

近代全球及中国海平面变化研究述评

A review on sea-level change research in global and the China Sea in recent years

王国栋¹, 康建成¹, 韩钦臣¹, Guoqi Han², 闫国东³

(1. 上海师范大学 城市生态与环境研究中心, 上海 200234; 2. Fisheries and Oceans Department, Northwest Atlantic Fisheries Centre, Newfoundland, Canada; 3. 上海工程技术大学 管理学院, 上海 201620)

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)05-0114-07
doi: 10.11759/hyxx20121203002

近代气候变化的直接观测表明, 全球气候系统变暖是毋庸置疑的^[1]。最近 100 a(1906~2005 年)的全球平均气温升高了 0.74℃(0.56~0.92℃), 最近 50 a 的变暖趋势是最近 100 a 的两倍^[2]。到 2050 年, 全球气温可能比 20 世纪上升 1.4~3℃, 其高值高于政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007 年分析报告给出的预测结果^[2]。海平面对气候变化的响应非常敏感, 是全球气候变化过程中一个重要的气候响应参数^[3]。近世纪来, 由于全球变暖导致的海平面在持续波动上升^[4-5]。

据统计, 目前世界上 60%的人口居住在距海岸 100 km 的地区, 10%的人口居住在海拔高度不足 10 m 的沿海地带^[5]。海平面上升增加了全球沿海地区生态环境系统的脆弱性, 导致这些地区经常受到洪涝灾害, 潮滩、湿地损失、盐水入侵等自然灾害的侵袭。在全球变暖背景下, 海平面上升已经成为全球性重大环境问题之一。有关海平面变化、变率、趋势及预测的研究日益得到关注和重视, 世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈-生物圈计划(IGBP)、中国《国家中长期科学和技术发展纲要(2006~2020 年)》等重大国际和国内计划和文件都将海平面变化作为重点研究支持领域。长期发展来看, 海平面上升影响到未来人类生存和活动的的环境, 影响到沿海国家和地区经济社会发展的长远发展, 已经成为各国政府在规划沿海经济和社会发时必须面对的重要问题。

同时, 海平面变化研究与大洋环流变化研究密不可分, 既是全球气候变异研究的重要内容, 又是物理海洋和大气科学研究中的热点问题^[6], 海平面变化机理的研究, 一直是海洋领域应对气候变化积

极探讨和急需解决的科学问题, 可为长期气候预测和预报等奠定基础。

前人^[7]曾对全球及中国海海平面变化进行综述, 但更多是从变化趋势的角度, 综述全球及中国海海平面变化、比容海平面变化以及温度、盐度贡献。本文将从变化趋势、空间分异、影响因素等三个方面对近代全球及中国海海平面变化进行综述。

1 全球海平面变化研究

1.1 变化趋势

前人基于验潮站、卫星测高仪等海面高度数据, 对全球海平面变化趋势进行了分析计算^[1, 3, 4, 7], 由于计算方法及数据长度选择的差异, 结果也有所不同。总体上看, 近百年以来, 全球海平面的上升与全球变暖趋势相一致, 自 1961 年以来, 全球海平面上升的平均速率为 1.8 mm/a, 而从 1993 年以来, 全球海平面的上升速度已经达到 3.1 mm/a^[1]。最新研究显示, 1993~2009 年, 平均海平面变化率上升至 3.3 mm/a±0.4 mm/a, 海平面在加速上升^[8]。

21 世纪, 海平面在加速上升, 但总体来看其变化幅度并不确定, 主要原因是格陵兰冰盖、西南极冰盖融化的贡献以及海平面区域变化的幅度并不十分

收稿日期: 2012-12-03; 修回日期: 2014-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(专项基金项目, 41340045); 上海师范大学理工科一般科研项目(SK201343); 上海地方本科院校“十二五”内涵建设项目(0852011XKZY15)

作者简介: 王国栋(1977-), 男, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 主要从事全球变化与海洋环境研究, E-mail: guodong@shnu.edu.cn; 康建成, 通信作者, E-mail: kangjc@126.com

清楚。但近年来新技术手段或实验(如 InSAR, GRACE)的出现,为极地冰盖的质量平衡探测提供了更多较客观的数据,数据显示,格陵兰冰盖和西南极冰盖质量损失在加速^[5]。IPCC 报告(2007)预测,由于海温升高和冰川融化等原因,到 2100 年全球海平面将上升 60 cm,之后有文献^[9-11]显示,目前极地冰盖在加速减少,到 2100 年未来海平面将上升 1 m 甚至更多,IPCC 报告或许低估了海平面变化的风险。许多地区,由于一些非气候因素(如区域地面沉降)的影响导致相对海平面变化,同时,由于区域地面沉降的影响,导致应用验潮站数据计算的海平面变化可能产生较大误差^[12]。

海平面具有显著的年、年际、年代际变化特征。其季节变化主要受太阳辐射季节变化引起的海表温度(SST)变化的影响^[13-14],其年信号和年际信号主要是由比容和海水总量的变化所引起^[15-16],与大尺度的 SST 变化也有关,与 ENSO 具有高度的相关性^[17-19],海平面年代际周期与北太平洋年代际振荡(PDO)关系密切^[16]。在北太平洋地区, PDO 和 NPGO(北太平洋涡旋振荡)是两个主要气候模态,有着显著的年代际变化特征,显著地改变着北太平洋各海洋要素的分布态势^[20]。

1.2 区域分异特征

全球海平面变化具有明显的区域差异^[3, 12, 21],西太平洋和东印度洋地区的上升幅度最大,个别海域上升幅度超过全球平均值的 10 倍^[12],而东太平洋和西印度洋海平面呈现下降的趋势^[12, 17, 22]。太平洋海平面变化比较激烈的区域还包括黑潮延伸体附近海域和西南太平洋,近 10 a 的海平面上升异常加快,核心值可达 30 mm/a 以上^[23]。综合研究发现,20°~50°N 是全球的危险海岸带,这是由于该区域海平面季节变化大,海平面年较差可以达到 5~6 cm,最大季节差值可达 12 cm,9~10 月为其海平面的最高值时期。同时,每年 5~11 月为上述区域热带-温带气旋-风暴潮的活动期,8~10 月为频发期,二者叠加形成全球危险海岸带^[24]。

全球比容海平面变化也存在着显著的空间差异^[12, 25],其热比容、盐比容海平面变化幅度都呈现出空间分布上的差异^[1, 26]。在南北纬 50°到极地海洋区域,热比容的变化相对较小,而南北纬 50°之间的各个大洋对世界海洋热比容海面变化的贡献是不同的。在热带区域,太平洋变化是占主导的,而在大西

洋和印度洋在亚热带海域占主导。1955~2003 年,在全球大部分大洋海域,热比容海平面显著增长,而在北大西洋副极地环流和北太平洋副热带、副极地过渡区域,却呈现负增长的趋势。

北太平洋(1993~2006 年)大部分海区海平面都在不同程度地上升,少数海区存在下降趋势。上升区域基本位于洋盆西侧的中低纬海区,高纬度海区及中低纬度海区的大洋东岸地区海平面在下降,其中上升最快和下降最快的海区位于黑潮和亲潮的交汇海域^[27]。

1.3 影响因素

影响全球海平面变化的因素很多(图 1),从中长时间尺度上来看,海平面变化成因可概括为两个方面^[28],一是随气候变暖,与陆地冰融化以及陆地储水量变化相关的水体质量变化引起的海平面变化(Eustatic sea level);二是由海水密度变化导致的海平面变化,包括海水温度、盐度的变化,即比容海平面变化(Steric sea level)。

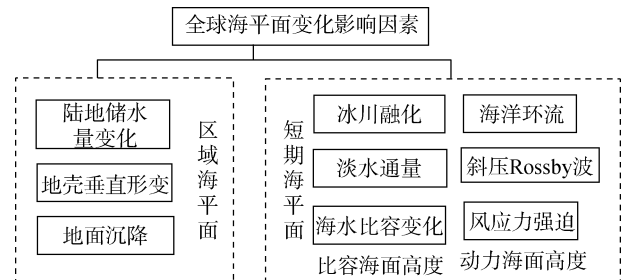


图 1 全球海平面变化影响因素一览表

近几十年的海水温度观测数据证明,海水热膨胀在增加^[5],1960 年以来海水热膨胀对海平面变化的贡献占 25%,基于 1993~2009 年卫星测高仪数据计算,海水温度变化对全球平均海平面的贡献率占到 30%左右^[29],而其中对 1993~2003 年海平面变化贡献率占 50%。由于全球变暖导致的陆地冰质量损失在增加,虽然由于自然气候变化和人类活动引起的陆地水储量的变化对当前海平面变化的影响较小(<10%),但 20 世纪后期沿河堤坝的建设减少海平面上升,贡献度为-0.5 mm/a^[5]。总体上估计,1993~2009 年,总的陆地冰质量损失可以解释海平面变化率的 60%^[29]。

斜压 Rossby 波、比容(比容变化和海气之间的热量交换)以及海平面对风应力强迫的响应^[30]等是短期海平面变化的主要影响因素。冰川融化和海水热

膨胀、地壳垂直形变、地面沉降、厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)和海洋环流变化、降水量和河流入海径流量等对区域海平面变化也有着重要的影响。

根据成因,海面高度变化也可分为比容高度变化和动力高度变化两部分,比容高度的变化对研究海平面的长期变化特征有重要意义,而动力海面高度场则是海洋环流的反应,代表了深度平均流的水平分布^[31]。海面动力高度的变化是指由环流引起的海水的堆积离散导致的海面高度变化,其季节变化与环流和风引起的 Ekman 运输密切相关。曹越男、左军成等^[31]对南海海面动力高度进行了计算和分析,认为,近岸海区动力高度对总的海面高度的贡献非常大,贡献可达 80%~90%。在深水海区,动力高度的贡献有所减弱。在大部分区域,比容高度对总海面高度变化的贡献与动力高度的贡献相当。

前人对影响海平面变化不同因素的贡献度进行了探讨^[17, 30, 32-34],研究显示,比容海面高度与动力海面高度在不同的区域、不同季节其贡献比例有所不同。海水比容变化可分为热比容海面变化和盐比容海面变化。热比容海面是指由于温度变化引起海水体积的热膨胀或缩小,从而导致的海面高度变化^[26, 35-36]。1955~2003年,世界大洋 0~700 m 层热膨胀对全球海平面的贡献为 0.33 mm/a, 大约热比容趋势的一半是由于大西洋的变暖^[37]。1993~2003年,总比容海平面(0~700 m)的线性变化趋势为 1.23 mm/a, 其中 60%源于太平洋变化趋势。对于整个大洋(0~3 000 m), 其 1955~1998年的线性变化趋势为 0.40 mm/a \pm 0.05 mm/a。Ishii 等^[33]分析了 1955~2003年热比容和盐比容海平面变化对全球海平面上升的贡献,得出,1993~2003年,南北纬 60°范围内按纬度带平均的热比容海面变化贡献约占整个海平面变化的 50%。

Levitus 等^[38]分析了 500 多万个温度数据后发现,20 世纪下半叶全球平均海面温度在增长,该变化伴随着海水的淡化^[26]。Antonov 等^[26]对 1957~1994年比容海平面变化的贡献进行了探讨,得出在 50°S~65°N, 0~3 000 m 层海域,温度和盐度变化导致的海平面上升速率为 0.55 mm/a, 其中 10%是由于平均盐度的减少。从全球尺度上来看,基于当前的历史盐度数据,全球平均盐度在减少,除了浮冰以外的淡水的增加导致海平面以 1.3 mm/a \pm 0.5 mm/a 的速度增长。盐比容在区域比容高度年周期中起到重要的作用,但目前对于全球海平面上升,盐度变化的效应被假设是很小的^[39],因为在全球水循环没有出现

大的变化时,长时间尺度上分析全球平均海水盐度量被假定为常数。在海水质量和温度恒定的情况下,应该更加关注盐度的变化。

2 中国海海平面变化研究

2.1 变化趋势

近 30 a 来,中国沿海海平面总体呈波动上升趋势,平均上升速率为 2.6 mm/a。2001~2010年,中国沿海的平均海平面总体处于历史高位,平均海平面比 1991~2000年的平均海平面高 25 mm,比 1981~1990年的平均海平面高 55 mm。受气候变暖及其他因素的影响,2010年中国沿海海平面变化存在明显的空间差异,渤海和黄海沿海海平面分别上升 11 mm 和 10 mm,东海沿海略有上升,南海沿海下降 24 mm^[40]。未来中国沿海海平面将长期保持上升趋势,海平面上升及其带来的各种海洋灾害威胁也将严重制约中国沿海经济和社会的可持续发展。

Han 等^[41]利用 1992~2002年卫星测高数据及部分验潮站数据对中国渤海、黄海和东海海平面变化与 PDO 的关系进行了探讨,得出,基于卫星测高数据得到的 1992~2002年海平面变化有 10~30 cm 的变化幅度,最高值出现在夏季。经过逆气压校正后,海平面变化年周期可以近似认为是由比容高度变化所引起的。年际海平面变化有着 10 cm 的变化幅度,年代际或更长时间尺度上的海平面变化与 PDO 呈现负相关的特征。

研究显示,目前长江三角洲等沿海地区正面临着地面下陷、海平面上升的双重威胁,并处于极度危险中^[42]。中国东海,是位于中国大陆与九州岛、琉球群岛和台湾岛之间的西太平洋边缘海,其持续上升的趋势对长江三角洲及其毗邻地区的生态、环境安全带来巨大的威胁^[11, 43]。1993~2009年中国东海海平面平均上升速率为 3.9 mm/a^[44],高于全球及中国沿海海平面变化速率。海平面上升加重了沿海地区洪涝威胁、咸潮上溯、海岸侵蚀等灾害的发生概率。每年秋季,尤其是 10 月份,长江三角洲地区海平面处于中国东海海平面极大值,而秋季又是风暴潮的多发时节,若海平面上升叠加风暴潮的影响,长江三角洲及其毗邻地区将面临巨大的灾害风险。

但是,前人计算海平面变化率基本采用均值计算,而本文基于经过逆气压校正后的 1992~2009年中国东海卫星测高仪数据(数据融合了 Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, ERS-1, ERS-2, Geosat-follow-on 与

Envisat 等测高卫星资料), 提取逐年逐月峰值和平均值, 并计算月峰值年变化率和月平均值年变化率, 对比发现(图 2), 其峰值变化率均高于对应月平均变化率, 以 3~4 月(春季), 10 月份(秋季)差距最大。可见, 运用均值变化率来描述海平面变化的速率, 降低了海平面变化对沿海城市影响的风险, 难以完全反映海平面峰谷值的变化程度和特点^[45], 因此, 应加强海平面峰值变化规律和趋势的研究。

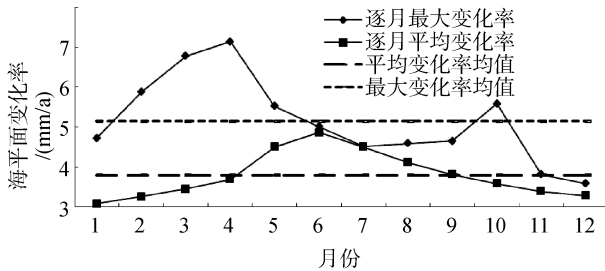


图 2 海平面月峰值年变化率和月平均值年变化率比较图

2.2 区域分异特征

在南海, 海面高度存在着明显的时空差异特征^[45], 在沿海和大陆架海域, 海平面秋冬季为最高; 在东部深海海域, 夏秋季为最高; 南海中心深度超过 2 000 m, 平均海面变化幅度为 4.5 cm, 海平面变化高值在 8 月, 可近似认为该变化是由于比容海面高度变化的贡献。

在东海, 海平面上升时空差异显著^[27], 本文基于 1992~2009 年海面高度数据对中国东海海平面季节空间分布特征进行了研究, 得出, 东海海平面变化峰值出现在夏、秋季节, 以秋季为最高; 谷值出现在冬、春季节, 以春季为最低。受到东海黑潮水和东亚季风的影响, 春季海平面, 总体上南部高于北部, 西部海平面低于东部, 峰值主要分布在台湾东部海域。受到台湾东北部暖涡和温州沿海暖涡的影响, 冬季海平面呈现西南部海域海平面高于东部海平面,

其峰值主要出现在台湾东北部海域和温州沿海海域。夏季海平面整体偏高, 其中, 西部海平面低于东部, 最低值位于福建东部沿海海域, 峰值位于日本海南部东海海域。秋季平均海平面达到全年最高值, 受到东亚季风的影响, 东海北部海域海平面高于南部, 海平面出现南北空间差异。

由 1992~2009 年卫星测高数据计算可得, 近 50 a 来, 长江口附近海平面年增长速率为 5.45 mm/a, 高于基于卫星测高仪数据得到的 3.6 mm/a 的年平均变化率; 夏秋季节, 特别是 9~10 月份, 由于受到长江径流量增大等因素的影响, 中国东海高海平面峰值区位于长江口附近海域。长期上涨的海平面, 若叠加风暴潮和天文大潮的影响, 必将对长江三角洲及其毗邻地区的生态环境及生命财产安全带来巨大的威胁。长江三角洲尤其是上海地区是海平面上升影响的脆弱区域, 而每年 9~10 月份是该地区海洋灾害的易发月份。

2.3 影响因素

中国海海平面变化主要受到比容、长江冲淡水 and 降水等淡水通量、海表风应力、ENSO、PDO、东海黑潮等的影响(图 3), 本文分别对其影响机理进行简单的综述和分析。

中国海海域比容海平面变化具有显著的时空差异, 受黑潮影响显著。在中纬度海域, 比容对海平面变化影响起主导作用^[30, 32]。在东海区域, 比容对海平面趋势变化的贡献为 50%~80%^[41, 46]; 比容海面的趋势分布与海平面的趋势分布相比, 离黑潮较近区域差异较大, 较远区域非常相似。比容海面也有显著的季节变化, 其季节变化对海平面季节变化的贡献大约为 81.3%^[27]。南海区域, 1993~2001 年南海海平面变化速率为 10~10.5 mm/a, 基本为比容海面高度(9 mm/a)的贡献。

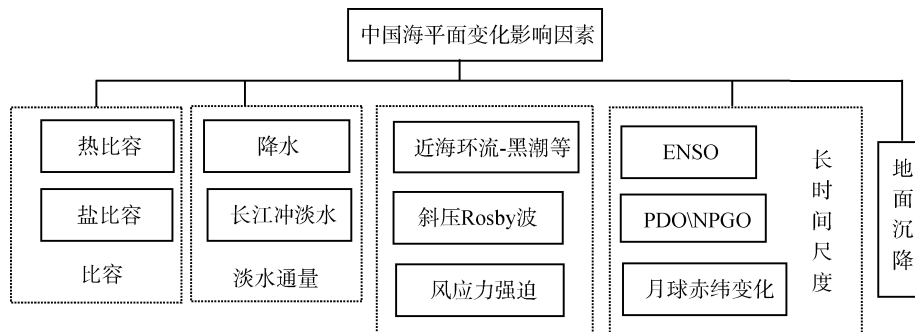


图 3 中国海平面变化影响因素一览表

ENSO 和 PDO 对中国海海平面年际和年代际变化有着重要的影响。研究发现, ENSO 和 PDO 位相为正时, 北太平洋出现较低的海平面, ENSO 和 PDO 位相为负时, 北太平洋出现较高的海平面; 海平面与 ENSO 及 PDO 信号的变化位相相反。当 ENSO 和 PDO 发生位相转变时, 海平面变化幅度较大, 将引起剧烈的海平面振荡^[27]。在年际时间尺度上, 南海海域海平面变化与 ENSO 变化呈现负相关的特征, 总体上海平面变化是温度上升和盐度降低的结果。

Arnold 等^[47]通过 1992~2002 年卫星测高数据得出, 日本和东中国海海平面年变化幅度约为 15 cm, 其海平面低频变化与 PDO 指数相关, 当 PDO 处于冷位相时, 海平面处于高值, 表层海面温度相对较高, 反之, 海平面处于低值, 表层海面温度相对较低; 1998 年后, PDO 显示已经进入冷位相时期。而东海海面高度与 PDO 相关的原因可能是由于黑潮水运输, PDO 处于冷位相时, 黑潮运输较弱, 对马暖流和韩国海峡流增强; 反之则黑潮运输较强, 对马暖流和韩国海峡流减弱。

东海纬向风应力与当地海平面异常、南方涛动具有很好的相关性; 大气环流的辐散带在 30°N 两侧风场的差异, 导致两侧海域平均 SLA 与纬向风应力距平的低频分量之间的相关关系不同, 其中在长江口附近海域呈正相关性。而 ENSO 通过大气环流过程对东海海域的风场产生影响, 当地风场通过纬向风应力对东海海平面的年际变化产生调制作用^[48]。

黑潮作为北太平洋副热带环流的西边界流, 对中国近海环流和海平面有着重要的影响。黑潮海域海表温度异常是影响我国夏季大气环流和降水的重要因素。研究表明, 黑潮流量的变化与黑潮左右两侧海平面、左右两侧海面高度差以及整个黑潮流域的海平面变化都存在着很密切的关系^[27]。黑潮流量增大时, 左侧海平面下降, 右侧海平面上升, 左右两侧海面高度差增加, 整体海平面上升, 反之则否, 海平面变化滞后黑潮流量变化大约半年左右。另外, 前人研究发现^[48], 当黑潮出现大弯曲时, 由于黑潮流量的增大, 也可能导致海平面出现异常。但是, 黑潮流量导致海平面变化的幅度、贡献度为多少? 黑潮主轴位置的摆动对海平面变化有什么影响? 这些问题尚不明晰。

东海长江冲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。近 20 a 来, 我国东海区域降水呈现减少的趋势, 降水的季节变化对海

平面季节变化的贡献较弱, 降水对海平面变化的贡献主要表现在年际尺度上。东海区域降水的年际信号大于蒸发, 且两者呈现反位相变化^[27]。

3 结论与讨论

1) 目前, 海平面变化趋势研究大多采用海平面变化均值的变化率来描述, 海平面年平均变化率未能全面反映海平面变化的峰谷值变化规律和特点, 且降低了海平面变化对沿海地区影响的风险值, 因此, 应加强海平面峰值变化的研究。在前人的研究中, 由于选用数据或方法技术的不同, 海平面变化趋势的计算结果也有所不同。

2) 从大尺度上来看, 全球海平面变化具有显著的空间分异特征, 全球比容海平面变化以及热比容、盐比容海平面变化也具有较强的空间分异特征。然而在局地尺度上海平面变化空间分异的研究不容忽视, 如中国东海、中国南海等海域海平面变化趋势和空间分异规律等的研究, 能够对中国长江三角洲、珠江三角洲地区沿海城市及时规避风险、制订防灾减灾规划有着重要的理论和现实意义。

3) 近几十年的海水温度观测数据证明, 海水热膨胀在增加, 海水温度变化对全球平均海平面的贡献率为 25%~50%; 总的陆地冰质量损失可以解释海平面变化率的 60%左右。长期的盐度观测数据表明, 盐比容在区域比容高度年周期中起到重要的作用, 但对于全球海平面变化, 盐度变化的效应是很小的, 但海水温度的升高, 陆地冰融化导致盐度的减小和海水的淡化。因此, 在海水质量和温度恒定的情况下, 也应关注盐度的变化。

4) 中国海海平面变化主要受比容、长江冲淡水和降水等淡水通量、海表风应力、ENSO、PDO、东海黑潮等因素的影响, 其中黑潮对中国海平面变化影响的研究还不够深入, 黑潮流量、流速对黑潮海域海平面变化的影响程度, 黑潮主轴位置的变化对海平面变化的具体影响, 还有待深入研究。此外, 局地海平面变化机理的研究还应考虑局地气候环境及大洋环流的影响以及其他影响因素的区域差异。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, United Kingdom and New York,

- NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Rowlands D J , Frame D J , Ackerley D , et al. Broad range of 2050 warming from an observationally constrained large climate model ensemble [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 3(5): 256-260.
- [3] Braithwaite R J, Raper, et al. Glacier and their contribution to sea level change[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27: 1445-1454.
- [4] Church J A, White N J, Coleman R, et al. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period [J]. *Climate*, 2004, 17 : 2609-2625.
- [5] Nicholls R J , Cazenave A. Sea level rise and its impact on coastal zones [J]. *Science*, 2010: 1517-1520.
- [6] 颜梅.全球海平面变化的热力学机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [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, 2: 197-200.
- [8] Ablain M, Cazenave A, Guinehut S, et al. A new assessment of global mean sea level from altimeters highlights a reduction of global slope from 2005 to 2008 in agreement with in-situ measurements [J]. *Ocean Science Discussion*, 2009, 6: 31-56 .
- [9] Pfeffer W T, Harper J T, O’Neel S. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise [J]. *Science*, 2008, 9 (321) : 1340-1343.
- [10] Jason L, Tom H, Anne P, et al.UK climate projections science report: marine and coastal projections[R].Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2009.
- [11] Rahmstorf S. A new view of sea-level rise: Has the IPCC underestimated the risk of sea-level rise [J]. *Nature Reports Climate Change*, 2010, 4(4): 44-45.
- [12] Cazenave A, Nerem R S.Present-day sea-level change observations and causes [J]. *Rev Geophys*, 2004, 42: RG3001.
- [13] Cazenave A, Dominh K, Gennero M C, et al. Global mean sea level changes observed by TOPEX/Poseidon and ERS-1 [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(9-10): 1069-1075.
- [14] 林丽茹, 胡建宇.太平洋东南海与海面高度的季节及年际变化特征[J].*海洋科学*, 2005, 29(2): 37-42.
- [15] Chen J L, Wilson C R, Chambers D P, et al.Seasonal global water mass budget and mean sea level variations [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(19): 3555-3558.
- [16] Chambers D P, Mehlhaff C A, Urban T J, et al. Low-frequency variations in global mean sea level: 1950–2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C4): 3026-3035.
- [17] Nerem R S. Measuring global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data [J]. *Geophy Res*, 1995, 100(c12): 25135-25151.
- [18] Lombard A, Cazenave A, Traon P Y L, et al. Contribution of thermal expansion to present-day sea-level change revisited [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47: 1-16.
- [19] 容增瑞, 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): 128.
- [20] 张立凤, 吕庆平, 张永垂.北太平洋涡旋振荡研究进展[J].*地球科学进展*, 2011, 26(11): 1143- 1149.
- [21] 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.
- [22] Zuo Juncheng, Zhang Jianli, Du Ling, et al. Global sea level change and thermal contribution [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2009, 8(1): 1-8.
- [23] 杜凌.中国海典型海域潮波研究与全球海平面变化规律研究[D].青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [24] 吴涛, 康建成.全球海平面变化研究新进展[J].*地球科学进展*, 2006, 21(7): 730-737.
- [25] Mitchum G T. An improved calibration of satellite altimetric heights using tide gauge sea levels with adjustment for land motion[J]. *Mar Geod*, 2000 (23): 145-166.
- [26] Antonov J L. Steric sea level variations during 1957-1994: importance of salinity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002(107), C12, 8013.
- [27] 陈美香.北太平洋、东海黑潮及黑潮延伸体海平面变化机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [28] Douglas B C. Global sea rise: a redetermination [J]. *Surveys in Geophysics*, 2007, 18: 279-292.
- [29] Cazenave A, Lovel W. Contemporary sea level rise [J]. *Science*, 2010, 2: 145-173.
- [30] Vivier F, Kelly K A, Harisendy M. Causes of

- large-scale sea level variations in the Southern Ocean: analyses of sea level and a barotropic model [J]. *Geophys Res*, 2005, 110: C09014.
- [31] 曹越男, 左军成, 杜凌, 等. 南海海面高度季节变化规律及机制探讨[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(sup 2): 31-38.
- [32] Chen J L, Shum C K, Wilson C R, et al. Seasonal sea level change from Topex/Poseidon observation and thermal contribution[J]. *J Geodesy*, 2000, 73: 638-647.
- [33] Ishii M, Kimoto M, Sakamoto K, et al. Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses [J]. *Oceanography*, 2006, 62(2): 155-170.
- [34] Cheng Xuhua, Qi Yiyuan. Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57: 371-382.
- [35] Pattullo J, Munk W, Revelle R, et al. The seasonal oscillation in sea level[J]. *J Mar Res*, 1995, 14, 88-156.
- [36] Tabata S, Thomas B, Ramsden D. Annual and interannual variability of steric sea level along line in the northeast Pacific Ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 1986, 16: 1378-1398.
- [37] Antonov J I, Levitus S, Boyer T P. Thermosteric sea level rise, 1955-2003[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L12602.
- [38] Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, et al. Warming of the world ocean [J]. *Science*, 2000, 287: 2225-2229.
- [39] Warrick R A, Provost C L, Meier M, et al. Changes in sea level, in climate change 1995: the science of climate change[M]. New York, Cambridge Univ Press, 1996: 359-405.
- [40] 国家海洋局. 2010 年中国海平面公报[EB/OL]. [2011-04-22]. http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/2011-04/t20110426_846186.htm.
- [41] Han G Q, Huang W. Pacific Decadal Oscillation and sea level variability in the Bohai, Yellow and ECSs [J]. *Physical Oceanography*, 2008, 38: 2772-2783.
- [42] James P M S, Albert J K, Irina O, et al. Sinking deltas due to human activities [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 681-686.
- [43] Shi Yafeng, Xie Zhiren, Ji Zixiu, et al. Prediction and prevention of the impacts of sea level rise on the Yangtze River Delta and its adjacent areas[J]. *Science in China (series D)*, 2000, 43: 412-422.
- [44] 王国栋, 康建成, Han G Q, 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): 104-110.
- [45] 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): 47-50.
- [46] Arnold L, Gordon C F G. Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East sea[J]. *Deep-Sea Research I*, 2004, 51: 653-663.
- [47] 刘雪源, 刘玉光, 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.
- [48] 李坤平, 房宪英. 海平面变化对黑潮变异的响应[J]. *黄渤海海洋*, 1993, 11(4): 30-37.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)