



刘玥琳, 车少静. 2026. 京津冀夏季降水与 ENSO 关系的年代际变化 [J]. 大气科学, 50(4): 1152–1164. LIU Yuelin, CHE Shaojing. 2026. Interdecadal Variation in the Relationship between Spring ENSO and Summer Precipitation in the Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 50(4): 1152–1164. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25048

京津冀夏季降水与 ENSO 关系的年代际变化

刘玥琳^{1,2,3} 车少静^{1,2,3}

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 雄安新区 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021

3 河北省气候中心, 石家庄 050021

摘要 ENSO (El Niño–Southern Oscillation) 是全球海气系统最显著的年际信号, 也是影响京津冀夏季降水的重要因素之一。本文基于 1961~2023 年春季海表温度与京津冀夏季降水、大气环流等数据, 分析了春季 ENSO 与京津冀夏季降水关系的年代际变化及其可能成因。结果表明, 对京津冀夏季降水年际异常产生显著影响的春季 ENSO 关键区在 1990 年代末发生年代际变化, 由前期东太平洋到后期转为中太平洋, 尽管转变前后春季 ENSO 关键区海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 对京津冀夏季降水异常的影响均表现为较强的负相关, 然而其成因却存在显著差异。在春季 ENSO 关键区的海温出现异常时, 北太平洋、印度洋和大西洋的夏季海温会表现出不同的特征, 进而通过不同区域海温异常的协同作用引起热带和中高纬环流异常。当春季 ENSO 关键区表现为暖海温异常时, 副热带西北太平洋存在明显的反气旋环流, 在发生年代际转变后此反气旋环流相对偏强, 但仍未把水汽输送到京津冀地区; 京津冀上空受气旋性环流控制, 前期的气旋性环流与北太平洋海温异常相关, 后期则是由北大西洋的海温异常激发出欧亚大陆上空的纬向波列所引起, 偏北风异常控制京津冀地区导致降水异常偏少。

关键词 京津冀地区 ENSO 降水 年代际变化

文章编号 1006-9895(2026)04-1152-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2508.25048

Interdecadal Variation in the Relationship between Spring ENSO and Summer Precipitation in the Beijing–Tianjin–Hebei Region

LIU Yuelin^{1,2,3} and CHE Shaojing^{1,2,3}

1 China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area 071800

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Climate Center, Shijiazhuang 050021

Abstract The El Niño–Southern Oscillation (ENSO) represents the most prominent interannual signal within the global ocean–atmosphere system and stands as one of the crucial factors influencing the interannual variability of summer

收稿日期 2025-03-20; 网络预出版日期 2025-11-05

作者简介 刘玥琳, 女, 硕士, 主要从事气候预测研究。E-mail: 1509785601@qq.com

通讯作者 车少静, 女, 正高级工程师, 主要从事气候预测研究。E-mail: checlimate@sina.com

资助项目 中国气象局创新发展专项 CXFZ2024J008, 海河流域气象科技创新项目 HHXM202408, 河北省气象局科研开发项目 24kyd03、25ky13

Funded by Innovation and Development Special Project of China Meteorological Administration (Grant CXFZ2024J008), Meteorological Science and Technology Innovation Project of the Haihe River Basin (Grant HHXM202408), and Scientific Research and Development Projects of Hebei Provincial Meteorological Bureau (Grants 24kyd03 and 25ky13).

precipitation in the Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) region. Based on data such as spring SST (Sea Surface Temperature), summer precipitation in the BTH region, and atmospheric circulation from 1961 to 2023, this study analyzes the interdecadal variation in the relationship between spring ENSO and summer precipitation in the BTH region as well as its possible causes. Results show that the key spring ENSO region significantly impacting the interannual summer-precipitation anomalies in the BTH region underwent an interdecadal shift in the late 1990s, migrating from the eastern Pacific in the earlier period to the central Pacific in the later period. Although SST anomalies (SSTAs) in the key spring ENSO region exhibit a strong negative correlation with the summer precipitation anomalies in the BTH region before and after the shift, the underlying mechanisms differ significantly. When SSTAs exist in the key spring ENSO region, the summer SSTAs in the North Pacific, Indian Ocean, and Atlantic Ocean show different characteristics, which in turn cause circulation anomalies in the tropics and mid-high latitudes through the synergistic effect of SSTAs in different regions. When the key spring ENSO region exhibits warm SSTAs, a distinct anticyclonic circulation is observed in the subtropical northwestern Pacific. After the interdecadal shift, this anticyclonic circulation strengthens, but it still fails to transport water vapor to the BTH region. The BTH region is controlled by a cyclonic circulation. In the earlier period, this cyclonic circulation is associated with SSTAs in the North Pacific, and in the later period, it is caused by the zonal wave train over the Eurasian continent, excited by SSTAs in the North Atlantic. The control of anomalous northerly winds over the BTH region reduces precipitation.

Keywords Beijing–Tianjin–Hebei region, ENSO, Summer precipitation, Interdecadal variation

1 引言

中国东部地处东亚季风区, 受东亚夏季风推进过程的影响, 中国东部夏季降水异常的空间分布存在明显的年际差异 (施能等, 1996; 张庆云等, 2003; 黄荣辉等, 2006, 2008; 丁一汇等, 2018)。若较长时间出现降水偏多、偏少或气温偏高、偏低, 风力偏强等现象, 会导致干旱、洪涝、热浪等灾害并给农业、工业、畜牧业、水利、运输等行业造成巨大的经济损失。因此, 理解中国东部夏季降水异常的变化特征及其作用机理, 对于提高我国季风区洪涝灾害的预测能力具有重要意义。

ENSO (El Niño–Southern Oscillation) 是全球海—气系统中对东亚气候产生最显著影响的年际信号 (张人禾等, 2017), Bjerknes (1969) 指出厄尔尼诺和南方涛动分别是 ENSO 在海洋与大气两个方面的体现。ENSO 具有季节锁相性, El Niño 与 La Niña 通常发生发展于北半球夏季, 在冬季达到成熟状态, 于次年春季减弱直至衰亡 (Rasmusson and Carpenter, 1982; Picaut et al., 1997)。在 El Niño 衰亡期夏季, 长江中下游及江南地区降水偏多, 而黄河流域、华北地区降水偏少 (金祖辉和陶诗言, 1999; 许武成等, 2005); 结束时间较晚的 El Niño 事件, 华北地区在次年夏季易发生干旱 (邹力和倪允琪, 1997); 在 La Niña 结束且当年转为 El Niño 的年份, 华北雨季降水更容易异常偏少 (赵树云等, 2017); 此外在 El Niño 次年夏季西太平洋对

流活动受到抑制, 使得南海、西太平洋生成台风数目偏少, 给东亚带来的台风降水相应偏少 (包澄澜和向元珍, 2000)。有关 ENSO 对北方地区降水年际异常的影响, 前人已做过相关研究, 华北降水的季节演变存在两个主要模态, 其中第一模态主要受 ENSO 演变过程的影响, 华北夏季降水与同期 El Niño 呈显著负相关关系, El Niño 可以通过调节高层与低层的环流系统诱发出与华北夏季干旱年一致的环流型 (郝立生等, 2011, 2023)。

ENSO 产生的气候影响存在年代际变化特征 (Chang et al., 2000a, 2000b; Wang, 2002; 王会军和贺圣平, 2012; Kim et al., 2014; 王东等, 2024)。受太平洋年代际涛动调制作用, 与 1970 年代中期之前相比较, 在 1970 年代中期以后当 ENSO 事件处于发展阶段, 对应华北和东北夏季气温由偏冷变为偏暖; 当 ENSO 事件处于衰减阶段, 华北夏季由偏涝变为偏旱, 且气温由偏冷变为偏暖 (陈烈庭和吴仁广, 1998; 朱益民等, 2007; 宗海锋等, 2010)。ENSO 与东亚夏季风的关系在不同年代存在差异, 在 1970 年代中期以前, El Niño 次年夏季华北地区与长江流域以南降水偏多, 梅雨爆发时间偏晚; 在 1970 年代中期以后, ENSO 与东亚夏季风的关系减弱 (Wu and Wang, 2002; Gao et al., 2006)。在 1960 年代中期至 1980 年代中期, 受大西洋多年代际涛动负位相的影响, ENSO 与初夏东亚夏季风呈现显著的正相关关系; 而在 1950 年代至 1960 年代中期与 1980 年代中期至 2010 年代, 大西洋多年

代际涛动处于正位相对应 ENSO 与初夏东亚夏季风的关系减弱 (Xu et al., 2021)。近年来的研究指出 El Niño 存在多样性,除了赤道东太平洋海表面温度 (SST, 简称海温) 持续暖异常这类传统的 El Niño 事件外,1990 年代末期以来更频繁地发生异常中心西移至赤道中太平洋即中部型 El Niño 事件 (Yeh et al., 2009; Lee and McPhaden, 2010),中太平洋 El Niño 频繁发生的原因包括以下两个方面,其一是外部强迫因素,自 1990 年代以来的全球变暖使得赤道太平洋温跃层变浅,更有利于中太平洋 El Niño 事件发生 (Yeh et al., 2009); 其二是内部变率,20 世纪末大西洋多年代际涛动处于正位相,有利于增加中太平洋的纬向海温梯度,进而增强纬向平流反馈作用,导致更多的中太平洋 El Niño 事件发生 (Gan et al., 2023)。不同类型的 El Niño 进一步导致中国雨带存在不同的分布特征 (Feng et al., 2011; 袁媛等, 2012),使用 CAM4 (Community Atmosphere Model Version 4) 对中太平洋 El Niño 与东太平洋 El Niño 的影响进行模拟,可以得到两者影响存在差异,且中太平洋 El Niño 对应的东亚夏季降水异常更明显 (Chen et al., 2014)。

关于 ENSO 对气候的影响机制,前人研究表明在热带地区,当 El Niño 发生时,赤道东太平洋海温偏暖,热带太平洋地区的纬向海温梯度减弱,导致其上空的 Walker 环流 (Walker Circulation) 偏弱,印度—西太平洋出现异常下沉运动,对应局地的 Hadley 环流减弱。有研究指出,在 El Niño 发展期,根据 Matsuno-Gill 效应,赤道东太平洋增暖在其西北侧激发出气旋性环流,气旋性环流西侧的东北风异常与气候态的东北信风相叠加,使得西太平洋海表面温度偏冷,进而在西北太平洋存在反气旋性环流,而反气旋性环流东侧的东北风进一步与东北信风叠加,使得冷海温异常得以维持,即风—蒸发—海温反馈机制,在副热带西北太平洋的反气旋性环流得以较长时间存在 (Gill, 1980; Wang et al., 2000; Wang and Zhang, 2002)。在 El Niño 衰亡期,由于 Walker 环流减弱,东印度洋出现西传的海洋 Rossby 波,使得印度洋增暖,进而激发出东传的 Kelvin 波,使得反气旋在西北太平洋维持,也就是印度洋电容器效应 (Yang et al., 2007; Xie et al., 2009; Wu et al., 2010)。在热带外地区, ENSO 事件所伴随的热带太平洋对流活动和非绝热加热会

在绝对涡度较大的副热带地区产生 Rossby 波源,在背景气流的作用下,异常波源产生的扰动向下游传播从而形成大尺度遥相关波列 (Hoskins and Karoly, 1981; Sardeshmukh and Hoskins, 1988)。在 El Niño 发生时,赤道中太平洋降水偏多,释放凝结潜热,在赤道太平洋地区形成热源,进而激发出“太平洋—北美”型波列 (Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987)。

京津冀地区是我国政治和文化中心,也是我国北方重要的经济发展区。夏季暴雨洪涝和少雨干旱是主要的气象灾害,对社会经济和人民生命财产安全有重大影响。关于 ENSO 对华北地区和京津冀夏季降水的影响,前人开展了大量研究,但有关 ENSO 与京津冀地区夏季降水关系的年代际变化却少有涉及。因此,本文聚焦近 60 年影响京津冀地区夏季降水的春季 ENSO 区域的年代际变化,分析不同年代背景下,不同区域的 ENSO 是如何产生影响东亚地区的环流异常,这对于提高京津冀地区汛期气候预测技巧具有重要意义。

2 资料与方法

本文使用的资料包括: (1) 京津冀地区 89 个气象站 1961~2023 年逐月降水数据,京津冀地区夏季降水量选用 6~8 月降水量,区域平均值是所有站点的平均值; (2) CRU (Climatic Research Unit) 提供的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的全球月平均降水数据 (Harris et al., 2020); (3) Hadley Center 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 HadISST1 (Hadley Centre Sea Ice and Sea Surface Temperature dataset version 1) 全球月平均海表面温度数据 (Rayner et al., 2003); (4) 逐月的 Niño 指数 (Niño 区海温距平),来自国家气候中心提供的 130 项气候指数; (5) ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 ERA5 (fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate) 全球月平均再分析数据,使用到的变量包括纬向风、经向风、位势高度、水汽与整层水汽通量散度 (Hersbach et al., 2020)。本文所选择的研究时段为 1961~2023 年。

对资料使用 Butterworth 数字滤波器进行带通滤波提取出 3~9 年的年际振荡信号,再使用滑动相关、回归分析等方法并进行显著性检验。在诊断静止 Rossby 能量传播时使用到波作用通量,在纬向变化的气候平均流中具有较好的表现效果:

$$W = \frac{1}{2|\bar{U}|} \left[\begin{array}{c} \bar{U}(\psi_x'^2 - \psi') + \bar{V}(\psi_x'\psi_y' - \psi'\psi_{xy}') \\ \bar{U}(\psi_x'\psi_y' - \psi'\psi_{xy}') + \bar{V}(\psi_y'^2 - \psi'\psi_{yy}') \end{array} \right], \quad (1)$$

其中, $\bar{U} = (\bar{U}, \bar{V})^T$ 表示稳定的纬向变化基本流, ψ' 表示扰动流函数。

3 ENSO 关键区指数与京津冀夏季降水之间关系的年代际变化

对春季不同 Niño 指数与京津冀夏季降水求 21 年滑动相关系数, 由图 1 可见, 在不同年代春季 Niño 指数与夏季京津冀降水的关系并非保持稳定不变, 而是存在明显差异, 且不同区域的 Niño 指数与降水求相关得到的结果并不相同。在 1970 年代末至 1990 年代末春季 Niño1+2 指数 [Niño1+2 区 (90°W~80°W, 10°S~0°) 区域平均海温距平] 与夏季京津冀降水成明显负相关且通过 90% 信度水平的显著性检验, 在后期两者之间的相关性减弱; 春季 Niño4 指数 [Niño4 区 (160°E~150°W, 5°S~5°N) 区域平均海温距平] 在前期与夏季京津冀降水成正相关, 直至近期两者关系转变成明显负相关且通过 90% 信度水平的显著性检验; 在整个分析时段中, 春季 Niño3 指数 [Niño3 区 (150°W~90°W, 5°S~5°N) 区域平均海温距平]、Niño3.4 指数 [Niño3.4 区 (170°W~120°W, 5°S~5°N) 区域平均海温距平] 与夏季京津冀降水的关系并不明显, 大部分时段未通过 90% 信度水平的显著性检验; 可以发现显著影响夏季京津冀降水的区域由前期的 Niño1+2 区转变为后期的 Niño4 区。因此我们选取两个区域负相关最显著的时间段: 1976~1996 年 (Niño1+2 区) 与 2001~2021 年 (Niño4 区),

来分析不同年代春季 ENSO 对夏季京津冀降水的影响差异, 以上选取的两个时间段内的 Niño1+2 指数与 Niño4 指数具有相对独立性。前期冬季 4 个 Niño 指数与京津冀夏季降水的 21 年滑动相关系数及基本表现与春季 Niño 指数得到的结果相似, 但不同区域海温与降水之间的关系差异不如春季明显 (图略)。

为了进一步验证上述结论, 将 CRU 夏季降水场分别对以上两个时间段的春季 Niño 指数作回归, 可以得到不同年代下夏季京津冀降水异常的空间分布 (图 2)。在 1976~1996 年, 春季 Niño1+2 指数与夏季京津冀降水呈现负相关, 表明当春季 Niño1+2 区海温偏暖时, 夏季京津冀地区降水异常偏少, 环渤海区域偏少最明显且通过 90% 信度水平的显著性检验; 在 2001~2021 年, 春季 Niño4 指数与夏季京津冀大部分区域降水成明显负相关, 表明当春季 Niño4 区海温表现为暖异常, 对应京津冀地区夏季偏旱, 除河北西南部分地区以外, 其他区域大都通过 90% 信度水平的显著性检验。这与使用气象站数据得到的回归结果具有较高的一致性。

通过滑动相关与回归分析, 我们得到春季 Niño 指数与夏季京津冀降水的关系存在年代际差异, 接下来将聚焦 1976~1996 年与 2001~2021 年这两个时间段对春季 ENSO 影响夏季京津冀降水异常展开成因分析。

4 不同年代 ENSO 影响夏季京津冀降水异常的可能成因

虽然两个时段不同 Niño 指数都与京津冀夏季

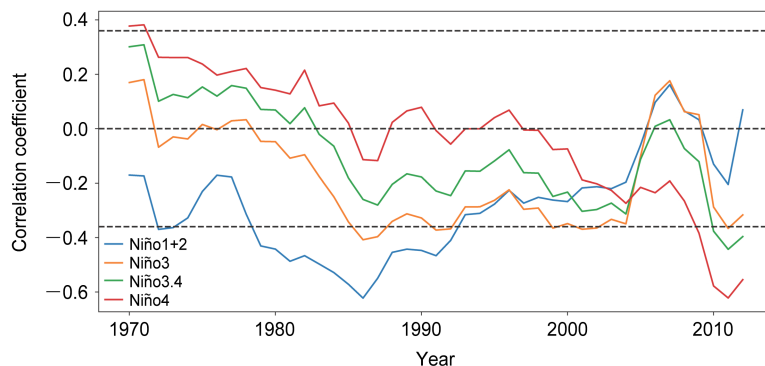


图 1 1961~2023 年春季 Niño 指数与夏季京津冀降水 21 年滑动相关系数的演变, 黑色虚线代表通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 1 Evolutions of the 21-year sliding correlation coefficient between the spring Niño index from 1961 to 2023 and the summer precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The black dashed line represents the significance level passing the 90% significance test.

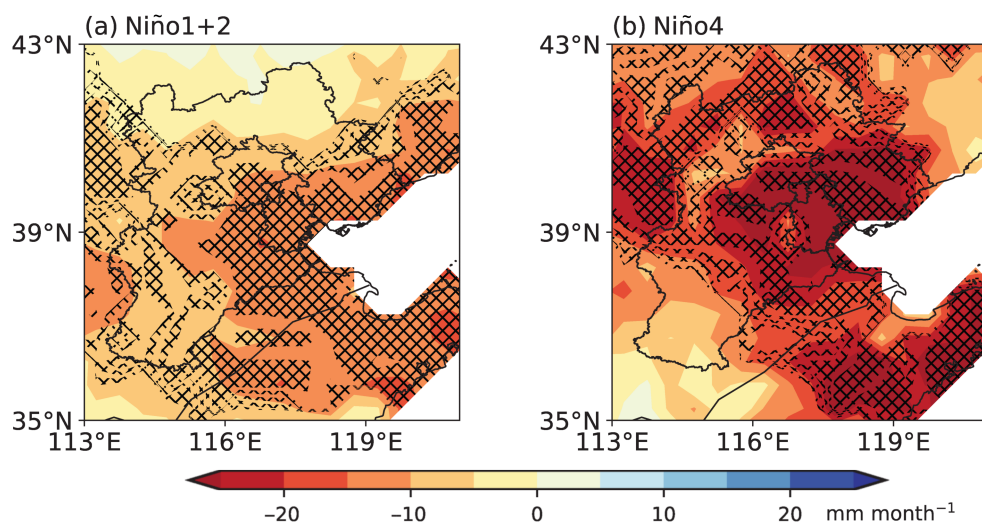


图2 夏季降水异常(填色, 单位: mm mon^{-1})分别与(a) 1976~1996年春季 Niño1+2 指数和(b) 2001~2021年春季 Niño4 指数回归的空间分布。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 2 Spatial distributions of summer precipitation anomalies (shadings, units: mm mon^{-1}) regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test.

降水呈负相关, 但降水异常的成因是否存在差异, 下面将从不同区域的 Niño 指数相关的海温异常和引起的大气环流异常来进一步分析。

4.1 三大洋海温异常

首先把夏季海温场分别对 1976~1996 年与 2001~2021 年不同区域的春季 Niño 指数作回归, 可以得到不同时段夏季全球海温异常的空间分布(图 3)。在 1976~1996 年, 春季赤道东太平洋的暖海温异常能维持到夏季, 在热带印度洋西部存在一定范围的暖海温异常, 而在热带西太平洋与中纬度北太平洋表现为海温偏冷。在 2001~2021 年, 春季赤道中太平洋海温偏暖同样可以维持到夏季, 与 1976~1996 年时段不同的是, 热带东印度洋、北太平洋东部沿岸存在较大范围且显著的暖海温异常, 热带西太平洋冷海温异常减弱, 中纬度北大西洋由较弱的海温异常转为明显的北冷南暖分布。下面从太平洋、印度洋和大西洋海温异常的协同作用影响欧亚地区热带和中高纬环流异常进行分析。

4.2 大气环流异常

根据两个时段的不同 ENSO 关键区的海温异常, 进一步分析产生的异常大气环流对京津冀地区夏季降水异常的影响。通过把夏季 850 hPa 水平风场分别对两个时段春季 Niño 指数作回归(图 4), 可以得到当两个时间段春季 Niño 指数为正时, 夏

季东亚沿岸均存在明显的 PJ (Pacific-Japan) 波列, 副热带西北太平洋受反气旋环流控制, 日本海附近存在气旋性环流, 京津冀地区位于气旋西侧偏北风控制下, 对应降水异常偏少(图 2)。具体来看, 在 1976~1996 年, Niño1+2 区为暖异常时, 副热带西北太平洋反气旋西侧的西南气流与日本海气旋西侧的偏北风在长江附近辐合, 京津冀地区受偏北风控制, 降水异常偏少(图 4a), 而在 2001~2021 年, 当 Niño4 指数为正时, 副热带西北太平洋存在更明显的反气旋环流, 日本海上空受更强的气旋性环流控制, 位于中纬度的气旋其西侧偏北风延伸控制到我国东南沿海地区, 京津冀地区存在更强的偏北风异常(图 4b), 对应此时间段的降水负异常更明显(图 2b)。

4.3 水汽输送异常

由环流所引起的水汽输送是造成降水的最直接因素, 图 5 是不同年代下夏季整层积分水汽通量散度与不同时段春季 Niño 指数作回归得到的结果。可以看到在两个研究时段, 当 Niño 指数为正时, 京津冀地区均表现为水汽通量散度正异常, 对应此处存在辐散, 与降水偏少相匹配(图 2)。在 1976~1996 年, 当 Niño1+2 指数为正值时, 水汽通量散度正异常比较明显的区域主要位于环渤海以及冀中地区, 且以上区域大都通过显著性检验(图 5a),

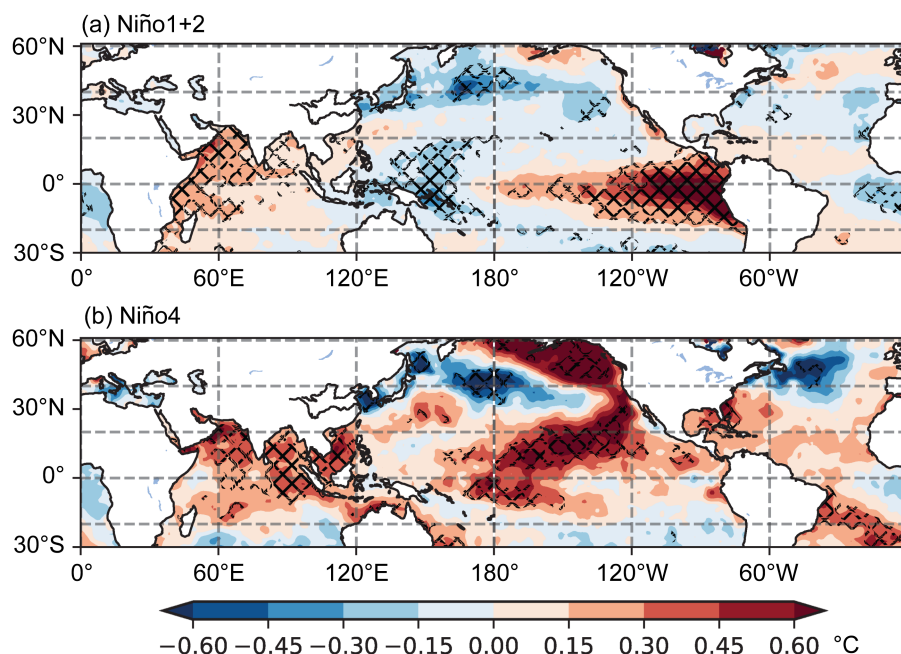


图3 夏季海表面温度异常(填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)分别与(a) 1976~1996年春季 Niño1+2 指数和(b) 2001~2021年春季 Niño4 指数回归的空间分布。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 3 Spatial distributions of summer sea surface temperature anomalies (shadings, units: $^{\circ}\text{C}$) regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test

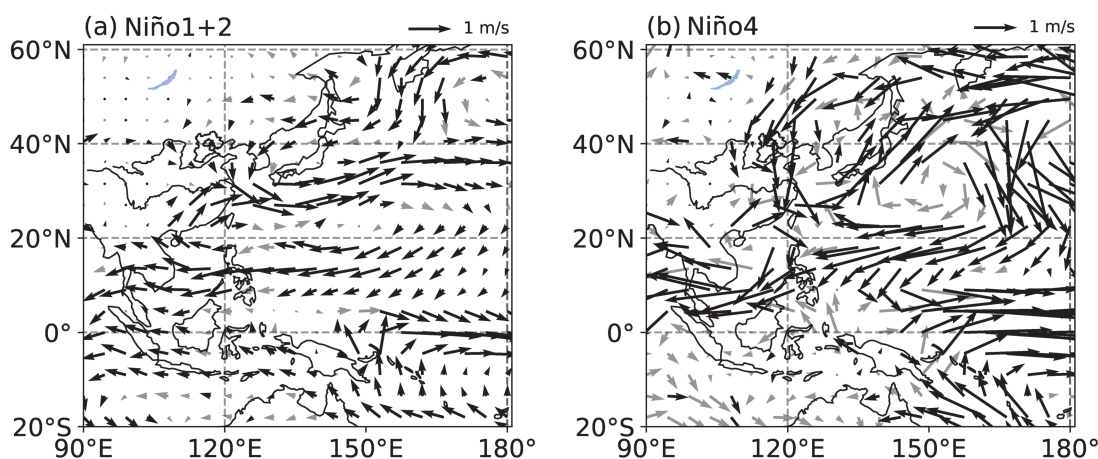


图4 夏季 850 hPa 水平风异常(箭头, 单位: m s^{-1})分别对(a) 1976~1996年春季 Niño1+2 指数与(b) 2001~2021年春季 Niño4 指数作回归的空间分布。水平风场中的黑色箭头表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 4 Spatial distributions of summer horizontal wind anomalies (arrows units: m s^{-1}) at 850 hPa regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black arrows in the horizontal wind indicate that the results pass the 90% significance test

与降水偏少的区域具有较高的一致性(图 2a)。与前一研究时段相比,在 Niño4 区表现为暖异常时,2001~2021 年在京津冀地区东北部存在明显的正异常辐散中心(图 5b),对应此时段京津冀地区

的东北部降水偏少更加明显(图 2b)。

4.4 热带地区的影响过程

图 6 为夏季 200 hPa 速度势及对应辐散风对不同区域的春季 Niño 指数的回归图,图 7 是夏季

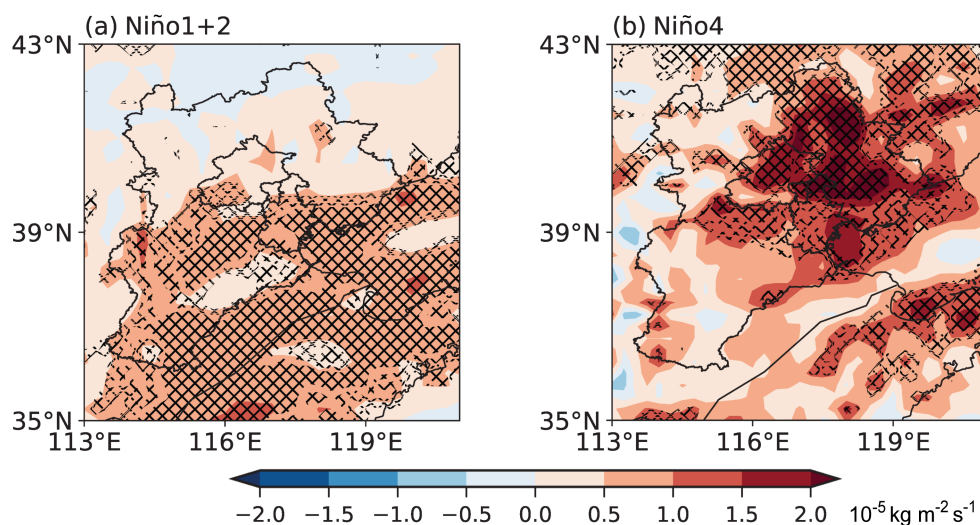


图5 夏季整层水汽通量散度异常(填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 分别对 (a) 1976~1996 年春季 Niño1+2 指数与 (b) 2001~2021 年春季 Niño4 指数作回归的空间分布。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 5 Spatial distributions of anomalies of the divergence of the vertically integrated water vapor flux (shadings, units: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in summer regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test.

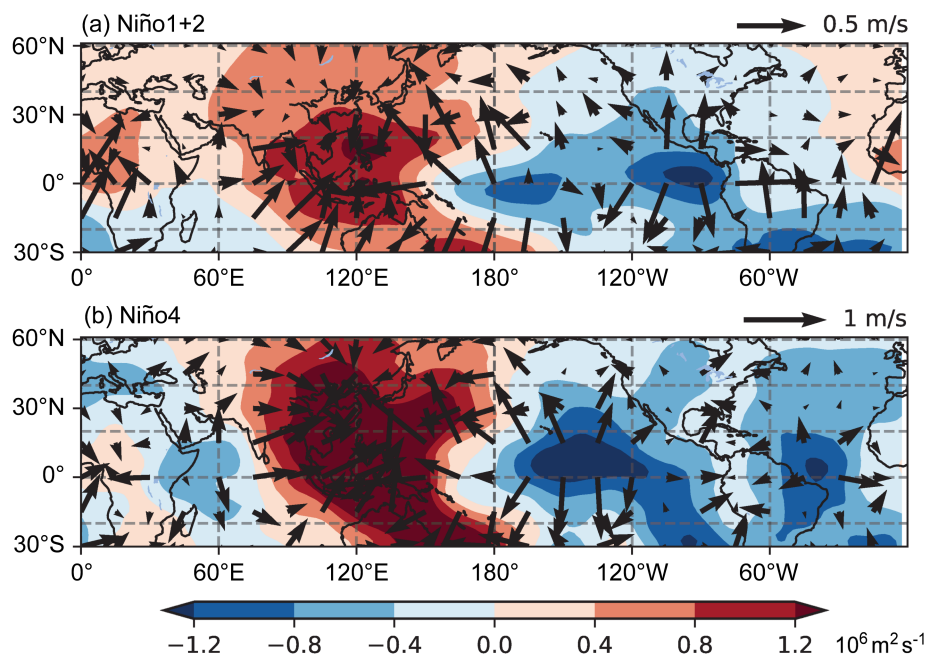


图6 夏季 200 hPa 速度势异常(填色, 单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 及辐散风异常(箭头, 单位: m s^{-1}) 分别对 (a) 1976~1996 年春季 Niño1+2 指数与 (b) 2001~2021 年春季 Niño4 指数作回归的空间分布。

Fig. 6 Spatial distributions of velocity potential anomalies (shadings, units: $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) at 200 hPa and the divergent wind anomalies (arrows, units: m s^{-1}) in summer regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively.

10°S~10°N 平均的纬向垂直环流回归不同时段
的春季 Niño 指数得到的结果。在 1976~1996 年, 热
带中东太平洋海温偏暖, 热带太平洋西部海温偏冷

(图 3a), 热带太平洋地区纬向温度梯度减弱,
对应在热带太平洋地区存在两个速度势异常中心,
分别是位于海洋性大陆上空的速度势正异常中心与

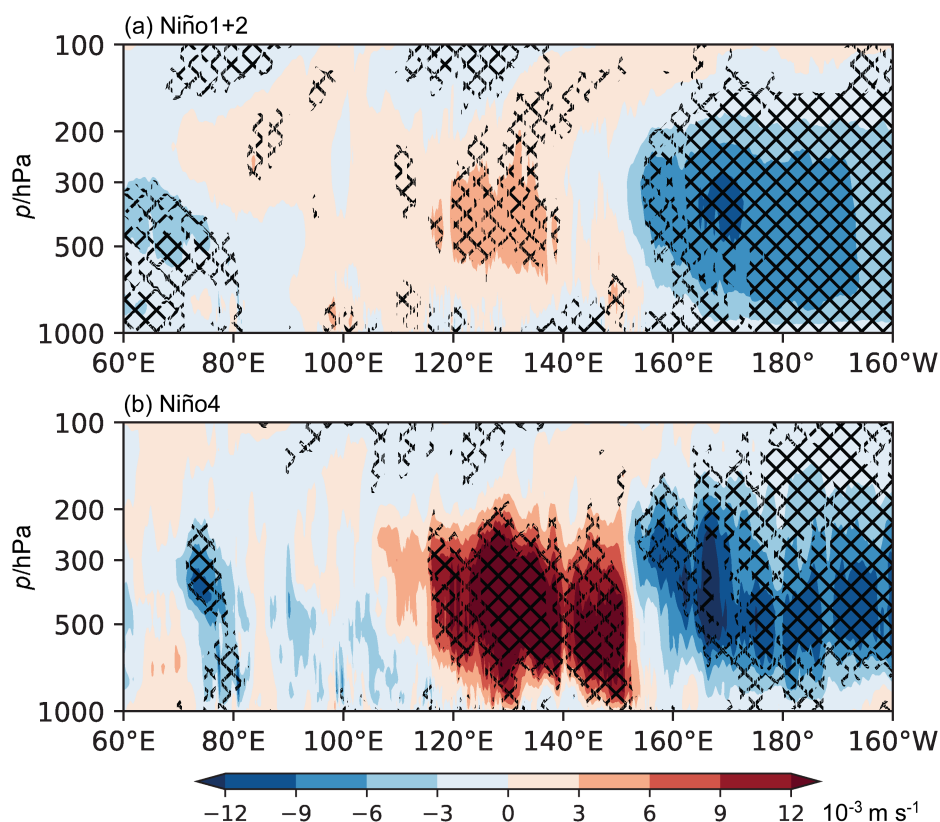


图7 夏季 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均的纬向垂直环流异常 (填色, 单位: 10^{-3} m s^{-1}) 分别对 (a) 1976~1996 年春季 Niño1+2 指数与 (b) 2001~2021 年春季 Niño4 指数作回归。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 7 Spatial distributions of anomalies of the zonal-vertical circulation averaged over $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ (shadings, units: m s^{-1}) in summer regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test.

位于热带中东太平洋的速度势负异常中心, 速度势负异常也就是辐散中心对应的上升运动位于热带太平洋中东部, 速度势正异常即辐合中心对应的下沉运动位于海洋性大陆附近 (图 6a), 导致热带太平洋地区的 Walker 环流受到抑制 (图 7a)。一方面热带中东太平洋的上升运动会释放凝结潜热, 根据 Matsuno-Gill 效应, 在热带中太平洋的西北侧激发出气旋性环流 (Gill, 1980), 其西侧存在的东北风与气候态的东北信风相叠加, 使得热带西太平洋海温偏冷 (图 3a), 有利于在此处生成反气旋性环流 (图 4a), 而反气旋性环流东侧的东北风与东北信风进一步叠加, 异常冷海温得以维持, 在副热带西北太平洋的反气旋性环流得以较长时间存在; 另一方面在热带西太平洋高层为速度势的辐合中心, 对应其低层为速度势的辐散中心, 进而在热带西太平洋激发出偏东风异常 (图 4a); 在两者的共同作用下副热带西北太平洋出现反气旋性环流 (图 4a),

此反气旋西侧的西南气流仅延伸至长江流域, 并不能给京津冀地区提供充足的水汽输送 (图 5a)。在 2001~2021 年, 热带太平洋暖海温异常西移至中太平洋, 且海温增暖更为明显 (图 3b), 对应热带太平洋高层存在两个强度更强的速度势异常中心, 速度势负异常中心西移至热带中太平洋, 速度势正异常中心位于热带西太平洋与海洋性大陆上空 (图 6b), 与此同时印度洋的海温暖异常更明显 (图 3b), 因此在印度洋上空出现一个较明显的速度势负异常中心 (图 6b)。与前一时段相比, 用 Niño4 指数回归得到的太平洋地区高层异常速度势强度更强, 范围更广, 对应 Walker 环流受到更明显的抑制作用 (图 7b), 进而在热带西太平洋存在更强的下沉运动, 低层的偏东风异常更为显著, 另一方面印度洋增暖更明显对应更强的对流上升运动, 有利于在西北太平洋地区出现更明显的反气旋式切变, 边界层的 Ekman 辐散更强, 两者的共同

作用更明显地削弱了热带西太平洋的对流活动,在副热带西北太平洋激发出的反气旋环流强度更强(图 4b),反气旋主要控制西北太平洋海上区域,并未对华北地区的水汽条件产生显著影响(图 5b)。

4.5 中高纬地区的影响过程

图 8 给出夏季北半球中高纬 200 hPa 位势高度异常及相应的波活动通量与两个时段春季 Niño 指数的回归图,图 9 为夏季北半球中高纬 200 hPa 纬向风异常分别回归到不同区域的春季 Niño 指数得到的结果,主要关注北半球中高纬环流异常与大尺度波列的联系。可以看出,两个时段夏季北半球中高纬大尺度准定常波列存在显著差异。在 1976~1996 年,当 Niño1+2 区表现为暖异常时,欧亚上空的纬向波列只影响到中亚地区,京津冀地区更多受由北太平洋延伸而来的低压影响。与热带地区海表面温度异常导致的直接热力强迫响应不同,经向海温梯度引起的斜压不稳定在中高纬地区占主导地位(Fang and Yang, 2016; Tao et al., 2020)。在此阶段,

中纬度北太平洋西部为一致的冷海温异常(图 3a),其南侧的经向海温梯度增加,相应地低层大气斜压性增强,有利于出现更多的瞬变涡旋活动。大气瞬变涡旋活动可以重新分配对流层中高层的热量和动量,有效地影响大尺度大气环流。根据瞬变涡旋平均流相互作用,瞬变涡旋活动增强往往会引起异常瞬变涡旋通量的辐合,进而导致高层纬向西风异常增加(Lau and Holopainen, 1984; Fang and Yang, 2016; Tao et al., 2020)。在日本南侧存在纬向风正异常中心(图 9a),这与 200 hPa 中纬度北太平洋延伸至我国北方的负位势高度异常相对应(图 8a),京津冀地区受异常东北风控制(图 4a),缺乏充足的水汽条件(图 5a),因此不易产生降水(图 2a)。而在 2001~2021 年,用 Niño4 指数进行回归得到的结果与前期存在很大差异,当 Niño4 指数为正值时,中纬度北大西洋为冷海温异常(图 3b),对应大西洋多年代际涛动的负位相,有利于在中高纬激发出一支横跨欧亚的 Rossby 波列(姜大膀等,

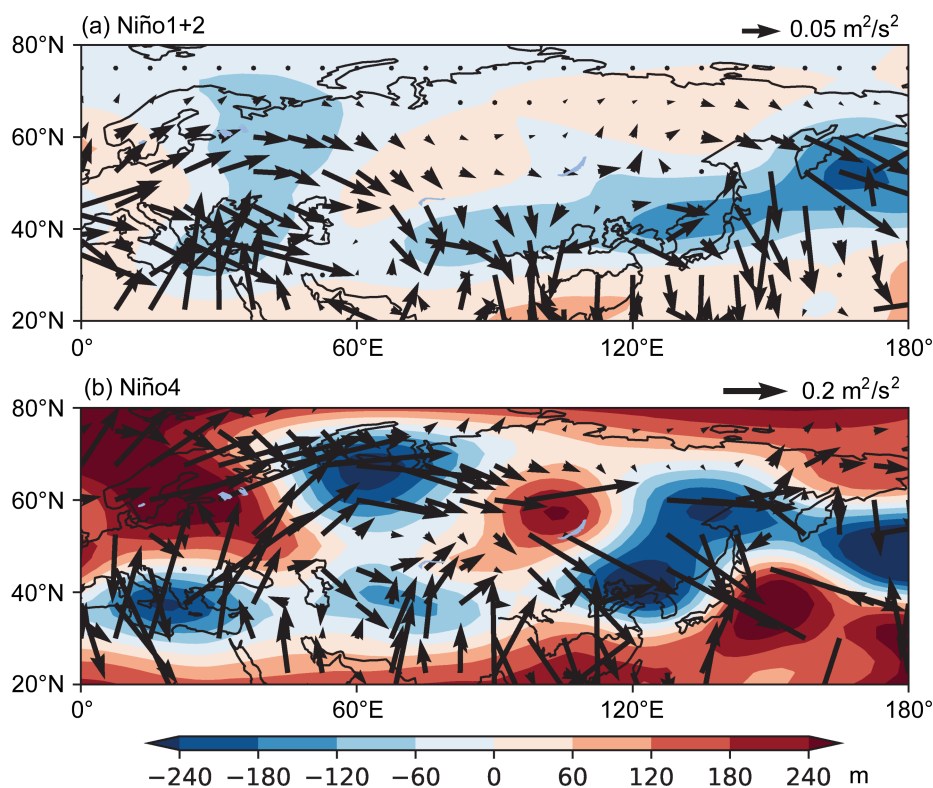


图 8 夏季 200 hPa 位势高度异常(填色,单位: m)和波作用通量(箭头,单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)分别对(a) 1976~1996 年春季 Niño1+2 指数与(b) 2001~2021 年春季 Niño4 指数作回归的空间分布。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验。

Fig. 8 Spatial distributions of summer geopotential height anomalies at 200 hPa (shadings, units: m) and wave activity flux (arrows, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test.

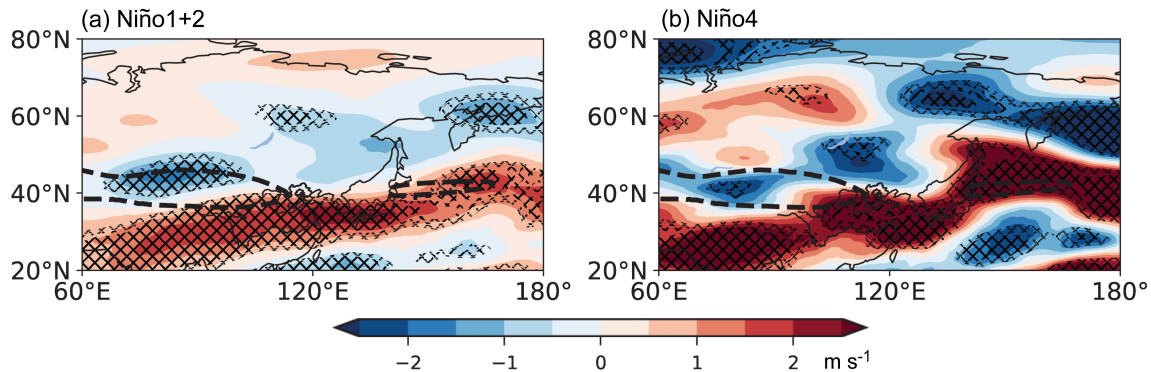


图9 夏季 200 hPa 纬向风异常(填色, 单位: m s^{-1}) 分别对 (a) 1976~1996 年春季 Niño1+2 指数与 (b) 2001~2021 年春季 Niño4 指数作回归的空间分布。黑色网格线表示通过 90% 信度水平的显著性检验, 黑色虚线表示 26 m s^{-1} 的东亚副热带西风急流的气候态。

Fig. 9 Spatial distributions of summer zonal wind anomalies at 200 hPa (shadings, units: m s^{-1}) regressed onto (a) the spring Niño1+2 index during the period from 1976 to 1996 and (b) the spring Niño4 index during the period from 2001 to 2021, respectively. The black grid lines indicate that the results pass the 90% significance test, and the black dashed line represents the climatological state of the East Asian subtropical westerly jet at 26 m s^{-1} .

2024), 该波列起源于大西洋, 经过乌拉尔山脉附近的低压异常与贝加尔湖附近的高压异常最终传至我国北方地区, 与从低纬印度洋传来的经向波列相叠加, 导致贝加尔湖附近存在高压异常, 东北亚地区受低压控制, 且此时波活动通量强度更强, 对应影响我国北方地区的低压更为明显(图 8b), 异常偏北风控制京津冀地区(图 4b), 水汽通量散度为明显的正异常(图 5b); 与此同时淮河流域上空的纬向风正异常位于气候态南侧(图 9b), 对应较弱的东亚夏季风, 最终导致京津冀地区降水异常偏少(图 2b)。

5 结论与讨论

ENSO 是全球海气系统最显著的年际信号, 也是影响京津冀夏季降水年际变化的重要因素之一。本文使用 1961~2023 年京津冀逐月降水数据、ERA5 逐月大气再分析数据与 HadISST1 逐月海温数据, 采用年际滤波与回归分析方法, 对影响京津冀夏季降水的春季 ENSO 区域随年代发生空间迁移这一现象进行分析, 并探究相关的物理机制, 得到的结论如下:

(1) 春季 ENSO 对京津冀夏季降水年际异常的影响在 1990 年代末发生年代际转变, 由前期春季东太平洋海温偏暖对应京津冀夏季负的降水异常转为后期春季中太平洋海温与京津冀夏季降水成负相关, 并选取两个负相关最强的时间段进行分析, 其中 Niño1+2 指数与京津冀降水的负相关关系在 1976~1996 年时段最强, Niño4 指数与京津冀降水

的负相关关系在 2001~2021 年时段最强。

(2) 从热带途径来看, 自 1970 年代中期至 1990 年代中期, 春季东太平洋的海温偏暖可以维持到夏季, 在热带西太平洋表现为海温偏冷, 热带太平洋地区的纬向海温梯度减弱, 异常 Walker 环流抑制热带西太平洋的对流活动, 在副热带西北太平洋生成异常反气旋性环流, 此反气旋性环流仅向北延伸至长江流域, 并不能为京津冀地区提供充足的水汽输送; 与前一段时间相比, 从 2000 年代初至今, 春季中太平洋的海温异常偏暖信号能够持续到夏季, 同样产生异常 Walker 环流显著抑制热带西太平洋的对流活动, 存在差异的是印度洋北部与海洋性大陆增温明显, 通过印度洋电容器效应产生东传的 Kelvin 波, 有利于在副热带西北太平洋生成异常反气旋性环流, 此反气旋性环流主要控制副热带西北太平洋, 同样不能把水汽输送到京津冀地区。

(3) 从热带外途径来看, 自 1970 年代中期至 1990 年代中期, 春季东太平洋出现 El Niño 时, 在夏季中纬度北太平洋西部海温偏冷, 其南侧的经向海温梯度增加, 低层大气斜压性增强, 有利于产生更多的瞬变涡旋活动, 使得北太平洋至我国东北地区出现大范围的位势高度负异常, 京津冀地区受偏北风异常的影响, 水汽条件不足, 京津冀地区夏季降水异常偏少; 与前一段时间相比, 从 2000 年代初至今, 春季中太平洋出现 El Niño 时, 中纬度大西洋夏季海温呈现冷异常, 在中高纬度欧亚大陆上空激发出纬向传播的 Rossby 波列, 与从印度洋

传来经向波列的影响相叠加,使得东北亚地区存在位势高度负异常中心,京津冀地区受异常偏北风的影响,使得京津冀夏季降水异常偏少。

与京津冀地区夏季降水成明显负相关的春季海温区域由热带东太平洋移至热带中太平洋,转变发生在 2000 年前后,这可能是与近期中太平洋 El Niño 频发相关 (Lee and McPhaden, 2010), 此文中主要分析春季 El Niño 对京津冀夏季降水影响的年代际差异,而 La Niña 与 El Niño 本身振幅具有非对称性,且中纬度大气的动力过程是非线性的 (Wang and Yang, 2023), 另外近些年发生更多的是东太平洋 La Niña 事件,因此关于 La Nina 对京津冀地区夏季降水影响中涉及的非线性过程有待未来做进一步的研究。

参考文献 (References)

- 包澄澜, 向元珍. 2000. 厄尼诺对人类社会的影响 [J]. 气象科学, 20(3): 277–288. Bao C L, Xiang Y Z. 2000. Impact of El Nino event on human society [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 20(3): 277–288. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2000.03.006
- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Wea. Rev., 115(6): 1083–1126. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific [J]. Mon. Wea. Rev., 97(3): 163–172. doi:10.1175/1520-0493(1969)097<0163:ATFTEP>2.3.CO;2
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000a. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. J. Climate, 13(24): 4310–4325. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4310:iaivot>2.0.co;2
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000b. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon [J]. J. Climate, 13(24): 4326–4340. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4326:iaivot>2.0.co;2
- 陈烈庭, 吴仁广. 1998. 太平洋各区海温异常对中国东部夏季雨带类型的共同影响 [J]. 大气科学, 22(5): 718–726. Chen L T, Wu R G. 1998. The joint effects of SST anomalies over different Pacific regions on summer rainbelt patterns in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22(5): 718–726. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.05.06
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: A numerical study [J]. Climate Dyn., 43(1-2): 469–481. doi:10.1007/s00382-013-1943-1
- 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 Y H, Si D, Liu Y J, 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
- Fang J B, Yang X Q. 2016. Structure and dynamics of decadal anomalies in the wintertime midlatitude North Pacific ocean-atmosphere system [J]. Climate Dyn., 47(5–6): 1989–2007. doi:10.1007/s00382-015-2946-x
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. Int. J. Climatol., 31(14): 2091–2101. doi:10.1002/joc.2217
- Gan R Y, Liu Q, Huang G, et al. 2023. Greenhouse warming and internal variability increase extreme and central Pacific El Niño frequency since 1980 [J]. Nat. Commun., 14(1): 394. doi:10.1038/s41467-023-36053-7
- Gao H, Wang Y G, He J H. 2006. Weakening significance of ENSO as a predictor of summer precipitation in China [J]. Geophys. Res. Lett., 33(9): L09807. doi:10.1029/2005GL025511
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106(449): 447–462. doi:10.1002/qj.49710644905
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠, 等. 2011. 华北降水季节演变主要模态及影响因子 [J]. 大气科学, 35(2): 217–234. Hao L S, Ding Y H, Min J Z, et al. 2011. Analysis on seasonally evolutive main modes of North China precipitation and their influence factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(2): 217–234. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.03
- 郝立生, 何丽辉, 马宁, 等. 2023. 厄尔尼诺事件年际变化与我国华北夏季干旱的关系 [J]. 干旱气象, 41(6): 829–840. Hao L S, He L Y, Ma N, et al. 2023. Relationship between interannual variability of El Niño events and summer droughts in North China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 41(6): 829–840. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2023)-06-0829
- Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. Sci. Data, 7(1): 109. doi:10.1038/s41597-020-0453-3
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 146(730): 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. J. Atmos. Sci., 38(6): 1179–1196. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1179:tslroa>2.0.co;2
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30(5): 730–743. Huang R H, Cai R S, Chen J L, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 730–743. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02
- 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. 大气科学, 32(4): 691–

719. Huang R H, Gu L, Chen J L, et al. 2008. Recent progresses in studies of the temporal-spatial variations of the East Asian monsoon system and their impacts on climate anomalies in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 691–719. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.02
- 姜大膀, 司东, 缪家鹏. 2024. 大西洋多年代际振荡对东亚气候影响的综述 [J]. *大气科学*, 48(1): 261–272. Jiang D B, Si D, Miao J P. 2024. Impacts of Atlantic multidecadal oscillation on the East Asian climate: A review [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 48(1): 261–272. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2307.23311
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 23(6): 663–672. Jin Z H, Tao S Y. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23(6): 663–672. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.03
- Kim J W, Yeh S W, Chang E C. 2014. Combined effect of El Niño-southern oscillation and pacific decadal oscillation on the East Asian winter monsoon [J]. *Climate Dyn.*, 42(3–4): 957–971. doi:10.1007/s00382-013-1730-z
- Lau N C, Holopainen E O. 1984. Transient eddy forcing of the time-mean flow as identified by geopotential tendencies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 41(3): 313–328. doi:10.1175/1520-0469(1984)041<0313:TEFOTT>2.0.CO;2
- Lee T, McPhaden M J. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37(14): L14603. doi:10.1029/2010gl044007
- Picaut J, Masia F, Du Penhoat Y. 1997. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO [J]. *Science*, 277(5326): 663–666. doi:10.1126/science.277.5326.663
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern Oscillation/El Niño [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110(5): 354–384. doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0354:VITSST>2.0.CO;2
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the Late Nineteenth Century [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45(7): 1228–1251. doi:10.1175/1520-0469(1988)045<1228:tgogrf>2.0.co;2
- 施能, 鲁建军, 朱乾根. 1996. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化 [J]. *南京气象学院学报*, 19(2): 168–177. Shi N, Lu J J, Zhu Q G. 1996. East Asian winter/summer monsoon intensity indices with their climatic change in 1873–1989 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 19(2): 168–177. doi:10.13878/j.cnki.dqkxb.1996.02.003
- Tao L F, Yang X Q, Fang J B, et al. 2020. PDO-related wintertime atmospheric anomalies over the midlatitude North Pacific: Local versus remote SST forcing [J]. *J. Climate*, 33(16): 6989–7010. doi:10.1175/JCLI-D-19-0143.1
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 784–812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2
- Wang B, Zhang Q. 2002. Pacific–East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development [J]. *J. Climate*, 15(22): 3252–3265. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<3252:peatpi>2.0.co;2
- Wang B, Wu R G, Fu X O H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- 王东, 胡晓霞, 王慧, 等. 2024. ENSO 对中国沿海夏季降水影响的区域特征研究 [J]. *热带地理*, 44(6): 987–1000. Wang D, Hu X X, Wang H, et al. 2024. Regional impacts of ENSO on summer precipitation along the Chinese coast [J]. *Tropical Geography (in Chinese)*, 44(6): 987–1000. doi:10.13284/j.cnki.rddl.20230912
- 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
- 王会军, 贺圣平. 2012. ENSO 和东亚冬季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱 [J]. *科学通报*, 57(19): 1713–1718. Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian Winter Monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(27): 3535–3540. doi:10.1007/s11434-012-5285-x
- Wang X Q, Yang X Q. 2023. Amplified asymmetric impact of ENSO events on the wintertime Pacific–North American teleconnection pattern [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 50(2): e2022GL100996. doi:10.1029/2022GL100996
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. *J. Climate*, 23(11): 2974–2986. doi:10.1175/2010jcli3300.1
- Wu R G, Wang B. 2002. A contrast of the East Asian summer monsoon–ENSO relationship between 1962–77 and 1978–93 [J]. *J. Climate*, 15(22): 3266–3279. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<3266:ACOTEA>2.0.CO;2
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22(3): 730–747. doi:10.1175/2008JCLI2544.1
- Xu M, Xu H M, Ma J, et al. 2021. Impact of Atlantic multidecadal oscillation on interannual relationship between ENSO and East Asian early summer monsoon [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(4): 2860–2877. doi:10.1002/joc.6994
- 许武成, 马劲松, 王文. 2005. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述 [J]. *气象科学*, 25(2): 212–220. Xu W C, Ma J S, Wang W. 2005. A review of studys on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 25(2): 212–220. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2005.02.015
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(2): L02708. doi:10.1029/2006gl028571

- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate [J]. *Nature*, 461(7263): 511–514. doi:10.1038/nature08316
- 袁媛, 杨辉, 李崇银. 2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响 [J]. *气象学报*, 70(3): 467–478. Yuan Y, Yang H, Li C Y. 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following-summer precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70(3): 467–478. doi:10.11676/qxxb2012.039
- 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 Q Y, Tao S Y, Chen L T. 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 Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(5): 559–568. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005
- 张人禾, 闵庆桦, 苏京志. 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47(5): 544–553. Zhang R H, Min Q Y, Su J Z. 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(6): 1124–1132. doi:10.1007/s11430-016-9026-x
- 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 S Y, Chen L J, Cui T. 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
- 朱益民, 杨修群, 陈晓颖, 等. 2007. ENSO 与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化 [J]. *热带气象学报*, 23(2): 105–116. Zhu Y M, Yang X Q, Chen X Y, et al. 2007. Interdecadal variation of the relationship between ENSO and summer interannual climate variability in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 23(2): 105–116. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.02.001
- 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 H F, Chen L T, Zhang Q Y. 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
- 邹力, 倪允琪. 1997. ENSO 对亚洲夏季风异常和我国夏季降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 13(4): 306–314. Zou L, Ni Y Q. 1997. Impact of ENSO on the variability of the summer monsoon over Asia and the summer rainfall in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 13(4): 306–314. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.1997.04.003