

基于卫星高度计数据的南海海平面时空变化特征分析

余荣臻*, 徐华兵*, 刘 贝
(广东海洋大学 电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088)

摘 要: 本文利用卫星高度计数据, 采用多种方法对1993—2017年中国南海海平面高度异常(Sea Level Anomaly, SLA)的空间分布和时间变化进行分析, 主要采取的方法有线性回归、Winters 指数平滑法、经验模态分解(Empirical Modal Decomposition, EMD)和经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)。通过研究发现, 南海大部分海域的多年平均SLA为正值, 只有很少一部分海域出现负值(菲律宾群岛中部海域), 并且南海的平均SLA有明显的季节性变化。利用线性回归的方法, 发现1993—2017年的南海海平面总体呈现上升趋势。利用EMD分析法发现南海有明显的年际和年代际变化。研究结果表明: 中国南海海平面高度呈不断上升的趋势, 具有明显的季节和年际变化周期, 且ENSO对中国南海海平面的作用不可忽视。

关键词: 南海; 海平面高度异常; 线性回归

中图分类号: P733.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029(2021)01-0001-09

近年来, 随着全球气候变暖, 海平面上升已成为不争的事实。根据《2018年中国海平面公报》, 1980—2018年中国近海海平面上升速率为3.3 mm/a, 高于同时段全球平均水平。中国海域海平面的上升不仅给中国的沿海城市带来危机, 而且还会导致各种海洋灾害的发生。张栋杨等^[1]利用“源—路径—受体—影响”模型分析, 得到2006—2016年海平面上升使得中国沿海地区发展脆弱性等级整体呈现上升趋势。研究海平面的变化对中国海洋灾害的预防、预报和海洋环境的监测、保护有着十分重要的作用。南海是中国四大海域之一, 与中国南方沿岸城市在地理位置上紧密相连。因此, 研究南海海平面的变化对中国南方沿岸

城市的经济、政治有着不可忽视的影响。

自20世纪70年代卫星高度计发明以来, 卫星测高技术不断发展、完善和成熟。卫星测高技术出现弥补了验潮站的一些缺陷, 使得学者们可以更全面地研究中国海平面的变化, 得到更大范围和更具代表性的结果。郭金运等^[2]利用TOPEX/Poseidon、Jason-1和Jason-2卫星测高数据分析得到, 1993年1月—2012年12月中国近海海域的海平面平均上升速率为4.64 mm/a, 而南海海平面同期的平均上升速率为4.25 mm/a。国外最新研究表明, 1985—2016年中国南海的海平面平均上升速率为7.6 mm/a, 在越南沿岸海域的上升趋势最大^[3]。值得指出的是, 与全球海平面相比,

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 广东海洋大学博士启动项目(R20008)

作者简介: 余荣臻(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水下机器人仿真。E-mail: 15913696238@163.com

通讯作者: 徐华兵(1990-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为海洋生态遥感。E-mail: xuhuabing1990@163.com

中国南海的海平面平均上升速率相对比较快^[4]。

目前,研究中国南海 *SLA* 数据的方法不是很全面,数据跨度不是很大。本文主要采用多种方法对中国南海 1993—2017 年的海平面数据进行分析,全面分析中国南海(月、季度和年)平均 *SLA* 的空间分布和时间变化,并探究其变化周期。

1 数据和方法

1.1 数据

1.1.1 研究区域 南海是西北太平洋最大的半封闭边缘海,海域面积约为 350 万 km²,最大水深约为 5 000 m,平均水深约为 1 212 m,是中国最深的海区之一。本文研究区域的覆盖范围是从 0°N—25°N, 100°E—122°E。

1.1.2 数据来源 本文 *SLA* 数据资料为 TOPEX/Poseidon、Jason-1/2、ERS-1/2 和 ENVISAT 等卫星高度计测高数据的融合产品,是法国 AVISO 数据分发中心提供的网格化 *SLA* 数据,该数据的空间分辨率为 0.25°×0.25°,数据的时间尺度为 1993 年 1 月—2017 年 12 月,共 25 a。

1.2 方法

1.2.1 线性回归 线性回归是利用最小二乘法对一个或者多个自变量与因变量之间的关系进行建模的一种回归分析方法。本文采用最小二乘拟合方法计算南海平均海平面变化的线性趋势及变化率,其计算原理如下:

$$y = a + bx \quad (1)$$

式中: y 为海平面变化; a 为常数项; b 为(月、季度和年)变化率; x 为时间。

1.2.2 时间序列 Winters 指数平滑法 指数平滑法是通过一定的时间序列预测模型对现象的未来进行预测。Winters 指数平滑法是对非线性较弱的趋势性变动和季节性波动的时间序列预测的方法^[5]。

1.2.3 EMD 分析法 EMD 分析法的核心思想在于,

将时间序列按一定规则分解成有限个本征模函数和一个趋势项的和^[6]:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n h_j(t) + r_n(t) \quad (2)$$

1.2.4 EOF 分析法 EOF 分析方法是一种通过分析变量场的结构特征,将时空分布的变量场分解成称作模态的正交函数的线性组合的数学统计方法^[7]。数据分析用主成分分析的方法。主成分分析是一种除去波段之间的多余信息,将多波段的图像信息压缩到比原波段更有效的少数几个转换波段,从而减少数据处理量的方法。

2 结果和分析

2.1 海平面变化的空间分布

2.1.1 多年平均 *SLA* 空间分布特征 对南海每个网格的 *SLA* 数据求取 1993—2017 年的时间平均,得到 1993—2017 年共 25 a 的平均 *SLA* 空间分布情况。从图 1 中可以看出,总体上,南海大部分海域的多年平均 *SLA* 为正值,只有很少一部分海域出现负值(菲律宾群岛中部海域),南海 25 a *SLA* 的总体平均值为 3.41 cm,最大为 5.11 cm,最小为 -1.52 cm。

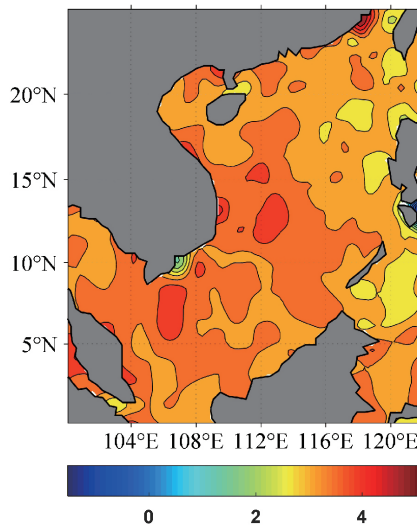


图1 南海多年平均 *SLA* 的空间分布(单位: cm)

对应南海多年平均 *SLA* 空间分布, 多年平均 *SLA* 变化率图的色标由蓝色至红色表示多年 *SLA* 变化率由负值(海平面下降)到正值(海平面上升)。从图2中可以发现, 其空间形态呈现较大差异, 不同网格的海平面上升速度不同。总体而言, 南海全部海域 *SLA* 变化率都为正值, 平均变化率为 4.05 mm/a, 最大为 6.33 mm/a, 最小为 1.99 mm/a。这说明南海海域 1993—2017 年海平面都呈上升趋势, 且 12°N—19°N 之间的南海中部海域多年 *SLA* 变化幅度较大, 出现多个正值中心。可以发现, 南海中部和东部海域的上升速率比西南部的上升速率要快, 而且最大的上升趋势出现在越南东部海域, 主要是受到该地区上升流的影响^[3]。

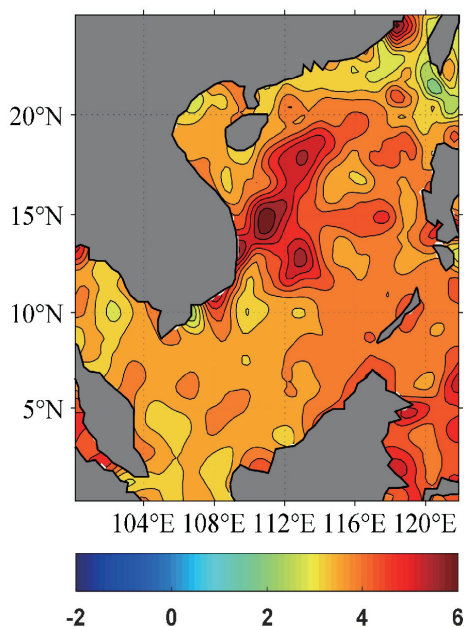


图2 南海多年平均 *SLA* 变化率的空间分布 (单位: mm/a)

2.1.2 南海多年月、季平均 *SLA* 空间分布特征 为了研究多年月平均 *SLA* 的分布特征, 对每个网格求取多年每个月平均 *SLA*, 得到了 12 个月的多年月平均 *SLA* 的空间分布 (图3)。本文季节划分如下:

春季为 3—5 月; 夏季为 6—8 月; 秋季为 9—11 月; 冬季为 12 月至次年 2 月。

冬季: 冬季盛行东北风, 它把寒冷干燥的大气带到南海, 从而通过海气热交换来冷却海面, 并且产生一股西南向的沿岸流, 使得南海 *SLA* 正值区域逐渐减少。冬季的正异常中心在泰国湾, 负异常中心在吕宋海峡西部和菲律宾群岛海域 (图4)。南海 12 月的月平均 *SLA* 达到全年的次大值 9.10 cm (表1)。

春季: 由于 3 至 4 月黑潮的影响, 和 5 月东北季风变成西南季风的结果, 南海 *SLA* 的负值区域先增加后减少, 且 4 月达到全年最大范围。3 月越南东部 *SLA* 出现正异常中心, 在 4 至 5 月, 该正异常逐渐扩增, 泰国湾的 *SLA* 从正异常逐渐变成负异常。南海的月平均 *SLA* 逐渐变成负值。

夏季: 西南季风对南海的持续影响, 使得吕宋海峡西部海域的 *SLA* 正值区域逐渐增加, 最强风速出现在越南海岸线上, 使得越南东海岸局部出现了上升流, 越南东部海域的正异常中心开始偏移。夏季的正异常中心在吕宋海峡西南部和越南东部, 负异常中心在泰国湾。南海夏季 *SLA* 的正异常范围持续增大, 月平均 *SLA* 由负值逐渐变成正值, 6 月的月平均 *SLA* 达到全年的最小值 -0.77 cm。

秋季: 西南季风开始减小, 南海 *SLA* 的正值区域先增加后减少, 且 10 月达到最大范围。吕宋海峡西部海域的 *SLA* 从正异常逐渐变成负异常。泰国湾的 *SLA* 从负异常逐渐变成正异常, 西沙群岛附近海域 *SLA* 的负异常区域逐渐增加。南海秋季的月平均 *SLA* 逐渐增大, 11 月达到全年的最大值 9.25 cm。

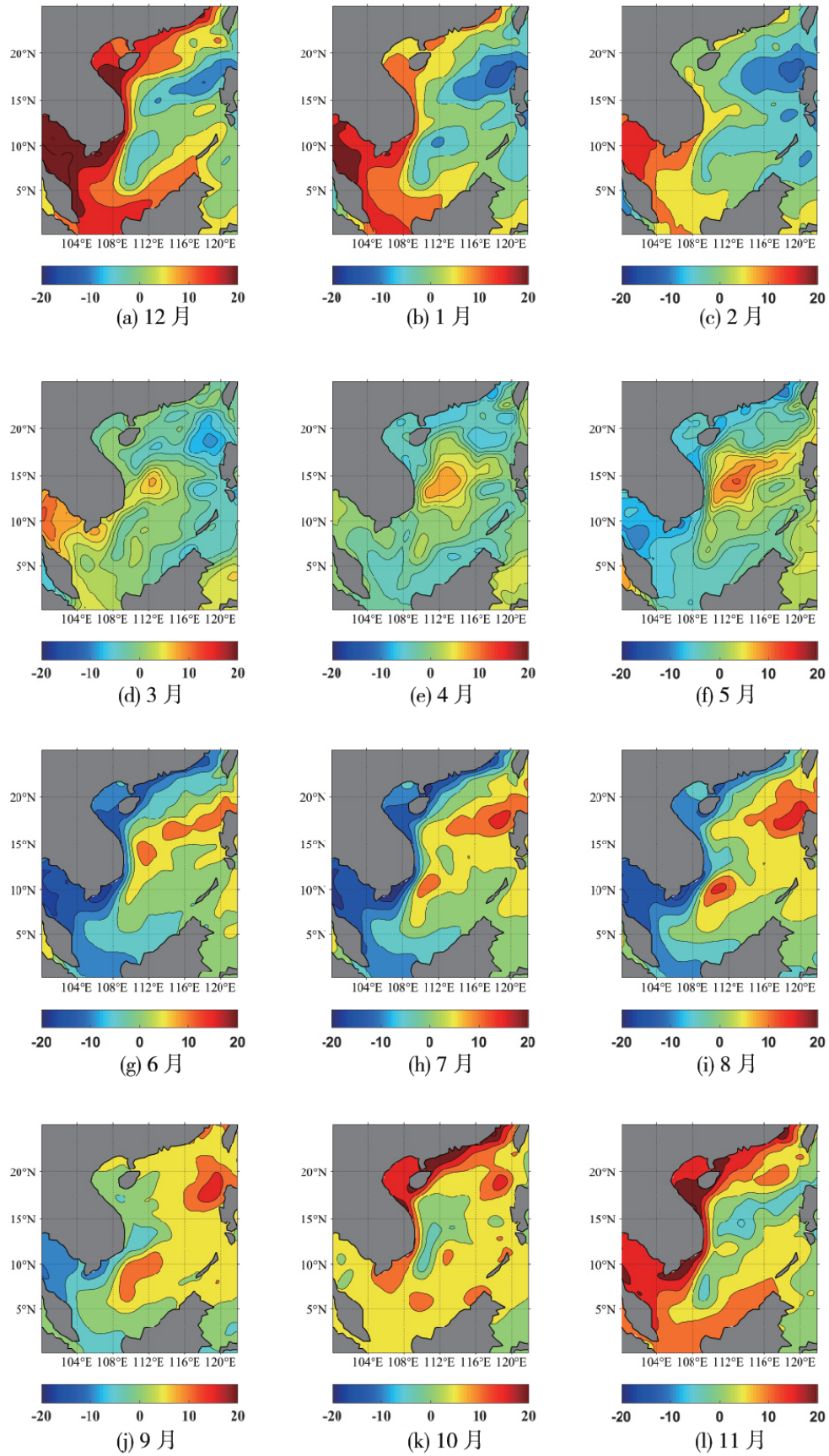
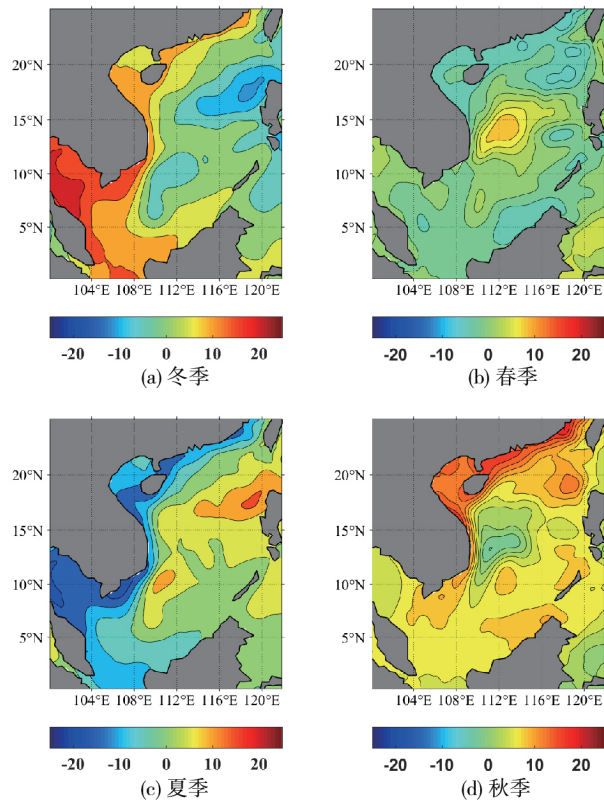


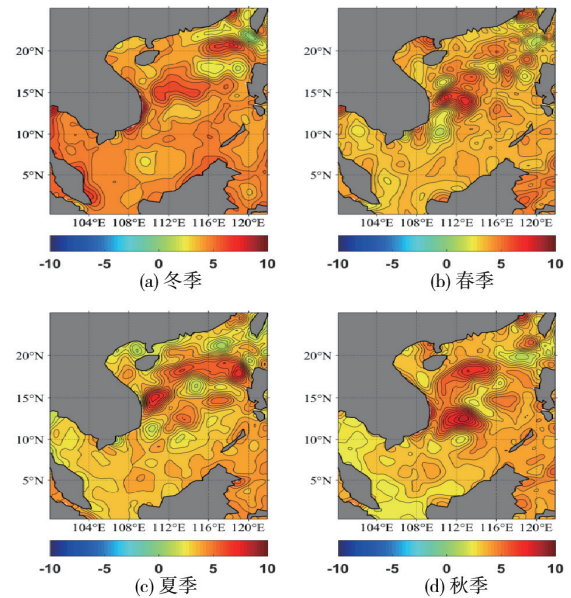
图 3 南海多年月平均 *SLA* 的空间分布 (单位: cm)

图 4 南海海域多年季平均 SLA 的空间分布 (单位: cm)表 1 南海各月的 SLA 平均值以及正 (负) SLA 所占比例

月份	正 SLA 占的比例	负 SLA 占的比例	均值 / cm
1 月	73.07%	26.93%	5.26
2 月	61.03%	38.97%	2.43
3 月	55.00%	45.00%	0.77
4 月	45.42%	54.58%	-0.05
5 月	47.05%	52.95%	-0.19
6 月	54.13%	45.87%	-0.77
7 月	61.29%	38.71%	0.36
8 月	63.33%	36.67%	1.64
9 月	82.18%	17.82%	4.55
10 月	98.33%	1.67%	8.50
11 月	93.44%	6.56%	9.25
12 月	86.04%	13.96%	9.10

1993—2017 年共 25 a 间, 对应南海多年季平均 SLA 空间分布, 多年季平均 SLA 变化率见图 5。

南海四季的多年季平均 SLA 变化率全部为正值。春季的正变化率最大值主要分布在越南东部。夏季的正变化率最大值主要分布在吕宋海峡西南部 and 西沙群岛附近。秋季的正变化率最大值主要分布在西沙群岛东北部和越南东部。冬季的正变化率最大值主要分布在吕宋海峡西部、西沙群岛和泰国湾。可以看出, 越南东部的正变化率最大值主要出现在春季和秋季, 吕宋海峡西南部的正变化率最大值主要出现在夏季和冬季, 即南海的平均 SLA 有明显的季节性变化。

图 5 南海多年季平均 SLA 变化率的空间分布 (单位: mm/a)

2.2 海平面的时间变化

2.2.1 海平面线性变化趋势

对南海 1993—2017 年 SLA 数据网格求取区域平均, 得到南海 25 a 的年、季节和月平均 SLA 时间序列, 对该序列进行线性拟合, 得到了南海 25 a 的年、季节和月 SLA 平均变化速率。

如图 6 所示, 1993—2017 年南海海平面的平均上升速率为 4.00 mm/a , 年平均 SLA 呈现上升趋势, 从 1998 年起, 年平均 SLA 全部为正值, 南海海平面高度整体上升, 并且得到从 1993—2002 年南海海平面的平均上升速率为 7.60 mm/a , 而从

2003—2017 年南海海平面的平均上升速率为 4.26 mm/a, 即 1993—2002 年南海海平面平均上升速率高于 2003—2017 年南海海平面平均上升速率。

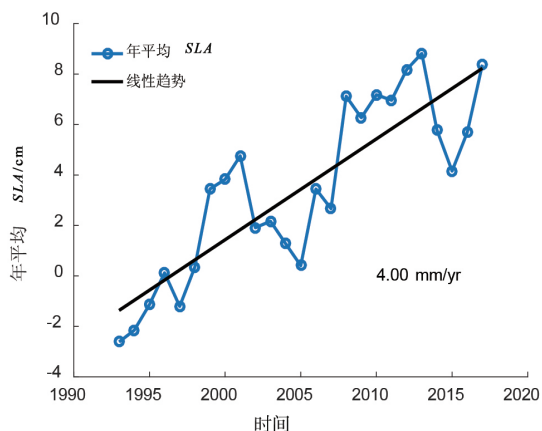


图 6 南海年平均 SLA 的时间变化及其线性趋势

季平均 SLA 最大的是秋季, 为 7.76 cm, 最小的是春季, 为 0.09 cm。冬季为 5.45 cm, 夏季为 0.31 cm。如图 7 所示, 季平均 SLA 上升速率最大的是冬季, 为 4.53 mm/a, 最小的是夏季, 为 3.77 mm/a。

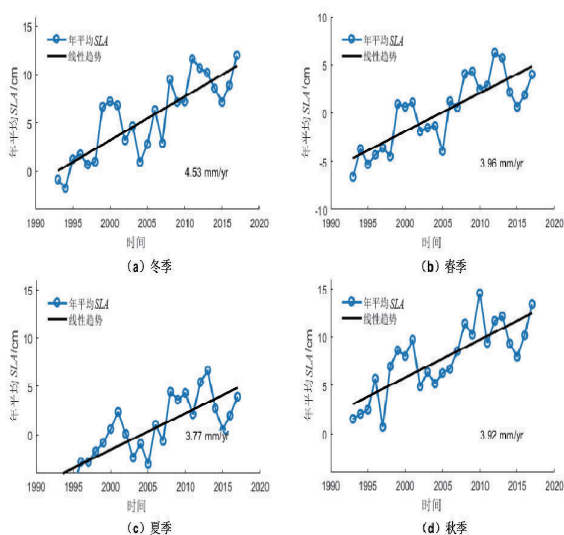


图 7 南海季平均 SLA 的时间变化及其线性趋势

在 1993—2017 年的 SLA 时间序列基础上, 预测接下来 6 年的 SLA 变化。如图 8 所示, 南海平均 SLA 不断升高, 接下来 6 年最高可达到将近 20 cm。

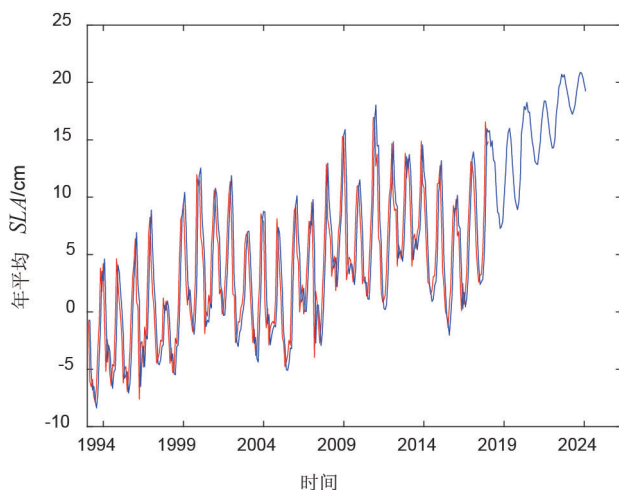


图 8 用 Winters 指数平滑法对南海平均 SLA 进行预测

2.2.2 海平面周期变化 EMD 分解得到的时间序列的第一个分量 IMF1 是高频信号, 主要是信号的高频变化, 时间序列的第二个分量 IMF2、第三个分量 IMF3 和第四个分量 IMF4 都为年际震荡, 第五个分量 IMF5 为年代际震荡, 随着分量增加, 频率逐渐变低 (图 9)。IMF2 主要变化周期是 1 a; IMF3 主要变化周期是 2 a; IMF4 主要变化周期是 5 a; IMF5 主要变化周期是 10 a。最后一个分量是 1993—2017 年南海海平面单调递增的趋势项。

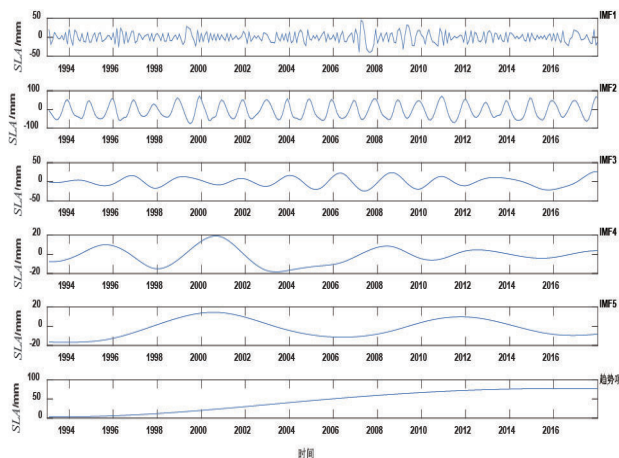


图 9 南海平均 SLA 的 EMD 分析

2.3 海平面变化的 EOF 分析

如图 10 所示, 当时间系数为正时, 空间分布为正值的海平面上升, 空间分布为负值的海

海平面下降,如果时间系数为负,则空间分布状况相反。本文主要对包含了59.8%信息量的前三个模态进行分析,第一模态占总方差的46.24%,第一模态的时间系数呈现上升的趋势,这表明南海海平面在该区间内呈现上升的趋势,见表2。而且该模态的水平梯度是从东南部到西部的。第三模态主要是以越南东部海域为中心的震荡,这显示了对该海域的上升流的响应(图11)。

表2 南海海平面 EOF 分解的模态信息

主成分	第一主成分	第二主成分	第三主成分
方差贡献率	46.24%	7.47%	6.09%

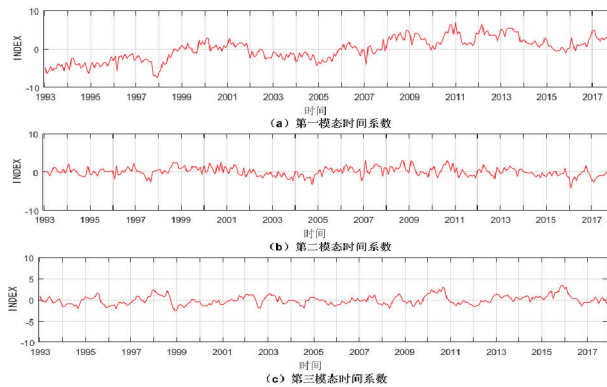


图10 南海海平面的 EOF 分解的时间系数

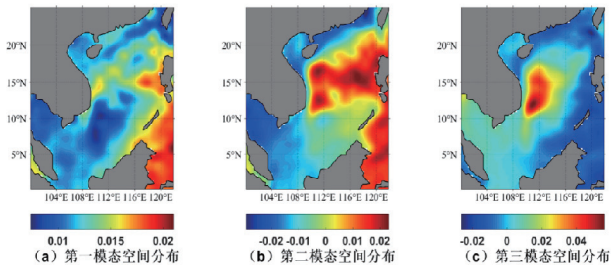


图11 南海海平面 EOF 分解的空间分布(单位: cm)

3 讨论

3.1 南海多年平均 SLA 变化率

本文得到1993—2017年南海全部海域的SLA平均变化率为4.05 mm/a,最小为1.99 mm/a,表明南海海域的海平面都呈现上升趋势。经分析可知南海中部和东部海域的上升速率比西南部的上升速率要快,这与丁荣荣等^[8]发现南海东北部海

域海平面高度上升较快,西南部海域海平面上升较慢相吻合。

3.2 南海多年月、季平均 SLA

本文发现南海SLA变化具有非常明显的季节性。吕宋海峡西部海域,冬季时海平面高度呈现为负异常,夏季时呈现为正异常;泰国湾海域,冬季时海平面高度呈现为正异常,夏季时呈现为负异常;越南东部海域,春季时海平面高度呈现为正异常,秋季时呈现为负异常。这与刘秦玉等^[9]利用POM模式,得出南海海平面高度的季节变化明显,冬季与夏季,春季与秋季,海平面高度的异常场型式完全相反的研究成果相似。

冬季的负异常中心在吕宋海峡西部和菲律宾群岛海域,春季的正异常中心在越南东部,夏季的正异常中心在吕宋海峡西南部和越南东部,秋季的负异常中心在越南东部。这与刘克修等^[10]分析得到南海夏季有2个正距平中心,冬季有2个负距平中心,春季有1个正距平中心,秋季有1个负距平中心的结果相同。

3.3 利用最小二乘拟合方法分析海平面线性变化趋势

本文得到1993—2017年南海海平面的平均上升速率为4.00 mm/a,这与郭金运等^[2]分析得到南海海平面在1993—2012年的平均上升速率为4.25 mm/a相近。

1993—2002年南海海平面平均上升速率为7.60 mm/a高于2003—2017年南海海平面平均上升速率4.26 mm/a。这与丁荣荣^[8]分析得到1993—2002年南海平均海平面上升速率为4.7 mm/a,高于谢友鸽^[11]分析得到2004—2015年南海平均海平面上升速率为1.61 mm/a的结果相类似。

3.4 EMD 的海平面周期分析

本文利用EMD分解得到主要周期变化1 a、2 a、5 a、10 a,证明了南海有明显的年际和年

代际变化,这与潘秩等^[6]利用 EMD 等算法,对 1993—2015 年南海海平面变化的规律进行总结,得到南海海平面的主要变化周期 0.5 a、1 a、1.5 a、2 至 3 a、4 至 7 a 的研究成果相似。

3.5 海平面变化的 EOF 分析

SLA 第一模态空间分布主要呈现 ENSO 模态,正值主要出现在南海东南部海域,负值主要出现在南海西部海域。1993—1999 年、2002—2006 年第一模态的时间系数为负值,在 1998 年附近出现了极小值,南海东部海域海平面高度下降,南海西部海域海平面高度上升,与 1994—1995 年、1997—1998 年和 2002—2003 年出现了厄尔尼诺现象吻合。与沈春等^[12]分析的南海 SLA 的 EOF 第一模态是 ENSO 模态的特征是 SLA 由西南部向东部倾斜的结果相同。Ho C R 等^[13]进一步揭示了南海海面高度对 ENSO 事件的响应。

3.6 南海海平面上升的机理

影响南海海平面上升的机理主要包括海水的热膨胀和冰川融化。全球变暖引起的热膨胀有一个滞后过程,这表明 20 世纪温室效应对海平面的影响将在下一世纪表现出来,世界海平面受热膨

胀的影响还会以一定的速率持续上升。南极西部冰盖的稳定性决定了未来海平面是否在短时间内上升,下一世纪海平面的上升幅度在 30 ~ 60 cm 之间^[14]。

4 结 论

本文针对中国南海 1993—2017 年的 SLA 数据进行分析。利用线性拟合分析,得到 1993—2017 年中国南海海平面的平均上升速率为 4.00 mm/a,说明近 25 a 中国南海的海平面高度上升。对南海多年平均 SLA 空间分布进行分析,得到南海大部分海域的多年平均 SLA 为正,只有很少一部分海域出现负值(菲律宾群岛中部海域)。对南海的四季进行分析,发现 SLA 平均上升速率最大的是冬季,最小的是夏季,且南海海平面高度变化具有明显的季节性变化规律。利用 Winters 指数平滑法分析,预测到相比 1993 年,2023 年南海平均海平面高度可达到将近 20 cm。利用 EMD 方法分析,得到南海有明显的年际和年代际变化。利用 EOF 对前三个主成分分析,发现第一模态是 ENSO 模态,说明 ENSO 对中国南海海平面的作用不可忽视。

参考文献:

- [1] 张栋杨,黄健元,焦嫚.海平面上升对沿海地区发展脆弱性影响评价[J].广东海洋大学学报,2018,38(4): 63-69.
- [2] 郭金运,王建波,胡志博,等.由 TOPEX/Poseidon 和 Jason-1/2 探测的 1993—2012 中国海海平面时空变化[J].地球物理学报,2015,58(9): 3103-3120.
- [3] Liu C, Li X, Wang S, et al. Interannual variability and trends in sea surface temperature, sea surface wind, and sea level anomaly in the South China Sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(11):4160-4173.
- [4] 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.
- [5] 张智光,蔡志坚.预报季节性指数的 Winters 平滑预测方法[J].预测,1993(6): 59-62.
- [6] 潘秩,岳建平,宋亚宏,等.1993—2015 年中国南海海平面变化的初步研究[J].地理空间信息,2017,15(10): 9-13.
- [7] 李婷.基于长时序遥感数据和 EOF 分析南海北部海表叶绿素 a 时空特征[D].北京:中国地质大学,2013.
- [8] 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(S2): 23-30.
- [9] 刘秦玉,贾英来,杨海军,等.南海北部海面高度季节变化的机制[J].海洋学报(中文版),2002(S1): 134-141.

- [10] 刘克修, 马继瑞, 许建平, 等. 用 TOPEX/Poseidon 资料研究南海潮汐和海面高度季节变化 [J]. 热带海洋学报, 2002(3): 55-63.
- [11] 谢友鸽. 1993—2015 年南海海平面变化研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- [12] 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.
- [13] Ho C R, Zheng Q, Soong Y S, et al. Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(C6): 13981-13990.
- [14] 黄长江, 董巧香, 林俊达. 全球温暖化与海平面上升 [J]. 自然杂志, 2000, 22(4): 225-232.

Analysis of Spatial and Temporal Variation of Sea Level in South China Sea Based on Satellite Altimeter Data

YU Rong-Zhen, XU Hua-Bing, LIU Bei

College of Electronics and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: Based on satellite altimeter data, the spatial distribution and temporal variation of Sea Level Anomalies (SLA) in the South China Sea (SCS) from 1993 to 2017 are analyzed by various methods. The main methods include linear regression, Winters exponential smoothing, Empirical Mode Decomposition(EMD) and Empirical Orthogonal Function(EOF). The results show that the annual mean SLA in most areas of the SCS is positive, and only a small number of areas have negative values (the central part of the Philippine Islands), and the mean SLA in the SCS have obvious seasonal changes. Using the linear regression method, it was found that the sea level of the SCS from 1993 to 2017 showed an overall upward trend. Based on EMD analysis, it was found that there are obvious “interannual and interdecadal changes in the SCS. The conclusions show that the sea level in the SCS is rising, with obvious seasonal and interannual cycles, and the role of ENSO on the sea level in the SCS cannot be ignored.

Key words: South China Sea; sea level anomaly; linear regression