

孟丽卫, 王龙升, 战超, 等. 现代黄河三角洲沉积物粒度端元特征及其对河道变迁和人类活动的响应[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(9): 16-24.

MENG Liwei, WANG Longsheng, ZHAN Chao, et al. End-member characteristics of sediment grain size of modern Yellow River Delta sediments and their response to channel shifts and human activities[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(9): 16-24.

现代黄河三角洲沉积物粒度端元特征及其对河道变迁和人类活动的响应

孟丽卫¹, 王龙升^{1,2*}, 战超¹, 刘现彬¹, 王庆¹

(1 鲁东大学海岸研究所, 烟台 264025;

2 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003)

摘要:黄河三角洲沉积物记录了长时间尺度黄河流域环境变化, 对流域河流改道和水库建设等自然和人类活动响应敏感。本研究以黄河 1976 年以来入海口附近陆上三角洲 YDC 钻孔为研究对象, 采用参数化端元 (EM) 分析模型对 YDC 钻孔的粒度数据进行分析, 结果表明: ①EM1 和 EM2 由粒径较细的黏土和细粉砂组成, 为黄河长距离搬运弱水动力条件下沉积, EM3 和 EM4 为粗粉砂组分, 为较强动力条件下波浪和潮流作用沉积; ②对比河道变迁和人类活动等资料, 结合前人黄河口沉积速率研究数据, 表明 YDC 钻孔粒度特征变化显著的界面可以作为黄河口沉积物定年的参考点; ③YDC 钻孔粒度参数和端元数据敏感地响应于 1976 年以来黄河改道清水沟入海、龙羊峡水库建设、黄河改道清 8 汊入海等自然和人类活动。研究结果对黄河三角洲河口治理和沿岸工程建设具有重要现实意义, 并可为黄河流域生态保护与高质量发展提供科学依据。

关键词: 粒度特征; 端元分析; 河道变迁; 人类活动; 黄河三角洲

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.202

0 引言

三角洲地区是海洋与陆地交互作用的地区, 对全球及区域气候和环境变化十分敏感。同时, 三角洲地区的气候演化、海平面变化及其形成与发育成为影响人类文明发展的重要自然因素, 其发育模式、规律及影响机制受到学者广泛关注^[1-3]。1885 年,

黄河从肖神庙入渤海, 携带大量沉积物在渤海西南部形成了 5 000 km² 的现代黄河三角洲。此后的 100 余年内, 黄河河道共发生 10 余次变迁, 1976 年黄河经人工改道自清水沟入海, 形成了最新的黄河三角洲^[4-5]。同时, 近年来随着黄河中上游水库建设、调水调沙等人类活动的加强, 黄河入海水沙成分发生显著改变^[1, 6-7]。黄河口沉积物真实地记录了黄河改道和水库建设等自然和人类活动, 因此, 开展黄河口沉积物研究为黄河三角洲地区地貌演化、动力变迁等提供了新的依据^[1, 8]。然而, 受黄河口位置变迁、沉积物定年困难、沉积环境欠稳定等因素影响, 对黄河口连续沉积记录的研究尚显不足^[1]。

粒度作为沉积物最基本的物理性质之一, 可有效反映沉积物物质来源、搬运-沉积过程、搬运方式及沉积环境等信息^[9-11]。然而, 受制于沉积物来源的多样性、搬运动力的多变化性和沉积环境的复杂性等因素, 使得粒度在解释其环境意义时具有复杂

收稿日期: 2022-07-12

资助项目: 国家自然科学基金(U1706220, 41702185, 41901102); 山东省重点研发计划(软科学)项目(2022RKY07006); 山东省自然科学基金(ZR2019PD013); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金(2022SKL005); 中国科学院海岸带环境过程生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)开放基金(2020KFJJ10); 山东省高等学校青年创新团队引育计划项目

作者简介: 孟丽卫(1998-), 女, 在读硕士, 主要从事河口海岸地貌环境演变方面的研究工作。E-mail: mlw6590@163.com

* 通讯作者: 王龙升(1988-), 男, 博士, 副教授, 主要从事河口海岸地貌环境演变等方面的研究工作。E-mail: 52wls@163.com

性和不确定性^[8-9], 全样的粒度参数只能近似的指示沉积环境的变化。而粒度端元分析模型可以将沉积物粒度分解成为与特定沉积过程有关的、具有特定粒度特征分布的端元, 在减少人为误差的同时, 将特征端元置于时间序列上可以判断环境因子的变化情况, 将分离出的粒度端元置于空间平面上能够有效识别出能够揭示沉积物物质来源、沉积动力组分组合特征等端元信息^[12-13], 因而在河口三角洲沉积环境演变、物源识别、人类活动指示等研究中得到广泛应用^[14-18]。张晓东等^[18]利用端元分析模型对长江口邻近海域的沉积物粒度数据进行分析, 了解了长江口区域沉积物的输运机制和沉降规律; 林镇坤等^[19]利用广西南流江河口水下三角洲表层沉积物进行粒度分析并结合端元分析模型对沉积物粒度数据进行分解, 探讨了水下三角洲的沉积动力作用的空间差异以及环境控制下的沉积物输送趋势; 解锡豪等^[20]利用闽江河段沉积物结合粒度端元分析来探讨各端元指示与传统指标的关系, 为海岸沙丘重建区域环境提供新的思路和方法。目前, 对黄河三角洲地区沉积物粒度端元的研究相对较少, 本研究以现代黄河三角洲黄河口 YDC 钻孔为研究对象, 分析沉积物粒度端元特征, 探讨粒度特征的年代学意义, 解释其对河道变迁和人类活动的响应机制。研究结果为黄河三角洲的规划治理与工程建设提供指导, 并对黄河三角洲的保护和可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

现代黄河三角洲(37°45.77'–38°12.31'N)以垦利县宁海为轴点, 形成于 1885 年之后, 由黄河多次河道变迁和泛滥而形成, 位于莱州湾和渤海湾之间(图 1)。根据黄河口利津水文站统计数据, 利津站多年平均径流量为 $3.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 年平均输沙量为 $8.39 \times 10^8 \text{ m}^3$, 近几十年来, 随着黄河流域水资源开发利用、小浪底水库等水利工程建设、调水调沙等人类活动的影响^[1, 21], 黄河入海水量逐年减少。现代黄河三角洲属于暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水量 530~630 mm, 四季温差明显。夏季炎热多雨, 有时会受台风侵袭, 冬季寒冷干燥, 盛行风为北风或西北风。除黄河三角洲自然保护区外, 其他地区均已开垦为农田, 农作物主要为棉花、玉米和水稻。

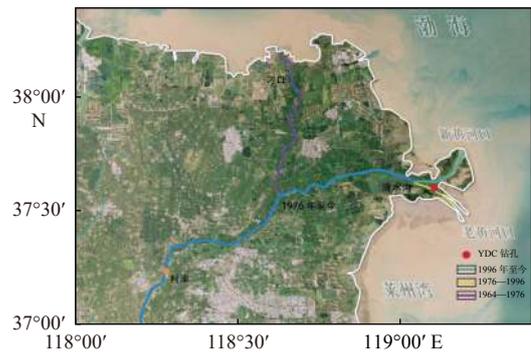


图 1 黄河三角洲河道变迁和钻孔位置

Fig.1 River channel changes and core locations in the Yellow River Delta

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

2018 年, 在现代黄河三角洲清 8 汉南部附近钻获 YDC 钻孔 (37°44'37.88"N、119°11'17.03"E) (图 1), 采集点高程为 1.5 m, 钻孔深度为 104 cm。在实验室对岩芯进行岩性描述, 以每 2 cm 间隔分样, 共获取沉积物样品 52 个。样品粒度测试在鲁东大学海岸研究所使用 Mastersizer 3000 激光粒度仪进行, 测试范围为 0.01~2000 μm , 相对误差 <2%。首先, 样品沉积物中分别加入双氧水(H_2O_2)和盐酸(HCl)以去除有机质和碳酸盐(CaCO_3); 然后, 加入六偏磷酸钠($(\text{NaPO}_3)_6$)溶液作为分散剂, 用超声波震动 7 min 后进行上机测量, 每个样品重复测量 3 次取平均值进行计算分析。

2.2 数据分析

本文按照伍登-温德华氏粒径分级(Uddenh-Wentworth grade scale)划分粒组: <4 μm (黏土), 4~63 μm (粉砂), >63 μm (砂); 其中, 将粉砂又划分为 4~8 μm (极细粉砂), 8~16 μm (细粉砂), 16~32 μm (中粉砂), 32~63 μm (粗粉砂)。本研究粒度端元分析通过在 Matlab 环境下加载 PATERSON 和 HESLOP^[22]研发的 AnalySize 程序进行分析, 选择 Gen.Weibull 参数法进行粒度端元分解。确定端元数量的标准主要结合拟合度(R^2)(linear correlations, 表示原始粒度数据集与拟合端元数据之间的相关性)和角度(θ)(angular deviation, 端元数据与粒度曲线分布偏离角度), 在拟合效果较好、不存在过度拟合的前提下, 选择尽可能少的端元数量。

3 结果与分析

3.1 粒度特征

沉积物粒度组成成分不仅与其母岩有关,还与沉积环境密切相关,可以用于判别沉积物物质来源、搬运营力及其所处的沉积环境等^[8-10]。从现代黄河三角洲 YDC 钻孔沉积物粒度成分可以看出(图 2):

YDC 钻孔沉积物主要以粉砂($4\sim 63\ \mu\text{m}$)为主,含量介于 $20.28\%\sim 82.83\%$,平均含量为 58.47% 。黏土($< 4\ \mu\text{m}$)含量介于 $6.57\%\sim 79.26\%$,平均含量为 36.9% ;砂($> 63\ \mu\text{m}$)介于 $0.01\%\sim 15.98\%$,平均含量为 4.62% 。从不同深度各粒度组分组成来看,黏土含量最大值出现在 U2($60\sim 90\ \text{cm}$)处,平均含量为 65.27% ,粉砂含量最大值在 U4($0\sim 36\ \text{cm}$),平均含量为 75.72% ;砂含量最大值在 U4($0\sim 36\ \text{cm}$),平均含量为 9.82% 。

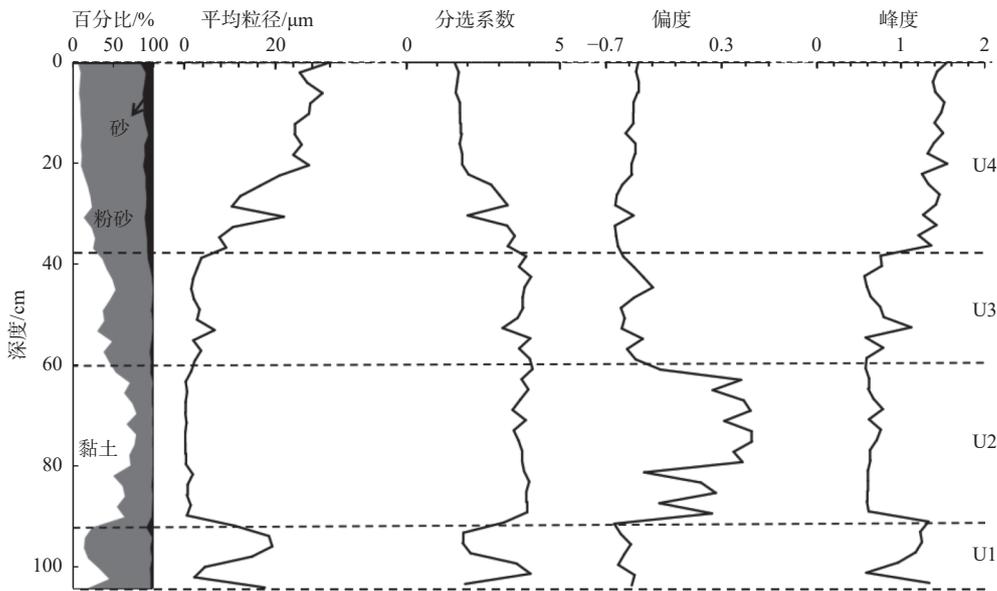


图 2 各地层粒度参数随深度变化特征

Fig.2 Characteristics of grain size parameters with depth for each stratum

沉积物粒度参数能很好地指示沉积环境条件变化^[17,23],YDC 钻孔各粒度参数如表 1、图 2 所示。平均粒径(Mz)最大值和最小值分别位于 U4($0\sim 36\ \text{cm}$)和 U2($60\sim 90\ \text{cm}$)处,暗示了不同深度沉积物沉积动力的变化。YDC 钻孔分选系数(σ)介于 $1.57\sim 4.1$,表明沉积物分选相对较差;偏态(Sk)在 U2($60\sim 90\ \text{cm}$)为正偏,而在其他深度为负偏;峰度(Kg)介于 $0.57\sim 1.56$,平均值为 1.00 ,属于窄峰度。

表 1 各地层粒度参数特征

Table 1 Characteristics of grain size parameters for each stratum

| 地层单元 | U1(90~102 cm) | U2(60~90 cm) | U3(36~60 cm) | U4(0~36 cm) |
|---------------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 平均粒径/ μm | 21.87 | 8.24 | 14.88 | 31 |
| 中值粒径(Md) | 17.77 | 2.03 | 6.69 | 26.87 |
| 分选系数(σ) | 2.56 | 3.76 | 3.81 | 2.23 |
| 偏度(Sk) | -0.52 | 0.23 | -0.44 | -0.5 |
| 峰度(Kg) | 1.1 | 0.7 | 0.71 | 1.41 |

粒度分布频率曲线和累计频率曲线可以直观地表现出沉积物粒度成分分布特征^[24]。从图 3a 粒度分布频率曲线可以看出,除 YDC 52 样品为双峰外,YDC 钻孔粒度成分呈三峰状态,粒度组成相对分散,显示出较差的分选性。第 1 峰值和第 2 峰值分别出现在 $0.02\sim 0.06\ \mu\text{m}$ 和 $0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$,属于黏土成分,第 3 峰值在 $20\sim 52\ \mu\text{m}$,属于粉砂组分。从图 3b 粒度累积频率曲线可以看出,YDC19、YDC46 和 YDC52 样品曲线斜率基本一致,且向粗成分偏移,而 YDC31 样品曲线曲率较小,粒度成分偏向细颗粒组分,暗示了搬运介质和动力条件的变化。

3.2 粒度端元分析

通过 Analysize 程序对 YDC 钻孔样品粒度数据进行参数化分析,对比不同端元数据的指标结果发现,随着端元数量增加,粒度曲线与端元拟合效果越好。当端元数为 2 时, $R^2=0.87$,角度偏差 $\theta=17$;端元数为 3 时, $R^2=0.97$,角度偏差 $\theta=8.3$;端元数为

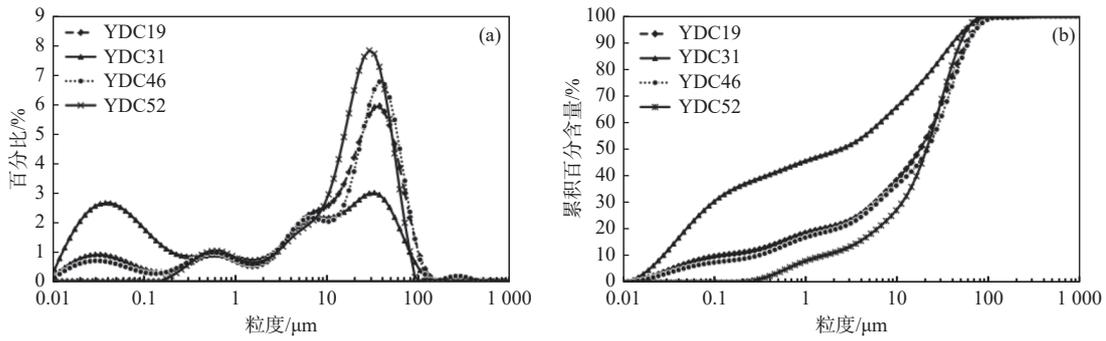


图 3 YDC 钻孔各地层单元粒度频率曲线 (a) 和粒度累积分布曲线 (b)

Fig.3 Grain size distribution (a) and accumulative frequency curves (b) of core YDC

4 时, $R^2=0.98$, 角度偏差 $\theta=5.9$, 说明此时已能满足拟合要求。当端元数为 5 和 6 时, R^2 分别为 0.99 和 0.99, 角度偏差 θ 分别为 3.7 和 2.7(图 4), 其数

值与 4 个端元时改善并不明显, 依据在满足拟合优选度选取最小端元数的原则, 本研究选择 4 个端元进行分析。

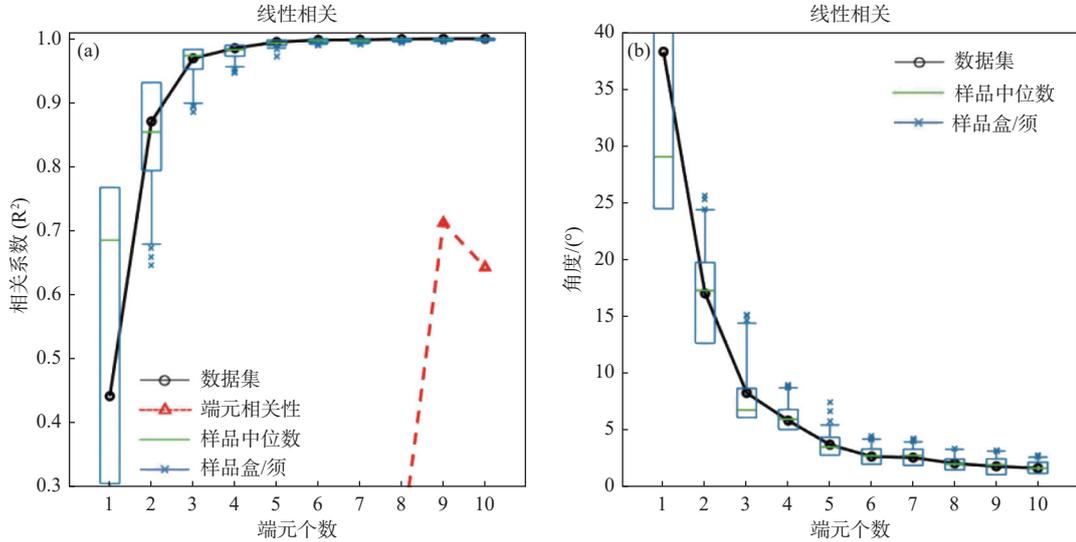


图 4 参数化端元分析结果

Fig.4 Results of parametric end-member analysis

从粒度端元参数化筛选出的粒度频率曲线(图 5)可以看出, 现代黄河三角洲 YDC 钻孔 4 个端元众数粒径分别为: EM1 为 0.05 μm , 属于黏土,

EM2 为 9.9 μm , 为细粉砂组分, EM1 和 EM2 峰区较宽, 分选性相对较差, EM3 为 40.14 μm , 属于粗粉砂, EM4 为 66.89 μm , 为砂组分, 两者峰值较高, 峰区较窄, 分选性较好。据前人研究结果, 沉积物离源区越近, 其粒度分布越粗、峰值越高、峰区越窄; 而当离源区越远时, 其粒度分布越细、峰值越低、峰区越宽^[25-27]。因此, 本研究中 EM1 和 EM2 组分离源区较远, 为长距离搬运沉积物, 而 EM3 和 EM4 组分离源区较近, 搬运距离短。

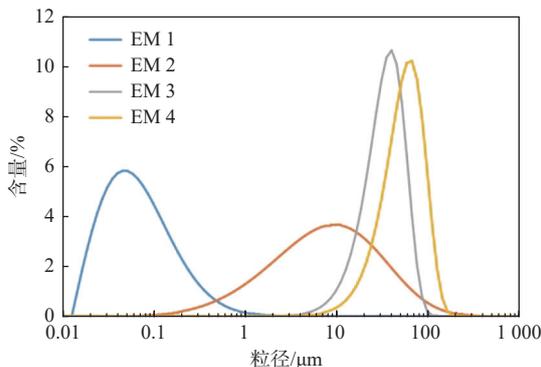


图 5 参数化端元频率分布曲线

Fig.5 Parametric end-member frequency distribution curves

从 YDC 钻孔各端元随深度变化来看(图 6), EM1 在整个钻孔中变化范围为 0.004%~67.81%, 平均值为 23.34%, 最大值出现在 U2(60~90 cm), 变化范围为 32.11%~67.81%; EM2 在钻孔中变化范围为 13.3%~56.17%, 平均值为 36.46%, 最大

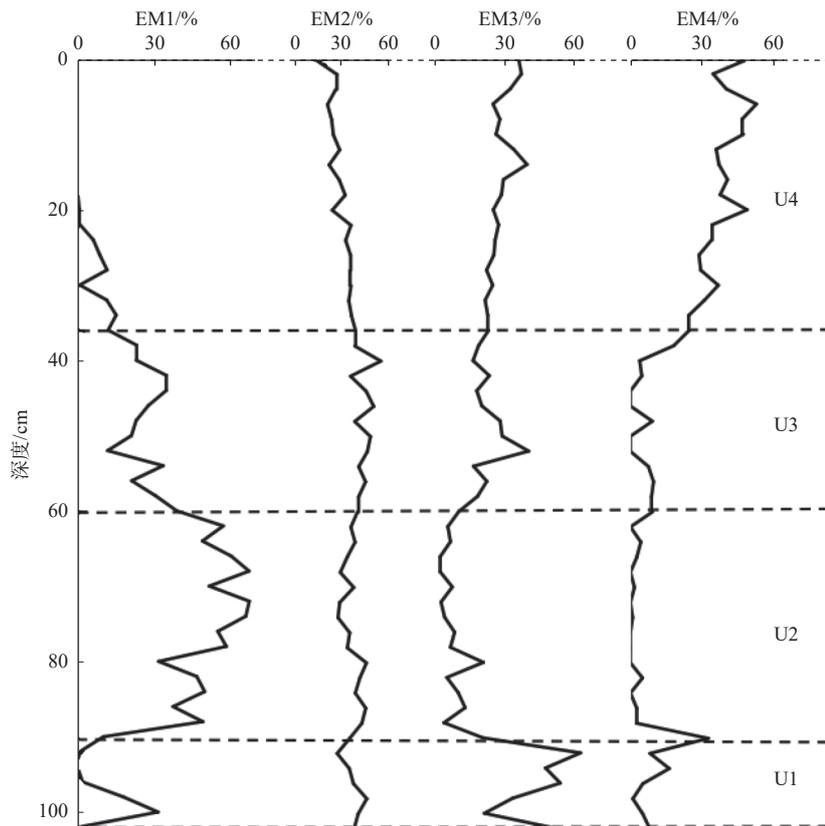


图6 各端元随深度变化曲线

Fig.6 Variation in grain size of each end member with depth

值出现在 U3 (36~60 cm), 变化范围为 39.2%~56.17%; EM3 在钻孔中变化范围为 2.42%~63.04%, 平均值为 23.09%, 最大值出现在深度 U1 (90~102 cm), 变化范围为 20.91%~63.04%; EM4 在钻孔中变化范围为 0~50.12%, 平均值为 17.11%, 最大值出现在深度 U4 (0~36 cm), 变化范围为 24.6%~50.12%。

4 讨论

4.1 钻孔粒度参数的年代意义

自 1885 年黄河改道注入渤海以来, 黄河几经改道形成了现代黄河三角洲, 黄河入海口的改变必然导致沉积环境的变化, 同时, 随着近年来人类活动的加剧, 导致现代黄河三角洲沉积环境异常复杂^[1, 7, 28-29], 使得已有的十年时间尺度沉积物定年方法(如²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 等)不适用于现代黄河三角洲^[30]。然而, 历次黄河改道和重大人类活动事件都会导致现代黄河三角洲沉积物岩性发生突变, 并使得沉积物粒度垂直方向上发生明显变化, 因此, 现代黄河三角洲岩性的变化尤其是粒度变化可以作为一种

定年的手段^[31-32]。

根据现代黄河三角洲 YDC 钻孔粒度参数、粒度端元数据和沉积特征变化, 将 YDC 钻孔分为 4 部分: U1 (90~102 cm)、U2 (60~90 cm)、U3 (36~60 cm) 和 U4 (0~36 cm)。其中, 在 90 cm 处存在明显的侵蚀界面, 下伏地层为青灰色砂质粉砂层, 为海洋动力作用下沉积物^[15-16], 而上覆地层为黄灰色粉砂质黏土, 属于黄河泥沙输入, 因此, 判定 90 cm 以上为 1976 年黄河改道清水沟输入的泥沙。YDC 钻孔中 U2 阶段黏土含量明显升高, 属于粉砂质黏土, 为典型黄河泥沙沉积物^[29, 33-34]; 与 U2 阶段相比, U3 阶段黏土含量明显降低, 粉砂含量明显升高。有研究表明, 龙羊峡水库建成后, 由于水库的调节作用, 使黄河入海泥沙减少, 粒度变粗^[35-36]。由此, 我们认为 60 cm 对应年代为 1986 年龙羊峡水库建设。通过年代再计算沉积速率发现, U2 阶段的平均沉积速率为 3 cm/a, U3 阶段的平均沉积速率为 2.4 cm/a, 验证了龙羊峡水库的建立导致沉积速率减小的猜测。YDC 钻孔在 36 cm 处岩性发生变化, 沉积物粒度由细粉砂(U3)为主变为砂质组分(U4)为主, 因此, 我们推测 U4 (0~36 cm) 为 1996 年后黄河改道清 8 汉开始的沉积, 计算沉积速率为 1.64

cm/a。宋莎莎等^[30]通过恒定初始浓度法(简称 CIC 法)测年方法对相邻区域钻孔沉积物分析,发现在 0~14 cm 处沉降速率为 1.55 cm/a;吴晓等^[37]通过对相邻区域钻孔岩芯沉积物²¹⁰Pb 测年分析,发现²¹⁰Pbex 在其岩芯 0~38 cm 稳定下降,呈最佳拟合线性回归(相关系数 $R^2=0.75$),由此估计平均沉积速率为 1.85 cm/a,其年代学数据与本研究结果相吻合,证明使用粒度变化作为定年手段是可靠的。

综上,现代黄河三角洲 YDC 钻孔各阶段的对应年代如下:U1(90~102 cm)年代为 1976 年以前,

U2(60~90 cm)年代范围为 1976—1986 年,U3(36~60 cm)年代范围为 1986—1996 年,U4(0~36 cm)年代范围为 1996—2018 年。

4.2 粒度端元的环境意义

为探讨各粒度端元的环境意义,需进一步明确粒度端元和传统粒度指标之间的关系。本研究采用 SPSS 软件分析了各粒度端元与粒度组分和参数的相关性,如表 2 所示。

表 2 各粒度端元与粒度组分、参数的相关性分析

Table 2 Correlation in grain size of each end member with the grain size components and the parameters

| | 黏土 | 粉砂 | 砂 | EM 1 | EM 2 | EM 3 | EM 4 | 平均粒径 | 分选系数 | 偏度 | 峰度 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 黏粒 | 1 | | | | | | | | | | |
| 粉砂 | -0.99 | 1 | | | | | | | | | |
| 砂 | -0.8 | 0.71 | 1 | | | | | | | | |
| EM 1 | 0.99 | -0.99 | -0.74 | 1 | | | | | | | |
| EM 2 | 0.39 | -0.32 | -0.61 | 0.29 | 1 | | | | | | |
| EM 3 | -0.8 | 0.9 | 0.33 | -0.83 | -0.21 | 1 | | | | | |
| EM 4 | -0.82 | 0.74 | 0.97 | -0.75 | -0.68 | 0.36 | 1 | | | | |
| 平均粒径 | -0.88 | 0.85 | 0.85 | -0.84 | -0.70 | 0.64 | 0.90 | 1 | | | |
| 分选系数 | 0.83 | -0.81 | -0.72 | 0.78 | 0.68 | -0.69 | -0.78 | -0.96 | 1 | | |
| 偏度 | 0.83 | -0.85 | -0.52 | 0.87 | -0.06 | -0.72 | -0.50 | -0.50 | 0.47 | 1 | |
| 峰度 | -0.88 | 0.84 | 0.83 | -0.84 | -0.61 | 0.63 | 0.86 | 0.89 | -0.87 | -0.57 | 1 |

平均粒径与 EM1、EM2 负相关,与 EM3、EM4 正相关,表明各端元粒径粗细程度差别明显,较好地反映了不同端元代表的沉积动力强弱差别显著。分选系数与 EM1、EM2 正相关,与 EM3、EM4 负相关,进一步说明了 EM1 和 EM2 分选较差,存在多个细粒峰值。峰态与 EM1、EM2 负相关,与 EM3 和 EM4 正相关,这与 EM1、EM2 的频率分布曲线主峰宽、EM3 和 EM4 主峰尖相对应,反映了 EM3 和 EM4 沉积环境相对稳定。粒度端元与粒度组分相关性分析表明:EM1 与黏土显著正相关($R^2=0.99$),EM2 与黏土正相关,EM1 和 EM2 均与粉砂和砂成分负相关;EM3 与粉砂显著正相关($R^2=0.9$),与黏土负相关;EM4 与砂显著正相关($R^2=0.97$),与黏土负相关。上述结果表明,各端元的粒径分布范围与粒度组分密切相关,即 EM1 与 EM2 主要以黏土为主,EM3 以粉砂为主,EM4 以砂为主。各端元相关分析结果显示:EM1 和 EM2 相关正相关,而与 EM3 和 EM4 呈负相关关系,表明 EM1 和 EM2 物质来源及影响因素存在一致性,EM3 和 EM4 存在一致性。已有研究表明,黄河入海口沉积物组分

主要以黏土和细粉砂为主,粗粉砂和砂含量相对较低^[34, 38-39]。因此,我们判定 EM1 和 EM2 为黄河长距离搬运弱水动力条件下沉积;结合沉积物形成年代分析,EM3 和 EM4 主要形成于黄河改道清 8 汉之后,沉积物来自近岸,而非河流补给^[5, 15-16],EM3 和 EM4 为较强水动力波浪和潮流作用下近源沉积物。

4.3 YDC 钻孔粒度特征对河道变迁和人类活动的响应

自 1976 年黄河改道清水沟入海以来,受水库建设、河道迁移等因素影响,现代黄河三角洲沉积环境不断发生变化,YDC 钻孔粒度特征对这些变化都有很好的记录和响应(图 7)。

YDC 钻孔 36~90 cm 形成于 1976—1996 年,主要以黏土和粉砂为主,为三角洲前缘河口沙坝沉积环境^[24, 40]。此时,黄河携带的泥沙已经成为该地区沉积物稳定的物源供给,90% 的黄河泥沙来自黄土高原,沉积物中粉砂和黏土含量较高^[21, 41-42]。该阶段黏土和粉砂含量较高与 1976 年黄河改道清水

沟后,水量丰富,携沙能力强,在河口切边锋的拦截下,快速在河口地区堆积有关^[28],与YDC钻孔粒度端元数据结果一致,如代表黄河沉积物组分的EM1和EM2端元组分,在36~90 cm处平均含量分别为39.33%和40.64%。

YDC钻孔中U3沉积物较U2相比,黏土含量明显的减少,粉砂含量明显增加。以年代结果作为参考,推测这可能与1986年龙羊峡水库建成有关。龙羊峡水库建成后,由于受水库的调节作用,使各时间尺度的径流量、输沙量分配更均匀,达到削减洪峰流量,调水调沙的目的,从而使黄河入海泥沙减少,粒度变粗^[1,21,36]。这一推断被YDC钻孔粒度数据所支持,U3平均粒径为14.88 μm,明显高于U2的平均粒径,在粒度端元数据中,EM1含量显著降低,而EM2含量明显升高,反映出龙羊峡水库建

设导致的动力条件变化对黄河河口沉积物组成的影响。

YDC钻孔U4沉积物中黏土和细粉砂含量进一步减少,粗粉砂和砂的含量迅速增加,以砂的含量增加最为明显,增加了81%。1996年黄河改道至清8汉,YDC钻孔所处位置物源发生变化,作为主要沉积物来源的黄河泥沙迅速减少,黏粒、细粉砂含量也随之减少,沉积环境由淤积状态变为侵蚀状态,沉积物来源由黄河泥沙变为近岸沉积体的侵蚀再悬浮,受潮流和波浪水动力条件影响显著,水动力较强,因此沉积物的粒度组成较粗^[4,24]。代表粗颗粒组分的EM3和EM4迅速升高,平均含量分别达到28.43%和37.93%,代表细颗粒组分的EM1和EM2组分迅速减少,平均含量分别为3.71%和29.93%。

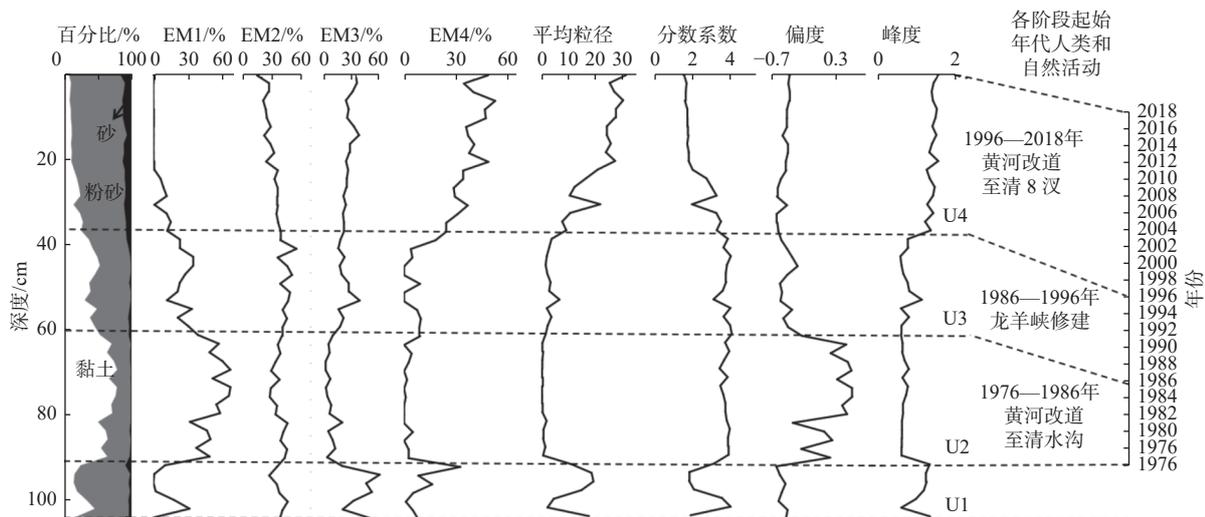


图7 YDC钻孔剖面粒度组分、各端元、粒度参数及黄河流域自然和人类活动的变化

Fig.7 The vertical variations in grain size, end-member, grain-size parameters of core YDC, and natural and human activities in the Yellow River basin

5 结论

现代黄河三角洲YDC钻孔粒度组分和粒度端元清楚地记录了黄河流域内河道变迁、水库建设等自然和人类活动信息。

(1)YDC钻孔粒度和岩性显著变化的界面,可以作为1976年以来黄河河口附近钻孔沉积物的年代参考点,主要包括1976、1986、1996年左右3个年代参考点。由此判定钻孔的4个沉积单元U1、U2、U3、U4对应的年代范围分别为1976年以前、1976—1986年、1986—1996年、1996—2018年。

(2)粒度端元与传统粒度参数相关性分析表明,

粒度端元EM1和EM2为黄河长距离搬运弱水动力条件下沉积,粒度端元EM3和EM4为较强水动力波浪和潮流作用下近源沉积物。

(3)YDC钻孔粒度参数较好地记录了黄河改道和人类活动等信息。1976—1996年,YDC钻孔为三角洲前缘河口沙坝沉积环境。沉积物中黏土和细粉砂含量较高,EM1和EM2组分较高,反映了黄河泥沙输入丰富。1986年之后,黏土含量降低,粉砂含量升高,EM1组分降低,而EM2组分升高,推测与龙羊峡水库建成后水库调节作用有关。1996年之后,沉积物中黏土和细粉砂含量进一步减少,粗粉砂和砂的含量增加,代表粗颗粒组分的EM3和EM4迅速升高,代表细颗粒组分的EM1和EM2

组分迅速减少, 表明 1996 年黄河改道至清 8 汉, 沉积物来源由黄河泥沙变为近岸沉积体的侵蚀再悬浮, 沉积环境由淤积状态变为侵蚀状态。

参考文献:

- [1] WANG H J, BI N S, SAITO Y, et al. Recent changes in sediment delivery by the Huanghe (Yellow River) to the sea: Causes and environmental implications in its estuary[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(3/4): 302-313.
- [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] 胡刚, 张勇, 孔祥准, 等. 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 77-89.
- [4] 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 三角洲废弃河道演化过程及受控机制: 以黄河刁口废弃河道为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(2): 22-29.
- [5] 韩广轩, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 467-472.
- [6] ZHOU L Y, LIU J, SAITO Y, et al. Modern sediment characteristics and accumulation rates from the delta front to prodelta of the Yellow River (Huanghe) [J]. *Geo-Marine Letters*, 2016, 36(4): 247-258.
- [7] DETHIER E N, RENSHAW C E, MAGILLIGAN F J. Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J]. *Science*, 2022, 376(6600): 1447-1452.
- [8] JIANG C, CHEN S L, PAN S Q, et al. Geomorphic evolution of the Yellow River Delta: Quantification of basin-scale natural and anthropogenic impacts[J]. *Catena*, 2018, 163: 361-377.
- [9] XU J X. Grain-size characteristics of suspended sediment in the Yellow River, China[J]. *Catena*, 2000, 38(3): 243-263.
- [10] 王兆夺, 黄春长, 杨红瑾, 等. 六盘山东麓晚更新世以来黄土粒度指示的物源特征及演变[J]. *地理科学*, 2018, 38(5): 818-826.
- [11] VARGA G, UJVARI G, KOVACS J. Interpretation of sedimentary (sub) populations extracted from grain size distributions of central European loess-paleosol series[J]. *Quaternary International*, 2019, 502: 60-70.
- [12] CHEN J, YANG T B, QIANG M R, et al. Interpretation of sedimentary subpopulations extracted from grain size distributions in loess deposits at the Sea of Azov, Russia[J]. *Aeolian Research*, 2020, 45: 100597.
- [13] WEN Y L, WU Y Q, TAN L H, et al. End-member modeling of the grain size record of loess in the Mu Us Desert and implications for dust sources[J]. *Quaternary International*, 2019, 532: 87-97.
- [14] WANG H J, WU X, BI N S, et al. Impacts of the dam-oriented water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): a review[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 157: 93-113.
- [15] WU X, BI N S, et al. Stepwise morphological evolution of the active Yellow River (Huanghe) delta lobe (1976–2013): dominant roles of riverine discharge and sediment grain size[J]. *Geomorphology Amsterdam*, 2017, 292: 115-127.
- [16] 朱纹君, 韩美, 孔祥伦, 等. 1990-2018年黄河三角洲人类活动强度时空格局演变及其驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 287-292.
- [17] 李越, 宋友桂, 宗秀兰, 等. 伊犁盆地北部山麓黄土粒度端元指示的粉尘堆积过程[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 162-177.
- [18] 刘蓉, 岳大鹏, 赵景波, 等. 陕西横山L₂以来风沙/黄土沉积序列的粒度端元特征及其环境意义[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(5): 1328-1338.
- [19] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报(中文版)*, 2006(4): 159-166.
- [20] 林镇坤, 王爱军, 叶翔. 南流江河口水下三角洲表层沉积物端元分析及其沉积动力环境意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 124-134.
- [21] 解锡豪, 曹向明, 李志忠, 等. 闽江口地区不同砂质沉积的粒度端元特征及其环境指示[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2021, 16(2): 38-46.
- [22] 李松, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河在调水调沙影响下的入海泥沙通量和粒度的变化趋势[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(7): 20-27.
- [23] PATERSON GA, HESLOP D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [24] 袁杰, 曹广超, 鄂崇毅, 等. 环青海湖表层土壤沉积物粒度分布特征及其指示意义[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 150-154.
- [25] 任寒寒. 黄河三角洲高分辨沉积记录及其对河道变迁和重大人类活动的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [26] 秦小光, 蔡炳贵, 穆燕, 等. 黄土粉尘搬运过程的动力学物理模型[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(6): 1154-1161.
- [27] 刘梦慧, 李徐生, 韩志勇, 等. 下蜀黄土参数化粒度端元分析及其物源示踪[J]. *地球环境学报*, 2021, 12(5): 510-525.
- [28] 王兆夺, 于东生, 汪卫国, 等. 泉州湾表层沉积物粒度指示的沉积动力端元解析[J]. *热带地理*, 2021, 41(5): 975-986.
- [29] 陈艇, 刘青松, 郑一. 黄河水下三角洲钻孔沉积物磁学记录及其年代学意义[J]. *科学通报*, 2021, 66(30): 3902-3915.
- [30] 宋莎莎. 现代黄河三角洲潮滩的沉积物粒度、核素分布及其环境意义[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [31] HU N J, HUANG P, LIU J H, et al. Tracking lead origin in the Yellow River estuary and nearby Bohai Sea based on its isotopic composition[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 99-107.
- [32] 王琬璋, 周良勇, 段宗奇, 等. 现代黄河三角洲沉积物磁性地层年代框架及环境磁学研究[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(5): 1772-1788.
- [33] 薛春汀, 叶思源, 高茂生, 等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定[J]. *海洋学报(中文版)*, 2009, 31(1): 117-124.
- [34] 李栓科. 近代黄河三角洲的沉积特征[J]. *地理研究*, 1989, 8(4): 45-55.

- [35] 李谷祺, 陈沈良, 彭俊, 等. 黄河三角洲YDZ1孔沉积环境分析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(2): 205-212.
- [36] 张金萍, 肖宏林, 张鑫. 龙羊峡水库对下游水沙条件变化的影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2020, 1: 83-87.
- [37] 胡春宏, 张晓明, 赵阳. 黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(5): 725-733.
- [38] WU X, WANG H J, Bi N S, et al. Evolution of a tide-dominated abandoned channel: a case of the abandoned Qingshuigou course, Yellow River[J]. Marine Geology, 2020, 422(7/26): 106116.
- [39] 袁萍, 毕乃双, 吴晓, 等. 现代黄河三角洲表层沉积物的空间分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 49-57.
- [40] 师长兴. 黄河口不同粒度泥沙沉积与扩散分析[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1125-1133.
- [41] 王兆夺. 黄河中游—淮河上游全新世黄土土壤粒度与物源关系分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [42] PYE K, ZHOU L P. Pleistocene and Holocene aeolian dust deposition in North China and the Northwest Pacific Ocean[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1989, 73(1/2): 11-23.

End-member characteristics of sediment grain size of modern Yellow River Delta sediments and their response to channel shifts and human activities

MENG Liwei¹, WANG Longsheng^{1,2*}, ZHAN Chao¹, LIU Xianbin¹, WANG Qing¹

(1 Institute of Coastal Research, Ludong University, Yantai 264025, China; 2 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Yellow River Delta sediments record environmental changes in the Yellow River basin at long time scales, and respond sensitively to natural and human activities such as river diversions and reservoir construction in the basin. We analyzed the grain size distribution of core YDC from onshore delta since 1976 near the river mouth were analyzed using a parametric end-member analysis model. Results show that EM1 and EM2 are composed of fine-grained clay and fine powder sand, deposited under weak hydrodynamic conditions for long distance transport in the Yellow River, while EM3 and EM4 are coarse powder sand fractions, deposited by wave and tidal action under stronger dynamic conditions. By comparing the data on channel alteration and human activities, and combining data from previous studies on sedimentation rates in the Yellow River estuary, we found that significant changes in grain size characteristics could be used as reference points for sediment age determination. The grain size parameters and end element data reflect the natural and human activities since 1976, such as the diversion of the Yellow River from Qingshuigou to the sea, the construction of the Longyangxia Reservoir, and the diversion of the Yellow River from Qingbacha to the sea. This study provide a reference for the management of the Yellow River Delta estuary and coastal engineering construction, and a scientific basis for ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin.

Key words: grain-size characteristics; end-member analysis; river channel change; human activities; Yellow River Delta