

热带太平洋海平面高度年变化 与季节内变化特征^{*}

胡瑞金 刘秦玉

(青岛海洋大学海洋环境学院 青岛 266003)

提要 利用小波分析方法,对热带太平洋(30°S—30°N, 130°E—80°W) 1992 年 10 月 3 日—1996 年 10 月 9 日期间的海平面高度资料从振荡周期、强度和传播等方面进行了全面分析。研究表明,海平面高度存在明显的年变化、58—139 天振荡和 29—35 天振荡。其中年变化主要存在于 0°—15°N、135°E—95°W,传播不明显。58—139 天振荡主要位于以 20°N 和 20°S 为中心的两个副热带区域中(范围约为 16°N—30°N、130°E—150°W 和 17°S—30°S、150°E—150°W),它们向西传播,传播速度随纬度增高而变慢,在 20°N 传播速度约为 10cm/s,波长约为 800km。90 天左右的振荡具有年变化且与 El Nino 事件有很好的对应关系。29—35 天振荡主要存在于中东太平洋以 5°N 和 5°S 为中心的带状区域中,经度范围约为 160°W—105°W 和 170°W—140°W,传播不明显。年变化、58—139 天和 29—35 天振荡方差占总方差的百分比分别约为:20%—40%、10%和 1%—2%。

关键词 热带太平洋,海平面高度,小波分析

中图分类号 P731

热带太平洋是全球海-气相互作用显著区域,海洋上层的变化对气候有很大影响。因此有关研究始终受到人们的重视。但以前由于观测资料缺乏,研究受到很大限制。自从有了卫星遥感观测以来,海洋研究取得了迅速进展。例如 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料(简称 T/P 资料),尽管其时间长度较短,但广泛应用于海洋环流、海洋潮汐等研究(李立等,1999;王海瑛等,1999;王东晓等,2001)。许多作者对 T/P 资料本身的分析也做了很多工作。例如,刘秦玉等(1999)利用功率谱和最大熵谱分析了 T/P 资料,指出在西太平洋副热带逆流区海平面高度存在 90 天振荡而在 10°N 附近存在明显的 60 天振荡;Qiu (1999)利用功率谱方法揭示在北太平洋副热带逆流区存在波长约为 300km 的波动;Cazenave 等(1998)则指出全球海平面高度存在(1.3±0.15)mm/a 的变化。考虑到 T/P 资料包含多时间尺度过程且随时间变化的信息,上述基于普通谱分析或趋势拟合方法皆有不足。近几年发展起来的小波分析方法由于可以同时揭示时间序列在时域和频域的性质而在海洋和大气研究中得到广泛的应用。例如小波分析方法被用来研究湍流(胡增臻等,1997)、气温和降水(纪忠萍等,1999)、SST(林振山等,1997)等。Torrence 等(1998)对小波

^{*} 国家自然科学基金资助项目,49776286 号。胡瑞金,男,出生于 1965 年 1 月,硕士,副教授, E-mail: hujrj@ mail. ouqd. edu. cn

收稿日期:2000-03-07,收修改稿日期:2001-07-29

分析的基本原理及其在大气海洋中的应用有一个很全面的介绍。但将小波分析应用于对 T/P 资料进行分析尚不多见,尤其是缺乏综合分析。本文基于小波分析方法对热带太平洋 T/P 资料进行全面研究。除进行通常的小波谱图分析外,还着重研究了振荡周期、强度及其空间分布和振荡传播特点等,以期从不同侧面揭示热带太平洋海平面高度不同时间尺度时-空变化特征。

1 资料与方法

1.1 资料

T/P 资料是由 1992 年起由法国与美国联合开展的 TOPEX/Poseidon 卫星观测经过订正和客观分析得到的网格点上的海平面高度资料。本文所用的资料来自美国 Massachusetts 技术研究所,资料范围为 $66^{\circ}\text{S}-66^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}-360^{\circ}\text{E}$; 空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$, 资料长度为 148(测次); 时间从 1992 年 10 月 3 日—1996 年 10 月 9 日, 时间间隔为 10 天。本文选取热带太平洋区域进行研究, 其范围为 $30^{\circ}\text{S}-30^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}-80^{\circ}\text{W}^{[1]}$ 。

1.2 方法

使用小波分析方法^[2]对上述每个网格点的 T/P 资料进行分析。设有时间函数 $f(t)$, 定义(连续)小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* ((t-b)/a) dt \quad (1)$$

其中, a, b 为实数, 分别称为尺度参数和位置参数; ψ 为小波母函数, $*$ 表示共轭; $W_f(a, b)$ 为小波系数。

$|W_f(a, b)|^2$ 即为小波谱, 它能揭示出时间序列中的频谱结构及其随时间的变化, 这一特点是一般功率谱(包括最大熵谱)所不具备的(丁裕国等, 1998)。

若在 b 域上对小波谱进行积分即可得到某一时间尺度上的不随时间变化的平均谱, 也称小波方差, 其含义与一般功率谱(或最大熵谱)相同, 因此也可得到普通意义下的周期。有关小波方差的显著性检验问题, 详见 Torrence 等(1998)的介绍。小波变化的逆变换(反演)为:

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a, b) \psi((t-b)/a) / a^2 da db \quad (2)$$

其中, C_{ψ} 为系数。

利用小波逆变换(反演)可以对原时间序列进行重构, 或提取某一特定频率域的时序信号, 因此也具有滤波功能(Torrence *et al*, 1998), 可见小波分析是时间序列分析中的一种十分有用的手段。

选用 Morlet 小波母函数, 其定义为:

$$\psi(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}} \quad (3)$$

其中, η 为无量纲时间参数; ω_0 为无量纲频率, 在此取 $\omega_0 = 6$ 以满足容许性条件(Torrence *et al*, 1998)。由(3)式可见, Morlet 小波母函数是高斯包络下的单频复正弦函数。这是一

1) 资料由 TEXAS A & M 大学海洋系 Chang Ping 教授提供

2) 本文所用小波分析程序可从网站下载, 网址: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>

个常用的小波,因为它在时域和频域的局部性能都比较好。

实际计算时对(1)、(2)式采用间接算法,即 FFT 算法进行计算;对尺度(a)按幂级数作离散化($a_j = a_0 2^{0.25j}$, $j = 0, 1, \dots, 32$, a_0 为两个时间间隔,即 20 天),而对位移(b)以基本间隔作均匀采样。如此即可完成相应的计算。

本研究基于上述方法对热带太平洋区 $2^\circ \times 2^\circ$ 网格点的 T/P 资料逐一进行分析,并考察各网格点分析结果的空间分布,以期得到一些有意义的结果。

2 结果分析

2.1 显著周期

首先计算了每种时间尺度的小波方差,并进行了显著性检验(5%信度)。结果表明通过信度检验的时间尺度有 4 种: 2645 天(年际), 331—393 天(年), 58—139 天(含 58, 69, 83, 98, 117, 139 天)和 29—35 天。每种时间尺度段中的显著周期之空间分布基本相同(图略),而不同时间尺度段间有很大差别。图 1 给出了 4 种时间尺度段中典型周期小波方差过信度空间分布情况。

由图 1 可见, 2645 天主要存在于暖池区和以 0°N 、 165°W 、 25°S 、 110°W 、 5°N 、 90°W 三点(中东太平洋)组成的三角区域; 331 天(即 331—339 天)主要存在于 0° — 15°N 的北半球, 经度范围约为 170°E — 95°W ; 在 5°N — 15°N 区域经度范围可扩至 135°E , 年际变化与年变化显著区域似有互补趋势; 83 天(亦即 58—139 天)振荡主要存在于分别以 20°N 和 20°S 为中心的两个副热带区域中, 范围约为 16°N — 30°N 、 130°E — 155°W 和 17°S — 30°S 、 150°E — 150°W ; 而 29 天(即 29—35 天)振荡主要存在于中东太平洋分别以 5°N 和 5°S 为中心的两个带状区域中, 经度范围分别为 160°W — 105°W 和 170°W — 140°W 。需要说明的是, 2645 天周期已经比时间序列长度长, 因此这一周期是否真正存在需要更长的资料进行验证。不过, 由于这一周期长度与 El Niño 周期相符, 加之空间分布型也与 El Niño 一致(Zhang *et al.*, 1997), 这一周期存在的可能性还是有的。此外, 刘秦玉等(1999)曾经指出海平面高度沿 10°N 、 10°S 均存在准 60 天的波动。本文的分析表明在这些纬度上似乎不存在这种振荡。83 天(58—139 天)与 29 天(29—35 天)振荡的空间分布则与刘秦玉等(1999)得到的结果基本一致。

2.2 振荡强度

为了进一步比较振荡的强度, 分别计算了 2645 天、331—393 天、58—139 天和 29—35 天振荡的小波方差与所有尺度振荡总方差之比, 结果绘于图 2。由图 2 可见, 2645 天变化、331—393 天变化、58—139 天振荡和 29—35 天振荡小波方差占总方差的比例分别可达 20%、20%—40%、10% 和 1%—2%, 最大区域与过信度区域非常吻合。小波方差空间分布情况也与之类似(图略)。可见年际变化和年变化占主导地位。不过由于分析所用资料长度所限, 年际变化周期未必可信, 故以下不再分析年际变化, 且着重对 58—139 天振荡和 29—35 天振荡做进一步分析。

2.3 小波谱图

图 3 给出了 20°N 纬度带上 130°E 、 160°E 、 170°W 和 140°W 4 点的小波谱图, 周期轴(纵轴)仅绘至 139 天。由图 3 可以看出, 90 天左右振荡信号最强, 其强度存在明显的年变化, 且与 El Niño 事件或 La Niña 事件有较好的对应关系。

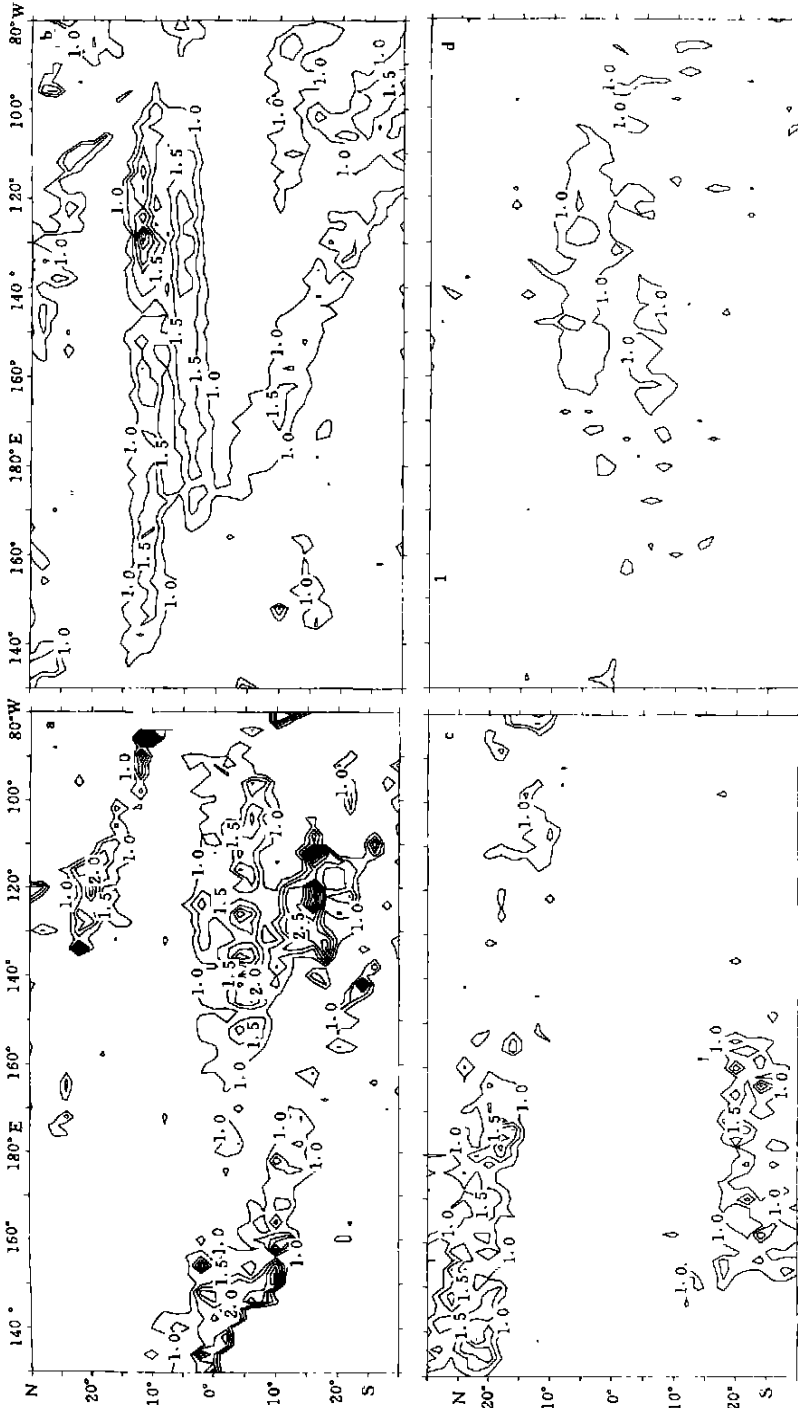


图 1 4 种时间尺度振荡过信度(5%)空间分布情况

Fig.1 Spatial distribution of oscillations exceeding significant level(5%) on 4 time scales

a. 2645 天; b. 331 天; c. 83 天; d. 29 天

(图中的数值代表小波方差与理论谱之比值,值大于或等于 1 表示振荡是显著的)

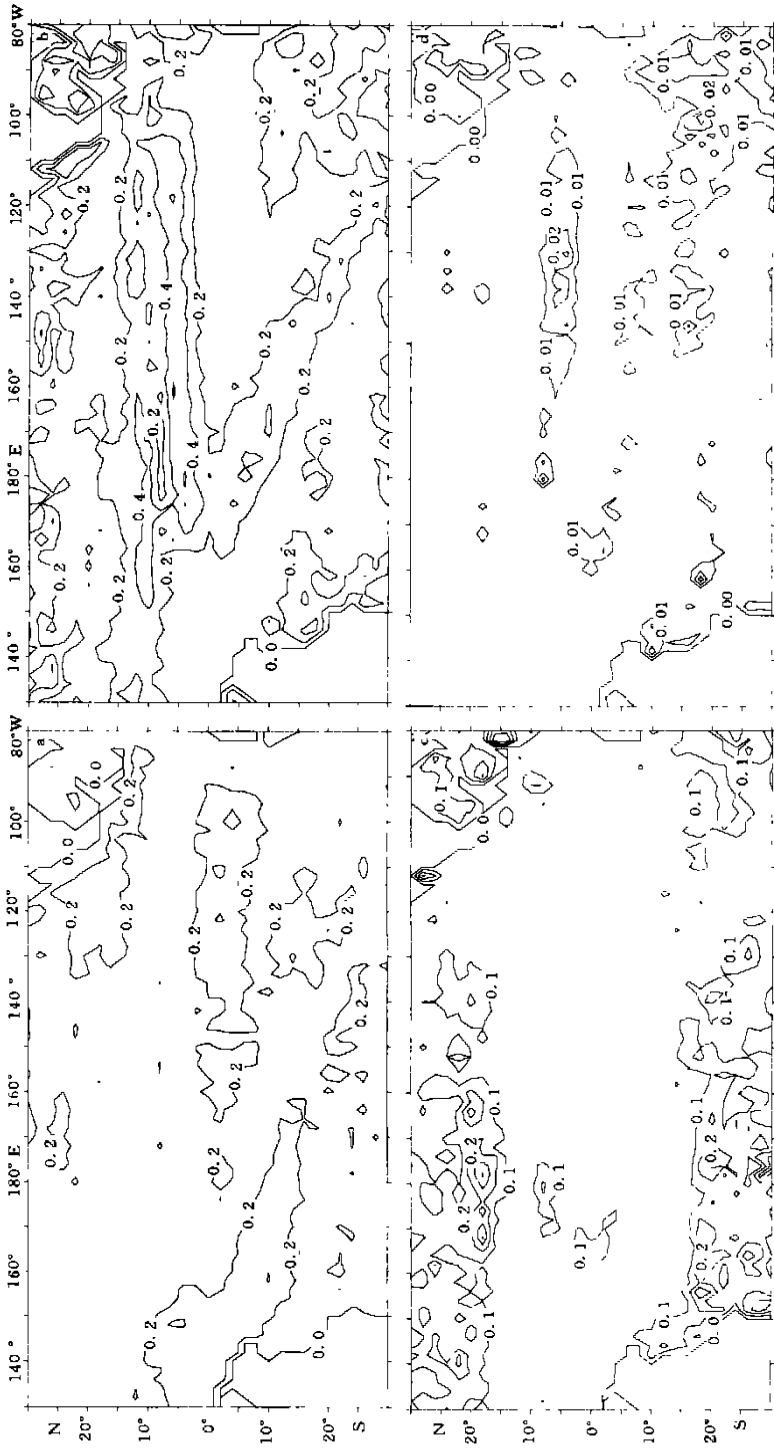


图2 4种时间尺度振荡的小波方差与总方差比值之空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the ratio of the wavelet variance to total variances on 4 time scales.

a: 2645 天; b: 331 - 393 天; c: 58 - 139 天; d: 29 - 35 天

根据 Trenberth (1998) 的研究, 1993 年 2 月至 1993 年 9 月和 1994 年 6 月至 1995 年 3 月发生了两次 El Niño 事件, 1995 年 9 月至 1996 年 3 月出现 La Niña。由图 3 可以看出, 在此期间, 在中西太平洋, El Niño 事件开始后, 90 天左右振荡强度逐渐增大, 大约半年后, 振荡强度达到最大, 当 El Niño 结束时, 振荡强度达到最小; 当 La Niña 开始时, 振荡强度达到另一个极大。20°N、160°E 对应于每次 El Niño 事件或 La Niña 事件, 较 20°N、130°E 点更典型些。中东太平洋规律似乎与中西太平洋不一致。20°N、160°W 处小波谱值对应 1993 年 El Niño 事件时, 当 El Niño 发生时及结束半年后达极大值, 而在 El Niño 结束时达极小; 对应 1994 年 El Niño 事件时, 当 El Niño 发生时谱值极小, 一直持续半年时间, 当 El Niño 结束时达到极大, 半年后当 La Niña 开始时, 谱值达到极小, 当 La Niña 结束时达到极大。而 20°N、140°W 海面高度仅对 1994 年 El Niño 事件有反映, 且谱值在各阶段皆很小, 这与前面的分析结果是一致的。不同点(区域)对 El Niño 事件或 La Niña 事件响应强度或位相关系之不同值得研究。

Mitchum (1995) 根据威克岛 (Wake Island, 19°17'N, 166°37'E) 20 年 (1973—1992 年) 海平面高度资料和 3 年的 GEOSAT 高度计资料, 利用高通滤波 (200 天以下) 指出 90 天振荡在威克岛很明显, 且倾向于在 El Niño 事件 1.5 年以后发生。本文的结论与 Mitchum (1995) 有所不同, 原因之一可能是所用的资料及分析方法的不同, 另一个可能的原因是 El Niño 在 90 年代发生了明显的年代际变化 (Wang, 1995)。Mitchum 也指出 90 天振荡在 El Niño 事件 1.5 年以后发生, 在 1988 年 El Niño 时最明显, 在 1984 年 El Niño 时次之, 而在 1991 年 El Niño 时不明显 (Mitchum, 1995)。

2.4 振荡传播

图 4 给出了用小波反演方法得到的 83 天振荡沿 16°N、18°N、20°N 和 22°N 的传播情况。由图 4 可见, 在某些经度以西 83 天振荡均存在明显的向西传播现象, 而在这些经度以东, 该振荡的传播不明显。不同的纬度带上, 这种临界经度并不相同。16°N、18°N、20°N 和 22°N 上, 相应的临界经度分别为 110°W、130°W、155°W 和 140°W。这说明 83 天振荡在 16°N—22°N 范围内至少在 155°W 以西总是向西传播的。传播速度随纬度的增高而降低, 沿 16°N、18°N、20°N 和 22°N 纬度西传速度分别约为 14cm/s、12cm/s、10cm/s 和 9cm/s, 波长随纬度的增高而减小, 在 20°N 波长大约为 800km。

图 5 进一步给出了 16°N、18°N、20°N 和 22°N 纬度带上的各点与各自纬度带上 140°E 的后延相关系数—经度分布图。由图 5 也可确定波动的传播方向、波速和波长, 所得结果与前面完全一致, 这说明这些振荡是真实存在的。58—139 天沿 16°N、18°N、20°N 和 22°N 传播规律与上述结论基本一致 (图略)。

需要说明的是, Qiu (1999) 指出在北太平洋副热带逆流区存在波长约为 300km, 周期约为 160—200 天, 波速约为 -1.6cm/s 至 -2.8cm/s 的最不稳定波, 并认为是由斜压不稳定引起的。本文的分析结果与 Qiu (1999) 有很大不同, 例如 160—200 天周期在本文的分析中并不显著, 因此 83 天 (58—139 天) 振荡的形成与维持机制需要研究 (Liu *et al.*, 2000)¹⁾。

1) Liu Q, Liu Z, Hu R, 2000. Comments on "Seasonal Eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon Observations and Theory". (unpublished)

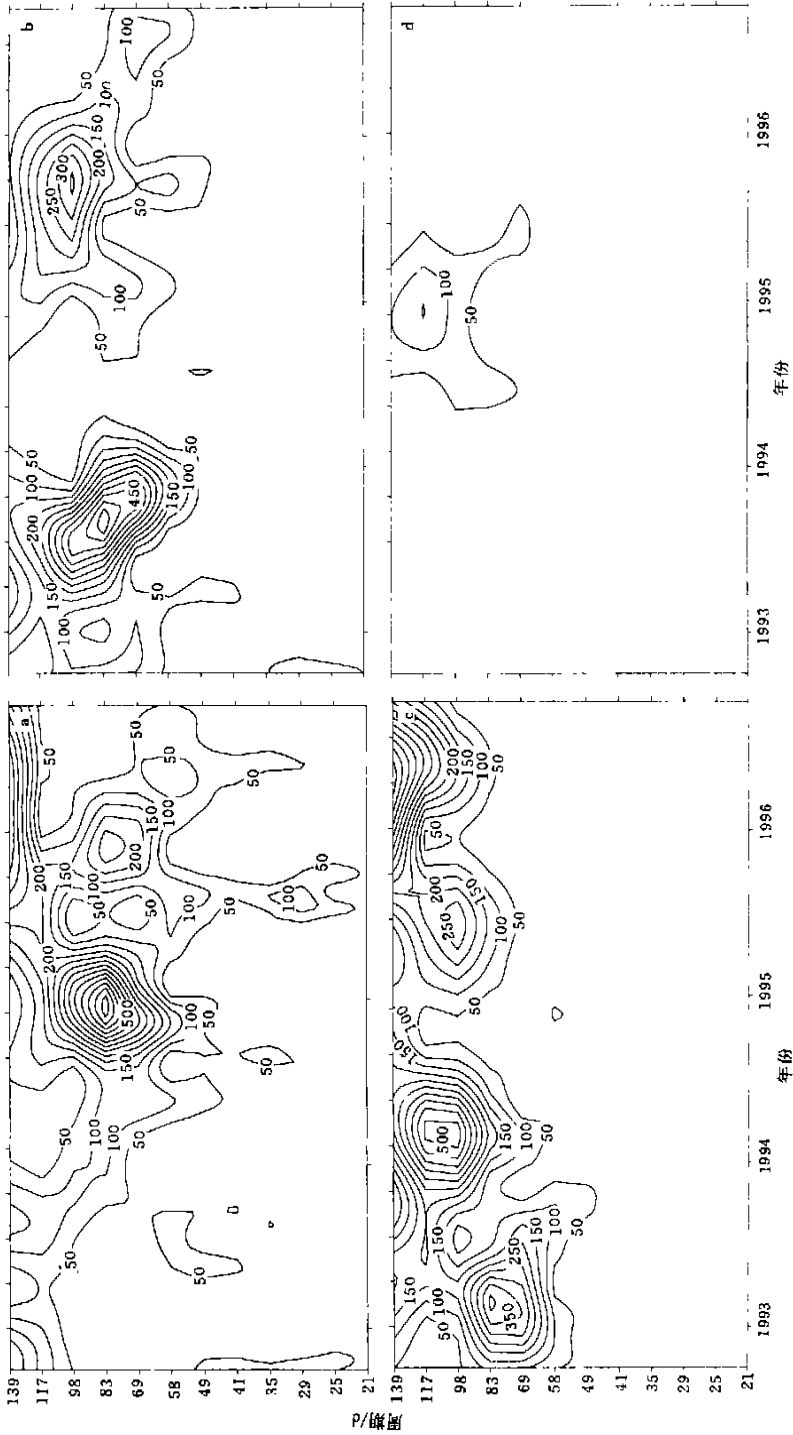


图 3 沿 20°N 4 个点 T/P 海平面高度的小波谱

Fig. 3 Wavedlet spectrums for T/P sea surface height at 4 points along 20°N

a. 130°E; b. 160°E; c. 170°W; d. 140°W

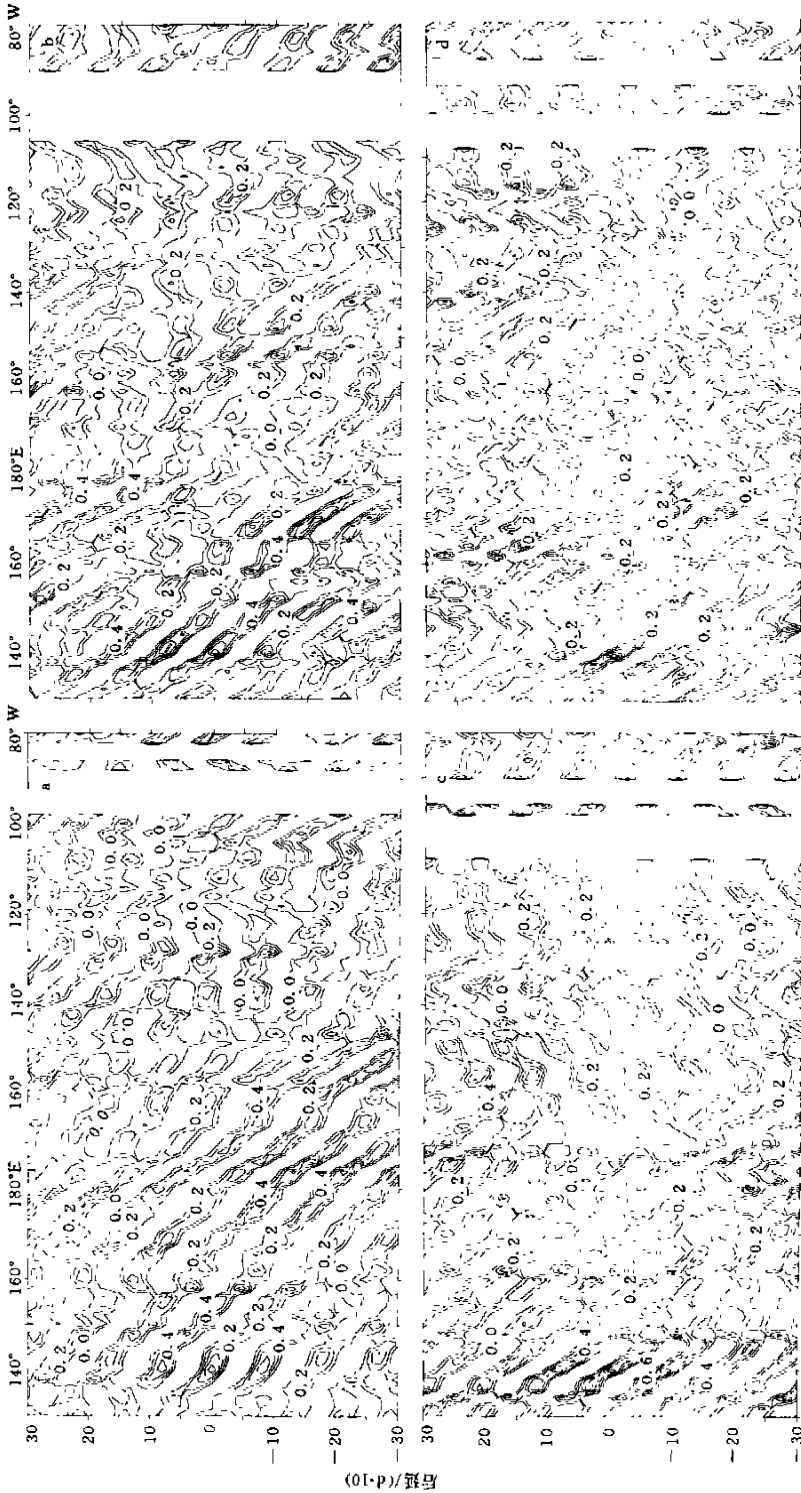


图5 沿4条纬度的落后相关系数(计算参考点为每条纬度上的140°E)
 Fig.5 Lag correlation coefficients along four latitudes(The reference point is 140°E for each latitude)
 a. 16°N; b. 18°N; c. 20°N; d. 22°N

值得注意的是, 20°N、155°W 附近正是夏威夷群岛中大岛(Big Island) 位置之所在, 考虑到 83 天振荡过信度水平及振荡强度均以 155°W 为明显分界线(图 1 和图 2), 夏威夷群岛中大岛在 83 天(58—139 天) 振荡的生成与传播中起何作用值得研究。

用同样的方法研究了 29 天振荡沿 0°、2°N、4°N、6°N 和 331 天振荡沿 6°N、8°N、10°N、12°N 的传播情况, 结果表明这些振荡传播不明显(图略)。

3 结论

3.1 小波分析方法能够揭示时间序列频谱结构及其随时间的变化, 也可用于普通意义下的周期提取和滤波分析, 因而是资料分析中的一种有力工具。

3.2 热带太平洋 T/P 海平面高度存在明显的年变化、58—139 天振荡和 29—35 天振荡。

3.3 年变化主要存在于太平洋 0°N—15°N 区域; 58—139 天振荡主要存在于以 150°W 以西, 以 20°N 和 20°S 为中心的两个副热带区域中; 29—35 天振荡主要存在于中东太平洋以 5°N 和 5°S 为中心的带状区域中。各种尺度振荡方差占总方差之百分比约为: 年变化 20%—40%、58—139 天 10%、29—35 天 1%—2%。

3.4 58—139 天振荡在热带中西太平洋向西传播, 传播速度随纬度增高而变慢。在 20°N 传播速度约为 10cm/s, 波长约为 800km。90 天左右的振荡具有年变化且与 El Niño(La Niña) 事件有很好的对应关系; 年变化和 29—35 天振荡传播不明显。

需要指出的是, 本文只是根据小波分析研究了 T/P 海平面高度多时间尺度变化特征, 关于这些振荡(例如 58—139 天振荡) 形成与维持的物理机制有待于结合其它要素(如温、盐、流) 从资料分析、理论研究和数值模式各方面做进一步研究。

致谢 在数据处理过程中得到王韶霞和贾英来博士的大力帮助, 王启教授对结果分析提出了很多有益的建议, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 丁裕国, 江志红, 1998 气象数据时间序列信号处理. 北京: 气象出版社, 278—283
- 王海瑛, 陆洋, 许厚泽等, 1999 利用 T/P 卫星测高资料构造中国近海及邻域平均海平面和海面地形. 海洋与湖沼, 30(4): 403—409
- 王东晓, 施平, 杨昆等, 2001 南海 TOPEX 海面高度资料的混合同化试验. 海洋与湖沼, 32(1): 101—109
- 纪忠萍, 谷德军, 谢炯光, 1999 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析. 热带气象学报, 15(1): 48—55
- 刘秦玉, 王启, 1999 热带太平洋海平面高度季节内振荡的空间分布特征. 青岛海洋大学学报, 29(4): 549—555
- 李立, 吴日升, 李燕初等, 1999 TOPEX/Poseidon 高度计浅海潮汐混淆的初步分析. 海洋学报, 21(3): 7—13
- 林振山, 丛峰, 邓自旺, 1997 El Niño 区域 SST 的空间结构. 大气科学, 21(3): 324—330
- 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
- Cazenave A, Dominh K, Brossier C *et al*, 1998 Mean sea level investigation at global and regional scales from TOPEX/Poseidon AVISO Altimetry Newsletter, 6: 23
- Mitchum G T, 1995. The source of 90-day oscillations at Wake Island. J Geophys Res, 100: 2459—2475
- Qiu B, 1999. Seasonal eddy field modulation of the North Pacific subtropical countercurrent: TOPEX/Poseidon observation and theory. J Phys Oceanogr, 29: 2471—2486
- Torrence C, G P Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis Bull Amer Meteor Soc, 79: 61—78
- Trenberth K E, 1998. The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(12): 2771—2777

Wang B, 1995. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades J Climate, 8: 267—285

Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900—93 J Clim, 10: 1004—1020

ANNUAL AND INTRASEASONAL VARIATIONS IN SEA SURFACE HEIGHT OVER THE TROPICAL PACIFIC

HU Rui-Jin, LIU Qin-Yu

(College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

Abstract On the basis of wavelet theory, comprehensive analysis of the data of sea surface height (TOPEX/Posidon data) in the tropical Pacific ($30^{\circ}\text{S}—30^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}—80^{\circ}\text{W}$), focusing on oscillation period, strength and propagation, is undertaken. The main results obtained are as follows. (1) Distinct variations with periods of one year, 58—139 days and 29—35 days exist in the surface height data. (2) Annual variation in the Northern Hemisphere locates in $0^{\circ}\text{N}—15^{\circ}\text{N}$, with longitudinal extension of $170^{\circ}\text{E}—90^{\circ}\text{W}$ in $0^{\circ}\text{N}—5^{\circ}\text{N}$ and $130^{\circ}\text{E}—90^{\circ}\text{W}$ in $5^{\circ}\text{N}—15^{\circ}\text{N}$, whereas in the Southern Hemisphere a narrow band extending from 0°N , 175°E to 30°S , 100°W can be seen. Oscillation of 58—139 day periods is remarked in $16^{\circ}\text{N}—30^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{E}—155^{\circ}\text{W}$ and $17^{\circ}\text{S}—30^{\circ}\text{S}$, $150^{\circ}\text{E}—150^{\circ}\text{W}$, where there are two subtropical regions with central latitude of 20°N and 20°S , respectively. 29—35 day variations are found in two bands in the central and eastern Pacific centered by 5°N and 5°S , ranging from 160°W to 105°W and from 170°W to 140°W , respectively. (3) Oscillation of 58—139 day periods propagates westward, with speed decreasing with latitude. The speed of propagation and the wavelength are around 10cm/s and 800km , respectively. Annual variations and oscillations of 29—35 days have no obvious propagation features. (4) Oscillation of 90 days period or so reveals annual variability and has a good correlation with ENSO. (5) The ratios of variances for period of one year, 58—139 days and 29—35 days to total variance are about 20%—40%, 10% and 1%—2%, respectively.

Key words Tropical Pacific, Sea surface height, Wavelet analysis