



风场在渤海表层悬浮体多年变化中的作用

李新如, 乔璐璐, 刘兴民, 张思晨

The role of wind in the multi-year variations of surface suspended sediment in the Bohai Sea

LI Xinru, QIAO Lulu, LIU Xingmin, and ZHANG Sichen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023061601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海湾泥质区南部悬浮体夏季输运过程与机制

Transportation of suspended sediment in the southern mud area of Bohai Bay in summer: Characteristics and mechanism

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 109–121

俄罗斯极地海表层海水悬浮体浓度和磁性矿物分布特征及其影响因素

Concentration of suspended particulate matter and magnetic minerals from surface seawater in Russian Arctic Seas: Distribution and influencing factors

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 94–102

山东半岛东北部海域悬浮体季节分布及控制因素

Seasonal distribution of suspended sediments in the water northeast to Shandong Peninsula and its controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 30–42

南海北部湾表层悬浮体分布规律

Surficial distribution of suspended sediment in Beibu Gulf of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 10–18

威海湾夏季上升流现象及其对悬浮体输运的影响

Summer upwelling current in Weihai Bay and its contribution to transportation of suspended matters

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 58–67

舟山海域悬浮体的特征及输运机制

Characteristics and transport mechanism of suspended particles in offshore area of Zhoushan Islands

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 39–48



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李新如, 乔璐璐, 刘兴民, 等. 风场在渤海表层悬浮体多年变化中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 140-151.

LI Xinru, QIAO Lulu, LIU Xingmin, et al. The role of wind in the multi-year variations of surface suspended sediment in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 140-151.

风场在渤海表层悬浮体多年变化中的作用

李新如¹, 乔璐璐^{1,2}, 刘兴民¹, 张思晨¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 渤海悬浮体浓度 (Suspended Sediment Concentration, SSC) 的长期变化, 对海域水质环境及生态系统等有重要影响。近年来黄河输沙量锐减, 风作为重要的驱动要素, 已成为影响渤海 SSC 长期变化的主要原因。本文基于 2003—2021 年中等分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectrometer, MODIS) 的 Level-1B (L1B) 卫星遥感数据, 结合渤海多个航次的实测 SSC 建立反演模型, 进一步获得渤海表层 SSC 的多年数据, 采用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析的方法获得 SSC 的时空变化特征, 结合 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 风场资料, 探明风场在渤海表层悬浮体多年变化中的作用。渤海表层 SSC 的 EOF 分析结果显示: 前三个模态累积方差贡献率为 73.4%, 其中第一模态对总体方差贡献率为 53.15%, 表现为全海域同步变化, 主要受冬季风速变化控制, 尤其表现为 2009 年以前, SSC 随冬季风速的升高而增大, 2009 年以后随冬季风速的下降而减小; 第二模态对总体方差贡献率为 14.14%, 显示的是渤海湾和莱州湾 SSC 反相位的变化特征, 与风向控制下的平流输沙作用有关。研究渤海 SSC 的长期变化特征及不同海湾间的物质输运与交换, 对于保护渤海生态环境、预测河口海岸地貌变化及防灾减灾等具有重要意义。

关键词: 风场; 悬浮体浓度; 长期变化; 渤海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023061601

The role of wind in the multi-year variations of surface suspended sediment in the Bohai Sea

LI Xinru¹, QIAO Lulu^{1,2}, LIU Xingmin¹, ZHANG Sichen¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. The Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

Abstract: The multi-year variations of suspended sediment concentration (SSC) in the Bohai Sea have important impacts on the water quality and ecosystem. In recent years, the river-delivered sediments, especially from the Yellow River, have decreased significantly. As one of the influencing factors, wind has become the main factor affecting the long-term changes of SSC in Bohai Sea. Based on the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) L1B data from 2003 to 2021, this paper established an inversion model combined with the measured SSC from several voyages in the Bohai Sea to obtain the multi-year data of the surface SSC in the Bohai Sea. And the empirical orthogonal function (EOF) method was used to analysis the spatial and temporal patterns of the surface SSC in the Bohai Sea. Furthermore, the climate forecast system reanalysis(CFSR) wind data were collected to explore the role of wind field in the multi-year variations of the surface SSC in the Bohai Sea. The results of EOF analysis of the SSC showed that the cumulative variance contributed by the first three modes was 73.4%. The first mode contributed 53.15% to the overall variance and was dominated by the synchronous variation of the whole sea area. This mode was mainly controlled by the wind speed change in winter, which indicated that the SSC increased with the enhanced winter wind speed before 2009 and decreased with the weakened winter wind speed after 2009. The second mode contributed 14.14% to the overall variance and showed the variation characteristics of the inverse phase of SSC in Bohai Bay and Laizhou Bay, which was related to the advective transport of sediment controlled by the wind direction. The study of long-term changes of the SSC in the Bohai Sea and the exchange of sediment between different bays are important scientific supports to the ecological environment protection in the Bohai Sea. And the results can also be used to predict the change of coastal geomorphology and seabed disaster.

资助项目: 国家自然科学基金“台湾北部跨陆架输运通道的成因及对台风的响应”(42076179); 国家重点研发计划“中国-希腊-基于多源对地观测技术支持下的海岸带大型基础设施监测与评价系统研究”(2017YFE0133500); 中央高校基本科研业务费专项(202172003)

作者简介: 李新如 (1999—), 女, 硕士研究生, 地质学专业, E-mail: lixinru@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 乔璐璐 (1981—), 女, 博士, 教授, 从事沉积动力学方面的研究, E-mail: luluq@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-06-16; **改回日期:** 2023-09-18. 张现荣编辑

Key words: wind field; suspended sediment concentration; long-term change; Bohai Sea

海水中的悬浮体, 包括矿物颗粒、生物残骸、絮凝体等, 在近海的主要成分为悬浮泥沙^[1-2]。悬浮体是物质运输的重要载体, 其分布和扩散、沉降和再悬浮对近海物理、化学和生物过程有重要意义^[3-4], 在全球物质循环中起重要作用^[5]。同时, 悬浮体的分布和运输对海底地形地貌发育、港口航道淤积等也有重要影响^[6-10]。尤其是在海洋动力、人类活动、气候变化及河流陆源物质输入等各种因素影响下悬浮体浓度 (Suspended Sediment Concentration, SSC) 的年际变化特征^[11], 对于研究海洋环境演化和生态系统可持续发展等有重要意义。近年来大河输沙量锐减^[12], 以风场强度变化为代表的气候变化因素, 可能逐渐成为影响 SSC 长期变化的主要原因。

渤海是一个半封闭的陆架浅海, 由渤海湾、莱州湾、辽东湾、中央海盆及渤海海峡组成, 平均水深 18 m, 海底地势从 3 个海湾向中央海盆及渤海海峡倾斜, 坡度平缓 (图 1)。渤海沿岸分布着黄河、辽河、滦河等多条河流, 这些河流每年向渤海输送大量淡水及陆源物质, 其中黄河过去 50 余年来 (1950—2003 年) 年均输沙量达 8.81 亿 t^[13], 这使得渤海成为世界上 SSC 最高的陆架海区之一^[14]。

自 20 世纪 60 年代以来, 国内外学者就开始了渤海 SSC 时空变化的研究, 常用的手段包括卫星遥感、沉积动力观测和数值模拟的方法^[15-25]。研究指出渤海表层 SSC 具有近岸高、远岸低、由岸向海方

向逐渐递减的空间分布特征, 其中高值区主要分布在黄河入海口附近海域, 低值区位于渤海中部; 在季节变化上, 由于受季风等影响, 渤海表层 SSC 呈现出冬季高、夏季低的变化规律^[18,21-22]。亦有学者进一步基于经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析的方法研究了 SSC 的时空变化规律^[22, 24], 结果显示渤海湾、莱州湾 SSC 空间变化最为显著, 这与孟庆辉等^[18]得出的渤海湾、莱州湾短周期内空间变化幅度大的结论较为一致。近年来在黄河输沙量锐减的背景下, 更多的学者开始关注渤海整个海域 SSC 的长期变化趋势, 但却得出了不同的结论。基于 2000—2004 年 SeaWiFs 卫星遥感反演并结合 EOF 分析得到, 渤海表层 SSC 有逐年增高的趋势^[22]。而更长期的变化, 如 2003—2014 年的结果却显示, 渤海表层 SSC 有明显的下降趋势, 其年均下降幅度为 1.49% ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), 且各海区的表层 SSC 均呈下降趋势^[11]。前人工作中或者没有进一步分析原因, 或者推测其与风速变化、围填海工程以及黄河输沙量减少有关, 但均未开展量化的相关性分析。

渤海 SSC 变化受到河流输沙量、风浪、潮汐潮流等诸多因素的影响。其中, 黄河输沙量影响范围为距河口 5 km 内, 离河口越远影响越小, 15 m 等深线是其影响极限^[26]。尤其是在 2003—2021 年黄河输沙量较 20 世纪 50 年代锐减的背景下, 黄河输沙

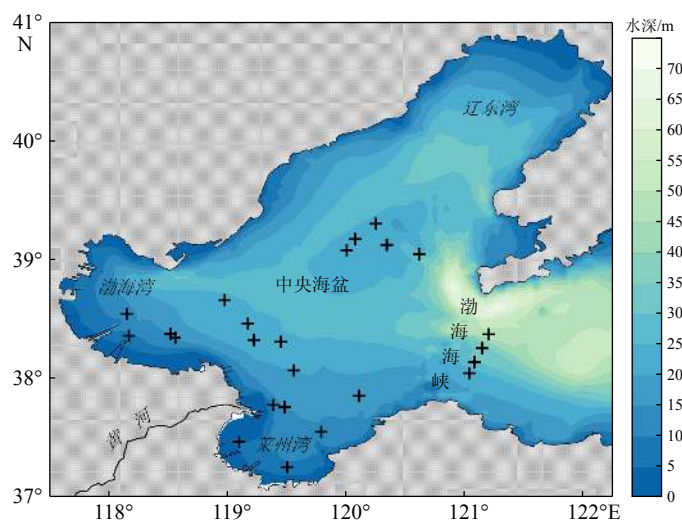


图 1 渤海水深地形和 SSC 实测站位分布图

图中黑色十字为用于遥感反演的 SSC 实测站位位置。

Fig.1 Water depth in the Bohai Sea and distribution of SSC observed stations

Black crosses show the location of the SSC observation stations used for remote sensing data inversion.

量对渤海 SSC 分布格局的影响更小;潮汐潮流主要影响 SSC 的日变化^[27-28];表层沉积物粒度和地形等因素则与海洋动力共同控制 SSC 的空间分布,如浅水区的细砂和粉砂更容易起动,形成高 SSC^[17,29-30]。在年际变化尺度上,潮汐潮流与底质地形的影响较小。除此之外,渤海 SSC 的变化还与风场强度有关^[27],大风过程可在短时间内显著改变渤海 SSC 的空间分布格局^[17,30-31],风对浅水区沉积物再悬浮和悬沙输运过程起重要作用^[17]。同时,渤海表层 SSC 冬高夏低的变化特征,也与风场冬强夏弱的季节变化规律有关。因此,在渤海表层 SSC 的长期变化中,风场强度变化有何贡献有待开展深入研究。

为了阐明渤海表层 SSC 的长期变化趋势,探明风场在其中的贡献以及对不同海湾间物质输运的影响,本文使用 2003—2021 年中等分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 的 Level-1B (L1B) 卫星遥感数据,结合渤海多个航次的实测 SSC 数据,建立遥感反演模型获得渤海表层 SSC 的时空变化,并利用 EOF 方法分析 SSC 的时空变化特征以及风场的影响。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本研究使用的卫星遥感数据来自 Aqua 卫星上搭载的 MODIS, 下载自美国宇航局网站 (<https://www.nasa.gov>) 的 L1B 数据, 时间长度为 2003 年 1 月—2021 年 12 月, 空间分辨率为 1 km。

实测 SSC 数据来自 2010 年 4 月、9 月, 2011 年 6 月, 2012 年 11 月, 2017 年 9 月, 2018 年 4 月、8 月、10 月和 2020 年 11 月的国家自然科学基金委渤海共享航次, 与遥感资料时空匹配的站位共计 30 个, 站位位置如图 1 所示。现场取样后, 用两层孔径为 0.45 μm 、直径为 47 mm 的微孔醋酸纤维膜对表层 (2~3 m) 水样进行现场抽滤、烘干、称重, 获得表层 SSC, 用于与遥感反射率 (Remote Sensing Reflectance, Rrs) 建立反演模型。

风场数据来自美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 发布的 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) 数据, 包括风速的东、北分量, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 0.312°, 时间长度为 1990 年 1 月—2022 年 2 月 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>)。

黄河利津站 2003—2021 年月均输沙量数据来自中国河流泥沙公报。

1.2 数据处理方法

1.2.1 遥感数据处理

遥感数据主要采用 NASA 官方提供的 SeaWiFS 数据分析系统 (SeaDAS) 进行大气校正、去云等初步处理, 将 L1B 遥感数据批量处理成二级 Rrs。此外, 由于冬季渤海存在可见海冰, 海冰对 SSC 反演影响较大, 会导致 Rrs 极高, 影响表层 SSC 的反演精度。本研究采用了 Liu 等^[32]使用的 Shi 和 Wang^[33-34]建立的方法去除海冰影响, 同时满足以下条件即被认定为海冰^[35]:

$$\rho_{\text{wN}}(859) > 0.048 \quad (1)$$

$$0.7 < \rho_{\text{wN}}(555) / \rho_{\text{wN}}(412) < 3.0 \quad (2)$$

$$\rho_{\text{wN}}(412) > 0.046 \quad (3)$$

$$\rho_{\text{wN}} = \text{Rrs} \times \Pi \quad (4)$$

其中 ρ_{wN} 为标准化的离水反射率, $\rho_{\text{wN}}(555)$ 为 555 nm 波段的标准化离水反射率, Rrs 为遥感卫星数据的波段反射率。

1.2.2 SSC 反演计算

前人研究表明, MODIS 第 4 波段 (545~565 nm) 的 Rrs 与渤海表层 SSC 具有较好的相关性^[11,17]。在建立反演模型时, 利用 Matlab 软件提取与实测 SSC 数据在空间 (范围 < 500 m) 和时间 (误差 < 2 h) 上匹配的 555 nm 波段的 Rrs, 共基于 30 组实测 SSC 数据和 Rrs 建立拟合关系 (图 2), 如下式所示:

$$\text{SSC} = \exp(98.96 \times \text{Rrs}_{555}) \times 1.753 \quad (5)$$

两者的拟合系数 (R^2) 为 0.92, 均方根误差 (RMSE) 为 6.25 mg/L, 拟合结果较好。基于以上公式, 反演得到 2003—2021 年渤海海域表层 SSC, 并对其进行年平均处理, 以定量化分析其时空演变特征。

1.3 经验正交函数 (EOF) 分析

对 2003—2021 年渤海海域表层年均 SSC 进行 EOF 分析, 以获得表层 SSC 的空间模态及时间系数, 研究其时空变化特征。

EOF 分析方法, 又称主成分分析或者空间模态分析法, 将变量场分解成空间模态和时间系数的乘积。空间模态对应空间样本, 称为空间特征向量或者特征向量, 反映要素场的空间分布特点。主成分对应时间变化, 也称时间系数, 反映对应空间模态

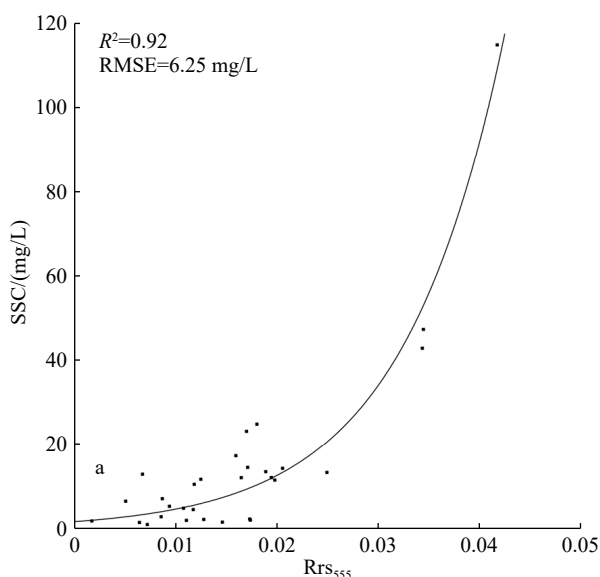


图 2 Rrs 与实测 SSC 拟合关系

Fig.2 Fitted relationship of Rrs with measured SSC

随时间的权重变化。

本文将渤海海域各站位的年均 SSC 数据处理成距平矩阵 $X_{m \times n}$, 其协方差矩阵 $C_{m \times m}$ 的特征根 ($\lambda_1 \dots \lambda_m$) 和空间模态 $V_{m \times m}$, 满足:

$$C_{m \times m} \times V_{m \times m} = V_{m \times m} \times E_{m \times m} \quad (6)$$

其中, E 是 $m \times m$ 的对角矩阵, 即

$$E = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

一般情况下, 特征根 λ 作降序排列, 即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ 。每一个特征根对应一列特征向量值, 也称 EOF 模态。如 λ_1 对应的特征向量值称为 EOF 第一模态, 记为 $\text{EOF}_1 = V(:, 1)$; λ_k 对应的特征向量值称为 EOF 第 k 模态, 记为 $\text{EOF}_k = V(:, k)$ 。将空间模态投影到原始矩阵 X 上, 得到对应的时间系数 (PC):

$$\text{PC}_{m \times m} = V_{m \times m}^T \times X_{m \times m} \quad (8)$$

EOF 分析时, 特征根 λ 越大, 其对应的空间模态越典型, 对总方差的贡献越大。第 k 个模态的方差贡献率 (S) 为:

$$S = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \times 100\% \quad (9)$$

分解出的经验正交函数是否为有意义的物理信号, 要通过显著性检验来确定。本文采用 North^[22] 提出的计算特征根的误差范围来进行显著性检验。特征根 λ_i 的误差范围可以表示如下:

$$e_i = \lambda_i \left(\frac{2}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

其中 m 为样本量, 当与相邻的特征根 λ_{i+1} 满足:

$$\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq e_i \quad (11)$$

就认为这两个特征根所对应的经验正交函数通过显著性检验, 是有意义的; 反之, 若没有通过显著性检验, 则无意义。

2 结果

2.1 渤海表层 SSC 的时空分布特征

为对 2003—2021 年渤海表层 SSC 分布进行详细研究, 绘制了 2003—2021 年渤海海域表层多年平均 SSC 及年均 SSC 距平图 (图 3)。

2003—2021 年渤海海域表层年均 SSC 表现为近岸高、远岸低的空间分布特征; 受陆源物质输入影响, SSC 高值区分布在黄河入海口附近及辽东湾顶部, 最大值可达 100 mg/L 以上, 与周舟等^[11]的研究结果一致。从各年距平值的空间分布来看: 2003—2008 年渤海表层 SSC 相对于 19 年的平均值 (图 3a), 浓度明显偏大 (图 3b-g); 2009 年为一转折点, 该年份之后 SSC 具有明显的减小趋势 (图 3h-t)。

2.2 渤海表层 SSC 的多年变化趋势

为对比渤海不同海域 SSC 的长期变化趋势, 本文将渤海划分为渤海湾、莱州湾、辽东湾以及中央海盆 4 个海域进行对比分析。图 4 为 2003—2021 年渤海不同海域年均区域化平均的 SSC 变化, 从多年平均值来看, 渤海湾、莱州湾、辽东湾以及中央海盆的 SSC 分别为 26.04、25.19、8.24、8.12 mg/L, 渤海湾 SSC 最高, 中央海盆 SSC 最低。

从多年变化趋势来看, 4 个海域年均 SSC 均表现出减小趋势, 减小速率从大到小依次为莱州湾、渤海湾、中央海盆和辽东湾, 不同海域 SSC 的变化速度不同可能与黄河输沙量的影响大小有关。

2.3 渤海表层 SSC 时空变化的 EOF 分析

对 2003—2021 年渤海表层年均 SSC 进行 EOF 分析, 得到了一系列空间模态 (表 1)。表中可得, 前三个模态累积方差贡献率为 73.4%: 其中第一模态的方差贡献率为 53.15%, 第二模态的方差贡献率为 14.14%, 第三模态的方差贡献率为 6.11%, 以下对主要模态分别成图分析 (图 5—7)。

第一模态对总体方差贡献率为 53.15%, 远大于其他模态的贡献率, 该模态反映的是渤海海域表层 SSC 的主要分布特征。渤海海域的空间模态整体

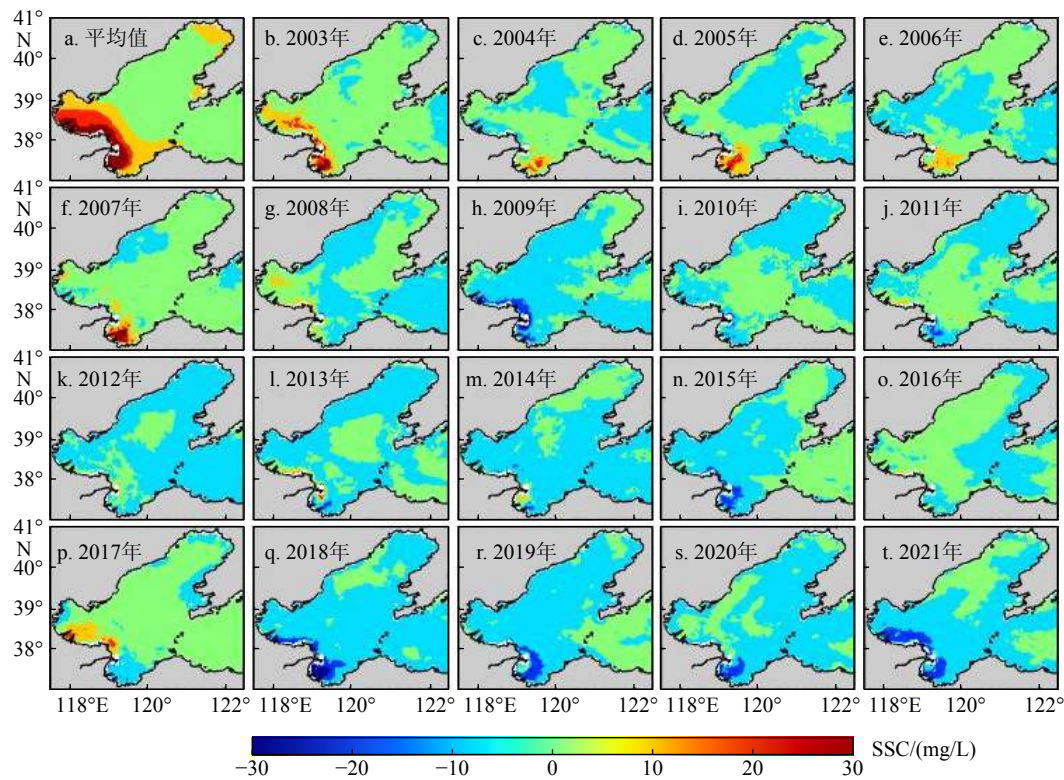


图 3 2003—2021 年渤海海域表层多年平均 SSC 及年均 SSC 距平
a 为 2003—2021 平均 SSC 分布图, b-t 分别是年均 SSC 距平图, 色轴代表 SSC 大小。

Fig.3 Multi-year averaged SSC from 2003 to 2021 and the difference between the annual averaged SSC and the multi-year averaged SSC at the surface layer of the Bohai Sea

a shows the 19-years averaged SSC from 2003 to 2021, b-t show the difference between the annual averaged SSC and the multi-year averaged SSC at the surface layer of the Bohai Sea, the color bar represents the SSC.

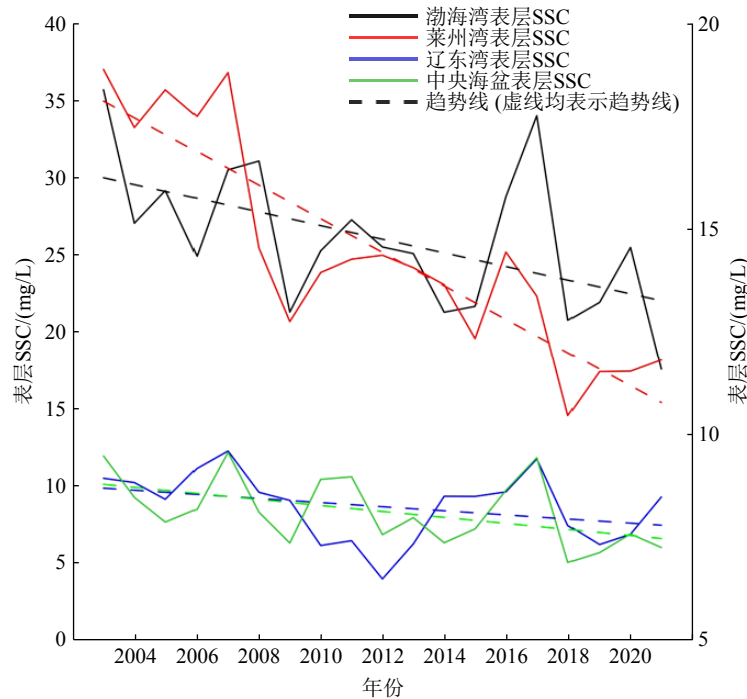


图 4 渤海不同海域 2003—2021 年年均区域化平均 SSC 变化
Fig.4 Annual averaged SSC in the different area of Bohai Sea from 2003 to 2021

表 1 渤海海域表层 SSC 空间模态
Table 1 Spatial modes of SSC in the surface layer of the Bohai Sea

	方差贡献率/%	方差累积贡献率/%	特征根误差下限	特征根误差上限	特征根
第一模态	53.15	53.15	45 726.92	47 425.52	46 576.22
第二模态	14.14	67.29	12 166.87	12 618.83	12 392.85
第三模态	6.11	73.40	5 255.24	5 450.45	5 352.84
第四模态	4.82	78.22	4 148.83	4 302.95	4 225.89
第五模态	3.45	81.67	2 970.36	3 080.70	3 025.53
第六模态	2.77	84.44	2 380.92	2 469.36	2 425.14
第七模态	2.37	86.81	2 039.76	2 115.53	2 077.64
第八模态	1.99	88.80	1 715.72	1 779.45	1 747.58
第九模态	1.87	90.67	1 608.42	1 668.17	1 638.30
第十模态	1.69	92.36	1 458.21	1 512.38	1 485.30

为正值(图 5a), 说明整个渤海海域的表层 SSC 多年变化趋势较为一致, 整体增大或减小。特征值高值分布在渤海湾和莱州湾海域, 说明这两处海域 SSC 变化最为显著。

时间系数与 SSC 的变化趋势存在一定的关联性, 当空间模态和时间系数同号(即数值同正或者同负), 则代表 SSC 变化呈现增大的趋势; 反之, 则代表 SSC 变化呈现减小的趋势, 且时间系数绝对值越大, 该年份 SSC 的空间分布类型及变化特征就越明显。第一模态空间模态总体为正, 2009 年以前时间系数为正(图 5b), 代表 SSC 整体为增大趋势; 2009 年以后时间系数多数为负, 与空间模态反号, 代表 SSC 整体为减小趋势。

第二模态对总体方差贡献率为 14.14%。图 6a 可见, 不同海区特征值的符号不同: 渤海湾和中央海盆特征值整体为正, 莱州湾和辽东湾特征值整体为负, 该模态显示的是不同海湾间 SSC 变化趋势不一致。其中以莱州湾和渤海湾的空间模态反相位变化特征最为显著, 2010 年以前时间系数大体为负(图 6b), 与莱州湾空间模态同号, 说明莱州湾表层 SSC 高于渤海湾; 而 2010 年以后时间系数大体为正, 说明渤海湾表层 SSC 高于莱州湾。从时间系数图中可以看到 2006 年和 2017 年时间系数绝对值最大, 渤海湾和莱州湾的反相位特征最为典型, 推测是海湾间悬浮体的平流输运与交换导致。从 SSC 的空间分布图(图 3e、p)也可以证实以上特征。

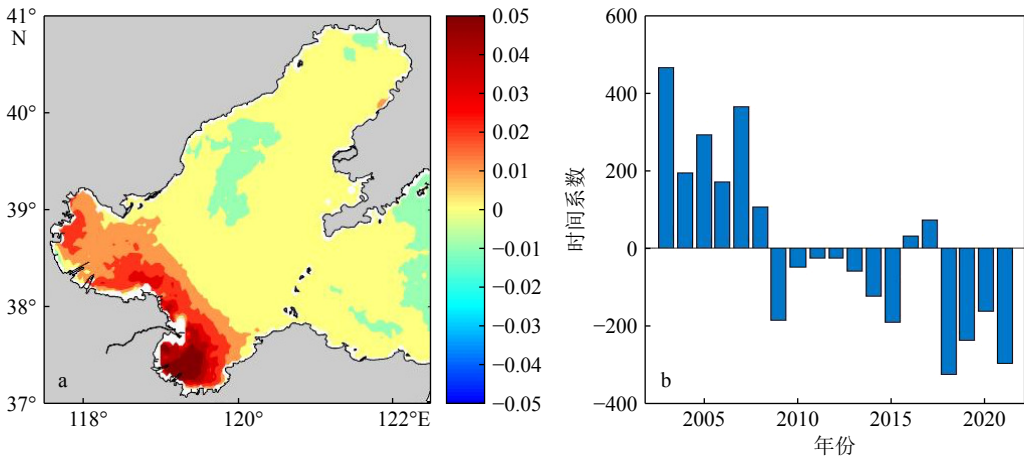


图 5 EOF 第一模态空间模态及时间系数
a 为第一模态空间模态分布图, 色轴代表特征值大小, b 为第一模态时间系数图。
Fig.5 The spatial mode and time coefficient of the first mode of EOF
a shows the distribution of spatial mode of the first mode, the color bar represents the eigenvalue, b shows the time coefficient of the first mode.

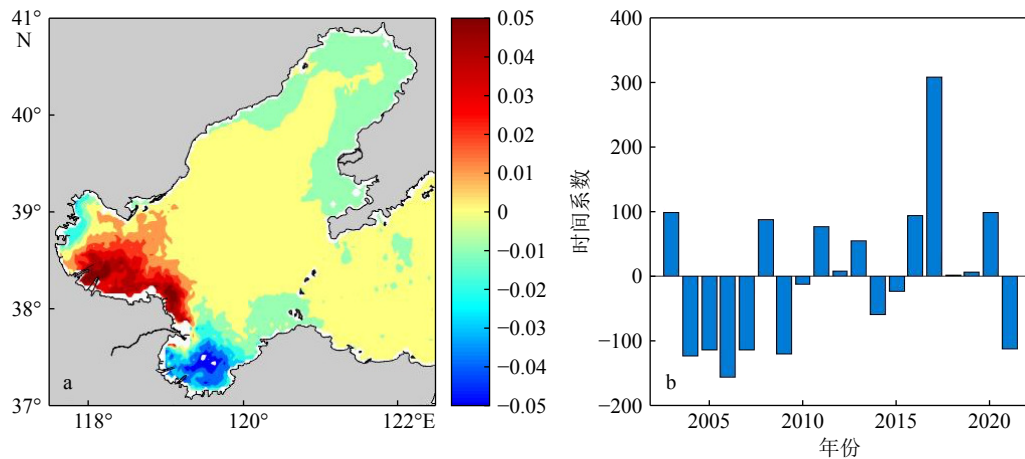


图 6 EOF 第二模态空间模态及时间系数

a 为第二模态空间模态分布图, 色轴代表特征值大小, b 为第二模态时间系数图。

Fig.6 The spatial mode and time coefficient of the second mode of EOF

a shows the distribution of spatial mode of the second mode, the color bar represents the eigenvalue, b shows the time coefficient of the second mode.

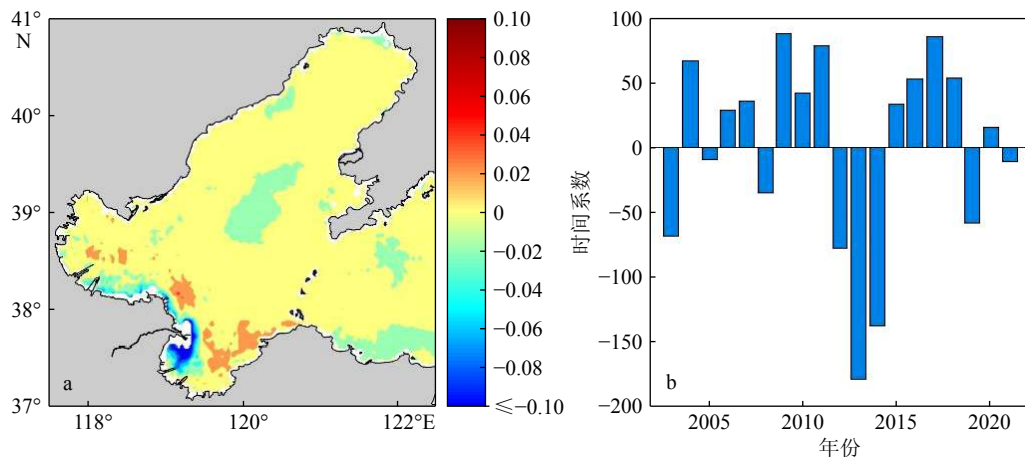


图 7 EOF 第三模态空间模态及时间系数

a 为第三模态空间模态分布图, 色轴代表特征值大小, b 为第三模态时间系数图。

Fig.7 The spatial mode and time coefficient of the third mode of EOF

a shows the distribution of spatial mode of the third mode, the color bar represents the eigenvalue, b shows the time coefficient of the third mode.

第三模态对总体方差贡献率为 6.11%。图 7a 可见, 渤海大部分海域空间模态为正值, 但在黄河入海口附近海域, 悬浮体以 10 m 等深线为界, 浅水区和深水区 SSC 呈现反相位变化, 以莱州湾西部海域及渤海南部海域反相位变化最为显著。该模态反映了悬浮体从浅水向深水扩散受到 10 m 等深线处海洋水文现象影响的特征, 根据学者们的研究成果, 黄河口切变锋即分布在 10 m 等深线处^[36-38], 表明了切变锋对黄河口附近悬浮体向外海扩散的阻碍作用。初步认为该模态反映的是黄河入海口切变锋的影响。

3 讨论

3.1 风速变化对渤海表层 SSC 长期变化的影响

因冬季风速在全年平均风速中的贡献较大^[39], 且冬季 SSC 影响了全年平均 SSC 的量值, 因此本文考虑冬季风速变化对渤海表层 SSC 长期变化的影响。从 1990—2021 年渤海湾、莱州湾海域风场长期变化趋势可见(图 8), 1990—2009 年, 渤海海域冬季风速呈增大趋势; 2009—2021 年, 该海域冬季风速呈减小趋势, 这和第一模态所反映的 SSC 随时间变

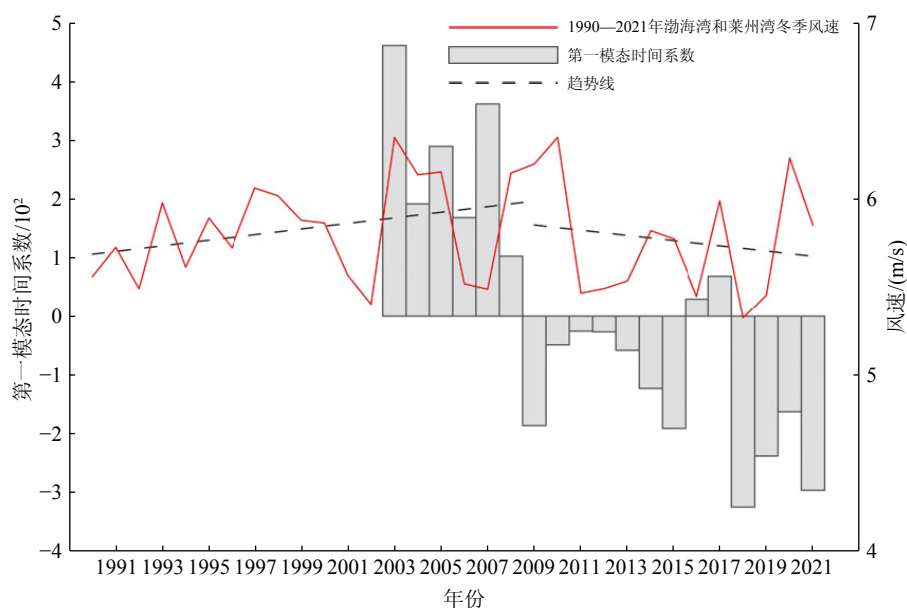


图 8 2003—2021 年渤海湾和莱州湾冬季区域化平均风速及第一模态时间系数

Fig.8 Regional averaged wind speed in Bohai Bay and Laizhou Bay during winter from 2003 to 2021 and the time coefficient of the first mode

化趋势基本一致,在风场驱动下,SSC 呈现出以 2009 年为界,前后变化趋势相反的特征。风速的这一变化趋势与杨宏达等^[39]、李正泉等^[40]的研究成果一致。

为对比 2009 年前后 SSC 的变化幅度,分别对 2005—2008 年及 2009—2012 年两个阶段的渤海海域表层 SSC 进行平均处理并计算其差值(图 9)。图中可见,以 2009 年为节点,前 4 年渤海海域表层 SSC 高值区分布范围较广(图 9a),主要见于渤海湾与莱州湾,且其均值与 2009 年之后的 4 年平均相比,明显偏大,两者相对变化最大可达 -70.94%(图 9c)。且这两个阶段,黄河的平均输沙量分别为 1.50×10^8 t 和 1.31×10^8 t,相差不大。因此 SSC 在 2009 年前后的变化主要与冬季风强弱有关,而与黄河输沙量的变化相关性不大。

3.2 风向变化对海湾间悬浮体运输的影响

第二模态显示了渤海湾和莱州湾 SSC 的反相位变化,为研究两个海湾 SSC 变化及可能存在的联系,本文分别计算了 2003—2021 年两个海湾区域平均的 SSC 距平值(图 10)。2009 年以前,二者变化趋势大体一致,均表现为相对于多年平均值偏大的趋势;2009 年及以后,相对于多年平均值总体表现为减小趋势,体现了如 3.1 所分析的风速对 SSC 多年变化趋势的控制作用,此为渤海 SSC 的主要变化特征。在此基础上叠加的第二模态所显示的渤海湾和莱州湾 SSC 反相位变化特征,为部分年份表现出来的分布特点,其中,以 2006 及 2017 两个年份最

为典型(图 10)。

从 2006 年与 2017 年的年均风速距平(图 11a、b)可以看到,2006 年除渤海湾南部和渤海中部的风速略大外,渤海湾大部分海域和莱州湾的风速都小于多年平均值,而 2017 年则反之。风速的这一变化特征与 SSC 的空间分布明显相反(图 11c、d),2006 年莱州湾 SSC 较高,渤海湾 SSC 较低;2017 年渤海湾 SSC 高而莱州湾 SSC 低。这说明这两个年份中风速变化导致的再悬浮变化对 SSC 的贡献较小。尽管 2006 年输沙量(1.64×10^8 t)明显大于 2017 年输沙量(0.08×10^8 t),根据前人研究结果,黄河输沙量影响范围仅限于河口地区^[26],因此黄河输沙量可能不是主要影响因素。但是从两个年份的风向对比(图 11e)来看,2017 年风向明显向东偏转,加强了悬浮体向渤海中部的平流运输,加之此时风速较强,再悬浮泥沙浓度较大,因此有利于莱州湾悬浮体向渤海湾中部的输运,导致 2017 年莱州湾 SSC 较低而渤海湾 SSC 较高。

3.3 风影响渤海 SSC 的机制分析

大风作用可使海水紊动强度增大,一方面可以增强垂直混合,另一方面使表层沉积物发生再悬浮^[2],从而使得海水表层 SSC 增大^[20]。同时,大风对 SSC 的影响又受到水深和表层沉积物类型的限制,相同风力条件下,在水深较浅及表层沉积物粒径较小的海区,SSC 对风的响应更为明显,例如渤海湾和莱州湾的 SSC 受风速影响程度远大于中央海

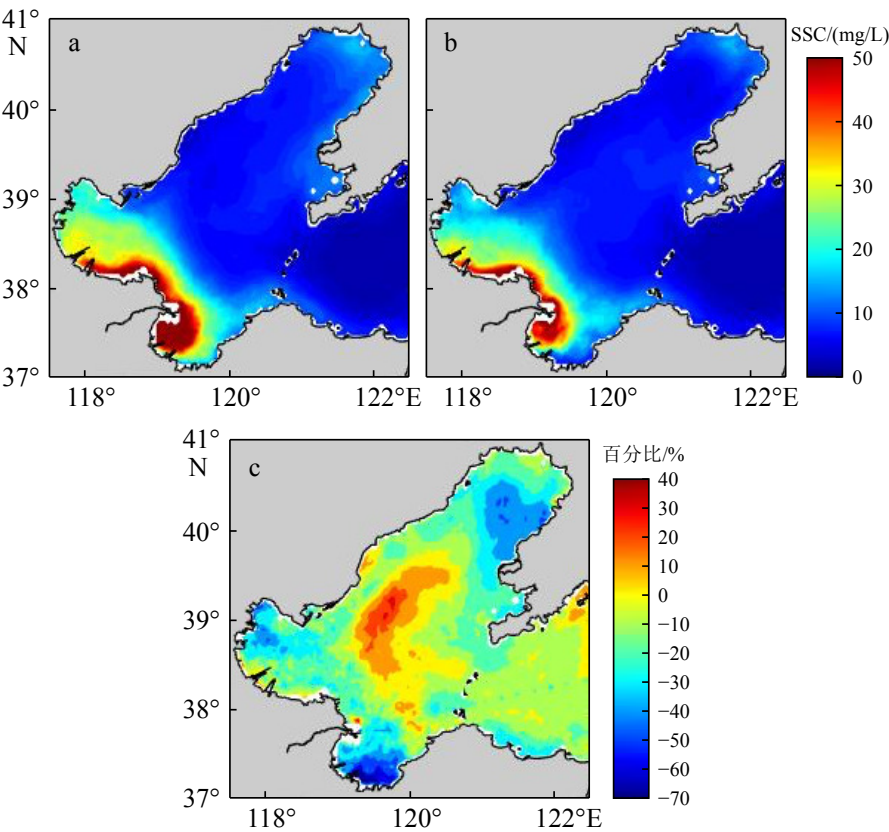


图 9 2009 年前后渤海海域表层 SSC 分布及相对变化

a: 2005—2008 年渤海海域表层平均 SSC 分布, b: 2009—2012 年渤海海域表层平均 SSC 分布, c: (b-a)/a, 2009—2012 年与 2005—2008 年渤海海域表层平均 SCC 分布相对变化。

Fig.9 Distribution and relative changes of averaged SSC at the surface layer of the Bohai Sea before and after 2009

a shows averaged SSC at the surface layer of the Bohai Sea from 2005 to 2008, b shows averaged SSC from 2009 to 2012, c is (b-a)/a which shows the relative changes of the latter stage to the former stage.

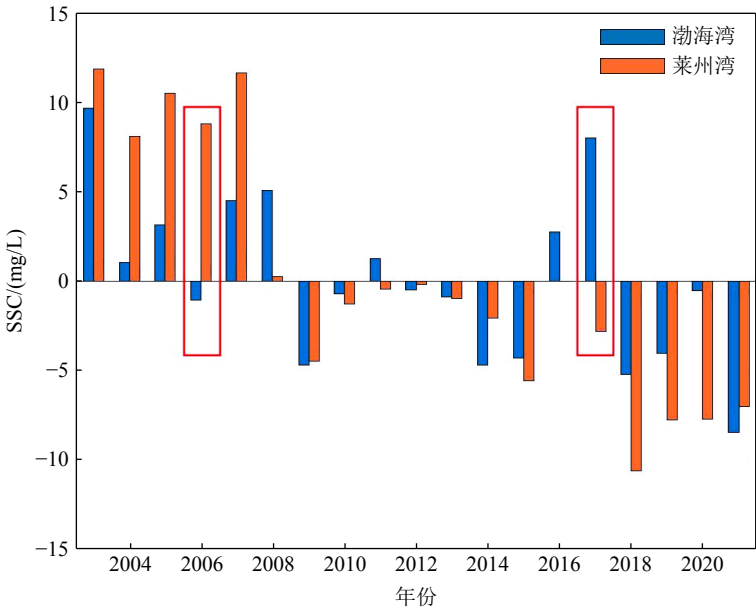


图 10 2003—2021 年渤海湾及莱州湾表层区域平均 SSC 的年距平

Fig.10 Annual regionalized averaged variation of SSC in Bohai Bay and Laizhou Bay

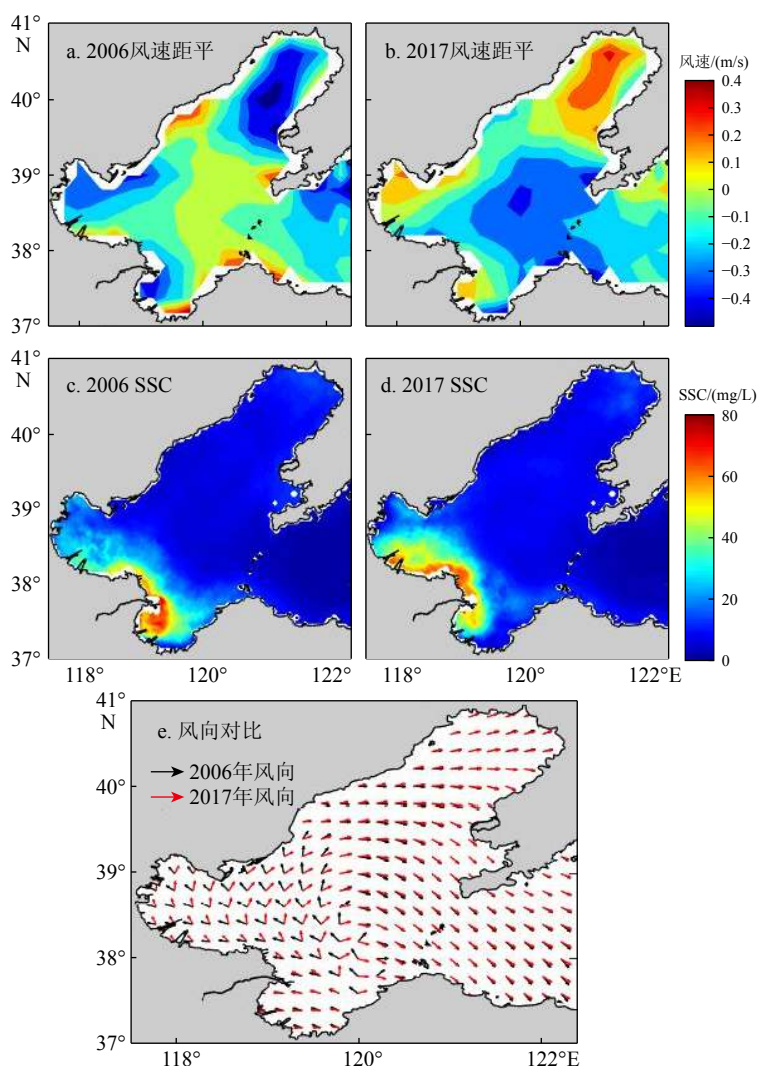


图 11 2006、2017 年渤海风速距平、表层 SSC 及风向对比图

Fig.11 The anomaly of annual averaged wind speed , distribution of SSC and the comparison of wind direction in 2006 and 2017 of the Bohai Sea

盆。同时,大风引起的海流可引起悬浮体的水平输运,也会影响 SSC 的空间格局^[2,20]。

4 结论

(1)渤海表层 SSC 的 EOF 分析结果显示:前三个模态累积方差贡献率为 73.4%,其中第一模态对总体方差贡献率为 53.15%,以全海域同步变化为主,其受控于冬季风速的长期变化;第二模态对总体方差贡献率为 14.14%,显示的是渤海湾和莱州湾 SSC 反相位的变化特征,与风向控制下的平流输沙作用有关;第三模态对总体方差贡献率为 6.11%,显示的是黄河三角洲附近以 10 m 等深线为界,浅水区和深水区 SSC 呈现反相位变化的分布特征,可能与黄河口切变锋对河口区 SSC 向外海运输的限制作用有关。

(2)冬季风速的变化影响了渤海表层 SSC 的多年变化趋势,二者呈现明显的正相关关系:以 2009 年为明显转折点,2009 年以前冬季风速呈上升趋势,SSC 增大;2009 年以后冬季风速呈下降趋势,SSC 减小。2009 年前后 4 年平均的渤海 SSC 相对变化量最大可达-70.94%。

(3)风向的偏转影响了渤海湾和莱州湾悬浮体的水平输运,表现为 2006 年与 2017 年两个海湾 SSC 距平值呈现反相位变化。

致谢: 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

- [1] 杨作升,王兆祥,郑爱芬,等. 黄河口毗邻渤海陆架区悬浮体成分 [J].

- 青岛海洋大学学报, 1990, 20(1): 22-36. [YANG Zuosheng, WANG Zhaoxiang, ZHENG Aifen, et al. Compositions of suspended matter on the southern Bohai shelf adjacent to the yellow river estuary[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1990, 20(1): 22-36.]
- [2] 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等. 南黄海海水中悬浮体的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 101-112. [QIN Yunshan, LI Fan, XU Shanmin, et al. Suspended matter in the South Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1989, 20(2): 101-112.]
- [3] DeMaster D J, Kuehl S A, Nittrouer C A. Effects of suspended sediments on geochemical processes near the mouth of the Amazon River: examination of biological silica uptake and the fate of particle-reactive elements[J]. *Continental Shelf Research*, 1986, 6(1-2): 107-125.
- [4] Kuehl S A, Nittrouer C A, Allison M A, et al. Sediment deposition, accumulation, and seabed dynamics in an energetic fine-grained coastal environment[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(5-6): 787-815.
- [5] Holligan P M, de Boois H. Land-ocean interactions in the coastal zone (LOICZ) science plan[R]. Global Change Report 25, Stockholm, 1993: 1-50.
- [6] 韦钦胜, 刘璐, 臧家业, 等. 南黄海悬浮体浓度的平面分布特征及其输运规律 [J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 73-83. [WEI Qinsheng, LIU Lu, ZANG Jiaye, et al. The distribution and transport of suspended matter in the southern Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 73-83.]
- [7] 白虹, 王凡. 台湾暖流和长江冲淡水在 32°N 断面和 PN 断面上的分布及其变化 [J]. 海洋科学集刊, 2010(50): 11-22. [BAI Hong, WANG Fan. Distributions and variations of the Taiwan warm current water and Changjiang diluted water along 32°N and PN sections[J]. Studia Marina Sinica, 2010(50): 11-22.]
- [8] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究 [J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 1-16. [SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(4): 1-16.]
- [9] Lü X G, Qiao F L, Xia C S, et al. Upwelling off Yangtze River estuary in summer[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111(C11): C11S08.
- [10] Ramakrishnan D, Bharti R, Das M. A technique for estimation of suspended sediment concentration in very high turbid coastal waters: an investigation from Gulf of Cambay, India[J]. *Marine Geology*, 2013, 346: 256-261.
- [11] 周舟, 张万磊, 江文胜, 等. 渤海表层悬浮物浓度长期变化 (2003—2014 年) 的卫星反演研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(3): 10-18. [ZHOU Zhou, ZHANG Wanlei, JIANG Wensheng, et al. Long-term variation of suspended sediment concentration in the Bohai sea based on retrieved satellite data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(3): 10-18.]
- [12] 杨立建, 马小川, 贾建军, 等. 近百年来黄河改道及输沙量变化对山东半岛泥质楔沉积物粒度特征的影响 [J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 78-89. [YANG Lijian, MA Xiaochuan, JIA Jianjun, et al. Impacts of channel shifts and interannual sediment load reducing of the Yellow River on the grain size characteristics of sediments in the Shandong mud wedge over the past 100 years[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(1): 78-89.]
- [13] 任惠茹, 李国胜, 崔林林, 等. 近 60 年来黄河入海水沙通量变化的阶段性 与多尺度特征 [J]. 地理学报, 2014, 69(5): 619-631. [REN Huiru, LI Guosheng, CUI Linlin, et al. Phases and periodic changes of water discharge and sediment load from the Yellow River to the Bohai Sea during 1950-2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 619-631.]
- [14] 郭瑜璇. 渤、黄、东海悬浮物传输过程和机制的数值模拟 [D]. 自然资源部第一海洋研究所硕士学位论文, 2019. [GUO Yuxuan. Numerical simulation of suspended sediment transport process and its mechanism of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[D]. Master Dissertation of the First Institute of Oceanography, MNR, 2019.]
- [15] 赵倩. 基于遥感定量反演的黄河口表层悬沙分布及动力机制分析 [D]. 鲁东大学硕士学位论文, 2016. [ZHAO Qian. The distribution of surface suspended sediment and its dynamic mechanism analysis based on Landsat images in Yellow River estuary[D]. Master Dissertation of Ludong University, 2016.]
- [16] 刘晓, 黄海军, 刘艳霞, 等. 黄河三角洲附近海域悬浮泥沙浓度估算 [J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 10-12. [LIU Xiao, HUANG Haijun, LIU Yanxia, et al. Estimation of suspended sediment concentration in the Sea Water Near the Yellow River Delta[J]. Yellow River, 2013, 35(2): 10-12.]
- [17] Wang H J, Wang A M, Bi N S, et al. Seasonal distribution of suspended sediment in the Bohai Sea, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 17-32.
- [18] 孟庆辉, 王林, 陈艳拢, 等. 基于 GOCI 的渤海悬浮物分布及日变化遥感初探 [J]. 海洋技术学报, 2018, 37(6): 73-78. [MENG Qinghui, WANG Lin, CHEN Yanlong, et al. Preliminary study on the distribution and daily variation of total suspended particulate matters in the Bohai Sea based on the geostationary ocean color imager[J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(6): 73-78.]
- [19] 褚言皓. 基于 GOCI 影像的黄河口邻近海域悬沙浓度时空动态及驱动因素研究 [D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2022. [CHU Yanhao. Spatiotemporal dynamics and driving factors of suspended sediment concentration in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on GOCI images[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2022.]
- [20] 卜栩楠. 黄河口海域悬浮物浓度遥感反演算法及时空分布特征研究 [D]. 内蒙古大学硕士学位论文, 2018. [BU Xunan. The temporal and spatial distribution characteristics of suspended particulate matters-based on remote sensing in the Yellow River estuary[D]. Master Dissertation of Inner Mongolia University, 2018.]
- [21] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海悬浮物分布的遥感研究 [J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 10-18. [CUI Tingwei, ZHANG Jie, MA Yi, et al. The study on the distribution of suspended particulate matter in the Bohai Sea by remote sensing[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 10-18.]
- [22] 于炜. 渤海表层悬浮物分布变异规律的研究 [D]. 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 2011. [YU Wei. Study on the variation pattern of the distribution of suspended sediment in the surface layer of the Bohai Sea[D]. Master Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences Institute of Oceanology, 2011.]
- [23] 庞重光, 李坤, 于炜. 渤海表层悬沙的时空分布特征及其动力成因 [J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 450-458. [PANG Chongguang, LI

- Kun, YU Wei. Distribution characteristics, seasonal variability and dynamical mechanism of suspended sediment in the surface layer of the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(4): 450-458.]
- [24] 庞重光, 于炜. 渤海表层悬浮泥沙的空间模态及其时间变化[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 722-727. [PANG Chongguang, YU Wei. Spatial modes of suspended sediment concentration in surface water in Bohai Sea and their temporal variations[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 722-727.]
- [25] Qiao S Q, Shi X F, Zhu A M, et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 337-344.
- [26] 褚言皓, 吴文娟, 李鹏, 等. 黄河口悬浮泥沙时空动态及其驱动机制[J]. *海洋学报*, 2022, 44(6): 150-163. [CHU Yanhao, WU Wenjuan, LI Peng, et al. Temporal and spatial dynamics of suspended sediment and its driving mechanism in the Yellow River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(6): 150-163.]
- [27] 李舒豪, 李广雪, 徐继尚, 等. 基于 ADCP 反演渤海湾悬浮体浓度年变化[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(1): 30-41. [LI Shuhao, LI Guangxue, XU Jishang, et al. Annual variation of suspended sediment concentration in Bohai bay based on ADCP[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(1): 30-41.]
- [28] 李阳东, 胡佳杰, 吴珍瑜. 基于 GOCI 影像的半月潮周期内渤海悬浮泥沙浓度变化研究[J]. *海洋通报*, 2021, 40(3): 348-360. [LI Yangdong, HU Jiajie, WU Zhenyu. Variation of suspended sediment concentration in the Bohai Sea during the fortnightly tide period based on GOCI images[J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(3): 348-360.]
- [29] 江文胜, 苏健, 杨华, 等. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系[J]. *海洋学报*, 2002, 24(S1): 212-217. [JIANG Wensheng, SU Jian, YANG Hua, et al. The relationship between SPM concentration and hydrodynamic condition in the Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(S1): 212-217.]
- [30] 王勇智, 江文胜. 渤、黄、东海悬浮物质量浓度冬、夏季变化的数值模拟[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(1): 28-33. [WANG Yongzhi, JIANG Wensheng. Numerical simulation of variations in winter and summer suspended material concentrations in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(1): 28-33.]
- [31] 曹永旺, 延军平. 1971—2013 年环渤海地区风速的时空特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1320-1329. [CAO Yongwang, YAN Junping. Spatial-temporal analysis of wind speed in the Bohai rim region during 1971-2013[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5): 1320-1329.]
- [32] Liu X M, Qiao L L, Zhong Y, et al. Multi-year winter variations in suspended sediment flux through the Bohai strait[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4066.
- [33] Shi W, Wang M H, Jiang L D. Spring-neap tidal effects on satellite ocean color observations in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2011, 116(C12): C12032.
- [34] Shi W, Wang M H. Sea ice properties in the Bohai Sea measured by MODIS-Aqua: 1. Satellite algorithm development[J]. *Journal of Marine Systems*, 2012, 95: 32-40.
- [35] Zhou Z, Bian C W, Wang C H, et al. Quantitative assessment on multiple timescale features and dynamics of sea surface suspended sediment concentration using remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2017, 122(11): 8739-8752.
- [36] 李广雪, 成国栋, 魏合龙, 等. 现代黄河口区流场切变带[J]. *科学通报*, 1994, 39(10): 928-932. [LI Guangxue, CHENG Guodong, WEI Helong, et al. Flow field shear zone in the modern Yellow River estuary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(10): 928-932.]
- [37] 王厚杰, 杨作升, 毕乃双. 黄河口泥沙输运三维数值模拟 I: 黄河口切变锋[J]. *泥沙研究*, 2006(2): 1-9. [WANG Houjie, YANG Zusheng, BI Naishuang. 3-D simulation of the suspended sediment transport in the Yellow River mouth I: shear front off the Yellow River mouth[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(2): 1-9.]
- [38] 毛政, 王楠, 宋德海, 等. 基于 GOCI 和 FVCOM 的黄河口切变锋特征与泥沙输运研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2022, 52(6): 13-26. [MAO Zheng, WANG Nan, SONG Dehai, et al. Study on the characteristics of shear front and current transport of sediment in the Yellow River estuary based on GOCI and FVCOM[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2022, 52(6): 13-26.]
- [39] 杨宏达, 乔璐璐, 李广雪, 等. 黄河三角洲海上风场再分析资料对比[J]. *海洋科学*, 2022, 46(3): 14-24. [YANG Hongda, QIAO Lulu, LI Guangxue, et al. Comparison of reanalysis wind field off the Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2022, 46(3): 14-24.]
- [40] 李正泉, 肖晶晶, 马浩, 等. 中国海域近海面风速未来变化降尺度预估[J]. *海洋技术学报*, 2016, 35(6): 10-16. [LI Zhengquan, XIAO Jingjing, MA Hao, et al. Downscaling projection of surface wind speed variation over China's sea areas[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2016, 35(6): 10-16.]