 这都是需要进一步研究的科学问题。总之, 对华北雨季开始早晚进行深入研究, 有很大的科学价值。同时国家气候中心 2014 年发布了新的华北雨季开始日期的监测业务规定, 那么在新的雨季开始划分标准下, 雨季开始早晚的异常与环流、海表温度的关系如何? 基于此, 本文利用 1961~2016 年华北雨季检测资料, 重点分析了近 56 a 来华北雨季的气候变化特征, 及影响华北雨季开始早晚的关键环流系统, 以及关键海表温度因子与华北雨季开始早晚的关系, 以期对华北雨季预测提供科学依据。

2 资料和方法

所用资料包括: 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球日和月平均高度场 (H)、风场 (U 、 V 分量) 再分析资料, 水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从 1000~10 hPa 共 17 层等压面 (Kalnay et al., 1996); 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的全球 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 月平均海表温度重建资料 (Reynolds et al., 2002), 中国气象局国家气候中心 (NCC) 提供的 Niño1.2、Niño3.4、印度洋全区海表温度一致模态 (IOBW) 指数, 时段均为 1961 年 1 月至 2016 年 12 月。

华北雨季是按照国家气候中心监测指标来确定, 华北雨季监测区主要包括北京、天津、河北 (京津冀)、山西、内蒙古共 236 站 (图 1)。确定区域雨季开始、结束和长度的主要依据是区域内各监测站的降水条件, 华北雨季典型环流形势等为辅助条件, 具体方法如下:

(1) 单站雨季开始日期: 自 7 月初开始, 若监测区内某站任意连续 5 天累计降水量 ≥ 35 (25) 毫米, 并且 5 天内至少出现一次日降水量 ≥ 10 毫米的雨日, 则将首个 ≥ 10 毫米的雨日定义为该站雨季开始日期。

(2) 单站雨季结束日期: 雨季开始后, 若监测区内某站截止某日时, 向前连续 10 天中逐日 5 天滑动累计降水量 ≤ 35 (25) 毫米, 则将此日定为雨季结束日期。

(3) 区域雨季起讫日期: 某区域内, 截止某日雨季已开始 (结束) 的累计站点比率 (即累计达标站点数与区域总站数的比率) 达到相应开始 (结束)

的比率阈值时 (累计站点比率见表 1), 则将该日确定为该区域雨季的开始 (结束) 日期。

表 1 区域雨季开始 (结束) 累计站点比率

Table 1 The cumulative regional site ratio on rainy season beginning (end) date

	累计站点比率		
	京津冀	山西	内蒙古
开始	70%	60%	60%
结束	60%	60%	50%

(4) 华北雨季起讫日期: 以京津冀、山西、内蒙古三个区域中, 最早进入雨季区域的日期作为华北雨季的开始日期; 上述三个区域中, 最晚结束雨季区域的日期作为华北雨季的结束日期。

关于华北雨季开始、结束和雨量的其他业务规范请参考中国气象局预报与网络司 2014 年发布的《华北雨季监测业务规定》^①, 这里不再赘述。

3 华北雨季开始早晚气候特征

图 2 为 1961~2016 年华北雨季开始日期 (Onset data of the rainy season in North China, 简称 OSDRS_NC) 距平的年际变化、线性趋势以及 9 a 滑动平均。由图 2 可见, OSDRS_NC 存在明显的年际变化, 表 2 为 1961~2016 年的华北雨季开始日期, 也体现了华北雨季近 56 a 以来的年际特征, 1961~2016 年华北雨季开始时间集中在 7、8 月, 其中从 7 月中下旬开始的有 54 a, 其次是 8 月上旬 (2 a), 开始最早的有 5 a, 发生在 7 月 6 日 (1963、1964、1973、1977、1981、1988、1994、1999 和 2000 年), 开始最晚的只有一年, 发生在 8 月 10 日 (1980 年), 最早与最晚相差 35 天。1961~2017 年华北雨季开始平均日期是 7 月 18 日, 标准差为 8 天。为研究华北雨季开始早晚的影响系统, 采用雨季开始偏早和偏晚 10 天及以上的标准来划分华北雨季开始异常偏早晚年, 得到偏早年共 12 年 (1962、1963、1964、1973、1977、1981、1988、1994、1999、2000、2012、2013 年), 偏晚年共 8 年 (1965、1980、1983、1987、2002、2007、2010、2014 年)。对这 20 个异常年进行合成典型场分析, 研究影响华北雨季开始偏早晚异常的环流系统。

从图 2 OSDRS_NC 的 9 a 平滑曲线看出其存在显著的年代际变化: 20 世纪 60 年代一直到 80 年代

① 中国气象局预报与网络司. 2014. 关于印发《华北雨季监测业务规定》的通知, 气预函 (2014)117 号 [R].

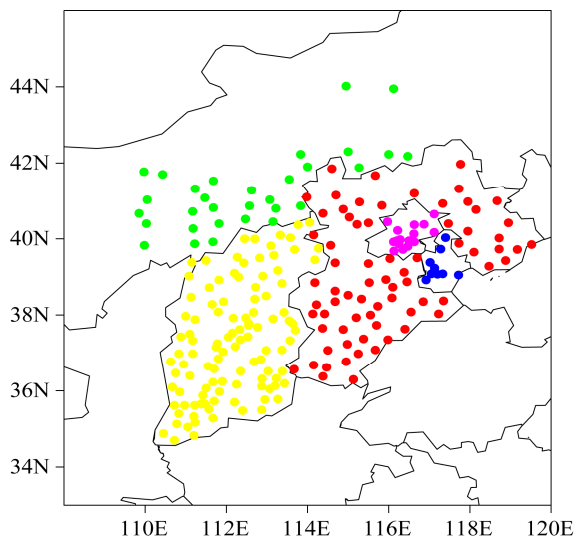


图1 华北雨季监测站点空间分布示意图(紫点为北京监测区站点,蓝点为天津监测区站点,红点为河北监测区站点,黄点为山西监测区站点,绿点为内蒙古监测区站点)

Fig. 1 Schematic diagram of the division of the monitoring area and spatial distribution of the rainy season monitoring stations in North China (purple spots are stations in Beijing, blue spots are stations in Tianjin, red spots are stations in Hebei, yellow spots are stations in Shanxi, green spots are stations in Inner Mongolia)

初, 偏早偏晚变化不明显, 在正常附近波动, 从 80 年代中期一直到 90 年代以偏早为主, 从 21 世纪初以来以偏晚为主。对 1961~2016 年 OSDRS_NC 进行小波功率谱分析表明(图略), 近 56 a 来 OSDRS_NC 存在显著的 4 年周期。线性趋势直线说明近 56 a 来 OSDRS_NC 呈现不太明显的偏晚的长期变化趋势。

4 影响华北雨季开始早晚与环流系统的关系

华北雨季受东亚夏季风环流系统向北推进的影响, 首先从环流形势的角度出发, 分析 OSDRS_NC 与高层到低层大气环流系统的关系。图 3 给出了 OSDRS_NC 与 7 月对流层各层大气环流场的相关系数分布。由 OSDRS_NC 与高层(200 hPa)纬向风场(U)的相关分布(图 3a)可见, 华北北部至东北呈显著的负相关, 长江至日本一带呈显著的正相关。7 月东亚副热带西风急流(西风急流)主体基本在 40°N 及其以北地区。图 4 给出了华北雨季开始偏早年和偏晚年东亚(110°~140°E 平均)上空 200 hPa 纬向风的时间—纬度剖面图。偏早年

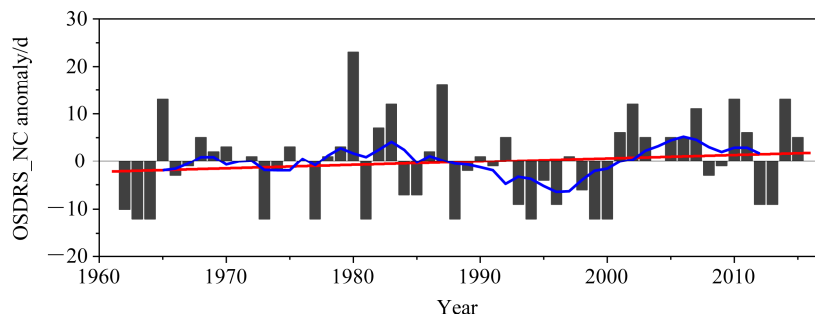


图2 1961~2016 年华北雨季开始日期(OSDRS_NC)距平序列图, 直线表示线性趋势, 曲线表示 9 a 滑动平均

Fig. 2 Anomaly sequence chart of onset dates of the rainy season in North China (OSDRS_NC) from 1961 to 2016, where the straight line represents the linear trend and the curve represents the 9-year running average

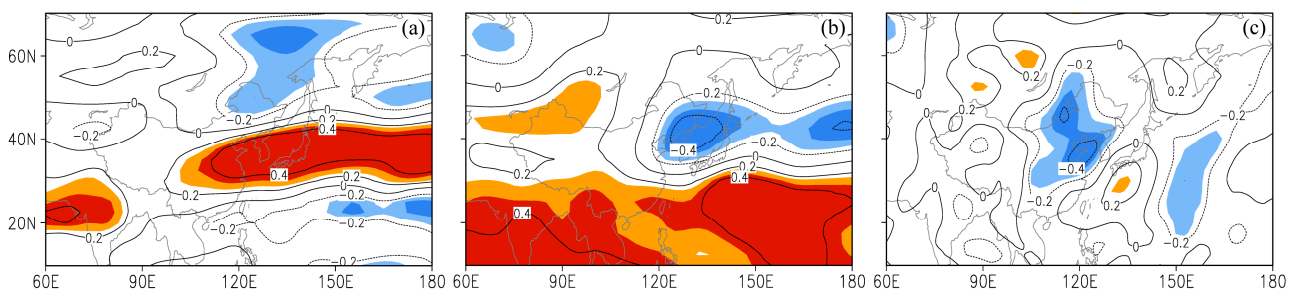


图3 1961~2016 年华北雨季开始时间与 7 月各层环流场的相关分布: (a) 200 hPa 纬向风场; (b) 500 hPa 高度场; (c) 850 hPa 经向风场。浅、深阴影区分别表示置信水平达到 95% 和 99%

Fig. 3 Correlation maps between OSDRS_NC and (a) 200 hPa zonal wind, (b) 500 hPa geopotential height, (c) 850 hPa meridional wind during 1961–2016. The light and dark shadings indicate values at the 95% and 99% confidence levels, respectively

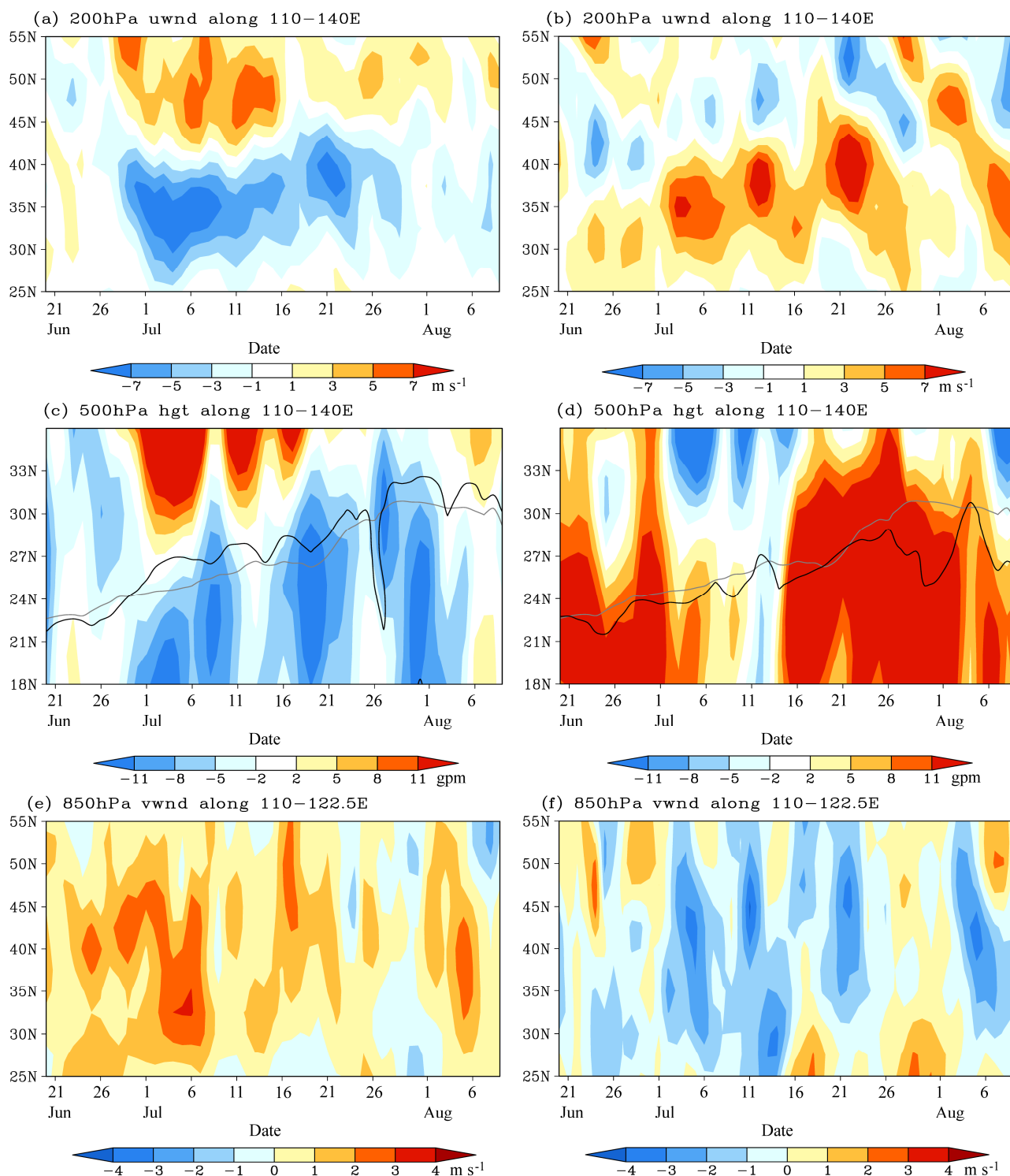


图4 华北雨季开始偏早年(左列)和偏晚年(右列)各层环流场的时间—纬度剖面:(a,b)东亚110°~140°E平均的200 hPa 纬向风(单位: m s^{-1}); (c,d) 东亚110°~140°E平均的500 hPa 高度场(单位: gpm); (e,f) 沿110°~122.5°E平均的850 hPa 经向风场(单位: m s^{-1})。虚线表示气候平均副高脊线, 实线表示异常年平均副高脊线

Fig. 4 Time-latitude cross sections of (a, b) zonal wind (units: m s^{-1}) at 200 hPa and (c, d) geopotential height (units: gpm) at 500 hPa averaged over 110°–140°E. (e, f) Time-latitude cross sections of meridional wind at 850 hPa (units: m s^{-1}) averaged over 110°–122.5°E. (a, c, e) are for early OSDRS_NC years, (b, d, f) are for late OSDRS_NC years. The dotted line represents the climatological mean subtropical high ridge line, and the solid line represents the mean subtropical high ridge line in anomalous years

(图 4a), 在 6 月下旬至 8 月中旬, 40°N 以北为正距平, 以南为负距平, 表明西风急流北跳偏早; 而在偏晚年 (图 4b), 在 6 月下旬至 7 月中旬, 40°N 以北为负距平, 以南为正距平, 7 月下旬 40°N 以北转为正距平, 表明西风急流北跳偏晚。图 5a 对比了 1961~2016 年西风急流位置变化与华北雨季开始早晚的年际变化, 其中西风急流位置指数为 200 hPa 的 U 风场所在区域内最大风速所在纬度的区域平均 (卫玮和黄卓禹, 2012)。两者的相关系数为 -0.33 , 置信水平达到 95%, 从图中可以看出西风急流位置变化与华北雨季开始早晚基本一致, 当西风急流位置偏北, 距平值为正时, 56 a 华北雨季开始时间基本偏早, 距平值负, 这种同步在 20 世纪 90 年代之后更加明显, 即 6 月下旬至 7 月西风急流偏北 (南), 有利于华北雨季开始偏早 (晚)。

西太平洋副热带高压 (简称副高) 的南北移动可以直接影响华北雨季的开始早晚和雨季长度 (张庆云和陶诗言, 2000; 赵俊虎等, 2012, 2014; Ye et al, 2014, 2015)。图 3b 给出了 OSDRS_NC 与 7 月 500 hPa 高度场的相关系数分布图。雨季开始与 7 月 500 hPa 高度场在副热带地区呈显著正相关, 与东北地区高度场呈显著负相关, 表明副高偏强偏北、东北冷涡活跃时, 华北雨季开始偏早, 反之则

偏晚。图 5b 进一步给出了 1961~2016 年华北雨季开始早晚与副热带高压第二次北跳 (候) 时间的年际变化, 两者相关系数为 0.36, 置信水平达到 99%, 可清楚地看到, 两者变化是基本一致的, 当副高第二次北跳偏晚, 距平值为正时, 对应华北雨季开始偏晚, 距平值为负, 尤其是到 20 世纪 90 年代以来, 变化更加同步。表 2 给出了 1961~2016 年副热带高压第 2 次北跳时间, 对比华北雨季开始日期, 进一步验证了两者的显著关系。图 4c、d 对比了 500 hPa 高度场 (110°~140°E 平均) 偏早年 and 偏晚年的时间-纬度剖面图。偏早年 (图 4c), 副高脊线在 6 月末有一次明显的北跳, 7 月初脊线达到 27°N 以北, 并一直较气候平均偏北, 而偏晚年 (图 4d) 基本与偏早年相反, 副高脊线一直较气候平均偏南, 在 7 月下旬才达到 27°N。由此可见, 华北雨季开始偏早晚与副高的北跳早晚有关, 副高北跳偏早 (晚) 有利于华北雨季开始偏早 (晚)。

低层环流系统可以直接反应越赤道气流、东亚夏季风爆发早晚及其强弱、及水汽的辐合辐散等。图 3c 是 OSDRS_NC 与 7 月 850 hPa V 风场的相关系数分布。由图可见, 雨季开始日期与长江至华北地区的 V 风场呈显著的负相关, 表明 7 月东亚季风偏强时, 有利于水汽向北方输送, 进而有利于华北

表 2 1961~2016 年华北雨季开始时间 (日) 与西太平洋副热带高压 (简称副高) 第二次北跳时间 (候)

Table 2 Onset dates of the rainy season in North China and the time (pentad) of second northward jump of the WPSH (western Pacific subtropical high) from 1961 to 2016

年份	华北雨季 开始日期	副高第二 次北跳	年份	华北雨季 开始日期	副高第二 次北跳	年份	华北雨季 开始日期	副高第二 次北跳
1961	7 月 18 日	6 月第 5 候	1980	8 月 10 日	9 月第 2 候	1999	7 月 6 日	7 月第 5 候
1962	7 月 8 日	7 月第 5 候	1981	7 月 6 日	7 月第 2 候	2000	7 月 6 日	7 月第 4 候
1963	7 月 6 日	7 月第 3 候	1982	7 月 25 日	7 月第 6 候	2001	7 月 24 日	7 月第 1 候
1964	7 月 6 日	7 月第 4 候	1983	7 月 30 日	8 月第 1 候	2002	7 月 30 日	7 月第 5 候
1965	7 月 31 日	8 月第 3 候	1984	7 月 11 日	6 月第 5 候	2003	7 月 23 日	8 月第 4 候
1966	7 月 15 日	7 月第 3 候	1985	7 月 11 日	7 月第 5 候	2004	7 月 18 日	7 月第 4 候
1967	7 月 17 日	7 月第 4 候	1986	7 月 20 日	8 月第 6 候	2005	7 月 23 日	8 月第 2 候
1968	7 月 23 日	8 月第 2 候	1987	8 月 3 日	8 月第 2 候	2006	7 月 23 日	7 月第 6 候
1969	7 月 20 日	7 月第 4 候	1988	7 月 6 日	7 月第 6 候	2007	7 月 29 日	7 月第 6 候
1970	7 月 21 日	7 月第 5 候	1989	7 月 16 日	7 月第 3 候	2008	7 月 15 日	7 月第 5 候
1971	7 月 18 日	7 月第 1 候	1990	7 月 19 日	7 月第 4 候	2009	7 月 17 日	7 月第 2 候
1972	7 月 19 日	7 月第 2 候	1991	7 月 17 日	7 月第 4 候	2010	7 月 31 日	7 月第 4 候
1973	7 月 6 日	7 月第 2 候	1992	7 月 23 日	7 月第 5 候	2011	7 月 24 日	8 月第 4 候
1974	7 月 16 日	7 月第 5 候	1993	7 月 9 日	8 月第 5 候	2012	7 月 9 日	7 月第 4 候
1975	7 月 21 日	7 月第 1 候	1994	7 月 6 日	7 月第 1 候	2013	7 月 9 日	7 月第 2 候
1976	7 月 18 日	7 月第 4 候	1995	7 月 14 日	7 月第 5 候	2014	7 月 31 日	7 月第 4 候
1977	7 月 6 日	7 月第 4 候	1996	7 月 9 日	7 月第 4 候	2015	7 月 23 日	7 月第 6 候
1978	7 月 19 日	7 月第 2 候	1997	7 月 19 日	8 月第 4 候	2016	7 月 18 日	7 月第 6 候
1979	7 月 21 日	7 月第 5 候	1998	7 月 12 日	9 月第 3 候			

降水。图 5 给出了 1961~2016 年 7 月东亚夏季风强度指数与华北雨季开始早晚的年际变化, 其中东亚夏季风强度指数使用王会军定义 (Wang, 2002), 根据图 3b 的相关显著区域, 选取 ($30^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$) 为异常风速平均区域, 两者相关系数 -0.31 , 置信水平达到 95%, 两者变化基本一致, 当夏季风偏强时, 华北雨季开始偏早, 在 20 世纪 90 年代以后这种同步变化更加明显。图 4e、f 对比了华北雨季开始偏早、晚异常年 850 hPa V 风场的时间—纬度剖面图。偏早年, 6 月下旬至 7 月下旬, 中国东部地区从南至北 ($25^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$) 多为南风距平, 说明夏季风爆发偏早、偏强, 有利于水汽向华北地区输送, 有利于华北雨季开始偏早。偏晚年则正好相反, 中国东部呈北风距平, 表明东亚夏季风爆发偏

晚、偏弱, 不利于水汽向华北地区输送, 导致华北雨季开始偏晚。

综上所述, 华北雨季开始早晚是东亚大气环流系统从南向北推进快慢的结果, 具体而言, 从对流层高层到低层, 与 6 月下旬至 7 月上旬, 西风急流北跳偏早、副高第二次北跳偏早和东亚夏季风向北推进的较快, 有利于华北雨季开始偏早, 偏晚年则相反, 而且这种环流配置建立早晚、强度与华北雨季开始早晚的异常在 20 世纪 90 年代后同步变化明显增加。

5 华北雨季开始早晚与前期至同期海表温度 (SST) 的关系

ENSO 对中国降水有重大影响, 是导致亚洲季

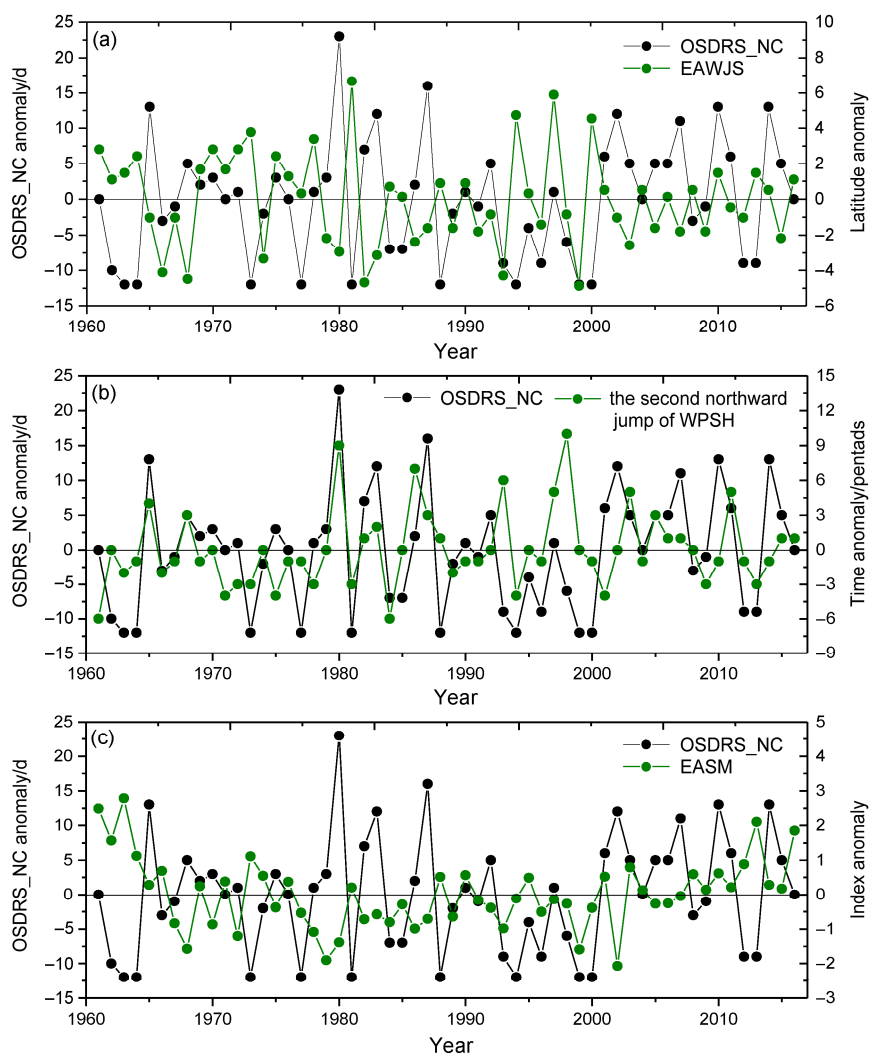


图 5 1961~2016 年华北雨季开始时间与 (a) 副热带西风急流位置 (纬度)、(b) 副高第二次北跳时间 (候)、(c) 东亚夏季风强度指数距平的年际变化
Fig. 5 Interannual variability of the onset date of the rainy-season in North China and that of (a) the latitude of the EAWJS (East Asian westerly jet stream), (b) the time of the second northward jump of WPSH (the western Pacific subtropical high), and (c) the intensity index of EASM (East Asian summer monsoon) from 1961 to 2016

风异常和我国旱涝发生的关键因素,郝立生和丁一汇(2012)指出在 ENSO 事件发展阶段,华北降水偏少,多干旱。同时印度洋海表温度也在影响华北地区降水,华北地区夏季降水的减少,是由于热带印度洋海表温度升高造成的(郝立生, 2011),而且 ENSO 与中国夏季降水之间的年际变化关系存在变化,在不同年代背景下,其对中国夏季降水的影响有不同的表现(宗海锋等, 2010),黄荣辉等(1999)分析华北地区干旱化发现,赤道中、东太平洋海表温度的升高与降低,对华北地区干旱化趋势有很大影响。同时也有研究发现, Niño3 区海表温度与印度季风的关系是变化的(Webster et al., 1998)。

分析 1961~2016 年 NCRSSD 与前冬(上一年 12 月至当年 2 月)、春季(3~5 月)和夏季(6~7 月)的 SST 场相关系数分布(图 6),在前冬 SST 相关场上,热带印度洋和赤道东太平洋出现显著正

相关区(图 6a),但显著区域比较小;到 3~5 月,春季 SST 相关场上(图 6b),热带印度洋显著正相关区域强度大小基本不变,但赤道中东太平洋显著正相关区域范围变大,中心最大值达到 99% 的置信水平,在太平洋北部出现了显著负相关区;在夏季 SST 相关场上(图 6c),热带印度洋仍呈显著的正相关,最大显著区域出现在北印度洋,相关区域较春季变大,强度变强,中心最大值达到 99% 的置信水平,在印度洋中心区域也出现了一个显著相关区,中心最大值通过 99% 的置信水平,春季出现在太平洋北部的显著负相关区在夏季消失,太平洋的显著正相关区域变大,强度增强。表明春季 El Niño 发展,春夏季印度洋偏暖时,华北雨季开始偏晚;反之则偏早。

由此可见,与 OSDRS_NC 有关的显著关键海表温度区域为赤道中东太平洋和热带印度洋。为了进一步了解赤道太平洋海表温度和印度洋海表温

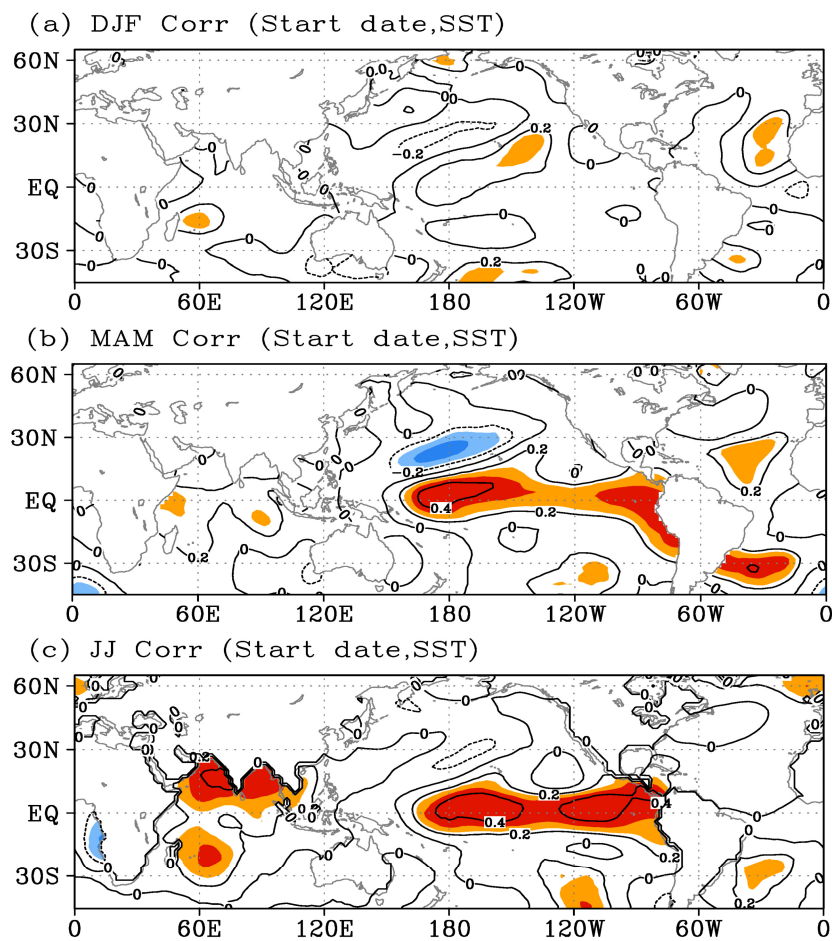


图 6 1961~2016 年华北雨季开始日期与海表温度的相关系数分布: (a) 冬季; (b) 春季; (c) 6~7 月。浅、深阴影区分别表示置信水平达到 95% 和 99%

Fig. 6 Correlation maps between OSDRS_NC and SST (Sea Surface Temperature) in the (a) winter, (b) spring, and (c) June and July during 1961–2016. The light and dark shadings indicate values at the 95% and 99% confidence levels, respectively

度异常与 OSDRS_NC 的关系, 选取 Niño3.4 指数、Niño1.2 指数和热带印度洋全区一致海表温度模态指数 (IOBW), 分析 SST 逐月指数与华北雨季开始时间的相关系数变化 (图 7)。由图 7 可见, 三个 SST 指数与 OSDRS_NC 一直是正相关, 相关系数从 1 月到 6 月逐渐升高, 相关显著月份集中在 4~6 月, 达到了 95% 的置信水平, 其中 Niño1.2 指数与 OSDRS_NC 相关最大月份为 4 月, Niño3.4 指数、IOBW 指数与 OSDRS_NC 相关最大月份均为 6 月, Niño3.4 指数在 6 月的相关系数接近 0.5, 达到了 99% 的置信水平。

进一步检验关键区 SST 与 OSDRS_NC 的相关关系是否发生年代际转变, 分别计算三个指数 (4 月 Niño1.2 指数、6 月 Niño3.4 指数和 IOBW 指数) 与 OSDRS_NC 的 21 年滑动相关 (图 8)。Niño1.2

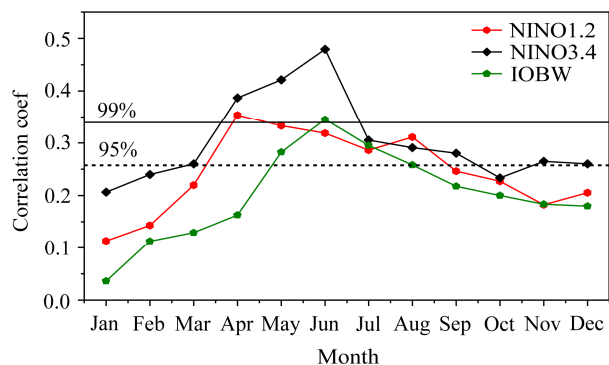


图 7 1961~2016 年华北雨季开始日期与关键区域海表温度指数的逐月相关系数。虚 (实) 线表示置信水平达到 95% (99%)

Fig. 7 Correlation coefficients between the OSDRS_NC and monthly SST [Niño1.2, Niño3.4, and IOBW (Indian Ocean Basin-wide Warming)]

indexes from 1961~2016. The dashed and solid lines indicate values at the 95% and 99% confidence levels, respectively

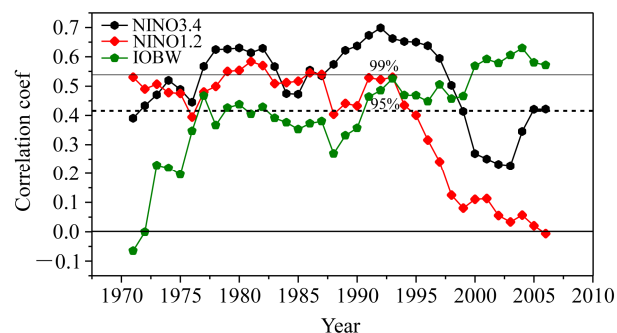


图 8 华北雨季开始时间与海表温度指数相关最大月份的 21 年滑动相关, 虚 (实) 线表示置信水平达到 95% (99%)

Fig. 8 21-year sliding window correlations between the OSDRS_NC and the SST indexes in the months the correlation coefficients are largest. The dashed and solid lines indicate values at the 95% and 99% confidence levels, respectively

指数与 OSDRS_NC 的相关系数在 1995 年之前呈显著的正相关关系, 之后相关系数逐步下降; Niño3.4 指数与 OSDRS_NC 的相关系数在 2000 年之前呈显著的正相关关系, 2000 年之后相关系数略有下降; IOBW 指数与 OSDRS_NC 的相关系数在 1972 年之前呈负相关, 之后转为正相关, 且相关关系一直增强, 20 世纪 90 年代之后呈显著的正相关关系。以上分析说明, 6 月 Niño3.4 和 IOBW 对 OSDRS_NC 的影响相对显著和稳定。

用 6 月的 IOBW 指数和 Niño3.4 指数分别回归 7 月大气环流 (图 9) 首先, 从 IOBW 回归的 7 月 500 hPa 高度场 (图 9a) 可见, 热带至副热带 30°N 以南地区、贝加尔湖及其周边地区为显著的正高度场, 表明副高偏强偏南, 大陆高压偏强; 从 IOBW 回归的 7 月 850 hPa 经向风场 (图 9c) 可见, 黄淮、华北、东北地区为显著的北风距平。即 6 月 IOBW 指数为正时, 大陆高压偏强, 副高偏强偏南, 东亚夏季风偏弱, 导致华北雨季开始偏晚。

从 6 月的 Niño3.4 指数回归的 7 月 500 hPa 高度场 (图 9b) 可见, 在日本岛东南面的西太平洋为显著正值区, 朝鲜半岛至鄂霍次克海为显著负值区; 在 6 月的 Niño3.4 指数回归的 7 月 850 hPa 风场上 (图 9d), 我国华北和东北为负值区。表明当 6 月 Niño3.4 指数为正时, 7 月副高偏强、偏南, 东亚夏季风偏弱, 导致华北雨季开始偏晚, 指数为负时则相反。

6 结论与讨论

华北地处东亚大陆和太平洋交界处, 华北雨季受到热带和副热带多个系统的综合影响, 华北雨季开始偏早晚的成因复杂。本文利用国家气候中心对 1961~2016 年华北雨季开始日期的监测资料、NCEP/NCAR 再分析资料, NOAA 海表温度资料等, 采用中国气象局对华北雨季监测的业务规定, 分析了 1961~2016 年华北雨季开始早晚的气候特征, 以及影响华北雨季开始偏早晚的关键环流系统和海表温度异常强迫作用, 得到的主要结论如下:

(1) 华北雨季开始时间具有显著的年际变化特征, 雨季开始最早出现在 7 月 6 日 (9 a), 最晚出现在 8 月 10 日 (1 a), 雨季开始集中在 7、8 月, 1961~2016 年华北雨季开始时间平均在 7 月 18 日, 呈现不太明显的偏晚的长期变化趋势。

(2) 华北雨季开始早、晚与副热带西风急流、

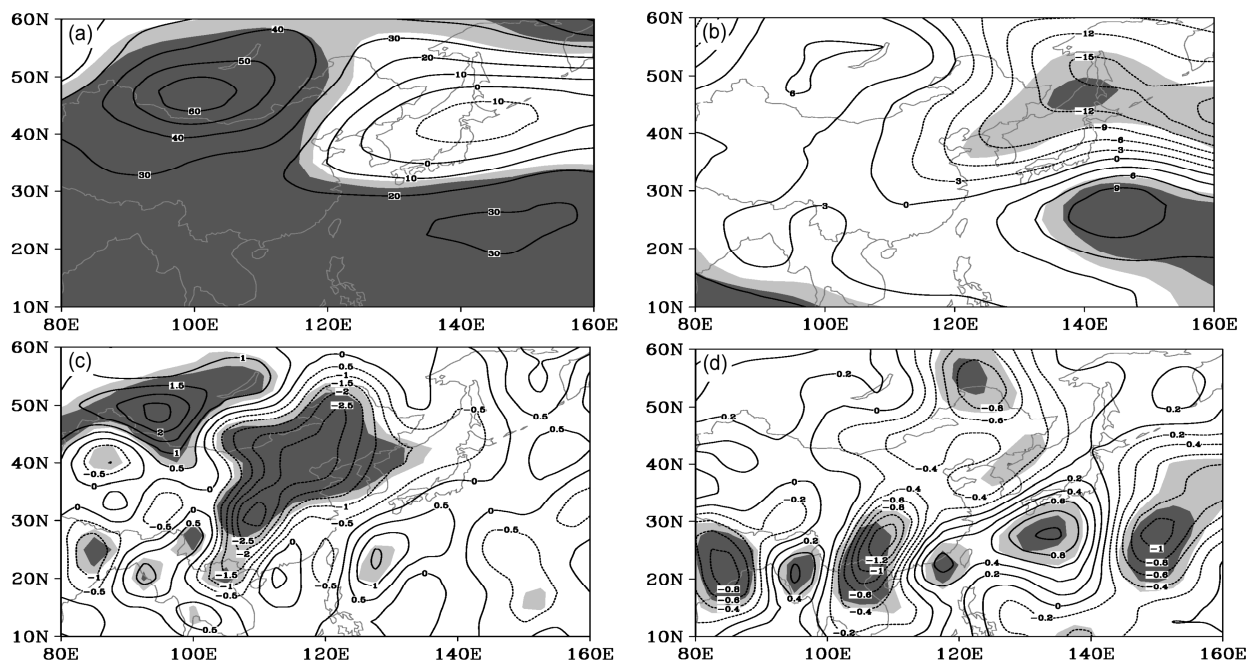


图9 1961~2016年6月IOBW指数(左列)和Niño3.4指数(右列)回归的7月(a、b)500 hPa高度场和(c、d)850 hPa经向风场。浅、深阴影区分别表示置信水平达到95%和99%

Fig. 9 (a, b) Geopotential height at 500 hPa (units: gpm) and (c, d) horizontal wind at 850 hPa (units: m s^{-1}) in July linearly regressed onto (a, c) IOBW and (b, d) Niño3.4 indexes in June. The light and darkshadings indicate values at the 95% and 99% confidence levels, respectively

副热带高压、和东亚夏季风等各层环流系统的演变有关,当高层西风急流建立较早,强度较强,中层副高第二次北跳偏早,低层东亚夏季风向我国北方推进偏早时,有利于水汽向北输送,导致华北雨季开始偏早;若上述环流系统演变特征相反,华北雨季开始将会偏晚;

(3) 华北雨季开始早晚与全球海表温度场存在两个主要相关区域,即赤道中东太平洋区域和热带印度洋,春、夏季赤道中东太平洋与华北雨季开始早晚呈显著的正相关,夏季热带印度洋海表温度与华北雨季开始早晚呈显著的正相关,且Niño3.4指数和IOBW指数与华北雨季开始日期的相关系数较稳定,没发生显著的年代际变化;

(4) Niño3.4与IOBW与华北雨季相关最大月份均为6月,当6月Niño3.4和IOBW指数为正值时,7月副高偏强、偏南,东亚夏季风偏弱,不利于水汽向华北地区输送,导致华北雨季开始偏晚;当两个指数为负值时,东亚环流系统则呈相反的特点,导致华北雨季开始偏早。

本研究通过观测资料的诊断分析,研究了影响华北雨季的关键环流系统配置和前期海表温度信号,还需要通过数值试验进一步阐述相关结论的物

理机制。此外,我们将继续开展华北雨季降水量的影响系统和预测信号研究,给华北雨季预测提供一些依据。

参考文献 (References)

- 陈文, 康丽华, 王玎. 2006. 我国夏季降水与全球海表温度的耦合关系分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 259–269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 259–269, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.03.002.
- 丁一汇, 刘芸芸. 2008. 亚洲—太平洋季风区的遥相关研究 [J]. 气象学报, 66 (5): 670–682. Ding Yihui, Liu Yunyun. 2008. A study of the teleconnection in the Asian–Pacific monsoon region [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 66 (5): 670–682, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.002.
- 郭彦, 李建平. 2012. 一种分离时间尺度的统计降尺度模型的建立和应用——以华北汛期降水为例 [J]. 大气科学, 36 (2): 385–396. Guo Yan, Li Jianping. 2012. A time-scale decomposition statistical downscaling model: Case study of North China rainfall in rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 385–396, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11045.
- 郝立生. 2011. 华北降水时空变化及降水量减少影响因子研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Hao Lisheng. 2011. Spatial-temporal variation of the precipitation in North China and the impact factors of

- precipitation reduction [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 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.
- 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:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- 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, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 闵锦忠, 赵悦晨, 郝立生. 2016. 华北雨季监测及对应环流变化特征 [J]. 干旱区地理, 39 (3): 539–547. Min Jinzhong, Zhao Yuechen, Hao Lisheng. 2016. Monitoring of rainy season and characteristics of corresponding circulation changes in North China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 39 (3): 539–547.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. J. Climate, 15 (13): 1609–1625, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 卫玮, 黄卓禹. 2012. 夏季东亚高空西风急流气候特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 6 (4): 21–26. Wei Wei, Huang Zhuoyu. 2012. Climatic characteristics of East Asian summer high-altitude westerly jet [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 6 (4): 21–26, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2012.04.005.
- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析 [J]. 大气科学, 30 (3): 391–401. Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, He Jinhai. 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 391–401, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.03.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relations [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (1): 1–11, doi:10.1007/s00376-002-0029-5.
- Webster P J, Magaña V O, Palmer T N, et al. 1998. Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction [J]. J. Geophys. Res., 103 (C7): 14451–14510, doi:10.1029/97JC02719.
- Ye T S, Zhi R, Zhao J H, et al. 2014. The two annual northward jumps of the West Pacific subtropical high and their relationship with summer rainfall in eastern China under global warming [J]. Chin. Phys. B, 23 (6): 069203, doi:10.1088/1674-1056/23/6/069203.
- Ye T S, Shen Q, Wang K, et al. 2015. Interdecadal change of the northward jump time of the western Pacific subtropical high in association with the Pacific decadal oscillation [J]. J. Meteor. Res., 29 (1): 59–71, doi:10.1007/s13351-014-4040-4.
- 张利平, 夏军, 胡志芳. 2008. 华北地区降水多时间尺度演变特征 [J]. 气候变化研究进展, 4 (3): 140–144. Zhang Liping, Xia Jun, Hu Zhifang. 2008. Precipitation change and drought–flood evolution in North China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4(3): 140–144, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2008.03.002.
- 张庆云. 1999. 1880 年以来华北降水及水资源的变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 486–495. Zhang Qingyun. 1999. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 486–495, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.003.
- 张庆云, 陶诗言. 2000. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. 气象学报, 57 (5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2000. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 57 (5): 539–548, doi:10.11676/qxxb1999.052.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (5): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (5): 559–568, doi:10.11676/qxxb2003.056.
- 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.
- 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]. Meteorological Monthly (in Chinese), 20 (6): 3–8.
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. 气象学报, 70 (5): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of large-scale drought/flood of summer in China under different types of western Pacific subtropical high [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (5): 1021–1031, doi:10.11676/qxxb2012.085.
- 赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 237–250. Zhao Junhu, Zhi Rong, Shen Qian, et al. 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 237–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12215.
- 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.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 68–72. Zhao Zhenguo. 1999. Drought/Flood and Environment Field of Summer

- in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 68–72.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, (1): 1–27. Chu C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), (1): 1–27, doi:10.11821/xb193401001.
- 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征 [J]. 大气科学, 34 (1): 184–192. Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(1): 184–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.17.