

张人禾, 闵庆焯, 苏京志. 有关副热带太平洋对 ENSO 影响研究的综述 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(1): 1-9.
Zhang Renhe, Min Qingye, Su Jingzhi. Review of studies on the influence of subtropical Pacific on ENSO [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1): 1-9. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.001. (in Chinese)

有关副热带太平洋对 ENSO 影响研究的综述

张人禾^{1,2}, 闵庆焯¹, 苏京志²

(1. 复旦大学大气科学研究所, 上海 200433; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 的发生发展既受到来自热带西太平洋纬向海气过程的影响, 也受到来自副热带太平洋经向海气过程的影响。本文概述了副热带太平洋海气异常影响 ENSO 研究方面的科学背景及研究进展, 综述了前人提出的副热带太平洋大气海洋异常通过经向风应力以及北太平洋/南太平洋经向模态, 影响 ENSO 发展演变的途径及相关物理机制, 总结了近些年观测资料分析及数值模拟研究工作所提出的新观点, 并讨论了相关研究中的学术分歧及有待进一步研究的问题。

关键词: ENSO; 经向风; 北太平洋经向模态; 南太平洋经向模态

中图分类号: P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0001-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.001

Review of studies on the influence of subtropical Pacific on ENSO

ZHANG Renhe^{1,2}, MIN Qingye¹, SU Jingzhi²

(1. Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract The onset and development of ENSO events are affected by both tropical western Pacific and subtropical Pacific. This paper provided an overview of scientific background and research progress on anomalies over subtropical Pacific affecting ENSO events. It reviewed about studies of physical mechanisms of atmosphere-ocean anomalies over subtropical Pacific on ENSO through meridional wind stress and the meridional modes of the South and North Pacific, summarizing new ideas concluded from analysis and numerical simulations in recent years. Academic divisions and issues needed to study in future were also discussed.

Key words ENSO; meridional wind; North Pacific meridional mode; South Pacific meridional mode

引言

厄尔尼诺/南方涛动 (El Niño/Southern Oscillation, ENSO) 是地球系统中最为重要的一种海气相互作用现象。前人的研究工作指出, ENSO 是热带海气耦合系统中的年际振荡信号^[1-4], 尽管 ENSO

现象本身局限于热带太平洋地区, 其对环境和社会经济造成的影响却是全球性的^[5]。ENSO 与北太平洋、南太平洋地区以及七大洲地区的天气、气候状况息息相关^[6-8], 其影响甚至可以达到平流层高度^[9]。ENSO 现象也影响着东亚季风的的活动, 前人的研究早已指出东亚地区的夏季风降水异常与

收稿日期: 2017-02-28; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFA0600602); 国家自然科学基金项目 (41376020)

作者简介: 张人禾 (1962—), 男, 博士, 教授, 中国科学院院士, 主要从事气候动力学研究, rhzhang@fudan.edu.cn。

ENSO 循环的不同阶段有着密切关系,东亚冬季风的年际变化也与 ENSO 有着很好的联系^[10-15]。所以,对于 ENSO 现象的机理研究,一直是国际大气和海洋学界的热点课题之一。另外,ENSO 的准确预测,对于中国地区降水的季节内、季节和年际尺度气候预测也有着重要的实际意义。得益于不断改进的观测、分析及同化系统^[16-19], ENSO 的观测、理论和预测研究在过去几十年里取得了长足的进展。

在进入 21 世纪之前,学者们主要着眼于热带西太平洋对 ENSO 发生发展的影响,提出了一系列经典理论。举例来说,就 ENSO 正位相——厄尔尼诺事件的出现而言有两个非常重要的前提条件:赤道西太平洋暖水堆积^[20]和西风异常^[21-22]。在满足这两个条件的情形下,赤道西太平洋暖水会迅速通过异常东向海流侵入赤道中东太平洋地区或者作为下沉开尔文波东传至赤道中东太平洋地区^[23-30],最终引起赤道中东太平洋的异常增暖,激发厄尔尼诺事件。但是进入 21 世纪后,ENSO 展现出了一系列不同于以往的特征,最为显著的就是暖海温异常中心位于赤道中太平洋地区的厄尔尼诺事件频繁发生。为了与经典的暖海温异常中心位于赤道东太平洋地区的东部型厄尔尼诺区别开来,学者们将其定义为中部型厄尔尼诺^[31-32]。中部型厄尔尼诺事件的出现及发生发展是经典理论不能完美解释的。值得注意的是,能否成功预测特定类型的厄尔尼诺事件直接影响着气候预测的准确程度。

除了热带西太平洋通过纬向过程对 ENSO 产生重要影响外,在过去 20 年中已有许多研究发现,副热带太平洋地区大气和海洋的异常信号可以通过经向过程影响热带海洋^[33-39],所以,副热带太平洋地区的异常信号通过经向过程对 ENSO 发生发展的影响是不容忽视的。深入理解副热带太平洋地区大气/海洋异常变化与 ENSO 之间的关系,毫无疑问有利于 ENSO 预报模式的改进。近些年已经涌现了许多利用观测资料及不同复杂程度的海气耦合模式深入探讨副热带太平洋地区海气异常信号与 ENSO 发生发展之间联系的研究工作,本文将对该方面的相关研究成果进行简要概述及回顾,说明副热带太平洋通过经向过程对 ENSO 影响的物理过程和机理。

1 副热带太平洋经向风

早期的 ENSO 研究并不重视副热带太平洋地区的经向风异常。如 McCreary^[40]的研究就认为,由于

经向风压异常不能激发海洋开尔文波,所以它们对于厄尔尼诺事件的发生发展是不重要的。但是,之后的许多研究却表明,副热带太平洋经向风异常对于赤道太平洋海区的气候、季节变化和年循环的影响是不容忽视的,是 ENSO 预测不能不考虑的重要方面。

Philander^[41]应用海洋模式研究发现,在季节、年际时间尺度上赤道东太平洋的海表面温度可能很大程度上受到局地经向风变化的影响。副热带东南太平洋偏南风的增强会使得秘鲁沿岸上升流区域通过海洋平流和罗斯贝波向西延展,造成赤道东太平洋海表面温度的降低。而偏南风的减弱则会通过南赤道流和南赤道逆流的纬向热量再分布造成赤道东太平洋海表面温度升高。Harrison^[42]应用海洋模式研究了 1982—1983 年厄尔尼诺事件中风应力的变化。模式实验结果表明,当不考虑经向风应力影响,同时纬向风应力在赤道 $7^{\circ}\text{N}\sim 7^{\circ}\text{S}$ 以内保留时,模式模拟的上层海洋动力高度与观测是相近的,但海表面温度却出现了接近 ENSO 信号的误差。据此,Harrison 认为经向风对于模式中 ENSO 的准确模拟有一定意义。Périgaud 等^[43]应用海气耦合模式进一步考察了热带太平洋地区的经向风应力异常对于 ENSO 发展的影响,结果表明,经向风应力异常对于维持年际变化的振幅很重要,当经向风应力异常不能反馈到海洋中时,模拟的 ENSO 振荡会出现异常的衰减。此外,在暖(冷)事件发展期间,经向风应力异常会导致赤道东太平洋表层洋流辐合(辐散),导致海水的异常下沉(上涌),使局地海温升高(降低)。

Zhang 等^[33]则应用相关分析和奇异值分解方法考察了热带太平洋经向风应力异常和 ENSO 发展的关系。结果表明,NINO3 区($150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}, 5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$)海面温度异常与赤道东太平洋来自副热带超前 6 个月左右的经向风应力异常辐合有着很好的相关性,该辐合对应着赤道以北和以南分别为来自副热带太平洋的北风和南风应力异常。随着超前时间的减少,相关性会变得越来越好,统计显著性区域也会从赤道东太平洋向西延展。相比于赤道西太平洋纬向风异常的影响,大约在超前 6 个月左右开始,NINO3 区海表面温度异常与经向风应力异常辐合的联系更加密切(图 1)。为了理解来自副热带太平洋的经向风应力异常辐合在 ENSO 事件发生发展中的作用,Zhang 和 Zhao^[34]进一步应用简单热带海洋动力学模式,从理论上分析了热带海洋对经向

风应力异常辐合的响应。结果表明,赤道东太平洋的经向风应力辐合会激发西传的罗斯贝波,这一方面使得近赤道地区的混合层加深,另一方面受所激发的西传罗斯贝波影响,西向海流会出现在赤道附近并进一步将上层海水输运到西部,这有利于赤道西太平洋暖水的堆积,进而为厄尔尼诺事件的出现提供有利的前期条件。

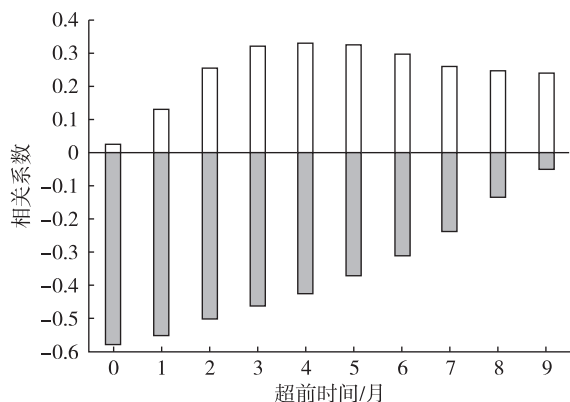


图 1 NINO3 区海面温度异常与超前的赤道西太平洋 ($124^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 区域平均纬向风应力的相关系数(空心柱)以及与超前的赤道东太平洋赤道以北 ($120^{\circ}\text{W}\sim 86^{\circ}\text{W}$, $3^{\circ}\text{N}\sim 9^{\circ}\text{N}$) 和以南 ($120^{\circ}\text{W}\sim 86^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 1^{\circ}\text{N}$) 经向风应力之差的相关系数(实心柱)^[33]

Fig.1 Correlation coefficients of NINO3 SSTA with leading zonal wind stress anomalies averaged over the area $124^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ (outline bar) and with the difference between leading meridional wind stress anomalies averaged over the area $120^{\circ}\text{W}\sim 86^{\circ}\text{W}$, $3^{\circ}\text{N}\sim 9^{\circ}\text{N}$ and those averaged over the area $120^{\circ}\text{W}\sim 86^{\circ}\text{W}$, $5^{\circ}\text{S}\sim 1^{\circ}\text{N}$ (filled bar)^[33]

实际上,赤道中、东太平洋地区经向风应力异常的出现与北太平洋、南太平洋副热带海气系统的变化有密切的联系,表现为北、南太平洋经向模态的活动对 ENSO 产生影响。在下文将对北、南太平洋经向模态影响 ENSO 的相关研究作详细介绍。

2 北太平洋经向模态

进入 21 世纪以后,针对热带外太平洋异常信号对 ENSO 发生发展影响的研究越来越多。Vimont 等^[44]的研究首先对热带外异常信号影响 ENSO 给出了合理的物理解释,他们的研究将前冬北太平洋热带外地区大气变化与热带地区的异常变化联系在一起。在北太平洋地区,表现为大尺度海平面气压振荡的北太平洋涛动^[45]及与之相关的半永久性副热带高压系统可以影响北太平洋热带地区东北

信风的强度,信风强度的变化会造成局地海表面热通量异常,进而改变局地海表面温度。受持续的信风影响,异常的局地海表面温度会逐渐向赤道地区移动,继而在北半球东北太平洋地区产生异常的海表面温度经向梯度,并造成热带太平洋地区大气环流的异常变化,这就是 Vimont 等^[44]所提出的季节性足迹机制。这种现象一般会从北半球冬季一直持续到次年夏季。Vimont 等^[38]也运用数值模式考察了季节性足迹机制对 ENSO 的影响,时序分析结果表明,季节性足迹机制可以解释模式中年代际尺度 ENSO 变化的 20%~40%,以及热带地区大约 70% 的年代际、多年代际变化。Vimont 等^[39]还进一步阐述了热带外异常信号影响 ENSO 发生发展的物理机制:受季节性足迹机制影响,北半球副热带海区 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 部分局地海温的变化会强迫出异常的大气环流,继而造成赤道太平洋纬向风异常,最终耦合的海气系统响应纬向风异常产生赤道对称的类 ENSO 海表面温度异常。Chiang 和 Vimont^[46]的研究进一步指出,受季节性足迹机制影响产生的异常海表面温度经向梯度可以有效地影响北太平洋赤道辐合带的位置,考虑热带太平洋和热带大西洋相似的气候状况,参考已经提出的大西洋经向模态^[47],Chiang 和 Vimont^[46]将这种模态定义为北太平洋经向模态,并证明了北太平洋经向模态是独立于 ENSO 存在的。

北太平洋经向模态对 ENSO 的影响在许多观测分析及模式研究中都有体现。Chang 等^[48]通过分析观测资料发现,过去几十年里大部分厄尔尼诺事件发生前的春季常常伴随着北太平洋经向模态的异常活动,北太平洋经向模态作为热带外大气影响 ENSO 的媒介对于准确预报 ENSO 有着重要的指示意义。Zhang 等^[49]通过耦合模式的长期模拟试验,也发现北太平洋经向模态对于 ENSO 的发展非常重要,海气热力耦合使得热带太平洋信风出现异常变化,在赤道西、中太平洋地区强迫出赤道拦截波动,有利于 ENSO 事件的出现。Lorenzo 等^[50]通过数值试验进一步确认了在年代际尺度上热带地区类 ENSO 海温异常分布的出现与太平洋经向模态和 ENSO 之间的相互作用是分不开的。

北太平洋经向模态也影响着 ENSO 的季节性锁相特征。Chang 等^[48]通过海气耦合模式发现,与北太平洋涛动相联系的大气季节性变化与北太平洋副热带地区海气热力耦合对 ENSO 季节性锁相非常重要。Vimont 等^[51]应用多模式集合数值试验也得

出了类似结论。Zhang 等^[52]进一步运用新型噪声滤波器减弱了耦合模式海气通量中的大气内部变化,结果发现模拟的北太平洋经向模态强度也出现了减弱的状况,与北太平洋经向模态相联系的 ENSO 变化相应减弱,ENSO 的季节锁相特征也出现了变化,进一步验证了 Chang 等^[48]与 Vimont 等^[51]关于“北太平洋经向模态影响着 ENSO 的季节性锁相特征”的观点。

在北太平洋经向模态对中部型 ENSO 影响的研究方面,Yu 等^[53]首先在肯定副热带强迫对于赤道太平洋地区年际尺度海面温度异常变化重要性的基础上,提出副热带太平洋,特别是北太平洋副热带海温的异常变化可能对中部型 ENSO 的出现有重要意义。Zhang 等^[54]通过海气耦合模式试验也提出了类似的观点。Min 等^[55]则通过分析观测资料,指出北太平洋经向模态有利于海面温度异常向中太平洋地区延展,最大海面温度异常中心向中太平洋偏移,进一步肯定了北太平洋经向模态有利于中部型 ENSO 的发生发展(图 2a-c)。

在北太平洋经向模态作为预报因子的研究方面,Larson 和 Kirtman^[56]通过高分辨率模式试验肯定了北太平洋经向模态作为 ENSO 预报因子的有效性。但是他们也指出,北太平洋经向模态的明显变化只有在赤道西太平洋前期条件满足的情形下(如,异常高的海面高度或热含量)才会引发 ENSO 事件。此外他们也发现,与北太平洋经向模态相联系的热带地区低频气候变异同高频大气变化和西风爆发,作为 ENSO 事件的前兆因子是同等重要的。Larson 和 Kirtman^[57]还考察了多模式集合预测试验预报北太平洋经向模态活动的水平以及试验中北太平洋经向模态和 ENSO 的关系。就模式性能而言,多模式集合预报试验能够成功捕捉到北太平洋经向模态的变异,在一定程度上能够作为前兆因子预报 ENSO 的活动。就预报技巧而言,正位相的北太平洋经向模态对于东太平洋型厄尔尼诺有一定预报技巧,但对中太平洋型厄尔尼诺事件预测的水平还有所欠缺。此外,负的北太平洋经向模态不能很好地预测处于 ENSO 负位相的拉尼娜事件。

也有学者考察了北太平洋经向模态在 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 中的模拟情况。Lin 等^[58]的研究发现,尽管 CMIP5 能够合理地模拟出北太平洋经向模态的空间分布、强度以及与北太平洋经向模态相关的副热带海气耦合过程,但是北太平洋经向模态的维持时间和向赤

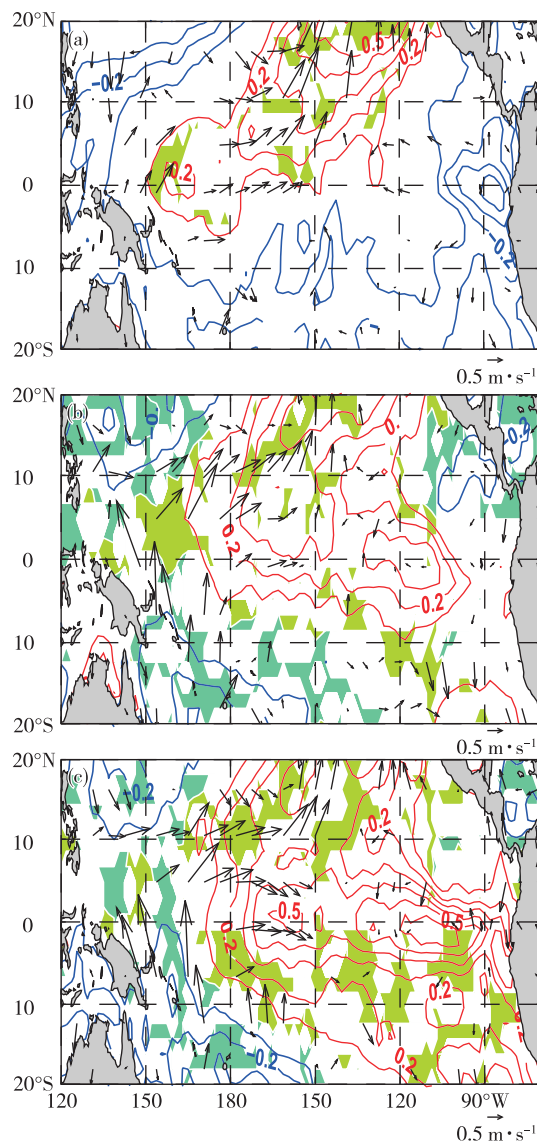


图2 北太平洋经向模态与异常海面温度(等值线,间隔 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)和 10 m 异常风(箭头)演变的关系(a、b、c分别为厄尔尼诺发生前3—5月、6—8月、9—11月的合成图)^[55]

Fig. 2 Composites of SSTA (contours with a $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ interval) and 10-m wind (vectors) for the North Pacific meridional mode (a. March-May before the onset of El Niño, b. June-August before the onset of El Niño, c. September-November before the onset of El Niño)^[55]

道的延展程度在大多数模式中是被低估的。在许多模式中,北太平洋经向模态向赤道的延展远远达不到影响 ENSO 的程度。此外,CMIP5 的模拟结果还表明,北太平洋经向模态活动与中部型 ENSO 的相关性要高于东部型 ENSO。

北太平洋经向模态影响 ENSO 事件发展不仅仅在统计分析和数值试验中得到了证实,从典型个例

中也可明显看出北太平洋经向模态影响 ENSO 事件的发展。对于 1994 年发生的中部型厄尔尼诺事件, Su 等^[59]的研究表明, 副热带太平洋海面温度正异常, 一方面通过激发出经向环流异常在赤道附近造成异常下沉运动和短波太阳辐射增强, 另一方面通过引起的表面风应力反气旋性旋度异常所增高的次表层海温向赤道附近输送, 导致了该次厄尔尼诺的发生。另外, 2012 年夏季赤道太平洋地区出现了厄尔尼诺事件发展的明显征兆, 许多气候模式都预测了其后将出现厄尔尼诺事件。但是, 到了 2012 年秋季增暖却突然中断。对此, Su 等^[60]指出 2012 年赤道太平洋增暖的异常中断与受北太平洋经向模态影响而产生的副热带东北冷的异常海表面温度有关, 异常冷的海表面温度导致了东风异常及低层辐散, 抑制了赤道中太平洋西风异常及对流活动的发展。最终赤道中、东太平洋地区海温的异常增暖受到抑制, 2012—2013 年冬季厄尔尼诺事件最终没能发展成。

3 南太平洋经向模态

进入 21 世纪以来, 已经有非常多的研究考察了北太平洋副热带海气异常活动与 ENSO 之间的关系, 但是, 针对南太平洋活动与 ENSO 研究总体而言相对较少。Zhang 等^[54]应用观测资料和多模式集合试验考察南太平洋大气变化与热带气候关系时发现, 在南太平洋副热带地区存在一个与北太平洋经向模态非常相似的海表面温度异常分布型, 并将其定义为南太平洋经向模态。

Zhang 等^[54]的研究认为, 同北太平洋经向模态相似, 风-蒸发-海表面温度反馈机制^[61]对于南太平洋经向模态的形成非常重要。同时, 正的云反馈机制也影响着南太平洋经向模态的发展。Zhang 等^[54]还强调, 尽管南太平洋经向模态形成的物理机制同北太平洋经向模态非常相似, 但是南太平洋经向模态在赤道太平洋地区的信号相对较强, 对于给定量级的副热带变化, 南太平洋经向模态相比于北太平洋经向模态会在赤道地区产生更强的信号。为了解释这个现象, Zhang 等^[62]应用海气耦合模式, 增强东北信风而减弱东南信风, 让赤道辐合带移至赤道以南。结果南太平洋经向模态不能很好地影响赤道地区, 而北太平洋经向模态与赤道西中太平洋变化的联系加强, 这说明背景风对于南、北太平洋经向模态的强度及其对 ENSO 的影响非常重要。

Min 等^[55]利用再分析资料考察了南、北太平洋经向模态的时空特征以及它们对 ENSO 的不同影响。结果表明, 南太平洋经向模态独立于 ENSO 及北太平洋经向模态而存在, 北太平洋经向模态有利于赤道中太平洋海区异常海温的出现, 促进中部型 ENSO 事件的发展。而与南太平洋经向模态相联系的海面温度异常向东太平洋地区延展、最大海温异常中心向东太平洋偏移, 有利于赤道东太平洋海区异常海温的出现, 促进经典的东部型 ENSO 事件的发展(图 3a-c)。这个结果除了从观测事实的角度

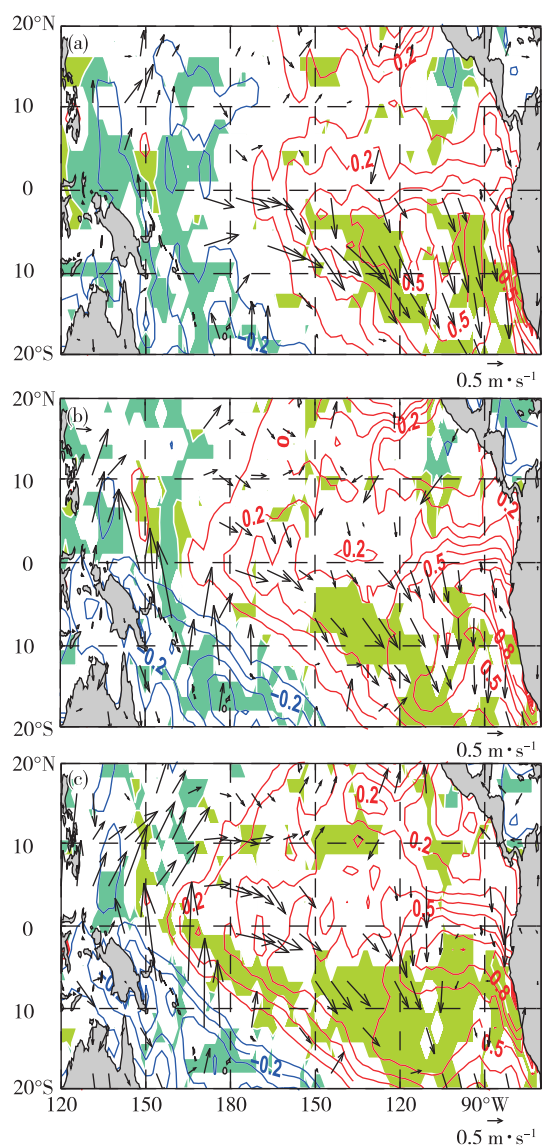


图 3 南太平洋经向模态与海面温度异常(等值线, 间隔 0.1 °C)和 10 m 异常风(箭头)演变的关系(a、b、c 分别为厄尔尼诺发生前 3—5 月、6—8 月、9—11 月的合成图)^[55]

Fig. 3 Same as Fig. 2 but for South Pacific meridional mode^[55]

证明了 Lin 等^[58]发现的“CMIP5 中北太平洋经向模态活动与中部型 ENSO 的相关性高于东部型 ENSO”外,也进一步说明了南太平洋经向模态在东部型 ENSO 事件发展中的作用。

从 ENSO 发展的典型个例中,同样可以清楚地看出南太平洋经向模态影响 ENSO 的发展。事实上,在 1994 年中部型厄尔尼诺发生过程中,北副热带太平洋的前期海气异常信号同样也出现在南副热带太平洋^[59],对该年厄尔尼诺的发生产生影响。在 2014 年年初,许多模式都预测在当年冬季会出现一次强厄尔尼诺事件,然而 2014 年夏季,厄尔尼诺的发展却出现了异常停滞,仅仅达到了弱厄尔尼诺水平,夏季的异常停滞直接导致了这次厄尔尼诺事件的夭折。Min 等^[63]指出,厄尔尼诺发展的停滞在很大程度上受到入侵赤道中东太平洋地区的副热带东南太平洋异常东风影响,异常东风的出现抑制了赤道中东太平洋西风异常的东侵及对流活动的加强,有效地阻碍了厄尔尼诺事件的发展^[63]。而副热带东南太平洋海区异常东风的出现与南太平洋经向模态是息息相关的。

4 结论和讨论

总的说来,除了热带西太平洋通过纬向过程影响 ENSO 的发生发展外,副热带太平洋地区的异常变化通过经向过程同样影响着 ENSO 的发生发展,而赤道中、东太平洋地区经向风异常以及北太平洋/南太平洋经向模态毫无疑问是造成这种经向影响的重要原因,同时,它们也是 ENSO 预测的重要前兆因子。从北太平洋/南太平洋经向模态形成的物理机制方面来看,经典的风-蒸发-海表面温度反馈机制^[61]对于两种经向模态的形成都是非常重要的。此外,正的云反馈机制会在一定程度上影响南太平洋经向模态的发生发展。许多研究通过观测资料分析及模式试验,证实了 Vimont 等^[44]所提出的季节性足迹机制可以很好地解释北太平洋经向模态的生成及演变。在经向模态对不同类型 ENSO 的影响方面,已有研究指出,独立于 ENSO 存在的北太平洋、南太平洋经向模态分别有利于中部型 ENSO、东部型 ENSO 的发生发展。北太平洋经向模态可以在模式预报中作为前兆因子来预测 ENSO 的发展演变。

与北太平洋经向模态相比,南太平洋经向模态概念的提出相对较晚,尚有许多相关问题未能得到很好的解释。北太平洋经向模态的发展演变可以

用季节性足迹机制来解释,与北太平洋涛动紧密相关的副热带信风强度变化,对于北太平洋经向模态的产生起着非常重要的作用。但对于南太平洋经向模态来说,究竟是哪些系统影响着南太平洋副热带信风强度,目前尚未有一致的结论。南太平洋经向模态是否可以在模式预报中作为前兆因子指示特定类型 ENSO 的发展演变,也有待于进一步研究。此外,很多时候经向模态的显著活动并不能激发 ENSO 事件,其物理原因目前还不清楚。

南太平洋经向模态并不是南半球副热带影响 ENSO 发展演变的唯一因素。如 Wang^[64]就指出南太平洋副热带海表面温度存在一个独立于 ENSO 的偶极子型。Zhang 等^[54]提出的南太平洋经向模态可能是偶极子的其中一支。对此,Zhang 等^[54]认为南太平洋经向模态可能是南太平洋副热带偶极子型的一部分,但二者也存在显著不同。首先,南半球副热带偶极子型有着明显的季节尺度变化特征,而南太平洋经向模态具有季节、年际甚至更长时间尺度的变化特征。其次,南太平洋经向模态是可以将南太平洋副热带异常传输到热带地区的一个传输模态,而南太平洋副热带偶极子型则是南太平洋副热带海区的固有模态,将二者区别开来还需要做进一步的工作。此外,也有学者认为是南半球副热带海区存在的四极子海表面温度分布型,影响着 ENSO 的发生发展^[65],Vimont 等^[44]提出的季节性足迹机制在南半球同样适用,而南半球的太平洋-南美型遥相关^[66]扮演着北半球北太平洋涛动的角色。南太平洋经向模态与南半球副热带四极子型靠近赤道东太平洋的极子有怎样的关系,也还需要做进一步的研究工作。

此外,在将经向模态作为预测因子对 ENSO 的演变进行预测时,也应将年代际气候背景态条件考虑在内。Min 等^[63]就指出太平洋年代际振荡^[67]/泛太平洋年代际振荡^[68]气候背景态条件,同样影响着副热带地区异常海温的持续。而针对特定年代际气候背景条件下,经向模态作为预测因子预报 ENSO 能力的差别,目前还没有系统的研究工作出现。

副热带太平洋的异常变化对于 ENSO 发展演变的重要影响是不容忽视的。南太平洋副热带异常对 ENSO 影响固然有很大的研究空间,但是,南太平洋副热带海区观测资料的数量和总体质量不如北太平洋,想进一步理解副热带太平洋异常变化与 ENSO 的关系,提高 ENSO 的预测水平,也依赖于南

太平洋副热带海区更为精确的观测数据。

参考文献:

- [1] Philander S G H, Yamagata T, Pacanowski R C. Unstable air-sea interactions in the tropics [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984, 41(4):604-613.
- [2] Zebiak S E, Cane M A. A Model El Niño-Southern Oscillation [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(10):2262-2278.
- [3] Zhang R, Chao J. Mechanisms of interannual variations in a simple air-sea coupled model in the tropics [M]. In: *Climate Variability* (Eds. Ye Duzheng et al.). Beijing: China Meteorological Press, 1993:236-244.
- [4] Neelin J D, Latif M, Jin F F. Dynamics of coupled ocean-atmosphere models: The tropical problem [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1994, 26(1): 617-659.
- [5] McPhaden M J, Zebiak S E, Glantz M H. ENSO as an integrating concept in earth science [J]. *Science*, 2006, 314(5806):1740-1745.
- [6] Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7):14291-14324.
- [7] Lloyd-Hughes B, Saunders M A. Seasonal prediction of European spring precipitation from El Niño-Southern Oscillation and local sea-surface temperatures [J]. *International Journal of Climatology*, 2002, 22(1):1-14.
- [8] Turner J. The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica [J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(1): 1-31.
- [9] Taguchi M, Hartmann D L. Increased occurrence of stratospheric sudden warmings during El Niño as simulated by WACCM [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(3): 324-332.
- [10] Huang R, Wang Y. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1989, 6(1):21-32.
- [11] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1996, 74(1):49-62.
- [12] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1999, 16(2): 229-241.
- [13] 李崇银. 频繁的强东亚大槽活动 El Niño 的发生 [J]. *中国科学(B辑)*, 1988, 18(6):667-674.
- [14] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 1998, 22(4):399-407.
- [15] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 2002, 26(5):595-610.
- [16] McPhaden M J, Busalacchi A J, Cheney R, et al. The Tropical Ocean-Global Atmosphere observing system: A decade of progress [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C7):14169-14240.
- [17] Guilyardi E, Wittenberg A, Fedorov A, et al. Understanding El Niño in ocean-atmosphere general circulation models: Progress and challenges [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 325-340.
- [18] Barnston A G, Tippett M K, L'Heureux M L, et al. Skill of real-time seasonal ENSO model predictions during 2002-11: Is our capability increasing? [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(5): 631-651.
- [19] 张人禾, 周广庆, 巢纪平. ENSO 动力学与预测 [J]. *大气科学*, 2003, 27(4):674-688.
- [20] Wyrski K. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C4): 7129-7132.
- [21] Luther D S, Harrison D E, Knox R A. Zonal winds in the central equatorial Pacific and El Niño [J]. *Science*, 1983, 222: 327-331.
- [22] McPhaden M J, Bahr F, Du Penhoat Y, et al. The response of the western equatorial Pacific Ocean to westerly wind bursts during November 1989 to January 1990 [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C9): 14289-14303.
- [23] McPhaden M J, Picaut J. El Niño-Southern Oscillation displacements of the western equatorial Pacific warm pool [J]. *Science*, 1990, 250(4986): 1385.
- [24] Wyrski K. El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1975, 5(4): 572-584.
- [25] Miller L, Cheney R E, Douglas B C. GEOSAT altimeter observations of Kelvin waves and the 1986-87 El Niño [J]. *Science*, 1988, 239(4835):52.
- [26] 张人禾, 黄荣辉. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用: I 资料诊断和理论分析 [J]. *大气科学*, 1998, 22(4):587-599.
- [27] Huang R, Zang X, Zhang R, et al. The westerly anomalies over the tropical Pacific and their dynamical effect on the ENSO cycles during 1980-1994 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1998, 15(2): 135-151.
- [28] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. El Niño 事件发生和消亡中热

- 带太平洋纬向风应力的动力作用 II 模式结果分析 [J]. 大气科学, 2001, 25(2): 160-172.
- [29] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. 大气科学, 1999, 23(5): 513-521.
- [30] 巢清尘, 巢纪平. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响 [J]. 自然科学进展, 2001, 11(12): 1293-1300.
- [31] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C11).
- [32] 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]. *Journal of Climate*, 2009, 22(6): 1499-1515.
- [33] Zhang R, Zhao G, Tan Y. Meridional wind stress anomalies over tropical Pacific and the onset of El Niño Part I: Data analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(4): 467-480.
- [34] Zhang R, Zhao G. Meridional wind stress anomalies over the tropical Pacific and the onset of El Niño Part II: Dynamical analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(6): 1053.
- [35] Servain J, Wainer I, McCreary J P, et al. Relationship between the equatorial and meridional modes of climatic variability in the tropical Atlantic [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(4): 485-488.
- [36] Pierce D W, Barnett T P, Latif M. Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal timescales [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(6): 1173-1194.
- [37] Kushnir Y, Seager R, Miller J, et al. A simple coupled model of tropical Atlantic decadal climate variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(23): 2133.
- [38] Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C. The seasonal footprinting mechanism in the CSIRO general circulation models [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(16): 2653-2667.
- [39] Vimont D J, Wallace J M, Battisti D S. The seasonal footprinting mechanism in the Pacific: Implications for ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(16): 2668-2675.
- [40] McCreary J. Eastern tropical ocean response to changing wind systems; with application to El Niño [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1976, 6(5): 632-645.
- [41] Philander S G H. The response of equatorial oceans to a relaxation of the trade winds [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(2): 176-189.
- [42] Harrison D E. Local and remote forcing of ENSO ocean waveguide response [J]. *Journal of physical oceanography*, 1989, 19(5): 691-695.
- [43] Périgaud C, Zebiak S E, Mélin F, et al. On the role of meridional wind anomalies in a coupled model of ENSO [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10(4): 761-773.
- [44] Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C. Footprinting: A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(20): 3923-3926.
- [45] Rogers J C. The North Pacific Oscillation [J]. *Journal of Climatology*, 1981, 1(1): 39-57.
- [46] Chiang J C H, Vimont D J. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(21): 4143-4158.
- [47] Chang P, Ji L, Li H. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions [J]. *Nature*, 1997, 385(6616): 516.
- [48] Chang P, Zhang L, Saravanan R, et al. Pacific meridional mode and El Niño—Southern oscillation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): 130-144.
- [49] Zhang L, Chang P, Ji L. Linking the Pacific meridional mode to ENSO: Coupled model analysis [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(12): 3488-3505.
- [50] Lorenzo E D, Liguori G, Schneider N, et al. ENSO and meridional modes: A null hypothesis for Pacific climate variability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(21): 9440-9448.
- [51] Vimont D J, Alexander M, Fontaine A. Midlatitude excitation of tropical variability in the Pacific: the role of thermodynamic coupling and seasonality [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 518-534.
- [52] Zhang L, Chang P, Tippett M K. Linking the Pacific meridional mode to ENSO: Utilization of a noise filter [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(4): 905-922.
- [53] Yu J Y, Kao H Y, Lee T. Subtropics-related interannual sea surface temperature variability in the central equatorial Pacific [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(11): 2869-2884.
- [54] Zhang H, Clement A, Di Nezio P. The South Pacific meridional mode: A mechanism for ENSO-like variability [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(2): 769-783.
- [55] Min Q, Su J, Zhang R. Observation-based comparisons of the impacts of the meridional modes of the South and North Pacific on the ENSO [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(5): 1705-1720.
- [56] Larson S M, Kirtman B P. The Pacific Meridional Mode as a trigger for ENSO in a high-resolution coupled model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12):

- 3189-3194.
- [57] Larson S M, Kirtman B P. The Pacific meridional mode as an ENSO precursor and predictor in the North American multimodel ensemble [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(18):7018-7032.
- [58] Lin, C Y Yu J Y, Hsu H H. CMIP5 model simulations of the Pacific meridional mode and its connection to the two types of ENSO [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(9):2352-2358.
- [59] Su J, Li T, Zhang R. The initiation and developing mechanisms of central Pacific El Niños [J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(12):4473-4485.
- [60] Su J, Xiang B, Wang B, et al. Abrupt termination of the 2012 Pacific warming and its implication on ENSO prediction [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24):9058-9064.
- [61] Xie S P, Philander S G H. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific [J]. *Tellus A*, 1994, 46(4):340-350.
- [62] Zhang H, Deser C, Clement A, et al. Equatorial signatures of the Pacific Meridional Modes: Dependence on mean climate state [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2):568-574.
- [63] Min Q, Su J, Zhang R, et al. What hindered the El Niño pattern in 2014? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(16):6762-6770.
- [64] Wang F. Subtropical dipole mode in the Southern Hemisphere: A global view [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(10):43-63.
- [65] Ding R, Li J, Tseng Y. The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44(7-8):2017-2034.
- [66] Mo K C, Higgins R W. The Pacific-South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter [J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(6):1581-1596.
- [67] Power S, Casey T, Folland C, et al. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia [J]. *Climate Dynamics*, 1999, 15(5):319-324.
- [68] England M H, McGregor S, Spence P, et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(3):222-227.