

ENSO 事件对中国东部夏季季节内降水影响的年代际差异分析

陈悦^{1,2}, 罗连升³, 段春锋^{1,2}, 卢燕宇^{1,2}, 于彩霞^{1,2}, 侯灿^{1,2}

1 安徽省气象科学研究所/安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

2 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地/寿县国家气候观象台, 安徽 寿县 232200

3 安徽省气候中心, 合肥 230031

提 要: 本文研究了 ENSO 事件对中国东部夏季季节内降水影响的年代际差异。在 1991–2024 年期间, El Niño 事件有利于长江中下游及以南地区在次年前夏 (6 月) 降水偏多, 而后夏 (8 月) 降水偏少。这一反位相影响关系在 21 世纪 00 年代初期发生了年代际变化。对比 1991–2003 年与 2004–2024 年两个时间段发现: 后一阶段 ENSO 与次年 8 月长江中下游及以南地区降水的关系减弱, 不利于该区域出现大范围降水偏少情况。本文分析与 ENSO 事件相关的海温和环流配置的共同变化发现, 2004–2024 年 8 月, 西北太平洋区域因东风异常减弱、海水蒸发潜热减少, 海温由负异常转为正异常, 同时北印度洋区域正异常海温偏弱。受此影响, 西北太平洋异常反气旋难以维持, 并转变为气旋式环流, 不利于长江中下游及以南地区降水偏少。在环流配置上, 500 hPa 层面, 东亚–太平洋/太平洋–日本遥相关型在 2004–2024 年 8 月由“+–”型转变为“–+”型; 200 hPa 层面, 东亚副热带西风急流减弱, 均不利于长江中下游及以南地区降水偏少。本研究在年代际尺度上揭示了 ENSO 对中国东部夏季季节内降水的影响, 为提升降水季节内预测能力提供了理论依据。

关键词: ENSO, 中国东部, 降水, 年代际差异, 季节内变化

中图分类号: P461 文献标志码: A DOI:

Analysis of Inter-Decadal Differences in the Impact of ENSO Events on Intraseasonal Summer Precipitation in Eastern China

CHEN Yue^{1,2} LUO Liansheng³ DUAN Chunfeng^{1,2} LU Yanyu^{1,2} YU Caixia^{1,2} HOU Can^{1,2}

1 Anhui Institute of Meteorological Sciences / Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

2 Huaihe River Basin Typical Farm Eco-Meteorological Experiment Field of CMA / Shouxian National Climatology Observatory, Shouxian, Anhui Province, 232200

3 Anhui Climate Center, Hefei 230031

国家自然科学基金 (U2342206)、安徽省气象局创新发展专项 (CXB202406) 和中国气象局创新发展专项 (CXFZ2024J048) 共同资助

第一作者: 陈悦, 主要从事气候与气候变化研究. E-mail: chen Yue@ahmi.org.cn

通讯作者: 罗连升, 主要从事气候与气候变化研究. E-mail: luolsh_gx@163.com

Abstract: This paper investigates the inter-decadal differences in the impact of ENSO events on intraseasonal summer precipitation in eastern China. During 1991–2024, early summer (June) following an El Niño event tended to see increased precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the southern regions, whereas late summer (August) precipitation experienced a decrease in these regions. This inverse-phase relationship underwent a significant inter-decadal shift around the early 2000s. A comparison between the periods 1991–2003 and 2004–2024 reveals that in the latter period, the relationship between ENSO and precipitation in August of the following year in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the regions to the south got weakened, making it less likely for widespread negative precipitation anomalies to occur in this region. By examining the concurrent changes in sea surface temperature (SST) and atmospheric circulation that were associated with ENSO events, we have found that over the western North Pacific in August of 2004–2024, the weakened easterly anomalies and the reduced latent heat flux due to sea evaporation resulted in a shift from negative to positive SST anomalies. Meanwhile, positive SST anomalies over the northern Indian Ocean became comparatively weaker. Consequently, the anomalous anticyclone over the western North Pacific was unable to persist, transitioning into a cyclonic circulation, which was detrimental to precipitation deficits over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the southern regions. In terms of circulation configuration, at 500 hPa, the East Asia–Pacific/Pacific–Japan teleconnection pattern turned from a “+ –” into a “– +” pattern in August of 2004–2024, while at 200 hPa the East Asian subtropical westerly jet weakened. These two kinds of changes both were unfavorable for precipitation deficits over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the southern regions. This research clarifies the inter-decadal modulation of ENSO’s influence on intraseasonal summer precipitation in eastern China and can provide a theoretical basis for improving the prediction level of intraseasonal precipitation.

Key words: ENSO, eastern China, precipitation, inter-decadal difference, intraseasonal variation

引 言

中国东部地处东亚，人口稠密，是农业与经济发展的核心地带，也是气象灾害频发区域（卜文惠等, 2023; 徐同等, 2025）。东亚夏季风主导了中国东部夏季降水分布格局，其异常变化通常会引发洪涝、干旱等灾害，不仅威胁人民生命财产安全，造成重大经济损失，也严重制约农业生产（Huang et al, 2007; Ding et al, 2021; Liu et al, 2023; 王婷等, 2024）。因此，深入理解中国东部夏季降水的变化及影响因素对减轻气象灾害的影响具有重要意义。

ENSO 是影响东亚夏季风的关键因子，主要通过其在衰减年激发的西北太平洋（western North Pacific, WNP）异常反气旋/气旋系统影响中国东部夏季降水，是我国汛期降水预测的重要依据（Huang and Wu, 1989; Wang et al, 2000; Zhang et al, 2017; 罗连升等, 2025; 徐博阳等, 2025）。跨海盆的海气反馈过程，即印度洋–西太平洋电容器（Indo-western Pacific Ocean capacitor, IPOC）（Xie et al, 2009; Kosaka et al, 2013）效应在西北太平洋异常反气旋系统

(western North Pacific anomalous anticyclone, WNPAC) 的维持过程中起到重要作用。具体而言, 在 WNP 区域, El Niño 激发的 WNPAC 东南侧的异常东北风增强了东北信风, 通过风-蒸发-海温反馈机制促使该区域海温冷却 (Wang et al, 2000)。反过来, WNP 海温冷却又通过大气 Rossby 波响应帮助维持 WNPAC。同时, 在北印度洋 (North India Ocean, NIO) 区域, 海温增暖对于 WNPAC 的维持也具有重要作用。西南季风爆发后, 赤道以北的东北风异常通过风-蒸发-海温正反馈机制促使 NIO 海温升高 (Du et al, 2009)。此外, WNPAC 南侧的东风异常可延伸至热带印度洋, 同样有利于该区域增温 (Wu et al, 2010; Kosaka et al, 2013)。El Niño 在其衰减年夏季引发的 NIO 增暖进一步激发暖性 Kelvin 波沿赤道向 WNP 传播, 并通过低层 Ekman 辐散维持 WNPAC (Yang et al, 2007; Xie et al, 2009; Wu et al, 2009)。

然而, ENSO 本身具有显著的年代际变化。它可以通过调控 IPOC 的跨海盆海气相互作用, 进而引发 ENSO 与东亚夏季风关系的年代际转变 (Huang et al, 2010; Xie et al, 2010; Yu et al, 2025)。如 20 世纪 70 年代中期以来, ENSO 频率减小变率增强 (An and Wang, 2000), 与此同时, 东亚夏季风对 ENSO 的响应也明显增强 (Wang et al, 2008; Xie et al, 2010)。造成这一变化的主要原因是, El Niño 事件引发的次年 NIO 增暖可持续至整个夏季, 从而增强了 ENSO 对东亚夏季风的影响 (Huang et al, 2010; Ding et al, 2010)。ENSO 在 21 世纪初经历了另一轮年代际转变, 其特征表现为发生频率增加但变率减弱 (Yeh et al, 2009; McPhaden, 2012; Hu et al, 2020; Cai et al, 2021)。伴随这一转变, ENSO 与东亚夏季风的关系在 21 世纪 00 年代初期经历了新的年代际变化 (Liu et al, 2024; Yu et al, 2025)。Liu et al (2024) 指出, 相较于 1979–1999 年, 2000–2021 年期间 ENSO 与次年春季中国南方降水的关系有所增强, 但与次年夏季降水的关系变化不大。Yu et al (2025) 的研究则表明, 自 21 世纪初期以来, ENSO 对东亚夏季风的影响呈现减弱趋势, 尤其在衰减年 8 月最为明显。这一变化主要与 ENSO 事件衰减速度加快导致的热带印度洋反馈作用减弱, 以及 WNP 区域伴随东风响应崩溃出现的增温有关 (Yu et al, 2025)。ENSO 与东亚夏季风关系的年代际变化仍需进一步深入探讨。

东亚夏季风具有自南向北的季节内推进特征, 受其影响, 中国东部夏季主雨带在 6–8 月也向北推进, 具有明显的季节内变化 (Ding and Chan, 2005; 陈文等, 2024)。与此同时, ENSO 对中国夏季降水的影响也存在季节内差异 (Yun et al, 2008; 黄平和黄荣辉, 2010)。针对 1979–2007 年期间 El Niño 事件在其衰减阶段对中国夏季降水影响的研究显示: 6 月降水在长江以南偏多、江淮流域偏少; 7 月长江流域及华北地区降水偏多、华南沿海降水偏少;

8 月则呈现长江以北降水偏多、以南偏少的分布特征(黄平和黄荣辉, 2010)。这些结果表明, 季节内信号对我国夏季汛期降水预测十分重要(孙晨等, 2025), 在研究中国东部夏季降水时不宜简单采用季节平均处理。此外, ENSO 与东亚夏季风的关系还存在年代际变化, 仅基于单一时期分析 ENSO 对我国东部夏季降水的影响可能缺乏代表性。然而, 关于 ENSO 事件对中国东部夏季降水季节内尺度的影响是否也存在年代际变化还不够清晰。同时, 基于新降水资料, ENSO 事件对我国东部夏季季节内降水的影响特征是否与前人结论一致, 也需进一步验证。为此, 本文将利用新降水资料研究 ENSO 对我国东部夏季降水季节内变化的影响及其可能的年代际演变, 以期提升季节内降水预测能力提供理论依据。

1 数据和方法

2.1 数据

本文研究时间范围为 1960–2024 年, 使用了时间分辨率为逐月的多种再分析数据。降水强度资料(单位: mm/d)来自国家青藏高原科学数据中心的 0.1°格点降水数据集(CHM_PRE)(v2 版本), 水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (Hu and Miao, 2023)。海温资料(单位: $^{\circ}\text{C}$) (Huang et al, 2017) 来自美国国家海洋和大气管理局扩展重建的海表温度版本 5 (ERSSTv5), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。还使用了来自欧洲中期天气预报中心第五代再分析产品中的 100–1000 hPa (共 26 层等压面) 的经向风速(单位: m/s)和垂直速度(单位: Pa/s)、850 hPa 纬向风速(单位: m/s)、500 hPa 位势高度(单位: gpm)、10 m 纬向风速和经向风速(单位: m/s)、潜热通量(单位: W/m^2), 这些数据的水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Hersbach et al, 2019)。

2.2 方法

2.2.1 数据处理与指数定义

本文所有数据均在 1960–2024 年时间范围内进行了去除线性趋势处理, 距平值基于 1991–2020 年气候态计算。冬季 Niño3.4 指数定义为 (5°S – 5°N 、 170° – 120°W) 区域平均的海温异常在 12 月、次年 1 月和 2 月的平均值。夏季指 6–8 月。通过将夏季降水强度等变量回归到前冬 Niño3.4 指数表征各要素场对 ENSO 事件的响应, 统计结果根据有效自由度进行显著性检验。参考况雪源和张耀存(2006)对东亚副热带急流轴线指数的定义, 将 (30° – 50°N 、 70° – 120°E) 区域平均的 200 hPa 纬向风速定义为东亚副热带急流强度指数。

2.2.2 滑动 t-检验与年代际转折点识别

本文采用 11 a 滑动 t -检验寻找 ENSO 与降水强度关系的年代际变化转折点。滑动 t -检验通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变 (魏凤英, 2007)。对于一个包含 n 个样本量的时间序列 x , 设定某一时刻为基准点, 该点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本量分别为 n_1 和 n_2 , 其平均值分别为 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$, 方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 。 t -检验统计量定义为:

$$t_i = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, i = 1, 2, \dots, n - (n_1 + n_2) + 1,$$

式中: 该统计量遵循自由度为 $n_1 + n_2 - 2$ 的 t 分布, $s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$ 。

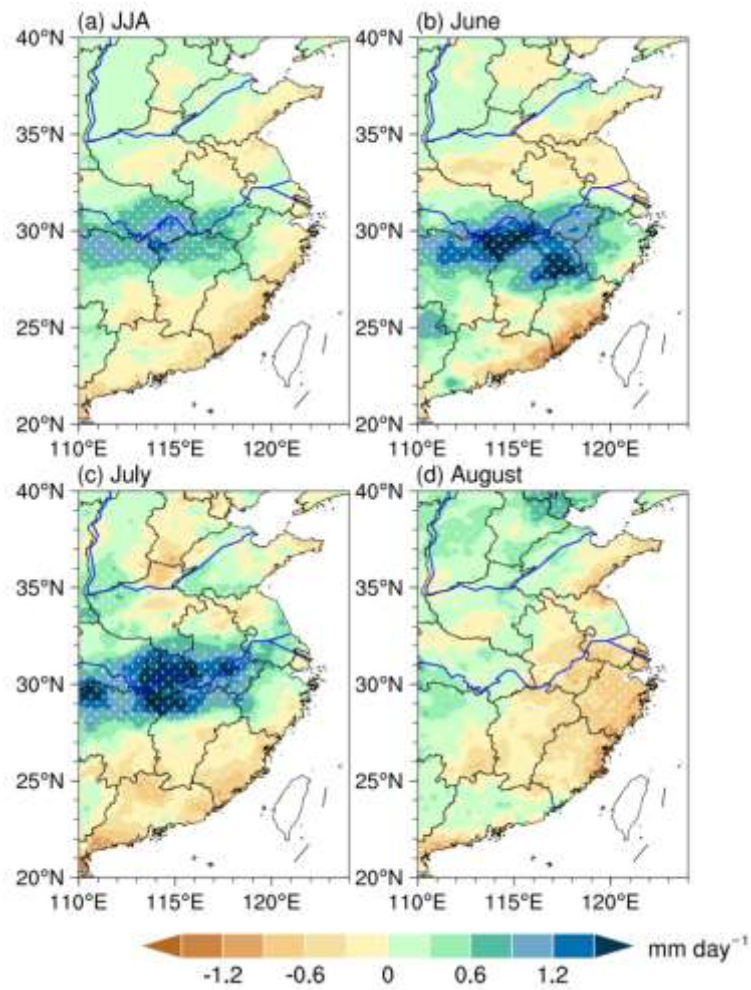
在 11 年滑动 t -检验中, 基准点前后各取 11 a, 即 $n_1 = n_2 = 11$ 。通过不断滑动基准点, 依次计算统计量。在给定的显著性水平 α 下, 根据自由度查找临界值 t_α , 若 $|t_i| < t_\alpha$, 则认为基准点前后两子序列的均值无显著差异; 反之, 则认为在基准点处发生了突变。在识别出的连续突变点中, 选取 $|t_i|$ 峰值对应的时间作为年代际转折点。

2 结果与分析

3.1 ENSO 影响中国东部夏季季节内降水的年代际差异

图 1 展示了 1960–2024 年中国东部夏季逐月和夏季平均降水强度距平回归到标准化的前冬 Niño3.4 指数上的回归系数分布, 由此可以看到 ENSO 事件影响中国东部夏季降水的典型特征。从夏季平均来看, 在 El Niño 事件的影响下, 降水偏多的区域主要集中在长江中下游和华北地区, 而黄淮地区、东南沿海和华南地区降水偏少 (图 1a)。逐月分析显示, El Niño 事件主要有利于次年 6 月长江中下游、江南和华南西部降水偏多, 而华南沿海和淮河流域降水偏少 (图 1b); 在次年 7 月, El Niño 事件使长江中下游及江南北部降水偏多, 而黄淮中部、江南南部和华南地区降水偏少 (图 1c); 至次年 8 月, 降水偏多区域主要出现在黄淮北部、华北和华南西部地区, 而降水偏少区域出现在江南中东部和华南东部地区 (图 1d)。上述结果表明, ENSO 对中国东部夏季雨带的影响具有明显的季节内北推特征, 这与前人研究结论一致 (黄平和黄荣辉, 2010)。黄平和黄荣辉 (2010) 的研究结果还表明, 随着 El Niño 对夏季降水的季节内北推影响, 前夏 (6 月) 和后夏 (8 月) 的降水影响格局在长江中下游及以南地区呈现出近乎相反的空间分布。从本文更长时间范围的结果来看, 这一特征仍基本

成立（图 1b, 1d）。下文将通过展示 ENSO 事件对中国东部夏季季节内降水影响的年代际变化情况，重点针对这一特征的年代际差异进行分析。



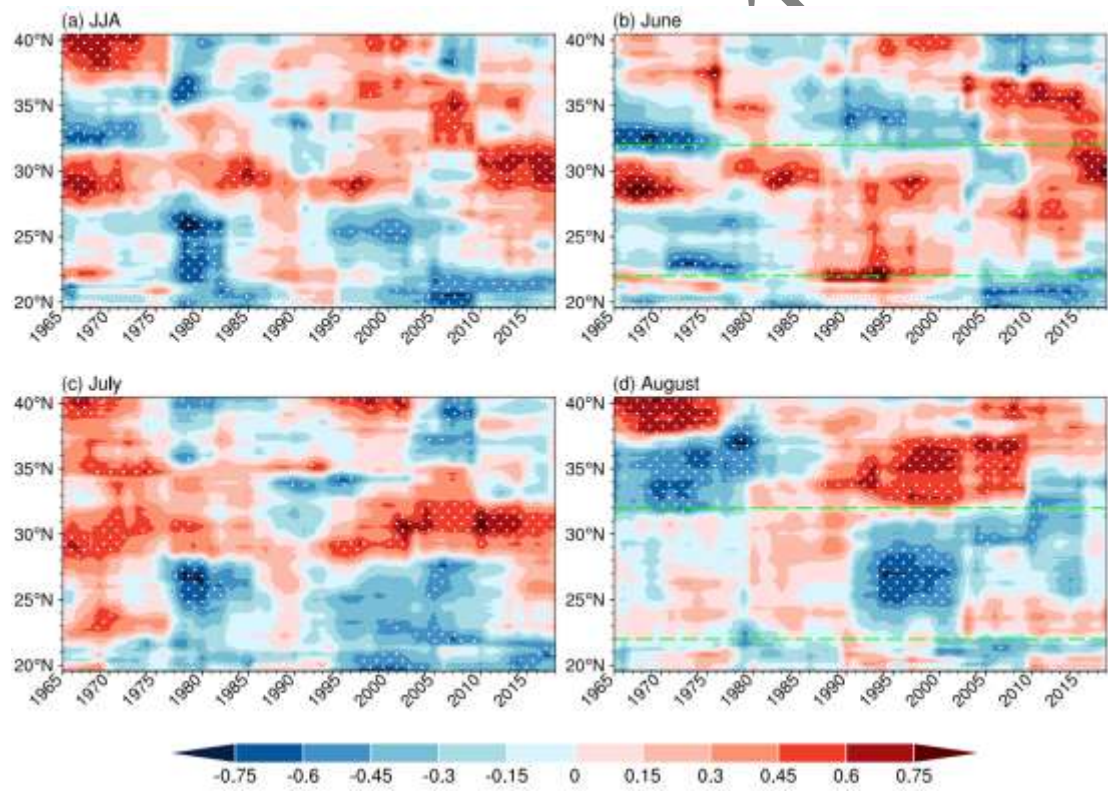
注：白色打点处的统计结果通过 0.1 水平的显著性检验（下同）；审图号：GS（2024）0650 号（下同）。

图 1 1960–2024 年中国东部（a）夏季平均，（b）6 月，（c）7 月和（d）8 月降水强度距平对标准化的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

Fig. 1 Distributions of regression coefficients of precipitation intensity anomalies in (a) summer average, (b) June, (c) July, and (d) August in eastern China against the standardized preceding winter Niño3.4 index for the period 1960–2024

为揭示 ENSO 对中国东部次年夏季季节内降水影响的年代际变化，本文对 1960–2024 年间中国东部夏季季节内降水强度和前冬 Niño3.4 指数进行了 11 a 滑动相关分析（图 2）。

考虑到夏季主雨带具有明显的南北向移动特征，为突出 ENSO 影响我国东部夏季降水在经向上的变化特征，首先对逐月降水强度进行纬向（ $110^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ ）平均处理。ENSO 对中国东部降水的影响在不同月份和纬度上均表现出明显的年代际差异，这些特征难以被单一时段和区域平均结果简单概括。从夏季平均来看，在 $21^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 范围内，ENSO 对降水的影响呈现年代际振荡特征；而在 $27^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 范围内，主要表现为正相关，对应长江中下游地区在 El Niño 事件发生次年夏季的多雨趋势（图 2a）。然而，夏季平均结果掩盖了季节内的特征。逐月分析表明，6 月 ENSO 与长江中下游及以南地区降水的关系在 1985 年后为持续的正相关（图 2b）；7 月正相关主要集中在长江中下游地区，长江以南则以负相关为主（图 2c）；8 月，ENSO 与长江中下游及以南地区降水的关系在 1990 年以前为弱的正相关，之后转为负相关（图 2d）。对比图 2b 和 2d 可以看出，在 $22^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 纬度范围内（覆盖长江中下游及以南地区），1990 年以后，ENSO 对前夏与后夏降水的影响呈现出相反的空间分布。这一反位相影响特征与图 1 所展现的基本特征一致。因此，本文后续主要关注 1990 年以后 ENSO 对降水的影响。

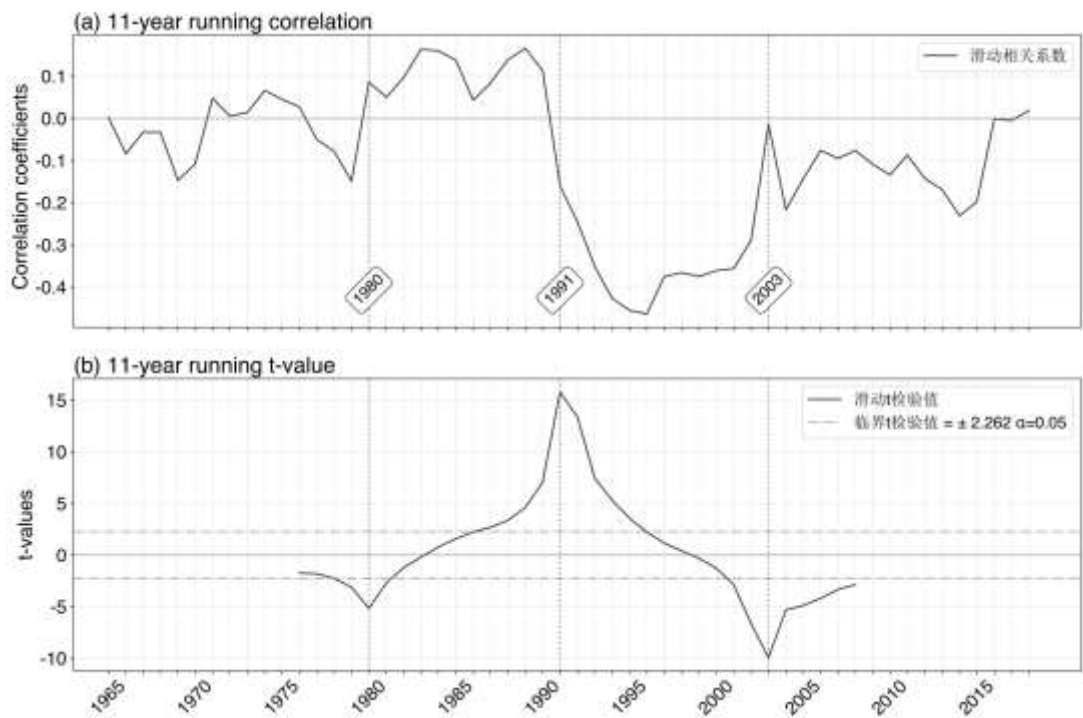


注：图 b 和图 d 中的绿色虚线标识了 22°N 和 32°N 两条纬度线。

图 2 1960–2024 年中国东部 (a) 夏季平均, (b) 6 月, (c) 7 月和 (d) 8 月降水强度经 $110^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 纬向平均后与前冬 Niño3.4 指数的 11 a 滑动相关系数

Fig. 2 The 11-year running correlation coefficients between the precipitation intensity averaged over zonal 110°–124°E in (a) summer average, (b) June, (c) July, and (d) August in eastern China and the preceding winter Niño3.4 index for the period 1960–2024

上述反位相影响关系在 21 世纪 00 年代初期左右发生了明显变化。初期之后, ENSO 事件对长江中下游及以南地区 6 月降水的影响与前期持平, 但对该区域 8 月降水的影响显著减弱 (图 2b, 2d)。为进一步分析, 本文对图 2d 中 22°–32°N 区域平均的滑动相关系数 (图 3a) 进行了 11 a 滑动 t -检验 (图 3b), 结果显示出三个显著的年代际转折点, 分别是 1980 年、1991 年和 2003 年。1980 年前后, ENSO 与次年 8 月长江中下游及以南地区降水的关系由弱负相关转变为弱正相关; 1991 年前后, 又转变为显著负相关; 2003 年前后, 再此转变为弱负相关。An and Wang (2000)、Xie et al (2010)、Hu et al (2020) 和 Liu et al (2024) 研究表明, ENSO 与东亚夏季风关系的年代际变化可能受到 ENSO 自身年代际变化的调控。图 3b 中 ENSO 与次年 8 月降水的关系在 1980 年与 2003 年的年代际转折点, 可能分别与 ENSO 在 20 年代 70 年代中后期与 21 世纪 00 年代初期的年代际变化有关。本文结合前文分析与上述转折点, 将后续研究时段设定为 1991–2024 年, 并将其划分为 1991–2003 年与 2004–2024 年两个子时段进行对比分析。此外, 我们对图 2b 中两子时段的经向平均 (22°–32°N) 的相关系数时间序列进行了均值差异检验。统计结果表明, 6 月的相关系数在两时段的均值并未发生显著变化, 与前文分析结果一致。



注：图 a 中标注的时间为年代际转折时间。临界 t -检验值对应 0.05 水平的显著性检验。

图 3 (a) 图 2d 中滑动相关系数在 22° – 32° N 的区域平均结果及 (b) 其 11 a 滑动 t -检验值

Fig. 3 (a) Regional average of the running correlation coefficients over 22° – 32° N from Fig. 2d, and (b) the corresponding 11-year running t -test values

据此，本文分别将两时段的 6 月和 8 月降水强度回归到前冬 $\text{Ni}\tilde{\text{ño}}3.4$ 指数上（图 4），以便更清晰地看到 ENSO 事件对两时段降水的影响差异。1991–2003 年期间，El Niño 事件有利于次年 6 月长江、江南和华南大部分地区降水偏多（图 4a），8 月长江中下游及以南地区则降水偏少（图 4b）。2004–2024 年期间，El Niño 事件仍有利于次年 6 月长江中下游及以南地区（除华南沿海外）降水偏多（图 4c）。但由于二者在 8 月的关系减弱，El Niño 不利于长江以南地区降水偏少，降水偏少区域仅局限于江南东部（图 4d）。总结来说，ENSO 对长江中下游及以南地区前夏与后夏降水反位相影响的年代际差异主要体现在 8 月的影响减弱上。下文将从海温和环流角度，重点针对这一变化进行深入分析。

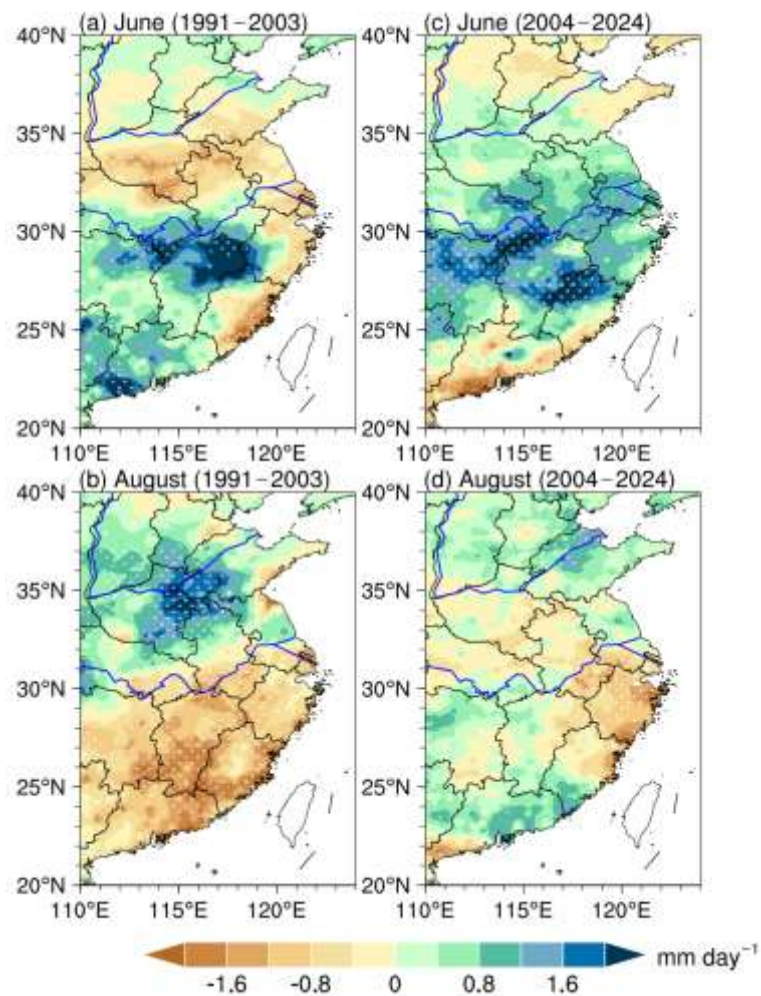


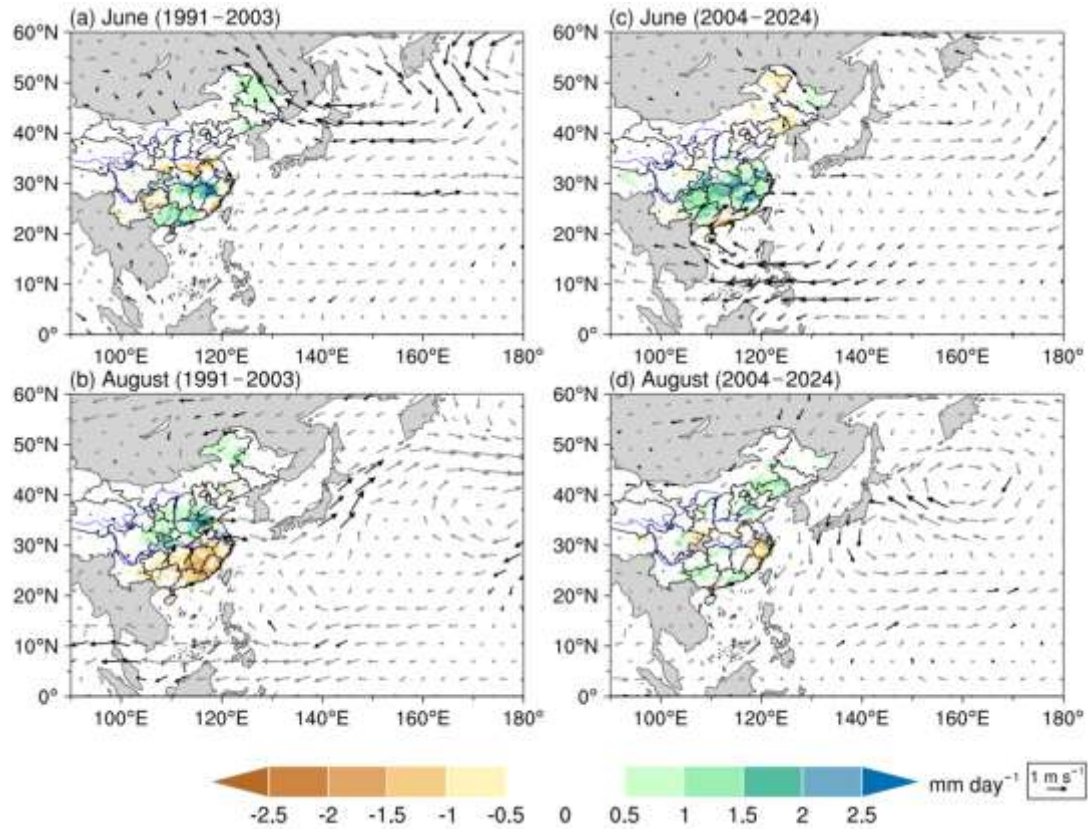
图 4 (a, b) 1991–2003 年, (c, d) 2004–2024 年中国东部 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月降水强度距平对标准化前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

Fig. 4 Distributions of regression coefficients of precipitation intensity anomalies in eastern China in (a, c) June and (b, d) August against the standardized preceding winter Niño3.4 index for the periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

3.2 WNPAC 的变化

WNPAC 是东亚夏季风低层环流年际变率的主要模态。ENSO 在其衰减年通过调控 WNPAC, 对东亚地区降水分布产生重要影响 (Zhang et al, 1999, 2017; Chang et al, 2000; Wang et al, 2000)。本文进一步分析了与 ENSO 事件相关的 WNPAC 情况。1991–2003 年期间, 6 月 WNPAC 西侧的水汽输送使长江中下游及以南地区普遍降水偏多 (图 5a); 8 月 WNPAC

217 中心偏西，同时向北偏移，控制长江中下游及以南地区，导致该区域出现大范围降水偏少（图
218 5b）。与 1991–2003 年相比，2004–2024 年 6 月 WNPAC 范围收缩，中心偏西，其西北侧的
219 西南水汽输送直达长江中下游及以南地区，有利于降水增强（图 5c）；然而 8 月 WNPAC 瓦
220 解并转为异常气旋式环流，对长江中下游及以南地区降水影响减弱，导致降水偏少的范围显
221 著缩小（图 5d）。



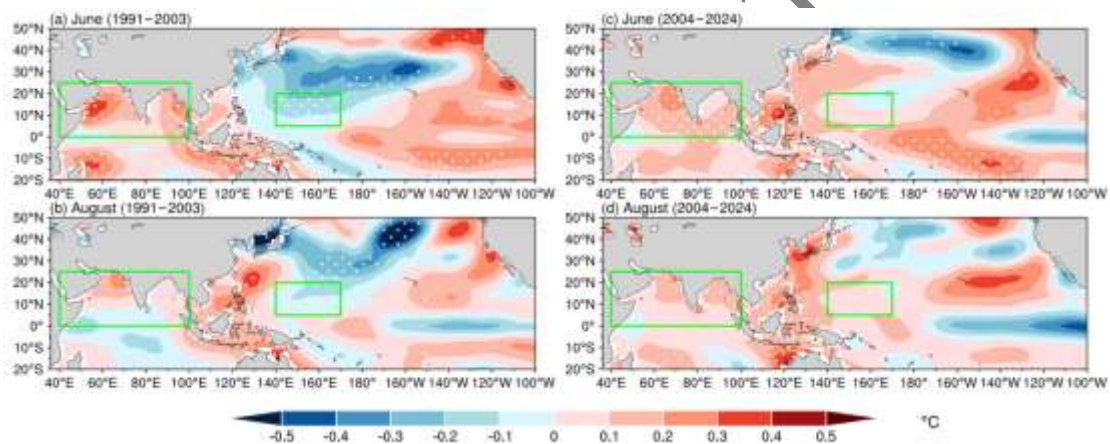
223 注：黑色矢量的统计结果通过 0.1 水平的显著性检验（同下文）。

224 图 5 (a, b) 1991–2003, (c, d) 2004–2024 年 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月降水强度距平（填色）和 850 hPa
225 风场距平（矢量）对标准化的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

226 Fig. 5 Distributions of regression coefficients of precipitation intensity anomalies (colored) and 850 hPa wind
227 anomalies (vector) in (a, c) June and (b, d) August against the standardized preceding winter Niño3.4 index for the
228 periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

230 El Niño 引发的 NIO 海温增暖与 WNP 海温冷却对次年夏季 WNPAC 及东亚夏季风具有
231 显著支撑作用 (Wang et al, 2000; Xie et al, 2009)。1991–2003 年期间, 6 月 NIO 显著增暖,
232 同时 WNP 明显降温, 热带中东太平洋仍然维持增暖状态 (图 6a)。在 WNP 冷海温的调制
233 下, 风–蒸发–海温正反馈作用显著, 与 NIO 增暖共同支撑了 WNPAC。至 8 月, NIO 正异
234 常海温与 WNP 负异常海温虽有减弱但仍然维持 (图 6b), 有利于 WNPAC 在 8 月持续存在
235 (图 5b)。

236 2004–2024 年期间, 6 月 NIO 海温增暖和 WNP 海温冷却的程度均弱于前一时期, 且热
237 带中东太平洋海温已经从正异常衰减并发展为负异常, 不利于 NIO 增暖的维持 (图 6c)。到
238 8 月, NIO 增暖进一步衰减, 且 WNP 海温负异常已完全转变为正异常 (图 6d)。WNP 南侧
239 的正异常海温增大了海气温度差和湿度差, 降低了对流层低层大气的层结稳定度, 促进了对
240 流发展, 从而不利于 WNPAC 的维持 (唐颖苏等, 2019)。此时仅有的弱 NIO 正异常海温不
241 足以支撑维持 WNPAC, 导致 8 月 WNP 环流异常由反气旋式转为气旋式 (图 5d)。



242 注: 绿色方框为北印度洋 (NIO) 范围 (0°–25°N, 40°–100°E) 和西北太平洋 (WNP) 范围 (5°–20°N, 140°–170°E)。
243

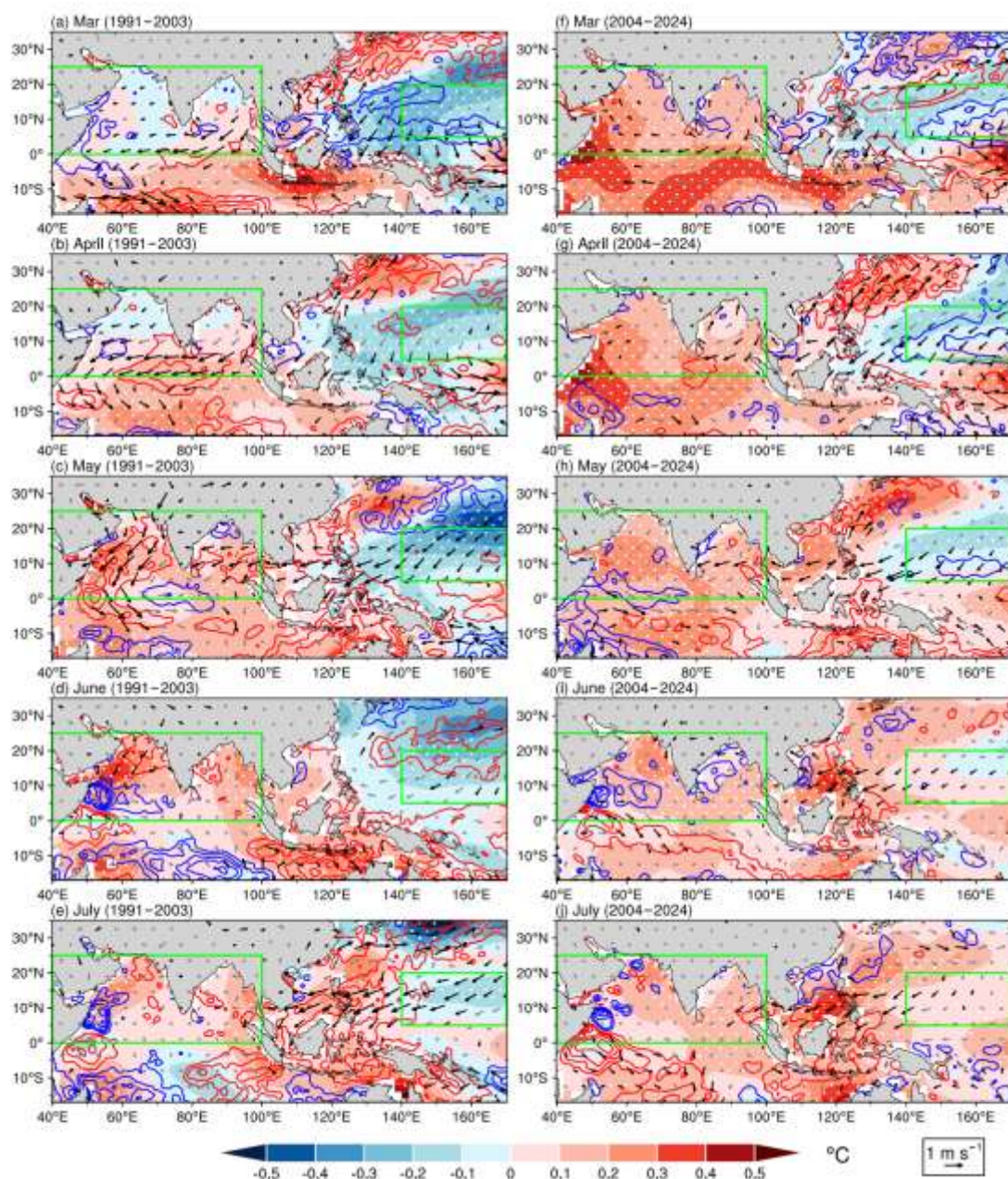
244 图 6 (a, b) 1991–2003, (c, d) 2004–2024 年 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月海温距平对标准化的前冬 Niño3.4
245 指数的回归系数分布

246 Fig. 6 Distributions of regression coefficients of SST anomalies in (a, c) June and (b, d) August against the
247 standardized preceding winter Niño3.4 index for the periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

248 图 7 展示了 ENSO 事件次年 3–7 月海温、风场以及潜热通量异常的发展演变。1991–2003
249 年期间, 从 3–4 月, WNP 海温负异常和东风异常略有减弱; 但至 5 月, WNP 海温负异常重

新增强，东风异常也随之加强（图 7a-7c）。从 3-7 月，WNP 负异常海温持续稳定维持（图 7a-7e）。在此期间，WNP 的东风异常引起潜热通量增强，促进冷海温发展，而冷海温反过来又能够抑制局地对流，有利于异常反气旋的维持（Wang et al, 2000）。根据 IPOC 理论，WNP 冷海温还可以通过增强从 WNP 延伸至 NIO 的东风异常，影响 El Niño 衰减年春季的 NIO 反馈过程。从 3-5 月，随着 WNP 东风异常增强，NIO 海温正异常逐渐发展，并在 6 月达到较强水平（图 7a-7d）。这一增强的热带印度洋响应为 WNPAC 提供了直接支持。尽管 WNP 海温负异常和 NIO 海温正异常分别在 6 月和 7 月开始削弱（图 7d, 7e），但二者的海温异常仍维持至 8 月，为 WNPAC 的维持提供了条件。

与前一阶段相比，2004-2024 年期间 NIO 暖海温在前期较强，而 WNP 海温负异常总体偏弱（图 7f-7j）。NIO 海温正异常在 3-5 月相对较强，此后逐渐衰减。WNP 冷海温自 3 月起偏弱，至 7 月已完全消失。在此期间，WNP 区域的潜热通量异常以负值为主，潜热耗散减少，不利于负异常海温的维持，此外该区域的东风异常也较前一阶段偏弱。在此配置下，仅靠较弱的 NIO 暖海温无法维持 WNPAC，至 8 月 WNPAC 已经消失并转变为异常气旋式环流，这与 WNP 地区的正异常海温相对应。



注：绿色方框为北印度洋（NIO）范围（0°–25°N，40°–100°E）和西北太平洋（WNP）范围（5°–20°N，140°–170°E）。

图7 (a–e) 1991–2003, (f–j) 2004–2024 年 (a, f) 3 月, (b, g) 4 月, (c, h) 5 月, (d, i) 6 月和 (e, j) 7 月海温距平（填色）、潜热通量距平（等值线，间隔为 4，单位： W m^{-2} ）、10 m 风场距平（矢量）对标准化
的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

Fig. 7 Distributions of regression coefficients of SST anomalies (colored), latent heat flux anomalies (contour, with intervals of 4, unit: W m^{-2}), and 10 m wind anomalies (vector) in (a, f) March, (b, g) April, (c, h) May, (d, i) June,

and (e, j) July against the standardized preceding winter Ni ño3.4 index for the periods (a–e) 1991–2003 and (f–j) 2004–2024

3.3 中高层环流配置的变化

在经向上, WNPAC 与北侧的气旋式环流共同构成东亚–太平洋 (East Asia–Pacific, EAP) (Huang and Wu, 1989) /太平洋–日本 (Pacific–Japan, PJ) (Nitta, 1987) 遥相关型, 在 500 hPa 位势高度异常场上表现为“+–”型遥相关波列 (宗海锋等, 2008; 陶丽等, 2017; Liu et al, 2018; 李建平等, 2025)。EAP 型与东亚夏季风关系密切, 对东亚地区夏季降水具有重要影响。图 8 展示了与 ENSO 事件相关的次年 6 月和 8 月 500 hPa 位势高度场异常。1991–2003 年期间, 6 月 EAP 遥相关型中的气旋式环流中心位于贝加尔湖附近, 其环流覆盖我国华北和东北地区, 有利于冷空气南下, 从而引起南方降水 (图 8a)。至 8 月, 该气旋式环流向东北方向移动, 我国南方转为受反气旋式环流控制, 降水北移至黄淮地区 (图 8b)。2004–2024 年期间, 6 月气旋式环流中心较前一阶段偏北, 我国大部分区域受反气旋式环流覆盖, 长江中下游及江南地区受反气旋式环流西北侧的偏南气流影响有降水活动 (图 8c)。至 8 月, 反气旋式环流向北移动, 在日本以南出现弱气旋式环流, 华东地区受该气旋式环流西北侧的东北气流影响, 降水减少 (图 8d)。从遥相关型结构来看, 1991–2003 年 6 月、8 月以及 2004–2024 年 6 月, 500 hPa 位势高度场异常在东亚–西太平洋地区均呈现清晰的“+–”型遥相关波列 (图 8a–8c)。然而, 2004–2024 年 8 月的遥相关型与 1991–2003 年同期相比发生显著变化, 转变为“–+”型 (图 8d)。

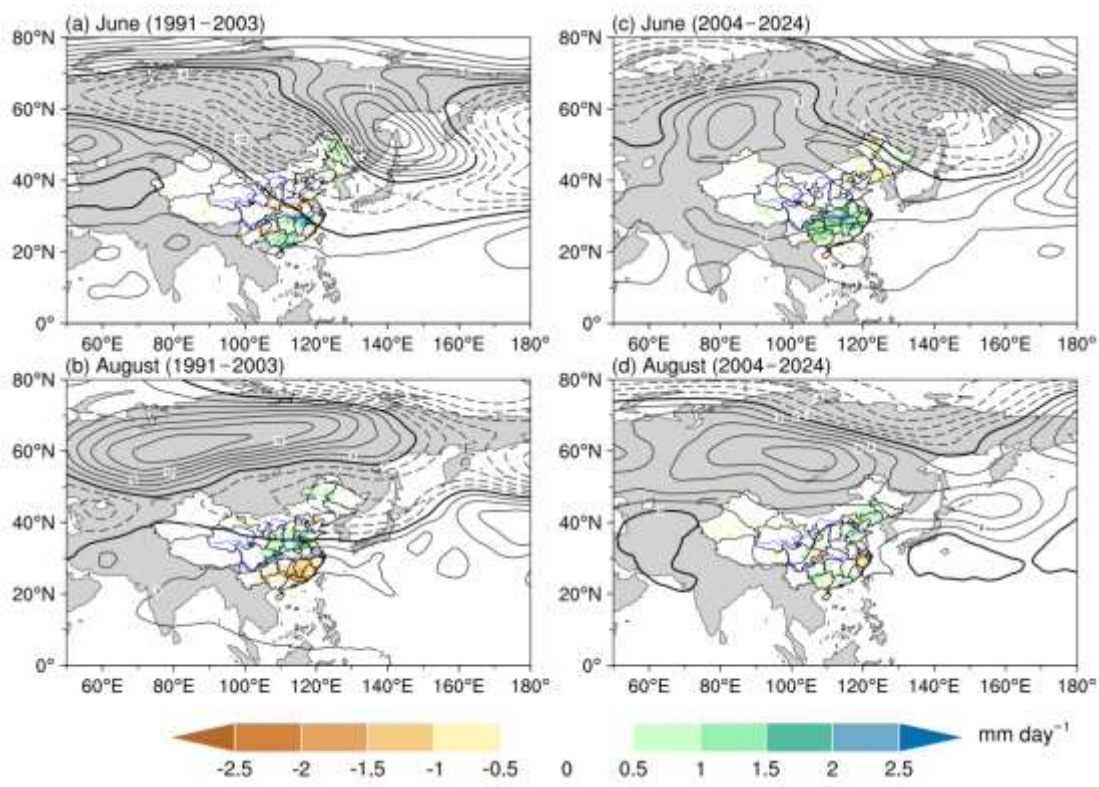


图 8 (a, b) 1991–2003 年, (c, d) 2004–2024 年 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月降水强度距平 (填色) 和 500 hPa 位势高度距平 (等值线, 间隔为 3 gpm) 对标准化的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

Fig. 8 Distributions of regression coefficients of precipitation intensity anomalies (colored) and 500 hPa geopotential height anomalies (contour, with intervals of 3 gpm) in (a, c) June and (b, d) August against the standardized preceding winter Niño3.4 index for the periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

东亚副热带西风急流对东亚地区的天气和气候具有重要影响,在夏季表现出明显的季节内向北推进特征,与中国东部雨带的季节性迁移密切相关(李崇银等, 2004)。本文通过将 200 hPa 纬向风异常回归到前冬 Niño3.4 指数上,进一步对比分析两时段对流层高层大气环流特征的差异。在 El Niño 次年夏季,1991–2003 年和 2004–2024 年 6 月,中国东部地区 200 hPa 纬向风均呈现增强,表明西风急流增强(图 9a,9c)。至 8 月,急流轴向北移至 40°N 附近(王梦遥, 2025)。1991–2003 年期间,8 月 200 hPa 纬向风增强,对应西风急流增强(图 9b),然而在 2004–2024 年 8 月,西风急流则出现减弱(图 9d)。

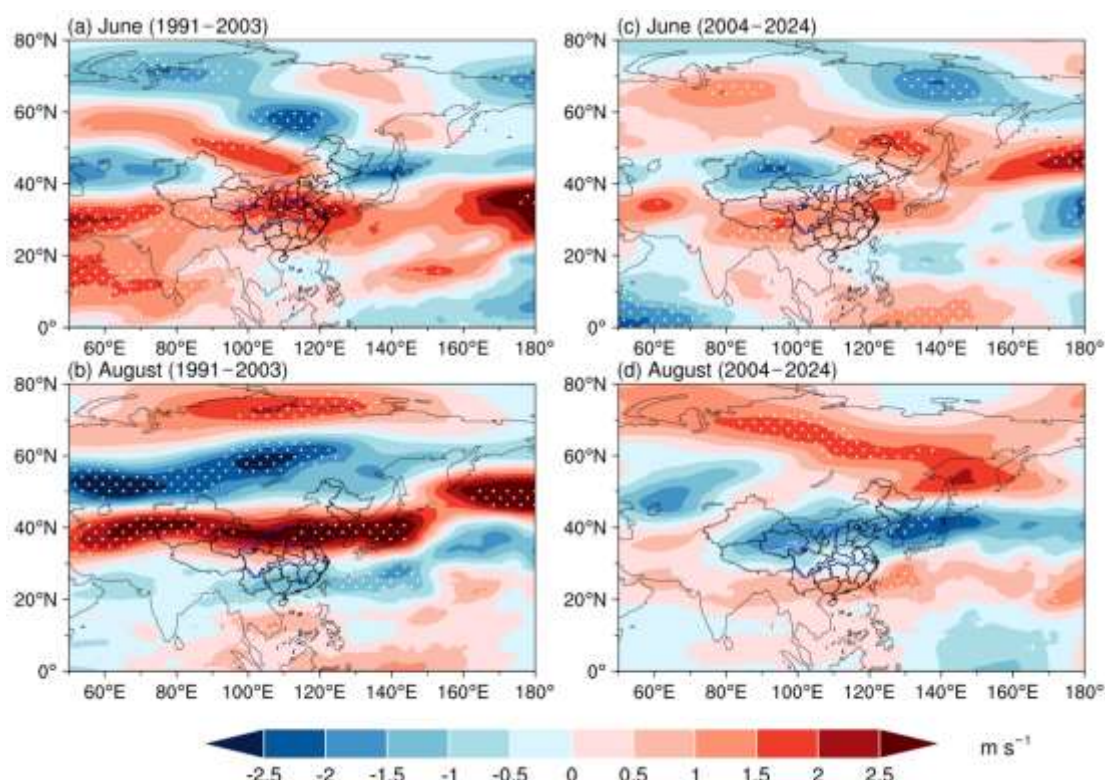
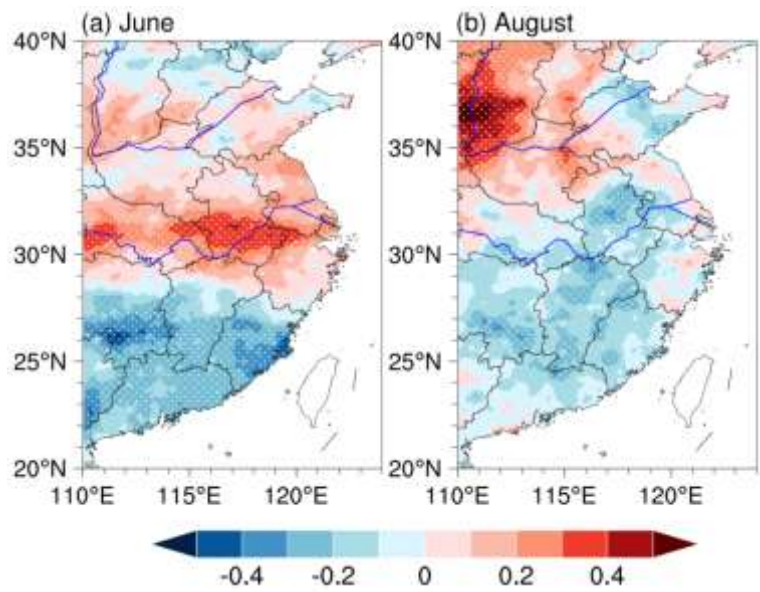


图9 (a, b) 1991–2003, (c, d) 2004–2024 年 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月 200 hPa 纬向风距平对标准化的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

Fig. 9 Distributions of regression coefficients of 200 hPa zonal wind anomalies in (a, c) June and (b, d) August against the standardized preceding winter Niño3.4 index for the periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

图 10 展示了 1960–2024 年期间夏季东亚副热带西风急流强度变化对中国东部同期夏季降水的影响。结果显示, 6 月急流偏强可能引起长江中下游地区降水偏多, 江南南部和华南地区降水偏少 (图 10a); 8 月急流偏强可能导致长江中下游及以南地区降水偏少, 黄淮北部降水偏多 (图 10b)。本文进一步统计了两时段 6 月和 8 月东亚副热带西风急流强度指数与前冬 Niño3.4 指数的相关性 (表 1)。其中, 仅 8 月的相关系数通过显著性检验。1991–2003 年期间, 8 月的相关系数为 0.55, 表明该时段 El Niño 事件次年 8 月西风急流增强 (图 9b), 其增强可能引起长江中下游及以南区域出现大范围少雨 (图 10b, 图 4b)。然而, 2004–2024 年期间, 8 月的相关系数转变为-0.41, 说明该时段 El Niño 事件次年 8 月西风急流减弱 (图

318 9d), 可能引起长江中下游及以南地区降水偏多 (图 10b), 从而不利于该区域 8 月出现大范
319 围降水偏少情况 (图 4d)。



320

321 图 10 1960–2024 年东亚副热带西风急流强度指数与中国东部 (a) 6 月和 (b) 8 月降水强度的同期相关

322 Fig. 10 Simultaneous correlation between the East Asian subtropical westerly jet intensity index and the
323 precipitation intensity in eastern China for (a) June and (b) August during 1960–2024

324 表 1 6 月和 8 月东亚副热带急流强度指数与前冬 Niño3.4 指数的相关系数

325 Table 1 Correlation coefficients between the East Asian subtropical jet intensity index in June and August and the
326 preceding winter Niño3.4 index

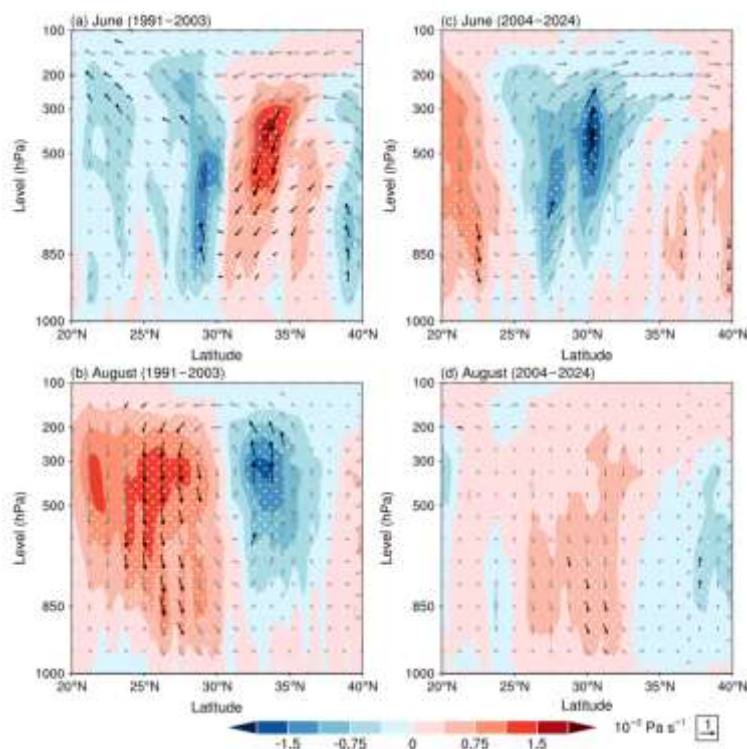
时间段	6 月相关系数	8 月相关系数
1991–2003 年	0.44	0.55**
2004–2024 年	−0.07	−0.41*

327

注: **和*分别表示相关系数通过 0.05 和 0.10 水平的显著性检验。

328 图 11 进一步展示了与前冬 Niño3.4 指数相关的 6 月和 8 月中国东部垂直环流特征。
329 1991–2003 年期间, 6 月长江中下游及以南地区呈现显著上升运动 (图 11a), 有利于降水偏
330 多 (图 4a); 而 8 月则表现为一致的下沉运动 (图 11b), 对应大范围的降水偏少 (图 4b)。
331 2004–2024 年期间, 6 月长江中下游及以南地区上升运动较前一阶段增强 (图 11c); 然而,

332 8月的下沉运动却明显减弱（图 11d），不利于出现降水偏少现象（图 4d）。与前冬 ENSO 事
 333 件相关的长江中下游及以南地区 8 月垂直环流在强度上存在明显的年代际差异。



334
 335 图 11 (a, b) 1991–2003 年, (c, d) 2004–2024 年中国东部 (a, c) 6 月和 (b, d) 8 月 110°–124°E 平均的垂
 336 直风速距平 (填色) 和经向–垂直风速距平 (矢量) 对标准化的前冬 Niño3.4 指数的回归系数分布

337 Fig. 11 Distributions of regression coefficients of vertical velocity anomalies averaged over zonal 110 °–124 °E
 338 (colored) and meridional–vertical velocity anomalies (vector) in (a, c) June and (b, d) August against the
 339 standardized preceding winter Niño3.4 index for the periods (a, b) 1991–2003 and (c, d) 2004–2024

341 3 结论和讨论

342 本文研究了 1991–2024 年期间 ENSO 事件对中国东部次年夏季季节内降水影响的年代际
 343 差异。1991–2024 年期间, El Niño 对次年 6 月和 8 月长江中下游及以南地区降水大致呈现
 344 相反的影响特征: 6 月降水偏多, 而 8 月降水偏少。这一反位相影响关系在 21 世纪 00 年代
 345 初期发生了年代际转变。统计结果表明, 2003 年之后, ENSO 与 6 月长江中下游及以南降

水的关系变化不大，但与 8 月该区域降水的关系明显减弱。在此变化下，ENSO 事件对 8 月该区域降水的影响范围显著缩小。

通过对比 1991–2003 年与 2004–2024 年两个子时段，本文重点从与 ENSO 事件相关的海温与环流变化的角度，分析了 ENSO 影响次年 8 月长江中下游及以南地区降水的年代际差异原因。与前一时段相比，2004–2024 年 8 月热带中东太平洋海温正异常衰减并转变为负异常，不利于 NIO 区域暖海温维持。此外，在东风异常减弱、潜热耗散减少的作用下，WNP 区域海温由负异常转变为正异常。上述海温变化共同导致 WNPAC 难以维持，并转变为气旋式环流，不利于长江中下游及以南地区降水偏少。在中高层环流方面，2004–2024 年 8 月 500 hPa 位势高度异常场显示，东亚–太平洋遥相关型发生了反转，由“+”型转变为“−”型；200 hPa 上东亚副热带西风急流减弱，均不利于长江中下游及以南地区降水偏少。

本文主要采用相关或回归方法研究 ENSO 与中国东部降水的关系，以反映二者之间的线性关系。回归结果体现了 El Niño 事件的影响，La Niña 事件的影响可简单理解为与之相反的情况。然而，ENSO 作为非线性系统，El Niño 与 La Niña 在振幅、持续时间与位相转换等方面都表现出显著的非对称性 (Hoerling et al, 1997; An and Jin, 2004; Zhang et al, 2014; Chen et al, 2016; An and Kim, 2018; Song et al, 2022; Huang et al, 2024)。因此，二者在气候影响上也同样存在非对称性 (李天然等, 2017; 姚睿等, 2019; Liu et al, 2024)。Liu et al (2024) 的研究表明，El Niño 与 La Niña 事件在发展及衰减过程中，均会诱发非对称的环流响应，进而使得东亚地区的降水异常分布呈现出明显的非对称特征。在后续研究中，我们将进一步深入探讨 ENSO 影响季节内降水的年代际变化及其对降水产生的非对称影响。

本文揭示的 ENSO 对长江中下游及以南地区前夏和后夏降水反位相影响的年代际差异，可能与 ENSO 和东亚夏季风关系的年代际变化有关。Yu et al (2025) 指出，21 世纪 00 年代初期以来 ENSO 对东亚夏季风的影响减弱，这一特征在 ENSO 衰减年的 8 月最为显著。受此影响，次年 8 月长江中下游及其以南地区降水对 ENSO 的响应也随之减弱(图 2d, 图 4d)。前人研究还表明，ENSO 与 EAP/PJ 遥相关型的关系同样具有年代际变化(Kubota et al, 2016)。然而以往研究多关注夏季平均情况，本文表明 ENSO 与 EAP/PJ 遥相关型的关系在月际尺度上可能存在差异。2004–2024 年期间，8 月西太平洋地区 500 hPa 位势高度场对前冬 Niño3.4 指数的响应转变为“+”型，可能发生了年代际反转 (图 8d)，其中的具体过程值得未来深入研究。此外，以往关于 ENSO 影响副热带急流的研究多聚焦于 ENSO 发展年冬季(Wang et al,

2021; Mao and Zhu, 2024)。本文表 1 的结果表明, 8 月东亚副热带急流与前冬 Niño3.4 指数具有较为显著的相关性, 而 6 月相关性却不显著, 显示出一定的月际差异。ENSO 对次年东亚副热带急流的影响机制亦值得在未来进一步探讨。

参考文献

- 卜文惠, 陈昊明, 李普曦, 2023. 江淮流域大范围雨带降水的精细化特征研究[J]. 气象学报, 81(3): 361-374. Bu W H, Chen H M, Li P X, 2023. Refined characteristics of precipitation and circulation in large-scale rainbelts derived from CMPAS and ERA5 over the Yangtze-Huaihe river valley[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 361-374 (in Chinese).
- 陈文, 于甜甜, 冯娟, 等, 2024. 东亚夏季风与热带海气相互作用研究进展[J]. 大气科学, 48(1): 160-187. Chen W, Yu T T, Feng J, et al, 2024. Progress in the study of the impacts of tropical air-sea interactions on the East Asian summer monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 48(1): 160-187 (in Chinese).
- 黄平, 黄荣辉, 2010. El Niño 事件对其衰减阶段夏季中国降水季节内演变的影响及其机理[J]. 大气科学学报, 33(5): 513-519. Huang P, Huang R H, 2010. Effects of El Niño events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism[J]. Trans Atmos Sci, 33(5): 513-519 (in Chinese).
- 况雪源, 张耀存, 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响[J]. 高原气象, 25(3): 382-389. Kuang X Y, Zhang Y C, 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River[J]. Plateau Meteor, 25(3): 382-389 (in Chinese).
- 李崇银, 王作台, 林士哲, 等, 2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学, 28(5): 641-658. Li C Y, Wang J T, Lin S Z, et al, 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location[J]. Chin J Atmos Sci, 28(5): 641-658 (in Chinese).
- 李建平, 陈文, 周天军, 等, 2025. 认识大气环流和气候系统动力学 100 年进步[J]. 气象学报, 83(3): 582-636. Li J P, Chen W, Zhou T J, et al, 2025. Progress in atmospheric circulation and climate system dynamics research in China over the past century[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 582-636 (in Chinese).
- 李天然, 张人禾, 温敏, 2017. ENSO 对中国冬半年降水影响的不对称性及机制分析[J]. 热带气象学报, 33(1): 1-10. Li T R, Zhang R H, Wen M, 2017. Impact of ENSO on the precipitation over China in winter half year[J]. J Trop Meteor, 33(1): 1-10 (in Chinese).
- 罗连升, 汪翔加, 程智, 等, 2025. 厄尔尼诺开始早晚对中国夏季降水的影响[J]. 气象, 51(10): 1182-1192. Luo L S, Wang X J, Cheng Z, et al, 2025. Impact of early and late onset of El Niño on summer precipitation in China[J]. Meteor Mon, 51(10): 1182-1192 (in Chinese).
- 孙晨, 杨青青, 吴碧琼, 等, 2025. BCC-CPSv3 次季节降水预测在长江流域汛期的检验评估[J]. 气象, 51(6): 724-734. Sun C, Yang Q Q, Wu B Q, et al, 2025. Performance evaluation of BCC-CPSv3 subseasonal precipitation prediction in the flood season of the Yangtze River Basin[J]. Meteor Mon, 51(6): 724-734 (in Chinese).
- 唐颖苏, 胡开明, 黄刚, 2019. El Niño 衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制[J]. 气候与环境研究, 24(4): 525-536. Tang H S, Hu K M, Huang G, 2019. Characteristics and mechanisms of sub-seasonal evolution of Northwest Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer[J]. Climatic Environ Res, 24(4): 525-536 (in Chinese).
- 陶丽, 柯元惠, 赵久伟, 2017. 东亚夏季 PJ 遥相关型的年际及年代际变化机理[J]. 大气科学学报, 40(5): 619-630. Tao L, Ke Y H, Zhao J W, 2017. The interannual and interdecadal variation mechanism of the summer PJ teleconnection pattern in East Asia[J]. Trans Atmos Sci, 40(5): 619-630 (in Chinese).
- 王梦遥, 2025. 夏季东亚副热带急流位置与我国降水的关系及其对海温的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang M Y, 2025. Relationship between the position of the East Asian subtropical jet in summer and precipitation in China and its response to sea surface temperature[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).

- 王婷, 祝从文, 马双梅, 2024. 东亚夏季风和中国雨季的趋势变化和关键区气温和海温的影响[J]. 大气科学, 48(3): 1217-1232.
- Wang T, Zhu C W, Ma S M, 2024. Changes in the East Asian summer monsoon and rainy season in China and critical impacts of regional air and sea surface temperature anomalies[J]. Chin J Atmos Sci, 48(3): 1217-1232 (in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第2版[M]. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern Statistical Diagnostic and Prediction Techniques for Climate[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 徐博阳, 张荣华, 吴敏敏, 等, 2025. 两类 El Niño 与长江中下游降水年际变化的协同演变[J]. 大气科学, 49(5): 1475-1494. Xu B Y, Zhang R H, Wu M M, et al, 2025. Synergistic interannual evolution of two types of El Niño and precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chin J Atmos Sci, 49(5): 1475-1494 (in Chinese).
- 徐同, 王琴, 漆梁波, 等, 2025. CMA-MESO 和 CMA-SH9 模式对中国东部地区降水预报的性能检验[J]. 气象, 51(2): 167-181. Xu T, Wang Q, Qi L B, et al, 2025. Verification of CMA-MESO and CMA-SH9 models for precipitation forecast in eastern China[J]. Meteor Mon, 51(2): 167-181 (in Chinese).
- 姚睿, 郑小童, 蒋灏, 等, 2019. ENSO 非对称性对热带降水的影响研究[J]. 海洋预报, 36(1): 59-68. Yao R, Zheng X T, Jiang H, et al, 2019. The influence of ENSO asymmetry on tropical precipitation[J]. Mar Forecasts, 36(1): 59-68 (in Chinese).
- 宗海峰, 张庆云, 陈烈庭, 2008. 东亚-太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究[J]. 大气科学, 32(2): 220-230. Zong H F, Zhang Q Y, Chen L T, 2008. A study of the processes of East Asia - Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 220-230 (in Chinese).
- An S I, Wang B, 2000. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency[J]. J Climate, 13(12): 2044-2055.
- An S I, Jin F F, 2004. Nonlinearity and asymmetry of ENSO[J]. J Climate, 17(12): 2399-2412.
- An S I, Kim J W, 2018. ENSO transition asymmetry: internal and external causes and intermodel diversity[J]. Geophys Res Lett, 45(10): 5095-5104.
- Cai W J, Santoso A, Collins M, et al, 2021. Changing El Niño-Southern Oscillation in a warming climate[J]. Nat Rev Earth Environ, 2(9): 628-644.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T, 2000. 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.
- Chen M C, Li T, Shen X Y, et al, 2016. Relative roles of dynamic and thermodynamic processes in causing evolution asymmetry between El Niño and La Niña[J]. J Climate, 29(6): 2201-2220.
- Ding R Q, Ha K J, Li J P, 2010. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean[J]. Climate Dyn, 34(7-8): 1059-1071.
- Ding Y H, Chan J C L, 2005. The East Asian summer monsoon: an overview[J]. Meteor Atmos Phys, 89(1): 117-142.
- Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z, 2021. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies[J]. Adv Atmos Sci, 38(12): 1980-1993.
- Du Y, Xie S P, Huang G, et al, 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean warming[J]. J Climate, 22(8): 2023-2038.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2019. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present[EB/OL]. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store. <http://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>.
- Hoerling M P, Kumar A, Zhong M, 1997. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections[J]. J Climate, 10(8): 1769-1786.
- Hu J, Miao C, 2023. CHM_PRE V2: an upgraded high-precision gridded precipitation dataset for the Chinese mainland considering spatial autocorrelation and covariates[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. <http://doi.org/10.11888/Atmos.tpcd.300523>.
- Hu Z Z, Kumar A, Huang B H, et al, 2020. The interdecadal shift of ENSO properties in 1999/2000: a review[J]. J Climate, 33(11): 4441-4462.

- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *J Climate*, 30(20): 8179-8205.
- Huang G, Hu K M, Xie S P, 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the northwest Pacific since the mid-1970s: an atmospheric GCM study[J]. *J Climate*, 23(19): 5294-5304.
- Huang P, Chen Y, Li J B, et al, 2024. Redefined background state in the tropical Pacific resolves the entanglement between the background state and ENSO[J]. *npj Clim Atmos Sci*, 7(1): 147.
- Huang R H, Wu Y F, 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. *Adv Atmos Sci*, 6(1): 21-32.
- Huang R H, Chen J L, Huang G, 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 24(6): 993-1023.
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N C, et al, 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110(19): 7574-7579.
- Kubota H, Kosaka Y, Xie S P, 2016. A 117-year long index of the Pacific-Japan pattern with application to interdecadal variability[J]. *Int J Climatol*, 36(4): 1575-1589.
- Liu B, Huang G, Hu K M, et al, 2018. The multidecadal variations of the interannual relationship between the East Asian summer monsoon and ENSO in a coupled model[J]. *Climate Dyn*, 51(5-6): 1671-1686.
- Liu Y, Yuan S S, Zhu Y, et al, 2023. The patterns, magnitude, and drivers of unprecedented 2022 mega-drought in the Yangtze River Basin, China[J]. *Environ Res Lett*, 18(11): 114006.
- Liu Y Y, Hu Z Z, Wu R G, et al, 2024. Evolution of ENSO-related seasonal precipitation anomalies in East Asia: a robustness revisit[J]. *Int J Climatol*, 44(1): 269-285.
- Mao J D, Zhu Z W, 2024. Change of boreal winter dominant ENSO teleconnection modulated by the East Asian westerly jet strength[J]. *Climate Dyn*, 62(7): 6985-7000.
- McPhaden M J, 2012. A 21st century shift in the relationship between ENSO SST and warm water volume anomalies[J]. *Geophys Res Lett*, 39(9): L09706.
- Nitta T, 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation[J]. *J Meteor Soc Japan*, 65(3): 373-390.
- Song X M, Zhang R H, Rong X Y, 2022. Dynamic causes of ENSO decay and its asymmetry[J]. *J Climate*, 35(2): 445-462.
- 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.
- Wang B, Yang J, Zhou T J, 2008. Interdecadal changes in the major modes of Asian-Australian monsoon variability: strengthening relationship with ENSO since the late 1970s[J]. *J Climate*, 21(8): 1771-1789.
- Wang Y, Hu K M, Huang G, et al, 2021. Asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the Pacific-North American teleconnection pattern: the role of subtropical jet stream[J]. *Environ Res Lett*, 16(11): 114040.
- Wu B, Zhou T J, Li T, 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate[J]. *J Climate*, 22(11): 2992-3005.
- 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.
- 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.
- Xie S P, Du Y, Huang G, et al, 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s[J]. *J Climate*, 23(12): 3352-3368.
- 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.

499 Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al, 2009. El Niño in a changing climate[J]. *Nature*, 461(7263): 511-514.
500 Yu T T, Chen W, Huang P, et al, 2025. Weakened influence of ENSO on the East Asian summer monsoon since the early 2000s[J]. *npj*
501 *Clim Atmos Sci*, 8(1): 114.
502 Yun K S, Seo K H, Ha K J, 2008. Relationship between ENSO and northward propagating intraseasonal oscillation in the east Asian
503 summer monsoon system[J]. *J Geophys Res Atmos*, 113(D14): D14120.
504 Zhang R H, Sumi A, Kimoto M, 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 16(2):
505 229-241.
506 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
507 anomalous western North Pacific anticyclone[J]. *Sci China Earth Sci*, 60(6): 1124-1132.
508 Zhang T, Perlwitz J, Hoerling M P, 2014. What is responsible for the strong observed asymmetry in teleconnections between El Niño and
509 La Niña?[J]. *Geophys Res Lett*, 41(3): 1019-1025.

510