



莱州湾南岸入海河流重矿物特征及其物源意义

王庆同, 王海根, 燕同祥, 毛方松, 陈 梁, 王孟瑶

Characteristics of heavy minerals in rivers entering the sea from the south bank of Laizhou Bay and their provenance significance

WANG Qingtong, WANG Haigen, YAN Tongxiang, MAO Fangsong, CHEN Liang, and WANG Mengyao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024051001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东北沙地重矿物组成及其对物源的指示

Heavy mineral compositions in the northeast sandy lands and the provenance analysis

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 181-190

基于人工和TIMA自动化方法的松花江水系重矿物组成：对源-汇物源示踪的指示

Heavy mineral composition of the Songhua River system identified by manual and TIMA automatic methods and implications for provenance tracing

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 170-183

两种重矿物分析方法在青藏高原东南缘伊洛瓦底江沉积物物源分析中的应用

Application of two heavy mineral analysis methods in the provenance study of Irrawaddy River sediments on the southeastern margin of Tibetan Plateau

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(4): 181-193

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67-81

莱州湾晚第四纪以来沉积物元素地球化学特征及来源

Geochemical characteristics and their geological implication in sediments from Laizhou Bay since late Quaternary

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 100-110

长江口和东海内陆架黏土矿物与黏土粒级碎屑矿物构成及物源指示意义

Clay minerals and detrital minerals in clay fraction from the Changjiang River estuary and inner continental shelf of the East China Sea and their provenance indication

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(5): 119-128



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王庆同, 王海根, 燕同祥, 等. 莱州湾南岸入海河流重矿物特征及其物源意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 130-139.

WANG Qingtong, WANG Haigen, YAN Tongxiang, et al. Characteristics of heavy minerals in rivers entering the sea from the south bank of Laizhou Bay and their provenance significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 130-139.

莱州湾南岸入海河流重矿物特征及其物源意义

王庆同^{1,2}, 王海根^{1,2}, 燕同祥³, 毛方松^{1,2}, 陈梁^{1,2}, 王孟瑶⁴

1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000

2. 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000

3. 寿光市海洋渔业发展中心, 潍坊 262700

4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

摘要:在关注大河物源辨别和示踪的同时,“短源河流-瞬时大通量-快速物质转换”的源-汇体系值得重视。莱州湾南岸入海的中小河流沉积物来源明确,母岩、气候及水动力条件等复杂程度低,易于进行有限边界条件下的物质端元特征分析。本文对莱州湾南岸的小清河、弥河、白浪河、虞河、堤河、潍河、胶莱河等中小河流进行碎屑重矿物特征差异研究,判别分析不同河源物质来源。结果显示,莱州湾南岸中小河流沉积物中共鉴定出31种重矿物,以角闪石和绿帘石为主。重矿物含量较高(>5.5%)的小清河和潍河沉积物中褐铁矿含量高,而重矿物含量低(<1.5%)的其他河流沉积物中黑云母含量较高。石榴石-磷灰石组成的特征矿物组合以及标型矿物(硅灰石、矽线石、刚玉、十字石和红柱石等)反映物源区出露的酸性花岗岩、区域变质岩以及接触变质岩等不同岩性,它们是产生不同河流矿物特征组合差异的主控因素。另外,双标图和热力图显示来自黄河与莱州湾南部近岸海域重矿物特征差异较为显著。莱州湾南岸近海海区沉积物主要来自附近河流物质,而黄河来源物质的影响程度自西向东减弱。因此,对短源河流碎屑重矿物特征分析,可为山东半岛近海碎屑沉积物的物源辨识探究提供依据,对深入认识大陆边缘物质供应过程具有重要意义。

关键词:物源判别; 重矿物组合; 近源; 中小河流; 莱州湾

中图分类号: P736.3

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024051001

Characteristics of heavy minerals in rivers entering the sea from the south bank of Laizhou Bay and their provenance significance

WANG Qingtong^{1,2}, WANG Haigen^{1,2}, YAN Tongxiang³, MAO Fangsong^{1,2}, CHEN Liang^{1,2}, WANG Mengyao⁴

1. Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China

2. Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China

3. Shouguang Marine Fishery Development Center, Weifang 262700, China

4. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

Abstract: While focusing on identifying and tracing the sources of large rivers, the source-sink system of "short-source river flow – instantaneous large flux – rapid material transformation" deserves attention. The sediment sources of small- and medium-sized rivers entering the sea on the south bank of Laizhou Bay have clear sources, and low complexity in parent rocks, climate, and hydrodynamic conditions, which makes it easy to analyze the characteristics of material end-members under limited boundary conditions. We studied the differences in the characteristics of detrital heavy minerals from small- and medium-sized rivers, including Xiaoqing River, Mihe River, Bailang River, Yuhe River, Dihe River, Weihe River, and Jiaolai River on the south bank of Laizhou Bay, by which the sources of different river sources were analyzed and discriminated. Results show that a total of 31 heavy minerals were identified, mainly amphibole and epidote. The sediments of Xiaoqing River and Weihe River had a high heavy mineral content (>5.5%) typical of abundant limonite, while those of other rivers had a low heavy mineral content (<1.5%) typical of ample biotite. The characteristic mineral assemblages composed of garnet-sphene-apatite and

资助项目: 中国地质调查局项目“渤海海峡南部海岸带 1:5 万综合地质调查 (DD20211578)”, “黄河口海岸带地质环境调查与监测 (DD20243124)”

作者简介: 王庆同(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海岸带综合地质调查与研究, E-mail: 44305591@qq.com

通讯作者: 王海根(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海岸带综合地质调查与研究, E-mail: 183649943@qq.com

王孟瑶(1992—), 女, 博士, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: wmy1327@126.com

收稿日期: 2024-05-10; 改回日期: 2024-07-17. 张现荣编辑

standard minerals (wollastonite, sillimanite, corundum, staurolite, and andalusite, and so on) reflect different rock types such as acidic granites, regional metamorphic rocks, and contact metamorphic rocks exposed in the source area, which are the main controlling factors for the differences in the characteristic assemblages of different riverine minerals. In addition, the biplot and heatmap show that the spectra of heavy minerals from Huanghe River and the southern coastal waters of Laizhou Bay are quite different. The sediments in the offshore area of the southern coast of Laizhou Bay mainly come from nearby river materials, and the impact of Huanghe River materials weakens from west to east. Therefore, analyzing the characteristics of heavy minerals in short-source river sediments can provide a basis for identifying the sources of detrital sediments in the Shandong Peninsula, which is of great significance for a deeper understanding of the material supply process at the continental margin.

Key words: Sedimentary provenance; heavy mineral combination; proximal source; small and medium-sized rivers; Laizhou Bay

渤海由于水深较浅, 沉积速率高, 其沉积物对于第四纪以来的气候及海平面变化相当敏感, 是研究晚第四纪地理环境演变以及海陆耦合作用的理想场所^[1]。陆架区的自然环境变化不仅深刻地影响着人类的生存方式和国民经济的发展, 而且也极易受到人类活动的影响, 深入研究其发展演化规律对海洋资源有序开发、环境可持续利用具有重要的指导意义^[2-3]。莱州湾作为中国入海河流最多、陆源物质供应量最大的海湾, 其沉积物主要来自黄河携带的入海泥沙的贡献^[4-5]。与黄河巨量的泥质粉砂相比, 注入莱州湾的小清河、弥河、白浪河、虞河、堤河、潍河、胶莱河等中小河流流程短、流域较小, 以粉砂质细砂入海为主, 虽年输沙量不大, 但累积时间长, 是构成莱州湾南岸河口、海岸和 6 m 以内滨海湿地粗粒底移质的主要来源^[6-7], 其中部分碎屑物质脱离近岸, 进入渤海深水陆架, 随黄海沿岸流到达苏北-苏中沿岸, 乃至长江浅滩以南的东海^[8-9]。其物源属性认识不仅可以用于沉积盆地、环境演变分析, 而且可对海岸整治、海滩养护提供科学依据。

随着物源研究的深入, 众多学者认识到短源河流具有快速物质转化、瞬时大通量、受人类活动和环境变化影响显著等特征^[10], 在海陆相互作用和地球环境演变过程中占据重要地位^[11-12], 故将视角从大江大河物源判别分析逐渐转移到中小河流上^[13-16]。莱州湾南岸入海河流所携带的碎屑物质主要来自于山东半岛西部低山丘陵区, 地质历史中长期处于风化剥蚀状态, 中生代酸性花岗质岩石大面积出露, 以及太古界胶东群、胶南群以及元古界褶皱基底出露地表所带来的风化产物^[17]。碎屑重矿物能较好地揭示沉积物的特征和物源属性, 其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有鲜明的指示作用, 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^[18-19]。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^[20]。

本研究对莱州湾南岸的小清河、弥河、白浪河、虞河、堤河、潍河、胶莱河等中小河流碎屑重矿物特征差异进行研究, 判别分析不同河流物质来源, 并区分其与黄河大河流域的物质供应差别。研究区沉积物大多来源明确, 矿物沉积分异相对较小, 对其研究为黄渤海陆架沉积提供山东半岛物质来源特征的翔实资料, 并对大河入海物源分析提供区域相似性的重要参考意义。

1 区域概况

1.1 气象和水文特征

研究区属暖温带半湿润季风型气候, 四季分明, 年均气温(1971—2015 年) 12.6 ℃, 年平均降水量(1981—2015 年) 477 mm, 降水量时空分布不均, 降水集中在 6—8 月。多年水面蒸发量为 1 200~1 500 mm。由于受大气环流和季风气候不稳定影响, 自然灾害发生较频繁^[21]。

研究区内大小河流多条, 其中自西向东主要河流为小清河、弥河、白浪河、虞河、潍河和胶莱河(表 1)。地表径流主要来自大气降水, 总量多年平均 $17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

莱州湾其潮汐为不规则半日潮, 潮差 2 m 左右。受渤海海流和季风影响, 莱州湾是一个多风暴潮海域, 特别是秋季, 当有连续几日偏南风突转偏北风时, 海水位剧增暴涨, 易形成风暴潮, 可向南岸陆地浸淹达十余千米。历史上多次波及地面高 7 m 地区, 形成严重的潮灾^[22]。

1.2 地质构造和岩性分布

研究区位于郯庐断裂带以东, 主要跨华北拗陷和胶北地块 2 个 II 级构造单元^[23]。华北拗陷广泛分布第四系, 厚度一般 180~270 m。胶北地块划分为胶北隆起和胶莱拗陷区两个 III 级构造单元, 胶

表 1 莱州湾南岸近海河流水系概况

Table 1 Hydrology in the nearshore rivers of the southern coast of Laizhou Bay

河流	源头	全长/km	流域面积/km ²
小清河	济南市趵突泉	237	10 276
弥河	临朐县沂山西麓	177	3 863
白浪河	昌乐县唐吾大鼓山	127	1 237
虞河	安丘市许营	75	890
潍河	沂山北麓官庄乡	246	6 367
胶莱河	平度市南部姚家	146	5 400

北隆起位于沂沭断裂带北段以东,胶莱拗陷区以北,主要由胶东群、荆山群和粉子山群组成,中生代岩浆活动强烈,NE、NNE 向断裂十分发育;胶莱拗陷区位于胶北隆起以南、山相家-郝官庄断裂以北,是一个中、新生代拗陷,其中主要发育侏罗纪河湖相砂页岩、白垩纪火山岩系和河湖相砂页岩、砾岩沉积^[17]。

2 样品与方法

2.1 样品

本实验样品采集于 2023 年 4 月中旬枯水期,在莱州湾南岸 7 条主要入海河流,自上、中、下游采取边滩样品。河流和样品编号分别为小清河 XQ01-XQ06、弥河 MH01-MH07、白浪河 BL01-BL07、虞河 YH01-YH05、堤河 DH01-DH02、潍河 WH01-WH07、胶莱河 JL01-JL06,共选取了 40 个样品。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),密封带回实验室进行实验分析。采样点如图 1 所示。

2.2 实验方法

取沉积物样品约 200 g,通过 0.125 mm 和 0.063 mm 的套筛进行水洗冲筛,分离出的极细砂粒级样品(0.125~0.063 mm)进行烘干和称重,获得鉴定粒级在沉积物中的百分含量^[24]。以三溴甲烷(CHBr₃,密度为 2.89 g/cm³)为比重液,倒入分液漏斗中,取各样品极细砂 2 g 左右倒入比重液中,在±20℃ 恒温下进行搅拌沉淀,每个样品搅拌 2 min 左右,间隔 15 min 再搅拌一次,共计 3 次;静止 8 小时后将分离好的轻、重矿物分别取出冲洗、烘干和称重,获得碎屑重矿物鉴定样品,并计出重矿物的百分含量^[25]。

重矿物用体式显微镜与偏光显微镜进行鉴定。把重矿物放在载玻片上,采用对角线四分法缩分至最小量(约 10 000 颗粒),然后把此样品用盖玻片(边缘一定要平直)划成一直线,再采用分段法把样品缩分至 320 颗左右,除去贝壳、岩屑和无法定名的蚀变矿物,对这些矿物颗粒逐个进行定名^[26]。

(1)在体式显微镜(奥林巴斯,型号 SZX16)下,先用经永久磁铁磁化的磁针把磁铁矿选出,再根据条痕对其他不透明矿物进行鉴定。然后再根据晶形、颜色、光泽等特性对透明矿物进行大致定名,最后用偏光显微镜检查后再确切定名。

(2)在偏光显微镜(徕卡,型号 DM2500P)下采用油浸薄片进行鉴定。利用 1.700 折色率油制成的

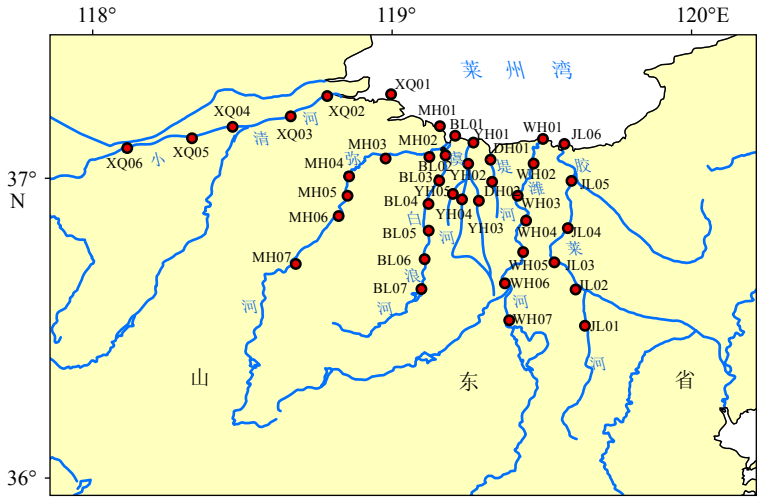


图 1 研究区及采样站位
Fig.1 The study area and sampling stations

矿物浸油薄片在偏光显微镜下鉴定矿物既方便且准确。因为大部分重矿物的折光率值比较高, 用 1.700 折光率可以迅速地把它大致分为大于 1.700, 近于 1.700 和小于 1.700 的三部分, 确定大致范围, 再结合其他光学性质进行定名。

2.3 数据处理方法

主成分(PCA)是一种用于降低复杂多元数据集维数的工具, 将原来众多的且具有一定相关性的原始变量进行线性变换, 得到数目较少且彼此独立的重要变量, 用较少的有代表性的因子来解释众多原始变量的复杂信息^[27-28]。PCA 通过奇异值分解实现, 原始测量数据矩阵 X 分解成两个矩阵, T 和 P (公式 1):

$$X = TP^T \quad (1)$$

其中 X 是原始测量数据矩阵, T 是得分矩阵, 代表在新坐标中样品的位置。 P 为载荷矩阵, 描述了新的坐标轴(如主成分)是如何从原始变量中形成的。

热力图是一种数据可视化技术, 又名相关系数图^[29]。根据热力图中不同方块颜色对应的相关系数的大小, 可以判断出变量之间相关性的强弱。其相关系数的计算公式(2)为:

$$\rho_{x_1x_2} = \frac{\text{Cov}(X_1, X_2)}{\sqrt{DX_1} \sqrt{DX_2}} = \frac{EX_1X_2 - EX_1 \times EX_2}{\sqrt{DX_1} \times \sqrt{DX_2}} \quad (2)$$

式中, ρ 表示相关系数, Cov 表示协方差, E 表示数学期望/均值, X_1 和 X_2 为两个变量。相关系数越高, 则变量间的线性相关程度越高; 相关系数小的两个变量, 说明变量间的线性相关程度弱。

3 结果

3.1 重矿物含量

莱州湾南岸近海河流中潍河(WH)的重矿物含量最高, 平均为 6.1%; 小清河(XQ)次之(5.6%), 弥河(MH)、白浪河(BL)和胶莱河(JL)重矿物含量相近, 平均在 1.4% 左右。虞河(YH)重矿物含量最低, 只占到了 0.3%, 堤河(DH)重矿物含量稍高于虞河, 为 0.4%。莱州湾近海中小河流共鉴定出碎屑重矿物 31 种, 包括普通角闪石、阳起石、透闪石、绿帘石、斜黧帘石、黧帘石、红帘石、白云母、黑云母、石榴石、磷灰石、榍石、锆石、电气石、金红石、磷灰石、白钛石、锐钛矿、普通辉石、斜方辉石、透辉石、磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿等。

根据矿物物理化学特性, 将其划分成不同族类, 分别为闪石族(普通角闪石、阳起石、透闪石)、帘石族(绿帘石、斜黧帘石、黧帘石)、云母族(白云母、黑云母、水黑云母)、稳定矿物类(石榴石、磷灰石、榍石、锆石、电气石、金红石等)、辉石族(普通辉石、斜方辉石、透辉石)及铁质金属矿物类(磁铁矿、钛铁矿、赤铁矿、褐铁矿)。各河流中多以闪石族矿物为主, 为 26.8%~49.1%, 其中堤河中闪石族含量最高, 虞河含量最低; 帘石族含量次之, 各河流帘石族含量为 6.0%~28.3%, 胶莱河中帘石族含量最大, 最低含量出现为堤河。云母族含量变化较大, 含量最高的为虞河, 占到了 30% 左右, 含量最低的为潍河(2.1%)。稳定矿物类为 3.6%~7.0% 变化, 含量最高为胶莱河; 辉石族为 1.0%~6.9%, 小清河中含量最大。铁质金属矿物含量最高的河流为小清河(14.6%), 最低的为堤河(5.0%), 其含量跟重矿物含量成正比, 重矿物含量超过 2% 的河流, 平均铁质金属矿物含量超过 11%(表 2)。

3.2 重矿物组合

莱州湾南岸近海河流重矿物组合特征分析得出小清河和潍河重矿物组合均为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿, 前者特征矿物为磷灰石, 后者则为石榴石。另外, 弥河、白浪河、堤河以及胶莱河重矿物组合均为普通角闪石+绿帘石+黑云母, 其中弥河和胶莱河两条河流特征矿物为石榴石, 白浪河和堤河两条河流的特征矿物为榍石。虞河特征矿物同为榍石, 其重矿物组合为普通角闪石+黑云母+绿帘石。

闪石族、云母族(白云母除外)及辉石族容易受到风化作用影响, 属于不稳定矿物(UM), 绘制不稳定矿物(UM)-稳定矿物(SM)-铁质金属矿物(FM)三角图(图 2), 将莱州湾南岸近海中小河流样品投影到图中, 结果显示各河流均以不稳定矿物为主, XQ、BL 和 WH 三条河流铁质金属矿物含量相对较高, 且呈现从河口向上游逐渐增加趋势; MH、DH 和 YH 相对集中, 河流沿程主要重矿物含量变化不大; JL 主要重矿物含量较为分散, 上游样品中铁质金属和稳定矿物含量较高, 下游至河口样品中铁质金属和稳定矿物含量降低。综上, 莱州湾的各中小河流沉积物样品中主要以不稳定矿物类为主, 从上游至河口不稳定矿物类逐渐增多, 铁质金属矿物和稳定矿物含量呈下降趋势。

3.3 河流沿程重矿物变化

对研究区不同河流沿程重矿物进行主成分

表 2 莱州湾南岸近海河流主要重矿物族类平均含量

Table 2 Average content of major heavy minerals in the coastal rivers on the south bank of Laizhou Bay							%
河流	闪石族	帘石族	云母族	稳定矿物类	辉石族	铁质金属类	HMC
XQ	40.36	23.44	5.89	4.87	6.88	14.55	5.56
MH	36.11	17.55	18.98	5.16	1.77	9.89	1.33
BL	37.63	26.97	7.90	5.53	3.60	12.27	1.51
YH	26.81	21.04	31.46	3.64	1.28	8.33	0.26
DH	49.06	5.97	20.44	4.09	5.03	5.03	0.41
WH	44.58	27.86	2.13	4.82	3.52	12.96	6.08
JL	39.51	28.33	13.67	6.99	0.95	8.05	1.43

注：矿物族类为体积含量，HMC为重矿物质量含量。

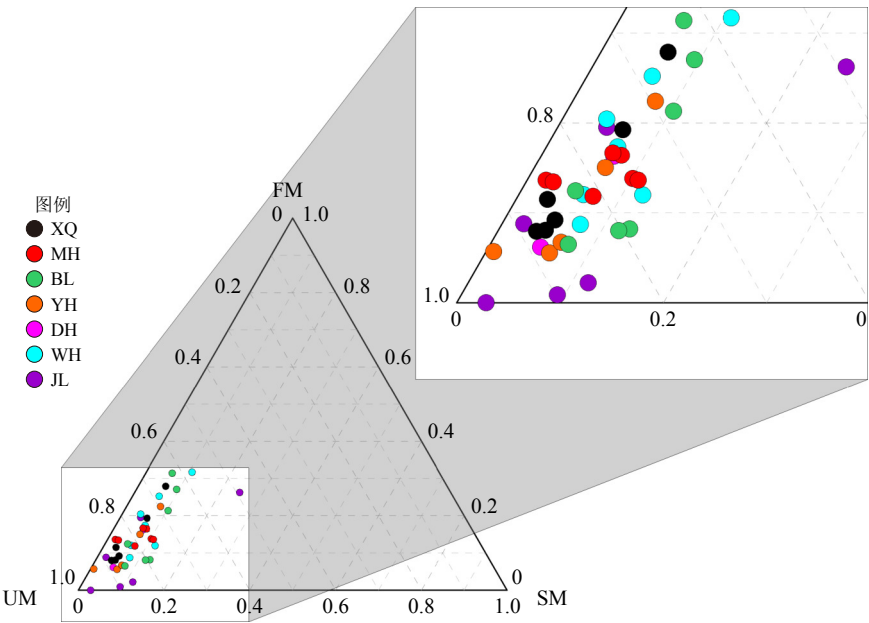


图 2 河流不稳定矿物 (UM) -稳定矿物类 (SM) -铁质金属类 (FM) 矿物三角图

XQ: 小清河, MH: 弥河, BL: 白浪河, YH: 虞河, DH: 堤河, WH: 潍河, JL: 胶莱河

Fig.2 Ternary diagram of unstable minerals (UM) – stable minerals (SM) – ferrous metal minerals (FM) in rivers

(PCA)分析(图 3), 堤河因样品数量少而无法进行主成分分析。其中, 小清河(XQ)样品采自下游和口外海区(图 3a), 提取 PCA1 占总方差的 34.1%, 对大部分稳定矿物和铁质金属矿物有较强的正载荷作用, 其中 XQ03 和 XQ05 样品与稳定类矿物相关性较强, XQ04 和 XQ06 样品与钛铁矿、磁铁矿和褐铁矿等铁质金属矿物联系密切; PCA2 占总方差的 25.7%, 对与 XQ02 相关性较强的云母族矿物具有负载荷作用, 小清河河口口外 XQ01 样品位于第二象限, 与闪石族和帘石族等矿物联系密切。弥河沉积物中 MH05 和 MH04 样品分别与占总方差 34.2% 的 PCA1 正载荷的金红石、钛铁矿以及普通角闪石等矿物相关性大(图 3b); MH03 和 MH01 差异较小,

与占总方差 21.2% 的 PCA2 负载荷的钛铁矿和碳酸盐相关性大; MH07 和 MH02 差异较小, 与云母族矿物相关性较强。

白浪河提取 PCA1 占总方差的 39.0%, PCA2 占总方差的 20.8%(图 3c); 其中口外样品 BL01 和下游 BL03 样品位于第一象限, 与红柱石、斜方辉石、黝帘石、石榴石等相关性较强; 中游样品 BL07 和下游样品 BL04 位于第二象限, 与普通角闪石、榍石、锆石等矿物关系密切; 中游沉积物 BL06 样品位于第三象限, 与金红石、普通辉石、磁铁矿和褐铁矿相关性较强; 下游样品 BL02 和 BL05 位于第四象限, 与云母族、碳酸盐、绿泥石以及阳起石等矿物相关性较强。虞河提取的两个主成分(PCs)占总方

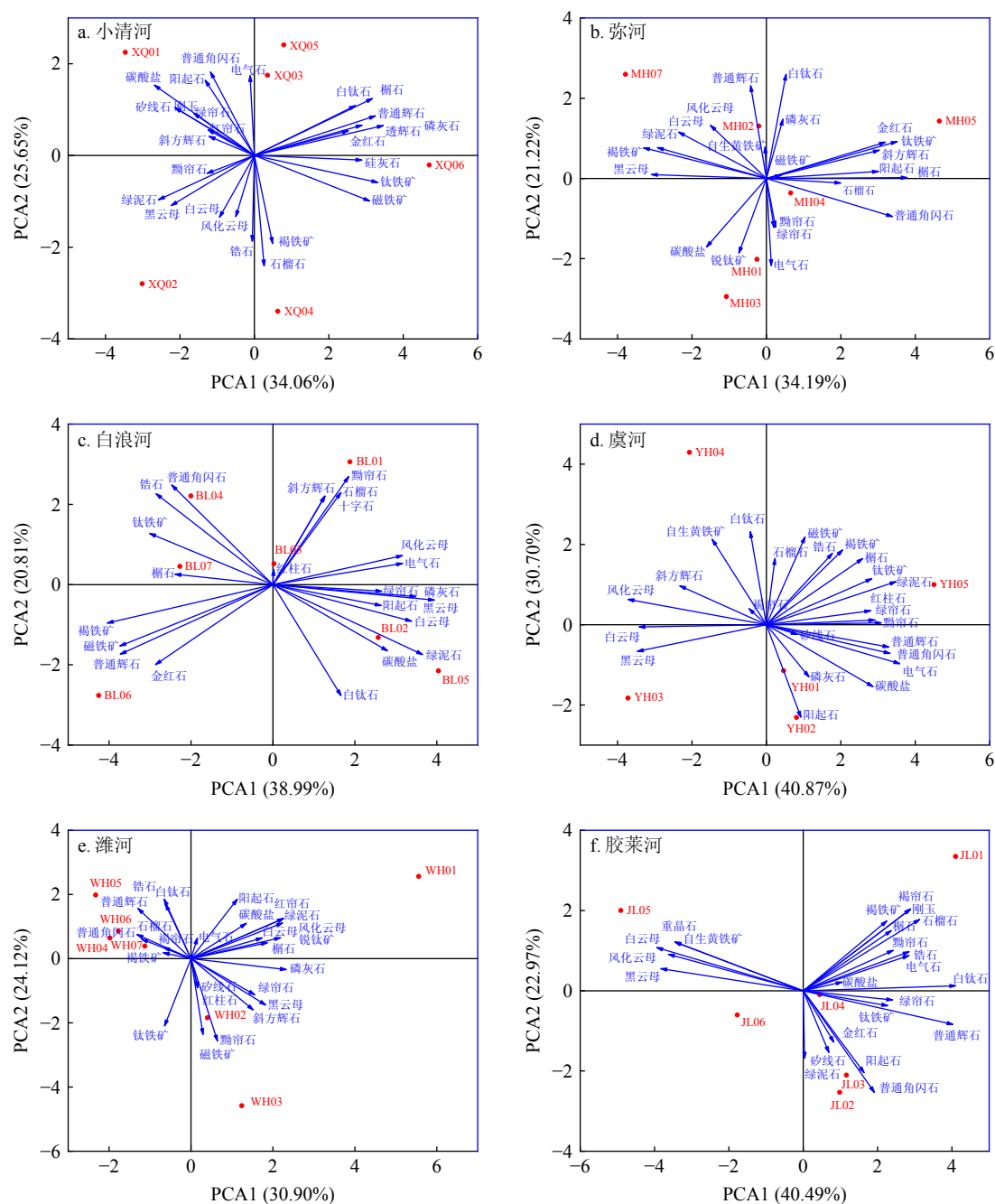


图 3 不同河流沿程重矿物双标图

Fig.3 Biplot of heavy minerals along river courses

差的 71% 左右, PCA1 占总方差的 40.9%, PCA2 占总方差的 30.7% (图 3d); 口外 YH01 和近河口 YH02 样品与闪石族相关性较强; YH03 位于下游夹沟河段, 与白云母、黑云母相关性较强, YH04 位于虞河干流下游, 与 PCA2 正载荷的白钛石、自生黄铁矿等相关性大, YH05 为下游利民河段沉积物样品, 与帘石族、稳定矿物类、铁质金属矿物类等呈正载荷关系的矿物相近。

潍河口外 WH01 样品位于与 PCA1 和 PCA2 都呈正载荷关系的第一象限, 与阳起石、碳酸盐、绿

泥石、白云母、楣石及锐钛矿等重矿物相关性大 (图 3e); 普通角闪石、普通辉石、白钛石、锆石、石榴石、褐铁矿等重矿物与 PCA2 呈正载荷关系, WH07、WH06、WH05、WH04 这 4 个样品与之相关性较大; 黝帘石、磁铁矿、红柱石、斜方辉石、黑云母及绿帘石等重矿物与 PCA1 呈正载荷关系, WH03 和 WH02 样品与之相关性较大。对胶莱河不同样品重矿物进行主成分 (PCA) 分析 (图 3f), 提取的两个主成分 (PCs) 占总方差的 63.5% 左右, PCA1 占总方差的 40.5%, PCA2 占总方差的 23%。JL01 为

南胶莱河样品,位于与 PCA1 和 PCA2 呈正载荷作用的第一象限,与褐铁矿、褐帘石、刚玉、榍石、石榴石等重矿物相关性较大;JL02、JL03 和 JL04 位于第四象限,与普通角闪石、阳起石、矽线石、金红石、钛铁矿、普通辉石等相关性较强;JL05 样品与 PCA2 呈正载荷关系的云母族(白云母、黑云母、风化云母)、重晶石和自生黄铁矿相关性较强,JL06 口外样品位于与 PCA1 和 PCA2 呈负载荷作用的第三象限。区域小河流流域内气候条件一致,母岩风化程度无差异,决定碎屑矿物种类组成的主要因素为不同源区母岩类型;小流域河流流经区所在的动力条件和沉积环境差异影响了碎屑矿物特征,使得流域内不同采样位置,碎屑矿物的种类、含量以及组合等特征存在一定差异。

4 讨论

4.1 河流重矿物物源分析

重矿物对母岩类型具有良好的继承性,因此作为一种物源敏感性因素被广泛应用于研究源区母岩性质和类型^[30-33]。莱州湾南岸近海河流中发现有硅灰石、矽线石、刚玉、十字石和红柱石等标型矿物,这些均为在特定的地质作用下形成稳定的矿物,能够反映不同地质母岩成因类型和特性。其中,小清河沉积物样品中含有少数的硅灰石、矽线石和刚玉,硅灰石和矽线石为典型的变质矿物^[34],硅灰石通常出现在酸性岩浆岩与碳酸岩的接触带,或在岩浆岩内再结晶的石灰岩的捕虏体中,是高温反应的产物^[35];矽线石常见于火成岩(尤其是花岗岩)与富含铝质岩石的接触带及片岩、片麻岩发育的地区,虞河、潍河以及胶莱河中均有一定含量的矽线石。刚玉主要与岩浆作用、接触变质及区域变质作用有关,在富铝贫硅的刚玉正长岩、刚玉伟晶岩、刚玉斜长岩等岩石中为主要矿物或主要副矿物,若大量集中则形成矿床^[36],胶莱河中也有少数的刚玉。白浪河个别样品中鉴定出少数的十字石和红柱石,十字石主要是区域变质及少数接触变质作用的产物;红柱石为富铝岩石在低压高温变质带的变质产物,主要是接触热变质成因,常见于泥质岩石与侵入体的接触带,为典型的接触热变质矿物^[37],虞河和潍河中也发现有红柱石。

莱州湾南岸不同入海河流沉积物中普通角闪石含量平均在 40% 左右,各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^[38]。潍河和胶莱河样品中帘石族含量平均为 28%,相较于其他河流样品较高,原因在于潍河和胶莱河所在流域的中上游出露着面积较大的元古界粉子山群片岩、片麻岩、变粒岩、透灰岩和大理岩等变质岩区^[17],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。虞河和弥河主要流经第四系松散沉积物,云母含量较高,分别为 31.5% 和 19%。

莱州湾南岸近海河流的特征矿物有石榴石、榍石和磷灰石,绘制石榴石-榍石-磷灰石组成的特征矿物三角图(图 4),将各莱州湾的中小河流样品投影到图中,得到各个河流存在较为明显的分区,分散性程度也存在差异。其中,堤河差异性最为明显,该河流特征矿物为榍石,仅有个别石榴石,未鉴定出磷灰石;榍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、磁铁矿共生^[36]。胶莱河流中也未发现磷灰石,石榴石含量较高。小清河中磷灰石含量相对较高,石榴石含量次之,榍石含量最低。弥河和潍河两条河流均以石榴石含量相对较高,且在各样品中多有出现。白浪河和虞河两条河流榍石含量相对较高,前者石榴石含量高于后者。

4.2 莱州湾沉积物端元判别

对黄河和莱州湾南岸入海河流口外样品主要重矿物进行主成分分析(图 5),在前两个主成分组成的散点图中,碎屑重矿物组成相似的样品被归为一组,矿物组成差异较大的样本被分开。黄河独自位于占 34.8% 的 PCA1 负载荷和 23% 的 PCA2 正载荷的第二象限,与石榴石、褐铁矿、磷灰石、阳起石和风华云母相关性较强,继承了黄土的矿物特性,含有较多的褐铁矿和云母族矿物,符合黄河物质以黄土为主的特征^[39]。潍河和白浪河河口位于 PCA1 和 PCA2 正载荷的第一象限,与榍石、钛铁矿和磁铁矿联系密切,表明这 3 种矿物在潍河和白浪河河口相较于其他样品含量比较高,榍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,与钛铁矿和磁铁矿共生。弥河、胶莱河和虞河河口外重矿物特征相近,位于 PCA1 和 PCA2 负载荷的第三象限,其白云母、黑云母及碳酸盐类矿物含量占比相对较高,原因在于其河流下游广泛分布的第四系松散沉积物。小清河和堤河河口口外样品重矿物位于 PCA1 正载荷和 PCA2 负载荷的第四象限,与

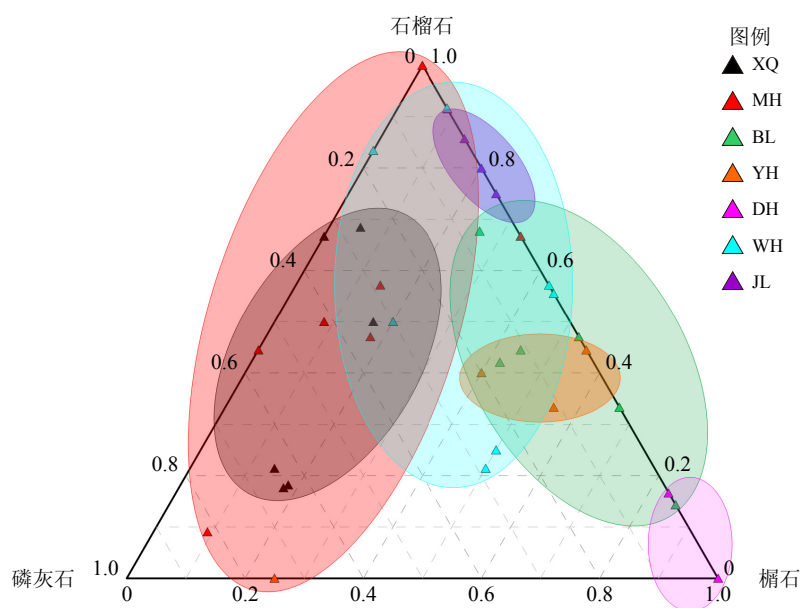


图 4 河流石榴石-榍石-磷灰石矿物三角图

XQ: 小清河, MH: 弥河, BL: 白浪河, YH: 虞河, DH: 堤河, WH: 潍河, JL: 胶莱河

Fig.4 Ternary diagram of garnet – sphene – apatite minerals in rivers

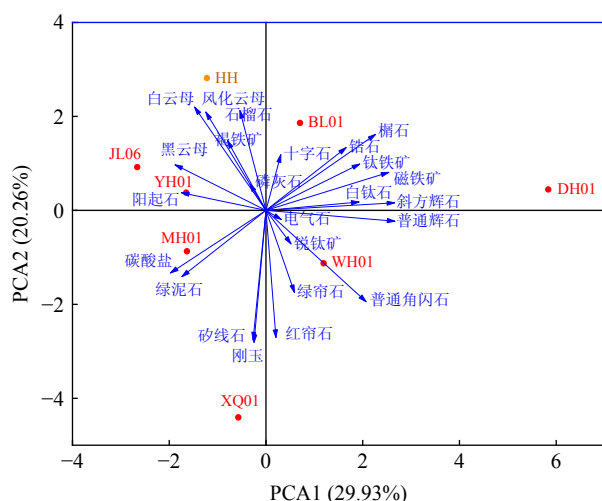


图 5 黄河河口三角洲和莱州湾南岸不同河流口外重矿物双标图

黄河 HH 重矿物数据引自文献 [40]。

Fig.5 Biplot of heavy minerals from the outside of the river estuary on the south bank of Laizhou Bay from different rivers and from the Huanghe River Delta

The Huanghe River heavy mineral data are from reference [40].

普通角闪石、普通辉石、锆石、电气石和绿帘石关系相近。

以黄河和 7 条莱州湾入海中小河流口外样品中重矿物种类和含量指标为参考标准, 计算各样品之间的相似度, 探讨莱州沿岸海域受黄河物质影响差异(图 6)。可以看出黄河与莱州湾南岸近岸海域物质存在一定差异, 与小清河和弥河口外相似度为

0.9 以上, 白浪河、虞河、堤河以及潍河等河口外与黄河物质相似度为 0.86~0.89, 胶莱河近海样品与黄河物质差异最大, 相似度仅为 0.79。故而, 莱州湾南岸近海海区主要受相近河流物质供应, 黄河物质影响程度自西向东减弱。另外, 胶莱河口外沉积物重矿物特征与其他地区也存在差异, 与堤河和潍河口外差异最大, 相似度仅为 0.72 和 0.71; 与虞河河口口外差异最小, 相似度为 0.93, 与其他流域口外样品相似度在 0.8 左右。潍河口外近海沉积物与小清河、弥河以及白浪河近岸海区相近程度加大, 反而与之相近的胶莱河口外海区差异较大。白浪河、弥河和小清河口外海区沉积物重矿物相似程度较大, 平均在 0.98 左右。

5 结论

(1) 莱州湾南岸入海河流沉积物中 (0.125~0.063 mm) 重矿物含量中等至较低 (0.3%~6.1%), 重矿物有 31 种, 以闪石族、帘石族矿物为主, 云母族和铁质金属矿物类含量变幅较大, 重矿物组合以普通角闪+绿帘石为骨干, 或+褐铁矿或+黑云母, 以石榴石或榍石或磷灰石为特征矿物, 不同河流之间重矿物特征有一定的差异。

(2) 重矿物种类和含量受河流流域内出露的岩石类型控制, 与河流流量和流程关系较小, 酸性花岗岩和区域变质岩以及接触变质岩为本区重矿物提供主要来源, 白浪河、虞河和堤河沉积物主要来

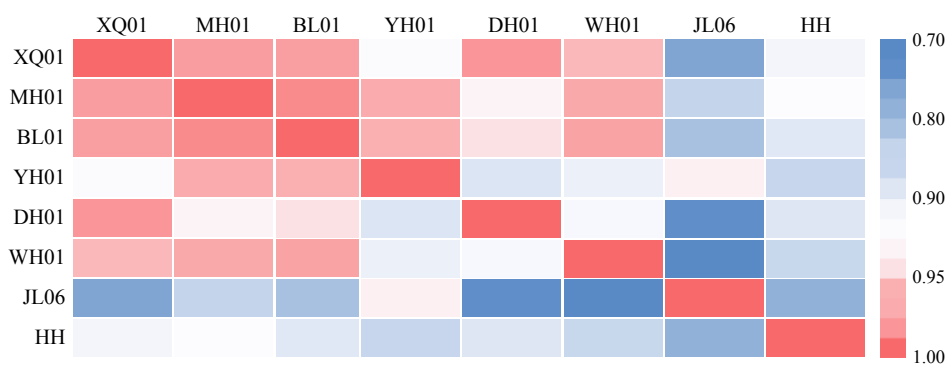


图 6 黄河和莱州湾南岸不同河流口外重矿物热力图

Fig.6 Heatmap of heavy minerals from outside of the estuary of different rivers on the south bank of Laizhou Bay and from the Huanghe River

源于风化的花岗岩,小清河、弥河、潍河和胶莱河受变质岩影响较大,特征矿物与源区的岩石类型有较好的对应关系。

(3)莱州湾南岸入海河流与黄河沉积物在重矿物物源属性上有较大的区别,在莱州湾近岸区,越远离黄河入海口,小河河口区的矿物特征与黄河差异越大,表现出少褐铁矿和云母族矿物的特征。

参考文献 (References)

- [1] 高抒. 全球变化中的浅海沉积作用与物理环境演化: 以渤、黄、东海区域为例 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 329-335. [GAO Shu. Shallow marine sedimentation and physical environment evolution as a part of global change: an example from the Bohai, Yellow and East China Sea regions[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 329-335.]
- [2] Kremer H H. River catchment-coastal sea interaction and human dimensions[J]. *Regional Environmental Change*, 2004, 4(1): 1-4.
- [3] Yang H F, Yang S L, Xu K H, et al. Human impacts on sediment in the Yangtze River: a review and new perspectives[J]. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 8-17.
- [4] Peng J, Chen S L. Response of delta sedimentary system to variation of water and sediment in the Yellow River over past six decades[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 613-627.
- [5] Ma Q, Li H L, Wang X J, et al. Estimation of seawater-groundwater exchange rate: case study in a tidal flat with a large-scale seepage face (Laizhou Bay, China)[J]. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(2): 265-275.
- [6] Gao M S, Guo F, Huang X Y, et al. Sediment distribution and provenance since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 2019, 2(1): 16-25.
- [7] 黄学勇, 高茂生, 侯国华, 等. 莱州湾海洋沉积物粒度特征及其环境响应分析 [J]. 华东地质, 2023, 44(4): 402-414. [HUANG Xueyong, GAO Maosheng, HOU Guohua, et al. Grain size characteristics and environmental response of marine sediments in Laizhou Bay[J]. East China Geology, 2023, 44(4): 402-414.]
- [8] 杨作升, 孙宝喜, 沈渭铨. 黄河口毗邻海域细粒级沉积物特征及沉积物入海后的运移 [J]. 山东海洋学院学报, 1985, 15(2): 121-129. [YANG Zuosheng, SUN Baoxi, SHENG Weiquan. Characteristics of fine-grained sediment of the shelf area adjacent to the mouth of the Huanghe River and sediment dispersion in that region[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1985, 15(2): 121-129.]
- [9] 秦蕴珊. 黄海地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1989. [QIN Yunshan. Geology of Yellow Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]
- [10] Milliman J D, Lee T Y, Huang J C, et al. Impact of catastrophic events on small mountainous rivers: temporal and spatial variations in suspended- and dissolved-solid fluxes along the Choshui River, central western Taiwan, during typhoon Mindulle, July 2-6, 2004[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 205: 272-294.
- [11] Simpson G, Castelltort S. Model shows that rivers transmit high-frequency climate cycles to the sedimentary record[J]. *Geology*, 2012, 40(12): 1131-1134.
- [12] 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 & Quaternary Geology, 2018, 38(1): 1-10.]
- [13] 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.]
- [14] 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.]
- [15] 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.]
- [16] 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, 2019, 41(1): 1-10. [YU Jian, JIN Bingfu, WANG Mengyao, et al. Compositional changes and controlling factors of detrital minerals in river channels, estuaries and beaches: a case study of the Xin'an River, Shandong Peninsula[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 41(1): 1-10.]

- 2023, 45(7): 168-182. [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.]
- [17] 马丽芳. 中国地质图集[M]. 北京: 地质出版社, 2002. [MA Lifang. Geological Atlas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [CHEN Lirong. Sedimentary Mineralogy of the China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.]
- [21] 孔祥淮, 叶思源, 王松涛, 等. 莱州湾海岸带海陆统筹综合地质调查(试点)成果报告[R]. 青岛: 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 2017. [KONG Xianghuai, YE Siyuan, WANG Songtao, et al. Report on the results of marine and land integrated geological survey (pilot) in Laizhou Bay coastal zone[R]. Qingdao: Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, 2017.]
- [22] 于永海, 张盼, 王鹏, 等. 莱州湾现代沉积特征及中全新世以来沉积环境演变研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2017. [YU Yonghai, ZHANG Pan, WANG Peng, et al. Study on the Modern Sedimentary Characteristics and Sedimentary Environment Evolution since the Mid-Holocene in Laizhou Bay[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2017.]
- [23] 山东省地质矿产局. 山东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province. Regional Geology of Shandong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.]
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.8-2007 Specifications for oceanographic survey: part 8: marine geology and geophysics survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]
- [25] Mange M A, Maurer H F W. Heavy Minerals in Colour[M]. Dordrecht: Springer, 1992: 11-22.
- [26] Marcinkowski B, Mycielska-Dowgiallo E. Heavy-mineral analysis in Polish investigations of Quaternary deposits: a review[J]. *Geologos*, 2013, 19(1-2): 5-23.
- [27] Montero-Serrano J C, Palarea-Albaladejo J, Martín-Fernández J A, et al. Sedimentary chemofacies characterization by means of multivariate analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 228(3-4): 218-228.
- [28] 匡芸芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(4): 964-976. [KUANG Huifen, HU Chunhua, WU Genlin, et al. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4): 964-976.]
- [29] Martens H, Næs T. Multivariate Calibration[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [30] Lee H J, Jeong K S, Han S J, et al. Heavy minerals indicative of Holocene transgression in the southeastern Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1988, 8(3): 255-266.
- [31] 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.
- [32] Sevastjanova I, Hall R, Alderton D. A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 179-194.
- [33] 陆凯, 秦亚超, 王中波, 等. 东海南中部海域表层沉积物碎屑重矿物组合分区及其物源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(8): 20-26. [LU Kai, QIN Yachao, WANG Zhongbo, et al. Heavy mineral provinces of the surface sediments in central-southern East China Sea and implications for provenance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(8): 20-26.]
- [34] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社, 1982. [WANG Pu, PAN Zhaolu, WENG Lingbao. Systematic Mineralogy[M]. Beijing: Geology Press, 1982.]
- [35] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学找矿矿物学[M]. 2版. 重庆: 重庆出版社, 1988. [CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, YIN Hui'an. Genetic and Prospecting Mineralogy[M]. 2nd ed. Chongqing: Chongqing Press, 1988.]
- [36] 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, 2006. [CHANG Lihua, CHEN Manyun, JIN Wei, et al. Manual for the Identification of Thin Sections of Transparent Minerals[M]. Beijing: Geology Press, 2006.]
- [37] 薛君治, 白学让, 陈武. 成因矿物学[M]. 2版. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. [XUE Junzhi, BAI Xuerang, CHEN Wu. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[M]. 2nd ed. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991.]
- [38] Hawthorne F C, Oberti R, Harlow G E, et al. Nomenclature of the amphibole supergroup[J]. *American Mineralogist*, 2012, 97(11-12): 2031-2048.
- [39] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Dongsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [40] Jin B F, Wang M Y, Yue W. 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.