

南沙与暖池海域 SST 的长期振荡 及其耦合过程*

谢 强 鄢利农[†] 侯一筠 胡基福^{††}

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

[†](国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266003)

^{††}(青岛海洋大学气象系 青岛 266003)

提要 利用多项式函数分析了南沙和暖池海温的长期变化,发现两海域的海面温度(SST)1934—1989年56年来有明显地增温趋势,并且存在着SST变化的周期和突变现象。根据交叉谱分析特征,两海区SST之间存在不同频率的耦合振荡,可分为两种主要类型:周期约为16.6年的同相低频耦合振荡和周期约为2年的反位相耦合振荡。

关键词 海面温度 低频振荡 耦合过程 南沙与暖池

学科分类号 P731

南沙群岛地处南海我国的最南端,位于菲律宾、马来西亚等陆地的环抱之中,仅与热带西太平洋的边缘接壤,是一个半封闭的深水海域。因此,它具有独特的海洋和气象条件。西太平洋暖池区是 Walker 环流上升区,是全球大洋表面水温(SST)最高的区域,是全球大气最重要的热源,它不仅与 El Niño 发生发展有密切关系,而且对中高纬度大气环流变化有重要影响。但是近些年来,人们多研究赤道东太平洋 SST 的振荡特征或 El Niño 事件的发生规律,而很少研究南沙 SST 的变化规律。周发琇(1991)利用近 25 年的资料主要分析南海 SST 的年际变化特征,研究南海 SST 的低频振荡。本文试图研究南沙 SST 的年代际变化特征及其与西太平洋暖池的关系,为探讨南海 SST 与中国气候间的关系及气候预测的研究提供依据。

1 资料与方法

SST 资料取自中国气象科学研究院气候研究所整理的全球月平均 SST 资料($5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 经纬网格)¹⁾。南沙海域所取资料范围为 $7.5^{\circ} - 12.5^{\circ} \text{N}$, $112.5^{\circ} - 117.5^{\circ} \text{E}$ 共 4 个网格点,西太平洋暖池的范围为 $7.5^{\circ} \text{N} - 7.5^{\circ} \text{S}$, $137.5^{\circ} - 177.5^{\circ} \text{E}$ (吴增茂等,1993)共 36 个网格点。根据两海域 SST 资料的情况,选定较完整的 1934—1989 年逐月 SST 作为统计分析的基本资料,利用海区所取网格点的平均值来表示本海区的平均温度状况。

首先根据逐年平均 SST 序列 $y_1(t)$,采用逐步筛选法建立趋势函数 $f(t)$,分析南沙和西

* 中国科学院重点资助项目, KZ952-S1-429 号。谢 强,男,出生于 1971 年 3 月,博士生, E-mail: yjhou@ms.qdio.ac.cn

1) 中国气象科学研究院气候研究所资料室, 1995

收稿日期: 1997-07-09, 收修改稿日期: 1998-06-01

太平洋暖池 SST 的长期趋势变化(章基嘉等, 1983)、SST 的变化阶段和 SST 的突变现象。然后对除去年变化的逐月海温距平序列, 采用一、二维谱分析法(黄嘉佑, 1984)分析各海域的主要周期振动和两海域 SST 的耦合过程(符淙斌等, 1981)。

2 南沙 SST 的长期振荡特征

2.1 长期变化趋势

将南沙海域年平均 SST 序列的长期趋势看成由时间 t 变量构成的一些简单函数的线性组合, 即

$$f(t) = C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 + C_4t^4 + C_5t^{1/2} + C_6t^{-1} + C_7t^{-1/2} + C_8t^{-2} + C_9e^{-1} + C_{10}\ln t \quad (1)$$

式中, t 变量以年为单位 ($\Delta t = 1$), 时间坐标从 1934 年作为 $t = 1$ 开始; $C_0 - C_{10}$ 为各因子的系数。然后, 进行逐步回归筛选, 在 $F_\alpha = 4$ 的标准下, 建立的最佳趋势函数为

$$f_1(t) = 28.061\ 709 - 1.571\ 058t^{-1/2} \quad (2)$$

由 (2) 式可见, 南沙 SST 的长期趋势函数为一抛物线形式(如图 1a), 从 1934—1944 年左右, SST 急剧上升, 1944 年以后变为缓慢上升。线性趋势函数为:

$$f_2(t) = 27.377\ 1 + 0.010\ 6875t \quad (3)$$

式 (3) 表明, 56 年来南沙 SST 的总趋势变暖, 增温约 0.6°C 。政府间气候变化委员会 (IPCC, 1990) 第一工作报告曾指出: 全球自有观测记录以来近 100 年的增温约为 $0.3 - 0.6^\circ\text{C}$ 。章基嘉等 (1994) 在分析北半球大气环流和中国气候的变化中也指出, 北京与上海两地近 100 年以来年平均温度增温分别为 0.6°C 和 0.9°C , 可见南沙海域近 56 年来 SST 变暖的趋势与全国、全球变暖趋势是一致的。

2.2 海温变化的阶段性

SST 的自身存在着低频振动特征, 为了分析它的偏冷与偏暖变化阶段, 将去掉趋势后的年平均 SST 序列 $y'(t) = y(t) - f(t)$, ($t = 1, 2, \dots, 56$), 采用高阶多项式来研究 SST 变化的阶段性。经过多次模拟实验, 最后确定 8 阶多项式能最好地反映南沙 SST 的阶段性。由图 1b 可见, 南沙 SST 明显地存在 10 年以上尺度的阶段性变化, 呈现一种较规则的低频振荡。在 40 年代中期, 50 年代末至 60 年代初期和 80 年代初期为海温变暖期; 在 30

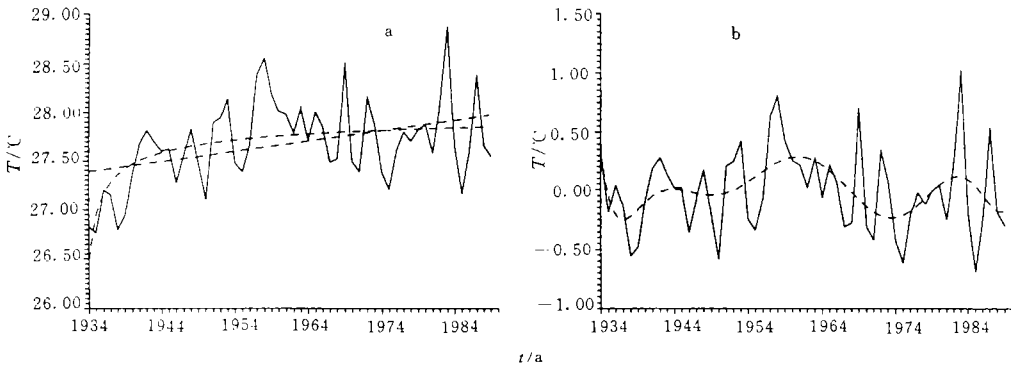


图1 南沙海域SST的长期趋势(a)和变化周期(b)

Fig.1 Long-period trend (a) and transition period (b) of Nansha SST
 ---- 拟合线; —— 实况 (图2—4图例相同)

年代中期、40年代末期和70年代初期为海温变冷期。从冷到暖或从暖到冷的转换期约在10年左右,称为年代际变化(李崇银,1991)。由图1b可推测,80年代末至90年代初南沙SST是处于变暖阶段。

2.3 海温的突变

气候系统的演变过程,往往存在气候突变(符淙斌,1991a),它是气候系统中非线性作用的结果。近几年来关于气候突变现象是国内外气象学家的重要研究课题(Yamamoto *et al*,1986;符淙斌,1991b)。可以设想作为气候重要要素的SST也存在突变现象,并且与大气突变相互关联。

为发现SST突变年份,仿气候分析方法,可采用累积距平这个指标,即

$$C(t) = \sum_{i=1}^t (y_i - \bar{y}) \quad (4)$$

式中, \bar{y} 为SST序列的均值。若该指标绝对值达到最大值,则所对应的年份为SST突变年。图2a是南沙SST的累积距平曲线,可见,南沙SST在1950年前后和1956年前后,累积距平绝对值都达到最大,结合相应的SST距平变化曲线(如图2b实线),也反映了SST在这两年前后的不连续性,因此,1950年与1956年可能是SST的突变年份。

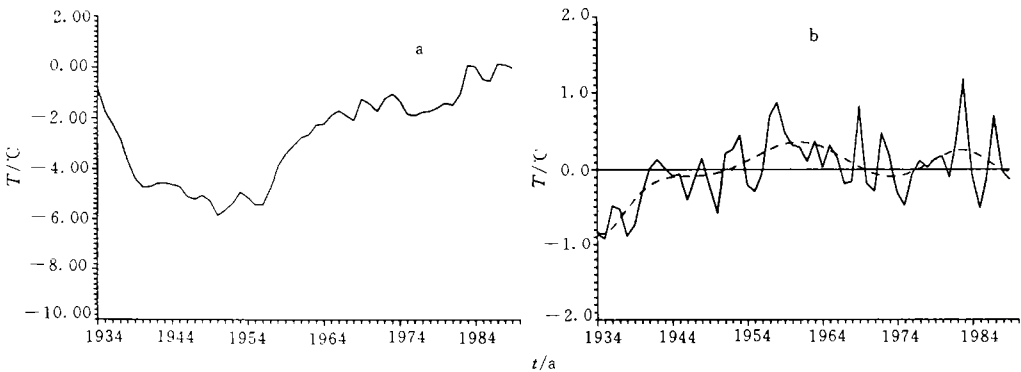


图2 南沙SST累积距平曲线(a)和距平逐年变化曲线(b)

Fig.2 The accumulative anomaly curve (a) and annually changing anomaly curve (b) of Nansha SST

为了客观地确定突变年份,Yamamoto等(1986)曾提出信噪比检验法,信噪比的定义为

$$\frac{S}{N} = \frac{|\bar{y}_a - \bar{y}_b|}{S_a + S_b} \quad (5)$$

式中, \bar{y}_a 与 \bar{y}_b 及 S_a 与 S_b 分别为突变年份 t 前后相邻两阶段 R_a 与 R_b 内的平均值和标准差,并规定当 $S/N > 1$ 时,可认为该年是气候突变年。

根据(5)式计算了1950和1956年两次转折相邻两阶段的信噪比。分别为0.93和1.12。因此可认为1956年为南沙SST从变冷到变暖的一次突变。因为1950年的信噪比接近于1,并结合距平拟合曲线(图2b),可认为该年是SST变化的一次转折。Yamamoto等(1986)曾利用信噪比方法研究日本的气温气压与降水等资料(1900—1980),发现在1950年有一次气候突变。章基嘉等(1994)同样发现全国气温在这一年存在一次强气候突变。因此,说明

南沙 SST1950—1956 年期间的转折可能与大气环流的突变有一定的关系。

3 西太平洋暖池 SST 长期振荡特征

3.1 长期趋势

与南海 SST 分析方法相同, 得到暖池的长期趋势函数为

$$f(t) = 27.860\ 070 + 0.020\ 040t \tag{6}$$

可知 $f(t)$ 是一线性函数 (如图 3a 虚线所示) 斜率为 $b = 0.02^\circ\text{C}/\text{a}$, 据 (6) 式可算出, 56 年来暖池 SST 增温约 1.1°C , 可见暖池比南沙增温幅度大, 也说明暖池近 56 年来的增温与全球近百年气温变暖现象是一致的。

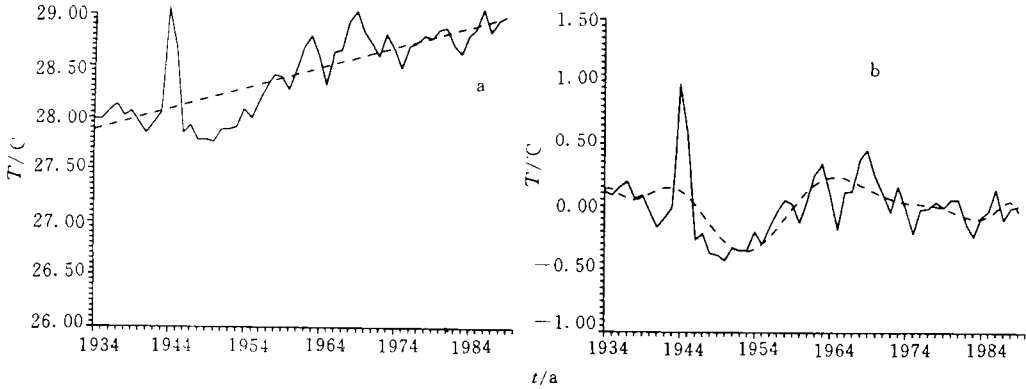


图3 暖池海域SST的长期趋势(a)和变化阶段(b)

Fig.3 Long-period trend (a) and transition period (b) of Warmpool SST

3.2 海温变化的阶段性

为了揭示暖池 SST 变化的阶段性, 同样也采用了 8 阶多项式对去掉趋势后的序列进行拟合, 图 3b 虚线为 8 阶多项式拟合线。由图 3b 可见, 近 56 年来暖池海温的内在演变过程也存在明显的阶段性, 即在 40 年代中期和 60 年代中期为两个偏暖期; 50 年代中期和 70 年代中、末期为偏冷期, 由冷(暖)转暖(冷)转换期约 10 年左右, 周期约 20 年左右。尽管暖

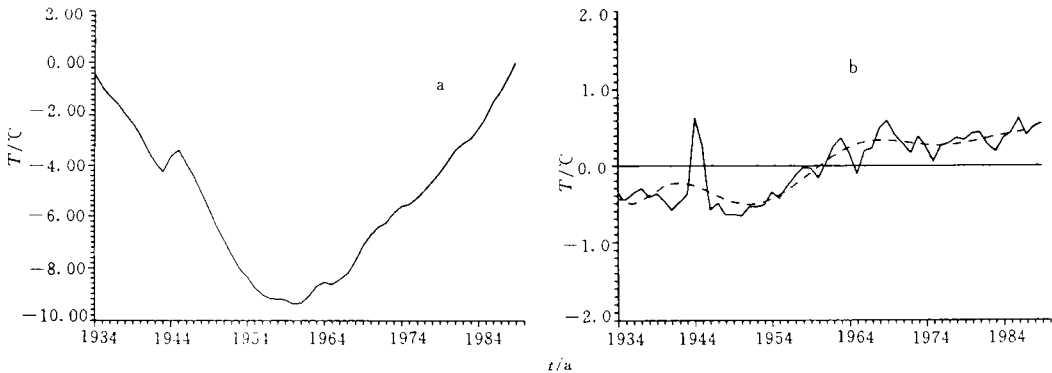


图4 暖池海域SST累积距平曲线(a)和距平逐年变化曲线(b)

Fig.4 The accumulative anomaly curve (a) and annually changing anomaly curve (b) of Warmpool SST

池 SST 阶段与南沙 SST 阶段不对应,但 10 年以上尺度的特征振动基本一致。

3.3 海温的突变

由图 4a 可见在 1960 年左右,累积距平值达到最大,相应的 SST 距平曲线(图 4b)也反映了该年存在 SST 的不连续性,即这以前是偏冷,之后是偏暖,说明在 1960 年是一次 SST

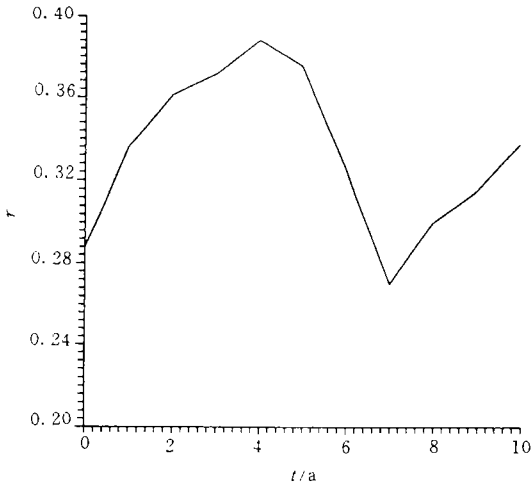


图5 南沙SST与暖池不同滞后(年)的相关系数

Fig.5 Correlation coefficient of Nansha SST and Warmpool SST in different lag

转折,根据(5)式,对该年前后和1961年前后两个相邻阶段计算了信噪比,分别为1.48和1.49,且均大于1。说明在1961年前后是西太平洋暖池SST的一次突变。但比南沙落后4年。

3.4 南沙与暖池的总体关系

据上述分析,南沙和暖池SST近56年来与全球气温一样均呈变暖趋势,而且都存在由暖变冷或由冷变暖的变化阶段,这种阶段性的变化尺度为10年以上的振动,此外在50年代中都有一次SST突变,这说明南沙与暖池两海区SST有较好的相关性。为了说明二者之间的相关关系,又计算了南沙与暖池之间不同滞后的相关系数(图5)。由图5可见,二区间同时相关系数 $r(0) = 0.29$,通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性标准,最大滞后相关系数 $r(4) = 0.39$,这说明暖池SST与南沙SST年际变化之间的关系,它们的最大相关不是同时,而是暖池比南沙落后4年相关最好,因此在50年代中一次SST突变,二海区发生的时间正好差4年,即南沙在1956年,而暖池却出现在1960年。而且可认为与大气环流的突变有关。

4 南沙与暖池SST的主要周期

根据1934—1989年月平均SST距平序列,分别对南沙与暖池两海区的SST进行谱分析,谱估计公式为

$$S_l = \frac{B_l}{m} \left[r(0) + \sum_{\tau=1}^{m-1} r(\tau) \left(1 + \cos \frac{\pi\tau}{m} \cos \left(\frac{\pi\tau l}{m} \right) \right) \right] \quad (l = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$B_l = \begin{cases} 1 & (l = 0, m) \\ 1/2 & (l = 1, m-1) \end{cases}$$

式中, $r(\tau)$ 为相关函数, $\tau = 0, 1, 2, \dots, m$, m 为相关函数的最大后延长度,这里取 $m = 100$ (月)。 S_0 为第0个谱波估计值,相当于无限波长的周期(趋势), S_m 为最后一个波谱估计值,相当于波谱中所有能分解的最短波长(周期), $S_l (l = 1, 2, \dots, m-1)$ 为除0和 m 以外的中间谐波的谱估计计算。

计算结果由图6表示,主要周期列于表1,可知,南沙SST存在200月(约16.6年)较显著的长周期振动,以50个月(约4年)的周期最显著,其次还有14、10.5和3—2个月的短周

期振荡,而暖池仅存在 200 个月特别显著的长周期,其次是 3—2 个月的短周期,但没有明显的中频周期。可见,200 个月的长周期与 3—2 个月的短周期是二海区的共有的振荡特征,200 个月(16.6 年)的长周期与大气环流 E 型(径向型)环流振荡中的 16.6 年周期完全吻合(章基嘉,1994)。

表1 南沙与暖池 SST 主要周期

周期	$\alpha=0.05$ 的显著周期(月)
南沙	200, 50, 14, 10, 5, 3—2
暖池	200, 3—2

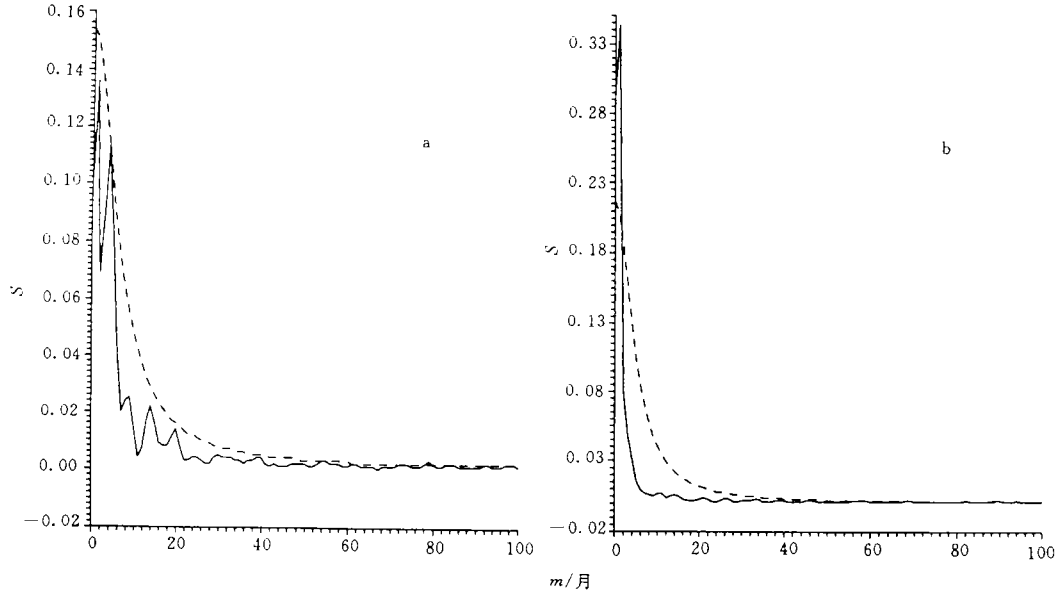


图6 南沙(a)与暖池(b) SST 的功率谱图

Fig.6 Power spectra of Nansha SST (a) and warmpool SST (b)

---- 0.05 的显著标准线; —— 功率谱曲线

5 南沙与暖池 SST 的耦合振荡过程

南沙与暖池年平均 SST 的总体相关系数 $r = 0.288$ ($n = 56, r_{0.05} = 0.250$), 通过 $\alpha = 0.05$ 的显著水平。南沙与暖池月平均 SST 的总体相关系数 $r = 0.204$ ($n = 12 \times 56 = 672, r_{0.01} = 0.628$), 通过 $\alpha = 0.01$ 的显著水平, 可见, 南沙与暖池海温无论是年平均还是月平均, 二海区的总体相关都是非常显著的。为了分析二海区不同频域内的相关程度, 下面对二海区的月距平序列又进行了交叉谱分析。

交叉谱的计算公式:

$$R_{12}^2(l) = \frac{P_{12}^2(l) + Q_{12}^2(l)}{P_{11}(l) P_{22}(l)} \quad (8)$$

式中, P_{12} 为协谱, Q_{12} 为正交谱。协谱与正交谱的估计分别为:

$$P_{12}(l) = \frac{B_l}{m} \left[r_{12}(0) + \frac{1}{2} \sum_{\tau=1}^{m-1} [r_{12}(\tau) + r_{21}(\tau)] \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right) \cos \left(\frac{\pi \tau l}{m} \right) \right]$$

$$Q_{12}(l) = \frac{B_l}{m} \left[\frac{1}{2} \sum_{\tau=1}^{m-1} \left(1 + \cos \frac{\pi \tau}{m} \right) \cos \left(\frac{\pi \tau l}{m} \right) [r_{12}(\tau) - r_{21}(\tau)] \right] \quad (9)$$

$$B_l = \begin{cases} 1 & (l \neq 0, m) \\ 1/2 & (l = 0, m) \end{cases} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, m)$$

位相谱估计为:

$$\theta(l) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{Q_{12}(l)}{P_{12}(l)} \right)$$

$$L(l) = \frac{m}{\pi} \frac{\theta(l)}{l} \Delta t \quad (l = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

为了分析南海与暖池之间的耦合过程,主要是对通过显著性检验的最大同调谱进行分析,对同调谱的检验是采用下面统计量

$$F = \frac{(v-1)R^2}{1-R^2} \quad (11)$$

式中, $v = \left(2n - \frac{m}{2} \right) / m$, F 服从分子自由度为 2, 分母自由度为 $2(v-1)$ 的 F -分布, 若 $F > F_\alpha$, 则该同调值显著。为检验方便。在 v 固定下, 对信度 $\alpha = 0.05$ 时, 可算得同调谱的临界值 R_c , 即

$$R_c = \sqrt{1 - \alpha^{\frac{1}{v-1}}} \quad (12)$$

若 $R^2 > R_c^2$, 则该同调谱值显著, 本文 $v = (2 \times 672 - 50) / 100 = 12.94$, 算得同调谱的临界值 $R_c^2 = 0.22$, 现将通过检验 ($\alpha = 0.05$) 的最大同调值及其相应的周期、协谱和位相差列于表 2, 其中协谱表明是二海区 SST 是同位相还是反位相振动, 位相谱给出各频域内振荡的位相差 (或落后月数)。

表2 交叉谱分析

Tab.2 Cross-spectrum analysis

同调谱	0.288	0.225	0.250	0.421	0.298	0.220	0.293	0.337
周期(月)	200	20	18	4.76	4.65	3.51	2.02	2.00
协谱	0.099	0.000	0.001	-0.001	-0.001	0.000	0.001	0.000
位相差(月)	17.52	4.80	3.40	0.094	0.246	0.85	-0.14	0.00

由表 2 可知, 南沙与暖池之间存在高、中、低频的耦合振荡, 二海域的最大同调值是出现在周期为 4.76 个月处, 此时协谱为 -0.001, 相应的位相差为 0.094, 就是说, 二海区存在着周期约为 5 个月的反位相的耦合振荡, 但位相差很小。同样分析, 有周期约 200 个月 (16.6 年) 的同相耦合振荡, 且南沙比暖池落后 17.5 月, 二海区 16.6 年的耦合振荡与大气环流正型环流型的振荡周期十分一致, 其次还存在着周期 20—18 个月同相耦合振荡, 且南沙比暖池落后 3—5 个月, 这种中频振荡, 反映了热带海洋与大气的准两年周期的振荡, 另外还存在着周期约 3—2 月的同相耦合振荡, 且没有明显的时间滞后。

6 结论

通过对两海区 SST 的长期振荡的分析, 得出如下结论。

6.1 近 56 年来南沙与暖池 SST 变化与近百年来全球气温的变暖趋势是一致的, 并且显著地存在着 10 年以上时间尺度的年代际变化, 这种阶段性变化二海区并非完全一致, 有一定的位相差。

6.2 两海域在 50 年代各有一次 SST 突变, 南沙 SST 突变约在 1956 年, 这与我国东部沿海地区(上海)的气温突变年代基本一致, 说明 SST 突变与大气环流的突变有关。而暖池 SST 突变约在 1960 年, 比南沙落后 4 年, 另一方面, 南沙与暖池在滞后 4 年时的相关达到最大, 二者是相一致的。这一事实, 在今后的分析中, 值得我们重视。

6.3 由功率谱分析可知, 两海域都存在着 200 个月(约 16.6 年)的长周期振荡, 这可能与大气环流的周期振动有关。

6.4 由交叉谱分析可知, 两海域存在着周期约 200 个月(16.6 年)的同位相耦合振荡, 且暖池落后南沙 17.6 个月, 还存在准两年同相耦合振荡且南沙落后暖池 4 个月左右。

参 考 文 献

李崇银, 1991. 大气低频振荡. 北京: 气象出版社, 1—238

吴增茂, 盛立芳, 张庆荣等, 1993. 西太平洋暖池低层大气气象学特征的观测分析. 青岛海洋大学学报, 专辑: 12—16

周发琇, 于慎余, 傅 刚等, 1991. 南海表层水温的低频振荡. 海洋学报, 13(3): 333—338

符淙斌, 苏炳凯, 1981. 北太平洋主要海流区海面温度的长期振荡. 见: 海洋与湖沼论文集. 北京: 科学出版社, 29—40

符淙斌, 王 强, 1991a. 气候突变的意义、种类和检验方法. 大气科学, 16(4): 482—493

符淙斌, 王 强, 1991b. 南亚夏季风长期变化中的实变现象及其全球迅速增暖的同步性. 中国科学(B), 6: 662—672

章基嘉, 葛 玲, 1983. 中长期天气预报基础. 北京: 气象出版社, 360

章基嘉, 高学杰, 1994. 1891—1990 年期间北半球大气环流和中国气候的变化. 应用气象学报 5(2): 1—10

黄嘉佑, 1984. 气象中的谱分析. 北京: 气象出版社, 1—96

黄嘉佑, 1993. 统计动力分析与预报. 北京: 气象出版社, 143—150

IPCC(WMO / UNEP), 1990. Climate Change. In: Houghton J T *et al* ed. The Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, reported by IPCC, XII 1—156

Yamamoto R, Iwashima T, Sanga N K, 1986. An analysis of climate jump. Journal of the Meteorological Society of Japan, 64(2): 273—280

LONG-PERIOD VARIATIONS AND COUPLING OSCILLATIONS OF SST OVER THE NANSHA AND WARMPOOL

XIE Qiang, YAN Li-nong[†], HOU Yi-jun, HU Ji-fu^{††}

(*Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

[†](*First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266003*)

^{††}(*Department of Meteorology, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003*)

Abstract In order to improve relationship between Nansha SST and the climate of China, the Long-period Variations of surface temperature of the Nansha region and Warmpool are studied by using the polynomial function and spectrum analysis based on the monthly mean SST data during 1934—1989. The results obtained are listed below.

1) The SST changes of Nansha and Warmpool over the past 56 years are in concordance with the warming trend of the global temperature, and have obvious changes on decadal time scales. Such changes are not completely the same for the two sea areas; some lag exists.

2) Rapid SST changes happened in both sea areas. The changes over Nansha were in about 1956, which fundamentally coincided with the period of the rapid air temperature changes in eastern China; the rapid SST changes had some links with the atmosphere circulation. The change over the Warmpool took place in about 1960 (i. e. about 4 years' lag), because the correlation between Nansha and Warmpool reached a maximum in 4-year lag. This is worth studying in the future.

3) According to their cross-spectrum characters, there are coupling oscillation in different frequencies; these oscillations may be divided into two main patterns: (1) in phase, low-frequency (period about 16.6 years) coupling oscillation and (2) out of phase, mid-frequency (period about 2 years) coupling oscillations.

Key words Sea surface temperature Low-frequency oscillation Coupling process Nansha and warmpool

Subject classification number P731