

文章编号: 1000-0550(2009) 03-0511-07

长江河口涨落潮槽沉积物特征及其动力响应^①

王永红¹ 沈焕庭² 李九发² 茅志昌²

(1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室 山东青岛 266100;

2 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室 上海 200062)

摘要 涨落潮槽是河口区的重要地貌单元,涨落潮槽的水动力有着明显的差异。通过对涨潮槽新桥水道和南小泓以及落潮槽南支主槽和南港表层沉积物的粒度、粘土矿物、重矿物以及磁性特征分析,发现落潮槽表层沉积物的粒径较粗,为粉砂质砂,涨潮槽沉积物主要是砂质粉砂。在双向水流的作用下,粘土矿物重新发生分配,涨落潮槽粘土矿物的组分变化不大。涨潮槽的重矿物颗粒百分含量中,稳定的不透明矿物比落潮槽有所减少,而比重小的片状矿物有所增加,碳酸盐含量较高。磁性矿物的含量在不同的地方相差很大,落潮槽中的亚铁磁性矿物含量高于涨潮槽。这些沉积特性的不同是对涨落潮槽内水动力差异响应的结果。

关键词 长江口 涨落潮槽 沉积特征 动力响应

第一作者简介 王永红 女 1969 年出生 博士 副教授 河口海岸沉积 E-mail yonghongw@ouc.edu.cn

中图分类号 P512.2 P343.5 文献标识码 A

河口涨潮槽是河口地区普遍存在的重要地貌单元。由于科氏力的影响,落潮主流呈南偏,涨潮主流呈北偏,在长江河口形成了二类河槽:一类以落潮流作用为主的落潮槽,一般表现为河口主槽;另一类以涨潮流作用为主的涨潮槽,一般表现为河口副槽。涨落潮槽在许多大河口都有发育,如英国泰晤士河口^[1]和孟加拉湾河系河口^[2],我国钱塘江河口^[3-5]、长江河口^[6-9]和珠江口黄茅海河口^[10]等。长江河口涨落潮槽发育非常普遍,如新桥水道和南小泓等都是典型的涨潮槽(图 1)。目前对于长江河口这两类河槽的研究多集中在水动力^[11]和泥沙输移机制的研究^[12-13],但是对于不同的水动力作用下涨落潮槽是否表现出沉积特征的差异还不清楚。以往对于长江河口沉积物的特征研究中,由于南支扁担沙和瑞丰沙嘴等水下沙坝的限制,取样地点多集中于南支主槽,只有个别样品取自涨潮槽,进行了粘土矿物的研究^[14-15],也有少量样品分析研究表明涨潮槽长兴岛底质中污染物的含量比落潮槽南港主槽中的含量要高^[16],但总体来说对于涨潮槽内沉积特性的研究较少。

本文对两类河槽的表层样品进行分析,试图阐明两类河槽的沉积特性及其与动力的响应关系,从而可以更好的理解沉积动力之间的相互作用,加深涨潮槽发育过程的认识;同时由于近年来长江口涨潮槽正在

不断地开发利用之中,如南通电厂、江南造船厂和上海造船厂等一批特大型企业分别已经或正在移建南小泓北岸长兴岛和新桥水道北岸崇明岛,所以对于长江河口涨落潮槽的沉积和动力之间关系研究也为河口涨潮槽开发利用及治理提供理论依据。

1 研究区域背景

扁担沙体将长江口南支分成两个水道(图 1):北部新桥水道和南部南支主槽。新桥水道以涨潮流作用为主,而南支主槽以落潮流为主;在南支下端,瑞丰沙嘴将南港分为北部南小泓和南部南港主槽,其中南港主槽以落潮流为主,而南小泓以涨潮流为主^[8]。

经过对于涨落潮槽的水动力观察和研究,发现涨潮槽内水动力较为复杂^[11-13]:无论是洪季还是枯季,潮流历时涨潮小于落潮,潮流速、潮量均为涨潮大于落潮,呈涨潮流优势,且落转涨潮后流速增速迅速,这种潮流特性对泥沙运动影响尤为明显。涨潮槽的涨潮潮量大于落潮潮量;落潮槽的情况与之相反。涨落潮槽中的流速和潮量大小特征存在明显的洪枯季变化,在洪季涨落潮槽的优势流均大于 50%,但是涨潮槽的落潮优势小于落潮槽的落潮优势。枯季涨潮槽的潮量优势流小于 50%,到洪季大于 50%。涨潮槽的涨潮输沙量大于落潮输沙量,涨潮流带进来的泥沙不能全部被落潮流带走,使涨潮槽不断淤积。落潮槽

①国家自然科学基金重点课题(批准号:40334038),国家自然科学基金(批准号:40572077)及“973”项目(编号:2005CB4022304)的联合资助。

收稿日期:2008-06-22 收修修改稿日期:2008-08-11

的涨潮输沙量小于落潮输沙量。

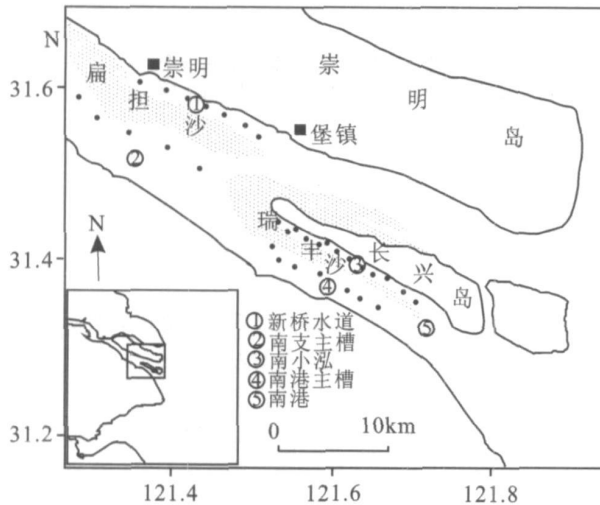


图 1 表层沉积物采样位置图

Fig 1 Sampling location of surface sediment in the flood and ebb channels

2 研究方法

2005 年 9 月航次对研究区域取得表层样品 32 个,其中涨潮槽内 20 个,取样水深为 7~18 m;落潮槽内 12 个,取样水深约为 12~25 m (图 1)。

2.1 粒度

粒度分析采用激光粒度仪 (Coulter LS-100Q)。称取约 2 g 样品于 50 ml 烧杯,加入蒸馏水 15 ml 再加入 5 ml H_2O_2 (30%),静置过夜,以去除有机质。第二天将烧杯加入 5 ml 分散剂 (含 3.3% 六偏磷酸钠)用超声振荡。然后按照仪器操作步骤分析。

2.2 粘土矿物

取 20 g 新鲜样,用蒸馏水浸泡去除可溶盐,然后制成悬液,用超声波均匀分散,按 Stokes 沉降原理的沉降时间提取小于 $2 \mu m$ 的粘土组分,采用离心方法使所提取的粘土组分沉降,倒掉多余水分,再用超声波将粘土稠液均匀分散,制成玻璃定向薄片,尽量保持薄片厚度一致,自然晾干后使用 X 射线衍射已进行分析。分析所用仪器为 2000 年出厂的荷兰飞利浦公司的 X'Pert-MPD 型 X 衍射仪, Cu 靶,管压 40 kV,管电流 30 mA,扫描范围 $3^\circ \sim 32^\circ 2\theta$,扫描速度为 $3^\circ / \text{min}$ 。使用定向片为自然片、乙二醇饱和加热处理 ($550^\circ C$, 2 h)。将所得衍射图谱进行分析,作定性鉴定,然后用乙二醇饱和片的 4 种主要粘土矿物 (001) 面反射峰强度进行半定量计算。根据 Johns 和

Biscaye 采用的权重系数蒙皂石:伊利石:(绿泥石+高岭石) = 1:4:2 进行百分含量计算。

2.3 重矿物

将样品浸泡后分散过筛,得到 $63 \sim 125 \mu m$ 粒级的极细砂样。用比重为 $2.902 \text{ cm}^3 / \text{g}$ ($15^\circ C$) 的三溴甲烷 (溴仿 $CHBr_3$) 重液分离出重、轻矿物。烘干后称重,计算出重轻矿物的百分比。重矿物采用双目实体显微镜和偏光显微镜鉴定。矿物定量采用条带颗粒法,每个鉴定样的颗粒为 300~500 计算出各种重矿物的颗粒百分含量。

2.4 磁性

表层样经 $40^\circ C$ 以下低温烘干后,倒入玛瑙研钵内,轻轻磨成粉末状,称取 10 g 左右样品,置于 10 ml 的圆柱状聚乙烯样品盒中,压实后进行磁性测量。磁化率测定选用英国产 Bartington MS2 磁化率仪,剩磁测量所用仪器为英国 Molspin 公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪。所测的磁性参数为:(1)低频磁化率 (0.47 kHz) 和高频磁化率 (4.7 kHz); (2)非滞后剩磁 (交变磁场峰值 100 mT, 直流磁场 0.04 mT); (3)样品经 20 mT、300 mT 磁场磁化后所得的剩磁; (4)饱和等温剩磁 (SIRM, 磁场强度为 1000 mT); (5)具有饱和等温剩磁的样品在磁场强度 -20 mT、-40 mT、-100 mT 磁场退磁后所带的剩磁,然后计算各磁性参数。

3 结果

3.1 粒度变化特征

新桥水道和南小泓各站位表层沉积物中粘土、粉砂和砂的变化范围如表 1 所示。

表 1 各站位表层沉积物中的粘土、粉砂和砂的平均值以及变化范围

Table 1 Characteristic values of clay, fine sand and sand in the surface sediments

平均值和 变化范围	粘土 ($< 4 \mu m$ / %)	粉砂 ($4 \sim 63 \mu m$ / %)	砂 ($> 63 \mu m$ / %)
涨潮槽	16.4 (12.1~31.9)	47.4 (12.6~65.1)	36.2 (3.1~83.5)
落潮槽	12.2 (2.3~28.3)	20.9 (3.9~65.2)	61.8 (6.5~93.8)

落潮槽沉积物粘土、粉砂和砂的含量不同于涨潮槽,如粘土含量为涨潮槽的四分之三,粉砂为其一半,而砂为其的 1.5 倍。落潮槽表层沉积物的粒径较粗,以砂为主。按照粒度的三种主要成分,涨潮槽表层沉

积物主要是砂质粉砂, 落潮槽为粉砂质砂。无论在涨潮槽或落潮槽, 沉积物在槽内从上游到下游没有明显的分布规律。

3.2 粘土矿物

根据 X 射线衍射图谱, 可知所测样品中含有: (1) 伊利石 (Illite), 具有 1.005 和 0.33 nm 等特征衍射峰, 经乙二醇饱和及加热处理后, 其特征保持不变; (2) 蒙皂石 (Smectite), 经乙二醇饱和后 (001) 衍射峰有 1.4 nm 膨胀到 1.7~1.8 nm, 经 550°C 加热处理后收缩到 1.0 nm; (3) 高岭石 (Kaolinite), 具有 0.7 nm 和 0.358 nm 特征衍射峰, 经乙二醇处理后无变化, 经 550°C 加热处理后衍射峰全部消失; (4) 绿泥石 (Chlrite), 具有 1.4 nm、0.7 nm、0.353 nm 和 0.47 nm 等特征衍射峰。在粘土矿物组分中, 还有少量非粘土矿物成分, 有石英 (0.428 nm, 0.334 nm), 长石 (0.403 nm, 0.318 nm), 方解石 (0.3 nm 和 0.19 nm) 等。

该区粘土矿物含量变化不大, 规律性也不明显。涨潮槽中伊利石含量最高, 平均为 69.5%, 其次为绿泥石、高岭石和蒙皂石, 平均含量分别为 14.8%、9.8% 和 5.4%。沿水道含量基本未有明显的变化趋势。在落潮槽, 伊利石平均百分含量为 67.9%, 绿泥石、高岭石和蒙皂石的平均百分含量分别为 16.1%、10.5% 和 3.7%, 沿水道含量也未有明显的变化趋势 (表 2)。

3.3 重矿物

本区主要的重矿物有磁铁矿、赤褐铁矿、黑色金属、角闪石、绿帘石、黝帘石、云母类、绿泥石、石榴石、碳酸盐等。这十种主要重矿物占总量的 95.8%, 而其中角闪石、绿帘石、赤褐铁矿和云母类为 80.5%。无论是涨潮槽或是落潮槽, 其重矿物组合的主要组分基本相似, 但是百分含量有所不同, 如表 3。

根据研究区沉积特性, 以及重矿物的含量变化和单矿物颗粒的百分比, 结合沉积物类型, 将本区的重

矿物划分为以下三种组合:

第一组合: 角闪石—绿帘石—云母类—不透明矿物。主要分布于涨潮槽和落潮槽的河槽中部, 由角闪石 38.8%、绿帘石 29.2%、云母类 5.3%、不透明矿物 (包括磁铁矿、赤褐铁矿、钛铁矿 3.4%) 组成。角闪石颜色多为绿色、浅兰绿色, 少量为褐绿色, 呈晶形不完整的不规则粒状或柱状, 较薄, 解理发育, 参差断口。绿帘石颗粒一般不大, 颜色多为绿黄色或黄绿色, 表面较为毛糙, 晶体大多受损。

第二组合: 不透明矿物—绿帘石—角闪石—石榴石。主要分布于涨潮槽的沙坝区, 如靠近扁担沙和瑞丰沙区域, 其中不透明矿物占 37.1%, 绿帘石占 27.7%, 角闪石为 14.4%, 石榴石为 3.8%。磁铁矿具有强磁性, 呈次棱—次圆的不规则粒状, 偶见完整的八面体; 赤褐铁矿主要为氧化的褐色粒状体—褐铁矿, 多见为次棱的不规则粒状, 少见板状, 弱磁性; 钛铁矿多为板状或粒状, 表面常见一层灰白色的次生粉状薄膜, 强电磁性。这一组合的特点是比重大的稳定矿物, 如磁铁矿、赤褐铁矿和石榴石等明显增加。

第三组合: 云母类—绿泥石—绿帘石—角闪石。主要分布于边滩沉积区。云母类 (包括白云母、黑云母和风化云母) 为 77%, 绿泥石 17%, 绿帘石 1.3%。角闪石 1.6% 组成。云母类为很薄的片状体, 颗粒小。白云母的含量高于黑云母, 两者为不规则的单片状产出, 珍珠光泽, 富有弹性。风化云母多呈片状集合体产出, 光泽暗淡, 结构松软, 缺乏弹性。这一组合的特点是比重小的 (2.8~3.1) 的片状矿物 (云母和绿泥石) 为主, 出现于弱水动力条件下。

3.4 磁性

沉积物的磁性特征, 主要体现为磁性的强弱, 磁化和退磁的难易程度等方面, 这些特征与沉积物所含的磁性矿物类型、含量和大小有关。表 4 列出涨潮槽和落潮槽中沉积物磁性的平均值和变化范围。

表 2 各站位表层沉积物中的粘土矿物的平均值以及变化范围
Table 2 Characteristic values of clay minerals in the surface sediments

平均值和变化范围	蒙皂石 %	伊利石 %	绿泥石 %	高岭石 %
涨潮槽 (新桥水道)	5.6 (4.0~9.9)	69.4 (65.7~72.9)	14.6 (13.5~15.9)	10.3 (9.5~11.0)
涨潮槽 (南小泓)	5.4 (3.3~9.1)	69.7 (65.5~73.2)	15.3 (13.6~17.9)	9.6 (8.6~10.5)
落潮槽 (南支主槽)	3.1 (2.5~3.9)	67.4 (62.2~69.1)	15.4 (13.9~18.1)	10.2 (8.1~13.2)
落潮槽 (南港主槽)	4.2 (3.8~5.3)	68.3 (64.8~70.3)	16.8 (14.1~22.4)	10.7 (8.9~11.9)

表 3 长江口涨潮槽和落潮槽主要重矿物颗粒含量平均值比较 (%)

Table 3 Comparison of average values of the heavy minerals between the flood and ebb channels in the Changjiang Estuary

研究区	不透明矿物*	角闪石	帘石类	云母类	石榴石	锆石	楣石	电气石	碳酸盐
涨潮槽	10.4	39.0	32.3	4.7	1.4	0.5	0.8	0.3	2.4
落潮槽	16.3	32.6	28.0	5.9	1.7	0.3	0.7	0.2	2.4

* 包括磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿

表 4 长江口涨潮槽和落潮槽表层沉积物磁性参数的平均值和变化范围

Table 4 Average values of the magnetization parameter of the sediments in the flood and ebb channels

样品	X_{ARM}	X_{ARM}/X	SIRM	$X_{ARM}/SIRM$	X	SIRM/ X	X_{eff}	HIRM	SOFT	F_{300}	S_{-100}
涨潮槽	109.5	0.5	6531.9	3.9	59.4	8.9	0.9	265.4	1046.9	91.3	77.0
变化范围	381.8	3.9	48277.6	30.3	353.9	20.0	4.5	1899.0	6103.5	96.5	86.62
平均值	34.8	2.3	16153.2	17.7	109.5	12.7	1.9	1243.9	2167.9	94.1	82.5
落潮槽	116.9	1.1	8412.3	13.7	78.7	8.1	1.0	430.8	1097.6	93.2	79.6
变化范围	437.8	4.5	15639.7	28.0	160.8	16.0	3.5	7351.0	2238.5	95.9	85.2
平均值	286.9	2.8	12701.1	20.9	148.1	12.1	2.3	1644.2	1904.8	94.7	83.8

从表 4 可以看出, 落潮槽中的 X_{ARM} 、 X_{ARM}/X 、 $X_{ARM}/SIRM$ 、 X_{eff} 值都大于涨潮槽中的值, 说明磁性矿物 (主要指亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物) 在落潮槽中的含量高于涨潮槽。根据磁性参数的物理意义, X_{eff} 、 X_{ARM}/X 、 $X_{ARM}/SIRM$ 和 $SIRM/X$ 主要反映了磁性矿物的晶粒特征。这些值在涨潮槽中略小于或近似于落潮槽, 表明两类河槽中磁性矿物的晶粒大小近似, 但落潮槽中的磁性矿物晶粒略大于涨潮槽。

4 讨论

4.1 水动力对于沉积物粒度分布的影响

落潮槽沉积物粒级比涨潮槽的粗, 这与水动力条件密切相关。虽然涨潮槽涨潮平均流速大于落潮槽, 但是落潮时落潮槽的流速大于涨潮槽, 落潮历时长。因此总体来说较大的流速使得落潮槽较细的物质不易留下来。另外在落潮槽南港主槽, 沿沉积物搬运方向, 粒度沿程减小, 平均粒径从 137 μm 变为 112 μm , 这主要是重力分异的缘故, 一般平均粒径向下游的方向减小。但在涨潮槽, 由于水动力条件复杂, 在涨潮流的强烈冲刷作用下, 粒度的总体分布不是逐渐过度, 而是呈块状断续分布, 分选性很差。

4.2 粘土矿物对于水动力的相应

影响粘土矿物分布的因素多种多样, 在河口海岸这一复杂的地区, 物源、水动力、地貌地质条件、盐度、粒径大小等都可能对本区的粘土矿物的分布产生影

响。河流带来的粘土暴露于海水中会经历离子交换反应^[17, 18]; 河口区盐淡水混合程度不同造成不同的絮凝, 引起粘土矿物分布的不同, 如伊利石和高岭石比蒙皂石发生絮凝需要的盐度要低^[19, 20]; 但也有研究认为在河口海岸盐淡水交换处粘土成岩和不同的絮凝状态只是起到很小的作用, 而河口区物理循环过程和粘土矿物的颗粒大小起决定性的作用^[21-23]; 河口环流的重要作用更为许多研究者重视, 如认为河口环流在将海源物质向陆地搬运中起重要的作用^[15, 24]; 物源也起到很重要的影响, 如在南英格兰, 蒙皂石的含量在上游高, 下游低, 是由于河源的物质富含蒙皂石, 而海源的物质贫蒙皂石^[25]。根据取样时间对于研究区盐度的观测结果, 所测盐度小于 1。在这种盐度下, 研究区粘土矿物在本区较少受到絮凝的影响, 盐度和絮凝作用的影响在本区只能作为非主要因素。本研究区有涨潮流和落潮流以及径流的共同作用, 粘土矿物是颗粒细小 (< 2 μm) 的层状结构铝硅酸盐矿物, 以它特有的“活性”对环境条件, 尤其是水动力变化极为敏感。涨潮槽的水动力变化非常复杂, 不仅有洪枯季的水文变化, 更有大小潮的变化。在涨潮流和落潮流作用下, 沉积物被来回搬运, 由于涨潮流为优势流, 将径流带到口门附近的沉积物又搬回河口区, 而口门附近的绝大部分沉积物虽然仍然是河流输出物^[23, 26], 但由于径流的作用, 粘土矿物在到达口门前已经发生了沉淀分离, 特别是口门处盐度高, 再加上盐水楔的环流作用, 粘土矿物特别是蒙皂

石的絮凝沉淀,使涨潮流挟带已经发生变化的沉积物重新进入涨潮槽,使该区的粘土矿物重新发生分配。如蒙皂石向下游并不增加,高岭石向下游也并不减少,而是趋于一致。虽然落潮槽以落潮水流为主,但粘土矿物颗粒细小,也受双向水流作用明显,所以涨落潮槽粘土矿物的组分变化不大,看不出明显的规律。

4.3 水动力和粒度变化对于重矿物和磁性特征分布的影响

在河口海岸环境中的研究,重矿物主要用来反映物源、水动力以及沉积物输移路径的信息^[27~29]。由于重矿物在不同的水动力、不同的物源的影响下,其组合特征不同,因此可以通过重矿物的含量变化及组合特征变化来探讨沉积物与水动力之间的相互影响关系。长江口沉积物的重矿物主要源于长江,矿物种类在河口区无显著的变化,但在区域内由于水流动力的变化使重矿物沉积时经受水动力的分选而使矿物组合特征明显不同。当介质的水动力条件适合重矿物沉积时聚集,反之就扩散,从而使重矿物的特征,包括含量、晶形、大小、颜色、密度等产生差异,这些差异既是水动力分选结果,又反映了沉积物的来源和沉积环境。长江口涨落潮历时不同,流路分歧,从而使涨落潮槽中的沉积物相应地有所变化。一般长江口区重矿物划分为 7 个组合^[30]。涨落潮槽内的三个组合分别与其中的三类相对应。在研究区内,除了个别点属于边滩和沙坝沉积组合外,其余的点都是河床沉积组合。涨潮槽的颗粒百分含量中,稳定的不透明矿物有所减少,而比重小的片状矿物有所增加,碳酸盐比落潮槽中含量高。这和落潮槽中沉积物颗粒较粗有关,因为比重大的重矿物颗粒容易富在较粗的沉积物颗粒中。另外也和水流的控制有关。

而南港主槽落潮槽的颗粒百分含量中,稳定的不透明矿物的含量较高,海相自生矿物碳酸盐比涨潮槽中有所减少。这是因为落潮槽受落潮水流的控制,平均流速比涨潮水流大,比重较大的矿物能够在此沉积下来。南港主槽是落潮优势流,海相自生矿物碳酸盐含量平均值小于涨潮槽。另外落潮槽内沉积物的粒度较涨潮槽粗,而重矿物在较粗的颗粒中富集,因此落潮槽内较粗的沉积物组成也是使重矿物富集的一个重要因素。从研究区的矿物组合以及重矿物的性质和分布模式,说明本区沉积物有三种来源:河流带来的陆源碎屑沉积,边滩沉积物和外海带入的沉积物。

落潮槽中的亚铁磁性矿物含量高于涨潮槽,从重

矿物分析中也可以看出,磁铁矿、磁赤铁矿等含量高于涨潮槽。由于磁性参数与各种因素有关。在涨落潮槽复杂的沉积动力环境下,磁性参数不同。涨落潮槽流速流向的差异以及沉积物粗细的差异,都会使两个类型河槽的磁性参数产生变化,也使落潮槽中的磁性矿物晶粒略大于涨潮槽

5 结论

在不同的水动力的影响下,涨落潮槽的沉积特征不同,可以通过沉积特征变化来探讨沉积物与水动力之间的相互影响关系。(1)落潮槽表层沉积物的粒径较粗,以砂为主。按照粒度的三种主要成分,涨潮槽沉积物主要是砂质粉砂,落潮槽为粉砂质砂;(2)在涨潮流和落潮流作用下,沉积物被来回搬运,使粘土矿物重新发生分配。所以涨落潮槽粘土矿物的组分变化不大,看不出明显的规律;(3)无论是涨潮槽或是落潮槽,其重矿物组合的主要组分基本相似,但是百分含量有所不同,组合不同。涨潮槽的颗粒百分含量中,稳定的不透明矿物有所减少,而比重小的片状矿物有所增加,碳酸盐含量高。新桥水道由于水动力变化复杂,重矿物的分布并无一定的分布规律,南小泓的重矿物沿涨潮流方向依次减少,说明涨潮流控制了本区的重矿物分布模式;南港主槽是落潮优势流,海相自生矿物碳酸盐含量平均值小于涨潮槽。从研究区的矿物组合以及重矿物的性质和分布模式,说明本区沉积物有三种来源:河流带来的陆源碎屑沉积,边滩沉积物和外海带入的沉积物。(4)磁性矿物的含量在不同的地方相差很大,落潮槽中的亚铁磁性矿物含量高于涨潮槽。这种分布特征主要受水动力和粒度分布特征的控制。

致谢 吴瑞明、师育新、严肃庄、张卫国等老师在粒度分析、粘土矿物、重矿物鉴定和磁性测定等实验中给以指导和帮助,在此深表谢意!同时非常感谢审稿人和编辑所给予本文的建设性意见。

参考文献 (References)

- 1 Fairbridge RW, Bougeois. The Encyclopedia of Sedimentology[M]. Dondon Hutchinson and Ross Inc, 1978: 288
- 2 Banu Dilip K. Suspended sediment movement in the estuary of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system [J]. Marine Geology, 1994, 91: 243-253
- 3 陈吉余, 虞志英, 陈德昌. 钱塘江河口段的泥沙移运与河槽变形 [C]// 河口海岸研究成果汇编: 钱塘江河口研究专集. 华东师范大学河口海岸研究室, 1965: 43-68 [Chen Jiyu, Yu Zhiying, Chen

- Dechang Sediment transport and channel defom in the Qiantangjiang Estuary[C]// Collection of Study Results in Estuaries and Coasts Collection of the Qiantangjiang Estuary. Institute of Estuary and Coast Research, 1965: 43-68]
- 4 曹沛奎, 董永发, 周月琴. 杭州湾北部潮流冲刷槽演变分析[J]. 地理学报, 1989, 44(2): 157-166 [Cao Peiku, Dong Yongfang, Zhou Yueqin. An analysis on the evolution of scouring channels in northern Hangzhou Bay[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(2): 157-166]
 - 5 余祚文, 符宁平. 杭州湾北岸深槽形成及演化特性的研究[J]. 海洋学报, 1994, 16(3): 74-85 [Yu Z Bowen, Fu Ningping. Features of formation and evolution of deep channel in Hangzhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(3): 74-85]
 - 6 陈吉余, 恽才兴, 徐海根. 两千年以来长江河口发育模式[J]. 海洋学报, 1979, 1(1): 103-111 [Chen Jiyu, Yun Caixing, Xu Haigen. The model of development of the Changjiang Estuary during the last 2000 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(1): 103-111]
 - 7 沈焕庭. 长江口潮波传播及其对河槽演变的影响[C]// 中国地理学会 1977 年地貌学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1981: 53-60 [Shen Huanting. The tidal wave propagation and its effect on the channel evolution in the Changjiang Estuary[C]// Proceeding of Geomorphologic Symposium of the Geographical Society of China in 1977. Beijing: Science Press, 1981: 53-61]
 - 8 沈焕庭, 李九发, 金元欢. 河口涨潮槽的演变及治理[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 83-89 [Shen Huanting, Li Jiufa, Jin Yuanhuan. Evolution and regulation of flood channels in estuaries[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(1): 83-89]
 - 9 宋志尧, 严以新, 朱勇. 河口涨潮沟形成水动力机制初探[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 45-48 [Song Zhiyao, Yan Yixin, Zhu Yong. Hydrodynamic mechanism of flood tide channel formation at estuaries[J]. Journal of Hehai University Natural Sciences, 2002, 30(4): 45-48]
 - 10 杨干然, 罗宪林, 彭炳健. 新会崖门港外航道拦门沙的发育演变及治理问题[C]// 海岸动力地貌学研究及其在华南港口建设中的应用. 广州: 中山大学出版社, 1995: 177-206 [Yang Ganran, Luo Xianlin, Peng Bingjian. Evolution and regulation of mouth bar in the waterway out of the Xinhuiyanmen harbour[C]// Study of Coastal Dynamic and Geomorphology and Its Application in the Construction of the Huanan Harbour. Guangzhou: Press of the Zhongshan University, 1995: 177-206]
 - 11 刘高峰, 沈焕庭, 吴加学, 等. 河口涨落潮槽水动力特征及河槽类型判定[J]. 海洋学报, 2005a, (5): 151-156 [Liu Gaofeng, Shen Huanting, Wu Jiaxue, et al. The study of hydrodynamic characteristics of flood and ebb channels and channel type judgment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, (5): 151-156]
 - 12 刘高峰, 朱建荣, 沈焕庭, 等. 河口涨落潮槽水沙输运机制研究[J]. 泥沙研究, 2005b, 10(5): 51-57 [Liu Gaofeng, Zhu Jianrong, Shen Huanting, et al. Study on mechanism of water and suspended sediment transport in flood and ebb channels[J]. Journal of Sediment Research, 2005, 10(5): 51-57]
 - 13 李九发, 沈焕庭, 万新宁, 等. 长江河口涨潮槽泥沙运动规律[J]. 泥沙研究, 2004, 10(5): 34-40 [Li Jiufa, Shen Huanting, Wan Xinlin, et al. Sediment transport in flood channels of the Changjiang estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 10(5): 34-40]
 - 14 吕全荣, 严肃庄. 长江河口重矿物组合的研究及其意义[C]// 严钦尚, 等著. 长江三角洲现代沉积研究, 1987: 196-206 [Lv Quanrong, Yan Suzhuang. Study on the heavy mineral combinations and their indication in the Changjiang Estuary[C]// Yan Qinshang, et al. ed. Study of Modern Sedimentation of the Changjiang Delta, 1987: 196-206]
 - 15 吕全荣, 王效京. 长江口细颗粒沉积物的粘土矿物及地球化学特征[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 141-151 [Lv Quanrong, Wang Xiaojing. Clay minerals in fine-grained sediments at Changjiang Estuary and their geochemical characteristics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 141-151]
 - 16 潘定安. 长江河口南港的水文泥沙环境及污染物输移[J]. 地理研究, 1996, 15(1): 39-46 [Pan Ding'an. Hydrological and sedimentary environment and pollutant transport of the South Channel in the Changjiang Estuary[J]. Geographical Research, 1996, 15(1): 39-46]
 - 17 Russell K L. Geochemistry and halimolysis of clay minerals Rio America Mexico[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, 34: 893-907
 - 18 Denver J L. Early diagnosis of clay minerals Rio America basin Mexico[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41: 982-994
 - 19 Edzwald JK, Orelia C R. Clay distribution in recent estuarine sediments[J]. Clays and Clay Mineral, 1975, 23: 29-44
 - 20 辛春英, 何良彪, 王慧艳. 黄河口及其近岸区的粘土矿物[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(4): 23-27 [Xinchunying, He Liangbiao, Wang Huiyan. Clay minerals in the surficial sediments from the Huanghe (Yellow River) Estuary and its offshore areas[J]. Journal of oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1998, 16(4): 23-27]
 - 21 Gibbs R J. Clay mineral segregation in the marine environment[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1977, 47: 237-243
 - 22 赵全基. 渤海表层沉积物中粘土矿物研究[J]. 黄渤海海洋, 1987, 5(1): 78-84 [Zhao Quanjia. A study of the clay minerals of the surficial deposit in the Bohai Sea[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1987, 5(1): 78-84]
 - 23 何良彪. 中国海及其邻近海域的粘土矿物[J]. 中国科学, 1989, 1: 75-83 [He Liangbiao. Clay minerals in the China Sea and adjacent seas[J]. Science in China, 1989, 1: 75-83]
 - 24 唐锦龙, 游仲华. 三都海湾粘土矿物组合特征与沉积环境[J]. 海洋通报, 1994, 13(1): 68-75 [Tang Jinlong, You Zhonghua. Combination characteristics and Sedimentary environment of clay minerals in Sandu Bay[J]. Marine Science Bulletin, 1994, 13(1): 68-75]
 - 25 Aigan O, Clayton T M, Tranter M B. Estuarine mixing of clay minerals in the Solent region, southern England[J]. Sedimentary Geology, 1994, 92: 241-255
 - 26 李国刚. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报, 1990, 12(4): 470-479 [Li Guogang. Composition, distribution and geological indication of clay in surface sedi-

- ment in coast sea of China [J]. *Acta Oceanologica Sinica* 1990 12 (4): 470-479]
- 27 Caniquiry JD, Sanchez A. Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss [J]. *Marine Geology* 1999, 158: 125-145
- 28 El-Agnaf M, Hesham, Kevin white. Changes in coastal sediment transport processes due to construction of new Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt [J]. *Coastal Engineering* 2002, 46: 127-138
- 29 Wong LF, Brence. Heavy mineral provinces of the Pecos Verdes margin [J]. *Southern California Continental Shelf Research* 2002 22: 899-910
- 30 吕全荣. 长江口浑浊带沉积物的矿物、地球化学特征及其沉积作用 [C]// 华东师范大学河口海岸研究所编. 河口最大浑浊带文集. 上海: 华东师范大学出版社, 1993: 285-303 [Lv Quanrong. Minerals geochemistry and sedimentation of sediments in the maximum turbidity of the Changjiang Estuary [C]// Collection of the maximum turbidity of estuaries. Ed Estuarine and Coastal Research Shanghai: East China Normal University Press 1993: 285-303]

Sedimentary Features of Sediment and Their Responses to Dynamics in the Flood and Ebb Channel of the Changjiang Estuary

WANG Yong-hong¹ SHEN Huan-ting² LI Ji-fa² MAO Zhì-chang²

(1. Key Lab of Submarine Geosciences and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100;

2. State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract Flood and ebb channel are the important geomorphic units and different hydrodynamic properties exist in these channels. Based on the analysis of particle size, clay and heavy mineral and magnetic features of the sediments in the flood and ebb channels of the Changjiang Estuary, it is found that there are different sedimentary features in the flood and ebb channels. Particle sizes of the sediments in the flood channel are coarser than that in the ebb channel. Distribution and concentrations of clay minerals in the flood channel sediment are similar with those in the ebb channel due to the dual-direction currents. Concentration of heavy minerals in the ebb channel is higher than that in the flood channel because there is strong ebb tide current and similarly there are more ferrimagnetic mineral in the ebb channel.

Key words The Changjiang Estuary, the flood and ebb channel, sedimentary features, dynamic response