

杭州湾口南汇咀近岸水域水沙特征与通量

陈沈良

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 南汇咀近岸水域是长江口与杭州湾交汇以及近岸水沙交换的重要地带。根据杭州湾口北部南汇咀-崎岖列岛断面上6个测站1999年1~2月大、中、小潮海流与悬沙含量的现场同步观测资料,阐述了该断面上潮流和悬沙浓度的分布变化特征,并通过断面进出潮通量和悬沙通量的计算,得出该断面以出水出沙为主要特征,与余流方向一致。分析表明,长江口与杭州湾的水沙交换是复杂的,而间接交换是其主要的方式。

关键词 潮流;悬沙浓度;水沙通量;杭州湾

中图分类号:P737.14 文献标识码:A 文章编号:1000-3096(2004)03-0018-05

长江口和杭州湾地形结构、动力环境迥异,但又相依为邻,水沙交换频繁。其中,长江口是我国最大的河口,丰水多沙,年均入海径流量达 $9.04 \times 10^{11} \text{m}^3$,入海泥沙量 $4.35 \times 10^8 \text{t}$ (大通站,1951~1999年),悬沙粒径较细,属粘性细颗粒泥沙范畴。巨量径流经口门与外海水混合形成庞大的冲淡水向外扩散,并在口外流系的制约下,与邻近的杭州湾产生明显的水沙交换^[1,2]。杭州湾是一强潮河口湾,具有潮大、流急、浪高、沙多和粒径小等特点。上游钱塘江水沙有限,分别仅为长江的4.2%和1.4%,对杭州湾的影响甚微。杭州湾(主要是北部)受长江入海水沙扩散的深刻影响,长江口大量水沙沿南汇咀近岸进入杭州湾,参与杭州湾的环流并随潮运移^[3]。因此,杭州湾与长江口既相对独立,又密切相关。长江口和杭州湾泥沙交换倍受关注,特别是长江口与杭州湾交汇带的近岸地区水沙特征和交换状况是值得进一步探讨的。悬移质泥沙随潮运移是杭州湾泥沙运动的主要形式,通过杭州湾口近岸水沙通量的计算可反映长江口与杭州湾北部沿岸的水沙交换特征。

1 资料来源与分析方法

因上海国际航运中心洋山深水港区及其跨海大桥建设规划设计的需要,在崎岖列岛及其周围海域于1999年1~2月进行了大潮(2月4~5日)、中潮(1月29~30日)、小潮(1月24~25日)大规模的周日同步水文泥沙测验。作者选择南汇咀与崎岖列岛小洋山西侧的乌龟礁之间基本在同一直线(A~B)上的6个测站资料($S_1 \sim S_6$)为基础,对断面AB上各测站的潮流

和悬沙浓度进行了较详细的分析(图1)。断面AB可作为杭州湾口北部与入侵杭州湾的长江冲淡水之间的分界线,因而以此断面为界,进行水沙特征分析和通量计算。

断面的潮通量为流速与断面积的乘积,悬沙通量为潮通量再乘上含沙量。断面水沙通量具体计算,采用由点到线、由线到面的方法。首先,由六点法实测水流资料求得各站垂线平均流速、流向,并将其换算到AB线的外法线上的投影流速,然后,以测站垂线为分界线,将整个断面分成若干部分,通过地形图并结合观测时的潮位,可得到各时刻垂线间梯形面积。两测站之间断面的潮通量为断面积与两测站平均流速之积。岸侧或岛屿侧的部分平均流速采用最近测站的流速乘以流速系数(近似取0.7)。各部分流量或沙量之和即为整个断面潮通量和悬沙通量。根据通过断面的水沙通量计算结果,进一步分析讨论长江口与杭州湾之间的水沙交换方式。

收稿日期:2002-12-12 修回日期:2003-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40276027);教育部科学技术研究重点项目(01079)

作者简介:陈沈良(1964-),男,浙江海盐人,教授,博士,从事河口海岸动力沉积和动力地貌研究,电话:021-62233686, E-mail: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

2 研究结果

2.1 潮流特征

南汇咀近岸水域平均潮差 2.9 m, 属于中等强度潮汐作用的海区, 涨落潮流是该水域的主要动力因素。根据实测资料, 断面 AB 上 6 个测站的潮性系数 $F(F = (W_{01} + W_{K1}) / W_{M2})$ 值为 0.16 ~ 0.23 之间(表 1), 均小于 0.5; $G(G = (W_{M4} + W_{M56}) / W_{M2})$ 值为 0.13 ~ 0.33, 综合 F 和 G 值 2 个指标, 该水域潮流属于不正规半日浅海潮流性质。M2 分潮潮流椭圆率 K 值的垂线平均值在 $-0.04 \sim -0.14$, 表明潮流的运动属典型的往复流。研究区以半日潮流为主, 故 M2 分潮流的椭圆长轴方向代表了潮波传播方向, 其数值则是该分潮可能达到的最大值。自南向北, 流向从 $287^\circ(S_5$ 站) 逐渐转向 $277^\circ(S_1)$ 汇入杭州湾, M2 分潮流的椭圆长轴垂线平均 $115 \sim 128$ cm/s 之间。

研究区潮流作用强劲。各测站实测最大涨潮流速在 $185 \sim 231$ cm/s, 流向在 $252^\circ \sim 284^\circ$; 最大落潮流速 $202 \sim 241$ cm/s, 流向 $89^\circ \sim 119^\circ$, 最大落潮流速均大于最大涨潮流速。从涨潮流向来看, 至南汇咀附近

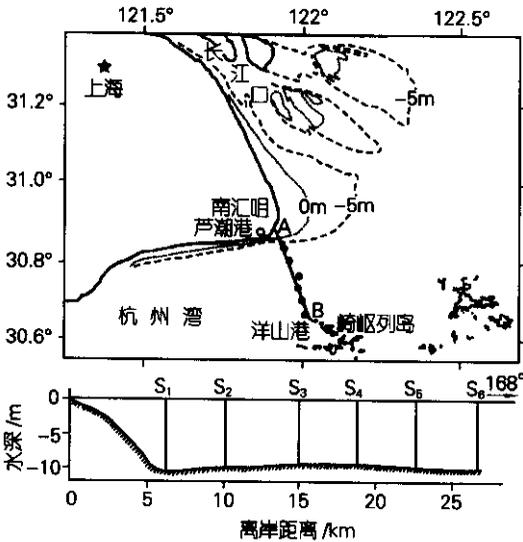


图 1 研究区域测站位置与断面示意

Fig. 1 Schematic map of the observation stations and section in the study area

表 1 南汇咀 - 崎岖列岛断面潮流特征值统计

Tab. 1 Characteristic values of tidal current along the section from Nanhui Spit to Qiqu Archipelago

站位	F	G	K	M2 分潮椭圆长轴		最大流速 (cm/s)		方向 ($^\circ$)		历时 (h)		
				W (cm/s)	α ($^\circ$)	涨潮	落潮	涨潮	落潮	涨潮	落潮	差
S_1	0.23	0.22	-0.04	118.1	277	219	207	252	96	5:25	6:25	1:00
S_2	0.22	0.17	-0.07	115.8	273	193	200	267	105	5:40	6:30	0:50
S_3	0.18	0.19	-0.12	115.3	281	186	200	294	105	5:45	6:05	0:20
S_4	0.23	0.13	-0.14	116.7	279	217	196	282	113	5:43	6:28	0:45
S_5	0.16	0.19	-0.11	128.3	287	226	212	297	107	5:55	5:55	0
S_6	0.20	0.33	-0.08	117.8	284	177	241	292	119	5:25	6:15	0:50

S_1, S_2 站已转为西南偏西向, 反映了东南向入射潮波在近岸受地形影响下而发生偏转; 落潮流向与涨潮流向并不呈 180° 变化, 总体上落潮时潮流均略向南偏转, 这明显与长江冲淡水向东南方向扩散并压迫杭州湾向东方向的落潮流速有关。

东海潮波以前进波方式传入, 向岸传播过程中受地形变浅的影响, 驻波成分逐渐增加, 涨、落潮最大流速往往出现在中潮位附近。如 S_6 站涨落急出现在高低潮位前 $3 \sim 4$ h, 而 S_1 站涨、落急出现在高、低潮位前 $2 \sim 3$ h。涨、落潮历时差异可反映潮波的变形状况。断面线 AB 的平均涨潮流历时在 $5 \sim 5.92$ h, 平均落潮流历时在 $5.92 \sim 6.5$ h, 落潮流历时略大于涨潮流历时, 其中涨、落潮流历时差最小的为 S_5 站, 涨、落潮历时相同, 最大的为 S_1 站, 相差达 1 h。

余流在一定程度上可指示水沙的运移方向。通过 3 次周日观测的平均余流状况统计(表 2), 各站平均

表 2 南汇咀 - 崎岖列岛断面平均余流统计

Tab. 2 Average residual currents along the section from Nanhui Spit to Qiqu Archipelago

站位	流速 (cm/s)			流向 ($^\circ$)		
	表层	底层	垂线	表层	底层	垂线
S_1	23	11	16	127	104	110
S_2	29	7	15	140	75	111
S_3	20	7	11	135	160	137
S_4	19	2	10	131	51	108
S_5	14	1	7	116	261	88
S_6	46	7	26	138	115	124

余流流速,表层较大,在 14~46 cm/s 之间;而底层较小,在 1~11 cm/s 之间。垂线平均余流流速 7~26 cm/s,方向在 88°~137°,基本与落潮流方向一致,即向东和东南方向,进一步反映出杭州湾口北部落潮流受长江冲淡水的影响。

2.2 悬沙分布变化特征

海水中悬沙浓度的变化是泥沙运动的重要表现形式,悬沙浓度时空上的变化反映了不同的动力作用和水深环境条件下的结果。6 个站的大、中、小潮平均悬沙浓度沿断面 AB 的分布均显示出,自北而南(即从南汇咀至崎岖列岛西侧)呈逐渐增大的趋势(图 2),平均悬沙浓度从 1.022 kg/m³ 逐渐增大到 2.299 kg/m³。研究表明^[2],杭州湾有 2 个高悬沙浓度区:其一位于杭州湾口北部,悬沙浓度为 2.7~3.2 kg/m³;其二位于杭州湾南岸庵东滩地前缘海区,悬沙浓度为 2.5~2.7 kg/m³。崎岖列岛西侧的高悬沙浓度区与上述杭州湾前一个高悬沙浓度区相吻合。

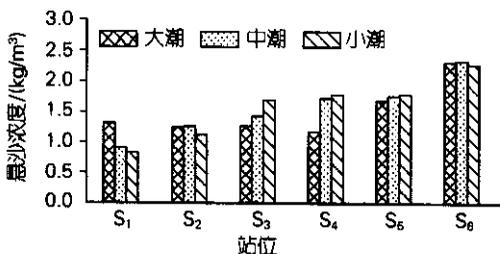


图 2 断面悬沙浓度变化趋势

Fig. 2 Changes of suspended sediment concentration along section AB

悬沙浓度的大小潮周期变化与潮流的月相周期有关。通常大潮期间流速大,悬沙浓度高,而小潮期间流速低,悬沙浓度也相应较低^[4-6]。然而,在局部特定地形和动力条件下并不一定遵循这一规律。在南汇咀与崎岖列岛之间的断面线上,除了最靠近南汇咀 S₁ 站外,其余 5 个站悬沙浓度出现“反转”现象,即悬沙浓度大潮小于中潮或小潮的现象。悬沙浓度的变化对于观测点在某个时间段,如大、中、小潮来讲,主要与底部泥沙侵蚀与落淤以及平流作用有关。Clarke 和 Elliott^[4]在平流作用较小的河口湾地区将悬沙浓度变化与底部泥沙的侵蚀与水体泥沙的落淤之差联系起来,通过确定侵蚀与沉积的临界值参数来模拟泥沙浓度的变化,得到研究地区的悬沙浓度变化与涨落潮流速有非常好的对应关系。然而,在杭州湾口由于潮差较大,潮流作用强劲,并且受到长江口-杭州湾泥沙扩散的影响,湾口内外泥沙浓度存在较明显的水平梯

度,因而泥沙浓度变化除了受到流速变化影响外,涨落潮水位变化引起的平流作用也有明显的作用。研究区悬浮于水体中的泥沙为黏性细颗粒泥沙,在强劲的潮流作用下泥沙不易沉降,悬浮于水体中的时间较长,在憩潮流速较缓时,近底层泥沙即使落于海床,但未经密实,又为接踵而来的高速水流掀起,悬浮泥沙表现为随潮往复搬运,这是该地区泥沙运动的基本形式。正是由于细颗粒泥沙运动过程的复杂性,悬沙浓度的变化也较复杂。

悬沙浓度的垂直分布通常是表层低,随着深度增加逐渐增大,底层最高。长江口悬沙浓度的垂直分布变化可归纳为直线型、斜线型、抛物线型和混合型^[6]。悬沙浓度垂直分布变化可反映垂向上水体的紊动交换强弱状况。根据研究区各站大、中、小潮垂线平均悬沙浓度分布形式(图 3),可以发现,小潮期间除

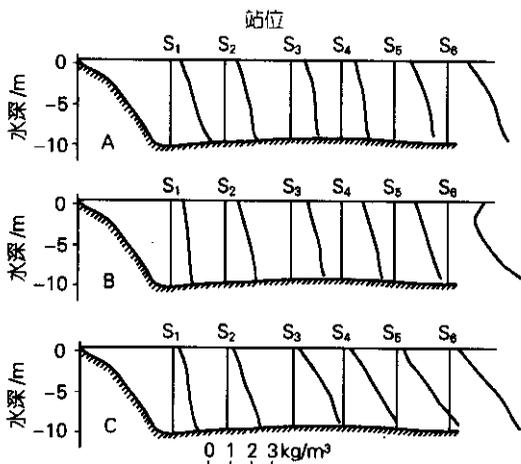


图 3 断面各站大、中、小潮垂线平均悬沙浓度

Fig. 3 Average vertical SSC during spring, middle and neap tides for each station

A: 大潮 B: 中潮 C: 小潮

了靠近南汇咀的 S₁ 站外,其余各站由表及底悬沙浓度显著增加,底层悬沙浓度大大高于表层;而大潮期间除 S₁ 和 S₆ 站由表及底悬沙浓度增加较小,底层悬沙浓度略高于表层。这说明大潮时水体垂向混合一般比较强烈,上、下层水体交换使得悬沙浓度趋于一致,而小潮时水体垂向混合较弱,上、下层水体交换减弱,致使上、下层悬沙浓度变率较大。

此外,从悬沙浓度变化过程还可以得出,潮周期中高悬沙浓度通常出现在落潮最大流速过后 1~2 h,悬沙浓度低潮时层化现象增强,垂直分布梯度增大;大潮时层化现象减弱,垂直分布梯度趋缓。

2.3 输沙率

输沙率是表征某一垂线上涨、落潮的单宽输沙状况。经统计,各站涨、落潮平均垂线输沙率如表 3 所示。根据计算结果,各测站涨、落潮输沙率从南汇咀岸外的 S₁ 站向崎岖列岛西口的 S₆ 站均表现为逐渐增大的趋势,其中 S₁ 至 S₅ 站单宽净输沙率涨、落潮接近,而 S₆ 站涨潮单宽输沙率明显较落潮输沙率大,反映了该地区水文泥沙的复杂性。涨潮单宽输沙方向偏北;落潮单宽输沙方向偏南,其中 S₃, S₄, S₅ 基本一致,在 161°~175°,而 S₁, S₂ 略向西南偏转。

表 3 南汇咀 - 崎岖列岛断面各站垂线单宽输沙率统计
Tab.3 Sediment transport rate for unit width at each station along section AB

站位	输沙率(kg/s)			方向(°)	
	涨潮	落潮	涨落潮之差	涨潮	落潮
S ₁	9.52	10.91	-1.39	5	194
S ₂	10.80	10.26	0.54	2	185
S ₃	11.24	12.26	-1.02	345	175
S ₄	12.25	12.10	0.5	351	167
S ₅	15.78	16.31	-0.53	345	161
S ₆	23.00	16.84	6.16	344	169

2.4 水沙通量与交换

断面水沙通量可反映进出断面的潮量和沙量。根据研究区设定断面的水沙通量计算结果表 4 表明,南汇咀 - 崎岖列岛之间断面大、中、小各潮型期间周日潮通量和悬沙通量随涨落潮均以落潮方向出水出沙为主,即通过该断面的净潮量和沙量均从杭州湾口北部向外输移。大、中、小潮日净流出水量在 5.1 亿 ~

表 4 南汇咀 - 崎岖列岛断面水沙通量
Tab.4 Water and sediment fluxes for the section from Nanhui Spit to Qiqu Archipelago

潮型	水沙通量	潮量(×10 ⁸ m ³)	沙量(×10 ⁴ t)
大潮	+	87.32	1 170.7
	-	-93.97	-1 397.4
	净	-6.65	-226.7
中潮	+	84.66	1 231.9
	-	-90.39	-1 304.7
	净	-5.72	-72.8
小潮	+	82.38	1 211.0
	-	-87.56	-1 302.2
	净	-5.18	-91.2

注 进杭州湾方向为“+”,出杭州湾为“-”。

6.6 亿 m³, 表现为大潮 > 中潮 > 小潮, 但各潮型期间的量值相差不大; 进出断面的日悬沙通量在 1100 万 ~ 1300 万 t 余, 显示出泥沙输移量“大进大出”的特点。日净流出量 72 万 ~ 226 万 t, 大、中、小潮均表现为落潮优势沙, 即净输沙量以出杭州湾为主, 并且大潮大于中、小潮。

2.5 长江口与杭州湾泥沙交换

根据以往研究结果, 整个杭州湾口夏季出沙, 冬季进沙^[2]。而据本次冬季大、中、小潮周日实测资料计算结果, 在杭州湾口北部南汇咀 - 崎岖列岛断面, 以出水出沙为主。该计算结果似乎与长江口水沙向杭州湾方向扩散的观点相悖。南汇咀岸外水域泥沙运移主要受涨、落潮潮流控制, 由于实测期间落潮流历时较长而且落潮流总体上也略大于涨潮流(表 1), 因此泥沙总体呈现向外净运移。实际上, 长江口冬季冲淡水出口后向南扩散, 这是一个总体的格局, 就特定时间某个断面来讲, 进出泥沙显著地受到气象状况、海洋动力及其引起的泥沙再悬浮影响, 观测期间总体天气状况良好, 中、小潮未受明显影响, 而大潮观测因受西北强冷空气的影响而延期两天, 从而影响到良好的观测天文日期和含沙量状况, 这也影响到断面的水沙通量计算结果。当然, 作者所选通量计算断面(方位 168°) 近乎南北向, 这一断面更主要的是反映杭州湾北部与外海的水沙交换状况。长江径流所携泥沙的浓度通常较口外水体低, 更低于杭州湾, 所以应该说长江冲淡水参与南汇咀近岸水域与杭州湾的水沙交换。

长江口与杭州湾的泥沙交换在杭州湾南汇咀近岸水域往往与该处潮流的往复运动和及其作用下的泥沙再悬浮紧密联系在一起。随长江冲淡水扩散出去的泥沙和底部再悬浮泥沙随涨落潮进出杭州湾。主要包括两个方面: 一方面, 长江冲淡水向外海扩散时, 其中一部分泥沙在杭州湾口外海域沉积下来, 成为长江口入海泥沙与杭州湾间接交换的重要沙源, 这部分沉积下来的泥沙在强劲水动力作用下再悬浮并随潮进出杭州湾, 在此我们称之为再悬浮泥沙间接交换; 另一方面, 长江冲淡水在落潮时段向外运动过程中, 一部分高含沙水体并不扩散很远, 而这部分水体在下一个涨潮时段又不可能原路返回, 其中就会有一小部分随涨潮流进入杭州湾, 这部分泥沙可称为悬浮泥沙间接交换。这种泥沙间接交换成为长江口与杭州湾泥沙交换的主要方式。

3 结语

杭州湾口南汇咀近岸水域的潮流为受浅水地形

影响的浅海半日潮流性质,潮流往复性强,流速较大,实测最大流速 2.3~2.4 m/s,落潮历时略大于涨潮历时。余流方向以东偏南方向为主,与落潮流向基本一致。悬沙浓度从南汇咀至崎岖列岛呈递增趋势,潮周期中高悬沙浓度主要出现在涨潮后期接近涨憩时和落潮后期接近落憩时,滞后于涨潮最大流速和落潮最大流速。断面水沙通量以向外输移为主,与余流向东和东南方向为主是一致的。本次测量分析结果只是反映观测期间设定断面的水沙进出状况,长期的或不同季节的观测将有助于进一步阐明长江口与杭州湾水沙交换在南汇咀近岸水域的表现。实际上,长江口与杭州湾的水沙交换是复杂的,可能存在着不同时空尺度的交换型式,而泥沙的间接交换是长江口与杭州湾之间泥沙交换的主要方式。

参考文献

[1] Su J L, Wang K S. Changjiang River plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay[J]. *Continental Shelf*

Research, 1989, 9(1): 99-111.

- [2] 曹沛奎,谷国传,董永发,等. 杭州湾泥沙运移的基本特征[A]. 陈吉余,王宝灿,虞志英,等. 中国海岸发育过程和演变规律[C]. 上海:上海科学技术出版社, 1989. 108-119.
- [3] 陈吉余,陈沈良,丁平兴,等. 长江口南汇水下沙咀的泥沙输移途径[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 166-172.
- [4] Clarke S, Elliott A J. Modeling suspended sediment concentrations in the Firth of Forth[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47: 235-250.
- [5] Chen S L. Seasonal, Neap-spring variation of sediment concentration in the joint area between Yangtze Estuary and Hangzhou Bay[J]. *Science in China (Series B)*, 2001, 44(supp.): 57-62.
- [6] 谷国传. 长江口外水域悬沙分布特征[J]. 东海海洋, 1986, 4(1): 15-24.

Hydrological and sediment features and fluxes in Nanhui nearshore waters, Hangzhou Bay

CHEN Shen-liang

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

Received: Dec., 12, 2002

Key words: tidal current; suspended sediment concentration; sediment flux; Hangzhou Bay

Abstract: The nearshore waters of Nanhui Spit, located in the transitional zone between the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay, is an important area of water for sediment exchanges. From the measured data for flow and suspended sediment concentration (SSC) in the section from Nanhui Spit to Qiqu Archipelago, the features of tidal current and SSC distributions were analysed. The calculation results of flow and sediment fluxes during neap-spring tidal cycle indicated that the net flow and sediment fluxes discharged eastward, approximately consistent with the direction of residual current. The sediment exchange between the Changjiang Estuary and Hangzhou Bay shows an indirect exchange pattern, that is the Changjiang plume and its sediments pass in and out of Hangzhou Bay with flood and ebb tides.

(本文编辑:刘珊珊)