

# 1997/1998年 El Niño/La Niña 期间 洋流的演变特征和影响的分析\*

张祖强 丁一汇 赵宗慈 P4 A

(国家气候中心, 北京 100081)

**摘要** 利用 TOGA-TAO 赤道次表层海流与海温观测资料, 比较清楚地揭示了 1997/1998 年 El Niño 期间在赤道西太平洋暖池上空西风异常的驱动下, 次表层异常海流的产生机制和向东传播过程中的变化特征。对比分析了海表、次表层异常海流的两种热力平流过程, 即水平温度平流和因海流水平辐合辐散造成的垂直上翻(或下沉)运动对混合层及海表温度异常的贡献, 结果证实了后一效应对 ENSO 发生发展的重要意义。最后还对文中的海流异常是否就是理论分析得到的 Kelvin 波在海流场上的反映进行了讨论。

**关键词:** ENSO; 海洋次表层; 海流异常

## 1 引言

El Niño / La Niña 是热带太平洋表层温度异常变化的海洋现象。根据早期的海温观测资料, Bjerknes<sup>[1~3]</sup>首先将赤道中东太平洋海温的变化同南方涛动联系起来讨论, 明确指出 ENSO 是海-气相互作用的结果。他认为 Walker 环流和 Hadley 环流的强弱调整引起低层信风减弱, 最终导致赤道中东太平洋冷水上翻减弱, El Niño 事件发生。

随着研究的深入, 人们逐渐认识到赤道海洋 Kelvin 波和 Rossby 波的存在。许多学者<sup>[4~9]</sup>通过理论分析和数值模式提出了一系列 ENSO 循环形成机理的理论。所有这些研究均认为, 大气低层风场异常所激发的海洋 Kelvin 波和 Rossby 波, 在沿赤道传播过程中引起次表层海洋异常上翻或下沉是导致海表温度异常的主要原因。巢纪平和张人禾<sup>[10]</sup>则从海气相互作用波动的观点出发讨论了不稳定海气相互作用现象, 并指出从模式中滤去 Kelvin 波, 通过海气相互作用, 耦合波动也可以向东传播, 而且可以产生不稳定。张人禾和黄荣辉<sup>[11]</sup>的分析也指出, 使得赤道东太平洋混合层厚度变厚的机制, 有东传西风应力激发的 Kelvin 波及其在大洋东边界反射产生的暖 Rossby 波, 还有西风应力本身到达赤道东太平洋时强迫产生的厚度正扰动异常。总之, 上述有关 ENSO 形成理论的研究都强调了热带海洋次表层动力过程在 ENSO 循环中的重要作用。

观测资料的分析也表明, 次表层海洋热力异常对于 El Niño / La Niña 发生有十分重要的意义。White<sup>[12]</sup>利用 XBT 观测资料分析指出, 早在 El Niño 成熟前一年的晚秋

2000-07-14 收到, 2000-12-14 收到修改稿

\* “九五”重中之重项目“我国短期气候预测系统的研究”96-908-02-05 专题和 APN99012、APN200012 共同资助

到冬季,西太平洋菲律宾沿岸次表层海洋就已经有海水热容量积聚,然后向东传播。李崇银和穆明权<sup>[13]</sup>分析了 El Niño 期赤道太平洋次表层海温异常的传播特征及其对 El Niño 发生的作用。

由于海流观测资料较海温稀少和零散,因而有关 ENSO 期间海流异常的系统研究相对较为少见。Firing<sup>[14]</sup>曾指出,1982/1983 年 El Niño 期间,1982 年 8 月中太平洋向东的赤道潜流减弱,9 月份部分反向,而 1983 年 1 月又迅速恢复。他认为这是海表倾斜状态对西风异常响应的结果。文献[15]中,对 1985 年到 1990 年中美热带西太平洋海-气相互作用联合调查期间获得的西太平洋的海洋资料分析表明:1986 年底在 165°E 剖面上,赤道附近的表层 100 m 之上海水均向东流动,流速高达 110 cm s<sup>-1</sup>;在 200 m 深度上潜流中心向东的流速减至 40 cm s<sup>-1</sup>。1987 年秋季,随着西风异常的减弱,风场向信风风系转变。此时流速普遍减小,流速梯度减弱。第四航次在 1988 年 4~5 月进行,此时 El Niño 事件已经结束,热带西太平洋为信风控制,上层海水恢复到向西流动的正常状态。Weisberg 与 Hayes<sup>[16]</sup>利用 TOGA-TAO 赤道 170°W 最初 3 年观测结果讨论了次表层洋流的年际和年变化,认为 170°W 的赤道潜流年变化较强,并且 1988 年它的向东流速很强。最近,Weisberg 与 Wang<sup>[17]</sup>使用 1988 年 5 月到 1994 年 3 月的资料,研究了中太平洋西部的海气耦合问题,认为 El Niño 期间海气耦合系统大气部分表现为 Walker 环流减弱,甚至反转,海洋中则表现为赤道潜流减弱或消失。由于资料长度只有 6 年,因此没有从距平的角度来讨论洋流的年际变化。由此说明,ENSO 期间赤道太平洋表层与次表层海流均表现出明显的异常。ENSO 现象并不仅仅是大气与海表相互作用的结果,它还与次表层海洋动力过程密切相关,特别表现为次表层海温和海流的异常。

作为热带海洋与全球大气研究计划(TOGA)的一个重要成果,TOGA-TAO 在热带太平洋利用锚定浮标阵对海气要素进行了点阵式的定时定点观测系统。该系统为科研与业务工作提供了丰富海洋资料,对于检验和改进现有的 ENSO 形成机制有十分重要的意义。现在通过国际互联网即可获得热带太平洋海表与次表层海温实时的监测结果,但是有关次表层海流演变的观测分析目前还不多,TOGA-TAO 的观测资料为这个问题的研究提供了极好的机会。本文将侧重分析 1996 年到 1999 年海表与次表层洋流的产生机制和演变特征,考察它们在 1997/1998 El Niño 事件发生、发展和消亡过程中的作用。

## 2 资料说明

本文所用的资料包括:

(1) 美国太平洋环境实验室 TAO 项目办公室提供的 TOGA-TAO 点阵式观测资料。该观测系统采用了 ATLAS 浮标和声学多普勒海流计(ADCP)两种仪器,前者用于观测大气低层的风、压、湿、温和次表层海温,后者用于观测表层到次表层海流速度。TAO 阵列式 ATLAS 浮标数目从 1985 到 1989 年由少到多逐渐增加,最终于 1994 年底布置完毕。它东起 137°E,西到 95°W,大致间隔 15 个经距;经向从 8°S 开始,以 2 个纬距的间隔,向北到 8°N 为止,组成了对赤道太平洋密集点阵式定时监测系统。

TOGA-TAO 分别在赤道 147°E、165°E、170°W、140°W、110°W 对海流进行每天一次定时观测, 其中 147°E 的观测资料较短, 本文没有使用。

下文主要使用的是次表层海温与海流资料, 垂直方向观测层次从 0 m 到 400 m 不等。为了使用方便, 我们将该离散点海温插值到  $5^\circ \times 2^\circ$  的网格点, 垂直方向 0、25、50、75、100、125、150、175、200、250、300、500 m 共 12 层, 资料序列从 1983 直到 1999 年底。赤道 165°E、170°W、140°W、110°W 四点的次表层洋流逐日观测资料从 10 m 开始, 以 5 m 或 10 m 间隔向下最深到 400 m。本文按 10 m 的间隔, 将其整理为 29 层月平均资料, 深度范围为 10~300 m, 序列长度从 1988 到 1999 年底。

(2) 美国综合全球海洋服务系统 (IGOSS) 提供的海表洋流模式实时预报 (Now-forecasting) 资料。格点分辨率为  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ , 范围覆盖 ( $120^\circ\text{E} \sim 90^\circ\text{W}$ ,  $19.5^\circ\text{S} \sim 19.5^\circ\text{N}$ ), 资料长度为 1994 年 9 月~1998 年 11 月。

(3) 国家气候中心计算机室提供的 NCEP / NCAR 全球月平均再分析数据集, 分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 资料年代为 1958~1998 年。本文用到 850 hPa 的纬向风场。

(4) 由国家气候中心提供的 NCEP (1981~1998) 最优插值全球海表温度月平均资料, 分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。

### 3 赤道纬向洋流与风场的关系

在气候状况下, 赤道太平洋盛行东风。在其驱动下, 赤道表层海水全年都是向西流动形成南赤道洋流。它的下方海水流向正好相反, 全年向东流动形成赤道潜流。显然, 大气风场的变化会引起海流的异常。下面来分析风场与海流异常的关系。

El Niño 发生前冬春季热带西太平洋地区总有强劲的西风异常出现<sup>[18]</sup>, 在此西风强迫下海表与次表层洋流的响应情况如何呢? 下面我们以 1997 / 1998 年 El Niño 事件为例进行分析。图 1 分别给出了 1996~1999 年赤道 165°E、170°W、140°W、110°W 四点 850 hPa 纬向风距平和 0~300 m 各深度上纬向洋流的距平演变情况。由图 1a 可见, 1996 年全年赤道西太平洋上空均维持弱的东风距平, 相应地, 上半年赤道 165°E 海表到 180 m 深的层次上出现微弱的向西洋流异常。下半年 80 m 以下的纬向海流为正距平。这一形式在 1997 年初出现明显改变。随着强劲的西风异常出现, 海洋上层 120 m 深度之上的海水异常向东流动, 相反, 从该深度以下直至 220 m 海流则异常向西。1997 年秋末西风明显减弱并在 1998 年转变为东风距平, 海洋上层流速向西, 而 60~200 m 层次上出现较强的向东异常海流。此后随着海表东风异常的加强, 纬向流速为负距平的层次不断加深, 1998 年底到达 150 m 附近。1999 年初东风距平开始减弱, 流速异常零线所在的深度迅速上升到 80 m 左右。

上述分析表明大气风场异常与赤道西太平洋海流异常的关系非常密切。当洋面为西(东)风异常时, 浅层海洋在风应力的推动下向东(西)流动, 较深层次上海水流动的方向正好相反。海表纬向西风异常越强, 直接受它驱动向东的海水到达的层次越深。此外, 我们特别注意到, 1997 年 3 月与 8 月赤道西太平洋分别出现两次西风爆发增强的过程, 相应的 120 m 深度之上的异常向东海流也两次加速, 但是该深度之下的海流仅仅对第一次西风爆发作出了响应, 而对 8 月份西风爆发的响应不显著。

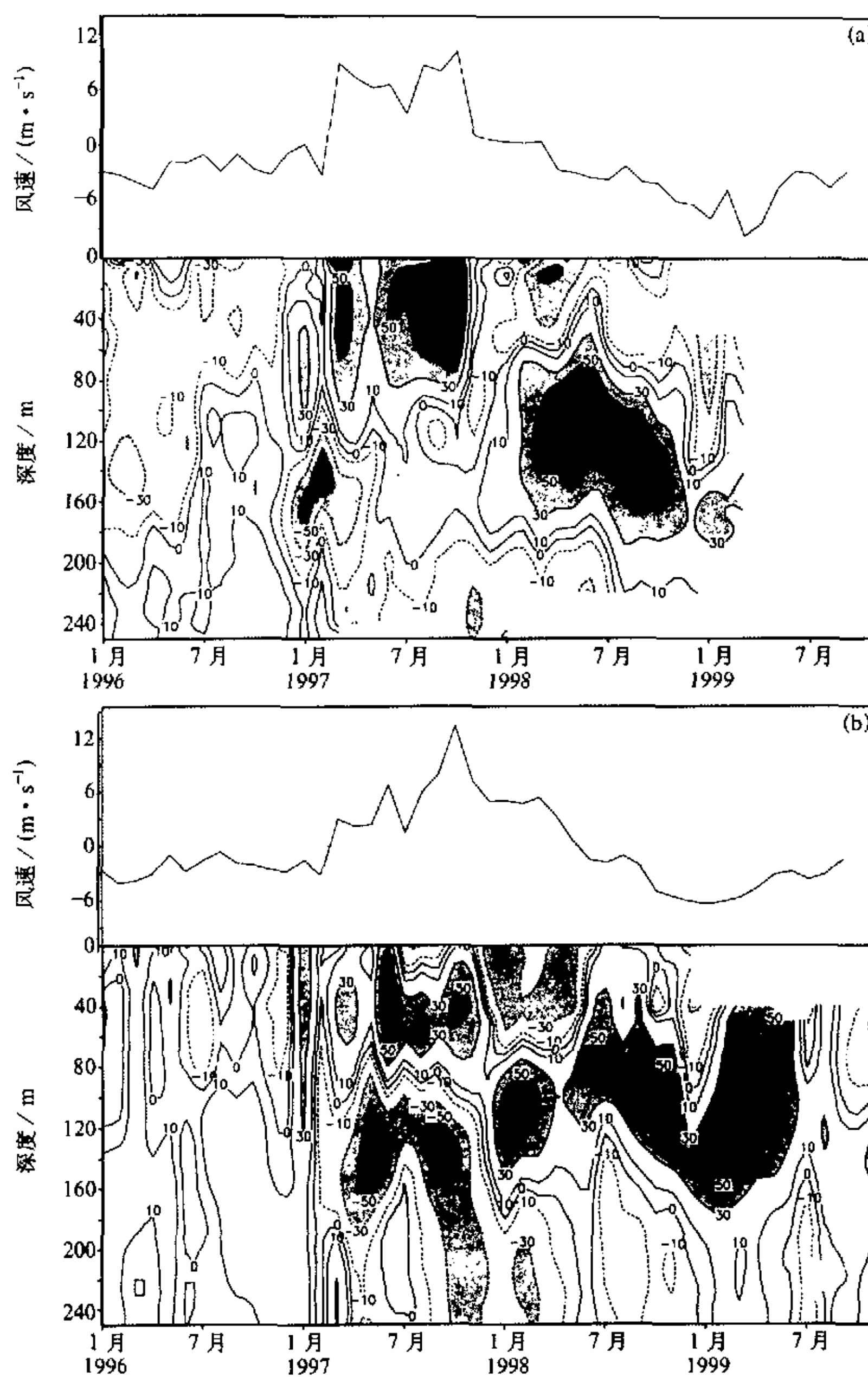


图1 1996~1999年沿赤道太平洋850 hPa纬向风异常(2.5°S~2.5°N)与次表层纬向海流异常  
 纬向风与海流的气候场均取1988~1998年的平均,海流单位:  $\text{cm s}^{-1}$   
 (a) 165°E; (b) 170°W;

在赤道中太平洋西部 170°W, 纬向风与纬向洋流的关系较 165°E 附近的情况有所不同。在该经度上, 纬向西风也同样经历了两次明显的加速过程, 相应的海表到 80 m 之间的浅层海流也出现了两次超过  $50 \text{ cm s}^{-1}$  的流速正距平。但需要强调的是, 100 m~

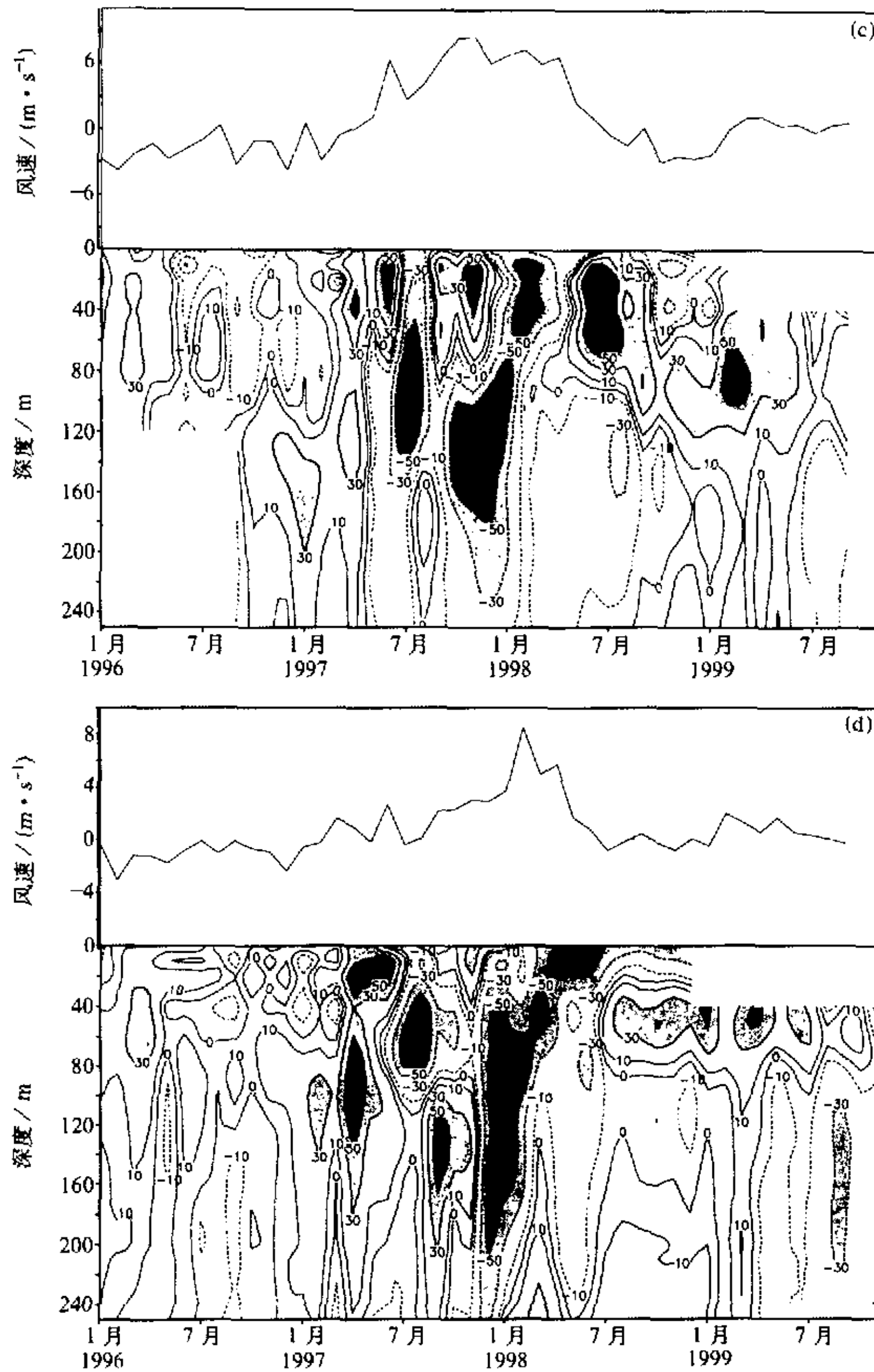


图1 (续)

(c) 140°W; (d) 110°W

180 m 的深层海洋不仅在 1997 年上半年, 而且在下半年也出现了异常强劲的向西距平海流, 中心强度超过  $-50 \text{ cm s}^{-1}$ 。这是与 165°E 海流异常的最大区别。

在中太平洋 140°W 经度上, 作为对 1997 年赤道西风两次加速过程的响应, 80 m 深度之上的浅层异常海流向东两次加速。但同时我们注意到, 在西风异常期间, 海表浅

层也曾出现较强的向西异常海流,说明在该中太平洋东部风场的位相对表层海流速度的位相不如在西太平洋一致。相比之下,在 80 m 之下的深层两者的位相吻合较好。不仅 1997 年至 1998 年 6 月一直维持着向西的海流,并且加速的时间与两次西风爆发一致,范围从 120 m 向上扩展到海表面。

在 110°W 东太平洋,在西风的驱动下海表曾出现两次短暂的向东异常海流,但强度很弱。相反,海流异常主要表现为两次向西流速加强的过程,第一次出现在 1997 年 6、7 月份,深度为海表到 100 m 附近;第二次出现在 1997 年末,垂直方向从海表面直达 250 m 的深度。

综上所述,赤道西太平洋暖池上空出现西风异常后,海洋浅层将伴有异常向东洋流,其下较深层次上海水则有反向的异常向西流动。这种风场与海流场相互匹配的显著性沿赤道向东逐渐减弱。

#### 4 海流与海温异常的关系

根据海温热动力方程<sup>[19]</sup>,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\bar{U} \cdot \nabla T' - U' \cdot \nabla(\bar{T} + T') - [M(\bar{W} + W') - M(\bar{W})] \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \\ & - M(\bar{W} + W') \frac{\partial T}{\partial z} - \alpha T', \end{aligned}$$

$$M(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases}$$

函数  $M(x)$  表示垂直平流项仅仅在上翻的情况下才能影响海表温度。方程右边前两项代表混合层水平洋流造成的温度平流对海温异常的贡献;第三项为异常上翻流对平均垂直温度梯度的平流贡献,它与上翻流的强弱和垂直温度梯度有关;第四项为总的上翻流对异常温度梯度的平流;第五项为牛顿冷却效应,它总是起着阻尼作用,抑止海温异常的发展加强。这里主要比较洋流的水平温度平流和垂直上翻流对 1997/1998 年 El Niño 事件发生、发展和消亡的贡献。鉴于 TAO 观测的次表层海流仅限于赤道剖面,无法据此计算次表层水平散度和相应的垂直上翻流速,因此本文将定量海表洋流的水平温度平流和定性分析垂直上翻流的异常。

由于 IGOSS 海表洋流的资料长度有限(从 1994 年 9 月到 1998 年 11 月),难以获得可信的气候场。但如图 2 所示,1997、1998 年赤道太平洋海温冷暖位相转变情况基本相反,只是 1997 年 Niño3、Niño3.4 指数反映的中东太平洋海温冷位相向暖位相转换发生在 3 月份,而 1998 年的反向转变出现在 5、6 月份。作为折衷的办法,我们用 1997 年各月洋流减去 1998 年各月洋流的值,大致反映 El Niño 发生过程中洋流的异常变化。

图 3 顺序给出了赤道次表层纬向海流与海水温度、海表纬向与经向海流及其各自的温度平流和海表温度的异常分布,图中各要素均为 1997 年 2 月与 1998 年 2 月的差值。由海流的赤道剖面可见,在西太平洋暖池区 60~180 m 深度上,异常向西流速差值强

度超过  $60 \text{ cm s}^{-1}$ 。它的范围向东伸展到中太平洋  $140^\circ\text{W}$ ，深度沿温跃层逐渐升高，并与东边异常向东海流一起造成赤道中太平洋次表层海水的纬向辐散，抑制和削弱深层冷水上翻流强度，促使该经度上次表层海温升高。从次表层海温看，在海流辐散运动较强的经度上已经出现暖水差值， $60\sim 180 \text{ m}$  深层的差值为正，暖水集中在暖池区。暖水异常差值中心与向西海流中心的位置吻合，都在混合层底附近。整个赤道太平洋浅层的海温差值几乎都为负，冷水中心退缩在东太平洋。

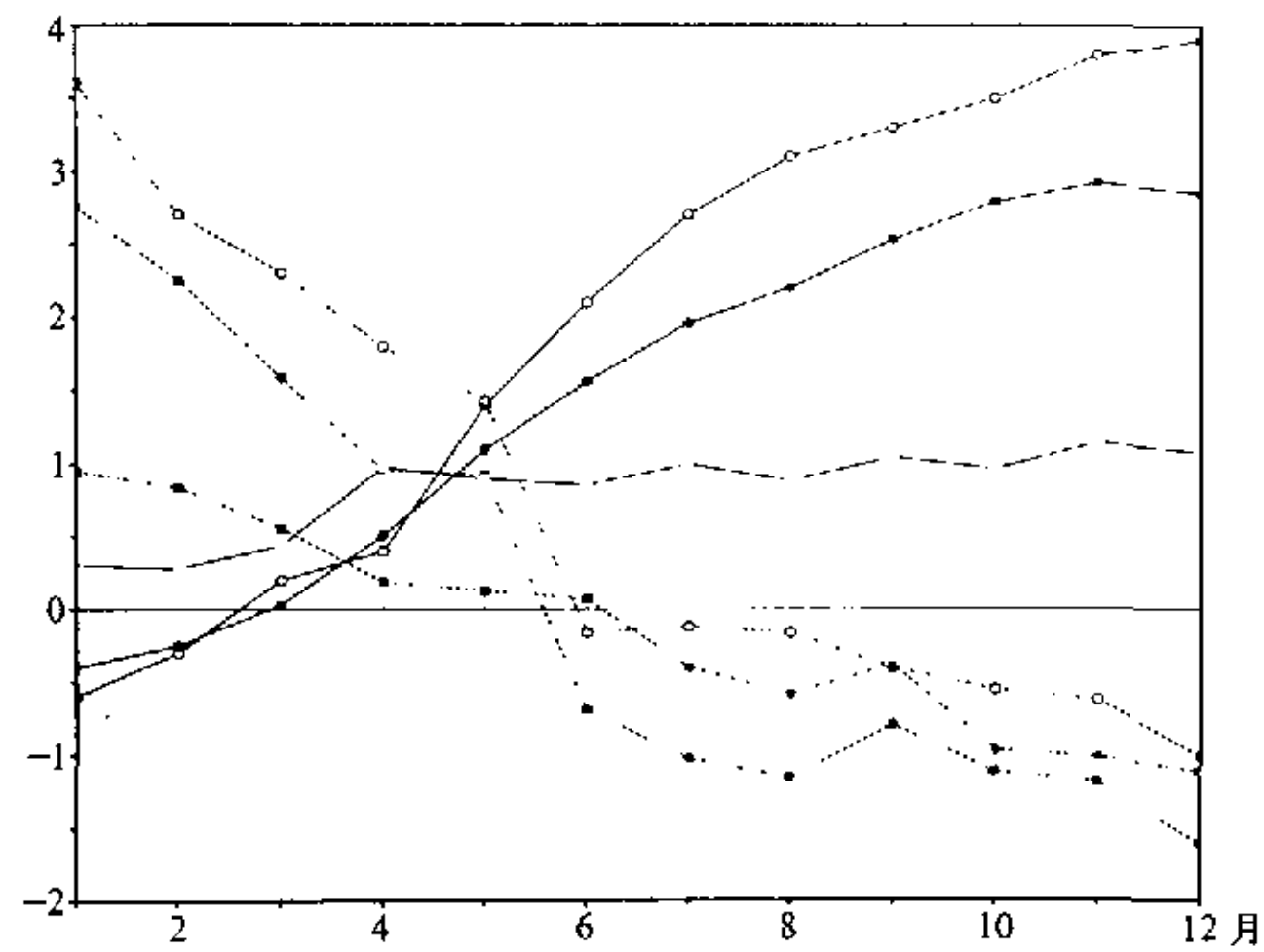


图2 Niño3 (空心圆圈)、Niño3.4 (实心圆点) 和 Niño4 (实心方框) 指数的逐月变化  
实线: 1997 年; 虚线: 1998 年

从海表海水的流动来看，中西太平洋赤道北侧出现了较强的向东异常海流，似乎正将暖池的暖水向东输送。但是实际计算表明，由于该区域的纬向海温梯度非常微弱（图略），纬向暖平流效应非常微弱，甚至在日界线附近的输送为冷平流。就在次表层纬向海流辐合的赤道中太平洋海区，海表经向异常海流相对赤道辐散。这表明仍有偏强的深层冷水上翻，并且将赤道冷水向北输送，造成图 3d 中赤道北侧较强的局地冷平流。此刻赤道中东太平洋的海表温差值仍然是较强的冷水负距平，表明 La Niña 正处在消退阶段，而 El Niño 尚未发展起来。

图 4 给出了上述要素 1997 年与 1998 年 5 月的差值分布情况。与 2 月份相比，暖池次表层异常向西海流强度增大到  $80 \text{ cm s}^{-1}$  以上，并继续向东太平洋浅层伸展。相应的纬向辐散区也随之东移到  $150^\circ\text{W}\sim 120^\circ\text{W}$  附近，深度相对图 3 变浅。次表层的辐散运动有效的减弱了深层冷水的上翻，使得该深度之上海温异常偏暖。这一增暖效应在次表层海温差值图中反映得十分清楚。图 4b 中暖水中心比 2 月份显著东移，深度变浅。

同时，热带太平洋海表海流向东流速异常进一步增强，但它的局地温度平流贡献仍然较弱。重要的是，太平洋中东部近赤道地区经向海流的辐散程度比 2 月份明显减弱，在赤道两侧有经向暖平流出现。由于次表层海流纬向辐合增强，海表的经向辐散海流减弱，海洋混合层加深，深层冷水上翻的降温效应显著降低，因而赤道中东太平洋海表温差比 2 月份大大减弱，并出现微弱的正差值，说明 El Niño 事件正处于起始阶段。在随后的两个月，次表层向东的海流中心继续东移上抬，到达  $110^\circ\text{W}$  以东。相伴的次表层辐散抑制了东太平洋及南美沿岸的冷水上涌，6、7 月份中东太平洋次表层海温差值中心增暖到  $12^\circ\text{C}$ ，海表温度差值迅速上升到  $5^\circ\text{C}$ （图略）。

结合图 3、图 4 中次表层海流和海温异常的分布不难看出，从海流平流的角度分

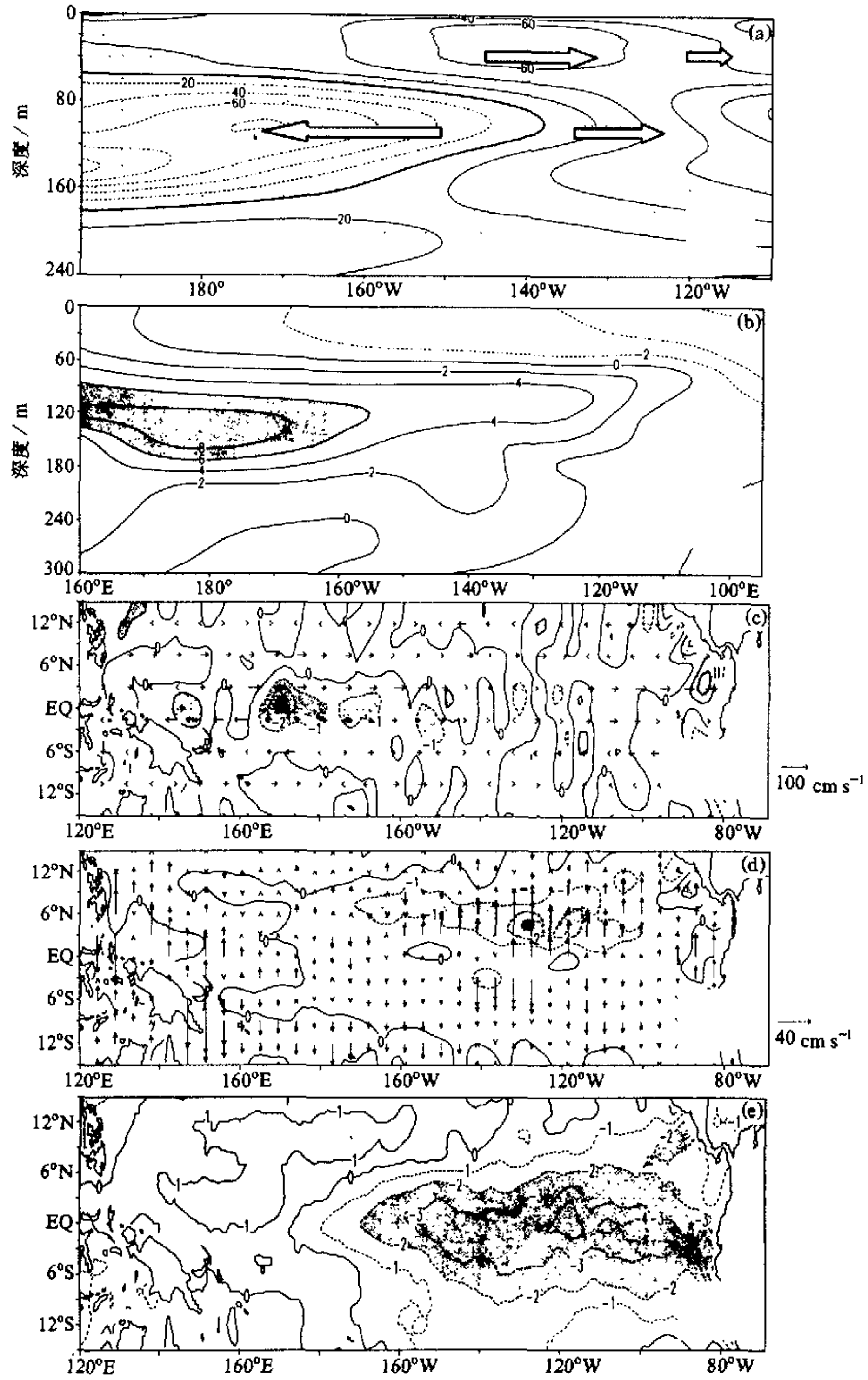


图3 1997年2月与1998年2月海洋物理量的差值分布

(a) 沿赤道次表层海流 ( $\text{cm s}^{-1}$ ); (b) 沿赤道次表层海温 ( $^{\circ}\text{C}$ ); (c) 海表纬向海流 (矢量箭头,  $\text{cm s}^{-1}$ ) 及其温度平流 ( $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ); (d) 海表经向海流 (矢量箭头,  $\text{cm s}^{-1}$ ) 及其温度平流 ( $^{\circ}\text{C}/\text{月}$ ); (e) 海表温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )



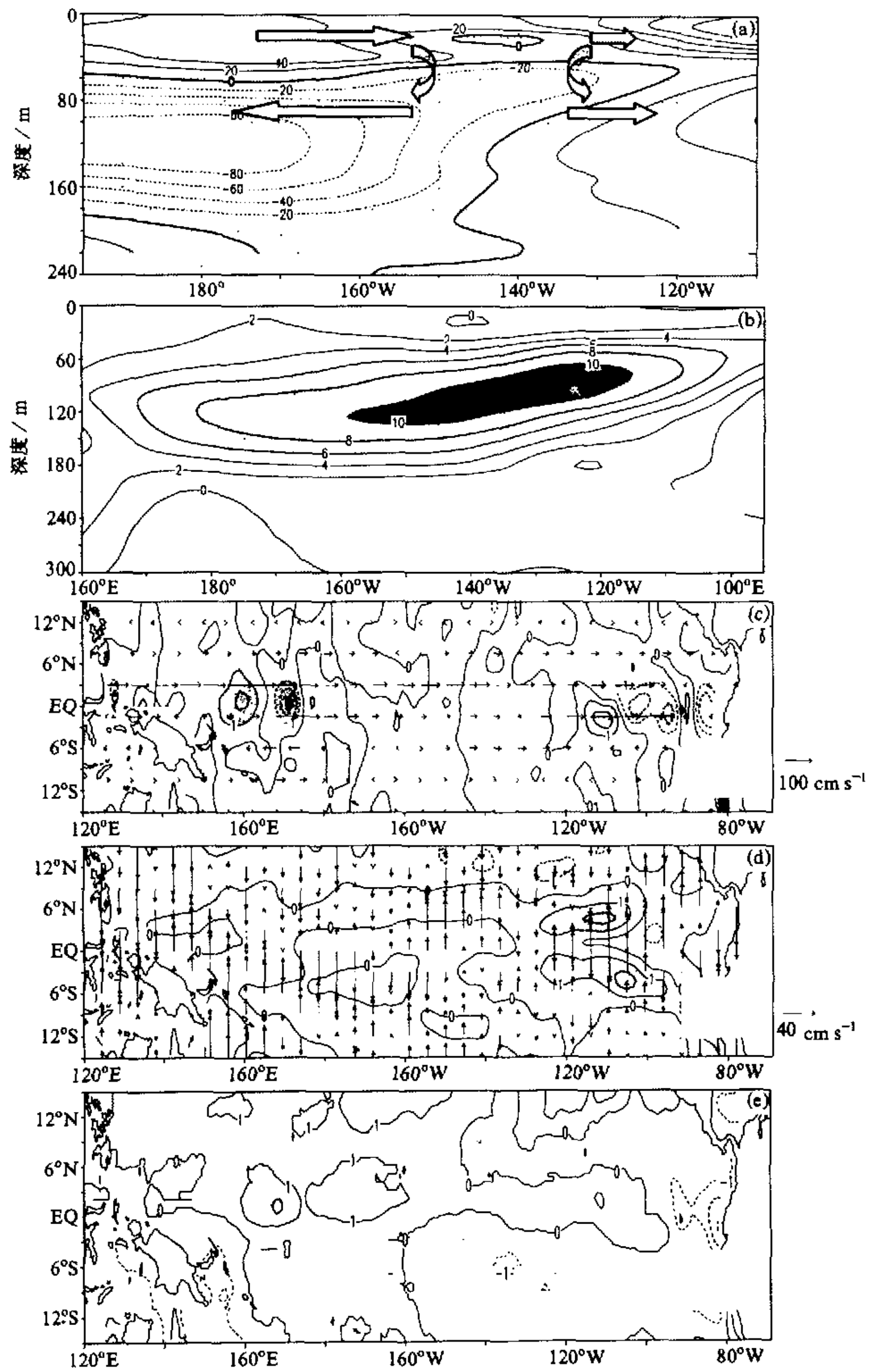


图4 1997年5月与1998年5月海洋物理量的差值分布, 其余同图3

析, 图中的海流异常倾向于将暖池次表层积聚的暖水向西而不是向东输送。显然, El Niño 发生过程中赤道太平洋次表层自西向东的升温现象并不是异常海流将暖池区暖水向东输送的结果, 而主要是次表层强劲的向西异常海流和相应的深层海水辐散区东传, 导致赤道中东太平洋混合层之下冷水上翻受到抑制的缘故。

Philander<sup>[20]</sup>、Wakata 与 Sarachik<sup>[21]</sup>认为,  $170^{\circ}\text{W}$  经度附近是西太平洋暖池同东太平洋冷舌区之间冷暖海水的过渡区。该地区海表风应力具有非常强的年际变率, 往往发生强烈的局地海气相互作用。因此它对于 ENSO 循环是一个比较关键的区域。由图 1 可知, 1997 年 8 月份西太平洋暖池上空西风再次显著增强。下面的分析表明, 热带西太平洋海洋与大气在  $170^{\circ}\text{W}$  附近发生强烈的相互作用。由图 5 可见, 在西风的强迫下, 西太平洋暖池区 80 m 之上的浅层海洋出现  $80\text{ cm s}^{-1}$  的向东海流中心, 同时该中心的东边有异常向西海流, 二者在中太平洋  $170^{\circ}\text{W}\sim 150^{\circ}\text{W}$  的海表浅层 (0~80 m) 造成海水的纬向辐合, 这从图 5c 海表纬向洋流的异常分布也可得到证实。表层辐合区的海水一方面背离赤道向南北两侧辐散开去, 如图 5d, 另一方面将被强迫下沉。可以推测, 在表层海水下沉过程中水团温度高于周围环境温度, 将受到向上的浮力作用。不过混合层内上下温差不大, 这一减速效应不太明显。但是在混合层底暖水团受到的浮力随海水温度急剧下降而迅速加大, 最终下沉动能耗尽难以穿过这一类似“刚性边界”的温度锐减区, 被迫向四周辐散。向西的辐散运动就构成了图 5a 中暖池区混合层底部向西的异常海流, 向东的辐散运动因为被迫沿东抬的混合层底爬升而不太强烈。这很可能就是图 3、图 4 中自西向东次表层异常海流辐散区的深度与混合层深度一致逐渐抬高的原因。也正因暖水团下沉的深度到达混合层底部, 才有效地减弱了其下冷水上翻对混合层和海表温度的降温效应。由此不仅可以解释 8 月份在中太平洋  $160^{\circ}\text{W}$  东西两侧 120~160 m 的深层上, 西太平洋向西异常海流和东太平洋向东海流的重新加强, 而且还解释了次表层暖海温异常自西向东传播过程中深度向上变浅的现象。

与  $160^{\circ}\text{W}\sim 140^{\circ}\text{W}$  海区附近上层海洋辐合、下层海洋辐散的海水下沉区吻合, 中太平洋次表层再次出现  $10^{\circ}\text{C}$  暖水区, 同时海表温度差值也高达  $6^{\circ}\text{C}$ 。不难看出, 与 6、7 月份相比, 无论是海表还是次表层海温的暖中心位置均较偏西, 说明此刻热带太平洋的确发生第二次强烈的局地海气相互作用, 再次激发了由西向东传播的、抑制深层海水上翻的海流异常。

3 个月后, 如图 6 所示, 海表浅层与深层的异常海流强度进一步加大, 并东传到中东太平洋。与 8 月份相比, 80 m 以上浅层海流的纬向辐合有所减弱, 100~140 m 深度上纬向海流表现出较强的深层辐散特征。海表经向洋流也在该海域从南北两侧向赤道辐合流动, 并在近赤道地区产生较强的暖平流。受其影响, 次表层海温差值比 8 月份明显增大, 位置更偏东。赤道中东太平洋海表温差也相应加强, El Niño 事件进入成熟位相。此外, 在西太平洋暖池次表层出现了较弱的海温负差值, 未来它将在海表东风异常强迫下, 与次表层异常向西海流和同层次海水纬向辐合造成的深层冷水上翻流一起向东传播, 导致 El Niño 事件在 1998 年夏季结束, La Niña 事件发生 (图略)。

综上所述, 西太平洋暖池出现西风异常后, 引起暖池区表层海水的辐合, 表层暖水下沉。暖水下沉到一定深度, 在周围冷水环境的浮力作用下, 被迫沿赤道向东西两侧辐散, 从而激发出暖池区次表层的异常向西和中东太平洋异常向东的海流。这一海表浅层

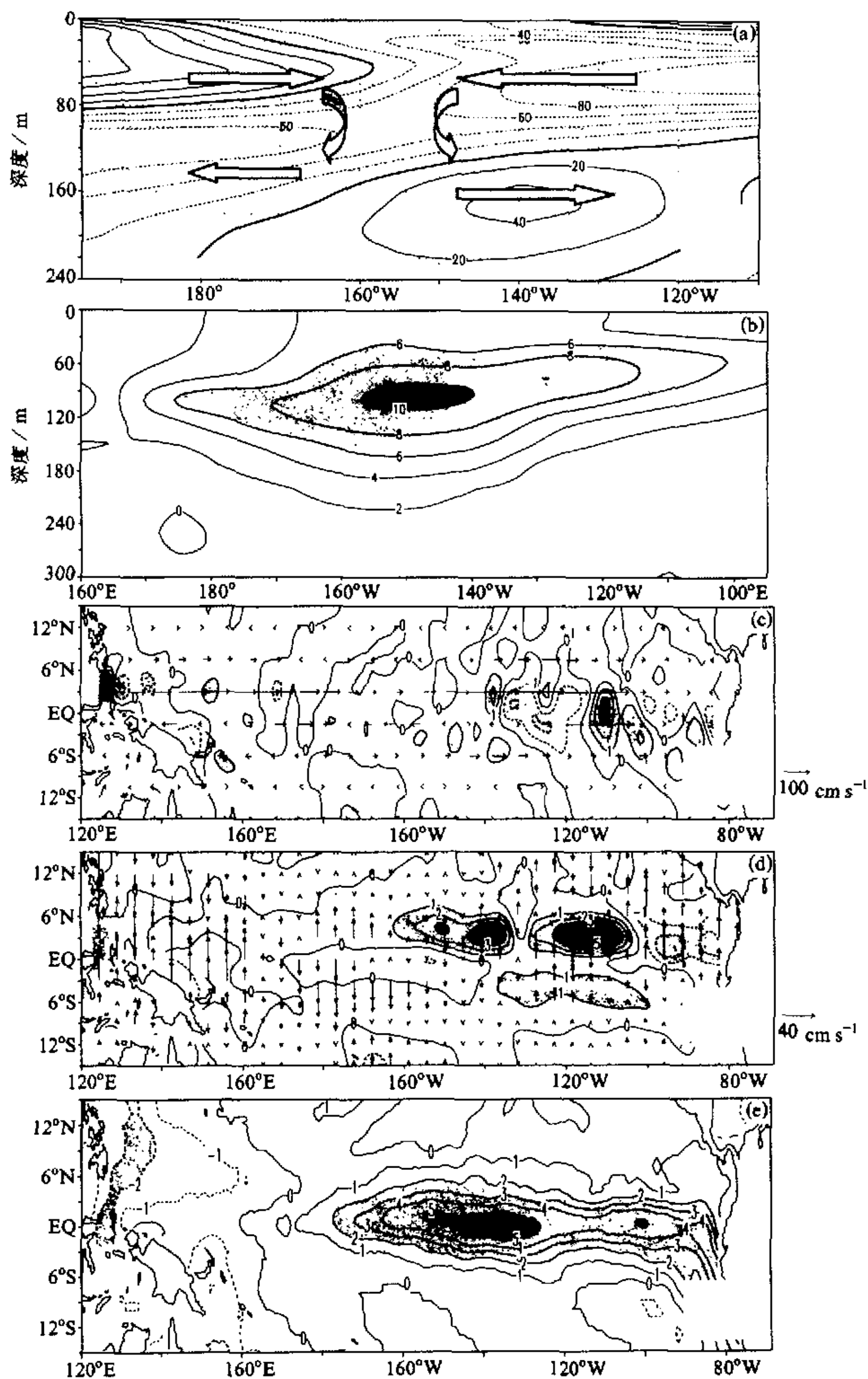


图5 1997年8月与1998年8月海洋物理量的差值分布, 其余同图3

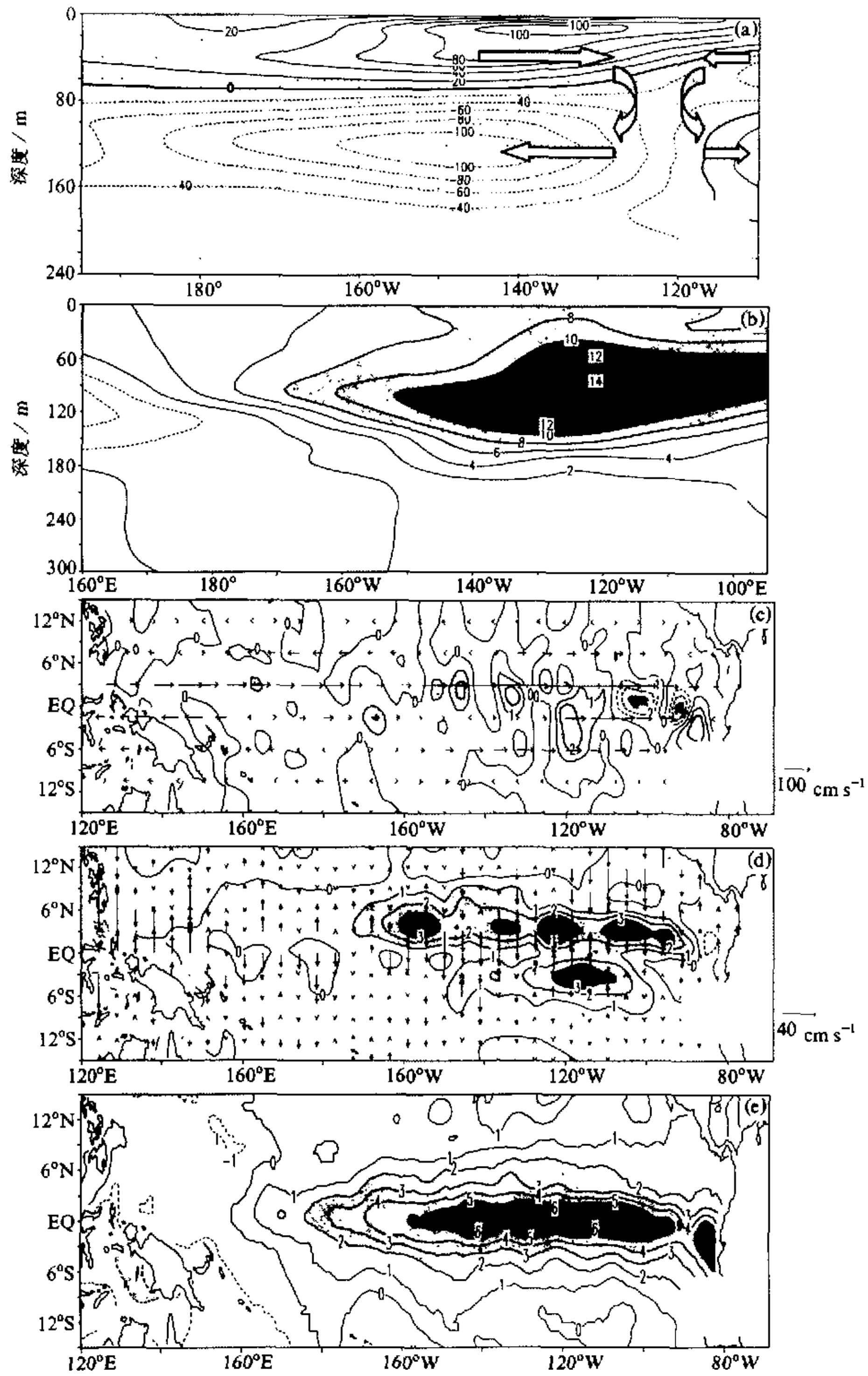


图6 1997年11月与1998年11月海洋物理量的差值分布, 其余同图3

万方数据  
WANGFANG DATA

海水辐合、次表层海水辐散的下沉结构形势, 在混合层内自西向东传播过程中逐渐上抬, 造成次表层暖水中心也沿赤道向东、向海表移动。在 3~4 个月后到达东太平洋, 抑制深层海水的上翻, 使得海表温度升高。由于气候状况下混合层沿赤道自西向东向上倾斜, 海表温度对深层冷水上翻冷却效应的敏感程度也是自西向东增强的, 因此这种因西风异常激发的下沉结构在中东太平洋导致海温大幅升高, 造成所谓的 El Niño 现象。

## 5 结语与讨论

本文主要利用 TOGA-TAO 次表层海流与海温资料, 重点分析了 1997/1998 年 El Niño 与 La Niña 期间赤道次表层海流的异常演变特征, 并讨论了它的产生原因以及对海表和次表层海温异常的影响。

结果表明, 1997~1998 年西太平洋暖池上空风场异常与赤道西太平洋海流异常耦合非常紧密。1997 年初暖池上空出现西风异常后, 浅层海洋在风应力的驱动下向东流动, 与中东太平洋异常向西的海流在日界线附近辐合下沉。暖水团下沉过程中受到的浮力不断加大, 最终在接近混合层底海温锐减的深度失去下沉的动能而被迫向东西两侧辐散。在海洋混合层底部附近上形成与浅层海水纬向异常流动方向相反的海流。这种混合层内浅层海水辐合、深层辐散的结构有利于表层暖水的下沉运动, 使得温跃层深度增加, 在原深度附近出现较强的海水温度正距平。

1997 年年初和夏末先后在暖池附近发生了两次强烈的海气相互作用。第一次耦合过程最先出现在  $165^{\circ}\text{E}$  及其以东, 第二次海气耦合发生在  $170^{\circ}\text{W}$  附近。大气强迫出的浅层纬向海流辐合、次表层海流辐散的结构在暖池区生成后, 在混合层内自西向东传播。传播过程中深层海温上翻受到抑制, 次表层和海表温度上升。由于气候状况下西太平洋混合层较深, 向东逐渐变浅, 混合层下的冷水上翻对海表温度的冷却效应也就逐渐增强。一旦上翻受到抑制, 相应的次表层海水增暖层次的深度也就自西向东抬高, 最终赤道中东太平洋海表出现异常强烈升温, 发生 El Niño 事件。我们注意到在这一过程中暖池海表和次表层的暖水并没有被异常海流向东传输, 即水平温度平流对 El Niño 发生的贡献不显著。

综上所述, TOGA-TAO 对赤道垂直剖面海流的观测结果, 比较清楚地揭示了 ENSO 循环过程中赤道太平洋海表与次表层海流的异常演变特征, 并阐明了海流异常产生的原因以及对 ENSO 循环的重要意义。不过, 由于缺乏近赤道地区次表层水平洋流资料, 所以本文的结果还不能十分确定西风强迫出来的混合层浅层纬向辐合、深层辐散结构, 就是理论分析中得到的下翻 Kelvin 波在流场上的表现。因此尽管本文结果表明, 当混合层的辐散辐合结构在西太平洋暖池生成时, 是由于西风异常首先造成海表浅层的海水辐合, 通过热动力作用强迫出浅层之下的反向海流。但是, 在这一辐散辐合结构东传过程中, 资料分析表明海表浅层的辐合强度较起源地有所减弱, 而其下深层的辐散强度却不见削弱, 反而有些增强。这使得根据本文所用资料和分析结果难以清楚地说明混合层的辐散辐合结构的东传, 到底是因为纬向西风的东传造成还是因为下翻 Kelvin 波在西太平洋暖池生成后在次表层东传的结果。对这一问题, 还

有待用更详细的观测资料进行深入的分析。

致谢: 感谢TOGA-TAO项目办公室Dr. Michael J. McPhaden提供有关观测资料。

### 参 考 文 献

- 1 Bejerkness, J., A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature, *Tellus*, 1966, **18**, 820~829.
- 2 Bejerkness, J., Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**, 163~172.
- 3 Bejerkness, J., Large-scale atmospheric response to the 1964~1965 Pacific equatorial warming, *J. Phys. Oceanogr.*, 1972, **2**, 212~217.
- 4 Wyrtki, K., Sea level during the 1973 El Niño, *J. Phys. Oceanogr.*, 1977, **7**, 780~787.
- 5 Wyrtki, K., The response of sea surface topography to the 1976 El Niño, *J. Phys. Oceanogr.*, 1979, **9**, 1223~1231.
- 6 McCreay, J. P., A model of tropical ocean-atmosphere interaction, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 370~387.
- 7 McCreay, J. P. and D. L. T. Anderson, A simple model of El Niño and Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**, 934~946.
- 8 Anderson, D. L. T. and J. P. McCreay, Slowly propagating disturbances in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**, 615~628.
- 9 Schopf, P. S. and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**, 549~566.
- 10 Chao Jiping and Zhang Renhe, The air-sea interaction waves in the tropics and their instabilities, *Acta Meteor. Sinica*, 1988, **2**, 275~287.
- 11 张人禾, 黄荣辉, 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*, 1998, **22**, 587~599.
- 12 White, W. B., S. E. Pazan et al., Hindcast/forecast of ENSO event based upon the redistribution of observed and modeled heat content in the western tropical Pacific 1964~86, *J. Phys. Oceanogr.*, 1987, **17**, 264~280.
- 13 李崇银, 穆明权, 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常, *大气科学*, 1999, **23**, 513~521.
- 14 Firing, E., R. Lukas et al., Equatorial undercurrent disappearing during 1982~1983 El Niño, *Science*, 1983, **222**, 1121~1123.
- 15 周静亚, 杨大升, *海洋气象学*, 北京: 气象出版社, 1990, 258~266.
- 16 Weisberg, R. H. and S. P. Hayes, Upper ocean variability on the equator in the Pacific at 170°W, *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**, 20485~20498.
- 17 Weisberg, R. H. and C. Wang, Slow variability in the equatorial west-central Pacific in relation to ENSO, *J. Climate*, 1997, **10**, 1998~2017.
- 18 张祖强, 丁一汇, 赵宗慈, ENSO发生前和发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题, *气象学报*, 2000, **58**, 11~25.
- 19 Zebiak, S. E. and M. A. Cane, A model El Niño-Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**, 2262~2278.
- 20 Philander, S. G., R. C. Pacanowski et al., Simulation of the ENSO with a global atmospheric GCM coupled to a high-resolution tropical Pacific ocean GCM, *J. Climate*, 1992, **5**, 308~329.
- 21 Wataka, Y. and E. S. Sarachik, Unstable coupled atmosphere-ocean basin modes in the presence of a spatially varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**, 2060~2077.

## **Evolutions and Roles of Subsurface Sea Currents during the Period of 1997/ 1998 El Niño / La Niña Event**

Zhang Zuqiang, Ding Yihui and Zhao Zongci

(National Climate Center, Beijing 100081)

**Abstract** In terms of TOGA-TAO subsurface currents and temperature dataset, observational evidences are presented to disclose the formation mechanism and eastward propagation features of subsurface current anomalies driven by the strong westerly wind anomalies over warm pool in the western Pacific Ocean during the period of 1997/1998 El Niño / La Niña event. Further comparisons suggest that the dominant factor leading to the equatorial sea temperature anomaly within the mixed layer of Pacific is the anomalous upwelling caused by the convergence of subsurface currents rather than the horizontal thermal advections of surface currents. Finally, the possibility has been discussed about the assumption that the revealed current anomaly is just the reflection of Kelvin wave obtained in theory.

**Key words:** ENSO; subsurface sea; current anomaly