

海平面年际变化研究进展

张永垂¹, 禹凯², 史剑¹, 张文静¹

(1. 国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044)

摘 要: 对影响中国近海海平面年际变化的气候模态(包括 ENSO 和 PDO)做了回顾。指出目前海平面年际变化研究的热点和难点问题, 如区域海平面加速上升、自然变率和人为因素对海平面变化的相对作用大小和区域海平面年际变化的可预测性等。

关键词: 海平面; 年际变化; 风应力; 海洋 Rossby 波

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)01-0095-08

1 引言

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel of Climate Change, IPCC)第五次评估报告指出, 全球平均海平面在 1901—2010 年间上升速率为 1.7 [1.5~1.9] mm/yr, 1993—2010 年间则达到了 3.2 [2.8~3.6] mm/yr^[1]。海平面上升作为一种缓发性海洋灾害, 其长期的累积效应将加剧风暴潮、海岸侵蚀、海水入侵、土壤盐渍化和咸潮等海洋灾害的致灾程度。高海平面抬升了风暴增水的基础水位, 高潮位相应提高, 风暴潮致灾程度加大。在全球范围内海平面分布的标准差极其不均匀, 全球海平面变化显著的区域分布在南极绕极流和西边界流海域, 如黑潮延伸体、湾流和东澳大利亚流等(见图 1a)。海面的上升会淹没沿岸设施, 对经济社会的稳定可持续发展产生重要的影响。

海平面作为一个物理量, 不仅反映了全球变暖导致的海水热含量增加, 还受到大尺度气候系统自然变率的调制, 表现出多时间尺度的变化特征(见图 1b, 黑色实线、点线和点虚线分别为太平洋、印度洋和大西洋年际变化信号, 其定义为海平面扣除线性趋势和年以下变化的信号; 红色实线为全球海平面变化趋势, 其定义为海平面扣除年以下变化的剩余部分)。以物理过程为基础的海气耦合模式的结

果表明: 1993 年后全球平均海平面加速上升的原因是因海水热含量的增加和冰盖的融化^[1]。

海平面年际变化是指海平面变化扣除线性趋势和季节及以下时间尺度的信号, 其更多地反映了海气系统内部的自然振荡^[2]。如全球平均海平面的年际变化与 ENSO 信号相一致^[3], 反映了热带太平洋海气系统的内部振荡会显著影响全球海平面变化。海平面的趋势性变化和年际变化信号存在互相影响: 海平面的长期上升趋势在某个时段内受到自然变率的影响, 会在某一段时期内减缓或加速海平面的上升趋势; 而海平面的年际变化是叠加在全球平均海平面长期上升的背景下, 会被后者信号所掩盖(见图 1b)。因此, 理解和掌握海平面年际变化机制对于认识海气相互作用机理, 海洋内部物理过程以及全球平均海平面升高都有着重要意义。

目前, 国内外学者对海平面的总体变化趋势研究已有不少综述^[4-8], 然而对自 1992 年 TOPEX/Poseidon 卫星发射以来海平面年际变化研究的综述则尚少见。为此, 本文重点关注该段时期海平面年际变化研究的进展, 并从全球平均海平面年际变化的观测事实、影响海平面年际变化的外部强迫因素、影响区域海平面年际变化的内部物理过程、中国近海海平面年际变化与气候变率的关系这 4 个方面做了回顾, 最后探讨了该研究的热点和难点

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-09-26。

基金项目: 国家自然科学基金(41406003); 江苏省自然科学基金(BK20130064); 中国博士后科学基金(2013M541959)。

作者简介: 张永垂(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事海洋环流动力学研究。E-mail: yczhang@ymail.com

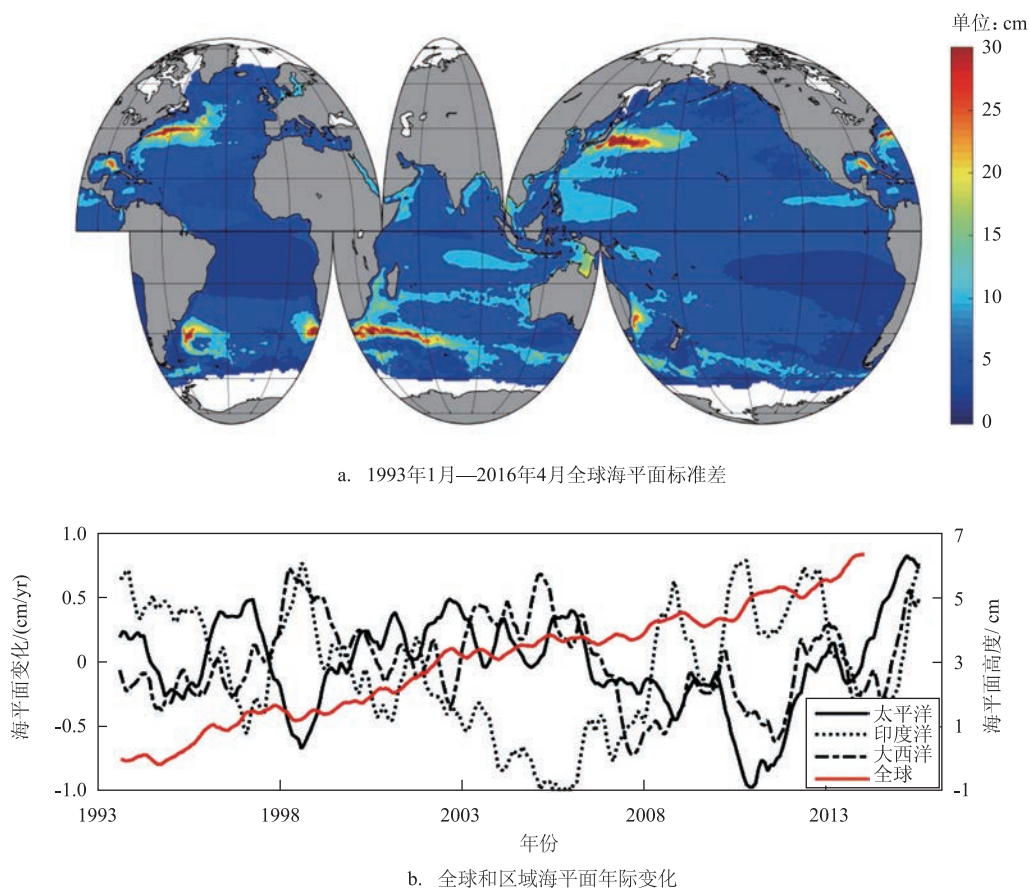


图1 海平面数据(来自法国国家空间研究中心卫星海洋学存档数据中心,ftp.aviso.oceanobs.com)

问题。

2 影响全球平均海平面年际变化机制

影响全球平均海平面的主要因素有两个:一是海水质量变化引起的海平面,主要包括陆地冰/雪的融化、降水、蒸发和表层径流;二是海水密度变化引起的比容海平面,主要包括海水吸收/辐射热通量。比容海平面又可分为温度改变导致的热比容海平面和盐度改变导致的盐比容海平面。

海水质量的改变主要是正压作用,比容变化主要是斜压作用^[9]。目前,用于测量海水质量变化的手段包括可测量全球海水重力变化的 GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) 卫星和定点测量海底压力的仪器(如:矩阵底部传感器倒置回声测深仪 (Pressure-sensor-equipped Inverted Echo Sounders, PIES))。对于年以上时间尺度海平面的变化,一般认为是斜压作用,即比容海平面。

随着观测资料的增多和精度的提高,发现在某些海域底部压力对海平面年际变化的贡献较大,如热带外深海大洋和浅海^[10]。

比容海平面无法直接测量,但可使用温盐数据诊断得出。温盐数据集包括再分析资料、模式输出结果以及海洋调查数据(CTD、XBT、Argo等)。不管是卫星高度计测量的绝对海平面,还是验潮站测量的相对海平面,绝大多数海域海平面的变化反映了海水的比容变化^[8]。在卫星高度计时代,绝大部分比容变化是热比容的作用。尽管盐比容会减弱或增强热比容变化,但其仅仅在某些海域起重要作用(如大西洋、孟加拉湾)。海洋模式和再分析资料^[11-12]也验证了这些结论。

理论上讲,海水质量变化引起的海平面和比容变化引起的海平面之和应该等于卫星高度计测量的绝对海平面。实际上,由于观测仪器精度不同、计算比容海平面使用参考深度的差异以及观测误差的存在,使得上述3种不同类型数据的闭合存在

一定的困难。通过计算,全球平均的比容海平面和GRACE测量海平面之和与卫星高度计观测值基本符合^[13],但也存在一定趋势上的偏差等^[14-15];在局地海域,振幅也还有较大差别^[16]。

3 影响区域海平面年际变化的外部强迫因素

对于区域海洋而言,海气系统内部的物理过程,如风应力、热通量、海洋环流和波动等物理过程都会显著改变海平面的年际变化。但对于全球平均海平面而言,理论上讲,除热通量之外,风应力、海流和波动等物理过程并不能改变全球平均值,因为上述物理过程并没有改变全球海水总质量或者平均密度。与海平面年际变化相比,海平面季节变化的物理机制相对清晰:中纬度海域主要由海表面热通量局地加热或冷却所引起^[17-20];热带海域主要是由风应力强迫^[21]和局地热通量的共同作用^[20]。

在年际时间尺度上,风应力对海平面强迫作用在不同海域具有不同效果。如在热带海域,印度洋-太平洋最近十年-几十年海平面变化是由该海域风场的盛行风变化造成^[22]。通过分析资料和模式模拟结果,Merrifield^[23]发现热带西太平洋海表面高度的升高对应于热带太平洋信风的增强。进一步的研究表明,该区域近20 a海平面的异常上升速率是由信风的线性增强分量造成的^[24]。

在大洋的东西边界,沿岸风对海平面的年际变化起着重要作用。在北半球,当风平行于海岸时,且海岸位于风向的左侧,由于埃克曼输送的作用,使得表层水离岸运动。为了保持水量均衡,上升流将下层的高密度水上涌至表面,因此使得温跃层抬升和海平面下降。尽管近20 a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^[25]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。Sturges等^[26]也证实了19世纪末和20世纪初北太平洋和北大西洋东

海岸海面高度大幅下降正是由于沿岸风强迫导致的。与大洋东海岸海平面下降不同的是,西海岸的海平面却呈现出加速上升的趋势^[27];在北大西洋的西海岸,海平面年际变化受到经向翻转流、沿岸风和大洋内区风应力等物理过程的共同作用,其中沿岸风起了主导作用^[28-29]。

由上可知,在热带和大洋东西边界海域,海平面的年际变化主要受到风应力的强迫作用。但在一些海域,如热带太平洋的东南部海域,风应力无法解释海平面年际变化信号,需要考虑浮力(热通量和淡水通量)强迫的作用^[30]。此外,大气对海洋的动力和浮力强迫作用只能改变局地海平面,而海洋内部物理过程,如海洋环流和波动,可以影响异地海平面,因而其在大洋内部发挥更重要作用。

4 影响区域海平面年际变化的内部物理过程

区域海平面的年际变化是发生在全球平均海平面上升的背景下的,故需要分清由气候因素导致的海平面和由全球海平面上升导致的区域海平面^[31-32]。气候模态是海气系统大尺度的自然变率,反映了海洋、大气或两者发生了大规模气候迁移,因此会显著调节包括海平面在内的多种要素。尽管使用相关分析等方法可以揭示气候模态指数与区域海平面变化的相关关系,但由于某些气候模态(太平洋年代际振荡,Pacific Decadal Oscillation, PDO)本身就是海洋和大气多种物理过程综合作用的结果,并不能直接改变海平面。尽管如此,气候模态则可通过与之相关的要素场作用于海平面,如风应力、热通量和海平面气压等。对于描述海气系统内部相互作用的模态(El Niño-Southern Oscillation, ENSO),其同样通过改变大尺度大气环流场,进而改变局地风场、热通量以及海流,从而建立起气候变率与海平面年际变化之间的关系。

海平面在局地风应力作用下产生的变异在风应力停止或者离开风区后不会立即停止,会以波动的形式继续传播。在地球旋转、海洋边界以及岛屿等作用下,其波动的表现形式不同,如Rossby波和Kelvin波等。此外,海洋本身的洋流也会对海平面的空间分布和时间变化产生重要影响。

海盆尺度海洋环流是导致北太平洋和北大西洋东边界海平面上升速率年际变化的可能机制之一^[33]。使用更长时间尺度验潮站资料,Woodworth等^[34]证实了北大西洋副热带环流自旋加快会造成东海岸海平面下降。Piecuch等^[35]综合考察了不同物理过程对年际尺度热容海平面变化的作用,结果表明在热带印度洋和太平洋,主要是平流作用;在热带外海域,平流和扩散起着同等作用。在西太平洋,海流的平流输送作用对海平面变化起着重要作用^[20]。美国东海岸海平面上升与大西洋内部动力过程紧密相关^[36],包括湾流^[37]或者大西洋径向翻转流^[38]。

尽管沿岸风的作用过程是局部的,但强迫产生的温跃层变化会以沿岸俘获波的形式传播,因此可以影响到远处海岸海平面的变化。Calafat等^[39]发现在大西洋25°N以北沿岸海平面年际时间尺度以上的变化主要是由沿岸风和沿岸传播的波动造成的,而副热带环流强度变化引起的质量重新分配不起显著作用。Marcos等^[40]对位于热带大西洋东北部验潮站的海平面低频变化进行了研究,证实了沿岸风对产生的沿岸波动传播起重要作用。Calafat等^[41]的研究揭示了沿挪威沿岸传播的波动对验潮站海平面变化起着重要作用,传播的信号加上局地风场作用可以解释其沿岸海平面变化的70%以上。

在赤道外大洋的中西部,卫星观测到海平面年际变化呈现西传现象,这是海洋Rossby波的信号特征^[42]。由于海平面变化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,一阶斜压模占据主导地位^[43]。了解这种物理性质至关重要,因为这样可以进一步简化问题,只需抓住影响海平面的主要机制进行研究。描述一阶斜压模最简洁、最有效的工具为一阶斜压Rossby波模型,并可用局地风应力强迫的该模型描述海洋波动的西传作用。由于Rossby波的传播特性,使得该模型具有可提前预测海洋要素变化的能力^[44],并已用来开展海表面温度^[45-46]和黑潮延伸体流速^[47-48]的预测研究。张永垂等^[49]使用该模型对西北太平洋海表面高度年际变异的预测性做了研究;结果表明,该模型在高纬中部和副热带环流处具有显著的可预测性。已有的研究还表明,该模型在解释海平面低频变异方面起了很重要的作用^[50-52]。在北太平洋热带和高纬度海域,由大洋内部风场强迫产生的Rossby波可解释

海平面年际变化的20%~60%^[53];在副热带海域,主要是由局地风场强迫产生的海平面以自由Rossby波的形式西传^[49]。

除了海洋环流和波动外,在涡旋活动强烈的海域,如20°~35°纬度,海平面的年际变化还会受到海洋斜压不稳定的影响^[54]。此外,对于数值模拟的海平面变化而言,模式的分辨率^[55]、垂向坐标的选择^[56]等都会有重要影响:如使用涡相容分辨率的模式对年际时间尺度海平面的变化模拟效果要优于目前普遍使用的气候模式的模拟结果^[55]。

综上所述,影响区域海平面年际变化的主要外强迫是风应力,海洋内部物理过程主要是海流和波动。但在不同海域,占主导地位的机制有所不同。在热带和大洋东西边界,风应力的局地强迫是造成海平面年际变化的主要原因。在赤道外大洋内部,由局地风场强迫的海平面异常信号以斜压Rossby波形式自东向西传播,从而影响大洋内部海平面年际变化。此外,大尺度海洋环流的变异也是调节大洋东西部海平面年际变化的因素之一。

5 中国近海海平面年际变化与气候变率的关系

由于海平面变化在空间上并不均匀,区域海平面变化对于沿岸国家和居民有着更现实的影响。根据《2016年中国海平面公报》,我国沿海海平面总体呈波动上升趋势。1980—2016年,中国沿海海平面平均上升速率为每年3.2 mm,高于同期全球平均水平,且2016年中国沿海海平面为1980年以来的最高位。

由于中国近海海平面的低频变异与全球平均海平面是反位相的关系^[57],更多的反映了气候变率的影响:其年际变化受到ENSO、PDO等太平洋气候模态的调制作用,而其年代际变化则受到NPGO和PDO等气候模态控制下的风应力旋度和热通量变化的控制^[58]。包括渤海、黄海和东海在内的中国东部海域,海平面的年际变化主要与ENSO^[59-63]、PDO^[64]或者两者都相关^[65-66]。Gordon等^[67]发现日本海与东中国海海平面变化与PDO指数呈现明显的负相关关系,他们认为PDO事件控制了这些海域的比容海平面变化。具体解释为PDO正位相年,黑潮流量变

强,入侵日本海与东中国海的北太平洋副热带低盐水减少,最终导致比容海平面降低。另一个原因则是PDO正位相年,长江径流量减少所致。而Han等^[64]则认为渤、黄、东海海平面变化与PDO指数呈反相关关系,并解释与PDO正相关的黑潮流量变化直接调制了黑潮两侧的海面高度变化。南海海盆区域海平面变化受到ENSO控制下的海表面风异常的影响^[68-70],在1997—1998年强El Niño事件期间,南海海平面年循环明显减弱^[71]。在更长的时间尺度中,南海海平面变化与PDO有显著的反相关关系^[71]。

6 讨论

本文对海平面年际变化的研究进展情况进行了综述,主要包括海平面的观测事实(质量和比容作用)、海洋外部强迫(大气外强迫)和内部输送(海流和波动)以及气候变率对中国近海海平面的影响。尽管目前对自然变率影响海平面的年际变化情况有了一定的认识,但下列科学问题仍值得进一步探讨:

(1)区域海平面加速上升的问题^[72]。最近一些研究根据验潮站数据得出北美东海岸的海平面在加速上升^[27,73-74]。但也有学者提出相反意见,认为海平面实际上并没有加速上升^[75-76],而是海气系统内部正常的自然振荡^[77-79]。由于世界上绝大部分验潮站数据都存在着一个60 a左右的周期,使用验潮站数据来检验全球和区域海平面加速上升需要足够长的时间尺度。因此,在分析海平面在某个时段内是否加速上升时,使用的历史资料应保证具有足够长的时间序列^[80];

(2)自然变率和人为因素对海平面变化的相对作用大小问题^[81]。在不同时间尺度上,人类活动排放温室气体导致的全球变暖都会对全球海平面上升起着不容忽视的作用^[82]。即使温室气体的浓度保持在目前的水平,全球海平面在未来几个世纪内仍将继续上升。气候系统自然变率存在着较大的不确定性,有较强的不可预测性^[83]。因此,分清全球和区域海平面长期稳定持续的上升作用和气候系统自然振荡对于认识和理解海平面的年际变化特征有着重要作用^[84-85];

(3)区域海平面年际变化的可预测性问题^[86-87]。

由于年代尺度的预测(10~30 a)仍处于“婴儿期”^[88-90],其不仅受到气候系统内部自然变率和外强迫的共同影响,大气、海洋的初值信息也非常重要,所以对该问题的研究成为近年来气候学研究的热点和难点。除了人为因素影响海平面年际变化,海气系统内部自然变率包括风应力的局地作用、海洋环流和海洋波动传输作用会显著影响其可预测性。年际尺度的大气外部强迫不具备可预测性,而海洋内部的传输过程有一定的可预测性。对于海洋环流,准确的观测和数值模拟都存在一定的困难。

随着卫星高度计、海水重力数据和Argo资料的不断累积,使得对海平面年际变化的观测事实和形成机制有了更深入的认识。但相对于海平面的趋势性上升的物理机制,反映海气系统内部自然变率的年际变化的认识仍不够深入。因年际到年代际时间尺度的预测是目前气候学研究的热点和难点问题之一,故深入理解和解决该问题对于应对海平面上升,科学制定相关政策有着重要的现实意义和应用价值。

参考文献:

- [1] Church J A, Clark P U, Cazenave A, et al. Sea Level Change[M]// Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Han W Q, Meehl G A, Stammer D, et al. Spatial Patterns of Sea Level Variability Associated with Natural Internal Climate Modes[J]. Surveys in Geophysics, 2017, 38(1): 217-250.
- [3] 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(S1): 435-446.
- [4] 吴涛,康建成,王芳,等. 全球海平面变化研究新进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 730-737.
- [5] 颜梅,左军成,傅深波,等. 全球及中国海平面变化研究进展[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(2): 197-200.
- [6] Cazenave A, Remy F. Sea Level and Climate: Measurements and Causes of Changes[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(5): 647-662.
- [7] Meyssignac B, Cazenave A. Sea Level: a Review of Present-day and Recent-past Changes and Variability[J]. Journal of Geodynamics, 2012, 58: 96-109.
- [8] Stammer D, Cazenave A, Ponte R M, et al. Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes[J]. Annual Review of Marine Science, 2013, 5: 21-46.

- [9] Jayne S R, Wahr J M, Bryan F O. Observing Ocean Heat Content Using Satellite Gravity and Altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C2): 13-1-13-12.
- [10] Piecuch C G. Dynamics of Satellite-derived Interannual Ocean Bottom Pressure Variability in the Western Tropical North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5117-5128.
- [11] 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(C9): C09006.
- [12] Wunsch C, Heimbach P. Practical Global Oceanic State Estimation [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2007, 230(1-2): 197-208.
- [13] Boening C, Willis J K, Landerer F W, et al. The 2011 La Niña: So Strong, the Oceans Fell[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19): L19602.
- [14] Willis J K, Chambers D P, Nerem R S. Assessing the Globally Averaged Sea Level Budget on Seasonal to Interannual Timescales [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C6): C06015.
- [15] Chambers D P, Cazenave A, Champollion N, et al. Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget Between 1993 and 2014[J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(1): 309-327.
- [16] García-García D, Chao B F, Boy J-P. Steric and Mass-induced Sea Level Variations in the Mediterranean Sea Revisited[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12016.
- [17] Kelly K A, Singh S, Huang R X. Seasonal Variations of Sea Surface Height in the Gulf Stream Region[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(3): 313-327.
- [18] Vivier F, Kelly K A, Thompson L. Contributions of Wind Forcing, Waves, and Surface Heating to Sea Surface Height Observations in the Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1999, 104(C9): 20767-20788.
- [19] Chen J L, Shum C K, Wilson C R, et al. Seasonal Sea Level Change from TOPEX/Poseidon Observation and Thermal Contribution[J]. *Journal of Geodesy*, 2000, 73(12): 638-647.
- [20] Moon J H, Tony Song Y. Sea Level and Heat Content Changes in the Western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(4): 2014-2022.
- [21] Vinogradov S V, Ponte R M, Heimbach P, et al. The Mean Seasonal Cycle in Sea Level Estimated from a Data-constrained General Circulation Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C3): C03032.
- [22] Timmermann 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.
- [23] Merrifield M A. A Shift in Western Tropical Pacific Sea Level Trends During the 1990s[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(15): 4126-4138.
- [24] Merrifield M A, Maltrud M E. Regional Sea Level Trends Due to a Pacific Trade Wind Intensification[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(21): L21605.
- [25] Bromirski P D, Miller A J, Flick R E, et al. Dynamical Suppression of Sea Level Rise Along the Pacific Coast of North America: Indications for Imminent Acceleration[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C7): C07005.
- [26] Sturges W, Douglas B C. Wind Effects on Estimates of Sea Level Rise[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C6): C06008.
- [27] Sallenger Jr A H, Doran K S, Howd P A. Hotspot of Accelerated Sea-level Rise on the Atlantic Coast of North America[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(12): 884-888.
- [28] Andres M, Gawarkiewicz G G, Toole J M. Interannual Sea Level Variability in the Western North Atlantic: Regional Forcing and Remote Response[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(22): 5915-5919.
- [29] Woodworth P L, Morales Maqueda M A, Roussenov V M, et al. Mean Sea-level Variability Along the Northeast American Atlantic Coast and the Roles of the Wind and the Overturning Circulation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(12): 8916-8935.
- [30] Piecuch C G, Ponte R M. Buoyancy-driven Interannual Sea Level Changes in the Southeast Tropical Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(5): L05607.
- [31] McGregor S, Gupta A S, 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): 8164-8176.
- [32] Zhang X, Church J A. Sea Level Trends, Interannual and Decadal Variability in the Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(21): L21701.
- [33] Miller L, Douglas B C. Gyre-scale Atmospheric Pressure Variations and Their Relation to 19th and 20th Century Sea Level Rise [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(16): L16602.
- [34] Woodworth P L, Pouvreau N, Woppelmann G. The Gyre-scale Circulation of the North Atlantic and Sea Level at Brest[J]. *Ocean Science, European Geosciences Union*, 2010, 6(1): 185-190.
- [35] Piecuch C G, Ponte R M. Mechanisms of Interannual Steric Sea Level Variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(15): L15605.
- [36] Yin J, Goddard P B. Oceanic Control of Sea Level Rise Patterns Along the East Coast of the United States[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5514-5520.
- [37] Ezer T, Atkinson L P, Corlett W B, et al. Gulf Stream's Induced Sea Level Rise and Variability Along the US Mid-Atlantic Coast [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(2): 685-697.

- [38] Ezer T. Sea Level Rise, Spatially Uneven and Temporally Unsteady: Why the US East Coast, the Global Tide Gauge Record, and the Global Altimeter Data Show Different Trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(20): 5439-5444.
- [39] Calafat F M, Chambers D P, Tsimplis M N. Mechanisms of Decadal Sea Level Variability in the Eastern North Atlantic and the Mediterranean Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C9): C09022.
- [40] Marcos M, Puyol B, Calafat F M, et al. Sea Level Changes at Tenerife Island (ne Tropical Atlantic) Since 1927[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 4899-4910.
- [41] Calafat F M, Chambers D P, Tsimplis M N. Inter-annual to Decadal Sea-level Variability in the Coastal Zones of the Norwegian and Siberian Seas: The Role of Atmospheric Forcing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(3): 1287-1301.
- [42] Chelton D B, Schlax M G. Global Observations of Oceanic Rossby Waves[J]. *Science*, 1996, 272(5259): 234-238.
- [43] Suzuki T, Ishii M. Regional Distribution of Sea Level Changes Resulting from Enhanced Greenhouse Warming in the Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 3.2[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(2): L02601.
- [44] Venzke S, Münnich M, Latif M. On the Predictability of Decadal Changes in the North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(5): 379-392.
- [45] Schneider N, Miller A J. Predicting Western North Pacific Ocean Climate[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(20): 3997-4002.
- [46] Zhang H, Wu L. Predicting North Atlantic Sea Surface Temperature Variability on the Basis of the First-mode Baroclinic Rossby Wave Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C9): C09030.
- [47] Nonaka M, Sasaki H, Taguchi B, et al. Potential Predictability of Interannual Variability in the Kuroshio Extension Jet Speed in an Eddy-resolving OGCM[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(10): 3645-3652.
- [48] Qiu B, Chen S, Schneider N, et al. A Coupled Decadal Prediction of the Dynamic State of the Kuroshio Extension System[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(4): 1751-1764.
- [49] 张永垂, 张立凤. 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[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(6): 1409-1417.
- [50] 张永垂, 张立凤. 北太平洋 Rossby 波研究进展[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 1219-1228.
- [51] 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.
- [52] 杨春辉, 顾小丽, 李培良, 等. Rossby 波对菲律宾以东太平洋海平面年际变化的影响研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(1): 23-29.
- [53] 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.
- [54] Penduff T, Juza M, Barnier B, et al. Sea Level Expression of Intrinsic and Forced Ocean Variabilities at Interannual Time Scales[J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(21): 5652-5670.
- [55] Penduff T, Juza M, Brodeau L, et al. Impact of Global Ocean Model Resolution on Sea-level Variability with Emphasis on Interannual Time Scales[J]. *Ocean Science*, 2010, 6(1): 269-284.
- [56] Hallberg R, Adcroft A, Dunne J P, et al. Sensitivity of Twenty-First-Century Global-Mean Steric Sea Level Rise to Ocean Model Formulation[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(9): 2947-2956.
- [57] Marcos M, Tsimplis M N, Calafat F M. Inter-annual and Decadal Sea Level Variations in the North-western Pacific Marginal Seas [J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 105: 4-21.
- [58] Zhang X, Wang X, Cao Y, et al. Climate Modulation on Sea Surface Height in China Seas[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(5): 1245-1255.
- [59] 刘雪源, 刘玉光, 郭琳, 等. 30°N 两侧东海海平面的低频变化及其与 ENSO 的关系[J]. *大地测量与地球动力学*, 2009, 29(4): 55-63.
- [60] 刘雪源, 刘玉光, 郭琳, 等. 渤海海平面的变化及其与 ENSO 的关系[J]. *海洋通报*, 2009, 28(5): 34-42.
- [61] Liu X, Liu Y, Guo L, et al. Interannual Changes of Sea Level in the Two Regions of East China Sea and Different Responses to ENSO[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72(3): 215-226.
- [62] Zuo J, He Q, Chen C, et al. Sea Level Variability in East China Sea and its Response to ENSO[J]. *Water Science and Engineering*, 2012, 5(2): 164-174.
- [63] 王慧, 范文静, 张建立, 等. 中国沿海近 31 年冬季海平面变化特征[J]. *海洋通报*, 2011, 30(6): 637-643.
- [64] Han G, Huang W. Pacific Decadal Oscillation and Sea Level Variability in the Bohai, Yellow, and East China Seas[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38(12): 2772-2783.
- [65] 顾小丽, 李培良. 太平洋海平面变化特征及影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2009, 31(1): 28-36.
- [66] 袁林旺, 罗文, 徐良将, 等. 西北太平洋海区年际至十年际海面变化尺度耦合与波动转型[J]. *地理研究*, 2010, 29(12): 2201-2211.
- [67] Gordon A L, Giulivi C F. Pacific Decadal Oscillation and Sea Level in the Japan/East Sea[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, 51(5): 653-663.
- [68] 荣增瑞, 刘玉光, 陈满春, 等. 全球和南海海平面变化及其与厄尔尼诺的关系[J]. *海洋通报*, 2008, 27(1): 1-8.
- [69] 丘福文, 方文东, 郭朴. 2000-2008 年期间南海海面温度的年际与空间变异[J]. *海洋学报*, 2011, 33(3): 11-18.
- [70] Cheng X, Xie S, Du Y, et al. Interannual-to-decadal Variability and Trends of Sea Level in the South China Sea[J]. *Climate dynamics*, 2016, 46(9-10): 3113-3126.
- [71] Cheng Y, Plag H, Hamlington B D, et al. Regional Sea Level Variability in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 95-107.
- [72] Visser H, Dangendorf S, Petersen A C. A Review of Trend Models

- Applied to Sea Level Data with Reference to the “Acceleration-deceleration Debate” [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(6): 3873-3895.
- [73] Boon J D. Evidence of Sea Level Acceleration at US and Canadian Tide Stations, Atlantic Coast, North America[J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 28(6): 1437-1445.
- [74] Ezer T, Corlett W B. Is Sea Level Rise Accelerating in the Chesapeake Bay? A Demonstration of a Novel New Approach for Analyzing Sea Level Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19): L19605.
- [75] Houston J R, Dean R G. Sea-level Acceleration Based on US Tide Gauges and Extensions of Previous Global-gauge Analyses[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 27(3): 409-417.
- [76] Watson P J. Acceleration in US Mean Sea Level? A New Insight Using Improved Tools[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 32(6): 1247-1261.
- [77] Hamlington B D, Leben R R, Strassburg M W, et al. Contribution of the Pacific Decadal Oscillation to Global Mean Sea Level Trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(19): 5171-5175.
- [78] Kopp R E. Does the Mid-Atlantic United States Sea Level Acceleration Hot Spot Reflect Ocean Dynamic Variability?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(15): 3981-3985.
- [79] Houston J R, Dean R G. Effects of Sea-level Decadal Variability on Acceleration and Trend Difference[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(5): 1062-1072.
- [80] Chambers D P, Merrifield M A, Nerem R S. Is there a 60-year oscillation in global mean sea level?[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(18): L18607.
- [81] Marcos M, Marzeion B, Dangendorf S, et al. Internal Variability Versus Anthropogenic Forcing on Sea Level and Its Components [J]. *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(1): 329-348.
- [82] Marcos M, Amores A. Quantifying Anthropogenic and Natural Contributions to Thermosteric Sea Level Rise[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(7): 2502-2507.
- [83] Hu A, Deser C. Uncertainty in Future Regional Sea Level Rise Due to Internal Climate Variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(11): 2768-2772.
- [84] Calafat F M, Chambers D P. Quantifying Recent Acceleration in Sea Level Unrelated to Internal Climate Variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3661-3666.
- [85] Lyu K, Zhang X, Church J A, et al. Time of Emergence for Regional Sea-level Change[J]. *Nature Climate Change*, 2014: 1006-1010.
- [86] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment [J]. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [87] Meehl G A, Goddard L, Boer G, et al. Decadal Climate Prediction: an Update from the Trenches[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(2): 243-267.
- [88] Meehl G A, Goddard L, Murphy J, et al. Decadal Prediction: Can it be Skillful?[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(10): 1467-1485.
- [89] Murphy J, Kattsov V, Keenlyside N, et al. Towards Prediction of Decadal Climate Variability and Change[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 1: 287-304.
- [90] Solomon A, Goddard L, Kumar A, et al. Distinguishing the Roles of Natural and Anthropogenically Forced Decadal Climate Variability: Implications for Prediction[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(2): 141-156.

Review on sea level interannual variability

ZHANG Yong-chui¹, YU Kai², SHI Jian¹, ZHANG Wen-jing¹

(1. *Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101 China;*

2. *Marine Science College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 China*)

Abstract: The interannual variation of sea level under the global warming is reviewed. The impact of external forcing and internal physical processes on interannual sea level and the climate modes affecting the sea level in China marginal seas are summarized. The hot-spots of the study of interannual variability of sea level are pointed.

Key words: sea level; interannual variability; wind stress; Rossby waves