

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.008

近十年我国海平面变化研究进展

左军成¹, 左常圣¹, 李娟², 陈美香¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510310)

摘要:系统地回顾了 2006—2015 年我国在海平面变化规律、机制及影响领域的最新研究进展。分析了全球及区域海平面以及比容海平面在不同时间尺度上的变化规律;探讨了海平面的变化机制,海表热通量、淡水通量、环流、风应力以及 Rossby 波对不同区域海平面变化的动力及热力影响;采用统计方法和数值模拟等手段,对 21 世纪海平面变化进行了预测;同时海平面变化会影响海洋的动力过程(如潮波系统的变化),并进而对近海和海岸带环境产生重要影响(如海岸侵蚀、海水入侵和土地盐渍化、河口咸潮入侵、近岸低地淹没、红树林衰退等)。

关键词:海平面变化;比容海平面;海平面变化机制;海平面变化预测;海平面变化影响;综述

中图分类号:P714 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2015)05-0442-08

Advances in research on sea level variations in China from 2006 to 2015

ZUO Juncheng¹, ZUO Changsheng¹, LI Juan², CHEN Meixiang¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. South China Sea Forecast Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China)

Abstract: Recent progresses in research on the regularity and mechanism of sea level variations and their impacts on the offshore and coastal environment in China from 2006 to 2015 are reviewed systematically. The regularities of global and regional sea level variations and steric sea level variations on different time scales were studied, and the mechanisms of sea level variations are discussed, including the dynamic and thermodynamic effects on sea level variations in different seas due to the sea surface heat flux, freshwater flux, circulation, wind stress, and Rossby waves. The sea level variations over the 21st century were also modeled using statistical methods and numerical simulation methods. It is concluded that sea level variations have influenced ocean dynamic processes such as tidal wave changes, and further influenced the offshore and coastal environment through coastal erosion, seawater intrusion, soil salinization, estuarine saltwater intrusion, submergence of coastal lowlands, and decline of mangroves.

Key words: sea level variation; steric sea level; mechanism of sea level variation; sea level variation prediction; influence of sea level variation; review

由于人类活动排放 CO₂ 的持续增加,全球变暖、海平面上升成为一系列全球性重大环境问题,沿海国家,尤其是岛国将面临海平面上升的巨大威胁。我国沿海地区集中了全国约 70% 以上的大中城市和 50% 的人口,创造了全国 60% 以上的 GDP。伴随着海岸带人口的快速增长,各级政府面临着如何科学管理海岸的问题。地势较低的沙质或泥质沉积型海岸受到海面上传侵的威胁最为显著,中国沿岸受海平面上升影响的 3 个典型脆弱区分别是渤海湾黄河三角洲和莱州湾沿岸、长江三角洲地区以及珠江三角洲地区等^[1]。

海平面变化受全球气候系统以及区域大气和海洋的共同影响。全球平均意义下的海平面变化主要受世界大洋海水的膨胀、陆地高原冰川、冰盖融化以及格陵兰和南极陆地储冰变化的影响。由抽取地下水

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(41276018);全球变化与海气相互作用专项(GASI03010109)

作者简介: 左军成(1965—),男,山东日照人,教授,博士,主要从事气候与海平面变化方面的研究。E-mail:zuo@ouc.edu.cn

等人为活动因素引起的地表垂直运动对相对海平面变化具有显著影响,某些沿海地区会比海平面绝对变化速率高 1~2 个量级。

2006—2015 年,国内在气候变化、海平面上升及影响与适应领域开展了一系列科学研究,并取得了一系列创新性研究成果^[1]。

1 海平面变化规律

海平面存在日变化、季节变化、年际变化、年代际变化和长期趋势等各种时间尺度的变化。随着海洋水文、气象观测资料的不断丰富和学术界对海平面低频变化研究的重视,最近几年海平面变化规律研究取得了丰硕成果,发现了许多新现象和新规律^[1]。

1.1 海平面季节变化

全球海平面变化具有显著的季节变化特征。根据 1993—2008 年期间 Topex 高度计资料分析,北半球 15°N~64°N 纬带内海平面季节振荡振幅达到 5~6 cm,南半球相同纬带内的振荡振幅稍小,约为 2~3 cm;北半球海平面的最高值和最低值分别出现在 9 月和 3 月,南半球位相刚好相反^[2]。

北太平洋海平面的季节变化占绝对优势,1993—2006 年 Topex 高度计资料分析得到最显著周期为 1 a 和 0.5 a^[3],这其中季节变化的振幅最大,年最高值出现在 9 月,最低值出现在 3 月^[4],南半球的位相与北半球相反^[5]。

最近十几年的 Topex 高度计资料得到中国海不同区域的上升趋势分别为:渤海 3.5 mm/a、黄海 2.9 mm/a、东海 2.4 mm/a、南海 10.0 mm/a。渤海、黄海和东海海平面的年最大值约发生在 8—9 月,而南海则出现在 10 月,位相逐渐滞后。各个海域的年周期振幅渤海最大,黄海次之,东海最小,东海 30°N 以南的海域振幅又小于长江口海域^[6]。东中国海的海平面存在显著的季节变化,3 月最低,9 月最高,年振幅达 7.8 cm^[7]。南海海平面季节变化占主导,汕尾沿岸海平面季节变化特征明显,每年 3—8 月为低海平面,9—11 月为高海平面^[8]。从整体上看,海平面变化的年振幅从北至南逐渐变小,而年最高海平面的位相由 8 月逐渐推移到 11 月左右^[9]。

1.2 海平面年际、年代际变化和长期趋势变化

北太平洋海平面具有显著年际变化特征,具有 28 个月的准周期。经验正交分解得到海平面距平的第二和第四模态均为年际变化,其中第二模态为 ENSO 模态,而第四模态则受 ENSO 和 PDO 的共同作用^[10]。1958—2008 年,南海平均海平面变化具有明显的 29 a 波动周期^[11]。

1993—2008 年间 Topex 高度计资料分析指出北太平洋海平面主要呈上升趋势,核心区主要位于洋盆西侧的中低纬海域,下降区域主要集中在高纬海域及洋盆东侧的中低纬海域^[2]。而 1993—2005 年期间,印太暖池附近海域是太平洋海平面上升速率最高的区域,西太暖池附近海域上升率达到 6.0 mm/a^[12]。

1993—2006 年间 Topex 资料分析得到全球平均海平面上升速率为 2.9 mm/a,其中南(15°S~64°S)、北(15°N~64°N)半球和低纬海区(15°S~15°N)3 个纬带内的平均海平面上升速率分别为 3.8 mm/a、2.2 mm/a 和 2.1 mm/a^[13]。1993—2013 年间的 AVISO 高度计数据分析表明,中国海平均海平面的上升速率为 4.7 mm/a,高于全球平均水平,渤海、黄海、东海和南海的上升速率依次为 3.8 mm/a、3.3 mm/a、3.4 mm/a 和 5.0 mm/a,渤海、黄海、东海平均为 3.4 mm/a^[14]。粤东沿海海平面自 1970 年以来持续上升,1987 年以后加速上升,且海平面年际变化受厄尔尼诺事件影响显著^[15]。近 53 年来(1959—2011 年)珠江三角洲区域海平面平均变化速率为 4.08 mm/a,且存在近期加速上升的趋势^[16]。近 40 年来福建沿海海平面呈上升趋势,平均上升速率为 1.7 mm/a,且海平面高低受厄尔尼诺事件影响明显^[17]。

2 海平面变化机制

海平面变化受海表热通量、淡水通量、环流、风应力的共同影响,洋盆尺度的海平面以 Rossby 波的形态传播^[1]。

2.1 比容海平面变化的影响

海平面变化受比容海平面变化影响显著,南海海平面变化受上层热比容海平面变化显著影响,热通量通过比容变化影响海平面变化^[18]。1993—2003 年间的 Topex 资料分析表明,东中国海平均海平面和比容海

平面平均值的的增长速率分别为 4.9 mm/a 和 3.2 mm/a,比容海平面变化主导着海平面上升趋势变化,可达 64.5%^[7]。1993—2011 年间东中国海海平面的分析结果与 1993—2003 年间类似,数值偏小,总海平面和比容海平面上升速率分别为 3.3 mm/a 和 1.8 mm/a,比容海平面的贡献达到 55%^[19]。北太平洋 1993—2006 年比容海平面的线性上升速率为 1.4 mm/a,比容变化对海平面上升速率的贡献约为 47.5%^[3]。

1955—2003 年全球平均比容海平面具有显著上升趋势,太平洋和印度洋比容海平面也存在较强的上升趋势^[20]。比容变化在热带东太平洋海平面年际变化中只是一小部分原因,动力因素对年际变化影响较大^[7]。海表热通量的季节变化决定着海平面的季节变化特征,海表淡水通量也有一定贡献,在黑潮、湾流以及东印度洋的 20°S 附近海域,Topex/Poseidon 高度计资料分析的海平面年振幅主要由比容变化决定。

南海比容海平面上升速率为 4.2 mm/a,比容海平面的位相比由 Topex/Poseidon 资料的海平面位相大约提前 2 个月^[21]。总比容海平面的变化主要来自热比容,盐比容贡献比较小。南海南部和西部比容海平面上升速率较低,如海南岛西侧有下降趋势^[8]。南海 1993—2004 年间的卫星高度计得到的海平面、1945—2004 年的比容海平面以及由验潮资料得到的海平面的年际变化与 ENSO 事件高度相关,海平面的平均上升速率约为 4.8 mm/a^[22]。热比容对西太暖池海平面的长期上升贡献很大,而对印度洋暖池的上升贡献较小^[12]。

1993—2012 年全球平均比容海平面具有显著上升趋势,太平洋和印度洋比容海平面也存在较强的上升趋势^[23]。季节变化尺度上,特别是在北半球中纬度海区,热膨胀引起的比容海平面变化占海平面变化的 86%。1993—2006 年变暖造成同期热比容海平面上升了 1.6 mm/a^[24],通过对 2005—2009 年的 Argo 浮标温度、盐度数据的分析计算,65°S~65°N 比容海平面的振幅为 4.2 mm,长期趋势项为 0.36 mm/a,对海平面影响较大^[25]。在中国近岸的浅水海域局部海平面上升则与比容变化的相关性不大,而与近岸海域动力过程和使用情况有关,尤其是在渤海海域^[26]。

2.2 风场对海平面变化的影响

黑潮延伸体南侧附近海域,风主导着海平面的年际变化和长期趋势变化,在黑潮延伸体北侧,海平面年际变化中风的作用也较显著;风的作用可以很好地解释赤道海区的海平面变化过程,Sverdrup 输运引起的海平面变化主要在季节尺度上影响海平面变化,在高纬海区影响较大;海平面的年际及趋势变化主要由斜压 Rossby 波的传播对其产生影响,在低纬度海区较重要^[11]。ENSO 通过大气环流过程对渤海、黄海海域的风场产生影响,局地风场通过风应力对渤海、黄海的海平面变化产生影响^[27]。风场对沿岸海域的海平面变化也具有一定的影响,汕尾沿岸季风导致的海面增水或减水对沿岸海平面的变化存在一定作用^[15]。珠江三角洲地区沿岸季风导致的海面增水或减水对沿岸海平面的变化存在一定作用^[16]。

2.3 海平面变化与环流的关系

环流变异会对东中国海海平面变化产生重要影响,受梯度流的约束,黑潮流量增强时,主轴左侧的海平面会下降;黑潮流量减弱时,左侧海平面会升高;在年际尺度的变化上,二者的变化成反相^[6]。El Niño 期间,Hadley 环流的加强使得南海东部和赤道西太平洋冷暖水交换加强,水温的降低和海水的流失使南海海面下降,Walker 环流结构和强度的变化则进一步促进了南海 SSH 的下降^[28]。在冬、夏季节,沿岸流较强,南海近岸海域总海平面变化主要受动力高度变化控制,尤其是越南、广东沿岸和泰国湾,约为 90% 多;而在春、秋季节,沿岸海域动力高度的贡献稍小,但贡献仍可达 80%。在南海深水区域动力高度的贡献明显小于沿岸海域,大部分海域的贡献只是比比容的贡献稍大,约为 50%~60%^[29]。

2.4 蒸发、降水和径流对海平面变化的影响

1993—2006 年期间,北太平洋西部的降水量线性增加,对海平面变化的贡献增加;大洋中部中纬海域和大洋东部低纬海域降水明显减少,对所在海域海平面下降均有一定贡献。1993—2008 年期间,北太平洋海域降水季节变化影响海平面季节变化,海表淡水通量变化对海平面上升的贡献约为 4.2%^[2]。东海长江淡水注入和降水也是影响中国东海和黄海海平面变化的重要原因^[30]。太阳辐射、降雨、入海径流及风应力等对渤海海平面的季节变化有一定影响^[27]。珠江口的径流量和 El Niño 都会影响珠江的河口区域和近岸海域的海平面变化在空间上的差异^[31]。

3 海平面长期变化的预测

目前,海平面变化的长期预测主要有 2 种方法,一种是对历史观测数据进行统计分析得到过去海平面变

化的主要周期和速率,通过简单外推对未来海平面变化进行预测;另一种是基于全球 CO₂ 排放情景的假设,采用全球海、气、陆及海冰的耦合模式对未来海平面变化进行预测^[1]。

利用随机动态分析预测方法分析 2003—2010 年间的卫星高度计资料,得到全球海平面平均上升速率为 3.1 mm/a,该值几乎是 20 世纪上升速率的 2 倍^[13]。使用 1992—2009 年海平面卫星测高仪数据资料,运用小波变换方法对中国东海水平面变化的周平均数据信号进行多尺度周期分析,并通过 Winters 指数平滑法对未来海平面变化进行预测,结果显示:预计到 2015 年,海平面将比 2006 年上升 4~5 cm;到 2030 年,海平面将比 2006 年上升 14~15 cm^[32]。采用奇异谱分析(SSA)与均值生成函数(MGF)模型相结合的方法,分析预测中国沿海 6 个验潮站自 20 世纪 50 年代以来的海平面,得出至 2050 年海平面上升最大值不超过 16 cm,平均值为 9 cm,其中烟台和秦皇岛站则为下降,这主要是由于陆面上升导致的^[33]。利用 CCSM 在 RCP4.5 情景下,用 POP 模式模拟预测,得出南海海域在 21 世纪末 10 a 平均海平面相对于 20 世纪末 10 a 上升了 15~39 cm,明显上升海域位于中南半岛东部的南海中部、南部海域和吕宋海峡东西两侧海域,上升值最大可达 39 cm^[8]。利用海-气耦合模式 CCSM3 在 IPCC A2 情景下数值模拟的全球海平面在东中国海开边界上的结果作为强迫场,驱动中国海区域海洋模式 POP,预测得到 21 世纪末东中国海海平面将上升 12~20 cm;渤海海平面上升最快,达 17 cm;黄东海东部比西部海域上升快,朝鲜半岛沿岸上升 16 cm 以上,南黄海和东海的西部中国沿海上升约 13 cm,琉球群岛及附近海域上升可达 20 cm^[34]。利用多元线性回归方法从卫星高度计数据提取出由太平洋年际振荡引起的海表面高度变化,从而计算海平面上升,在 1993—2012 年的 20 a 间,太平洋年际振荡引起的海表面高度变化在 8°N~15°N、130°E~160°E 和 30°N~40°N、170°E~220°E 的海平面上升的贡献率为 30%~40%^[35]。

利用统计模型的外推来预测海平面未来变化,多受制于数据序列的长度、质量、处理方法等因素的共同影响,且因其是基于未来影响海平面变化的因素值保持过去同样变化规律的假设下外推的,在一定程度上不能很好地反应气候系统变化的实际情况。数值模拟能较好地考虑未来气候系统的变化,是当前气候变化预测的主流方法,也是未来海平面预测的发展趋势。但是,由于目前耦合数值模型中对气候变化过程理论认识水平的限制,大部分模式对云、海洋、极地冰盖以及大气中 CO₂ 浓度等物理过程和化学过程的耦合作用的刻画还很不完善,以及人类行为导致的 CO₂ 排放过程的不确定性使得对未来气候变化的预测包含很多不确定性。因此加强气候系统耦合过程的认识,提高模式精度是海平面变化研究的主要方法;另外在气候变化的背景下,大洋环流和陆架海环流也会发生较大的变化,与之相应的海平面变化也将受到很大影响^[7]。

4 海平面变化对近海和海岸带的影响

4.1 海平面变化对潮波的影响

海平面上升水深变大,入射潮波和反射潮波的传播都会加快,底摩擦发生相应变化,这将导致旋转潮波的主要特征(即无潮点、同潮时线及等振幅线)都发生变化。海平面上升后,渤海、黄海、东海同一个潮波系统的同位相线相对原先的同位相线将沿逆时针方向发生偏转;无潮点相对于原先的无潮点发生偏移;振幅也将发生变化,两者的差值空间上存在一定的分布模式。海平面上升 3 m 和 5 m 后,南黄海各分潮的无潮点向东南方向分别偏移约 14 km 和 25 km,同潮时线和等振幅线均发生较明显的改变,同潮时线沿逆时针方向出现一定的偏转;该海域沿岸潮差呈现不同的变化特征,无潮点附近的沿岸海域(左侧及湾顶)变化明显,而远离无潮点的沿岸海域(右侧及湾顶)则变化较小^[36]。

平均高潮位的变化趋势与潮差变化一致;潮差增大的区域,高潮位增大幅度超过海平面上升的幅度。海平面上升 1 m 后,青岛和连云港的天文最高潮位增高可达 10~16 cm,海图基准面降低可达 10~12 cm^[37]。海平面上升引起的高潮位异常变化,增加了沿海地区风暴潮和其他动力灾害的强度^[38]。数值模拟试验表明,在长江径流枯季时,如果海平面上升大于 0.18 m,会使得涨潮和落潮的流速减小,影响区域随着海平面上升的幅度而增加^[39]。

4.2 海平面变化对河口水位的影响

珠江三角洲河口区海平面上升对水位的影响非常复杂,灯笼山站年均水位与海平面的相关系数为 0.529,显著性概率水平为 0.01,表现高度相关,海平面上升对年平均水位的贡献率为 20.1%^[40]。

4.3 海平面变化对河口咸潮入侵的影响

海平面上升使枯季河口区咸潮上溯的影响范围和强度增加。珠江三角洲地区,咸潮的界线每上移1 km,则受咸潮上溯影响的人口就会增加 20 万人左右,影响非常显著。在上游来水频率和强度一定的前提下,随着海平面的上升,珠江口咸潮界线向上游方向移动明显。珠江口在 97% 的上游来水条件下,海平面升高 10 cm、30 cm 和 60 cm 分别会使横门水道 250 mg/L 等盐度线上移 1.1 km、2.0 km 和 3.1 km;在 50% 上游来水条件下,海平面升高 10 cm、30 cm 和 60 cm 分别会使横门水道 250 mg/L 等盐度线上移 0.7 km、0.8 km 和 1.7 km^[40]。

4.4 海平面变化对沿岸低地的影响

海平面上升,一方面直接淹没沿海低地使岸线后退,另一方面造成海洋动力过程加强,使原有的沉积-侵蚀平衡打破,造成海岸蚀退或加速海岸蚀退。海平面上升对长江三角洲沿岸地区影响显著,岸线淤进速率减缓甚至发生海岸蚀退,在南汇东岸,近 400 a 的平均淤涨速率为 20 m/a,海平面上升速率为 1.0 cm/a 时,将导致岸线后退速率为 4.5 ~ 16.0 m/a,从而使岸线实际增长速率减至 4.0 ~ 15.5 m/a^[41]。如果同时考虑海平面上升、陆地沉降、风暴潮的共同影响,则上海地区近岸湿地及其生态系统受到的影响显著,海平面上升、泥沙沉降减少、陆地下沉等共同作用会导致长江口崇明东滩自然保护区的近岸湿地、生物栖息地减小乃至消失^[42-43]。当广东沿岸海域海平面上升速率为 2.0 ~ 2.5 mm/a 时,后江湾和水东湾的岸线后退速率分别为 0.19 ~ 0.24 m/a 和 0.11 ~ 0.15 m/a。海平面微小幅度的上升就可造成海岸带低地平原大面积被淹没,如果以百年计,后江湾岸线将后退约 19 ~ 24 m,水东湾岸线将后退约 12 ~ 15 m^[44]。海南龙王湾在 1981—1996 年的海平面上升速率为 9.4 mm/a,香港附近海域在 1991—2001 年期间的海平面上升速率为 13.7 mm/a,岸线蚀退都很显著^[45]。

海平面上升及近岸区的淹没使得中国近岸区域成为脆弱区,中国近岸大约有 18 000 km 的岸线,有 3% 处于非常脆弱区,29% 是高脆弱区,58% 是中等脆弱区,10% 是低脆弱区^[46]。利用 CCSM 耦合模式在 IPCC SRES A2 情景假设下,以 2000 年为基年预测未来海平面变化^[34],当出现百年一遇极端水位时,2080 年整个中国沿岸的可能淹没面积为 104.943 7×10³ km²,海河三角洲及渤海湾和莱州湾地区、长江三角洲及江苏沿岸和浙北沿岸地区、珠江三角洲地区三大主要脆弱区的可能淹没面积分别为 5.175 5×10³ km²、67.802×10³ km² 和 17.209×10³ km²^[13]。

4.5 海平面变化对红树林海岸的影响

在全球变化的各种效应中,海平面上升是对红树林的最大威胁之一^[47]。海平面上升对红树林生态系统的影响不只是向陆迁移这么简单。当红树林生长海域潮滩的沉积速率大于或等于海平面上升速率时,红树林生长带将基本保持稳定甚至向外海推进;当海平面上升速率大于潮滩的淤长速率时,红树林可能受到侵害而向陆迁移,但如果岸边有障碍物,如基岩海岸或海堤时,则红树林的生态带转移受阻,导致红树林湿地资源衰退或丧失^[48]。与王国栋预计的海平面上升速率相比^[32],我国大部分红树林生长区域的潮滩淤积速率大于或等于 2030 年前的海平面上升速率,红树林面积能基本上保持稳定;在 2030 年后海平面上升速率进一步加大的前提下,我国部分红树林潮滩的淤积速率将小于海平面上升速率,从而对我国红树林面积造成显著影响,尤其在泥沙来源少、红树林潮滩淤积速率较低的沿岸区域^[48]。

5 结 论

海平面变化既是全球变化的重要组成部分,又是全球海洋环流演变的重要组成部分。海平面变化受海表热通量、淡水通量、环流、风应力以及 Rossby 波的共同影响。关于海平面的长期预估,有统计方法和气候耦合数值模拟 2 种手段,耦合模式的预测表明,21 世纪中国海海平面上升速率要高于全球平均水平。海平面变化会影响陆架海动力过程,尤其是潮波的传播。海平面上升会引起近海和海岸带的一系列生态环境变化,如近岸低地淹没,海岸侵蚀、海水入侵和土地盐渍化加剧,红树林生态衰退等。

海平面上升及其影响和适应是气候变化领域的核心研究内容,我国在海平面变化机制和气候预估方面的研究积累较多,而在海平面上升的影响、适应技术和决策等相关领域的研究较薄弱,对海岸带经济、社会、环境生态的影响评估研究比较零散且缺乏深入系统的研究,缺乏针对性的应对海平面上升的适应技术和应对决策政策研究;在海平面上升对近海环境的影响研究领域,仅有对红树林的影响研究,对海洋动力过程、

红树林和珊瑚礁生态系统的影响研究基本是空白。这都是我国在海平面变化研究领域亟需开展的工作。

参考文献:

- [1] 左军成,杜凌,陈美香,等. 气候与海平面变化及其对海岸带的影响[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 陈美香,王蕾,左军成,等. 基于多卫星融合数据的海平面特征分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(3):325-331. (CHEN Meixiang, WANG Lei, ZUO Juncheng, et al. Global sea level change characteristics based on multi-altimeter data [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(3): 325-331. (in Chinese))
- [3] 徐珊珊,左军成,陈美香. 1993—2006年北太平洋海平面变化特征及影响因素[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2010,40(9):24-32. (XU Shanshan, ZUO Juncheng, CHEN Meixiang. North Pacific sea level change and its impact factors during 1993—2006[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Sciences, 2010, 40(9): 24-32. (in Chinese))
- [4] 陈美香. 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[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [5] 杨春辉,郎咸瑞,许春艳,等. 海平面季节变化及比容贡献[J]. 海洋测绘,2011,31(1):47-49. (YANG Chunhui, LANG Xianrui, XU Chunyan, et al. Seasonal sea level changes and the steric contribution[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2011, 31(1): 47-49. (in Chinese))
- [6] 何倩倩. ENSO期间东中国海海平面变化机制[D]. 南京:河海大学,2010.
- [7] 颜梅,左军成,傅深波,等. 全球及中国海海平面变化研究进展[J]. 海洋环境科学,2008,27(2):197-201. (YAN Mei, ZUO Juncheng, FU Shenbo, et al. Advances on sea level variation research in global and China sea[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(2): 197-201. (in Chinese))
- [8] 张吉,左军成,李娟,等. RCP4.5情景下预测21世纪南海海平面变化[J]. 海洋学报,2014,36(11):21-29. (ZHANG Ji, ZUO Juncheng, LI Juan, et al. Sea level variations in the South China Sea during the 21st century under RCP4.5[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 21-29. (in Chinese))
- [9] 钱安,孙文科. 近年来中国近海区域海平面变化特征研究[C]//佚名. 2014年中国地球科学联合学术年会. 专题3. 地球重力场及其地学应用论文集. 北京:中国地球物理学会,2014:393-393.
- [10] 王智祖,左军成,陈美香,等. 黄、东海沿海岸表温度变化与厄尔尼诺的关系[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(4):461-468. (WANG Zhizu, ZUO Juncheng, CHEN Meixiang, et al. Relationship between El Nino and sea surface temperature variation in coastal region of Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(4): 461-468. (in Chinese))
- [11] 黄琳,孙佳,杨逸秋,等. 北太平洋海表面高度(SSH)与风应力变化的关系[J]. 海洋与湖沼,2013,44(1):111-119. (HUANG Lin, SUN Jia, YANG Yiqiu, et al. Sea surface height (SSH) change and its relationship with wind stress in the north pacific ocean[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 111-119. (in Chinese))
- [12] CHENG Xuhua, QI Yiquan, ZHOU Wen. Trends of sea level variations in the Indo-Pacific warm pool[J]. Global and Planetary Change, 2008, 63(1): 57-66.
- [13] ZUO Juncheng, YANG Yiqiu, ZHANG Jianli, et al. Prediction of china's submerged coastal areas by sea level rise due to climate change[J]. Journal of Ocean University of China, 2013, 12(3): 327-334.
- [14] 张静,方明强. 1993—2012年中国海海平面上升趋势[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2015,45(1):121-126. (ZHANG Jing, FANG Mingqiang. Sea level trends of China seas from 1993 to 2012[J]. Journal of Ocean University of China: Natural Sciences, 2015, 45(1): 121-126. (in Chinese))
- [15] 沈东芳,龚政,程泽梅,等. 1970—2009年粤东(汕尾)沿海海平面变化研究[J]. 热带地理,2010,30(5):461-465. (SHEN Dongfang, GONG Zheng, CHENG Zemei, et al. Sea level change in coastal eastern Guandong (Shanwei) in 1970—2009[J]. Tropical Geography, 2010, 30(5): 461-465. (in Chinese))
- [16] 何蕾,李国胜,李阔,等. 1959年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势[J]. 地理研究,2014,33(5):988-1000. (HE Lei, LI Guosheng, LI Kuo, et al. Changes and trends of sea level in the Pearl River Delta in the last 50 years[J]. Geographical Research, 2014, 33(5): 988-1000. (in Chinese))
- [17] 林选跃,张世民,陈德文,等. 福建沿海年平均海平面年际、年代际变化特征及预测[J]. 海洋预报,2014,31(5):63-68. (LIN Xuanyue, ZHANG Shimin, CHEN Dewen, et al. Variability of interannual and decadal sea level and its prediction along Fujian coastal area[J]. Marine Forecasts, 2014, 31(5): 63-68. (in Chinese))
- [18] CHENG Xuhua, QI Yiquan. Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4): 371-382.
- [19] 王龙,王晶,杨俊钢. 东海海平面变化的综合分析[J]. 海洋学报,2014,36(1):28-37. (WANG Long, WANG Jing, YANG

- Jungang. The comprehensive analysis of sea-level change in the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(1): 28-37. (in Chinese))
- [20] 张建立. 全球海平面变化规律及比容变化的影响[D]. 青岛:中国海洋大学, 2006.
- [21] 丁荣荣,左军成,杜凌,等. 南海海平面变化及其比容高度和风场间的关系[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2007, 37(增刊2):23-30. (DING Rongrong, ZUO Juncheng, DU Ling, et al. Sea Level Change in the South China Sea and Its Relations to the Steric Height Variation and Wind[J]. *Journal of Ocean University of China: Natural Sciences*, 2007, 37 (Sup2): 23-30. (in Chinese))
- [22] 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. (RONG Zengrui, LIU Yuguang, CHEN Manchun, et al. Mean sea level change in the global ocean and the South China Sea and its response to ENSO[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(1): 1-8. (in Chinese))
- [23] CHEN Xian Yao, FENG Ying, HUANG N E. Global sea level trend during 1993—2012[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112(1): 26-32.
- [24] 韩飞,杜凌,李杰,等. 黑潮延伸体海域海平面变化及其与比容变化的关系[J]. 海洋湖沼通报,2011(2): 7-19. (HAN Fei, DU Ling, LI Jie, et al. Sea level change and its relationship with steric sea level in the Kuroshio extension[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(2): 7-19. (in Chinese))
- [25] 吴迪,滕春江. 基于Argo浮标的比容海平面变化的研究[J]. 测绘通报,2014(7):90-93. (WU Di, TENG Chunjiang. The study of steric sea level variations by using argo data[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(7): 90-93. (in Chinese))
- [26] BI Xiaoli, LU Qingshui, PAN Xubin. Coastal use accelerated the regional sea-level rise[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 82(3): 1-6.
- [27] 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. (LIU Xueyuan, LIU Yuguang, GUO Lin, et al. Mean sealevel change in East China Sea and its response to ENSO[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(5): 34-42. (in Chinese))
- [28] 沈春,杜凌,左军成,等. 南海海面高度异常与厄尔尼诺和大气环流的关系[J]. 海洋预报,2013,30(2):14-21. (SHEN Chun, DU Ling, ZUO Juncheng, et al. Correlation between the sea surface height anomaly and ENSO in the South China Sea [J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(2): 14-21. (in Chinese))
- [29] 曹越男. 南海海面高度季节变化规律及机制探讨[D]. 青岛:中国海洋大学, 2007.
- [30] 王国栋,康建成,韩钦臣,等. 近代全球及中国海平面变化研究述评[J]. 海洋科学,2014,38(5):114-120. (WANG Guodong, KANG Jiancheng, HAN Qinchen, et al. A review on sea-level change research in global and the China Sea in recent years[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(5): 114-120. (in Chinese))
- [31] HE Lei, LI Guosheng, LI Kuo, et al. Estimation of regional sea level change in the Pearl River Delta from tide gauge and satellite altimetry data[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 141(2): 69-77.
- [32] 王国栋,康建成,刘超,等. 中国东海海平面变化多尺度周期分析与预测[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6):678-684. (WANG Guodong, KANG Jiancheng, LIU Chao, et al. Analysis and prediction of sea-level-change multi-scale cycle for East China Sea[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 678-684. (in Chinese))
- [33] 袁林旺,谢志仁,俞肇元. 基于SSA和MGF的海面变化长期预测及对比[J]. 地理研究,2008,27(2):305-313. (YUAN Linwang, XIE Zhiren, YU Zhaoyuan. Long-term prediction and comparison of sea-level change based on the SSA and MGF model[J]. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 305-313. (in Chinese))
- [34] 陈长霖,左军成,杜凌,等. IPCC气候情景下全球海平面长期趋势变化[J]. 海洋学报, 2012, 34(1):29-38. (CHEN Changlin, ZUO Juncheng, DU Ling, et al. Long term trends in global sea level under IPCC SRES A2 scenario[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012,34(1): 29-38. (in Chinese))
- [35] SI Zongshang, XU Yongsheng. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on regional sea level rise in the Pacific Ocean from 1993 to 2012[J]. *Chinese Journal of Oceanology & Limnology*, 2014, 32(6):1414-1420.
- [36] 王伟,宋志尧,陆卫国,等. 海平面上升对海岸潮差响应的理论解析[J]. 海洋工程, 2008, 26(3):94-97. (WANG Wei, SONG Zhiyao, LU Weiguo, et al. A thoretical analysis of the responses of coast tidal range to sea level rise[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(3): 94-97. (in Chinese))
- [37] 于宜法,刘兰,郭明克. 海平面上升导致渤、黄、东海潮波变化的数值研究Ⅱ:海平面上升后渤、黄、东海潮波的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2007, 37(1):7-14. (YU Yifa, LIU Lan, GUO Mingke. Numerical research on tidal waves changes due to mean-sea-level rise in the Bohai Sea, the Huanghai Sea and the East China Sea Ⅱ: numerical modeling of tidal waves after mean-sea-level rise in the areas[J]. *Periodical of Ocean University of China: Natural Sciences*, 2007, 37(1):

7-14. (in Chinese))

[38] 章卫胜, 张金善, 林瑞栋, 等. 中国近海潮汐变化对外海海平面上升的响应[J]. 水科学进展, 2013, 24(2):243-250. (ZHANG Weisheng, ZHANG Jinshan, LIN Ruidong, et al. Tidal response of sea level rise in marginal seas near China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 243-250. (in Chinese))

[39] ZHOU Xiaoyan, ZHENG Jinhai, Doong D J, et al. Sea level rise along the East Asia and Chinese coasts and its role on the morphodynamic response of the Yangtze River Estuary[J]. Ocean Engineering, 2013, 71(10): 40-50.

[40] 孔兰, 陈晓宏, 杜建, 等. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7): 1097-1104. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Impact of sea-level rise on salt water intrusion based on mathematical model [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7): 1097-1104. (in Chinese))

[41] 徐健. 海平面上升对上海的影响及对策措施研究[J]. 中国水运, 2012, 12(11):28-29. (XU Jian. The influence of sea-level rise on Shanghai and the counter measures[J]. China Water Transport, 2012, 12(11):28-29. (in Chinese))

[42] WANG Heng, GE Zhenming, YUAN Lin, et al. Evaluation of the combined threat from sea-level rise and sedimentation reduction to the coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China[J]. Ecological Engineering, 2014, 71:346-354.

[43] CUI Lifang, GE Zhenming, YUAN Lin, et al. Vulnerability assessment of the coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China to sea-level rise[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 156: 42-51.

[44] 李志龙, 李志强, 陈子燊. 华南海平面变化分析及海岸的响应[J]. 海洋通报, 2009, 28(6):7-13. (LI Zhilong, LI Zhiqiang, CHEN Zishen. Sea level variation analysis and coastal response in South China[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(6): 7-13. (in Chinese))

[45] LIU Yi, PENG Zicheng, WEI Gangjian, et al. Interannual variation of rare earth element abundances in corals from northern coast of the South China Sea and its relation with sea-level change and human activities[J]. Marine Environmental Research, 2011, 71(1):62-69.

[46] YIN Jie, YIN Zhane, WANG Jun, et al. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast[J]. Journal of Coastal Conservation, 2012, 16(1):123-133.

[47] 傅海峰, 陶伊佳, 王文卿. 海平面上升对中国红树林影响的几个问题[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10):2842-2848. (FU Haifeng, TAO Yijia, WANG Wenqing. Some issues about the impacts of sea level rise on mangroves in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2842-2848. (in Chinese))

[48] 张乔民. 海平面上升对红树林的影响[C]//佚名. 中国第五届红树林学术会议论文摘要集. 广州:中国科学院南海海洋研究所, 2011:7-9.