

1997/1998 厄尔尼诺的发生与发展*

蒲书箴 于非 赵新 胡筱敏

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266003)

关键词 厄尔尼诺 拉尼娜 赤道太平洋 次表层

1 引言

厄尔尼诺现象是大尺度海气相互作用过程而引起的异常变化。由于伴随着厄尔尼诺的发生往往出现全球范围的气候异常, 因此厄尔尼诺的诊断和预测引起了海洋学家和气象学家的密切注意。为了建立和改善厄尔尼诺的预报模式, 寻求可供厄尔尼诺预报使用的预报因子和诊断厄尔尼诺发生与发展的物理条件是科学工作者面临的重大挑战。长期以来, 为了选取那些具有明显的物理意义、预报提前量足够大的物理量, 及早地诊断厄尔尼诺的发生、发展和消衰, 海洋和气象学界付出了不懈的努力。例如, 各种厄尔尼诺和南方涛动指数及反映全球气候异常的指标等都是这种努力的结果。回顾既往发生的厄尔尼诺过程, 虽然有其共同的一面, 但具体个例之间却又不尽相同。因此, 及时地对厄尔尼诺物理过程进行分析和诊断, 从海洋动力学的角度说明赤道太平洋次表层的变化即是本文的宗旨。

2 850 hPa 风场异常的先兆

赤道太平洋经历了本世纪持续最长的厄尔尼诺事件(1991~1994年)之后, 于1995和1996年呈现出明显的拉尼娜(La Niña——厄尔尼诺的反变化)特征: 180°日更线以西的赤道西太平洋海面气压(SSP)和外向长波辐射为负距平, 海面温度(SST)、云量和降水为正距平; 而日更线以东的赤道东太平洋的 SSP 和外向长波辐射为正距平, SST、云量和降水为负距平; 赤道海洋上空的沃克环流加强; 海洋次表层的温跃层发生东高西低的深度倾斜等。上述这些拉尼娜特征一直持续到1996年上半年。1996年下半年, 当其他各物理量尚未发生任何显著的厄尔尼诺异常特征时, 赤道太平洋西部上空850 hPa 风场首先有了微妙的变化, 此种变化以异常西风为明显特点。虽然赤道西太平洋上空850 hPa 高度上, 在冬季有时也会出现短时间的西风(这是由于南向越赤道气流的影响), 但是在夏季, 正当东南季风盛行的季节, 西风却是罕见

本文于1997-10-05收到, 修改稿于1998-04-12收到。

* 国家自然科学基金(编号: 49676282)和国家海洋局共同资助项目。

第一作者简介: 蒲书箴, 男, 55岁, 研究员, 现从事海气相互作用、大洋环流和全球海洋变化研究。

的. 纬向风距平资料表明, 自1996年下半年起, 异常西风的范围不断地从西向东扩展. 至1997年4月西风正距平范围已经扩展到整个赤道太平洋海域 ($100^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{W}$). 1997年8~9月, 日更线附近的赤道中太平洋的西风达到最强, 约为 9 cm/s 的正距平 (图 1). 由于在盛行东风的赤道太平洋海域, 异常西风的暴发往往可以激发赤道开尔文波向东传播, 使赤道太平洋的海流和跃层深度发生明显的波动和变化, 导致赤道中、东太平洋海水温度的升高, 从而引发厄尔尼诺事件, 因此赤道低空异常西风的暴发及其持续时间和强度是监测厄尔尼诺事件发生与发展的重要指标之一^[1,2]. 本文下述各节将进一步说明其余各海洋要素的时间和空间变化. 经过对比后不难发现, 850 hPa 风场的异常变化远比其他各海洋要素的变化来得早. 此外, 还可把850 hPa 风场与其他诸如南方涛动指数、厄尔尼诺指数、200 hPa 纬向风场、SSP、SST 以及外向长波辐射等气象要素加以比较, 也可得出同样结论 (图略). 因此, 能够确认850 hPa 风场的异常变化是 1997/1998 厄尔尼诺事件中最早出现的先兆.

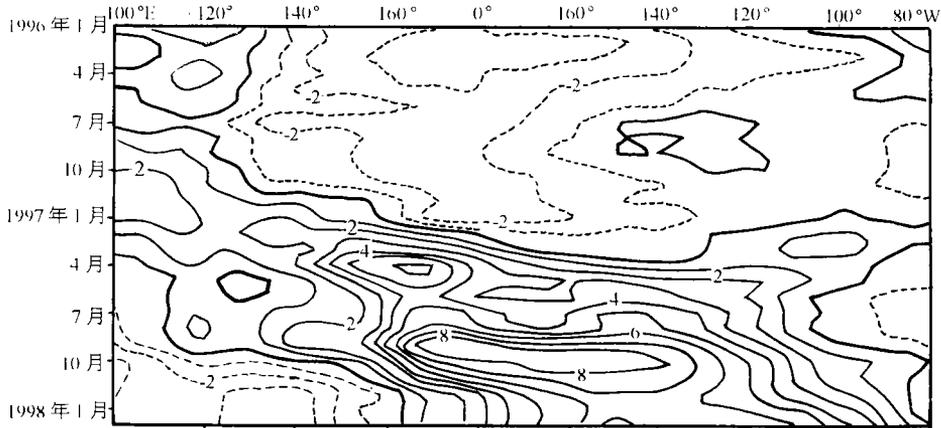


图 1 赤道断面850 hPa 风场随时间的变化
实线为西风距平, 虚线为东风距平 (cm/s)

图 1 还表明, 自1997年下半年, 赤道太平洋西部已有东风恢复正常的迹象, 然后纬向风的负距平域逐渐东扩. 1998年初已达到 160°E 附近洋面, 这标志着厄尔尼诺已开始有了消衰的迹象.

3 赤道东太平洋的异常变化

秘鲁沿岸以西的赤道东太平洋海域是反映厄尔尼诺现象的敏感区域. 除 SST 外, 秘鲁沿海的海面高度 (SSL) 在厄尔尼诺期间也会发生明显的变化. 资料表明, SSL 是一个比 SST 更为直观、更为敏感的指标^[3,4]. 引起 SSL 变化的一种动力原因是秘鲁沿海的风增 (减) 水. 通常秘鲁沿海盛行离岸风——赤道东风. 离岸风的作用使局地海域产生减水, 并引起温跃层的抬升和深层冷水的涌升. 这是导致秘鲁沿海 SST 偏低的根本原因之一. 如果离岸风减弱或出现异常西风, 则会产生与上述情况相反的增水和升温现象. 但风场资料表明, 局地风场的变化远远滞后于 SSL 的变化. 秘鲁沿海的异常西风是从1997年初才开始的 (见图1的经度范围—— $100^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{W}$). 而秘鲁外海 Baltra 岛屿站的水位自1996年9月即已开始上升 (见表 1), 显

表 1 Baltra 岛屿站和 Callao 滨海站 SST 距平和 SSL 距平的逐月变化

时 间	Baltra (0.5°S, 90°W)		Callao (12°S, 77°W)	
	SST 距平 (°C)	SSL 距平 (cm)	SST 距平 (°C)	SSL 距平 (cm)
1996年1月	-1.17	-0.22	-1.68	-4.98
2月	-0.98	-4.70	-2.37	-4.40
3月	-0.83	-2.37	-2.33	-5.80
4月	-3.95	-2.18	-1.03	-4.48
5月	-2.38	-1.13	-2.08	-6.80
6月	-2.10	-2.55	-1.72	-6.25
7月	-2.05	-2.30	-2.03	-5.39
8月	-1.54	-3.05	-1.83	-4.47
9月	-1.65	4.30	-1.12	-2.93
10月	-1.12	3.55	-0.98	-4.80
11月	-1.53	1.10	-1.60	0.07
12月	-2.23	0.55	-1.63	-3.65
1997年1月	-1.95	1.18	-1.78	-7.40
2月	-0.18	7.25	-2.35	0.85
3月	0.65	12.22	-0.47	0.23
4月	1.37	12.58	1.33	5.65
5月	2.67	26.22	2.02	18.08
6月	3.35	22.40	5.20	23.63
7月	3.93	26.42	4.92	25.08
8月	4.1	15.2	4.9	16.3
9月	3.8	19.0	3.6	18.3
10月	3.4	32.2	2.7	22.4
11月	4.4	39.5	4.3	26.2
12月	5.0	41.6	6.7	33.9
1998年1月	4.3	30.9	7.7	22.9
2月	3.5	20.2	6.9	14.7

然, 局地风场的变化并非是导致海面抬升的始发因素. 表 1 列出了 Baltra 岛屿站和 Callao 沿岸站的 SST 距平和 SSL 距平的逐月变化.

由表1可看出如下特点: (1) 1996年10月以前, 以 Baltra 和 Callao 站为代表的赤道东太平洋海域的 SST 和 SSL 均为负距平, 具有明显的减水和低温等拉尼娜特征. (2) Baltra 和 Callao 的增水分别是自1996年11月和1997年3月开始的; 而两个测站的水温则分别是自1997年3月和1997年4月开始升温的. 显然, SSL 的变化明显领先于 SST 的变化. 这说明 SSL 也比 SST 更为敏感. (3) 自1997年4月以后, Baltra 和 Callao 两测站的 SST 和 SSL 皆为正距平, 表现为典型的厄尔尼诺特征. 无论是 SST 的变化, 还是 SSL 的变化, 远离美洲海岸的 Baltra 均明显早

于 Callao (两测站相距800余海里). 这表明在两站所在的赤道东太平洋 SST 和 SSL 的起伏具有从远海向近岸传播的方向性. (4) Baltra 的月平均最大增水为41.6 cm, 月平均最大升温为5.0°C, 发生在1997年12月; Callao 的月平均最大增水为33.9 cm, 月平均最大升温为7.7°C, 分别发生在1997年12月和1998年1月, 此后便开始下降. 结合前面图1所示的850 hPa 风场资料和后面将给出的温跃层变化, 以及其他各种诸如外向长波辐射、厄尔尼诺指数、南方涛动指数等资料 (图略), 可以确认厄尔尼诺事件至此已发展到鼎盛阶段.

这里还要特别指出, Callao 站测得的7.7°C 月平均 SST 距平值是迄今为止最高的数值, 它比 Niño1区、Niño2区、Niño3区和 Niño4区的 SST 月平均距平值都高. 但是这个表面温度距平变化的数要比次表层温度距平变化的数 (11°C) 相比要小得多. 此外, Baltra 增水的数与跃层深度的起伏相比也小得多. 对此, 下面将有专述.

4 赤道太平洋次表层的异常变化

1997/1998厄尔尼诺期间, 赤道太平洋次表层发生了明显的异常变化. 这种变化以次表层的厚度达200 m 余水体的海温升高和温跃层的大幅度抬升 (达90 m 余) 为显著特点, 它们的变化都比海表面的异常变化要大得多.

本文所说的次表层海温是指海面以下300 m 以浅的水层而言的. 首先值得注意的是1995/1996拉尼娜期间次表层海温的背景情况. 图 2a 是1996年5月赤道太平洋海温的垂直断面. 它表明, 在日更线以西的赤道西太平洋170°W 附近的150 m 水深处有一个海温正距平, 其中心强度3°C 以上; 而赤道东太平洋则有一个负距平中心, 位于120°~100°W 之间的50 m 水深处. 其中心强度为-4°C. 介于两者之间的洋域则与常年相差无几. 显然, 这是一种西暖东冷的形势. 随着时间的推移, 位于赤道西太平洋的正距平中心和赤道东太平洋的负距平中心逐渐减弱. 正距平域或负距平域的面积也在逐渐减小 (图略). 时至1996年12月赤道西太平洋正距平域的面积明显向东扩展. +3°C 的等值线已经超过日更线. 此时, 赤道东太平洋负距平域的面积已明显缩小, 且强度继续减弱, 但负距平并未完全消失.

在1996年12月至1997年2月期间, 赤道西太平洋的正距平域继续向东扩展, 并且不断加强; 而赤道东太平洋负距平域逐渐缩小, 强度也继续减弱. 整个赤道太平洋处在一个从拉尼娜向厄尔尼诺过渡的调整阶段 (图略).

1997年3月, 原本位于赤道东太平洋的负距平域已演化为正距平域. 中心强度已达到3°C 以上. 赤道西太平洋的正距平中心的强度继续加强, 达到5°C 以上, 其面积进一步向东扩展 (见图2b). 1995年5月赤道西太平洋不断东扩的正距平域与赤道东太平洋的由负距平域演化并发展成的正距平域连接成为一片. 其范围从150°E 直至80°W, 横跨了130个经度之多. 正距平域的厚度可达百余米, 中心位置东移至170°~110°W 的赤道东太平洋次表层100~150 m 之间. 强度达到6°C 以上. 大面积的赤道太平洋面出现了 SST 正距平 (见图2c). 此后, 正距平的强度继续加强, 正距平水体的厚度进一步增大. 1997年7月的仲夏季节, 位于赤道东太平洋的正距平域的厚度已超过300 m 以上. 强度为9°C 的正距平中心有两个, 分别位于130°~120°W 之间和100°W 附近 (见图2d). 由图还可看到, 位于次表层的正距平中心的最大值几乎是 SST 正距平最大值的2倍. 相反的是, 赤道西太平洋和中太平洋开始形成了两个强度为-1°C 的弱负距平中心, 分别位于170°E 的150 m 处和170°W 的200 m 处. 此后, 负距平中心不断地扩大并加强.

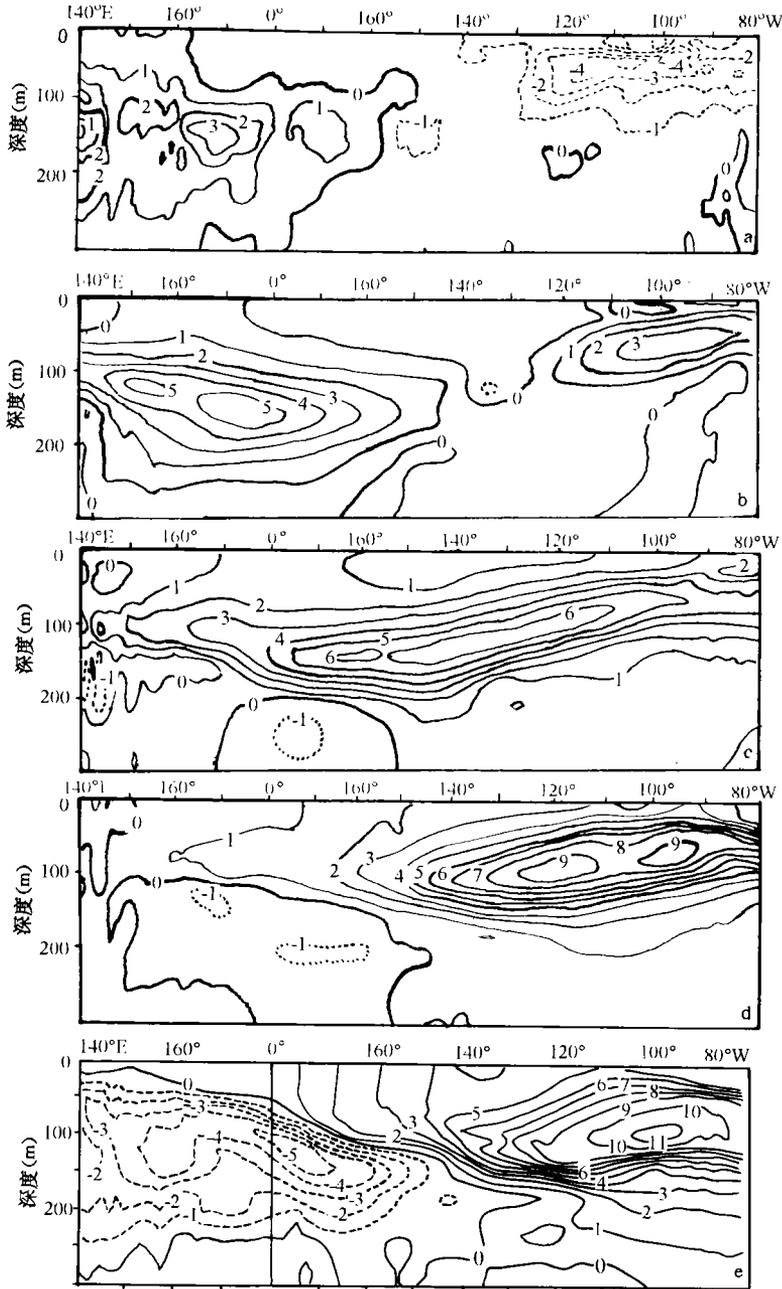


图 2

- a. 1996年5月(拉尼娜期间), 赤道太平洋垂直断面的海温距平 b. 1997年3月(厄尔尼诺初期), 赤道太平洋垂直断面的海温距平 c. 1997年5月(厄尔尼诺发展中)赤道太平洋垂直断面的海温距平 d. 1997年7月(厄尔尼诺加强后), 赤道太平洋垂直断面的海温距平 e. 1997年12月(厄尔尼诺盛期), 赤道太平洋垂直断面的海温距平

1997年12月, 赤道东太平洋正距平域的范围已扩大到从140°E一直伸展到80°W, 正距平中心位置已经东移至100°W附近的100 m水深处, 中心强度达11 C以上. 正距平水体的厚度仍可达300 m以上. 此时, 厄尔尼诺发展到鼎盛阶段. 与赤道东太平洋正距平适成对照的是赤道

中、西太平洋的负距平域进一步发展加厚, 形成了 $140^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{W}$ 和 $50\sim 250\text{ m}$ 所占的负距平水体. 中心强度为 -5°C , 位于日更线的 $100\sim 150\text{ m}$ 之间. 于是形成了西冷东暖的形势. 这种形势与前面所述的西暖东冷的拉尼娜形势完全相反(比较图2a和图2e).

上述次表层海温的变化可概括如下: (1) 拉尼娜期间, 赤道西太平洋次表层异常温暖; 而赤道东太平洋则恰好相反. (2) 从拉尼娜向厄尔尼诺转变时, 赤道西太平洋的暖中心不断向东扩展并加强; 而赤道东太平洋的冷中心不断减弱并缩小, 直至转化为正距平, 并与赤道西太平洋的暖中心合并. (3) 在厄尔尼诺发展阶段, 赤道西太平洋次表层的暖中心不断东移, 面积东扩、强度加强, 厚度增加. (4) 厄尔尼诺期间, 由于海温正距平中心位于次表层 $100\sim 150\text{ m}$ 之间, 因此 SST 增温的幅度远不如次表层增温的幅度. (5) 厄尔尼诺期间, 赤道太平洋次表层温度场的分布是一种西冷东暖的形势, 这与西暖东冷的拉尼娜期间的形势恰好相反.

下面我们将根据资料说明赤道东太平洋次表层温度的升高是与跃层的下降有关的, 但赤道西太平洋次表层温度的下降则与跃层的抬升有关, 而这种跃层的起伏和温度的变化是长周期内开尔文波的明显特征.

5 赤道太平洋温度跃层的波动

赤道太平洋温跃层的分布通常具有东高西低的特征. 在拉尼娜期间, 这种倾斜更甚. 造成温跃层倾斜的动力原因是因为在通常情况下, 赤道太平洋盛行东风. 在东风强迫下, 海洋上层为西向的南赤道流. 东风的强迫和西流的输运作用使赤道太平洋上层暖水在热带西太平洋堆积起来, 而赤道东太平洋则因离岸风的作用而使下层冷水涌升, 因此在赤道西太平洋, 温跃层深度在 $150\sim 200\text{ m}$ 之间; 而在赤道东太平洋海岸附近, 温跃层则在 50 m 以浅^[5]. 拉尼娜期间, 东风和西流更强, 温跃层的水平倾角更大, 这就是为什么赤道西太平洋次表层有温度正距平, 而赤道东太平洋次表层有温度负距平的道理(见图2a). 但是如果东风减弱或西风暴发, 赤道太平洋的跃层深度则要发生变化. 这种变化是以赤道开尔文波的形式向东传播的. 1997/1998厄尔尼诺期间, 温度跃层的变化首先是从赤道西太平洋开始的, 它发生在 850 hPa 西风暴发之后. 为了说明跃层的变化, 将以温跃层中值等温线—— 20°C 等温线的深度为例加以解释. 1997年初, 20°C 等温线在日更线以西约 160°E 附近加深了 20 m (见图3). 至1997年

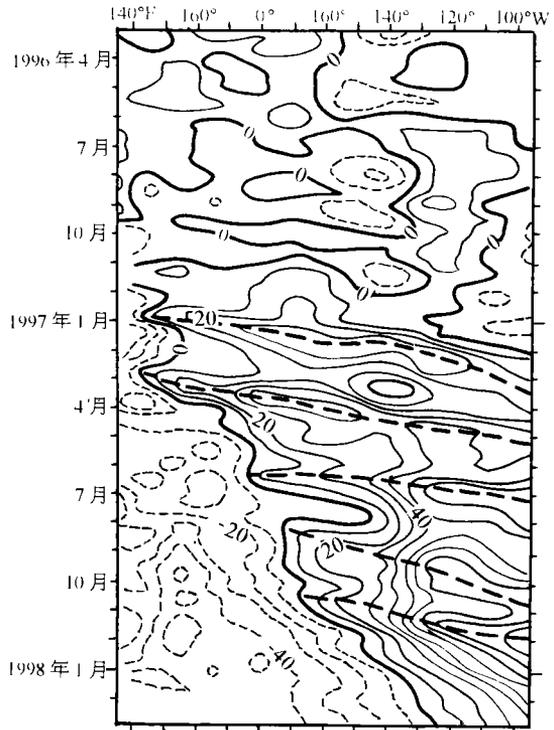


图3 20°C 等温线深度的距平及其位相的传播
图中粗虚线的斜率相当于开尔文内波的相速度

3月跃层加深的变化进一步向东传播至 100°W 。然后跃层回升,个别地方(如 140°W 处)甚至出现了深度负距平,表现为起伏的波动状。1997年4月初,温跃层深度再度下降,并随着时间的推移而向东传播。至1997年7月在赤道太平洋东部,跃层深度负距平可达70 m以上。温度跃层的这种起伏恰好反映了赤道开尔文内波沿赤道向东的传播。其传播速度相当于3个月左右,即可由西部传至东部(见图3中的粗虚线所示)。这里说明的温跃层深度的加深及其向东传播与上节所述的次表层温度的升高和正距平中心的东移是完全一致的。也就是说,当跃层深度变深时,次表层海温将升高;当跃层加深的位相东传时,次表层海温的正距平中心向东移动。这一事实恰好说明了造成跃层起伏的开尔文内波正是跃层所在的次表层海温发生变化的动力机制。

6 结论

综合上述的1997/1998厄尔尼诺事件的发生和发展过程,不难得出如下诊断结论:

6.1 1997/1998厄尔尼诺期间,850 hPa风场的异常变化明显早于其他海洋水文气象要素的变化。早在1996年下半年,赤道西太平洋850 hPa高度即出现了异常西风。此后,异常西风的范围逐渐向东扩展,至1997年4月已扩大至整个赤道太平洋。因此,850 hPa西风异常可作为一个较好的预报厄尔尼诺发生和发展的因子。

6.2 1996年9月开始,赤道东太平洋Baltra站(0.5°S , 90°W)的月平均海面高度明显上升(增水),此后一直维持正距平不变。远离南美沿岸的Baltra站增水出现的时间明显早于秘鲁沿岸的Callao(12°S , 77°W)增水出现的时间,因此水位变化有向岸传播的特征。分析表明,水位变化的原因不是由于局地风的变化引起的。

6.3 赤道太平洋次表层海温的升高明显早于海表面水温的升高。前者升温的幅度也大于后者升温的幅度。次表层升温的正距平域首先出现在日更线以西的赤道西太平洋,然后其面积不断向东扩展。升温水体的厚度变厚,温度正距平中心的强度不断加强并向东移动。

6.4 赤道太平洋跃层深度(以跃层中值等温线—— 20°C 等温线为例)于1997年1月从 150°E 的赤道西太平洋首先加深,加深的位相有明显向东传播的特征。这种东传的速度与赤道开尔文内波的波速相当。跃层加深的最大深度位于赤道太平洋的东部 100°W 处,深度正距平可达90 m之多,出现时间是在1997年12月,这也是赤道太平洋次表层海温最大正距平—— 11°C 出现的位置和时间。

6.5 反映1997/1998厄尔尼诺发生和发展的各物理量的变化顺序依次是西风异常—水位升高—次表层增暖和跃层加深—海面温度上升。其中前3个物理量皆比SST更为敏感,可以做为更好的预报因子。

6.6 次表层海温升高的时间不仅早于SST,而且增温的幅度也更大。

参考文献

- 1 Barnett T P, Latif M, Kirk E *et al.* On ENSO physics. *J. Climate*, 1991, **4**, 487~515
- 2 Barttist D S. Dynamics and thermodynamics of a warming event in a coupled tropical atmosphere-ocean model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**, 2 889~2 919
- 3 Philander S G H. El Niño Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 1983, **302**, 296~301
- 4 Wyrtki K. The slope of sea level along the equator during the 1982/1983 El Niño. *J. Geo. Res.*, 1984, **89**, 10 419~10 424

- 5 巢纪平, 陈则实, 王宗山等. 热带西太平洋海气相互作用综合研究. 北京: 海洋出版社, 1993, 256

Occurrence and evolution of 1997/1998 El Niño

Pu Shuzhen,¹ Yu Fei,¹ Zhao Xin,¹ Hu Xiaomin¹

1. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266003*

Key words El Niño, La Niña, equatorial Pacific Ocean, subsurface layer