



庙岛海峡周边海域表层沉积物再悬浮及悬浮泥沙输运机制

林纪江, 胡日军, 王 平, 宋卓利, 张文静, 牛建伟, 伊善堂, 丁小雨

Surface sediment resuspension and suspended sediment transportation mechanism in the waters around Miaodao Strait

LIN Jijiang, HU Rijun, WANG Ping, SONG Zhuoli, ZHANG Wenjing, NIU Jianwei, YI Shantang, and DING Xiaoyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021122002>

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

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

冲绳海槽西部陆坡泥底辟和泥火山特征及其形成动力机制

Characteristics and genetic dynamics of mud diapirs and mud volcanoes on the western slope of Okinawa Trough schematic geographic map of studied area mud diapirs with different morphology in multi-channel seismic section

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 91

新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58



关注微信公众号，获得更多资讯信息

林纪江, 胡日军, 王平, 等. 庙岛海峡周边海域表层沉积物再悬浮及悬浮泥沙输运机制 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(3): 9-24.

LIN Jijiang, HU Rijun, WANG Ping, et al. Surface sediment resuspension and suspended sediment transportation mechanism in the waters around Miaodao Strait[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(3): 9-24.

庙岛海峡周边海域表层沉积物再悬浮及悬浮泥沙输运机制

林纪江^{1,2}, 胡日军³, 王平^{1,2}, 宋卓利⁴, 张文静^{1,2}, 牛建伟⁵, 伊善堂⁶, 丁小雨^{1,2}

1. 国家海洋局南海信息中心, 广州 510310

2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州 510310

3. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

4. 国家海洋局北海海洋工程勘察研究院, 青岛 266061

5. 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

6. 广州海洋地质调查局, 广州 510075

摘要: 根据实测水文泥沙资料, 利用悬浮泥沙沉降公式、泥沙起动流速公式、再悬浮通量与沉降通量公式以及通量机制分解方法, 分析了庙岛海峡周边海域的悬浮泥沙时空分布和变化特征, 计算了再悬浮通量、沉降通量、单宽悬浮泥沙输运量, 探讨了表层沉积物再悬浮和悬浮泥沙运移特征及动力机制。结果表明, 悬浮泥沙浓度周期变化与潮流流速周期变化具有较好的相关性, 底层泥沙浓度变化对高流速的响应比较明显, 表层泥沙浓度变化对低流速响应比较明显; 悬浮泥沙单颗粒沉降现象不明显, 除庙岛海峡外其他海域较适合悬浮泥沙絮凝沉降, 并以中、底层絮凝沉降为主, 且表现出自表层至底层絮凝沉降作用逐渐加强趋势; 表层沉积物再悬浮对近岸浅水区、庙岛群岛周边海域水体悬浮泥沙浓度的影响显著于其他海域; 悬浮泥沙输运整体以平流输运为主, 垂向净环流为辅, 庙岛海峡南侧向黄海输沙、北侧向渤海输沙, 二者同时进行, 悬浮泥沙净输运主要由水道向两侧浅滩。

关键词: 悬浮泥沙; 沉降及再悬浮; 动力机制; 庙岛海峡

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021122002

Surface sediment resuspension and suspended sediment transportation mechanism in the waters around Miaodao Strait

LIN Jijiang^{1,2}, HU Rijun³, WANG Ping^{1,2}, SONG Zhuoli⁴, ZHANG Wenjing^{1,2}, NIU Jianwei⁵, YI Shantang⁶, DING Xiaoyu^{1,2}

1. South China Sea Information Center, SOA, Guangzhou 510310, China

2. Key Laboratory of Marine Environmental Detection Technology and Application, MNR, Guangzhou 510310, China

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

4. North China Sea Marine Engineering Prospecting Institute of SOA, Qingdao, 266061, China

5. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

6. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: Based on the hydrological and sediment measurement data, characteristics of spatiotemporal distributions and variations of suspended sediment concentration and particle size around Miaodao Strait in Bohai Sea were analyzed. By using formulas of suspended sediment settlement, sediment incipient velocity, resuspension flux, and settlement flux, and the flux mechanism decomposition method, the resuspension flux, sedimentation flux, and suspended sediment transport capacity in the study area were calculated. The characteristics and dynamic mechanism of surface sediment resuspension and suspended sediment transport were analyzed. Results reveal a strong relationship between the periodic changes in the suspended sediment concentration and the tidal current velocity. The bottom layer responds obviously to high velocity while the surface layer responds obviously to low velocity. The phenomenon of single particle sedimentation of suspended sediment is not obvious. The hydrodynamic conditions in the sea areas are suitable for flocculation and sedimentation of suspended sediments except for the

资助项目: 2020 年国家重点研发计划重点专项“海洋环境预报模式业务化运行评估与专项数据产品共享服务平台构建”(2019YFC1408400)

作者简介: 林纪江(1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: 1025862976@qq.com

通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: hrj@ouc.edu.cn

收稿日期: 2021-12-20; 改回日期: 2022-03-04. 文凤英编辑

Miaodao Strait, and are mainly dominated by middle and bottom flocculation and sedimentation. The effect of surface sediment resuspension on the concentration of suspended sediment in the nearshore shallow water area and the sea area around the Miaodao Strait is significantly higher than that in other sea areas. The transport of suspended sediment is mainly advection transport and supplemented by vertical net circulation. In the southern side of Miaodao Strait, sediments are transported to the Yellow Sea, while those on the northern side to the Bohai Sea. The net transport of suspended sediment is mainly from the waterway to the shoals on both sides.

Key words: suspended sediment; settlement and resuspension; dynamic mechanism; Miaodao Strait

表层沉积物再悬浮是影响水体中悬浮泥沙浓度的一个重要因素, 悬浮泥沙浓度的变化过程及运移趋势指示了不同的水动力环境, 对海洋沉积、生态环境、岸线冲淤以及物质循环具有重要意义。前人对庙岛海峡周边海域开展了大量的研究工作, 主要集中于大尺度的渤海悬浮体季节性分布、变化及运移和沉积动力、地质地貌等方面, 认为渤海悬浮泥沙浓度分布的主要影响因素是水动力条件(海浪、海流等), 悬浮泥沙输运主要动力形式包括平流输运、潮泵效应等^[1-2], 底质类型对水体含沙量影响较大, 细颗粒物质更易发生再悬浮^[3-4]。庙岛群岛周边沉积物分布及沉积动力格局主要受潮流控制^[5], 冬季是渤海海域悬浮体输运的主要季节, 山东半岛沿岸在强动力下的再悬浮是水体悬浮体的主要来源^[6-8]。对庙岛海峡周边小尺度海域悬浮泥沙输运机制与趋势的研究较少。研究区受到庙岛群岛和庙岛海峡的双重影响, 其悬浮泥沙的分布和输运必然具有独特的性质, 本文基于连续实测水文泥沙资料, 利用不同数理公式和物质通量分解方法, 分析探讨庙岛海峡周边悬浮泥沙分布、沉降及表层沉积物再悬浮特性, 揭示悬浮泥沙输运的动力机制和运移特性, 不仅可以丰富庙岛海峡海域沉积动力过程的相关研究内容, 加深对黄渤海泥沙交换过程的理解, 而且可以为周边海域生态修复、环境保护等提供科学参考。

1 区域概况

庙岛海峡位于渤海海峡的南部, 北侧是庙岛群岛, 南侧是山东半岛, 是渤海海水沙交换的主要通道。研究区海域属于海洋暖湿季风性气候, 年平均气温 13℃, 累年平均降水量为 586.7 mm, 多年平均风速 4.2 m/s, 常风向为 SSW 向^[9], 最大水深约 37 m^[10]。潮汐类型属于不规则半日潮, 平均潮差 1 m 左右, 最大潮差 2.9 m^[11]; 潮流属于不规则半日潮, 以往复流为主, 落潮流向西, 涨潮流向东, 落潮平均历时略小于涨潮平均历时; 波浪以风浪为主, 涌浪次之, 强浪向为 NE 向, 最大波高 4.1 m, 常浪向为 NNE 向,

次常浪向为 ENE 向^[12]。庙岛海峡周边海底有登州浅滩和登州水道两个重要的地貌元素。登州浅滩位于蓬莱的西北侧, 主要由 4 个沙洲组成, 地形复杂, 大致位于 10 m 等深线以外, 登州水道位于登州浅滩的东北侧, 是渤海海水沙交换的主要通道, 蓬莱西海岸近岸海底与登州浅滩之间有一条 EN—WS 向的海底洼地, 比两侧区域深约 1~2 m, 坡度较缓, 并无明显的边缘陡坎, 近岸海底区域在 2 m 等深线附近一般发育有水下沙坝^[9]。表层沉积物类型多样, 以砂质粉砂分布最广, 其次为粉砂, 砾与砂质砾集中分布在登州水道内^[5]。

2 资料与方法

2.1 资料来源与处理

2.1.1 海流

2011 年 7 月天津水运工程勘察设计院在庙岛海峡及其两侧海域布设 9 个站位(图 1), 进行大、小潮期的 27 h 海流连续观测, 2015 年 10 月中国海洋大学在庙岛群岛海域布设 3 个站位进行大潮期的 27 h 海流连续观测, 采集流速、流向、水深等, 测流间隔为 1 h, 单次测流历时 2.5 min, 2011 年数据按“六点法”进行处理(即表层、0.2 H 、0.4 H 、0.6 H 、0.8 H 和底层(H 为取样点的水深)), 2015 年数据按表层、中层、底层进行处理, 对海流资料进行准调和分析, 得出研究区的海流性质、余流的特征。

2.1.2 悬浮泥沙

悬浮泥沙采用 CTD(日本)与测流同步进行测定, 为保证含沙量数据的准确性, 在测量过程中使用竖式采水器同步采取现场水样, 经实验室处理(抽滤、烘干、称重)后, 用其率定同步获取的浊度数据。2011 年数据按“六点法”进行处理(即表层、0.2 H 、0.4 H 、0.6 H 、0.8 H 和底层(H 为取样点的水深))。2015 年数据按表层、中层、底层进行处理。悬浮泥沙粒度的测定采用 Mastersizer2000 型激光粒度仪, 测量范围为 0.02~2000 μm , 重复试验的相对误差 <3%, 粒级分辨率为 0.1 Φ , 粒径间距为 0.25 Φ 。

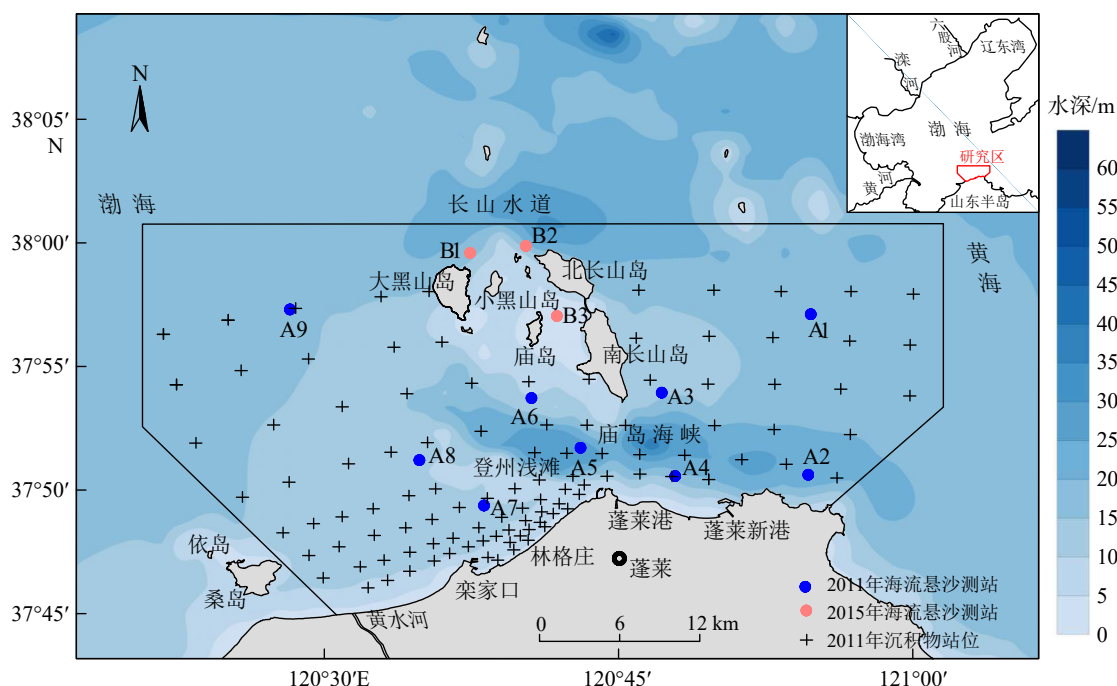


图 1 研究区水深地形及调查站位

Fig.1 Topography of the study area and survey stations

由于滤膜中粘附的悬浮泥沙样品不等量, 仅对 9 个站位中粘附量大的部分滤膜进行测定, 测定步骤同常规激光粒度仪粒径测定。

2.1.3 表层沉积物

2011 年 6—7 月天津水运工程勘察设计院在庙岛海峡周边海域通过蚌式取样器获取了 107 个表层沉积物样品, 沉积物粒度测定采用 NSY-III 型宽域粒度分析仪 (河海大学) 和 SFY-B2000 音波振动式半自动筛分粒度仪 (中科院南京地理与湖泊研究所)。

2.2 研究方法

2.2.1 悬浮泥沙沉降速度

悬浮泥沙沉降速度计算公式参考 Camenen^[13] 的半经验公式, 通过 A 、 B 和 m 3 个参数将泥沙颗粒的形状因子 (csf) 和圆度 (P) 引入泥沙沉降公式中, 公式如下:

$$W_s = \frac{v}{d} Re = \frac{v}{d} \left[\sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B} \right)^{\frac{2}{m}} + \left(\frac{4}{3} \frac{d_*^3}{B} \right)^{\frac{1}{m}}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B} \right)^{\frac{1}{m}} \right] \quad (1)$$

式(1)中, W_s —沉降速度; Re —雷诺数; v —流体动粘滞系数; d —颗粒直径; A 、 B 、 m —阻力系数方程中的系数; d_* —无量纲的粒子直径。

2.2.2 泥沙起动流速

泥沙起动流速计算采用窦国仁 1999 年提出的泥沙起动流速公式^[14], 各参数及含义见文献 [14]。

$$U_c = k' \left(\ln 11 \frac{h}{\Delta} \right) \left(\frac{d'}{d_*} \right)^{1/6} \sqrt{3.6 \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}} \right)^{5/2} \frac{\varepsilon_0 + g h \delta (\delta/d)^{1/2}}{d}} \quad (2)$$

$$\gamma_{0*} = 0.68 \gamma_s (d/d_0)^n \quad (3)$$

$$n = 0.080 + 0.014 (d/d_{25}) \quad (4)$$

2.2.3 再悬浮通量与沉降通量

再悬浮通量采用 Partheniades 提出的公式^[15]:

$$\frac{dM_E}{dt} = E \left(\frac{\tau_0}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad (5)$$

沉降通量采用 Krone 提出的公式^[16]:

$$\frac{dM_D}{dt} = C_b \omega_s \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cr}} \right) \quad (6)$$

式(5)中 E 是再悬浮常数, 其范围一般为 $5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}$ ^[17], 再悬浮常数对再悬浮通量的计算影响较大, 本文选取再悬浮常数的最小和最大值分别进行估算; τ_0 为底切应力; τ_{cr} 为临界切应力; C_b 为近底部悬浮泥沙浓度; ω_s 为悬浮泥沙的沉降速度。

2.2.4 悬浮泥沙单宽通量

悬浮泥沙单宽通量机制分解依据 Ingram^[18] 和 Uncles 等^[19] 提出的用相对水深进行分解瞬时的物质输运量。潮周期 T_t 平均瞬时单宽悬沙输移通量 T 的计算式为:

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h ucdz_0 dt = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 uchdzdt \\
 &= h_0 \overline{u_0 c_0} + \langle h_t \overline{u_t} \rangle \overline{c_0} + \langle h_t \overline{c_t} \rangle \overline{u_0} + \langle h_t \overline{u_t c_t} \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \\
 &\quad \langle h_t \overline{u'_0 c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_0} \rangle + \langle h_t \overline{u'_t c'_t} \rangle \\
 &= (T_1) + (T_2) + (T_3) + (T_4) + (T_5) + \\
 &\quad (T_6) + (T_7) + (T_8)
 \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中: T_1 —欧拉余流贡献项; T_2 —Stokes 漂移输移量; T_1+T_2 —平流输移; T_3 —潮汐与悬沙潮变化相关项; T_4 —悬沙与潮流变化相关项; 理论上, $\overline{u_t}$, $\overline{c_t}$, $\overline{h_t}$ 各自潮周期平均值为零, 但三者的相关产生了泥沙净输移, 即潮汐捕集作用; T_5 —垂向流速变化和含沙量变化的相关项, 为垂向净环流的贡献; T_6 , T_7 —时均量和潮汐振动切变引起的剪切扩散; T_8 —垂向潮振荡切变作用。

其中, 垂线平均含沙量采用黄才安和梅小文^[20]推荐的流量法计算:

$$S_1 = \frac{\int_0^h usdy}{\int_0^h udy} \quad (8)$$

式(8)中, 垂线平均含沙量用 S_1 表示, h 代表垂线水深, s 代表距底床 y 处的当地含沙量, u 代表距底床 y 处的当地流量。

3 结果与讨论

3.1 海流与底质特征

研究区海域潮流性质以不规则半日潮流性质为主, 实测潮流最大流速值为 1.84 m/s, 流向为 284°, 出现在大潮期 A5 站位的表层, 潮流最小流速值为 0.04 m/s, 流向为 164°, 出现在小潮期 A9 站位

的底层, 垂线平均最大 1.53 m/s, 潮流流速值呈现自庙岛海峡至周边海域、自表层至底层递减的趋势。大、小潮期潮流流向基本一致 (A8 站位除外), A3 站位潮流流向最为复杂, 表现出旋转流的性质, A2、A5、B3 站位受地形影响明显, 潮流流向较单一, 往复流特征显著 (图 2)。

各站各层余流流速相差较小, 大、小潮期最大值分别为 26.4、16.2 cm/s, 均出现在 A3 站位表层, A2、A5 站位自表层至底层余流逐渐增大, 其余各站位余流大致自表层至底层逐渐减小; 大、小潮期垂线平均余流方向 A1、A2、A8 站位不一致, 其余站位基本一致 (图 3)。基于 Mike-21 数值模拟软件模拟的研究区海域余流场见图 4^[21], 由图 4 可见, 庙岛海峡南侧余流由渤海指向黄海方向, 庙岛海峡北侧余流由黄海指向渤海方向, 并在中部产生小环流。

根据 Folk 分类命名, 研究区表层沉积分为砾 (G)、砂质砾 (sG)、砾质砂 (gS)、含砾砂 ((g)S)、砂质粉砂 (sZ)、粉砂 (Z)、砂质泥 (sM) 和泥 (M) 8 种类型 (图 5), 含砾样品中砂的含量较高 (其中 4 个样品为砾 (G), 直径最大 3 cm, 最小 0.5 cm), 不含砾样品中粉砂含量较高 (图 6)。

3.2 悬浮泥沙分布及变化特征

3.2.1 时空分布特征及变化

实测最大悬浮泥沙浓度为 155 mg/L, 出现在 A4 站位的底层, 研究区海域垂向平均悬浮泥沙浓度整体上较低, 最大值为 37.04 mg/L (大潮期 A4 站位); 庙岛群岛北侧海域表、中、底层悬浮泥沙浓度差别不大 (图 7), 群岛中部表、中层差别不大, 远低于底层悬浮泥沙浓度, 其他海域自表层至底层递增明显; 落潮段悬浮泥沙高于涨潮段 (A6、B3 站位除

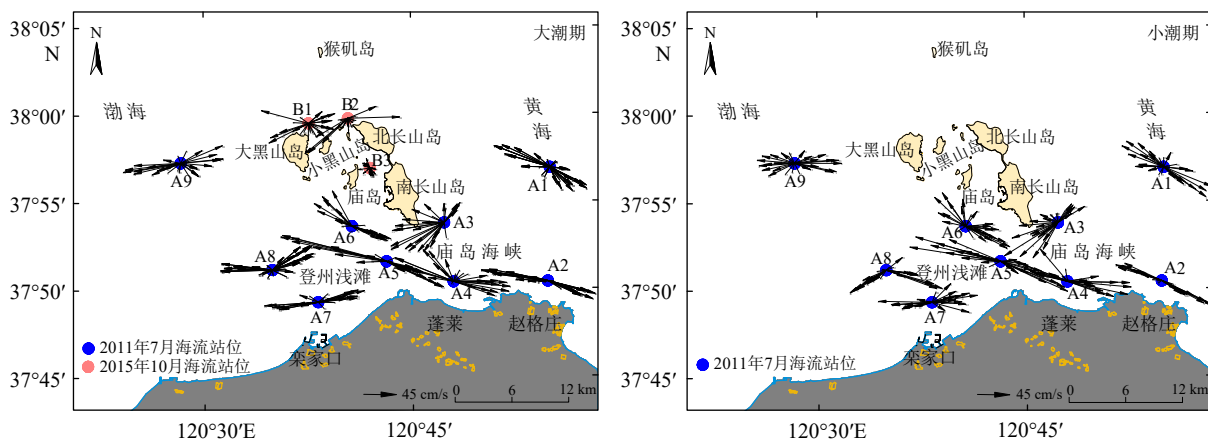


图 2 各站位垂向平均潮流矢量^[22]

Fig.2 The vector of vertical-averaged current of each station

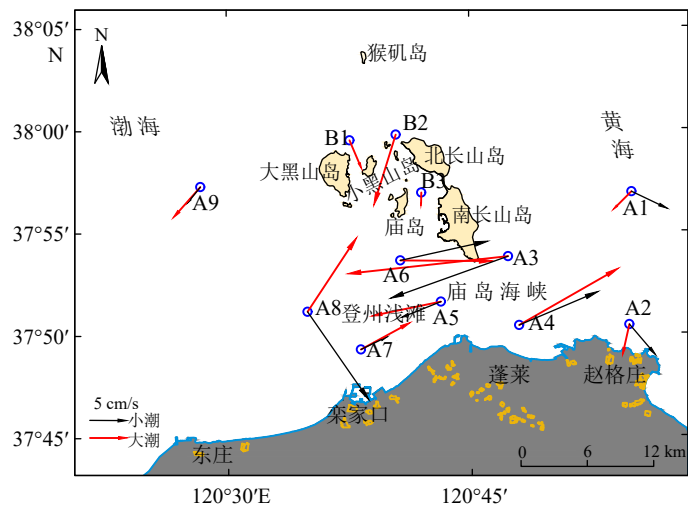


图 3 各站位垂向平均余流矢量

Fig.3 Vector of vertical-averaged residual current at each station

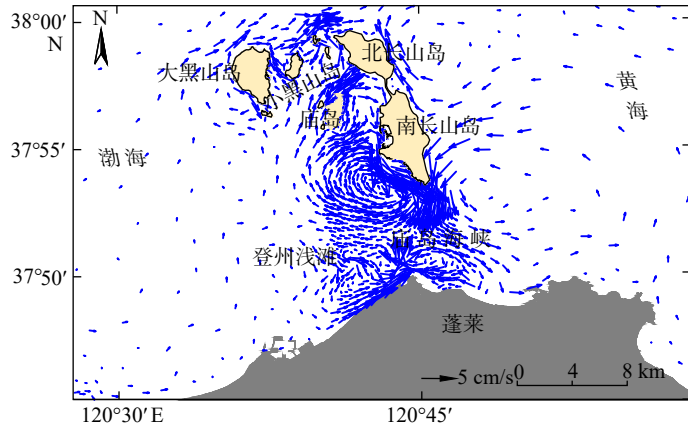


图 4 研究区余流场数值模拟结果^[21]

Fig.4 The numerical simulation results of residual current field in the study area

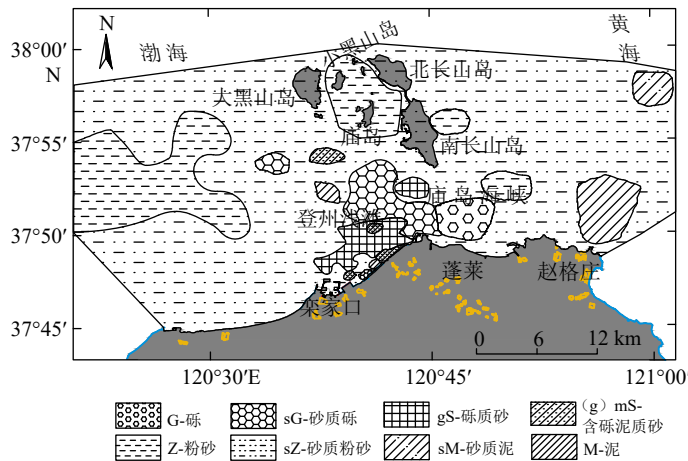


图 5 研究区沉积物类型分布

Fig.5 Distribution of sediment types in the study area

外), 庙岛海峡、庙岛群岛海域悬浮泥沙浓度高于周边开阔海域, 呈现自岸向海悬浮泥沙浓度递减趋势, 这可能是海峡处、近岸处底部泥沙发生再悬浮所致。

悬浮泥沙浓度随时间变化呈现出周期性波动, 9~16 h 尺度的周期变化在整个分析时段表现的非常稳定, 具有全域性^[22], 通过对比各站位悬沙浓度

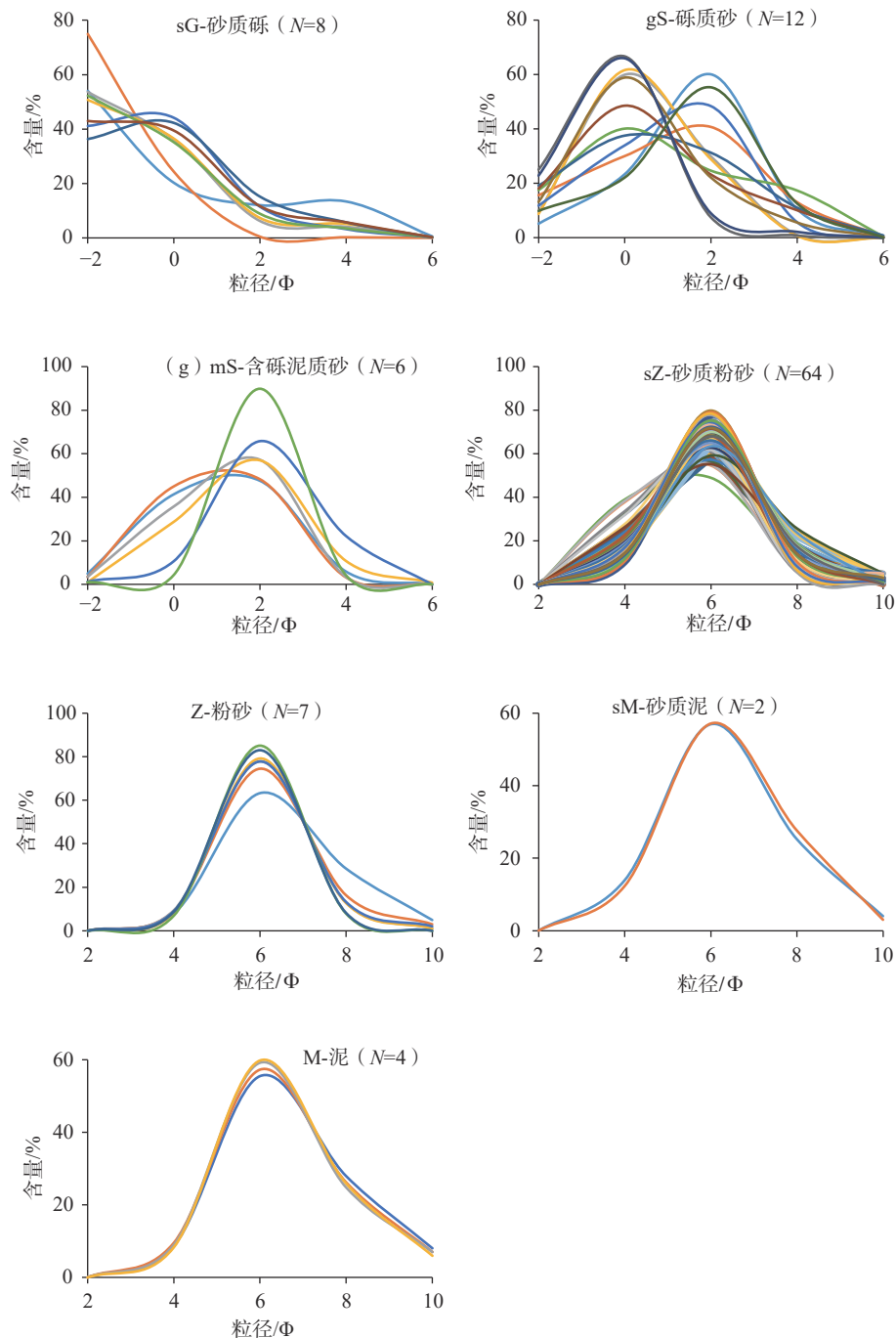


图6 各类型沉积物粒级频率曲线

N 为样品数, 不同颜色曲线表示不同站位。

Fig.6 Grain size frequency curve of various types of sediments

N is the number of samples, different color curves represent different stations.

时间序列剖面(图8)发现,潮周期内庙岛海峡悬浮泥沙浓度峰值形态较平滑,高值持续时间较长,其他区域悬浮泥沙浓度峰值曲线形态较尖锐,高值持续时间较短。

3.2.2 潮周期内悬沙浓度变化特征

根据相关经验,潮流流速的变化直接影响水体悬浮泥沙浓度的变化,当流速增大时,海底表层沉

积物受到的剪切应力相应变大,海底受到冲刷,细颗粒的泥沙物质进入水体,悬浮泥沙浓度增高;当流速减小到一定程度时,海底表层沉积物受到的剪切应力小于临界剪切应力,水体中的悬浮泥沙发生沉降,悬浮泥沙浓度也相应降低。对比潮流流速与悬沙浓度时间序列剖面(图8)发现,悬浮泥沙浓度潮周期变化与潮流流速周期变化相关性较好,潮流

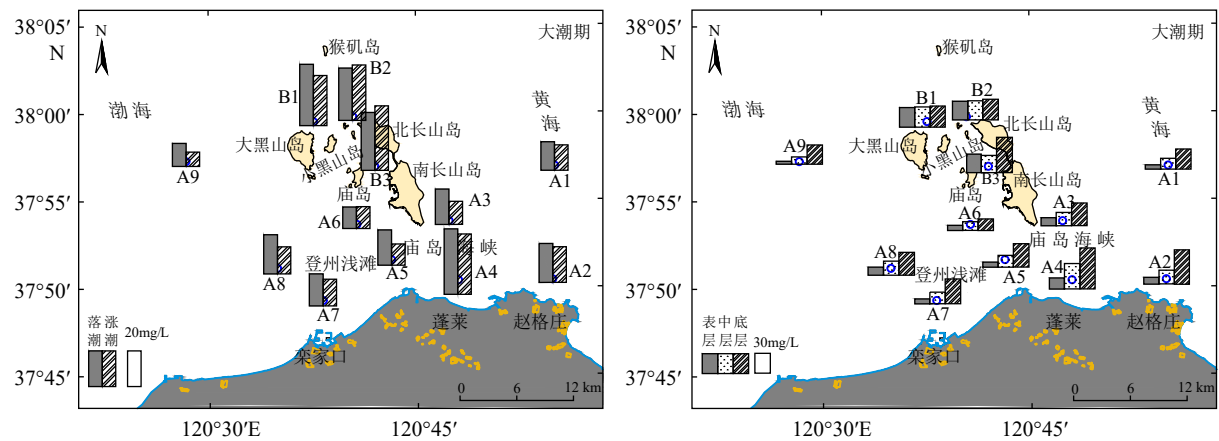


图 7 悬浮泥沙涨落潮段(左图)与表中底各层(右图)平均浓度分布^[22]

Fig.7 Distribution of suspended sediment concentration averaged during ebb and flow period (left) and in each layer (right)^[22]

流速超过 40 cm/s 时,研究区海域发生明显的再悬浮现象,并且潮流流速越大,底部悬浮泥沙浓度越高,悬浮泥沙浓度峰值整体上滞后于潮流流速峰值 0.5~2 h。潮周期内各站位的悬浮泥沙浓度随流速出现高低值的更迭,且存在分层现象。悬沙浓度高低值更迭表现为底层变化对高流速响应明显,表层变化对低流速响应明显,底层悬浮泥沙浓度大于表层。分层现象可能是研究区海域存在跃层的影响:当流速较高时,底质沉积物再悬浮,底层浓度增加,因跃层影响,表层接受自底部向上扩散的悬沙很少;当流速处于低值时,表层的悬浮泥沙会发生落淤,使表层悬浮泥沙浓度明显降低,因此表层变化对低流速反应明显。

3.3 泥沙沉降及再悬浮特性

3.3.1 悬浮泥沙沉降特征

研究区悬浮泥沙沉降速度计算结果表明,单颗粒沉降速度整体上不大,最大为 0.030 6 mm/s,出现在研究区西部的 A9 站位;最小值为 0.0246 mm/s,出现在研究区中部的 A6 站位(表 1)。有学者研究表明,泥沙絮凝沉降速度是单颗粒悬浮泥沙沉降速度的几十倍至上百倍^[23-26],在悬浮泥沙絮凝沉降中起主导作用的有悬浮泥沙粒径、盐度、水体流速、含沙量 4 个因子^[27],悬浮泥沙粒径<16 μm 絮凝沉降现象明显,悬浮泥沙粒径 8 μm 左右,絮凝沉降

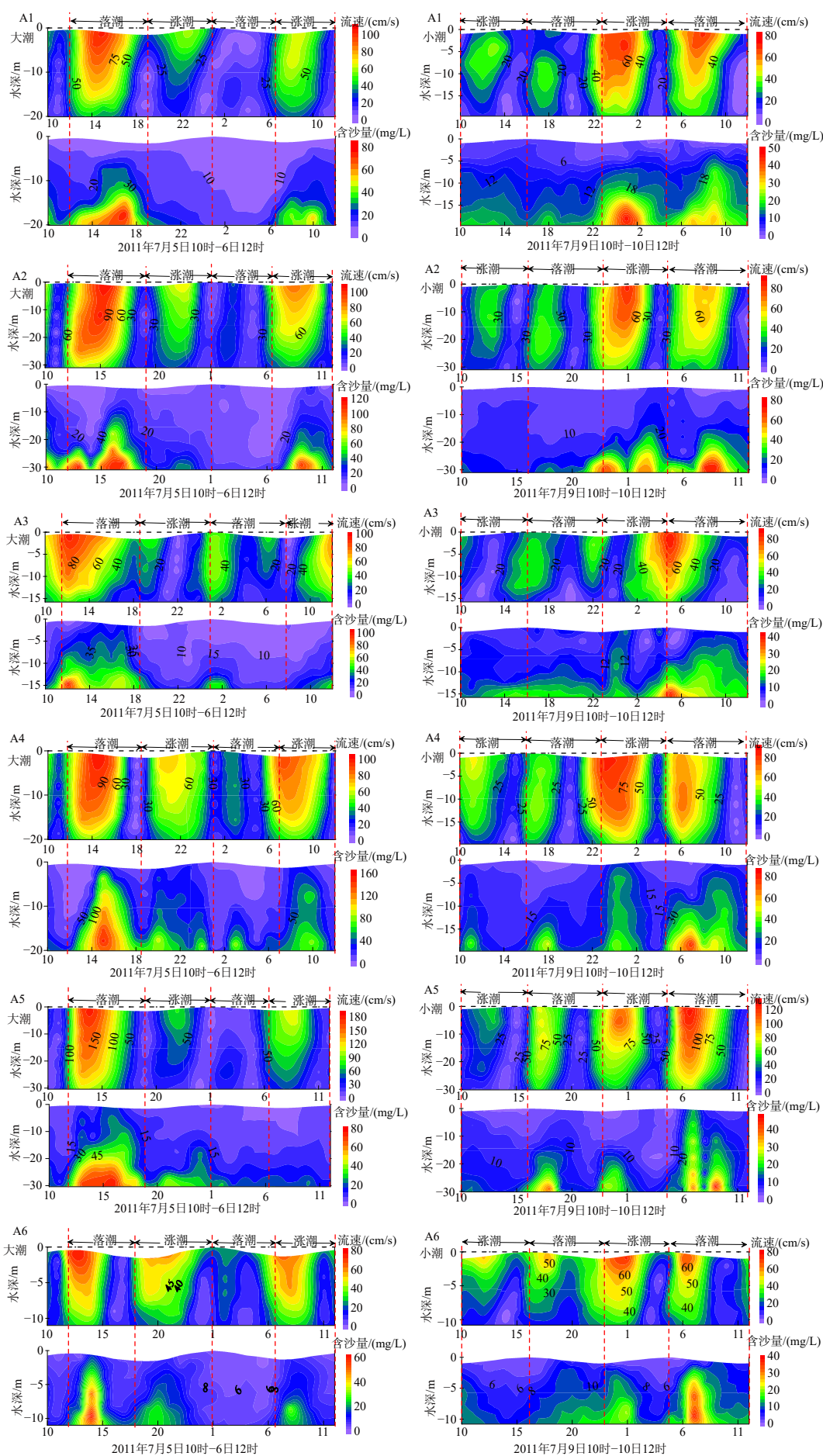
现象最为强烈^[28],水体中细颗粒物发生絮凝沉降的必要条件是阳离子浓度为 60~500 mmol/L^[29],研究区悬浮泥沙粒径为 10.4~11.6 μm、盐度值 30.87~31.21(其对应的水溶液阳离子浓度在前述区间内),均适宜悬浮泥沙的絮凝沉降。有学者^[26,30]基于控制变量的室内试验证明,基于同等其他条件,在较低悬浮泥沙浓度(0~1 000 mg/L)情况下,亦可发生絮凝沉降,絮凝平均沉降速率与悬浮泥沙浓度正相关,但此时悬浮泥沙浓度对沉降速率影响较小。在水体流速小于 30 cm/s 的情况下,粒径为 8~32 μm 的悬浮泥沙可以絮凝沉降^[31],由图 9 可见, A4、A5 站位流速小于 30 cm/s 的持续时间较短,其余站位表层流速小于 30 cm/s 的持续时间较长,表明研究区除庙岛海峡外其他海域水动力条件适合悬浮泥沙絮凝沉降,并以中、底层絮凝沉降为主。

3.3.2 沉积物再悬浮特征

表层沉积物起动流速计算结果表明(表 2),研究区内自庙岛海峡向渤海、黄海、庙岛群岛海域表层沉积物起动流速递减,研究区东侧表层沉积物起动流速自岸向海递减,西侧自岸向海先增大后减小,对比各站位流速时间序列剖面图(图 8), A2、A4、B3 站位最大底层潮流流速均达不到表层沉积物起动流速。根据同期获取的底质资料发现, A2 站位表层沉积物主要为泥,颗粒粒级细,颗粒组分中黏土含量较高,颗粒间黏性大,需要的起动流

表 1 A1—A9 各站悬浮泥沙沉降速度
Table 1 The settling velocity of suspended sediment at stations A1-A9

站位	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
$D_{50}/\mu\text{m}$	11	10.7	10.9	10.8	11.1	10.4	11.5	11.4	11.6
沉降速度/(mm/s)	0.0275	0.0260	0.0270	0.0265	0.0280	0.0246	0.0300	0.0295	0.0306



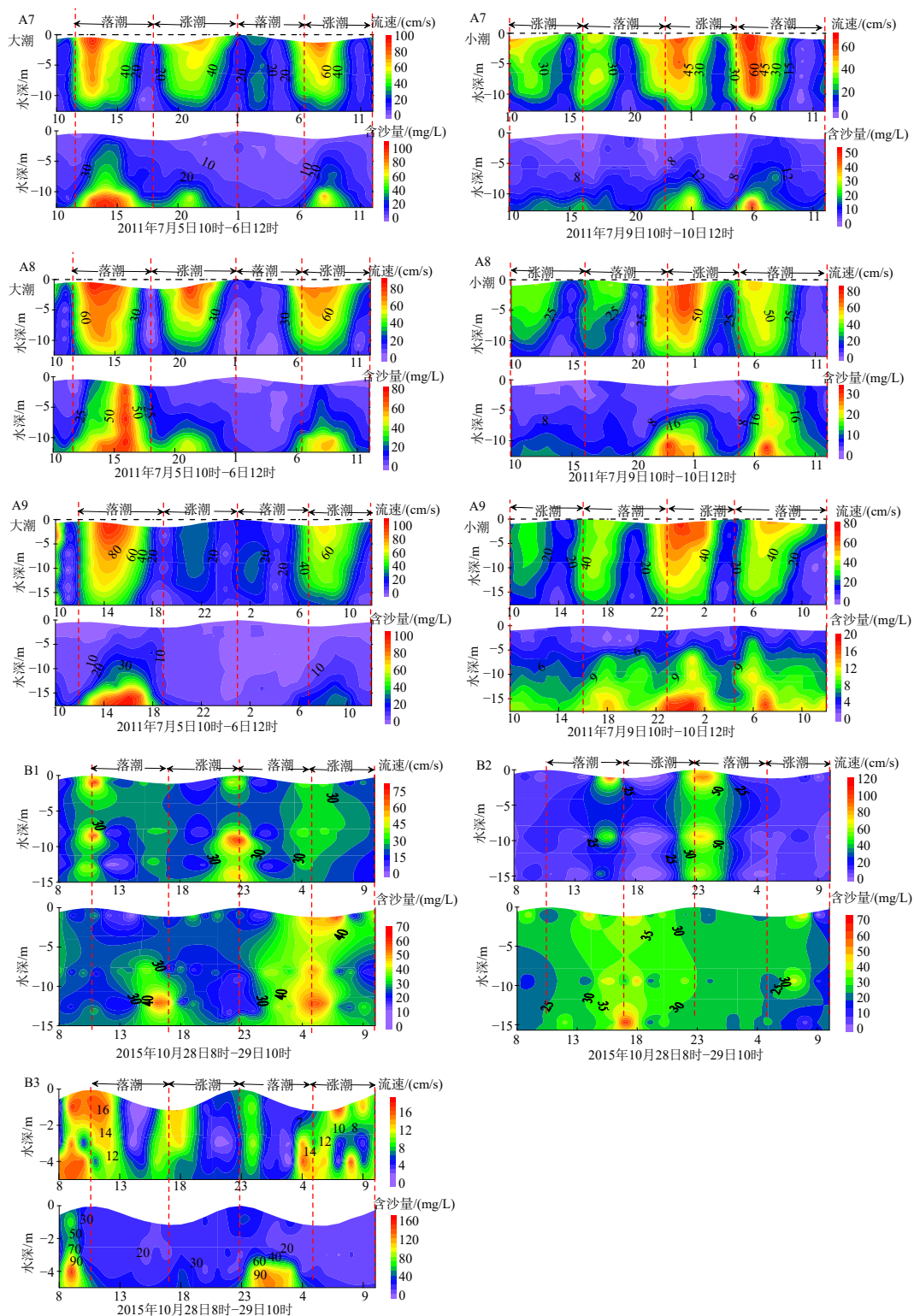


图 8 各站位潮流流速、含沙量时间序列剖面

Fig.8 The current velocity and the variation of sediment concentration with time in each station

速较大; A4 站位表层沉积物主要为砾, 颗粒粒级粗, 自身的重力较大, 需要的起动流速亦增加, B3 站位位于庙岛群岛内部且水深较浅, 潮流流速较小, 动力不足。A6、A7、A8 3 个站位底层最大流速超过起动流速的时间较长, 指示其潮流流速容易使

表层沉积物再悬浮。其余站位底层最大流速超过起动流速的时间较短, 短暂的时段内不足以使表层沉积物再悬浮太久。

3.3.3 再悬浮通量与沉降通量

为了加深对研究区悬浮泥沙特性的理解, 对研

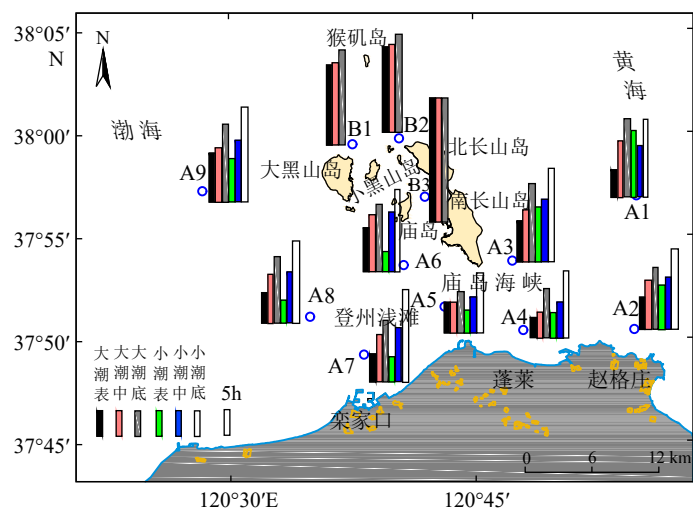


图 9 单日内各站位表中底层流速小于 30 cm/s 的持续时间 (h)

Fig.9 Duration of flow velocity less than 30 cm / s in a single day in the each layer of each station (h)

表 2 各站位表层沉积物起动流速

Table 2 The critical motion velocity of surface sediment at each station

站位	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	B1	B2	B3
水深/m	19.2	30.0	14.9	19.1	29.7	10.2	12.0	11.8	17.0	13.6	14.6	5.0
中值粒径/ μm	30.8	21.4	41.6	5000.0	1824.8	415.9	124.1	29.1	42.9	35.3	35.8	26.1
起动流速/(cm/s)	46.0	72.0	34.0	119.0	70.0	28.0	22.0	39.0	35.0	37.0	37.0	32.0

究区表层沉积物再悬浮通量与悬浮泥沙沉降通量进行了计算、对比分析,以求寻得二者对研究区悬浮泥沙浓度分布及运移的影响。为了更为直观地分析出二者单日内对水体中悬浮泥沙浓度的影响,将计算得到的再悬浮通量与沉降通量区间进行了算术平均计算,同时将单日 24 h 按照再悬浮与沉降特点划分为再悬浮时间与沉降时间,进而求出单日每平方米的再悬浮量与沉降量(表 3)。研究区再悬浮通量整体较小,庙岛海峡最小,分区差异不显著,沉降通量明显小于再悬浮通量;单日表层沉积物再悬浮量最大为 43.47 kg/m²,出现在 A2 站位,最小为 2.30 kg/m²,出现在 A5 站位,悬浮泥沙沉降量较小,远小于再悬浮通量,表层沉积物再悬浮量、悬浮泥沙沉降量平面变化规律与再悬浮通量的平面变化具有较高的一致性。

有学者认为,登州浅滩细颗粒的粉砂、黏土级物质被潮流带走同时输入较粗的细砂物质,但峡道地貌形成之后,海区地貌形态基本趋于稳定,海底侵蚀量已极为有限^[4]。张伟^[32]发现蓬莱西海岸沿岸泥沙呈离岸方向运移的趋势,并有可能成为登州浅滩泥沙来源的一部分,同时也有学者通过卫星遥感反演大面积海域,认为渤海中部和渤海海峡海域表层悬浮泥沙主要来源于表层沉积物再悬浮及其输运^[33]。

还有学者认为自 20 世纪 80 年代以来,西庄至栾家口一带黄土质海岸遭受严重侵蚀^[12],季节性河流径流将数量可观的以黄土为主的侵蚀物带入海中^[34],海岸侵蚀来沙、河流输沙、邻近海域搬沙及微弱的海底侵蚀供沙共同构成庙岛海峡周边海域的主要泥沙来源^[5]。据以上计算结果及讨论分析,大致可以认为研究区除庙岛海峡以外的其他海域,表层沉积物再悬浮对水体中悬浮泥沙的影响较显著,尤其研究区东南侧的泥质分布区和西部登州浅滩的西南侧细颗粒物区,在庙岛海峡的峡道效应及庙岛群岛的群岛效应双重影响下,加之山东半岛北部沿岸流的周期性推动,表层沉积物再悬浮与底层水体水沙交换的现象更加显著。

3.4 悬浮泥沙输移特征

3.4.1 悬浮泥沙输运机制

本文所提到的悬浮泥沙输运通量计算均是指在正常天气潮流作用下的计算结果(表 4—6、图 10—11),未考虑波浪、风暴潮的影响因素。结果显示,各站位中单宽悬沙净输运率(T)只有 A9 站位小潮期大于大潮期,其余站位均是大潮期大于小潮期,大、小潮期 T 最大值均出现在 A4 站位, T 最小值均出现在 A9 站位。大、小潮期 A1、A2、A9 3 个

表 3 A1—A9 各站位再悬浮通量与沉降通量
Table 3 Resuspension and sedimentation fluxes of stations A1-A9

站位	再悬浮通量/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	沉降通量/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)	悬浮时间/h	沉降时间/h	再悬浮量/(kg/m ²)	沉降量/(kg/m ²)
A1	2.91×10 ⁻⁶ ~1.45×10 ⁻³	5.04×10 ⁻⁸ ~5.41×10 ⁻⁷	16	8	21.40	7.68×10 ⁻³
A2	8.57×10 ⁻⁶ ~3.24×10 ⁻³	1.50×10 ⁻⁷ ~1.03×10 ⁻⁶	19	5	43.47	6.89×10 ⁻³
A3	5.33×10 ⁻⁷ ~1.44×10 ⁻³	3.32×10 ⁻⁸ ~3.63×10 ⁻⁷	15	9	15.36	5.13×10 ⁻³
A5	7.40×10 ⁻⁶ ~3.78×10 ⁻⁴	1.54×10 ⁻⁸ ~1.27×10 ⁻⁷	5	19	2.30	4.06×10 ⁻³
A6	2.37×10 ⁻⁵ ~3.40×10 ⁻⁴	4.56×10 ⁻⁸ ~3.61×10 ⁻⁷	10	14	4.61	7.92×10 ⁻³
A7	9.50×10 ⁻⁶ ~6.37×10 ⁻⁴	3.74×10 ⁻⁸ ~6.39×10 ⁻⁷	15	9	16.53	7.68×10 ⁻³
A8	1.04×10 ⁻⁵ ~2.05×10 ⁻³	1.12×10 ⁻⁸ ~6.54×10 ⁻⁷	16	8	29.28	6.75×10 ⁻³
A9	1.03×10 ⁻⁵ ~1.72×10 ⁻³	7.31×10 ⁻¹⁰ ~7.07×10 ⁻⁷	13	11	19.47	6.36×10 ⁻³

表 4 A1—A9 各站悬沙输运项及单宽悬沙净输运率（大潮）
Table 4 Items of suspended sediment transport and the net transport rate of single-width suspended sediment at stations A1-A9 (spring tide)

站位	输沙项	T_1	T_2	T_5	T_1+T_2	T_3+T_4	$T_6+T_7+T_8$	T
A1	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.89	0.45	2.81	3.62	0.03	0.05	4.29
	方向/(°)	154	285	256	160	273	16	200
A2	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	18.68	0.91	9.42	17.93	0.27	0.12	18.00
	方向/(°)	142	289	249	144	105	13	173
A3	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	35.94	1.77	3.81	37.50	0.53	0.18	35.16
	方向/(°)	265	236	128	264	288	56	260
A4	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	89.97	2.21	4.43	89.38	1.37	0.32	86.12
	方向/(°)	62	316	279	61	128	266	60
A5	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	21.33	1.72	12.27	22.83	0.32	0.05	35.38
	方向/(°)	261	291	257	263	271	175	261
A6	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	15.74	1.17	1.03	14.77	0.22	0.09	13.67
	方向/(°)	87	301	260	85	317	130	85
A7	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	14.71	0.74	2.70	14.01	0.17	0.13	11.44
	方向/(°)	67	265	265	66	258	87	62
A8	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	26.04	1.34	2.93	24.77	0.16	0.08	22.73
	方向/(°)	42	240	261	41	328	51	36
A9	输沙率/(g·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	3.21	0.26	2.75	3.19	0.07	0.07	0.43
	方向/(°)	164	262	344	169	57	76	186

站位 T 与 (T_1+T_2) 的方向差别较大, 其余站位 T 与 (T_1+T_2) 的方向基本一致。潮周期平均输运率由 $T_1—T_8$ 决定, 但各分项贡献值差别较大, 在庙岛群岛海域 (T_1+T_2) 平流输运项主导着悬浮泥沙的输运, 其余各项均较小, 在其他海域内 (T_1+T_2) 平流输运项在研究区悬浮泥沙输运过程中起了主导作用, T_5 垂向净环流贡献项对研究区悬浮泥沙输运的影响也较大, (T_3+T_4) 和 $(T_6+T_7+T_8)$ 对研究区悬沙输运贡献

值很小, 本文讨论分析时 (T_3+T_4) 和 $(T_6+T_7+T_8)$ 贡献项忽略不计。大潮期的 A3—A6、A8、B1、B2 站位和小潮期的 A3 站位 T_2 贡献值大于其他站位, 表明这几个站位斯托克斯漂移效应明显, 这与登州水道涨落潮流作用增强相关, 实测资料亦显示, 此处潮流流速大于研究区内的其他海区。A7 站位 T_2 贡献值较小, 主要是因为登州浅滩的存在, 地形影响使 A7 站位处涨落潮流作用减弱。登州浅滩和登州水

表 5 A1—A9 各站悬沙输运项及单宽悬沙净输运率（小潮）

Table 5 Items of suspended sediment transport and the net transport rate of single-width suspended sediment at stations A1-A9 (neap tide)

站位	输沙项	T_1	T_2	T_5	T_1+T_2	T_3+T_4	$T_6+T_7+T_8$	T
A1	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	7.96	0.48	4.55	7.49	0.03	0.09	3.27
	方向/(°)	90	259	259	91	98	47	107
A2	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	10.82	0.09	4.36	10.87	0.11	0.24	7.83
	方向/(°)	118	172	260	119	119	296	139
A3	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	18.61	1.30	1.89	19.86	0.11	0.12	19.81
	方向/(°)	249	234	161	248	57	80	243
A4	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	30.53	0.25	2.92	30.53	0.24	0.01	28.26
	方向/(°)	61	332	273	60	107	327	57
A5	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	16.26	0.98	3.90	17.23	0.02	0.01	19.64
	方向/(°)	273	281	216	273	312	279	263
A6	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	10.06	0.54	1.19	9.61	0.05	0.04	8.55
	方向/(°)	72	286	275	70	295	81	67
A7	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	4.44	0.57	0.71	3.89	0.00	0.06	3.33
	方向/(°)	67	263	273	65	276	71	60
A8	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	12.87	0.48	0.93	12.64	0.12	0.02	12.04
	方向/(°)	142	261	278	144	76	13	146
A9	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.31	0.28	1.26	3.07	0.03	0.02	2.14
	方向/(°)	95	244	242	98	279	357	117

表 6 B1—B3 各站悬沙输运项及单宽悬沙净输运率（大潮）

Table 6 Items of suspended sediment transport and the net transport rate of single-width suspended sediment at stations B1-B3 (spring tide)

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
B1	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.15	0.34	0.00	0.02	0.02	0.01	1.12	1.13
	方向/(°)	156	260	336	69	192	92	174	172
B2	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	4.68	0.10	0.01	0.04	0.01	0.00	4.74	4.75
	方向/(°)	201	256	21	240	326	99	202	203
B3	输沙率/($\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.23	0.04	0.00	0.01	0.02	0.01	0.21	0.20
	方向/(°)	187	312	187	251	45	325	195	195

道之间的泥沙交换、潮周期不对称输沙以及表层沉积物再悬浮导致了垂向流速变化和悬浮泥沙浓度变化的相关项(T_5)的增大。

对于平流输运项(T_1+T_2)与垂向净环流项(T_5)在大、小潮期对各个站位的贡献又有所不同,总体来讲,平流输运项(T_1+T_2)在悬浮泥沙输运中占主导作用,除了 A5 站位平流输运项(T_1+T_2)与垂向净环流项(T_5)悬浮泥沙输运方向差别较大外,其余各站悬浮泥沙输运方向基本一致。庙岛海峡(T_1+T_2)贡献项要大于东、西两侧海域,从实测资料的分析中

也可以发现(图 8),垂向悬浮泥沙浓度和潮流流速的梯度变化,庙岛海峡小于东、西两侧海域,庙岛海峡东、西两侧海域余流作用相对减弱。研究区悬浮泥沙输运整体以(T_1+T_2)贡献项为主, T_5 贡献项为辅,自庙岛海峡至东、西两侧海域 T_5 贡献项的作用逐渐增加。研究区悬浮泥沙运移的主要动力来源于潮流的周期性变化,潮流对悬浮泥沙的搬运以往复搬运为主,落潮流在悬浮泥沙输运中发挥了更大的作用。

平面上研究区大、小潮期垂向平均悬浮泥沙净

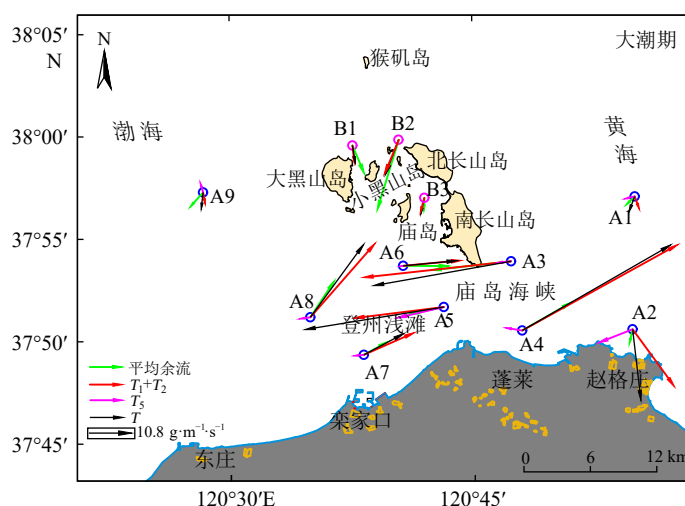


图 10 大潮期各站位悬沙输运与平均余流叠置图

注: A9 的 T 放大 10 倍, A4 的 T_1+T_2 和 T 缩放为 $1/2$, B1 的 T_1+T_2 和 T 放大 4 倍, B3 的 T_1+T_2 和 T 放大 20 倍, B2 放大 2 倍。

Fig.10 The superimposition of suspended sediment transport term and average residual current at each station during spring tide

Note: T of A9 is magnified 10 times, T_1+T_2 and T of A4 are zoom $1/2$, T_1+T_2 and T of B1 are magnified 4 times, T_1+T_2 and T of B3 are magnified 20 times, and B2 is magnified 2 times.

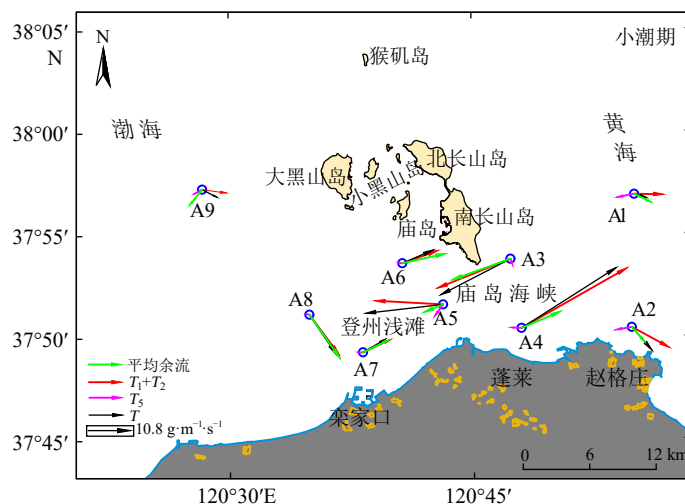


图 11 小潮期各站位悬沙输运与平均余流叠置图

注: A7、A9 各项放大 2 倍。

Fig.11 The superimposition of suspended sediment transport term and average residual current at each station during neap tide

Note: A7 and A9 are magnified 2 times.

输运方向和垂向平均余流方向基本一致, 悬浮泥沙净输运量大小变化趋势与垂向平均余流大小变化趋势亦基本一致。研究区内对悬浮泥沙净输运贡献最大的是余流, 净输运率不大, 主要由水道向两侧浅滩输沙。A3、A6 站位净输沙方向指向长山尾附近的浅滩, A5、A7 站位净输沙方向指向登州浅滩, A5、A6 站位净输沙方向相反, 峡道效应起了关键性作用。水深地形的复杂变化, 岛屿对潮流场的制约作用, 致使悬浮泥沙在庙岛海峡北侧浅滩与登州浅滩沉降堆积。

3.4.2 悬浮泥沙输运趋势

庙岛群岛海域悬浮泥沙输移方向表现为自北向南, 穿过庙岛群岛浅滩又分为两个方向, 一是沿着庙岛群岛西侧岸线向北输运, 另一方向则是沿着庙岛海峡北侧浅滩输运至黄海方向; 庙岛海峡西侧则表现出远海向近岸输沙、近岸海域向庙岛海峡方向输沙的特点; 庙岛海峡东侧悬浮泥沙输运相对简单, 沿山东半岛北岸向东南方向输沙的同时, 自近岸向远海输沙。庙岛海峡悬浮泥沙输运相对复杂, 通过图 10、11, 并结合数值模拟的余流场(图 4)和

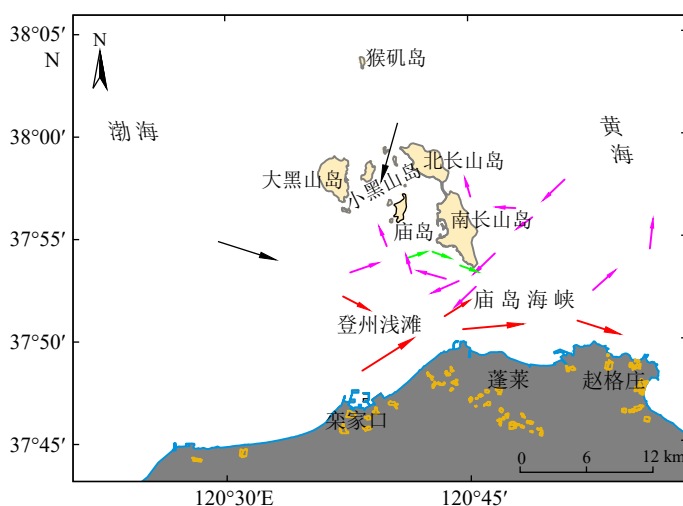


图 12 研究区悬浮泥沙输运方向示意图

Fig.12 The transportation direction of suspended sediment in the study area

计算的表层沉积物通量(A4、A6、A7 站位净输运方向为涨潮,即向东输沙,A5 净输运方向为落潮,即向西输沙)的结果,发现在庙岛海峡的南侧由渤海向黄海方向输运物质,在庙岛海峡的北侧亦有明显的自黄海向庙岛海峡方向的物质输移,并且庙岛海峡内部也有小环流进行物质交换。北黄海悬浮泥沙通过庙岛海峡北侧进入渤海,一部分向登州浅滩方向输运,另一部分在长山岛涡旋的作用下通过庙岛海峡北侧进入黄海;渤海悬浮泥沙通过庙岛海峡南侧进入北黄海,并沿着山东半岛向东和东北向输运;庙岛群岛北侧悬浮泥沙沿着长山岛与大黑山岛之间狭道向登州水道输运,穿过峡道浅滩后一部分悬浮泥沙加入小环流进行物质交换(图 12)。

根据以上探讨,初步认为研究区悬浮泥沙运移趋势整体如下:①研究区西南侧悬浮泥沙沿着蓬莱西海岸经庙岛海峡南侧进入黄海,到达赵格庄北侧海域分为两部分,一部分悬浮泥沙继续沿着山东半岛沿岸向前运移,另一部分悬浮泥沙垂直岸线向北黄海深处运移;②来自黄海的少量悬浮泥沙,经庙岛海峡北侧进入,在南长山岛西南侧海域与来自渤海的水体碰撞产生小环流,部分悬浮泥沙进入庙岛群岛海域,部分悬浮泥沙继续跟随环流运移;③来自渤海的悬浮泥沙由于东来的黄海水体的干扰,部分南下运移与西部区西南侧悬浮泥沙一起经庙岛海峡南侧运往黄海;④庙岛群岛北侧悬浮泥沙为群岛内悬浮泥沙输运提供了来源,输运至庙岛群岛内部的悬浮泥沙,大部分会沉降淤积在庙岛群岛内,小部分随落潮流输运至群岛外侧;⑤庙岛海峡悬浮泥沙输运最为复杂,不只是将渤海悬浮物质输往黄海,亦有黄海悬浮物质经庙岛海峡向渤海运移,如

本文的 A4、A7 站位净输运方向指向黄海,A3、A5 站位净输运方向指向渤海。

4 结论

(1)研究区海域悬浮泥沙浓度潮周期变化与潮流流速周期变化相关性较好,底层悬沙浓度变化对高流速的响应比较明显,表层悬沙浓度变化对低流速响应比较明显,悬沙浓度存在垂向分层现象,底层大于表层,悬浮泥沙浓度峰值整体上滞后于潮流流速峰值 0.5~2 h。

(2)研究区悬浮泥沙单颗粒沉降现象不明显,除庙岛海峡外其他海域较适合悬浮泥沙絮凝沉降,并以中、底层絮凝沉降为主,且表现出自表层至底层絮凝沉降作用逐渐加强趋势;表层沉积物再悬浮对近岸浅水区、庙岛群岛周边海域水体悬浮泥沙浓度的影响要强于研究区其他海域,庙岛群岛南、北两侧表层沉积物再悬浮供沙作用强于中部;表层沉积物再悬浮量、悬浮泥沙沉降量平面变化规律与再悬浮通量的平面变化具有较高的一致性。

(3)研究区悬浮泥沙输运整体以平流输运为主,垂向净环流为辅;潮流对悬浮泥沙的搬运以往复搬运为主,落潮流在悬浮泥沙输运中发挥了更大的作用;悬浮泥沙净输运方向与余流方向大致相同,净输运率不大,主要由水道向两侧浅滩输沙。

(4)研究区西部悬浮泥沙经庙岛海峡南侧输运至黄海,东部悬浮泥沙经庙岛海峡北侧输运至渤海,二者同时进行,部分悬浮物质经海峡内的小环流进行物质间的交换,庙岛群岛北侧悬浮泥沙为群岛内悬浮泥沙输运提供了来源。

参考文献 (References)

- [1] 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.]
- [2] 陈斌, 刘健, 高飞. 莱州湾泥沙输运机制研究[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 857-866. [CHEN Bin, LIU Jian, GAO Fei. Suspended sediment transport mechanism in Laizhou Bay [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 857-866.]
- [3] 江文胜, 王厚杰. 莱州湾悬浮泥沙分布形态及其与底质分布的关系[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(2): 97-103. [JIANG Wensheng, WANG Houjie. Distribution of suspended matter and its relationship with sediment particle size in Laizhou bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2005, 36(2): 97-103.]
- [4] 王庆, 仲少云, 刘建华, 等. 山东庙岛海峡的峡道动力地貌[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 17-24. [WANG Qing, ZHONG Shaoyun, LIU Jianhua, et al. The channel dynamic geomorphology of Miaodao strait, Shandong, China [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(2): 17-24.]
- [5] 刘成, 胡日军, 朱龙海, 等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 24-33. [LIU Cheng, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Dynamic environment division and sediment transport trend in the area off Miaodao islands [J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(8): 24-33.]
- [6] 李爱超, 乔璐璐, 万修全, 等. 渤海海峡悬浮体分布、通量及其季节变化[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 310-318. [LI Aichao, QIAO Lulu, WAN Xiuyan, et al. Distribution, flux and seasonal variation of suspended particulate matters in the Bohai strait [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(2): 310-318.]
- [7] 肖合辉, 王厚杰, 毕乃双, 等. 渤海海域悬浮体季节性分布及主要运移路径[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(2): 11-21. [XIAO Hehui, WANG Houjie, BI Naishuang, et al. Seasonal variation of suspended sediment in the Bohai and Yellow Sea and the pathway of sediment transport [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(2): 11-21.]
- [8] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93(3): 173-181.
- [9] 董超. 登州浅滩表层沉积物输运特征的研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2011 [DONG Chao. Study on the characters of surface sediment transport in Dengzhou shoal area[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2011.]
- [10] 姜胜辉, 王楠, 成海燕, 等. 渤海海峡水动力分布特征研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(S1): 66-73. [JIANG Shenghui, WANG Nan, CHENG Haiyan, et al. The study on hydrodynamic distribution characteristics of the Bohai strait [J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(S1): 66-73.]
- [11] 李福林, 夏东兴, 王文海, 等. 登州浅滩的形成、动态演化及其可恢复性研究[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 65-73. [LI Fulin, XIA Dongxing, WANG Wenhai, et al. Discussion on the evolution cause and its recovery for the Dengzhou Shoal, China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(6): 65-73.]
- [12] 陈雪英, 胡泽建. 山东蓬莱西庄附近海域波浪与海岸侵蚀[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(2): 19-26. [CHEN Xueying, HU Zejian. On waves and coastal erosion in the sea area near west village, Penglai County, Shandong Province [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1992, 10(2): 19-26.]
- [13] Camenen B. Simple and general formula for the settling velocity of particles [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(2): 229-233.
- [14] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9. [DOU Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9.]
- [15] Partheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1965, 91(1): 105-139.
- [16] Krone R B. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes: Final Report[R]. Berkeley: Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, 1962.
- [17] Clark S, Elliott A J. Modelling suspended sediment concentrations in the firth of forth [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47(3): 235-250.
- [18] Ingram R G. Characteristics of the great whale river plume [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(C3): 2017-2023.
- [19] 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.
- [20] 黄才安, 梅小文. 垂线平均含沙量两种表述方法之比较[J]. 泥沙研究, 1999(1): 70-73. [HUANG Caian, MEI Xiaowen. Comparison on two formulae of mean suspended sediment concentration in vertical [J]. Journal of Sediment Research, 1999(1): 70-73.]
- [21] 林纪江. 蓬莱近岸海域悬浮泥沙分布及运移机制研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2017. [LIN Jijiang. The distribution and migration mechanism of suspended sediment in the Penglai coastal waters[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2017.]
- [22] 林纪江, 胡日军, 朱龙海, 等. 潮流作用下蓬莱近岸海域悬浮泥沙的时空分布及变化特征[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(12): 13-23. [LIN Jijiang, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Spatio-temporal distribution and variation of suspended sediment by the action of tide in Penglai coastal area [J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(12): 13-23.]
- [23] 陈沈良, 谷国传, 张国安. 长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算[J]. 泥沙研究, 2003(6): 45-51. [CHEN Shenliang, GU Guochuan, ZHANG Guoan. Settling velocity of suspended sediment in the Nanhui nearshore waters of Changjiang estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2003(6): 45-51.]
- [24] 程江, 何青, 王元叶. 利用LISST观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布[J]. 泥沙研究, 2005(1): 33-39. [CHENG Jiang, HE Qing, WANG Yuanye. Using LISST-100 for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity, Changjiang Estuary, China [J]. Journal of Sediment Research, 2005(1): 33-39.]

- [25] 时钟, 朱文蔚, 周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速度[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(1): 18-22. [SHI Zhong, ZHU Wenwei, ZHOU Hongqiang. Settling velocity of fine suspended sediment in the Changjiang estuary [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2000, 34(1): 18-22.]
- [26] 唐建华. 长江口及其邻近海域粘性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2007. [TANG Jianhua. Characteristics of fine cohesive sediment's flocculation in the Changjiang estuary and its adjacent sea area[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2007.]
- [27] 蒋国俊, 陈吉余, 姚炎明. 舟山群岛峡道潮流动力沉积特性[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 139-147. [JIANG Guojun, CHEN Jiyu, YAO Yanming. Characteristics of dynamic sedimentation on tidal flat in channels of Zhoushan islands [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(2): 139-147.]
- [28] 徐志刚. 长江口细颗粒泥沙的絮凝特性试验[J]. 东海海洋, 1984(3): 45-50. [XU Zhigang. Experiment on flocculation characteristics of fine sediments from the Changjiang estuary [J]. *Donghai Marine Science*, 1984(3): 45-50.]
- [29] 蒋国俊, 张志忠. 长江口阳离子浓度与细颗粒泥沙絮凝沉积[J]. 海洋学报, 1995, 17(1): 76-82. [JIANG Guojun, ZHANG Zhizhong. Cation concentration and fine-grained sediment flocculation deposition in the Yangtze Estuary [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(1): 76-82.]
- [30] 关许为, 陈英祖. 长江口泥沙絮凝静水沉降动力学模式的试验研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(1): 46-50. [GUAN Xuwei, CHEN Yingzu. Experimental study on dynamic formula of sand coagulation sinking in stationary water in Changjiang estuary [J]. *The Ocean Engineering*, 1995, 13(1): 46-50.]
- [31] Li J F, Zhang C. Sediment resuspension and implications for turbidity maximum in the Changjiang Estuary [J]. *Marine Geology*, 1998, 148(3-4): 117-124.
- [32] 张伟. 渤海海峡南部海域地貌特征及控制因素研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2014. [ZHANG Wei. Study on the geomorphological characteristic and controlling factors in the southern Bohai strait[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2014.]
- [33] 陆建忠. 遥感反演与数值模拟耦合的渤海悬浮泥沙输移研究[D]. 武汉大学博士学位论文, 2010. [LU Jianzhong. Study on suspended sediment transport coupling remote sensing retrieval and numerical simulation in the Bohai Sea, China[D]. Doctor Dissertation of Wuhan University, 2010.]
- [34] 赵奎寰. 登州浅滩物质来源及运移趋势[J]. 海岸工程, 1992, 11(1): 32-40. [ZHAO Kuihuan. The sediment source of Dengzhou shallows and its transport tendency [J]. *Coastal Engineering*, 1992, 11(1): 32-40.]