

热带海表温度及北大西洋涛动与 ENSO 事件的相关分析

程炳岩¹ 孙卫国² 王记芳¹

(1 河南省气象局, 郑州 450003; 2 南京信息工程大学, 南京 210044;)

摘要 采用交叉小波变换方法分析了热带 SST、NAO 与 ENSO 事件之间的多时间尺度相关特征。结果表明, 热带 SST 与 ENSO 事件在 2~7 年和 30 年以上尺度的周期振荡上存在着显著的同位相正相关, 其中以 4 年尺度周期的方差贡献最大, 时域中热带 SST 冷暖变化的时间与 ENSO 冷暖交替的时间一一对应; 北大西洋 SST 与 ENSO 事件在 4 年和 15 年尺度周期振荡上表现为方差贡献较大的正相关; NAO 与 ENSO 事件相关较弱, 在 2~7 年和 10~24 年尺度上表现为负相关, 而 25 年以上尺度为正相关, 时域中 NAO 强弱变化与 ENSO 冷暖交替的对应关系并不完全一致。

关键词 ENSO 事件 热带海表温度 北大西洋涛动 交叉小波变换

引言

全球热带海洋与大气, 特别是以 ENSO 为核心的热带海气相互作用一直是人们研究的热门课题。热带海洋温度的变化可能影响整个大气环流的演变, 同时大气环流的异常又通过动力和热力作用使海洋的温度等发生变化^[1, 2]。ENSO 的形成和发展是热带太平洋海气相互作用的结果, 大气和海洋之间的耦合可以发生在多种时间尺度上, 结果使 ENSO 的发生具有不规则性; 因此, 作为预测未来大气状态及其对社会活动影响的少数几个问题之一, ENSO 事件受到了人们与日俱增的关注。

近年来的研究结果表明, ENSO 的变化特征与海洋的长期变率以及热带外海洋的相互作用有关^[3]; 全球海表温度的变化中存在 ENSO 信号^[4]; ENSO 期间的大气环流异常会使冰岛低压发生变化, 从而影响北大西洋涛动^[5]。由于以往的研究大多采用数值模拟、EOF 和 REOF 等方法以及原始的 SST、SOI 和 NAOI 进行的; 难以反映 ENSO 与热带 SST、NAOI 之间相互联系的时频结构及其随时间变化的特征。因此, 本文拟根据资料, 采用交叉小波

变换方法, 分析 ENSO 与热带 SST、NAOI 之间的相关特征, 着重讨论其相互联系的频率结构及其在时域中的分布特征, 并通过小波交叉谱分析检验两者的谐波分量对总体方差的贡献。这对于进一步了解 ENSO 与热带 SST 及热带外海洋的相互作用, 研究其对全球和地区气候、经济和社会的影响等都具有一定的现实意义。

1 资料与方法

1.1 资料处理

本文所用资料为 1950 年 1 月至 2003 年 12 月期间 Nino 3 区 ($5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}, 150^{\circ} \sim 90^{\circ}\text{W}$)、北大西洋 ($5^{\circ} \sim 20^{\circ}\text{N}, 60^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{W}$) 和全球热带地区 ($10^{\circ}\text{N} \sim 10^{\circ}\text{S}, 0^{\circ} \sim 360^{\circ}$) 的月海表温度距平 (SSTA), 南方涛动指数 (SOI, 即 Tahiti 和 Darwin 的月标准海平面气压差), 北大西洋涛动指数 (NAOI, 即 Ponta Delgada、Azores 和 Stykkisholmur/Reykjavik、Iceland 的标准海平面气压差); 分别以 ΔT_{SS} 、 ΔT_{NA} 、 ΔT_{GT} 、 ΔI_{SO} 和 ΔI_{NAO} 表示, 资料总样本数 $n = 648$ 。为了分析方便和消除边界效应的影响, 在小波变换之前对原资料序列进行了标准化和延拓处理^[6-8]。

1.2 交叉小波变换方法

基于连续小波分析技术^[9]的交叉小波变换,是将小波变换和交叉谱分析两种方法结合产生的一种新型的信号分析技术^[10],可以从多时间尺度的角度来研究两个时间序列在时频域中的相互关系。对气候信号函数 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的交叉小波变换方法,函数 $f(t)$ 的连续小波变换表示为:

$$W_f(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(s, t - \tau) dt \quad (1)$$

类似于傅里叶功率谱,可定义时间序列 $f(t)$ 的小波功率谱(能量谱)函数为:

$$P_f(k) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(s, \tau)|^2 d\tau \quad (2)$$

同理,函数 $g(t)$ 的小波变换为 $W_g(s, \tau)$,两个信号序列 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的小波交叉谱可定义为:

$$C_{f,g}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} W_f(s, \tau) \overline{W_g(s, \tau)} d\tau \quad (3)$$

可见,交叉小波变换 $W_f(s, \tau) \overline{W_g(s, \tau)} d\tau$ 即信号 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的协方差的时间分解,它在时间轴上的积分即为小波交叉谱。通常人们称 $W_f(s, \tau) \overline{W_g(s, \tau)} d\tau$ 为信号 $f(t)$ 、 $g(t)$ 的交叉小波变换。实质上 $f(t)$ 、 $g(t)$ 信号在不同尺度振荡的交叉小波变换系数值在时间域的分布可为正(负),表明两个信号在相应尺度振荡上存在着正(负)相关关系,其绝对值越大,正(负)相关程度越密切。小波交叉谱揭示了 $f(t)$ 、 $g(t)$ 信号序列在没有时间位移(同位相或反位相)各谐波分量对总体方差的贡献,因而可以考察两信号相关显著的频率结构。这是交叉小波变换应用于两信号时频对应关系分析的优点所在,能够比传统的功率谱分析更能刻画其相互联系的精细结构。

本文选用墨西哥帽小波作为小波母函数,其表

$$\psi(t) = \left| \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{\frac{1}{4}} \right| (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

在实数域,信号 $f(t)$ 小波变换的离散表达式为:

$$W_f(s, \tau) = |s|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i \Delta t) \psi \left| \frac{i \Delta t - \tau}{s} \right| \quad (5)$$

式中, s 为伸缩尺度, τ 为平移因子, Δt 为样本间隔。取伸缩尺度 $s = s_0 2^{j \Delta j}$, 其中 $s_0 = 0.5$, $\Delta j = 0.2$, $j = 1, 2, \dots, 7$; 由此, s 所对应的 Fourier 分析中的时间尺度为 0.5 ~ 42.7 年。

2 结果分析

2.1 ENSO 循环的时频结构

目前,大多采用 Nino 3 区 SSTA 来确定 El Nino 和 La Nina 事件的发生、发展和结束时间以及事件强度的定义。通常规定:当 SSTA 大于等于 0.5 °C (或小于等于 -0.5 °C),且时间长度达到 2 个季度以上(其中允许中断 1 个月),即可定义一次 El Nino (或 La Nina) 事件。

根据 Nino 3 区 SSTA 和 SOI 的时间序列分析结果表明,正值海温距平对应负值 SOI,而负值海温距平对应正值 SOI,两序列之间负相关关系非常明显;两者都存在不同时间尺度的变化,且变化的周期和强度也基本一致。1950 ~ 2003 年期间共发生 14 次暖事件和 11 次冷事件。暖事件分别出现在 1951、1952 ~ 1953、1957 ~ 1958、1963、1965 ~ 1966、1968 ~ 1969、1972、1976、1982 ~ 1983、1986 ~ 1987、1991 ~ 1992、1994 ~ 1995、1997 ~ 1998 和 2002 年,平均每 3 ~ 4 年出现 1 次 El Nino 事件;冷事件分别出现在 1954 ~ 1956、1962、1964、1967 ~ 1968、1970 ~ 1971、1973 ~ 1974、1975、1984 ~ 1985、1988 ~ 1989、1995 ~ 1996 和 1999 ~ 2000 年。这一结果与其它研究基本一致^[10]。

通过对 Nino 3 区 SSTA 和 SOI 的小波变换系数及其功率谱分析,ENSO 事件的时频变化特征表现为 ENSO 事件所对应的小波系数绝对值在 2 ~ 8 年尺度上都比较大,上述 14 次暖事件和 11 次冷事件的发生时间与小波系数峰值和谷值位置都具有较好的一一对应关系,其中以 1957 ~ 1958、1982 ~ 1983、1997 ~ 1998 年的 3 次暖事件和 1954 ~ 1956、1988 ~ 1989、1999 ~ 2000 年的 3 次冷事件最为剧烈,强度很大。不同尺度上 ENSO 事件的突变点在年代际大尺度上较少,而在年际小尺度上较多;32 年尺度上的突变点有 2 个,分别位于 1978 和 2003 年,而在 2 年尺度上多达 40 个。

ENSO 循环的频率结构及其强度在时域中的变化存在着不同尺度的高、中、低频结构,振荡能量主要集中在 2 ~ 8 年尺度上,绝大多数 ENSO 事件的周期振荡都以年际尺度最为显著。此外,同一事件的频率结构、强度和显著性水平在 SSTA 和 SOI 序列小波功率谱中的表现又不完全相同;例如,1957 ~ 1958 年的暖事件在 SSTA 小波功率谱通过 95 % 置

信水平的显著性频域为 2~8 年,而在 SOI 小波功率谱中则未通过显著性检验;1982~1983 年的暖事件在 SSTA 小波功率谱中的显著性频域为 1~16 年,而在 SOI 小波功率谱中仅为 1~4 年。这是因为 El Nino 发生在海洋中,而南方涛动则发生在大气中,是由赤道太平洋海温冷暖交替变化造成的下垫面热力强迫作用所产生的,所以,反映在 ENSO 事件的频率结构、强度和显著性水平上两者并不完全一致。

2.2 ΔT_{SS} 与 ΔI_{SO} 、 ΔT_{GT} 、 ΔT_{NA} 、 ΔI_{NAO} 的交叉小波变换

ΔT_{SS} 与 ΔI_{SO} 、 ΔT_{GT} 、 ΔT_{NA} 、 ΔI_{NAO} 的交叉小波变换结果如图 1 所示。根据前述小波变化的意义,交叉小波变换系数值,正值对应正相关,负值则对应负相关;交叉小波系数绝对值大小,表示两个信号在时频域中的相关程度。

Nino 3 区 SST 与 SOI 交叉小波变换结果(图 1a)表明,在频域中 2~32 年所有尺度振荡上,SST 与 SOI 序列交叉小波变换系数在时域中绝大多数小于零,仅 8 年尺度振荡的交叉小波变换系数在 1995~1998 年略大于 0,二者存在较为一致的负相关关系;频域中以 2~8 年尺度振荡上交叉小波系数绝对值较大,二者负相关程度较为密切,尤其 2 年尺度上出现交叉小波系数绝对值最大,SST 与 SOI 的负相关程度最为密切;时域中每次冷暖事件的强度就代表了两者之间的相关紧密程度。由热带太平洋大尺度海气相互作用的机理,人们已经认识到南方涛动(SO)和 El Nino 实际上是一个密不可分的有机整体,是一个问题的两个侧面,所以合称为 ENSO。

由图 1b 可见,Nino 3 区 SST 与全球热带地区 SST 之间的关系在时频域中几乎全部表现为很好的正相关周期振荡,其中以 2~8 年时间尺度的周期振荡正相关最为密切,4 年尺度上出现交叉小波系数最大值。时域中每次冷暖交替的发生时间都存在程度不同的正相关关系,表明全球热带地区 SST 对 ENSO 事件的响应是明显的;特别是强度较大的 1957~1958、1982~1983、1997~1998 年的暖事件和 1954~1956、1975、1999~2000 年的冷事件,相关紧密的频域范围分别为 4~8 年、1~16 年、1~8 年和 4~8 年、4~16 年、4~8 年。这与热带三大洋对 ENSO 的响应有关,由于赤道印度洋 SSTA 与赤道东太平洋 SSTA

为强正相关,而赤道东大西洋 SSTA 与赤道东太平洋 SSTA 为弱的负相关关系^[11],所以全球热带地区 SSTA 与 Nino 3 区 SSTA 仍为正相关。

Nino 3 区 SST 与北大西洋 SST 的交叉小波变换表明,两者之间存在着程度不等的正、负相关,以正相关为主,负相关较弱。频域中 2~8 年尺度的正相关关系密切,4 年尺度上出现交叉小波系数最大值。此外,由图 1c 可见,16 年尺度上交叉小波系数也比较大,表明两者之间还存在年代际尺度的正相关周期振荡。时域中小尺度周期的高频振荡存在较为明显的负相关关系,如 1982~1983、1988~1989、1995~1996 和 1997~1998 年的冷暖事件等,但相关程度较弱。总体上北大西洋 SST 对 ENSO 事件的响应比全球热带地区 SST 要差得多。

图 1d 为 Nino 3 区 SST 与 NAOI 的交叉小波变换结果。由图可见,两者的相关程度较弱,16 年以下尺度的周期振荡多为负相关,其中 2~4 年尺度上的相关程度稍大一些,32 年尺度的低频振荡以正相关为主;由于 SO 和 NAO 的海气相互作用机制及其显著振荡周期存在差异,致使两者的相关程度较低。时域中也可以分辨出 NAO 对 ENSO 事件的响应,ENSO 冷事件与低 NAO 相对应,但两者相关程度较低;而 ENSO 暖事件中,除 1982~1983、1994~1995 年对应高 NAO 以外,其余暖事件都对应低 NAO;这可能与 ENSO 事件的类型、发生的地理位置及其发展过程等因素有关。

2.3 ΔT_{SS} 与 ΔT_{GT} 、 ΔT_{NA} 、 ΔI_{NAO} 的交叉小波功率谱分析

Nino 3 区 SST 与全球热带 SST 的交叉小波功率谱如图 2 表所示。从图 2 看出,全球热带地区 SST 的冷暖变化对 ENSO 事件的响应非常明显,交叉谱密度在频域皆为正值,表明频域中两者之间呈同位相正相关关系,总体方差贡献大于 95%且相关显著的频率结构为 2~7 年和 30 年以上尺度的周期振荡;小波交叉谱密度最大值出现在 4 年尺度周期上。在所讨论的时域中 1954~1956、1957~1958、1968~1969、1970~1971、1973~1974、1975、1982~1983、1984~1985、1986~1987、1988~1989、1997~1998 和 1999~2000 年等冷暖事件的正相关方差贡献较大,特别是 1997~1998 年的强暖事件两者的相关最好。

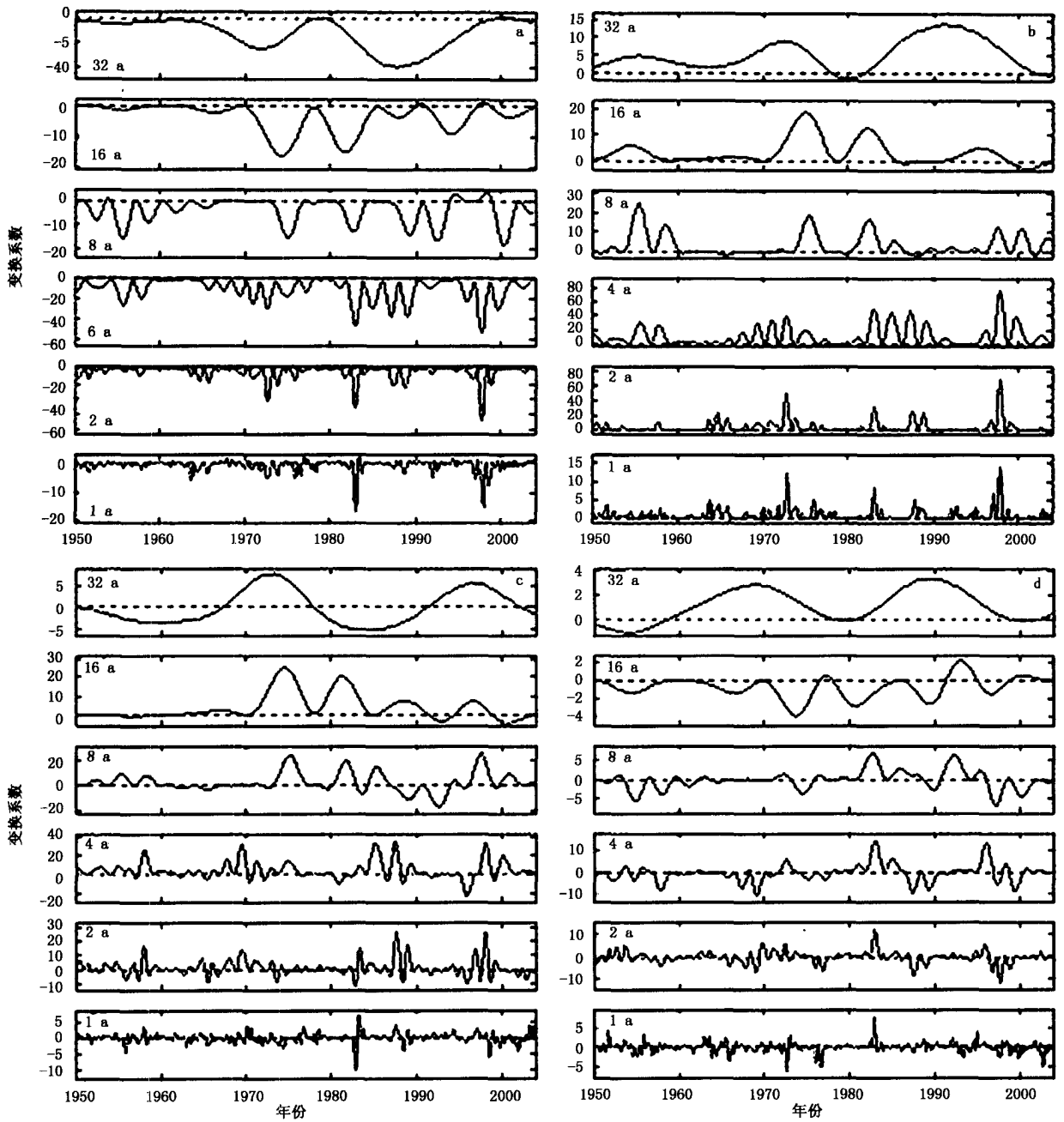


图 1 ΔT_{SS} 与 ΔI_{SO} 、 ΔT_{GT} 、 ΔT_{NA} 、 ΔI_{NAO} 的交叉小波变换:

(a) Nino 3 区 SST 与 SOI;(b) Nino 3 区 SST 与热带地区 SST;(c) Nino 3 区 SST 与北大西洋 SST;(d) Nino 3 区 SST 与 NAOI (图中虚线为交叉小波变换系数零等值线)

Nino 3 区 SST 与北大西洋 SST 的交叉小波功率谱(图 3)表明,两者在 2~24 年尺度的周期变化上表现为正相关,方差贡献大于 95%;频域中谱线呈双峰型,交叉谱密度函数的最大值和次大值分别出现在 4 年和 15 年左右尺度周期上。时域中相关紧密,方差贡献显著的分别为 1957~1958、1968~

1969、1975、1982~1983、1984~1985、1986~1987 和 1997~1998 年的冷暖事件。

Nino 3 区 SST 与 NAO 的交叉小波功率谱,如图 4 所示。总体上,NAO 对 ENSO 事件的响应不明显,两者之间相关程度较弱,表现为 2~7 年、10~24 年尺度上的负相关和 25 年以上尺度的正相关。时

域中除了 1982 ~ 1983 年的暖事件呈正相关较为明显以外,其余冷暖事件与 NAO 的相关都较差,且时域中 NAO 的强弱变化与 ENSO 冷暖交替的对应关系并不完全一致,这与两者之间的海气相互作用机制以及显著性振荡周期互不相同等因素有关。

和小波交叉谱的分析,得到以下几点初步结论:

(1) 全球热带地区 SST 对 ENSO 事件的响应明显,2 ~ 7 年和 30 年以上尺度的周期振荡存在着显著的同位相正相关,其中以 4 年尺度周期的方差贡献最大,时域中热带 SST 冷暖变化的时间位置与 ENSO 冷暖交替的发生时间相对应。

(2) 北大西洋 SST 与 ENSO 事件的关系在 2 ~ 24 年尺度的周期变化上表现为正相关,方差贡献较大,频域中交叉谱呈双峰型,谱密度函数的最大值和次大值出现在 4 年和 15 年左右的尺度上。时域中相关紧密,方差贡献显著的是强度较大的 ENSO 冷暖事件。

(3) NAO 与 ENSO 事件相关程度较弱,表现为 2 ~ 7 年,10 ~ 24 年尺度上的负相关和 25 年以上尺度的正相关。时域中可以分辨出 NAO 对 ENSO 事件的响应,但 NAO 的强弱变化与 ENSO 冷暖交替的对应关系并不完全一致。

(4) 本文利用交叉小波变换进行所研究信号的周期与相关性分析,通过交叉小波系数和谱密度值的相对大小讨论了信号的周期与相关的显著性是一种积极尝试,需说明的是究竟如何更客观地检验其可靠性仍是今后交叉小波技术应用中值得深入探讨的问题。

参考文献

- 1 王绍武.气候诊断研究进展.北京:气象出版社,1995.344
- 2 倪允琪.气候动力学.北京:气象出版社,1993.641
- 3 Gu D, Philander S G H. Inter-decadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extra-tropics. Science, 1997, 275: 805 - 807
- 4 Tourre Y M, White W B. ENSO signals in global upper ocean temperature. Journal Physical Oceanography, 1995, 25(6): 1317 - 1332
- 5 May W, Bengtsson L. The signature of ENSO in the Northern Hemisphere mid-latitude seasonal mean flow and high-frequency inter-seasonal variability. Meteorology and Atmosphere Physics, 1998, 69: 81 - 100
- 6 孙卫国,程炳岩.河南省近 50 年来旱涝变化的多时间尺度分析.南京气象学院学报,2000,23(2): 251 - 255
- 7 程炳岩,王记芳,孙卫国.河南省月平均气温变化的时频分析.气象科技,2004,32(增刊): 1 - 4
- 8 程炳岩,黄海仁,刘朝顺,等.河南气温变化及其与 ENSO 的相关.气象科技,2004,32(3): 177 - 181
- 9 林振山,邓自旺.子波气候诊断技术的研究.北京:气象出版社,1999. 8 - 37
- 10 Hudgins L, Huang Jiangping. Bivariate wavelet analysis of Asia

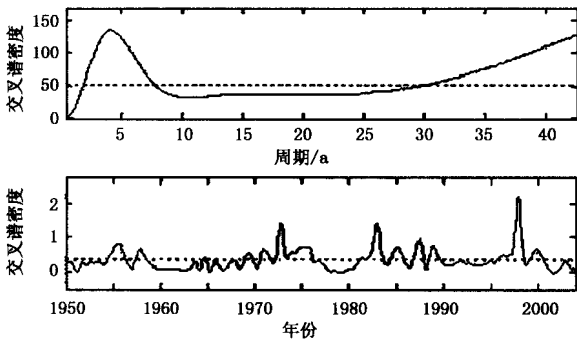


图 2 ΔT_{SS} 与 ΔT_{GT} 的交叉小波功率谱
(图中虚线为 95% 总体方差谱线,下同)

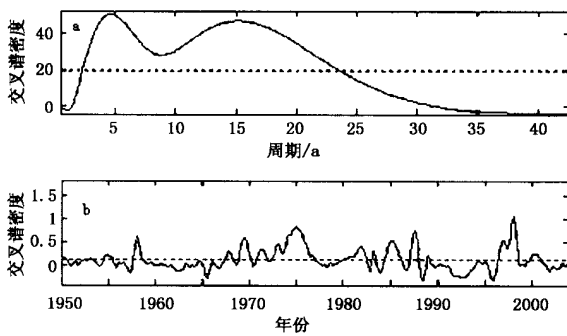


图 3 ΔT_{SS} 与 ΔT_{NA} 的交叉小波功率谱

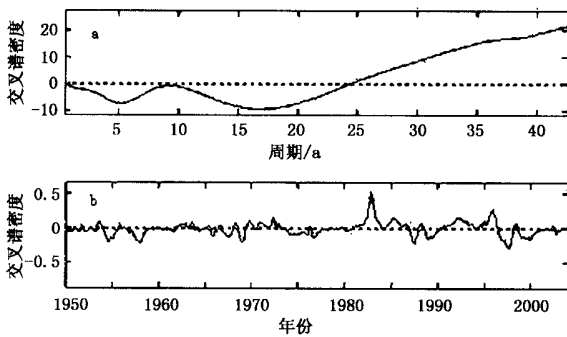


图 4 ΔT_{SS} 与 ΔI_{NA0} 的交叉小波功率谱

3 结论

通过对 Nino 3 区 SSTa 与全球热带地区 SSTa 北大西洋 SSTa、NAOI 序列进行交叉小波变换

monsoon and ENSO. Adv. Atmos. Sci., 1996, 13(3): 299 - 312

ENSO 循环的相关特征研究. 气象学报, 2001, 59(4): 459 - 471

11 殷永红, 倪允琪. 热带海表温度和低层风场的年际变率及与

Analysis of Correlation between Tropic SST and NAO and ENSO Events

Cheng Bingyan¹ Sun Weiguo² Wang Jifang¹

(1 Henan Provincial Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003; 2 Nanjing University of information Science and Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The correlation between tropic sea surface temperature of global and NAO and ENSO events were studied by means of bivariate wavelet analysis. Results show that the correlation between tropic SST and ENSO cycle on the time scales of 2 to 7 years and over 30 years is apparent with the maximum variance contribution appearing at the period of 4 years. The most striking correlation between North Atlantic SST and ENSO events was found on the time scales of 4 years and 15 years. There is weak anticorrelation between NAO and ENSO events on the time scales of 2 to 7 years and 10 to 24 years, and weak correlation on over 25 year scale.

Key words: tropic SST, NAO, ENSO, bivariate wavelet analysis

欢迎订阅《气象科技》、《气象科技合作动态》、 《中国气象科学研究院年报》

《气象科技》刊载对大气科学各领域发展水平的综合评述, 大气科学领域和相关科学领域的专题研究论文, 并报道城市环境、大气探测、气象业务与服务方面的新方法、新技术和新成果。《气象科技》为大 16 开本双月刊, 全年订价: 60 元。《气象科技合作动态》介绍各国气象局的综合概况及我国与其他国家在气象科技领域的合作、交流情况, 双月刊, 全年订价: 30 元。《中国气象科学研究院年报》(中英文对照), 反映该院研究和技术领域内的新成果和新进展以及该年度内的重大学术活动, 每年 1 期, 订价: 30 元。全年随时订阅。

联系地址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号中国气象科学研究院, 《气象科技》编辑部
邮政编码: 100081, 电话: (010) 68407256, Email: qxkj@cams.cma.gov.cn
户名: 中国气象科学研究院, 账号: 6510005052610086013, 开户行: 北京建行白石桥支行