

南海东北海域海面高度的多尺度变异

李燕初¹, 蔡文理¹, 李 立¹

(1. 国家海洋局 第三海研究所, 福建 厦门 361005)

摘要: 利用 8 a 的 TOPEX/Poseidon 高度计资料, 采用小波分析方法, 研究南海东北部海域海面高度的多尺度变异. 研究得出, 南海东北部海域的海面高度变化主要受 3 个不同时间尺度因素的影响, 其中最强的是季节变化(V_a)的影响, 其周期范围为 0.60~1.20 a, 它主要与海面高度的年循环相联系; 其次是周期在 0.17~0.45 a(即 2~5 个月)的变化(V_{25})的影响, 它主要与中尺度时间周期引起的海面高度变化相联系. 较小的一个因素是周期在 1.50~5.00 a 的年际变化(V_i)的影响, 它主要与 El Niño 事件引起的海面高度变化相联系. 分析表明对 8 a 平均而言, 海面高度变化所引起的能量偏差 V_{25} 的高值区主要分布在吕宋海峡以西海域, 在 1995, 1996 和 1999 年出现最大值; 偏差 V_a 的高值区分布在吕宋岛西北海域, 在 1995 年出现最大值; 年际偏差 V_i 的高值区位于台湾的西南海域, 在 1997~1998 年 El Niño 事件期间达到最大.

关键词: 南海东北海域; 卫星高度计; 多尺度变异; 小波变换

中图分类号: P722.7; P731.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-4193(2003)05-0001-08

1 引言

近十几年来, 国内外海洋学家通过不同的资料和方法对南海东北海域的环流做了很多的研究^[1,2], 如 Shaw 等^[3,4]根据我国台湾西南海域的水文资料, 论述了黑潮入侵南海的季节特征. 李立等^[5]用现场实测资料的分析, 论证了在南海北部黑潮分岭流环的存在, 说明南海东北海域是中尺度环流活跃的地方. 杨昆等^[6]用 POM 模式模拟了冬季南海北部中尺度涡. 特别在近些年来, 卫星高度计资料被许多海洋学家用来研究南海的大尺度和中尺度环流, 如 Ho 等^[7,8]用 TOPEX/Poseidon(以下简称 T/P)资料研究南海海面高度的季节变化, Wang 等^[9]用 T/P 研究了南海的中尺度变异, Shaw 等^[10]用 T/P 数据研究南海大尺度低频变化, 等等.

收稿日期: 2001-09-15; 修订日期: 2003-05-02.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043807); 国家自然科学基金资助项目(49976010).

作者简介: 李燕初(1943-), 男, 福建省惠安县人, 研究员, 从事海洋微波遥感及在物理海洋学的应用研究. E-mail:

liyanch_cn@sina.com

本文利用 8 a (1992 年 10 月至 2000 年 10 月) 的 T/P 高度计资料, 采用小波分析方法, 研究南海东北海域不同时间尺度海面高度变化的特征.

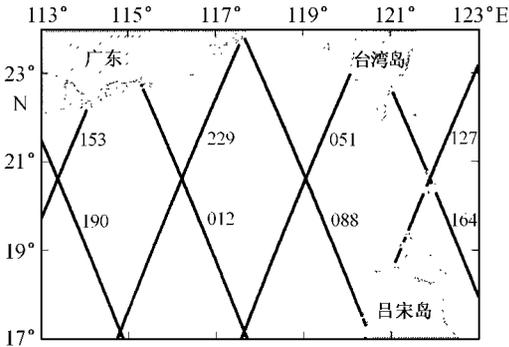


图 1 研究的海域及 T/P 地面轨道

2 T/P 高度计数据处理

为了研究南海东北海域的海面变化特征, 本文选取 T/P 高度计的 8 条轨道 (图 1), 从 1992 年 10 月到 2000 年 10 月的数据组 (相应于 T/P 周期 2 ~ 298) 进行分析. T/P 资料由美国 NASA/JPL PO. DAAC 提供. 分析前首先对这些数据进行环境参数修正, 包括气压效应、电磁偏差、电离层偏差, 干、湿对流层偏差以及潮汐修正等. 为避免在浅海范围内的潮汐修正会引起较大

的偏差, 深度小于 200 m 的浅海海域不包含在本文分析的范围内. 环境参数修正后对数据沿轨道进行重新取样, 个别缺测数据通过内插得到, 减去 8 a 平均的海面高度, 从而得到海面高度距平, 也就是所谓海面高度异常, 并在时间方向上得到各取样点的海面高度距平的时间序列 (以下均称海面高度时间序列). 另外, 为了消除因为潮汐混淆所产生的强 60 d 振荡^[9], 采用 7 点的汉宁滤波器对每个时间序列进行滤波, 然后用小波分析方法对这些序列进行分析.

3 小波分析方法概述

为了分析不同时间尺度海面高度的变化, 我们采用小波变换方法对上述的海面高度时间序列进行分析, 通过小波变换不仅可以看到时间序列的能谱在频率域的分布状况, 而且还能看到能谱随时间的变化特征. 小波变换简单介绍如下^[11]:

令 $f(t) \in L^2(R)$ 是时间信号, 它的小波变换定义为

$$w(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^*((t-b)/a) dt, \quad (1)$$

式中, $w(b, a)$ 是小波系数, 其中 b 是平移因子, a 是伸缩因子; 函数 $\Psi \in L^2(R)$ 称为基小波. 基小波可以通过平移和伸缩产生一簇小波; Ψ^* 是 Ψ 的复共轭函数. 基小波必须满足允许条件:

$$c_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} (|\Psi(\omega)|^2 / |\omega|) d\omega < \infty, \quad (2)$$

式中, $\Psi(\omega)$ 是 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换.

在满足允许条件下信号可由小波系数重构:

$$f(t) = 1/c_\Psi \int_{-\infty}^{+\infty} a^{-2} da \int_{-\infty}^{+\infty} w(b, a) \{ |a|^{-1/2} \Psi[(t-b)/a] \} db. \quad (3)$$

小波变换的一个重要的性质是能量守恒, 其总能量随尺度 a 的变化可以表示为

$$E(a) = 1/c_\Psi \int_{-\infty}^{+\infty} (|w(b, a)| / a)^2 db. \quad (4)$$

本文尺度 a 即为周期值, $E(a)$ 即表示总能量随周期的变化, 或可称为海面高度的小波能谱.

为分析上述的海面高度时间序列, 本文选择 Morlet 小波为基小波进行分析, 其形式如下:

$$\Psi(t) = \exp\{- (\pi^2/18) t^2 - i2\pi t\}. \quad (5)$$

4 不同时间尺度的海面高度变化分析

4.1 能量随周期的变化

图 2a 给出 088 轨道上一典型测点(20.7°N, 119.0248°E)的海面高度时间序列(SSH). 图 2b 给出其小波系数与伸缩因子 a 比值的平方(即总能量公式 $E(a)$ 中被积函数 $(|w(b, a)|/a)^2$ 随时间和频率的分布, 它反映该点在不同时间、不同频率(或周期)的能量变化, 由图可看出, 从 1993 到 2000 年, 每年频率在 1~2 周/a 的海面高度变化是最为明显(1993 和 2000 年两端存在计算边缘效应除外), 此外在 1995, 1996 年下半年到 1997 年初以及 1999 年在该点附近有相当强的频率在 2~6 周/a 的海面高度变化.

图 3 是由 20.7°N 纬线上 3 个测点的海面高度时间序列分析得出的具有代表性的 8 a 平均的 $E(a)$ 曲线, 它表示能量随不同周期的变化. 由图可看出每条曲线都有 3 个极小值, 分别位于周期为 0.17, 0.60, 1.50 a 附近(其中 0.17 a 的极小值说明滤潮有效). 与之相应, 每条曲线都呈现 3 个峰, 一个位于周期为 0.17~0.60 a 之间, 这个峰主要对应海面高度的中尺度变化^[9]. 另一峰位于周期为 0.60~1.20 a 之间, 主要对应于海面高度的季节循环(或称为年变化). 还有一个小峰位于周期为 1.50~5.00 a 之间, 它主要反映海面高度的年际变化, 可能与 El Niño 事件所引起的海面高度

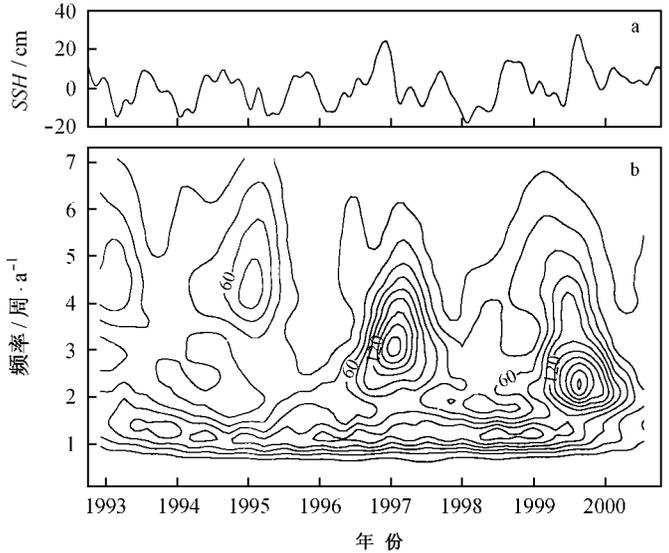


图 2 a 测点(20.7°N, 119.0248°E)的海面高度(SSH)时间序列;
b 其小波系数与伸缩因子 a 比值的平方 $(|w(b, a)|/a)^2$ 随频率和时间的分布(单位: cm^2/a)

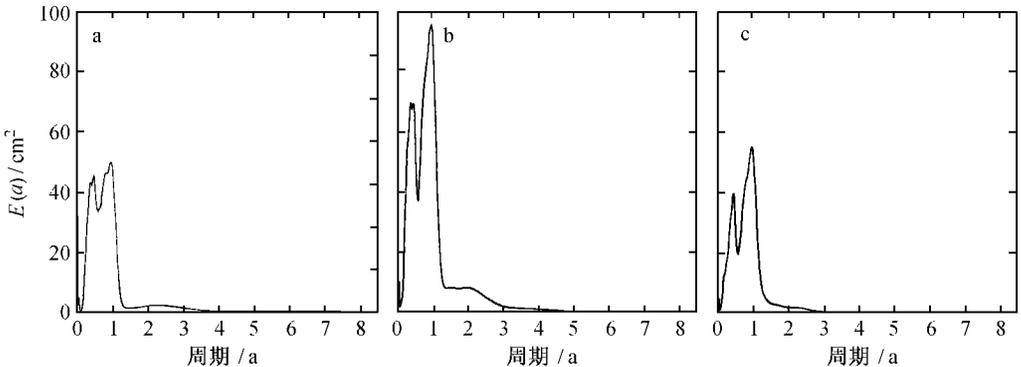


图 3 吕宋海峡内外不同测点上 8 a 平均的 $E(a)$ 曲线

a. 20.7°N, 116.275°E; b. 20.7°N, 119.102°E; c. 20.7°N, 121.940°E

变化有密切的关系. 下一小节我们将根据这些能量随周期的变化特征分析给出 3 种主要时间尺度海面高度能量偏差值的变化情况.

4.2 不同时间尺度海面高度变化能量偏差的定义

在本文中 3 种主要时间尺度海面高度变化所引起的能量偏差定义如下:

(1) V_{25} 代表周期为 0.17~0.45 a 之间海面变化, 称为中尺度偏差, 其表达式为

$$V_{25}(b) = 1/c\psi \int_{0.17}^{0.45} (|w(b, a)|/a)^2 da, \quad (6)$$

(2) V_a 代表周期为 0.60~1.20 a 之间海面变化, 称为季节偏差, 其表达式为

$$V_a(b) = 1/c\psi \int_{0.6}^{1.2} (|w(b, a)|/a)^2 da \quad (7)$$

(3) V_i 代表周期为 1.50~5.00 a 之间海面变化, 称为年际偏差, 其表达式为

$$V_i(b) = 1/c\psi \int_{1.5}^{5.0} (|w(b, a)|/a)^2 da. \quad (8)$$

下面我们对各条轨道进行分析, 选取几条轨道的结果以说明不同尺度海面高度变化的特征.

4.3 V_{25} 的时空分布特征

图 4a 和 4b 分别是分析得出的沿 088 轨道和 051 轨道上各点 V_{25} 随时间的变化(各点的纬度列于图的右侧). 由图 4a 可以看出在 088 轨道上, 1993~2000 年间两个时段有相当高的 V_{25} 值, 其中在 1996 年, 位于 18.3°~19.9°N 的轨道南段有较大的 V_{25} 值, 峰值位置在 19.1°N 左右, V_{25} 的最大值为 132 cm². 还有在 20.7°~21.5°N 上, 在 1996 年下半年和 1997 年上半年间也有一高的 V_{25} 值区域, 峰值位置在 21.1°N 附近. 另一个高 V_{25} 值的时段在 1999 年, 高值区位置在 19.1°~20.7°N, 峰值位于 20.3°N 左右, 最大偏差值为 120 cm². 除上述时间和位置上 V_{25} 有大的值外, 沿轨道其他时间 V_{25} 相对都较小.

由图 4b 可以看出在 051 轨道上, 有 3 个高的 V_{25} 时段, 其中在 1994~1995 年间, 位于 19.5°~20.7°N 有一较高的 V_{25} 值区, 但最大值较小, 只有 65 cm². 与 088 轨道类似, 在 20.7°~21.5°N 上, 在 1996 年下半年到 1997 年上半年间也有一高的 V_{25} 值区域, 峰值位置与 088 轨道类似, 也在 21.1°N 附近, 最大值为 107 cm². 另一个高 V_{25} 值的时段在 1999~2000 年间, 高值区位置在 19.1°~20.3°N, 峰值在 19.9°N 左右, 最大值为 73 cm².

012 轨道在 088 轨道的西边, 离吕宋海峡更远一些, 较大的 V_{25} 值出现在 1995~1996 年间, 其高值区位置在 17.7°~20.1°N, 峰值在 19.0°N 左右, 最大值为 107 cm². 其他时段 V_{25} 都较小(图省略).

164 轨道是吕宋海峡外的一条轨道, 也有几个时段 V_{25} 较大, 1995 年在 21.1°N 以上纬度有一较大的 V_{25} , 最大值为 43 cm². 1996 年在 18.7°~20.3°N 有较大的 V_{25} , 峰值在 19.5°N 左右, 最大值为 38 cm². 其他时段 V_{25} 都较小(图省略).

由上述几条轨道的分析可以看出, 在 1993~2000 年间, 南海东北海域中尺度变异最强的年份是在 1995, 1996 和 1999 年.

4.4 V_a 的时空分布特征

由图 3 的 $E(a)$ 曲线可以看出季节偏差是海面高度变化最大的因子, 下面对 V_a 沿 088 和

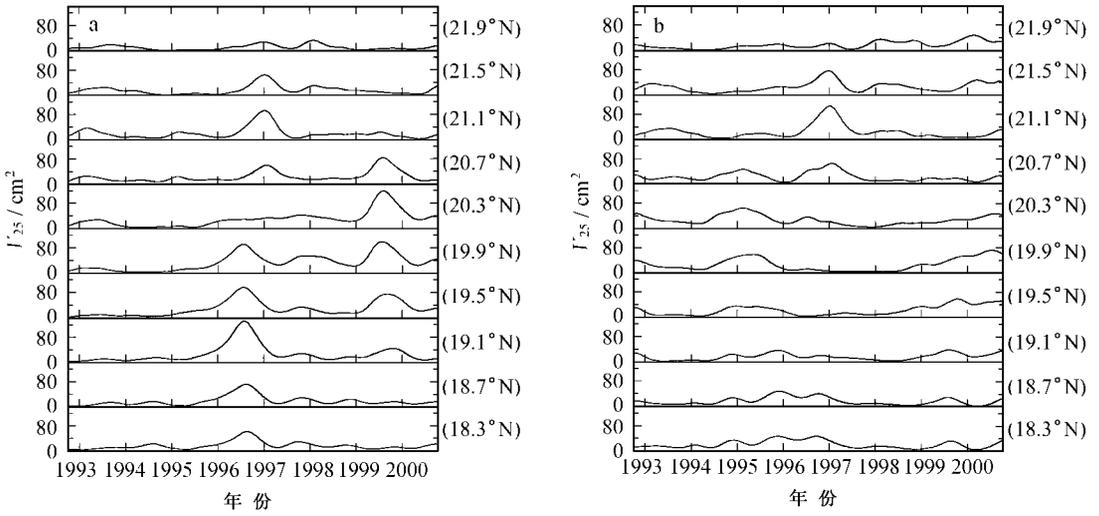


图 4 沿轨各点 V_{25} 随时间的变化
a. 088 轨道, b. 051 轨道

051 轨道 8 a 的变化情况作简要的叙述:

由图 5a 可以看出在 088 轨道上, 季节偏差 V_a 在几个时段有较大的值. 在轨道的南段, 即 $18.7^\circ \sim 20.3^\circ \text{N}$ 上, 在 1995 和 1999 年 V_a 有较大的值, 而 1995 年的峰值为最大, 最大值为 153 cm^2 . 在 088 轨道的北段 (20.1°N 以上纬度) 在 1997 年有较大的季节偏差值, 但最大偏差值只有 74 cm^2 , 而其他时段较小.

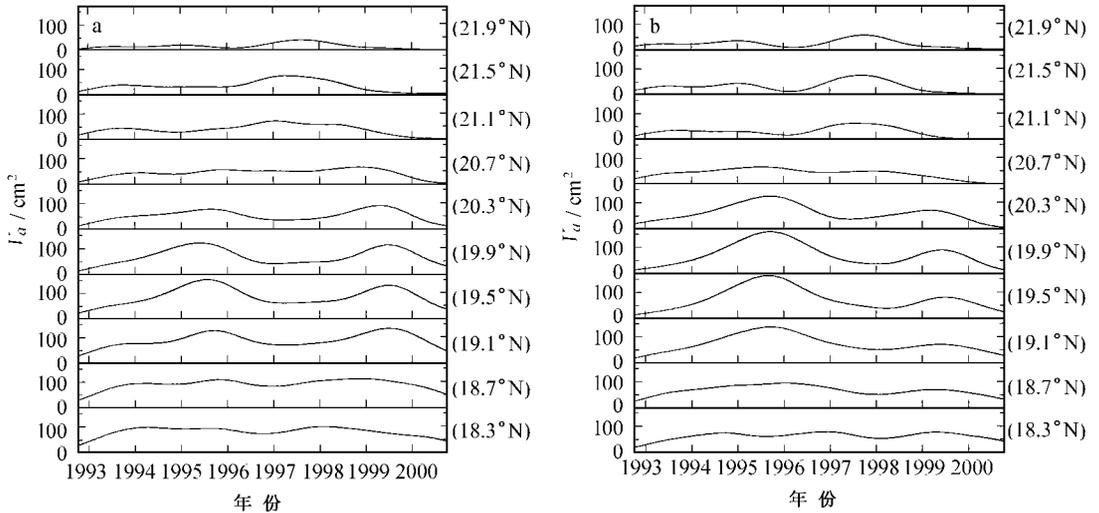


图 5 沿轨各点 V_a 随时间的变化
a. 088 轨道, b. 051 轨道

由图 5b 可以看出在 051 轨道上, 季节偏差 V_a 沿 051 轨道的时空变化与 088 轨道非常相似. 在 051 轨道的南段, 即 $18.7^\circ \sim 20.3^\circ \text{N}$ 上, V_a 有两个峰值分别出现在 1995 和 1999 年, 同

样以 1995 年的峰值为最大,最大值为 163 cm^2 , 而 051 轨道的北段(20.1°N 以上纬度)也是在 1997 年有较大的偏差值,其最大偏差值为 75 cm^2 ,其他时段都较小.

其他轨道 V_a 的变化情况与 088 和 051 轨道也有一些类似,本文不一一列举.

4.5 V_i 的时空分布特征

由图 3 的 $E(a)$ 曲线可以看出 1.50~5.00 a 周期的能量偏差 V_i 是比 V_{25} , V_a 都小的因子. 图 6a 和 6b 分别是 088 轨道和 051 轨道上 V_i 的时空变化情况. 由图可以看出在这两条轨道上其 V_i 的峰值差不多都出现在 1997~1998 年间,在 088 轨道上的最大值为 20 cm^2 ,而在 051 轨道上,最大值为 24 cm^2 ,其他时段都较小. 在 1997~1998 年间产生了 20 世纪最强的一次 El Niño 事件,在 1997~1998 年间产生的高 V_i 峰值可能与之有关.

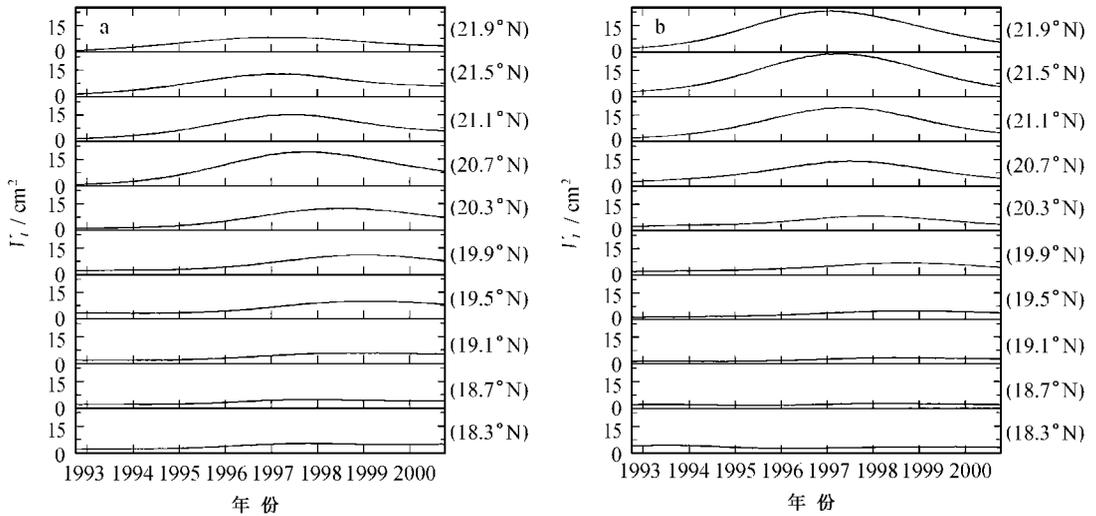


图 6 沿轨道各点 V_i 随时间的变化
a. 088 轨道, b. 051 轨道

我们还注意到, V_i 沿轨变化也较大,在 19.5°N 以北的轨道段上, V_i 要比在 19.5°N 以南的轨道段大得多,而且同样在北段,靠近吕宋海峡的 051 轨道上的值要比 088 轨道上的大.

4.6 能量的空间分布特征

在上述逐轨道分析的基础上,图 7 给出了 3 种不同时间尺度海面高度 8 a 平均能量偏差的空间分布特征. 由图可见, 25 cm^2 等值线以上的 V_{25} 高值区广泛分布在吕宋海峡以西的大片海域,但峰值区则在 20.0°N , 119.5°E 吕宋海峡西口附近,最大值在 40 cm^2 以上,能量自东向西逐步减小(见图 7a). 从 8 a 平均的 V_a 的空间分布可看出,季节偏差对海面高度变化的贡献是最大的,高值区分布在吕宋岛西北一带,峰值区位于 19.0°N , 119.5°E 附近(见图 7b),最大值达 90 cm^2 以上. 此外, V_i 的高值区局限于台湾的西南部海域,峰值区位于 21.5°N , 119.5°E 附近,最大值为 15 cm^2 (图见 7c).

5 小结和讨论

(1) 南海东北部海域的海面高度的波动主要受 3 个不同时间尺度变化因素所控制,其中

最主要的是周期在 0.60~1.20 a 的季节变化 V_a 的影响, 它主要与海面高度的季节循环相联系。其次是周期在 0.17~0.45 a 的变化 V_{25} 的影响, 它主要与中尺度时间周期引起的海面高度变化相联系。最后是周期在 1.50~5.00 a 的年际变化 V_i 的影响, 它可能与 El Niño 事件导致的海面高度变化有关。

(2) 小波分析结果表明, 季节偏差 V_a 对南海东北海域海面高度变化的影响最为显著, 吕宋岛西北侧海域是南海东北海域海面高度年变化最大的海区。在所分析的 8 a 中, 在 1995 年 V_a 偏差值最大。该结果得到以往卫星高度计的分析结果的支持: 李立等^[13]对 1992~1996 年 T/P 资料的多年季节平均分析和 Ho 等^[8]对 1992~1998 年 T/P 资料的 EOF 分析均表明, 夏季吕宋岛西侧海域是南海北部海面高度的高中心区, 冬季则变为低中心区, 其差值在 20 cm 以上, 这种波动主要反映了季风作用下南海环流季节转换。Ho 等^[8]的分析结果显示南海海面高度年波动在 1995 年达到一个最大值。

(3) 在南海东北海域, V_{25} 偏差在 1995, 1996 和 1999 年出现最大值, 8 a 平均的 V_{25} 高值区主要分布在吕宋海峡西侧海域, 峰值区位于 20.0°N, 119.5°E 附近海域。吕宋海峡是南海与太平洋沟通的主渠道, 由于黑潮在流经吕宋海峡时直接作用于南海, 吕宋海峡西侧海域受黑潮的影响较大。前人研究表明, 该海域经常出现黑潮水的入侵^[3,4], 并有反气旋强涡形成^[5]。因此, 本文 V_{25} 的分析结果支持这些结论, 并揭示在 1995, 1996 和 1999 年在南东北海域有相当强的中尺度过程发生。

(4) 在所分析的 8 a 之中, 南海东北海域海面高度的年际偏差 V_i 在 1997~1998 年间达到最大, 8 a 平均的 V_i 高值区主要位于台湾西南海域, 峰值区位于 21.5°N, 119.5°E 附近, 其强度和影响范围均小于 V_a 和 V_{25} 。Ho 等^[8]在分析南海海面高度变化时曾得到一个与 El Niño 相关的 EOF 模态, 并指出在 1997~1998 年强 El Niño 事件爆发期间南海水位的年际变化有一大的峰值, 这都说明 V_i 与 El Niño 密切相关。有关验潮站的功率谱分析也表明在高雄一带即台湾西南海域的水位有明显的年际变化谱峰^[14]。因此, 本分析所揭示的 1997~1998 年间的 V_i 峰值, 应与该海域受 El Niño 的影响较大有关系。

本文 T/P 资料由美国 NASA/JPL PO. DAAC 提供。

参考文献:

[1] SU Ji-lan. Circulation dynamics of the China seas north of 18°N coastal segment [A]. ROBINSON A R, BRINK K H. The

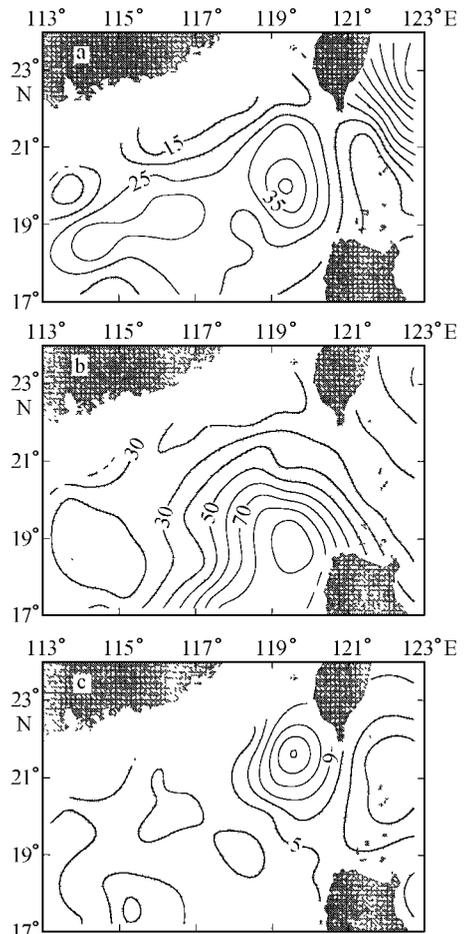


图 7 8 a 平均的 V_{25} , V_a , V_i 的空间分布
(单位: cm^2)

a. V_{25} (等值线间隔 5 cm^2), b. V_a (等值线间隔 10 cm^2), c. V_i 等值线间隔 2 cm^2)

- Sea, Volume 11 [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998. 483—505.
- [2] FANG G, FANG W, FANG Y, et al. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation [J]. *Acta Oceanogr Taiwanica*, 1998, 37(1): 1—16.
- [3] SHAW P T. The intrusion of water masses into the sea southwest of Taiwan [J]. *J Geophys Res*, 1989, 94: 18 213—18 226.
- [4] SHAW P T. The seasonal variation of the intrusion of the Philippine Sea water into the South China Sea [J]. *J Geophys Res*, 1991, 96: 821—827.
- [5] LI Li, NOWLIN W D, SU J+lan. Anticyclonic rings from the Kuroshio in the South China Sea [J]. *Deep-Sea Res (Part 1)*, 1998, 45: 1 469—1 482.
- [6] 杨 昆, 施 平, 王东晓, 等. 冬季南海北部中尺度涡旋的数值研究 [J]. *海洋学报*, 2000, 22(1): 27—34.
- [7] HO C R, ZHENG Q, SOONG Y S, et al. Seasonal variability of surface height in the South China Sea observed with TOPEX/POSEIDON altimeter data [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13 981~ 13 990.
- [8] HO C R, KUO N J, ZHENG Q, et al. Dynamically active areas in South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data [J]. *Remote Sensing Environ*, 2000, 71: 320—328.
- [9] WANG L, KOBLINSKY C, HOWDEN S. Mesoscale variability in the South China Sea from the TOPEX/POSEIDON altimetry data [J]. *Deep-Sea Res (Part 1)*, 2000, 47: 681—708.
- [10] SHAW P T, CHAO S Y, FU L L. Sea surface height variation in the South China Sea from satellite altimetry [J]. *Oceanolog Acta*, 1999, 22(1): 1—17.
- [11] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [12] DAIFANG G U, FHILANDER G H. Secular change of annual and interannual variability in the tropics during the past century [J]. *Journal of Climate*, 1995, 8: 864—876.
- [13] 李 立, 吴日升, 郭小钢, 等. 南海的季节环流——TOPEX/POSEIDON 卫星测高应用研究 [J]. *海洋学报*, 2000, 22: 13—26.
- [14] 李 立. 台湾海峡两岸月平均海面高度的变化 [J]. *台湾海峡*, 1987, 6: 234—239.

The multi-scale variability of sea surface height in the northeastern South China Sea

LI Yan-chu¹, CAI Wen-li¹, LI Li¹

(1. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*)

Abstract: The wavelet transformation methods were applied to 8 a(1993~ 2000) TOPEX/Poseidon data set to investigate the multiple time-scale variability of sea surface height (*SSH*) in the northeastern South China Sea (SCS). Analysis results indicate that *SSH* variation mainly subjects to influences from three factors of different time-scale. Among them, the seasonal variation (V_a), with period range from 0.60 to 1.20 a, appears to be the strongest, which mainly relates to seasonal cycling of *SSH*. Secondly, the variation (V_{25}), with period range from 0.17 to 0.45 a (i.e., of 2~ 5 months period), mainly relates to *SSH* variation caused by mesoscale phenomena. A relatively weak factor is the interannual variation (V_i) with period range from 1.50 to 5.00 a, which mainly associates with *SSH* changes of El Niño events. Analyses also show that, from eight years mean distribution, high variation areas of energy variance V_{25} appears mainly to the west of Luzon Strait with energy maximums in 1995, 1996 and 1999. Areas of high V_a appear in the sea area northwest off Luzon Island show a energy peak in 1995. And high variation areas of interannual variance V_i are located to southwest of Taiwan Island which reaches energy maximum during the 1997/1998 El Niño event period.

Key words: northeastern South China Sea; satellite Altimeter; multi-scale variability; wavelet transformation