



南黄海西部日照近海悬浮泥沙分布、输运及控制因素

卢鹏飞, 岳英洁, 朱龙海, 胡日军, 尹砚军, 冷 星

Distribution, transport and controlling factors of suspended sediment near Rizhao in the west of South Yellow Sea

LU Pengfei, YUE Yingjie, ZHU Longhai, HU Rijun, YIN Yanjun, and LENG Xing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021080901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

特提斯构造域海底流体逃逸活动特征及其控制因素

Characteristics and controlling factors of submarine fluid escape in Tethys tectonic domain

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 27

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine–continental transitional source rocks in the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卢鹏飞, 岳英洁, 朱龙海, 等. 南黄海西部日照近海悬浮泥沙分布、输运及控制因素 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 36-49.
LU Pengfei, YUE Yingjie, ZHU Longhai, et al. Distribution, transport and controlling factors of suspended sediment near Rizhao in the west of South Yellow Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3): 36-49.

南黄海西部日照近海悬浮泥沙分布、输运及控制因素

卢鹏飞¹, 岳英洁², 朱龙海^{1,3}, 胡日军^{1,3}, 尹砚军¹, 冷星¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
2. 山东省海洋工程咨询协会, 济南 250000
3. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

摘要: 基于 2020 年 10 月日照近岸海域大潮期水文泥沙观测资料, 研究了海流和悬浮泥沙时空分布特征, 利用单宽通量机制分解等方法, 探讨了悬浮泥沙输运机制和控制因素。结果表明, 日照近岸海域悬浮泥沙浓度平面上呈由岸向海逐渐降低的分布特征, 垂向上呈由表层至底层逐渐升高的趋势。悬浮泥沙浓度变化与潮周期流速变化趋势总体一致, 但具有滞后效应。研究区单宽净输沙率为 4.72~24.68 g/(s·m), 近岸单宽净输沙率明显大于远岸输沙率。悬浮泥沙输运以平流输运为主, 其次为潮泵效应或垂向净环流输运。研究区水体垂向混合均匀, 对悬浮泥沙垂向分布影响微弱。潮流引起研究区悬浮泥沙浓度的潮周期变化, 南黄海西部近海悬浮泥沙净输运方向和潮余流方向大体相同, 在远岸开阔海域总体呈向南的净输运趋势。研究成果有利于完善南黄海西部近海泥沙输运规律理论成果, 对日照近岸工程建设具有一定的指导意义。

关键词: 控制因素; 悬浮泥沙; 输运机制; 日照; 南黄海

中图分类号: P736.21 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021080901

Distribution, transport and controlling factors of suspended sediment near Rizhao in the west of South Yellow Sea

LU Pengfei¹, YUE Yingjie², ZHU Longhai^{1,3}, HU Rijun^{1,3}, YIN Yanjun¹, LENG Xing¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China
2. Shandong Ocean Engineering Consulting Association, Jinan 250000, China
3. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266100, China

Abstract: In this paper, based on the hydrological and sediment observation data collected from the coastal area of Rizhao in October 2020 during the spring tide, the spatial and temporal distribution pattern of ocean current and suspended sediment are studied, and the transport mechanism and controlling factors of the suspended sediment discussed by means of single wide flux mechanism decomposition. The results show that the concentration of suspended sediment in the studied coastal area decreases gradually from shore to sea laterally, and increases gradually from top to bottom vertically. The variation trend of suspended sediment concentration is consistent with the velocity change of tidal cycle, except for the hysteresis effect. The net sediment transport rate per width in the study area varies between 4.72 and 24.68 g/(s·m), and the net sediment transport rate per width near shore is significantly higher than that offshore. The main transport of suspended sediment is advection, followed by tidal pump effect or vertical net circulation. The vertical mixing of water body in the study area is uniform, and its effect on vertical distribution of suspended sediment is rather weak. Tidal current is the major process to cause the tidal cycle change of suspended sediment concentration in the study area. The net transport direction of suspended sediment and tidal residual current are roughly the same in the west coast of the South Yellow Sea, and there is southward net transport trend in general in the far shore area of the open sea. The research results are beneficial to improve the theoretical results of sediment transport pattern in the west of the South Yellow Sea and have certain guiding significance to the engineering construction in the Rizhao coast.

Key words: control factors; suspended sediment; transport mechanism; Rizhao; South Yellow Sea

悬浮泥沙是沉积物由陆地向海洋输运的主要载体, 同时悬浮泥沙在运移过程中会携带各类营养盐和污染物, 因此悬浮泥沙的输运和沉积不仅能反映海洋沉积动力过程, 而且也深刻影响着陆架海海

资助项目: 国家自然科学基金“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制—以威海湾为例”(41776059)

作者简介: 卢鹏飞 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: lupengfei7@163.com

通讯作者: 岳英洁 (1982—), 女, 高级工程师, 主要从事海洋环境影响和海域使用动态监视监测研究, E-mail: yueyingjie@shandong.cn

收稿日期: 2021-08-09; 改回日期: 2021-10-11. 文凤英编辑

洋生态环境和资源分布^[1-5]。

针对南黄海海域悬浮泥沙分布、运移和物质来源的研究,前人利用实测资料分析^[6-9]、数值模拟^[10]、遥感资料反演^[11-12]等方法开展了相关研究。如李文建等^[13]基于现场激光粒度仪(LISST)观测数据研究了南黄海的悬浮物粒度分布特征;仲毅等^[14]通过水样抽滤得到的悬浮体质量浓度数据和现场激光粒度仪(LISST)观测到的悬浮体体积浓度数据研究了南黄海 35°断面的悬浮体浓度垂直分布及其季节变化。李建超等^[15]基于现场激光粒度仪(LISST)观测数据证明南黄海底部存在多个悬浮体高浓度区域,沿岸流控制下的近岸悬浮体高浓度区,悬浮体多为细颗粒物;黄海暖流流经海域浓度相对较低,悬浮体多为粗颗粒物;海洋温跃层会抑制底层悬浮体向表层运移,促进其在底部富集。部分学者对悬浮泥沙输运机制的研究表明,不同海域悬浮泥沙输运机制存在差异,如鸭绿江河口地区、苏北近岸西洋水道、洋山港海域和长江口悬浮泥沙输运以平流输运为主,主要控制因素是欧拉余流^[16-19];天津港和福宁湾附近海域悬浮泥沙净输运以潮泵效应为主^[20-21];椒江河口悬浮泥沙输运以潮泵效应和平流输运为主^[22]。

前人对南黄海海域的悬浮泥沙分布及输运取得了丰富的研究成果,但对日照近岸海域悬浮泥沙分布及输运的研究稍显匮乏。日照近岸海域位于南黄海西部,水体稳定,地表径流对其影响微弱,是研究波浪及海流作用对悬浮泥沙分布及输运影响的理想区域^[23]。鉴于此,本文以日照近岸海域为研究区(图 1),通过开展多站位、大比例尺的同步实测潮流、温盐和悬浮泥沙调查,运用通量机制分解法,研究日照近岸海域悬浮泥沙的平面和垂向分布特征,探究不同水动力因素对悬浮泥沙输运贡献率的差别。研究成果对完善南黄海近岸海域悬浮泥沙分布及输运机制,揭示日照近岸海域海底地貌演变机制,指导海岸工程建设具有一定的理论和现实意义。

1 研究区概况

研究区位于南黄海西部的日照海岸带地区,岸线以砂质海岸为主。研究区底质类型以砂和粉砂为主,东部、中部、西部海域多见砾质泥质砂和含砾泥质砂,沉积动力较强,以滚动和跳跃组分为主;岚山港和日照港附近海域多见含砾泥、砂质泥和泥等细颗粒物,沉积动力较弱,以悬浮组分为主^[24]。

日照海域潮汐类型属规则半日潮,平均海平面 3.10 m,历年最高潮位 5.40 m,历年最低潮位 0.27 m,平均高潮位 4.22 m,平均低潮位 1.24 m。波浪以风浪为主,常浪向、强浪向均为 E 向;次常浪向为 ESE 向和 SE 向^[25]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2020 年 10 月 18 日 10:00—19 日 11:00(大潮期),中国海洋大学在日照近岸海域进行了 5 个站位 25 h 的海流连续同步观测;2020 年 10 月 20—23 日(秋季),中国海洋大学在日照东部海域进行了 35 个站位的大面站水文泥沙现场调查,调查内容包括水体浊度和水体温盐,观测期间海况良好,调查站位如图 1 所示。

(1) 海流和潮位

采用美国 LinkQuest 公司生产的 FlowQuest 600 kHz 多普勒海流剖面仪(ADCP)和美国 Teledyne RD Instruments 公司生产的 WHS 600 多普勒海流剖面仪(ADCP)采集流向、流速、水深数据,ADCP 于船右舷后侧位置固定,每隔 10 min 采集一次数据。观测剖面按 0.5 m 分层,根据实际水深按 6 点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)进行数据提取。

潮位观测采用美国 Global Water 生产的 DCX-22-2 潮位仪和中国中船海鹰加科海洋技术有限责任公司生产的海鹰 HY1300 全数字潮位仪,采样间隔 1 s。

(2) 悬浮泥沙

5 个连续站悬浮泥沙水样的采集和海流观测同步进行,采样间隔 1 h,根据水深在表(水面以下 1 m)、中、底(海底以上 1 m)3 层各采集 1 L 水样,用于悬浮体质量浓度的测定。对现场采集的水样在实验室进行抽滤、烘干、称重。过滤膜为孔径 0.45 μm、直径 47 mm 的醋酸纤维膜,在电热培养恒温箱中以 50℃ 烘干,恒温 6 h 后放入硅胶干燥器,放置 6 h。称重精度 1/10 万的天平进行。为保证结果准确,悬浮体浓度数据利用空白校正膜进行了校正。

水体浊度(FTU)的现场测量使用英国 Aquatec 公司生产的 Aqualogger 310TY 型浊度仪和美国 D&A 公司生产的 OBS-3A 型浊度仪完成,采样频率为 1 Hz,量程(0~200 FTU),测量精度为±0.01 FTU。

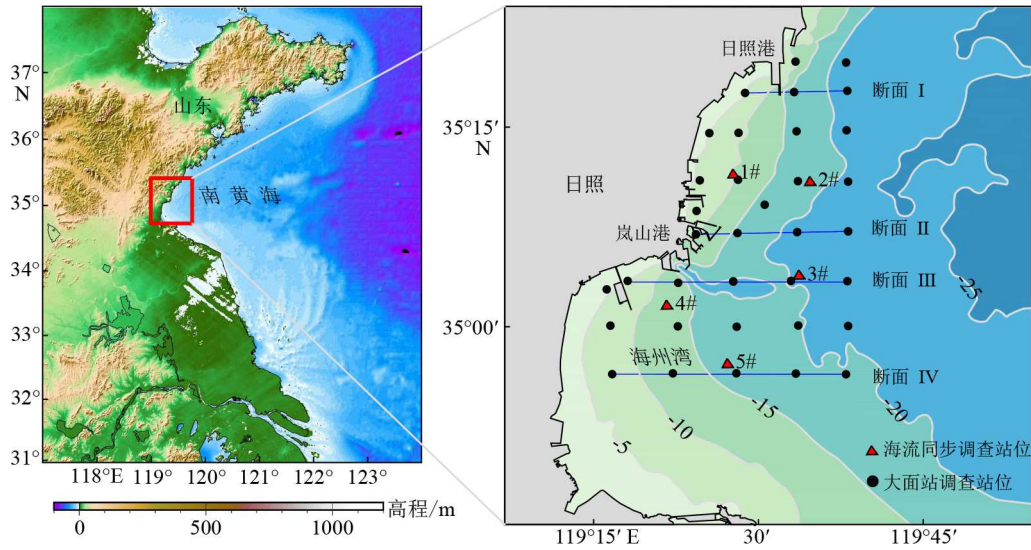


图1 日照海域调查站位图

Fig.1 Location map of survey stations in Rizhao Sea area

对实测浊度数据与悬浮泥沙浓度实验结果进行相关性分析,结果表明二者相关系数达到0.85以上(图2),证明水体浊度是悬浮泥沙浓度的良好替代性指标,本文已根据相关性关系将浊度换算成悬浮泥沙浓度。

(3) 温度和盐度

水体温度(°C)、盐度(PSU)、水深(m)的现场测量使用美国TRDI公司生产的CTD-NV型温盐深仪完成,采样频率5 Hz,温度和盐度测量精度为 ± 0.005 °C和 ± 0.005 PSU。

2.2 研究方法

(1) 通量机制分解法

本文采用Dyer^[26]的物质通量计算方法将悬浮泥沙通量分解为多个动力项,从而研究海流作用下各动力项所对应的主要动力因子对研究区悬浮泥沙输运的作用。依据Ingram^[27]和Uncles等^[28]提出的用相对水深进行分解瞬时的物质输运量的方式,

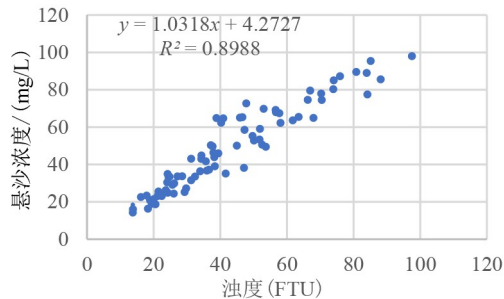


图2 实测浊度与悬浮泥沙浓度相关曲线图

Fig.2 Correlation curve of measured turbidity and sediment concentration

潮周期 T_t 平均瞬时单宽悬浮泥沙输移通量 T 的计算式为:

$$T = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h ucdz_0 dt = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 ucdz dt =$$

$$h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle + h_0 \overline{u_0' c_0'} +$$

$$\langle h_t \overline{u_0' c_t'} \rangle + \langle h_t \overline{u_t' c_0'} \rangle + \langle h_t \overline{u_t' c_t'} \rangle =$$

$$(T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) + (T_6) + (T_7) + (T_8) \quad (1)$$

式中: T_1 为欧拉余流控制下发生的悬浮泥沙输运, T_2 为斯托克斯漂移输运量,表示潮波与潮流相关项; T_1 与 T_2 之和为拉格朗日余流平流输运贡献项; T_3 为潮汐与悬浮泥沙浓度的潮变化相关项; T_4 为悬浮泥沙浓度与潮流变化相关项,即水位、垂向流速和垂向含沙量的三阶相关项,该项反映了底部泥沙再悬浮的强度; T_3 与 T_4 之和为潮泵效应,表示一个潮周期内涨落潮造成的上层水体和底部泥沙之间发生泥沙输运; T_5 为垂向流速变化和悬浮泥沙浓度变化的相关项,垂向上净环流产生的贡献; T_6 、 T_7 为时均量和潮汐振动引起的剪切扩散, T_8 为垂向潮振荡引起的剪切扩散, T_6 、 T_7 与 T_8 之和为剪切扩散项。

(2) Richardson数(Ri_g)

利用Richardson数(Ri_g)描述水体的混合和层化程度,其表达式为:

$$Ri_g = \frac{N^2}{M^2} = \frac{g}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{-2}$$

式中, N^2 为浮力频率, M^2 为流速切强度, z' 为垂向距离, ρ 为海水密度, u 为各层海水流速, g 为重力加速

度。当 $Ri_g < 0.25$ (或 $\ln(Ri_g/0.25) < 0$) 时, 水体不稳定, 混合增强; 当 $Ri_g > 0.25$ (或 $\ln(Ri_g/0.25) > 0$) 时, 水体稳定, 混合被抑制^[29]。

(3) 盐度层化系数

利用盐度层化系数可以判断水体的稳定程度, 层化系数与水体稳定程度呈正相关性, 层化系数越大, 水体越稳定, 水体各层的物质交换越不频繁, 反之则相反。盐度层化系数^[30]表达式如下:

$$N = \frac{S_d - S_b}{\bar{S}}$$

式中, S_d 、 S_b 分别为底层、表层盐度, \bar{S} 为垂向平均盐度, 当 $N < 0.01$ 时, 水体属于强混合型, 盐度密度分层不影响悬浮泥沙的垂向扩散; $0.01 < N < 1$ 时, 水体为缓混合型; $N > 1$ 时, 水体为弱混合型, 盐度密度分层会抑制悬浮泥沙垂向扩散。

(4) 遥感影像反演悬浮泥沙浓度

考虑到大面站取样时间不同步对于分析研究区悬浮泥沙浓度平面分布特征可能存在一定影响, 为了弥补此方面的缺陷, 利用取样时间段内 (2020 年 10 月 23 日) 的遥感影像进行反演, 获得研究海域表层悬浮泥沙浓度。本文采用韩国海洋卫星中心提供的 GOCI-TSS 影像来反演悬浮泥沙浓

度, GOCI-TSS 是基于 GOCI 数据的二级产品, 其中的 TSS 是利用 GDPS 软件基于 Case-2 算法得到的产品。

3 结果

3.1 海流特征

根据实测海流资料, 将各个站位表层、中层、底层海流特征值列于表 1, 并绘制各站位垂向海流矢量图 (图 3)。各站位流向以 NE-SW 为主, 海流运动形式为逆时针往复流, 涨潮流主方向为 SW, 落潮流主方向为 NE。总体上, 3#站位流速最大, 最大流速出现在涨潮期表层, 为 105.80 cm/s, 5#站位流速最小, 最小流速出现在落潮期底层, 为 11.30 cm/s。涨潮时, 各站位最大流速为 78.78~105.80 cm/s, 落潮时, 各站位最大流速为 52.00~79.06 cm/s。在潮周期内, 涨潮流速大于落潮流速, 落潮历时更长, 研究区各站位涨、落潮最大流速都出现在中潮位附近 (图 8)。垂向上, 研究区各站位流速从表层到底层逐渐减小。

准调和和分析结果表明研究区各测站潮流以

表 1 各站位海流观测结果

Table 1 Marine current observation results at each station

站位	层位	涨潮				落潮			
		最大		平均		最大		平均	
		流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)
1#	表层	78.78	274.2	51.69	223.14	67.93	108.4	45.03	68.19
	中层	66.50	294.5	46.22	239.22	56.21	97.1	41.26	58.04
	底层	53.43	271.3	32.06	233.10	40.90	91.3	29.89	59.91
2#	表层	94.56	277.9	55.50	216.15	77.60	134.1	50.55	65.71
	中层	92.17	351.7	55.36	242.51	69.24	181.6	42.47	66.52
	底层	63.54	267.2	44.16	228.07	44.79	123.3	28.25	69.73
3#	表层	105.80	345.9	58.30	255.99	75.60	152.5	52.13	74.80
	中层	89.95	336.9	55.27	256.61	77.48	120.0	53.53	61.68
	底层	67.35	355.1	32.76	267.59	45.89	113.9	28.50	47.94
4#	表层	96.21	279.0	58.30	254.57	79.06	105.6	49.91	60.66
	中层	85.10	303.0	52.24	261.03	75.26	135.5	47.65	59.28
	底层	61.33	277.0	34.50	248.25	67.88	103.9	31.84	61.78
5#	表层	83.70	347.5	53.89	260.53	52.00	144.3	38.11	70.11
	中层	78.60	320.4	51.30	257.51	44.60	140.9	33.85	63.83
	底层	57.10	308.1	33.22	251.34	31.70	135.5	20.36	90.33

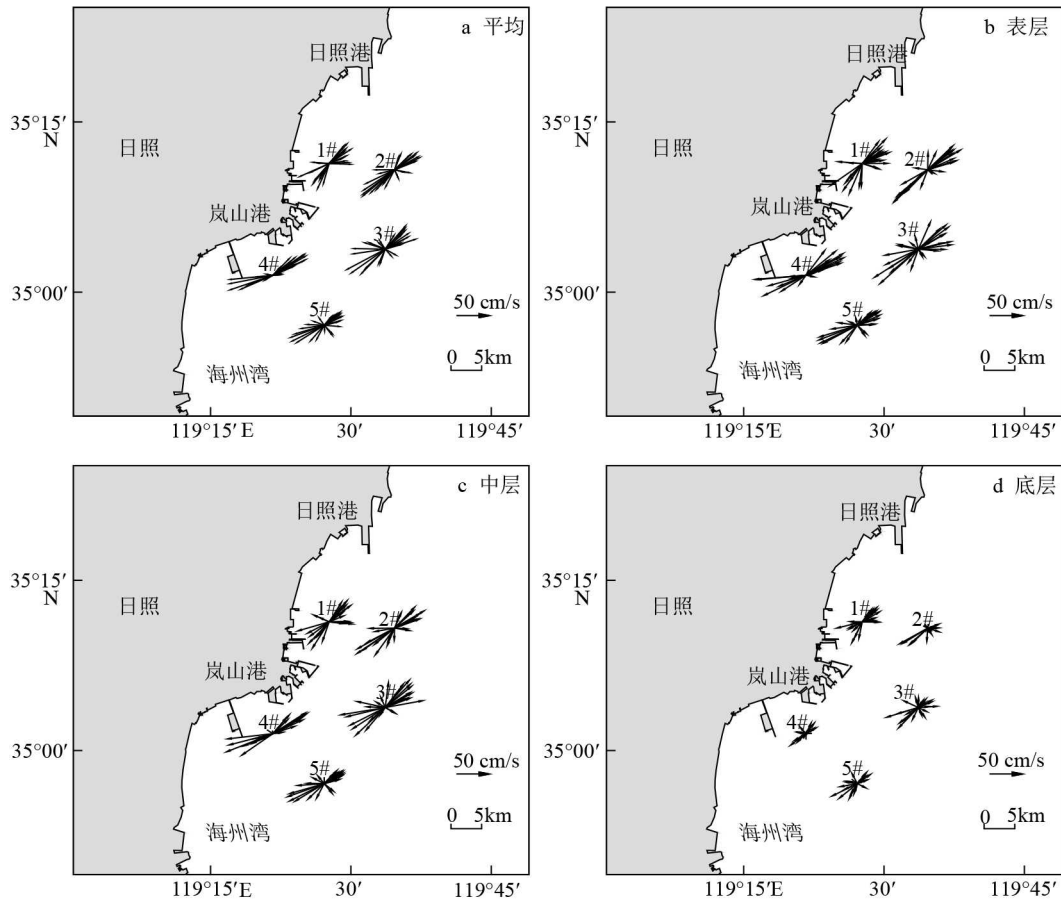


图3 各站位垂向潮流矢量

Fig.3 Vertical power flow vector at each station

M₂分潮为主,潮流椭圆长轴比为0.07~0.3,小于0.5,说明潮流性质为规则半日潮流。研究区海域余流变化复杂,方向既有向海又有向陆,大体呈顺时针方向旋转,与前人研究结果一致^[25]。离岸较近的1#、4#站位余流值明显大于离岸较远的2#、3#、5#站位,最大余流出现在1#站位表层为10.1 cm/s,对应流向为107.0°,最小余流出现在5#站位中层为2.5 cm/s,对应流向为279.7°(表2)。

表2 各站位垂向余流特征值

Table 2 Vertical residual power flow characteristic values at each station

站位	表层		中层		底层	
	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)	流速/(cm/s)	流向/(°)
1#	10.1	107.0	7.5	56.6	6.6	71.9
2#	4.9	140.8	4.7	193.9	5.6	198.6
3#	3.8	264.5	5.4	312.4	3.4	324.5
4#	8.9	14.6	8.7	15.8	5.5	34.6
5#	3.3	297.0	2.5	279.7	3.9	241.3

3.2 悬浮泥沙时空分布及变化特征

3.2.1 悬浮泥沙浓度平面分布变化特征

研究区各海流观测站位涨潮阶段悬浮泥沙浓度稍微大于落潮阶段悬浮泥沙浓度(图4),涨潮阶段悬浮泥沙浓度为23.54~49.79 mg/L,落潮阶段悬浮泥沙浓度为20.75~46.09 mg/L。离岸较近的1#、4#站位平均悬浮泥沙浓度在涨潮、落潮阶段均明显大于离岸较远的2#、3#、5#站位。其中,平均悬浮泥沙浓度最大值出现在1#站位,其涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为49.79、46.09 mg/L,其次是4#站位,其涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为44.75、42.06 mg/L,最小值出现在3#站位,其涨、落潮阶段平均悬浮泥沙浓度分别为23.40、20.17 mg/L。最大平均悬浮泥沙浓度出现在离岸较近的1#站位的涨潮阶段,为49.79 mg/L,最小平均悬浮泥沙浓度出现在离岸较远的3#站位的落潮阶段,为20.17 mg/L。

根据大面站水文泥沙现场调查结果,研究区水体悬浮泥沙浓度呈现由陆向海逐渐降低的趋势

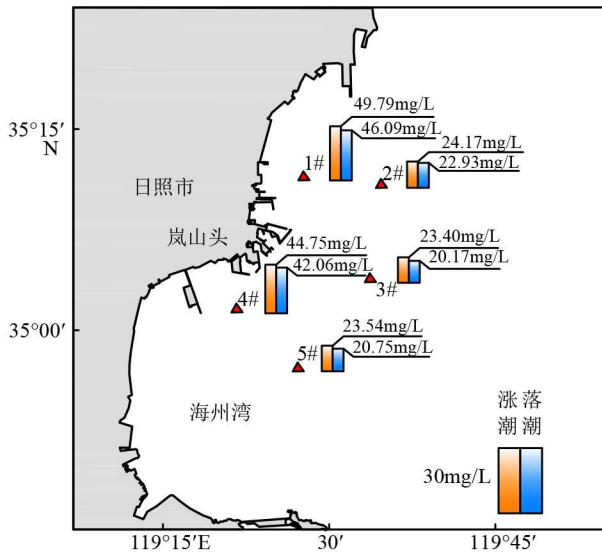


图 4 平均悬浮泥沙浓度随涨落潮分布图

Fig.4 Distribution of average suspended sediment concentration with fluctuating tide

测结果大体相同,日照近海悬浮泥沙浓度呈现明显的近岸高、远岸低的分布特征。

3.2.2 悬浮泥沙浓度垂向分布变化特征

垂向上,研究区悬浮泥沙浓度呈现从表层向底层逐渐升高的分布特征(图 7)。根据各站位平均悬浮泥沙浓度垂向变化统计表(表 3),4#站位的表、底层平均悬浮泥沙浓度差值最大,为 29.06 mg/L,5#站位的表、底层平均悬浮泥沙浓度差值最小,为 22.52 mg/L。研究区大面站调查结果表明,表层水体悬浮泥沙浓度为 14.79~45.22 mg/L,平均值为 23.97 mg/L;中层水体悬浮泥沙浓度为 19.43~53.85 mg/L,平均值为 30.22 mg/L;底层水体悬浮泥沙浓度为 33.25~85.53 mg/L,平均值为 50.19 mg/L。

3.2.3 悬浮泥沙浓度在潮周期内变化特征

研究区各站位悬浮泥沙浓度在潮周期内大小变化非常复杂(表 4)。悬浮泥沙浓度变化周期与流速变化周期类似,各站位悬浮泥沙浓度在单日内出现 4 次峰值(图 8)。由于当天海上风况良好,除 1#站位外,其余站位涨潮阶段的悬浮泥沙浓度峰值都比落潮阶段更大。研究区海域悬浮泥沙浓度的变化滞后于流速的变化,从各站位流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布图(图 8)中可以发现,悬浮泥

(图 5)。为了弥补大面站取样时间不同步对于分析研究区悬浮泥沙浓度平面分布特征存在的影响,本文利用取样时间段内的遥感影像进行反演,获得研究海域表层悬浮泥沙浓度(图 6)。结果表明,遥感影像反演得到的悬浮泥沙浓度平面分布特征与实

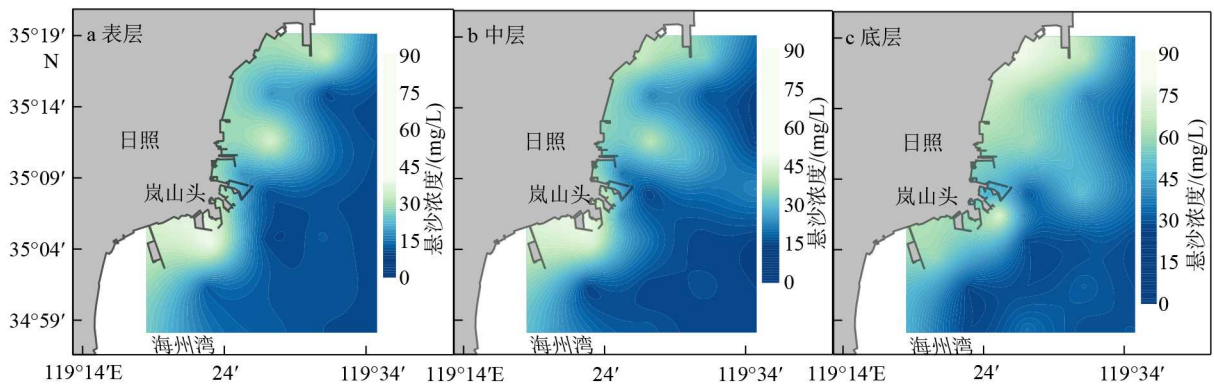


图 5 秋季大面站悬浮泥沙浓度平面分布图

Fig.5 Plane distribution map of suspended sediment concentration at large surface station in autumn

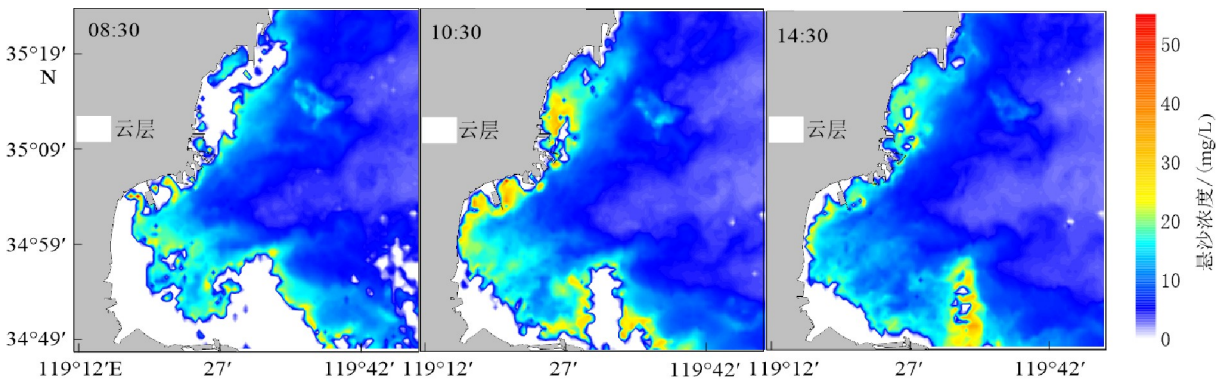


图 6 研究区表层悬浮泥沙浓度平面分布图

Fig.6 Plane distribution of surface suspended sediment concentration in the study area

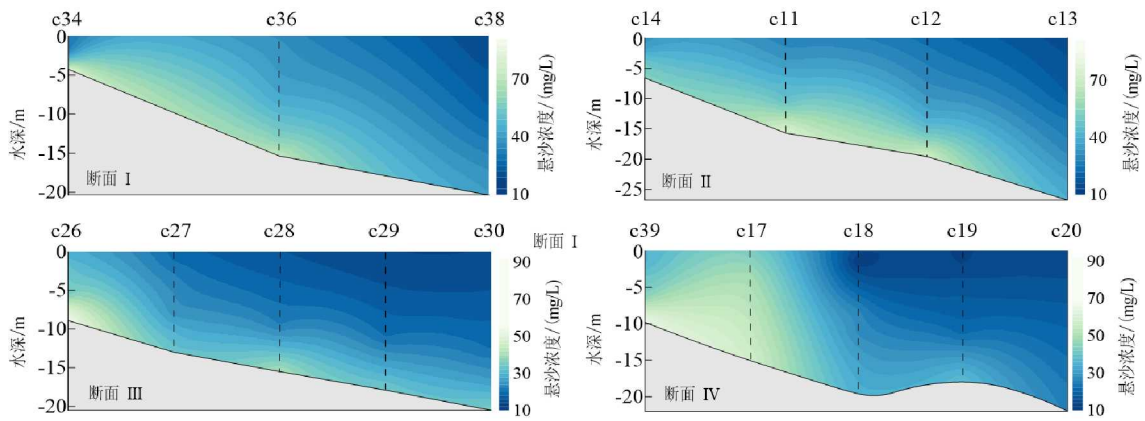


图7 秋季典型断面悬沙浓度垂向分布图

Fig.7 Vertical distribution of suspended sediment concentration at typical sections in autumn

表3 各海流观测站位平均悬浮泥沙浓度垂向变化统计

Table 3 Statistical table of vertical variation of average suspended sediment concentration at each current observation station

	mg/L				
站位	1#	2#	3#	4#	5#
表层	34.92	12.92	12.62	30.55	12.67
中层	44.61	19.06	16.30	39.12	17.61
底层	63.00	38.25	35.32	59.61	35.19

表4 悬浮泥沙浓度特征值

Table 4 List of characteristic values of suspended sediment concentration

	mg/L		
	表层	中层	底层
最小值	14.79	19.43	33.25
最大值	45.22	53.85	85.53
平均值	23.97	30.22	50.19

沙浓度的峰值较流速峰值存在 2 h 的滞后。

3.3 温度、盐度特征

根据 CTD 实测数据, 绘制 1#、3#、4# 站位温度、盐度时间序列变化图(图 9)。研究区 3 个站位温度为 18.66~21.28 °C, 盐度为 26.85~29.31 PSU, 平均温度为 20.31 °C, 平均盐度为 28.39 PSU。3 个站位观测期间表层平均温度为 20.28 °C, 底层平均温度为 20.34 °C; 表层平均盐度为 28.34 PSU, 底层平均盐度为 28.42 PSU(表 5)。由图 9 可以发现, 一个潮周期内温度和盐度都存在两个峰值, 涨潮时温度和盐度升高, 落潮时温度和盐度降低, 温度峰值对应盐度高点。对比研究区海水温度、盐度周期性波动曲线与潮位波动曲线, 可以发现三者呈正相关, 这表明当海况良好时, 研究区水体温度和盐度

的变化主要是由潮流驱动下的水体水平运动造成的^[23]。

研究区大面站调查结果表明, 各层水体温度为 18.30~21.23 °C, 表层、中层、底层温度平均值分别为 20.07、20.08、20.09 °C; 各层水体盐度为 27.38~29.70 PSU, 表层、中层、底层盐度平均值分别为 28.60、28.61、28.63 PSU。水体表层和底层的温度、盐度差值极小(表 6), 温度、盐度垂向梯度接近于零, 平面上总体呈近岸低、远岸高的特征(图 10)。

3.4 悬浮泥沙输运通量

根据各站位悬浮泥沙输运项及单宽净输沙率计算结果(表 7), 比较各站位单宽净输沙率($T_{总}$)可以发现, 离岸较近的 4# 站位单宽净输沙率($T_{总}$)最大, 为 24.68 g/(s·m), 对应输沙方向为 5.61°; 其次为离岸较近的 1# 站位, 单宽净输沙率($T_{总}$)为 19.12 g/(s·m), 对应输沙方向为 103.02°; 最小单宽净输沙率($T_{总}$)出现在离岸较远的 5# 站位, 为 7.62 g/(s·m), 对应输沙方向为 247.69°。 T_1 最大值出现在 4# 站位, 为 38.96 g/(s·m), 对应输沙方向为 25.47°; T_2 最大值出现在 1# 站位, 为 9.82 g/(s·m), 对应输沙方向为 214.97°; T_3+T_4 最大值出现在 4# 站位, 为 7.34 g/(s·m), 对应输沙方向为 248.82°; T_5 最大值出现在 2# 站位, 为 3.75 g/(s·m), 对应输沙方向为 234.00°; 剪切扩散项($T_6+T_7+T_8$)净输沙率较低, 所有站位均低于 1.3 g/(s·m)。

4 讨论

4.1 悬浮泥沙输运机制

结合各站位悬浮泥沙输运项及单宽净输沙率

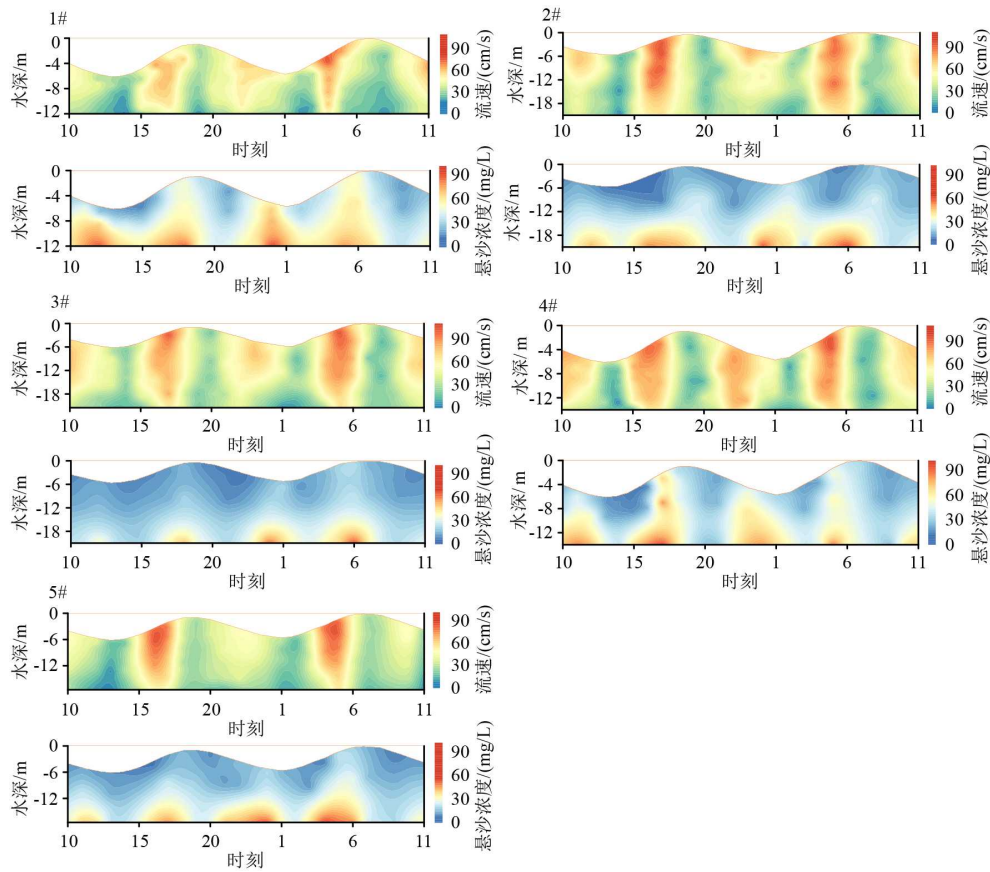


图 8 流速和悬浮泥沙浓度随时间变化分布图

Fig.8 Distribution of velocity and suspended sediment concentration over time

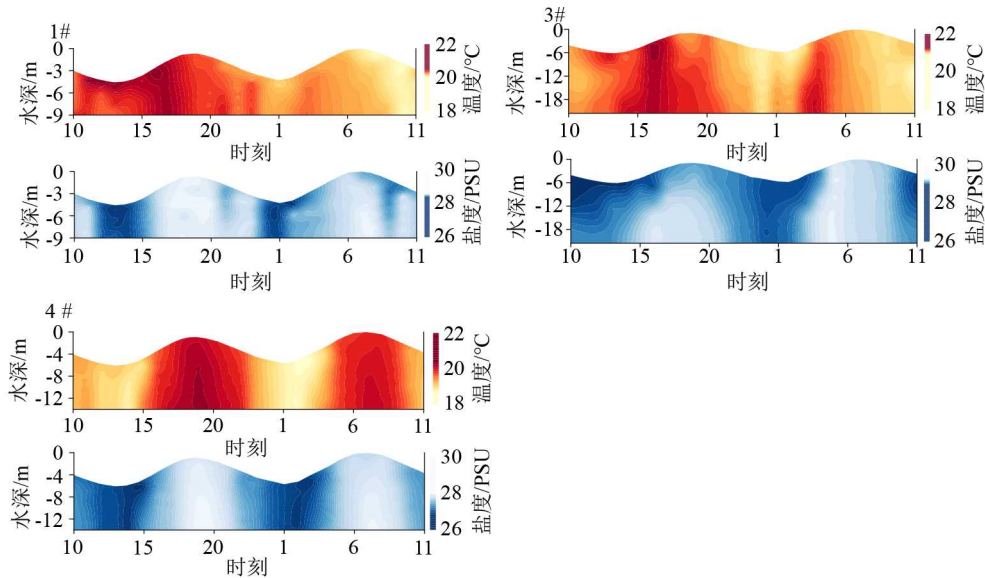


图 9 1#、3#、4# 站位温度、盐度随时间变化分布图

Fig.9 Distribution of temperature and salinity at stations 1, 3 and 4 over time

计算结果(表 7)和各悬浮泥沙输运项在单宽净输沙率中占比(表 8), 研究区域悬浮泥沙输运整体以平流输运项(T_1+T_2)为主, 其次为潮泵效应(T_3+T_4)或垂向净环流贡献项(T_5)。平流输运项(T_1+T_2)在 5 个站位单宽净输沙率中平均占比为 95.24%, 其输

沙方向与净输沙方向基本一致; 潮泵效应(T_3+T_4)在 1#、4# 站位中占据次要地位, 在单宽净输沙率($T_{总}$)中分别占比 27.77%、29.73%; 垂向净环流贡献项(T_5)在 2#、3#、5# 站位中占据次要地位, 在单宽净输沙率($T_{总}$)中分别占比 27.98%、23.39%、25.86%。

表5 1#、3#、4#站位温度、盐度特征值

Table 5 The characteristic values of temperature and salinity at stations 1, 3 and 4

站位	温度/°C			盐度/PSU		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
1#	20.01	20.51	20.29	28.45	28.65	28.57
3#	20.93	21.28	21.10	28.99	29.31	29.15
4#	18.66	20.32	19.54	26.85	28.02	27.44

表6 大面站温度、盐度特征值

Table 6 Table of characteristic values of temperature and salinity of the main surface station

层位	温度/°C			盐度/PSU		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
表层	18.70	21.22	20.07	27.38	29.69	28.60
中层	18.30	21.23	20.08	27.46	29.70	28.61
底层	18.42	21.23	20.09	27.49	29.68	28.63

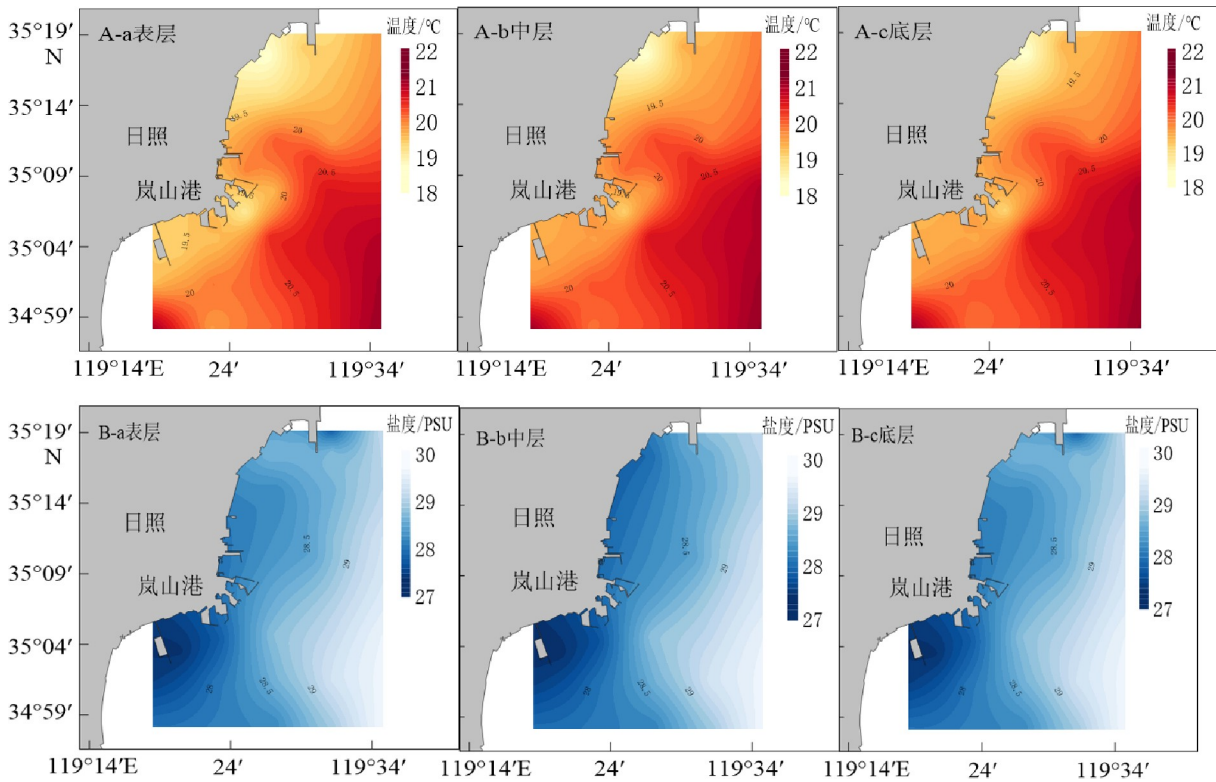


图10 大面站温度、盐度平面分布图

Fig.10 Planar distribution of temperature and salinity of the large surface station

剪切扩散项($T_6+T_7+T_8$)净输沙率较低,在单宽净输沙率($T_{总}$)中平均占比为6.33%,对研究区域悬浮泥沙输运贡献有限。

研究区单宽输沙量变化复杂,1#、2#站位单宽净输沙量向海,而3#、4#、5#站位的单宽净输沙量向陆。对比研究海域各站位垂向平均余流和悬浮泥沙输运项可以发现,垂向平均余流方向与拉格朗日平流输运项(T_1+T_2)方向和单宽净输沙项($T_{总}$)方向基本相同,所有站位余流方向与 T_1+T_2 、 $T_{总}$ 的输沙方向相差均不超过 25° (图11)。可以初步判定,潮余流是主导悬浮泥沙输运的重要因素。比较各站位单宽净输沙率($T_{总}$)可以发现,离岸较近站位的单宽净输沙率($T_{总}$)明显大于离岸较远站位的单宽净输沙率($T_{总}$)。这是由于平流输运项(T_1+T_2)方向

受余流控制,量值由流速和悬浮泥沙浓度控制,由于近岸1#、4#站位余流流速和悬浮泥沙浓度数值均高于远岸2#、3#、5#站位,所以近岸站位的拉格朗日平流输运项(T_1+T_2)数值更大,进而导致离岸较近站位的单宽净输沙率($T_{总}$)明显大于离岸较远站位的单宽净输沙率($T_{总}$)。

通过研究区各站位涨落潮时悬浮泥沙输运量表(表9)可以发现,该海域的悬浮泥沙涨潮时沿SW向输运,落潮时沿NE向输运,与涨落潮的方向基本一致。比较涨落潮输沙率和净输沙率可以发现,研究区净输沙率远小于涨落潮输沙率,这表明研究区水体中的悬浮泥沙只是在涨落潮流携带下做往复搬运,实际产生的净输沙量很小。但潮余流是非周期性的,可以携带泥沙做远距离转移。研究

表 7 悬浮泥沙输运项及单宽净输沙率
Table 7 Suspended sediment transport items and net sediment transport rate per width

站位	输沙项	T_1	T_2	T_3+T_4	T_5	$T_6+T_7+T_8$	T_1+T_2	$T_{总}$
1#	输沙率/(g·s·m)	30.38	9.82	5.31	2.15	0.47	24.46	19.12
	方向/(°)	80.09	214.97	232.65	308.18	31.32	96.62	103.02
2#	输沙率/(g·s·m)	7.90	8.39	0.37	3.75	1.06	11.64	13.42
	方向/(°)	128.20	217.06	178.32	234.00	42.02	174.31	184.97
3#	输沙率/(g·s·m)	7.66	7.11	2.10	2.13	1.21	7.33	9.11
	方向/(°)	335.83	215.20	232.30	340.35	49.06	279.22	286.92
4#	输沙率/(g·s·m)	38.96	9.95	7.34	1.98	0.55	30.25	24.68
	方向/(°)	25.47	230.62	248.42	187.12	48.33	17.44	5.61
5#	输沙率/(g·s·m)	4.36	3.75	1.70	1.97	0.43	4.45	7.62
	方向/(°)	304.62	190.64	241.68	234.14	50.10	254.26	247.69

表 8 各悬浮泥沙输运项在单宽净输沙率中占比
Table 8 Proportion of suspended sediment transport terms in net sediment transport rate per width %

站位	T_1	T_2	T_3+T_4	T_5	$T_6+T_7+T_8$	T_1+T_2
1#	158.88	51.37	27.77	11.26	2.47	129.72
2#	58.88	58.88	2.76	27.98	7.92	86.73
3#	84.12	78.13	23.06	23.39	13.34	80.52
4#	157.89	40.31	29.73	8.04	2.22	122.6
5#	57.27	49.24	22.36	25.86	5.68	58.42

注: 各悬浮泥沙输运项为具有方向的矢量值, 因此, 部分悬浮泥沙输运项在净输沙率中占的比例大于100%。

区在潮周期内, 涨潮流(SW向)占优势。2#、5#站位涨潮流方向和潮余流方向大体相同, 受其影响2#、5#站位呈向南的净输沙趋势; 与之不同的是, 3#站位由于其周围及其西部海域存在一狭长地带, 水深较深, 受水深、地形影响, 3#站位呈向西的净输沙趋势; 1#、4#站位受到近岸岬角、防波堤、岚山港池以及航道等阻挡, 呈现向东、向北的净输沙趋势。整体而言, 研究区悬浮泥沙在远岸开阔海域呈向南的净输运趋势。

南黄海西部近岸海域影响悬浮泥沙输运的因素十分复杂, 前人的成果表明废黄河口海域可能同时存在向北(海州湾方向)和向南(苏北辐射沙洲方向)的输运趋势^[31]。针对日照南侧废黄河口海域悬浮泥沙的输运观测, 鲁号号等^[32]认为悬浮泥沙输运方向和潮余流方向基本相同, 涨潮期间悬浮泥沙沿岸向南输运(涨潮流方向), 落潮期间悬浮泥沙沿岸向北输运(落潮流方向); 周良勇等^[33]认为悬浮泥沙涨潮时向南运移, 落潮时向北运移, 与涨落潮的方

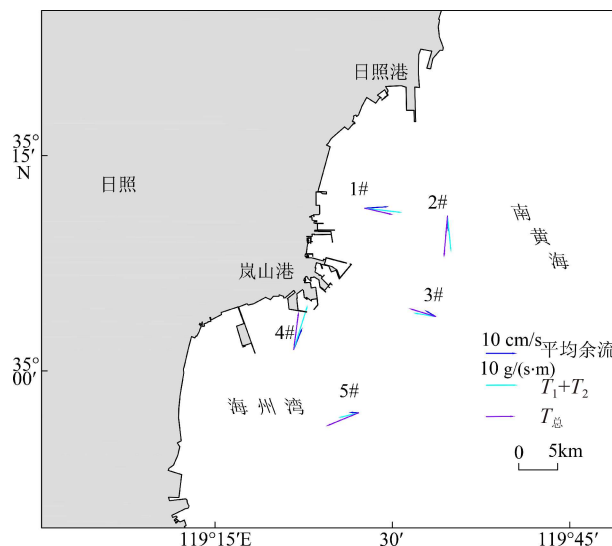


图 11 悬浮泥沙输运通量与余流矢量叠置图

注: 1#、4#站位悬浮泥沙输运项缩小至原来的 1/2, 5#站位悬浮泥沙输运项扩大至原来的 2 倍。

Fig.11 Overlay diagram of suspended sediment transport volume and residual flow vector

表 9 各站位涨落潮悬浮泥沙输运通量

Table 9 Suspended sediment transport at each station at ebb and flow tide

站名	输沙率/(g·s·m)		输沙方向/(°)	
	涨潮	落潮	涨潮	落潮
1#	207.86	153.78	229.68	60.97
2#	189.41	111.06	238.50	69.08
3#	212.53	104.16	252.23	59.36
4#	290.63	205.09	255.72	59.24
5#	150.73	71.60	248.22	63.59

向基本相同;杨林等^[34]认为悬浮泥沙输运的主要影响因素是 T_1 和 T_2 项,各测站净输沙方向与潮余流方向较为一致。徐粲等^[35]对苏北辐射沙脊群的研究表明,该区域 T_1 和 T_4 项对研究区的悬沙输运贡献最大。

综合前人的成果并结合本文的研究,可以推断南黄海西部近岸海域悬浮泥沙在涨潮、落潮期间输运方向与涨潮、落潮方向基本一致,悬浮泥沙净输运方向和潮余流方向大体相同,受余流、悬浮泥沙浓度、水深地形等多因子影响,在不同潮周期内各输沙项对净输沙率的贡献不尽相同。

4.2 悬浮泥沙输运的影响因素

影响悬浮泥沙输运的水文动力因素包括海洋环流、潮汐、潮流和波浪等,在外陆架和中陆架地区,悬浮泥沙的长期输运受环流控制^[36],黄海陆架深海区悬浮泥沙输运受苏北沿岸流、黄海西部沿岸流、黄海暖流、黄海冷水团等影响,存在“夏储冬输”的季节性输运模式;在内陆架浅海区,潮流和波浪对悬浮泥沙的分布、输运起决定性作用,其中潮流引起悬浮泥沙浓度的潮周期变化,波浪控制悬浮泥沙浓度季节性变化^[37-38]。前人对南黄海近海悬浮体无机物和有机物组分含量的研究证实,该区域的悬浮泥沙主要为陆源物质,其主要来源为近岸地区海底沉积物的再悬浮和河流输沙^[39-41]。日照及海州湾海域周边沿岸无大型供沙河流,河流输沙对该海域悬浮泥沙分布及输运影响有限^[24, 42]。研究区岚山港和日照港附近海域表层沉积物以含砾泥、砂质泥和泥等细颗粒物为主^[24],细颗粒物被侵蚀、搬运、再悬浮之后,在波浪、潮流和水质状态等因素的控制下发生输运和再沉积。

4.2.1 水体垂向混合对悬浮泥沙垂向运移的影响

在近岸浅海区,水体的混合和层化程度会影响悬浮泥沙垂向分布^[21]。水体垂向混合较弱时会出现分层从而抑制悬浮泥沙向上的运移扩散。根据1#、3#、4#站位的实测数据,计算 Richardson 数来判断水体混合和层化程度,并分析其对研究区悬浮泥沙浓度垂向分布的影响。当 $Ri_g < 0.25$ (或 $\ln(Ri_g/0.25) < 0$) 时,水体不稳定,混合增强;当 $Ri_g > 0.25$ (或 $\ln(Ri_g/0.25) > 0$) 时,水体稳定,混合被抑制。计算结果显示,研究区水体在观测期间 Richardson 数大部分时段小于 0.25,表明水体混合良好,仅在少部分时段出现微弱分层现象(图 12)。

在近岸海域,由盐度产生的水体密度分层会抑制悬浮泥沙的垂向扩散,进而影响悬浮泥沙浓度垂

向分布^[43]。盐度层化系数可以判断水体的稳定程度,层化系数越大,水体越稳定,水体各层的物质交换越不频繁,反之则相反。为了探究本次观测期内水体密度分层对悬浮泥沙浓度垂向分布的影响,本文利用实测数据计算了研究区 3 个海流观测站位和 35 个大面站的盐度分层系数。数据计算结果表明,观测期间所有站位的盐度分层系数均小于 0.005,表明水体处于强混合状态,盐度密度分层极小,不影响悬浮泥沙浓度垂向扩散(图 13)。

整体上,研究区水体垂向混合良好,对底层悬浮泥沙的向上扩散运移无抑制作用,推断可能受大

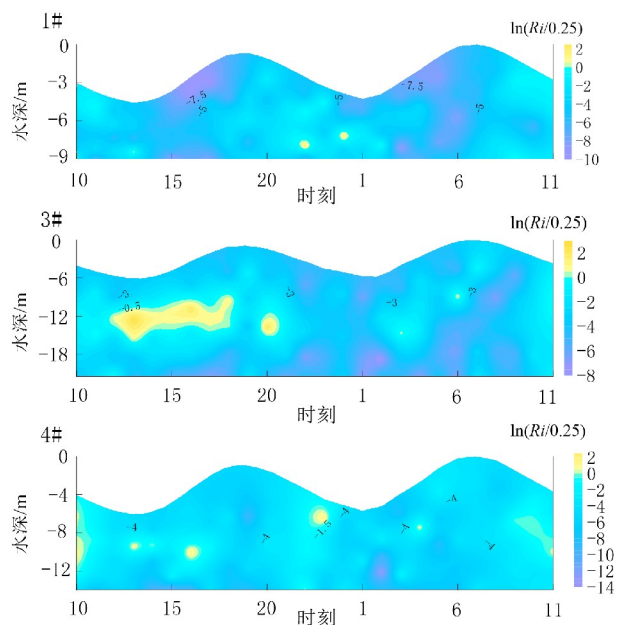


图 12 各站位垂向 Richardson 数时间序列图

Fig. 12 Vertical Richardson number time series diagram of each station

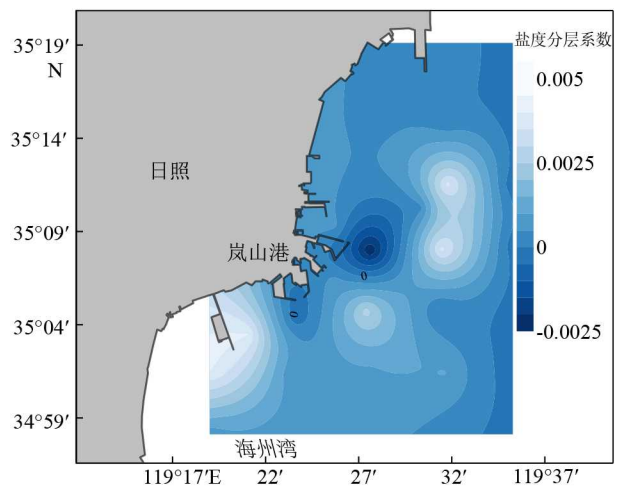


图 13 大面站盐度分层系数平面分布图

Fig. 13 Planar distribution of salinity stratification coefficient of Dameen Station

潮期间强潮流作用影响, 潮流的混合搅拌作用增强, 导致海水垂向混合作用强烈。

4.2.2 潮流在潮周期内对悬浮泥沙分布、输运的影响

再悬浮作用是南黄海近岸海域悬浮泥沙浓度变化的主导因素^[44], 研究区海域悬浮泥沙浓度在潮周期内的变化与潮流流速的变化存在高度相关性, 悬浮泥沙浓度的高值区在流速高值区时刻附近, 悬浮泥沙浓度的低值区也对应着流速低值区附近(图 8)。以往研究表明, 同样的温盐条件下, 潮流强度对悬浮泥沙的垂向分布有较大影响^[45], 潮流强度越高, 悬浮泥沙的垂向扩散作用和再悬浮作用就越强, 反之则弱, 同时潮流的加速和减速也深刻影响着悬浮泥沙垂向分布。

在涨、落潮过程中, 初期随着潮流流速的增大, 海底的表层沉积物受到侵蚀和冲刷, 当底层潮流流速大于泥沙起动流速时, 大量海底泥沙会被起动, 悬浮于水中, 导致近底层悬浮泥沙浓度快速增大, 随后底层悬浮泥沙在剧烈的紊动作用下向上运移、扩散, 致使中上层悬浮泥沙浓度增大; 在涨潮落潮相互转换时期, 由于流向的转变, 潮流流速较低, 再悬浮作用会变弱, 悬浮泥沙会发生沉降, 导致悬浮泥沙浓度变低。总体而言, 由于涨潮流速略大于落潮流速, 所以涨潮阶段的平均悬浮泥沙浓度略大于落潮阶段。然而, 海底表层沉积物的起动、再悬浮均需要一定时间, 因此悬浮泥沙浓度的变化滞后于流速的变化, 研究区海域悬浮泥沙浓度的峰值较流速峰值存在 2 h 的滞后。由于研究区海域潮流为典型的往复流, 悬浮泥沙在涨、落潮流挟带下沿涨、落潮方向进行物质运移和交换, 涨潮时沿涨潮流方向(SW)净输运, 落潮时沿落潮流方向(NE)净输运。

根据宋红瑛等^[24]人对日照近海表层沉积物粒度特征的研究, 利用窦国仁泥沙起动公式, 大致计算出研究区潮流流速达到 18 cm/s 时便可起动粒径

小于 0.16 mm(大于 2.6 Φ)的细粒物质, 日照近海表层沉积物以细砂(2~4 Φ)为主, 海流调查站位附近沉积物平均粒径为 2~5 Φ , 近岸 1#、4#站位沉积物粒径较远岸 2#、3#、5#站位更小^[24]。研究区大潮期潮流流速为 11.30~105.80 cm/s, 因此绝大部分海域海底泥沙都能在潮流作用下发生起动(图 14), NE-SW 向潮流既能输沙又能掀沙。表层沉积物粒径大小是影响沉积物再悬浮的重要因素, 细粒物质沉降速度慢, 发生再悬浮时需要的水动力条件更弱, 相反粗粒沉积物更难于向水体上部运移、扩散^[46]。相较于远岸的 2#、3#、5#站位, 岚山港附近的 1#、4#站位沉积物粒径更小, 起动所需要的潮流流速更小, 且 1#、4#站位水动力条件较 2#、3#、5#站位更强, 潮流施加于海床沉积物的底切应力作用更强, 使得 1#、4#站位沉积物更易发生起动和再悬浮。因此, 受底质类型和潮流流速的共同影响, 1#、4#站位悬浮泥沙浓度明显高于 2#、3#、5#站位。

5 结论

(1) 平面上, 研究区悬浮泥沙浓度呈现近岸高、远岸低的分布特征; 垂向上, 研究区悬浮泥沙浓度呈现从表层向底层逐渐升高的分布特征。悬浮泥沙浓度变化与潮周期流速变化趋势总体一致, 悬浮泥沙浓度的峰值较流速峰值存在 2 h 的滞后。

(2) 研究区观测期内单宽净输沙率为 4.72~24.68 g/(s·m), 近岸单宽净输沙率明显高于远岸单宽净输沙率, 悬浮泥沙输运以平流输运为主, 其次为潮泵效应或垂向净环流输运项, 南黄海西部近海净输沙方向和潮余流方向基本相同, 在远岸开阔海域总体呈向南的净输运趋势。

(3) 研究区水体温度、盐度垂向梯度接近于零, 水体垂向混合均匀, 对底层悬浮泥沙的向上扩散运移无抑制作用。日照近岸海域悬浮泥沙浓度的潮周期变化受潮流控制。

参考文献 (References)

- [1] Bian C W, Jiang W S, Quan Q, et al. Distributions of suspended sediment concentration in the Yellow Sea and the East China Sea based on field surveys during the four seasons of 2011 [J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 121-122: 24-35.
- [2] Bouchez J, Gaillardet J, France-Lanord C, et al. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: clues from Amazon River depth profiles [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2011, 12(3): Q03008.

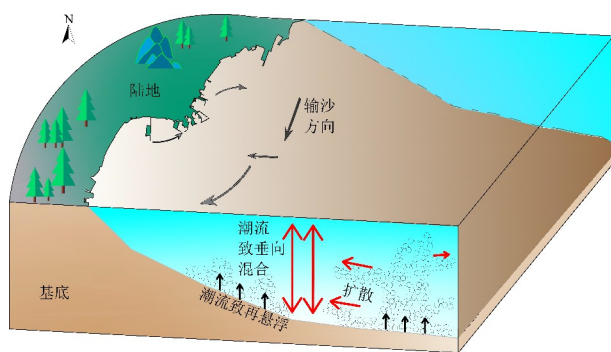


图 14 日照近海悬浮泥沙输运模式概念图

Fig.14 Concept diagram of suspended sediment transport model in Rizhao Offshore

- [3] Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12 (3): 345-354.
- [4] Ma M, Feng Z, Guan C, et al. DDT, PAH and PCB in sediments from the intertidal zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42 (2): 132-136.
- [5] Zhang J, Liu S M, Xu H, et al. Riverine sources and estuarine fates of particulate organic carbon from North China in late summer [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46 (3): 439-448.
- [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] 刘芳, 黄海军, 郗昂. 春、秋季黄东海海域悬浮体平面分布特征及海流对其分布的影响[J]. *海洋科学*, 2006, 30 (1): 68-72. [LIU Fang, HUANG Haijun, GAO Ang. Distribution of suspended matter on the Yellow Sea and the East China Sea and effect of ocean current on its distribution [J]. *Marine Sciences*, 2006, 30 (1): 68-72.]
- [8] 蔡德陵, 石学法, 周卫健, 等. 南黄海悬浮体和沉积物的物质来源和运移: 来自碳稳定同位素组成的证据[J]. *科学通报*, 2003, 48 (S1): 21-29. [CAI Deling, SHI Xuefa, ZHOU Weijian, et al. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the southern Yellow Sea: evidence from stable carbon isotopes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (S1): 21-29.]
- [9] 范恩梅, 陈沈良, 张国安. 连云港海域水文泥沙运动特征[J]. *世界科技研究与发展*, 2009, 31 (4): 703-707. [FAN Enmei, CHEN Shenliang, ZHANG Guoan. The hydrological and sediment characteristics in Lianyungang coastal waters [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2009, 31 (4): 703-707.]
- [10] 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, 2019.]
- [11] 庞重光, 杨扬, 刘志亮. 黄东海悬浮泥沙输运结构及其形成机制[J]. *泥沙研究*, 2010 (3): 24-30. [PANG Chongguang, YANG Yang, LIU Zhiliang. Transportation pattern of suspended sediment and its forming mechanism in the Yellow and East China Sea [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010 (3): 24-30.]
- [12] 余佳, 王厚杰, 毕乃双, 等. 基于MODIS L1B数据的黄海悬浮体季节性分布的反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34 (1): 1-9. [YU Jia, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal distribution and variation of suspended sediment in the Yellow Sea in 2010 based on retrieved monthly data from Modis L1B imagery [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34 (1): 1-9.]
- [13] 李文建, 王珍岩, 黄海军. 夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (6): 49-60. [LI Wenjian, WANG Zhenyan, HUANG Haijun. Grain size distribution pattern and influencing factors of suspended matters in the Southern Yellow Sea during summer season [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (6): 49-60.]
- [14] 仲毅, 乔璐璐, 王震, 等. 南黄海中部悬浮体垂直分布及其季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47 (3): 518-526. [ZHONG Yi, QIAO Lulu, WANG Zhen, et al. Vertical distribution and seasonal variation of suspended particulate matter in the central South Yellow Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47 (3): 518-526.]
- [15] 李建超, 乔璐璐, 李广雪, 等. 基于LISST数据的冬季南黄海悬浮体分布[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (5): 13-25. [LI Jianchao, QIAO Lulu, LI Guangxue, et al. Distribution of winter suspended particulate matters in the South Yellow Sea based on LISST data [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33 (5): 13-25.]
- [16] 高建华, 高抒, 董礼先, 等. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送[J]. *海洋通报*, 2003, 22 (5): 26-33. [GAO Jianhua, GAO Shu, DONG Lixian, et al. Sediment distribution and suspended sediment transport in Yalu River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22 (5): 26-33.]
- [17] 刘运令, 汪亚平, 吴祥柏, 等. 南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35 (11): 120-127. [LIU Yunling, WANG Yaping, WU Xiangbai, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport in the Xiyang Channel along the Southwestern Yellow Sea coast [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35 (11): 120-127.]
- [18] 英晓明, 丁平兴. 洋山港海域水体和悬沙输运机制研究[J]. *海洋通报*, 2011, 30 (2): 135-140. [YING Xiaoming, DING Pingxing. Research on transport mechanism of water and suspended sediment in the Yangshan harbor waters [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30 (2): 135-140.]
- [19] Liu J H, Yang S L, Zhu Q, et al. Controls on suspended sediment concentration profiles in the shallow and turbid Yangtze Estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 96-108.
- [20] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例[J]. *海洋学报*, 2012, 34 (1): 136-144. [DU Jiabi, PEI Yandong, GAO Jianhua, et al. The suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34 (1): 136-144.]
- [21] 孟令鹏, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (3): 61-73. [MENG Lingpeng, HU Rijun, LI Yi, et al. Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (3): 61-73.]
- [22] 刘伟, 范代读, 涂俊彪, 等. 椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38 (1): 41-51. [LIU Wei, FAN Daidu, TU Junbiao, et al. Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38 (1): 41-51.]
- [23] 秦亚超, 高飞, 苏大鹏, 等. 南黄海西部日照至连云港海域的春季温跃层和化学跃层[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (3): 22-32. [QIN Yachao, GAO Fei, SU Dapeng, et al. Late spring thermocline and chemoclines in the area off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (3): 22-32.]
- [24] 宋红璞, 刘金庆, 印萍, 等. 日照近海表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46 (3): 96-104. [SONG Hongyong,

- LIU Jinqing, YIN Ping, et al. Grain size characteristics of the surface sediment and sedimentary environment in Rizhao offshore [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(3): 96-104.]
- [25] 薛刚. 岚山港西突堤工程对海底冲淤影响预测[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2007. [XUE Gang. Prediction on erosion and accumulation of the seabed by the project of western jetty of Lanshan Harbor[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2007.]
- [26] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2(3): 273-281.
- [27] Ingram R G. Characteristics of the great Whale River Plume [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C3): 2017-2023.
- [28] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. *Estuaries*, 1985, 8(3): 256-269.
- [29] Trowbridge J H. A simple description of the deepening and structure of a stably stratified flow driven by a surface stress [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C10): 15529-15543.
- [30] Prandle D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 20(5): 615-635.
- [31] 陈斌, 周良勇, 刘健, 等. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 73-81. [CHEN Bin, ZHOU Liangyong, LIU Jian, et al. The relationship between the suspended sediment movement and tidal current dynamic characteristic in Old Yellow River Delta [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(5): 73-81.]
- [32] 鲁号号, 杨旸, 唐杰平, 等. 南黄海废黄河口近岸海域近底部悬沙输运观测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 38-48. [LU Hao-hao, YANG Yang, TANG Jieping, et al. Observation of near-bottom transport of suspended sediment in the offshore area of abandoned Yellow River mouth [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 38-48.]
- [33] 周良勇, 陈斌, 刘健, 等. 江苏废黄河口外夏季悬浮泥沙运动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 17-24. [ZHOU Liangyong, CHEN Bin, LIU Jian, et al. Observation of currents and suspended sediment concentration off Northern Jiangsu Coast, China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 17-24.]
- [34] 杨林, 杨红, 吉新磊, 等. 废黄河口海域悬沙输运特征[J]. 海洋湖沼通报, 2018(6): 1-8. [YANG Lin, YANG Hong, JI Xinlei, et al. Sediment transportation in the Abandoned Yellow River Delta [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2018(6): 1-8.]
- [35] 徐粲, 高建华, 杨旸, 等. 南黄海辐射沙脊群潮汐水道的悬沙输运特征[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 150-162. [XU Can, GAO Jianhua, YANG Yang, et al. Suspended sediment transport patterns in the tidal channels in the southwestern Yellow Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 150-162.]
- [36] 庞重光, 白学志, 胡敦欣. 渤、黄、东海海流和潮汐共同作用下的悬浮物输运、沉积及其季节变化[J]. 海洋科学集刊, 2004(46): 32-41. [PANG Chongguang, BAI Xuezhi, HU Dunxin. The transport and sedimentation of suspended matter and their seasonal variation are affected by circulation and tide current in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Studia Marina Sinica*, 2004(46): 32-41.]
- [37] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260-266. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, YANG Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 260-266.]
- [38] 曹祖德, 王桂芬. 波浪掀沙、潮流输沙的数值模拟[J]. 海洋学报, 1993, 15(1): 107-118. [CAO Zude, WANG Guifen. Numerical simulation of wave lifting sand and tidal current transporting sand [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(1): 107-118.]
- [39] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 459-468. [XING Fei, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2010, 41(3): 459-468.]
- [40] 秦蕴珊, 李凡, 郑铁民, 等. 南黄海冬季海水中悬浮体的研究[J]. 海洋科学, 1986, 10(6): 1-7. [QIN Yunshan, LI Fan, ZHENG Tiemin, et al. Study on suspended matter of the South Yellow Sea in winter [J]. *Marine Science*, 1986, 10(6): 1-7.]
- [41] 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.]
- [42] 左书华, 庞启秀, 杨华, 等. 海州湾海域悬沙分布特征及运动规律分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2013, 32(1): 10-17. [ZUO Shuhua, PANG Qixiu, YANG Hua, et al. Analysis on the distribution and movement of suspended sediment in Haizhou Bay sea area [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2013, 32(1): 10-17.]
- [43] 赵季伟, 李占海, 徐圣, 等. 长江口北港上段河道枯季悬沙浓度垂向分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2207-2218. [ZHAO Jiwei, LI Zhanhai, XU Sheng, et al. Vertical profile of suspended sediment concentration in the upper reach of north channel in the Changjiang Estuary during the dry season [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(9): 2207-2218.]
- [44] 郑铁民, 赵一阳, 李凡, 等. 南黄海夏季海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学报, 1990, 12(6): 749-757, 806. [ZHENG Tiemin, ZHAO Yiyang, LI Fan, et al. A study on total suspended matter in winter in the south Yellow Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(6): 749-757, 806.]
- [45] Dyer K R. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*[M]. Chichester: Wiley, 1986.
- [46] 文明征, 陈天, 胡云壮, 等. 波浪作用下海底边界层沉积物再悬浮与影响因素研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 97-106. [WEN Mingzheng, CHEN Tian, HU Yunzhuang, et al. Sediment resuspension of bottom boundary layer under waves and currents [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(3): 97-106.]