

Rossby 波模型对西北太平洋海表面高度 年际变异的可预测性研究*

张永垂 张立凤

(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

提要 根据海洋 Rossby 波的西传特性,使用一阶斜压 Rossby 波模型对北太平洋海表面高度的年际变异进行了回报和预测研究。回报结果表明, Rossby 波模型能够较好地模拟北太平洋海表面高度的年际变异。尤其是黑潮延伸区的下游,模拟结果与卫星观测的相关系数达到 0.8 以上。预测结果表明, Rossby 波模型在两个纬向分布的海域有显著的预报能力,分别位于高纬度中部和副热带环流西部。前者可提前 5—6 年,后者可提前 2—4 年。此外,重点开展了 Rossby 波模型在西北太平洋的预报能力研究。结果表明, Rossby 波模型对中国的边缘海有着很好的预测能力,包括南海北部、台湾以东和东海黑潮海域,分别在提前 32、40 和 52 个月时能取得最佳的预测效果。

关键词 可预测性;海表面高度;年际变异;Rossby 波模型;边缘海

中图分类号 P731.34

全球变暖的一个显著后果是全球海平面上升。自可测量全球海表面变化(Sea Level Anomaly, SLA)的卫星高度计诞生以来,其观测到的全球平均海平面上升速度分别达到 IPCC 第三次和第四次评估报告中关于海平面上升预测结果的上限(Church *et al.*, 2011)。全球海平面在 1972—2008 年间上升速率为 2.10mm/yr,而在 1993—2008 年间达到了 3.22 mm/yr(Church *et al.*, 2011)。海平面的加速上升给海岸带带来了巨大的影响(Nicholls *et al.*, 2010; Nicholls, 2011)。

由于 SLA 在空间上分布不均,因此区域 SLA 对于沿岸不同国家和居民具有更现实的影响。SLA 空间分布型态主要由热通量、淡水通量和风应力等外部强迫决定(Lowe *et al.*, 2006)。在季节尺度上,中纬度海域主要由海表面热通量加热或冷却引起(Kelly *et al.*, 1999; Vivier *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2000; Ferry *et al.*, 2000),热带海域主要是由风应力强迫产生(Vinogradov *et al.*, 2008)。在年际尺度上,海洋的动力过程发挥着主要作用(Piecuch *et al.*, 2011)。使用风应力驱动简单

的海洋动力模式, Timmermann 等(2010)认为热带印度洋-太平洋区域最近几十年 SLA 是由海域风场的盛行风变化造成。通过分析资料和模式模拟结果, Merrifield(2011)发现热带西太平洋海平面的升高与热带太平洋信风的增强相对应。进一步的研究表明,该区域近 20 年 SLA 的异常上升速率是由信风的线性增强分量造成的(Merrifield *et al.*, 2011)。尽管近 20 年全球海平面在加速上升,但太平洋北美沿岸的海平面却没有上升。Bromirski 等(2011)对此的解释是:20 世纪 70 年代中期气候态发生转换后,风应力旋度也相应地发生了剧烈变化,使得北太平洋东海岸海洋环流以及与之相关的海表面高度发生改变,因此抑制了 1980 年以后沿岸海平面的上升。他们警告近期风应力旋度回到了位相转换前的状态,这将导致北美西海岸海平面达到、甚至超过全球的上升速率。

SLA 由正压和斜压两部分组成,且以后者为主。在所有的斜压模态中,第一阶斜压模态占据主导地位(Suzuki *et al.*, 2011)。了解这种物理性质至关重要,

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2013CB956200 号; 江苏省自然科学基金项目, BK20130064; 中国博士后科学基金项目, 2013M541959 号; 解放军理工大学气象海洋学院博士(后)科研启动基金项目。张永垂, E-mail: zhangyc@yml.com

通讯作者: 张立凤, 博导, E-mail: zhanglif@yeah.net

收稿日期: 2011-11-06, 收修改稿日期: 2012-12-18

因为这样可以进一步简化问题,只需抓住影响 SLA 的主要机制进行研究。描述一阶斜压模态最简洁、最有效的工具为一阶斜压 Rossby 波模型。研究表明,一阶斜压 Rossby 波模型在解释海表面高度的低频变异方面起了很重要的作用(张永垂等, 2009)。如借助于一阶斜压 Rossby 波模型,可以解释黑潮延伸区系统在稳定和不稳定动力学之间转换的原因(Qiu *et al.*, 2010), 以及热带西太平洋海平面异常升高的机制(Qiu *et al.*, 2012)等。

对于一阶斜压 Rossby 波模型而言, SLA 的外强迫机制是大气的局地风应力, 内部机制是 Rossby 波在海洋内的传播。Rossby 波的传播特性, 使得其具有可提前预测海洋要素变化的能力(Venzke *et al.*, 2000)。基于一阶斜压 Rossby 波模型, Schneider 等(2001)认为可以提前 3 年有效地预测黑潮-亲潮海域冬季海表面温度的变化。Zhang 等(2010)研究发现, 在北大西洋的热带、副热带东部和纽芬兰以东海域, 分别可以提前 3 个月、18 个月和 3 年有效地预测冬季海表面温度的变化。

由于 Rossby 波的西传特性, 波动一旦被激发, 即使不施加风应力, 仍能够将信号自东向西传播, 从而改变其源地以西海域海表面高度和温度/密度跃层变化。所以利用 Rossby 波的传播特征预测 SLA 是很有意义的工作, 但到目前为止, 这方面的成果还不多, 特别是量化的预测工作更是缺乏。本文基于一阶斜压 Rossby 波模型, 对北太平洋海表面高度的年际变化进行预测, 重点对影响中国边缘海海表面高度年际变异的主要动力过程进行研究, 下文安排如下: 第 1 节为模型和资料介绍; 第 2 节和第 3 节分别为模型的回报和预测结果及分析; 第 4 节为使用模型对西北太平洋边缘海的预测效果; 最后一节为结论和讨论。

1 模型和资料介绍

1.1 模型

在准地转和长波近似下, 风应力驱动的一阶斜压 Rossby 波模型在研究 SLA 低频变异方面有着很多应用(张永垂等, 2009)。描述第一阶斜压 Rossby 波的 $1^{1/2}$ 层约化重力线性涡度方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} - c_R \frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{g'}{\rho_0 g} \nabla \times \bar{\tau} \quad (1)$$

h 为一阶斜压 Rossby 波传播的 SLA, x 为东西向的坐标, c_R 为一阶 Rossby 波的传播速度, g' 为约化重力加速度。

方程(1)右端 Ekman 抽吸项由两部分组成, 分别为 $-\frac{g'}{\rho_0 g f} \nabla \times \bar{\tau}$ 和 $\frac{g' \beta \tau_x}{\rho_0 g f^2}$, 前者为风应力旋度的垂直分量, 后者为 β 的作用。分别利用两项作为方程(1)的强迫项进行计算, 结果发现, 前者的作用远大于后者, 因此以下计算中只考虑风应力旋度的垂直分量对模型的强迫作用。Rossby 波模型的解由两部分组成: 大洋内区风场的强迫作用和北美西海岸的边界强迫作用。已有的研究表明, 西海岸强迫产生的 Rossby 波由于强的耗散作用, 并不能传入大洋内部海域(Fu *et al.*, 2002; 张永垂等, 2010)。因此本文只考虑大洋内区风应力对 SLA 低频变异的作用。沿 Rossby 波特征线积分方程(1)可得:

$$h(x, y, t) = \frac{g'}{\rho_0 g f(y) c_R(y)} \int_{x_e}^x \nabla \times \bar{\tau} \left(x', y, t + \frac{x-x'}{c_R} \right) dx' \quad (2)$$

c_R 取 Chelton 等(1998)根据实际观测资料计算的数值。为了减小理论计算与实际观测值之间的偏差(前者小于后者), 将 Rossby 波相速度乘以放大因子 $\alpha(y) = 1.0 + 0.025 \times (y - 10^\circ\text{N})$ (Qiu *et al.*, 2006), y 为纬度。分别取 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $g' = 0.02 \text{ m/s}^2$ 。在本文中, 由于使用相关系数定量化模型的模拟和预测效果, 因此取不同的 g' 对结果没有影响。

1.2 资料

SLA 资料为法国国家空间研究中心(CNES)的卫星海洋存档数据中心(AVISO)提供的数据。该数据融合了 ERS-1/2、TOPEX/Poseidon 及其后继 Jason-1、2 等卫星的观测值。资料已经进行了仪器误差、环境干扰(湿对流层、干对流层及电离层影响)、波浪影响(海况偏离)、潮汐影响(海潮、固体潮及极潮)和反变气压计影响等因素的校正(Ducet *et al.*, 2000)。本文使用的 SLA 为“升级”(Updated)版本的数据, 即最大可能利用所有卫星的测量值, 因此保证了该资料拥有最大的样本容量。使用资料分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间自 1992 年 10 月—2011 年 1 月, 共计 220 个月。由于该资料原始的时间分辨率是 7d, 故首先对每个月的数据进行加权累加, 再除以该月的天数, 以获得月平均的 SLA。

风应力资料为 NCEP-NCAR 月平均资料(Kistler *et al.*, 2001)。空间分辨率为 T62 高斯格点($1.904^\circ \times 1.825^\circ$), 使用双线性插值方法将其转换为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。资料年限为 1982 年 10 月—2011 年 1 月。

1.3 试验方案

对 Rossby 波模型分别进行回报试验和预测试验。对于回报试验,使用风应力自 1982 年 10 月开始计算模型,取 1992 年 10 月—2011 年 1 月的模拟结果与卫星观测的海表面高度进行比较。

对于预测试验,预测开始之前模型中有风应力强迫。预测开始后,风应力强迫设为 0,此时向后计算的时间为预测时效。即 t 月之前有风应力强迫,从 $t+1$ 到 $t+N$ 月,风应力设为 0。 N 为预测时效。

当某一时刻风场强迫产生 SLA 后,在 Rossby 波的作用下,向西传播,在没有耗散的情况下,可传至大洋西边界。模型预测结果可理解为:某点的 SLA 变化只受上游 SLA 西传的作用,不受局地风应力的强迫作用。这样就使得预测的 SLA 为预测时效内所有上游西传的 Rossby 波作用之和,而与初始风场的局地强迫无关。

由于本文主要研究 SLA 的年际变化,因此对卫星观测和模型积分的 SLA 月平均资料进行 17 个月的高斯低通滤波。使用线性相关系数来定量分析一阶斜压 Rossby 波模型回报和预测的 SLA 与观测值年际变异的相符程度。使用 t 检验方法对相关系数的显著性进行检验。样本的自由度考虑了时间序列的自相关 (Bretherton *et al.*, 1999)。对于低通滤波的 SLA,在估计样本自由度时使用了滞后 17 个月的自相关 (Kwon *et al.*, 2012)。本文定义北太平洋区域为: 10° — 60° N, 110° — 260° E。

2 北太平洋海表面高度年际变异的回报效果

图 1 为 Rossby 波模型回报的年际 SLA 与观测值的相关系数,阴影区为超过显著性检验的海域。由图可见,一阶斜压 Rossby 波模型对海表面高度年际变异的模拟较好。在东北太平洋大部分海域,相关系数超过 0.4。在黑潮延伸区的下游 (30° — 35° N, 170° — 155° W),相关达到 0.8 以上,说明模型能够很好地模拟出与实际观测相一致的年际变异。在西太平洋,包括西太暖池、副热带西部和亲潮等海域,也有一定的模拟能力。

模型的回报能力在热带中部和副热带环流西部与我们的

前期(张永垂等, 2010)工作有所区别。前期工作使用的是 SODA 资料,而本文使用的是 NCEP-NCAR 再分析资料。我们(Zhang *et al.*, 2011)比较过 QuikSCAT 和 NCEP-NCAR 两种不同的风场对一阶 Rossby 波模型的影响,发现前者能够显著地改善模型在热带海域的模拟效果。Merrifield 等(2011)的结果也表明,相比较 NCEP-NCAR,融合了 QuikSCAT 资料的 ECMWF 风应力能够显著地提高对热带西太平洋 SLA 的模拟能力。因此,使用质量相对较高的风应力资料可以提高模型对热带海表面高度年际变异的模拟能力。

与前期工作(张永垂等, 2010)的另一个差异是耗散系数不同。本文 Rossby 波模型中不考虑耗散作用,主要目的是使 Rossby 波在西传过程中能够保持振幅。图 2 为模型取不同耗散系数对 (20° — 30° N) 海域平均的模拟结果。可以发现,在 170° W 以西海域,随着耗散的减弱,模拟能力呈单调增强的趋势。因此,在副热带环流西侧,当 Rossby 波模型不考虑耗散时,模拟效果最好。

3 北太平洋海表面高度年际变异的预测效果

3.1 预测结果

Rossby 波模型回报和预测的主要区别是:前者不仅包括 Rossby 的西传作用,而且也受局地风应力的强迫作用;后者仅考虑 Rossby 波西传的作用。图 3 为模型预测的海表面高度年际变异与观测的相关系数。超过 99% 显著性检验且相关系数大于等于 0.4 本文认为是可预测的。

图 3a 为预测时效 1 年的结果,从图可见,可预测的区域主要分布在中高纬度的中东部海域,这也是回报能力较强的海域(图 1)。在黑潮延伸区下游,相

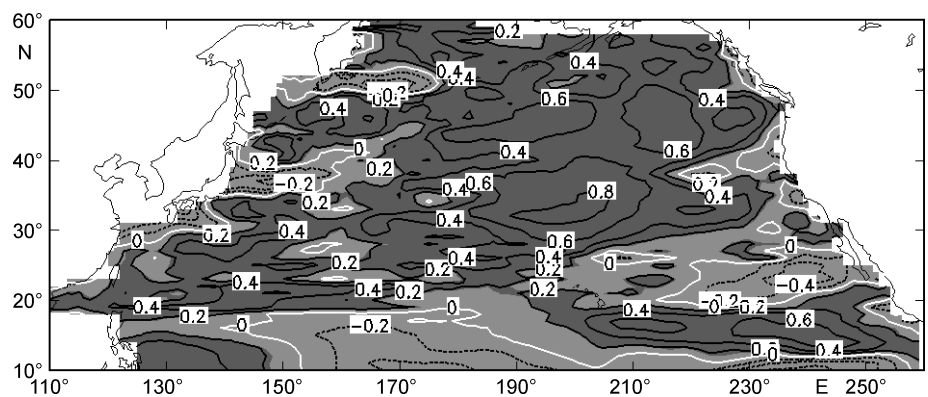


图 1 海表面高度年际变异的 Rossby 波模型回报结果的与观测值的相关系数

Fig 1 The correlation coefficients between the interannual SLA hindcasted with Rossby waves model and altimeter observation. The time spans from 1992.10 to 2011.1

注: 阴影区为超过 99% 显著性检验的区域, 时间范围为 1992 年 10 月—2011 年 1 月

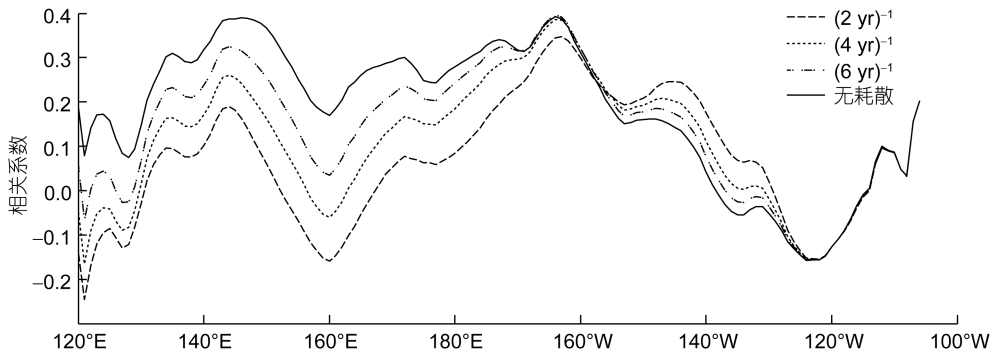


图 2 海表面高度年际变异的模拟结果与观测值的相关系数

Fig. 2 The correlation coefficients between the interannual SLA hindcasted with Rossby waves model and the observation. The time spans from 1992.10 to 2011.1.

注: 区域范围为 20°—30°N, 时间范围为 1992 年 10 月—2011 年 1 月

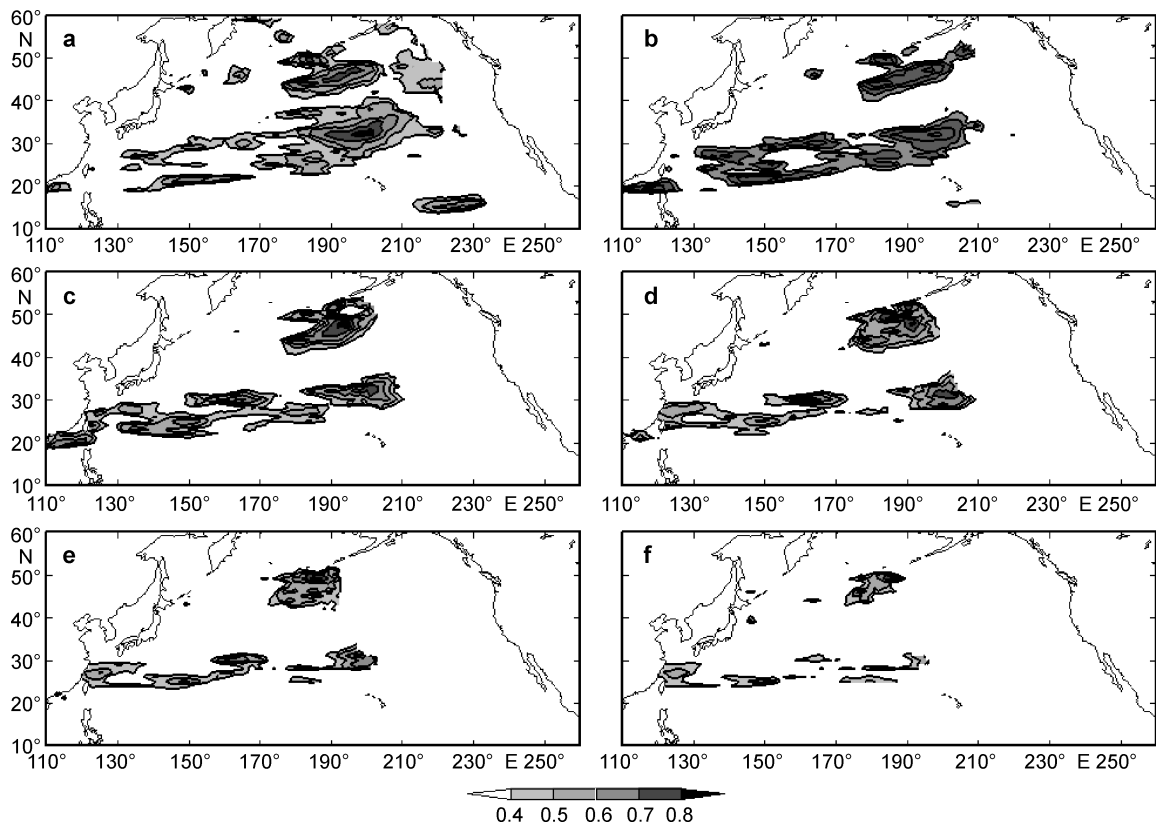


图 3 提前不同时间时 Rossby 波模型对年际变异预测值和观测值的相关系数

Fig.3 The correlation coefficients between the forecast of interannual SLA using Rossby waves model and observation

注: 阴影区为模型的可预测海域, 定义为相关系数超过 99% 的显著性检验且大于等于 0.4。a、b、c、d、e 和 f 分别代表模型提前 1、2、3、4、5 和 6 年预测

关系数可达到 0.8 以上, 体现了模型很强的预测能力。预测时效为 2 年时(图 3b), Rossby 模型有预测能力的海域主要呈现两个纬向分布带: 副热带的中西部和高纬度(40°—50°N)的中部, 这同样在回报试验的结果中得到体现。值得一提的是, 在副热带的西部, 模型的预测能力要高于回报能力。当提前 3 年预测时,

在高纬度的可预测海域与 2 年时基本不变, 而副热带海域西部海域显得有些零乱, 但仍存在较强的预测能力。进一步延长预测时效至 4 年时, 高纬度的可预测海域仍然比较集中, 且区域有所扩大; 而副热带西部的海域逐渐减小、变弱。提前 5 年时, 高纬度海域和副热带西部海域可预测海域都减小。提前至 6 年时,

除了局部海域,如高纬度的中部海域(45° — 50° N, 175° — 170° W)和琉球海域,整个北太平洋上可预测海域基本消失。

综上所述, Rossby 波模型对 SLA 年际变化的可预测性表现为两个特征:一是模型有两个显著的可预测海域,分别位于副热带环流的中西部和高纬度的中部;二是随着时效的增加,大部分海域的可预测性逐渐减小、西移,且中纬度的西移速度要快于高纬度。

3.2 讨论

在不考虑耗散作用时,从一阶斜压 Rossby 波模型看, SLA 变化取决于两个因子:局地风应力强迫(Ekman 抽吸)和自由 Rossby 波西传。前者反映了海表面高度对风应力的瞬时响应,是大气的外强迫结果,没有可预测性(局地 Ekman 模型);而自由 Rossby 波是风场强迫产生 SLA 后,在 β 作用下向西传播,是海洋的内部动力过程,具有可预测性。因此,位于某个海域的海表面高度是由其东侧所有海表面高度西传累加作用的结果。张永垂等(2010)的研究表明:一阶斜压 Rossby 波模型和局地 Ekman 抽吸模型对副热带环流西侧回报技巧较弱;而两者之差,即自由 Rossby 波模型可以解释海表面高度的年际变异。图 3b 也验证了这一观点。因此,对于副热带环流西部的大部分海域而言,风应力的强迫对海表面高度的年际变异起着相反的作用,而自由 Rossby 波可以模拟和预测海表面高度的低频变异。最近,Penduff 等(2011)根据海洋环流数值模式的模拟结果,认为中纬度海

域年际 SLA 主要是由海洋内部动力过程决定的,并进一步推断这个过程是连续不断激发出的 Rossby 波。本文的模拟和预测结果也证实了这个观点。

4 对西北太平洋的预测效果

以上一阶斜压 Rossby 波模型对 SLA 预测能力的分析都是局限于北太平洋内部海域,仔细分析图 3 还可发现,模型对于西北太平洋的中国近海海域海表面高度年际变异具有较好的预测能力,下面对此进行分析。

4.1 南海北部海域

尽管一阶斜压 Rossby 波模型对南海北部海表面高度的回报能力较差(图 1),但是却具有较好的预测能力。当提前 12 个月预测时,模型对南海北部的部分海域有一定的预测能力。当提前 24—36 个月时,预测能力进一步提高。图 4 为南海北部(19° — 22° N, 110° — 120° E)海域平均相关系数随预测时间的分布图。随着预测时间的增加,区域平均相关系数也逐渐增加。当提前 32 个月时, Rossby 波模型对海表面高度年际变异的预测效果最好,相关系数达到 0.548。随着预测时效的进一步增加,预测技巧逐渐下降。图 5(a)为提前 32 月时模型预测的南海北部海域海表面高度年际变异的平均值和卫星高度计观测值。卫星观测的 SLA 主要体现了台阶式的跃升趋势,两个快速上升期位于 1998 年, 2005—2006 年,三个振荡维持期分别为 1998 年以前, 1999—2005 年和 2006—2011 年。当 Rossby 波模型提前 32 个月时,预测出了 1998 年

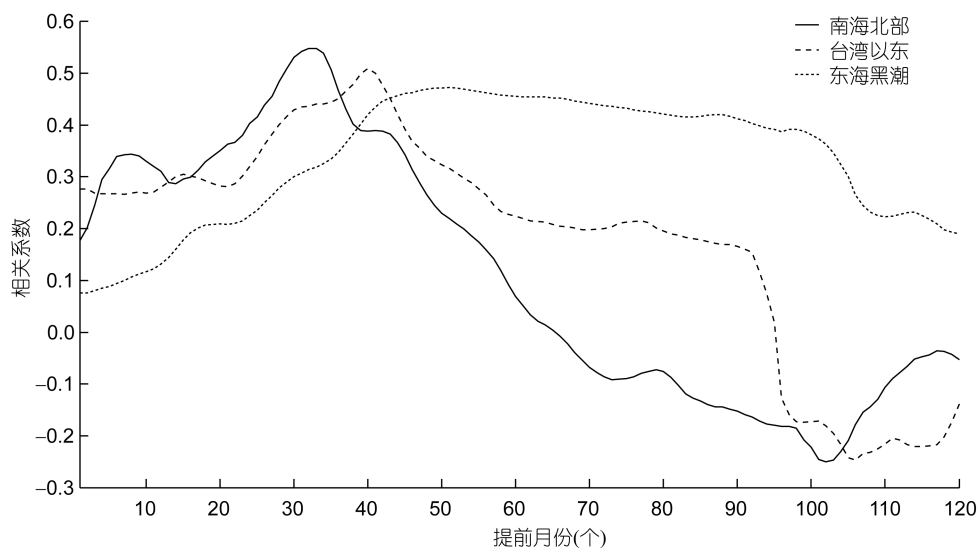


图 4 不同海域、提前不同时间使用 Rossby 波模型的预测值与观测值的平均相关系数

Fig.4 Average correlation coefficients between the forecast of interannual SLA of different timescales in advance and the observation

左右的快速上升期,但对于 2005—2006 年的快速上升期的预测较弱,这样也导致了 2006—2011 年预测的结果低于观测值。

回报结果表明大洋内区的风场强迫产生的 Rossby 波不能解释南海北部海表面高度的低频变异(图 1)。Yang 等(2003)认为局地风场强迫 Rossby 波在南海北部海表面高度季节变化中起了重要作用(Liu *et al.*, 2001)。最近, Zheng 等(2011)研究发现,半径大于 150km 的非线性 Rossby 波涡旋可以穿越吕宋海峡处的黑潮进入南海北部,从而改变局地环流型态。以上结果表明,由大洋内区风场强迫产生的 Rossby 波,西向自由传播,穿越吕宋海峡处的黑潮,进入南海北部,进而改变海表面高度的年际变异,也使得此海域的海表面高度有一定的可预测性。

4.2 台湾以东海域

在台湾以东海域,一阶斜压 Rossby 波模型对海表面高度的年际变异有一定的模拟能力(图 1),但相关系数仅在 0.3 左右。而当提前 36 或者 48 月预测时,相关系数均可达 0.4 以上(图 3c、d)。台湾以东海域(22°—25°N, 122°—125°E)相关系数平均值随时间变化也体现了该特征(图 4),随着预测时效的增加,相关系数也逐渐增大;在 40 月时达到最大,为 0.509;随后逐渐降低。图 5b 为提前 40 个月对台湾以东海域

海表面高度年际变异的平均值和观测值。由图可见,观测的海表面高度呈现一个上升趋势,1997 年以前是快速上升期;1997—2003 年在 1cm 上下振荡,振幅为 2cm 左右;2003—2010 年海表面高度的变化剧烈,最高处可达 8cm。提前 40 个月时预测,基本上能再现该演变特征,如 1997 年以前的快速上升期,1997—2002 年的低幅振荡期,以及 2003—2007 年的剧烈振荡期。不足的是 2007—2009 年之间海表面高度的预测值与观测的变化趋势相反。

刘秦玉等(2001, 2007)的研究也表明:台湾以东副热带逆流区 70—210d 周期振荡的 SLA 是自由 Rossby 波在西传过程增幅的原因。通过本文 Rossby 波模型的预测结果可发现,自由 Rossby 波对台湾以东海域海表面高度的年际变异确实起着重要作用。

4.3 东海黑潮海域

Rossby 波模型在东海黑潮和琉球海域的回报能力较弱(图 1)。但是当提前 36 个月预测时,相关系数在 0.4 以上。而随着预测时间的进一步延长,如 48 月时,可预测的区域进一步加大,相关系数也进一步提高(图 3d);72 个月时,相关系数仍然达到 0.5;即使提前 100 个月预测, Rossby 波模型对东海黑潮和琉球海域仍有一定的预测能力(图略),图 4 也证实了这一特征。在提前 40—100 个月预测时, Rossby 波模型在

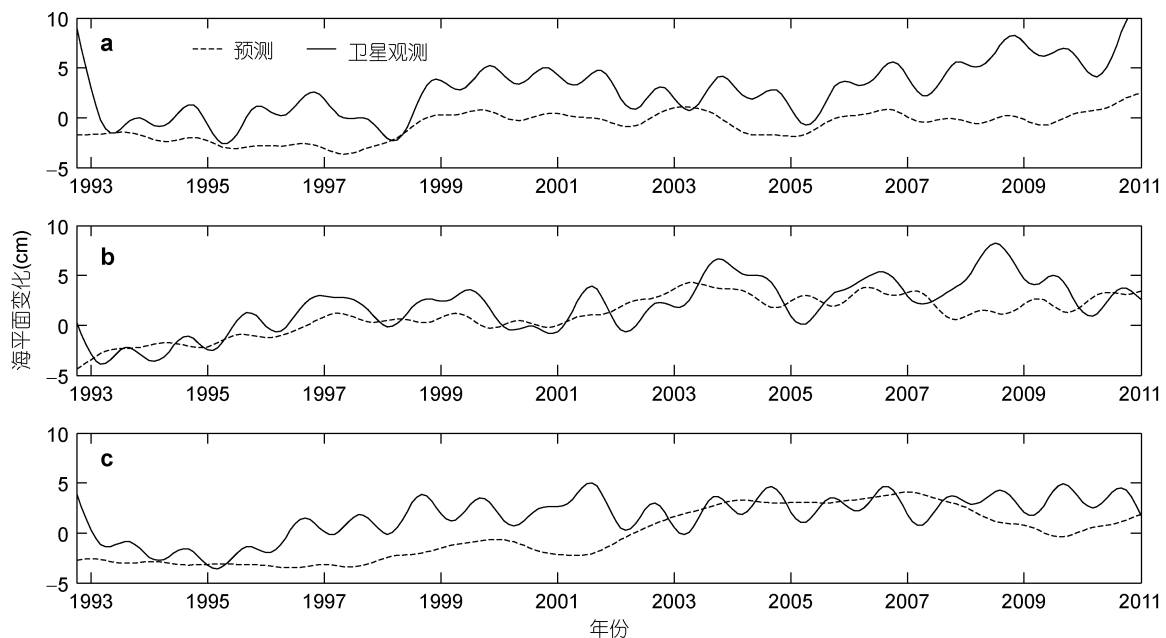


图 5 不同海域 Rossby 波模型预测与卫星观测 SLA。(a)、(b)和(c)分别为南海北部海域提前 32 月、台湾以东海域提前 40 月和东海黑潮海域提前 52 月

Fig.5 Average interannual SLA predicted with the Rossby waves model and satellite observation in different areas (unit: cm). (a) in the northern South China Sea, the forecast of 32 months in advance, (b) in the area east to Taiwan, the forecast of 40 months in advance, (c) Kuroshio in the East China Sea, the forecast of 52 months in advance

东海黑潮和琉球海域(25°—29°N, 120°—130°E)平均相关系数维持在 0.4 以上。其中, 在提前 52 个月预测时, 相关系数达到最大, 为 0.472。图 5c 为使用 Rossby 波模型提前 52 个月对东海黑潮和琉球海域的平均海表面高度的预测值与观测值。海表面高度的年际变异的观测值在 1995 年之前呈下降趋势, 之后上升至 1999 年, 随后维持一个振荡的状态。相比较而言, Rossby 波模型在该海域的预测效果较差, 尤其是对 2000 年以后的高频振荡特征的预测。

最近, Andres 等(2011)的研究表明, 一阶斜压 Rossby 波模型在东海黑潮所在纬度的模拟效果很差(张永垂等, 2010; Zhang *et al.*, 2011)。他们对此的解释是并非 Rossby 波不重要, 而是存在其它因素控制着 SLA 变化。本文的预测试验则揭示了自由 Rossby 波, 而非风场的局地强迫, 对东海黑潮和琉球海域海表面高度的年际变异发挥着重要作用。

5 结论和讨论

基于海洋 Rossby 波西传特征, 使用一阶斜压 Rossby 波模型对北太平洋海表面高度的年际变异进行了回报和预测试验。回报的结果表明, Rossby 波模型可以较好地模拟东北太平洋海表面高度的年际变异。尤其是在黑潮延伸区的下游, 相关系数达到 0.8 以上。预测结果表明, 在北太平洋, 可预测性大的海域有两个, 呈纬向分布的, 分别为高纬度的中部太平洋和副热带环流的西部。前者预测时效可提前 5—6 年; 后者可提前 2—4 年。这主要是自由 Rossby 的西传作用, 局地风应力强迫起着相反作用。Rossby 波模型对西太平洋的中国边缘海有着较好的预测能力, 包括南海北部、台湾以东和东海黑潮海域, 分别在提前 32、40 和 52 个月时达到最好效果。

鉴于 Rossby 波模型良好的预测效果, 可知其对于理解海表面高度年际变异的机理和可预测性有重要意义, 尤其是可以加深对中国边缘海海表面低频变异的认识。由于台湾以东黑潮流量与基隆(25.15°N, 121.75°E)和石埭岛之间的海表面差密切相关(Johns *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2001; 贾英来等, 2004; 温娜等, 2006; Chang *et al.*, 2011), 因此预测台湾以东的 SLA 在一定程度上可以估算出台湾以东黑潮流量, 以及其下游的东海黑潮流量。

本文使用的一阶斜压 Rossby 波模型是线性模型。而最近 Chelton 等(2007, 2011a)的研究表明, 全球海洋中无处不在的西传特征为非线性中尺度涡旋。结

合全球 SLA 和上层海洋叶绿素的观测资料, 认为后者的西传信号是由涡旋旋转的水平速度携带传输的, 而非 Rossby 波(Chelton *et al.*, 2011b)。实际上, 本文关注的是 SLA 的大尺度(100km 以上)低频(年际)变异, 因此把海表面高度的西传信号理解为线性行星波是可行的。当然, 对于中小尺度(100km 以下)高频变化(年或以内)的 SLA 是否适用需要进一步的探讨, 这也是我们今后的工作方向。

参 考 文 献

- 刘秦玉, 王韶霞, 刘征宇等, 2001. 北太平洋副热带逆流区长 Rossby 波动力特性. 地球物理学报, 44(增): 28—37
- 刘秦玉, 李丽娟, 2007. 北太平洋副热带向东逆流区 Rossby 波斜压稳定性. 地球物理学报, 2007, 50(1): 83—91
- 张永垂, 张立凤, 2009. 北太平洋 Rossby 波研究进展. 地球科学进展, 24(11): 1219—1228
- 张永垂, 张立凤, 王业桂, 2010. 北太平洋海表面高度的年际变化及其机制. 地球物理学报, 53(2): 247—255
- 贾英来, 刘秦玉, 刘伟等, 2004. 台湾以东黑潮流量的年际变化特征. 海洋与湖沼, 35(6): 507—512
- 温娜, 刘秦玉, 2006. 台湾以东黑潮流量变异与冬季西北太平洋海洋-大气相互作用. 海洋与湖沼, 37(3): 264—270
- Andres M, Kwon Y-O, Yang J, 2011. Observations of the Kuroshio's barotropic and baroclinic responses to basin-wide wind forcing. J Geophys Res, 116, C04011, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006863>
- Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P *et al.*, 1999. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. J Climate, 12: 1990—2009
- Bromirski P D, Miller A J, Flick R E *et al.*, 2011. Dynamical suppression of sea level rise along the Pacific coast of North America: Indications for imminent acceleration. J Geophys Res, 116, C07005, <http://dx.doi.org/10.1029/2010JC006759>
- Chang Y-L, Oey L-Y, 2011. Interannual and seasonal variations of Kuroshio transport east of Taiwan inferred from 29 years of tide-gauge data. Geophys Res Lett, 38, L08603, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL047062>
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M *et al.*, 2007. Global observations of large oceanic eddies. Geophys Res Lett, 34, L15606. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030812>
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M, 2011a. Global observations of nonlinear mesoscale eddies. Prog Oceanogr, 91: 167—216
- Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M *et al.*, 2011b. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll. Science, 334: 328—332
- Chen J L, Shum C K, Wilson C R *et al.*, 2000. Seasonal sea level change from TOPEX/Poseidon observation and thermal contribution. J Geodesy, 73: 638—647

- Church J A, White N A, 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv Geophys*, 32, <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>
- Church J A, Gregory J M, White N J *et al*, 2011. Understanding and projecting sea level change. *Oceanography*, 24(2): 130—143
- Ducet N, Le Traon P-Y, Reverdin G, 2000. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2. *J Geophys Res*, 105(C8): 19477—19498
- Ferry N, Reverdin G, Oschlies A, 2000. Seasonal sea surface height variability in the North Atlantic Ocean. *J Geophys Res*, 105(C3): 6307—6326
- Fu L-L, Qiu B, 2002. Low-frequency variability of the North Pacific Ocean: The roles of boundary- and wind-driven baroclinic Rossby waves. *J Geophys Res*, 107(C12), 3220, <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC001131>
- Johns W E, Lee T N, Zhang D *et al*, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 array. *J Phys Oceanogr*, 31: 1031—1053
- Kelly K A, Singh S, Huang R X, 1999. Seasonal variations of sea surface height in the Gulf Stream region. *J Phys Oceanogr*, 29: 313—327
- Kistler R, Kalnay E, Collins W *et al*, 2001. The NCEP-NCAR 50-Year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(2): 247—267
- Kwon Y-O, Frankignoul C, 2011. Stochastically-driven multidecadal variability of the Atlantic meridional overturning circulation in CCSM3. *Climate Dyn*, 38(5—6): 859—876
- Liu Z, Yang H, Liu Q, 2001. Regional dynamics of seasonal variability of sea surface height in the South China Sea. *J Phys Oceanogr*, 31(1): 272—284
- Lowe J A, Gregory J M, 2006. Understanding projections of sea level rise in a Hadley Centre coupled climate model. *J Geophys Res*, 111, C11014, <http://dx.doi.org/10.1029/2005JC003421>
- Merrifield M A, 2011. A shift in western tropical Pacific sea-level trends during the 1990s. *J Climate*, 24: 4126—4138
- Merrifield M A, Maltrud M E, 2011. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification. *Geophys Res Lett*, 38, L21605, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL049576>
- Nicholls R J, Cazenave A, 2010. Sea level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328: 1517—1520
- Nicholls R J, 2011. Planning for the impacts of sea level rise. *Oceanography*, 24(2): 144—157
- Penduff T, Juza M, Barnier B *et al*, 2011. Sea level expression of intrinsic and forced ocean variabilities at interannual time scales. *J Climate*, 24: 5652—5670
- Piecuch C G, Ponte R M, 2011. Mechanisms of interannual steric sea level variability. *Geophys Res Lett*, 38, L15605, <http://dx.doi.org/10.1029/2011GL048440>
- Qiu B, Chen S, 2006. Decadal variability in the large-scale sea surface height field of the South Pacific Ocean: Observations and causes. *J Phys Oceanogr*, 36: 1751—1762
- Qiu B, Chen S, 2010. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system. *Deep-Sea Res II*, 57: 1098—1110
- Qiu B, Chen S, 2012. Multidecadal sea level and gyre circulation variability in the northwestern tropical Pacific Ocean. *J Phys Oceanogr*, 42: 193—206
- Schneider N, Miller A J, 2001. Predicting western North Pacific Ocean climate. *J Climate*, 14: 3997—4002
- Suzuki T, Ishii M, 2011. Regional distribution of sea level changes resulting from enhanced greenhouse warming in the Model for Interdisciplinary Research on Climate version 3.2. *Geophys Res Lett*, 38, L02601, <http://dx.doi.org/10.1029/2010GL045693>
- Timmermann A, McGregor S, Jin F-F, 2010. Wind effects on past and future regional sea level trends in the Southern Indo-Pacific. *J Climate*, 23: 4429—4437
- Venzke S, Munnich M, Latif M, 2000. On the predictability of decadal changes in the North Pacific. *Climate Dyn*, 16: 379—392
- Vinogradov S V, Ponte R M, Heimbach P *et al*, 2008. The mean seasonal cycle in sea level estimated from a data-constrained general circulation model. *J Geophys Res*, 113, C03032, <http://dx.doi.org/10.1029/2007JC004496>
- Vivier F, Kelly K A, Thompson L, 1999. Contributions of wind forcing, waves, and surface heating to sea surface height observations in the Pacific Ocean. *J Geophys Res*, 104(C9): 20767—20788
- Yang H, Liu Q, 2003. Forced Rossby wave in the northern South China Sea. *Deep-Sea Res I*, 50: 917—926
- Zhang D, Johns W E, Lee T N *et al*, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior mesoscale eddies. *J Phys Oceanogr*, 31: 1054—1074
- Zhang H, Wu L, 2010. Predicting North Atlantic sea surface temperature variability on the basis of the first-mode baroclinic Rossby wave model. *J Geophys Res*, 115, C09030, <http://dx.doi.org/10.1029/2009JC006017>
- Zhang Y C, Zhang L F, Lv Q P, 2011. Dynamic mechanisms of interannual sea surface height variability in the North Pacific subtropical gyre. *Adv Atmos Sci*, 28(1): 158—168
- Zheng Q, Tai C, Hu J *et al*, 2011. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait. *J Oceanogr*, 67(4): 365—376

PREDICTABILITY TO SEA LEVEL INTERANNUAL VARIABILITY IN THE NORTHWESTERN PACIFIC BY FIRST-ORDER BAROCLINIC ROSSBY WAVES MODEL

ZHANG Yong-Chui, ZHANG Li-Feng

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 211101)

Abstract Based on the westward movement nature of oceanic Rossby waves, we applied the first-order baroclinic Rossby waves model to hindcast and forecast the sea level interannual variability in North Pacific Ocean. The hindcast results show that the Rossby wave model can simulate very well the observed sea level anomaly (SLA), especially in the downstream of Kuroshio extension in high correlation coefficient at >0.8 between the hindcast and observed SLAs. The forecast results reveal two zonal areas well presented in the Rossby waves model for predication, i.e., the central high-latitude area and western subtropical gyre in North Pacific, to which the interannual SLA could be predicted in advance by 5—6 and 2—4 years, respectively. Furthermore, the Rossby waves model exhibited good performance in marginal China seas, including the northern South China Sea, area east to the Taiwan, and Kuroshio in the East China Sea, to which the best prediction were achieved for 32, 40 and 52 months in advance, respectively.

Key words Predictability; sea level; interannual variability; Rossby waves model; marginal seas