

# 废黄河口门外砂质海滩粒度和重矿物特征及其成因机理分析

王孟瑶, 金秉福, 王 昕, 李 坤

(鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025)

**摘要:** 为研究黄河南流变迁过程中物质沉积分异作用下的产物, 进而追踪废黄河沉积物在江苏沿海以及南黄海的运移状况, 测量废黄河口门外砂质海滩沉积物粒级组成及特征参数, 分析各样品重矿物含量及种类特征; 结合与废黄河陆上沉积物的对比, 探讨在不同沉积分异作用下重矿物沉积特征。结果表明: 砂质海滩沉积物平均粒度  $\Phi$  为 2.67(0.16 mm), 分选较好, 为微负偏, 具有海滩砂粒度特征; 陆域样沉积物粒度跨度大, 以粉砂组分为主, 为河流沉积特征。另外, 对海滩砂样进行广粒级重矿物( $\Phi$  为 1~6)分析, 重矿物含量在极细砂和粗粉砂粒级中最高, 不同粒级形成不同的矿物组合, 砂粒级重矿物组合为黑云母+普通角闪石+褐铁矿, 粉砂粒级则为钛铁矿+石榴子石+普通角闪石; 砂质海滩样品广粒级重矿物质量分数为 3.66%, 其中  $\Phi$  为 3~4 (0.125~0.063 mm) 的粒级重矿物质量分数高达 15.66%, 比重大且稳定性较高的矿物在此粒级中富集, 表明海滩重矿物分选强烈。

**关键词:** 重矿物; 沉积分异; 粒度分析; 砂质海滩; 废黄河口

中图分类号: P736.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)01-0050-11

DOI: 10.11759/hyxx20180827001

机械沉积分异作用主要决定因素是沉积物的颗粒大小、形状、比重以及搬运介质的性质和速度<sup>[1]</sup>, 沉积物的粒度特征是反映沉积环境的重要参数, 与地貌类型、水动力条件、物质来源和搬运方式等因素密切相关, 通过粒度特征的变化来反演影响沉积物的环境因素<sup>[2-3]</sup>, 特别是沉积水动力条件和物源, 沉积物的重矿物分析对研究沉积动力条件、沉积环境有重要意义<sup>[4-6]</sup>。废黄河三角洲沉积物与现代黄河物源相同<sup>[7-8]</sup>, 是在黄河南流夺淮入海时所形成, 在经历不同的沉积环境与动力改造作用后, 产生了具有不同重矿物特征的沉积分异体。

1128—1185 年黄河曾南流夺淮入海, 通过河流泥沙的纵向堆积和横向决口分流堆积、填充堤外的海湾和堤内的泻湖形成废黄河三角洲<sup>[9-10]</sup>。黄河泥沙入海后, 除了在河口区堆积形成三角洲沉积外, 还受到潮流、波浪和沿岸流的动力分选, 粒度不同的泥沙会不同程度地产生沿岸输移并参与邻近海区的沉积过程, 在废黄河入海处形成粉砂和淤泥为主的条带状海岸<sup>[11-13]</sup>。后来废黄河三角洲淤泥质海岸由于受到黄河北归后泥沙及海洋动力的调整过程, 侵蚀强烈, 苏北海岸后退将近 17 km<sup>[14]</sup>, 海岸潮间带狭窄, 宽约 500~1 000 m, 主要由粉砂组成。而在长带状的粉砂质海岸中, 废黄河入海口南岸海滩潮间带出现一片由较粗沉积物组成的范围不大的砂质海滩,

成为废黄河河口湾(月亮湾)的宝贵旅游资源和特色显著的科研资源。砂质海滩在充满粉砂质和泥质来源的环境中出现, 意味着水动力的沉积分异作用强烈而持久, 沉积物成分经历强烈的分选, 其矿物组成为何? 与其同源的河流沉积物有什么样的差异? 引发笔者思考并进行深入研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

野外调查和样品采集工作分别于 2016 年 3 月和 2017 年 11 月在江苏省盐城市废黄河口进行, 第一次取样采集废黄河河口区陆上表层沉积物 5 件, 样品编号为 FHH1—FHH5; 第二次取样取自废黄河口门外砂质海滩表层沉积物 3 件, 样品编号为 FHB1—FHB3。取样用 GPS 定位, 通过手持平铲挖取表层沉积物, 采样窗口 20 cm×20 cm, 深 10 cm 左右, 放入自封袋中保存。研究区与采样点位置见图 1。

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(41576057)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41576057]

作者简介: 王孟瑶(1992-), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向: 河口海岸过程分析与应用, 电话: 18363866785, E-mail: wmy1327@126.com; 金秉福, 通信作者, 教授, 主要从事海洋地质研究, E-mail: bfjin@126.com

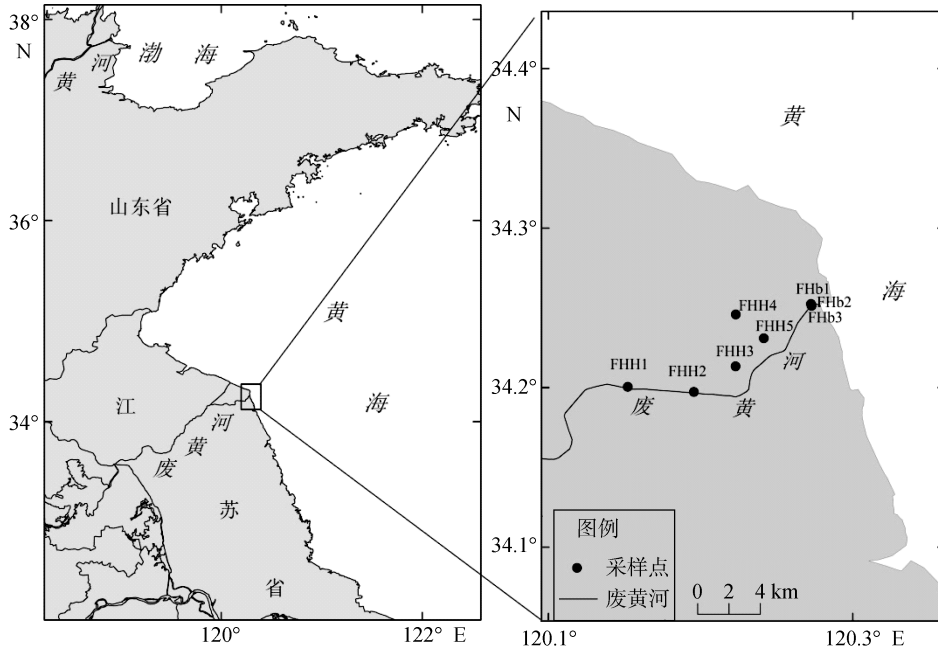


图 1 废黄河口表层沉积物采样站位

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in the abandoned Yellow River estuary

## 1.2 粒度与重矿物分析试验方法

首先对样品进行前期预处理, 取质量 200 g 左右原始样品, 加入 30% 的双氧水, 去除样品中的有机质, 微热后静置 24 h, 再加入 10% 六偏磷酸钠溶液, 用超声波振荡对样品进行分散处理<sup>[15-16]</sup>。使用激光粒度分析仪 Microtrac S3500 对 5 个陆域沉积物样品进行粒度测定和参数分析, 同时使用粒度  $\Phi$  为 3~4 (0.125~0.063 mm) 的套筛筛出约 2 g 作为重液分离样品; 由于要进行碎屑矿物粒级分选, 所以对海域 3 个粗粒样品采用 Shepard 的沉积物粒度划分标准<sup>[17]</sup>, 以  $\Phi$  为 0.5 的套筛为间隔进行湿筛并烘干称质量, 将样品分成  $\Phi$  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 以及 <2.0 多个粒级, 筛下的粉砂质悬浮液, 按照沉降法(吸管法)粒度分析原理, 以  $\Phi=1$  为间隔单位, 提取出  $\Phi$  为 5~6 的沉积物。计算每个粒级区间沉积物的质量分数, 同时各粒级取 2 g 左右作为重液分离样品。

利用三溴甲烷( $d_4^{20}=2.88\sim 2.89\text{ g/cm}^3$ )( $d_4^{20}$  为恒温 20°C 下矿物的质量与 4°C 相同体积的水的质量比)对样品进行轻重矿分离, 采用分液漏斗在恒温 20°C $\pm$ 1°C 下进行搅拌分离, 每次搅拌 2 min, 间隔 15 min 再搅拌一次, 共 3~4 次<sup>[18-19]</sup>。将分离好的矿物用酒精反复冲洗、烘干和称质量, 计算重矿物质量分数, 获得重矿物鉴定样品。重矿物样品的定性和定量分析采用体视显微镜和偏光油浸法相结合的方法, 在油浸薄

片上计数 300 颗以上进行鉴定, 统计每种重矿物所占的体积分数, 并对重矿物颜色、形状、风化程度及光学性质进行鉴定和描述。

## 2 结果分析

### 2.1 废黄河口陆上及海滩沉积物粒度组成及特征对比分析

沉积物的粒度分布特征是判别沉积环境的重要标志, 包括粒度大小和各粒级分布状况, 可直接反映沉积环境的水动力条件和沉积环境变化<sup>[20-22]</sup>。对废黄河口 8 个样品分别进行粒度分析, 得出沉积物频率分布曲线图(图 2)。

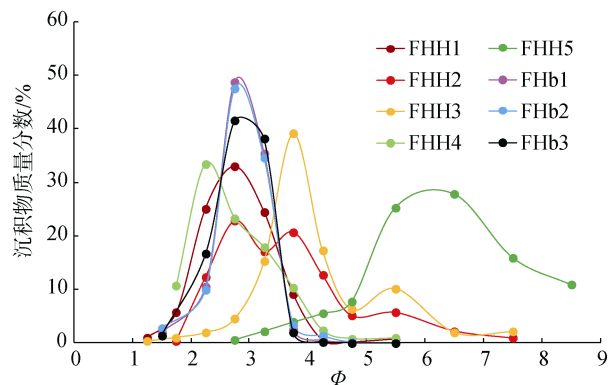


图 2 废黄河口各粒级沉积物质量分数

Fig. 2 Grain size distribution patterns of sediments in the abandoned Yellow River estuary

黏土、粉砂和砂的粒度分类采用国际通用的  $\Phi$  ( $\Phi = -\log_2 D$ ,  $D$  为颗粒直径) 分类标准, 对于沉积物类型的划分及其命名则采用 Shepard 沉积物分类方法<sup>[17]</sup>。根据沉积物三角图分类图解, 废黄河河口沉积物类型可分为砂质、粉砂质砂和粉砂质沉积物三大类。由表 1 可知, 废黄河河口陆域 FHH1 和 FHH4 样品为砂质沉积物类型, 砂 ( $\Phi < 4$ ) 的平均质量分数为 97.11%, 粉砂质量分数很低, 平均为 2.89%; FHH2 和 FHH3 样品为粉砂质砂, 其砂 ( $\Phi < 4$ ) 的平均质量分数为 67.8%, 粉砂质量分数平均为 32.2%; FHH5 为粉砂类型的沉积物, 粉砂 ( $\Phi = 4 \sim 8$ ) 质量分数占到了 82.39%, 砂和黏土质量分数较小, 分别为 6.76% 和 10.85%。另外, 废黄河入海口外泥质海岸中的砂质海滩的表层沉积

物 FHb1、FHb2、FHb3 三个样品砂 ( $\Phi < 4$ ) 的平均质量分数为 99.13%, 粉砂 ( $\Phi = 4 \sim 8$ ) 的平均质量分数为 0.87%; 在砂这一粒度中细砂 ( $\Phi = 2 \sim 3$ ) 和极细砂 ( $\Phi = 3 \sim 4$ ) 占据绝大部分, 分别为 58.33% 和 38.72%。

将样品划分为废黄河河口陆域样和砂质海滩样两类, 计算沉积物各组分的百分比平均值, 得出废黄河河口陆域样砂、粉砂、黏土各组分百分比为 67.31%、30.52%、2.17%; 海滩样砂、粉砂、黏土各组分百分比分别为 99.11%、0.89%、0%。说明在经过海浪动力分异后, 废黄河河口物质由粉砂质砂类型变为砂质类型的沉积物, 粉砂和黏土损失量达 29.63% 和 2.17%, 砂质组分百分比增加了 31.80%。

表 1 废黄河河口样品各组分百分比

Tab. 1 Weight content of each component of the abandoned Yellow River estuary samples

样品	组分百分比/%							
	砂			粉砂				黏土
	中砂 $\Phi = 1 \sim 2$	细砂 $\Phi = 2 \sim 3$	极细砂 $\Phi = 3 \sim 4$	粗粉砂 $\Phi = 4 \sim 5$	中粉砂 $\Phi = 5 \sim 6$	细粉砂 $\Phi = 6 \sim 7$	极细粉砂 $\Phi = 7 \sim 8$	$\Phi > 8$
FHH1	6.67	58.09	33.65	0.83	0.76	—	—	—
FHH2	0.44	35.14	37.80	17.76	5.69	2.26	0.91	—
FHH3	1.42	6.49	54.31	23.51	10.17	1.99	2.11	—
FHH4	10.74	56.82	28.24	3.26	0.94	—	—	—
FHH5	—	0.63	6.13	13.31	25.34	27.81	15.93	10.85
FHb1	1.93	59.3	38.05	0.67	0.04	—	—	—
FHb2	2.81	57.54	38.06	1.53	0.06	—	—	—
FHb3	1.44	58.16	40.04	0.32	0.03	—	—	—

注: “—” 为无数据。

沉积环境、搬运介质的水动力条件和自然地理条件的不同, 使得碎屑沉积物被搬运沉积的方式不一样, 粒度概率累积频率图上的图形和含义亦有所区别<sup>[23]</sup>。废黄河河口区样品中跃移组分为主要成分 (图 3), 陆域样品由于地貌、河流流速、搬运物质的粒度和数量等因素变化大, 其粒度概率累积曲线复杂, FHH5 为天然堤沉积, 只有一段代表悬移组分的直线; FHH1 和 FHH4 为由跃移和悬移组分构成的两段式, FHH1 跃移组分百分比要 FHH4 的高, 分别为 98.41% 和 66%, 其跃移与悬移的截点  $\Phi$  分别为 3.75 和 2.55, 说明 FHH4 处水动力要强于 FHH1; FHH2 和 FHH3 呈三段式, 由推移质、跃移质和悬移质组成。其中 FHH2 推移组分百分比在 20% 左右, 其下限  $\Phi$  为 2.5, 跃移质线段粒级  $\Phi$  在 2.5~4.6 范围之内, 百分比约为 73%; 悬移质的百分比约为 7%; FHH3 推移质

百分比在 10% 左右, 其下限  $\Phi$  为 2.75, 跃移质线段粒级  $\Phi$  在 2.75~3.75 范围之内, 百分比在 60% 左右, 悬移质的百分比约为 30%。海滩 3 个样品水动力较强, 底部推移质下限  $\Phi$  为 2.2~2.6, 中间跃移质组分下限  $\Phi$  在 3.2~3.4, FHb3 推移质百分比达到 34%。

根据表 2 并对照图解法粒度参数参考表可以看出, 废黄河河口陆域样整体沉积物粗细跨度大, 除 FHH5 分选差外其余样品分选都为中等, 且大多呈正偏, FHH2 出现双峰, 表明沉积时经历两种不同水动力作用; FHb1、FHb2 和 FHb3 三个海滩样沉积物较粗且比较均一, 平均粒径  $\Phi$  的范围为 2.63~2.70, 标准偏差为 0.36~0.41, 表明其样品分选好, 原因是波浪能力强, 海滩沉积物被波浪反复搬运, 得到充分分选。另外, 其频率曲线都为微弱的负偏态, 峰态尖锐, 沉积物较单一, 粒径分布更集中, 呈现海滩砂特

征<sup>[24-25]</sup>。总之，从陆到海物质分选从中等到好，偏态由正偏转向轻微负偏，峰度逐渐变尖锐。

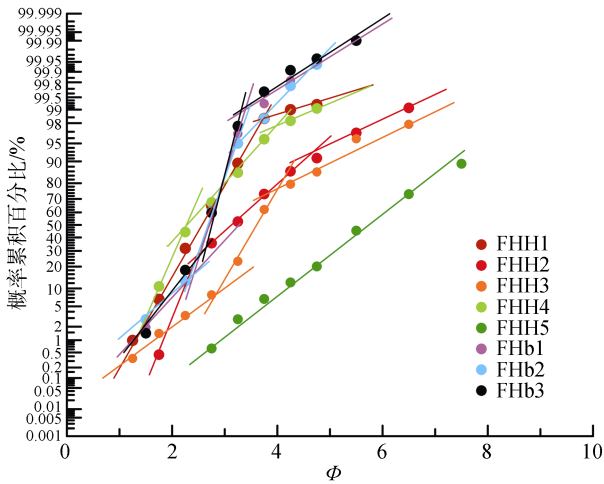


图3 废黄河口沉积物概率累积图

Fig. 3 Cumulative probability curves of sediments in the abandoned Yellow River estuary

表2 废黄河口沉积物粒度参数

Tab. 2 Grain size parameters of sediments in the abandoned Yellow River estuary

样品	$\phi$	标准偏差	偏度	峰度
FHH1	2.98	0.53	0.16	0.96
FHH2	3.54	0.92	0.23	0.84
FHH3	4.15	0.77	0.61	1.53
FHH4	2.86	0.71	0.02	0.81
FHH5	5.97	1.28	0.59	1.48
Fhb1	2.70	0.36	-0.14	1.43
Fhb2	2.67	0.40	-0.17	1.23
Fhb3	2.63	0.41	-0.27	1.15

## 2.2 砂质海滩沉积物重矿物含量及组成分析

### 2.2.1 砂质海滩沉积物广粒级的重矿物含量分布

分析重矿物在整个沉积物所有粒度中的分布状况，是准确记录矿物特征的一种可靠方法，但受矿物鉴定粒度的局限，理论上约 0.02 mm 是碎屑矿物自然破碎的下限，显微镜下肉眼鉴定相当困难，故  $\phi > 6$  的细颗粒不宜作重矿物分析，所以一般采取广粒级(即多个粒度)矿物鉴定法<sup>[26]</sup>。本文广粒级是指  $\phi$  在 1~6 的粒度范围，以  $\phi = 0.5$  为粒度间距将整个样品筛分成 8 个分样品，分别对各个分样品进行重矿物分离和鉴定。其重矿物含量的变化可以直接反映废黄河口水动力差异，对沉积物的物质来源、沉积分异作用等具有明显的指示意义<sup>[27-28]</sup>。

Fhb1、Fhb2 和 Fhb3 三个砂质海滩样品重矿物在广粒级中质量分数分别为 4.41%、3.28% 和 3.57%(加权平均计算得出)，且大致呈正态分布。在  $\phi = 3 \sim 4$  粒级部分重矿物质量分数出现高值(图 4)，在粗粒端和细粒端两个部分重矿物质量分数较低，在  $\phi < 2$  的粒级区间重矿物质量分数分布图中出现翘起现象。在中砂粒级，砂质海滩样品重矿物平均质量分数为 6%；在细砂粒级组分中，三样品重矿物平均质量分数为 1.98%；三个砂质海滩样品在极细砂粒级中，重矿物平均质量分数为 15.66%；在粗粉砂粒级，重矿物平均质量分数为 13.96%；中粉砂粒级的重矿物平均质量分数为 4.51%。综上，重矿物在极细砂这一粒级中所占比最大，在细砂这一粒级中占比最小。

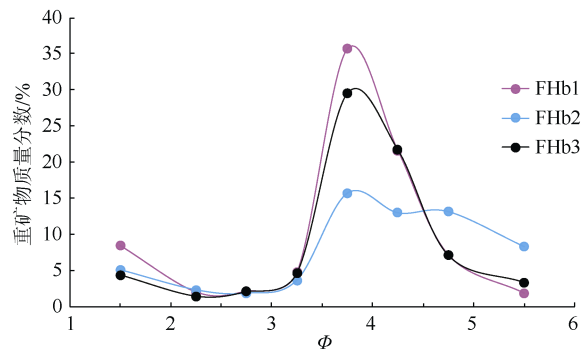


图4 废黄河口砂质海滩广粒级重矿物质量分数

Fig. 4 Heavy mineral weight content in sediments of different size fractions From the sandy beach of the abandoned Yellow River estuary

### 2.2.2 砂质海滩沉积物广粒级的主要重矿物特征

研究表明，碎屑矿物中的重矿物，因其抗风化及稳定性等的不同，不仅能保留丰富的母岩信息，而且能反映运移过程的分异作用<sup>[29]</sup>，不同比重的重矿物在不同粒度中的分配差异性很大<sup>[30]</sup>。在此，将主要重矿物合并成不同类族：普通角闪石、阳起石、透闪石为闪石族；黑云母、水黑云母、白云母为云母族；钛铁矿、褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿为铁质金属矿物类；石榴子石、楣石、磷灰石、电气石、锆石、金红石等为稳定矿物类<sup>[31]</sup>。对废黄河口门外砂质海滩沉积物广粒级的重矿物种类、含量和组合进行特征分析，探讨同一水动力下因矿物大小、形态和比重等因素造成重矿物种类与含量上的沉积分异。

在废黄河河口砂质海滩样中，重矿物的种类以闪石族、云母族和铁质金属矿物类为主，其中闪石族

以普通角闪石为主, 云母族以黑云母(包括水黑云母)为主, 铁质金属矿物类以褐铁矿为主, 稳定矿物类

以石榴子石为主。总体上, 各粒级的普通角闪石平均含量最高(图 5)。

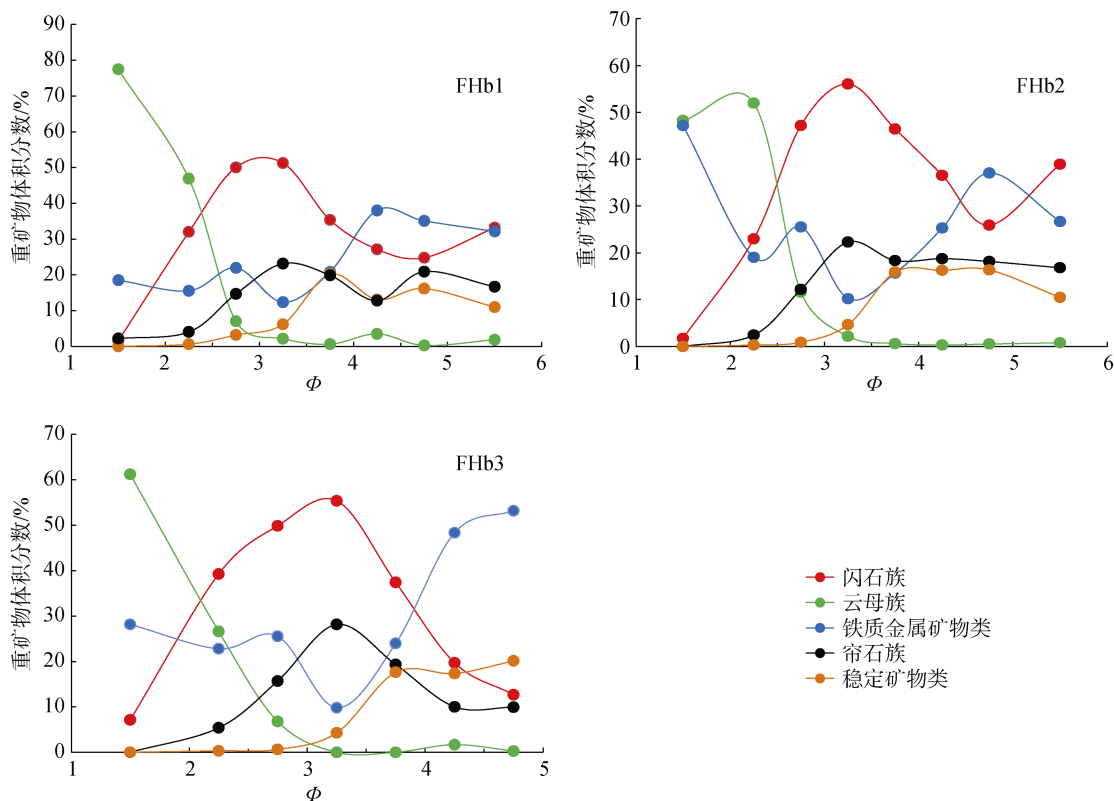


图 5 废黄河口砂质海滩样品广粒级主要重矿物族类体积分数

Fig. 5 Volume content of major heavy minerals grains in sediments of different grain size fractions in the sandy beach of the abandoned Yellow River estuary

样品 FHb1 闪石族在  $\phi < 3.5$  的范围内, 在重矿物中所占体积分数随着沉积物粒度的细化而增大, 在  $\phi$  为 3.5 之后, 随着沉积物粒度的增大, 其体积分数有所下降; 帘石族矿物在  $\phi$  为 3~3.5 处体积分数出现最高值为 23.15%; 云母族在重矿物中所占体积分数随着沉积物粒度的变细而减小, 最高出现在中砂粒级( $\phi < 2$ )内, 约 77.43%, 在  $\phi$  为 3 之后其体积分数减小殆尽; 铁质金属矿物类的体积分数随着粒度的变细有逐渐增多的趋势, 在  $\phi$  为 4~4.5 之间其体积分数达到最大, 约 38.02%; 稳定矿物类体积分数在  $\phi$  为 3 后逐渐增多。

在 FHb2 样品中, 闪石族的体积分数在  $\phi$  为 3~3.5 处出现高值, 达到 56.04%; 帘石族矿物随着粒度的细化逐渐增多, 在  $\phi$  为 3~4 处其体积分数出现高值, 而后体积分数趋于平缓; 云母族在重矿物中所占的体积分数整体上随着沉积物粒度的变细而减小, 最高出现在  $\phi$  为 2~2.5 的范围内, 约 66.8%, 在

$\phi$  为 3 之后体积分数降至很低, 为 0.56%; 稳定矿物类在  $\phi$  为 3 后逐渐增多并趋于平缓; 铁质金属矿物类在  $\phi$  为 3 后符合随粒级细化而其体积分数逐渐增多的一般趋势, 但在  $\phi$  为 2 之前有翘起现象, 最高约为 47.18%, 主要原因是此粒级段以板状、皮壳状的褐铁矿为主, 因在河口区受海水顶托作用胶体凝结而成的自生矿物<sup>[32]</sup>, 受水动力分异的影响不大。

在 FHb3 样品中(图 5), 闪石族在  $\phi$  为 3~3.5 处体积分数出现高值为 55.35%; 帘石族同样在  $\phi$  为 3~3.5 处体积分数最高为 28.13%; 云母族在重矿物中所占体积分数随着沉积物粒度的变细而减小, 最高出现在  $\phi < 2$  的范围内, 约为 61.19%, 在  $\phi > 3$  的范围内含量很低; 铁质金属矿物类的体积分数随着粒度的变细有逐渐增多的趋势, 在  $\phi$  为 4.5~5 之间达到最大, 约 53.17%, 其中钛铁矿占到 50%之多, 褐铁矿和赤铁矿次之; 稳定矿物类在  $\phi$  为 3.5 之后逐渐增多至 20%左右。

综上,同一水动力和沉积环境下,因矿物本身大小,结晶形状,比重等性质的不同,不同粒级内会形成不同的优势矿物组合,在中砂组分中,废黄河河口砂质海滩样品重矿物组合为黑云母+褐铁矿;细砂粒级组分中,其重矿物组合为黑云母+普通角闪石+褐铁矿;在极细砂粒级部分,其重矿物组合则为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿;粗粉砂粒级部分的重矿物组合是钛铁矿+石榴子石+普通角闪石。比重小且以片状、板状为主的矿物在粗粒级端富集,比重较大且粒状或自形性强的矿物则在粉砂组分中含量增多。

### 2.3 废黄河河口沉积物极细砂粒级重矿物特征对比分析

对废黄河河口样品极细砂(0.125~0.063 mm)粒级进行重矿物鉴定,因 FHH5 沉积物颗粒较细,基本不含极细砂组分,因此没有进行重矿物分析。废黄河河口陆域样极细砂粒级重矿物平均质量分数为 0.94%,砂质海滩样品中重矿物平均质量分数为 15.66%。废黄河河口沉积物中重矿物种类较多,可达 30 余种。

废黄河河口陆域样重矿物组合为普通角闪石+

褐铁矿+绿帘石, FHH4 云母含量较高,其重矿物组合为普通角闪石+黑云母+绿帘石;另外,海滩样(FHb1—FHb3)重矿物组合为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿。次要矿物有阳起石、石榴子石、楣石、磷灰石、斜黝帘石;少量矿物有透闪石、磁铁矿、钛铁矿、菱镁矿、水黑云母;偶见黝帘石、普通辉石、透辉石、金红石等。

将废黄河河口沉积物中陆域样与砂质海滩样极细砂粒级中主要重矿物体积分数进行对比发现(图 6),砂质海滩样闪石族矿物的体积分数(46.48%)低于陆域样闪石族体积分数(57.09%),其中普通角闪石占主要部分,分别为 38.29%和 43.92%;砂质海滩样沉积物中帘石族矿物体积分数(21.62%)高于陆域样(7.41%);对比云母族体积分数,砂质海滩样中云母族体积分数为 1.39%,陆域样品中的云母体积分数为 15.61%;砂质海滩样中稳定矿物类体积分数(12.16%)要比陆域样高(5.91%),陆域样品中锆石和金红石含量极低,石榴子石、磷灰石和楣石占主要部分。两者的铁质金属矿物含量相差不大,砂质海滩样略高于陆域样,主要是其钛铁矿含量较高。

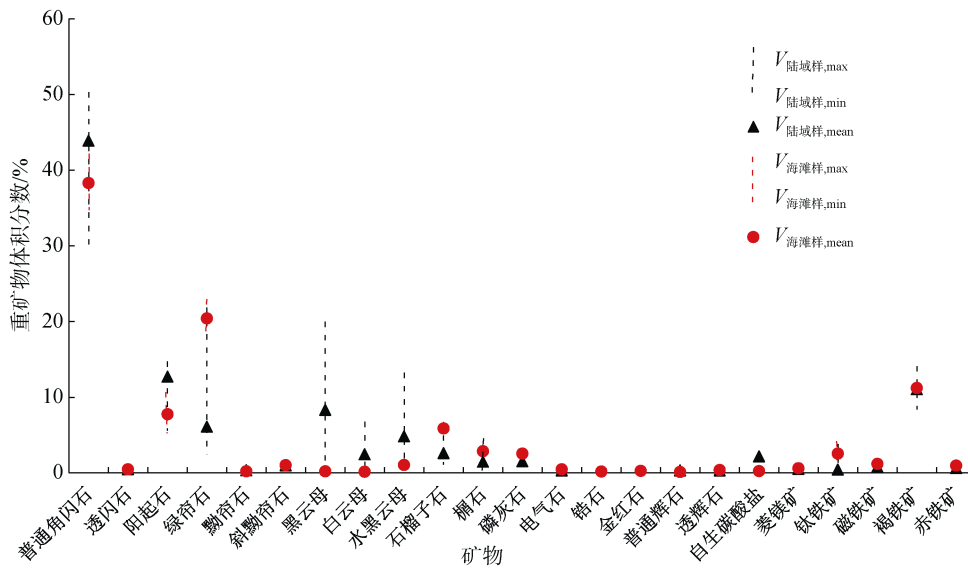


图 6 废黄河河口陆域样和砂质海滩样主要重矿物体积分数对比图

Fig. 6 Comparison of main heavy mineral contents between land and sandy beaches in the abandoned Yellow River estuary

注:  $V_{\text{陆域样,max}}$ 、 $V_{\text{陆域样,min}}$ 、 $V_{\text{陆域样,mean}}$  分别为陆域样某矿物体积分数最大值、最小值、平均值;  $V_{\text{海滩样,max}}$ 、 $V_{\text{海滩样,min}}$ 、 $V_{\text{海滩样,mean}}$  分别为砂质海滩样某矿物体积分数最大值、最小值、平均值

Note:  $V_{\text{陆域样,max}}$ 、 $V_{\text{陆域样,min}}$ 、 $V_{\text{陆域样,mean}}$  are the maximum, minimum, and average values of the volume fraction of minerals in the land;  $V_{\text{海滩样,max}}$ 、 $V_{\text{海滩样,min}}$ 、 $V_{\text{海滩样,mean}}$  are the maximum, minimum, and average values of the volume fraction of minerals in the sandy beach

相较于废黄河河口陆域样品沉积物,砂质海滩样品中比重较大的矿物族类体积分数较高,如帘石族、

稳定矿物类以及铁质金属矿物类;而比重较小的矿物如闪石族、云母族矿物含量会减少,与水动力强

弱相关。另外,陆域样各重矿物最大值与最小值的跨度大于砂质海滩样;同时因海滩样分选好于陆域样,导致稀有矿物比如锆石和金红石等富集。综上,说明因水动力条件、分选程度以及沉积环境造成的沉积分异作用,使得即使是同一粒级,不同样品之间的重矿物含量和种类也会不同。

### 3 讨论

#### 3.1 废黄河口门外砂质海滩形成机制

江苏北部沿岸发育了我国最长的潮坪沉积带,延伸远且稳定,潮差为 2~4 m,潮坪宽度为 10 km<sup>[33]</sup>左右。苏北潮坪带的形成不只是由于该地区潮差大、地形缓、波浪作用弱,且在 1128—1855 年黄河夺淮期间从黄土高原带来大量的粉砂物质,在苏北沿岸地区迅速沉积了大量泥沙,形成了 20 m 多的黄灰色沉积层构成的废黄河三角洲,其表层物质组成多为泥或粉砂质黏土<sup>[34]</sup>,为苏北潮坪的形成提供了丰富的细粒沉积物。自黄河改道北上后,废黄河入海泥沙量减少,海岸演变由河流作用为主的堆积过程转变为海洋动力作用下的岸滩侵蚀改造<sup>[35]</sup>,由于缺乏新的物质来源,废黄河口附近沿岸成为退蚀型潮坪。

沉积物输运是波浪、潮流、海流、径流等多种因素综合作用的结果,波浪掀砂和潮流输砂是海岸侵蚀的动力机制<sup>[36]</sup>。研究区海洋水动力主要为潮流和波浪,废黄河三角洲沿岸潮汐为正规半日潮,受潮波系统影响,无潮点附近的潮差较小,由三角洲附近向南北两侧增大,潮流以往复型强潮流为主<sup>[37]</sup>,涨潮为 SE 向,落潮为 NW 向,主流向大致与岸线平行,涨潮流速大于落潮流速,流速由北至南增大。废黄河三角洲的海岸线向海凸出,岸外没有天然屏障,灌河口至中山河口、废黄河口和扁担港以南的区域波能比较集中。因此,波浪辐聚区的动力作用较强,较细的沉积物在波浪、潮流作用下被侵蚀、搬运,导致近岸区域的沉积物明显粗化。再加上该地区常风浪来自 NE 向,强风浪扰动效应明显,平均风速近海为 4~5 m/s,波高多集中在 1 m 左右,周期 4~5 s<sup>[38]</sup>。研究区细颗粒沉积物一般沿西北和东南两侧运移<sup>[39]</sup>,较粗的物质则就地沉积或做短距离运移,砂粒含量逐渐富集<sup>[40]</sup>,废黄河入海口外泥质海岸中的砂质海滩的表层沉积物 3 个样品砂质组分的平均质量分数达到了 99%以上,其中细砂和极细砂粒级的平均质量分数分别为 58.33%和 38.72%。废黄河口门外海滩

样多以细砂和极细砂组分为主,经强波浪作用大部分粉砂和泥质组分被带走,反映了较强的水动力作用对沉积物侵蚀的结果,形成废黄河河口小范围的砂质海滩。

#### 3.2 重矿物特征对沉积分异作用的响应

随着搬运介质速度的降低,被搬运物沿搬运方向按颗粒大小、形状或矿物比重依次沉积下来<sup>[41]</sup>。若水动力增强,沉积下来的物质则会进行进一步的搬运,进而产生沉积分异。沉积物的颗粒大小、形状、比重是沉积分异作用的主要内部因素<sup>[42]</sup>,对于废黄河河口来说,河流及海洋的水动力条件及沉积环境是产生沉积分异至关重要的外部因素。沉积物的粒度组成和矿物组合尤其是重矿物的特征都是对不同沉积分异作用的体现<sup>[26]</sup>,海滩砂样广粒级重矿物质量分数为 3.66%,且在极细砂粒级中重矿物质量分数达到 15.66%,粗粉砂粒级的重矿物质量分数为 13.96%。一般来说,沉积物整体粒度较粗且重矿物含量较高,表明水动力较强,从而使得分选变好,说明沉积分异作用大<sup>[43-44]</sup>。

矿物的密度和物理化学稳定性会对沉积矿物组合产生影响,不同的气候环境、风化条件和搬运机制可以使碎屑物发生沉积分异作用,导致重矿物组成的含量变化<sup>[45]</sup>。经研究,近代黄河沉积物的重矿物组合以云母+普通角闪石+绿帘石为特征<sup>[46]</sup>,废黄河河口陆域样重矿物组合为普通角闪石+褐铁矿+绿帘石、普通角闪石+黑云母+绿帘石;另外,海滩样重矿物组合为普通角闪石+绿帘石+褐铁矿。废黄河口陆域和海滩物质都属于黄河沉积物,为同一物源,陆域样沉积物粒度和重矿物含量都低于砂质海滩样品沉积物,是水动力分选差异造成沉积作用分异的结果。另外,比重较大但体积小的矿物与比重较小但体积较大的矿物一同沉积<sup>[26]</sup>,造成不同粒级重矿物成分与含量有所不同。粗粒级中云母所占含量较高,这是由于云母虽然比重低,但其为层状结构,物理风化方式大多沿片状解理破碎变薄为板状或片状,不易破碎变细,且沉降速度远小于其他类球状矿物,故而颗粒大的云母在强水动力下不会与同等体积的矿物共同沉积,而会与比重大的较小矿物一同沉积,且在粗粒级中富集;而破碎成细小颗粒的云母则在水动力条件较弱的环境下同其他更加细小的矿物颗粒沉积下来,造成整体粒度较细的沉积物中云母含量较高。一些稳定矿物比如锆石在母岩中一般细小

且自形性较好,铁质金属类矿物比重大,也多在细粒级富集。闪石族矿物比重和硬度适中且作为主要造岩矿物之一,在各个粒级中分布广泛,含量也较高;帘石族矿物因比重略大于闪石族矿物,多出现在比闪石族富集粒级更细的粉砂分样中。同一样品不同粒度所沉积的重矿物种类有所不同,原因在于各种矿物的大小、形态、比重等物理及化学性质的不同,在搬运过程中的会出现差异沉降,沉积物中不同粒级下矿物组成及含量呈现明显的差异性也是对沉积分异作用的响应。

## 4 结论

1) 废黄河口门外海滩样以砂质组分为主,平均粒径  $\Phi$  为 2.67 (0.16 mm),分选程度较好,偏态为微负偏,呈现出水动力作用较强下的海滩砂样特征。

2) 海滩样各粒级重矿物含量大致呈正态分布,在  $\Phi$  在 3.5~4.5 粒级中含量最多,粗粒端和细粒端含量降低,广粒级重矿物平均质量分数为 3.66%。在中砂组分有翘起现象,原因是该粒级段云母和褐铁矿较多。不同重矿物质量分数随粒径变化而变化,形成不同的重矿物组合,砂组分重矿物组合为黑云母+普通角闪石+褐铁矿,粉砂组分则为钛铁矿+石榴子石+普通角闪石。

3) 因水动力条件、分选程度以及沉积环境造成的沉积分异作用,即使是同一粒级,不同样品之间的重矿物特征也会不同。废黄河口门外砂质海滩极细砂(0.125~0.063 mm)粒级中重矿物平均质量分数为 15.66%,而陆域样仅占 0.94%,海滩砂样沉积分异作用强,比重大且稳定性较高的矿物富集。

### 参考文献:

[1] 李玉中. 沉积分异作用与河口海洋沉积[J]. 地质学刊, 2014, 38(4): 556-560.  
Li Yuzhong. Sedimentation differentiation and surface deposition for estuary and oceans[J]. Journal of Geology, 2014, 38(4): 556-560.

[2] 刘秀明, 罗祎. 粒度分析在沉积物研究中的应用[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(8): 20-23.  
Liu Xiuming, Luo Y. Application of grain size analysis in sediments research[J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(8): 20-23.

[3] Krippner A, Meinhold G, Morton A C. Grain-size dependence of garnet composition revealed by provenance signatures of modern stream sediments from the Western Hohe Tauern (Austria)[J]. Sedimentary Geology, 2015,

321: 25-38.

[4] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 12-17.  
Chen Lirong. Chinese Marine Sedimentary Mineralogy[M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 12-17.

[5] 王凤, 金秉福. 广西海岸带有用重矿物粒级分布[J]. 海洋科学, 2010, 34(12): 57-66.  
Wang Feng, Jin Bingfu. Grain size distributions of heavy minerals in the littoral zone of Guangxi Province[J]. Marine Sciences, 2010, 34(12): 57-66.

[6] 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.

[7] 孟宪伟, 杜德文, 王湘芹. 南黄海表层沉积物物质来源的逐步判别分析[J]. 地质论评, 2000, 46(S1): 269-273.  
Meng Xianwei, Du Dewen, Wang Xiangqin. Stepwise discriminant analysis used for discriminant sediment source of south of the Yellow Sea[J]. Geological Review, 2000, 46(S1): 269-273.

[8] 王昆山, 石学法, 姜晓黎. 南黄海沉积物的来源及分区: 来自轻矿物的证据[J]. 科学通报, 2001, 46(S1): 24-29.  
Wang Kunshan, Shi Xuefa, Jiang Xiaoli. Sources and zoning of sediments in the South Yellow Sea: Evidence from light minerals[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(S1): 24-29.

[9] 张晓祥, 王伟玮, 严长清, 等. 南宋以来江苏海岸带历史海岸线时空演变研究[J]. 地理科学, 2014, 34(3): 344-351.  
Zhang Xiaoxiang, Wang Weiwei, Yan Changqing, et al. Historical coastline spatiotemporal evolution analysis in Jiangsu coastal area during the past 1000 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(3): 344-351.

[10] 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.

[11] 王志一, 徐素宁, 姜艳辉, 等. 苏北废黄河三角洲岸线变迁与海岸冲淤动态遥感监测[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 136-139, 154.  
Wang Zhiyi, Xu Suning, Jiang Yanhui, et al. Remote sensing based dynamic monitoring of coast line change and coastal erosion and deposition of the abandoned Yellow River Delta in norther area of Jiangsu Province[J].



- South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 136-139, 154.
- [12] 陈可锋, 王艳红, 陆培东, 等. 苏北废黄河三角洲侵蚀后退过程及其对潮流动力的影响研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 189-196.  
Chen Kefeng, Wang Yanhong, Lu Peidong, et al. Research on the abandoned Huanghe River Delta erosion process and impact on tidal current dynamic characteristic of the Huanghai Sea off the coast of north Jiangsu, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3): 189-196.
- [13] 夏非, 张永战, 王瑞发, 等. 苏北废黄河水下三角洲沉积范围研究述评[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 29-48.  
Xia Fei, Zhang Yongzhan, Wang Ruifa, et al. Review for the studies on sedimentation range of the abandoned Yellow River subaqueous delta, North Jiangsu Plain Coast[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 70(1): 29-48.
- [14] 刘小喜, 陈沈良, 蒋超, 等. 苏北废黄河三角洲海岸侵蚀脆弱性评估[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 607-618.  
Liu Xiaoxi, Chen Shenliang, Jiang Chao, et al. Vulnerability assessment of coastal erosion along the abandoned Yellow River Delta of northern Jiangsu Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 69(5): 607-618.
- [15] 张云吉, 王凤, 金秉福. 广西铁山港表层沉积物碎屑矿物组成、分布及水动力环境分析[J]. 海洋科学, 2013, 37(6): 95-101.  
Zhang Yunji, Wang Feng, Jin Bingfu. Composition and distribution of detrital minerals in surface sediments and their relations with hydrodynamic environment in the Tieshan Bay, Guangxi Province[J]. Marine Sciences, 2013, 37(6): 95-101.
- [16] 陆勤, 陈沈良. 废黄河三角洲海域表层沉积物分布特征[J]. 上海国土资源, 2011, 32(1): 14-19.  
Lu Qin, Chen Shenliang. Distribution of surface sediments on the subaqueous delta of the abandoned Yellow River Delta[J]. Shanghai Land and Resources, 2011, 32(1): 14-19.
- [17] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24(3): 151-158.
- [18] 任迎新, 朱宝华. 重砂矿物分选及鉴定[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1987, 87-99.  
Ren Yingxin, Zhu Baohua. Sorting and Identification of Heavy Sand Minerals[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1987: 87-99.
- [19] 林振宏, 吕亚男. 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, 1996, 26(3): 361-368.  
Lin Zhenhong, Lü Yanan. Distribution and sources of heavy mineral in the surface sediment in the middle Okinawa trough[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1996, 26(3): 361-368.
- [20] 杨旭辉, 冯秀丽, 褚忠信, 等. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, 42(Z2): 126-134.  
Yang Xuhui, Feng Xiuli, Chu Zhongxin, et al. Surface sediment distribution and sedimentary environment on the East China continental shelf[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(Z2): 126-134.
- [21] 冯秀丽, 魏飞, 刘杰, 等. 渤海湾西部表层沉积物粒度及黏土矿物特征分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(8): 70-77.  
Feng Xiuli, Wei Fei, Liu Jie, et al. The sediment grain size characteristics and analysis of sources in the western Bohai Bay[J]. Marine Sciences, 2015, 39(8): 70-77.
- [22] 战庆, 王张华, 王昕, 等. 长江口区晚新生代沉积物粒度特征和沉积地貌环境演变[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 674-683.  
Zhan Qing, Wang Zhanghua, Wang Xin, et al. Grain-size characteristics and geomorphology evolution in late cenozoic era sediments, Changjiang Estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 674-683.
- [23] Eynatten H, Tolosana-Delgado R, Karius V. Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition[J]. Sedimentary Geology, 2012, 280: 80-92.
- [24] 张凌华, 张振克, 符跃鑫, 等. 长江下游南京-镇江河段河漫滩粒度特征[J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1183-1190.  
Zhang Linghua, Zhang Zhenke, Fu Yuexin, et al. Grain-size characteristics of overbank sediments in the lower reaches of the Changjiang River and its environmental implication[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(9): 1183-1190.
- [25] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学, 2012, 36(2): 129-135.  
Jin Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis[J]. Marine Sciences, 2012, 36(2): 129-135.
- [26] Garzanti E, Andò S, Vezzoli G. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies[J]. Earth Planet, 2009, 277(3-4): 422-432.
- [27] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sediment Geology, 1999, 124(1): 3-29.
- [28] 王昆山, 姜晓黎, 叶青, 等. 南黄海潮流沙脊区表层沉积物重矿物分布及来源[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(5): 1-11.  
Wang Kunshan, Jiang Xiaoli, Ye Qing, et al. Distribution and source of heavy minerals in the surface sedi-

- ment of the tidals and ridges area in South Yellow Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 1-11.
- [29] 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.
- [30] Yang Shouye, Wang Zhongbo, Guo Yun, et al. Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(1): 56-65.
- [31] 高文华, 高抒, 王丹丹, 等. 废黄河沉积记录中来自不同河流物质的信息: 基于重矿物与地球化学元素分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(12): 1631-1639.  
Gao Wenhua, Gao Shu, Wang Dandan, et al. Sediment source information of different catchments in the sedimentary records of the abandoned Yellow River: Heavy mineral and geochemical analyses[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(12): 1631-1639.
- [32] 金秉福, 张云吉, 宋键. 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(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 and Quaternary Geology*, 2007(3): 9-15.
- [33] 王琦, 朱而勤. *海洋沉积学*[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 18-31.  
Wang Qi, Zhu Erqin. *Marine Sedimentology*[M]. Beijing: Science Press, 1989: 18-31.
- [34] 陈斌, 周良勇, 刘健, 等. 废黄河口海域潮流动力与悬沙输运特征[J]. *海洋科学*, 2011, 35(5): 73-81.  
Chen Bin, Zhou Liangyong, Liu Jian, et al. The relationship between the suspended sediment movement and tidal current dynamic characteristic in Old Yellow River Delta[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(5): 73-81.
- [35] 陈沈良, 张国安, 陈小英, 等. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀及机理[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 9-14.  
Chen shenliang, Zhang Guoan, Chen Xiaoying, et al. Coastal erosion feature and mechanism at feiyantan in the Yellow River Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 9-14.
- [36] 刘强, 项立辉, 张刚, 等. 苏北废黄河口表层沉积物分布特征及其控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 118-126.  
Liu Qiang, Xiang Lihui, Zhang Gang, et al. Distribution patten of surface sediments around the abandoned Yellow River estuary of North Jiangsu Province and its controlling factors[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 118-126.
- [37] 吴永成, 黄海军, 杨玉玲. 水动力在江苏北部岸外辐射沙洲形成和演变中的作用[C]//中国科学院海洋研究所. *海洋科学集刊*(40). 北京: 科学出版社, 1998: 55-63.  
Wu Yongcheng, Huang Haijun, Yang Yuling. Hydraulic dynaical effect on the formation and evolution processes of the deltaic sand banks off northern Jiangsu coast[C]// Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. *Studia Marina Sinica*(40). Beijing: Science Press, 1998: 55-63.
- [38] 陈洪全, 彭俊, 陈沈良, 等. 苏北废黄河三角洲海域表层沉积物粒度的空间变异和分布特征[J]. *应用海洋学报*, 2014, 33(4): 574-580.  
Chen Hongquan, Peng Jun, Chen Shenliang, et al. Spatial variability characteristics of sediment grain size in sea area of the abandoned Yellow River Delta, North of Jiangsu Province[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(4): 574-580.
- [39] 郭志刚, 张东奇. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 71-80.  
Guo Zhigang, Zhang Dongqi. Seasonal distribution of suspended matter in the Northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(5): 71-80.
- [40] 贺松林. 东海近岸带沉积物陆源矿物组分的比较研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1991(1): 78-86.  
He Songlin. Comparative study of terrigenou miniroil component of sediment along nearshore area of the East China Sea[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 1991(1): 78-86.
- [41] Zhang Lin, Chen Shenliang, Pan Shunqi, et al. Sediment variability and transport in the littoral area of the abandoned Yellow River Delta, northern Jiangsu[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(4): 717-730.
- [42] Xing Fei, Wang Yaping, Wang H V. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 291: 192-210.
- [43] Eduardo G, Sergio A, Giovanni V. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(2): 138-151.
- [44] Frihy O E. Spatial variations in heavy minerals and patterns of sediment sorting along the Nile Delta, Egypt[J]. *Geology*, 1995, 97(1): 33-41.
- [45] 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 Zhengbo. Characteristics

of mineralogy in the clastic sediments from the Yellow River provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 17-21.

## Characteristics of grain size and heavy minerals of sandy beach outside the abandoned Yellow River Estuary and its genetic mechanism

WANG Meng-yao, JIN Bing-fu, WANG Xin, LI Kun

(College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Received:** Aug. 27, 2018

**Key words:** heavy minerals; sedimentary differentiation; grain size analysis; sandy beach; the abandoned Yellow River Estuary

**Abstract:** To study the products under the influence of material sedimentation in the process of the Yellow River's southward transition and track the migration process of the abandoned Yellow River sediments in the South Yellow Sea, the grain size compositions were measured, and the characteristic parameters of sediments in the sandy beach outside the abandoned Yellow River estuary, the heavy mineral content, and the characteristics of each species sample were analyzed. In addition to comparing the land sediments on the abandoned Yellow River estuary, characteristics of heavy mineral deposition under different sedimentary conditions were evaluated. The results show that the sandy beach sediments had an average grain size  $\Phi$  of 2.67 (0.16 mm), which were well sorted and slightly negative skewness, and was characterized by beach sand grain size. The land size sediments had a large particle size range and were mainly composed of silt components, a feature of river sedimentation. In addition, the beach sand samples were analyzed for multiple-window ( $\Phi$  was within 1~6) heavy minerals. The heavy mineral content was highest in the fine sand and coarse silt grades. Different grades had different mineral combinations. The heavy mineral combination of sand grade was biotite + hornblende + limonite, and that of silt was ilmenite + garnet + hornblende. The weight content of the sandy beach wide-grained heavy mineral was 3.66%, and very fine sand (0.125~0.063 mm) fractions had a heavy mineral weight content of 15.66%. The minerals with higher specific gravity and higher stability were enriched in the fine sand grade of sandy beach samples, indicating that the heavy minerals in the beach are strongly sorted.

(本文编辑: 刘珊珊)