

文章编号: 1000-0550(2019)03-0541-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.169

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

王勇智^{1,2}, 张永强¹, 孙惠凤¹

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

2. 澳大利亚新南威尔士大学, 堪培拉 2601

摘要 山东半岛东部近岸海域流系和水团要素季节变化显著, 沉积动力环境特殊, 发育有剖面形状独特的泥质沉积体。基于两个年度的夏、冬季山东半岛东部近岸海域水体温度、浊度、悬浮体浓度和海流等调查资料, 分析了水团要素分布季节变化特征, 并结合研究区域冬季海流和余流分布特征, 计算了冬季经山东半岛东部近岸海域向南输送的悬浮体净通量。结果表明: 山东半岛东部近岸海域悬浮体分布受沿岸流、黄海冷水团和黄海暖流等流系季节变化的影响存在显著季节变化。夏季, 水体垂向层结和黄海冷水团均可抑制悬浮体垂向和东西向扩散。与以往的研究有所不同的是, 冬季大量悬浮体可穿越沿岸流与黄海暖流形成的海流切变锋面, 进入黄海暖流向北输送, 海流切变锋的屏障作用会随着黄海暖流的减弱或东移而削弱。每年冬季经山东半岛东部近岸海域输送的悬浮体占渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的 3.22%~9.10%, 冬季的悬浮体输送量较大, 占冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的 6.84%~19.38%。

关键词 悬浮体; 泥质沉积体; 黄海暖流; 切变锋

第一作者简介 王勇智, 男, 1980 年出生, 博士, 高级工程师, 浅海动力沉积学, E-mail: wangyongzhi@fio.org.cn

通信作者 张永强, 男, 工程师, E-mail: zyqiang@fio.org.cn

中图分类号 P736.21 **文献标志码** A

陆架浅海是陆源沉积物输送与沉积的重要通道^[1-2], 其悬浮体输送、季节性变化及输运通量研究, 对研究陆架浅海泥质沉积区成因及其演变趋势具有重要的科学价值。北黄海是我国典型半封闭陆架浅海, 为辽东半岛、朝鲜半岛和山东半岛所环绕, 平均水深 38 m, 是渤海与其他海域进行物质能量交换的重要通道。

因此, 大量有关黄海悬浮体分布、输运及沉积等的观测和研究表明黄海悬浮体分布、输送和沉积主要受到物质来源、沿岸流、环流、季风等影响, 具有显著的季节变化特征^[3-9]。来自黄河的物质大量沉积于黄河水下三角洲, 山东半岛东北部海域和黄海海槽^[10-11]。近期发现的环山东半岛东部近岸海域分布的泥质沉积体, 形成于全新世早期, 其物质主要来源于黄河沉积物, 其表层沉积速率约为 6~12 mm/年^[12-14], 其剖面形状独特, 呈现出“Ω”型, 不同于一般的陆架斜坡沉积, 可能是由强潮汐、海浪、沿岸流、冬季风暴和沿岸上升流共同作用产生^[6,9,13], 其中潮

汐对悬浮体的输运和沉积分布起到了主导作用^[9,12,15-16]。

北黄海流系众多, 主要由黄海暖流、黄海沿岸流、山东半岛沿岸流和朝鲜沿岸流组成, 且各流系季节变化显著。黄海暖流是北山黑潮的重要分支, 是渤、黄、东海唯一的外海水源, 黄海暖流主要沿黄海槽西侧流动, 季节变化显著, 冬季影响范围要大于夏季^[17-19], 冬季黄海暖流占据黄海海槽, 与山东半岛东部沿岸流形成明显的海流切变锋^[20-22]。春季黄海暖流东移, 流速减弱, 夏季黄海暖流消失, 但黄海暖流残留水仍然存在于冷水团的核心区内, 夏季黄海冷水团占据北黄海大部分区域, 不仅在垂向上产生明显的水体层结, 而且与沿岸流形成显著的温度锋面。

由此可见, 山东半岛东部近岸海域沉积动力环境复杂且季节性变化显著, 山东半岛东部近岸海域的悬浮体和再悬浮沉积物是怎样输送到北黄海和南黄海, 冬季悬浮体能否穿越沿岸流与黄海暖流形成的强海流切变锋进行跨锋面输送, 冬季山东半岛东部海域的

收稿日期: 2018-05-16; 收修改稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406100); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ001); 我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ST02)
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406100; Natural Science Foundation of Shandong Province, No. ZR2013DQ001; Marine Comprehensive Survey and Evaluation in China, No.908-01-ST02]

沿岸流对悬浮体输送是否起到了关键作用,其输送量是多少,一直是当前众多学者关注的问题。因此,本研究以山东半岛东部近岸海域冬、夏季悬浮体、水团要素和海流的分布特征及其季节变化分析为基础,计算了冬季山东半岛东部近岸海域悬浮体的净通量,量化研究了冬季山东半岛东部近岸海域悬浮体的跨锋面输送及其通量,进一步丰富了冬季山东半岛东部沿岸流所携带泥沙与山东半岛东部近岸海域泥质沉积体再悬浮沉积物对本区沉积动力环境的影响。

1 数据来源和研究方法

1.1 资料来源

2007年夏季和冬季的研究区水体水文要素观测资料来源于国家908专项ST02区块(渤海海峡和北黄海)的现场调查资料,其中夏季的观测时间为2007年7月23日至8月6日,冬季的观测时间为2007年1月1日至1月16日,调查范围为渤海海峡和北黄海区,总计21个断面和209个站位(图1)。2007年的水体温度、浊度等数据采用Seabird 911 plus CTD获取,水体悬浮体质量浓度采用抽滤称重方法获得。但2007年在研究区未获得长时间序列的海流观测资料。因此,自然资源部第一海洋研究所在2017年冬季的2月12日(大潮期)和2月21日(小潮期)在山东东部海域的B1和B2断面上分别各设置3个站位补充海流和悬浮体调查,B1-1和B2-1站位位于顶积层西侧,B1-2和B2-2站位位于顶积层,B1-3和B2-3站位位于顶积层东侧,开展连续25小时的潮流和悬浮体

观测,观测期间风浪较大,故所有站位均使用400马力渔船,观测期间部分站位的风浪接近400马力渔船的抗风浪极限,所获得的冬季悬沙资料较有代表性。海流观测采用小阔龙海流计,垂向分为5层,悬浮体质量浓度采用抽滤称重方法获得,垂向分层与潮流观测一致。

1.2 研究依据

在陆架海的悬浮体研究中,由于水体浊度与悬浮体浓度联系紧密,往往根据水体浊度值来分析悬浮体的分布特征,以往的研究表明渤海和黄海的水体浊度与悬浮物质量浓度之间存在显著的线性关系^[3,8,10-11,23],2007年夏、冬季水体浊度调查数据与96个站位的悬浮物质量浓度的线性拟合分析表明山东半岛东部近岸海域夏、冬季浊度与悬浮体质量浓度相关系数在0.80以上,置信度检验为95%,说明水体浊度分布特征可代表悬浮体分布特征^[12]。

1.3 悬浮体通量计算

虽然潮流的周期性变化可能会对悬浮体质量浓度产生一定影响,并可能导致悬浮体输运通量计算产生一定误差,但2017年冬季调查期间并无极端天气过程,考虑到悬浮体质量浓度是在正常海况条件下取得,代表了冬季一般天气下悬浮体浓度水平。因此,得到的悬浮体通量可以反映正常海况情况下的物质运输情况。

由于在垂向上实测潮流与悬浮体观测一致,将计算各层次计算所得的余流结果与悬浮体质量浓度进行全水深积分,采用的公式如下^[24]:

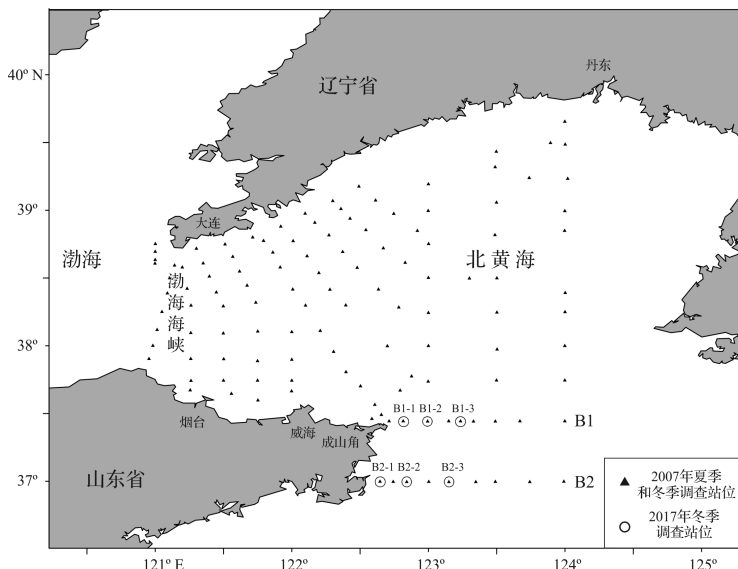


图1 2007年夏、冬季和2017年冬季观测站位分布图

Fig.1 Distribution of observation stations in the summer and winter of 2007 and winter of 2017

$$F_T = \int_0^s \int_0^H CU dz ds$$

其中, F_T 是悬浮体通量(t), C 为实测悬浮体浓度(mg/L); U 为经过观测获得的潮流流速(cm/s); H 为站位水深(m), s 指沿该断面两个测站之间的距离(m)。

1.4 研究方法

应用 908 专项调查获得的 2007 年北黄海和山东半岛东部海域的夏、冬季水文要素观测资料以及 2017 年冬季山东半岛东部海域潮流和悬浮体补充调查资料, 分析了夏季和冬季山东半岛东部海域悬浮体分布特征及其季节变化, 基于 2017 年典型断面的悬沙观测结果, 结合该区的浅地层层序历史资料, 进一步分析了夏、冬季山东半岛东部近岸海域悬浮体分布与泥质沉积体之间关系。应用 2017 年冬季山东半岛东部近岸海域潮流和悬浮体观测资料, 分析了冬季山东半岛东部近岸海域潮流和余流的分布特征, 基于 B1 和 B2 断面冬季悬浮体通量的定量化计算, 揭示了冬季山东半岛东部近岸海域悬浮体可跨越沿岸流与黄海暖流形成的强海流切变锋进行跨锋面输送, 研究了冬季山东半岛东部沿岸流所携带泥沙与山东半岛东部近岸海域泥质沉积体再悬浮沉积物对泥质沉积

体沉积环境的影响。

2 山东半岛夏、冬季海域悬浮体分布特征及其季节变化

2.1 山东半岛东部夏季近岸海域悬浮体分布特征

由 2007 年夏季各层次的温度观测结果来看, 夏季北黄海冷水团影响北黄海大部分海域, 温跃层主要控制 -10 ~ -20 m 深海水, 强度约为 0.65 ~ 1.13 °C/m, 黄海海槽 -20 m 以深海水则呈现出冷水团的特征。以泥质沉积体顶积层为界, 存在一个弱的水平分布温度锋面, 锋面东侧为北黄海冷水团, 西侧为温度相对较高的沿岸水(图 2)。B1 和 B2 断面的高浊度水主要集中在底层, 而且集中分布在泥质沉积体顶积层附近, 最高可以达到 12 FTU, 中上层水体则浊度很小(图 3)。温跃层以下水体浊度相对高, 而温跃层以上水体浊度则很低, 说明水体层结对抑制悬浮体分布具有较大的影响作用。顶积层两侧水体浊度相对较高, 顶积层所处位置的水体浊度则相对低, 说明夏季山东半岛沿岸流与北黄海冷水团交汇处流速很小, 其携带悬浮体的能力很弱。

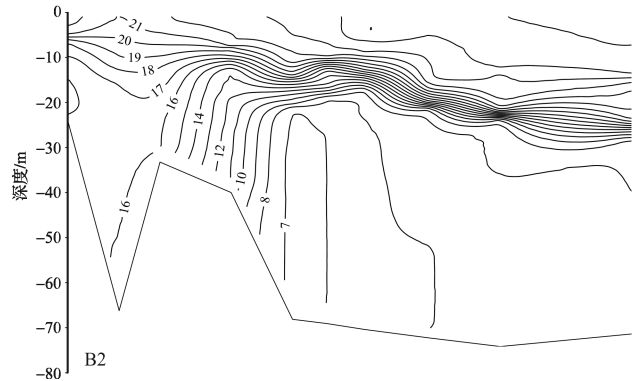
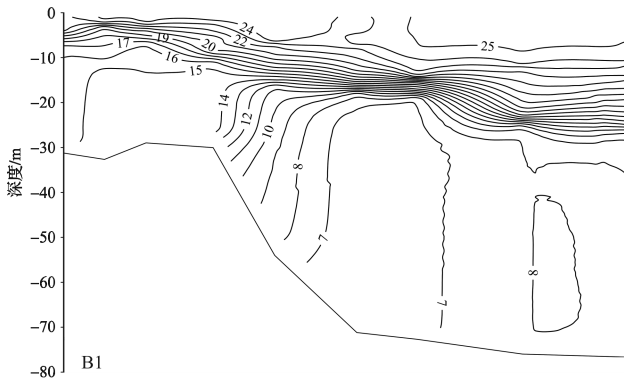


图 2 2007 年夏季 B1 和 B2 断面温度分布图(单位: °C)

Fig.2 Temperature distribution for Sections B1 and B2, summer 2007 (unit: °C)

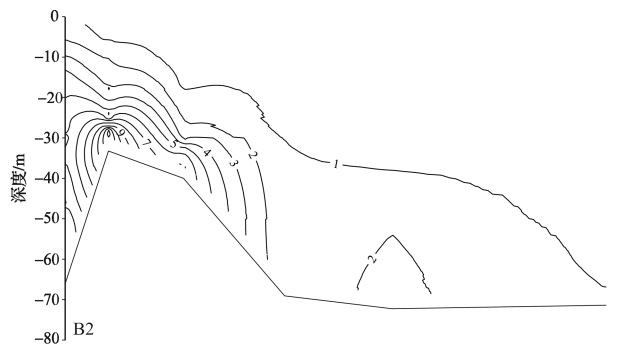
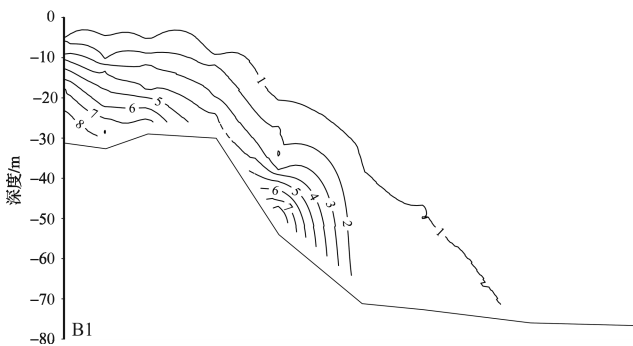


图 3 2007 年夏季 B1 和 B2 断面浊度分布图(单位: FTU)

Fig.3 Turbidity distribution for Sections B1 and B2, summer 2007 (unit: FTU)

2.2 山东半岛东部冬季近岸海域悬浮体分布特征

2007年冬季北黄海区沿岸温度较低,中部温度相对高,温度垂向混合均匀。山东半岛东部近岸海域泥质沉积体顶积层上方的等温线分布密集,而东侧海域温度则相对较高,山东半岛东部沿岸流与黄海暖流在顶积层附近形成了锋面(图4)。锋面两侧水体浊度分布差异较大,东侧水体浊度很低,西侧浊度很高,且垂向混合较均匀(图5)。表明冬季沿岸流携带的悬浮体和顶积层附近的再悬浮沉积物少有能越过该锋面向东输送,在山东半岛东部近岸海域黄海暖流对泥质沉积体附近海域的再悬浮沉积物的物质输送贡献很小,绝大多数悬浮体和再悬浮沉积物只能随沿岸流输送。

为研究冬季山东半岛东部近岸海域泥质沉积体的悬浮体分布和输送特征,自然资源部第一海洋研究所于2017年2月份在B1和B2断面上分别设置3个潮流悬沙测站。结果显示,冬季各测站的悬浮体浓度普遍较高,底层悬浮体浓度最高(表1)。无论是大潮期还是小潮期,其最大悬沙浓度均超过了100 mg/L,部分站位的最大悬沙浓度甚至超过了200 mg/L,均出现在底层,不仅说明山东半岛东部近岸海域泥质沉积体附近的悬沙活动强烈或沉积物大量再悬浮,而且冬季风浪作用下悬浮体浓度相当大,对沉积物再悬浮

和悬浮体的输送贡献巨大。冬季山东半岛东部近岸海域泥质沉积体顶积层上方海域的悬浮体浓度最高,其次为顶积层西侧附近海域,而顶积层东侧海域悬浮体浓度相对低,说明冬季顶积层上沉积物再悬浮现象十分显著。B2断面的平均悬沙浓度均大于B1断面,由此推断冬季B2断面的悬浮体通量要大于B1断面。

2.3 山东半岛东部夏、冬季近岸海域悬浮体分布与泥质沉积体之间关系

夏、冬季山东半岛东部近岸海域悬浮体的分布存在显著的季节变化,冬季悬浮体浓度可以达到夏季的3倍以上,大风浪海况下,研究区域的悬浮体浓度可超过200 mg/L,可见冬季是该区悬浮体输送的主要季节。由2017年冬季悬沙观测结果可见,冬季B1-2和B2-2测站的悬浮体浓度最大,B1-3和B2-3测站最小,B1-1和B2-1测站居中,表明B1-2和B2-2测站的悬浮体输送和沉积特征可能与同一断面上的其他测站有所不同。前人通过 ^{210}Pb 测试获得了该泥质沉积体的沉积速率,表明泥质沉积体在不同水深,对应着不同的沉积速率,水深小于30 m的沉积区,其沉积速率约为6~12 mm/a,沉积体中部沉积速率约为3 mm/a,水深大于50 m的沉积体,沉积速率小于1 mm/a^[6-7]。可见,泥质沉积体的沉积速率呈现出自

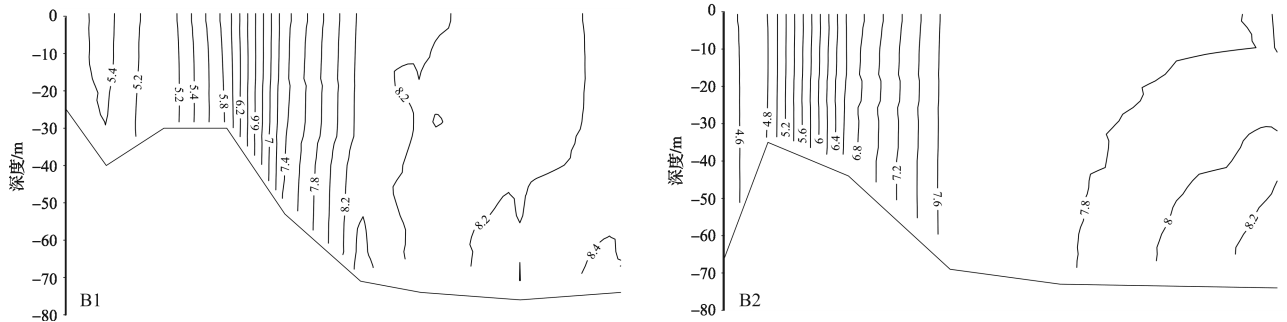


图4 2007年冬季B1和B2断面温度分布图(单位:℃)

Fig.4 Temperature distribution for Sections B1 and B2, winter 2007 (unit: °C)

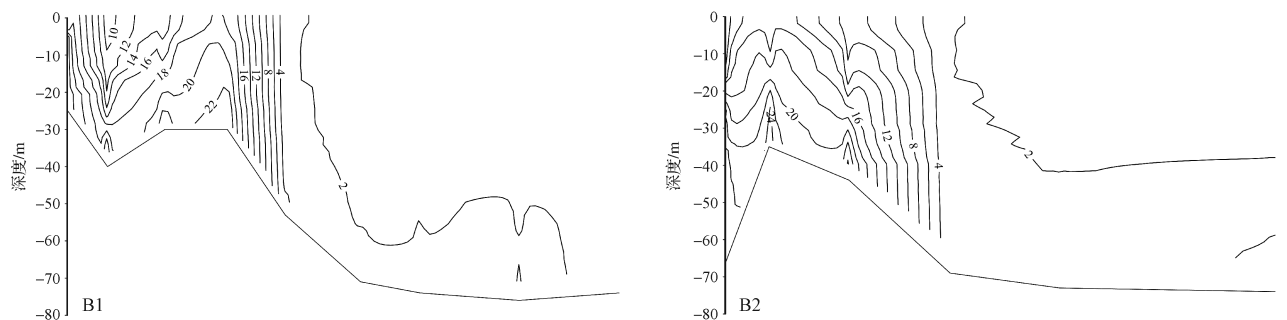


图5 2007年冬季B1和B2断面浊度分布图(单位:FTU)

Fig.5 Turbidity distribution for Sections B1 and B2, winter 2007 (unit: FTU)

表1 2017年冬季B1和B2断面各测站悬沙浓度统计表

Table 1 Observed sediment concentration statistics, winter 2017

潮时	悬沙浓度 /(mg/L)	站位					
		B1-1	B1-2	B1-3	B2-1	B2-2	B2-3
大潮期	平均值	59.3	83.2	50.6	150.1	89.5	92.6
	最大值	175.4	189.8	102.4	272.6	213.0	120.4
小潮期	平均值	40.9	54.9	32.5	58.2	94.7	56.6
	最大值	78.8	116.4	93.2	106.8	190.6	100.2

西向东逐渐减小的趋势。从2017年冬季各测站悬浮体浓度水平分布特征来看,位于沉积体中部海域的B1-2和B2-2测站悬浮体浓度要大于其他测站,但该处并不是沉积体沉积速率最大的地方,而近岸浅水区的悬浮体浓度略低,却是沉积体沉积速率最大的地方,位于沉积体东部的B1-3和B2-3测站悬浮体浓度最小,则对应了沉积体沉积速率最小的区域。由此可见,夏季各测站的悬浮体浓度较低,加之水体的层结效应,泥质沉积体的表层沉积体再悬浮较弱,黄海冷水团与沿岸流形成的锋面更是阻碍了悬浮体的东西向输送,导致大量悬浮体在沉积体的顶积层沉积;而在冬季强风、强流和大浪的联合作用下,顶积层表层沉积体再悬浮强烈,而风浪对深水区的沉积物再悬浮作用相对小,对应的沉积速率也最小,但是何种沉积动力环境导致顶积层西侧和顶积层附近海域的沉积

速率相差较大,还需要结合冬季本区的流场开展进一步研究。

3 山东半岛东部海域冬季潮流特征

3.1 B1和B2断面冬季海流特征分析

2017年冬季连续25小时的海流观测表明,冬季6个测站的平均流速均较大,均呈现出往复流特征,其中距离海岸较近的测站海流流速相对大(图6)。各测站的垂向流向分布较为一致,受山东半岛东部海岸走向和冬季环流的影响,B1断面各测站的主要流向与B2断面各测站的主要流向存在明显差异,B1断面各站的主要流向为西北—东南向,B2断面各站的主要流向为东北—西南向(表2)。多数站位的表层最大流速超过1.0 m/s,底层流速小于表层。从观测期间B1-1、B1-2、B2-1和B2-2站的表层最大流速来看,冬季山东半岛东部近岸海域的沿岸流流速较大,对冬季沉积物的输送贡献较大。

3.2 B1和B2断面冬季余流特征分析

通过2017年冬季的周日潮流观测数据的短期调和分析,对观测的潮流进行时间平均得到欧拉余流。大潮期和小潮期B1-1和B1-2站的余流流向较为一致,均是东南向,但B1-1站底层余流流向更加偏向

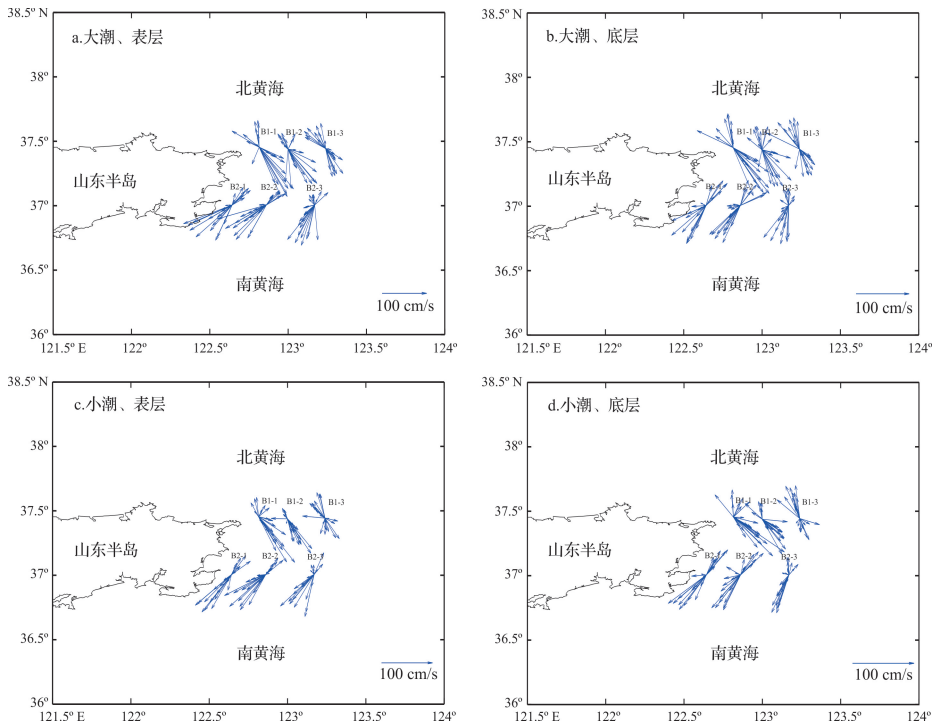


图6 2017年冬季大小潮表、底层流矢分布图

Fig.6 Current distributions at the surface and bottom level of the spring and neap tide, winter 2017

表2 2017年冬季观测期间各站流速流向统计

Table 2 Observed velocity and direction statistics, winter 2017

潮时	流速和流向统计	站位					
		B1-1	B1-2	B1-3	B2-1	B2-2	B2-3
大潮期	表层平均流速/(m/s)	0.75	0.65	0.51	0.60	0.57	0.54
	表层最大流速/(m/s)	1.49	1.14	0.79	1.20	1.16	1.14
	平均流向/°	229	190	222	164	176	263
小潮期	表层平均流速/(m/s)	0.53	0.39	0.35	0.50	0.48	0.46
	表层最大流速/(m/s)	1.30	0.94	0.63	1.02	1.04	1.02
	平均流向/°	156	208	235	146	161	247

东, B1-1 站的余流流速相对较大, 流速接近 5 cm/s, B1-3 测站的余流流速为 6 个测站中最小, 流向与 B1-1 和 B1-2 也存在较大差别, 表层和底层余流流向均指向西北或偏北向, 底层流速强于表层, 具有黄海暖流的特征。B2 断面各站的余流较小, 均未超过 5 cm/s, B2 断面的各测站的余流流向基本一致, 大潮期和小潮期余流流向基本指向西南或偏南, 表层余流流速略大于底层, 小潮期余流流速略小(图7)。

一般来说, 余流的指向代表了物质运输的方向, 从本次观测所得 6 个测站的余流分布特征来看, B1 和 B2 断面的余流流向基本指向南(B1-3 测站除外), B1 断面余流主要偏向东南, B2 断面余流则主要偏向西南, 可以说明冬季山东半岛东部近岸海域沿岸流可

携带大量悬浮体向南或向东输送(B1 断面附近), 但至 B1-3 测站附近海域, 北上黄海暖流与沿岸流形成了显著的海流剪切, 可能导致少有悬浮体能够穿越海流切变锋, 只能随沿岸流输送, 导致本区的沉积速率低。至 B2 断面近岸海域余流方向逐渐转向西南或南向, B2-3 站余流方向未能体现黄海暖流的特征。因本次冬季观测的时间为 2 月份, 黄海暖流的强度已经发生减弱, 其流幅也有所减小, 若是在 12 月份或者 1 月份的黄海暖流强盛时期, 其影响范围较大, 可能 B2-3 测站的余流会呈现北向, 从而对本区悬浮体输送产生较大影响。

4 山东半岛东部海域冬季悬浮体通量

由于调查范围所限, 悬浮体通量计算的范围仅限于 2017 年山东半岛东部海域冬季 6 个补充调查站位所在断面。根据 2017 年冬季的潮流和悬浮体观测数据, 垂向积分后得到观测期间各站位的悬浮体通量(表3), 应用 1.3 节的悬浮体断面通量计算公式, 分别得到 B1 和 B2 断面大潮期和小潮期的悬浮体通量(表4)。冬季大潮期和小潮期 B1 断面向南输送悬浮体通量分别约为 660.54 t 和 238.57 t, 大潮期和小潮期向东输送悬浮体通量分别约为 602.56 t 和 295.92 t;

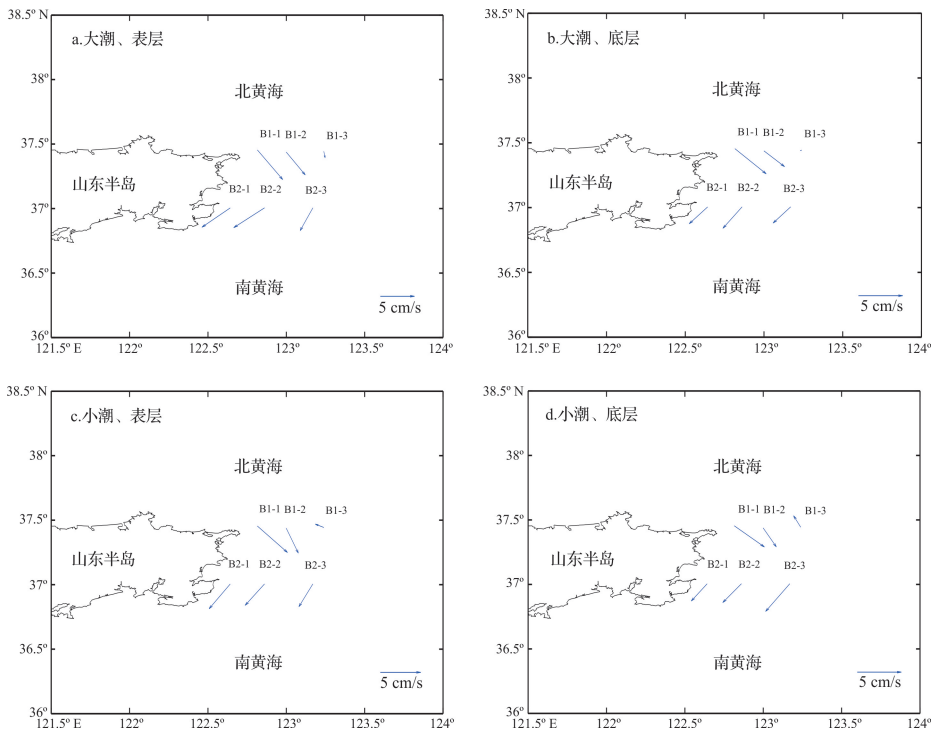


图7 2017年冬季大小潮间表、底层余流流矢分布图

Fig.7 Residual current distribution at the surface and bottom level of the spring and neap tide, winter 2017

表3 2017年冬季观测期间各站位悬浮体通量(单位:t)

Table 3 Suspended matter flux for observation stations, winter 2017 (unit: t)

潮时	输送方向	站位					
		B1-1	B1-2	B1-3	B2-1	B2-2	B2-3
大潮期	南北方向	-13.52	-13.82	-12.78	-19.81	-8.46	-29.44
	东西方向	-7.06	-11.04	10.13	-6.79	-11.12	-26.9
小潮期	南北方向	-7.06	-11.04	10.13	-6.79	-11.12	-26.9
	东西方向	8.79	9.22	-4.72	-4.7	-10.21	-15.74

注:南北方向悬浮体输送中北方向为正,东西方向悬浮体输送中东方向为正,下同。

表4 2017年冬季观测期间B1和B2断面悬浮体通量(单位:t)

Table 4 Suspended matter flux for sections B1 and B2, winter 2017 (unit: t)

潮时	输送方向	断面	
		B1断面	B2断面
大潮期	南北方向	660.54	1 687.35
	东西方向	602.56	-1 689.21
小潮期	南北方向	238.57	1 001.61
	东西方向	295.92	-713.22

冬季大潮期和小潮期B2断面向南输送悬浮体通量分别约为1 687.35 t和1 001.61 t,大潮期和小潮期向西输送悬浮体通量分别为1 689.21 t和713.22 t。将B1和B2断面大潮期和小潮期的悬浮体通量平均,可得冬季B1和B2断面日均悬浮体通量,即B1断面日均南向和东向悬浮体通量分别为449.55 t和449.24 t,B2断面日均南向和西向悬浮体通量分别为1 344.48 t和1 201.21 t。按冬季3个月(90天)的时间计算,则一般冬季天气条件下,B1断面冬季南向和东向的悬浮体通量分别为 4.05×10^4 t和 4.04×10^4 t,B2断面冬季南向和西向的悬浮体通量分别为 12.10×10^4 t和 10.81×10^4 t。可见,B1和B2断面的冬季悬浮体输送方向和通量数量存在较大差异。B1断面悬浮体净输送方向主要为东南方向,其中向南和向东的悬浮体输送量基本相当,相当一部分悬浮体可能会跨越锋面向东输送,而B2断面的悬浮体通量净输送方向主要为西南,但仍以南向输送为主,少有悬浮体可跨锋面输送。冬季B1断面的净通量约为 8.09×10^4 t,而B2断面的净通量为 22.91×10^4 t,约为B1断面的3倍,说明通过B1断面的悬浮体多为山东半岛北岸沿岸的再悬浮沉积物及通过渤海海峡沿山东半岛北部沿岸输送的悬浮体,而通过B2断面的悬浮体不仅是来自于B1断面的悬浮体,更多的是来源于B1和B2断面之间的泥质沉积体的再悬浮沉积物。因此,冬季

山东半岛东部近岸海域的泥质沉积体的再悬浮沉积物对渤海物质向南输送和北南黄海的物质输送起到了重要作用。

根据前人的计算结果,通过渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量约为 251.63×10^4 t,冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量约为 118.19×10^4 t,则B1和B2断面的冬季悬浮体净通量分别占渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的3.22%和9.10%,占冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的6.84%和19.38%。根据山东半岛东部近岸海域泥质沉积体的浅地层层序分析结果,沉积体基本上由黄河径流所携带物质组成,在山东半岛北部沿海沿岸流和渤海环流的共同作用下,经过再悬浮和再沉积逐渐输送至此,冬季强风浪和强流导致该沉积体上大量再悬浮,并随南下的沿岸流分别向东南和西南输送。由此可以断定每年冬季通过山东半岛东部近岸海域向东输送的悬浮体净通量占冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量约为3.42%,每年冬季通过山东半岛东部近岸海域向南输送的悬浮体净通量占冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量约为19.38%,以沿岸的南向输送为主,虽存在跨锋面,但其输送量较为有限。因此,冬季山东半岛东部近岸海域的泥质沉积体的再悬浮沉积物是本区物质输送的重要来源,对本区物质输送具有重要的影响作用。

5 沉积动力环境讨论

山东半岛东部近岸海域水团要素和环流场存在显著的季节性时空变化,因此,本区的悬浮体沉积和输运特征也理应具有显著的季节变化特征。夏季,研究区悬浮体浓度整体较低,垂向的温跃层和沿岸流与黄海冷水团形成的水平温度锋面,对抑制本区悬浮体扩散和输运具有较大的影响和控制作用,阻挡了顶积层附近悬浮体跨越锋面向东输送,加之夏季沿岸流流速较弱,故夏季通过山东半岛东部海域的东向和南向悬浮体输送量较为有限。

在冬季大风、强流和大浪的联合作用下,不仅导致大量沉积物再悬浮,而且沿岸流携沙能力也大大增强,应是悬浮体输送的主要季节。然而,冬季也是黄海暖流强盛时期,其在泥质沉积体顶积层东侧与沿岸流形成明显的海流切变锋,对本区的悬浮体输送和沉积存在重要影响。根据研究区冬季海流观测结果,除B1-3站外,山东半岛东部近岸海域的余流指向基本为东南向或西南向,悬浮体南向输送特征显著。同

时, B2 断面的悬浮体通量计算表明, 由于经过石岛附近海域后, 山东半岛东部海域海岸线向西收缩, 导致沿岸流的流幅扩大, 故有部分悬浮体会沿海岸向西输送, 部分悬浮体继续向南输送, 其输送量基本相当。B1-3 站的余流方向为西北, 具有黄海暖流的特征, 该站悬浮体通量的计算结果也说明部分悬浮体可穿越海流切变锋向东或向北输送, 但占整个山东半岛东部近岸海域冬季悬浮体输送量的很小一部分。由于 2017 年冬季观测时间为 2 月, 此时黄海暖流已经开始减弱, 其流幅有所减小, 海流切变锋的强度也相应减弱, 若是在黄海暖流强盛时期的 12 月和 1 月, 穿越锋面随黄海暖流北上输送的悬浮体通量可能更大, 而沿岸南下的悬浮体通量可能会相应减小。此外, 冬末春初时节, 黄海暖流东移并逐渐衰弱, 沿岸流影响范围扩大, 加之春季北风频繁, 南向的悬浮体输送量可能会相应增加, 由于暂无观测数据证明, 故推测春季也应是悬浮体输送量较大的季节。通过 2017 年冬季山东半岛东部近岸海域的海流观测, 泥质沉积体底积层附近海域测站的海流流速相对小, 悬浮体浓度相对小, 受到黄海暖流流幅季节性变化的影响较大, 故沉积速率小。

6 结论

山东半岛东部近岸海域的悬浮体输送和沉积具有显著的季节变化特征。夏季, 水体垂向层结和水平向锋面抑制了悬浮体扩散。冬季, 沿岸流在强风的作用下大大加强, 山东半岛东部近岸海域的悬浮体浓度较高, 沿岸流携带大量悬浮体向南输送。每年冬季约有 $(8.09 \sim 22.91) \times 10^4$ t 的悬浮体经由山东半岛东部近岸海域向南输运, 占每年冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的 3.22% ~ 9.10%, 占冬季渤海海峡向外海输送的悬浮体年净通量的 6.84% ~ 19.38%。通过潮流观测和悬浮体通量计算表明部分悬浮体可穿越沿岸流与黄海暖流形成的海流切变锋进行跨锋面输送, 但跨锋面输送量较小, 且受到黄海暖流季节性变化的影响。随着冬季结束, 黄海暖流东移, 沿岸流可携带大量悬浮体向南输送, 故春季可能也是悬浮体向南输送的重要季节。

参考文献 (References)

[1] 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.]

- [2] Li G X, Yue S H, Zhao D B, et al. Rapid deposition and dynamic processes in the modern Yellow River Mouth[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 29-36.
- [3] 秦蕴珊, 李凡. 渤海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋学报, 1982, 4(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, 4(2): 191-200.]
- [4] Zhang J, Huang W W, Martin J M. Trace metals distribution in Huanghe (Yellow River) estuarine sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1988, 26(5): 499-516.
- [5] 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(1/2/3/4): 45-67.
- [6] Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea[J]. Geo-Marine Letters, 2001, 21(4): 212-218.
- [7] Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240(1/2/3/4): 169-176.
- [8] Correggiari A, Trincardi F, Langone L, et al. Styles of failure in Late Holocene highstand prodelta wedges on the Adriatic shelf[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(2): 218-236.
- [9] 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.
- [10] 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.]
- [11] Pang C G, Bai X Z, Hu D X. Numerical study of water and suspended matter exchange between the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2003, 21(3): 214-221.
- [12] Li Z, Bao X W, Wang Y Z, et al. Seasonal distribution and relationship of water mass and suspended load in North Yellow Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 907-918.
- [13] Wang G S, Qiao F L, Xia C S. Parallelization of a coupled wave-circulation model and its application[J]. Ocean Dynamics, 2010, 60(2): 331-339.
- [14] Xia C S, Qiao F L, Zhang Q H, et al. Numerical modelling of the quasi-global ocean circulation based on POM[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 16(5): 537-543.
- [15] Yuan Y L, Hua F, Pan Z D, et al. LAGFD-WAM numerical wave model-I. Basic physical model[J]. Acta Oceanologica Sinica,

- 1991, 10(4): 483-488.
- [16] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 1-7. [Yang Yongzeng, Qiao Fangli, Zhao Wei, et al. MASNUM ocean wave numerical model in spherical coordinates and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 1-7].
- [17] Xia C S, Qiao F L, Yang Y Z, et al. Three-dimensional structure of the summertime circulation in the Yellow Sea from a wave-tide-circulation coupled model[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(C11): C11S03, doi: 10.1029/2005JC003218.
- [18] Qiao F L, Yuan Y L, Yang Y Z, et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(11): L11303, doi: 10.1029/2004GL019824.
- [19] Lü X G, Qiao F L, Xia C S, et al. Upwelling and surface cold patches in the Yellow Sea in summer: Effects of tidal mixing on the vertical circulation [J]. Continental Shelf Research, 2010, 30(6): 620-632.
- [20] 凌铁军, 张蕴斐, 杨学联, 等. 中尺度数值预报模式(MM5)在海面风场预报中的应用[J]. 海洋预报, 2004, 21(4): 1-9. [Ling Tiejun, Zhang Yunfei, Yang Xuelian, et al. The application of MM5 model to predict sea surface wind field [J]. Marine Forecasts, 2004, 21(4): 1-9.]
- [21] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17/18): 2141-2156.
- [22] Harris C K, Sherwood C R, Signell R P, et al. Sediment dispersal in the northwestern Adriatic Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C11): C11S03, doi: 10.1029/2006JC003868.
- [23] 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 Xiuquan, 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.]
- [24] 刘世东, 乔璐璐, 李广雪, 等. 东海内陆架悬浮体运输、通量及季节变化, 海洋与湖沼, 2018, 49(1): 24-39. [Liu Shidong, Qiao Lulu, Li Guangxue, et al. Transport and flux of suspended sediment and its seasonal variation over the inner shelf of the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(1): 24-39.]

Seasonal Variation of Suspended Matter Distribution and Flux in Coastal Waters of Eastern Shandong Peninsula

WANG YongZhi^{1,2}, ZHANG YongQiang¹, SUN HuiFeng¹

1. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao, Shandong 266061, China

2. The University of New South Wales, Canberra ACT 2601, Australia

Abstract: The seasonal variation of coastal waters off eastern Shandong Peninsula contributes significantly to the special sedimentary dynamic environment. Based on temperature, turbidity, and concentration of suspended matter observed during the summer and winter of 2007 and tidal currents and suspended matter observed during the winter of 2017, the seasonal variation for the distribution of suspended matter was analyzed, and the annual suspended matter net flux to the south through eastern Shandong Peninsula in winter was calculated. The sedimentary dynamic environment of the mud wedge was further studied, combined with the distribution of tidal and residual currents in winter. The results show that the distribution of suspended matter in the shelf waters off eastern Shandong peninsula is mostly affected by seasonal variations of the coastal currents, the Yellow Sea cold water mass, and the Yellow Sea warm current. Its concentration in winter is several times larger than in summer. Suspended matter off eastern Shandong Peninsula is restricted near the bottom by vertical water stratification and the Yellow Sea cold water mass in summer. A large amount of suspended matter is transported southward, driven by the strong coastal currents due to strong winter winds, while some suspended matter can also be transported northward by the Yellow Sea warm current. The annual suspended matter net flux in winter through the shelf waters off eastern Shandong Peninsula accounts for 3.22% - 9.10% of the annual suspension matter net flux outward through the Bohai Strait, and also accounts for 6.84% - 19.38% of the annual suspension matter net flux outward through the Bohai Strait in winter.

Key words: suspended sediment, mud wedge, Yellow Sea warm current, shear current front