

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.03.005

夏威夷, 赵晓冬, 张新周. 椒江河口径、潮流变化对含沙量时空分布的影响[J]. 水利水运工程学报, 2016(3): 35-45. (XIA Wei-yi, ZHAO Xiao-dong, ZHANG Xin-zhou. Influences of variations in runoff and tide on spatial and temporal distribution of sediment concentration in Jiaojiang River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3): 35-45.)

椒江河口径、潮流变化对含沙量时空分布的影响

夏威夷, 赵晓冬, 张新周

(南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:通过对3次水文泥沙测验资料的整理,分析了椒江河口含沙量在纵向、垂向的空间分布和随季节变化、潮汛变化、涨落潮变化等时间分布特征;依据径、潮流相对强弱的不同,将椒江河口分为3个区段来讨论。研究表明:①径、潮流通过对河床的冲刷和对泥沙的输运来实现对含沙量时空分布的影响。②径流控制的河段含沙量垂向变化梯度大于潮流控制的河段。不同区段含沙量峰值出现时刻具有显著差异,含沙量变化周期大致有两种,分别约为6和12 h。造成各区段差异的原因主要与水流输沙方向,水力活跃度和沙源供给有关。③径流量增大能显著提高灵江河床冲刷速率,且对含沙量起到“稀释”作用。④洪水将严重破坏含沙量分布的规律性,各区段含沙量明显降低且持续时间较长。

关 键 词: 椒江河口; 径流; 潮流; 含沙量; 时空分布

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)03-0035-11

对于河口泥沙特性的研究一直是国内外相关领域的热点问题,国内学者对于河口含沙量的时空分布进行了大量研究^[1-5],这些文献大多采用数据分析的手段,对水文、泥沙等现场测验资料进行整理分析,从而研究含沙量在纵向、垂向的空间分布或随涨落潮变化的时间分布特征,并进而探讨形成这些特征的内在机理。

椒江河口属山溪性强潮河口,潮流界可达灵江起点三江村处。永宁江大闸建成后,椒江河口由灵江、椒江、椒江口三段组成^[6]。灵江为三江村至三江口河段,长约45 km,宽约200~1 100 m。三江口以下至口门(牛头颈)河段为椒江,长约12 km,宽约为880~1 800 m。椒江出口门入海后,河道呈喇叭型向外展宽,称为椒江口,口门处宽约1 km,离口门约18 km的白沙—琅玕山断面宽达19 km。

早在20世纪80年代,祝永康等^[7-9]学者通过资料分析对椒江河口的泥沙运移、沉积结构、含沙量分布进行了研究。随着科学技术的进步,李炎等^[10]应用光学和声学泥沙剖面监测系统,对椒江河口最大浑浊带纵横剖面和时间剖面进行了观测;郭琳等^[11]运用遥感技术分析了椒江口悬浮泥沙分布特征。近年来,潮流泥沙数学模型^[12]和分形理论^[13]亦被应用于椒江河口的泥沙研究中。在内容上,椒江河口的泥沙研究主要集中于含沙量分布特征^[14]、挟沙力计算、浮泥运动、沉积构造特征、拦门沙、最大浑浊带、泥沙来源及采砂活动造成的影响等几个方面。对于这些方面的研究,基本都要以对泥沙时空变化特征的分析作为基础,且重点对最大浑浊带或高含沙量区进行研究。据历史资料^[7,15],最大浑浊带在椒江河口的位置变化不一,核部一般位于椒江的海门~栅浦河段,1980年7月最大浑浊带的核部位于椒江的栅浦附近,垂线平均含沙量涨潮时高达15 kg/m³,落潮时为9 kg/m³。最大浑浊带随涨落潮往返运移,且受径、潮流相对强弱的影响较大。1983年某时段落憩时,最大浑浊带核部位于老鼠山附近,垂线平均含沙量达20.6 kg/m³;涨憩时,核部上溯至石仙

收稿日期: 2015-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409163);水利部公益性行业科研专项(201201070);交通运输部重大科技专项(201132874640)

作者简介: 夏威夷(1988—),男,江苏南京人,博士研究生,主要从事河口动力学及泥沙运动研究。

E-mail: 335056446@qq.com

妇附近,含沙量达 20.5 kg/m^3 。

最大浑浊带所处河段往往是悬沙落淤较多,浮泥发育条件最佳的位置,该处河床冲淤速率也较快。椒江河口的冲淤演变主要受径流主导的陆域来水来沙、潮流主导的海域来水来沙及边界条件的变化影响,在口门内表现为“洪冲枯淤”特征,口门外则为“洪淤枯冲”。冲淤状况随季节的变化特征,实质上是由冬、夏季不同的径流量导致。

近年来椒江河口的人类活动较为频繁,航道整治、建库建闸、河道采砂等活动较大改变了河口水动力和边界条件。径流量及洪峰流量的减小,配合潮水的顶托作用,导致河道淤涨,江水变浑,并呈不断恶化的趋势,对流域地区的水资源利用、防洪排涝、港口航运等造成了不利影响。研究含沙量时空分布对径、潮流变化的响应,有助于从本质上探索椒江河口泥沙的运动规律,对河口治理和资源利用具有现实意义。

1 资料与方法

本文基础资料来源于 2005 年 9 月、2013 年 12 月和 2014 年 6 月的椒江河口水文泥沙测验。测验利用 9 条水文泥沙测验垂线和 5 个潮位站进行资料搜集(垂线及潮位站位置如图 1 所示),观测内容主要有潮位观测、定点水文泥沙测验、走航测流、水质测验、断面流量观测和底质取样等,水文测验期潮汛情况与柏枝岙站日均径流量如表 1 所示。

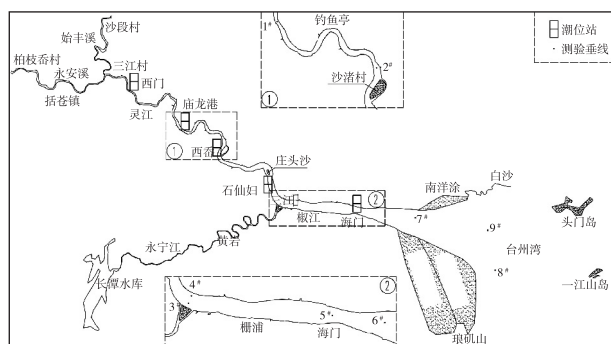


图 1 椒江水系概况及各测站位置

Fig. 1 Diagrammatic sketch of Jiaojiang River system and locations of survey stations

表 1 水文测验期潮汛情况与柏枝岙站日均径流量

Tab. 1 Tidal types and average daily runoff volumes of Bozhi'ao station in survey period

季节	测验时间	潮汛	径流量范围/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
夏季	2005-09-01—09-02	洪水	171.20~447.30
	2005-09-03—09-04	大潮	100.60~188.80
冬季	2013-12-04—12-05	大潮	4.17~4.86
	2013-12-08—12-09	中潮	5.02~4.88
	2013-12-12—12-13	小潮	6.22~6.30
夏季	2014-06-14—06-15	大潮	20.00~20.50
	2014-06-18—06-19	中潮	21.80~23.30
	2014-06-21—06-23	小潮	46.90~387.00
	2014-06-22—06-23	洪水	387.00~1 200.00

本文通过 3 次水文泥沙测验资料的整理,分析了椒江河口含沙量在纵向、垂向的空间分布特征和随季节变化、潮汛变化、涨落潮变化等时间分布特征。依据径、潮流相对强弱不同,将椒江河口分为 3 个区段来讨论,分析了含沙量时空分布对径、潮流变化的响应机理,以期为进一步研究河口泥沙运动规律提供理论参考。

2 数据分析

2.1 潮汐、潮流特征

椒江河口潮型为不规则半日潮,台州湾则是典型的正规半日潮。潮波自外海传入台州湾,又经喇叭形河口传入椒江。随着河宽和水深减小,潮波受到地形摩阻、上游径流顶托和河岸边界的约束反射等影响,传播过程中变形剧烈,涨潮历时减小,落潮历时增加,潮波变形且接近驻波。根据近年测验资料统计,潮差自海门沿江道上溯呈现逐渐增大趋势(如表 2),最大潮差在西门附近达 6.85 m。

涨落潮流的垂线平均流速分布,总体上呈现出台州湾—椒江—灵江逐渐增大的趋势。台州湾水域最大垂线平均涨潮流速约为 $0.57 \sim 1.70 \text{ m/s}$,落潮流速约为 $0.51 \sim 1.45 \text{ m/s}$ 。椒江河道最大垂线平均涨潮流速约 $1.57 \sim 2.30 \text{ m/s}$,落潮流速约 $1.01 \sim 2.00 \text{ m/s}$ 。灵江庙龙港、西岙附近最大垂线平均涨潮流速约 $1.42 \sim$

2.28 m/s,落潮流速约 1.48~1.90 m/s。值得注意的是,三江口附近涨潮流速小于相邻河段,落潮流速大于相邻河段。由于受到口门河道束窄的影响,口内 5#垂线处涨潮流速大于口外 6#垂线,落潮流速则相反。

表 2 各潮位站潮差情况
Tab. 2 Tidal ranges in tide stations

站位	平均潮差/m			最大潮差/m			最小潮差/m		
	2005 年	2013 年	2014 年	2005 年	2013 年	2014 年	2005 年	2013 年	2014 年
西门	5.65	5.54	4.84	6.31	6.61	6.85	4.77	4.41	1.25
庙龙港	6.27	5.14	4.90	6.75	6.39	6.73	5.85	3.95	2.98
西岙	6.04	4.87	4.74	6.47	6.11	6.54	5.65	3.67	3.07
石仙妇	5.38	4.55	4.46	5.85	5.83	6.20	4.96	3.37	2.77
海门	5.02	4.26	4.23	5.63	5.61	6.00	4.24	3.02	2.44

注:2005 年,2013 年,2014 年测验资料时段分别为 2005-09-03—04,2013-11-29—12-13,2014-06-01—30。

2.2 含沙量的空间分布特征

本文主要从纵向和垂向上分析椒江河口含沙量的空间分布特征,初步探求径、潮流变化对含沙量空间分布的影响。由于横向分布特征在以往文献^[9,15]中已有论述,本文不作探讨。

2.2.1 纵向分布特征 椒江河口含沙量的纵向分布,沿灵江河道—椒江河道—椒江口门形成一个类似抛物线的变化趋势(见图 2),即存在一个最大浑浊带。径流与潮流相互作用,会在河口某段位置形成一个势均力敌的动力平衡区。在水动力作用下,动力平衡区内底沙再悬浮,盐淡水混合作用又会造成大量细颗粒泥沙在此絮凝沉降,从而进入一个悬浮—沉降—再悬浮的状态。泥沙在这个区域滞留徘徊,从而形成最大浑浊带。特大洪水时,浑浊带甚至被推出口外。沈焕庭等^[16]指出椒江河口最大浑浊带为海源—潮致型,泥沙主要来源于海域,潮汐作用是最大浑浊带形成的主要原因,盐水入侵作用相较而言较小。

以 2013 年冬季大潮为例,庙龙港处垂线平均含沙量约为 14 kg/m³,至下游西岙处增大到 19 kg/m³,之后逐渐减小,至海门下流仅有 5 kg/m³左右。最大浑浊带出现位置亦随流量的增大往下游转移,如 2005 年夏季灵江上游柏枝岙站日均流量为 100.6~188.8 m³/s,此时最大浑浊带出现在海门偏向上游处;而 2013 年冬季流量仅为 4.17~6.30 m³/s,此时最大浑浊带往上游转移至西岙处。由此可见,最大浑浊带具有季节性变化特征。最大浑浊带季节性纵向变化,本质上是由于径流量随季节变化而不同,径、潮流相对强弱的改变,导致最大浑浊带所在的径、潮流动力平衡区随径流增强而往下游推移,反之因径流减弱而随潮上溯。

径流变化不仅改变最大浑浊带在河口的位置,在径流增强到一定程度后亦会显著改变河口悬沙含量。图 2 显示 2005 年 9 月的含沙量普遍明显小于 2013 年和 2014 年测次,1#~6#含沙量都在 5 kg/m³以下。造成这一现象的主要原因是 2005 年 9 月初暴发的洪水冲淡了河口泥沙含量,9 月 2 日柏枝岙站日均径流量达 447.3 m³/s。洪水冲刷河床并将床底浮泥挟往下游,悬沙亦随洪水输送至口门外,在缺少沙源的供给下,灵江、椒江的垂线平均含沙量均出现显著减小,且在洪水减弱的后续几天,存在一个沙源恢复期,或者说在背景含沙量较小情况下,河口悬沙依然维持较小浓度,需要一段时间才能恢复到洪水前的状态。

2.2.2 垂向分布特征 含沙量垂向分布与当地水流运动、床沙组成、来沙情况、水体盐度等因素密切相关。不同河段径、潮流相对强弱的变化,将会导致这些因素的改变,从而影响含沙量垂向分布。

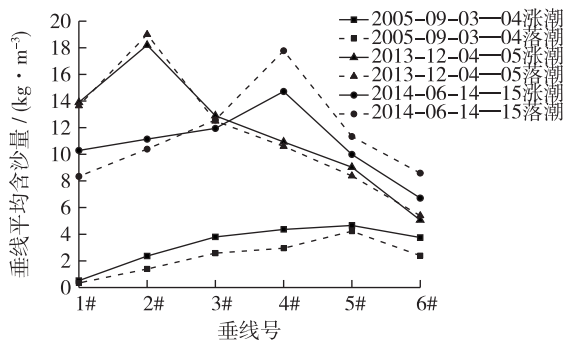


图 2 各测次垂线平均含沙量沿程变化
Fig. 2 Changes of vertical average sediment concentration in each survey period along river

在垂向上,含沙量表现为“上稀下浓”的特点(见图3),底部含沙量普遍较大,椒江、灵江河道基本都在 15 kg/m^3 以上。椒江河口泥沙来源主要是口门附近及近海^[14],流域来沙大多集中于汛期,冬季潮流主导下以海域来沙为主。含沙量垂向分布在冬、夏季存在差异,主要是由于冬、夏季径流强度不同,各河段径、潮流的相对强弱会随季节变化发生改变。比较2013年冬季和2014年夏季的情况可知(见图3(b)和(c)),夏季含沙量垂向分布梯度普遍大于冬季,尤以3#~4#垂线最为明显。同一季节,径流强度的不同亦会造成含沙量垂向分布的变化,如2005年各层含沙量明显小于2013年与2014年(见图3),且灵江河道的1#~4#垂线含沙量垂向变化梯度均较小。其原因与当时处于洪水期有关,在上节中亦解释了洪水对水体含沙量的冲淡作用。高浓度底沙被洪水冲往下游,导致灵江河段底沙含量显著降低,在表层含沙量与2014年相比变化不大的情况下,含沙量垂向变化梯度自然减小。

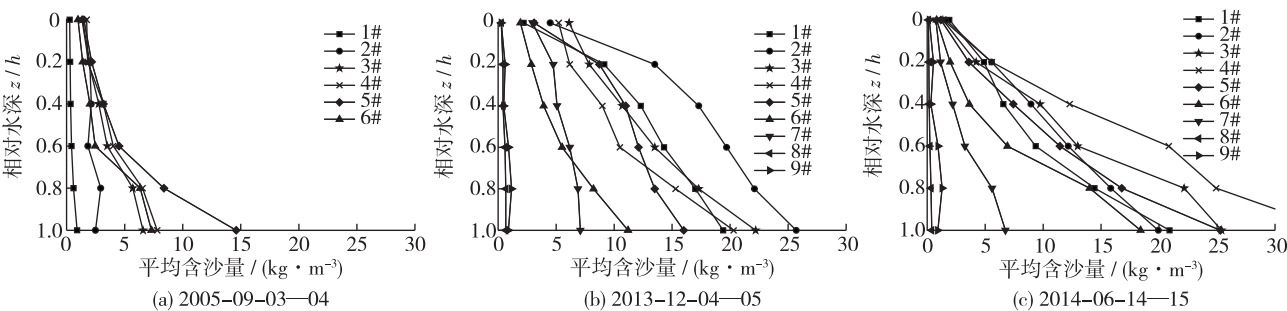


图3 大潮沿程各垂线分层平均含沙量

Fig. 3 Average sediment concentration in each layer during spring tide

为研究流速对含沙量垂向分布造成的影响,统计了涨、落潮周期中垂线平均流速极大值与极小值出现时的分层含沙量。由表3可见,1#~5#垂线 $S_{0.4h}$ 与 $S_{0.6h}$ 比值随流速增大而增大,表明泥沙在流速增大时有从底层往表层起悬的趋势。椒江出口门后,床面多以易起动的细颗粒泥沙为主,6#~9#垂线各层含沙量在大流速时均较大。其中位于台州湾开阔海域的8#~9#垂线,各层含沙量普遍小于口内水域, $S_{1.0h}$ 长期小于 1 kg/m^3 。在沙源不足、流速较小的条件下,各层含沙量间的变化梯度没有1#~7#垂线明显,含沙量垂向分布较为均匀。

表3 各垂线流速极值对应的分层含沙量

Tab. 3 Sediment concentration of each layer corresponding to extremum of vertical average flow velocities

垂线		V	S_0	$S_{0.4h}$	$S_{0.6h}$	$S_{1.0h}$
1#	涨潮	1.39	1.56	8.15	10.24	15.27
	落潮	0.65	0.72	5.74	9.92	18.79
2#	涨潮	1.26	2.44	12.84	13.09	15.10
	落潮	0.63	1.31	8.99	11.63	18.54
3#	涨潮	1.26	2.37	11.26	10.50	24.50
	落潮	0.65	0.46	1.56	2.43	17.81
4#	涨潮	1.25	1.29	15.37	10.64	19.57
	落潮	0.71	4.70	6.92	9.66	13.26
5#	涨潮	1.21	1.28	6.20	14.09	29.67
	落潮	0.36	0.82	3.18	5.89	18.30

垂线		V	S_0	$S_{0.4h}$	$S_{0.6h}$	$S_{1.0h}$
6#	涨潮	1.21	0.34	2.62	4.75	19.21
	落潮	0.66	0.24	1.23	2.30	15.36
7#	涨潮	1.05	1.63	2.58	3.08	4.71
	落潮	0.49	0.14	0.33	0.85	3.40
8#	涨潮	0.57	0.28	0.40	0.88	0.74
	落潮	0.27	0.11	0.14	0.16	0.23
9#	涨潮	0.25	0.17	0.21	0.24	0.27
	落潮	0.52	0.23	0.35	0.83	0.67

注: V 表示流速(m/s), S 表示含沙量(kg/m^3), S 的下标表示相对水深(如 $1.0h$ 表示底层, $0.6h$ 表示所在深度与水深 h 之比为 0.6)。

为进一步研究底层含沙量 $S_{1.0h}$ 与垂线平均含沙量 S_m 之比的沿程变化,作者将各垂线测得的 $S_{1.0h}$ 与 S_m 点绘在坐标图上(见图4)。图4表明,椒江河口的底层含沙量为垂线平均含沙量的2倍左右。5#、6#垂线由于位于拦门沙附近,底沙浓度大,导致 $S_{1.0h}$ 与 S_m 的比值较大。

综上所述,椒江河口含沙量的垂线分布不仅与径、潮流的挟沙特征有关,也受流速变化的影响。径流挟带的泥沙主要为细砂及其以上的粗颗粒物,粗颗粒泥沙以推移质形式往下游输移,少量细颗粒泥沙则以悬沙形式冲往下游,含沙量垂向变化梯度较大;潮流挟带的泥沙主要来自于口外拦门沙及浅滩,大多以细颗粒物为主,悬沙含量较大,潮流动力下泥沙亦发生悬浮与再悬浮,含沙量垂向分布相对趋于均匀。夏季径流控制下,含沙量垂线分布表现为径流挟沙的特征;冬季潮流主导下,则表现为潮流挟沙的特征。河口床面发育有浮泥和浅滩,在水流卷挟作用下,床面泥沙再悬浮,底部含沙量显著增大,随潮进入河道,或随径流往下游输移,这也是冬、夏季底部含沙量都较大的原因。故径流控制的河段含沙量垂向变化梯度要大于潮流,在具体水域上表现为灵江河道的垂向递增现象最明显,椒江河口次之,台州湾相对较小;三江口夏季位于径、潮流动力平衡区上游,受径流控制,冬季位于平衡区下游则受潮流控制,故冬季含沙量垂向分布较均匀。

2.3 含沙量的时间变化特征

本文从不同时间尺度对椒江河口含沙量变化进行分析,发现不同河段各具特征。

2.3.1 季节变化特征 椒江河口含沙量随季节的变化基本表现为夏季小于冬季的特征,但仍有例外,如2013年冬季3#~6#大潮垂线平均含沙量几乎都小于2014年夏季。造成这种现象的原因应与径流强度有关。2005年夏季大潮灵江上游柏枝岙站流量是2013年冬季的25倍以上,径流强度相差很大,夏季含沙量明显小于冬季;而2014年夏季流量仅为2013年冬季的5倍左右,径流强度相差不大,如前文关于最大浑浊带的描述,2014年的最大浑浊带在石仙妇附近,2013年在上游的西岙附近,两者的含沙量分布曲线在3#垂线处交汇(见图2)。最大浑浊带随径流强度增大往下游推移的特性,导致冬季3#~6#含沙量小于2014年夏季。

总体而言,含沙量随夏、冬季的变化不妨理解为随径流强弱的变化,径流量越大,高浓度泥沙被冲往下游,上游含沙量则越小。径流弱时(如柏枝岙站日均流量约 $5 \text{ m}^3/\text{s}$),全河段含沙量均较大,灵江、椒江垂线平均含沙量均可达 $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上;径流稍强时(如柏枝岙站日均流量达 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右),上游河段含沙量减小,下游河段因最大浑浊带占据反而增大;径流增幅较大(如柏枝岙站日均流量达 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上)或突发洪水时,全河段含沙量均明显减小,甚至低于 $5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2.3.2 大、中、小潮的变化特征 含沙量随潮汛强弱的变化主要由潮流动力的改变所致。在不同潮汛,不同地点处含沙量变化都比较大,特别是河口、浅滩水域有大量易于起动的泥沙。大量浮泥的存在为高浓度的起浮悬沙提供了沙源条件,水体含沙量随潮流流速的增大而迅速增大,同样也随流速的减小而急剧减小。大、中潮汛潮流动力强,流速快,较多的浮泥被卷挟悬浮,垂线平均含沙量相对较大;小潮汛的潮流动力减弱,底质难以起动,含沙量相对较小。

以2013年各潮汛垂线平均含沙量为例,灵江河道大、中、小潮汛含沙量分别为 $10.6 \sim 19.0 \text{ kg}/\text{m}^3$, $8.7 \sim 17.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $8.1 \sim 10.1 \text{ kg}/\text{m}^3$,椒江河道各潮汛含沙量分别为 $5.1 \sim 10.4 \text{ kg}/\text{m}^3$, $3.91 \sim 10.75 \text{ kg}/\text{m}^3$ 和 $1.6 \sim 9.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2.3.3 涨、落潮变化特征 椒江河口涨、落潮期的平均含沙量略有区别(见表4),在灵江1#~4#垂线大致表现为落潮略大于涨潮,表明在径流与落潮流的合力下,水流冲刷床底造成更多底沙悬浮,这从1#~4#落潮期底部平均含沙量基本大于涨潮亦可得到验证。涨潮流受到径流顶托作用,对床底的冲刷不及落潮流强,冲刷时间较短,底部平均含沙量相对较小。

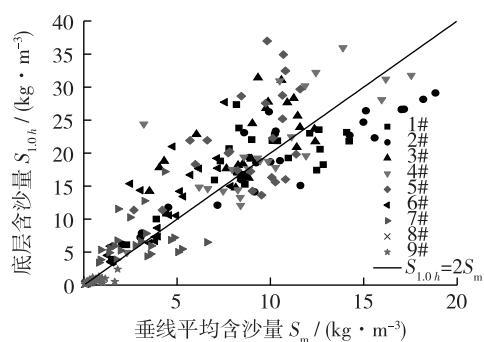


图4 各垂线底层含沙量与垂线平均含沙量关系

Fig. 4 Relationships between bottom sediment concentration and average vertical sediment concentration

表 4 涨落潮各阶段垂线平均含沙量和底部含沙量

Tab. 4 Average vertical sediment concentration and bottom sediment concentration

during flood tide, ebb tide and total tide (kg·m⁻³)

垂线号	垂线平均含沙量						底部含沙量					
	2013 年冬季			2014 年夏季			2013 年冬季			2014 年夏季		
	涨潮	落潮	全潮	涨潮	落潮	全潮	涨潮	落潮	全潮	涨潮	落潮	全潮
1#	11.01	11.24	11.13	7.20	6.57	6.88	18.75	20.41	19.58	15.15	18.34	16.75
2#	13.33	14.82	14.07	7.04	7.78	7.41	21.63	24.61	23.12	15.75	13.49	14.62
3#	9.61	9.56	9.58	7.95	8.73	8.34	18.70	19.17	18.93	24.61	24.87	24.74
4#	8.67	9.04	8.86	9.32	12.38	10.85	17.55	16.74	17.15	23.53	26.21	24.87
5#	10.09	8.58	9.33	9.17	7.40	8.29	21.77	16.50	19.13	24.91	22.02	23.47
6#	3.28	3.40	3.34	4.93	5.03	4.98	7.02	7.17	7.10	13.15	18.39	15.77
7#	3.99	3.31	3.65	2.45	2.01	2.23	6.24	5.64	5.94	7.88	7.43	7.66
8#	0.38	0.33	0.36	0.14	0.14	0.14	0.52	0.44	0.48	0.35	0.25	0.30
9#	0.70	0.61	0.66	0.65	0.61	0.63	0.78	0.58	0.68	1.01	0.43	0.72

5#~9#垂线位于椒江口及台州湾南北潮滩之间的河段,为口外拦门沙所在,底沙颗粒细而易起动,含沙量变化更多受流速影响,径流的干扰到此已逐渐减弱。该区段 5#,7#~9#涨潮流速大于落潮,涨潮流能掀起更多底沙,导致涨潮含沙量基本大于落潮。6#垂线位于口门外约 3 km 处,涨落潮期的平均含沙量也受水流输沙方向的影响。涨潮时,水流由外海向口门内输沙,悬沙浓度较低;落潮时,水流由上游往口外输沙,沙源充足而含沙量较高。故 6#垂线落潮期平均含沙量大于涨潮,更多与输沙方向有关,而流速影响次之。

2.3.4 周期性变化特征 含沙量的周期性变化特征主要体现在含沙量变化周期和底部含沙量峰值出现时刻的不同。本文通过垂线平均含沙量、水位、流速变化过程图(流速负值为涨潮流,反之为落潮流)和垂线含沙量时间序列图的对比,对各测点含沙量的周期性变化进行了具体分析。

(1)垂线平均含沙量变化周期的差异。如果将相邻两个含沙量峰值间的时段视为一个周期,椒江河口大致具有 3 种周期类型:

①含沙量变化周期大致等于潮波周期,约为 12 h,即含沙量峰值出现的周期与潮位峰值大致相同。此种情况多发生于河口上游灵江段(见图 5)、口门附近、椒江口及台州湾。灵江河段含沙量峰值和高潮位几乎同时出现,而椒江口外水域含沙量峰值多出现于低潮位。这种含沙量变化主要受潮波影响所致(因版面所限,只给出灵江段的 2#垂线为例)。

②含沙量变化周期大致为潮波周期的一半,约为 6 h,即含沙量峰值出现于潮位峰值前后。此种情况多发生于三江口(3#垂线,见图 6)与冬季的口门附近,且含沙量峰值多于涨急和落急时刻或滞后 1 h 左右出现,说明含沙量变化受流速和潮波共同影响,变化较复杂,多发生于水流运动活跃区。

③含沙量变化周期不明显,即含沙量峰值出现的规律性不强。此种情况多发生于夏季的口门(见图 7)附

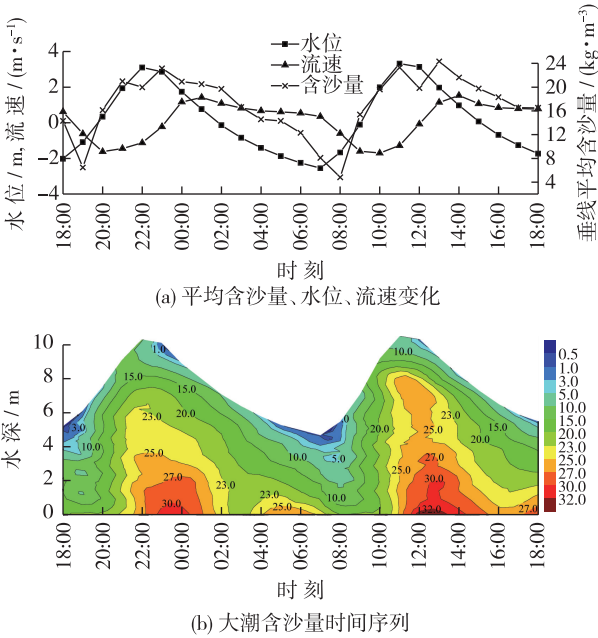


图 5 2#垂线水沙特征值时间序列(2013-12-04—05)

Fig. 5 Time series of water-sediment characteristic values along 2# test vertical line

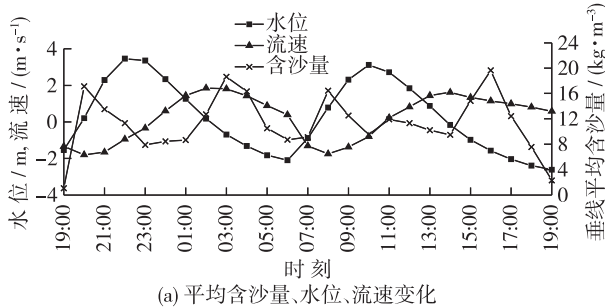
近,含沙量峰值、次峰值频繁出现,涨落憩、涨落急、高低潮位时刻均有可能产生。

(2)底部含沙量峰值出现时刻的差异。河口地区水沙特性多变,水体运动复杂,底部含沙量峰值出现的时刻受到多种因素的影响从而在微观上具有一定随机性,在宏观上大致表现为:

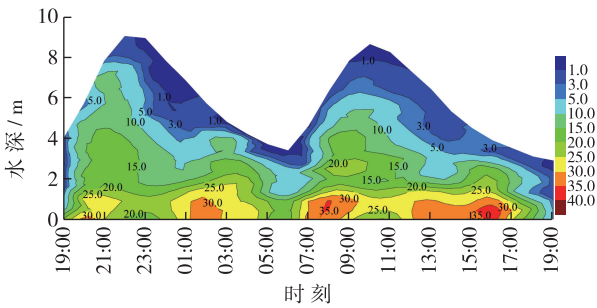
①底部含沙量峰值出现于涨憩时刻,多出现于上游灵江河段,此时底部泥沙再悬浮可能是由于涨潮流流时产生的垂向分速度与下泄径流合力造成(见图5)。

②底部含沙量峰值出现于落憩时刻,多位于上游径流量较少时的口门附近,此时底部泥沙发生再悬浮可能是由于落潮流转流时产生的垂向分速度与海域来水合力造成。

③底部含沙量峰值出现于涨落急时刻或滞后1 h左右出现,多发生于三江口及下游多处水域,如三江口,口门,椒江口等处。此时底部泥沙再悬浮可能由大流速水流对床底的剪切力造成。



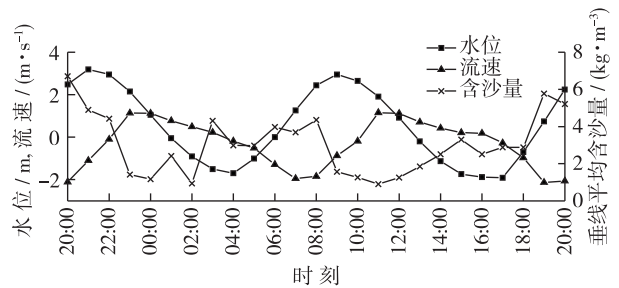
(a) 平均含沙量、水位、流速变化



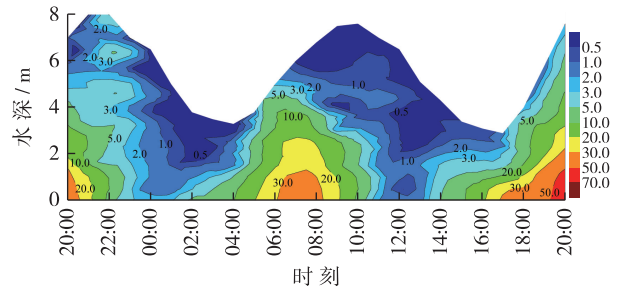
(b) 大潮含沙量时间序列

图6 3#垂线水沙特征值时间序列(2014-06-14—15)

Fig. 6 Time series of water-sediment characteristic values along 3# test vertical line



(a) 平均含沙量、水位、流速变化



(b) 大潮含沙量时间序列

图7 6#垂线水沙特征值时间序列(2005-09-03—04)

Fig. 7 Time series of water-sediment characteristic values along 6# test vertical line

2.3.5 突发洪水条件下的变化特征 椒江河口的含沙量分布受径流强度的影响较大,2014年6月22—23日洪水期间柏枝岙站日均径流量达到 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$,本文将该时段的含沙量变化特征与冬、夏季的情况进行了对比。

首先以灵江段2#垂线为例,2013年冬季大潮期间含沙量变化周期基本与潮波周期一致,峰值出现在高潮位附近,低潮位附近底部含沙量出现一个次峰值,如图5;到了2014年夏季大潮期间,径流强度增大到5倍左右(如以柏枝岙站日均径流量为径流强度参照依据),此时含沙量变化周期仍然与潮波周期基本一致,但从含沙量等值线可以看出,中上层含沙量出现一定程度减小,低潮位的底部含沙量次峰值消失,这可能与上游径流强度增加有关;之后随着洪水来临,径流强度增加了数十倍,含沙量峰值显著减小,底部最大含沙量只有 $10\text{ kg}/\text{m}^3$ 左右,垂线平均含沙量基本在 $1.5\text{ kg}/\text{m}^3$ 以下,且含沙量变化规律比较混乱,潮波在洪水压制下已难以对含沙量变化产生较大影响。由此可见,上游径流强度的改变,可对椒江河口泥沙分布特性造成较大影响。

2.4 单宽输沙量变化特征

单宽输沙量可以反映悬沙运移趋向,是流速和含沙量的综合物理量,其大小与流速、含沙量和水深成

正比。

从大、中、小潮汛的演变来看,椒江河口输沙率逐渐递减;从涨落潮流对比来看,涨潮流输沙率大于落潮流输沙率。椒江河口短期内河床冲淤变化是涨落潮流输沙不平衡的结果,输沙量的大小与潮型有关,即对不同的潮差或潮汛,潮流输沙有差异。

根据2013年12月海门5#断面的净进沙量来看,中潮最大,大潮次之,小潮最小。潮汛越大,潮差越大,潮波变形越剧烈,涨落潮流速比值也越大,从而导致全潮净进沙量增多;而当潮差特大时,涨潮输沙量增加不多,而落潮流挟沙能力的相应提高却能增大泥沙输出,导致海门断面净进沙量反而减少。

从2014年6月的输沙情况看,各垂线的输沙方向与2013年12月大致对应,表明灵江的4个测量断面均以净输沙为主。海门断面表现为净进沙,泥沙有往椒江河段内聚集的趋势。该河段径、潮流相互作用剧烈,是最大浑浊带常年分布区域。在输沙量上,由于2014年6月处于夏季,径流量明显增大,1#~4#断面的净输沙量均大于2013年12月冬季,表明在上游来沙条件不变情况下,径流量增大能显著提高灵江河床冲刷速率。

2.5 悬沙及底质粒径

各垂线悬沙中值粒径为0.005 0~0.010 2 mm,底质中值粒径为0.003 3~0.032 1 mm。灵江河段底质明显粗于椒江和口外段,椒江段及口外悬沙、底质粒径差异小,悬沙底沙交换强劲。

3 讨 论

3.1 椒江河口的区段特征

椒江河口依据径、潮流相对强弱的不同,可以划分为3个各具特点的区段。

3.1.1 第1区段——西门至石仙妃河段 该区段在冬、夏季均以径流控制为主,含沙量分布主要受上游来水来沙影响,但由于地处潮流界内,含沙量垂向分布变化亦与潮波存在一定联系。

含沙量在垂向上分布极不均匀,各层间变化梯度大,且底部含沙量特别高,常在 20 kg/m^3 以上。涨憩时,涨潮流转流时产生的垂向分速度与下泄径流合力造成底部泥沙再悬浮,底部含沙量达到峰值。受潮波影响,含沙量变化周期大致等于潮波周期,即含沙量峰、谷值分别大致出现在高、低潮位时。含沙量变化滞后于流速变化,存在1~2 h的相位差。

最大浑浊带在冬季可以上溯至该区段的西岙附近,如径流量长期偏小(柏枝岙站日均流量在 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 以下),该区段极易出现淤积,且淤积速度将大于其他区域。故未来如在庙龙港建闸,水力冲淤等增大下泄流量的措施可有效缓解闸下淤积。

3.1.2 第2区段——石仙妃至海门河段 该区段受径流与潮流交替影响,冬季受潮流控制为主,夏季则以径流为甚。含沙量分布取决于径、潮流的相对强弱,受到流速和潮波共同影响。

三江口一带水沙运动活跃,含沙量变化周期大致为潮波周期的一半,含沙量峰值多于涨急和落急时刻或滞后1 h左右出现。涨落急时刻,大流速水流对床底的剪切力造成底部泥沙再悬浮,底部含沙量达到最大。

夏季该区段径、潮流相互作用剧烈,水沙运动活跃,盐淡水高度混合,泥沙极易受絮凝作用捕集,并形成最大浑浊带,为泥沙的聚集、落淤提供了条件,导致椒江河段始终面临航道整治问题。

3.1.3 第3区段——海门至椒江口河段 该区段毗邻台州湾,主要受潮流控制。由于牛头颈河道束窄作用的影响,涨落潮流在进出口门时会出现加速,导致5#和6#垂线含沙量变化不仅受到外海潮波影响,亦受到流速变化的作用。

一般情况下,垂线平均含沙量的变化周期大致等于潮波周期。不同于第1区段,第3区段的含沙量峰值出现在低潮位时,谷值则在高潮位时出现。

特别情况下,如在2013年冬季6#垂线含沙量变化周期出现了类似于第2区段的特征,即1个涨落潮周期中出现了2次含沙量峰值,这表明在没有下泄径流阻碍的情况下,涨落潮流到达口门附近的加减速运动,增加了底部泥沙的掀起机会,导致含沙量不仅在潮波运动中出现峰值,亦在潮流涨、落急时刻达到最大。

另外在下泄径流量足够大时,如在2005年夏季,由于径、潮流相互剧烈运动,水沙运动活跃,床底受水流冲刷剪切增强,该区段的含沙量峰值、次峰值可能会频繁出现在涨落憩、涨落急、高低潮位等时刻,一个涨落潮周期中含沙量峰值出现的次数在2次以上。

3.2 含沙量时空分布对径、潮流变化的响应

径、潮流在椒江河口的含沙量时空变化上所起的作用,主要体现在对河床的冲刷和泥沙的输运上。

(1) 灵江段:在水流对河床的冲刷方面,径流对落潮流起合力辅助效应,对涨潮流则起反力阻碍作用,导致落潮期含沙量略大于涨潮期。在泥沙输运方面,径流挟带的上游来沙悬沙浓度低,粗颗粒泥沙多以推移质形式输往下游,含沙量垂向变化梯度较大。灵江段含沙量变化与潮波运动亦存在一定联系。涨潮时,泥沙多来自于口外拦门沙及外海,且本地底沙受涨潮流冲刷掀起,导致灵江段含沙量随潮位升高而逐渐增大,在高潮位时达到最大;落潮时,泥沙多来自于径流挟沙,沙源不足,导致含沙量随着潮位降低而逐渐减小,在低潮位时达到最小值。

(2) 椒江段:径、潮流的动力平衡区常出现在该河段,导致最大浑浊带核部常在石仙妇至牛头颈河段徘徊。江水浑浊,底沙浓度大是椒江河段的特点。径、潮流在该河段含沙量分布方面的作用,主要体现在对床底的冲刷上,且径流的影响已趋弱。径流对含沙量的稀释作用,在该河段表现得不明显。仅在洪水暴发期,洪水对含沙量的分布造成破坏,并形成明显的低含沙量带。

(3) 椒江口喇叭形河段:该水域床底以易起动的细颗粒泥沙为主,底部含沙量低于口内河段,在潮流冲刷扰动下,底沙极易起悬,含沙量垂向分布趋于均匀。在输沙方面,涨潮流挟带的泥沙主要来自外海,沙量不足,即使有拦门沙提供沙源补充,泥沙也会随涨潮流挟往椒江上游,导致涨潮过程中垂线平均含沙量逐渐减小,至高潮位时出现最小值;落潮流挟带的泥沙主要来自于上游高含沙量区和拦门沙,大多以细颗粒物质为主且沙量充足,落潮时垂线平均含沙量逐渐增大,至低潮位时达到最大。这种含沙量随潮位的变化情况与灵江段正好相反。

4 结 语

(1) 径、潮流在椒江河口的含沙量时空变化上所起的作用,主要体现在对河床的冲刷和对泥沙的输运上。依据径、潮流相对强弱不同,椒江河口大致可以分为3个区段。

(2) 椒江河口第1区段含沙量峰值多出现于高潮位,第2区段含沙量峰值多于涨落急时刻或滞后流速峰值1h左右出现,第3区段含沙量峰值多出现于低潮位。造成各区段差异的原因主要与水流输沙方向,水力活跃度和沙源供给有关。

(3) 径流量增大能显著提高灵江河床冲刷速率,且对含沙量起到“稀释”作用。最大浑浊带随着径流量的增大,表现出往下游推移的特性。

(4) 径流控制的河段含沙量垂向变化梯度大于潮流控制的河段。垂线平均含沙量在时间上存在两种变化周期,一种是大致等于潮波周期(12h),另一种是大致为潮波周期的一半(6h)。前者说明含沙量变化主要受潮波影响,后者则由流速和潮波的共同影响导致。

(5) 洪水将严重破坏含沙量分布的规律性,各区段含沙量显著降低,效果能持续较长时间。未来如在庙龙港建闸,采用水力冲淤等增大下泄流量的措施可有效缓解闸下淤积状况。

参 考 文 献:

- [1] 吴明阳, 许家帅, 冯玉林. 杭州湾湾口水体含沙量的时空分布[J]. 泥沙研究, 2011(1): 33-37. (WU Ming-yang, XU Jia-shuai, FENG Yu-lin. Spacial-temporal distribution of suspended sediment concentration in Hangzhou bay[J]. Journal of Sediment Research, 2011(1): 33-37. (in Chinese))
- [2] 刘杰, 程海峰, 赵德招, 等. 长江口12.5m深水航道悬沙分布特征[J]. 水运工程, 2013(11): 49-54. (LIU Jie, CHENG

- Hai-feng, ZHAO De-zhao, et al. Spatial and temporal distribution of suspended sediment concentration in the Yangtze estuary 12.5 m deepwater channel[J]. Port & Water Engineering, 2013(11): 49-54. (in Chinese))
- [3] 邢飞, 汪亚平, 高建华, 等. 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(3): 459-468. (XING Fei, WANG Ya-ping, GAO Jian-hua, et al. Seasonal distributions of the concentrations of suspended sediment along Jiangsu coastal sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2010, 41(3): 459-468. (in Chinese))
- [4] 姚章民. 珠江流域主要河流泥沙变化分析[J]. 水文, 2013, 33(4): 80-83. (YAO Zhang-min. Study on variation of main rivers sediment in Pearl River basin[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(4): 80-83. (in Chinese))
- [5] 李伯根, 谢钦春, 夏小明, 等. 椒江河口最大浑浊带悬沙粒径分布及其对潮动力的响应[J]. 泥沙研究, 1999(1): 18-26. (LI Bo-gen, XIE Qin-chun, XIA Xiao-ming, et al. Size distribution of suspended sediment in maximum turbidity zone and its response to tidal dynamics in Jiaojiang River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 1999(1): 18-26. (in Chinese))
- [6] 陈甫源, 胡金春, 白咸勇, 等. 江道采砂对椒江河口的影响分析[J]. 泥沙研究, 2008(4): 46-53. (CHEN Fu-yuan, HU Jin-chun, BAI Xian-yong, et al. Effect of evacuating sand on Jiaojiang River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2008(4): 46-53. (in Chinese))
- [7] 祝永康. 浙江椒江山溪性强潮河口的若干特征[J]. 地理研究, 1986, 5(1): 21-31. (ZHU Yong-kang. Some characteristics of the Jiaojiang mountain river estuary under strong tides in Zhejiang Province[J]. Geographical Research, 1986, 5(1): 21-31. (in Chinese))
- [8] 毕敖洪, 孙志林. 椒江河口过程初步研究[J]. 泥沙研究, 1984(3): 12-26. (BI Ao-hong, SUN Zhi-lin. A preliminary study on estuarine process of the Jiaojiang River[J]. Journal of Sediment Research, 1984(3): 12-26. (in Chinese))
- [9] 符宁平, 毕敖洪. 椒江悬沙运动若干问题的探讨[J]. 泥沙研究, 1989(3): 51-57. (FU Ning-ping, BI Ao-hong. The study on some problems of suspended sediment movement in Jiaojiang River[J]. Journal of Sediment Research, 1989(3): 51-57. (in Chinese))
- [10] 李炎, 夏小明, 董礼先. 椒江河口浮泥的分布和调整[J]. 海洋学报, 1998, 20(4): 72-82. (LI Yan, XIA Xiao-ming, DONG Li-xian. Distribution of fluid mud layer in the Jiaojiang estuary, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(4): 72-82. (in Chinese))
- [11] 郭琳, 陈植华. 椒江口—台州湾悬浮泥沙分布特征遥感研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 49-52. (GUO Lin, CHEN Zhi-hua. Remote sensing research on the distributed characteristics of suspended matter in Jiaojiang estuary and Taizhou Gulf[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 49-52. (in Chinese))
- [12] 孙平锋. 椒江口二维潮流泥沙数学模型研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. (SUN Ping-feng. Study on 2-D mathematical model of tidal flow and sediment in Jiaojiang estuary[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))
- [13] 李炎, 陈锡土, 夏小明, 等. 沉积过程分形表达及其冲淤幅度分析应用[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(1): 84-92. (LI Yan, CHEN Xi-tu, XIA Xiao-ming, et al. Fractal representation and analysis of depositional processes and sequence[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2000, 31(1): 84-92. (in Chinese))
- [14] 陈慧锋, 赵晓冬. 河口区含沙量分布特征分析[C]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2007: 498-503. (CHEN Hui-feng, ZHAO Xiao-dong. Analysis of distribution characteristics of sediment concentration in estuaries[C]//The 13th China Ocean (Shore) Engineering Conference Proceedings. Beijing: China Ocean Press, 2007: 498-503. (in Chinese))
- [15] 袁杜帆. 椒江河口流速和悬沙浓度沿垂线分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (YUAN Du-fan. Vertical distribution of current velocity and suspended sediment concentration in Jiaojiang estuary[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [16] 沈焕庭, 贺松林, 茅志昌, 等. 中国河口最大浑浊带刍议[J]. 泥沙研究, 2001(1): 23-29. (SHEN Huan-ting, HE Song-lin, MAO Zhi-chang, et al. On the turbidity maximum in the Chinese estuaries[J]. Journal of Sediment Research, 2001(1): 23-29. (in Chinese))

Influences of variations in runoff and tide on spatial and temporal distribution of sediment concentration in Jiaojiang River estuary

XIA Wei-yi, ZHAO Xiao-dong, ZHANG Xin-zhou

(*Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: According to the field observation data concerning the Jiaojiang River estuary, the characteristics of the spatial distributions of longitudinal and vertical directions and the temporal distributions of the seasons and tide are analyzed in this study. Based on the relative strength between the runoff and tidal current, the Jiaojiang River estuary is divided into three segments. The analysis results indicate that: (1) The influences on the spatial and temporal distribution of the sediment concentration is given by the runoff and tide scouring the riverbed and transporting the sediment; (2) The vertical gradient of the sediment concentration is larger in the segment controlled mainly by the runoff than that in which controlled by the tidal current. There are significant differences among the moments of the peak sediment concentration in the different segments. The change periods of the sediment concentration are about 6 hours or 12 hours. The differences between three segments are mainly caused by the main direction of sediment transportation, the hydraulic activity and the sediment sources; (3) The increasing runoff discharge can raise the riverbed erosion rate and make dilution of effects on the sediment concentration; (4) The flood can break the rules of the sediment distribution and reduce the sediment concentration severely for a long time. The analysis results would be of important scientific values revealing the sediment movement rules in the estuaries and be of realistic significance for estuary regulation and resource utilization.

Key words: Jiaojiang River estuary; runoff; tide; sediment concentration; spatial and temporal distribution