

东中国海海平面高度的时空变化特征*

杨 洋 孙 群 杨 敏 吕雯瑾

(天津科技大学海洋与环境学院 天津 300457)

摘要 基于 AVISO 卫星高度计数据, 采用小波分析和 EOF 分析方法, 对 1993—2015 年东中国海海平面高度的时空变化进行分析, 结合海水温度比容效应和 ENSO 过程探讨了海平面高度变化成因。东中国海海平面高度具有明显的季节变化, 冬春季较低, 夏秋季较高, 且 SSH 极值滞后海水温度极值月份一个月出现。东中国海海平面高度整体为北低南高, 由于海区水深和水动力过程的影响, 不同季节 SSH 空间分布区域性强。在 23 年间, 海平面高度平均线性上升速率为 2.82mm/a, 具有 1a、2.2a 的特征变化周期。EOF 分析三个主要模态依次反映了海水温度比容效应的季节变化、水动力过程的季节变化和 ENSO 事件的年际变化对东中国海海平面高度的影响。

关键词 海平面高度; 东中国海; 季节变化; EOF 分析; ENSO

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyhz20170500129

随着全球气候变暖, 海平面在不断上升。根据 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)的第五次评估报告(Church *et al.*, 2013), 1993-2010 期间全球海平面上升速率达到 2.8—3.6mm/a, 明显大于 1901—2010 年的平均上升速率 1.5—1.9mm/a, 这表明近二十年全球海平面上升变化正在加剧。在全球海平面上升的背景下, 我国沿海海平面高度同样处于快速上升趋势。《2015 年中国海平面公报》显示, 中国沿海 1980—2015 年的海平面上升速率为 3.0mm/a, 2015 年的海平面为近三十年的第四高位(国家海洋局, 2016)。受到海平面升高的影响, 海水位的不断升高加剧了风暴潮、海岸侵蚀、海水入侵等海洋灾害性事件发生的可能性, 给沿海地区经济发展和人类生存环境造成威胁。通过开展海平面变化研究, 探究其主要影响因子, 进一步预测海平面的变化趋势可有效预防海洋灾害性事件的发生。因此, 开展海平面变化研究, 对于灾害评估具有十分重要的意义。

截止 20 世纪 90 年代末, 研究者们主要基于验潮站数据, 对中国近海海平面变化进行统计分析。吴中鼎等(2003)利用验潮站数据得出中国近海 50 年平均

的海平面变化速度为 (1.3 ± 0.25) mm/a。但由于验潮站主要位于沿岸海域, 且分布不均, 同时验潮站测量的海平面变化受陆地沉降与近海地形的严重影响, 无法全面反映气候变化(Nerem, 1995)。随着卫星高度计遥感观测的不断发展, 遥感测高数据以其高空间覆盖度、高测量精度和长时间序列等特点成为研究海平面变化的重要数据源(Fu *et al.*, 2000; Feng *et al.*, 2012)。李大伟等(2012)利用多源卫星数据对全球海域海平面变化趋势进行分析, 认为在 1993-2011 年间全球平均海平面以 3.12 ± 0.4 mm/a 的速率上升。王龙等(2014)针对东海海域海平面变化特征进行分析, 认为 1993—2011 年间东海海平面线性上升速率为 3.28mm/a。

除了具有趋势变化外, 东中国海海平面变化还表现出周期性和时空差异大等特性。詹金刚等(2008)利用卫星数据分析我国近海海平面变化, 结果表明 1992—2007 年周期信号在海平面变化中占主导地位, 半年周期信号在南海比较明显, 而黄海和东海则主要为高频信号。王慧等(2011)利用海洋观测站数据分析中国沿海冬季海平面的变化, 指出冬季海平面于 1980—2010 年存在显著的年际和年代际变化, 具有

* 国家重点研发计划项目, 2016YFA0601301 号; 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA11020305 号; 国家自然科学基金项目, 41376006 号。杨洋, 硕士研究生, E-mail: 18222398213@163.com

通讯作者: 孙 群, 硕士生导师, 副研究员, E-mail: sunqun@tust.edu.cn

收稿日期: 2017-05-15, 收修改稿日期: 2017-11-26

准 2—4a、7—9a 和 18.6a 周期。

导致海平面变化的主要因素包括两个方面 (Cazenave *et al.*, 2008): 一是海水质量导致的变化, 如冰的溶化、降水、蒸发、径流等水体质量交换; 二是由海水密度变化, 可称为因温度或盐度变化引起的比容效应 (Steric effect)。郭金运等 (2015) 研究了东中国海 SSH 季节变化和空间分布, 认为与季风和海水温度引起的海水体积变化和热比容效应有关。

本文基于卫星高度计数据, 分析东中国海海平面的时空变化特征和长期变化趋势, 探讨了不同海域海平面变化的影响因素及相关性。

1 数据与对比

1.1 数据来源

本文采用的卫星高度数据为法国国家空间研究中心 (CNES) AVISO (Archiving Validation and International of Satellites Oceanographic) 提供的网格化绝对动力高度地形 ADT (Absolute Dynamic Topography) 数据 (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>)。该数据为 T/P、Jason-1、ERS 和 ENVISAT 等卫星的多源测高融合数据。AVISO 提供了两种数据, 一种是海平面异常 SLA (Sea Level Anomaly) 数据; 第二种是 ADT 数据, 它等于 SLA 与平均动力地形 MDT (Mean Dynamic Topography) 之和, 其中 MDT 是平均海表面高度与大地水准面之差, 它代表大尺度平均海流引起的海表面高度变化。由于同一地点的 ADT 与 SLA 仅差一个常值 MDT, 在进行长期趋势估计时两类数据是等效的。

1.2 数据校验与对比

文中采用网格化 ADT 数据对东中国海海平面高度 SSH (Sea Surface Height) 进行分析, 时间长度为 1993 年 1 月至 2015 年 12 月, 空间分辨率为 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$, 时间分辨率为 1 天, 海域范围 $23^\circ\text{—}41^\circ\text{N}$, $117^\circ\text{—}130^\circ\text{E}$ 。

选取两个验潮站数据与 AVISO 卫星高度计的 SSH 数据进行对比, 遥感数据格点与验潮站经纬度相同。在渤海和东海各取一个台站, 分别为大连验潮站和坎门验潮站, SSH 数据时间范围是 2013—2015 年, 计算得到各月距平变化 (图 1)。通过比较得知, 大连验潮站 SSH 的季节变化明显, 最低值出现在冬季 (12、1、2 月), 夏季 (7、8、9 月) SSH 最高, 虽然与卫星高度计 SSH 数据变化较为一致, 但后者在冬、夏两季的结果偏差较大。坎门验潮站的 SSH 变化要复杂, 最高值出现在 9—11 月, 最低值主要出现在 1—3 月份, 但

变化较大。整体而言, 卫星高度计数据与两个验潮站数据对应较好, 利用该数据分析东中国海 SSH 的时空变化可信度较高。

2 结果与讨论

2.1 东中国海 SSH 空间分布与季节变化特征

对 1993—2015 共 23 年的东中国海海平面高度月均数据进行气候态平均, 得到 SSH 多年平均的空间分布, 并进行了标准差分析 (图 2)。图 2a 表明东中国海 SSH 具有显著的区域性差异, 从北向南递增, 以 70cm 等值线为界, 渤海、黄海和东海北部海域 SSH 较低, 小于 70cm。渤海大部分海域, 黄海中部和山东半岛南部海域 SSH 最低, 低于 60cm。SSH 最低值为 56.8cm, 位于渤海北部秦皇岛附近海域。东海大部分海域 SSH 高于 70cm, 最大值出现在台湾海峡澎湖列岛以西海域, 高达 107.0cm, 整个研究海域南北 SSH 高度差为 50.2cm。东海黑潮主轴路径几乎与 SSH 的 100cm 等值线一致, 往东南方向, SSH 迅速升高, 琉球群岛以东海域 SSH 高达 140cm。且在东海黑潮流经海域 SSH 等值线比较密集, 表明垂直于黑潮流轴方向, 海平面高度的变化梯度较大, 形成驱动太平洋西边界强地转流的水平压强梯度力。

图 2b 是东中国海 SSH 季节变化的标准差分布。SSH 标准差高值区主要分布在渤海、黄、东海的近岸浅水区和台湾海峡西侧海域, 表明在这些海域海平面的季节差异较大, 具有较明显的季节变化特征。低值区主要分布在黄海中部、台湾东北部和台湾海峡东侧海域, 这些海域的季节差异相对要小。

对研究海域 1993—2015 年的 SSH 进行逐月平均, 得到气候态月均分布, 取 1、4、7、10 月分别代表冬季、春季、夏季和秋季。为比较不同海区 SSH 变化, 定义渤海范围为 ($37^\circ\text{—}41^\circ\text{N}$, $117^\circ\text{—}122^\circ\text{E}$), 黄海范围为 ($37^\circ\text{—}39^\circ\text{N}$, $122^\circ\text{—}126^\circ\text{E}$) 和 ($32^\circ\text{—}37^\circ\text{N}$, $117^\circ\text{—}126^\circ\text{E}$), 东海范围为 ($23^\circ\text{—}32^\circ\text{N}$, $117^\circ\text{—}126^\circ\text{E}$)。图 3 和图 4 分别给出东中国海 SSH 在不同季节的空间分布和不同海区 SSH 的季节变化。

冬季, 整个东中国海 SSH 呈现北低南高的分布特征, 最低海域在渤海北部, 1 月平均 SSH 为 46.7cm (图 4), 为全年最低; 最高海域位于台湾海峡南端, 高达 110cm。但 1 月并不是 SSH 最低的月份, 海平面仍呈下降变化, 70cm 等值线继续南移, 到春季 4 月份时, 整个海区 SSH 呈最低分布, 渤海、黄海和东海中北部大部分海域 SSH 都小于 70cm, 该等值线移至长江口以南。

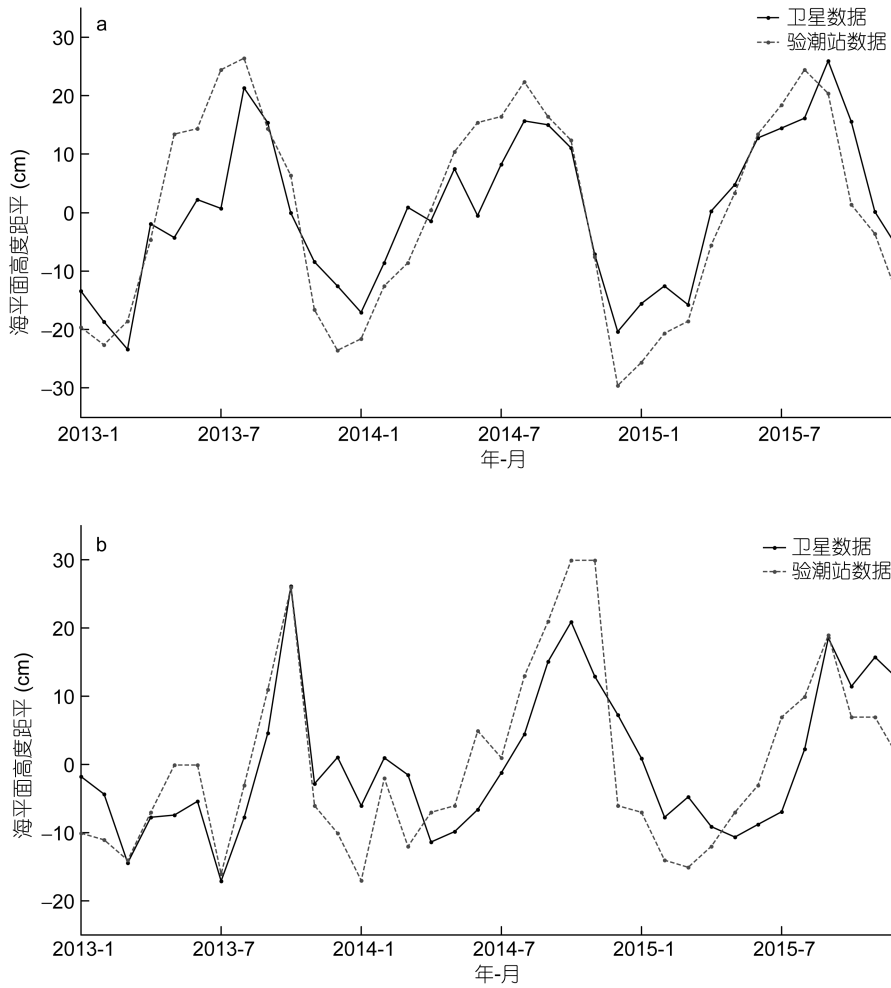


图 1 2013—2015 年验潮站(虚线)和卫星高度计(实线)的 SSH 月均数据比较

Fig.1 Comparison in monthly mean SSH between tide gauge stations (dashed line) and AVISO data (solid line) during 2013—2015 at Dalian (a) and Kanmen (b) Stations
注: a: 大连; b: 坎门

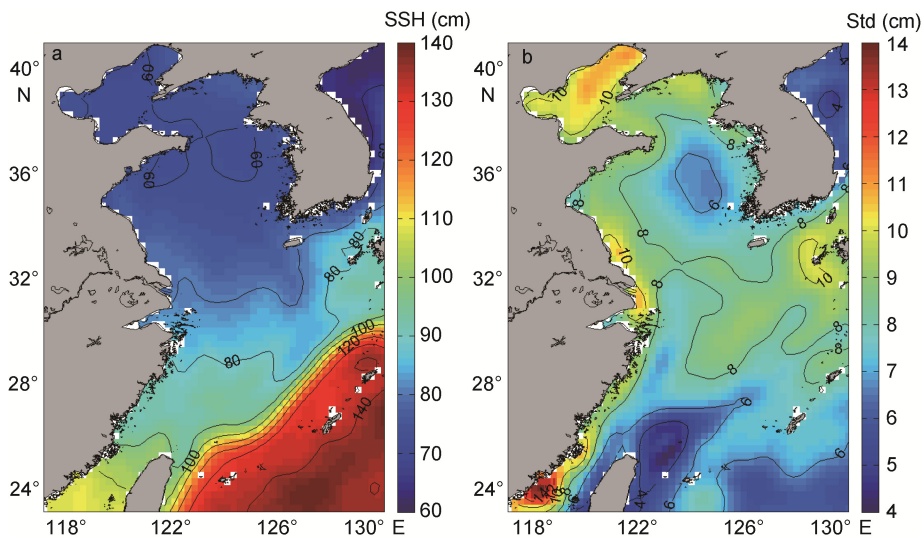


图 2 多年 SSH 高度平均空间分布(a)及其标准差分布(b)

Fig.2 The mean (a) and standard deviation (b) of SSH during 1993—2015 in the East China Sea (ECS)

夏季, 太阳辐射加强, 海水温度不断升高, 海水膨胀, 整个海域海平面明显升高, 渤海和黄海近岸浅水区升温明显, 海平面高度增加也相应较大。对应黄海夏季中北部的冷水团区, 海平面出现低值区, 此外, 由于受沿岸上升流的影响, 闽浙沿岸海域海平面高度在 7 月也出现低值分布。但 7 月也不是 SSH 最高的月份, 海平面继续呈上升变化, 70cm 等值线在秋季 10 月份时已向北扩展到黄海中部, 东海大部分海域 SSH 均高于 80cm。由于北上台湾暖流的影响, 秋季(10 月)时 SSH 的 100cm 等值线出现台湾海峡北部和闽浙沿岸, 90cm 等值线则沿垂直于岸线方向向北到达浙江外海, 同时夏季长江淡水的大量输入也导致苏北沿岸海域 SSH 的增加, 海平面高度超过 80cm。

东中国海 SSH 有显著的季节变化(图 4)。整个研究海域, SSH 最小值为 67.5cm, 出现在 3 月, 9 月则最高, 两极值月份高度差为 17.6cm。虽然一年中海洋上最低和最高气温分别出现在 2 月和 8 月, 但由于海水的比热容比大气大三倍量级, 海水降温 and 升温均出现一个月的时间滞后, 相应地整个东中国海 SSH 的变化也滞后一个月达到极值。但渤海、黄海和东海三个海区的 SSH 分布除受季节温度变化影响, 还受到海区水深和一些海洋动力过程的影响。

由于渤海水深较浅, 冬季(1 月)气温最低时, 在海上强劲的风应力搅拌混合作用下, 海水温度可从表到底快速地混合均匀, 水温也降到最低, 所以 1 月渤海 SSH 最低。考虑黄海冷水团的影响, 黄海最高

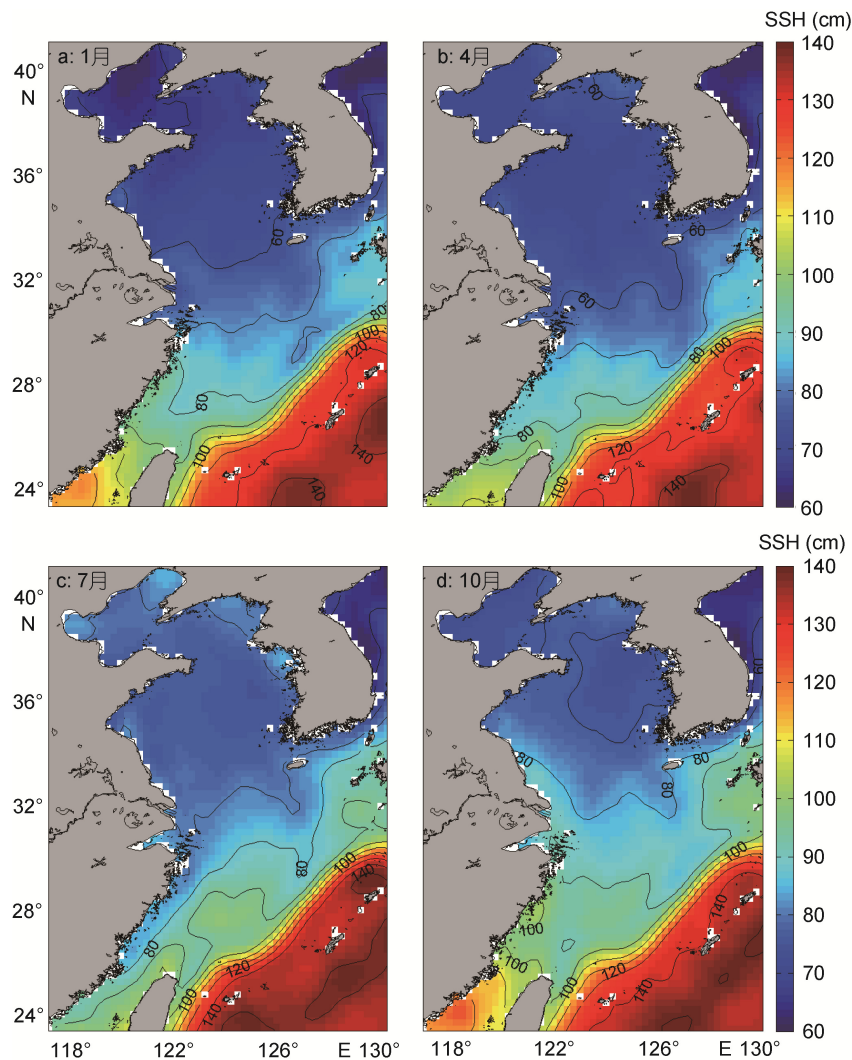


图 3 研究海域 SSH 的季节变化

Fig.3 Seasonal distributions of SSH in the study areas. (a) Winter, (b) Spring, (c) Summer, (d) Autumn
注: a: 冬季; b: 春季; c: 夏季; d: 秋季

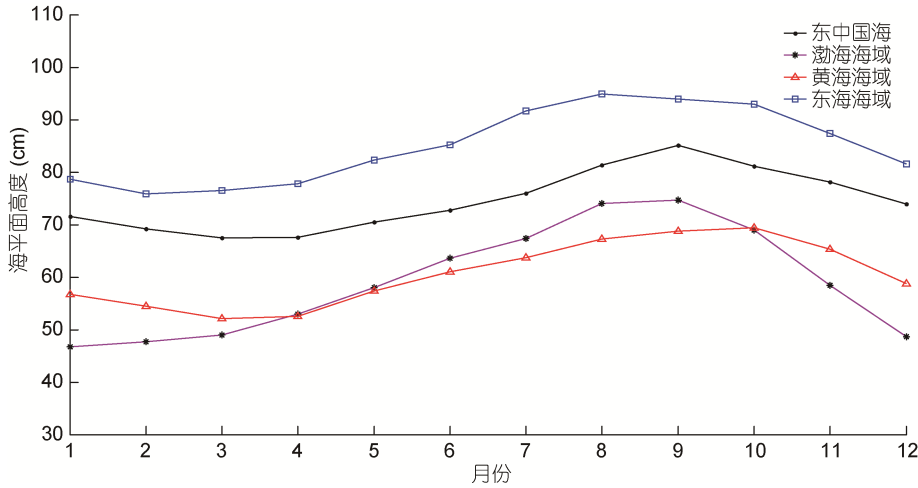


图 4 不同海区 SSH 的季节变化

Fig.4 Seasonal variations of monthly mean SSH

表 1 不同海区 SSH 的极值
Tab.1 Peak values of SSH in the different areas

SSH 海域	渤海	黄海	东海	整个海域
月份	1	3	2	3
最小值(cm)	46.7	52.1	75.8	67.5
月份	9	10	8	9
最大值(cm)	74.7	69.5	94.9	85.1

SSH 分布更是推迟到 10 月份冷水团消退之后。东海海面高度除了受气温的季节变化影响外,台湾暖流强弱的季节变化对东海 SSH 的分布也有重要影响。

根据图 4 可知,冬季(1 月)是东中国海气候态月平均 SSH 南北差值最大的季节,东海和渤海高达 31.9cm; 9 月的南北差异最小,减小到 19.2cm。渤海是海面高度季节差异最大的海域,最大年变化为 28.0cm。黄海则是 SSH 季节差异最小的海域,最低和最高值分别出现在 3 月和 10 月,年较差只有 16.9cm,考虑主要是夏季黄海冷水团的存在阻碍了海面高度的升高。由图 2b 中 SSH 的标准差分布也可知,渤海是标准差较大的分布海域,黄海中部 SSH 的标准差则较小。综上所述,东中国海面高度具有季节变化特征,和显著的区域分布特点。

2.2 东中国海 SSH 年际变化特征

对 SSH 进行区域平均,图 5a 给出 1993—2015 年东中国海 SSH 的时间序列。东中国海面高度变化有显著的年周期变化,冬春季降低到低值,夏秋季达到高值。在 1995—1998 年,2013—2015 年东中国海 SSH 年变化幅度减小,而 1999—2001 年,2010—2012

年东中国海 SSH 的年变化幅度明显增大,海面高度的这种年振幅变化规律与 ENSO 过程密切相关(王国栋等, 2011; 王慧等, 2014)。

根据 NOAA 气候预报中心(Climatic Prediction Center, CPC)对 Nino 3.4 区 ENSO 过程的 ONI(Ocean Nino Index)统计分析,1997/1998 年发生强厄尔尼诺事件,1997 年 12 月 ONI 达到 2.3,东中国海 SSH 年变化幅度明显减小,且在 1996 年 3 月 SSH 提前约 1 年出现显著减小,同样对于 2015/2016 的强厄尔尼诺事件,2015 年 SSH 年变化幅度也相应减小,类似地在 2013 年 10 月 SSH 也提前约 1 年(2014 年 10 月该厄尔尼诺事件开始)出现减幅变化(图 5a)。1998 年 6 月厄尔尼诺事件结束后,于 1998 年 8 月转变为强拉尼娜事件,且该事件持续时间较长,直到 2001 年 1 月才结束,此时东中国海 SSH 年变化幅度显著增大,且于 2001 年 9 月达到一极大值,比拉尼娜事件结束滞后 8 个月。从 2010 年 8 月至 2011 年 3 月同样出现一次中等强度拉尼娜事件,2010 年 12 月 ONI 达到 -1.4,东中国海 SSH 年幅度在 2011 年有明显增大,且于 2011 年 9 月达到一极大值,比拉尼娜事件结束时间滞后 6 个月。可见东中国海 SSH 的年变化振幅与 ENSO 事件呈负相关,厄尔尼诺事件期间 SSH 年变化幅度减小,且减小的变化提前约 1 年出现,相反,拉尼娜事件期间 SSH 年幅度变化增大,且增加的变化会持续并滞后 6 个月或以上。

图 5a 还表明东中国海面高度存在明显的升高趋势,通过对原始日平均 SSH 数据移除年周期和半年周期信号,并进行 30 天和 60 天滤波分析,

最后对所得数据进行线性拟合(图 5b)。在这 23 年中, 东中国海平均海平面呈明显的线性上升趋势, 上升速率为 2.82mm/a。根据 AVISO 数据统计

结果, 同时期全球平均海平面的线性上升速率为 3.21mm/a, 东中国海的 SSH 升高趋势略小于全球变化。

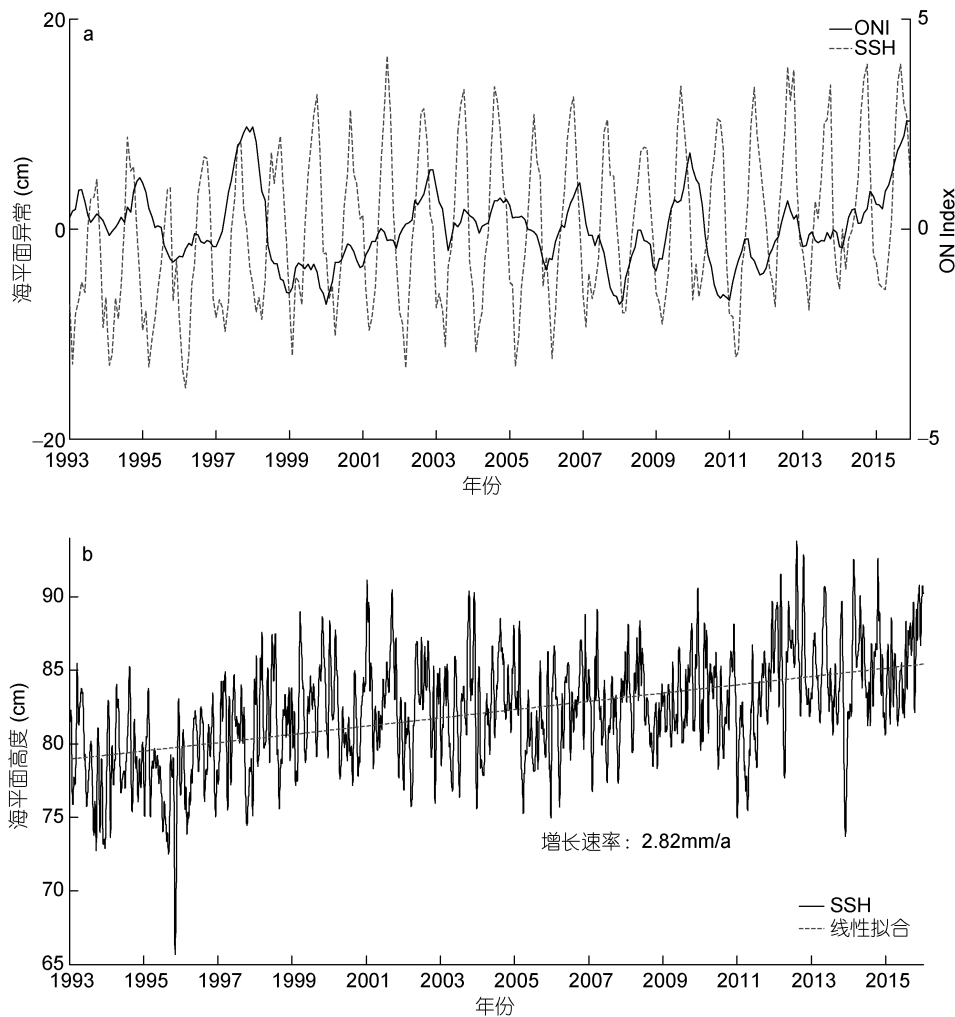


图 5 1993—2015 年东中国海 SSH 的时间序列

Fig.5 The time series of spatial mean (a) and the rising trend of SSH (b) in 1993—2015 in the ECS

注: a: 区域平均; b: 趋势分析

采用小波分析方法, 对东中国海海平面变化的周期特征进行了分析。先对东中国海 SSH 异常去除趋势项后进行 1—10a 带通滤波处理, 再将滤波后获得的年际变化分量进行小波分析。图 6a 中黑线所包含的区域超过了 95% 信度检验, 其结果是可信的, 可信数据显示东中国海 SSH 异常在 1.5—3a 的年际振荡最为明显, 尤其体现在 2009—2013 年间。图 6b 为整个时间序列的小波谱分布图, 横坐标为方差, 纵坐标为周期, 与图 6a 中的纵轴相同, 结果显示 1.5—3a 的振荡信号超过了 95% 信度, 表明 SSH 具有显著年际变化特征, 其谱峰值对应的年际变化周期为 2.2a。

2.3 东中国海 SSH 的 EOF 模态分析

对东中国海 23 年的 SSH 气候态距平数据去除趋势项后进行经验正交函数分析(Empirical orthogonal function, EOF), 得到 SSH 距平的空间模态分布及其对应的时间变化系数(图 7)。EOF 前三个主要模态的累计贡献率达 77.03%, 前三模态分别记为 EOF1, EOF2, EOF3, 它们的方差贡献率依次为: 44.95%、18.06% 和 14.02%。

图 7a 是 SSH 距平的第一模态, 对应时间系数在图 7d 中。EOF1 的方差贡献率为 44.95%, 解释了 SSH 偏差变化近一半的信息。从其空间分布可知渤海、黄

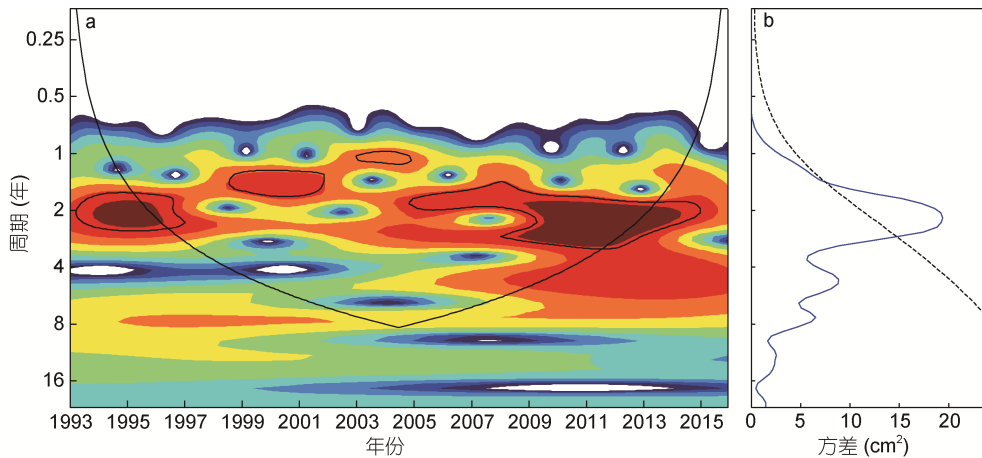


图 6 1993—2015 年东中国海 SSH 数据小波分析

Fig.6 Wavelet analysis of SSH of 1993—2015 in the ECS

海北部、山东半岛沿岸和苏北浅滩海域、东海中北部 SSH 偏差变化较大, 黄海中部、台湾东北部及台湾海峡的 SSH 偏差变化较小。从时间变化曲线可知, 海平面年周期变化显著, 季节空间分布模态占主导地位。整个研究海域都呈正位相分布, 表明东中国海 SSH 的升高或降低都是同步的。

渤海和苏北浅滩海域由于水深较浅, 对冬季强风搅拌混合作用及夏季净热输入的响应较迅速, SSH 的年变化幅度较大, 表现为 EOF1 中的高值区。黄海中部受夏季黄海冷水团的影响, 抑制了夏季海平面的升高, 表现为 EOF1 中的低值区, 而台湾海峡虽然 SSH 较大(图 2), 但其年幅度变化较小, 同在 EOF1 中为低值区; 台湾岛东北部存在冷涡, 决定了该海域的 SSH 在 EOF1 中的分布。该模态主要反映了海水温度对海平面季节变化有较大贡献, 因为该模态下高值区域均位于海水温度季节变化较为显著的海域, 而低值区则为海水温度季节变化较小的海域(武扬, 2013)。

图 7b 是 SSH 距平的第二模态, 其空间分布反映了由于风应力及长江径流等局地过程导致的 SSH 偏差变化。除苏北浅滩、闽浙沿岸海域和台湾东北部为负值外, 其他海域均为正值, 这种分布正是反映了夏秋季节这三个海区与其他海域 SSH 偏差变化的反位相关系。时间序列显示夏季为负值, 表明闽浙沿岸、苏北浅滩和长江口附近海域 SSH 在夏季表现为正偏差, 由于台湾暖流北上势力与长江径流在夏季较强(张志欣, 2014)同时东南风盛行(毛园等, 2002), 由此引起的海水堆积导致该海区 SSH 上升。渤海北部和黑潮主流区域 SSH 表现为正位相, 表明在夏秋季节

这两个海区 SSH 呈下降趋势。

图 7c 是 SSH 距平的第三模态, 其空间分布反映东中国海 SSH 与西北太平洋 SSH 偏差变化之间的反位相关系, 整个东中国海 SSH 基本呈负偏差, 黑潮东南大洋区 SSH 出现一正值中心。对 EOF3 时间系数进行谱分析, 得到其年际变化周期为 2.9a 和 4.3a。由图 5a 可知, 1993—2015 这 23 年间, 共发生 7 次 El-Nino 事件(平均周期 3.3a), 与东中国海海平面异常的 EOF3 模态时间序列主周期相近。此外, 自 2000 年以后, ENSO 的主周期明显缩短(McPhaden, 2012; Hu *et al.*, 2017), SSH 年际变化的振荡周期主要集中在 1—3a, 因此可认为 EOF3 的空间分布反映了 SSH 年际变化特征, 同时还表明东中国海 SSH 年际变化受 ENSO 事件的调制(Zuo *et al.*, 2012)。

3 结论

本文采用 1993—2015 年的 AVISO 卫星高度数据, 分析了东中国海海平面高度的时空变化特征, 并探讨了不同海洋水文动力过程和 ENSO 过程对东中国海 SSH 的影响。

东中国海海平面高度具有显著的季节变化, 冬、春季为海平面低值季节, 夏、秋季是高值季节, 由于海水比大气的比热容要大, 导致一年中 SSH 的最小值和最大值相对气温的极值月份滞后一个月。虽然东中海 SSH 整体呈现从北向南逐渐升高的分布特点, 但由于海区水深和水文过程(如黄海冷水团、长江径流输入、闽浙沿岸流、台湾暖流等)的影响, 导致东中国海 SSH 在不同季节呈现出明显的区域性特点。

东中国海 SSH 在 23 年间的线性上升速率为

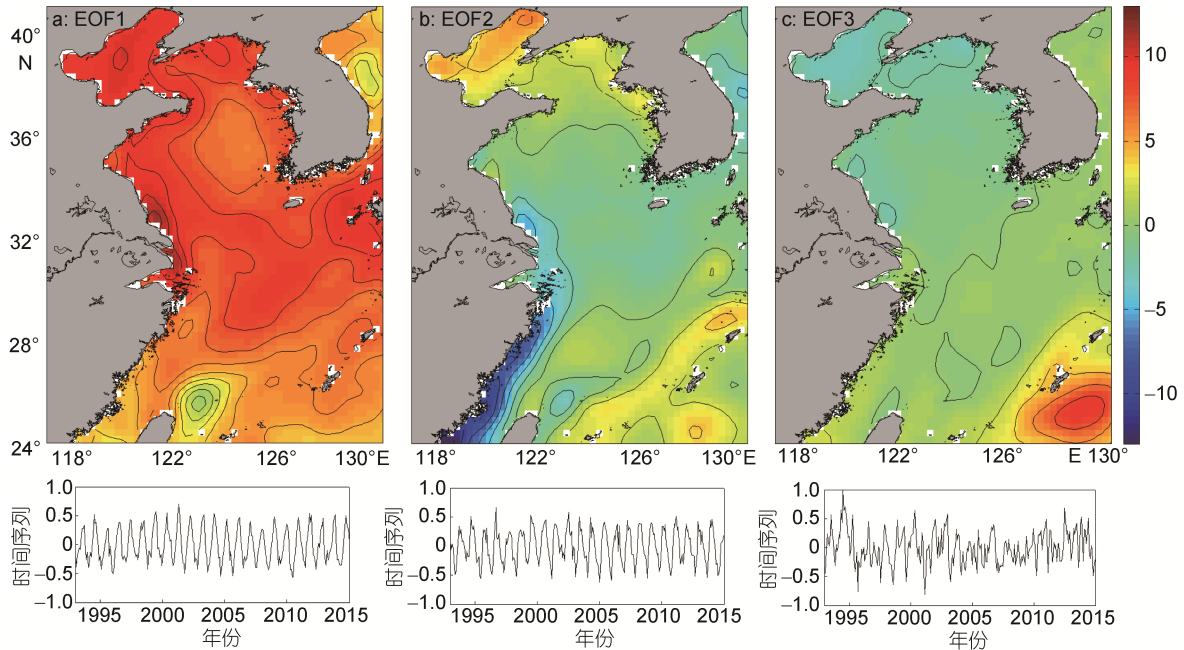


图7 东中国海 SSH 距平的 EOF 分析(空间分布中等值线间隔为 2cm)

Fig.7 EOF modes for SSH in the ECS. (a) EOF1, (b) EOF2 and (c) EOF3. The contour interval is 2cm

2.82mm/a, 通过小波分析, 表明存在多时间尺度的周期变化, 特征周期主要包括 1a、2.2a, 其中年变化周期特征最为显著。

基于 EOF 分析, 东中国海海平面高度距平分为三个主要模态。EOF 第一模态的方差贡献率为 44.95%, 主要解释了年变化周期下的 SSH 偏差分布, 且整个研究海域都为正位相, 表明 SSH 的升高或降低是同步的, 反映了季节变化下海水温度比容效应对 SSH 分布的影响。EOF 第二模态的方差贡献率为 18.06%, 主要解释了半年周期内 SSH 的偏差分布, 反映了局地季节内水动力过程长江径流、闽浙沿岸流和季风的影响。EOF 第三模态的方差贡献率为 14.02%, 主要解释了年际周期内 SSH 的偏差分布, 表明东中国海 SSH 受 ENSO 过程调制, 年际变化主周期为 2.9a 和 4.3a。关于两者之间的影响机制, 希望通过进一步研究进行深入探讨。

参 考 文 献

毛 园, 沙文钰, 2002. 海面风场对环台湾岛海域温跃层的影响. 海洋预报, 19(3): 33—43
 王 龙, 王 晶, 杨俊钢, 2014. 东海海平面变化的综合分析. 海洋学报, 36(1): 28—37
 王 慧, 刘克修, 张 琪等, 2014. 中国近海海平面变化与 ENSO 的关系. 海洋学报, 36(9): 65—74
 王 慧, 范文静, 张建立等, 2011. 中国沿海近 31 年冬季海平面变化特征. 海洋通报, 30(6): 637—643

王国栋, 康建成, 刘 超等, 2011. 中国东海海平面变化多尺度周期分析与预测. 地球科学进展, 26(6): 678—684
 吴中鼎, 李占桥, 赵明才, 2003. 中国近海近 50 年海平面变化速度及预测. 海洋测绘, 23(2): 17—19
 张志欣, 2014. 中国近海沿岸流及毗邻流系的观测与分析研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 66—68
 李大炜, 李建成, 金涛勇等, 2012. 利用多代卫星测高资料监测 1993-2011 年全球海平面变化. 武汉大学学报(信息科学版), 37(12): 1421—1424
 国家海洋局, 2016. 2015 年中国海平面公报. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmbg/201603/t20160324_50508.html
 武 扬, 程国胜, 韩桂军等, 2013. 基于 CORA 资料的中国海海面温度季节和年际变化特征分析. 海洋学报, 35(1): 44—54
 郭金运, 王建波, 胡志博等, 2015. 由 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1/2 探测的 1993—2012 中国海海平面时空变化. 地球物理学报, 58(9): 3103—3120
 詹金刚, 王 勇, 许厚泽等, 2008. 我国近海 1992—2006 年海平面变化的小波分析. 测绘学报, 37(4): 438—443
 Cazenave A, Lombard A, Llovel W, 2008. Present-day sea level rise: A synthesis. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(11): 761—770
 Church J A, Clark P U, Cazenave A *et al*, 2013. Sea level change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, *et al*, eds. *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, 641—693
 Feng W, Zhong M, Xu H Z, 2012. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data. *Science China Earth Sciences*,

- 55(10): 1696—1701
- Fu L L, Cazenave A, 2000. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. San Diego: Academic Press, 69
- Hu Z Z, Kumar A, Huang B *et al*, 2017. Interdecadal variations of ENSO around 1999/2000. *Journal of Meteorological Research*, 31(1): 73—81
- Mcphaden M J, 2012. A 21st century shift in the relationship between ENSO SST and warm water volume anomalies. *Geophysical Research Letters*, 39(9): L09706
- Nerem R S, 1995. Measuring global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C12): 25135—25151
- Zuo J C, He Q Q, Chen C L *et al*, 2012. Sea level variability in East China Sea and its response to ENSO. *Water Science and Engineering*, 5(2): 164—174

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF SEA LEVEL OF THE EAST CHINA SEA

YANG Yang, SUN Qun, YANG Min, LV Wen-Jin
(*Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China*)

Abstract Based on AVISO satellite altitude data, temporal and spatial patterns of the sea surface height (SSH) in the East China Sea (ECS) from 1993 to 2015 were analyzed using wavelet analysis and EOF methods. The variations of SSH related to the thermosteric effect and the ENSO were discussed. The SSH of the ECS had a significant seasonal variation, lower in winter-spring and higher in summer-autumn. The peak values of SSH lagged behind that of the sea temperature for a month. In overall, the SSH in the northern part is lower than that in the southern part of the ECS. In addition, the SSH showed obvious regional and seasonal features due to the effect of depth and ocean dynamical processes. The annual mean growth rate of SSH in the ECS from 1992 to 2015 is 2.82mm/a. Wavelet analysis results show a cycles of 1a and 2.2a in sealevel change. The first three modes of EOF (empirical orthogonal function) show that the seasonal variation of thermosteric effect and dynamical processes, and the interannual variation of ENSO had important impacts on the variations of SSH in the ECS.

Key words sea surface height; East China Sea; seasonal variation; EOF analysis; ENSO