

HHT 新技术及其对 ENSO 的诊断

孙 娴^{1,2} 林振山¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 2. 陕西省气象局)

提 要: 年际及年代际时间变率是当代气候研究的重要问题之一。通过对近百年 Niño3 区月平均海面温度 (SST) 资料做 HHT 多时间尺度分析, 结果表明: SST 的变化包含了 7 个不同时间尺度的准周期振荡和一个世纪尺度的气候态, SST 的主周期发生了一次显著的变化: 1891—1943 年主周期是准 2a, 1944—2002 年的主周期是 3~4a; 分析不同模态对 ENSO 事件的作用表明: 3~4a 和 6~8a 分量决定了 ENSO 事件发生, 具有相位锁定的作用, 而其余尺度上的分量起着振幅和持续时间的调制作用; 近百年来, 冷、暖气候态变化对 ENSO 的冷、暖事件的影响并不显著; 一些研究认为的 1977 年以来的“暖态有利于 ENSO 暖事件发生”的主要原因是: 准 18~20a、40a 和平均气候态三个时间尺度振荡的共同作用在 1977—2002 年期间呈强暖相位的缘故。自 20 世纪 90 年代末期, 这三个尺度的共同作用在暖相位的振幅显著的减弱, 对 ENSO 暖事件的影响可能会减小, 这在 ENSO 的预报中应该引起注意。

关键词: 希尔伯特-黄变换 (HHT) 经验模态分解 本征模函数 ENSO 年代际变化

A New Technology HHT and Its Diagnosis for ENSO

Sun Xian^{1,2} Lin Zhenshan¹

(1. Department of Geography, Nanjing Normal University, 210097; 2. Shaanxi Province Meteorological Bureau)

Abstract: Based on a multi-timescale analysis method—Hilbter-Huang Transform (HHT), inter-annual and inter-decadal variability of the SST in Niño3 region in the last 100 years is

资助项目: 国家自然科学基金项目资助 (40371044)

收稿日期: 2006 年 3 月 27 日; 修定稿日期: 2006 年 6 月 19 日

analyzed. The results show that the SST variability involves seven quasi-period oscillations and one century's climate state. The main period of SST has experienced a significant change in different period. The inter-annual modes of 3—4a and 6—8a have a phase-locked to the ENSO cycle, and the rest of inter-annual and inter-decadal modes contribute significantly to the ENSO events both in amplitude and duration. But the effects of the “cool or warm climate regime” on La Niña and El Niño events are not prominent. The “warm” regime is in favor of El Niño events since 1977 is because the inter-decadal oscillations are very strong in warming phase. It is noteworthy that the amplitudes of three inter-decadal oscillations in warming phase have been weakened since the late 1990s, whose influence on ENSO warm events will be reduced.

Key Words: Hilbert-Huang Transform (HHT) empirical mode decomposition intrinsic mode function ENSO inter-decadal variability

引 言

Bjerknes^[1]首先提出 El Niño 事件是赤道东太平洋海-气相互作用的结果。从这一观点提出到目前, 研究人员对 ENSO 产生的机制及海气相互作用进行了大量研究。许多研究^[2-5]表明, 赤道东太平洋 SST 除年际变化外, 还存在着年代际和气候平均态的信号, 1970 年代中期 ENSO 事件的气候平均态发生了改变。Wang^[6,7]等发现平均气候暖态对 ENSO 暖 (El Niño) 事件的爆发有影响, 王绍武等^[8]的研究表明近 20 年来是暖事件的多发期。那么近百年来是否还发生过类似的平均气候态的改变? 平均气候态的改变对 ENSO 事件的发生具有什么作用?

Weng 和 Lau^[9]用 14a 日本静止气象卫星红外辐射的月平均资料作小波分析, 发现不同时间尺度的过程对各次 ENSO 事件的发展有不同的贡献。由于不同时间尺度的波动可能在不同时期占优势, 形成了 ENSO 变率的不规则性^[10], 这种变率会影响 ENSO 的预测。例如, 1991—1995 年连续发生了 3 次弱 ENSO 事件; 1991—1992 年、1993 年和 1994—1995 年, 特别是对后两次的预测, 许多动力学模式和统计模式遭到失败。Latif^[11]分析认为热带太平洋 SST 年代

际变化对其有重要作用。这 3 次厄尔尼诺事件和 1997/1998 年异常的厄尔尼诺事件, 使许多学者认识到 20 世纪 90 年代的厄尔尼诺事件与历史上其它年代相比存在很大的差异^[12-14]。是什么原因造成了这种差异目前尚未有一致的看法。ENSO 变率随时间的变化是一个值得关注的问题, 进一步认识 ENSO 随时间的变化, 对 ENSO 的预测有重要的意义。

Huang 等于 1998 年提出经验模态分解 (EMD) 方法^[15,16], 可将不同尺度的波动从原信号中逐级分离出来, 不同尺度的波动称为本征模函数 (IMF), 再对各 IMF 进行 Hilbert 变换, 称为 Hilbert-Huang 变换 (HHT)。它适合于非平稳、非线性信号。EMD 是自适应的, 具有更强的局地特性。小波分析不是自适应的, 一旦子波基确定, 就被应用于整个序列, 其测不准原理限制了其分析精度的提高^[15]。利用 HHT 方法对赤道东太平洋 SST 进行多尺度分析, 讨论各种气候变率对 ENSO 循环的影响, 为 ENSO 预测提供新的气候背景。

1 方法和资料

EMD 分解过程为: 找出序列 $x(t)$ 所有极大值和极小值点, 分别用三次样条函数拟

合成上下包络线, 得到平均包络线 m_1 , 将原序列减去 m_1 可得到去掉低频的新序列 h_1 。一般 h_1 不是平稳的, 多次重复上述过程, 使平均包络线趋近于零, 得到第一个 IMF 分量 c_1 , 代表原始序列中最高频的分量。即:

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (1)$$

对 r_1 继续上述分解, 直到所得到的剩余部分为单一信号或其值小于预先给定的值, 分解结束。原始的时间序列 $x(t)$ 可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (2)$$

对每一个 IMF 分量 $c_i(t)$ 进行 Hilbert 变换:

$$\tilde{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(t')}{t-t'} dt' \quad (3)$$

p 为 Cauchy 主值, $c_i(t)$ 和 $\tilde{c}_i(t)$ 可以构成一个复序列:

$$z_i(t) = c_i(t) + i\tilde{c}_i(t) = a_i(t)e^{i\theta_i(t)} \quad (4)$$

其中 $\tilde{c}_i(t)$ 是复序列 $z_i(t)$ 的虚部, 相应

的振幅和频率为:

$$a_i(t) = |c_i(t) + i\tilde{c}_i(t)|, \quad \omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt},$$

$$\theta_i(t) = \arctan(\tilde{c}_i(t)/c_i(t)) \quad (5)$$

所选取 Niño3 区 1881—2002 年月平均 SST 距平序列, 资料来源见参考文献 [17]。

无论是小波分析方法, 还是 EMD 方法, 都存在着边界效应。因此, 本文采用特征波进行两端延拓方法处理边界效应 [18]。

2 SST 异常的多尺度分析

对 Niño3 分析区 1881—2002 年月平均 SST 距平序列进行 EMD (图 1), 得到 7 个 IMF 分量和趋势分量 res。分析表明, IMF1、IMF2 和 IMF3 分别表示周期为准 1a、2a 和 3~4a 尺度振荡, IMF4 是 6~8a 尺度振荡; IMF5、IMF6 分别是 10~12a, 18~20a 尺度振荡, IMF7 是准 40a 尺度振荡, res 代表世纪尺度的平均气候态。

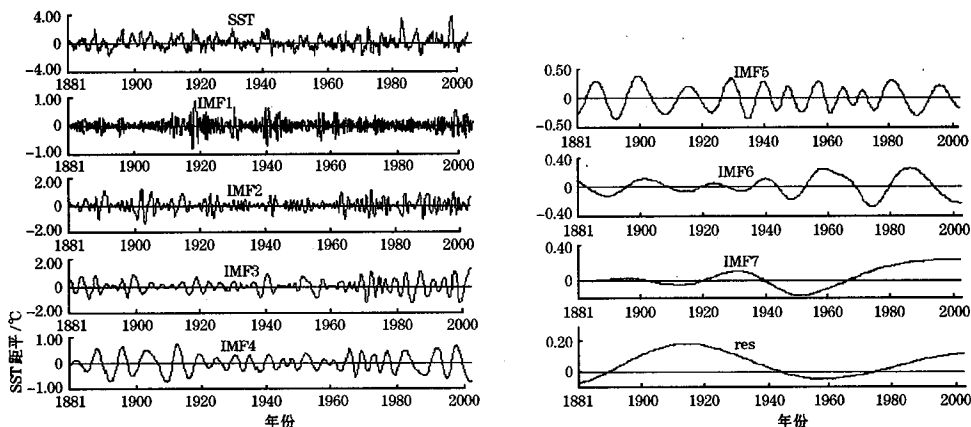


图 1 Niño3 区 1881—2002 年月平均 SST 序列 EMD 各分量

表 1 是各分量和 res 的方差贡献: (1) 3~4a 尺度的 IMF3 对 SST 的方差贡献最大, 是主周期; (2) IMF2、IMF3 和 IMF4 三个分量的解释方差相近, 三者的方差贡献之和为 81.7%, 所谓的 2~7a 的准周期实

际是由 2a、3~4a 和 6~8a 3 个不同尺度的波动组成; (3) 年际变化的方差贡献和振幅最大, 年代际变化次之, 气候态变化最小; (4) 图 1 中 res 曲线表明长时间尺度的平均气候态 [3,6,7] 确实是存在的。近百年来, 平

均气候态在 1891—1943 年、1977—2002 年为暖气候态（定义为正距平，负距平为冷气候态），1944—1976 年呈现冷气候态。1891—1943 年的暖气候态并未呈现利于

ENSO 暖事件发生。由于气候态 res 的解释方差仅 1.0%，振幅仅为 0.15℃，它对 ENSO 的冷、暖事件的影响较弱。

表 1 Niño3 区 SST 不同时期 IMF 分量及 res 的方差贡献（%）

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7	res
准周期	1a	2a	3~4a	6~8a	10~12a	18~20a	40a	90a
1881—2002 年	6.1	27.0	35.9	18.8	6.4	2.7	2.1	1.0
1891—1943 年	9.2	33.6	22.9	23.5	9.0	0.7	0.5	0.6
1944—1976 年	6.2	27.5	40.5	12.2	5.2	6.3	2.0	0.1
1977—2002 年	3.2	21.4	48.3	19.5	4.1	3.3	0.1	0.1

同时，计算 1891—1943 年、1944—1976 年、1977—2002 年二个气候态下的各分量的方差贡献（表 1）：1891—1943 年期间 SST 的波动主周期为 2a，而 1944—1976 年、1977—2002 年两个气候态下主周期则都为 3~4a。这意味自 1944 年起 Niño3 区 SST 主周期发生了变化。

3 1920—1950 年 ENSO 变化的特殊性

有学者^[19,20]很早就发现 1920—1950 年是 ENSO 年际变化很弱时期，Webster 等^[21]指出这是一个 ENSO 减弱时期，Allan^[22]与 Kleeman 等^[23]称为静止期。这段时间 ENSO 频率变化有什么特点，还不很明确。

计算这一时期各 IMF 的平均频率和方差贡献，表明：（1）在 1920—1950 年 IMF2 的平均周期由 2.0a 减小为 1.7a，IMF3 的平均周期由 3.8a 减少到 3.4a，IMF4 的平均周期由 6.5a 减少到 4.7a 及 IMF5 的平均周期由 12.3a 减少到 10.4a，表明各年际尺度上的振荡频率变快，平均周期变小；（2）在 1920—1950 年期间准 2a 波动成为主周期，3~4a 的波动减弱为次周期，而准 1a 方差贡献增强了约 131%。同时，IMF2、IMF3 和 IMF4 的振幅在 1920—1950 年期间显著减小，相当于其余年份平均振幅 50%左右。

可见，造成 1920—1950 年出现了 ENSO 活动减弱的主要原因是：占方差贡献 69.1%的 IMF2、IMF3 和 IMF4 年际波动显著减弱。

4 Niño3 区 SST 不同模态对 ENSO 的贡献

近年来人们发现赤道东太平洋海温变化中不但存在年际变化的信号，还存在年代际变化的信号^[3]。不同时间尺度的过程对各次 ENSO 事件的发展有不同的贡献^[7]。近百年来，各种不同尺度的模态对 ENSO 事件起着什么样的作用呢？为此，对不同尺度的 IMF 进行 SST 重构，如图 2 所示。

Niño3 区 SST 的 IMF2、IMF3 和 IMF4 的方差贡献之和为 81.8%，IMF3 和 IMF4 的方差贡献之和为 54.8%，但是两者的位相分布基本一致，不同的只是振幅的大小（图略）。所以，决定 ENSO 事件发生的频率或年份是由 IMF3 和 IMF4 的合成频率所决定的（即相位锁定作用），而其余尺度的波动则主要表现为对 ENSO 事件振幅的影响（起着振幅的调制作用），即决定事件的相对强弱。如图 2a，虚线是 IMF3 和 IMF4 的合成，仅仅确定了 ENSO 事件可能发生的年份，但是振幅较小。但是在加上 IMF1 和 IMF2 的振荡时，相对强的 ENSO 事件（如 1896/1897，1939/1941，1972/1973，

1982/1983, 1986/1987, 1997/1998) 就显现出来 (图 2b)。同时, 年际尺度 IMF1~4 的波动在加上年代际尺度上的振荡后, 其振幅发生了变化。例如 IMF1~4 的振幅在 1993—1995 年很小, 达不到 EL Niño 事件, 但是将年代际尺度上的波动叠加后, 1993 年、1994—1995 年表现出 El Niño 事件。所以 1993 年、1994—1995 年弱的 ENSO 事件主要是年代际尺度上的贡献。

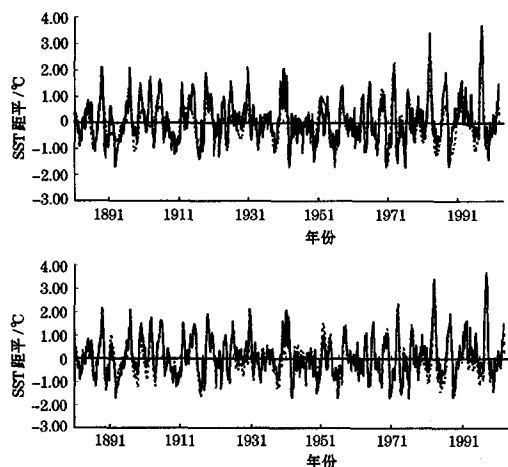


图 2 1881—2002 年不同尺度的 IMF 对 SST 重构
图 a 虚线为 IMF3 和 IMF4 合成, 实线为 SST; 图 b 虚线为 IMF1~4 合成; 实线为 SST

将 SST 的年代际尺度上的准 18~20a (IMF6)、准 40a (IMF7) 振荡和气候态 (res) 合成 IMFc (图 3)。IMFc 从 1977 年以来不仅处于暖相位, 而且强度显著的增强, 平均振幅 (0.30°C) 相当于 1891—1943 年期间的 200%, 方差贡献也增至 3.5%, 造成 IMFc。增强的主要原因是准 18~20a、40a 尺度上波动从 1950 年代中期振幅显著的增强, 并且在 1980—1997 期间 IMF6、IMF7 和 res 均处于暖相位。因此在 1977—2002 年呈现出暖相位有助于暖事件 (El Niño) 发生的主要原因是准 18~20a、准 40a 及气候态二个年代际尺度振荡的共同作用。

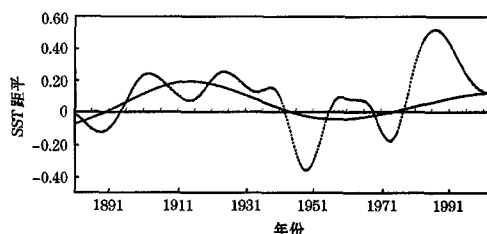


图 3 1881—2002 年 SST 的 IMF6、IMF7 和 res 合成的 IMFc (虚线), 实线是气候态 res

5 讨论

通过对 1881—2002 年 Niño3 区 SST 多尺度分析, 指出 SST 变化隐含了 7 个不同时间尺度的准周期振荡和一个世纪尺度的气候态, 3~4a 周期振荡是其主周期。准 3~4a、6~8a 尺度振荡决定 ENSO 事件发生 (即相让锁定作用), 而其余尺度上的分量起着 ENSO 事件振幅和持续时间的调制作用。平均气候态对 SST 的解释方差、波动强度等的分析表明, 冷、暖气候态对 ENSO 的冷、暖事件的影响并不显著。一些研究认为 1977 年以来的“暖态有利于 ENSO 暖事件发生”的主要原因是: 准 18~20a、40a 和平均气候态三个时间尺度振荡的共同作用在 1977—2002 年期间呈强暖相位的缘故。值得注意的是自 20 世纪 90 年代末期, 合成的 IMFc 的振幅显著减弱, 这对 ENSO 暖事件的影响将会减小, 这在 ENSO 预报中应该引起注意。

HHT 方法可以将信号中的不同时间尺度的波动逐级分解开来, 它指出 IMF 的振幅允许改变, 突破了传统上仅将振幅不变的简谐信号定义为基本信号的局限, 获得变化的振幅和频率, 可准确地反映出该物理过程中能量在时间上的分布规律, 这将有助于全面认识海温变化的年际、年代际变动到世纪尺度的演变规律, 对探索 ENSO 的可预报性是至关重要的。

参考文献

- 1 Bierknes J. Atmospheric Teleconnections from the E-

- quatorial Pacific [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, 97: 163-172.
- 2 Nitta T, Yamada S. Recent Warming of Tropical Sea Temperature and Its Relationship to the Northern Hemisphere Circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, 67: 375-383.
- 3 钱维宏, 朱亚芬, 叶谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率 [J]. *科学通报*, 1998, 43 (10): 1098-1102.
- 4 Seager R, Murtugudde R. Ocean Dynamics, Thermocline Adjustment and Regulation of Tropical SST [J]. *Climate*, 1997, 10: 521-534.
- 5 Liu Z. The Role of Ocean in the Response of Tropical Climatology to Global Warming: The West-east SST Contrast [J]. *Climate*, 1998, 11: 864-875.
- 6 Wang B. Interdecadal Changes in El Niño Onset in the Last Four Decades [J]. *Climate*, 1995, 8: 267-285.
- 7 张勤, 丁一汇. 热带太平洋年代际平均气候态变化与 ENSO 循环 [J]. *气象学报*, 2001, 59 (2): 157-172.
- 8 王绍武, 龚道溢. 近百年来的 ENSO 事件及其强度 [J]. *气象*, 1999, 25 (1): 9-13.
- 9 Weng H, Lau K M. Low-frequency Time-space Regimes in Tropical Convection [J]. *Theor Appl Climatol*, 1996, 55: 89-98.
- 10 王绍武, 朱锦红, 蔡静宁等. 近 500 年 ENSO 时间序列的建立与分析 [J]. *自然科学进展*, 2004, 14 (4): 424-431.
- 11 Latiff M, Kleeman R, Eckert G. Greenhouse Warming, Interdecadal Variability, or El Niño? An Attempt to Understand the Anomalous 1990s [J]. *Climate*, 1997, 10 (9): 2221-2239.
- 12 Trenberth K E, Hoar T J. The 1990-1995 El Niño Southern Oscillation Event: Longest on Record [J]. *Geophy Res Lett*, 1996, 23: 57-60.
- 13 Gu D, Philander S G H. Interdecadal Climate Fluctuations that Depend on Exchanges between the Tropics and Extratropics [J]. *Science*, 1997, 275: 805-807.
- 14 周琴芳, 翟盘茂. 1994/1995 年 ENSO 事件的诊断分析 [J]. *气象*, 1996, 22 (2): 18-23.
- 15 Huang N E, Shen Z, Long S R et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [J]. *Proc. R. Soc. Land. A*, 1998, 454: 899-955.
- 16 Huang N E, Shen Z, Long S R. A New View of Nonlinear Water Waves: the Hilbert Spectrum [J]. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 1999, 31: 417-457.
- 17 Kaplan A, Cane M, Kushnir Y et al. Analysis of Global Sea Surface Temperature 1856-1991 [J]. *Geophy. Res.*, 1998, 103: 18567-18589.
- 18 Huang Da-ji, Hao Jin-ping, Su Ji-lan. Practical Implementation of the Hilbert-Huang Transform Algorithm [J]. *Acta. Oceanologica Sinica*, 2003, 25 (1): 1-11.
- 19 Troup A J. The Southern Oscillation [J]. *Quart. J. Roy. Metsor. Soc.*, 1965, 91: 490-506.
- 20 Trenberth K E. Signal Versus Noise in the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, 112: 326-332.
- 21 Webster P J, Magaña V O, Palmer T N et al. Monsoons: Processes, Predictability, and the Prospects for Prediction [J]. *Geophy. Res.*, 1998, 103: 14451-14510.
- 22 Allan R J. ENSO and Climatic Variability in the Past 150 Years [M]. In Diaz H F, Markgraf V, eds. *El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 3-35.
- 23 Kleeman R, Power S B. Modulation of ENSO Variability on Decadal and Longer Timescale [M]. In Diaz H F, Markgraf V, eds. *El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 413-441.