

Rossby 波对菲律宾以东太平洋海平面 年际变化的影响研究*

杨春辉^{1,3} 顾小丽¹ 李培良¹ 刘聪¹ 张军²

(1. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100; 2. 国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005;
3. 海军东海舰队海洋水文气象中心 宁波 315122)

提要 采用能够反映斜压大洋对大尺度海表面风应力旋度响应的一层半约化重力模式研究菲律宾以东太平洋海区 Rossby 波与海平面年际变化的关系。模式分别利用海区东侧验潮站和卫星高度计海表面数据作初始东边界,对 Rossby 波西传路径上的风应力旋度进行积分,得到西侧海平面信号。结果发现,模拟的海平面信号跟验潮站和卫星高度计资料相关性很高,并能模拟出海平面年际变化特征和低(高)异常信号由东侧产生并向西传播的过程,反映了一阶斜压 Rossby 波对菲律宾以东太平洋海区年际海平面变化的动力机制。

关键词 海平面变化, Rossby 波, 一层半约化重力模式
中图分类号 P731

海平面变化对人类有着至关重要的影响,海平面变化作为气候变化的一种表现,对自然环境、生态系统和人类社会产生广泛而深远的影响。由于全球气候变暖和地壳的垂直运动,未来海平面上升将引起一系列自然环境灾害,破坏社会经济的发展,影响沿海地区和岛国人民的社会生活。全球和区域海平面变化的研究成为近年来科学家们关注的热点。

Rossby 波在海洋动力过程中扮演着重要角色,Rossby 波对海平面变化的影响也受到越来越多的关注。Chelton 等 (1996)指出 Rossby 波在海洋环流对大尺度大气变化的及时调整中起着核心作用。Chelton 等 (1998)利用月平均温、盐资料计算出 Rossby 波变形半径,并由此得到第一模态斜压 Rossby 波波速。随着观测技术的提高,T/P, Jason-1 等卫星的发射和应用,使得大尺度的海平面变化与 Rossby 波运动间关系的研究更加细致深入,成果显著。Qiu(2002)利用长波近似下的线性涡方程建立了一层半约化重力模式,认为西北太平洋中纬度地区海面高度(SSH)变化是由

海表风应力旋度强迫在斜压 Rossby 波由东边界西传路径上累积而引起的。随后 Qiu(2003)利用此模式研究了 Rossby 波与海平面变化的关系,认为 Rossby 波把太平洋中东部风应力异常信号传播到西岸并影响海平面的年代际变化。Firing 等(2004)指出一层半约化重力模型能解释 SSH 年代际变化大小及空间分布的某些特征,但由于受该地区风场数据的精确度和时间长度影响,难以预报 Hawaii 周围海平面的细微变化。Qiu 等(2006)利用一层半约化重力模式研究了南太平洋大尺度海平面的空间变化,结果表明模式在中纬度南太平洋西部和中部地区对海平面的年代际变化反演的结果较好,东部地区在引入边界效应后反演效果有明显改善。Li 等(2007)的研究显示太平洋 5°—28°S, 160°W 以西的年代际海平面信号可由年际 Ekman 输运旋度导致的斜压 Rossby 波垂向第一、二模态解释。Yoshi 等 (2007)对南太平洋海平面变化的研究表明,风应力旋度异常强迫的斜压 Rossby 波由 New Zealand 西传,引起 Tasman 海区域的海平面变

* 国家自然科学基金资助项目, 41076005 号, 41176009 号; 国家重点基础研究发展计划资助项目, 2012CB955602 号; 海洋公益性行业科研专项经费资助项目, 201005019 号。杨春辉, zilong_517@163.com

通讯作者: 李培良, 博士, 副教授, E-mail: lpli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2011-12-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

化。以往的研究对北太平洋中高纬度和南太平洋中低纬度地区的年际、年代际海平面变化做出了较好的模拟,而 Rossby 波对北太平洋低纬度海区海平面变化的影响研究相对较少。根据近 16 年卫星高度计资料的计算结果,菲律宾以东太平洋海区海平面异常(SLA)的年际变化幅度很大,特别是在 5° — 14° N、 131° — 144° E 区域,海平面年际变幅达到 10 cm 以上(图 1),而该区域处于西太暖池区,北赤道流在此分支,黑潮发源于此,夏、秋季很多侵袭我国的台风也都发源于此。因此本文采用较为成熟的一层半约化重力模式,结合卫星高度计数据和长期验潮站资料,研究此海区 Rossby 波与海平面年际变化的关系,从而更好地预测该区域海平面长期变化的趋势。

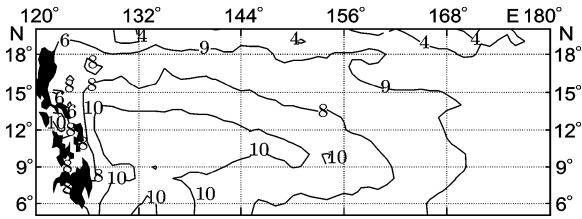


图 1 1993—2008 年高度计观测的年际海平面异常的均方根值(cm)

Fig.1 Root mean square of interannual SLA (cm) from 1° × 1° T/P and J1 estimates over the period from January 1993 to December 2008

1 数据和模型介绍

1.1 数据来源

文中验潮站数据来源于 Permanent Service for Mean Sea Level(PSMSL)提供的月均海平面 RLR (Revised Local Reference)数据,选取资料长度 30 年以上的站点,以便于研究海平面的长期变化。高度计资料来源于法国空间局(CNES)SSALTO/DUACS 多卫星(TOPEX/Poseidon, Jason-1, Envisat, GFO, ERS-1/2, GEOSAT)融合的海表面高度异常,空间精度为 $1/3^{\circ}$ × $1/3^{\circ}$,时间间隔为 7 天,时间范围为 1993 年 1 月—2008 年 12 月,将其月均为 1° × 1° 格点上数据。风场数据本文采用 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)月均海面动量通量,其全球格点为 T62 高斯网格点(192° × 94°),时间范围为 1948 年 1 月—2008 年 12 月,将其插值到 1.0° × 1.0° 格点上。

1.2 一层半约化重力模式

本文利用一层半约化重力模式,对海平面变化中的动力学信号进行估计,该动力模型由长波近似的线性涡方程控制(Qiu *et al.*, 2006):

$$\frac{\partial h}{\partial t} - C_R \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{g' \text{curl} \tau}{\rho_0 g f} - \varepsilon h \quad (1)$$

其中 h 为海平面异常(SLA), C_R 为第一斜压模态 Rossby 波传播速度, g' 为约化重力加速度, ρ_0 为参考密度, $\text{curl} \tau$ 为 z 方向的风应力旋度, ε 为牛顿耗散系数,沿 Rossby 波轨迹从东边界积分到西边界,得到方程(1)的解:

$$h(x, y, t) = h\left(x_e, y, t + \frac{x - x_e}{C_R}\right) \exp\left[\frac{\varepsilon(x - x_e)}{C_R}\right] + \frac{g'}{\rho_0 g f C_R} \int_{x_e}^x \text{curl} \tau\left(x', y, t + \frac{x - x'}{C_R}\right) \exp\left[\frac{\varepsilon(x - x')}{C_R}\right] dx' \quad (2)$$

利用 Qiu(2002)的研究结果,耗散系数取 $\varepsilon = 1/(6 \text{ a})$ 。文中参数设置如下 $g' = 0.027 \text{ m/s}^2$, $\rho_0 = 1024$, 选用 Chelton 等(1996)通过温、盐资料计算得出的 Rossby 波变形半径,根据 $C_R = -\beta R^2$, 得到第一模态斜压 Rossby 波波速。

2 验潮站与高度计数据分析

2.1 验潮站资料分析

2.1.1 海平面年际变化信号显著 选取 7° N 附近四个验潮站(表 1), 利用一层半约化重力模式研究验潮站观测的海面高度异常,并从中探讨 Rossby 波传播过程对海面高度变化的影响。

表 1 验潮站信息
Tab.1 Tidal gauges information

名称	纬度	经度	起始年份
Malakal	$07^{\circ}20'N$	$134^{\circ}28'E$	1969—2003
Chuuk	$07^{\circ}27'N$	$151^{\circ}52'E$	1953—1995
Pohnpei	$06^{\circ}59'N$	$158^{\circ}14'E$	1974—2004
Majuro	$07^{\circ}06'N$	$171^{\circ}22'E$	1968—2001

图 2 左侧四副图中的蓝色细实线是月均 SLA 曲线,对原始月均 SLA 数据序列采用线性滑动平均法进行平滑,由于观测数据之间的时间间隔都是 1 个月,因此可以假定观测值之间的真实数值是线性变化的,作者取 11 个月的线性函数滑动平均值法对数据作滑动平均后,可以将数据中周期小于等于 11 个月的周期波动很好的消除,以便于从图中能够更清楚的认识海平面年际变化规律。图 2 左侧四副图中的黑色粗虚线即是 11 个月滑动平均后的 SLA 曲线(下图 3b、4b 中的曲线亦是采用此滑动平均的结果),4 个站的海平面异常可见 4—6 年的年际周期变化,图 2 右侧的功率谱分析中有显著的 2—6 年的峰值。热带太平洋地区为 ENSO 影响显著区域,而 2—6 年的验潮站显著周期正落在 ENSO 特征周期内。据较成熟的 ENSO

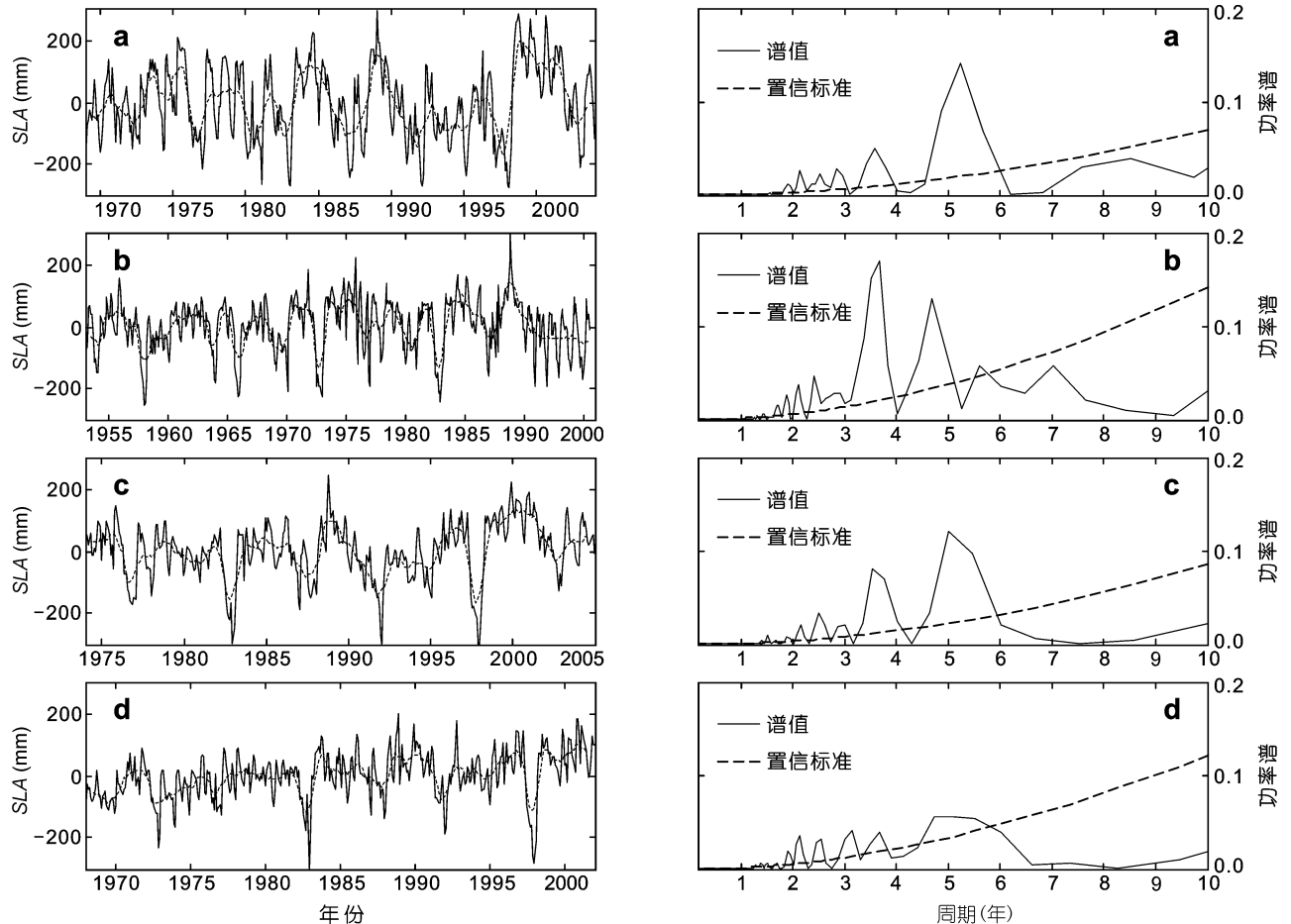


图2 左侧为(a)Malakal、(b)Chuuk、(c)Pohnpei 和(d)Majuro 月均 SLA(实线)和 11 个月平滑的 SLA(虚线); 右侧为各站平滑后 SLA 的功率谱(实线), 其中虚线为置信度 95%红谱检验

Fig.2 (a) Malakal, (b) Chuuk, (c) Pohnpei and (d) Majuro monthly SLA (solid line) and smoothed SLA (dashed lines) at left; Right panel is the power spectrum (solid line) corresponding to the left panel smoothed SLA and their 95% confidence test (dashed lines)

形成机制——滞后振荡理论(Cane *et al.*, 1990; Munnich *et al.*, 1991): 变弱的东风带产生的冷的表温扰动, 产生上升的西传 Rossby 波, 并在西向传播的过程中被大气的正反馈放大(Tziperman *et al.*, 1997)。由此可见, 与 ENSO 信号有关的 Rossby 波传播对验潮站观测的海平面变化有一定影响。

2.1.2 验潮站处观测海平面年际变化信号与模型比较 图 3a 是 Pohnpei 验潮站观测 SLA 与该处以 Majuro 站为初始边界模拟结果, 二者吻合良好。模拟信号对观测信号的方差贡献达到 68.7%, 该站于 1977、1983、1987、1992 和 1997 年表现的较低海面高度异常, 在模拟信号中都有非常好的反映, 可见风驱动的斜压 Rossby 波动力模型较好的反演了 Pohnpei 站年际海面高度异常。由图 3b 可见, 模拟信号的变化振幅要比观测结果小, 且没有反应出 1975 年前后观测的较高海面异常, 说明该模型不能完全解释

Pohnpei 站海面高度的变化。图 4 是 Malakal 验潮站观测 SLA 与该处以 Pohnpei 站为初始边界模拟结果, 以及二者平滑信号、原始信号与平滑结果二者的相关系数, 模拟信号对观测信号的方差贡献达 63%。模拟信号大体反应了 Malakal 站海平面年际变化特征, 尤其对 1977、1983、1987/88、1992 和 1997 年的异常低海面高度有非常好的反演, 而对 1976、1984、1988 和 1998 年观测的异常高海面变化, 模拟结果振幅偏小。

Pohnpei、Chuuk 和 Malakal 站分别以 Majuro、Pohnpei 和 Chuuk 为边界的模拟结果与该站验潮站观测资料的相关系数见表 2。验潮站的观测与各组模拟实验结果的年际变化(经平滑后结果)相关系数都在 0.54 以上, 甚至可达 0.83, 模拟信号对观测信号的方差贡献大多在 50%以上。由一层半约化重力模型解可知, 模型的本质是东边界处的海面高度异常和 Rossby

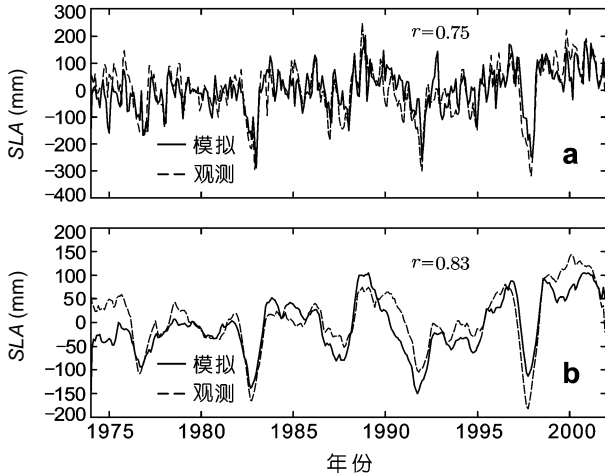


图3 (a) Pohnpei 验潮站观测的月均 SLA 与该处以 Majuro 站为初始边界的模拟结果, 二者相关系数为 0.75, 95%置信区间(0.70, 0.79); (b) 二者平滑信号显示相关系数为 0.83, 95%置信区间(0.79, 0.86)

Fig.3 (a) Monthly SLA time series at Pohnpei and its model output from Majuro boundary. The regression coefficient between the simulation and the observed time series is 0.75 with 95% confidence interval(0.70, 0.79). (b) The smoothed single between the simulation and the observed time series displays the regression coefficient is 0.83 with 95% confidence interval(0.79, 0.86)

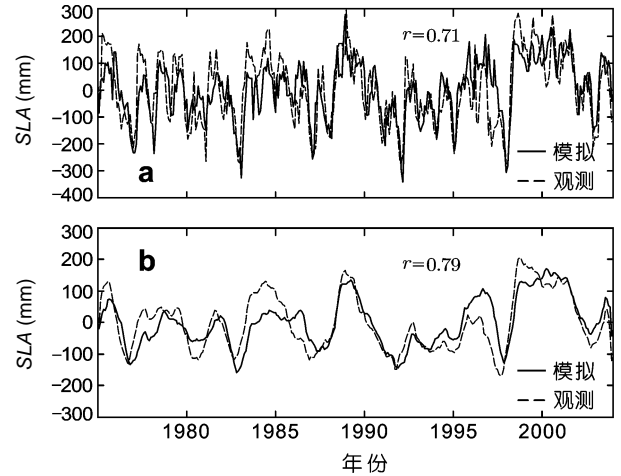


图4 (a) Malakal 验潮站观测的月均 SLA 与该处以 Pohnpei 站为初始边界的模拟结果, 二者相关系数为 0.71, 95%置信区间(0.66, 0.76); (b) 二者平滑信号显示相关系数为 0.79, 95%置信区间(0.75, 0.83)

Fig.4 (a) Monthly SLA time series at Malakal and its model output from Pohnpei boundary. The regression coefficient between the simulation and the observed time series is 0.71 with 95% confidence interval(0.66, 0.76). (b) The smoothed single between the simulation and the observed time series displays the regression coefficient is 0.79 with 95% confidence interval(0.75, 0.83)

表2 Pohnpei、Chuuk 和 Malakal 站分别以 Majuro、Pohnpei 和 Chuuk 为边界的模拟结果的相关系数
Tab.2 Correlation coefficients between model results of Pohnpei, Chuuk and Malakal based on Majuro, Pohnpei and Chuuk and observed values

验潮站	Majuro			Pohnpei			Chuuk		
	平滑后的 相关系数	95% 置信区间	模拟对实测的 方差贡献(%)	平滑后的 相关系数	95% 置信区间	模拟对实测的 方差贡献(%)	平滑后的 相关系数	95% 置信区间	模拟对实测的 方差贡献(%)
Pohnpei	0.83	0.79, 0.86	68.7	—	—	—	—	—	—
Chuuk	0.54	0.45, 0.61	23.6	0.78	0.73, 0.82	50.7	—	—	—
Malakal	0.55	0.48, 0.62	29.5	0.79	0.75, 0.83	63.0	0.77	0.72, 0.81	56.2

波传播路径上不断累积的风应力旋度驱动的海平面变化, 以第一斜压 Rossby 波波速传播到西边验潮站, 东边界验潮站海平面异常, 超前西侧站点的时间, 相当于该纬度上第一斜压 Rossby 波由东边界站点传到西边站点所用时间。由此推断, 验潮站海平面信号中包含 Rossby 波信号。从表 2 中对比发现, 以 Majuro 为初始边界模拟的 Chuuk 和 Malakal 验潮站的结果稍差, 模拟结果对实测数据的方差贡献不足 30%, 这很可能是在 7°N 线附近, Chuuk 和 Malakal 验潮站与初始边界 Majuro 验潮站的距离较远。由于 Rossby 波传播路径越长, 所需风应力累积时间越长, 风应力及模型自身局限导致的误差累积增大, 模拟效果变差。

2.2 高度计资料分析

2.2.1 海平面年际变化信号西传与 Rossby 波 验

潮站数据的模拟结果表明, 以第一斜压 Rossby 波传播为特征的一层半约化重力模式能够很好地解释验潮站海面高度的年际变化。然而验潮站数据的空间覆盖毕竟有限, 只能选取有限的点作研究, 高度计数据很好地弥补了验潮站资料的这一缺陷。图 5 为 Pohnpei

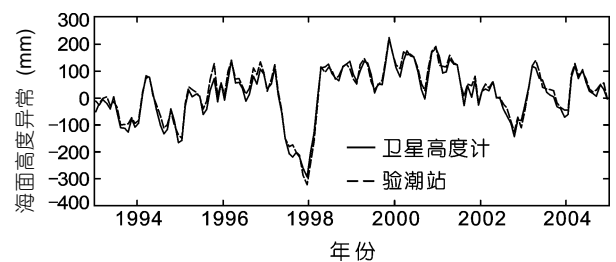


图5 Pohnpei 站处验潮站与高度计观测的海平面异常
Fig.5 Tidal gauge and altimeter observed SLA at Pohnpei

站处验潮站观测海面高度异常与高度计观测值,二者基本吻合。

图 6a 为高度计观测的沿 7°N 海面高度异常的经度-时间分布。由图 6a 可见明显的海面高度异常随时间西向传播的特征。1998 年初正海面高度异常在 130°W 附近生成并西传,到 170°W—170°E 区域信号较弱,向西加强,在 1999 年到达西边界,且该加强的正信号一直持续到 2001 年中期,热带西太平洋这一时期的正异常对应着拉尼娜年。2002 年中期到 2005 年中期海面高度表现为显著的负异常,该负异常于 2002 年初在太平洋中部生成,向西传播并累积,这一负异常对应着厄尔尼诺年。在北太平洋 7°N 区域,根据观测的海面高度异常计算得到的信号西传速率为 0.35—0.50m/s,图 6a 中标示的黑色诊断线斜率约为 0.44m/s。根据 Chelton 等(1998)的 Rossby 波变形半径数据计算的第一斜压 Rossby 波在 7°N 范围内传播速度为 0.47m/s,海面高度信号的西向传播速度与 Rossby 波速非常接近,可见高度计观测的海面高度异常信号传播与第一斜压 Rossby 波运动密切相关。

2.2.2 高度计观测海平面年际变化信号与模型比较
由验潮站资料的模拟可知,模拟区域的東西间距离越远,东边站点海平面信号传到西侧站点的时间越长。此外,由于 Rossby 波波速依赖于纬度,纬度越高 Rossby 波传播速度越小,这也将导致东、西海区间信

号传播时间越长。由于卫星高度计资料时间长度有限,考虑到模型在长时间、长路径上误差累积会造成模拟失真,因此选取太平洋 180°E 为初始边界模拟 5°—20°N、122°—180°E 区域的 SLAs。图 7 为 Majuro、Pohnpei、Chuuk 和 Malakal 四个不同验潮站处高度计观测资料与模式结果经平滑后的比较,其相关系数分别为 0.93、0.80、0.67 和 0.27,95%的置信区间分别在(0.90—0.94)、(0.73—0.85)、(0.58—0.75)和(0.13—0.41)。由图 7 可见 Rossby 波信号在总体上能够解释海面高度的年际变化,四个地点的模拟信号都能很好地反演 1997 年末 El Niño 发生时的异常低海面高度异常。图 7b、c、d 于 1998 年末到 2001 年间对 La Niña 发生时期的高异常海平面模拟效果不明显,模拟振幅偏小,特别是 Malakal 站距离东边界较远,模拟的效果最差。

图 6b、c 为沿 10°N 高度计观测和模式 SLAs 的时间-经度分布,模式较好地反映了 10°N Rossby 波信号的西向传播和海平面年际尺度上的变化。模拟结果与观测资料的对比可发现,在研究海区西侧模拟得到的海平面异常相对卫星高度计观测振幅偏小。

由图 8a 可见,大部分海区模拟的海平面变化与卫星高度计资料间的相关系数都在 0.6 以上,图 8b 中模拟结果对高度计观测的方差贡献大部分在 0.4 以上。图 8a、b 中,8°N 以南、145°E 以西区域的模拟不

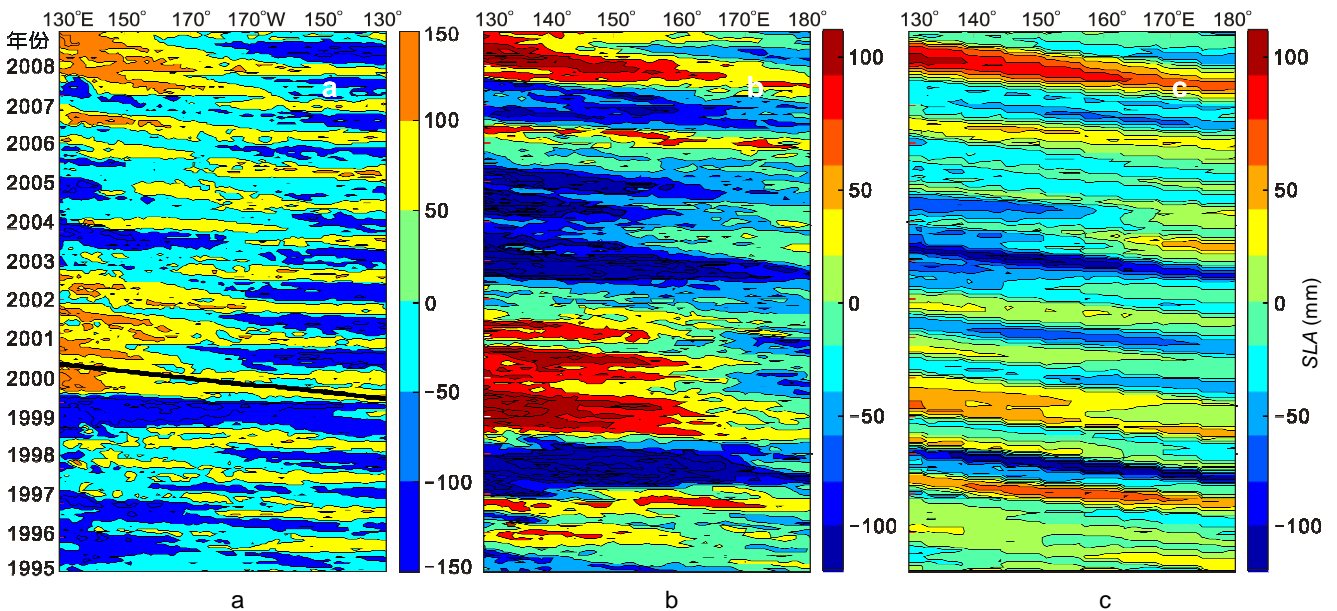


图 6 高度计观测的沿 7°N 海平面异常时间-经度分布[(a), 黑色诊断线斜率为 0.44 m/s]

及沿 10°N 高度计 SLAs (b)和模拟结果(c)的时间-经度分布

Fig.6 SLA observed by altimeter along 7°N as a function of time and longitude, the rate of black diagnostic line is 0.44 m/s(a) and altimetry (b) and model (c) SLAs along 7°N as a function of time and longitude

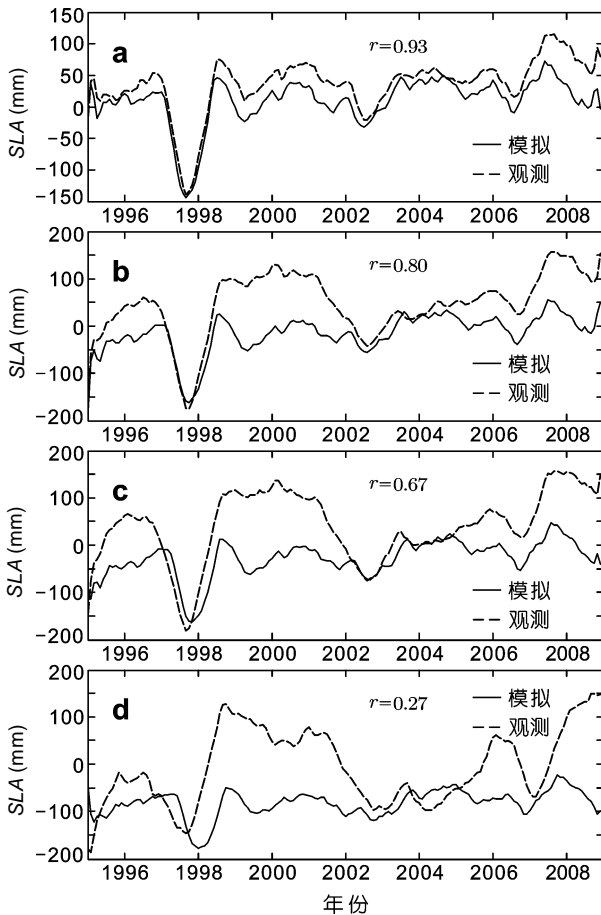


图7 Majuro 站(a), Pohnpei 站(b), Chunk 站(c)和 Malakal 站(d)处高度计数据与模型结果

Fig.7 Altimetry observed and model SLAs at Majuro (a), Pohnpei(b), Chunk (c) and Malakal (d)

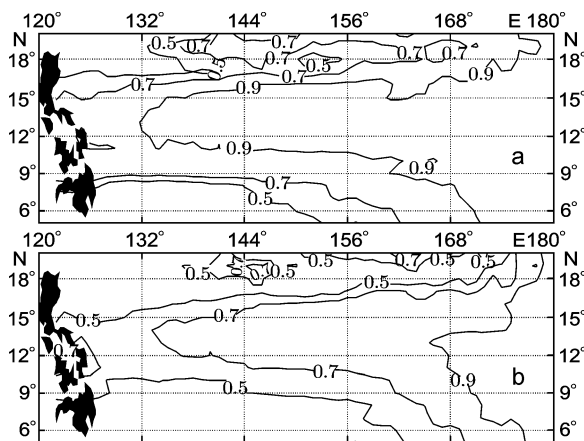


图8 高度计观测 SLA 与模型计算 SLA 的相关系数分布(a)

及模型计算 SLA 对高度计观测 SLA 的方差贡献分布(b)

Fig.8 Distribution of correlation coefficients between altimetry observed and model SLA (a) and the rate distribution of variance reductions between model and altimetry observed SLA (b)

够准确,这是由于此区域位于北赤道逆流区,与流系不稳定相联系的区域性涡旋变化显著,对一层半模

型的模拟结果影响较大。另外,图 8a,b 中 17°N 以北、 135°E 以西区域的模拟也不够准确,这可能是由于此纬度上 Rossby 波传播时间较长,风应力及模型在长时间、长路径上的误差累积造成模拟效果变差。

3 结论

高度计与验潮站观测资料中都表现出 20°N 以南西太平洋海区明显的年际变化特征,该年际信号与第一斜压模 Rossby 波的产生与传播密切相关。

利用海表面风应力驱动的一层半约化重力模型,对西太平洋 7°N 的四个验潮站位置和(5° — 20°N 、 122° — 180°E)区域的 SLA 进行模拟。尽管一层半约化重力模型在形式上比较简单,但由于其抓住了 SLA 变异的主要物理机制,所以能取得不错的模拟效果。验潮站观测信号与模拟信号的相关系数都在 0.54 以上,而基于高度计观测的模拟结果与观测信号在大部分区域的相关系数都在 0.6 以上,模拟结果对高度计观测的方差贡献大部分在 0.4 以上,总体上反映了海平面年际变化特征和低(高)异常信号由东侧产生并向西传播的过程。

海洋是一个非线性系统,对于模拟不好的区域无法用线性 Rossby 波来解释,非线性的作用必须考虑。虽然风应力精度的提高在一定程度上可以改善 Rossby 波动力模型的模拟效果,但海域中复杂的岛屿和海底地形,且逆流,不稳定、涡旋-基流相互作用等非线性物理机制可能起更显著的作用。

参考文献

- Cane M A, Munnich M, Zebiak S E, 1990. A study of self-excited oscillations of the tropical ocean-atmosphere system Part I: Linear analysis. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47: 1562—1577
- Chelton Dudley B, Michael G Schlax, 1996. Global observations of oceanic Rossby waves. *Science*, 272: 234—238
- Chelton Dudley B, Roland A Deszoeke, Michael G Schlax *et al*, 1998. Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. *Journal of Phys Oceanogr*, 28(3): 433—460
- Firing Yvonne L, Mark A Merrifield, Thomas A Schroeder *et al*, 2004. Interdecadal sea level fluctuations at Hawaii. *Journal of Phys Oceanogr*, 34: 2514—2524
- Li Jianke, Allan J Clarke, 2007. Interannual sea level variations in the South Pacific from 5° to 28°S . *Journal of Phys Oceanogr*, 37: 2882—2894
- Munnich M, Cane M A, Zebiak S E, 1991. A study of selfexcited

- oscillations of the tropical ocean-atmosphere system. *Journal of Atmospheric Sciences*, 48: 1238—1248
- Maharaj A M, Neil P C, Peter J H *et al*, 2007. An evaluation of the classical and extended Rossby wave theories in explaining spectral estimates of the first few baroclinic modes. *Ocean Dynamics*, 57: 173—187
- Qiu Bo, 2002. Large-Scale Variability in the Midlatitude Subtropical and Subpolar North Pacific Ocean: Observations and Causes. *Journal of Phys Oceanogr*, 32: 353—375
- Qiu Bo, 2003. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback. *Journal of Phys Oceanogr*, 33: 2465—2482
- Qiu Bo, Chen Shuiming, 2006. Decadal variability in the large-scale sea surface height field of the south Pacific Ocean: observations and causes. *Journal of Phys Oceanogr*, 36: 1751—1762
- Tziperman E, Cane M A, Stephen E Zebiak *et al*, 1997. Locking of El Niño's peak time to the end of the calendar year in the delayed oscillator picture of ENSO. *Journal of Climate*, 11: 2191—2199
- Yoshi N. Sasaki, Shoshiro Minobe, Nikla Schneider *et al*, 2007. Decadal sea level variability in the South Pacific in a global eddy—resolving ocean model hindcast. *Journal of Phys Oceanogr*, 38: 1731—1747

IMPACT OF ROSSBY WAVES ON INTERANNUAL SEA LEVEL VARIABILITY IN THE PACIFIC OCEAN EAST OF THE PHILIPPINES

YANG Chun-Hui^{1,3}, GU Xiao-Li¹, LI Pei-Liang¹, LIU Cong¹, ZHANG Jun²

(1. *Oceanography Department, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 2. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen, 361005*; 3. *Ocean Hydrometeorology Institute, Navy Donghai-Armada, Ningbo, 315122*)

Abstract The influence of Rossby waves on sea level variability in the Pacific Ocean east of Philippines is studied based on a 1½-layer reduced gravity model, which represents the relationship between baroclinic ocean and the large-scale sea-surface wind stress curl. Tidal gauges and altimeter observation sea level data were used as the eastern initial boundary separately in the model to simulate the sea level in the west area. The calculated results show a strong correlation with tidal gauge and altimeter observation data. The observed pattern of the interannual sea level variability is well reflected in the model results. The generation and westward spread of abnormal signals are also reproduced successfully. Therefore, the first baroclinic Rossby waves have a significant influence on the interannual sea level variability in the Pacific Ocean east of the Philippines.

Key words Sea level variability, Rossby waves, The 1½-layer reduced-gravity model