El Niño 事件大气-洋流异常与暖海温传播机理研究

张庆云[1,2] 常蕊[2,3]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
2 中国科学院大气物理研究所灾害性气候研究与预测中心，北京 100029
3 中国科学院研究生院，北京 100039

摘 要 利用 1971～2000 年逐月 SODA（Simple Ocean Data Assimilation）同化资料（Carton 等，2004）、1980～2000 年逐月 NCEP/NCAR 再分析资料（Kalnay 等，1996）探讨中部型（暖海水首先出现在 120°W 以西）和东部型（暖海水首先出现在 120°W 以东）El Niño 事件赤道纬向风应力及洋流的异常变化与暖海水信号的传播特征。研究指出：(1) 中部型和东部型 El Niño 事件发生时，太平洋上赤道海表最大西风应力距平在西太平洋地区都有显著的东传现象，但中部型 El Niño 事件西风应力距平强度强，造成西太平洋赤道表层的东向流可达东太平洋地区，这类 El Niño 事件强度偏强。(2) 中部型 El Niño 事件，赤道表层洋流辐合区及其下沉运动由西太平洋向东太平洋传播，辐合下沉运动抑制了深层冷海水上翻，西太平洋暖水能够传到东太平洋与西太平洋赤道表层洋流辐合区及其下沉运动的东移有关。(3) 东部型 El Niño 事件西太平洋赤道表层洋流辐合区及其下沉运动没能直接传到东太平洋地区，东太平洋暖水形成与局地（120°W 以东）辐合下沉运动抑制深层冷海水上翻有关；东部型 El Niño 事件暖池次表层的暖水，不是沿着西太平洋赤道次表层向东传播到东太平洋地区，而是由南太平洋西边界流将暖池海水带到 40°S 左右的西风漂流区，再由西风漂流平流到东太平洋。

关键词 El Niño 事件 洋流异常 海温信号
文章编号 1006－9895（2007）06－1160－11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

A Study of Anomalous Atmosphere－Ocean Currents and the Propagation Mechanism for Warm Signal of Sea Temperature during El Niño Events

ZHANG Qing-Yun[1, 2] and CHANG Rui[2, 3]

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
2 *Centre for Disastrous Climate Research and Prediction, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

Abstract Because of the sparse observation over the ocean, the important problems about the characteristics of the ocean currents and their relationship with the sea temperature anomaly during El Niño events are still not completely resolved, although there already have been a few researchers focused their attentions on this field. In order to deeply investigate the truth behind the puzzles in a new way, this research is based upon the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) dataset from 1971 to 2000 and the NCEP/NCAR reanalysis dataset from 1980 to 2000, which are of high resolution and long time scale. Therefore, from the departures point of view, the variations of zonal wind and

收稿日期 2007－05－30，2007－06－28 收修定稿
资助项目 国家重点基础研究发展规划 973 项目 2004CB418303，中国科学院知识创新重要方向性项目 KZCX3-SW-226，国家自然科学基金资助项目 40523001
作者简介 张庆云，女，1950 年出生，研究员，主要从事亚洲季风和短期气候变化的成因机理及预测研究。E-mail：zqy@mail.iap.ac.cn

ocean currents as well as the propagation features of the sea temperature signal during El Niño events have been investigated by composite analysis. In this research, special emphasis is placed on the two main types of El Niño events: the middle-pattern El Niño and the east-pattern El Niño. According to the amplitude of the sea surface temperature anomaly and its characteristics of propagation, the middle-pattern El Niño event is the composite of 1982/1983, 1991/1992 and 1997/1998 events and the east-pattern El Niño event is the composite of 1972/1973 and 1976/1977 events. The results show that:

(1) In the middle-pattern El Niño event (the anomalous warm water appears first to the west of 120°W) and the east-pattern El Niño event (the anomalous warm water appears first to the east of 120°W), there is a significantly eastward propagation of the strongest western wind anomalies over the western equatorial Pacific Ocean. Besides, the positive (negative) equatorial surface current anomalies are associated with the enhanced (weakened) western wind anomalies. The response of the ocean currents to the zonal wind anomaly has a high correlation with the intensity and the propagation characteristics of the zonal wind anomaly. In the middle-pattern El Niño event, the western wind anomalies are relatively strong, which is favorable for the eastward movement of the positive equatorial surface current anomalies over the western Pacific. Therefore, the intensity of such a El Niño event is relatively strong.

(2) In the middle-pattern El Niño event, over the western Pacific, the anomalous downwelling of the equatorial ocean currents caused by the convergence of surface zonal ocean current anomalies suppresses the uprush of the deep cold water, leading to the warm surface water, which also moves eastward with the eastward propagation of the anomalous downwelling.

(3) In the east-pattern El Niño event, the anomalous downwelling of the equatorial ocean currents caused by the convergence of surface zonal currents anomalies over the western Pacific Ocean does not move eastward, and the formation of warm water is relevant to the regional (east of 120°W) anomalous downwelling of the equatorial ocean currents caused by the convergence of surface zonal ocean current anomalies, which suppresses the uprush of the deep cold water. This is considerably different from the feature in the middle pattern El Niño event. Besides, based on the analysis of the propagation of the sea surface temperature and ocean currents over the southern Pacific, it is found that the path along which the warm water propagates eastward may be the westerly drift region rather than the climatic equatorial thermal-cline.

Key words El Niño event, ocean current anomaly, sea temperature signal

1 引言

ENSO 事件是年际尺度上海气相互作用的最强信号，它表现为赤道中东太平洋海表温度的正、负异常。White 等[1]、李崇银等[2]、Weisberg 等[3]和张韧等[4]的研究指出：在 El Niño 事件发生前，赤道西太平洋次表层已经有暖水形成，然后沿气候温跃层向东传播。周广庆和李崇银[5]利用海气耦合模式（CGCM）也成功模拟了这一暖水沿次表层向东传的过程。巢清尘等[6]研究指出，只有赤道西太平洋上空出现西风异常时，西太平洋的暖水才向东传。张人禾和黄荣辉[7]的研究也强调了东传的西风应力在 El Niño 事件中的重要作用。Wyrtki[8]和 McCreay[9]的模拟结果认为，纬向风异常激发的海洋 Kelvin 波和 Rossby 波的传播对 ENSO 循环过程的产生具有重要的物理意义。Zhang 等[10]在肯定了远程风对海表温度的作用的同时也强调了局地风的作用。Wyrtki[11]研究了 1976～1977 年 El Niño 事件指出，赤道信风的减弱激发内波向东传，抬高了大洋东边的海表高度，进而西太平洋地区海表高度降低，促使北赤道逆流加强和南赤道流减弱。Firing 等[12]研究了 1982～1983 年 El Niño 事件指出，赤道潜流（Equator Undercurrent）减弱、消失甚至反向，这种反向与海表高度梯度的逆转和局地风的衰亡有关。Weisberge 等[13]的研究也指出：随着纬向风应力和纬向压力梯度的变化，赤道潜流在 El Niño 期间出现了减弱，同时在赤道潜流中心上方的里查逊数和 SST 都有升高的趋势。而管秉贤[14]指出，赤道潜流的逆转自西向东的传播速度大约是 0.5～1.0 m/s。张祖强等[15]利用 TAO（Tropical Atmosphere Ocean）的观测洋流资料分析指出，1997～1998 年 El Niño 期间，西太平洋赤道地区 850 hPa

风场西风应力异常，激发出海表层的东向流和次表层的西向流，并有上涌（upwelling）的结构随时间向东传。巢纪平[16]的研究也指出，在西太平洋暖水东传的同时，东太平洋有冷水异常向北流到10°N左右再向西传到西太平洋，形成一个传播回路。

上述分析表明，El Niño 事件发生时，赤道太平洋 Kelvin 波、Rossby 波的异常以及海洋表层异常的东向流和次表层西向流的异常都与赤道太平洋上空西风异常有关，然而，ENSO 事件发生发展时赤道太平洋上空西风以及太平洋洋流异常与冷暖信号传播过程及机理的研究并不多。近年来，SODA（Simple Ocean Data Assimilation）、NCEP/NCAR 的海洋同化资料在时空覆盖范围方面有了很大的提高，弥补了海洋观测资料稀少的现象，为我们进一步探讨大气-海洋内部动力过程（如海表高度、洋流异常）的异常与 ENSO 事件冷暖信号传播的关系及可能物理机制提供了基本条件。Fu 等[17]根据 El Niño 事件开始时的增温位置，把 El Niño 事件定义为东部型和西部型，并指出这两类增温型的暖信号传播方向是不一样的。因此，本文探讨大气-海洋内部动力过程异常与 El Niño 事件暖信号的传播，重点探讨东部型和中部型 El Niño 事件发生发展时，大气（赤道太平洋纬向风应力异常）、海洋（海温、洋流等）的演变特征与太平洋暖海水信号的传播；本文第 2 节介绍资料及分析方法；第 3 节探讨中、东部型 El Niño 事件发生发展时赤道纬向风异常与洋流、海温的关系；第 4 节探讨中、东部型 El Niño 事件洋流与太平洋暖信号传播的可能机理；第 5 节给出本文小结与讨论。

2 资料与方法

（1）1971 年 1 月至 2000 年 12 月间 SODA 海洋同化数据资料[18]，水平分辨率为 0.5°×0.5°，垂直方向不等距分层，从表面 5 m 开始至深海5374 m 共分为 40 层。资料的空间覆盖范围是全球海洋，其中有纬（经）向风应力、纬（经）向洋流、海温、盐度和海表高度共 7 个变量。

（2）NCEP/NCAR 再分析的纬（经）向洋流、海温资料[19]，其水平分辨率为 1.5°×1°，垂直方向不等距分层，从表面 5 m 开始至深海 3126.5 m 共分为 27 层。资料的空间覆盖范围是（122.25°E～71.25°W，35.0°S～45.0°N），资料长度为 1980 年 1 月至 2000 年 1 月。

（3）NCEP/NCAR 再分析的 850 hPa 纬向风资料，水平分辨率为 2°×2°，气候平均的风场资料是 1948 年 1 月至 1999 年 12 月的逐月平均值。

（4）本文给出的剖面图都是不同要素的 1958 年至 2001 年平均逐月距平。

本研究使用了 SODA 和 NCEP/NCAR 两套海洋同化资料进行分析。分析发现两套资料结果类似，因此，本文给出的图是根据 SODA 资料的结果。

3 中、东部型 El Niño 事件赤道纬向风异常与洋流、海温关系

为了清楚地了解近 40 年 ENSO 事件发生情况，图 1 给出 1970～2006 年海洋 Niño 指数（Oceanic Niño Idex，简称 ONI）序列[20]，本文把 ONI≥0.8 的年定义为 El Niño 事件，而 ONI≤－0.8 作为 La Niña 事件年，并把暖水首先出现在 120°W 以西的 El Niño 事件称为中部型 El Niño 事件，暖水首先出现在 120°W 以东的 El Niño 事件称为东部型 El Niño 事件。分析发现，1994～1995 年、2002～2003 年虽属于中部型 El Niño 事件，但强度不如

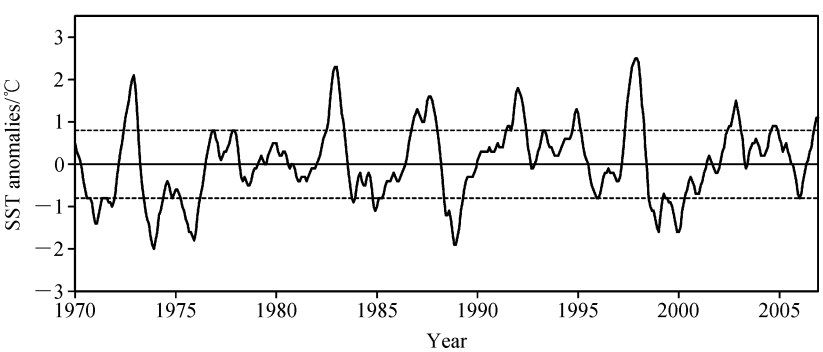

图 1 1970～2006 年海洋 Niño 指数

Fig. 1 Oceanic Niño index during 1970－2006

1982～1983 年、1991～1992 年和 1997～1998 年这 3 个中部型 El Niño 事件强（ONI≥1.8），因此，本文的中部型 El Niño 事件是指 1982～1983 年、1991～1992 年和 1997～1998 年这 3 次的合成；东部型 El Niño 事件是指 1972～1973 年和 1976～1977 年这 2 次的合成。此外，我们还分析了中部型（冷水首先出现在 120°W 以西）的 La Niña 事件（1973～1974 年、1988～1989 年和 1998～2000 年）的特征，由于它与中部型 El Niño 事件有很好的对称性，文中就不进行具体讨论。本文将 ENSO 事件开始酝酿的年份称为－1 年，成熟年称为 0 年，衰亡年称为＋1 年。

为了清楚地看出中部型和东部型 El Niño 事件发生时赤道（2.5°S～2.5°N）平均的海表纬向风应力距平异常特征，图 2a、b 分别给出中部型、东部型 El Niño 事件沿 120°W 上 2.5°S～2.5°N 平均的纬向风应力距平剖面图，图中水平虚线为 0 线。中部型 El Niño 事件（图 2a），从成熟年（0 年）5 月到衰亡年（＋1 年）5 月，赤道东太平洋纬向风应力距平基本为正值（表明有较强的西风距平）；而东部型 El Niño 事件（图 2b），从成熟年（0 年）5 月到衰亡年（＋1 年）5 月，赤道东太平洋海表纬向风应力距平基本为负值（表明东风距平强）。这说明中部型和东部型 El Niño 事件的赤道东太平洋海表东风应力有显著差别，赤道东太平洋海表东风应力减弱有利出现中部型 El Niño 事件，赤道东太平洋海表东风应力加强有利出现东部型 El Niño 事件。

图 2a、b 清楚表明，中、东部型 El Niño 事件其赤道东太平洋海表东风应力强度有显著差别。中、东部型 El Niño 事件的赤道海表东风应力强弱变化对海表洋流及海表温度有怎样影响？图 3 分别给出赤道（2.5°S～2.5°N）平均的海表纬向风应力距平、海表（0～60 m 平均）洋流与海表（0～60 m 平均）温度的经度－时间剖面图，图 3a～c 分别是中部型的风应力、洋流和海温变化；图 3d～f 分别是东部型的风应力、洋流和海温变化。中部型海表纬向风应力距平（见图 3a），成熟年（0 年）的 5～11 月，正距平（西风距平）从西太平洋向东太平洋伸展，11 月中心强度达到 0.45。东部型（见图 3d）海表纬向风应力距平从成熟年的 5～11 月，虽然也有西风距平从西太平洋向东太平洋伸展，但 11 月中心强度仅为 0.2，说明在 El Niño 事件盛期，东部型赤道太平洋东风应力偏强。图 3b 是中部型赤道（2.5°S～2.5°N）平均的 0～60 m 平均洋流距平的变化，成熟年 5～11 月（盛期），西太平洋与东太平洋都为正距平，最大正值为 40，表明该区域东向流偏强，强东向流与赤道太平洋东风应力弱一致（见图 3a）。图 3e 是东部型 El Niño 事件洋流距平分布，西太平洋上为正距平，但最大值为 20，表明该区域东向流偏弱，而在中太平洋为负距平（西向流），该区域的西向流与东风应力加强一致（见图 3d）。图 3c 和 3f 分别是中、东部型赤道（2.5°S～2.5°N）平均的 0～60 m 平均海温距平的变化，El Niño 事件成熟年盛期（11 月）中部型海温正距平达到 4.5（见图 3c），而东部型海温正距平为 2.5（见图 3f），分析发现，中部型 El Niño 事件强度比东部型强，可能与中部型赤道太平洋的东向流比东部型事件偏强有关。

综上所述，中部型 El Niño 事件赤道太平洋海表西风应力距平比东部型相对偏强（即东风应力相对弱），使得赤道太平洋地区的东向流加强，东向

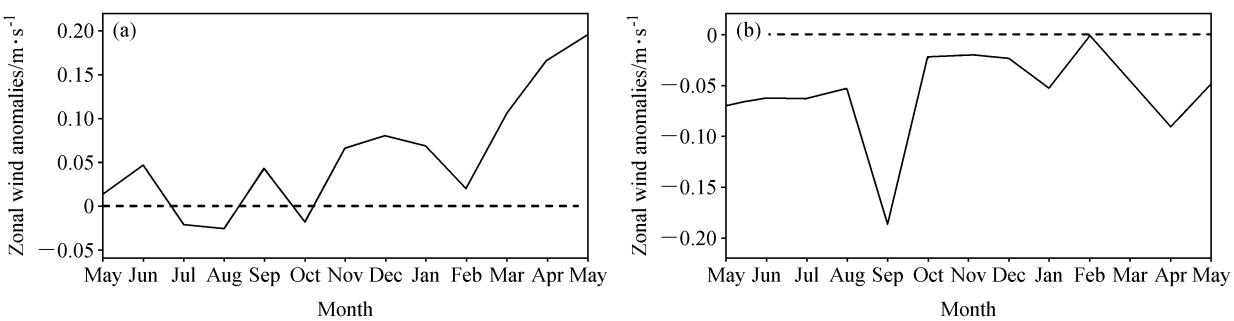

图 2　120°W 上 2.5°S～2.5°N 平均的纬向风应力距平随时间的变化：(a) 中部型 El Niño 事件；(b) 东部型 El Niño 事件。水平虚线为 0 线

Fig. 2　Time evolutions of composite zonal wind anomalies averaged from 2.5°S to 2.5°N along 120°W: (a) Middle-pattern El Niño events; (b) east-pattern El Niño events. The dashed line indicates zero line

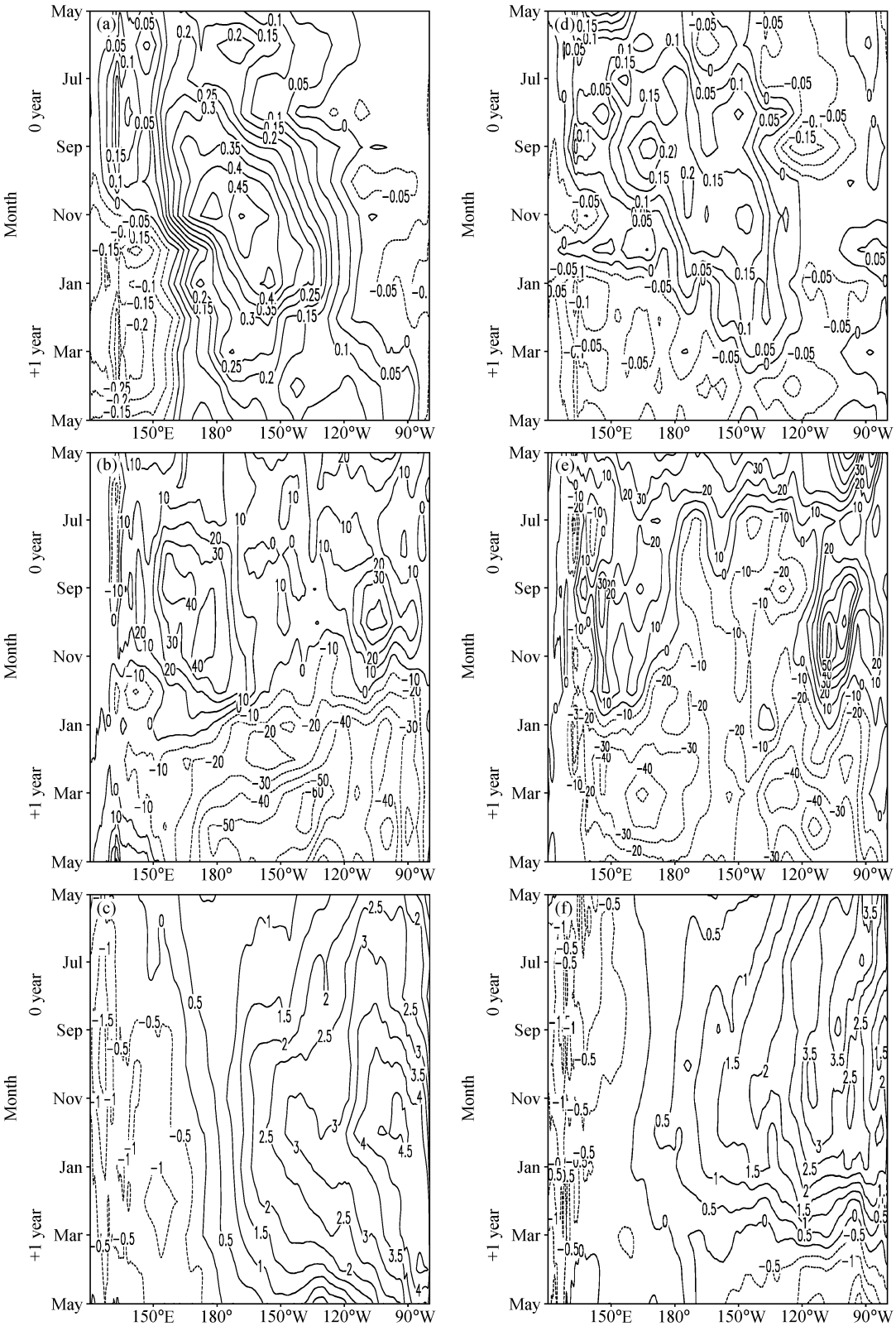

图3 赤道（2.5°S～2.5°N）平均的海表纬向风应力距平（a、d，单位：m/s）、0～60 m平均洋流距平（b、e，单位：cm/s）及温度距平（c、f，单位：℃）的经度-时间剖面图：（a、b、c）中部型；（d、e、f）东部型

Fig. 3 Composite zonal wind anomalies (a, d, units: m/s), zonal sea surface (0－60 m) current anomalies (b, e, units: cm/s) and sea temperature anomalies (c, f, units: ℃) averaged from 2.5°S to 2.5°N during middle-pattern (a, b, c) and east-pattern (d, e, f) El Niño events

流把西太平洋暖海水输送到赤道中东太平洋地区，中部型 El Niño 事件更多受到西太平洋暖水影响。东部型 El Niño 事件赤道中东太平洋的西风应力相对偏弱（即东风应力相对强），东向流维持在日界线以西，东太平洋呈现为西向流，不利于西太平洋暖海水输送到赤道中东太平洋地区，故东部型 El Niño 事件的强度相对偏弱。

为了进一步说明中、东部型 El Niño 事件强度变化与赤道太平洋海表风应力及海表（0～60 m）洋流异常关系，图 4 给出平均纬向风应力距平及相同经度上洋流距平时间-深度剖面图；左列为中部型 El Niño 事件，右列为东部型 El Niño 事件。160°E 经度（图 a1：中部型，图 d1：东部型）西风应力剖面图显示，二者在 9 月之前都表现为西风应力距平加强期，9 月达到最大后开始减弱；在西风应力距平加强期，海表层(0～60 米)洋流都出现正异常即东向洋流，西风应力距平减弱期，海表层洋流都对应负异常即出现西向流（见图 a2，d2）。140°W 经度（图 b1：中部型，图 e1：东部型）西风应力剖面图显示，二者西风应力距平在 12 月都达到最大后开始减弱，随着西风应力减弱，表层洋流也由正异常转为负异常（图 b2 和 e2）。120°W 经度西风应力剖面图表明，中部型（图 c1）仍为西风应力距平控制，该经度上的东向流持续到 12 月（图 c2）；但东部型（图 f1）已转为东风应力距平控制，该经度上的东向流在 8 月就转为西向流（图 f2）。从上可见，中部型暖事件最大西风应力距平 9 月出现在 160°E，12 月到达 140°W 后仍继续东传到达 120°W，因此 120°W 经度上呈现东向流；而东部型暖事件西风应力距平 9 月到达 160°E，12 月到达 140°W 后没有继续东传，因此 120°W 经度呈现西向流。

综上所述，赤道表层洋流东向流（西向流）与赤道海表西（东）风应力距平变化一致，当赤道海表西风应力距平随时间增加（减弱）时，表层洋流相应呈现为东（西）向流；中部型和东部型 El Niño 事件，赤道西太平洋地区海表最大西风应力距平都有显著的东传现象，但中部型 El Niño 事件西风应力距平强度偏强，造成赤道海表西风应力距平及赤道表层东向流可到达东太平洋 120°W 地区，这可能是中部型 El Niño 事件强度比东部型 El Niño 事件强度偏强的原因之一。

4　中、东部型 El Niño 事件洋流特征及暖海温信号传播的可能机制

中、东部型 El Niño 事件洋流与海温变化通过什么样的过程完成？如我们所知，海水密度变化较小，用于海洋研究动力过程的连续性方程可简化为：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0.$$

由于赤道地区洋流距平的纬向分量远大于经向分量，因而在质量连续的前提下，可近似用纬向洋流的东向流和西向流的异常分布表示辐合、辐散以及海洋内部的垂直运动。也就是说在海洋某经度一深度层上，比如 180°以东的区域出现西向流，而在 180°以西的区域有东向流，180°附近出现辐合，则表明该经度范围的海洋内部有下沉运动。本节利用纬向洋流正（负）距平的深度－经度变化近似代表海洋内部垂直运动的状况，并探讨中、东部型暖事件中垂直运动的变化特征与暖海温信号传播的可能机制。

图 5 给出中部型暖事件 0 年 6 月、0 年 9 月、0 年 12 月和次年 3 月赤道纬向洋流距平的分布。在中部型暖事件成熟年 6 月，表层洋流（60 m 处，下同）的东向流和西向流的辐合区出现在日界线以西的 160°E 附近（图 5a 箭头），表明该经度范围出现下沉运动；成熟年 9 月，表层洋流的东向流和西向流的辐合区出现在日界线以东的 170°W 附近（图 5b 箭头），表明下沉运动区随着时间变化东移到 170°W 经度范围；成熟年 12 月，表层洋流的东、西向洋流的辐合区引起下沉运动区进一步东移到 160°W 和 130°W 附近（图 5c）；图 5a～c 显示，海表层东、西向洋流产生辐合，随着海表层辐合区的东移下沉运动区也东移，下沉运动抑制深层冷海水的上翻，造成上层海水动力增暖，故暖海水的东移与下沉运动区东移有关，这可能是中部型暖海温信号向东传的原因。图 5d 给出的是次年 3 月洋流的变化，太平洋上东、西向流引起的辐合区出现在 120 m 深层附近，低层辐合区有利上升运动，冷海水上涌使得上层海洋温度局地冷却，预示 El Niño 事件结束。图 5d 的洋流变化也进一步表明，表层洋流的辐合引起的下沉运动抑制深层冷海水上翻，暖海水随着下沉运动东移也东移。

前面分析已指出，东部型 El Niño 事件受赤道西太平洋的影响相对较小，这是由于西太平洋海表

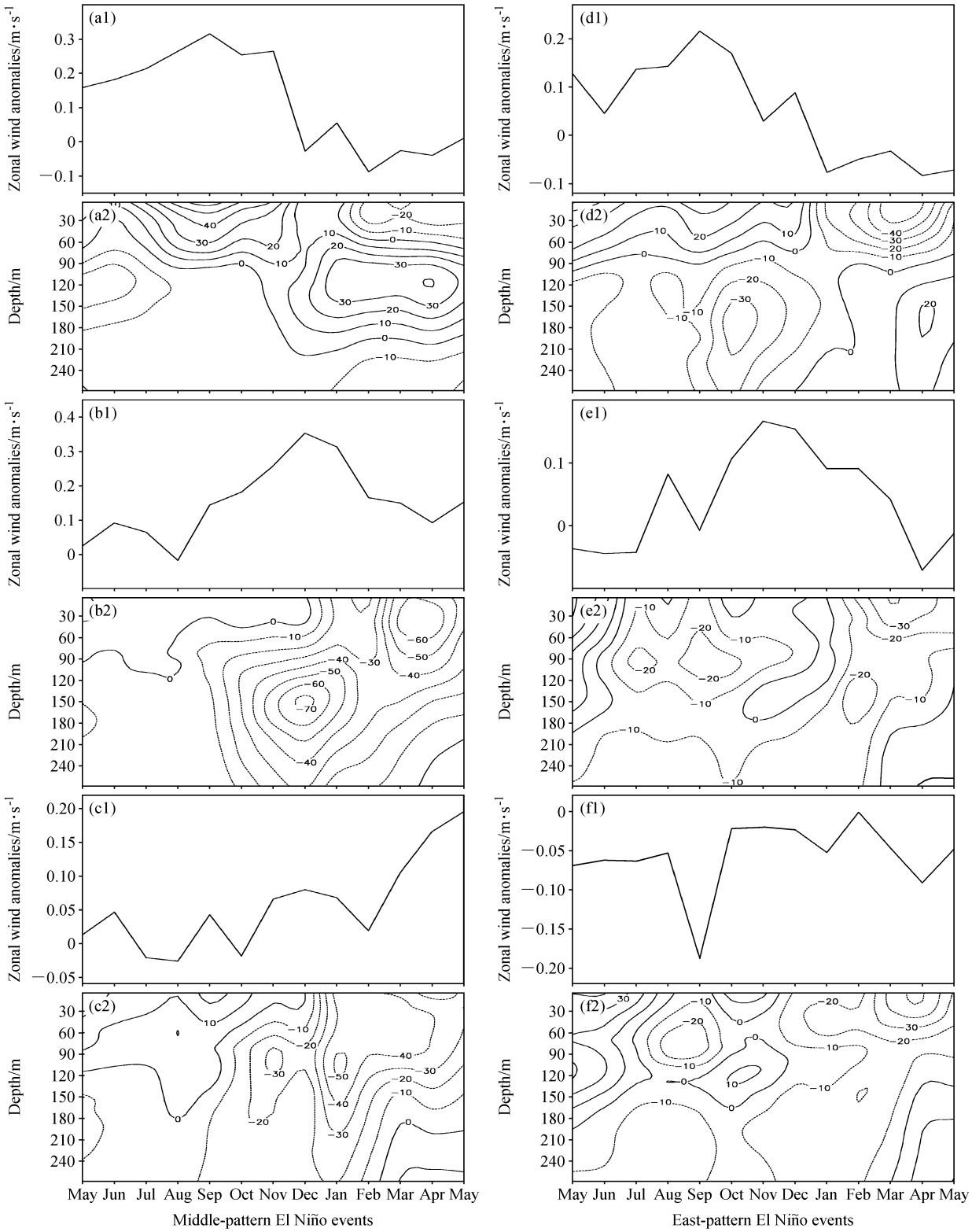

图 4 赤道（2.5°S～2.5°N）平均纬向风应力距平随时间的变化（a1～f1，单位：m/s）及对应经度的 0～250 m 洋流距平的时间-深度剖面（a2～f2，单位：cm/s）：（a1、a2、d1、d2）160°E；（b1、b2、e1、e2）140°W；（c1、c2、f1、f2）120°W

Fig. 4 Time evolutions of composite zonal wind anomalies averaged from 2.5°S to 2.5°N (a1 – f1, units: m/s) and time-depth sections of the corresponding upper ocean current anomalies above 250 m depth (a2 – f2, units: cm/s): (a1, a2, d1, d2) 160°E; (b1, b2, e1, e2) 140°W; (c1, c2, f1, f2) 120°W

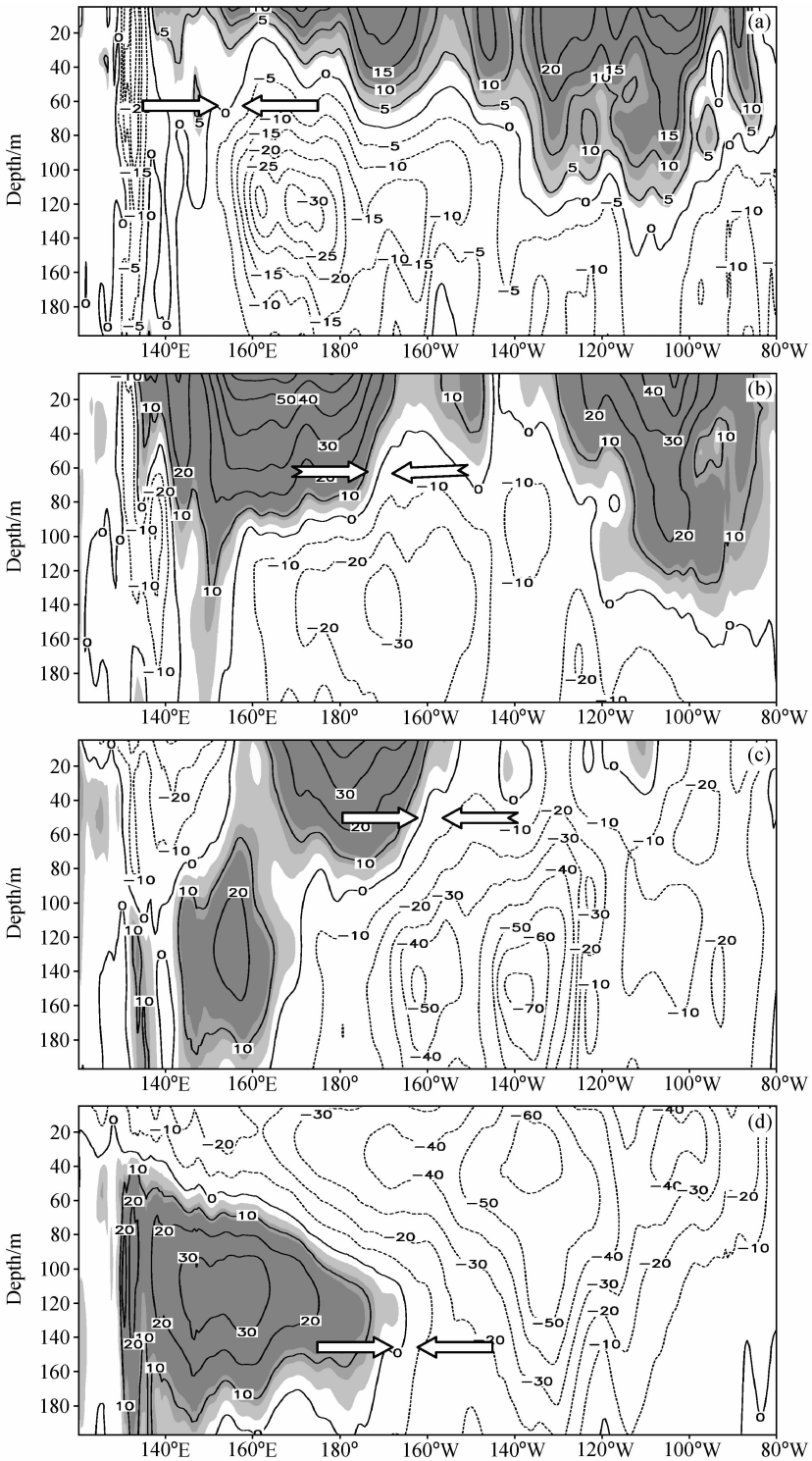

图 5　中部型 El Niño 事件赤道纬向洋流异常分布合成图（单位：cm/s）：(a) 0 年 6 月；(b) 0 年 9 月；(c) 0 年 12 月；(d) ＋1 年 3 月

Fig. 5　Composite equatorial zonal ocean current anomalies (cm/s) in Jun of 0 year (a), Sep of 0 year (b), Dec of 0 year (c), and Mar of ＋1 year (d) during middle-pattern El Niño events

西风应力距平偏弱，海表洋流距平的东向流相对偏弱，并且没有过日界线。我们进一步分析东部型 El Niño 事件洋流与海温之间通过什么样的过程完成。图 6 是东部型 El Niño 事件 0 年 6 月、0 年 9 月、0 年 12 月和次年 3 月赤道纬向洋流异常分布合成图。如图 6a～c 所示，在整个暖事件过程中，西太平洋

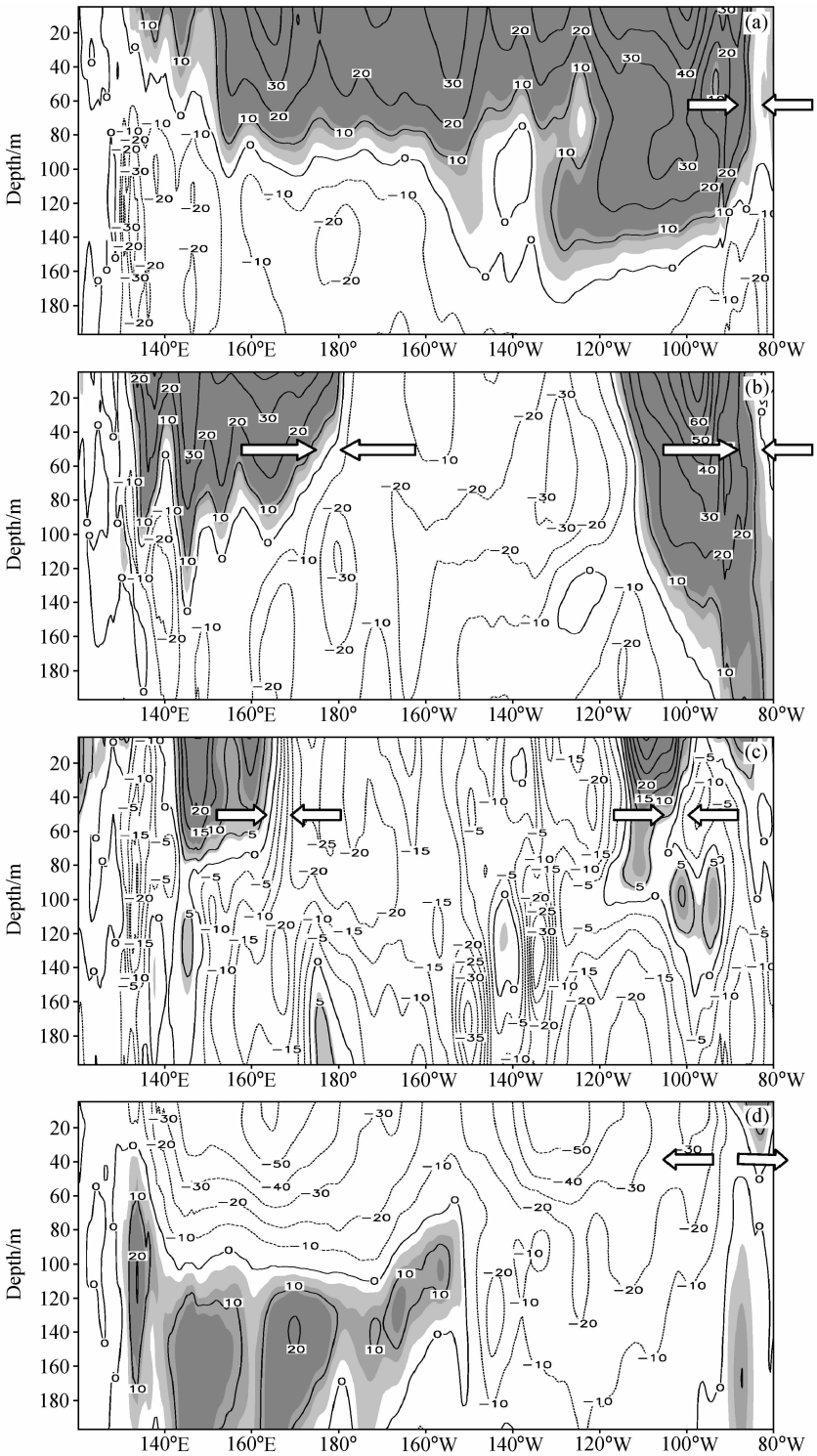

图 6 同图 5，但为东部型 El Niño 事件

Fig. 6 Same as Fig. 5，but for east-pattern El Niño events

地区洋流距平的水平辐合而引起的垂直下沉运动没有向东太平洋移动的现象，即成熟年的 9 月和盛期 12 月洋流距平的水平辐合而引起的垂直下沉运动都没有过日界线，这说明西太平洋地区洋流的水平辐合引起的垂直下沉运动没有东移到东太平洋地区，东部型暖水事件主要受东太平洋地区（120°W 以东）洋流距平的水平辐合产生的垂直下沉运动抑制深层冷海水上翻引起增暖。图 6a 是成熟年 6 月

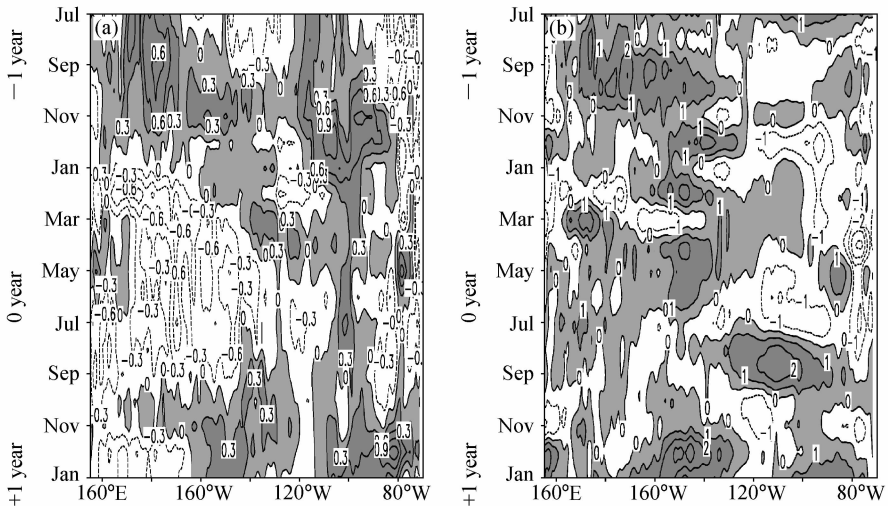

图 7　东部型 El Niño 事件合成的西风漂流区（30°S～45°S）附近 5 m 海温异常（a）和表层纬向洋流异常（b）分布。阴影区为正

Fig. 7　Composite sea temperature anomalies (a) and zonal ocean current anomalies (b) averaged from 30°S to 45°S at 5 m depth during east-pattern El Niño events. The shaded areas indicate the positive anomalies

情况，85°W 附近表层洋流呈现辐合下沉结构，下沉运动抑制深层冷海水的上翻，有利表层海温增暖；到了 9 月份，这种辐合下沉结构的强度增大，并且相对 6 月份其位置略有西移；成熟年 12 月份（El Niño 鼎盛期），100°W 附近海洋表层的异常洋流辐合加强，强下沉运动更强地抑制了深层冷海水的上翻，有利表层暖海温维持。图 6d 是次年 3 月情况，90°W 附近表层洋流的辐散对应着低层的上升运动，使得冷水上翻，不利于暖海温的维持，预示着 El Niño 事件的衰亡和结束。

上节分析表明，东部型 El Niño 事件西太平洋地区西风应力距平偏弱，暖池次表层的暖信号沿温跃层向东太平洋传播的现象不明显。那么，西太平洋的暖水通过什么样的过程传到东太平洋地区？图 7 给出西风漂流距平与表层海温异常的分布，可以看出二者的正距平自西向东的传播有很好的一致性。这说明在东部型 El Niño 事件中，西太平洋的暖水并不是直接由赤道次表层向东传播，而可能是西太平洋暖水由向南的西边界流平流至40°S附近的西风漂流区域（图略），再由异常的西风漂流将这个暖信号向东传播至东南太平洋，为暖事件的发生提供了一定的条件。这一现象说明，El Niño 期间的暖信号自西向东传播可能有两条路径：一是沿赤道次表层温跃层向东传送（如中部型 El Niño 事件）；二是由南半球中高纬表层东向流向东传播，南半球西风漂流区是暖信号东传的显著区域。

5　小结与讨论

本文利用 SODA 海洋同化资料，重点分析中、东部型 El Niño 暖事件赤道纬向风应力距平及洋流变化与暖水传播的特征。分析发现，中部型 El Niño 事件，赤道地区正的纬向风应力距平随时间增加时，赤道海洋表层有正的纬向流响应，这种响应与纬向风应力距平的强度和传播特征紧密联系在一起，中部型 El Niño 事件西风应力距平强度强，有利于西太平洋地区赤道表层东向流到达东太平洋地区；东部型 El Niño 事件，西太平洋地区的纬向风应力距平较弱，赤道西太平洋海表层的洋流对风场的响应也很弱，120°W 以东太平洋地区的西风应力距平及相应洋流的异常可能是由局地变化引起。

中部型 El Niño 事件，赤道太平洋地区强烈的海气相互作用导致了洋流的异常，表层洋流的辐合使得垂直方向产生下沉运动，抑制了冷水上翻，造成上层海水局地增暖，上层海水增暖现象随着下沉运动的东移而东传，上层暖海水的显著东移现象，在一定程度上为 El Niño 事件发生提供了暖水条件。东部型 El Niño 事件，中西太平洋地区的西风应力距平较弱，西太平洋表层洋流辐合及下沉运动区没有东移到东太平洋地区，东部型 El Niño 事件暖水形成与局地（120°W 以东）辐合下沉运动抑制深层冷海水上翻有关；东部型 El Niño 事件暖池次表层的暖水不是直接由西太平洋赤道次表层传播到

东太平洋地区，而是通过南太平洋西边界流将暖池海水带到40°S左右的西风漂流区，再由西风漂流将其平流到东太平洋。

本文对El Niño事件中洋流异常特征的分析是建立在SODA、NCEP/NCAR的海洋同化资料的基础上，由于现有的海洋观测资料长度不足，不能做大量个例诊断研究，有关的科学问题有待于进一步研究和探讨。

参考文献（References）

[1] White W B, Pazan S E, Inoue M. Hindcast/forecast of ENSO event based upon the redistribution of observed and modeled heat content in the western tropical Pacific 1964－84. *J. Phys. Oceanogr.*, 1987, **17**: 264～280

[2] 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**（5）：513～521
Li Chongyin, Mu Mingquan. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 513～521

[3] Weisberg R H, Wang C. Slow variability in the equatorial west-central Pacific in relation to ENSO. *J. Climate*, 1997, **10**: 1998～2017

[4] 张韧，余志豪. 热带海洋对南亚季风和太平洋信风强迫的几种响应模态. 海洋通报，2000，**19**：19～28
Zhang Ren, Yu Zhihao. Several response modes of tropical ocean to the South Asia monsoon and the Pacific trade wind forcing. *Marine Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **19**: 19～28

[5] 周广庆，李崇银. 西太平洋暖池次表层海温异常与ENSO的关系的CGCM模拟结果. 气候与环境研究，1999，**4**（4）：346～352
Zhou Guangqing, Li Chongyin. Simulation on the relation between the subsurface temperature anomaly in western Pacific and ENSO by using CGCM. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (4): 346～352

[6] 巢清尘，巢纪平. 热带太平洋和东印度洋对ENSO发展的影响. 自然科学进展，2001，**11**（12）：1293～1300
Chao Qingchen, Chao Jiping. The impacts of the tropical Pacific and eastern Indian Ocean on the development of ENSO event. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11** (12): 1293～1300

[7] 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
Zhang Renhe, Huang Ronghui. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22**: 587～599

[8] Wyrtki K. The response of sea surface topography to the 1976 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 1979, **9**: 1223～1231

[9] McCreay J P. A model of tropical ocean－atmosphere interaction. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**: 370～387

[10] Zhang Xuebin, McPhaden M J. Wind stress variations and interannual sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific. *J. Climate*, 2006, **19**: 226～241

[11] Wyrtki K. The response of sea surface topography to the 1976 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 1979, **9**: 1223～1231

[12] Firing E, Lukas R, Sadler J, et al. Equatorial undercurrent disappearing during 1982－83 El Niño. *Science*, 1983, **222**: 1121～1123

[13] Weisberg R H, Wang C. Slow variability in the equatorial west-central Pacific in relation to ENSO. *J. Climate*, 1998, **10**: 1998～2017

[14] 管秉贤. 棉兰老冷涡的变异及其与El Niño的关系. 海洋与湖沼，1989，**20**（2）：131～137
Guan Bingxian. Variation of the Mindanao eddy and its relation with El Niño event. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese), 1989, **20** (2): 131～137

[15] 张祖强，丁一汇，赵宗慈. 1997/1998年El Niño/La Niña期间洋流的演变特征和影响分析. 大气科学，2001，**26**（1）：127～141
Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. Evolution and roles of subsurface sea currents during the period of 1997/1998 El Niño/La Niña event. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **26** (1): 127～141

[16] 巢纪平. 对“厄尔尼诺”、“拉尼娜”发展的新认识. 中国科学院院刊，2001，**6**：412～417
Chao Jiping. New understanding of the development of El Niño and La Niña events. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2001, **6**: 412～417

[17] Fu Zongbin, Fletcher J. Two patterns of equatorial warming associated with El Niño. *Chinese Science Bulletin*, 1985, **30** (10): 1360～1364

[18] Carton J A, Giese B. Simple Ocean Data Assimilation (SODA) reanalysis effort. Paper presented at CLIVAR Workshop on Ocean Reanalysis, Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colorado, 2004 (http://www.atmos.umd.edu/～ocean/soda1.2.pdf)

[19] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437～471

[20] http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history