

El Niño 区域 SST 的空间结构*

林振山 丛 峰 邓自旺

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 本文利用 MHAT 小波对 1970~1990 年 El Niño 区域的 SST 进行多尺度分析, 研究结果发现: (1) 在洲洋尺度($4 \times 10^3 \sim 13 \times 10^3$ km)里, El Niño 区域存在着特征波长为 6000 km 的纬向长波 ψ_2 和波长为 6500 km 的经向长波 ψ_1 ; (2) 在区域尺度($1 \times 10^3 \sim 4 \times 10^3$ km)里, El Niño 区域的 SST 存在着特征波长为 4500 km 的经向中波 ψ_3 和波长为 3500 km 的纬向中波 ψ_4 ; (3) 大尺度范围的海温异常及 4 波共振机制是发生 El Niño 现象的两个重要原因。

关键词 小波 El Niño 4 波共振

1 引言

我们曾经利用小波技术对 El Niño 区域的 SST 时间序列进行多分辨分析。结果表明, El Niño 区域的 SST 变化特征具有 6~9 月、1~2 年和 4 年 3 个时间层次。不同的时间层次, 其行为特性不同、起因不同。

El Niño 事件的表现行为不仅具有多时间尺度结构^[2~4,6], 还具有空间结构。如太平洋南美沿岸与中太平洋温度分布的差异; 太平洋暖舌的东伸位置等。又如, 一般的 El Niño 过程是自东向西传播的, 而 1982~1983 年的 El Niño 过程则是自西向东传播的。为了研究 El Niño 事件的空间结构, 我们有必要对其进行空间尺度层次分析。

本文将利用 1970~1989 年太平洋部分海区($124^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{W}$, $29^\circ\text{S} \sim 29^\circ\text{N}$)的 84×30 的空间网格上的共 240 个月的海温距平资料来研究 El Niño 区域 SST 的空间层次结构。

本文的第二部分简单介绍了有关的资料处理和尺度选择。第三、第四部分则分别研究了纬线上和经线上 SST 资料的空间结构。第五部分提出了多波相互作用机制。

2 资料处理和尺度选择

小波分析较 Fourier 分析优越之处在于^[5], 小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部性质, 能将信号分解成多尺度成分。这种多尺度成分既可是多时间尺度, 亦可以是多空间尺度。这里将研究 SST 的多空间尺度结构。

这里选用 MHAT 小波

1995-10-13 收到, 1996-06-16 收到再改稿

* 国家攀登计划项目课题

$$g(x) = (1 - x^2)e^{-x^2/2}, \tag{1}$$

设资料(空间或时间序列)为 $\{f(x)\}$, 则小波变换为

$$F(a, x_0) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g\left(\frac{x - x_0}{a}\right)dx. \tag{2}$$

在本研究中, 我们取尺度因子 a 为

$$a = 2^{0.2(i-1)}, \quad (i = 1, 2, \cdots, 31) \tag{3}$$

当 x 分别表示纬度和经度时, 其对应的尺度参数 a 的量纲亦分别为纬度或经度。表 1 中是典型取值及其所对应的空间尺度。

表 1 空间尺度的分类

a (纬度或经度)	纬向尺度	经向尺度	层次及其特征尺度
$2^6 = 64$	$\frac{64}{360} L_e$	$\frac{64}{180} \left(\frac{L_z}{2}\right)$	第 3 层次, 4000~7000 km (洲际尺度)
$2^5 = 32$	$\frac{32}{360} L_e$	$\frac{32}{180} \left(\frac{L_z}{2}\right)$	第 2 层次, 1800~3600 km (局域尺度)
$2^4 = 16$	$\frac{16}{360} L_e$	$\frac{16}{180} \left(\frac{L_z}{2}\right)$	
$2^3 = 8$	$\frac{8}{360} L_e$	$\frac{8}{180} \left(\frac{L_z}{2}\right)$	第 1 层次, 450~900 km (小局域尺度)
$2^2 = 4$	$\frac{4}{360} L_e$	$\frac{4}{180} \left(\frac{L_z}{2}\right)$	

表 1 中的 L_e 和 L_z 分别表示赤道周长和子午线周长。

本文利用美国分析中心(CAC)的资料^[1], 将太平洋部分海区(124°E~70°W、29°S~29°N)分为 84 条经线和 30 条纬线。经线的标号次序为: 第 1 条(124°E)、第 2 条(126°E)、第 3 条(128°E)……, 依此类推。而纬线的标号次序为第 1 条(29°S)、第 2 条(27°S)、第 15 条(1°S)、第 16 条(1°N)、第 17 条(3°N)……, 依此类推。

3 纬向结构

由于 El Niño 活动的区域中心主要位于赤道和 10°S 之间, 故选取第 15 条纬线(1°S)和第 12 条纬线上的资料(SST)进行小波空间变换。

图 1a、b 分别给出了 1972 年 3 月和 1972 年 12 月太平洋 El Niño 区域 SST 的小波变换。从图 1 可以看出:

(1) 从小局地尺度来看, 1972 年 3 月南美沿岸有一正距平(较小)而东太平洋和中太平洋区域则属于正常状态。从区域尺度来看, 1972 年 3 月中太平洋区域和南美沿岸出现正距平(较小)而东太平洋区域则出现一较小的负距平扰动。

(2) 暖流向东移动, 到 1972 年 12 月时, 中太平洋区域的正距平扰动已传至东太平洋, 同时南美沿岸的正扰动得到加强。从区域尺度来看, 此时 SST 沿 7°S 出现双波振荡, 双波的正中心分别处于 166°E 和 82°W 附近。此时从中太平洋区域到南美沿岸均为正距平。从图 1b 还可以看出此扰动不具有全球尺度。

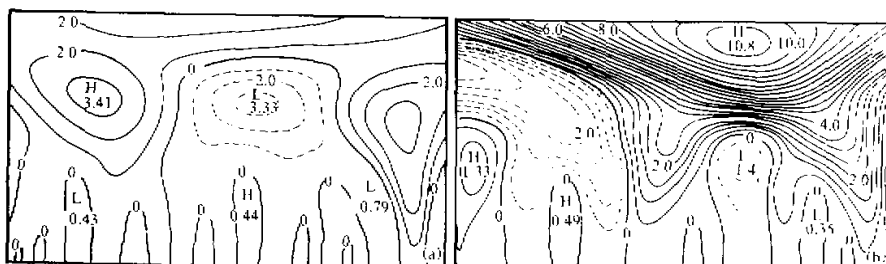


图1 太平洋 El Niño 区域(7°S)SST 的小波变换
(a)1972 年 3 月, (b)1972 年 12 月

图 2a、b 是太平洋 1°S 区域 SST 的小波变换。从图 2 可以看出, 1972 年 3 月赤道中太平洋区域和赤道南美沿岸区域的扰动(局域尺度)分布与 7°S 的扰动分布几乎一致, 但中太平洋区域的正扰动和东太平洋区域的负扰动相对 7°S 区域正负扰动的振幅值要小。但在 1972 年 12 月, El Niño 发展成熟阶段, 对应于洲际尺度的正扰动幅值却要比 7°S 的正扰动大得多(约大 40%)。

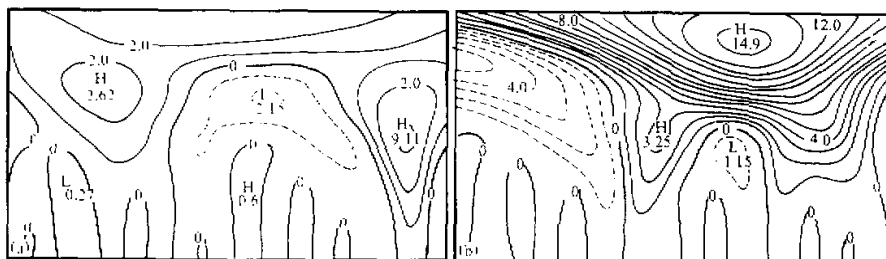


图2 太平洋赤道地区(1°S)SST 的小波变换
(a)1972 年 3 月, (b)1972 年 12 月

作为例子, 这里只给出 7°S 区域 1976 年 11 月、1982 年 5 月、1983 年 3 月、1986 年 10 月和 1987 年 4 月 SST 的小波变换图, 如图 3 所示。从图 3 可以看出:

(1) 对(较)成熟的 El Niño 事件, 它们具有以下共性: ①空间多层次结构; ②在区域尺度范围内, 中、东太平洋 7°S 区域均有双波结构, 而南美沿岸均有正扰动; ③相同层次里, 南美沿岸 SST 的纬向梯度要比中、东太平洋区域的大。

(2) 1976 年的 SST 的空间层次最少, 其高层次的分布尺度也最小。1983 年 3 月区域尺度的正、负扰动值的振幅差(相对值)及洲际尺度的正扰动幅值均最大。

(3) 平均说来, 在 124°E~70°W 的纬向上存在着两种长波, 即区域尺度的 2.5 波长的波和洲际尺度的 1.5 波长的波。前者的平均波长约为 $40076 \times (80 / 360) \div 2.5 \approx 3500$ km。后者的平均波长为 $40076 \times (80 / 360) \div 1.5 \approx 6000$ km。

4 经向结构

为研究太平洋 El Niño 区域 SST 的经向结构, 我们分别选 174°W, 114°W 和

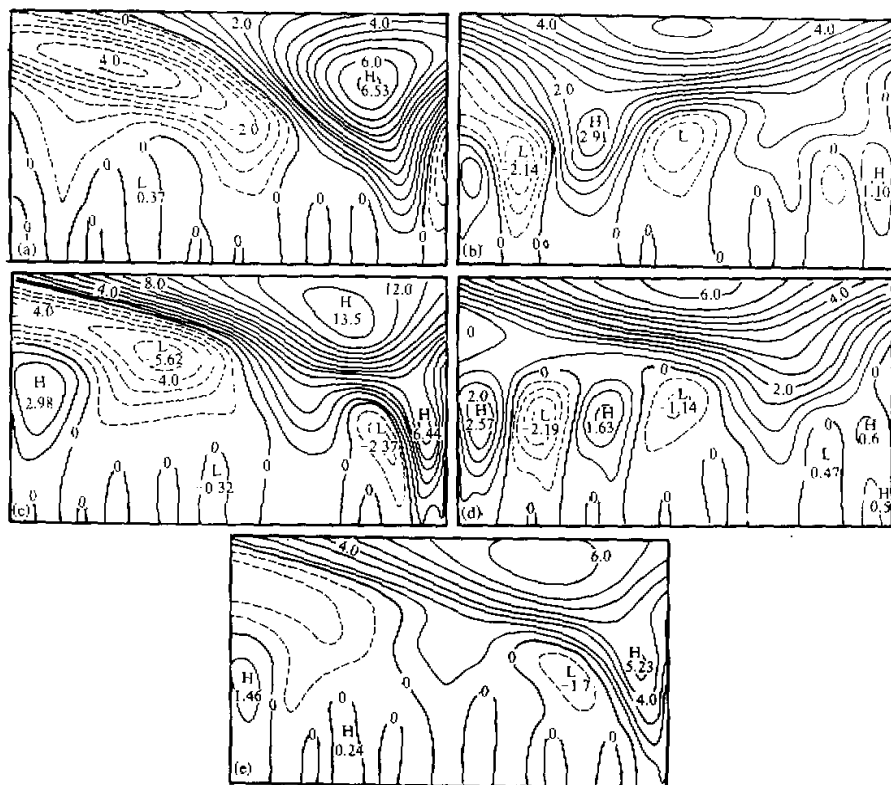


图 3 太平洋 7°S 区域 SST 的小波变换

(a) 1976 年 11 月; (b) 1982 年 5 月; (c) 1983 年 3 月; (d) 1986 年 10 月; (e) 1987 年 4 月

82°W 代表中太平洋、东太平洋和南美区域。图 4a~f 分别是 1972 年 12 月太平洋 174°W 区域、1972 年 12 月太平洋 114°W 区域、1976 年 6 月太平洋 114°W、1981 年 3 月太平洋 174°W 区域、1983 年 3 月太平洋 82°W 区域、1986 年 10 月太平洋 114°W 区域 SST 的小波变换。从图可以看出:

(1) 不同的经向 El Niño 所含的层次结构不同。如 1972 年 12 月太平洋 174°W 的 SST 含有 2、3 两个空间层次, 而 114°W 区域则含有 2、3、4 三个空间层次。

(2) 纬向梯度越大, 所含层次越高, 小波变换值越大则 El Niño 事件越强。如图 4e 所示, 1982~1983 年的 El Niño 事件为最强事件。

(3) 就区域尺度而言, 在 29°S~29°N 区域多表现为 1.5 个“波”的扰动, 其平均“波长”为 $2000 \div (60 / 180) \div 1.5 \approx 4000$ km。而对洲洋尺度而言, 其纬向波的“波长”将大于 6500 km。

(4) 在经向上, 小波变换的极大值均位于赤道附近(6°N~6°S)。

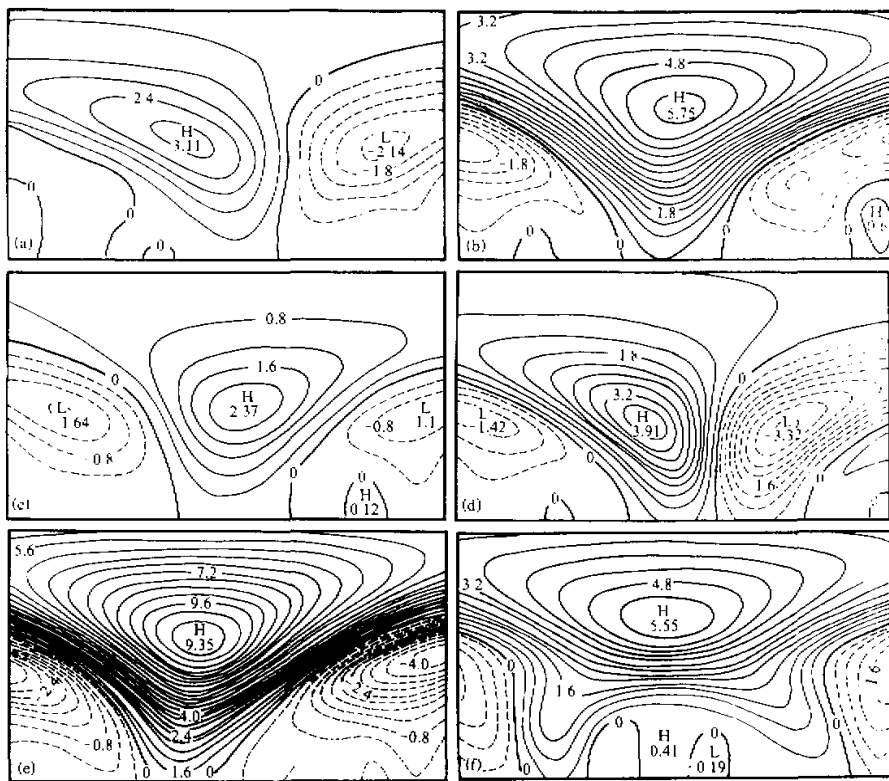


图4 太平洋 El Niño 区域 SST 的小波变换

(a)1972 年 12 月 174°W, (b)1972 年 12 月 114°W, (c)1976 年 6 月 114°W
(d)1981 年 3 月 174°W, (e)1983 年 3 月 82°W, (f)1986 年 10 月 114°W

5 多波相互作用机制

图 1~4 表明, El Niño 区域的 SST 分布存在着多种不同尺度的波。由于这些波均来自相同的流场,彼此间存在着相互作用。作为特例,这里只研究具有特征尺度的 4 种波。(1) 纬向分布的洲洋尺度的波 (特征波长为 6000 km); (2) 纬向分布的区域尺度的波 (特征波长为 3500 km); (3) 经向分布的洲洋尺度的波 (特征波长为 6500 km); (4) 经向分布的区域尺度的波 (特征波长为 4000 km)。分别把它们记为 ψ_2 、 ψ_4 、 ψ_1 、 ψ_3 。

正压非线性(含弱相互作用)准地转涡度方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla_h^2 \psi - \lambda_0^2 \psi) + \beta_0 \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\varepsilon J(\psi, \nabla_h^2 \psi), \quad (4)$$

这里的 ε 表示弱非线性作用。设

$$\Psi = \sum_{i=1}^4 A_i \cos \theta_i, \quad \theta_i = k_i x + l_i y - \omega t = \vec{K}_i \cdot \vec{r} - \omega t, \quad (5)$$

式中 k_i 、 l_i 分别为纬向和经向上的波数。

由(4)~(5)式可得 4 波演化的振幅方程

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dt} = iA_1 \sum_{j=1}^4 a_{1j} |A_j|^2 + ih\omega_1 A_1^* A_2 A_3 A_4 e^{-i\Delta\omega t}, \\ \frac{dA_2}{dt} = iA_2 \sum_{j=1}^4 a_{2j} |A_j|^2 + ih\omega_2 A_2^* A_1 A_3 A_4 e^{-i\Delta\omega t}, \\ \frac{dA_3}{dt} = iA_3 \sum_{j=1}^4 a_{3j} |A_j|^2 + ih\omega_3 A_3^* A_1 A_2 A_4 e^{-i\Delta\omega t}, \\ \frac{dA_4}{dt} = iA_4 \sum_{j=1}^4 a_{4j} |A_j|^2 + ih\omega_4 A_4^* A_1 A_2 A_3 e^{-i\Delta\omega t}, \end{cases} \quad (6)$$

式中 A_j^* 为 A_j 的共轭, a_{ij} 为与 $\vec{K}_i$ 、 λ_0 有关的矩阵因子。而

$$\Delta\omega = \omega_1 + \omega_4 - (\omega_2 + \omega_3). \quad (7)$$

由文献[7]可知, 4 波共振条件为

$$\begin{cases} \vec{K}_1 + \vec{K}_4 = \vec{K}_2 + \vec{K}_3, \\ \omega_1 + \omega_4 = \omega_2 + \omega_3. \end{cases} \quad (8)$$

当 4 波共振条件(8)满足时, 由(6)式可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{|A_1|^2}{\omega_1} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{|A_4|^2}{\omega_4} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{-|A_2|^2}{\omega_2} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{-|A_3|^2}{\omega_3} \right). \quad (9)$$

由波长 λ 、波速 C 及频率 $f = \omega / 2\pi$ 关系及(9)式可知: 对于高层次的长波其振幅的幅值较小, 而对于低层次的小局地或局域尺度而言, 其温度的振动幅值较大。

由(9)式可知, 当 4 波共振时,

$$\frac{|A_1|^2}{\omega_1} = \frac{|A_4|^2}{\omega_4}, \quad (10)$$

即

$$|A_4| = \sqrt{\omega_4 / \omega_1} |A_1|. \quad (11)$$

所以, 洲洋尺度的温度振动对(小)局域气候系统的温度变化具有非线性放大作用。例如, 当太平洋发生 6000 km 范围(设为一个波长)温度振动, 其振幅为 1°C , 则太平洋的某些海区(设尺度为 1000 km)则有可能发生 2.45°C 左右的温度变化。当太平洋发生尺度为 $(1 \sim 2) \times 10^4$ km 范围的温度异常, 若异常幅值为 1°C , 则在 1000 km 的某些海区里, 将发生幅值为 $3.16 \sim 4.47^\circ\text{C}$ 的海温异常。故而, 我们认为: 不同尺度的 4 波共振是 El Niño 的起因之一。而其前提是太平洋发生大尺度(全球或洲洋尺度)范围的温度异常。

当共振条件满足时, 系统的能量是守恒的。而当条件(8)不满足时, 系统的能量演化将满足以下关系^[7]:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{j=1}^4 |A_j|^2 = ih(\omega_1 + \omega_4 - \omega_2 - \omega_3)(A_1^* A_4^* A_2 A_3 - A_2^* A_3^* A_1 A_4). \quad (12)$$

有关 4 波共振的详细讨论请参见文献[7]。

6 结语

本文利用 MHAT 小波对 1970~1990 年 El Niño 区域($124^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{W}$, $29^{\circ}\text{S}\sim 29^{\circ}\text{N}$) 的 SST 进行多尺度分析, 结果表明:

(1) El Niño 区域的 SST 不仅具有多时间尺度还具有多层次空间结构, 即无论是在纬向上, 还是在经向上均含有区域尺度和洲洋尺度两种空间结构。

(2) 当 SST 所含的空间层次越多, 其结构越复杂, 强度亦越大。同时, 经向及纬向上的温度梯度亦越大。

(3) 就区域尺度($1\times 10^3\sim 4\times 10^3\text{ km}$)平均而言, El Niño 区域的 SST 在纬向上存在着“平均波长”为 3500 km(正、负 SST 的中心距离为 1750 km)的波动。而经向上则存在着“平均波长”为 4000 km(正、负中心距离约为 2000 km)的波动。对洲洋尺度平均而言, El Niño 区域的 SST 在纬向存在着“平均波长”为 6000 km 的波动。在经向上存在着“平均波长”为 6500 km 的波动。

(4) 多尺度范围的海温异常及 4 波共振机制是产生 El Niño 的两个重要因素。

参 考 文 献

- 1 林振山、杨修群, 1995, 理论气候学, 南京: 南京大学出版社.
- 2 周静亚、杨大升, 1993, 海洋气象学, 北京: 海洋出版社.
- 3 Angell, J.K. and Koshover, J. 1983, Global temperature variations in the troposphere and stratosphere. 1958-1982. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 901~921.
- 4 刘式适、刘式达, 1991, 大气动力学(下), 北京: 北京大学出版社.
- 5 Y. 迈耶(尤众译), 1992, 小波与算子, 北京: 世界图书出版社.
- 6 王绍武, 1993, 气候诊断研究进展, 北京: 气象出版社.
- 7 Craik, A., 1985, *Wave Interactions and Fluid Flows*, Cambridge University Press.

The Space Structure of El Niño Area SST

Lin Zhenshan, Cong Feng and Deng Ziwan

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Multiple space scale analysis of the El Niño area SST is performed for 1970~1990 years. It shows that: (1) There are latitudinal and longitudinal long waves with characteristic wavelength 6000 and 6500 kilometers in the El Niño area. (2) There are latitudinal and longitudinal medium waves with characteristic wavelength 3500 and 4000 kilometers in the El Niño area. (3) The SST abnormal on large space scale and the four wave cointeraction mechanism are the top important cause of El Niño.

Key words wavelet El Niño four wave cointeraction