

影响夏季西北太平洋副热带高压年际变率的关键海区及影响机制^{* 1}

何超^{1,2} 周天军^{2,3} 吴波²
HE Chao^{1,2} ZHOU Tianjun^{2,3} WU Bo²

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州, 510080
2. 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京, 100029
3. 全球变化研究协同创新中心, 北京, 100875

1. *Institute of Tropical and Marine Meteorology (ITMM), China Meteorological Administration (CMA), Guangzhou 510080, China*
2. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029, China*
3. *Joint Center for Global Change Studies (JCGCS), Beijing 100875, China*

2015-03-16 收稿, 2015-04-27 改回.

何超, 周天军, 吴波. 2015. 影响夏季西北太平洋副热带高压年际变率的关键海区及影响机制. 气象学报, 73(5):940-951

He Chao, Zhou Tianjun, Wu Bo. 2015. The key oceanic regions responsible for the interannual variability of the western North Pacific subtropical high and their impacting mechanisms. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(5):940-951

Abstract The western North Pacific subtropical high (WNPSH) is an important circulation system which impacts the East Asian summer climate. The interannual variability of WNPSH is modulated by tropical air-sea interaction. In order to make it clear which oceanic regions are crucial to the interannual variability of the WNPSH, the relevant research progresses in the past decades are reviewed. Based on the review, five oceanic regions are ascertained to be responsible for the interannual variability of the WNPSH in summer, including the equatorial central-eastern Pacific Ocean, tropical Indian Ocean, the subtropical western North Pacific, the vicinity of the maritime continent and the tropical Atlantic Ocean. The mechanisms how the sea surface temperature (SST) anomalies (SSTA) in these regions impact the WNPSH are elaborated. The formation mechanisms for the SSTAs in these five regions are discussed. Strengths and weaknesses of the climate models in simulating and predicting the WNPSH are also examined and documented. Finally, the key scientific problems reserving further study are proposed.

Key words Western North Pacific subtropical high, Interannual variability, Air-sea interaction

摘要 西北太平洋副热带高压(西太副高)是影响东亚夏季气候的主要环流系统,其年际变率受热带多个海区的海-气相互作用过程的调控。为明确影响夏季西太副高的关键海区及其影响机制,在总结最近十余年来相关研究进展的基础上,归纳出影响夏季西太副高年际变率的5个关键海区,包括赤道中东太平洋、热带印度洋、副热带西北太平洋、海洋大陆附近海区以及热带大西洋。阐述了这5个关键海区的海温异常影响西太副高年际变率的机制,并探讨了5个关键海区海温异常的形成机制。围绕夏季西太副高的年际变率,回顾了当前气候模式的模拟和预测研究的现状。最后,提出了本领域亟待解决的关键科学问题,展望未来可能的研究热点。

关键词 西北太平洋副热带高压, 年际变率, 海-气相互作用

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB953901)、国家自然科学基金项目(41330423、41375095)、广东省自然科学基金项目(2014A030310432)。

作者简介:何超,主要从事东亚-西北太平洋气候变率和全球气候变化研究。E-mail: hechao@mail.iap.ac.cn

通讯作者:周天军,主要从事气候模拟、海气相互作用和东亚气候研究。E-mail: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

中图法分类号 P461

1 引言

夏季北太平洋地区受一个洋盆尺度的大型高压系统控制,即北太平洋副热带高压(North Pacific Subtropical High, NPSH),其中心位于东太平洋北美西岸,而其脊线向西延伸到西北太平洋和东亚沿岸。北太平洋副热带高压的西段被称为西北太平洋副热带高压,简称“西太副高”(Western North Pacific Subtropical High, WNPSH)。西太副高作为东亚夏季风的重要成员,与东亚夏季气候有密切关联。每年暮春到盛夏,西太副高脊线的北跳分别对应东亚主雨带的几次北抬,即华南前汛期、江淮梅雨和华北雨季的开始(Tao, et al, 1987)。

西太副高有着强烈的年际变率,西太副高区是夏季北半球副热带气候年际变率最强的区域(Lu, 2001; Sui, et al, 2007; Wu, et al, 2008; Chung, et al, 2011)。西太副高的偏强/偏弱分别对应西北太平洋对流层低层的异常反气旋/气旋(WNPAC/WNPC)。西太副高的年际变率会造成夏季东亚地区显著的气候异常。夏季西太副高偏强时,其脊线位置偏南,强大的西太副高使长江中下游的梅雨锋稳定少动,同时反气旋环流西侧的异常偏南风向长江中下游输送大量水汽,使长江中下游降水偏多(张庆云等, 2003; Chang, et al, 2000; Zhou, et al, 2005);西太副高偏强还可导致盛夏江南地区出现持续性高温酷暑(张尚印等, 2004; 管兆勇等, 2010; 史军等, 2013),东北出现夏季低温冷害(李崇银, 1989)。西太副高偏弱时,其脊线位置偏北,来自南海和中纬度地区的异常水汽输送在淮河流域交汇,淮河流域降水偏多(Zhou, et al, 2005; 赵俊虎等, 2012; 刘屹岷等, 2013)。关于西北太平洋与东亚气候的密切联系,陆日宇等(2009)已进行了详尽的综述。

鉴于西太副高对东亚气候的重要影响,西太副高年际变率的机理一直备受关注。中国学者很早就注意到了前冬厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)与夏季西太副高的密切联系(陈烈庭, 1977; 符淙斌等, 1979; 黄荣辉, 1986; 李崇银等, 1987; 李崇银, 1989),以及夏季发展位相的 ENSO 对西太副高的

影响(Huang, et al, 1989; Zhang, et al, 1999)。最近十余年来,随着观测资料的日渐丰富和气候模式水平的不断提高,西太副高年际变率的研究取得了显著进展,特别是关于夏季不同海区的海温异常对西太副高的强迫作用,发现了许多新现象,提出了许多新机制。本文旨在梳理最近十余年来关于西太副高年际变率的研究进展,阐述海气相互作用影响西太副高的各种机制,挖掘本领域尚待解决的前沿科学问题,展望未来可能的研究热点。

2 影响西太副高的 5 个关键海区及其影响机制

已有的研究表明多个关键海区的海温异常(简称 SSTA)均对西太副高具有显著影响,并提出了多种不同的影响机制。以下将从有利于西太副高偏强的角度,阐述影响西太副高的关键海区及其影响机制。如无特殊说明,下文的海温异常均指夏季的海温异常。

2.1 赤道中东太平洋

早期的研究多强调夏季赤道东太平洋的正 SSTA 有利于西太副高偏强。在厄尔尼诺衰减年夏季,赤道东太平洋仍然存在残余的厄尔尼诺型正 SSTA,驱动赤道东太平洋大气的异常辐合上升。异常上升气流向西偏北方向运动,在副热带西北太平洋下沉,这一异常翻转环流可以称为异常“准沃克环流”。赤道东太平洋的正 SSTA 通过驱动异常准沃克环流而增强西太副高(应明等, 2000)。此外,厄尔尼诺期间,由于赤道西太平洋海温相对偏低,对流减弱,负的加热异常在其西北侧激发出反气旋性异常环流(Zhang, et al, 1996),也有利于西太副高偏强(Zhang, et al, 1999)。

近期的研究强调赤道中太平洋的负 SSTA 有利于西太副高偏强。赤道中太平洋的负 SSTA 抑制局地降水,因此,在其西北侧和西南侧激发出沿赤道对称的反气旋式罗斯贝波(Gill, 1980),西北侧的异常反气旋叠加在气候态西太副高之上,使西太副高增强(Wang, et al, 2013; Xiang, et al, 2013)。夏季赤道中太平洋的负 SSTA 来自拉尼娜发展位相或持续的拉尼娜事件的贡献(Wang, et al, 2013)。海温异常强迫大气模式的数值试验也表明,

赤道中太平洋负 SSTA 的强迫有利于西太副高偏强(Wu, et al, 1992; Wang, et al, 2013)。

厄尔尼诺事件可按照其海温变暖中心区域的不同而细分为东太平洋厄尔尼诺以及中太平洋厄尔尼诺(Ashok, et al, 2007)。最近有不少研究发现两类 ENSO 事件对西太副高和东亚降水的影响存在明显差异。观测分析和数值模拟结果一致表明,在厄尔尼诺发展年夏季,中太平洋厄尔尼诺事件对西太副高的影响比东太平洋厄尔尼诺事件的影响更强(Hong, et al, 2011; Yuan, et al, 2012a; Chen, et al, 2014b);然而在厄尔尼诺衰减年夏季,东太平洋厄尔尼诺的影响强于中太平洋厄尔尼诺的影响(Yuan, et al, 2012a)。中太平洋拉尼娜和东太平洋厄尔尼诺事件都有利于副热带西北太平洋出现异常反气旋,使长江中下游降水增多;中太平洋厄尔尼诺和东太平洋拉尼娜事件都有利于副热带西北太平洋出现异常气旋,中太平洋厄尔尼诺事件期间华南降水偏多,而中太平洋拉尼娜事件对华南降水无显著影响(Karori, et al, 2013; Chen, et al, 2014b)。Zhou 等(2014)总结了关于两类 ENSO 对东亚—西北太平洋气候影响的近期研究进展。

2.2 热带印度洋

热带印度洋海温的年际变率表现为两个独特的模态,第 1 模态是洋盆尺度一致变暖模态(简称“洋盆模”),主要是对前冬 ENSO 的响应,第 2 模态是印度洋偶极子模态(简称“偶极子”),独立于 ENSO 但与 ENSO 存在相互作用(Saji, et al, 1999; Webster, et al, 1999; Li, et al, 2003)。洋盆模的峰值出现在春季,并能够通过海-气相互作用一直持续到夏季(Klein, et al, 1999; Du, et al, 2009),故对夏季西太副高和东亚夏季风有显著影响(Yang, et al, 2010);偶极子通常在夏季形成,并在随后的秋季达到峰值(Li, et al, 2003),其对东亚夏季风和冬季风均有影响,对冬季风的影响更为显著(Guan, et al, 2003; Yang, et al, 2010)。

中国学者很早就着手研究印度洋海温异常对东亚气候的影响(吴国雄等, 2000)。Guo 等(2004)通过数值试验证明印度洋的海温异常对于中国夏季降水具有重要的驱动作用。近年来,越来越多的研究开始关注夏季热带印度洋高海温异常对东亚气候的影响(Yang, et al, 2007, 2010; Li, et al, 2008; Xie, et al, 2009; Wu, et al, 2010a; Kosaka, et al,

2013; Song, et al, 2014a)。关于热带印度洋正 SSTA 使西太副高增强的物理机制,主要有以下两种解释:

(1)“两级热力适应”机制。该机制主要强调热带北印度洋的贡献。北印度洋的正 SSTA 通过感热加热,在其东侧激发出近地层的异常气旋式环流,这是第 1 级热力适应。异常气旋式环流东侧的异常偏南风向北输送大量水汽,使华南沿海附近产生正异常降水。正异常降水的潜热加热的垂直廓线表现为对流层中低层的加热率随高度增大,从而诱发出中低层的偏南风异常,增强其东侧的西太副高,即第 2 级热力适应(吴国雄等, 2000)。第 1 级的感热适应和第 2 级的潜热适应共同解释了热带印度洋海温异常影响西太副高的原理。

(2)“开尔文波和波致埃克曼辐散”机制。热带印度洋的正 SSTA 通过湿绝热调整激发出暖性开尔文波,在热带印度洋和西太平洋低层为异常低气压。由于气压梯度和埃克曼抽吸的作用,赤道外西北太平洋低层辐散,形成异常反气旋,增强西太副高。这就是开尔文波导致的埃克曼辐散(WIED)机制(Terao, et al, 2005; Xie, et al, 2009; Wu, et al, 2009a)。由于春、夏季热带印度洋的正海温异常是对前冬厄尔尼诺的响应,热带印度洋的正 SSTA 传递了前冬 ENSO 对夏季西太副高的影响,因此,热带印度洋起到了“电容器”的作用:在冬季厄尔尼诺成熟期,印度洋海-气相互作用的关系表现为大气强迫海洋,印度洋海表温度在厄尔尼诺的强迫下逐渐上升,处于“充电”状态;在厄尔尼诺衰亡之后的夏季,热带印度洋的海-气相互作用关系表现为海洋强迫大气,通过暖性开尔文波和波致埃克曼辐散影响西太副高,此时热带印度洋处于“放电”状态(Xie, et al, 2009)。热带印度洋洋盆内的海-气相互作用有助于正 SSTA 的维持(Du, et al, 2009)。

东太平洋厄尔尼诺事件衰减年夏季印度洋的增暖强于中太平洋厄尔尼诺衰减年夏季,更有利于对夏季西太副高施加强迫作用(Yuan, et al, 2012b)。20 世纪 70 年代末期以后,厄尔尼诺衰减年夏季热带印度洋正 SSTA 衰减速率减慢,热带印度洋的正 SSTA 可以维持到夏末,从而热带印度洋对西太副高的影响增强(Xie, et al, 2010; Huang, et al, 2010)。利用 1870—2007 年多种观测资料进行检查,发现年际尺度上热带印度洋电容器效应的强度

存在年代际振荡,1910—1977年较弱,而1910年以前以及1977年以后较强(Chowdary, et al, 2012)。耦合模式对全球变暖情景的预估结果表明,尽管ENSO的振幅和周期无显著变化,但由于大气水汽含量增高,热带印度洋同样强度的海温异常即可导致更强的湿绝热调整和更强的大气开尔文波,因此,热带印度洋的电容效应会随着全球变暖而增强(Tao, et al, 2014)。

此外,近期有不少研究强调热带印度洋—太平洋纬向海温梯度对西太副高的作用(Terao, et al, 2005; Chen, et al, 2012; Cao, et al, 2013)。热带印度洋和太平洋西暖东冷的异常纬向海温梯度驱动了赤道西太平洋的异常东风,并通过埃克曼抽吸作用,引起热带外西北太平洋行星边界层辐散,使得西太副高偏强(Terao, et al, 2005)。该机制可以看作热带印度洋正SSTA与赤道中太平洋负SSTA的联合作用。有研究指出,夏季西太副高的异常与ENSO衰减速率有显著关系:快速衰减的厄尔尼诺比慢速衰减的厄尔尼诺更有利于夏季西太副高偏强;若在厄尔尼诺衰减年夏季拉尼娜事件已经形成,则西太副高的偏强最为明显(Chen, et al, 2012)。ENSO衰减速率与西太副高强度关系事实上反映了热带印度洋—太平洋纬向海温梯度的影响。厄尔尼诺衰减得越快,则夏季热带印度洋—太平洋的纬向海温梯度越大,赤道西太平洋的低层的异常东风越强(Lindzen, et al, 1987),越有利于在副热带西北太平洋形成埃克曼辐散。与单纯印度洋海温异常或太平洋海温异常的提法相比,“印度洋—太平洋纬向海温梯度”的提法有助于更好地理解全球变暖背景下西太副高与印度洋—太平洋海温在年际尺度上的关系(He, et al, 2015a)。

2.3 副热带西北太平洋(WNP)

副热带西北太平洋的负SSTA有利于西太副高偏强。副热带西北太平洋的负SSTA一般形成于前冬厄尔尼诺成熟期,是由于赤道中东太平洋的正SSTA通过大气桥梁强迫所致(Wang, et al, 2000; Alexander, et al, 2002; Lau, et al, 2003)。副热带西北太平洋的负SSTA抑制局地对流形成大气负异常加热,作为罗斯贝波响应(Gill, 1980),在冷源西侧形成异常反气旋,增强西太副高(Wang, et al, 2000, 2013; Wu, et al, 2010a; Xiang, et al, 2013)。此外,也有研究工作强调北印度洋—西北太

平洋的纬向海温梯度对西太副高的强迫作用。北印度洋偏暖、西北太平洋偏冷的纬向海温梯度有利于西太副高偏强(Ohba, et al, 2006; Wu, et al, 2014)。

在厄尔尼诺成熟位相的冬季和随后的春季,西北太平洋盛行东北信风,异常西北太平洋反气旋东侧的异常东北风与气候态东北信风叠加,增强总风速,增大海面向上的热通量,有利于副热带西北太平洋负SSTA的维持和增强,从而形成风-蒸发-海温反馈(Wang, et al, 2000, 2013; Lau, et al, 2003);这一正反馈有利于异常西太副高和副热带西北太平洋的负SSTA维持到厄尔尼诺衰减年夏季(Wang, et al, 2013; Xiang, et al, 2013)。

在厄尔尼诺衰减年夏季,副热带西北太平洋的负SSTA仍可通过激发反气旋式罗斯贝波而使西太副高增强,这一点得到了数值试验的证实(Wu, et al, 2010a)。7月西北太平洋夏季风爆发后副热带西北太平洋的平均态风场由东北信风转变成西南季风,不利于风-蒸发-海温反馈的维持,因此,厄尔尼诺衰减年夏季副热带西北太平洋的负SSTA是逐渐衰减的;但异常西太副高却可以维持到整个夏季,甚至在盛夏(7—8月)更强(Wu, et al, 2010a; Xiang, et al, 2013)。可能的原因有二:

(1)西太副高只在初夏(6月)依靠副热带西北太平洋局地负SSTA的强迫而维持,而在盛夏主要由热带印度洋正SSTA的遥强迫而维持;尽管热带印度洋的正SSTA从前冬到夏季一直存在,但只有在盛夏西北太平洋季风槽建立、平均态降水增多之后,热带印度洋的正SSTA才能有效地通过暖性开尔文波和埃克曼辐散而抑制副热带西北太平洋降水,使西太副高增强(Wu, et al, 2010a; Jiang, et al, 2013)。

(2)西北太平洋夏季风爆发后其对流活动总体增强,同样强度的局地海温异常可以导致更强的降水和环流异常,大气对局地海温异常变得更为“敏感”;尽管副热带西北太平洋的负SSTA在盛夏减弱了,但副热带西北太平洋的对流-风-蒸发-海温反馈在盛夏增强,从而使西太副高对局地海温异常的响应增强(Xiang, et al, 2013)。

2.4 海洋大陆附近海区

海洋大陆附近海区是指(10°S—10°N, 100°—150°E)范围内的海洋区域,这一区域内海洋与陆地

交错分布,气候态海温较高,对流旺盛。海洋大陆附近海区的正 SSTA 增强局地对流,释放大量的异常凝结潜热,从而增强局地哈得来环流,局地哈得来环流在副热带西北太平洋下沉,抑制副热带西北太平洋降水,激发出异常反气旋,使西太副高增强(Lu, et al, 2006; Sui, et al, 2007; Wu, et al, 2009a; Chung, et al, 2011)。除观测证据以外,大气环流模拟结果也显示海洋大陆附近海区的正 SSTA 有利于西太副高增强(Chung, et al, 2011)。海洋大陆附近海区的正 SSTA 总是伴随着衰减位相的厄尔尼诺在夏季向拉尼娜事件的转变,可能来源于发展位相的拉尼娜的强迫(Sui, et al, 2007; He, et al, 2015b)。

西太副高的年际变率呈现出两个特征主导周期,一个是 2—3 a 周期,另一个是 3—5 a 周期。已有的研究结果一致表明,2—3 a 周期的振荡呈现相当正压的垂直结构,受起源于海洋大陆附近海区的局地哈得来环流异常的强迫(Sui, et al, 2007; Chung, et al, 2011; Chen, et al, 2014a)。西太副高的 3—5 a 周期的振荡呈现斜压的垂直结构,其强迫源可能是副热带西北太平洋局地海温异常(Sui, et al, 2007; Chung, et al, 2011)或热带印度洋海温异常(Chen, et al, 2014a)。20 世纪 90 年代初期以前,夏季西太副高主要表现为 3—5 a 周期振荡,而在此之后主要表现为 2—3 a 周期振荡。这一年代际变化的原因在于,20 世纪 90 年代初期以后海洋大陆附近海区的海温异常对西太副高的强迫增强了(Chen, et al, 2014a)。

2.5 热带大西洋

近期的许多研究显示,热带大西洋的正 SSTA 有利于西太副高增强(Lu, et al, 2005; 容新尧等, 2010; Ham, et al, 2013; Hong, et al, 2014)。热带大西洋正 SSTA 在其东侧激发暖性开尔文波,使赤道印度洋至赤道西太平洋均受异常东风控制,由此引发的赤道外西北太平洋的埃克曼辐散有利于西太副高增强(Lu, et al, 2005; 容新尧等, 2010)。

此外,热带大西洋的正 SSTA 触发的局地辐合上升气流通过纬向翻转环流在赤道中太平洋下沉,抑制赤道中太平洋降水并形成大气异常冷源,赤道中太平洋的大气异常冷源通过激发反气旋式罗斯贝波,使西太副高增强(Hong, et al, 2014)。大气模式 HadCM3 的个例模拟试验显示,热带大西洋的海

温异常对于模拟 1998 年夏季的异常西太副高和中国南方降水非常重要,其重要性与大西洋之外所有洋面海温异常的总效应相当(Lu, et al, 2005)。20 世纪 80 年代初期之后,热带大西洋海温异常对西太副高的影响增强了,而 ENSO 对热带大西洋海表温度的影响减弱了(Hong, et al, 2014)。大西洋热盐环流的减弱有利于大西洋对西太副高的影响增强(Chen, et al, 2015)。热带大西洋正 SSTA 可以通过增强西太副高,在赤道中西太平洋诱导出异常东风,从而触发中太平洋拉尼娜事件(Ham, et al, 2013)。

3 气候模式对西太副高的模拟和预测

第 5 轮气候模式比较计划(CMIP5)提供了大量气候模式的模拟试验结果,包括历史海温驱动单独大气模式的 AMIP 试验和耦合模式的历史气候模拟试验等。AMIP 试验都能模拟出西太副高的反气旋风场,主要模拟偏差是西太副高脊线偏北。28 个模式中有 26 个模式的气候态西太副高脊线偏北,偏北幅度一般为 3 个纬距左右,最严重的可达 7 个纬距(He, et al, 2014)。由于东亚季风雨带受西太副高脊线位置的调控,西太副高脊线偏北的模拟偏差极大地限制了模式对东亚季风雨带的模拟。模式模拟的长江中下游至日本的梅雨降水普遍偏弱,而华北降水偏强(Chen, et al, 2010; Sperber, et al, 2013)。CMIP5 的耦合模式模拟的西太副高脊线位置也明显偏北,平均偏北幅度为 2 个纬距,尽管偏北幅度略小于单独大气模式 AMIP 试验,但这一偏差仍然十分明显(He, et al, 2015a)。这说明考虑海气耦合并不能从根本上解决西太副高偏北的问题,西太副高气候态脊线偏北的问题很可能源于大气模式本身。

使用法国动力气象实验室(LMD)的变网格模式,提高模式在东亚—西太平洋地区的水平分辨率,可以改善西太副高的模拟,从而改善东亚夏季风雨带的模拟(Zhou, et al, 2002)。对大气模式 CAM3.5,在同一动力框架下采用多个不同的对流参数化方案,发现模拟的东亚雨带位置和季节演变依赖于对流参数化方案的选取,但西太副高的大尺度环流场对参数化方案的选取并不敏感。尽管有证据显示优化对流参数对于改进区域模式 RegCM3

的西太副高偏差有一定帮助(Zou, et al, 2014),但不能完全期望通过改进对流参数化方案来改进西太副高环流场的模拟。模式中西太副高偏北的模拟偏差可能与大尺度海陆热力对比的模拟偏差有关(Chen, et al, 2010)。

西太副高的年际变率表现出两个独特的模态。对西北太平洋的风矢量场(Park, et al, 2010; He, et al, 2013, 2014)、纬向风场(Lu, et al, 2006)、降水场(Zhou, et al, 2009a)、位势高度场(Wang, et al, 2013; Xiang, et al, 2013)或水汽输送场(Li X Z, et al, 2012)做经验正交函数(EOF)分解,都可以得到这两个模态。其中,使用位势高度场得到的两个模态的顺序与使用风场(风矢量、纬向风、水汽输送场)得到的两个模态的顺序相反。这两个模态总共可以解释西太副高年际方差的50%—80%。两个模态对应截然不同的热带海温异常型,显示出截然不同的海-气关系。

历史海温驱动大气模式的AMIP试验可以很好地模拟第1模态,说明第1模态是热带海温强迫大气的结果。来自热带印度洋(Park, et al, 2010; Song, et al, 2014a)、海洋大陆(Wu, et al, 2009a; Sui, et al, 2007; Chung, et al, 2011)和赤道中太平洋(Wang, et al, 2013; Xiang, et al, 2013)海温异常的强迫都可能对第1模态有贡献。

关于第2模态是不是海温异常强迫大气的结果,已有的结论存在争议。有的研究认为第2模态是大气环流对西北太平洋局地海温异常的响应(Sui, et al, 2007; Wu, et al, 2009a; Chung, et al, 2011);有的研究认为第2模态是局地海-气耦合现象,西北太平洋局地的风-蒸发-海温正反馈可以有效地支持异常西太副高从初夏维持到盛夏(Wang, et al, 2013; Xiang, et al, 2013);还有研究认为第2模态是纯粹的大气内部动力过程的产物,与海温强迫无关(Lu, et al, 2006, 2008)。28个CMIP5模式的AMIP试验可以在一定程度上再现第2模态,但模拟的第2模态的异常西太反气旋强度明显偏弱,异常反气旋中心位置偏西偏南,模式对第2模态的模拟能力明显低于第1模态。在第2模态的5个典型异常年中,模式只能模拟出1993和1994年的异常西太副高,而模拟的1980、1981和1987年的异常西太反气旋强度接近于0。AMIP试验对第2模态只有部分的模拟能力,说明第2模态

既不是纯粹的大气内部模态,也不是纯粹的海温强迫模态,而很可能是一个混合模态,即受到海温异常调制的内部变率模态(He, et al, 2014)。

夏季异常西太副高可以通过两步法或一步法进行预测。使用韩国的全球海温动力统计集合预测系统预测的海温异常作为强迫场,中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室的大气模式GAMIL对西太副高年际变率有较强的预测能力。作为影响东亚夏季降水的重要天气系统之一,与来自中高纬度的系统不同,西太副高的异常受热带海温的调控,具有较高的可预报性(邹立维等, 2009)。利用春季印度洋—西北太平洋海温梯度、赤道太平洋海温倾向以及北大西洋涛动指数建立线性模型,可以较好地预测夏季西太副高的异常,预测的西太副高指数与观测值的时间相关达到0.81。参加ENSEMBLES计划的5个耦合模式对异常西太副高有超前一个月的预测技巧(Li C F, et al, 2012);预测技巧在厄尔尼诺年和ENSO中性年均较高,但在拉尼娜年较低(Li, et al, 2014)。NCEP的耦合预测系统CFSv2能够抓住西太副高在初夏受控于西北太平洋局地海温异常而在盛夏受控于热带印度洋海温异常的特征(Jiang, et al, 2013)。利用西太副高的可预报性,可以显著改善东亚夏季风降水和西北太平洋热带气旋的预测(Wang, et al, 2013)。

4 总结与展望

4.1 总结

夏季西太副高的年际变率受到热带海温异常的调控。关于西太副高年际变率的机制,最近十余年来中外开展了大量的研究,提出了多种可能的解释。总体来看,夏季热带印度洋、海洋大陆附近海区和热带大西洋的正SSTA有利于西太副高偏强,赤道中太平洋和副热带西北太平洋的负SSTA也有利于西太副高偏强;反之亦然。已有的研究提出了这5个关键海区的海温异常影响西太副高的物理机制,图1是关键海区及影响机制的简单示意。热带印度洋海温异常可通过两级热力适应或开尔文波导致的埃克曼辐散而影响西太副高;海洋大陆附近海区的海温异常通过局地哈得来环流影响西太副高;热带大西洋海温异常通过开尔文波和波致埃克曼辐散而影响西太副高;赤道中太平洋海温异常通过罗斯贝

波影响西太副高;副热带西北太平洋海温异常也通过罗斯贝波影响西太副高,并可与西太副高形成局地海-气反馈。根据已有的研究,赤道中东太平洋和海洋大陆附近海区对西太副高的影响主要表现在 ENSO 发展位相,而热带印度洋、副热带西北太平洋和热带大西洋对西太副高的影响主要表现在 ENSO 衰减位相。

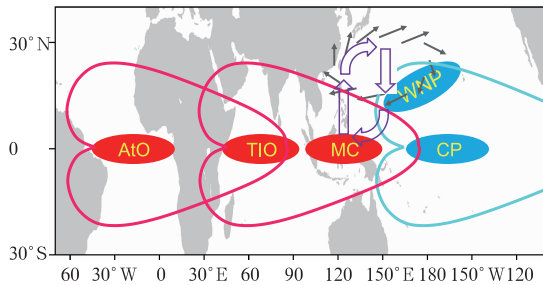


图 1 影响夏季西太副高年际变率的 5 个关键海区 (热带大西洋 (AtO), 热带印度洋 (TIO), 海洋大陆附近海区 (MC), 赤道中太平洋 (CP), 副热带西北太平洋 (WNP)) 及影响机制示意

(红色 (蓝色) 椭圆形表示有利于西太副高偏强的关键区正 (负) 海温异常; 黑色细箭头表示西北太平洋的异常反气旋环流, 对应异常偏强的西太副高; 红色粗线表示由热带大西洋和热带印度洋正海温异常激发的 Gill 模态响应 (西侧的一对暖性罗斯贝波和东侧的暖性开尔文波); 亮蓝色粗线表示由赤道中太平洋负海温异常激发的 Gill 模态响应; 紫色空心箭头表示由海洋大陆附近海区正海温异常激发的局地哈得来环流异常)

Fig. 1 Schematic for the location of the five key regions and their mechanisms responsible for the interannual variability of WNP SH

(The five regions include Tropical Atlantic Ocean (AtO), Tropical Indian Ocean (TIO), the vicinity of Maritime Continent (MC), equatorial Central Pacific (CP) and Western North Pacific (WNP). Red (blue) ovals indicate the location of warm (cold) SST anomalies which are in favor of an enhanced WNP SH; The thin black arrows indicate the anticyclonic circulation over WNP associated with an enhanced WNP SH; The red lines represent the Gill type responses to warm SST anomalies over AtO and TIO, each includes a pair of Rossby waves on the west and a Kelvin wave on the east of the warm SST anomaly; The light blue thick lines represent the Gill type response to the cold SST anomaly over CP; The hollow purple arrows indicate the anomalous local Hadley circulation triggered by the warm SST anomaly over MC)

当前的气候模式均能够模拟出西太副高的主要环流特征, 大气模式对西太副高平均态的模拟偏差主要表现为副高脊线位置偏北, 西太副高位置的模拟偏差直接导致了东亚雨带的模拟偏差。考虑海-气耦合并不能从根本上改进脊线位置偏北的问题, 尽管耦合模式中西太副高脊线位置偏北的问题略有改进。西太副高的年际变率表现为两个独特的模态。历史海温强迫大气模式的 AMIP 试验对第 1 模态有较高的模拟技巧, 但对第 2 模态只有部分的模拟能力, 说明第 1 模态的本质是大气对海温异常强迫的响应, 而第 2 模态可能是海洋强迫与大气内部动力过程的混合模态。短期气候预测的“一步法”和“两步法”均对西太副高有较高的预报技巧, 利用西北太平洋大尺度环流的可预报性, 可以改善东亚季风降水的预测。

本文主要从海-气相互作用的角度回顾了西太副高年际变率的机制。除了海-气相互作用之外, 陆气相互作用对西太副高的年际变率也有重要贡献。许多研究工作表明, 春、夏季青藏高原异常强的感热加热有利于西太副高偏强 (王跃男等, 2008; 周秀骥等, 2009)。而春季青藏高原积雪能够在很大程度上调节青藏高原的感热加热异常, 异常偏多的高原春季积雪能够通过增强地表反照率和增大土壤湿度而削弱春、夏季青藏高原热源的强度 (朱玉祥等, 2009), 从而削弱西太副高的强度。有关青藏高原热力状况影响西太副高和东亚夏季风的研究进展, 已经有详尽的综述 (Wu, et al, 2007; 周秀骥等, 2009; 段安民等, 2014)。

4.2 展望

围绕西太副高年际变率的机制, 尽管最近十余年取得了丰硕的研究成果, 但仍有很多问题尚待解决, 这些问题可能成为未来一段时间的研究热点。

(1) 海-气耦合过程对西太副高年际变率的影响。已有关于西太副高的研究多将异常大气环流看做对海温异常强迫的响应, 多按照海温异常导致异常环流的思路来寻找异常环流的成因。事实上, 西北太平洋存在强烈而复杂的海-气相互作用 (Wu, et al, 2009b; Wang, et al, 2013; Lu, et al, 2014, 2015), 该区域大气强迫海洋的过程占主导, 与其他热带海区截然不同 (Wang, et al, 2005)。西北太平洋海气相互作用的特征在厄尔尼诺年和拉尼娜年之间并不对称 (Wu, et al, 2010b), 在 ENSO 发展位

相和衰减位相也有明显差异(Wu, et al, 2009b)。区域海-气耦合模式的试验也证实了考虑海-气耦合过程对于提高该区域年际变率模拟技巧的重要性(Zou, et al, 2013)。单独大气模式并不能真实刻画西北太平洋的海-气关系,海-气耦合模式将成为研究东亚—西北太平洋气候变率的重要手段。

(2)西太副高异常的预测。作为影响东亚夏季降水的重要系统之一,与中高纬度系统不同,西太副高受热带海温的调控,具有较高的可预报性(邹立维等,2009)。利用西太副高的可预报性,可以显著改善东亚夏季降水和西北太平洋热带气旋的预测(Wang, et al, 2013)。如何准确地预测西太副高年际乃至季节内尺度的异常,是理论界和业务界共同关心和亟待解决的重要问题。

(3)全球变暖和太平洋年代际变率对西太副高的影响。西太副高的平均态强度在20世纪70年代末期发生了明显的年代际变化,并可能导致了东亚夏季雨带的年代际变化及“南涝北旱”型(Gong, et al, 2002; Yu, et al, 2004, 2007; Zhou, et al, 2009b; Huang, et al, 2015)。西太副高的年际变率与热带海温的关系在20世纪70年代末期也有年代际变化(Xie, et al, 2010; Huang, et al, 2010; Hong, et al, 2014)。人为温室气体排放导致的全球变暖和自然气候变率(例如太平洋年代际振荡)均有可能导致东亚—西太平洋气候的年代际转型(Li, et al, 2010; Zhou, et al, 2013; Qian, et al, 2014; Song, et al, 2014b)。人为温室气体强迫导致的热带太平洋海温变暖呈现东部强于西部的类厄尔尼诺型(An, et al, 2012; Yeh, et al, 2012),印度洋海温的变暖呈现出西部强于东部的类印度洋偶极子型(Zheng, et al, 2013; Dong, et al, 2014)。全球变暖如何影响西太副高的平均态和年际变率?西太副高对全球变暖的响应和太平洋年代际振荡等自然气候变率又将如何影响未来的东亚气候?目前还很少有研究涉及这些问题,有待未来深入探讨。

致谢:本文撰写期间,与中国气象局广州热带海洋气象研究所的谷德军研究员、中国科学院大气物理研究所的邹立维博士和宋丰飞博士进行了有益的讨论,在此表示感谢。

参考文献

陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响. 大气科学, 1(1): 1-12. Chen L T. 1977. Influences of sea surface temperature anomalies over e-

quatorial Eastern Pacific on tropical circulation and flood-season precipitation in China. Chinese J Atmos Sci, 1(1): 1-12 (in Chinese)

- 段安民, 肖志祥, 吴国雄等. 2014. 青藏高原冬春积雪影响亚洲夏季季风的研究进展. 气象与环境科学, 37(3): 94-101. Duan A M, Xiao Z X, Wu G X, et al. Study progress of the influence of the Tibetan Plateau winter and spring snow depth on Asian summer monsoon. Meteor Environ Sci, 37(3): 94-101 (in Chinese)
- 符淙斌, 孙翠霞, 张金枝. 1979. 赤道海温异常与大气的垂直环流圈. 大气科学, 3(1): 50-57. Fu C B, Sun C X, Zhang J Z. 1979. The atmospheric vertical circulation during anomalous periods of sea surface temperature over equatorial Pacific ocean. Chinese J Atmos Sci, 3(1): 50-57 (in Chinese)
- 管兆勇, 蔡佳熙, 唐卫亚等. 2010. 长江中下游夏季气温变化型与西太平洋副高活动异常的联系. 气象科学, 30(5): 666-675. Guan Z Y, Cai J X, Tang W Y, et al. 2010. Variations of west Pacific subtropical high associated with principal patterns of summertime temperature anomalies in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Scientia Meteor Sinica, 30(5): 666-675 (in Chinese)
- 黄荣辉. 1986. 冬季低纬度热源异常对北半球大气环流影响的物理机制. 中国科学 B 辑, (1): 91-103. Huang R H. 1986. Physical mechanism of influence of heat source anomaly over low latitudes on general circulation over northern hemisphere in winter. Sci China Series B, (1): 91-103 (in Chinese)
- 李崇银, 胡季. 1987. 东亚大气环流与埃尔尼诺相互影响的一个分析研究. 大气科学, 11(4): 359-364. Li C Y, Hu J. A study on interaction between the East Asia atmospheric circulation and El Niño. Chinese J Atmos Sci, 11(4): 359-364 (in Chinese)
- 李崇银. 1989. El Niño 事件与中国东部气温异常. 热带气象, 5(3): 210-219. Li C Y. 1989. El Niño event and the temperature anomalies in eastern China. J Trop Meteor, 5(3): 210-219 (in Chinese)
- 刘屹岷, 洪洁莉, 刘超等. 2013. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常. 大气科学, 37(2): 439-450. Liu Y M, Hong J L, Liu C, et al. 2013. Meiyu flooding of Huaihe River valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the western Pacific. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 439-450 (in Chinese)
- 陆日宇, 富元海. 2009. 夏季东亚和西北太平洋地区的气候变异及其机理. 地球科学进展, 24(2): 123-131. Lu R Y, Fu Y H. 2009. Summer climate variability in East Asia and the western North Pacific and its mechanisms. Adv Earth Sci, 24(2): 123-131 (in Chinese)
- 容新尧, 张人禾, Li T. 2010. 大西洋海温异常在 ENSO 影响印度-东亚夏季风中的作用. 科学通报, 55(14): 1397-1408. Rong X Y, Zhang R H, Li T. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship. Chin Sci Bull, 55(22): 2458-2468

- 史军, 崔林丽, 梁萍等. 2013. 长江三角洲极端高温与西太平洋副热带高压的关系. 地理科学, 33(11): 1383-1389. Shi J, Cui L L, Liang P, et al. 2013. Relationship between extreme high temperature in the Changjiang River Delta and the western Pacific subtropical high. Scientia Geograph Sinica, 33(11): 1383-1389 (in Chinese)
- 王跃男, 张博, 陈隆勋等. 2008. 夏季青藏高原大气热源与东亚大气热源及环流的关系. 科学通报, 53(15): 1842-1848. Wang Y N, Zhang B, Chen L X, et al. 2008. Relationship between the atmospheric heat source over Tibetan Plateau and the heat source and general circulation over East Asia. Chin Sci Bull, 53(21): 3387-3394
- 吴国雄, 刘平, 刘屹岷等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响: 大气中的两级热力适应. 气象学报, 58(5): 513-522. Wu G X, Liu P, Liu Y M, et al. 2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific: Two stage thermal adaptation in the atmosphere. Acta Meteor Sinica, 58(5): 513-522 (in Chinese)
- 应明, 孙淑清. 2000. 西太平洋副热带高压对热带海温异常响应的研究. 大气科学, 24(2): 193-206. Ying M, Sun S Q. 2000. A study on the response of subtropical high over the western Pacific on the SST anomaly. Chinese J Atmos Scis, 24(2): 193-206 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 61(4): 559-568. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. Acta Meteor Sinica, 61(4): 559-568 (in Chinese)
- 张尚印, 王守荣, 张永山等. 2004. 我国东部主要城市夏季高温气候特征及预测. 热带气象学报, 20(6): 750-760. Zhang S Y, Wang S R, Zhang Y S, et al. 2004. The climatic character of high temperature and the prediction in the large cities of east of China. J Trop Meteor, 20(6): 750-760 (in Chinese)
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布. 气象学报, 70(5): 1021-1031. Zhao J H, Feng G L, Yang J, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high. Acta Meteor Sinica, 70(5): 1021-1031 (in Chinese)
- 周秀骥, 赵平, 陈军明等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(11): 1473-1486. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the Northern Hemispheric climate. Sci China Ser D: Earth Sci, 52(11): 1679-1693
- 朱玉祥, 丁一汇, 刘海文. 2009. 青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究. 大气科学, 33(5): 903-915. Zhu Y X, Ding Y H, Liu H W. 2009. Simulation of the influence of winter snow depth over the Tibetan Plateau on summer rainfall in China. Chinese J Atmos Sci, 33: 903-915 (in Chinese)
- 邹立维, 周天军, 吴波等. 2009. GAMIL CliPAS 试验对夏季西太平洋副热带高压的预测. 大气科学, 33(5): 959-970. Zou L W, Zhou T J, Wu B, et al. 2009. The interannual variability of summertime western Pacific subtropical high hindcasted by GAMIL CliPAS experiments. Chinese J Atmos Sci, 33(5): 959-970 (in Chinese)
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. J Climate, 15(16): 2205-2231
- An S -I, Kim J -W, Im S -H, et al. 2012. Recent and future sea surface temperature trends in tropical Pacific warm pool and cold tongue regions. Climate Dyn, 39(6): 1373-1383
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. J Geophys Res: Oceans, 112(C11): C11007
- Cao J, Lu R Y, Hu J M, et al. 2013. Spring Indian Ocean-western Pacific SST contrast and the East Asian summer rainfall anomaly. Adv Atmos Sci, 30(6): 1560-1568
- Chang C P, Zhang Y S, 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 Climate, 13(24): 4310-4325
- Chen H M, Zhou T J, Neale R B, et al. 2010. Performance of the new NCAR CAM3. 5 in East Asian summer monsoon simulations: Sensitivity to modifications of the convection scheme. J Climate, 23(13): 3657-3675
- 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 Niño decaying phases. J Geophys Res: Atmos, 117: D12111
- Chen W, Lee J Y, Lu R Y, et al. 2015. Intensified impact of tropical Atlantic SST on the western North Pacific summer climate under a weakened Atlantic thermohaline circulation. Climate Dyn, doi: 10.1007/s00382-014-2454-4
- Chen X L, Zhou T J. 2014a. Relative role of tropical SST forcing in the 1990s periodicity change of the Pacific-Japan pattern interannual variability. J Geophys Res: Atmos, 119(23): 13043-13066, doi: 10.1002/2014JD022064
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014b. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: A numerical study. Climate Dyn, 43(1-2): 469-481
- Chowdary J S, Xie S P, Tokinaga H, et al. 2012. Interdecadal variations in ENSO teleconnection to the Indo-western Pacific for 1870-2007. J Climate, 25(5): 1722-1744
- 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 Geophys Res: Atmos, 116(D13): D13111

- Dong L, Zhou T J. 2014. The Indian ocean sea surface temperature warming simulated by CMIP5 models during the twentieth century: Competing forcing roles of GHGs and anthropogenic aerosols. *J Climate*, 27(9): 3348-3362
- 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 Climate*, 22(8): 2023-2038
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 106(449): 447-462
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys Res Lett*, 29(10): 781-784
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophys Res Lett*, 30(10)
- Guo Y F, Wang J, Zhao Y. 2004. Numerical simulation of the 1999 Yangtze River valley heavy rainfall including sensitivity experiments with different SSTA. *Adv Atmos Sci*, 21(1): 23-33
- 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. *Nat Geosci*, 6(2): 112-116
- He C, Zhou T J, Zou L W, et al. 2013. Two interannual variability modes of the Northwestern Pacific subtropical anticyclone in boreal summer. *Sci China Earth Sci*, 56(7): 1254-1265
- He C, Zhou T J. 2014. The two interannual variability modes of the western North Pacific subtropical high simulated by 28 CMIP5-AMIP models. *Climate Dyn*, 43(9-10): 2455-2469
- He C, Zhou T J. 2015a. Responses of the western North Pacific subtropical high to global warming under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios projected by 33 CMIP5 models: The dominance of tropical Indian Ocean-tropical western Pacific SST gradient. *J Climate*, 28(1): 365-380
- He C, Zhou T J. 2015b. Decadal change of the connection between summer western North Pacific subtropical high and tropical SST in the early 1990s. *Atmos Sci Lett*, doi: 10.1002/asl2.550
- Hong C -C, Li Y -H, Li T, et al. 2011. Impacts of central Pacific and eastern Pacific El Niños on tropical cyclone tracks over the western North Pacific. *Geophys Res Lett*, 38(16): L16712
- 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 Geophys Res: Atmos*, 119(7): 3715-3722, doi: 10.1002/2013JD021394
- 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 Climate*, 23(19): 5294-5304
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 6(1): 21-32
- Huang Y Y, Wang H J, Fan K, et al. 2015. The western Pacific subtropical high after the 1970s: Westward or eastward shift? *Climate Dyn*, 44(7-8): 2035-2047
- Jiang X W, Yang S, Li J P, et al. 2013. Variability of the Indian Ocean SST and its possible impact on summer western North Pacific anticyclone in the NCEP Climate Forecast System. *Climate Dyn*, 41(7-8): 2199-2212
- Karori M A, Li J P, Jin F F. 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over southeast China. *J Climate*, 26(13): 4567-4582
- Klein S A, Soden B J, Lau N C. 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J Climate*, 12(4): 917-932
- Kosaka Y, Xie S P, Lau N -C, et al. 2013. Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern Pacific. *Proc Natl Acad Sci*, 110(19): 7574-7579
- Lau N -C, Nath M J. 2003. Atmosphere-ocean variations in the Indo-Pacific sector during ENSO episodes. *J Climate*, 16(1): 3-20
- Li C F, Lu R Y, Dong B W. 2012. Predictability of the western North Pacific summer climate demonstrated by the coupled models of ENSEMBLES. *Climate Dyn*, 39(1-2): 329-346
- Li C F, Lu R Y, Dong B W. 2014. Predictability of the western North Pacific summer climate associated with different ENSO phases by ENSEMBLES multi-model seasonal forecasts. *Climate Dyn*, 43(7-8): 1829-1845
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950-2000. *Climate Dyn*, 34(4): 501-514
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM Study. *J Climate*, 21(22): 6080-6088
- Li T, Wang B, Chang C P, et al. 2003. A theory for the Indian Ocean dipole-zonal mode. *J Atmos Sci*, 60(17): 2119-2135
- Li X Z, Zhou W. 2012. Quasi-4-yr coupling between El Niño-southern oscillation and water vapor transport over East Asia-WNP. *J Climate*, 25(17): 5879-5891
- Lindzen R S, Nigam S. 1987. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics. *J Atmos Sci*, 44(17): 2418-2436
- Lu R Y. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool. *J Meteor Soc Japan*, 79(3): 771-783
- 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 Geophys Res: Atmos*, 110(D16): D16102
- Lu R Y, Li Y, Dong B W. 2006. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia. *J Meteor Soc Japan*, 84(3): 447-462.
- Lu R Y, Li Y, Ryu C -S. 2008. Relationship between the zonal displacement of the western Pacific subtropical high and the dominant modes of low-tropospheric circulation in summer. *Prog*

- Natl Sci, 18(2): 161-165
- Lu R Y, Lu S. 2014. Local and remote factors affecting the SST-precipitation relationship over the western North Pacific during summer. *J Climate*, 27(13): 5132-5147
- Lu R Y, Lu S. 2015. Asymmetric relationship between Indian Ocean SST and the western North Pacific summer monsoon. *J Climate*, 28(4): 1383-1395
- Ohba M, Ueda H. 2006. A role of zonal gradient of SST between the Indian Ocean and the Western Pacific in localized convection around the Philippines. *Sola*, 2: 176-179
- Park J -Y, Jhun J -G, Yim S -Y, et al. 2010. Decadal changes in two types of the western North Pacific subtropical high in boreal summer associated with Asian summer monsoon/El Niño-Southern Oscillation connections. *J Geophys Res: Atmos*, 115 (D21): D21129
- Qian C, Zhou T J. 2014. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900-2010. *J Climate*, 27(3): 1210-1222
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751): 360-363
- 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 Climate*, 27(4): 1679-1697
- Song F F, Zhou T J, Qian Y. 2014b. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. *Geophys Res Lett*, 41(2): 596-603, doi: 10.1002/2013GL058705
- 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. *Climate Dyn*, 41(9-10): 2711-2744
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high. *Geophys Res Lett*, 34(11): L11701
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China//Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. London: Oxford University Press, 60-92
- Tao W C, Huang G, Hu K M, et al. 2014. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections to the Indian Ocean basin mode and their relationship under global warming in CMIP5 models. *Int J Climatol*, 35(3): 391-407, doi: 10.1002/joc.3987
- Terao T, Kubota T. 2005. East-west SST contrast over the tropical oceans and the post El Niño western North Pacific summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 32(15): L15706
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 13(9): 1517-1536
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys Res Lett*, 32(15): L15711
- 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*, 110(8): 2718-2722
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, 401(6751): 356-360
- Wu B, Zhou T J. 2008. Oceanic origin of the interannual and interdecadal variability of the summertime western Pacific subtropical high. *Geophys Res Lett*, 35(13): L13701
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009a. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. *J Climate*, 22(11): 2992-3005
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009b. Contrast of rainfall-SST relationships in the western North Pacific between the ENSO-developing and ENSO-decaying summers. *J Climate*, 22(16): 4398-4405
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010a. 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 Climate*, 23(11): 2974-2986
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010b. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña. *J Climate*, 23(18): 4807-4822
- Wu G X, Liu H Z. 1992. Atmospheric precipitation in response to equatorial and tropical sea surface temperature anomalies. *J Atmos Sci*, 49(23): 2236-2255
- Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. *J Hydrometeorol*, 8(4): 770-789
- Wu R G, Huang G, Du Z C, et al. 2014. Cross-season relation of the South China Sea precipitation variability between winter and summer. *Climate Dyn*, 43(1-2): 193-207
- Xiang B Q, Wang B, Yu W D, et al. 2013. How can anomalous western North Pacific subtropical high intensify in late summer? *Geophys Res Lett*, 40(10): 2349-2354
- 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 Climate*, 22(3): 730-747
- Xie S P, Du Y, Huang G, et al. 2010. Decadal shift in El Niño influences on Indo-Western Pacific and East Asian climate in the 1970s. *J Climate*, 23(12): 3352-3368
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 34(2): L02708
- Yang J L, Liu Q Y, Liu Z Y. 2010. Linking observations of the Asian monsoon to the Indian Ocean SST: Possible roles of Indian Ocean basin mode and dipole mode. *J Climate*, 23(21): 5889-

- 5902
- Yeh S-W, Ham Y-G, Lee J-Y. 2012. Changes in the tropical Pacific SST trend from CMIP3 to CMIP5 and its implication of ENSO. *J Climate*, 25(21): 7764-7771
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geophys Res Lett*, 31(22): L22212, doi: 10.1029/2004GL021270
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon. *J Climate*, 20(21): 5344-5355
- Yuan Y, Yang S. 2012a. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 25(21): 7702-7722
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. 2012b. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the Eastern and Central Pacific El Niño: Possible effects of Indian Ocean SST. *J Climate*, 25(22): 7867-7883
- 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 Meteor Soc Japan*, 74(1): 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(2): 229-241
- Zheng X T, Xie S P, Du Y, et al. 2013. Indian Ocean Dipole response to global warming in the CMIP5 multimodel ensemble. *J Climate*, 26(16): 6067-6080
- Zhou T J, Li Z X. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. *Climate Dyn*, 19(2): 167-180
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *J Geophys Res: Atmos*, 110(D8): D08104
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009a. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian-Australian monsoon? *J Climate*, 22(5): 1159-1173.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009b. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *J Climate*, 22(8): 2199-2215
- Zhou T J, Song F F, Lin R P, et al. 2013. The 2012 North China floods: explaining an extreme rainfall event in the context of a long-term drying tendency [in "Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective"]. *Bull Am Meteor Soc*, 94(9): S49-S51
- Zhou T J, Wu B, Dong L. 2014. Advances in research of ENSO changes and the associated impacts on Asian-Pacific climate. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 50(4): 405-422
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Can a regional ocean-atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the western North Pacific summer monsoon? *J Climate*, 26(7): 2353-2367
- Zou L W, Qian Y, Zhou T J, et al. 2014. Parameter tuning and calibration of RegCM3 with MIT-Emanuel cumulus parameterization scheme over CORDEX East Asia domain. *J Climate*, 27(20): 7687-7701