

文章编号: 1000-0550(2013)03-0486-11

近岸强海流切变锋作用下悬浮沉积物的输送和沉积^① ——以山东半岛东端外海为例

王勇智^{1 2} 乔璐璐³ 杨作升³ 鲍献文³ 赵美训³ 王关锁^{1 4}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061; 2. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室 山东青岛 266071;
3. 中国海洋大学 山东青岛 266100; 4. 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室 山东青岛 266061)

摘要 利用2007年国家908专项ST02区块(渤海海峡及北黄海)水体专项夏季和冬季两个航次调查的温度、浊度和悬浮体浓度数据,选取了跨越山东半岛东端外海泥质沉积体的B1和B2两个断面,结合该区浅地层剖面资料,辅以研究海域的冬季环流数值模拟,着重分析了山东半岛东端外海强海流切变锋作用下的悬浮体输送和沉积特征。结果表明山东半岛东端外海悬浮体向外海输送存在类似“夏储冬输”的规律:夏季,北黄海海水浊度普遍小,不仅北黄海温跃层抑制了底层悬浮体向中上层水体扩散,而且北黄海冷水团在中底层与山东半岛东部沿岸水也形成了显著的温度和悬浮体锋面,阻碍了悬浮物的纬向输送,故夏季应是悬浮体沉积的主要时节;冬季,温跃层消亡,在强风的作用下,山东半岛东部悬浮体浓度高且垂向混合较好,然而在泥质沉积体顶积层两侧,山东半岛东部沿岸中下层北上的逆风补偿流和北上的黄海暖流与位于顶积层上方表中层南下的沿岸流构成了两道显著的强海流切变锋,使得底积层上大量的再悬浮沉积物不能越过山东半岛东部陆架末梢,从而有助于形成山东半岛东端外海特有的 Ω 状泥质沉积体。

关键词 悬浮体 北黄海冷水团 海流切变锋 黄海暖流 泥质沉积体

第一作者简介 王勇智 男 1980年生 博士 助理研究员 浅海沉积动力学 E-mail: wangyongzhi@fio.org.cn

通讯作者 乔璐璐 E-mail: qiaolulu126@sina.com

中图分类号 P512.2 P736.21 **文献标志码** A

0 前言

北黄海是典型的半封闭的陆架浅海,受风浪、潮流的作用,及径流的影响,以高水体浊度而著称。从历年渤、黄海的水色卫星图片中,可发现从渤海内的莱州湾沿山东半岛沿岸终年存在一条高悬浮物浓度带(图1),可一直延伸到山东半岛西南沿岸,因此不少研究者推测该条高悬浮物浓度带是渤海物质向北黄海输送一条通道^[1-5]。近期,Liu等^[5,6]、Yang和Liu^[7]发现在山东半岛东北沿岸存在一条沿内陆架分布的泥质沉积带,形成于全新世,其表层沉积速率为6~12 mm/a。沿陆架分布的斜坡沉积是悬浮泥沙沿岸输送和沉积的重要特征,斜坡沉积体在国外和我国均有发现。Correggiari等^[8]发现在意大利亚得里亚海西岸沿岸存在一条厚度约为30 m的斜坡沉积带,Liu等^[5]发现自长江口以南沿岸800 km存在一条沿内陆架20~30 m等深线分布的斜坡沉积,并认为该

斜坡沉积体是由长江泥沙沿岸输送并沉积、强潮汐、海浪、沿岸流、冬季风暴和沿岸上升流共同作用产生。然而,值得关注的是山东半岛东部沉积体的剖面形状较为独特,不同于一般的斜坡状沉积体剖面厚度自陆架坡顶端向海逐渐变薄,该沉积体的剖面形状却类似 Ω 状。Liu等^[5,6]认为该泥质沉积体是沿岸泥沙输送和北黄海上升流作用产生,却没有给出为何剖面形状为 Ω 状的解释。Lu等^[9]通过数值模拟表明黄河入海泥沙沿山东半岛先向东运输再向南进入南黄海,沉积厚度与Yang和Liu^[7]的观测结果相一致,潮汐对悬浮体的输运和沉积分布起到了主导作用。然而,北黄海海域流系众多,且季节性变化强,山东半岛东端外海独特的剖面形状类似 Ω 状的斜坡沉积的形成和演化是否受到特殊的沉积动力环境影响——北黄海冷水团、黄海暖流和山东半岛沿岸流等扮演了何种角色,目前是众多学者关注的问题之一。因此,本研究从冬、夏季研究海域温度、浊度和悬浮体浓度分析入

^①我国陆架海生态环境演变过程、机制及未来变化趋势预测(编号:2010CB428901);国家自然科学基金项目(批准号:40906025);“海陆相互作用和海岸带地质灾害研究”项目(编号:GZH201100203);我国近海海洋综合调查与评价专项(编号:908-01-ST02);山东优秀中青年奖励基金(编号:BS2012HZ022)联合资助

收稿日期:2012-06-25;收修改稿日期:2012-08-27



图1 Modis 水色卫星 2000 年 4 月图

Fig. 1 Image from MODIS ocean color satellite in April 2000

手 选取有代表性的 B1、B2 断面,分析了冬、夏季泥质沉积体附近海域的温度、浊度的水平和垂向分布特征 结合浅地层剖面资料 辅以北黄海冬季环流的数值模拟,初步探讨了形成山东半岛东端外海 Ω 剖面形状沉积体的独特沉积动力环境。

1 资料及依据

1.1 资料来源

根据国家 908 专项 ST02 区块(渤海海峡和北黄海) 水体调查的要求 2007 年 7 月 23 日~8 月 6 日, 2007 年 1 月 1 日~1 月 16 日,对渤海海峡及北黄海的总计 21 个断面、209 个站位(图 2) 进行了水文、化学及生物等要素的观测 其中温度和浊度数据的获取采用的观测仪器为 Seabird 911 plus CTD,悬浮体质量浓度的获取采用的是水样抽滤称重方法。

1.2 研究依据

海水浊度值的大小与水体中悬浮体浓度分布有直接关系 故水体浊度值可以大致反应悬浮体浓度的变化 国内外在陆架海悬浮沉积物的研究中,经常根据浊度和悬浮物浓度的对应关系 采用浊度来分析悬浮体的分布和输运。而且,在以往的研究中均认为渤海和黄海的浊度与悬浮物的质量浓度存在线性关系^[3,10~12]。因此,可以通过水体浊度的变化来反映悬浮物浓度的变化。本次 908 专项 ST02 区块水体调查中除使用 CTD 观测外,在 209 个站位中选取 96 个站位用过滤法进行了悬浮物质量浓度的测量。应用

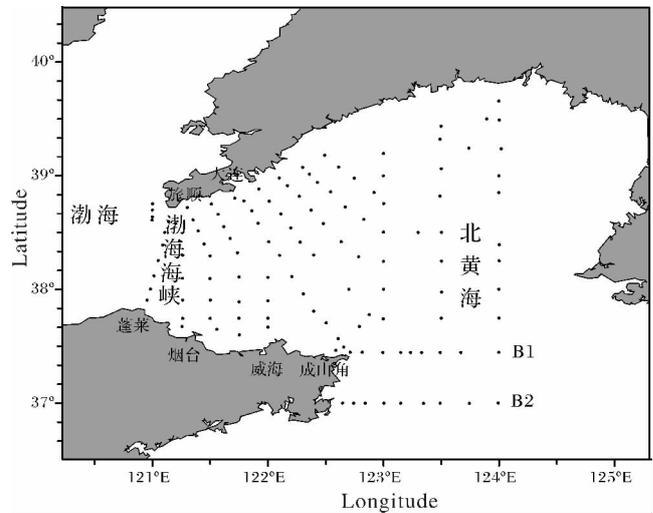


图2 夏、冬季调查站位图

Fig. 2 Investigation stations distribution in summer and winter

1320 个悬浮体质量浓度和浊度样本,对冬、夏季北黄海的浊度与悬浮体浓度作线性拟合,得到如下结果(见表 1)。由此可见 除夏季表层外,拟合结果良好,冬季的相关系数要略高于夏季,夏季和冬季悬浮体质量浓度和浊度的相关系数基本在 0.80 以上,并通过了 95% 置信度检验。夏季表层(3 m 以上水深)的相关系数较差,主要原因是夏季风力较弱,阳光较强,生物大量繁殖所致。因此,冬、夏季除表层浊度值与悬浮体浓度拟合程度一般外,其他层次的浊度值可较好的代表悬浮体浓度分布。

表1 冬、夏季北黄海调查海域的浊度与悬浮物浓度
线性拟合关系

Table 1 The linear fitting relationship between turbidity
and suspended matter concentration in the northern
Yellow Sea in winter and summer

层次	夏季	冬季
表层	$S = 1.9636T + 1.7564 (R = 0.41)$	$S = 1.1465T + 0.1313 (R = 0.96)$
10m层	$S = 1.1467T + 0.5985 (R = 0.80)$	$S = 1.2023T - 0.1739 (R = 0.97)$
30m层	$S = 1.4770T + 0.1725 (R = 0.95)$	$S = 1.0026T + 0.2100 (R = 0.92)$
底层	$S = 1.1520T - 0.0982 (R = 0.94)$	$S = 0.9177T + 0.5206 (R = 0.79)$

注: S 是悬浮物浓度, T 是浊度, R 是相关系数

2 夏季和冬季北黄海温盐密分布特征

2.1 夏季水文要素特征

北黄海冷水团是夏季北黄海显著的水文特征之一。夏季,北黄海冷水团的冷中心在 122.5°E , 38.3°N 的 25 m 水深层次上显现出来,并与山东半岛东侧的黄海槽的冷水中心实现贯通,至底层北黄海冷水团控制范围增大,基本占据整个黄海槽(图 3a),冷中心温度为 $6 \sim 7^{\circ}\text{C}$,并略向西南移动,低温高盐高密特性逐渐明显。辽东半岛东南沿岸由于庄河等径流注入,呈现出低盐低密高温的特征。而在山东半岛北部沿岸,则表现为表层水高温高盐高密高浊,以蓬莱和荣成沿岸最为显著,随着水深逐渐加深,温度逐渐减小,浊度逐渐增大,将至底层时迅速增大,但高浊度区以山东成山角北部沿岸最为显著,可达到约 30 FTU (图 4a)。从 B1 和 B2 断面温度分布来看(图 5a 和图 5b) 在 B203_01 站和 B105_01 站附近,北黄海冷水团在 15m 水深以深与山东半岛沿岸水在泥质沉积体顶积层上方附近形成一个明显的垂向温度跃层(图

5a 和图 5b), B2 断面的垂向温度梯度略高于 B1 断面。在 B201_01 站与 B202_01 站之间的底层水域,盐度和密度比其周边海水的盐度和密度均略高,而与锋面处的盐度和密度较为接近,说明北黄海冷水团与山东半岛沿岸水形成的温、盐锋面可能会时而越过山东半岛外海东端的泥质沉积体顶积层(距离海岸距离约 20 km)。B1 和 B2 断面浊度分布的共同特征为:表层浊度低($1 \sim 2$ FTU),泥质沉积体近底层浊度相对高($8 \sim 12$ FTU),而北黄海冷水团中心区域的水体浊度最低(低于 1 FTU)。然而,两个断面的底层浊度分布却有所差异:在 B1 断面中,泥质沉积体顶积层附近的水体浊度很低,并恰好对应垂向温度锋面所在的位置,说明该锋面处的流速很弱,浊度值接近 $0 \sim 2$ FTU,泥质沉积体顶积层上的沉积物不易再悬浮(图 5c)。而泥质沉积体的底积层附近,则各存在一个高浊度区,浊度最高值约为 8 FTU,分别对应北黄海冷水团和山东半岛沿岸流影响的海域(图 5c),说明夏季 B1 断面泥质沉积体底积层附近的沉积物再悬浮现象较为显著。B2 断面中,在 B203_01 站,即泥质沉积体的顶积层西侧附近存在一个高浊度区,浊度值可达到 12 FTU,而两侧的底积层浊度则相对较低,基本为 $2 \sim 8$ FTU。从 B2 断面温度分布来看,高浊度值区对应山东半岛沿岸流影响的海域,故应为沿岸流携带或再悬浮的沉积物所致。由此可见,夏季山东半岛沿岸流与北黄海冷水团之间的垂向水团锋面基本上位于泥质沉积体的顶积层附近海域,由于锋面附近流速较小,故沉积体顶积层附近的浊度始终很低,而锋面两侧分属不同水团控制,且流速相对较大,故相对容易造成沉积体的再悬浮。

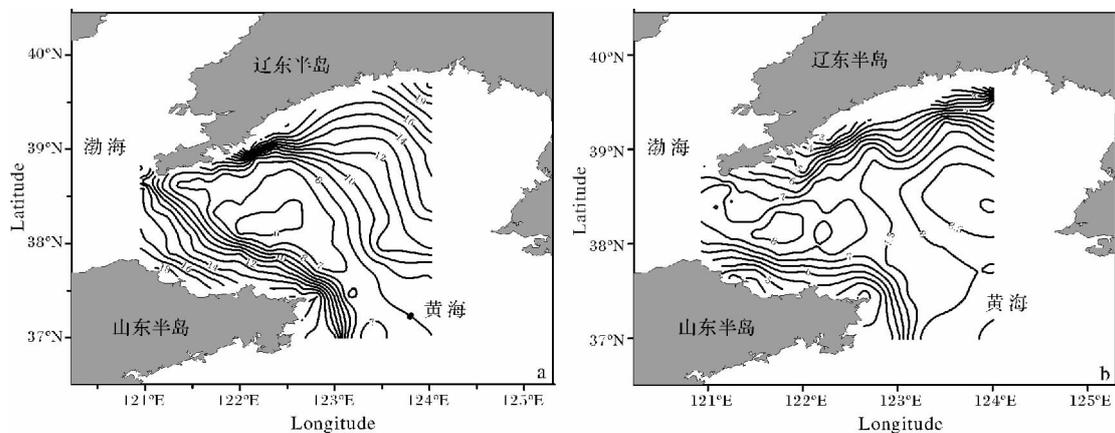


图3 夏季和冬季底层海水温度分布图(单位: $^{\circ}\text{C}$) (a. 夏季, b. 冬季)

Fig. 3 Bottom temperature distribution in summer and winter (unit: $^{\circ}\text{C}$) (a. summer, b. winter)

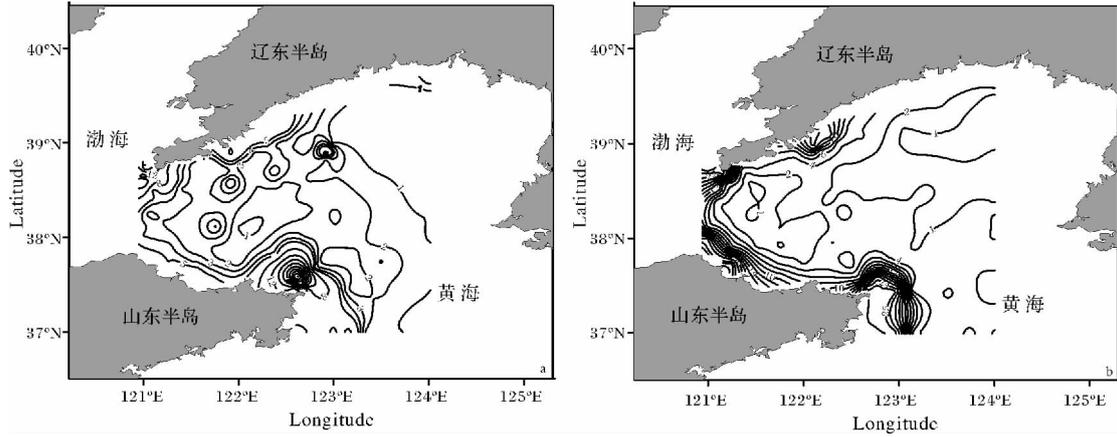


图 4 夏季和冬季底层海水浊度分布图(单位: FTU) (a. 夏季 b. 冬季)

Fig. 4 Bottom turbidity distribution in summer and winter (unit: FTU) (a. summer , b. winter)

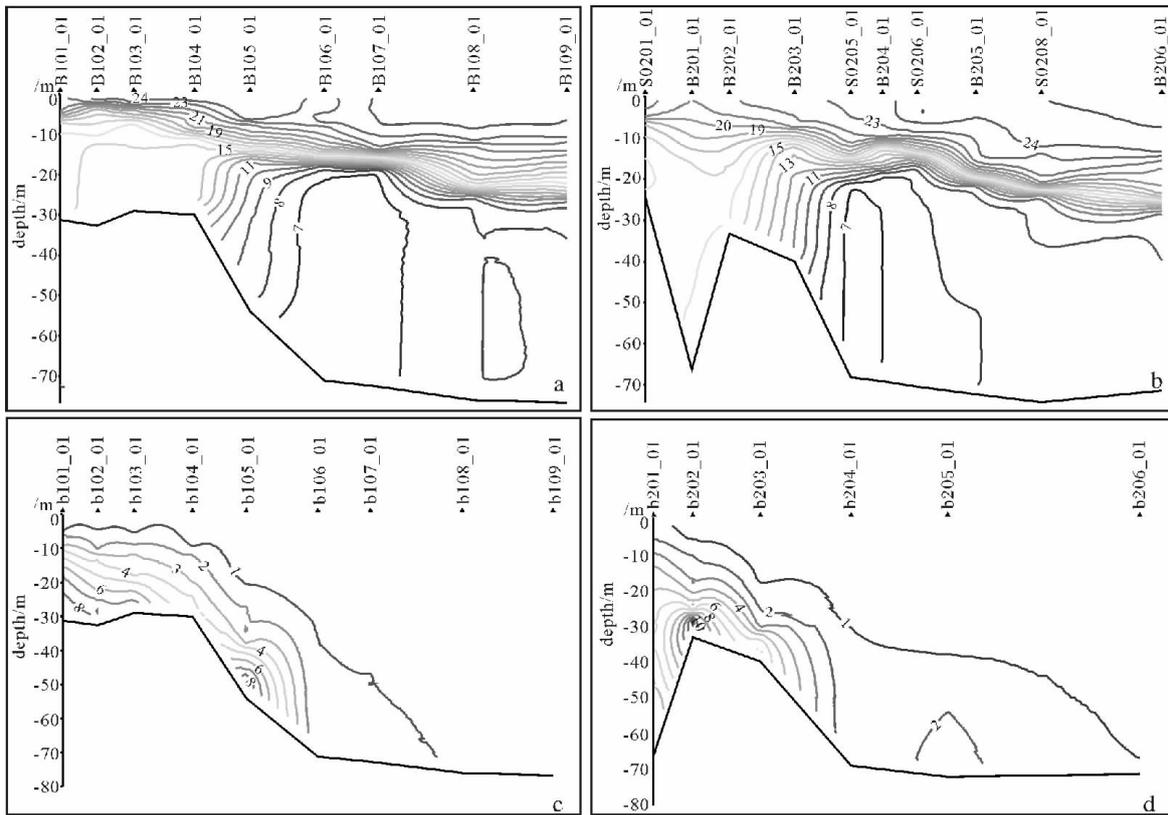


图 5 B1、B2 断面夏季温度和浊度分布图(单位: °C ,FTU)

(a. B1 断面温度 b. B2 断面温度 c. B1 断面浊度 d. B2 断面浊度)

Fig. 5 Temperature and turbidity in section B1 and B2 in summer (unit: °C , FTU)

(a. temperature in section B1 , b. temperature in section B2 , c. turbidity in section B1 , d. turbidity in section B2)

2.2 冬季水文要素特征

冬季,北黄海海水温度分布与夏季差异显著: 沿岸温度普遍较低,渤海海峡及北黄海中部水温相对较高,温度垂向分布较均匀(图 3b)。冬季盐度、密度的分布与温度不同,盐度、密度最高值出现于北黄海南

部,至底层,盐度、密度最高值逐渐偏向西南,说明夏季黄海冷水团的冷中心温度稳定,并向西南方向移动,而山东半岛东北部盐度、密度混合均匀。B1 和 B2 断面中,泥质沉积体顶积层以西近岸海域的温度较低,而以东海域温度较高,约为 8°C,是黄海暖流水

的体现。冬季调查海域浊度分布呈现出 4 个高值区：辽东半岛东南的庄河河口、辽宁老铁山沿岸海域、山东半岛北部蓬莱沿海和山东半岛成山角附近，且浊度垂直混合均匀(图 4b)。除庄河口浊度相对略低外，其余 3 个高浊度区的水体浊度均为 24 FTU 以上，以成山角附近浊度最高。B2 断面中，泥质沉积体顶积层上方等温线密集，垂向温度锋面依旧位于 B203_01 站附近(图 6b)，锋面两侧水体垂向混合均匀，泥质沉积体顶积层两侧盐度、密度和浊度相差甚小。从浊度垂向分布来看，B2 断面浊度垂向分布不同于温度(图 6c 和图 6d)，夏季 B202_01 站近底层的高浊度区在冬季浊度值显著增加，约为夏季的 2~3 倍，且垂向混合均匀，并向两侧逐渐递减，而 B204_01 站以东海域的浊度则很低，浊度值约为 0~2 FTU，与泥质沉积体附近的高浊度形成了鲜明对比。可见虽然在冬季强劲(东)北风作用下，B2 断面的泥质沉积体附近存在大量的再悬浮沉积物，但其始终不能越过泥质沉积体进入黄海槽中，显示出以 B204_01 站为界，其东西两侧的动力条件差异较大。断面 B1 中浊度锋面出现

于泥质沉积体的底积层附近(分别对应 B104_01 站和 B105_01 站)(图 6b)，但泥质沉积体西侧底积层的锋面强度相对东侧底积层附近的锋面较弱，两个浊度锋面附近的浊度值均相对较低，泥质沉积体顶积层附近的浊度值相对较高，泥质沉积体顶积层西侧浊度锋面以西海域的浊度呈逐渐增加的趋势，而泥质沉积体东侧底积层附近的浊度锋面以东海域的浊度则急剧下降，以 B105_1 站为界限，以东的黄海暖流影响海域中水体垂向的浊度则很低。由此可见，冬季 B1 和 B2 断面浊度分布与夏季较为相似，只不过垂向混合较好且浊度值高，泥质沉积体顶积层附近的浊度高，而黄海暖流控制海域的浊度整体较低。

3 数值模型

3.1 模型简介

由于研究海域缺乏长期、大面的潮流实测资料，故采用数值模拟方法以分析山东半岛东端外海泥质沉积体附近海域的冬季环流场结构。数值模式来源于国家海洋局第一海洋研究所研发的 MASNUM 海浪

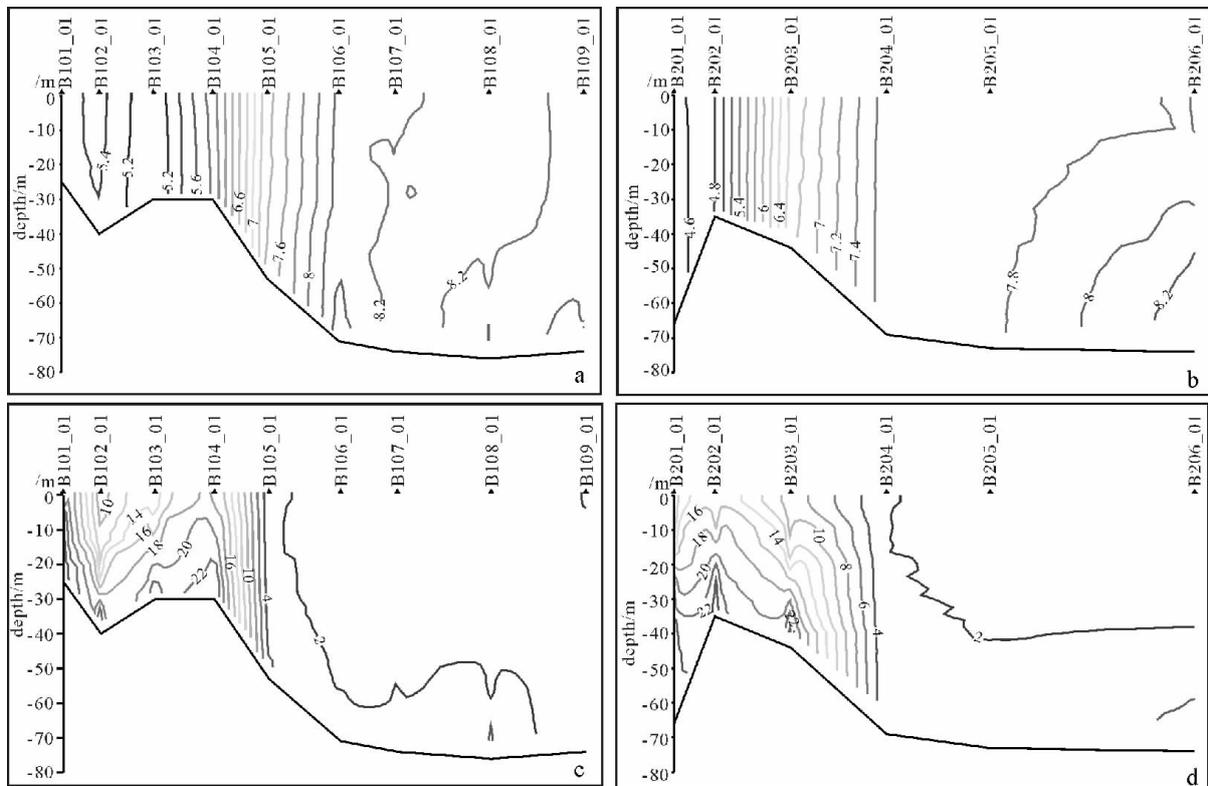


图 6 B1、B2 断面冬季温度和浊度分布图(单位: °C, FTU)

(a. B1 断面温度 b. B2 断面温度 c. B1 断面浊度 d. B2 断面浊度)

Fig. 6 Temperature and turbidity in section B1 and B2 in winter (unit: °C, FTU)

(a. temperature in section B1 , b. temperature in section B2 , c. turbidity in section B1 , d. turbidity in section B2)

—潮流—环流耦合数值模式^[13],该模型已在国家海洋环境预报中心和国家海洋局东海预报中心业务化运行,具有较高的模拟精度和可信度。模型潮流模式基于美国普林斯顿海洋数值模式(Princeton Ocean Model)^[13,14],海浪模式采用MASNUM海浪数值模式^[15,16]。模拟区域为 $15^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 $1/24^{\circ}\times 1/24^{\circ}$,海流模式垂向分为30层。边界条件由全球模式、西北太平洋区域模式逐层嵌套得到,全球模式水平分辨率为 $1/2^{\circ}\times 1/2^{\circ}$,覆盖 $78^{\circ}\text{S}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 之间的全球海域^[17],海洋环流模式所需的气象预报场取自NCEP预报结果,西北太平洋区域模式^[18]水平分辨率为 $1/8^{\circ}\times 1/8^{\circ}$,模拟区域为 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $99^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 。海浪—环流的耦合通过波致混合的方式引入^[20],潮流—环流耦合采用在开边界上考虑潮波输入方式^{[17][19]}。气象强迫场来自MM5大气数值模式^[20]的72小时预报,该模式的区域为 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $99^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 $1/5^{\circ}\times 1/5^{\circ}$,由国家海洋局海洋环境预报中心研制并业务化运行^[21]。

3.2 B1和B2断面冬季环流结构分析

由于受到冬季强劲的东北风影响,沿岸流和黄海暖流也得以增强,冬季北黄海海域沉积物再悬浮现象显著,水体浊度值远高于夏季,沿岸水体尤为显著。数值模拟的结果显示冬季北黄海海域2月份中层(20 m)环流场的显著特征为山东半岛北部(蓬莱至威海)的沿岸流基本沿岸向东流向外海,且流速较大,其输送悬浮体的能力大大增强(图7),结合冬季山东半岛北岸高悬浮体浓度带的卫片(图1)以及冬季山东半岛北岸高浊度水体观测结果(图4b),说明

冬季是山东半岛北岸再悬浮沉积物向外海输送的主要季节。冬季来自山东半岛北部沿岸中底层的沿岸流经过成山角后,由于惯性作用,并不能马上沿岸转向南,除表层流受风影响外,中底层流均与山东半岛东岸保持一定距离而平行南下。该现象在B1断面的温度、密度分布图中均有反映:在泥质沉积区西侧的两条 5.4°C 等温线中间出现 5.2°C 等温线,在泥质沉积区西侧在 25.1 kg/m^3 等密度线中间出现一段高密水,这均是冬季渤海水低温高盐特征的体现。然而,山东半岛东部(荣成以南至石岛)沿岸表、中、底层环流结构并不完全一致(图8)。以B1和B2断面所在海域的环流结构为例,受冬季盛行东北风作用,泥质沉积体顶积层上方海域(123°E 附近)15 m以浅以南向的风海流为主,这支南下的沿岸流流幅与山东半岛东端外海的泥质沉积体顶积层宽度相当,但泥质沉积体顶积层近底层附近的流速很小,至山东半岛东端外海的泥质沉积体顶积层附近南向风海流则基本消失。值得关注的是,B1断面和B2断面中泥质沉积体顶积层两侧的环境结构呈现出对称分布的特征——B1和B2断面中泥质沉积体顶积层两侧中下层水体各存在一支强大的逆风补偿流,其中东侧的北向流流速相对较大,且流幅相对较宽。B1断面 122.8°E 和B2断面 123.1°E 以西10 m以浅海域以南向沿岸风海流为主,而10 m以深海域则以北向逆风补偿流为主,同样,B1断面 123.1°E 和B2断面 123.0°E 以东表层以深海域为北向逆风补偿流,而表层流则为南向风海流。而且,由B1和B2断面垂向环流结构图可看出,泥质沉积体两侧中下层水体的北

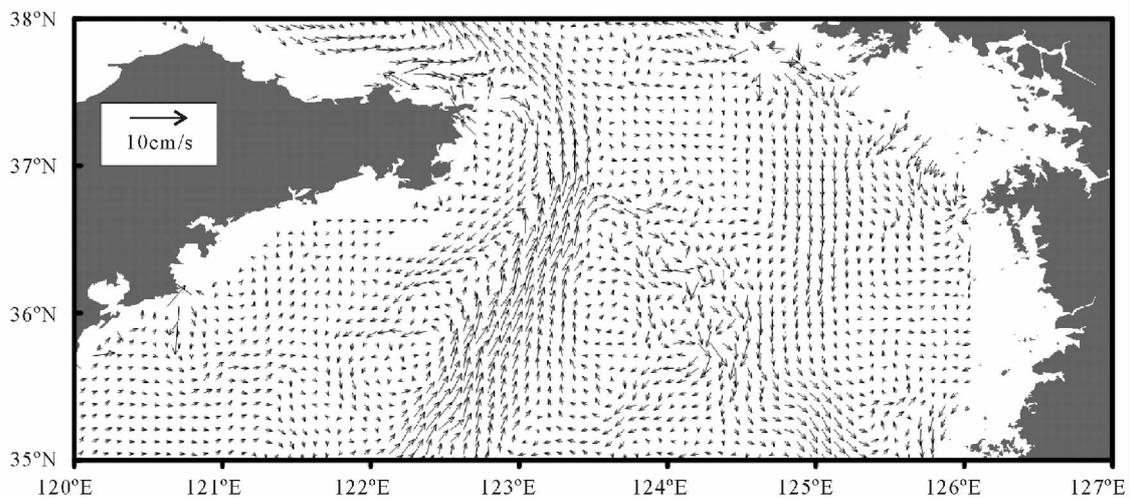


图7 渤、黄海冬季中层水环流图(20 m)

Fig. 7 Circulation in the middle layer in winter in the Yellow Sea and Bohai Sea

向流均在泥质沉积体的底积层附近达到最强,形成了两个鲜明的强流区。此外,在泥质沉积体东侧的底积层附近存在显著的温度和浊度锋面(B104_01站和B105_01站之间,以及B203_01和B204_01之间),其中B1断面锋面强度要强于B2断面。锋面两侧的温度和浊度分布差异较大,锋面以东温度和浊度迅速衰减,表明锋面两侧应是两支性质不同的水团。根据冬季B1和B2断面的温度分布可知,锋面以西为山东半岛沿岸流,锋面以东为黄海暖流。结合冬季B1和B2断面环流场的垂向分布(图8),在黄海中部表层海域,黄海暖流并不明显,表层流在黄海槽处较弱,与黄海槽西侧的南下强沿岸流形成鲜明的反差,但至中底层水,黄海暖流逐渐加强(图8),中层水中山东半岛流向外海的沿岸流有所减弱,其流速与黄海暖流相当,说明泥质沉积区顶积层与底积层附近海域是山东半岛南下的沿岸流与黄海暖流发生强烈海流切变的分界线。

因此,从B1和B2断面的冬季环流场垂向特征来看,冬季山东半岛东端外海的泥质沉积体两侧中下层水体的北向逆风补偿流与泥质沉积体上方的南向风海流形成了显著的强海流切变锋,而泥质沉积体则恰好位于两道锋面的中间(图8)。

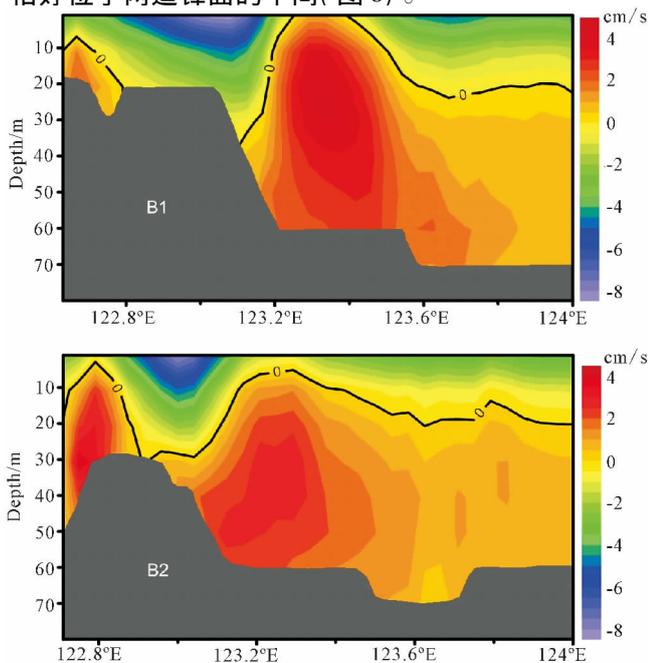


图8 B1和B2断面冬季流速分量 v 分布
(正值代表北向流,负值代表南向流)

Fig. 8 Velocity component v distribution in B1 and B2 in winter
(Positive value denotes northward current, negative value denotes southward current)

4 浅地层剖面和钻孔取样分析

环山东半岛东端外海分布的泥质沉积体引起了众多海洋地质学家的关注,比较有代表性的研究有:Yang^[7]于2004年和2005年在山东半岛东北部沿海进行了约1600 km长的高分辨率浅地层剖面观测(图9),完整揭示了环绕山东半岛东北部沿陆架坡分布的泥质沉积带(图10),并通过a、b两个断面浅地层剖面资料分析(图9),表明该泥质沉积体分布在距离山东半岛东端的陆架坡附近20~25 m水深处,厚约20~40 m,东西跨度约40 km,而且泥质沉积体的剖面形状为独特的 Ω 形状。Yang^[7]对泥质沉积体实施了钻孔取样,¹⁴C同位素测年分析结果表明钻孔底部沉积对应11ka时的融冰水1B事件的海侵沉积,而泥质沉积体以下则是最大洪泛面,而且该沉积体主要为黄河入海泥沙,其沉积年代约是11ka BP。Liu等^[6]认为环绕山东半岛东端外海的泥质沉积体总量大约为400 km³,其形成年代约是9.2~11 ka,并对该泥质沉积体进行了²¹⁰Pb分析,测算了该泥质沉积体的沉积速率,结果表明在水深小于30m的沉积区,沉积速率约为6~12 mm/a,泥质沉积体中部的沉积速率约为3 mm/a,而水深大于50 m的沉积体,沉积速率则不足1mm/a。

由此看来,来自渤海的悬浮体和再悬浮沉积体能够通过海洋动力作用输送到北黄海,而山东半岛东北沿岸则是其输送和沉积路径之一。然而,沿山东半岛东端外海分布的泥质沉积体的顶积层和底积层的沉积速率并不相同,而且其剖面形状不同于一般的斜坡式沉积体,呈现出 Ω 状。因此,该海域的沉积动力条件必有其独特之处,山东半岛沿岸流、黄海冷水团和黄海暖流等流系在泥质沉积体的形成和演化过程中均起到了重要作用。

5 山东半岛东端外海泥质沉积体沉积动力环境初步探讨

综合夏季和冬季北黄海海域浊度的大面分布以及B1、B2断面夏季和冬季浊度分布,可发现夏季高浊度水体仅限于近底层水体,随着季节性温跃层的消失,以及冬季强风的作用,冬季水体浊度垂向混合良好,水体浊度值显著高于夏季,加之研究海域冬、夏季环流场的差异。因此,泥质沉积体附近海域的悬浮体输送和沉积可能具有显著的季节性变化。

夏季,由于研究海域温跃层对水体水平和垂向扩

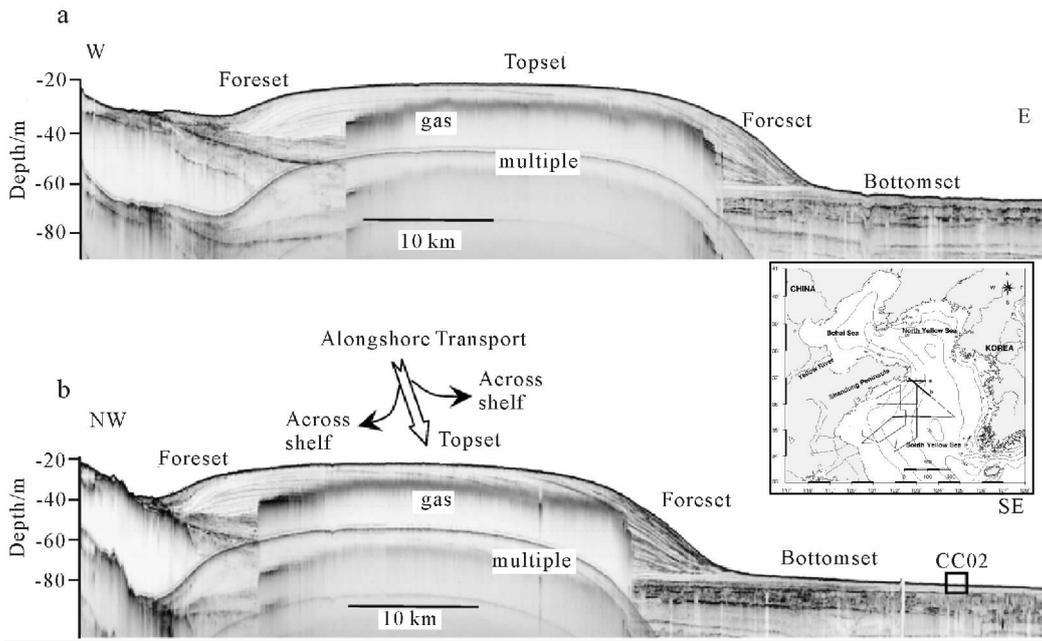


图 9 浅地层剖面示意图(引自 Yang and Liu ,2007)

Fig. 9 Interpretation of subbottom profiler diagram (from Yang and Liu ,2007)

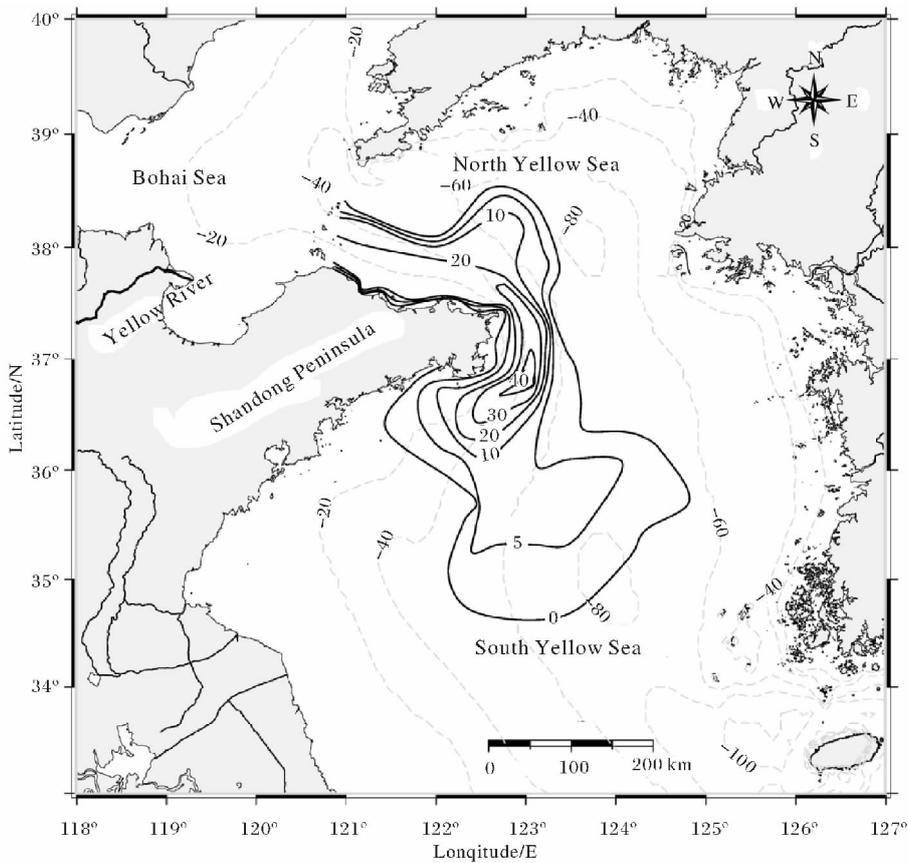


图 10 山东半岛东端泥质沉积体分布(引自 Yang and Liu 2007)

fig. 10 The mud wedge distribution off eastern Shandong Peninsula(from Yang and Liu ,2007)

散能力的抑制作用,影响了泥质沉积体底层高浊度水体向中上层水体以及两侧水体的扩散,故高浊度水体仅限于泥质沉积体近底层水体附近。而且,夏季山东半岛东端外海的沿岸水与北黄海冷水团形成了鲜明的温度锋面,强度要小于水平方向上的温跃层,然而,该温度锋面的位置恰好位于泥质沉积体东侧底积层附近,温度锋面代表了夏季两支不同的流系以山东半岛东端外海泥质沉积体东侧底积层附近为界。与此同时,在温度切变锋处也同样存在显著的浊度切变锋,也从一个方面反映出山东半岛东端外海泥质沉积体附近的再悬浮沉积体鲜有穿越山东半岛东端沿岸流与北黄海冷水团形成的温度锋面。因此,夏季水体垂向层结现象显著,泥质沉积体上方水平分布的季节性温跃层与沿岸水和北黄海冷水团形成的垂向温度锋面共同作用,抑制了泥质沉积体近底层的再悬浮沉积物向中上层水体的扩散和纬向的扩散,加之夏季泥质沉积体附近潮流流速较弱,夏季泥质沉积体近底层水体相对高的水体浊度,应多是沉积物局地再悬浮所致,有部分再悬浮沉积物可沿岸输送,却鲜有穿越锋面进入北黄海冷水团。

冬季,南下的山东半岛沿岸流位于泥质沉积体底积层的上层水体,而北上的黄海暖流位于泥质沉积体东侧底积层中下层水体,两支流在泥质沉积体东侧底积层中上层附近发生了强烈的流速切变,由于水团性质的差异,形成了显著的温度和浊度锋面。锋面以东水体浊度衰减明显,说明冬季山东半岛沿岸流与黄海暖流形成的强海流切变锋面扮演了“水障”的角色,使得底积层附近的再悬浮沉积物少有能穿过锋面向东输运。因此,冬季泥质沉积体附近的再悬浮沉积物的纬向输送量应很小。其次,在泥质沉积体向岸一侧底积层附近的中下层水中存在一支北上的逆风补偿流(在20 m环流场和流速剖面中均可见),这支流与泥质沉积体顶积层附近上层水中的南下的山东半岛沿岸流也形成了较强烈的流速切变。因此,泥质沉积体底积层附近中下层水分别处于北上的黄海暖流和山东半岛近岸一支北上的逆风补偿流的作用之下,且两支流的流速相对较大,容易掀动泥质沉积体底积层附近的沉积物再悬浮,从而造成底积层附近中下层水体维持较高的水体浊度。然而,泥质沉积体顶积层附近中下层水体流速虽然相对较弱,但顶积层附近水体浊度值却很高。这主要应归功于顶积层两侧两支北向的逆风补偿流掀动泥质沉积体底积层上的沉积物大量再悬浮,由于顶积层位于两支强海流切变锋的中

间,底积层附近大量的再悬浮沉积物少有能穿越切变锋,故只能扩散至顶积层附近,从而导致顶积层附近中下层水体的高悬浮体浓度。加之,泥质沉积体顶积层中上层水体以南向风海流为主,故大量来源于底积层的再悬浮沉积物可向南输送。因此,冬季是泥质沉积体上大量再悬浮沉积体经向输送的主要季节,而山东半岛东部沿岸则是再悬浮沉积物向南黄海输送的一条通道。但泥质沉积体的顶积层和底积层的输送和沉积却并不相同。由于顶积层两侧存在的山东半岛近岸中下层水的逆风补偿流和黄海暖流的作用,泥质沉积体底积层上的沉积物可大量的再悬浮,同时两支北向流在顶积层中上层水中与南向的沿岸流产生的海流切变锋,使得再悬浮沉积物大量富集于顶积层附近。然而,顶积层附近流速相对较小,故沉积物再悬浮量较小,从而造成了顶积层附近沉积速率明显高于两侧的底积层。

此外,山东半岛的岸线形状十分也有助于泥质沉积体的形成,该海域是多个水团和流系交汇的地方,且季节性变化较强。数值模拟所得的冬季环流场显示,南下的山东半岛东部沿岸流流经山东半岛西南角后,除表层流外,中底层水流速迅速减小,由于继续向南受到黄海暖流的阻碍,故在 36.7°N 附近逐渐向西偏转,流速减弱,故其携带的大量再悬浮物沉积物也随之沉积,可能对形成南黄海西北部较大的沉积区(Liu et al.^[11])具有一定的贡献。而在山东半岛东端外海泥质沉积体西侧底积层附近北上的一支逆风补偿流,在沿岸山东半岛东部沿岸北上的过程中流速不断减小,当抵达成山角附近时受凸出的岸线阻碍而转向东南,故其沿途携带的再悬浮物汇入南下的沿岸流向南输送。

6 结论

综上所述,冬季是山东半岛东端外海的泥质沉积体的再悬浮物沉积物向南输送的主要季节,而夏季的输送量非常有限,无论夏季还是冬季,对于山东半岛东部沿岸的悬浮体来说,夏季北黄海冷水团和冬季黄海暖流均起到了“水障”的作用——使得山东半岛东端外海泥质沉积体附近的再悬浮沉积体主要以沿岸输送为主,而鲜有纬向的输送。夏季,调查海区海水浊度普遍小,北黄海温跃层抑制了底层悬浮体向上层水体的扩散,而在中底层北黄海冷水团与山东半岛东部沿岸水在泥质沉积体附近形成明显的垂向温度锋面,进一步阻碍了悬浮体的纬向输送,少量悬浮体只

能沿岸输送和沉积,故夏季主要是泥质沉积体附近悬浮体沉积的主要时节。冬季,山东半岛东端外海的泥质沉积体顶积层上方浊度较高,且垂向混合较高,而顶积层两侧浊度则有明显的减小。受冬季盛行的东北风作用,山东半岛东端的泥质沉积体上方10 m以浅海域主要为沿岸南下的风海流,其流幅与泥质沉积体的宽度相当,这支南下的沿岸流与顶积层西侧的山东半岛北上逆风补偿流和北上的黄海暖流形成了两道明显的强海流切变锋。虽然泥质沉积体底积层附近两支北上的逆风补偿流掀起了底积层上的大量沉积悬浮体,然而由于强海流切变锋的制约,却少有穿越海流切变锋面,只能扩散至泥质沉积体顶积层附近,并随南下的沿岸流向南输送,从而有助于形成山东半岛东部沿海特有的 Ω 形状的泥质沉积带,而不是通常所见的斜坡状沉积带。

致谢 感谢国家海洋局908项目的支持,感谢国家海洋局第一海洋研究所海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室为本文提供了业务化浪潮流耦合数值预报模式模拟结果。

参考文献(References)

- 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]. Journal of Ocean University of China, 2005, 35(2): 237-244]
- Li G. X., Yue S. H., Zhao D. B., et al. Rapid deposition and dynamic process in the modern Yellow River Mouth[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(3): 29-36
- 秦蕴珊,李凡,等. 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, et al. The study on suspended matter in Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1982, 14(2): 191-200]
- Zhang J., Huang W. W., Martin J. M. Trace metals distribution in Huanghe (Yellow River) estuarine sediments[J]. Coastal and Shelf Science, 1988, 26(5): 499-516
- Liu J. P., Milliman J. D., Gao S. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2004, 209: 45-67
- 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, 2002, 21(4): 212-218
- Yang Z. S., Liu J. P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240: 169-176
- Correggiari A., Trincardi F., Langone L., et al. Styles of failure in late Holocene highstand prodelta wedges on the Adriatic shelf[J]. Journal of Sediment Research, 2001, 71: 218-236
- 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
- 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): 647-653 [Su Jian, Jiang Wensheng, Sun Wenxin. Analysis of SPM data obtained in ocean investigation in the Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 2001, 31(5): 647-653]
- 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
- Li Z., Bao X. W., Wang Y. Z. 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
- 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
- Xia C. S., Qiao F. L., Zhang Q. H. Numerical modeling of the quasi-global ocean circulation based on POM[J]. Journal of Hydrodyn: Series B, 2004, 16: 537-543
- Yuan Y. L., Pan Z. D., Hua F. LAGFD-WAM numerical wave model-I Basic physical model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1991, 10: 483-488
- 杨永增,乔方利,赵伟. 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: 1-7 [Yang Yongzeng, Qiao Fangli, Zhao Wei. MASNUM ocean wave numerical model in spherical coordinates and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27: 1-7]
- 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: C11S03, doi: 10.1029/2005JC003218
- Qiao F. L., Yuan Y. L., Yang Y. Z., et al. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application in a global ocean circulation[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L11303, doi: 10.1029/2004GL019824
- Lv 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: 620-632
- Grell G. A., Dudhia J., Stauffed D. R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, 1995
- 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: 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: 1-9]
- Liu J. P., Li A. C., Xu K. H. Sedimentary features of the Yangtze River-

derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. Conti-

ental Shelf Research, 2006, 26: 2141-2156

Suspended Sediment Transport and Deposition due to Strong Regional Shear Current Front: an example from the shelf waters off eastern Shandong Peninsula

WANG Yong-zhi^{1 2} QIAO Lu-lu³ YANG Zuo-sheng³ BAO Xian-wen³
ZHAO Mei-xun³ WANG Guan-suo^{1 4}

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao, Shandong 266061;

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071;

3. College of Geo-Marine Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100;

4. Key Lab of Marine Science & Numerical Modeling (MASNUM), Qingdao, Shandong 266061)

Abstract: Based on field data of temperature, turbidity and suspended matter concentration in summer and winter derived from the project named National Coastal Sea Comprehensive Investigation and Evaluation (908-ST02), the suspended sediment transport and deposition due to strong regional shear current front off eastern Shandong Peninsula were studied, combined with observation from B1 and B2 sections, circulation simulation in winter by POM model and shallow seismic profile. The results show that the transportation mechanism of suspended matter off eastern Shandong Peninsula is similar to the existing rule in East China Sea: deposition in summer and transport in winter. In summer, not only suspended matter was restricted near bottom by thermocline, but also restricted by the front formed by coastal currents off eastern Shandong Peninsula and northern Yellow Sea cold water mass. Therefore suspended matter mainly deposited in summer. In winter, with the help of strong northeasterly wind and the thermocline, the turbidity was high vertical mixing was better off eastern Shandong Peninsula. However, two strong shear current fronts could be found on both sides of the top-set of mud wedge, which was respectively generated by northward upwind compensation current along eastern Shandong Peninsula in the middle and lower water, northward Yellow Sea warm currents and southward coastal wind currents above topset of mud wedge. The two strong shear current fronts prevented suspended sediments from bottom-set of the mud wedge getting cross eastern Shandong Peninsula continental shelf peripheral, which was helpful to omega-shaped (‘Ω’) mud wedge formation off eastern Shandong Peninsula.

Key words: suspended sediment; Yellow Sea cold water mass; yellow Sea warm current; muddy wedge