

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2020.02.007

基于高分一号遥感卫星的渤海湾悬浮泥沙 时空分布反演

蔡新立

(安徽建筑大学, 安徽 合肥 230601)

摘要: 悬浮泥沙是评价 II 类水体水质的重要参数之一, 近海岸水域悬浮泥沙对重金属、营养盐等具有一定的吸附作用, 悬浮泥沙的分布特征在一定程度上反映着污染物的迁移和循环, 因此研究悬浮泥沙对渤海湾建设和环境保护具有重要意义。为探究渤海湾水域悬浮泥沙浓度和分布的变化特征, 利用高分一号多光谱卫星影像, 通过采用波段组合的方式对悬浮泥沙含量指数反演提取, 反演得到 2019 年 9 个月的渤海湾悬浮泥沙指数, 分析发现渤海湾悬浮泥沙含量在冬季受季风影响较高, 春季和夏季的时候渤海湾高浓度悬浮泥沙向近岸收缩, 秋季悬浮泥沙分布格局有正在向冬季过渡的趋势, 本文研究可为渤海湾的生态环境保护和工业开发提供重要的科学依据和参考价值。

关键词: 渤海湾; 悬浮泥沙; 泥沙指数; 波段组合; 时空分布

中图分类号: P731.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6141(2020)02-0134-09

Retrieve of Spatial and Temporal Distribution of Suspended Sediment in Bohai Bay Based on GF-1 Remote Sensing Satellite

CAI Xinli

(Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Suspended sediment is one of the important parameters to evaluate the quality of Case II Waters. As the suspended sediment in coastal waters has a certain adsorption effect on heavy metals and nutrients, its distribution characteristics can reflect transferring and circling of pollutants to some extent. Therefore, the study of suspended sediment is of great significance to the construction and environmental protection of Bohai Bay, China. In order to explore the variations of sediment index and distribution of suspended sediment in Bohai Bay, the suspended sediment index of the Bohai Bay is retrieved by band combination from the multi-spectral satellite image of GF-1, and the suspended sediment indexes of the nine months in 2019 are

基金项目: Supported by Major Projects of Science and Technology in Anhui (安徽省科技重大专项项目, 18030801106), Science and technology innovation strategy and soft science research project of Anhui province(安徽省科技创新战略与软科学研究专项项目, 201806a02020046), Natural Science research major project of Anhui Educational Committee (安徽省教育厅自然科学重大项目, KJ2017ZD41)

作者简介: 蔡新立 (1963 -), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事污染排放与环境监测研究。

E-mail: ahcxl@163.com

收稿日期: 2019-12-27; **修改日期:** 2020-01-07

obtained. It is found that the suspended sediment in Bohai Bay is greatly influenced by monsoon in winter, and in spring and summer, the suspended sediment of high concentration shrinks towards nearshore. Besides, the distribution pattern of suspended sediment in fall has a trend of transition to that of winter. The study provides an important scientific basis and reference for the ecological environment protection and industrial development in Bohai Bay.

Key words: Bohai Bay; suspended sediment; sediment index; band combination; temporal and spatial contribution

1 引 言

近海岸丰富的自然资源成为近海岸城镇快速发展的重要条件,随着工业化不断推进,近海岸的生态环境受到人类活动和工业污染物排放的严重影响,早在 2009 年的《渤海海洋环境公报》中指出渤海湾近岸有 75% 的排污口被监测到严重超标排放污水,这导致渤海有 1/4 以上海水受到了不同程度的影响。悬浮泥沙是评价二类水体重要的水质参数之一,由于悬浮泥沙是近海水体营养盐及污染物的主要载体,通过遥感技术不仅可以对近海岸水土流失情况进行大范围、连续动态监测,同时可以对水体污染的分布和迁移进行监测和防控,因此利用遥感技术对渤海湾的悬浮泥沙进行监控对于生态环境保护、自然资源合理开发利用、以及近海岸合理开发建设有着重要的研究意义和应用价值。

通常,近海岸的悬浮泥沙监测都是依赖作业船在海上调查,这种传统的调查方式不仅速度慢,而且得到的调查点数据在时间和空间上都有局限性,不能够满足大范围实时动态监测的要求。利用卫星遥感技术可以对渤海湾悬浮泥沙进行大面积、实时、连续监测。目前,在悬浮泥沙的反演方法上主要有三种:经验法、分析法和半分析法^[1]。国内外相关学者分别基于 MODIS、Landsat8、HJ-1 等不同卫星数据对悬浮泥沙的提取做了重要研究^[2-7]。本文以渤海湾近岸海域为例,利用波段组合的方法对渤海湾的悬浮泥沙相对浓度进行反演提取,分析 2019 年不同月份的渤海湾悬浮泥沙时空分布特征以及生态环境变化,为渤海湾近海岸资源开发、工程工业建设以及环境保护提供重要的参考资料。

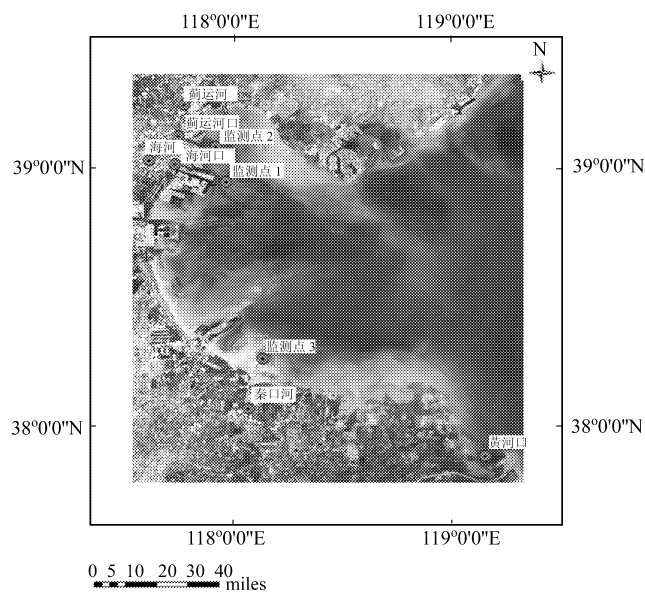


图 1 渤海湾概况图

Fig.1 Overview of Bohai Bay

2 研究区域概况

渤海属于半封闭内海,自净能力差,随着工业化快速发展,受人类活动影响,很多入海河流的径流量相比以前大大减少,并且流入海内的有很多污水,致使污染物难以稀释,污染沉积物增加,水环境严重恶化^[8]。同时渤海湾处于季风性气候,季风显著,夏季和秋季多为南风,风势偏小,而冬季和春季多为北风或者西北风,风势较大,降雨量也因为季节的不同而有较大的差异主要集中在7、8月份^[9]。渤海湾近岸海域的悬浮泥沙主要来源于海河、蓟运河等河流(如图1所示),由于渤海湾是半封闭性海域,根据一些学者对渤海环流结构的研究,发现主要沉积物来自周边入海河流^[10-11],其中黄河、辽河、滦河等占了很大比重,而黄河作为我国的第二长河,携带的泥沙量居世界首位,是渤海湾主要泥沙来源^[12],部分河流的径流量和输沙量如表1所示。同时,一些学者研究发现秦皇岛悬浮泥沙浓度较低,主要跟秦皇岛附近海域水深较浅、底质较粗、水动力交换较弱有关^[13]。

表1 部分河流的径流量和输沙量

Table 1 Runoff and sediment transport in some rivers

河流	注入海区	平均年径流量 (10^8 m^3)	平均年输沙量 (10^6 t)
黄河	渤海	423	1006
海河	渤海湾	154	9
辽河	渤海	118	20~25
滦河	渤海	47.9	221
蓟运河	渤海湾	7.4	7~10

表2 高分一号卫星多光谱数据参数

Table 2 Multispectral data parameters of GF-1 satellite

参数	多光谱相机	
光谱范围	Band1	0.45~0.52 nm
	Band2	0.52~0.59 nm
	Band3	0.63~0.69 nm
	Band4	0.77~0.89 nm
空间分辨率	16 m	
幅宽	800 km(4台相机组合)	
覆盖周期(不侧摆)	4天	

3 反演模型与反演流程

以渤海湾为研究对象(如图1所示),基于我国高分一号遥感卫星多光谱影像数据,其性能参数如表2所示,选用2019年1、3、4、5、6、8、9、10、11月份共9个月,每月1幅的晴空影像,对渤海湾悬浮泥沙相对浓度进行反演和分析。如图2所示,通过数据读取、辐射定标、大气校正、几何校正等对高分一号卫星多光谱数据进行预处理,然后通过波段组合方式构建泥沙指数模型对渤海湾悬浮泥沙相对浓度进行反演提取,最后对2019年渤海湾的悬浮泥沙分布特征变化进行分析。

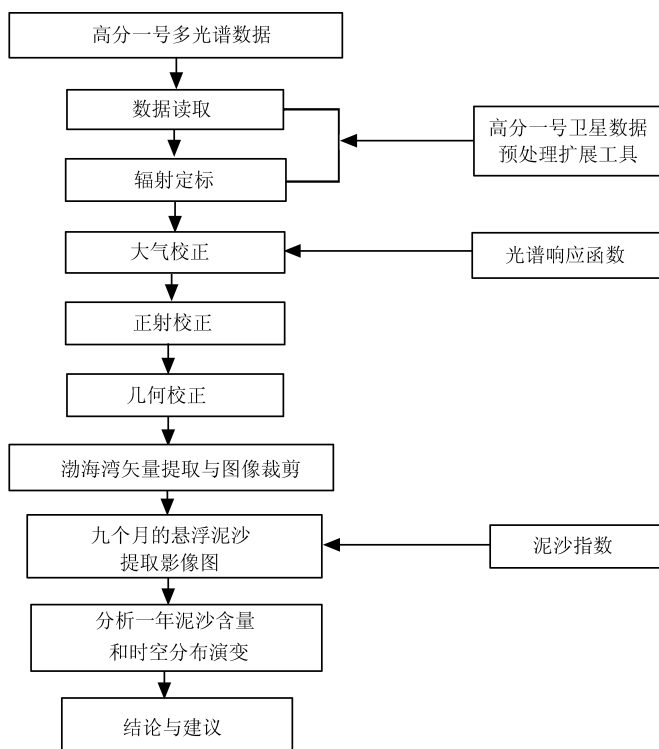


图 2 GF-1 多光谱数据预处理与渤海湾悬浮泥沙反演流程图

Fig.2 GF-1 multispectral data preprocessing and retrieval flow chart of suspended sediment in Bohai Bay

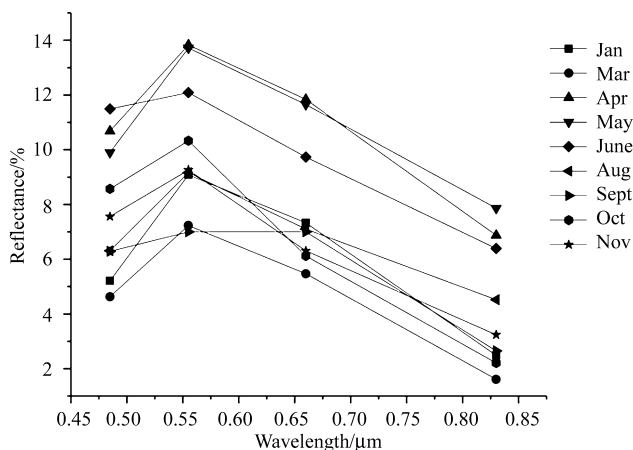


图 3 2019 年不同月份的探测通道含沙水体反射率

Fig.3 The reflectivity of channel sand-bearing water in different months of 2019

通过对海河河口附近含沙海域九幅影像的光谱曲线进行分析，如图 3 所示，含沙水体在探测通道和探测通道 (即在 0.555 μm、0.66 μm 中心波长处) 的反射率较高。相关研究表明在一定水深范围内探测通道 Band3 对泥沙的灵敏度高于探测通道 Band2，随着水深的增加，探测通道 Band2 对泥沙的灵敏度要高于探测通道 Band3^[14]。因此本文采用相应的波段组合对渤海湾悬浮泥沙进行反演提取，其反演提取水体悬浮泥沙含量指数 (Sediment Index, SI) 的模型为

$$SI = \frac{(Band2 + Band3)}{(Band2/Band3)} \quad (1)$$

Band2 对水体具有一定的穿透能力, 可用于反映水下特征, 如水体浑浊度等, *Band3* 对水体的悬浮泥沙敏感, 其中 $Band2 + Band3$ 可以反映水体含沙量高低, $Band2/Band3$ 与悬浮泥沙浓度的相关性很高, 同时可以减少叶绿素含量对低含沙水体提取的影响。

4 渤海湾悬浮泥沙反演和时空分布特性研究

4.1 渤海湾悬浮泥沙反演

利用 (1) 式中的泥沙指数分别反演提取渤海湾 2019 年九个月的悬浮泥沙, 并将渤海湾悬浮泥沙相对浓度分为四个等级: 清洁水体、低含沙量水体、中含沙量水体、高含沙量水体。2019 年 1 月~11 月共选取了九幅影像质量较好的渤海湾地区卫星数据, 经过反演提取后的渤海湾悬浮泥沙时空分布按冬季、春季、夏季、秋季分类分别如图 4、图 5、图 6、图 7 所示, 其中冬季为 1 月, 春季为 3、4、5 月, 夏季为 6、8 月, 秋季为 9、10、11 月。通过结合各季节下渤海湾的水文特性对渤海湾悬浮泥沙的分布特征进行分析。

4.2 渤海湾悬浮泥沙时空分布分析与研究

1) 冬季悬浮泥沙分布特征

由图 4 可以看出, 选用的冬季渤海湾遥感影像图是 2019 年 1 月 25 日, 渤海湾处于大陆性季风气候, 冬季强风以北风和西北风为主, 这使得较浅海区大量海底沉积物再悬浮造成了渤海湾表层悬浮泥沙浓度较大, 同时可以从影像图中可以看到靠近秦皇岛的海域悬浮泥沙浓度偏低。

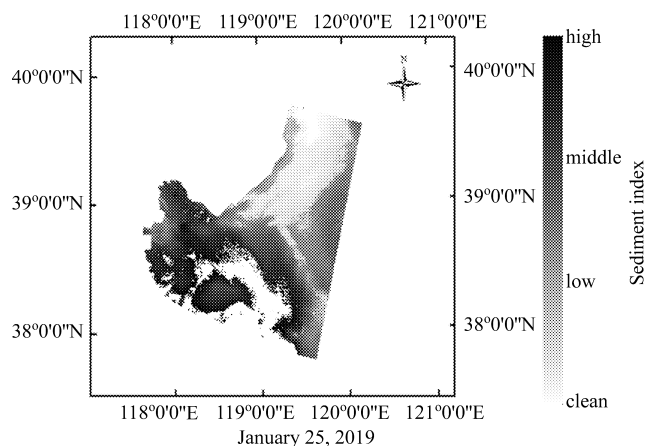


图 4 2019 年冬季 1 月 25 日渤海湾悬浮泥沙指数反演分布

Fig.4 The distribution of retrieve suspended sediment index in bohai bay on January 25, 2019

2) 春季悬浮泥沙分布特征

由图 5 可以看出, 选用的春季渤海湾遥感影像图是 2019 年 3 月 15 日, 2019 年 4 月 17 日, 2019 年 5 月 28 日的三期影像, 春季由于受季风影响较小, 因此悬浮物会相比于冬季会有向岸边收缩的趋势, 含沙量低的水体面积不断也扩大, 这在 5 月的遥感影像图表现地尤为明显, 由 4 月 5 月的影像图可以看出靠近黄河入海口也就是渤海湾的南部的悬浮泥沙浓度相对较高, 靠近秦皇岛海域的悬浮泥沙浓度仍然比较低, 2019 年 3 月 15 日遥感影像图可以看出有两处靠岸出的悬浮泥沙浓度较低, 可能 3 月份河流还在处于枯水季节, 具体原因还还能需要做进一步研究论证。

3) 夏季悬浮泥沙分布特征

由图 6 可以看出, 选用的夏季渤海湾遥感影像图是 2019 年 6 月 14 日, 2019 年 8 月 18 日的两期影

像，夏季渤海湾地区多为南风，风速也较小，高浓度悬浮泥沙向近岸收缩，从图 3 中的 6 月遥感影像图可以看到高浓度地区主要集中在一些近海岸的河口，其中以黄河口区域影响最大，7、8 月是河口径流量最大时候，此时黄河口会携带大量的泥沙入海，并向渤海湾扩散，如 8 月的遥感影像图所示。

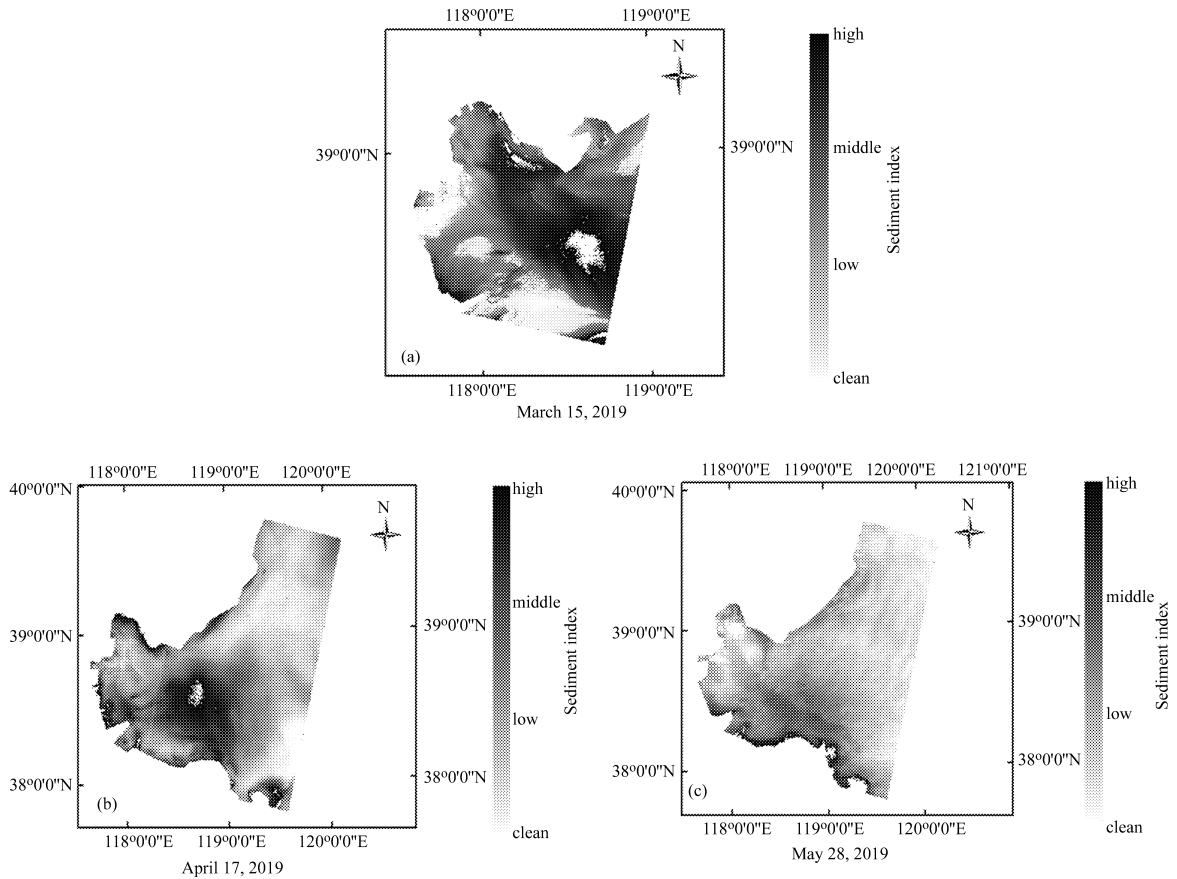


图 5 2019 年春季 3 月 15 日 (a)、4 月 17 日 (b)、5 月 28 日 (c) 渤海湾悬浮泥沙指数反演分布

Fig.5 The distribution of retrieve suspended sediment index in Bohai Bay on March 15 (a), April 17 (b) and May 28 (c) in spring 2019

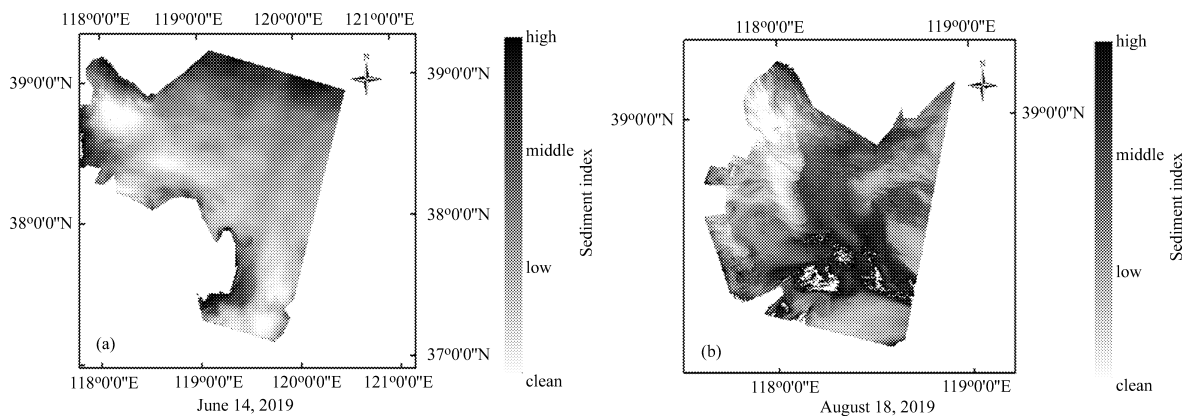


图 6 2019 年夏季 6 月 14 日 (a)、8 月 18 日 (b) 渤海湾悬浮泥沙指数反演分布

Fig.6 The distribution of retrieve suspended sediment index in bohai bay on 14 June (a) and 18 August (b) in the summer of 2019

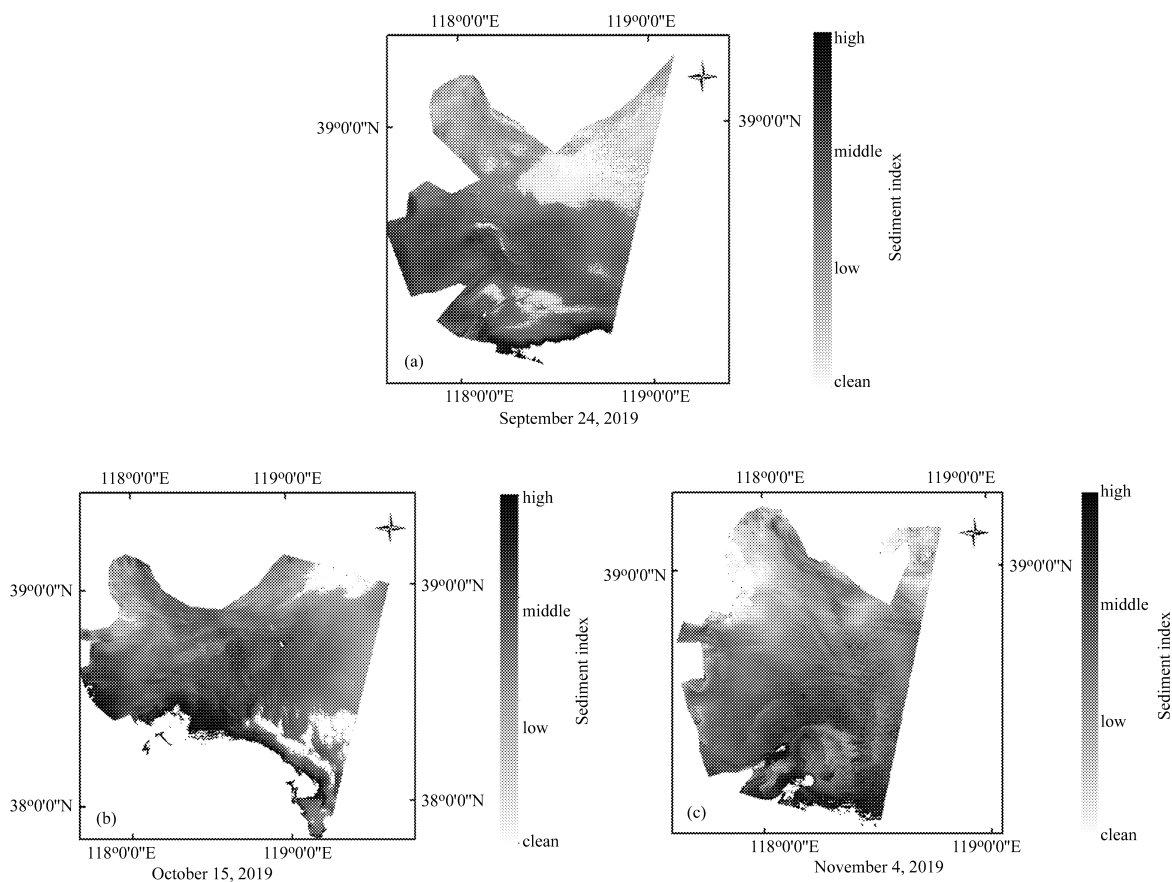


图7 2019年秋季9月24日(a)、10月15日(b)、11月4日(c)渤海湾悬浮泥沙指数反演分布

Fig.7 The distribution of retrieve suspended sediment index in Bohai Bay September 24 (a), October 15 (b) and November 4 (c) in autumn 2019

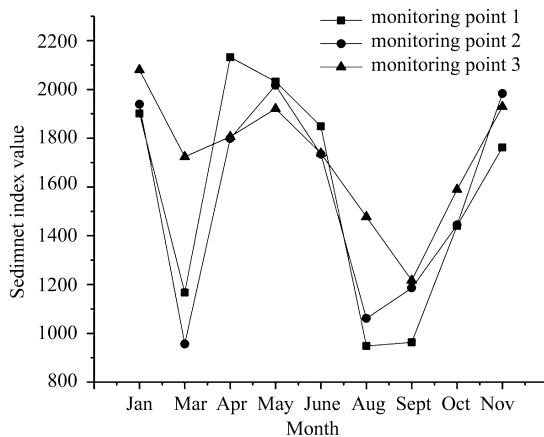


图8 不同监测点泥沙指数值变化统计图

Fig.8 Statistical chart of sediment index changes at different monitoring points

4) 秋季悬浮泥沙分布特征

由图7可以看出,选用的秋季渤海湾遥感影像图是2019年9月24日,2019年10月25日,2019年11月4日的三期影像,从9月至11月,季风逐渐由南风 and 东南风转换为北风和西北风,因此浅海地区的泥沙会开始发生悬浮,高浓度悬浮泥沙的面积也不断增大,含沙量区域由近岸向海扩散。

5) 监测点泥沙指数值变化分析

在海河、秦口河、蓟运河的附近海域选取三个监测点(如图 1 所示),通过九个月的泥沙指数分析悬浮泥沙浓度变化趋势,如图 8 所示,根据悬浮泥沙指数,1 月的悬浮泥沙相对浓度比较高,这是由于冬季季风强烈,使得沉积泥沙大量悬浮于表层,3 月的悬浮泥沙相对浓度大幅度减少,可能因为季风减小,泥沙开始沉积。4 月到 8 月,是春季到夏季的过渡时期,渤海湾一带由南风或东南风控制,且风势较小,导致高浓度泥沙向近海岸收缩,因此河口附近海域的悬浮泥沙浓度相对较高,8、9 月时,河口附近海域悬浮泥沙浓度低主要因为这个时间段降雨量较大,河口的排水对悬浮泥沙有一定的稀释作用。从 9 月至 10 月可以看出水体含沙量逐渐增大,到 11 月时,浓度接近于 1 月,这是因为 9 月至 11 月,正值秋季向冬季过渡,季风由南风转向北风,导致水体含沙量不断偏高。

5 结 论

结合渤海湾海域的水文气象特征对渤海湾一年四季悬浮泥沙的时空分布进行了分析,由分析可知在冬季时,渤海湾的悬浮泥沙浓度受季风影响较大,导致渤海湾表层悬浮泥沙浓度逐渐变大,而秋季特征表现为逐渐向冬季的分布特征过渡,夏季处于丰水时期,黄河口向渤海湾输送和扩散大量泥沙但也开始沉积,形成了靠近岸边的悬浮泥沙浓度高的悬浮泥沙分布格局,春季悬浮泥沙高浓度地区向岸边收缩,从 3 月至 5 月逐渐变化,5 月的变化最为明显。根据本文对渤海湾四季悬浮泥沙含量的分布情况研究与其他学者研究对比,可知在缺少实测数据的情况下可以利用该泥沙指数对 II 类水体的悬浮泥沙相对分布进行提取。

通过反演 2019 年不同季节 9 个月份的悬浮泥沙指数,发现近海岸的悬浮泥沙浓度相对于其他区域来说都要高,因为水体的泥沙浓度受风浪、水深等因素的影响,近海岸水深比较浅容易受风浪影响,泥沙比较容易悬浮,而对于远离海岸的地方由于受到条件限制,波浪起沙作用相对较弱。近几十年来由于工业建设和社会发展迅速,渤海湾一带围海造地的开发情况较多,造成了近海岸水体污染严重,生态环境质量严重下降,特别是排放的工业污水含有大量重金属,悬浮泥沙对这些污染物会起到载体作用,而近海岸的悬浮泥沙浓度较高同时随气候进行扩散,对渤海的水环境造成了较为严重的影响。对渤海湾悬浮泥沙迁移变化监控提供重要了的科学依据和参考价值。

参考文献:

- [1] Son S H, Platt T, Bouman H, et al. Satellite observation of chlorophyll and nutrients increase induced by Typhoon Megi in the Japan/East Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(5): L05607.
- [2] Luan Hong, Fu Dongyang, Li Mingjie, et al. Based on Landsat 8 suspended sediment concentration of the Pearl River on each season inversion and analysis [J]. *Marine Environmental Science*, 2017, **26**(06): 892-897 (in Chinese). 栾虹, 付东洋, 李明杰, 等. 基于 Landsat 8 珠江口悬浮泥沙四季遥感反演与分析 [J]. *海洋环境科学*, 2017, **26**(06): 892-897.
- [3] Li Wenkai, Zeng Qun, Tian Liqiao, et al. Estimation of total suspended matter concentration from HJ-1B CCD1 imagery with the assistance of MODIS imagery [J]. *Journal of Central China Normal University(Natural Sciences)*, 2016, **50**(04): 619-623 (in Chinese). 李文凯, 曾群, 田礼乔, 等. MODIS/Terra 辅助的 HJ-1B CCD1 数据悬浮泥沙浓度反演研究 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2016, **50**(04): 619-623.

- [4] Yin Yuwei, Tang Danling, Liu Yupeng. Remote Sensing of spatial-temporal distribution of suspended sediment surrounding islands and reefs in the South China Sea [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(02): 435-444 (in Chinese).
殷宇威, 唐丹玲, 刘宇鹏. 南海岛礁附近悬浮泥沙时空分布的遥感研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2019, **34**(02): 435-444.
- [5] Cai Lina, Tang Danling, Li Congying. An investigation of spatial variation of suspended sediment concentration induced by a bay bridge based on Landsat TM and OLI data [J]. *Advance in Space Research*, 2015, **56**(02): 293-303.
- [6] Ye Taoyan, Li Li, Yao Yanming, *et al.* Inter-Annual variability of the turbidity maximum zone in Hangzhou Bay based on Landsat imagery [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, **44**(09): 1377-1383 (in Chinese).
叶涛焱, 李莉, 姚炎明, 等. 基于 Landsat 影像的杭州湾最大浑浊带年际变化研究 [J]. *武汉大学学报. 信息科学版*, 2019, **44**(09): 1377-1383.
- [7] Yepez S, Laraque A, Martinez J M, *et al.* Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River (Venezuela) [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2018, **350**: 20-30.
- [8] Liu Cheng, Wang Zhaoyin, Wu Yongsheng. Analysis on water quality of the estuary around Bohai Bay [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2003, (04): 222-225 (in Chinese).
刘成, 王兆印, 何耘, 吴永胜. 环渤海湾诸河口水质现状的分析 [J]. *环境与污染防治*, 2003, (04): 222-225.
- [9] Chen Yan. *Study on the Models of Retrieval Sea Surface Suspended Sediment Concentration in Bohai Bay Offshore Area, China, Using Remote Sensing Data* [D]. Xi'an: Master's Thesis of Changan University, 2014 (in Chinese).
陈燕. 渤海湾近岸海域悬浮泥沙浓度遥感反演模型研究 [D]. 西安: 长安大学硕士论文, 2014.
- [10] Wan Xiuquan, Ma Qian, Ma Weiwei. The Effect of High Frequency Strong Winds on Winter Circulation and Water Exchange in the Bohai Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, **45**(04): 1-8 (in Chinese).
万修全, 马倩, 马伟伟. 冬季高频大风过程对渤海冬季环流和水交换影响的数值模拟 [J]. *中国海洋大学学报*, 2015, **45**(04): 1-8.
- [11] Ma Weiwei, Wan Xiuquan, Wan Kai. Interannual variation and formation of wind-driven currents of Bohai Sea in winter [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, **47**(02): 295-302 (in Chinese).
马伟伟, 万修全, 万凯. 渤海冬季风生环流的年际变化特征及机制分析 [J]. *海洋与湖沼*, 2016, **47**(02): 295-302.
- [12] Zhang Likui, Wu Jianzheng, Li Weiran, *et al.* Coastline changes and tidal flat evolution in West and South parts of Bohai Bay and affecting factor [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, **34**(01): 21-27 (in Chinese).
张立奎, 吴建政, 李巍然, 等. 渤海湾西部与南部海岸线和潮滩演变及其影响因素 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, **34**(01): 21-27.
- [13] 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**(05): 722-727 (in Chinese).
庞重光, 于炜. 渤海湾表层悬浮泥沙的空间模式及其时间变化 [J]. *水科学进展*, 2013, **24**(05): 722-727.
- [14] Mei Changqing, Wang Xinyuan, Li Wenda. Environment background analysis of suspended sediment in lake Chaohu based on remote sensing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(03): 87-91 (in Chinese).
梅长青, 王心源, 李文达. 基于遥感的巢湖悬浮泥沙分布的环境背景分析 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(03): 87-91.