

珠江口虎门悬浮泥沙浓度的测量*

唐兆民¹, 何志刚¹, 任 杰¹, 谢正峰²

(1. 中山大学近岸海洋研究中心, 广东 广州 510275)

(2. 聊城大学环境与规划院, 山东 聊城 252000)

摘 要: 利用2004年虎门口ADP的反向散射声强数据, 和同步采样经实验室过滤得出悬沙浓度的数据, 建立了半经验公式, 得到虎门高分辨率的悬沙浓度剖面的时间序列; 计算的悬沙浓度与水样法测量的平均相对误差是7.4%, 与目前通用的悬沙浓度测量仪器的误差相当, 为提高ADP仪器使用效率, 更好地研究沉积动力提供一种新的方法。

关键词: 珠江; 虎门; 河口; 悬浮泥沙; ADP

中图分类号: P714+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 04-0124-05

水体悬沙的分布、扩散、沉降影响着港口、航道和生态环境等, 所以水体悬沙浓度的测量对河口海洋沉积动力学研究和近岸工程都是一个十分关键的问题。测量悬沙浓度的方法很多, 各种方法的精度、利弊等均不相同^[1-3]。其中水样法得到的含沙量数据精度高, 基本上排除了尤其是二类水中丰富的浮游动植物、黄色物质等干扰, 但费时、费力, 数据零散, 还因船舶航行的原因, 代表垂线往往也不能设在主航道中, 这使得在观测中可能丢失峰值数据。声学散射方法提供了一种获取悬沙浓度垂向分布的高时空分辨率的手段。从20世纪80年代开始, 利用声散射原理研制的悬沙观测设备在国际上得到很快的发展, 声学后散射悬沙测量仪(ABS)已得到广泛的应用; 90年代以来, 国内外利用声学仪器测流的同时, 又利用其反向发射信号反演悬沙浓度的研究很多^[4-12], 但是由于仪器等原因, 提取悬沙精度不是太高。

ADP(全称 Nortek Aquadopp™ 水流剖面仪)是挪威 Nortek 公司生产的第三代声学多普勒水流剖面仪, 专为固定式应用设计的完整的自容式系统, 较第一代 ADCP (1982) 具有性能强、操作简便等优势。为了研究珠江虎门河口洪水季节的动力(潮流、风等)、悬沙、盐度特征及水域表层沉积物类型、组成和搬运趋势, 我们于2004年7月28日至8月4日使用6条木壳机船在虎门口外附近河口区进行了水文、泥沙等项目调查, 为期8d, 其中在C站位使用ADP进行了定点观测。本文对这次C

站调查结果进行分析, 并讨论数据分析的方法和应用前景。

1 研究区域概况

虎门位于喇叭状河口湾湾顶, 两岸山丘(沙角、大角山)对峙如门, 过水断面狭窄, 最窄处3.8 km, 上游河道中大、小虎岛错落, 似老虎看门, 故名虎门。NW-ES走向, 长9 km; 东江、珠江正干、流溪河和北江沙湾水道水流携带泥沙等网河区物质经由虎门纳入伶仃洋河口湾, 与近岸陆架水交汇。复杂的水动力条件造就了虎门特殊的水动力结构。

珠江流域丰水少沙, 年平均径流量 $3400 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中通过虎门口的平均年径流量为 $540 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年平均含沙量为 $0.13 \sim 0.33 \text{ kg/m}^3$, 汇入虎门的年平均输沙量为 $495 \times 10^4 \text{ t}^{[13]}$ 。

虎门是珠江河口湾伶仃洋海区的潮汐优势型河口。虎门口属不规则半日混合潮型, 年平均潮差 $1.61 \sim 1.66 \text{ m}$, 平均涨潮流速 1.3 m/s , 落潮流速 $1.4 \text{ m/s}^{[14]}$ 。

2 测量方法与计算

2.1 现场观测

野外调查在虎门口布设5条船同步测量(图1), 共完成4个横断面、4个纵断面的26 h的固定站观测, 其中1条为机动船。在C站位进行了ADP定点观测。ADP的工作频率1 MHz, 最大探测深度

* 收稿日期: 2004-12-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40331007, 40176026, 40406016)和国家“973”计划项目(2002CB412407)

作者简介: 唐兆民(1969年生), 男, 博士研究生; E-mail: eetzhm103@163.com

25 m, 水层单元分辨率设置为 0.5 m, 数据采样间隔为 5 min, 回声强度在 90 dB 内, 连续观测 8 d。ADP 固定在调查船前部船舷右侧水下, 探头距水面 0.5 m。C 站的平均水深 16.1 m。

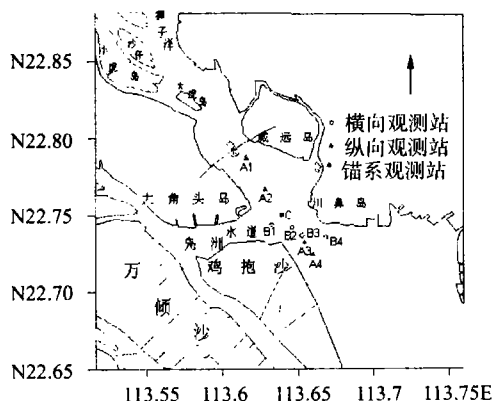


图1 虎门水域观测站点示意图

Fig.1 Location map of Humen estuary current meter mooring

2.2 悬沙浓度与回声强度关系

声学多普勒剖面仪 (NDV、NDP、ADCP、ADP 等) 不断发射声波脉冲, 并接受不同水层单元悬浮物质 (悬沙等) 背向散射信号, 根据多普勒效应, 可以同时测定各水层单元的三维流速, 还可以从背向散射的声强信号中提取出有关水中悬浮物质的信息, 如测定各水层单元悬沙浓度的大小^[15]。具体的步骤是:

(1) 将背向散射信号单位 counts 按线性或对数关系转化成声强单位 dB。普遍试验数据表明, 在 $1 \sim 10000 \text{ mg/L}$ 范围内, 散射信号与悬沙浓度是线性相关的, 公式 (1) 中①项 amp 是仪器记录的回声强度 (单位: counts);

$$EL = 0.43 \text{amp} + 201 \lg R + 2\alpha_w R + 20R \int \alpha_p dr \quad (1)$$

① ② ③ ④

(2) 修正回声声强数据。在计算声强时, 要考虑声波能量的损失。公式 (1) 中, ②项是由于声波束的锥形几何形状; ③是由于水体分子的双程吸收; (是由于水体颗粒物的散射、吸收。由于声波的发射和背向散射是双程的, 所以②、③项乘以 2; R 是声波发射的路程, $R = z / \cos 25^\circ$, 25° 是声束与轴线夹角, z 是距水面下水深; α_w 是水分子吸收系数, 是盐度和频率的函数。对于发射频率 1 mHz、盐度为 0 的水体, 取 0.28 dB/m ①; α_p 是水中颗粒物衰减系数, 因为不同的水深情况下, 衰减程度不同, 所以要沿程积分, 但在低浓度的情况下可以忽略不计。

(3) 绝对的校准需要发射功率、发射声波波

长、转换器效率、电路的温度敏感性等参数。ADP 工作期间, 电压稳定为 12 V, 发射功率是 20 W, 声速为 1500 m/s。

2.3 水样分析

与 ADP 测量同步取得该站点的 6 层水样。样品分析严格按规范的要求 (《海洋调查规范海洋地质地球物理调查》, 1992), 在过滤前每个水样都先摇匀再量样 (500 mL), 采用微孔滤膜 ($0.45 \mu\text{m}$ $\phi 66 \text{ mm}$) 过滤处理, 过滤中待海水全部滤干后再加 200 mL 蒸馏水冲洗数次; 再放置在 40°C 的烘箱中恒温 4 h, 装入干燥器后, 在其常温下用万分之一分光天平称重, 然后计算悬沙的含沙量。

C 船在大小潮期 8 个特征潮位 (涨急、涨平、落急、落平时刻) 离底 1 m 处取 2.5 kg 水样作级配分析。测试仪器为 Mastersizer 2000 型激光衍射粒度分析仪, 测量范围 $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$, 相对误差小于 2%。原样充分混合均匀后在 80°C 下烘干; 对于粒径小于 $2000 \mu\text{m}$ 的样品, 直接用激光粒度仪器分析: 取干样 2 g 左右, 用蒸馏水浸泡并滴加 0.05 N 六偏磷酸钠, 在烧杯中静置 24 h, 并用超声波振荡仪振荡 15 min, 然后上机测试; 每个样品测试 3 次, 测试结果取平均值; 从而得到每一个水样中悬沙的粒径分布。

3 结果与讨论

3.1 悬沙浓度计算公式中系数的确定

采集 6 层水样的时间间隔 1 h, 为了较好地分析泥沙浓度与声强的关系, 分别寻找每层采集水样时所对应或接近的 ADP 工作测量的信息, 再将 3 个探头的反散射信号算术平均, 根据公式 (1) 从而计算出各水层所对应的回应强度。水团单位体积的反散射强度 S_v 与悬沙质量浓度 C 之间的关系可表示为^[16-18]

$$S_v = 10 \lg \left[\sum_i n_i \sigma_i \right] + 10 \lg C - 10 \lg C_0 \quad (2)$$

式中, n_i 是第 i 级悬沙的量级, σ_i 是第 i 级悬沙的反散射横断面面积, C_0 是与环境有关的常数, 在某一特定区域中, 假设悬沙具有一定的粒级组成且沉积物来源稳定, n_i 、 σ_i 可看作常数, 所以反散射声强与泥沙浓度有较好的指数关系。

将 26 h、6 层的水样法得到的泥沙浓度 (mg/L) 取常用对数, 分别与各层同步的回声声强采用最小二乘法进行线性回归分析, 得到公式和相关系

① Nortek Tehcnical 提供的资料: Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments.

数 (表 1), 并根据各层悬沙一回声强度公式和间隔 5 min 的回声强度, 反向推算出各层间隔 5 min 的悬沙浓度, 从而得到各层悬沙浓度随涨潮落的变化规律 (图 2)。表 1 表明, 在含沙量较低的虎门口海域, 每层的悬沙浓度和回声强度的关系是较密切的; 从图 2 不难看出, C 站悬沙浓度 (mg/L) 随深度增加而急剧增加, 底层悬沙浓度是表层悬沙浓度的数倍多, 落急时可相差 1 个数量级; 每层的悬沙都随涨、落潮变化而发生相应的变化, 落潮浓度大, 涨潮浓度小; 从现场观测中明显看出, 强大的、浑浊的落潮流挟带着上游的悬浮物 (泥沙、生活垃圾等) 向西南流出, 而较清的涨潮水东南方向流进来。

表 1 悬沙浓度 C 与反散射强度 S_0 的关系

Tab.1 Relationships between echo intensity and surface suspended sediment concentration

垂向分层	拟合公式	R^2
0.0H	$\lg(C) = 0.0420 S_0 - 1.106$	0.7289
0.2H	$\lg(C) = 0.05030 S_0 - 1.7283$	0.8023
0.4H	$\lg(C) = 0.0613 S_0 - 2.4428$	0.894
0.6H	$\lg(C) = 0.0670 S_0 - 2.8077$	0.8791
0.8H	$\lg(C) = 0.0405 S_0 - 0.7892$	0.9128
1.0H	$\lg(C) = 0.0495 S_0 - 1.429$	0.9367

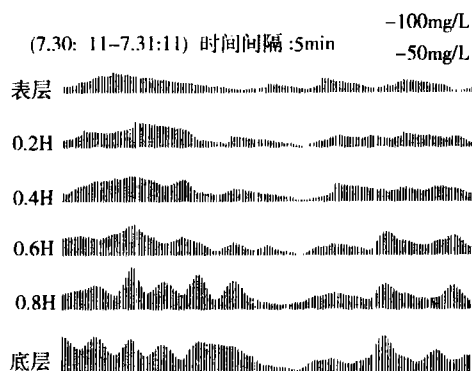


图 2 ADP 提取悬沙浓度垂向分布

Fig.2 Suspended sediments concentration base on ADP echo intensity

可见, 用宽幅 ADP 测量悬沙浓度能够达到较高的精度, 计算的悬沙浓度与水样法测量的平均相对误差是 7.4%, 与目前通用的悬沙浓度测量仪器的误差相当。但毕竟不同于用于专门观测泥沙的仪器, 在河口二类水体中, 悬浮物除悬沙外, 还有很多的浮游微生物、有机物和污染物等因子影响着声强背向反射, 诸因子的影响程度及计算悬沙的回声强度的方法等有待于今后的进一步研究。

将近底层水样悬沙粒度分析结果作出频率直方图 (图 3), 8 个特征水位的频率直方图都表现为一个个近似的正态分布曲线, 表明沉积物来源稳定, 具有一定的粒级组成; 大小潮期 4 个特征潮位悬沙水样级配分析表明 (见表 2), 中值粒径在 $5.532 \sim 6.907\varphi$ ($\varphi = -\log_2 D$, D 粒径单位 mm), 属于中粉砂, 粉砂的百分含量为 70% ~ 80%; 峰态值 K_g 较窄 (1.05 ~ 1.26), 偏态值 Sk_f 近于对称 (-0.122 ~ 0.121); 分选性较差 (σ_i : 1.415 ~ 2.031)。涨急、落急时刻砂较粗, 表明在流速较大的情况下底砂起动 (图 4, 表 3); 涨平、落平时刻砂较细, 是因为随着流速的减小悬沙中较粗的部分沉降。

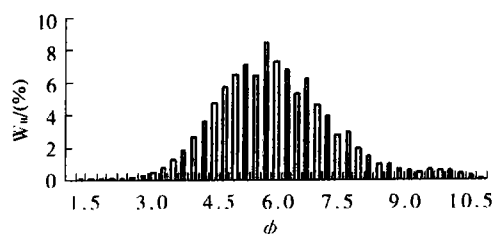


图 3 悬沙粒度分布图

Fig.3 Distribution of grain size of the suspended sediment

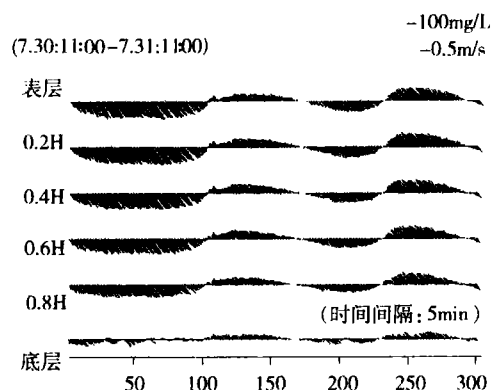


图 4 ADP 流速 6 层分布图

Fig.4 Six layers current velocity of ADP

4 结 论

(1) 用 1 MHz 的宽幅 ADP 在虎门水域进行了定点观测, 用水样过滤法率定相应的 ADP 声学信号, 获得了计算悬沙浓度的半经验公式及垂向悬沙浓度随涨落潮变化的数据。分析结果表明, 即使在悬沙浓度较低、悬沙分选系数较差等不利 ADP 观测的现场条件下, 观测结果仍与水样过滤法测量的数值较接近, 平均误差 7.4%。

(2) 用传统的方法, 耗费大量的人力、物力、财力, 加上河口区风大浪急, 安全难以保障; 数据

表 2 C 站特征潮位悬沙水样粒度参数

Tab.2 Grain size of the suspended sediment of characteristic water line

特征潮位	粒组含量/%			粒度系数				
	砂	粉砂	粘土	Mz	Md/(Φ)	Skf/(Φ)	Kg/(Φ)	σi/(Φ)
落急 7.30	8.215	77.984	13.802	6.186	6.161	-0.063	1.097	1.661
落平 7.30	3.562	83.824	12.614	6.305	6.229	-0.122	1.083	1.415
涨急 7.31	10.206	76.672	13.121	6.077	6.058	-0.050	1.099	1.714
涨平 7.31	19.685	69.984	10.331	5.572	5.532	-0.033	1.045	1.889
落急 8.3	11.591	69.061	19.349	6.376	6.509	0.067	1.087	1.951
落平 8.3	3.026	78.559	18.415	6.709	6.701	-0.043	1.114	1.468
涨急 8.3	11.999	66.840	21.161	6.518	6.669	0.121	1.260	2.031
涨平 8.3	3.855	73.611	22.535	6.887	6.907	0.004	1.153	1.543

表 3 2004 洪季 C 站位水动力分析表¹⁾

Tab.3 The water dynamical analysis of station C of the flood season in 2004

项目		表层	0.2H	0.4H	0.6H	0.8H	底层
涨潮	历时/h	10.81	10.73	10.79	10.79	10.42	10.55
	平均流速	-0.63	-0.62	-0.59	-0.56	-0.54	-0.44
	最大流速	-1.28	-1.17	-1.07	-1.01	-0.90	-0.72
落潮	历时/h	14.19	14.27	14.21	14.21	14.58	14.45
	平均流速	0.91	0.85	0.80	0.74	0.62	0.41
	最大流速	1.44	1.47	1.35	1.25	1.03	0.48
全潮	平均流速	0.24	0.22	0.20	0.18	0.14	0.05
	优势流	0.65	0.65	0.64	0.63	0.62	0.56

1)流速单位:m/s,向海为正

除了在空间上不连续、时间上也无瞬时性外，还要受船舶、观测仪器、水沙运动等因素的限制，而用宽幅 ADP 测量利用回声强度来反演悬沙浓度，可以实时、连续、高精度，高分辨率获得悬沙浓度剖面的时间序列，且干扰水体结构，在沉积动力学研究中，具有更广阔的应用前景。

(3) ADP 可供研究和挖掘的东西还有很多，有待于今后在实践中作进一步的探索和研究。

但它毕竟不同于用于专门观测泥沙的仪器，在河口二类水体中，悬浮物质除悬沙外，还有很多的浮游微生物、有机物和污染物等因子影响着声强背向反射，诸因子的影响程度及计算悬沙的回声强度的方法等有待于今后的进一步研究。

参考文献：

[1] 唐兆民,何志刚,韩玉梅.悬浮泥沙浓度的测量[J].中山大学学报,2004(8):244-247.
[2] 时钟,张叔英.河口近底细颗粒悬沙运动的声散射观测[J].声学学报,1998,23(3):221-228.
[3] 吴中,李宇,苏长城,等.悬沙的 ADCP 估测方法[J].海洋工程,2001,19(2):69-73.
[4] 程鹏,高抒.ADCP 测量悬沙浓度的可行性分析与现场

标定[J].海洋与湖沼,2001,32(2):168-176.
[5] 翟俊芬.声学方法监测悬浮物浓度的定标技术研究[J].海洋技术,1995,14(3):90-96.
[6] 黄衍镇,粘宝卿,蒋志迪.ABSS 的研制及其观测水中悬沙含量的实验研究[J].海洋科学,1997(4):54-57.
[7] 郭纪捷,任来法,李允武.声学悬浮泥沙观测数据现场定标研究[J].海洋学报,1998,20(5):120-125.
[8] 张叔英,李允武.声学悬浮泥沙观测系统的研制和应用[J].海洋学报,1998,20(5):114-119.
[9] 张叔英,李允武.悬浮泥沙声学观测的原理分析[J].声学学报,1999,24(3):269-274.
[10] 汪亚平,高抒,李坤业.用 ADCP 进行走航式悬浮泥沙浓度测量的初步研究[J].海洋与湖沼,1999,30(6):758-763.
[11] 陈力平.铁质测船上 ADCP 流向测量误差的改进方法[J].水利水电快报,2001,22(18):22-23.
[12] 张锁平,周长兴,等.60 m 船用多功能 ADCP 悬浮沙浓度测量及比测数据分析[J].海洋技术,2001,20(1):83-87.
[13] 李富铜.狮子洋新沙建港问题探讨[A]//珠江口海岸带和海底资源综合调查研究文集(四)[M],广州:广东科技出版社,1986:145-153.
[14] 中国海湾志编纂委员会.中国海湾志(第 14 分册)

- [M], 北京: 海洋出版社, 1998.
- [15] GORDON R L. Acoustic Doppler Currents Profiles of operation: a practical primer(2nd edition for Brand ADCPS)[M]. RD Instruments, USA, 1996: 29 – 32.
- [16] URICK R J. Principles of underwater sound[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983: 1 – 95.
- [17] THEVENOT M M, KRAUS N C. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary[J]. Marine Envir Engin. 1993(1): 65 – 79.
- [18] DAMMANN W P, PRONI J R, CRAYNOCK J R, et al. Oceanic waste-water outfall plume characteristics measured acoustically[J]. Chemistry and Ecology, 1991(5): 75 – 84.

Measurement on Suspended Sediment Concentration at Humen Estuary of the Pearl River

TANG Zhao-min¹, HE Zhi-gang¹, REN-jie¹, XIE Zheng-feng²

(1. Research Center for Coastal Ocean Science and Technology, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. School of Environment and Planning Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: The back echo intensity of the waters obtained by using ADP at Humen estuary, the Pearl River in 2004, and synchronous suspended sediment data by experimentation measurement were used to set up a experimental formula, and a time-series profile of high resolution suspended sediment at Humen estuary was calculated by using the formula. The average relative error between the calculated and measured suspended sediment contents is 7.4%, it is inferred that ADP can be used to the measurement of suspended sediments.

Key words: suspended sediment; ADP; Humen estuary; the Pearl River

(上接第 114 页)

Effect of EDTA and LMWOA on Availability of Nickel and Cobalt in Serpentine Soil

FANG Xiao-hang, QIU Rong-liang, ZENG Xiao-wen, TANG Ye-tao, LIU Wen

(School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Effects of chelator addition on the solubility of Ni and Co in serpentine soil were studied by adding EDTA, citric acid and malonate with various concentration. The experimental results indicated that available concentrations of Ni and Co increased with the increase of EDTA or organic acid concentration. EDTA was more effective on the solubility of Ni, Co than citric acid and malonate. The combining ratio, the ratio of molar concentration of heavy metal in solution and molar concentration of organic chelators, of EDTA decreased with its concentration, while the combining ratios of citric acid and malonate increased first and then dropped down. The optimal concentration of EDTA in extracting nickel and cobalt was 1 ~ 10 mmol/L, those of citric acid and malonate were 10 ~ 30 mmol/L.

Key words: EDTA; LMWOA; serpentine soil; availability; nickel; cobalt