

# 长江口北槽柱状沉积物粒度分布特征及沉积环境指示意义

邓智瑞, 何青, 邢超锋, 郭磊城, 王宪业

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 为了研究长江口北槽深水航道的泥沙回淤机制及来源, 通过对长江口北槽深水航道中部南、北导堤两侧坝田区域所采浅钻柱状样的沉积物特征、粒度参数特征、粒度成分和沉积速率特征等的分析, 探讨北槽深水航道水动力条件和泥沙沉积环境。结果显示, 柱状样以黏土质粉砂为主, 受径流和潮汐作用, 分选性都较差, 偏态均为正偏, 北导堤和南导堤两侧柱状样的分选系数、偏态和峰态在同一侧相互之间的特征较一致, 且三组分组成接近; 南北导堤异侧之间的粒度特征差异较为明显, 北导堤一侧的平均粒度比南导堤的小, 北导堤坝田附近的柱状样粒级百分比在垂向上波动变化较大, 南导堤则表现的较为单一; 南北导堤的敏感组分主要集中在粒级 100 μm 部分。结合资料和测年数据, 综合得出, 由于北导堤和南导堤的涨落潮不对称, 导致了其粒度特征上的不同; 北槽淤积中的流域供沙逐渐减少, 泥沙来源逐渐转变为滩槽交换供沙为主; 北槽受深水航道工程影响巨大, 泥沙沉积过程复杂, 还需深入研究。

**关键词:** 长江口; 北槽; 沉积; 柱状样; 粒度

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)01-0112-11

doi: 10.11759/hyqx20150104002

河口作为河流与海洋的枢纽, 受自然条件和人为影响, 许多沉积物在此产生复杂变化, 同时对周围的环境进行反馈。沉积物的粒度分析方法是研究地表沉积物的沉积过程、沉积环境的重要手段。粒度特征不仅可以对沉积物进行分类, 还可以比较出不同时期的沉积环境, 同时由于沉积物的沉积过程受组成物质、动力条件等影响, 沉积物的特征也会反映出相关的重要环境信息<sup>[1-3]</sup>。

## 1 研究区域概况

长江作为中国第一大河, 多年平均径流量和输沙率分别为  $8970 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  (1950~2007 年) 和  $4.02 \times 10^8 \text{ t/a}$  (1951~2007 年)<sup>[4]</sup>。长江河口则为径流与潮流相互消长非常明显的多级分汊沙岛型中等潮汐河口<sup>[5]</sup>。长江河口从徐六泾往外江面骤然开阔, 呈“三级分汊, 四口入海”的形势: 崇明岛将长江河口分为南支和北支, 南支又被长兴岛、横沙岛分为南港和北港, 九段沙又将南港分为南槽和北槽, 因而又是一个典型的分汊型河口(图 1)。自从 2003 年 6 月三峡工程蓄水以后, 长江上游的供沙情况发生了显著变化, 河口区冲淤状况也产生了相应的响应<sup>[6]</sup>; 另外, 长江口深水航道工程于 1997 年底经国务院批准实施, 工程分三期建设, 包括在长江口南港北槽内建筑南、北导

堤和丁坝等整治建筑物, 其中北导堤 49 km、南导堤 48 km、分流口南线堤 1.6 km 和潜堤 3.2 km; 南北导堤间丁坝 19 座, 疏浚航道近 80 km, 使航道水深分阶段增深到 8.5、10 及 12.5 m, 航道底宽 350~400 m, 北槽深水航道的泥沙特性、水流结构也受到工程影响而产生相应的响应<sup>[7]</sup>。因此研究北槽深水航道的沉积特征, 既可以总结三期工程后深水航道的回淤情况, 也可以为今后航道的治理工作提供基础资料。本文以 2013 年 7 月北槽深水航道浅钻柱状样采集资料为基础, 分析长江口北槽深水航道中部浅钻柱状样沉积物粒度特征及其对水动力和沉积环境的指示。

## 2 材料与方法

2013 年 7 月, 在北槽深水航道, 按一定间距采集了 5 个柱状样(图 1): 北槽北导堤 4、5 号丁坝之间

收稿日期: 2015-01-04; 修回日期: 2015-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276080, 51320105005); 水利部公益项目(201201070-03)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41276080, No.51320105005; Non-Profit Industry Financial Program of MWR, No.201201070-03]

作者简介: 邓智瑞(1990-), 男, 广西来宾人, 壮族, 博士研究生, 主要从事河口海岸泥沙研究, E-mail: 52132601012@ecnu.cn; 何青, 通信作者, 博士生导师, E-mail: qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

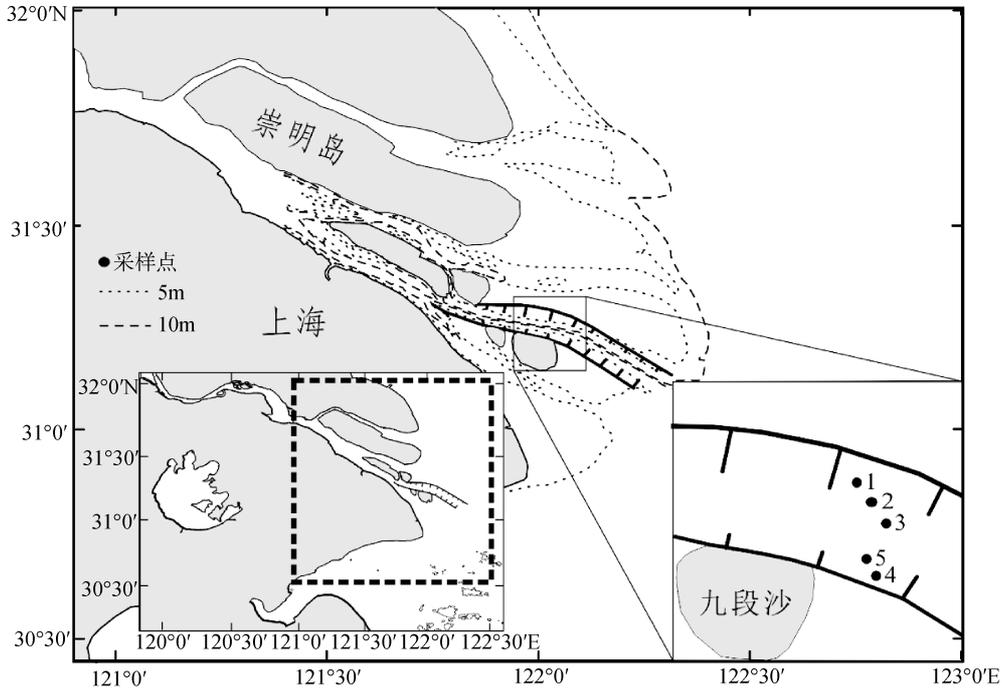


图 1 长江口研究区域示意图

Fig.1 Map of the Yangtze River Estuary topography and the sample site in the North Passage

表 1 采样记录表

Tab.1 The sampling record

|     | 编号    | 纬度 N      | 经度 E       | 水深(m) |
|-----|-------|-----------|------------|-------|
| 北导堤 | NPN-1 | 31°15'37" | 122°02'51" | 1.5   |
|     | NPN-2 | 31°15'20" | 122°02'56" | 3.0   |
|     | NPN-3 | 31°15'00" | 122°03'27" | 7.0   |
| 南导堤 | NPS-1 | 31°13'33" | 122°03'01" | 4.5   |
|     | NPS-2 | 31°13'25" | 122°03'06" | 3.0   |

回淤区前沿 1、2、3 号(NPN-1、NPN-2、NPN-3)、北槽南导堤 4、5 号丁坝之间回淤区前沿 4、5 号(NPS-1、NPS-2)。柱状样深度在 30~136 cm, 实验室内将沉积物柱状样纵向剖开, 进行拍照与描述后, 以 10 cm 间隔进行分割。每一段各取 5 g 左右样品, 一份做粒度分析, 另一份利用  $^{210}\text{Pb}$  放射性同位素方法进行年代测定。

粒度分析的方法如下: 取样品约 2 g 放入小烧杯, 加入 0.16% 的六偏磷酸钠( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> 浸泡 24 h, 用英国马尔文公司生产的 Master sizer 2000 型激光粒度仪进行粒度分析, 获得 1/4 间隔的粒度分布, 数据测量范围为 0.01~2 000  $\mu\text{m}$ , 粒级分辨率为 0.1, 重复测量的相对误差 <3%<sup>[8]</sup>, 具体参数根据 Matlab 相关程序计算而得<sup>[9]</sup>。

同位素测年方法如下: 称取 3 g 左右研磨后样品装入直径 1 cm 圆柱状样品管中, 密封 3 周后, 使用

EG&G ORTEC 生产的井型探头 GWL-120210-S 测量。利用 46.5 keV 和 351.9 keV 特征峰作为总  $^{210}\text{Pb}$  和补偿  $^{210}\text{Pb}$  的比活度, 计算二者的差值即为过剩  $^{210}\text{Pb}$  的比活度<sup>[10-11]</sup>。粒级-标准差分析方法主要是通过计算沉积物粒度每一粒径范围组分在样品中的偏差值, 偏差值大反映了某一粒径范围的组分变化大, 偏差值小则反映了某一粒径范围的组分变化小, 据此可以分析不同粒径组分对于环境变化的响应。

$$\text{标准偏差的计算公式为: } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n}}$$

其中  $S$  为偏差,  $S_i$  为样本值,  $\bar{S}$  为样本的平均值,  $n$  为样本数<sup>[12]</sup>。

### 3 结果

#### 3.1 柱状样沉积物特征

柱状样 NPN-1、NPN-2、NPN-3 相对较长, 垂向上沉积物颜色变化显著, 而 NPS-1 和 NPS-2 岩性较为均一(图 2)。

NPN-1: 样品长 134 cm, 0~15 cm 为黄褐色细黏土质粉砂; 15~60 cm 为灰褐色细粉砂; 60~90cm 为灰色粉砂; 90~125 cm 为褐色黏土质粉砂, 125~130 cm 为灰黑色砂质粉砂, 整个剖面在外观上变化为上部颜色浅, 下部颜色深。

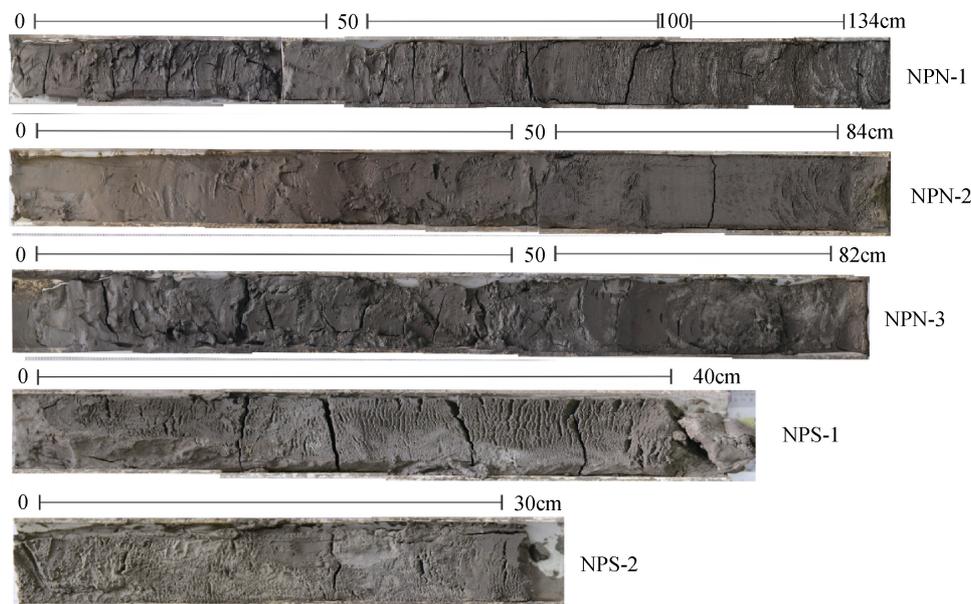


图 2 柱状样形态特征  
Fig. 2 The appearances of sediment cores

NPN-2: 样品长 80 cm, 0~20 cm 为黄褐色黏土; 20~40 cm 红褐色粉砂质黏土, 其中 30 cm 处开始向下沉积物粒度明显变粗; 40~70 cm 为灰黑褐色黏土质粉砂; 70~80 cm 为灰色黏土质粉砂, 整个剖面颜色以及沉积物的粒度变化分界明显。

NPN-3: 样品长 80 cm, 0~28 cm 为灰褐色黏土; 28~60 cm 为灰黑色黏土质粉砂, 其中上部 28~60 cm 为颜色较黑的黏土质粉砂; 60~80cm 为灰褐色砂质粉

砂, 质地均匀。

NPS-1: 样品长 40 cm, 上下部粒度组成大致相同, 为褐色砂质粉砂, 样品呈现清晰的平行层理分布。

NPS-2: 样品长 30 cm, 该样品砂含量相对 NPS-1 要多, 颜色偏黄, 样品出现平行层理。

### 3.2 柱状样粒度数特征

各柱状样沉积物的平均粒径、分选系数、偏态、峰态等粒度参数及沉积物分布组分如表 2、图 3 所示。

表 2 北槽柱状样粒度参数数据表

Tab. 2 Grain size parameter of sediment cores from the North Passage

|             | 编号    | 分析值   | 中值粒径(μm) | 分选系数 | 偏态   | 峰态    | 黏土(%) | 粉砂(%) | 砂(%)  |
|-------------|-------|-------|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 南<br>导<br>堤 | NPS-1 | 最大值   | 30.85    | 2.00 | 0.40 | 0.94  | 17.07 | 67.01 | 22.61 |
|             |       | 最小值   | 24.85    | 1.97 | 0.36 | 0.89  | 14.85 | 62.55 | 15.95 |
|             |       | 平均值   | 26.90    | 1.98 | 0.38 | 0.91  | 16.23 | 65.15 | 18.62 |
|             | NPS-2 | 最大值   | 40.78    | 2.00 | 0.48 | 1.06  | 14.97 | 62.52 | 30.30 |
|             |       | 最小值   | 30.80    | 1.91 | 0.40 | 0.96  | 11.96 | 57.74 | 22.52 |
|             |       | 平均值   | 36.24    | 1.96 | 0.44 | 1.00  | 13.35 | 59.64 | 27.01 |
| 北<br>导<br>堤 | NPN-1 | 最大值   | 32.48    | 2.32 | 0.38 | 1.00  | 30.56 | 69.59 | 33.63 |
|             |       | 最小值   | 8.32     | 1.92 | 0.02 | 0.78  | 15.76 | 50.39 | 6.37  |
|             |       | 平均值   | 18.21    | 2.06 | 0.21 | 0.90  | 20.98 | 64.85 | 14.16 |
|             | NPN-2 | 最大值   | 24.51    | 2.08 | 0.32 | 1.08  | 28.59 | 72.03 | 14.90 |
|             |       | 最小值   | 8.80     | 1.82 | 0.11 | 0.90  | 15.17 | 65.51 | 3.46  |
|             |       | 平均值   | 16.42    | 1.96 | 0.22 | 0.95  | 20.92 | 68.90 | 10.18 |
| NPN-3       | 最大值   | 42.54 | 2.09     | 0.47 | 1.01 | 28.30 | 71.99 | 33.59 |       |
|             | 最小值   | 9.37  | 1.91     | 0.05 | 0.87 | 12.62 | 53.79 | 6.79  |       |
|             | 平均值   | 22.72 | 2.00     | 0.28 | 0.94 | 18.46 | 65.33 | 16.20 |       |

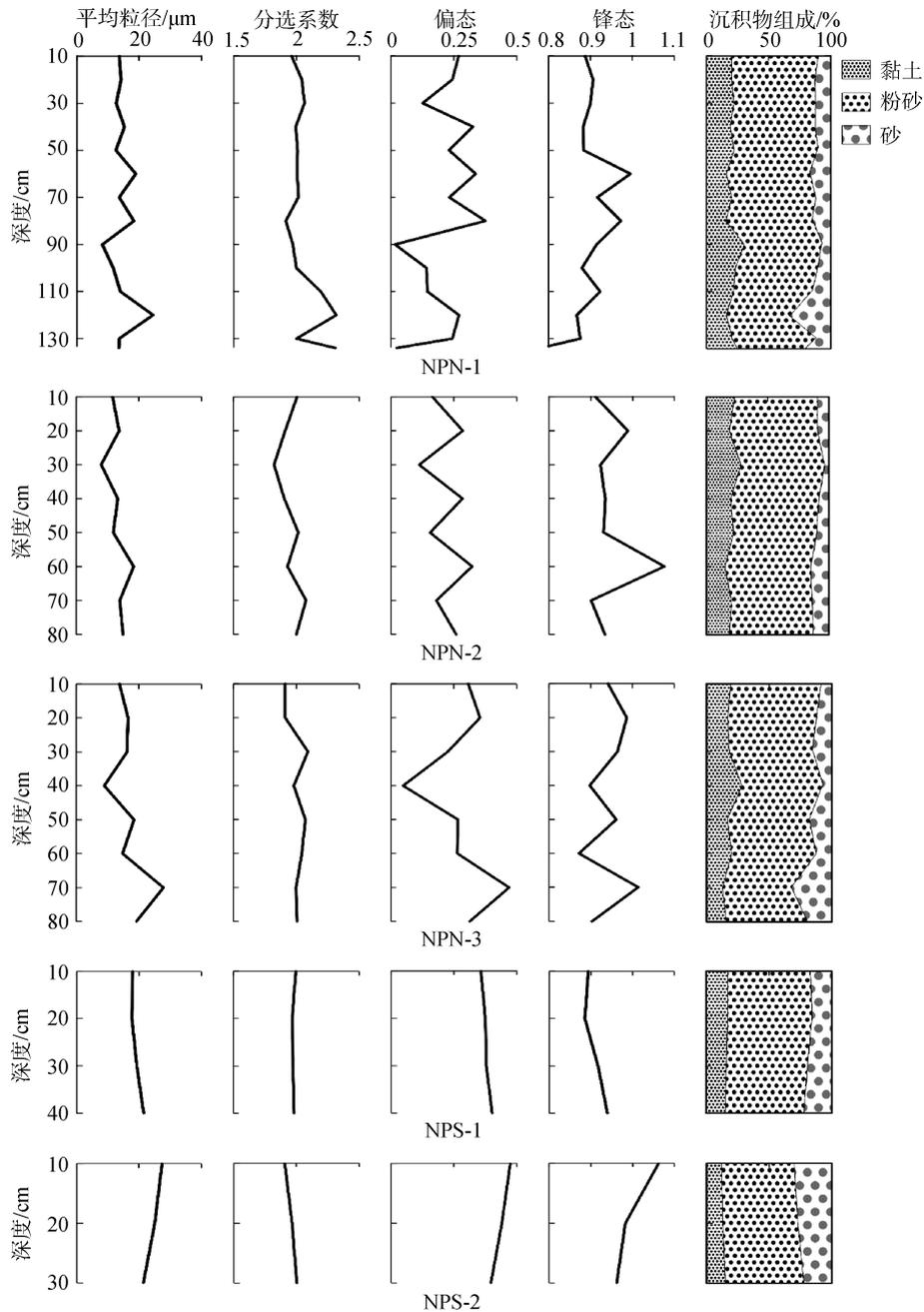


图 3 北槽各柱状样沉积物粒度参数及组分垂向分布

Fig. 3 The vertical distribution of grain size parameters and components

平均粒径可以反映沉积物的大小概况。

柱状样 NPN-1 的平均粒径自 10~80 cm 处于变大的趋势, 在 80~90 cm 处粒径最小, 之后 90~120 cm 又呈增加的趋势, 在 120 cm 处沉积物颗粒最粗; 分选性较差, 分选系数为 2 左右, 而且随着深度的增加分选系数有增大趋势; 柱状样粉砂的含量约占 60%~70%, 黏土和砂的含量接近。

柱状样 NPN-2 沉积物的平均粒径在垂向上的变

化不明显, 变化范围在 10~20  $\mu\text{m}$  之间, 在 30 cm 处最细, 60 cm 处较粗; 平均分选系数 1.96, 分选较差, 在 30 cm 处分选系数最小, 粒径越小, 分选越好; 偏态和峰态变化大致呈波动变化的形式, 总体上变化较小; 柱状样组分与 NPN-1 接近, 以粉砂为主, 砂的含量最少。柱状样 NPN-3 沉积物分布由下部往上呈现波动细化, 总体可以分为两段, 0~30 cm 处粒径变化不大, 之后在 40 cm 处达到最小值, 40~80 cm 呈

波动增加趋势；组份上依然是粉砂为主要成分，在 40 cm 处黏土所占比例大于砂，而在 70 cm 处砂所占比例大于黏土，其它位置两者所占组份相当。

柱状样 NPS-1 平均粒径由上往下逐渐变粗，且变化越来越显著，总体以粉砂为主，砂和黏土含量相当，各组份含量垂向上变化幅度不大；平均分选系数 1.98，平均偏态 0.38。

柱状样 NPS-2 的沉积物有由上往下逐渐变细的趋势，分选系数随着粒径的减小而增大，组份在各个深度都呈现出粉砂 > 砂 > 黏土的特征。

总体看来，在北导堤三个柱样中，平均粒径大约在 10~20  $\mu\text{m}$  之间变化，仅在 120 cm 和 70 cm 的较深处出现较大粒径，接近 30  $\mu\text{m}$ ；分选系数在 2 左右，分选性都较差；偏态均为正偏，偏态值在 0~0.4 之间；峰态值在 0.9 左右；在组份上粉砂占据绝对优势，含量达到 60%~70%，砂和粉砂的含量相当；各个参数

在垂向上的变化大致为波动变化，没有明显趋势。在南导堤两个柱样中，平均粒径在 20~30  $\mu\text{m}$  之间，NPS-1 有随深度增加粒径增大的趋势，而 NPS-2 的平均粒径则随深度增加而减小；两个柱样的分选系数、偏态和峰态大小接近，而且分选系数呈现随粒径减小而增大的趋势，偏态和峰态呈现出随粒径减小而减小的趋势；两个柱样依旧是粉砂为主。

依据柱样剖面颜色等变化，各柱样中取一些特征点进行粒度频率曲线分析，结果如图 4。NPN-1 沉积物粒度频率曲线上部与底部较为一致，而中部的峰则分布各异。NPN-2 的沉积物粒度频率曲线在上部和底部与 NPN-1 较为接近，而中部主峰则有比较明显的集中，其中 60 cm 处的主峰最高。柱样 NPN-3 的粒度频率曲线除了 40 cm 和 70 cm 外都比较一致，总体比 NPN-1 的主峰高。NPS-1 和 NPS-2 垂向上不同深度的粒度频率曲线较为一致，基本无变化。

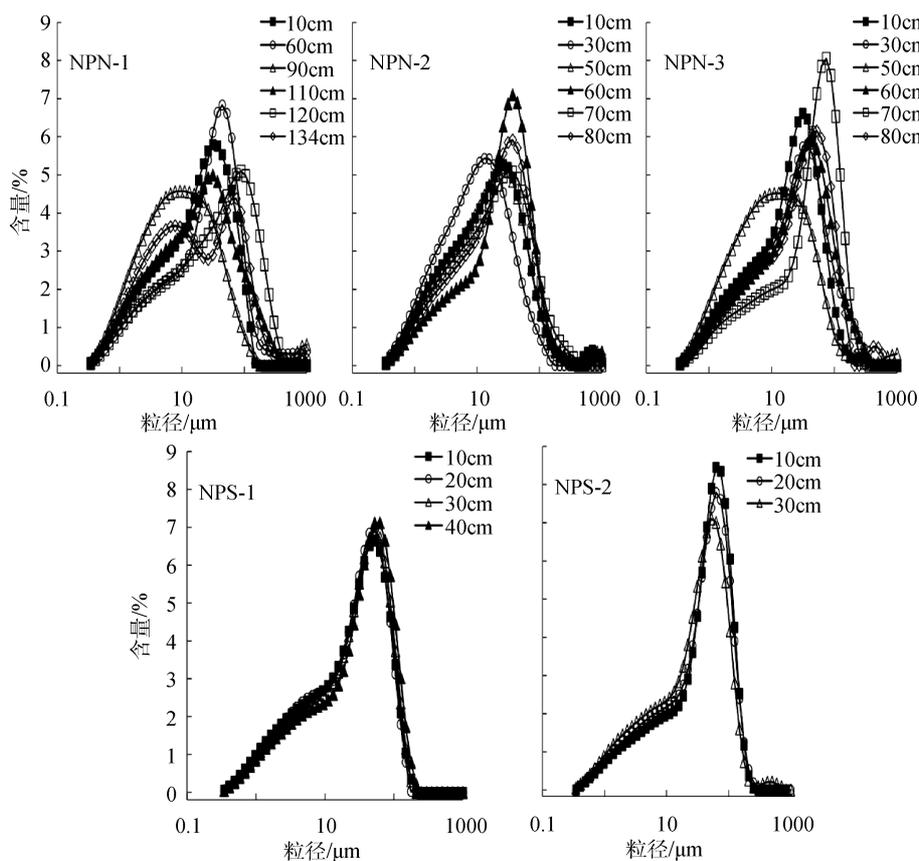


图 4 北槽各柱样典型粒度频率曲线分布

Fig. 4 Typical grain size-frequency curves of sediment cores from the North Passage

### 3.3 环境敏感因子的提取

由于沉积物的来源不同以及受到各种因素的影响，沉积过程变得尤为复杂，要对柱状样进行沉积

环境分析，则需要提取出对环境响应敏感的组份来分析动力过程。因为整个沉积序列所包含的粒度组份并不都在单个样品中表现为明显的组份峰值(众数)，所

以从单个样品的粒度频率曲线上很难确定沉积物总体所包含的粒度组分个数,这就需要使用粒度-标准差方法,依据每一粒级对应含量的标准偏差变化来获取环境敏感因子,通过计算每一粒级在柱状沉积物中标准偏差值,将标准偏差值最大的粒级作为环境敏感因子,进而分析沉积环境对于某些组分的影响<sup>[12]</sup>。

图 5 展示了利用粒度-标准偏差算法所得出的长江口北槽柱状样中每个粒级组分标准偏差随粒级组分的变化曲线,曲线中标准偏差值较高的部分即对应柱状样中对环境因素敏感的部分。从图 5 中可

以看出,北导堤三个点(NPN-1、NPN-2、NPN-3)在粒径大小 7~10 μm 的部分有一个敏感点,而粒径大小在 100 μm 左右的部分更为敏感;南导堤两个点(NPS-1、NPS-2)则在粒径 20 μm 左右和 100 μm 左右的部分较为敏感;总体看来,在同一侧的柱状样敏感部分较为一致,两个地区的柱状样在粒径大小为 100 μm 左右的部分最为敏感,而总体上标准偏差值从大到小为北导堤>南导堤。从标准偏差可看出,北导堤部分动力作用比南导堤变化大,导致粒度组分变化较大。

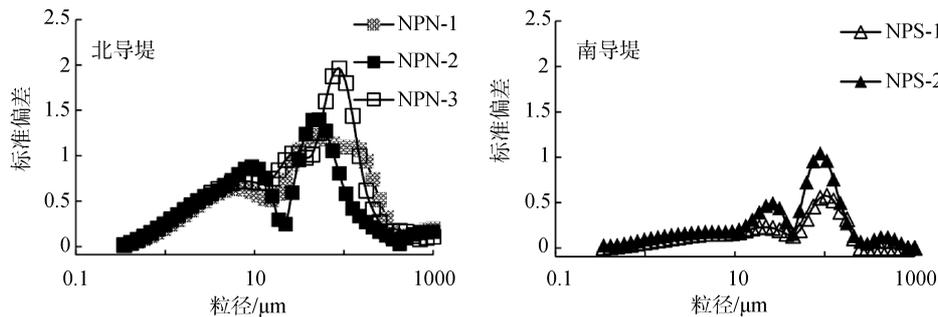


图 5 长江口北槽柱状样粒度-标准偏差曲线图

Fig. 5 Standard deviations of grain size components for core sediments from the North Passage

## 4 讨论

### 4.1 北槽坝田淤积泥沙来源

长江口北槽深水航道的回淤现象是研究航道工程影响的重点。北槽中回淤泥沙的来源较为复杂,基本来源主要有流域来沙、海域来沙以及汉道之间的来沙等。金镠等<sup>[13]</sup>提出近底高浓度悬沙的生成与黏性细颗粒泥沙在潮汐水流中的沉降特性有关,滩槽之间的泥沙交换为主要泥沙来源,泥沙可能在横向水体中高浓度悬沙输运。陈维<sup>[4]</sup>根据实测资料分析了影响北槽回淤的原因,包括南沙头通道、横沙通道、科氏力以及分流口鱼咀工程等;刘高峰<sup>[14]</sup>研究了北槽三期工程中的回淤规律,认为北槽整体表现为“洪淤枯冲”的规律,北槽中段(即本文柱状样所在部分)淤积强度大,极可能与附近南滩淤积有内在联系。陈炜等<sup>[15]</sup>提出,北槽分流口泥沙来源于南港河段,在向“南港—北槽”输运的过程中,一部分泥沙受到分流潜堤拦截,落淤在潜堤北侧造成九段沙沙头持续淤长。综合各学者的研究,说明北槽的泥沙来源是多方面的。

多年统计显示,近年来长江中下游各水文观测站普遍表现出输沙量减少的现象,特别是 1998 年以

后,年输沙量均小于  $3 \times 10^8$  t, 平均  $2.24 \times 10^8$  t, 仅为多年平均值的 48%<sup>[4]</sup>, 据赵捷<sup>[16]</sup>的统计, 1998~2010 年, 进入北槽的流域悬沙量约为  $4.4 \times 10^8$  t/a, 2010 年则不足  $3 \times 10^8$  t/a, 流域来沙的直接落淤已经不再是航道泥沙回淤的主要来源。柱状样多以细颗粒粉砂为主, 在南北两个部分泥沙的三组分接近。通过多年来的现场观测, 北槽中泥沙与潮汐的关系大致为: 大潮含沙量大于小潮, 涨潮含沙量大于落潮, 并且多年来长江口水域的悬沙含沙量及其季节性变化和随潮汐而变的规律均未改变, 说明北槽的水体含沙量主要受潮汐动力控制<sup>[17-19]</sup>。4、5 号丁坝之间回淤量大于其他区域的原因, 主要还是由于北槽中段涨潮动力有所增强而落潮动力减弱, 落潮优势和输沙能力降低<sup>[18]</sup>。从柱状样的粒度参数看, 能看出北导堤和南导堤在垂向上的粒度曲线明显不同, 在北边不同深度粒度曲线变化较大, 南边则基本保持一致, 这估计是由于动力条件的不同而产生的。

一般认为, 沉积物的平均粒径(或中值粒径)和标准偏差(或分选系数)主要受物源控制的; 沉积环境对沉积物的粒度性质的改造(严格地说是最后沉积环境对原来沉积的改造), 主要表现在某些原有组分的丢失或新组分的加入, 即主要反映在频率曲线上

粗、细两尾部的变化(即峰态和偏态)<sup>[20]</sup>。从表 1 中可以看出,虽然南导堤采样点与北导堤采样点的粒度参数有所不同,但总体大小比较接近,说明南北导堤的泥沙来源较为一致,因水动力等沉积环境不同而产生微小差异;所有柱状样偏度值均属于正偏,说明沉积物的来源较为复杂。结合相关资料<sup>[16, 18-19, 21]</sup>,北槽淤积量并未随着流域来沙减少而产生明显减少,说明北槽泥沙的来源组成正在发生转变,北槽泥沙应该为非流域来沙为主,一方面由于坝田区的不断淤积,由原来的泥沙“收纳区”转变为“来源地”,另一方面,北槽与周边横沙岛和九段沙的泥沙交换也日益显著,此外,南槽口附近高浊度的泥质区也将成为北槽泥沙的来源之一。

## 4.2 北槽动力差异

沉积物粒度参数包含了丰富的海洋沉积动力学和沉积物运移方面的重要信息,粒度分析不仅可以用来识别沉积环境或判定物质运动方式,而且可以用于海洋环境中沉积物输运方向的研究。刘红<sup>[22]</sup>在研究中发现,长江口主槽表层沉积物中值粒径与落潮历时等动力参数呈正相关关系,认为落潮流动力条件是决定长江口表层沉积物中值粒径的大小的主要动力因素。不同粒径的碎屑物质进入浅海后,会遭受海浪的荡涤,在不同方向的波浪和海流的作用下,缓慢地向外海运动;一般认为,离岸越远,水动力越来越弱,沉积物颗粒越小;粗粒沉积物在近海沉积,细粒物质携带较远,多在较深海沉积<sup>[9]</sup>。北槽以落潮占优势,从海到陆,潮流动力作用逐渐减弱。而 NPN-1、NPN-2 和 NPN-3 则属于北槽北导堤, NPS-1 和 NPS-2 属于南导堤,从粒度分布曲线就可看出明显差别:北导堤的柱状沉积条件比较复杂,主要因为涨潮流受地转偏向力会靠北边上溯,而长江来水则靠南,涨潮时北导堤受涨潮流控制,而到了落潮时,落潮流和径流虽然靠南冲刷,但北导堤此时处于河流控制阶段,因而沉积来源会有反复,受潮流和径流交替控制;而南导堤部位水动力作用较强,因而颗粒较粗。

为进一步分析北槽中各个部分对于水动力的响应,采用粒度-标准偏差算法得到柱状样在垂向上沉积物每个粒度组分标准偏差(图 5),从结果中看出,北边和南边均为双峰曲线,南北导堤几个柱状样的较高标准偏差值(主峰)所对应的粒度大约在 100 μm 部分,说明南北导堤的泥沙的主要变化组分在 100 μm,二者来源较为一致;北导堤的三个柱状样

的标准差值大于南导堤,说明北导堤的泥沙交换比南导堤的更为频繁;南北导堤的副峰所对应粒径大小有区别,北导堤副峰在 10 μm 左右,南导堤副峰在 20 μm 左右,说明南北导堤虽然泥沙来源较为一致,但是由于水动力影响,泥沙的沉积过程会稍有不同。研究表明<sup>[23]</sup>,深水航道工程使北槽流态调整为往复流,并且中段靠近航道北侧流向与航道有一定夹角,导堤阻挡九段沙区域涨潮流进入北槽,坝田区出现环流,南导堤加高工程使航道内水流只在高潮时与外界交换,所以余流很小,水动力变化情况为北边复杂而南边较为稳定,这与粒度频率曲线和粒级-标准差所反映的结果较为一致。从粒度参数上看,南导堤水动力作用较强,因而产生变动的粒径比北导堤粗一些,这与北槽内涨落潮不对称的情况一致。

## 4.3 人类活动作用

由于长江上游水利工程以及人们对航道的疏浚工作,北槽航道的发展变化较为复杂,北槽航道三期工程以后,航道两端淤积严重,许多专家对此进行了研究,基本认为:(1)航道工程的影响改变了北槽的流场情况,如丁坝的遮挡导致水动力减弱,泥沙落淤;工程后由于受到导堤和丁坝的束水作用,主槽潮流流向更集中,潮流的横向动力减弱,主流线基本与导堤走向一致,由旋转流变为往复流等,并且影响优势潮量(落潮),即落潮流优势比从 65% 下降到 55% 左右<sup>[14]</sup>;(2)人工疏浚也在人为地影响泥沙的输运,且在北槽中也有相应的抛泥区和贮泥坑,但疏浚抛泥仅能影响贮泥坑和抛泥区附近的局部区域<sup>[21]</sup>,从图 6 中看到,本次采样点在 4 号和 5 号丁坝之间,附近有 3 号吹泥站(贮泥坑),虽然径流或潮流有可能将上游或下游的疏浚泥沙输送到采样点,但根据粒度参数结果,南导堤和北导堤的柱状样在粒径组分上接近,说明吹泥站的存在并未对坝田区回淤的来源造成很大影响,而根据臧定满等<sup>[24]</sup>的研究结果,3 号吹泥站周围流速较快,抛泥流失率较高,因而北导堤的沉积环境比南导堤更为复杂,这点在柱状样的敏感性分析中得以体现;(3)此外,还有水库、鱼咀等工程影响,导致研究区域流场较为复杂,还需作进一步研究。

## 4.4 沉积速率

一般来说,同位素测年(<sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs 等)和断面高程重复测量是用来计算沉积速率最常用的两种手

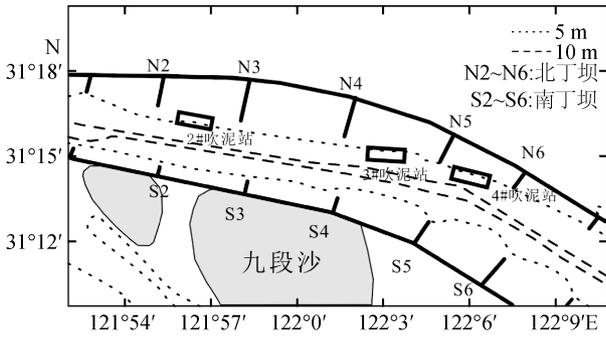


图 6 北槽内部 3 个吹泥站位置<sup>[24]</sup>

Fig. 6 The four disposal zones of the Yangtze River Estuary the North Passage

段。测定沉积速率可以一定程度上判断长江口的演变过程, 依据同位素测年方法, 根据  $^{210}\text{Pb}$  的恒定初始活度(CIC)模式推算 NPN-1 柱样平均沉积速率约为 3.5 cm/a; 根据  $^{210}\text{Pb}$  衰变模式, 垂向上理想的  $^{210}\text{Pb}$  活度应随深度增加呈现指数递减, NPN-2 柱样中过剩  $^{210}\text{Pb}$  活度下部高, 上部低, 无法进行沉积速率的计算。NPN-3 也呈现出和 NPN-2 类似的现象。沉积物柱样 NPS-2 的平均沉积速率约为 1.0 cm/a。

由于本次所采柱样长度较短, 而且研究区域受人为影响较大, 同位素的测定结果不尽人意, 根据柱状样的沉积速率以及柱状样长度可以推断出, 北导堤 NPN-1 和南导堤 NPS-2 的泥沙淤积大约都在近 30 a 内形成, 但靠近深水航道中部的部分则无法用  $^{210}\text{Pb}$  确定沉积速率, 说明北槽内泥沙交换频繁。北导堤有两个柱状样在垂向上表现出下部  $^{210}\text{Pb}$  活性比上部高, 很有可能为在航道工程初期, 河床水动力作用复杂, 泥沙交换频繁, 而到工程后期, 滩槽的淤积呈现出趋于稳定的趋势。而南导堤柱状样由于采样数较少, 难以作垂向上的比较。谢文静<sup>[25]</sup>通过对长江口三角洲 31 个站位的  $^{210}\text{Pb}$  测定发现, 长江口许多柱状样  $^{210}\text{Pb}$  比活度在垂向上存在复杂的变化规律, 说明长江河口复杂的源汇过程和沉积动力过程破坏了  $^{210}\text{Pb}$  的正常沉积, 而在北槽中的柱状样  $^{210}\text{Pb}$  比活度呈现的是分段衰变类型, 这可能为块体搬运沉积的结果。综上所述, 长江口北槽深水航道的泥沙来源和沉积过程较为复杂, 要探究其年代变化规律, 还有许多工作待开展。

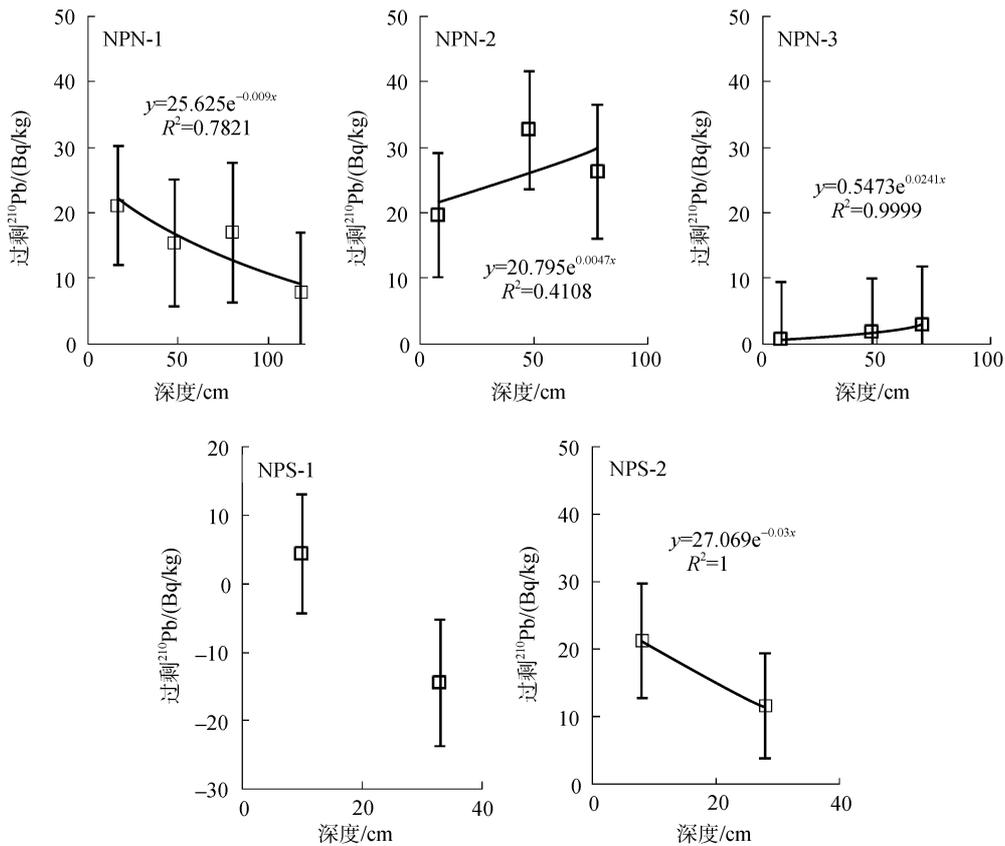


图 7 长江口北槽柱状样  $^{210}\text{Pb}$  分析结果

Fig. 7 Results of isotopic dating using  $^{210}\text{P}$  bisotopic dating

## 5 结论

本研究根据对北槽航道中部浅钻柱样沉积物粒度特征的分析,得到关于水沙动力和沉积环境的如下结果。

1) 长江口北槽深水航道中段柱状样以黏土质粉砂为主,受径流和潮汐作用,分选性都较差,偏态均为正偏,北导堤各个柱状样平均粒径大约在 10~20  $\mu\text{m}$  之间,其他参数在垂向上的变化大致为波动变化,没有明显趋势;南导堤两个柱样,平均粒径在 20~30  $\mu\text{m}$  之间,两个柱样的分选系数、偏态和峰态大小接近。

2) 研究区域南北的差异较为明显。北导堤的平均粒度比南导堤的小,虽然南北导堤的三组分组成接近,但是北导堤的柱样在垂向上波动变化较大,南导堤则表现的较为单一,这与北导堤泥沙沉积条件较为复杂有关。从粒度频率曲线上看,北导堤的频率曲线在垂向上差别较大,有双峰曲线的出现,并且峰值会出现在不同的粒径处,南导堤的频率曲线在垂向上表现的比较均一,没有明显差别。

3) 南北导堤的敏感组分主要集中在粒级 100  $\mu\text{m}$  部分,在 100  $\mu\text{m}$  部分对于水动力的变化较为敏感,而且北边和南边均为双峰曲线,北导堤的三个柱状样的标准差大于南导堤,说明北导堤的泥沙活动较为频繁,这与北槽内涨落潮不对称的情况一致。

4) 影响北槽泥沙沉积的因素很多,首先,泥沙来源便是一个复杂问题,从柱状样参数来看,南北两处三组分组成较为一致,说明两边的来源较为一致,且由于流域来沙减少,北槽受潮汐作用强,流域供沙所占比重逐渐减小,泥沙来源逐渐转变为滩槽交换等其他方式;其次,由于北导堤和南导堤的水动力作用差异,导致了南北在粒度特征上的不同;结合资料和测年数据,可知北槽受三期工程影响巨大,研究区域的泥沙大量淤积可能由于坝区水动力的变化而产生。

致谢:感谢华东师范大学河口海岸科学研究院虞志英教授,徐海根教授在柱状样分析过程中给予的帮助和支持!同时感谢王张华教授为论文修改提出宝贵意见!

### 参考文献:

[1] Folk R L. Petrology of sedimentary rocks[M]. Austin: Hemphill Publishing Company, 2014.  
 [2] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology. 1957, 27(1): 3-26.  
 [3] Visher G S. Grain size distributions and depositional

processes[J]. Journal of Sedimentary Research. 1969, 39(3): 1074-1106.

- [4] 陈维. 长江口北支、北槽冲淤变化及河势演变分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.  
 Chen Wei. Analysis on Morphological Change and Evolution of River Regime in the North Passage and North Branch of the Changjiang River Estuary. Shanghai Ocean University, 2012.  
 [5] 楼飞. 长江口深水外航道海域沉积和冲淤环境研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.  
 Lou Fei. The research of sediment erosion and deposition in the area outside of North Passage, Yangtze estuary [D]. East China Normal University, 2005.  
 [6] 张强, 陈桂亚, 许崇育, 等. 长江流域水沙周期特征及可能影响原因[J]. 水科学进展. 2009, 20(1): 80-85.  
 Zhang Qiang, Chen Guiya, Xu Chongyu, et al. Periodic characters of sediment load and runoff changes in the Yangtze River basin in the past 40 years, China[J]. Advances in Water Science. 2009, 20(1): 80-85.  
 [7] 长江口航道管理局. 长江口深水航道治理工程成套技术[J]. 中国水运. 2007, 8: 9-11.  
 Yangtze Estuary Channel Administration. A complete sets of technology of Yangtze Estuary deep-water channel regulation project [J]. China Water Transport. 2007, 8: 9-11.  
 [8] 刘幼萍, 董娟, 李小妮. 应用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪分析河流泥沙颗粒[J]. 水利科技与经济. 2005, 6: 329-331.  
 Liu Youping, Tong Juan, Li Xiaoni. Analyzing the silt particles with the Malvern Mastersizer 2000[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy. 2005, 6: 329-331.  
 [9] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
 Qian Ning, Wan Zhaohui. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing Science Press, 2003.  
 [10] 万国江. 现代沉积的  $^{210}\text{Pb}$  计年[J]. 第四纪研究. 1997, 3: 230-239.  
 Wan Guojiang.  $^{210}\text{Pb}$  dating for recent sedimentation [J]. Quaternary science. 1997, 3: 230-239.  
 [11] 万国江.  $^{137}\text{Cs}$  及  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  方法湖泊沉积计年研究新进展[J]. 地球科学进展. 1995, 2: 188-192.  
 Wan Guojiang. Progresses on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  dating of lake sediments [J]. Advance in Earth Science. 1995, 2: 188-192.  
 [12] 陈桥, 刘东艳, 陈颖军, 等. 粒级-标准偏差法和主成分因子分析法在粒度敏感因子提取中的对比[J]. 地球与环境. 2013, 3: 319-325.  
 Chen Qiao, Liu Dongyan, Chenyingjun. Comparative analysis of Grade-standard deviation method and factors analysis method for environmental sensitive factor analysis [J]. Earth and Environment. 2013, 3: 319-325.  
 [13] 金镠, 虞志英, 何青. 滩槽泥沙交换对长江口北槽深水航道回淤影响的分析[J]. 水运工程. 2013, 1: 101-108.

- Jin Liu, Yu Zhiying, He Qing. Response of deepwater channel in north passage to water and sediment exchange between channel and shoal in the Yangtze Estuary [J]. *Port & Waterway Engineering*. 2013, 1: 101-108.
- [14] 蒋陈娟, 李九发, 吴华林, 等. 长江河口北槽水沙过程对航道整治工程的响应[J]. *海洋学报*. 2013, 35(4): 129-141.  
Jiang Chenjuan, Li Jiufa, Wu Hualin, et al. Effects of the Deep Waterway Project on the characteristics of hydrodynamics and sediment dynamics in the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 2013, 35(4): 129-141.
- [15] 陈炜, 李九发, 李为华. 近期长江口南北槽分流河口段悬沙输运机制研究[J]. *长江流域资源与环境*. 2013, 22(7): 865-870.  
Chen Wei, Li Jiufa, Li Weihua. Recent suspended sediment transport in bifurcation area of North and South Passage of the Yangtze Estuary [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 2013, 22(7): 865-870.
- [16] 赵捷, 何青, 虞志英, 等. 长江口北槽深水航道回淤泥沙来源分析[J]. *泥沙研究*. 2014, 5: 18-24.  
Zhao Jie, He Qing, Yu Zhiying, et al. Sediment sources of the back-siltation in the North Passage of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*. 2014, 5: 18-24.
- [17] 刘杰, 程海峰, 赵德招. 长江口 12.5m 深水航道回淤特征[J]. *水科学进展*. 2014, 3: 358-365.  
Liu Jie, Cheng Haifeng, Zhao Dezhao. Siltation characteristics of the 12.5m deepwater navigation channel in Yangtze Estuary[J]. *Advances in Water Science*. 2014, 3: 358-365.
- [18] 谈泽炜, 范期锦, 郑文燕, 等. 长江口北槽航道回淤原因分析[J]. *水运工程*. 2009, 6: 91-102.  
Tan Zewei, Fan Qijin, Zheng Wenyan, et al. Analysis of reasons for the siltation in North Passage of Yangtze Estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*. 2009, 6: 91-102.
- [19] 沈淇, 高钦钦, 顾峰峰, 等. 长江口深水航道三期工程后北槽洪枯季水沙运动特征研究[J]. *海洋学报(中文版)*. 2014, 7: 118-124.
- Shen Qi, Gao Qinqin, Gu Fengfeng, et al. Analysis of sediment motion at north passage in flood and dry season after 3rd phase engineering of deep waterways in Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*. 2014, 36(7): 118-124.
- [20] 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, 2: 129-135.  
Jin Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis[J]. *Marine Sciences*. 2012, 2: 129-135.
- [21] 潘灵芝, 丁平兴, 葛建忠, 等. 长江口深水航道整治工程影响下北槽河床冲淤变化分析[J]. *泥沙研究*. 2011, 5: 51-59.  
Pan Lingzhi, Ding Pingxing, Ge Jianzhong, et al. Analysis of influence of Deep Waterway Project on morphological change in North Passage of Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*. 2011, 5: 51-59.
- [22] 刘红, 何青, 孟翊, 等. 长江口表层沉积物分布特征及动力响应[J]. *地理学报*. 2007, 1: 81-92.  
Liu Hong, He Qing, Meng Yi, et al. Characteristics of Surface Sediment Distribution and Its Hydrodynamic Responses in the Yangtze River Estuary [J]. *Acta Geographica Sinica*. 2007, 1: 81-92.
- [23] 范中亚. 长江口深水航道整治工程对流场、盐度场影响的数值模拟研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.  
Fan Zhongya. The Effect of Deep Waterway Project on Current and Salinity in Changjiang Estuary [D]. East China Normal University. 2011.
- [24] 戚定满, 王元叶, 万远扬. 长江口北槽深水航道整治工程贮泥坑抛泥过程监测分析[J]. *水运工程*. 2013, 11: 43-48.  
Qi Dingman, Wang Yuanye, Wan Yuanyang. Field measurement for dumped sediment transport at disposal zone of the Yangtze estuary deep navigation regulation project [J]. *Port & Waterway Engineering*. 2013, 11: 43-48.
- [25] 谢文静, 高抒, 杨旸. 长江口水下三角洲粒度与<sup>210</sup>Pb特征的空间分布[J]. *第四纪研究*. 2012, 32(6): 1121-1131.  
Xie Wenjing, Gao Shu, Yang Yang. Spatial distribution of grain size and <sup>210</sup>Pb characteristics over the Changjiang subaqueous delta [J]. *Quaternary Sciences*. 2012, 32(6): 1121-1131.

# Sediment depositional characteristics of North Passage in the Yangtze River Estuary

DENG Zhi-rui, HE Qing, XING Chao-feng, GUO Lei-cheng, WANG Xian-ye

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Received:** Jan., 4, 2015

**Key words:** Yangtze River Estuary; North Passage; sediment depositional; core sediments; grain size

**Abstract:** Sediment transport and sedimentation in the North Passage in the Yangtze River Estuary were investigated by exploring the hydrodynamic and depositional processes through analyses of sediment core characteristics, grain size parameters, and sedimentation rates. It was observed that the deposited sediment mostly comprised clayey silt, which features poor sorting and a positive skewness due to the significant influence of river–tide interactions. The values of core skewness and kurtosis coefficients indicate consistent characteristics of sediment components at the north jetty and south jetty, respectively. However, the difference between the north side and south side is evident because the mean grain size at the north jetty was smaller than that at the south jetty. Conversely, the vertical grading curve at the north jetty had a larger fluctuation than that at the south jetty, suggesting a more stable sediment core grain size distribution at the south jetty. Standard deviation of grain size component analysis showed that a 100-micron grain size was the most sensitive component on both sides. In combination with data from both hydrodynamics and isotope dating, it was observed that tidal asymmetry was the primary controlling factor that caused differences in grain size characteristics on both sides[Editor1] of the North Passage. In addition, it was found that the sediment from the riverine side gradually reduces, while the supply from sediment exchange between the channel and floodplain becomes dominant for the sedimentation process. Further study is required as the deep-water channel project has substantial influence on sediment transport in the North Passage.

(本文编辑: 李晓燕)