

渤海湾近二十年生态环境关键参数月平均变化规律

田明阳^{1,2,3}, 田振环^{1,2,3*}, 冯琦¹, 范玉锦¹, 董娜^{2,3}, 邵艳琴^{1,2,3}, 王振国^{2,3}

¹中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛

²山东省地质矿产勘查开发局第一地质大队, 山东 济南

³山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南

收稿日期: 2024年7月10日; 录用日期: 2024年10月7日; 发布日期: 2024年10月18日

摘要

海面温度(SST)、悬浮体浓度(SSC)和叶绿素a(Chla)等参数是海洋生态环境的关键指标, 可为保护海洋生态环境、维护生物多样性、推动可持续发展等提供科学依据。文章利用近20年遥感资料, 反演了渤海湾海面温度(SST)、悬浮体浓度(SSC)和叶绿素a(Chla)月平均变化规律, 得到以下研究成果: 1) 渤海湾SST多年月平均空间变化规律十分明显, 表现出冬半年和夏半年特征。冬半年, 10~12月至翌年1~3月, 近岸SST低, 远岸SST高; 4至9月为夏半年, 近岸SST高, 远岸SST低。2) 渤海湾的细颗粒物主要来自黄河三角洲近海的再悬浮。每年10月份黄河三角洲地区近海出现SSC高浊度带, 范围和强度逐渐加强, 至翌年2、3月份达到最大, 4月份突然收缩, 5~9月份高浊度带消失, 整个渤海湾SSC也随之降低。从最大浊度带分布状况可以看出, 渤海湾表层悬浮体主要来自现代黄河三角洲的冬季再悬浮, 尤其是到2、3月份SSC高值区覆盖大部分渤海湾区域。3) 渤海湾叶绿素分布特点始终呈现近岸高远岸低的特点。八月达到一年中的最大值, 五月次之, 12月达到一年中的最小值, 11月次之。

关键词

渤海湾, 海面温度, 悬浮体浓度, 叶绿素a, 卫星遥感

Monthly Average Variation Pattern of Key Ecological and Environmental Parameters in Bohai Bay over the Past Two Decades

Mingyang Tian^{1,2,3}, Zhenhuan Tian^{1,2,3*}, Qi Feng¹, Yujin Fan¹, Na Dong^{2,3}, Yanqin Shao^{1,2,3}, Zhenguo Wang^{2,3}

¹College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²No.1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan Shandong

*通讯作者。

文章引用: 田明阳, 田振环, 冯琦, 范玉锦, 董娜, 邵艳琴, 王振国. 渤海湾近二十年生态环境关键参数月平均变化规律[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(10): 1247-1255. DOI: 10.12677/ag.2024.1410115

Abstract

Sea surface temperature (SST), suspended solids concentration (SSC), and chlorophyll a (Chla) are key indicators of the marine ecological environment, which can provide scientific basis for protecting the marine ecological environment, maintaining biodiversity, and promoting sustainable development. This article uses remote sensing data from the past 20 years to invert the monthly average variation patterns of sea surface temperature (SST), suspended sediment concentration (SSC), and chlorophyll a (Chla) in the Bohai Bay. The following research results are obtained: 1) The spatial variation patterns of monthly average SST in the Bohai Bay over the years are very obvious, showing characteristics of winter and summer half months. In the winter half year, from October to December to January March of the following year, the SST near the shore is low, while the SST far away is high; April to September is the summer half year, with high SST near the shore and low SST far away. 2) The fine particulate matter in Bohai Bay mainly comes from the resuspension near the Yellow River Delta. Every October, a high turbidity zone of SSC appears in the nearshore areas of the Yellow River Delta, gradually strengthening in scope and intensity. It reaches its maximum in February and March of the following year, suddenly contracting in April, and the high turbidity zone disappears from May to September. The SSC in the entire Bohai Bay also decreases accordingly. From the distribution of the maximum turbidity zone, it can be seen that the surface suspended particles in the Bohai Bay mainly come from the winter resuspension of the modern Yellow River Delta, especially in February and March when the SSC high value area covers most of the Bohai Bay area. 3) The distribution characteristics of chlorophyll in the Bohai Bay have always shown a high near shore and low far shore. August reaches the maximum value of the year, followed by May, December reaches the minimum value of the year, and November takes the second place.

Keywords

Bohai Bay, Sea Surface Temperature, Suspended Sediment Concentration, Chlorophyll a, Satellite Remote Sensing

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋水文和悬浮物质等要素是海洋环境研究的重要依据，是了解海洋、认识海洋、经略海洋的关键要素。渤海作为我国的内陆海，是我国改革开放的前沿和海洋开发的重要场所，是人民生活不可缺少的宝贵资源，对环渤海经济带的发展起到不可估量的作用。近年来，随着经济的飞速发展，城市化、工业化不断加快，大量的工业废水和生活污水排放，人口增加带来的人类活动的日渐频繁，港口海岸的开发利用，这些都给渤海水环境带来极大的影响。悬浮体是影响水体的重要陆源物质，也是水体生态系统的重要组成部分，它既是藻类的生存基础，又可以通过改变水质、透光度等，影响其他水生生物的生存环境。

渤海湾是水动力条件较为复杂的海湾，人类活动频繁，物质和能量高频交换。在水动力作用下，悬沙的输运往往会引起海底冲淤变化，影响海床演变和岸滩稳定[1]，进而也影响着人类生活。开展近岸和

海湾地区悬浮泥沙分布特征和运输机制的研究,对于指导海洋工程建设和人类活动有重要意义,对底床冲淤、营养盐和污染物的输送、生物初级生产力、旅游业等具有重要影响[2][3],对于研究现代沉积过程有实用意义和理论价值。

渤海湾的泥沙输运具有季节变化特征。夏季渤海湾表层悬浮体浓度表现出近岸高、远岸低,底层高、表层低的分布特征[4]-[6],冬季表层悬浮体空间分布也不均匀,呈现近岸高、远岸低;南岸高、北岸低的趋势,冬季受强风浪以及冬季风的影响,水体扰动强烈,黄河口的沉积物发生再悬浮,悬浮体浓度增加,并在环流、潮流、波浪等作用向渤海湾西部和北部扩散[7]。发生极端天气事件时,由于波浪影响,渤海湾浅水区破波带范围内形成较宽的高含沙带,而且在风暴过程中悬沙变化比深水区更加剧烈[8]。另外,关于潮流对泥沙输运的影响,从小潮到大潮,渤海湾表层水体 SSC 呈现为先减小后增加的趋势,潮汐作用对 SSC 的半月潮周期变化有着非常重要的影响[4]。

黄河口作为渤海湾泥沙供应的重要来源,黄河口附近的水动力结构对渤海湾的泥沙输运也有重要影响,研究表明,1996年改道后,黄河入海悬浮泥沙通量指向河口西北方(渤海湾内)。而原清水沟流路时期,黄河入海泥沙输运方向为先向河口东南偏转,扩散入外海的泥沙经河口切变锋阻挡大量在河口东南侧落淤,部分扩散入远岸端的泥沙绕过流场切变带向河口西北扩散[9]。

在风、潮汐和环流影响下,渤海湾内悬浮体的搬运对海岸工程也有重要作用,前人多用实测、遥感和数值模拟的方法勘测水体的悬浮体浓度和分布情况[10][11],然而现场勘测不仅受天气影响较大,又耗费大量人力、物力和财力,因此本文利用海水表层的遥感数据,探寻渤海湾悬浮泥沙、海表温度以及叶绿素浓度的变化规律。

2. 数据与方法

渤海湾是中国渤海三大海湾之一,位于渤海西部。研究区(图1)海域水深变化平缓,最大水深为32.4 m,出现在东北部凹槽处;海湾平均水深不大于20 m,约为18 m。海底地形平坦,除个别海域(如凹槽、水下岸坡)外,海底地形坡度不大于0.2‰。

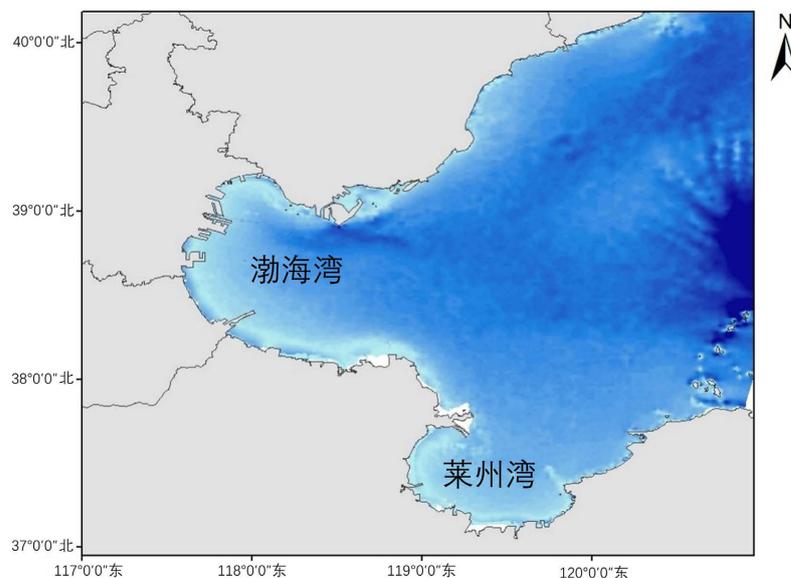


Figure 1. Geographical location map of the research area
图1. 研究区地理位置图

2.1. 悬沙浓度 SSC

MODIS-Aqua 卫星数据来自美国 NASA 官网(<https://www.nasa.gov>), 时间跨度从 2003 年 1 月至 2022 年 12 月, 数据级别为 L1B 级, 空间分辨率是 1 km。目前关于 MODIS-Aqua 卫星数据在海洋方面的应用较为广泛, 技术手段目前也较为成熟, 它提供的遥感数据时间尺度较长, 数据质量较好, 遥感波段丰富, 覆盖范围也较广泛, 空间分辨率也满足本次研究的需要。

遥感数据的处理主要使用官网提供的 SeaDAS 软件。在处理数据之前, 首先要将下载的 L1B 级数据转化为 L2 级的遥感反射率(Rrs)数据, 然后对遥感数据进行大气校正、云剔除等预处理。将处理之后的数据与实测的海表悬浮体抽滤数据进行匹配拟合, 建立反演模型。建立反演模型时, 用于匹配的表层悬浮体数据与遥感获得的反射率数据时间相隔不超过 3 个小时, 本次用于反演的反射率波段是 Rrs555 波段。本文使用的渤海表层悬浮泥沙反演公式:

$$SSC = \text{Exp}(101.8 \times X) \times 1.301$$

2.2. 温度 SST

海表温度(SST)数据来自美国 NASA 官网(<https://www.nasa.gov>)共享的 4 km 空间分辨率 NOAA AVHRR (2001 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日)白天数据和 1 km 空间分辨率 MODIS-Aqua 白天数据 (2002 年 7 月 4 日至 2020 年 12 月 31 日)。

将下载的 NC 格式的数据文件, 进行信息提取, 质量控制值为大于等于 3, 将提取的信息进行月平均、历年月平均处理, 得到区域月平均值, 历年区域月平均值, 所有年份的平均及区域平均值。

将 NOAA 的 AVHRR 数据与 MODIS-Aqua 数据获取时间重叠的部分进行分析对比, 将 AVHRR 数据校准到 MODIS 平台上来, 得到 2001 年 1 月至 2020 年 12 月连续 20 年的海表温度月平均数据。

2.3. 叶绿素数据

叶绿素(Chla)数据来自美国 NASA 官网共享的 1 km 空间分辨率 MODIS-Aqua 数据(2003 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日)。

将下载的 NC 格式的数据文件, 进行信息提取, 将提取的信息进行月平均、历年月平均处理, 得到区域月平均值, 历年区域月平均值, 所有年份的平均及区域平均值。

3. 结果分析

3.1. SSC

从渤海湾 SSC 多年月平均分布图(图 2)来看渤海湾 SSC 月变化特征明显。一月渤海湾 SSC 由南向北逐渐降低, 高值区分布在渤海湾南岸, 低值区分布在渤海湾东北部; 二月 SSC 高值向北扩大, 高值区依然分布在南侧; 三月, SSC 南北分布特征与二月相似, 高值区的分布在继续向北扩展; 四月, 渤海湾 SSC 南北分布特征与二月和三月相似, 高值区回缩明显; 五月, 渤海湾 SSC 高值区减少, 仅在南部近岸河口附近出现, 最西侧到达渤海湾近岸大港附近, 以至于渤海湾 SSC 在南北方向上的分布出现先下降再上升的特点; 六月, 渤海湾 SSC 高值区几乎消失, 分布在南部河口附近, 低值区的范围继续扩大, 由北向南延伸; 七月, 渤海湾 SSC 高值区出现在渤海湾南部沿岸附近, 整体呈现近岸高远岸低的特点; 八月, SSC 低值区的主体区域继续东撤; 九月, 高值区分布特征较七月相似, 低值区分布特征明显, SSC 分布由南向北再次出现先减小再增加的特点; 十月, 渤海湾南部 SSC 高值区范围扩大明显; 十一月, 渤海湾南岸的高值区范围继续扩大, SSC 小于 5 mg/L 区域消失; 十二月, 渤海湾南部 SSC 高值区继续向北扩展, 低值区近岸部分几乎消失。

渤海湾 SSC 多年月平均空间变化规律非常清楚。每年 10 月份黄河三角洲地区近海出现明显的高浊度带, 范围和强度逐渐加强, 到第二年 2、3 月份达到最大, 4 月份突然收缩, 5~9 月份高浊度带消失, 整个渤海湾 SSC 很低。从最大浊度带分布状况可以看出, 渤海湾表层悬浮体主要来自现代黄河三角洲的再悬浮, 尤其是 2、3 月份, SSC 高值区覆盖大部分渤海湾区域。

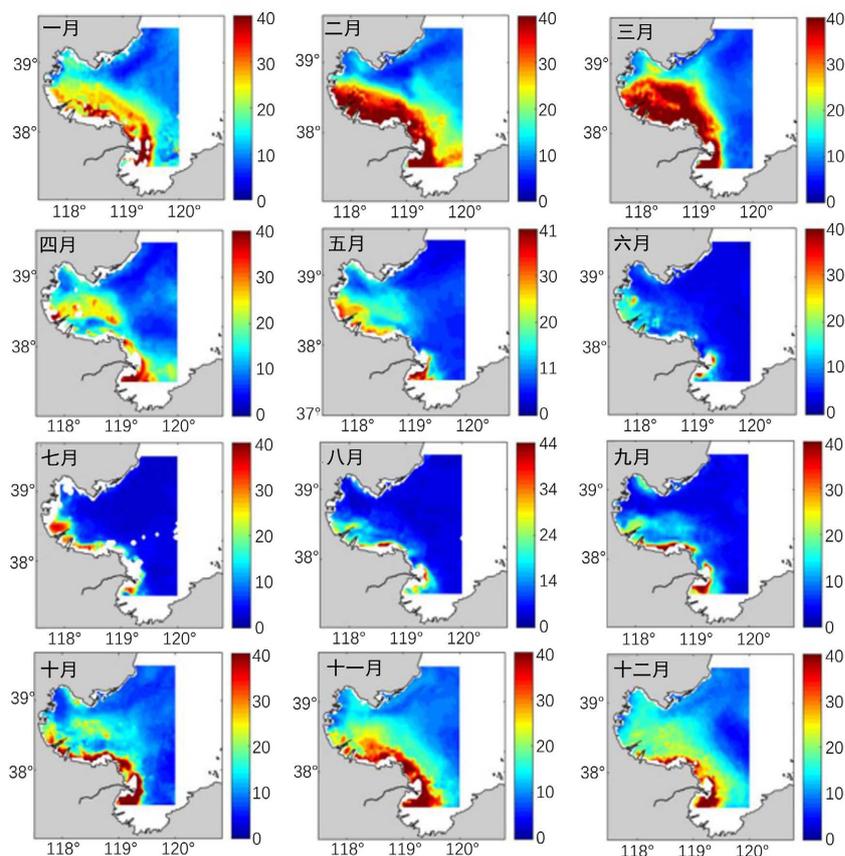


Figure 2. Multi year monthly average distribution map of SSC in Bohai Bay (mg/L)
图 2. 渤海湾 SSC 多年月平均分布图(mg/L)

3.2. SST

渤海湾 SST 多年月平均分布图(图 3)显示, 一月除港口和河口小范围区域, 渤海湾 SST 呈现近岸低远岸高的分布特征, 远岸的北部高南部低; 二月渤海湾 SST 整体最低, 渤海湾区域内其他区域分布特征与一月相同; 三月渤海湾西侧和南侧 SST 分布出现近岸高远岸低的特点, 整体呈现南部高北部低, 沿岸流特点消失, 在渤海湾的东北部 3℃等温线出现闭合, 形成低温闭合中心, “暖舌”现象消失(沈辉等, 2017); 四月渤海湾 SST 分布整体呈现近岸高远岸低南部高北部低的特点, 在渤海湾东北部 7℃等温线闭合形成低温中心; 五月渤海湾 SST 分布整体呈现近岸高远岸低南部高北部低的特点, 在渤海湾东北部存在 13℃等温线闭合低温中心; 六月渤海湾 SST 分布整体呈现近岸高远岸低南部高北部低的特点, 在渤海湾东北部形成 19℃等温线闭合低温中心; 七月渤海湾 SST 分布整体呈现近岸高远岸相对较低, 南部和北部 SST 相差不大的特点, 渤海湾东北部的等温线低温闭合中心消失; 八月渤海湾 SST 分布特征与七月相近, 整体 SST 达到一年中的最高值; 九月渤海湾中部出现 24.5℃等温线高温闭合中心, 相对较低的 SST 开始从东北部进入渤海湾; 十月渤海湾 SST 再次出现近岸低远岸高现象, 南北部 SST 差别不大, 19.5℃

等温线形成的高温闭合中心进入“暖舌”内部；十一月渤海湾 SST 近岸低远岸高，等温线闭合中心消失；十二月渤海湾 SST 依然呈现近岸低远岸高的特点，温度继续下降。

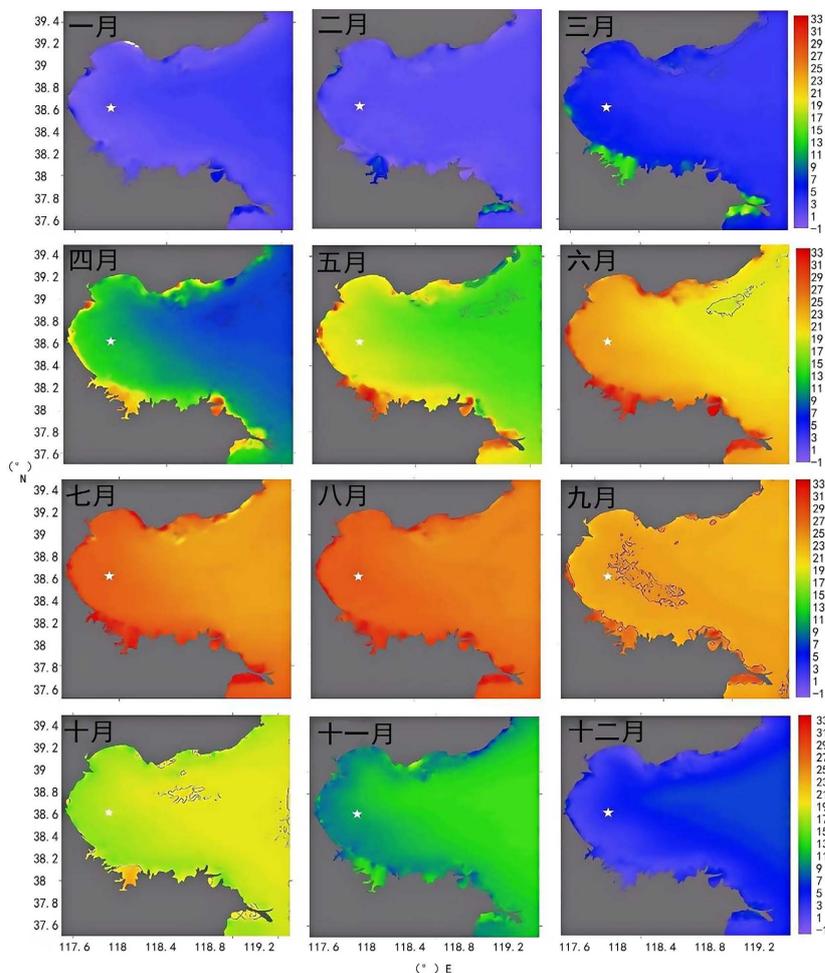


Figure 3. Multi year monthly average distribution of SST in Bohai Bay ($^{\circ}\text{C}$)
图 3. 渤海湾 SST 多年月平均分布图($^{\circ}\text{C}$)

3.3. Chla

从渤海湾 Chla 多年月平均分布图来看，渤海湾 Chla 高浓度区域主要分布在近岸海域。渤海湾的西北部是高值区分布的重点区域。本文将 Chla 梯度变化最明显的 8 mg/m^3 等值线作为高值区的界限， $>8 \text{ mg/m}^3$ 的区域作为 Chla 分布的高值区， $<3.5 \text{ mg/m}^3$ 的区域作为 Chla 分布的低值区。

一月，Chla 的高值区主要分布在渤海湾的四周沿岸区域，低值区从东北部向渤海湾延伸；二月，Chla 的高值区仍分布在渤海湾沿岸区域，而低值区范围扩大，继续向西延伸；三月，Chla 的低值区范围继续增大，向西北方向；四月 Chla 的分布范围与三月类似，近岸 Chla 的浓度与湾内海域差异明显；五月，Chla 浓度整体上升，整个渤海湾 Chla 浓度几乎都高于 5.5 mg/m^3 ，但近岸 Chla 浓度仍明显高于离岸区域，可达 $>10 \text{ mg/m}^3$ ；六月和七月，渤海湾 Chla 浓度整体有所下降，东部开始再次出现低值区，但近岸仍是高值区；八月，渤海湾 Chla 达到峰值，整个区域都被高浓度 Chla 覆盖，渤海湾中部出现分散高值区，低值区消失；九月开始，近岸高值区范围缩小，渤海湾中东部海域零星分布着 Chla 高值区，低值区开始在

渤海湾中部出现；十月和十一月 Chla 分布特征相似，高值区范围逐渐缩小，低值区范围逐渐增大；十二月，渤海湾 Chla 达到年内最低值，低值区开始出现回缩的趋势(图 4)。

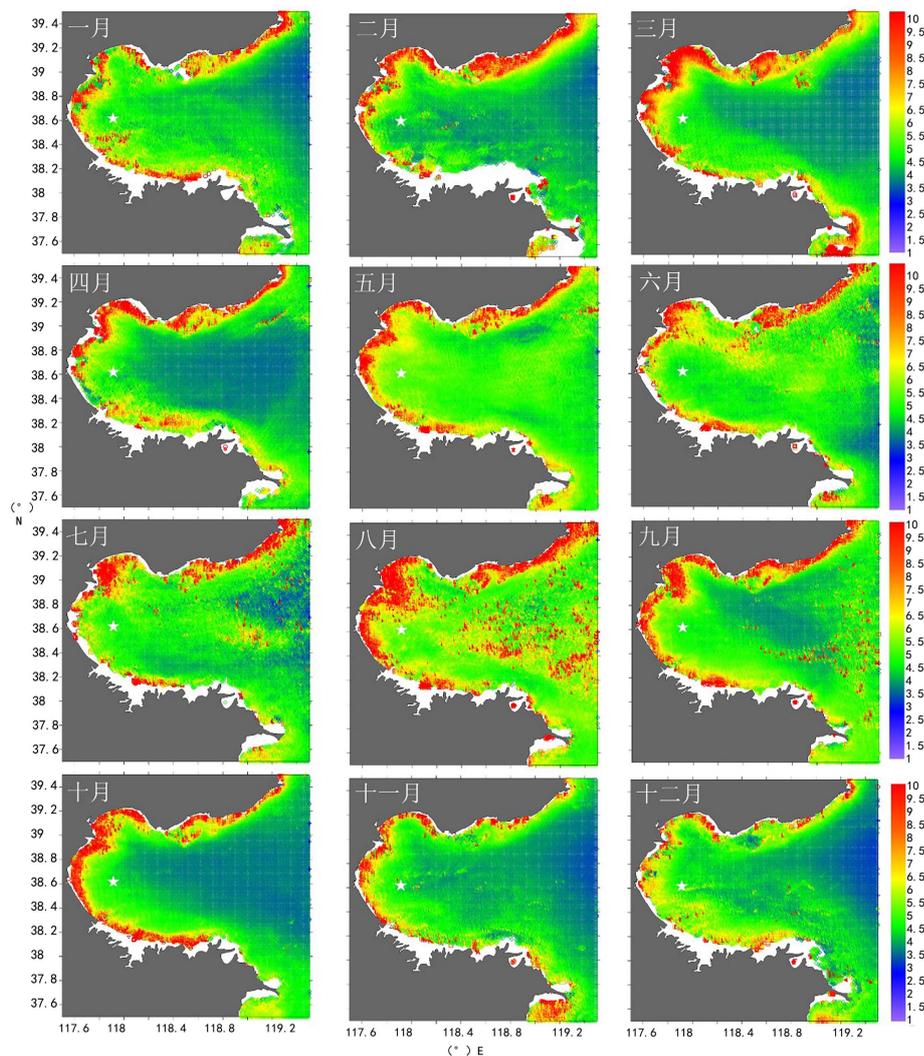


Figure 4. Monthly average spatial distribution of Chla in Bohai Bay over the years (mg/m^3)

图 4. 渤海湾 Chla 多年月平均空间分布图(mg/m^3)

4. 讨论

4.1. 渤海湾 SSC 长期变化特征

渤海湾的 SSC 三月最高，二月次之；七月最低，六月次之。冬季最高(12 月、1 月和 2 月)，春季次之(3 月、4 月和 5 月)，夏季最低(6 月、7 月和 8 月)，月变化和季节变化特征明显。

渤海湾 SSC 的变化主要受海床泥沙再悬浮和径流泥沙输入的影响。环渤海湾径流的水沙输入主要来自黄河，近 50 年来，黄河的输沙量巨幅下降，在上游筑坝和盆地降雨减少的影响下，径流泥沙输入量由 1950~1970 年的年均 13 亿吨，下降为 2001~2020 年的年均 1.3 亿吨，输入渤海的沉积物仅为原有的 10%，这也是渤海湾 SSC 呈下降趋势的主要原因。另一方面，渤海湾再悬浮泥沙的变化主要受风浪的影响，三月是冬春转化的月份，渤海湾既受到北向冬季风的影响，又受到南向夏季风的影响，两者共同作用，加

强了悬浮泥沙的再悬浮, 致使三月份成为一年中 SSC 最高的月份。

4.2. 渤海湾 SST 长期变化特征

渤海湾的 SST 二月最低, 一月次之; 八月最高, 七月次之; 冬季最低(12 月、1 月和 2 月), 春季次之(3 月、4 月和 5 月), 夏季最高(6 月、7 月和 8 月), 月变化和季节变化特征明显。

由于渤海湾属于中纬度大陆性季风气候, 季风是影响渤海湾 SST 的重要因素。在冬季风影响下沿岸流盛行[10], 沿岸流从东北部进入渤海湾带来温度相对较低的冷水, 来自渤中海域温度相对较高的暖水作为补偿流进入渤海湾, 从而使得渤海湾 SST 分布呈现近岸低远岸高的特点。二月是一年中冬季风最强的月份, 冬季风加强, 沿岸流也会加强, 渤海湾的 SST 随之更低。随着冬季风的减弱, 沿岸流减弱, 因此, 在三月沿岸流带来的冷水只分布在渤海湾的东北部, 渤海湾 SST 呈现北部低南部高的特点。三月低温等值线闭合中心的出现是沿岸流消失的标志。四月, 受大陆性气候影响, 渤海湾出现近岸 SST 高于远海的分布特点, 受纬度的影响, SST 北部低南部高。随着冬季风的消失, 太阳的北移, 渤海湾 SST 继续升高, 直到八月达到一年中的最大值, 九月渤海湾 SST 出现下降趋势, 九月高温中心的出现是北部“冷水”开始南下的标志。随着太阳的南移, 冬季风的出现, 渤海湾 SST 继续下降, 并再次呈现近岸低远岸高的分布特点, 高温等值线的闭合中心出现在“暖舌”内部。随着冬季风的加强, 沿岸流加强, 渤海湾 SST 继续降低, 等值线闭合中心的消失是沿岸流比十月份加强的标志。冬季风影响下的十二月, 渤海湾的 SST 继续下降。

4.3. 渤海湾 Chla 长期变化特征

渤海湾叶绿素分布特点始终呈现近岸高远岸低的特点。八月达到一年中的最大值, 五月次之, 12 月达到一年中的最小值, 11 月次之。叶绿素是反映浮游植物的重要指标, 通过分析研究叶绿素的变化和分布, 可以进一步了解水域生态环境。随着工业发展, 由于废水的注入和水交换不良, 水体富营养化, 赤潮现象时有发生, 水域生态环境治理引起了人们的重视, 随着治理措施的不断推进, 叶绿素也呈逐年下降的趋势。另外, 浮游植物的生长跟水环境的温度, 营养盐成分, 悬浮泥沙浓度等密切相关。

5. 结论

1) 渤海湾 SST 多年月平均空间变化规律十分明显, 表现出冬半年和夏半年特征。冬半年, 10~12 月至翌年 1~3 月, 近岸 SST 低, 远岸 SST 高; 4 至 9 月为夏半年, 近岸 SST 高, 远岸 SST 低。

2) 渤海湾的细颗粒物主要来自黄河三角洲近海的再悬浮。每年 10 月份黄河三角洲地区近海出现 SSC 高浊度带, 范围和强度逐渐加强, 至翌年 2、3 月份达到最大, 4 月份突然收缩, 5~9 月份高浊度带消失, 整个渤海湾 SSC 也随之降低。从最大浊度带分布状况可以看出, 渤海湾表层悬浮体主要来自现代黄河三角洲的冬季再悬浮, 尤其是到 2、3 月份 SSC 高值区覆盖大部分渤海湾区域。

3) 渤海湾叶绿素分布特点始终呈现近岸高远岸低的特点。八月达到一年中的最大值, 五月次之, 12 月达到一年中的最小值, 11 月次之。

基金项目

资助项目: 山东省第一地质矿产勘查院开放基金“黄河三角洲海洋牧场生态环境遥感监测及其时空变化规律研究”(鲁地一勘 2021DW01)。

参考文献

[1] 魏泽勋, 李春雁, 方国洪, 等. 渤海夏季环流和渤海海峡水体运输的数值诊断研究[J]. 海洋科学进展, 2003(4):

454-464.

- [2] 万修全. 渤海冬夏季环流特征及变异的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [3] 鲍献文, 苏洁, 郭心顺, 等. 黄、渤海热结构及环流季节变化的数值模拟[J]. 青岛: 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004(4): 513-522.
- [4] 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.
- [5] 张鹏程, 孙林云, 诸裕良. 渤海湾围填海对三河口海域水动力及含沙量的影响[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(10): 6-12.
- [6] 乔璐璐, 李广雪, 邓声贵, 等. 夏季渤海湾中北部悬浮体分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(3): 23-30.
- [7] 宋文鹏. 渤海冬、夏季温盐场结构及其海流特征分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [8] 林全泓. 强风浪过程中近岸泥沙运动的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2004.
- [9] 史文静. 黄河口悬浮泥沙扩散规律及其数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [10] 孙思婷, 徐继尚, 李广雪, 等. 基于遥感分析渤海湾冬季表层悬浮体浓度变化规律[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(2): 258-264.
- [11] Fu, Y.Z., Xu, S.G. and Liu, J.W. (2016) Temporal-Spatial Variations and Developing Trends of Chlorophyll-a in the Bohai Sea, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **173**, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.02.016>