

于健, 金秉福, 王孟瑶, 等. 短源河流碎屑矿物在河道、河口和海滩的组分变化及其控制因素——以山东半岛辛安河为例[J]. 海洋学报, 2023, 45(7): 168–182, doi:10.12284/hyxb2023055

Yu Jian, Jin Bingfu, Wang Mengyao, et al. Component changes and control factors of detrital minerals in riverbed, estuary and beach of short source rivers: taking the Xin'an River in Shandong Peninsula as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(7): 168–182, doi:10.12284/hyxb2023055

短源河流碎屑矿物在河道、河口和海滩的 组分变化及其控制因素 ——以山东半岛辛安河为例

于健¹, 金秉福^{1*}, 王孟瑶², 王昕¹

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院/海岸研究所, 山东 烟台 246025; 2. 华东师范大学 河口海岸科学研究院/河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 山东半岛诸多小河沉积物大多来源明确, 矿物沉积分异相对较小, 对其研究能为大河入海物源分析提供区域相似性, 也可为黄、渤海陆架沉积提供山东半岛物质来源特征。本文以山东半岛东北部短源小河辛安河为例, 对取自河床、河口、海滩的表层沉积样品的碎屑矿物分布规律进行了多粒级分析。研究表明, 辛安河流域和海滩沉积物多为中砂和细砂, 全样重矿物含量中等, 在 1.47%~8.19% 之间。出现重矿物 27 种, 轻矿物 8 种, 主要重矿物为普通角闪石 (41.7%)、绿帘石 (16.7%)、阳起石 (10.6%) 和褐铁矿 (6.7%), 主要轻矿物为石英 (49.0%)、斜长石 (26.5%) 和钾长石 (20.7%), 这些矿物的含量在河床、河口和海滩远高于其他碎屑矿物, 且矿物组合保持不变, 相对含量变幅不大; 非主要矿物种类与碎屑粒径存在显著的非线性相关关系。辛安河矿物种类和含量受控于区域岩性物源, 即酸性、中酸性侵入岩和区域变质岩。闪石族矿物在辛安河不同地貌中的相对稳定输出是其同宗同源属性所在, 矿物组成变化主要受水动力控制下的粒度分选影响。山东半岛短源河流虽碎屑矿物种类和含量不尽相同, 但它们来源于相似的地质地貌和岩石类型, 矿物组成变化的主要控制因素为区域物源和粒度分选, 其次为沉积环境差异。相比而言, 黄河闪石族矿物的低含量、云母族和碳酸盐类矿物在特定粒级的高含量有别于半岛南北两侧的河源物质。

关键词: 碎屑矿物; 广粒径多粒级分析法; 矿物分布; 沉积环境; 辛安河; 山东半岛

中图分类号: P736.21²

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)07-0168-15

1 引言

碎屑矿物的种类和含量可以解读其源岩成分和构造背景, 对源区的自然地理环境、泥沙运移和沉积的水动力状况以及沉积后的成分变化具有鲜明的指示作用^[1]。对碎屑矿物组成特征及影响因素的分析是

反演区域构造机制和沉积环境的重要方法^[2-3]。尤其在矿物种类多、影响因素复杂的地区, 碎屑矿物的组合研究更能作为沉积环境和物质来源的指示剂^[4]。中国东部边缘海的沉积组成主要受外流河输入物质的影响, 既包括长江、黄河等大河, 也包括入海的诸多中小河流^[5-6]。陆源碎屑沉积物是近海陆架的沉积主

收稿日期: 2022-08-30; 修订日期: 2022-11-16。

基金项目: 国家自然科学基金(41576057)。

作者简介: 于健(1996—), 男, 山东省青岛市人, 研究方向为河口海岸过程分析与应用。E-mail: aristocjy@163.com

* 通信作者: 金秉福(1963—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积学研究。E-mail: bingfu_jin@163.com

体,其物源识别要求对重要入海河流的矿物组成做出详细全面的端元特征构建。目前,国内较多学者对入海大河的碎屑矿物进行了系统研究,分析黄河重矿物含量和碎屑矿物组合变化^[7-11];探究长江碎屑矿物的特征及其对物源追溯的意义^[12-15]。国外学者多对河流沉积物进行矿物学特征研究^[16-18],讨论河流沉积物地球化学和矿物组合变化等^[19-21]。但与大河研究相比,对于中小河流的研究就略显薄弱。虽然已经有学者开始研究入海中小河流的碎屑矿物的示踪意义^[22-23],但对于中小河流在不同地貌间的矿物组分变化和内在联系方面的探究仍有待发展。小河由于其流域面积较小,岩性复杂程度较低,自然条件相对单一,碎屑矿物组分变异性小,水动力环境识别度高等原因,易于进行在有限边界条件下的矿物沉积分异规律性分析,探索在同一物源供给下,不同地貌位置 and 不同水动力环境下沉积组成的异同,为复杂的大中河流物源研究提供特定区域的相似型。

山东半岛周围海域作为我国东部边缘陆海相互作用的重要场所,其复杂的沉积环境和沉积物多物源的沉积特征,使得该海域一直是我国现代海洋沉积研究的热点区域。目前,黄河物质从渤海入海后,在沿岸流作用下经由北黄海向南黄海输送已经被众多学者论证^[24-27],即黄河是此区域的主要陆源物质提供者。同时,在山东半岛也有十几条入海短小河流,它们均起源于山东半岛低山丘陵区,流域岩石特征相

近,每年尤其是洪水期都会携带大量中细砂质碎屑注入黄渤海海域,是该区域沉积物不可或缺的提供者。

辛安河流域位于山东半岛东北部,自南向北流入黄海,全长 43.5 km,支流少,流域面积约为 315 km²,年平均径流量为 5 582 万 m³,在山东半岛众多小河中处于中等。流域范围内地质类型虽然简单但具有代表性,中上游主要分布岩浆岩(黑云母花岗岩和少量安山岩)和区域变质岩(黑云片岩、片麻岩、变粒岩、透辉岩、大理岩)^[28],下游主要被第四系的松散沉积物所覆盖。本文选取辛安河作为山东半岛入海河流的代表,对辛安河河床、河口和海滩的沉积物采用广粒级碎屑矿物分析,通过挖掘辛安河河床、河口和海滩之间的矿物组分在不同粒度间的构成与分异规律,进而归纳山东半岛类似河流在入海前后碎屑矿物分布的共性,总结入海小河碎屑矿物的端元特征,建立起非黄河质入海泥沙与黄渤海海底沉积物之间的源汇联系,为山东半岛近海碎屑沉积物的物源探究提供实验数据和辨识依据。

2 样品来源和研究方法

2.1 样品来源

本实验样品于 2018 年 3 月中旬枯水期,在辛安河中游边滩、河口和海滩位置,通过手持 GPS 定位,采用表层取样的方式,样方为 20 cm × 20 cm,深度为 5~10 cm,均匀取样约 2 kg(剔除较大砾石),密封带

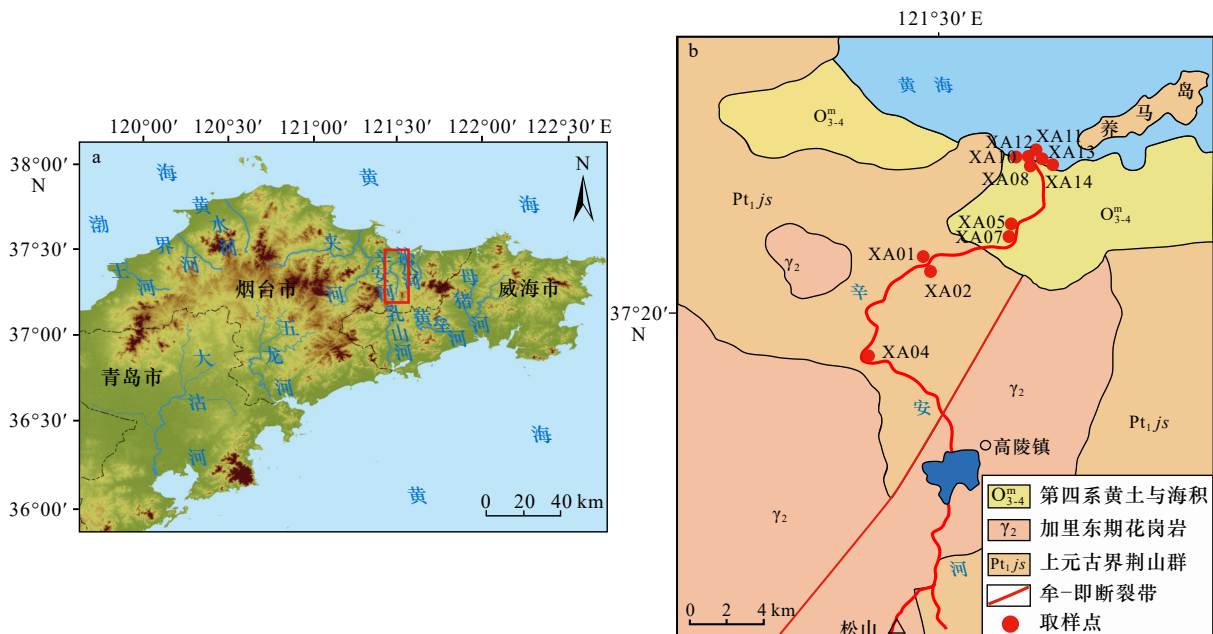


图 1 研究区及采样站位

Fig. 1 Map of study area and sampling points

a. 山东半岛短源河流地形图; b. 辛安河流域地质示意图

a. The topographic of the short-source rivers in the Shandong Peninsula; b. the geological sketch map of the Xin'an River basin

表 1 采样点位

Table 1 Sampling point location

样点号	经纬度位置	地貌位置
XA01	37°24'20"N, 121°32'18"E	辛安河大桥西北侧河床
XA02	37°24'09"N, 121°32'19"E	辛安河大桥西北侧河床
XA04	37°20'47"N, 121°27'49"E	北水桃林村桥下边滩
XA05	37°26'15"N, 121°33'12"E	辛安河特大桥西南侧河口
XA07	37°26'14"N, 121°33'06"E	辛安河特大桥西南侧河口
XA08	37°26'30"N, 121°32'59"E	水下岸坡远处
XA10	37°26'29"N, 121°33'01"E	海滩沿岸槽谷
XA11	37°26'28"N, 121°33'00"E	海滩中滩面
XA12	37°26'28"N, 121°33'02"E	海滩中滩面
XA13	37°26'28"N, 121°33'06"E	海滩中滩面
XA14	37°26'27"N, 121°33'10"E	海滩中滩面

回实验室进行实验分析。本研究共选取了 11 个样品, 采样点如图 1 和表 1 所示。

2.2 粒度测试

将采取的样品搅拌均匀后, 按照海洋地质实验规范要求取样^[29], 烘干称重。将样品加入 10% 双氧水去除样品中的有机质, 然后加入 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠, 使样品颗粒彼此分散, 用玻璃棒搅拌均匀后静置 24 h, 待水清亮后去除上层清液。按照沉降分析原理, 以 $\Phi = 1$ 为间隔, 提取出 Φ 为 5~6 的沉积物; 留在 $\Phi = 5$ 筛中的部分再依次通过粒级间隔为 $\Phi = 0.5$ 、孔径不同的标准筛, 将样品分成 Φ 为 5.0~4.5、4.5~4.0、4.0~3.5、3.5~3.0、3.0~2.5、2.5~2.0、2.0~1.5、1.5~1.0、1.0~0.5 以及小于 0.5 多个粒级(若有), 然后再进行冲洗、收集、烘干和称重, 计算每个粒级区间的质量百分比。

2.3 轻重矿物分离和鉴定

本研究采用广粒径多粒级矿物分析法, 此方法是指在 Φ 为 1~5 的范围内, 以 $\Phi=0.5$ 为间隔分筛, 若

有 Φ 为 5~6 和小于 1 粒级, 可把每个样品分为 7~9 个分样, 测试统计可进行矿物鉴定的轻重矿物相对含量^[30]。辛安河属于入海短河, 沉积物中重矿物在粒级中的分布有一定跨度, 粗粒级(Φ 小于 1)沉积物中重矿物所占权重很小, 含量极少, 可以忽略不计。分离实验前将每个试样搅匀、均分取出 2 g 左右或全部(小于 2 g)试样, 利用三溴甲烷重液(2.89 g/cm³)进行浮选分离, 静置 8 h 后回收样品烘干(80℃), 称重并计算轻、重矿物百分比含量, 天平仪精度为 0.000 1 g。主要采用体视显微镜和油浸法偏光显微镜相结合的方法^[31], 对矿物的风化程度、颜色、形状进行鉴定和描述, 每个试样的轻、重矿物鉴定多为 300~500 颗。鉴定完成后计算各矿物百分比含量。

3 实验数据及结果分析

3.1 碎屑矿物粒径分析

在河流沉积物的分析中, 粒度特征既能表征碎屑物的组成和结构, 又能作为判断自然地理环境和流体动力条件的良好标志, 是物质来源、沉积区水动力环境、沉积物输移能力和输移路线的综合反映^[32], 尤其是粒度较粗的短源小河, 其粒度对不同碎屑矿物种类的含量具有强烈的控制作用。本文粒度参数的求解方法为图解法, 图解法能够更好地反映出沉积物沉积环境的水动力条件变化。用频率累积曲线上对应的 5%、16%、25%、50%、75%、84%、95% 的粒径值来获取粒度参数, 使用福克(Folk)和沃德(Ward)图解公式计算, 分别求取粒度的平均粒径、标准偏差、偏态和峰度(表 2)^[33]。

沉积环境对沉积物的粒度特征的改造主要表现为沉积物原有组分丢失或者新组分的加入。筛析法可以得到沉积物质量百分数, 即各样品各粒级沉积物质量分别占总重的百分比。将数据经归一化计算后, 得到辛安河沉积物粒度数据(表 2)。由表 2 可见, 辛安河碎屑矿物样品中, 沉积物粒径整体差异较大, 平均粒径最大和最小的样品都位于河床位置, 河口和海

表 2 辛安河沉积物粒度参数

Table 2 Grain size parameters of the Xin'an River sediments

粒度参数	XA01	XA02	XA04	XA05	XA07	XA08	XA10	XA11	XA12	XA13	XA14
平均粒径	4.82	3.74	0.93	1.46	1.64	1.44	1.98	1.27	1.60	1.73	1.72
标准偏差	0.95	1.73	1.65	0.91	0.68	0.56	0.62	0.65	0.58	0.54	0.56
偏态	0.24	0.24	0.27	-0.28	-0.17	0.02	-0.48	0.15	-0.18	-0.16	-0.25
峰度	1.04	1.14	1.31	0.84	0.80	0.76	1.03	0.8	0.73	0.43	0.21

滩的平均粒径都位于 ϕ 为1~2之间,变化幅度较小、多属于细砂和中砂。辛安河样品标准偏差变化范围为0.54~1.73,河床样品分选较差,河口和海滩分选中等,河床样品都为正偏,河口和海滩样品整体为负偏,整体偏度位于-0.48~0.27之间。

3.2 重矿物含量及其在不同粒度中的变化

河流中矿物沉降与其密度、水流状况、体积等因素有关。重力越大的矿物沉降速度越快,如考虑体积的影响,密度大的矿物如果要与密度小的矿物一起沉降,则其体积会小,而密度小则相反。泥沙在搬运过程中不断沉积分异,不同粒级的碎屑矿物组成会有一定幅度的变化。前人认为重矿物分析要考虑到沉积物的等效沉积效应和水动力影响等因素,故选择沉积物的某一粒度来分析碎屑矿物的变化规律^[34]。但实际上,单一粒度只能代表狭窄粒度范围的沉积属性,不能反映分选差的样品的整体特征,而广粒级的重矿物组分是在大的粒度范围进行检测,矿物组分极少溢出沉积系统之外,每种矿物含量变化要比单一粒度来的更小,加权值更接近实际矿物含量^[35-36]。因此本文根据河床、河口和海滩11个样品的重矿物和轻矿物的分离实验,将沉积物的全部粒度重矿物与重矿物分析传统方法,即小区间 ϕ 为3~4粒级的重矿物进行比较分析,运用加权计算方法(辛安河各粒度百分比含量与相应的重矿物百分比含量的乘积、 ϕ 为3~4粒度百分比含量与 ϕ 为3~4重矿物百分比含量的

乘积)得出辛安河重矿物变化(表3)。

由表3可见,辛安河重矿物所占百分比都较低,其中河口重矿物占百分比达到7.2%,是辛安河中重矿物含量最高的地方。河床和海滩的重矿物百分比分别为2.8%和2.4%,含量较低。尽管河口重矿物含量最高,但是 ϕ 为3~4粒度占比平均仅为1.2%,海滩该粒度仅为2.5%。河床的 ϕ 为3~4粒度占比最高,平均值达到了13.3%。整体而言,河床、河口和海滩的重矿物在该粒度占比都不高。由此可见,作为入海小河的辛安河,即使搬运距离近,重矿物组分在单一粒度中的变化仍然很明显。从 ϕ 为3~4占比与广粒级的对比情况可以看出,尽管单一粒度在整个矿物粒度中所占比重很小,辛安河整个广粒度中 ϕ 为3~4占比最多仅为15.7%,其他样点都在3%以下,但重矿物在该粒度中百分含量有明显增多。因此,不论是单一粒度还是广粒度分析都有利于表现出碎屑矿物的增减变化,应该根据样品数据选择合适的粒度分析。

3.3 辛安河轻重矿物种类和分布特征

3.3.1 重矿物种类

本文对辛安河碎屑矿物分析采用广粒度加权计算的方法,对辛安河碎屑矿物数据进行归一化处理得到表4和表5,加权计算公式为^[37]

$$T_i = \sum_{j=1}^n Z_j H_j Q_{ij}, \quad (1)$$

式中, T_i 是样品广粒度中某种重矿物(i)的含量; Z_j 是粒度(j)的百分比; Q_{ij} 是该重矿物(i)在粒度(j)中的百分比; n 是粒度的数量。每种矿物结果的合计值用作样品的重矿物统计数据。统计发现存在于整个辛安河流域的重矿物共有27种,包括普通角闪石、透闪石、阳起石、绿帘石、黝帘石、斜黝帘石、黑云母、白云母、水黑云母、石榴子石、榍石、磷灰石、电气石、锆石、金红石、透辉石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿等。其中,普通角闪石、绿帘石、阳起石和褐铁矿在辛安河碎屑重矿物中占主要部分,每种重矿物所占百分数在10%以上,4种矿物占总矿物的百分数超过70%。

从河床到海滩矿物百分含量有明显变化。海滩处褐铁矿含量上升,成为优势矿物。优势重矿物中,普通角闪石作为辛安河流域占比最高的重矿物,多数呈柱状,少量粒状、绿色,次棱角状,少量风化较强;河床角闪石平均占比41.8%,河口处占比34.5%,海滩处占比44.1%,从河床到海滩占比轻微上升但变化不显著。阳起石多数呈柱状,次棱角状,浅绿色或浅灰

表3 辛安河不同粒度重矿物含量差异

Table 3 Difference of heavy mineral content of different grain size fractions in the Xin'an River

样品位置	样品编号	广粒度重矿物在全样中的含量/%(加权值)	ϕ 为3~4粒级含量/%	ϕ 为3~4重矿物在全样中的含量/%(加权值)	ϕ 为3~4重矿物在该粒度中的含量/%
河床	XA01	2.01	2.98	0.07	3.92
	XA02	4.06	15.73	1.12	27.65
	XA04	2.51	1.86	0.21	8.29
河口	XA05	6.11	0.63	0.11	1.88
	XA07	8.19	0.37	0.05	0.62
水下岸坡	XA08	2.59	0.08	0.01	0.69
海滩槽谷	XA10	3.27	1.68	0.25	7.91
中滩面	XA11	1.48	0.09	0.01	0.60
	XA12	2.43	0.09	0.02	0.77
	XA13	1.83	0.27	0.07	3.54
	XA14	2.96	0.16	0.04	1.44

表 4 辛安河沉积物重矿物加权百分数 (%)

Table 4 Heavy mineral weighted percentages for the Xin'an River sediments (%)

矿物	XA01	XA02	XA04	XA05	XA07	XA08	XA10	XA11	XA12	XA13	XA14
普通角闪石	37.96	44.51	42.93	34.37	34.69	51.25	38.45	42.84	44.91	47.34	39.29
透闪石	1.58	4.01	4.96	6.23	7.74	5.52	9.10	4.38	3.45	8.65	5.93
阳起石	10.96	10.02	13.59	12.38	14.77	4.59	7.96	8.04	10.34	9.73	14.28
绿帘石	20.37	17.20	13.85	24.04	16.08	11.44	23.20	13.36	14.65	13.97	15.26
黝帘石	2.48	1.48	0.44	0.44	0.33	—	0.05	0.07	0.22	0.14	—
斜黝帘石	9.44	4.46	1.78	1.38	1.61	0.09	0.55	0.17	0.41	0.44	0.61
黑云母	0.58	0.27	0.20	0.23	0.29	—	0.04	—	—	—	0.01
白云母	0.42	—	0.75	—	0.23	0.28	0.07	0.21	0.14	0.08	0.08
水黑云母	0.10	1.06	2.38	0.23	3.33	2.33	1.81	3.77	3.09	3.28	3.04
石榴子石	4.12	5.16	5.46	8.41	5.80	1.33	5.65	1.72	4.78	3.46	6.28
榍石	5.61	5.12	3.95	3.94	4.58	0.93	1.24	0.55	1.27	1.39	3.78
磷灰石	—	0.02	0.18	0.78	0.68	0.02	0.18	0.13	0.01	0.18	0.28
电气石	0.14	0.23	0.15	0.54	0.10	1.10	0.50	0.85	1.16	0.43	0.78
锆石	0.54	0.32	0.25	0.16	—	—	0.05	—	0.29	0.04	0.03
金红石	0.37	0.19	0.03	—	—	—	—	—	0.09	—	—
透辉石	0.18	0.87	0.15	0.17	0.80	—	—	—	—	—	—
钛铁矿	1.53	1.18	0.79	0.49	1.29	0.04	0.21	0.31	0.16	0.18	0.40
磁铁矿	0.24	0.73	0.65	1.16	1.19	0.03	0.10	0.03	0.37	0.06	0.83
褐铁矿	2.35	1.43	4.93	3.85	3.66	11.75	7.01	13.37	11.00	7.59	6.84
赤铁矿	—	—	0.40	0.43	—	0.15	0.43	—	0.01	0.02	0.01
风化碎屑	0.99	1.40	1.87	0.77	2.49	7.96	2.57	9.42	2.84	2.58	1.83
岩屑	0.03	0.36	0.24	—	0.22	1.99	0.83	0.58	0.82	0.21	0.41

注：“—”表示未测得数据，仅在某一粒级偶尔出现的矿物未作计算。

表 5 辛安河沉积物轻矿物加权含量百分数 (%)

Table 5 Weighted percentage of light minerals in the Xin'an River sediments (%)

矿物	XA01	XA02	XA04	XA05	XA07	XA08	XA10	XA11	XA12	XA13	XA14
石英	66.36	51.56	41.81	52.82	46.72	44.60	47.01	46.67	45.38	50.58	46.89
斜长石	18.07	25.95	29.17	25.83	29.56	25.62	27.19	28.28	29.89	25.97	26.65
钾长石	11.80	18.09	23.45	17.73	17.57	26.26	22.84	22.83	22.11	20.69	24.35
白云母	1.84	0.89	1.19	0.50	0.37	0.14	0.04	—	0.10	0.15	0.06
风化云母	1.91	3.19	2.54	1.41	2.50	0.92	1.54	0.55	0.63	0.97	0.83
方解石	0.01	—	—	0.01	0.05	0.10	0.02	0.05	0.20	—	0.13
岩屑	0.01	0.25	1.12	1.33	1.90	2.26	1.22	1.27	1.26	1.33	0.85
风化碎屑	0.01	0.07	0.72	0.39	1.23	0.05	—	0.36	0.43	0.05	0.25

注：“—”表示未测得数据，仅在某一粒级偶尔出现的矿物未作计算。

绿色;河床占比 11.5%,河口占比 13.5%,海滩占比 9.2%,从河床到海滩总体趋势先升后降。绿帘石多数呈粒状,柱状,次棱角状,黄绿色、浅黄色或淡黄色;绿帘石河床占比 17.1%,河口占比 20.1%,海滩占比 15.3%,从河床到海滩绿帘石含量略有下降。褐铁矿多数呈粒状,黄褐色或红褐色,具有弱磁性;河床和河口的褐铁矿百分比都在 10% 以下,在海滩处褐铁矿含量较高,能达到 13.4%。

3.3.2 轻矿物种类

河床样品中,共检测出 6 种轻矿物,其中,优势矿物有石英、斜长石和钾长石,平均体积分数为 1%~10% 的有白云母和风化云母,平均含量小于 1% 的为方解石。在河口样品中,共检测出 7 种轻矿物,其中,优势矿物有石英、斜长石和钾长石,平均体积分数为 1%~10% 的有白云母和风化云母,平均含量小于 1% 的有方解石和绿泥石。在海滩样品中,共检测出 8 种轻矿物,其中,优势矿物有石英、斜长石和钾长石,平均体积分数 1%~10% 的为风化云母,平均含量小于 1% 的有白云母、方解石、白云石、绿泥石。

综上所述,辛安河流域除风化碎屑和岩屑外共有 8 种轻矿物,从河床到海滩矿物种类有所增加。而流域内的优势矿物为石英、斜长石和钾长石,3 种矿物占比超过 90%。从河床到海滩的轻矿物种类较少,组分无明显变化,因此下文着重分析辛安河重矿物变化规律。

3.3.3 重矿物在不同粒级中的分布

根据矿物的理化性质将矿物分为闪石族(普通角闪石、阳起石、透闪石)、帘石族(绿帘石、黝帘石、斜黝帘石)、云母族(黑云母、白云母、水黑云母)、稳定矿物类(电气石、锆石、金红石、石榴子石、榍石、磷灰石)和铁质金属类(褐铁矿、赤铁矿、钛铁矿、磁铁矿)。计算获得矿物族类百分比,做出辛安河取样点重矿物在不同粒级中的变化与重矿物含量分布图(图 2)。

通过图 2 可以看出,样品内部不同粒级控制下的重矿物组合基本相同,但非主要矿物含量存在明显差异。云母族在河床和河口样品中占比都在 10% 以下。河床 3 个样品中,位于中游的 XA04 样品中白云母在 Φ 为 4~5 粒级出现增多,而在下游的 XA01 和 XA02 样品中,云母族从粗粒级到细粒级逐渐减少。河口两个样品中云母族从粗粒级到细粒级变化不明显,但在 XA07 样品中水黑云母粗粒级明显多于细粒级。海滩大部分样品(除 XA08)的云母族都是富集在粗粒级中,并且水黑云母占云母族 90% 以上,粒径

Φ 小于 3 的云母族占比极低。闪石族在辛安河重矿物中含量最高,平均每个样品的闪石族都达到了重矿物含量的 50% 以上。普通角闪石在闪石族中含量超过 60%,与阳起石之间呈现出一定的此消彼涨变化,河床和河口样品表现在细粒级范围,海滩样品主要体现在 Φ 为 1~2 之间。帘石族在重矿物中占比为 10%~40%,河床 3 个样品中帘石族含量较高,斜黝帘石在 Φ 为 4~5 粒级占比增高,导致河床的帘石族在细粒级有一定增长。海滩样品中,绿帘石含量占帘石族的 95% 以上,从粗粒级到细粒级呈现明显增多的趋势。稳定类矿物占比都在 20% 以下,石榴子石和榍石是稳定类矿物的主要成分。海滩样品的稳定类矿物含量从粗粒级到细粒级出现显著的增加,而河床稳定类矿物随粒级变化并不明显,河口 XA07 样品稳定类矿物开始出现从粗粒级到细粒级增长的趋势。铁质金属类矿物在辛安河中矿物种类变化最明显。河床 XA04 样品中褐铁矿占主要部分,赤铁矿含量较高,钛铁矿含量最低,而 XA01 和 XA02 样品中钛铁矿明显增多,赤铁矿几乎消失。河口样品中磁铁矿出现显著增长,赤铁矿和钛铁矿含量变少。海滩样品中,褐铁矿含量占稳定金属类矿物的 80% 以上,成为主要矿物且多分布在粗粒级中,细粒级中钛铁矿和磁铁矿含量较高。

从重矿物含量和矿物种类关系来看,河床和河口重矿物主要分布在 Φ 为 2.5~3.5,而海滩主要分布在 Φ 为 3~4。海滩样品中,重矿物含量越高,重矿物种类越多,成分越复杂。海滩粗粒级重矿物占比较小,成分简单,矿物组合主要为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿+水黑云母。整个辛安河从粗粒级到细粒级重矿物种类逐渐增多,如稳定类矿物中金红石、锆石、磷灰石等多在细粒级中出现。海滩与河床和河口的重矿物分布存在明显的差异,尤其是云母族、稳定类矿物和铁质金属矿物。

4 讨论

4.1 辛安河碎屑矿物组分变化

4.1.1 重矿物组合分析

矿物对物源和水动力有明显的指示作用,不同的矿物组合能反映物质来源的不同和沉积动力的差异^[38]。辛安河流经区域主要由元古代的花岗岩和区域变质岩组成,变质岩系的岩石组合具有中-高级变质程度的各种成分的片岩、片麻岩、变粒岩、浅粒岩、麻粒岩和斜长角闪岩,角闪岩相组合和麻粒岩相组合丰富^[39]。流域内的碎屑矿物分布特征与大多数

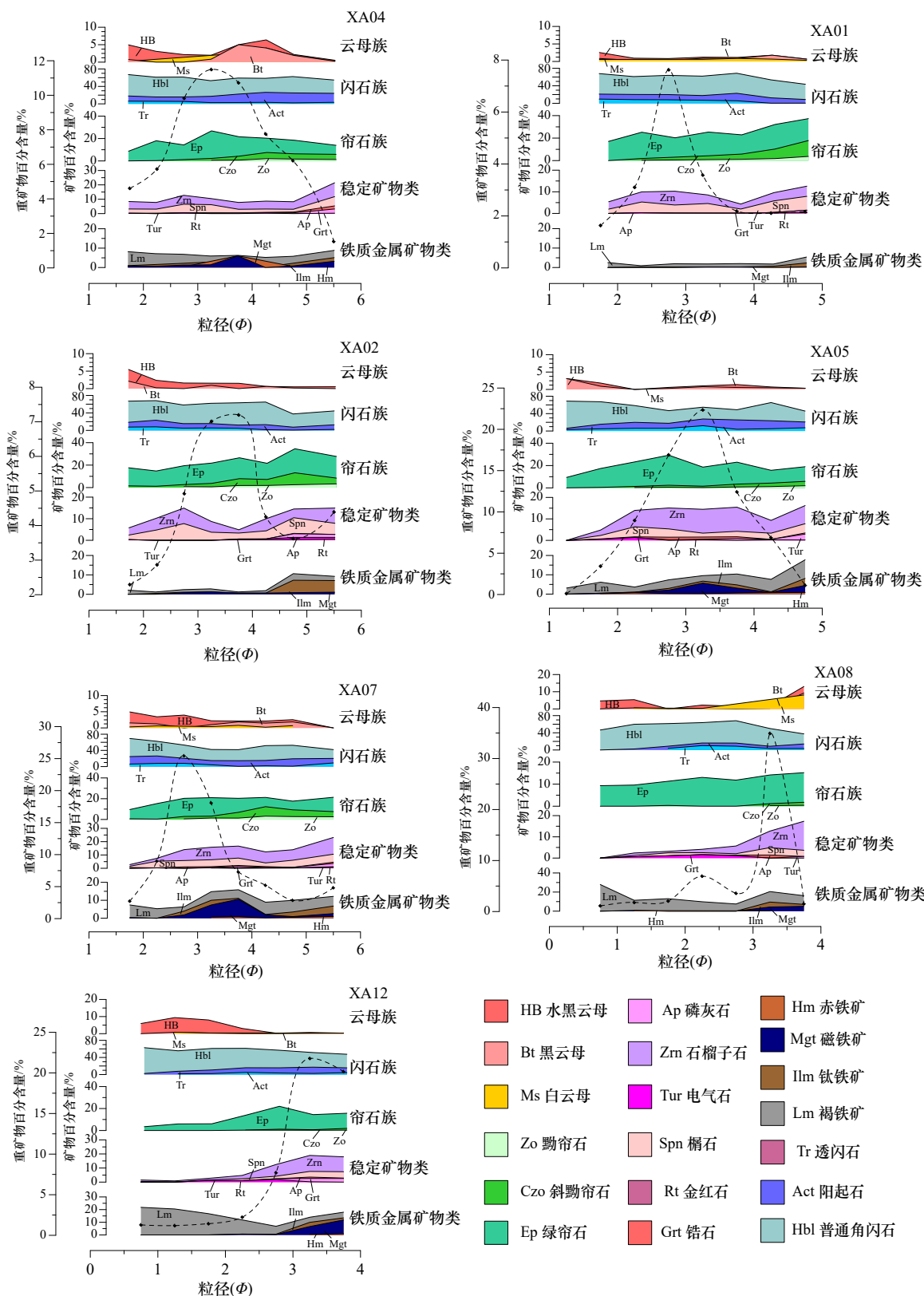


图 2 辛安河重矿物在不同粒级中的变化与重矿物含量分布曲线
 Fig. 2 Distribution curves of heavy mineral content with different grain classes of the Xin'an River

河流相同,都是以轻矿物为主,重矿物含量较低。重矿物主要以普通角闪石、绿帘石、阳起石和褐铁矿为主;轻矿物主要以石英和长石为主。

辛安河虽是小河,但与其他大河一样,碎屑矿物种类都繁杂多样,变量多。主成分分析法中的因子分析能够在多个变量之间构建线性关系,从众多变量中

提取出具有代表性的因子。因此,运用因子分析可以突出辛安河河床、河口和海滩不同位置的主要碎屑矿物组合^[40]。由于研究区内因子种类多,交叉性强,因此采取更加合理的R型因子分析法^[41],对较常见的重矿物如:普通角闪石、透闪石、阳起石、绿帘石、黝帘石、黑云母、白云母、石榴子石、磷灰石、电气石、锆石、金红石、透辉石、自生碳酸盐、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿进行计算,其主因子荷载矩阵见表6。

表6 碎屑矿物因子荷载矩阵
Table 6 Clastics mineral factor load matrix

碎屑矿物	因子1	因子2	因子3
普通角闪石	-0.25	-0.92	-0.04
透闪石	0.09	-0.07	-0.70
阳起石	0.41	0.79	-0.17
绿帘石	0.63	-0.19	-0.58
黝帘石	0.80	0.28	-0.34
黑云母	0.41	0.81	-0.06
白云母	-0.02	-0.16	-0.05
石榴子石	-0.08	0.90	0.15
磷灰石	-0.64	0.38	-0.28
电气石	-0.80	-0.33	0.23
锆石	-0.32	0.00	0.88
金红石	0.56	0.20	0.11
透辉石	0.76	0.45	-0.11
自生碳酸盐	-0.05	-0.16	0.02
钛铁矿	0.01	0.04	0.81
磁铁矿	-0.36	-0.11	0.80
褐铁矿	-0.86	-0.19	0.31
赤铁矿	0.04	-0.02	0.01
特征值	6.78	3.65	2.62
累计贡献	0.25	0.47	0.66

因子1解释了碎屑矿物25%的信息,主要荷载矿物是绿帘石、黝帘石和透辉石,属于帘石类矿物和辉石类矿物,该类矿物主要产自花岗闪长岩和交代变质岩中。说明因子1反映了辛安河源岩对其碎屑矿物组分的影响。因子2解释了碎屑矿物22%的信息,主要荷载矿物为阳起石、石榴子石、黑云母,主要产自酸性、中酸性岩浆岩和变质岩中。根据辛安河的地质背景,元古代区域变质岩主要分布于辛安河中游部

分,花岗岩则位于上游部分。说明因子2反映了物质来源和水动力对辛安河碎屑矿物组分的影响。因子3解释了碎屑矿物19%的信息,主要荷载矿物为锆石、钛铁矿、磁铁矿,矿物抗侵蚀和风化能力较强,自身较为稳定。因子3反映了辛安河水动力分选对碎屑矿物组分的影响。

从辛安河碎屑矿物分布和组合特征来看,碎屑矿物组合变化主要受到水动力分选和源岩的影响,但在不同沉积环境下受到影响的程度不同,这与大河或者海洋表层的沉积物矿物组合变化受到的影响因素相一致^[7,23]。

4.1.2 矿物特征指数分析

矿物成熟度是指以碎屑岩中最稳定组分的相对含量来标志其成分的成熟程度。石英与长石+岩屑的比值被认为是碎屑矿物成熟度的一个重要标志^[42]。

经过计算发现辛安河流域矿物成熟度在0.79~2.22之间波动,平均值为1.14,总体而言成熟度不高,河床平均成熟度为1.40,河口的平均成熟度为1.10,海滩的平均成熟度为0.93。一般情况下,随着河流搬运距离越远,水动力对碎屑矿物分选越好,矿物成熟度越高。而对于辛安河这类入海小河,河流多发源于丘陵,流程短。不论是洪水期还是枯水期,水动力对矿物成熟度的影响都不高。辛安河从河床到海滩碎屑矿物粒径逐渐趋于细砂部分,而河流中的长石主要富集在细砂粒级,因此出现了海滩的矿物成熟度反而最低的情况,这说明辛安河的矿物成熟度受到粒度的影响要大于水动力的分选。

稳定矿物(SM)包括磷灰石、楣石、锆石、金红石、电气石、石榴子石等化学性质稳定、抗磨蚀能力强、不易被风化的矿物;不稳定矿物(UM)包括闪石族、云母族和透辉石等化学性质不稳定、易发生蚀变的矿物^[43]。UM/SM能够反映出辛安河流域的矿物分布。一般而言,随着河流向下游搬运,稳定组分留存较多,不稳定组分变少。也有学者认为河流中不稳定组分在经历流水搬运时并没有显著减少^[44],即流水对砂粒的矿物组分、大小、磨圆都没有明显的改造作用。通过辛安河UM/SM的分析我们可以看出,辛安河作为入海小河,虽然搬运距离短,但稳定组分和不稳定组分仍然有明显的变化,河床和河口位置的UM/SM比值分别为5.56和4.66,而海滩位置的UM/SM比值为11.84,其海滩不稳定组分相较于河口明显增多。这是因为在广粒级范围内,辛安河稳定矿物与不稳定矿物的粒度变化与重矿物含量呈现出一定的相关性,中上游碎屑重矿物多在中砂粒级沉积物中,海滩重矿物多在细砂粒级沉积物中。由图2可以看出,海滩稳定

矿物在中砂粒级部分明显减少, 而不稳定矿物变化较小, 因此导致海滩位置出现 UM/SM 比值增高现象。

辛安河作为山东半岛入海小河的典型河流, 矿物特征指数如矿物成熟度和 UM/SM, 会出现与一般理论不同甚至相反的现象, 其主要原因是河流短小, 矿物指数变化并不与风化程度完全对应, 而主要与粒度和水动力分选有关。

4.2 辛安河碎屑矿物的分布和物源意义

4.2.1 重矿物在不同沉积环境的沉积分布

根据闪石族、帘石族、云母族、稳定矿物类和铁质金属类重矿物含量, 计算获得自河床至海滩重矿物族类变化(图3), 并结合相关系数分析做出重矿物族类相关系数图(图4)。

通过图3我们发现, 闪石族的含量在 50%~65% 之间波动, 在所有族类中占比最高, 普通角闪石在闪石族含量最高。河床到海滩闪石族单矿物变化明显但闪石族含量的波动较小。帘石族在河床和河口处占比为 11%~32%。到海滩占比明显下降, 主要是因为黝帘石和斜黝帘石的减少。稳定矿物含量从河床到海滩逐渐减少与楣石的减少密不可分。铁质金属矿物从河床到海滩有明显增多的趋势。其中, 褐铁矿变化最为明显, 从河床的 2% 升高至海滩的 13%。云母族中水黑云母从河床到海滩的增多带动云母族含量上升。

通过图4我们可以看到, 云母族和帘石族、稳定

矿物和铁质金属矿物呈现出明显的负相关关系, 相关系数分别为-0.81 和-0.80。铁质金属矿物和帘石族也有较强的负相关关系, 相关系数达到了-0.74。稳定矿物和帘石族、铁质金属矿物和云母族则有轻微的正相关关系。

结合图3和图4可以得出, 辛安河矿物种类虽然少, 但是单矿物从河床到海滩依然有明显的增减变化, 这种现象主要与碎屑矿物粒度由粗变细的变化有关。高含量的闪石族从河床到海滩变化较小, 输出稳定。百分含量小的矿物族类有显著增减变化并且族类之间呈现出一定的相关关系。

4.2.2 重矿物物源指示意义

河流流经区所在的源岩类型和环境差异影响了流域内碎屑矿物种类和含量。不同气候环境和地质背景下, 碎屑矿物的组合特征、形态特征及矿物地球化学含量都会存在一定差异^[45]。辛安河作为区域小河流, 其流域内气候条件一致, 母岩风化程度无明显差异, 决定碎屑矿物种类组成的主要因素为源区母岩类型。其中, 重矿物对母岩类型具有良好的继承性, 因此它作为一种物源敏感性因素被广泛应用于反映源区母岩性质和类型上^[46]。辛安河流域中广粒级重矿物组合为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿, 其中角闪石和绿帘石作为主要造岩重矿物, 在我国中高纬度河流沉积物中分布广泛^[47]; 褐铁矿是一种常见的次生矿物, 火成岩和变质岩中的铁镁矿物风化后均能形成褐

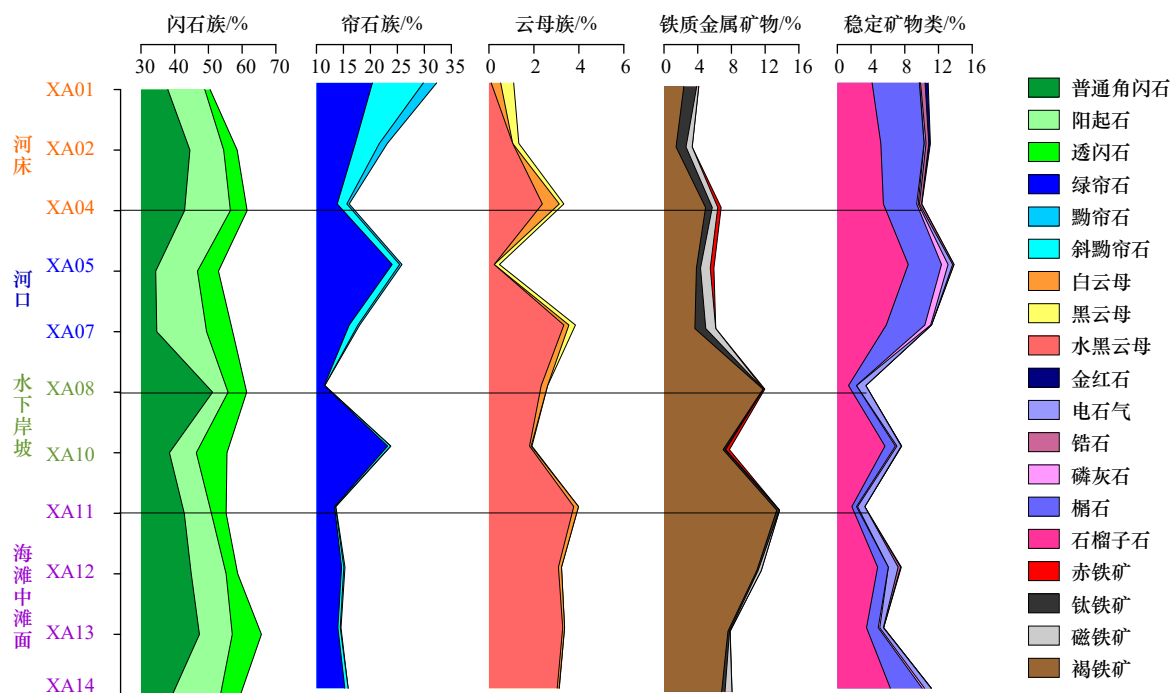


图3 辛安河重矿物族类在不同取样点的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of heavy mineral groups in the Xin'an River at different sampling points

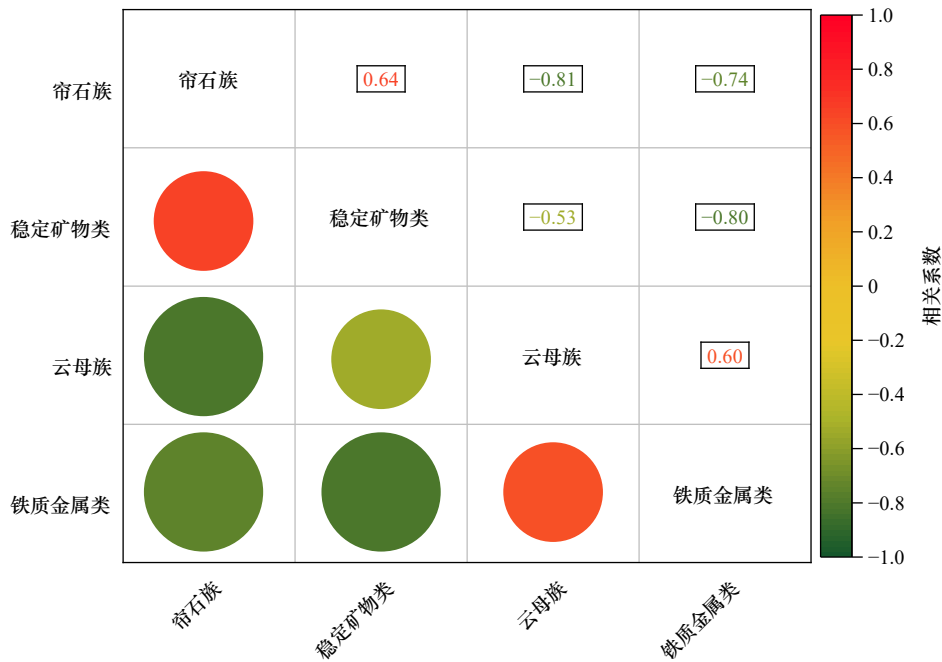


图4 辛安河重矿物族类相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of heavy mineral groups in the Xin'an River

铁矿^[48]。

辛安河不同沉积位置中普通角闪石含量均在40%左右,其流域中上游主要分布岩浆岩和区域变质岩,普通角闪石是变质岩和岩浆岩的主要造岩矿物之一,故而在重矿物中含量最高。河床样品中帘石族含量(23.8%)相较于河口(21.9%)和海滩(15.8%)样品较高,原因在于流域所在母岩类型为元古界荆山群片岩、片麻岩、变粒岩、透灰岩和大理岩等变质岩区,出露面积较大^[49],绿帘石、黝帘石和斜黝帘石作为蚀变矿物在变质岩中含量较高。辛安河中石榴子石含量也比较高,平均占比达到5.8%,并在各样品粒级中广泛存在,是辛安河指示变质源岩的特征矿物。辛安河上游主要为黑云母花岗岩和安山岩为主的岩浆岩,河床上含有相对较高含量的榴石,占比为4.6%,榴石是火成岩中分布较广的副矿物,特别在酸性岩、碱性岩比如花岗岩、闪长岩、正长岩、粗面岩、安山岩中,与锆石、磷灰石和磁铁矿共生^[50]。河床和河口样品中碎屑重矿物组成及含量特征比较相似,两者与海滩存在一定差异,原因在于海滩的是在海浪和潮汐等多种动力下沉积的,存在扰动和混层。另外,海滩样品中含有相对较高的褐铁矿(9.6%),其中部分粗颗粒褐铁矿呈皮壳状,是受海水电化学作用下Fe元素以氢氧化物的形式沉淀下来的^[51],而非水动力搬运而来,故而这部分褐铁矿是次生或者自生的。

4.3 山东半岛入海河流的矿物特征

山东半岛各河流域地质背景虽然相近,但也有差

异。乳山河主要受到白垩系火山岩和元古代胶南群变质岩的影响,作为变质岩和岩浆岩的主要造岩矿物之一的普通角闪石,在该河流中含量最高^[52]。大清河主要流经区域为第四系的松散沉积物,因此河流当中云母族含量较高,上游到入海云母族有增多的趋势^[52]。五龙河上游主要为白垩系火山岩和荆山群变质岩,因此河床位置帘石族的含量比其他河流略高,而闪石族含量较少^[52]。虽然地质条件略有差异,但同作为山东半岛的入海小河,碎屑矿物变化存在共性。因此,我们选取辛安河及大清河、乳山河和五龙河的不同粒级碎屑重矿物,对比分析粒度控制之下碎屑重矿物入海前后特征。根据闪石族、帘石族、稳定矿物、铁质金属矿物和云母族矿物制成的三角图(图5)可以看出,山东半岛的入海小河中,闪石族和帘石族在碎屑重矿物中含量最高,不论是河床还是河口其含量都在65%以上,其中,闪石族是碎屑重矿物中含量最多的族类。根据辛安河的广粒级和 Φ 为3~4对比数据可以看出,云母族类不论是河床还是海滩位置的碎屑重矿物中不同粒级差别明显, Φ 为3~4粒级云母族百分含量远小于广粒级。而稳定矿物和铁质金属矿物在河床位置不同粒级内含量差别不大,但是在海滩位置 Φ 为3~4和广粒级中百分含量有明显变化。 Φ 为3~4粒级中铁质金属矿物和稳定矿物百分含量明显增多。

广粒级的辛安河河床到海滩碎屑重矿物组合并无明显差别,三角图内两者几乎重叠。但 Φ 为3~

4 粒级从河床到海滩的碎屑重矿物组合有明显变化。铁质金属矿物和稳定矿物的百分含量增多是造成差异的根本原因。同样的大沽河、五龙河和乳山河在该粒级由于铁质金属矿物和稳定矿物减少, 导致河床到入海后的碎屑重矿物组合存在差异。

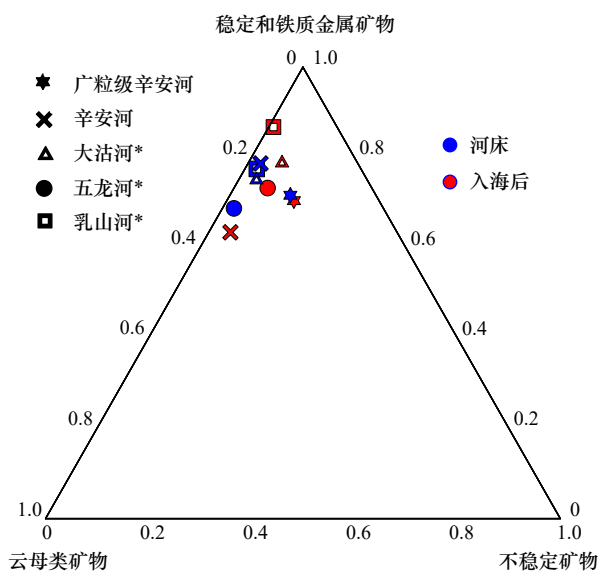


图5 山东半岛主要河流碎屑重矿物组合在不同沉积环境的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of detrital heavy mineral assemblages in main rivers from the Shandong Peninsula to sea in different sedimentary environments

不稳定矿物包括闪石族和帘石族; 云母族、稳定矿物和铁质金属矿物与文中分类相同; 未标注广粒级的粒级 ϕ 为 3~4; *数据引自

参考文献 [52]

Unstable minerals include amphiboles and epidotes; mica, stabilized and ferrous metal minerals are classified as in this paper; unmarked wide grain size ϕ with 3 to 4; *data cited from reference [52]

山东半岛入海小河从河床到海滩在广粒级范围内虽然单矿物百分含量会发生变化, 但是重矿物族类以及重矿物组合并不会有明显波动。而在传统 ϕ 为 3~4 粒级范围内, 河床到海滩过程中, 含量较少的云母族和稳定矿物以及铁质金属矿物的百分含量则会发生明显增减。即山东半岛入海小河的碎屑矿物组合变化受控于矿物粒级变化, 单一粒级碎屑矿物在受到水动力分选后, 百分含量越小的矿物种类变化越明显, 而广粒级范围内矿物组合相对稳定。

4.4 山东半岛物质与黄河物质的端元辨别

黄河于山东半岛西北处流入渤海, 其碎屑物质多数来源于黄土高原, 相较于其他大河粒度较细, 以粉砂为主, 易于随流水搬运^[53], 因此不可避免的会与来自山东半岛的碎屑物质在周围海域发生混合。通过对比黄河物质和山东半岛入海河流碎屑矿物, 有利于

为山东半岛周围海域碎屑沉积物的物源探究提供辨识依据。

山东半岛河流多发源于低山丘陵区, 搬运距离短, 与黄河物质相比沉积物较粗, 磨圆度差。山东半岛入海河流的典型重矿物为闪石族类矿物, 其中普通角闪石是山东半岛岩浆岩和变质岩地质背景下的主要造岩矿物。除此之外, 还有绿帘石、楣石、石榴子石和锆石等受到源岩影响显著的矿物组分。同时, 黄河与山东半岛入海河流从河床到入海后的碎屑重矿物组分也存在着明显的差异。根据山东半岛小河和黄河 ϕ 为 3~4 粒级重矿物含量作两者在入海前后的对比图(图6)可以看出, 山东半岛小河流碎屑重矿物组合变化较小, 不管是在河床还是在入海以后, 闪石族与帘石族占比都位于 60%~80% 之间, 是重矿物的主要成分, 而黄河重矿物组合变化明显, 其闪石族和帘石族矿物仅在下游位置有较高的含量^[8, 53]。其次, 山东半岛入海小河的矿物成熟度等数值都明显偏低, 而黄河的矿物成熟度不论是在河床还是入海后都明显高于山东半岛小河。此外, 黄河碎屑矿物中含有较高含量的碳酸盐类矿物^[4, 54], 而半岛小河中碳酸盐类矿物含量很低。

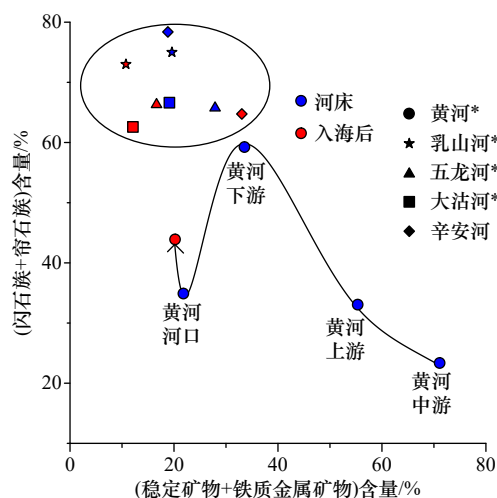


图6 山东半岛入海小河和黄河重矿物组合入海前后对比
Fig. 6 Comparison of heavy mineral assemblages of small rivers on the Shandong Peninsula and the Huanghe River before and after entering the sea

*黄河数据引自参考文献 [7, 53]; 其他河流数据引自参考文献 [52]

*The Huanghe River data are cited from references [7, 53]; other river data are cited from reference [52]

整体而言, 黄河经山东入海, 矿物种类要远高于山东半岛入海小河, 主要矿物虽然含量较低, 但变化明显。源岩对山东半岛河流的影响更为明显, 而沉积环境对黄河的影响要高于山东半岛河流。再者, 黄河其流经黄土高原, 携带大量云母类矿物入海, 与山东

半岛小河较少的云母类矿物含量形成明显对比。

5 结论

(1) 辛安河流域沉积物以中砂和细砂为主,碎屑矿物相对简单,鉴定出轻矿物8种,以石英、斜长石、钾长石为主;重矿物含量在1.47%~8.19%之间,鉴定出重矿物27种,主要为普通角闪石、绿帘石和褐铁矿,常见石榴子石、榍石、锆石、钛铁矿、磁铁矿等稳定矿物随沉积物粒度变细(极细砂至粗粉砂)呈显著的富集趋势。

(2) 河床、河口和海滩不同地貌位置主要碎屑矿物种类和基础含量主要受控于流域基岩(中酸性深成

侵入岩和区域变质岩);矿物含量的变幅则受水动力影响下的粒度控制和沉积环境影响,河床与河口相对富集帘石族和稳定重矿物类,而海滩相对富集普通角闪石和褐铁矿。整体而言,闪石族矿物广泛存在且含量变化较小,其矿物标型可作为源汇辨识的基石。

(3) 山东半岛入海短河虽地质背景、沉积环境不尽相同,但河流入海前后的碎屑重矿物近乎同源,矿物组合变化主要受控于区域岩性和碎屑矿物粒度变化,不同河流具有差异性特征矿物,沉积环境对矿物组分影响并不明显。高含量的闪石族和较低含量的云母族和碳酸盐类矿物是山东半岛小河在其周围海域区别于黄河物质的主要判别指征。

参考文献:

- [1] Garzanti E, Andò S, France-Lanord C, et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments: 1. Bedload sand (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 299(3/4): 368–381.
- [2] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 138–151.
- [3] 方建勇, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡表层沉积物的粒度和碎屑矿物分布特征[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 91–99.
Fang Jianyong, Chen Jian, Wang Aijun, et al. The distribution characteristics of grain size and mineral of surface sediment in the Taiwan Strait[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5): 91–99.
- [4] 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 & Quaternary Geology*, 1990, 10(3): 23–34.
- [5] 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.
- [6] 杨守业, 印萍. 自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 1–10.
Yang Shouye, Yin Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and human activities[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 1–10.
- [7] 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(3): 17–21.
Lin Xiaotong, Li Weiran, Shi Zhenbo. Characteristics of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River Provenance, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 17–21.
- [8] 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 & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 73–85.
- [9] Jin Bingfu, Wang Mengyao, Yue Wei, et al. Heavy mineral variability in the Huanghe River sediments as determined by the multiple-window strategy[J]. *Minerals*, 2019, 9(85): 1–16.
- [10] 樊水淼, 金秉福, 王昕, 等. 云母在黄河河口段沉积物中的形状系数与等效沉积[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(5): 31–38.
Fan Shuimiao, Jin Bingfu, Wang Xin, et al. Mica shape factor and its equivalent sedimentation in the Sediments of the Yellow River Estuary[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(5): 31–38.
- [11] 金秉福, 党丽丽, 孔庆祥, 等. 黄河和长江沉积角闪石亲石元素地球化学特征对比与物源辨识[J]. *沉积学报*, 2022, 40(1): 149–165.
Jin Bingfu, Dang Lili, Kong Qingxiang, et al. Comparison of geochemical characteristics of Lithophile Elements of Amphibole: identification of estuarine sediment provenance, Huanghe River and Changjiang River[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(1): 149–165.
- [12] 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.
- [13] 窦衍光, 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, 31.
Dou Yanguang, Wang Kunshan, Wang Guoqing, et al. Research of detrital minerals in the sediment of sub-aqueous Yangtze Delta[J]. *Marine Science*, 2007, 31(4): 22–26, 31.
- [14] 潘大东, 王张华, 陈艇, 等. 长江口表层沉积物矿物磁性分区特征及其沉积环境指示意义[J]. *海洋学报*, 2015, 37(5): 101–111.
Pan Dadong, Wang Zhanghua, Chen Ting, et al. Mineral magnetic characteristics of surficial sediments and their implications for identi-

- fyng sedimentary environments at the Changjiang River Mouth[J]. *Marine Science*, 2015, 37(5): 101–111.
- [15] Yue Wei, Jin Bingfu, Zhao Baocheng. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: implication for provenance evolution of the Yangtze Delta[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 364: 42–52.
- [16] Cascalho J, Fradique C. Chapter 3 The sources and hydraulic sorting of heavy minerals on the Northern Portuguese continental margin[J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 75–110.
- [17] Pang Hongli, Pan Baotian, Garzanti E, et al. Mineralogy and geochemistry of modern Yellow River sediments: Implications for weathering and provenance[J]. *Chemical Geology*, 2018, 488: 76–86.
- [18] Garzanti E, Andò S. Heavy minerals for junior woodchucks[J]. *Minerals*, 2019, 9(148): 2–25.
- [19] Morton A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1991, 57(1): 31–45.
- [20] Weckwerth P, Chabowski M. Heavy minerals as a tool to reconstruct river activity during the Weichselian glaciation (Toruń Basin, Poland)[J]. *Geologos*, 2013, 19(1/2): 25–46.
- [21] Eker C S, Sipahi F, Gümüş M K. Tracing provenance and chemical weathering changes in Ankara Stream sediments, central Turkey: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic evidence[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 138: 367–382.
- [22] 王利波, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积物碎屑矿物组合分布及其对物源和沉积物扩散的指示意义[J]. *海洋学报*, 2014, 36(2): 66–74.
- Wang Libo, Li Jun, Zhao Jingtao, et al. Detrital mineral assemblages and distributions as indicators of provenance and dispersal pattern in surface sediments from Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(2): 66–74.
- [23] 邓凯, 杨守业, 王中波, 等. 台湾山溪性小河流碎屑重矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 531–542.
- Deng Kai, Yang Shouye, Wang Zhongbo, et al. Detrital heavy mineral assemblages in the river sediments from Taiwan and its implications for sediment provenance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 531–542.
- [24] Li Guangxue, Wei Helong, Yue Shuhong, et al. Sedimentation in the Yellow River Delta, part II: suspended sediment dispersal and deposition on the subaqueous delta[J]. *Marine Geology*, 1998, 149(1/4): 113–131.
- [25] Liu Jian, Saito Y, Wang Hong, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinof orm off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3/4): 165–187.
- [26] 窦衍光, 李军, 杨守业. 山东半岛东部海域表层沉积物元素组成及物源指示意义[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 109–119.
- Dou Yanguang, Li Jun, Yang Shouye. Element compositions and provenance implication of surface sediments in offshore areas of the eastern Shandong Peninsula in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 109–119.
- [27] Qin Yachao, Xue Chunting, Jiang Xuejun. Tidal current-dominated depositional environments in the central-northern Yellow Sea as revealed by heavy-mineral and grain-size dispersals[J]. *Marine Geology*, 2018, 398: 59–72.
- [28] 张维武. 山东省辛安河上游砂金矿床成矿地质特征[J]. *黄金*, 1989, 10(12): 7–12.
- Zhang Weiwu. The metallogenic geological characteristics of placer gold deposit in upper reaches of Xin'an River, Shandong Province[J]. *Gold*, 1989, 10(12): 7–12.
- [29] 金秉福, 王孟瑶, 王昆山, 等. 长江口和黄东海沉积物单矿物分选的常用方法和流程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 163–174.
- Jin Bingfu, Wang Mengyao, Wang Kunshan, et al. Methods of single mineral separation for sediments of the Changjiang Estuary, the Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 163–174.
- [30] 王孟瑶, 金秉福, 岳伟. 长江口表层沉积物重矿物在不同粒级中的分布与研究意义[J]. *海洋学报*, 2019, 41(11): 89–100.
- Wang Mengyao, Jin Bingfu, Yue Wei. Patterns of heavy mineral combination in different grain-size categories and their sedimentary significance: a case study for surficial sediments in the Changjiang River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(11): 89–100.
- [31] Mange M A, Maurer H F W. *Heavy Minerals in Colour*[M]. London: Chapman & Hall, 1992.
- [32] 杨立建, 马小川, 贾建军, 等. 近百年来黄河改道及输沙量变化对山东半岛泥质楔沉积物粒度特征的影响[J]. *海洋学报*, 2020, 42(1): 78–89.
- Yang Lijian, Ma Xiaochuan, Jia Jianjun, et al. Impacts of channel shifts and interannual sediment load reducing of the Yellow River on the grain size characteristics of sediments in the Shandong mud wedge over the past 100 years[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(1): 78–89.
- [33] 刘宝珺. *沉积岩石学*[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- Liu Baojun. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980.
- [34] Morton A, Hallsworth C, Strogen D. Evolution of provenance in the NE Atlantic rift: the Early-Middle Jurassic succession in the Heidrun Field, Halten Terrace, offshore Mid-Norway[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1100–1117.
- [35] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 277(3/4): 422–432.
- [36] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G, et al. Petrology of the Namib Sand Sea: long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 112(3/4): 173–189.
- [37] Wang Mengyao, Jin Bingfu, Gao Jianhua, et al. Identification of sediment provenance in the South Yellow Sea using detrital amphibole geochemistry[J]. *Marine Geology*, 2022, 450: 106857.

- [38] 张凯棣, 李安春, 董江, 等. 东海表层沉积物碎屑矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. 沉积学报, 2016, 34(5): 902–911.
Zhang Kaidi, Li Anchun, Dong Jiang, et al. Detrital mineral distributions in surface sediments of the East China Sea: implications for sediment provenance and sedimentary environment[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 902–911.
- [39] 王孔海. 山东烟台地区晚太古代胶东群变质岩系原岩恢复及其地质意义[C]//中国地质科学院沈阳地质矿产研究所文集. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1983: 14–36.
Wang Konghai. Primary rock restoration for metamorphic rocks of late Archean Jiaodong Group and its significance in Yantai, Shandong Province[C]//Bull Shenyang institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1983: 14–36.
- [40] 李学杰, 汪品先, 廖志良, 等. 南海西部表层沉积物碎屑矿物分布特征及其物源[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 123–130.
Li Xuejie, Wang Pinxian, Liao Zhiliang, et al. Distribution of clastic minerals of surface sediments in the western South China Sea and their provenance[J]. *Geology in China*, 2008, 35(1): 123–130.
- [41] 杨东宁, 袁东星. 主成分分析法用于厦门西港和香港维多利亚港沉积物样品分类研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(3): 61–66.
Yang Dongning, Yuan Dongxing. Application of principal component analysis to sediment sample classification[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(3): 61–66.
- [42] Cojan I, Renard M. *Sedimentology*[M]. Netherlands: CRC Press, 2020.
- [43] 刘炳辰, 金秉福, 王萌, 等. 内蒙古五岔沟地区洮儿河流域重矿物特征分析[J]. 世界地质, 2013, 32(1): 69–76.
Liu Bingchen, Jin Bingfu, Wang Meng, et al. Analysis of the characteristics of heavy minerals in Taoer River area, Wuchagou region in Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 2013, 32(1): 69–76.
- [44] 胡修棉. 物源分析的一个误区: 砂粒在河流搬运过程中的变化[J]. 古地理学报, 2017, 19(1): 175–184.
Hu Xiumian. A misunderstanding in provenance analysis: sand changes of mineral, roundness, and size in flowing-water transportation[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(1): 175–184.
- [45] 石勇, 高建华, 刘强, 等. 陆架环流作用下的北黄海中北部细颗粒物物质运输[J]. 海洋学报, 2019, 41(4): 53–63.
Shi Yong, Gao Jianhua, Liu Qiang, et al. Fine sediment transport in north-central of Yellow Sea: the role of continental shelf circulation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(4): 53–63.
- [46] 林旭, 赵希涛, 吴中海, 等. 渤海湾边缘主要河流钾长石物源示踪指标研究[J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 10–18.
Lin Xu, Zhao Xitao, Wu Zhonghai, et al. Source tracing elements of K-feldspars of main rivers around Bohai Bay Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(6): 10–18.
- [47] Jin Bingfu, Wang Mengyao, Yue Wei, et al. Comparative analysis of heavy mineral characteristics of sediments from the Huanghe River and the Changjiang River based on the multiple-window grain size strategy[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 216: 104326.
- [48] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
Chang Lihua, Chen Manyun, Jin Wei, et al. *Manual of Transparent Mineral Thin Section Identification*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [49] 刘雪亚, 王荃. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Liu Xueya, Wang Quan. *Geological Atlas of China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [50] 赵珊茸. 结晶学及矿物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
Zhao Shanrong. *Crystallography and Mineralogy*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [51] 金秉福, 张云吉, 宋健. 长江三角洲第一硬土层中微结核的矿物化学特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3): 9–15.
Jin Bingfu, Zhang Yunji, Song Jian. Characteristics of mineral chemistry and formation of the micro-nodules in the first stiff clay layer in the Yangtze River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(3): 9–15.
- [52] 宁泽, 韩宗珠, 林学辉, 等. 山东半岛南部近岸海域碎屑矿物对中小河流的物源响应[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 57–68.
Ning Ze, Han Zongzhu, Lin Xuehui, et al. Provenance response of detrital minerals from medium and small rivers in offshore Southern Shandong Peninsula[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(4): 57–68.
- [53] 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 & Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 1–8.
- [54] 王艳君, 金秉福. 黄河河口段与海河河口段沉积物碳酸盐对比分析[J]. 海洋科学, 2017, 41(7): 94–104.
Wang Yanjun, Jin Bingfu. Comparative analysis of carbonates in sediments of the Yellow River and the Haihe River estuaries[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(7): 94–104.

Component changes and control factors of detrital minerals in riverbed, estuary and beach of short source rivers: taking the Xin'an River in Shandong Peninsula as an example

Yu Jian¹, Jin Bingfu¹, Wang Mengyao², Wang Xin¹

(1. Institute of Coast/School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 246025, China; 2. Institute of Estuary and Coastal Research/State Key Laboratory for Estuary and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Most of the small rivers in the Shandong Peninsula have clear sediment sources and relatively small mineral deposition differentiation, and their study can provide regional similarities for the analysis of the sources of large rivers into the sea, as well as the characteristics of the material sources in the Shandong Peninsula for the deposition of the Yellow Sea shelf and Bohai Sea shelf. In this paper, the distribution patterns of detrital minerals in surface sediment samples taken from riverbeds, estuaries and beaches were analysed at multiple grain levels, taking the Xin'an River, a small short-source river in the northeastern part of the Shandong Peninsula, as an example. The study shows that the Xin'an River basin and beach sediments are mostly medium and fine sands, with moderate heavy mineral content in the whole sample, ranging from 1.47% to 8.19%. Twenty-seven heavy minerals and eight light minerals occur, with the main heavy minerals hornblende (41.7%), chlorite (16.7%), actinolite (10.6%) and limonite (6.7%) and the main light minerals quartz (49.0%), plagioclase (26.5%) and potassium feldspar (20.7%), which are much more abundant than the other detrital minerals in the riverbed, estuary and beach, and the mineral assemblage remains constant, with less significant variation in relative content between them, while there is a significant non-linear correlation between non-dominant mineral species and clastic grain size. Mineral species and content in the Xin'an River are controlled by the regional lithological sources, i.e. acidic and moderately acidic intrusive rocks and regional metamorphic rocks, and the relatively stable output of amphibole group minerals across the different features of the Xin'an River is responsible for their homogeneity. The short source rivers of the Shandong Peninsula are derived from similar geological features and rock types, although the types and content of detrital minerals vary. The main controlling factors for mineral composition variation are regional sources and particle size sorting, followed by sedimentary environmental differences. In contrast, the high content of mica group and carbonate minerals in a specific grain size and the low content of amphibole group minerals are the aspects that distinguish the Huanghe River from the river source materials in the northern and southern coastal waters of the Shandong Peninsula.

Key words: detrital minerals; multiple-window grain size strategy; mineral distribution; sedimentary environment; the Xin'an River; Shandong Peninsula