

东亚夏季风与热带海气相互作用研究进展^{*1}

陈文^{1,2} 于甜甜³ 冯娟³ 陈尚锋³ 朴金玲³

1 云南大学云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室, 昆明 650500

2 云南大学大气科学系, 昆明 650500

3 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

摘要 在东亚夏季风变异的众多影响因子中, 热带海温是影响夏季风系统变化的主要原因。近年来, 国内外学者在热带海温异常对东亚夏季风影响的研究方面取得了很大进展。本文从季节内、年际到年代际时间尺度, 简要回顾了近年来关于热带海气相互作用影响东亚夏季风变异及其机理的研究进展, 特别综述了关于 ENSO (El Niño–Southern Oscillation)、热带印度洋和大西洋海温异常对东亚夏季风系统的影响和机理方面的主要研究进展。此外, 本文还系统回顾了热带海温对东亚夏季风与冬季风关联的影响及过程。最后, 提出了在热带海温异常影响东亚夏季风季节内尺度变化、全球变暖下热带海温的变化及其对东亚夏季风的影响等方面值得深入探讨的科学问题。

关键词 东亚夏季风 西北太平洋异常环流 ENSO 热带印度洋 热带大西洋

文章编号

中图分类号

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23310

Progress in the Study of the Impacts of the tropical air-sea interactions on the East Asian Summer monsoon

CHEN Wen^{1,2}, YU Tiantian³, FENG Juan³, CHEN Shangfeng³, PIAO jinling³

1 Yunnan Key Laboratory of Meteorological Disasters and Climate Resources in the Greater Mekong Subregion, Yunnan University, Kunming 650500

2 Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650500

3 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Among the factors that influencing the East Asian summer monsoon (EASM), tropical sea surface temperature (SST) is the main reason for the variation of the East Asian summer monsoon system. In recent decades, the study of the impacts of the tropical SST anomalies on the EASM have achieved great progress. In this

收稿日期 2023- **网络预出版日期**

作者简介 陈文, 男, 1966 年出生, 教授, 主要从事季风与平流层-对流层相互作用方面的研究。E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn

通讯作者 陈文, E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn; 于甜甜, E-mail: yutiantian@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金重点项目 42230605

Funded by National Natural Science Foundation Key Project (Grants 42230605)

paper, we briefly reviewed recent advances on the influence of tropical air-sea interactions on the EASM and the associated mechanisms, from sub-seasonal, interannual to interdecadal timescales, with focuses on the main progress of the impacts of El Niño–Southern Oscillation (ENSO), tropical Indian Ocean and Atlantic. In addition, roles of tropical SSTs in the link between EASM and the East Asian winter monsoon are also systematically reviewed. Finally, we put forward several related issues that need to be further investigated in the future, for instance, the impact of tropical SST anomalies on the sub-seasonal variation of EASM, changes in tropical SSTs under global warming and their impact on the EASM.

Keywords East Asian summer monsoon, Western North Pacific wind anomalies, ENSO, tropical Indian Ocean, tropical Atlantic

1 引言

东亚地区人口密集,气候受东亚季风影响显著,气候异常对社会和经济的影响尤为突出(Huang et al., 2007)。夏季是东亚地区降水的多发季节,东亚夏季风环流将热带西太平洋和印度洋的水汽输送至中国东部、日本以及朝鲜半岛,给这些区域带来了充沛的降水(Tao and Chen, 1987; Huang et al., 2012; 丁一汇等, 2018; Chen et al., 2019b; Chen et al., 2023)。然而,东亚夏季风具有显著的年际和年代际变化,近年来由东亚夏季风异常引发的大范围旱涝等气候灾害频繁发生,如2020年长江淮河流域的特大暴雨洪涝和2022年长江流域的干旱等,造成了严重的社会影响和经济损失(Ding et al., 2021)。因此,研究和理解东亚夏季风的变异及机理,对提高我国气候预测水平、减轻气候灾害所带来的损失有重要的科学意义。

东亚夏季风变异除了受到内部大气环流影响外,还受到外强迫的影响,如海表面温度、青藏高原热力影响、欧亚积雪和海冰等(比如: He et al., 2007; Wu et al., 2016; 丁一汇等, 2018; Chen et al., 2019a; Shen et al., 2019; You et al., 2020; Lu et al., 2020; Wu and Li, 2022)。在众多影响因子中,热带海温是影响东亚夏季风系统变化的主要原因(Huang et al., 2012; 陈丽娟等, 2013; Xue et al., 2015a; 黄刚等, 2016; 陈文等, 2018; 胡娟等, 2018; Chen et al., 2019b)。热带海温作为大气变化的一个外强迫源,其变化可以通过海气相互作用过程影响东亚夏季风。同时,热带海温具有较强的可预报性,海洋巨大的热容量使得海温变化有明显的持续性,是东亚夏季风和夏季气候可预报性的主要来源。有关东亚夏季风与热带海气相互作用的研究一直以来都是大气科学研究的热点。

ENSO (El Niño–Southern Oscillation) 是年际气候变化的最强信号,其循环演变过程对东亚夏季风有着重要影响(比如: Huang and Wu, 1989; 刘永强和丁一汇, 1995; 陶诗言和张庆云, 1998; Zhang et al., 1999, 2017; Wang et al., 2000; Wu et al., 2003; Xie et al., 2009; Yuan and Yang, 2012; Chen et al., 2013; Li et al., 2017; Zhang et al., 2016; 陈文等, 2018; 杨崧等, 2018)。ENSO 处于不同时期(发展期和衰减期)对东亚夏季风有着不同的影响,与 ENSO 发展期相比, ENSO 衰减期对东亚夏季风的影响更为显著(比如: Huang and Wu, 1989; 陈文, 2002; Zhou et al., 2019; Wen et al., 2020; Wen and Hao, 2021)。然而 ENSO 具有季节锁相, ENSO 事件往往在冬季发展到盛期,次年春季逐渐衰减,到夏季热带中东太平洋异常海温基本消退。随后一系列的研究表明,热带印度洋和大西洋储存了前期冬季的 ENSO 信号,在夏季释放并直接影响东亚气候,该过程并非 ENSO 强迫下印度洋和大西洋的直接响应,而是涉及复杂的热带海气相互作用和海洋动力的耦合,促进局地异常信号的发生和发展(比如: Zhang et al., 1996; Enfield and Mayer, 1997; Wang et al., 2000; Huang and Shukla, 2005; Yang et al., 2007; Du et al., 2009; Xie et al., 2009, 2016; Rong et al., 2010; Ham et al., 2013; Wu et al., 2017; He et al., 2020; Kosaka, 2021; Zhang et al., 2021, 2023; Lu et al., 2023)。此外,热带西太平洋异常海温、海洋性大陆附近的异常海温等也对东亚夏季风有着重要影响(比如: 黄荣

辉和李维京, 1988; Lu et al., 2006; Chung et al., 2011; Cao et al., 2018; Cheng et al., 2020; Han et al., 2020)。值得一提的是, 以上热带海温的变化并非孤立而是紧密联系的, 在东亚夏季风变异的研究中, 应考虑各海区海温变化的协同影响(Cai et al., 2019; Wang, 2019)。

东亚夏季风呈现出多时间尺度的变化特征, 是造成东亚地区旱涝等重大气候灾害发生的主要原因(Tao and Chen, 1987; Huang et al., 2012; Ding et al., 2020)。近年来, 国内外关于东亚夏季风与热带海气相互作用的研究日益发展, 本文拟从季节内、年际到年代际时间尺度, 回顾热带海气相互作用影响东亚夏季风方面的研究进展, 同时回顾了热带海温在东亚季风循环中所起的作用, 并在最后提出该领域亟需进一步研究的几个科学问题。探讨热带海气相互作用对东亚夏季风的影响, 有助于深入理解夏季风变异特征和成因, 为改进和提高未来预测和预估水平及应对气候灾害提供科学依据。

2 年际时间尺度上热带海温对东亚夏季风的影响

2.1 ENSO 的影响

ENSO 是热带太平洋海气耦合系统年际变率最强的信号, 其演变过程与东亚夏季风关系紧密(比如: Huang and Wu, 1989; Wang et al., 2000; Wu et al., 2010; Chen et al., 2012; Yuan and Yang, 2012; 陈文等, 2018; Jiang et al., 2019; Lu et al., 2019; Wang et al., 2020; Yang and Huang, 2022; Tao et al., 2022)。近年来 ENSO 事件的空间多样性被逐渐认识到, 中太平洋型 ENSO 事件(CP ENSO)与传统东太平洋型 ENSO 事件(EP ENSO)无论是在演变过程还是在东亚气候的影响上均有较大差异, 陈文等(2018)系统回顾了两类 ENSO 事件对东亚季风的影响和机理方面的主要研究进展。

ENSO 处于不同时期(发展期和衰减期), 其对东亚夏季风的影响明显不同。ENSO 对东亚夏季风的影响主要是通过调制对流层低层西北太平洋异常环流来实现的(Li et al., 2017; Zhang et al., 2017; 陈文等, 2018)。ENSO 对夏季风的影响主要表现为在 El Niño 的发展年夏季, 西北太平洋低层受异常的气旋性环流控制, 东亚夏季风往往偏弱, 中国南方和北方雨水偏少; 而在 El Niño 衰减年夏季, 西北太平洋低层受异常的反气旋性环流控制, 东亚夏季风往往偏强, 中国中部的雨水偏多。值得注意的是, 随着 El Niño 事件在冬季达到峰值, 从次年春季开始衰减直到夏季消退, 位于西北太平洋的异常反气旋环流也在 El Niño 盛期的冬季达到最强, 但是它并没有随着 El Niño 事件一同消退, 而是在次年夏季继续维持, 从而将 El Niño 事件的影响传递给东亚夏季风。前人对 ENSO 期间西北太平洋异常反气旋的形成和维持机制开展了大量的研究(比如: Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000; Xie et al., 2009, 2016; Rong et al., 2010; Ham et al., 2013; Fan et al., 2013; Stuecker et al., 2015; Wu et al., 2017; Hu et al., 2019; 张文君等, 2022)。Zhang et al. (1996) 指出西北太平洋异常反气旋的形成是由于西北太平洋局地降水减少, 对流冷却作用激发大气罗斯贝波响应的结果。Wang et al. (2000) 提出了局地海气

正反馈理论, El Niño 能激发冬季西北太平洋异常反气旋, 其东侧的异常东北风通过加强东北信风和海表蒸发导致海温冷却, 该冷海温又可通过抑制局地对流激发下沉罗斯贝波, 进一步加强并维持西北太平洋异常反气旋。然而, 夏季该区域的海气耦合并不明显。进一步研究指出, ENSO 期间热带中东太平洋异常海温可以通过“大气桥”过程、海洋动力过程、表面热通量变化和激发大气遥相关等一系列跨洋盆海气相互作用触发印度洋和大西洋的海温变化, 使其影响得以延续到 ENSO 衰减年夏季。此外, 当 El Niño 衰减较快时, 次年夏季中东太平洋已转变为异常冷海温, 该冷海温也可以通过激发罗斯贝波响应维持西北太平洋异常反气旋 (Fan et al., 2013; Wang et al., 2013)。

El Niño 和 La Niña 在振幅、结构以及时间演变上存在着不对称性 (比如: Hoerling et al., 1997; Kang and Kug, 2002; Jin et al., 2003; Song et al., 2022), 夏季风环流对 ENSO 的响应也有所不同 (Wu et al., 2010)。最近, Chen and Li (2023) 研究发现 ENSO 处于不同位相时, 对中国中部 7 月降水的影响存在明显不对称性, El Niño 衰减年降水异常的强度更强。

2.2 印度洋海温的影响

观测分析表明, 东亚夏季风与热带海温的海气耦合关系并不局限于太平洋, 在北印度洋和热带北大西洋也有较高的正相关, 这两个海区的异常海温可以和太平洋的异常海温相配合, 对东亚夏季风产生影响。

热带印度洋海温的变化规律在年际尺度上有两个主导模态: 印度洋海盆一致模 (IOBM) 和印度洋偶极子 (IOD)。其中, IOBM 主要发生在 ENSO 事件的衰减年, 在滞后于 ENSO 事件一个季度的春季达到峰值; IOD 常常伴随着 ENSO 事件发生, 但也有一定的独立性, 在发展年秋季达到峰值。

印度洋海盆一致模能够显著影响东亚夏季风 (比如: 黄刚等, 2016; Leung et al., 2020; Zhou et al., 2021; Kim and Kug, 2021)。IOBM 能起到类似电容器的作用, 将热带中东太平洋的 ENSO 信号储存并且在次年夏季释放, 从而影响夏季的西北太平洋异常反气旋 (Yang et al., 2007; Xie et al., 2009; Hu et al., 2019)。具体来看, ENSO 影响下副热带东南印度洋低层有异常反气旋产生, 通过激发向西传播的下沉罗斯贝波导致温跃层比较浅薄的西南印度洋海温持续增暖 (Xie et al., 2010)。随后, 西南印度洋暖海温引起异常降水, 并在印度洋形成沿赤道南北反对称的异常环流, 北印度洋上空的异常东北风通过减弱气候态风场, 减少海洋向大气的潜热释放, 引起北印度洋的海温增暖 (Du et al., 2009)。ENSO 衰减年夏季, 北印度洋暖海温能够激发暖性开尔文波东传到热带西太平洋, 并通过艾克曼辐散和对流抑制来维持西北太平洋异常反气旋 (Xie et al., 2009)。Xie et al. (2016) 和黄刚等 (2016) 进一步将印度洋电容器效应与局地海气正反馈理论发展结合为跨洋盆的印度洋-西太平洋联合效应 (Kosaka et al., 2013, 2021)。

研究表明, 印度洋海盆一致模可以通过改变南亚高压等夏季风系统, 影响东亚夏季气候 (Hu et al., 2012; Qu and Huang, 2012a; 黄刚等, 2016)。Xue and Chen

(2019)将南亚高压分为南北两个模态分析其年际变化机制,发现低纬度模态的变化主要受到 ENSO 衰减年印度洋异常海温的影响。夏季印度洋暖海温通过激发 Gill-Matsuno 响应 (Matsuno, 1966; Gill, 1980), 加强南亚高压, 同时导致南亚高压位置偏南。随着南亚高压南模态的加强, 我国长江流域及日本夏季降水偏多, 我国北方地区降水明显偏少 (Xue et al., 2021)。Chen et al. (2022c) 研究发现, 春季索马里急流强度的变化可以通过调节热带印度洋海温影响随后夏季南亚高压的移动。强春季索马里急流加强了西南季风, 通过改变表面热通量引起印度洋海温冷却, 导致南亚高压向西北移动。

印度洋偶极子是西印度洋和东印度洋的反位相海温异常 (Saji et al., 1999), 对东亚夏季风有着显著的影响 (比如: Li and Mu, 2001; Guan and Yamagata, 2003; Li et al., 2003; Yuan et al., 2008; Xiao et al., 2020)。Feng and Chen (2014a) 指出 IOD 能够调制发展位相的中太平洋 El Niño 与夏季风的关系。最近, Zhang et al. (2022) 从季节演变的角度对比分析了中国东部降水对 IOD 和 ENSO 的响应, 发现秋季和次年夏季的降水变化主要受到 IOD 的影响。此外, Takaya et al. (2020) 和 Zhou et al. (2021) 指出 2019 年强 IOD 事件导致次年东亚夏季风偏强, 我国长江流域降水明显偏多。

2.3 大西洋海温的影响

近年来, 越来越多的学者注意到除印度洋的影响外, 热带大西洋的海温异常也对东亚夏季风的年际变化有着重要贡献 (比如: Lu and Dong, 2005; 陈文等, 2006; Li et al., 2016; Wang et al., 2017; Choi and Ahn, 2019; Ma et al., 2020; Takaya et al., 2021)。研究表明, 前冬 El Niño 可以通过激发太平洋-北美遥相关及改变表面热通量, 引起春夏季热带北大西洋海温的偏暖 (Enfield and Mayer, 1997; Chang et al., 2006; Brönnimann, 2007)。此外, 大西洋内部变化特别是北大西洋涛动 (NAO) 也可以引起热带北大西洋海温的变化 (Huang and Shukla, 2005; Lee et al., 2008)。随后, 夏季的热带北大西洋暖海温可以触发局地辐合上升气流, 并通过纬向翻转环流在赤道中太平洋的下沉来抑制局地对流, 进一步激发罗斯贝波, 加强西北太平洋异常反气旋和夏季风 (Ham et al., 2013; Wang et al., 2017)。同时, 大气对北大西洋暖海温的 Gill 型响应使得和赤道开尔文波相伴随的异常东风从西印度洋延伸到西太平洋, 并诱发艾克曼辐散机制, 也有利于西北太平洋异常反气旋的维持 (Rong et al., 2010)。

Chen et al. (2018) 指出 ENSO 对东亚夏季风的影响受到春季热带北大西洋海温的调制。由图 1 可见, 当冬季 ENSO 相关的太平洋海温异常与随后春季热带北大西洋海温异常同号时, ENSO 对后期夏季风的影响是显著的。但是, 当春季热带北大西洋海温异常与前期冬季热带太平洋海温异常信号相反时, ENSO 对东亚夏季风的影响很弱。春季热带北大西洋海温异常可以增强或者削弱前期冬季 ENSO 所激发的西北太平洋异常反气旋, 进而影响 ENSO 和东亚夏季风的关系。该研究结果表明, 利用 ENSO 信号预测东亚夏季风需要考虑春季热带北大西洋

海温的信号。最近，Chen et al. (2022a) 研究发现北大西洋涛动引起的北大西洋春季三极子型海温异常可以通过热带和温带两条途径显著影响 7 月华中地区的降水异常。Lu et al. (2023) 和 Yang et al. (2023) 的研究表明在去除 ENSO 的影响后，大西洋的海温异常仍可以通过大气遥相关对西北太平洋异常反气旋和东亚夏季降水产生显著影响，体现了大西洋在东亚夏季气候影响中较重要的作用。

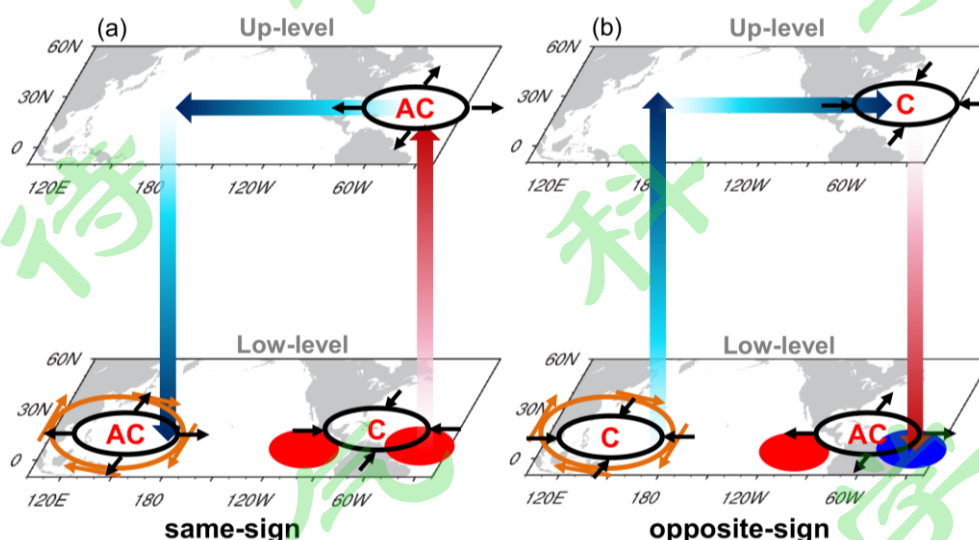


图 1 ENSO 和热带北大西洋海温异常对东亚夏季风的联合影响示意图。红色（蓝色）阴影表示暖（冷）海温异常。“C”和“AC”分别表示热带北大西洋海温异常引起的异常气旋和反气旋。垂直方向的箭头表示热带北大西洋海温异常引起的沃克异常环流。北太平洋西部的棕色异常反气旋是由 El Niño 诱发的

Fig. 1 Schematic diagrams for the combined impact of ENSO and tropical North Atlantic SST anomalies on the East Asian summer monsoon. Red (blue) shadings represent warm (cold) SST anomalies. “C” and “AC” indicate anomalous cyclone and anticyclone, respectively, induced by the tropical North Atlantic SST anomalies. The arrows in vertical direction indicate the anomalous Walker circulation induced by tropical North Atlantic SST anomalies. The anomalous anticyclone in brown around the western North Pacific was induced by El Niño

东亚夏季风北边缘活动带地处东亚夏季风北界附近，具有较强的年际变化。Zhao et al. (2019a, 2019b, 2020a) 研究发现，热带北大西洋海温对活动带雨季撤退和 8 月降水的年际变化具有显著的调制作用。一方面，热带北大西洋暖海温通过触发大尺度垂直环流形成异常反气旋，其西侧的偏南风异常将南部海洋上的水汽输送至活动带，导致 8 月降水增多雨季撤退偏晚。另一方面，热带北大西洋暖海温可激发东传途经欧亚地区的中高纬准正压大气遥相关波列，该波列中位于活动带附近的负位势高度异常有助于上升运动的产生，同时该负位势高度中心南侧的偏西风，与热带北大西洋海温异常增暖激发的西北太平洋反气旋西侧的偏南风

在活动带地区的辐合，有利于降水增多雨季撤退偏晚。

2.4 ENSO、印度洋和大西洋的协同影响

研究热带海温对东亚夏季风的影响时，仅考虑某一海区的海温变化还不够充分，对东亚夏季风年际变化的研究应综合考虑各区域热带海温变化的协同影响（Li et al., 2016; Chen et al., 2017; Cai et al., 2019; Wang, 2019; Kim and Yu, 2022）。比如，Chen et al. (2016) 研究了 El Niño 到 La Niña 过渡年热带印度洋暖海温和中东太平洋冷海温对维持西北太平洋异常反气旋的相对重要性。最近，Feng et al. (2020) 研究发现，中太平洋 El Niño 激发的西北太平洋异常反气旋环流在衰减年夏季呈现出再次增强的特征。随着中太平洋 El Niño 的衰减，夏季的海温异常主要表现为热带北大西洋的暖海温和中东太平洋的冷海温。进一步分析表明，单独中东太平洋冷海温影响下，夏季异常反气旋环流表现出微弱的增强，而单独热带北大西洋暖海温影响下，夏季反气旋经历了显著的再次增强。数值模拟发现当中东太平洋冷海温和热带北大西洋暖海温强度相当时，西北太平洋异常反气旋对热带北大西洋暖海温的响应更强。这种差异是由于中东太平洋变冷和热带北大西洋增暖的有效热带强迫的位置不同所致。此外，Feng and Chen (2021) 分析了 El Niño 衰减年夏季西北太平洋异常反气旋的南北纬向范围，发现北印度洋暖海温导致反气旋向南收缩，而热带北大西洋暖海温导致反气旋向北扩展（图 2）。从图 2 中可以看出，北印度洋暖海温通过激发开尔文波影响反气旋，而开尔文波激发的西太平洋抑制对流主要位于 20°N 以南，导致反气旋被限制在低纬度地区。相对比，热带北大西洋暖海温通过激发罗斯贝波及太平洋上辐散辐合响应影响西北太平洋异常反气旋，罗斯贝波造成赤道以北中东太平洋的对流抑制，并进一步增强其西南侧的对流，导致西北太平洋低层辐散风和对流抑制。在这个过程中，西北太平洋的抑制对流被进一步向北推进，造成了反气旋的向北扩展。

梅雨是东亚夏季风季节进程中最重要的一個雨季（Ding et al., 2020）。2020 年发生了一次典型的超强梅雨，降水总量为 1961 年以来最大值，持续的强降水过程导致江淮流域出现严重的洪涝灾害（Ding et al., 2021; Niu et al., 2021）。研究表明，造成这次超强梅雨的关键环流系统是西北太平洋异常反气旋（WNPAC），然而前冬的中太平洋 El Niño 事件持续时间短且强度偏弱，不足以激发和维持异常偏强的 WNPAC。进一步研究表明，北印度洋和热带北大西洋海温异常的持续偏暖为这次强 WNPAC 的主要驱动因子（Fang et al., 2021; Guo et al., 2021; Cai et al., 2022; Yin et al., 2022; Zhu et al., 2023）。此外，Takaya et al. (2020) 和 Zhou et al. (2021) 指出 2019 年的强 IOD 事件是造成这次超强梅雨的重要原因。强 IOD 与太平洋的弱 El Niño 事件激发了向西传播的下沉罗斯贝波动，导致西南印度洋温跃层创纪录加深，进而造成北印度洋增暖并持续到 2020 年夏季维持 WNPAC。Liu et al. (2020) 指出，北大西洋涛动（NAO）位相转换能够通过调制欧亚大陆中纬度高空波列结构，造成梅雨锋面性质和环流结构的次季节调整，最终导致 2020 年超强梅汛期降水。

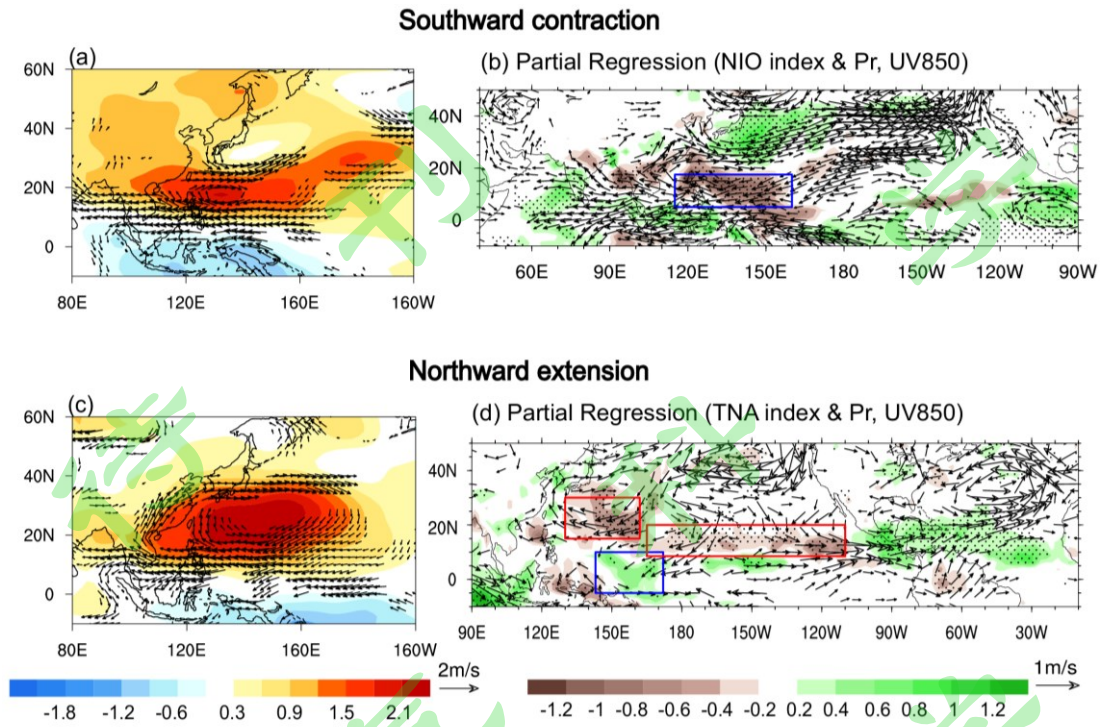


图 2 El Niño 衰减年夏季 850-hPa 异常风场（矢量；单位： m s^{-1} ）和异常流函数（填色；单位： $0.3 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ）在（a）向南收缩和（c）向北扩展时的合成图。矢量为通过了 90%信度检验的异常风场。（b）北印度洋（NIO）指数和（d）热带北大西洋（TNA）指数偏回归下的异常降水（填色；单位： mm day^{-1} ）和 850-hPa 异常风场（矢量；单位： m s^{-1} ）。其中，NIO 指数定义为（0°–20°N, 40°–100°E）区域平均的异常海温，TNA 指数定义为（0°–20°N, 80°–20°W）区域平均的异常海温。打点区域代表异常通过了 90%的信度检验。其中，（b）图中的蓝色方框表示加强西北太平洋异常反气旋（WNPAC）的关键降水异常区，（d）图中的红（蓝）色方框表示在 WNPAC 形成并向北延伸过程中的关键降水异常区

Fig. 2 Composite 850-hPa wind anomalies (vectors; m s^{-1}) and streamfunction anomalies (shading; $0.3 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) during El Niño decaying summer for (a) the southward contraction group and (c) the northward extension group. The wind vectors exceeding the 90% confidence level according to the Student's t test are shown here. Partial regression of precipitation anomalies (shading; mm day^{-1}) and 850-hPa wind anomalies (vectors; m s^{-1}) against the (b) NIO index and (d) TNA index. The NIO index is calculated via the area-averaged (0°–20°N, 40°–100°E) SST anomalies, and the TNA index is calculated by the same method but over the region (0°–20°N, 80°–20°W). The dotted regions indicate the rainfall anomalies exceeding the 90% confidence level according to the Student's t test. The blue rectangle in (b) indicates the key rainfall anomaly region that intensifies the WNPAC. The red (blue) rectangle in (d) indicates the key rainfall anomaly region in the process of WNPAC generation and extending northward

2.5 CMIP 模式对东亚夏季风与热带海温关系的模拟

气候模式是研究东亚夏季风变异的重要工具,气候模式能否合理模拟出东亚夏季风与热带海温的关系不仅是评估模式性能的一个重要指标,也是选择和利用气候模式进行预测及未来预估的基础。近年来,围绕当前模式对东亚夏季风和热带海温关系的模拟能力及其模拟偏差问题,国内外学者开展了大量的研究工作(比如:周天军等, 2018; Gong et al., 2018; Feng et al., 2019; Wang et al., 2019; Yang et al., 2019; Xin et al., 2020; Chen et al., 2021; Fu et al., 2021; Kim et al., 2021; Wang et al., 2021; Huang et al., 2022; Yu et al., 2022; Piao et al., 2023)。

随着模式的不断改进和发展,当前模式对东亚夏季风具有一定的模拟能力,但由于地形复杂和模式局限,合理再现东亚夏季风气候态和年际变率仍是挑战(比如: Huang et al., 2013; Sperber et al., 2013; Feng et al., 2014d; Song and Zhou, 2014a; Tao et al., 2016; Kim et al., 2021; Wang et al., 2021)。已有研究表明,海气相互作用可以显著改善东亚夏季风气候态和年际变率的模拟(Song and Zhou, 2014b; Yang et al., 2019; Huang et al., 2022)。最近, Fu et al. (2021) 比较了三代 CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) 模式模拟 ENSO 影响东亚夏季降水物理过程的能力,发现与 CMIP3 和 CMIP5 模式相比, CMIP6 模式能更加合理地模拟出 ENSO 影响热带印度洋海温变化的物理过程,并且模式间差异较小。Xin et al. (2020) 对比了 CMIP5 和 CMIP6 中相对应的 8 个模式,指出 CMIP6 模式较 CMIP5 在夏季降水气候态和年际变率方面均有提高。Yu et al. (2022a) 基于 CMIP5 和 CMIP6 的模拟结果,评估了模式对东亚夏季风气候态和年际变率的模拟能力。结果表明,与 CMIP5 模式相比, CMIP6 对东亚地区气候态环流和降水场的模拟更为合理且模式间的差异性较小,气候态的合理模拟有利于年际变率的合理模拟。年际变率方面, CMIP5 模式对西北太平洋反气旋偏弱的模拟偏差在 CMIP6 中有所改进,相对应的偶极子型降水结构也得到了更好的刻画。进一步分析表明,观测中北印度洋和热带北大西洋暖海温通过抑制西北太平洋对流活动,共同加强异常反气旋环流,该过程在 CMIP6 模式中得到了合理再现。此外,夏季北印度洋和北大西洋暖海温与前冬 ENSO 密切相关,更真实的 ENSO 海温型有利于北印度洋和热带北大西洋海温演变的合理模拟。该研究表明 CMIP6 模式中东亚夏季风年际变率模拟的改善,很大程度上依赖于 ENSO 及次年夏季北印度洋和北大西洋海温的模拟。

ENSO 事件本身具有复杂的时空变化。Jiang et al. (2017) 研究发现, CMIP5 模式对 El Niño 衰减年夏季西北太平洋异常反气旋模拟技巧的差异,与模式对 ENSO 衰减速率的模拟能力密切相关。Wang et al. (2019) 评估了 CMIP5 模式中两类 El Niño 及其对东亚夏季风的影响,发现模式对中太平洋 El Niño 及其遥相关的模拟偏差较大。Feng et al. (2019) 最近评估了 CMIP5 模式对中太平洋 El Niño (CP El Niño) 影响东亚夏季风的模拟能力。观测中,中太平洋海温异常从暖海温转变为冷海温,并通过 Gill-Matsuno 响应激发西北太平洋异常反气旋,建立起

CP El Niño 和夏季风的联系。与观测结果相比,只有三分之一的模式 (type-I) 模拟出了较弱的异常反气旋,其他三分之二的模式 (type-II) 都无法再现该反气旋环流。进一步研究发现,两组模式的模拟偏差主要来源于模式中 CP El Niño 暖海温的持续,该暖海温通过海气相互作用导致模式中北印度洋海温出现暖偏差。type-I 模式中,该北印度洋暖海温通过电容效应激发西北太平洋异常反气旋环流,这与观测中反气旋的形成机制不同,从而导致了 type-I 模式的模拟偏差。在 type-II 模式中,CP El Niño 暖海温偏差一直持续到夏季,通过在西北太平洋激发出一个异常气旋性环流抵消了北印度洋暖海温激发的反气旋性环流,造成 type-II 模式中环流异常的消失。研究还发现,CP El Niño 缓慢衰减的偏差是由模式中不真实的气候态海温所致。

南亚高压、西风急流、太平洋-日本 (EAP/PJ) 遥相关型和西北太平洋副热带高压是东亚夏季风及其环流系统的主要成员。Xue et al. (2017) 评估了 CMIP5 模式对南亚高压气候态和年际变率及其与 ENSO 关系的模拟能力。大约三分之二的 CMIP5 模式可以合理模拟出观测中 ENSO 与南亚高压的关系,这主要是由于模式抓住了 ENSO 热带太平洋海温异常所激发的印度洋电容器效应。Yan et al. (2019) 评估了 CMIP5 模式中东亚西风急流经向移动的年际变率及其与东亚夏季降水的关系,指出大部分模式可以再现西风急流的经向移动,但是急流与夏季降水的关系明显偏弱且模式间差异较大,这主要与气候平均态及急流强度的模拟有关。Gong et al. (2018) 则分析了 CMIP5 模式对 PJ 遥相关型空间结构和振幅的模拟能力,重点探讨了海温异常和大气基本流的作用。根据 PJ 遥相关型在模式模拟和观测中的相关性,将模式分为高相关组 (HCG) 和低相关组 (LCG)。相比较,HCG 模式较好地再现了西北太平洋和赤道中太平洋的冷海温、有组织的对流和降水异常以及罗斯贝波响应,而 LCG 模式则无法再现这些特征。研究还发现模式对 PJ 遥相关型的模拟能力与模式对前冬 ENSO 及其在热带印太海区的海温演变密切相关,印度洋海温异常在 HCG 和 LCG 中都很弱,这意味着 CMIP5 模式中印度洋电容器效应对 PJ 遥相关型的影响较弱。进一步研究表明,模式中 PJ 西北太平洋中心振幅的模拟能力主要受到西北太平洋海温异常及其局地海气反馈机制的影响。另外,东亚沿岸气候态南风的强度对于 PJ 中纬度中心的模拟也有重要作用,强的气候态南风存在类似波导的作用,更有助于局地正压能量转换,因而更利于模拟出真实的 PJ 中纬度中心振幅以及向极方向的波活动通量。最近,Chen et al. (2021) 分析了 CMIP6 模式对春季热带北大西洋海温影响随后夏季西北太平洋副热带高压的模拟能力。发现 CMIP6 模式集合平均可以很好地再现春季热带北大西洋海温异常影响夏季西北太平洋副热带高压的物理过程,即春季热带北大西洋暖海温可以在热带大西洋激发上升运动,而在热带中太平洋激发下沉运动。热带中太平洋下沉运动伴随的降水减少通过罗斯贝波响应引起了西北太平洋上空的低层异常反气旋,进而影响西北太平洋副热带高压。同时,春季热带北大西洋暖海温可以通过开尔文波引起印度洋的东风异常,并通过改变表面热通量使得印度洋海温增暖,继而通过印度洋电容器效应影响西北太平

洋副热带高压。研究进一步指出不同 CMIP6 模式对春季热带北大西洋海温异常对西北太平洋副热带高压的影响存在较大差异,这主要与 CMIP6 模式对印度洋降水气候态的模拟偏差有关。对印度洋降水气候态模拟偏强的模式,春季热带北大西洋暖海温激发的印度洋降水异常也更强,因而对西北太平洋副热带高压的影响更显著。

夏季风北界是东亚夏季风每年向北推进的最北位置,夏季风北界位置的南北变化对我国北方的干湿分布格局有重要影响。最近, Piao et al. (2023) 评估了 CMIP6 对东亚夏季风北界的模拟能力。发现大部分模式对东亚夏季风北界位置的模拟呈现明显向北的偏差,这主要与模式模拟的西北太平洋副热带高压位置偏西以及副热带西风急流位置偏北有关,二者均可以通过增强华北地区的夏季降水,进而导致北界位置向北偏移。进一步研究表明,副热带西风急流位置偏北主要与黑潮/亲潮海温偏暖有关,而西北太平洋副热带高压位置偏西则受到了黑潮/亲潮以及海洋大陆和东南印度洋海温偏暖的综合影响。

3 季节内时间尺度上热带海温对东亚夏季风的影响

东亚夏季风不仅具有明显的年际变化,还表现出明显的季节内变化(比如: Tao and Chen, 1987; 丁一汇等, 2018; 祝从文等, 2019)。南海夏季风爆发后,东亚夏季风与雨带呈现阶段性北进,经历两次北跳和三次停滞过程(Lau and Yang, 1996; Chen et al., 2004; Ding and Chan, 2005),最终到达夏季风北界(胡豪然和钱维宏, 2007)。其中,南海夏季风的爆发标志着东亚夏季风的建立和雨季的开始,南海夏季风爆发的偏早或偏晚,常常伴随着东亚夏季气候异常,陈文等(2022)就其变化特征及机制做了比较系统的回顾和总结。

鉴于东亚夏季风具有逐步向北推进的季节内变化,夏季平均无法体现季节内尺度上的变化特征,越来越多的研究开始关注季节内尺度上热带海温对东亚夏季风的影响(比如: Wang et al., 2009; 黄平和黄荣辉, 2010; Xiang et al., 2013; Zhao et al., 2015; 薛峰和苏同华, 2018; Qiao et al., 2021; Liu et al., 2021; 张潇潇等, 2022; Tang et al., 2022)。前人研究发现,初夏(5-6月)到盛夏(7-8月)的环流转变是东亚夏季风季节内变化的主要模态(Chang et al., 2000; Wang et al., 2009; Zhao et al., 2015; 薛峰等, 2018; Guan et al., 2019),其与热带海温的关系也有所不同(Yuan et al., 2019)。Xiang et al. (2013)指出8月西北太平洋对流增强使得大气对局地海温的强迫在盛夏比初夏更为敏感,从而西北太平洋副热带高压在8月更易加强。薛峰和苏同华(2018)指出, ENSO 对东亚夏季风季节内变化的影响,与热带海温偏高地区的热带对流发展所引起的异常环流有关,但不同位相的影响过程和机理存在明显差异。最近, Feng and Chen (2022)分析了季节内尺度上,热带北大西洋(TNA)和北印度洋(NIO)海温变暖不同配置下夏季西北太平洋异常反气旋(WNPAC)的逐月演变过程。由图3可见,单独TNA暖海温强迫下的WNPAC呈现出逐步向北移动的季节内变化特征,而单独NIO暖海温强迫下的WNPAC在整个夏季(6-8月)几乎稳定维持在20°N附近,造成

Meiyu-Baiu-Changma 的持续性强降水。进一步研究表明, TNA 暖海温通过激发罗斯贝波响应形成 WNPAC, 西太平洋对流受抑制区随着热带辐合带和气候态夏季季风区一起向北移动, 导致 WNPAC 的逐步北移。相比较, NIO 暖海温通过激发开尔文波东传至西太平洋产生 WNPAC, 由于开尔文波活动范围被限制在 20°N 以内, 对流抑制稳定在 20°N 附近, 造成 6-8 月 WNPAC 位置稳定。研究还发现, 在 TNA 和 NIO 暖海温同时存在的情况下, WNPAC 的季节内变化与单独 NIO 增暖的情况相似, TNA 暖海温的作用被抑制。

值得指出的是, 在东亚夏季风北进阶段, 大气季节内振荡 (ISO) 也会对东亚夏季风起到重要的调控作用 (Hsu et al., 2016; Sun et al., 2016; Li and Mao, 2019; Cheng et al., 2020, 2021)。比如, Sun et al. (2016) 指出长江中下游地区 1998 年夏季极端降水很大程度上受到了不同地区 ISO 的协同影响, 其中, 北印度洋异常暖海温激发的 30-60 天 ISO 与西北太平洋-南海海气相互作用引起的 10-30 天 ISO 均起到重要的调制作用。此外, 热带海温还可以通过调节 ISO 的强度和发生频率进而影响东亚夏季风 (Yao et al., 2019; Lin, 2019; Chen et al., 2020)。Yao et al. (2019) 发现不同类型 El Niño 事件衰减年夏季, 东亚-西北太平洋 ISO 的强度差异影响了梅雨开始日期的早晚。Chen et al. (2020) 指出在 La Niña 衰减年夏季, 西北太平洋 ISO 受局地背景场调制表现出较气候平均更强的季节内变率, 异常增强的 ISO 信号通过北传进而影响到更高纬度的夏季风系统。

与爆发和向北推进相比, 东亚夏季风的撤退是非常迅速的。Chen et al. (2022b) 基于东亚沿岸 850hPa 经向风的转变时间确定了每年东亚夏季风的撤退日期, 系统研究了东亚夏季风撤退的气候态特征。在对流层低层 850hPa, 东亚夏季风撤退前后的差异表现为东亚大陆 (副热带西太平洋) 有反气旋性环流 (气旋性环流), 东亚沿岸北风增强; 环流的转变使得东亚上空水汽输送减少, 并将更高纬度地区的冷空气带到东亚沿岸地区。在对流层中层, 副热带高压东移, 东北亚上空的槽在加深, 槽后的冷平流和涡度平流有利于增强东亚地区的下沉运动。在对流层高层 200hPa, 副热带西风急流加强并南压, 辐散风的辐散中心从菲律宾岛移向北太平洋西部。以上东亚夏季风撤退所伴随的三维环流特征有利于东亚大陆降水减少、雨季的结束和大范围的降温。Wang et al. (2021) 指出江淮流域梅雨的撤退与阿拉伯海的海温异常密切相关, 撤退偏晚 (早) 年 6 月阿拉伯海海温显著增暖 (冷却), 该异常海温可以通过 “大气桥” 影响相关环流场从而调节梅雨的维持和撤退。

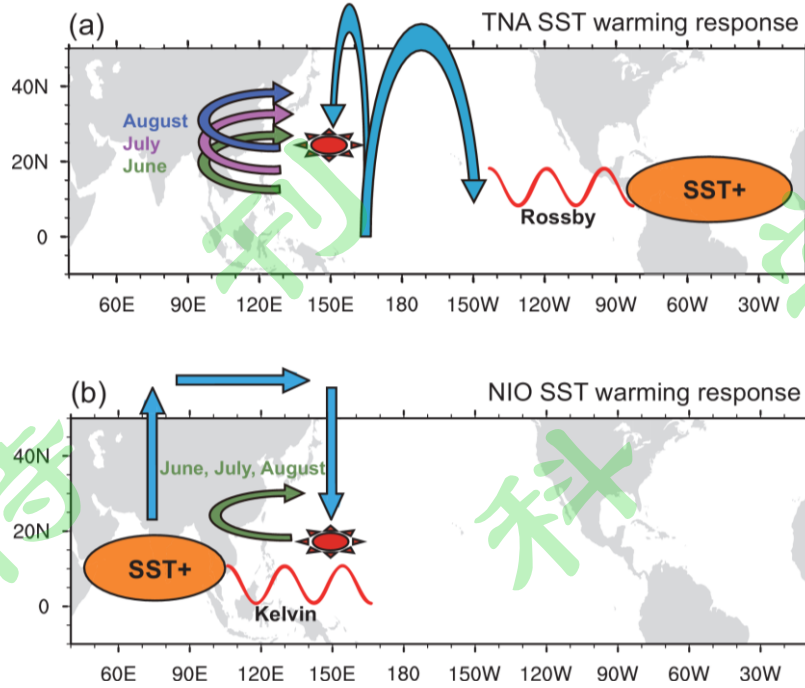


图 3 季节内尺度上 (a) 热带北大西洋 (TNA) 和 (b) 北印度洋 (NIO) 暖海温影响西北太平洋异常反气旋 (WNPAC) 的示意图。(a) TNA 暖海温激发西传罗斯贝波 (红色曲线), 通过太平洋上的辐合辐散响应 (蓝色箭头) 导致西北太平洋对流抑制 (红色太阳) 随着热带辐合带和气候态夏季风区一起向北移动, 导致 WNPAC (弯箭头) 从 6 月到 8 月的逐步北移。(b) NIO 暖海温激发开尔文波 (红色曲线) 东传至西太平洋辐散 (蓝色箭头), 受开尔文波范围所限, 西太平洋对流抑制 (红色太阳) 稳定在 20°N 以南, 导致 WNPAC (弯箭头) 在 6-8 月位置稳定

Fig. 3 The schematic diagrams showing the different impacts of (a) TNA SST warming and (b) NIO SST warming on the sub-seasonal movement of WNPAC. (a) In response to TNA SST warming, a Rossby wave over the eastern Pacific is stimulated (red curve), which further induces a divergence/convergence chain response over the Pacific (blue arrows). And then, the suppressed convection over the western North Pacific (red sun) shifts northward with the northward expansion of the ITCZ and climatological summer monsoon. Thus, the generated WNPAC (bent arrow) moves northward from June to August. (b) In response to the NIO SST warming, a Kelvin wave over the tropical western Pacific is stimulated (red curve), which induces a divergence response over the western Pacific (blue arrows). Owing to the limited domain of Kelvin wave, the resultant suppressed convection over the western Pacific (red sun) is always confined to the south of 20°N. Thus, the generated WNPAC (bent arrow) maintains a nearly stationary state, which is located in the low latitudes from June to August

4 年代际时间尺度上热带海温对东亚夏季风的影响

年代际变化为年际变化提供重要背景，也可以显著调整更长时间尺度的变化，是气候变化研究中的重要科学问题。热带太平洋、印度洋和大西洋是影响东亚夏季风的关键海区，其海气相互作用的转变对东亚夏季风年代际变化有着重要影响（比如：Wu and Wang, 2002; Zhou et al., 2009; Huang et al., 2010; Xie et al., 2010; 王会军和范可, 2013; Hong et al., 2014; 丁一汇等, 2018; Zhang et al., 2018; Ha et al., 2019; Yang and Huang, 2021）。

4.1 东亚夏季风对 ENSO 年代际变化的响应

ENSO 事件本身存在很大的年代际变率。在气候变化的背景下，ENSO 的典型空间形态、强度和频率在 20 世纪 70 年代末和 90 年代末分别经历了两次明显的年代际转变（An and Wang, 2000; McPhaden, 2012; Hu et al., 2020; 任宏利等, 2020）。70 年代末这次年代际气候突变使 ENSO 循环的主周期延长，从之前的 2-4 年增长到了之后的 4-6 年，同时振幅增强，其海气耦合结构也发生了显著变化，除传统东太平洋型 ENSO 外，出现了中太平洋型 ENSO 事件（An and Wang, 2000; Ashok et al., 2007），这种增暖型 ENSO 事件无论是在空间形态、形成机制以及对气候的影响上都与传统事件有很大差别。90 年代末 ENSO 特征的年代际转变主要表现为 ENSO 主周期明显缩短并向准两年移动，振幅减弱，中太平洋型 ENSO 发生的频率显著升高（McPhaden, 2012; Gan et al., 2023）。

鉴于 ENSO 对东亚气候的重要影响，有关 ENSO 性质的转变对东亚夏季风系统年代际变化影响的研究已取得了一些成果（比如：Wang et al., 2008; Xie et al., 2010; Huang et al., 2020; Li and Lu, 2020; Piao et al., 2020; Yang and Huang, 2021）。Wang et al. (2008) 发现 ENSO 对夏季风的影响在 20 世纪 70 年代末显著增强，并归因于 ENSO 自身的强度和周期的增强以及热带太平洋海气相互作用的增强。Sun et al. (2021) 分析了 20 世纪 50 年代以来 ENSO 事件对中国东部夏季降水变化的影响，发现分别在 70 年代末和 90 年代末经历了两次年代际变化，该研究指出 ENSO 遥相关及太平洋和印度洋海气相互作用的改变是主要原因。Li and Lu (2020) 研究发现西北太平洋和东亚的经向遥相关在 21 世纪初出现中断。在 21 世纪初之前，西北太平洋副热带高压西伸和东亚西风急流南移关系密切；而在 21 世纪初之后，副热带高压西伸同时急流北移，导致副热带高压和急流的关系中断。进一步研究指出这与 ENSO 性质转变下的中太平洋 El Niño 衰减及夏季印度洋暖海温的变化密切相关。Huang et al. (2020) 指出 90 年代末前后，受 ENSO 性质转变影响，夏季西太平洋副热带高压的空间型和周期表现出显著的年代际变化。Cen et al. (2022) 的研究发现，ENSO 对南亚高压纬向移动的影响在 80 年代初前后经历了明显的年代际减弱，这主要是 ENSO 与印度夏季风关系减弱所致。Piao et al. (2020) 研究指出 90 年代初之后，El Niño 对东亚盛夏降水的影响显著加强，降水异常呈现出显著的偶极子模态，而 90 年代初期之前盛夏降水异常信号较弱。进一步研究发现，这主要是由于 90 年代初之后，El Niño 事件衰减速度较快，导致与之相关的夏季西北太平洋异常对流以及由其触发的类似 PJ 遥

相关波列向西移动,进而增强了 El Niño 事件对东亚地区盛夏降水的影响。最近,张文君等(2022)指出 90 年代末后 ENSO 事件衰减速率加快影响下,西北太平洋和印度洋海温异常与西北太平洋异常反气旋(WNPAC)的关系明显减弱,而 ENSO 组合模态与夏季 WNPAC 的关系在年代际尺度上较稳定,并没有受到 ENSO 性质变化的影响。该研究指出,相比于局地海气相互作用与印度洋电容器效应,ENSO 组合模态自身持续性较强,在 ENSO 衰减年夏季 WNPAC 的维持中起到了关键的作用。

东亚夏季风具有准两年周期变化的特征(TBO; 黄嘉佑, 1988; Si and Ding, 2012),即前一年较强的季风可指示次年将有较弱的季风,反之亦然。东亚夏季风 TBO 对东亚气候有着重要影响。已有研究表明,东亚夏季风 TBO 与同样具有准两年周期振荡特性的 ENSO 密切相关(黄荣辉等, 2006; Si and Ding, 2012; Liu et al., 2015)。最近, Yu et al. (2022b, c) 的研究发现, ENSO 影响下东亚夏季风 TBO 在 20 世纪 70 年代末和 90 年代末分别经历了两次明显的年代际变化。从图 4 可以看到, 70 年代末之后东亚夏季风 TBO 明显增强,并在 90 年代末之后有所减弱,但仍比 70 年代末之前要强。研究发现,上述东亚夏季风 TBO 的年代际变化与西北太平洋异常环流强度和位置的变化密切相关,受环流系统水汽输送的影响,中国东部准两年降水也呈现出不同的分布特征。70 年代末之后,准两年风场显著增强并向北扩展,准两年降水异常由华南向北移动至长江流域; 90 年代末之后,准两年风场略有减弱,准两年降水位置不变但强度减弱。进一步研究表明, ENSO 相关海温异常的强度、周期和位置等性质的转变在其中起到重要作用。70 年代末 ENSO 年代际转变下,东太平洋暖海温西移到中太平洋,北印度洋海温显著增暖,热带北大西洋暖海温有所增强,以上关键区海温的变化通过海气相互作用共同引起了西北太平洋环流异常的增强。90 年代末之后, ENSO 强度减弱且周期变短,以上关键区的异常海温也相对减弱,导致西北太平洋异常环流减弱。研究结果表明, ENSO 跨洋盆海气耦合的变化引起了西北太平洋异常环流的变化,进而导致了 70 年代末和 90 年代末夏季风 TBO 的两次年代际变化。

夏季北印度洋(NIO)和热带北大西洋(TNA)海温的变化,会通过海气相互作用影响西北太平洋地区的环流系统,从而对东亚夏季风造成显著影响。最近, Yu et al. (2022d) 研究指出, NIO 与 TNA 的关联在 21 世纪初经历了明显的年代际减弱,对夏季风的影响也相应减弱(图 5)。研究指出, ENSO 在夏季 NIO 与 TNA 的联系中起着重要作用。21 世纪初之前, ENSO 强迫西南印度洋海温增暖,通过激发反对称风场减少海洋向大气的潜热释放,使得夏季 NIO 海温偏暖。同时, ENSO 通过激发太平洋-北美遥相关,引起夏季 TNA 海温偏暖。因此, 21 世纪初之前的 ENSO 事件建立起了 NIO 和 TNA 海温的密切联系。相对比, 21 世纪初之后夏季 NIO 海温异常仍与 ENSO 有关,但由于 ENSO 强度减弱, TNA 海温异常与 ENSO 的连接发生中断。进一步研究指出, 21 世纪初之后 TNA 的增暖主要受负位相的北大西洋涛动影响。因此, 21 世纪初之后 ENSO 偏弱的情况下, NIO 和 TNA 海温异常的联系出现崩溃。

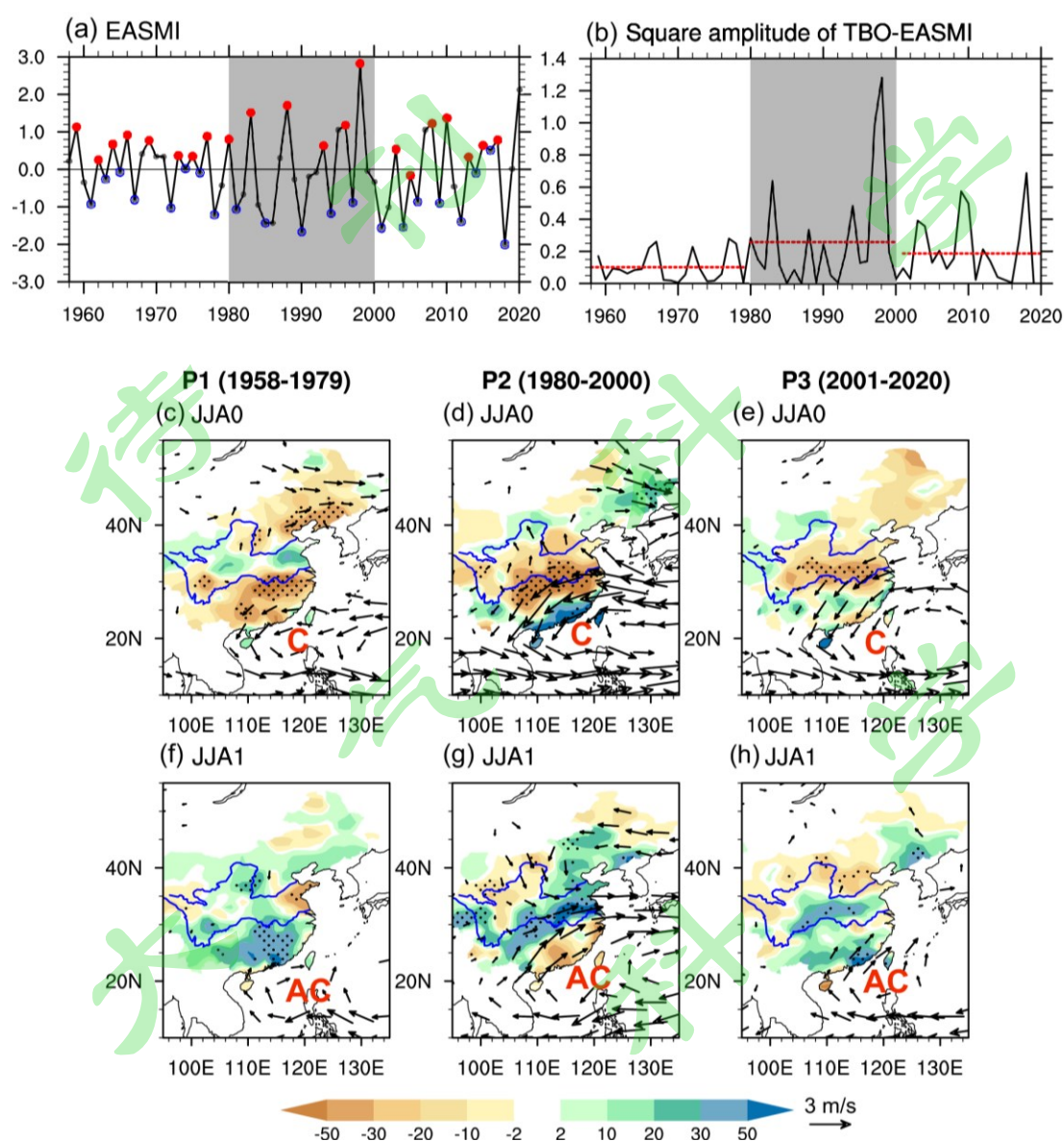


图 4 (a) 1958–2020 年东亚夏季风指数时间序列，红点（蓝点）代表强（弱）TBO 年。参考 Wang and Fan (1999)，东亚夏季风指数（EASMI）定义为（22.5°–32.5°N, 110°–140°E）和（5°–15°N, 90°–130°E）两个区域平均的 850-hPa 纬向风之差。(b) 带通滤波（2–3yr）东亚夏季风指数的振幅平方，红线分别代表 P1（1958–1979），P2（1980–2000）和 P3（2001–2020）三个时段的平均值。（c, f）P1，(d, g) P2 和 (e, h) P3 时段前一年夏季（JJA0）和后一年夏季（JJA1）的 850-hPa 风场（矢量；单位： m s^{-1} ）和降水（填色；单位： mm/month ）在弱 TBO 和强 TBO 年的合成差值场。打点为通过了 95% 信度检验的异常降水。矢量为通过了 95% 信度检验的异常风场。“AC” 和 “C” 分别表示异常反气旋和气旋

Fig. 4 (a) Time series of the summer (JJA) mean EASM index in the period 1958–2020. According to Wang and Fan (1999), the EASM index (EASMI) is calculated as the difference in summer mean 850-hPa zonal winds between the

regions (22.5° – 32.5° N, 110° – 140° E) and (5° – 15° N, 90° – 130° E). Solid dots indicate strong (red) and weak (blue) TBO years when the EASM is stronger or weaker than the preceding and following years, respectively. (b) Square amplitude of the TBO bandpass-filtered EASM index. The red lines indicate the amplitude averaged during P1 (1958–1979), P2 (1980–2000) and P3 (2001–2020). (c–h) Differences in 850-hPa wind anomalies (vectors; m s^{-1}) and summer rainfall of 160 stations over China (contours; mm/month) between the composites of the weak and strong TBO cases in JJA(0) and JJA(1) during (c, f) P1, (d, g) P2 and (e, h) P3, respectively. Dots indicate composite differences significant at the 95% confidence level. Wind anomalies exceeding the 95% confidence level are shown. The letters “AC” and “C” indicate the anticyclonic and cyclonic anomalies, respectively.

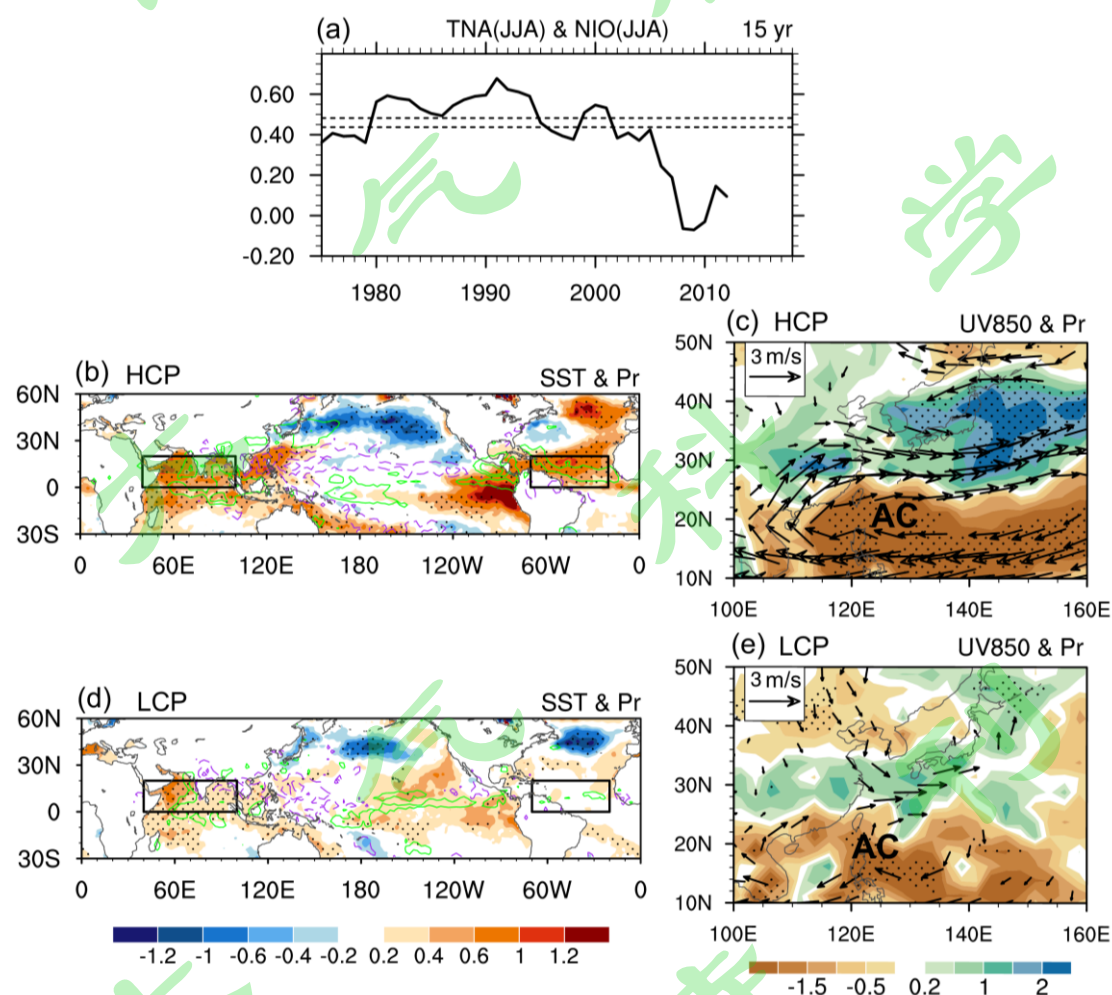


图5 (a) 夏季热带北大西洋(TNA)和北印度洋(NIO)海温指数的15年滑动相关系数, 虚线分别代表相关通过90%和95%的信度检验。(b, c) 二者高相关时期(HCP)和(d, e)低相关时期(LCP)夏季海表温度(填色; 单位: $^{\circ}\text{C}$), 降水(等值线; 单位: mm/day)和850-hPa风场(矢量; 单位: m s^{-1})。绿(紫)等值线代表正(负)异常降水, 等值线的间隔为2 mm/day 。方框代表选定的热

带北大西洋 (0° – 20° N, 70° W– 20° W) 和北印度洋 (0° – 20° N, 40° E– 100° E) 区域。打点处代表通过 95% 信度检验的异常场, 矢量为通过了 95% 信度检验的异常风场。“AC” 表示异常反气旋

Fig. 5 (a) 15-year sliding correlation coefficients of the JJA TNA index with the NIO index. The dashed lines indicate the 90% and 95% confidence levels, respectively. Composite differences of JJA SST anomalies ($^{\circ}$ C), precipitation anomalies (shading; mm/day) and 850-hPa wind anomalies (vectors; m s^{-1}) between positive and negative cases during (b, c) High Correlation Period (HCP) and (d, e) Low Correlation Period (LCP) during 1980–2020. The green (purple) contour lines in (b, d) represent the positive (negative) precipitation anomalies, respectively. The contour interval is 2 mm/day. The boxes shown are the NIO (0° – 20° N, 40° E– 100° E) and TNA (0° – 20° N, 70° W– 20° W) regions, respectively. The dots indicate the composite differences are above the 95% confidence levels. Winds anomalies exceeding the 95% confidence level are shown. The letters “AC” indicate the anticyclonic anomalies

4.2 东亚夏季风对印度洋和大西洋海温年代际变化的响应

热带印度洋和大西洋对东亚夏季风环流及夏季气候的影响也存在着明显的年代际变化 (Qu and Huang, 2012b; 孙颖等, 2014; Chang et al., 2016; Chen et al., 2020b; Zhao et al., 2020b; Piao et al., 2021; Li et al., 2022)。比如, Xie et al. (2010) 和 Huang et al. (2010) 指出, 20 世纪 70 年代末之前, 春季反对称风场和前冬中东太平洋的海温关系并不密切, 导致印度洋暖海温消退得很快不能维持到夏季, 从而对西北太平洋异常反气旋和夏季风的影响较弱; 而 70 年代末以后, 副热带西南印度洋的温跃层变浅, 印度洋对 ENSO 的响应增强, 热带印度洋暖海温能维持到夏季, 并通过激发开尔文波动对东亚夏季气候造成显著影响。Ding et al. (2010) 指出 70 年代末之后 IOD 对东亚夏季风的影响减弱。此外, Hong et al. (2014) 研究发现大西洋海温异常和夏季西太平洋副热带高压的关系存在明显的年代际变化, 80 年代之前二者并无显著联系, 而 80 年代之后二者联系紧密。Chang et al. (2016) 指出大西洋对西北太平洋和北印度洋海气耦合的强迫作用在 80 年代初加强。

EAP/PJ 遥相关型建立了东亚夏季风系统成员的内在联系, 对东亚夏季风气候有着重要影响 (Huang and Li, 1987; Nitta, 1987; 黄荣辉和李维京, 1988)。孙颖等 (2014) 指出 70 年代末前后 PJ 遥相关型的中心位置明显向西向南偏移, 这种位置的年代际变化与热带太平洋、印度洋海温的异常改变有关。最近, Xu et al. (2019) 发现 PJ 遥相关型的结构在 90 年代末之后再次改变, PJ 遥相关型向东偏移, 其热带外正压结构强度明显减弱, 对东亚降水的影响也相应减弱。Li et al. (2022) 进一步将其归因为 ENSO 相关的印度洋海温异常的改变。

春季北大西洋涛动 (NAO) 和春季北大西洋异常海温三极子型是东亚夏季风变异的重要调制因子。最近, Chen et al. (2020b) 研究发现春季 NAO 与北大

西洋三极子海温异常之间的关系自 80 年代末以来显著增强,使得春季 NAO 激发的海温异常信号更易维持至随后夏季影响东亚夏季风。研究表明,80 年代的前后两个时期,热带北大西洋海温冷却都可以通过罗斯贝波响应导致副热带西北大西洋出现异常反气旋。该异常反气旋北部的西风异常增强中纬度的天气尺度涡旋活动,并在其北(南)侧强迫出气旋性(反气旋性)涡度,进而在北大西洋产生一种类似 NAO 的偶极型大气异常,NAO 反过来可以通过调节表面热通量维持三极子海温异常。20 世纪 80 年代末以后天气尺度波活动对平均流的反馈作用增强,这与北大西洋天气尺度波强度的年代际增加有关。因此,自 20 世纪 80 年代末以来,北大西洋海温异常三极子可以激发出更强的 NAO 大气响应。进一步分析表明,80 年代前后春季 NAO 空间结构的变化也可能是导致春季 NAO 与三极子型海温联系年代际变化的原因,特别是 80 年代末之前,NAO 相关的大气环流异常较弱且位置偏北,对北大西洋三极子海温异常维持的贡献减小。

夏季风北边缘是季风区向非季风区的过渡地带,也是湿润区向干旱区的转换地区,其特有的生态脆弱性和气候敏感性使其表现极强的气候响应。Piao et al. (2018) 研究发现,70 年代末之后,5 月 NAO 对夏季风北边缘带夏季降水的影响显著加强。70 年代末之前,5 月 NAO 相关的位势高度异常局限在北大西洋地区并在夏季衰退,而在 70 年代末之后位势高度异常可持续到 7 月并呈现出类似极地-欧亚大陆遥相关型的大气环流异常模态,进而显著影响北边缘带夏季降水。二者关系的年代际增强可能与 70 年代末之后北半球环极涡旋的年代际收缩有关。Piao et al. (2017, 2021) 的研究还发现,伴随着干旱问题的加剧,90 年代末之后,亚洲内陆高原地区的降水呈现显著减少的趋势。进一步观测和模式试验的结果表明,90 年代末之后北大西洋海温的异常增暖可以触发欧亚大陆上空的遥相关波列并在夏季风北边缘带上空形成一个高压异常,进而通过引起水汽通量辐散和抑制对流活动导致降水出现年代际减少。此外,Zhao et al. (2020b) 研究发现热带北大西洋海温对北边缘带 8 月降水的年际关系的影响在 90 年代末之后显著减弱。90 年代末之后,热带北大西洋海温所激发的中高纬波列的空间结构发生了明显变化,原本位于活动带上空显著的负位势高度异常明显减弱而且北移,难以影响活动带地区的降水。进一步研究表明,热带北大西洋海温和活动带 8 月降水年际关系的年代际变化与热带北大西洋海温和 ENSO 关系的年代际变化无关。

4.3 PDO 和 AMO 的年代际调制

海表温度的年代际振荡主要有两种模态:太平洋年代际振荡(PDO)与北大西洋年代际振荡(AMO),它们是东亚夏季风年代际变化的主要自然驱动力,可以调制热带海温对夏季风的影响(比如:Lu et al., 2006; Dong and Zhou, 2014; Feng et al., 2014c; Song and Zhou, 2015; Zhang et al., 2018; Xue et al., 2018; Fan et al., 2019; Zhang et al., 2019; Chen et al., 2020a; Si et al., 2021b; Wu et al., 2022)。

PDO 作为更长时间尺度的气候背景场,可以调制 ENSO 的变化及其气候影

响（比如：Chen et al., 2013; Feng et al., 2014c; Xue et al., 2018; 张雯等, 2020）。Feng et al. (2014c) 指出 PDO 可以通过调节 ENSO 的衰减速度来显著调制 ENSO 对东亚夏季风的影响。PDO 正位相下, El Niño 衰减缓慢, 有利于印度洋暖海温的维持, 并通过电容器效应引起了夏季环流异常, 东亚地区受异常的西北太平洋反气旋和日本附近的气旋环流共同控制, 降水异常呈现三极型的分布特征, 季节内变率较小。相反, PDO 负位相下, El Niño 衰减加快, 次年夏季东太平洋转变为冷海温, 并通过 Gill 响应引起了西北太平洋异常反气旋环流, 降水异常呈现偶极型分布特征且存在明显的季节内变化。Xue et al. (2018) 研究发现 PDO 可以调制 ENSO 对夏季南亚高压的影响。当热带太平洋地区海温分布与 PDO 同位相, 即 El Niño (La Niña) 与 PDO 正 (负) 位相一起发生时, El Niño (La Niña) 事件会对夏季南亚高压的强度和位置造成显著影响, 而当 El Niño (La Niña) 与 PDO 负 (正) 位相一起发生时, El Niño (La Niña) 事件对南亚高压的影响明显偏弱。进一步研究表明, PDO 通过调制 ENSO 与热带印度洋海温异常的关系, 影响南亚高压的异常。此外, Yu et al. (2022b) 认为 PDO 可能通过调制 ENSO 衰减速度及印度洋海温异常的变化, 引起西北太平洋环流异常的改变, 从而对夏季风 TBO 的年代际变化产生间接影响。

Fan et al. (2019) 指出 AMO 可以调制与 El Niño 相关的东南亚降水异常, 具体调制过程在初夏和盛夏有所不同。初夏, AMO 通过调制 El Niño 相关的西北太平洋海气相互作用影响华南和中南半岛的降水; 盛夏, AMO 通过调制北大西洋激发的遥相关波列影响东南亚降水。随后, Xu et al. (2021) 研究了 AMO 对 ENSO 和初夏东亚夏季风关系的调制作用, 指出当 AMO 负位相时, ENSO 和初夏夏季风高度相关, 而 AMO 正相位时二者相关不显著。北极涛动 (AO) 是北半球热带外大气环流变化第一主导模态, 春季 AO 对随后东亚夏季风活动存在显著影响。Chen et al. (2020a) 最近指出 AMO 可以显著调制春季 AO 与夏季风之间的联系。在 AMO 负位相, 春季 AO 与夏季风联系紧密, 春季 AO 可以在北太平洋激发出明显的偶极型大气环流异常和三极型海温异常, 并通过风-蒸发-海温反馈机制维持至随后夏季, 进而影响东亚夏季风和东亚-西北太平洋气候。然而, 在 AMO 正位相, 春季 AO 对夏季风的影响非常弱, 春季 AO 的北太平洋活动中心偏弱, 导致其不能有效激发副热带环流和海温异常, 因此对随后夏季东亚环流和气候的影响很弱。研究结果表明, AMO 通过调制北太平洋环流背景态和天气尺度波活动改变春季 AO 的北太平洋中心, 进而影响春季 AO 相关的北太平洋海气相互作用过程及其对夏季风的影响。

最近, Si et al. (2021a) 分析了 PDO 和 AMO 对东北亚夏季降水年代际变化的协同影响。当 PDO 和 AMO 反位相时二者作用叠加有利于东亚夏季风异常的加强, 而当 PDO 和 AMO 同位相时二者作用抵消, 导致东亚夏季风异常的减弱。Zhang et al. (2020) 研究了 PDO 和 AMO 对华北极端高温年代际变化的影响, 指出 AMO 正位相和 PDO 负位相均可导致华北出现极端高温, 且 AMO 的影响占主导。

4.4 太阳活动和 QBO 的年代际调制

热带海温影响东亚夏季风的不稳定性，还受到如太阳活动 11 年周期和热带平流层下层纬向风准两年周期振荡（QBO）的显著调制。Xue et al. (2015b) 指出 ENSO 对南亚高压的影响受到 QBO 的调制。在 QBO 东风位相，ENSO 对夏季南亚高压的变化有显著影响，而在西风位相，两者几乎没有联系。太阳活动具有比较规律的 11 年周期变化，也是重要的年代际变化信号。研究表明，太阳活动的影响可以通过热带海气相互作用得到强化。比如，周群和陈文（2012）分析了太阳活动对 ENSO 年海温异常演变以及与之相联系的东亚降水的影响。最近，Jin et al. (2019) 指出太阳活动可以通过激发一个具有显著 11 年周期类似 PDO 负位相的海温异常模态，进一步影响东亚夏季风的年代际变化。Xue et al. (2020) 研究发现，ENSO 与夏季南亚高压之间的关系受到太阳活动 11 年周期的显著调制。El Niño 或 La Niña 与低太阳活动位相年一起发生时，ENSO 可以显著影响夏季南亚高压的变化。在低太阳活动位相年，El Niño 和印度洋充电过程较强，使得强的印度洋和海洋大陆暖海温延伸至西北太平洋地区，显著影响南亚高压的变化。然而，当 El Niño 或 La Niña 与高太阳活动位相年一起发生时，南亚高压的变化则很弱，这主要是 ENSO 引起的印度洋海温异常偏弱所致。Chen et al. (2020c) 分析了太阳活动 11 年周期对春季北大西洋涛动（NAO）与随后夏季风关系的影响。研究发现，低太阳活动位相年春季 NAO 与夏季风的关系更为密切，与 5 月 NAO 相关的北大西洋三极子型海温异常可以发展并持续到初夏，进一步激发强的大气响应并加强东亚急流。

5 热带海温在东亚冬夏季风循环中的作用

东亚夏季风和东亚冬季风作为东亚季风系统的两个组成部分，它们之间存在着显著的相互联系和影响（比如：Chen et al., 1992; Sun and Sun, 1994; Wu and Chan, 2005; Yan et al., 2011; Li et al., 2011）。针对东亚夏季风和冬季风关联的研究，有助于我们从东亚季风循环演变的整体角度来理解东亚季风的变异及机理。本节统一定义强夏季风代表季风区为南风异常，梅雨带降水偏多；强冬季风代表季风区为北风异常。

5.1 东亚冬季风与次年夏季风的联系

研究表明，东亚冬季风与次年夏季风之间存在紧密联系（Chen et al., 2000; 陈文, 2002）。Chen et al. (2013)、Feng and Chen (2014b) 和 Yu et al. (2019, 2020) 的一系列研究指出，当 ENSO 事件发生时，冬季的海温分布型有利于在西北太平洋地区激发异常环流，并从冬季维持到次年夏季，从而建立起冬季风与次年夏季风之间的紧密联系（图 6）。与 ENSO 相关的冬季风异常可以引起西北太平洋异常环流从冬季到夏季的持续，从而影响次年东亚夏季风；而与 ENSO 不相关的冬季风异常虽然也可以引起冬季西北太平洋异常环流，但是只在冬季存在且主要位于西北太平洋的北侧，异常环流不能持续到次年的春夏季，也就无法建立起

冬季风与次年夏季风的联系。进一步的分析表明，以上与 ENSO 相关的影响过程受到 PDO 的显著调制。

以上研究强调了 ENSO 在东亚冬季风与次年夏季风的联系中扮演着重要角色。徐霈强等（2016）进一步分析发现冬季风与次年夏季风的联系在 ENSO 冷暖事件中存在着明显的非对称性，El Niño 影响下的西北太平洋异常反气旋环流较 La Niña 影响下的异常气旋环流位置偏南且强度偏强，这主要由于热带太平洋和印度洋海温演变的差异所致。随后，Shi and Qian（2018）针对 ENSO 影响冬季风与次年夏季风关联进行了分类、分位相研究，发现东太平洋 El Niño 影响下西北太平洋异常反气旋强度更强且范围更大，冬季风与次年夏季风的关系较中太平洋 El Niño 更为紧密。此外，La Niña 影响下西北太平洋异常气旋强度较弱，冬季风与次年夏季风的联系明显弱于两类 El Niño 事件，强冬季风到弱夏季风的反位相转变仅出现在中部型 La Niña 事件中，这主要与北印度洋和西北太平洋海温异常的影响有关。

除了 ENSO 事件对冬季风与次年夏季风联系的影响外，Wang and Wu（2012）的研究还发现，印度洋海温在强冬季风到次年弱夏季风的转变中也起到重要作用。强冬季风造成海洋性大陆上的正降水异常，通过激发了 Gill-Matsuno 响应导致西北印度洋出现异常西风，并引起海温冷却，该印度洋冷海温可以持续到次年夏季，导致西北太平洋地区出现异常气旋性环流。此外，周群和陈文（2014）研究了太阳活动 11 年周期对冬季风与次年夏季风关系的影响及具体过程。研究表明，太阳活动显著影响了东亚冬季风与 ENSO 的关系，在低太阳活动位相年 ENSO 与东亚冬季风的关系更为密切，西北太平洋异常环流更强且范围更广，从而冬季风与次年夏季风的关系较高太阳活动位相年更为紧密，而这主要与印度洋和热带西太平洋异常海温有关。

5.2 东亚夏季风与后期冬季风的联系

相对于冬季风与次年夏季风的联系，有关夏季风与后期冬季风关系的研究较少。Yu et al.（2021）最近的研究发现，东亚夏季风与后期冬季风也存在密切关联。通过挑选东亚夏季风和冬季风异常年份，分为四组转换关系进行合成分析。结果表明，强（弱）夏季风之后常发生强（弱）冬季风，即夏季风与后期冬季风的关系以同位相转换为主。夏季西北太平洋的异常反气旋和冬季的异常气旋建立起了强夏季风到后期强冬季风的转换，夏季西北太平洋异常气旋和冬季的异常反气旋则建立起了弱夏季风到弱冬季风的转换关系（图 6）。进一步研究表明，ENSO 在夏季风与后期冬季风的同位相转换中起到关键作用，ENSO 相关的对流异常通过激发罗斯贝波响应，导致夏季到后期冬季西北太平洋环流异常发生转变。此外，研究还发现 ENSO 冷暖事件在夏季风影响后期冬季风的同位相转换中也存在明显的非对称性，El Niño 事件下夏季风到冬季风的同位相转换比 La Niña 事件下更强。

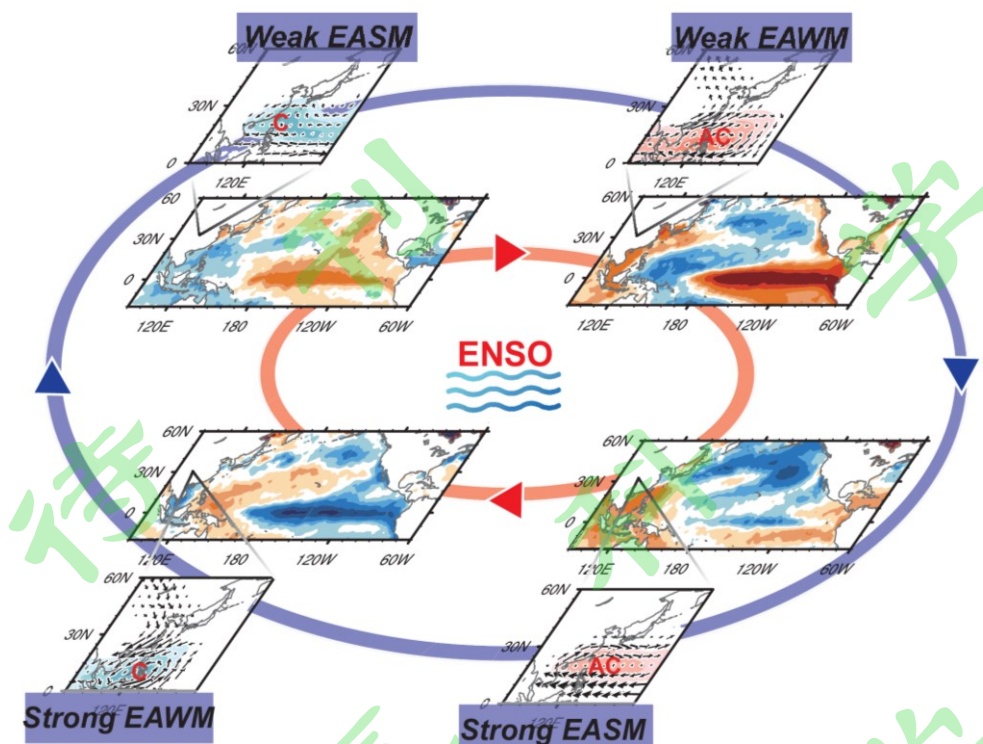


图 6 ENSO 在东亚冬、夏季风循环中的作用的示意图。ENSO 的循环演变（红色内环）导致了关键风场西北太平洋异常环流的演变（蓝色外环），最终造成东亚季风的循环演变。其中，红色内环四张图中填色为异常海温场。蓝色外环四张图中填色为异常流函数，矢量为异常风场，“C”和“AC”分别表示西北太平洋异常气旋和反气旋

Fig. 6 Schematic representation of the roles of ENSO in the link between the East Asian winter monsoon (EAWM) and the East Asian summer monsoon (EASM). The link between the EAWM and EASM is established by the evolution of the western North Pacific wind anomalies (outer blue ring), in which ENSO (inner red ring) plays a crucial role. In the four plots on the inner red ring, shading represents the anomalous sea surface temperature. In the four plots on the outer blue ring, shading indicates the anomalous stream-functions, and the vectors are the anomalous winds. “C” and “AC” indicate anomalous cyclone and anticyclone over the western North Pacific, respectively

6 总结和讨论

本文从季节内、年际和年代际三个不同时间尺度，简要回顾了 ENSO、印度洋和大西洋热带海气相互作用对东亚夏季风的影响及其机制，重点介绍了近五年来的最新研究进展。热带海温主要通过激发西北太平洋环流异常来影响东亚夏季风。西北太平洋环流异常主要由 ENSO 相关的海气相互作用所激发，并通过热带各关键区海温异常及海气耦合机制维持到次年夏季，影响东亚夏季气候。受

ENSO 季节锁相影响，中东太平洋海温异常往往在次年夏季消退，而印度洋和大西洋在夏季西北太平洋环流异常的维持中起到更为重要的作用，这两个海区对 ENSO 有着显著的响应，可以将前冬热带太平洋的异常信号存储并在夏季释放出来直接影响西北太平洋异常环流。需要注意的是，以上过程并非 ENSO 强迫下的直接响应，而涉及复杂的热带海气相互作用和海洋动力的耦合，共同促进局地异常信号的发生发展。此外，某一海区的海温异常可能包含其他海区之间相互作用的结果，近年来越来越多的研究开始关注不同区域热带海温变化对东亚夏季风的协同影响。

年际时间尺度上，以往的研究多侧重于 ENSO 和印度洋或大西洋海温变化对东亚夏季风的影响。近期研究指出，El Niño 衰减年夏季西北太平洋异常反气旋的南北纬向范围受到北印度洋和热带北大西洋的不同影响，北印度洋暖海温导致反气旋向南收缩，而热带北大西洋暖海温导致反气旋向北扩展。2020 年的超强梅雨导致江淮流域出现了严重的洪涝灾害，研究指出造成这次超强梅雨的关键环流系统是西北太平洋异常反气旋，而热带印度洋和大西洋海温异常的持续偏暖为这次持续偏强的异常反气旋提供了主要驱动力。研究模式对热带海温与东亚夏季风关系的模拟能力，分析耦合模式中的误差来源，有助于加深我们对热带海气相互作用影响夏季风机制的理解。近期研究指出，CMIP5 模式对中太平洋型 El Niño 影响东亚夏季风的模拟偏差，主要与 El Niño 缓慢衰减所致的北印度洋暖海温偏差有关。此外，模式对 ENSO 与南亚高压关系的再现，来源于对 ENSO 激发印度洋电容器效应的合理模拟。模式对 PJ 遥相关型的模拟能力与前冬 ENSO 及其在热带印-太海区的海温演变密切相关。相较于 CMIP3 和 CMIP5 模式，CMIP6 中东亚夏季风模拟的改善，很大程度上依赖于 ENSO 及次年夏季印度洋和大西洋海温的合理模拟。

以往的工作主要基于夏季平均开展热带海温变化对夏季风系统及气候的影响研究。然而，东亚夏季风具有阶段性向北推进的季节内变化，夏季平均无法体现其季节内尺度上的变化特征，近年来的研究开始关注季节内尺度上热带海温对东亚夏季风的影响。初夏（5-6 月）到盛夏（7-8 月）的环流转变是东亚夏季风季节内变化的主要模态，其与热带海温的关系也有所不同。近期研究指出，在热带北大西洋暖海温影响下夏季西北太平洋反气旋环流呈现出逐步向北移动的季节内变化，而在北印度洋影响下西北太平洋反气旋环流位置稳定不变。此外，当二者共同影响下西北太平洋反气旋环流稳定不动，热带北大西洋暖海温的作用被抑制。东亚夏季风与雨带的向北推进对东亚夏季气候有着重要影响，今后应该重视季节内尺度上热带海气相互作用对东亚夏季风的影响及机理研究，以期在实际业务工作提供更精确的参考。

最近，关于热带海温对东亚夏季风影响的年代际变化研究取得较大进展，这些研究结果表明：20 世纪 70 年代末和 90 年代末 ENSO 自身性质的两次年代际转变，导致 ENSO 遥相关及太平洋、印度洋和大西洋关键区的热带海温发生显著调整，并通过海气相互作用引起西北太平洋环流异常的变化，最终造成东亚夏

季风系统及夏季降水发生改变。21 世纪初以来 ENSO 自身强度的减弱，导致北印度洋和热带北大西洋的联系显著减弱，二者对夏季风的影响也相应发生改变。近期研究还发现，春季北大西洋涛动与北大西洋三极子海温异常之间的关系自 80 年代末以来显著增强，使得春季北大西洋涛动激发的海温异常信号更易维持至随后夏季影响东亚夏季风。90 年代末之后，北大西洋海温的异常增暖导致夏季风北边缘带降水骤减。热带海温影响东亚夏季风的不稳定性，还受到如 PDO、AMO、太阳活动 11 年周期等的显著调制。近期研究表明，PDO 可以调制 ENSO 对夏季风环流系统的影响，AMO 可以调制 ENSO 与夏季风及降水的关系，以及春季北极涛动与夏季风之间的联系。PDO 和 AMO 对东北亚夏季降水及华北极端高温的年代际变化有不同的影响。此外，ENSO 与夏季南亚高压的关系，春季北大西洋涛动与夏季风的关系均受到太阳活动 11 年周期的显著调制。以上变化机制可能和全球增暖有关，也可能与热带海温及东亚夏季风的年代际变化有关。为了更好的分析未来东亚夏季风的变异，今后有必要深入研究全球变暖背景下热带海温的变化及其对东亚夏季风的影响和机理。

东亚夏季风与冬季风之间存在密切的关联，以往的研究主要揭示了东亚冬季风与次年夏季风的联系，并强调了 ENSO 对二者联系的重要影响。近期研究发现，东亚夏季风与后期冬季风也存在紧密联系，随着 ENSO 海温的发展演变，相应的海气相互作用导致西北太平洋环流异常从夏季到冬季发生转变，从而形成了东亚夏季风与后期冬季风的同位相转换关系。针对东亚夏季风和冬季风关联的研究，有助于我们从东亚季风循环演变的整体角度来理解东亚季风的变异及机理。最后，由东亚夏季风异常所引发的极端气候灾害事件近年来频繁发生，为了更好的理解极端气候异常事件的成因，需要在未来深入研究热带海温异常导致夏季气候异常的机制，建立极端事件与夏季风变异的可能联系。

参考文献 (References)

- An S Il, Wang B. 2000. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency [J]. *J. Clim.*, 13(12): 2044–2055. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2044:ICOTSO>2.0.CO;2
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res. Ocean.* 112. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- Brönnimann S. 2007. Impact of El Niño–Southern Oscillation on European climate [J]. *Rev. Geophys.*, 45(3): 1–28. doi:10.1029/2006RG000199
- Cai W J, Wu L X, Lengaigne M, et al. 2019. Pantropical climate interactions [J]. *Science*, 363(6430): eaav4236. doi:10.1126/science.aav4236
- Cai Y, Chen Z, Du Y. 2022. The role of Indian Ocean warming on extreme rainfall in central China during early summer 2020: without significant El Niño influence [J]. *Clim. Dyn.*, 59(3–4): 951–960. doi:10.1007/s00382-022-06165-9
- Cao J, Ding Y C, Wang J, et al. 2018. The sea surface temperature configuration of Greenland Sea–subpolar region of North Atlantic and the summer rainfall anomaly in low-latitude highlands of China [J]. *Int. J. Climatol.*, 38(7): 3082–3089. doi:10.1002/joc.5484
- Cen S X, Chen W, Chen S F, et al. 2022. Weakened influence of El Niño–Southern Oscillation on the zonal shift of the South Asian High after the early 1980s [J]. *Int. J. Climatol.*, 42(15): 7583–7597. doi:10.1002/joc.7666
- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Clim.*, 13(24): 4310–4325. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4310:IAIVOT>2.0.CO;2
- Chang P, Fang Y, Saravanan R, et al. 2006. The cause of the fragile relationship between the Pacific El Niño and the Atlantic Niño [J]. *Nature*, 443(7109): 324–328. doi:10.1038/nature05053
- Chang T C, Hsu H H, Hong C C. 2016. Enhanced influences of tropical atlantic SST on WNP-NIO atmosphere-ocean coupling since the early 1980s [J]. *J. Clim.*, 29(18): 6509–6525. doi:10.1175/JCLI-D-15-0807.1
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. *应用气象学报*, 24(5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of Physical Mechanisms of the Global SSTA Impact on EASM [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 24(5): 521–532. doi:10.11898/1001-7313.20130502
- Chen L, Li G. 2023. Asymmetric effect of ENSO in the decaying stage on the central China July precipitation [J]. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06731-9>
- Chen L, Li G, Lu B, et al. 2022a. Two Approaches of the Spring North Atlantic Sea Surface Temperature Affecting the Following July Precipitation over Central China: The Tropical and Extratropical Pathways [J]. *J. Clim.*, 35(20): 2969–2986. doi:10.1175/JCLI-D-21-1012.1
- Chen L J, Gu W, Li W J. 2019a. Why Is the East Asian Summer Monsoon Extremely

- Strong in 2018?—Collaborative Effects of SST and Snow Cover Anomalies [J]. *J. Meteorol. Res.*, 33(4): 593–608. doi:10.1007/s13351-019-8200-4
- Chen L Y, Chen W, Hu P, et al. 2022b. Climatological characteristics of the East Asian summer monsoon retreat based on observational analysis [J]. *Clim. Dyn.*, 60(9): 3023–3037. doi:10.1007/s00382-022-06489-6
- Chen S F, Wu R G, Chen W. 2018. Modulation of spring northern tropical Atlantic sea surface temperature on the El Niño–Southern Oscillation–East Asian summer monsoon connection [J]. *Int. J. Climatol.*, 38(13): 5020–5029. doi:10.1002/joc.5710
- Chen S F, Chen W, Wu R G, et al. 2020a. Impacts of the atlantic multidecadal oscillation on the relationship of the spring arctic oscillation and the following east asian summer monsoon [J]. *J. Clim.*, 33(15): 6651–6672. doi:10.1175/JCLI-D-19-0978.1
- Chen S F, Wu R G, Chen W. 2020b. Strengthened connection between springtime north atlantic oscillation and north atlantic tripole SST pattern since the late 1980s [J]. *J. Clim.*, 33(5): 2007–2022. doi:10.1175/JCLI-D-19-0628.1
- Chen S F, Chen W, Wu R G, et al. 2021. Performance of the IPCC AR6 models in simulating the relation of the western North Pacific subtropical high to the spring northern tropical Atlantic SST [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(4): 2189–2208. doi:10.1002/joc.6953
- Chen S F, Shi W J, Wang Z B, et al. 2022c. Impact of interannual variation of the spring Somali Jet intensity on the northwest–southeast movement of the South Asian High in the following summer [J]. *Clim. Dyn.*, 60(5): 1583–1598. doi:10.1007/s00382-022-06399-7
- Chen T C, Wang S Y, Huang W R, et al. 2004. Variation of the East Asian summer monsoon rainfall [J]. *J. Clim.*, 17(4): 744–762. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0744:VOTEAS>2.0.CO;2
- 陈文. 2002. El Niño和La Niña事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26: 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 26: 595–610. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- 陈文, 康丽华, 王玓. 2006. 中国夏季降水与全球海温的耦合关系分析 [J]. *气候与环境研究*, 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)*, 3: 259–269. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.03.002.
- 陈文, 丁硕毅, 冯娟, 等. 2018. 不同类型ENSO对东亚季风的影响和机理研究进展 [J]. *大气科学*, 42 (3): 640–655. Chen Wen, Ding Shuoyi, Feng Juan, et al. 2018. Progress in the study of impacts of different types of ENSO on the East Asian monsoon and their mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (3): 640–655. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17248.
- Chen W, Hans-F. G, Huang R H. 2000. The Interannual Variability of East Asian Winter Monsoon and Its Relation to the Summer Monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*,

- 17(1): 48–60. doi:10.1007/s00376-000-0042-5
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013. Roles of ENSO and PDO in the link of the east asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. *J. Clim.*, 26(2): 622–635. doi:10.1175/JCLI-D-12-00021.1
- Chen W, Wang L, Feng J, et al. 2019b. Recent Progress in Studies of the Variabilities and Mechanisms of the East Asian Monsoon in a Changing Climate [J]. *Adv. Atmos. Sci.* 36:887–901. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-8230-y>
- Chen W, Zhou Q, Xue X. 2020c. Solar cycle modulation of the relationship between the boreal spring Northern Atlantic Oscillation and the East and Southeast Asian summer climate [J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 132(2): 287–295. doi:10.1007/s00703-019-00687-4
- Chen W, Zhang R H, Wu R G, et al. 2023. Recent advances in understanding multi-scale climate variability of the Asian monsoon. *Adv. Atmos. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2266-8>
- Chen W, Park J K, Dong B W, et al. 2012. The relationship between El Niño and the western North Pacific summer climate in a coupled GCM: Role of the transition of El Nio decaying phases [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117(12):. doi:10.1029/2011JD017385
- Chen X, Li C, Li X. 2020. Influences of ENSO on boreal summer intraseasonal oscillation over the western Pacific in decaying summer [J]. *Clim. Dyn.*, 54: 3461–3473. doi:10.1007/s00382-020-05183-9
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2016. Relative importance of tropical SST anomalies in maintaining the Western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño to La Niña transition years [J]. *Clim. Dyn.*, 46(3–4): 1027–1041. doi:10.1007/s00382-015-2630-1
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2017. Roles of tropical SST anomalies in modulating the western north Pacific anomalous cyclone during strong La Niña decaying years [J]. *Clim. Dyn.*, 49(1–2): 633–647. doi:10.1007/s00382-016-3364-4
- Cheng Y F, Wang L, Li T. 2020. Causes of interdecadal increase in the intraseasonal rainfall variability over Southern China around the Early 1990s [J]. *J. Clim.*, 33(21): 9481–9496. doi:10.1175/JCLI-D-20-0047.1
- Cheng Y, Wang L, Li T. 2021. Two Distinct Types of 10–30-Day Persistent Heavy Rainfall Events over the Yangtze River Valley [J]. *J. Clim.*, 34(23): 9571–9584. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0741.1
- Choi Y W, Ahn J B. 2019. Possible mechanisms for the coupling between late spring sea surface temperature anomalies over tropical Atlantic and East Asian summer monsoon [J]. *Clim. Dyn.*, 53(11): 6995–7009. doi:10.1007/s00382-019-04970-3
- Chung P H, Sui C H, Li T. 2011. Interannual relationships between the tropical sea surface temperature and summertime subtropical anticyclone over the western North Pacific [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(13):. doi:10.1029/2010JD015554
- 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]. *Clim. Dyn.*, 34(7):

- 1059–1071. doi:10.1007/s00382-009-0555-2
- 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化 [J]. 大气科学, 42 (3): 533–558. Ding Yihui, Si Dong, Liu Yanju, et al. 2018. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (3): 533–558. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17261.
- Ding Y H, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview [J]. Meteorol. Atmos. Phys., 89(1–4): 117–142. doi:10.1007/s00703-005-0125-z
- Ding Y H, Liang P, Liu Y J, et al. 2020. Multiscale Variability of Meiyu and Its Prediction: A New Review [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 125(7):. doi:10.1029/2019JD031496
- 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. doi:10.1007/s00376-021-0361-2
- Dong L, Zhou T J. 2014. The formation of the recent cooling in the eastern tropical Pacific Ocean and the associated climate impacts: A competition of global warming, IPO, and AMO [J]. J. Geophys. Res., 119(19): 11,272–11,287. doi:10.1002/2013JD021395
- 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. Clim. 22:2023–2038. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2590.1>
- Enfield D B, Mayer D A. 1997. Tropical atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation [J]. J. Geophys. Res. C Ocean. 102:929–945. <https://doi.org/10.1029/96JC03296>
- Fan L, Shin S I, Liu Q Y, et al. 2013. Relative importance of tropical SST anomalies in forcing East Asian summer monsoon circulation [J]. Geophys. Res. Lett., 40(10): 2471–2477. doi:10.1002/grl.50494
- Fan Y, Fan K, Zhu X H, et al. 2019. El Niño-related summer precipitation anomalies in Southeast Asia modulated by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. J. Clim., 32(22): 7971–7987. doi:10.1175/JCLI-D-19-0049.1
- Fang C X, Liu Y, Cai Q F, et al. 2021. Why Does Extreme Rainfall Occur in Central China during the Summer of 2020 after a Weak El Niño? [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(12): 2067–2081. doi:10.1007/s00376-021-1009-y
- Feng J, Chen W. 2014a. Influence of the IOD on the relationship between El Niño Modoki and the East Asian-western North Pacific summer monsoon [J]. Int. J. Climatol., 34(6): 1729–1736. doi:10.1002/joc.3790
- Feng J, Chen W. 2014b. Interference of the East Asian winter monsoon in the impact of ENSO on the East Asian summer monsoon in decaying phases [J]. Adv. Atmos. Sci., 31(2): 344–354. doi:10.1007/s00376-013-3118-8
- Feng J, Wang L, Chen W. 2014c. How does the east asian summer monsoon behave in the decaying phase of el niño during different PDO phases [J]. J. Clim., 27(7): 2682–2698. doi:10.1175/JCLI-D-13-00015.1
- Feng J, Chen W, Gong H N, et al. 2019. An investigation of CMIP5 model biases in simulating the impacts of central Pacific El Niño on the East Asian summer

- monsoon [J]. *Clim. Dyn.*, 52(5–6): 2631–2646. doi:10.1007/s00382-018-4284-2
- Feng J, Chen W, Wang X C. 2020. Reintensification of the Anomalous Western North Pacific Anticyclone during the El Niño Modoki Decaying Summer: Relative Importance of Tropical Atlantic and Pacific SST Anomalies [J]. *J. Clim.*, 33(8): 3271–3288. doi:10.1175/JCLI-D-19-0154.1
- Feng J, Chen W. 2021. Roles of the North Indian Ocean SST and Tropical North Atlantic SST in the Latitudinal Extension of the Anomalous Western North Pacific Anticyclone during the El Niño Decaying Summer [J]. *J. Clim.*, 34(21): 8503–8517. doi:10.1175/jcli-d-20-0802.1
- Feng J, Chen W. 2022. Respective and combined impacts of north Indian Ocean and tropical North Atlantic SST anomalies on the sub-seasonal evolution of anomalous western North Pacific anticyclone [J]. *J. Clim.*, (May): 1–30. doi:10.1175/jcli-d-21-0799.1
- Feng J M, Wei T, Dong W J, et al. 2014d. CMIP5/AMIP GCM simulations of East Asian summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(4): 836–850. doi:10.1007/s00376-013-3131-y
- Fu Y H, Lin Z D, Wang T. 2021. Simulated Relationship between Wintertime ENSO and East Asian Summer Rainfall: From CMIP3 to CMIP6 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(2): 221–236. doi:10.1007/s00376-020-0147-y
- 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):. doi:10.1038/s41467-023-36053-7
- Gill A. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 106(449): 447–462. doi:10.1256/smsqj.44904
- Gong H N, Wang L, Chen W, et al. 2018. Diversity of the Pacific-Japan Pattern among CMIP5 Models: Role of SST Anomalies and Atmospheric Mean Flow [J]. *J. Clim.*, 31(17): 6857–6877. doi:10.1175/JCLI-D-17-0541.1
- Guan W N, Hu H B, Ren X J, et al. 2019. Subseasonal zonal variability of the western Pacific subtropical high in summer: climate impacts and underlying mechanisms [J]. *Clim. Dyn.*, 53(5–6): 3325–3344. doi:10.1007/s00382-019-04705-4
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections[J]. *Geophys Res Lett*, 30, doi:10.1029/2002 GL016831
- Guo Y Y, Zhang R J, Wen Z P, et al. 2021. Understanding the role of SST anomaly in extreme rainfall of 2020 Meiyu season from an interdecadal perspective [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 64(10): 1619–1632. doi:10.1007/s11430-020-9762-0
- Ha Y, Zhong Z, Hu Y J, et al. 2019. Differences between decadal decreases of boreal summer rainfall in southeastern and southwestern China in the early 2000s [J]. *Clim. Dyn.*, 52(5–6): 3533–3552. doi:10.1007/s00382-018-4408-8
- Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al. 2013. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/Southern Oscillation events [J]. *Nat. Geosci.* 6:112–116. <https://doi.org/10.1038/ngeo1686>
- Han T T, Zhang M H, Zhou B T, et al. 2020. Strengthened relationship between tropical west pacific and midsummer precipitation over northeast China after the Mid-1990s [J]. *J. Clim.*, 33(16): 6833–6848. doi:10.1175/JCLI-D-19-0957.1

- He J H, Ju J H, Wen Z P, et al. 2007. A review of recent advances in research on Asian monsoon in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24(6): 972–992. doi:10.1007/s00376-007-0972-2
- He S, Yu J Y, Yang S, et al. 2020. ENSO's impacts on the tropical Indian and Atlantic Oceans via tropical atmospheric processes: observations versus CMIP5 simulations [J]. *Clim. Dyn.*, 54(11–12): 4627–4640. doi:10.1007/s00382-020-05247-w
- Hoerling M P, Kumar A, Zhong M. 1997. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections [J]. *J. Clim.*, 10(8): 1769–1786. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2
- Hong C C, Chang T C, Hsu H H. 2014. Enhanced relationship between the tropical atlantic SST and the summertime western north pacific subtropical high after the early 1980s [J]. *J. Geophys. Res.*, 119(7): 3715–3722. doi:10.1002/2013JD021394
- Hsu P C, Lee J Y, Ha K J. 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China. *Int. J. Climatol.*, 36: 1403–1412. doi:10.1002/joc.4433
- 胡娟, 晏红明, 周建琴. 2018. 影响东亚夏季风降水异常的前期海温信号 [J]. *热带气象学报*, 34(3): 401–409. Hu Juan, Yan Hongming, Zhou Jianqin. 2018. The research of antecedent SST signal to East Asia summer monsoon [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 34(3): 401–409. doi: 1004-4965(2018)03-0401-09
- 胡豪然, 钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 57–65. Hu Haoran, Qian Weihong. 2007. Recognition of the Northern boundary of the East Asian summer monsoon [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17(1): 57–65. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2007.01.009
- Hu K M, Huang G, Qu X, et al. 2012. The impact of Indian Ocean variability on high temperature extremes across the southern Yangtze River valley in late summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29(1): 91–100. doi:10.1007/s00376-011-0209-2
- Hu K M, Huang G, Xie S P, et al. 2019. Effect of the mean flow on the anomalous anticyclone over the Indo-Northwest Pacific in post-El Niño summers [J]. *Clim. Dyn.*, 53(9–10): 5725–5741. doi:10.1007/s00382-019-04893-z
- Hu Z Z, Kumar A, Huang B, et al. 2020. The Interdecadal Shift of ENSO Properties in 1999/2000: A Review [J]. *J. Clim.*, 33(11): 4441–4462. doi:10.1175/jcli-d-19-0316.1
- Huang B H, Shukla J. 2005. Ocean-atmosphere interactions in the tropical and subtropical Atlantic Ocean [J]. *J. Clim.*, 18(11): 1652–1672. doi:10.1175/JCLI3368.1
- Huang D Q, Liu A Q, Zheng Y X, et al. 2022. Inter-Model Spread of the Simulated East Asian Summer Monsoon Rainfall and the Associated Atmospheric Circulations From the CMIP6 Models [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 127(20):.. doi:10.1029/2022JD037371
- Huang D Q, Zhu J, Zhang Y C, et al. 2013. Uncertainties on the simulated summer precipitation over Eastern China from the CMIP5 models [J]. *J. Geophys. Res.*

- Atmos., 118(16): 9035–9047. doi:10.1002/jgrd.50695
- 黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40(1): 121–130. Huang Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 121–130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143
- 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. Clim., 23(19): 5294–5304. doi:10.1175/2010JCLI3577.1
- 黄嘉佑. 1988. 准两年周期振荡在我国月降水量中的表现 [J]. 大气科学, 12(3): 267–273. Huang Jiayou. 1988. The representations of the quasi-biennial periodic oscillation in precipitation over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12(3): 267–273. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.03.06
- 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: 513–519. Huang Ping, Huang Ronghui. 2010. Effects of El Nino events on intraseasonal variations of following summer rainfall in China and its mechanism [J]. Trans. Atmos. Sci., 33: 513–519. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2010.05.015
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. 大气科学, 特刊: 95–107. Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia and physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), Special Issue: 95–107. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.08
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. 大气科学, 30(4): 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The Quasi-Biennial Oscillation of Summer Monsoon Rainfall in China and Its Cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(4): 545–560. doi:10.1016/S1001-8042(06)60011-0
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// Proceedings of the International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 40–45.
- 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. doi:10.1007/BF02656915
- 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. doi:10.1007/s00376-007-0993-x
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. Adv. Atmos. Sci., 29(5): 910–942. doi:10.1007/s00376-012-2015-x
- Huang Z C, Zhang W J, Geng X, et al. 2020. Recent shift in the state of the western

- Pacific subtropical high due to ENSO change [J]. *J. Clim.*, 33(1): 229–241. doi:10.1175/JCLI-D-18-0873.1
- Jiang W P, Huang G, Hu K M, et al. 2017. Diverse relationship between ENSO and the northwest pacific summer climate among CMIP5 models: Dependence on the enso decay pace [J]. *J. Clim.*, 30(1): 109–127. doi:10.1175/JCLI-D-16-0365.1
- Jiang W P, Huang G, Huang P, et al. 2019. Northwest Pacific anticyclonic anomalies during post-El Niño summers determined by the pace of El Niño decay [J]. *J. Clim.*, 32(12): 3487–3503. doi:10.1175/JCLI-D-18-0793.1
- Jin C H, Liu J, Wang B, et al. 2019. Decadal variations of the east Asian summer monsoon forced by the 11-year insolation cycle [J]. *J. Clim.*, 32(10): 2735–2745. doi:10.1175/JCLI-D-18-0288.1
- Jin F F, An S Il, Timmermann A, et al. 2003. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(3): 20–1. doi:10.1029/2002GL016356
- Kang I S, Kug J S. 2002. El Niño and la Niña sea surface temperature anomalies: Asymmetry characteristics associated with their wind stress anomalies [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107(19):. doi:10.1029/2001JD000393
- Kim J W, Yu J Y. 2022. Single- and multi-year ENSO events controlled by pantropical climate interactions [J]. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 5(1):. doi:10.1038/s41612-022-00305-y
- Kim S, Kug J S. 2021. Delayed impact of Indian Ocean warming on the East Asian surface temperature variation in boreal summer [J]. *J. Clim.*, 34(8): 3255–3270. doi:10.1175/JCLI-D-20-0691.1
- Kim T, Lee S, Park H J, et al. 2021. The impact of coupled air–sea interaction on extreme East Asian summer monsoon simulation in CMIP5 models [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(14): 6336–6349. doi:10.1002/joc.7198
- 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. U. S. A.*, 110(19): 7574–7579. doi:10.1073/pnas.1215582110
- Kosaka Y. 2021. Chapter 13 - Coupling of the Indian, western North Pacific, and East Asian summer monsoons [M]// Chowdary J, Parekh A, Gnanaseelan C. *Indian Summer Monsoon Variability*. Eds., Elsevier, 263–286. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822402-1.00002-8>
- Lau K M, Yang S. 1996. Seasonal variation, abrupt transition, and intraseasonal variability associated with the asian summer monsoon in the GLA GCM [J]. *J. Clim.*, 9(5): 965–985. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0965:SVATAI>2.0.CO;2
- Lee S K, Enfield D B, Wang C. 2008. Why do some El Niños have no impact on tropical North Atlantic SST? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35(16): 1968–1969. doi:10.1029/2008GL034734
- Leung M Y T, Zhou W, Wang D, et al. 2020. Remote tropical Western Indian ocean forcing on changes in june precipitation in South China and the Indochina Peninsula [J]. *J. Clim.*, 33(17): 7553–7566. doi:10.1175/JCLI-D-19-0626.1
- Li C Y, Mu M Q. 2001. The Influence of the Indian Ocean Dipole on Atmospheric

- Circulation and Climate [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18(5): 831–843. doi:10.1007/bf03403506
- Li C Y, Pan J, Que Z P. 2011. Variation of the East Asian Monsoon and the tropospheric biennial oscillation [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 56(1): 70–75. doi:10.1007/s11434-010-4200-6
- Li J Y, Mao J Y. 2019. Coordinated influences of the tropical and extratropical intraseasonal oscillations on the 10–30-day variability of the summer rainfall over southeastern China [J]. *Clim. Dyn.*, 53: 137–153. doi:10.1007/s00382-018-4574-8
- Li S P, Su T, Yan P C, et al. 2022. The role of SST forcing in the interdecadal variations of the Pacific-Japan pattern in the late 1990s [J]. *Int. J. Climatol.*, 2022(August): 1–15. doi:10.1002/joc.7930
- Li T, Wang B, Chang C P, et al. 2003. A theory for the Indian Ocean dipole-zonal mode [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60(17): 2119–2135. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<2119:ATFTIO>2.0.CO;2
- Li T, Wang B, Wu B, et al. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western North Pacific during El Niño: A review [J]. *J. Meteorol. Res.*, 31(6): 987–1006. doi:10.1007/s13351-017-7147-6
- Li X Y, Lu R Y. 2020. Breakdown of the summertime meridional teleconnection pattern over the western north pacific and east Asia since the early 2000s [J]. *J. Clim.*, 33(19): 8487–8505. doi:10.1175/JCLI-D-19-0746.1
- Li X C, Xie S P, Gille S T, et al. 2016. Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades [J]. *Nat. Clim. Chang.*, 6(3): 275–279. doi:10.1038/nclimate2840
- Lin, H. 2019. Long-lead ENSO control of the boreal summer intraseasonal oscillation in the East Asian-western North Pacific region [J]. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 2, 31. doi:10.1038/s41612-019-0088-2
- Liu B Q, Yan Y H, Zhu C W, et al. 2020. Record-Breaking Meiyu Rainfall Around the Yangtze River in 2020 Regulated by the Subseasonal Phase Transition of the North Atlantic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(22):. doi:10.1029/2020GL090342
- Liu B Q, Zhu C W, Jiang N, et al. 2021. Seasonal Evolution of Anomalous Rainband over East China Regulated by Sea Surface Temperature Anomalies in the Northern Hemisphere [J]. *J. Clim.*, 34(8): 3087–3102. doi:10.1175/JCLI-D-20-0398.1
- Liu Y, Hu Z Z, Kumar A, et al. 2015. Tropospheric biennial oscillation of summer monsoon rainfall over East Asia and its association with ENSO [J]. *Clim. Dyn.*, 45(7–8): 1747–1759. doi:10.1007/s00382-014-2429-5
- Chen L X, Dong M, Shao Y N. 1992. The characteristics of interannual variations on the East Asian Monsoon [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 70(1): 397–421. doi:10.2151/jmsj1965.70.1B_397
- Lu B, Li H Y, Wu J, et al. 2019. Impact of El Niño and Southern Oscillation on the summer precipitation over Northwest China [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 20(8):. doi:10.1002/asl.928

- Lu M M, Kuang Z M, Yang S, et al. 2020. A bridging role of winter snow over Northern China and Southern Mongolia in linking the east Asian winter and summer monsoons [J]. *J. Clim.*, 33(22): 9849–9862. doi:10.1175/JCLI-D-20-0298.1
- Lu R Y, Dong B W. 2005. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997-1998 [J]. *J. Geophys. Res. D Atmos.*, 110(16): 1–11. doi:10.1029/2004JD005676
- Lu R Y, Li Y, Dong B W. 2006. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 84(3): 447–462. doi:10.2151/jmsj.84.447
- Lu R Y, Lu S. 2014. Local and remote factors affecting the SST-precipitation relationship over the western North Pacific during summer [J]. *J. Clim.*, 27(13): 5132–5147. doi:10.1175/JCLI-D-13-00510.1
- Lu T, Zhu Z W, Yang Y, et al. 2023. Formation Mechanism of the ENSO-Independent Summer Western North Pacific Anomalous Anticyclone [J]. *J. Clim.*, 36(6): 1711–1726. doi:10.1175/jcli-d-22-0271.1
- Ma J, He W B, Chen Z H, et al. 2020. The impact of north tropical Atlantic sea surface temperature anomalies in the ensuing spring of El Niño on the tropical Indian Ocean and Northwest Pacific [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(11): 4978–4991. doi:10.1002/joc.6500
- Matsuno T. 1966. Quasi-Geostrophic Motions in the Equatorial Area [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, 44(1): 25–43. doi:10.2151/jmsj1965.44.1_25
- 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):.. doi:10.1029/2012GL051826
- 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: 373–390. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.3_373
- Niu R Y, Zhai P M, Tan G R. 2021. Anomalous Features of Extreme Meiyu in 2020 over the Yangtze-Huai River Basin and Attribution to Large-Scale Circulations [J]. *J. Meteorol. Res.*, 35(5): 799–814. doi:10.1007/s13351-021-1018-x
- Piao J L, Chen W, Wei K, et al. 2017. An abrupt rainfall decrease over the Asian inland plateau region around 1999 and the possible underlying mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 34(4): 456–468. doi:10.1007/s00376-016-6136-5
- Piao J L, Chen W, Chen S F, et al. 2018. Intensified impact of North Atlantic Oscillation in May on subsequent July Asian inland plateau precipitation since the late 1970s [J]. *Int. J. Climatol.*, 38(5): 2605–2612. doi:10.1002/joc.5332
- Piao J L, Chen W, Chen S F, et al. 2020. The intensified impact of El Niño on late-summer precipitation over East Asia since the early 1990s [J]. *Clim. Dyn.*, 54(11–12): 4793–4809. doi:10.1007/s00382-020-05254-x
- Piao J L, Chen W, Chen S F. 2021. Water vapour transport changes associated with the interdecadal decrease in the summer rainfall over Northeast Asia around the late-1990s [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(S1): E1469–E1482. doi:10.1002/joc.6780
- Piao J L, Chen W, Chen S F, et al. 2023. How well do CMIP6 models simulate the

- climatological northern boundary of the East Asian summer monsoon? [J]. *Glob. Planet. Change*, 221(January): 104034. doi:10.1016/j.gloplacha.2023.104034
- Qiao S B, Chen D, Wang B, et al. 2021. The Longest 2020 Meiyu Season Over the Past 60 Years: Subseasonal Perspective and Its Predictions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 48(9):. doi:10.1029/2021GL093596
- Qu X, Huang G. 2012a. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of East Asian jet in boreal summer [J]. *Int. J. Climatol.*, 32(13): 2073–2080. doi:10.1002/joc.2378
- Qu X, Huang G. 2012b. An enhanced influence of tropical Indian Ocean on the South Asia high after the Late 1970s [J]. *J. Clim.*, 25(20): 6930–6941. doi:10.1175/JCLI-D-11-00696.1
- 任宏利, 郑飞, 罗京佳, 等. 2020. 中国热带海-气相互作用与ENSO动力学及预测研究进展 [J]. *气象学报*, 78 (3) : 351-369. Ren Hongli, Zheng Fei, Luo Jingjia, et al. 2020. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78 (3) : 351-369. doi:10.11676/qxxb2020.023
- Rong X Y, Zhang R H, Li T. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 55(22): 2458–2468. doi:10.1007/s11434-010-3098-3
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian ocean [J]. *Nature*, 401(6751): 360–363. doi:10.1038/43854
- Shen H B, He S P, Wang H J. 2019. Effect of summer Arctic sea ice on the reverse August precipitation anomaly in Eastern China between 1998 and 2016 [J]. *J. Clim.*, 32(11): 3389–3407. doi:10.1175/JCLI-D-17-0615.1
- Shi J, Qian W H. 2018. Asymmetry of two types of ENSO in the transition between the East Asian winter monsoon and the ensuing summer monsoon [J]. *Clim. Dyn.*, 51(9–10): 3907–3926. doi:10.1007/s00382-018-4119-1
- Si D, Ding Y H. 2012. The tropospheric biennial oscillation in the East Asian monsoon region and its influence on the precipitation in China and large-scale atmospheric circulation in East Asia [J]. *Int. J. Climatol.*, 32(11): 1697–1716. doi:10.1002/joc.2386
- Si D, Jiang D B, Ding Y H. 2021a. Synergistic Impacts of the Atlantic and Pacific Oceans on Interdecadal Variations of Summer Rainfall in Northeast Asia [J]. *J. Meteorol. Res.*, 35(5): 844–856. doi:10.1007/s13351-021-0191-2
- Si D, Jiang D B, Hu A X, et al. 2021b. Variations in northeast Asian summer precipitation driven by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(3): 1682–1695. doi:10.1002/joc.6912
- Song F F, Zhou T J. 2014a. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean-western pacific anticyclone teleconnection [J]. *J. Clim.*, 27(4): 1679–1697. doi:10.1175/JCLI-D-13-00248.1
- Song F F, Zhou T J. 2014b. The climatology and interannual variability of east Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air-sea coupling improve the simulations? [J]. *J. Clim.*, 27(23): 8761–8777. doi:10.1175/JCLI-D-14-00396.1

- Song F F, Zhou T J. 2015. The crucial role of internal variability in modulating the decadal variation of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship during the Twentieth Century [J]. *J. Clim.*, 28(18): 7093–7107. doi:10.1175/JCLI-D-14-00783.1
- Song X M, Zhang R H, Rong X Y. 2022. Dynamic Causes of ENSO Decay and Its Asymmetry [J]. *J. Clim.*, 35(2): 445–462. doi:10.1175/JCLI-D-21-0138.1
- Sperber K R, Annamalai H, Kang I S, et al. 2013. The Asian summer monsoon: An intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century [J]. *Clim. Dyn.*, 41(9–10): 2711–2744. doi:10.1007/s00382-012-1607-6
- Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, et al. 2015. Combination Mode Dynamics of the Anomalous Northwest Pacific Anticyclone [J]. 1093–1111. doi:10.1175/JCLI-D-14-00225.1
- Sun B M, Sun S Q. 1994. The analysis on the features of the atmospheric circulation in preceding winters for the summer drought and flooding in the Yangtze and Huaihe river valley [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 11, 79–90. doi:10.1007/BF02656997
- Sun L Y, Yang X Q, Tao L F, et al. 2021. Changing impact of ENSO events on the following summer rainfall in eastern China since the 1950s [J]. *J. Clim.*, 34(20): 8105–8123. doi:10.1175/JCLI-D-21-0018.1
- Sun X G, Jiang G X, Ren X J, et al. 2016. Role of intraseasonal oscillation in the persistent extreme precipitation over the Yangtze River basin during June 1998. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 10 453–10 469. doi:10.1002/2016JD025077
- 孙颖, 徐海明, 邓洁淳. 2014. 太平洋–日本遥相关型的年代际变化特征及其成因 [J]. *大气科学*, 38(6): 1055–1065. Sun Ying, Xu Haiming, Deng Jiechun. 2014. Interdecadal variation in Pacific–Japan teleconnection patterns and possible causes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (6): 1055–1065. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13273
- Takaya Y, Ishikawa I, Kobayashi C, et al. 2020. Enhanced Meiyu-Baiu Rainfall in Early Summer 2020: Aftermath of the 2019 Super IOD Event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(22): 1–9. doi:10.1029/2020GL090671
- Takaya Y, Saito N, Ishikawa I, et al. 2021. Two tropical routes for the remote influence of the northern tropical Atlantic on the Indo-Western Pacific summer climate [J]. *J. Clim.*, 34(5): 1619–1634. doi:10.1175/JCLI-D-20-0503.1
- Tang H S, Hu K M, Huang G, et al. 2022. Intensification and Northward extension of Northwest Pacific anomalous anticyclone in El Niño decaying mid-summer: an energetic perspective [J]. *Clim. Dyn.*, 58(1–2): 591–606. doi:10.1007/s00382-021-05923-5
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- Tao W C, Huang G, Hu K M, et al. 2016. A study of biases in simulation of the Indian Ocean basin mode and its capacitor effect in CMIP3/CMIP5 models [J]. *Clim. Dyn.*, 46(1–2): 205–226. doi:10.1007/s00382-015-2579-0
- Tao W C, Kong X W, Liu Y, et al. 2022. Diversity of Northwest Pacific atmospheric circulation anomalies during post-ENSO summer [J]. *Front. Environ. Sci.*, 10.

- doi:10.3389/fenvs.2022.1068155
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of South Asian Summer Monsoon Indices [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80(4): 629–638. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0629:COSASM>2.0.CO;2
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Clim.*, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- Wang B, Yang J, Zhou T J, et al. 2008. Interdecadal changes in the major modes of Asian-Australian monsoon variability: Strengthening relationship with ENSO since the late 1970s [J]. *J. Clim.*, 21(8): 1771–1789. doi:10.1175/2007JCLI1981.1
- Wang B, Liu J, Yang J, et al. 2009. Distinct principal modes of early and late summer rainfall anomalies in East Asia [J]. *J. Clim.*, 22(13): 3864–3875. doi:10.1175/2009JCLI2850.1
- Wang B, Xiang B Q, Lee J Y. 2013. Subtropical High predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 110(8): 2718–2722. doi:10.1073/pnas.1214626110
- Wang B, Luo X, Liu J. 2020. How robust is the asian precipitation-ENSO relationship during the industrial warming period (1901-2017)? [J]. *J. Clim.*, 33(7): 2779–2792. doi:10.1175/JCLI-D-19-0630.1
- Wang B, Biasutti M, Byrne M P, et al. 2021. Monsoons climate change assessment [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 102(1): E1–E19. doi:10.1175/BAMS-D-19-0335.1
- Wang C Z. 2019. Three-ocean interactions and climate variability: a review and perspective [J]. *Clim. Dyn.*, 53(7–8): 5119–5136. doi:10.1007/s00382-019-04930-x
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. *大气科学*, 37(2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(2): 313–318. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301
- Wang J, Liu Y J, Ding Y H, et al. 2021. Towards influence of Arabian Sea SST anomalies on the withdrawal date of Meiyu over the Yangtze-Huaihe River basin [J]. *Atmos. Res.*, 249. doi:10.1016/j.atmosres.2020.105340
- Wang L, Wu R G. 2012. In-phase transition from the winter monsoon to the summer monsoon over East Asia: Role of the Indian Ocean [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117(11): 1–16. doi:10.1029/2012JD017509
- Wang L, Yu J Y, Paek H. 2017. Enhanced biennial variability in the Pacific due to Atlantic capacitor effect [J]. *Nat. Commun.*, 8. doi:10.1038/ncomms14887
- Wang P, Tam C Y, Xu K. 2019. El Niño–East Asian monsoon teleconnection and its diversity in CMIP5 models [J]. *Clim. Dyn.*, 53(9–10): 6417–6435. doi:10.1007/s00382-019-04938-3
- Wen N, Hao Y S. 2021. Contrasting El Niño impacts on East Asian summer monsoon precipitation between its developing and decaying stages [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(4): 2375–2382. doi:10.1002/joc.6964
- Wen N, Li L, Luo J J. 2020. Direct impacts of different types of El Niño in

- developing summer on East Asian precipitation [J]. *Clim. Dyn.*, 55(5–6): 1087–1104. doi:10.1007/s00382-020-05315-1
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western north Pacific between El Niño and La Niña [J]. *J. Clim.* 23:4807–4822. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3222.1>
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2017. Atmospheric dynamic and thermodynamic processes driving the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño. Part I: Maintenance mechanisms [J]. *J. Clim.*, 30(23): 9621–9635. doi:10.1175/JCLI-D-16-0489.1
- Wu B Y, Li Z K. 2022. Possible impacts of anomalous Arctic sea ice melting on summer atmosphere [J]. *Int. J. Climatol.*, 42(3): 1818–1827. doi:10.1002/joc.7337
- Wu Q G, Cheng L, Chan D, et al. 2016. Suppressed midlatitude summer atmospheric warming by Arctic sea ice loss during 1979–2012 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43(6): 2792–2800. doi:10.1002/2016GL068059
- Wu K J, Liu H W, Zhao L, et al. 2022. The strengthening relationship between summer rainfall over North China and PDO since the mid-2000s [J]. *Front. Earth Sci.*, 10. doi:10.3389/feart.2022.957940
- Wu M C, Chan J C L. 2005. Observational relationships between summer and winter monsoons over East Asia. Part I: Basic framework [J]. *Int. J. Climatol.*, 25(4): 437–451. doi:10.1002/joc.1132
- Wu R G, Wang B. 2002. A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962–77 and 1978–93 [J]. *J. Clim.*, 15(22): 3266–3279. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<3266:ACOTEA>2.0.CO;2
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. *J. Clim.*, 16(22): 3742–3758. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2
- Xiang B Q, Wang B, Yu W D, et al. 2013. How can anomalous western North Pacific Subtropical High intensify in late summer? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40(10): 2349–2354. doi:10.1002/grl.50431
- Xiao F, Wang D, Leung M Y T. 2020. Early and Extreme Warming in the South China Sea During 2015/2016: Role of an Unusual Indian Ocean Dipole Event [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 47(17):. doi:10.1029/2020GL089936
- 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. Clim.* 22:730–747. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2544.1>
- 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. Clim.*, 23(12): 3352–3368. doi:10.1175/2010JCLI3429.1
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(4): 411–432. doi:10.1007/s00376-015-5192-6
- Xin X G, Wu T W, Zhang J, et al. 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon [J].

- Int. J. Climatol., 40(15): 6423–6440. doi:10.1002/joc.6590
- 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
- 徐霏强, 冯娟, 陈文. 2016. ENSO冷暖位相影响东亚冬季风与东亚夏季风联系的非对称性 [J]. 大气科学, 40(4): 831–840. Xu Peiqiang, Feng Juan, Chen Wen. 2016. Asymmetric role of ENSO in the link between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 831–840. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15192.
- Xu P Q, Wang L, Chen W, et al. 2019. Structural changes in the Pacific-Japan pattern in the late 1990s [J]. J. Clim., 32(2): 607–621. doi:10.1175/JCLI-D-18-0123.1
- 薛峰, 苏同华. 2018. ENSO循环背景下东亚夏季风的季节内变化 [M]//隋珂珂, 李太宇. ENSO循环背景下东亚夏季风的季节内变化. 北京: 气象出版社. 1-105. Xue Feng, Su Tonghua. 2018. Intraseasonal Variation of the East Asian Summer Monsoon Regulated by the ENSO cycle [M]// Su Keke, Li Taiyu. Intraseasonal Variation of the East Asian Summer Monsoon Regulated by the ENSO cycle. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese). 1-105.
- 薛峰, 段欣好, 苏同华. 2018. 强El Niño衰减年东亚夏季风的季节内变化: 1998年和2016年的对比分析 [J]. 大气科学, 42(6): 1407–1420. Xue Feng, Duan Xinyu, Su Tonghua. 2018. Intraseasonal variation of East Asian summer monsoon during strong El Niño decaying summer: Comparison between 1998 and 2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1407–1420, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17205.
- Xue F, Zeng Q C, Huang R H, et al. 2015a. Recent advances in monsoon studies in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 32(2): 206–229. doi:10.1007/s00376-014-0015-8
- Xue X, Chen W, Chen S F, et al. 2015b. Modulation of the connection between boreal winter ENSO and the South Asian high in the following summer by the stratospheric quasi-biennial oscillation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 175(4449): 238. doi:10.1038/175238c0
- Xue X, Chen W, Chen S F. 2017. The climatology and interannual variability of the South Asia high and its relationship with ENSO in CMIP5 models [J]. Clim. Dyn., 48(11–12): 3507–3528. doi:10.1007/s00382-016-3281-6
- Xue X, Chen W, Chen S F, et al. 2018. PDO modulation of the ENSO impact on the summer South Asian high [J]. Clim. Dyn., 50(3–4): 1393–1411. doi:10.1007/s00382-017-3692-z
- Xue X, Chen W. 2019. Distinguishing interannual variations and possible impacted factors for the northern and southern mode of South Asia High [J]. Clim. Dyn., 53(7–8): 4937–4959. doi:10.1007/s00382-019-04837-7
- Xue X, Chen W, Zhou Q. 2020. Solar cycle modulation of the connection between boreal winter ENSO and following summer South Asia high [J]. J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys., 211(December 2019): 105466. doi:10.1016/j.jastp.2020.105466
- Xue X, Chen W, Chen S, et al. 2021. Distinct impacts of two types of South Asian

- highs on East Asian summer rainfall [J]. *Int. J. Climatol.*, 41(S1): E2718–E2740. doi:10.1002/joc.6876
- Yan H M, Yang H, Yuan Y, et al. 2011. Relationship between East Asian winter monsoon and summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28(6): 1345–1356. doi:10.1007/s00376-011-0014-y
- Yan Y H, Li C F, Lu R Y. 2019. Meridional Displacement of the East Asian Upper-tropospheric Westerly Jet and Its Relationship with the East Asian Summer Rainfall in CMIP5 Simulations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36(11): 1203–1216. doi:10.1007/s00376-019-9066-1
- Yang B, Zhang Y C, Qian Y, et al. 2019. Better monsoon precipitation in coupled climate models due to bias compensation [J]. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 2(1):. doi:10.1038/s41612-019-0100-x
- 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):. doi:10.1029/2006GL028571
- 杨崧, 邓开强, 段晚锁. 2018. 季风与 ENSO 的选择性相互作用: 年循环和春季预报障碍的影响 [J]. *大气科学*, 42 (3): 570–589. Yang Song, Deng Kaiqiang, Duan Wansuo. 2018. Selective interaction between monsoon and ENSO: Effects of annual cycle and spring predictability barrier [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42 (3): 570–589. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17241
- Yang S, Wu R G, Jian M Q, et al. 2021. Climate Change in Southeast Asia and Surrounding Areas [M]. Springer Nature. doi:10.1007/978-981-15-8225-7.
- Yang X K, Huang P. 2021. Restored relationship between ENSO and Indian summer monsoon rainfall around 1999/2000 [J]. *Innov.*, 2(2): 100102. doi:10.1016/j.xinn.2021.100102
- Yang X K, Huang P. 2022. The Diversity of ENSO Evolution during the Typical Decaying Periods Determined by an ENSO Developing Mode [J]. *J. Clim.*, 35(12): 3877–3889. doi:10.1175/JCLI-D-21-0892.1
- Yang Y, Zhu Z W, Shen X Y, et al. 2023. The Influences of Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies on the ENSO-Independent Interannual Variability of East Asian Summer Monsoon Rainfall [J]. *J. Clim.*, 36(2): 677–692. doi:10.1175/JCLI-D-22-0061.1
- Yao Y H, Lin H, Wu Q G. 2019. Linkage between Interannual Variation of the East Asian Intraseasonal Oscillation and Mei-Yu Onset. *J. Clim.*, 32(1): 145–160. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0873.1
- Yin X X, Zhou L T, Liu K, et al. 2022. Record-breaking flood over the Yangtze River in early summer 2020: role of the north Indian Ocean and north tropical Atlantic SST [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 150(3–4): 1173–1186. doi:10.1007/s00704-022-04217-y
- You Q L, Wu T, Shen L C, et al. 2020. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system [J]. *Earth-Science Rev.*, 201. doi:10.1016/j.earscirev.2019.103043
- Yu T T, Feng J, Chen W. 2019. Linear respective roles of El Niño–Southern

- Oscillation and East Asian winter monsoon in the formation of the western North Pacific anticyclone [J]. *Int. J. Climatol.*, 39(7): 3257–3270. doi:10.1002/joc.6016
- Yu T T, Feng J, Chen W. 2020. Evaluation of CMIP5 models in simulating the respective impacts of East Asian winter monsoon and ENSO on the western North Pacific anomalous anticyclone [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(2): 805–821. doi:10.1002/joc.6240
- Yu T T, Chen W, Feng J, et al. 2021. Roles of ENSO in the Link of the East Asian Summer Monsoon to the Ensuing Winter Monsoon [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 126(4): 1–19. doi:10.1029/2020JD033994
- Yu T T, Chen W, Gong H N, et al. 2022a. Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models in simulations of the climatology and interannual variability of the east asian summer Monsoon [J]. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06408-9>
- Yu T T, Chen W, Huang P, et al. 2022b. Recent interdecadal changes in the Tropospheric Biennial Oscillation of the East Asian summer monsoon [J]. *Atmos. Res.*, 277(June): 106301. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106301
- Yu T T, Feng J, Chen W, et al. 2022c. Enhanced Tropospheric Biennial Oscillation of the East Asian Summer Monsoon since the Late 1970s [J]. *J. Clim.*, 35(5): 1613–1628. doi:10.1175/jcli-d-21-0416.1
- Yu T T, Feng J, Chen W, et al. 2022d. The Interdecadal Change of the Relationship Between North Indian Ocean SST and Tropical North Atlantic SST *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 1–14. doi:10.1029/2022JD037078
- Yuan C X, Liu J Q, Luo J J, et al. 2019. Influences of tropical Indian and Pacific Oceans on the interannual variations of precipitation in the early and late rainy seasons in South China [J]. *J. Clim.*, 32(12): 3681–3694. doi:10.1175/JCLI-D-18-0588.1
- Yuan Y, Yang H, Zhou W, et al. 2008. Influences of the Indian ocean dipole on the asian summer monsoon in the following year [J]. *Int. J. Climatol.*, 28(14): 1849–1859. doi:10.1002/joc.1678
- Yuan Y, Yang S. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles [J]. *J. Clim.*, 25(21): 7702–7722. doi:10.1175/JCLI-D-11-00576.1
- Zhang G W, Zeng G, Li C, et al. 2020. Impact of PDO and AMO on interdecadal variability in extreme high temperatures in North China over the most recent 40-year period [J]. *Clim. Dyn.*, 54(5–6): 3003–3020. doi:10.1007/s00382-020-05155-z
- Zhang L, Wang G, Newman M, et al. 2021. Interannual to decadal variability of tropical indian ocean sea surface temperature: Pacific influence versus local internal variability [J]. *J. Clim.*, 34(7): 2669–2684. doi:10.1175/JCLI-D-20-0807.1
- Zhang L, Wang C, Han W, et al. 2023. Emergence of the Central Atlantic Niño [J]. *Sci. Adv.*, 1–10. doi:10.1126/sciadv.adi5507
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon:

- A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 74(1): 49–62. doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49
- Zhang R H, Akimasa S, Masahide K. 1999. A Diagnostic Study of the Impact of El Niño on the Precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.* 16:229–241. <https://doi.org/10.1007/BF02973084>
- 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]. *Sci. China Earth Sci.* 60:1124–1132. <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9026-x>
- 张文君, 余佐励, 姜枫, 等. 2022. ENSO组合模态对夏季西北太平洋异常反气旋维持的关键作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 52(8): 1652-1661. Zhang Wenjun, Yu Zuoli, Jiang Feng, et al. 2022. Important role of the ENSO combination mode in the maintenance of the anomalous anticyclone over the western North Pacific in boreal summer [J]. *Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 52(8): 1652-1661. doi:10.1360/SSTe-2021-0324
- Zhang W J, Li H Y, Stuecker M F, et al. 2016. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode [J]. *J. Clim.*, 29(12): 4347–4359. doi:10.1175/JCLI-D-15-0104.1
- Zhang W J, Mei X B, Geng X, et al. 2019. A nonstationary ENSO-NAO relationship due to AMO modulation [J]. *J. Clim.*, 32(1): 33–43. doi:10.1175/JCLI-D-18-0365.1
- 张雯, 董啸, 薛峰. 2020. 不同PDO位相下El Niño 发展年和La Niña年东亚夏季风的季节内变化 [J]. *大气科学*, 44(2): 390–406. Zhang Wen, Dong Xiao, Xue Feng. 2020. Intra-seasonal Variations of the East Asian Summer Monsoon in El Niño Developing Years and La Niña Years under Different Phases of the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 390–406. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1910.18269
- 张潇潇, 薛峰, 董啸, 等. 2022. 国家气候中心两个CMIP6模式模拟的东亚夏季风的季节内演变 [J]. *气候与环境研究*, 27(6): 729-746. Zhang Xiaoxiao, Xue Feng, Dong Xiao, et al. 2022. Sub-seasonal Evolution of the East Asian Summer Monsoon Simulated by Two BCC Climate Models Participating in CMIP6 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 27(6): 729-746. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21112
- Zhang Y, Zhou W, Wang X, et al. 2022. IOD, ENSO, and seasonal precipitation variation over Eastern China [J]. *Atmos. Res.*, 270. doi:10.1016/j.atmosres.2022.106042
- Zhang Z Q, Sun X G, Yang X Q. 2018. Understanding the interdecadal variability of East Asian summer monsoon precipitation: Joint influence of three oceanic signals [J]. *J. Clim.*, 31(14): 5485–5506. doi:10.1175/JCLI-D-17-0657.1
- Zhao G J, Huang G, Wu R G, et al. 2015. A new upper-level circulation index for the East Asian summer monsoon variability [J]. *J. Clim.*, 28(24): 9977–9996. doi:10.1175/JCLI-D-15-0272.1
- Zhao W, Chen S F, Chen W, et al. 2019a. Interannual variations of the rainy season withdrawal of the monsoon transitional zone in China [J]. *Clim. Dyn.*, 53(3–4):

- 2031–2046. doi:10.1007/s00382-019-04762-9
- Zhao W, Chen W, Chen S F, et al. 2019b. Inter-annual variations of precipitation over the monsoon transitional zone in China during August–September: Role of sea surface temperature anomalies over the tropical Pacific and North Atlantic [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 20(1):. doi:10.1002/asl.872
- Zhao W, Chen W, Chen S F, et al. 2020a. Combined impact of tropical central-eastern Pacific and North Atlantic sea surface temperature on precipitation variation in monsoon transitional zone over China during August–September [J]. *Int. J. Climatol.*, 40(2): 1316–1327. doi:10.1002/joc.6231
- Zhao W, Chen W, Chen S F, et al. 2020b. Interdecadal change in the impact of North Atlantic SST on August rainfall over the monsoon transitional belt in China around the late 1990s [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 140(1–2): 503–516. doi:10.1007/s00704-020-03102-w
- 周天军, 吴波, 郭准, 等. 2018. 东亚夏季风变化机理的模拟和未来变化的预估: 成绩和问题、机遇和挑战 [J]. *大气科学*, 42(4): 902–934. Zhou Tianjun, Wu Bo, Guo Zhun, et al. 2018. A review of East Asian summer monsoon simulation and projection: Achievements and problems, opportunities and challenges [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 902–934, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17306.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the Western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. *J. Clim.*, 22(8): 2199–2215. doi:10.1175/2008JCLI2527.1
- 周群, 陈文. 2012. 太阳活动11年周期对ENSO事件海温异常演变和东亚降水的影响 [J]. *大气科学*, 36(4): 851–862. Zhou Qun, Chen Wen. 2012. Influence of the 11-year solar cycle on the evolution of ENSO-related SST anomalies and rainfall anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(4): 851–862. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11162.
- 周群, 陈文. 2014. 太阳活动11年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程 [J]. *气候与环境研究*, 19 (4): 486–496. Zhou Qun, Chen Wen. 2014. Impact of the 11-year solar cycle on the relationship between the East Asian winter monsoon and the following summer monsoon and the related processes [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (4): 486–496. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13011
- Zhou X Y, Liu F, Wang B, et al. 2019. Different responses of East Asian summer rainfall to El Niño decays [J]. *Clim. Dyn.*, 53(3–4): 1497–1515. doi:10.1007/s00382-019-04684-6
- Zhou Z Q, Xie S P, Zhang R H. 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 118(12):. doi:10.1073/pnas.2022255118
- 祝从文, 刘伯奇, 左志燕, 等. 2019. 东亚夏季风次季节变化研究进展 [J]. *应用气象学报*, 30(4): 401–415. Zhu Congwen, Liu Boqi, Zuo Zhiyan, et al. 2019. Recent Advances on Sub-seasonal Variability of East Asian Summer Monsoon [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 30(4): 401–415. doi:10.11898/1001-7313.20190402.

Zhu Z W, Feng Y N, Jiang W, et al. 2023. The compound impacts of sea surface temperature modes in the Indian and North Atlantic oceans on the extreme precipitation days in the Yangtze River Basin [J]. Clim Dyn. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06733-7>