



洋山港悬沙输移对冲淤环境的影响分析*

张志林¹, 邓乾焕², 朱巧云¹, 钱峰¹

(1. 长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局, 上海 200136;

2. 长江航务管理局 长江宜宾航道局, 四川 宜宾 644002)

摘要: 洋山港区通过堵汉吹填兴建了北港区, 边界条件的改变对海区流场结构以及泥沙运动产生影响, 进而影响到地形的冲淤, 通过应用“ADCP测沙”技术, 对洋山港区悬浮泥沙的运动有了总体认识。分析成果表明: 洋山港区含沙量分布涨落潮略有差异; 主通道涨潮挟沙能力大于落潮, 南北汉道的落潮挟沙能力大于涨潮; 洋山港区输沙量大进大出, 大潮微冲, 中潮冲淤基本平衡, 小潮淤积, 相对而言, 涨潮动力对洋山港区的地形演变作用较大, 即涨潮从东部带来的泥沙, 部分淤积于港区的西南部, 其中又以小潮对淤积的贡献为大; 南北岛链间现存的3个汉道分泄主通道下泄泥沙、减轻港区淤积的作用不可忽视。

关键词: 洋山深水港; 含沙量; 单宽输沙量; 区域输沙; 地形演变

中图分类号: TV 142.3; TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2011)04-0067-10

Impact analysis of suspended sediment transport on the environment of erosion and deposition in Yangshan port

ZHANG Zhi-lin¹, DEN Qian-huan², ZHU Qiao-yun¹, QIAN Feng¹

(1. The Survey Bureau of the Hydrology and Water Resources of Changjiang Estuary, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China; 2. Yibin Waterway Bureau, Changjiang River Administration of Navigational Affairs, Changjiang, Yibin 430010, China)

Abstract: Yangshan deepwater port was formed by blocking up the branched channels and connecting the inlets. The change in boundary conditions influenced the flow structure and sediment movement, which in turn affected the topographic evolution. Applying the “measuring suspended sediment concentration based on the ADCP backscatter” technology, this article presents the overall character of the suspended sediment movement. Analysis results show that the sediment concentration distribution of Yangshan port has a slight difference between the flood and ebb. The sediment carrying capacity of flood in the main channel is greater than that of the ebb. However, it has a contrary character in the north and south inlets. Huge sediment runoff goes through the Yangshan port. The underwater topography scours slightly in the spring tide, and keeps the balance between erosion and deposition in the moderate tide, and deposits in the neap tide. In relative terms, the power of the flood plays a leading role in the underwater topographic evolution of the Yangshan port. In other words, the sediment carried by the flood from the eastern will deposit in the southwest area of the port, and the neap tide contributes the main effect. Meanwhile, the three inlets of the north and south island chain play an important role in separating sediment from the main channel, and reducing the deposition.

Key words: Yangshan deep-water port; suspended sediment concentration; unit sediment runoff; regional sediment transport; topographic evolution

收稿日期: 2010-10-20

*基金项目: 上海市科研计划项目课题 (09231200504)

作者简介: 张志林 (1968—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文测绘、河口海岸及自然地理研究。

海岸带水域在自然条件下，水动力与泥沙运动以一种动态平衡的方式共存，大型工程的建设可能会暂时改变这种平衡，从而对局部水流结构、泥沙运动、水下地形产生影响。

洋山港是距离上海最近的具备 15 m 以上天然水深的港址，具有多汉道、强潮流、高含沙的特点，为保持港区水流平顺，保证船舶靠离及航行的安全，形成足够的港区用地，进行了大规模的潮汐汉道封堵、炸礁、吹填造陆。建港前后，多家科研机构对洋山所在崎岖列岛海域的水文泥沙条件、沉积环境、地形演变进行了研究^[1-11]，并利用多种数值模拟和物理模型对港区的建设方案以及产生的影响进行了预估。部分研究成果认为，工程后洋山港局部水沙动力将有所改变，港区和航道将出现泥沙回淤，并认为将西口门缩窄为 3.5 km 左右的单通道方案为最优建设方案^[5,11]。

鉴于崎岖列岛岛群汉道之间复杂的水沙运动关系，汉道封堵后将改变原水沙动态平衡关系，新的边界条件将对海区地形冲淤产生影响^[12-13]。洋山港建港过程中，大量应用高新监测技术来跟踪监测岛链间水文、地形的适应性变化，自 2002 年始，共进行了 24 期多断面的 ADCP 准同步测验，对大小洋山岛链内的流场结构的动态调整，取得丰富的资料，有了科学的认识。然而限于技术手

段，在宽阔的西口门和窄深东口门，以传统方法同步开展悬沙输移监测无法实现。为研究利用 ADCP 输出数据中的声学信息，计算实时输沙率在洋山港区应用的可行性，2008 年 5 月先期于颗珠山汉道开展了“ADCD 测沙”技术试验性研究，结论认为：“只要标定得当，利用 ADCP 的声反向散射信号，在洋山港区得到的垂线平均含沙量和断面输沙率是可信的”，基于此，2009 年 4 月，应用“ADCP 测沙”技术于洋山港区进行了全范围的断面输沙率同步测验，对港区悬浮泥沙的时空分布以及输移对冲淤环境的影响进行分析。

1 测验布置

文中所述“洋山港区”，指大小洋山岛链之间 41.5 km² 的海域，非已建成的北岛链局部建成的港区。

1.1 测验断面布置

依据洋山港区岛链地形，于北岛链颗珠山汉道布置 ADCP-9 断面，南岛链双连山和大山塘、大山塘和大洋山之间分别布置 ADCP-22、ADCP-23 断面，港区通道从西向东分别布置 ADCP-13、-12、-14、-16 断面，蒋公柱前沿布置 ADCP-37 断面，断面特征见表 1，所处位置见图 1。

表 1 测验断面特征

断面名称	宽度/m	平均水深/m	最深点/m	位置
ADCP-9	632	26.0	41.3	颗珠山汉道
ADCP-22	1 560	21.2	36.8	双连山—大山塘之间
ADCP-23	1 616	7.8	15.0	大山塘—大洋山之间
ADCP-37	1 542	9.3	15.5	蒋公柱前沿
ADCP-13	7 689	10.8	35.8	大乌龟—双连山之间，西口门
ADCP-12	4 530	13.0	23.3	小洋山—大山塘之间
ADCP-14	2 816	23.3	30.4	镬盖塘—大洋山西之间
ADCP-16	995	49.1	81.2	小洋山—大洋山东之间，东口门

注：以小洋山理论深度 0 m 计算断面宽度和平均水深。

1.2 测验时间

测验时间和潮汐特性见表 2。

其中中潮实际从 2009-04-14T8:00 开始，当天夜里海面大雾弥漫，测船无法航行，故至 2009-04-15T8:00 重新开始，与小潮交叉进行。

2 计算公式^[14-17]

2.1 流量

ADCP 流量测验的方法，本质上为沿断面方向的积宽和沿水深方向的积深，流量计算公式如下：

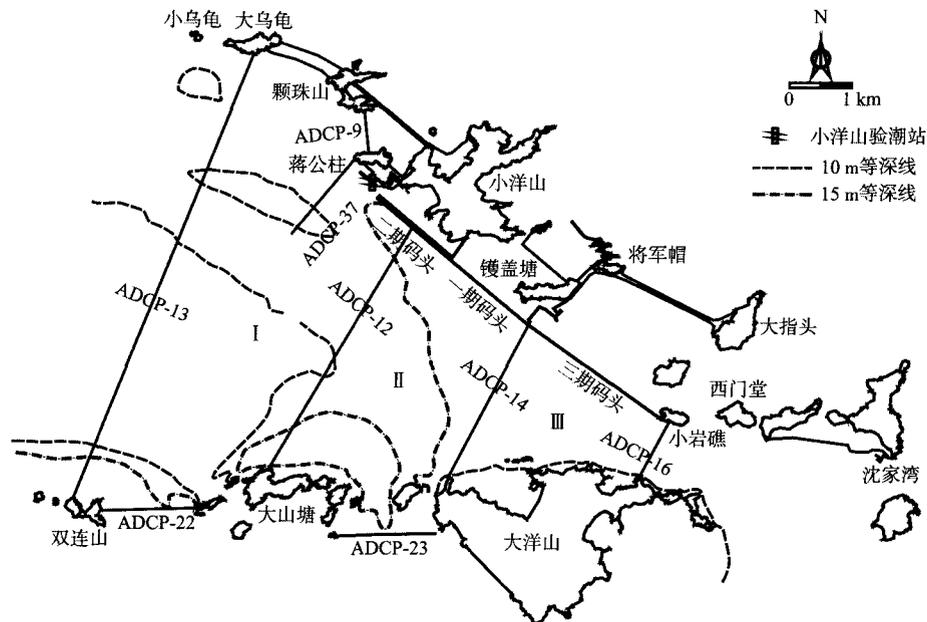


图1 洋山港区地形及测验断面布置

表2 测验时间和潮汐特性

潮型	开始时间	结束时间	平均潮差/m	平均历时	
				涨潮	落潮
大潮	2009-04-11T11:00	2009-04-12T22:00	3.60	5 h20 min	6 h53 min
中潮	2009-04-15T8:00	2009-04-16T12:00	2.30	5 h50 min	6 h33 min
小潮	2009-04-16T8:00	2009-04-17T12:00	1.86	5 h55 min	6 h35 min

$$Q = \int_S \mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\xi} ds \quad (1)$$

式中: Q 为流量 (m^3/s); S 为沿测船航迹断面面积 (m^2); \mathbf{u} 为测船航迹断面某微元处流速矢量 (m/s); $\boldsymbol{\xi}$ 为测船航迹上的单位法线矢量 (m); ds 为测船航迹断面上微元面积。

经过多重转换, 将 ADCP 测量时沿航迹的断面划分成许多微断面, 最终可得全断面的流量^[17]。

2.2 输沙率和含沙量

输沙率按下式计算:

$$Q_s = \int_0^B \int_0^h \rho_s v dh dB \quad (2)$$

式中: Q_s 为断面输沙率 (kg/s); ρ_s 为断面上任一点的单位面积输沙率 ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$); dh 为单位宽度 (m); dB 为断面宽度 (m)。

潮平均含沙量按下式计算:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\int_0^t Q_s dt}{\int_0^t Q dt} \quad (3)$$

式中: $\bar{\rho}_s$ 为潮平均含沙量 (kg/m^3); Q_s 为输沙率 (kg/s);

Q 为流量 (m^3/s); t 为历时 (s)。

2.3 输沙量和单宽输沙量

$$W_s = \sum_{i=1}^n \left[\frac{Q_{s_i} + Q_{s_{i+1}}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (4)$$

$$Q_{dks} = \int_0^t \int_0^h \rho_s v dh dB = \int_0^t \left(\int_0^h \rho_s v dh \right) dt \quad (5)$$

式中: W_s 为断面输沙量 (kg); Q_{s_i} , $Q_{s_{i+1}}$ 为相邻测次; t_i , t_{i+1} 时刻的输沙率 (kg/s); Q_{dks} 为单宽输沙量 (kg/m); $\int_0^h \rho_s v dh$ 为断面上任一垂线位置的单位宽度输沙率 ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)。

3 含沙量的时空分布

3.1 空间分布

因本测次仅观测了悬浮泥沙, 所以文中提及的“泥沙输移”特指悬浮泥沙的输移。水体含沙量的主要特性呈瞬时性, 随地域与水文条件的变化而变化, 本报告为便于分析, 采用式 (2) 和 (3) 计算了涨落潮期的单宽平均含沙量 (每隔 100 m 垂线的潮段平均值), 大潮期平均含沙量分布见图 2, 大、中、小潮断面平均含沙量的变化见表 3。

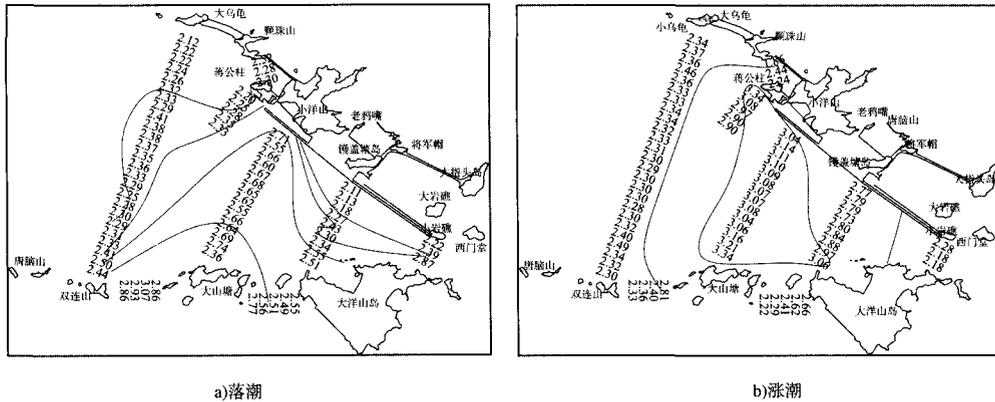


图 2 大潮平均含沙量分布 (单位: kg/m³)

表 3 断面平均含沙量变化

kg/m³

潮型	主通道				南北汉道			
	ADCP-13 西口	ADCP-12	ADCP-14	ADCP-16 东口	ADCP-9 颗珠山	ADCP-22	ADCP-23 南汉	
大	落潮	2.33	2.64	2.32	2.29	2.31	2.92	2.59
	涨潮	2.34	3.11	2.84	2.21	2.31	2.42	2.38
中	落潮	1.92	1.72	1.87	1.50	1.75	1.94	2.11
	涨潮	1.97	2.58	2.02	1.67	1.63	2.79	2.34
小	落潮	1.39	1.22	1.34	1.13	1.87	1.32	1.61
	涨潮	1.38	2.27	1.50	1.50	1.29	2.20	2.08

由以上图表可见, 洋山港区涨落潮期间的含沙量分布具有不同的特征。落潮大潮期, 整个港区含沙量分布略呈南高北低态势, 具体而言, 主通道中部含沙量最高, ADCP-12 全断面平均含沙量为 2.64 kg/m³, 最大值为 2.82 kg/m³, 近南部大山塘侧; 东西口门平均含沙量为 1.95~2.87 kg/m³; 南岛链双连山汉道(ADCP-22)为 2.61~3.07 kg/m³, 大山塘汉道(ADCP-23)为 2.42~2.87 kg/m³; 北岛链颗珠山汉道(ADCP-9)为 2.25~2.52 kg/m³。中潮期, 主通道基本呈西高东低的态势, 南汉道 22 和 23 两断面, 均约 2.00 kg/m³, 北颗珠山汉道平均 1.75 kg/m³, 小于南部汉道。小潮期, 主通道西口门含沙量(平均 1.39 kg/m³)依然略大于东口门(平均 1.13 kg/m³), 而南汉道(平均 1.45 kg/m³)低于颗珠山汉道(平均 1.87 kg/m³)。

相对于落潮, 涨潮期洋山港区的含沙量分布相对有规律, 无论大、中、小潮, 主通道含沙量从东向西逐渐增大, 至 ADCP-12 断面达到最大, 到达西口门 ADCP-13 断面时, 含沙量有所减小; 南岛链两个汉道之间, 同潮型下含沙量相差不大, 而北岛链的颗珠山汉道, 涨潮期平均含沙量要小

于南岛链汉道, 尤其是中、小潮时。

3.2 单宽输沙量分布

在相同水文条件下, 单宽输沙量大的地方, 表明水流挟带的过境泥沙多, 反之则小。本次测验大潮单宽输沙量矢量图见图 3, 单宽输沙量落涨比例等值线见图 4。

从图 3 可以看出, 主通道涨潮期, 单宽输沙量从东向西总体沿程减弱。落潮期则相对复杂, 大潮时, 西口门(ADCP-13)全断面平均单宽输沙量为 1 328 t/m, 起点距 400~6 700 m, 该值为 1 263 t/m, 而 6 800~7 600 m, 为 2 230 t/m, 即断面南端近双连山汉道约 800 m 宽的范围, 单宽输沙量较大; ADCP-12 断面单宽输沙量中间小两端大, 即落潮时中间挟沙力小, 泥沙可能于此落淤; 与西口相反, ADCP-14 和东口 ADCP-16 两断面的单宽输沙量均为中间大, 这一现象一方面与地形有关, 即东口地形窄深, 断面中间水深大, 单宽过水面积大, 单宽输沙量相应也大, 另一方面也说明主通道东部中间, 挟沙能力强, 利于泥沙输移出港。

南北汉道比较, 北颗珠山汉道水流集中, 动

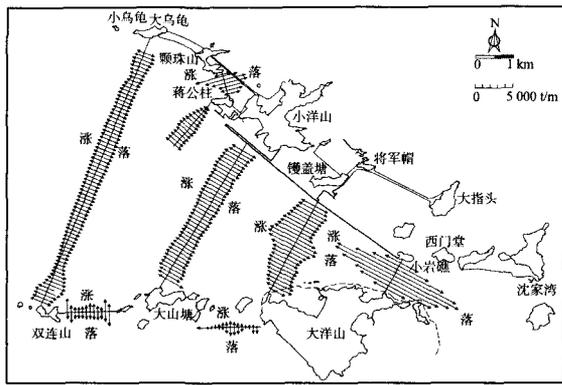


图 3 大潮单宽输沙量矢量分布

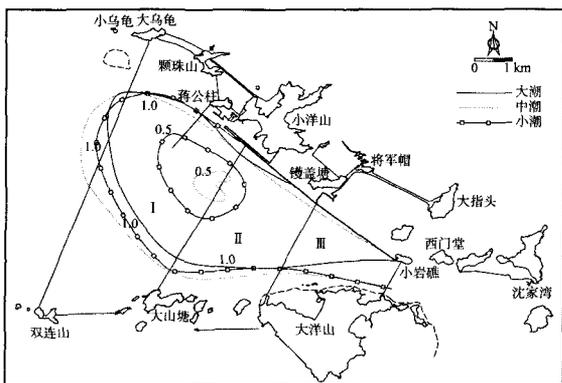


图 4 单宽输沙量落涨比等值线

力强劲, 无论涨落潮挟带泥沙的能力均较强, 相对而言, 南双连山汉道及大山塘汉道, 断面与水流存在一定的夹角, 地形起伏较大, 水流分散,

挟沙能力稍逊。

从单宽输沙量的落涨比等值线图可以看出, 主通道涨潮挟沙能力大于落潮, 与之相反, 南北汉道的落潮挟沙能力总体大于涨潮。洋山港区强劲的涨潮在从东向西运动过程中, 由于挟沙能力大, 掀起港区东部泥沙, 向西运移时, 当断面宽度增大, 水流分散, 挟沙能力下降, 悬浮泥沙在港区西南部落淤。

3.3 区域输沙分析

根据测验断面以及地形冲淤情况, 将洋山港区从西向东分成 3 个基本封闭的区域, 分别为: 1) 西部 I 区, 由 9, 13, 22, 12 断面组成; 2) 中部 II 区, 由 12, 23, 14 断面组成; 3) 东部 III 区, 由 14, 16 断面组成。分区见表 4。各区进出输沙量统计见表 5。

表 4 区域输沙分区

分区	区域位置	分析断面
I	港区西部, 大乌龟、双连山、大山塘、二期码头包围的海域	ADCP-9, 13, 22, 12
II	港区中部, 一期码头、大山塘包围的海域	ADCP-12, 23, 14
III	港区东部, 三期码头、大洋山包围的海域	ADCP-14, 16

表 5 各区进出输沙量

万 t

区域	潮期	类型	断面	大潮		中潮		小潮		
				输沙量	进出差	输沙量	进出差	输沙量	进出差	
I	落潮	进	ADCP-13	989.8		591.3		377.1		
			ADCP-9	143.2		99.0		84.2		
			ADCP-22	183.1	-51.7	108.7	66.2	58.5	21.6	
	涨潮	出	ADCP-12	715.2		317.4		212.8		
			ADCP-9	90.8		68.2		54.9		
			ADCP-22	140.7	227.6	88.1	113.8	64.1	167.5	
		出	ADCP-12	775.2		470.0		355.5		
		出	ADCP-13	779.1		512.5		307.0		
		小计			175.9		180.0		189.1	
II	落潮	进	ADCP-12	715.2		317.4		212.8		
			ADCP-14	616.2	16.2	307.3	-62.8	203.5	-40.8	
			ADCP-23	82.8		72.9		50.1		
	涨潮	进	ADCP-14	654.2		377.3		241.7		
			ADCP-23	57.3	-63.7	27.5	-65.2	26.7	-87.1	
			ADCP-12	775.2		470.0		355.5		
		出								
		小计			-47.5		-128.0		-127.9	
III	落潮	进	ADCP-14	616.2		307.3		203.5		
		出	ADCP-16	620.6	-4.4	254.2	53.1	178.0	25.5	
	涨潮	进	ADCP-16	524.1		271.8		224.2		
		出	ADCP-14	654.2	-130.1	377.3	-105.5	241.7	-17.5	
			小计			-134.5		-52.4		8.0
			总计			-6.1		-0.4		69.2

3.3.1 全港区

从全港区看,大潮落潮期经过西口门ADCP-13断面进入港区 989.8 万 t 悬沙,从南北汉道(22, 23, 9 断面)以及东口门(16 断面)共向外输移了 1 029.7 万 t,即大潮落潮从港区向东带走了 39.9 万 t 悬浮泥沙;涨潮期,从东口门和南北汉道共有 812.9 万 t 悬沙进入港区,而从西口门ADCP-13断面向西输出 779.1 万 t,即有 33.8 万 t 泥沙在港区沉积。总体计算,一个大潮期(约 24.5 h, 中小潮期计算历时同),约有 6.1 万 t 的悬沙向东被输移出港。

中潮落潮期,西口 13 断面进入港区的泥沙为 591.3 万 t,从南北汉道以及东口门输出的泥沙为 534.8 万 t,两者相较,有 56.5 万 t 的悬沙在港区沉积;涨潮期,由南北汉道和东口门进入港区的泥沙总量为 455.6 万 t,而从西口门 13 断面输移出境的泥沙为 512.5 万 t,两者相较,港区有 56.9 万 t 的泥沙被涨潮水流冲刷悬浮向西输出。总体计算,一个中潮期,港区冲刷起 0.4 万 t 泥沙,冲淤基本平衡。

小潮落潮期,西口 13 断面进入港区的泥沙为 377.1 万 t,从南北汉道以及东口门输出的泥沙为 370.8 万 t,两者相较,有 6.3 万 t 的泥沙在港区沉积;小潮涨潮期,由南北汉道和东口门进入港区的泥沙总量为 369.9 万 t,而从西口门 13 断面输移出境的泥沙为 307 万 t,两者相较,港区沉积了 62.9 万 t 的泥沙。总体计算,一个小潮期,约有 69.2 万 t 的泥沙在港区沉积。

因此,以 2009 年 4 月测验为例,洋山港区大潮呈微冲状态,中潮冲淤基本平衡,而小潮以淤积为主。

3.3.2 各区段

由表 5 可知,洋山港区各区段输沙存在极大的不平衡。西部 I 区,除大潮落潮冲刷了 51.7 万 t 向东输送外,其余中、小潮时段的落潮以及所有涨潮期,顺水流方向(落,自西向东;涨,自东向西)带进的泥沙均未能完全带出该区域,即该区域为泥沙落淤场所,以本测次大中小三潮计, I 区落潮共落淤泥沙 36.1 万 t,涨潮共落淤泥沙 508.9 万 t,涨潮落淤远大于落潮,即涨潮从东部

挟带的悬浮泥沙为本区段落淤的主要泥沙来源。

中部 II 区,与 I 区相反,除大潮落潮期落淤了 16.2 万 t 泥沙外,其余时段均为冲刷,以本测次大中小三潮计,落潮期共冲刷泥沙 87.4 万 t,而涨潮期冲刷了 216 万 t 泥沙,是西部 I 区落淤泥沙的来源之一。

东部 III 区,大潮,除落潮期略微冲刷了 4.4 万 t 泥沙外,中小潮落潮均以落淤为主;涨潮期,本区域涨潮流强劲,大中小潮均为冲刷。以三潮计,落潮本区域共落淤 74.2 万 t 泥沙,涨潮期则冲刷了 253.1 万 t。

从整个港区看,以大中小三潮计,落潮时,从西向东, I 区落淤了 36.1 万 t, II 区冲刷了 87.4 万 t, III 区落淤了 74.2 万 t,总体落淤了 22.9 万 t;涨潮期,从东向西, III 区冲刷了 253.1 万 t, II 区冲刷了 216.0 万 t, I 区则落淤了 508.9 万 t,港区总体落淤 39.8 万 t。

3.3.3 南北汉道

洋山港区目前的边界条件中,南北现存的 3 个汉道对港区泥沙输移起着重大的分泄作用,相对而言,颗珠山汉道(ADCP-9)的作用最大,大山塘汉道(ADCP-23)次之,双连山汉道(ADCP-22)作用最小。

从各汉道输沙量占西口门 ADCP-13 断面的比例看,北岛链颗珠山汉道,落潮期大、中、小潮的比例分别为 14.5%, 16.7%, 22.3%, 平均 17.8%, 涨潮期分别为 11.7%, 13.3%, 17.9%, 平均 14.3%, 落潮比重均大于涨潮;从净输沙量看,颗珠山汉道大、中、小每潮分别向外海净泄 52.4 万 t, 30.8 万 t 和 29.3 万 t, 若按 1 a 含 354 个潮汐周期计算,则每年通过颗珠山汉道向外海净泄的泥沙约为 1.33 亿 t。

南岛链双连山汉道(ADCP-22),大、中潮期,输沙量均为净泄,小潮净进,输沙量占西口门的比例,落潮平均为 17.4%, 涨潮平均为 18.7%, 基本相当。大山塘汉道,虽然输沙量绝对值小于双连山汉道,但大中小潮均为净泄,其占西口门的比例,落潮平均为 11.3%, 涨潮平均为 7.1%。以本测次大中小潮平均计,每年通过双连山汉道和 大山塘汉道向外海输出的泥沙约为 0.68 亿 t 和

1.11 亿 t, 汉道分泄主通道泥沙的能力不可忽视。

4 悬沙运动与地形演变关系探讨

海域中的悬移质含量是一种随机性很强的变量, 其分布受大小潮、波浪、地形、泥沙来源等诸多因素的影响。已有研究表明, 洋山海域的泥沙来源于长江口^[14,6], 长江口拦门沙是长江来沙的聚集地, 夏季长江径流强盛, 但风浪作用较弱, 在台湾暖流向北扩展的作用下, 长江向南扩散的泥沙很少, 从而造成长江口与杭州湾毗连的地带含沙量较小; 冬季长江径流减弱, 台湾暖流退缩, 偏北风盛行, 风浪作用增强, 口外泥沙被掀起再悬浮, 长江冲淡水沿岸南下, 泥沙向南扩散, 导致该海域冬季含沙量较高。

从小洋山验潮站长年表层含沙量观测资料看^[8], 洋山海域含沙量冬高夏低, 与长江径流输沙的冬少夏多无正相关, 即长江入海泥沙对洋山港区的直接影响较小, 而是经历输移-沉积-再悬浮-再输移-再沉积的复杂而漫长的过程到达洋山港区, 因此, 洋山港区“波浪掀沙, 潮流输沙”的泥沙运动特性, 决定水体含沙量的大小与当时的波浪大小和潮流强度有关, 而底沙再悬浮是洋山海域悬沙浓度变化的主要因素。刘家驹^[9]认为

一般情况下波浪的作用水深在 2~10 m, 大于 10 m 水深时波浪的掀沙能力有限; 当流速达到 1.0 m/s 时, 10 m 水深处的泥沙仍可被掀起。因此, 在水深较浅的西部, 大风天波浪的强烈作用导致海底表层泥沙再悬浮, 憩流流速较缓时, 近底层泥沙落于海床, 未经密实, 又被接踵而来的高速水流掀起悬浮, 故泥沙难于落淤, 而随潮反复搬运, 使得本海域水体含沙量偏高。

洋山海域泥沙运动以大进大出为主。主通道的泥沙运动主要受潮流控制, 沙随潮输, 在高流速动力环境下, 泥沙来回搬运很少落淤, 因而水体含沙量高; 南北汉道落潮含沙量大于涨潮输沙量, 表明汉道是洋山港区的出沙通道。洋山港区所在岛链峡道水域是潮流对泥沙运动起控制作用的典型区域, 洋山港建设期间, 进行的汉道封堵、围填造陆、港池疏浚等工程, 对岛链间的流场结构产生了一定的影响, 北岛链码头岸线形成以后, 岛链间水流对主通道潮流影响减弱, 原海床地形为了适应新的水动力条件, 必然会经历一个冲淤调整期达到新的平衡。近年来, 洋山港区逐年冲淤统计见表 6, 2004 年 4 月-2009 年 4 月 5 年间洋山港区的冲淤见图 5。

表 6 洋山港区冲淤状况统计

时间	冲刷			淤积		
	面积/km ²	占统计面积/%	体积/万 m ³	面积/km ²	占统计面积/%	体积/万 m ³
1998-11—2004-04	24.93	60.0	2 663.7	16.30	39.2	1 145.0
2004-04—2005-04	33.65	81.0	2 258.0	7.19	17.3	602.1
2005-04—2006-04	13.76	33.1	1 362.8	27.03	65.1	2 274.0
2006-04—2007-04	21.82	52.5	1 937.1	18.66	44.9	1 081.8
2007-04—2008-04	17.26	41.5	1 256.4	23.47	56.5	1 142.7
2008-04—2009-04	13.90	33.5	525.6	27.13	65.3	1 417.4

注: 统计范围大致为图 1 中西口门 (ADCP-13) 至东口门 (ADCP-16), 约 41.5 km²。

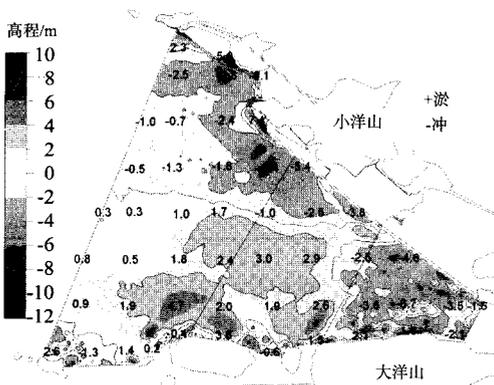


图 5 2004-04—2009-04 洋山港区冲淤图

由表 6 可知, 近 5 年来, 洋山港区海床地形冲淤规律发生了一些改变。以往研究成果表明^[20-21], 建港以前, 近百年来洋山港所在崎岖列岛海区冲淤交替, 周边总体呈淤积为主趋势, 而在峡道区 (即文中主通道) 则呈冲刷状态。表 6 中 1998 年 11 月—2004 年 4 月, 港区冲刷面积达 60%, 冲刷量是淤积量的 2.3 倍。建港初期, 洋山港区冲淤演变剧烈, 2004-04—2005-04 以冲刷为主, 而 2005-04—2006-04 以淤积为主, 这两年是洋山港区涉水工程建设频繁期, 至 2006 年 10 月三期码

头工程合拢，北港区涉水建筑基本完成，新的边界生成，此时港区地形呈淤积态势，从图 5 可以看出，淤积的部位主要集中在港区的中南部，较大淤积体的迅速出现，与北岛链 3 个堵汉工程密切相关，淤积范围和强度与原汉道潮流量的大小相对应，地形冲淤与堵汉工程之间的相关性，除了与水流动力的减弱有关外，潮流挟带泥沙的即时补给也发挥了巨大作用。

为比较输沙量沿主通道的分配，将监测断面按从东向西扩散的趋势划分成北、中、南 3 个区域，分段示意区间见图 6。

以本测次平均水位 2.5 m 计，各断面过水面积及北、中、南各分段占所在断面过水面积的比

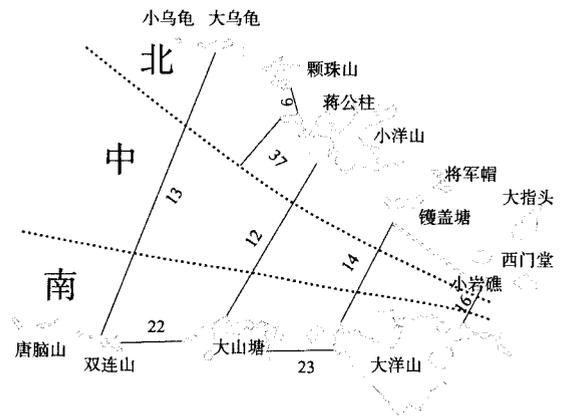


图 6 各断面输沙权重分段

例见表 7，表 8 为大、中、小潮各分段占断面输沙量的比例。

表 7 平均潮位下各分段过水面积占断面面积的比例

断面	全断面/m ²	北部		中部		南部	
		区间/m	比例/%	区间/m	比例/%	区间/m	比例/%
ADCP-13	95 953	0~2 000	25.3	2 000~5 500	44.2	5 500~7 696	30.5
ADCP-12	69 762	0~1 200	29.4	1 200~3 200	37.3	3 200~4 470	33.3
ADCP-14	72 606	0~800	22.6	800~2 000	45.1	2 000~2 831	32.4
ADCP-16	51 363	0~300	18.5	300~700	58.3	700~1012	23.2

表 8 各分段占断面输沙量的比例

断面	潮型	涨潮				落潮			
		全断面/万 t	北/%	中/%	南/%	全断面/万 t	北/%	中/%	南/%
ADCP-13	大	779.1	23.3	52.2	24.5	989.8	22.9	46.3	30.8
	中	512.5	25.8	51.3	22.9	591.3	25.8	43.0	31.2
	小	307.0	26.0	53.7	20.3	377.1	25.3	44.3	30.5
	平均		25.0	52.4	22.5		24.7	44.5	30.8
ADCP-12	大	775.2	31.0	46.6	22.4	715.2	27.5	39.7	32.8
	中	469.8	29.1	45.1	25.7	317.4	28.5	39.4	32.1
	小	355.5	30.1	48.3	21.6	212.8	26.0	40.1	33.9
	平均		30.1	46.7	23.2		27.3	39.7	32.9
ADCP-14	大	654.2	27.1	56.8	16.1	616.2	24.0	46.4	29.6
	中	377.3	26.6	56.6	16.8	307.3	26.9	45.3	27.8
	小	241.7	29.5	56.1	14.4	203.5	24.3	42.6	33.1
	平均		27.7	56.5	15.8		25.1	44.8	30.2
ADCP-16	大	524.1	18.5	63.9	17.6	620.6	16.8	60.9	22.3
	中	271.8	20.6	62.3	17.1	254.2	21.1	55.7	23.2
	小	224.2	23.2	59.2	17.6	178.0	18.9	56.6	24.6
	平均		20.8	61.8	17.4		18.9	57.7	23.4

由表 7 和 8 可以看出，落潮时，主通道内平均分段时间输沙量占全断面的比例与过水面积占全断面的比例几乎一致，即水流输沙与断面结构是相适应的。涨潮时，水流输沙权重明显偏北，与分

段过水面积所占比例相比，从西至东，南部各分段分别相差-7.9%，-10.1%，-16.6%，-5.8%，输沙量占比均小于过水面积占比，相差最大集中于 ADCP-12 和-14 断面之间，说明涨潮时有部分泥

沙在主通道南部淤积,淤积部位最大的在 ADCP-12、-14 断面之间及上下区间;主通道中部,两种比例之间分别相差 8.2%, 9.4%, 11.4%, 3.5%, 输沙量占比均大于过水面积占比,表明洋山主通道中间涨潮动力强劲,往往掀起海床表层未密实泥沙以再悬浮形式向西输移;主通道北部,两种比例之间分别相差-0.3%, 0.7%, 5.2%, 2.3%, 涨潮输沙量占比略大于过水面积占比。

地形的冲淤变化与水流动力和悬沙运动特性密切相关,水流动力强,挟沙力大,海床表层泥沙掀起,地形冲刷;反之,地形淤积。从以上分析可以看出,洋山港区落潮期悬沙输移与过水面积是相适应的,可以认为该时段对洋山的地形演变贡献不大,而涨潮期,港区主通道输沙量呈现南弱、中强、北部差异小的态势,地形演变总体上也相应略呈“北冲南淤”,因此,涨潮动力对洋山港区的地形演变起主导作用,大中小潮比较,小潮对淤积的贡献最大。

5 结论

大型涉水工程的兴建会改变原有的水沙动力平衡,洋山港区通过堵汉围填兴建了北港区,边界条件的改变对海区地形冲淤产生影响。笔者通过应用“ADCP 测沙”技术,对洋山港区悬浮泥沙的运动作了大范围同步观测,有以下几点结论:

1) 洋山港区涨落潮期的含沙量分布具有不同的特征,落潮时,整个港区含沙量分布基本呈南高北低、西高东低的态势;而涨潮期,主通道含沙量从东向西逐渐增大,至 ADCP-12 断面达到最大,到达西口门时,含沙量有所减小。

2) 涨潮时,主通道从东向西单宽输沙量总体沿程减弱;落潮期相对复杂,大潮时,西口门南端单宽输沙量较大;ADCP-12 断面中间小两端大,再向东均为中间大,说明主通道东部中间,落潮挟沙能力强,利于泥沙输移出港。落涨单宽输沙量比较,总体看,主通道中部偏北涨潮挟沙能力大于落潮,南北汉道的落潮挟沙能力大于涨潮。

3) 洋山港区悬浮泥沙大进大出,对比涨落潮期间的输沙量,大潮呈微冲状态,中潮冲淤基

本平衡,而小潮以淤积为主。总体看,涨潮从东部带来的泥沙,部分淤积于港区的西南部。南北岛链现存的 3 个汉道对港区泥沙输移起着重大的分泄作用,以本测次现场观测资料统计,通过颗珠山汉道(北)、双连山汉道(南)以及大山塘汉道(南)每年向外海净泄泥沙分别约为 1.33 亿 t, 0.68 亿 t, 1.11 亿 t,因此,这 3 个汉道分泄主通道下泄泥沙、减少港区泥沙来源、减轻淤积的作用不可忽视。

4) 洋山海域泥沙运动遵循“波浪掀沙,潮流输沙”模式,在水深较浅的西部,大风天波浪的强烈作用导致海底表层泥沙再悬浮,憩流流速较缓时,近底层泥沙落于海床,未经密实,即被接踵而来的高速水流掀起悬浮,因此本海域泥沙难于落淤,而随潮反复搬运。地形的冲淤变化与水流动力和悬沙运动特性密切相关,洋山港区落潮期悬沙输移与过水面积相适应,可以认为该时段对洋山的地形演变贡献不大,而涨潮期,港区主通道输沙量呈现南弱、中强、北部均衡的态势,涨潮动力对洋山港区的地形演变起主导作用,大中小潮比较,小潮对淤积的贡献最大。

以上几点结论,是基于一个测次的成果,其可靠性需在后续测验中验证。

参考文献:

- [1] 曹沛奎,谷国传,董永发,等.杭州湾泥沙运移的基本特征[J].华东师范大学学报,1985(3):75-84.
- [2] 戴贤凯,陆培东,杨正己.开辟大洋山深水航道的初步分析[J].水运工程,1998(4):24-28.
- [3] 蒋唯耀,吴明阳.上海国际航运中心洋山港水文地形特征与建议方案选择标准的分析研究[J].水道港口,2000(3):1-61.
- [4] 陈沈良.崎岖列岛海区的水文泥沙及其峡道效应[J].海洋学报,2000,22(3):123-131.
- [5] 张金善,陈永平,赵铁卫,等.大、小洋山建港总体规划中的水流泥沙问题[J].海洋工程,2004,22(3):56-60.
- [6] 阎新兴.上海洋山港区的自然条件及泥沙来源分析[J].水道港口,2000(3):33-36.
- [7] 谢文辉,陈沈良,谷国传.崎岖列岛邻近海域的水文泥沙特征[J].东海海洋,2000,18(2):1-8.
- [8] 庄骅.洋山港区一期工程港池水域水文泥沙分析[J].水

道港口, 2001, 22(1): 31-35.

[9] 李玉中, 陈沈良. 洋山港海域与长江口相似性研究[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 662-670.

[10] 李玉中, 陈沈良. 洋山港区余流分离和会聚现象研究[J]. 水利学报, 2003(5): 25-34.

[11] 程泽坤, 田佐臣. 上海国际航运中心洋山深水港区平面布置方案[J]. 中国港湾建设, 2007, 151(5): 31-35.

[12] 杜景龙, 杨世伦, 贺松林, 等. 洋山港堵汉工程对邻近海底冲淤影响分析[J]. 海洋工程, 2008, 20(11): 53-59.

[13] 左书华, 张宁川, 李蓓, 等. 洋山深水港海域悬沙浓度时空变化及其动力原因[J]. 华东师范大学学报, 2009(3): 72-82.

[14] GB 50179—1993 河流流量测验规范[S].

[15] GB 50159—1992 河流悬移质泥沙测验规范[S].

[16] GB/T 24558—2009 声学多普勒流速剖面仪[S].

[17] 田淳, 刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.

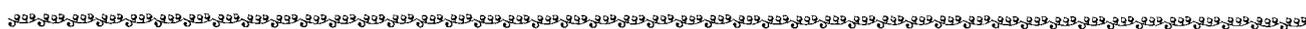
[18] 张志林, 朱巧云, 陈建民. 洋山深水港堵汉工程对港区地形与水流结构影响分析[G]//中国水利学会 2007 学术年会论文集 (人类活动与河口). 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 61-67.

[19] 刘家驹. 波浪作用下泥沙起动问题[G]//水利水运专题述评. 南京: 南京水利科学研究所, 1966.

[20] 陈沈良. 崎岖列岛海区百年冲淤特征及其原因[J]. 海洋通报, 2000, 19(1): 58-66.

[21] 左书华, 李蓓, 杨华, 等. 洋山港建设时期海域通道冲淤变化特征分析[J]. 水道港口, 2009, 30(1): 14-19.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 62 页)

虑这种复杂环境条件下的建模要求, 从而为港口集装箱吞吐量的预测提供了坚实的理论基础和规范化的建模方法。

宁波-舟山港案例仿真结果表明, 2000—2009 年集装箱吞吐量预测误差 < 5%, 说明该模型具有较高的可靠度; 另外, 2010—2020 年期间, 该港的集装箱吞吐量将持续快速增长, 2015 年将突破 2 000 万 TEU, 2020 年达到 3 095 万 TEU。该预测值与《宁波-舟山港总体规划》提出的 2020 年集装箱吞吐量达到 3 000 万 TEU 较为一致。

参考文献:

[1] 高凤姣, 石小法. 上海港口集装箱吞吐量影响因素分析[J]. 物流技术, 2009, 28(9): 77-80.

[2] 孙秋高, 潘国强. 浙江沿海港口竞争力提升[J]. 上海海事大学学报, 2007(3): 75-80.

[3] 许长新, 严以新, 张萍. 基于系统动力学的港口吞吐量预测模型[J]. 水运工程, 2006(5): 26-28.

[4] 崔英会, 李伟. 基于组合模型的港口集装箱吞吐量预测方法[J]. 中国水运, 2007, 7(10): 35-37.

[5] 翟希东. 港口集装箱吞吐量预测模型研究 [D]. 大连: 大

连理工大学, 2006.

[6] 蒋学炼, 吴永强, 史艳娇. 港口吞吐量预测的混合算法实证研究[J]. 中国港湾建设, 2009(2): 7-11.

[7] 彭红. 港口集装箱预测方法分析[J]. 中国水运, 1999(12): 16-18.

[8] 池弘福, 王家宏, 陈毓. 舟山港口吞吐量预测方法探讨[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2001, 20 (2): 101-106.

[9] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.

[10] 傅海威. 宁波港集装箱腹地拓展的实现与展望[J]. 中国港口, 2007(9): 32-33.

[11] 王翠霞, 贾仁安, 邓群钊. 中部农村规模养殖生态系统管理策略的系统动力学仿真分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007(12): 158-169.

[12] 陈俊虎. 基于系统动力学的港城互动发展模型研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.

[13] 杨小平. 统计分析方法与 SPSS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[14] 陈建光, 刘洋. 《宁波-舟山港总体规划》获批[N]. 中国交通报, 2009-04-17(1).

(本文编辑 武亚庆)