

莱州湾东岸三山岛段砂质海岸沉积物 运移动力机制^{*}

刘世昊¹, 丰爱平¹, 杜 军¹, 夏东兴¹, 胡维芬², 李 平^{1,3}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301;

3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266001)

摘 要:通过对三山岛岸段冬夏重复的地形测量和表层沉积物的粒度分析,研究了其地貌特征与地形变化规律、沉积物类型、粒度特征、运移趋势,并探讨了沉积物运移的动力机制。结果表明:该岸段可根据 1985 黄海高程-1.2 m(低潮水位)和-6.5 m(闭合深度)平面划分为海滩、水下岸坡和浅海陆架三个地貌单元,各地貌单元表层沉积物分布规律与地形变化特征区别显著。其中水下岸坡和浅海陆架地貌单元主要受潮流作用,海滩地貌单元主要受波浪作用。在西向落潮流和西南向潮余流的作用下,水下岸坡地貌单元发育一个中等规模潮流通道-沙脊沉积系统。表层沉积物以向西运移的趋势为主,少数滞留于西部潮流沙脊处,与地形“东侵西淤”的变化规律相符,这些西向运移的沉积物最终离开研究区,补给莱州浅滩。

关键词:粒度参数;粒径趋势;沉积物;动力沉积;三山岛;莱州湾

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2014)03-0343-12

沉积物粒度特征能够有效地鉴别沉积环境^[1-4],判别沉积物运移方式^[5-6],揭示环境动力条件^[7-8],是海岸动力地貌研究中发展最为迅速的手段之一。近年来,进行了大量关于海岸带表层沉积物分布规律与海岸动力地貌作用的研究^[9-14]。在此基础上,一些学者开始利用平均粒径、分选系数和偏态这三个粒径参数建立沉积物运移趋势^[15-17],目前 Gao 和 Collins^[18-20]所建立的二维粒径趋势分析模型(GSTA)具有较高的认可度,并在近岸和远海等多种的海洋环境中得到成功应用^[19,21-24],但是鲜有关于受潮流作用的砂质岸段环境的研究。

砂质海岸具有无可比拟的旅游资源,是海岸动力沉积研究的一大课题。近年来,我国滨海沙滩遭受严重侵蚀,海滩滩面变窄、变陡、海滩沉积物粗化等问题严重,近 70% 的沙质海滩处于侵蚀状态^[25-28](三山岛岸段被证实也遭受侵蚀^[29-31])。因此,本文章选取莱州湾东岸三山岛砂质岸段为研究区,在多次地形测量和表层沉积物粒度特征分析的基础上,揭示该区地貌特征及变化规律、沉积物分布特征与运移趋势,探讨造成其运移的动力机制,意在为海滩养护和海岸管理提供相应的技术支持,为现代沉积学和海岸动力地貌学的理论研究提供数据帮助。

1 研究区概况

三山岛海滩位于渤海三大海湾之一的莱州湾东岸,地处莱州浅滩东部(图 1a),由古潟湖淤积填满而成^[32]。海滩顺直,长达 12 km,处于郯庐大断裂东侧,胶东隆起及胶北台凸的西北翼^[33],为构造上升区,沿岸

^{*} 收稿日期:2013-11-12

资助项目:海洋公益性行业科研专项——我国砂质海岸生境养护和修复技术示范(200905008-4);国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务项目——莱州三山岛砂质海岸侵蚀风险评价及其灾害预测研究(2012G19);山东省自然科学基金——调水调沙后黄河入海沙泥扩散运移特征比较研究(ZR2013DQ025)

作者简介:刘世昊(1988-),男,四川绵阳人,硕士,主要从事海洋地质方面研究. E-mail:liushihao@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

多低缓丘陵,砂嘴、沙坝和潟湖十分发育。

三山岛海滩富含优质的石英砂资源。但是自 20 世纪 80 年代起,人为挖沙活动猖獗加之大量修建后滨建筑物,造成海滩严重侵蚀,侵蚀速率高达 $2.0 \text{ m/a}^{[31]}$,对当地旅游业造成严重影响。

研究区受往复潮流影响,涨潮流、落潮流分别指向东南和西北^[34]。离岸一定距离,潮流控制海底地貌,使本区海底形成一个潮流通道(潮流冲刷槽),呈 SE—NW 走向,贯穿整个研究区,断面由东及西逐渐增大。自 2 号测线开始向西,发育三个近似平行且与潮流通道方向一致的潮流沙脊,造成了该处通道的分汊,也使得通道在此处形成脊间沟槽(图 2)。在研究区东侧莱州市三山岛镇发现一个规模较小的潮汐汉道系统(图 1b),有充填痕迹,纳潮盆地面积约 0.4 km^2 ,口门水道宽约 78 m ,汉道开口方向与潮流冲刷槽走向一致。纳潮盆地受王河补给,使得该汉道系统属于介于潮汐汉道与河口湾之间的沉积环境^[35],并在汉道口门西侧形成一个受潮流和河流共同控制的三角洲。

根据开发程度的差异,研究区砂质海岸可分为开发岸段和未开发岸段。其中,开发岸段(图 1c)地处于莱州市黄金海岸海水浴场,海滩宽度较宽,达 $200 \sim 250 \text{ m}$;未开发岸段(图 1d)处海水浴场西侧,海滩较窄,仅有 $120 \sim 150 \text{ m}$ 。

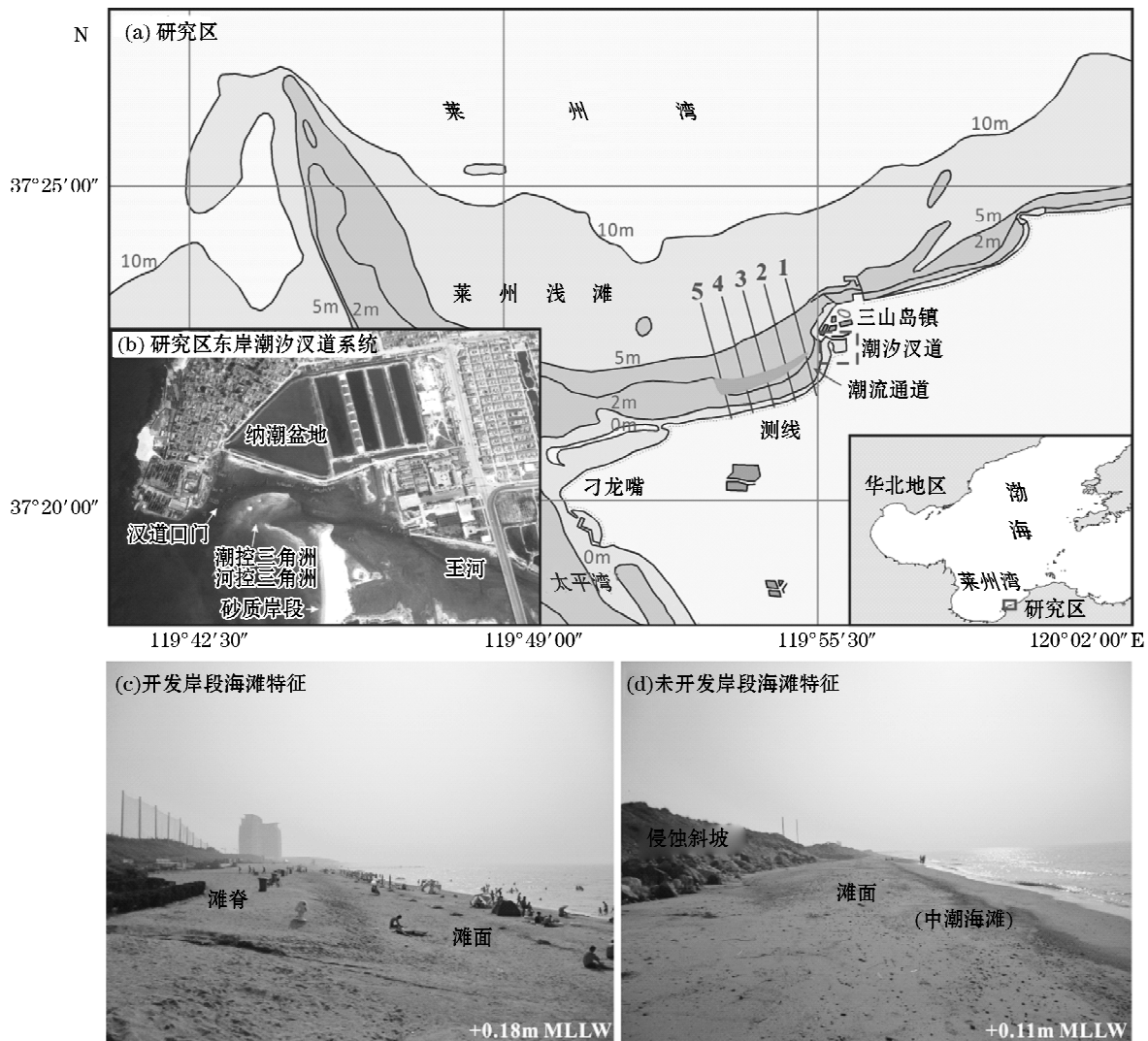


图 1 研究区基本概况

Fig. 1 The general situation of the study area

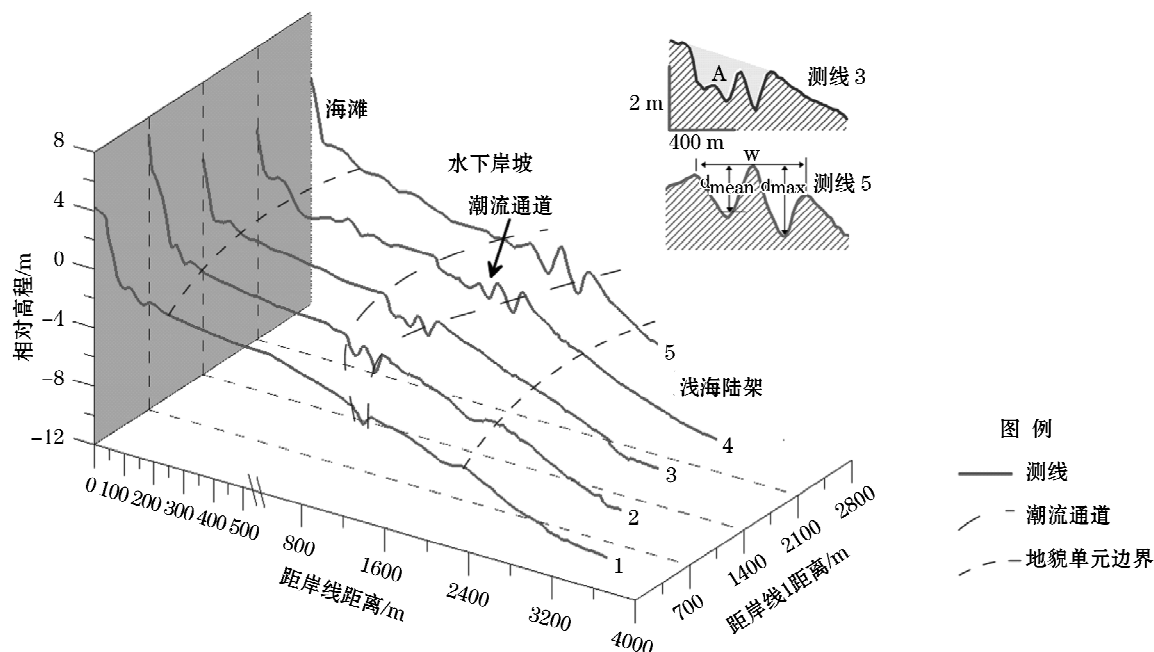


图 2 研究区地形曲线及地貌单元划分

Fig. 2 Terrain curves and geomorphic units of the study area

2 材料与方法

2.1 地形测量与样品采集

如图 1 所示,在研究区内以坐标 $37^{\circ}23'N, 119^{\circ}56'E$ 为起点,向西每 700 m 布设一条测线,共计布设 5 条测线,测线以后滨人工岸线为起点,垂直于海滩展布方向测量至波浪破碎带以下的浅海陆架区域,每条测线长达 4~6 km(其中 1 和 2 布设于开发岸段,而 3,4 和 5 布设于未开发岸段)。自 2010-11—2012-08,对 5 条测线进行了冬夏重复地形测量,岸滩部分在低潮位时期或近低潮位时期采用 HD5800N-RTK 实时动态差分 GPS 定位仪进行测量,仪器基点位于莱州市三山岛黄金海岸沙滩后滨商务区(CBD),高 6.552 m(1985 国家高程基准),水下部分采用高潮时船舶走航式测深的方式测量,两者实现完全闭合。

在研究区共布设了 45 个表层沉积物站位,并在 2010-11 进行了沉积物的采样工作。45 个站位中有 17 个位于岸滩部分,沿测线间隔约 8~10 m,采样深度在 2 cm 以内。另外 28 个站位位于海底,间隔约 450~550 m,采样使用自制锚式取样器,取样深度控制在 5 cm 以内。采样过程采用 RTK 星链差分定位,定位精度优于 0.2 m。所有沉积物样品送至国家海洋局第一海洋研究所进行室内粒度测试和分析。

2.2 粒度测试

在充分混合均匀的前提下,选取样品烘干并称重,加入 10~15 mL 质量分数为 30% 的过氧化氢溶液去除有机质,微加热并静置 24 h,再次烘干样品称取干重。采用 $63\ \mu\text{m}$ 标准分样筛将样品分为两部分,直径大于 $63\ \mu\text{m}$ 部分采用标准分样套筛继续分筛,小于 $63\ \mu\text{m}$ 部分采用层析法以获得各个粒级的级配。沉积物分类和定名采用 Folk 分类方案^[86],同时利用各粒径质量百分含量拟合各样品沉积物概率累积曲线和分布曲线,并在此基础上运用 Mcmanus 矩法公式^[87]计算出平均粒径(M_z)、分选系数(σ_i)和偏态系数(Sk_i)等粒径参数。

2.3 沉积物粒径趋势分析

在粒度测试和分析的基础上,根据平均粒径、分选系数和偏态系数的计算结果,按照 Gao-Collins 粒径趋势分析理论(Grain Size Trend Analysis)^[18-20],采用 Poizot 和 Mear 开发的 eCsetrend 软件^[88]进行研究区表层沉积物输运趋势分析,其中特征距离 D_{cr} 采用最大采样间距。最后将粒径趋势矢量图与两年内海底地形变化图相叠加,观察其耦合关系,结合相关水文和输砂资料,校验模型的准确性,以揭示研究区表层沉积物在较短时间尺度内的输运规律。

3 地形特征与变化规律

3.1 地形特征和地貌分区

根据夏东兴等^[39]对一般砂质岸段地貌单元划分方法,三山岛岸段横向(垂直于岸线的方向)分别以低潮水位和闭合水深(H)为节点,由后滨至陆架平原可划分为海滩、水下岸坡和浅海陆架三个地貌单元。由于闭合深度的计算十分复杂,需要长期水文数据,因此本文采用经验公式 $H=1.57H_c$ 计算该值。式中 H_c 采用 10% 大波平均波高近似代替。根据龙口站相关潮汐资料^[34]和相关波浪资料^①^[34,40],计算出两个节点分别位于 -1.2 和 -6.5 m(1985 国家高程基准)处(图 2)。水下岸坡地貌单元覆盖了大部分测区,其间发育前文提到的潮流通带。就地形资料而言,该潮流通带距后滨岸线 850~1 500 m,中等规模,平均断面宽度 451 m,平均高差 1.02 m,平均断面面积 437.8 m²。通道断面由东及西逐渐增大,最大值均出现于 5 号海滩剖面,最大断面宽度为 602 m,最大高差为 2.4 m,最大断面面积为 709 m²。潮流通带断面多呈“V”型,沙脊靠近通道一侧坡度较大。

3.2 地形变化

就海滩横向剖面年际和年内变化规律而言(图 3),在 2 a 的研究尺度内,该岸段高程变化微弱,平均值约 2 cm。变化主要集中于海滩地貌单元和潮流通带处,以海滩地貌单元中潮海滩和高潮海滩交界处的高程变化最为显著,最大高差达 1.8 m,变化规律复杂(表现为季节性的海底韵律更迭,但并不是简单的冬夏更替规律)。剩余海滩地貌单元高程变化幅度略小,滩肩和低潮海滩有显著的夏侵冬淤现象,高程变化约 5~15 cm;潮流通带断面表现出侵蚀扩大的趋势,尤其是向岸一侧的沙脊边坡,高程变化约 5~10 cm。

就横截面地形变化规律而言,以第一次(2010-10)和第四次(2012-08)地形测量结果为例,存在如下特点:1)研究区大部分区域以弱侵蚀作用为主,但侵蚀厚度小于 20 cm。淤积物主要形成于研究区西部,邻近莱州浅滩处以及潮流通带处内,淤积范围较小;强侵蚀区位于研究区东部,其最大高程变化达 1 m,而淤积区最大高程变化为 0.9 m。地形变化整体态势可概括为“东侵西淤”;2)强侵蚀区域与淤积区往往相伴而生;研究区西部和潮流通带处的淤积区泥沙可能来自中、东部损失的沙泥。3)潮流通带内冲淤变化较为复杂,概括而言,为“两脊侵蚀,底部淤积;东、西部淤积,中部侵蚀”。

① 天津市水利科学研究院,烟台港莱州口港区航道工程,2013。

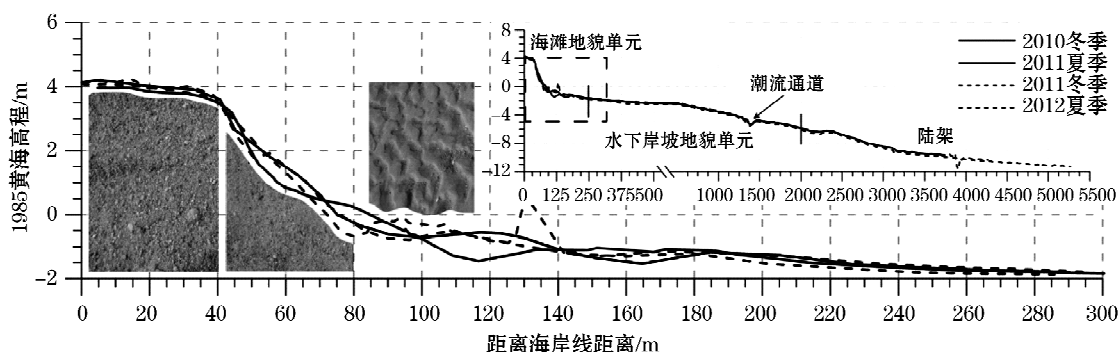


图3 研究区典型海滩剖面年际与年内高程变化(以1号海滩剖面为例)

Fig. 3 Annual and within-one year variations of elevations for different geomorphic units in the typical beach profile (taking profile 1 as an example)

4 表层沉积物粒度分布与运移趋势

4.1 沉积物组分和类型

三山岛海滩表层沉积物类型多样,包括砂、砾质砂、粉砂质砂、泥质砂、砂质粉砂和含砂砾,其中砂、砾质砂和粉砂质砂三种类型分布较广(图4)。不同地貌单元不同采样点的沉积物类型差异很大,尤其是一些次级地貌单元,如中潮海滩、潮流通道等处沉积物类型和组分差异显著。海滩地貌单元多为砂、含砾砂、砾质砂;水下岸坡多见含砾砂、砂、粉砂质砂和泥质粉砂;陆架区表层沉积物较为复杂,以砂、含砾砂、粉砂质砂和砂质粉砂为主,局部伴有含砂砾。研究区各采样点常见砾、砂、粉砂和粘土四大组分,其中砂组分分布最为广泛,质量分数变化范围为31.0%~100.0%,平均值为87.4%,绝大多数样品砂组分质量分数超过90%,砂质量分数100.0%的样品多位于动力条件较强的风成沙丘和低潮海滩。砾组分质量分数变化范围为0~39.5%,平均值为3.76%,主要集中于海滩地貌单元,在滩肩、滩面分界线和平均水位两处,砾组分质量分数达20.0%以上。粉砂组分质量分数变化范围为0~64.2%,平均值为7.5%,绝大多数样品粉砂质量分数不足10.0%,粉砂组分质量分数高于30.0%的样品多位于远离海岸的陆架平原地貌单元和潮流通道内。粘土组分质量分数变化范围为0~10.4%,平均值为1.3%,研究区绝大多数样品不含粘土或粘土含量低于0.5%,仅少数位于潮流通道处的沉积物样品粘土组分可达6%~10%。

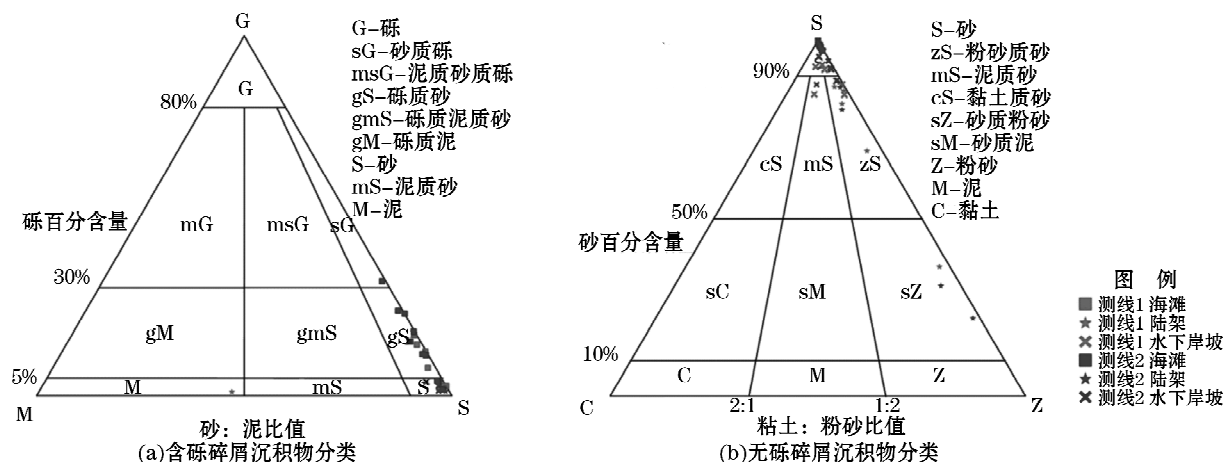


图4 研究区表层沉积物分布 Folk 三角图

Fig. 4 Folk triangular diagram for classifying surface sediment types in the Sanshan Dao beach

4.2 沉积物粒径参数分布

不同的地貌单元受不同的动力条件影响,如波浪(冲流、回流、裂流)、潮汐(潮流)、风应力和人为因素[10,12-13,41-45]。粒径参数的差异性分布规律与地貌单元是对应的,主要表现在这些动力因素对各个地貌单元沉积物的搬运作用以及各个地貌单元的物源补给情况。相反地,粒径参数的分布规律也能反映出各环境动力因素的状况。

1) 平均粒径

平均粒径可反映环境能量的强弱,一般高能量的地区沉积粗颗粒物质,而弱能量地区则多见细颗粒物质。研究区大部分地区平均粒径为 $0\sim4\Phi$,但在闭合水深附近和海滩地貌单元存在几个平均粒径的负值区;海滩地貌单元沉积物中值粒径是三个地貌单元中最大的,为 $0\sim2.5\Phi$,由于受到多种波浪能量和风应力等动力因素的控制,该处环境能量高,尤其是平均海平面和平均低潮线附近堆积“砾石带”,形成平均粒径的负值区;水下岸坡地貌单元平均粒径多集中于 $1\sim3\Phi$,粗颗粒物质多见于潮流通处及其北部区域;陆架平均粒径为 $-1\sim4\Phi$,在闭合深度附近出现平均粒径的负值区,向外沉积物粒度依次变细(图 5 a)。

2) 分选系数

分选系数表示沉积物的分选程度,其数值大小与分选程度成反比,能综合反映沉积动力过程的能量变幅、运移方式(滚动、跳跃、悬浮)和组分的组合情况。研究区各采样点分选系数为 $0.6\sim1.8$,以中等分选和较差分选最为常见;海滩地貌单元中,开发岸段由于养滩的原因,分选系数多小于 0.6 ,为好-较好分选,而未开发岸段分选显著变差,为中等-较差分选(分选系数 $0.9\sim1.8$);水下岸坡地貌单元分选系数为 $0.9\sim1.5$,多数样品分选较差,中等分选的沉积物样品主要来自潮流通处和闭合水深附近;陆架区分选系数为 $0.6\sim1.5$,由闭合深度处向海延伸,沉积物分选逐渐变差(图 5 b)。

3) 偏态系数

偏态系数能够辅助辨别沉积物的物源和成因。研究区沉积物偏态系数多介于 $-0.3\sim0.5$ 之间,以对称偏态和正偏态最为常见,负偏态沉积物主要来自潮流通处中部,对应地形的淤积区(图 5 c)。

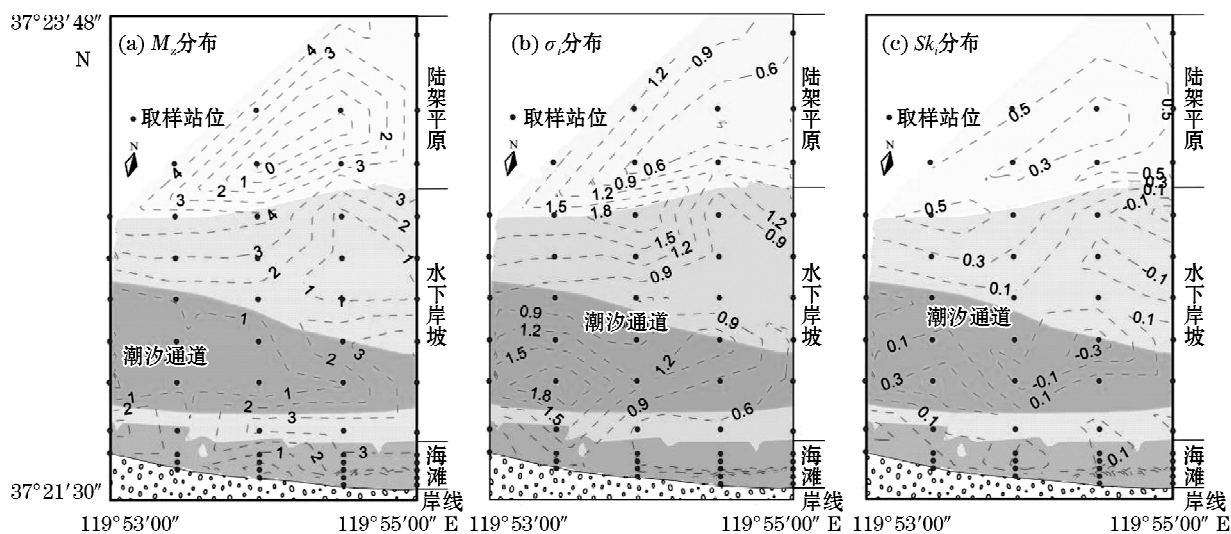


图 5 研究区表层沉积物粒径参数分布(Φ)

Fig. 5 Distribution of grain size parameters of surface sediments(Φ)

4.3 沉积物运移趋势

粒径趋势分析结果及其与空间地形变化间关系(图 6)表明,研究区表层沉积物总体上呈现出向西的运移趋势,这与研究区地形上“东侵西淤”的整体态势吻合。在水下岸坡地貌单元和陆架平原地貌单元,西向粒径趋势矢量占主导,在矢量长度上也有优势。但在潮流通道的以南和闭合水深以南的区域,沉积物粒径趋势矢量则多平行于岸线方向,即西偏南向。海滩地貌单元的沉积物运移规律较复杂,但大体上仍与地形变化规律吻合。在开发岸段,沉积物存在着较强的向海运移的趋势,而未开发岸段沉积物则多向西运移。

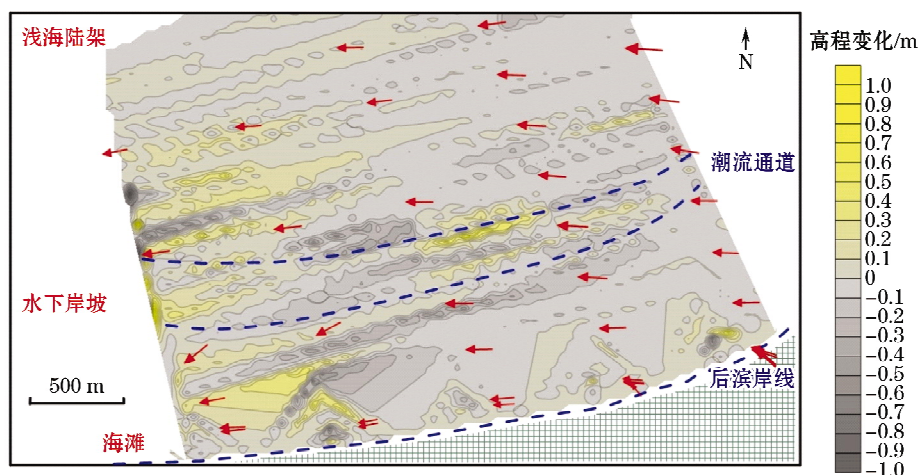


图 6 研究区表层沉积物粒径趋势分析模型(GSTA)及其与地形变化的耦合关系

Fig. 6 Transport pattern of surface sediments in the study area (analyzed by using the GSTA model) and its relationship with terrain variations

5 运移机制与动力特征探讨

5.1 特殊动力区域及其动力特征

研究区各粒径参数的差异性分布虽与地貌单元的划分结果吻合,仍受到两个次级地貌单元的影响,即潮流通带处和闭合深度线,这也预示着它们拥有与周边不同的沉积动力环境。本文章将采用粒度分析所获得的频率趋势和概率累积曲线(图 7)分析潮流通带处和闭合深度线附近的沉积动力特征。

潮流通带内沉积物频率曲线为双峰型(图 7 a)。其主峰突出,粒度区间在 $250 \sim 1\,250 \mu\text{m}$,次峰较弱,在 $180 \sim 250 \mu\text{m}$,附于主峰一旁。主峰组分主要为中砂和粗砂,次峰组分主要为细砂,表明该系统环境能量较强,并且主要存在两种沉积动力,其中,主峰水流占据主导,次峰水流有一定的控制作用。由于潮流通带两侧的沉积环境动力较弱,可以推测主峰水流是往复潮流。次峰水流可能是波浪作用或动力差异引起的边界流。累积曲线不同于水下岸坡大部分样品的“滚动跳跃加悬浮式”(标准波浪带砂样^[6,46-47])曲线类型,而介于“低截位一跳一悬式”与“上拱式”之间,在强潮流动力作用下,其曲线形态与标准河道砂^[6,46-47]相似,特点是悬浮组分发育,达 10% 以上,跳跃组分含量高,不存在滚动组分。

浅海陆架地貌单元表层沉积物样品(图 7 b)个体间差异明显,就整体而言,在频率曲线和累积曲线上呈现出类似波浪带砂样^[6,46-47]的特征,但是悬浮组分含量显著高于波浪带砂样,达 10%,甚至在一些样品中达到 20% 以上,滚动总体和跳跃总体之间的细截点在不同样品间也存在差别。由于该地貌单元处于闭合深度之后,波浪对海底表层沉积物已不存在明显影响^[48],纷繁复杂的近岸潮流^[49]控制着这一沉积区表层沉积物。

作为水下岸坡和陆架的分界,闭合深度附近的表层样显著区别于浅海陆架其他表层沉积物样品。频率曲线呈单峰型(图 7b),主峰极端突出,粒度区间在 $1\ 000\sim 2\ 000\ \mu\text{m}$,主要为粗砂,含量达 95%以上,该峰型反应了较潮流通处更强的环境能量。累计曲线呈“低截位一跳一悬式”,跳跃总体与悬浮总体截点较粗。此处是海底沉积物发生显著横向运动的向海界线^[50],也是海滩剖面是否存在显著年际变化及季节变化的界线^[44],由于沉积环境较为特殊,暂未发现与其概率曲线或累积曲线类似的典型沉积物样品,动力环境亟待进一步探索。

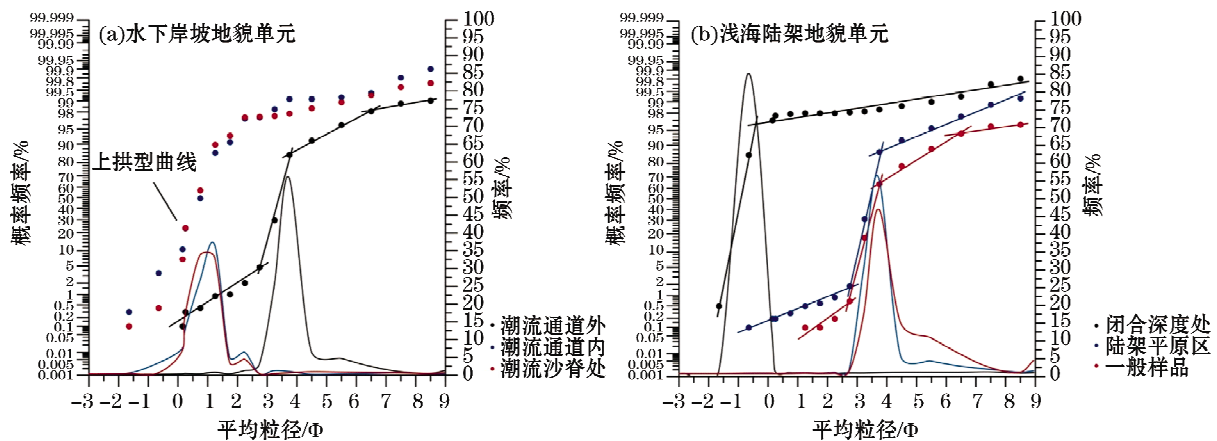


图 7 研究区特殊动力环境表层样品频率曲线与概率累积曲线

Fig. 7 Distribution curves and probability accumulative curves of surface sediments under special dynamic conditions

5.2 运移动力与沉积机制

粒径趋势的结果(图 6)表明西北向的落潮流是本区往复流中优势水流,这在潮流通道的空间地貌形态上也能得到验证(图 2),潮流通断面随流向扩大,沙脊出现在潮流动能逐渐减弱的下游,共同指示在潮流通处,优势流流向向西。由于潮流通两侧潮流沙脊发育,地势较高,加之潮流通和闭合深度附近的沉积物多以跃移方式运动,一旦遇到沙脊等正地形,易被拦截而产生局部堆积,这正是本区西部沙脊处地形逐渐增高的原因之一。此外,粒径趋势表明该处受到多个方向运移而至的沉积物补给,也是逐渐淤积堆高的原因之一。海滩地貌单元的沉积物运移规律较复杂。其中开发岸段沉积物运移趋势中的北向分量推测是由波浪作用造成:由于海滩地貌单元受到波浪和风等营力的作用^[12-18],加之其处于不稳定岬角-海湾的地理格局之中,造成 NNE 向的强浪向和常浪向,波浪频率达 12%^[34],与岸线走向成钝角。这一波浪能量在开发岸段最强,向西至未开发岸段最弱。在到达海滩地貌单元之后,波浪能量分解为平行于岸线方向的冲流^[30]和垂直于岸线方向的回流^[42,52]。由于开发岸段波浪能量大,其冲流延伸至未开发岸段之后,占据了能量上的优势,使得海滩地貌单元的北向粒径趋势矢量向西逐渐减弱,而西向矢量则逐渐增强。

三山岛岸段主要受两种优势沉积动力因素的控制。前人研究表明,莱州浅滩东北侧存在反气旋式潮余环流,在研究区内表现为西南向水流,流速可达 $15.0\ \text{cm/s}$ ^[52]。水下岸坡地貌单元和陆架平原地貌单元由于受落潮流占优势的往复潮流和潮余流影响,沉积物多向西输移,形成潮流通-沙脊沉积系统。西向的泥沙流以悬浮和跳跃组分为主,造成研究区海域沉积物的亏损,仅在本区西部有部分沉积物滞留。之后该沉积物流继续向西运动,离开研究区,到达莱州浅滩,受波浪和潮汐共同作用而空间分异沉积^[53]于此。研究发现,莱州浅滩存在东北迁移和西北延伸^[54],其整体上处于拓展状态,莱州浅滩的整体发育规律^[54]表明研究区的沉积物在一定程度上对莱州浅滩进行补给。不同地貌单元的补给动力存在差异,水下岸坡和浅海陆架地貌单元主要在潮流和潮余流的作用下直接西向输移,而海滩地貌单元主要在波浪作用下存在西向输移的趋势,也存在着补给莱州浅滩的可能性,但部分沉积物在波浪回流的作用下向北入海。

6 结 论

研究区根据-1.2和-6.5 m(1985国家高程基准),即低潮水位和闭合深度处的高程划分为海滩、水下岸坡和浅海陆架三个地貌单元,各地貌单元受不同的动力条件控制,其沉积物粒度特征存在着一定差异。研究区主要受潮流作用控制,而非波浪作用。在西向落潮流占优势的往复流和西南向潮余流的作用下,形成中等规模的潮流通-沙脊沉积系统,坐落于水下岸坡地貌单元,离岸约1.0~1.5 km。潮流对水下岸坡地貌单元和陆架平原地貌单元的沉积物运移作用明显迫使这些沉积物西向运移,最终补给莱州浅滩。三山岛岸段大部分地区处于弱侵蚀状态,仅有少数悬浮组分和跳跃组分沉积物在沙脊的阻挡下,滞留于本区西部潮流沙脊处,造成潮流沙脊处的淤积增高,这与地形上“东侵西淤”的整体态势一致。海滩地貌单元主要受波浪控制,在东北常浪向的波浪作用下,表现为向海和向浅滩方向的双重运移趋势,其中向海的趋势由开发岸线向未开发岸段逐渐减弱,而向莱州浅滩(向西)的趋势则逐渐增强。因而,海滩地貌单元沉积物对莱州浅滩可能也存在着补给作用。

参考文献(References):

- [1] BANNISTER R J, BATTERSHILL C N, DE NYS R. Suspended sediment grain size and mineralogy across the continental shelf of the Great Barrier Reef: impact on the physiology of a coral reef sponge [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 32: 86-95.
- [2] ALEKASEEVA T N, SVALNOV V N. Grain-size Parameters of Marine Sediments [J]. *Marine Geology*, 2006, 46(3): 461-470.
- [3] VANDENBERGHE J. Grain size of fine-grained windblown sediment; A powerful proxy for process identification [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 121: 18-30.
- [4] GYLLENCREUTZ R. Late Glacial and Holocene paleoceanography in the Skagerrak from high-resolution grain size records [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222: 344-369.
- [5] BLOTT S J, PVE K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [6] VISHNER G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39: 1074-1106.
- [7] CAO Y C, WANG J, LIU H M. Preliminary study on the hydrodynamic mechanism of beach-Bar sandbodies with environmentally sensitive grain size components [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 274-284. 操应长,王健,刘惠民. 利用环境敏感组分分析滩坝砂体水动力学机制的初步探讨-以东营凹陷西部沙四上滩坝沉积为例[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 274-284.
- [8] ZHOU D. The estimation of sedimentary hydrodynamic parameters from sediment grain size data [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(1): 49-58. 周蒂. 利用沉积物粒度数据反演沉积水动力参数[J]. *地质科学*, 1999, 34(1): 49-58.
- [9] CHEN Z S, LI C C, LUO Z R. Analysis on process of arc-shaped coast tangent beach profile Shuidong Bay Guangdong [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(1): 82-90. 陈子桑,李春初,罗章仁. 广东水东湾弧形海岸切线段海滩剖面的过程分析[J]. *海洋通报*, 1991, 13(1): 82-90.
- [10] SILVESTER R, HUSU J R C. Coastal stabilization: Innovative concepts [M]. Englewood Cliffs, P T R Prentice Hall, 1993.
- [11] VOUSDOKAS M I, VELEGRAKAS A F, KARAMBAS T V. Morphology and sedimentology of a microtidal beach with beachrocks, Vatera, Lesbos, NE Mediterranean [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, (2): 1937-1947.
- [12] SHORT A D, MASSELINK G. Embayed and structurally controlled beaches [M] // SHORT A D. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. New York: John Wiley & Son, 1999: 230-249.
- [13] RODRIGUEZ A B, RODRIGUEZ P L, FEGLEY S R. Fegley. One-year along-beach variation in the maximum depth of erosion resulting from irregular shoreline morphology [J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 12-23.
- [14] WARRICK J A, GEORGE D A, GELFRNBAUM G, et al. Beach morphology and change along the mixed grain-size delta of the dammed Elwha River, Washington [J]. *Marine Geology*, 2009, 111: 135-148.
- [15] MCCAVE I N. Grain-size trends and transport along beaches: Example from eastern England [J]. *Marine Geology*, 1978, 28: 43-51.
- [16] MCLAREN P, BOWLES D. The effects of sediment transport on grain-size distributions [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1985, 55(4): 457-470.
- [17] MCLAREN P. An interpretation of trends in grain size measurements [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51: 611-624.

- [18] GAO S, COLLINS M B, LANCKNEUS J, et al. Grain size trends associated with net sediment transport patterns; An example from the Belgian continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1994, 121(3): 171-185.
- [19] GAO S, COLLINS M B. Net sediment transport pattern inferred from grain size trends, based upon definition of "transport vectors" [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(1): 47-60.
- [20] GAO S. A fortrain program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways [J]. *Computers and Geosciences*, 1996, 22: 449-552.
- [21] WANG W W, ZHUANG L H, YAN J, et al. Grain size characteristics and transport trend of surficial sediment in Huiquan Bay beach in Qingdao [J]. *Journal of China University of Petroleum; Natural Science Edition*, 2007, 31(3): 13-17. 王伟伟, 庄丽华, 阎军, 等. 青岛市汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(3): 13-17.
- [22] QIAO S Q, SHI X F, WANG G Q, et al. Discussion on grain size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(4): 139-147. 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物特征及输运趋势探讨[J]. *海洋学报*, 2010, 32(4): 139-147.
- [23] ZUO S H, SHI L Q. Hydrodynamic explanation and characteristic of sediment granularity of Nanhuizui foreland in Changjiang Estuary [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2008, 29(2): 88-93. 左书华, 时连强. 南汇嘴潮流沉积物粒度特征研究[J]. *水道港口*, 2008, 29(2): 88-93.
- [24] PEDREROS R, HOWA H L, MICHEL D. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal areas [J]. *Marine Geology*, 1996, 135(1): 35-49.
- [25] CHEN Y J, XIA D X, YU Z Y, et al. Summary on coastal erosion in China [M]. Beijing: Ocean Press, 2010, 7: 1-18. 陈吉余, 夏东兴, 虞志英, 等. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [26] XIA D X, WANG W H, WU G Q. Summary to coastal erosion in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 467-476. 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. *地理学报*, 1993, 48(5): 467-476.
- [27] ZHAO Y L. The remote sensing dynamic monitoring of China's shoreline evolution in the past 30 years [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2010, (S1): 174-177. 赵玉灵. 近 30 年来我国海岸线遥感调查与演变分析[J]. *国土资源遥感*, 2010, (S1): 174-177.
- [28] FENG A P, XIA D X. Grading of coastal erosion disaster situation [J]. *Coastal Engineering*, 2003, 22(2): 60-66. 丰爱平, 夏东兴. 海岸侵蚀灾情分级[J]. *海岸工程*, 2003, 22(2): 60-66.
- [29] FENG A P, XIA D X, GU D Q, et al. Study on process and cause of the coastal erosion along the south coast of the Laizhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(1): 83-90. 丰爱平, 夏东兴, 谷东起, 等. 莱州湾南岸海岸侵蚀过程与原因研究[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(1): 83-90.
- [30] FENG X L, DONG W W, ZHUANG Z Y, et al. The calculation of alongshore silt discharge rates and development in the east coast of Laizhou Bay [J]. *Preiodical of Ocean University of China; Natural Science Edition*, 2009, 39(2): 301-308. 冯秀丽, 董卫卫, 庄振业, 等. 莱州湾东岸沿岸输沙率及冲淤演化动态分析[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(2): 301-308.
- [31] WANG W H, WU S Y. A study on the disasters caused by coastal erosion in Shandong Province [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1993, 2(4): 60-66. 王文海, 吴桑云. 山东省海岸侵蚀灾害研究[J]. *自然灾害学报*, 1993, 2(4): 60-66.
- [32] ZHUANG Z Y, JU L J, FENG X L, et al. Barrier lagoon sedimentation and evolution in Sanshan Island-Diaolong Zui area, Laizhou, Shandong [J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 1994, 14(4): 43-52. 庄振业, 鞠连军, 冯秀丽, 等. 山东莱州三山岛-刁龙嘴地区沙坝潟湖沉积和演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(4): 43-52.
- [33] CHEN L, CHENG C, WEI Z G. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286: 171-183.
- [34] China Bay Editorial Board. China Bay-Volume III [M]. Beijing: Ocean Press, 1991. 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第三分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [35] FITZGERALD D M, BUYNEVICH I V, DAVIS R A, et al. New England tidal inlets with special reference to riverine-associated inlet systems [J]. *Geomorphology*, 2002, 48(1): 179-208.
- [36] FOLK R L, WARD W C. Branos river bar: a study in the significance of grain size parameter [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- [37] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation [M] // TUCKER M E. *Techniques in Sedimentology*. London: Oxford-Blackwell Scientific Publication, 1988: 63-85.
- [38] POIZOT E, MEAR Y. ECSETREND: A new software to improve sediment trend analysis [J]. *Computer & Geosciences*, 2008, 34: 827-837.
- [39] XIA D X, DUAN Y, WU S Y. Study on the methodology of recent coastline delimitation [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2009, 27: 28-33. 夏东兴, 段焱, 吴桑云. 现代海岸线划定方法研究[J]. *海洋学研究*, 2009, 27: 28-33.

- [40] Regional Oceanography of China Seas Editorial Board. Regional Oceanography of China Seas—Physical Oceanography [M]. Beijing: Ocean Press, 2012. 中国区域海洋学编写委员会. 中国区域海洋学——物理海洋学[M]. 北京:海洋出版社, 2012.
- [41] HUGHES M G, KEENE J B, JOSEPH R G. Hydraulic sorting of heavy-mineral grains by swash on medium-sand beach [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(5): 994-1004.
- [42] CALLAGHAN D P, WAINWRIGHT D. The impact of various methods of wave transfers from deep water to nearshore when determining extreme beach erosion [J]. Coastal Engineering, 2013, 74: 50-58.
- [43] YU J T, CHEN Z S. A review on progress of morphodynamic classification study of sandy beaches [J]. Tropical Geography, 2011, 31(1): 107-112. 于吉涛, 陈子桑. 砂质海滩地形动力分类研究进展[J]. 热带地理, 2011, 31(1): 107-112.
- [44] CHEN X Q, CHEN J Y. A study of closure depth on the profiles of the Changjiang Deltaic Coast—On the fundamental problems associated with Bruun Rule and its application [J]. Acta Geographica Sinica, 1998, 53(4): 323-333. 陈西庆, 陈吉余. 长江三角洲海岸剖面闭合深度的研究—Bruun 法则及其应用的基本问题[J]. 地理学报, 1998, 53(4): 323-333.
- [45] LIU Z X, XIA D X, BERNER S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea [J]. Marine Geology, 1998, 145 (3-4): 225-253.
- [46] VISHNER G S. Fluvial processes as interpreted from ancient and recent fluvial deposits [J]. Journal of Sediment Geology, 1965, 12: 116-132.
- [47] ZHANG X M. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.
- [48] MA K E. Beach process and sedimentation [M]. Translated by QIU J L, ZHUANG Z Y, CUI C Q. Beijing: Ocean Press, 1985: 12-75. 马柯尔. 海滩过程与沉积作用[M]. 丘建立, 庄振业, 崔承琦, 译. 北京:海洋出版社, 1985: 12-75.
- [49] Coastal Hydrology of China Editorial Board. Coastal Hydrology in China [M]. Beijing: Ocean Press, 1995: 144-188. 中国海岸带水文编写组. 中国海岸带水文[M]. 北京:海洋出版社, 1995: 144-188.
- [50] NICHOLLS R J, MIMURA N. Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications [J]. Climate Research, 1998, 11: 5-18.
- [51] POTTS M K. Forms and distributions of hurricane Ike backflow and scour features; Bolivar Peninsula, Texas [D]. Texas: Texas A&M University, 2011.
- [52] XU H D. Numerical modeling of tidal current and pollutant dispersion in Laizhou Bay [J]. Marine Science Bulletin, 1991, 10(2): 80-98. 徐洪达. 莱州湾潮流和污染物扩散的数值模拟[J]. 海洋通报, 1991, 10(2): 80-98.
- [53] WANG Q, ZHAN C, SHANG J, et al. On the sedimentation characteristics and morpho-dynamic model of the Laizhou Shoal, Shandong, China [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2011, 42(3): 337-342. 王庆, 战超, 商杰, 等. 山东莱州浅滩地区沉积特征与沉积作用[J]. 海洋与湖泊, 2011, 42(3): 337-342.
- [54] WANG Q, YANG H, ZHONG S Y, et al. Sedimentary dynamics and geomorphic evolution of the Laizhou Shoal [J]. Acta Geographologica Sinica, 2003, 58(5): 749-756. 王庆, 杨华, 钟少云, 等. 山东莱州浅滩的沉积动态和地貌演变[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 749-756.

Sediment Transport and Morphodynamic Model of the Sanshan Dao Sandy Coast Area, East of Laizhou Bay

LIU Shi-hao¹, FENG Ai-ping¹, DU Jun¹, XIA Dong-xing¹, HU Wei-fen², LI Ping^{1,3}

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

2. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;*

3. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266001, China*)

Abstract: Based on grain size analysis of surface sediments and repetitive topographic survey on the Sanshan Dao sandy coast area, east of Laizhou Bay, this study revealed the geomorphic features, topographic variations, grain size characteristics and sediment transport, and discussed the morphodynamic mechanism for sediment transportation. Taking the Yellow Sea height -1.2 m (low water level) and -6.5 m (closure depth) in the year 1985 as the intersected planes, the study area can be divided into the following three geomorphic units, i. e. , beach unit, underwater slope unit and shelf unit, Each unit had its own distinctive characteristics for surface sediment distribution and topographic variation, e. g. , the sediment transportation on the underwater slope and shelf units were mainly controlled by the offshore tidal current and that on the beach unit was mainly influenced by the wave. Under the influences from the westward ebb current and southwestward tidal residual current, there generated a tidal channel on the flat seabed and caused the westward transport of the surface sediments to supply the Laizhou Shoal.

Key words: Grain size parameters; Grain size trend; Sediment; sediment dynamics; Sanshan Dao; Laizhou Bay

Received: November 12, 2013