



基于 Landsat-8 卫星数据的洋山深水港区 近年悬沙变化特征研究

侯仲荃¹, 陈语¹, 袁文昊¹, 陈嘉民²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 华东师范大学, 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 洋山深水港区的建设对周围海域水沙分布产生显著影响, 深入分析建港后的水沙特征对后期港区开发具有重要意义。基于近6年的 Landsat-8 OLI 洋山深水港区遥感影像, 对洋山深水港区的表层悬沙浓度时空变化特征进行分析。结果表明: 洋山港海域冬季悬沙浓度明显大于夏季, 冬、夏季悬沙浓度差异接近1倍; 大潮期的悬沙浓度大于小潮期, 涨潮期的悬沙浓度大于落潮期; 受喇叭口地形影响, 潮流作用较强, 潮型变化对口外悬沙浓度影响更为明显; 强风引起的波浪变化也会使悬沙浓度明显提高。

关键词: Landsat-8 OLI; 洋山深水港区; 悬沙浓度

中图分类号: U652.3; TV143

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0027-07

Recent characteristics of suspended sediment in Yangshan Deep-water Harbor based on Landsat-8 satellite data

HOU Zhongqian¹, CHEN Yu¹, YUAN Wenhao¹, CHEN Jiamin²

(1. CCCC Shanghai Waterway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The construction of Yangshan Deep-water Harbor area has a significant impact on the distribution of water and sediment in the surrounding waters, and an in-depth analysis of water and sediment characteristics after the construction of the port is of great significance to the later development of the port area. Based on the Landsat-8 OLI remote sensing image of Yangshan Deep-water Harbor in recent 6 years, we analyze spatial-temporal variation characteristics of surface suspended sediment concentration in Yangshan Deep-water Harbor. The results show that the suspended sediment concentration of waters in Yangshan Deep-water Harbor in winter is obviously higher than that in summer, and the difference between the suspended sediment concentration in winter and summer is nearly once. The suspended sediment concentration in the spring tide is higher than that in the neap tide, and the suspended sediment concentration in the high tide is higher than that in the low tide. Under the influence of the trumpet topography, the tidal current is strong, and the tidal pattern has a more obvious influence on the suspended sediment concentration.

Keywords: Landsat-8 OLI; Yangshan Deep-water Harbor; suspended sediment concentration

悬沙浓度 (suspended sediment concentration, SSC) 是水文观测中最为基础和关键的数据之一, 其分布特征和扩散机理对海岸带的发育演变、海

域水质环境、渔业及水产养殖、港口航道回淤及治理等方面有着举足轻重的影响^[1]。

洋山港区的泥沙主要来源于杭州湾和长江口

收稿日期: 2023-11-23

作者简介: 侯仲荃 (1996—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为河口海岸水沙动力及工程应用。

的人海泥沙^[2],受流域自然环境变化及人类活动的影响,长江口入海泥沙自1980年以来呈现明显的下降趋势^[3-5]。由于海洋动力及泥沙运动过程的复杂性,并在流域来沙锐减的大背景下,这必将直接或间接影响洋山港区的水文条件、泥沙分布以及沉积动力过程,因此需要密切关注并动态掌握洋山港区悬浮泥沙的分布规律及变化特征。近年来,国内外在获取悬浮泥沙含量的研究上取得了一定的进展,如曹杰等^[6]尝试从现场原位观测出发,基于流速、流向、含沙量、悬沙粒径等实测数据揭示长江口南槽入口河段近岸水域水文泥沙特征。然而,现场原位观测存在观测成本昂贵、容易受天气因素的影响、采样点空间分散导致观测区域较为局限等缺陷。随着遥感技术的快速发展,利用遥感影像资料研究大范围海域内悬沙变化特征日益广泛^[7]。相比于现场原位观测数据而言,遥感数据具有观测时空尺度大的特点,在大面积水域监测上具有较大优势。

综上,本文采用2018—2023年质量良好且研究区域无云层遮挡的Landsat-8陆地成像仪(operational land imager,OLI)遥感影像,选取洋山深水港区的6个特征点位,分析洋山深水港区近6年的悬浮泥沙时空分布特征及变化过程,为港区内航道回淤原因分析及治理思路提供科学依据。

1 研究区域概况

1.1 地貌特征

洋山深水港区位于上海南汇嘴东南海域的崎岖列岛,是由大、小洋山南北两支岛链组成,大小岛屿共有69个,总面积约10.72 km²,大、小洋山是其中两个主要岛屿,两岛链之间形成东窄西宽面向杭州湾开口的喇叭状水域。在长期的波浪和潮流动力作用下,形成了洋山港海域特有的地形地貌分布特征:通道内水域自西向东宽度逐渐缩窄,水深逐渐增大,地形西高东低;在蒋公柱西侧,靠近小洋山侧有20 m深槽,外侧有8 m浅滩,见图1。

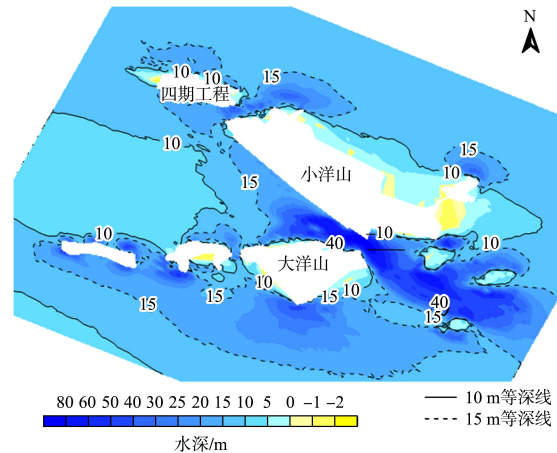


图1 洋山港及周边海域位置

1.2 潮流特征

根据崎岖列岛海域众多验潮站水位资料的调和分析结果,潮型显示半日潮特征明显,但有日潮不等现象;浅水分潮比较显著,落潮历时长于涨潮历时,因此该海域潮汐类型属于非正规半日浅海潮型。海域西部比东部、北部比南部半日潮性质更强,越近海岸浅水分潮相对越大。

根据洋山深水港区附近小洋山潮位站2019年7月—2023年6月潮位观测资料统计,每天2次高潮、2次低潮,其中最高潮位变化区间为4.67~5.75 m(当地理论最低潮面),最高潮位的极值为5.75 m,出现在2021年7月(“烟花”台风影响期间);最低潮位变化区间在-0.26~0.82 m,最低潮位的极小值为-0.26 m,出现于2021年1月。

1.3 悬沙特征

洋山海域地处杭州湾与长江口的交汇处,前期研究分析表明长江口泥沙通过南汇水下沙嘴泥沙通道向杭州湾输移,洋山海域泥沙来源为长江口输沙以及洋山近岸浅滩风浪掀沙、潮流输沙。根据中交上海航道勘察设计研究院有限公司在洋山港区及周边水域实测含沙量现场勘察结果^[8],2022和2023年冬季大潮洋山海域含沙量相对较高,除岛链外侧和相对开敞的进港航道处,各汉道及港区附近的平均涨落潮平均含沙量在0.90~2.95 kg/m³,夏季大潮在0.14~1.17 kg/m³;冬季小潮在0.90~1.98 kg/m³,夏季小潮在0.04~1.02 kg/m³。

2 研究方法

2.1 数据来源

本文的表层悬沙浓度反演利用 Landsat-8 OLI 卫星影像资料,所有数据均为 L_1 级别,经过系统辐射校正和地面控制点集合校正,并且通过数字高程模型(digital elevation model, DEM)进行地形校正。通过对大量遥感影像数据筛选,挑选出2018—2023年期间质量良好且研究区域无云层遮挡的影像。已获取影像的时刻及其对应水文气象状况见表1。

表1 洋山港周边水域 Landsat-8 OLI 影像数据

影像时刻	潮型	潮流阶段	风向	风力/级
2018-07-10T10:24:00	中潮	落急	SE	6
2018-07-26T10:24:00	大潮	落憩	S	4
2019-03-23T10:24:00	大潮	涨憩	NE	4
2019-08-14T10:24:00	大潮	涨憩	WSW	2
2019-11-02T10:25:00	小潮	涨急	NNE	2
2020-02-22T10:25:00	大潮	涨憩	NW	3
2020-08-16T10:25:00	中潮	落急	S	4
2021-03-28T10:25:00	大潮	涨憩	WSW	2
2021-11-23T10:25:00	中潮	涨急	NW	4
2021-12-17T10:25:00	大潮	涨憩	N	5
2022-01-02T10:25:00	大潮	涨憩	N	3
2022-02-27T10:25:00	中潮	落急	E	2
2022-04-08T10:25:00	小潮	涨急	SSE	5
2022-08-06T10:25:00	小潮	落憩	SW	2
2022-10-01T10:25:00	小潮	涨急	SE	2
2022-11-26T10:25:00	大潮	涨憩	NNE	3
2023-01-29T10:25:00	小潮	落憩	W	3
2023-03-02T10:25:00	中潮	落急	NNE	5
2023-03-10T10:25:00	中潮	涨急	SSE	2
2023-08-09T10:25:00	小潮	落憩	NW	4

2.2 反演方法

本文采用的所有原始遥感影像数据均是 L_1 级别数据,通过 ACOLITE(20220222.0 版本)对 Landsat 8 影像进行辐射定标和大气校正,使用 MATLAB 提取 .nc 文件中的特征波段进行遥感反演。对于悬沙浓度的反演主要利用张伯虎等^[9]根据杭州湾1988—2014年的 Landsat-TM/OLI 遥感影像,结合实测水体光谱和同步悬沙取样数据,构建表层悬沙浓度遥感定量反演模式,公式主要利用红光波段(550~670 nm)与近红外波段(780~830 nm)的

比值关系,可作为杭州湾表层悬沙浓度遥感定量反演的模式,即:

$$C_{SS} = 0.787 4B^2 - 0.137 6B + 0.209 8 \quad (1)$$

式中: B 为近红外波段与红波段遥感反射率的比值; C_{SS} 为表层悬沙浓度, kg/m^3 。

3 结果与分析

为了更直观地定量对比表层悬沙浓度的分布情况,在洋山港附近海域的东西口门、颀珠山汉道等处共提取了6个特征点(图2)的悬浮泥沙浓度值,具体位置坐标见表2。

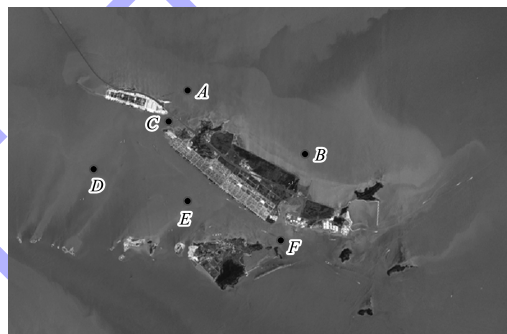


图2 洋山港海域特征点位置

表2 特征点位置坐标

点位	坐标
A	(30°39'39.07"N, 122°03'11.41"E)
B	(30°38'01.14"N, 122°06'45.98"E)
C	(30°38'50.78"N, 122°02'31.25"E)
D	(30°37'35.57"N, 121°59'57.84"E)
E	(30°36'40.86"N, 122°03'07.68"E)
F	(30°35'49.01"N, 122°05'49.83"E)

3.1 悬沙浓度平面分布特征

洋山港周边海域表层悬沙反演结果见图3。可以看出,空间分布上表现为表层悬沙浓度自杭州湾口外向口内逐渐递增,湾内南北两侧沿岸高于中部。杭州湾口外海域北侧的南汇嘴沿岸至大戢山附近存在表层悬沙浓度较高水体,并有向南扩散的趋势。这是由于长江口大量向海水沙,在潮流影响下向南沿海输移,随大戢洋、黄泽洋等潮汐通道的涨潮流进入杭州湾,表明长江口来沙是洋山港海域悬浮泥沙的主要来源之一^[10]。沿岸水域表层悬沙浓度普遍较高,体现了本地底层泥沙起悬也是表层悬浮泥沙的主要来源之一。

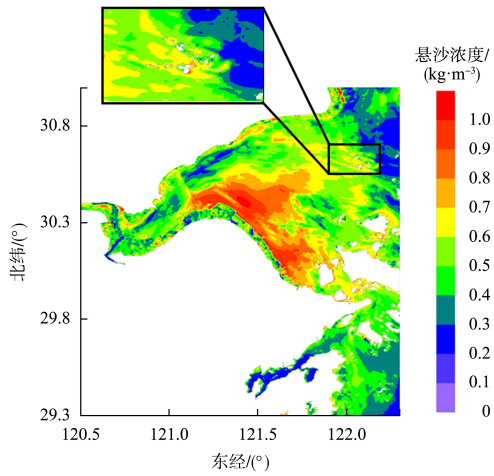


图3 2020-02-22 洋山港及其周边海域表层悬沙浓度分布

从平面上总体来看,杭州湾海域悬沙浓度分布呈现口内大于口外、两岸大于中部、沿岸大于外海的特点。从传播方向上来看,洋山港区周边海域表层悬浮泥沙的来源包括口内来沙、长江口

来沙和本地底层泥沙起悬。量级上看,卫星过境期间表层悬沙浓度范围普遍为 0.2~1.0 kg/m³ 范围内,最高值大多位于杭州湾口内区域。

受南北岛链所夹形成的喇叭口地形影响,洋山港区港内水域悬沙浓度普遍较高,浅水泥沙起悬等因素影响悬沙浓度也高于周围海域。洋山岛沿岸附近悬沙浓度要高于周边邻近海域,洋山岛北侧沿岸地区,由于受周围工程影响,悬沙浓度明显高于洋山岛南侧水域。

3.2 潮型变化下的悬沙浓度分布特征

选取 2019—2023 年同为涨潮阶段、天气状况类似、季节相近的遥感影像反演结果进行对比,分析大小潮变化对洋山港海域悬沙浓度的影响,结果见图 4 和表 3。总体上看,洋山港海域悬沙浓度呈现出大潮大于小潮的变化规律,小潮阶段洋山港海域平均悬沙浓度为大潮时期的 47%~69%。

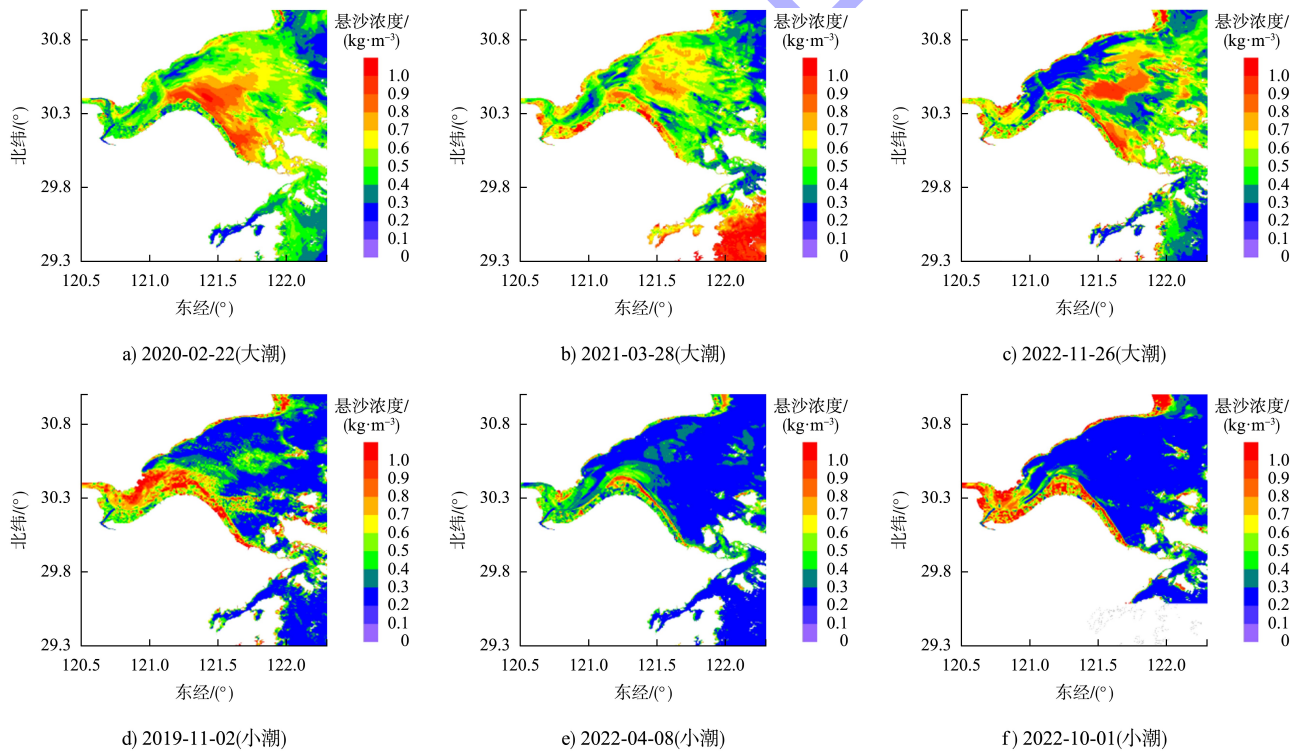


图4 洋山港海域表层悬沙浓度反演结果大小潮对比

表 3 大小潮洋山港海域特征点表层悬沙浓度对比

时间	潮型	表层悬沙浓度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)						表层平均悬沙浓度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
		A	B	C	D	E	F	
2020-02-22	大潮	0.564	0.413	0.619	0.659	0.628	0.721	0.601
2019-11-02	小潮	0.238	0.206	0.502	0.310	0.465	0.780	0.417
2021-03-28	大潮	0.545	0.387	0.628	0.605	0.478	0.735	0.563
2022-04-08	小潮	0.233	0.271	0.320	0.216	0.246	0.297	0.264
2022-11-26	大潮	0.726	0.721	0.745	0.737	0.719	0.873	0.754
2022-10-01	小潮	0.212	0.218	0.443	0.221	0.221	0.520	0.306

选取 2021—2023 年潮型相同、天气状况类似、季节相近的遥感影像反演结果进行对比, 分析涨落潮变化对洋山港海域悬沙浓度的影响, 结

果见图 5。从涨、落潮悬沙分布的情况看, 呈现出涨潮悬沙浓度分布范围大于落潮, 落潮期为涨潮期平均悬沙浓度的 49%~77%。

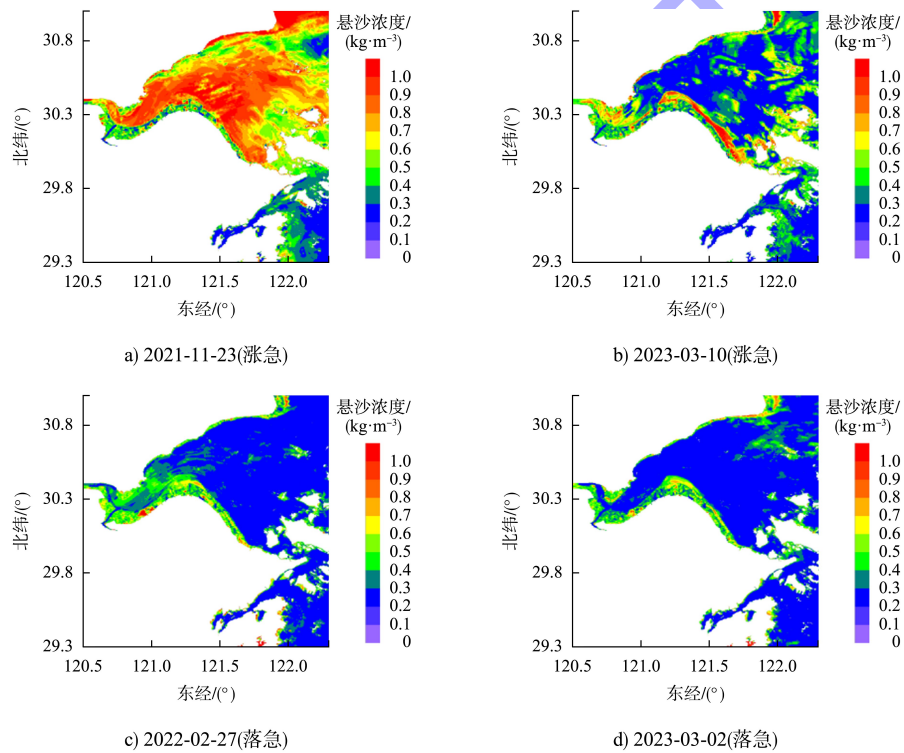


图 5 洋山港海域特征点表层悬沙浓度涨落潮变化对比

洋山港海域各点位的统计结果见表 4。可以看出, 位于港内水域的 D~F 各点的表层悬沙浓度变幅较大。以时间相近的 2023-03-10(涨急)和 2023-03-02(落急)为例, 北侧的 A~C 各点悬沙浓

度变幅较小, 涨急较落急增加约 5%, 而 D~F 各点涨急悬沙浓度较落急增加约 66%。这是由于受喇叭口地形影响, 潮流作用较强, 因而涨落潮影响对悬沙浓度的影响更大。

表 4 涨落潮洋山港海域特征点表层悬沙浓度对比

时间	潮流形态	表层悬沙浓度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)						表层平均悬沙浓度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
		A	B	C	D	E	F	
2021-11-23	涨急	0.657	0.560	0.728	0.789	0.810	0.864	0.735
2022-02-27	落急	0.242	0.212	0.489	0.360	0.399	0.478	0.363
2023-03-10	涨急	0.214	0.332	0.470	0.670	0.377	0.640	0.451
2023-03-02	落急	0.361	0.263	0.465	0.330	0.286	0.389	0.349

3.3 季节性变化下的悬沙浓度分布特征

表层悬沙浓度变化主要受潮汐和波浪等因素影响，因此选取潮型潮流相似、风场强度接近的反演结果进行对比，分析季节变化对表层悬沙浓度的影响。分别选取2019、2020和2023年冬夏季

表层悬沙浓度反演结果进行对比，结果见图6和表5。可以看出，洋山海域冬季表层悬沙浓度明显高于夏季，冬季的平均悬沙浓度为0.60~0.73 kg/m³，而夏季的平均悬沙浓度为0.23~0.40 kg/m³，冬、夏季表层悬沙浓度差异接近1倍。

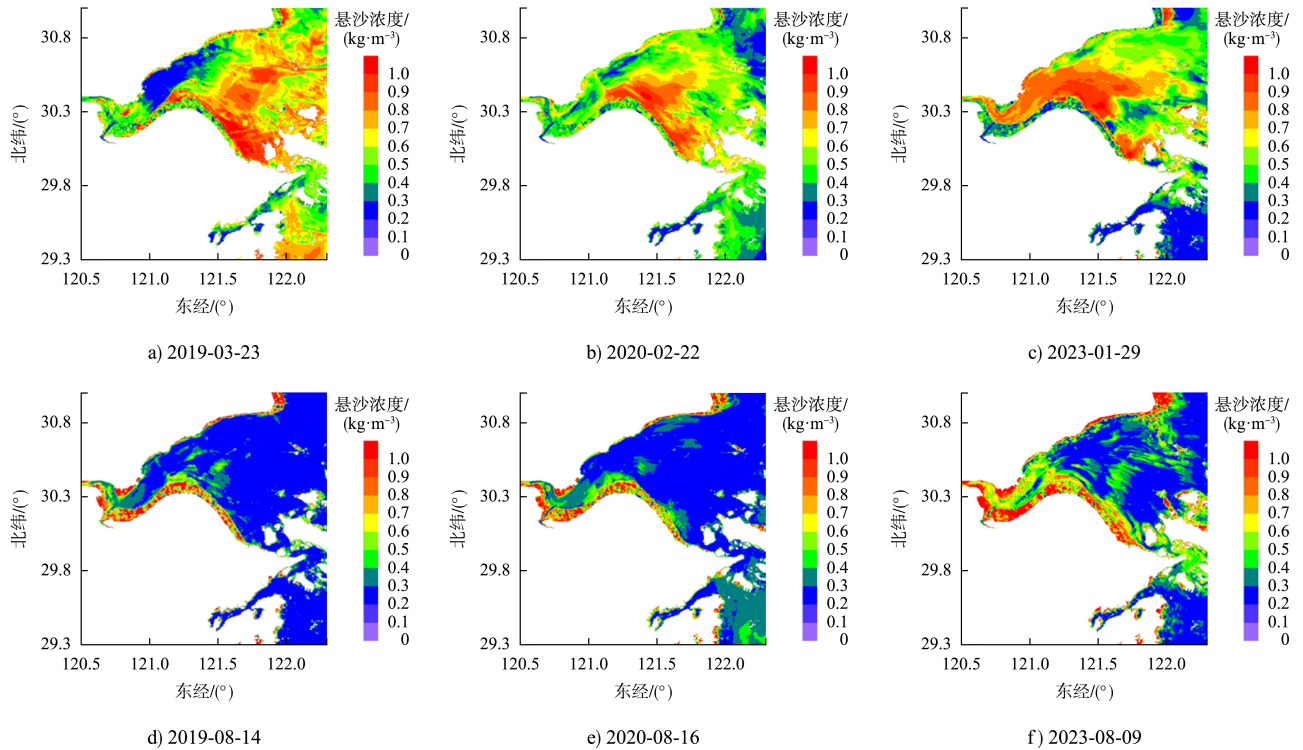


图6 洋山港海域表层悬沙浓度反演结果季节性对比

表5 冬夏季洋山港海域特征点表层悬沙浓度

时间	表层悬沙浓度/(kg·m ⁻³)						表层平均悬沙浓度/(kg·m ⁻³)
	A	B	C	D	E	F	
2019-03-23	0.599	0.648	0.660	0.845	0.790	0.824	0.728
2019-08-14	0.207	0.204	0.245	0.209	0.256	0.283	0.234
2020-02-22	0.564	0.413	0.619	0.659	0.628	0.721	0.601
2020-08-16	0.261	0.255	0.273	0.249	0.257	0.252	0.258
2023-01-29	0.626	0.453	0.616	0.664	0.677	0.574	0.602
2023-08-09	0.300	0.292	0.430	0.580	0.360	0.457	0.403

3.4 风浪变化下的悬沙浓度分布特征

泥沙运动主要过程可以概述为“波浪掀沙、潮流输沙”，波浪作用是悬浮泥沙的重要动力组成，波浪作用引起的底层泥沙起悬也是悬沙的重要来源^[11]。波浪主要由外海传播过来的涌浪和本地风场引起的风浪组成，由于实测波浪数据的缺乏，本文主要以当地风场变化为标准，研究波浪变化对悬沙浓度的影响。

选取潮型潮流状况相似、季节接近的遥感影像反演结果进行对比，表层悬沙浓度反演结果见图7、表6。可以看出，本地风场引起杭州湾区域的波浪掀沙，因此随着风级增大表层悬沙浓度也出现明显增大。根据表6的各点位悬沙浓度分布统计，对于洋山岛附近海域而言，风向对各点位的影响程度各有不同，例如2021-12-17(5级)及2022-01-02(3级)洋山港海域均受北风控制，后者

A~C点悬沙浓度是前者的68%~80%, 而D~F点悬沙浓度是前者的85%~95%, 这是由于D~F各点受洋山岛遮蔽作用, 受风浪作用较小。而位于岛

屿北侧的A~C点, 由于海向来风通常会伴随着外海涌浪传播到当地, 与当地风浪叠加, 因而使波浪作用加强, 悬沙浓度变幅较大。

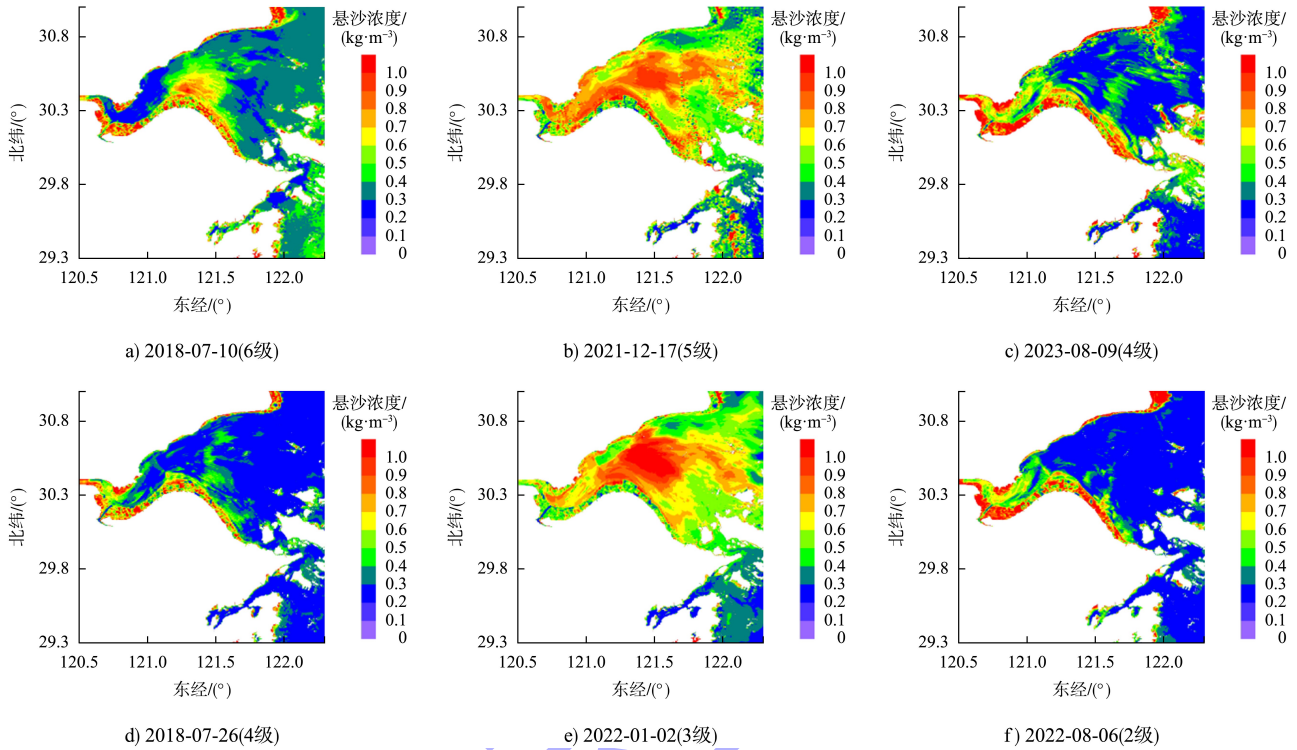


图7 洋山港海域特征点表层悬沙浓度风浪强度变化对比

表6 洋山港海域特征点表层悬沙浓度

时间	风力/级	表层悬沙浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)						表层平均悬沙浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
		A	B	C	D	E	F	
2018-07-10	6级	0.370	0.378	0.331	0.361	0.345	0.400	0.364
2018-07-26	4级	0.228	0.211	0.283	0.209	0.229	0.337	0.250
2021-12-17	5级	0.653	0.743	0.642	0.768	0.707	0.788	0.717
2022-01-02	3级	0.505	0.596	0.439	0.657	0.684	0.746	0.605
2023-08-09	4级	0.300	0.292	0.430	0.580	0.360	0.457	0.403
2022-08-06	2级	0.250	0.207	0.278	0.240	0.268	0.289	0.255

4 结论

1) 从季节变化看, 洋山港海域冬季悬沙浓度明显大于夏季。从反演结果来看, 冬季的平均悬沙浓度为 $0.60 \sim 0.73 \text{ kg/m}^3$, 而夏季的平均悬沙浓度为 $0.23 \sim 0.40 \text{ kg/m}^3$, 冬夏季悬沙浓度差异接近1倍。

2) 不同潮型下, 大潮期的悬沙浓度大于小潮期, 涨潮期的悬沙浓度大于落潮期。受喇叭口地形影响, 潮流作用较强, 潮型变化对口外悬沙浓度变化更为明显。

3) 强风引起的波浪变化也会使悬沙浓度明显

提高。由于海向来风通常会伴随着外海涌浪传播到当地, 与当地风浪叠加, 因而使波浪作用加强, 悬沙浓度变幅增大。

参考文献:

[1] ROSE C P, THORNE P D. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary [J]. Continental shelf research, 2001, 21(15): 1551-1575.
 [2] 阎新兴. 上海洋山港区的自然条件及泥沙来源分析[J]. 水道港口, 2000(3): 33-36.

(下转第40页)