

# 洋山港海域水体和悬沙输运机制研究

英晓明, 丁平兴

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 对洋山港海域水体和悬沙长期输运速度分离, 并进行机制分解, 分析各种物理过程对水体和悬沙长期输运速度所起的作用。结果表明, 水体和悬沙输运存在明显差异, 直接描述悬沙净输运更准确合理; 欧拉余流在水体长期输运中占主导地位, 平流输运和潮泵输运是洋山港海域悬沙输运的主要动力因素, 由于潮动力混合较强, 垂向输运作用很小。

**关键词:** 水沙长期输运速度; 机制; 洋山港海域

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2011)02-0135-06

## Research on transport mechanism of water and suspended sediment in the Yangshan Harbor waters

YING Xiao-ming, DING Ping-xing

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

**Abstract:** The long-term transport velocity of water and suspended sediment are separated, mechanism decomposition is made on them, and effects of all kinds of physical process by observed data is analyzed in Yangshan Harbor waters in this paper. The results show that, the obvious difference exists between water and suspended sediment residual transport, and it is more accurate and reasonable to calculate residual sediment transport directly. Euler transport plays predominant role in water long-term transport, and horizontal advection and tidal pumping take primary role in suspended sediment transport in the study area, while the contribution of vertical transport is small due to strong mixed tide.

**Keywords:** Long-term transport velocity of water and suspended sediment; mechanism; Yangshan Harbor Waters

## 1 引言

在河口海岸地区, 海流作用下的悬沙输运引起地形冲淤变化, 进而影响岸滩演变、航道疏浚及水下岸坡的稳定性, 悬沙的长期输运成为河口海岸研究的核心问题之一<sup>[1,2]</sup>。潮流及其余流对河口海岸地区悬沙的输运起着非常重要的作用, 由于潮流涨落潮不对称输沙, 因而余流在某种程度上可以指示悬沙的净输运。然而, 余流并不能完全代表悬沙净输运。实际上, 河口存在潮周期平均物质输运与潮周期平均水体输运方向不同的现象<sup>[3]</sup>。在悬沙空间分布较均匀的地方, 悬沙和水体的长期(一个或若干个潮周期)输运特征基本一致; 在悬沙空间分布差异大的区域, 悬沙和水体长期输运存在明显差异<sup>[4]</sup>。通

量分析是研究物质长期输运较好的方法<sup>[5,6]</sup>。悬沙长期输运速度比水体长期输运速度描述悬沙输运更准确合理<sup>[4]</sup>。朱首贤等<sup>[3]</sup>从理论上分析了河口地区存在物质和水体长期输运分离的自然条件。通过 ADCP 走航观测研究, 洋山港地区断面存在周期内净潮通量与净悬沙通量相反的现象<sup>[7]</sup>, 说明存在水体和悬沙输运分离现象。

李玉中等<sup>[8]</sup>通过 1996 年实测资料, 证实了洋山港海域下层水体存在余流分离和汇聚现象。然而, 关于洋山港海域悬沙长期输运的研究尚未见报道。洋山港海域悬沙长期输运有何特征? 水体长期输运(余流)能否代表悬沙长期输运? 本文将运用通量分析方法揭示洋山港海域水体和悬沙长期输运的特征, 并对机理进行研究。

收稿日期: 2010-02-23; 收修改稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家海洋局公益性项目(200905001-9)。

作者简介: 英晓明(1979—), 男, 博士, 主要从事河口海岸动力学研究。电子邮箱: xmying2005@yahoo.com.cn。



$$\begin{aligned}
 v_c = & \frac{\int_0^T \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} hvcd\sigma dt}{\int_0^T \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} hcd\sigma dt} = \frac{\langle H \rangle \langle \bar{v} \rangle \langle \bar{c} \rangle}{\langle Hc \rangle} + \\
 & \frac{\langle H_i \bar{v}_i \rangle \langle \bar{c} \rangle}{\langle Hc \rangle} + \frac{\langle H_i \bar{c}_i \rangle \langle \bar{v} \rangle}{\langle Hc \rangle} + \frac{\langle H_i \bar{v}_i \bar{c}_i \rangle}{\langle Hc \rangle} + \\
 & \frac{\langle H \rangle \langle \bar{v}_i \bar{c}_i \rangle}{\langle Hc \rangle} + \frac{\langle H \rangle \langle \bar{v}'c' \rangle}{\langle Hc \rangle} + \frac{\langle H_i \bar{v}'c' \rangle}{\langle Hc \rangle} + \\
 & \frac{\langle H_i \bar{v}'c'_i \rangle}{\langle Hc \rangle} \quad T_8
 \end{aligned} \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 中,  $u_c$ ,  $v_c$  分别是  $i$ ,  $j$  方向的二维悬沙输运速度, 其他符号意义同前。  $T_1+T_2$  为平流输运项,  $T_1$  为欧拉余流输运项,  $T_2$  为斯托克斯漂流输移项;  $T_3+T_4+T_5$  是“潮泵效应”输运项,  $\bar{u}_i$ 、 $\bar{v}_i$ 、 $\bar{c}_i$  和  $H_i$  的潮周期平均值为 0, 但三者的相关则产生了泥沙的净输移, 即为通常所说的“潮泵作用”,  $T_3$  是悬沙与水深变化相关项,  $T_4$  是悬沙与水深、流速的潮脉动相关项,  $T_5$  是悬沙与潮流场变化的相关项;  $T_6+T_7+T_8$  是垂向潮振荡切变输运项,  $T_6+T_7$  是时均量与潮振荡切变引起的剪切扩散,  $T_8$  为垂向潮振荡切变作用。

## 4 结果和讨论

### 4.1 水体和悬沙输运速度特征及比较

截止 2006 年 5 月, 港区 3 个堵汉工程均已经竣工, 测量站位分布较广, 具有一定的代表性, 因此选择此次资料进行分析。二维悬沙和水体长期输运速度如图 2(a) 所示, 垂向给出表层、中层和底层悬沙和水体长期输运速度, 分别如图 2(b-d) 所示。

港区北侧 N1 测站二维悬沙和水体长期输运方向基本一致, 前者是后者量值的 2.1 倍; 中层和底层悬沙和水体长期输运速度方向基本一致, 但表层悬沙和水体长期输运速度方向相差  $39^\circ$ , 且表层量值上前者是后者的 3.5 倍, 表层和底层悬沙输运方向相差  $114^\circ$ , 表层和底层水体输运方向相差  $134^\circ$ 。N2 测站二维悬沙和水体长期输运方向相差  $69^\circ$ , 底层悬沙和水体长期输运速度方向基本一致, 主要是表层和中层两者速度方向差异显著, 表层和底层悬沙长期输运速度方向相差  $119^\circ$ , 表层和底层水体输运速度方向相差  $95^\circ$ 。N3 测站二维悬沙和水体输运速度方向相差  $146^\circ$ , 量值上后者是前者的 1.7 倍, 垂向上悬沙和水体长期输运速度方向均差异显著, 但垂向上

悬沙输运速度方向相差不大, 量值上表层是底层的 5.7 倍。

港区西侧 W1 测站二维悬沙和水体长期输运速度大小和方向相差不大, 垂向上亦如此, 表层悬沙输运速度方向和底层相差  $63^\circ$ 。W2 测站二维悬沙和水体长期输运方向基本一致, 前者是后者量值的 2.2 倍; 垂向上悬沙和水体长期输运方向相差不大, 表层和底层悬沙输运速度方向相差  $96^\circ$ , 量值上前者是后者的 5.4 倍, 表层和底层水体输运速度方向相差  $138^\circ$ 。W3 测站二维悬沙和水体长期输运速度相差不大, 垂向上底层悬沙和水体长期输运速度方向相差  $101^\circ$ , 表层悬沙输运速度方向和底层相差  $69^\circ$ , 量值上前者是后者的 3 倍, 表层和底层水体输运速度方向相差  $135^\circ$ 。

港区南侧 S1 测站二维悬沙和水体长期输运速度差异不大, 垂向上亦如此, 垂向上表层和底层悬沙输运方向相差不大, 量值上前者是后者的 1.8 倍。

港区东侧 P4 测站二维悬沙和水体长期输运方向相差很小, 量值上前者是后者的 2.5 倍, 垂向上表层和中层悬沙和水体长期输运方向相差很小, 但底层悬沙和水体长期输运方向相差  $159^\circ$ , 量值上后者是前者的 1.5 倍, 表层悬沙输运速度量值是底层的 7.3 倍, 表层水体和中下层水体输运方向相反。E1 测站二维悬沙和水体长期输运速度相差不大, 垂向上亦如此, 表层悬沙输运速度量值是底层的 1.9 倍。E2 测站二维悬沙和水体长期输运速度相差不大, 表层和底层悬沙输运方向相差  $73^\circ$ , 表层和底层水体输运方向相差  $39^\circ$ 。

港区颍珠山汉道 K1 测站二维悬沙和水体输运方向相差  $55^\circ$ , 量值上后者是前者的 1.6 倍, 垂向上底层悬沙和输运速度基本一致, 但表层和中层悬沙和输运速度方向差异显著, 方向差异与两者垂向平均差异相差不大, 底层悬沙输运速度量值是表层的 1.9 倍。K2 测站二维悬沙和输运方向相差不大, 垂向上亦如此, 表层和底层悬沙输运速度方向相差  $64^\circ$ , 量值上相差不大。

港区双连山汉道 SC1 测站二维悬沙和输运方向基本一致, 垂向上亦如此, 底层悬沙输运速度量值是水体的 2.6 倍。SC2 测站二维悬沙和输运速度相差很小, 垂向上亦如此, 表层悬沙输运速度量值是底层的 3.6 倍。港区大山塘汉道 SC3 测站二维悬沙和输运方向相差  $54^\circ$ , 量值相近, 垂向上两者方向差异与垂向平均差异值相差不大。

港区内部 K4 测站二维悬沙和水体输运方向相差 59°，量值上前者是后者的 1.8 倍，垂向上两者差异变化不大。P1 测站二维悬沙和水体输运速度相差 不大，垂向上两者差异变化不大，仅表层两者方向相差稍大为 40°。P2 测站二维悬沙和水体输运速度量值相近，方向相差 25°，垂向上两者差异由表至底减小，表层两者方向相差为 39°，底层两者方向基本一致。

以上分析说明，悬沙和水体长期输运速度大小和方向存在明显差异，在描述洋山港海域悬沙长期输运时，悬沙长期输运速度比水体长期输运速度更准确合理。

在洋山港北侧 N1 和 N2 测站、西侧 W2 和 W3 测站和东侧 P4 测站，表层和底层水体输运方向相反或差异较大。而悬沙输运不仅在 N1、N2、W2、W3 测站，而且在 W1、K1、K2、P2 和 E2 测站，表层和底层输运方向相反或差异较大，但 P4 测站表层和底层悬沙输运方向确相差很小。在东侧 E1 和 E2 测站水体输运方向相反。

在中、南部 P1、P2 和 W1 测站形成悬沙输运方向辐聚区，此区域位于 2006 年 4 月到 2007 年 4 月形成的港区淤积带（图 3），港区南侧落潮流和落潮沙占优，而中轴涨潮流和涨潮沙占优，两股流向切变区流速必然减少，加之悬沙汇聚是造成港区淤积的原因之一。

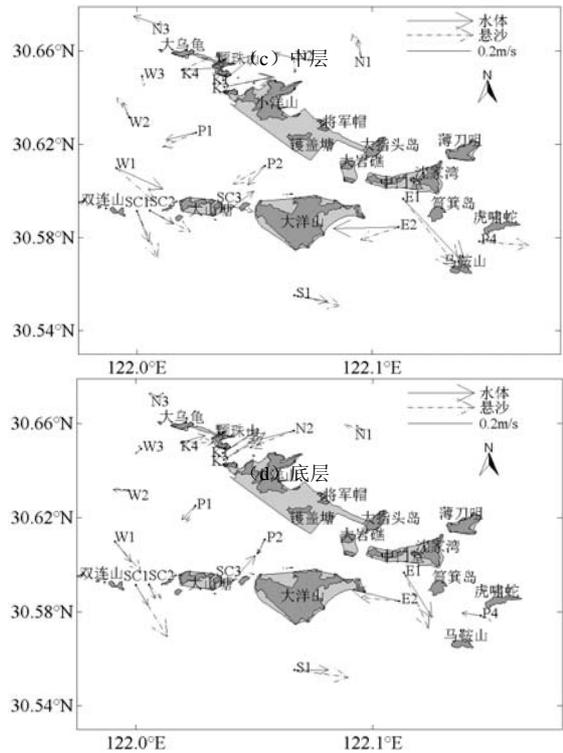


图 2 悬沙和水体长期输运速度

Fig. 2 Water and suspended sediment long-term transport velocity

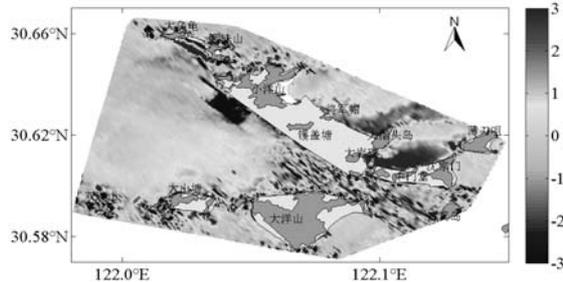
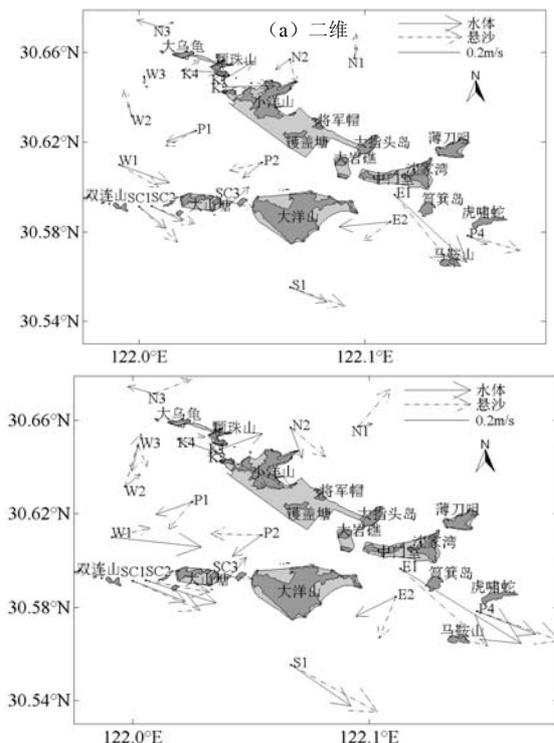


图 3 2006 年-2007 年地形冲淤分布（据三航院资料绘制）

Fig. 3 Deposition/erosion distribution from 2006 to 2007



#### 4.2 二维悬沙和水体长期输运速度机制分析

二维水体长期输运速度分量列在表 1 中。由表 1 可以分析各物理过程对水体输运速度的贡献。在大部分测站（W1、K4、K1、K2、P2、E1、E2、P4、N1、N3、SC1、SC2 和 S1），欧拉余流在水体长期输运中占主导地位；在 W3 测站欧拉余流量值是斯托克斯漂移速度 1.3 倍，两者方向相反；在 W2 和 SC3 测站斯托克斯漂移速度大于欧拉余流，两者方向相反；在 P1 测站欧拉余流和斯托克斯漂移速度量值相近，方向相差 92°。洋山港海域相当多测站余流超过 0.1 m/s，该区域属于余流较强区域。由于岛屿附近地形集聚效应，因此 W1、E1 和 E2 等测站余流值较大。

表 1 二维水体长期输运速度及其分解项 (量值: cm/s 方向: °)

Tab. 1 2-D long-term transport velocity of water and its components (magnitude: cm/s direction: °)

测站	W3	W2	W1	K4	K1	K2	P1	P2	E1	E2	P4	N3	N2	N1	SC1	SC2	SC3	S1	
U <sub>i</sub>	量值	2.3	3.9	16.8	11.5	11.8	16.3	9.8	7.8	31.4	16.3	6.8	7.6	5.6	3.7	11.0	10.9	7.3	12.6
	方向	181	344	110	92	59	89	250	231	133	264	114	286	234	13	129	116	50	112
U <sub>E</sub>	量值	6.3	4.4	20.9	16.0	12.3	17.3	7.5	7.9	32.6	16.2	7.5	6.5	5.3	3.4	10.9	14.7	6.0	14.4
	方向	136	82	114	101	61	88	208	232	131	264	114	284	216	27	132	118	109	111
U <sub>s</sub>	量值	5.0	6.3	4.3	4.8	0.6	0.9	6.6	0.3	1.7	0.2	0.6	1.1	1.7	0.9	0.5	3.8	6.6	1.8
	方向	297	300	312	301	280	258	300	118	271	318	294	299	307	307	50	303	360	287

表 2 二维悬沙长期输运速度及其分解项 (量值: cm/s 方向: °)

Tab. 2 2-D long-term suspended sediment transport velocity and its components (magnitude: cm/s direction: °)

测站	W3	W2	W1	K4	K1	K2	P1	P2	E1	E2	P4	N3	N2	N1	SC1	SC2	SC3	S1	
U <sub>c</sub>	量值	3.8	8.7	14.3	6.3	7.2	14.6	10.6	10.6	30.2	10.4	17.2	4.6	7.9	7.8	16.5	14.9	7.2	18.2
	方向	165	343	120	59	4	93	243	256	141	234	106	72	165	4	133	112	104	109
T <sub>1</sub>	量值	6.3	4.5	20.8	16.1	12.2	17.5	7.5	8	32.8	16.4	7.4	6.6	5.4	3.5	10.7	14.8	6	14.6
	方向	136	82	114	101	61	88	208	232	131	264	114	284	216	27	132	118	109	111
T <sub>2</sub>	量值	5	6.4	4.3	4.9	0.6	0.9	6.7	0.3	1.7	0.1	0.6	1.1	1.8	0.9	0.5	3.8	6.6	1.8
	方向	297	300	312	301	280	258	300	118	271	318	294	299	307	307	49	303	360	287
T <sub>3</sub>	量值	0	0.1	0.1	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0	0.1	0	0.2	0.1	0	0.1
	方向	315	263	113	279	56	267	30	52	313	82	0	104	37	207	133	293	0	293
T <sub>4</sub>	量值	1.4	0.9	1.7	1.2	0.4	0.2	1.8	0.2	0.2	0.2	0.9	0.4	0.4	0.6	0.3	1.7	0.5	
	方向	291	292	302	304	281	249	301	297	260	281	288	283	307	298	125	187	176	286
T <sub>5</sub>	量值	2.7	3.8	3.6	4.6	9.6	1.1	2.9	5	4.1	8.9	10.5	11.9	7.9	4.3	5	3.9	4.7	5.5
	方向	128	344	215	298	275	239	162	291	244	117	100	95	123	351	142	106	165	102
T <sub>6</sub>	量值	0.1	0.6	0.7	1.5	0.4	0.7	0.6	0.8	0.3	0.6	0.3	0.7	0.3	0.7	0.1	0.5	0.1	0.7
	方向	166	39	3	308	57	250	52	48	77	185	157	87	160	105	203	16	171	115
T <sub>7</sub>	量值	0.1	0	0	0.1	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0
	方向	127	90	0	114	0	0	129	225	162	0	0	34	108	81	90	124	153	270
T <sub>8</sub>	量值	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0
	方向	124	117	270	112	0	198	225	0	153	0	0	342	56	68	45	135	135	315

二维悬沙长期输运速度分量列在表 2 中。从表 2 中可以看出,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_5$  占主要地位,  $T_4$  和  $T_6$  仅在部分测站作用相对重要,  $T_3$  的作用很小,  $T_7$  和  $T_8$  几乎不起作用。在大部分测站(与水体输运一样),  $T_1$  量值最大, 说明洋山海域欧拉输运是主导因素。在 W3 测站欧拉输运和斯托克斯漂移输运方向相反, 量值前者是后者的 1.3 倍。在 W2 测站欧拉输运和斯托克斯漂移输运方向相反, 量值后者是前者的 1.4 倍。在 P1 测站欧拉输运和斯托克斯漂移输运方向相差  $92^\circ$ , 两者量值相差不大。在 SC3 测站欧拉输运和斯托克斯漂移输运方向相反, 两者量值相差不大。

$T_5$  在有些测站(W1、K4、K2、SC2)与  $T_2$  量值相近, 在很多测站(K1、P1、P2、E1、E2、P4、N3、N2、N1、SC1 和 S1)  $T_5$  比  $T_2$  量值都要大的多, 说明洋山海域潮泵输运作用地位仅次于欧拉输运。 $T_4$  仅在 W3、W1、K4、P1 和 SC3 测站相对重要,  $T_6$  在 K4 测站相对重要。

为直观了解悬沙在不同区域的输运机制, 将平流输运项( $T_1+T_2$ )、潮泵输运项( $T_3+T_4+T_5$ )和垂向输运项( $T_6+T_7+T_8$ )与悬沙长期输运速度( $U_c$ )绘制在一起, 如图 4 所示。平流输运项是洋山港海域泥沙输运的主导因素, 潮泵输运所起作用居于第二位, 垂向剪切扩散和切变作用不大。由于洋山港海域是强潮混合区, 垂向混合作用大, 因此垂向作用不大。

## 5 结 语

本文对洋山港海域悬沙和水体长期输运分离计算, 并对水体和悬沙输运速度进行机制分解。研究结果表明, 在洋山港海域悬沙输运速度比水体输运速度描述悬沙输运更准确合理。

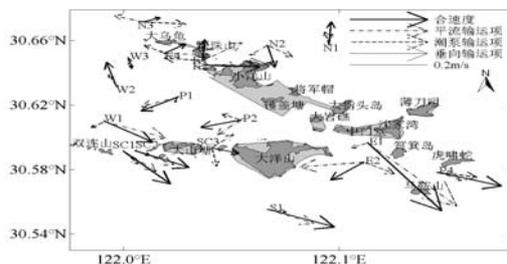


图 4 悬沙长期输运速度及三个合成分量

Fig. 4 Long-term transport velocity of suspended sediment and its components

机制分解结果表明, 欧拉余流在水体长期输运中占主导地位, 平流输运和潮泵作用是洋山海域悬沙输运的主要动力因素, 由于潮动力混合较强, 垂向输运作用很小。悬沙和水体的分层输运分析表明, 洋山海域悬沙和水体输运垂向存在差异, 例如, 在 N2 测站表层水沙和底层水沙输运方向均相反, 在 P4 测站表层水体和底层水体输运方向相反, 而悬沙输运方向相同。港区中南部悬沙净输运指向大山塘北侧, 可能是该地区淤积的原因之一。由于测站偏少, 利用实测资料得到的悬沙长期输运尚不能明确说明港区内部地形冲淤演变机理, 通过补充观测或者利用泥沙数值模拟研究港区悬沙长期输运变化, 将会更好的分析地形冲淤演变机理。

## 参考文献:

- [1] Rose P C, Thorne P D. Measurements of suspended sediment transport parameters in a tidal estuary [J]. Cont Shelf Resh, 2001, (21): 1 551-1 575.
- [2] 陈建勇, 戴志军, 陈吉余, 等. 杭州湾北岸弧形岸段悬沙净输移分析—以龙泉—南竹港岸段为例 [J]. 泥沙研究, 2009, 2: 53-59.
- [3] 朱首贤, 丁平兴, 沙文钰, 等. 河口物质和水体长期输运分离的理论分析和观测验证 I 物质和水体长期输运分离的理论分析 [J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 24-29.
- [4] 张文静, 朱首贤, 沙文钰. 二维悬沙长期输运速度的定义和机理分析 [J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 56-61.
- [5] Dyer K R. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics [M]. A Wiley Interscience Publication John Wiley and Sons, 1985:253-254.
- [6] 朱首贤. 流、浪模式和物质长期输运分离研究 [D]. 华东师范大学博士学位论文, 2005.
- [7] 虞志英, 张志林. 上海市国际航运中心洋山深水港区西港区海床冲淤趋势和增深研究 [R]. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局, 2009, 3.
- [8] 李玉中, 陈沈良. 洋山港海域余流分离和会聚现象研究 [J]. 水利学报, 2003, 5: 24-34.
- [9] 俞航, 陈沈良, 谷国传. 崎岖列岛海区水沙特征及近期冲淤演变 [J]. 海岸工程, 2008, 27(1): 10-20.
- [10] 刘蔡胤. 上海洋山港港区海域潮流泥沙数值模拟及水下地形变化特征分析 [D]. 大连理工大学硕士学位论文, 2008.
- [11] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Observed fluxes of water, salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. Estuar Coast Shelf Sci, 1985, 20(2): 147-167.
- [12] 沈健, 沈焕庭, 潘定安, 等. 长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析 [J]. 地理学报, 1995, 50(5): 411-420.