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

张文君^{1*}, 余佐励^{1,2}, 姜枫¹, 耿新¹, 张人禾³

1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院, 南京 210044;

2. 张家港市气象局, 苏州 215600;

3. 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

* 通讯作者, E-mail: zhangwj@nuist.edu.cn

收稿日期: 2021-10-12; 收修改稿日期: 2022-02-04; 接受日期: 2022-02-18; 网络版发表日期: 2022-06-13

国家自然科学基金项目(批准号: 42125501、42088101)资助

摘要 基于1979~2020年美国环境预报中心/美国大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的逐月大气环流和美国国家大气海洋管理局(NOAA)提供的逐月海表温度资料, 文章研究了厄尔尼诺(El Niño)衰减年夏季西北太平洋异常反气旋(WNPAC)维持的关键物理成因, 对比分析了西北太平洋(WNP)冷海温、印度洋(IO)暖海温和ENSO组合模态在其中的作用. 结果表明, El Niño衰减年冬、春季, WNP地区通常存在显著的冷海温异常, 但该信号不能持续到夏季, 因而不能很好地解释El Niño衰减年夏季WNPAC的维持. IO暖海温对El Niño衰减年夏季WNPAC的影响具有明显的年代际差异, 2000年之前, IO暖海温能通过斜压大气开尔文波响应显著加强WNPAC, 但2000年之后, 这种影响较弱. 进一步分析发现, 这种影响的年代际减弱可能与ENSO事件衰减速度的加快有关, 2000年之后的El Niño事件衰减较快, 衰减年夏季热带中东太平洋表现为类La Niña型海温异常, 热带IO上没有显著的暖海温异常, 因而其对El Niño衰减年夏季WNPAC的影响较弱. 与WNP冷海温和IO暖海温相比, ENSO组合模态与夏季WNPAC的关系在研究时段一直较为稳定, 在El Niño衰减年夏季WNPAC的维持中起到了关键的作用. 由于ENSO组合模态自身持续性较强, 因此基于ENSO组合模态可以更好地预测北半球夏季的WNPAC及相关天气气候异常.

关键词 ENSO, 西北太平洋异常反气旋, ENSO组合模态

1 引言

作为热带海气耦合年际变率的最主要模态, 厄尔尼诺和南方涛动(El Niño and Southern Oscillation, ENSO)对全球气候都能产生重要影响(Bjerknes, 1969;

Wallace和Gutzler, 1981; Wallace等, 1998; Alexander等, 2002), 其中对东亚地区的气候影响也非常显著(Zhang等, 1996; 陶诗言和张庆云, 1998; Chen等, 2000; Wang等, 2000). 研究表明, 西北太平洋(WNP)异常反气旋(WNPAC)/气旋(WNPC)是ENSO影响东亚气

中文引用格式: 张文君, 余佐励, 姜枫, 耿新, 张人禾. 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. 中国科学: 地球科学, 52(8): 1652–1661, doi: 10.1360/SSTe-2021-0324

英文引用格式: Zhang W, Yu Z, Jiang F, Geng X, Zhang R. 2022. Important role of the ENSO combination mode in the maintenance of the anomalous anticyclone over the western North Pacific in boreal summer. Science China Earth Sciences, 65(7): 1379–1387, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9908-5>

候的重要纽带, 它一般从ENSO发展年秋季开始建立, 在衰减年春季达到鼎盛状态, 并一直持续至初夏(Harrison和Larkin, 1996; Wang等, 2000; 张人禾等, 2017). 在El Niño成熟期, 受WNPAC西北侧异常西南暖湿气流的影响, 东亚冬季风容易偏弱(Zhang等, 1996; Wang等, 2003), 中国东南部降水容易偏多(Zhang等, 1999; Zhang和Sumi, 2002; Wang等, 2017). 在El Niño衰减年夏季, WNPAC的位置有所北抬, 中国长江中下游地区梅雨降水增强(Chang等, 2000a, 2000b; Lin和Lu, 2009; 黄平和黄荣辉, 2010; Li等, 2017; 张人禾等, 2017). 当La Niña事件发生时, 情况虽然并不是反对称, 但大致相反(Zhang R H等, 2015). 为了描述方便, 本文主要以El Niño期间的WNPAC为例, 对于La Niña期间的WNPC, 只需从相反位相考虑即可.

鉴于WNPAC的重要性, 其生成和维持机制一直是学术界的研究热点. Zhang等(1996, 1999)指出当赤道中东太平洋ENSO事件发生时, 西北太平洋(WNP)出现冷海温异常, 局地对流活动受到抑制, 由此产生的大气Rossby波响应使得WNP副热带高压西伸, 导致东亚地区降水异常. Wang等(2000)提出WNPAC是西太平洋大气对局地冷海温的响应, 它之所以能长期维持与风-蒸发-海温正反馈有关, 其机制是: 北半球冬季WNP盛行东北信风, 当El Niño事件发生时, 赤道东太平洋暖海温会在其西北侧激发气旋性环流异常(Matsuno, 1966; Gill, 1980), 其西部的东北风异常与气候态东北信风叠加, 使风速增强、向上的潜热通量增加, 从而导致西太平洋地区的海温变冷进而在其西侧激发出反气旋性环流, 其东侧的偏北气流进一步使得信风增强, 海温进一步变冷, 由此使得WNPAC一直维持到El Niño衰减年的初夏.

然而, 到El Niño衰减年夏季, WNP局地冷海温的信号已经消失, 这似乎意味着风-蒸发-海温正反馈机制对夏季WNPAC作用较弱. 随后, 大量的研究开始从印度洋(IO)海温的角度(称为印度洋电容器效应)解释夏季WNPAC的维持(周天军等, 2004; 黄刚和胡开明, 2008; Xie等, 2009; Du等, 2009; Wu等, 2010), 也有研究强调了印度洋-西北太平洋联合效应(Indo-western Pacific Ocean Capacitor, IPOC)对WNPAC维持的关键作用(Wang等, 2013; Xie等, 2016; Wang等, 2018, 2020). El Niño衰减年IO暖海温异常在春季达到峰值并一直持续到夏季(Klein等, 1999). Yang等(2007)和Xie等

(2009)进一步指出, El Niño衰减年IO变暖对WNPAC起到重要作用, 这种热带IO暖异常海温将会激发出向东传播的Kelvin波, 而由于边界层的摩擦作用使得在热带西太平洋两侧产生Ekman辐散, 抑制了WNP对流潜热的释放, 最终有利于WNPAC的维持. 但是, 最近的研究发现, IO延迟增暖无法解释对称Kelvin波作用下WNP大气响应不对称性现象(Stuecker等, 2015). 因此, ENSO期间WNPAC形成和维持的物理机制仍存在一些亟待解决的争议点. 近年来, Stuecker等(2013)在赤道太平洋低层环流场中发现并定义了ENSO组合模态(Combination Mode, C-mode), 该模态具有10和15个月左右的主周期, 在物理上来源于ENSO年际变率与海温年循环之间的非线性相互作用, 在空间型上则表现为中太平洋赤道南侧的西风异常和西北太平洋上的反气旋性环流(McGregor等, 2012, 2013; Stuecker等, 2013; 李海燕等, 2016; Zhang W J等, 2015, 2016a, 2016b). 近年来, C-mode也被认为是WNPAC形成和维持的重要机制之一(Stuecker等, 2015; Zhang等, 2016a, 2016b).

综上所述, 前人主要提出了三种WNPAC形成和维持的可能物理机制: 局地海气相互作用、印度洋电容器效应和 C-mode, 那么哪个机制对夏季WNPAC的维持起到关键作用? 本文将基于美国环境预报中心/美国国家气候数据研究中心(NCEP/NCAR)和美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的最新逐月大气环流和海表温度资料, 采用相关回归、合成分析的方法, 对这一问题进行系统研究, 即对WNP冷海温、IO暖海温和C-mode与北半球夏季WNPAC的关系分别进行再研究.

2 资料和方法

本文使用的资料包括: (1) NOAA月平均海表温度扩展重建资料(ERSST.v5)(Huang等, 2017), 水平分辨率为 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$. (2) NCEP/NCAR全球逐月位势高度场、风场再分析资料(NCEP/DOE Reanalysis II)(Kanamitsu等, 2002), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. (3) 美国国家气候预测中心(Climate Prediction Center, CPC)逐月降水资料(CMAP)(Xie和Arkin, 1997), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 以上资料均取1979年1月至2020年12月. 文中的春季和夏季分别定义为3~5月和6~8月的平均, 冬季定义为当年12月至次年2月的平均, 如1960年冬季为1960年12月至1961年2月的平均.

参照前人的做法, 本文将北半球夏季WNPAC指数定义为WNP地区($15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)850hPa位势高度场距平的区域平均(Wang等, 2013), 利用区域平均的流函数定义WNPAC指数可以得到相似结论. WNP海温指数定义为WNP地区($0^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$)海温距平的区域平均(Wang等, 2013). IO海温指数定义为印度洋($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$)海温距平的区域平均(Wang等, 2013), 使用北印度洋($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$)海温距平的区域平均, 文章的定性结论不会改变. C-mode指数用赤道太平洋($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 80^{\circ}\text{W}$)表面风场经验正交函数分解(EOF)第2模态所对应的标准化时间序列(即PC2)表示.

本文使用的方法包括EOF分解、相关分析和回归分析等. 采用CPC对ENSO事件的定义标准来筛选ENSO事件, 得到的ENSO事件如表1所示. 需要指出的是, 由于本文主要关注ENSO衰减年夏天, 对于连续ENSO事件, 只挑选其最后一年. 鉴于本文主要关注年际尺度上WNPAC的维持机制, 所有数据均进行了去趋势处理, 并使用Butterworth带通滤波器对数据进行了6~120个月的滤波.

3 ENSO衰减年夏季WNP环流特征及其东亚降水响应

我们首先给出了1979~2020年夏季WNPAC指数和前冬Niño-3.4指数的时间序列(图1), 由此可见, 夏季WNPAC指数具有显著的年际变化特征, 大致存在2~5年的变化周期(图略). 在El Niño事件的衰减年夏季, WNP上一般存在反气旋性环流, 对应WNPAC指数为正, La Niña事件的衰减年夏季则相反(Wang等, 2000; Xie等, 2009; Stuecker等, 2015). 统计上前冬Niño-3.4指数与夏季WNPAC指数存在0.53的相关, 超过了信度为0.05的显著性检验, ENSO是夏季WNPAC年际变率的主要可预报性来源.

夏季WNPAC变率对中国天气气候有着重要的影响. 我们将夏季WNPAC指数回归到同期850hPa异常降水场和风场(图2), 从中可以看出, 当WNPAC指数为正时, 反气旋存在于WNP菲律宾东北部上空, 主体范围大致位于 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$, 其西侧甚至可以延伸到印度半岛以东的孟加拉湾, 在孟加拉湾形成单独的异常反气旋中心, 形成横跨WNP到孟加拉湾更大范围

表1 1979~2020年ENSO事件

事件	年份
厄尔尼诺	1979/1980、1982/1983、1986/1987、1987/1988、1991/1992、1994/1995、1997/1998、2002/2003、2004/2005、2006/2007、2009/2010、2014/2015、2015/2016、2018/2019
拉尼娜	1983/1984、1984/1985、1988/1989、1995/1996、1998/1999、1999/2000、2000/2001、2005/2006、2007/2008、2008/2009、2010/2011、2011/2012、2016/2017、2017/2018

的异常反气旋环流(Xie等, 2016). 该环流系统对东亚地区的气候异常具有显著影响. 当WNPAC指数为正时, 东亚地区存在“南负北正”的降水异常结构, 即中国长江流域、华北地区以及日本和朝鲜半岛等地降水明显偏多, 而WNPAC中心控制的菲律宾、中南半岛以及中国华南沿海等地降水显著偏少. 就中国而言, 显著的降水异常位于长江中下游流域, 这对应于当地梅雨降水的增多增强, 进一步凸显了WNPAC对中国夏季气候影响的关键作用.

4 WNPAC的形成机制探讨

为了探究夏季WNPAC的形成和维持机制, 我们给出了夏季WNPAC指数回归的前期冬季至同期夏季的海温场和环流场(图3). 可以看到, WNPAC指数为正, 即WNP存在反气旋性环流时, 前期冬、春季WNP呈现明显的冷海温异常, 这与Wang等(2000)的结论一致, 但是, 该冷海温异常到夏季时非常弱, 几乎消失, 似乎不是反气旋维持到夏季的关键因子. 另一方面, WNPAC维持时, 前期冬、春季和同期夏季IO均呈现暖海温异常, 其中春季暖海温最为显著, 夏季时暖海温异常有所减弱.

为进一步分析IO关键区海温与夏季WNPAC的关系, 我们给出了IO海温指数与夏季WNPAC指数的17年滑动相关(图4). 从图中可以看出, 前期冬、春季和同期夏季IO海温指数与WNPAC指数的相关关系均在0.5左右, 前冬IO海温指数与WNPAC关系较为稳定. 而前期春季和同期夏季与WNPAC关系有所减弱, 且出现了明显的年代际变化, 在2000年之前两者关系稳定, 2000年后相关性有所减弱, 尤其对于夏季IO海温而言, 其与WNPAC的关系在2005年以后关系变得不显著, 说明IO海温与夏季WNPAC关系在年代际尺度上存在着

图1 1979~2020年夏季(JJA)WNPAC指数(柱状)和前冬(DJF)Niño-3.4指数(虚线)的时间序列
JJA: 6月、7月、8月; DJF: 12月、1月、2月

图2 夏季WNPAC指数回归的同期850hPa异常降水场(阴影, 单位: mm day^{-1})和风场(矢量, 单位: m s^{-1})的空间分布
打点区域表示降水异常通过90%信度检验, 图中仅给出通过90%显著性检验的风场

较强的不稳定性. 这不得不使得我们思考一个问题, 即2000年之后, 夏季IO暖海温是否对同期WNPAC的维持起着重要作用? 我们对比了2000年前后夏季WNPAC指数回归的前期冬春季和同期夏季异常海温和风场的空间分布(图5), 发现2000年前, WNPAC与前期冬、春季和同期夏季IO暖海温的正相关关系都比较显著, 即WNPAC正异常时, IO常出现显著的暖海温异常, 反之则为冷海温异常. 2000后它们之间的关系明显下降, 虽然前期冬、春季IO海温还存在一些显著性信号, 但是显著的范围与2000年前相比大大减小; 尤其是到了夏季, IO海温信号几乎消失, 进一步说明IO海温与夏季WNPAC的关系存在年代际尺度的不稳

定性.

接下来, 我们将分析夏季IO暖海温与WNPAC指数在2000年前后关系出现不稳定的原因. 从图5可以看出, 夏季WNPAC除了与IO海温存在关系之外, 还与热带太平洋海温密切相关, 通过对比不难发现, 2000年前, 夏季WNPAC与同期中东太平洋异常海温的关系弱, 然而2000年后, 中东太平洋区域出现明显的冷海温异常. 考虑到两阶段前期冬季热带太平洋地区均存在显著的暖海温异常, 我们猜想可能是因为2000年前后ENSO事件衰减的快慢对IO暖海温与夏季WNPAC关系的稳定性产生了影响.

为了验证我们的猜想, 我们从ENSO事件出发, 给出了2000年前后两个阶段El Niño衰减年夏季异常海温场的空间分布(图6), 可以看出, 2000年前, 热带印度洋同期夏季存在显著的暖海温异常, 而这一信号在2000年后几乎消失; 与此同时, 2000年前, 伴随着热带印度洋的暖海温, 赤道中东太平洋并没有明显的海温异常; 而2000年后, 热带中东太平洋已转变为负海温异常, 表现为类La Niña的海温异常特征. 这一结果与图5是一致的, 进一步证实夏季IO暖海温与WNPAC关系的减弱与ENSO事件的衰减速度加快有关. 2000年前, El Niño事件衰减慢, 到衰减年夏季还未转变为La Niña状态, IO暖海温响应能持续到夏季, 进而对WNPAC的维持产生作用; 2000年后, El Niño事件的衰减速率加快, 到夏季已转为La Niña状态, 不利于IO暖海温的维持(Feng等, 2014, 2019), 进而削弱了IO暖海温与WNPAC的关系, 这可能与IPO在不同位相下对

图3 1979~2020年夏季WNPAC指数回归的前期冬季(a)、前期春季(MAM)(b)和同期夏季(c)异常海温场(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和850hPa风场(矢量, 单位: m s^{-1})的空间分布
蓝框表示WNP冷海温的关键区, 红框表示IO暖海温关键区, 打点表示海温场通过了90%信度检验的区域, 图中仅给出通过90%信度检验的风场。MAM: 3月、4月、5月

ENSO衰减速度的调控有关(Liu等, 2021)。值得注意的是, 2000年后El Nino衰减年夏季赤道中东太平洋表现出显著的冷海温异常, 这一冷海温异常对夏季WNPAC的形成和维持也有贡献(Wang等, 2003)。

5. C-mode与WNPAC的关系

根据前文的分析可知, IO和WNP海温均似乎不能很好地解释ENSO衰减年夏季WNP异常环流的维持, 尤其是在2000年后, 他们对夏季WNPAC的影响显著减弱。前文提到, 近年来研究认为C-mode是WNPAC形成

和维持的重要机制之一, 其在ENSO衰减年春-夏季东亚气候异常中起到了关键作用(Zhang W J等, 2015, 2016a, 2016b; Jiang等, 2019)。下面我们进一步对C-mode与夏季反气旋的关系展开研究。图7是C-mode指数与WNPAC指数的17年滑动相关。如图所示, 无论是前期冬春季, 还是同期夏季, C-mode与夏季WNPAC之间的正相关关系都很显著, 且非常稳定, 同期夏季C-mode指数与WNPAC指数的相关关系达到将近0.7, 尤其在1990年代中期之后其相关系数达到0.85。即C-mode正位相时, WNP上一般都出现明显的反气旋性环流, WNPAC指数为正, 而在C-mode负位相时, WNP一般出现明显的气旋性环流, WNPAC指数为负。

图8进一步基于合成分析对比了2000年前后ENSO及C-mode时间演变特征。由图可知, Niño-3.4指数始终表现出典型ENSO事件的时间演变特征, 即在春、夏季发生, 在秋、冬季达到成熟, 并在衰减年春季减弱。与Niño-3.4指数不同的是, C-mode指数(即热带太平洋低层风场的第二主分量PC2)在El Niño发展年的10月份仍然为负值, 之后在12月迅速转为正值, 在晚冬和早春(FMA)达到峰值, 并且在El Niño衰减年春季减弱, 其峰值相对Niño-3.4指数(大致对应PC1)大约延迟3个月左右。显然, 2000年前后C-mode动力学机制及其演变特征并没有发生显著变化。相比于WNP冷海温和IO暖海温的作用, C-mode对夏季WNPAC维持的作用始终是较为稳定。如图9所示, C-mode自身的持续性较强, 早春与夏季C-mode指数相关为0.55; 在ENSO发生的年份, 其相关系数达到0.65。因此基于C-mode, 可以较好地预测北半球夏季的WNPAC及相关天气气候异常。

6 结论

本文基于1979~2020年NCEP/NCAR逐月大气环流和NOAA逐月海表温度资料, 采用相关分析和合成分析等方法, 考察了El Niño衰减年春季WNPAC的时间变化特征, 并探讨了其维持的可能机制, 对比分析了WNP冷海温、IO暖海温和C-mode在其中的关键作用, 主要结论如下。

(1) El Niño衰减年春季WNPAC与前期冬、春季WNP冷海温存在一定的负相关关系, 但是El Niño衰减年WNP海温异常信号不能持续到夏季, 因而不能很好

图4 1979~2020年前期冬季(蓝)、前期春季(橙)和同期夏季(红)IO暖海温关键区指数与夏季WNPAC指数17年的滑动相关
红色虚线表示90%信度检验线

图5 夏季WNPAC指数回归的前期冬季((a), (d))、前期春季((b), (e))、同期夏季((c), (f))异常海温场(矢量, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和风场(阴影, 单位: m s^{-1})的空间分布

蓝框表示WNP冷海温关键区, 红框表示IO暖海温关键区, 打点表示海温场通过了90%信度检验的区域, 图中仅给出通过90%信度检验的风场.
(a)~(c), 1979~1999年; (d)~(f), 2000~2020年

图6 ENSO衰减年(EI Niño-La Niña)前期冬季((a), (d))、前期春季((b), (e))和同期夏季((c), (f))异常海温的合成差值场(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

蓝框表示WNP冷海温关键区, 红框表示IO暖海温关键区, 打点区域表示对应的海温场通过了90%信度检验. (a)~(c), 1979~1999年; (d)~(f), 2000~2020年

图7 前期冬季(蓝)、前期春季(橙)和同期夏季(红)C-mode指数与夏季WNPAC指数17年的滑动相关
红色虚线表示90%信度检验线

图 8 1979~1999年(a)、2000~2020年(b)El Niño事件合成的Niño-3.4指数和C-mode指数的时间演变
打点表示通过了90%的信度检验

图 9 初春(February-March-April; FMA)C-mode指数的滞后自相关系数

地解释夏季WNPAC的维持。

(2) IO暖海温与夏季WNPAC之间的正相关关系存在年代际变化。在2000年前, IO暖海温对WNPAC的关系能够持续到夏季, 2000年后IO暖海温与夏季WNPAC的关系在统计上不显著。进一步分析发现, IO暖海温与WNPAC关系的年代际减弱与El Niño事件衰减速度的加快有关, 2000年前, ENSO事件衰减较慢, 到夏季时还未转变为La Niña状态, IO海温存在显著的暖异常响应, 因而能对夏季WNPAC的维持产生作用; 2000年后, El Niño事件衰减速率加快, 热带中东太平洋在夏季时已转为La Niña状态, IO暖海温响应也消失, 因此对夏季WNPAC的维持作用也明显减弱。

(3) 与WNP冷海温和IO暖海温相比, C-mode与夏季WNPAC的正相关关系在年代际尺度上较稳定, 在El Niño衰减年夏季WNP异常环流的维持中起到了关键的作用。在当前气候变化的背景下, 基于C-mode预报北半球夏季WNPAC变率具有优越性。

参考文献

- 黄刚, 胡开明. 2008. 夏季北印度洋海温异常对西北太平洋低层反气旋异常的影响. 大气科学学报, 31: 749–757
- 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. 大气科学学报, 33: 513–519
- 李海燕, 张文君, 何金海. 2016. ENSO及其组合模态对中国东部各季节降水的影响. 气象学报, 74: 322–334
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对ENSO事件的响应. 大气科学, 22: 399–407
- 张人禾, 闵庆辉, 苏京志. 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用. 中国科学: 地球科学, 47: 544–553
- 周天军, 俞永强, 宇如聪, 张学洪, 李肇新. 2004. 印度洋对ENSO事件的响应: 观测与模拟. 大气科学, 28: 357–373
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, Lanzante J R, Lau N C, Scott J D. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. J Clim, 15: 2205–2231
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Weather Rev, 97: 163–172

- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000a. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge. *J Clim*, 13: 4310–4325
- Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000b. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon. *J Clim*, 13: 4326–4340
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 17: 48–60
- Du Y, Xie S P, Huang G, Hu K M. 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced north Indian Ocean warming. *J Clim*, 22: 2023–2038
- Feng J, Li J P, Jin F F, Liu Z Y, Zhao S. 2019. Effect of El Niño on the response ratio of Hadley circulation to different SST meridional structures. *Clim Dyn*, 53: 3877–3891
- Feng J, Wang L, Chen W. 2014. How does the East Asian summer monsoon behave in the decaying phase of El Niño during different PDO phases? *J Clim*, 27: 2682–2698
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Q J R Met Soc*, 106: 447–462
- Harrison D E, Larkin N K. 1996. The COADS sea level pressure signal: A near-global El Niño composite and time series view, 1946–1993. *J Clim*, 9: 3025–3055
- Huang B, Thorne P W, Banzon V F, Boyer T, Chepurin G, Lawrimore J H, Menne M J, Smith T M, Vose R S, Zhang H M. 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J Clim*, 30: 8179–8205
- Jiang F, Zhang W J, Geng X, Stuecker M F, Liu C. 2019. Impacts of central Pacific El Niño on southern China spring precipitation controlled by its longitudinal position. *J Clim*, 32: 7823–7836
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S K, Hnilo J J, Fiorino M, Potter G L. 2002. Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2). *Bull Amer Meteorol Soc*, 83: 1631–1644
- Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J Clim*, 12: 917–932
- Li T, Wang B, Wu B, Zhou T, Chang C P, Zhang R. 2017. Theories on formation of an anomalous anticyclone in western north Pacific during El Niño: A review. *J Meteorol Res*, 31: 987–1006
- Lin Z D, Lu R Y. 2009. The ENSO's effect on eastern China rainfall in the following early summer. *Adv Atmos Sci*, 26: 333–342
- Liu F Y, Zhang W J, Jin F F, Hu S Q. 2021. Decadal modulation of the ENSO-Indian Ocean basin warming relationship during the decaying summer by the interdecadal Pacific oscillation. *J Clim*, 34: 2685–2699
- Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteorol Soc Jpn*, 44: 25–43
- McGregor S, Ramesh N, Spence P, England M H, McPhaden M J, Santoso A. 2013. Meridional movement of wind anomalies during ENSO events and their role in event termination. *Geophys Res Lett*, 40: 749–754
- McGregor S, Timmermann A, Schneider N, Stuecker M F, England M H. 2012. The effect of the south Pacific convergence zone on the termination of El Niño events and the meridional asymmetry of ENSO. *J Clim*, 25: 5566–5586
- Stuecker M F, Jin F F, Timmermann A, McGregor S. 2015. Combination mode dynamics of the anomalous northwest Pacific anticyclone. *J Clim*, 28: 1093–1111
- Stuecker M F, Timmermann A, Jin F F, McGregor S, Ren H L. 2013. A combination mode of the annual cycle and the El Niño/Southern Oscillation. *Nat Geosci*, 6: 540–544
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon Weather Rev*, 109: 784–812
- Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, Kousky V E, Sarachik E S, von Storch H. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J Geophys Res*, 103: 14241–14259
- Wang B, Li J, He Q. 2017. Variable and robust East Asian monsoon rainfall response to El Niño over the past 60 years (1957–2016). *Adv Atmos Sci*, 34: 1235–1248
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Clim*, 13: 1517–1536
- Wang B, Wu R G, Li T. 2003. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. *J Clim*, 16: 1195–1211
- Wang B, Xiang B Q, Lee J Y. 2013. Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 110: 2718–2722
- Wang C Y, Xie S P, Kosaka Y. 2018. Indo-western Pacific climate variability: ENSO forcing and internal dynamics in a tropical Pacific pacemaker simulation. *J Clim*, 31: 10123–10139
- Wang C Y, Xie S P, Kosaka Y. 2020. ENSO-unrelated variability in Indo-Northwest Pacific climate: Regional coupled Ocean-Atmospheric feedback. *J Clim*, 33: 4095–4108
- Wu B, Li T, Zhou T. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer. *J Clim*, 23: 2974–2986
- Xie P P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and

- numerical model outputs. *Bull Amer Meteorol Soc*, 78: 2539–2558
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, Tokinaga H, Du Y, Huang G, Sampe T. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J Clim*, 22: 730–747
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, Hu K M, Chowdary J S, Huang G. 2016. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 33: 411–432
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, Liu Z Y, Wu L X. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 34: L02708
- Zhang R H, Li T R, Wen M, Liu L K. 2015. Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter. *Clim Dyn*, 45: 559–567
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian Monsoon. *J Meteorol Soc Jpn*, 74: 49–62
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 16: 229–241
- Zhang R H, Sumi A. 2002. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern Winter, Spring and Autumn. *J Meteorol Soc Jpn*, 80: 213–227
- Zhang W J, Jin F F, Stuecker M F, Wittenberg A T, Timmermann A, Ren H L, Kug J S, Cai W J, Cane M. 2016a. Unraveling El Niño's impact on the East Asian monsoon and Yangtze River summer flooding. *Geophys Res Lett*, 43: 11,375–11,382
- Zhang W J, Li H Y, Jin F F, Stuecker M F, Turner A G, Klingaman N P. 2015. The annual-cycle modulation of meridional asymmetry in ENSO's atmospheric response and its dependence on ENSO zonal structure. *J Clim*, 28: 5795–5812
- Zhang W J, Li H Y, Stuecker M F, Jin F F, Turner A G. 2016b. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode. *J Clim*, 29: 4347–4359

(责任编辑: 陈文)