

罗风云, 谭伟, 李娟, 等. 南海海平面对两类 El Niño 的不同响应[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 36–46, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.004  
Luo Fengyun, Tan Wei, Li Juan, et al. Different sea level variations in the South China Sea in response to two types of El Niño[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 36–46, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.004

## 南海海平面对两类 El Niño 的不同响应

罗风云<sup>1</sup>, 谭伟<sup>2,3\*</sup>, 李娟<sup>2</sup>, 左军成<sup>1</sup>, 梅宇立<sup>4</sup>, 纪棋严<sup>1</sup>, 李直龙<sup>1</sup>, 庄圆<sup>1</sup>

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022; 2. 山东科技大学海洋科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237; 4. 上海市海洋管理事务中心, 上海 200050)

**摘要:** 利用 ECMWF ORAS4 重构数据, 分析了南海海平面异常 (SLA) 对东部型 (EP) El Niño 和中部型 (CP) El Niño 的不同响应特征。南海 SLA 在两类 El Niño 期间表现出不同的时空演变规律。对于东部型 El Niño, 南海空间平均的 SLA 在发展年的秋、冬季显著下降, 最低可达  $-2\text{ cm}$ , 并在次年开始上升, 至次年冬季可达  $2\text{ cm}$ 。空间分布上, 在发展年秋、冬季, 除越南东南部海域存在一个正异常中心外, 在南海绝大部分海域, SLA 均表现为显著的负异常; 从次年春季开始, SLA 负异常减弱, 而越南东南部的正异常开始发展, 直至冬季南海大部分海域以正异常为主。对于中部型 El Niño, 南海 SLA 在整个 El Niño 发展和衰退期间均表现为显著负异常, 异常值始终维持在  $-2\text{ cm}$  左右, 并且在空间上表现为全海盆一致的负异常模态。相比于传统的经验正交分解 (EOF), 季节 EOF (S-EOF) 能够更好地刻画南海 SLA 在两类 El Niño 期间的时空演变特征, S-EOF 的第一模态表现为中部型 El Niño 模态, 而第二模态更多地表现为南海 SLA 在东部型 El Niño 期间的演变特征。南海海平面在两类 El Niño 期间的不同变化主要是由于海峡通道处的热量平流输运异常所产生的热比容效应导致的, 但是比容海平面的贡献主要集中在南海内区和南海东部等深水海域, 对于南海西部等近岸海域, 海平面的变化机制还有待进一步深入研究。

**关键词:** 东部型 El Niño; 中部型 El Niño; 南海海平面; 比容海平面

中图分类号: P732.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)03-0036-11

### 1 引言

南海是一个半封闭海盆, 是西北太平洋最大的边缘海, 通过北部的台湾海峡、东北部的吕宋海峡、东南部的民都洛海峡和巴拉巴克海峡以及南部的卡里马塔海峡等与太平洋和印度洋相通 (图 1), 进行复杂的水交换和热量交换。吕宋海峡水深最大, 平均水深超过  $2\ 000\text{ m}$ , 流速在垂直方向上呈现“三明治”夹层结构, 上层和底层向西输运 (即流入南海), 中间层向

东输运 (即流出南海)<sup>[1-2]</sup>, 垂向净输运以西向为主, 约为  $5 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ <sup>[3]</sup>。民都洛海峡的平均深度约为  $500\text{ m}$ , 巴拉巴克海峡平均深度约为  $30\text{ m}$ , 二者受季风影响其上层水体在夏季向北流动, 在冬季向南流动<sup>[4]</sup>。台湾海峡水深平均约为  $60\text{ m}$ , 尽管同样受到季风影响<sup>[5]</sup>, 但全年表现为东北向输运, 夏季水体流量大 (近  $3 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ ), 冬季小 (近  $0$ )<sup>[6]</sup>。卡里马塔海峡平均水深约  $40\text{ m}$ , 水体输运存在双层结构, 上层全年向南输运, 并且冬季流量大 ( $2 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ ), 夏季小 ( $0.7 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[7]</sup>; 底

收稿日期: 2019-04-26; 修订日期: 2019-07-14。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0604901); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41806039); 国家社科重大项目 (15ZDB170); 国家自然科学基金 (41576020); 国家自然科学基金面上项目 (41976025)。

作者简介: 罗风云 (1993—), 女, 浙江省衢州市人, 从事气候变化和海平面研究。E-mail: phoebe\_luo@outlook.com

\* 通信作者: 谭伟, 讲师, 主要从事热带海气相互作用方向的研究。E-mail: tw0419@yeah.net

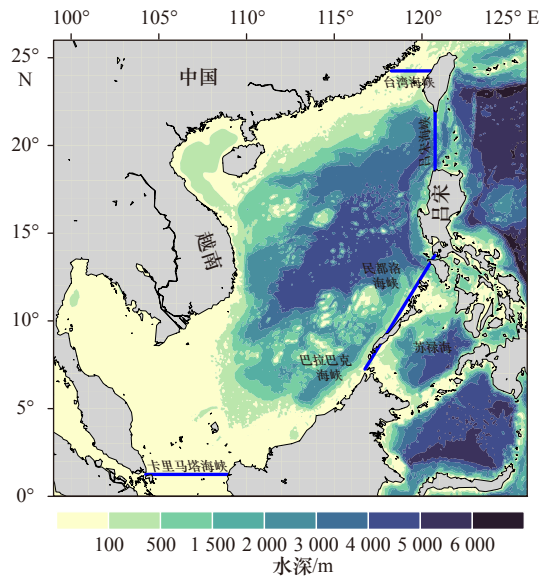


图1 南海水深及其主要海峡

Fig. 1 South China Sea topography and its main straits

层水体积输运以向北为主<sup>[8]</sup>。

南海海平面具有显著的年际变化特征,且主要受 ENSO 影响,在 El Niño 期间呈现负异常,而在 La Niña 期间呈现正异常<sup>[9-10]</sup>,其 EOF 第一模态与 Niño3.4 指数的相关系数高达 0.94<sup>[11]</sup>,并且不同区域受影响程度不同<sup>[12-13]</sup>。国内外学者已对 El Niño 引起南海海平面变化的机制进行了许多有益的探讨。在 El Niño 期间,赤道太平洋的西风异常引起北赤道流加强以及分叉点的向北移动,使得黑潮流量减弱,而棉兰老流的流量加强,进而在吕宋海峡处出现入隙现象,最终导致 El Niño 期间通过吕宋海峡的南海贯穿流加强<sup>[14-16]</sup>。南海贯穿流的冷平流作用使得南海上层热含量减少<sup>[17]</sup>,导致比容海平面下降<sup>[9]</sup>。此外,热带太平洋风场强迫可以通过斜压 Rossby 波以及沿岸 Kelvin 波来影响苏禄海和南海东部海域的海平面年际变化<sup>[18]</sup>。在南海内区,海平面的年际变化主要与 ENSO 导致的局地海表风应力旋度异常有关。而东边界激发的 Rossby 波则可以很好地解释南海东部海平面的年际变化<sup>[12,18]</sup>。

近些年,一种新的 El Niño 类型被提出<sup>[19]</sup>。与东部型 El Niño 发生时最大暖海温异常出现在热带东太平洋不同,新型 El Niño 的最大暖海温异常位于赤道太平洋中部,在日界线附近,因此被称为中部型 El Niño<sup>[20]</sup>,日界线 El Niño<sup>[21]</sup>或暖池 El Niño<sup>[22]</sup>。在本文中,选用东部型 El Niño (EP El Niño) 和中部型 El Niño (CP El Niño) 这种命名方式来对两类 El Niño 进行区分。自 20 世纪 90 年代以来,中部型 El Niño 发生频率增加<sup>[19,23-24]</sup>,并且强度在过去 30 年中不断增

强<sup>[19,23-25]</sup>。两类 El Niño 由于增暖位置、强度以及大气环流异常的不同,对全球气候的影响有着显著的差异<sup>[22-23,26-27]</sup>。一些文献研究并比较了南海海表温度、热带气旋等对两类 El Niño 事件的不同响应<sup>[28-30]</sup>。南海海表面温度 (Sea Surface Temperature, SST) 在东部型 El Niño 期间表现为整个南海海盆尺度增暖模态和冷-暖的准两年振荡,而在中部型 El Niño 期间则表现为半海盆 (115°E 以西) 增暖模态和暖-冷-暖-冷的年变化特征<sup>[28-30]</sup>。目前,关于比较南海海平面对两类 El Niño 响应的研究较少。因此本文将探究两类 El Niño 期间南海海平面的不同演变特征,并结合上层海水的温度结构和海峡热输运解释不同类型 El Niño 对南海海平面的影响机制。

## 2 数据来源与处理

本文所使用的海平面数据是由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的 ORAS4 海洋再分析数据集<sup>[31-32]</sup>。该数据可以表征真实的海平面变化,并且在 1993 年后与卫星高度计数据有很好的 consistency<sup>[31]</sup>。ORAS4 海平面数据的空间覆盖范围为 89°S~89°N,环全球经度,时间范围为 1958 年 1 月至 2017 年 12 月,水平空间分辨率是 1°×1°。考虑到 ORAS4 在南海海峡通道处的数据较少,在南海海峡热输运计算时选用水平空间分辨率相对更高的 (0.5°×0.5°) 海洋再分析数据集 SODA (V2.1.6)<sup>[33]</sup>。该产品是由美国马里兰大学研制开发的,垂向分为 40 层,时间跨度为 1958 年 1 月至 2008 年 12 月,此时间长度虽短于 ORAS4 的时间长度,但由后面介绍的两类 El Niño 年份可知,只缺少一个 2015/16 东部型 El Niño 事件,因此对本文结论的影响不大。

本文利用 Hadley 中心提供的月平均海表温度资料 (HadISST)<sup>[34]</sup> 计算两类 El Niño 指数。将区域 (5°S~5°N, 90°~150°E) 平均的海表温度异常定义的 Niño3 指数表征东部型 El Niño; 利用 Ashok 等<sup>[19]</sup> 提出的 EMI 指数表征中部型 El Niño, EMI 指数计算公式为

$$EMI = [SSTA]_C - 0.5 \times [SSTA]_W - 0.5 \times [SSTA]_E, \quad (1)$$

式中, SSTA 表示区域平均的海表温度异常,下标 C、E 和 W 分别代表热带中太平洋区域 (10°S~10°N, 165°E~140°W)、热带东太平洋区域 (15°S~5°N, 70°~110°W) 和热带西太平洋区域 (10°S~20°N, 125°~145°E)。根据 Wang 等<sup>[35]</sup> 的 El Niño 分类方法,并将其扩展至 2017 年,确定两类 El Niño 年份,得到 6 个东部型 El Niño (1965/66, 1972/73, 1976/77,

1982/83, 1997/98, 2015/16) 和 11 个中部型 El Niño(1963/64, 1968/69, 1977/78, 1979/80, 1987/88, 1990/91, 1991/92, 1992/93, 1994/95, 2002/03, 2004/05)。

热比容海平面 (TSL) 用来描述海水温度变化通过水体热胀冷缩而引起的海平面变化, 可以依照下式进行计算,

$$\text{TSL} = \int_{-H}^0 \frac{\rho_0(x, y, z) - \rho(x, y, z, t)}{\rho_0(x, y, z)} dz, \quad (2)$$

式中,  $\rho_0$  代表参考密度, 参考温度取值为  $0^\circ\text{C}$ , 参考盐度由 SODA 盐度气候态值确定;  $\rho(x, y, z, t)$  代表海水密度, 通过国际海水状态方程 (EOS80) 计算得到;  $H$  为积分的深度, 在本文中  $H=700\text{ m}$ 。

海水热量输运 ( $F_H$ ) 的计算公式为

$$F_H = \rho C_p \int (T - T_0) v_n dl, \quad (3)$$

式中,  $\rho$  表示海水密度 ( $\rho=1021\text{ kg/m}^3$ );  $C_p$  表示定压比热 ( $C_p=3890\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ );  $T$  为海水温度;  $T_0$  为参考温度, 选择  $3.72^\circ\text{C}$  作为参考温度<sup>[36-37]</sup>;  $v_n$  表示垂直于断面的流速;  $dl$  表示断面在水平方向的微元。这里没有进行垂向积分, 因此  $F_H$  在本文中的单位是  $\text{TW/m}$ 。计算热输运的海峡断面选取如下: 台湾海峡 ( $24.25^\circ\text{N}$ ,  $118.25^\circ\sim 120.75^\circ\text{E}$ ), 吕宋海峡 ( $18.25^\circ\sim 22.75^\circ\text{N}$ ,  $120.75^\circ\text{E}$ ), 民都洛-巴拉巴克海峡 ( $7.25^\circ\sim 13.75^\circ\text{N}$ ,  $116.75^\circ\sim 120.75^\circ\text{E}$  的东北-西南向断面) 以及卡里马塔海峡 ( $1.25^\circ\text{N}$ ,  $104.25^\circ\sim 109.25^\circ\text{E}$ )。

本文所有数据在使用之前都去掉了线性趋势项, 并通过扣除整个时间段的气候平均态得到异常值。文中用到了合成分析, 经验正交分解 (EOF) 和季节经验正交分解 (S-EOF) 等统计分析方法。

### 3 南海海平面异常在两类 El Niño 期间的演变特征

#### 3.1 南海海平面异常在两类 El Niño 期间的不同时空演变特征

为了探究南海海平面在两类 El Niño 期间的演变差异, 首先对南海区域平均的海平面异常 (Sea Level Anomaly, SLA) 进行了合成分析 (图 2)。南海 SLA 在东部型 El Niño 期间存在先下降后上升的演变规律, 最低值出现在发展年的秋季 (约  $-2\text{ cm}$ ), 之后 SLA 开始上升, 并在次年的秋冬季达到最大 (约  $2\text{ cm}$ )。此外, SLA 在极小值和极大值期间通过 90% 的置信检验。而对于中部型 El Niño, 南海 SLA 始终表现为负异常, 并且几乎在整个发展-衰减阶段均通过 90% 的置信检验。在中部型 El Niño 的发展年, 南海 SLA 维

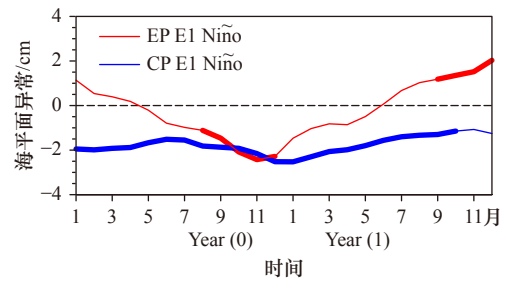


图 2 两类 El Niño 期间合成的南海区域平均海平面异常时间演变

Fig. 2 Evolution of composited area-averaged sea level anomaly during two types of El Niño

Year (0) 表示 El Niño 发展年, Year (1) 表示 El Niño 衰减年; 加粗实线表示通过 90% 置信检验

Year (0) and Year (1) indicate the developing and decaying year of El Niño, respectively. Bold parts represent the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's  $t$  test

持在  $-2\text{ cm}$  左右, 秋冬季负异常最大; 次年出现一个弱的上升趋势, 到冬季负异常减弱至  $-1\text{ cm}$  左右。接下来进一步探究两类 El Niño 期间南海 SLA 的空间演变特征。

对于东部型 El Niño 事件 (图 3), 从 El Niño 发展年的夏季至次年春季, SLA 在南海北部、东部和南部的绝大部分海域以负异常为主, 负异常中心位于苏禄海附近。此外, 在越南东南部海域还存在一个正异常中心。但是由于负异常的范围和强度明显大于正异常, 因此导致南海区域平均的 SLA 在 EP El Niño 的发展年持续下降 (图 2)。从次年春季开始, SLA 的负异常开始衰减, 与此同时, 越南东南部海域的正异常进一步加强, 并向东北方向发展; 至次年冬季, 南海 SLA 呈现出与发展年冬季相反的空间分布特征, 南海大部分海域 SLA 以正异常为主, 在巴拉巴克海峡附近存在一个正异常中心, 最大值超过  $4\text{ cm}$ , 在越南东南部海域存在一个弱负异常中心, 约为  $-1\text{ cm}$ 。

不同于东部型 El Niño, 南海 SLA 在整个中部型 El Niño 期间呈现全海盆负异常分布形态 (图 4)。负异常中心交替出现在吕宋岛西侧海域、越南东部海域和苏禄海附近。虽然南海空间平均的 SLA 在两类 El Niño 发展年的秋季都出现了最低值, 但其空间分布结构却截然不同。在东部型 El Niño 的秋季 (图 3c), 南海 SLA 呈中间高四周低的穹顶状分布, 除越南以东海域出现弱的正异常外, 在南海其他海域均表现为负异常, 最大负异常中心位于南海东部和东南部。对于中部型 El Niño 的秋季 (图 4c), 在整个南海海盆均表现为显著的负异常, 并且中心值位于越南以东海域。

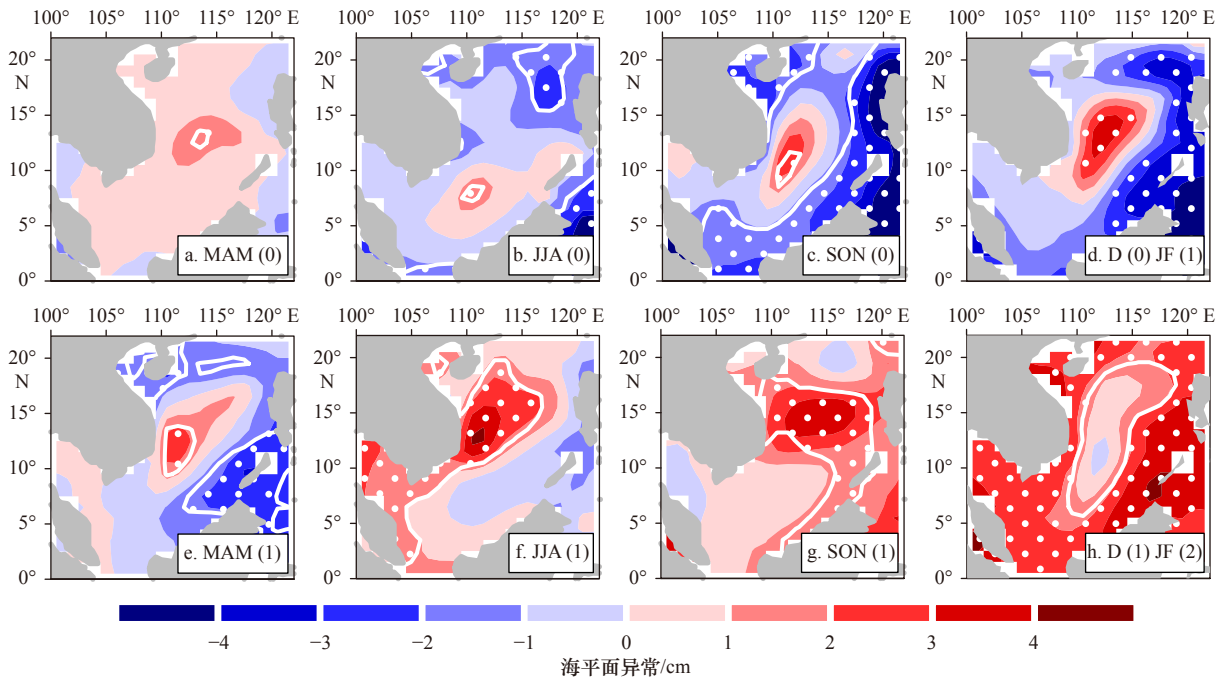


图3 东部型 El Niño 期间合成的南海海平面异常空间分布

Fig. 3 Spatial evolution of composited sea level anomaly during EP El Niño

MAM, JJA, SON 和 DJF 分别表示春、夏、秋、冬 4 个季节。(0),(1),(2) 分别表示 El Niño 的发展年、衰减年以及衰减年的次年。白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

MAM, JJA, SON, DJF indicate boreal spring, summer, autumn, and winter. (0), (1), (2) denote the developing year, decaying year, and third year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

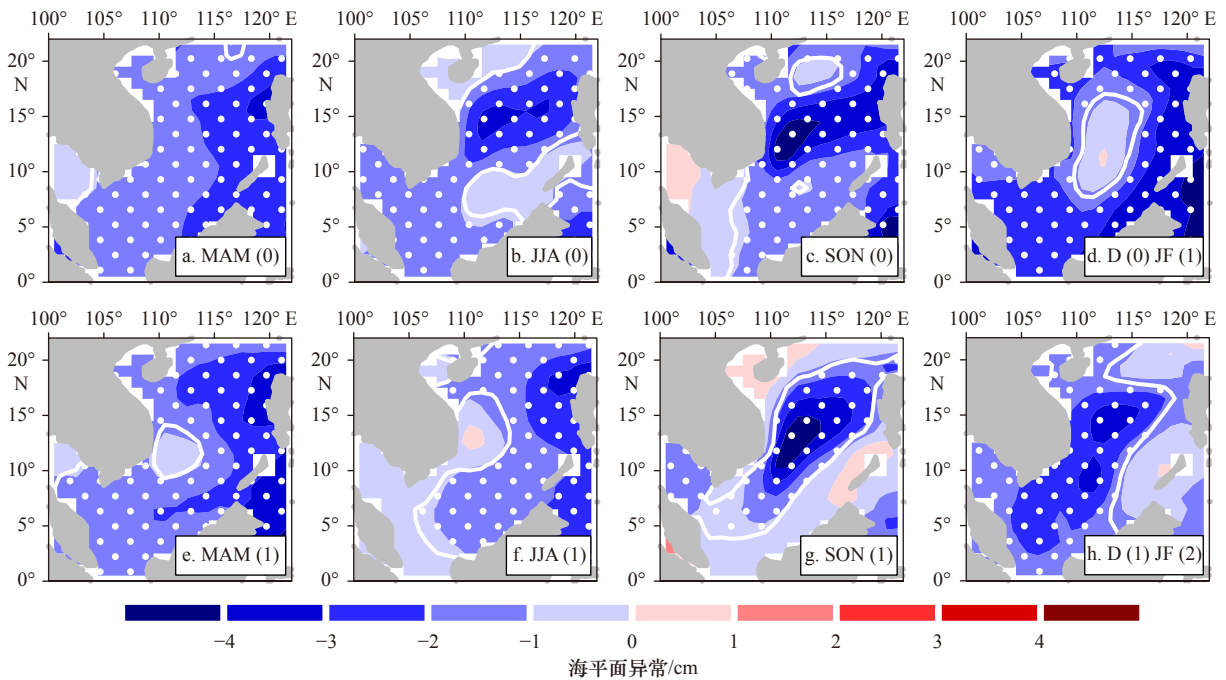


图4 中部型 El Niño 期间合成的南海海平面异常空间分布

Fig. 4 Spatial evolution of composited sea level anomaly during CP El Niño

MAM, JJA, SON 和 DJF 分别表示春、夏、秋、冬 4 个季节。(0),(1),(2) 分别表示 El Niño 的发展年、衰减年以及衰减年的次年。白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

MAM, JJA, SON, DJF indicate boreal spring, summer, autumn, and winter. (0), (1), (2) denote the developing year, decaying year, and third year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

### 3.2 南海海平面异常的 EOF 分析

#### 3.2.1 EOF 分析

对南海 SLA 做 EOF 分析,其 EOF 第 1 模态的解释方差高达 60.32%,整个南海均表现为负的海平面异常,尤其是在南海东南陆架海域负异常达到最大,而在越南东南海域负异常最小(图略),该模态与中部型 El Niño 发展年冬季(图 4d)的空间分布一致,其时间系数(PC-1)与 EMI 指数的相关系数为 0.46,超过了 99%的显著性检验,但需要注意的是 PC-1 与表征东部型 El Niño 的 Niño3 指数的相关系数甚至更高,达到 0.50。

EOF 第 2 模态的解释方差为 13.25%,与东部型 El Niño 的冬季(图 3d)空间分布类似。第 2 模态的时间系数(PC-2)与 Niño3 指数和 EMI 指数的相关系数均为 0.45,同样超过了 99%的显著性检验。基于 3.1 节和 3.2 节的分析发现,南海 SLA 在两类 El Niño 期间最大的差异来自于其随时间(或季节)的演变,因此下面采用季节 EOF(S-EOF),从季节时空演变的角度来尝试更好地刻画南海 SLA 在两类 El Niño 期间的不同变化特征。

#### 3.2.2 S-EOF 分析

将季节平均的南海 SLA 按春-夏-秋-冬的季节顺序排列,计算了南海 SLA 的 S-EOF。S-EOF 第 1 模态的解释方差高达 49.30%,其时间系数(SPC-1)(图 5e)与 Niño3 指数的同期相关系数为 0.48,而与 EMI 指数的同期相关系数更高达 0.51,因此表现出很强的 ENSO 特征。从空间分布上看(图 5a 至图 5d),南海在春、夏、秋、冬 4 个季节均表现为负的海平面高度异常,并且在越南以东海域的负值较弱。与东部型 El Niño 相比,S-EOF 的第 1 空间模态与中部型 El Niño 发展年份的空间分布(图 4a 至图 4d)更加一致。此外,采用超前滞后相关进一步发现,SPC-1 滞后 EMI 指数 1 年的相关系数仍然可以达到 0.46,超过 90%的显著性检验,这从空间分布也可以得到证实,在中部型 El Niño 的衰减年份南海海平面依然保持着显著的负异常(图 4e 至图 4h)。而 SPC-1 滞后 Niño 3 指数 1 年的相关系数则降为 0.03,两者并不相关。这进一步说明,尽管 SPC-1 与 Niño 3 指数的同期相关系数同样较高,但是 S-EOF 的第 1 模态更多地表现为中部型 El Niño 的时空分布模态。

S-EOF 第 2 模态的解释方差为 11.05%。从空间分布上看(图 6a 至图 6d),南海在春、夏、秋、冬 4 个季节表现为正的海平面高度异常逐步向东发展,负异常向越南东部海域集中。这一季节演变与东部型 El

Niño 衰减年份的空间分布(图 3e 至图 3h)一致。尽管第 2 模态的时间系数(SPC-2)与 Niño3 指数和 EMI 指数的同期相关系数非常低(约为 0.16),但是 SPC-2 在滞后 Niño3 指数 1 年情况下的相关系数却高达 0.57,而 SPC-2 与 EMI 指数则不存在这种显著的滞后关系(滞后 EMI 指数 1 年的相关系数为 0.38)。因此,无论是空间分布还是时间系数都能够说明 S-EOF 的第 2 模态表现为南海海平面在东部型 El Niño 衰减年的时空演变特征。

## 4 南海热比容海平面在两类 El Niño 期间的变化

南海区域平均的热比容海平面异常(TSLA)(图 7)与 SLA(图 2)的时间演变规律非常相似。TSLA 在东部型 El Niño 发展年秋冬季达到最低(约-3 cm),秋冬季之后 TSLA 开始上升,并在次年秋季达到最大(约 1.5 cm)。在整个中部型 El Niño 期间,南海 TSLA 表现为持续的负异常,异常值在-1.8 cm 左右波动。无论是从时间变化规律,还是量值大小,都可以看出热比容海平面是南海 SLA 在两类 El Niño 期间变化的主要因素。

进一步对南海区域 TSLA 演变的空间分布特征进行研究发现,在东部型 El Niño 发展年的夏季至次年春季(图 8),TSLA 在南海北部、东部的绝大部分海域以负异常为主;在 El Niño 发展年冬季,南海中部越南东部附近海域出现显著 TSLA 正异常中心,此后正异常进一步加强并向东北方向发展,至次年秋季扩展到南海中部,冬季扩展至东部海域。在整个 TSLA 东部型 El Niño 发展年-衰减期间,南海 TSLA 呈现出与南海 SLA 同时期(图 3)大致相同的空间分布特征。由此可见,TSLA 亦可以从空间分布上解释南海 SLA 空间分布结构演变特征。

在整个中部型 El Niño 期间,南海 TSLA 呈现全海盆负异常分布形态(图 9),与 SLA 分布特征(图 4)一致。在发展年的夏季、秋季和衰减年的秋季、冬季,TSLA 的负异常中心呈现东北西南形态位于南海中部海域越南东侧;其余时段在位于南海东部吕宋岛西侧。

为了解释南海 SLA 在两类 El Niño 期间的不同变化,本文对南海 700 m 以浅的垂向海温做合成分析(图 10)。在东部型 El Niño 发展年的秋冬季,南海 50~200 m 的次表层存在一个显著的冷海温异常中心,中心值为-0.4~-0.5℃,同时 200~700 m 水层的冷海温异常也通过了 90%的置信度检验。在东部型

El Niño 发展年的秋季, 在上 50 m 水层开始出现暖海温异常, 在次年进一步加强并逐渐向次表层发展。这种演变可能与越南冷涡的暖海温异常有关(图略)。在整个中部型 El Niño 期间, 南海上层水体垂向上整体表现为负异常, 并且在 50~200 m 的次表层负异常较大, 负异常通过 90% 的置信检验。两类 El Niño 期间合成的上层海温异常与南海 SLA 有很好的对应关系。

在两类 El Niño 期间, 对南海海平面变化起主导作用的并不是表层海温变化, 而是位于 50~200 m 次

表层的海温变化, 与 Rong 等<sup>[9]</sup> 的结论一致。南海次表层的海温变化与热平流有关, 因此接下来进一步计算了南海与周边海域相联通的 4 个关键海峡(其中民都洛-巴拉巴克海峡视为 1 个海峡)的热量运输异常(图 11), 分析热运输对南海次表层海温的影响。两类 El Niño 期间, 南海净热运输主要集中在 100 m 以上水层, 其演变特征却与 50~200 m 的海温异常演变特征存在很好的对应关系。对于东部型 El Niño, 净热运输在发展年夏季和秋季表现为明显的负异常, 负

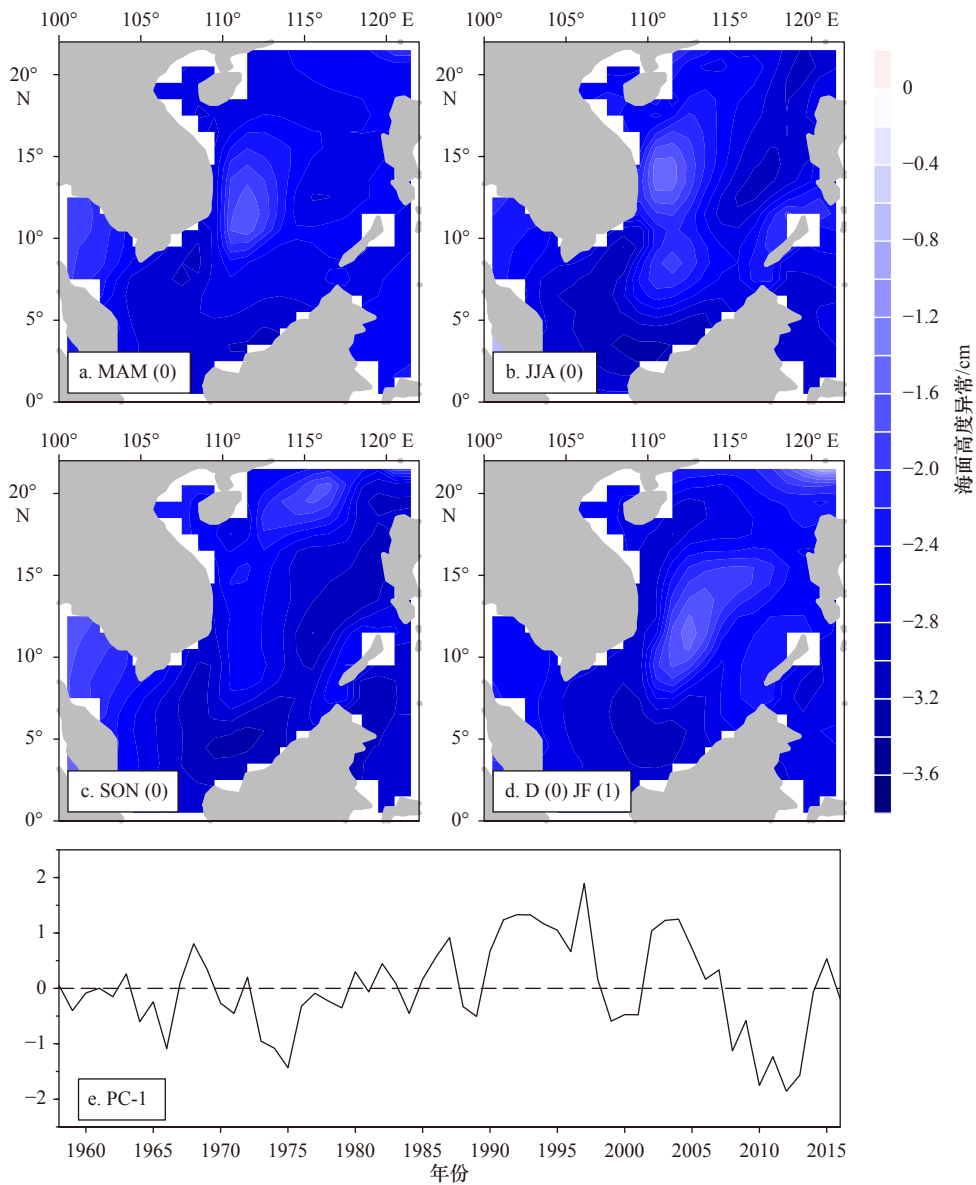


图 5 南海海平面高度异常 (SLA) 的 S-EOF 分解第一模态

Fig. 5 First S-EOF mode of sea level anomaly (SLA) in the South China Sea

a-d 分别为春 (MAM)、夏 (JJA)、秋 (SON)、冬 (DJF) 4 个季节的海面高度异常空间分布;(0)和(1)分别表示 El Niño 的发展年和衰减年; e 为第一模态时间序列图  
 a-d are SLA spatial pattern of spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), winter (DJF), respectively; (0) and (1) indicate the developing and decaying year of El Niño; e is principal component time series of SLA

异常值大于 $-1.0$  TW/m, 冬季开始至次年冬季, 表现为持续的正异常, 其值超过 $1.0$  TW/m, 与次表层海温在秋季存在负异常中心, 后转为正异常的演变规律对应。对于中部型 El Niño, 南海上 $100$  m 热输运在整个发展-衰退期间均表现为负异常, 并在 El Niño 发生当年秋冬就达到最大负异常, 这与中部型 El Niño 期间持续的负异常海温演变规律一致, 也与持续的南海 SLA 负异常演变一致。净热输运异常主要来源于民都洛-巴拉巴克海峡(图略), 该海峡水深在 $100$  m 以上。

## 5 结论

两类 El Niño 期间的南海海平面显示了不同的时空演变规律。合成的南海平均 SLA 在东部型 El Niño 发展年的秋季达到最低( $-2$  cm), 并在之后持续上升, 至次年冬季达到最大( $2$  cm)。空间分布上, 发展年秋冬季, 除越南东南部海域存在一个正异常中心外, 在南海北部、东部和南部的绝大部分海域, SLA 均表现为显著的负异常; 次年, 负异常减弱并且范围

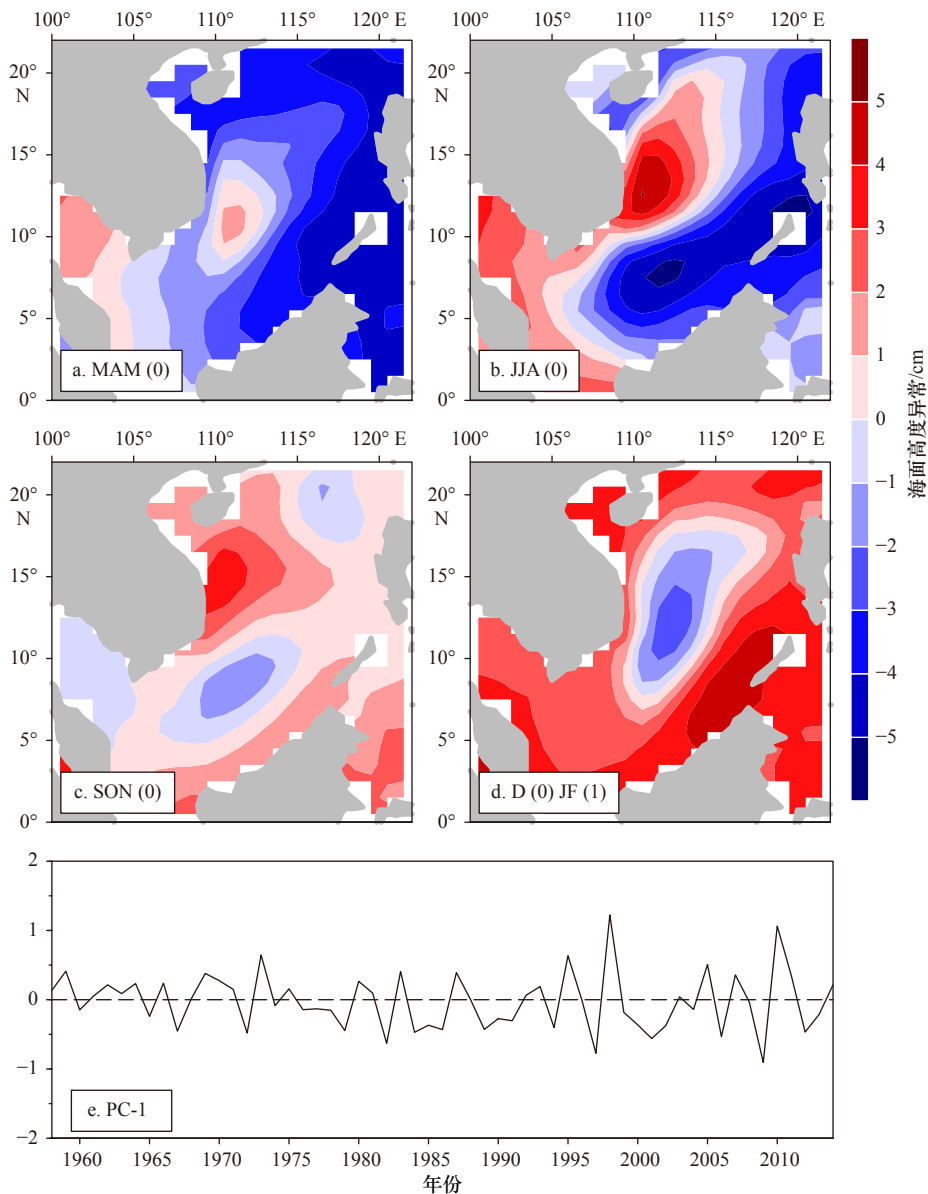


图6 南海海面高度异常(SLA)的S-EOF分解第二模态

Fig. 6 The second S-EOF mode of sea level anomaly (SLA) in the South China Sea

a-d 分别为春(MAM)、夏(JJA)、秋(SON)、冬(DJF)4个季节的海面高度异常空间分布;(0)和(1)分别表示 El Niño 的发展年和衰退年; e 为第二模态时间序列图  
a-d are SLA spatial pattern of spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), winter (DJF), respectively; (0) and (1) indicate the developing and decaying year of El Niño; e is principal component time series of sea level anomaly

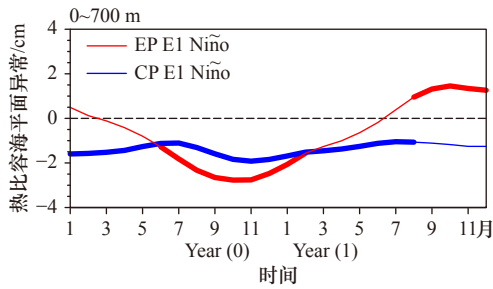


图7 两类 El Niño 期间合成的南海区域平均热比容海平面异常(TSLA)时间演变

Fig. 7 Evolution of composited area-averaged TSLA during two types of El Niño

Year (0) 表示 El Niño 发展年, Year (1) 表示 El Niño 衰减年; 加粗实线表示通过 90% 置信检验

Year (0) and Year (1) indicate the developing and decaying year of El Niño, respectively. Bold parts represent the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

缩小, 大部分海域以正异常为主。而对于中部型 El Niño, 南海 SLA 在整个发展和衰退期间始终为负异常, 约为 -2 cm, 并在空间分布上表现为全海盆负异常。与传统的 EOF 相比, S-EOF 可以更好地刻画南海 SLA 在两类 El Niño 期间的时空演变特征, S-EOF 第一模态表现为中部型 El Niño 模态, 第二模态表现为

东部型 El Niño 模态。

两类 El Niño 期间的南海 SLA 的演变特征与南海上层海温、热比容海平面高度和南海热平流输运存在一致的对应关系。两类 El Niño 期间, 南海海温负异常中心存在于 50~200 m 水深范围内, 对于东部型 El Niño, 负异常中心出现的时间是在发展年秋季和冬季, 对于中部型 El Niño, 负异常从发展年夏季开始加强, 到次年春季达到最大。基于南海海温与 SLA 演变的对应关系, 积分计算南海上层(700 m)的热比容海平面, 得到两类 El Niño 期间合成的热比容海平面演变规律与南海 SLA 一致, 热比容海平面是两类 El Niño 期间 SLA 的主要影响因素。进一步通过南海净热输运分析南海次表层海水的温度变化, 发现南海净热输运主要发生在 0~100 m 的深度, 净热输运演变与南海次表层海水的温度演变一致。在东部型 El Niño 发生当年的秋冬季南海出现负净热输运, 其他时间以正净热输运为主, 而对于中部型 El Niño, 负的净热输运持续存在。此外, 从图 8 和图 9 可知, 热比容的贡献主要集中在南海内区和南海东部等深水海域, 而在南海西部等近岸浅水海域比容贡献较小, 这可能更多地与海洋动力过程有关, 关于南海近海海平面变化的深层原因仍有待于进一步的分析。

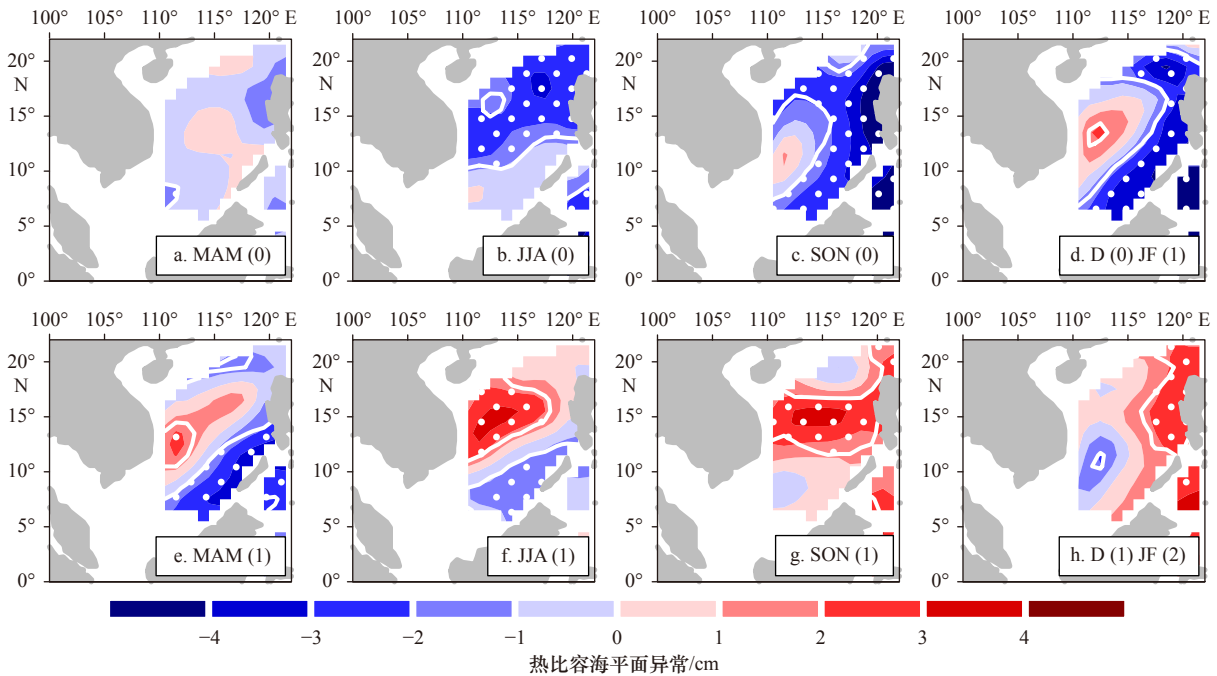


图8 东部型 El Niño 期间合成的南海热比容海平面异常(TSLA)空间分布

Fig. 8 Spatial evolution of composited TSLA during EP El Niño

MAM, JJA, SON 和 DJF 分别表示春、夏、秋、冬 4 个季节。(0),(1),(2) 分别表示 El Niño 的发展年、衰减年以及衰减年的次年。白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

MAM, JJA, SON, DJF indicate boreal spring, summer, autumn, and winter. (0), (1), (2) denote the developing year, decaying year, and third year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

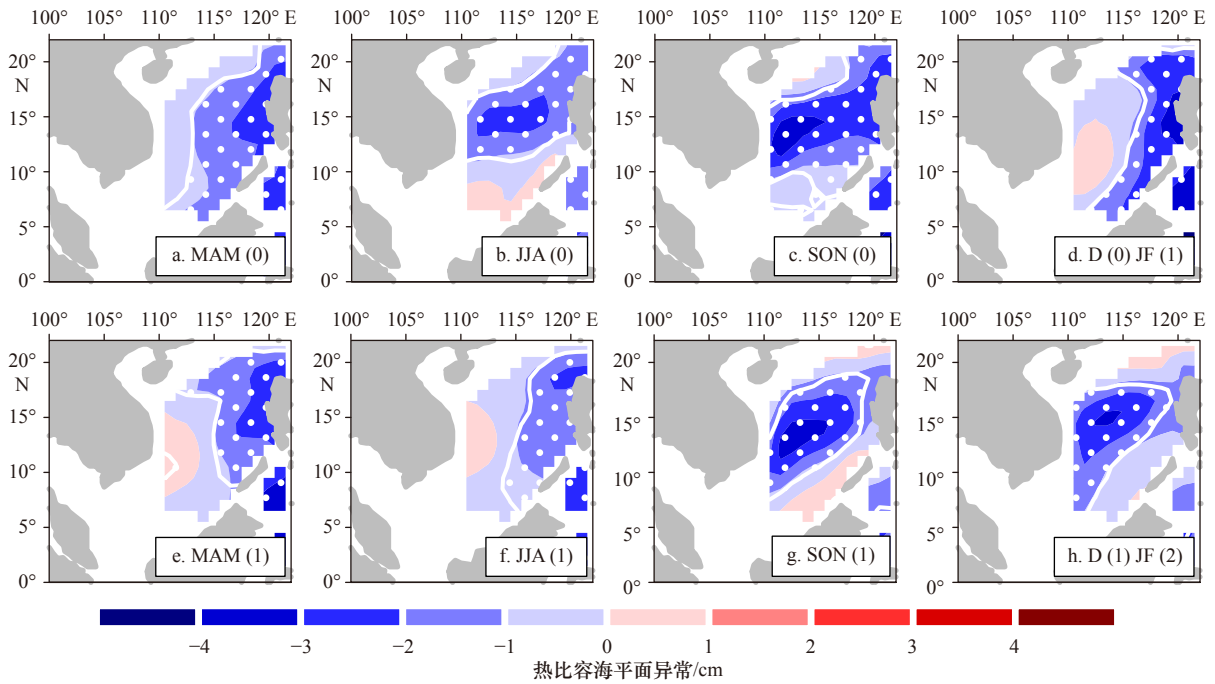


图 9 中部型 El Niño 期间合成的南海热比容海平面异常(TSLA)空间分布

Fig. 9 Spatial evolution of composited TSLA during CP El Niño

MAM, JJA, SON 和 DJF 分别表示春、夏、秋、冬 4 个季节。(0),(1),(2) 分别表示 El Niño 的发展年、衰减年以及衰减年的次年。白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

MAM, JJA, SON, DJF indicate boreal spring, summer, autumn, and winter. (0), (1), (2) denote the developing year, decaying year, and third year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

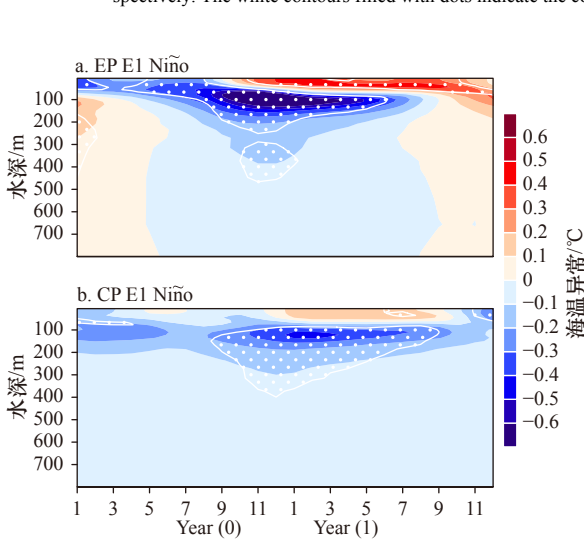


图 10 东部型 El Niño(a)和中部型 El Niño(b)期间合成的海温异常垂向分布

Fig. 10 Composite temperature anomaly as a function of depth during the EP El Niño (a) and CP El Niño (b)

Year (0) 表示 El Niño 发展年, Year (1) 表示 El Niño 衰减年; 白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

Year (0) and Year (1) indicate the developing and decaying year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

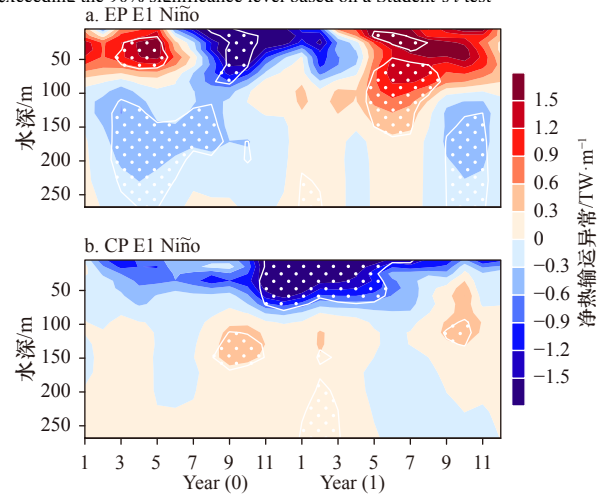


图 11 东部型 El Niño(a)和中部型 El Niño(b)期间合成的南海净热运输异常垂向演变

Fig. 11 Composite net heat transport anomaly as a function of depth during the EP El Niño (a) and CP El Niño (b)

净热运输负值表示南海热量减少, 正值表示南海热量增加。Year (0) 表示 El Niño 发展年, Year (1) 表示 El Niño 衰减年。白色等值线包围的区域表示通过 90% 显著性检验的区域

Negative net heat transport means that heat decreases in the South China Sea, vice versa. Year (0) and Year (1) indicate the developing and decaying year of El Niño, respectively. The white contours filled with dots indicate the composite exceeding the 90% significance level based on a Student's *t* test

## 参考文献:

- [1] Chao S Y, Shaw P T, Wu S Y. Deep water ventilation in the South China Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1996, 43(4): 445–466.
- [2] Chen C T A, Huang M H. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine sea water[J]. *Journal of Oceanography*, 1996, 52(1): 17–25.
- [3] Qu Tangdong, Song Y T, Yamagata T. An introduction to the South China Sea throughflow: its dynamics, variability, and application for climate[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47(1/3): 3–14.
- [4] Sprintall J, Gordon A L, Flament P, et al. Observations of exchange between the South China Sea and the Sulu Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C5): C05036.
- [5] Cai Shuqun, Liu Hailong, Li Wei, et al. Application of LICOM to the numerical study of the water exchange between the South China Sea and its adjacent oceans[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(4): 10–19.
- [6] Chen H W, Liu C T, Matsuno T, et al. Temporal variations of volume transport through the Taiwan Strait, as identified by three-year measurements[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 114: 41–53.
- [7] Wang Yan, Xu Tengfei, Li Shujiang, et al. Seasonal variation of water transport through the Karimata Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(4): 47–57.
- [8] Susanto R D, Wei Zexun, Adi R T, et al. Observations of the Karimata Strait throughflow from December 2007 to November 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(5): 1–6.
- [9] Rong Zengrui, Liu Yuguang, Zong Haibo, et al. Interannual sea level variability in the South China Sea and its response to ENSO[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 55(4): 257–272.
- [10] Wang Hui, Liu Kexiu, Wang Aimei, et al. Regional characteristics of the effects of the El Niño-Southern Oscillation on the sea level in the China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2018, 68(4/5): 485–495.
- [11] Fang Guohong, Chen Haiying, Wei Zexun, et al. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and surface temperature in the recent decade[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2006, 111(C11): C11S16.
- [12] Cheng Yongcun, Hamlington B D, Plag H P, et al. Influence of ENSO on the variation of annual sea level cycle in the South China Sea[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 126: 343–352.
- [13] Soumya M, Vethamony P, Tkalich P. Inter-annual sea level variability in the southern South China Sea[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 133: 17–26.
- [14] Qiu Bo, Chen Shuiming. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(11): 2525–2538.
- [15] Qu Tangdong, Kim Y Y, Yaremchuk M, et al. Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea?[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3644–3657.
- [16] Liu Qinyan, Huang Ruixin, Wang Dongxiao, et al. Interplay between the Indonesian throughflow and the South China Sea throughflow[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(S2): 50–58.
- [17] Liu Qinyan, Feng Ming, Wang Dongxiao. ENSO-induced interannual variability in the southeastern South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2011, 67(1): 127–133.
- [18] Zhuang Wei, Qiu Bo, Du Yan. Low-frequency western Pacific Ocean sea level and circulation changes due to the connectivity of the Philippine Archipelago[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(12): 6759–6773.
- [19] 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): C11007.
- [20] Yu Jinyi, Kao H Y. Decadal changes of ENSO persistence barrier in SST and ocean heat content indices: 1958–2001[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D13): D13106.
- [21] Larkin N K, Harrison D E. Global seasonal temperature and precipitation anomalies during El Niño autumn and winter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): L16075.
- [22] Kug J S, Jin Feifei, 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.
- [23] Kao H Y, Yu Jinyi. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 615–632.
- [24] Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. El Niño in a changing climate[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 511–514.
- [25] Lee T, McPhaden M J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14): L14603.
- [26] Weng Hengyi, Ashok K, Behera S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer[J]. *Climate Dynamics*, 2007, 29(2/3): 113–129.
- [27] Kim J S, Zhou Wen, Wang Xin, et al. El Niño Modoki and the summer precipitation variability over South Korea: a diagnostic study[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2012, 90: 673–684.
- [28] Wang Xin, Zhou Wen, Li Chongyin, et al. Comparison of the impact of two types of El Niño on tropical cyclone genesis over the South China Sea[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(8): 2651–2660.

- [29] Liu Qinyan, Wang Dongxiao, Wang Xin, et al. Thermal variations in the South China Sea associated with the eastern and central Pacific El Niño events and their mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(12): 8955–8972.
- [30] Hong C C, Li Y H, Li T, et al. Impacts of central Pacific and eastern Pacific El Niños on tropical cyclone tracks over the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): L16712.
- [31] Balmaseda M A, Mogensen K, Weaver A T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(674): 1132–1161.
- [32] Balmaseda M A, Trenberth K E, Källén E. Distinctive climate signals in reanalysis of global ocean heat content[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1754–1759.
- [33] Carton J A, Giese B S. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA)[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(8): 2999–3017.
- [34] Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4407.
- [35] Wang Chunzai, Wang Xin. Classifying El Niño Modoki I and II by different impacts on rainfall in Southern China and typhoon tracks[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(4): 1322–1338.
- [36] Fang Guohong, Susanto R D, Wirasantosa S, et al. Volume, heat, and freshwater transports from the South China Sea to Indonesian seas in the boreal winter of 2007–2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12020.
- [37] Fang Guohong, Wang Yonggang, Wei Zexun, et al. Inter-ocean circulation and heat and freshwater budgets of the South China Sea based on a numerical model[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47(1/3): 55–72.

## Different sea level variations in the South China Sea in response to two types of El Niño

Luo Fengyun<sup>1</sup>, Tan Wei<sup>2,3</sup>, Li Juan<sup>2</sup>, Zuo Juncheng<sup>1</sup>, Mei Yuli<sup>4</sup>, Ji Qiyan<sup>1</sup>, Li Zhilong<sup>1</sup>, Zhuang Yuan<sup>1</sup>

(1. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. Shanghai Administration Center for Ocean Affairs, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Using the ECMWF ORAS4 reconstruction data, the different response characteristics of the South China Sea Sea Level Anomaly (SLA) to the Eastern Pacific (EP) El Niño and the Central Pacific (CP) El Niño were analyzed. The South China Sea SLA showed different spatial and temporal evolution during the two types of El Niño. For the EP El Niño, the average SLA in the South China Sea decreased significantly in the autumn and winter of the developing year, with a minimum of  $-2$  cm, and began to rise in the following year, up to 2 cm in the following winter. In terms of spatial distribution, in the autumn and winter of developing year, except for the existence of a positive anomaly to the southeast of Vietnam, in most of the South China Sea, SLAs are characterized by significant negative anomalies; from the spring of the following year, SLA negatively weakens, while the southeastern part of Vietnam was beginning to develop abnormally until the majority of the South China Sea is dominated by positive anomalies. For the CP El Niño, the South China Sea SLA showed significant negative anomalies throughout the El Niño development and decline, the outliers were always maintained at around  $-2$  cm, and spatially represented as a consistent negative anomaly of the whole basin. Compared with the traditional empirical orthogonal decomposition (EOF), the seasonal EOF (S-EOF) can better characterize the temporal and spatial evolution of the South China Sea SLA during the two types of El Niño. The first mode of the S-EOF is CP El Niño mode, while the second mode is more characterized by the evolution of the South China Sea SLA during the EP El Niño. The different variations of the South China Sea SLA during the two types of El Niño are mainly due to the thermal specific volume effect caused by the thermal advection transport anomaly at the channel, but the contribution of the thermosteric sea level is mainly concentrated in the interior South China Sea. While in the coastal regions, such as the western South China Sea, the mechanism of sea level change needs further study.

**Key words:** EP El Niño; CP El Niño; sea level variation in the South China Sea; thermosteric sea level