

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.006

鸭绿江口沉积粒度特征及其对沉积环境演化的指示

李红军¹, 刘月¹, 程岩¹, 张春鹏¹, 高建华², 刘敬伟¹, 张亮¹, 郑金华³

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

3. 辽中县水利局水务与资源管理办公室, 沈阳 110200)

摘要:基于鸭绿江口主汉道 10 个沉积柱的粒度分析, 讨论了鸭绿江口水动力条件、物源输入、沉积事件等沉积环境的演化过程。沉积记录显示, 空间上自陆向海潮流对沉积的影响逐渐加强, 时间上从上层到下层径流影响逐渐减弱。沉积物的敏感粒度分析表明, 细组分可能来源于鸭绿江径流; 粗组分大部分来源于径流悬移质中的较粗部分和跃移质, 少部分来源于浅海潮流脊的物质。在可识别的 9 个沉积事件中, 4 个与洪水直接相关, 其他也表现出对环境事件或流域变化的响应。1960 年的沉积事件非常重要, 导致了河口地貌“二级分汉, 三口入海”的重大地貌格局的形成。鸭绿江河口三角洲沉积与西岸潮滩的沉积具有“耦合效应”, 1970 年、1988—1992 年和 1995 年的沉积事件在鸭绿江口西汉道及西岸潮滩剖面中同样存在, 可以用来进行地层的划分和对比。

关键词:粒度分析; 沉积环境; 沉积事件; 鸭绿江口

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2017)03-0058-09

沉积物粒度特征及其时空分布是河口沉积物的基本属性之一, 蕴含了物质来源、水动力条件、沉积事件等重要信息。在沉积物测年的基础上, 依据沉积物的粒度频率曲线、粒度参数、敏感粒度变化特征可以进行沉积环境的判别, 推断沉积时的动力条件, 帮助人们更好地认识海陆变迁、物源输入、河口发育阶段等沉积事件, 是研究海陆相互作用和沉积环境演化的重要手段^[1-4]。依据沉积物所包含的粒度特征来追溯沉积物输运和堆积中的沉积环境变化, 已被较好地应用于东海、南海、黄海和冲绳海槽等区域^[5-9]。

近年来, 已经通过粒度分析在鸭绿江河口西汉道及邻近西岸潮滩做了一些研究工作, 揭示出鸭绿江西汉道及其邻近西岸潮滩近百年来发生的沉积环境变化和对流域变化的响应^[10,11]。但是, 这些研究还不能代表鸭绿江主汉道(东汉道)的状况, 不能判断发生在西汉道的这些环境变化是否具有普遍性。造成这种状况的主要原因是鸭绿江主汉道区域属于中朝边境, 柱状样采集受到多种限制, 使以往研究缺失鸭绿江主汉道的沉积记录。2014 年采集到了鸭绿江主汉道的 10 个柱状样, 进行了²¹⁰Pb 与¹³⁷Cs 测

试和粒度分析。本文依据这些沉积剖面所承载的粒度记录, 探讨鸭绿江口三角洲形成过程中的物质来源、环境变化和较大的沉积事件, 以期对鸭绿江口三角洲的演化进程有一个全面的认识。

1 研究区概况

鸭绿江长 779 km, 流域面积 $6.45 \times 10^4 \text{ km}^2$, 多年平均径流量 $266.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年入海沙量 $159.1 \times 10^4 \text{ t}$ 。鸭绿江口是一个喇叭状河口湾, 呈现“二级分汉, 三口入海”的河势^[12](图 1)。以绸缎岛为界分西汉道(向海延伸部分称为西水道)和东汉道, 东汉道进一步分为中水道和东水道。近百年来鸭绿江口地貌的发育模式已有定论: 绸缎岛扩张向西并岸, 西水道退化为潮汐水道。东水道的径流量占比也越来越小, 中水道成为鸭绿江的主要水流通道^[12]。口门外受强潮动力影响发育了条带状水下三角洲, 并与西朝鲜湾潮流脊自然连接。西朝鲜湾潮流脊是低海平面时古河口三角洲或海滩物质受潮流作用改造形成的残留沉积^[13]。

2 材料和方法

2.1 样品采集

2014 年 8 月在鸭绿江主汉道采集了 10 个柱状样, K5、K6、K4 采自口门内的江心岛周围, K12、

基金项目:国家自然科学基金项目(41271028, 41576043)

作者简介:李红军(1968—), 男, 讲师, 主要从事环境与生态研究, E-mail: xmcx68@sohu.com

通讯作者:刘月(1972—), 女, 副教授, 主要从事河口沉积和河口环境研究, E-mail: moonliudd@126.com

收稿日期:2016-09-01; **改回日期:**2017-01-17. 蔡秋蓉编辑

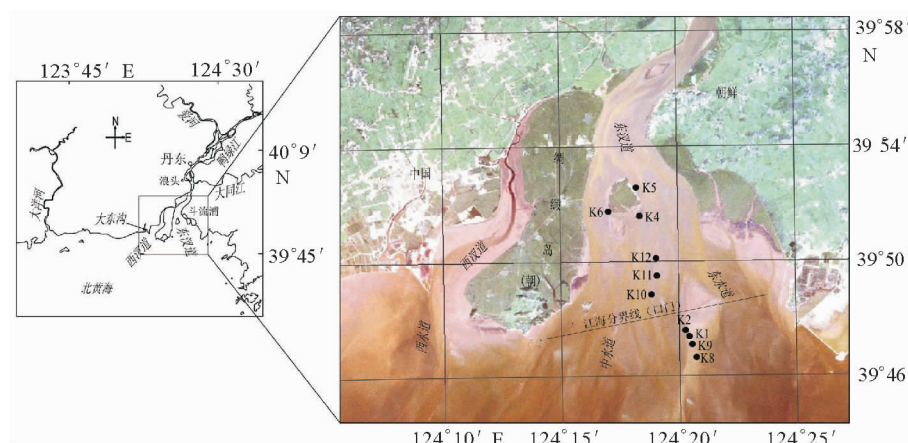


图 1 研究区域及采样点位置图(2006 年 9 月 TM 遥感图像,区域图经过数字化编绘)

Fig. 1 Study area and the location of sampling sites

K11、K10 采自中水道与东水道分隔滩, K2、K1、K9、K8 采自口门外三角洲前缘(图 1)。各柱状样均是在大潮最低潮位 1.5 m 水深时, 利用内径 85 mm、外径 90 mm 的 PVC 管打入水下滩面获得。野外采样时分别量取内柱及滩面至柱顶的高差, 求得样品的压缩比。计算结果显示压缩程度较小, 在本研究中未考虑压缩影响。实验室对柱样进行切割、拍照及描述, 以 2 cm 等间隔分割, 研磨后测量粒度。分别从各柱样中选取平均粒径尽可能一致的子样(大致 4~6 cm 间隔)供 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测定。

2.2 分析方法

^{210}Pb 和 ^{137}Cs 是用 γ 谱分析系统测量, ^{137}Cs 和 ^{226}Ra 标准样品由中国原子能研究院提供, 用英国利物浦大学 ^{210}Pb 标准样品做比对标准^[14]。放射性测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成。

粒度测量是将样品置于沉淀 24 h 的水中, 加入 10~20 mL、浓度为 0.05 mol/L 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 作为分散剂, 采用 BT-9300HT 激光粒度仪对样品进行粒度测量。粒度参数包括平均粒径(M_z)、分选系数或标准偏差(σ_1)、偏态(S_{ki})和峰态(K_g), 粒度参数计算采用 Collias 等矩法公式^[15]。

3 结果

3.1 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 的沉积速率及测年数据

用 CIC 模式计算 ^{210}Pb 的沉积速率^[16], 用 ^{137}Cs 计年时标推算 ^{137}Cs 的沉积速率^[17]。以 ^{137}Cs 蓄积峰为主建立年代框架, 并用 ^{210}Pb 沉积速率做校验。各

柱状样的沉积速率和沉积年代见表 1(据刘月, 另文发表, 在此不做深入讨论)。

3.2 粒度频率曲线

鸭绿江口门以内的江心岛和中、东水道分隔滩以单峰曲线为主。K5 单峰曲线占 91%; K4 单峰曲线占 86%; K6 单峰曲线占 95%。K12 单峰曲线占 98%; K11 单峰曲线占 93%; K10 单峰曲线占 93%。

鸭绿江口门以外的三角洲前缘, 自陆向海方向单峰曲线明显减少, 双峰曲线显著增加。K2 单峰曲线占 98%; K1 单峰曲线占 72%; K9 双峰曲线占 66%; K8 双峰曲线占 92%。

3.3 粒度参数的垂向变化

各柱状样的粒度参数在垂向上有分段变化的趋势。根据各柱状样粒度参数垂向曲线显著差异的层位(往往也是各粒度曲线的峰值或 ^{137}Cs 峰值对应的层位)进行分段, 并用 ^{137}Cs 测年结果标年。K1 和 K5 可以分为 3 段, 其他柱状样分为 2 段(图 2)。

各柱状样的垂向变化特征是: K1 以 26 cm(2000 年)和 72 cm(1969 年)为界分为 3 段。下段是“向上细化”(自下而上砂含量渐少、粉砂含量渐多、黏土含量不变, 平均粒径渐细、分选渐好、偏态变大、峰态变宽)的沉积旋回, 中段是“稳定”(砂的含量较高, 其他参数波动很小)的沉积旋回, 上段是“不稳定”(各粒度参数的剧烈变动)的沉积旋回。K5 以 20 cm(1999 年)和 52 cm(1974 年)为界分为 3 段, 各段均表现为“向上细化”的沉积旋回。K12 以 74 cm(1975 年)为界, 均表现为“向上细化”的沉积旋回。K11 以 36 cm(1992 年)为界, K6 以 34 cm(1995 年)为界, 都是下段为“稳定”的沉积旋回, 上

表 1 鸭绿江口柱状样的沉积速率与沉积年代
Table 1 Sedimentation rate and depositional age of the cores in Yalu River estuary

柱样编号	柱状 样长度/cm	²¹⁰ Pb 测年 层位/cm	²¹⁰ Pb 沉积 速率/(cm/a)	¹³⁷ Cs 计年时标层位 及年代/cm	¹³⁷ Cs 沉积 速率/(cm/a)	¹³⁷ Cs 其他蓄积 峰层位及 年代/cm
K5	69	6~30 38~63	1.13 1.09	67(1963)	1.31	2(2012) 34(1988)
K6	112	—	—	104(1963)	2.04	—
K4	98	0~60	1.33	48(1963)	0.94	38(1974) 76(1954)
K12	108	26~92	1.80	96(1963)	1.88	14(2007)
K11	86	—	—	82(1963)	1.61	36(1992) 54(1980)
K10	184	54~136	2.24	148(1963)	2.90	30(2004) 54(1995) 66(1991) 172(1955)
K2	104	0~44	1.36	98(1963)	1.92	62(1982) 80(1972)
K1	108	14~70	1.80	82(1963)	1.61	28(1997) 40(1989)
K9	154	8~74	1.77	80(1963)	1.57	26(1997)
K8	108	26~74	2.83	104(1963)	2.04	68(1981)

段为“不稳定”的沉积旋回。K8 以 108 cm(1960 年)为界,下段为“不稳定”的沉积旋回,上段为“稳定”的沉积旋回。K2 以 66 cm(1980 年)为界分为 2 段,各段均表现为“向上粗化”(砂含量渐增、粉砂含量渐少、黏土含量不变、平均粒径变粗)的沉积旋回。K4 以 52 cm(1959 年)为界,K9 以 32 cm(1994 年)为界。2 个柱状样的下段都是“向上粗化”的沉积旋回,而上段都是“向上细化”的沉积旋回。K10 以 52 cm(1996 年)为界,下段为“稳定”的沉积旋回,上段为“向上粗化”的沉积旋回。

3.4 敏感粒度

由于物源和沉积动力的复杂性,并非所有的粒级都对环境敏感或具有环境指示意义;因此,有必要进行环境敏感粒度组分的提取。粒级-标准偏差算法是提取柱状样敏感粒度的常用方法^[18]。

3.4.1 全样的敏感粒度

全样的敏感粒度均为双峰类型,可提取出粗、细两个环境敏感粒度(图 3)。

细组分的敏感粒度大部分都是 21.1 μm(K2、K1 是 19.0 μm,K10 是 23.5 μm)。粗组分的敏感粒度 K5、K12、K2、K1 是 117.1 μm,K4、K10、K11、K9 是 145.1 μm,K8 是 306.9 μm,K6 是 130.1 μm。

3.4.2 分时段敏感粒度

根据粒度参数垂向的分段变化,提取各沉积时段的敏感粒度(图 4)。综观各柱状样沉积分时段敏感粒度,细组分自下而上变粗的有 K4、K11、K10、K1、K9 和 K8(占柱状样总数的 75%),粗组分自下而上变粗的有 K6、K11、K10、K1 和 K9(占柱状样总数的 63%),可见敏感粒度自下而上变粗是大趋势。

4 讨论

4.1 水动力变化

4.1.1 沉积物粒度频率曲线所表现的水动力特征

主汉道(东汉道)口门以内的各柱状样的粒度频率曲线以单峰为主,表明沉积物组成简单、沉积环境稳定、形成时的水动力条件单一。这些粒度频率曲线是以径流为主要控制因素形成的,与鸭绿江西汉道及邻近西岸双峰或多峰的粒度频率曲线形成了极大的反差。说明前期研究^[10,11]使用西汉道和西岸潮滩的粒度记录来代表整个鸭绿江口的粒度沉积特征存在缺欠。这里出现少数的双峰曲线可能预示着潮流动力的“改造”事件。在粗粒径方向产生副峰,可能与风暴潮有关,强大动力过程会引起滩面沉积物的再悬浮,使滩面相对粗化产生副峰;在细粒径方向产生副峰,可能与再悬浮物质在低能环境下的沉积过程有关^[19]。

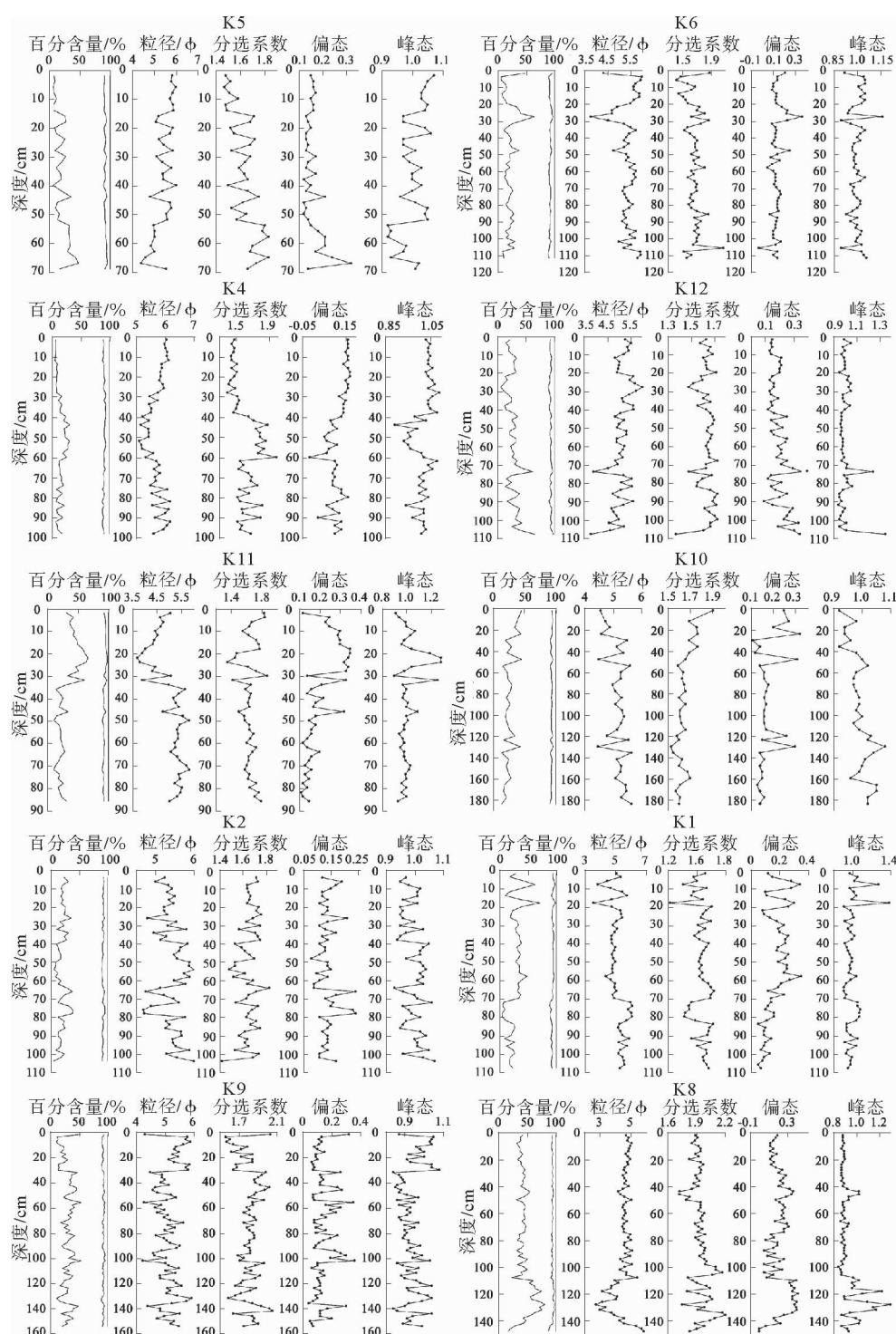


图 2 鸭绿江口各柱状样沉积物粒度参数及组分垂向分布

Fig. 2 Vertical profiles of grain size parameters and components of sediments

而口门以外 K9、K8 的沉积物粒度频率曲线以双峰为主,与口门以内完全不同。多数层位前峰(细粒)小于后峰(粗粒)、沉积构造中含有贝壳碎屑,这是潮流动力在沉积中的反映,与鸭绿江西汉道及西岸潮滩沉积物的粒度频率曲线一致^[10]。说明口门以外水动力主要是受到潮流的控制,偶尔出现的单峰很可能是对流域极端事件(洪水)的响应。

4.1.2 粒度参数垂向变化所表现的水动力变化

各柱状样粒度参数垂向上分段呈现 4 种沉积变化。“向上细化旋回”出现得最多,表明了鸭绿江口沉积水动力总体上的阶段性变化趋势;“向上粗化旋回”出现不多,推测是微地貌(潮流沟摆动)造成局部水动力的增强效应;“沉积稳定旋回”和“沉积不稳定旋回”出现较少,主要受到离主泓线距离远或近的影响。

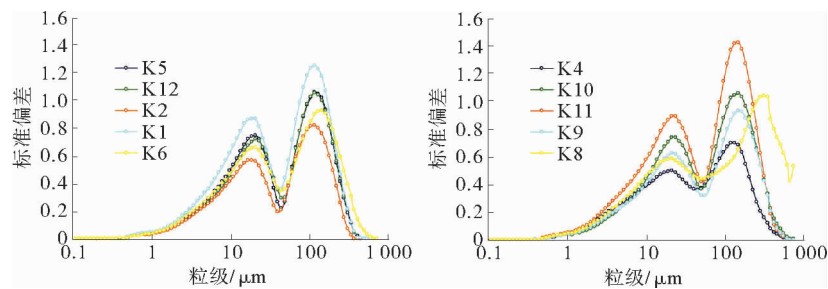


图3 各柱样沉积物粒度-标准偏差曲线

Fig. 3 Granularity level-standard deviation curve of the cores

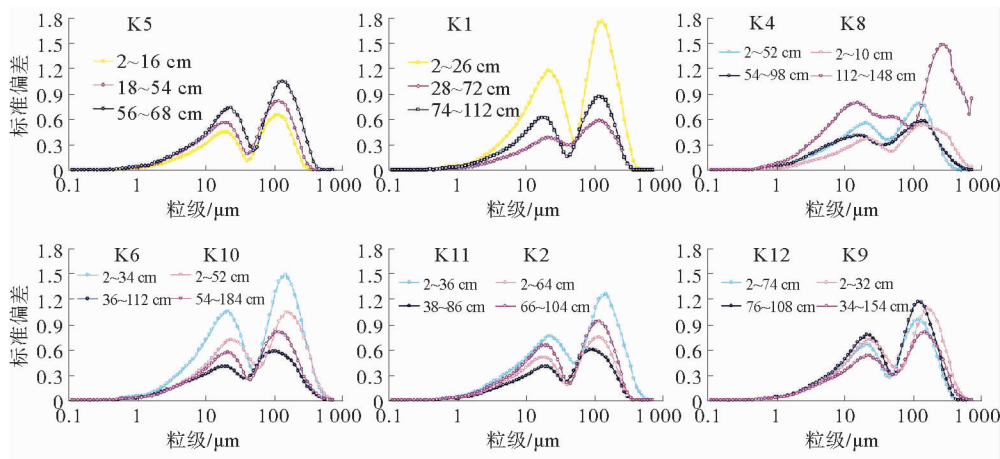


图4 各柱样不同沉积时段沉积物粒度-标准偏差曲线

Fig. 4 Grain size-standard deviation curve of the cores in different periods

响,反映的是径流对沉积的改造效应。需要特别指出的是,每个旋回的水动力减弱过程并不代表整个剖面的水动力减弱,K5柱状样连续出现3次“向上细化旋回”,而自下而上每个旋回的平均粒径却依次变粗。

4.2 物源变化

4.2.1 全样敏感粒度的物源提示

细组分敏感粒度各柱状样几乎相同,表明细组分来源的一致性。根据与鸭绿江悬沙的粒径范围^[11]相同来判断应为鸭绿江来源。

粗组分敏感粒度差异较大,来源相对复杂。K5、K12、K2、K1的微地貌部位是滩面,推测117.1 μm 的粗组分敏感粒度,应该是鸭绿江输沙悬移质中的较粗组分,被较强水团带至此处沉积下来。K4、K10、K11、K9、K6的微地貌部位是潮流沟附近,推测145.1 μm 的粗组分敏感粒度,应该是鸭绿江输沙的跃移质部分被径流携带沉积于此,也不排除有浅海物质的加入^[12]。K8粗组分敏感粒度异常偏大,是受到了邻近浅海的线性潮流沙脊群的影响,

这些潮流脊沉积物质是一种以浅黄色的中砂、细砂为主的残留砂质沉积^[13],这也验证了前期研究提出的鸭绿江口临近浅海表层沉积物已经开始向陆运动的结论^[12]。

4.2.2 分时段敏感组分的物源提示

分时段粗、细组分的敏感粒度都有自下而上变粗的总趋势,这是鸭绿江口沉积过程对物源输入总体变化的响应。近百年来受到鸭绿江干流一系列大型水利工程的影响,干流来沙被拦截,相应地突出了鸭绿江最大支流爱河的输沙效应。爱河流经粒状岩浆岩地区,产沙粗,使河漫滩与江心洲普遍缺少细粒物质^[20]。鸭绿江入海泥沙的逐年变粗必然带来鸭绿江口沉积记录也相应的下细上粗。K4与K8下段的细组分敏感粒度相对很小,而粗组分敏感粒度又相对较大,推测应该是对1960年以前鸭绿江水沙输运特征的一种响应。

4.3 沉积事件

在河口特殊的水动力条件下,物质细化的过程通常表现为渐变,而物质粗化的过程则更多地表现

为突变,所以物质粗化成为更容易识别的沉积事件。粗化事件不一定每次都能在沉积剖面中被保留下来,所以不同柱状样中保留的变粗层位不能代表所有的粗化沉积事件^[21]。提取这些粗化沉积事件、或粒度曲线中粒度参数突变层位(往往是分段界限)、或¹³⁷Cs 非定年时标蓄积峰的位置,在鸭绿江口沉积记录中可以识别出多次沉积事件(考虑到误差,测年年份略有差异的沉积事件可以考虑为同一沉积事件)。在这里仅对一些明显的、确凿的沉积事件对沉积环境变化或者流域变化的响应进行追踪。

4.3.1 1960 年的沉积事件及其对河口地貌变化的响应

在可识别的沉积事件中,1960 年的沉积事件最为显著:表现为 K4 和 K8 是分段界限(测年为 1959 和 1960 年);K5、K6、K12、K11 和 K2 是柱状样的底部(这些柱状样的底部¹³⁷Cs 测年都是 1960 年前后)。这绝不是巧合,而是采样时 PVC 管同样遇到了再往下难以插入的坚硬细砂层。该时期普遍存在的坚硬细砂层代表了鸭绿江口大范围的沉积间断或显著的沉积事件,它不是大洪水单一作用的产物,而是多种因素共同作用的结果。

1940 年以前,西汉道作为鸭绿江径流的主汉道,是当时“江口宽 27 km 内的唯一深水航道”^[20]。但从 1941 年修建水丰水库开始到 60 年代,鸭绿江流域修建大中小型水库 41 座^[10],同期还修建了各类岸坝、丁坝等工程^[22],导致鸭绿江口各汉道的水沙平衡被打破,叠加上 1960 年全流域特大洪水的诱导,终于引发了鸭绿江口地貌的巨变(图 5):即主汉

道由西汉道转到东汉道,绸缎岛形成并扩大,“二级分汊,三口入海”河口地貌格局形成^[12]。70% 的柱状样为这一重大的地貌变化事件留下了相应的沉积记录。前期研究虽然对鸭绿江河口地貌的发育模式给出了定论,但没有给出确切的形成年代。程岩等认为是 1934 年至 1982 年间^[12];冉隆江等认为是 1941 年至 1982 年间^[10];石勇等认为是 1940 年至 1970 年间^[11]。现有的证据可以将形成年代进一步精确为 1960 年,而 1960 年全流域大洪水无疑是河口地貌发生巨变的触发因素。

4.3.2 1970 年的沉积事件对流域环境变化的响应

1970 年前后粗化沉积事件也比较确凿,表现为:K1 的分段界限(测年为 1969 年)、K10 和 K4 的粗化极值(测年为 1969 和 1970 年)、K2 的粗化峰值和¹³⁷Cs 峰值(测年为 1972 年)。这些与洪水无关的沉积事件应该是对流域变化的响应。

对西岸潮滩的前期研究证实该沉积事件的确存在。石勇等^[11]将 1958—2008 年间鸭绿江年径流量及输沙量进行二次多项式拟合时发现 1970 年是一个重要的时间节点,西岸潮滩各柱状样相应层位的沉积物显著变细。有理由相信,西岸潮滩相应层位的物质细化与同时期主汉道 K1、K10、K4、K2 的物质粗化是一种带有“耦合效应”的沉积过程。西岸潮滩相应层位的细粒物质应该来源于同时期 K1、K10、K4、K2 所在的三角洲区域的再悬浮物质。原因是随着鸭绿江输沙量的锐减,导致潮流作用加强,潮流动力的再悬浮作用可将主汉道沉积物中的细粒物质带走,沉积在西岸潮滩,并导致主汉道滩面沉积

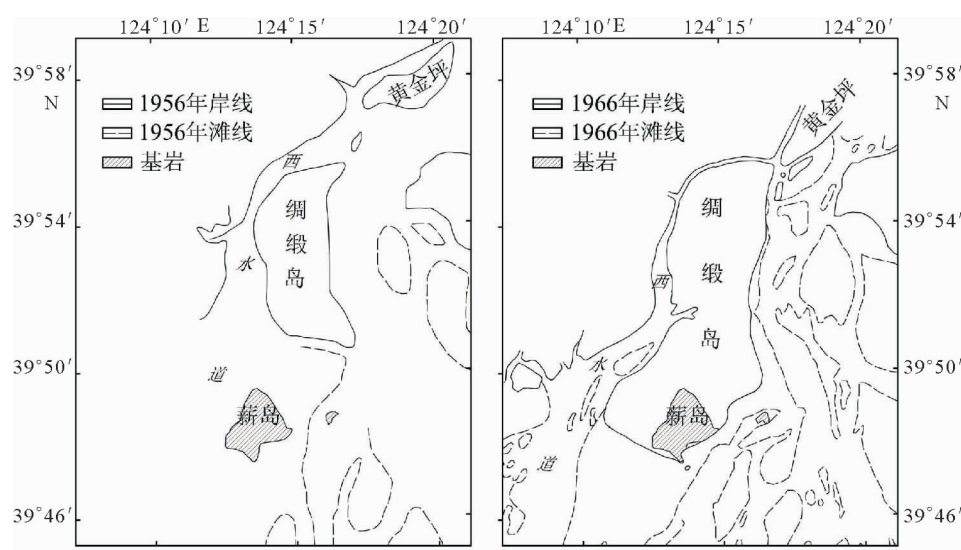


图 5 鸭绿江口岸线演变^[9,10]

Fig. 5 Shoreline evolution of the Yalu River estuary^[9,10]

物粗化事件的发生。

4.3.3 1988年至1992年沉积事件对人类活动的响应

1988年至1992年的粗化沉积事件也比较明显,表现为:K11的分段界限和 ^{137}Cs 蓄积峰(测年为1992年)、K6的粗化峰值(测年为1990年)、K5、K10、K1的 ^{137}Cs 蓄积峰(测年为1988、1991和1989年)。

这次沉积事件,推测是对鸭绿江下游大规模采砂活动的响应。对西岸潮滩的前期研究也证实了该沉积事件的存在。1990年前后鸭绿江下游采砂达到0.38 MT/a,相当于鸭绿江年输沙量的25%,使鸭绿江西岸潮滩沉积的跳跃式变细,成为分层界限^[11]。这是因为鸭绿江下游的采砂改变了河床形态,强化了潮流影响,加剧了再悬浮作用。所以鸭绿江主汉道附近滩面的粗化与西岸潮滩沉积的跳跃式变细可能也是带有“耦合效应”的沉积过程,西岸潮滩的细粒物质来源于主汉道再悬浮物质的沉降。

4.3.4 1995年的沉积事件对全流域大洪水的响应

1995年的沉积事件的可信度也非常高,表现为:K9分段界限、粗化极值(测年为1994年),K6和K10的分段界限(测年为1995、1996年), ^{137}Cs 蓄积峰(测年为1995年),K11的粗化极值(测年为1994年)。

前期研究在鸭绿江西汉道和西岸潮滩的地层剖面中也确认了这个分段界限的存在^[9]。可能与1995年鸭绿江流域发生了有水文记录以来的最大洪水有关。

另外,在沉积记录中,1950、1975、1980、2000和2005年也能提取出沉积事件,甚至可能追踪为某种沉积环境的变化,有待于以后用更多的方法或更多指标进行进一步的研究。

5 结论

(1) 鸭绿江口主汉道的沉积记录表明自陆向海潮流对沉积的影响逐渐加强,从上层到下层形成沉积物的径流影响逐渐减弱。仅口门以外的沉积物粒度特征与前期报道的西汉道和西岸潮滩相似,口门以内表现出以径流为主要水动力环境沉积物的粒度记录,前期研究用西汉道和西岸潮滩的粒度记录来代表整个鸭绿江口的粒度沉积特征存在明显欠缺。

(2) 鸭绿江口沉积物中细组分大都来源于鸭绿江径流,粗组分大部分来源于鸭绿江的跃移质和推移质,少部分来自浅海西朝鲜湾潮流沙脊群的残留

堆积,前期研究提出的浅海表层沉积物已经开始向陆运动的结论得到了验证。

(3) 鸭绿江口沉积记录中可识别的沉积事件,大部分都是对环境或流域变化的响应。尤其是1960年的沉积事件是河口地貌发生巨变的沉积记录。1970、1988—1992和1995年的沉积事件在西汉道及西岸潮滩也能找到,鸭绿江口主汉道与西岸潮滩的沉积具有明显的“耦合效应”,可以用来进行地层的划分和对比。

参考文献(References)

- [1] Clarke D W, Boyle J F, Chiverrell R C, et al. A sediment record of barrier estuary behaviour at the mesoscale: Interpreting high-resolution particle size analysis[J]. *Geomorphology*, 2014, 221: 51-68.
- [2] Carlin J A, Dellapenna T M. Event-driven deltaic sedimentation on a low-gradient, low-energy shelf: The Brazos River subaqueous delta, northwestern Gulf of Mexico[J]. *Marine Geology*, 2014, 353: 21-30.
- [3] 刘世昊, 丰爱平, 李培英, 等. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积粒度特征及动力沉积环境演化[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 291-306. [LIU Shihao, FENG Aiping, LI Peiying, et al. High-resolution grain size distribution and evolution of the sediment-dynamic environment in the modern yellow river delta since the latest pleistocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 291-306.]
- [4] 田动会, 滕珊, 冯秀丽, 等. 黄河三角洲埕北海域底质沉积物粒度特征及泥沙输运分析[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 106-114. [TIAN Donghui, TENG Shan, FENG Xiuli, et al. Grain-size pattern of surface sediment and analysis of sediment transport in the Chengbei area of the Yellow River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 106-114.]
- [5] Huang J, Li A C, Wan S M. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope[J]. *Quaternary Research*, 2011, 75(3): 734-744.
- [6] 程芳晋, 俞志明, 宋秀贤. 东海近岸泥质区柱状沉积物的百年内沉积粒度变化及其影响因素[J]. *海洋科学*, 2013, 37(10): 58-64. [CHENG Fangjin, YU Zhiming, SONG Xiuxian. Variations of sediment grain size of the coastal mud area of the East China Sea and the influence factors during recent hundred years[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(10): 58-64.]
- [7] 姜韬, 曾志刚, 南青云, 等. 全新世以来冲绳海槽北部S9孔粒度变化特征及其古气候响应[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 307-318. [JIANG Tao, ZENG Zhigang, NAN Qingyun, et al. The Grain Size Characteristics of the Core S9 Sediments in the Northern Okinawa Trough and their paleoclimate response since Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(2): 307-318.]
- [8] 沈星, 褚忠信, 王玥铭, 等. 北黄海西部与南黄海中部泥质区

- 岩芯敏感粒级及其环境意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 124-133. [SHEN Xing, CHU Zhongxin, WANG Yueming, et al. Sensitive grain size and its environmental significance of modern mud patches in southern and northern parts of the Yellow Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 124-133.]
- [9] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 1-12. [ZHANG Jian, LI Rihui, WANG Zhongbo, et al. Grain size characteristics of surface sediments in the east Bohai Sea and the northern Yellow Sea and their implications for environments[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2016, 36(5): 1-12.]
- [10] 冉隆江, 石勇, 高建华, 等. 鸭绿江河口地区沉积物的粒度变化及影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 31-41. [RAN Longjiang, SHI Yong, GAO Jianhua, et al. Grain size variation and its influencing factors in the sediment cores of Yalu River estuary[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(2): 31-41.]
- [11] 石勇, 高建华, 杨旸, 等. 鸭绿江河口西岸潮滩沉积特征对流域变化的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1221-1233. [SHI Yong, GAO Jianhua, YANG Yang, et al. Responses of depositional characteristics of tidal flats on the west bank of the Yalu River estuary to catchment changes[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1221-1233.]
- [12] 程岩, 刘月, 高建华, 等. 近百年来人类活动对鸭绿江口河床演变的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 609-620. [CHENG Yan, LIU Yue, GAO Jianhua, et al. Influence of human activities on the riverbed evolution in Yalu River estuary during recent one century[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 609-620.]
- [13] 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 74-75. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 74-75.]
- [14] 夏威岚, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 年代学方法测定[J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 124-125. [XIA Weilan, XUE Bin. The ^{210}Pb and ^{137}Cs chronological measurement on sedimentation rate of Xiaolongwan, Jiling[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(1): 124-125.]
- [15] 刘志杰, 公衍芬, 周松望, 等. 海洋沉积物粒度参数 3 种计算方法的对比如研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 179-188. [LIU Zhijie, GONG Yanfen, ZHOU Songwang, et al. A comparative study on the grain-size parameters of marine sediments derived from three different computing methods[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 179-188.]
- [16] Szymtkiewicz A, Zalewska T. Sediment deposition and accumulation rates determined by sediment trap and ^{210}Pb isotope methods in the Outer Puck Bay (Baltic Sea)[J]. Oceanologia, 2014, 56(1): 85-106.
- [17] 张信宝, 龙翼, 文安邦, 等. 中国湖泊沉积物 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 断代的一些问题[J]. 第四纪研究, 2012, 32(3): 430-440. [ZHANG Xinbao, LONG Yi, WEN Anbang, et al. Discussion on applying ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ for lake sediment dating in China[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(3): 430-440.]
- [18] 陈桥, 刘东艳, 陈颖军, 等. 粒级—标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境, 2013, 41(3): 319-325. [CHEN Qiao, LIU Dongyan, CHEN Yingjun, et al. Comparative analysis of grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis[J]. Earth and Environment, 2013, 41(3): 319-325.]
- [19] 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.]
- [20] 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. River channel evolution of lower Yalu River and its influence on harbor[J]. Journal of Sediment Research, 1990(2): 77-84.]
- [21] 张瑞, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 80-91. [ZHANG Rui, WANG Yaping, GAO Jianhua, et al. The vertical sedimentary structure and its implications for environmental evolutions in the Changjiang Estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 80-91.]
- [22] 杜启明, 郭维东. 鸭绿江河道演变分析[J]. 中国科技信息, 2006(19): 53-54. [DU Qiming, GUO Weidong. Analysis on the channel evolution of the Yalu River[J]. China Science and Technology Information, 2006(19): 53-54.]

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT GRAIN SIZE AT YALU RIVER ESTUARY AND IMPLICATIONS FOR DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

LI Hongjun¹, LIU Yue¹, CHENG Yan¹, ZHANG Chunpeng¹, GAO Jianhua²,
LIU Jingwei¹, ZHANG Liang¹, ZHENG Jinhua³

(1. Urban Construction College, Eastern Liaoning University, Dandong 118003;

2. Key Laboratory of Coast of Island Development of Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210093;

3. Water Conservancy Bureau of Liaozhong County, Shenyang 110200)

Abstract: Ten cores are collected along the Main Branch of the Yalu River estuary. Dating and grain size analysis are made for the cores layer by layer. The data of grain size is used in this paper for revealing the evolution of depositional environment. Hydrodynamic conditions, source input and depositional events are discussed as major topics. The results indicate that the influence of tidal current increased from land to sea spatially, and the runoff influence weakened gradually with time. The fine fractions of sediments came mainly from the runoff of the Yalu River, and most of the coarse fractions were from the coarser suspended load and saltation load, and few of them came from tidal ridges offshore. Nine depositional events are identified, among which four were directly related to flooding, and the others related to changes in environment and/or drainage. The 1960 event was certainly a significant one which led to the changes in landform pattern, including the formation of secondary branching, and three outlets towards the sea. The deltaic deposits at the Yalu River are well correlated with the tidal flat deposits on the west bank. Depositional events in 1970, 1988 to 1992 and 1995 are all recognizable in the profiles of the West Branch as well as the tidal flat in the west bank, and could be used as marks for sequence classification and correlation.

Key words: grain size analysis; sedimentary environment; depositional event; Yalu River estuary