

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020032201

山东半岛东北部海域悬浮体季节分布及控制因素

朱颖涛¹, 冯秀丽^{1,2}, 朱龙海^{1,2}, 胡日军^{1,2}, 姜胜辉^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 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 2018 年山东半岛东北部海域冬、夏两季悬浮体浓度、浊度及水温和盐度调查资料, 分析了研究区水体悬浮体浓度的季节性变化, 探讨了其控制因素。结果表明: 夏季浊度在 0.2~37.8FTU 之间变化, 冬季浊度在 1.5~100.1FTU 之间变化, 均表现为底高表低、东高西低的特征。夏季水温分层明显, 表现为表层高、底层低的特征, 盐度整体无明显变化; 冬季温盐垂向上混合均匀, 平面上表现为近岸低温低盐水体向远岸高温高盐水体的过渡。悬浮体浓度分布受潮流、波浪、温跃层和温盐锋面等因素影响。夏季, 悬浮体垂向上受到温跃层影响, 底层悬浮体难以向表层输运; 平面上潮混合和波浪差异性作用阻碍了悬浮体的水平输运。冬季, 强风浪促使悬浮体垂向混合剧烈, 表层悬浮体浓度明显较夏季变高; 平面上沿岸流和黄海暖流形成的温、盐锋面阻碍了水团间悬浮体的输运。

关键词: 悬浮体浓度; 温跃层; 锋面; 山东半岛

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Seasonal distribution of suspended sediments in the water northeast to Shandong Peninsula and its controlling factors

ZHU Yingtao¹, FENG Xiuli^{1,2}, ZHU Longhai^{1,2}, HU Rijun^{1,2}, JIANG Shenghui^{1,2}

1. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. The Key Lab of Submarine Geoscience and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Based on the characteristics of suspended matter, such as sediment content, turbidity, temperature and salinity, acquired in the summer and winter of 2018 in the water northeast to the Shandong Peninsula, we studied the seasonal variation of suspended sediment and it's controlling factors. The results show that the turbidity varies from 0.2 to 37.8 FTU in summer, 1.5 to 100.1 FTU in winter, of which both are high on the bottom and low on the surface and high in the east and low in the west. Concerning water temperature, it is obviously stratified in summer, high on the surface and low on the bottom. However, there is no obvious changes as far as salinity is considered. In the winter time, both the temperature and salinity show a transition from the low temperature and low salinity water mass near the shore to the high temperature and high salinity water mass off the coast on plane, and evenly mixed in vertical direction. The distribution of suspended sediment content is controlled by various factors, such as tide, wave, thermocline, temperature and salinity fronts. In summer, affected by the thermocline vertically, the suspended sediments in bottom water are difficult to move into the upper layer, while tidal mixing and wave differentiation will accelerate the exchange of suspended sediment between the near shore and the far shore areas. However, the content of surface suspended matter is significantly higher in winter, because of the intensification of vertical mixing by strong wind and waves. The temperature and salinity front, formed by the coastal current and the Yellow Sea warm current, will block the exchanges of suspended sediments between water masses.

Key words: suspended sediment content; thermocline; fronts; Shandong Peninsula

水体中悬浮体是入海河流向海洋输送污染物和营养物质的主要载体之一, 其不仅反映了海洋沉积动力特征, 同时也记录了源区、输运路径的地球化学元素和矿物等信息。悬浮体在水体中的浓度大小、分布特征及输运规律对海洋生态环境和资源

的分布有重要影响。中国入海河流悬浮体向渤海黄海输运会影响中国海洋物质通量, 对全球海洋物质循环的研究具有重要意义^[1-3]。由于陆源物质供给和海洋水动力的季节变化, 陆架浅海悬浮体浓度和分布也呈季节性变化^[4-6]。受东亚季风影响, 渤、

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: 朱颖涛(1991—), 男, 博士研究生, 海洋地质专业, E-mail: 402481807@qq.com

通讯作者: 朱龙海(1979—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: zhulonghai@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-03-22; 改回日期: 2020-06-04。 文凤英编辑

黄海水动力整体呈现冬强、夏弱的特征, 陆源河流携带的大量物质在夏季沉积后, 在冬季又发生再悬浮继续输运^[7]。悬浮体浓度分布能较好地反映物源供给、水动力及季风的周期性变化特征。山东半岛近岸泥质区呈“Ω”型或反 C 型的独特分布特征, 其物质主要来源于沿岸流携带的黄河入海沉积物, 平均沉积速率约 3.7 mm/ka^[8-13], 泥沙沉积后受潮流、波浪以及水团的多重影响发生再悬浮和搬运过程。前人通过海洋观测、遥感反演和数值模拟等方法, 对山东半岛附近海域的悬浮体运输和沉积过程开展了研究, 并取得了一系列成果。Wang 等^[14]通过高分辨率海洋-大气-波浪-沉积耦合 COAWST 模式系统的数值模拟, 认为锋面和跃层对山东半岛近岸海域的悬浮体运输和沉积产生了明显影响, 并且控制了泥质体沉积中心的发育。王勇智等^[15]通过对山东半岛东部冬季潮流和悬浮体浓度观测, 认为每年冬季约有 $(8.09 \sim 22.91) \times 10^4$ t 的悬浮体经山东半岛东部近岸海域向南输运。学者普遍认为山东半岛附近海域悬浮体主要来自于沉积物的再悬浮, 但是对波浪和潮流在沉积物再悬浮过程中的作用存在争议。赵一阳等^[16]认为冬季风浪是底层沉积物再悬浮的主要动力, 而边昌伟^[17]及 Zeng 等^[18]则认为强风浪能显著增强海底沉积物的再悬浮, 但波高 < 1 m 的风浪, 对底质沉积物的再悬浮作用较小, 主要影响水体的垂向混合, 潮流是沉积物再悬浮的主控因素。

前人对山东半岛附近海域的悬浮体运输取得了丰硕的研究成果, 但是研究多集中于大海域范围, 缺少近岸大比例尺、高精度的实测资料。本文选择山东半岛近岸泥质区分布的典型区域——东北部近岸海域作为研究区(如图 1、图 2 所示), 其位于北黄海与南黄海的交界区域, 不仅是内外海之间重要的物质输运通道, 而且是多源物质的汇聚区^[19-22]。通过开展大比例尺、高精度的不同季节水文泥沙调查, 分析山东半岛近岸海域悬浮体的水平和垂向季节分布特征, 探讨悬浮体浓度分布和季节变化的控制因素, 研究成果对于完善山东半岛泥质区沉积物输运机制具有重要意义。

1 区域概况

研究区位于山东半岛东北部近岸海域、北黄海南部。该区属于温带季风性气候, 冬季以强度大的北风和西北风最为盛行, 平均风速较高, 约为 6~7 m/s, 夏季以南风和东南风为优势风向, 风速较小,

平均约为 5~6 m/s。研究区最大水深 42 m, 平均水深约 25 m, 以正规半日潮占主导, M₂ 分潮为黄海潮波的主要分潮^[23]。潮流流速约为 20~60 cm/s, 自成山头向西北方向 M₂ 分潮流速逐渐减小^[24]。研究区受季节性环流影响明显, 冬季鲁北沿岸流和黄海暖流作用较大^[25-26]; 夏季北黄海冷水团主要影响水深 50 m 以上海域^[27-28], 与研究区距离也较近(如图 1 所示)。受到季风和地形影响, 波浪表现出显著的季节性变化, 冬季波高较大, 平均波高为 0.9~1.9 m; 夏季波高较小, 平均波高为 0.5~1.0 m^[23]。研究区沉积物类型以砂质粉砂和粉砂为主^[10]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

中国海洋大学于 2018 年夏季(8 月 1—5 日)和冬季(12 月 22—25 日)在山东半岛东北部海域开展了 7 条断面、87 个站位大面站水文泥沙现场调查, 取样站位如图 2 所示。调查内容包括水体温度、盐度、悬浮体浓度和浊度。

2.2 调查与处理方法

水体温度(℃)、盐度(PSU)、水深(m)采用美国 TRDI 公司 CTD-NV 型温盐深仪进行测量, 采样频率 5 Hz, 温度和盐度测量精度为 ±0.005 ℃ 和 ±0.005 PSU; 水体浊度(FTU)采用英国 Aquatec 公司生产的 Aqualogger 310TY 型浊度仪进行现场测量, 采样频率 1 Hz, 量程 0~200 FTU, 测量精度为 ±0.01 FTU。仪器从水面下海底匀速释放, 释放速度约 0.5 m/s。同时, 各站位采集表层(距海面约 1 m)、中层(0.5H, H 为水深)和底层(距海底约 1 m)水样, 体积约 1000 mL, 用于悬浮体质量浓度的测定。水体悬浮体浓度通过室内抽滤实验测定^[29]。温度、盐度和浊度平面和垂向分布图采用 surfer11.0 软件绘制, 运用克里金差值方法, 平面分布图差值步长约 330 m, 垂向分布图差值步长约 370 m。

2.3 悬浮体浓度与浊度的关系

研究区每个站位只进行了表、中、底 3 层水体取样, 无法详细呈现悬浮体浓度的垂向变化特征。由于浊度采用仪器测量, 采样精度高, 为更清晰地呈现悬浮体浓度垂向分布特征, 本文采用水体浊度(单位: FTU)替代悬浮体浓度(单位: mg/L)进行分析^[30-32]。通过冬季各站位表、中、底 3 层水体悬浮

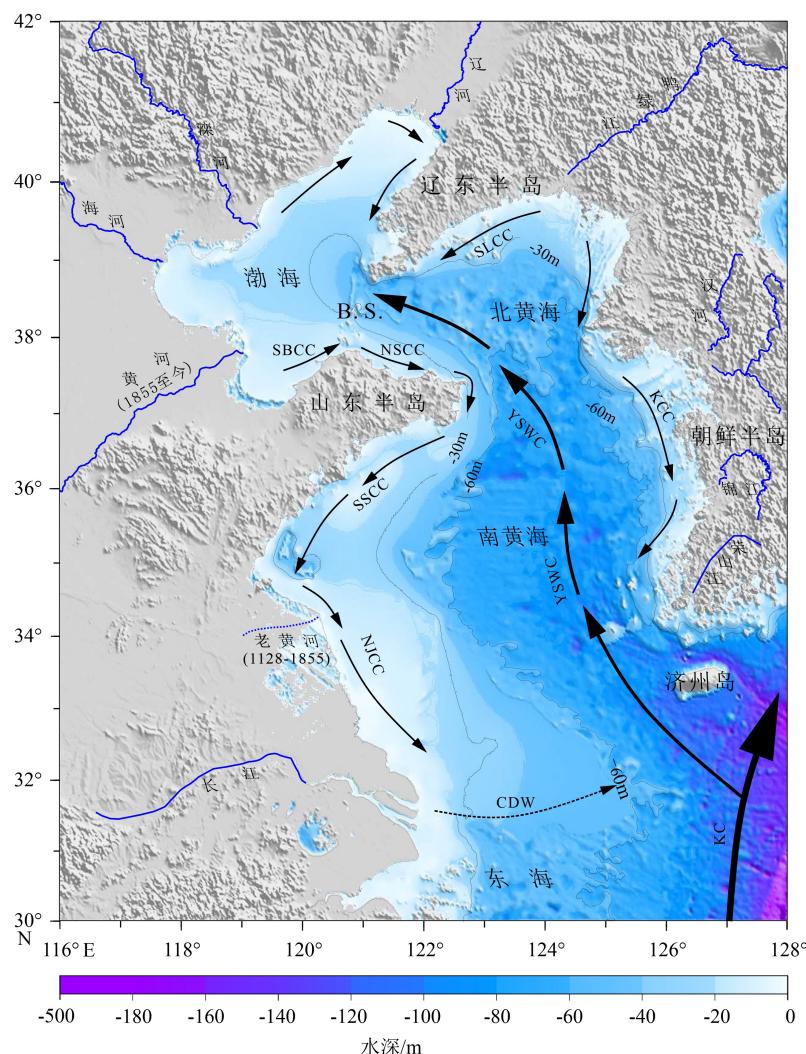


图 1 黄海冬季环流及夏季冷水团分布图^[23]

B.S.: 渤海海峡, SLCC: 辽南沿岸流, SBCC: 渤南沿岸流, NSCC: 鲁北沿岸流, SSCC 山东半岛南部沿岸流, KCC: 朝鲜半岛沿岸流,

NJCC: 苏北沿岸流, YSWC: 黄海暖流, CDW: 长江冲淡水, KC: 黑潮, YSCW: 黄海冷水团(10 °C 等温线包围的水体)。

Fig.1 Winter circulation and cold water mass in summer in Yellow Sea^[23]

B.S.: Bohai Strait, SLCC: South Liaoning coastal current, SBCC: South Bohai coastal current, NSCC: North Shandong Peninsula coastal current, SSCC: South Shandong Peninsula coastal current, KCC: Korean Peninsula coastal current, NJCC: North Jiangsu coastal current, YSWC: Yellow Sea warm current, CDW: Changjiang River diluted water, KC: Kuroshio Current, YSCW: Yellow Sea Cold Water (Water surrounded by isotherms at 10 °C).

体浓度实验结果和相应的浊度测量结果相关性分析表明,研究区水体悬浮体浓度与浊度的相关性非常好($R^2=0.92$)(图3),说明水体浊度是悬浮体浓度(SSC)的良好替代性指标。

3 结果

3.1 研究区水温和盐度分布特征

3.1.1 夏季水温和盐度分布特征

(1) 水温和盐度分布特征

夏季,研究区各层水温平面分布显示,表层水

温普遍较高,温度为 20.4~28.8 °C,呈近岸低、远岸高的特征;中层(0.5H)水温为 15.0~21.7 °C;底层水温为 14.2~21.0 °C,呈近岸高、远岸低的特征(图4)。在近岸浅水区域不同层位水温变化较小,远岸深水区域分布不同层位水温差异较明显;随着水深增大,中、底层水温差异减小。水温垂向分布显示(图5),夏季水体层化现象显著,但近岸浅水区域水体层化呈上下波动的特征。底层冷水向岸呈楔形分布,且其楔入程度受水深地形影响,近岸海域水深越大,受冷水影响越大(图5 Trend 01, Trend 02),水深相近海域冷水楔进程度相近(图5 Trend 05, Trend 06)。

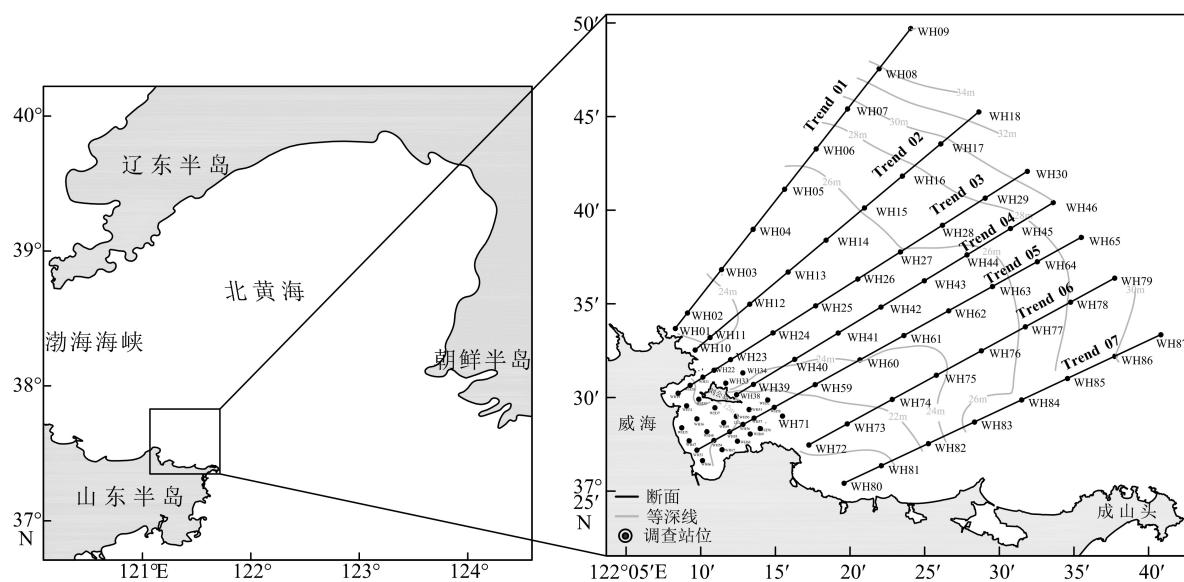


图 2 研究区位置及取样站位图
Fig.2 Location of the study area and sampling sites

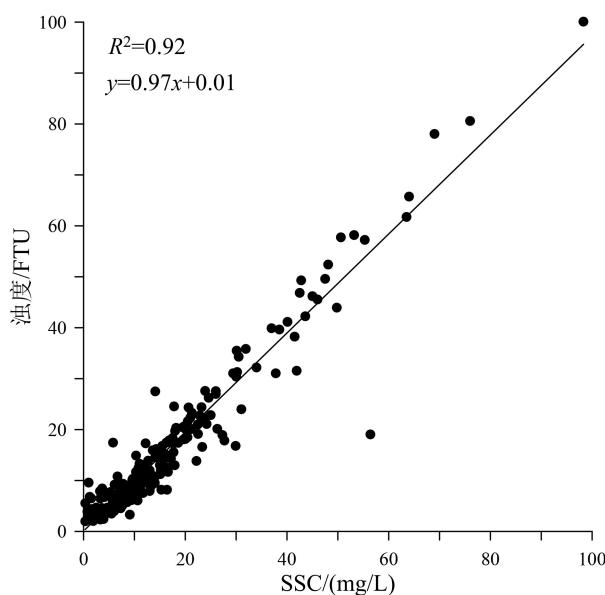


图 3 悬浮体浓度与浊度相关性图
Fig.3 Correlation between suspended sediment content and water turbidity

夏季, 研究区各层水体盐度平面分布显示, 表、中、底三层水体盐度分别为 31.71~32.28PSU、

31.70~32.25PSU、31.85~32.31PSU(表 1)。各层盐度平面分布总体趋势一致, 均呈东南高、西北低的特征(图 4)。水体盐度垂向上变化较小, 从底到表有先增大后减小的变化特征(图 5)。

(2) 温跃层特征

根据垂直梯度法, 浅水海域(水深<200 m), 温跃层的温度梯度最低标准值为 0.2 °C/m^[33]。本文将垂直梯度值大于或等于上述最低指标值的水层划定为温度跃层, 其上下端点所在深度作为跃层上界深度和下界深度。分析结果表明, 研究区夏季水体存在明显的温跃层。温跃层的上界在 0~1 m 水深范围, 下界深度在 2.4~22.2 m 水深范围, 下界深度明显受水深地形影响, 在研究区北部深水区, 温跃层下界可达 20 m 水深处; 在近岸浅水区域, 温跃层仅在 5 m 以浅范围内。在水深相近的研究区中部海域, 温跃层的下界深度也存在明显差异, 研究区东部的温跃层下界深度(8~10 m)要明显浅于西部区域(约 14 m)(图 6)。

3.1.2 冬季水温和盐度分布特征

冬季, 研究区水温和盐度平面分布显示, 各层

表 1 夏季温度、盐度
Table 1 Water temperature and salinity in summer

层位	表层		中层		底层	
	温度/°C	盐度/PSU	温度/°C	盐度/PSU	温度/°C	盐度/PSU
最大值	28.8	32.28	21.7	32.25	21.0	32.31
最小值	20.4	31.71	15.0	31.70	14.2	31.85
平均值	25.4	32.00	18.6	31.98	17.4	31.99

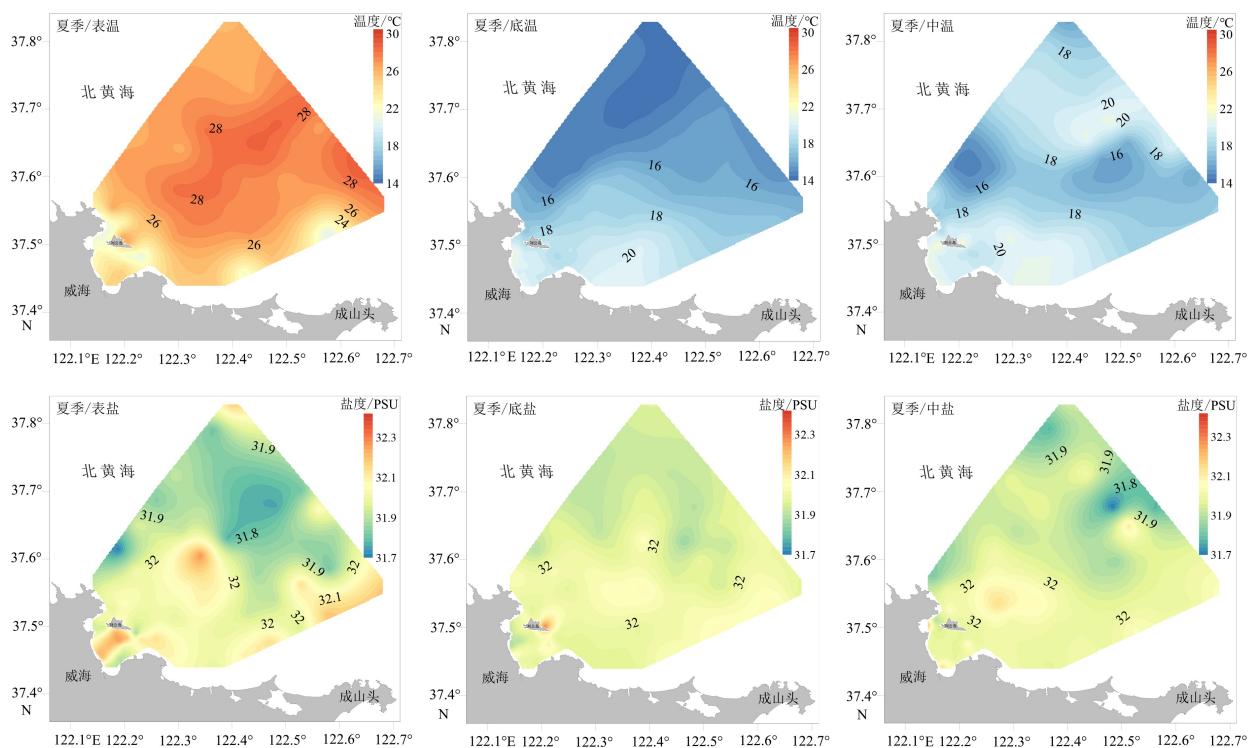


图 4 夏季水温、盐度平面分布图

Fig.4 Plane distribution of water temperature and salinity in summer

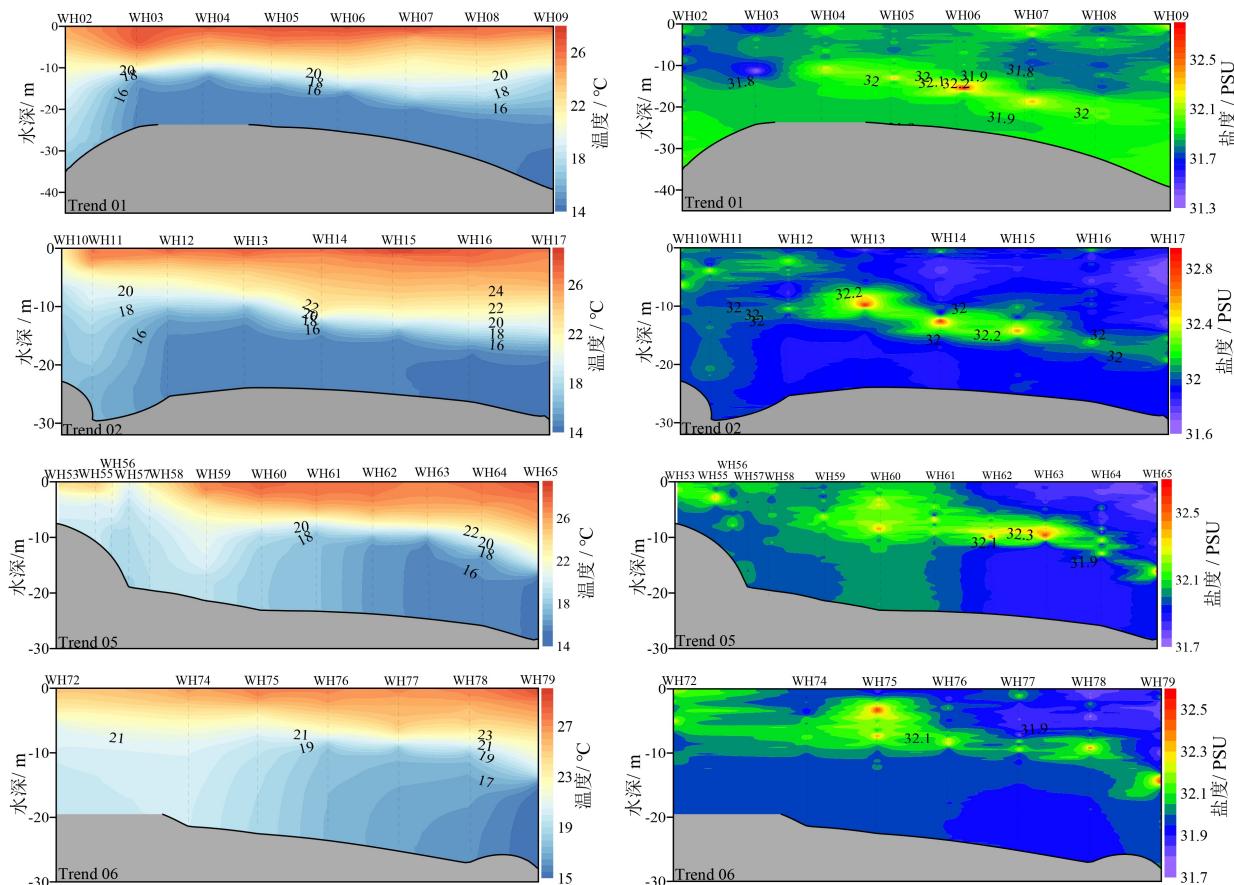


图 5 夏季典型断面水温、盐度垂向分布图

Fig.5 Vertical distribution of water temperature and salinity in summer

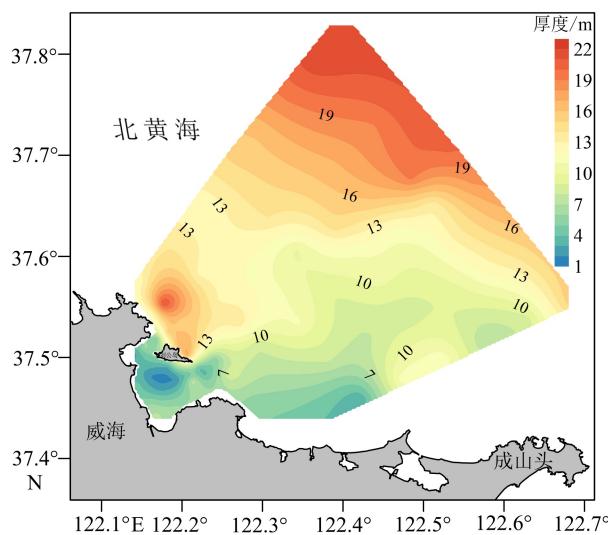


图 6 夏季温跃层厚度分布图

Fig.6 Plane distribution of thermocline thickness in summer

水温均为 6.3~9.9 °C, 盐度均为 31.1~32PSU(表 2), 水温和盐度均呈近岸低、远岸高的特征(图 7)。

从冬季典型断面水温和盐度剖面显示, 水体垂向混合剧烈, 近岸和远岸水体之间存在明显的温、盐切变锋面(图 8), 在 Trend 01 断面上锋面在 WH06 和 WH07 之间, Trend 02 断面上锋面在 WH16 和 WH17 之间。在锋面两侧的水体温度和盐度比较均匀。其他断面由于离岸较近, 未观测到明显的水温和盐度锋面。

3.2 研究区水体浊度分布特征

3.2.1 夏季浊度分布特征

夏季, 研究区水体浊度平面分布特征显示, 表层浊度普遍较低(0.2~2.3FTU)(表 3), 威海湾及刘公岛近岸区域水体浊度相对较高; 中层(0.5H)浊度

表 2 冬季水温和盐度特征值
Table 2 Water temperature and salinity in winter

层位	表层		中层		底层	
	温度/°C	盐度/PSU	温度/°C	盐度/PSU	温度/°C	盐度/PSU
最大值	9.9	31.97	9.9	31.99	9.9	31.99
最小值	6.4	31.13	6.3	31.19	6.3	31.15
平均值	7.4	31.36	7.4	31.39	7.4	31.38

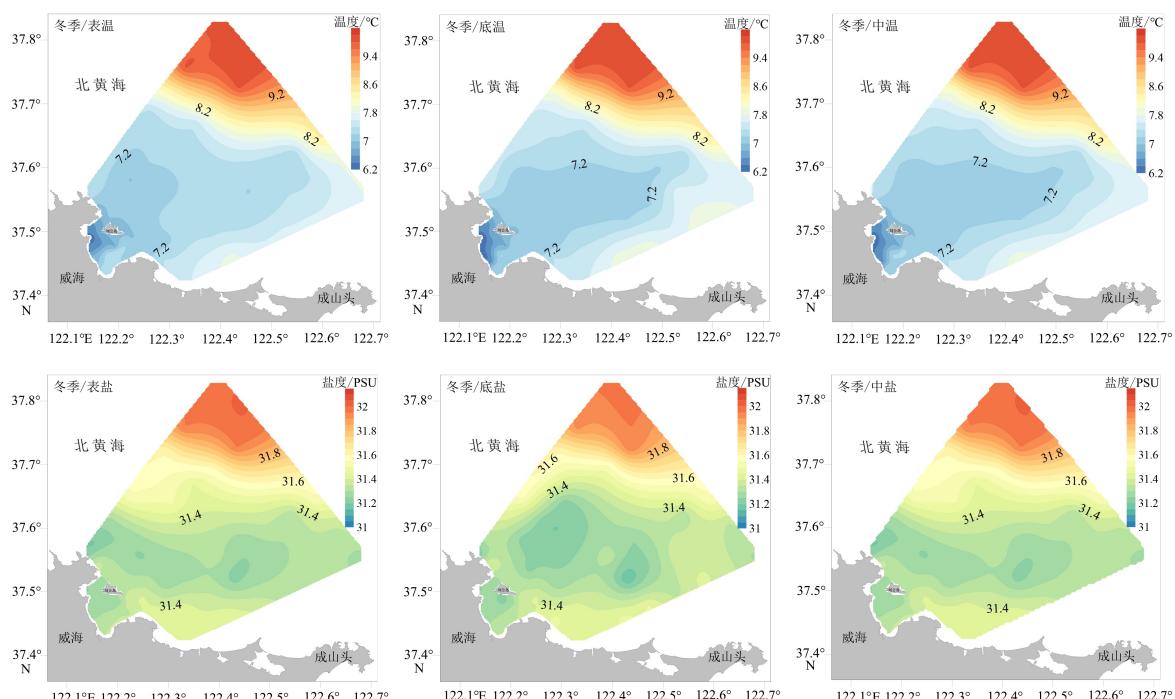


图 7 冬季水温、盐度平面分布图

Fig.7 Plane distribution of water temperature and salinity in winter

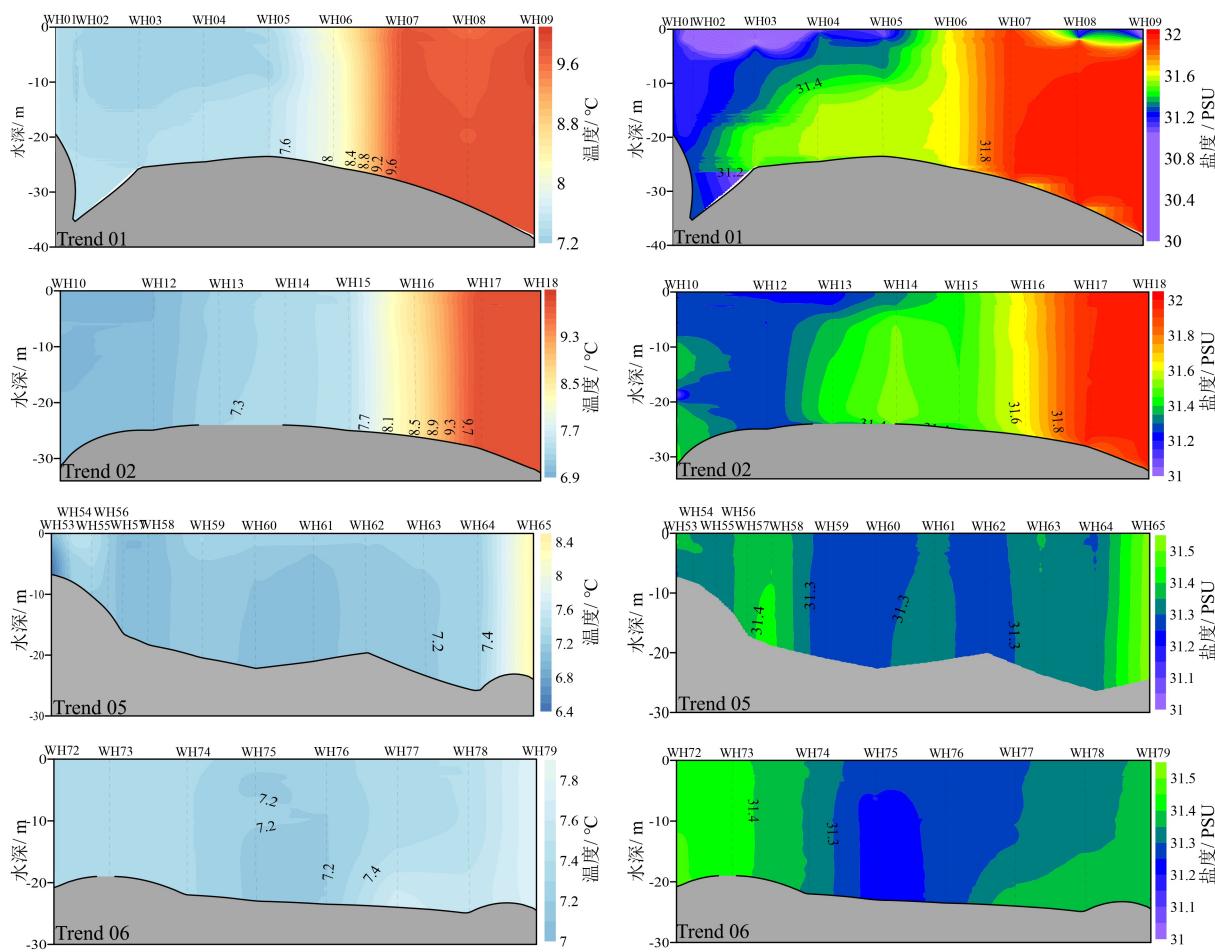


图 8 冬季典型断面水温和盐度垂向分布图

Fig.8 Vertical distribution of water temperature and salinity in winter

表 3 冬季和夏季水体浊度特征值

Table 3 Water turbidity in winter and summer

FTU

	夏季			冬季		
	表层	中层	底层	表层	中层	底层
最大值	2.3	8.9	37.8	22.4	44.0	100.1
最小值	0.2	0.2	2.9	1.5	2.3	3.9
平均值	0.6	2.5	9.3	9.2	13.0	23.4

(0.2~8.9FTU)略高于表层,呈近岸高、远岸低,东南高、西北低的分布特征;底层浊度(2.9~37.8FTU)最高,呈东南高、西北低的分布特征(图9)。

研究区典型断面水体浊度垂向分布显示,悬浮体浊度明显呈底层高、表层低的梯度变化(图10)。在20m以深区域,水体上部存在厚10~20m且浊度较小(<1FTU)的均匀层,其厚度与水深大小大致呈正相关关系,水深大则均匀层厚,水深小则均匀层薄。

3.2.2 冬季浊度分布特征

冬季,研究区水体浊度从表至底逐渐增大,表

层水体浊度为1.5~22.4FTU,中层(0.5H)水体浊度为2.3~44.0FTU,底层水体浊度为3.9~100.1FTU。各层水体浊度平面分布特征基本一致,研究区中部存在高浊度区,自东向西呈舌状分布,自中部向海湾和外海两侧浊度逐渐降低(图11)。

研究区水体浊度垂向分布特征显示,底层浊度略高于表层,沿剖面方向底部浊度越高、表层浊度相应也较高(如图12所示)。受水体垂向混合作用,浊度分层现象不明显,例如Trend 02断面的WH16、WH17和WH18站位的水体浊度基本不随水深变化。

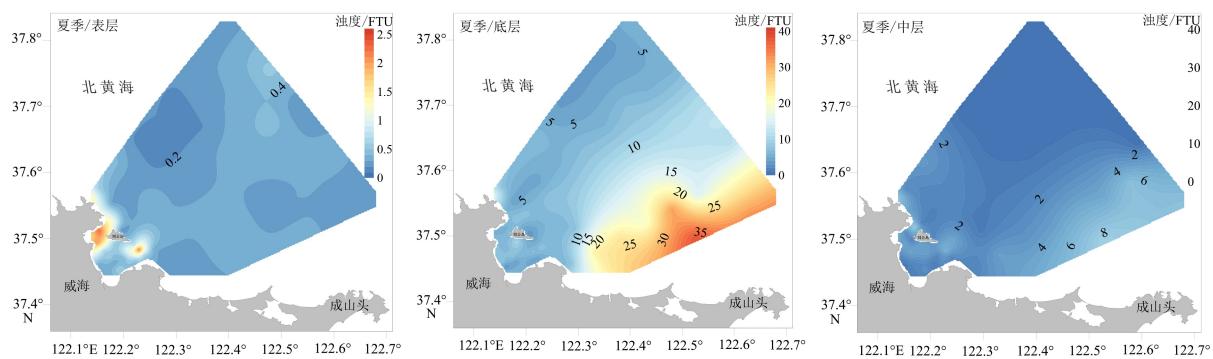


图 9 夏季水体浑浊平面分布图
Fig.9 Plane distribution of water turbidity in summer

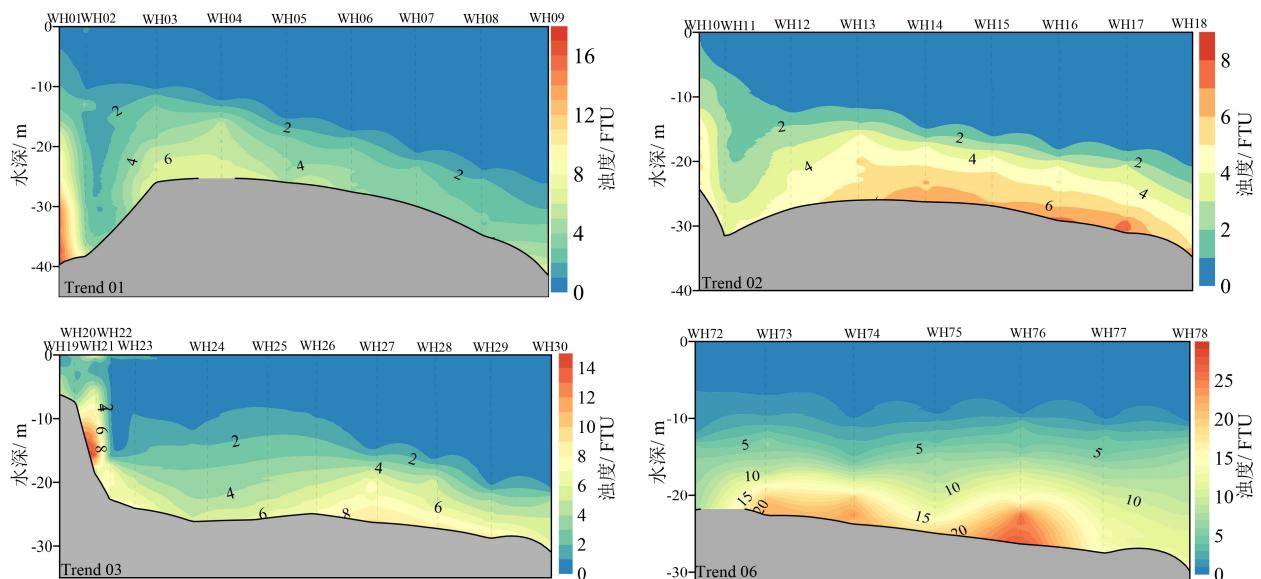


图 10 夏季典型断面水体浑浊垂向分布图
Fig.10 Vertical distribution of water turbidity in summer

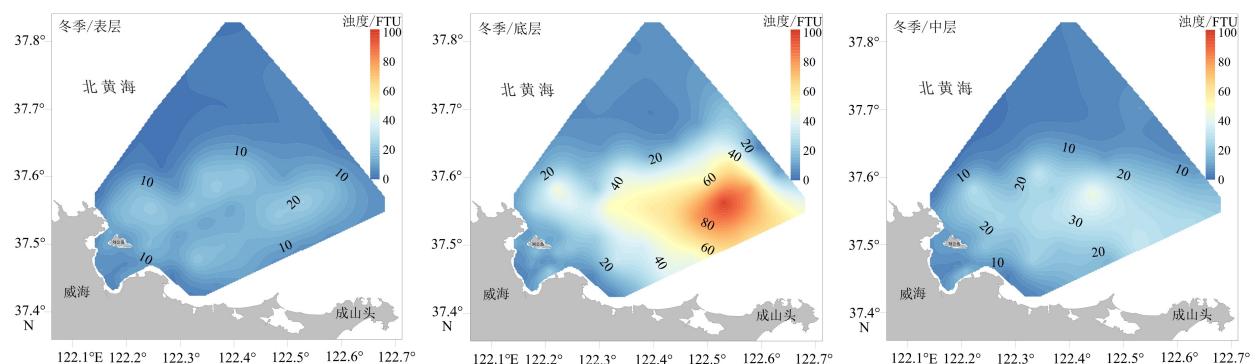


图 11 冬季水体浑浊平面分布图
Fig.11 Plane distribution of water turbidity in winter

4 讨论

前人研究表明, 山东半岛泥质区的沉积物主要来源于冬季发育的由西向东的鲁北沿岸流携带的

黄河物质^[8-13]。但是, 从研究区浑浊平面分布来看, 冬、夏两季均呈现出东高西低的特征, 这一特征与沿岸流的运动方向相反, 说明悬浮体的来源有待商榷。同时, 浑浊垂向分布特征显示, 底层的悬浮体浓度明显高于表层, 尤其夏季浑浊自底层往上阶梯

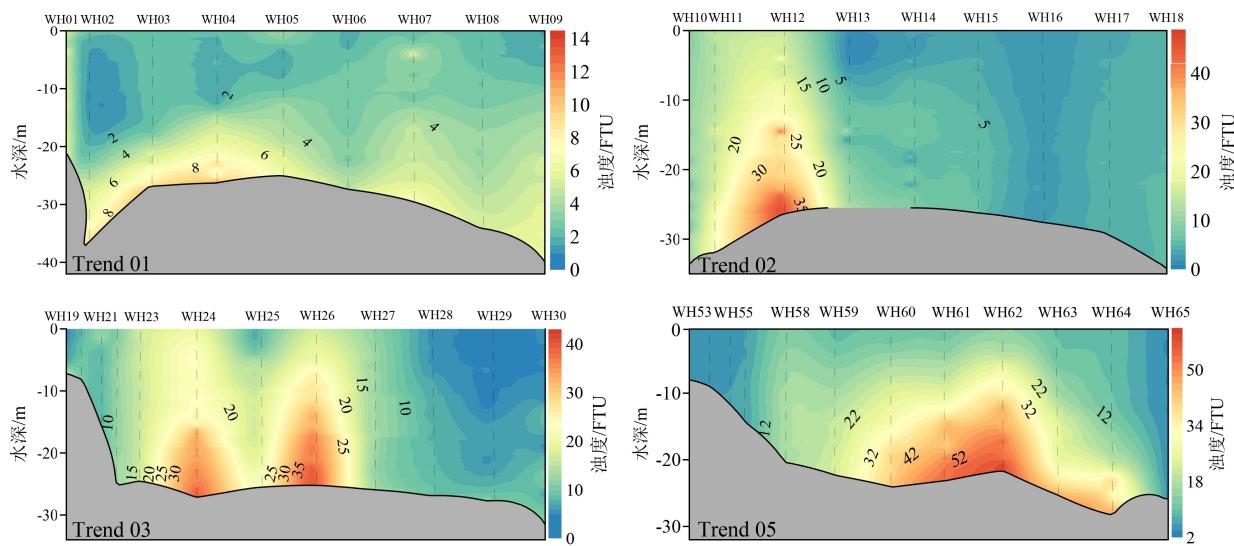


图 12 冬季典型断面水体浊度垂向分布图
Fig.12 Vertical distribution of water turbidity in winter

式减小,说明底质沉积物再悬浮才是悬浮体的主要来源,与前人研究结论一致^[14-15]。沉积物再悬浮之后,在潮流、波浪以及水体结构等综合因素的控制下发生输运和再次沉积。

4.1 潮流对悬浮体输运的影响

M_2 分潮是研究区的主要分潮^[17],如图 13 可见,研究区以东为成山头强潮区海域, M_2 分潮流速可达 50~70 cm/s; 以西为威海北部弱潮区海域, M_2 分潮流速低至 30 cm/s^[34]。潮流平面不均匀性对泥沙输运的作用不容忽视。

夏季,整个黄海受东南季风的影响,波浪作用很小,水体垂向混合弱,潮流对悬浮体的分布、输运及沉积过程起到了主导作用^[35-36]。由于海底底摩擦作用,潮流出现水体层间流速不等现象,平均运动

的动能将转化成湍流而消耗,湍流应力将克服海水浮力而做功。水深越小,湍流越强^[37]。远岸深水区域,地势平缓,水体湍动能较小,无法打破水体层化,使得上层海水悬浮体浓度非常低并且均匀分布;而在近岸浅水区,潮混合作用的效果体现的异常明显,上层水体的悬浮体浓度较深水区明显增大,说明在潮混合和波浪的共同作用下,近岸水体的层化被打破,水体垂向混合加强,底层的悬浮体被带到上层水体中。同时,潮混合作用使上层水体温度相对降低,下层水体温度相对升高。这一个过程使得深水和浅水区域之间温度梯度增大,阻碍了悬浮体在深水和浅水区域的交换,一定程度上影响了悬浮体的水平输运。

冬季由于强风浪的影响,潮流作用在垂向上的体现相对变弱,主要是体现在悬浮体平面分布特征

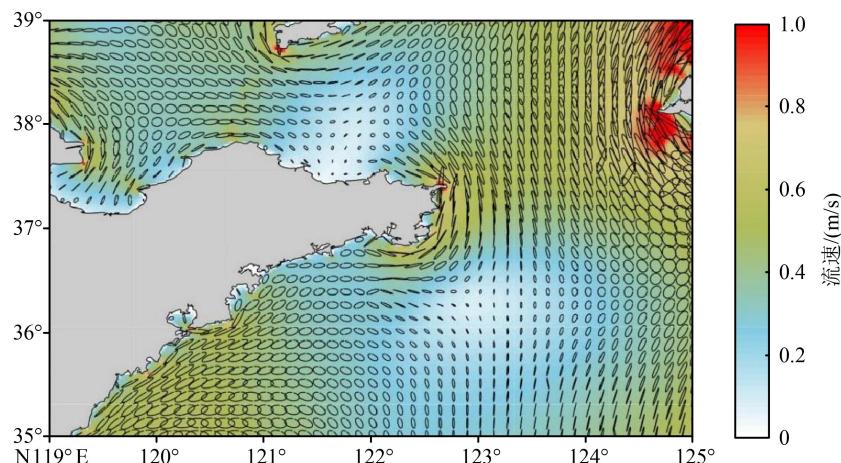


图 13 黄海 M_2 分潮潮流椭圆及最大潮流分布图^[25]
Fig.13 Distribution of M_2 tidal current ellipse and maximum current in the Yellow Sea^[25]

上。东部强潮区底层水体悬浮体浓度明显比西部弱潮区水体悬浮体浓度高, 冬季潮流主要影响研究区悬浮体的平面分布。

4.2 波浪对悬浮体输运的影响

波浪也是黄海沉积物再悬浮的主要动力之一。研究区夏季盛行偏南风, 风速弱; 冬季盛行偏北风, 风速强。受季风影响, 研究区波浪也存在季节性变化。冬季研究区平均波高为 0.9~1.9 m, 夏季平均波高约为 0.5~1 m^[35-36]。Wei Zhong 等^[38]根据风况资料计算, 夏季浪基面可达 30 m 以上(大于研究区平均水深 25 m), 冬季浪基面更深, 波浪对悬浮体的影响不容忽视。

研究区浊度分布特征显示, 冬季底层水体浊度最大值达到 100.1FTU, 明显大于夏季(37.8FTU); 冬季表层水体的浊度最大值为 22.4FTU, 明显高于夏季(2.3FTU)。温盐的垂向分布显示, 冬季水体垂向

上的温盐值基本一致, 而夏季水体的温度随水深增大逐渐降低。综合温盐和浊度特征表明, 波浪不仅促进了沉积物的再悬浮, 而且加强了水体的垂向混合及悬浮体的垂向运动。

4.3 温跃层对悬浮体输运的影响

温跃层附近常发育湍流边界层, 水体变得极为稳定, 抑制了底层悬浮体向上扩散, 使得沉积物主要集中在温跃层以下输送^[39-40]。从 WH06、WH15 和 WH75 三个典型站位水温和浊度的垂向分布可见, 温度和浊度在垂向上的变化相反, 温跃层以下水体浊度显著高于上部水体浊度(图 14)。底部再悬浮的泥沙在湍流作用下随机向上运动, 但是受到温跃层的阻隔, 再悬浮的泥沙无法向上部运动, 使得上部水体中的悬浮体浓度很低, 浊度相应地减小, 小于 1FTU。因此, 温跃层阻碍了悬浮体的垂向运动。

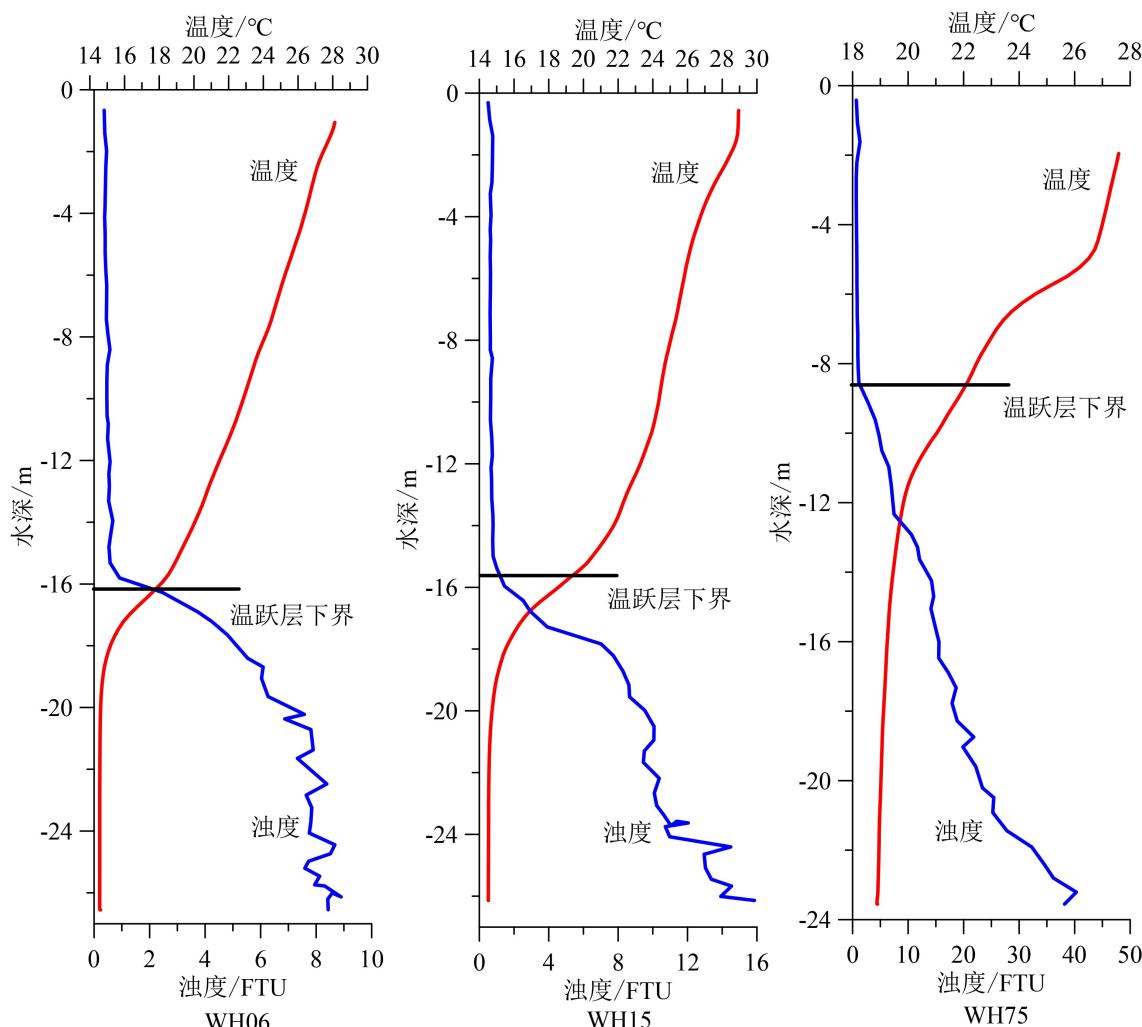


图 14 典型站位水温和浊度垂向变化图

Fig.14 Vertical variation diagrams of water temperature and turbidity at some typical stations

4.4 温盐锋面对悬浮体输运的影响

锋面是指物理性质不同的两种水团或水系的交界面，其常常表现为梯度变化的极大值。最明显的锋面发生在两种不同密度的水体之间。锋面不仅会影响水体的混合及营养元素、污染物等的富集^[41-42]，同时其稳定的水体结构和弱水动力条件，对沉积物输送及沉降过程起到了重要作用^[43-44]。

冬季水体垂向混合均匀，其温盐锋面与夏季的形成机理完全不同，起因于环流作用。在强冬季风的影响下，低温、低盐的鲁北沿岸流和高温、高盐的黄海暖流发育明显，黄海暖流进入北黄海之后在123°E、37.7°N左右自东向西经过研究区北部^[45]。由研究区表层水体T-S图可见，研究区可分为三种不同性质的水体，分别为高温高盐水、低温低盐水和过渡带水（图15左），这一特征恰好响应了研究区的环流特征。近岸低温低盐水体（温度：6.2~7.8 °C，盐度：31.1~31.5PSU），影响研究区约离岸30 km

以内的整个近岸海域；远岸高温高盐水体（温度：9.8~10 °C，盐度：31.9~32.1PSU），影响研究区的北部海域。在两个性质迥异的水团之间，水温和盐度均呈现阶梯式变化，形成近东西向的水温和盐度的切变锋。在温盐锋面的影响下，东部高浓度悬浮体难以向北扩散，主要向西扩散，使得研究区北部的悬浮体浓度急剧下降，浊度在5FTU以内，研究区中部形成了条带状的高浊度带。从典型断面Trend03的浊度分布与温盐锋面图可知（图15右），锋面两侧的浊度相差巨大，说明温盐锋面阻碍了悬沙的水平运输。运输模式概念图详见图16。

5 结论

(1) 研究区悬浮体浓度存在明显的季节变化，夏季浊度为0.2~37.8FTU，冬季浊度为1.5~100.1FTU，均表现为底高表低、东高西低的特征。

(2) 夏季水温分层明显，表现为表高底低的特

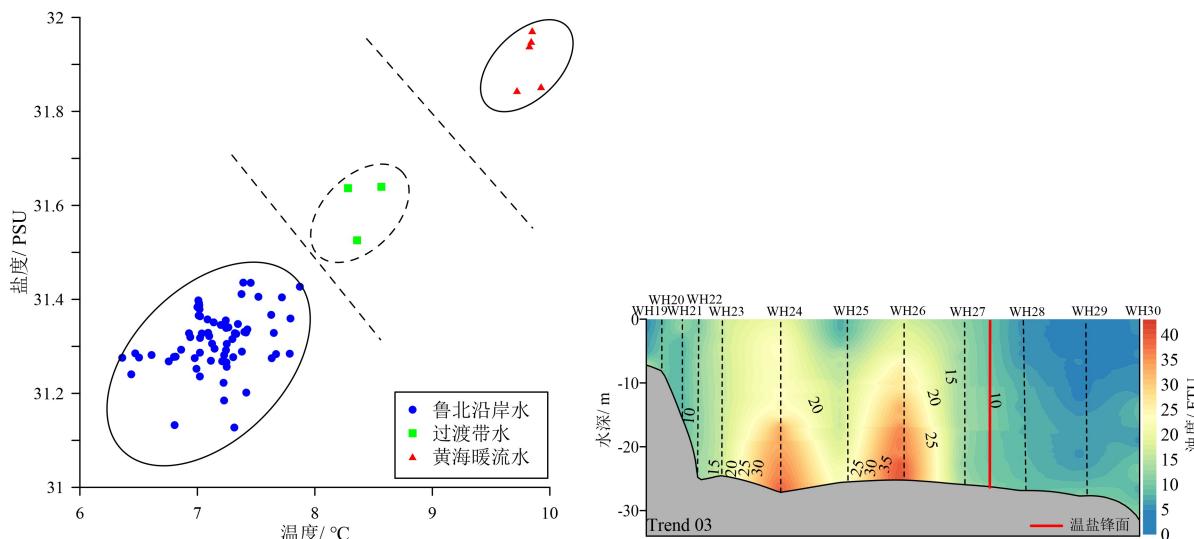


图15 冬季表层水体T-S图（左），Trend03温盐锋面位置与浊度分布图（右）

Fig.15 The T-S diagram of surface water in winter(left)and the temperature and salinity front position and turbidity distribution map in Trend03(right)

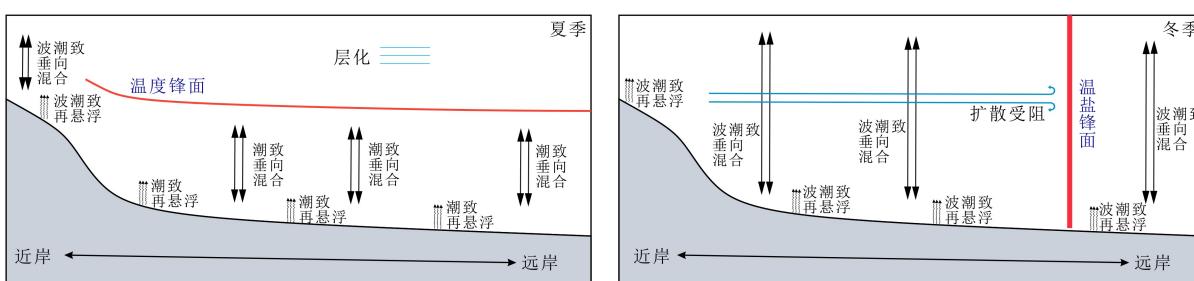


图16 冬夏季运输模式概念图

Fig.16 Conceptual transportation models in winter and summer

征, 盐度整体变化较小; 冬季温盐垂向上混合均匀, 平面上表现为近岸低温低盐水体向远岸高温高盐水体的过渡。

(3) 研究区悬浮体浓度分布特征受控于潮流、波浪、温跃层和温盐锋面。夏季, 悬浮体垂向上受到温跃层影响, 底层悬浮体难以向表层输运; 平面上近岸潮混合和波浪作用阻碍了悬浮体的水平输运。冬季, 强风浪促使悬浮体垂向混合剧烈, 表层悬浮体浓度明显较夏季变高; 平面上鲁北沿岸流和黄海暖流形成的温、盐锋面阻碍了水团间悬浮体的输运。

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.
- [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] Yuan D L, Zhu J R, Li C Y, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1-2): 134-149.
- [5] Muslim I, Jones G. The seasonal variation of dissolved nutrients, chlorophyll a and suspended sediments at Nelly Bay, Magnetic Island [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(3): 445-455.
- [6] Lu J, Qiao F L, Wang X H, et al. A numerical study of transport dynamics and seasonal variability of the Yellow River sediment in the Bohai and Yellow seas [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(1): 39-51.
- [7] 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.
- [8] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 169-176.
- [9] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [10] Qiao S Q, Shi X F, Wang G Q, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [11] 窦衍光, 李军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义 [J]. 海洋学报, 2012, 34(1): 109-119. [DOU Yanguang, LI Jun, YANG Shouye. Element compositions and provenance implication of surface sediments in offshore areas of the eastern Shandong Peninsula in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 109-119.]
- [12] 蓝先洪, 李日辉, 密蓓蓓, 等. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别 [J]. 地球科学, 2016, 41(3): 463-474. [LAN Xianhong, LI Rihui, MI Beibei, et al. Distribution characteristics of rare earth elements in surface sediment and their provenance discrimination in the eastern Bohai and northern Yellow Seas [J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 463-474.]
- [13] Li Y, Li A C, Huang P, et al. Clay minerals in surface sediment of the north Yellow Sea and their implication to provenance and transportation [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 33-40.
- [14] Wang A M, Ralston D K, Bi N S, et al. Seasonal variation in sediment transport and deposition on a muddy clinoform in the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 179: 37-51.
- [15] 王勇智, 张永强, 孙惠凤. 山东半岛东部海域悬浮体分布季节变化及其冬季输送通量研究 [J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 541-549. [WANG Yongzhi, ZHANG Yongqiang, SUN Huifeng. Seasonal variation of suspended matter distribution and flux in coastal waters of eastern Shandong Peninsula [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(3): 541-549.]
- [16] 赵一阳, 朴龙安, 秦蕴珊, 等. 南黄海沉积学研究新进展——中韩联合调查 [J]. 海洋科学, 1998(1): 34-37. [ZHAO Yiyang, PARK Y A, QIN Yunshan, et al. Recent development in the southern Yellow Sea sedimentology——The China-Korea Joint investigation [J]. *Marine Sciences*, 1998(1): 34-37.]
- [17] 边昌伟. 中国近岸泥沙在渤海、黄海和东海的输运 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2012. [BIAN Changwei. Chinese coastal sediment transport in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2012.]
- [18] Zeng X M, He R Y, Xue Z, et al. River-derived sediment suspension and transport in the Bohai, Yellow, and East China Seas: A preliminary modeling study [J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 112-125.
- [19] 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.]
- [20] 李广雪, 岳淑红, 赵东波, 等. 黄河口快速沉积及其动力过程(英文) [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 29-36. [LI Guangxue, YUE Shuhong, ZHAO Dongbo, et al. Rapid deposition and dynamic processes in the modern Yellow River Mouth [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 29-36.]
- [21] 齐君, 李凤业, 宋金明, 等. 北黄海沉积速率及其沉积通量 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 9-14. [QI Jun, LI Fengye, SONG Jinming, et al. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 9-14.]
- [22] 程鹏. 北黄海细颗粒物质的沉积特征与输运过程 [D]. 中国科学院海洋研究所博士学位论文, 2000. [CHENG Peng. *Sediment*

- characteristics and transport processes of fine-grained material over the northern Yellow Sea [D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000.]
- [23] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 207-246. [SU Jilan. China's Offshore Hydrology [M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 207-246.]
- [24] 王爱美. 黄海中部泥质沉积区温度锋面及层化的时空变化及其沉积效应[D]. 中国海洋大学, 2019. [WANG Aimei. Thermal front and stratification effect on the sediment transport and deposition at a muddy clinoform in the Yellow Sea [D]. Ocean University of China, 2019.]
- [25] Xu L L, Wu D X, Lin X P, et al. The study of the Yellow Sea warm current and its seasonal variability [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 21(2): 159-165.
- [26] Yu F, Zhang Z X, Diao X Y, et al. Observational evidence of the Yellow Sea warm current [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(3): 677-683.
- [27] 管秉贤. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(4): 255-284. [GUAN Bingxian. A preliminary study of the temperature variations and the characteristics of the circulation of the cold water mass of the Yellow Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(4): 255-284.]
- [28] 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(1): 11-15. [HE C B, WANG Yuanxiang, LEI Zongyou, et al. A preliminary study of the formation of Yellow Sea cold mass and its properties [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1959, 2(1): 11-15.]
- [29] 冷星, 朱龙海, 胡日军. 山东半岛东部海域泥质区冬季悬浮泥沙时空变化及输运机制[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(4): 106-116, 8. [LENG Xin, ZHU Longhai, HU Rijun. The spatiotemporal change and transport mechanism of suspended sediment in the mud area of the eastern sea of Shandong Peninsula in winter [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 106-116, 8.]
- [30] 秦蕴珊, 李凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学报, 1982, 14(2): 191-200. [QIN Yunshan, LI Fan. Study on the suspended matter of the sea water of the Bohai gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 14(2): 191-200.]
- [31] 苏健, 江文胜, 孙文心. 渤海中南部悬浮物海洋调查资料分析[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 647-652. [SU Jian, JIANG Wensheng, SUN Wenxin. Analysis of SPM Data Obtained in Ocean Investigation in the Bohai Sea [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, 31(5): 647-652.]
- [32] 王勇智, 乔璐璐, 杨作升, 等. 夏、冬季山东半岛东北部沿岸悬浮物输送机制的初步研究[J]. *泥沙研究*, 2012(5): 49-57. [WANG Yongzhi, QIAO Lulu, YANG Zuosheng, et al. Research on suspended sediment transport mechanisms along northeast coast of Shandong Peninsula in summer and in winter [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(5): 49-57.]
- [33] 江伟, 邢博, 楼伟, 等. 海洋温跃层分析方法比较[J]. *海洋预报*, 2016, 33(3): 41-49. [JIANG Wei, XING Bo, LOU Wei, et al. Comparisons of three thermocline detection methods [J]. *Marine Forecasts*, 2016, 33(3): 41-49.]
- [34] 朱学明, 鲍献文, 宋德海, 等. 渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟与研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(6): 1103-1113. [ZHU Xueming, BAO Xianwen, SONG Dehai, et al. Numerical study on the tides and tidal currents in Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1103-1113.]
- [35] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. 海洋学报(中文版), 2001, 23(4): 1-16. [SU Jilan. A review of circulation dynamics of the coastal oceans near China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(4): 1-16.]
- [36] 赵保仁. 黄海冷水团锋面与潮混合[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 451-460. [ZHAO Baoren. The fronts of the Huanghai Sea cold water mass induced by tidal mixing [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1985, 16(6): 451-460.]
- [37] 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. [ZHENG Tiemin, ZHAO Yiyang, LI Fan, et al. Study on the suspended matter of the sea water of the south Yellow Sea in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(6): 749-757.]
- [38] Zhong W, Zhu L H, Dong P, et al. Mechanisms of sediment trapping in coastal embayments off the Shandong Peninsula in summer—A case study in Weihai Bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 236: 106623.
- [39] Qiao L L, Liu Y, Chen J J, et al. Distribution and its mechanism of suspended particulate matters in the southern Huanghai Sea and the East China Sea in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 30(5): 94-100.
- [40] Acha E M, Mianzan H W, Guerrero R A, et al. Marine fronts at the continental shelves of austral South America: physical and ecological processes [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(1-2): 83-105.
- [41] Chen C T A. Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas [J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 394-410.
- [42] Belkin I M, Cornillon P C, Sherman K. Fronts in Large Marine Ecosystems [J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 81(1-4): 223-236.
- [43] Zang Z C, Xue Z G, Bi N S, et al. Seasonal and Intra-seasonal Variations of Suspended-Sediment Distribution in the Yellow Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 148: 116-129.
- [44] Isobe A. Recent advances in ocean-circulation research on the Yellow Sea and East China Sea shelves [J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(4): 569-584.
- [45] 张凯南. 北黄海冷水团对悬浮体物质组成和沉积环境的影响机制[D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2018. [ZHANG Kainan. The influence of the North Yellow Sea cold water mass on the properties of suspended particulate matter and sedimentary environment [D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.]