

长江河口河槽近期沉积特征及影响因子分析

李一鸣, 张国安, 游博文, 李占海

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 随着流域和河口水利工程建设, 长江河槽沉积环境发生了巨大改变, 对河势演变和河槽冲淤均产生重要影响。依据长江河口河槽大面积表层沉积物采样和各河槽定点水文观测资料, 分析各河槽沉积特征, 探讨其影响因子及作用机制。结果表明: 河槽沉积物类型以砂质粉砂和粉砂质砂分布最广, 粒径分布纵向上呈自西向东减小、横向上自北向南减小趋势, 河槽总体主槽粗、边滩细。涨落潮泥沙输运和沉降过程影响河槽纵向沉积分布特征, 风浪作用强化了口门段河槽南北沉积环境的差异, 北支、北港口门段河槽受到偏北方向风浪作用强烈, 沉积物粗化明显。不同泥沙来源是造成河槽整体沉积环境差异的主导因素, 南支、南港上段表现为流域来沙的沉积特征, 北港、南槽、北槽则表现为流域与海域来沙的混合沉积特征, 口外沉积物对口内河槽的影响主要是为口内河槽提供细颗粒物来源。

关键词: 长江口; 河槽; 沉积特征; 沉积类型; 影响因子

DOI: 10.11821/dlxb201901013

1 引言

河槽一般由河岸、滩地(河漫滩)、边滩、河底等部分组成, 是河流的核心地貌单元。河口河槽地处河流与海洋的交互地带, 河流到达河口地区后, 径流受到潮汐顶托, 盐淡水混合, 水流趋缓, 河槽展宽, 并出现分汊现象。由于动力因子作用方式和作用强度的差异, 在不同的分汊型河槽中, 呈现了其独特的地貌形态、动力特征和沉积环境。研究河口河槽沉积特征及其影响因子, 对河口演变理论、资源开发和利用具有重要意义。

河口沉积环境是物质来源和多种动力环境因子长期综合作用的结果^[1], 同时河口沉积特征也对河口动力环境、物质输运、地貌演变等具有重要指示意义。对河口沉积环境的研究已取得较多的研究成果, 在研究方法上包括因子分析^[2-3]、聚类分析^[4-6]、粒径趋势分析^[4-6]、数值模拟^[4, 9]等; 在研究内容上, 一是沉积物的粒度参数在时空上的分布和变化特点^[10-13], 二是沉积物沉积特征及其输运趋势^[14-16]。20世纪80年代开展的上海市海岸带和海涂资源综合调查, 对长江口水文、沉积、地貌等作了全面的调查和阐述。近年来, 许多学者也对长江口的沉积物粒度特征^[10, 14, 17]、时空分布特征及变化^[11-12, 15, 18]、冲淤变化^[19-20]、动力因子^[17, 21]等开展了许多研究工作, 并取得了相当成果。现阶段随着流域及河口大量水利工程建设及其导致的水沙条件改变, 沉积环境已经发生了很大变化, 因此近期对长

收稿日期: 2018-01-17; 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 科技部基础性工作专项重点项目(2013FY112000); 国家重点研发计划(2017YFE0107400) [Foundation: The Key Program for Fundamental Work, Ministry of Science and Technology, No.2013FY112000; National Key R&D Program of China, No.2017YFE0107400]

作者简介: 李一鸣(1992-), 男, 上海人, 硕士生, 主要从事动力地貌与沉积研究。E-mail: lea17@163.com

通讯作者: 张国安(1969-), 男, 博士, 副教授, 主要从事河口海岸动力地貌和动力沉积研究。

E-mail: gazhang@sklec.ecnu.edu.cn

江河口河槽沉积环境开展了大范围的调查工作,以长江口徐六泾至口外的河槽表层沉积物资料以及河槽定点水文观测资料为依据,分析河口河槽沉积物的分布特征,探讨其影响因子及作用机制。

2 资料来源和方法

2.1 区域概况

长江口位于中国东部海岸线的中部位置,是世界上典型的沙岛型多级分汊中等潮汐河口^[22],主要由第四纪松散沉积物构成^[23],在崇明岛分为南支和北支,南支在长兴岛分为南港和北港,南港在九段沙分为南槽和北槽,形成“三级分汊,四口入海”的格局,并形成了南支、北支、南港上段、北港上段、北港下段、南槽、北槽7个典型河槽。

2.2 采样方法

沉积物样品为课题组于2015年9月16日-9月27日在长江口区域开展的大面积野外观测所采集,采样范围大致从长江口徐六泾(121°0'E)至口外(122°30'E),口外北至31°44'N,南至30°50'N(图1)。水沙资料来自2013年7月以及2014年1月开展的长江口洪、枯季包括大、小潮综合水文调查(图1),使用多船同步采集水文、泥沙、盐度数据,分别在大、小潮现场每个整点使用OBS(光学后向散射浊度计)现场实时测定垂线盐度、浊度数据,并同步根据6点法采集水样进行盐度和含沙量室内实验分析,用以标定OBS数据,以获取垂线盐度和含沙量的连续资料;同时使用ADCP(声学多普勒流速剖面仪)测定流速剖面数据。计算6点法垂线平均流速、盐度及含沙量,并计算潮周期平均值。

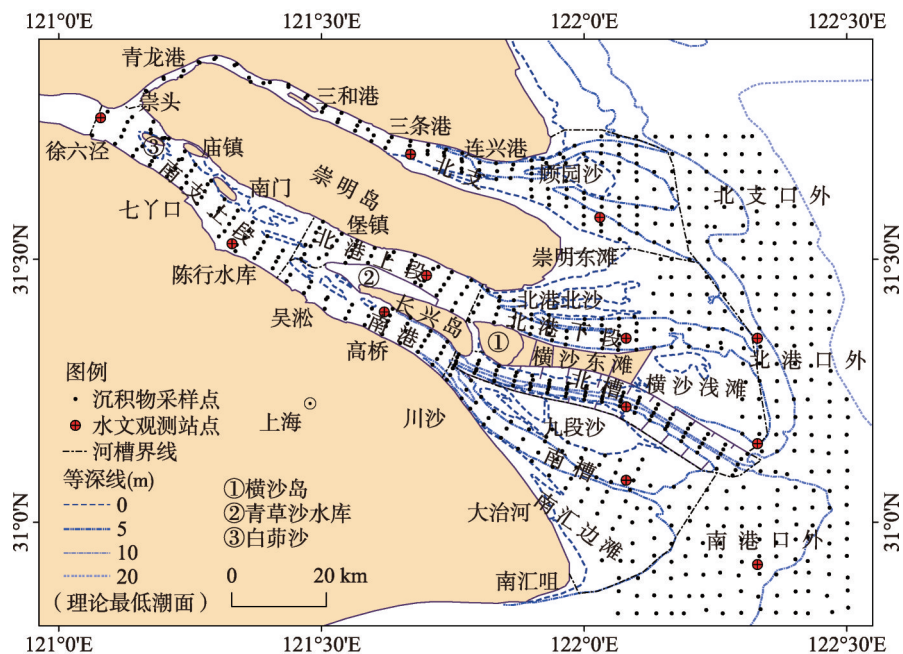


图1 研究区域及沉积物采样点、固定观测站点分布

Fig. 1 Study area, sampling sites of surface sediments and observation sites in the Yangtze Estuary

2.3 样品处理

将采集的沉积物样品统一编号分装于密封袋中,混匀后取少许样品置于烧杯中,加

入 5 ml 浓度为 10% 的 H_2O_2 以及 5 ml 浓度为 10% 的 HCl 以去除样品中的有机质、碳酸盐, 加热至反应完全, 加纯水静置 24 h 后吸去上层清液, 再加入 10 ml 浓度为 4% 的六偏磷酸钠 ($[\text{NaPO}_3]_6$), 经超声振荡仪对样品进行分散处理后, 使用 Coulter (LS-13320) 激光粒度仪进行测试分析 (粒度范围 0.04~2000 μm), 得到各沉积物样品的粒度分布, 通过其自带软件 (Blackman Coulter LS) 计算各样品的中值粒径。将采样点的中值粒径用 Kriging 法进行空间插值, 得到长江口表层沉积物中值粒径的平面分布情况。采用 Folk 全面图解算法^[24]计算分选系数 (σ)、偏态 (S_k)、峰态 (K_g) 等粒度参数, 采用 Folk 分类法^[25]对沉积物进行分类和定名。

对采集的水样使用 SYA2-2 实验室盐度计 (盐度测量范围 2‰~42‰, 分辨率 0.001‰) 测量水样盐度, 再使用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜以抽滤法过滤水样, 烘干后称量得到悬浮物干重, 与水样体积的比值即悬沙浓度。

2.4 数据处理

以地貌形态、等深线走向为界, 将河槽划分为 7 个区域 (图 1), 以 5 m 等深线作为主槽与边滩的界线进行二级划分; 口外分为北支口外、北港口外、南港口外, 以 10 m 等深线为界进行二级划分。分别统计每个区域内采样点的粒度参数。沿河槽主槽深泓线作纵断面, 提取所经采样点沉积物的各项参数。地形主要采用 2013 年长江口及附近海图^①, 对水深点及等深线进行数字化, 建立不规则三角网 (TIN), 经转换得到长江口数字高程模型 (DEM), 并提取地形特征。

3 长江河口河槽沉积特征

3.1 长江口总体沉积特征

3.1.1 长江河口沉积物粒度分布 长江口沉积物粒度差异大, 中值粒径分布在 4.6~240 μm 范围, 平均中值粒径为 49.8 μm 。中值粒径分布出现 11~16 μm 和 125~177 μm 两个峰值, 前者主要分在北槽浅滩、南槽主槽及南北槽口外 10 m 等深线外, 反映了悬浮细颗粒物质的沉积作用; 后者主要分布在北支上段、南支上段、南港主槽、顾园沙以东 0~5 m 浅滩上, 其中河槽内粗颗粒物质主要是流域来沙的沉积作用, 浅滩上主要是波浪掀沙的分选作用。按尤登—温德华氏等比制 ϕ 粒级标准对样品中值粒径进行分级 (图 2), 其中以 6.5~6 ϕ (11~16 μm) 的样品数最多, 达到 121 个, 约占 17.1%; 3~2.5 ϕ (125~177 μm) 的样品数 73 个, 占 10.3%。从累积频率看, 25% 分位粒径为 6.5 ϕ (11 μm), 75% 分位粒径为 3.5 ϕ (88 μm), 有 50% 的样品粒径小于 5.5 ϕ (22 μm)。

从长江口沉积物粒度分布趋势看 (图 3), 粗颗粒物质 ($> 110 \mu\text{m}$) 主要分布在北支、北港口外 10 m 等深线内以及南支、北支上段, 细颗粒物质 ($< 32 \mu\text{m}$) 主要分布在北支中段三和港、北支下段浅滩、北槽、南槽下段及口外, 其中南北槽口外 5~10 m 等深线处颗粒最细, 平均中值粒径仅 10 μm 左右。河槽沉积物粒度分布趋势总体纵向上呈自西向东到口外减小趋势, 反映沉积河槽沉积作用由流域底沙沉积向悬浮细颗粒物质沉积的转变; 横向上口门段呈自北向南减小趋势, 反映口门段河槽受风浪作用北部强于南部。

3.1.2 长江河口沉积类型和分布 长江口沉积物类型总体以细粉砂和中粉砂为主。以 Folk 分类法^[25]为分类标准, 将研究区域内的沉积物样品绘制于 Folk 三角图上 (图 4), 共有泥 (M)、粉砂 (Z)、砂质泥 (sM)、砂质粉砂 (sZ)、泥质砂 (mS)、粉砂质砂 (zS)、砂 (S) 7 个类型, 其中以砂质粉砂数量最多, 占有所有样品的 45%, 其次为粉砂质砂, 与砂

① 中华人民共和国海事局, 人民交通出版社, 2013 年 6 月 第 2 版。

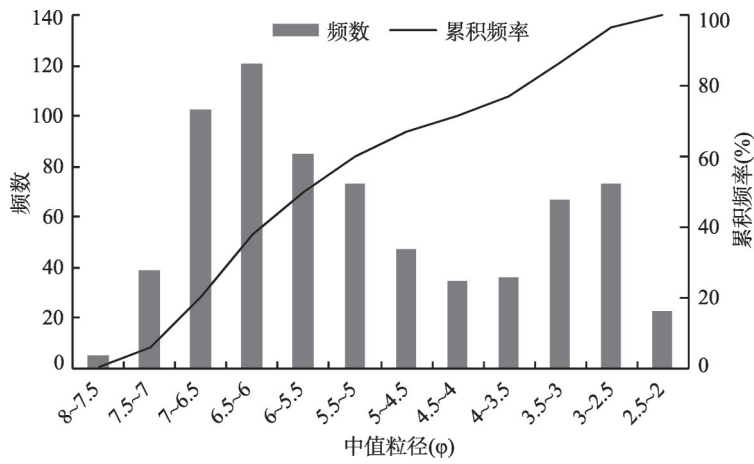


图2 长江口表层沉积物中值粒径频数分布、累积频率

Fig. 2 Frequency distribution and cumulative frequency of the surface sediments median size diameter in the Yangtze Estuary

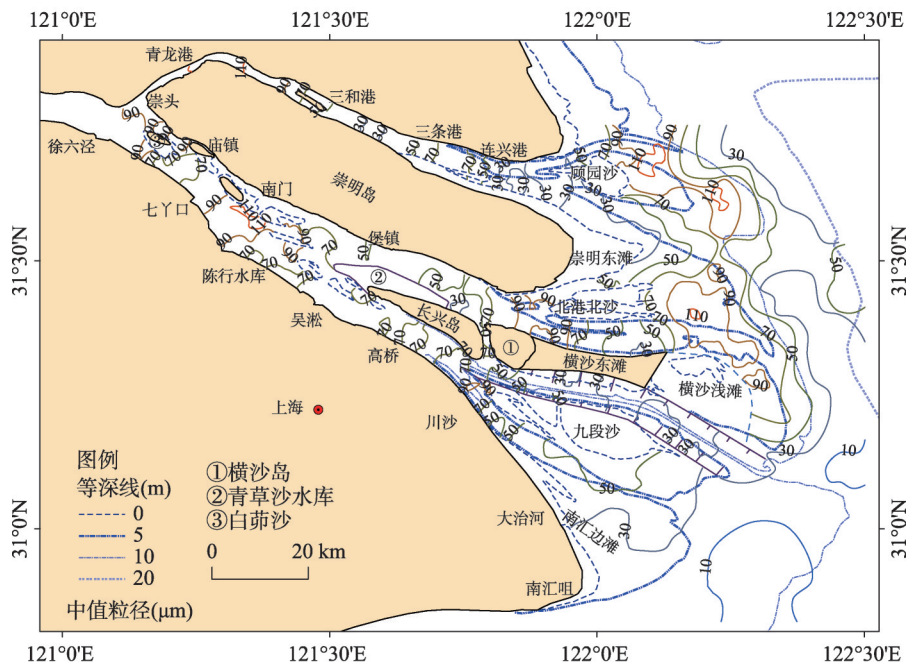


图3 长江口表层沉积物中值粒径分布

Fig. 3 Spatial distribution of the surface sediments median size diameter in the Yangtze Estuary

质粉砂合计占比超过70%。

长江口沉积物类型的空间分布如图5所示,其中砂主要分布在顾园沙外侧,范围较小;粉砂质砂主要分布在南支、南港上段主槽及北支上游、北港口外;砂质粉砂和粉砂分布最广,主要分布在北支中下段、北港、南北槽及其口外,以及南支、南港河槽边滩、北支及北港口外10 m等深线以外;泥分布区域较小,主要分布在北槽口门以及口外10~20 m区域,与粉砂、砂质粉砂呈相间分布。沉积类型的空间分布与沉积物粒度变化趋势基本一致。

3.2 长江口河槽沉积特征

3.2.1 长江河口南、北支河槽沉积特征 自 18 世纪以来, 长江主泓南偏, 北支不断萎缩、南支河槽发育。北支河槽束狭淤浅, 近几年分流比在 5% 以下^[26], 处于衰亡过程中, 南支河槽由于巨量径流作用, 河槽不断发育, 造成南、北支河槽沉积环境的差异。从沉积物粒度看, 南支粗于北支, 北支平均中值粒径为 57.7 μm , 南支为 58.7 μm ; 从沉积物类型看, 南支主要为粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂, 北支除顾园沙外侧浅滩分布有砂外, 其余与南支基本相同。从南、北支河槽上、中、下游河段看, 沉积分布特征又有所不同 (表 1)。

北支河槽除顾园沙外侧受风浪作用沉积物最粗外, 从上至下, 总体粒度特征表现为由粗

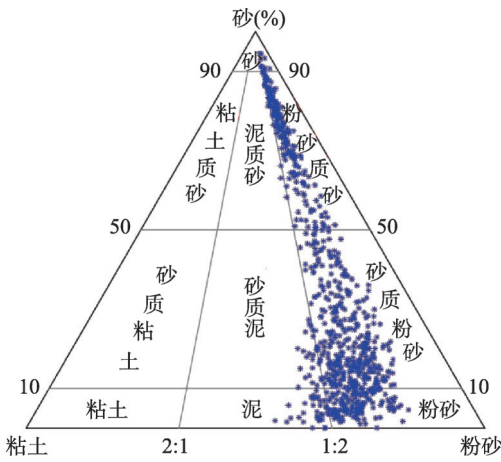


图 4 长江口表层沉积物 Folk 三角图
Fig. 4 Folk triangular diagram of the surface sediments in the Yangtze Estuary

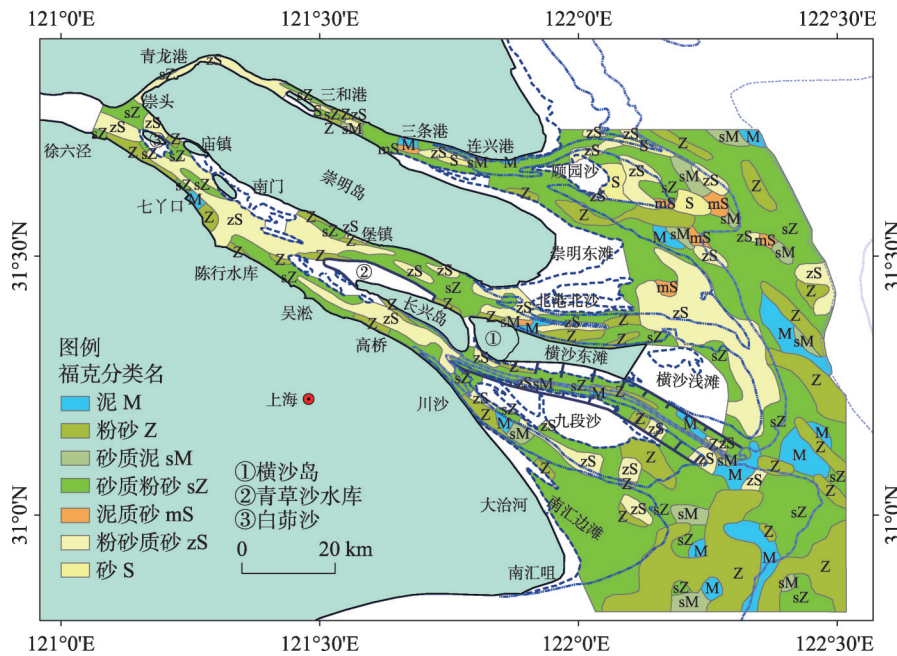


图 5 长江口表层沉积物 Folk 分类
Fig. 5 Folk's classification of surface sediments in the Yangtze Estuary

表 1 各河段区域表层沉积物平均中值粒径
Tab. 1 Average median size of surface sediments in each channel segment

区域	南支河槽		北支河槽	
	河段	中值粒径(μm)	河段	中值粒径(μm)
上段	南支上段	81.9	崇头—三和港	94.8
中段	南港、北港上段	60.5	三和港—连兴港	44.9
下段	南槽、北槽、北港下段	52.4	连兴港下段	50.9

变细的过程, 平均中值粒径为 57.7 μm , 主槽平均为 53.1 μm , 边滩平均 61.2 μm 。其中, 上段平均中值粒径为 94.8 μm , 沉积物多为粉砂质砂; 中段多边滩、浅滩发育, 中值粒径平均 44.9 μm , 主要为砂质粉砂; 下段水浅开阔, 直接面对东北风, 波浪掀沙作用强, 中值粒径平均 50.9 μm , 主要为砂、粉砂质砂。

南支河槽大体呈西北—东南走向, 上段河槽从南北支分流口至南北港分流口, 深槽偏南, 中段包括南、北港上段, 口门段则包括南、北槽及北港下段, 形成两级分汊的河势格局。南支上段平均中值粒径为 81.9 μm , 较北支细, 南支中、下段则较北支略粗, 其中中段平均为 60.5 μm , 下段平均 52.4 μm , 总体上呈现由上至下逐渐减小、槽粗滩细的特征, 主槽沉积物以粉砂质砂为主, 边滩则以砂质粉砂、粉砂居多。

3.2.2 长江口南支各河槽沉积特征 长江口南支河槽演变非常复杂, 整个南支河槽在长兴岛被分为南、北港河槽, 南港下段又被分为南、北槽, 形成两级分汊、上中下段 6 个典型河槽的格局 (表 2)。

表 2 各河槽表层沉积物平均中值粒径
Tab. 2 Average median size of surface sediments in each riverbed

区域	河槽	河槽平均中值粒径(μm)	主槽平均中值粒径(μm)	边滩平均中值粒径(μm)
上段	南支上段	81.9	82.6	80.5
中段	北港上段	55.9	54.5	56.9
	南港上段	66.5	80.9	44.2
下段	北港下段	75.7	78.5	72.9
	北槽	36.7	39.8	27.3
	南槽	44.4	53.6	40.3

南支上段河槽, 沉积物普遍较粗, 主槽中值粒径平均为 82.6 μm 、边滩为 80.5 μm , 并且主槽、边滩基本一致, 反映两者沉积物来源相同, 主要是流域的底沙推移物质沉积。受落潮科氏力影响, 深槽偏南, 北侧分布有白茆沙等沙体, 北侧边滩粗于南侧。河槽沉积物类型主槽多为粉砂质砂, 北侧边滩由砂质粉砂、粉砂质砂、粉砂相间分布, 南侧边滩上游以粉砂为主, 下游则变为砂质粉砂为主。

南支中段包括北港上段和南港上段, 平均中值粒径 60.5 μm , 细于南支上段。① 北港上段沉积物中值粒径总体呈滩粗槽细的特征, 其中主槽平均为 54.5 μm , 边滩为 56.9 μm , 沉积类型从南支上段的粉砂质砂逐步过渡到了砂质粉砂、粉砂, 主槽和边滩基本相似。② 南港上段在滩、槽沉积物上与北港上段表现差异, 呈槽粗滩细的特征, 其中主槽中值粒径平均为 80.9 μm , 和南支上段一致, 边滩平均为 44.2 μm , 河槽平均为 66.5 μm , 主槽沉积物类型为粉砂质砂, 边滩则以砂质粉砂分布最为广泛。

南支下段包括北港下段、北槽和南槽, 沉积物平均中值粒径 52.4 μm , 总体进一步变细, 除北港下段分布有粉砂质砂外, 主要是砂质粉砂。① 北港下段沉积物平均中值粒径为 75.7 μm , 粗于上段, 总体上呈现上、下部偏粗, 而中部偏细的特征。上部主槽偏南, 紧贴横沙岛, 处于北港北沙的分汊口地带, 水流较集中, 沉积物粒径较粗, 以粉砂质砂居多; 中部两侧分别为北港北沙及横沙东滩填筑区, 中间浅滩发育, 横断面沉积物中值粒径曲线呈现类似“W”的形态, 中间为粉砂质砂, 其余为粉砂、砂质粉砂; 下部出横沙浅滩入海, 由于河槽两侧边滩受到风浪作用, 沉积物粒径较粗, 分布有大量粉砂质砂, 其余为砂质粉砂。② 北槽河槽由深水航道工程双导堤固定河槽, 河槽狭长且形态稳定, 且航道频繁疏浚, 沉积物扰动现象明显, 混合均匀, 粒度沿程变化较小, 平均中值粒径为 36.7 μm , 其中主槽为 39.8 μm , 边滩为 27.3 μm , 与其他河槽相比明显偏细, 沉积

物类型以砂质粉砂居多,中段深槽偏北有粉砂分布,下段出口处局部有泥分布。③南槽河槽呈上窄下宽的喇叭形,上口宽约3 km,而口门宽度约有30 km,中值粒径主槽平均为53.6 μm ,边滩为40.3 μm ,大体呈槽粗滩细的分布特征。受科氏力作用影响,涨潮流偏北,下部呈复式河槽,南侧为落潮槽,北侧为涨潮槽,中间有浅滩发育,北侧九段沙边滩沉积物粗于南侧的南汇边滩,反映出南槽北冲南淤的沉积差异。河槽沉积物以砂质粉砂为主,上段北侧为粉砂质砂,南侧为粉砂,下段南汇边滩主要为砂质粉砂,九段沙下游为粉砂。

4 长江河口河槽沉积环境影响因子探讨

河槽沉积特征不仅受到地形地貌、沉积物来源、沉积环境的影响,同时也受到潮汐、径流、风浪、水流强度等水动力环境的影响,变化十分复杂,而不同因子对河槽沉积特征的作用机制也各有不同。

4.1 不同泥沙来源是造成河槽整体沉积环境差异的主导因素

河口河槽沉积物来源包括流域来沙和海域来沙。流域来沙包括悬沙输运和底沙推移两部分,其中底沙部分颗粒较粗,多为粉沙质砂和砂质粉砂,易受到水流放缓的影响而沉积,而悬沙颗粒较细,多为粘土和泥,不易沉降,可以做更远范围的输运和扩散,海域来沙则表现为浅滩泥沙在波浪和潮流作用下再悬浮,随涨潮流向河槽内的输运过程。不同泥沙来源对河槽沉积环境影响显著。

泥沙来源对河槽纵向沉积环境影响显著。①从南支上段—南港—南槽河槽主泓沉积特征分布看(图6),南支上段沉积物中值粒径在100~200 μm 之间,颗粒粗,沉积物粒度分布曲线呈单峰分布,表明沉积物来源单一,为河流底沙输移物质,是典型的河流沉积特征;南港上段河槽与南支上段河槽沉积特征相似,中值粒径在70~180 μm 之间,整体较南支上段略有减小,仍表现为河流沉积特征;自南北槽分流口向下的南槽河段,沉积物中值粒径迅速下降到10 μm 左右,河槽沉积物以悬沙沉降为主,包括再悬浮泥沙的沉降过程,同时沉积物粒度分布曲线呈双峰分布,表明该河槽沉积物来源包含了河流来沙和海域来沙,体现了河流来沙和海域来沙的混合沉降过程。②从南支上段—北港上段—北港下段河槽主泓沉积特征分布看,北港上段较南支上段的100~200 μm 快速下降到最低20 μm 左右,沉积物粒度分布曲线呈双峰分布,为河流来沙和海域来沙的混合沉积;北港下段中值粒径变化幅度大,沉积环境复杂,其中北港北沙的分汉口地带水流集中、横沙东滩圈围导致细颗粒泥沙来源减少、北港口门处受到较强的风浪掀沙作用等均是导致

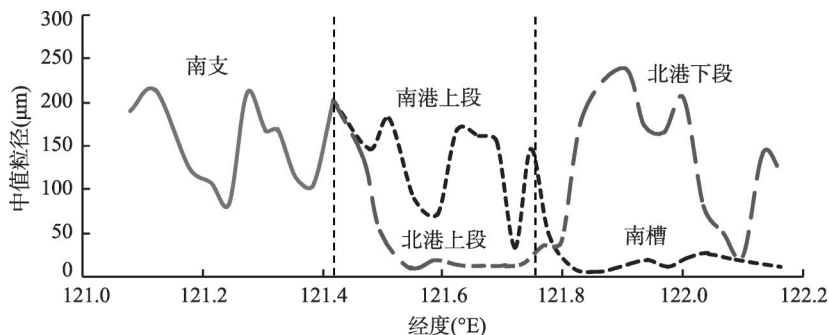


图6 南支河槽主泓沉积物中值粒径纵向变化

Fig. 6 Median size of surface sediments along the main channel of the south branch

主槽粒径粗化的因素, 沉积物粒度曲线呈现单、双峰并列的分布特征, 体现了潮流和波浪共同作用的结果。③ 北槽深槽颗粒较细, 分布较为均匀, 扰动作用强烈, 粒度分布曲线呈双峰分布, 总体与南槽相似, 为河流来沙和海域来沙的混合沉积。

泥沙来源对南北支口门段河槽沉积环境影响也非常显著。北支河槽由于泥沙来源进一步枯竭, 由落潮槽向涨潮槽河口转变, 口门段河槽沉积物质在风浪和潮流作用下, 细颗粒物被悬扬、搬运, 沉积类型主要为砂、粉砂质砂、砂质粉砂, 粒径普遍较粗。北港下段河槽, 由于横沙东滩促淤圈围工程影响, 河道束窄, 水流集中, 波浪频繁作用, 沉积类型为粉砂质砂和砂质粉砂, 粒径也普遍较粗。南、北槽河槽由于接受流域来沙的沉降, 以及口外浅滩泥沙补给, 泥沙来源丰富, 沉积类型主要为砂质粉砂、粉砂, 颗粒较细。

4.2 涨落潮泥沙输运和沉降过程是影响河槽纵向沉积分布特征的重要因素

涨落潮泥沙输运和沉降过程是影响河槽纵向沉积分布特征的重要因素。考虑到北槽、北港下段河槽因人工扰动和风浪影响, 数据受到干扰, 因此, 本研究选取北支—南港—南槽纵向河槽为代表, 探讨涨落潮泥沙输运和沉降过程对河槽纵向沉积分布特征的影响(表3)。

表3 各河槽表层沉积物平均中值粒径、小潮涨落潮平均流速

Tab. 3 Average median size of surface sediments and average flow velocity during neap tide in each riverbed

河槽	河槽平均中值粒径(μm)	涨潮平均流速 V_f (cm/s)	落潮平均流速 V_d (cm/s)	V_d/V_f
南支上段	81.88	58.1	74.3	1.28
南港上段	66.45	50.6	52.1	1.03
南槽	44.36	54.6	53.3	0.98

河口悬浮泥沙包括随长江径流下泄所携带的悬浮泥沙, 和口外浅滩泥沙在波浪和潮流作用下再悬浮, 并随涨落潮流向口内输运的泥沙。悬浮泥沙沉降过程与涨落潮流速密切相关, 由于径流的存在, 河槽内涨、落潮流速过程的不对称, 造成水体中悬浮泥沙的沉降过程并不均匀, 间接影响河槽沉积物的分布。涨落潮作用在河槽纵向上的差异用落潮平均流速 V_d 与涨潮平均流速 V_f 之比 (V_d/V_f) 来反映。长江口自西向东, 从南支上段、南港上段到南槽, V_d/V_f 在小潮分别为 1.28、1.03 和 0.98, 同时河槽沉积物粒度分别为 81.9 μm、66.5 μm 和 44.4 μm (表3), 涨、落潮作用的相对大小与沉积物中值粒径存在较好的正相关性。

由于长江径流的存在, 泥沙的净输运方向总体向海, 但各河口河槽表现又有所差异, 对南支上段河槽, V_d/V_f 比值最大, 说明落潮流占比高, 水体中细颗粒泥沙向下游输运, 河槽沉积物主要为粗颗粒物质的河床沉积物, 细颗粒泥沙少, 表现为河槽沉积物中值粒径最大; 反之, 对南槽河槽而言, V_d/V_f 比值最小, 落潮流速相对减弱, 水体中细颗粒泥沙沉降越多, 表现为河槽沉积物中值粒径越细; 南港河槽则介于上述两者之间。 V_d/V_f 比值还反映了在径、潮流作用下, 悬浮泥沙沉降对河槽沉积物贡献的大小, 比值越大, 表明河槽沉积物中来自悬浮泥沙沉降的贡献越小, 河槽沉积物颗粒越粗; 反之, 比值越小, 河槽沉积物中来自悬浮泥沙沉降的贡献越大, 河槽沉积物颗粒越细。此外, 小潮期间 V_d/V_f 比值与沉积物粒径的正相关性更高, 这是由于径流的存在, 使小潮期间涨落潮不对称性愈加明显, 并且小潮期间流速较小, 也有利于泥沙淤淤。

4.3 风浪作用强化了口门段河槽南、北沉积环境的差异

前文已述泥沙来源对口门段河槽沉积环境影响非常显著, 而风浪作用则强化了口门段河槽南北沉积环境的差异。长江口河槽大致呈西西北—东东南走向, 口门区域水面开

阔，口外又无岛屿屏障，易受到风浪掀沙的作用。长江口门附近以N、NNE、NE向风浪居多^[27]，8 m/s的风速，口门地区可掀起波高为1 m左右的风浪^[22]。北支、北港口门段河槽直接受到偏北方向风浪的强烈作用，处于强破波带影响范围^[28]，在5~6级的NE向风作用下，0~5 m的浅滩波高可达0.75~1 m^[29]，水深较浅的浅滩表面易受到波浪的冲刷，细颗粒泥沙被风浪和潮流悬扬、输移，致使河槽受到冲刷，沉积物粗化。而北槽、南槽河槽则由于长江口深水航道双导堤工程的阻挡，处于波影区范围，在5~6级的NE向风作用下，0~5 m的浅滩波高在0.5 m以下^[29]，波浪能量被消减，利于泥沙淤积，同时双导堤工程也阻挡了细颗粒泥沙向北扩散，沉积物粒径与北港相比明显偏细。从各口门段河槽主槽、边滩表层沉积物中值粒径统计结果看（表4），口门区域沉积物粒径呈现出北粗南细的分布格局，尤以5 m等深线内的边滩差异更为显著，北支下段边滩平均中值粒径甚至高于主槽。由此可见，风浪掀沙作进一步强化了口门段河槽南北沉积环境的差异。

4.4 盐度变化影响河槽细颗粒泥沙的沉降作用

涨落潮的变化同时也带来盐度的变化，进而影响河槽细颗粒泥沙的沉降作用。盐度在一定范围内的升高，能减小泥沙颗粒双电层间的排斥作用，从而降低其稳定性^[30]，使悬浮泥沙发生絮凝沉降，根据观测和室内实验研究^[31-32]，长江口细颗粒泥沙絮凝的特征盐度在5‰~10‰左右。细颗粒泥沙以絮团的形式沉降到河床上，致使表层物质细化，给河槽沉积环境带来深刻影响。

从盐度纵向变化上看（表5），南支河槽从西向东，盐度呈增加趋势，而河槽沉积物粒度则呈减小趋势，由于盐度的增加，河槽沉积物中细颗粒（32 μm 以下）含量也由南支上段的42.1%增加到口门段的50.4%，尤其是口门段河槽，平均盐度超过10 ‰，在涨落潮作用下，盐淡水混合强烈，悬沙浓度高，形成河口最大浑浊带，细颗粒泥沙易絮凝沉降，河槽细颗粒物质增加，沉积物粒度细化。

从口门段河槽横向变化上看（表5），盐度自北向南递增，北港下段河槽窄浅，在南北港分流比相对稳定情况下，径流作用强烈，盐度最低，沉积物粒度也最粗；南槽河槽呈喇叭口形态，径流分散，纳潮量增加，潮汐作用显著，因此河槽盐度也最高。在盐淡水混合过程中，较高的盐度以及较弱的水动力环境，使得悬沙极易发生絮凝沉降，沉积物偏细；北槽因受到航道疏浚等影响，扰动强烈，总体与南槽相似。

4.5 口外沉积物主要为口内河槽提供细颗粒物质来源

口外沉积物呈北粗南细特征，与口内河槽关联度不高。从口外各区域统计结果来看（表6），口外区域沉积物中值粒径由北到南呈减小趋势。在5~10 m等深线间，北支及北港口外由于5 m与10 m等深线距离较近，水下三角洲坡度更陡，总体表现为风浪作用下

表4 口门段各河槽表层沉积物平均中值粒径
Tab. 4 Average median size of surface sediments of each riverbed in the entrance segment

河槽	河槽平均中值 粒径(μm)	主槽平均中值 粒径(μm)	边滩平均中值 粒径(μm)
北支下段	50.9	38.8	57.6
北港下段	75.7	78.5	72.9
北槽	36.7	39.8	27.3
南槽	44.4	53.6	40.3

表5 各河段区域表层沉积物平均中值粒径、平均盐度变化
Tab. 5 Average median size of surface sediments and salinity in each channel segment

区域/河槽		区域平均中值 粒径(μm)	平均32μm以下 含量(%)	平均盐度 (‰)
南支纵向变化	上段	81.9	42.1	0.2
	中段	60.5	47.1	0.4
	下段	52.4	50.4	10.7
口门横向变化	北港下段	75.7	39.2	5.8
	北槽	36.7	56.9	9.7
	南槽	44.4	55.4	16.7

的侵蚀特征，特别是北支口外，由于缺乏泥沙来源，颗粒最粗；南港口外整体处于淤积环境，泥沙来源丰富，沉积物最细。在10 m等深线以深区域，由于水深增加，风浪作用减弱，粒度进一步变细，在长江泥沙来源减少的背景下，表现为北粗南细的特征。

沉积物粒度曲线呈双峰型分布，表明沉积物的来源具有差异。长江口口门段（北槽、南槽）河槽沉积物粒度曲线多呈双峰型分布（图7），表明口门段河槽沉积物具有不同的物质来源：一方面来自于河流的输沙沉积作用（如南港上段），另一方面在风浪作用下口外再悬浮细颗粒泥沙，随涨落潮流以悬沙方式向口内输运、沉降和落淤，参与口内河槽沉积过程^[33]，因此口外沉积物对口内河槽的影响主要是为口内河槽提供细颗粒物质来源。

5 结论

随着流域和河口水利工程建设，河槽沉积环境发生了巨大改变，本文依据长江河口河槽大面积表层沉积物采样和河槽定点水文观测资料，分析河口河槽沉积物的分布特征，探讨其影响因子及作用机制。

（1）河槽沉积物类型以砂质粉砂和粉砂质砂分布最广，河槽主槽以粉砂质砂为主，边滩以砂质粉砂居多，口外主要为砂质粉砂、粉砂、泥等类型。沉积物粒度分布差异大，沉积物粒径纵向上自西向东呈减小趋势，口门段河槽横向上自北向南呈减小趋势，总体上主槽粗、边滩细；口外区域也表现为北粗南细特征，并且随水深增加呈自西向东减小趋势。

（2）不同泥沙来源对河槽沉积环境影响显著。流域来沙包括悬沙输运和底沙推移两部分，其中底沙部分颗粒较粗，多为粉沙质砂和砂质粉砂，易受到水流放缓的影响而沉积，而悬沙颗粒较细，多为粘土和泥，不易沉降，可以做更远范围的输运和扩散。海域来沙则表现为浅滩泥沙在波浪和潮流作用下再悬浮，随涨潮流向口内河槽的输运过程，为口内河槽提供细颗粒物质来源。总体而言，南支上段、南港上段表现为流域来沙的沉积特征，北港、南槽、北槽则表现为河流与海域来沙的混合沉积特征。

（3）涨落潮泥沙输运和沉降过程是影响河槽纵向沉积分布的重要因素。悬浮泥沙沉降过程与涨落潮流速密切相关，由于径流的存在，河槽内涨、落潮流速过程的不对称，造成水体中悬浮泥沙的沉降过程并不均匀，涨落潮流作用的相对大小与沉积物中值粒径存在较好的正相关性。

表6 口门段及口外表层沉积物平均中值粒径
Tab. 6 Average median size of surface sediment of each riverbed in the entrance segment and offshore area

区域	口门段河槽中值粒径(μm)	口外5~10 m平均中值粒径(μm)	口外>10 m平均中值粒径(μm)
北支	50.9	110.7	30.6
北港	75.7	64.2	17.6
南港	40.1	12.8	10.4

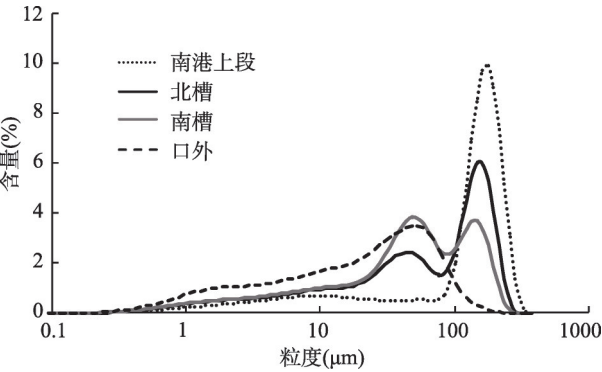


图7 口门段河槽中部及口外10m等深线附近表层沉积物粒度曲线
Fig. 7 Grain-size distributions of surface sediments in center riverbed of the entrance segment and offshore area near the 10-m contour line

(4) 风浪作用强化了口门段河槽南北沉积环境的差异。北支、北港口门段河槽受到偏北方向风浪的强烈作用, 沉积物粗化, 而北槽、南槽河槽则由于长江口深水航道双导堤工程的阻挡, 处于波影区范围, 波浪能量被消减, 利于泥沙淤积, 沉积物粒径与北港相比明显偏细。

(5) 盐度变化影响河槽细颗粒泥沙的沉降作用, 在盐度达到一定条件时, 悬浮泥沙易发生絮凝, 细颗粒的泥沙以絮团的形式沉降到河床上, 致使表层物质细化, 这在口门段河槽表现最为明显。

参考文献(References)

- [1] Brooks G, Doyle L, Davis R, et al. Patterns and controls of surface sediment distribution: West-central Florida inner shelf. *Marine Geology*, 2003, 200(1-4): 307-324.
- [2] Li Liang, Chen Zhong, Liu Jianguo, et al. Distribution of surface sediment types and sedimentary environment divisions in the northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33(1): 54-61. [李亮, 陈忠, 刘建国, 等. 南海北部表层沉积物类型及沉积环境区划. *热带海洋学报*, 2014, 33(1): 54-61.]
- [3] Xu Liqiang, Xu Fang, Zhou Taofa. Grain-size features of lacustrine sediments from Chaohu Lake and its sedimentary implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1318-1324. [徐利强, 徐芳, 周涛发. 巢湖沉积物粒度特征及其沉积学意义. *地理科学*, 2015, 35(10): 1318-1324.]
- [4] Yang Yang, Gao Shu, Zhou Liang, et al. Grain size distribution of surface sediments and sedimentary environment in the lagoon of Xincun, Hainan Island. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(1): 94-105. [杨阳, 高抒, 周亮, 等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境. *海洋学报*, 2016, 38(1): 94-105.]
- [5] Chen Dinghao, Ren Jie, Tang Quanhui, et al. Transport characteristics of surface sediments at the Yangtze river estuary. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(3): 22-29. [陈鼎豪, 任杰, 唐权辉, 等. 长江河口表层沉积物输移特征分析. *中山大学学报(自然科学版)*, 2016, 55(3): 22-29.]
- [6] Zhang Jin, Li Anchun, Wan Shiming, et al. Grain size distribution of surface sediments in the southern South China Sea and influencing factors. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 1-10. [张晋, 李安春, 万世明, 等. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(2): 1-10.]
- [7] Gao Shu, Collins M. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 70-78.
- [8] Wang Yaping, Gao Shu, Jia Jianjun. Sediment distribution and transport patterns in Jiaozhou Bay and adjoining areas. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 449-458. [汪亚平, 高抒, 贾建军. 胶州湾及邻近海域沉积物分布特征和运移趋势. *地理学报*, 2000, 55(4): 449-458.]
- [9] Peng Xiaotong, Zhou Huaiyang, Ye Ying, et al. Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River Estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(3): 487-493. [彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示. *沉积学报*, 2004, 22(3): 487-493.]
- [10] Chen Shenliang, Yan Suzhuang, Li Yuzhong. Characteristics of surface sediment distribution in the Yangtze Estuary and its adjacent waters. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 152-156. [陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 152-156.]
- [11] Liu Hong, He Qing, Wang Zhengbing, et al. Dynamics and spatial variability of near-bottom sediment exchange in the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 322-330.
- [12] Zhan Qing, Wang Zhanghua, Chen Yong, et al. Grain size of recent sediments in Yangtze River subaqueous delta and its response to sediments supply decline. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1715-1723. [战庆, 王张华, 陈勇, 等. 长江口水下三角洲沉积物粒度组成及其在减沙背景下的响应. *地质通报*, 2016, 35(10): 1715-1723.]
- [13] Yuan Ping, Bi Naishuang, Wu Xiao, et al. Surface sediments at the subaqueous Yellow River Delta: Classification and distribution. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 49-57. [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. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(2): 49-57.]
- [14] Dai Zhijun, Chen Jiyu, Cheng Heqin, et al. Sediment characteristics and transport patterns in Nanhui joint area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(6): 63-67. [戴志军, 陈吉余, 程和琴, 等. 南汇边滩的沉积特征和沉积物输运趋势. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(6): 63-67.]

- [15] Luo Xiangxin, Yang Shilun, Zhang Wenxiang, et al. Recent spatial pattern and temporal variation in sediment grain size in the inshore area adjacent to the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 137-147. [罗向欣, 杨世伦, 张文祥, 等. 近期长江口—杭州湾邻近海域沉积物粒径的时空变化及其影响因素. *沉积学报*, 2012, 30(1): 137-147.]
- [16] Xie Huoyan, Wang Rusheng, Zhang Guo'an, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the northern passage of the Yangtze River Estuary. *Shanghai Land & Resources*, 2016, 37(2): 84-88. [谢火艳, 王如生, 张国安, 等. 长江口北槽沉积物的粒度特征和输运趋势探讨. *上海国土资源*, 2016, 37(2): 84-88.]
- [17] Yan Hong, Dai Zhijun, Li Jiufa, et al. Distribution of surficial tidal flat sediments in the Yangtze Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 629-637. [闫虹, 戴志军, 李九发, 等. 长江口拦门沙河段潮滩表层沉积物分布特征. *地理学报*, 2009, 64(5): 629-637.]
- [18] Liu Hong, He Qing, Wang Yuanye, et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang Estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 445-455. [刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征. *沉积学报*, 2007, 25(3): 445-455.]
- [19] Wu Shuaihu, Cheng Heqin, Li Jiufa, et al. Recent morphological processes and surface sediment distributions on the Yangtze Estuary. *Journal of Sediment Research*, 2015(6): 52-58. [吴帅虎, 程和琴, 李九发, 等. 近期长江河口主槽冲淤过程与沉积物分布及变化特征. *泥沙研究*, 2015(6): 52-58.]
- [20] Zhu Lei, He Qing, Shen Jian, et al. The influence of human activities on morphodynamics and alteration of sediment source and sink in the Changjiang Estuary. *Geomorphology*, 2016, 273: 52-62.
- [21] Liu Hong, He Qing, Meng Yi, et al. Characteristics of surface sediment distribution and its hydrodynamic responses in the Yangtze River Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 81-92. [刘红, 何青, 孟翊, 等. 长江口表层沉积物分布特征及动力响应. *地理学报*, 2007, 62(1): 81-92.]
- [22] Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2004: 1-2. [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-2.]
- [23] Wang Jun. Study on the Evolution and Regulation of the River Channel in the Yangtze Estuary. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 3-8. [王俊. 长江口河道演变规律与治理研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 3-8.]
- [24] Folk R, Ward W. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [25] Folk R, Andrews P, Lewis D. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [26] Mao Zhichang, Yu Zhiying, Xu Haigen. Muddy Tidal Flats Shanghai. Shanghai: East China Normal University Press, 2014: 12-18. [茅志昌, 虞志英, 徐海根. 上海潮滩研究. 上海: 华东师范大学出版社, 2014: 12-18.]
- [27] Zhu Huifang, Yun Caixing, Mao Zhichang, et al. Characteristics and empiric relationships of wind generated wave in the Changjiang Estuary. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 1984(1): 74-84. [朱慧芳, 恽才兴, 茅志昌, 等. 长江河口的风浪特性和风浪经验关系. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1984(1): 74-84.]
- [28] Du Jinglong, Jiang Liping, Yang Shilun. GIS analysis of the natural evolvement of the Hengsha East Shoal of the Yangtze River and the infects of projects in the last thirty years. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(5): 43-48. [杜景龙, 姜俐平, 杨世伦. 长江口横沙东滩近30年来自然演变及工程影响的GIS分析. *海洋通报*, 2007, 26(5): 43-48.]
- [29] Xiao Wenjun. Numerical simulation of water waves in Yangtze Estuary and adjacent sea area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008. [肖文军. 长江口邻近海域波浪场数值计算[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.]
- [30] Wang Baodong. Flocculation of fine sediments in estuaries. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1994, 12(1): 71-76. [王保栋. 河口细颗粒泥沙的絮凝作用. *黄渤海海洋*, 1994, 12(1): 71-76.]
- [31] Shen Huanting, He Songlin, Pan Ding'an, et al. A study of turbidity maximum in the Changjiang Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(5): 472-479. [沈焕庭, 贺松林, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带研究. *地理学报*, 1992, 47(5): 472-479.]
- [32] Guan Xuwei, Chen Yingzu, Du Xinhui. Experimental study on mechanism of flocculation in Yangtze Estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(6): 70-74. [关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究. *水利学报*, 1996, 27(6): 70-74.]
- [33] Liu Hong, He Qing, Gert J, et al. Sediment exchange and transport processes in the Yangtze River Estuary: Concurrent discussion on the effects of sediment sink in the muddy area. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 291-304. [刘红, 何青, Gert J, 等. 长江入海泥沙的交换和输移过程: 兼论泥质区的“泥库”效应. *地理学报*, 2011, 66(3): 291-304.]

Recent sediment characteristics and their impact factors in the Yangtze Estuary riverbed

LI Yiming, ZHANG Guo'an, YOU Bowen, LI Zhanhai

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: The sedimentary environments of the Yangtze Estuary riverbed have changed a lot with the construction of water conservancy projects in the drainage basin and the estuary, which have significantly influenced the river regime evolution and accretion/erosion of the estuary riverbed. However, less has been reported on detailed sedimentary characteristics of the current estuary riverbed, which restrains further evaluation on the impact on both hydrology and sedimentology of the Yangtze Estuary. Therefore, based on the large-scale surface sediment samples and associated flow-sediment data collected during September 2015, we analyzed the sedimentary characteristics in the seven riverbeds within the estuary and discussed the influencing factors and mechanisms. The particle sizes of the sediment samples were analyzed by Model LS-13320 Coulter laser particle size analyzer and the types of the surface sediments were classified by Folk's classification. The results are shown as follows. The riverbed sediments of the whole estuary is dominated by sandy silt and silty sand. The coarsest surface sediments are observed in the outer estuary of north branch/north channel above 10 m and upper north/south branch, while the finest surface sediments are found in the north passage, lower south passage and the outer estuary of north/south passage deeper than 5 m. Generally, the particle sizes of the river sediments are coarser in the main channels and finer on the shoals, and decrease from west to east and from north to south. The lateral sedimentation distribution characteristics are affected by the sediment transportation and deposition in ebb and flow process. The longitudinal sedimentation distribution reflects the differences of the sedimentary environment strengthened by the wind wave. The sediments in the north branch are coarsened remarkably due to the intense north wind wave action. The difference of sediment origins is the factor leading to deviation of the sedimentary environment. The sediment in the south branch and upper south channel show a characteristic of riverine sediments, while the sediments in the north channel, north passage and south passage show a mixture of riverine and marine sediments. Sediments in the outer estuary mainly provide fine-grained particles to the inner estuary.

Keywords: Yangtze Estuary; riverbed; sediment characteristics; sediment classification; impact factors