

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.010

热带太平洋海平面年际和年代际变化研究进展

陈美香,左常圣,张雯皓,贾亚茹,吕晓凤

(河海大学海洋学院,江苏南京 210098)

摘要: 回顾热带太平洋对海平面长期趋势有重要影响的海平面年际和年代际变化的相关研究,总结包括近期提出的中部型厄尔尼诺在内的2种类型厄尔尼诺对热带太平洋海平面年际变化的影响,揭示了热带太平洋海平面年代际变化与信风年代际变化之间的紧密联系。指出赤道信风的增强对近期热带太平洋海平面变化格局的形成有决定性作用,厄尔尼诺强度的减弱对这种格局有贡献,而拉尼娜的影响有待深入研究。研究资料的局限性导致年代际变化的定量研究成果较少,在研究海平面年际和年代际变化时应用的热通量评估模型有待改进。

关键词: 热带太平洋;海平面变化;厄尔尼诺;信风

中图分类号: P714 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2017)03-0249-07

Research progress of inter-annual and multi-decadal sea level variability in tropical Pacific Ocean

CHEN Meixiang, ZUO Changsheng, ZHANG Wenhao, JIA Yaru, LYU Xiaofeng

(College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Research on the inter-annual and multi-decadal sea level variability which may influence the long-term trend of the sea level change in the tropical Pacific Ocean was reviewed, the effect of two types of El Niño events on the inter-annual sea level change in the tropical Pacific Ocean was summarized, and the close relationship of the multi-decadal changes in trade winds and sea level in the tropical Pacific Ocean was revealed. It is pointed out that the pattern of recent sea level change in the tropical Pacific Ocean is determined by the trade wind intensification, and the decrease of strength of El Niño events is favorable to this pattern, while the effect of La Nina events needs to be further studied. Data limitation leads to fewer quantitative research achievements of the multi-decadal change, and the heat flux model for study of inter-annual and multi-decadal sea level variability needs to be improved.

Key words: tropical Pacific Ocean; sea level change; El Niño; trade wind

全球变暖伴随的海平面上升使得人类对海平面变化的关注空前增加,全球及区域海平面变化是当今气候变化研究领域的重要科学问题,受到各国科学家和政府决策者的高度关注。一方面,海平面变化与气候变化密不可分,全球变暖引起的海洋增温和陆地、极地冰川的消融对全球海平面上升影响深远,而海平面变化后引起的地球系统各个圈层的变化会反过来影响气候变化,因而海平面变化是气候变化的重要组成者和影响者;另一方面,海平面变化与人类的生活息息相关,海平面上升将会对近海的自然环境、生态环境和人类活动产生广泛而深远的影响,如沿海湿地损失、风暴潮灾害加剧、咸潮上溯加重等。

卫星高度计资料的出现极大丰富了人们对近乎全球范围海平面变化的了解,也加深了对全球及区域海

收稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41506006,41376028,41506020,41276018);江苏省自然科学基金(BK20140846);全球变化与海气相互作用专项(GASI-03-01-01-09,GASI-IPOVAI-04);国家海洋局海洋数据分析与应用重点实验室开放基金(LDAA-2013-01)

作者简介: 陈美香(1981—),女,山东潍坊人,讲师,博士,主要从事气候与海平面变化研究。E-mail: chenmeixiang@hhu.edu.cn

平面上升这一事实的认识,是海平面变化研究历程的重要里程碑。利用验潮站、卫星高度计及温盐等多种资料的研究结果显示,20世纪全球平均海平面的上升速率为 $1.7 \pm 0.3 \text{ mm/a}$,1950—2000年、1993—2003年、2003年以来上升速率分别为 $1.8 \pm 0.3 \text{ mm/a}$ 、 $3.1 \pm 0.7 \text{ mm/a}$ 、 $2.4 \pm 0.8 \text{ mm/a}$,其中高精度卫星高度计观测以来(1993年以来)全球平均海平面上升速率较之前的时段有很大增加^[1-8]。

在全球平均海平面上升速率显著增加的同时,上述研究结果也显示全球海平面变化存在很强的区域不均匀性。热带太平洋在最近20年同时出现了全球海平面上升最快和下降最快的区域:热带西太平洋海平面上升速率居全球之首,平均海平面上升速率超过 10 mm/a ,为全球平均值(3 mm/a 左右)的3~4倍;而热带东太平洋是全球海平面下降最快的海域^[1,9-14];这一巨大反差格局使得热带太平洋海平面变化备受关注。原因之一是热带西太平洋岛屿遍布、国家众多、人口密集,另外珊瑚礁资源丰富,海平面上升对这些岛国及珊瑚礁生态系统的影响重大,如果海平面持续快速上升将引发区域性危机,开展该海域海平面变化研究具有重要的现实意义;其二,热带西太平洋暖池是全球大气运动最主要的热源地和全球气候异常的敏感区,海平面变化在很大程度上是气候系统低频变化的一种反映,如大气环流、信风和海洋环流的变化等,故对该区域海平面变化进行深入研究兼备重要的科学意义。

考虑到气候变化研究更关注低频变化,尽管海平面长期趋势是人们非常关心的问题,而本文的出发点也是热带太平洋海平面长期趋势的空间分布,但准确来说长期趋势的研究需要依赖于相当长的时间序列数据,以往众多研究者给出的海平面长期趋势的估计在很大程度上是长度非常有限的时段内海平面的变化速率,准确地说,这种趋势是年代际尺度上的变化趋势而非严格意义上的长期趋势,受到研究时段内海平面年际和年代际变化的显著影响^[1,15-17]。因此本文主要从年际变化和年代际变化角度对热带太平洋海平面变化研究进行回顾,总结已有的研究成果,分析存在的主要问题,提出相应的改进建议。

1 热带太平洋海平面年际变化特征及机制

由于处在厄尔尼诺-南方涛动(ENSO, El Niño-Southern Oscillation)的发生区,热带太平洋海平面存在与ENSO事件有关的显著年际变化^[1-2,18-26],与ENSO有关的变化是热带太平洋海平面主要年际变化信号^[26-27]。近期研究发现了与原先提出的传统型厄尔尼诺(也叫东部型厄尔尼诺)现象有显著区别的中部型或暖池型厄尔尼诺(El Niño Modoki)现象^[28-32]。传统型厄尔尼诺以赤道东、西太平洋海表温度(SST, sea surface temperature)分别出现暖异常和冷异常为主要特征,赤道上空出现异常的反方向Walker环流,对应海平面也分别在热带东、西太平洋出现异常高值和异常低值的“跷跷板”形态^[1-2,18-27]。暖池型厄尔尼诺发生时,SST偏高的区域是以Niño-4区($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $160^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{W}$)也就是暖池的东部或者热带太平洋中部为主要区域,而在赤道东、西太平洋均出现冷异常;大气环流在赤道上空出现大洋中部为上升气流的东、西热带太平洋双Walker环流模式^[30,33];期间海平面呈现赤道太平洋中部为异常高值而东西两侧均为异常低值的“梭子”形态^[26]。除以上主要特点外,传统型厄尔尼诺引起的海平面年际变化强度往往大于暖池型厄尔尼诺,而且传统型厄尔尼诺事件结束后通常会接连发生拉尼娜事件,但暖池型厄尔尼诺事件之后一般没有拉尼娜事件发生^[31-32]。

1993年以来的高度计数据分析结果显示,传统型和暖池型厄尔尼诺在海平面年际变化信号中分别表现为52个月和30个月的显著周期,暖池型厄尔尼诺爆发周期更短。基于Ishii海温数据的统计结果显示,过去60a总共发生了21次厄尔尼诺事件,其中有11次传统型厄尔尼诺,10次暖池型厄尔尼诺;20世纪80年代以前,暖池型厄尔尼诺每个年代仅发生1次,而90年代以来却发生了6次,发生频率明显增加;与此同时传统型厄尔尼诺发生频率在下降^[26,32-33];海温统计结果显示的暖池型厄尔尼诺事件发生频率的增加与高度计分析得到的此类型厄尔尼诺事件的爆发周期较短是一致的。数值模式预测结果也显示,全球变暖背景下未来暖池型厄尔尼诺发生频率大约是传统型的5倍之多^[34]。因此关注暖池型厄尔尼诺对海平面年际变化的影响具有重要的意义。

热带太平洋与ENSO有关的海平面年际变化与大气和海洋过程密不可分,风场、海气界面的热通量、海洋垂向热结构以及环流的变化等都是海平面变化的原因。Chang等^[26]用风场的辐聚辐散异常来解释不同类型厄尔尼诺期间热带太平洋典型海域海平面的年际变化,如暖池型厄尔尼诺发展初期到成熟阶段,热带太平洋中部和东部海平面持续上升是由辐散风场持续减弱引起的。海洋对大气环流异常的响应是海平面

发生变化的重要途径,仍以暖池型厄尔尼诺为例:东太平洋的东风异常和西太平洋的西风异常在赤道太平洋日界线附近引起大气辐聚,促使赤道太平洋中部温跃层加深,层化加强,垂向对流减弱,导致次表层明显增暖,海洋热容量增加,最终赤道太平洋中部海平面出现上升。Lu 等^[35]认为热带太平洋海平面年际变化中热通量的作用不可忽略,热通量的变化通过改变上层海洋温度从而导致海水的体积膨胀或者收缩即通过热比容效应来改变海面高度。另外,北赤道流分叉的南北移动、赤道流系的强度变化都会引起邻近的热带太平洋海平面出现年际差异^[36-37]。

从大气强迫的角度看,风场、热通量的变化会引起海洋密度场和环流的变化,继而导致热含量等因素的变化从而引起海平面发生变化,因此风场和热通量是引起海平面年际变化的根本原因。单纯的风场的作用可以从局地的 Ekman 抽吸和西传的 Rossby 波的影响 2 个方面来分析。一层半约化重力模型结果显示,2 种类型的厄尔尼诺事件期间风场的作用对传统型事件的贡献更大,而来自遥过程的 Rossby 波机制比局地 Ekman 抽吸更为重要。Ekman 抽吸对传统型厄尔尼诺期间海平面变化的影响仅限于发展阶段和成熟阶段,对消衰阶段几乎没有作用;但对暖池型厄尔尼诺自始至终都有影响。Rossby 波的贡献在传统型厄尔尼诺期间有明显的空间形态的变化且贡献值在 50% 左右,而在暖池型事件中基本没有空间形态的差异且贡献值仅有 35%^[26]。Lu 等^[35]指出热通量对热带太平洋海平面年际变化的贡献在东北部和西部最大,分别可以达到 60% 和 50%,尽管不同热通量数据产品有较大差别。

2 热带太平洋海平面年代际变化特征及机制

1993 年以来整个太平洋海平面变化趋势的空间分布表现为洋盆西升东降的特征,热带西太平洋平均海平面上升速率居全球之首而热带东太平洋是全球海平面下降最快的海域^[1,9-14,38];然而上述海平面变化的空间形态并非一直如此。1950—2000 年太平洋海平面变化趋势与 1993 年以来的空间分布形态有很大差别,其空间特征表现为赤道外海域洋盆东升西降,全球范围内海平面上升速率最快的海域在赤道外东太平洋,整个赤道太平洋海平面以下降为主,而热带西太平洋及热带东印度洋海平面下降速率最大^[1,39-40]。通过比较不难看出,热带太平洋海平面变化趋势在不同时段差异很大。实际上海平面变化趋势的年代际差异并不是一个新事物,研究海平面变化的学者们早已发现了在时间序列长度有限的情况下,海平面的年际信号和年代际振荡尤其是后者会严重影响海平面变化趋势,短时间内的趋势变化可能仅仅是海平面年代际信号的反映^[1,15-17]。因此,尽管 1993 年以来热带西太平洋海平面在快速上升,但如果这种上升只是受年代际变化的影响,那么这种快速上升可能不会持久,这对预测未来海平面长期变化很有意义,所以关注热带太平洋海平面年代际变化非常重要。

1993 年以来高精度卫星高度计资料的时间序列最长不过 23 a,像太平洋年代际涛动(PDO, Pacific Decadal Oscillation)^[41]甚至更加低频的信号很难从时间序列中完全分离出来。但迄今为止基于长期验潮站数据和高度计数据仍有一些重要的结论被发现,如热带太平洋海平面年代际振荡与 PDO 指数存在很好的相关关系,尤其是 20 世纪 70 年代中后期以及 90 年代初期太平洋气候转型伴随的 PDO 位相的转变在热带太平洋海平面信号中有很好的体现^[42-45];同时北太平洋环流涛动(NPGO, North Pacific Gyre Oscillation)可能对热带太平洋海平面年代际变化也有重要影响^[12,46]。其实热带太平洋的年代际变化与 PDO 和 NPGO 存在相关并不奇怪,因为 PDO 和 NPGO 分别对应太平洋海平面年代际变化的经验正交函数 EOF 的第一模态和第二模态,二者从根本上来讲是对大尺度大气强迫的一种响应,而赤道大气耦合过程在太平洋乃至全球的大气运动中起着重要作用^[47]。另外,ENSO 本身也有较为明显的年代际特征,如 Timmermann 等^[48]指出 1993—2008 年间厄尔尼诺事件的平均强度从强到弱的年代际变化有利于热带西太平洋海平面的上升。

在年代际时间尺度上,热带太平洋海平面存在的几十年的年代际振荡与热带太平洋信风强度的年代际变化有很好的对应关系。实测资料分析方面,Feng 等^[43]指出澳大利亚 Fremantle 站的海平面在 20 世纪 50 年代到 70 年代中期出现高值与太平洋信风增强有关,而 70 年代中期到 90 年代中期海平面维持较低水平则与该时段信风减弱有关;近期基于更长的时间序列众多研究者认为热带太平洋海平面存在的年代际变化在很大程度上受制于 1950—1990 年太平洋信风的减弱以及 1990 年以来的信风增强^[12,16,44-45,48-51]。数值研究则证明了风的强迫是决定热带太平洋海平面变化空间分布的重要因素,尤其是 1993 年以来高度计观测时段^[13,37,52-54]。

文献[12,43,54]基于1950年以来的风场数据和海平面重构数据认为可以用纬向风应力增强与压强梯度保持平衡的理论来解释赤道太平洋海平面出现的年代际振荡如热带西太平洋暖池近期的快速上升,而在赤道外海域海平面变化可以用风应力旋度变化导致的 Ekman 抽吸以及 Rossby 波的传播来解释,但这些研究仅仅止于定性分析并未给出定量估计。Qiu 等^[13]利用风应力强迫的非线性一层半模型模拟了1993—2009年热带西太平洋海平面变化是为数不多的定量研究,分析发现风场的驱动可以很好地刻画这一时段西太暖池海平面线性趋势的空间分布,但研究时段较短难以反映风场的低频变化对海平面年代际变化的影响。

3 研究现状剖析

总体来看,已有研究对热带太平洋海平面变化的规律有较为清晰的认识,包括海平面年际变化与不同类型厄尔尼诺的关系,海平面年代际变化与 PDO、ENSO 和 NPGO 的联系等;机制方面已经认识到风场、热通量等强迫对热带太平洋海平面年际和年代际变化的影响,并且已经建立了相对完善的理论或者模型来描述这些机制。然而目前我们能够掌握的关于热带太平洋海平面低频变化的定量分析结果,主要针对的是年际尺度,年代际尺度的结果非常少,其原因可以归结为3个方面资料的局限性。

a. 海平面资料的不完善。高精度的近乎覆盖全球范围的卫星高度计资料是从1993年开始的,到目前大约23 a 的长度,这个长度用于分析年际变化尚可,但对于几十年的年代际信号的提取资料长度远远不够。卫星高度计资料出现之前只能依赖于长期验潮站数据,由于验潮站空间分布稀疏,多半分布在北半球以及大洋沿岸,资料长度参差不齐等原因限制了验潮站数据在全球及区域海平面研究中的应用。近年来出现了利用高度计资料结合验潮站资料进行的海平面数据重构研究,被广泛引用的有 Church 等^[1]和 Hamlington 等^[55-56]的成果,但由于重构方法及数据资料的局限性不同重构数据分析结果差别较大,对于这些重构数据的可靠性尚存在争议。

b. 风场数据的局限性。不同风场数据产品提供的历史风场数据的差异是导致这项研究存在难度的另外一个原因,尤其是年代际尺度。如 Merrifield 等^[45]在研究风场对热带太平洋海平面年代际变化的影响时发现,美国国家环境预报中心(NCEP)再分析风场数据显示1950—1990年赤道信风呈减弱趋势,1990年以来呈增强趋势,这可以很好的解释1950—1990年以及20世纪90年代以来热带西太平洋海平面在2个时段分别出现的下降和上升趋势;然而欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ORA-S3资料却显示1950—1990年间赤道信风基本无趋势变化而20世纪90年代以来出现增强趋势,这样基于ECMWF风场数据不能给出1950—1990年间赤道信风与热带太平洋海平面年代际变化之间的对应关系。

c. 热通量数据产品的不一致性,这是导致无法定量给出热通量对海平面低频变化影响的一个主要原因。Lu 等^[35]在分析热通量对热带太平洋海平面年际变化的影响时发现,基于同样的理论进行计算,常用的几种热通量数据中OAFlux与CORE.2和ORA-S3数据结果有很大差异,而后两者也存在明显的不符合之处。笔者在分析热通量对全球上层海洋比容变化的影响时也发现,NCEP-NCAR、GODAS以及OAFlux数据也都存在不小的差异。

除数据的局限性以外,评估热通量对海平面影响所用的数值模型可能不够完善。目前几乎所有研究者都在采用Stammer等^[57]提出的理论模型,这个模型在早期研究中仅仅用于剔除热通量引起的海平面变化中的季节信号^[57-59],只是近几年才被一些年轻学者用于分析热通量对海平面低频变化的影响^[35,60]。笔者通过研究发现,该模型用于评估热通量对海平面季节变化这样相对高频变化的影响是可以的,但是用于像年际乃至更低频的变化可能需要谨慎。原因是其他一些刻画低频过程的理论模型都有考虑耗散作用^[26,35,60],而这个模型是没有考虑耗散的。由于耗散作用有一定的时间尺度,季节尺度上因时间相对较短,采用这个模型不考虑耗散可能没有太大影响,但在年际或者更长的时间尺度上不考虑耗散效应可能会导致对热通量作用的估计失真。这或许是Lu等^[35]发现热通量给出的热带太平洋海平面长期趋势与实测资料有很大差异的部分原因。

4 结论与展望

近20年来热带西太平洋海平面持续快速上升而热带东太平洋却表现为下降使得热带太平洋的关注度在ENSO等现象的基础上再次升温,一方面是因为热带太平洋是全球大气海洋运动能量的源地,全球气候变

化的发动机,热带太平洋海平面变化是气候变化的承载者;另一方面则与热带西太平洋岛屿国家众多,热带珊瑚礁生态系统非常宝贵,海平面持续上升将会带来危险后果有关。

关于海平面的众多研究成果是基于1993年以来的高精度高分辨率的卫星高度计资料的,热带太平洋也不例外。考虑到1993年以来西太暖池出现的海平面持续快速上升,以及人们对于大尺度海气过程的认识,有必要弄清这种快速上升是否受年际和年代际变化的影响。这是笔者选择研究时间尺度的出发点。

热带太平洋海平面年际变化主要受 ENSO 事件的影响,不同类型 ENSO 事件期间热带太平洋海平面变化形态不同。海平面年代际变化主要受制于 PDO 和 NPGO 等大尺度海气过程以及 ENSO 的年代际变化。ENSO、PDO 和 NPGO 主要通过太平洋信风的变化来影响海平面变化,也有热通量等因素的作用。目前海平面和风场之间的联系已经基本确定,如年际尺度上 ENSO 期间纬向风的辐聚辐散会导致海平面出现升降,年代际尺度上不同的 PDO 位相对应的信风强弱会导致海平面发生变化。从已有研究的定性结论来看,厄尔尼诺在近20年平均强度的减弱有利于近期热带西太平洋海平面出现上升趋势;而拉尼娜现象发生时西太暖池海平面会升高,研究热带西太平洋海平面近期快速上升与海平面年际变化之间的关系也需要关注拉尼娜事件的变化。年代际尺度上 PDO 或者 NPGO 通过信风强度的调整可能是近期热带西太平洋海平面快速上升的主要原因。

风场、热通量等因子对海平面变化影响的定量分析结果,以年际尺度较多,年代际尺度相对缺乏。资料的长度和数据的质量是影响热带太平洋海平面变化定量分析结果的关键因素。高空间分辨率的长时间序列的海平面资料的缺乏,重构海平面数据的不确定性,不同来源的风场数据和热通量数据的巨大差异都是造成上述问题的原因。另外,热通量模型可能并不完善是一个需要深入研究的问题。

数据的可靠性和模型的准确性是决定热带太平洋海平面低频变化研究能否取得合理结论的主要因素。在目前的情况下,数据开发者在不断探寻新的分析方法和处理手段,继续开展深入研究需要尽可能利用最新的数据产品,多来源的资料,在总结不同数据结果一致性的基础上也要注意比较不同数据结果的差异,这样才能给出客观准确的分析结果。

参考文献:

- [1] CHURCU J A, WHITE N J, COLEMAN R, et al. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950—2000 period[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17 (13): 2609-2625.
- [2] CHURCH J A, WHITE N J, A 20th century acceleration in global sea-level rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (1): 313-324.
- [3] CHURCH J A, WHITE N J, AARUP T, et al. Understanding global sea levels: past, present and future[J]. *Sustainability Science*, 2008, 3(1): 9-22.
- [4] BERGE-NGUYEN M, CAZENAVE A, LOMBARD A, et al. Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(1-2): 1-13.
- [5] JEVREJEVA S, GRINSTED A, MOORE J C, et al. Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: 201-219.
- [6] CAZENAVE A, DOMINH K, GUINEHUT S, et al. Sea level budget over 2003—2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo[J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1-2): 83-88.
- [7] CHURCH J A, WHITE N J, Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century[J]. *Surveys in Geophysics*, 2011, 32(4): 585-602.
- [8] LI J, ZUO J, CHEN M, et al. Assessing the global averaged sea level budget over 2003—2010[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(10): 16-23.
- [9] BINDOFF N L, WILLEBRAND J, ARTALE V, et al. Observations: oceanic climate change and sea level[C]//SOLOMON S. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 385-432.
- [10] CHENG X, QI Y, ZHOU W. Trends of sea level variations in the Indo-Pacific warm pool[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 63(1): 57-66.
- [11] NEREM R S, CHAMBERS D P, CHOE C, et al. Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(Sup1): 435-446.
- [12] MERRIFIELD M A. A shift in western tropical Pacific sea level trends during the 1990s[J], *Journal of Climate*, 2011, 24 (15): 4126-4138.

- [13] QIU B, CHEN S. Multidecadal sea level and gyre circulation variability in the northwestern tropical Pacific Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(1): 193-206.
- [14] CHEN C L, ZUO J C, CHEN M X, et al. Sea level change under IPCC-A2 scenario in Bohai, Yellow, and East China Seas [J]. *Water Science and Engineering*, 2014, 7(4): 446-456.
- [15] NEREM R S, MITCHUM G T. Observation of sea level change from satellite altimetry[C] //DOUGHLAS B C, KEARNEY M S, LEATHERMAN S P. In *Sea Level Rise: History and Consequences*. San Diego: Academic Press, 2001: 121-159.
- [16] BECKER M, MEYSSIGNAC B, LETETREL C, et al. Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950[J]. *Global Planetary Change*, 2012, 80/81: 85-98.
- [17] SI Z, XU Y. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on regional sea level rise in the Pacific Ocean from 1993 to 2012[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(6): 1414-1420.
- [18] WYRTKI K. Sea level during the 1972 El Nino[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1977, 7(6): 779-787.
- [19] GILL A E. An estimation of sea level and surface current anomalies during the 1972 El Nino and consequent thermal effects[J]. *Journal of physical oceanography*, 1983, 13: 586-606.
- [20] BUSALACCHI A J, CANE M A. Hindcasts of sea level variations during 1982—83 El Nino [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15(2): 213-224.
- [21] LUKAS R, HAYES S P, WYRTKI K. Equatorial Sea Level Response During the 1982—1983 El Niño [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1984, 891(C6): 10425-10431.
- [22] TRENBERTH K E, HURRELL J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 1994, 9(6): 303-319.
- [23] CHAMBERS D P, MELHAFF C A, URBAN T J, et al. Low-frequency variations in global mean sea level: 1950—2000[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2002, 107(C4): 1-10.
- [24] QIU B, CHEN S. Decadal variability in the large-scale sea surface height field of the South Pacific Ocean: observations and causes[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, 36(9): 1751-1762.
- [25] LEE T, MCPHADEN M J. Decadal phase change in large-scale sea level and winds in the Indo-Pacific region at the end of the 20th century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): 568-569.
- [26] CHANG Y T, DU L, ZHANG S W, et al. Sea level variations in the tropical Pacific Ocean during two types of recent El Niño events[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 108: 119-127.
- [27] ZHANG X, CHURCH J A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(21): 653-660.
- [28] ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C11): C1107.
- [29] ASHOK K. The El Niño with a difference[J]. *Nature*, 2009, 461: 481-484.
- [30] WENG H, ASHOK K, BEHERA S K, et al. Impacts of recent El Nino Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer[J]. *Climate Dynamics*, 2007, 29(2): 113-129.
- [31] KAO H Y, YU J Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(3): 615-632.
- [32] KUG J S, JIN F F, AN S I. Two types of El Niño event: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(22): 1499-1515.
- [33] LEE T, MCPHADEN M J. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(14): L14603.
- [34] YE H S W, KUG J S, DEWITTE B, et al. El Nino in a changing climate[J]. *Nature*, 2009, 461: 511-514.
- [35] LU Q, ZUO J, LI Y, et al. Interannual sea level variability in the tropical Pacific Ocean from 1993 to 2006[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 107(5): 70-81.
- [36] LI Y F, ZUO J C, LI J, et al. The influence of wind anomaly on tropical Pacific sea level variation during El Nino[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(12): 1-7.
- [37] QIU B, CHEN S. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(11): 2525-2538.
- [38] CHURCH J A, WHITE N J, HUNTER J R. Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 53(3): 155-168.
- [39] CABANES C, CAZENAVE A, LE P C. Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations[J]. *Science*, 2001, 294: 840-842.
- [40] ANTONOV J I, LEVITUS S, BOYER T P. Steric sea level variations during 1957—1994: importance of salinity [J]. *Journal of*

- Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(C12): 8013-8029.
- [41] MANTUA N J, HARE S R, ZHANG Y, et al. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(6): 1069-1079.
- [42] 李淑江,赵进平,李宜振,等. 热带太平洋海面高度年代际变化的研究[J]. 海洋科学进展,2008, 26(2):163-170. (LI Shujiang, ZHAO Jinping, LI Yizhen, et al. Study on decadal variability of sea surface height in the tropical pacific ocean[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(2): 163-170. (in Chinese))
- [43] FENG M, LI Y, MEYERS G. Multi-decadal variations of Fremantle sea level: footprint of climate variability in the tropical Pacific[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(16): 144-151.
- [44] FENG M, MCPHADEN M J, LEE T. Decadal variability of the Pacific subtropical cells and their influence on the southeast Indian Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(9): 493-533.
- [45] MERRIFIELD M A, THOMPSON P R, LANDER M. Multidecadal sea level anomalies and trends in the western tropical Pacific [J], Geophysical Research Letters, 2012, 39(13): 34-47.
- [46] 陆青. 热带太平洋海平面低频变化机制研究[D]. 南京:河海大学,2014.
- [47] LORENZO E D, SCHNEIDER N, COBB K M, et al. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change [J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(8):1-6.
- [48] TIMMERMAN A, MCGREGOR S, JIN F F. Wind effects on past and future regional sea level trends in the southern Indo-Pacific[J]. Journal of Climate, 2010, 23(16): 4429-4437.
- [49] KOHL A, STAMMER D, CORNUELLE B. Interannual to decadal changes in the ECCO Global Synthesis[J]. Journal of Physical Oceanography, 2007, 37(37): 313-337.
- [50] FENG M, BONING C, BIASTOCH A, et al. The reversal of the multi-decadal trends of the equatorial Pacific easterly winds, and the Indonesian Throughflow and Leeuwin Current transports[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L11604.
- [51] CARTON J A, GIESE B S, GRODSKY S A. Sea level rise and the warming of the oceans in the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) ocean reanalysis[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2005, 110(9): 291-295.
- [52] MERRIFIELD M A, MALTRUD M E. Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(38): 759-775.
- [53] MCGREGOR S, SEN GUPTA A, ENGLAND M H. Constraining wind stress products with sea surface height observations and implications for Pacific Ocean sea level trend attribution[J]. Journal of Climate, 2012, 25(23): 8165-8176.
- [54] NIDHEESH A G, LENGAGNE M, VIALARD J, et al. Decadal and long term sea level variability in the tropical Indo-Pacific Ocean[J]. Climate Dynamics, 2013, 41(2): 381-402.
- [55] HAMLINGTON B D, LEBEN R R, NEREM R S, et al. Reconstruction sea level using cyclostationary empirical orthogonal functions[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2011, 116(C12): 90-99.
- [56] HAMLINGTON B D, LEBEN R R, STRASSBURG M W, et al. Cyclostationary empirical orthogonal function sea-level reconstruction[J]. Geoscience Data Journal, 2014, 1: 13-19.
- [57] STAMMER D. Steric and wind-induced changes in TOPEX/POSEIDON large-scale sea surface topography observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978—2012), 1997, 102(C9):20987-21009.
- [58] VIVIER F, KELLY K A, THOMPSON L A. The contributions of wind forcing, waves, and surface heating to sea surface height observations in the Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1999, 104(C9): 20767-20788.
- [59] QIU B. Large-scale variability in the midlatitude subtropical and subpolar North Pacific Ocean: observations and causes[J]. Journal of Physical Oceanography, 2002, 32: 353-375.
- [60] 张永垂,张立凤,王业桂. 北太平洋海表面高度的年际变化及其机制[J]. 地球物理学报,2010, 53(2):247-255. (ZHANG Yongchui, ZHANG Lifeng, WANG Yegui. Interannual sea level variability in the North Pacific Ocean and its mechanisms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 247-255. (in Chinese))