



渤海湾泥质区南部悬浮体夏季输运过程与机制

王 燕, 陈 斌, 李日辉, 徐晓达, 苏大鹏

Transportation of suspended sediment in the southern mud area of Bohai Bay in summer: Characteristics and mechanism

WANG Yan, CHEN Bin, LI Rihui, XU Xiaoda, and SU Dapeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022020901>

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

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

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

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

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



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王燕, 陈斌, 李日辉, 等. 渤海湾泥质区南部悬浮体夏季输运过程与机制 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 109-121.

WANG Yan, CHEN Bin, LI Rihui, et al. Transportation of suspended sediment in the southern mud area of Bohai Bay in summer: Characteristics and mechanism[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 109-121.

渤海湾泥质区南部悬浮体夏季输运过程与机制

王燕^{1,2}, 陈斌^{1,2}, 李日辉^{1,2}, 徐晓达^{1,2}, 苏大鹏^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 为了解渤海湾泥质区南部近岸及毗邻海域夏季悬浮体输运格局, 分别在湾内、湾口、湾口外和黄河口外 NE 向剖面处设置站位, 进行 25 h 海流、温盐连续观测及悬浮体浓度 (SSC) 测定。结果显示, 高温淡水以羽状流的方式自近岸向渤海中部传输, 高浊度悬浮体多出现在涨急和落急的流速较高时期, 较高的 SSC 值多出现在距底 5 m 水深范围, 其中湾内和湾口两站的底层 SSC 值最高, 分别可达约 130 和 80 mg/L, 黄河口外 NE 向剖面 20 m 以深海域 SSC 值最小, 均低于 40 mg/L。单宽输沙率具有潮周期性特点: 湾内 A1 站涨潮和涨平期以向湾内近岸输沙为主, 落潮和落平期以向湾外输沙为主, 潮平均单宽输沙率为 $7.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 280° ; 湾口 A2 站涨落潮流输沙方向相反, 整体以 SE 向朝湾外近岸输沙为主, 潮平均单宽输沙率为 $7.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 328° 。湾外 A3 站涨潮和涨平时期输沙方向基本相反, 大小相当, 落潮和落平时期输沙方向以偏 E 和偏 NE 向为主, 潮平均单宽输沙率为 $4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 77° 。黄河口 SE 向的两个站位涨潮时输沙偏 SE 向, 涨平时输沙偏 NW 向, 落潮时输沙偏 NW 向, 落平时输沙偏 N 向和偏 NE 向, 两站的潮平均单宽输沙率方向以偏 N 向为主, A4 站的潮平均单宽输沙率为 $5.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 94° , A5 站潮平均单宽输沙率为 $7.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 102° 。潮平均单宽输沙率以拉格朗日输沙贡献最显著, 在湾口泥质区南部和东南部水深 15~25 m 的海域, 垂向净环流的影响较大, 有抵消一部分拉格朗日输沙率的作用, 且对潮平均单宽输沙率的影响比湾内和 25 m 以深海域的大, 其他分量数量级较小, 对潮平均单宽输沙率贡献较小。水体以混合为主, 水体层化程度加强对各站位悬浮体输运均有一定的抑制作用。

关键词: 悬浮体浓度; 输沙量; 温盐结构; 渤海湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022020901

Transportation of suspended sediment in the southern mud area of Bohai Bay in summer: Characteristics and mechanism

WANG Yan^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, LI Rihui^{1,2}, XU Xiaoda^{1,2}, SU Dapeng^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: To understand the transport pattern of suspended sediment in summer in the coastal and adjacent waters of the southern muddy area of Bohai Bay, observation stations were deployed in the bay, the bay mouth, and at the N-E-directed section off the Huanghe (Yellow) River estuary, in which current, thermohaline, and suspended sediment concentration (SSC) were observed in-situ continuously in 25 h. Results show that warm fresh waters travelled from shore to the middle of Bohai Sea in the form of plume flow. High turbidity suspension occurred mostly during periods of maximum flood and maximum ebb, and high SSC value appeared mostly in 5m above sea bottom. The bottom SSC values in the bay and bay mouth stations are the highest, reaching about 130 and 80 mg/L, respectively. The SSC value at 20 m-deep sea area outside the Huanghe River estuary was the lowest at below 40 mg/L. The average single-width sediment transport rate at Station A1 in the bay was $7.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ toward 280° . However, the sand transport direction of the ebb and flow tide at Station A2 in the bay mouth was opposite, and the sand transport direction was mainly southeastward to the outside of the bay. The average single width sand transport rate of the tide was $7.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ toward 328° . The sediment transport directions of Station A3 outside the bay during flood tide and flood slack were generally opposite to each other on similar scales, and the sediment transport directions were mainly east-to-northeastward during ebb tide and ebb slack.

资助项目: 国家自然科学基金“渤海湾季节性悬浮体输运过程与机制”(41606082); 中国地质调查局地调项目“1:100 万大连幅海洋区域地质调查”(GZH200800501), “1:100 万天津幅海洋区域地质调查”(1212011220113)

作者简介: 王燕 (1983—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事沉积动力调查研究, E-mail: wangyan_hds@163.com

通讯作者: 陈斌 (1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事河口海岸沉积动力及环境演变研究, E-mail: chenbin1007@hotmail.com

收稿日期: 2022-02-09; **改回日期:** 2022-04-13. 文凤英编辑

The tidal averaged sediment transport rate per unit width was $4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, and the direction was 77° . At the two stations in SE of the Huanghe River estuary, the sediment transport was in southeastward in flood tide, northeastward in flood slack, northwestward in ebb tide, and north-northeastward in ebb slack. The average single-width sediment transport in the two stations was mainly northward. The average sediment transport rate per unit width of Station A4 was $5.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, and the direction of transport was 94° . The tidal averaged sediment transport rate per unit width at Station A5 is $7.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, and the direction of transport was 102° . The Lagrange sediment transport rate contributed most significantly to the tidal averaged sediment transport rate per unit width. In the southern and southeastern parts of the bay-mouth mud area, the vertical net circulation showed a large impact on the Lagrange sediment transport rate, which could offset partially the Lagrange sediment transport rate, thus affecting more obviously the tidal averaged sediment transport rate per unit width than those in the bay and the sea area deeper than 25 m. Other directional components of velocity had smaller orders of magnitude and contributed less to the tidal averaged sediment transport rate per unit width.

Key words: suspended sediment concentration; suspended sediment flux; thermohaline structure; Bohai Bay

渤海湾毗邻现代黄河三角洲, 沿岸主要为砂质淤泥质海岸, 其沉积物主要来自沿岸河流携带的大量泥沙, 受河流与沿岸细粒物质大量供给和潮流作用为主的海洋动力控制, 呈不规则带状和斑块状分布, 沿岸粒度较粗, 多为粉砂和黏土粉砂, 东北部沿岸多为砂质粉砂, 中部海域粒度较细, 多为黏土软泥和粉砂质软泥^[1]。渤海湾沿岸有多条河流, 如黄河、海河、滦河等, 其中黄河和滦河是渤海湾沉积物的主要来源^[2], 并以黄河入海泥沙量最大^[3]。黄河每年入海泥沙约 11 亿 t, 大量入海泥沙在黄河口沉积下来, 不仅使河流入海流路发生频繁变迁, 而且导致河口三角洲快速淤积^[4-7]。在海洋动力作用下, 大量细颗粒泥沙自黄河口三角洲向北、东北、西北方向海域传输, 可达到渤海湾湾顶^[8-9]。自 1976 年以来其北部废弃的三角洲叶瓣遭受强烈的海岸侵蚀, 在冬季强海洋动力作用下, 大量再悬浮沉积物为渤海湾区域提供充足的物源供应^[3,10-11]。随着人类活动的增强, 河流入海径流量和泥沙量明显减少, 粒度粗化^[6,10,12], 大量泥沙快速沉积在河口附近, 在波浪和潮流的控制下, 泥沙再悬浮并在渤海海域传输, 在沿岸悬浮体浓度明显高于渤海湾中部^[13-14], 水体底层浓度明显高于表层浓度, 悬浮体浓度的分布呈季节性分布特征^[3,11,15-16], 冬季渤海湾在强风浪的再悬浮和沿岸流的搬运作用下, 悬浮体浓度分布明显高于海洋动力较弱的夏季^[3,17-18], 水体的层化混合过程对黄河入海悬浮体传输过程起到重要的控制作用^[6,19]。除此之外, 渤海湾海域悬浮体的分布还具有明显的大小潮差异, 大潮时期悬浮体浓度高于小潮时期^[20]。因此, 不同时段、不同区域内, 渤海湾海域悬浮体的分布特征与海域内海洋动力条件有着密不可分的关系, 要了解该海域悬浮体分布的变化规律, 就需要分不同时段对不同区域进行连续观测研究, 才能更全面地掌握渤海湾悬浮体的运移特征。但是迄今为止对黄河三角洲北部和渤海湾泥

质区毗邻海域再悬浮沉积物的输运过程及其沉积分布尚缺乏系统性观测研究, 这方面的观测有待加强。大量的研究表明^[21-23], 近海沉积物输运过程及其沉积分布与污染物和生源要素的扩散具有极为密切的关系, 是影响区域生物地球化学循环和生态系统的重要因素。渤海湾周边城市人口稠密, 大中城市密集, 有重要能源生产基地, 是目前我国重要的经济发展区之一。随着大规模的围海造地工程和周边临港工程建设, 填海面积增加的同时, 大量来自陆域的重金属和污染物较易附着在悬浮体上随径流入海, 并在海洋动力的作用下, 在近岸海域扩散和沉积, 对近岸海洋生态系统产生了重要影响^[24-27]。因此渤海湾及毗邻海域不同时间尺度的沉积动力过程及其环境效应, 有利于推进对该海域沉积动力学和“源-汇”过程研究的进一步认识, 对区域环境可持续发展具有重要的意义。

本文在前人的研究基础上, 对渤海湾泥质区南部靠近黄河三角洲北部海域的夏季悬浮体浓度、水体温盐结构进行了 25 h 连续观测调查, 对悬浮体输运过程展开了时空对比分析, 并探讨了其水动力机制。

1 材料及方法

1.1 数据采集

2012 年 8 月 20 日—9 月 10 日在渤海湾海域完成了对 10 个站位的海流连续 25 h 定点观测, 并每隔 1 h 对垂向剖面进行温度、盐度和浊度的观测, 采集表、中、底 3 层水位的悬浮体水样用于悬浮体浓度的实验室抽滤测试分析(图 1)。其中, 流速、流向及水深数据采集使用美国 SonTek 公司生产的声学多普勒流速剖面仪 ADCP(工作频率为 300 kHz, 盲区为 1 m, 测流误差 $< 5 \text{ mm/s}$ 和 $< 1^\circ$)来进行观

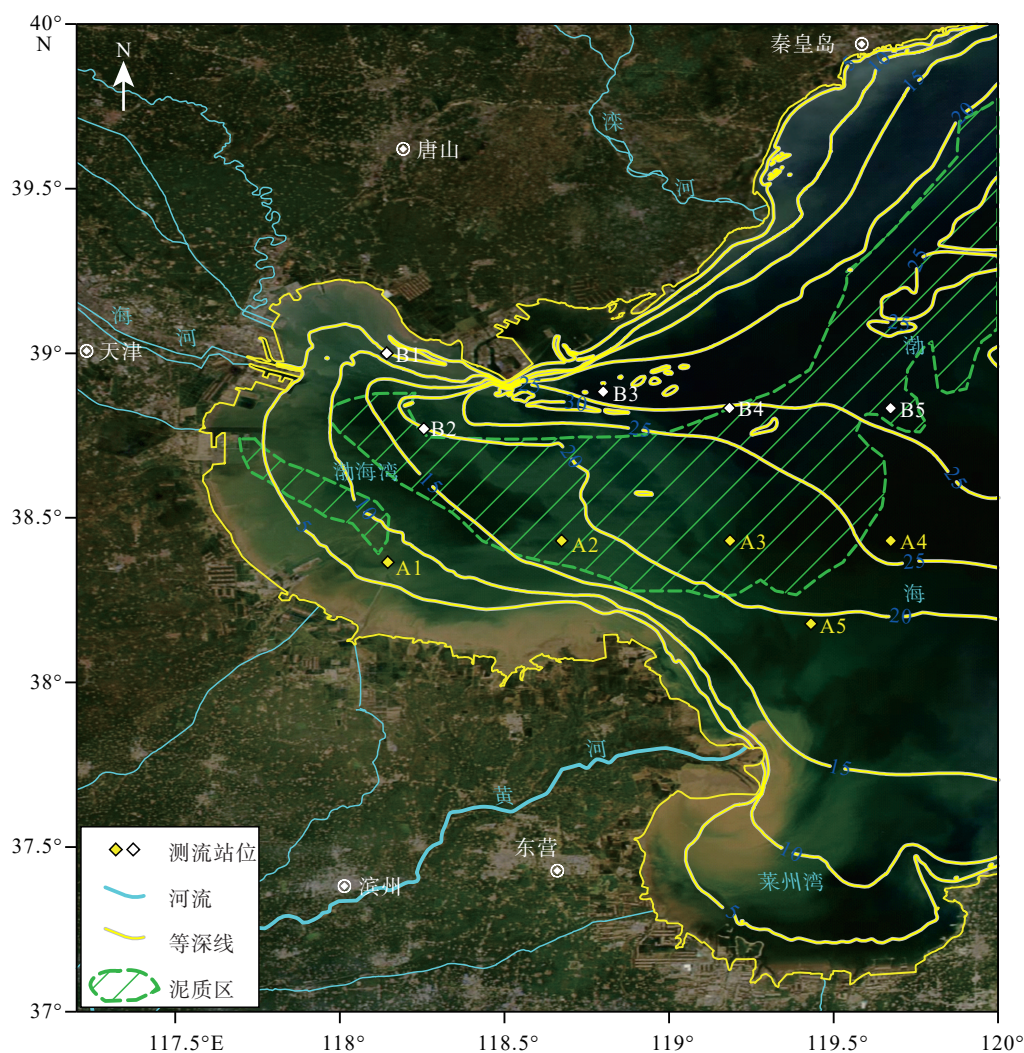


图 1 研究区域及定点连续观测站位

泥质区位置出自文献 [28], 遥感底图来自 <https://wvs.earthdata.nasa.gov/>

Fig. 1 The study area and in-situ observation stations

The location of mud area from reference [28], remote sensing map from <https://wvs.earthdata.nasa.gov/>

测, 测层间隔设置为 1 m, 定点观测采样频率设为 10 s, 温度、盐度及浊度数据采集使用美国 Seabird 公司生产的 SBE19 Plus 多参数水质剖面仪来进行观测(温度、电导率和浊度的精度分别为 $<0.1^{\circ}\text{C}$ 、 0.001 mS/cm 和 0.01 NTU), 用绞车以平均每 2 s 下放 1 m 的速度下放仪器, 平均每 0.2 s 可获取一个数据, 悬浮体水样采集使用美国 Seabird 公司生产的 SBE ECO55 自动采水器进行采集, 该仪器与 SBE19 Plus 集成在一起。悬浮体水样采集以 ADCP 测深为准, 分层进行采取(表层样取自水深 2 m 以内, 中层样取自 0.5 倍水深处, 底层样取距底 0.5~2 m 处), 与温度、盐度及浊度数据采集同步进行。本文采用本航次调查的 10 个站位中位于渤海湾泥质区南部的 5 个站位(A1—A5 站)的观测结果进行悬浮体输运过程分析。

1.2 数据处理

悬浮体水样在实验室进行双滤膜抽滤测试, 抽滤实验采用孔径 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜进行双膜抽滤矫正, 抽滤前将滤膜以 45°C 烘干 24 h 并称得上膜前质量(W_{t1})和下膜前质量(W_{b1}), 称重采用万分之一的电子天平, 抽滤后再以 45°C 烘干 24 h 并称得上膜后质量(W_{t2})和下膜后质量(W_{b2}), 并记录抽滤水体体积(V)通过计算公式(1)计算悬浮体浓度(SSC)。

$$\text{SSC} = \frac{W_{t2} - W_{t1} - \frac{(W_{b2} - W_{b1}) \times W_{t1}}{W_{b1}}}{V} \quad (1)$$

选取 10 个站位 SSC 测试结果, 对采集悬浮体样品所在的垂向 2 m 范围内的悬浮体浊度进行平

均计算, 并与 SSC 进行拟合, 拟合结果如图 2 所示, 相关系数 $R^2=0.83$, 拟合结果较好, 可参考拟合结果, 根据悬浮体浊度的观测结果, 对 SSC 进行拟合判定。

2 结果

2.1 潮流特征

渤海湾泥质区南部潮流以 M2 潮流为主^[29-30], 从图 3 和图 4 的流速矢量图以及图 3 潮流类型分布^[29]可以看出, A1、A2、A3、A5 站的潮流类型为规则半日潮流, A4 站潮流类型为不规则半日潮流, A1 站为逆时针旋转流, A2 站为 E-W 向往复流, A3、A4、A5 站为顺时针旋转流。从图 4 水深变化以及图 3 潮汐类型分布^[29]可以看出, A1、A2、A4 站的潮汐类型为不规则半日潮, A3 站为不规则全日潮, A5 站处在不规则全日潮的位置, 而在观测期间, A5 站出现半日潮特征。各站位的流速东西分量 u 明显高于流

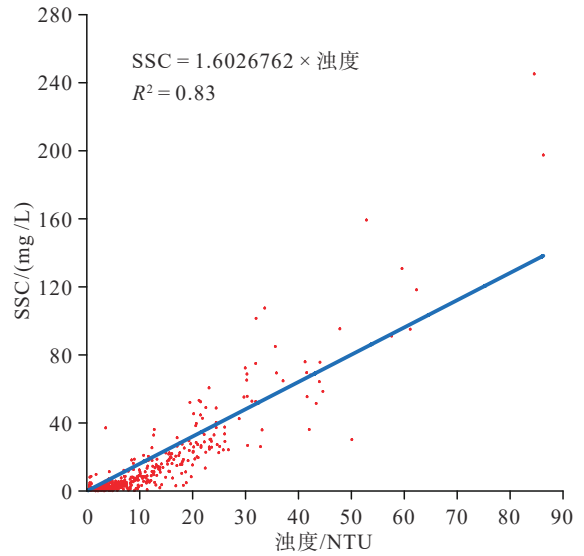


图 2 悬浮体浓度 (SSC) 与浊度的相关性数据
Fig.2 Correlation between suspended sediment concentration (SSC) and turbidity

南北分量 v (图 4), u 分量流速超过 40 cm/s 的历时超过观测历时的 1/2, v 分量流速低于 40 cm/s 的历

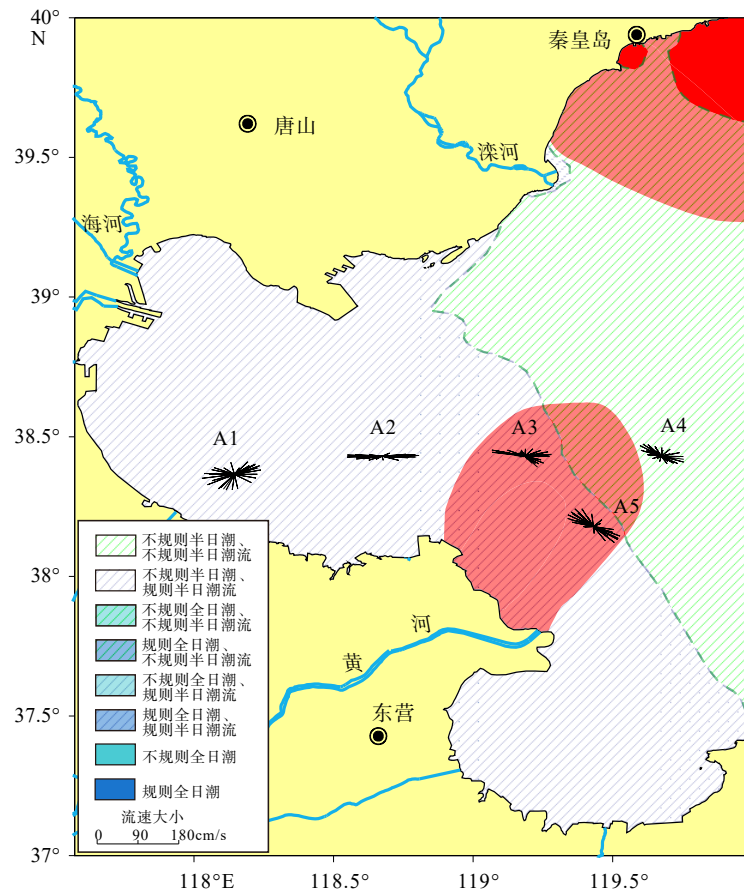
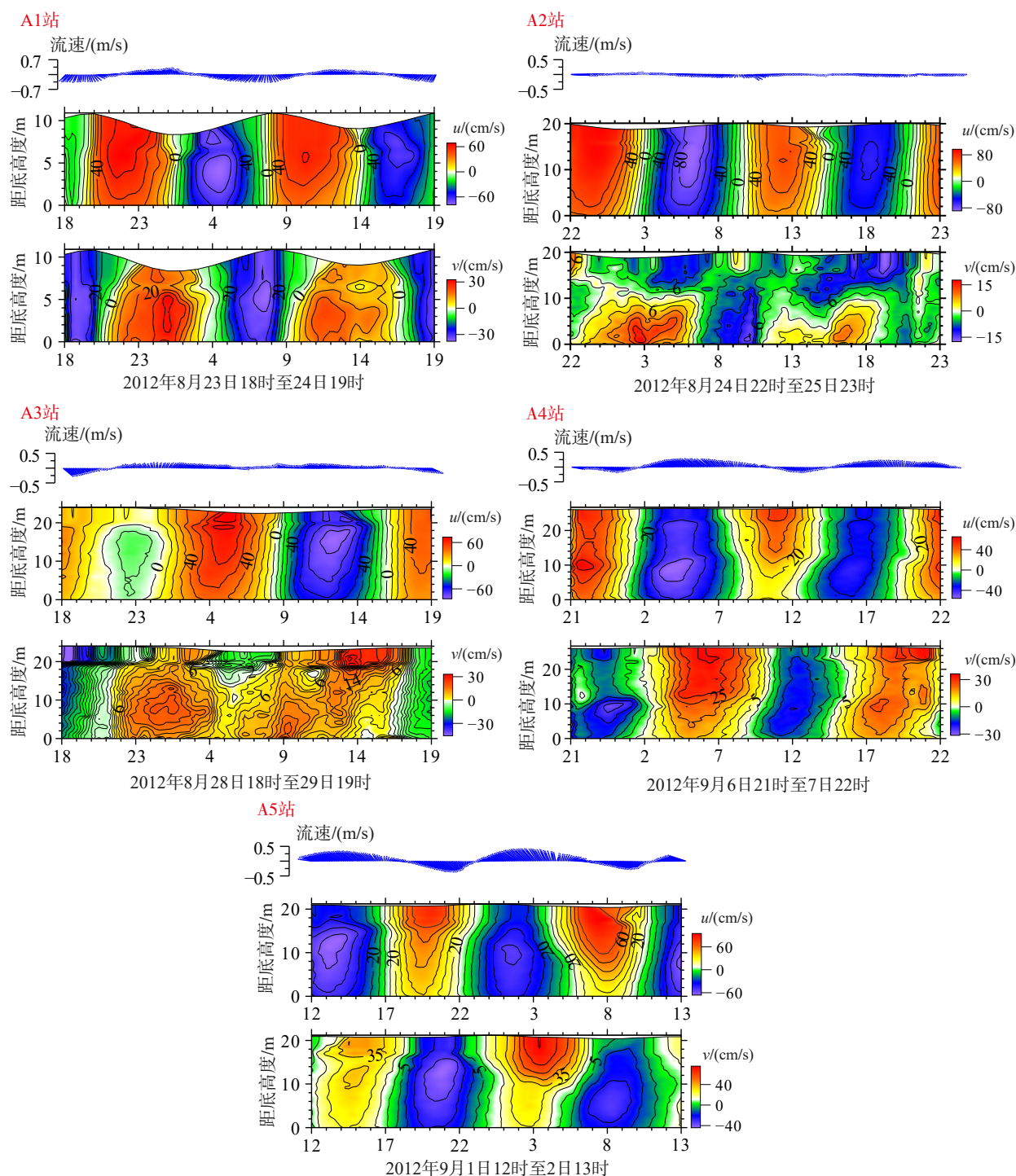


图 3 各站位 25 h 流速矢量图
潮汐和潮流类型出自文献^[29]。

Fig.3 Current vectors in 25 hours at each station
Tidal and current types are from reference^[29].

图 4 各站位垂向平均流速矢量与流速各分量 (u , v) 时空分布图Fig.4 Vertical mean current vectors and temporal and spatial distributions of current components (u , v) at each station

时占观测历时的主要部分。A1 站涨潮流为 SW 向, 落潮流为 NE 向; A2 站涨潮流为 W 向, 落潮流为 E 向; A3 站涨潮流和落潮流均有 N 向顺时针旋转为 E 向的现象; A4 站涨潮流为 SE 向顺时针旋转为 NW 向, 落潮流为 NW 向顺时针旋转为 SE 向; A5 站涨潮流和落潮流均有 NW 向顺时针旋转一周回到 NW 向的现象。

2.2 温盐交换过程

从各站位温盐垂向剖面结构可以看出(图 5), 受各站位涨落潮流影响, 水体的垂向温盐结构具有周期性分布的特点。整体来看(图 6), 水深最浅、最靠近岸边的 A1 站(水深 5~15 m)温度最高, 盐度最低, 水深 15~20 m 的 A2 站和 A5 站温度和盐度

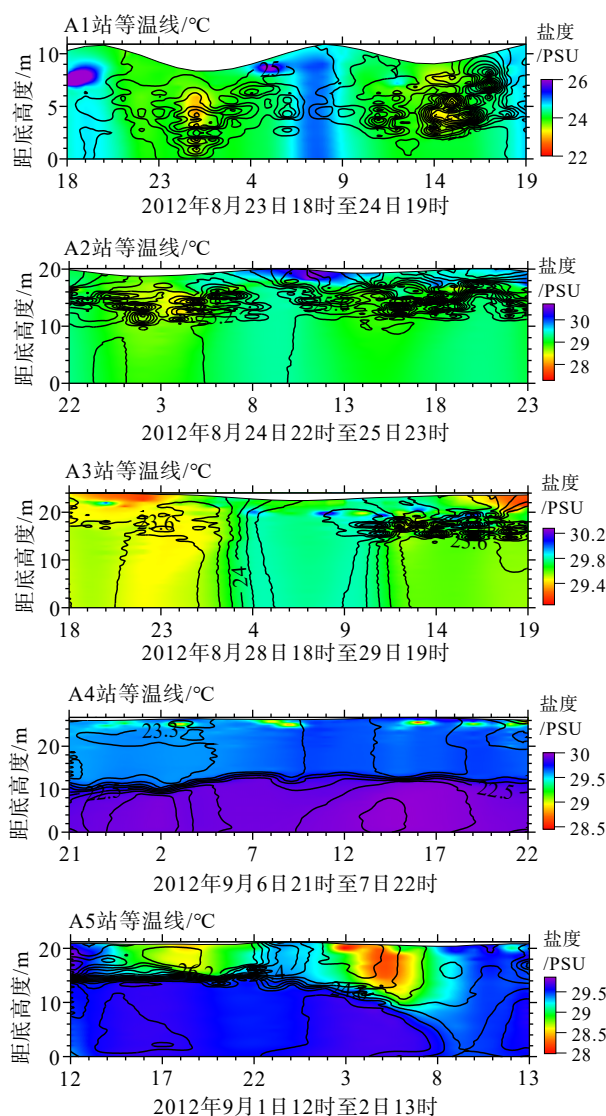


图 5 各站位温盐结构时空分布图

Fig.5 Spatial and temporal distribution of thermohaline structure at each station

都偏高,水深大于 20 m 的 A3 站和 A4 站温度偏低,盐度偏高。这说明渤海湾泥质区南部海域,15 m 等深线以浅海域受周边径流高温淡水影响较大,15~20 m 范围高温淡水与低温低盐水体交汇,盐度明显升高,20 m 以深海域主要受渤海中部低温高盐水体入侵影响,水体温度偏低。

A1 站 SW 向涨潮流从湾外带来低温高盐的水体,NE 向落潮流从湾外带走近岸的高温低盐的水体;湾口处 A2 站 W 向涨潮流从湾外带来低温高盐水体,E 向的落潮流从湾内带出高温低盐水体,主要在表层水深 10 m 范围内传输,10 m 以深水体为盐度较高、温度较低的水体;A3 站的温盐结构在涨潮和涨平阶段,在表层 10 m 范围内层化明显,出现高温低盐水体,10 m 以深水体垂向较均匀,在落潮和落平阶段,水体温盐垂向结构整体均匀,主要为温

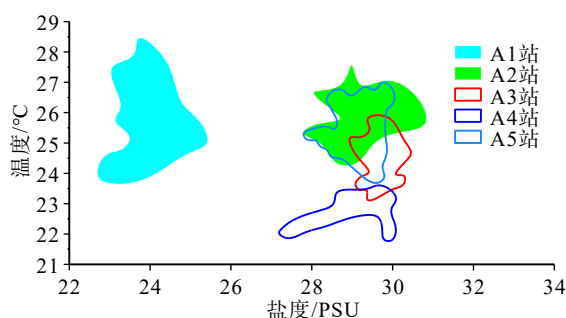


图 6 各站位温度和盐度范围比较

Fig.6 Comparison in the range of temperature and salinity at each station

度和盐度都相对较高的水体;A4 站和 A5 站的温盐结构较其他站位更稳定,温度自上而下逐渐降低,盐度自上而下逐渐升高,A4 站(站位水深约 25 m)在水深 15 m(自海面向下)处温盐梯度较大,A5 站(站位水深约 20 m)则是在水深 10 m 处温盐梯度较大,两站连线与黄河口附近岸线和等深线接近垂直,呈 NE 向展布,说明夏季黄河口高温低盐的淡水向 20 m 以深的渤海中部海域传输的方式,主要为表层传输的羽状流形式。

2.3 SSC 时空变化特征

从图 7 可以看出,渤海湾内(A1 站)和湾口(A2 站)处高浊度悬浮体多出现在涨急和落急时期,较高的流速对底质掀沙作用加强(图 8a),其中 A1 站涨平后到落急期间 SSC 明显降低,可见,在渤海湾南部湾内的近岸海域,大部分底质再悬浮的泥沙还是随着涨潮流向湾内汇聚,方向多为 SW 向。黄河口 SE 向的 A3、A4、A5 三站 SSC 分布的潮周期特点较湾内和湾口处不显著,且水体较湾内和湾口清澈,SSC 值偏低。A3 站 SSC 高值出现在 N 向和 E 向潮流时期,A4 和 A5 站 SSC 高值出现在 NW 向和 SE 向潮流时期。

整体来看(图 8a),夏季渤海湾南部海域高于 20 mg/L 的 SSC 值出现在 A2、A3 站表层 5 m 水深范围内,A3、A4、A5 站底层 5 m 水深范围内,A2 站底层 12 m 范围内,以及 A1 站的整个垂向水体范围内。靠近底层的 SSC 值均高于表层 SSC 值(图 8a),各站位靠近底层最高 SSC 值对比结果显示,湾内(A1 站)及湾口(A2 站)处最高,分别可达约 130 和 80 mg/L,黄河口 SE 向 20 m 及更深(A4、A5 站)处最小,均低于 40 mg/L。SSC 值高于 20 mg/L 的流速值基本位于 50~70 cm/s 区间(图 8b),各站位流速基本低于 100 cm/s,结合图 8a,可知该区域底层高浊度的悬浮细颗粒物质的输运流速在 50~100 cm/s 区

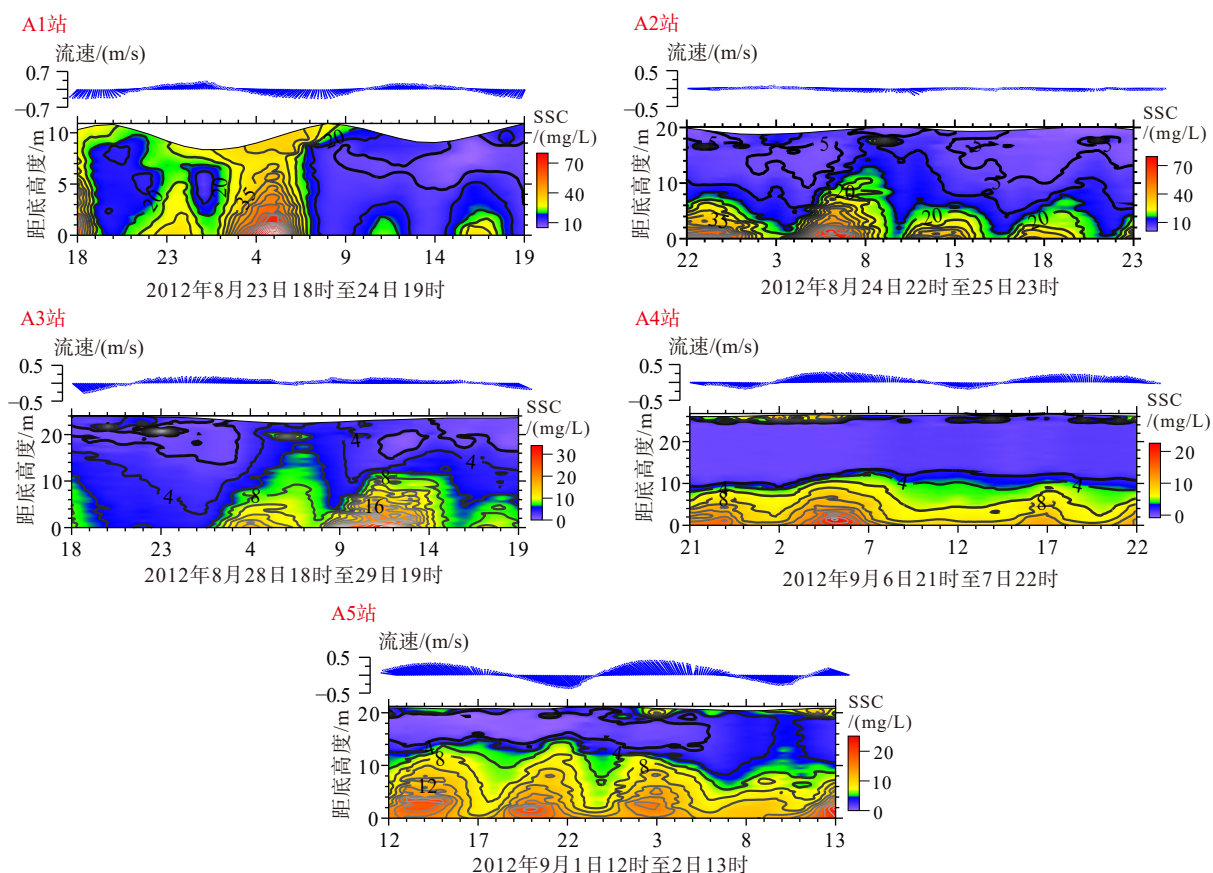


图 7 各站位悬浮体浓度的时空分布特征与垂向平均流速矢量对比

Fig.7 Comparison of spatial and temporal distribution characteristics of SSC at each station and vertical mean current vector

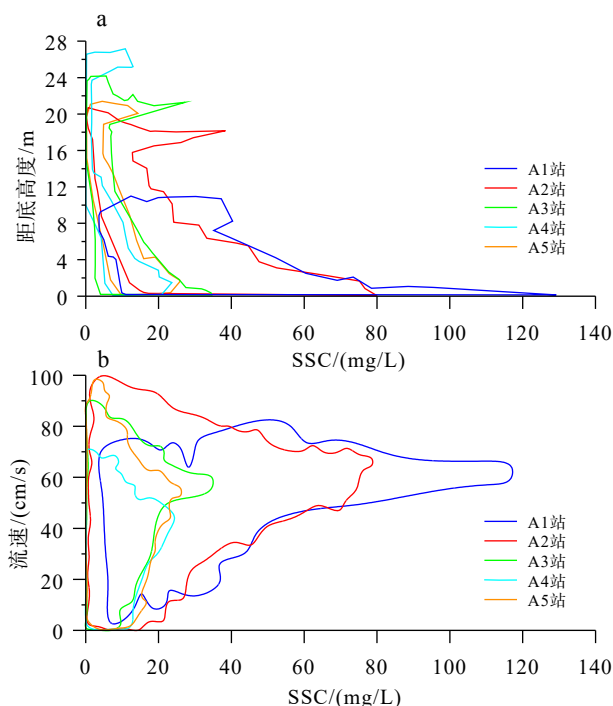


图 8 各站位悬浮体浓度与距底高度值 (a) 和流速值 (b) 的分布范围

Fig.8 Distribution range of SSC and height from bottom (a) and velocity (b) at each station

间, 且具备这种输运条件的高浊度悬浮体多出现在渤海湾南部湾内和湾口海域, 其向湾内汇沙的效应也符合中国东部陆架边缘海沉积物“夏储冬输”的季节性特征^[31]。

3 讨论

3.1 悬浮体输沙率的潮周期变化特征

采用相对水深对瞬时物质输移量进行分解^[32], 设 x 轴为纵向坐标, t 为时间, z 为相对水深 ($0 \leq z \leq 1$), 不计流速脉动项, 将瞬时流速 $u(x, z, t)$ 分解成垂向平均量项及其偏项之和:

$$u(x, z, t) = \bar{u} + u' \quad (2)$$

$\bar{u}$ 和 u' 均分解为潮平均量项和潮变化项之和:

$$\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t, u' = u'_0 + u'_t \quad (3)$$

瞬时流速即为:

$$u(x, z, t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t \quad (4)$$

水深可分解为:

$$h(x, t) = h_0 + h_t \quad (5)$$

单宽潮周期平均输水量为:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^1 u h d z d t = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle \quad (6)$$

其中, $\langle \rangle$ 表示潮平均, $\bar{u}_0 h_0$ 为平均流项, $\langle \bar{u}_t h_t \rangle$ 为潮汐与潮流相关项, 即斯托克斯漂移效应, T_t 为潮周期。式(6)可表示为:

$$\langle Q \rangle = h_0 (\bar{u}_E + \bar{u}_S) = h_0 \bar{u}_L \quad (7)$$

其中, $\bar{u}_E = \bar{u}_0$, $\bar{u}_S = \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0$

$$\bar{u}_L = \langle Q \rangle / h_0 = \bar{u}_E + \bar{u}_S \quad (8)$$

由式(8)计算出来的 $\bar{u}_L$ 即为一维垂向平均拉格朗日余流, 其中 $\bar{u}_E$ 、 $\bar{u}_S$ 分别为一维垂向平均欧拉余流和斯托克斯余流。

与余流的计算原理相似(式(2)—(5)), 悬浮泥沙浓度 SSC 的函数 $c(x, z, t)$ 可分解为:

$$c(x, z, t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c'_0 + c'_t \quad (9)$$

单宽输沙率 E 为:

$$\int_0^1 h u c d z = h \bar{u}_0 \bar{c}_0 + h \bar{u}_0 \bar{c}_t + h \bar{u}_t \bar{c}_0 + h \bar{u}_t \bar{c}_t + \overline{h u'_0 c'_0} + \overline{h u'_0 c'_t} + \overline{h u'_t c'_0} + \overline{h u'_t c'_t} \quad (10)$$

其中, $E_1 = h \bar{u}_0 \bar{c}_0$ 为平流引起的平均输沙量, $E_2 = h \bar{u}_0 \bar{c}_t$ 和 $E_3 = h \bar{u}_t \bar{c}_0$ 为潮周期平均输沙量与潮变化量的相关项, $E_4 = h \bar{u}_t \bar{c}_t$ 为潮汐振荡引起的输沙量, $E_5 = \overline{h u'_0 c'_0}$ 为时均量引起的扩散, $E_6 = \overline{h u'_0 c'_t}$ 和 $E_7 = \overline{h u'_t c'_0}$ 为时均量与潮变化量引起的剪切扩散, $E_8 = \overline{h u'_t c'_t}$ 为潮振荡引起的剪切扩散。

潮平均单宽瞬时输沙率 T 为:

$$T = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \int_0^h u c d z d t = h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_0 \rangle + \langle h_t \bar{c}_t \bar{u}_0 \rangle + \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \overline{u'_0 c'_0} + \langle h_t u'_0 c'_t \rangle + \langle h_t u'_t c'_0 \rangle + \langle h_t u'_t c'_t \rangle \quad (11)$$

其中, $T_1 = h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0$ 为平均流引起的输沙量; $T_2 = \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_0 \rangle$ 为潮汐与潮流的相关项, 即斯托克斯漂流输沙量; $T_1 + T_2$ 为拉格朗日输沙量; $T_3 = \langle h_t \bar{c}_t \bar{u}_0 \rangle$ 为潮汐与含沙量潮变化相关项; $T_4 = \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle$ 为 SSC 与潮流变化相关项; $T_5 = h_0 \overline{u'_0 c'_0}$ 为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; $T_6 = \langle h_t u'_0 c'_t \rangle$ 和 $T_7 = \langle h_t u'_t c'_0 \rangle$ 为时均量与潮汐振动切变引起的剪切扩散; $T_8 = \langle h_t u'_t c'_t \rangle$ 为垂向潮振荡切变作用项。

湾内 A1 站(图 9a)涨平期间的单宽输沙率为 $68 \sim 143 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为偏 S 向, 向岸输沙。落平

期间单宽输沙率为 $41 \sim 93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为偏 N 向, 向湾外输沙, 单宽输沙率明显小于涨平期间。落潮时期输沙以 E、SE 向为主, 涨潮时期输沙率方向以 W、SW 向为主, 大小相当。整体来看(图 10a), 渤海湾南部湾内海域以向近岸输沙为主, 潮平均单宽输沙率为 $7.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 280° (以 E 向为 0° 的逆时针旋转角度), 其中, $T_1 + T_2$ 所代表的拉格朗日输沙率为 $7.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 274° ; T_4 和 T_5 数量级相当, 分别为 0.6 和 $0.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为偏 E 向和偏 SE 向; 其他分量的数量级较小, T_3 、 T_6 数量级相当, T_7 和 T_8 数量级相当, T_3 、 T_6 、 T_7 方向偏 E 向和偏 SE 向, T_8 方向偏 N 向。

湾口 A2 站(图 9b)落平和落潮时期输沙方向偏 E 向, 以朝湾外输沙为主, 在涨平和涨潮期间输沙方向偏 W 向, 以向湾内输沙为主, 前者的单宽输沙率范围为 $24 \sim 281 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 后者的单宽输沙率范围为 $28 \sim 258 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 后者历时更长。整体上(图 10b), 湾口处海域拉格朗日输沙率($T_1 + T_2$)为 $12.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 329° ; 垂向净环流的贡献项 T_5 为 $5.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 149° , 方向与拉格朗日输沙率方向相反; 整体来看 A2 站潮平均输沙率为 $7.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 328° , 输沙以向湾外 SE 向输沙为主; 其他分量数量级较小, T_4 和 T_7 数量级相当, T_3 、 T_6 、 T_8 数量级最小, T_3 、 T_6 、 T_7 方向偏 SE 向, T_4 和 T_8 方向偏 NW 向。

A3 站(图 9c)落平时输沙以偏 E 向为主 ($18 \sim 46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 涨平时输沙以偏 SE 向为主 ($10 \sim 54 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 涨潮时输沙以偏 W 向为主 ($12 \sim 59 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 落潮时输沙以偏 N 向和偏 NE 向为主 ($5 \sim 44 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。整体来看(图 10c), A3 站潮平均单宽输沙率为 $4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 77° , 其中, 拉格朗日输沙率($T_1 + T_2$)为 $5.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 50° ; 垂向净环流的贡献项 T_5 为 $2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 166° ; T_3 、 T_4 数量级相当, T_6 、 T_7 、 T_8 数量级最小, T_4 、 T_7 方向偏 E 向, T_6 偏 SE 向, T_3 、 T_8 偏 SW 向。

A4 站(图 9d)涨潮时输沙偏 SE 向, 单宽输沙率为 $8 \sim 49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 涨平时输沙偏 NW 向, 单宽输沙率为 $19 \sim 52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 落潮时输沙偏 NW 向, 单宽输沙率为 $29 \sim 56 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 落平时输沙偏 N 向和偏 NE 向, 单宽输沙率为 $11 \sim 51 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。A4 站潮平均单宽输沙率为 $5.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 94° , 其中, 拉格朗日输沙率($T_1 + T_2$)为 $5.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 91° , 其他各分量数量级较小, T_3 和 T_7 方向相反, 数量级相当; T_4 数量级与 T_3 和 T_7 相当, 方向为偏 NW 向; T_5 数量级比 T_3 大, 方向为偏 W 向; T_6 数量级与

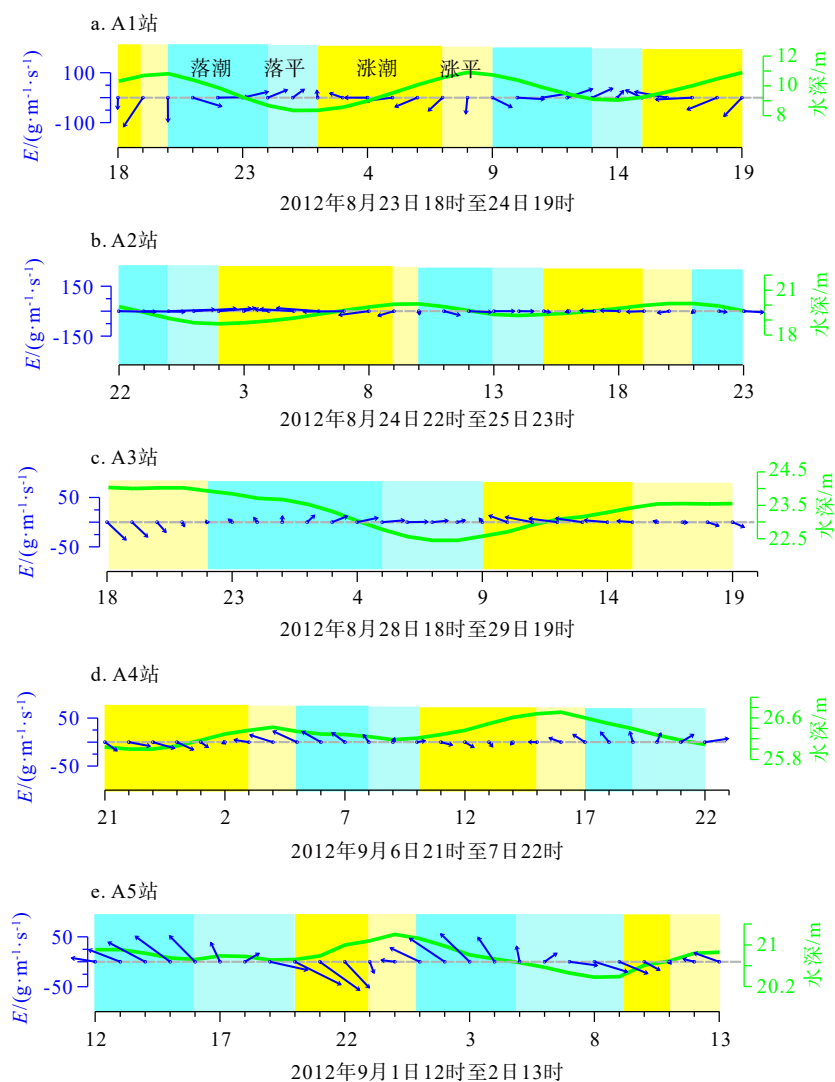


图9 各站位潮平均单宽输沙率的变化

Fig.9 Variation of tidal averaged suspended sediment flux per unit meter width at each station

T_3 相当, 方向为偏 NE 向; T_8 数量级比 T_3 小, 方向为偏 SE 向。

A5 站 (图 9e) 落潮时输沙偏 NW 向, 单宽输沙率为 $50 \sim 88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 落平时单宽输沙率为 $32 \sim 78 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向自偏 NW 向顺时针旋转至偏 SE 向; 涨潮时输沙偏 SE 向, 单宽输沙率为 $37 \sim 105 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 涨平时单宽输沙率为 $7 \sim 55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 输沙偏 NW 向。A5 站潮平均单宽输沙率为 $7.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向为 102° , 其中, 拉格朗日输沙率 ($T_1 + T_2$) 为 $8.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向 86° ; 垂向净环流的贡献项 T_5 为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向 208° ; 其他各分量数量级较小, 其中 T_4 数量级最大, 方向偏 E 向, T_3 、 T_6 、 T_7 、 T_8 数量级相当, T_3 、 T_7 方向偏 NE 向, T_6 、 T_8 方向偏 SW 向。

整体来看, 渤海湾南部各站位潮平均单宽输沙率以拉格朗日输沙贡献最显著, 在湾口泥质区南部

和东南部水深 $15 \sim 25 \text{ m}$ 的海域, 垂向净环流的影响较大, 有抵消一部分拉格朗日输沙率的作用, 且对潮平均单宽输沙率的影响比湾内和 25 m 以深海域的大, 其中对 A2 站的拉格朗日输沙率的抵消作用最大, 这跟 A2 站垂向净环流输沙率较大, 且方向与拉格朗日输沙率相反有关。其他分量数量级较小, 对潮平均单宽输沙率贡献较小。由于本次观测站位非同步连续观测, 时间跨度较大, 部分站位观测的是小潮时期的输沙率 (A1、A2、A3 站), 另一部分站位观测的是大潮时期的输沙率 (A4、A5 站), 因此对各站位之间输沙率的比较还需要未来进一步开展同步观测调查。

3.2 水体层化混合过程与输沙率之间的相关性

水体的垂向混合状态可以用 Richardson 数来体现^[6, 33-34], 其计算公式如下:

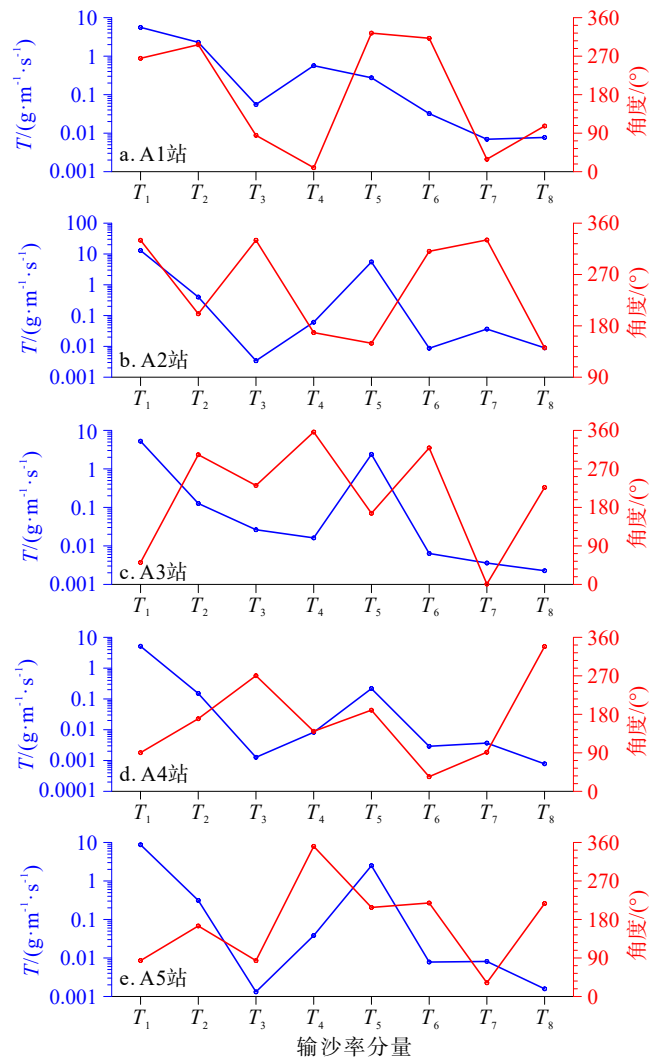


图 10 各站位潮平均输沙率的各分量值与输沙角度

Fig.10 Values of each component of tidal-averaged sediment transport rate and transport angles at each station

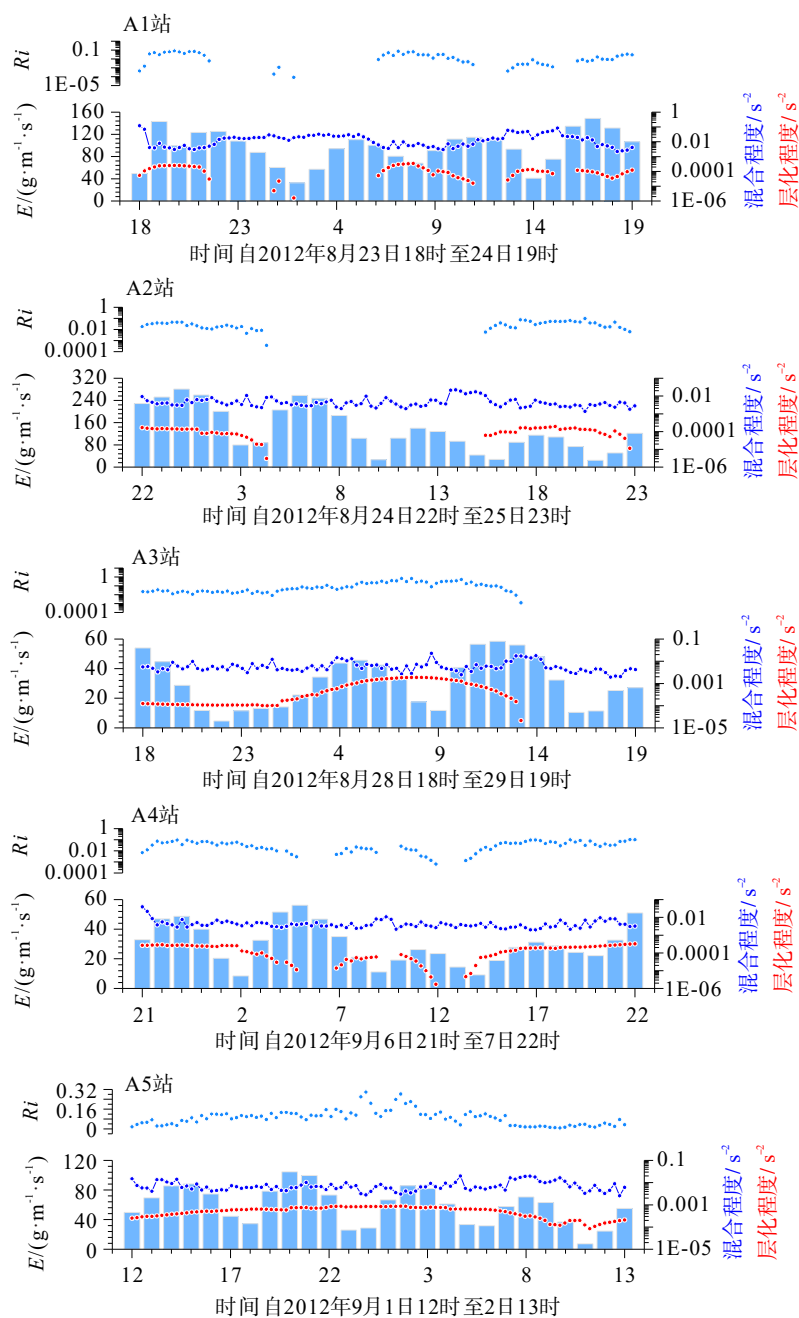
$$Ri = \frac{-\left(\frac{g}{\rho}\right)\left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (12)$$

其中,分子表示水体密度梯度导致的层化强度,分母表示水体剪切力所导致的湍动混合程度, $Ri > 0.25$,代表水体以层化为主, $Ri < 0.25$,代表水体以混合为主。结果如图 11 所示,结合图 5 的温盐结构来看,A1、A2、A3、A4 站受近岸高温低盐水体影响,这 4 个站位的密度结构不稳定,层化强度和 Ri 值多数时刻为负,相应时刻对应的混合程度较高。 Ri 值整体以小于 0.25 为主,说明渤海湾南部海域水体以混合为主,单宽输沙率降低的时刻,与水体层化程度和 Ri 值增加的时刻相吻合,如 A1 站的 0 时、14 时、20 时,A2 站的 5 时、18 时、23 时,A3 站的 4 时、14 时,A4 站的 5 时、17 时、23 时,A5 站的 6 时、11 时、12 时、17 时、18 时、22 时,可见水

体的层化程度加强对各站位悬浮体输运均有一定的抑制作用,这与黄河口、加利福尼亚北部的大陆架和福宁湾海域前人研究结论相符^[6,35-36]。

4 结论

(1)受周边径流高温淡水影响,夏季渤海湾南部及黄河三角洲北部 15 m 以浅海域水体温度较高,盐度较低;15~20 m 范围内高温淡水与低温盐水交汇,水体盐度明显升高;20 m 以深海域主要受渤海中部低温高盐水舌入侵影响,水体温度偏低。高温淡水以羽状流的方式自近岸向渤海中部传输。渤海湾内和湾口处高浊度悬浮体多出现在涨急和落急时期,较高的流速对底质的再悬浮作用加强,距底 5 m 水深范围内 SSC 值较高,其中湾内和湾口的底层 SSC 值最高,黄河口外 NE 向剖面 20 m 以深海域 SSC 值最小。

图 11 各站位水体 Ri 、层化程度、混合程度与 E 的变化Fig.11 Variation of Ri , stratification stability, turbulent intensity, and E at each station

(2) 渤海湾泥质区南部海域夏季单宽输沙率具有潮周期性特点。湾内海域涨潮和涨平期以向湾内近岸输沙为主, 落潮和落平期以向湾外输沙为主, 整体以向湾内近岸输沙为主, 潮平均单宽输沙率为 $7.8 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 方向为 280° 。湾口 A2 站涨落潮流输沙方向相反, 整体以 SE 向朝湾外近岸输沙为主, 潮平均单宽输沙率为 $7.2 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 方向为 328° 。湾外 A3 站涨潮和涨平时期输沙方向基本相反, 大小相当, 落潮和落平时期输沙方向以偏 E 和偏 NE 向为主, 潮平均单宽输沙率为 $4.7 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 方向为 77° 。黄河口 SE 向的 2 个站位涨潮时输沙偏 SE 向,

涨平时输沙偏 NW 向, 落潮时输沙偏 NW 向, 落平时输沙偏 N 向和偏 NE 向, 两站潮平均单宽输沙率方向以偏 N 向为主, A4 站潮平均单宽输沙率为 $5.2 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 方向为 94° , A5 站潮平均单宽输沙率为 $7.7 g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$, 方向为 102° 。

(3) 渤海湾泥质区南部各站位夏季潮平均单宽输沙率以拉格朗日输沙贡献最显著, 在湾口泥质区南部和东南部水深 $15 \sim 25 m$ 海域, 垂向净环流的影响较大, 有抵消一部分拉格朗日输沙率的作用, 且对潮平均单宽输沙率的影响比湾内和 $25 m$ 以深海域的大, 其他分量数量级较小, 对潮平均单宽输沙

率贡献较小。

(4) 渤海湾泥质区南部海域夏季水体以混合为主,各站位水体层化程度加强对各站位悬浮体输运均有一定的抑制作用。

参考文献 (References)

- [1] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985 [Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. The Bohai Sea Geological[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] 秦蕴珊, 廖先贵. 渤海湾海底沉积作用的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1962, 4(3-4): 199-207. [QIN Yunshan, LIAO Xiangui. A preliminary study on seabed sedimentation in Bohai Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1962, 4(3-4): 199-207.]
- [3] Wang Y, Li R H, Wen Z H, et al. The summer spring-neap variation of the water thermohaline-turbidity structure and its dynamical mechanism in the southern Bohai Strait [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 52-59.
- [4] 庞家珍, 司书亭. 黄河河口演变I. 近代历史变迁[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(2): 136-141. [PANG Jiazhen, SI Shuting. The estuary changes of Huanghe River I. Changes in modern time [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1979, 10(2): 136-141.]
- [5] 杨作升, 戴慧敏, 王开荣. 1950-2000年黄河入海水沙的逐日变化及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(2): 237-244. [YANG Zuosheng, DAI Huimin, WANG Kairong. Daily variations of water discharge and sediment discharge into the sea from Yellow River from 1950 to 2000 and relevant influential factors that generate these changes [J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(2): 237-244.]
- [6] Wang H J, Bi N S, Wang Y, et al. Tide-modulated hyperpycnal flows off the Huanghe (Yellow River) mouth, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(11): 1315-1329.
- [7] Wang H J, Bi N S, Saito Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3-4): 302-313.
- [8] 庞家珍, 司书亭. 黄河河口演变II. 河口水文特征及泥沙淤积分布[J]. 海洋与湖沼, 1980, 11(4): 295-305. [PANG Jiazhen, SI Shuting. Fluvial process of the Huanghe River estuary II. Hydrographical character and the region of sediment silting [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1980, 11(4): 295-305.]
- [9] 杨作升, 孙宝喜, 沈渭铨. 黄河口毗邻海域细粒级沉积物特征及沉积物入海后的运移[J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(2): 121-129. [YANG Zuosheng, SUN Baoxi, SHEN Wei-quan. Characteristics of fine-grained sediment of the shelf area adjacent to the mouth of the Huanghe River and sediment dispersion in that region [J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(2): 121-129.]
- [10] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3-4): 212-225.
- [11] 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.
- [12] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3-4): 331-354.
- [13] Ren M E, Shi Y L. Sediment discharge of the Yellow River (China) and its effect on the sedimentation of the Bohai and the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1986, 6(6): 785-810.
- [14] Jiang W S, Pohlmann T, Stündermann J, et al. A modelling study of SPM transport in the Bohai Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 24(3-4): 175-200.
- [15] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- [16] 李建伟. 渤海湾西南部海域海底沉积物分布特征研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2011 [LI Jianwei. Research on distribution characteristics of bed sediments in Southwest of Bohai Bay[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2011.]
- [17] 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.]
- [18] 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.]
- [19] Wang Y, Wang H J, Bi N S, et al. Numerical modeling of hyperpycnal flows in an idealized river mouth [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 228-238.
- [20] Shi W, Wang M H, Jiang L D. Spring-neap tidal effects on satellite ocean color observations in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C12): C12032.
- [21] Kirk J T O. Effects of suspensions (turbidity) on penetration of solar radiation in aquatic ecosystems [J]. *Hydrobiologia*, 1985, 125(1): 195-208.
- [22] Liu C G, Wang J L, Feng J F, et al. Effects of suspended particles on the growth of two dominant phytoplankton species of Bohai Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74(1): 220-224.
- [23] Song G D, Liu S M. Phosphorus speciation and distribution in surface sediments of the Yellow Sea and East China Sea and potential impacts on ecosystem [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(4): 84-91.
- [24] Duan L Q, Song J M, Xu Y Y, et al. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai

- Bay, North China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183 (1-3): 155-164.
- [25] 冯剑丰, 王秀明, 孟伟庆, 等. 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征[J]. *生态学报*, 2011, 31 (20): 5875-5885. [FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al. Variation characteristics of macrobenthic communities structure in Tianjin coastal region in summer [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (20): 5875-5885.]
- [26] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾岸线变化(2003-2011年)对近岸海域水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, 32 (9): 2149-2159. [QIN Yanwen, ZHANG Lei, ZHENG Binghui, et al. Impact of shoreline changes on the costal water quality of Bohai Bay(2003-2011) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (9): 2149-2159.]
- [27] 蔡文倩, 刘录三, 乔飞, 等. 渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨[J]. *环境科学*, 2012, 33 (9): 3104-3109. [CAI Wenqian, LIU Lusan, QIAO Fei, et al. Study on the changes of macrobenthos communities and their causes in Bohai Bay [J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (9): 3104-3109.]
- [28] 李广雪, 杨子赓, 刘勇. 中国东部海域海底沉积物成因环境图[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [LI Guangxue, YANG Zigeng, LIU Yong. Formation Environment of the Seafloor Sediment in the East China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2005.]
- [29] 李秉天. 渤海地形演变对潮波系统影响的数值研究[D]. 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文, 2014 [LI Bingtian. Numerical study on impact of Bohai Sea topography changes on the tidal wave system[D]. Master Dissertation of First Institute of Oceanography, MNR, 2014.]
- [30] 江文胜, 汪景庸, 赵建中, 等. 渤海湾环流的一次观测和分析[J]. *青岛海洋大学学报*, 1997, 27 (1): 25-34. [JIANG Wensheng, WANG Jingyong, ZHAO Jianzhong, et al. An observation of current in Bohai gulf and its analysis [J]. *Journal of Ocean University of China*, 1997, 27 (1): 25-34.]
- [31] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14 (2): 81-90. [YANG Zuosheng, GUO Zhigang, WANG Zhaoxiang, et al. Macroscopic pattern of suspension transport from the Yellow Sea and East China Sea to the eastern deep sea area [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14 (2): 81-90.]
- [32] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 辐射沙洲东大港潮流水道悬沙输移机制分析[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2006, 34 (2): 216-222. [WU Dean, ZHANG Renshun, YAN Yixin, et al. Mechanism of suspended sediment transport in Dongdagang tidal channel of radial sand ridges [J]. *Journal of Hohai University:Natural Sciences*, 2006, 34 (2): 216-222.]
- [33] Zhang D L, Anthes R A. A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21 (11): 1594-1609.
- [34] Kundu P K, Beardsley R C. Evidence of a critical Richardson number in moored measurements during the upwelling season off northern California [J]. *Journal of Geophysical Research:Ocean*, 1991, 96 (C3): 4855-4868.
- [35] Wright L D, Friedrichs C T, Scully M E. Pulsational gravity-driven sediment transport on two energetic shelves [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22 (17): 2443-2460.
- [36] 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.]