

# ENSO 发展和衰亡阶段中非线性项的作用<sup>\*</sup>

袁心仪 张文君 耿新

YUAN Xinyi ZHANG Wenjun GENG Xin

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京, 210044

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/International Joint Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2016-12-23 收稿, 2017-05-08 改回.

袁心仪, 张文君, 耿新. 2017. ENSO 发展和衰亡阶段中非线性项的作用. 气象学报, 75(5):784-796

Yuan Xinyi, Zhang Wenjun, Geng Xin. 2017. Effects of nonlinear terms during ENSO developing and decaying phases. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(5):784-796

**Abstract** The features of sea surface temperature (SST) anomaly skewness in the equatorial Pacific are investigated based on the SST dataset from the Hadley Center and the Simple Ocean Data Assimilation (SODA 2.2.4) dataset from the University of Maryland. Impacts of nonlinear terms on the developing and decaying speeds of different types of ENSO events are further studied through analyzing the heat budget of mix-layer sea temperature. The results show that the asymmetry of ENSO amplitude is mainly attributed to the EP El Niño, and the SST anomaly amplitude associated with the CP El Niño displays a quasi-symmetric feature with that of La Niña. Nonlinear terms exhibit positive effects during the developing phases of EP El Niño and La Niña, which tend to strengthen the EP El Niño amplitude but suppress the La Niña amplitude. However, the influence of nonlinear terms on the CP El Niño is relatively smaller compared to that on other types of ENSO. The overall effects of the nonlinear terms largely lead to the formation of the ENSO amplitude asymmetry. During the ENSO decaying phases, nonlinear terms remain positive values during La Niña but with a much weaker intensity. In addition, nonlinear terms accelerate and decelerate the EP and CP El Niño's decay, respectively. This may be responsible for the faster decaying speed during the EP El Niño events compared to that during the CP El Niño events.

**Key words** ENSO, Nonlinear term, Asymmetry

**摘要** 利用哈得来中心海表温度(HadISST)和美国马里兰大学海洋同化(Simple Ocean Data Assimilation, SODA 2.2.4)数据集,分析了1979—2015年赤道太平洋地区海表温度异常的偏度特征;并通过诊断混合层热量收支平衡方程着重探讨了非线性项在不同类型 ENSO 发展衰亡过程中起的不同作用。研究表明,中部型厄尔尼诺和拉尼娜事件的偏度很弱,且符号相反、强度相当,而东部型厄尔尼诺的偏度为很强的正值,即 ENSO 的强度非对称性主要来自东部型厄尔尼诺的贡献,中部型厄尔尼诺和拉尼娜的海表温度异常呈现准对称特征。在 ENSO 事件的发展阶段,非线性项对东部型厄尔尼诺和拉尼娜均有很强的正贡献,而对中部型厄尔尼诺的正贡献相对较弱,这会促进东部型厄尔尼诺强度的增强而抑制拉尼娜振幅的发展,从而有利于 ENSO 强度非对称性的产生;在 ENSO 事件的衰亡阶段,非线性项对拉尼娜维持正贡献但强度大为减弱,对东部型厄尔尼诺和中部型厄尔尼诺的衰减则分别起促进和抑制作用,这可能是东部型厄尔尼诺衰减速度较快而中部型厄尔

<sup>\*</sup> 资助课题:国家自然科学基金项目(41675073)、国家公益性行业专项(GYHY20150613)、江苏省高校自然科学研究项目(13KJB170013)、江苏省青蓝工程、六大人才高峰及高校优势学科建设工程(PAPD)。

作者简介:袁心仪,从事 ENSO 与海气相互作用研究。E-mail:18252083636@163.com

通讯作者:张文君,主要从事 ENSO 机理及海-气相互作用等方面研究。E-mail:zhangwj@nuist.edu.cn

尼诺衰减速度较慢的重要原因之一。

**关键词** ENSO, 非线性项, 非对称性

**中图法分类号** P47

## 1 引言

ENSO(El Niño-Southern Oscillation)是热带太平洋大尺度海-气相互作用在年际尺度上的最强信号(Bjerknes, 1969; Rasmusson, et al, 1982; Philander, 1983; Wallace, et al, 1998),其发生往往伴随全球范围的大气环流和天气气候异常(Van Loon, et al, 1981; Ropelewski, et al, 1987; Trenberth, et al, 2000; Alexander, et al, 2002)。中国东临太平洋,其气候异常与 ENSO 密切相关,许多研究(Huang, et al, 1989; Zhang, et al, 1996, 2016; 刘永强等, 1995; 陶诗言等, 1998; 金祖辉等, 1999; 黄荣辉等, 2003; 李海燕等, 2016)表明,不同位相的 ENSO 对中国气候的影响存在显著差异,且对中国不同地区的影响也不尽相同,在厄尔尼诺发展年的夏季,江淮流域降水偏多;而在衰减年,长江流域和江南地区雨量偏多,江淮流域雨量偏少。另外,不同类型的 ENSO 对中国气候的影响也有显著差别(Feng, et al, 2011, 2016; Karori, et al, 2013),研究表明,传统型厄尔尼诺通常造成华南春季降水偏多、夏季降水偏少,而中部型厄尔尼诺由于其不同的海-气耦合过程则会使华南春季和夏季降水均偏少;中部型拉尼娜会造成长江流域夏季降水偏多,而东部型拉尼娜对其影响较小。正是东亚乃至全球气候对 ENSO 的显著响应引发了人们对这一现象的高度关注,正确认识 ENSO 现象的发生、发展过程,对于短期气候预测具有重要的科学价值和指导意义。

过去几十年里,科学家们对 ENSO 循环的基本特征及动力过程进行了深入研究,提出并逐步完善了 ENSO 动力学理论(Bjerknes, 1969; Wyrki, 1975; Suarez, et al, 1988; Battisti, et al, 1989; Zhang, et al, 1993; Jin, 1997a, 1997b; Picaut, et al, 1997; Weisberg, et al, 1997; 张人禾等, 1998; 严邦良等, 2002; 陈锦年等, 2003a, 2003b; 李崇银等, 2008),深化了对 ENSO 现象的理解和认识。其中, Suarez 等(1988)和 Battisti 等(1989)提出的延迟振子理论和 Jin(1997a, 1997b)提出的“充放电”理论,分别着重考虑了热带海洋波动和斯维尔德鲁普平衡

理论在 ENSO 循环过程中的重要作用,被广泛用于解释 ENSO 冷暖位相的循环过程。然而,由于 ENSO 具有难以捉摸的复杂性和多变性,与此相关的很多科学问题仍需要更深入的研究。Philander (1990)提出 ENSO 是一种复杂的不规则非线性振荡;众多学者研究也发现 ENSO 具有年际尺度和年代际尺度的双重变化特征,其年际尺度上的变化主要由热带海-气相互作用造成,而年代际变率则很大程度上受热带外海-气过程或扰动的影响(Jin, et al, 1994; Tziperman, et al, 1994; Chang, et al, 1996)。Timmermann 等(2002)首次将热带地区自身的非线性作用与 ENSO 的年代际变化联系起来,指出温度方程中的非线性平流项可能发挥关键作用。此外, ENSO 的复杂性还体现在冷暖事件强度、纬向位置、经向范围和持续时间等多方面的不对称性(Zhang, et al, 2009, 2012, 2013; Okumura, et al, 2010; Dommenget, et al, 2013; Yeh, et al, 2014)。早在 20 世纪末就有观测结果表明,厄尔尼诺成熟期的赤道东太平洋海表温度异常(SSTA)远强于拉尼娜同期(Burgers, et al, 1999),这就造成 Nino3 区海表温度指数较正常态会强烈地偏向暖值(Trenberth, 1997)。起初,并不清楚这种强度不对称性的原因,因为如果海-气耦合系统是一个由气候噪音引起的线性系统, ENSO 的振幅应当是正态分布的(Thompson, et al, 2000, 2001)。直到 21 世纪初, Jin 等(2003)首次计算了赤道太平洋混合层热量收支后发现,厄尔尼诺和拉尼娜期间非线性加热项符号均为正,这意味着非线性项只有利于厄尔尼诺强度的增长而不利于拉尼娜的增长,进而指出非线性加热的不对称是厄尔尼诺和拉尼娜的振幅非对称性的重要原因。Su 等(2010)在 An 等(2004)的基础上进行了进一步研究,并且不再使用统一的 ENSO 发展时期,而是根据海表温度异常的强度对各次 ENSO 事件的发展阶段进行单独定义,即各次事件的发展阶段不尽相同,由此考察了热带太平洋非线性加热在 ENSO 发展时期的作用,得到了与 An 等(2004)类似的结论,同时指出非线性项中水平方向上的温度平流项起最为关键的作用。

然而,近年来热带太平洋观测到了一类新型厄尔尼诺事件。不同于传统型厄尔尼诺,这类厄尔尼诺的海表温度异常暖中心不再位于热带东太平洋,而是向西移到了赤道中太平洋区域,因而通常被称为中部型厄尔尼诺(CP El Niño)(Kao, et al, 2009),也有将其命名为日界线厄尔尼诺(Larkin, et al, 2005)、Modoki 厄尔尼诺(Ashok, et al, 2007)和暖池(Warm Pool)厄尔尼诺(Kug, et al, 2009; Ren, et al, 2011)等,尽管不同研究所用的名字和定义略有差异,但是所指的现象本质却是一致的。为了描述方便,文中将传统型厄尔尼诺称为东部型厄尔尼诺(EP El Niño)。不少研究指出两类厄尔尼诺对于全球气候异常的影响有着明显的不同(Feng, et al, 2010; Zhang, et al, 2011, 2014, 2015; Yu, et al, 2011; Kim, et al, 2012; Xu, et al, 2013),其发生、发展机制也存在着显著差异(Kao, et al, 2009; Kug, et al, 2009; Yeh, et al, 2009),但不同类型厄尔尼诺对 ENSO 强度非对称性的贡献以及非线性加热作用对不同类型厄尔尼诺的影响目前尚无深入的研究;此外,以往大多关注 ENSO 的发展阶段,对衰亡阶段非线性加热作用的研究较少。因此,本研究在前人工作的基础上进一步探讨了非线性项在 ENSO 的不同阶段对其强度非对称性所起到的作用,重点关注了两类厄尔尼诺期间的不同特征。从而更全面系统地认识非线性加热对 ENSO 发展演变的影响。

## 2 资料和方法

资料主要包括美国马里兰大学提供的 1979 年 1 月—2008 年 12 月的月平均海洋同化数据(Simple Ocean Data Assimilation, SODA 2. 2. 4)(Carton, et al, 2000; Giese, et al, 2011),水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,垂直方向上共 9 层;英国哈得来中心提供的 1979 年 1 月—2016 年 5 月的月平均海表温度(HadISST)资料(Rayner, et al, 2003)。文中主要采用合成分析方法对两类厄尔尼诺及拉尼娜时期非线性项的作用进行分析,并利用  $t$  检验对合成结果进行显著性检验。

采用 Nino3.4 指数(即  $5^\circ\text{N}$ — $5^\circ\text{S}$ ,  $120^\circ$ — $170^\circ\text{W}$  区域平均的海表温度距平序列)作为 ENSO 事件的监测指标。考虑到 ENSO 事件的成熟期不尽相同,即可能在秋季达到顶峰、也可能到冬季达到峰值,因

此,根据秋冬季(SONDJF)平均 Nino3.4 指数选取 ENSO 事件,若该指数大于  $0.5^\circ\text{C}$ (小于  $-0.5^\circ\text{C}$ ),则将当年定义为厄尔尼诺(拉尼娜)年。由此定义出 11 次厄尔尼诺事件:1982/1983、1986/1987、1987/1988、1991/1992、1994/1995、1997/1998、2002/2003、2004/2005、2006/2007、2009/2010 和 2015/2016 年;以及 12 次拉尼娜事件:1983/1984、1984/1985、1985/1986、1988/1989、1995/1996、1998/1999、1999/2000、2000/2001、2007/2008、2008/2009、2010/2011 和 2011/2012 年。此外,采用 Kug 等(2009)的定义方法区分两类厄尔尼诺事件,即通过比较秋冬(SONDJF)Nino3 指数和 Nino4 指数的大小来选定东部型和中部型厄尔尼诺:若 Nino3 指数大于(小于)Nino4 指数,则将该事件定义为东部型厄尔尼诺(中部型厄尔尼诺)。由此定义出 3 次东部型厄尔尼诺:1982/1983、1997/1998 和 2015/2016 年;以及 8 次中部型厄尔尼诺:1986/1987、1987/1988、1991/1992、1994/1995、2002/2003、2004/2005、2006/2007 和 2009/2010 年。受 SODA 资料长度所限,2008 年后发生的 5 次 ENSO 事件在热量收支分析中不予考虑。

为了量化 ENSO 的强度非对称性,采用偏度来表征海表温度异常相对于平均状态的偏差程度。若偏度为 0,则表示海表温度异常呈正态分布;而如果偏度  $>0$  则表示海表温度异常呈正偏态,偏度  $<0$  表示呈负偏态(White, 1980)。偏度算式为

$$S = \frac{m_3}{(m_2)^{3/2}} \quad (1)$$

式中,  $m_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^k$ ,  $\bar{X}$  表示气候平均态,  $x_i$  表示第  $i$  次观测值,  $N$  为观测次数。

非线性作用通过计算海洋混合层热量收支的非线性部分得到,热量收支平衡方程参照 Jin 等(2003)定义

$$\begin{aligned} \frac{\partial T'}{\partial t} = & - (u' \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} + v' \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} + w' \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \bar{u} \frac{\partial T'}{\partial x} + \\ & \bar{v} \frac{\partial T'}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial T'}{\partial z}) - (u' \frac{\partial T'}{\partial x} + v' \frac{\partial T'}{\partial y} + \\ & w' \frac{\partial T'}{\partial z}) + R' \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $T$  及  $u, v, w$  分别为月平均海温及纬向、经向、垂直海流速度,  $\bar{\quad}$  和  $'$  分别表示气候平均态和异常态,海表热通量、一些次网格尺度和高频信号的贡献项

用残差项  $R'$  表示。其中,等式右端第 2 个括号中的各项即为文中所讨论的非线性项。在计算过程中,太平洋混合层粗略地定义为 0—45 m 深度平均,与选取其他深度得到的定性结果一致。值得注意的是,非线性项中的第 3 项,即非线性垂直项表示海洋下层海温对上层海温的输送作用,其结果大小受深度选取的影响较大,为了较准确地计算,图 1 给出了

厄尔尼诺冬季(DJF)赤道太平洋( $2^{\circ}\text{S}$ — $2^{\circ}\text{N}$ )海温异常和垂直速度异常乘积( $t'w'$ )的经向深度剖面合成,可以看出, $t'w'$ 的最大值约在 65 m 深度,因此,垂直方向上非线性温度平流的计算以 65 m 为中心,向上、向下各取 40 m。也尝试了其他深度,如 60 m 等,其定性结果不受影响。

### 3 赤道太平洋海表温度异常偏度

为了量化 ENSO 事件的非对称性,首先给出了 1979—2015 年热带太平洋冬季(DJF)海表温度异常偏度的空间分布(图 2)。可见“类东部型厄尔尼诺”的海表温度异常偏度在  $150^{\circ}\text{W}$  以东、尤其是  $130^{\circ}\text{W}$  以东的赤道东太平洋地区有强的正偏度中心,最大值位于赤道太平洋东南区域,强度超过 2.5(图 2a)。这表明 1979—2015 年以来,赤道东太平洋海表温度异常容易偏向暖值,即厄尔尼诺事件的强度明显大于拉尼娜事件,这与以往的研究结果(Su, et al, 2010)一致。值得注意的是,当将 3 次强东部型厄尔尼诺年及前两次厄尔尼诺随后的拉尼娜年份(即 1982/83/84、1997/98/99 和 2015 年)去除后,发现赤道太平洋  $150^{\circ}\text{W}$  以东大部分地区的正偏度几乎消失(图 2b)。即去除强东部型厄尔尼诺的影响后该区域的海表温度异常呈一个近似的正态分布, ENSO 的冷暖事件强度相当,海表温度异常不再存在向暖偏斜状态。这似乎说明 ENSO 的强度非对称性在很大程度上是由强东部型厄尔尼诺造成的,并不是所有的厄尔尼诺和拉尼娜事件之间都存在着强的强度非对称。

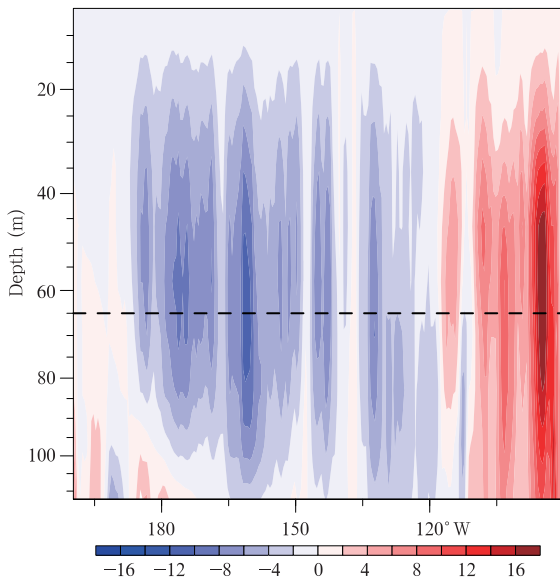


图 1 厄尔尼诺冬季(DJF)赤道太平洋( $2^{\circ}\text{S}$ — $2^{\circ}\text{N}$ ) $t'w'$ 经向深度剖面合成(单位: $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$ )

Fig. 1 Composite depth-longitude cross section of  $t'w'$  (unit:  $10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m/s}$ ) for El Niño winter (DJF) along the equatorial Pacific ( $2^{\circ}\text{S}$ — $2^{\circ}\text{N}$ )

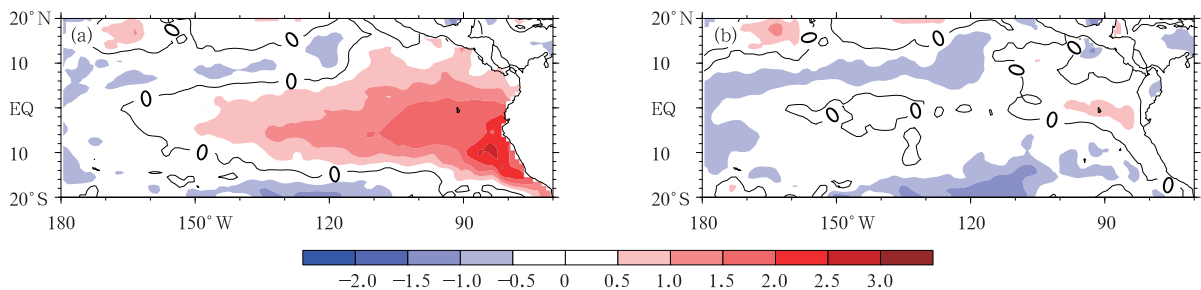


图 2 冬季(DJF)热带太平洋海表温度异常偏度分布

(a. 1979—2015 年, b. 去除 1982/83/84、1997/98/99 和 2015 年)

Fig. 2 Spatial distributions of the skewness of DJF SST anomalies in the equatorial Pacific for (a) 1979–2015 period, (b) as in (a) but with 1982/83/84, 1997/98/99, 2015 removed

为了进一步说明上述结论,将偏度公式变为

$$S^* = \frac{(x_i - \bar{X})^3}{(m_2)^{3/2}} = \frac{(x_i - \bar{X})^3}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}} \quad (3)$$

即式(2)的分母与式(1)一致,仍为  $m_2$  的  $3/2$  次方(标准差的3次方);但分子不再为一段时间的平均状态,而是计算每年海表温度异常对平均状态的偏差程度,以此得到每年海表温度异常的偏度。由于海表温度异常整体偏度分布呈“类东部厄尔尼诺”型(图2a),即在  $150^\circ\text{W}$  以东的赤道东太平洋地区有强的正偏度,因此,主要分析  $150^\circ\text{W}$  以东的偏度正值核心区域。图3给出了各次 ENSO 事件 Nino3 区

( $5^\circ\text{N}-5^\circ\text{S}, 90^\circ-150^\circ\text{W}$ ) 海表温度异常偏度的大小及各类 ENSO 事件偏度的平均值。可以清晰地看出,中部型厄尔尼诺(黄色柱)的偏度为弱正值,拉尼娜(蓝色柱)事件的偏度为弱负值,尽管其符号不一致,但均位于 0 线附近,且强度相当;但东部型厄尔尼诺(红色柱)的偏度则远大于 0 值。假设不考虑东部型厄尔尼诺的存在,只考虑中部型厄尔尼诺和拉尼娜,其海表温度异常偏度正负抵消,则 ENSO 的强度将呈现准对称性。以上结果表明 ENSO 强度的非对称性主要是东部型厄尔尼诺的贡献,这再次证明了图 2b 中的结论。

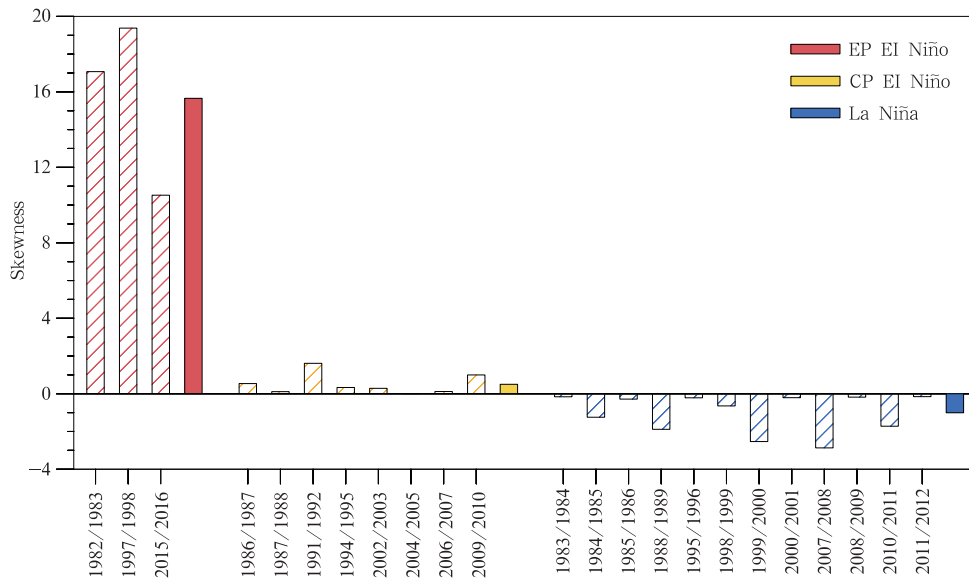


图3 ENSO事件各年偏度值

(红色斜线柱表示东部型厄尔尼诺,黄色斜线柱表示中部型厄尔尼诺,蓝色斜线柱表示拉尼娜;对应颜色的实心柱分别表示其事件类型的合成)

Fig. 3 Skewness of ENSO events

(red, yellow and blue slash bars represent EP El Niño, CP El Niño and La Niña events, respectively. The corresponding solid bars represent their composite values)

#### 4 ENSO年赤道太平洋混合层非线性平流演变

第3节的研究表明,厄尔尼诺事件的平均强度强于拉尼娜的主要贡献来源于东部型厄尔尼诺。以往研究指出,海洋混合层热量收支平衡方程中的非线性项是造成 ENSO 强度非对称性的主要原因(Jin, et al, 2003; An, et al, 2004)。那么非线性项

在两类厄尔尼诺及拉尼娜事件的演变过程中是否也表现出不同的特征呢?为回答这一问题,首先给出了东部型厄尔尼诺期间赤道太平洋地区( $5^\circ\text{S}-5^\circ\text{N}$ )混合层非线性平流的时间演变(图4),重点关注非线性作用的主要加热区域,即  $2^\circ\text{S}-2^\circ\text{N}$ (虚线范围内)。为了与温度趋势项作比较,也对此项做了分析,但由于该项在以往的文献中已多次出现,故不再展示其演变。从图中可以看出,  $130^\circ\text{W}$  以东的赤道



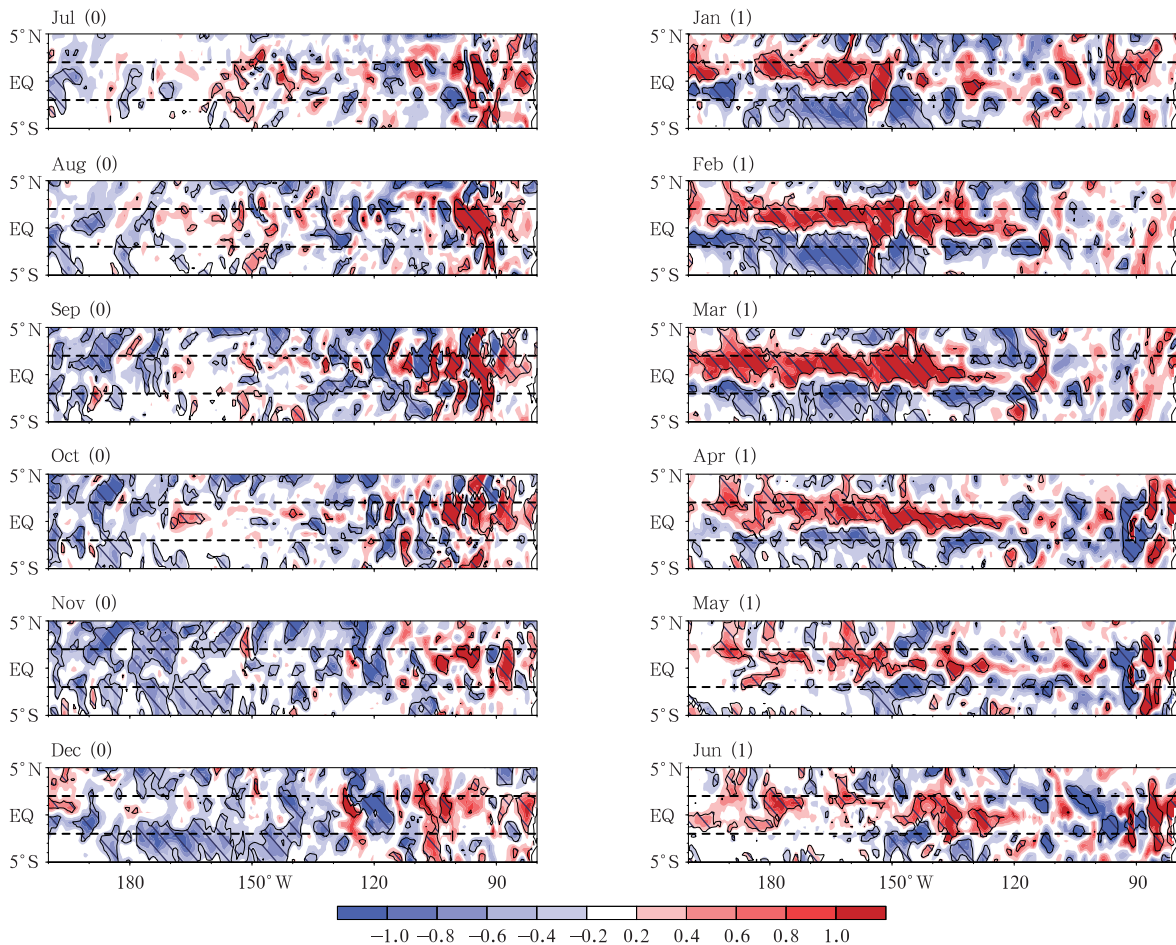


图4 东部型厄尔尼诺发展至衰亡阶段赤道太平洋混合层的非线性温度平流  
(括号中0表示发展年,1表示衰亡年;单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ ,阴影部分为通过90%的显著检验)

Fig. 4 Nonlinear temperature advection (unit:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ ) fields from the developing (0) to the decaying phases (1) of EP El Niño events  
(shaded areas indicate that the values are significant at the 90% confidence level)

太平洋地区,即前文所述的偏差正值中心区域在东部型厄尔尼诺发展年7月就已经出现了正的非线性平流;随着时间的推移,非线性平流的强度有所增强,对东部型厄尔尼诺强度的发展起到了一定的促进作用,相应海温升高趋势的范围也随之逐渐扩大且强度加强(图略);直到发展年的11月,赤道东太平洋地区的非线性作用的强度才有所减弱,但正异常仍能一直维持至次年1月前后,此时海温升高趋势的范围相应地缩小且强度减弱,至次年1月方转为负值(图略)。从次年1月起,  $130^{\circ}\text{W}$  以西的赤道中西太平洋地区出现了大范围的正非线性作用,而  $130^{\circ}\text{W}$  以东地区原有的正非线性作用逐渐减弱甚至转变为负作用,对应区域混合层的海温降低趋势

范围逐渐扩大且强度增强(图略)。

中部型厄尔尼诺时期的非线性平流演变(图5)明显不同于东部型厄尔尼诺时期。整体而言,无论是在发展阶段还是衰减阶段,中部型厄尔尼诺时期的非线性作用相对于东部型厄尔尼诺时期均要弱得多。在其发展阶段,赤道东太平洋地区从当年8月起一直维持着很弱的正非线性作用,主要集中在  $120^{\circ}\text{W}$  附近,对中部型厄尔尼诺发展的促进作用较弱。在衰减阶段,  $130^{\circ}\text{W}$  以东的赤道东太平洋地区从次年2月起仍然维持着较弱的正非线性作用;海温从次年1月起一直表现为降低趋势,随着时间的推移范围有所扩大,但其强度与东部型厄尔尼诺衰减阶段相比要弱得多,且强度变化不大(图略)。值得

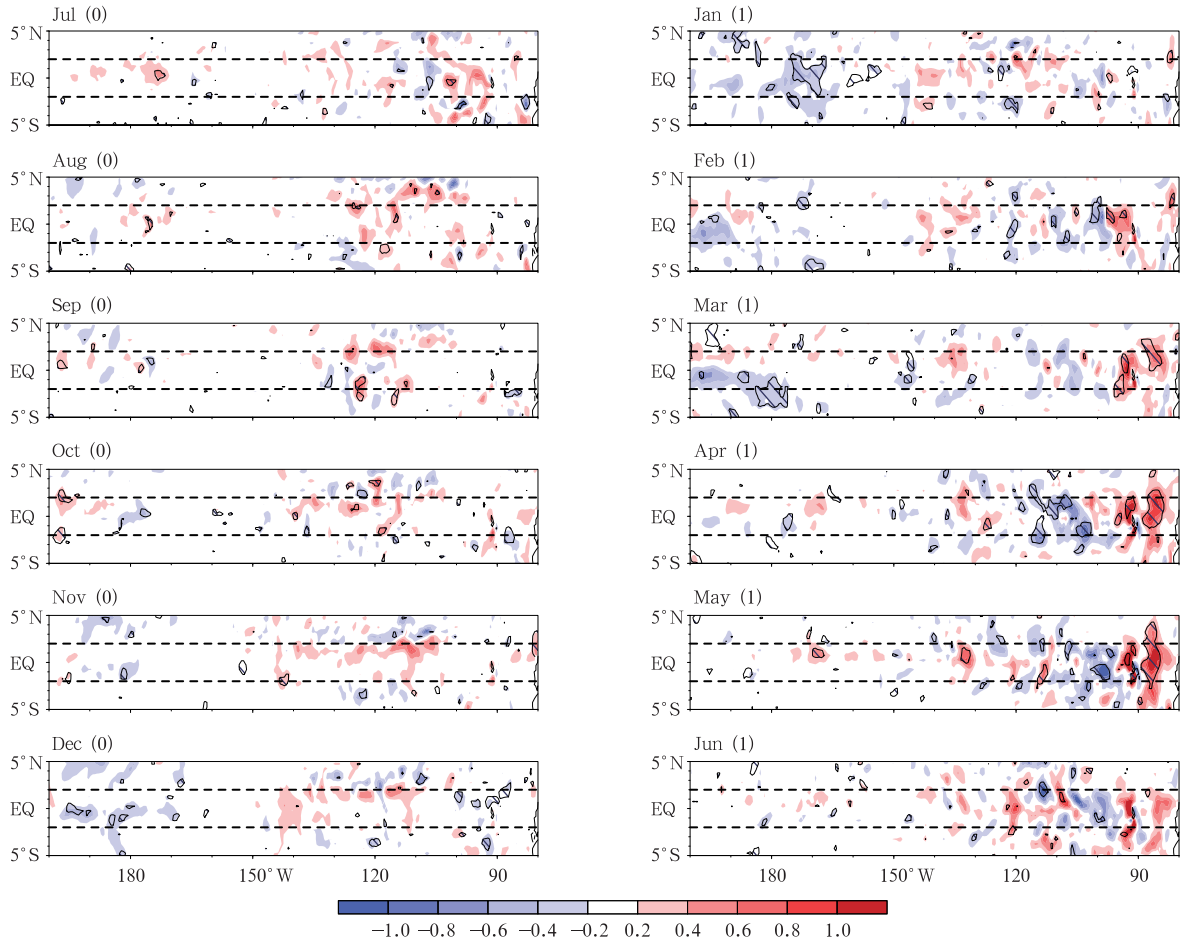


图5 中部型厄尔尼诺发展至衰亡阶段赤道太平洋混合层的非线性温度平流  
(括号中0表示发展年,1表示衰亡年;单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ , 阴影部分为通过90%的显著检验)

Fig. 5 Nonlinear temperature advection (unit:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ ) fields from the developing (0) to the decaying phases (1) of CP El Niño events  
(shaded areas indicate that the values are significant at the 90% confidence level)

注意的是,不管是东部型还是中部型厄尔尼诺,南美沿岸的非线性项在其衰减期均起较强的正作用。

拉尼娜时期非线性平流(图6)的整体强度相较于东部型厄尔尼诺时期也弱得多,但稍强于中部型厄尔尼诺时期。在拉尼娜的发展阶段,非线性温度平流在发展年7月的赤道东太平洋 $130^{\circ}\text{W}$ 以东地区就有着正贡献,且随着月份推移强度逐渐增强,对拉尼娜强度的发展起到了一定的抑制作用。到了衰减阶段,赤道东太平洋地区的正非线性作用依然维持在 $130^{\circ}\text{W}$ 以东地区,但强度弱于发展阶段。

## 5 非线性加热对 ENSO 发展和衰亡的作用

从上述分析可以看出,发展阶段的非线性加热

作用对 ENSO 振幅非对称性具有一定影响,这与以往研究结论一致(An, et al, 2004; Su, et al, 2010),同时可以看到不同类型 ENSO 事件的不同阶段非线性加热作用也展现了不同的特征。为了进一步探索非线性项对 ENSO 增长的作用,将第4节所述的偏度正值中心相对应区域内的非线性作用进行区域平均( $2^{\circ}\text{S}-2^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}-80^{\circ}\text{W}$ ),得到东部型厄尔尼诺、中部型厄尔尼诺以及拉尼娜时期的非线性加热作用从发展年7月至衰亡年6月的变化(图7)。可以看出,在东部型厄尔尼诺和拉尼娜的发展阶段,非线性项均显示为较强的正值,即对东部型厄尔尼诺的发展有正贡献,有利于其强度增强,而对拉尼娜的发展有负贡献,不利于其强度增强;中部型厄尔尼诺

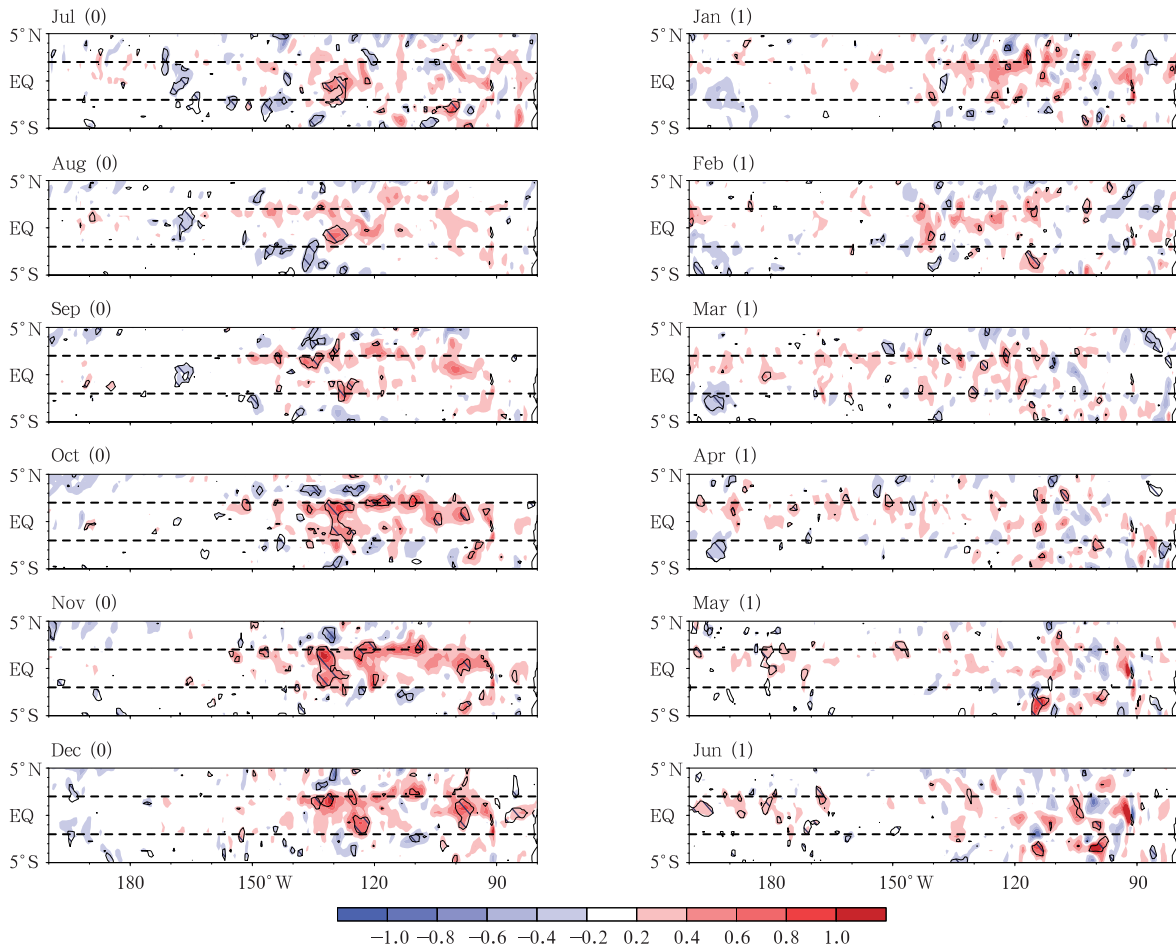


图6 拉尼娜发展到衰亡阶段赤道太平洋混合层的非线性温度平流

(括号中0表示发展年,1表示衰减年;单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ , 阴影部分为通过90%的显著检验)

Fig. 6 Nonlinear temperature advection (unit:  $^{\circ}\text{C}/\text{month}$ ) fields from the developing (0) to the decaying phases (1) of La Niña events (shaded areas indicate the values are significant at the 90% confidence level)

时期非线性作用的正贡献较弱。衰减阶段,非线性作用在中部型厄尔尼诺和拉尼娜时期维持弱的正贡献,而对东部型厄尔尼诺的作用由正转负,由此可见,非线性项加速了拉尼娜的衰亡,同时加速东部型厄尔尼诺的衰亡而减缓中部型厄尔尼诺的衰亡,这也部分解释了东部型厄尔尼诺比中部型厄尔尼诺衰亡快的原因。

由第2节已知,非线性项由纬向平流( $u\text{ata}$ )、经向平流( $v\text{ata}$ )、垂直平流( $w\text{ata}$ )3部分组成。为了进一步明确这3项起到的作用,图8给出了ENSO发展和衰亡阶段赤道东太平洋地区海温趋势项( $dT/dt$ )、非线性作用项及其3个方向上分量的大小。以1月为中心,发展阶段取当年7—12月,衰减

阶段取次年2—6月。可以清晰地看出,在发展阶段,非线性作用对东部型厄尔尼诺和拉尼娜有较强的正贡献、对中部型厄尔尼诺的正贡献相对较弱,这与图7一致。非线性加热作用会增强东部型厄尔尼诺的强度,且主要由经向温度平流项贡献;对中部型厄尔尼诺强度起到的作用较弱;对拉尼娜则会抑制其振幅的发展,3个方向的平流贡献相当(图8a)。衰减阶段,非线性项在东部型厄尔尼诺时期为负值,而在中部型厄尔尼诺时期为正值,在拉尼娜时期也维持正贡献,但强度都大大减弱。非线性温度平流对东部型厄尔尼诺的衰亡起正作用,对中部型厄尔尼诺的衰亡起负作用,且分别主要由水平项和垂直项贡献,这有利于东部型厄尔尼诺的衰亡速



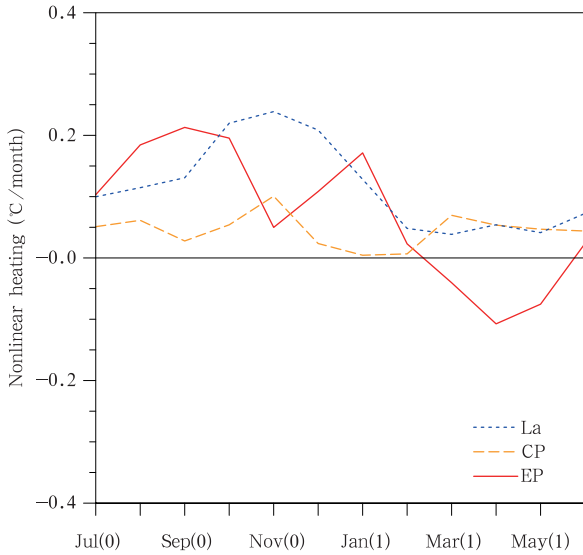


图7 赤道东太平洋(2°S—2°N,130°—80°W)混合层非线性温度平流的时间演变(单位: °C/month;红线为东部型厄尔尼诺,黄线为中部型厄尔尼诺,蓝线为拉尼娜;括号中0表示发展年,1表示衰减年)

Fig. 7 Evolutions of nonlinear temperature advection (unit: °C/month) from the developing (0) to the decaying phases (1) over the eastern equatorial Pacific (2°S—2°N, 130°—80°W) during EP El Niño (red line), CP El Niño (yellow line) and La Niña (blue line) events

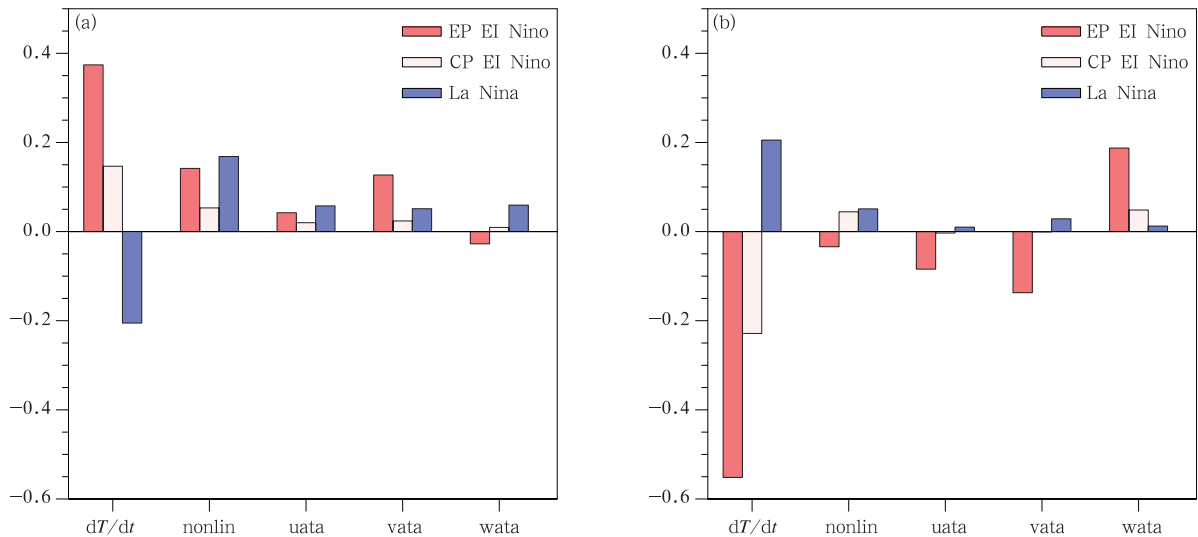


图8 赤道东太平洋(2°S—2°N,130°—80°W)混合层温度趋势项和非线性温度平流项及其纬向、经向、垂直项各部分在 ENSO 发展(a)和衰减(b)阶段的作用(单位: °C/month;红、白、紫色柱分别表示东部型、中部型厄尔尼诺和拉尼娜)

Fig. 8 The mix-layer temperature tendency, the nonlinear temperature advection and its zonal, meridional and vertical components (unit: °C/month) averaged over the eastern equatorial Pacific (2°S—2°N, 130°—80°W) for ENSO developing (a) and decaying (b) phases (red, white and purple bars represent composite results for EP El Niño, CP El Niño and La Niña events, respectively)

度快于中部型厄尔尼诺(图 8b)。此外,拉尼娜衰减阶段的非线性项主要来自于经向平流的贡献。

已有研究(Picaut, et al, 1997; Jin, et al, 1999; An, et al, 2001; Bejarano, et al, 2008; Zhang, et al, 2013)表明,海温趋势项主要受到异常纬向流对平均海温的纬向输送和平均上升流对异常海温的垂直输送的影响。为了对比非线性项与这两个影响因子对海温趋势所做的贡献,图 9 给出了 ENSO 发展和衰亡阶段海温趋势项( $dT/dt$ )、平均海温的异常纬向平流项( $uata$ )和异常海温的平均垂直输送项( $wata$ )的作用以及非线性项相对于海温趋势项所占的百分比。从中可以看出,平均海温的异常纬向平流项和异常海温的平均垂直输送项对东部型厄尔尼诺和拉尼娜的发展都起到了促进作用,而对中部型厄尔尼诺的发展起到了抑制作用;非线性作用在发展阶段对厄尔尼诺有 30% 以上的正贡献,对拉尼娜则有 80% 以上的负贡献(图 9a),这与已有研究(Su, et al, 2010)结论基本一致。在衰减阶段,平均海温的异常纬向平流项抑制东部型厄尔尼诺、加速中部型厄尔尼诺和拉尼娜的衰亡;异常海温的平均垂直输送项加速了厄尔尼诺的衰亡,对拉尼娜的影响很小;非线性加热项的作用虽然有所减弱,但其加速了东部型厄尔尼诺的衰亡、抑制了中部型厄尔尼诺的衰

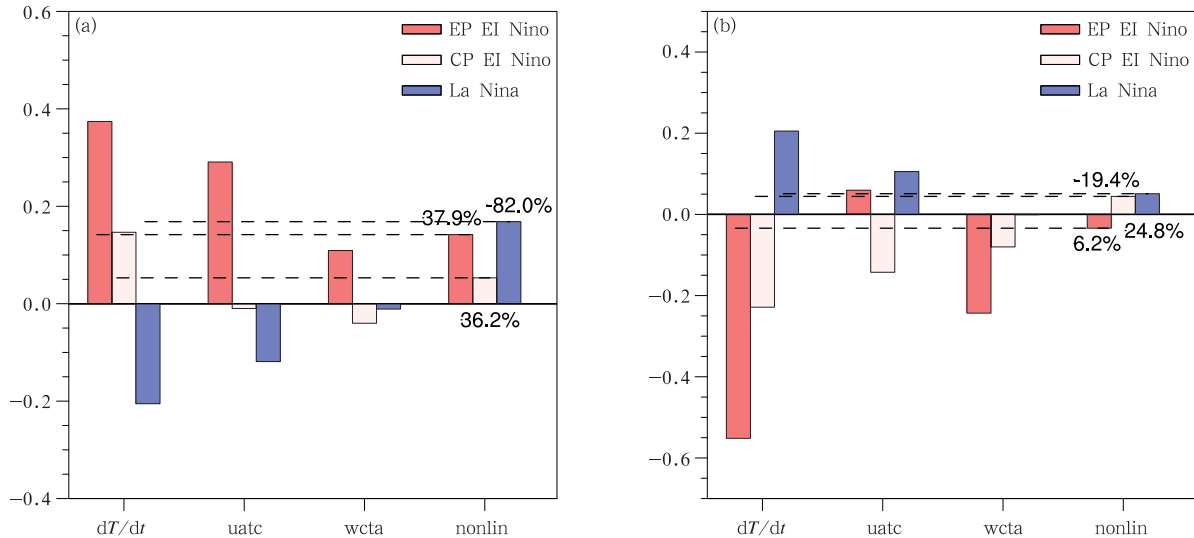


图9 赤道东太平洋(2°S—2°N, 130°—80°W)混合层温度趋势项、线性温度平流项中的 uatc 和 wcta 项以及非线性温度平流项在 ENSO 发展(a)和衰减(b)阶段的作用

(单位: C/month; 红、白、紫色柱分别表示东部型、中部型厄尔尼诺和拉尼娜)

Fig. 9 The mix-layer temperature tendency, the uatc and wcta parts of linear temperature advection, and the nonlinear temperature advection (unit: C/month) averaged over the eastern equatorial Pacific (2°S—2°N, 130°—80°W) for ENSO developing (a) and decaying (b) phases

(red, white and purple bars represent composite results for EP El Niño, CP El Niño and La Niña events, respectively)

亡,其中对中部型厄尔尼诺衰亡的抑制作用尤为明显,占到海温趋势项的-19.4%(图9b),这可能是东部型厄尔尼诺较中部型厄尔尼诺衰减更快的重要原因之一。因此,非线性项在 ENSO 事件的发展演变过程中起到了不容忽视的关键作用。

## 6 结论

使用 SODA 次表层海温资料和哈得来中心海表温度(HadISST)资料对 1979—2015 年赤道太平洋地区海表温度异常的偏度特征进行了分析,通过计算赤道太平洋混合层热量收支方程,分析了非线性项在不同类型 ENSO 发展和衰亡阶段所起到的不同作用。主要得到如下结论:

(1) ENSO 强度非对称性主要是由于东部型厄尔尼诺造成的;中部型厄尔尼诺和拉尼娜相关的偏度较弱,且符号相反、强度相当,海表温度异常呈现准对称特征。

(2) 在 ENSO 发展阶段,非线性作用项对东部型厄尔尼诺和拉尼娜都有着较强的正贡献,且随着时间推移有所加强,因此,会促进东部型厄尔尼诺强度的发展而抑制拉尼娜强度的增强;而在中部型厄尔尼诺的发展阶段,非线性作用虽然也一直维持正

贡献,但强度较东部型厄尔尼诺时期弱得多。

(3) 在东部型厄尔尼诺的衰减阶段,非线性作用为负值,因而有利于东部型厄尔尼诺的快速衰亡;而在中部型厄尔尼诺的衰减阶段,非线性项为正值,对中部型厄尔尼诺的衰亡起到了抑制作用,这可能是东部型厄尔尼诺衰减速度较中部型厄尔尼诺更快的重要原因之一。另外,拉尼娜衰亡阶段的非线性项与发展阶段类似,都为正值,对拉尼娜的衰亡起到加速作用。

在经典 ENSO 动力学中,温跃层反馈和纬向平流反馈是 ENSO 发生和衰亡的主要贡献项,这已被证明(Picaut, et al, 1997; Jin, et al, 1999; An, et al, 2001; Bejarano, et al, 2008; Zhang, et al, 2013),但这些都是线性项,并不会造成非对称性结果。ENSO 非对称性主要源于非线性过程的贡献(Thompson, et al, 2000, 2001; Jin, et al, 2003),本研究主要关注了不同类型 ENSO 期间非线性加热的不同特征以及非线性项在 ENSO 的不同阶段对非对称性所起到的作用,结果表明非线性项对不同类型 ENSO 的影响有着较大的差别,对 ENSO 不同阶段的影响也不尽相同。值得注意的是,非线性项所包含的内容十分复杂,其对 ENSO 的影响也尚未

完全解释清楚。例如,研究结果显示非线性项对拉尼娜的衰亡起加速作用,但就观测而言拉尼娜的衰亡速度是相对较慢的,其具体原因仍存在争议,因此,对于其他抑制拉尼娜衰亡的因子以及 ENSO 事件次年持续时间长短的具体机制均待进一步研究。

**致谢:**感谢金飞飞教授对本文提出的指导性的改进意见,同时感谢李智玉博士提供的资料帮助。

## 参考文献

- 陈锦年, 宋贵霆, 褚健婷等. 2003a. 赤道太平洋次表层海水温度异常的信号通道. 水科学进展, 14(2): 152-157. Chen J N, Song G T, Chu J T, et al. 2003. Oceanic temperature anomalous signal pathway in the equatorial Pacific. Adv Water Sci, 14(2): 152-157 (in Chinese)
- 陈锦年, 宋贵霆, 褚健婷等. 2003b. 北赤道流区海温异常与 ENSO 循环. 热带海洋学报, 22(4): 10-17. Chen J N, Song G T, Chu J T, et al. 2003. Anomalous sea temperature of westward transferring north equatorial current and ENSO. J Trop Oceanogr, 22(4): 10-17 (in Chinese)
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究. 大气科学, 27(4): 484-502. Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle. Chinese J Atmos Sci, 27(4): 484-502 (in Chinese)
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. 大气科学, 23(6): 664-672. Jin Z H, Tao S Y. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China. Chinese J Atmos Sci, 23(6): 664-672 (in Chinese)
- 李崇银, 穆穆, 周广庆等. 2008. ENSO 机理及其预测研究. 大气科学, 32(4): 761-781. Li C Y, Mu M, Zhou G Q, et al. 2008. Mechanism and prediction studies of the ENSO. Chinese J Atmos Sci, 32(4): 761-781 (in Chinese)
- 李海燕, 张文君, 何金海. 2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响. 气象学报, 74(3): 322-334. Li H Y, Zhang W J, He J H. 2016. Influences of ENSO and its combination mode on seasonal precipitation over eastern China. Acta Meteor Sinica, 74(3): 322-334 (in Chinese)
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响. 大气科学, 19(2): 200-208. Liu Y Q, Ding Y H. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China. Sci Atmos Sinica, 19(2): 200-208 (in Chinese)
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. 大气科学, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. Sci Atmos Sinica, 22(4): 399-407 (in Chinese)
- 严邦良, 张人禾. 2002. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中作用的数值试验. 大气科学, 26(3): 315-329. Yan B L, Zhang R H. 2002. A numerical test of the effects of wind anomaly over the equatorial western Pacific on ENSO cycle. Chinese J Atmos Sci, 26(3): 315-329 (in Chinese)
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I: 资料诊断和理论分析. 大气科学, 22(4): 587-599. Zhang R H, Huang R H. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño, Part I: Diagnostic and theoretical analyses. Sci Atmos Sinica, 22(4): 587-599 (in Chinese)
- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. J Climate, 15(6): 2205-2231
- An S I, Jin F F. 2001. Collective role of thermocline and zonal advective feedbacks in the ENSO mode. J Climate, 14(16): 3421-3432
- An S I, Jin F F. 2004. Nonlinearity and asymmetry of ENSO. J Climate, 17(12): 2399-2412
- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. J Geophys Res, 112 (C11): C11007, doi: 10.1029/2006JC003798
- Battisti D S, Hirst A C. 1989. Interannual variability in a tropical atmosphere-ocean model: Influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. J Atmos Sci, 46(12): 1687-1712
- Bejarano L, Jin F F. 2008. Coexistence of equatorial coupled modes of ENSO. J Climate, 21(12): 3051-3067
- Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Wea Rev, 97(3): 163-172
- Burgers G, Stephenson D B. 1999. The "normality" of El Niño. Geophys Res Lett, 26(8): 1027-1030
- Carton J A, Chepurin G, Cao X H, et al. 2000. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950 - 95. Part I: Methodology. J Phys Oceanogr, 30(2): 294-309
- Chang P, Ji L, Li H, et al. 1996. Chaotic dynamics versus stochastic processes in El Niño-Southern Oscillation in coupled ocean-atmosphere models. Physica D, 98(2-4): 301-320
- Dommenget D, Bayr T, Frauen C. 2013. Analysis of the non-linearity in the pattern and time evolution of El Niño Southern Oscillation. Climate Dyn, 40(11-12): 2825-2847
- Feng J, Wang L, Chen W, et al. 2010. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. J Geophys Res, 115(D24): D24122, doi: 10.1029/2010JD014761
- Feng J, Li J P. 2011. Influence of El Niño Modoki on spring rainfall over south China. J Geophys Res, 116(D13): D13102, doi: 10.1029/2010JD015160
- Feng J, Li J P, Zheng F, et al. 2016. Contrasting impacts of developing phases of two types of El Niño on southern China rainfall. J Meteor Soc Jpn Ser II, 94(4): 359-370
- Giese B S, Ray S. 2011. El Niño variability in simple ocean data as-

- simulation (SODA), 1871-2008. *J Geophys Res*, 116 (C2): C02024, doi: 10.1029/2010JC006695
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv Atmos Sci*, 6 (1): 21-32
- Jin F F, Neelin J D, Ghil M. 1994. El Niño on the devil's staircase: Annual subharmonic steps to chaos. *Science*, 264(5155): 70-72
- Jin F F. 1997a. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I: Conceptual mode. *J Atmos Sci*, 54(7): 811-829
- Jin F F. 1997b. An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part II: A stripped-down coupled model. *J Atmos Sci*, 54(74): 830-847
- Jin F F, An S I. 1999. Thermocline and zonal advective feedbacks within the equatorial ocean recharge oscillator model for ENSO. *Geophys Res Lett*, 26(19): 2989-2992
- Jin F F, An S I, Timmermann A, et al. 2003. Strong El Niño events and nonlinear dynamical heating. *Geophys Res Lett*, 30 (3): 1120, doi: 10.1029/2002GL016356
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J Climate*, 22(3): 615-632
- Karori M A, Li J P, Jin F F. 2013. The asymmetric influence of the two types of El Niño and La Niña on summer rainfall over southeast China. *J Climate*, 26(13): 4567-4582
- Kim S T, Yu J Y, Kumar A, et al. 2012. Examination of the two types of ENSO in the NCEP CFS Model and its extratropical associations. *Mon Wea Rev*, 140(6): 1908-1923
- Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Climate*, 22(6): 1499-1515
- Larkin N K, Harrison D E. 2005. On the definition of El Niño and associated seasonal average U. S. weather anomalies. *Geophys Res Lett*, 32(13): L13705, doi: 10.1029/2005GL022738
- Okumura Y M, Deser C. 2010. Asymmetry in the duration of El Niño and La Niña. *J Climate*, 23(21): 5826-5843
- Philander S G H. 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 302(5906): 295-301
- Philander S G H. 1990. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. London: Academic Press, 293pp
- Picaut J, Masia F, du Penhoat Y. 1997. An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO. *Science*, 277(5326): 663-666
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon Wea Rev*, 110(5): 354-384
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J Geophys Res*, 108 (D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670
- Ren H L, Jin F F. 2011. Niño indices for two types of ENSO. *Geophys Res Lett*, 38(4): L04704
- Ropelewski C F, Halpert M S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/southern oscillation. *Mon Wea Rev*, 115(8): 1606-1626
- Su J Z, Zhang R H, Li T, et al. 2010. Causes of the El Niño and La Niña amplitude asymmetry in the equatorial Eastern Pacific. *J Climate*, 23(3): 605-617
- Suarez M J, Schopf P S. 1988. A delayed action oscillator for ENSO. *J Atmos Sci*, 45(21): 3283-3287
- Thompson C J, Battisti D S. 2000. A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part I: Model development. *J Climate*, 13 (15): 2818-2832
- Thompson C J, Battisti D S. 2001. A linear stochastic dynamical model of ENSO. Part II: Analysis. *J Climate*, 14(4): 445-466
- Timmermann A, Jin F F. 2002. A nonlinear mechanism for decadal El Niño amplitude changes. *Geophys Res Lett*, 29(1): 3-1-3-4, doi: 10.1029/2001GL013369
- Trenberth K E. 1997. The definition of El Niño. *Bull Am Meteor Soc*, 78(12): 2771-2777
- Trenberth K E, Caron J M. 2000. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. *J Climate*, 13(24): 4358-4365
- Tziperman E, Stone L, Cane M A, et al. 1994. El Niño chaos: Overlapping of resonances between the seasonal cycle and the Pacific ocean-atmosphere oscillator. *Science*, 264(5155): 72-74
- Van Loon H, Madden R A. 1981. The Southern Oscillation. Part I: Global associations with pressure and temperature in northern winter. *Mon Wea Rev*, 109(6): 1150-1162
- Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. 1998. On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA. *J Geophys Res*, 103 (C7): 14241-14259
- Weisberg R H, Wang C Z. 1997. A western Pacific oscillator paradigm for the El Niño-Southern oscillation. *Geophys Res Lett*, 24(7): 779-782
- White G H. 1980. Skewness, kurtosis and extreme values of Northern Hemisphere geopotential heights. *Mon Wea Rev*, 108(9): 1446-1455
- Wyrtki K. 1975. El Niño-the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 5(4): 572-584
- Xu K, Zhu C W, He J H. 2013. Two types of El Niño-related Southern Oscillation and their different impacts on global land precipitation. *Adv Atmos Sci*, 30(6): 1743-1757, doi: 10.1007/s00376-013-2272-3
- Yeh S W, Kug J S, Dewitte B, et al. 2009. El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7263): 511-514
- Yeh S W, Kug J S, An S I. 2014. Recent progress on two types of El Niño: Observations, dynamics, and future changes. *Asia Pac J Atmos Sci*, 50(1): 69-81
- Yu J Y, Kim S T. 2011. Relationships between extratropical sea

- level pressure variations and the Central Pacific and Eastern Pacific types of ENSO. *J Climate*, 24(3): 708-720, doi: 10.1175/2010JCLI3688.1
- Zhang R H, Chao J P. 1993. Mechanisms of interannual variations in a simple air-sea coupled model in the tropics // Yu D I. *Climate Variability*. Beijing, China: China Meteorological Press, 236-244
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events. *J Meteor Soc Jpn Ser II*, 74(1): 49-62
- Zhang W J, Li J P, Jin F F. 2009. Spatial and temporal features of ENSO meridional scales. *Geophys Res Lett*, 36(15): L15605, doi: 10.1029/2009GL038672
- Zhang W J, Jin F F, Li J P, et al. 2011. Contrasting impacts of two-type El Niño over the Western North Pacific during boreal autumn. *J Meteor Soc Jpn Ser II*, 89(5): 563-569
- Zhang W J, Jin F F, Ren H L, et al. 2012. Differences in teleconnection over the North Pacific and rainfall shift over the USA associated with two types of El Niño during boreal autumn. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 90(4): 535-552, doi: 10.2151/jmsj.2012-407
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013. On the bias in simulated ENSO SSTA meridional widths of CMIP3 models. *J Climate*, 26(10): 3173-3186
- Zhang W J, Jin F F, Turner A. 2014. Increasing autumn drought over southern China associated with ENSO regime shift. *Geophys Res Lett*, 41(11): 4020-4026, doi: 10.1002/2014GL060130
- Zhang W J, Wang L, Xiang B Q, et al. 2015. Impacts of two types of La Niña on the NAO during boreal winter. *Climate Dyn*, 44(5): 1351-1366, doi: 10.1007/s00382-014-2155-z
- Zhang W J, Li H Y, Stuecker M F, et al. 2016. A new understanding of El Niño's impact over East Asia: Dominance of the ENSO combination mode. *J Climate*, 29(12): 4347-4359, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0104.1

### 欢迎订阅 2018 年度《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象局主管,中国气象学会主办的全国性大气科学学术刊物,主要刊载有关大气科学及其交叉科学研究的具有创新性的论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;研究工作简报及重要学术活动报道;优秀大气科学专著的评介以及有关本刊论文的学术讨论等。

《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百种重点学术期刊”奖;2003—2007、2009 年被中国科学技术信息研究所评为“百种中国杰出学术期刊”;2007—2011 年和 2015 年获得中国科学技术协会精品科技期刊工程项目的资助,2008、2011、2014 年《气象学报》(中文版)被评选为“中国精品科技期刊”;2012、2013、2014、2015 年获评“中国最具国际影响力学术期刊”;2013、2015 年入选国家新闻出版广电总局“百强报刊”。

《气象学报》为大气科学研究提供了学术交流平台,一直致力于推动中国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于中国气象现代化建设事业。作者和读者对象主要为从事气象、海洋、地理、环境、地球物理、天文、空间及生态等学科的科研人员、高校师生。

《气象学报》中文版为双月刊,国内外发行。

2018 年全年共 6 期,定价 240 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)

通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部

邮政编码: 100081

联系电话: 010-68406942, 68408571(传真)

邮箱: cmsqxxb@263.net; qxxb@cms1924.org

期刊主页: [http://www.cmsjournal.net/qxxb\\_cn](http://www.cmsjournal.net/qxxb_cn)

开户银行: 北京建行白石桥支行

户名: 中国气象学会

帐号: 11001028600059261046