

陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展. 应用气象学报, 2013, 24(5): 521-532.

# 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展

陈丽娟\* 袁媛 杨明珠 左金清 李维京

(国家气候中心 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

## 摘 要

从短期气候预测关注的外强迫信号角度出发,回顾了国内外在海温异常对东亚夏季风和我国汛期降水影响机理方面的主要研究进展,重点评述了热带太平洋 ENSO 循环、热带印度洋全区一致型海温模态、热带印度洋海温异常偶极子、南印度洋偶极子和北大西洋海温三极子模态的年际变化及其对东亚夏季风年际变率的影响。从研究成果在短期气候预测业务中应用的角度,重点关注海温异常和东亚夏季风年际变率以及我国汛期降水多雨带位置的关系,总结了海温异常作为外强迫信号对我国汛期降水预测的指示意义以及汛期降水预测的难度。最后指出气候预测业务对东亚夏季风影响的机理研究和动力气候模式发展方面的需求。

**关键词:** 外强迫信号; 海温异常; 东亚夏季风; 汛期降水

## 引 言

短期气候预测主要指月、季、年时间尺度的气候预测,与人类的生产生活关系密切。该时间尺度的预测既是初值问题,也是边值问题。随着预测时间尺度的延长,更多地表现为边值问题<sup>[1]</sup>。在我国短期气候预测的边值问题中,主要考虑的外强迫信号包括多海区的海温异常<sup>[2-8]</sup>、土壤湿度异常<sup>[9-11]</sup>、积雪覆盖异常<sup>[12-14]</sup>、极冰异常<sup>[15-17]</sup>、植被异常<sup>[18-19]</sup>等信息。利用这些外强迫信号的气候预测业务或试验性业务在国外从 19 世纪后期就存在了,我国于 20 世纪 50 年代正式发布气候展望<sup>[20]</sup>。在这些外强迫信号中,对东亚夏季风预测而言,海温异常是最强、最重要的因子,而土壤湿度、积雪覆盖、极冰、植被等信息受资料来源、异常持续时间长、因子季节性变化等特征的限制,对东亚夏季风影响的不确定性更大,在我国短期气候预测业务中的应用也受到季节限制。长期的预测业务实践<sup>[21]</sup>、海气相互作用方面的理论研究进展<sup>[22]</sup>、气候系统模式的发展<sup>[23]</sup>均证实海洋异常在全球气候异常和海气相互作用方面作用重大。

本文以我国短期气候预测业务和服务中非常关注的东亚夏季风和我国夏季降水预测为目标,回顾了国内外全球主要海洋异常模态对东亚夏季风年际变率的影响机理,重点梳理了热带太平洋 ENSO 循环、热带印度洋全区一致型海温模态、热带印度洋海温异常偶极子、南印度洋偶极子、北大西洋海温三极子模态对东亚夏季风系统以及我国夏季降水多雨带分布的影响,从而有利于全面认识海温异常的年际信号在东亚夏季风和我国夏季降水预测中的应用能力。

## 1 热带太平洋 ENSO 循环对东亚夏季风的影响

作为年际气候变化中的最强信号,ENSO 现象很早就倍受气象学者关注。ENSO 不仅是造成全球气候异常的一个重要原因,也是导致亚洲季风异常和我国旱涝发生的关键因素。我国位于东亚季风区,东亚夏季风和冬季风异常直接导致我国气候异常,ENSO 通过大气环流以遥相关的形式影响东亚季风系统的每个关键成员,并由此间接影响中国的气候异常<sup>[22-24]</sup>。国际上在 ENSO 冷暖位相对全球

2013-04-08 收到, 2013-07-12 收到再改稿。

资助项目:国家重点基础研究发展计划(2013CB430203),国家自然科学基金项目(41275073,41005038),国家科技支撑项目(2009BAC51B05)

\* email: chenlj@cma.gov.cn

降水和温度分布型的影响方面也开展了大量研究<sup>[25-27]</sup>,但是这些结果基本上未给出 ENSO 循环对东亚夏季风和我国区域的影响结果。本章着重回顾 ENSO 循环对东亚夏季风和我国夏季降水的影响机理,阐述菲律宾异常反气旋在 ENSO 循环对东亚夏季风影响中的桥梁作用,随着对 ENSO 循环复杂性的进一步认识,总结了不同分布型厄尔尼诺对东亚夏季风的影响。

### 1.1 ENSO 循环对东亚夏季风和我国夏季降水的影响

大量研究表明,ENSO 事件的不同阶段对我国夏季降水有不同影响<sup>[28]</sup>。厄尔尼诺发展期的夏季,西太平洋副热带高压偏弱、偏南,影响我国的西南气流偏弱,东亚夏季风偏弱,我国夏季主要季风雨带偏南,中南半岛和华南大部降水偏少,东南沿海偏多,夏季中期江淮流域多雨;厄尔尼诺衰减期的夏季,西太平洋副热带高压偏强、偏北,影响我国的西南气流偏强,东亚夏季风偏强,从而导致江淮流域降水偏少、洞庭湖和鄱阳湖流域出现洪涝灾害<sup>[4,28-30]</sup>。拉尼娜对东亚夏季风和我国夏季雨带的影响与厄尔尼诺大致相反,但拉尼娜影响没有厄尔尼诺影响显著。拉尼娜发展阶段的夏季对应着强的东亚夏季风,我国夏季华北和江南往往多雨;而拉尼娜衰减期的夏季则对应弱的东亚夏季风,我国夏季江淮多雨,华北、东北以及长江中游地区少雨<sup>[30-31]</sup>。

厄尔尼诺和拉尼娜对东亚夏季风和我国夏季雨带影响还可能与西太平洋暖池北部海温异常有关。Huang 等<sup>[32-34]</sup>研究指出,东亚夏季风的季节内变化受菲律宾附近对流活动影响。当菲律宾附近海域海温偏暖导致对流活动增强时,西北太平洋副热带高压在 6 月中上旬北跳明显,我国长江和淮河流域以及韩国、日本夏季降水偏弱;相反,当暖池附近海温偏冷、对流活动偏弱时,西太平洋副热带高压北跳不明显,长江流域和淮河流域以及韩国、日本等地的夏季降水偏强。曹杰等<sup>[35]</sup>从非线性动力学理论角度出发,研究了菲律宾附近对流活动强弱对西太平洋副热带高压影响的物理机制。

西太平洋暖池的热状态不仅强烈影响西太平洋副热带高压的季节内变化,还影响南海夏季风爆发的早晚<sup>[36]</sup>。当西太平洋暖池海水变暖时,则对流活动从中印半岛向菲律宾以东加强,且西太平洋副热带高压可能向北异常移动,在这种情况下,南海夏季风可能提前爆发;相反,当暖池处于冷状态时,则菲

律宾的对流活动减弱,西太平洋副热带高压可能偏南、偏西,南海夏季风可能爆发偏晚。其主要原因可能是暖池热状态明显地影响着 Walker 环流与 Hadley 环流<sup>[37]</sup>。

### 1.2 ENSO 循环影响东亚气候异常的物理机制

研究表明,正是由于热带太平洋海温异常所产生的对流活动异常分布,使 ENSO 事件对热带西太平洋和东亚上空的季风环流有显著影响<sup>[38]</sup>。在厄尔尼诺成熟期,赤道中太平洋和以东地区对流活动加强,而在热带西太平洋海洋性大陆区对流活动偏弱,从而使赤道太平洋洋面上的对流活动异常形成了一个偶极子结构。热带西太平洋海洋性大陆上空的对流冷却使得热带大气在对流层低层产生 Rossby 波响应,从而在海洋性大陆以北的热带西太平洋和我国南海地区强迫出反气旋环流的异常。与此异常反气旋性环流相伴随的水汽输送异常使得东亚沿岸附近的水汽输送增强,并在我国华南沿岸附近产生异常辐合,导致了我国华南地区在厄尔尼诺盛期出现降水正异常<sup>[24,39-40]</sup>。Wang 等<sup>[22,41]</sup>也指出,在 ENSO 的极端位相时出现在海洋性大陆以北的反气旋异常(称为菲律宾异常反气旋)环流是连接 ENSO 暖位相和东亚冬季风的桥梁,这个反气旋异常可以持续到夏季,对东亚夏季风产生滞后影响。在厄尔尼诺达到成熟期之后的夏季,东北亚往往出现异常强的反气旋性环流,并且西太平洋副热带高压异常偏西,从而加强副热带东亚地区的季风环流,并使长江流域降水偏多,发生洪涝灾害。

### 1.3 不同分布型厄尔尼诺及其对气候影响

研究发现,20 世纪 80 年代后 ENSO 不同位相与次年夏季我国雨带的对应关系似乎较难成立<sup>[42-43]</sup>,例如 2002,2004,2006 年发生了 3 次厄尔尼诺事件,每次事件衰减年的夏季,我国的主要多雨带并未出现在长江流域而是位于淮河流域至黄淮地区<sup>[43]</sup>,这可能与 ENSO 事件成熟期分布类型的变化有关<sup>[44]</sup>。事实上,早期研究已经注意到厄尔尼诺事件的发生过程包括两类:一类主要在太平洋东部(秘鲁沿岸)增暖再向西扩展,另一类则主要在赤道中太平洋出现大范围增暖并自西向东扩展<sup>[45-48]</sup>。但人们注意到厄尔尼诺成熟期的海温分布特征在 20 世纪 90 年代以后发生了显著变化,最大海温正距平中心不同于传统的厄尔尼诺事件分布在赤道东太平洋秘鲁沿岸,而是向西移动到赤道中太平洋日界线附近。人们将这类事件称为中部型厄尔尼诺(或厄尔尼诺

Modoki), 而将传统的厄尔尼诺事件称为东部型厄尔尼诺<sup>[49-54]</sup>。实际观测发现, 20 世纪 90 年代以后, 中部型厄尔尼诺的发生频率和强度都呈现明显上升趋势<sup>[54]</sup>, 期间共发生了 8 次厄尔尼诺事件, 其中 5 次为中部型, 而另外 3 次则兼有中部型和东部型的共同特征, Kug 等<sup>[52]</sup>称之为混合型厄尔尼诺<sup>[55]</sup>。

中部型厄尔尼诺事件不仅在发展演变机制上与东部型厄尔尼诺不同, 其对全球大气环流<sup>[56]</sup>、西北太平洋台风和大西洋飓风活动<sup>[57-58]</sup>以及北美、澳大利亚和东亚的气温和降水<sup>[56, 59-66]</sup>影响也表现出与东部型厄尔尼诺的显著差异。当中部型厄尔尼诺发生时, 由于最大海温正距平中心位于赤道中太平洋日界线附近, 对流活跃区较东部型厄尔尼诺偏西, 在赤道太平洋上空地区会形成两个异常 Walker 环流圈, 从而对南美、北美西海岸, 甚至日本和新西兰气候的影响与东部型厄尔尼诺的影响可能完全相反<sup>[49, 67]</sup>。由于海温偏高, 赤道太平洋中部为相对偏湿的区域, 由此会在西北太平洋上空对流层中层激发正位相的太平洋—日本 (Pacific—Japan, PJ) 波列, 在西北太平洋—北美地区上空的对流层中层激发正位相的夏季太平洋—北美 (Pacific—North American, PNA) 型, 从而导致西北太平洋夏季风偏强, 东亚夏季风偏弱<sup>[61]</sup>。

前面提到, 菲律宾异常反气旋性环流是联系 ENSO 与东亚气候异常的重要桥梁<sup>[22, 24, 40-41]</sup>。但当中部型厄尔尼诺发生时, 菲律宾异常反气旋强度会显著减弱, 持续时间会明显缩短, 其位置则会西移到我国南海地区<sup>[68]</sup>, 由此而导致在中部型 ENSO 事件循环期, 东亚南部的降水异常分布特征与东部型 ENSO 对应的情况几乎完全相反<sup>[56, 62-64, 66]</sup>, 该特征提示在使用 ENSO 信号进行气候预测时, 不能仅考虑 Niño 指数, 而要从热带海温分布型以及大气的垂直环流特征等多种角度看待 ENSO 循环的影响。

## 2 印度洋海温异常对东亚夏季风的影响

印度洋位于亚洲地区夏季季风气流上游, 是亚洲夏季风各种能量及水汽的重要源地之一, 也是亚澳季风系统活动的重要下垫面, Walker 环流、横向季风环流和侧向季风辐散风环流均交汇于此, 其中自西南印度洋指向东亚、南亚的侧向季风辐散风环流最强。因此, 印度洋热力异常对作为“第二推动

力”的海陆热力特性差异, 对印度洋—太平洋海温配置, 以及对大气环流和亚-澳季风的变异均具有十分重要的作用<sup>[69-70]</sup>。大量研究显示, 热带印度洋海温异常模态和南印度洋偶极子模态对东亚夏季风和我国夏季降水有明显影响。

热带印度洋海温异常最主要的模态就是全区一致型海温变化, 而热带印度洋秋季海温异常最主要模态是热带西印度洋和东南印度洋反相变化的偶极型海温模态<sup>[71-72]</sup>。南印度洋偶极子是指副热带西南印度洋和南热带中东印度洋 SST 异常呈反位相分布模态。

### 2.1 热带印度洋海温异常偶极子

热带印度洋偶极子 (TIOD) 具有两个相反的模态, 通常将西印度洋偏暖、东南印度洋偏冷的模态称为正偶极子 (或偶极子正位相), 将西印度洋偏冷、东南印度洋偏暖的模态称为负偶极子 (或偶极子负位相)。TIOD 具有明显的季节位相锁定的特征, 通常在春末夏初开始出现, 秋季达到盛期, 冬季快速衰亡。一般 5—6 月海温负距平最先出现在爪哇岛南部, 同时赤道东南印度洋上出现东南风异常。7—8 月海温负距平加强且沿着印度尼西亚海岸向赤道方向延伸, 同时西印度洋开始出现海温正距平, 赤道印度洋纬向东风距平也随之加强。9—10 月上述特征迅速达到盛期, 赤道印度洋偶极型海温模态与赤道印度洋东风距平相互耦合; 11—12 月偶极子快速衰减<sup>[71, 73]</sup>。

研究表明, TIOD 对我国夏季降水有显著影响。TIOD 正偶极子发生的夏季, 热带西印度洋偏暖、东南印度洋偏冷的海温异常分布型使得赤道印度洋盛行东风距平, 从而使 Walker 环流减弱, 同时菲律宾附近对流活动减弱, 西太平洋副热带高压偏强、偏西、偏南, 我国南方地区大气呈异常上升运动, 为整层水汽的异常辐合区, 从而有利于我国华南夏季降水偏多。而当 TIOD 负位相发生时, 西太平洋副热带高压偏弱、偏东、偏北, 华北处于异常辐合区, 降水偏多, 而南方降水偏少<sup>[74-76]</sup>。

尽管有些年份, TIOD 正 (负) 位相刚好发生在厄尔尼诺 (拉尼娜) 发生年的夏、秋季节, 使得 TIOD 对印度洋周边地区气候的影响在很大程度上被认为是 ENSO 的影响。但实际上, TIOD 也有相对独立于 ENSO 的一面。百年尺度的海温资料清楚地揭示了热带印度洋偶极子和太平洋 ENSO 事件关系的年代际变化。在 1948—1969 年阶段, 正 (负) 位相

的 TIOD 与暖(冷)ENSO 事件表现出较多的相对独立性,但在 1970—2000 年阶段,两者常同时发生。ENSO 影响偶极子的整个生命史,而偶极子反过来也会显著影响 ENSO 事件发展阶段的强度<sup>[77-78]</sup>。前面提到,2000 年以后中部型 ENSO 事件的发生频率和强度都显著增加,统计结果显示,当中部型 ENSO 事件发生时,热带印度洋海温和大气环流的响应均没有东部型 ENSO 事件发生时显著<sup>[51,68]</sup>,TIOD 与 ENSO 的同位相关系在近 10 年是否发生变化值得进一步深入研究。

正是考虑到 TIOD 与 ENSO 显著的同位相关系,刘宣飞等<sup>[79]</sup>详细分析了偶极子独立发生年和偶极子与 ENSO 共同发生年我国夏季降水的特征。研究表明,TIOD 独立发生时,其正位相年,夏季江南西部到华南大部的降水偏多;TIOD 与 ENSO 同时发生时,正位相年,河套、华北地区夏季降水偏少,而东南沿海地区降水偏多。因此,ENSO 与偶极子对我国夏季降水关系的影响主要表现为在华南西部、江淮流域、河套及华北地区起抵消作用,而在东南沿海地区起协同作用。

## 2.2 热带印度洋全区一致海温模态

热带印度洋全区一致海温模态是热带印度洋海温变化的最主要模态,并没有特别显著的季节变化特征,但经常发生在 ENSO 事件成熟的冬季和次年春季<sup>[69]</sup>。早期研究已经揭示出热带印度洋全区一致增暖(变冷)模态对太平洋厄尔尼诺(拉尼娜)事件的滞后响应,而其中的物理机制包括印度尼西亚贯穿流<sup>[80]</sup>、大气桥<sup>[81-83]</sup>、南印度洋海洋 Rossby 波的传播等<sup>[84]</sup>。

然而,近几年的研究则更多强调热带印度洋海温在 ENSO 衰减年所起的重要“充电器”作用,正是因为热带印度洋全区一致海温增暖(变冷)在厄尔尼诺(拉尼娜)衰减时却发展到盛期,因此,通过改变对流活动和 Walker 环流异常以及激发向东传播的 Kelvin 波,印度洋海温像“充电器”一样延续了 ENSO 对大气环流和气候异常的影响<sup>[85-89]</sup>。例如,热带印度洋全区一致增暖(变冷)通过海气相互作用激发赤道印度洋—西太平洋异常 Walker 环流圈,加强(减弱)西太平洋副热带高压的强度,进而有利于南海夏季风爆发的推迟(提前)。由此可知,热带印度洋全区一致海温模态在维持 ENSO 对第 2 年南海夏季风爆发的影响方面起到了重要的传递作用<sup>[88]</sup>。

## 2.3 热带印度洋海温对菲律宾异常反气旋的影响

菲律宾异常反气旋被认为是联系 ENSO 与东亚季风环流的重要纽带。Zhang 等<sup>[39]</sup>最早提出了与厄尔尼诺盛期相伴随的热带西太平洋的对流异常减弱所造成的对流冷却异常,激发出大气 Rossby 波响应,导致菲律宾异常反气旋的产生。Wang 等<sup>[41]</sup>也对该反气旋的产生进行研究,认为热带西太平洋负海温异常使热带西太平洋的对流潜热释放减弱,从而激发冷的 Rossby 波在菲律宾海域附近形成菲律宾异常反气旋。另外,菲律宾异常反气旋的建立和维持还受到 ENSO 事件的遥强迫作用、热带—热带外大气的相互作用(来自北半球中高纬度地区的外强迫)以及季风-海洋间相互作用的影响。Chou<sup>[90]</sup>和 Chen 等<sup>[91]</sup>还提出了对菲律宾异常反气旋建立起作用的另一种过程。Chou<sup>[90]</sup>认为在厄尔尼诺情形下,菲律宾异常反气旋是印度洋生成的低层异常反气旋环流东移,秋末锁定在菲律宾海域称为菲律宾异常反气旋。在热带印度洋正偶极子发生的夏季,海气相互作用使热带西印度洋对流活动增强、异常上升运动发展,而东南印度洋对流活动减弱、为异常下沉运动控制。根据 Matsuno-Gill 响应原理<sup>[92-93]</sup>,正偶极子会激发关于赤道对称的异常反气旋对。赤道北侧的异常反气旋比赤道南侧强,且随正偶极子的发展成熟不断加强并缓慢向东移动<sup>[68]</sup>。而这种东移是由东西湿度和温度的水平不对称以及强厄尔尼诺事件影响大尺度辐散异常所驱动<sup>[90-91,94]</sup>。

由于该异常反气旋环流能持续到厄尔尼诺衰减年的夏季,显著加强了西太平洋副热带高压并给我国夏季南方带来大量降水。Wang 等<sup>[22]</sup>认为,西太平洋局地海气相互作用的正反馈机制是菲律宾异常反气旋能够维持到厄尔尼诺次年夏季的重要原因。但 Watanabe 等<sup>[95]</sup>通过一系列的模拟试验发现,热带印度洋全区一致增暖模态强度不一定比西太平洋的异常冷水和中东太平洋的异常暖水强,而是通过激发东传的 Kelvin 波更加显著影响了菲律宾异常反气旋在厄尔尼诺次年夏季的维持。Xie 等<sup>[89]</sup>的统计分析和大气环流模式进一步证实了该观点。近期,Wu 等<sup>[96-97]</sup>再次对比分析了西太平洋局地海温和印度洋海温对菲律宾异常反气旋在厄尔尼诺衰减年的作用,认为在衰减年夏季(6—8 月),热带印度洋暖海温的作用不断增强,而西太平洋冷海温的作用则不断减弱。因此,当东部型厄尔尼诺事件发生

时,在其发展年的夏秋季热带印度洋有西暖东冷的正偶极子发生,而在其盛期至次年春季,热带印度洋全区一致海温增暖发展,共同导致菲律宾异常反气旋建立早、结束晚、强度强。而当中部型厄尔尼诺事件发生时,印度洋海温的响应变得不显著,由此导致菲律宾异常反气旋建立晚、结束早、强度弱<sup>[68]</sup>。

#### 2.4 南印度洋偶极子

研究发现,印度洋除了上述热带印度洋海温异常一致型和热带印度洋偶极子(TIOD)模态外,在南印度洋副热带区域存在西南印度洋(西极子)和南热带中东印度洋(东极子)海温异常呈反位相分布的另一种偶极型海温差异现象,具有明显的年际和年代际尺度变化特征,称为南印度洋偶极子(SIOD)或南印度洋偶极模(SDP)<sup>[98-101]</sup>。本文定义当西极子为负异常海温、东极子为正异常海温时,为SIOD(SDP)正位相,反之为SIOD(SDP)负位相。研究表明,SIOD现象主要出现在冬春季<sup>[100-102]</sup>。晏红明等<sup>[70]</sup>研究认为,印度洋副热带海温偶极差异的季节锁相出现在1—3月,而一些个例合成则显示SIOD在春季最为显著<sup>[101,103]</sup>。但大多研究表明,SIOD在前期秋冬季开始出现,并能持续到次年夏、秋季。因此,SIOD在区域和季节锁相上与TIOD不同,同时SIOD的持续性高于TIOD。

大多研究认为,SIOD的形成与大气环流异常有重要关系。由于赤道印度洋环流场异常(热带季风变化),激发出Kelvin波向南沿苏门答腊传播,之后通过Rossby波或耦合的Rossby波向西传播,快速地将海表高度异常、温跃层异常(或海温异常)由热带印度洋向西南副热带印度洋传播<sup>[104]</sup>,并认为这种波的传播每年有4次。但Xie等<sup>[84]</sup>认为SIOD主要由ENSO强迫造成,杨明珠等<sup>[101]</sup>认为SIOD的形成是对前期秋冬季中高纬度环流场强迫(即对风应力)的响应。另外,海温-辐射-云反馈过程对区域海温变化的影响对于SIOD的维持具有重要作用<sup>[70,98]</sup>。有研究认为,SIOD与ENSO是相互独立的<sup>[100]</sup>;也有研究认为,SIOD与ENSO事件具有密切的联系,SIOD就像连接ENSO位相转换的一个中间环节,SIOD事件前后期,ENSO的位相刚好相反,SIOD在ENSO事件中的作用不仅涉及海气相互作用的正负反馈过程,还与热带和副热带大气环流之间的相互作用有关,尤其东南印度洋海温变化所引起的异常纬向风由赤道印度洋向赤道太平洋传播,对后期赤道东太平洋海温异常变化具有重要影

响<sup>[102]</sup>。还有研究认为,冬季SIOD能激发出极显著的南北半球环绕太平洋的波列结构<sup>[105]</sup>,而南半球的这种环流结构对ENSO循环的年际变化有重要影响<sup>[106]</sup>。此外,SIOD与西太平洋暖池海温异常呈显著的滞后相关关系,西太平洋暖池的热状况在联系SIOD与夏季我国东部地区降水异常的关系中起重要作用<sup>[100]</sup>。

SIOD形成后,通过热力强迫影响并调整着局地大气环流。副热带中纬度南印度洋区域海温变化对邻近区域环流及降水具有显著影响<sup>[98-99,107-108]</sup>。亚洲夏季风的来源可以追溯到南半球中高纬度地区,马斯克林高压、索马里越赤道气流、孟加拉湾越赤道气流等季风环流系统正是以副热带印度洋区域作为其直接下垫面或源区<sup>[109]</sup>,SIOD对局地环流有影响,也间接影响着亚洲季风系统。SIOD为正位相时,夏季马斯克林高压增强,进而使得索马里越赤道气流增强,在印度地区低空产生异常辐合、高层辐散,从而增强印度季风环流,使得印度季风降水偏多,印度季风偏强<sup>[101]</sup>;SIOD为负位相时,情况相反。另外,SIOD海温异常分布型对南海夏季风建立早晚起重要作用<sup>[110-111]</sup>,SIOD通过加大(减弱)东亚和西太平洋区域的海陆热力差异以及增强(减弱)南海区域的对流活动对南海夏季风产生影响。前期SIOD为正(负)位相时,南海夏季风建立较早(晚)。SIOD与马斯克林高压变化的关系明显,并通过马斯克林高压的影响,使得南半球中高纬度地区出现异常波列,再通过Hadley环流的变化,对北半球环流产生影响<sup>[70]</sup>。因此,SIOD形成后通过热力强迫不仅影响局地大气环流,还对南北半球环流、亚洲季风系统产生影响,并影响我国夏季降水的分布。概括已有研究成果,SIOD主要通过3种途径影响我国夏季降水:①通过影响当地马斯克林高压的强度而改变越赤道气流强度,进而影响印度夏季风对中国地区的西南水汽输送条件;②暖海温异常在热带中东印度洋和海洋大陆可以维持到秋季,影响当地对流以及来自印度洋和太平洋水汽输送通道上的量值和输送方向,从而改变进入东亚的水汽输送条件;③改变西北太平洋副热带高压的位置和强度,对我国夏季降水造成影响。

总之,春季SIOD可以通过影响南北半球环流系统和亚洲季风系统,进而对我国夏季降水产生影响。具体表现:SIOD正位相年,黄河及其以北、以东区域、华南地区降水明显偏多,长江流域降水偏

少;SIOD 负位相年,西南、江南、黄淮地区降水偏多<sup>[70,100,103]</sup>。

### 3 大西洋海温异常对东亚夏季风的影响

早在 20 世纪 80 年代就有研究指出,冬季北大西洋的海温异常能够引起欧亚环流的显著变化,并可进一步影响到同期冬季东亚的地表气候<sup>[112]</sup>。实际上,北大西洋海温异常对东亚夏季气候也存在显著影响,但这方面研究直到最近几年才受到人们的重视。Wu 等<sup>[113]</sup>指出,在年际时间尺度上东亚夏季风的增强(减弱)与春—夏季北大西洋区域经向上呈现为“—+—”(“+—+”)的三极子型海温异常(以下称为北大西洋海温三极子)显著相关。其中,显著负相关主要出现在北大西洋热带和副极地地区,而显著正相关主要出现在美国东部海域。在年代际时间尺度上,当长江中下游夏季梅雨降水偏少(多)时,前期冬季北大西洋的海温异常也呈现为一种“—+—”(“+—+”)的三极子型<sup>[114]</sup>。观测分析和数值试验结果表明,夏季北大西洋海温三极子可以激发出一支跨越欧亚大陆的准正压的纬向遥相关波列,并通过该波列引起东亚夏季风的强弱变化<sup>[115]</sup>。其中,对应于北大西洋海温三极子的正位相(“—+—”),美国东部和西欧上空主要为显著的反气旋式环流异常,而副极地北大西洋和乌拉尔山地区上空为气旋式环流异常;反之亦然。由于乌拉尔山环流形势是影响东亚夏季风降水的关键环流系统<sup>[116]</sup>,若乌拉尔山地区上空的位势高度场异常偏高(低),则该地区阻塞高压增强(减弱),有利于梅雨锋偏强(弱),使长江中下游梅雨降水偏多(少),东亚夏季风偏弱(强)。当夏季北大西洋海温三极子处于正(负)位相时,乌拉尔山地区上空主要为负(正)的高度异常所控制,因此,有利于长江中下游梅雨降水偏少(多)和东亚夏季风偏强(弱)。

北大西洋海温三极子的形成受局地上方北大西洋涛动(NAO)型的环流异常所控制<sup>[117-118]</sup>。由冬至夏,NAO 的活动中心将会发生系统性北移<sup>[119]</sup>,它所激发的海温三极子也随之北移。Zuo 等<sup>[115]</sup>分析发现,对东亚夏季风存在显著影响的北大西洋海温三极子实际上是由前期春季的 NAO 异常激发形成的,而与同期夏季的 NAO 异常无明显联系。其中,夏季 NAO 异常所激发的海温三极子主要位于热带外北大西洋;而春季 NAO 异常所激发的海温三极

子的位置较偏南,其低纬度异常中心出现在热带北大西洋。这也说明,东亚夏季风环流对北大西洋海温三极子的响应敏感于对后者的经向位置异常。研究还指出,东亚夏季风与北大西洋海温三极子的年际关系在 20 世纪 70 年代之前较弱,而之后明显增强,这种年代际不稳定性与 NAO 的影响有关<sup>[120]</sup>。

除了北大西洋外,南大西洋的海温异常对东亚夏季风和我国夏季降水也可能存在显著影响。例如,在年代际时间尺度上我国华北地区夏季降水与南大西洋海温异常之间存在显著负相关关系<sup>[121]</sup>。但南大西洋海温异常对我国夏季降水的影响机理尚不明确。此外,在厄尔尼诺事件成熟的次年夏季,热带大西洋海温往往高于其气候平均值;反之亦然<sup>[122]</sup>。耦合模式的试验结果显示,只有在考虑大西洋海温变化的情况下,模式才能够较好地再现 ENSO 成熟次年印度—东亚季风区大气环流异常的主要特征<sup>[123-124]</sup>。因此,与印度洋类似,热带大西洋海温异常在联系 ENSO 对东亚夏季风的影响中发挥着重要作用。

### 4 总结和展望

本文主要回顾了太平洋 ENSO 事件、印度洋海温、大西洋海温年际变率对东亚夏季风以及我国夏季降水的影响机理研究。需要指出的是,近几年关于不同分布型厄尔尼诺对东亚气候的不同影响、热带印度洋海温的作用、南印度洋偶极子的作用、菲律宾异常反气旋环流的发展演变特征及物理机制、大西洋海温异常型的作用等研究已经在气候异常诊断和短期预测业务中发挥了重要作用。

与厄尔尼诺的分布型及其气候影响的大量研究相比,拉尼娜的分类及气候影响的研究相对较少,有些研究认为拉尼娜事件的东部型和中部型特征非常相似,可能不存在不同的分布类型<sup>[52,125-126]</sup>。最新研究根据成熟期标准化的 Niño3 和 Niño4 指数及成熟期海温距平的空间分布特征,将 1950 年以来的 14 次拉尼娜事件分为了东部型和中部型,并指出热带大气对这两类不同分布型拉尼娜事件的响应特征具有显著差异<sup>[127-128]</sup>。值得注意的是,尽管拉尼娜事件的气候影响可能没有厄尔尼诺事件显著,但是拉尼娜事件的发展演变特征以及对东亚气候的影响却表现出与厄尔尼诺事件明显的非对称性。Zhang 等<sup>[39]</sup>利用东亚沿岸对流层低层的经向风作为东亚

季风指数,分析了与 Niño3 区海面温度异常之间的关系,指出厄尔尼诺盛期时东亚季风异常显著,而拉尼娜期间东亚季风异常在统计上不显著,指出东亚季风对厄尔尼诺和拉尼娜响应的不对称性。还有研究表达了类似观点<sup>[129-131]</sup>。因此,鉴于拉尼娜影响的复杂性及其与厄尔尼诺影响的非对称性,关于拉尼娜的不同分布型及其对东亚季风和我国气候异常的影响更值得深入分析。

热带印度洋全区一致海温模态经常发生在 ENSO 事件成熟的冬季和次年春季, TIOD 也常发生在厄尔尼诺(拉尼娜)发生年的夏秋季,但反过来也会影响 ENSO 事件的强度。有研究表明<sup>[102]</sup>, SIOD 事件就像连接正负 ENSO 位相转换的一个环节,不仅涉及海气相互作用的正负反馈过程,还与热带和副热带大气环流之间的相互作用有关。因此印度洋海气相互作用是全球海气相互作用的一部分,印度洋不同海温异常分布型与不同类型 ENSO 事件的相互联系及独立作用对于亚洲季风系统和我国气候的影响需要进一步探讨。另外,印度洋海气相互作用与南半球中高纬度大气环流之间的联系及影响、与青藏高原形成的南北海陆热力对比、与北半球中高纬度环流系统的多因子多尺度相互作用及对我国夏季气候的影响非常复杂,也是未来气候预测需要深入探索的方向。

热带外北大西洋海温的年际变率主要受大气环流控制,而前者对后者往往也存在显著的反馈作用<sup>[132]</sup>。在北大西洋海温三极子影响东亚夏季风强弱变化的过程中,虽然热带海温异常所引起的非绝热加热起主导作用,但是热带外海温异常的贡献仍需要在未来利用对大气内部变率有较好模拟能力的气候模式进行深入研究<sup>[115]</sup>。

在实际的气候预测业务中,需要面临的问题非常复杂,有的年份海温异常信号强且异常信息对东亚夏季风的影响比较一致,有利于预报员根据已有研究成果进行分析,但这种年份并不多;有的年份海温异常信号强,但是不同海域的异常信息对东亚夏季风的影响不一致甚至矛盾,因而很难判断采用哪个强信号;有的年份海温异常信号弱,根据强信号影响的研究成果对这些海温接近常年的特征不适用,使得预报员无所适从。因此,针对实际气候预测业务,海温的影响领域还有大量的研究工作要做。此外,本文主要回顾了各大洋独立的海温年际变化特征及其对东亚夏季风年际变率的影响,没有考虑各

大洋海温异常对我国气候变异的综合影响、海温异常的年代际变化及其对东亚夏季风的影响以及海温异常的多时间尺度特征与东亚夏季风的联系。在这些领域已经有一些研究工作<sup>[133-135]</sup>,值得进一步梳理和应用。

## 参考文献

- [1] 李维京. 现代气候业务. 北京:气象出版社, 2012:202-203.
- [2] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国天气气候的影响. 应用气象学报, 1992, 3(4): 473-481.
- [3] 倪允琪, 沈新勇. ENSO 动力学及其数值模拟的研究评述. 应用气象学报, 1998, 9(2): 239-245.
- [4] 金祖辉, 陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. 大气科学, 1999, 23(6): 663-672.
- [5] 张人禾, 李强. 热带海洋变异对东亚季风的影响. 气象, 2004, 30(12): 22-26.
- [6] 王蕾, 张人禾. 不同区域海温异常对中国夏季旱涝影响的诊断研究和预测试验. 大气科学, 2006, 30(6): 1147-1159.
- [7] 张人禾, 殷永红, 李清泉, 等. 利用 ARGO 资料改进 ENSO 和我国夏季降水气候预测. 应用气象学报, 2006, 17(5): 538-547.
- [8] 魏凤英. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路. 应用气象学报, 2011, 22(1): 1-11.
- [9] 王万秋. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验. 大气科学, 1991, 15(5): 115-123.
- [10] 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验. 应用气象学报, 2007, 18(1): 1-11.
- [11] Zhang R H, Zuo Z Y. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in East China. *J Climate*, 2011, 24: 3309-3322.
- [12] 陈烈庭, 阎志新. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 // 中长期水文气象预报文集(第一集). 北京: 水利电力出版社, 1979: 145-148.
- [13] 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系. 应用气象学报, 1998, 9(增刊): 39-46.
- [14] Wu B Y, Yang K, Zhang R H. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(1): 31-44, doi: 10. 1007/s00376-009-0031-2.
- [15] Zhao P, Zhang X, Zhou X J, et al. Sea-ice extent anomaly in the North Pacific and impact on the East Asian summer monsoon rainfall. *J Climate*, 2004, 17: 3434-3447.
- [16] 王嘉, 郭裕福. 北半球海冰强迫作用下大气可预报性研究. 应用气象学报, 2004, 15(3): 291-305.
- [17] Wu B, Zhang R, Wang B, et al. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, L09501, doi: 10. 1029/2009GL037299.
- [18] Zhang J Y, Dong W J, Fu C B, et al. The influence of vegetation cover on summer precipitation in China: A statistical a-

- analysis of NDVI and climate data. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(6):1002-1006.
- [19] Zuo Z Y, Zhang R H, Zhao P. The relation of vegetation over the Tibetan Plateau to rainfall in China during the boreal summer. *Clim Dyn*, 2011, 36:1207-1219.
- [20] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000:191-194.
- [21] 王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001:304-326.
- [22] Wang B, Wu R G, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 2000, 13:1517-1535.
- [23] Wang B, Ding Q, Fu X, et al. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, L15711, doi:10.1029/2005GL022734.
- [24] Zhang Renhe, Akimasa Sumi, Masahide Kinoto. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv Atmos Sci*, 1999, 16(2):229-241.
- [25] Ropelewski C F, Halpert M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1987, 115:1606-1626.
- [26] Ropelewski C F, Halpert M S. Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *J Climate*, 1989, 2:268-284.
- [27] Halpert M S, Ropelewski C F. Surface temperature patterns associated with the Southern Oscillation. *J Climate*, 1992, 5:577-593.
- [28] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 1989, 6:21-32.
- [29] 符淙斌, 腾星林. 我国夏季的气候异常与埃尔尼诺/南方涛动现象的关系. 大气科学, 1988, 12(增刊):133-141.
- [30] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. 大气科学, 2002, 26(5):595-610.
- [31] 倪东鸿, 孙照渤, 赵玉春. ENSO 循环在夏季的不同位相相对东亚夏季风的影响. 南京气象学院学报, 2000, 23(1):18-54.
- [32] Huang R H, Li C Y. Influence of the Heat Source Anomaly over the Tropical Western Pacific on the Subtropical High over East Asia. Proceeding of the International Conference on the General Circulation of East Asia, 1987:40-51.
- [33] Huang R H, Sun F Y. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 1992, 70:243-256.
- [34] Huang R H, Yin B Y, Liu A D. Intraseasonal Variability of the East Asian Summer Monsoon and Its Association with the Convective Activities in the Tropical Western Pacific // Ye Duzheng. Climate Variability. Beijing: Chinese Meteorological Press, 1992:134-155.
- [35] 曹杰, 黄荣辉, 谢应齐, 等. 西太平洋副热带高压演变物理机制的研究. 中国科学: D 辑, 2002, 32:659-666.
- [36] Huang R H, Wu S S. Impact of the Thermal State of the Tropical Western Pacific on the Onset of the South China Sea Summer Monsoon. Proceedings of the Third International Symposium on Asian Monsoon System (ISAM3), 2001:8-21.
- [37] 黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究. 大气科学, 2003, 27(4):484-502.
- [38] 黄荣辉, 陈文. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展. 气候与环境研究, 2002, 7(2):146-159.
- [39] Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74:49-62.
- [40] Zhang R H, Sumi A. Moisture circulation over East Asia during El Niño episode in northern winter, spring and summer. *J Meteor Soc Japan*, 2002, 80:213-227.
- [41] Wang B, Zhang Q. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: How the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development? *J Climate*, 2002, 15:3252-3265.
- [42] 高辉, 王永光. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究. 气象学报, 2007, 65(1):131-137.
- [43] 宗海峰, 陈烈庭, 张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征. 大气科学, 2010, 34(1):184-192.
- [44] 袁媛, 杨辉, 李崇银. 不同分布型 El Niño 事件及对中国次年夏季降水的可能影响. 气象学报, 2012, 70(3):467-478.
- [45] Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, 222:1195-1202.
- [46] Fu C B, Diaz H, Fletcher J. Characteristics of the response of sea surface temperature in the central Pacific associated with the warm episodes of the Southern Oscillation. *Mon Wea Rev*, 1986, 114:1716-1738.
- [47] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J Climate*, 1995, 8:267-285.
- [48] 李崇银. 气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 2000:240-260.
- [49] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res*, 2007, 112: C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- [50] Yu J Y, Kao H Y. Decadal changes of ENSO persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958—2001. *J Geophys Res*, 2007, 112, D13106, doi:10.1029/2006JD007654.
- [51] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO. *J Climate*, 2009, 22:615-632.
- [52] Kug J S, Jin F F, An S I. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Climate*, 2009, 22:1499-1515.
- [53] Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. El Niño in a changing climate. *Nature*, 2009, 461:511-514.
- [54] Lee T, McPhaden M J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L14603, doi:10.1029/2010GL044007.
- [55] 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 等. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾. 气象科技进展, 2012, 2(3):17-24.
- [56] Yuan Y, Yang S. Impacts of different types of El Niño on the

- East Asian climate; Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 2012, 25:7702-7722, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00576.1.
- [57] Kim H M, Webster P J, Curry J A. Impact of shifting patterns of Pacific Ocean warming on North Atlantic tropical cyclones. *Science*, 2009, 325:77-80, doi: 10.1126/science.1174062.
- [58] Chen G, Tam C. Different impacts of two kinds of Pacific Ocean warming on tropical cyclone frequency over the western North Pacific. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, L01803, doi: 10.1029/2009GL041708.
- [59] Wang G, Hendon H H. Sensitivity of Australian rainfall to inter-El Niño variations. *J Climate*, 2007, 20:4211-4226.
- [60] Taschetto A S, England M H. El Niño Modoki impacts on Australian rainfall. *J Climate*, 2009, 22:3167-3174.
- [61] Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific Rim during boreal summer. *Climate Dyn*, 2007, 29:113-129.
- [62] Weng H, Behera S K, Yamagata T. Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events. *Climate Dynamics*, 2009, 32: 663-674, doi: 10.1007/s00382-008-0394-6.
- [63] Weng H, Wu G X, Liu Y M, et al. Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans. *Climate Dynamics*, 2011, 36: 769-782, doi: 10.1007/s00382-009-0658-9.
- [64] Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int J Climatol*, 2011, 31(14): 2091-2101, doi: 10.1002/joc.2217.
- [65] Feng J, Wang L, Chen W, et al. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. *J Geophys Res*, 2010, 115, D24122, doi: 10.1029/2010JD014761.
- [66] Feng J, Li J. Influence of El Niño on spring rainfall over south China. *J Geophys Res*, 2011, 116, D13102, doi: 10.1029/2010JD015160.
- [67] Larkin N K, Harrison D E. Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L13705, doi: 10.1029/2005GL022738.
- [68] Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between Eastern and Central Pacific El Niño; Effects of Indian Ocean SST. *J Climate*, 2012, 25:7867-7883, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00004.1.
- [69] 袁媛. 热带印度洋海温异常及其与 ENSO 事件的相互联系. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [70] 晏红明, 袁媛. 印度洋海温异常的特征及其影响. 北京: 气象出版社, 2012.
- [71] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360-363.
- [72] Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, 1999, 401: 356-360.
- [73] 肖莺, 张祖强, 何金海. 印度洋偶极子研究进展综述. 热带气象学报, 2009, 25(5): 621-627.
- [74] 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系. 热带气象学报, 2002, 18(4): 335-344.
- [75] 唐卫亚, 孙照渤. 印度洋海温偶极振荡对东亚环流及降水影响. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 316-322.
- [76] 钱玮, 管兆勇. 中国南方夏季降水与热带印度洋偶极型海温异常的联系. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 9-16.
- [77] 袁媛, 李崇银. 热带印度洋偶极子与 ENSO 事件关系的年代际变化. 科学通报, 2008, 53(12): 1429-1436.
- [78] Yuan Y, Li C Y. Decadal variability of the IOD-ENSO relationship. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 1745-1752.
- [79] 刘宣飞, 袁慧珍, 管兆勇. ENSO 对 IOD 与中国夏季降水关系的影响. 热带气象学报, 2008, 24(5): 502-506.
- [80] Meyers G. Variation of Indonesian throughflow and El Niño/Southern Oscillation. *J Geophys Res*, 1996, 101: 12255-12263.
- [81] Klein S A, Soden B J, Lau N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO; Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J Climate*, 1999, 12: 917-932.
- [82] Lau N C, Nath M J. Impact of ENSO on the variability of the Asian-Australian monsoons as simulated in GCM experiments. *J Climate*, 2000, 13: 4287-4309.
- [83] Yang S, Ding X, Zheng D, et al. Time-frequency characteristics of the relationships between tropical Indo-Pacific SSTs. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 343-359.
- [84] Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. Structure and mechanism of south Indian Ocean climate variability. *J Climate*, 2002, 15: 864-878.
- [85] Wu R, Kirtman B. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM. *J Climate*, 2004, 17: 4019-4031.
- [86] Annamalai H, Xie S P, McCreary J P, et al. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño. *J Climate*, 2005, 18: 302-319.
- [87] Yang J, Liu Q, Xie S P, et al. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys Res Lett*, 2007, 34, L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- [88] Yuan Y, Zhou W, Chan J C L, et al. Impacts of the basin-wide Indian Ocean SSTA on the South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 2008, 28: 1579-1587.
- [89] Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J Climate*, 2009, 22: 730-747.
- [90] Chou C. Establishment of the low-level wind anomalies over the western North Pacific during ENSO development. *J Climate*, 2004, 17: 2195-2212.
- [91] Chen J M, Li T, Shih J. Fall persistence barrier of sea surface temperature in the South China Sea associated with ENSO. *J*

- Climate*, 2007, 20: 158-172.
- [92] Matsuno T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteor Soc Japan*, 1966, 44: 25-43.
- [93] Gill A E. Some simple solutions for heat induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 447-462.
- [94] 李琰, 王亚非, 朱伟军. 热带太平洋、印度洋海温异常在菲律宾海异常反气旋建立过程中的作用. *气象学报*, 2010, 68(6): 865-876.
- [95] Watanabe M, Jin F F. Role of Indian Ocean warming in the development of Philippine Sea anticyclone during ENSO. *Geophys Res Lett*, 2002, 29, 1478, doi: 10. 1029/2001GL014318.
- [96] Wu B, Zhou T, Li T. Seasonally evolving dominant interannual variability mode over the East Asia. *J Climate*, 2009, 22: 2992-3005.
- [97] Wu B, Li T, Zhou T. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western north Pacific between El Niño and La Nina. *J Climate*, 2010, 15: 4807-4822.
- [98] Reason C J C. Warm and cold events in the southeast Atlantic/southwest Indian Ocean region and potential impacts on circulation and rainfall over southern Africa. *Meteor Atmos Phys*, 1998, 69: 49-65.
- [99] Behera S K, Yamagata T. Subtropical SST dipole in the southern Indian. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(2): 327-330.
- [100] 贾小龙, 李崇银. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1238-1249.
- [101] 杨明珠, 丁一汇. 印度洋海表温度的变化及其对印度夏季季风降水影响的诊断研究. *海洋学报*, 2006, 28(4): 9-16.
- [102] 晏红明, 李崇银, 周文. 南印度洋副热带偶极模在 ENSO 事件中的作用. *地球物理学报*, 2009, 52(10): 2436-2449.
- [103] 杨明珠, 丁一汇. 中国夏季降水对南印度洋偶极子的响应研究. *大气科学*, 2007, 31(4): 685-694.
- [104] Schouten M W, de Ruijter W P M, van Leeuwen P J, et al. An oceanic teleconnection between the equatorial and southern Indian Ocean. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(16), doi: 10. 1029/2001GL014542-59-1-4.
- [105] 杨秋明. 南印度洋副热带偶极子型海温异常与全球环流和我国降水变化的关系. *海洋学报*, 2006, 28(3): 47-56.
- [106] Ray G P, White W B. Slow oceanic teleconnections linking the Antactic circumpolar wave with the tropical El Niño-Southern Oscillation. *J Geophys Res*, 1998, 103 (C11): 24573-24583.
- [107] Mason S J. Sea-surface temperature-South African rainfall associations, 1910—1989. *Int J Climatol*, 1995, 15: 119-135.
- [108] Reason C J C. Interannual warm and cool events in the subtropical mid-latitude South Indian Ocean region. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(2): 215-218.
- [109] 丁一汇. 高等天气学(第二版). 北京: 气象出版社, 2005: 212-235.
- [110] 梁肇宁, 温之平, 吴丽姬. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系: I 耦合分析. *大气科学*, 2006, 30(4): 619-634.
- [111] 温之平, 梁肇宁, 吴丽姬. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系: II 机理分析. *大气科学*, 2006, 30(6): 1138-1146.
- [112] Gambo K, Lu L, Li W J. Numerical simulation of Eurasian teleconnection pattern in atmospheric circulation during the Northern Hemisphere winter. *Adv Atmos Sci*, 1987, 4(4): 385-394.
- [113] Wu Z, Wang B, Li J, et al. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J Geophys Res*, 2009, 114, D18120, doi: 10. 1029/2009JD011733.
- [114] Gu W, Li C Y, Wang X, et al. Linkage between Mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal time scale. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26(1): 101-108.
- [115] Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. The impact of North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2013, doi: 10. 1007/s00376-012-2125-5.
- [116] 张庆云, 陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. *气象学报*, 1998, 56(2): 199-211.
- [117] Deser C, Timlin M. Atmosphere-ocean interaction on weekly timescales in the North Atlantic and Pacific. *J Clim*, 1997, 10: 393-408.
- [118] 周天军, 宇如聪, 郜永琪, 等. 北大西洋年际变率的海气耦合模式模拟. I: 局地海气相互作用. *气象学报*, 2006, 64(1): 1-17.
- [119] Barnston A G, Livezey R E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon Wea Rev*, 1987, 115: 1083-1126.
- [120] 左金清, 李维京, 任宏利, 等. 春季北大西洋涛动与东亚夏季风年际关系的转变及其可能成因分析. *地球物理学报*, 2012, 55: 384-395.
- [121] 陈文, 康丽华, 王玓. 中国夏季降水与全球海温的耦合关系分析. *气候与环境研究*, 2006, 11: 259-269.
- [122] Saravanan R, Chang P. Interaction between tropical Atlantic variability and El Niño-Southern Oscillation. *J Clim*, 2000, 13: 2177-2194.
- [123] Lu R, Dong B. Impact of Atlantic sea surface temperature anomalies on the summer climate in the western North Pacific during 1997—1998. *J Geophys Res*, 2005, 110: D16102, doi: 10. 1029/2004JD005676.
- [124] 容新尧, 张人禾, Li Tim. 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*, 2010, 55(14): 1397-1408.
- [125] Kug J S, Ham Y G. Are there two types of La Niña? *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L16704, doi: 10. 1029/2011GL048237.
- [126] Shinoda T, Hurlburt H E, Metzger E J. Anomalous tropical ocean circulation associated with La Niña Modoki. *J Geophys Res*, 2011, 116: C12001, doi: 10. 1029/2011JC007304.
- [127] 袁媛, 晏红明. 不同分布型 La Nina 事件及热带大气的响应特征对比. *科学通报*, 2012, 57(34): 3312-3322.

- [128] Yuan Y, Yan H M. Different types of La Niña events and different responses of the tropical atmosphere. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(3): 406-415, doi:10.1007/s11434-012-5423-5.
- [129] Hoerling M P, Kumar A, Zhong M. El Niño, La Niña and the nonlinearity of their teleconnections. *J Climate*, 1997, 10: 1769-1786.
- [130] Wu B, Li T, Zhou T. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño decaying summer. *J Climate*, 2010, 23: 2974-2986.
- [131] Wang X, Wang D X, Zhou W, et al. Interdecadal modulation of the influence of La Niña events on Mei-yu rainfall over the Yangtze River Valley. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 157-168, doi:10.1007/s00376-011-1021-8.
- [132] Peng S, Robinson W A, Li S. Mechanisms for the NAO responses to the North Atlantic SST tripole. *J Climate*, 2003, 16: 1987-2004.
- [133] Xie S P, Du Y, Huang G, et al. Decadal shift in El Niño influences on Indo-western Pacific and East Asian climate in the 1970s. *J Climate*, 2010, 23: 3352-3368.
- [134] 马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系. *大气科学*, 2012, 36(2): 397-410.
- [135] Chen W, Feng J, Wu R. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon. *J Climate*, 2013, 26: 622-635.

## A Review of Physical Mechanisms of the Global SSTA Impact on EASM

Chen Lijuan Yuan Yuan Yang Mingzhu Zuo Jinqing Li Weijing

(Laboratory of Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081)

### Abstract

The impact of global sea surface temperature anomaly (SSTA) on the East Asia Summer Monsoon (EASM) and summer precipitation in China is reviewed from the aspects of physical mechanisms, on the basis of key external forcing signals in short-term climate prediction. Focusing on El Niño-Southern Oscillation (ENSO) cycle in the tropical Pacific and the main SSTA modes in Indian and Atlantic Ocean, their inter-annual variability are further reviewed as well as their different impacts on the EASM, especially their relationship with the main summer rainfall belt in China.

During different phases of ENSO cycle, ENSO exerts different impacts on the EASM and the summer precipitation in China. In the developing summer of El Niño, the EASM tends to be weak and the main summer rainfall belt would shift southward in eastern China. However, in the decaying summer of El Niño, the EASM tends to be strong, and the summer precipitation would be below normal in the Yangtze-Huaihe Valley. The situations are approximately reverse for the impact of La Niña on the EASM and summer precipitation in China, although the impact of La Niña is not as significant. The influence of ENSO on the EASM and the summer rainfall belt in China is closely correlated with the SSTA in the western Pacific warm pool as well as the resulted convective activities in its northern part. Moreover, the Philippine Sea anticyclone also plays an important role. In recent years, different types of El Niño are widely discussed. It is revealed that the Central Pacific (CP) El Niño not only has different evolution mechanisms, but also shows different impacts on the global atmospheric circulation as compared with the Eastern Pacific (EP) El Niño or classical El Niño.

Indian Ocean SSTA modes also show significant influences on the EASM and the summer precipitation in China. For example, the basin-wide warming (cooling) mode in the tropical Indian Ocean would cause a late (an early) South China Sea summer monsoon (SCSSM) onset; in the summer of positive (negative) tropical Indian Ocean dipole phase, more precipitation would occur in South China (North China); during the positive (negative) phase of subtropical southern Indian Ocean dipole, Indian summer monsoon tends

to be stronger (weaker), and SCSSM may establish earlier (later). The positive (negative) North Atlantic tri-pole mode would lead to a stronger (weaker) EASM through motivating quasi-barotropic zonal tele-connection wave train across the Eurasian continent.

SSTA is the important pre-signal on the prediction of summer precipitation anomaly in China. Because of the predictability of short-term climate prediction, it is still difficult to give high skill prediction for summer rainfall anomaly in China. Some advices and requirements on the physical mechanism research and dynamical model development are proposed in order to improve the prediction of the EASM and summer rainfall in China.

**Key words:** external forcing signal; SSTA; EASM; summer precipitation

## 《应用气象学报》征稿简则

《应用气象学报》(双月刊)是大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊,主要刊登反映新理论与新技术在大气科学中的应用,以及大气科学理论与实践相结合,应用于各个有关领域的研究论文、业务系统和研究简报;国内外大气科学与应用气象科学发展中的新动态与新问题的探讨与评论;国内外重要学术会议或研究、业务活动的报道;气象书刊评介。

投稿要求和注意事项:

1. 论点明确、文字精炼。摘要请按文摘四要素(目的、方法、结果、结论)撰写,列出3~8个关键词,作者姓名请附汉语拼音,所在单位请附中、英文全名、地名、邮编。要求中文摘要为200~400字,英文摘要为500个单词左右(并请附对应的中文译文)。

2. 插图请插入文中适当位置,要求准确、清晰、美观。图中物理量、单位请勿遗漏,中、英文图题及说明写在插图下面。表格请采用三线表形式,并列出中、英文表题。

3. 参考文献请择主要的列入,并请按文中引用顺序标号。期刊书写格式:作者. 文章题目. 刊名,年,卷(期):起止页. 专著书写格式:作者. 书名. 译编者. 出版地:出版社,出版年:起止页。

4. 计量单位请按《中华人民共和国法定计量单位》列出,已废止的单位请换算成法定计量单位。

5. 科技术语和名词请使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。外国人名和地名,除常用者外请注原文。

6. 网上投稿(<http://qk.cams.cma.gov.cn>)请同时寄送全体作者签名的《承诺书》(请网上自行下载)。稿件自收到之日起,将在6个月内决定刊用与否,来稿一经刊登,酌情收取版面费,并酌付稿酬。

7. 文中的数字及符号必须清楚无误,易混淆的外文字母、符号,请标注文种,大、小写,正、斜体,黑、白体,公式中的上、下标。

8. 本刊已加入“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。本刊所付稿酬包含光盘稿酬和刊物内容上网服务报酬。凡向本刊投稿的作者(除事先声明外),本刊视为同意将其稿件纳入此两种版本进行交流。

欢迎投稿。投稿请登录 [qk.cams.cma.gov.cn](http://qk.cams.cma.gov.cn)。

地址:中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部,邮政编码:100081;电话:(010)68407086,68408638;网址:[qk.cams.cma.gov.cn](http://qk.cams.cma.gov.cn); E-mail:[yyqxxb@cams.cma.gov.cn](mailto:yyqxxb@cams.cma.gov.cn), [yyqxxb@163.com](mailto:yyqxxb@163.com)。