

# 北太平洋海表面高度(SSH) 与风应力变化的关系\*

黄琳<sup>1</sup> 孙佳<sup>1</sup> 杨逸秋<sup>2</sup> 袁逸凡<sup>3</sup>

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室 河海大学物理海洋研究所 南京 210098;

2. 国家海洋环境预报中心 北京 100081; 3. 重庆交通大学河海学院 重庆 400064)

**提要** 利用 1958—2008 年的北太平洋海表面高度和风应力资料, 并与 ENSO 和 PDO 指数进行相关分析。结果发现, 风应力及其经向分量主要通过季节振动影响海表面高度(SSH)的年周期变化, 纬向风应力主要通过多年振动影响 SSH 的 ENSO 和 PDO 周期。纬向风应力和 SSH 均以黑潮延伸体主轴为界, 两侧呈现出相反的升降趋势, SSH 为北降南升, 纬向风应力南降北升。风应力和 SSH 升降趋势相同, 均表现为“上升—下降—上升”的变化特征。在地形变化剧烈、等深线南北分布的海区, 西风增强会导致 SSH 升高, 且西侧升高较为明显。北风增强将导致北太平洋西岸 SSH 升高, 东岸 SSH 降低。

**关键词** 北太平洋, 海表面高度, 风应力, 厄尔尼诺

**中图分类号** P731.21

西北太平洋风应力分布有明显的地域性, 存在非常明显的年周期和天气尺度周期, 最强的季节振荡存在于中纬西风带洋区, 低纬信风带洋区和西中纬西风带洋区纬向风应力则具有明显的年际振荡(杨清华等, 2005)。黑潮延伸体南侧海域海平面变化的动力部分可以通过风驱动的一层半模式进行很好地刻画, 风引起的海平面季节变化通过 Sverdrup 输运影响海平面, 年际变化主要由斜压 Rossby 波的传播对其产生影响(陈美香, 2009)<sup>1)</sup>。Masami 等(2003)利用卫星微波手段分析, 指出黑潮及其延伸体海区的 SST(Sea Surface Temperature, 海洋表面温度, 简称“海表温度”)与风速呈现出强烈的正相关性。Zhu 等(2007)利用一个高分辨率的海洋环流模式(OGCM)设计了 4 个对比实验和一个补充实验讨论了 ENSO 期间经向风应力异常和热通量变化的重要性, 结果显示在增大一个 5.0 的因数之前经向风应力异常对 ENSO 模拟

基本没有影响, 而热通量对 ENSO 有较显著的作用。而南极绕极流(ACC)对风应力的响应过程有两种, 瞬时的正压过程和 2 年延迟的斜压过程。纬向风应力的增强使得等密面的倾斜加剧, 导致更强烈的斜压不稳定, 从而导致了 ACC 的体积输运(Yang *et al.*, 2008)。海气环流耦合模式的研究表明, 在 Ekman 流和垂向混合起到重要作用的情况下, 高纬地区风应力的关闭导致了 ACC 区的降温(Ma *et al.*, 2010)。气象观测资料和数值模式分析显示, 影响越南冷水团的一个主要因素是强的正风应力涡旋, 这导致了表面海水的辐散并引起深层水向上的补充; 另一个原因是沿岸的偏南季风导致离岸的 Ekman 输运和近岸的上升流。从这两方面影响了冷水的空间分布(ZHUANG *et al.*, 2006)。利用沿岸上升流的两层垂向积分模式发现, 风应力旋度能显著改变上层的厚度(Enriquez *et al.*, 1995)。利用 AOSN-II (Autonomous

\* 国家自然科学基金项目“太平洋海平面变化的动力和热力学机制研究”, 40976006 号; 科技部科技支撑项目“全球环境变化应对技术与示范”, 2007BAC03A06 号; 海洋公益性行业科研专项“中国海平面变化预测及海岸带脆弱性风险评估技术与应用”专题, 201005019, 201105010, 201105009 号。黄琳, 河海大学硕士研究生, E-mail: yelin1943@gmail.com

1) 陈美香, 2009. 北太平洋、东海黑潮及黑潮延伸体海域海平面变化机制研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 205—213

收稿日期: 2012-04-05, 收修改稿日期: 2012-06-08

Ocean Sampling Network)计划的测量措施, 研究小尺度变化的近表层风应力在蒙特利海湾沿岸上升流的影响, 研究表明不同时间尺度的过程(风应力场的变化、海洋响应及上升流、海表海流、太阳辐射的加热)均会影响到 SST 的变化(Wang *et al*, 2011)。Samuel 等(1999)研究了自 1987 年以来地中海东部海区热盐状态变化的一个机制可能是由风强迫所引起的海气通量变化。

El Niño 前期, 西太平洋地区有大量暖水堆积与赤道太平洋的东风异常有关(Wyrtki, 1975), 仅通过异常风应力的旋转强迫, 就可以产生 El Niño 现象(管兆勇等, 2001)。风应力距平场与 Niño 3 区 SSTA 有很好的相关关系, 这种相关性超前 8 个月时就有所显现, 无论纬向风应力还是经向风应力都对 ENSO 的产生起重要作用(李明等, 2003)。对 ENSO 变化的多重时间尺度过程的研究工作表明, 对理解热带海洋大气相互作用机制以及年际气候预测具有重要理论意义和应用价值(Rasmusson *et al*, 1990; Barnett, 1991)。

目前对热带太平洋的海表面高度和风应力的关系进行了较多的研究(严邦良等, 2002; 胡瑞金等, 2002; 姜鹏等, 2006; 穆松宁等, 2004), 但在北太平洋海表面高度和风应力的关系缺乏相应的研究。本文对北太平洋海表面高度和风应力的相关关系进行研究, 以期对风应力对海表面高度影响机制的研究工作提供参考。

## 1 资料介绍

本文采用的海表面高度及海表风应力资料来自美国马里兰大学(University of Maryland)开发的 SODA(Simple Ocean Data Assimilation)海洋数据集 2.1.6 版本。该数据集由美国马里兰大学于 20 世纪 90 年代初开始开发的全球简单海洋资料同化分析系统产生, 该系统最初采用的是美国地球物理流体力学实验室(GFDL)的海洋模式 MOM2, 后来又引入了以 POP 数值方法和 SODA 程序为基础的全球海洋环流模式(General Circulation Ocean Model)。该资料覆盖全球, 空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 时间年限为 1958 年 1 月—2008 年 12 月, 时间分辨率为 1 个月。

本文选取的空间范围为  $(5^\circ\text{N}—65^\circ\text{N}, 110^\circ\text{E}—260^\circ\text{E})$ , 时间范围为 1958 年 1 月到 2008 年 12 月, 共计 51 年 612 个月。

## 2 北太平洋海表面高度分布特征及趋势变化

### 2.1 北太平洋 SSH 分布特征及趋势变化

样本时间序列的均方差(RMS)可以描述变量围

绕平均值的变化情况, 反应出变量在一段时间内的波动情况(胡基福, 1996)。

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2}$$

从图 1 可以看出, 北太平洋西岸 SSH 变化明显强于东岸, 变化最剧烈的海区集中在黑潮延伸体(KE)区( $25^\circ—40^\circ\text{N}, 130^\circ—180^\circ\text{E}$ ), SSH 变化最大的位置位于  $(31.75^\circ\text{N}, 136.25^\circ\text{E})$ , 最高可达  $0.33\text{m/a}$ 。北太平洋高纬度地区东西岸 SSH 变化均较小。

从北太平洋在 1958—2008 年的升降趋势特征分布中可以看出, SSH 升降速度最大的海区在 KE 区, 以 KE 主轴(约  $36^\circ\text{N}$ )为界, 低纬度海区上升趋势明显, 高纬度海区下降趋势明显。上升速率最大处与 SSH 变化最大的位置相同, 位于  $(31.75^\circ\text{N}, 136.25^\circ\text{E})$ , 最大上升速率为  $1.20\text{mm/a}$ ; SSH 下降速率最大处位于  $(33.25^\circ\text{N}—138.25^\circ\text{E})$ , 最大下降速率为  $0.64\text{mm/a}$ 。

1958—2008 年北太平洋 SSH 呈下降趋势, 速率为  $-1.04 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 。北太平洋 SSH 变化明显分为三段: (1) 1958—1980 年, SSH 缓慢上升, 速率为  $3.60 \times 10^{-6}\text{m/s}$ ; (2) 从 1981 年开始至 1995 年, SSH 突然迅速下降, 下降速率为  $-1.57 \times 10^{-4}\text{m/s}$ ; (3) 从 1996 年开始, SSH 开始迅速上升, 上升速率达  $1.56 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 。

### 2.2 北太平洋 SSH 变化的主要模态

对北太平洋 1958—2008 年共 51 年的 SSH 数据进行 EOF 分解, 取前 5 个主要模态, 方差贡献分别为 15.20%、12.80%、6.85%、3.72% 和 2.47%, 方差贡献和为 41.04%。第 4、第 5 模态比重较低, 本文中暂不分析。

图 2 是北太平洋海表面高度 EOF 分解的第 1 和第 2 模态的空间分布及时间特征曲线。在第 1 模态中, SSH 的位相变化沿纬度分布, 极值区出现在 KE 区 ( $36^\circ\text{N}$  附近)。主要周期是季节性变化的年周期, SSH 呈逐渐下降的趋势。第 2 模态显示北太平洋 SSH 的整体变化趋势, 高值区以西太暖池为中心沿北赤道暖流(NEC)向东北方向扩散, 低值区则以东太平洋冷舌为中心向西北方向扩散, 时间曲线以年周期最为显著, 出现较明显的 ENSO 周期, 在 1980 年和 1995 年时 SSH 出现了两次大幅度的降低。

EOF 分解的第 3 模态显示, SSH 的空间分布出现了明显的沿经线变化的特点, 北太平洋中高纬度海区西岸和东岸的变化位相相同, 中部基本无变化。低纬海区 SSH 高值区沿 NEC 向东扩散, 西岸和东岸的位相相反。位相变化最剧烈的海区仍是 KE 区。时间

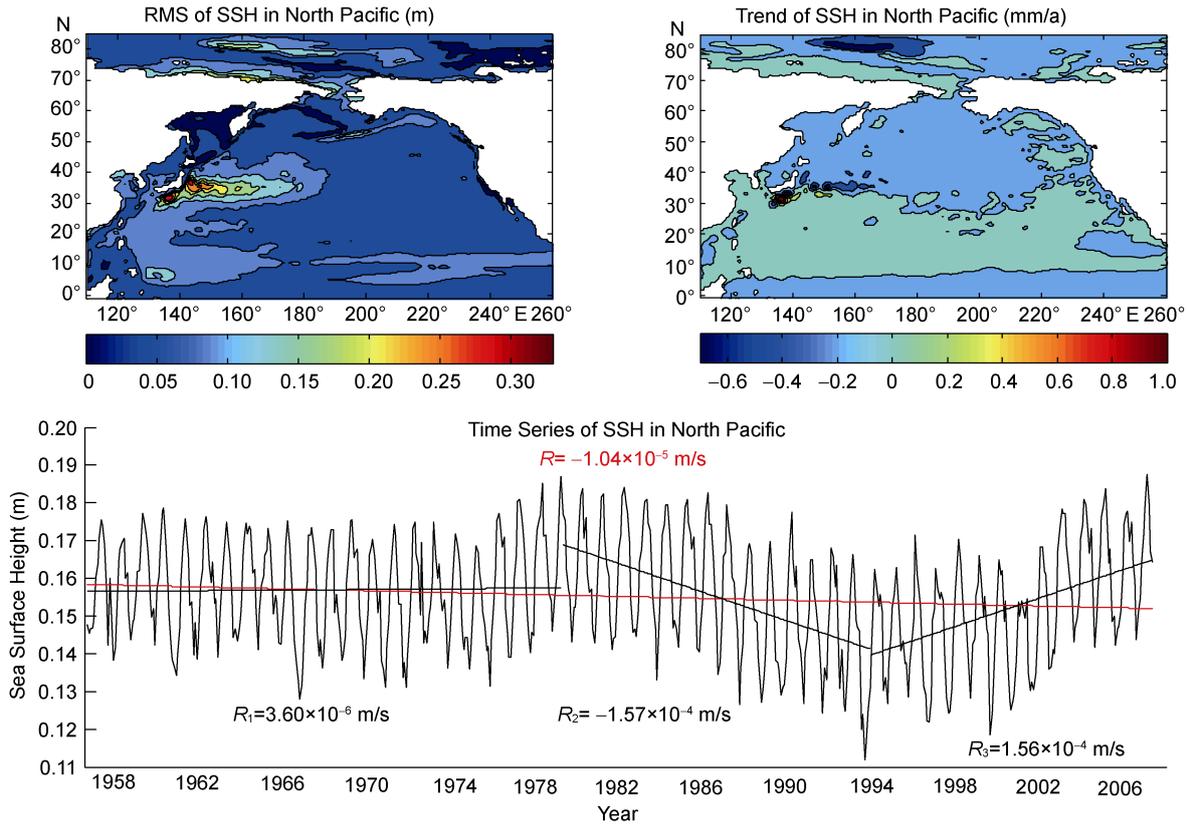


图1 北太平洋 1958—2008 年 SSH 均方差分布、趋势特征分布及时间序列

Fig.1 SSH, RMS, trend distribution and time series in the North Pacific Ocean from 1958 to 2008

曲线中出现显著的多年变化周期, ENSO 周期成为第 3 模态的主要周期。1958—1980 年, SSH 逐渐降低, 1980 到 1996 年 SSH 均值明显降低, 1996 年以后 SSH 逐渐上升。

对 EOF 分解的空间部分综合分析, 北太平洋 SSH 沿纬向和经向分布, 这可能与纬向风应力和经向风应力的作用有关。季节周期是 SSH 变化最显著的周期, ENSO 及 PDO 周期也是 SSH 变化的主要周期。

### 2.3 北太平洋 SSH 变化的显著周期

对 SSH 原始时间序列及前 5 个模态的时间部分进行功率谱分析, T1、T2 的主要周期为 12 个月的季节周期, 这两个模态方差贡献共占 28.00%; T3、T4、T5 的主要周期为 2—7 年的 ENSO 周期和 10—25 年的 PDO 周期, 这三个模态的方差贡献共占 13.04%。

从图 3 中可以看出, EOF 分解的 1、2 模态中, 季节性振动最显著, 存在 12 个月、6 个月的周期, 以 12 个月的振动周期最为显著。同时存在 2—7 年的 ENSO 周期以及 10 年以上的 PDO 周期。第 3—5 模态中, ENSO 和 PDO 周期明显, 成为控制 SSH 变化的最主

要周期。

## 3 北太平洋风应力分布特征及趋势变化

因为纬向风应力  $\overline{\text{TAUX}}$  和经向风应力  $\overline{\text{TAUY}}$  均为矢量(正号分别代表西风 and 南风), 可以通过求两者的平方和的根来求出作用北太平洋的 1958—2008 年的风应力。为简洁表达, 文中以  $\text{TAUX}$ 、 $\text{TAUY}$  表示矢量。

$$\text{TAU} = \sqrt{\text{TAUX}^2 + \text{TAUY}^2}$$

### 3.1 北太平洋风应力(TAU)变化

北太平洋风应力以 30°N 纬线为界, 以北风应力变化较强, 以南相对较弱(图 4)。沿经线和纬线方向, 风应力变化均出现“低值区—高值区—低值区—高值区”的波动。风应力变化的高值区主要集中在 180°E 经线上, 高值中心沿经向遥相呼应: 在 KE 海区(36°N, 180°E)、白令海海区(60°N, 180°E)、黑潮源地海区(15°N, 130°E)、北赤道流上游海区(10°N, 220°E)形成 4 个高值中心。风应力强度稳定区集中在 25°N 纬线上, 在 25°N 纬线上分布着 3 个波动的低值中心。在

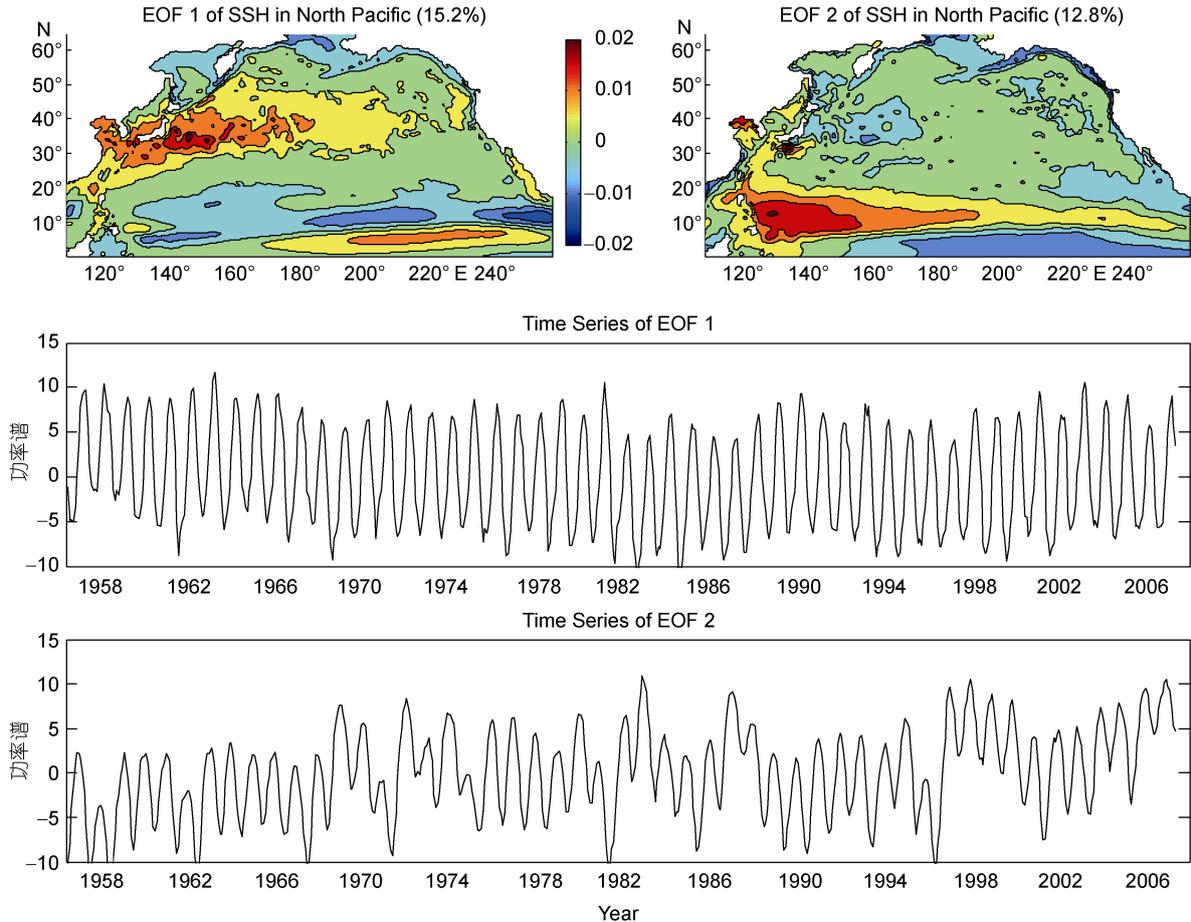


图 2 北太平洋海表面高度 EOF 第 1、第 2 模态  
Fig.2 EOF 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> mode of SSH in North Pacific Ocean

北太平洋中低纬海区, 西岸和东岸的风应力强度波动的等值线的形状极为相似。西岸沿“东南—西北”及“西北—东南”方向分布, 与这一海区显著的季风现象密切相关; 东岸主要沿“西北—东南”方向分布。

北太平洋大部分海区风应力无明显的升降趋势, 在中高纬西岸海区, 风应力存在减弱的趋势。

与图 1 相比, 50°N 以南的海区, SSH 和风应力的 RMS 等值线形状大致相同, 都表现出“低值区—高值区”间隔出现的特征, 风应力与 SSH 的高值区和低值区所在的位置基本相同。这说明风应力的变化可能是 SSH 变化的一个原因。

1958—2008 年北太平洋风应力整体呈上升趋势, 速率为  $7.14 \times 10^{-6} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。按照风应力不同时间段内的变化趋势, 可分为三段: (1) 1958—1980 年, 风应力增强, 速率为  $1.11 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; (2) 从 1981 年开始至 1995 年, 风应力强度突然迅速减小, 下降速率为  $-2.00 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ; (3) 从 1996 年开始, 风应力又开始增强, 上升速率达  $1.24 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

风应力与 SSH 的变化趋势相同, 均变现为“上升—下降—上升”的变化特征。

### 3.2 北太平洋纬向风应力(TAUX)变化

纬向风应力以 30°N 纬线为界, 高纬海区纬向风应力变化幅度较大, 低纬海区较弱。KE 下游及白令海西岸存在纬向风应力变化强烈的高值区, 夏威夷群岛附近海区、北太平洋中纬度西岸和东岸纬向风应力强度基本不变。

北太平洋中高纬海区纬向风应力强度呈明显的上升趋势, 其余大部分海区的纬向风应力均呈下降趋势, 中低纬部分海区下降趋势显著。

西北太平洋纬向风应力和 SSH 均以 KE 主轴为界, 两侧呈现出相反的升降趋势, SSH 为北降南升, 纬向风应力则是南降北升。KE 主轴以北的海区西风加强导致海水向南输运增强, 而主轴以南的海区西风减弱导致海水向南输运减弱。因此导致海水在 KE 主轴北侧减少南侧增多, 从而使 SSH 出现北降南升的变化趋势。

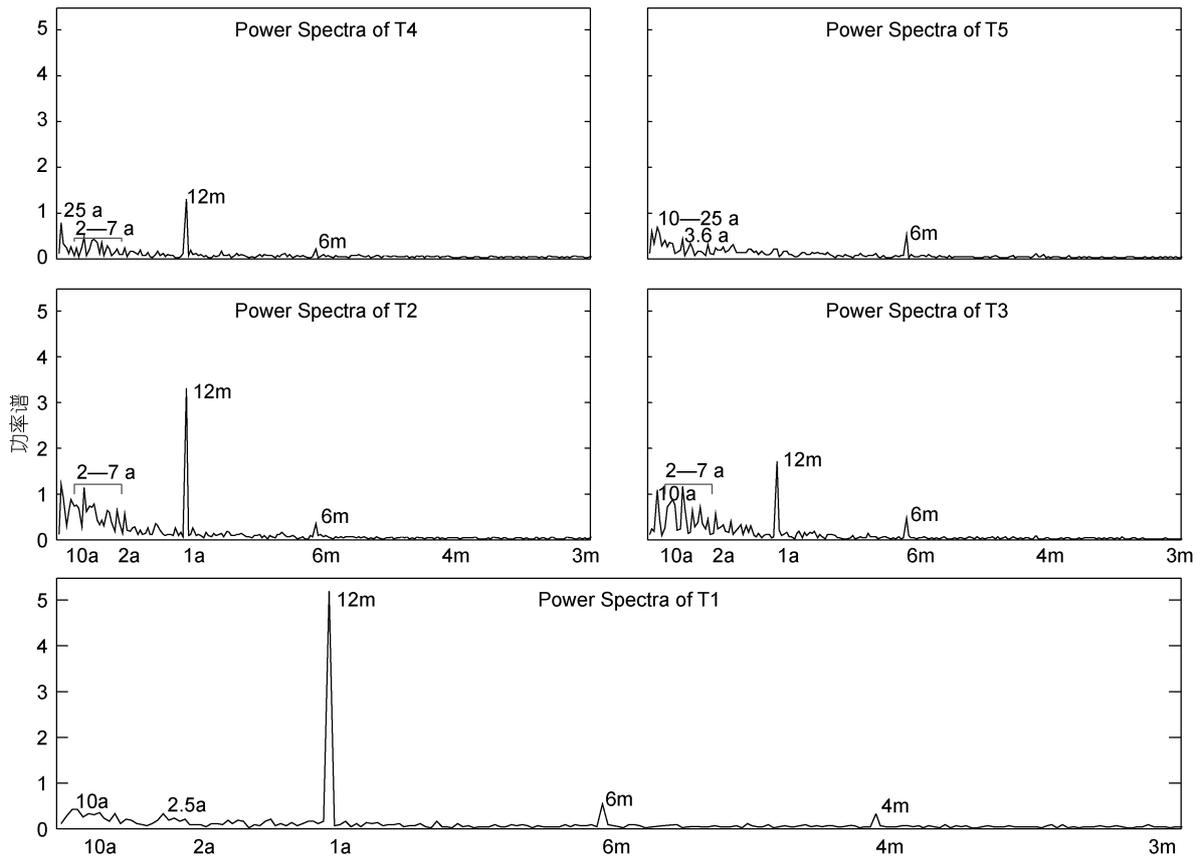


图 3 EOF 时间部分功率谱分析

Fig.3 Power Spectra analysis of EOF time part

注: 图中 a 表示年, m 表示月

1958—2008 间, 纬向风应力强度增强速率为  $1.03 \times 10^{-6} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 1980 年以前纬向风应力强度基本不变, 1981—1995 年强度开始增加, 速率为  $8.47 \times 10^{-6} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 1996 年以后强度迅速减小, 下降速率达  $-2.45 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 3.3 北太平洋经向风应力(TAU<sub>Y</sub>)变化

经向风应力的波动在太平洋中东部表现出沿纬线分布的特征, 西岸季风气候显著, RMS 沿经线分布。

经向风应力引起海水的向岸和离岸输运, 北风增强导致海水向岸输送, 近岸 SSH 升高。

1958—2008 年, 经向风应力强度减弱, 速率为  $-3.38 \times 10^{-6} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 1980 年以前经向风应力强度呈减弱趋势, 1981 年以后强度开始增加, 到 1996 年为止, 上升速率为  $7.87 \times 10^{-6} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 1996—2008 年上升速率为  $1.37 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

## 4 风应力与 SSH 的关系

样本相关系数  $r_{xy}$  可以衡量两变量之间的相互依赖关系。对于不同单位的两类变量, 为消除单位的影

响, 将变量标准化之后求出的相关系数可以很好地体现其相关性(胡基福, 1996)。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^n x_t y_t - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{t=1}^n x_t^2 - n\bar{x}^2\right)\left(\sum_{t=1}^n y_t^2 - n\bar{y}^2\right)}}$$

### 4.1 北太平洋 SSH 变化与风应力变化的相关性

本文对 SSH 与风应力的原始序列进行 3 月、6 月、1 年—11 年的低通滤波。滤波后 SSH 与风应力 (TAU, TAUX, TAU<sub>Y</sub>) 的相关系数见表 1。

从表 1 中可以看出, SSH 与 TAU 的原始时间序列的相关系数为 -0.31, 3 个月、6 个月和 1 年的低通滤波后的相关系数分别为 -0.32、-0.36 和 -0.25。随着低通滤波周期的增长, 两者的相关系数迅速变小。这说明 TAU 主要通过年周期的季节性振动影响 SSH, 多年周期上基本不影响 SSH。2 年以上的低通滤波后, SSH 与 TAUX 的相关系数迅速变大。这说明 TAUX 主要通过 ENSO 和 PDO 周期的多年振动影响 SSH 的变化。TAU<sub>Y</sub> 与 TAU 一样, 主要通过年周期的季节性

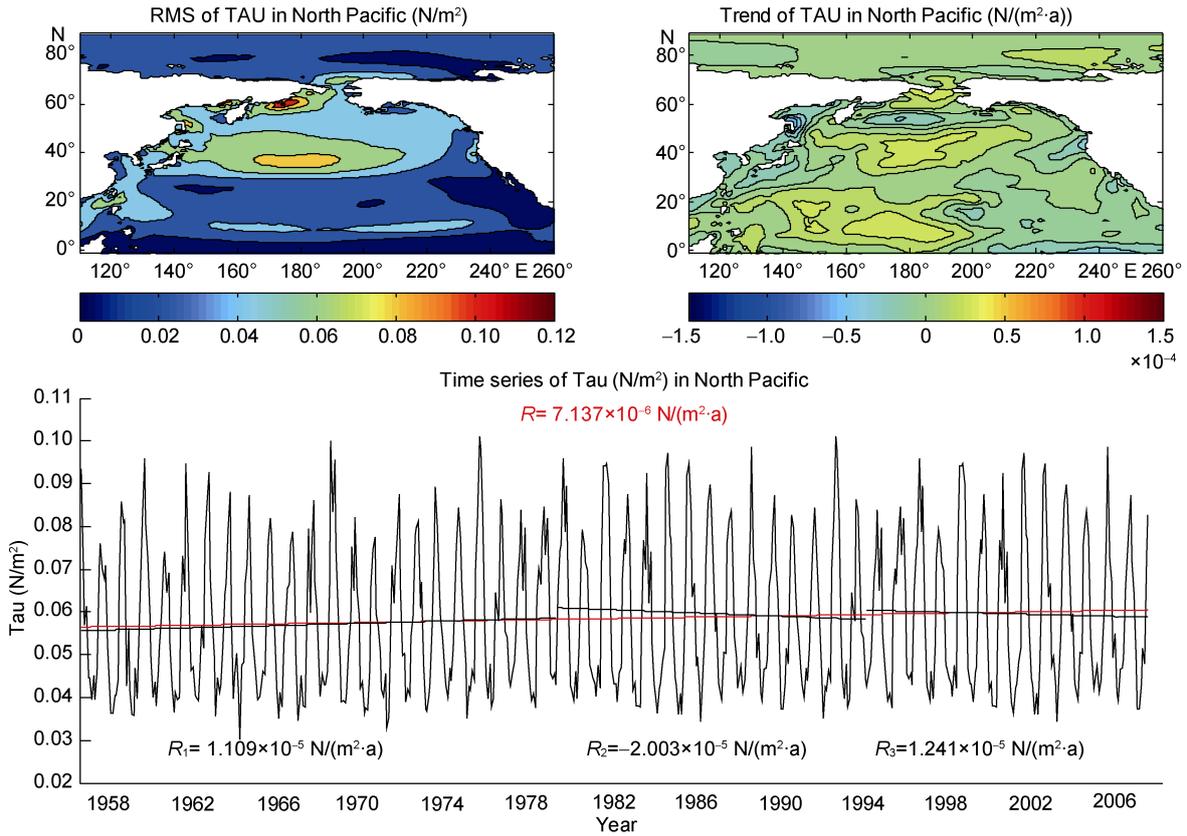


图 4 北太平洋 1958—2008 年 TAU 均方差分布、趋势特征分布及时间序列

Fig.4 TAU, RMS, trend distribution and time series in the North Pacific Ocean from 1958 to 2008

表 1 低通滤波后 SSH 与 TAU、TAUX、TAUY 的相关系数

Tab.1 Correlation coefficient between the SSH and TAU, TAUX, TAUY after low-pass filtering

低通滤波周期	未滤波	3 个月	6 个月	1 年	2 年	3 年	4 年	5 年
SSH-TAU (季节性)	-0.310	-0.323	-0.356	-0.249	0.068	0.089	0.103	0.096
SSH-TAUX (ENSO 及 PDO)	0.153	0.153	0.126	-0.024	-0.257	-0.331	-0.377	-0.407
SSH-TAUY (季节性)	0.453	0.479	0.506	0.376	0.062	0.061	0.072	0.107
低通滤波周期	6 年	7 年	8 年	9 年	10 年	11 年	12 年	
SSH-TAU (季节性)	0.080	0.070	0.066	0.067	0.071	0.079	0.087	
SSH-TAUX (ENSO 及 PDO)	-0.430	-0.446	-0.457	-0.465	-0.471	-0.477	-0.485	
SSH-TAUY (季节性)	0.145	0.175	0.193	0.200	0.203	0.206	0.209	

振动影响 SSH。

对每一个空间点求得的 SSH 与 TAU, TAUX 和 TAUY 的相关系数空间场分布, 如图 5。

SSH 和风应力(及其经向和纬向分量)在北太平洋沿岸及地形变化剧烈的海区相关性最显著。中低纬度上 SSH 和 TAU 在北太平洋西岸呈正相关、东岸负相关, 中高纬度上西岸呈负相关、东岸正相关, 中部海区相关系数等值线沿纬线呈带状分布, 沿经线方向为“正相关—负相关—正相关—负相关”变化。北太平洋西岸和东岸在西风减弱时均会导致 SSH 升高;

在菲律宾群岛等地形变化剧烈、等深线南北分布的海区, 西风增强会导致 SSH 升高, 且西侧升高较为明显。北风增强导致北太平洋西岸 SSH 升高, 东岸 SSH 降低。

在东海、南海沿岸, 风应力与 SSH 呈正相关, 在渤、黄海沿岸及南海中部呈负相关。北太平洋中纬度海区西风减弱时, 东中国海沿岸 SSH 升高, 北风减弱时, 东海、南海沿岸 SSH 升高, 渤海 SSH 降低。

4.2 厄尔尼诺现象(ENSO)对 SSH 及风应力的联系  
对 SSH、TAU、TAUX 及 TAUY 的 EOF 分解结

果表明, 四者均存在典型的 ENSO 和 PDO 周期。由于时间序列中存在大量的高频信号, 将其进行 2 年低通滤波后, 将原始序列及各模态时间部分与 ENSO 和 PDO 信号相比较, 以寻找北太平洋 SSH 与风应力联系。求 SSH、风应力(TAU, TAUX, TAUY)与 Niño3 指

数、MEI 和 PDO 指数的相关系数见表 2。

北太平洋 SSH 平均值的时间序列无明显的 ENSO 和 PDO 信号, 但方差贡献率占 12.8%的第二模态与 ENSO 信号负相关性显著, 与 Niño3 指数和 MEI 的相关系数达-0.594 和-0.499; 方差贡献率为 6.85%

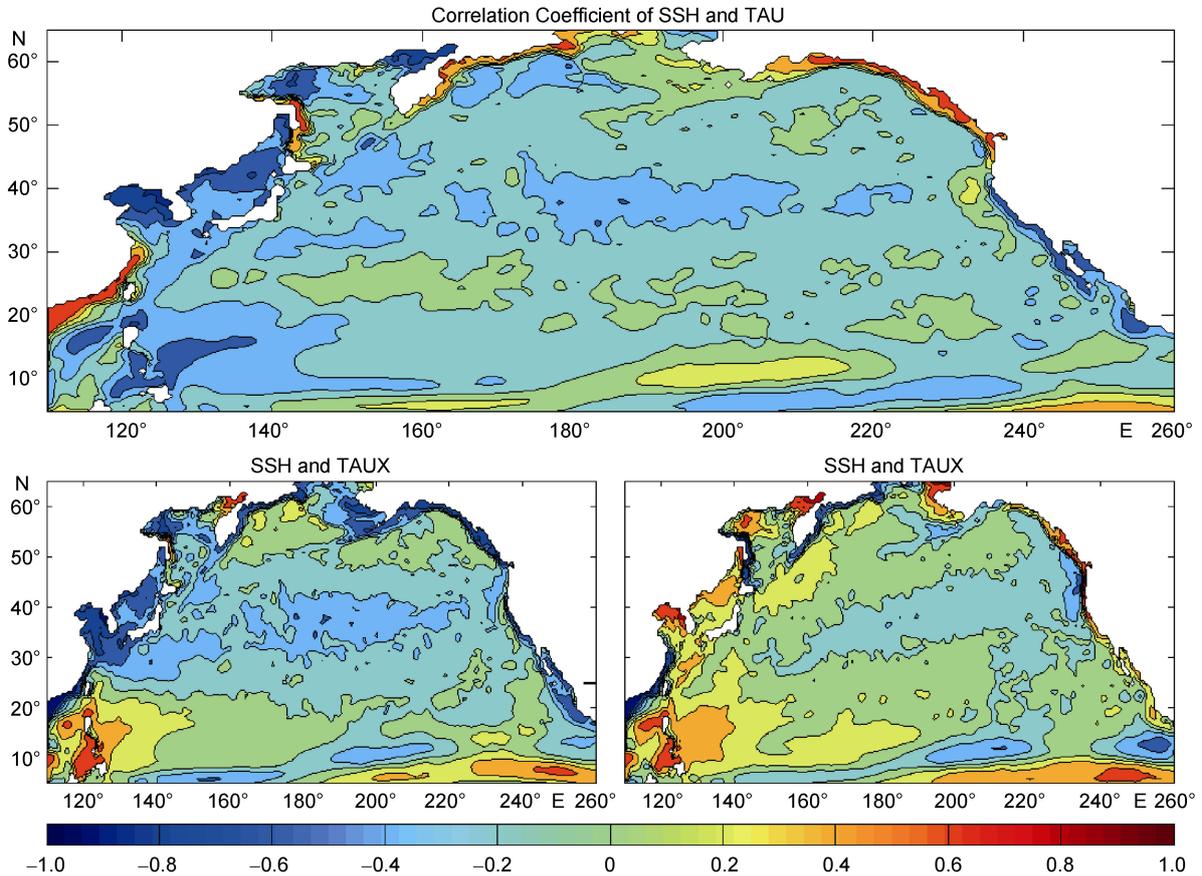


图 5 北太平洋 SSH 与风应力(TAU、TAUX、TAUY)的相关系数分布

Fig.5 Correlation coefficient partition distribution between the SSH and wind stress (TAU, TAUX, TAUY)

表 2 2 年低通滤波后的 SSH、风应力与 Niño3、MEI、PDO 指数的相关系数

Tab.2 Correlation coefficient between the SSH, wind stress and Niño3, MEI and PDO index after 2-years low-pass filtering

时间序列		Niño3	MEI	PDO	时间序列	Niño3	MEI	PDO	
SSH	Origin	-0.119	-0.085	0.050	TAUX	Origin	0.512	0.542	0.417
	T1	0.074	-0.065	-0.458		T1	-0.401	-0.511	-0.733
	T2	-0.594	-0.499	-0.172		T2	0.078	0.102	-0.043
	T3	-0.871	-0.945	-0.738		T3	-0.585	-0.673	-0.707
	T4	-0.098	-0.254	-0.567		T4	0.144	0.041	-0.058
	T5	0.037	-0.036	-0.266		T5	-0.105	-0.120	-0.220
TAU	Origin	0.252	0.346	0.452	TAUY	Origin	-0.425	-0.548	-0.565
	T1	0.360	0.433	0.604		T1	0.177	0.260	0.553
	T2	-0.065	-0.032	-0.078		T2	0.127	0.224	0.382
	T3	0.366	0.485	0.513		T3	0.173	0.293	0.190
	T4	-0.324	-0.368	-0.486		T4	0.673	0.735	0.496
	T5	0.128	0.118	0.204		T5	0.286	0.336	0.231

的第三模态为明显的 ENSO 和 PDO 周期, 与 Niño3、MEI 和 PDO 的相关系数高达-0.871、-0.945 和-0.738; 第四模态为 PDO 周期。

北太平洋风应力与 ENSO 和 PDO 关系密切, 与 PDO 信号的联系相对更强。TAU、TAUX、TAUY 原始序列与 PDO 信号相关系数绝对值均在 0.4 以上, 其中 TAU、TAUX 与后者正相关, TAUY 负相关。TAU 的一、三模态与 ENSO 和 PDO 信号相关性明显, 受 PDO 影响更强。经向风应力和纬向风应力与 ENSO 相关性较强, TAUX 与 ENSO 信号正相关, TAUY 负相关。

联系表 1 相关系数数据, 可知北太平洋风应力主要通过经向分量影响 SSH 的季节性变化, 通过纬向分量影响 SSH 的 ENSO 周期和 PDO 周期。

## 5 结论

北太平洋 SSH 变化沿纬度分布, 高值区以西太暖池为中心沿北赤道暖流向东北方向扩散, 低值区则以东太平洋冷舌为中心向西北方向扩散。西岸 SSH 变化明显强于东岸, 变化最剧烈的海区集中在黑潮延伸体区, 最高可达 0.33m/a。北太平洋高纬度地区东西岸 SSH 变化均较小。以 KE 主轴为界, 低纬度海区上升趋势明显, 高纬度海区下降趋势明显。最大上升速率为 1.20mm/a, 最大下降速率为 0.64mm/a。SSH 变化的主要周期为年周期, 存在明显的 2—7 年的 ENSO 周期以及 10 年以上的 PDO 周期。SSH 变化趋势分为三段: 1958—1980 年缓慢上升, 速率为  $3.60 \times 10^{-6}$ m/s; 1981—1995 年迅速下降, 速率为  $-1.57 \times 10^{-4}$ m/s; 1996 年以后迅速上升, 速率达  $1.56 \times 10^{-4}$ m/s。

风应力以 30°N 纬线为界, 以北风应力变化较强, 以南相对较弱。沿经线和纬线方向, 风应力变化均出现“低值区—高值区—低值区—高值区”的波动。风应力变化存在 4 个高值中心: 黑潮延伸体海区、白令海海区、黑潮源地海区、北赤道流上游海区, 主要集中在 180°E 经线上; 25°N 纬线上分布着三个风应力强度的稳定区。大部分海区风应力无明显的升降趋势, 在中高纬西岸海区, 风应力存在减弱的趋势。风应力与 SSH 的变化趋势相同, 均表现为“上升—下降—上升”的变化特征。速率分别为  $1.11 \times 10^{-5}$ 、 $-2.00 \times 10^{-5}$  和  $1.24 \times 10^{-5}$  N/(m<sup>2</sup>·a)。

中高纬海区纬向风应力变化幅度较大, 强度呈明显的上升趋势, 低纬海区变化较弱, 呈下降趋势。经向风应力的变化在太平洋中东部沿纬线分布, 北

太平洋季风气候区, 沿经线分布。纬向风应力和 SSH 均以 KE 主轴为界, 两侧呈现出相反的升降趋势, SSH 为北降南升, 纬向风应力南降北升。KE 主轴以北的海区西风加强导致海水向南输运增强, 以南的海区西风减弱导致海水向南输运减弱, 导致海水从 KE 主轴北侧向南侧积累, 从而使 SSH 出现北降南升的变化趋势。经向风应力引起海水的向岸和离岸输运, 北风增强导致海水向岸输送, 近岸 SSH 升高。

在北太平洋沿岸及地形变化剧烈的海区 SSH 和风应力的相关性最显著。中低纬度上的北太平洋西岸呈正相关、东岸呈负相关, 中高纬度上西岸呈负相关、东岸呈正相关, 中部海区相关系数等值线沿纬线呈带状分布, 沿经线方向为“正相关—负相关—正相关—负相关”变化。在菲律宾群岛海区等地形变化剧烈、等深线南北分布的海区, 西风增强会导致 SSH 升高, 且西侧升高较为明显。北风增强导致北太平洋西岸 SSH 升高, 东岸 SSH 降低。在东海、南海沿岸, 风应力与 SSH 呈正相关, 在渤、黄海沿岸及南海中部呈负相关。北太平洋中纬度海区西风减弱时, 东中国海沿岸 SSH 升高, 北风减弱时, 东海、南海沿岸 SSH 升高, 渤海 SSH 降低。

风应力及其经向分量主要通过季节振动影响 SSH 的年周期变化, 纬向风应力主要通过多年振动影响 SSH 的 ENSO 和 PDO 周期。

## 参 考 文 献

- 严邦良, 张人禾, 2002. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中的数值试验. 大气科学, 26(3): 315—329
- 李明, 吴洪宝, 高维英, 2003. 风应力对 SST 气候场和年际变率作用的诊断及数值研究. 南京气象学院学报, 26(2): 155—163
- 杨清华, 张林, 2005. 西北太平洋表面风应力分布和周期特征分布. 海洋预报, 22(4): 36—45
- 胡基福, 1996. 气相统计原理与方法. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1—4
- 胡瑞金, 刘秦玉, 2002. 热带太平洋海面高度年变化与季节内变化特征. 海洋与湖沼, 33(3): 303—313
- 姜鹏, 吴洪宝, 2006. 热带太平洋风应力距平场的主振荡型分析. 南京气象学院学报, 29(2): 166—172
- 管兆勇, 刘宣飞, 2001. 风应力的旋转和辐散分量在 ENSO 循环中作用的数值试验研究. 南京气象学院学报, 24(4): 447—456
- 穆松宁, 江志红, 闵锦忠等, 2004. ENSO 对黑潮海区风应力异常影响的初步探讨. 南京气象学院学报, 27(2): 258—266
- Barnett T P, 1991. The interaction of multiple time scales in the tropical climate system. J Climate, 4(3): 269—285

- Enriquez A G, Friehe C A, 1995. Effects of Wind Stress and Wind Stress Curl Variability on Coastal Upwelling. *J Phys Oceanogr*, 25: 1651—1671
- Ma Hao, Wu Lixin, Li Chun, 2010. The role of southern high latitude wind stress in global climate. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(2): 371—381
- Masami Nonaka, Xie Shang-Ping, 2003. Covariations of Sea Surface Temperature and Wind over the Kuroshio and Its Extension: Evidence for Ocean-to-Atmosphere Feedback. *Climate*, 16: 1404—1413
- Rasmusson E M, Wang X, Ropelewski C, 1990. The biennial component of ENSO variability. *J Mar Sci*, 3(1): 71—96
- Samuel S, Haines K, Josey S *et al*, 1999. Response of the Mediterranean Sea thermohaline circulation to observed changes in the winter wind stress field in the period 1980—1993. *J Geophys Res*, 104(C4): 7771—7784
- Wang Q, Kalogiros J A, Ramp S R *et al*, 2011. Wind Stress Curl and Coastal Upwelling in the Area of Monterey Bay Observed during AOSN-II. *J Phys Oceanogr*, 41: 857—877
- Wyrtki K, 1975. El Niño: the dynamics response of the equatorial Pacific to atmosphere forcing. *J Phys Oceanogr*, 5(3): 572—584
- Yang Xiaoyi, Huang Ruixin, Wang Jia *et al*, 2008. Delayed baroclinic response of the Antarctic circumpolar current to surface wind stress. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 51(7): 1036—1043
- Zhu Jieshun, Sun Zhaobo, 2007. A Note on the Role of Meridional Wind Stress Anomalies and Heat Flux in ENSO Simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(4): 729—738
- ZHUANG Wei, WANG Dongxiao, HU Jianyu *et al*, 2006. Response of the cold water mass in the western South China Sea to the wind stress curl associated with the summer monsoon. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(4): 1—13

## SEA SURFACE HEIGHT (SSH) CHANGE AND ITS RELATIONSHIP WITH WIND STRESS IN THE NORTH PACIFIC OCEAN

HUANG Lin<sup>1</sup>, SUN Jia<sup>1</sup>, YANG Yi-Qiu<sup>2</sup>, YUAN Yi-Fan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education, Institute of Physical Oceanography, Hohai University, Nanjing, 210098; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing, 100081; 3. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400064)

**Abstract** Correlation analysis between sea surface height, wind stress and index of ENSO and PDO for the period of 1958—2008 shows in the North Pacific Ocean, wind stress and its meridional component affect the annual cycle of SSH mainly through the seasonal vibration, and the zonal component affect the ENSO and PDO cycles of the SSH through years of vibration. Separated by the Kuroshio extension spindle, the zonal wind stress and SSH show different trends at the same side: SSH decreases at the north while increasing at the south, and the zonal wind stress decreases at the south while increasing at the north. Wind stress and SSH has the same trend: “increase—decrease—increase”. The westerly enhanced the SSH rise in sea area where the topography is steep and isobaths distribute along the north-south direction, and the west side increased more significantly. The north wind enhancement led to SSH rise at the west coast of the North Pacific and drop at the east coast.

**Key words** North Pacific Ocean, Sea Surface Height, Wind Stress, El Niño