

乔立新, 张国安, 何青, 等. 长江分汊河口涨、落潮悬沙不对称特征及季节性差异[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 107–117, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.010

Qiao Lixin, Zhang Guoan, He Qing, et al. Tidal and seasonal asymmetry of suspended sediment concentration in branched channels of the Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(3): 107–117, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.03.010

长江分汊河口涨、落潮悬沙不对称特征及季节性差异

乔立新¹, 张国安^{1*}, 何青¹, 张卫国¹, 李茂田¹

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 入海河口由于径流的存在以及河口地貌形态的影响, 存在涨、落潮水动力、悬沙以及盐度分布等不对称现象, 同时这一不对称现象还存在显著的区域性和季节性差异。根据 2013 年 7 月和 2014 年 1 月洪、枯季长江口定点准同步水文泥沙调查结果, 发现长江口分汊型河槽悬沙浓度在时间上存在洪枯季、大小潮不对称特征, 在空间上存在东西向沿程分布、南北向横向分布以及垂向上表底层分布不对称特征。河势演变形成南、北支河口涨、落潮悬沙浓度不对称分布的整体格局; 洪、枯季变化影响河口涨、落潮悬沙分布的再分配过程; 大潮涨、落潮过程对悬沙分布不对称影响显著大于小潮; 季节性风浪作用影响河口最大浑浊带涨、落潮悬沙不对称南北差异; 底部高含沙浓度对口门段涨、落潮悬沙不对称性贡献显著。

关键词: 分汊型河口; 河槽; 悬沙浓度; 涨、落潮不对称; 季节性差异

中图分类号: TV148⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)03-0107-11

1 引言

河口地区由于潮汐作用周期性变化、径流作用季节性差异以及河口地貌形态的影响, 河口涨、落潮水动力过程、悬沙以及盐度分布等均存在不对称现象^[1-5]。径流下泄抑制涨潮流速和历时, 增大落潮流速与历时; 同时由于地形、河床阻力等因素影响, 潮波在传播过程中易发生变形, 同样导致了涨、落潮流速的差异^[1, 6]。河口地区泥沙来源包括径流输沙与海域来沙, 由于涨、落潮过程悬沙分布的不对称性, 从而产生周期性净输沙过程^[3-4, 7-8]。此外由于河口地区径、潮流和盐度分布的差异, 进而影响涨、落潮泥沙的起动、沉降过程^[9-10]。河口地区涨、落潮不对称对河口泥沙运输和地貌、沉积环境演变均具有重要影响。

长江口自徐六泾以下被崇明岛、长兴岛及九段沙

分割为南北支、南北港及南北槽等多支典型河槽, 由于河口河槽地貌形态以及水动力、泥沙、盐度等环境差异, 涨、落潮悬沙过程不对称性显著, 并存在显著季节性差异^[11]。众多学者对长江口水动力环境、悬沙分布、泥沙起动和沉降过程等进行研究, 并取得了若干重要成果^[12-19], 关于长江口悬沙不对称性研究也有不少涉及^[20-24]。如时钟等^[12]基于北槽口内外实测水文资料, 认为潮汐的不对称性和河口重力环流是北槽口内最大浑浊带形成的主要动力过程; 王飞等^[23]基于南槽河道水文连续观测数据认为南槽拦门沙河段存在潮汐不对称现象, 以上研究多集中在南、北槽河段。长江口作为特大型潮汐河口, 三级分汊, 河槽类型多样, 悬沙浓度的空间分布、大小潮变化和季节性差异显著, 因此系统开展不同河槽涨、落潮悬沙不对称及季节性差异研究, 可为河口河势演变研究及治理提供

收稿日期: 2019-02-13; 修订日期: 2019-03-13。

基金项目: 国家自然科学基金(41671007); 国家重点研发计划(2017YFE0107400); 科技部基础性工作专项重点项目(2013FY112000)。

作者简介: 乔立新(1992—), 女, 山西省晋中市人, 主要从事河口海岸水沙过程研究。E-mail: qiaolx1992@163.com

* 通信作者: 张国安, 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

科学依据。本文根据2013年7月和2014年1月洪、枯季长江口定点准同步水文泥沙调查和沉积物调查资料为依据,开展长江口典型河槽涨、落潮悬沙不对称特征及季节性差异定量研究,探讨分汊型河槽涨、落潮悬沙不对称性特征和机制。

2 研究区域概况与资料来源

2.1 研究区域概况

研究区域为西起长江口徐六泾,东至口外10 m等深线处,由崇明岛分为北支和南支,南支由长兴岛和横沙岛分为北港和南港,南港由九段沙分为北槽和南槽,形成“三级分汊,四口入海”的地貌格局。研究区域为非正规半日潮,平均潮差南支为2.0~2.5 m,北支为2.6~3.1 m,属中等强度大型潮汐河口。东海潮波传入口内,受到河口地形及径流影响,涨、落潮长轴方向与河槽轴线一致,潮波发生变形,涨、落潮流速、含沙量、盐度及历时均产生不对称现象。根据大通站多年实测水文资料(1950~2015年),长江口多年平均年径流量约为9 000亿 m^3 ,受长江流域降水量的影响,其中5~10月为洪季,径流量占全年的71.7%,11~4月为枯季,径流量占全年的28.3%,洪枯季变化有明显差异。此外,随着三峡大坝、沿江水土保持等大型水利工程建设^[25-27],长江流域向海输沙量由年平均4.7亿吨锐减到1.4亿吨左右,对河口泥沙输运和地貌演变过程产生深刻影响。

2.2 资料来源

长江口洪季综合调查(2013年7月20~31日)和长江口枯季综合调查(2013年12月31日至2014年1月11日),分大、小潮两个时段,洪季大、小潮调查时间为2013年7月22~25日、7月29~31日,枯季大、小潮调查时间为2014年1月1~3日、1月8~11日。洪、枯季综合水文调查采用6条调查船进行准同步水文定点测量,具体方法是先进行6个站点同步观测27 h,换位后,再进行6个站点27 h的同步水文观测,从而获得一次典型潮型12测点准同步水文资料。调查站位设北支中段(1301)、北支下段(1302)、南支河槽(1304)、北港上段(1305)、北港下段(1306)、南港(1308)、北槽(1309)、南槽(1311)8个典型河槽站位,以及上游徐六泾站(1303)和口外10 m等深线处的北港口外(1307)、北槽口外(1310)、南槽口外(1312)4个固定站位(图1),调查项目包括洪季、枯季及大、小潮的水文、泥沙和沉积过程。

采用多普勒流速剖面仪(ADCP)获取流速流向数据,使用光学后向散射浊度计(OBS)记录盐度和浊度数据,并同步准点进行6点法水样采集。在实验室内使用盐度仪测量水样盐度,使用0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤水样、烘干、称重,由前后重量差计算含沙量,通过OBS数据对水样数据进行校正(图2),获得定点洪枯季、大小潮潮周期内水文、泥沙和盐度数据。

观测期间大通站径流量数据来源于长江水利委

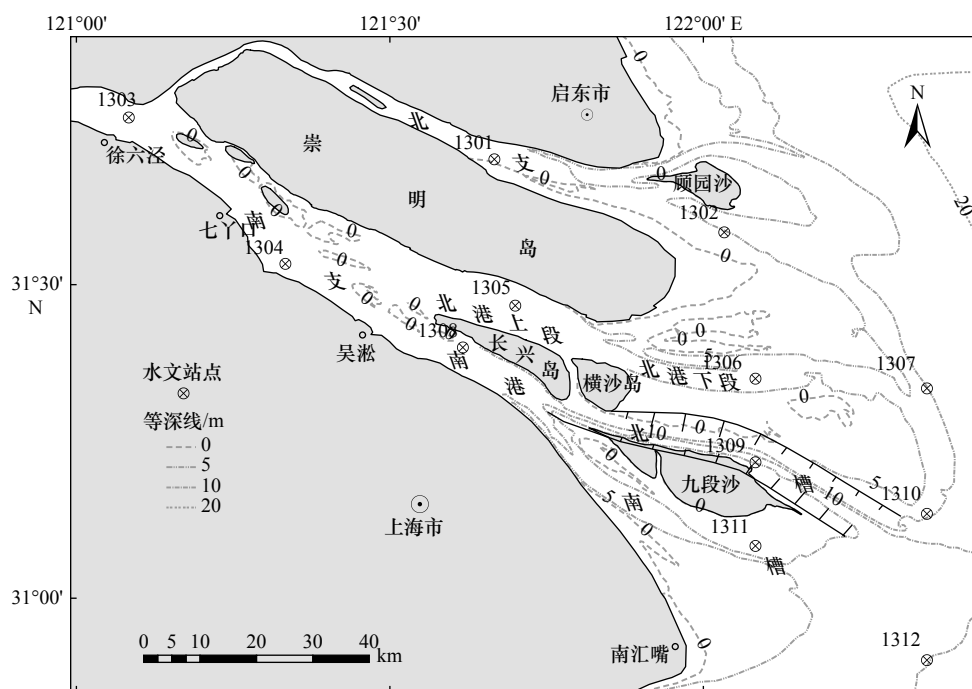


图1 研究区域及观测站位布置

Fig. 1 Locations of the survey stations in Changjiang River Estuary

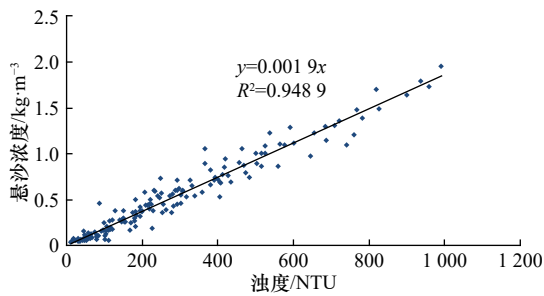


图2 OBS浊度和悬沙浓度的关系

Fig. 2 The relationship of the turbidity measured with OBS and suspended sediment concentration

员会, 2013年7月20–31日平均径流量约为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, 2014年1月1–11日平均径流量约为 $1.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ (图3), 调查期间日均径流量与大通站洪、枯季平均径流量接近。此外, 根据崇明东滩气象站资料, 观测期间, 洪季风速5~6级, 风向S-E向, 枯季风向多变, SE向和NE向交替, 以NE向为主, 风速5~6级, 调查期间崇明东滩风场与长江口洪、枯季平均风场特征基本一致。

2.3 数据处理

以5 m等深线为口内、口外分界线, 口内根据河槽地貌形态将其分为8个典型河槽: 以崇明岛划分北支河口与南支河口; 北支河口以顾园沙为节点分为北支和顾园沙南水道; 南支河口以长兴岛以上水域为南支, 长兴岛为界划分北港和南港, 北港又以横沙岛通道口为节点分为北港上段及北港下段, 南港以九段沙

为界线分为北槽及南槽。徐六泾站和口外10 m等深线为河口上下游控制节点。

为消除水深不同对数据分析的影响, 将各参量数据做标准化处理

$$\bar{A} = \frac{1}{h} \int_0^h A_i \cdot dh, \quad (1)$$

式中, \bar{A} 为垂线平均参量; h 为潮周期平均水深。垂线平均参量根据六点法加权计算,

$$\bar{A} = (A_{0.0} + A_{1.0}) \times 0.1 + (A_{0.2} + A_{0.4} + A_{0.6} + A_{0.8}) \times 0.2, \quad (2)$$

式中, $A_{0.0}$ 、 $A_{0.2}$ 、 $A_{0.4}$ 、 $A_{0.6}$ 、 $A_{0.8}$ 、 $A_{1.0}$ 分别代表表层、0.2h、0.4h、0.6h、0.8h、1.0h水深处的参量值。

3 长江口典型河槽悬沙浓度分布特征

3.1 长江口典型河槽悬沙浓度总体分布特征

从定点观测含沙量均值看(表1), 长江口各分汉型河槽平均含沙量为 $0.60 \text{ kg}/\text{m}^3$, 其中北支河口为 $0.87 \text{ kg}/\text{m}^3$, 南支河口为 $0.50 \text{ kg}/\text{m}^3$, 北支河口含沙量高于南支河口。从不同河槽看, 高含沙量出现在北支、北港下段、北槽、南槽河口最大浑浊带区域, 并呈自北向南递减趋势。河口最大含沙量北支河口为 $1.25 \text{ kg}/\text{m}^3$, 南支河口为 $0.71 \text{ kg}/\text{m}^3$, 北支河口最大含沙量也显著高于南支; 南支河口高含沙量区分布在 $122^\circ 05' \text{ E}$ 位置, 而北支高含沙量区分布在 $121^\circ 40' \text{ E}$ 位置, 与南港河槽经度位置接近, 反映北支最大浑浊带位置较南支河口整体上移。含沙量低值区在南支, 平均含沙量为 $0.17 \text{ kg}/\text{m}^3$, 与徐六泾站 ($0.14 \text{ kg}/\text{m}^3$) 基本接近, 其次

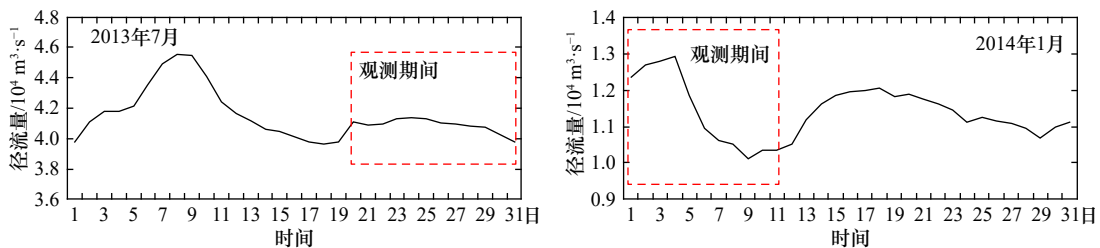


图3 观测期间长江大通站径流量

Fig. 3 The runoff of Datong Station during observation period in Changjiang River

表1 长江河口典型河槽悬沙浓度分布 (单位: kg/m^3)Table 1 Suspended sediment concentration in the typical channels of Changjiang River Estuary (unit: kg/m^3)

	徐六泾	北支中段	北支下段	南支	南港和北港上段	南、北槽和北港下段	口外10 m线
洪季	0.10	1.29	0.62	0.15	0.19	0.65	0.22
枯季	0.18	1.17	0.41	0.19	0.51	0.76	0.47
大潮	0.16	1.56	0.89	0.18	0.45	1.05	0.51
小潮	0.12	0.90	0.14	0.15	0.24	0.36	0.18
平均	0.14	1.23	0.51	0.17	0.35	0.71	0.34

为北港上段和南港,平均含沙量约为 0.35 kg/m^3 ,并与口外 10 m 水深线含沙量均值(0.34 kg/m^3)接近。南、北支河口各典型河槽悬沙浓度分布不对称特征,反映了南北支河口整体动力沉积环境的差异。

3.2 长江口典型河槽洪、枯季悬沙浓度分布特征

观测期间,长江口典型河槽含沙量总体表现为枯季大于洪季(图 4a),洪、枯季平均含沙量分别为 0.55 kg/m^3 和 0.63 kg/m^3 。南、北支河口表现又有不同,北支河口洪季平均含沙量大于枯季,洪、枯季分别为 0.95 kg/m^3 和 0.79 kg/m^3 ,而南支河口平均含沙量则表现为枯季大于洪季,洪、枯季平均含沙量分别为 0.41 kg/m^3 和

0.58 kg/m^3 。从南、北支河口洪、枯季最大含沙量分布看,北支洪季含沙量大于枯季,洪、枯季最大含沙量分别为 1.29 kg/m^3 和 1.17 kg/m^3 ,南支河口最大含沙量则表现为枯季大于洪季,洪、枯季最大含沙量分别为 0.65 kg/m^3 和 0.76 kg/m^3 ,南、北支河口最大含沙量季节性差异反映了南、北支河口悬浮泥沙受季节性径流作用的不同。南支河口最大浑浊带南、北季节性差异也有明显不同,洪季平均含沙量自北港、北槽到南槽分别为 0.44 kg/m^3 、 0.65 kg/m^3 、 0.86 kg/m^3 ,平均含沙量呈递增趋势;枯季则相反,平均含沙量分别为 1.05 kg/m^3 、 0.75 kg/m^3 、 0.49 kg/m^3 ,呈递减趋势,南支

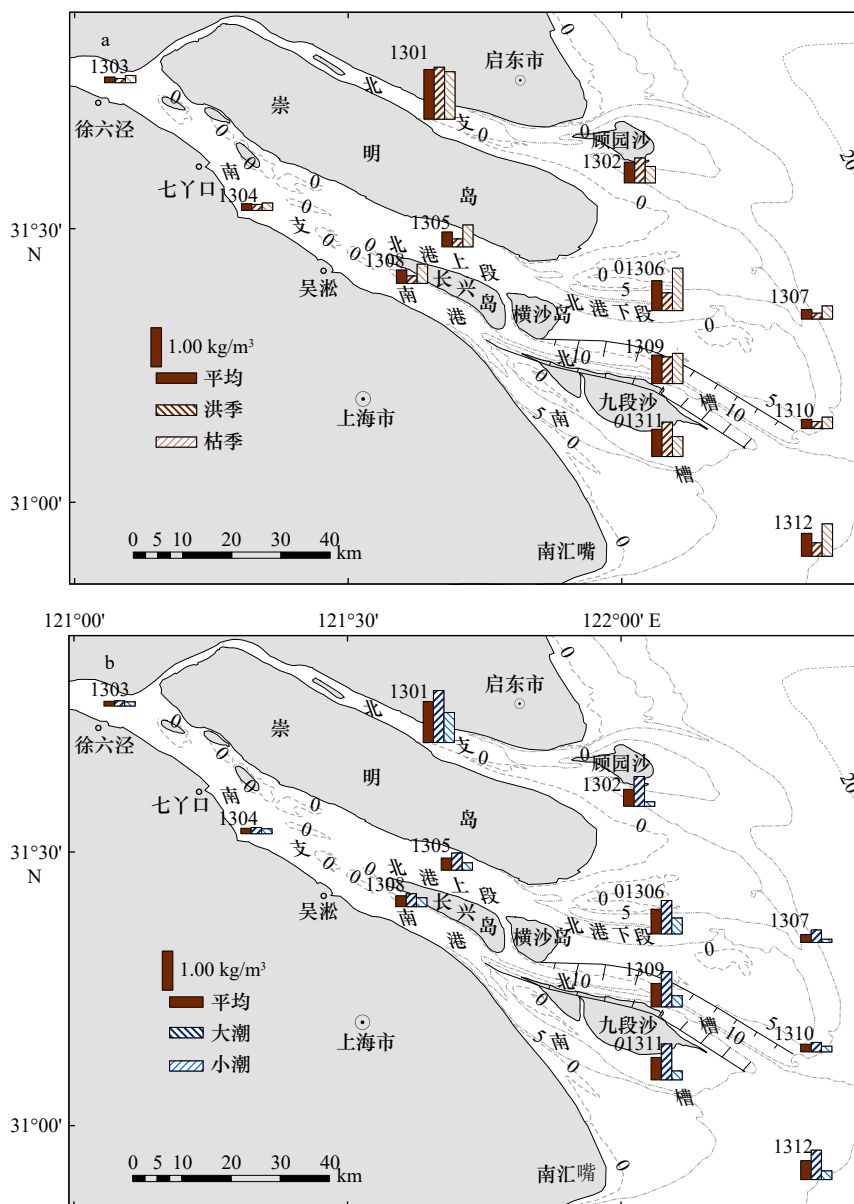


图 4 长江口典型河槽洪枯季 (a)、大小潮 (b) 悬沙浓度分布

Fig. 4 Suspended sediment concentration in typical channels of flood and dry seasons (a), spring and neap tide (b) in the Changjiang River Estuary

河口最大浑浊带平均含沙量季节性南、北趋势的不同,反映河口悬浮泥沙受季节性风浪作用明显。

3.3 长江口典型河槽大、小潮悬沙浓度分布特征

观测期间,长江口典型河槽含沙量大潮显著高于小潮(图4b),大、小潮平均含沙量分别为 0.84 kg/m^3 和 0.35 kg/m^3 ,大潮平均含沙量是小潮的2.4倍。分区域看,北支河口大、小潮平均含沙量均为南支河口的1.7倍左右;北支河口大、小潮平均含沙量分别为 1.22 kg/m^3 和 0.52 kg/m^3 ,南支河口大、小潮平均含沙量分别为 0.71 kg/m^3 和 0.29 kg/m^3 ,大潮平均含沙量为小潮的2.4倍。从口门段大、小潮含沙量变化上看,北支河口最大浑浊带大、小潮平均含沙量分别为 1.56 kg/m^3 和 0.90 kg/m^3 ,大潮约为小潮的1.7倍,与平均含沙量变化趋势一致;南支河口最大浑浊带大、小潮平均含沙量分别为 1.05 kg/m^3 和 0.36 kg/m^3 ,大潮平均含沙量约为小潮的3倍;大、小潮平均含沙量变化幅度北支河口小于南支河口,反映南支河口不同河槽含沙量受潮汐作用影响具有显著差异,大、小潮变化对南支河口最大浑浊带含沙量影响更为明显。

3.4 南支河口典型河槽悬沙浓度沿程分布特征

观测期间,南支河口典型河槽悬沙浓度沿程分布具有规律性(表1,图5a),最大浑浊带含沙量最高,南港、北港上段含沙量与口外10m线含沙量较为接近,约为最大浑浊带含沙量的一半左右,至南支河槽南支,含沙量再减半,并与上游徐六泾站含沙量接近。徐六泾平均含沙量为 0.14 kg/m^3 ,自南支、南港和北港上段、口门段(南、北槽、北港下段),至口外10m等深线,平均含沙量分别为 0.17 kg/m^3 、 0.35 kg/m^3 、 0.71 kg/m^3 和 0.34 kg/m^3 ,平均含沙量沿程变化率分别为19%、101%、103%、-51%,最大浑浊带含沙量最高,向两侧呈递减趋势(图5b)。

南支河口沿程河槽悬沙浓度大、小潮不对称性差

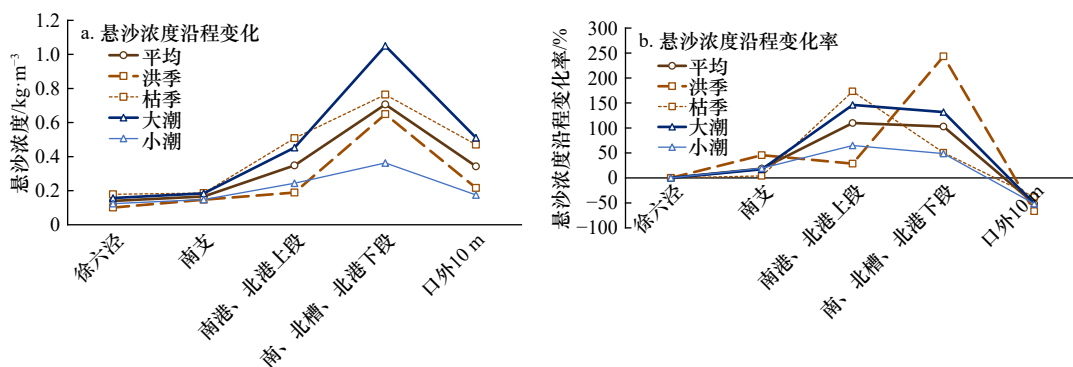


图5 南支河口典型河槽悬沙浓度沿程分布

Fig. 5 Distribution of suspended sediment concentration along the typical channels of the South Branch of Changjiang River Estuary

异显著。自徐六泾至口外,大潮含沙量为小潮含沙量的1.2倍、1.2倍、1.9倍、2.9倍、2.9倍,大、小潮变化对最大浑浊带及口外10m等深线区域含沙量影响显著。大潮含沙量对平均含沙量的贡献率占74%,对南港及北港上段河槽含沙量贡献率约占65%,对南支河槽及徐六泾站含沙量影响不显著。大潮含沙量沿程变化率分别为17%、146%、132%和-51%,小潮分别为19%、65%、49%和-52%,大、小潮含沙量沿程变化主要集中在南港及以下段河槽,大潮对含沙量沿程变化贡献率更为显著。

南支河口典型河槽沿程悬沙浓度洪季小于枯季,洪、枯季不对称性小于大、小潮的不对称性。南港及北港上段河槽洪枯季不对称性最为明显,该河段洪季含沙量与南支相近,分别为 0.19 kg/m^3 和 0.15 kg/m^3 ,而枯季则与南北槽含沙量相近,分别为 0.51 kg/m^3 和 0.76 kg/m^3 。洪、枯季含沙量沿程变化率上,南港至南北槽河槽变化率呈剪刀差分布,反映洪季径流作用已影响到南港及北港上段河槽含沙量分布,而枯季该河段含沙量则仍受潮汐控制。

4 长江口典型河槽涨、落潮悬沙浓度不对称机制探讨

4.1 长江口河势演变成南、北支河口涨、落潮悬沙浓度不对称分布的整体格局

长江口悬沙浓度不对称分布总体表现为北支河口大于南支河口,涨潮含沙量大于落潮含沙量,其中涨潮含沙量南、北支河口分别为 0.55 kg/m^3 、 0.95 kg/m^3 ,落潮含沙量分别为 0.45 kg/m^3 、 0.81 kg/m^3 。河口地区悬沙浓度涨、落潮不对称性与上、下游泥沙来源密切相关。潮汐作用下的悬浮泥沙含量显著高于径流作用下的悬浮泥沙含量,潮汐和径流相互作用的强度和范围影响河口的悬沙分布。以徐六泾、和口外10m

等深线含沙量分别代表河口径流和潮汐作用的泥沙来源,口外 10 m 等深线处平均含沙量为 0.34 kg/m^3 , 显著高于徐六泾平均含沙量 (0.14 kg/m^3) (表 2), 上游径流含沙量低, 而下游潮流含沙量高, 表明径流与潮流输沙过程对河口悬沙分布影响具有重要作用。

表 2 长江口南、北支河口涨、落潮含沙量分布
(单位: kg/m^3)

Table 2 Distribution of suspended sediment concentration between flood and ebb in the south and north branches of the Changjiang River Estuary (unit: kg/m^3)

	洪季 涨潮	枯季 涨潮	涨潮 平均	洪季 落潮	枯季 落潮	落潮 平均	平均
徐六泾	0.11	0.18	0.14	0.10	0.18	0.14	0.14
北支河口	1.08	0.82	0.95	0.85	0.77	0.81	0.88
南支河口	0.47	0.63	0.55	0.37	0.54	0.45	0.50
口外 10 m	0.24	0.49	0.36	0.19	0.45	0.32	0.34

自 18 世纪长江主泓改走南支以来, 南支河口河槽逐渐成为长江主要通道, 北支河口河槽逐渐淤积, 北支河槽逐渐由落潮槽演变为涨潮槽性质, 河势演变形成为南、北支河口涨、落潮悬沙浓度不对称分布的格局。北支河口从 1920 年前后径流量占总径流量的 25% 到现在已经不到 5% [28], 南支河口自长兴岛和九段沙上端又分汊为南、北港和南、北槽, 南、北港分流比长期稳定在 50% 左右, 长江径流自新桥通道进入北港后, 大致以横沙通道口为界, 把北港分为北港上段和北港下段, 其中北港上段位置与南港相对应, 成为南支河口入海通道的中间过渡河槽, 而北港下段则与南、北槽相对应, 是长江入海河口的下段区域, 并对应于河口最大浑浊带位置 (图 1), 河口河势演变影响了径流下泄和潮波上溯的强度和范围, 并形成南、北支河口河槽涨、落潮悬沙浓度分布不对称的格局。

4.2 洪、枯季变化影响河口涨、落潮悬沙分布的再分配过程

长江口洪、枯季变化, 主要体现在径流变化上, 观测期间大通站径流量, 洪季约为 $40\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、枯季约为 $11\,500 \text{ m}^3/\text{s}$, 由于径流含沙量普遍较低, 徐六泾站洪、枯季含沙量仅为 0.10 kg/m^3 和 0.18 kg/m^3 , 而口外 10 m 等深线含沙量相对较高, 洪、枯季分别为 0.22 kg/m^3 和 0.47 kg/m^3 , 因此径流作用强弱影响南支河口低悬沙分布范围 (图 4a)。

径流作用的强弱可以从沿程盐度变化上得到反映, 总体表现为枯季盐度大于洪季 (表 3)。徐六泾站

盐度基本在 0.2 左右, 而口外 10 m 等深线盐度为 25.4, 洪枯季变化不大; 而南支及南北港上段, 洪季盐度仍维持在 0.2, 与徐六泾站盐度基本一致, 枯季则增大到 0.7 左右, 反映了枯季潮汐作用的增加; 最大浑浊带区域, 盐度迅速上升, 平均盐度洪季为 7.9, 枯季为 14.0, 出现盐度变化率峰值, 河口混合过程强烈, 并且洪、枯季盐度出现明显差异, 南支河口盐度沿程变化特征与径流、潮汐作用强弱和转化密切相关, 并影响河口悬沙不对称分布。

由于枯季径流量远小于洪季径流量, 南支河口悬沙浓度分布均体现出枯季大于洪季的特征; 从沿程变化上看, 洪季小于 0.20 kg/m^3 含沙量可以到达南港及北港上段, 而枯季小于 0.20 kg/m^3 含沙量则仅分布在徐六泾至南支河槽; 从涨、落潮沿程悬沙分布上看 (图 6), 除河口南槽、北槽及北港下段的最大浑浊带以外, 涨、落潮差异仅在 0.03 kg/m^3 或 10% 以内, 涨、落潮含沙量具有高度的相关性; 河口最大浑浊带涨、落潮含沙量出现明显差异, 洪、枯季涨潮含沙量均高出落潮含沙量 0.20 kg/m^3 左右。由此表明, 洪、枯季

表 3 长江口洪、枯季涨、落潮盐度分布

Table 3 Distribution of salinity between flood and ebb of flood and dry seasons of the Changjiang River Estuary

	徐六泾	南支上段	南港、 北港上段	南槽、北槽、 北港下段	口外 10 m 线
洪季涨潮	0.2	0.2	0.2	6.6	25.6
洪季落潮	0.2	0.2	0.2	9.1	25.3
洪季平均	0.2	0.2	0.2	7.9	25.4
枯季涨潮	0.2	0.9	0.6	12.9	25.3
枯季落潮	0.2	0.9	0.8	15.1	25.5
枯季平均	0.2	0.9	0.7	14.0	25.4

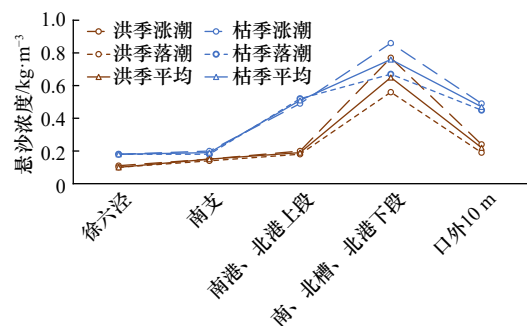


图 6 南支河口典型河槽悬沙浓度洪、枯季涨、落潮沿程分布

Fig. 6 Distribution of suspended sediment concentration between flood and ebb of flood and dry seasons along the typical channels of the South Branch of Changjiang River Estuary

变化影响河口涨、落潮悬沙不对称分布的再分配过程。

4.3 大潮涨、落潮过程对悬沙分布不对称影响显著大于小潮

河口潮汐作用强弱通常用潮差来表示,南支河口平均潮差在 2.5 m 左右,但河口潮差在季节性和区域性及大小潮过程中表现各有不同,总体表现为大潮大于小潮,洪季大潮大于枯季大潮,但枯季小潮大于洪季小潮(表 4)。河口潮差变化特征与河口悬沙分布具有相似的特征。

表 4 长江口典型河槽潮差分布(单位: m)

Table 4 Distribution of tidal range in the typical channels of the Changjiang River Estuary (unit: m)

	徐六泾	南支上段	南港、北港上段	南槽、北槽、北港下段	口外 10 m 线
洪季大潮	2.88	3.33	3.36	3.49	3.85
枯季大潮	2.55	2.93	3.24	2.96	3.60
大潮平均	2.71	3.13	3.30	3.23	3.73
洪季小潮	2.28	2.13	1.19	1.41	1.88
枯季小潮	2.05	2.20	2.16	2.21	1.88
小潮平均	2.17	2.16	1.67	1.81	1.88

大、小潮含沙量沿程差异呈递增趋势,南支河段大潮含沙量约为小潮含沙量的 1.3 倍。河口上游徐六泾站大、小潮含沙量分别为 0.16 kg/m^3 和 0.12 kg/m^3 ,南支河槽大、小潮含沙量分别为 0.19 kg/m^3 和 0.15 kg/m^3 ,含沙量均较低,反映潮汐动力对南支河段影响较弱。口外 10 m 线大、小潮含沙量则分别为 0.51 kg/m^3 和 0.17 kg/m^3 ,大、小潮差异明显,潮汐动力对悬沙分布影响显著。南港、北港上段和南槽、北槽、北港下段,大、小潮平均含沙量分别为 0.45 kg/m^3 、 1.06 kg/m^3 和 0.24 kg/m^3 、 0.37 kg/m^3 ,大、小潮含沙量沿程差异呈递增趋势(图 4b)。

从涨、落潮沿程悬沙分布不对称变化上看(图 7),河口最大浑浊带位置涨、落潮含沙量出现明显差异,涨潮含沙量达 1.23 kg/m^3 ,而落潮含沙量为 0.89 kg/m^3 ,并显著高于两侧含沙量分布,表明最大浑浊带区域大潮期间涨、落潮过程对泥沙具有再悬浮作用,涨潮泥沙再悬浮作用大于落潮。

4.4 季节性风浪作用影响河口最大浑浊带涨、落潮悬沙不对称南北差异

河口悬沙浓度洪枯季变化也体现在口外风浪作用的差异。长江口区波浪以风浪为主,占比达 98% 以上,长江口风浪季节性差异显著,冬季以偏北向浪

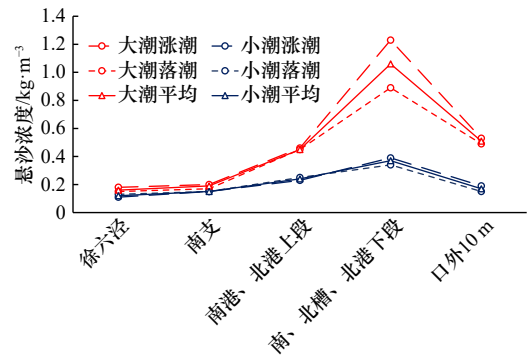


图 7 南支河口典型河槽悬沙浓度大、小潮涨、落潮沿程分布

Fig. 7 Distribution of suspended sediment concentration between flood and ebb of spring and neap tides along the typical channels of the South Branch of Changjiang River Estuary

为主,占比超过 60%,夏季以东南偏南向浪为主,占比 40%~50%,风浪季节性差异影响河口最大浑浊带不对称分布南北差异。

观测期间,洪季最大含沙量出现在南槽大潮涨潮过程(图 8),最大含沙量可达 2.05 kg/m^3 左右,并向北槽和北港下段依次递减,北港下段仅为 0.81 kg/m^3 ,南北差异达 2.5 倍,反映洪季含沙量受夏季东南偏南向风浪作用强烈;而小潮阶段,含沙量普遍较低,多在 0.20 kg/m^3 以下,洪季口门含沙量受低含沙量径流下泄作用显著,河口最大浑浊带特征已不明显。枯季悬沙浓度分布则与洪季趋势有显著差异,最大含沙量出现在北港下段涨潮过程中,最大含沙量为 1.40 kg/m^3 左右,并向北槽、南槽呈递减趋势,南槽含沙量为 0.61 kg/m^3 ,反映枯季含沙量受冬季偏北向风浪作用强烈;枯季小潮含沙量变化趋势与大潮一致,但较洪季小潮高,主要是枯季径流作用减弱的原因。

最大浑浊带悬沙浓度涨、落潮不对称性主要反映在洪、枯季大潮期间。洪季大潮,南槽涨潮含沙量为 2.05 kg/m^3 ,落潮为 1.24 kg/m^3 ,到北港下段,涨、落潮含沙量分别为 0.81 kg/m^3 、 0.80 kg/m^3 ,涨、落潮含沙量基本相近;枯季大潮涨、落潮含沙量分别为 1.43 kg/m^3 、 0.97 kg/m^3 ,北槽含沙量分别为 1.21 kg/m^3 和 0.79 kg/m^3 ,南槽涨、落潮含沙量分别为 0.61 kg/m^3 和 0.52 kg/m^3 ,依次呈递减趋势。小潮阶段,总体涨潮含沙量大于落潮含沙量,但含沙量总体较小,差异不明显。最大浑浊带悬沙不对称分布的南北差异,与风浪作用季节性差异具有较好的一致性。

4.5 底部高悬沙浓度对口门段涨、落潮悬沙不对称贡献显著

盐水入侵是河口地区重要的物理过程,受盐水异

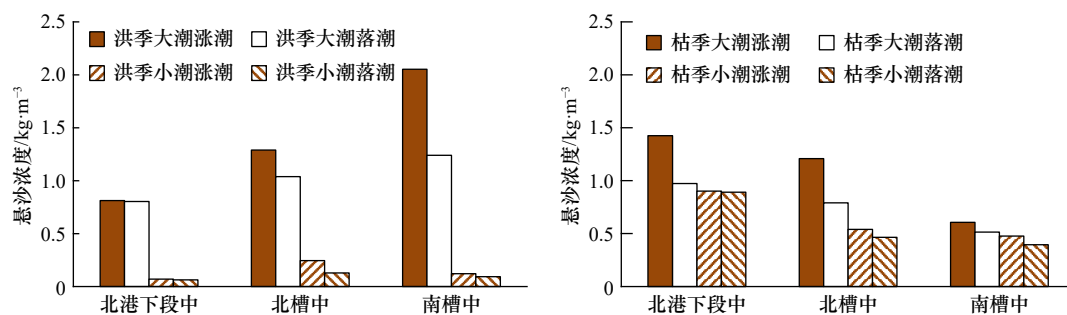


图 8 长江河口最大浑浊带悬沙浓度分布

Fig. 8 Distribution of suspended sediment concentration in the maximum turbidity zone of the Changjiang River Estuary

重流的影响,河口地区水体出现上层水流向海,下层水流向陆的重力环流现象,这是最大浑浊带形成的主要影响机制^[20]。底部高含沙浓度分布对口门段悬沙不对称贡献显著。

从洪枯季表底层差异看(图 9),涨潮含沙量高于落潮,但落潮表底层悬沙浓度差异大于涨潮,洪季表底层差异主要集中在口门段河槽,而枯季表底层差异峰值上溯到南、北港河段。洪季时,南支河口底层含沙量约为表层含沙量的 5.1 倍,表底层差异主要集中在口门段;枯季时,底层含沙量约为表层含沙量的 3.2 倍,表底层显著差异主要分布在口门段和南、北港位置,范围更广,但差异缩减,反映径流作用减弱。从洪、枯季涨、落潮过程看:洪季时口门段底部高含沙浓度尤为明显,涨、落潮底部含沙量为 1.52 kg/m^3 和 1.32 kg/m^3 ,涨潮含沙量大于落潮含沙量,但表底层含沙量差异落潮大于涨潮,涨、落潮不对称现象显著;枯季时,径流作用减弱,潮汐作用增强,表底层含沙量差异峰值上移到南、北港附近,涨、落潮底部含

沙量为 1.30 kg/m^3 和 1.02 kg/m^3 ,与洪季趋势一致,但底部高浓度含沙量区域分布更广,峰值降低。

从大、小潮表底层差异看,大潮含沙量显著大于小潮,底部含沙量差异更明显。大、小潮表、底层含沙量分别 0.18 kg/m^3 、 0.85 kg/m^3 和 0.13 kg/m^3 、 0.33 kg/m^3 ,反映大潮期间潮汐作用强劲,底部泥沙再悬浮特征明显。大潮时表、底层最大悬沙浓度分布在口门段,并向上、下游递减,涨、落潮底层含沙量分别为表层含沙量的 4.2 倍和 5.5 倍;而小潮时含沙量峰值不显著,表、底层含沙量差异显著缩小,涨、落潮底层含沙量分别为表层含沙量的 2.3 倍和 2.8 倍。从大、小潮涨、落潮过程看:大潮时口门段底部高含沙浓度尤为明显,涨、落潮底部含沙量为 2.07 kg/m^3 和 1.80 kg/m^3 ,涨潮含沙量大于落潮含沙量,但表底层含沙量差异落潮大于涨潮,涨、落潮不对称现象显著;小潮时,含沙量峰值在口门段,由于潮汐作用减弱,泥沙沉降,含沙量降低,底部泥沙沉降更快,涨、落潮底部含沙量为 0.57 kg/m^3 和 0.51 kg/m^3 ,涨、落潮及表底层不对称性

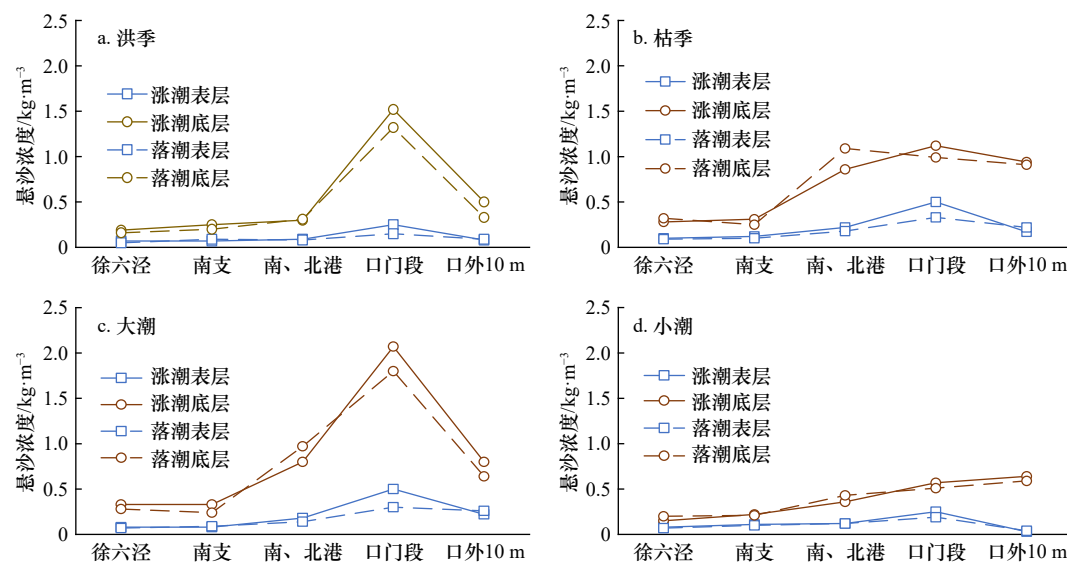


图 9 长江口涨、落潮表、底层悬沙不对称

Fig. 9 Asymmetry of suspended sediment concentration at the surface and bottom between flood and ebb of the Changjiang River Estuary

显著缩减。

5 结论

长江口自徐六泾至口外, 三级分汊, 并形成了多个不同类型的分汊河槽, 由于分汊型河槽在动力、沉积、地貌等环境不同, 以及径流、潮汐作用存在季节性和大、小潮差异, 造成各分汊河槽涨、落潮过程悬沙浓度显著不对称特征。

河势演变形成南支为落潮槽、北支为涨潮槽的整体格局, 北支河口悬沙浓度显著高于南支。季节性径流变化影响南支河口涨、落潮悬沙分布的再分配过

程, 洪季径流作用基本覆盖了南港及北港上段河槽悬沙分布, 枯季潮汐作用可以影响到南支涨、落潮悬沙过程。大潮涨、落潮过程对悬沙分布不对称影响显著大于小潮, 口外 10 m 等深线含沙量显著高于徐六泾站含沙量, 强劲的涨、落潮水流造成口门内外泥沙交换频繁。底部高含沙浓度多出现在大潮期间, 对口门段涨、落潮悬沙不对称贡献显著。季节性风浪作用影响河口最大浑浊带涨、落潮悬沙不对称南北差异, 洪季含沙量呈自南向北递减趋势, 枯季呈自南向北递增趋势。

参考文献:

- [1] Huang Haosheng, Chen Changsheng, Blanton J O, et al. A numerical study of tidal asymmetry in Okatee Creek, South Carolina[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(1): 190–202.
- [2] 王彪, 朱建荣, 李路. 长江河口涨落潮不对称性动力成因分析[J]. *海洋学报*, 2011, 33(3): 19–27.
Wang Biao, Zhu Jianrong, Li Lu. A study on the dynamics of the asymmetry between flood and ebb in the Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(3): 19–27.
- [3] 李谊纯, 董德信, 陈波. 河口往复流中潮流不对称与推移质输沙的关系[J]. *海洋科学*, 2015, 39(6): 99–103.
Li Yichun, Dong Dexin, Chen Bo. A study on the relationship between tidal asymmetry and bed-load transport in estuarine rectilinear current[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(6): 99–103.
- [4] Li Zhanhai, Wang Yaping, Cheng Peng, et al. Flood-ebb asymmetry in current velocity and suspended sediment transport in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(10): 37–47.
- [5] 张钊. 长江口南槽悬沙输运涨落潮不对称研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
Zhang Zhao. Flood-ebb asymmetry in suspended sediment transport in the South Passage of the Changjiang Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [6] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口潮流特性及其对河槽演变的影响[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1979(1): 131–144.
Shen Huanting, Pan Ding'an. The characteristics of tidal current and its effects on the channel changes of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 1979(1): 131–144.
- [7] 杜家笔, 裴艳东, 高建华, 等. 弱动力浅海中的悬沙输运机制: 以天津港附近海域为例[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 136–144.
Du Jiabi, Pei Yandong, Gao Jianhua, et al. The suspended sediment transport associated with low flow patterns in shallow waters: a case study from the Tianjin subtidal area[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 136–144.
- [8] 沈逸, 何青, 张迨, 等. 长江口浑浊带北槽悬沙输运研究[J]. *泥沙研究*, 2019, 44(1): 16–23.
Shen Yi, He Qing, Zhang Dai, et al. Study on transport of suspended sediment in the Turbidity Maximum Zone in the North Passage of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(1): 16–23.
- [9] 陈沈良, 谷国传, 张国安. 长江口南汇近岸水域悬沙沉降速度估算[J]. *泥沙研究*, 2003(6): 45–51.
Chen Shenliang, Gu Guochuan, Zhang Guo'an. Settling velocity of suspended sediment in the Nanhui nearshore waters of Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(6): 45–51.
- [10] 杨云平, 李义天, 王冬, 等. 长江口悬沙有效沉速时空变化规律[J]. *水利水运工程学报*, 2012(5): 24–29.
Yang Yunping, Li Yitian, Wang Dong, et al. Space-time variation in effective settling velocity of suspended sediment in Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(5): 24–29.
- [11] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. *地理学报*, 2004, 59(2): 260–266.
Chen Shenliang, Zhang Guo'an, Yang Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 260–266.
- [12] 时钟, 朱文蔚, 周洪强. 长江口北槽口外细颗粒悬沙沉降速度[J]. *上海交通大学学报*, 2000, 34(1): 18–22.
Shi Zhong, Zhu Wenwei, Zhou Hongqiang. Settling velocity of fine suspended sediment in the Changjiang estuary[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2000, 34(1): 18–22.
- [13] 沈焕庭, 张超, 茅志昌. 长江入河口区水沙通量变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(3): 288–294.
Shen Huanting, Zhang Chao, Mao Zhichang. Patterns of variations in the water and sediment fluxes from the Changjiang River to the estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(3): 288–294.
- [14] 张国安, 虞志英, 何青, 等. 长江口深水航道治理一期工程前后泥沙运动特性初步分析[J]. *泥沙研究*, 2003(6): 31–38.
Zhang Guo'an, Yu Zhiying, He Qing, et al. Primary analysis on sediment motion before & after 1st phase engineering of the deep water-

- ways in Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(6): 31–38.
- [15] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口悬沙浓度变化特征分析[J]. *泥沙研究*, 2006(3): 68–75.
Zuo Shuhua, Li Jiufa, Wan Xinning, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of suspended sediment concentration in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(3): 68–75.
- [16] 陆叶峰, 杨世伦, 刘建华, 等. 长江口悬沙浓度时空变化研究——以2012年和2013年洪季为例[J]. *人民长江*, 2015, 46(5): 19–25.
Lu Yefeng, Yang Shilun, Liu Jianhua, et al. Spatial and temporal variation of suspended sediment concentration (SSC) in Yangtze Estuary: A case study on flood seasons of 2012 and 2013[J]. *Yangtze River*, 2015, 46(5): 19–25.
- [17] 何超, 丁平兴, 孔亚珍. 长江口及其邻近海域洪季悬沙分布特征分析[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2008(2): 15–21.
He Chao, Ding Pingxing, Kong Yazhen. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of suspended sediment concentration of the Yangtze estuary and adjacent sea areas in flood seasons[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science Edition*, 2008(2): 15–21.
- [18] 张迨, 何青, 沈健, 等. 长江口浑浊带水沙特性研究[J]. *泥沙研究*, 2015(4): 31–37.
Zhang Dai, He Qing, Shen Jian, et al. Study on flow and sediment transport of the turbidity zone in Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(4): 31–37.
- [19] 戴志军, 朱文武, 李为华, 等. 近期长江口北槽河道浮泥变化及影响因素研究[J]. *泥沙研究*, 2015(1): 49–54, 74.
Dai Zhijun, Zhu Wenwu, Li Weihua, et al. Research on recent changes of fluid mud and its impacted factors in the north passage of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(1): 49–54, 74.
- [20] 时钟, 陈伟民. 长江口北槽最大浑浊带泥沙过程[J]. *泥沙研究*, 2000(1): 28–39.
Shi Zhong, Chen Weimin. Fine sediment transport in turbidity maximum at the north passage of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2000(1): 28–39.
- [21] 杨世伦, 谢文辉, 朱骏, 等. 大河口潮滩地貌动力过程的研究——以长江口为例[J]. *地理学与国土研究*, 2001, 17(3): 44–48.
Yang Shilun, Xie Wenhui, Zhu Jun, et al. A study of intertidal flat morphodynamics of a large river mouth: Yangtze River mouth[J]. *Geography and Territorial Research*, 2001, 17(3): 44–48.
- [22] 张文祥, 杨世伦, 李鹏, 等. 基于OBS-3A、ADP-XR崇明东滩悬沙变化及动力过程研究[G]//2006年华东六省一市地学科技论坛论文集. 南昌: 中国地质学会, 江西省地质学会, 2006: 260–268.
Zhang Wenxiang, Yang Shilun, Li Peng, et al. Measurement of variation in SSC and dynamic process using OBS-3A and ADP-XR in eastern chongming tidal flat[G]//Regional Science and Technology Forum of Six Provinces and One City in East China. Nanchang: Geological Society of China, Geological Society of Jiangxi Province, 2006: 260–268.
- [23] 王飞, 李九发, 李占海, 等. 长江口南槽河道水沙特性及河床沙再悬浮研究[J]. *人民长江*, 2014, 45(13): 9–13.
Wang Fei, Li Jiufa, Li Zhanhai, et al. Research on flow and sediment characteristics and bed sediment re-suspension in South Passage of Yangtze River Estuary[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(13): 9–13.
- [24] 陈景东, 汪亚平, 史本伟, 等. 长江口北港口门海域悬沙输运机制分析[J]. *海洋工程*, 2014, 32(3): 45–54.
Chen Jingdong, Wang Yaping, Shi Benwei, et al. Mechanisms on the suspended sediment transport in the mouth of North Channel of Yangtze River estuary[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(3): 45–54.
- [25] Yang Z, Wang H, Saito Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4): W04407.
- [26] Yang S L, Zhang J, Xu X J. Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications, Yangtze River[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(10): L10401.
- [27] 高抒. 长江三角洲对流域输沙变化的响应: 进展与问题[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(3): 233–241.
Gao Shu. Changjiang delta sedimentation in response to catchment discharge changes: progress and problems[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(3): 233–241.
- [28] 韩乃斌, 卢中一. 长江口北支演变及治理的探讨[J]. *人民长江*, 1984(3): 40–45.
Han Naibin, Lu Zhongyi. Discussion on the evolution and control of the North Branch of the Yangtze Estuary[J]. *Yangtze River*, 1984(3): 40–45.

Tidal and seasonal asymmetry of suspended sediment concentration in branched channels of the Changjiang River Estuary

Qiao Lixin¹, Zhang Guoan¹, He Qing¹, Zhang Weiguo¹, Li Maotian¹

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

Abstract: Due to the influence of runoff and estuarine morphology, asymmetrical phenomena of hydrodynamics, suspended sediment concentration (SSC) and salinity occurs between the flooding and ebbing stage in the estuary. Such a phenomena also shows significant regional and seasonal differences. Based on hydrological survey in July 2013 and January 2014 in the Changjiang River Estuary, it is found that suspended sediment concentration in the branched channels of the Changjiang River Estuary has asymmetric characteristics, which varies with flood and dry season as well as spring and neap tide. In terms of spatial variability, there exists along channel difference, inter-channel difference as well as water volume difference. The evolution of the estuary controls the overall SSC difference between the North Branch and South Branch. The flood and dry seasons affect the redistribution process of SSC in the estuary. Spring tides has a stronger impact on SSC asymmetry than that of neap tides. Theseasonal wave condition affect the SSC asymmetric distribution in the turbidity maximum zone of the estuary along the north-south direction. The high sediment concentration near the bottom contributes significantly to the SSC asymmetry between flooding and ebbing stages at the river mouth.

Key words: branched estuary; channel; suspended sediment concentration; flood-ebb asymmetry; seasonal difference