

山东莱州浅滩地区沉积特征与沉积作用*

王庆¹ 战超¹ 商杰² 宋传广¹ 仲少云¹ 刘亚龙¹ 王红艳¹

(1. 鲁东大学海岸研究所 烟台 264025; 2. 国家海洋局北海预报中心 青岛 266033)

提要 通过系统采集海底表层沉积样品进行粒度测试分析,对现代莱州浅滩地区的沉积类型、粒度特征、泥沙搬运方式、运移趋势及沉积动力、沉积机制进行了研究。结果表明,莱州浅滩是形成于松散碎屑堆积海岸岬角岸外的砂砾质水下沙洲/沙脊,它的形成深刻改变了浅滩地区原有的沉积动力和机制,在浅滩两侧海域各自形成了大致对称的潮余环流,分别与两个主要由跃移质和悬移质组成的沉积区域对应。莱州浅滩的沉积动力模式与现有的岬角相连型浅滩沉积动力模式均不同,可能代表了岬角相连型水下沙洲/沙脊的一种新的类型。

关键词 水下沙洲/沙脊, 动力沉积, 莱州浅滩, 岬角相连型沙洲, 刁龙嘴

中图分类号 P731

水下沙洲/沙脊是重要的海岸堆积地貌类型(邢飞等, 2010)。其中,发育在海岸岬角附近者被称为岬角相连型水下沙洲/沙脊,包括位于由坚硬基岩构成的侵蚀海岸岬角一侧或两侧水下者(Dyer *et al.*, 1999)和正好位于由松散碎屑堆积物构成的海岸岬角顶部岸外水下者(McNinch *et al.*, 1999)。研究表明,形成和维持岬角相连型水下沙洲/沙脊的沉积动力过程,包括潮流在海岸岬角附近运动产生的瞬时潮流和余流漩涡(Pygree, 1978; Signell *et al.*, 2000; Bastos *et al.*, 2004)、次生环流或螺旋流(Heathershaw *et al.*, 1980; Geyer *et al.*, 1989; Geyer, 1993; Alae *et al.*, 2004)、非对称性落潮或涨潮(Berthot *et al.*, 2005)和海岸岬角两侧两个潮流漩涡的汇合(McNinch *et al.*, 1999, 2000)等。

莱州浅滩位于山东省东部的胶东半岛西北岸、莱州湾东南部的刁龙嘴西北岸外(赵鹏等, 2010),按 1984 年测量海图上-5.0 m 等深线量算,浅滩长 16.0 km、宽 0.5—7.0 km、相对高度 8.0—10.0 m,滩顶近岸部分低潮时出露水面以上。自 19 世纪中叶以来就是著名大型航道浅滩,其附近海域和陆地自然资源丰富,在建或拟建大型海岸海洋工程众多,浅滩具有

潜在的开发利用价值。前人曾对与浅滩相连的海岸岬角——刁龙嘴海岸地貌演变动态进行深入研究(蔡爱智, 1980; 庄振业等, 1989, 1994; 常瑞芳等, 1993)。近年来的研究表明,浅滩为波浪作用下形成的典型沙嘴式水下浅滩,受刁龙嘴岬角海岸地貌演变控制,最近 150 年来浅滩整体不断向东北迁移、西北延伸(王庆等, 2003)。

在 Dyer 等(1999)的水下沙洲/沙脊分类系统中,莱州浅滩属于岬角相连型水下沙洲/沙脊(Headland associated sand banks and ridges),其所处地貌部位与许多著名的大型沙洲/沙脊如美国 Cape Lookout 浅滩(McNinch *et al.*, 1999)非常相似,均位于由松散碎屑物质堆积而成的海岸岬角顶部岸外。但是,Lookout 岬角等一直处于蚀退状态,而与莱州浅滩相连的刁龙嘴岬角处于淤进状态,二者有完全不同的碎屑物质组成、泥沙来源、海岸动力地貌背景,其沉积动力及动力沉积分异过程也必然不同。近年来,作者在前人研究基础上,通过在系统采集海底表层沉积样品进行粒度测试分析,对浅滩地区的沉积特征、沉积作用进行了研究,以期对浅滩自然环境保护和资源科

* 国家自然科学基金项目, 41071011 号; 教育部重点科技项目, 210122 号; 山东省自然科学基金项目, Z2008E03 号; 山东省高等学校科技计划项目, J09LE07 号和烟台市科技攻关计划项目, 2008323 号。

通讯作者: 王庆, 教授, 博士生导师。E-mail: schingwang@tom.com

收稿日期: 2010-02-15, 收修改稿日期: 2011-06-10

学利用提供海岸地貌理论依据。

1 实验方法

1.1 样品采集

在船上利用抓斗式重力取样器采集莱州浅滩海底表层沉积物样品 108 个, 样品采集深度不超过 5.0 cm, 其中 30 个分布在浅滩顶部, 56 个分布在浅滩西南, 22 个分布在浅滩东北(图 1、图 2)。样品间隔一般为 1000 m, 在某些地形变化急剧区域加密为 500 m。采样过程中利用手持 GPS 定位系统定位。样品采出后立即置入可自动密封的聚乙烯塑料袋, 统一编号后带回实验室进行粒度测试和分析。

1.2 粒度测试

首先, 取部分充分混合的样品烘干(50℃以下)并测重后, 加入 10.0—15.0 ml 浓度 30%的过氧化氢溶液并浸泡 12 h 以上, 再次将样品烘干(80℃以下)后测量沉积物干重。其次, 利用 63 μm 标准分样筛将样品分成两部分, 直径大于 63 μm 部分利用标准分样套筛继续分筛, 小于 63 μm 部分利用激光粒度仪进行测量。再次, 对得到的粒度原始数据归一化并用 Φ 值表示, 计算样品中不同粒级颗粒的质量百分含量, 绘制粒度累积曲线图和累积概率曲线图(图略)。最后, 利用乌顿-温德华氏粒级标准进行沉积物类型划分, 并绘出表层沉积物类型分布图(图 2)。

1.3 参数计算

首先, 从粒度累积曲线上得到 5%、16%、25%、50%、75%、84% 和 95%处的粒径值, 据此计算平均粒径 (MZ_{Φ})、中值粒径 (Md_{Φ})、四分位离差(QD_{Φ})、

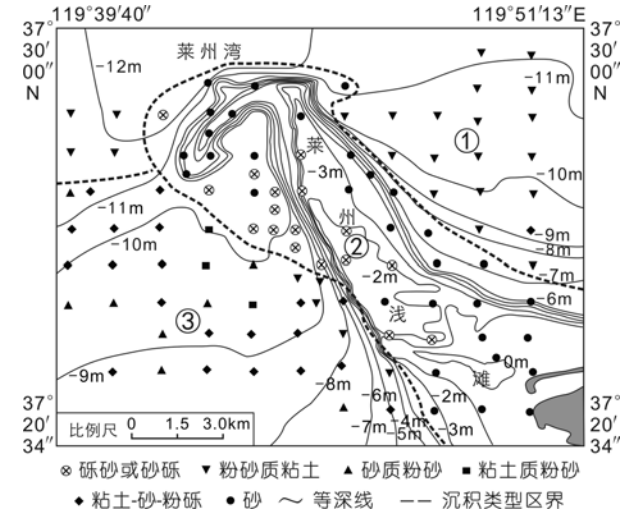


图 2 莱州浅滩地区表层沉积物采样点和各样点沉积类型(①沙沉积区;②砂砾沉积区;③粉砂沉积区)

Fig.2 Surface sediment sampling sites, sediment types and their distribution in the Laizhou shoal

分选系数(σ)、偏态系数(SK)、众数(MO_{Φ})和峰度(KG)等粒度参数, 并做出各参数的等值线分布图(图 3、图 4, 其余图略)。

其次, 根据平均粒径、分选系数和偏态系数等粒度参数的计算结果, 按照 Gao-Collins 模型(Gao et al, 1992; Gao, 1996)方法进行粒径参数分析, 计算时采用 Surfer 软件自动生成每一个样点的粒径趋势矢量。最后, 获得表层沉积物的运动趋势矢量图(图 7), 定性显示研究区沉积物净运移方向信息。

2 研究结果

2.1 浅滩沉积特征

2.1.1 沉积物类型 沉积物类型及区域分异综合反映泥沙、动力、地貌和冲淤状态对沉积过程影响。莱州浅滩及附近表层沉积物类型多样, 包括砂砾、砾砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粘土质粉砂、粉砂质粘土、砂-粉砂-粘土混合物, 而且不同样点之间的沉积物类型差别很大, 不同地貌部位沉积物类型组合的区域分异明显(图 2)。浅滩顶部及西南部分地区为砂砾、砾砂和砂为主的砂-砾质沉积区, 其中颗粒最粗区域位于浅滩西北段与北东向倒钩之间的 9—10 m 水深区, 该粗粒区与其地貌部位、水深显然不一致; 浅滩东北为以粉砂质砂为主的砂质沉积区, 7—11 m 水深之间广大区域为单一的粉砂质砂; 浅滩西南为粉砂质沉积区, 粉砂质砂、砂质粉砂、粘土质粉砂和粘土-砂-粉砂混合物都有出现, 各类型沉积物呈斑块状交错分布, 但向西北方向的 12 m 水深区域又迅速转变

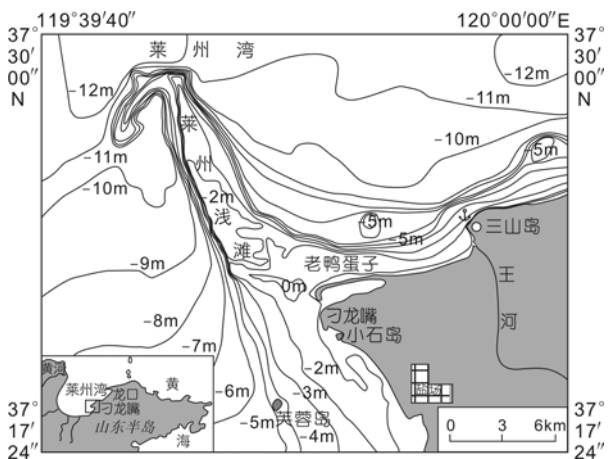


图 1 莱州浅滩地区地理位置和海底地形(据 1984 年测量海图改编)

Fig.1 Map of geographical location and topography of the Laizhou shoal region(adopted according to the chart measured in 1984)

为较粗的粉砂质砂(图 2)。

2.1.2 中值粒径 沉积物粒径的区域差异能够反映区域沉积动力环境的能量分布情况(李原等, 1999)。以中值粒径代表沉积物粗细的平均状况, 中值粒径越粗则环境能力越大, 中值粒径越细则能力越小。研究区沉积物样品中值粒径在 $-1.55\sim 7.65\Phi$ 之间。其中, 浅滩顶部中值粒径最大($0\sim 0.5\Phi$), 自东南向西北变细的趋势不明显, 但向两侧海域急剧变细; 浅滩东北海域中值粒径为 $1\sim 4\Phi$, 沿浅滩延伸方向自东南而西北有明显的变粗趋势; 浅滩西南海域粒径为 $0\sim 6\Phi$, 沿浅滩延伸方向自东南向西北先变细再变粗(图 3)。

2.1.3 Φ 值四分位离差 表示沉积物分选程度, 其大小与分选程度相反, 而分选程度又综合反映沉积动力过程的能量变幅、泥沙搬运方式及组合情况。研究区 Φ 值四分位离差值为 $0.4\sim 2.9$ (图 4)。其中, 浅滩顶部为 $0.4\sim 2.2$, 沉积物分选程度为中等到很好, 自西南向东北、自东南向西北变差; 东北部大部分为 $0.6\sim 1.4$, 沉积物分选程度为好, 沿浅滩延伸方向自东南而西北明显变好; 西南部大部分为 $1.4\sim 2.2$, 分选程度为中等, 沿浅滩延伸方向自东南而西北变好, 但局部(如浅滩中段西南侧)大于 2.2 , 分选程度为差。

2.1.4 粉砂、粘土含量 近岸海底沉积物中粉砂与粘土含量及空间变化反映泥沙来源和区域动力差异(Collins, 1987; Mazzullo, 1988)。莱州浅滩顶部表层沉积物以砂为主, 粉砂和粘土含量小于 5% , 且绝大部分样品含量为 0 (图 5、图 6)。自浅滩顶部向两侧粉砂、

粘土含量剧增, 浅滩东北大部分样品粉砂与粘土总量为 $40\%\sim 55\%$, 其中粘土为 $6\%\sim 20\%$ 、粉砂为 $30\%\sim 40\%$ 。西南大部分样品粉砂与粘土总量为 $65\%\sim 80\%$, 其中粘土为 $20\%\sim 30\%$ 粉、砂为 $40\%\sim 55\%$ 。沿浅滩延伸方向自东南而西北, 浅滩东北部和西南部粉砂与粘土总量均显著变小, 但粘土含量在东北部一直减小, 而西南部为先增加再减小。

沉积物中粉砂/粘土含量比值(S/C)反映沉积动力强弱及区域差异, 比值高则表示动力条件强, 反之则弱(Ergin *et al*, 1999)。由于浅滩顶部几乎不含有粉砂、粘土, 因而仅对浅滩西南 56 个、东北 22 个样品 S/C 比值进行了计算。结果显示, 浅滩东北 S/C 比值为 $2.5\sim 7.0$, 但空间分布很不均衡, 沿浅滩延伸方向自东南而西北有增加的趋势, 并表现出中部比例高、周围低的分布格局。浅滩西南 S/C 为 $2.0\sim 2.5$, 远远小于东北海域, 但区域分布比较均匀, 沿浅滩延伸方向自东南而西北有先减小再增加的趋势, 也呈现出中部比例高、周围低的分布格局。以上粉砂、粘土含量及其比值表明, 浅滩东北海域动力强于西南海域, 而西南、东北海域又均具有中部弱、周围强的环状区域动力格局。

2.2 浅滩沉积作用

2.2.1 泥沙搬运方式 泥沙搬运方式取决于泥沙粗细、数量和动力强弱等, 粒径相同的泥沙在同一动力环境中必然具有相同的搬运方式,但在不同动力环境中可能具有完全不同的搬运方式,因而其组合情况在不同区域因动力环境不同而有区别。对 108 个样品

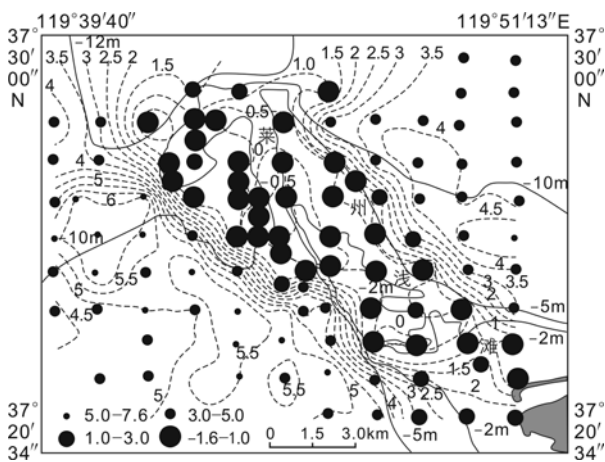


图 3 莱州浅滩地区表层沉积物中值粒径/ Φ 分布 (实线: 等深线; 虚线: 等值线)

Fig.3 Surface sediment Md_{Φ} distribution in the Laizhou shoal

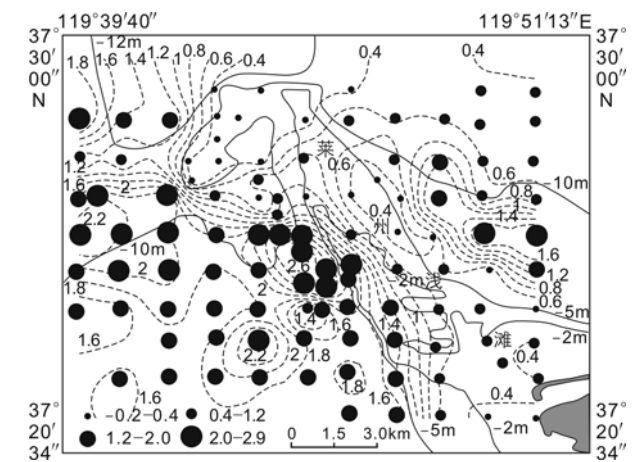


图 4 莱州浅滩地区表层沉积物四分位离差分布 (实线: 等深线; 虚线: 等值线)

Fig.4 Surface sediment QD_{Φ} distribution in the Laizhou shoal

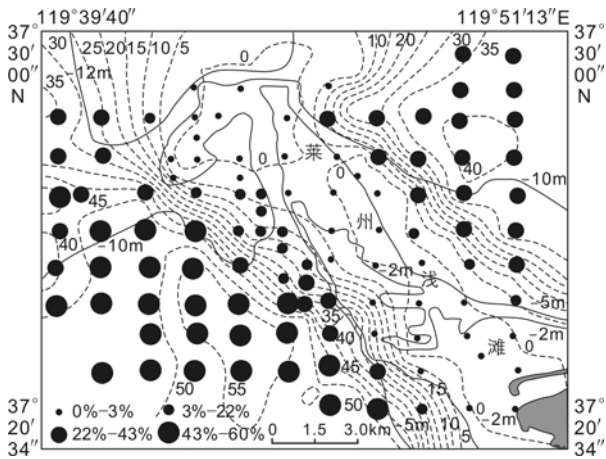


图5 莱州浅滩表层沉积物粉砂加粘土含量/%(实线: 等深线; 虚线: 等值线)

Fig.5 Silt and clay content of the surface sediments in the Laizhou shoal

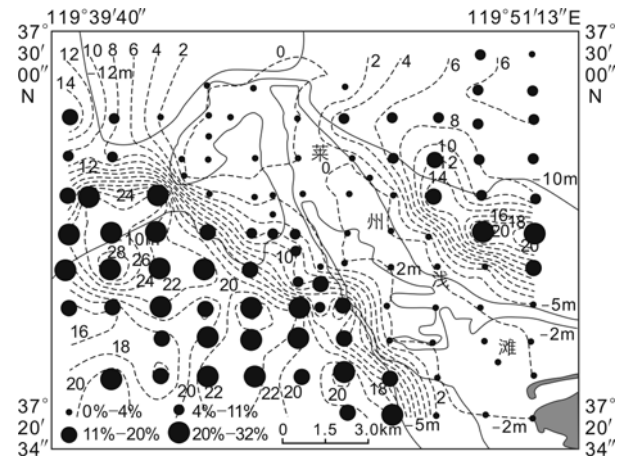


图6 莱州浅滩表层沉积物粘土含量/%(实线: 等深线; 虚线: 等值线)

Fig.6 Clay content in the surface sediments in the Laizhou shoal

概率累积曲线分析、统计表明, 莱州浅滩沉积物的泥沙搬运方式及组合情况复杂多样, 不同地貌部位具有不同的泥沙搬运方式组合(表 1)。浅滩顶部沉积物主要为推移质和跃移质组成, 其含量分别为 10%—65%和 15%—95%, 悬移质含量很少。浅滩东北沉积物主要为跃移质和悬移质组成, 其含量分别为 85%和 20%左右, 推移质含量很少。浅滩西南沉积物主要由悬移质和跃移质组成, 其含量分别为 30%—80%和 10%—50%, 推移质含量很少。

2.2.2 泥沙运移趋势 其分析结果显示, 由于不同地貌部位的动力条件、沉积物类型差异很大, 莱州浅滩地区的泥沙运移趋势比较复杂(图 7)。老鸭蛋子以北近岸泥沙一部分沿浅滩根部向西北运移, 以 0 m 和 6 m 等深线之间最显著, 另一部分则越过浅滩向西运移。浅滩东北泥沙运移趋势比较散乱, 其西北部向西北运移的趋势比较明显, 东南部则有显著的向南运移趋势。刁龙嘴以西近岸泥沙向西—西北运移的趋势比较明显, 以 9 m 和 10 m 等深线之间最显著。浅滩西南侧 10 m 等深线包围的砂砾沉积区域, 泥沙向

滩顶运移趋势非常显著; 而据浅滩地貌冲淤动态研究结果, 此区域近 50 年来因北西向潮流冲刷而处于强烈侵蚀状态, 地貌上为平行浅滩延伸的洼槽(王庆, 等, 2003)。因此, 该区域粗颗粒沉积为蚀余物质, 其粒径趋势不反映侵蚀前动力沉积区域分异。

2.2.3 沉积动力 现代莱州浅滩的沉积特征与波浪有密切关系。浅滩泥沙来源于刁龙嘴至龙口沿岸入海的河流输沙, 其中以王河及在其东 30 km 处入海的界河输沙为主(王庆等, 2003)。据附近三山岛站测量资料, 莱州浅滩海域强浪向和常浪向均为北北东, 频率 12%, 平均波高 1.3 m, 最大波高 3.9 m; 次强浪和常浪向为北西, 频率为 6%, 平均波高 1.1 m, 最大波高 3.8 m; 波浪年均周期 4.4 s、4.5 s(中国海湾志编委会, 1991)。由于龙口至刁龙嘴岸线为北东—西南走向, 入海泥沙在北北东波浪作用下, 形成自东北向西南运动的沿岸泥沙流, 到达刁龙嘴附近时因岸线发生 270 度转折而导致泥沙流容量减小, 部分泥沙进入刁龙嘴岸外的浅滩顶部沉积。因此, 浅滩自身由粒径较粗的砂砾质沉积物组成, 系由波浪作用为主沉积而成。

表 1 莱州浅滩地区表层沉积物的泥沙搬运方式和粒度构成

Tab.1 Sediment transportation pathway and grain size distribution of the surface sediments in the Laizhou shoal

地貌部位		浅滩顶部	浅滩东北	浅滩西南
搬运方式	推移	10%—65%	很少	很少
	跃移	15%—95%	约 85%	10%—50%
	悬移	很少	<20%	30%—80%
粒度构成	砂	>95%	45%—60%	20%—35%
	粉砂	<5%	30%—40%	40%—55%
	粘土	很少	6%—20%	20%—30%

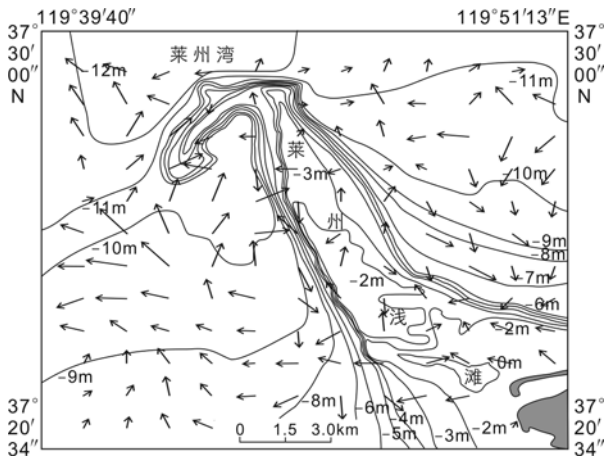


图7 莱州浅滩地区各样点粒径趋势矢量图(实线: 等深线, 箭头: 泥沙运移趋势)

Fig.7 A vector diagram of sediment migration trend in the Laizhou shoal

莱州浅滩两侧地区的沉积特征与潮流有密切关系。研究表明, 当潮流沿着海岸岬角流动时在其两侧能够形成旋转方向相反的两个潮余流涡环(方国洪等, 1985)。而莱州浅滩的形成与存在必然会进一步强化刁龙嘴岬角附近海域固有的此种动力作用。据数值模拟结果, 在浅滩两侧确有两个大致对称的潮汐余流环流。其中, 浅滩西南侧存在逆时针气旋式潮余环流, 直径约为 40.0 km (黄大吉等, 2002); 东北侧有顺时针反气旋式潮余环流, 直径约为 20.0 km, 中心、周围速度分别约为 3.0—8.0、15.0 cm/s (徐洪达 1991)。与这两个潮余环流相对应, 浅滩两侧有两个大致对称的细颗粒沉积区域, 沉积物主要由跃移质和悬浮质组成, 粘土加粉砂含量超过 40%、粘土含量超过 20%, 沉积物分选较差(图 4, 5, 6)。

因此, 作为位于由松散沉积物构成的海岸岬角——刁龙嘴岸外的砂砾质水下沙洲/沙脊, 莱州浅滩是粗颗粒泥沙在波浪作用下于岬角外沉积形成的沙嘴式水下浅滩, 其形成后又强化了岬角两侧的潮余环流体系, 导致细颗粒的沉积物在浅滩两侧沉积。莱州浅滩的这种沉积动力模式, 可以概括为波浪作用形成的岬角外粗颗粒浅滩, 通过对浅滩两侧潮余环流体系的加强, 进而促进浅滩两侧细颗粒碎屑物质的沉积, 最终形成中间为粗颗粒区、两侧为细颗粒区的沉积格局。显然, 莱州浅滩形成和维持的这种动力模式不同于 Pygree (1978)、Dyer 等 (1991)、Signell 等 (2000) 的瞬时潮流和余流漩涡模型, 与次生环流或螺旋流 (Heathershaw *et al*, 1980; Geyer *et al*, 1989; Geyer, 1993; Alae *et al*, 2004) 也不同, 也有别于非对称性落潮或涨潮 (Berthot *et al*, 2005) 和 McNinch 等 (1999、

2000) 的两潮流漩涡交界汇合的沉积动力模型。

2.2.4 沉积机制 浅滩沉积物粒度与泥沙搬运方式、泥沙运移方向决定于其动力沉积机制。一般而言, 砂砾主要以推移质方式运移, 粉砂主要以跃移方式运移, 粘土主要以悬浮方式运移。浅滩东北表层沉积物中粘土和悬浮质含量相当(均不超过 20%), 而粉砂含量(不到 40%)远小于跃移质含量(约 85%), 并且推移质含量也远小于砂含量(表 1), 说明大部分砂是以跃移方式搬运而来。浅滩顶部几乎没有粉砂、粘土及悬浮质, 而砂含量(超过 95%)远大于推移质含量(表 1), 说明粉砂和粘土因水动力强烈难以在滩顶沉积, 而大量砂粒以跃移的方式搬运到滩顶后, 因水深急剧变浅导致的波浪破碎而沉积下来。浅滩西南粘土含量(20%—30%)小于悬浮质含量, 粉砂含量(40%—55%)高于跃移质含量(10%—55%)(表 1), 说明部分粉砂以悬浮方式搬运而来; 砂含量(20%—35%)远高于推移质含量(表 1)。根据最近 150 多年来浅滩不断向东北迁移的事实(王庆等, 2003), 推测这些砂可能是近期浅滩向东北迁移后的残余物质。因此, 现代莱州浅滩地区的动力沉积机制, 就是海岸泥沙流自东北而西南进入浅滩地区后, 在波浪、潮流共同作用下的空间沉积分异。

3 结论

莱州浅滩是位于由松散碎屑堆积而成的海岸岬角——刁龙嘴岸外的砂砾质水下沙洲/沙脊, 它的形成深刻改变了浅滩地区原有的沉积动力体系, 在浅滩两侧海域各自形成了大致对称的反向潮余环流, 分别与两个主要由跃移质和悬移质组成的沉积区域对应。浅滩地区沉积物的直接来源是刁龙嘴东北部的沿岸泥沙流, 它是在北北东向波浪、北东向海岸线和源于胶东半岛西北部的入海河流输沙共同作用下形成的。当沿岸泥沙流沿北东—西南向进入浅滩及附近海域时, 泥沙在其特有的沉积动力系统作用下发生空间沉积分异, 粗颗粒的砂砾物质以推移质、跃移质的形式主要在波浪作用强烈的浅滩顶部沉积, 而细颗粒的粉砂、粘土物质以跃移质和悬浮质的形式, 为两潮汐余流环流所捕获并沉积。这种沉积动力模式与现有的岬角相连型浅滩沉积动力模式均不相同, 可能代表了岬角相连型水下沙洲/沙脊的一种新的类型。

参 考 文 献

- 王 庆, 杨 华, 仲少云等, 2003. 山东莱州浅滩的沉积动态和地貌演变. 地理学报, 58(5): 749—756
中国海湾志编委会, 1991. 中国海湾志(第三卷). 北京: 海洋出版社, 1—82

- 方国洪, 杨景飞, 1985. 渤海潮运动的一个二维数值模型. 海洋与湖沼, 16(5): 337—346
- 邢飞, 汪亚平, 高建华等, 2010. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征. 海洋与湖沼, 41(3): 459—468
- 庄振业, 1994. 山东莱州三山岛—刁龙嘴地区砂坝泻湖沉积与演化. 海洋地质与第四纪地质, 14(4): 43—52
- 庄振业, 陈卫民, 许卫东, 1989. 山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果. 青岛海洋大学学报, 19(1): 90—98
- 李原, 李任伟, 尚榆民等, 1999. 云南洱海的环境沉积学研究——表层沉积物的粒度分布、水流方向和能量. 沉积学报, 17: 769—774
- 赵鹏, 江文胜, 毛新燕等, 2010. 2000—2005年莱州湾盐度的变化及其主要因素. 海洋与湖沼, 41(1): 12—23
- 徐洪达, 1991. 莱州湾潮流和污染物扩散的数值模拟. 海洋通报, 10(2): 80—98
- 黄大吉, 苏纪兰, 2002. 河三角洲岸线变迁对莱州湾流场和对虾早期栖息地的影响. 海洋与湖沼, 24(6): 104—111
- 常瑞芳, 庄振业, 吴建政, 1993. 山东半岛西北海岸的蚀退与防护. 青岛海洋大学学报, 23(3): 60—68
- 蔡爱智, 1980. 刁龙咀海岸的发育. 海洋与湖沼, 11(3): 204—210
- Alaee M J, Ivey G, Pattiaratchi C B, 2004. Secondary circulation induced by flow curvature and Coriolis effects around headlands and islands. *Ocean Dynamics*, 54(1): 27—38
- Berthot Alexis, Pattiaratchi Charitha, 2005. Maintenance of headland-associated linear sandbanks: modeling the secondary flows and sediment transport. *Ocean Dynamics*, 55(5—6): 526—540
- Bastos A C, Paphitis D, Collins M B, 2004. Short-term dynamics and maintenance processes of a headland-associated sandbanks: Shambles bank, English Channel(UK). *Estuarine Coastal Shelf Science*, 59(1): 33—47
- Collins M, 1987. Sediment transport in the Bristol Channel: a review. *Proceedings of the Geological Association*, 93: 367—383
- Dyer K R, Huntley D A, 1999. The origin, classification and modeling of sand banks and ridges. *Continental Shelf Research*, 19: 1285—1330
- Ergin M, Bodur M N, 1999. Silt/clay fractionation in surficial Mar-mara sediments: implication for water movement and sediment transport paths in a semi-enclosed and two-layered flow system(northeastern Mediterranean Sea). *Geo-Marine Letters*, 18: 225—233
- Gao S, Collins M, 1992. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”. *Sedimentary Geology*, 81: 47—60
- Gao S, 1996. A fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways. *Computers & Geosciences*, 22(4): 449—452
- Geyer W R, Signell R P, 1989. Measurements of tidal flow around a headland with a shipboard acoustic Doppler current profiler. *J Geophys Res*, 95: 3189—3197
- Geyer W R, 1993. Three-dimensional tidal flow around headland. *J Geophys Res*, 98: 955—966
- Heathershaw A D, Hammond F D C, 1980. Secondary circulations near sand banks and in coastal embayments. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 33: 135—151
- Mazzullo J, Leschak P, Prusak D, 1988. Sources and distribution of late Quaternary silt in the surficial sediment of the northeastern continental shelf of the United States. *Marine Geology*, 78: 241—254
- McNinch J E, Wells J T, 1999. Sedimentary processes and depositional history of a cape-associated shoal, Cape Lookout, North Carolina. *Marine Geology*, 158: 233—252
- McNinch J E, Luettich Jr R A, 2000. Physical processes around a cusped foreland: implications to the evolution and long-term maintenance of a cape-associated shoal. *Continental Shelf Research*, 20(17): 2367—2389
- Pygree R D, 1978. The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the seas. *Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom*, 58: 211—226
- Signell R P, Harris C K, 2000. Modelling sandbank formation around tidal headland, *Proceedings of the 6th International Conference on Estuarine Coastal Modelling*. ASCE Press, New York, 209—222

ON THE SEDIMENTATION CHARACTERISTICS AND MORPHODYNAMIC MODEL OF THE LAIZHOU SHOAL, SHANDONG, CHINA

WANG Qing¹, ZHAN Chao¹, SHANG Jie², SONG Chuan-Guang¹, ZHONG Shao-Yun¹,
LIU Ya-Long¹, WANG Hong-Yan¹

(1. *Coast Institute, Ludong University, Yantai, 264025*; 2. *North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao, 266033*)

Abstract By testing granularity of surface sediment samples, we studied sedimentary types, granularity characteristics, sediment transporting pathway, sediment migration trends, sedimentary dynamic and morphodynamic model of the Laizhou shoal. The results showed that the Laizhou shoal is sand banks/ridges made of loose clastic sediment, the formation of the shoal has profoundly changed the original sedimentary system through circulations of two symmetrical tidal residual current on both sides of the shoal, which corresponded to two sedimentary depocenters dominated by saltation and suspended load, respectively. Morphodynamic model of Laizhou shoals is different from the existing models about headland associated shoals, and this shoal represents a new type of headland associated sand banks/ridges.

Key words Sand banks/ridges, Dynamic sedimentation, the Laizhou shoal, Headland associated sand banks/ridges, the Diaolongzui cape