

悬浮泥沙浓度的测量^{*}

唐兆民, 何志刚, 韩玉梅

(中山大学近岸海洋研究中心, 广东 广州 510275)

摘 要: 分析了悬浮泥沙浓度测量的几种方法的原理及目前的研究进展, 为悬浮泥沙浓度测量的进一步创新研究和河口海岸研究中新技术的运用提供科学的依据和建议。

关键词: 悬浮泥沙; 浓度; 测量; 遥感

中图分类号: P736.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) S2-0244-04

悬沙的分布、扩散、沉降影响着港口、航道和生态环境等。所以悬沙浓度的测量对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, 归纳起来可分为取样法和不取样法。前者如称重法、比重瓶法等, 它们均存在取样代表性差和取样麻烦等缺陷; 后者有光电法、电导法、同位素法等, 这类方法各有千秋, 但测量时总要有移动探头, 这将导致测量结果不具有“同步性”, 同时也不可避免探头对流场的影响^[1]。常用的方法有水的点采样法、声学方法、核物理方法以及光学方法等^[2]。

下面将分别介绍、对比几种常用的方法、原理及各自的利弊, 从而为悬浮泥沙浓度测量进一步的创新研究和河口海岸研究中新技术的运用提供科学的依据和建议。

悬浮泥沙粒径一般在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 量级。我国沿岸、河口附近水域具有高悬沙量的特点, 长江口南槽表层悬沙浓度在 $100 \sim 700 \text{ mg/L}$ 之间^[2]; 伶仃洋西滩洪季落潮悬沙浓度在 $200 \sim 400 \text{ mg/L}$, 枯季落潮 $200 \sim 300 \text{ mg/L}$ ^[3]。

1 过滤称量法

长期以来, 河流悬沙浓度的现场观测一直采用传统的水样本方法, 在若干代表垂线上, 泊船定时分层采取水样, 经实验室分析后推算整个断面的含沙浓度。悬移质泥沙采用两点法或三点法等, 用 2000 mL 采样器采样; 样品分析严格按规范和协议书的要求, 在过滤前每个水样都先摇匀再量样, 过滤中待海水全部滤干后再加蒸馏水冲洗数次盐酸; 在实验室中, 用马丁炉灰化滤纸, 然后用万分之一

的分析天平称量, 测定泥沙含量, 从而求出悬浮泥沙的浓度, 表层的悬沙浓度常采用 0.2 水深 ($0.2h$) 的泥沙含量^[4]。

含沙量的计算公式如下:

$$\text{悬沙含量} = \frac{\text{校正后的悬沙样品质量}}{\text{水样体积}}$$

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。由于水沙运动的复杂性和观测仪器的限制, 提高现场观测效率, 也是当务之急的大事^[7]。

2 电磁波遥感

它是电磁波为信息传播媒介的遥感。现在常用的是可见光遥感、红外遥感、微波遥感^[8]。光学仪器已广泛应用于悬沙浓度的观测研究中, 它通过应用光的后散射 (光学散射仪) 及光波衰减原理进行测量^[2]。

2.1 可见光、红外遥感的原理及意义

混浊的自然水体主要由泥沙、浮游微生物、有机物和污染物组成, 它们的光谱反射率要比纯净的水体高。特别是含有悬浮泥沙微粒的水体对太阳光具有选择性的散射和反射能力。通常在入射光条件一定的情况下, 不考虑水深、波浪等因素的影响, 水体反射光主要是水中悬浮颗粒所产生的散射的结果。水中悬浮泥沙散射属于米氏散射, 它的强度与水中悬沙颗粒有关, 是悬沙大小、种类、形状和浓度的函数。研究表明, 混浊的水体在 $600 \sim 700 \mu\text{m}$

* 收稿日期: 2002-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40176026); 国家 973 资助项目 (2002CB4124007)

作者简介: 唐兆民 (1969 年生), 男, 博士生; E-mail: eep02tzm@student.zsu.edu.cn

反射效果最好^[9]。Bartolucci 等的研究 (1977) 指出, 当水体的泥沙浓度为 99 mg/L 时, 20 cm 深度的水体即可当作“无限水深”。所以, 我国沿岸、河口附近水域测量的常常是表层悬浮泥沙浓度。

自从地球资源技术卫星 (ERTS) (1972 年 7 月, 后改名为“陆地卫星”1 号) 成功地应用于地球环境遥感后, 尤其是 20 世纪 90 年代后期, 国际上陆续发射多颗海洋水色卫星, 国内外又掀起了遥感热。对各种水体的光谱辐射特性、最佳遥感波段的选择、有效遥感方法的建立和相应的图像处理技术等, 作了大量的研究。对数关系式 (J. Alföldi, 1979); 悬沙浓度的模拟研究 (舒守荣等人, 1982); “七五”攻关黄河口和长江口几种悬沙定量的经验、半经验模式 (恽才兴, 1982); Gordon 关系式及 I 类水体大气校正方法 (Gordon, 1983, 1989); 珠江三角洲部分地物光谱曲线分析 (陈永鸿, 1985); 负指数关系式 (李京, 1986); NOAA AVHRR 悬浮泥沙的提取实用系统 (Stumpf 等, 1989); 灰色模型 (李铁芳, 1990); 悬沙遥感模式识别方法 (Ma 等, 1993); 黄河口悬浮水体光谱的“红移”现象及分段回归模式 (黄海军等, 1994); 悬浮泥沙浓度与峰值波长红移关系 (陈涛等, 1994); 高精度摄像机灰度、悬沙浓度的关系式 (晁晓波等, 1997); 海面、卫星遥感器的相似曲线 (李炎等, 1999); 海面反射率光谱主峰、次级峰的研究 (李京, 1987; 李炎等, 1998); 因子分析法 (傅可忖等, 1999); 比例系数法、斜率算法 (李炎等, 1998, 1999); 泥沙指数算法、多时相悬浮泥沙遥感定量模式 (李四海等, 2001; 2002)。

遥感要求有专有的设备 (如船等) 和较好的天气条件 (无风、无云天气, 小于 3 级海况等)、最佳测试时间 (上午 10 时至下午 3 时左右) 等, 还有正常条件下水体的反射率很低, 测量误差相对较高, 测量的准确性和可靠性也较差, 所以水体的光谱测量和研究具有很大的困难性和复杂性^[10]。对于航空、卫星遥感, 情况就较复杂, 还要考虑气溶胶散射、双程臭氧层透过率等。由于许多原因, 即使在同一地区, 还没有统一的定量模式或模型参数。主要在于: ①缺乏足够、可靠的同步实测定标资料; ②遥感资料未能做有效的辐射和大气校正处理; ③不同时间获取的遥感资料, 因外界的干扰条件不同, 遥感数据本身存在的差异性难以有效消除^[11]。

我国第一颗海洋探测卫星“海洋一号”的发射 (2002 年 5 月), “蓝色国土”上就有了“千里眼”, 为有效地利用海色资料, 进一步开展悬沙定量算法及传感器波段选择具有重要的意义。

2.2 光电法

浊度计或浊度仪的品牌很多, 如意大利的 HI93703、LP2000 系列、上海的 WGZ 系列、苏州的 QZ201 系列、无锡的 GDS-3 系列、OBS-3、光学后向散射 OBS-5 浊度计等。其原理是光束通过含沙水体被吸收、散射后, 剩余的透射部分的光通量符合消光散射定律。关键的是 K 值的选取, 它与光的波长、泥沙颗粒的折光系数、沙色及粒径等有关。

有关光电测沙仪的实用性研究很多。光电泥沙分析仪的研制 (华东水利学院物理教研组, 1978); 光电测沙仪的研制 (徐明才等, 1986); 关于光电测沙仪使用性问题的探讨 (张宗德等, 1995); YM-1 与 ZD-1000 型光电测沙仪实用性比较 (徐詠岗等, 1997); 长江河口横沙小港观测到落潮期间泥沙浓度的高频扰动 (朱建荣等, 1998)。

徐詠岗等 (1997) 分别在室内、水下隧道、长江口及南通港野外实测, 根据 3~5 个沙样确定 K 值后输入仪器, 含沙量可直接显示或打印出来; 水流挟沙能力变化大, 粒径变化大的地方, 需根据数个沙样, 分组求出 K 的值。YM 仪器测试范围为 $0.031 \sim 4.0 \text{ kg/m}^3$, 粒径变化不大的含沙水体, 相对误差小于 20%, 符合水文规范要求。YM 仪器探头像手雷, 现场测试不破坏流线, 不影响流速测验。但电源要求 220 V (YM)^[12]。

2.3 红外测沙法

红外测沙仪原理跟其他光一样, 当射线进入某一水体, 被吸收后, 透过光的强度与入射光的强度之间的关系由朗伯—贝尔定律确定。本仪器不必取样, 将探头直接放在模型中进行在线测量便能连续记录含沙量的变化过程。

红外光电测沙仪的研制^[13] (任裕民等, 三峡坝区泥沙模型试验, 1999), 被测含沙量可达到 30 kg/m^3 , 能测含沙水流的瞬时浓度、垂线分布及时间变化过程。当泥沙粒径范围一定时, 有较好的重复性。该仪器稳定性好, 每天漂移量在 1% 以内。在三峡坝区泥沙模型试验中, 采用该仪器实时监测模型进、出口的含沙量, 具有良好的效果。

从实测资料说明了它的可用性, 但还存在一些问题: ①如何消除 D_{50} 级配影响; ②入射波长, 以及调制频率与颗粒直径 D 存在着一定函数关系 (即米氏理论)。如何利用此理论采用多波长量测和现代计算技术, 来同时求得颗粒直径 D 和浓度与消光关系等。这些问题有待今后在工作实践中不断探索改进^[13]。

2.4 浊度法

浊度法是 YSI 监测的主要水质参数之一, 浊度传感器根据光学原理设计, 光发射器采用的脉冲光源, 不受周边光源干扰, 波长为 860 μm , 发光光纤及检测光纤与探头平面都成 45° , 总测量角为 90° , 聚焦点 8 mm; 浊度测量范围 0 ~ 1000 NTU, 读数可以准确到 $\pm 5\%$ (即 2 NTU), 分辨率达 0.1 NTU。浊度主要决定于粒子对进入样本水体的光线的散射率, 影响浊度读数的因素有叶绿素、浮游植物色素、黄色物质、器件玷污等。

“818/863 珠江河口海洋环境立体监测技术示范项目”, 从 1999 年 7 月 17 ~ 27 日对珠江口伶仃洋部分水质元素进行了调查, 与实测的泥沙浓度建模, 相关系数达到 88% ^[14]。结果表明, YSI 现场采集多参数数据十分便捷, 仪器性能稳定, 数据也较为准确可靠, 可完成走航式测量项目。缺陷是只能测量探头所在位置的悬沙浓度, 测量不同层次的数据时, 需要人为地改变它的入水深度; 造价高昂, 要求的配套设备技术含量高, 目前在国内还少见使用, 由于它具有优越的测量性能和多参数综合的特点, 所以有良好的应用前景。

3 声波遥感

它是以声波为信息媒介的遥感, 一般用超声波遥感^[2]。声学散射方法提供了一种远距离获取悬沙浓度垂向分布的高时空分辨率的手段。从 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^[2]。声学后散射悬沙测量仪 (ABS) 已得到广泛的应用 (Hanes et al, 1998; Libicki et al, 1989; Lynch et al, 1991; Thorne et al, 1993; Crawford et al, 1993; Shi et al, 1997)^[15]。

20 世纪 90 年代以来, 国外利用 ADCP 可以走航观测的特性, 不断研究、开发出它的副产品—声波的背向散射强度进行河流断面的悬沙浓度估测 (Land 等, 1997); (Holdaway 等 1999)。国内学者也进行了广泛的研究。我国第一台声学悬沙观测仪研制、长江口、杭州湾悬沙运动的观测应用 (张叔英, 1994); 声反向散射系统 (黄衍镇等, 1996); 较小含沙浓度下泥沙浓度、散射强度的线性关系 (翟俊芬, 1995; SonTek, 1997); 悬浮泥沙声学观测的原理分析 (张叔英等, 1999); 胶州湾走航式悬沙浓度测量可行性分析 (汪亚平等, 1999); 观测数据特征时刻的标定方法 (张锁平等, 2001); 标定实验中分段线性回归方法 (程鹏, 高抒, 2001); 非线性关系的神经网络模型算法 (吴中等, 2000)。

用来设计测量流速的 ADCP 毕竟不同于用于专

门设计声学后散射泥沙观测系统, 其操作系统和标定方法中存在着一一定的不足, 有待于仪器设计的提高和今后的进一步研究。相比而言, 声学遥测的方法不需要采样, 不干扰水体, 具有高空间分辨率 ($10^2 \sim 10^3 \text{ mm}$), 可以实时、连续观测, 获得悬沙浓度剖面的时间序列, 在沉积动力学研究中, 具有更广阔的应用前景^[15]。

ADP 是美国 SomTek 水文仪器公司生产的新一代声学河流流量测量系统, 也是利用多普勒效应原理, 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^[16]。

4 现场激光测沙仪

Mie 氏激光散射理论指出: 照射在颗粒上的校直激光束, 其大部分能量被散射到特定的角度上。颗粒越小, 散射角越大; 颗粒越大, 散射角越小。激光悬沙测量仪就是根据这一原理设计的, 测沙仪将不同角度上的散射能量记录下来, 通过数学转换成颗粒粒径级配、含沙量和平均粒径。吸收率和体积散射函数是光学固有的两个特性, 吸收率目前可以按常规方法测得, 但是由于技术难度大, 体积散射函数很难测量。美国 Sequoia 科学仪器公司根据激光散射原理, 研制成功一系列用于现场测记悬沙含沙量、悬沙颗粒级配、平均粒径的激光测沙仪。根据不同用户需要, 先后生产了 LISST 系列的激光悬沙测量仪器, 能测量 $0.1^\circ \sim 20^\circ$ 散射角范围内的体积散射函数。它是激光测沙仪的关键技术, 也是该公司的专利技术。其中 LISST-100 和 LISST-25 更适用于水文。这两种仪器的主要技术指标, 含沙量测量范围: $0.1 \sim 7.8 \text{ kg/m}^3$; 误差 $< 20\%$; 颗粒级配: 32 个粒径级, 粒径范围: $1.25 \sim 500 \mu\text{m}$ ^[17]。

激光悬沙测量仪坚固耐用, 使用方便灵活, 可固定在水底或岸边、拖曳、锚泊或装在船前、实验室。可现场测颗粒粒径级配、含沙量和平均粒径, 具有广阔的应用前景。缺点是只能做点、线探测, 价格昂贵。

5 小 结

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; 数据除了在空中上不连续、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, 提高现场观测效率, 完善观测方法是当务之急的大事。

泥沙测验以物测技术为标志, 新技术不断出现, 超声波测沙仪, 光电测沙仪、振动测沙仪, 激

光测沙仪, 激光粒度分析仪等的出现使泥沙的测验数字化、自动化成为可能。虽然这些仪器都因其测量信号受泥沙粒径等影响, 且大多数常规手段只能作点、线探测, 但它仍然是当前泥沙测验的主要方法。

遥感具有观测周期短、时间频率高的优势, 可以实现大面积、实时、同步、连续及密集的海洋探测^[18], 受自然条件影响较小等优势, 有利于观察和研究大面积水域水体泥沙的空间分布和空间运动规律。因此, 我们要加强二类水体中多时相的遥感资料的有效的辐射和大气校正的理论和技术研究, 积累长时间序列的同步实测定标资料, 对深入了解该区悬沙运移的规律和趋势, 因地制宜的搞好海湾地区的建设规划、深水航道的开发、航道整治和维持港口河道的稳定有着重要的意义。

参考文献:

[1] 晁晓波, 等. 数字图像处理技术在悬沙浓度测量中的应用[J]. 四川联合大学学报, 1997, 1(1), 7— 11.

[2] 时钟, 等. 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] 沈焕庭. 潘安定长江口最大浑浊带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.

[4] 吴家学. 黄茅海河口动力及动力沉积研究[D]. 广州: 中山大学河口所, 1994.

[5] 温令平. 伶仃洋悬浮泥沙遥感定量分析[J]. 水运工程,

2001, 332(9), 9— 17.

[6] 谢必勇, 等. 珠江口洪湾水道水体悬移质泥沙反射光谱特性的试验研究[J]. 广东遥感, 1985(3): 55— 76.

[7] 吴中, 等. 悬沙的 ADCP 估测方法[J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 69— 73.

[8] 胡著智, 等. 遥感技术与地学应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 2000.

[9] 罗健, 等. 九龙江口及厦门湾悬沙分布和输移沉积的多时相遥感分析[J]. 水利水运科学研究, 1999, 4: 368— 376.

[10] 赵冬至, 刘玉机. 中国污染水体光谱特征[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.

[11] 李四海, 恽才兴. 河口表层悬浮泥沙气象卫星遥感定量模式研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(2), 154— 160.

[12] 徐詠岗, 徐还. YM— 1 与 ZD— 1000 型光电测沙仪实用性比较[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(3): 52— 53.

[13] 任裕民, 等. 红外测沙仪的研制和应用[J]. 试验技术与管理, 1999, 16(3): 26— 29.

[14] 任杰, 周作付. YSI 的工作原理与操作步骤[J]. 南海研究与开发, 2002(2), 19— 25.

[15] 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.

[16] 杜亚南. ADP 河流流量测验系统在长江口水域的应用[J]. 长江职工大学学报, 2002, 19(1): 55— 56.

[17] 新型现场激光测沙仪[J]. 水利水电快报, 2001, 22(16): 22— 23.

[18] 吴培中. 海洋遥感及其在我国的应用和发展目标[J]. 国土资源遥感, 1993, 3(1): 1— 7.

The Measurement on Suspended Sediment Concentration

TANG Zhao min, HE Zhi gang, HAN Yu mei

(Research Center for Coastal Ocean Science and Technology, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In this paper, some methods on sediment concentration measurement are introduced. And the result is considered as the foundation and suggestion of concentration measurement on suspended sediment and some new technology applied in the estuarine and coastal study.

Key words: suspended sediment; concentration; measurement; remote sensing