

# 赤道太平洋区域风应力与海表温度 年际异常的奇异值分解\*

王盘兴 周伟灿 薛志华 王欣

(南京气象学院, 南京 210044)

## 提 要

用向量场奇异值分解方法分析了赤道太平洋区域风应力场与海表温度场年际异常的相关联系。结果表明,最主要的一对奇异向量与 ENSO 循环关系密切,其主要特征为赤道中、东太平洋风应力向赤道的异常辐合(辐散)与该区的 SST 异常升高(降低)准同步变化。对 70 和 80 年代的 4 次 El Niño 事件中标准化风应力异常场的分析表明,它们均表现出赤道中、东太平洋的辐合。这一结果可能比用信风张弛描述 ENSO 循环中的环流异常更合理和更具代表性。

关键词: 赤道太平洋区域 奇异值分解 ENSO 循环 风应力异常

## 引 言

ENSO 循环是热带太平洋海气年际异常的最强信号<sup>[1]</sup>。在 ENSO 循环机制研究中, Bjerkness-Wyrtki 假说已被科学家普遍接受。按照这个假说<sup>[2, 3]</sup>, 海洋和大气的作用是互为因果的。如果赤道太平洋中、东部的偏东信风松弛(即出现正的西风异常), 将会使西部暖池区的暖水向东涌进及太平洋东部南美沿岸上翻海流减弱, 结果导致该区出现 SST 正异常; 而近赤道太平洋东部正的 SST 异常将进一步减弱偏东信风, 从而形成一种有利于 ENSO 循环暖位相出现和维持的正反馈机制。研究表明, 多次 El Niño 事件前可观测到信风的松弛; 但也存在一些 El Niño 事件, 在其发生之前, 信风松弛的特征并不明显, 如 1982~1983 年 El Niño 事件, 这就对 Bjerkness-Wyrtki 假说提出了强烈挑战<sup>[4]</sup>。

根据吹流原理<sup>[5]</sup>, 在赤道附近, 能够导致 SST 异常升高的海面风场异常不仅仅限于信风松弛。我们认为, 在 ENSO 循环机制分析中, 应全面考察海面风场(或风应力场)异常与 SST 异常之间的关系。据此, 本文用文献[6]提出的向量场奇异值分解方法, 研究赤道太平洋区域风应力与海表温度年际异常的关系, 以期较客观且全面地考察二者关系。

\* 本工作属国家自然科学基金项目(编号 49375242)。  
1996-08-12 收到, 1997-11-03 收到再改稿。

## 1 资料来源及预处理

在太平洋热带(10°S~10°N)区研究风应力与 SST 年际异常的相关联系. 风应力月距平资料取自美国 FSU 分析结果, 其地理范围为 29°S~29°N, 129.375°E~73.125°W, 网格距为  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 2^\circ \times 5.625^\circ$ , 时域为 1970 年 1 月~1989 年 12 月. 月平均海平面温度资料取自中国科学院大气物理研究所, 地理范围为 72.5°S~72.5°N, 0°~360°(经度), 网格距为  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 5^\circ \times 5^\circ$ , 时域为 1948 年 10 月~1988 年 9 月.

根据拟采用的奇异值分解方法及分析的需要, 从上述资料中摘取时域为 1970 年 1 月~1988 年 9 月的风应力月距平资料  $F_{n1 \times m}$  及 SST 月平均资料  $G_{n2 \times m}$ .  $F_{n1 \times m}$  资料的地理区域为 9°S~9°N, 140.625°E~78.75°W, 网格距为  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 6^\circ \times 5.625^\circ$ ;  $G_{n2 \times m}$  资料的地理区域为 7.5°S~7.5°N, 122.5°E~82.5°W, 网格距为  $\Delta\varphi \times \Delta\lambda = 5^\circ \times 5^\circ$ ;  $F$ 、 $G$  的相应参数为  $m=225$ ,  $n1=104$ ,  $n2=128$ .

对  $F$ 、 $G$  作预处理, 使其成为滤除全部年变化信息的标准化距平场时间序列(注: 对  $F$  的标准化是按分量进行的), 并仍将它们记为  $F_{n1 \times m}$ ,  $G_{n2 \times m}$ , 它们是向量场 SVD 分解的对象.

## 2 向量场 SVD 分解方法

奇异值分解(SVD)方法是在极大拟合相关函数模方的原则下确定两个要素场相关型的方法. 关于标量场 SVD 分解方法, 文献[7]已有成熟方案. 本文的分析涉及向量场时间序列( $F_{n1 \times m}$ ), 故需采用文献[6]提供的向量场 SVD 方法.

据文献[6], 向量场 SVD 分解方案的关键是将向量场时间序列

$$F_{n \times m} = V_{n \times m} = \begin{bmatrix} u_{11}i + v_{11}j & u_{12}i + v_{12}j & \cdots & u_{1m}i + v_{1m}j \\ u_{21}i + v_{21}j & u_{22}i + v_{22}j & \cdots & u_{2m}i + v_{2m}j \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{n1}i + v_{n1}j & u_{n2}i + v_{n2}j & \cdots & u_{nm}i + v_{nm}j \end{bmatrix} \quad (1)$$

看作标量场时间序列

$$F_{2n \times m} = V_{2n \times m} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \\ v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ v_{n1} & v_{n2} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1m} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ F_{n1} & F_{n2} & \cdots & F_{nm} \\ F_{m,1} & F_{m,2} & \cdots & F_{m,m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ F_{2n,1} & F_{2n,2} & \cdots & F_{2n,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样, 对向量场时间序列  $F_{n1 \times m}$ ,  $G_{n2 \times m}$  的 SVD 分解就可以通过对标量场时间序列  $F_{2n1 \times m}$ 、 $G_{n2 \times m}$  的 SVD 分解来实现. 分解结果可分为两个部分: 一部分是左奇异向量  $X_k$  (与  $F$  对

应)和右奇异向量  $Y_h$  (与  $G$  对应), 序数  $h$  按奇异值大小排定, 且  $X_h$ 、 $Y_h$  被标准化(模为 1); 还有它们的时间系数序列  ${}_f T_h$ 、 ${}_g T_h$ . 另一部分是 SVD 分解质量的度量参数, 它们包括  $X_h$ 、 $Y_h$  对相关函数  $FG^T$  模方的拟合率  $\rho_h$  及前  $h$  对奇异向量对该模方的总拟合率  $P_h$ ;  $X_h$  ( $Y_h$ ) 对  $F$  ( $G$ ) 模方的拟合率  $\alpha_h$  ( $\beta_h$ ); 还有时间系数  ${}_f T_h$ 、 ${}_g T_h$  间的相关系数  $r_h$ .

### 3 度量参数分析

表 1 给出了  $F$ 、 $G$  奇异值分解的前 10 组参数. 由  $\rho_h$  值知,  $\rho_1$  远大于其余  $\rho_h$ , 说明第一对奇异向量  $X_1$ 、 $Y_1$  在拟合相关函数矩阵模方中具有特别重要的意义. 在  $\alpha_h$ 、 $\beta_h$  值中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  较大, 量级也相当, 而较大的  $\beta_h$  值只有  $\beta_1$ , 说明第一对奇异向量在描述  $F$ 、 $G$  (它们是标准化的异常值) 中均起到重要作用, 因此可以被观测到; 而第二对奇异向量在描述  $F$  中所起作用也重要, 有可能在实际观测中被确认, 但在描述  $G$  中所起的作用明显地小, 它可能不易被实际观测到.  $\alpha_h$ 、 $\beta_h$  的这种分布表明, 风应力的年际变化规律较 SST 的年际变化规律复杂, 前者具有两种较显著的变化, 而后者只有一种. 由  $r_h$  值可知, SVD 分解给出的奇异向量时间系数间一般具有显著相关, 在本例中最强的相关发生在前两对奇异向量的时间系数之间. 为此, 我们将分析限制在前两对奇异向量上, 并重点分析第一对奇异向量及时间系数.

表 1 赤道太平洋区域风应力、SST 异常奇异值分解的度量参数表

$h$	$\rho_h$	$P_h$	$\alpha_h$	$\beta_h$	$r_h$
1	0.858	0.858	0.167	0.303	0.853
2	0.057	0.915	0.103	0.045	0.719
3	0.023	0.938	0.055	0.044	-0.643
4	0.012	0.949	0.063	0.022	-0.597
5	0.009	0.958	0.026	0.039	-0.599
6	0.006	0.964	0.044	0.016	-0.607
7	0.004	0.968	0.021	0.022	0.632
8	0.003	0.971	0.025	0.014	-0.627
9	0.003	0.974	0.027	0.016	-0.549
10	0.003	0.977	0.024	0.013	-0.595

### 4 主要奇异向量及其时间系数的分析

图 1 给出了前两对奇异向量的时间系数曲线. 与表 1 中  $r_1$ 、 $r_2$  给出的强正相关联系对应, 图上实、虚线均有大致相同的走向. 虽然两组时间系数曲线均包含明显的慢变过程(周期为几年的振荡), 但图 1a 上这种过程更为明显. 由图 1a 上曲线峰(谷)位置与 El Niño (La Niña) 事件很好的对应关系可知, 第一对奇异向量是与 ENSO 循环相关的模态, 且它们与 ENSO 暖阶段 (El Niño 事件) 相对应. 由图 1b, 明显的峰(谷)与 El Niño (La Niña) 事件的对应关系复杂; 但多数 El Niño 事件均开始于时间系数的负值区, 结束

于正值区(1976年6月~1977年3月的弱 El Niño 事件不典型). 因此, 第二对奇异向量可能对 El Niño 事件开始时间及结束时间起到一种调制作用.

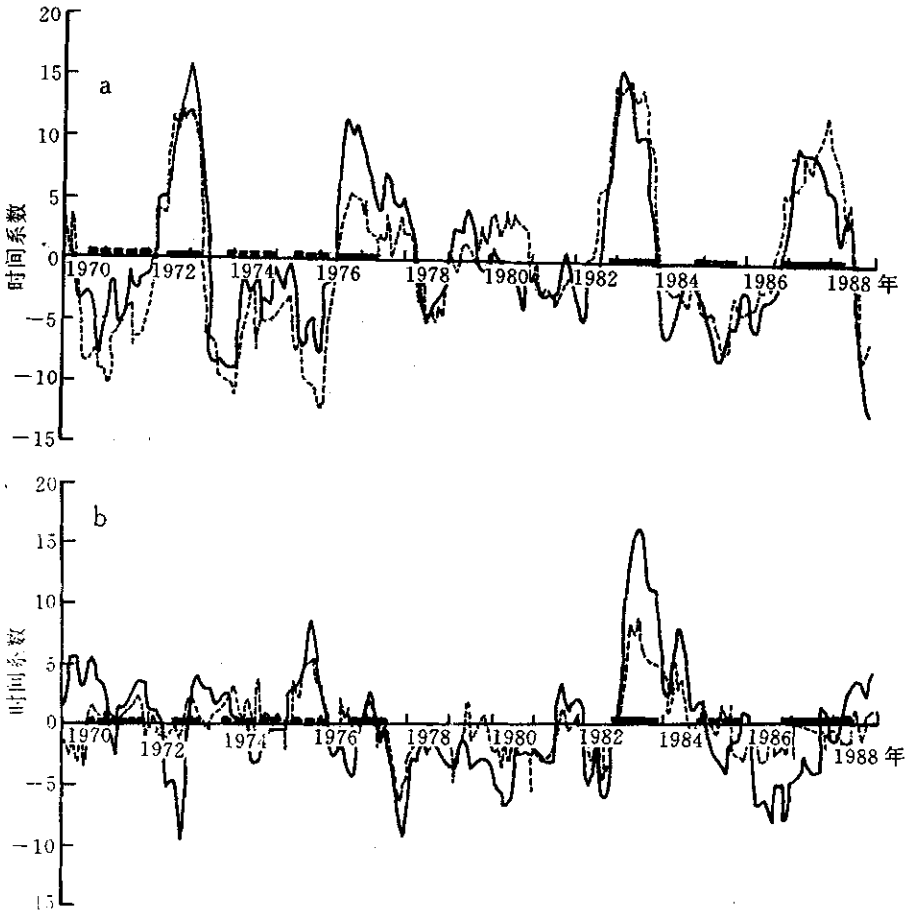


图1 奇异向量的时间系数曲线 (a)  $h=1$ ; (b)  $h=2$ (实(虚)线为左(右)奇异向量时间系数曲线, 时间轴上的粗实(虚)线为 El Niño(La Niña)事件覆盖时段<sup>[8]</sup>)

图 2a、b 给出了前两对奇异向量, 其上风应力与 SST 均具有明显的大尺度特征.

图 2a 给出了 ENSO 暖阶段(与 El Niño 事件对应)模态, 其上风应力异常的特征是经向分量明显大于纬向分量, 且有向中、东太平洋赤道辐合的倾向, 信风减弱主要出现在中太平洋赤道附近; SST 异常的特征是赤道中、东太平洋存在明显的异常升温带, 两个升温中心分别位于 180°以东及南美西海岸附近, 形态相似于文献[9]的 El Niño 事件合成 SST 异常分布图. 图 1a 和图 2a 联合给出了描述 ENSO 循环的一个驻波振荡, 它给出了 ENSO 循环暖(冷)位相阶段中、东太平洋区域伴随发生 Hadley 环流加强(减弱)及中太平洋区域伴随发生 Walker 环流明显减弱(加强)的基本特征. 应用 Ekman 漂流原理或直接热力环流原理, 由第一对奇异向量揭示的这一对驻波振荡的物理实质是容易理解的.

图 2b 给出的 SST 异常模态主要有两个中心, 正中心位于赤道东太平洋, 负中心位

于180°经线以西. 注意到风应力异常模态图上有北风和东风应力贯穿上述 SST 异常中心, 联系图 1b、图 2b, 对于多数 El Niño 事件, 随着第二对奇异向量时间系数由负转正, 180°附近的赤道区域将有信风的弛张过程发生, 并伴随有一个 SST 正异常从国际更日线自西向东传播. 但由于表 1 中  $\alpha_2$  远较  $\beta_2$  大, 信风弛张的过程可能要较 SST 正异常的过程更容易被观测发现.

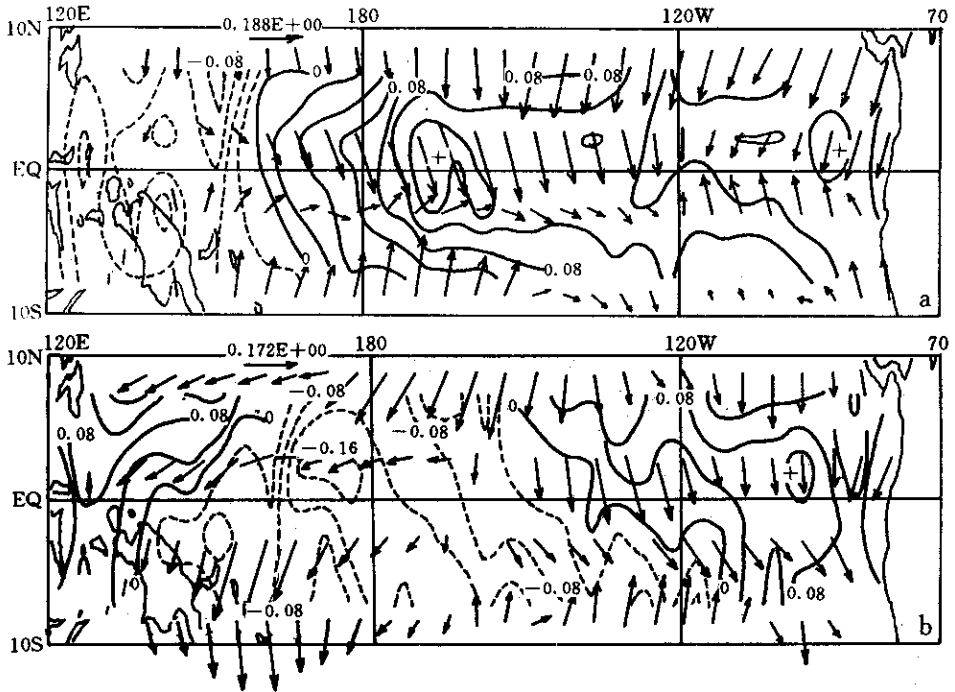


图 2 标准化奇异向量图 (a)  $h=1$  (b)  $h=2$ (箭头为左奇异向量(与风应力对应), 等值线为右奇异向量(与 SST 对应))

为了充分显示风应力异常辐散、辐合在 ENSO 循环中的意义, 求出了图 2 中左奇异向量的散度场. 图 3 给出了左奇异向量散度场与右奇异向量的配置. 由图 3a, 第一对奇异向量的风应力辐合中心与 SST 增暖中心基本重合, 风应力辐合区与 SST 增暖区也基本重合. 因此, 伴随 ENSO 循环的主要海气异常为赤道中、东太平洋区域风应力辐合(辐散)与 SST 增温(降温)的准同步变化. 这种关系已被文献[10]对强 El Niño、La Niña 事件中热带辐合带异常的观测研究证实. 这些研究指出, 在 El Niño 期间, 热带辐合带(ITCZ)移向赤道, 南太平洋辐合带(SPCZ)向北移动, 西太平洋辐合带向东移动; 在 La Niña 期间, 发生相反的情况, 这些辐合带彼此分离. 第二对奇异向量情况较复杂, 不再分析.

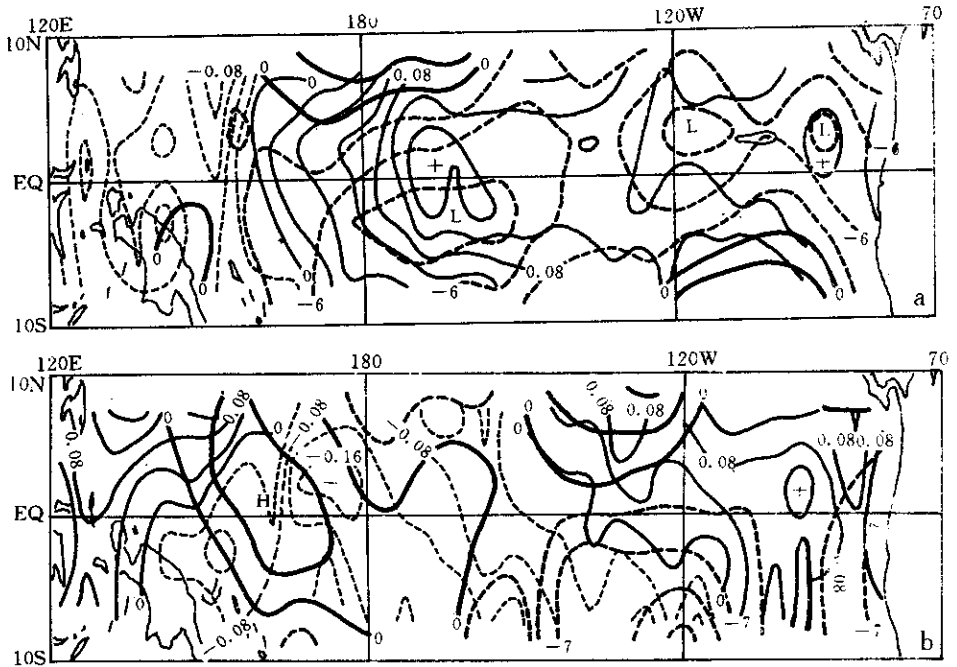


图3 同图2, 但用左奇异向量的散度场(图中粗实线)代替风应力场

## 5 实例分析

上述分析得到的最重要结果是赤道中、东太平洋风应力的辐合(辐散)与该区域 SST 的正(负)异常同步变化。因为第一对奇异向量对样本  $F$ 、 $G$  模方有很高的拟合率, 因此, 上述关系应在具体过程中得到反映; 同时, 因奇异向量是整个时段的统计结果, 因此, 它可能存在个例之间的差异。为了分析这些问题, 求出了逐次 El Niño 事件的风应力、SST 标准化距平平均值, 并由前者求得散度, 然后制作 El Niño 事件风应力散度、SST 异常图(图 4)。

由图 4 可见, El Niño 事件阶段(ENSO 暖位相)赤道中、东太平洋区域风应力异常的辐合是普遍存在的, 但其范围、强度的差异是明显的。例如, 1982~1983 年 El Niño 事件阶段(图 4c)辐合区限于  $180^\circ$  经线以东、且主要在赤道东太平洋区域;  $150^\circ\text{E} \sim 180^\circ$  间的强辐散区是其它 3 次 El Niño 事件没有的。由于这种明显的特殊性, 基于经验对 1982~1983 年 El Niño 事件的监测是不成功的。而 1986~1988 年 El Niño 事件因其基本特征类似于 70 年代的两次同类事件, 其监测取得成功<sup>[11]</sup>。

## 6 结论

借助于向量场奇异值分解方法, 从赤道太平洋区域标准化风应力距平场, 标准化海

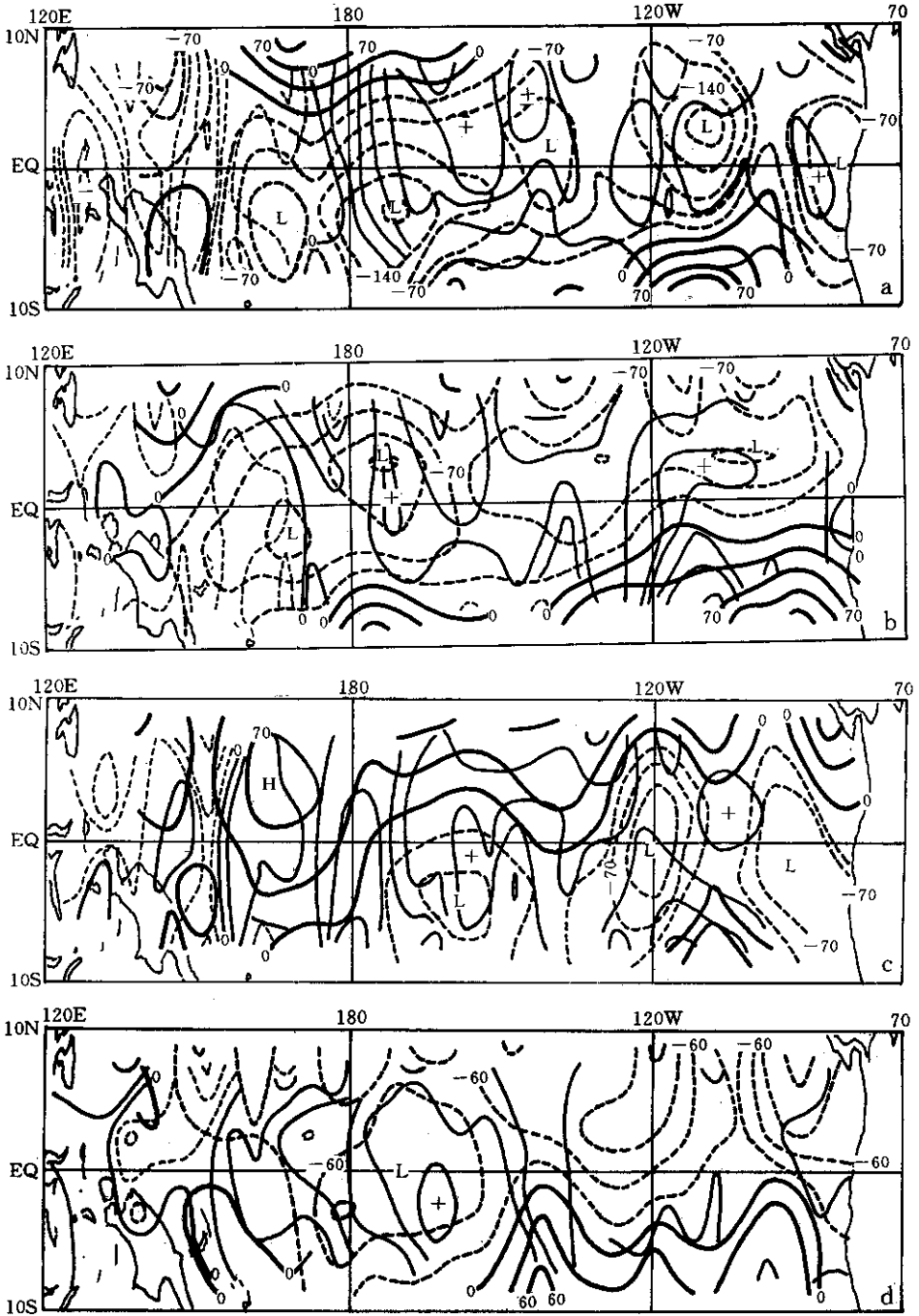


图 4 逐次 El Niño 事件风应力(散度)、SST 标准化距平平均值 (a) 1972 年 6 月~1973 年 3 月 (b) 1976 年 6 月~1977 年 3 月 (c) 1982 年 9 月~1983 年 9 月 (d) 1986 年 10 月~1988 年 3 月 (粗(细)线分别为事件平均异常风应力散度(异常 SST))

表温度距平场时间序列中分离出与 ENSO 循环关系密切的、呈显著相关的海气异常模态。其中第一对奇异向量包含了 El Niño 事件中 Hadley 环流、Walker 环流异常与中、东

太平洋 SST 异常的关系;也可以简要地概括为上述区域风应力辐合与 SST 异常的关系.第二对奇异向量则起到一种调制作用.对 4 次 El Niño 事件风应力、SST 异常的统计表明,所揭示的海气异常相关模态至少对 El Niño 事件阶段是普遍存在的.

### 参考文献

- 1 Trenberth K E. Signal versus noise in the Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 326~332.
- 2 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 163~172.
- 3 Wyrtki K. El Niño-the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *J. phys. Oceanogr.*, 1975, **5**: 572~584.
- 4 符淙斌. 厄尔尼诺/南方涛动现象与年际气候变化. *大气科学*, 1987, **11**(3): 209~220.
- 5 景振华. 海流原理. 北京: 科学出版社, 1966. 284~300.
- 6 王盘兴, 周伟灿, 王欣, 薛志华. 气象向量场奇异值分解方法及其应用. *南京气象学院学报*, 1997, **20**(2): 152~157.
- 7 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法. 北京: 气象出版社, 1995. 229~238.
- 8 ENSO 监测小组. 厄尔尼诺事件的划分标准和指数. *气象*. 1989, **15**(3): 37~38.
- 9 Rasmusson E M and Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 354~384.
- 10 Pazan S and Meyers G. Pacific trend wind fluctuations and the southern oscillation index. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 587~600.
- 11 余志豪, 蒋全荣. 厄尔尼诺、反厄尔尼诺和南方涛动. 南京: 南京大学出版社, 1994. 10~58.

## SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF INTERANNUAL ANOMALIES OF WIND STRESS AND SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE EQUATORIAL PACIFIC AREA

Wang Panxin Zhou Weican Xue Zhihua Wang Xin

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

### Abstract

The relationship between interannual anomalies of wind stress and sea surface temperature (SST) in the equatorial Pacific area is analyzed using a singular value decomposition (SVD) scheme. The results show that the major pair of singular vectors is closely related with ENSO cycles and its main feature is the quasi-synchronous variations of the anomalous convergence (divergence) towards the equator of wind stress with the anomalous increase (decrease) of SST over the equatorial eastern and middle Pacific. The analyses of anomaly fields of the normalized wind stress during four El Niño events in the seventies and eighties show that there was the convergence of wind stresses over the equatorial eastern and middle Pacific in all four events. The results show that the singular value decomposition scheme of vector may be more reasonable and representative than trade relaxation in describing the circulation anomaly in ENSO cycles.

**Key words:** Equatorial Pacific area Singular value decomposition ENSO cycle Wind stress anomaly