

南沙暖水变化及其与 ENSO 和西太副高的耦合关系*

陈永利** 张庆荣*** 赵永平**

** (中国科学院海洋研究所)

*** (中国科学院南海海洋研究所)

南沙暖水域位于南海南部, 濒临赤道, 处于 Walker 环流上升区和南北半球气流交换的通道上, 是南海海温较高的区域, 也是海气相互作用的敏感地区。热带海域海洋及大气环流的变化对该海域海温的变化有着重要影响。

以往的研究表明, 南海海温与赤道中、东太平洋水温和西太平洋副热带高压关系密切 (钮智旺, 1994; 陈永利, 1996)。南海是一个半封闭性海域, 南海海温的变化与热带西太平洋水温之间具有非“承接”性 (周发琇, 1991), 与西太平洋之间的水体交换不可能是引起南海海温变化的主要原因。那么, 赤道中、东太平洋海温及副高是通过什么过程影响南海海温呢? 它们之间的相互关系如何? 西太平洋副热带高压是控制南海海域的主要天气系统, 厄尔尼诺和南方涛动是热带太平洋地区海洋、大气中的两种大尺度异常现象, 南海海温与它们之间的耦合关系可能就是影响海温变化的过程。本文根据综合海洋大气资料 (COADS), 分析了南沙暖水的变化与南海海温的关系, 并借助功率谱和交叉谱分析了南沙暖水的变化周期以及与赤道东、中太平洋水温、南方涛动和西太副高之间的显著耦合频段及相互耦合振荡关系, 以探讨南沙暖水与 ENSO (厄尔尼诺-南方涛动) 和西太副高之间的内在联系及海温变化的原因, 对于研究南沙暖水域及南海海温变化的物理成因有着重要意义。

一、计算方法

南沙海域海温采用 1961—1987 年 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 网格点上 $15^{\circ}N$ 以南南沙区域的海表面温度资料; 赤道中、东太平洋水温和南方涛动指标采用 Wright (1984) 所取的赤道东太平洋 ($5^{\circ}N-10^{\circ}S, 180^{\circ}-90^{\circ}W$ 范围内) 的海温距平值和达尔文与塔希堤的海平面气压距平差; 副高特征量为西北太平洋区域的 500hpa 副高面积指数。为讨论它们之间的耦合时频特征, 寻找其内在联系, 对资料进行了标准化处理, 消除了年变化的影响。

海洋和气象要素的变化是由多种频率的振动信号叠加的结果, 用简单的周期和相关分析不可能很好地揭示出不同频率的振动特点和两个要素对应序列的相互关系。本文采

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2895 号。“八五”国家科技攻关资助项目, 85—927—05 号。
收稿日期: 1995 年 11 月 27 日。

用的功率谱和交叉谱方法,不仅可以分析出其振动的主要频率和周期,同时又能给出两个时间序列在不同频域内的相关关系和位相差,可以综合地了解对应周期上两个序列振动的总关系,能较好的反映其之间振荡的相互联系。

两个时间序列 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 的交叉谱

$$S_{xy}(f) = \int_{-m}^m R_{xy}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau = C_{xy}(f) - iQ_{xy}(f) \quad (1)$$

式中, $S_{xy}(f)$ 为交叉谱, f 为频率, $R_{xy}(\tau)$ 为两序列交叉落后 τ 时刻的相关系数,它是由同相谱 $C_{xy}(f)$ 和异相谱 $Q_{xy}(f)$ 组成,同相谱表示两个时间序列同位相谐波之间的关系对总相关的贡献;异相谱表示两个时间序列位相差 90° 的谐波分量之间的相关对总相关的贡献。 m 为最大滞后时间,本文取 $m=23$ 。

研究两个时间序列之间的总关系,是要综合地了解对应周期上两个振动的总关系及它们之间的位相情况。在频域内刻划两个序列的相关性和它们之间的位相情况,则可由凝聚谱和相位谱来描述。

凝聚谱

$$CH(f) = \frac{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)}{S_x(f)S_y(f)} \quad (2)$$

式中, $S_x(f)$, $S_y(f)$ 分别为 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 两个序列在频率为 f 时的一维谱估计值,且 $0 \leq CH \leq 1$ 。

位相谱

$$\theta_{xy}(f) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)}\right) \quad (3)$$

为了更直观地表示两个序列的相互关系,把位相谱转换成滞后时间长度谱

$$\tau(f) = \frac{\theta_{xy}(f)T}{2\pi} = \frac{\theta_{xy}(f)}{2\pi f} \quad (4)$$

它表示一序列的某种振动提前或落后于另一序列对应振动的长短。式中 $\theta_{xy}(f)$ 为各频率分量中 y 对 x 提前或落后的月数,当 $\tau(f) > 0$ 时, y 落后于 x ; 否则, x 落后于 y , T 为周期。

具体计算方法及原理详见有关文献(陈上及等,1991;黄嘉佑等,1984)。

二、南沙暖水变化及振动周期

南沙海域水温终年较高,年平均海表温度(SST)在 28°C 以上。春末、夏秋季节,SST在南沙海域形成明显暖中心,月平均水温最高可达 29.6°C ,这一海区基本由暖水所控制,是南海海温较高的区域。我们取南沙海域($9^{\circ}\text{--}13^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\text{--}116^{\circ}\text{E}$)范围内的平均 SST 代表南沙暖水。分析表明,南沙暖水水温最低在1—2月,平均为 26.5°C ;最高值在5月,为 29.6°C ;9月份出现弱的峰值,为 28.8°C 。一年之中,南沙暖水均呈双峰型分布,其主要原因是由于太阳赤纬每年两次越过南海地理纬度,太阳辐射量出现两次高峰所致。

为了了解南沙暖水与南海海域海温变化的关系,我们用27年共324个月的南沙暖水与南海海区逐点的 SST 距平资料做点相关(图1),从图可以看出,南沙暖水与南海整个海区的海温变化相关密切,其变化基本一致。除了福建沿海及台湾海峡海域之外,相关系数

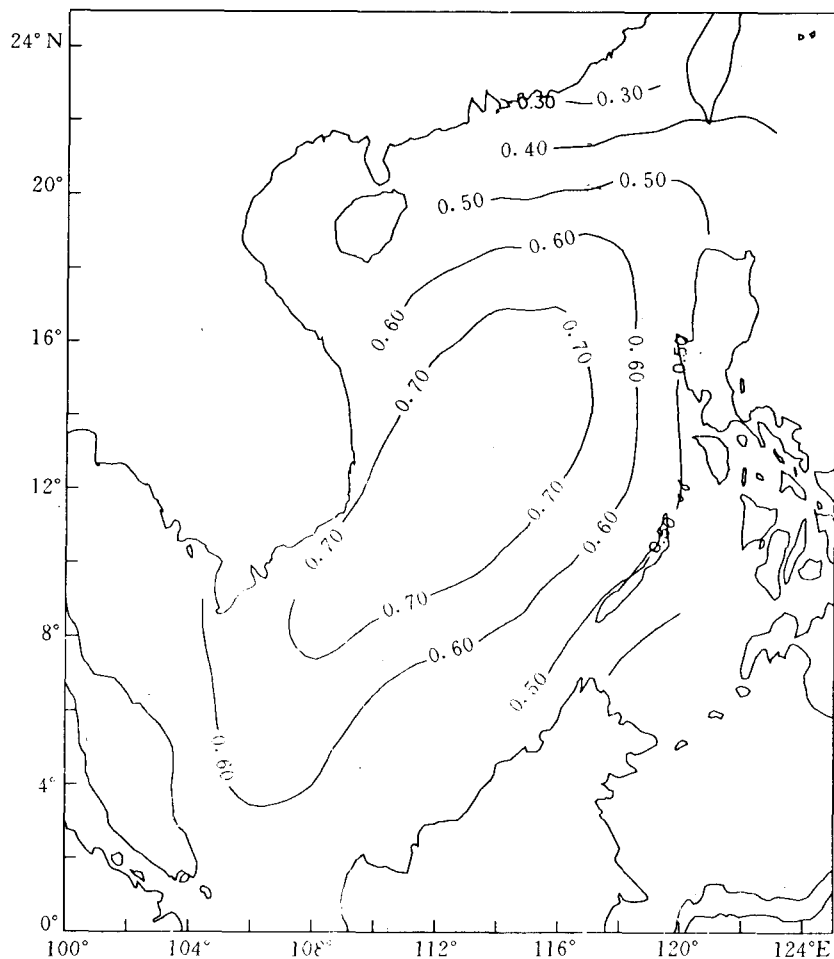


图1 南沙暖水与南海海域逐点 SST 的点相关
(图内数字为相关系数)

基本沿南海陆架边缘海域向南海中部逐渐增加,高相关中心位于 8° — 16° N 范围内南海中部的海盆区域,呈东北—西南向的带状分布,相关系数高达 0.7 以上;信度检验结果, $\alpha=0.0005$ 时, $\gamma=0.1807$,远超过 0.0005 的置信水平。上述相关分布范围与南海海温经验正交分析(EOF)的第一主要特征场的分布范围是一致的(陈永利,1996),是南海海温变化最大的区域。南沙暖水的变化表征着南海海温的变化,整个南海海域海温变化的一致性是其主要特点。图 2 是南沙暖水与南海北部西沙站(16.5° N, 112.2° E)两区水温距平的时间序列,由图可以看出,两区海温的变化除在振幅上有差异外,其变化趋势基本一致,呈现出明显的季节变化和年际变化。南沙暖水的变化幅度不大,其年平均方差为 0.5°C ,平均最大方差为 1.3°C ,平均年较差为 3°C ,温度变化最大季节在冬季。

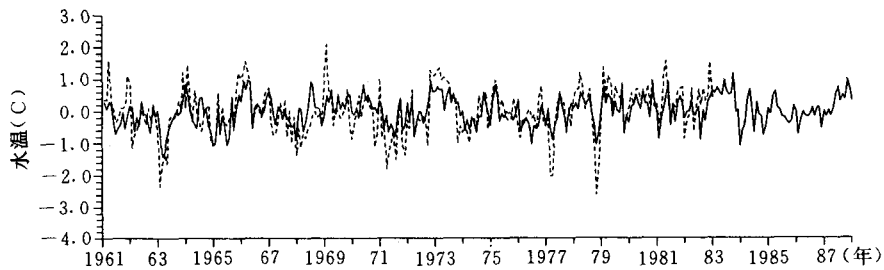


图 2 南沙 SST 与西沙 SST 距平的时间序列
实线为南沙;虚线为西沙

对南沙暖水月距平值进行谱分析表明,南沙暖水存在 2.2, 2.9, 4.5, 6.7 和 25.6 个月左右的振荡周期。经显著性检验,在这些频域内海温变化均达到 95% 的信度要求(图 3)。2 年左右的长周期变化与低纬度海洋和大气中存在的准两年周期振荡相一致,与赤道东太平洋水温和南方涛动的长周期变化相吻合。有关它们之间的耦合关系将在下面讨论。

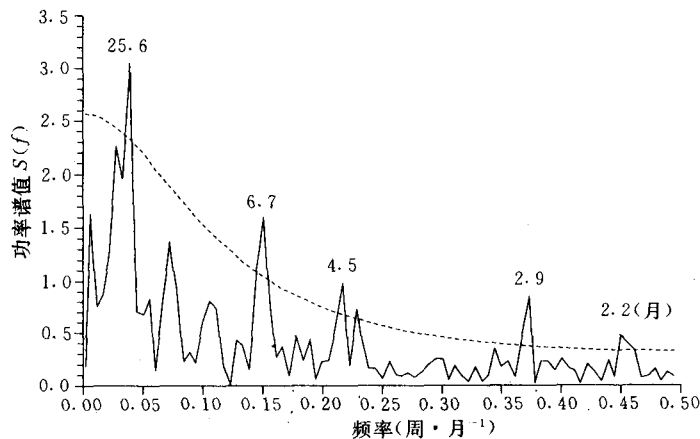


图 3 南沙 SST 距平功率谱分布

三、南沙暖水与赤道东太平洋水温、南方涛动和西太副高之间的耦合关系

取赤道中、东太平洋水温(SST*)、达尔文减塔希堤气压差(PSI)、西太副高面积指数(FAI)和南沙暖水(NSI)为指标,讨论它们之间的耦合关系。由于SST*只有1961—1983年期间的资料,故交叉谱分析资料仅限于这一时段。

1. 总体相关性

(1)同期相关:根据相关系数检验,在本文所取范围内($N=276$)达到0.001相关信度水平的相关系数为0.1974。表1为各物理量之间后延时间为零时的相关系数。

表1 各参量之间的同期相关系数

$R_{xy}(0)$	SST*	FAI	NSI
PSI	0.71	0.30	0.12
SST*		0.42	0.29
FAI			0.38

*有别于海表面水温。 $R_{xy}(0)$ 为同期(滞后时间 τ 为零时)相关系数。

上表说明,赤道东太平洋水温、南方涛动、西太副高和南沙暖水之间总体存在同期正相关,尤以赤道中、东太平洋水温与南方涛动之间关系最显著,相关系数高达0.71,反映出赤道东太平洋水温与热带大气环流之间同期总体变化的一致性。当赤道中、东太平洋水温增高时,赤道西太平洋地区气压也升高,沃克环流减弱;反之,水温降低,沃克环流加强。南沙暖水与赤道东太平洋水温和西太平洋副高之间关系密切,与西太副高尤为显著,其相关系数为0.38,远超过 $\alpha=0.0005$ 的显著相关信度。而南沙暖水与南方涛动之间同期则无显著相关存在。

(2)滞后相关:各物理量之间的最大滞后相关系数及滞后时间(月)见表2,表中 $R_{xy}(\tau)$ 为最大滞后相关系数; τ 为滞后时间。由表2可见,赤道中、东太平洋水温与南方涛动,西太副高和南沙暖水之间同期总体相关最好。赤道中、东太平洋水温和南方涛动与其落后4—5个月的西太副高和南沙暖水变化总体相关显著,与西太副高较之与南沙暖水之间关系明显。西太副高和南沙暖水比南方涛动落后5个月,比赤道中、东太平洋水温变化落后4—5个月。赤道中、东太平洋水温变化有先影响副高进而影响南沙暖水的趋势。

表2 各参量之间最大滞后相关系数及滞后时间

$R_{xy}(\tau)$	SST*	FAI	NSI
PSI	0.71(0)	0.52(5)	0.41(5)
SST*		0.62(4—5)	0.48(5)
FAI			0.38(0)

2. 耦合特征 凝聚谱和滞后时间长度谱表示两个序列在不同频域内对应振动的总相关程度,同时也反映出一序列的某种振动提前或落后于另一序列对应振动的时间长

短,凝聚值 CH 越大,关系越好。为概括其耦合特征,通过概率水平 $\alpha=0.001$ 的临界凝聚谱置信度检验(自由度 $V=13$),我们给出了各物理量之间耦合振荡出现最大凝聚的前两个主要频域的凝聚值和相应周期。

表 3 各物理量之间前两个最大凝聚值及相应周期(月)

$CH(T)$	SST*	FAI	NSI
PSI	0.96(23.2)	0.89(23.2)	0.88(23.2)
	0.92(46.5)	0.83(46.5)	0.85(46.5)
SST*		0.92(23.2)	0.87(23.2)
		0.92(46.5)	0.86(46.5)
FAI			0.83(5.1)
			0.78(23.2)

$CH(T)$ 为两物理量之间相应周期为 T 时的凝聚值。

表 3 结果表明,赤道中、东太平洋水温、南方涛动与西太副高和南沙暖水之间主要存在 23.2—46.5 个月左右的长周期低频耦合振荡关系,以 2 年左右的耦合周期最为显著,赤道中、东太平洋水温与南方涛动和西太副高之间关系尤为密切。它们同存在于太平洋低纬海洋大气的长周期耦合系统之中,与厄尔尼诺事件的发生密切相关。南沙暖水与西太副高之间除主要存在 2—3.8 年左右的低频振荡外,还存在 5 个月左右的周期振荡,它们之间存在显著的同相正相关。由位相谱表明(图略),在低频振荡中,赤道中、东太平洋水温较南方涛动变化早 0.1—0.4 个月,基本无位相差存在。西太副高落后赤道中、东太平洋水温和南方涛动变化 5—5.7 个月,南沙暖水则落后 5—7 个月。这一结果与总体相关分析的赤道中、东太平洋水温和南方涛动的同期变化及其影响其后 5 个月左右的西太副高及南沙暖水变化的结果基本一致。

图 4 为南沙暖水与赤道太平洋水温、南方涛动和西太副高之间的凝聚谱和滞后时间长度谱,图中虚线表示凝聚信度 $\alpha=0.001$ 显著相关的临界值,由图可以明显看出:

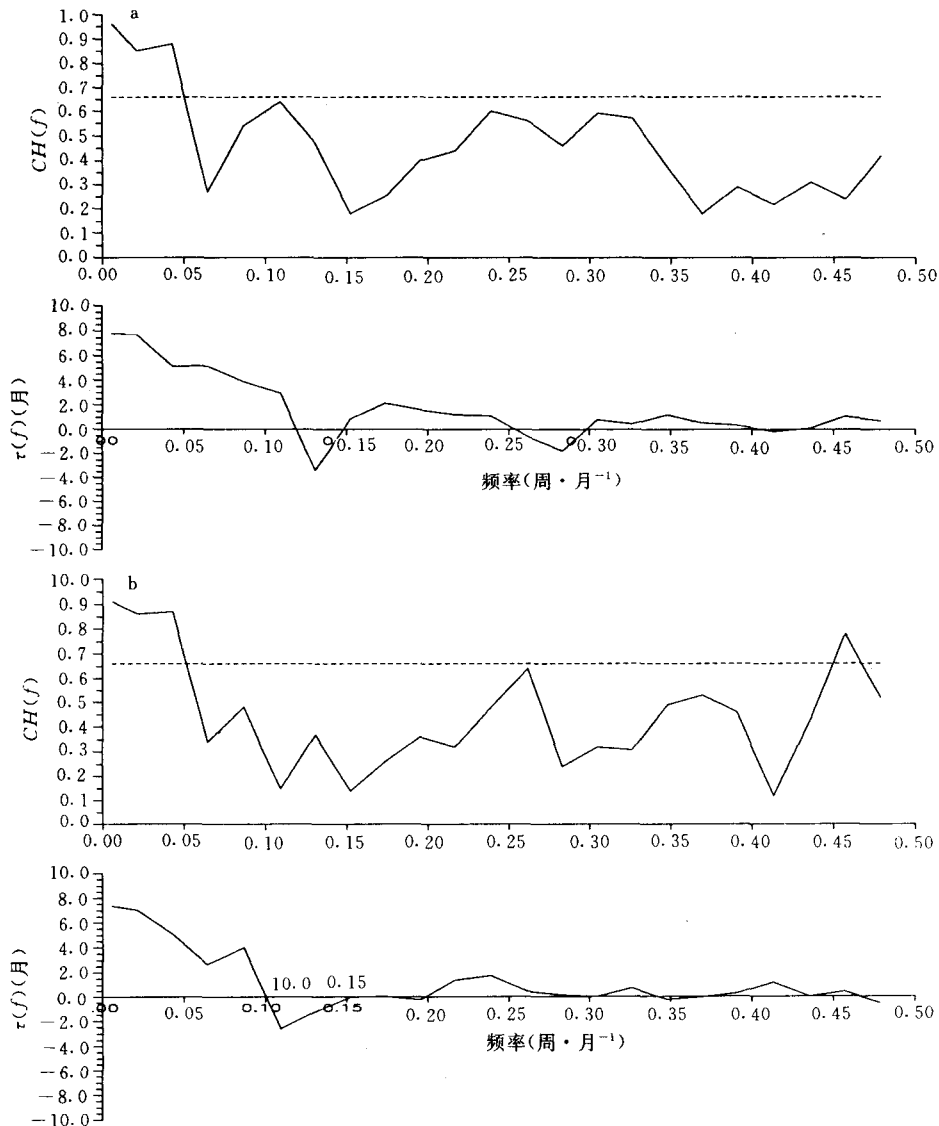
(1)南沙暖水与南方涛动之间仅存在 23.2—46.5 个月左右的低频耦合过程,南沙暖水落后南方涛动变化 5—7 个月(图 4a)。(2)南沙暖水与赤道东太平洋水温之间除了存在 2—3.8 年长周期低频振荡外,还存在 2.2 个月左右的高频同相耦合振荡。在低频振荡中,赤道中、东太平洋水温较南沙暖水早变化 5—7 个月;在 2 个月左右的高频振荡中,南沙暖水则落后变化 0.4 个月,几乎同位相变化(图 4b)。(3)南沙暖水与西太副高之间存在 2—3.8 年和 5 个月、4 个月左右的耦合振荡周期。在低频耦合频域内,西太副高变化较南沙暖水变化提前 0.2—1.0 个月;在 5 个月左右周期振荡中,副高较南沙暖水提前变化 1.6 个月,而在 4 个月频域内,南沙暖水变化则较副高超前 1.4 个月,位相差为 -123° ,即西太副高与南沙暖水存在反相负相关。这说明在 4—5 个月左右的耦合振荡中,存在着西太副高强(弱)影响南沙暖水的水温高(低),而南沙暖水水温的高(低)又反过来影响西太副高弱(强)的相互作用过程(图 4c)。

综上所述可以说明,赤道中、东太平洋水温和南方涛动在西太副高和南沙暖水的低频振荡中起着主导作用,它的长周期变化制约着西太副高和南沙暖水的长周期变化。通过海气耦合过程先影响副高,进而影响南沙暖水。在短周期振荡中,赤道中、东太平洋水温 2 个月左右的耦合振荡和西太副高与南沙暖水 4—5 个月左右的相互耦合作用过程对南沙暖

水的短周期变化有着重要影响。

四、ENSO 及西太副高对南沙暖水低频影响的可能过程

图 5 是经 5 个月滑动的 SST*, PSI, PAI, NSI 的时间序列。由图 5a 可见, SST* 与 PSI 之间关系甚为密切, 两者同期变化趋势基本一致, NSI 则落后于这两者, 5—6 个月时可表现出与 SST* 相同的变化趋势。西太副高的增强期和减弱期, 也分别和南沙暖水的暖水期或冷水期相吻合(图 5b), 尤其在短周期振荡中, 两者变化更为密切。SST* 和 PSI 正指数年, 如 1963, 1965, 1969, 1972—1973, 1976—1977, 1979—1980, 1982—1983, 1986—1987 年后西太副高增强, 南沙暖水均出现增温; 而负指数年, 如 1964, 1967—1968, 1970, 1973, 1975 年后西太副高减弱, 南沙暖水均出现降温, 南沙暖水落后两者变化 5—7 个月。



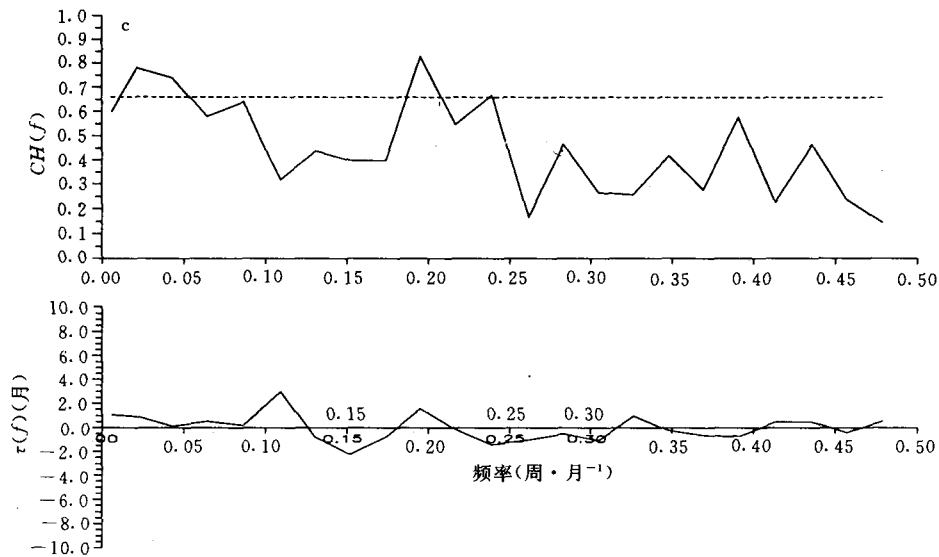


图4 赤道中、东太平洋水温,赤道西、东太平洋海面气压距平差和西太副高强度

与南沙暖水之间的凝聚谱和滞后时间长度谱

(图中 $CH(f)$ 为凝聚谱值; $\tau(f)$ 为滞后时间长度谱值)

a. PSI—NSI; b. SST*—NSI; c. FAI—NSI

从图5还可以看出, SST*, PSI 大的正、负指数年, 恰是厄尔尼诺和反厄尔尼诺发生年, 两者的异常构成所谓的 ENSO 现象, 影响着西太副高和南沙暖水的长周期变化。当赤道东太平洋水温高时, 达尔文与塔希堤海平面气压差 $PSI > 0$, 赤道西太平洋气压升高, 为下沉气流区, 云量少, Walker 环流弱, Hadley 环流强, 西太副高加强, 南沙暖水增暖; 反之, 赤道东太平洋水温低时, $PSI < 0$, 则西太平洋气压降低, 对流活动强, 云量增多, Walker 环流加强, Hadley 环流减弱, 西太副高弱, 南沙水温低。

关于 ENSO 的研究较多 (Bjerknes, 1969; 向元珍等, 1993), Webster (1983) 给出了 ENSO 状态下热带海洋与赤道纬圈大气环流变化的物理图象, 揭示了 ENSO 与 Walker 环流的关系, 符淙斌等 (1979) 及潘怡航 (1981) 研究了赤道东太平洋水温异常对纬向与经向环流和东亚上空西风带的影响, 向元珍等 (1993) 的研究认为, 厄尔尼诺首先通过 Walker 环流在低纬度作纬向传播, 然后通过 Hadley 环流和二维 Rossby 波列作经向频散传播, 影响西北太平洋和北大西洋副热带高压及中高纬的大气活动中心。

那么西太副高的强、弱又是怎样影响南沙暖水的变化呢? 作者分析认为, 冬季是西太副高最弱的季节, 图6给出了南沙暖、冷水年冬季(暖水年取 1966, 1969, 1973, 1979, 1980, 1983, 1987 年; 冷水年取 1963, 1965, 1971, 1974, 1976, 1984, 1986 年前一年 12 月至当年 3 月的平均)的 500hpa 高度场分布图, 由图可以明显看出, 暖、冷水年西太副高的强度变化明显不同。暖水年, 西太副高强, 588 线覆盖了 16°N 左右以南、 160°E 以西的广大副热带地区, 南沙海域在副高控制之下; 而冷水年, 西太副高弱, 在西太平洋地区无副高体

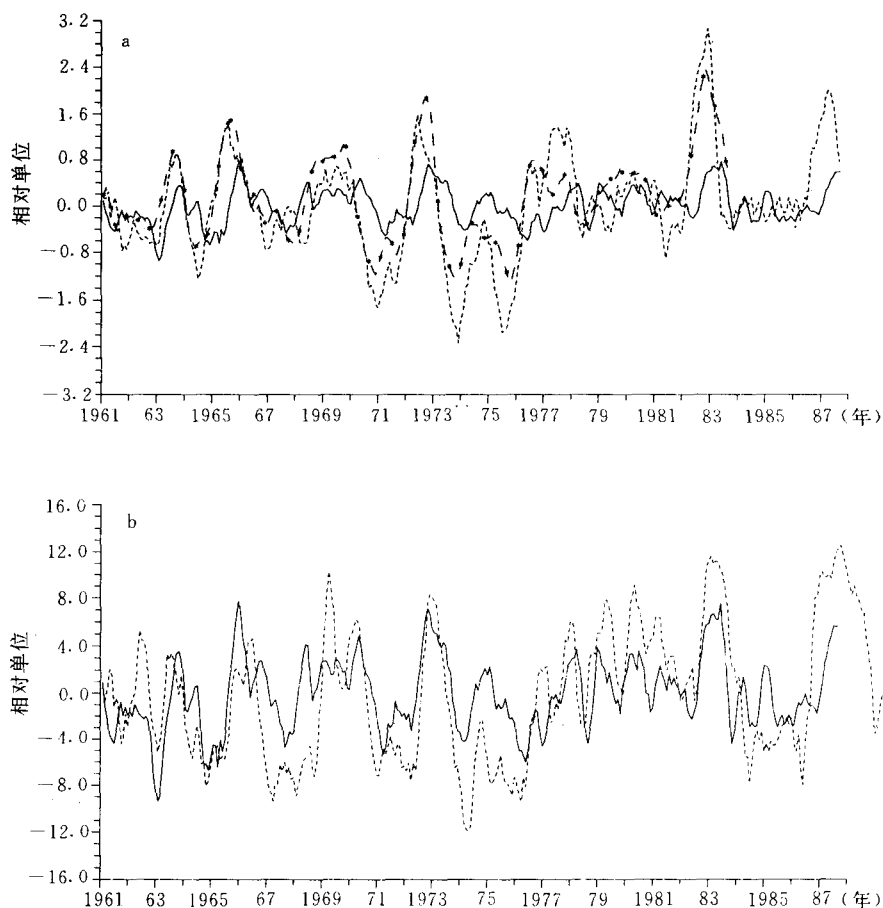


图 5 SST*, PSI, FAI 和 NSI 距平值变化的时间序列

a. - · - · SST* ($\times 10^{\circ}\text{C}$), - - - PSI (hpa), - - - NSI ($\times 10^{\circ}\text{C}$);
 b. - · - · FAI (hpa), - - - NSI ($\times 10^{\circ}\text{C}$)

存在, 584 线明显偏南。在副高控制之下, 南沙海域为下沉气流区, 云量少, 气温高, 太阳辐射强烈, 海面吸热多, 埃克曼质量输送使表层海水向中心辐合, 从而使海水辐聚增强, 海温升高; 反之, 本海区气压低, 热带辐合带 (ITCZ) 活动频繁, 对流活动增强, 冷空气南下影响本海区, 云量增加, 太阳辐射减小, 海温降低。图 7 是西沙 (16.5°N , 112.2°E) 月平均总云量与海表温度距平的年变化曲线 (经 5 个月滑动), 从图可以看出, 海温与云量之间基本为反相变化, 正的海温距平和负的云量距平相对应, 尤其是厄尔尼诺发生的 1963—1964, 1966, 1969, 1972—1973, 1979, 1983 年均反映出较好的变化关系, 云量的变化直接影响着海温的变化。厄尔尼诺年, 赤道中、东太平洋水温高, Walker 环流减弱, 西太副高加强, 南沙海域在副高控制之下, 云量少, 海面吸收太阳辐射多, 海温增加, 反之亦然。这可能就是 ENSO \rightarrow 西太副高 \rightarrow 南沙暖水之间影响的整个过程和南沙海域海温变化的基本原因。

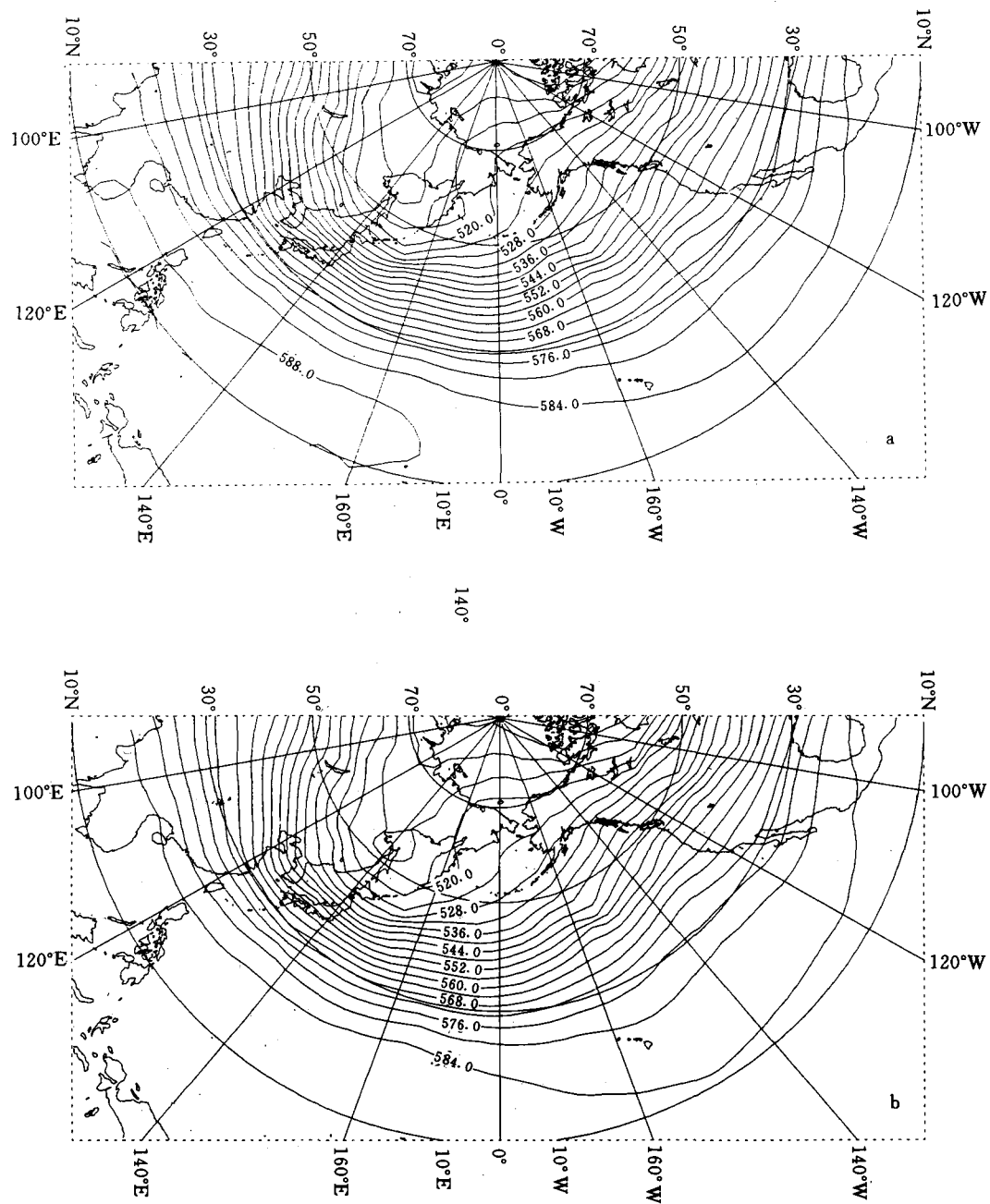


图6 南沙暖、冷水年冬季平均500hpa高度变化的分布
a. 暖水年; b. 冷水年

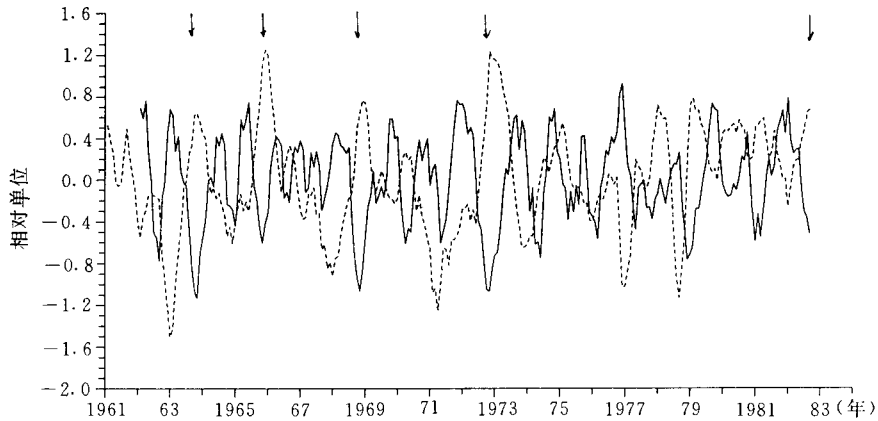


图7 西沙(16.5°N,112.2°E)月平均总云量与 SST 距平值的年际变化

---总云量;—SST(°C)

(图中箭头位置为 El Nino 发生年)

参 考 文 献

- 向元珍、包青澜,1993, 埃尔尼诺事件与北半球大气环流遥相关, *海洋学报*, **15**(3):29—36。
- 陈永利等,1996, 南海海表温度分布特征及其与西太副高和 ENSO 的关系, 南沙群岛及其邻近海区海洋-大气物理分析及应用论文集, 科学出版社(印刷中)。
- 陈上及、马继瑞,1991, 海洋数据处理分析方法及其应用, 海洋出版社, 481—580。
- 周发琇、于慎余,1991, 南海表层水温的低频振荡, *海洋学报*, **13**(3):323—328。
- 钮智旺,1994, 南海表层水温的长周期振荡及其与埃尔尼诺的关系, *海洋学报*, **16**(2):43—49。
- 黄嘉佑、李黄,1984, 气象中的谱分析, 气象出版社, 68—128。
- 符淙斌等,1979, 赤道海温异常与大气的垂直环流圈, *大气科学*, **3**(1):50—57。
- 潘怡航,1981, 赤道东太平洋海温异常对东亚上空西风带强度影响的诊断分析, *气象学报*, **39**(1):98—109。
- Bjerknes, I., 1969, Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific, *Mon. Wea. Rev.*, **97**(3):163—172。
- Webster, P. J., 1983, Seasonality in the Local and remote response to sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **39**:41—52。
- Wright P. B., 1984, Relationship between indices of the South Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, **112**:1913—1919。

**ON THE COUPLING OSCILLATION BETWEEN
THE NANSHA WARM WATER, THE WESTERN PACIFIC
SUBTROPICAL HIGH AND ENSO***

Chen Yongli**, Zhang Qingrong*** and Zhao Yongping**

*(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)***

*(Institute of Nanhai Oceanology, Chinese Academy of Sciences)****

ABSTRACT

Cross-spectrum revealed the coupling relationships between the Nansha sea surface temperature (SST), the Central and Eastern Equatorial Pacific SST, Southern Oscillation (the difference between the standardized sea level pressure at Darwin and Tahiti) and the Western Pacific Subtropical High. The results showed that there are apparent coupling periods of 2, 5 and 23.3–46.5 months among them, and the inphase low-frequency coupling oscillation of 2–3.8 years period is predominant and associated with the ENSO events. The physical processes affecting the Nansha SST are discussed. During the ENSO events, the Central and Eastern Equatorial Pacific SST increase, then the Western Subtropical High develops and extends westward. The cloudiness over the Nansha area decreases, the Nansha SST increases, and vice versa. The variations of cloudiness over the Nanhai (weak ocean current area) play an important role in influencing the Nansha SST under the control of the Western Subtropical High.

* Contribution No. 2895 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.