

副热带太平洋海气变异对 ENSO 影响的研究进展和展望

冯俊乔^{1,2,4,5}, 鲁云龙^{1,2,3,4}, 官 聪^{1,2,4,5}, 袁 欣^{1,2,3,4}, 惠玉超^{1,2,3,4},
武 杰^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院 海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 5. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋动力过程与气候功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: El Niño–Southern Oscillation(ENSO)是热带太平洋海气作用最强的年际信号, 其变化会引起全球气候异常, 对东亚季风具有重要影响。2000 年后中部型 El Niño 频繁发生, 掀起了 ENSO 多样性研究热潮; El Niño 的复杂性也对 ENSO 理论研究和预测提出了新的挑战。为进一步理解并深入研究 ENSO 物理机制, 本文总结了近年来对两类 ENSO 的最新认识; 特别对副热带太平洋通过海气界面“大气桥”和太平洋副热带-热带经向环流圈的内部经向翻转环流这一“海洋通道”与热带太平洋建立联系的相关成果进行了阐述, 并对存在的关键问题进行了展望。

关键词: 太平洋副热带-热带经向翻转环流; 副热带南太平洋经向模; 副热带北太平洋经向模; ENSO
中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)08-0001-07
DOI: 10.11759/hyxx20191213001

El Niño–Southern Oscillation(ENSO)是热带太平洋海气相互作用最强的年际信号。它的发生会在全球引起巨大的气候异常, 也是引起我国气候变化的重要因素。过去二十年, 相比东太平洋增暖的传统东部型 El Niño, 海温异常中心位于中西太平洋的中部型 El Niño 频繁发生^[1-3]。2015/16 年发生了 21 世纪第一个极端 El Niño 事件, 造成世界许多地区出现强烈的灾害性天气。不同于 1982/83 和 1997/98 年均均为东部型的极端 El Niño 事件, 此次事件成熟时赤道中西太平洋 Niño4 区的海表面温度异常(SSTA)创历史新高(达 1.7°C), 对流中心较 1982/83 和 1997/98 时西移了 20 个经度, 赤道东太平洋 SSTA 扩展到日界线以西, 同时显示了中部型和东部型 El Niño 的共同特征^[4-6]。鉴于其最大异常中心在赤道中太平洋, Palmeiro 等^[7]将其归为中部型 El Niño 事件。此次极端 El Niño 的复杂性为 ENSO 理论研究和预测提出了新的挑战, 甚至大部分模式未能成功预报 2010—2014 以及 2017/18 年的 ENSO 事件^[8-10]。两类 ENSO 在时空分布、遥相关模态及演变上都有明显区别, 对全球气候的影响亦有很大差异^[11-12]。ENSO 对我国气候的影响也取决于其爆发时间、发展阶段、类型等^[13-15]。比如, 在 El Niño 发展期的夏季, 华北偏旱; 而在其

衰减期, 长江流域往往发生洪涝^[16-18]。华南地区在东部型 El Niño 衰减期的春季降雨增多, 而在中部型 El Niño 衰减期的春季则偏少^[11]。因此, 研究 ENSO 对深刻理解海气相互作用过程和机制, 提高我国乃至全球气候预测能力具有重要的科学意义和实用价值。

1 ENSO 理论

关于 ENSO 传统的较成熟且广泛流行的理论都强调次表层海洋对大气驱动的滞后响应过程。比如, 源于赤道波动的延迟振子理论^[19]、西太平洋振子理论^[20]、基于赤道和赤道外水体交换的充放电理论(Recharge-Discharge, RD 理论)^[21-22]。“充放电”机制主要包括两种动力学过程^[23]: 一是常发生于赤道东太平洋的温跃层反馈机制——温跃层温度异常通过垂向平流反馈到海表面温度(SST)^[22, 24]; 二是常发生于赤道中太平洋的水平温度平流反馈机制^[25]。这两种动力过程通过温跃层深度和海洋环流的地转平

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(41976027, 41476017)

[Foundation: Natural Science Foundation of China, No. 41976027, No. 41476017]

作者简介: 冯俊乔(1981-), 女, 河北无极人, 博士, 主要从事海气相互作用研究, E-mail: fengjunqiao@qdio.ac.cn

衡建立动力学联系,促进 ENSO 发展和演变^[26-27]。

2000 年后中部型 El Niño 发生频繁,对传统理论提出了挑战。有研究认为,全球变暖影响下,赤道东风减弱,温跃层变平,温跃层反馈从赤道东太平洋移至中太平洋,引起中部型 El Niño 发生^[1]。与此相反,鉴于 1998/99 年以后,赤道信风增强,东/西太平洋明显变冷/暖,有学者将其归因于东风和纬向 SST 梯度增强的结果^[28-29]。许多学者认为温跃层反馈是推进东部型 El Niño 发展的重要机制;中部型 El Niño 由水平温度平流反馈驱动^[30-31]。Ramesh 等^[32]的研究结果表明两类 El Niño 都起源于西太平洋次表层,早在其发生前一年的夏秋季节,温跃层海温就开始出现暖异常并向东传播;当暖信号到达中太平洋后,也可以通过温跃层反馈机制影响 SSTA,促进中部型 El Niño 发展^[33]。Ashok 等^[1]认为东传的赤道 Kelvin 波和西传的赤道 Rossby 波共同引起的中太平洋温跃层变化是中部型 El Niño 产生的物理机制。Xu 等^[33]指出虽然两类 El Niño 期间,赤道次表层海温异常均显示向东传播的特征,但中部型 El Niño 的初始建立和发展是海气相互作用的结果;温跃层反馈在后期发展中起重要作用。Dewitte 等^[34]基于模式数据指出中部型 El Niño 充电期间中太平洋水平温度平流反馈的贡献大于东太平洋的温跃层反馈,放电期间由垂向温度平流减弱 SSTA。Guan 等^[35]的最新研究表明在 ENSO 期间温跃层反馈和水平温度平流反馈在赤道中、东太平洋均起重要作用,二者在不同时期的不同特征是导致 El Niño 和 La Niña 在强度、持续时间上呈现不对称性的主要物理机制。Zhang 等^[36]提出了中太平洋北赤道逆流区次表层海温通过夹卷引起 SST 暖异常,进而在海气耦合作用下导致 El Niño 发展的新机制;他们认为赤道中太平洋次表层海温暖异常的持续存在对 2015/2016 年 El Niño 事件的产生起至关重要的作用^[37]。最近,Abellán 等^[38]发现经向温度平流和垂向温度平流对 2015/2016 年 El Niño 事件的发展均具有很大贡献。

2 副热带南北太平洋经向模和 ENSO

越来越多的学者强调赤道外过程对 ENSO 的贡献。Vimont 等^[39]最先提出季节性足迹机制,认为北太平洋涛动作为北半球冬季大气变率的第二模态,其南半支通过调节东北信风的强度,从而改变潜热

通量,在副热带北太平洋留下海表面温度(SST)异常足迹,同时与信风相互作用,在风-蒸发-海表面温度反馈(WES)^[40]作用下向西南传播,在赤道太平洋引起类 ENSO 变率。Chiang 等^[41]提出 SST 经向梯度和热带辐合带(ITCZ)的变化存在一定联系,并对副热带北太平洋经向模(NPMM,图 1a)的产生有一定影响。Chang 等^[42]研究表明,大多数 El Niño 事件之前都有明显的 NPMM 事件,是北太平洋大气变率影响 ENSO 的重要通道。Larson 等^[43]肯定了 NPMM 作为 ENSO 预报因子的有效性,但也发现其预报技巧很低。

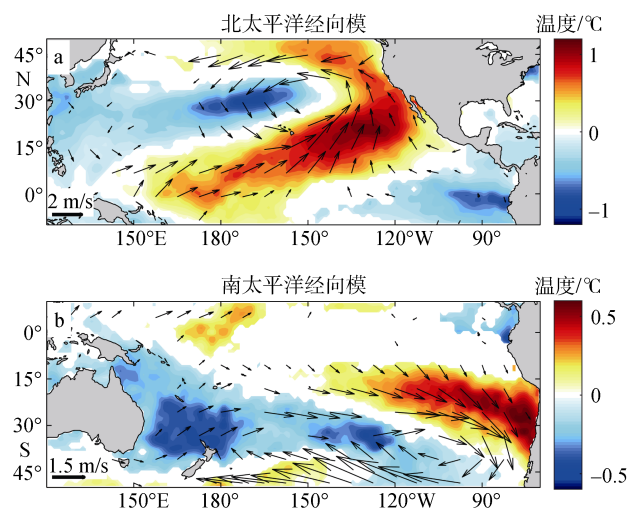


图 1 (a) 副热带北太平洋 SSTA 和 10 m 风场在二者 SVD 分解系数上的回归场; (b) 副热带南太平洋 SSTA 和 10 m 风场在二者 SVD 分解系数上的回归场

Fig. 1 Regression maps of the SVD leading mode SST-normalized expansion coefficients for the SST and 10-m wind vectors in the northern Pacific (a) and southern Pacific (b). The SVD analysis was conducted between the SSTA and both components of the 10-m wind in the extratropical northern and southern Pacific, respectively, in (a) and (b)

注: 填色和矢量箭头分别为超过 95%置信度检验的 SSTA 和 10 m 风场

Yu 等^[44]认为中部型 El Niño 的初始暖异常海温是由副热带北太平洋驱动。有研究认为 2015/2016 年极端中部型(或混合型)El Niño 很大程度上由副热带驱动^[45],且与东北太平洋暖斑有关^[46];其结束后 2016 年未出现 La Niña 也是源于副热带太平洋 SSTA 的作用^[47]。在 2014 年初,许多预测会发生强度堪比 1997/1998 年 El Niño 的暖事件,然而,到夏季暖异常增长停滞。有研究

认为这可能与副热带南太平洋经向模(SPM, 图 1b)有关^[48]。Zheng 等^[49]发现 SPM 东极子区的东南太平洋异常海温信号向赤道传播过程中, WES 反馈不是必须的, 信风的变化也可引起赤道太平洋次表层变化, 从而引起 ENSO 事件。有研究表明, 南北半球的经向模态与不同类型的 ENSO 之间有重要的联系, SPM 有利于东部型 El Niño, NPM 更有利于中部型 El Niño 的发生^[50]。Min 等^[48]也指出副热带南、北太平洋经向模分别影响赤道东、中太平洋 SST 异常。有学者提出南太平洋经向模的强度和位相可有效预测 El Niño 发展及其类型^[51]。南、北太平洋副热带经向模通过海气热力过程, 比如, WES 机制、云-SST 负反馈机制等, 影响赤道太平洋 SSTA, 从而影响两类 El Niño^[47-48]。

3 太平洋副热带-热带经向翻转环流与 ENSO

副热带太平洋除了通过海气“大气桥”过程和热带建立联系外, 通过副热带-热带经向环流圈的内部输运(STC)影响赤道也是一个非常重要的动力过程^[52]。STC 主要由 10°N/S—20°N/S 之间的副热带风应力驱动^[52], 通过经向热量输送和赤道上流显著影响热带太平洋年际-年代际变化^[53-54]。赤道 SST 和 STC 在年际和年代际尺度存在显著负相关关系, ENSO 与 STC 的年际变化高度相关^[55]。甚至有学者认为热带太平洋 SST 的年代际变化有可能通过 ENSO 对大气的响应而受控于 STC^[56]。

太平洋副热带-热带经向环流圈(STCs)提供了联系副热带和热带的海洋通道。STCs 包括: 海表面 50 m 以浅极向的 Ekman 流、沿等密度面流向赤道的西边界流(北半球的棉兰老流和南半球的新几内亚沿岸流)和核心位于 250 m 以浅的内部经向翻转环流(STC), 以及赤道上流^[57-58]。由海表面风场驱动的 STCs 在调整热带-副热带之间的海洋热量和质量分布中起着至关重要的作用^[59-60]。2000 年后, 中部型 El Niño 频繁发生时期, 次表层海洋动力过程与 ENSO 的关系发生了显著变化, 是 ENSO 预报技巧降低的主要原因^[61-62]。作为重要的次表层海洋动力过程之一的 STC 是驱动赤道水体充放的直接变量, 在 ENSO 演变中扮演重要角色。

源于赤道水体辐合/辐散的充放电(RD)理论亦将

STC 和 ENSO 紧密联系在一起。Chen 等^[63]定性描述了 RD 理论框架中, 赤道 SST、内部 STC 和 WWV 之间显著的相关关系以及与之相关的 ENSO 演变过程。Ren 等^[64]认为 RD 理论在中部型 ENSO 中依然成立。Singh 等^[65]的研究结果显示该理论仅适用于东部型 ENSO; 在中部型 ENSO 期间, 西太平洋的极向输运(放电)同东太平洋的向赤道输运(充电)相抵消, 赤道太平洋暖水体积变化(简称 WWV)主要由水平输送决定。Feng 等^[66]基于海洋再分析资料发现赤道太平洋上层海洋热含量在东部型 El Niño 期间完成一次充放电过程约需 42 个月, 而中部型 El Niño 期间长达 55 个月。最近, Lu 等^[67]通过分析观测资料发现赤道西太平洋边界流区纬向输送对 WWV 起重要作用, 可超前 STC 辐合 4~5 个月。2000 年前, 表征 STC 辐合/辐散的 WWV 与 SST 高度相关, 前者超前后者 6~9 个月, 是 ENSO 预测的有效因子; 2000 年后, 与 ENSO 相关的 SST 异常振幅减弱、周期变短, WWV 仅超前 SST 2~3 个月, 并且相关系数大大降低^[68-69]。Lu 等^[70]认为赤道外风应力变化及其驱动的赤道热含量变化是引起 ENSO 周期变化的重要原因之一。同时, 20 世纪 60—90 年代太平洋 STCs 减弱期间, 东部型 El Niño 比较活跃; 但 2000 年以后, STCs 增强期恰好对应着中部型 El Niño 活跃^[71-72]。因此, STC 的变化可能与 El Niño 类型的变化有着千丝万缕的联系。

已有学者通过数值模拟数据对 STC 在两类 El Niño 中的变化规律进行了初步探索。Hasegawa 等^[73]发现 1995—2003 年期间的 12 次 El Niño 事件中, 仅有 7 次事件在其成熟后存在赤道上层热含量“放电”, 其中南太平洋 STC 输运起重要作用, 并且这 7 次事件大部分是东部型 El Niño 事件; 其余 5 次多数为中部型 El Niño 事件。也有研究认为与 ENSO 相关的 STC 输送在北半球大于南半球, 北半球 WWV 交换在充放电理论中更重要, 南半球 STC 输运与西边界流相互抵消^[74-75]。Feng 等^[76]发现无论是沿 9°N 还是 9°S 的 STC 与 ENSO 的关系在不同类型期间均具有显著差异, 并提出 STC 通过西传 Rossby 波影响西太平洋温跃层深度是其影响 ENSO 的重要动力过程之一。

4 小结和展望

综上所述, 副热带-热带的物质能量交换对 ENSO 循环具有重要作用, 关于副热带变量对两类 El Niño

影响的研究已引起人们的广泛关注。以往学者对联系副热带-热带的“大气桥”进行了大量研究,特别是SPMM和NPMM。也有学者关注联系二者的“海洋通道”,即副热带-热带经向圈的内部分支经向翻转环流。目前仍然存在一些争议和悬而未决的问题,比如,NPMM和SPMM和热带太平洋的关系尚不明确,二者对两类El Niño发展演变的相对贡献和物理机制尚有争议;由于海洋观测资料的匮乏及其时空分辨率的限制,STC变异规律在两类El Niño期间的差异及其对两类El Niño发展的作用和机理还不完全清楚,是亟需解决的前沿科学问题。温跃层反馈、经向/纬向温度平流反馈是El Niño演变中至关重要的海洋动力过程,各反馈机制的相对强度、时空分布特征决定了El Niño的发展和类型。副热带太平洋如何影响这些反馈机制最终影响El Niño将是问题的关键。当今世界,海洋大气观测网日臻完善,特别是在海洋,Argo资料、TAO/TRITON浮标资料以及融合观测数据的多源海洋再分析数据的丰富为我们从观测数据深入了解SPMM、NPMM以及STC在两类El Niño中的差异及其如何影响两类El Niño提供了机遇。

参考文献:

- [1] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C11007.
- [2] 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.
- [3] Lee T, Mcphaden M J. Increasing intensity of El Niño in the central-Equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L14603.
- [4] L'heureux M L, Takahashi K, Watkins A B, et al. Observing and predicting the 2015/16 El Niño[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(7): 1363-1382.
- [5] Santoso A, Mcphaden M J, Cai W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño[J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(4): 1079-1129.
- [6] Xue Y, Kumar A. Evolution of the 2015/16 El Niño and historical perspective since 1979[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(9): 1572-1588.
- [7] Palmeiro F M, Iza M, Barriopedro D, et al. The complex behavior of El Niño winter 2015-2016[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(6): 2902-2910.
- [8] Huang B, Shin C S, Shukla J, et al. Reforecasting the ENSO events in the past 57 years (1958–2014)[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(19): 7669-7693.
- [9] Zhang R H, Zheng F, Zhu J, et al. A successful real-time forecast of the 2010-11 La Niña event[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1108.
- [10] Hu Z Z, Kumar A, Zhu J, et al. On the challenge for ENSO cycle prediction: An example from NCEP Climate Forecast System[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(1): 183-194.
- [11] 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[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(14): 2091-2101.
- [12] Kumar A, Hu Z Z. Interannual and interdecadal variability of ocean temperature along the equatorial Pacific in conjunction with ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(5-6): 1243-1258.
- [13] 张人禾. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 567-574.
Zhang Renhe. The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase[J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(4): 567-574.
- [14] 刘永强, 丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J]. *大气科学*, 1995, 19(2): 200-208.
Liu Yongqiang, Ding Yihui. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 19(2): 200-208.
- [15] Feng J, Li J. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116: D13102.
- [16] Huang R H, Wu Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1989, 6(1): 21-32.
- [17] Zhang R H. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China[J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 1999, 16(2): 229-241.
- [18] Feng S, Hu Q. Variations in the teleconnection of ENSO and summer rainfall in northern China: A role of the Indian summer monsoon[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(24): 4871-4881.
- [19] Suarez M J, Schopf P S. A delayed action oscillator for ENSO[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(21): 3283-3287.
- [20] Weisberg R H, Wang C. A Western Pacific Oscillator Paradigm for the El Niño-Southern Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(7): 779-782.
- [21] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54: 811-829.

- [22] Jin F F. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54: 830-847.
- [23] Jin F F, An S I. Thermocline and zonal advective feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(19): 2989-2992.
- [24] Bjerknes J A. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(3): 163-172.
- [25] Picaut J. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO[J]. *Science*, 1997, 277(5326): 663-666.
- [26] An S I, Jin F F. Collective role of thermocline and zonal advective feedbacks in the ENSO Mode[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(16): 3421-3432.
- [27] Bejarano L, Jin F F. Coexistence of equatorial coupled modes of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(12): 3051-3067.
- [28] McPhaden M J, Lee T, Mcclurg D. El Niño and its relationship to changing background conditions in the tropical Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L15709.
- [29] Chung P H, Li T. Interdecadal relationship between the mean state and El Niño types[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(2): 361-379.
- [30] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 615-632.
- [31] Yu J Y, Kim S T. Relationships between extratropical sea level pressure variations and the central Pacific and eastern Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(3): 708-720.
- [32] Ramesh N, Murtugudde R. All flavours of El Niño have similar early subsurface origins[J]. *Nature Climate change*, 2012, 3(1): 42-46.
- [33] Xu K, Huang R X, Wang W, et al. Thermocline fluctuations in the equatorial Pacific related to the two types of El Niño events[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(17): 6611-6627.
- [34] Dewitte B, Choi J, An S I, et al. Vertical structure variability and equatorial waves during central Pacific and eastern Pacific El Niños in a coupled general circulation model[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(11-12): 2275-2289.
- [35] Guan C, McPhaden M J, Wang F, et al. Quantifying the role of oceanic feedbacks on ENSO asymmetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(4): 2140-2148.
- [36] Zhang R H, Gao C. Role of subsurface entrainment temperature (Te) in the onset of El Niño events, as represented in an intermediate coupled model[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(5-6): 1417-1435.
- [37] Zhang R, Gao C. Processes involved in the second-year warming of the 2015 El Niño event as derived from an intermediate ocean model[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(9): 1601-1613.
- [38] Abellán E, McGregor S, England M H, et al. Distinctive role of ocean advection anomalies in the development of the extreme 2015-2016 El Niño[J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51(5-6): 2191-2208.
- [39] 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.
- [40] Liu Z, Xie S. Equatorward propagation of coupled air-sea disturbances with application to the annual cycle of the eastern tropical Pacific[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(24): 3807-3822.
- [41] 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.
- [42] Chang P, Zhang L, Saravanan R, et al. Pacific meridional mode and El Niño-Southern Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L16608.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] Paek H, Yu J Y, Qian C. Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Niños different?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 1848-1856.
- [46] Tseng Y H, Ding R, Huang X M. The warm Blob in the northeast Pacific—the bridge leading to the 2015/16 El Niño[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): 054019.
- [47] Su J, Zhang R, Rong X, et al. Sea surface temperature in the subtropical Pacific boosted the 2015 El Niño and hindered the 2016 La Niña[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(2): 877-893.
- [48] Min Q, Su J, Zhang R. Impact of the south and north Pacific meridional modes on the El Niño–Southern Oscillation: Observational analysis and comparison[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(5): 1705-1720.
- [49] Zheng J, Wang F, Alexander M A, et al. Impact of south Pacific subtropical dipole mode on the equatorial Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2017, 31: 2197-2216.
- [50] 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.
- [51] You Y, Furtado J C. The south Pacific meridional mode and its role in tropical Pacific climate variability[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(24): 10141-10163.
- [52] Graffino G, Farneti R, Kucharski F, et al. The effect of wind stress anomalies and location in driving Pacific subtropical cells and tropical climate[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(5): 1641-1660.
- [53] Nonaka M, Xie S P, McCreary J P. Decadal variations in the subtropical cells and equatorial Pacific SST[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(7): 1116.
- [54] Lee T, Fukumori I. Interannual-to-decadal variations of tropical-subtropical exchange in the Pacific Ocean: Boundary versus interior pycnocline transport[J]. *Climate*, 2003, 16: 4022-4042.
- [55] Capotondi A, Alexander M A, Deser C, et al. Anatomy and decadal evolution of the Pacific subtropical-tropical cells (STCs)[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(18): 3739-3758.
- [56] Farneti R, Molteni F, Kucharski F. Pacific interdecadal variability driven by tropical-extratropical interactions[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42(11-12): 3337-3355.
- [57] McCreary J P, Lu P. Interaction between the subtropical and equatorial ocean circulations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24: 466-497.
- [58] Rothstein L M, Zhang R H, Busalacchi A J, et al. A numerical simulation of the mean water pathways in the subtropical and tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(2): 322-343.
- [59] Lu P, McCreary J P, Klinger B A. Meridional circulation cells and the source waters of the Pacific Equatorial Undercurrent[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(1): 62-84.
- [60] Klinger B A, Marotzke J. Meridional heat transport by the subtropical cell[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(4): 696-705.
- [61] Hu Z Z, Kumar A, Ren H L, et al. Weakened interannual variability in the tropical Pacific Ocean since 2000[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(8): 2601-2613.
- [62] Hu Z Z, Kumar A, Huang B, et al. Interdecadal variations of ENSO around 1999/2000[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(1): 73-81.
- [63] Chen H C, Sui C H, Tseng Y H, et al. An analysis of the linkage of Pacific subtropical cells with the recharge-discharge processes in ENSO evolution[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(9): 3786-3805.
- [64] Ren H L, Jin F F. Recharge oscillator mechanisms in two types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6506-6523.
- [65] Singh A, Delcroix T. Eastern and Central Pacific ENSO and their relationships to the recharge/discharge oscillator paradigm[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2013, 82: 32-43.
- [66] Feng J Q, Jin F F, Hu D X, et al. Oceanic processes of upper ocean heat content associated with two types of ENSO[J]. *Journal of Oceanography*, 2018, 74(2): 219-238.
- [67] Lu Q, Ruan Z, Wang D P, et al. Zonal Transport from the western boundary and its role in warm water volume changes during ENSO[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2017, 47(1): 211-225.
- [68] Horii T, Ueki I, Hanawa K. Breakdown of ENSO predictors in the 2000s: Decadal changes of recharge/discharge-SST phase relation and atmospheric intraseasonal forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(10): L10707.
- [69] McPhaden M J. A 21st century shift in the relationship between ENSO SST and warm water volume anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(9): L09706.
- [70] Lu B, Jin F F, Ren H L. A coupled dynamic index for ENSO periodicity[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(6): 2361-2376.
- [71] McPhaden M J, Zhang D. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean[J]. *Nature*, 2002, 415(6872): 603-608.
- [72] McPhaden M J. Pacific Ocean circulation rebounds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(18): L18301.
- [73] Hasegawa T, Horii T, Hanawa K. Two different features of discharge of equatorial upper ocean heat content related to El Niño events[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(2): L02609.
- [74] Ishida A, Kashino Y, Hosoda S, et al. North-south asymmetry of warm water volume transport related with El Niño variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18): L18612.
- [75] Kug J S. Symmetric and antisymmetric mass exchanges between the equatorial and off-equatorial Pacific associated with ENSO[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C8): 3284.
- [76] Feng J Q, Hu D X, Jin F F, et al. The different relationship of Pacific interior subtropical cells and two types of ENSO[J]. *Journal of Oceanography*, 2018, 74(5): 523-539.

Influence of subtropical Pacific variability on ENSO: Review and advance

FENG Jun-qiao^{1, 2, 4, 5}, LU Yun-long^{1, 2, 3, 4}, GUAN Cong^{1, 2, 4, 5}, YUAN Xin^{1, 2, 3, 4},
HUI Yu-chao^{1, 2, 3, 4}, WU Jie^{1, 2, 3, 4}

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Marine Dynamics Process and Climate Functional Laboratory, Qingdao 266237, China)

Received: Dec. 13, 2019

Key words: subtropical–tropical Pacific meridional overturning circulation; subtropical South Pacific meridional mode (SPMM); subtropical North Pacific meridional mode (NPMM); ENSO

Abstract: The El Niño/Southern Oscillation (ENSO) is the strongest air–sea coupled interannual signal in the tropical Pacific. Its variation can induce severe global climate change and has a significant impact on the eastern Asian monsoon. Compared to the eastern Pacific El Niño, the occurrence frequency of the central Pacific El Niño has increased since 2000. The complexity of ENSO brings new challenges for its theoretical studies as well as its prediction. This paper reviews the related studies on two types of ENSO. We particularly pay attention to the influence of the subtropical variability on ENSO, through both the “atmospheric bridge” and “ocean tunnel.” The North Pacific meridional mode (NPMM) and South Pacific meridional mode (SPMM) are two important components linking the subtropical and tropical Pacific via air–sea interaction; the interior branch of the subtropical–tropical cells (STC) is the important “ocean tunnel.” The scientific issues are proposed, providing a reference for further study.

(本文编辑: 丛培秀)