

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.

不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理研究进展

陈文^{1,2} 丁硕毅^{1,2} 冯娟¹ 陈尚锋¹ 薛旭³ 周群⁴

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

3 贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025

4 国家海洋局国家海洋环境预报中心, 北京 100081

摘 要 近十几年来有关热带太平洋存在不同类型的增暖型的研究成为热点课题, 其中主要依据海温的空间形态将厄尔尼诺与南方涛动 (ENSO) 分为两类: 一类为传统的东太平洋型 ENSO, 另一类为中太平洋型 ENSO。该两类 ENSO 的形成机制、演变过程均有不同, 产生的气候影响也有差异。本文简要回顾了国内外有关不同类型 ENSO 及其气候影响的研究进展, 特别综述了近年来关于两类 ENSO 事件对东亚夏季风、东亚冬季风以及东亚冬夏季风关联的影响和机理方面的主要研究进展。文中侧重讨论了年际和年代际时间尺度上 ENSO 事件对东亚季风的影响, 并提出了今后在该领域一些需要进一步研究的科学问题。

关键词 两类 ENSO 东亚夏季风 东亚冬季风 大气遥相关 海气相互作用

文章编号 1006-9895(2018)03-0640-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17248

Progress in the Study of Impacts of Different Types of ENSO on the East Asian Monsoon and their Mechanisms

CHEN Wen^{1,2}, DING Shuoyi^{1,2}, FENG Juan¹, CHEN Shangfeng¹, XUE Xu³, and ZHOU Qun⁴

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

2 School of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Department of Ecosystem, College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025

4 China National Marine Environmental Forecasting Center, State Oceanic Administration, Beijing 100081

Abstract In recent decades, different types of tropical Pacific Ocean warming events have received extensive attention. According to the spatial pattern of sea surface temperature anomalies, El Niño–Southern Oscillation (ENSO) is generally classified into two types. One is called the conventional eastern-Pacific ENSO, the other is called the central-Pacific ENSO. These two types of ENSO are totally different in both formation mechanism and evolution process. Moreover, they also generate different climate responses. This paper has briefly reviewed the advances in the studies on the different types of ENSO and their climate impacts, and particular attention is given to the main progress of the impacts on the East Asian summer monsoon, the East Asian winter monsoon, and the relationship between the East Asian winter and summer monsoons by the two different types of ENSO and the associated mechanisms. The climate impacts of ENSO on the

收稿日期 2017-10-10; **网络预出版日期** 2018-01-15

作者简介 陈文, 男, 1966 年出生, 研究员、博士生导师, 主要从事东亚季风和气候动力学研究。E-mail: chenw@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2016YFA0600604, 国家自然科学基金项目 41721004、41505050, 中国科学院前沿科学重点研究项目 QYZDY-SSW-DQC024

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600604), National Natural Science Foundation of China (Grant 41721004, 41505050), Chinese Academy of Sciences Key Research Program of Frontier Sciences (Grant QYZDY-SSW-DQC024)

interannual and interdecadal timescales are mainly focused. Finally, several scientific issues are proposed for future investigation.

Keywords Two types of ENSO, East Asian summer monsoon, East Asian winter monsoon, Atmospheric teleconnection, Ocean-atmosphere interaction

1 引言

厄尔尼诺与南方涛动 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) 是影响我国夏季旱涝和冬季低温雨雪等气候灾害最重要的一个因子, 它是热带太平洋海气耦合系统中最强的年际变化信号 (Wang, 1995)。ENSO 事件往往导致全球气候异常, 产生严重的经济和社会影响, 已有不少研究分析了它对东亚夏季风和气候的影响 (比如, 符淙斌和滕星林, 1988; Huang and Wu, 1989; 刘永强和丁一汇, 1995; Zhang et al., 1999; 陈文, 2002; Huang et al., 2003; Zhou and Chan, 2007; Zhou et al., 2012; Chen et al., 2013a; Jia et al., 2014; Jia and Ge, 2016)。研究表明: ENSO 事件在发展的不同阶段对东亚夏季风有不同影响, 在 El Niño 发展位相的夏季, 华北降水偏少易发生干旱, 江淮流域降水偏多, 容易形成洪涝; 而在衰减期, 我国江南北部的鄱阳湖、洞庭湖和湘江流域等地区降水偏多, 往往产生严重洪涝。研究还表明, El Niño 年衰减期对东亚夏季风的影响更显著 (Huang and Wu, 1989; 陈文, 2002)。El Niño 发展期和衰减期对东亚夏季降水的不同影响主要是由于大气环流对与 El Niño 演变相关的热带海温异常的不同响应所致: 在发展期, 西北太平洋低层受异常的气旋环流控制, 西太平洋副热带高压偏弱, 同时影响我国的西南气流偏弱; 在衰减期, 西北太平洋低层受异常反气旋环流控制, 该反气旋在 El Niño 发展期秋季形成, 盛期冬季达到最强, 通常能持续到夏季, 它导致了副热带高压和水汽输送的异常, 从而引起东亚夏季降水的异常 (Zhang et al., 1996; 陈文, 2002; 张人禾等, 2017)。

一些研究同样发现 ENSO 事件对东亚冬季风也有重要影响 (Li, 1990; Chen et al., 2000, 2013b, 2013d; Huang et al., 2004; Wang et al., 2008; Zhou et al., 2013; Gong et al., 2015; Jia et al., 2015; Zhang et al., 2015a)。实际上, ENSO 事件往往在冬季达到最强盛, 因此对气候的影响也最显著。在 El Niño 年, 东亚冬季风往往偏弱, 而 La Niña 年通常偏强。这是由于在 El Niño 年, 西北太平洋地区为异常反气旋环流, 其西侧的异常偏南风削弱了南下的偏北

风, 另一方面东亚有明显的异常高空脊维持, 高空锋区位置偏北, 不利于寒潮向南爆发, 从而使得冬季风偏弱, 气温偏高; La Niña 的情况则大致相反 (Zhang et al., 1996; 穆明权和李崇银, 1999; Chen et al., 2000; Wang et al., 2000)。

近十几年来, 大气和海洋学界已经认识到随着全球气候变化, 不同于以东太平洋海温正异常为特征的传统 El Niño 事件, 一种以中太平洋海温正异常, 同时东、西太平洋海温为负异常为特征的事件开始增多 (Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009)。一些研究已表明, 中太平洋增温型对我国夏季旱涝的影响与传统的 El Niño 事件有明显的差别 (Huang and Huang, 2009; Feng et al., 2011; Chen et al., 2014c)。如 2003 年和 2007 年我国汛期旱涝分布预测与实况不太符合, 正是由于我们没有清楚认识到热带太平洋存在着两类增温事件, 而且它们对东亚季风和我国气候的影响是不同的。由此可见, 在全球变暖背景下热带太平洋两类增温事件对东亚冬、夏季风的不同影响及其机理研究, 对认识和提高两类太平洋增温事件及它们所引起的夏季旱涝和冬季低温雨雪冰冻等灾害的预测有重要科学意义和应用价值。

最近几年, 在国家自然科学基金重点项目“全球变暖背景下两类太平洋增温型对东亚冬、夏季风和台风活动的影响及其机理”以及首批启动的《国家重点研究发展计划》项目“全球变暖背景下热带关键区海气相互作用及其对东亚夏季风气候的影响研究”等相关项目的资助下, 关于不同类型 ENSO 对东亚冬、夏季风变异的影响和机理方面取得了一些新的研究成果。由于我国地处东亚, 夏季盛行偏南风, 偏南风从海洋带来大量水汽, 在东亚地区引起大量降水; 而冬季盛行偏北风, 偏北风从高纬度带来干燥又寒冷的空气, 故降水很少。因此, 东亚地区的气候是典型的季风气候, 东亚夏季风的异常往往会导致我国严重的旱涝, 而冬季风的异常又会给我们带来严重低温雨雪等气候灾害。大量研究已经揭示出 ENSO 对东亚夏季降水的重要影响, 同时一些研究也表明 ENSO 可以对东亚冬季风产生显著影响。因此, 本文将主要回顾和综述最近几年

来国际上有关不同类型 ENSO 的研究,特别是回顾我们研究组在有关不同类型 ENSO 影响东亚季风变化的机理方面所取得的最新进展。

2 不同 ENSO 类型事件的研究概况

早在 20 世纪 80 年代,就有研究尝试将太平洋增温事件分成不同的类型(如 Fu et al., 1986; 林学椿和于淑秋, 1993)。但直到 2007 年, Ashok et al. (2007)指出“假”El Niño 现象(El Niño Modoki),且发现这类 El Niño 事件对气候的影响与传统的 El Niño 事件也有显著的差异(Ashok et al., 2007; Weng et al., 2007),才使得两类太平洋增温型的研究成为国际大气和海洋领域研究的热点。这种新的增温型的海温分布特征表现为赤道太平洋海温异常呈纬向三极型分布:中太平洋海温异常偏高,而东、西太平洋海表温度异常偏低。不同的学者给它取了不同的名称,如 El Niño-Modoki (Ashok et al., 2007; Weng et al., 2007), Central Pacific El Niño (Kao and Yu, 2009; Yeh et al., 2009), Warm Pool El Niño (Kug et al., 2009, 2010)等。该增温型在长时间序列的海温资料分析中出现在 EOF 分析的第二模态中,可以解释总方差的 12%,是独立于传统 ENSO 事件而存在的一种热带太平洋海温异常型(Ashok et al., 2007)。这种中太平洋 El Niño 事件(CP El Niño)不仅在空间形态上与传统的东太平洋 El Niño 事件(EP El Niño)有差别,而且它们的演变过程、形成机制也不同。对 EP El Niño 事件适用的延迟振子理论和充放电等理论,对于 CP El Niño 事件也不成立(Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009)。EP El Niño 事件无论是在海温还是大气响应上空间尺度都较大,但 CP El Niño 事件在建立、发展和消亡整个过程中,海表温度异常和次表层温度异常等信号都一直维持在中太平洋(Ashok et al., 2007; Trenberth and Smith, 2009; Hendon et al., 2009)。EP El Niño 事件伴随着东太平洋温跃层的变化和强的表层风的异常,而 CP El Niño 发生时温跃层并无显著变化(Kug et al., 2009)。EP El Niño 事件结束后通常是一个 La Niña 事件的开始,而对于 CP El Niño 这种循环关系并不明显,使得 CP El Niño 更像是一次事件,而不是一个振荡或循环(Kao and Yu, 2009)。事实上,对 El Niño 如何分类以及可以分成多少类也有一些争议,比如 Wang and Wang (2013)将 CP El Niño 分成两类来研究其气候影响,Chen et al.

(2015c)则认为 El Niño 可以分为三类。本文主要讨论两类 ENSO 的气候影响,不涉及对 ENSO 如何分类的讨论。

研究也已表明,CP El Niño 事件对气候的影响与 EP El Niño 事件也有显著的差异。在北半球冬季, Graf and Zanchettin(2012)指出 CP El Niño 通过“副热带大气桥”机制引起负位相的北大西洋涛动(NAO),并导致北大西洋和欧洲地区显著的冷异常;而 EP El Niño 对 NAO 没有显著的影响,往往导致北大西洋和欧洲地区弱的暖异常。Frauen et al. (2014)进一步利用大气环流模式的敏感性试验证实了两类太平洋增暖事件的不同影响。在南半球夏季,CP El Niño 事件往往对应着澳大利亚西北部的多雨,这与 EP El Niño 事件对应的降水异常是相反的(Taschetto et al., 2010)。事实上,对亚澳季风区的温度和降水,在不同的季节对两类太平洋增温事件都有不一样的异常(比如:Wang and Hendon, 2007; Weng et al., 2007, 2009; Taschetto and England, 2009; Feng et al., 2010, 2011; Feng and Li, 2011; Zhang et al., 2011, 2013, 2014; Yuan and Yang, 2012; Karori et al., 2013; Su et al., 2013; Xu et al., 2013; Chen et al., 2014c; Jia et al., 2016)。

之前的研究绝大部分针对的是 CP El Niño 事件和 EP El Niño 事件,而对相应的冷事件关注很少。有一些研究认为对 La Niña 事件,热带海温和降水异常的分布型大致相似,没有必要对冷事件分型(比如:Kug and Ham, 2011; Ren and Jin, 2011)。但一些研究认为可以区分中太平洋 La Niña 事件和传统的东太平洋 La Niña 事件,并且它们对热带太平洋和周边的气候影响也是不同的(Cai and Cowan, 2009; Yuan and Yang, 2012; Shinoda et al., 2013; Chen et al., 2014c; Zhang et al., 2015b)。比如 Zhang et al. (2015b)根据冬季的 Niño3.4 指数和最强的负海温异常的位置区分出两类 La Niña 事件,他们指出中太平洋 La Niña 事件往往引起正的 NAO 异常和增强的北大西洋急流,导致西欧的冬季偏暖和偏湿;而东太平洋 La Niña 事件往往导致相反的气候异常。

最近, Ding et al. (2017)进一步研究了两类 La Niña 事件和太平洋年代际振荡(PDO)对欧洲冬季气候异常的协同影响。他们发现当 PDO 处于负位相时,两类 La Niña 事件往往会导致 NAO 的异常,并且 NAO 的位相相反。中太平洋 La Niña (CP

La Niña) 事件会引起明显的 NAO 的正异常, 导致欧洲地表温度偏暖以及北湿南干的降水偶极子异常; 而东太平洋 La Niña (EP La Niña) 事件对应着 NAO 的负异常, 导致大致相反的气候异常。NAO 异常的形成与源自北太平洋的波列的传播有关, 波列传播的不同则与 CP La Niña 和 EP La Niña 相联系的海温异常引起的对流位置和强度以及北半球对流层高层西风基本态有关。此外, Song et al. (2017) 针对两类 La Niña 事件对澳大利亚夏季降水的影响开展研究, 揭示出当发生 CP La Niña 时, 最大 SST 冷异常中心位于 150°W 以西, 澳大利亚东北部有显著的东北风异常, 有利于暖湿气流从热带地区向澳洲大陆输送, 从而导致澳大利亚北部和东部降水显著偏多; 但当发生 EP La Niña 时, 最大 SST 冷异常中心位于 150°W 以东, 此时大气环流异常偏弱, 澳大利亚降水无显著的异常信号。两类 La Niña 事件对澳大利亚降水影响的差异主要是由于大气环流异常的不同所造成的, CP La Niña 时热带太平洋大气环流异常的强度比 EP La Niña 时要强, 同时位置更加偏西; 赤道西太平洋气候态 SST 高于赤道东太平洋, 同时 CP La Niña 时 SST 冷异常中心振幅更大、位置更偏西可能是导致大气环流异常不同的主要原因; 并且, 上述观测结果利用大气环流模式试验得到证实。两类 La Niña 事件对北半球冬季欧洲和澳大利亚气候异常的影响和机制可以用图 1 来表示。

此外, 虽然热带太平洋地区的海气相互作用对 ENSO 的发生、发展和衰亡起到重要的作用, 但热带太平洋区域以外的气候系统对 ENSO 事件也有重要影响 (比如: Li, 1990; Vimont et al., 2003, 2009)。最近的一系列研究则指出, 北极涛动 (AO) 作为北半球热带外大气环流变化第一主导模态, 它对随后的 ENSO 或赤道中东太平洋海温变率也存在显著的影响 (Chen et al., 2013c, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2016, 2017a, 2017b)。Chen et al. (2014a, 2015a) 通过观测资料分析, 研究了春季和 11 月份 AO 对后期热带中东太平洋地区海温影响的过程, 以及春季 AO 对前期北太平洋涛动 (NPO) 影响后期热带太平洋海温的调制作用 (Chen et al., 2013c); 进一步分析了 AO 影响后期热带太平洋海温的年代际变化和不对称性 (Chen et al., 2014b, 2015b); 并利用 CMIP5 多模式模拟结果, 分析了耦合模式对 AO 影响后期热带太平洋地区海温的模拟能力

(Chen et al., 2017a)。事实上, 从图 2 中可以很容易看出, 除了春季和 11 月份 AO 对后期热带中东太平洋地区海温影响外, ENSO 对后期 AO 也有重要影响。但上述研究并没有区分两类不同的 ENSO, 今后有必要进一步研究热带太平洋区域以外的气候系统对两类不同的 ENSO 的影响。

3 不同类型 ENSO 事件对东亚夏季风影响的研究

3.1 印度洋偶极子对中太平洋增暖型事件与东亚夏季风关系的影响

一些研究已经分析了 CP El Niño 和 EP El Niño 对东亚—西北太平洋夏季风的影响 (比如: Weng et al., 2007, 2011; Feng et al., 2011)。最近, Feng and Chen (2014a) 的研究指出 CP El Niño 与东亚夏季风的关系受到印度洋偶极子 (IOD) 事件的影响。通过将 CP El Niño 事件分为两类, 即纯 CP El Niño 年 (没有 IOD 发生的年份) 和 CP El Niño 伴随 IOD 同时发生的年份, 并利用合成分析方法分析这两种情况下东亚夏季风异常的变化特征。结果表明: 纯 CP El Niño 事件对东亚夏季气候异常存在显著的影响, 主要表现为西北太平洋地区低层出现了显著的大范围气旋环流异常, 在高层为反气旋环流异常, 低层的异常气旋环流阻碍了夏季风的水汽输送通道, 造成长江流域降水偏少。而当 CP El Niño 伴随 IOD 事件同时发生时, 西北太平洋地区低层的异常气旋环流减弱甚至消失, 东亚夏季风异常不显著。他们还利用 CMIP3 模式的 20 世纪模拟试验的数据分析了上述关系在模式中的表现。模式结果中 13 个纯 CP El Niño 年中, 有 12 年的东亚夏季风都存在显著的异常信号, 而在 8 个 CP El Niño 伴随 IOD 事件年中, 有 7 年的东亚夏季风无显著的异常信号。因此印度洋 IOD 事件对 CP El Niño 与东亚夏季风关系的减弱作用不仅体现在观测中, 在数值模式模拟中也有很好的体现。他们进一步利用再分析资料以及普林斯顿大学流体力学实验室 (GFDL) 发展的一个简单的斜压大气环流模式的数值模式, 结果表明: 在纯 CP El Niño 年, 热带中西太平洋对流异常通过 Gill 响应在其西北侧激发出了低层西北太平洋的气旋环流异常, 从而造成东亚夏季风异常; 而 IOD 事件使得 CP El Niño 年热带中西太平洋对流减弱, 导致 Gill 响应减弱, 最终导致低层西北太平洋区域无明显的环流异常。因此 IOD 通过减弱热带中太平

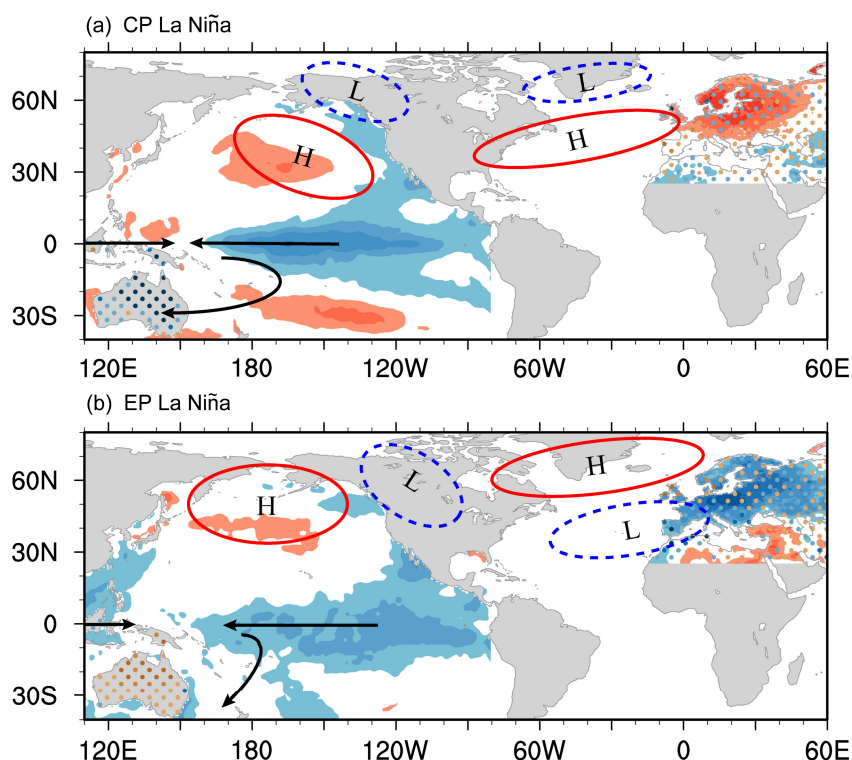


图1 (a) 与 CP La Niña 事件相联系的海表面温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)和大气环流异常,及其引起的澳大利亚夏季降水(单位: mm d^{-1})与欧洲冬季降水(单位: mm d^{-1})、地表温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)异常的示意图。(b) 同图 a, 但为 EP La Niña 事件。填色代表海表面和地表温度异常,红(蓝)色为暖(冷)异常;打点代表陆地降水异常,绿(棕)色为偏湿(干);H(L)代表对流层高层的高(低)压异常;箭头代表低层风场的方向

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the sea surface temperature anomaly (SSTA, units: $^{\circ}\text{C}$) and atmospheric circulation anomaly, and the precipitation anomaly (units: mm d^{-1}) and surface air temperature anomaly (SATA, units: $^{\circ}\text{C}$) for both Australian summer and European winter associated with the CP La Niña (central-Pacific La Niña) events. (b) As in Fig. a, but for the EP La Niña (eastern-Pacific La Niña) events. Color shading indicates the SSTA and SATA (units: $^{\circ}\text{C}$) with warm (cold) in red (blue); dotted area indicates the rainfall anomalies with wet (dry) in green (brown); H (L) represents the anticyclonic (cyclonic) anomaly in the upper troposphere; the arrows indicate winds in the lower troposphere

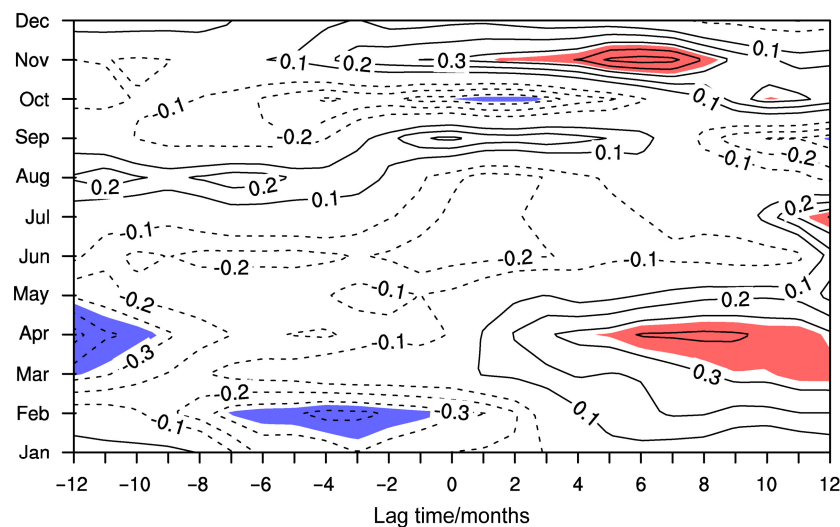


图2 1979~2011年逐月平均AO指数与Niño3.4指数之间的超前—滞后相关系数分布。纵坐标表示AO所在的月份;横坐标的数值(单位:月份数)为正(负)时表示AO超前(滞后)Niño3.4指数;填色区域表示相关系数通过95%信度水平检验;等值线间隔为0.1,零值未画出

Fig. 2 Lead-lag correlation coefficients between the monthly AO (Arctic Oscillation) index and the Niño3.4 index during 1979–2011. Y-axis indicates the months for the AO; positive (negative) lag time (units: months) on x-axis indicates that the AO index leads (lags) the Niño-3.4 index; the shadings indicate the correlation exceeding the 95% confidence level; the contour interval is 0.1, zero line is omitted

洋的对流异常,从而减弱了 CP El Niño 对东亚夏季风的影响。

3.2 两类太平洋增温事件年 MJO (Madden-Julian oscillation) 的不同活动特征

ENSO 和 MJO 分别是热带大尺度海气耦合现象在年际和季节内尺度上最主要的模态,以往的研究表明两者有比较复杂的关系。最近, Feng et al. (2015) 考虑了两类不同的太平洋增温事件以及它们的位相,进一步研究了 MJO 活动特征的差异。结果表明, MJO 活动与两类太平洋增温事件有密切的关系,在 EP El Niño 年, MJO 的年际变化较弱,其异常并不显著;而在 CP El Niño 年, MJO 存在较强的年际变化,并且,强的 MJO 活动主要出现在 CP El Niño 的建立、盛期以及衰减期。在以往的研究中,即不区分 EP El Niño 和 CP El Niño 的情况下, MJO 通常在 El Niño 盛期前的春季强度较强,对 El Niño 的发生有激发作用。但是当把 El Niño 事件划分为 EP El Niño 和 CP El Niño 之后, MJO 只是在 CP El Niño 的盛期前的春季强度较强,在 EP El Niño 的盛期前的春季并没有异常强的 MJO 活动。

3.3 两类太平洋增温事件对南亚高压的不同影响

南亚高压 (SAH) 是亚洲夏季风系统的重要成员之一 (比如: 陶诗言和朱福康, 1964; Wei et al., 2013, 2014)。前人的研究指出夏季南亚高压与其前期 ENSO 有密切的联系; 在厄尔尼诺 (拉尼娜) 事件期间, 南亚高压偏强 (弱)、位置偏南 (北)。薛旭 (2016) 进一步将 El Niño 事件分成传统 El Niño 和 El Niño Modoki, 比较了两类事件对 SAH 的影响。图 3 给出了南亚高压强度和纬度指数随时间的变化。由图可见, 在 11 个传统 El Niño 事件中, 有 10 年南亚高压强度偏强 (超过 0.5 个标准差); 而在 7 个 El Niño Modoki 事件中, 只有 1 年南亚高压强度偏强, 2 年南亚高压强度偏弱 (超过 -0.5 个标准差)。对于南亚高压的中心纬度, 11 个传统 El Niño 事件中, 有 7 年南亚高压位置偏南 (纬度指数超过 -0.5 个标准差), 4 年位于平均位置; 相反, 在 El Niño Modoki 事件中, 只有 1 年南亚高压偏南, 3 年南亚高压偏北 (纬度指数大于 0.5 个标准差)。因此, 两类 El Niño 事件衰减期的夏季, 平均而言, 南亚高压在传统 El Niño 事件时明显比 El Niño Modoki 事件时偏强, 中心位置偏南, 即传统 El Niño 事件对其衰减期夏季南亚高压的影响比 El Niño Modoki 事件偏强。进一步还比较了由 El Niño 事件引起的热带印度洋海温的

充电过程的差别, 及其在南亚高压异常中的作用。

此外, 薛旭的一系列研究还指出, ENSO 影响 SAH 的不稳定性不但受不同 ENSO 类型的影响, 还受到如热带平流层下层纬向风准两年周期振荡 (QBO)、太阳活动 11 年周期、PDO 等的显著调制作用 (Xue et al., 2015, 2017a, 2017b; 薛旭, 2016)。这具体表现为: 在 QBO 东风位相, 冬季 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; 在低太阳活动位相年, 夏季的南亚高压在 El Niño 事件后显著增强, 并在 La Niña 事件后显著减弱, 而在高太阳活动位相年, 夏季南亚高压的异常与 ENSO 就没有显著的联系; 当 El Niño (La Niña) 与 PDO 正 (负) 位相一起发生时, El Niño (La Niña) 事件会对南亚高压的强度和位置有显著影响, 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就明显偏弱。并且, 这三个影响因子调制 ENSO 影响南亚高压的不稳定的过程都是通过调制热带东太平洋海温异常与热带印度洋海温异常的关系, 即通过异常沃克环流和印度洋上空的纬向环流进而影响热带印度洋海温异常, 从而影响南亚高压异常。因此, 有必要在今后开展 QBO、太阳活动 11 年周期和 PDO 三者的共同影响, 当然这个研究依赖于长序列观测资料的获取以及大气环流模式对 QBO 和 PDO 的模拟能力以及两者和太阳活动影响的模拟能力。

3.4 两类太平洋增温事件在南海夏季风爆发年代际变化的作用

南海夏季风是东亚夏季风的重要组成部分, 南海夏季风的爆发标志着亚洲大气环流由冬季型转换为夏季型, 预示着东亚夏季风来临、中国雨季开始。以往的研究表明, ENSO 对南海夏季风的建立有着重要影响, 其暖位相下本年以及下一年的季风爆发偏晚, 而冷位相下则正好相反 (比如: 陶诗言和张庆云, 1998; Zhou and Chan, 2007)。南海夏季风爆发日期在 1993/1994 年出现年代际偏早的转变, 丁硕毅等 (2016) 利用海温和再分析资料的研究揭示出西北太平洋增暖和两类海温型的年代际差异可能是导致此种变化的重要成因, 其研究表明, 在南海夏季风爆发出现年代际变化的背景下, 南海夏季风爆发日期与太平洋海温的关系也出现明显的变化: 1993/1994 之前的第一年代东太平洋 (EP) 型海温异常起主导作用, 而 1993/1994 之后的第二年代两类海温型均影响了季风爆发, 但以中

太平洋 (CP) 型海温异常为主。第一年代, 东太平洋型增温通过抑制西北太平洋—孟加拉湾的对流活动, 在菲律宾海、孟加拉湾西部激发出两个距平反气旋, 使越赤道气流建立偏晚、孟加拉湾低槽填塞、西太平洋副热带高压增强, 进而导致南海夏季风爆发偏晚, 且其影响可从 4 月维持到 5 月; 而中太平洋型增温对季风爆发前期的流场无显著影响。第二年代, 中太平洋型增温通过抑制菲律宾—孟加拉湾东部的对流活动, 在菲律宾—孟加拉湾激发出一个距平反气旋, 使孟加拉湾低槽填塞、南海地区副高增强, 进而阻碍季风爆发, 且显著影响仅出现在 4 月; 东太平洋型增温对 4 月大气环流场的影响与第一年代较为接近, 在菲律宾—孟加拉湾一带产生的风场、对流场异常稍弱于中太平洋型增温, 但其影响无法持续到 5 月。

3.5 ENSO 与东亚夏季风关系的年代际变化

东亚夏季风的异常受 ENSO 的影响, 但这种影响并不稳定 (比如: Wang, 2002)。最近的研究表明, 太平洋年代际振荡 (PDO; Zhang et al., 1997) 和太阳活动 11 年周期都会调制 ENSO 与东亚夏季风的关系 (周群和陈文, 2012; Feng et al., 2014)。Feng et al. (2014) 指出在 PDO 的不同位相, 东亚夏季风的演变在 El Niño 衰减期有明显的不同。在 PDO 正位相背景下, El Niño 衰减年的夏季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, 中国夏季平均降水异常呈现三极型的分布特征, 即中部地区降水偏多, 北部和南部降水偏少。季节内的降水异常变率较小, 同时月平均的降水异常依然维持着三极型的分布特征。这与副热带高压季节内变化较弱有关, 即副热带高压只在 7 月份发生了一次较弱的北跳。相反, 在 PDO 负位相的背景下, El Niño 衰减期的夏季东亚地区主要受异常的西北太平洋反气旋环流影响。在该反气旋的控制下, 中国夏季平均降水异常呈现偶极型分布特征。与 PDO 正位相情形不同, 在 PDO 负位相的情形下中国夏季降水异常存在显著的季节内的变化特征, 主要表现为正降水异常经历显著的北跳过程, 即从 6 月份的华南地区北跳到 7 月份的江淮流域, 再北移到 8 月份的东北地区。这与副热带高压在 7 月和 8 月份两次较强的北跳有关。进一步分析指出, 造成上述差异的原因是 PDO 影响了 El Niño 衰减的进程。在 PDO 正位相背景下, El Niño 衰减缓慢, 有利于印度洋暖海温异常的维持, 因此印度洋的暖海

温通过电容器效应引起了东亚地区的环流异常; 相反, 在 PDO 负位相背景下, El Niño 衰减加快, 到次年夏季时东太平洋的暖海温异常已经消失并且转变为负海温异常, 形成了 La Niña 海温异常型, 因此, 位于东太平洋的负海温异常通过 Gill 机制引起了东亚地区的环流异常。

太阳辐射是地气系统的基本能量来源, 人们很早就注意到太阳活动有比较规律的 11 年周期变化。以往关于太阳活动以及 ENSO 对东亚地区气候的影响的研究局限于考察其中之一的效应, 周群和陈文 (2012) 分析了太阳活动 11 年周期对 ENSO 年海温异常演变以及与之相联系的东亚降水的影响。针对 ENSO 与东亚地区降水异常的研究发现, ENSO 对我国降水的显著影响主要出现在发展期的秋季和衰减期的春季。若分别考虑太阳射电流量高年 (HS) 和低年 (LS), 与 ENSO 相联系的东亚降水异常的差异则主要出现在 ENSO 发展期的秋季。在 HS 年, ENSO 发展期秋季我国大部分地区的降水异常信号较弱; 而 LS 年时我国长江以南和长江以北的反向降水变化就非常显著。进一步分析表明, 这种差别的原因在于对流层低层控制南、北方降水异常的两个重要环流系统——位于菲律宾附近的反气旋和我国华北北部的气旋的强度在 HS 和 LS 年有显著差异。LS 年南海及菲律宾地区附近出现的反气旋式环流异常偏强, 加强了我国南方地区的水汽供应; 而位于华北北部的气旋式环流异常也偏强, 其西侧的偏北风造成长江以北地区的降水负异常。与此相反, HS 年热带西太平洋反气旋和位于我国北方的气旋异常同时偏弱, 造成我国大部分地区的降水异常偏弱且不显著。ENSO 发展期秋季东亚大气环流对太阳射电流量高、低的不同响应可能是由于太阳活动对热带海温的影响所致, HS (LS) 年时会在太平洋强迫出类 La Niña (El Niño) 的海温异常, 导致在热带中东太平洋上升并在热带西太平洋下沉的异常 Walker 环流明显偏弱 (偏强); 这样与 HS 年相比较, LS 年在热带西太平洋的低层辐散就更强, 热源导致的反气旋环流也就更强。

4 不同类型 ENSO 对东亚冬季风以及冬、夏季风关联的影响研究

4.1 两类 ENSO 对冬季北半球遥相关型和西北太平洋反气旋环流影响的非对称性

在北半球冬季, ENSO 主要通过太平洋—北美

型遥相关(PNA)和太平洋—东亚遥相关型(PEAT)分别影响北太平洋和北美地区以及东亚地区。但其实这种影响对暖 and 冷事件并不是对称的。Feng et al. (2017)进一步将 ENSO 分为东太平洋型 ENSO(EP ENSO)和中太平洋型 ENSO(CP ENSO),研究了它们对大气环流影响的非对称性。结果表明:在 EP ENSO 年,中高纬大气环流呈现出两个不同的遥相关型,一个是位于北太平洋和北美大陆的 PNA 型,另一个是位于大西洋和欧亚大陆的遥相关型。PNA 遥相关型的非对称性表现为其强度在 EP El Niño 明显强于 EP La Niña 年。由于 PNA 型的产生主要与 ENSO 事件所引起的热带非绝热加热有密切关系,因此,该非对称性的出现是由于热带热源异常在 EP El Niño 年强度强于 EP La Niña 年。而大西洋—东亚遥相关型主要出现在 EP La Niña 年,在 EP El Niño 年,该遥相关型并不显著;对波活动及其波射线的分析表明,该遥相关型与背景态有密切的关系,EP La Niña 年的气候态更利于波射线的传播,因此也更利于该遥相关型的产生。与此不同的是,大气环流对 CP ENSO 的响应与 EP ENSO 相比较有明显差异:CP ENSO 主要引起了 AO 遥相关型的环流异常,其非对称性表现在该遥相关型的强度在 CP El Niño 年要强于 CP La Niña 年,而背景态在 CP El Niño 年和 CP La Niña 年的差异是该非对称性产生的主要原因。在 CP El Niño 年,赤道方向的波射线在 $U=0$ (U 表示纬向风)的纬度反射并进一步传播到中高纬;而在 CP La Niña 的背景态下,赤道方向的波射线在 $U=0$ 的纬度消失,因此不利于环流异常的形成。

ENSO 所引起的西北太平洋反气旋/气旋环流异常是 ENSO 影响东亚气候的重要桥梁,充分认识其对称性对预测东亚气候异常有重要的作用。图 4 给出了将 ENSO 分为 EP ENSO 和 CP ENSO 后冬季西北太平洋环流异常的分布特征。在 EP ENSO 年,暖事件强迫出强的西北太平洋反气旋环流异常,但冷事件强迫出的异常气旋环流很弱(见图 4),造成这一非对称性的主要原因为 EP El Niño 事件的暖异常明显强于 EP La Niña 事件的冷异常,由此所引起的 Walker 环流异常的下沉支存在明显的非对称性。因此,西北太平洋非绝热冷却作用在 EP El Niño 年更强,该冷却作用通过 Gill 型响应所产生的反气旋环流更强。而在 CP ENSO 年,西北太平洋环流异常对冷或暖的 CP ENSO 事件的响应在强度上基本

是对称的,这是由于 CP El Niño 和 CP La Niña 所产生的 Walker 环流响应基本是对称的,由此产生的非绝热冷却作用也是相似的。此外,无论是 EP ENSO 还是 CP ENSO,异常气旋环流中心较反气旋环流偏西,这主要是由于冷事件所引起的加热异常位置较暖事件偏西所致。

4.2 CMIP5 模式对 ENSO 与东亚冬季风关系的模拟

作为北半球冬季最强的大气环流系统之一,东亚冬季风主导着东亚的冬季气候,并与热带系统有强烈的相互作用,比如,ENSO 事件可以通过西北太平洋的低层反气旋/气旋异常与冬季风产生紧密的联系。气候模式能否正确反映出冬季风与 ENSO 的这种关系不仅是评估模式性能的一个重要指标,而且也是选择和利用气候模式预测和预估冬季风变化的基础。Gong et al. (2014, 2015) 利用 CMIP5 多模式数据对当前情景下(historical run)东亚冬季风的基本特征及其与 ENSO 年际关系的模拟能力进行了评估,指出 CMIP5 中的气候模式基本能模拟出东亚冬季风的气候态特征,但模式对冬季风年际变率的模拟较观测偏弱,且模式对与冬季风相联系的热带—热带外相互作用普遍模拟较差。他们进一步评估了模式中冬季风与 ENSO 的年际关系,发现模式对冬季风与 ENSO 年际关系的模拟能力主要依赖于模式对 ENSO 振幅以及 ENSO 海温异常信号东西位置的模拟情况。若模拟的赤道中东太平洋 ENSO 海温异常较观测位置偏东,则 ENSO 的振幅往往偏弱,此时东亚—西北太平洋对 ENSO 的大气响应非常弱;当模拟的 ENSO 海温异常较观测过分偏西,则异常 Walker 环流也明显西移,导致异常反气旋在印度洋产生,在东亚模拟出与观测相反的风场异常;当模拟的 ENSO 海温异常位置接近观测时,西北太平洋反气旋异常的位置与观测接近,此时增大 ENSO 的振幅可以使东亚—西太平洋地区的大气响应更加接近观测。

4.3 ENSO 对东亚冬季风与东亚夏季风关联的影响

东亚冬季风(EAWM)和东亚夏季风(EASM)作为东亚季风的组成部分有着明显的关联,之前的研究表明 EAWM 与次年 EASM 的关系只有在 ENSO 事件发生时才显著。Chen et al. (2013b) 分析了 ENSO 在东亚冬、夏季风关联中的作用。结果表明:东亚冬季风通过从冬季持续到夏季的西北太平洋反气旋(气旋)环流可以影响后期夏季风,弱(强)EAWM 通过西北太平洋反气旋(气旋)环流

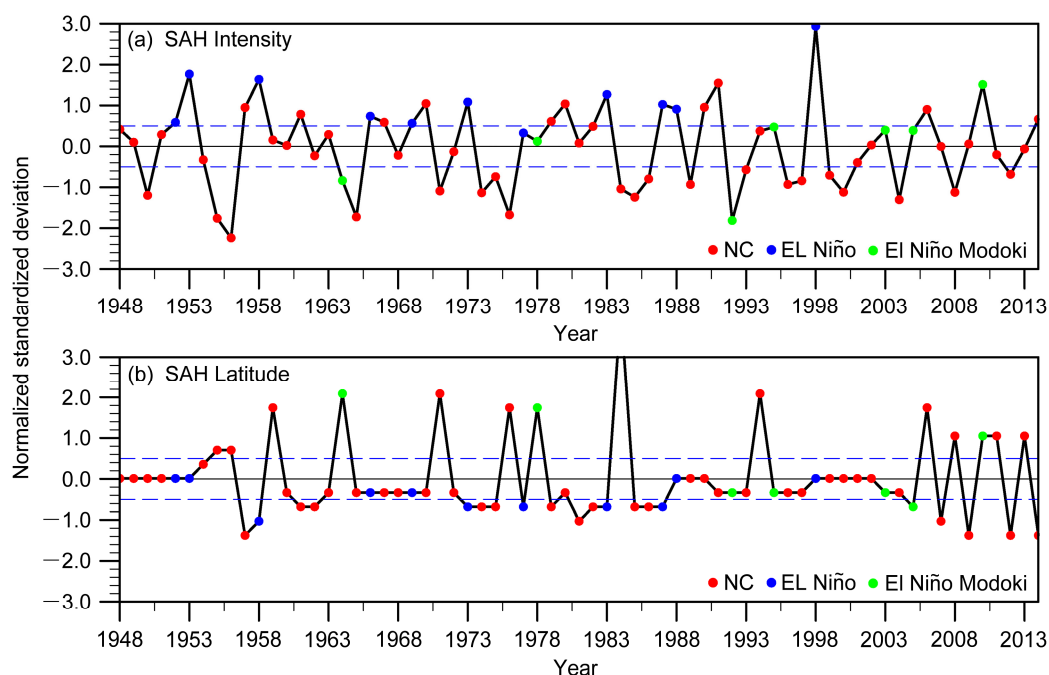


图3 夏季平均的 (a) 南亚高压强度 (单位: gpm)、(b) 南亚高压纬度指数 (单位: degrees) 的标准差在 1948~2014 的变化。红色圆点表示未分类 (NC) 的年份, 蓝色圆点表示传统 El Niño 事件, 绿色圆点表示 El Niño Modoki 事件

Fig. 3 Normalized standardized deviation of summer (JJA, June, July, August) mean (a) SAH (South Asia High) intensity index (units: gpm) and (b) SAH latitude index (units: degrees) for the period of 1948–2014. The red dots represent the unclassified (NC) years, blue dots denote the El Niño events, and green dots denote the El Niño Modoki events

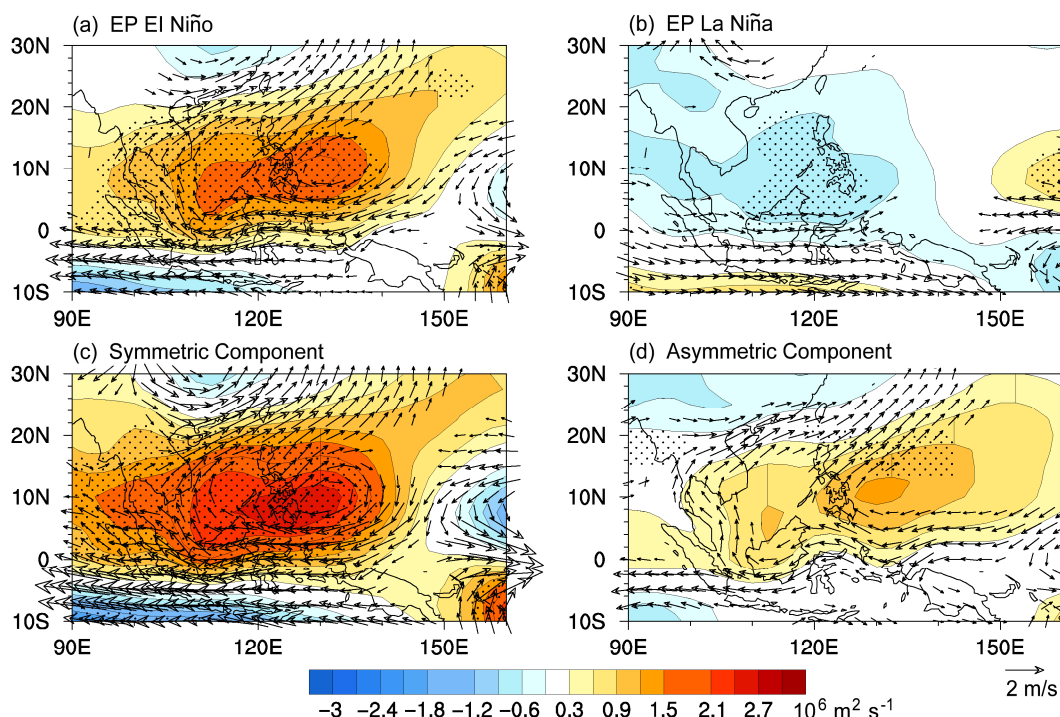


图4 (a) EP El Niño 年, (b) EP La Niña 年合成的冬季 (12~2 月) 平均的 850 hPa 上的风场 (矢量, 单位: m s^{-1}) 和流函数场 (彩色阴影, 单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) 的异常分布。(c) 用图 a 与图 b 的差表征的对称部分; (d) 用图 a 与图 b 的和表征的非对称部分。打点区域表示流函数异常通过 95% 信度水平检验, 小于 0.5 m s^{-1} 的风场矢量未画出

Fig. 4 Composite winter mean (DJF, December, January, February) 850-hPa wind (vectors, units: m s^{-1}) and stream function (colour shadings, units: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) anomalies during the (a) EP El Niño and (b) EP La Niña cases, respectively. (c) Symmetric part estimated by the difference of (a) and (b). (d) Asymmetric part estimated by the sum of (a) and (b). The stream function anomalies above the 95% confidence level are dotted, the wind anomalies less than 0.5 m s^{-1} are omitted

使得后期夏季风偏强(弱), 这表现为在降水场上, 弱 EAWM 后期夏季的降水异常分布为长江流域和东北地区降水偏多。为了进一步研究冬季风对夏季风的影响, 他们将 EAWM 指数线性分解成与 ENSO 有关的部分($EAWM_{EN}$)和与 ENSO 无关的部分($EAWM_{res}$)。 $EAWM_{EN}$ 的异常可以引起西北太平洋的反气旋(气旋)环流的异常, 从而导致后期的夏季风异常。然而, $EAWM_{res}$ 的异常虽然也可以引起冬季西北太平洋的反气旋(气旋)环流异常, 但是该反气旋(气旋)环流不能维持到次年的春季和夏季。因此, $EAWM_{res}$ 的异常不能对后期夏季风产生影响。因此, ENSO 在冬季风对夏季风的影响中扮演着不可或缺的角色。他们进一步的分析还表明, $EAWM_{EN}$ 对东亚夏季风的影响受到 PDO 的明显的调制作用。

针对有关 EAWM 和 EASM 之间的关联研究基本上都是在假设 ENSO 冷、暖位相对大气环流的影响是对称的前提下进行的, 最近, 徐需强等(2016)进一步分析了 EAWM 和次年 EASM 的关系在 ENSO 冷暖事件中的不对称性。合成分析的结果表明: 在强 $EAWM_{EN}$ 年(La Niña 年), 西北太平洋地区存在异常的气旋环流从冬季持续到次年夏季, 造成 EASM 偏弱; 而在弱 $EAWM_{EN}$ 年(El Niño 年), 西北太平洋地区存在异常的反气旋环流也可以从冬季持续到次年夏季, 使得 EASM 偏强。但比较而言, 该反气旋环流较 La Niña 年的气旋环流位置偏南, 强度偏强, 因而导致次年 EASM 异常强度偏强。造成这一不对称性关系的主要原因在于热带太平洋和印度洋的海温演变的差异。在强 $EAWM_{EN}$ 年, 热带太平洋负海温异常衰减较慢, 至次年夏季时仍然维持着显著的负海温异常; 而在弱 $EAWM_{EN}$ 年, 热带太平洋的正海温异常衰减较快, 至次年夏季时已经显著减弱甚至消失, 但此时印度洋有显著的暖海温异常维持。海温演变的差异进一步引起了大气环流的差异, 从而导致 EAWM 与 EASM 关系的不对称。

此外, Feng and Chen (2014b) 还分析了 $EAWM_{res}$ 在 ENSO 衰减期对东亚夏季风影响中的作用。结果表明, 当弱 $EAWM_{res}$ 与 El Niño 同时发生时, El Niño 激发的西北太平洋反气旋偏强, 因此对东亚夏季风的影响偏强, 且在降水场上表现为东北地区降水偏多; 与此相反, 当强 $EAWM_{res}$ 与 El Niño 同时发生时, 东亚冬季风减弱了 El Niño 激发的西

北太平洋反气旋, 从而使得 El Niño 对东亚夏季风的影响减弱, 在降水场上表现为东北地区降水偏少。La Niña 年的情况有类似的结果, 当强 $EAWM_{res}$ 与 La Niña 同时发生时, La Niña 激发的西北太平洋气旋环流偏强, 因此 La Niña 对东亚夏季风的影响偏强, 且导致中国西南地区降水偏多; 与此相反, 当弱 $EAWM_{res}$ 与 La Niña 同时发生时, La Niña 激发的西北太平洋气旋环流偏弱, 从而对东亚夏季风的影响偏弱, 且中国西南地区降水偏少。进一步研究表明, 东亚冬季风($EAWM_{res}$)对 ENSO 与东亚夏季风关系的调制主要是通过影响热带外的海温异常来实现的。

4.4 ENSO 与东亚冬季风关系的年代际变化

之前的研究已经表明 ENSO 与东亚冬季风的关系存在年代际变化(比如: Wang et al., 2008)。东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中后期开始明显减弱, 我国冬季气温从全国一致变冷变为全国一致变暖, 出现持续的暖冬(康丽华等, 2006), 有研究指出 20 世纪 80 年代后期的东亚季风的年代际变化是北半球大尺度环流异常变化的结果(Wang et al., 2009; Yang and Wu, 2013)。最近的研究(黄荣辉等, 2014; 丁一汇等, 2014; 肖晓等, 2016)指出, 20 世纪 90 年代末之后, 东亚冬季风也经历了一次明显的年代际变化, 这次年代际变化的特征表现为东亚北方气温显著偏冷而南方偏暖的南北反相变化分布, 即我国冬季气温变化从全国一致变化型变成南北振荡型(即北冷南暖型)。黄荣辉等(2014)和肖晓等(2016)均认为此次我国冬季气温和东亚冬季风发生的年代际跃变可能与热带海温的年代际变化有关。

太阳活动 11 年周期也是重要的年代际变化信号, 人们也早就注意到太阳活动的变化对气候变化的影响。最近的一系列研究揭示出太阳活动 11 年周期对东亚冬季气候与 ENSO 关系的影响(周群和陈文, 2012, 2014; Zhou et al., 2013)。在太阳活动偏低(LS)的冬季, ENSO 和 EAWM 关系显著, 东亚地区对流层低层明显增温, 这与冷的欧亚大陆和暖的太平洋之间的气压梯度减弱密切相关; 对应 LS 且是 El Niño 的冬天, 在东南亚有显著的降水异常, 即在我国南方地区降水偏多而菲律宾、苏门答腊和罗婆州的西部降水偏少, 该降水异常可以用西北太平洋反气旋异常进行解释。然而, 在太阳活动偏高(HS)的冬季, 与 ENSO 相关的地表气温和降

水异常都较弱。太阳活动对 ENSO 和东亚冬季气候异常关系的调制的可能机制是通过改变热带地区海气相互作用实现的,特别是在 LS 位相,较强的与 ENSO 相联系的海温异常导致西北太平洋异常反气旋加强。进一步利用长期资料的分析也证实, ENSO 与冬季气候的关系显著受到太阳活动 11 年周期调制,在 LS 年的冬季东亚冬季气候变化与 ENSO 关系更密切。此外,太阳活动 11 年周期对东亚冬季风与随后夏季风的关系也有显著影响。研究表明,在 LS 年,西北太平洋附近的异常反气旋明显增强,范围扩大,其西北侧的西南气流强度偏强并向北延伸,从而使春季多雨地区绵延到内蒙乃至西北地区;而夏季降水主要集中在长江流域中游,表明是一个强的夏季风年。然而,在 HS 年的次年春、夏季,不论是环流异常还是降水场的异常都明显偏弱。这说明东亚冬季风与随后夏季风的关系在 LS 年要比 HS 年更紧密。对海温异常的分析则进一步表明,LS (HS) 年从冬至夏与 ENSO 有关的东亚冬季风异常相联系的印度洋及热带西太平洋海温正相关范围明显偏大(小);而赤道东太平洋的显著正海温异常衰减迅速(缓慢)。上述海温异常的差异是西北太平洋反气旋能否从冬持续到夏的重要原因,并可以很好地解释太阳活动对东亚冬、夏季风关系的影响。

5 总结和讨论

本文首先简要回顾了国内外有关不同类型 ENSO 及其气候影响的研究进展,指出近十几年来主要关注的是两类太平洋增温型,即东太平洋 El Niño(EP El Niño)和中太平洋 El Niño(CP El Niño)。该两类事件在海温的空间形态、形成机制、演变过程以及大气的响应上都有明显的不同。近年来的若干研究也指出有必要区分东太平洋和中太平洋 La Niña 事件。两类 ENSO 事件不但可以通过直接的大气响应影响澳大利亚降水,还可以通过 PNA 波列和“副热带大气桥”机制引起 NAO 的异常,进而影响北美和欧洲气候。应该指出的是,这些研究主要侧重于两类 ENSO 达到盛期时的北半球冬季和南半球夏季的气候影响;而在两类 ENSO 对东亚气候的影响研究中则不仅关注冬季,而且特别关注夏季,这可能是由于东亚夏季风与冬季风相比较,其对经济和人民生活等的影响更甚的缘故。

在上述回顾的基础上综述了最近几年关于不

同类型 ENSO 对东亚夏季风、东亚冬季风以及冬夏季风关联的影响和机理方面的研究进展。在年际尺度上,以往的研究主要分析了两类 ENSO 对东亚夏季风的单独影响,近几年的研究则关注了 ENSO 与气候系统一些基本模态的共同影响。如 CP El Niño 伴随印度洋偶极子同时出现时,对东亚—西北太平洋夏季风的影响就明显减弱,这主要是由于印度洋偶极子减弱了热带中西太平洋的对流异常,导致激发的低层西北太平洋气旋环流异常显著减弱。再如 MJO 只是在 CP El Niño 盛期前的春季强度较强,在 EP El Niño 年则没有这种关系成立,这修正了以往关于 MJO 通常在 El Niño 盛期前的春季强度较强的结论。在年代际尺度上,最近的研究揭示出西北太平洋增暖和两类太平洋海温型的年代际差异是导致南海夏季风在 1993/1994 年出现年代际爆发偏早的重要成因。PDO 和太阳活动 11 年周期都显著调制了 ENSO 与东亚夏季风的关系;对 PDO 而言主要表现在 El Niño 的衰减期,而对太阳活动 11 年周期变化则主要表现在 ENSO 发展期的秋季;这些调制作用的机理都与海温演变的不同及其强迫出的大气环流异常有关。

由于 ENSO 事件既影响了东亚夏季风又影响了东亚冬季风,最近的研究不但在不同类型 ENSO 对东亚冬季风的影响上,而且在对东亚冬夏季风关联上取得了一系列进展。在 ENSO 影响东亚冬季风方面,以往的研究指出 ENSO 主要通过激发西北太平洋反气旋/气旋环流异常影响东亚冬季气候,近几年的研究则进一步关注了不同 ENSO 激发的大气环流异常的非对称性。对 EP ENSO 而言,EP El Niño 强迫出很强的西北太平洋反气旋,而 EP La Niña 强迫出很弱的西北太平洋气旋,存在明显的非对称性;对 CP ENSO 而言,西北太平洋大气环流异常对暖或冷的事件的响应则基本上是对称的。近年来的研究还揭示,目前的气候模式对东亚冬季风与 ENSO 关系的模拟能力主要依赖于模式对 ENSO 振幅和 ENSO 海温异常信号的东西位置的模拟情况。此外,在年代际尺度上,以往的研究主要侧重于 PDO 的影响以及 20 世纪 80 年代中后期东亚冬季风的年代际减弱现象,最近的研究则关注了 20 世纪 90 年代末的年代际变化,分析了大气内动力过程和外强迫的作用,特别指出热带海温的年代际变化的重要影响;以及太阳活动 11 年周期变化对东亚冬季气候与 ENSO 关系的影响,指出只是在太阳活动偏低的

年份, ENSO 和东亚冬季风关系才显著, 这种调制作用的可能机制是通过改变热带地区海气相互作用特别是 ENSO 的强度来实现的。在 ENSO 影响东亚冬夏季风关联方面, 近年来的研究进一步指出与 ENSO 相联系的西北太平洋反气旋/气旋环流异常从冬季一直持续到夏季, 从而导致后期的夏季风异常; ENSO 导致的东亚冬夏季风关联也受到 PDO 明显的调制作用, 并且这种关联在 ENSO 的暖 and 冷位相下存在明显的不对称性。在年代际尺度上, 东亚冬夏季风的关联除受 PDO 的影响外, 也受到太阳活动 11 年周期变化的显著影响。

需要说明的是, 上述的近几年关于 ENSO 影响东亚季风的研究中, 有一些只是针对 EP ENSO 或者没有区分两类 ENSO, 这一方面是因为通常 CP ENSO 对东亚季风的影响偏弱, 比如 EP El Niño 年的夏季南亚高压明显偏强, 位置偏南, 而 CP El Niño 年夏季南亚高压几乎没有明显异常 (薛旭, 2016); 另一方面则说明今后可能需要进一步区分两类 ENSO 来深入研究。另外, 虽然不同类型 ENSO 对东亚季风的影响和机理方面近几年取得了一些研究进展, 但要看到在该研究领域还存在一些问题需要进一步深入研究:

(1) 目前的研究主要还是侧重于 ENSO 的单独影响, 今后应该更关注印度洋以及大西洋海温异常的模态与不同类型 ENSO 对东亚季风的协同影响。并且, 东亚季风从我国南海一直伸展到西伯利亚地区, 具有广阔的经向跨度, 其异常不但与热带海气相互作用有关, 而且与中高纬气候系统密切相关。近几年已经有研究关注 ENSO 与中高纬大气环流变异的重要模态对东亚气候的共同影响 (比如 Chen et al., 2013b), 今后应该重视不同类型 ENSO 与中高纬度不同的大气遥相关型之间的联系和相互影响研究, 以及它们对东亚气候异常的协同影响。

(2) 近年来的研究还发现热带太平洋 El Niño 事件可以通过平流层桥 (stratospheric bridge) 来影响中高纬对流层气候, 即 El Niño 事件可以引起冬季平流层极涡减弱, 导致负的北极涛动 (AO) 位相的建立 (Ineson and Scaife, 2009; Cagnazzo and Manzini, 2009)。而 AO 的异常会引起我国冬季气候的显著异常 (Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002; Suo et al., 2009; Chen et al., 2013d)。因此, 进一步探索两类太平洋增温型通过影响大气遥相关和波列的传播导致平流层极涡的异常, 进而影响东亚冬

季风变异, 特别是这中间的物理过程和机理亟需开展研究。

(3) 最后, 在全球变暖的背景下, 热带中太平洋增温事件的发生频率明显超过传统的东太平洋 El Niño 事件 (Yeh et al., 2009; Lee and McPhaden, 2010; Pascolini-Campbell et al., 2015)。比如, 20 世纪 80 年代以来, 发生的 11 次太平洋增温事件中只有 3 次传统 El Niño 事件, 而 El Niño Modoki 事件却有 8 次之多。高辉和王永光 (2007) 也指出 80 年代以来传统的 ENSO 事件对我国夏季降水的影响明显减小。但这是年代际变化的影响, 还是全球增暖的作用仍不清楚。因此, 全球变暖有可能通过影响热带太平洋增温事件的变化, 进而影响我国气候异常的发生。在全球变暖背景下热带太平洋增温型的变化及其对东亚季风的影响和机理是当前全球气候变化研究中的一个前沿课题, 需要更深入的研究。

参考文献 (References)

- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (C11): C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- Cagnazzo C, Manzini E. 2009. Impact of the stratosphere on the winter tropospheric teleconnections between ENSO and the North Atlantic and European region [J]. *J. Climate*, 22: 1223–1238, doi:10.1175/2008JCLI2549.1.
- Cai W, Cowan T. 2009. La Niña Modoki impacts Australia autumn rainfall variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L12805, doi:10.1029/2009GL037885.
- 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.
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 17: 46–60, doi:10.1007/s00376-000-0042-5.
- Chen W, Lan X Q, Wang L, et al. 2013a. The combined effects of the ENSO and the Arctic oscillation on the winter climate anomalies in East Asia [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58: 1355–1362, doi:10.1007/s11434-012-5654-5.
- Chen W, Feng J, Wu R G. 2013b. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. *J. Climate*, 26: 622–635, doi:10.1175/JCLI-D-12-00021.1.
- Chen S F, Chen W, Yu B, et al. 2013c. Modulation of the seasonal footprinting mechanism by the boreal spring Arctic oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40: 6384–6389, doi:10.1002/2013GL058628.
- Chen S F, Chen W, Wei K. 2013d. Recent trends in winter temperature extremes in eastern China and their relationship with the Arctic

- oscillation and ENSO [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30: 1712–1724, doi:10.1007/s00376-013-2296-8.
- Chen S F, Yu B, Chen W. 2014a. An analysis on the physical process of the influence of AO on ENSO [J]. *Climate Dyn.*, 42: 973–989, doi:10.1007/s00382-012-1654-z.
- Chen S F, Chen W, Yu B. 2014b. Asymmetric influence of boreal spring Arctic oscillation on subsequent ENSO [J]. *J. Geophys. Res.*, 119: 11135–11150, doi:10.1002/2014JD021831.
- Chen Z S, Wen Z P, Wu R G, et al. 2014c. Influence of two types of El Niños on the East Asian climate during boreal summer: A numerical study [J]. *Climate Dyn.*, 43: 469–481, doi:10.1007/s00382-013-1943-1.
- Chen S F, Wu R G, Chen W, et al. 2015a. Influence of the November Arctic oscillation on the subsequent tropical Pacific sea surface temperature [J]. *Int. J. Climatol.*, 35: 4307–4317, doi:10.1002/joc.4288.
- Chen S F, Yu B, Chen W. 2015b. An interdecadal change in the influence of the spring Arctic oscillation on the subsequent ENSO around the early 1970s [J]. *Climate Dyn.*, 44: 1109–1126, doi:10.1007/s00382-014-152-2.
- Chen D K, Lian T, Fu C B, et al. 2015c. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity [J]. *Nat. Geosci.*, 8: 339–345, doi:10.1038/ngeo2399.
- Chen S F, Wu R G, Chen W, et al. 2016. Genesis of westerly wind bursts over the equatorial western Pacific during the onset of the strong 2015–2016 El Niño [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17: 384–391, doi:10.1002/asl.669.
- Chen S F, Chen W, Yu B. 2017a. The influence of boreal spring Arctic oscillation on the subsequent winter ENSO in CMIP5 models [J]. *Climate Dyn.*, 48: 2949–2965, doi:10.1007/s00382-016-3243-z.
- Chen S F, Wu R G, Chen W. 2017b. A strengthened impact of November Arctic oscillation on subsequent tropical Pacific sea surface temperature variation since the late-1970s [J]. *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-017-3937-x.
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. *气象学报*, 72 (5): 835–852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 835–852, doi:10.11676/qxb2014.079.
- 丁硕毅, 温之平, 陈文. 2016. 南海夏季风爆发与热带太平洋两类海温型关系的年代际差异 [J]. *大气科学*, 40 (2): 243–256. Ding Shuoyi, Wen Zhiping, Chen Wen. 2016. Interdecadal change in the relationship between the South China Sea summer monsoon onset and two types of Pacific sea surface temperature anomaly [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (2): 243–256, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15102.
- Ding S Y, Chen W, Feng J, et al. 2017. Combined impacts of PDO and two types of La Niña on climate anomalies in Europe [J]. *J. Climate*, 30: 3253–3278, doi:10.1175/JCLI-D-16-0376.1.
- Feng J, Li J P. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over South China [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D13102, doi:10.1029/2010JD015160.
- 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: 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, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D24122, doi:10.1029/2010jd014761.
- Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. 2011. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases [J]. *Int. J. Climatol.*, 31: 2091–2101, doi:10.1002/joc.2217.
- 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]. *J. Climate*, 27: 2682–2698, doi:10.1175/JCLI-D-13-00015.1.
- Feng J, Liu P, Chen W, et al. 2015. Contrasting Madden-Julian oscillation activity during various stages of EP and CP El Niños [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 16: 32–37, doi:10.1002/asl2.516.
- Feng J, Chen W, Li Y J. 2017. Asymmetry of the winter extra-tropical teleconnections in the Northern Hemisphere associated with two types of ENSO [J]. *Climate Dyn.*, 48: 2135–2151, doi:10.1007/s00382-016-3196-2.
- Frauen C, Dommengot D, Tyrrell N, et al. 2014. Analysis of the nonlinearity of El Niño–Southern Oscillation teleconnections [J]. *J. Climate*, 27: 6225–6244, doi:10.1175/JCLI-D-13-00757.1.
- 符淙斌, 滕星林. 1988. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系 [J]. *大气科学*, 12 (S1): 133–141. Fu Congbin, Teng Xinglin. 1988. Climate anomalies in China associated with El Niño/Southern Oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 12 (S1): 133–141, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.11.
- Fu C B, Diaz H F, Fletcher J O. 1986. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with warm episodes of the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114: 1716–1738, doi:10.1175/1520-0493(1986)114<1716:COTROS>2.0.CO;2.
- 高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究 [J]. *气象学报*, 65: 131–137. Gao Hui, Wang Yongguang. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65: 131–137, doi:10.11676/qxb2007.013.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2073–2076, doi:10.1029/2000GL012311.
- Gong H N, Wang L, Chen W, et al. 2014. The climatology and interannual variability of the East Asian winter monsoon in CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 27: 1659–1678, doi:10.1175/JCLI-D-13-00039.1.
- Gong H N, Wang L, Chen W, et al. 2015. Diverse influences of ENSO on the East Asian–western Pacific winter climate tied to different ENSO properties in CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 28: 2187–2202, doi:10.1175/JCLI-D-14-00405.1.
- Graf H F, Zanchettin D. 2012. Central Pacific El Niño, the “subtropical bridge”, and Eurasian climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D01102, doi:10.1029/2011JD016493.

- Hendon H, Lim E, Wang G M, et al. 2009. Prospects for predicting two flavors of El Niño [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L19713, doi:10.1029/2009GL040100.
- 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: 21–33, doi:10.1007/BF02656915.
- Huang P, Huang R H. 2009. Relationship between the modes of winter tropical Pacific SST anomalies and the intraseasonal variations of the following summer rainfall anomalies in China [J]. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, 2: 295–300, doi:10.1080/16742834.2009.11446813.
- Huang R H, Zhou L T, Chen W. 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20: 55–69, doi:10.1007/BF03342050.
- Huang R H, Chen W, Yan B L, et al. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21: 407–424, doi:10.1007/BF02915568.
- 黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 2014. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *大气科学*, 38 (4): 627–644. Huang Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (4): 627–644, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13245.
- Ineson S, Scaife A A. 2009. The role of the stratosphere in the European climate response to El Niño [J]. *Nat. Geosci.*, 2: 32–36, doi:10.1038/ngeo381.
- Jia X J, Ge J W. 2016. Interdecadal changes in the relationship between ENSO, EAWM, and the wintertime precipitation over China at the end of the twentieth century [J]. *J. Climate*, 30: 1923–1937, doi:10.1175/JCLI-D-16-0422.1.
- Jia X J, Lin H, Yao X. 2014. The influence of tropical Pacific SST anomaly on surface air temperature in China [J]. *J. Climate*, 27: 1425–1444, doi:10.1175/JCLI-D-13-00176.1.
- Jia X J, Wang S, Lin H, et al. 2015. A connection between the tropical Pacific Ocean and the winter climate in the Asian–Pacific region [J]. *J. Geophys. Res.*, 120: 430–448, doi:10.1002/2014JD022324.
- Jia X J, Ge J W, Wang S. 2016. Diverse impacts of ENSO on wintertime rainfall over the Maritime Continent [J]. *Int. J. Climatol.*, 36: 3384–3397, doi:10.1002/joc.4562.
- 康丽华, 陈文, 魏科. 2006. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 330–339. Kang Lihua, Chen Wen, Wei Ke. 2006. The interdecadal variation of winter temperature in China and its relation to the anomalies in atmospheric general circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 330–339, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.03.009.
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO [J]. *J. Climate*, 22: 615–632, doi:10.1175/2008JCLI2309.1.
- 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]. *J. Climate*, 26: 4567–4582, doi:10.1175/JCLI-D-12-00324.1.
- Kug J S, Ham Y G. 2011. Are there two types of La Nina? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L16704, doi:10.1029/2011GL048237.
- Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 1499–1515, doi:10.1175/2008JCLI2624.1.
- Kug J S, Choi J, An S I, et al. 2010. Warm pool and cold tongue El Niño events as simulated by the GFDL 2.1 coupled GCM [J]. *J. Climate*, 23: 1226–1239, doi:10.1175/2009JCLI3293.1.
- Lee T, McPhaden M J. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central–equatorial Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L14603, doi:10.1029/2010GL044007.
- Li C Y. 1990. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 7: 36–46, doi:10.1007/BF02919166.
- 林学椿, 于淑秋. 1993. 厄尔尼诺与我国汛期降水 [J]. *气象学报*, 51 (4): 434–441. Lin Xuechun, Yu Shuqiu. 1993. El Niño and rainfall during the flood season (June–August) in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 51 (4): 434–441, doi:10.11676/qxxb1993.054.
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. *大气科学*, 19 (2): 200–208. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 19 (2): 200–208, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.02.09.
- 穆明权, 李崇银. 1999. 东亚冬季风年代际变化的 ENSO 信息 I. 观测资料分析 [J]. *大气科学*, 23 (3): 276–285. Mu Mingquan, Li Chongyin. 1999. ENSO signals in the interannual variability of East-Asian winter monsoon. Part I: Observed data analyses [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (3): 276–285, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.03.03.
- Pascolini-Campbell M, Zanchettin D, Bothe O, et al. 2015. Toward a record of central Pacific El Niño events since 1880 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 119: 379–389, doi:10.1007/s00704-014-1114-2.
- Ren H L, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Shinoda T, Hurlburt H E, Metzger E J. 2013. Anomalous tropical ocean circulation associated with La Niña Modoki [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: C12001, doi:10.1029/2011JC007304.
- Song L Y, Chen S F, Chen W, et al. 2017. Distinct impacts of two types of La Niña events on Australian summer rainfall [J]. *Int. J. Climatol.*, 37: 2532–2544, doi:10.1002/joc.4863.
- Su J Z, Zhang R H, Zhu C W. 2013. ECHAM5-simulated impacts of two types of El Niño on the winter precipitation anomalies in South China [J]. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, 6: 360–364, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0013.
- Suo L L, Tan B K, Huang J Y. 2009. Further exploration on causes of temperature anomalies associated with the abnormal northern annular mode [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 54: 2101–2106, doi:10.1007/s11434-009-0045-2.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. *气象学报*, 34: 385–395. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the west-Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*,

- 34: 385–395, doi:10.11676/qxxb1964.039.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22: 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22: 399–407, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02.
- Taschetto A S, England M H. 2009. El Niño Modoki impacts on Australian rainfall [J]. J. Climate, 22: 3167–3174, doi:10.1175/2008JCLI2589.1.
- Taschetto A S, Haarsma R J, Gupta A S, et al. 2010. Australian monsoon variability driven by a Gill–Matsuno-type response to central West Pacific warming [J]. J. Climate, 23: 4717–4736, doi:10.1175/2010JCLI3474.1.
- Trenberth K E, Smith L. 2009. Variations in the three-dimensional structure of the atmospheric circulation with different flavors of El Niño [J]. J. Climate, 22: 2978, doi:10.1175/2008JCLI2691.1.
- Vimont D J, Wallace J M, Battisti D S. 2003. The seasonal footprinting mechanism in the Pacific: Implications for ENSO [J]. J. Climate, 16: 2668–2675, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2668:TSMIT>2.0.CO;2.
- Vimont D J, Alexander M, Fontaine A. 2009. Midlatitude excitation of tropical variability in the Pacific: The role of thermodynamic coupling and seasonality [J]. J. Climate, 22: 518–534, doi:10.1175/2008JCLI2220.1.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades [J]. J. Climate, 8: 267–285, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0267:ICIENO>2.0.CO;2.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relations [J]. Adv. Atmos. Sci., 19: 1–11, doi:10.1007/s00376-002-0029-5.
- Wang G M, Hendon H H. 2007. Sensitivity of Australian rainfall to inter-El Niño variations [J]. J. Climate, 20: 4211–4226, doi:10.1175/JCLI4228.1.
- Wang C Z, Wang X. 2013. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in southern China and typhoon tracks [J]. J. Climate, 26: 1322–1338, doi:10.1175/JCLI-D-12-00107.1.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13: 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 35: L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Wang L, Huang R H, Gu L, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. J. Climate, 22: 4860–4872, doi:10.1175/2009JCLI2973.1.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2013. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian high and its influence on summer rainfall over China [J]. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-013-1938-y.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2014. Interannual variation of the South Asian high and its relation with Indian and East Asian summer monsoon rainfall [J]. J. Climate, 28: 2623–2634, doi:10.1175/JCLI-D-14-00454.1.
- Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer [J]. Climate Dyn., 29: 113–129, doi:10.1007/s00382-007-0234-0.
- Weng H, Behera S K, Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the Pacific Rim during recent El Niño Modoki and El Niño events [J]. Climate Dyn., 32: 663–674, doi:10.1007/s00382-008-0394-6.
- Weng H Y, Wu G X, Liu Y M, et al. 2011. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo–Pacific oceans [J]. Climate Dyn., 36: 769–782, doi:10.1007/s00382-009-0658-9.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 29: 1897, doi:10.1029/2002GL015373.
- 肖晓, 陈文, 范广洲, 等. 2016. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化的外强迫因子分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (2): 197–209. Xiao Xiao, Chen Wen, Fan Guangzhou, et al. 2016. Possible external forcing factors for the interdecadal change in the East Asian winter monsoon around the late 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (2): 197–209, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15169.
- Xu K, Zhu C W, He J H. 2013. Two types of El Niño-related Southern Oscillation and their different impacts on global land precipitation [J]. Adv. Atmos. Sci., 30: 1743–1757, doi:10.1007/s00376-013-2272-3.
- 徐需强, 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.
- 薛旭. 2016. 厄尔尼诺—南方涛动事件对南亚高压影响的不稳定性及其机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Xue Xu. 2016. The instable influence of ENSO on South Asian high and its possible physical mechanisms [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Xue X, Chen W, Chen S F, et al. 2015. 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., 120: 7393–7411, doi:10.1002/2015JD023260.
- Xue X, Chen W, Chen S F, et al. 2017a. PDO modulation of the ENSO impact on the summer South Asian high [J]. Climate Dyn., doi:10.1007/s00382-017-3692-z. (in press)
- Xue X, Chen W, Chen S F. 2017b. The climatology and interannual variability of the South Asia high and its relationship with ENSO in CMIP5 models [J]. Climate Dyn., 48: 3507–3528, doi:10.1007/s00382-016-3281-6.
- Yang L N, Wu B Y. 2013. Interdecadal variations of the East Asian winter surface air temperature and possible causes [J]. Chin. Sci. Bull., 58: 3969–3977, doi:10.1007/s11434-013-5911-2.
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate [J]. Nature, 461: 511–514, doi:10.1038/nature08316.
- Yuan Y, Yang S. 2012. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles [J]. J. Climate, doi:10.1175/JCLI-D-11-00576.1.
- 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. Meteor. Soc. Japan, 74: 49–62, doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. J. Climate, 10: 1004–1020, doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2.

- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 16: 229–241, doi:10.1007/BF02973084.
- Zhang W J, Jin F F, Li J P, et al. 2011. Contrasting impacts of two-type El Niño over the western North Pacific during boreal autumn [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89: 563–569, doi:10.2151/jmsj.2011-510.
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China [J]. *J. Climate*, 26: 8392–8405, doi:10.1175/JCLI-D-12-00851.1.
- Zhang W J, Jin F F, Turner A. 2014. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 41: 4020–4026, doi:10.1002/2014GL060130.
- Zhang R H, Li T T, Wen M, et al. 2015a. Role of intraseasonal oscillation in asymmetric impacts of El Niño and La Niña on the rainfall over southern China in boreal winter [J]. *Climate Dyn.*, 45: 559–567, doi:10.1007/s00382-014-2207-4.
- Zhang W J, Wang L, Xiang B Q, et al. 2015b. Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter [J]. *Climate Dyn.*, 44: 1351–1366, doi:10.1007/s00382-014-2155-z.
- 张人禾, 闵庆桦, 苏京志. 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用 [J]. *中国科学: 地球科学*, 47: 544–553. Zhang Renhe, Min Qingye, Su Jingzhi. 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone [J]. *Science China: Earth Sciences*, 60: 1124–1132, doi:10.1007/s11430-016-9026-x.
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Int. J. Climatol.*, 27: 157–167, doi:10.1002/joc.1380.
- 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 W, Chen W, Wang D X. 2012. The implications of El Niño–Southern Oscillation signal for South China monsoon climate [J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 15: 14–19, doi:10.1080/14634988.2012.652050.
- Zhou Q, Chen W, Zhou W. 2013. Solar cycle modulation of the ENSO impact on the winter climate of East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 118: 5111–5119, doi:10.1002/jgrd.50453.