

西太平洋暖池热含量时频特征的区域性*

张启龙 翁学传

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

摘要 根据 1955—1999 年间的 JEDAC 月平均海温资料, 利用 Morlet 小波变换方法, 对西太平洋暖池东、西代表区热含量的时(间)–频(率)特征进行了分析, 并用交叉谱分析方法探讨了两海区热含量间的耦合振荡。结果表明, 暖池热含量的时频特征具有明显的区域性, 即暖池东、西区热含量的年际和年代际变化都是反相的, 且其年际变化的时频特征有较大差异; 暖池东、西区热含量间主要存在着年际(43 个月)和年代际(172 个月)时间尺度的反位相耦合振荡。

关键词 西太平洋暖池, 热含量, 时频特征, 区域性

中图分类号 P731.1

西太平洋暖池(简称暖池, 下同)是全球大洋表层水温最高的海域, 也是全球最大的热源之一。已有的研究表明, 暖池热状态的异常会导致大气环流的异常变化, 进而影响东亚乃至全球的气候异常变化(黄荣辉等, 1994; 董敏等, 1994; 叶笃正等, 1996; 翁学传等, 1996; 张启龙等, 1999; 李永平等, 1999)。

暖池的 SST 和热含量是暖池热状态的主要指标, 也是暖池影响大气的主要参数。谢强等(1999)利用 1934—1989 年间的 SST 资料, 研究了暖池海域 SST 的长期变化及其与南沙 SST 的耦合振荡, 得出暖池海域 SST 具有明显的增温趋势、阶段性变化和突变现象, 且与南沙 SST 存在不同频率的耦合振荡。近期, 作者利用 1950—1998 年月平均 SST 资料对暖池海域 SST 场的时空特征进行了分析(张启龙等, 2001), 并用谱分析等方法探讨了暖池海域 SST 的变化特征(Zhang *et al.*, 2001)。为了进一步了解暖池热状态的区域性特征, 作者利用 1955—1999 年太平洋月平均海温资料, 根据 Zhang 等(2001)选定的暖池东、西代表区范围, 分别计算了东(170°E—160°W, 8°S—4°N)、西(130°—155°E, 0°—12°N)代表区热含量, 并利用 Morlet 小波分析等方法, 研究了西太平洋暖池热含量时频特征的区域性。

1 资料及热含量计算

1.1 资料

所用资料是由美国 Scripps 海洋研究所 JEDAC(Joint Environmental Data Analysis Center)提供的全球月平均海温资料。该资料包括 1955 年 1 月—1999 年 12 月间的太平洋海域 5°×2°经纬度网格点 11 层(0、20、40、60、80、120、160、200、240、300 和 400m)的月平均海温值。

* 国家重点基础研究发展规划资助项目, G1998040900 号第一部分; 中国科学院知识创新工程资助项目, KZCX2-205。张启龙, 男, 出生于 1954 年 2 月, 研究员, E-mail: qlzhang@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2001-01-15, 收修改稿日期: 2002-06-20

1.2 热含量计算

暖池东、西代表区的热含量按下式计算:

$$Q = \iiint C_p \cdot \rho \cdot T dx dy dz$$

式中, C_p 为海水定压比热; ρ 为海水密度; T 为海水温度。

在具体计算两代表区的热含量时,根据暖池的定义(Wyrki, 1989; 张启龙等, 1997),在水平和垂直方向上只统计水温高于 28°C 水体的热含量。由于作者感兴趣的是暖池热含量的变化特征,因此为简便计算,将 $C_p \cdot \rho$ 视为 1。需要指出的是,文中用于分析的 1955—1999 年暖池东、西区热含量月距平序列是根据这两个代表区 1961—1990 年间热含量月平均值求取的。

1.3 小波分析

小波分析是一种新兴的时频分析方法,不同于 Fourier 分析基础上的功率谱,它以一种子波变换方式产生出一系列“瞬时”波谱信号估计,详细而准确地揭示出时间序列中瞬时频率结构随着时间的变化。正因为它有这种特殊功能,现已成为研究气象等要素长期变化的十分重要的工具。鉴于该方法已有详细介绍(胡增臻, 1997; 杨辉等, 1999),因此文中仅给出其中的主要计算公式。

时间函数 $f(t)$ 的小波变换为:

$$w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{ab}^*(t) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中, $a (> 0)$ 是尺度参数, b 是平移参数, $\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right)$ 称作小波,“*”表示共轭运算。

小波函数 $\Psi_{ab}(t)$ 可以取不同形式。作者选用 Morlet 小波进行变换。取 Morlet 小波为母小波,即:

$$\Psi(t) = e^{i2\pi t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2)$$

其子波为:

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (3)$$

在实际计算中,由于资料 $f(t)$ 长度的有限性,尺度参数 a 最小取为 2 个月,最大取为 20 年。平移参数 b 也不能取至资料的两端,特别在 a 较大时。为了减小两端的影响,作者对资料进行了外延处理。

设原资料系列为:

$$f(1), f(2), \dots, f(n)$$

向前延伸 n 点

$$f(-i) = f(i+1), i = 0, 1, \dots, n-1.$$

向后延伸 n 点

$$f(i+n) = f(n+1-i), i = 1, 2, \dots, n.$$

小波系数模的大小表示特征时间尺度信号的强弱,而小波系数的实部可以表示不同特征时间尺度信号在不同时间的强弱和位相两方面的信息。

2 暖池代表区热含量的时频特征

2.1 暖池东区

图1引列了暖池东区热含量距平时间序列的Morlet小波变换系数的模平方和实部的时频分布。由图1a可见,该区热含量存在明显的年际和年代际变化。其年际变化的主要周期为4—5年,周期中心为4.6年,最强信号出现在80年代初至90年代中期,而在50年代中期至70年代末期,年际变化信号相对较弱。年代际变化的周期主要为14年左右,其最强信号出现在70年代初至90年代末期,而在50年代中期至60年代末期,年代际变化信号相对较弱。

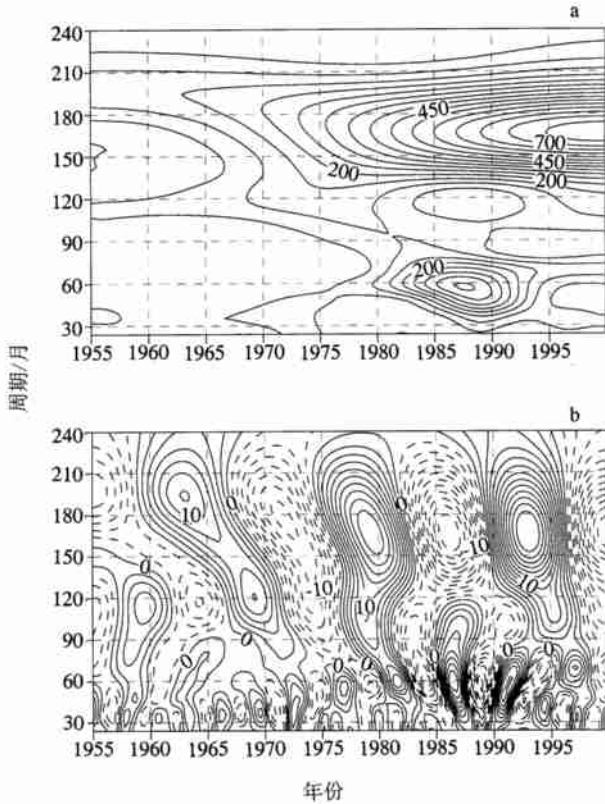


图1 暖池东区热含量距平的Morlet小波变换系数的模平方(a)和实部(b)的时频分布(实线为正值;虚线为负值)

Fig. 1 Time frequency diagrams for (a) the square of modules and (b) the real part of the Morlet wavelet transform coefficients of heat content anomaly in the eastern Warm Pool region (the solid lines denote positive values, and the dashed lines denote negative values)

作者曾对暖池东区1950—1998年间的月平均SST时间序列进行功率谱分析,得出其年际变化的主要周期也为4.6年(Zhang *et al.*, 2001);而用小波分析得到该区热含量变化的4.6年周期主要出现在80年代初期至90年代中期。

由于小波系数实部绝对值的大小反映了周期信号的强弱,同时,其正、负值分别表示暖池热含量的偏多和偏少,因此,从小波系数实部的时频分布形式既能得知暖池热含量的周期变化特征又能了解不同周期下的冷暖位相结构。图1b列示了暖池东区热含量距平小波系数实部的时频分布。图中暖池东区热含量14年左右时间尺度的年代际变化表现得非常清楚,其相应的位相则有13年左右的时间振荡,即在1955—1999年间的45年中,1961—1968年、1976—1982年和1989—1996年的各时段实部均为正,表明暖池东区热含量在这些时段是偏多的;在1960年以前、1969—1975年、1983—1989年及1997年后的各时段实部均为负,暖池东区热含量在这些时段是偏少的。

此外,从小波系数的实部分布(图1b)还得出暖池东区热含量年际变化的位相与ENSO循环有较密切的联系,即热含量实部正、负值的出现时间基本与El Niño和La Niña事件的出现时间有较好的对应。这表明暖池东区热含量在El Niño期间偏多,而在La Niña期间则偏少。

2.2 暖池西区

暖池西区热含量距平时间序列的 Morlet 小波变换系数的模平方和实部的时频分布如图 2 所示。由小波变换系数的模平方分布(图 2a)可见, 60 年代中期以前, 暖池西区热含量的年际和年代际变化相对较弱, 而 60 年代中期以后, 年际和年代际变化特征十分明显。

其中, 年际变化的主周期约为 4 年, 此盛行周期随时间缓慢增大, 在 60 年代末期至 70 年代中期, 周期中心为 3.7 年, 而在 80 年代中期至 90 年代末期, 周期中心缓增至 3.9 年, 同时其信号的强度也逐渐增大。此外, 在 90 年代末期还出现准二年周期的信号。

作者(Zhang *et al.*, 2001) 曾用功率谱分析得出暖池西区 1950—1998 年间月平均 SST 年际变化的主要周期为 3.6 年, 而小波分析结果则表明, 该区热含量约 4 年周期的信号主要出现在 60 年代末期至 90 年代末期。

暖池西区热含量年代际变化的周期与东区相似, 也为 14 年左右(图 2a), 强信号出现时间也是在 70 年代初至 90 年代末期。暖池东、西区热含量年代际变化周期颇为一致这一事实表明, 暖池东、西区热含量的年代际变化可能是受同一大尺度海气系统的异常变化影响的。同样, 从暖池西区热含量距平的小波变换系数实部分布(图 2b) 还可得出, 与暖池东区相似, 西区热含量 14 年左右时间尺度年代际变化的位相也有 13 年左右的时间振荡, 但位相与东区相反, 即在 1955—

1999 年间的 45 年中, 1956—1962 年、1970—1975 年、1983—1989 年和 1997 年以后的各时段小波系数的实部为正, 表明在这些时段暖池西区热含量偏多, 而在 1963—1969 年、1976—1982 年和 1990—1996 年实部为负, 即暖池西区热含量在这些时段是偏少的。

暖池西区热含量年际变化的位相也与 ENSO 循环有密切的联系(图 2b), 但两者的关系与暖池东区相反, 在 El Niño 期间西区热含量实部为负, 而在 La Niña 期间实部为正, 也即表明暖池西区热含量在 El Niño 期间偏少, 而在 La Niña 期间偏多。

3 暖池东、西区热含量的耦合振荡

图 3 为经过 5 个月滑动平均后的暖池东、西区热含量距平年际变化。由图 3 可见, 暖

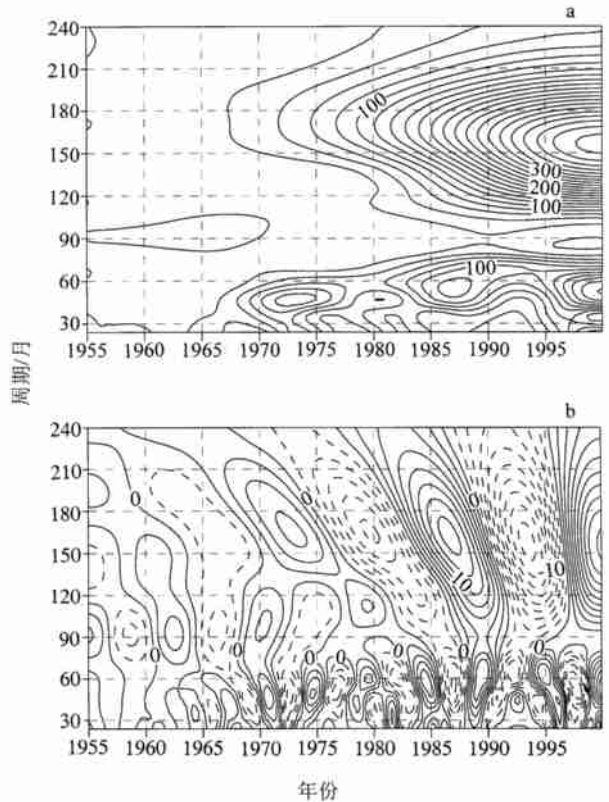


图 2 暖池西区热含量距平的 Morlet 小波变换系数的模平方(a)和实部(b)的时频分布(实线为正值; 虚线为负值)

Fig. 2 Time-frequency diagrams for (a) the square of modules and (b) the real part of the Morlet wavelet transform coefficients of heat content anomaly in the western Warm Pool region (the solid lines denote positive values, and the dashed lines denote negative values)

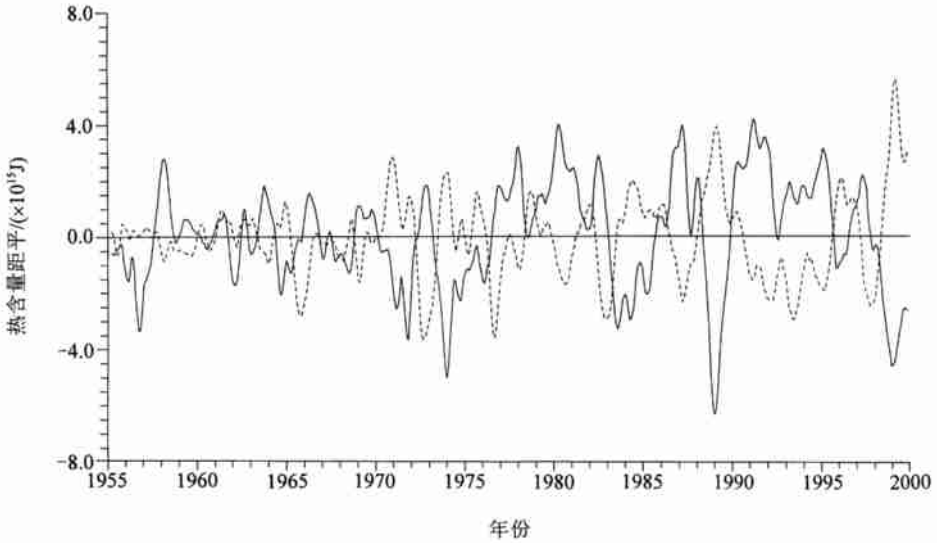


图3 暖池东、西区热含量距平年际变化(实线为暖池东区;虚线为暖池西区)

Fig. 3 Inter-annual changes in heat content anomalies of the eastern and western Warm Pool regions (the solid line is the heat content anomaly of the east regions; and the dashed line is the heat content anomaly of the west regions)

池东、西区热含量的变化具有明显的反位相关系。这与作者研究暖池 SST 场的时空特征得出的结论(张启龙等, 2001)是一致的。相关分析结果表明, 暖池东、西区热含量的同期相关系数为 -0.65 ($n = 450, r_{0.001} = 0.15$), 通过 $\alpha = 0.001$ 的显著水平。可见暖池东、西区热含量的负相关关系是非常密切的。

为了进一步了解 1955—1999 年间暖池东、西区月平均热含量时间序列在不同频域内的相关程度, 作者对这两个序列进行了交叉谱分析。该方法的基本原理已有详细介绍(黄嘉佑等, 1984), 文中仅给出部分计算公式。

若将暖池东、西区热含量序列分别记为 x_{1t} 和 x_{2t} , 则其凝聚谱估计为:

$$R_{12}^2(l) = \frac{P_{12}^2(l) + Q_{12}^2(l)}{P_{11}(l)P_{22}(l)} \quad (l = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (4)$$

式中 $P_{11}(l)$ 及 $P_{22}(l)$ 分别是 x_{1t} 和 x_{2t} 的功率谱; $P_{12}^2(l)$ 和 $Q_{12}^2(l)$ 分别为两序列的协谱和正交谱(计算公式从略); m 为最大滞后时间长度(下同)。

两序列(x_{1t} 对 x_{2t}) 的落后位相谱为:

$$\Theta(l) = \text{tg}^{-1} \left[\frac{Q_{12}(l)}{P_{12}(l)} \right] \quad (l = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (5)$$

在实用中常使用落后时间长度谱

$$L(l) = \frac{m\Theta(l)}{\pi l} \quad (l = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (6)$$

利用交叉谱方法分析两序列间的耦合振荡关系是否密切, 通常要对其凝聚谱进行显著性检验。所用的统计量

$$F = \frac{(v-1)R_{12}^2}{1-R_{12}^2}$$

遵从分子自由度为 2, 分母自由度为 $2(v-1)$ 的 F 分布。其中, $v = \left[2n - \frac{m}{2} \right] / m$ 。对于给定的显著水平 α , 可算得相应的 F 临界值 F_α 。若 $F > F_\alpha$, 则认为是显著的。通常为了检验方便, 在 v 固定下, 对于显著水平 $\alpha = 0.05$, 可算得凝聚谱的临界值 R_c , 即:

$$R_c = \sqrt{1 - \alpha^{\frac{1}{v-1}}}$$

若 $R_{12}^2 \gg R_c^2$, 则认为两序列振荡的凝聚(相干)是显著的。

文中 $v = (2 \times 540 - 43) / 86 = 12.06$, 算得凝聚谱的临界值 $R_c^2 = 0.237$ 。现将通过检验 ($\alpha = 0.05$) 的较大凝聚谱值及相应的周期、协谱和落后时间长度谱值列于表 1。

表 1 交叉谱分析结果

Tab 1 Results of cross spectrum analysis

周期(mon)	172.0	86.0	57.3	43.0	28.7	24.6	21.5
P_{12}	-0.070	-0.078	-0.098	-0.109	-0.045	-0.023	-0.017
R_{12}^2	0.417	0.468	0.635	0.651	0.619	0.317	0.280
L	0.676	4.524	3.763	0.998	0.926	0.568	0.438

由表 1 可见, 在 28.7—86.0 个月周期段上, 暖池东、西两代表区热含量间的凝聚谱值均较大, 但最大凝聚谱值出现在 43 个月(约 3.6 年)周期处, 而相应的协谱为负, 落后时间长度谱为 0.998。说明暖池东、西两海区热含量间存在着周期为 43 个月(约 3.6 年)的际时间尺度的反位相耦合振荡, 且暖池东区热含量的变化落后于西区近一个月($L = 0.998$)。此外, 周期为 172 个月处的凝聚谱值也较大, 而相应的协谱也为负, 就是说, 两海区还存有周期为 172 个月(约 14.3 年)的年代际时间尺度的反位相耦合振荡, 但两者的位相差略小, 仅 0.7 个月($L = 0.676$)。由此可见, 暖池东、西区热含量间主要存在着明显的年际和年代际时间尺度的反位相耦合振荡。

4 结语

4.1 暖池东、西区热含量的年际变化是反位相的, 其变化周期有所不同。暖池东区热含量年际变化的主要周期为 4.6 年, 强信号出现在 80 年代初期至 90 年代中期; 西区热含量年际变化的主要周期随时间缓慢增大, 周期中心在 60 年代末至 70 年代中期为 3.7 年, 而在 80 年代中至 90 年代末期为 3.9 年。

4.2 暖池东、西区热含量也具有明显的反位相年代际变化。其主要周期均为 14 年左右, 强信号都出现在 70 年代初期至 90 年代末期。

4.3 暖池东、西区热含量间存在着年际和年代际时间尺度的反位相耦合振荡, 且其年际变化的位相都与 ENSO 循环有较好的对应, 即在 El Niño 期间, 暖池东区热含量偏多, 西区热含量偏少, 而在 La Niña 期间, 暖池东区热含量偏少, 西区热含量偏多。这与 ENSO 循环过程中暖池暖水的运移有关。

致谢 中国科学院大气物理研究所杨辉副研究员提供小波分析计算程序, 谨致谢忱。

参 考 文 献

叶笃正, 黄荣辉, 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 237—242

- 李永平, 端义宏, 刘秦玉等, 1999. 热带海洋 SST 与北半球大气环流的低频振荡特征. 海洋与湖沼, 30(1): 97—103
- 杨 辉, 宋正山, 1999. 华北地区水资源多时间尺度分析. 高原气象, 18(4): 496—508
- 张启龙, 翁学传, 1997. 热带西太平洋暖池的某些海洋学特征. 海洋科学集刊, 38: 31—38
- 张启龙, 翁学传, 程明华, 1999. 华北地区汛期降水与热带西太平洋暖池和黑潮的关系. 高原气象, 18(4): 575—584
- 张启龙, 翁学传, 颜廷壮, 2001. 西太平洋暖池海域 SST 场的时空特征. 海洋与湖沼, 32(4): 349—354
- 胡增臻, 石 伟, 1997. 子波变换在大气科学中的应用研究. 大气科学, 21(1): 58—72
- 翁学传, 张启龙, 1996. 热带西太平洋暖池域次表层水热含量变化与我国东部汛期降水和副高的相关关系. 海洋科学集刊, 37: 1—9
- 黄荣辉, 孙凤英, 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 18(2): 141—151
- 黄嘉佑, 李 黄, 1984. 气象中的谱分析. 北京: 气象出版社, 96—127
- 谢 强, 鄢利农, 侯一筠等, 1999. 南沙与暖池海域 SST 的长期振荡及其耦合过程. 海洋与湖沼, 30(1): 88—95
- 董 敏, 陈隆勋, 廖 宏, 1994. 西太平洋暖池区海温异常对冬季环流影响的数值研究. 海洋学报, 16(3): 39—49
- Wyrtki K, 1989. Some thoughts about the west Pacific wam pool. Proceedings of the Western Pacific Intemational Meeting and Workshop on TOGA-COARE, 89—109
- Zhang Qilong, Weng Xuechuan, Cheng Minghua, 2001. Regional features of long-term SST Variation in the western Pacific wam pool area. Chi J Oceanol Limnol, 19(4): 312—318

REGIONAL DIFFERENCES OF TIME-FREQUENCY FEATURE IN HEAT CONTENT OF THE WESTERN PACIFIC WARM POOL

ZHANG Qi-Long, WENG Xue-Chuan

(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

Abstract The time-frequency features and the coupling oscillations in the heat contents of the east and west regions in the western Pacific warm pool were analyzed by using the Morlet wavelet transformation method and the cross spectrum analysis method based on the monthly mean temperature data over the Pacific Ocean during 1955—1999 offered by JEDAC. The results showed that the wam pool heat contents are of obvious regional differences in time frequency feature. The heat contents of both the east and the west regions have contrary interannual and interdecadal changes. And there is a large difference between their time-frequency features in the interannual scale. It is found that there are mainly out of phase interannual(43-month) and interdecadal(172-month) time scale coupling oscillations in the heat contents of these two regions.

Key words The western Pacific wam pool, Heat content, Time frequency feature, Regional difference