

盛芳, 智海, 刘海龙, 等. 2016. 中国近海海平面变化趋势的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 346–356. Sheng Fang, Zhi Hai, Liu Hailong, et al. 2016. Analysis and comparison of the sea level rising trend in the marginal seas around China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 346–356, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15271.

中国近海海平面变化趋势的对比分析

盛芳¹ 智海¹ 刘海龙² 林鹏飞²

¹ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 本文分析了近 40 年的中国近海验潮站资料海表面高度的线性变化趋势, 并与卫星高度计资料进行了对比。通过对验潮站资料的分析发现, 中国海域无论是近 40 年 (1970~2013 年)、还是近 20 年 (1993~2013 年) 海平面均显著上升。各海区近 20 年的海平面上升有加速的趋势, 且各时段上升速率大于全球平均海平面上升率。但是, 受到海平面的年际和年代际变化的影响, 近 10 年海平面上升趋势放缓。同时, 本文也分析了不同季节海平面变化的趋势, 北部海域秋季最大, 冬季最小; 南海海域春季最大, 秋季最小。通过 AVISO 资料和验潮站资料的对比可以发现, AVISO 资料在描述近 20 年海平面变化的线性趋势上与验潮站资料接近, 较大的差异主要是由验潮站地表发生升降引起的。同时, 通过对比也发现了用验潮站资料估算海域平均的海平面高度变化会有一些的误差, 在黄海、渤海、东海海域验潮站估计的数值偏高, 而在南海海域则偏低。

关键词 中国近海 海平面上升 线性趋势

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0346-11

中图分类号 P07

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15271

Analysis and Comparison of the Sea Level Rising Trend in the Marginal Seas around China

SHENG Fang¹, ZHI Hai¹, LIU Hailong², and LIN Pengfei²

¹ College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The linear trend in sea level rise (SLR) in recent 40 years in the marginal seas around China is analyzed by using the tide gauge (TG) data. Results are compared with satellite remote sensing data. Results from the TG data indicate that the sea level height around the China has been significantly rising in both the recent 40 years and the recent 20 years. The trends in SLR in all the study regions have accelerated in the recent 20 years. Furthermore, the speed of SLR is greater than the global averaged SLR in all the study periods. However, the trend in SLR during the recent 10 years has slowed down due to the interannual and interdecadal variability in sea level height. In addition, the trends in SLR in different seasons are also investigated. A comparison between the AVISO data and TG data indicates that the linear trend

收稿日期 2015-12-09; 网络预出版日期 2016-02-24

作者简介 盛芳, 女, 1989 年出生, 从事海洋海平面变化研究。E-mail: 793660760@qq.com

通讯作者 刘海龙, E-mail: lhl@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 2013CB956204, 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) XDA11010304, 国家自然科学基金 41275084、41075059

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB956204), Chinese Academy of Sciences Strategic Priority Program (Grant XDA11010304), National Natural Science Foundation of China (Grants 41275084 and 41075059)

during the recent 20 years can be well reproduced by AVISO data. Large differences are mainly caused by the rise of the land surface. Meanwhile, it is also found that there are biases if we use samples such as data collected at tidal gauge stations to estimate the trend of the mean SLR, which is overestimated in the Bo–Yellow–East Sea (BYE) and underestimated in the South China Sea (SCS).

Keywords Marginal seas around China, Sea level rise, Linear trend

1 引言

在全球变暖的背景下，热膨胀和冰盖融化等效应导致的全球海平面上升，直接影响到岛屿和沿海地区人类活动。我国沿海地区人口密集、经济发达，海平面上升对中国沿海地区有着极为重要的影响。由于受到海洋动力作用、海水密度变化以及质量输入等过程的影响，区域海平面上升可能与全球海平面上升不同，研究发现中国近十几年来海平面上升速率明显高于全球平均水平，因此有必要对中国近海的海平面变化特征进行更深入的研究。

早期的中国近海海平面分析主要使用验潮站资料（左军成等，1994；Yanag and Akaki, 1994），验潮站观测的是相对于陆地的海平面高度，即相对海平面高度。最近也有类似的分析，如吴涛等（2007）利用验潮站资料分析得到中国海域海平面变化时空差异明显，相对海平面上升率较快的区域是黄河三角洲、长江三角洲、珠江三角洲。Chen et al.(2008)对所选 50 个验潮站资料进行对比分析发现，整个中国海域 1960~2008 年海平面上升率为 2.3 mm/a，比较大的海平面上升率出现在岛屿或者大的河流入海口，主要是由于河口注入淡水调整和地壳运动导致的。国家海洋信息中心依据验潮站的资料每年定期公布《中国海平面公报》（<http://www.coi.gov.cn/gongbao/haipingmian/>[2015-03-26]）。2011 年报告中近 50 年中国沿海海平面上升 2.5 mm/a，2015 年报告中 1980~2014 年中国沿海海平面平均上升速率为 3.0 mm/a。

随着卫星资料的发展，近年来的研究多使用卫星高度计资料（Wang et al., 2004; Fang et al., 2006; Zhang et al., 2012; 王龙, 2013）。虽然卫星高度计资料测量的是相对于参考椭球面的高度，但中国近海海平面依然体现出来显著的升高趋势，上升的速率也与验潮站得出的结果接近。如 Wang et al. (2004) 使用 TOPEX、ERS-2 等卫星资料观测的 1993~1998 年中国海域海平面资料，发现整个中国海域海平面上升趋势为 2~3 mm/a。Fang et al. (2006) 对南海月

平均海平面变化分析发现，1980~2005 年南海海平面变化趋势为 6.7 ± 2.7 mm/a。而两种资料的差异则主要体现了验潮站地标沉降的速率，如胡志博等（2014）利用卫星资料和验潮站资料比对分析监测香港海平面变化，发现香港验潮站所处的地面存在 4.5 mm/a 的沉降。

比较发现，虽然通过两种资料的分析对中国近海的海平面的变化趋势已经有较清晰的结论，但结果还存在一定的不确定性，比如对于各季节差异研究较少、不同计算趋势的方法对结果的影响等。此外，由于验潮站的空间采样较稀疏，用验潮站的平均来表征整个海域的状态也存在一定的问题。有鉴于此，本文拟采用验潮站资料和卫星资料，对比分析中国沿海海平面高度变化趋势，并对不同季节的变化趋势进行进一步分析，以明确中国近海海平面上升的基本特征。文中还分析了不同计算方案对趋势计算的影响，以及利用卫星资料检验了稀疏的空间采样点的代表性问题。

2 资料与方法

2.1 数据组成及来源

本文在海平面长期监测网站 PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level)收集了中国海域 41 个验潮站的验潮记录（<http://www.psmsl.org/> [2014-03-28]），考虑到中国海域南北跨度较大，将其分为北边的渤海—黄海—东海（BYE）和中国南海（SCS）两部分，二者以厦门为界，其中 BYE 海域有 22 个验潮站，SCS 海域有 19 个验潮站（图 1）。验潮站只能依托于陆地，建在大陆或海岛上，因此资料的空间采样具有较大的局限性，比如 BYE 海域内区就没有观测点，南海内区也只有西沙和南沙两个站点。还有一点需要说明，本文虽然使用了 41 个站点，但有些站点在研究时间段内并不是都有观测值，因此研究时段两个海域统一取 1970~2013 年进行研究。此外，为了和卫星资料对比，也将 1993~2013 年作为研究对比时段。从图 2 可以看到，1970 年以前 BYE 海域只有 10 个站点，SCS 海域只有 3

到，在本文中第二种方法计算出来的趋势较大，但也都都在第一种方法的不确定范围内，因此可以认为二者基本相当。

3 验潮站资料分析

由于 BYE、SCS 海域的地理位置、气候环境条件不同，导致两者区域平均海平面变化趋势各不相同，因此我们将两个区域分开研究。验潮站资料 1970 年之前观测站点较少，且在下面研究需要与 AVISO 资料的海平面变化趋势进行比对，因此我们利用区域内所有验潮站海平面变化的集合平均进行线性回归计算了两个时间段（即 1970~2013 年和 1993~2013 年）内的平均海平面变化趋势，具体数值在表 1 中记为 TIDE I，所有趋势均通过了 90% 的 MK 检验。

图 2a 和 2b 分别是 BYE 海域的 22 个站点和 SCS 海域的 19 个站点海平面高度变化，结合图 2 和表 1 可知，1970~2013 年 BYE 海域上升趋势达到 2.5 ± 0.8 mm/a，SCS 海域上升趋势为 2.4 ± 1.0 mm/a。1993~2013 年期间，BYE 海域上升趋势达到 3.2 ± 1.2 mm/a，SCS 海域上升趋势达到 3.9 ± 2.2 mm/a。无论是 BYE 还是 SCS 海域 1970~2013 年、1993~2013 年区域平均海平面变化趋势均明显上升。比较两个海域，SCS 海域的上升趋势要强于 BYE 海域。比较两个时段，1993~2013 年变化的趋势要显著大于 1970~2013 年的趋势，也就是说近 20 年，中国近海海平面上升明显在加剧。《中国

海平面公报》（[http://www.coi.gov.cn/gongbao/haipingmian/\[2015-03-26\]](http://www.coi.gov.cn/gongbao/haipingmian/[2015-03-26])）公布的结果也是如此：2011 年报告中近 50 年中国沿海海平面上升 2.5 mm/a，2015 年报告中 1980~2014 年中国沿海海平面平均上升速率为 3.0 mm/a。

对比 Church and White (2011) 计算的 1970~2013 年和 1993~2013 年全球平均海平面变化趋势发现，中国海域两个区域的平面变化趋势都明显高于全球平均趋势，也就是说中国近海是海平面上升较剧烈的海域。

为了了解 BYE、SCS 以及全海域 1970~2013 年海平面变化趋势随时间变化的特征，对 BYE 和 SCS 海域验潮站的集合平均计算了 5 年和 11 年的线性趋势，对 Church and White (2011) 的观测资料也做同样处理（结果见图 3）。两者均可以看出，趋势其本身有着周期振荡并整体缓慢上升的特征，其中 5 年的线性趋势振荡明显大于 11 年的，而且 SCS 海域的振幅要大于 BYE 海域的。近 10 年左右，无论是 5 年还是 11 年在两个海域海平面变化趋势均有减弱，其原因是受年际和年代际气候变率的影响。全球平均的海平面变化趋势均比 BYE 和 SCS 海域小，基本的特征类似。

此外，对 BYE 和 SCS 海域海平面变化趋势的季节特征也进行了分析。由表 1 可见，1993~2013 年期间 BYE 海域海平面上升趋势秋季最大达到 4.1 ± 1.8 mm/a，冬季最小其值为 2.8 ± 1.4 mm/a，秋季的最大值是年平均的 1.7 倍。这与 BYE 海域温度的季节变化有关，此外，强大的冬季风引起黄渤海

表 1 渤海—黄海—东海、中国南海验潮站和 AVISO 资料观测的年平均和四个季节海平面变化趋势

Table 1 Linear trends in the annual and seasonal mean sea level rise derived from the tidal gauge stations and AVISO data in the Bo–Yellow–East Sea (BYE) and the South China Sea (SCS) mm/a

海域	资料	时段	年均值	春季	夏季	秋季	冬季
渤海—黄海—东海	TIDE I	1970~2013 年	2.5 ± 0.8	2.1 ± 0.7	2.0 ± 0.9	3.1 ± 1.1	3.8 ± 1.0
	TIDE I	1993~2013 年	3.2 ± 1.2	3.1 ± 1.2	3.8 ± 1.7	4.1 ± 1.8	2.8 ± 1.4
	TIDE II	1993~2013 年	3.8	3.4	4.5	4.5	2.4
	AVISO I	1993~2013 年	3.2	-	-	-	-
	AVISO II	1993~2013 年	2.7	-	-	-	-
南海	TIDE I	1970~2013 年	2.4 ± 1.0	2.6 ± 1.1	2.9 ± 1.2	1.7 ± 1.0	2.7 ± 1.2
	TIDE I	1993~2013 年	3.9 ± 2.2	4.2 ± 2.2	3.4 ± 2.1	3.2 ± 2.3	3.7 ± 2.7
	TIDE II	1993~2013 年	4.7	5.7	4.8	4.7	5.6
	AVISO I	1993~2013 年	4.0	-	-	-	-
	AVISO II	1993~2013 年	4.9	-	-	-	-
全球	Church and White (2011)	1970~2013 年	2.1 ± 0.7	-	-	-	-
		1993~2013 年	2.8 ± 1.1	-	-	-	-

注：TIDE I 和 TIDE II 分别代表先平均和先计算趋势两种方法；AVISO I 是通过验潮站周围 AVISO 观测的趋势叠加平均获得，AVISO II 通过 AVISO 观测的海平面面积加权获得海平面变化趋势。为了方便比较，表中还展示了 Church and White (2011) 全球平均的海平面高度变化的趋势。表中所有数值均通过了 90% 的信度检验。

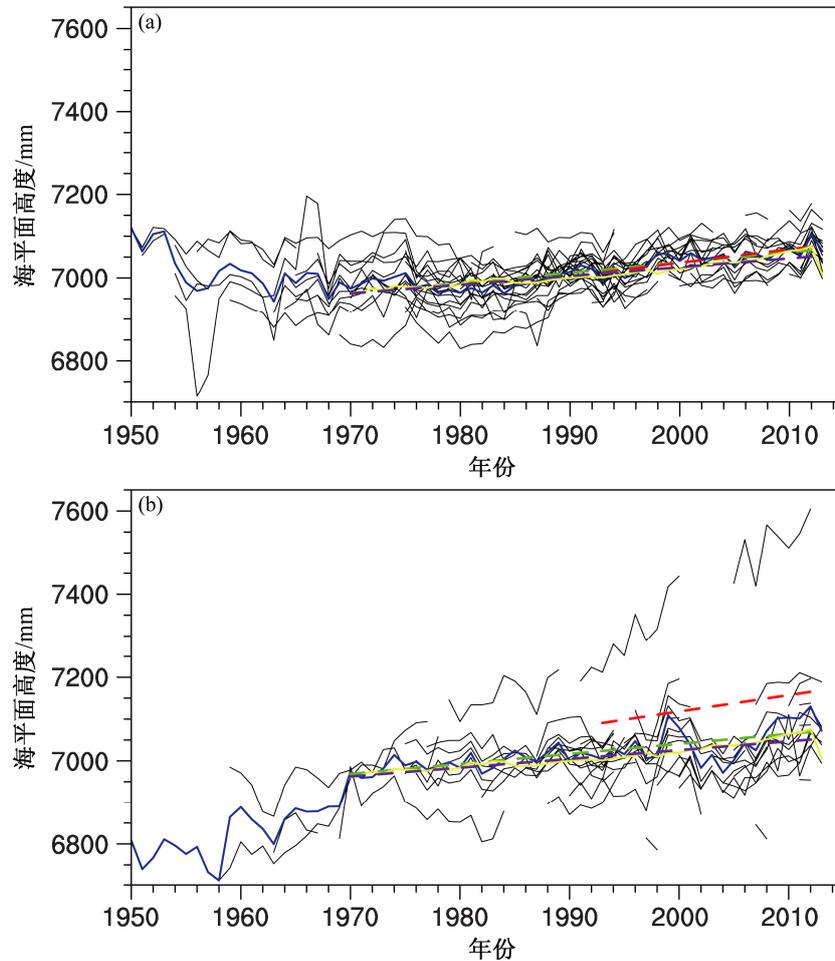


图2 (a) BYE (22个)和(b) SCS (19个)海域各验潮站海平面高度(黑色实线)及其集合平均(蓝色实线),黄色实线为 Church and White (2011)观测的全球平均海平面高度。绿色虚线为1970~2013线性趋势,红色虚线为1993~2013年线性趋势,紫色虚线是 Church and White (2011)观测的1970~2013年全球平均海平面变化线性趋势;趋势均通过了90%的信度检验

Fig. 2 Time series of sea level heights from individual tidal gauge stations in (a) BYE (22 stations) and (b) SCS (19 stations) (black curves) and their ensemble means (blue curves). The yellow solid curves show global mean sea level height from Church and White (2011). The green and red dashed curves represent the linear trends of sea level heights during 1970–2013 and 1993–2013, respectively. The purple dashed curves are the linear trends of the global mean sea level height during 1970–2013 from Church and White (2011). The linear trends shown in the figures all pass the 90% confidence test

海域海平面下降、冬季强大的高压系统共同作用下导致冬季海平面上升趋势最小。1993~2013年期间SCS海域海平面上升趋势春季最大,达到 4.2 ± 2.2 mm/a;秋季最小,其值为 3.2 ± 2.3 mm/a。

前面是将BYE和SCS海域的验潮站集合平均起来,这里分别计算每个站点的线性趋势,再对通过显著性检验的线性趋势取平均,在表1中标记为“TIDE I”。利用TIDE II方法计算的1993~2013年BYE和SCS的年均海平面变化趋势分别为3.8 mm/a和4.7 mm/a。与TIDE I比较发现,TIDE II方法计算出来的趋势偏大些,但与TIDE I方法计算结果的变化范围是一致的,而且

所体现出来的相对关系(SCS海域大于BYE海域)和季节变化(BYE海域秋季最大,冬季最小;SCS海域春季最大,秋季最小)也一致,因此可以认为两种方法的结果没有本质的差异。对照图2中的黑色实线发现,无论BYE海域还是SCS海域在研究早期各验潮站海平面变化位相同步,而在研究的后几年,各站点出现位相差,这导致后期的集合平均各站点相互抵消,从而造成了TIDE II获得的区域平均趋势略大于TIDE I获得的区域平均趋势。

为了解BYE海域22个验潮站和SCS海域19个验潮站研究年份(1970~2013年)内的趋势

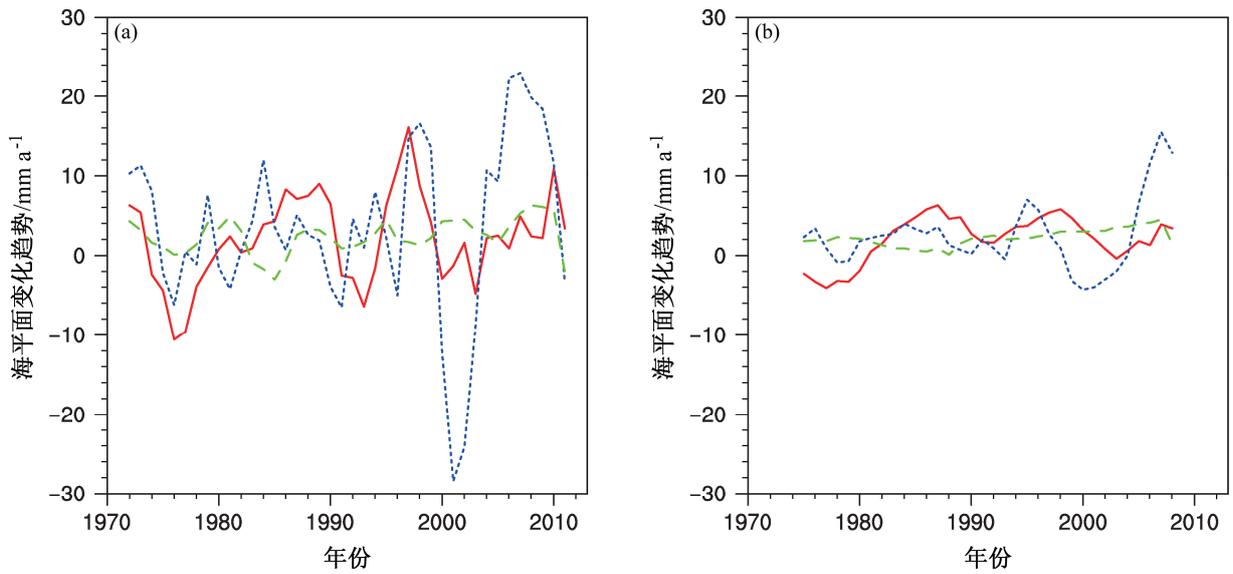


图3 (a) BYE (红色实线) 和 SCS (蓝色虚线) 验潮站平均以及全海域海平面高度[绿色虚线, 引自 Church and White (2011)]每 5 年的滑动平均趋势。(b) 同 (a), 但为 11 年滑动平均趋势。趋势均通过了 90% 的信度检验

Fig. 3 (a) The 5-year moving linear trend of sea level height based on the tidal gauge stations data averaged in BYE (red solid curve) and SCS (blue dashed curve), and the global mean sea level height from Church and White (2011) (green dashed curve); (b) same as (a), but for the 11-year moving trend. The linear trends shown in the figures all pass the 90% confidence test

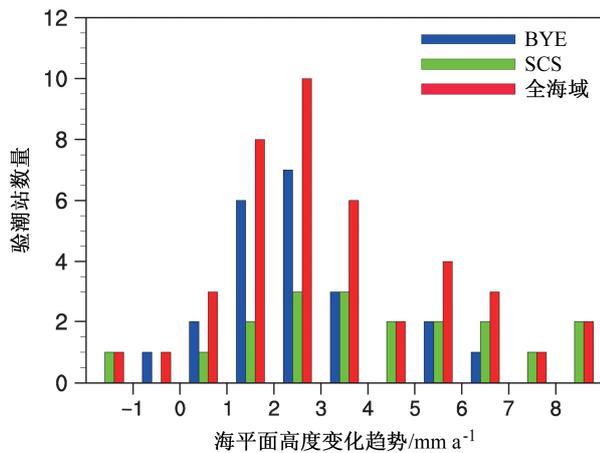


图4 BYE、SCS 及全部海域验潮站观测的 1970~2013 年海平面高度变化趋势的概率分布。趋势均通过了 90% 的信度检验

Fig. 4 Probability distributions of the linear trends of sea level height for BYE, SCS, and both regions during 1970-2013. The linear trends shown in the figure all pass the 90% confidence test

分布特征, 对 BYE、SCS 和全海域各验潮站的线性趋势的概率分布状况进行了分析。由图 4 可知, BYE 海域各验潮站获得的海平面变化趋势主要集中在 1~3 mm/a, SCS 海域各验潮站海平面变化趋势略大, 主要集中在 2~3 mm/a。BYE 海域所有验潮站海平面变化趋势的中位数为 2.1 mm/a, SCS 海域所有验潮站海平面变化趋势的中位数为 3.7 mm/a。从分布上而言, BYE、SCS 和全海域的验潮站观测的

趋势均近似满足准正态分布, SCS 海域的验潮站趋势分布相对比较均匀, 且普遍比较高。

为了方便与 AVISO 资料 (1993~2013 年) 观测的海平面变化趋势的空间分布比较, 图 5 展示了 1993~2013 年 BYE 海域 15 个和 SCS 海域 10 个时间序列相对完整的验潮站海平面变化趋势的空间分布, 由图 5 可以看出, BYE 海域 15 个验潮站有 14 个验潮站通过 90% 的信度检验, SCS 海域 10 个验潮站有 5 个验潮站通过信度检验。BYE 海域北部地区验潮站趋势大于南部地区验潮站趋势, 最大值出现在济州和吕泗两个站点, 分别由于位于海岛和河流入海口。SCS 海域南部地区验潮站趋势大于北部地区, 最大值位于西沙等岛屿上。这与 Chen et al. (2008) 的研究结论是一致的, 他们发现中国海域北部海域的海平面上升率略小于南部海域, 海平面大的上升率出现在岛屿和河流入海口。

通过以上研究我们发现, 中国海域无论是近 40 年 (1970~2013 年) 还是近 20 年 (1993~2013 年) 海平面均显著上升。在 BYE 海域前者为 2.5 mm/a, 后者为 3.2 mm/a, 而在 SCS 海域前者为 2.4 mm/a, 后者为 3.9 mm/a。可以看出, 各海区近 20 年的海平面上升有加速的趋势, 且各时段上升速率大于全球平均海平面上升率 (2.1 mm/a 和 2.8 mm/a)。但是, 受到海平面的年际和年代际变化的影响, 近 10

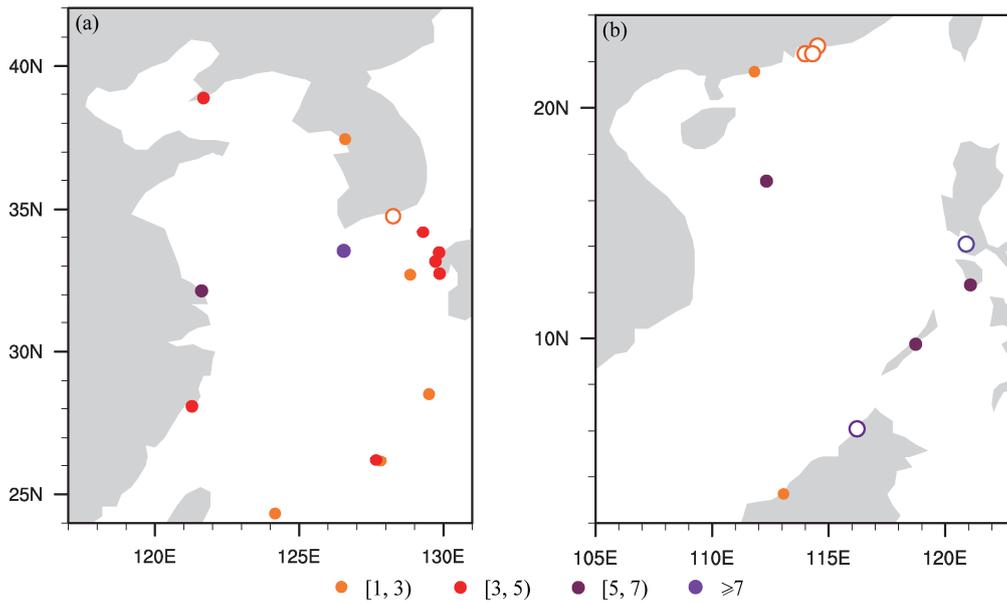


图5 (a) BYE 和 (b) SCS 海域各验潮站 1993~2013 年海平面变化趋势 (单位: mm/a), 实心点 (空心圈) 代表通过 (未通过) 90% 信度检验的站点
Fig. 5 Linear trends of sea level height at tidal gauge stations during 1993–2013 in (a) BYE and (b) SCS regions (units: mm/a). The solid points (hollow circles) indicate the stations where the trends can (cannot) pass the 90% confidence test

年海平面上升趋势放缓, 近 10 年两个海区海平面上升趋势为 2.5 mm/a (BYE) 和 3.1 mm/a (SCS)。海平面趋势变化有着明显的季节变化特征, 其中 BYE 海域秋季最大, 冬季最小; SCS 海域春季最大, 秋季最小。海平面趋势变化也有明显的空间分布特征, SCS 海域海平面上升趋势大于 BYE 海域, 且大的海平面上升率出现在海岛和河流入海口。

4 AVISO 资料与验潮站资料对比分析

AVISO 资料相对验潮站资料具有高时空分辨率的显著优势, 利用 AVISO 资料观测的中国海域海平面变化能够比较全面地反应整个中国海域的海平面变化实际情况。图 6a 和 6b 展示的是 AVISO 资料观测的 BYE 和 SCS 海域海平面高度。SCS 海域整体海平面异常明显大于 BYE 海域, 1993~2013 年 BYE 海域海平面高度年平均上升高度为 0.5~1.5 m, 变化范围比较大, 而 SCS 海域集中在 1~1.2 m 范围内, 变化范围比较小。BYE 海域年均海平面高度由西北向东南递增, BYE 海域东海黑潮路径附近, 对应强的黑潮流量沿着东南部 200 m 等深线有较大的海平面高度梯度。SCS 海域南高北低, 并且在东北部开阔洋域出现极小值中心。

首先, 我们分别对 BYE 海域 22 个验潮站和 SCS 海域 19 个验潮站 1993~2013 年年均海平面变化异

常与该验潮站周围 $[0.8^\circ$ (纬度) $\times 0.8^\circ$ (经度) 范围内]平均的 AVISO 资料的海平面变化异常进行比对。图 7 是 BYE、SCS 海域验潮站与 AVISO 资料观测的海平面异常比对散点图。由图可见, 无论 BYE 海域还是 SCS 海域 AVISO 资料和验潮站资料观测的 1993~2013 年的每年年均海平面异常都具有较高一致性, BYE 海域两者相关系数为 0.81, SCS 海域两者相关系数为 0.79。

其次, 比较两个海域集合平均的结果。与图 2 相同, 我们将验潮站周围平均的 AVISO 资料进行集合平均 (表中标记为 AVISO I)。图 8 展示了 AVISO 在各验潮站周围海平面异常 (黑色实线)、集合平均 (绿色实线) 及其线性趋势 (紫色虚线)。为了方便比较, 将图 2 中的验潮站资料的集合平均 (蓝色实线) 及 1993~2013 年的线性趋势 (红色虚线) 加上, 其数值可以参照“TIDE I”。此外, 我们还利用 AVISO 资料计算了 BYE 和 SCS 两个海域整体的平均, 用黄色虚线表示 (表中标记为 AVISO II), 用来考察验潮站空间采样的代表性。

在两个海域, 所有验潮站周围 AVISO 资料的集合平均与验潮站资料的结果非常一致, 特别是在 BYE 海域, 也就是说 AVISO 资料可以很好地反应两个海域海平面变化的年际和年代际变率。AVISO 资料获得 BYE 和 SCS 海域 1993~2013 年的海平面变化趋势分别为 3.2 mm/a 和 4.0 mm/a, 与验潮站资

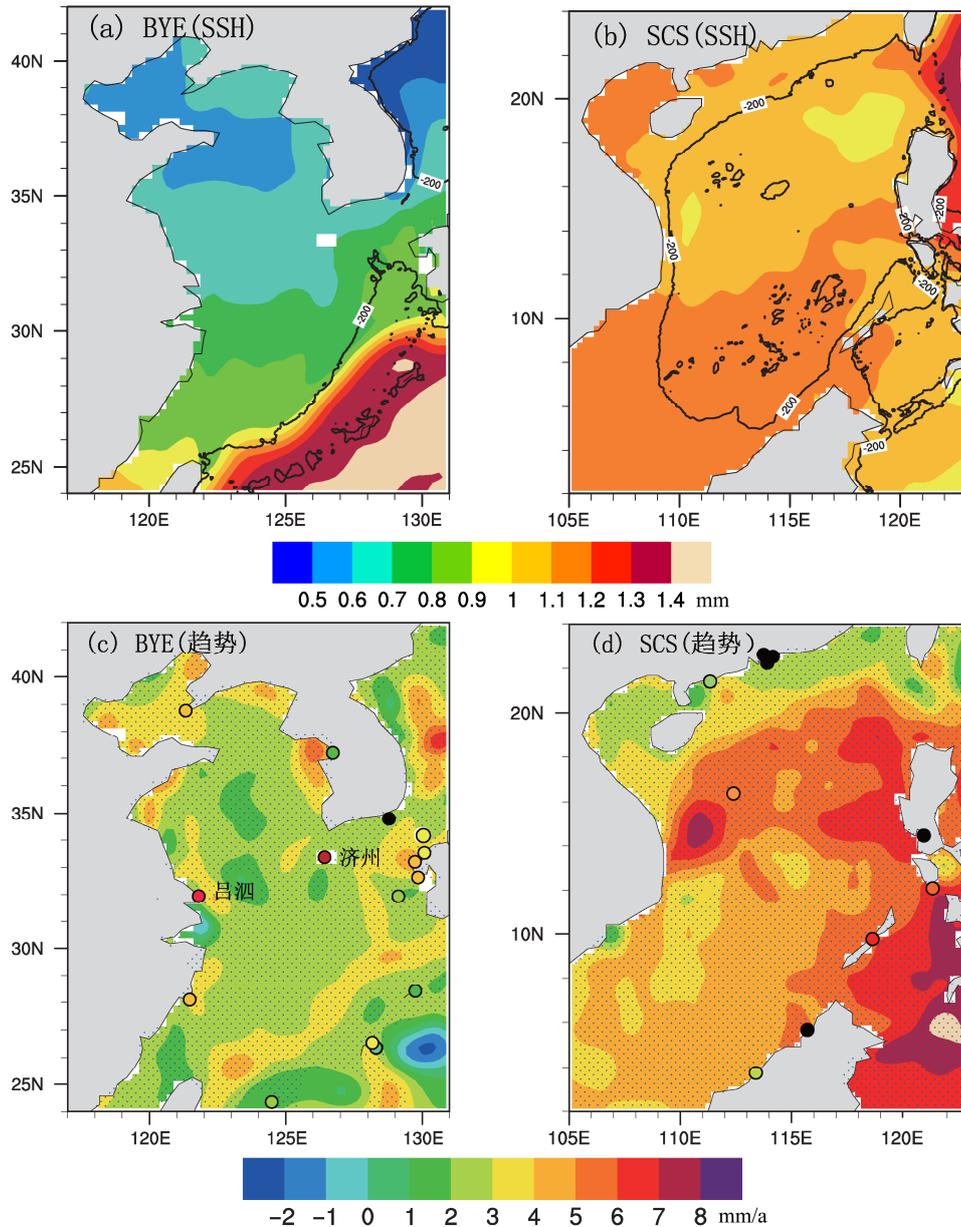


图6 1993~2013年 AVISO 观测的 BYE 海域(左列)和 SCS 海域(右列)的(a、b)海平面高度(填色;黑色等值线为200 m等深线)和(c、d)海平面变化趋势(填色;带点区域为通过90%显著性检验的区域;圆点为验潮站海平面变化的趋势,色标与填色一致,黑色点为未通过检验的站点)
Fig. 6 Spatial distributions of the (a, b) sea level height (coloured; black contour is the 200 m isobaths) and (c, d) linear trend of sea level rise (coloured; areas with small dots indicate regions where the trend passes the 90% confidence test. The circle denotes results from the tidal gauge stations. The large black dots indicate stations at which the trend cannot pass the 90% confidence test) from AVISO during 1993–2013 in the BYE region (left panel) and in the SCS region (right panel)

料的结果非常接近 (3.2 ± 1.2 mm/a 和 3.9 ± 2.2 mm/a)。因此,从总体平均上而言,AVISO 和验潮站资料的变化和线性趋势一致。这个结果也可以说明,较显著的地表变化只出现在个别的点上,对整体的结果影响较小。

接下来对 AVISO 观测的海平面变化趋势的空间分布特征进行分析。图 6c 和 6d 是 AVISO 观测的 BYE、SCS 海域海平面变化趋势的空间分布。为了

方便对比,各验潮站的结果也一并展示在图上。从图 6c 和 6d 可以看到,虽然集合平均的结果是一致的,但在个别点上 AVISO 和验潮站资料还是有显著的差异,比如在吕泗和济州两个站点。为了更清晰地看清两份资料的差异,图 9 给出了两份资料的站点上线性趋势的散点图和差值的空间分布。从散点图上可以看到,除了 BYE 海域的吕泗和济州之外,其它的站点上差异都较小。图 9b 展示了各点的差

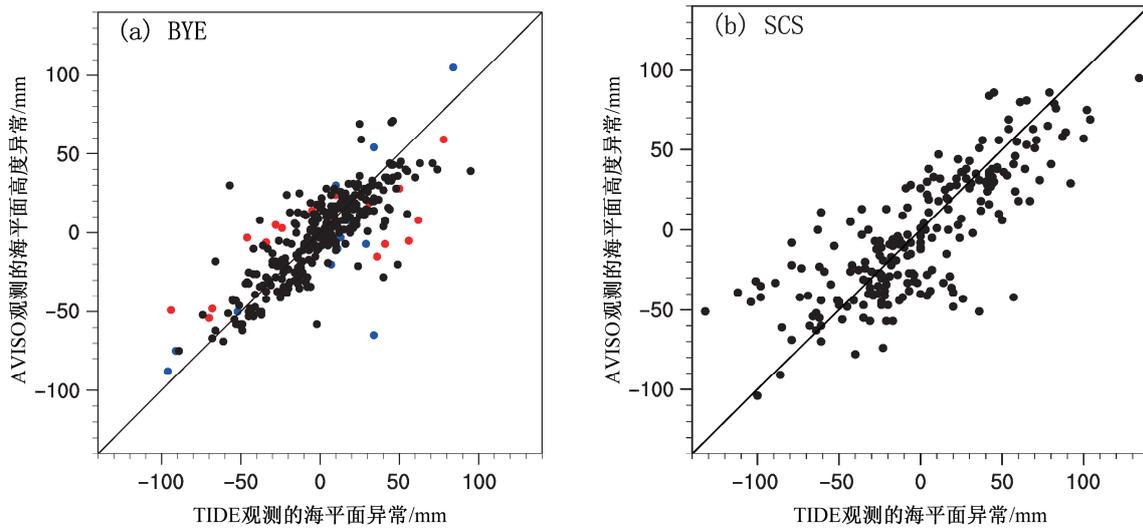


图7 (a) BYE 和 (b) SCS 海域验潮站与 AVISO 资料 1993~2013 年年平均海平面高度异常的散点图 (红点和蓝点为吕泗和济州岛站点观测的海平面异常。两套资料在 BYE 和 SCS 的相关系数分别为 0.81 和 0.79)

Fig. 7 Scatter diagram of the sea level height anomalies between observations from the tidal gauge stations and the AVISO data in the (a) BYE and (b) SCS during 1993–2013 (red and blue points show the results from Lüsi and Jeju, respectively. The correlation coefficient between observations from the tidal gauge stations and AVISO data are 0.81 and 0.79 for the BYE and SCS, respectively)

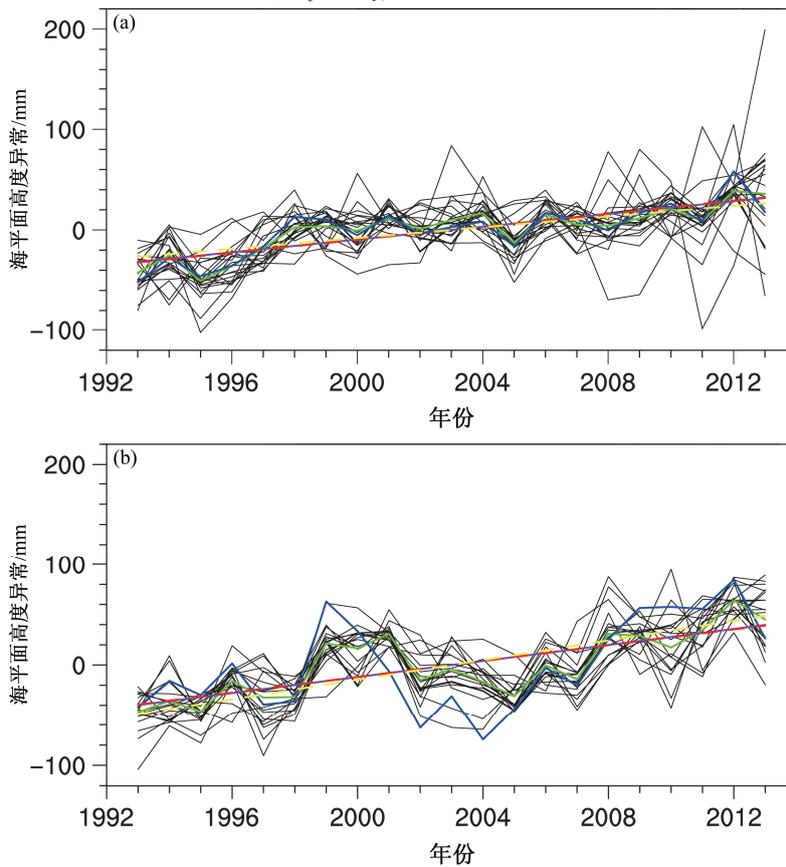


图8 (a) BYE 和 (b) SCS 海域 1993~2013 年各验潮站上 AVISO 观测的海平面高度异常 (黑色实线) 及其集合平均 (绿色实线), 以及验潮站资料集合平均 (蓝色实线) 的海表面高度异常。虚线为线性回归 (其中紫色为各验潮站上 AVISO 集合平均, 红色为验潮站资料集合平均, 黄色为 AVISO 资料区域平均)。趋势均通过了 90% 的信度检验

Fig. 8 Time series of annual mean sea level height anomaly data for AVISO data around each individual tidal gauge stations (black solid curve) and their ensemble mean (green solid curve) in (a) BYE and (b) SCS regions during 1993–2013. The blue solid curves are the ensemble mean of observations from the tidal gauge stations. The dashed curves are for the linear regressions (the purple one is the ensemble mean of the AVISO data at the tidal gauge stations, the red one is for the observations from the tidal gauge stations, and the yellow one is for the regional average sea level height anomaly). The liner trends shown in the figures all pass the 90% confidence test

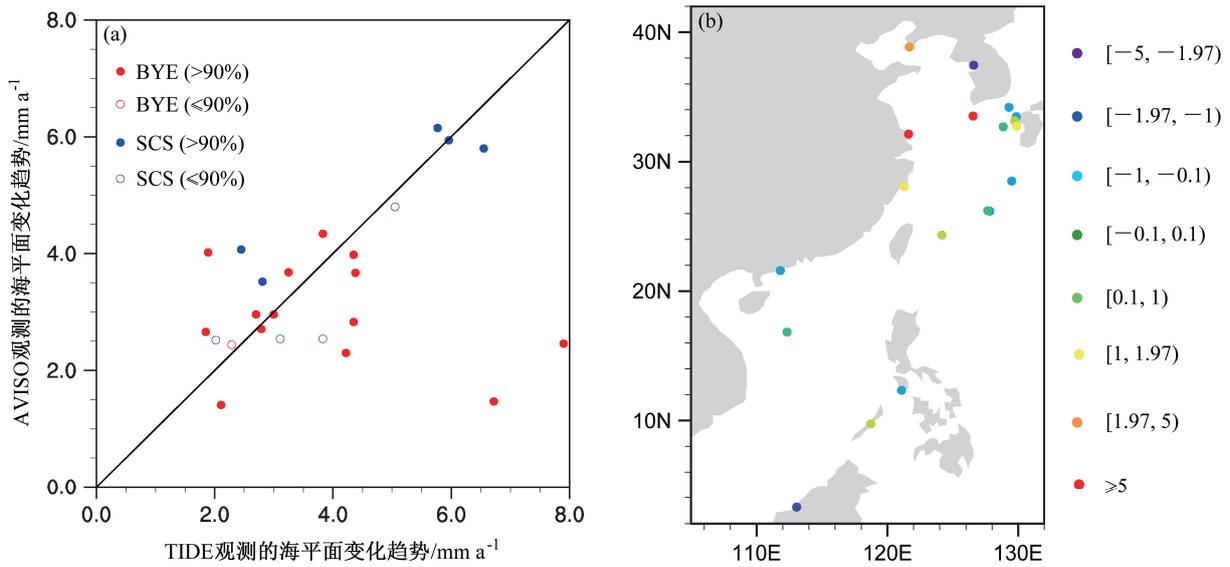


图 9 1993~2013 年中国海域 (a) 验潮站和 AVISO 资料年平均海平面变化趋势的散点图 (实心为通过 90% 信度检验。其中 Nanila 观测的海平面变化趋势超过 17 mm/a, 不在图描述范围内) 以及 (b) 19 个过 90% 信度的验潮站与 AVISO 资料的海平面变化趋势之差 (单位: mm/a)

Fig. 9 (a) The scatter diagram of the linear trend of the annual mean sea level rise between the observations from the tidal gauge stations data and the AVISO data during 1993–2013 (solid dots are the trends which passed the 90% significance test. The value of the station Nanila is not shown in the figure because it is larger than 17 mm/a) and (b) the differences of the linear trends between the tidal gauge stations data and the AVISO data at 19 stations whose linear trends passed the 90% significance test (units: mm/a)

值,计算出在验潮站上 AVISO 资料和验潮站资料的海平面变化趋势的均方根误差为 1.97 mm/a。在 19 个验潮站中只有 4 个验潮站的差值超出 ±1.97 mm/a 范围,大部分验潮站差值主要集中在 ±1 mm/a 范围内,因此可以认为大部分验潮站观测的海平面变化趋势与其周围 AVISO 观测的海平面变化趋势差别比较小。此外,SCS 海域的差值明显小于 BYE 海域的差值,开阔海域差值明显小于沿岸差值,如西沙其差值接近 0。只有吕泗和济州两个验潮站相对其他验潮站的差值比较大,分别是 5.4 mm/a、5.3 mm/a,这里的差异可能与地下水的使用、地震等人为、自然因素导致地表沉降有关。

为了检验潮汐站点空间取样对海域平均值的影响,我们用 AVISO 资料计算了两个海域的面积进行加权平均,在表 1 中记为“AVISO II”。从表 1 可以看到,区域平均值在 BYE 海域的上升趋势为 2.7 mm/a,而在 SCS 海域为 4.9 mm/a。对比“AVISO I”的计算结果发现,区域平均值在 BYE 海域要略小于站点平均,而在 SCS 海域要略大于站点平均(图 8)。对照图 6c 和 6d 可以发现,BYE 海域所选的 22 个验潮站所处位置大多位于 AVISO 观测的海平面趋势相对较小的地区,而 SCS 海域所选 19 个验潮站位置大多位于 AVISO 资料的海平面趋势

相对较大的地区。这也证明了,在 BYE 海域采用验潮站集合平均估算的区域平均的海平面高度偏大,而在 SCS 海域则偏小。

通过以上比较可以发现,AVISO 资料在描述近 20 年海平面变化的线性趋势上与验潮站资料接近,偏差主要集中在 ±1 mm/a 以内,较大的差异主要是由验潮站地表发生升降引起的。AVISO 和验潮站资料的一致性也从侧面证明了,中国近海海平面上升主要和动力海平面的变化有关。与验潮站相比,AVISO 资料在空间和时间采样上有先天的优势,通过对比也发现用验潮站资料估算海域平均的海平面高度变化会有一定的误差,在 BYE 海域验潮站估计的数值偏高 0.5 mm/a,而在 SCS 海域则偏低 0.9 mm/a。

5 结论

本文分析了中国近海验潮站资料近 40 年的海表面高度的线性变化趋势,并和 AVISO 卫星资料进行了对比。通过对验潮站资料的分析发现,中国海域无论是近 40 年(1970~2013 年)还是近 20 年(1993~2013 年)海平面均显著上升。在 BYE 海域前者为 2.5±0.8 mm/a,后者为 3.2±1.2 mm/a,而在 SCS 海域前者为 2.4±1.0 mm/a,后者为 3.9±

2.2 mm/a。可以看出,各海区近 20 年的海平面上升有加速的趋势,且各时段上升速率大于全球平均海平面上升率 (2.1 ± 0.7 mm/a 和 2.8 ± 1.1 mm/a)。但是,受到海平面的年际和年代际变化的影响,近 10 年海平面上升趋势放缓,近 10 年两个海区海平面上升趋势为 2.5 mm/a (BYE) 和 3.1 mm/a (SCS)。

海平面趋势变化有着明显的季节变化特征,其中 BYE 海域秋季最大,冬季最小;SCS 海域春季最大,秋季最小。海平面趋势变化也有明显的空间分布特征,SCS 海域海平面上升趋势大于 BYE 海域,且大的海平面上升率出现在岛屿和河流入海口。

通过 AVISO 和验潮站资料的对比可以发现,AVISO 资料在描述近 20 年海平面变化的线性趋势上与验潮站资料接近,偏差主要集中在 ± 1 mm/a 以内,较大的差异主要是由验潮站地表升降引起的。AVISO 和验潮站资料的一致性也从侧面证明了,中国近海海平面上升主要和动力海平面的变化有关。与验潮站相比,AVISO 资料在空间和时间采样上有先天的优势,通过对比也发现使用验潮站资料估算海域平均的海平面高度变化会有一定的误差,在 BYE 海域验潮站估计的数值偏高 0.5 mm/a,而在 SCS 海域则偏低 0.9 mm/a。

以上的研究发现,中国区域海平面高度上升要大于全球海平面高度上升趋势,这也再次说明了全球变暖的信号在区域分布上是不均匀的。全球海平面高度主要受到海水热膨胀效应、冰雪圈融化以及地壳变形及其相应的重力位势变化所控制;而区域的海平面变化是在全球变化的大背景下,局地环流和密度变化所导致的。因此,区域和全球的海平面变化存在联系,但也存在显著的差异。

参考文献 (References)

Chen M C, Du L, Zuo J C, et al. 2008. Spatial distribution of sea level trend

- and annual range in the china seas from 50 long term tidal gauge station data [C]// Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, Canada: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 583–587.
- Church J A, White N J. 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century [J]. *Surveys in Geophysics*, 32 (4–5): 585–602. doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.
- Fang G H, Chen H Y, Wei Z X, et al. 2006. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and surface temperature in the recent decade [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (C11): C11S16. doi: 10.1029/2005JC003276.
- 胡志博, 郭金运, 谭争光, 等. 2014. 由 TOPEX/Poseidon 和验潮站监测香港海平面变化 [J]. *大地测量与地球动力学*, 34 (4): 56–59. Hu Zhibo, Guo Jingyun, Tan Zhengguang, et al. 2014. Sea level variation in Hong Kong determined with TOPEX/Poseidon and tide gauge [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics (in Chinese)*, 34 (4): 56–59.
- 王龙. 2013. 基于 19 年卫星测高数据的中国海海平面变化及其影响因素研究 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 1–52. Wang Long. 2013. Study of sea level change and its influencing factor in the china sea based on nineteen years' altimeter data [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China, 1–52.
- Wang Z T, Li J C, Chao D B, et al. 2004. Sea level changes detected by using satellite altimeter data and comparing with tide gauge records in China sea [M] //Hwang C, Shum C K, Li J C. *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*. Berlin Heidelberg: Springer, 126: 271–277, doi: 10.1007/978-3-642-18861-9_33.
- 吴涛, 康建成, 李卫江, 等. 2007. 中国近海海平面变化研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 27 (4): 123–130. Wu Tao, Kang Jianchen, Li Weijiang, et al. 2007. Advance of sea level change research in China [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology (in Chinese)*, 27 (4): 123–130.
- Yanag T, Akaki T. 1994. Sea level variation in the Eastern Asia [J]. *J. Oceanogr.*, 50 (6): 643–651, doi: 10.1007/BF02270497.
- Zhang S W, Chang Y T, Li J, et al. 2012. Interannual and decadal variation of sea level in the east China sea [C]// Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 693–700.
- 左军成, 于宜法, 陈宗镛. 1994. 中国沿岸海平面变化原因的探讨 [J]. *地球科学进展*, 9 (5): 48–53. Zuo Juncheng, Yu Yifa, Chen Zongyong. 1994. The analysis of sealevel variation factor along China coast [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 9 (5): 48–53.