

张文珺, 李建平. ENSO事件下赤道中东太平洋海温场非对称性特征[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(1): 1-13.  
ZHANG Wenjun, LI Jianping. Asymmetric characteristics of SSTs in the central and eastern equatorial Pacific under ENSO events [J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(1): 1-13. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220408001. (in Chinese)

## ENSO事件下赤道中东太平洋海温场非对称性特征

张文珺<sup>1,2,3,4</sup>, 李建平<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. 中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 4. 中国海洋大学未来海洋学院, 山东 青岛 266100; 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** 利用1950—2020年冬季HadISST逐月海面温度(sea surface temperature, SST)资料、SODAv2.2.4逐月SST和三维海洋流速同化资料以及NCEP/NCAR 2 m高度上的逐月气温(surface air temperature, SAT)资料,使用非对称合成差分分析方法、海洋混合层热量收支诊断方法等,探究El Niño事件和La Niña事件下造成赤道东太平洋(E区:110°W~80°W,10°S~10°N)、赤道中太平洋(C区:160°E~170°W,10°S~10°N)SST异常场显著不同非对称性特征的可能海洋动力过程,分析ENSO事件非对称强迫下2 m高度上SAT异常场的非对称空间响应。结果表明:E区El Niño事件的强度显著强于La Niña事件,C区则相反。非线性动力学加热作用对E区和C区El Niño年和La Niña年SST异常场的非对称分量都起到了正反馈作用,是造成这两个区域SST异常场产生正、负非对称分量的主导动力因子。埃克曼输送作用不利于E区SST异常场正非对称分量的形成,但有利于C区SST异常场负非对称分量的形成。平均流、纬向平流和温跃层的非对称正反馈作用阻碍了C区SST异常场负非对称分量的形成。2 m高度上SAT异常场的非对称分布与SST异常场的非对称分布较为一致,但SAT异常场正、负非对称分量的显著范围明显减小,部分区域的非对称结果不显著。

**关键词** ENSO; 非对称性; 热收支分析

**中图分类号:** P732.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2024)01-0001-13

**DOI:** 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20220408001

## Asymmetric characteristics of SSTs in the central and eastern equatorial Pacific under ENSO events

ZHANG Wenjun<sup>1,2,3,4</sup>, LI Jianping<sup>1,2,3,4,5</sup>

(1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Key Laboratory of Physical Oceanography of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 3. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 4. *Academy of the Future Ocean, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 5. *Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*)

**Abstract** The study uses monthly sea surface temperature (SST) data from HadISST, monthly SST and three-dimensional ocean current velocity assimilation data from SODAv2.2.4, and monthly surface air

收稿日期:2022-04-08;修回日期:2022-05-13

基金项目:国家自然科学基金重大项目(41790474);山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2019ZD12)

第一作者简介:张文珺,女,硕士研究生,主要从事 ENSO 非对称性、极端降水等研究,zhangwenjun2233@foxmail.com。

通信作者简介:李建平,男,博士,教授,主要从事气候动力学与可预报性、季风与海气相互作用等研究,ljp@ouc.edu.cn。

temperature (SAT) at 2 m from NCEP/NCAR during 1950–2020 in winter. Combined with the asymmetric composite difference analysis method and mixed layer heat budget analysis method, the possible ocean dynamic processes of significantly asymmetric SST anomaly over the eastern (E region: 110°W–80°W, 10°S–10°N) and central (C region: 160°E–170°W, 10°S–10°N) equatorial Pacific under El Niño and La Niña events are explored. The asymmetric spatial responses of SAT anomaly at 2 m under asymmetric forcing of ENSO events are also analyzed. The results show that El Niño events are significantly stronger than La Niña events in the E region, while the C region is the opposite. The contribution of nonlinear dynamic heating to the asymmetric components of SST anomaly in El Niño and La Niña years over the E and C regions is positive feedback, and it is the dominant dynamic factor that causes the positive and negative asymmetric components of SST anomaly in these two regions. Ekman pumping is unfavorable for the formation of the positive asymmetric component of the SST anomaly in the E region, but favorable for the formation of the negative asymmetric component of the SST anomaly in the C region. The formation of the negative asymmetric component of SST anomaly in the C region is damped by the positive feedback of mean circulation, zonal advection, and thermocline feedback. The asymmetric distribution of SAT anomaly at 2 m is consistent with the asymmetric spatial distribution of SST anomaly. However, the significant range of positive and negative asymmetric components of SAT anomaly is evidently reduced, and the asymmetric results in some areas are not significant.

**Keywords** El Niño-Southern Oscillation (ENSO); asymmetry; heat budget analysis

## 引言

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 事件是热带地区最强的海-气耦合现象,作为热带海面温度(sea surface temperature, SST; 简称“海温”)年际变率的主导模态一直备受关注<sup>[1-5]</sup>。ENSO 事件的频繁发生给人们的生产生活、交通、农业等都造成了巨大的影响<sup>[6-20]</sup>。因此,针对 ENSO 事件的研究具有十分重要的意义。

以往的研究表明 ENSO 事件冷暖位相在振幅上存在非对称性<sup>[21]</sup>,东太平洋异常 SST 在 El Niño 年的空间范围明显大于 La Niña 年<sup>[22]</sup>。全球 SST 偏差系数的异常空间分布同样显示赤道东太平洋存在强烈的正偏差,而西太平洋为负偏差<sup>[23]</sup>。因此不能完全将 La Niña 事件作为 El Niño 事件的相反位相对待<sup>[24-27]</sup>。

研究表明海洋中的内部动力过程在造成 ENSO 冷暖位相振幅非对称的过程中起主导作用<sup>[26,28]</sup>。显著的 SST 正异常可以诱发赤道太平洋东部深对流产生比 La Niña 事件更大范围的 El Niño 事件<sup>[25]</sup>。在 La Niña 时期更为活跃的热带不稳定波的负反馈机制也能够削弱 La Niña 事件的振幅大小,从而有利于 ENSO 冷暖位相振幅非对称的形成<sup>[29]</sup>。此外,海洋非线性动力加热过程会使 La Niña 事件中 SST 增高,进而达到减小 La Niña 强度的作用<sup>[30-31]</sup>。有研究将海

洋反馈过程在造成 ENSO 振幅非对称性中所起的作用量化后发现,El Niño 时期的海洋正反馈作用更强使得在太平洋东部 El Niño 暖异常更强<sup>[32]</sup>。Hayashi 等<sup>[33]</sup>通过对气候模式的分析发现 ENSO 振幅非对称性在很大程度上与沿赤道太平洋次表层非线性动力过程有关。在年代际尺度上,Pan 等<sup>[34]</sup>发现 El Niño 自 1980 年前后,存在振幅上的年代际非对称现象,在 1980 年之前(后),赤道东太平洋异常的向东流会产生负(正)非线性纬向平流,从而造成 El Niño 事件振幅在年代际上的非对称变化。

前人对 ENSO 事件非对称性已有不少研究,但对本文中发现的赤道中东太平洋海温表现为显著不同的非对称性特征及其可能的影响因子并没有进行深入探讨,同时对除非线性动力加热项以外其他影响非对称分量的可能海洋内部动力过程探究较少。因此,利用非对称合成差分析方法和海洋热量收支诊断方法等,在前人研究基础上对造成赤道中东太平洋海温显著非对称性特征的可能海洋内部动力过程及其对表面气温的影响展开研究,进一步补充与 ENSO 事件相关的非对称性研究,为 ENSO 事件的预报、预测提供科学的参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据

研究时段为 1950 年 1 月—2020 年 12 月冬季(冬

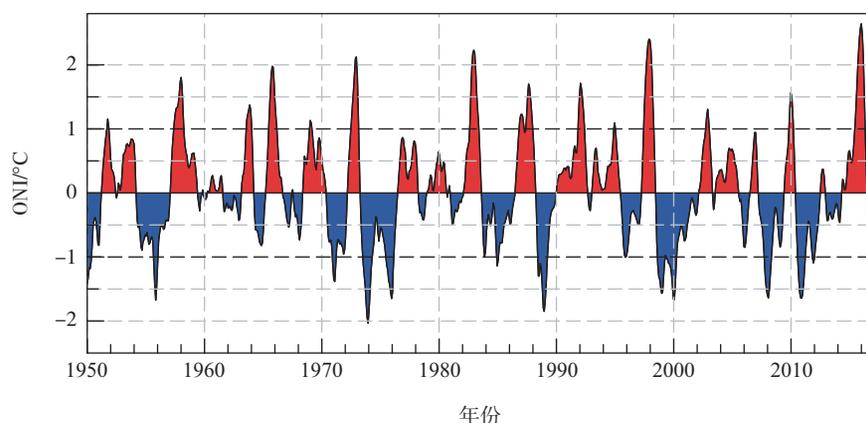
季表示当年 12 月—次年 2 月),使用的数据如下:  
(1)英国气象局哈得来中心提供的 1950—2020 年空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  (经度 $\times$ 纬度)的全球范围 SST 资料 1.1 版本 (HadISST1; <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>)<sup>[35]</sup>; (2)美国马里兰大学提供的 1950—2020 年空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (经度 $\times$ 纬度)的全球范围逐月 SST 以及纬向、经向和垂向流速海洋同化资料 (simple ocean data assimilation, SODA) 2.2.4 版本 (SODAv2.2.4; [http://apdr.c.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/hawaii\\_soest\\_c71f\\_e12b\\_37f8.html](http://apdr.c.soest.hawaii.edu/erddap/griddap/hawaii_soest_c71f_e12b_37f8.html)), 其垂直方向为不等间距的 40 层<sup>[36]</sup>; (3)美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) (NCEP/NCAR) 提供的 1950—2020 年空间分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$

(经度 $\times$ 纬度)的全球范围 2 m 高度气温场 (surface air temperature, SAT) 资料<sup>[37]</sup>; (4)美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 气候预测中心 (Climate Prediction Center, CPC) (NOAA-CPC) 提供的海洋尼诺指数 (Oceanic Niño Index, ONI; <https://ggweather.com/enso/oni.htm>)。

## 1.2 方法

### 1.2.1 ENSO 事件的挑选

利用 NOAA-CPC 提供的 ONI 选取 ENSO 事件。如图 1 所示,该指标通过计算 Niño 3.4 区域 ( $170^\circ\text{W} \sim 120^\circ\text{W}, 5^\circ\text{N} \sim 5^\circ\text{S}$ ) 连续 3 个月平均的异常 SST 得到。本研究定义的 El Niño 事件为异常 SST 大于或等于  $1.0^\circ\text{C}$  的事件, La Niña 事件为异常 SST 小于或等于  $-1.0^\circ\text{C}$  的事件<sup>[34,38]</sup>。



红色阴影—异常 SST 大于 0; 蓝色阴影—异常 SST 小于 0。

图 1 1950—2020 年 ONI 的时间序列

Fig.1 Time series of ONI during 1950–2020

根据以上分类标准,结合本研究的时间段 1950—2020 年,挑选出的 ENSO 事件如表 1 所示。分别有 15 次 El Niño 事件和 11 次 La Niña 事件,选取的样本数量具有统计学意义,符合本文的研究需求。

表 1 研究所选取的 1950—2020 年冬季 ENSO 事件

Table 1 Winter ENSO events used in this study during 1950–2020

ENSO 事件(个数)	年份
El Niño 事件(15)	1951、1957、1963、1965、1968、1972、1982、1986、1987、1991、1994、1997、2002、2009、2015
La Niña 事件(11)	1955、1970、1973、1975、1988、1995、1998、1999、2007、2010、2011

注:所列年份冬季指当年 12 月—次年 2 月,如 1951 年冬季指 1951 年 12 月—1952 年 2 月。

### 1.2.2 非对称合成差分析方法

使用的非对称合成差分析方法 (图 2) 来自 Karori 等<sup>[9]</sup>的研究,将其整理成如下表达式:

$$\begin{cases} F(A^+) - [-F(A^-)] = \Delta_F \\ R(A^+) - [-R(A^-)] = \Delta_R \end{cases} \quad (1)$$

其中: $A^+$ 和 $A^-$ 表示某物理量  $A$  通过一定正负标准差筛选后所得到的正事件和负事件, $F$  表示与强迫相关的物理量 (例如 SST 异常场), $R$  表示与响应有关的物理量 (例如 SAT 异常场), $F(A^+)$ 和 $F(A^-)$ 分别表示强迫  $F$  的正事件和负事件, $\Delta_F$ 表示  $F$  对应的非对称分量, $R(A^+)$ 和 $R(A^-)$ 分别表示响应  $R$  的正事件和负事件, $\Delta_R$ 表示  $R$  对应的非对称分量。如果 $\Delta_F$

的数值与 0 相比,二者的差异并不显著,则说明  $F(A^+)$  与  $F(A^-)$  在振幅上没有明显的差异,同时也

表示在强度上,  $F(A^+)$  和  $F(A^-)$  是对称的,即:该强迫对应的正事件  $F(A^+)$  与负事件  $F(A^-)$  强度相当。

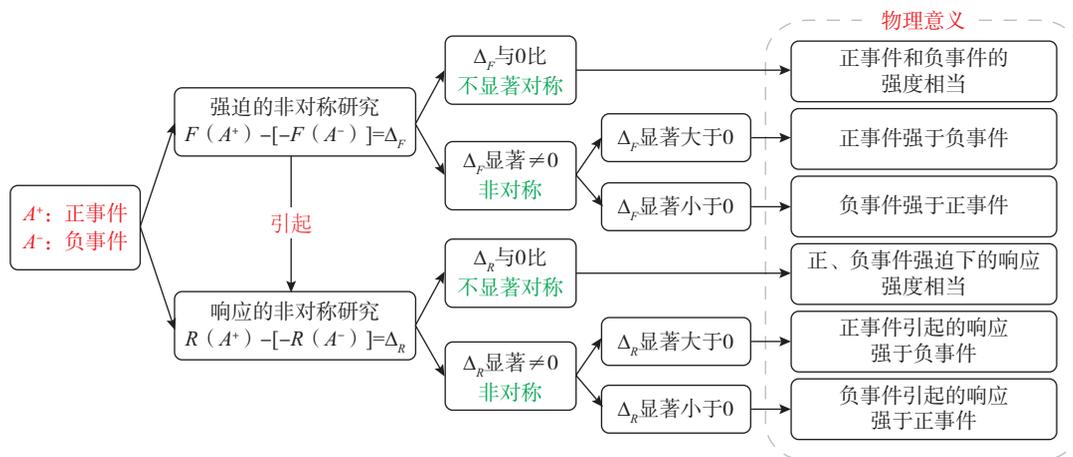


图2 非对称合成差分析方法

Fig.2 Asymmetric composite difference analysis method

相反的,如果  $\Delta_F$  的数值与 0 相比是比较显著的,会出现两种情况。第一种是当  $\Delta_F$  的数值显著大于 0,表示  $F(A^+)$  比  $F(A^-)$  的振幅强很多,即:该强迫对应的正事件  $F(A^+)$  比负事件  $F(A^-)$  显著强很多。另一种情况是  $\Delta_F$  的数值显著小于 0,表示  $F(A^+)$  比  $F(A^-)$  的振幅弱很多,即:该强迫对应的正事件  $F(A^+)$  比负事件  $F(A^-)$  显著弱很多。对于响应  $R$  的分析也与上式相同。这种非对称合成差分析方法不仅可以研究对应物理量的非对称性特征,还可以研究其对称特征。此外,正事件和负事件之间的显著差异可以通过显著性  $t$  检验来计算。

### 1.2.3 热量收支诊断方法

所使用的海洋热量收支诊断方程<sup>[39-40]</sup>如下:

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = f_{MC} + f_{ZA} + f_{EK} + f_{TH} + f_{NDH} + f_{TD} + f_R \quad (2)$$

方程右边的每项分别表示如下:

$$f_{MC} = -\bar{u} \frac{\partial T'}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial T'}{\partial y} - \bar{w} \frac{T'}{H}, \quad (3)$$

$$f_{ZA} = -u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x}, \quad (4)$$

$$f_{EK} = -v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} - w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \quad (5)$$

$$f_{TH} = -\bar{w} \frac{T'_{sub}}{H}, \quad (6)$$

$$f_{NDH} = -u' \frac{\partial T'}{\partial x} - v' \frac{\partial T'}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial T'}{\partial z}, \quad (7)$$

$$f_{TD} = Q. \quad (8)$$

其中:上标“-”和侧标“'”分别表示该物理量的气候平均值和异常值,  $T$ 、 $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别表示海洋的温度、纬向流速、经向流速和垂向流速,  $H$  表示平均有效混合层深度(取 50 m),“sub”表示 50~100 m 次表层平均深度。  $f_{MC}$  表示平均流(mean circulation, MC)作用,  $f_{ZA}$  表示纬向平流(zonal advection, ZA)反馈作用,  $f_{EK}$  表示埃克曼(Ekman, EK)输送反馈作用,  $f_{TH}$  表示温跃层(thermocline, TH)反馈作用,  $f_{NDH}$  表示非线性动力加热(nonlinear dynamical heating, NDH)作用,  $f_{TD}$  表示热力学耗散(thermodynamical damping, TD)作用,  $f_R$  表示残余(residual, R)项。ZA、EK 和 TH 项是海洋动力过程中最主要的 3 项<sup>[41-42]</sup>。NDH 项主要与 El Niño 和 La Niña 之间振幅的非对称性有关<sup>[26,28]</sup>。本文主要分析 MC、ZA、EK、TH 和 NDH 这 5 项对赤道中东太平洋 SST 异常场显著非对称性关键区的作用,揭示上述 5 项对 SST 异常场非对称性分布的可能贡献。

### 1.2.4 统计学方法

除以上方法外,还用了合成分析、显著性  $t$  检验的统计学方法。通过合成分析能够得到不同事件下某气象变量的平均值,从而探究这种气象变量在某一事件下的总体特征。本文使用的非对称合成差分析方法主要是将 El Niño 事件下某物理量的合成结果与负的 La Niña 事件下某物理量的合成结果作差,得到该物理量的非对称空间分布。

关于非对称合成差分析方法的显著性检验, 检验的样本是某物理量的正事件和负的负事件, 这与传统的正事件、负事件的显著性检验相比, 分母所对应的数值不变, 分子对应的正事件与负的负事件的差值结果相比于正事件与负事件的差值结果明显减小, 使得在进行非对称性分析时计算出的显著性检验数值相对较小, 如果以置信水平为 95%、99% 等条件进行显著性检验是相对严格的。因此, 在计算非对称性分析的显著性检验时, 适当降低置信水平是必要的。

## 2 SST 异常场的空间分布及其非对称性特征

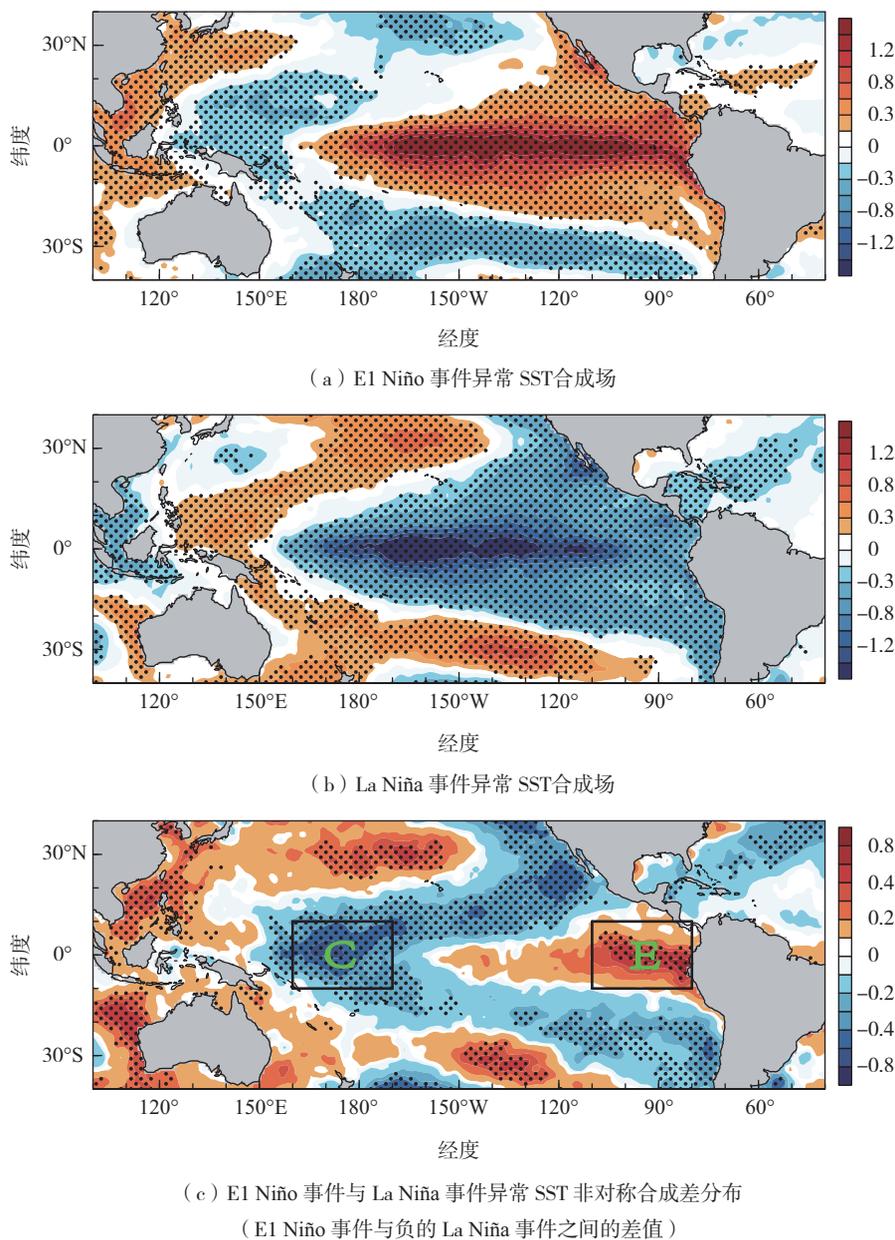
图 3a 和图 3b 分别给出了 1950—2020 年冬季 ENSO 事件冷、暖位相合成后 SST 异常的空间分布。当 El Niño 事件发生时(图 3a), SST 正异常范围集中在南北纬  $30^{\circ}$  左右, 东西方向从  $80^{\circ}\text{W}$  附近的南美洲沿岸一直向西延伸到赤道中太平洋地区  $165^{\circ}\text{E}$  附近, 整体空间分布具有明显的“马蹄形”特征。SST 正异常强度达到  $0.8^{\circ}\text{C}$  的海区范围集中在南北纬  $10^{\circ}$  内, 而强度达到  $1.2^{\circ}\text{C}$  以上的范围在主要位于南北纬  $5^{\circ}$  内, 呈窄长的细条状沿赤道分布, 该区域内 SST 正异常最大值为  $1.58^{\circ}\text{C}$ 。当 La Niña 事件发生时(图 3b), SST 负异常范围在南北方向上能延伸到南北纬  $30^{\circ}$  以外, 东西方向上能从  $70^{\circ}\text{W}$  一直向西延伸到  $155^{\circ}\text{E}$  左右, 虽然 La Niña 事件在范围上相对 El Niño 事件有所扩张, 但 SST 负异常较强的区域(强度小于  $-0.8^{\circ}\text{C}$ ) 却比 El Niño 事件发生时更小, 主要集中在  $100^{\circ}\text{W} \sim 165^{\circ}\text{E}$ 、 $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$  的区域内, SST 负异常强度小于  $-1.0^{\circ}\text{C}$  的区域呈块状分布在赤道两侧, 且在  $180^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{W}$  的范围内更为集中, SST 负异常的最小值为  $-1.43^{\circ}\text{C}$ 。

通过对比 El Niño 事件与 La Niña 事件 SST 异常空间分布(图 3a、b) 可以发现, El Niño 事件发生时(图 3a), SST 正异常超过  $1.2^{\circ}\text{C}$  以上的海温范围从南美洲秘鲁沿岸一直沿赤道向西延伸到  $170^{\circ}\text{W}$ , SST 正异常呈现连续的带状分布, 中间没有断裂。但在 La Niña 事件发生时(图 3b),  $110^{\circ}\text{W} \sim 80^{\circ}\text{W}$ 、 $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$  范围内, SST 负异常的大值有很明显的空缺, 并且负异常大值区域在沿着赤道延伸时呈块状分布, 表现的并不是很连续, 这似乎说明在该经纬度范围内, El Niño 事件与 La Niña 事件的强度大小

和影响范围并不一致, 很可能会造成赤道东太平洋东部地区 SST 异常的非对称性。此外, El Niño 事件发生时(图 3a), SST 正异常大于  $1.0^{\circ}\text{C}$  的范围比 La Niña 事件发生时(图 3b) SST 负异常小于  $-1.0^{\circ}\text{C}$  的范围要大很多, 并且 El Niño 事件下的 SST 正异常的中心位置更偏东, 而 La Niña 事件下 SST 负异常的中心位置更偏西。对比冷暖事件下 SST 异常值的西边界零线范围(图 3a、b) 可以发现, La Niña 事件向西延伸的程度相比于 El Niño 事件更加偏西, 使得其 SST 负异常中心也更加偏西, 这很可能会导致赤道中太平洋 SST 异常场产生负非对称分量。

为了更好地衡量 ENSO 事件冷暖位相的非对称性, 利用非对称合成差分析方法(El Niño 事件的合成结果与负的 La Niña 事件的合成结果作差) 进一步对 ENSO 事件的非对称性进行分析。图 3c 表示的是 El Niño 事件与 La Niña 事件 SST 异常场的非对称空间分布。正如前文所分析, 在赤道东太平洋存在一个 SST 异常的正非对称分量中心, 其东西范围从  $80^{\circ}\text{W}$  一直向西延伸到  $110^{\circ}\text{W}$  附近, 并且该非对称分量通过了置信水平为 85% 的显著性  $t$  检验。该范围 SST 异常的正非对称分量基本都能达到  $0.8^{\circ}\text{C}$  以上, 其最大值为  $0.96^{\circ}\text{C}$ , 由此可见在该区域, El Niño 事件时 SST 正异常与 La Niña 事件时 SST 负异常的强度之差最大接近  $1.0^{\circ}\text{C}$ , 表现出强烈的正非对称性特征, 与前文分析的  $110^{\circ}\text{W} \sim 80^{\circ}\text{W}$ 、 $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$  范围内(图 3b), SST 较强负异常范围空缺的结果一致, 说明在该区域范围内 El Niño 事件 SST 正异常的强度显著强于 La Niña 事件负异常的强度。

同样, 在赤道中太平洋地区也存在一个 SST 异常场表现为负非对称性特征的显著区域(图 3c), 该负非对称性特征区域的范围主要集中在  $160^{\circ}\text{E} \sim 170^{\circ}\text{W}$ 、 $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$  的范围内, 其结果也通过了置信水平为 85% 的显著性  $t$  检验。该区域异常 SST 的负非对称分量基本都在  $-0.80^{\circ}\text{C}$  以下, 最小值达到  $-0.83^{\circ}\text{C}$ , 表现出强烈的负非对称性特征, 这对应于图 3b 中, La Niña 事件 SST 负异常中心更偏西, 导致负非对称分量也集中于赤道中太平洋地区。同时, 该区域异常 SST 的负非对称分量也说明在该范围内, La Niña 事件 SST 负异常强度显著强于 El Niño 事件 SST 正异常强度。



色阶—异常SST, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 打点区域—通过置信水平为85%的显著性  $t$  检验;  
 内有C的黑方框—赤道太平洋具有明显非对称特征的C区; 内有E的黑色  
 方框—赤道太平洋具有明显非对称特征的E区。

图3 1950—2020年冬季异常SST合成场

Fig.3 Composite winter SST anomaly during 1950–2020

由以上分析可知, El Niño 事件与 La Niña 事件的 SST 异常场在赤道东太平洋东区和赤道中太平洋存在显著的非对称性特征, 而这两个区域的非对称特征明显不同, SST 异常场在赤道东太平洋表现为正非对称性特征, 在赤道中太平洋则表现为负非对称性特性。以往的研究中, 并没有对这两个不同非对称性特征区域的形成原因展开研究, 那么赤道中东太平洋这两个显著的非对称性特征区域究竟是如

何形成的, 又与怎样的海洋内部动力过程相关, 这是本文需要探讨的科学问题。因此, 选取上述赤道东太平洋 SST 异常场表现为正非对称性特征的区域 (E 区:  $110^{\circ}\text{W} \sim 80^{\circ}\text{W}$ ,  $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ ) 和赤道中太平洋 SST 异常场表现为负非对称性特征的区域 (C 区:  $160^{\circ}\text{E} \sim 170^{\circ}\text{W}$ ,  $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ ) 作为两个 SST 异常场非对称性关键区, 并以此为切入点, 进一步探究造成上述 E 区和 C 区 SST 异常场出现不同非对称性特

征的主导海洋动力过程。

### 3 海洋混合层异常热量收支的非对称性特征

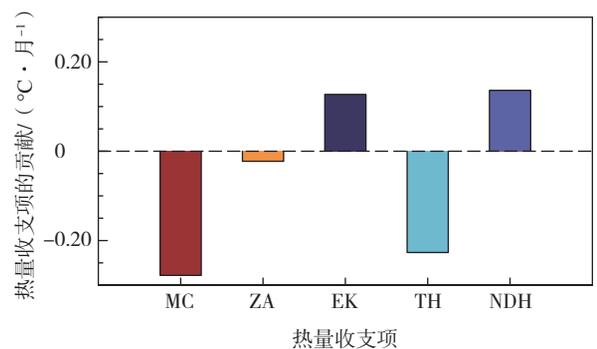
#### 3.1 赤道东太平洋 E 区

对海洋混合层进行热量收支诊断分析有助于更好地探究造成 E 区、C 区 SST 非对称性特征的主要海洋内部动力因子。图 4a 和图 4b 分别表示 El Niño 年和 La Niña 年赤道东太平洋 E 区海洋混合层的异常热量收支合成结果。在 El Niño 事件发生时(图 4a), E 区的平均流作用项 MC 为负异常, 温跃层反馈项 TH 也为负异常, MC 项与 TH 项的数值相对较大, 分别为  $-0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $-0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。而纬向平均流反馈作用 ZA 则表现为较弱的负异常, 其数值只有  $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。该区域异常热量收支表现为正异常的有 Ekman 输送作用 EK 项和非线性动力学加热作用 NDH 项这两项, 其数值分别为  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 二者的数值大小相当。由以上 5 项的数值大小来说, EK 项与 NDH 项造成的正反馈作用之和为  $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 这与 MC、TH 和 ZA 这 3 项共同造成的负反馈作用  $-0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  的绝对值相比是较小的。而由图 3a 的分析可知, El Niño 事件发生时 E 区 SST 为正异常, 这说明除了 EK 项与 NDH 项的正反馈作用外, 热收支方程中的其他项对 E 区海温正异常的形成可能也起到重要正反馈作用, 因此造成该地区 SST 异常场显著为正的结果。但 EK 项和 NDH 项是 5 项之中造成 E 区 SST 为正异常的主导 2 项。

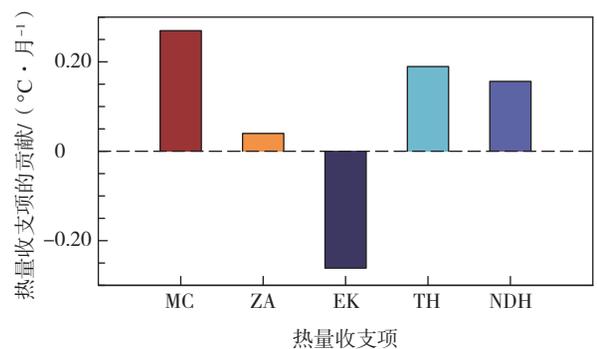
对比 La Niña 事件发生时赤道东太平洋 E 区海洋混合层的异常热量收支合成结果(图 4b), 除 EK 项表现为  $-0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  的负反馈作用外, MC、ZA、TH、NDH 项均表现为正反馈作用, 其值分别为  $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 、 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 、 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 、 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 这 4 项正反馈作用的总和达到  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。由上文分析可知, 在 La Niña 事件发生时(图 3b), E 区 SST 表现为负异常, 这说明造成 E 区 La Niña 年海温负异常的海洋动力因子除 Ekman 输送下的负反馈作用, 还有其他动力过程导致该区域 SST 显著负异常, 但就上述 5 项而言, EK 项是造成 E 区 La Niña 年海温负异常的主要动力过程。

值得注意的是, 通过对比 E 区 El Niño 事件和 La

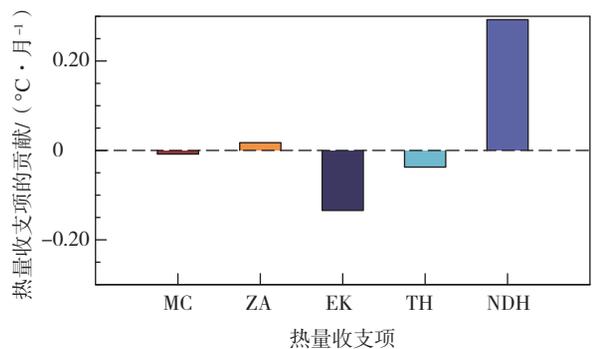
Niña 事件发生时海洋混合层异常热量收支合成结果的强度(图 4a、b), 可发现 MC、ZA、TH 项在冷、暖位相的强度相差不多, 而 EK、TH 和 NDH 项的强度相差较大, 尤其 EK 项, 其绝对值之差为  $-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。NDH 项无论在 El Niño 年还是在 La Niña 年都表现为正异常, 这说明很有可能是 EK、TH 和 NDH 项所主导的动力过程, 使得 E 区 SST 异常场表现为显著的非对称性特征。



(a) El Niño 事件



(b) La Niña 事件



(c) El Niño 事件与 La Niña 事件的非对称合成差结果

图 4 E 区 MC 项(红色柱)、ZA 项(黄色柱)、EK 项(深蓝色柱)、TH 项(浅蓝色柱)、NDH 项(紫色柱)的热量收支合成结果

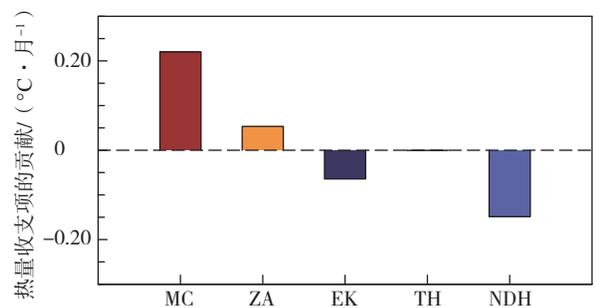
Fig.4 Heat budget composite analysis of MC item (red bar), ZA item (yellow bar), EK item (dark blue bar), TH item (light blue bar), and NDH item (purple bar) in the E region

为深入探究造成赤道东太平洋 E 区 SST 异常场表现为显著正非对称性的原因,进一步采用非对称合成差分分析方法,对 El Niño 年和 La Niña 年异常热量收支结果进行探究(图 4c)。其结果与上文推测结果一致,5 项当中有两项表现为弱的非对称性,分别是平均流作用 MC 项和纬向平均流反馈作用 ZA 项,数值只有  $-0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,其作用基本可以忽略不计。这说明在 E 区,水平和垂直温度平流( $-\bar{u}\frac{\partial T'}{\partial x}, -\bar{v}\frac{\partial T'}{\partial y}, -\bar{w}\frac{T'}{H}, -u'\frac{\partial \bar{T}}{\partial x}$ ),即 MC 项和 ZA 项整体对该区域非对称性贡献较小,这一结论与宋迅殊<sup>[43]</sup>的研究结论相符。而对造成 E 区 SST 异常场非对称性特征作用明显的过程主要有两类:一类贡献较大的是非线性动力加热作用 NDH 项,该项无论在 El Niño 年还是在 La Niña 年都表现为正异常,造成的 SST 正异常数值为  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ;另一类贡献较小的是与 Ekman 输送有关的 EK 项,其数值为  $-0.13\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。TH 项对非对称性的形成也有一定的贡献,其值为  $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,但与 NDH、EK 的数值相比是较小的。

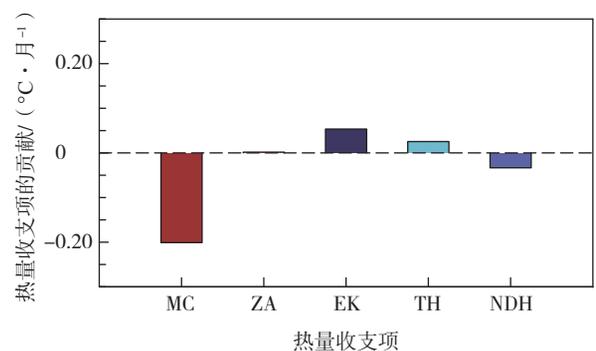
值得注意的是,NDH 与 EK 项虽然都对 E 区非对称性的形成有很大贡献,但二者的作用是相反的。NDH 项的主要作用是导致 E 区 SST 异常产生正非对称分量,而 EK 项的作用则是导致该区域 SST 异常产生负非对称分量,由图 3c 的分析可知,E 区 SST 异常非对称分量表现为正,这说明 NDH 项是导致 E 区 SST 异常产生显著正非对称分量的主要动力过程。NDH 项使 E 区异常 SST 在 El Niño 年时不断增加,同样在 La Niña 年时,也使 E 区异常 SST 升高,这就导致了 El Niño 年和 La Niña 年 E 区 SST 异常场之间的不平衡,造成二者非对称性分布,这与 Jin 等<sup>[28]</sup>对 NDH 项非线性动力学加热作用的解释一致。总的来说,E 区 NDH 项在不断增加海温非对称分量的过程中,EK 项和 TH 项却起到抵消该非对称分量的负反馈作用,但 EK 项和 TH 项的负反馈作用只有  $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,与 NDH 项  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  的正反馈作用相比,并不影响 E 区 SST 异常场正非对称分量的形成(图 3c),使得在 E 区范围内,El Niño 事件的强度显著强于 La Niña 事件。

### 3.2 赤道中太平洋 C 区

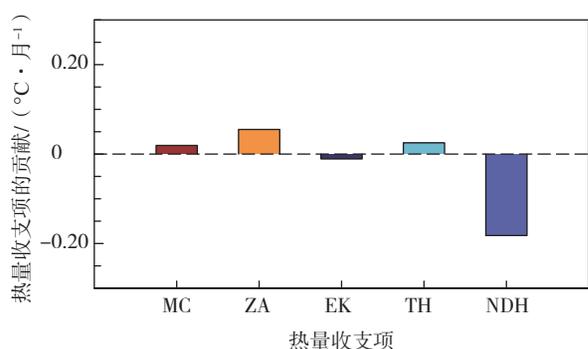
图 5a、b 分别表示 El Niño 年和 La Niña 年赤道中太平洋 C 区海洋混合层的异常热量收支合成结果。对赤道中太平洋 C 区来说,当 El Niño 事件发生时(图 5a),平均流作用 MC 项与纬向平流项作用 ZA 项表现为正反馈作用,其数值分别为  $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,Ekman 输送相关的 EK 项和非线性加热作用 NDH 项均表现为负反馈作用,其数值为  $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $-0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,值得注意的是,TH 项在 El Niño 年对 C 区 SST 异常场的贡献很小,几乎为 0,其作用在图中几乎可以忽略不计,这可能与该区域混合层深度有关。由图 3a 的分析可知,El Niño 年赤道中太平洋 C 区的 SST 表现为正 SST 异常,对比图 5a 的结果,该 SST 正异常主要是由 MC 和 ZA 这两项的正反馈作用贡献的,其数值为  $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ,同时 MC 项的正反馈作用比 ZA 项更强,几乎是 ZA 项的 3 倍多,因此 MC 项是造成 El Niño 年 C 区正异常 SST 形成的主要海洋动力作用,ZA 项为辅。二者在 El Niño 事件发生时,不断对 C 区的 SST 加温,造成正 SST 异常。在这个过程中,与 Ekman 输送相关的 EK 项和非线性加热作用 NDH 项对 El Niño 年 C 区正异常 SST 的形成则起到负反馈作用,使得 C 区 SST 不断降温。由于 C 区总的正反馈作用( $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ )强于总的负反馈作用( $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ),使得该地区 SST 表现为正异常。



(a) El Niño 事件



(b) La Niña 事件



(c) El Niño 事件与 La Niña 事件的非对称合成差结果

图 5 同图 4, 但表示 C 区的热量收支合成结果

Fig.5 The same as Fig.4, but for heat budget composite analysis results in the C region

在 La Niña 事件发生时(图 5b), 5 项动力过程只有 MC 项数值较大, 为  $-0.20$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 此时 ZA 项几乎无作用, 而 EK 项、TH 项都为较小的正反馈作用, 数值为  $0.06$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $0.03$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , NDH 项则表现为较小的负反馈作用, 其数值为  $-0.04$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。MC 项的负反馈作用(图 5b)与 El Niño 年时的正反馈作用(图 5a)截然相反, 该负反馈作用有利于在 C 区产生 SST 负异常信号, 使得 La Niña 事件异常 SST 的合成结果在 C 区表现为负异常(图 3b)。同时有利于 La Niña 事件 SST 负异常产生的还有 NDH 项, 虽然对该地区负异常海温也有贡献, 但相对较少。EK 项和 TH 项则不利于 C 区 SST 负异常信号的形成, 但二者之和相对比较小, 只有  $0.09$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 与 MC 项和 NDH 项有利于 C 区 SST 负异常产生的  $-0.24$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$  的贡献相比, 是不足以抵消的。因此, 在 La Niña 年, C 区的负异常 SST 信号主要受到 MC 项的负反馈作用, 其次是 NDH 项的负反馈作用。

对比 El Niño 年和 La Niña 年 C 区海洋混合层的异常热量收支合成结果可以发现, MC 项在 El Niño 年时使得 C 区 SST 场异常增温, 在 La Niña 年时使得 C 区 SST 场异常降温, 在两种事件下的贡献值差不多, 非对称性特征并不明显。EK 项也是如此, 只不过与 MC 项相比作用相反, 其非对称性特征也不明显。但是对于 NDH 项来说, 在 El Niño 年使得该地区异常降温较大, 而在 La Niña 年则异常降温较小, 存在非常明显的非对称性。类似的还有 ZA 项, 在 La Niña 年几乎没有什么贡献, 但在 El Niño 年则表现为较大的正异常, 这也可能导致 C 区的非对称性特征。

因此, 为了进一步探究 C 区 El Niño 年与 La Niña 年异常热收支合成结果的非对称性特征, 从而揭示导致 C 区表现为显著负非对称性的主导动力过程, 同样采用非对称合成差分析方法, 得到 C 区 SST 异常场的非对称结果如图 5c 所示。与上文推测的较为一致, ZA、TH、NDH 项的动力过程都表现出较大的非对称性, 其数值分别是  $0.06$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 、 $0.03$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 、 $-0.19$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ , 而 MC、EK 项的非对称性相对较小, 分别为  $0.02$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$  和  $-0.01$   $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ 。这说明造成 C 区 SST 异常场非对称性的主要是 ZA、TH、NDH 项这 3 项所对应的动力过程, 而其中 ZA 和 TH 项对 C 区 SST 异常非对称分量起到的是正反馈作用, 即有利于 C 区 SST 异常场表现出正非对称分量的结果, 与图 3c 中对 C 区表现出的显著负非对称分量结果不符合。相反的, NDH 项则对 C 区 SST 异常场非对称分量起到负反馈作用, 即有利于 C 区 SST 异常场表现出负非对称性的结果, 并且 NDH 项的数值相对于 ZA 项和 TH 项是更大的, 这也对应了图 3c 中 C 区 SST 异常场负非对称性比较显著的结果。因此, NDH 项是造成 C 区 SST 异常场显著负非对称性的主导动力过程, 而 ZA 项和 TH 项则在 C 区 SST 异常场产生显著负非对称性的过程中起阻碍作用, EK 项在这当中几乎无作用。

通过横向对比 E 区和 C 区 La Niña 年与 El Niño 年异常热收支结果(图 4a—c 和图 5a—c), 可以发现: (1) El Niño 年时, TH 项在 E 区的数值相比于 C 区要大很多, 而 MC、ZA、EK、NDH 与 C 区的异常热收支结果相比符号相反(图 4a 和图 5a); (2) La Niña 年时, 除 TH 项, MC、EK、NDH 项对 E 区和 C 区的反馈作用相反(图 4b 和图 5b); (3) 对于非对称合成差的结果(图 4c 和图 4d), 无论是 E 区还是 C 区, NDH 项都是造成非对称分量正、负分布的主导因子, 不同的是 E 区 EK 项和 TH 项都不利于 E 区异常 SST 正非对称特征的形成。C 区的 MC、ZA 和 TH 项不利于 C 区异常 SST 负非对称特征的形成。

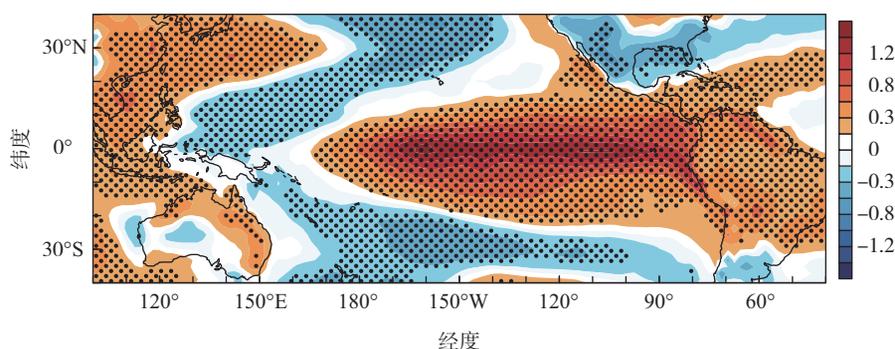
#### 4 2 m 高度上 SAT 异常场的空间分布非对称性特征

在上一节的研究中, 对 ENSO 事件下赤道中东太平洋 SST 异常场及其非对称性特征有了较为清晰的认识, 同时对造成赤道中东太平洋 E 区和 C 区

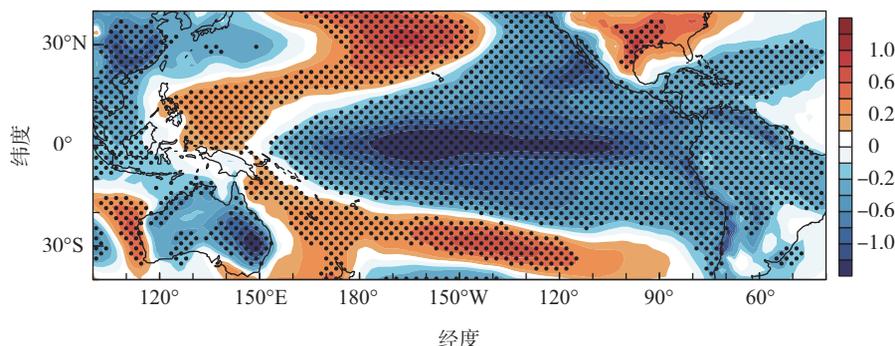
SST异常场非对称性特征的海洋动力过程进行了探究,揭示了造成这两个区域不同非对称性特征的主导动力过程。由于海-气相互作用,海洋的非对称性特征对大气也有一定的影响,二者紧密相关。为了进一步探究在 ENSO 事件非对称性强迫下大气的响应情况,进一步对 2 m 高度上 SAT 异常场的空间分布、非对称性特征进行探讨,这有助于理解在海洋非对称强迫作用下大气的响应情况。

图 6a 和图 6b 分别给出了 1950—2020 冬季 El Niño 事件和 La Niña 事件下 2 m 高度上 SAT 的异常

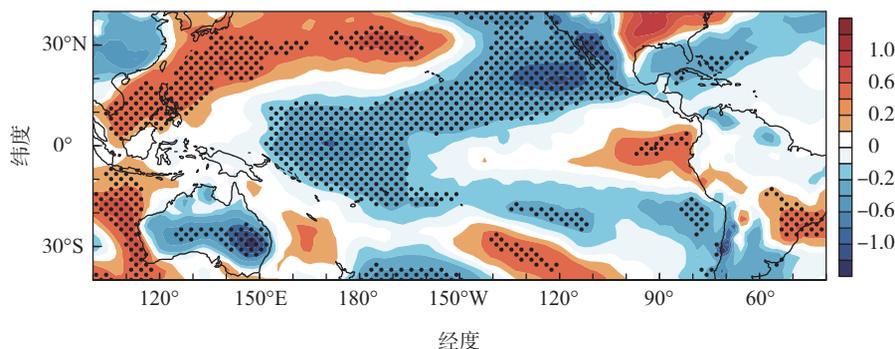
场。当 El Niño 事件发生时(图 6a), SAT 异常场与 SST 异常场(图 3a)空间分布大体相似, SAT 正异常范围同样可以自 80°W 附近一直向西延伸到赤道中太平洋地区 165°E 附近, SAT 正异常强度达到 0.8 °C 的海区范围集中在南北纬 10° 内,而强度达到 1.2 °C 以上的范围则主要位于南北纬 5° 内,同样呈沿赤道分布的窄长条状。有所不同的是, SAT 正异常强度达到 1.2 °C 以上的范围比 SST(图 3a)的范围更大,且 SAT 正异常的边缘范围更圆润,“马蹄形”特征更明显,该区域内 SAT 正异常最大值为 1.52 °C。



(a) El Niño 事件异常 SAT 合成场



(b) La Niña 事件异常 SAT 合成场



(c) El Niño 事件与 La Niña 事件异常 SAT 非对称合成差分布

色阶—异常 SAT, 单位: °C; 打点区域—通过置信水平为 85% 的显著性  $t$  检验。

图 6 同图 3, 但表示 2 m 高度上 SAT 异常场及其非对称空间分布  
Fig.6 The same as Fig.3, but for spatial distribution of SAT anomaly at 2 m and its asymmetric spatial distribution

而当 La Niña 事件发生时(图 6b), 2 m 高度上 SAT 的负异常中心能够在南北方向上延伸到南北纬 30° 以外, 东西方向上能从 60°W 一直向西延伸到 150°E 左右, 虽然 La Niña 事件在范围上相对 El Niño 事件更大, 但 SAT 负异常强度小于 -1.0 °C 的范围却比 El Niño 事件更小, 主要集中在 90°W ~ 170°E、10°S ~ 10°N 的区域内。与 SST 负异常的小值区域(图 3b)相比, SAT 的小值范围明显在南北方向上扩张, 东西方向上也有延伸, 其分布特征不再是 SST 异常小值范围所对应的块状分布, 而是与 El Niño 事件相似的条状分布, 同时强度小于 -1.2 °C 以下的中心范围则更加集中地分布在太平洋赤道的南北两侧。同时, La Niña 年 SAT 负异常值的绝对值在 E 区较大, 根据非对称合成差分析可知, E 绝对值较大的负异常数值可能导致该区域异常 SAT 正非对称分量减小。对于 SST 异常场(图 3c)表现为显著非对称特征的 C 区, SAT 异常在 El Niño 事件和 La Niña 事件中虽然与 SST 异常场分布(图 3a、b)相似, 但 La Niña 年 SAT 最小负异常绝对值 1.30 °C (图 6b) 小于 SST 最小负异常绝对值 1.43 °C (图 3b), 这可能会使该区域的负非对称分量减小。

为了更好地衡量 ENSO 事件冷暖位相强迫下 SAT 的非对称性特征, 同样利用非对称合成差分析方法对 2 m 高度上 SAT 异常场非对称性进行分析。图 6c 表示在 ENSO 强迫下 2 m 高度上 SAT 异常场非对称性特征的空间分布, 结果与前文的推测较为符合, 虽然 SAT 异常场的非对称空间分布总体与 SST 异常场的非对称空间分布(图 3c)相似, 能够表现出类似 E 区、C 区的正、负非对称分量, 不同的是对于 E 区而言, 其正非对称分量的显著范围明显减少, 正非对称性有所减弱, 这可能是由于在 La Niña 事件发生时, SAT 在该区域 La Niña 年负异常强度较强, 使得该区域正非对称性减弱, 正非对称分量范围减少。对于 C 区来说, SAT 异常场的负非对称性特征相比于 SST 异常场也有所减弱, 负非对称分量的大值区域明显减少, 负非对称分量在 C 区大部分区域只有 -0.6 °C 左右。总的来说, 在 ENSO 事件强迫下, 2 m 高度上的 SAT 场在 E 区、C 区部分范围非对称结果并不显著, 这或许与大气中的其他物理过程有关。

## 5 总结与讨论

利用 1950 年 1 月—2020 年 12 月 HadISST 资料以及 SODAv2.2.4 逐月 SST、纬向流速、经向流速和垂向流速同化资料和 NCEP/NCAR 2 m 逐月 SAT 资料, 结合非对称合成差分析方法、海洋混合层热量收支诊断方法等, 对 ENSO 事件强迫下赤道中东太平洋 E 区、C 区 SST 异常场显著非对称性的特征进行了分析, 探究了造成 E 区和 C 区 SST 异常场显著正、负非对称性的可能海洋内部动力过程, 对比了 E 区和 C 区主导海洋动力项在 El Niño 事件、La Niña 事件以及非对称分布结果下的异同, 同时也分析了 ENSO 事件强迫下 2 m 高度上 SAT 的异常空间分布和非对称分布。通过研究可得到以下结论:

(1) E 区 El Niño 事件异常 SST 的合成结果显著强于 La Niña 事件, 该区域异常 SST 非对称分量表现为显著正分量。NDH 项是造成 E 区异常 SST 非对称分量显著为正的主导海洋内部动力过程, 而 EK 项不利于 E 区异常 SST 正非对称分量的形成。

(2) C 区 La Niña 事件异常 SST 的合成结果显著强于 El Niño 事件, 该区域异常 SST 非对称分量表现为显著负分量。与 E 区相同的是 NDH 项对该区域异常 SST 负非对称分量的形成有较大贡献, 不同点在于尽管该区域 EK 项数值较小, 但有利于 C 区异常 SST 负非对称分量的形成。此外, MC、ZA 项和 TH 项则不利于 C 区异常 SST 显著负非对称分量。

(3) E 区总体上比 C 区异常热量收支结果的绝对值更大, 说明 E 区的海洋内部动力过程更剧烈。无论是在 E 区还是 C 区, NDH 项都有利于该区域 SST 非对称分量的形成。

(4) 2 m 高度上 SAT 异常场及其非对称空间分布与 SST 异常场较为一致, 能表现出类似 SST 异常场中 E 区、C 区的正、负非对称分量, 不同的是其正、负非对称分量的显著范围明显减小, 这说明除 ENSO 外, 大气中的其他物理过程也可能影响该区域 SAT 异常非对称分量的形成。

本文针对 ENSO 事件下造成赤道中东太平洋 SST 异常场非对称性分布的海洋内部动力过程及 2 m 高度上 SAT 异常场的响应进行了研究, 对 ENSO 事件的非对称性研究起到了一定的补充作用, 但在探究造成 SST 异常场显著非对称性特征的海洋动力

过程中只考虑了热量收支中与海洋内部动力有关的5项作用,并没有对热力学耗散项 TD 和残余项 R 进行说明,这是本文的不足之处。同时在考虑 ENSO 事件非对称强迫下的大气响应时,仅对 2 m 高度上 SAT 异常场进行了分析,并没有对其他大气要素进行讨论,这是今后需要补充的内容。ENSO 事件冷暖位相的强弱与其 SST 的持续时间长短也有关系,这点在未来研究 El Niño 事件与 La Niña 事件的非对称性时也应该考虑。由于 ENSO 事件的非对称强迫及其大气响应是比较复杂的物理过程,在 ENSO 事件强迫大气的过程中,是否还有其他信号的参与从而导致不同的非对称特征出现,这也是未来需要进一步研究的内容。

### 参考文献:

- [1] ROPELEWSKI C F, HALPERT M S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115(8): 1606-1626.
- [2] TRENBERTH K E, HOAR T J. The 1990–1995 El Niño–Southern Oscillation event: longest on record [J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(1): 57-60.
- [3] BOVE M C, ELSNER J B, LANDSEA C W, et al. Effect of El Niño on U.S. landfalling hurricanes, revisited[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1998, 79(11): 2477-2482.
- [4] McPHADEN M J, ZEBIAK S E, GLANTZ M H. ENSO as an integrating concept in earth science[J]. *Science*, 2006, 314(5806): 1740-1745.
- [5] 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.
- [6] McPHADEN M J, YU X. Equatorial waves and the 1997–98 El Niño[J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(19): 2961-2964.
- [7] 王林, 冯娟. 我国冬季降水年际变化的主模态分析[J]. *大气科学*, 2011, 35(6): 1105-1116.
- [8] 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]. *Int J Climatol*, 2011, 31(14): 2091-2101.
- [9] KARORI M A, LI J P, JIN F F. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over southeast China [J]. *J Climate*, 2013, 26(13): 4567-4582.
- [10] FENG J, LI J P, ZHENG F, et al. Contrasting impacts of developing phases of two types of El Niño on southern China rainfall[J]. *J Meteor Soc Japan*, 2016, 94(4): 359-370.
- [11] DING R Q, LI J P, TSENG Y H, et al. Joint impact of North and South Pacific extratropical atmospheric variability on the onset of ENSO events[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2017, 122(1): 279-298.
- [12] HOU Z L, LI J P, DING R Q, et al. Asymmetry of the predictability limit of the warm ENSO phase[J]. *Geophys Res Lett*, 2018, 45(15): 7646-7653.
- [13] 姚睿, 郑小童, 蒋灏, 等. ENSO 非对称性对热带降水的影响研究[J]. *海洋预报*, 2019, 36(1): 59-68.
- [14] ZHANG Y Z, LI J P, XUE J Q, et al. The relative roles of the South China Sea summer monsoon and ENSO in the Indian Ocean dipole development [J]. *Climate Dyn*, 2019, 53(11): 6665-6680.
- [15] 冯俊乔, 鲁云龙, 官聪, 等. 副热带太平洋海气变异对 ENSO 影响的研究进展和展望[J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 1-7.
- [16] YUN K S, LEE J Y, TIMMERMANN A, et al. Increasing ENSO-rainfall variability due to changes in future tropical temperature-rainfall relationship [J]. *Commun Earth Environ*, 2021, 2(1): 43.
- [17] FENG J, LI J P. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2011, 116(D13): D13102.
- [18] 林婷婷, 李春. ENSO 与南海 SST 关系的年代际变化 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(2): 68-75.
- [19] 褚颖佳, 郭飞燕, 尹承美, 等. 东部型和中部型厄尔尼诺事件对山东夏季降水的不同影响[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(4): 97-104.
- [20] FENG J, LI J P. Contrasting impacts of two types of ENSO on the boreal spring Hadley circulation [J]. *J Climate*, 2013, 26(13): 4773-4789.
- [21] CAI W J, VAN RENSCHE P, COWAN T, et al. Asymmetry in ENSO teleconnection with regional rainfall, its multidecadal variability, and impact [J]. *J Climate*, 2010, 23(18): 4944-4955.
- [22] DESER C, WALLACE J M. El Niño events and their relation to the Southern Oscillation: 1925–1986 [J]. *J Geophys Res: Oceans*, 1987, 92(C13): 14189-14196.
- [23] BURGERS G, STEPHENSON D B. The “normality” of El Niño [J]. *Geophys Res Lett*, 1999, 26(8): 1027-1030.
- [24] HOERLING M P, KUMAR A, ZHONG M. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections [J]. *J*

- Climate, 1997, 10(8): 1769-1786.
- [25] KANG I S, KUG J S. El Niño and La Niña sea surface temperature anomalies: asymmetry characteristics associated with their wind stress anomalies[J]. J Geophys Res: Atmos, 2002, 107(D19): 4372.
- [26] AN S I, JIN F F. Nonlinearity and asymmetry of ENSO [J]. J Climate, 2004, 17(12): 2399-2412.
- [27] OKUMURA Y M, DESER C. Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña [J]. J Climate, 2010, 23(21): 5826-5843.
- [28] JIN F F, AN S I, TIMMERMANN A, et al. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating [J]. Geophys Res Lett, 2003, 30(3): 1120.
- [29] AN S I. Interannual variations of the tropical ocean instability wave and ENSO [J]. J Climate, 2008, 21(15): 3680-3686.
- [30] TIMMERMANN A, JIN F F. A nonlinear mechanism for decadal El Niño amplitude changes [J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(1): 1003.
- [31] LI Y, LI J P, ZHANG W J, et al. Impacts of the tropical Pacific cold tongue mode on ENSO diversity under global warming [J]. J Geophys Res: Oceans, 2017, 122(11): 8524-8542.
- [32] GUAN C, McPHADEN M J, WANG F, et al. Quantifying the role of oceanic feedbacks on ENSO asymmetry [J]. Geophys Res Lett, 2019, 46(4): 2140-2148.
- [33] HAYASHI M, JIN F F, STUECKER M F. Dynamics for El Niño-La Niña asymmetry constrain equatorial-Pacific warming pattern [J]. Nat Commun, 2020, 11: 4230.
- [34] PAN X, LI T, CHEN M C. Change of El Niño and La Niña amplitude asymmetry around 1980 [J]. Climate Dyn, 2020, 54(3/4): 1351-1366.
- [35] RAYNER N A 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]. J Geophys Res: Atmos, 2003, 108(D14): 4407.
- [36] CARTON J A, CHEPURIN G, CAO X H. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950-95. Part II: results [J]. J Phys Oceanogr, 2000, 30(2): 311-326.
- [37] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(3): 437-472.
- [38] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. J Geophys Res: Oceans, 2007, 112(C11): C11007.
- [39] JIN F F, KIM S T, BEJARANO L. A coupled-stability index for ENSO [J]. Geophys Res Lett, 2006, 33(23): L23708.
- [40] REN H L, JIN F F. Recharge oscillator mechanisms in two types of ENSO [J]. J Climate, 2013, 26(17): 6506-6523.
- [41] JIN F F, NEELIN J D. Modes of interannual tropical ocean-atmosphere interaction: a unified view. Part I: numerical results [J]. J Atmos Sci, 1993, 50(21): 3477-3503.
- [42] JIN F F, AN S I. Thermocline and zonal advective feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO [J]. Geophys Res Lett, 1999, 26(19): 2989-2992.
- [43] 宋迅殊. ENSO 事件非对称性成因研究 [J]. 海洋学研究, 2013, 31(1): 35-44.