

doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2013.06.002

陈永利,赵永平,王凡,等. ENSO 循环相联系的北太平洋低纬度异常西边界流[J]. 海洋学报,2013,35(6):9-20.

Chen Yongli, Zhao Yongping, Wang Fan, et al. Low-latitude western boundary current anomalies in the North Pacific associated with the ENSO cycle[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2013, 35(6):9-20.

# ENSO 循环相联系的北太平洋低纬度异常西边界流

陈永利<sup>1,2</sup>, 赵永平<sup>1,2</sup>, 王凡<sup>1,2</sup>, 唐晓晖<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 用 SODA 海洋同化和 NCEP 大气再分析资料, 分析了热带太平洋次表层海温异常主要模态与北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋环流和亚洲—北太平洋地区大气垂直和水平流场变化之间的关系, 得到以下结果: (1) 在热带太平洋海洋次表层 ENSO 事件具有两种模态, 二者组合构成 ENSO 循环。第一模态为 ENSO 成熟期, 主要出现在冬季, 第二模态为 ENSO 过渡期, 主要出现夏季。(2) ENSO 循环对北太平洋低纬度西边界流区上层海洋环流有重要影响。在 El Niño 发展期或 La Niña 衰退期, 该区出现气旋性异常环流, 北赤道流(NEC)加强, NEC 分叉位置北移, 棉兰老海流(MC)加大, 菲律宾以东黑潮(KC)减小, 北赤道逆流(NECC)最强。在 El Niño(La Niña)成熟期, 该区气旋性(反气旋性)异常环流达最强, NEC 最强(最弱), NEC 分叉位置最北(最南), MC 最大(最小), KC 最小(最大), NECC 减弱(加强)。在 El Niño 衰退期或 La Niña 发展期与 El Niño 发展期相反, 该区出现反气旋性异常环流, 由此导致相应流系异常发生反位相变化。(3) ENSO 循环对北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋环流的影响是通过 ENSO 事件期间热带太平洋热力状况异常改变上空大气环流来实现的。ENSO 事件首先造成热带太平洋海洋热力状况异常, 导致其上空对流活动异常, 后者直接或间接通过“大气桥”能量传输引起相关地区大气环流场的变化, 致使海面风应力场异常, 进而强迫上层海洋环流场的相应变化。文章最后还分析了 ENSO 事件期间菲律宾附近异常反气旋或异常气旋性风场的产生和持续原因, 讨论了北太平洋低纬度西边界流海域海气相互作用在 ENSO 循环中的贡献。

**关键词:** 北太平洋低纬度西边界流; ENSO 循环; 北赤道流分叉; 棉兰老流; 源区黑潮

中图分类号: P732.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2013)06-0009-12

## 1 引言

北太平洋低纬度西边界流连接着太平洋热带环流和副热带环流, 对于世界大洋经向质量、热量和盐量输送起着重要的作用, 北赤道流(NEC)的分叉决定着棉兰老海流(MC)和菲律宾以东黑潮(KC)的强度,

对西太平洋暖池中的热量收支平衡也起着非常重要的作用, 并通过黑潮的变化对南海和东海产生影响。进行 NEC、KC、MC 和 NEC 分叉的时空特征和变异规律的研究, 对认识北太平洋西边界流在全球气候系统中的作用具有重要的理论和实践意义。

多年来, 人们对北太平洋低纬度西边界流的结

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2013-06-23。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417401); 国家自然科学基金重点基金(40890152); 中国科学院战略先导性专项(XDA10010104)共同资助。

作者简介: 陈永利(1954—), 男, 山东省蓬莱市人, 研究员, 主要从事海洋环流与海气相互作用研究。E-mail: ylchen@qdio.ac.cn

构特征、输运规律、北赤道流分叉及其动力机制和北太平洋低纬度西边界流异常的影响因子等进行了大量的研究<sup>[1-4]</sup>,取得了有意义的成果。近年来,随着观测资料的积累和高精度海洋模式的开发,对北太平洋低纬度西边界流的研究有了更进一步的认识。关于 ENSO 事件对北太平洋低纬度西边界流异常的影响机制,已有的研究结果<sup>[5-6]</sup>表明,其异常特征均与 ENSO 循环有密切的联系,指出:El Niño 年,北赤道流强,北赤道流分叉位置偏北,棉兰老流比正常年份强劲,而 La Niña 期间则相反。它与中赤道太平洋产生的向西传播的向上或向下 Rossby 波有密切关系。但 ENSO 循环究竟通过怎样的物理过程来强迫北太平洋低纬度西边界流变化仍然是模糊的。

以往的研究多采用海面水温异常(SSTA)为基本海洋参数,但 SSTA 受海面热通量的严重影响,不能充分表现海洋热力异常的动力学过程。基于 SSTA 的观测和分析结果,ENSO 事件在海面温度场上仅表现为其成熟期模态。为解释 ENSO 循环过程,Schopf 和 Suarez<sup>[7]</sup>从赤道太平洋不稳定海气相互作用的观点提出了时滞振子(delayed oscillation)理论。然而进一步的观测资料表明,在 ENSO 事件期间,次表层海温异常比 SSTA 更加明显,特别在温跃层较深的热带西太平洋。赵永平等<sup>[8]</sup>最近研究指出,在热带太平洋次表层,ENSO 具有成熟期和过渡期两种模态,二者组合构成 ENSO 循环,并认为 ENSO 循环实质上是在信风异常和海气耦合作用下的热带太平洋海洋混合层水体在赤道和 12°N 之间的热带太平洋海盆内的惯性振荡,合理解释了热带太平洋发生的 ENSO 循环现象。可见,用次表层海温异常为指标能更好反映 ENSO 事件和循环过程。

基于上述认识,本文以热带太平洋次表层海温异常为基本数据,获得 ENSO 循环的两个模态,研究与其相联系的北太平洋低纬度西边界流和大气环流及海面风应力异常特征,探讨 ENSO 循环对北太平洋低纬度西边界流影响的物理过程。

本文主要采用简单海洋同化(SODA2.0.2-4)和 NCEP 再分析大气资料,资料起讫时间为 1958 年 1 月至 2007 年 12 月。基于次表层海温距平的最大值一般都出现在温跃层附近的观测事实,用温跃层曲面上海温距平表示次表层海温异常(SOTA)。首先用 SODA 资料确定太平洋气候温跃层曲面,计算温跃层曲面上海温距平时间序列,以此作为次表层海温异常指数。为获得上层海洋水平流场,我们对 200 m 以

浅 14 层的  $u$  和  $v$  进行加权平均,以此代表上层海洋的平均流场,并计算该流场距平的时间序列。为获得热带太平洋 SOTA 和上层海洋异常环流场的年际变率,我们对这两个指数进行 1 年低通滤波以去除年变化,然后再对其进行 EOF 分析。滤波过程中去除了长期倾向。对 NCEP 大气资料也进行 1 a 低通滤波和去倾等类似处理。

## 2 ENSO 循环的两个模态

图 1 为对热带太平洋 SOTA 进行 EOF 分析得到的前两个特征向量场(图 1a,b)及时间系数(图 1c,d)分布。SOTA 前两个特征向量场分别占总方差贡献的 31.0%和 15.4%,二者贡献超过 46%。第一特征向量场空间分布型(见图 1a)的主要特征是,在南、北纬 20° 以内的热带海洋,呈现大致以 160°W 为轴线的东西向 SOTA 偶极子分布,热带西太平洋极值中心位于赤道北侧的 150°E 附近的暖池海域,热带东太平洋极值中心位于赤道 90°~120°W 海域,后者绝对值稍高于前者。第二特征向量场空间分布(见图 1b)的主要特征是,在热带太平洋范围内,平均以 6°~8°N 为横轴南北向准对称 SOTA 跷跷板分布,沿 6°~8°N 南北两侧存在反号的 SOTA 大值区,其南侧沿赤道的 SOTA 大值区出现在赤道太平洋中东部海域,北侧的 SOTA 大值区表现为沿 10°~15°N(平均 12°N)东西向带状分布,沿赤道海域的 SOTA 在量级和范围上均远大于其北侧的 SOTA。第一特征向量场表征了 ENSO 成熟期 SOTA 分布,其时间变化与 Nino3 指数基本一致(见图 1c),时间系数为正时为 El Niño 事件,时间系数为负时为 La Niña 事件。第二特征向量场代表了 ENSO 过渡期 SOTA 分布,时间系数为正时为 El Niño 事件衰退期或 La Niña 事件发展期,时间系数为负时反之。谱分析结果(见图 1d)表明,第一特征向量场和第二特征向量场均具 56 和 44 个月两个显著 ENSO 周期。相关分析表明,Nino3 指数与同期及后 1 个月的第一特征向量场有密切相关,相关系数达 0.89,与后期 9 个月的第二特征向量场相关达 0.67。SOTA 第三特征向量场及以下各特征向量场对总方差的贡献均小于 4.7%,它们的时间系数与 Nino3 指数无可信的相关性。这就是说,ENSO 事件具两种 SOTA 模态。第一模态为 ENSO 事件成熟期 SOTA 分布状况,与人们熟悉的 ENSO 事件 SSTA 模态空间分布相似,时间系数变化趋势完全一致;第二模态为 ENSO 过渡期(衰退期或发展期)SOTA 分

布状况,它反映了 ENSO 循环过渡期间热带太平洋次表层海温异常信号沿赤道与  $12^{\circ}\text{N}$  之间的变化<sup>[8]</sup>。由朱艳峰等<sup>[9]</sup>得到 ENSO 准 4 年循环对应的 SSTA 分布看到, ENSO 成熟期 SSTA 分布为人们熟知的 ENSO 模态(图略),热带中东太平洋为沿赤道由东向西舌状特征值分布,其西北、西和西南侧为异号特征值分布。 ENSO 发展期/衰退期 SSTA 表现为减弱的

ENSO 模态,其中在冷/暖事件海温转变的临界期,热带太平洋 SSTA 很小,处于气候平均态。就是说,在 SSTA 分布场上, ENSO 事件仅表现为一种模态, SSTA 第二模态因空间分布与第一模态相似但强度较弱而为其所掩盖。 SOTA 前两个特征向量场时间系数可以看到, ENSO 成熟期主要出现在冬季, ENSO 过渡期主要出现在夏季,二者组合构成 ENSO 循环。

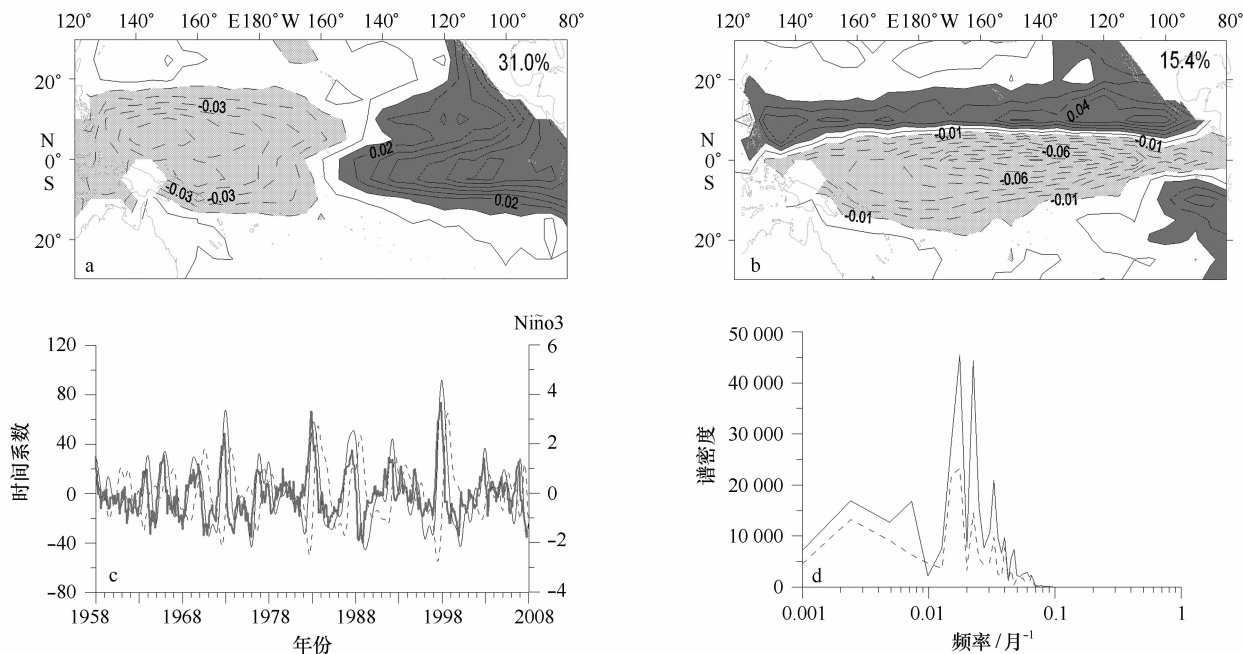


图 1 SOTA 第一(a)和第二(b)特征向量(等值线间隔为  $0.01^{\circ}\text{C}$ )及时间系数(c)与相应谱分析(d)结果(实线为第一特征向量场,虚线为第二特征向量场,粗实线为 nino3 指数)

### 3 ENSO 循环相联系的北太平洋低纬度异常西边界流

研究表明,在北太平洋低纬度西边界海域内的主要流系,如北赤道流、菲律宾以东黑潮、棉兰老流和北赤道逆流(NECC)等均与 ENSO 循环有重要联系。 Kim 等<sup>[5]</sup>用高分辨 OGCM 计算结果分析了 NEC 分叉位置的年际变化,用菲律宾东岸至  $130^{\circ}\text{E}$ 、沿  $18^{\circ}\text{N}$  断面流量定义为 KC 流量,沿  $10^{\circ}\text{N}$  流量定义为 MC 流量,结果指出, El Niño 年份, NEC 分叉出现在最北位置,在成熟期 NEC 最强, MC 最大, KC 最小; La Niña 年份, NEC 分叉出现在最南位置,在成熟期 NEC 最弱, MC 最小, KC 最大。为了解 ENSO 循环期间北太平洋上层海洋流场变化,对北太平洋上层海洋异常环流场与热带太平洋 SOTA 进行联合 EOF 分析,得到与 ENSO 循环同步出现的北太平洋上层海洋异常环流场。为详细了解研究海区异常流场,同时给

出北太平洋低纬度西边界流海域较细网格资料的分析结果。图 2 为与 ENSO 第一和第二模态同步出现的北太平洋上层海洋异常流场,其中图 2a<sub>1</sub> 和 a<sub>2</sub> 分别为北太平洋和北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋年平均流场,图 2b 和 c 分别为 El Niño 成熟期和衰退期北太平洋(见图 2b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)及低纬度西边界流海域(见图 2b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)上层海洋异常流第一和第二特征向量场。由图 2a 可以清楚地看到,北太平洋的主要流系,如 NEC、MC、KC、NECC、北太平洋漂流、加利福尼亚冷流、阿拉斯加暖流及亲潮等。在北太平洋低纬度西边界海域, NECC 两侧的涡旋对也表现得非常清楚。在 El Niño 成熟期(见图 2b),北太平洋上层海洋异常流场在低纬度  $165^{\circ}\text{W}$  以西的西部海域为显著气旋性异常环流, NEC 西向异常流抵达菲律宾沿岸,在吕宋海峡外侧向南、向北分流,  $165^{\circ}\text{W}$  以东的东部 NEC 区及加利福尼亚沿岸海区分别为异常偏东向流和偏北向流、NECC 区为两个纬向分布的气旋性异常

环流。此外,在北太平洋中高纬海区也出现较弱的且分布较分散的涡旋性异常环流。在北太平洋低纬度西边界海域为显著气旋性异常环流中,其北侧为异常西向流,菲律宾东侧海域为异常南向流,在 NECC 平均位置为一连串东西向气旋性异常环流。以上情况表明,在 El Niño 成熟期,北太平洋低纬度西边界流海域,其北侧异常西向流导致 NEC 加强,NEC 流量加大,其西侧异常南向流导致 NEC 分叉位置偏北,MC 加大, KC 减小,在其南侧 NECC 平均位置上一连串气旋性异常环流导致 NECC 减弱。在 El Niño 衰退期(图 2c),北太平洋低纬度海域总的形势转为反气旋性异常环流,北太平洋低纬度东部和西部 NEC 平均位置上为一致的异常东向流,NECC 区为异常西向流;在北太平洋低纬度西边界海域,西侧菲律宾沿岸为异常北向流,在 NECC 西段的两侧出现异常涡旋对,北侧为反气旋性异常环流,南侧为气旋性异常环流。以上情况表明,在 El Niño 衰退期,其北侧异

常东向流导致 NEC 减弱,NEC 流量减小,其西侧异常北向流导致 NEC 分叉位置偏南,MC 减小, KC 加大,其南侧为异常西向流,NECC 达最弱。根据这种 El Niño 事件不同阶段相联系的北太平洋低纬度西边界流的变化,可以清楚简明地解释 El Niño 期间 NEC 分叉位置、NEC、MC、KC 和 NECC 的异常变化特征。La Niña 期间的情况恰恰相反。就北太平洋低纬度西边界流海域而言,在 La Niña 成熟期,该区为反气旋性异常环流,其北侧为异常东向流,NEC 流量减少,其西侧与菲律宾东岸沿海为异常北向流导致 NEC 分叉位置偏南,MC 减少, KC 加大,其南侧 NECC 平均位置上为一连串反气旋性异常环流,导致 NECC 加强;在 La Niña 衰退期,该区为气旋性异常环流,其北侧异常西向流加强了 NEC,其西侧异常南向流导致 NEC 分叉位置偏北,MC 加大, KC 减小,其南侧为异常东向流,NECC 达最强。

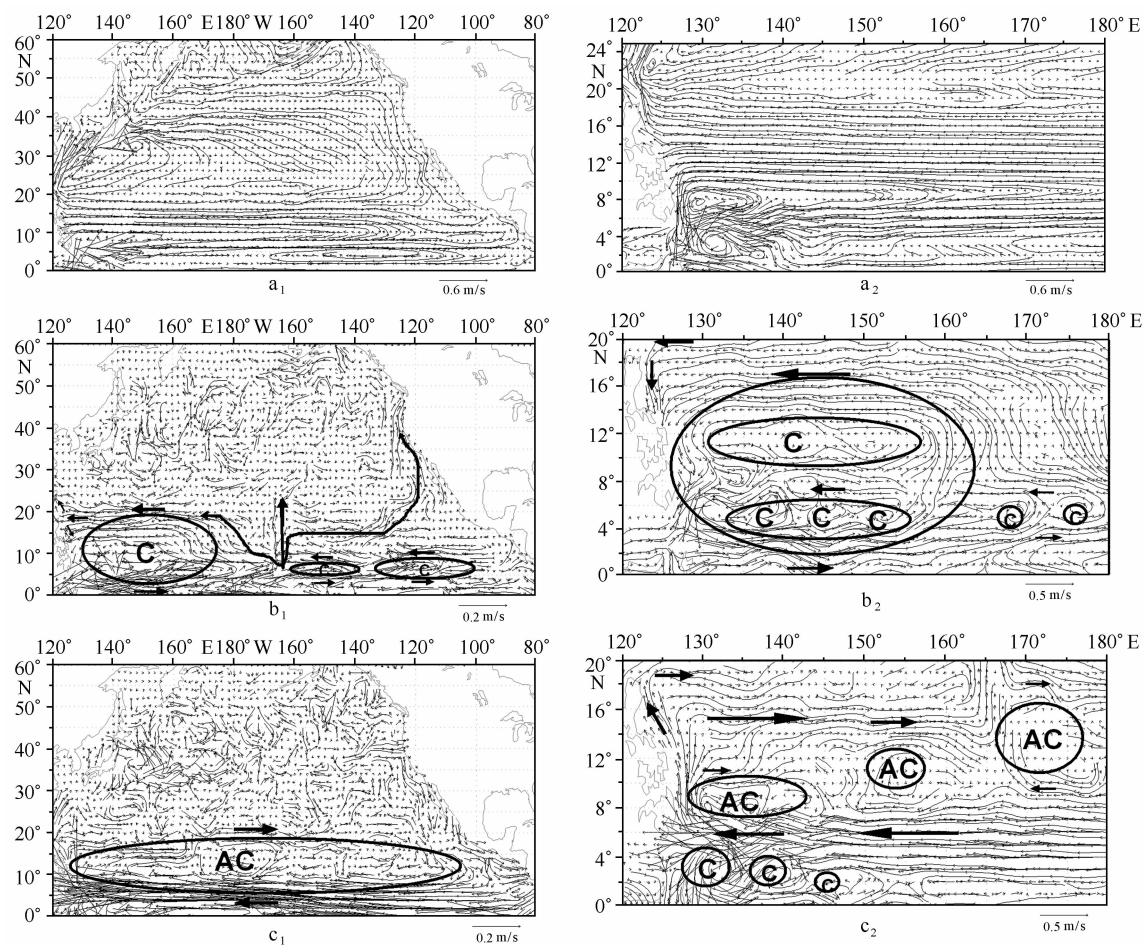


图2 与 ENSO 第一(b)和第二模态(c)相联系的北太平洋(左)和北太平洋低纬度西边界海域(右)上层海洋异常流场(单位:m/s,细实线表示流线),(a)为平均流场

图 3 为 ENSO 第一和第二模态对北太平洋上层海洋异常流的贡献。由图 3 可见, ENSO 成熟期(图 3b)对北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋流场有主要贡献, 它对 NEC、MC 和太平洋-印度洋贯通流区有超过 30% 的贡献率; ENSO 过渡期(图 3c)对北太平洋低纬度海域上层海洋流场有重要贡献, 其中对

NECC 有高出 50% 的贡献。二者共同的贡献率如图 3a。由此可见, ENSO 循环对北太平洋上层海洋环流异常的影响主要集中在北太平洋低纬度海域, 尤其在西边界流海区, 对北太平洋中高纬度海域上层海洋环流影响极小, 如图 2 所示, 在北太平洋中高纬海区仅出现较弱的且较散的涡旋性异常环流。

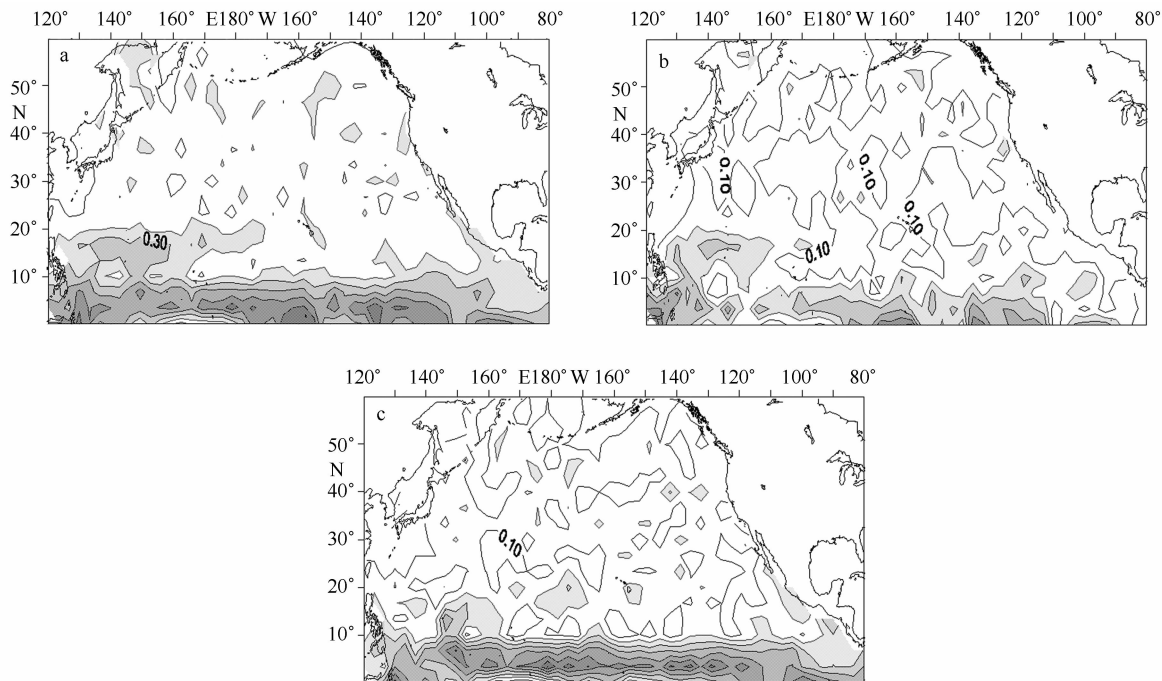


图 3 ENSO 第一和第二模态对北太平洋上层海洋异常流的贡献(a, b 和 c 分别为两个模态共同及第一模态和第二模态各自对总方差的贡献, 等值线间隔 0.1, 阴影区为超过 20% 贡献)

为详细了解 ENSO 事件不同时期北太平洋上层海洋异常环流, 我们对多次 ENSO 冷/暖事件时 SOTA 和北太平洋上层海洋异常环流进行了合成分析。1958 年以来, 出现 7 次较强 El Niño 事件(1965/66, 1965/66, 1972/73, 1982/83, 1986/87, 1991/92, 1997/98 和 2002/03 年), 出现 6 次较强 La Niña 事件(1964/65, 1970/71, 1973/74, 1974/75, 1988/89, 1998/99 年), 其中除 1986/87 年 El Niño 事件外, 它们的极值均出现在冬季。将 6 次 El Niño 事件(除 1986/87 年外)和 6 次 La Niña 事件合成得到 ENSO 事件不同阶段热带太平洋 SOTA 和北太平洋上层海洋异常环流。图 4 为 El Niño 发展期、成熟期和衰退期 SOTA 和北太平洋上层海洋异常环流。由图可见, 在 El Niño 发展期, 赤道太平洋 SOTA 为显著正值, 北侧沿 12°N 为带状较弱负值, 同期北太平洋低纬度海域上层海洋为气旋性异常环流, 北太平洋低纬度西边界流海区北侧为异常西向流, 西侧为异常南向流。这种情

况表明, 在 El Niño 发展期, NEC 分叉位置北移, NEC 和 MC 加强, KC 减少, NECC 最强。在 El Niño 成熟期, 热带太平洋 SOTA 为东正西负的偶极子分布, 北太平洋低纬度海域上层海洋西部和东部海洋环流出现反相的变化, 在北太平洋低纬度西边界流海区为气旋性异常环流加强, 其北侧异常西向流, 西侧为异常南向流, 南侧为异常东向流。这种情况表明, 在 El Niño 成熟期, NEC 分叉位置达最北, NEC 和 MC 达最强, KC 达最弱, NECC 减弱。在 El Niño 衰退期, 北太平洋低纬度海域上层海洋 SOTA 基本上为南北向跷跷板分布, 北侧较弱正值 SOTA 沿 12°N 由东向西伸展, 南侧显著负值 SOTA 沿赤道由西向东伸展, 同期的上层海洋异常流场转为反气旋性异常环流分布, 北侧异常东向流导致 NEC 减弱, 西侧异常北向流导致 NEC 分叉位置南移, MC 减弱, KC 加强, NECC 最弱。La Niña 事件时(图略)相反, 但事件过程中 SOTA 和上层海洋异常流的强度均较 El Niño 事件期间弱。



根据上述分析, ENSO 循环期间北太平洋低纬度西边界流的变化可以归纳为: 在 El Niño 成熟期, 该区为强气旋性异常环流, NEC 最强, NEC 分叉位置到达最北, MC 最大, KC 最小, NECC 减弱; 在 El Niño 衰退或 La Niña 发展期, 该区为反气旋性异常环流, NEC 减弱, NEC 分叉位置南移, MC 减小, KC 加大, NECC 最弱; 在 La Niña 成熟期, 该区为强反气旋性异常环流, NEC 最弱, NEC 分叉位置到达最南, MC 最小, KC 最大, NECC 加强; 在 La Niña 衰退或 El Niño 发展期, 该区为气旋性异常环流, NEC 加强, NEC 分叉位置北移, MC 加大, KC 减小, NECC 最强。其后又进入 El Niño 成熟期, 由此完成一个完整的 ENSO 循环。

#### 4 ENSO 事件对北太平洋低纬度西边界流影响的物理过程

已有的观测研究和本文的上述关系表明, 北太平洋上层海洋环流的异常与 ENSO 循环有重要联系。那么, ENSO 事件是通过什么过程来影响海洋环流的呢? Alexander 等<sup>[10]</sup>通过分析 50 多年资料和数值模拟, 指出在 ENSO 事件期间, 热带太平洋通过“大气桥”将其异常能量传送到其它热带海洋和中高纬度地区, 改变了这些地区上空风、温、湿及云量分布, 最后主要经由异常海面动量及热量输送影响这些海区的海洋热动力结构。为了解热带太平洋 SOTA 年际变化期间亚洲—北太平洋地区上空大气环流场的相应变化, 这里我们将热带太平洋海洋和亚洲—北太平洋地区上空大气作为一个统一的海气耦合系统, 用热带太平洋 SOTA 分别与 SSTa、大气垂直气流场、亚洲—北太平洋地区上空 700 hPa 高度场和水平风场及北太平洋海面风应力场进行联合 EOF 分析, 获取 ENSO 循环期间与 ENSO 事件相联系的海面温度场和大气环流场的变化, 探索其对北太平洋低纬度西边界流影响的物理过程。在联合 EOF 分析时, 通过控制相关物理量的量级, 始终保持 SOTA 主导场地位, 以确保计算得到的与 ENSO 相联系的相关物理量与 ENSO 呈同步变化。

图 5 为 El Niño 成熟期和衰退期期间热带太平洋海面温度异常(见图 5a)、赤道(5°S~5°N)太平洋纬向(见图 5b)、北太平洋东(160°~140°W)、西部(100°~140°E)经向(见图 5c, d)垂直流场, 700 hPa 高度和水平风异常(见图 5e, 其中  $e_1$  和  $e_2$  中实线分别为 1 月和 7 月多年平均高度场)、海面风应力异常(见图 5f)分布。由图 5a 可见, 在 El Niño 成熟期, 热带中东太

平洋显著正海面温度异常舌状沿赤道西伸。在 El Niño 衰退期, 热带太平洋中部大范围显著负海面温度异常, 大值区出现在赤道中太平洋, 其东西两侧为正海面温度异常。与此海面热力异常相对应(见图 5b), 在 El Niño 成熟期, 赤道中东太平洋上空有强烈的异常上升运动, 在赤道西太平洋上空有显著异常下沉运动, 表现为反 Walker 异常环流。在 El Niño 衰退期, 赤道中太平洋上空为较强异常下沉气流, 其两侧的赤道西太平洋—东印度洋和赤道东太平洋—南美亚马孙河流域为异常上升气流。这些垂直气流场分布, 有利于 Walker 环流的加强。同时, 由图 5d 可见, 在 El Niño 成熟期, 在热带中太平洋(160°E~140°W)10°S~10°N 范围内上空异常上升, 在 10°~40°N (平均 25°N)异常下沉, 有利于该区 Hadley 环流的加强; 在热带西太平洋—南海海域—中国东部(100°~140°E, 图 5c), 0°~20°N 上空异常下沉, 在 30°N 附近异常上升, 存在弱异常反 Hadley 环流。在 El Niño 衰退期, 热带和副热带中太平洋均为异常下沉运动, 40°N 以北的中高纬度地区才出现较弱的异常上升气流, 热带西太平洋—南海海域—中国东部 35°N 以南地区均为异常上升运动, 40°~50°N 地区为较弱下沉气流。La Niña 期间上述大气垂直运动状况恰恰相反。由图 5e 可见, 在 El Niño 成熟期, 北太平洋东北部出现显著负变高和强大气旋性异常环流, 阿留申低压显著加强, 在热带—副热带西太平洋和东印度洋海域为显著正变高, 总体上为反气旋性异常环流, 我国东南沿海 SW 气流加强, 但在热带西太平洋低纬海区, 出现气旋性异常环流转变。在 El Niño 衰退期, 北太平洋副热带地区有显著正变高, 极值出现在北太平洋副热带高压中心附近, 并有反气旋性异常环流伴随, 该大值区向西南伸展, 在我国东南沿海地区亦为反气旋性异常环流, 导致该地区 S—SE 风加强。上述大气环流的异常特征表现在异常海面风应力场(见图 5f), 在 El Niño 成熟期, 北太平洋中高纬海域为强气旋性异常环流, 北太平洋西部热带—副热带海域表现为“Z”字型异常风分布, 20°N 以北为反气旋性异常环流, 组成“Z”之上半部, 在 20°N 以南转为气旋性异常环流, 组成“Z”之下半部。此时, 在北太平洋低纬度西边界流区, 其北侧为异常东风应力, 南侧为异常西风应力。在 El Niño 衰退期, 北太平洋西部热带—副热带海域为强大、范围广泛的反气旋性异常环流, 北太平洋东部为异常偏北风应力, 北太平洋低纬度西边界流区, 其北侧为异常西南—西风应力, 其南侧为异常东风应力。

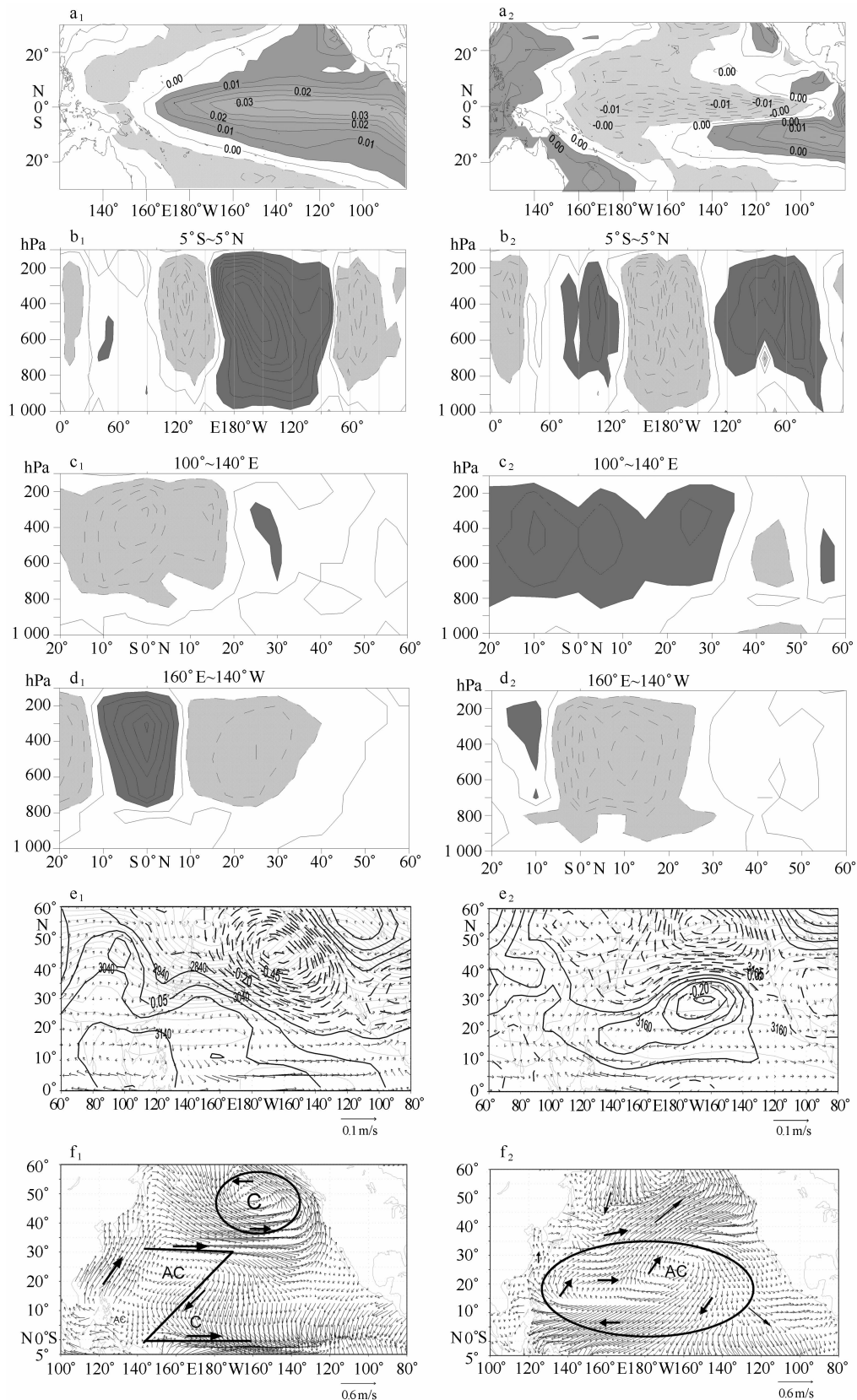


图5 El Niño成熟期(左)和衰退期(右)热带太平洋海面温度异常(a, a<sub>1</sub>和a<sub>2</sub>图中等值线间隔分别为0.005°C和0.002°C),赤道太平洋纬向(b)、北太平洋西、东部经向(c, d)异常垂直流场(深阴影区为上升区,浅阴影区为下沉区,等值线间隔为 $0.005 \times 10^{-3}$  hPa/s),700 hPa高度(位势米)和水平风异常(e, e<sub>1</sub>和e<sub>2</sub>中粗实线分别为1月和7月多年平均高度场)和海面风应力异常(f, N/m<sup>2</sup>)分布

研究表明,在海气相互作用过程中,大气响应 SST 异常约需 2 个星期时间,而海洋对大气的完全响应则需几个月时间。由图 5a<sub>1</sub> 可见,在 El Niño 成熟期,热带中东太平洋异常偏暖,对流活动加强,西太平洋异常偏冷,对流活动减弱,赤道太平洋 Walker 环流减弱,表现在图 5b<sub>1</sub> 中沿赤道异常垂直流场的分布。该异常热力状况及导致的异常对流活动造成北太平洋上空大气经向环流的变化,如图 5c<sub>1</sub> 和 5d<sub>1</sub> 所见。此时,在赤道海洋存在异常反 Walker 环流,东部异常上升气流,西部异常下沉气流,在北太平洋东部和西部各存在一个位相相反的异常 Hadley 环流,东部为正异常 Hadley 环流,北太平洋中部为异常下沉气流,北太平洋西部为负异常 Hadley 环流,30° N 附近为异常上升气流,但强度较弱。Wang<sup>[11]</sup> 分析了与 ENSO 相联系的大气环流特征,指出 ENSO 成熟阶段太平洋上空存在显著异常 Walker、Hadley 环流和中纬度纬向环流(MZC),该结果与本文 ENSO 成熟期的大气环流异常状况完全一致。Alexander 等<sup>[10]</sup> 的研究指出,在 El Niño 成熟期,通过经向北太平洋东部上空“大气桥”(Hadley 环流)激发北太平洋中部偏北气流,异常西北风输送冷空气越过北太平洋中部南下,而在北美西海岸偏南风携带暖湿空气北上,导致阿留申低压异常加深。统计结果表明,在 El Niño 期间比在 La Niña 期间阿留申低压明显加深平均低 9 hPa。表现在图 5e<sub>1</sub> 中北太平洋东北部强负变高和气旋性异常环流及图 5f<sub>1</sub> 阿留申地区显著气旋性异常风应力场。在热带—副热带太平洋西部—南海—中国东部地区上空为异常反 Walker 环流的下沉分支控制。它一方面导致该区上空大范围正变高和反气旋性异常环流,另一方面导致该区东侧赤道海洋异常西风。二者共同作用下,中国东南沿海为反气旋性异常环流,但在热带西太平洋低纬度海域转为气旋性异常环流,如图 5e<sub>1</sub> 所示。在海面异常风应力场上,在北太平洋西部热带—副热带海域构成该海区特殊的“Z”型异常风应力场分布,在北太平洋东部热带海域为反气旋性异常环流形势,盛行异常偏北风(图 5f<sub>1</sub>)。在北太平洋低纬度西边界流区,由于“Z”型下半部的气旋性异常环流,该区北侧为异常东风,南侧为异常西风,在此风应力场强迫作用下导致本海域上层海洋出现气旋性异常环流,此时北侧为异常西向流,西侧为异常南向流,南侧为异常东向流,导致 NEC 加强,分叉位置偏北,MC 加大,KC 减小,在 NECC 位置上出现一连串东西向气旋性异

常环流,NECC 减弱。在北太平洋东部低纬度海域,由于异常偏北风应力场的作用,NEC 南压,导致该区 NEC 和 NECC 同时减弱。由图 5a<sub>2</sub> 可见,在 El Niño 衰退期,热带太平洋中部大范围显著负异常海温,大值区出现在赤道中太平洋,其东西两侧为正异常海温。在此海洋热力条件下,北太平洋中部热带—副热带海域上空为异常下沉气流。此时赤道西太平洋热带海洋(可能还有南海和热带东印度洋)为正海温异常,在该异常热力场作用下,北太平洋西部及南海—热带东印度洋热带—副热带海域上空为异常上升气流。北太平洋中东部热带—副热带上空异常下沉气流导致北太平洋中部上空出现异常显著正变高中心,北太平洋副高加强,北太平洋西部及南海—热带东印度洋热带—副热带上空异常上升气流导致西太平洋副高减弱,位置偏西偏南,由此造成北太平洋中低纬度大范围呈西南—东北走向的反气旋性异常环流,如图 5e<sub>2</sub> 和 5f<sub>2</sub> 所示。主要在偏南偏西的西太平洋副高控制的异常风应力作用下,北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋出现反气旋性异常环流。此时,该区北侧为异常东向流,NEC 减弱,西侧为异常北向流,NEC 分叉位置南移,MC 减弱,KC 加大,南侧 NECC 位置为强劲异常西向流,NECC 最弱。北太平洋东部低纬度海域异常风应力场同 El Niño 成熟期,继续造成 NEC 和 NECC 减弱。注意到海洋对大气的响应需几个月时间,因此实际海洋环流异常往往较 ENSO 事件落后, Kim 等<sup>[5]</sup> 的分析结果指出,NEC 分叉较 SOI 滞后 1 个月。在 La Niña 成熟期和衰退期的情况与上述完全相反。

由此可见,北太平洋低纬度西部边界流确实受 ENSO 循环的影响,而这种影响主要通过海洋温度异常导致的大气环流变化来实现的。首先是 ENSO 事件导致热带太平洋海洋热力状况异常,造成其上空对流活动异常,后者直接或间接通过“大气桥”能量传输引起相关地区大气环流场的变化,最后致使海面风应力场异常,进而强迫上层海洋环流场出现相应变化。

## 5 讨论和结论

Wang 等<sup>[12]</sup> 指出,赤道东太平洋异常增暖时会在西北太平洋菲律宾海域对流层低层强迫产生一个异常反气旋,该区出现正 SSTA,而在其以东约 20 个经度的海域出现负 SSTA,后者又会使反气旋加强,通过海面热通量作用形成正反馈机制。对 El Niño 事件

期间, 菲律宾海域反气旋性异常环流的持续, Xie 等<sup>[13]</sup> 则用热带印度洋增暖产生延伸到西太平洋的 Kelvin 波来解释, 认为该 Kelvin 波导致赤道海平面气压降低, 赤道以北气流辐散抑制了西北太平洋对流。本文的结果表明, 在 El Niño 成熟期, 热带西太平洋 SOTA 为负, 其上空为异常下沉气流, 导致该区副热带高压加强, 但此时赤道太平洋上空为异常反 Walker 环流, 赤道西太平洋低层为异常西风。二者共同作用造成北太平洋西部热带一副热带海域“Z”型异常风场分布, 菲律宾东北海域为反气旋性异常环流 (“Z”型异常风场上半部), 菲律宾以东、赤道以北的低纬度海域 (“Z”型异常风场下半部) 为气旋性异常环流。对 El Niño 衰退期西北太平洋异常反气旋的持续, 以往人们多采用 SSTa 作为 ENSO 事件的基本依据, 但 ENSO 事件 SSTa 仅具一个成熟期模态, 因此不能给出 ENSO 循环过程中过渡期 SSTa 的空间分布和时间变率, 同样也很难了解 ENSO 循环过渡期热带太平洋对流活动状况及其对大气环流的影响。本文用海洋次表层海温异常为指标, 获得了构成 ENSO 循环的两个模态, 第一模态同 SSTa 第一模态, 为 ENSO 成熟期, 第二模态为 ENSO 过渡期, 由第二模态时 SOTA 导致 ENSO 过渡期热带太平洋异常对流分布。此时, 北太平洋西部热带一副热带为异常上升运动, 它导致西太副高减弱, 位置偏南偏西, 表现在夏季菲律宾以东海域仍持续反气旋性异常环流。

据 ENSO 循环过程中 SOTA 演变过程<sup>[8]</sup> 看到, 在 ENSO 成熟期, 热带太平洋东部和西部 SOTA 之量级基本相当, 但在 ENSO 过渡期, 沿赤道太平洋东传的 SOTA 的量级约两倍于沿 12°N 西传的 SOTA。现在的问题是, 在 ENSO 循环过程中, 是什么原因导致热带西太平洋持续产生并提供给沿赤道东传的强 SOTA 源? Kim 等<sup>[5]</sup> 指出, 在 ENSO 期间, 北太平洋低纬度西边界流区显著异常热储量是由中赤道太平洋产生的向西传播的向上或向下 Rossby 波造成。由本文的分析可知, 在 El Niño 发展期, 负 SOTA 沿 12°N 不断西传到达北太平洋低纬度西边界流区, 同时该区上层海洋气旋性异常环流开始形成并逐步加强, 上层辐散导致海水上翻, 负 SOTA 进一步加强, 在 El Niño 成熟期达到最强。La Niña 时相反, 它导致北

太平洋低纬度西边界流区的正 SOTA 进一步加强。就是说, 北太平洋低纬度西边界流区异常 SOTA 或热储量主要是沿 12°N 西传的结果, 同时该区局地海气相互作用产生的异常上层海洋环流又使其进一步加强, 为 ENSO 事件提供了足够量级的异常热源, 对 ENSO 循环的持续做出重要贡献。

综上所述, 可以得到以下几个结论:

(1) 在热带太平洋海洋次表层 ENSO 事件具有两种模态, 二者组合构成 ENSO 循环。第一模态为 ENSO 成熟期, 主要表现 ENSO 事件冬季热带太平洋 SOTA 分布, 第二模态为 ENSO 过渡期, 主要表现 ENSO 事件夏季热带太平洋 SOTA 分布。由此导致 ENSO 循环不同位相 SSTa 的分布。

(2) ENSO 循环对北太平洋低纬度西边界流区上层海洋环流有重要影响。在 El Niño 发展期或 La Niña 衰退期, 该区出现气旋性异常环流, NEC 加强, NEC 分叉位置北移, MC 加大, KC 减小, NECC 最强。在 El Niño 成熟期, 该区气旋性异常环流最强, NEC 最强, NEC 分叉位置最北, MC 最大, KC 最小, NECC 减弱。在 La Niña 发展期 (El Niño 衰退期), 该区出现反气旋性异常环流, NEC 减弱, NEC 分叉位置南移, MC 减小, KC 加大, NECC 最弱。在 La Niña 成熟期, 该区反气旋性异常环流最强, NEC 最弱, NEC 分叉位置最南, MC 最小, KC 最大, NECC 加强。

(3) ENSO 循环对北太平洋低纬度西边界流海域上层海洋环流的影响是通过 ENSO 事件期间热带太平洋热力状况异常改变上空大气环流来实现的。首先是 ENSO 事件导致热带太平洋海洋热力状况异常, 造成其上空对流活动异常, 后者直接或间接通过“大气桥”能量传输引起相关地区大气环场的变化, 最后致使海面风应力场异常, 由此强迫上层海洋环流场出现相应变化。

这里需要强调说明的是, 本文上述结论中对 KC 的定义是指通过菲律宾以东沿 18°N 断面的海水流量, 即文中所谓的菲律宾以东黑潮 (KC), 而不是 NEC 分叉后北向进入东海的 KC 流量。关于 ENSO 事件对菲律宾以东黑潮、南海贯通流及台湾以东黑潮的影响, 我们将另文讨论。

## 参考文献:

[1] Qu T D, Mitsuder A H, Yamagata T. On the western boundary currents in the Philippine Sea[J]. J Geophys Res, 1998, 103(4): 7537-7548.

- [2] Qu T, Lukas R. The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific[J]. *J Phys Oceanogr*, 2003,33:5—18.
- [3] Yaremchuk M, Qu T D. Seasonal Variability of the large-scale currents near the coast of the Philippines[J]. *J Phys Oceanogr*, 2004,34(4):844—855.
- [4] Wang Q, Hu D. Bifurcation of the North Equatorial Current derived from altimetry in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006,18(5):620—626.
- [5] Kim Y, Qu T, Jensen T, et al. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM[J]. *J Geophys Res*, 2004, 109: C03049, doi:10.1029/2003JC002913.
- [6] LUKAS R. Interannual fluctuation of the Mindanao Current inferred from sea level[J]. *J Geophys Res*, 1988,93: 6744—6748.
- [7] Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean—atmosphere model[J]. *J Atmos Sci*, 1988,45:549—566.
- [8] 赵永平,陈永利,王凡,等. 热带太平洋海洋混合层水体振荡与 ENSO 循环[J]. *中国科学: D辑*,2007, 37(8): 1120—1133.
- [9] 朱艳峰,陈隆勋,宇如聪. 中国气候异常变化与 ENSO 准四年循环的联系分析[J]. *热带气象学报*,2003, 19(4):345—356.
- [10] Alexander M A, Blade I, Newman M, et al. The atmospheric bridge: the influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans[J]. *J Climate*, 2002, 15: 2205—2231.
- [11] Wang C. Atmospheric circulation cells associated with the El Niño-Southern Oscillation[J]. *J Climate*, 2002, 15:399—419.
- [12] Wan G B, Wu R, Fu X. Pacific—East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?[J]. *J Climate*,2000, 13:1517—1536.
- [13] Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo—western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. *J Climate*, 2009, 22:730—747.

## Low-latitude western boundary current anomalies in the North Pacific associated with the ENSO cycle

CHEN Yongli<sup>1,2</sup>, ZHAO Yongping<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>, TANG Xiaohui<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave Studies, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China*)

**Abstract:** Based on SODA ocean assimilation and NCEP atmospheric reanalysis data, relationships of the main modes of tropic Pacific subsurface ocean temperature anomalies with variations of the upper ocean circulation of the North Pacific low-latitude western boundary currents (NPLLWBC) and the Asian—North Pacific atmospheric vertical and horizontal flow fields are analyzed. Major results are summarized as follows: (1) The tropical Pacific subsurface ocean variabilities are dominated by two primary modes, which make up the ENSO cycle. The first mode, represents the ENSO mature phase, and mainly prevails in winter, while the second mode represents the ENSO transition phase, prevailing in summer. (2) ENSO cycle has major impact on the upper ocean circulation in the NPLLWBC areas. During the developing phase of El Niño events or decaying phase of La Niña events, anomalous cyclonic circulation evolves in this area, accompanied by strengthening of the North Equatorial Current (NEC), northward shift of the NEC bifurcation location, enhancement of the Mindanao Current (MC), weakening of the Kuroshio Current (KC) in its source region, and the strongest phase of the North Equatorial Countercurrent (NECC). During the mature phase of El Niño, the anomalous cyclonic circulation in this area reaches its strongest phase, with NEC also strongest, NEC bifurcation location northmost, MC strongest, KC weakest, and NECC weakened. Vice versa, during the decaying of El Niño or developing of La Niña, anomalous anti-cyclonic circulation appears in the area, the NEC weakens, NEC bifurcation location shifts southward, MC weakens while KC strengthens, and the NECC becomes weakest. During the mature phase of La Niña, the anti-cyclonic circulation anomalies become strongest, with NEC weakest, NEC bifurcation location southmost, MC weakest, KC strongest, and NECC strengthened. (3) The influence of ENSO cycle on the upper ocean circulation of NPLLWBC are mainly achieved through the change of atmospheric circulation in response to thermal condition anomalies in the tropical

Pacific during ENSO events. The ENSO events first generate anomalous thermal conditions in the tropical Pacific Ocean, which lead to anomalous convection activities in the above atmosphere. The latter in turn alters atmospheric circulation field in related area directly or indirectly by energy transport through the “atmospheric bridge” resulting in anomalous sea surface wind stress fields, and thus forces corresponding variations in the upper ocean circulation. In the end of the paper, the reasons for generation and sustainment of the anomalous anti-cyclonic/cyclonic wind fields near Philippines during the ENSO events are also analyzed, and the contributions of air-sea interaction in the NPLWBC areas to the ENSO cycle are discussed.

**Key words:** North Pacific low-latitude western boundary currents; ENSO cycle; North Equatorial Current bifurcation; Mindanao Current; Kuroshio Current in source region