

文章编号: 1000-0550(2013)04-0663-09

辽东湾周边河流沉积物碎屑矿物组成及其物源意义^①

王利波^{1,2} 李 军^{1,2} 赵京涛^{1,2} 翟 滨^{1,2}

(1. 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; 2. 青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘 要 对辽东湾周边七条河流下游段河漫滩沉积物的碎屑矿物进行了鉴定,分析了轻重矿物组分的差异、流域基岩类型和沉积物粒度对碎屑矿物组成的影响。轻矿物组成以石英和长石占绝对优势。由于辽东湾西侧河流(六股河、小凌河和大凌河)和东侧河流(双台子河、大辽河、复州河)位于两个构造块体之上,不同的基岩类型导致重矿物组合差别很大。湾西河流普通角闪石含量低、金属矿物含量高,湾东河流则相反,这两种组分能有效区分辽东湾东西两侧的河流,同时也可将滦河与上述河流区分开。石榴子石和普通辉石含量特征可区分湾西三条河流,特征为大凌河前者含量高,小凌河后者含量高,六股河两者含量都很低。绿帘石和阳起石的含量在湾东河流沉积物中差别较大,特征为双台子河前者含量高,大辽河后者含量高,复州河两者含量都很低。七条河流片状矿物和碳酸盐矿物含量低的特征有别于黄河沉积物。

关键词 碎屑矿物 物质来源 中小型河流 辽东湾

第一作者简介 王利波 男 1983年出生 硕士 助理研究员 海洋沉积学 E-mail: wanglibowlb@gmail.com

通讯作者 李军 男 教授 E-mail: junli741001@gmail.com

中图分类号 P736.21 **文献标志码** A

“从源到汇”(Source to Sink)是“大陆边缘计划”(MARGINS program)的核心科学研究领域之一^[1]。陆源入海沉积物的物质来源识别是“从源到汇”过程的重要环节,而河流入海沉积物物源端元的建立则是这一环节的关键问题。我国东部陆架海沉积物的物质来源近十几年来一直是海洋地质研究的热点和争论的焦点。长江和黄河两条世界性大河以每年 4.8×10^8 t和 11×10^8 t的巨量泥沙流入东部陆架海^[2,3],引起了国内外学者的广泛关注,为建立其物源判别指标和方法做了大量工作^[4~12]。然而,中小河流对河流入海泥沙量的贡献也十分重要^[3,13],虽然以前低估了它们的作用,但近几年来逐渐得到重视,我国中小河流物源示踪研究也越来越多地见于报道^[14~16]。

辽东湾位于渤海北部,是一个西、北、东三面被辽宁省包围,仅南面与渤海相通的半封闭海湾。周边主要有滦河、六股河、小凌河、大凌河、双台子河、大辽河、复州河等中小型河流注入(图1),其中双台子河和大辽河在1958年台安县六间房辽河堵截以前是辽河下游的两个入海河道,1958年堵截以后双台子河和大辽河分别成为独立的水系。虽然辽东湾的南部的黄河每年向渤海注入 10×10^8 t级的巨量泥沙^[2,3],

但绝大部分都沉积于河口地区^[17],其余主要向南、东南方向搬运^[18,19],黄河入海泥沙对辽东湾的影响不大^[20~22],并且这些中小河流也输运大量泥沙入海(表1),因此它们对辽东湾海域陆源沉积物有很大的影响。建立这些中小河流物源识别指标,对于认识它们搬运入海沉积物的扩散以及判别辽东湾沉积物的来源有重要意义。

特征碎屑矿物组合因其物源继承性以及其在表生环境中的稳定性,被广泛应用于沉积物的物质来源研究^[5,16,20,24~34]。前人曾研究过其中的滦河、六股河和辽河沉积物碎屑矿物特征^[12,20,21],能较好地区分三条河流。但总体而言,系统研究辽东湾周边河流沉积物碎屑矿物特征的报道少见。本文拟在前人研究基础之上,鉴定辽东湾周边七条中小型河流沉积物的碎屑矿物,分析轻、重矿物组成及其控制因素,探讨入海沉积物中碎屑矿物的差异,为进一步研究辽东湾沉积物的物质来源和扩散模式提供支持。

1 样品和方法

本文所用的样品于2011年春未取自辽东湾周边的滦河(5个)、六股河(3个)、小凌河(3个)、大凌河

^①辽东湾近海海砂及相关资源潜力调查项目(编号:1212011088110) 国家自然科学基金项目(批准号:40976036)和国家自然科学基金青年基金项目(批准号:40906033,41006032)资助
收稿日期:2012-05-16; 收修稿日期:2012-11-19

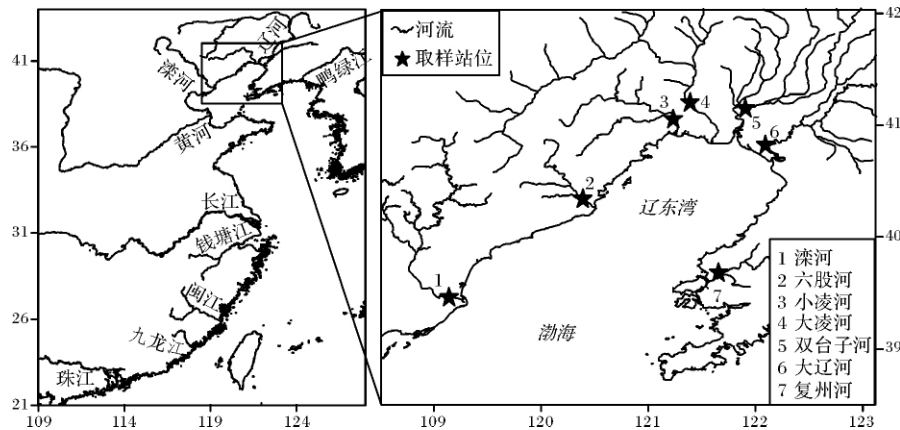


图 1 辽东湾周边河流及取样站位图

Fig. 1 Sketch map of rivers around Liaodong Bay and sampling sites

表 1 辽东湾入海河流水文特征

Table 1 Hydrological characteristics of rivers around Liaodong Bay

河流	长度/km	流域面积/km ²	水文站	年均径流量/10 ⁸ m ³	年均输沙量/10 ⁴ t
辽河	1396	219000	六间房	38.84*	699.1
			唐马寨 + 邢家窝棚	52.89*	303
滦河	877	44900	滦县	46.51*	1739*
大凌河	397.4	23549	锦县	19.63	2740
小凌河	206.2	5475	锦州	4.03	364
六股河	153.2	3080	绥中	6.02	148
复州河	133.7	1593	关家屯	2.37	16.8

注: 数据引自中国海湾志^[23]。六间房水文站代表双台子河; 唐马寨水文站代表太子河, 邢家窝棚水文站代表浑河, 两者之和代表大辽河; * 数据根据文献数据计算所得。

(3 个)、双台子河(3 个)、大辽河(3 个)、复州河(2 个)七条河流下游临近入海口处(图 1), 共 22 个样品。取样时上述河流处于枯水季向洪水季过渡时期, 流量不大, 样品均取自紧靠水流的河漫滩上层粒度较细的沉积物, 同一河流不同样品的取样位置沿水流方向间隔几十到几百米不等。总体而言, 双台子河、大辽河等流域范围较大的河流样品粒度较细, 六股河、复州河等流域范围较小的河流样品粒度较粗。碎屑矿物分析流程如下: 取沉积物原样 200 ~ 300 g, 用 0.125 mm 和 0.063 mm 的双层套筛筛选(个别有机质含量高的样品加 H₂O₂ 浸泡 6 h), 水筛分离出的样品(0.063 ~ 0.125 mm) 经烘干后用缩分法取 3 ~ 4 g 在三溴甲烷重液(CHBr₃, 比重 2.89) 中分离, 得轻、重矿物两部分, 再分别称重, 计算轻、重矿物的质量百分数。轻矿物在体式显微镜下完成鉴定和统计; 重矿物用体式显微镜和偏光显微镜油浸法, 辅以微化试验进行鉴定和统计。轻、重矿物统计方法相同, 首先计数 300 ~ 500 颗待鉴定矿物, 然后对鉴定出的每种矿物进行计数, 最后求得不同矿物的颗粒百分含量。

2 结果

2.1 轻矿物组成及差异

辽东湾周边河流沉积物的轻矿物组成如表 2 所示。六股河轻矿物质量百分含量最低, 仅 70%, 双台子河和大辽河最高, 达 99% 以上。轻矿物种类主要包括石英、斜长石、钾长石、风化云母、绿泥石、白云母和碳酸盐矿物等。滦河、大凌河、双台子河和大辽河沉积物中石英颗粒百分含量较高, 斜长石和钾长石含量较低。六股河和复州河的石英和斜长石含量中等、钾长石含量较高。小凌河石英含量较低, 斜长石含量较高、钾长石含量中等。七条河流中, 风化云母的含量大辽河最高, 大凌河最低, 其余河流差别不大; 绿泥石的含量小凌河最高, 双台子河最低, 其余河流差别不大。白云母在滦河和复州河沉积物中未发现, 六股河、小凌河和大凌河中只有在个别沉积物样品偶见 1 颗, 平均含量都小于 0.3%, 在双台子河和大辽河沉积物中较常见。碳酸盐矿物仅在六股河、小凌河、大凌河和双台子河的个别沉积物样品中偶见 1 颗, 平均

表2 辽东湾周边河流沉积物的轻矿物平均含量(%)

Table 2 Average contents of light minerals in river sediments around Liaodong Bay

	滦河	六股河	小凌河	大凌河	双台子河	大辽河	复州河	滦河 ^{a,b}	六股河 ^{a,b}	辽河 ^{a,b}	黄河 ^{a,b}	黄河下游 ^c
样品数	5	3	3	3	3	3	2	10	7	10	40	
轻矿物	89.3	70.1	92.5	95.5	99.4	99.4	90.3					99.7
石英	62.1	46.4	37.7	52.9	70.3	54.6	55.7	33.6	25.4	57.8	30.6	61.2
斜长石	27.5	32.6	44.0	24.1	19.9	25.4	26.8	51.5	62.8	25.5	53.7	6.8
钾长石	6.5	15.1	10.0	6.3	3.9	1.0	14.3	14.3	9.3	16.2	6.5	
白云母	-	0.1	0.1	0.1	1.1	2.7	-					0.8
风化云母	2.2	3.4	1.7	0.7	2.3	7.9	1.8					
绿泥石	1.0	1.1	2.8	0.7	0.6	0.9	1.0					
碳酸盐矿物	-	0.1	0.2	0.1	0.1	-	-	0.4	1.5		7.8	17.8
岩屑	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1	0.1	-					1.6
风化碎屑	0.3	0.6	1.9	2.7	0.4	1.0	0.3					
其它	0.1	0.4	1.1	12.1	1.2	6.4	-					

注: a 据渤海地质^[21]、b 据中国海沉积矿物学^[12]、c 据王中波等^[35]; 轻矿物含量单位为质量百分数、石英等轻矿物组分含量单位为颗粒百分数

表3 辽东湾周边河流沉积物的重矿物平均含量(%)

Table 3 Average contents of heavy minerals in river sediments around Liaodong Bay

	滦河	六股河	小凌河	大凌河	双台子河	大辽河	复州河	滦河 ^{a,b}	六股河 ^{a,b}	辽河 ^{a,b}	黄河物源 ^c
样品数	5	3	3	3	3	3	2	10	7	10	149
重矿物	10.7	29.9	7.5	4.5	0.6	0.6	9.7				
普通角闪石	38.8	11.3	14.3	15.9	34.3	45.5	73.0	42.0	20.0	45.0	13.5
透闪石	0.3	0.4	0.3	0.2	1.1	0.7	0.2				1.0
阳起石	2.0	0.5	1.3	1.6	2.2	5.0	0.9				2.8
绿帘石	13.5	8.4	7.9	12.5	26.9	16.9	2.1	19.7	19.9	27.4	6.5
黝帘石	0.4	-	-	0.5	1.4	1.1	-				
黑云母	0.1	0.1	0.3	0.1	0.6	1.2	0.5				47.4
白云母	-	0.1	-	-	-	0.1	-	0.3	0.6	1.0	5.3
水黑云母	0.1	0.3	0.1	-	0.2	1.9	0.8				8.3
绿泥石	0.1	-	-	-	0.1	0.2	0.2				
石榴子石	6.1	0.6	3.3	10.2	7.3	2.2	4.9	5.4	1.1	3.3	2.8
楣石	2.3	3.2	2.4	3.8	6.1	2.3	4.3	2.8	2.7	3.6	0.9
磷灰石	1.1	1.2	0.7	0.7	0.4	0.6	0.8				0.6
电气石	0.3	-	0.1	0.5	0.9	0.6	0.2				
锆石	0.6	0.7	0.6	0.2	0.1	-	0.5	1.7	2.8	1.2	0.1
金红石	0.1	-	-	-	-	-	-				
萤石	0.1	0.1	-	-	-	-	-				
普通辉石	2.4	1.9	15.9	3.4	1.9	1.4	0.6	6.6		1.6	0.4
透辉石	1.3	0.7	-	0.4	1.0	0.6	-				0.9
紫苏辉石	0.9	-	0.2	0.1	0.2	0.1	-				
白云石	0.1	-	-	0.1	-	-	-				
菱镁矿	0.2	-	-	0.4	-	0.3	-				
钛铁矿	8.8	6.2	12.0	10.8	5.6	1.1	1.3	9.3	15.4	5.9	1.4
磁铁矿	12.7	45.5	17.8	26.6	0.4	4.1	0.5	5.6	17.8	0.2	0.9
褐铁矿	4.0	5.8	10.1	4.7	2.7	3.7	6.6				3.3
赤铁矿	1.8	9.9	6.4	5.5	0.4	7.1	2.4				0.5
白钛石	-	-	-	0.2	0.5	-	-				
自生黄铁矿	-	-	-	-	2.5	0.9	-				1.1
软锰矿	-	-	-	-	-	0.3	-				
菱铁矿	-	-	-	-	0.2	-	-				
磷钇矿	0.1	-	-	-	-	-	-				
霓石	-	-	0.1	-	-	-	-				
霓辉石	-	0.1	0.1	-	0.2	-	-				
玄武闪石	-	-	0.2	0.2	-	-	-				
岩屑	1.6	2.4	5.6	0.6	1.8	1.7	0.2				
风化碎屑	0.4	0.3	0.3	0.5	0.9	0.4	0.3				

注: a 据渤海地质^[12]、b 据中国海沉积矿物学^[12]、c 据林晓彤等^[28]; 重矿物含量单位为质量百分数、普通角闪石等重矿物组分含量单位为颗粒百分数

含量均不足 0.3%。与前人发表数据相比^[12, 20, 21], 本文石英含量偏高、长石含量偏低, 这可能由于取样位置不同或矿物鉴定所选的粒级范围不同等因素造成的。

2.2 重矿物组成及差异

辽东湾周边河流沉积物的重矿物组成如表 3 所示, 与前人发表数据^[12, 20, 21]相近(表 3)。这些河流的重矿物质量百分含量以六股河最高, 达 30%, 双台子河和大辽河含量最低, 不足 1%。除岩屑和风化碎屑外, 在这七条河流沉积物中共发现 33 种重矿物。其中普通角闪石、磁铁矿和绿帘石在这些河流中普遍存在, 且在部分河流中含量相对较高; 钛铁矿、褐铁矿、赤铁矿、石榴子石、普通辉石、榍石、阳起石、磷灰石、黑云母也在这些河流中均有发现, 但含量中等到相对较低。其余重矿物仅在部分河流中偶见, 含量很低。

将各条河流沉积物中重矿物含量由高到低排序后累加, 统计累加之和达 80% 的前几种主要重矿物, 滦河为普通角闪石 + 绿帘石 + 磁铁矿 + 钛铁矿 + 石榴子石 + 褐铁矿, 六股河为磁铁矿 + 普通角闪石 + 赤铁矿 + 绿帘石 + 钛铁矿, 小凌河为磁铁矿 + 普通辉石 + 普通角闪石 + 钛铁矿 + 褐铁矿 + 绿帘石 + 赤铁矿, 大凌河为磁铁矿 + 普通角闪石 + 绿帘石 + 钛铁矿 + 石榴子石 + 赤铁矿, 双台子河为普通角闪石 + 绿帘石 + 石榴子石 + 榍石 + 钛铁矿, 大辽河为普通角闪石 + 绿帘石 + 赤铁矿 + 阳起石 + 磁铁矿 + 褐铁矿, 复州河为普通角闪石 + 褐铁矿 + 石榴子石。

利用 SPSS 数据统计分析软件, 以重矿物颗粒百分含量为变量, 对 22 个河流沉积物样品做聚类分析(图 2)。聚类结果显示, 辽东湾周边河流分为两组, 大辽河、复州河和双台子河三条辽东湾东侧的河流为一组, 六股河、大凌河和小凌河三条辽东湾西侧的河流为一组, 滦河样品在这两组中均有出现。

普通角闪石和金属矿物(磁铁矿 + 钛铁矿 + 褐铁矿 + 赤铁矿)含量之和, 除双台子河仅 43% 外, 其余河流都高达 60% 以上, 是这些河流沉积物中的主要重矿物, 并且含量特征有明显的差别(图 3)。辽东湾西部的六股河、小凌河和大凌河以低普通角闪石、高金属矿物含量为特征, 辽东湾东部的双台子河、大辽河和复州河以高普通角闪石、低金属矿物含量为特征, 滦河普通角闪石和金属含量居中。其中, 六股河和复州河的上述含量特征差别最明显。除主要重矿物的差别外, 中、低含量的重矿物组分在这七条河流

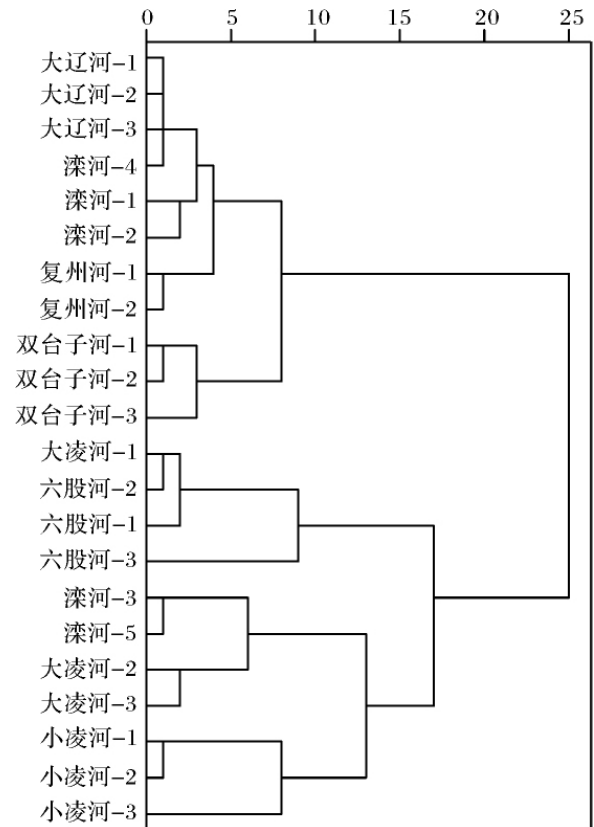


图 2 辽东湾周边河流沉积物聚类树谱图

Fig 2 Dendrogram of sediments from rivers around Liaodong Bay

沉积物中也有明显差异。黑云母在双台子河、大辽河和复州河沉积物中的含量明显高于滦河、六股河、小凌河和大凌河。对于湾西的六股河、小凌河和大凌河沉积物, 磁铁矿、石榴子石和普通辉石的含量差别较大, 六股河磁铁矿含量明显高于其它河流, 石榴子石含量明显低于其它河流, 小凌河普通辉石含量明显高于其它河流, 大凌河石榴子石含量明显高于其它两条河流。对于湾东的双台子河、大辽河和复州河沉积物, 双台子河以高绿帘石、榍石和透闪石含量为特征, 大辽河以高阳起石和黑云母、低石榴子石含量为特征, 复州河以高普通角闪石含量为特征。

2.3 辽东湾周边河流与黄河的差异

本文七条河流与黄河共同注入渤海, 认识它们与黄河碎屑矿物的差异, 对于渤海沉积物的物源判别十分重要。片状矿物(白云母 + 黑云母 + 绿泥石)和碳酸盐矿物(白云石 + 方解石)的含量在本文河流与黄河沉积物之间的差别很大, 黄河沉积物中碳酸盐矿物和片状矿物含量很高^[12, 28, 35], 而本文河流都很低。因此碳酸盐矿物和片状矿物含量可作为判别黄河和本文河流的指标。

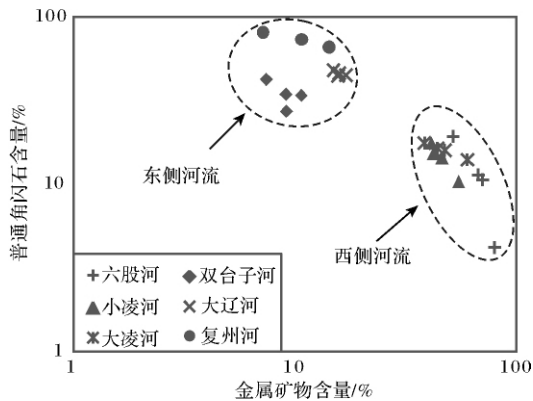


图3 辽东湾东、西两侧河流沉积物普通角闪石和金属矿物含量散点图

Fig. 3 Scatter plot of hornblende vs. metal minerals of river sediments from the eastern and western side of Liaodong Bay

3 讨论

3.1 流域内基岩类型对碎屑矿物组成的影响

通过上文的比较,辽东湾西侧入海的六股河、小凌河、大凌河与辽东湾东侧入海的双台子河、大辽河、复州河下游河漫滩沉积物中碎屑矿物组分差别较大。其原因是这些河流位于被郯庐断裂分割的两个不同构造单元之上,湾西部的三条河流主要位于华北块体,湾东部的三条河流主要位于胶辽朝块体,两个构造单元岩性差别较大^[36]。

六股河发源于建昌县谷杖子乡,于绥中县大渔场注入渤海。流域内主要出露太古代片麻状花岗岩,早燕山期二长花岗岩^[37]。太古代强烈的变质作用导致磁铁矿、赤铁矿、磷灰石、榍石、锆石等副矿物的产出,这可能是该河流下游沉积物中上述矿物,尤其是金属矿物含量高的原因。二长花岗岩的风化剥蚀提供了大量斜长石和钾长石,使得下游沉积物中长石含量较高。

小凌河发源于建昌县东北境楼子山东麓,在锦州市南凌村东南注入渤海。流域内主要出露白垩系安山岩,侏罗系安山岩,太古代片麻状花岗岩,早燕山期二长花岗岩等^[37]。辉石和斜长石是安山岩的常见矿物组分,广泛分布的安山岩经风化剥蚀,为该河流供给了大量辉石,使得该河流下游沉积物中辉石的含量明显高于其它河流,同时也提供了大量斜长石,使得沉积物中斜长石的含量明显偏高。与六股河类似,该河流高含量的金属矿物可能主要来源于下游太古代片麻状花岗岩强烈变质作用产生的副矿物。

大凌河有两源,北源出自凌源县打鹿沟,南源出

自建昌县黑山,在锦州东南注入渤海。流域内主要出露第四纪松散沉积物,太古代变粒岩夹磁铁矿、石英岩、片麻状花岗岩,白垩系安山岩、砂岩,侏罗系砂岩等^[37]。该河流较高含量的磁铁矿主要来源流域内的太古代磁铁矿石英岩及强烈变质作用产生的副矿物。中、上游地区广泛出露的砂岩可能是导致该河流沉积物中石英含量较高的主要原因。

辽河是我国东北地区南部最大的河流,发源于河北省平泉县,于辽宁省昌图县福德店汇流后为辽河干流,纳招苏台河、清河、柴河、泛河、柳河等支流,在台安县六间房分流两股,一股西流,称双台子河,纳绕阳河后,于盘锦市盘山县注入渤海,另一股南流,纳浑河、太子河后经营口注入渤海,称大辽河。1958年,在六间房附近进行了堵截,使辽河由双台子河入海,浑河、太子河由大辽河入海。因此,双台子河沉积物碎屑矿物组分主要反映了辽河流域的基岩性质,大辽河碎屑矿物主要反映了浑河、太子河流域的基岩特征。两条河流中、下游流域范围内大部分地区被第四纪松散沉积物所覆盖,上游支流地区有基岩出露。辽河上游支流分布面积不大的太古和元古期片麻状花岗岩,燕山期二长花岗岩,太古代片麻岩、斜长角闪岩,中、上元古界碎屑岩、碳酸盐岩,白垩系砂岩^[37]。双台子河沉积物中较高含量的普通角闪石可能来源于斜长角闪岩的风化剥蚀。虽然辽河上游基岩具备产出磁铁矿等金属矿物的地质条件,但由于此类矿物密度较大,可能难以长距离搬运到下游河口地区,因此双台子河沉积物中磁铁矿含量很低。浑河和太子河流域主要出露太古代片麻状花岗岩,太古代斜长角闪岩、黑云变粒岩,元古界二云片岩等^[37]。斜长角闪岩为下游沉积物提供大量角闪石,使得大辽河普通角闪石含量较高。低磁铁矿等金属矿物的原因与上太子河相同,可能因为它们难以长距离搬运到下游河口地区。含云母变质岩的出露使得大辽河白云母和黑云母的含量都明显高于其它河流。

复州河发源于普兰店市同益乡老帽山南麓,于瓦房店市三台子乡西蓝旗的老羊头注入渤海。流域内主要出露上元古界青白口系和震旦系的长石砂岩和石英砂岩,太古代鞍山群低角闪岩相变质岩,印支期石英闪长岩和二长花岗岩等火成岩^[37]。上游的角闪质变质岩和石英闪长岩可能是该河流下游沉积物中高含量普通角闪石的主要提供者,中、下游的长石砂岩和石英砂岩可能是该河流石英和长石含量均中等偏高的主要原因。

3.2 沉积物粒度与碎屑矿物组成的关系

本文 0.063 ~ 0.125 mm 粒级的碎屑矿物,尤其是轻、重矿物质量百分含量,与沉积物粒度有良好的相关性(图4),表现为沉积物平均粒径越粗,重矿物质量百分含量越高。轻矿物质量百分含量与重矿物的上述特征则相反。重矿物组分颗粒百分含量与沉积物平均粒径的相关性分析(表4)可以看出,与平均粒径(ϕ 值)呈正相关的矿物多为密度较小的矿物或难以沉降的片状矿物,如透闪石、阳起石、绿帘石、黝帘石和黑云母等,表现为沉积物平均粒径越细,密度较小或难以沉降的矿物含量高;与平均粒径(ϕ 值)呈负相关的矿物多为密度较大的矿物,如锆石、钛铁矿、磁铁矿等,表现为平均粒径越粗,密度较大的矿物含量高。

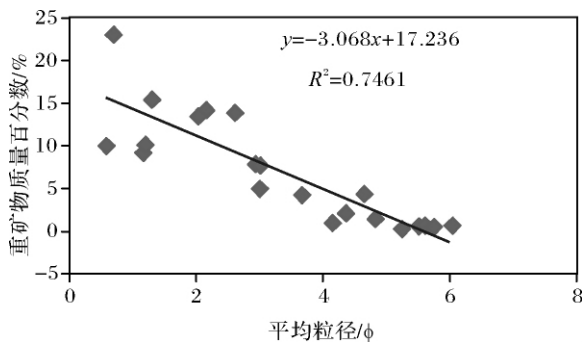


图4 辽东湾周边河流沉积物重矿物质量百分含量与平均粒径散点图

Fig.4 Scatter plot of heavy mineral content vs. mean grain size of river sediment around Liaodong Bay

总体而言,沉积物粒度与碎屑矿物的关系大致体现了河流动力分选作用对碎屑矿物组合的影响。双台子河和大辽河等流域范围较大的河流,下游沉积物砂含量偏低、粒度偏细,重矿物重量百分含量或密度较大的碎屑矿物组分含量较低。六股河、复州河和小凌河等流域范围较小的河流,下游沉积物中砂含量偏高、粒度偏粗,重矿物重量百分含量或密度较大的碎屑矿物组分含量较高。这是因为流域范围较大的河流沉积物搬运距离长,密度大的碎屑矿物易于沿途沉积而导致搬运到下游的较少,流域范围较小的河流具有山溪性河流的性质,沉积物搬运到河口的距离短、动力强,从而导致密度较大的碎屑矿物含量较高。值得注意的是,轻、重矿物的质量百分含量与平均粒径的相关系数较高,说明河流动力分选对轻、重矿物分异的影响较大;各矿物组分的颗粒百分含量与平均粒径的相关性分析虽然表现出了一定的规律性,但它们

之间的相关系数并不高,说明河流动力分选对矿物组合有一定影响,但作用有限。

表4 辽东湾周边河流沉积物重矿物组分与平均粒径(ϕ)的相关系数

Table 4 Correlation between heavy mineral components and mean grain size of river sediments around Liaodong Bay

重矿物	相关系数	重矿物	相关系数
普通角闪石	0.17	楣石	0.00
透闪石	0.49	磷灰石	-0.33
阳起石	0.73	普通辉石	-0.10
绿帘石	0.68	锆石	-0.48
黝帘石	0.72	钛铁矿	-0.37
黑云母	0.52	磁铁矿	-0.48
透辉石	0.18	褐铁矿	-0.23
石榴子石	0.14	赤铁矿	-0.27

3.3 碎屑矿物特征指数分析

石英/长石(Q/F)比值是用于评价碎屑沉积物成熟度的传统指标^[38,39]。七条河流中流域面积较大的双台子河、大凌河、大辽河和滦河下游沉积物的Q/F比值整体高于流域面积较小的小凌河、六股河和复州河(图5)。除受母岩类型的影响外,流域范围的大小可能是影响Q/F比值的重要因素。虽然七条河流位置相近、化学风化强度整体差别不大,但流域范围大的河流沉积物搬运距离长,经历了较长时间的化学风化过程,并且下游地区出露的第四纪松散沉积物也是河流入海泥沙的重要来源,它们长期暴露于地表环境中导致风化程度可能更高,因此入海沉积物的Q/F比值大,而流域范围小的三条河流属于山溪性河流,搬运距离短,化学风化作用时间短,因此Q/F比值小。

稳定重矿物的特征指数能够对物源特征有很好的反映,如ATi指数和GZi指数^[25,40,41]。ATi指数 = $100 \times \text{磷灰石} \% / (\text{磷灰石} \% + \text{电气石} \%)$,指示磷灰石的风化程度,如果风化作用很弱,则该指数主要反映沉积物物源的变化。GZi指数 = $100 \times \text{石榴子石} \% / (\text{石榴子石} \% + \text{锆石} \%)$,反映含有石榴子石的母岩组成的变化。双台子河、大辽河和大凌河的ATi指数(图5)相对其余河流较低,指示沉积物中磷灰石可能在化学风化过程中遭受溶蚀,沉积物经受的化学风化作用较强,与轻矿物高Q/F比值所反映情况相一致。六股河、小凌河和复州河ATi指数较高,反映沉积物化学风化程度较弱,与Q/F比值较小相对应。值得注意的是,本研究的七条河流处于我国东北部地

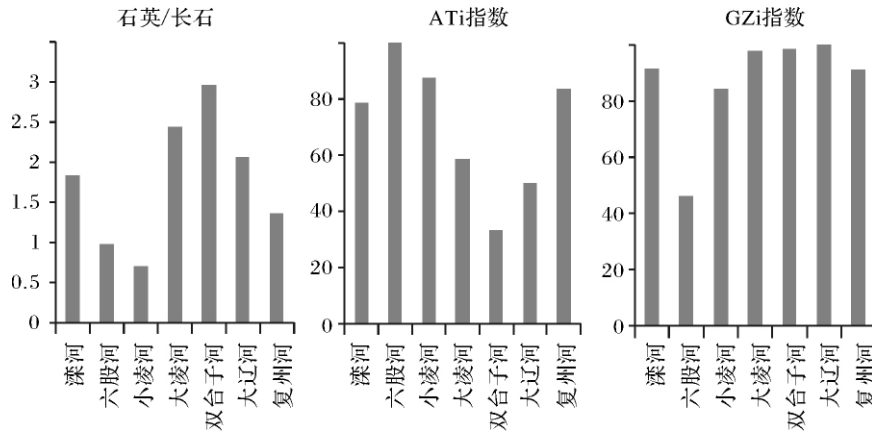


图5 辽东湾周边河流碎屑矿物特征指数对比图

Fig. 5 Comparison of detrital mineral indexes in river sediments around Liaodong Bay

区,化学风化作用总体不强,母岩类型对各指标的影响很大。例如,滦河 ATi 指数和 Q/F 比值均较高,两个指标所指示的化学风化作用强弱不一致,其原因就是受到了母岩类型的影响。GZi 指数(图 5)除六股河仅 46 以外,其余河流均在 80 以上。因为石榴子石主要产于基性—超基性岩浆岩和变质岩中,沉积物高 GZi 指数与这些河流流域内出露的变质岩有关。

4 结论

辽东湾周边七条河流下游河漫滩沉积物中轻矿物以石英和长石占绝对优势,云母、绿泥石和碳酸盐矿物含量很低。除岩屑和风化碎屑外,共鉴定出 33 种重矿物,以普通角闪石、金属矿物(磁铁矿+钛铁矿+褐铁矿+赤铁矿)、绿帘石、石榴子石、普通辉石、榍石和阳起石等为主。河流沉积物中普通角闪石和金属矿物含量的差别最明显,湾东侧的双台子河、大辽河和复州河普通角闪石含量高、金属矿物含量低,而湾西侧的六股河、小凌河和大凌河则相反。湾东部三条河流中绿帘石和阳起石的含量,湾西部三条河流中石榴子石和普通辉石的含量也各自有较大差别。本文七条河流片状矿物和碳酸盐矿物含量很低的特征,很好地区别于黄河沉积物。辽东湾东、西两侧河流重矿物组成差别如此明显,可能是两侧河流位于两个不同的构造单元之上,基岩类型不同所造成的。此外,河流动力分选和化学风化作用对碎屑矿物组成也有一定影响。

参考文献 (References)

1 高抒. 美国《洋陆边缘科学计划 2004》述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 119-123 [Gao Shu. Comments on the "NSF

Margins Program Science Plans 2004" [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(1): 119-123]

- 2 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21
- 3 Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. The Journal of Geology, 1992, 100(5): 525-544
- 4 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系 [J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 336-346 [Yang Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336-346]
- 5 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(3): 23-34 [Sun Baiyun. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang River delta sediments [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1990, 10(3): 23-34]
- 6 范德江, 杨作升, 王文正. 长江、黄河沉积物中碳酸盐组成及差异 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(1): 60-64 [Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Wang Wenzheng. Carbonate compositions in sediments from Changjiang, Huanghe and their differences [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(1): 60-64]
- 7 杨守业, 李从先, Lee C B, 等. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及沉积物物源示踪 [J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1233-1236 [Yang Shouye, Li Congxian, Lee C B, et al. REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(11): 1233-1236]
- 8 杨守业, Jung H S, 李从先, 等. 黄河、长江与韩国 Keum、Yeongsan 江沉积物常量元素地球化学特征 [J]. 地球化学, 2004, 33(1): 99-105 [Yang Shouye, Jung H S, Li Congxian, et al. Major element geochemistry of sediments from Chinese and Korean rivers [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 99-105]

- 9 杨守业,李从先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J]. 地球化学,1999,28(4): 374-380 [Yang Shouye, Li Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments[J]. Geochimica, 1999, 28(4): 374-380]
- 10 乔淑卿,杨作升. 长江和黄河入海沉积物不同粒级组分中稀土元素的比较[J]. 海洋地质与第四纪地质,2007,27(6): 9-16 [Qiao Shuqing, Yang Zuosheng. Comparison of rare earth element compositions in different grain-size fractions of sediments from the Yangtze and Yellow Rivers and the sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(6): 9-16]
- 11 杨作升,王海成,乔淑卿. 黄河与长江入海沉积物中碳酸盐含量和矿物颗粒形态特征及影响因素[J]. 海洋与湖沼,2009,40(6): 674-681 [Yang Zuosheng, Wang Haicheng, Qiao Shuqing. Carbonate minerals in estuary sediments of the Changjiang (Yangtze River) and Huanghe (Yellow River): the content, morphology, and influential factors [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(6): 674-681]
- 12 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社,2008: 22-38 [Chen Lirong. Sedimentary mineralogy of the China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 22-38]
- 13 Liu J P, Liu C S, Xu K H, *et al.* Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait [J]. Marine Geology, 2008, 256(1-4): 65-76
- 14 徐勇航,陈坚. 台湾海峡西岸闽江口和九龙江口沉积物中碎屑锆石铀-铅定年及物源意义[J]. 海洋学报,2010,32(4): 110-117 [Xu Yonghang, Chen Jian. Uranium-Lead dating of detrital zircons from the Minjiang and Jiulong Estuaries in the western coast of the Taiwan Strait: implication for its provenance [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(4): 110-117]
- 15 金秉福,宫立新,宋键. 大沽河泥沙来源的重矿物分析及其环境意义[J]. 海洋科学,2010,34(10): 71-76 [Jin Bingfu, Gong Lixin, Song Jian. Heavy mineral analysis in the sediment originated from the Daguhe River and its environmental significance [J]. Marine Sciences, 2010, 34(10): 71-76]
- 16 程岩,刘月,李富祥,等. 鸭绿江口及邻近浅海碎屑矿物特征与物源辨识[J]. 地理研究,2010,29(11): 1950-1960 [Cheng Yan, Liu Yue, Li Fuxiang, *et al.* Detrital mineral characteristics and material source identification in surface sediments of Yalu River estuary and adjacent waters [J]. Geographical Research, 2010, 29(11): 1950-1960]
- 17 Martin J M, Zhang J, Shi M C, *et al.* Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the Western Pacific Ocean [J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1993, 31(3): 243-254
- 18 Yang Z, Ji Y, Bi N, *et al.* Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93(3): 173-181
- 19 Qiao S, Shi X, Zhu A, *et al.* Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 86(3): 337-344
- 20 陈丽蓉,栾作峰,郑铁民,等. 渤海沉积物中的矿物组合及其分布特征的研究[J]. 海洋与湖沼,1980,11(1): 46-64 [Chen Lirong, Luan Zuofeng, Zheng Tiemin, *et al.* Mineral assemblages and their distribution patterns in the sediments of the gulf of Bohai Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1980, 11(1): 46-64]
- 21 中国科学院海洋研究所. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社,1985 [Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 1985: 76-97]
- 22 刘建国,李安春,陈木宏,等. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征[J]. 地球化学,2007,36(6): 559-568 [Liu Jianguo, Li Anchun, Chen Muhong, *et al.* Geochemical characteristics of sediments in the Bohai Sea mud area during Holocene [J]. Geochimica, 2007, 36(6): 559-568]
- 23 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 [Compiling Council of Chinese Embayment. Chinese Embayment, Part 14 (Important Estuary) [M]. Beijing: Ocean Press, 1998]
- 24 林振宏,吕亚男,高学敏. 冲绳海槽中部表层沉积物的重矿物分布和来源[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版,1996,26(3): 361-368 [Lin Zhenhong, Lu Yanan, Gao Xuemin. Distribution and sources of heavy minerals in the surface sediment in the middle Okinawa Trough [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1996, 26(3): 361-368]
- 25 Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones [J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1-4): 3-29
- 26 Hallsworth C R, Morton A C, Clauoué-Long J, *et al.* Carboniferous sand provenance in the Pennine Basin, UK: constraints from heavy mineral and detrital zircon age data [J]. Sedimentary Geology, 2000, 137(3-4): 147-185
- 27 Rimington N, Cramp A, Morton A. Amazon Fan sands: implications for provenance [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 267-284
- 28 林晓彤,李巍然,时振波. 黄河物源碎屑沉积物的重矿物特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003,23(003): 17-21 [Lin Xiaotong, Li Weiran, Shi Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River provenance, China [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(3): 17-21]
- 29 王昆山,王国庆,蔡善武,等. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合[J]. 海洋地质与第四纪地质,2007,27(1): 7-12 [Wang Kunshan, Wang Guoqing, Cai Shanwu, *et al.* Heavy mineral characteristics of surface sediments in the subaqueous Yangtze River delta [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(1): 7-12]
- 30 王昆山,石学法,蔡善武,等. 黄河口及莱州湾表层沉积物中重矿物分布与来源[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(6): 1-8 [Wang Kunshan, Shi Xuefa, Cai Shanwu, *et al.* Distribution and provenance of the surface sediments of the Yellow River mouth and Laizhou bay deduced from heavy minerals [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(6): 1-8]
- 31 王中波,杨守业,李萍,等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其

- 示踪意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 570-578 [Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Ping, *et al.* Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 570-578]
- 32 奚衍光, 王昆山, 王国庆, 等. 长江水下三角洲沉积物碎屑矿物研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 22-26 [Dou Yanguang, Wang Kunshan, Wang Guoqing, *et al.* Research of detrital minerals in the sediment of sub-aqueous Yangtze Delta [J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(4): 22-26]
- 33 向绪洪, 邵磊, 乔培军, 等. 珠江流域沉积物重矿物特征及其失踪意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 27-35 [Xiang Xuhong, Shao Lei, Qiao Peijun, *et al.* Characteristics of heavy minerals in Pearl River sediments and their implications for provenance [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 27-35]
- 34 李艳, 李安春, 黄朋. 大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(6): 13-20 [Li Yan, Li Anchun, Huang Peng. Distribution of heavy mineral assemblages in subsurface sediments of Dalian Bay and their implications for provenance and environment [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2011, 31(6): 13-20]
- 35 王中波, 杨守业, 李日辉, 等. 黄河水系沉积物碎屑矿物组成及沉积动力环境约束[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 73-85 [Wang Zhongbo, Yang Shouye, Li Rihui, *et al.* Detrital mineral composition of the sediments from Huanghe and its hydrodynamic environmental constraints [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 73-85]
- 36 乔秀夫, 张安棣. 华北块体、胶辽朝块体与郯庐断裂[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 337-345 [Qiao Xiufu, Zhang Andi. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault [J]. *Geology in China*, 2002, 29(4): 337-345]
- 37 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989 [Bureau Geology and Mineral Resources Exploration, Liaoning Province, China. *Regional Geology of Liaoning Province* [M]. Beijing: Geology Press, 1989]
- 38 Wang X, Miao X. Weathering history indicated by the luminescence emissions in Chinese loess and paleosol [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(13-14): 1719-1726
- 39 杨作升, 赵晓辉, 乔淑卿, 等. 长江和黄河入海沉积物不同粒级中长石/石英比值及化学风化程度评价[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(2): 244-250 [Yang Zuosheng, Zhao Xiaohui, Qiao Shuqing, *et al.* Feldspar/Quartz (F/Q) ratios as a chemical weathering intensity indicator in different grain size-fractions of sediments from the Changjiang and Huanghe rivers to the seas [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(2): 244-250]
- 40 Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 241-256
- 41 Morton A, Hurst A. Correlation of sandstones using heavy minerals: an example from the Statfjord Formation of the Snorre Field, northern North Sea [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1995, 89(1): 3-22

Detrital Minerals in the Surrounding River Sediments, Liaodong Bay, Bohai Sea: Composition and its Geological Significance

WANG Li-bo^{1 2} LI Jun^{1 2} ZHAO Jing-tao^{1 2} ZHAI Bin^{1 2}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract: According to the characteristics of detrital minerals in downstream floodplain sediments from seven rivers around Liaodong Bay, detrital mineral assemblages among the rivers, and impacts of rocks in drainage basin and sediment grain size on detrital mineral assemblages were analyzed. Light mineral assemblages are mainly Quartz, Plagioclase and Potassium Feldspar. Because rivers flowing in western Liaodong Bay (Liuguhe, Xiaolinhe, Dalinghe) and rivers flowing in eastern Liaodong Bay (Shuangtaizihe, Daliaohe, Fuzhouhe) are located on two tectonic blocks separately, different rock types in drainage basin lead to prominent discrepancies of heavy mineral assemblage in river sediments. The western rivers are characterized by low hornblende and high metal minerals, but the eastern rivers are reverse, so that these two compositions can identify rivers flowing in western and eastern Liaodong Bay effectively, and they can also separate Luanhe sediment from rivers in Liaoning. The garnet and augite can distinguish the three rivers flowing in western Liaodong Bay, because content of the garnet is high in Dalinghe, the augite is high in Xiaolinghe, and both are low in Liuguhe. The epidote and actinolite can differentiate the three rivers flowing in eastern Liaodong Bay, because content of the epidote is high in Shuangtaizihe, the actinolite is high in Daliaohe, and both are low in Fuzhouhe. Low contents characteristics of schistose minerals and carbonate minerals of these seven rivers are different from Huanghe sediments.

Key words: detrital minerals; provenance; medium and small river; Liaodong Bay