副热带南北太平洋经向模与 ENSO 的关系*

鲁云龙[1, 2, 3, 4] 冯俊乔[1, 2, 4, 5①] 贾 凡[1, 2, 4, 5] 王庆业[1, 2, 4, 5]

(1. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所 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 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 青岛 266237)

摘要 本文利用 Hadley 中心的海表面温度、海洋再分析资料 ORAS4(Ocean Reanalysis System 4)的海表面高度、NCEP(National Centers for Environmental Prediction)的海气界面风场及热通量等数据, 分析了 1948—2018 年期间副热带南、北太平洋经向模(South Pacific meridional mode, SPMM、North Pacific meridional mode, NPMM)的基本特征及其与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño and Southern Oscillation, ENSO)的关系。结果显示, 两个副热带太平洋经向模对应的海表面温度异常都呈现南北反位相的偶极子结构, 并与 ENSO 关系密切: 当 Niño3.4 滞后北太平洋经向模 10 个月时, 二者达到最大正相关; Niño3.4 滞后南太平洋经向模 6 个月时, 二者达到最大正相关。换句话说, 在副热带太平洋发生北太平洋经向模正位相事件(北太平洋东南暖, 西北冷)1 a 后或者南太平洋经向模正位相事件(南太平洋东北暖, 西南冷)半年后, 热带太平洋可能会发生厄尔尼诺事件。据此, 利用二元线性回归方法建立了基于南太平洋经向模和北太平洋经向模预测 ENSO 的统计模型, 得到拟合的 Niño3.4 和观测的 Niño3.4 之间的相关系数达 0.57, 预测效果良好。

关键词 ENSO; 南太平洋经向模; 北太平洋经向模

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20200400115

厄尔尼诺-南方涛动(El Niño and Southern Oscillation, ENSO)是热带太平洋海气作用最强的年际信号, 主要的暖冷 ENSO 事件分别对应厄尔尼诺和拉尼娜。进入 21 世纪之前, 关于 ENSO 传统的较成熟理论主要着眼于热带西太平洋对 ENSO 发生发展的影响。一般而言, 厄尔尼诺事件存在两个先决条件: 赤道西太平洋的暖水堆积(Wyrtki, 1985)和西风异常(Luther *et al*, 1983; McPhaden *et al*, 1992)。当条件满足时, 异常的暖水可以很容易的向东传播, 造成中东太平洋的异常变暖。这一变暖会通过大气遥相关对全球的天气和气候造成显著的影响。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中部型厄尔尼诺事件频繁发生(Ashok *et al*, 2007), 这对 ENSO 传统理论提出了挑战。

除了热带太平洋海气变率对 ENSO 产生重要影响外, 在过去十几年中, 许多研究表明, 热带以外的太平洋海气变率可能为 ENSO 事件的激发提供一个重要的确定因素。Vimont 等(2001)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, 在副热带东北太平洋留下海表面温度异常(sea surface temperature anomalies, SSTA)足迹, 同时与信风相互作用, 在风-蒸发-海表面温度反馈(wind-evaporation-sea surface temperature (SST) feedback, WES, Xie *et al*, 1994)作用下向西南传播, 在赤道太平洋引起类 ENSO 变率。Chiang 等(2004)提出北太平洋 SST 经向梯度和热带辐合带(intertropical convergence zone, ITCZ)的变化存在一定联系, 在副热带北太平洋存在一个与大西洋经向模类似的模态,

* 国家自然科学基金, 41976027 号, 41876008 号。鲁云龙, 硕士研究生, E-mail: luyunlong18@mails.ucas.ac.cn

① 通信作者: 冯俊乔, 硕士生导师, E-mail: fengjunqiao@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-04-08, 收修改稿日期: 2020-05-13

称之为北太平洋经向模(North Pacific meridional mode, NPMM)。Chang 等(2007)研究表明, 大多数厄尔尼诺事件之前都有明显的北太平洋经向模正位相(东北太平洋暖异常)活动, 北太平洋经向模是北太平洋大气变率影响 ENSO 的重要通道。还有一些研究表明, 北太平洋经向模能通过海气过程对中部型厄尔尼诺事件产生重要影响(Yu *et al*, 2010; Su *et al*, 2014a)。Su 等(2014b)指出 2012 年秋季厄尔尼诺事件增暖的突然中断与北太平洋经向模的活动有关, 副热带东北太平洋受北太平洋经向模影响产生 SST 冷异常, 其所导致的东风异常和低层辐散抑制了赤道中太平洋的对流活动, 使得 2012—2013 年厄尔尼诺夭折。在年代际尺度上, Di Lorenzo 等(2015)的数值实验结果表明太平洋低频变率与 NPMM-ENSO 的联合作用相关。

Zhang 等(2014)利用海气热力学耦合模式研究了南太平洋经向模(South Pacific meridional mode, SPMM)暖异常海温信号在风-蒸发-海表面温度反馈下传到热带太平洋的过程, 并提出云-SST 反馈机制在其中的作用。2014 年初, 许多专家预测年底会出现强度堪比 1997—1998 年厄尔尼诺的 ENSO 暖事件, 然而, 到了夏季暖异常增长停滞; 有研究发现, 在该事件过程中, 与南太平洋经向模有关的副热带东南太平洋冷 SSTA 与赤道西太平洋的持续增暖相配合, 减弱了赤道太平洋纬向温度梯度, 增强了赤道中东太平洋的东南信风, 抑制了赤道中东太平洋的海气相互作用, 使得厄尔尼诺发展受到阻碍(Min *et al*, 2015)。Zheng 等(2018)发现南太平洋经向模东北极子区域的异常海温信号向赤道传播过程中, 风-蒸发-海表面温度反馈不是必须的, 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。

在 ENSO 预报方面, Larson 等(2014)肯定了北太平洋经向模作为 ENSO 预报因子的有效性, 但也发现其预报技巧很低, 并且 Larson 等(2018)提出南太平洋经向模的另一个角色, 不是作为 ENSO 的触发因子, 而是作为 ENSO 振幅和不确定性的热力学驱动因子。有研究表明, 南北半球的经向模态与不同类型 ENSO 之间具有重要联系, 南太平洋经向模有利于东部型厄尔尼诺, 北太平洋经向模更有利于中部型厄尔尼诺的发生(Zhang *et al*, 2014; Lin *et al*, 2015)。Min 等(2017)也指出南太平洋经向模主要有利于东太平洋 SSTA 发展, 北太平洋经向模主要有利于赤道中太平洋 SSTA 发展, 并据此可以参考这两个经向模态对两类 ENSO 进行预测。

综上可见, 近些年来, 已有学者对北太平洋经向模和南太平洋经向模同 ENSO 的关系进行了探索, 但同时对比分析两半球副热带太平洋经向模和热带的关系的研究比较少, 且尚无一致结论。本文将系统分析南北太平洋两个副热带经向模和 ENSO 的关系, 深入理解副热带和热带海气相互作用的过程和机制, 并试图建立利用副热带变量预测 ENSO 的统计模型。

1　数据与方法

本文所使用的月平均海表面温度资料来自英国气象局 Hadley 中心的海冰和海表面温度数据集(HadISST)。月平均海表面高度(sea surface height, SSH)资料来自海洋再分析系统 ORAS4(ocean reanalysis system 4), 因为海表面高度涨落是衡量温跃层深度扰动的一种很好的方法, 所以可以用它来代表温跃层的变化(Rebert *et al*, 1985)。使用的大气资料来自美国国家环境预报中心发布的再分析数据(NCEP-NCAR Reanalysis 1, Kalnay *et al*, 1996), 其中包括海表面月平均风场和热通量。本文分析的变量期间为 1948—2018 年。

首先对所有数据进行线性去趋势处理, 去倾后的各变量减去其季节循环得到变量异常值。对异常序列进行 3 个月的滑动平均。

使用的主要分析方法有最大协方差分析(maximum covariance analysis, MCA)、超前滞后相关分析、回归分析等。对相关分析的结果检验采用了 Student's *t*-test 方法。

2　结果分析

2.1　副热带南、北太平洋经向模

为了获得北太平洋经向模的时空分布, 对 10m 风异常和 SSTA 的协方差矩阵进行最大协方差分析, 由于热带地区更强的信号会掩盖副热带的特征, 所以在分析之前, 线性去除了冷舌指数(6°S—6°N, 180°—90°W 平均 SSTA, CTI, Deser *et al*, 1990), 从而将 ENSO 信号剔除。在北太平洋(0°—35°N, 175°E—95°W)对余下数据进行最大协方差分析, 第一模态的方差贡献为 72.5%, 相应的时间序列分别标记为 NPC(north principal components)-Wind 和 NPC-SST。为了探索 NPC-Wind 和 NPC-SST 的关系, 计算了两个系数的超前滞后相关(图 2a), 结果显示当风超前 SST 一个月时, 相关系数最大, 为 0.75, 这表明风驱动海洋。

如图 1a 所示, 分别将 10m 风、SSTA、潜热通量和海表面气压异常(sea level pressure anomalies, SLPA)

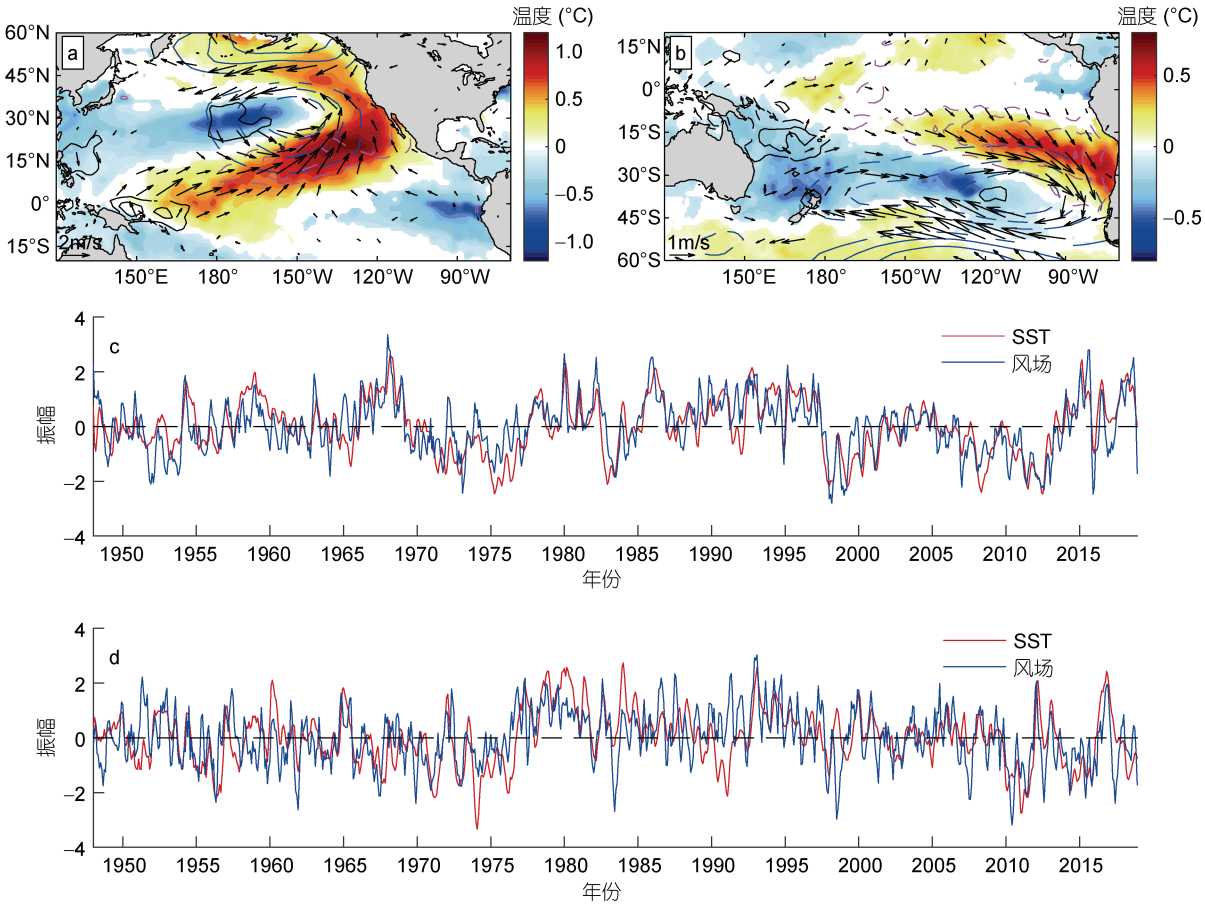


图 1 副热带北、南太平洋经向模态(a, b)及其时间序列(c, d)

Fig.1 North and south Pacific meridional modes and the time series

注: a: 北太平洋经向模; b: 南太平洋经向模; 填色阴影区为海表面温度异常超过 95%置信度检验(单位: °C); 矢量为 10m 风异常超过 95%置信度检验(单位: m/s); a、b 中蓝色虚(实)线表示负(正)的海表面气压异常(单位: mb); 洋红色虚线表示负的潜热通量异常(单位: W/m^2), 负(正)潜热通量表示海洋得(失)热; c: 北太平洋时间序列; d: 南太平洋时间序列

回归到标准化的 NPC-Wind 上, 得到北太平洋经向模的空间结构。北太平洋经向模态的物理解释与已经建立的大西洋经向模态类似。图 1a 显示北太平洋经向模的海温正异常中心位于(150°—125°W, 12°—25°N), 负异常中心位于(180°—160°W, 25°—32°N), 定义该结构为北太平洋经向模正位相。除 SSTA 呈现偶极子结构外, 海表面气压异常也表现为南北偶极子结构, 其南极(中心位于 160°—140°W, 25°—40°N)通过调节副热带高压系统, 使副热带东南太平洋出现异常西南风, 这就抑制了背景东北信风, 对应负潜热通量异常, 潜热释放减少, 有利于正 SSTA 发展。

在副热带南太平洋(12°—38°S, 180°—70°W), 对 10m 风异常和 SSTA 进行相同的最大协方差分析, 第一模态的方差贡献为 44.4%, 相应的时间序列标记为 SPC-Wind 和 SPC-SST。超前滞后相关分析显示(图 2d), 与北太平洋经向模相同, 当风超前 SST 一个月时相关系数达到最大 0.54。同样的, 图 1b 显示了 10 m 异常风场、SSTA、潜热通量异常和海表面气压异常相对于标准化的 SPC-Wind 的回归场。海温正异常中心位于(100°—70°W, 20°—35°S), 负异常中心位于(140°—120°W, 32°—45°S), 定义为南太平洋经向模的正位相结构。在中高纬度存在一个海表面气压异常的偶极子结构, 类似于北太平洋经向模的情形, 副热带高压系统的变化调节背景信风, 从而改变潜热通量, 影响海表面温度。

为了研究两个经向模的时间特征, 分别计算了 SST 和风指数的季节性变率。由图 2b、c 可知北太平洋经向模在北半球冬季(12 月至来年 3 月, DJFM)大气变率最强, SST 在冬春季(1—5 月, JFMAM)变率最强。而南太平洋经向模有所不同, 图 2e、f 显示, 南太平洋经向模在南半球冬季(5—8 月, MJJA)大气变率最强, 而 SST 最大变率发生在南半球秋夏(11 月至来年 3 月,

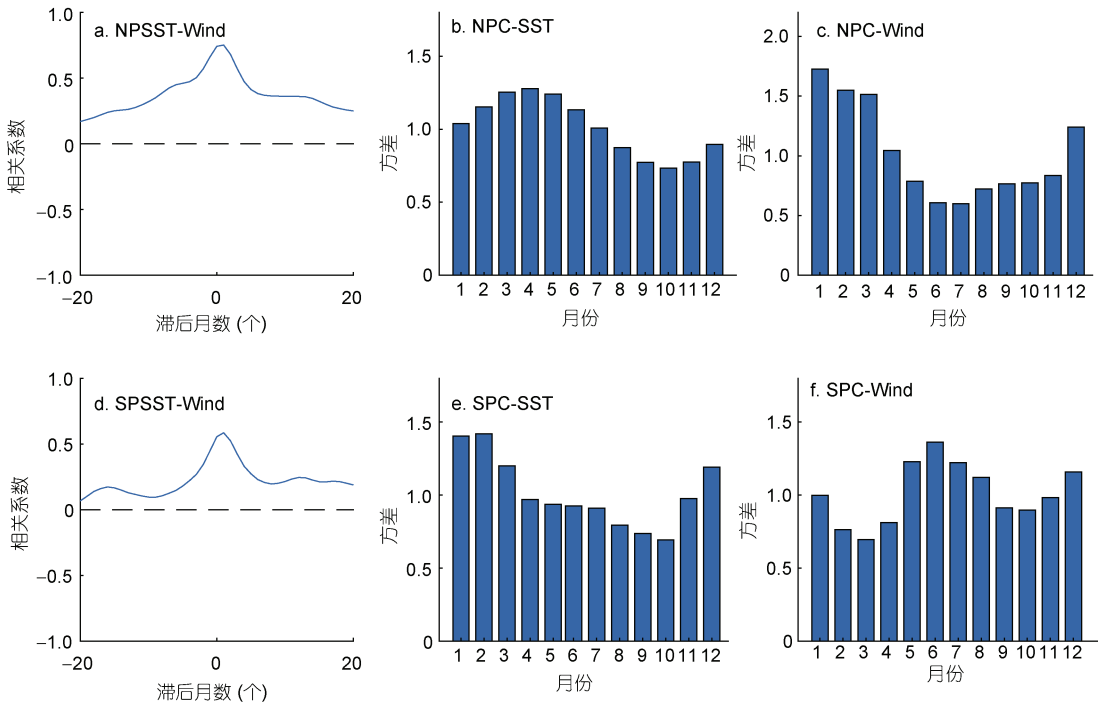


图 2　海表面温度和风指数的超前滞后相关以及风和海表面温度指数的季节性

Fig.2　The lead-lag correlations between PC-SST and PC-Wind, and the seasonality of the PC-SST and PC-Wind

注: N(S)PC-SST: 北(南)太平洋经向模的 SST 时间序列; N(S)PC-Wind: 北(南)太平洋经向模的 Wind 时间序列; a: NPC-SST 和 NPC-Wind 的超前滞后相关; b 和 c 分别为 NPC-SST 和 NPC-Wind 的季节方差; d: SPC-SST 和 SPC-Wind 的超前滞后相关; e 和 f 分别为 SPC-SST 和 SPC-Wind 的季节方差

NDJFM)。南太平洋经向模风和 SST 季节性的较大差异很可能是受副热带东南太平洋混合层深度(mixed layer depth, MLD)的季节性的影响。副热带东南太平洋混合层在南半球冬季较深夏季较浅(Ding *et al*, 2014), 浅的混合层可能会放大 SST 对风的响应, 相反, 更深的混合层会抑制 SST 对风的响应。

2.2　副热带南北太平洋经向模与 ENSO 的关系

为了探索北太平洋经向模、南太平洋经向模与 ENSO 的可能关系, 计算了 NPC-Wind、SPC-Wind 与 Niño3.4 指数的滞后相关, 由于 ENSO 的非线性可能会对 SSTA 产生影响, 所以以下的分析都是基于风指数(Chiang *et al*, 2004), 并且风指数包含内部大气变率的信息, 且与 ENSO 密切相关的海洋开尔文波(Kelvin)的产生有关(Thomas *et al*, 2016)。

图 3a 中可以看到, 当 Niño3.4 超前 NPC-Wind 时, 二者基本没有相关关系, 说明 ENSO 对北太平洋经向模事件发生的贡献不大; 但是, 当 Niño3.4 滞后 NPC-Wind 8—11 个月时, 二者达到 99%的置信度检验, 滞后 10 个月时, 相关系数最大, 为 0.45。这说明, 北太平洋经向模能够激发热带太平洋 ENSO 事件, 北太平洋经向模正位相事件成熟 10 个月后, EI Niño 事件可能会达到成熟位相。从图 3b 可以看到, 当 Niño3.4 超前 SPC-Wind 时, 二者为负相关, 但未达到 95%的置信度检验; 当 Niño3.4 滞后 SPC-Wind 时, 二者为显著正相关, 滞后 6 个月左右达到最大, 为 0.34, 超过 95%置信度检验。这意味着, 如果在南太平洋发生南太平洋经向模正位相事件, 6 个月后, 热带太平洋可能会发生 EI Niño 事件。NPC-Wind、SPC-Wind 和 ENSO 的关系表明, 副热带南、北太平洋经向模对 ENSO 的激发有着重要的影响, 两个经向模态可能是诱发 ENSO 的原因之一。下面我们将利用回归分析讨论副热带和热带联系的可能机理。

2.3　北太平洋经向模与 ENSO 联系的可能机制

图 4、5 展示了 SSTA、海表面风场、海气界面热通量(潜热通量和短波辐射通量, 由于感热和长波辐射通量相对贡献较小, 从而没有展示)、海表面高度异常 (sea surface height anomalies, SSHA) 相对于 NPC-Wind 2—4 月(FMA)平均指数的滞后回归场。

由图 4a 可以看出, 在 1—3 月(JFM)期间, 副热带北太平洋存在大尺度的气旋式环流, 北太平洋经向模暖极子区所在的副热带北太平洋的东南海区首先出现西南风异常, 削弱背景场的东北信风, 使得潜热释放

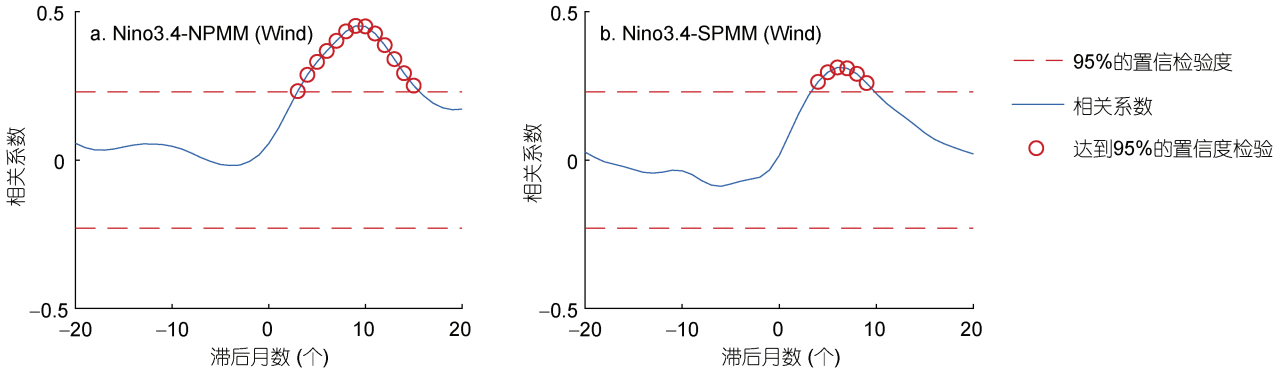


图 3 北(a)、南(b)太平洋经向模态时间序列与 Niño3.4 指数的滞后相关

Fig.3 The lead-lag correlation between NPC-Wind (a), SPC-Wind (b), and Niño3.4

注：横坐标代表 Niño3.4 滞后 NPC/SPC 的月数；实线表示 Niño3.4 与南北太平洋经向模 Wind 时间序列的相关系数

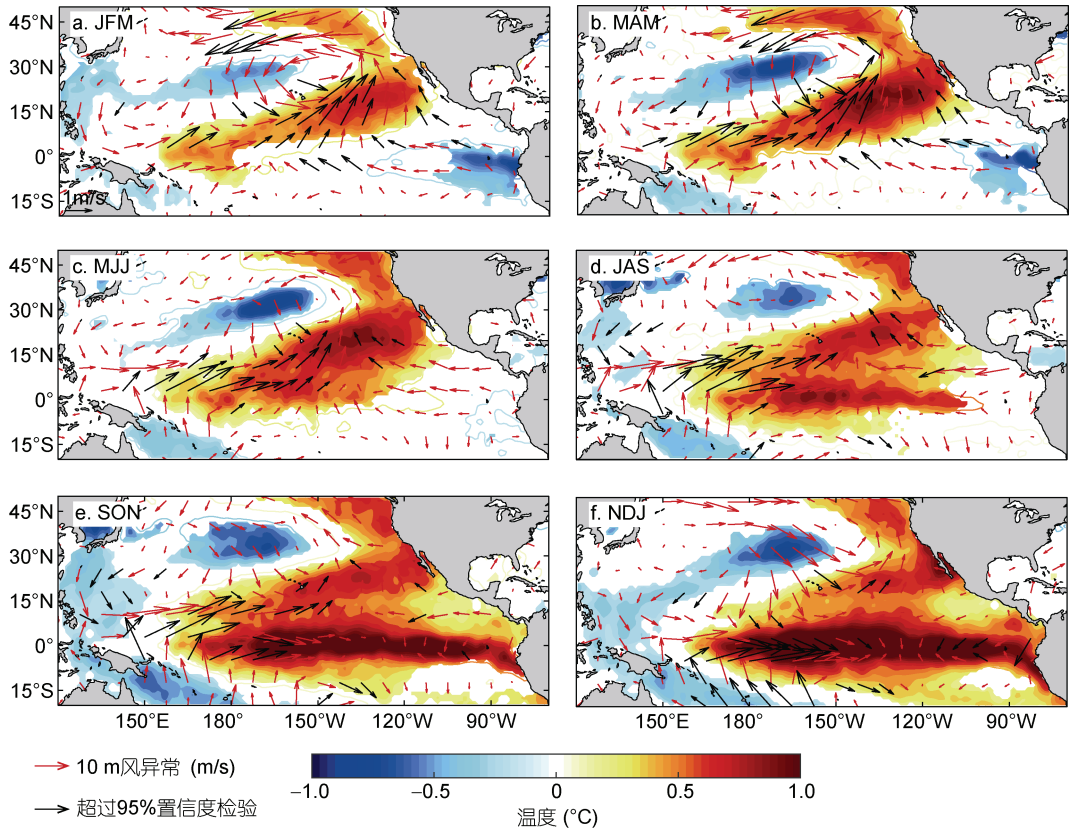


图 4 3 个月平均的 SSTA、10 m 异常风场相对于 NPC-Wind 2—4 月(FMA)指数的回归

Fig.4 The lag regressions of 3-month averaged SSTA and surface wind anomalies at 10 m on February-March-April (FMA)-averaged NPC-Wind

注：填色阴影区为海表面温度异常超过 95%置信度检验(单位:°C); JFM: 1—3 月; MAM: 3—5 月; MJJ: 5—7 月; JAS: 7—9 月; SON: 9—11 月; NDJ: 11—1 月; 女，NDI: 11-L 月; SSTA: 海表温度异常; NPC: 北太华洋经向模主成分; 图 6 同

减少，而冷极子区信风加强潜热释放增加(图 5a1)，可以看出，这时大气变率最强，对应的潜热通量的变化最大，这一过程一直持续到北半球春季，北太平洋经向模的海温异常达到最大。另外，在北太平洋经向模冷极子区的西北黑潮延伸体区，海表面高度出现显著负异常，表明次表层冷水可通过海水上升运动夹卷至混合层，促进 SSTA 冷异常发展(图 5a3)。

北太平洋经向模成熟后，SSTA 暖异常伴随着异

常西南风向西南扩展，这一过程称为风-蒸发-海表面温度反馈。在 5—7 月(MJJ)以及 7—9 月(JAS)期间，赤道中北太平洋西风异常加强；赤道西太平洋的新几内亚沿岸区域负海表面温度异常加强，对比各个通量项，可以发现这主要是由潜热通量变化引起的。随着时间发展，赤道中太平洋暖 SSTA 不断增强，并向东发展，在赤道太平洋出现 Matsuno-Gill 型大气响应(Matsuno, 1966; Gill, 1980)，西太平洋赤道两侧出现气旋式环流异常，呈现大气罗斯贝波(Rossby)调整，赤道西太平洋盛行异常西风，并激发东传的海洋暖开尔文波(图 5c3, d3)，有利于赤道中东太平洋地区温跃层深度增加和 SSTA 增暖。同时，赤道中太平洋地区短波辐射加强，有利于 SSTA 增长(图 5c2, d2)。

在 9—11 月(SON)和 11—1 月(NDJ)期间，赤道西太平洋西风异常不断向东推进，在赤道东太平洋，在 SST-温跃层反馈机制作用下，次表层过程影响 SSTA 变化；同时从海表面高度异常图中可以看到赤道海洋开尔文波持续东传，最终导致厄尔尼诺发展并达到成熟。在这一期间从短波辐射变化导致的热通量回归场可以看到，向下短波辐射增强，促进暖 SSTA 发展。

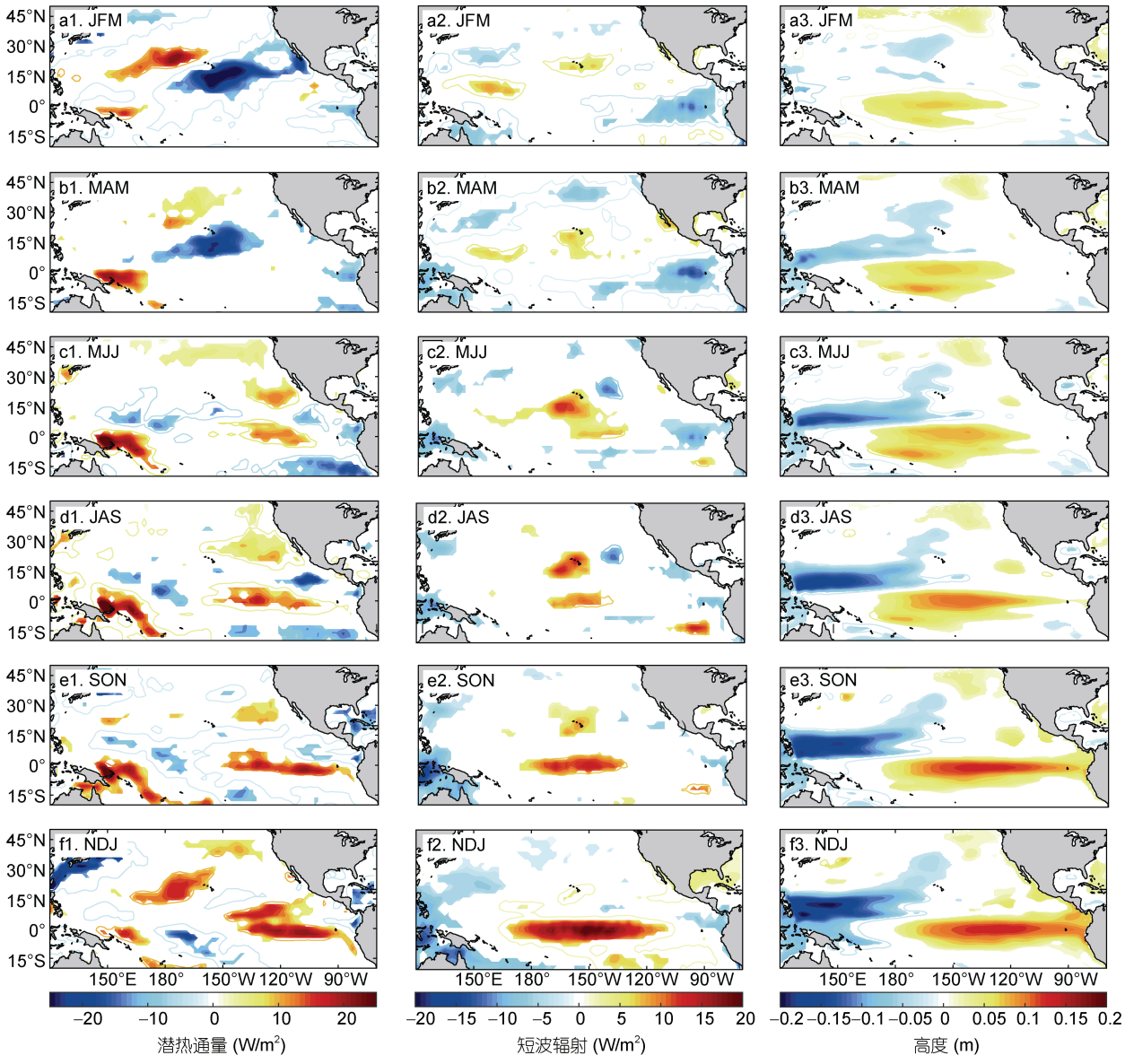


图 5　3 个月平均的潜热通量、短波辐射和海表面高度异常相对于 NPC-Wind 2–4 月(FMA)指数的回归

Fig.5　The lag regressions of 3-month averaged latent heat flux, short wave radiation heat flux, and sea surface height anomalies on February-March-April (FMA)-averaged NPC-Wind

注：左列：潜热通量(单位: W/m²)，海洋得热为负；中列：短波辐射(单位: W/m²)，海洋得热为正；右列：海表面高度(单位: m)；阴影区为回归值超过 95%置信度检验的区域；图 7 同

2.4 南太平洋经向模与 **ENSO** 联系的可能机制

类似于北太平洋经向模，图 6、7 展示了各个变量场相对于 SPC-Wind 2—4 月(FMA)平均指数的滞后回归场。

图 6 可以看出，在 1—3 月(JFM)期间，副热带东南太平洋有大尺度的气旋式环流异常，正 SSTA 上空存在异常西北风，削弱了背景场的东南信风，潜热释放减少。相较于暖极子，冷极子范围较小，因此暖极子可能在联系南太平洋经向模与 ENSO 中起更重要的作用；澳大利亚东南海域背景西风的加强使得潜热释放增加，产生了冷的 SSTA。这一过程一直持续到春季，同时东南太平洋气旋式环流异常加强，暖异常信号在风-蒸发-海表面温度反馈下向西北延伸。这一热力学耦合过程也发生在澳大利亚东岸，负 SSTA 向西北延伸。赤道西风异常不断增强。

5—7 月(MJJ)和 7—9 月(JAS)期间，从海表高度异常场的回归图中可以看到(图 7c3, d3)，沿着赤道的异常西风分量激发向东传播的开尔文波，促进赤道中东太平洋暖 SSTA 发展。同时，东南太平洋暖异常信号沿着南美洲西海岸继续向西北扩展，加强了中东赤道太平洋 SSTA 发展。在 9—11 月(SON)和 11—1 月(NDJ)期间，由于开尔文波的到来，变暖进一步加强，厄尔尼诺模态不断发展。从短波辐射通量的回归场可以发现，赤道中太平洋地区短波辐射加强，有利于厄尔尼诺模态的成熟(图 7e2, f2)。

2.5 回归模型

图 3 超前滞后相关分析结果表明，在副热带太平洋出现北太平洋经向模正位相事件或者南太平洋经向模正位相事件后，热带太平洋可能会发生厄尔尼诺事件。该结果为我们提前预测 ENSO 事件提供了一个新的途径。据此，我们利用月平均北太平洋经向模和南太平洋经向模的风场指数(二者关系不大，相关系数约为 0.2)，基于二元线性回归构建了如下预测模型：

$$Y(t)=aX_1(t-t_1)+bX_2(t-t_2), \qquad (1)$$

其中，$Y(t)$为预测的 t 时刻 Niño3.4，$X_1(t-t_1)$为 $t-t_1$ 时刻 NPC-Wind，$X_2(t-t_2)$为 $t-t_2$ 时刻 SPC-Wind。为了获得提前时间较长且较准确的预测效果，我们取不同的 t_1 和 t_2 进行组合，通过比较发现，当 t_1=10, t_2=6，即，当 NPC-Wind 和 SPC-Wind 分别提前 10 和 6 个月时，效果最好。利用最小二乘法计算了研究时段内的多元回

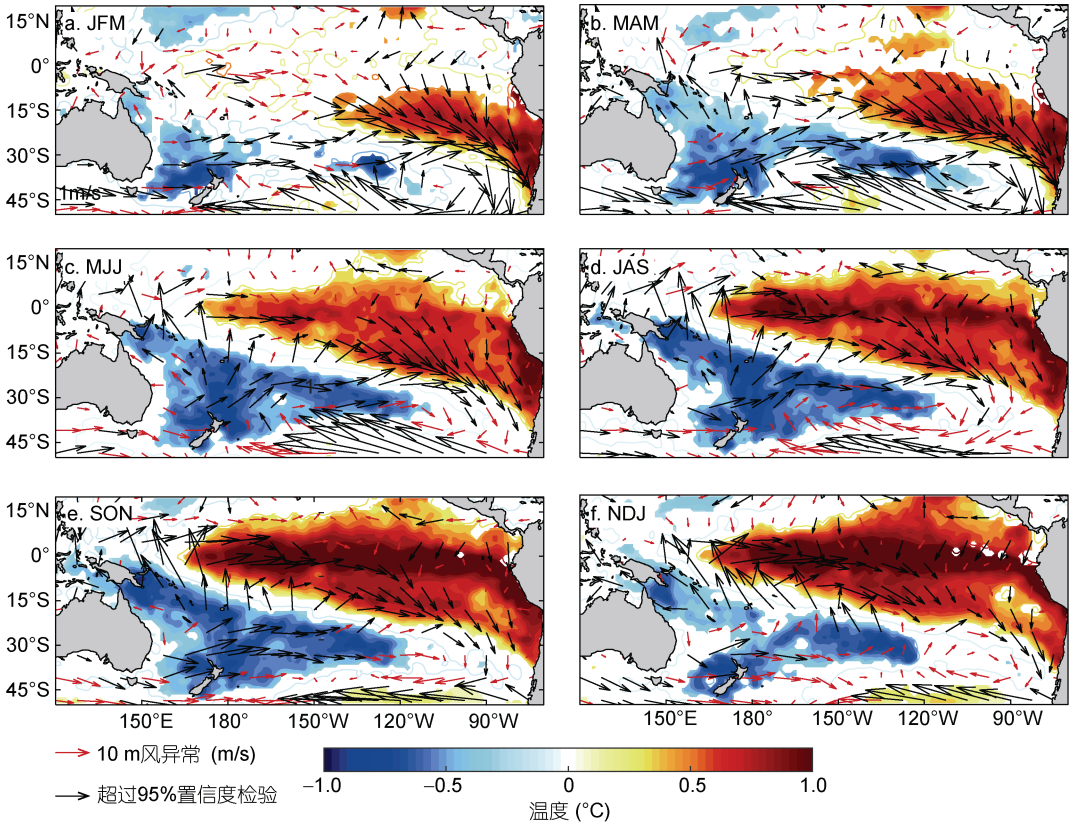


图 6 3 个月平均的 SSTA、10 m 异常风场相对于 SPC-Wind 2—4 月(FMA)指数的回归

Fig.6 The lag regressions of 3-month averaged SSTA and surface wind anomalies at 10 m on February-March-April (FMA)-averaged SPC-Wind

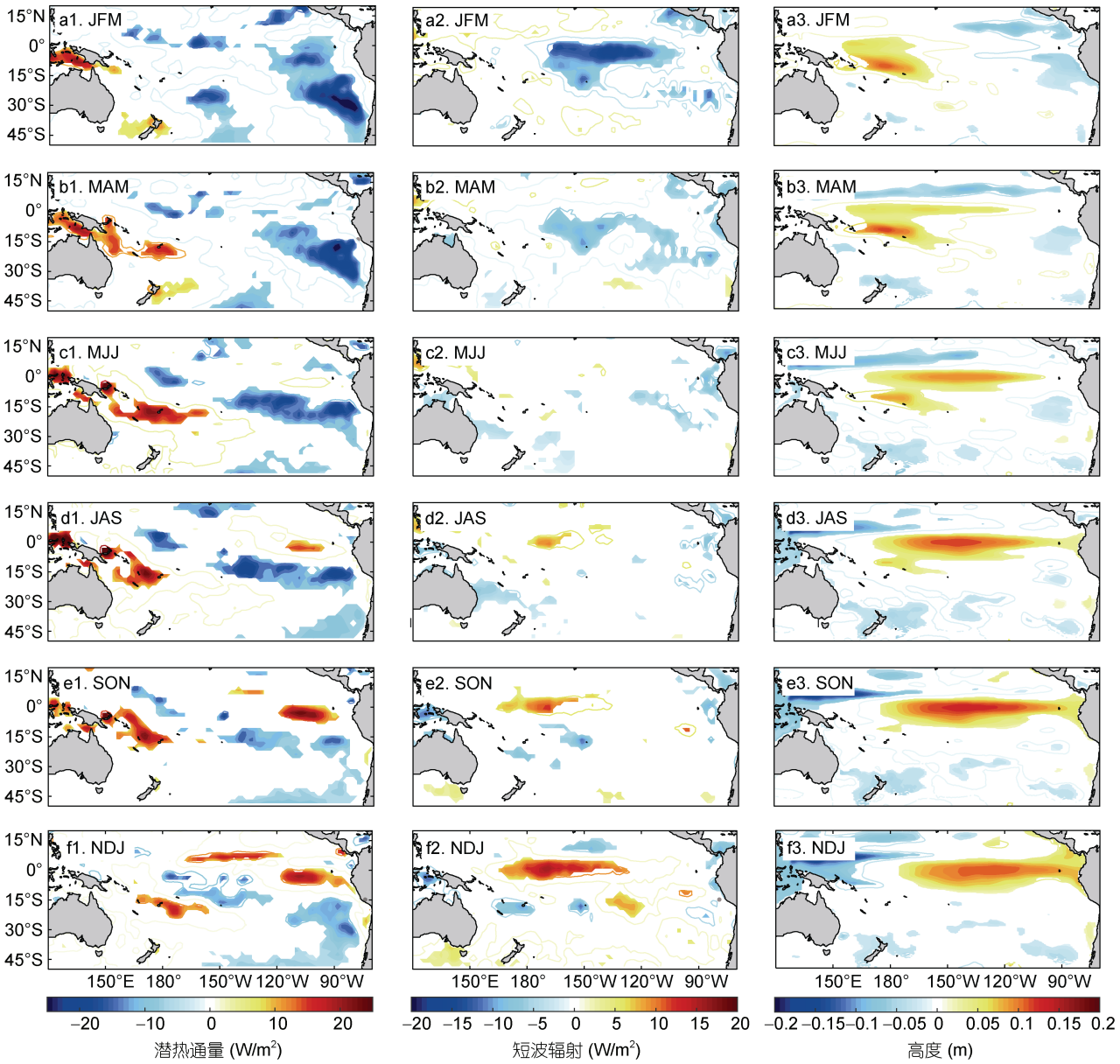


图 7　3 个月平均的潜热通量、短波辐射和海表面高度异常相对于 SPC-Wind 2–4 月(FMA)指数的回归

Fig.7　The lag regressions of 3-month averaged latent heat flux, short wave radiation heat flux, and sea surface height anomalies on February-March-April (FMA)-averaged SPC-Wind

归系数，获得拟合公式为:

$$Y(t)=0.4X_1(t-10)+0.25X_2(t-6). \quad (2)$$

1950—2018 年，根据该模型拟合的 Niño3.4 和观测的 Niño3.4 之间的相关系数达 0.57(图 8)，远超过 99%的置信度检验，并强于单独使用 NPC-Wind 或者 SPC-Wind 预测的情形。有学者也曾提出联合南北太平洋海气变率预测 ENSO 有望提升 ENSO 预报技巧。比如，You 等(2018)利用 CMIP5 模式和再分析资料基于 2—4 月平均的表征南太平洋经向模和北太平洋经向模的风场指数以及赤道暖水体积指数共同构建了预测整个太平洋海盆同年 11—1 月平均 SSTA 的统计模型；Ding 等(2014)基于由 SSTA 表征的南太平洋四极子结构和北太平洋偶极子结构在 1—3 月期间的平均指数，构建了预测同年 11—1 月平均的 Niño3.4 的经验模型。本文建立的二元回归模型基于受 ENSO 非线性影响较小的风场指数，且采用北太平洋经向模超前 10 个月和南太平洋经向模超前 6 个月的指数预测月平均 Niño3.4，考虑了南北两个模态与 ENSO 关系的区别；对月平均 Niño3.4 的预测，不仅能体现 ENSO 成熟期的状态，而且还能了解其时空演变过程。

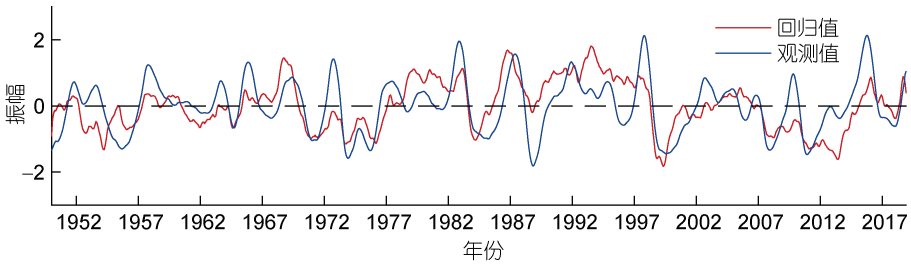


图 8 观测的 Niño3.4 指数与模型预测指数
Fig.8 Observed and model predicted Niño3.4 index

3 总结与讨论

本文利用观测和再分析资料，分析了副热带南、北太平洋经向模的基本特征及其与 ENSO 的关系。两个经向模态都与副热带高压系统的变化有着重要的联系；副高引起的信风强度的变化，可以通过调节海气界面潜热通量，从而影响海表面温度。相关分析结果表明，两个经向模态与 ENSO 均具有密切联系。当 Niño3.4 滞后北太平洋经向模 8—11 个月时，二者相关系数超过 99%置信度检验，滞后 10 个月时，相关最大；Niño3.4 滞后南太平洋经向模 5—10 个月时，二者显著正相关，滞后 6 个月时，相关最大。在副热带太平洋发生北太平洋经向模正位相事件(北太平洋东南暖，西北冷)大约 1 年后或者南太平洋经向模正位相事件(南太平洋东北暖，西南冷)大约半年后，热带太平洋可能会发生厄尔尼诺事件。据此，根据表征南太平洋经向模和北太平洋经向模的风场指数，建立了预测 ENSO 的回归模型，效果良好。

利用回归分析探讨了副热带南北太平洋经向模与 ENSO 联系的可能机制。结果发现，海气热力学过程在联系二者中起主要作用，同时海洋动力学过程也具有一定贡献。副热带北太平洋暖异常信号在风-蒸发-海表面温度反馈下向西南传播到赤道中太平洋，在 Matsuno-Gill 型响应下，海气耦合过程使得厄尔尼诺事件快速发展并走向成熟；南太平洋经向模事件发生后，东南太平洋暖异常信号沿着南美西海岸向赤道传播，另外，澳大利亚东岸冷异常向西北延伸，赤道太平洋异常西风不断增强，有助于 ENSO 的发展。

当前流行的 CMIP5 模式对热带太平洋背景条件比较敏感，对热带外信号的捕捉存在很大不确定性(You *et al*, 2018)。此外，在全球变暖的背景下，目前的气候预测模式亦有很多不确定性(Wang *et al*, 2019)。因此，为了提高对 ENSO 的预测，不仅要重视热带海洋动力和热力过程，更要重视热带外过程，特别是最近才开始受到广泛关注的南太平洋。

参 考 文 献

Ashok K, Behera S K, Rao S A *et al*, 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. Journal of Geophysical Research: Oceans, 112(C11): C11007

Chang P, Zhang L, Saravanan R *et al*, 2007. Pacific meridional mode and El Niño-Southern Oscillation. Geophysical Research Letters, 34(16): L16608

Chiang J C H, Vimont D J, 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability. Journal of Climate, 17(21): 4143—4158

Deser C, Wallace J M, 1990. Large-scale atmospheric circulation features of warm and cold episodes in the tropical Pacific. Journal of Climate, 3(11): 1254—1281

Di Lorenzo E, Liguori G, Schneider N *et al*, 2015. ENSO and meridional modes: A null hypothesis for Pacific climate variability. Geophysical Research Letters, 42(21): 9440—9448

Ding R Q, Li J P, Tseng Y H, 2014. The impact of South Pacific extratropical forcing on ENSO and comparisons with the North Pacific. Climate Dynamics, 44(7—8): 2017—2034

Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat induced tropical circulation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 106(449): 447—462

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R *et al*, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(3): 437—471

Larson S M, Kirtman B P, 2014. The Pacific meridional mode as an ENSO precursor and predictor in the North American multimodel ensemble. Journal of Climate, 27(18): 7018—7032

Larson S M, Pegion K V, Kirtman B P, 2018. The South Pacific meridional mode as a thermally driven source of ENSO amplitude modulation and uncertainty. Journal of Climate, 31(13): 5127—5145

Lin C Y, Yu J Y, Hsu H H, 2015. CMIP5 model simulations of the Pacific meridional mode and its connection to the two types of ENSO. International Journal of Climatology, 35(9): 2352—2358

Luther D S, Harrison D E, Knox R A, 1983. Zonal winds in the central equatorial Pacific and El Niño. Science, 222(4621): 327—330

Matsuno T, 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 44(1): 25—43

McPhaden M J, Bahr F, Du Penhoat Y *et al*, 1992. The response of the western equatorial Pacific Ocean to westerly wind bursts during November 1989 to January 1990. Journal of Geophysical Research: Oceans, 97(C9): 14289—14303

Min Q Y, Su J Z, Zhang R H *et al*, 2015. What hindered the El Niño pattern in 2014? Geophysical Research Letters, 42(16): 6762—6770

Min Q Y, Su J Z, Zhang R H, 2017. Impact of the South and North Pacific Meridional modes on the El Niño–Southern Oscillation: observational analysis and comparison. Journal of Climate, 30(5): 1705—1720

Rebert J P, Donguy J R, Eldin G *et al*, 1985. Relations between sea level, thermocline depth, heat content, and dynamic height in the tropical Pacific Ocean. Journal of Geophysical Research: Oceans, 90(C6): 11719—11725

Su J Z, Li T, Zhang R H, 2014a. The initiation and developing mechanisms of Central Pacific El Niños. Journal of Climate, 27(12): 4473—4485

Su J Z, Xiang B Q, Wang B *et al*, 2014b. Abrupt termination of the 2012 Pacific warming and its implication on ENSO prediction. Geophysical Research Letters, 41(24): 9058—9064

Thomas E E, Vimont D J, 2016. Modeling the mechanisms of linear and nonlinear ENSO responses to the Pacific Meridional Mode. Journal of Climate, 29(24): 8745—8761

Vimont D J, Battisti D S, Hirst A C, 2001. Footprinting: A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes. Geophysical Research Letters, 28(20): 3923—3926

Wang B, Luo X, Yang Y M *et al*, 2019. Historical change of El Niño properties shed light on future changes of extreme El Niño. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116(45): 22512—22517

Wyrtki K, 1985. Water displacements in the Pacific and the genesis of El Niño cycles. Journal of Geophysical Research: Oceans, 90(C4): 7129—7132

Xie S P, Philander S G H,1994. A Coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 46(4): 340—350

You Y J, Furtado J C, 2018. The South Pacific meridional mode and its role in tropical pacific climate variability. Journal of Climate, 31(24): 10141—10163

Yu J Y, Kao H Y, Lee T, 2010. Subtropics-related interannual sea surface temperature variability in the Central Equatorial Pacific. Journal of Climate, 23(11): 2869—2884

Zhang H H, Clement A, Di Nezio P, 2014. The South Pacific meridional mode: a mechanism for ENSO-like variability. Journal of Climate, 27(2): 769—783

Zheng J, Wang F M, Alexander M A *et al*, 2018. Impact of South Pacific subtropical dipole mode on the Equatorial Pacific. Journal of Climate, 31(6): 2197—2216

RELATIONSHIP BETWEEN THE SUBTROPICAL SOUTH/NORTH PACIFIC MERIDIONAL MODES AND ENSO

LU Yun-Long[1, 2, 3, 4], FENG Jun-Qiao[1, 2, 4, 5], JIA Fan[1, 2, 4, 5], WANG Qing-Ye[1, 2, 4, 5]

(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. *Laboratory for Ocean and Climate Dynamics*, *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology* (*Qingdao*), *Qingdao* 266237, *China*)

Abstract The relationship of the subtropical South/North Pacific Meridional Modes (SPMM, NPMM) with ENSO was investigated using sea surface temperature (SST) data from Hadley center, Sea surface height (SSH) from ORAS4(Ocean Reanalysis System 4), and wind and air-sea heat flux from NCEP-NCAR reanalysis 1 (1948—2018). Results show that the SSTA associated with the two meridional modes both show north-south dipole patterns and are closely related to ENSO. The significant maximum positive correlation appears when Niño3.4 lags NPMM for 10 months, there are significant maximum positive correlations when Niño3.4 lags for 6 months, with the peak correlation appearing at 6-month lag. In other words, about one year after a positive NPMM (North Pacific: warm in the southeast and cold in the northwest) appears in the north Pacific, or half a year after a positive SPMM (South Pacific: warm in the northeast and cold in the southwest) happens in the south Pacific, and there will be an El Niño event in the tropical Pacific. A binary linear regression model was constructed based on SPMM and NPMM to improve ENSO prediction. The correlation between the reconstructed Niño3.4 and the observed Niño3.4 reached 0.57.

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