

鸭绿江河口地区沉积物的粒度变化及影响因素

冉隆江¹, 石勇¹, 高建华¹, 刘月², 李富祥², 白凤龙³, 李军³

(1 南京大学 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093; 2 辽东学院 城市建设学院, 丹东 118003;

3 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:通过对比鸭绿江河口不同地区柱状样的粒度参数及敏感组分变化规律, 分析了河口不同地区沉积动力环境和沉积特征的差异; 结合代表性柱状样的²¹⁰Pb 测年, 分析了柱状样在不同时期自然和人类活动影响下的沉积特征变化。结果表明, 西水道主要受潮流作用而含有泥沙互层, 粒度参数变化小; 西岸潮滩受潮流和波浪作用含有贝壳碎屑, 并在顶部出现粗化层。近几十年来, 鸭绿江河口地区沉积特征的变化主要由于人类活动对水沙入海通量的影响; 1941 年以前柱状样的波动沉积特征反映了河流山溪性特征; 1941—1970(1980)年随水沙入海通量减少而呈现砂含量降低、粉砂增加的特征; 1970(1980)—1990 年由于水沙入海通量变化较小, 而呈现沉积物组成和敏感组分保持稳定的特征; 但 1990 年后随水沙入海通量的进一步降低, 邻近河口区域的沉积物出现明显的粗化。

关键词:沉积物粒度; 水沙通量; 水动力特征; 人类活动; 鸭绿江

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2012)02-0031-11

河口是连接海洋和流域的桥梁, 受岩石圈、水圈、大气圈和生物圈 4 个圈层的共同作用, 是各类界面物质的汇集、转运和交换的地带。河口海岸各种过程(物理的、化学的、生物的和地质的)耦合多变, 演变机制复杂, 生态环境敏感脆弱^[1]。在自然状态下, 河口系统具有自我调节机制, 并以负反馈的形式适应外界环境的变化, 以维持自身的物理和生态系统平衡。但自工业革命以来, 作为第三驱动力的人类活动, 其作用已非过去一般的人为因素影响可比, 以致于有人将工业革命以来的地质年代称之为“人类世”^[2]。在这种背景下, 流域和河口地区日益加剧的人类活动及其资源开发, 极大地改变了河口过程, 使得河口海岸环境变化更为显著和迅速^[1], 且与近岸海域环境变化有着密切关系^[3]。河口系统对于流域内的自然和人类活动将如何响应, 是有待于进一步深入探讨的科学问题。对河口沉积物特性及其运动特征的了解是研究河口过程的基础, 河口区沉积物的分布一方面受沉积动力环境差异的影响, 会产生区域分异特征; 另一方面, 也会因流域变化(水沙入海通量)而在垂向上发生改变^[4]。因此, 河口区的沉积特征和河口沉积动力过程对流域变化有哪些响应? 受到了越来越多的学者关注。

鸭绿江位于中国和朝鲜边境, 是汇入北黄海的一条重要地区性河流。在 1941 年以前, 鸭绿江河口地区的水深和岸线大致保持稳定。但近几十年来, 水库修建、河道挖沙等人类活动导致流域入海通量变化, 引发鸭绿江河口沉积动力过程和沉积环境发生了快速演变^[5-7]。本文通过分析鸭绿江河口地区柱状样沉积物的粒度空间分布特征, 探讨了鸭绿江河口地区不同动力环境下的沉积特征差异; 通过对代表性柱状样进行同位素定年, 分析河口地区在不同时期沉积特征的变化, 以了解自然和人类活动双重影响下的鸭绿江河口沉积环境演化过程。

1 区域概况

鸭绿江发源于长白山天池胭脂峰南麓, 自东北流向西南, 跨越吉林、辽宁两省, 是中朝两国的界河。鸭绿江全长 790 km, 总流域面积 6.45 万 km², 其中中国境内的流域面积为 3.25 万 km², 多年平均径流量为 289 × 10⁸ m³, 年平均输沙量为 1.13 × 10⁴ t。鸭绿江水沙的年内季节分配极不平衡, 洪季的径流量约占全年的 80%, 而枯水期则显得流缓水清^[8]。鸭绿江河口地区以悬沙含量高、潮差大、潮流强、最大浑浊带显著为主要特征^[9-10]。目前主要有 3 条入海通道, 绸缎岛和新岛以西为西水道, 绸缎岛和新岛以东又可分为中水道和东水道。西水道上游已淤浅, 逐渐退化为涨潮通道, 东水道也因上口淤塞, 流域来沙不足, 沿岸潮滩不断遭受侵蚀, 因此, 中水

基金项目: 国家自然科学基金项目(40976051, 40871019, 40906042)

作者简介: 冉隆江(1985—), 男, 硕士生, 主要从事河口海岸研究, E-mail: ranlongjiang3050@126.com

收稿日期: 2011-06-30; 改回日期: 2011-09-19. 文凤英编辑

道是目前主要的水流通道。

鸭绿江河口地区潮流性质为正规半日潮,运动形式基本呈现往复流。鸭绿江口为强潮河口,平均潮差由口门向上游逐渐减少,落潮流速大于涨潮流速,落潮历时明显大于涨潮历时^[11]。该海域全年以风浪为主,涌浪较少,且具有明显的季节性变化。波浪频率以东南南向浪最高,东南和南向浪次之,各向最大波高为 1.3~4.0 m^[8]。

2 材料和方法

2006 年 7 月和 2010 年 7—8 月在鸭绿江河口采集了 6 个柱状样(图 1)。2006 年采集的柱状样岩心为 Z2;2010 年采取的柱状样岩心分别为 Z1、Z3、Z4、Z5 和 Z6,由于中水道的沉积物主要为砂^[8,12],柱状样的采集不理想。岩心运回后对岩性、沉积结构等描述后,以 2 cm 为间距逐层取出 3 个子样,其中子样 1 用于含水量测定,子样 2 用于粒度分析,子样 3 用铅²¹⁰Pb 测年方法对沉积物测年。

粒度分析采用如下方法进行:取适量样品放入烧杯中,加入浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠作为分散剂,静置 24 h 以上,最后上机测试(由于样品含较少的有机质和贝壳,为保持样品的完整性而未加双氧水和盐酸处理)。仪器为英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,仪器的测量范围为 0.02~2 000 μm ,重复测量的误差小于 3%。粒度测试数据采用矩法^[13]计算平均粒径、分选系数、偏态和峰态等粒度参数。并采用粒级-标准偏差算法

来提取这 6 个柱状样的敏感粒度组分。粒级-标准偏差法的原理,是通过研究激光粒度仪给出的每一粒级所对应含量的标准偏差变化而获得粒度组分的个数和分布范围。较大的标准偏差值所对应的粒度即为对沉积环境变化敏感的粒度众数。

将已分好的柱状样沉积物样烘干、研磨细搅匀后,使用 Po- α 法对其进行²¹⁰Pb 测年分析,实验过程见文献^[14],仪器为低本底的 α 谱仪(576A Alpha Spectrometer,美国 EG&G 公司生产)。根据初始浓度恒定(CIC)模式,由下式求得沉积速率^[15]:

$$S = \lambda H / \ln(A_0/A_i) \quad (1)$$

式中 S 为沉积速率($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$); λ 为²¹⁰Pb 衰变常数, $\lambda = 0.03114 \text{ a}^{-1}$; H 为深度(cm), A_0 和 A_i 分别为表层与深度 H 层的²¹⁰Pb 过剩值,其中 $H/\ln(A_0/A_i)$ 可由²¹⁰Pb 放射性活度过剩值取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率求出。本文所有的粒度测试和²¹⁰Pb 分析测试均在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。

3 结果

3.1 粒度参数

3.1.1 西水道

西水道柱状样沉积物(Z1、Z2 和 Z3)的平均粒径、分选系数、峰态等参数和沉积物组分如图 2—4 所示。柱状样沉积物的组分以粉砂为主,砂次之,黏土含量较少且变化较小;自陆向海方向上,砂的含量

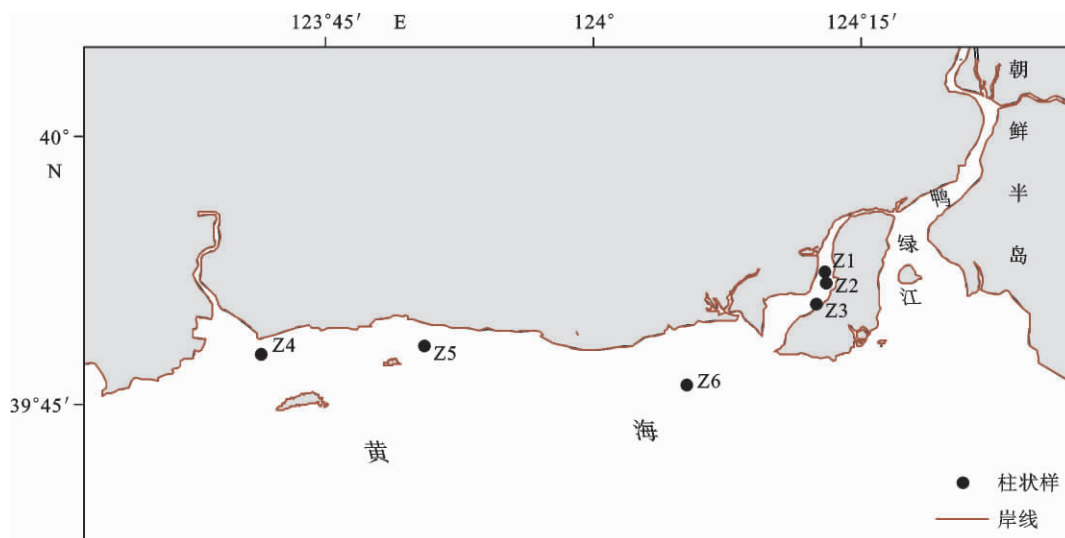


图 1 研究区位置及采样点站位

Fig. 1 Location of the Yalu River estuary and sampling stations

由 40.48% 减少至 32.78%, 粉砂含量由 48.07% 增加到 55.57%。柱状样平均粒径的均值为 5.12~5.47 Φ , 从山口至入海口方向上沉积物粒度逐渐变细; 分选系数和偏态分别为 2.08~2.21 与 0.58~1.39, 分选差, 偏态自陆向海由正偏至近对称; 峰态在 2.65~2.69 间波动, 峰态为宽。从总体上来看, 西水道柱状样的各种参数在平面变化小, 颗粒较细, 且自陆向海渐变; 而在垂向上变化则较大: 上部(柱状样顶部至三分之二深度处) 粒度参数在某一值附近波动, 沉积物组分也较稳定; 而下部自上向下粒度

波动变粗, 砂含量增加, 其他参数也呈相应的变化。

3.1.2 西岸潮滩

西岸潮滩柱状样(Z4、Z5 和 Z6)的沉积物组分、平均粒径、分选系数等参数如图 5—7。该区柱状样的各种粒度参数和组分变化较大: 大洋河口东侧柱状样 Z4 的组分以粉砂为主, 砂次之, 黏土少, 平均粒径为 5.00 Φ , 分选较差, 偏态为正偏; 潮滩柱状样 Z5 和 Z6 的组分中, 砂含量多于粉砂, 黏土含量约 10%, 其平均粒径分别为 4.80 与 4.81 Φ , 分选差, 极正偏, 峰态很宽。西岸潮滩柱状样各参数的垂

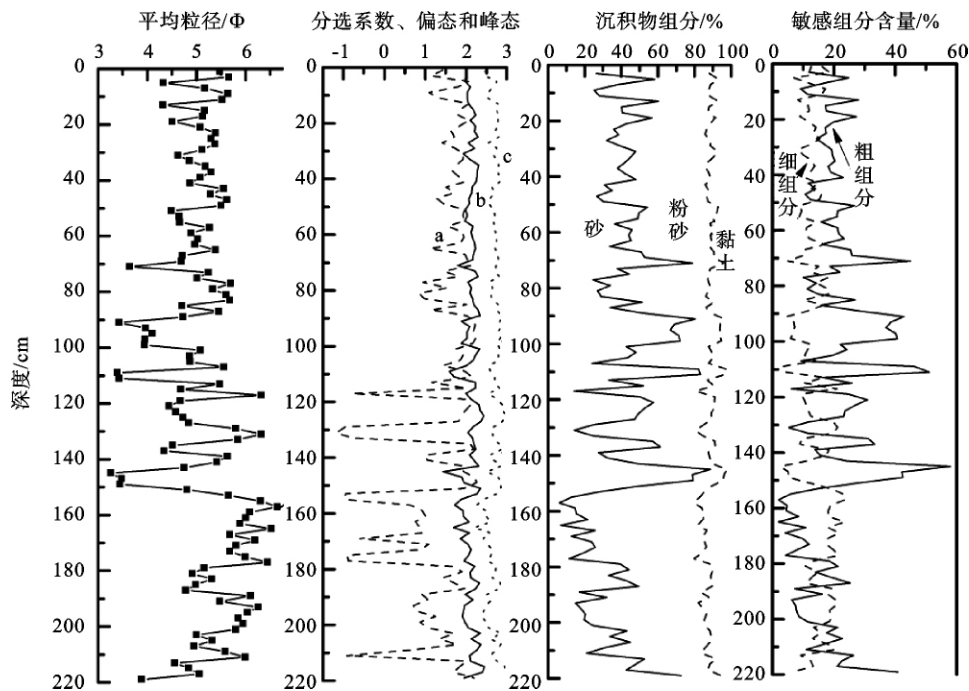


图 2 鸭绿江河口柱状样 Z1 的粒度参数和沉积物组分及敏感组分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 2 Vertical distribution of sediment components, grain size parameters and sensitive populations for Z1

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

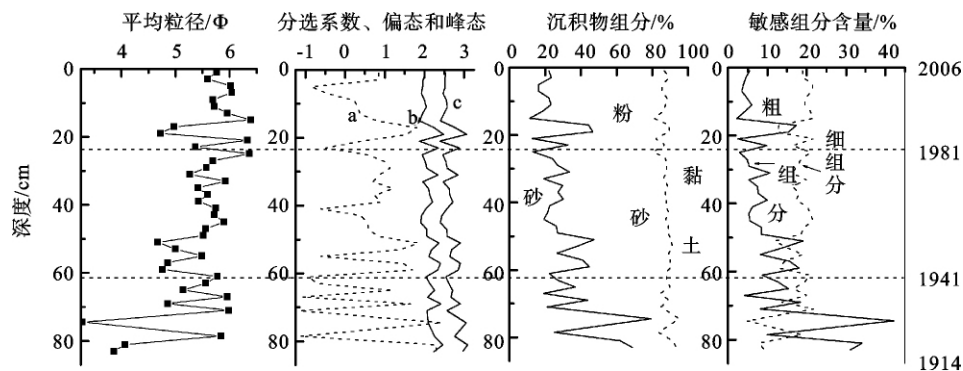


图 3 鸭绿江河口柱状样 Z2 的粒度参数和沉积物组分及敏感组分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 3 Vertical distribution of sediment components, grain size parameters and sensitive populations for Z2

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

向变异较大,可分成 3 段:柱状样顶部的沉积物较粗,厚度自西向东逐渐增加,而粒度逐渐变细,其分选较好;中段沉积物的粒度参数产生波动,沉积组分

中砂与粉砂含量也相应地变化;底层沉积物较小,且粒度变化表现出一定的趋势,分选系数、偏态等也对应地变大或变小。

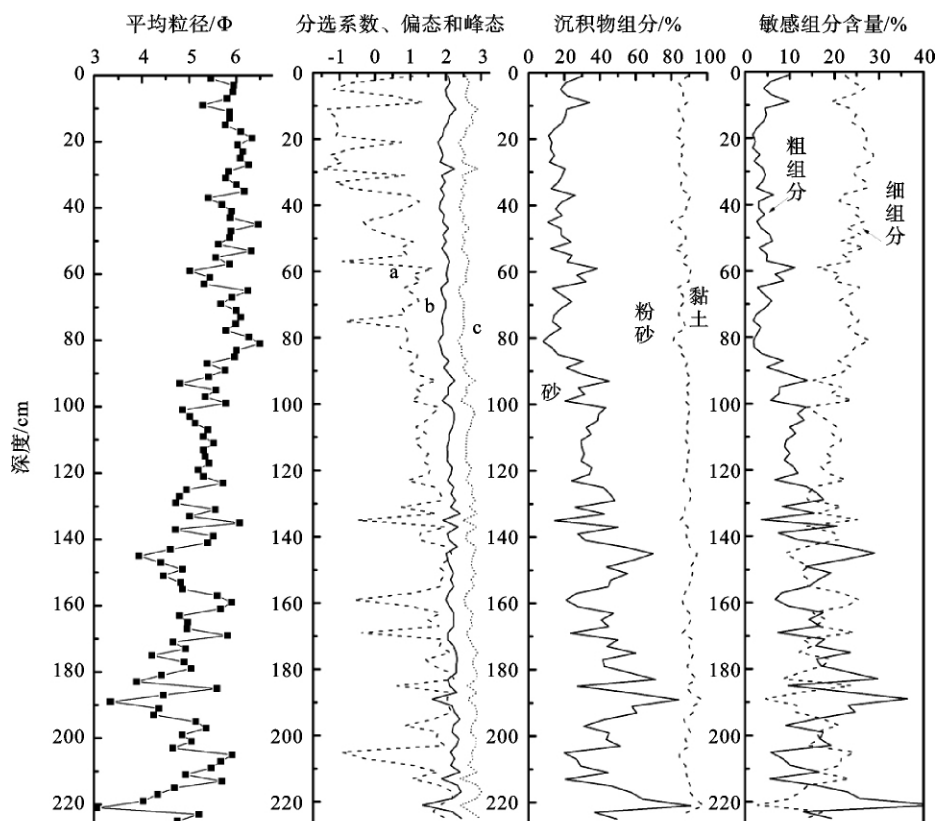


图 4 鸭绿江河口柱状样 Z3 的粒度参数和沉积物组分及敏感组分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 4 Vertical distribution of sediment components, gain size parameters and sensitive populations for Z3

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

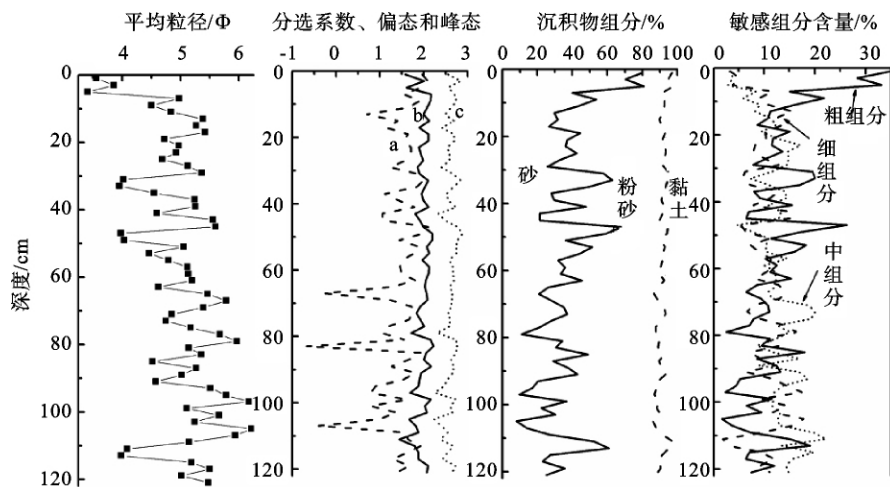


图 5 鸭绿江河口柱状样 Z4 的粒度参数和沉积物组分及敏感组分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 5 Vertical distribution of sediment components, gain size parameters and sensitive populations for Z4

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

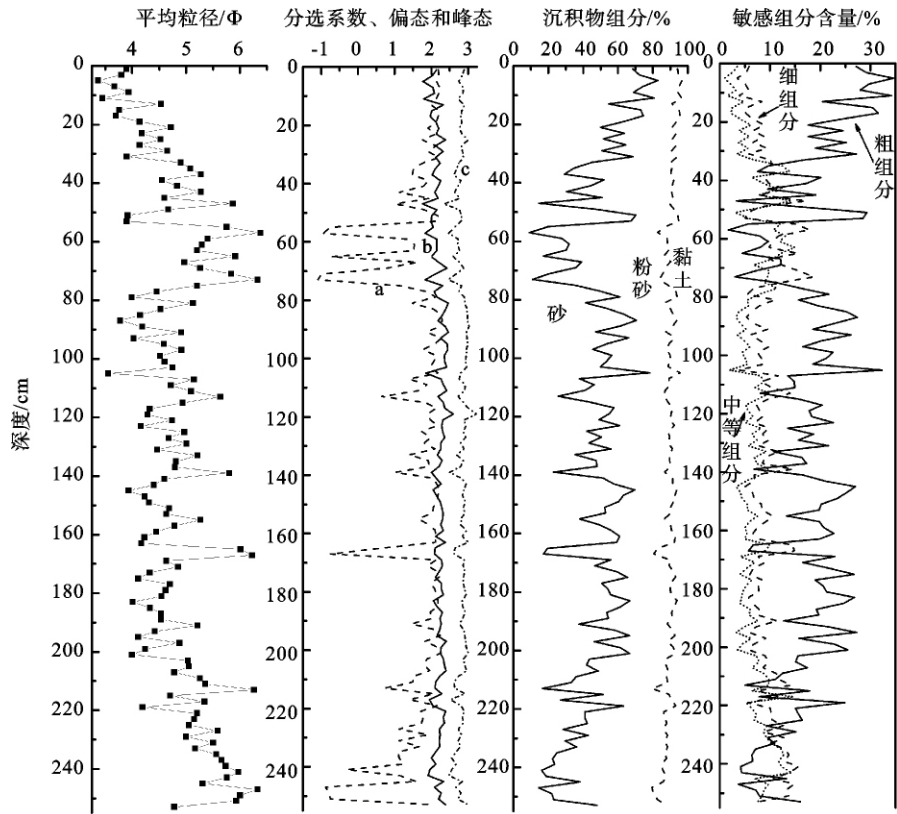


图 6 鸭绿江河口柱状样 Z5 的粒度参数和沉积物组分及敏感组分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 6 Vertical distribution of sediment components, gain size parameters and sensitive populations for Z5

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

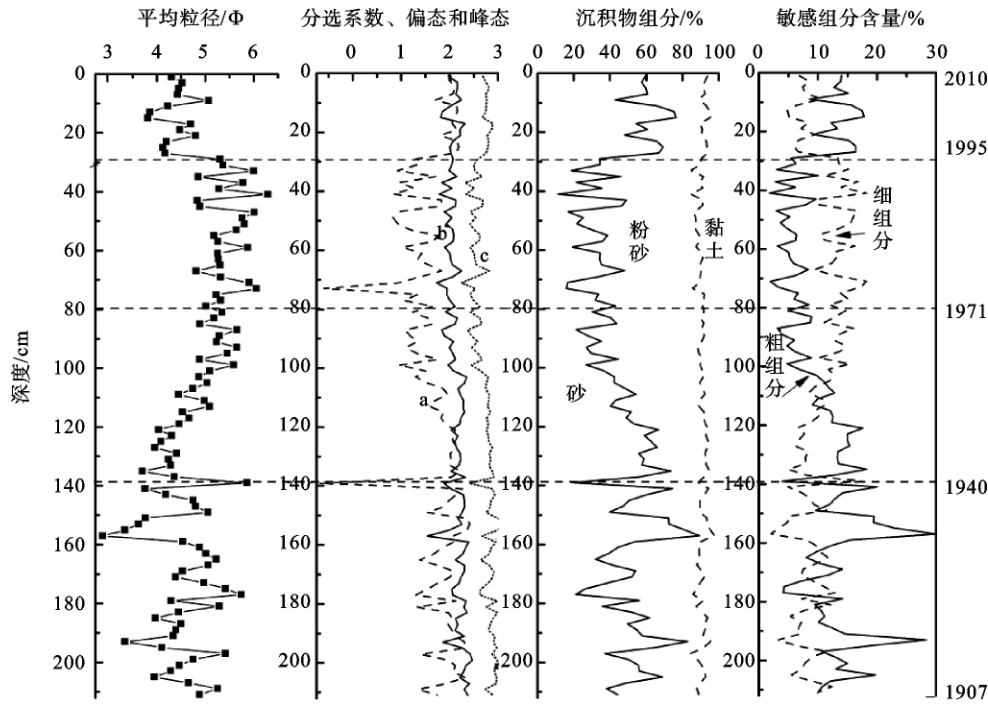


图 7 鸭绿江河口柱状样 Z6 的粒度参数和沉积物组分及粗细组分百分含量的垂向变化

a. 偏态; b. 分选系数; c. 峰态

Fig. 7 Vertical distribution of sediment components, gain size parameters and sensitive populations for Z6

a. skewness; b. sorting coefficient; c. kurtosis

3.2 敏感组分

3.2.1 西水道

鸭绿江西水道柱状沉积物的粒度-标准偏差曲线如图 8a 所示,西水道柱状样 Z1、Z2 和 Z3 的粒度-标准偏差曲线呈典型的双峰分布模式,即可分为粗细两个环境敏感粒度组分。柱状样 Z1、Z2 和 Z3 的细组分峰值分别为 8.5、12 和 10 μm ;粗组分峰值分别为 161、193 和 163 μm 。从数值的空间分布上看,西水道柱状样的粗组分标准偏差值约为细组分的 3 倍,且粗细组分标准偏差值都是 $Z1 > Z3 > Z2$ 。

3.2.2 西岸潮滩

西岸潮滩柱状样沉积物的粒度-标准偏差曲线分布较复杂(图 8b),既包括双峰分布模式(Z6),又包括 3 峰分布(Z4),还有 4 峰分布模式(Z5)。首先,潮滩柱状样均有同西水道相似的粗、细敏感粒度组分,其峰值分别为 12 和 162 μm (大洋河口粗峰值略小,为 136 μm);其次,邻近大洋河口的柱状样 Z4 和 Z5 还存在中等颗粒的敏感组分,其峰值分别为 40 和 34 μm ;最后,Z5 还有一个峰值为 1 094 μm 的极粗敏感组分。从数值的空间分布上看,西侧潮滩柱状样的粗组分标准偏差值大于细敏感组分,中等敏感组分介于其间,极粗敏感组分极低;粗组分标准偏差值为 $Z6 > Z5 > Z4$,细组分峰值为 $Z6 > Z4 > Z5$,这与西水道的敏感组分有差异。

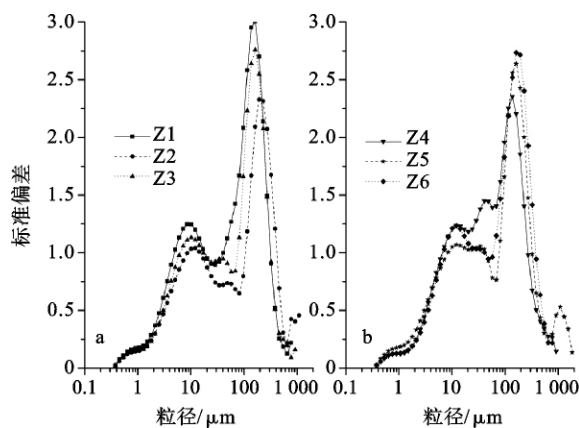


图 8 鸭绿江河口西水道和西岸潮滩柱状样的粒度-标准偏差曲线

Fig. 8 Standard deviations vs grain size for core sediments from West channel and West tidal flat in Yalu River estuary

3.3 ^{210}Pb 测年结果

岩心 Z2 的 ^{210}Pb 在 0~71 cm 为衰减层,并在 71 cm 处达到平衡(图 9)。柱状样 Z6 在 0~11 cm

层段略有混合,推测是水动力和生物对近表层沉积物扰动的结果, ^{210}Pb 在 21~41 cm 为第 1 衰减层,在 51~141 cm 为第 2 衰减层,且衰减比第 1 层略快,最终在 151 cm 处达到平衡。计算结果表明,Z2 的沉积速率为 0.94 cm/a,Z6 在 21~41 和 51~141 cm 的沉积速率分别为 1.97 和 2.04 cm/a。

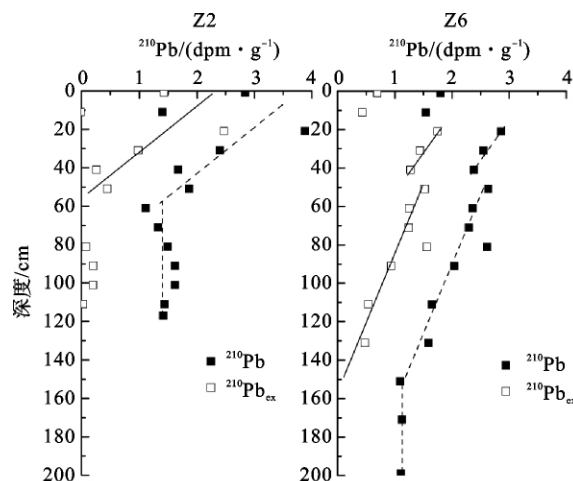


图 9 鸭绿江河口 Z2 和 Z6 岩心 ^{210}Pb 放射性比活度的垂向分布剖面

Fig. 9 Vertical distribution of ^{210}Pb radioactivity of Z2 and Z6

4 讨论

4.1 不同水动力对沉积物分布的影响

由前述可知,鸭绿江河口地区柱状样的沉积特征存在地域性差异,这种差异表征了不同地域的水动力环境的特点。鸭绿江河口受到包括径流、潮流及波浪等复杂水动力影响,中水道、西水道和西岸潮滩的水动力条件各不相同。中水道为径流与潮流交汇区,以推移质运动为主导^[7],1993 年,国家海洋局环保研究所^[8]和南京大学高建华等^[7]2006 年采集的样品分析表明,中水道沉积物颗粒粗,组分基本为砂,分选差,这种沉积特征基本与中水道强水动力环境相适宜。

目前,西水道上口已被淤积,径流宣泄不畅,已退化为潮汐汊道,因而潮流是影响该区沉积物分布的最主要动力条件,径流影响较弱^[16]。受制于北黄海潮波和西水道目前的特殊地形条件,鸭绿江西水道涨落潮流后于东中水道,而鸭绿江中水道的细颗粒沉积物被落潮流带出口门后,在涨潮流的作用下进入西水道^[17];西水道的含沙量自下游河口向上沿

程呈递减趋势^[18]。西水道柱状样沉积物自海向陆方向上粒度基本逐渐递增;同时,组分中粉砂含量逐渐降低,而砂含量渐增;它们的粒度频率曲线基本为双峰分布(图 10),其中 Z1 多数层位的前峰明显小于后峰,Z2 和 Z3 半数层位的前峰大于后峰,这反映了西水道水动力自海向陆的变化。2006 年,高建华等采集的表层样粒度也基本为自海向陆粒度变粗的趋势^[7]。从西水道沉积结构来看,柱状沉积物在垂向上均有薄的沙泥互层,这与潮滩在潮汐环境下形成

的韵律沉积特征具有相似性^[19]。

鸭绿江西岸潮滩沉积物除受潮流作用外,还受到波浪的影响^[20]。西侧潮滩柱状样的粒度无明显的规律性变化,这与高建华等 2001 年采集的柱状样自东向西粒径变小^[17]和高建华等 2006 年采集的西侧表层柱状样不尽相同,这可能受采样时间与地域的影响。西侧潮滩柱样的频率曲线分布较复杂(图 11):柱状样 Z4 为单峰、双峰相间分布,单峰峰值波动大;柱状样 Z5 和 Z6 以双峰为主,夹杂单峰和三

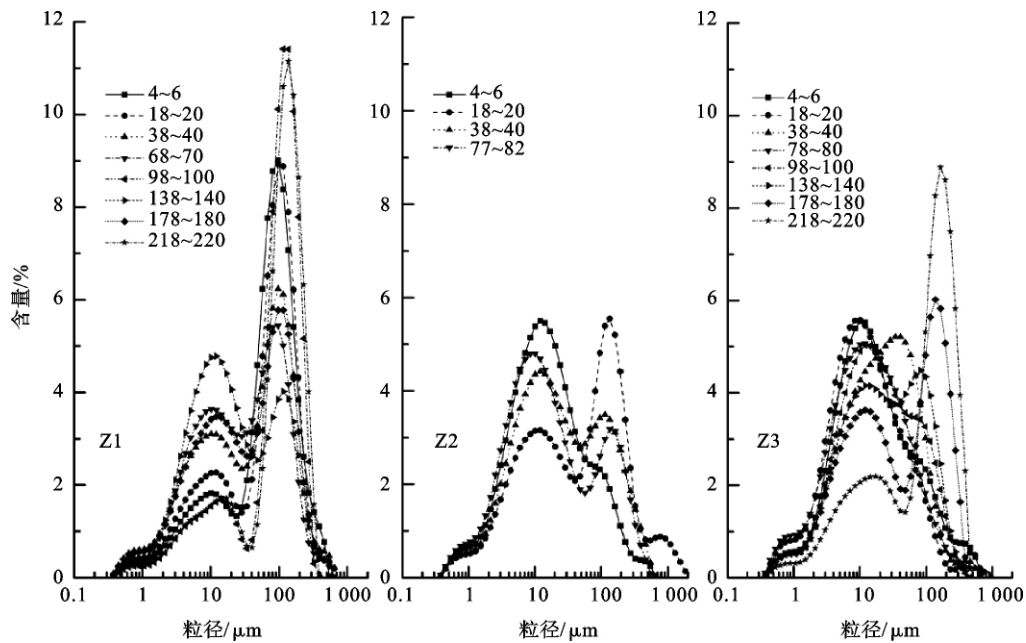


图 10 鸭绿江河口西水道柱状样典型点粒度频率曲线分布

Fig. 10 Typical grain-size frequency distribution curves of core sediments from West channel of Yalu River estuary

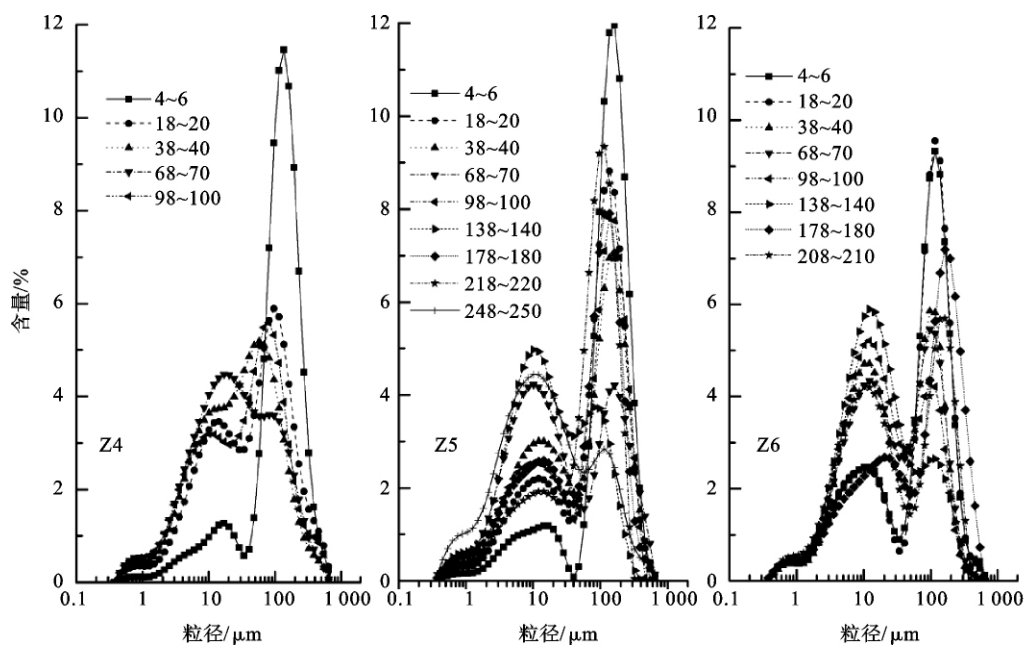


图 11 鸭绿江河口西岸潮滩柱状样典型点粒度频率曲线

Fig. 11 Typical grain-size frequency distribution curves of core sediments from West tidal flat of Yalu River estuary

峰,且自西向东单峰分布的层减小,双峰分布中多数层位为前峰小于后峰;同时,潮滩柱样的沉积构造均含有贝壳碎屑或贝壳碎屑夹层。这些沉积特征是波浪与潮流动力在沉积中的反映,大洋河口柱样 Z4 的单峰层多极峰值波动表明其还受径流的影响。此外,本区柱状沉积物分布的另一个主要特点是上部沉积物的粒度出现粗化现象,但深度不均,基本为自西向东逐渐变厚,其形成机制将在后面的讨论中加以分析。

4.2 人类活动的影响

一般来说,沉积物来源和水动力条件的改变是导致河口区沉积物粒度变化的最主要因素^[17]。由于水动力条件的变化需要长时间尺度的水文观测资料,而且鸭绿江河口地区的水动力资料匮乏,因此,本文主要从沉积物来源,即水沙入海通量变化的角度来探讨流域变化对鸭绿江河口地区沉积物分布的影响。

自 1941 年水丰水库修建以来,目前整个鸭绿江流域共修建了大、中、小型水库 41 座。20 世纪 60 年代,随着鸭绿江中游修建云峰水库和马市夹心子丁坝等工程,鸭绿江入海通量更是逐年减少。由图 12 可见,60 年代,鸭绿江河口的平均入海径流量为 $312.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,但 70 年代则迅速降至 $258.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,且有逐年下降的趋势。由于水库对径流的削峰填谷作用^[21],径流的年内分配也发生了巨大变化。据水文资料统计,水丰水电站拦洪前的 1926—1941 年,8 月份的径流量是 2 月份的 30 倍^[22];但由于水库的影响,1960 年间 8 月份的径流

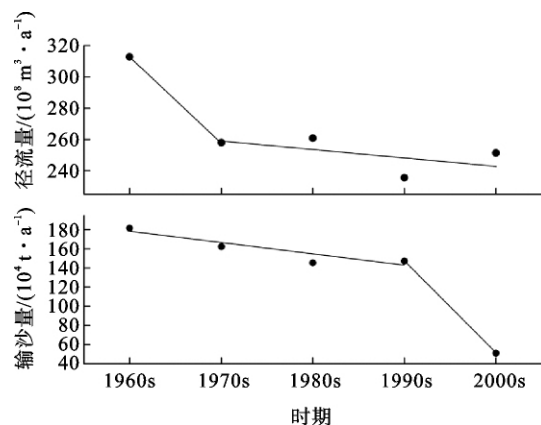


图 12 鸭绿江水沙年际变化

(2000s 年平均水沙通量为 2001—2008 的统计数据)

Fig. 12 The inter-annual variations of runoff and sediment load of Yalu River

(The mean water and sediment flux data of 2000 from statistics between 2001 and 2008)

量仅是 2 月份的 3 倍,汛期流量明显削弱,枯季流量明显加大。水库对悬沙的拦截作用,使悬沙平均入海通量由 60 年代的 $181.6 \times 10^4 \text{ t/a}$,逐渐降至 90 年代的 $147.2 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。进入 90 年代以后,由于加强了鸭绿江流域内植树造林和水土保持,鸭绿江流域的入海通量进一步降低,2000—2008 年的年平均悬沙入海通量更骤降至 $51.0 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。水库对推移质的拦截效应更加显著,Mahmood 通过对世界主要河流的研究发现,水库可以拦截上游 79% 的推移质^[23]。

从柱状样 Z2 和 Z6 也可以看出,1941 年以前的鸭绿江河口由于人类活动的干扰较少,河流基本处于自然演化中。该时期内沉积物的分布特点是:组分中的砂与粉砂呈波动变化,砂含量较平均值高;柱状样的平均粒径和敏感粒度组分含量波动大,分选系数和峰态大于整个柱状样的平均值。但由于河口的不同地域,具体特征又有不同:柱状样 Z2 的粒度频率曲线为双峰分布,前后峰的百分含量相差不大,且此段的粒度为自上而下变粗的趋势,对应的粗、细敏感组分的标准偏差均比整个柱状样高(图 13);而 Z6 的粒度频率曲线除多数为双峰分布外,还有峰值在 $21 \sim 118 \mu\text{m}$ 波动的单峰分布,且粒度中的细组分含量小于粗组分含量;而粗敏感组分比整个柱状样稍高,细敏感组分明显低,此外还多一个中等敏感组分。这些特征均反映了该时期鸭绿江作为自然状态下的山溪性河流的特点。

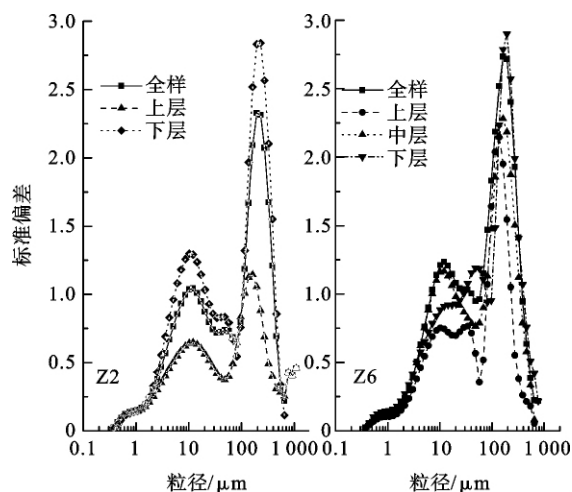


图 13 鸭绿江河口岩心 Z2 与 Z6 不同层段的粒级-标准偏差曲线

Fig. 13 Standard deviations vs grain size in different periods of Z2 and Z6

随着 1941 年开始大规模修建水库,水沙入海通

量急剧减小,鸭绿江河口的地貌形态发生了巨大的变化^[24]。例如,河流主泓与西水道上交角越来越大,入海水道逐渐偏离西水道,因而西水道上口逐渐淤堵,到70年代西水道已蜕化为潮汐汉道^[20]。由于沉积物供应减少,鸭绿江河口西岸的潮滩沉积速率明显减慢。根据李光天等^[22]80年代在靠近西水道潮滩进行的测定,该地1941年以前的沉积速率为10.50 cm/a,而1941—1982年的沉积速率仅为0.86 cm/a,两者相差12.2倍。与此相适应,鸭绿江河口沉积物的分布也发生了快速的变化:由于水库对粗颗粒物质的拦截效应要大于细颗粒物质^[26],因此,柱状样Z2在1940—1980年,以及柱状样Z6在1940—1970年沉积物组分中砂的含量逐渐减少,粉砂增加,平均粒径变小;虽然沉积物的频率分布曲线基本为双峰,但粗颗粒敏感组分逐渐降低,而细颗粒敏感组分逐渐增高。

柱状样Z2在1980—2006年,以及柱状样Z9在1970—1995年的沉积物变化较小,沉积物组成、频率分布曲线和敏感组分都大致保持稳定。但随着1990年以来鸭绿江悬沙入海通量的进一步降低,柱状样Z6的沉积物在1995—2009年又发生了进一步的变化:粒度频率曲线虽为双峰分布,但细组分物质的峰值明显增高;粗颗粒的敏感组分含量增高,而细敏感颗粒敏感组分的含量降低,并出现中等敏感组分。

由上述分析可知,受流域变化的影响鸭绿江河口的沉积物也相应地发生了变化,但其变化的敏感程度具有明显的地域性:距离河口较近的潮滩(柱状样Z6),由于直接受鸭绿江物源变化的影响,其敏感性最高;而在西水道地区,由于所处环境较为封闭,且只能接受鸭绿江流域的细颗粒物质,因此,其柱状样中没有出现类似于潮滩1990年以后出现的沉积物粗化现象;而在距离河口较远的其他潮滩地区(柱状样Z4和Z5),由于沉积物来源和水动力更为复杂,柱状样对沉积物的粗化更为敏感。

鸭绿江的径流输沙被认为是河口地区沉积物的最主要来源^[8,27],且一直被运移到浅海区,并汇入辽东沿岸流,促使北黄海淤泥质海岸带浅滩不断增长^[25,28]。元素分析的结果也表明,鸭绿江河口西岸潮滩的沉积物也主要来源于其径流入海泥沙^[12,29]。本文认为,鸭绿江河口西岸潮滩自1990年以来出现的物质粗化现象由以下几个因素造成:(1)流域及河流自身的变化(如气候、植被、土壤、径流等),以及人类活动(修建水库,人工挖沙等),造成入海的悬移质沉积物中的细颗粒组分减少,从而造成潮滩沉积物

变粗;(2)由于河流来源的细颗粒沉积物减少,造成潮滩原有的沉积物在波浪和潮汐的作用下,细颗粒沉积物被淘洗搬运;(3)由于陆源沉积物供应减少,潮下带的粗颗粒沉积物在波浪和潮流的作用下被输送到潮间带,使其上部的物质粗化。但其具体原因还有待于在今后的研究中,结合长时间尺度的动力观测、入海沉积物的粒径变化以及潮滩剖面形态等多种手段进行进一步研究。但可以肯定的是,人类活动影响带来的流域变化是造成鸭绿江河口地区沉积特征在近几十年发生变化的最主要原因。

5 结论

(1)不同区域柱状样的沉积特征与该区域的水动力条件相适应,西水道柱状样由于主要受潮流作用影响,主要以粉砂为主,含有泥沙互层,粒度参数的垂向变化较大;西岸潮滩在潮流和波浪的作用下,柱状样以砂和粉砂为主,含有贝壳碎屑或贝壳碎屑夹层,柱状样上部出现沉积物粗化层。

(2)西水道柱状样有粗细2个敏感粒度组分,峰值主要分布在8.5~14与115~230 μm ;西岸潮滩柱状样的敏感粒度组分较复杂,潮滩东侧柱状样的粗细敏感粒度组分峰值与西水道较为相似,潮滩西侧柱状样则又出现了一个40与34 μm 的中等颗粒敏感组分。

(3)人类活动影响带来的流域变化,是造成鸭绿江河口地区沉积特征在近几十年发生变化的最主要原因,而距离河口较近的潮滩是对流域变化最为敏感的区域。1941年以前的鸭绿江河口沉积特征均反映了该时期鸭绿江作为自然状态下的山溪性河流的特点。随着1941年开始大规模修建水库,水沙入海通量急剧减小,柱状沉积物在1940—1970(1980)年沉积物组分中砂的含量逐渐减少,粉砂增加,平均粒径变小;虽然沉积物的频率分布曲线仍基本为双峰,但粗颗粒敏感组分逐渐降低,而细颗粒敏感组分逐渐增高。1970(1980)年至90年代中期,由于流域水沙入海通量变化不大,沉积物变化较小,沉积物组成、频率分布曲线和敏感组分都大致保持稳定。但随着90年代以来鸭绿江悬沙入海通量的进一步降低,靠近河口地区的柱状沉积物又发生了进一步的变化:沉积物出现明显的粗化,粒度频率曲线虽为双峰分布,但粗颗粒物质的峰值明显增高,粗颗粒的敏感组分含量增高,而细敏感颗粒敏感组分的含量降低,并出现中等敏感组分。

致谢:刘运令、张亮、严杰及石勇、盛景景、杜家

笔参加了野外采样工作和室内分析测试,刘运令、张亮、严杰在论文写作过程中给予指导和帮助,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 陈吉余,陈沈良. 中国河口研究五十年:回顾与展望[J]. 海洋与湖沼,2007,38(6):481-486. [CHEN Jiyu, CHEN Shenliang. China estuarine research for 50 years: retrospect and prospect [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(6):481-486.]
- [2] Leithold E L, Perkey D W, Blair N E, et al. Sedimentation and carbon burial on the northern California shelf: the signatures of land-use change [J]. Continental Shelf Research, 2005, 25:349-371.
- [3] 高抒. 浅海细颗粒沉积物通量与循环过程[J]. 世界科技研究与发展,2000,22(5):73-77. [GAO Shu. Fine-grained Sediment Fluxes and Cycling on Continental Shelves[J]. World Sci-tech R&D, 2000,22(5):73-77.]
- [4] 杨作升,陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究,2007,27(5):690-698. [YANG Zuosheng, CHEN Xiaohui. Centurial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang (Yangtze river) estuary and its influential factors [J]. Quaternary Sciences, 2007,27(5):690-698.]
- [5] 程岩,毕连信. 鸭绿江河口浅滩的基本特征和动态变化[J]. 泥沙研究,2002,3:59-63. [CHENG Yan, BI Lianxin. Primary character and motive change of shallow beach in Yalujiang river mouth [J]. Journal of Sediment Research, 2002,3:59-63.]
- [6] 王励. 中朝界河鸭绿江河口段(虎山以下)河道演变分析[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2006. [WANG Li. Analyze of channel change in Yalu River estuary after Hushan-Boundary River between China and North Korea [D]. Master's degree thesis Of Harbin industrial university, 2006.]
- [7] 高建华,李军,汪亚平,等. 鸭绿江河口及近岸海域沉积物中矿物组成、分布及其沉积动力学意义[J]. 海洋学报,2009,31(3):84-94. [GAO Jianhua, LI Jun, WANG Yaping, et al. Heavy mineral distribution and their implications for sediment dynamics in the Yalu Estuary and its adjacent sea area [J]. Acta oceanologica Sinica, 2009, 31(2):1-11.]
- [8] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志:第十四分册(重要河口)[M]. 北京:海洋出版社,1998:386-432. [State Oceanic Administration. Chinese Harbours and Embayments (Volume 14): Important Estuaries [M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 386-432.]
- [9] 金惜三,李炎. 鸭绿江洪季的河口最大混浊带[J]. 东海海洋,2001,19(1):1-9. [JIN Xisan, LI Yan. Turbidity maximum belt of Yalujiang River estuary in the wet season [J]. Donghai Marine Science, 2001,19(1):1-9.]
- [10] GAO Jianhua, GAO Shu, CHENG Yan, et al. Formation of turbidity maxima in the Yalu River Estuary, China [J]. Journal of Coastal Research, 2004,43 (SI): 134-146.
- [11] 白凤龙,高建华,汪亚平,等. 鸭绿江口的潮汐特征[J]. 海洋通报,2008,27(3):7-13. [BAI Fenglong, GAO Jianhua, WANG Yaping, et al. Tidal characteristics at Yalu River estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(3):7-13.]
- [12] 李家胜,高建华,李军,等. 鸭绿江河口元素常量元素地球化学分布特征及其控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(1):25-32. [LI Jiasheng, GAO Jianhua, LI Jun, et al. Distribution and controlling factors of major elements in sediments of the Yalu river estuary [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010,30(1):25-32.]
- [13] Mcmanus J. Grain size determination and interpretation [C]//Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988:63285.
- [14] Flynn W. The determination of low level of polonium-210 in environmental materials [J]. Analytica Chimica Acta, 1968, 43: 221-227.
- [15] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean [C]//In: Geiss J, Goldberg E D (Ed.). Earth Science and Meteoritics. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1963:90-102.
- [16] 程岩. 鸭绿江河口地貌的形成与演变[D]. 东北师范大学硕士学位论文,2007. [CHENG Yan. Estuary landform's formation and evolution of Yalu River [D]. Master's degree thesis of Northeast normal university, 2007.]
- [17] 高建华,高抒,董礼先,等. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送[J]. 海洋通报,2003,22(5):26-33. [GAO Jianhua, GAO Shu, DONG Lixian, et al. Sediment distribution and suspended sediment transport in Yalu River estuary [J]. Marine Science Bulletin, 2003,22(5):26-33.]
- [18] 高峰,孙连成,麦苗. 鸭绿江河口潮流泥沙数值模拟[J]. 水道港口,2009,30(2):89-95. [GAO Feng, SUN Liancheng, MAI Miao. Numerical simulation of tidal current and sediment in Yalu River estuary [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009,30(2):89-95.]
- [19] 范代读,李从先. 现代潮汐层偶与古环境解释[J]. 自然科学进展,2000,10(12):1109-1114. [FAN Daidu, LI Congxian. Modern tidal couplets and interpretation on paleo-environment [J]. Progress in Natural Science, 2000,10(12):1109-1114.]
- [20] 程岩. 鸭绿江河口地貌的形成、演变与港口建设[J]. 海港工程,1988,7(1):28-35. [CHENG Yan. Formation and evolution on geomorphology of Yalu River mouth and harbor construction [J]. Coastal Engineering, 1988,7(1):28-35.]
- [21] Yang S L, Cao A, Hotz H J, et al. Trends in annual discharge from the Yangtze River to the sea (1865-2004) [J]. Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 2005,50(5):825-836.
- [22] 李鸿鹰,程岩. 鸭绿江三角洲开发中的资源与环境问题[J]. 经济地理,1996,16(3):37-42. [LI Hongying, CHENG Yan. The resource and environment problems in Yalu River delta development. Economic geography, 1996,16(3):37-42.]
- [23] Mahmood K. Reservoir sedimentation. Impact, Extent and Mitigation [M]. World Bank technical paper 71, Washington, D C, 1987.

- [24] 程岩,张毅. 鸭绿江下游河道演变及其对港口的影响[J]. 泥沙研究,1990,2:77-84. [CHENG Yan,ZHANG Yi. The formation of Yalu River downstream channel and its influence for ports[J]. Journal of Sediment Research,1990,2:77-84.]
- [25] 李光天,符文侠,贾锡钧. 辽东潮间浅滩的综合特征[J]. 地理学报,1986,41(3):262-273. [LI Guangtian,FU Wenxia,JIA Xijun. The comprehensive characteristic of the Liaodong peninsular tidal flat[J]. Acta Geographica Sinica,1986,41(3):262-273.]
- [26] LIU Cheng, SUI Jueyi, WANG Zhaoyin. Sediment load reduction in Chinese Rivers[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23:44-55.
- [27] 陈吉余. 开发浅海滩涂资源 拓展我国的生存空间[J]. 中国工程科学,2000,2(3):27-31. [CHEN Jiyu. To exploiting lower tidal flats for expending living space of China[J]. Engineering Science, 2000,2(3):27-31.]
- [28] 沈焕庭. 黄海沿岸河口过程类比[J]. 海洋与湖沼,1990,21(5):449-457. [SHEN Huanting. Comparative studies of estuaries bordering the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(5):449-457.]
- [29] 严杰,高建华,李军,等. 鸭绿江河口及近岸地区稀土元素的物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(4):95-103. [YAN Jie, GAO Jianhua, LI Jun, et al. Implications of REE for provenance in the Yalu estuary and its adjacent sea area[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010,30(4):95-103.]

GAIN SIZE VARIATION AND ITS INFLUENCING FACTORS IN THE SEDIMENT CORES OF YALU RIVER ESTUARY

RAN Longjiang¹, SHI Yong¹, GAO Jianhua¹, LIU Yue², LI Fuxiang², BAI Fenglong³, LI Jun³

(1 Ministry of Education Key Laboratory of Coastal and Island Development, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;

2 School of Urban Construction, East Liaoning University, Dandong 118003, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The gain size parameters and sensitive components of the core sediments in the Yalu river estuary were analyzed in order to reveal the depositional characteristics under changing dynamic environment. The depositional characteristics in the estuary areas are influenced by both the nature and human activities. ²¹⁰Pb was used for dating the cores. The sediments in the west Yalu River channel are dominated by mud and sand under the action of tidal current, and the vertical variation of gain size parameters is small. The cores in western tidal flat of the estuary, controlled by tide and wave, contained shell fragments, and the gains became coarser from certain depth to the surface. The variation of the sediments characteristics in the Yalu river estuary was mainly affected by the variations of water and sediment discharges induced by human activities in recent decades. The wavy characteristics of the core sediments indicate the unstable feature of the river before 1941. Due to the decrease in both the sediment and water discharges, the sandy sediment had been decreasing and instead silt component increasing during the period from 1941 to 1970 (1980). The grain composition and sensitive components remained stable during the period of 1970(1980) and 1990 since the sediment and water flux had little change. However, with the further decreasing of the sediment flux, the trend of sediment coarsening upwards have been recorded near the Yalu River mouth after 1990.

Key words: gain size; water and sediment discharge; sediment dynamics; human activities; Yalu River estuary