

利用光谱辐射计测定不同深度 水体中泥沙含量的新方法*

舒守荣

陈健

(岩溶地质研究所)

(广州地理所)

1985年10月30日收到

一、概 论

海洋、水文和环境调查中,经常需要测定不同深度水体中的泥沙含量。因目前的常规光学遥感技术只能测量表层水体中的泥沙含量,所以满足这种要求的唯一途径迄今仍然是采用传统的水文学方法。这种方法需要用船只运载笨重的采水器采集不同深度的水样,然后将大量瓶装的水样,运送回实验室进行过滤、灼烧、衡重、称重等一系列繁杂操作。对于泥沙含量较高的水体,过滤一升水样就需要十多小时。成百上千水样的过滤,耗时十分惊人。所以这种成本高、效率低的技术现状亟待改善。

利用航空和卫星遥感进行水体泥沙含量的定量测量,对研究河口和河床的演变、悬浮泥沙的扩散和沉积规律、浅海区水深测量和沿岸工程的选址等均具有重要的意义。进行这种测量时,通常要求在被测水域设定许多测点,与飞机或卫星进行同步或准同步水体泥沙含量测定。水面实况数据的同步性,对测量精度有重大影响。传统的水文方法,由于速度太慢,已远不能满足这种同步测量的要求,迫切需要研究一种实时快速测量的新技术,以适应这种需要。

为改变水体泥沙含量测定方面的技术现状,我们在几年前进行的一项水体泥沙含量遥感的模拟研究中,曾提出利用光谱辐射计进行水体泥沙含量遥测的设想^[1]。本研究的目的是将这一设想付诸实现并提高一步,使之成为一种能够测定不同深度水体中泥沙含量的可行方法。

二、原 理

利用光谱辐射计对自然水体(海洋、河流、湖泊、水库),特别是对海水进行泥沙含量测定的主要困难是,仪器的安置和操作问题,波浪闪光导致的严重测量误差以及无法对表层以下水体进行泥沙含量测定。为克服这些技术障碍,本研究特别设计制造了一种水体悬

* 本工作曾得到珠海市委、珠海市环保办和广东省航运局勘探爆破工程公司九洲港作业队的大力协助。邓仁达、石东龙和王传华、陆国祺分别协助进行实验测量和泥沙含量实验室分析,在此一并致谢。

浮物浓度测定装置 (suspended solids concentration determination device, 简称 SSCD 装置)。该装置内的水泵, 可将水体中不同深度的水样抽入水样容器内, 因而水样表面不会产生强烈闪光。光谱辐射计, 则靠支臂固定在 SSCD 装置的上方进行光谱测量。这样的设计安排, 不仅仪器的安置和操作十分方便, 而且测量的几何条件能保持严格稳定。

水体中悬浮泥沙粒子的后向散射特性是泥沙含量遥感的物理依据。传感器在混浊水体上方接收到的总辐射能量 $I(\lambda)\Delta\lambda$, 是下列四部分能量的总和(图 1):

$$I(\lambda)\Delta\lambda = I_{a/w}(\lambda)\Delta\lambda + I_b(\lambda)\Delta\lambda + I_w(\lambda)\Delta\lambda + I_s(\lambda)\Delta\lambda \quad (1)$$

式中: $I_{a/w}(\lambda)\Delta\lambda$ 为空气-水界面的反射能量, $I_b(\lambda)\Delta\lambda$ 为水体底部的反射能量, $I_w(\lambda)\Delta\lambda$ 为水分子的瑞利散射能量, $I_s(\lambda)\Delta\lambda$ 为泥沙粒子的后向散射能量。

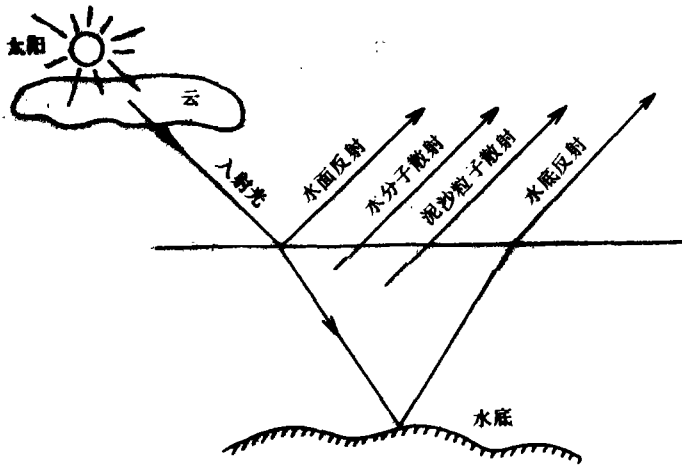


图 1 太阳光在混浊水体中的反射、折射和散射作用

Fig. 1 Reflect, Refract and Scatter of Sunlight in Muddy Water

根据光学原理, 公式(1)中的第一项和第三项, 均与泥沙含量无关, 可当作常量。若混浊水体满足“无限深水”条件, 则 $I_b(\lambda)\Delta\lambda = 0$ 。因此, 公式(1)可改写成

$$I(\lambda)\Delta\lambda = K + I_s(\lambda)\Delta\lambda \quad (2)$$

式中, 常数 K 表示与泥沙含量无关的前三项之和, 与泥沙含量有关的只剩下泥沙粒子的后向散射项 $I_s(\lambda)\Delta\lambda$ 。水体中悬浮泥沙粒子的光散射皆属米氏散射 (Mie's scattering), 散射的强度是粒子种类、形状、粒径、浓度和入射光波长的函数, 而且散射强度具有角分布, 粒径越大, 后向散射作用越强。由此可见, 后向散射项 $I_s(\lambda)\Delta\lambda$, 是反映水体泥沙含量的主要遥感信息。将公式(2)两边各除以入射光的能量, 就可以获得如下反射率形式的公式:

$$R(\lambda) = k + R_s(\lambda) \quad (3)$$

即光谱辐射计在混浊水体上方所测得的光谱反射率, 等于泥沙粒子后向散射的反射率, 加上一个常数项 k 。因此, 如果能够证明 $R(\lambda)$ 在某一光谱波段内与水体的泥沙含量之间具有密切的相关性, 则我们就有可能利用光谱辐射计来定量遥测水体的泥沙含量。我们过去的模拟研究不仅从理论上证实了这种可能性, 而且还用回归分析证明了水体泥沙含量遥感的最佳陆地卫星波段为 TM3 和 MSS5。在这两个波段内, 水体泥沙含量 Y 与水体的

波段反射率 X 之间的最佳回归方程为:

$$\log Y = a + bX \quad (X = \bar{R}_{TM3} \text{ 或 } \bar{R}_{MSS5}) \quad (4)$$

式中 \bar{R}_{TM3} 和 \bar{R}_{MSS5} 分别表示水体在 TM3 和 MSS5 波段内的反射率。为方便计,我们称方程(4)为水体泥沙含量定量遥测的数学模式, X 为最佳光谱特征量。

方程(4)中的系数 a 、 b 主要与下列因素有关:①光谱辐射计和光谱测量条件,②水样容器的几何形状和器壁的物理性质,③光谱波段,④水体泥沙粒子的散射特性。在本研究中,因素②是固定不变的,在适当控制的情况下,因素①也是可以保持不变的。选定了最佳光谱波段(TM3 或 MSS5)后,因素③亦可认为不变,所以,只有因素④随被测自然水体的不同而变化。

对于某一确定的自然水体(如某一水库、湖泊或海洋的某一局部海域),可以通过模拟实验来确定数字模式中的系数 a 和 b 。具体的方法是首先采集水体底部的沉积泥沙,在 SSCD 装置内用人工配制一系列不同泥沙含量 Y 的模拟水体,然后用光谱辐射计测定其最佳光谱特征量 X 。对 X 和 Y 进行回归分析后,即可求得 a 和 b 的数值。

确定了系数 a 、 b 后,就可以将光谱辐射计和 SSCD 装置放到机动船舶上对该自然水体进行泥沙含量的现场实测。设现场测得某一深度水样的光谱特征量为 \bar{R}_{TM3} (或 \bar{R}_{MSS5}),代入方程(4)后,立即就能求得该水样的泥沙含量 Y 。利用可编程序计算器来完成这种计算最为方便迅速。这种遥测方法的最大优点,是测量的实时性和对泥沙含量深度分布的可测性。

现场测量时应注意:①光谱测量条件应与模拟实验中完全一致,②对泥沙粒子散射特性不同的自然水体,不能使用相同的数学模式,应通过不同的模拟实验求得相应的系数 a 和 b 。

三、仪器和测量方法

(一) 仪 器

1. 光谱辐射计

本研究使用的光谱辐射计为手提式比值辐射计(Hand Held Ratioing Radiometer,简称 HHRR,加拿大 Barringer 公司制造)。双光束,滤光片分光。光谱测量范围 0.4—2.5 微米。每一通道的滤光片轮上均可装入五个预选的滤光片,HHRR 既可测量目标的波段反射率,又可测定两个波段的反射率比值。输出方式有两种:液晶数显和模拟输出。仪器备有 MSS 四个波段和 TM 六个波段的标准滤光片,以及大量窄波段滤光片,适合作各种环境实况调查。

2. SSCD 装置

SSCD 装置的构造示意图如图 2 所示,其各部件的功能和技术参数如下:

A. 水样容器:圆柱形,存放被测水体,直径 $\phi = 46$ 厘米,高度 $H = 80$ 厘米,容积 $V \approx 133$ 立升。

B. 水泵:清水泵,功率 370 瓦,吸上高度 7 米,流量 40 升/分,抽满水样容器约需 3.5 分钟。

C. 自动溢流阀: 将水样容器内多余的水样自动溢出, 确保被测水样具有固定的高度(80厘米)。

D. 水下采样器: 扁平圆盘状, 圆柱形壁上有许多小孔。可放置到水体的不同深度, 通过水泵可将某一深度水平方向的水样抽入水样容器。

E. 电磁排水阀: 排放水样容器内的水样, 排放速度 40 升/分, 排完全部水样约需 3、5 分钟。

F. 电动搅拌器: 搅拌被测水样, 使水样各部分的泥沙浓度均匀一致, 并且保证泥沙粒子不沉淀。60 瓦串激电机驱动, 搅拌速度连续可调。

G. 光谱仪支臂及安装座: 支臂为铝合金型材, 高度可调, 最大高度为 1.5 米。光谱仪安装座为相机三脚架的万向云台, 能使仪器倾角任意调节。

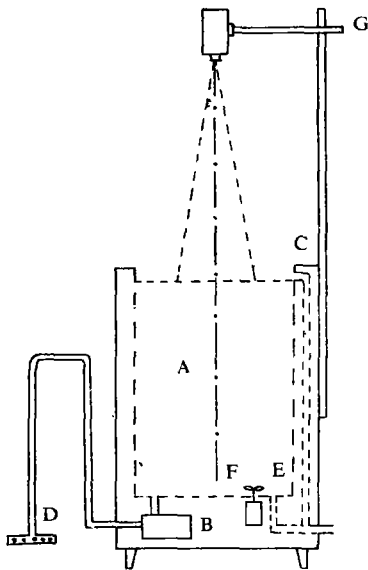


图2 SSSD装置
Fig. 2 SSSD Device

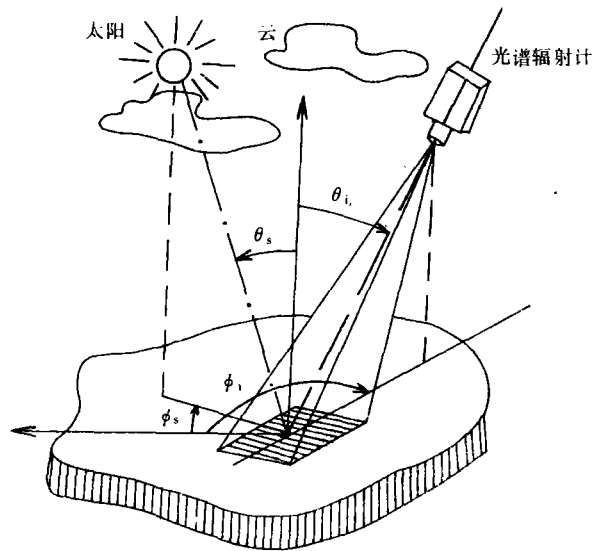


图3 野外光谱测量中的几何参数
Fig. 3 Geometric Parameters of
Spectral Measurement in Field

(二) 测量方法

1. 水体目标和测区的选择

在各种自然水体中, 一般认为测定海水泥沙含量的难度较大。为确定光谱仪遥测法的可行性, 本研究特选择海水作为测量目标。测区选在广东省珠海市的九洲港附近海域。如果在工作和环境条件较恶劣的海上, 能证实方法的可行性, 则在河流、湖泊、水库上应能获得更佳的测量效果。选择港区海域的另一原因是进出港的船舶较多, 船舶推进器在海面造成的大片浊水航迹能为实测提供各种泥沙含量的水样。

九洲港位于珠江口的西岸、珠海市南面五公里处。九洲港附近海域的海底, 其分层结构为软淤泥、硬粘土、沙、沙砾和卵石形成的冲积层, 风化花岗岩层和基岩。该海域的平均

水深较浅,约 1—3 米,少数为 4 米,为一宽阔的浅海区。

2. 光谱测量条件

光谱辐射计在野外所测得的目标的光谱反射率 R_λ ,是太阳天顶角 θ_s 、太阳方位角 ϕ_s 、仪器倾角 θ_i 和仪器方位角 ϕ_i 的函数(图 3)^[2,3]:

$$R_\lambda = f(\theta_s, \phi_s, \theta_i, \phi_i) \quad (5)$$

为获得可靠的野外反射光谱数据,测量几何参数应尽量满足下列条件^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &\approx 0^\circ \\ \theta_s &\leq 40^\circ \\ |\phi_i - \phi_s| &\approx \pi/2 \text{ 或 } 3\pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

本研究中,不论模拟实验还是现场实测,全部光谱测量均按条件(6)进行。此外,为了提高测量精度,每一水样的光谱特征量均重复测量四次,取其均值进行数据分析。

3. 泥沙含量的实验室测定

水样泥沙含量的实验室分析,全部采用传统水文方法,即重量分析法。采样体积为 500 毫升,用中速定量滤纸过滤之后,用镍坩埚在马弗炉中灼烧滤纸,然后用称重法计算水样的泥沙含量。这种方法的实测结果表明,泥沙含量四次重复测定的最大相对标准误差不超过 10%,平均相对标准误差不超过 3.5%。本研究中每个水样泥沙含量的实验室测定值均为四次测量的平均值。

4. 模拟实验

如原理部分所述,对于九洲港测区的海洋水体,需预先通过模拟实验来确定其数学模式(见公式(4))中的系数 a 、 b 。为此,可用该测区的海底沉积泥沙在 SSCD 装置内配制 15 个不同泥沙含量的模拟水体,然后用 HHRR 测定其最佳光谱特征是 X (即 \bar{R}_{TM3} 和 \bar{R}_{MSS3}),泥沙含量 Y 则用实验室方法分析。对模拟水体的 X 和 Y 进行回归分析后,即可求得系数 a 、 b 的准确数值。

5. 现场实测

确定了数学模式后,即可选择晴朗天气进行现场实测。实测时应选择较大的机动船舶运载光谱仪和 SSCD 装置。若船舶太小,风浪中易晃动,不利于测量操作。1985 年 8 月进行现场测量时,海面均有 3—4 级风力和海浪,但仪器功能始终正常,测量亦比较迅速顺利。

在测区内共选择了 21 个测点。这些测点分别分布在航道、防波堤、浅滩和中等水深的海域。每测点的采样深度从 0.1 到 3.5 米不等。现场测量中,为了节省时间,未测 \bar{R}_{MSS3} ,只用 HHRR 测定了 \bar{R}_{TM3} 。由于数学模式已预先输入可编程序的计算器(CASIO /x-180 型),故测得 \bar{R}_{TM3} 后就可从计算器上立即求得每个测点的泥沙含量。实测一次泥沙含量只需 8 分钟(抽吸水样 3.5 分钟,排放水样 3.5 分钟)。

为了判断遥测法的精度,每一测点均回采三个水样,利用实验室方法测定其泥沙含量。

四、数据的处理和分析

表 1 列出了 15 个模拟水体的泥沙含量的实验室测定值 Y ,最佳光谱特征量 X (\bar{R}_{TM3})

和 \bar{R}_{MSS5}) 的测定值,以及系数 a 、 b 和相关系数 r 的计算结果。此外,表 1 还列出了每个模拟水体泥沙含量的回归估计值 \hat{Y} 及其相对误差 $\delta(\delta = (\hat{Y} - Y)/Y \cdot 100\%)$, $\bar{\delta}$ 则为 δ 的平均值($\bar{\delta} = \sum_1^{15} \delta_i / 15$)。根据表 1 所列出的 a 和 b 的数值,我们可以将测区海洋水体的泥沙含量的定量遥测数学模式写成如下的具体形式:

$$\log Y = 0.1815 + 0.0569\bar{R}_{TM3} \tag{7}$$

$$\log Y = -0.4429 + 0.0687\bar{R}_{MSS5} \tag{8}$$

表 1 模拟水体的泥沙含量、最佳光谱特征量及回归分析结果

Table 1 Suspended Sediment Content, the Optimum Spectral Signature Value and Regression Analysis Result of Analog Water Bodies

模拟水体编号	Y (mg/L)	最佳波段 TM3 (0.63-0.69 μ m)			最佳波段 MSS5(0.50-0.60 μ m)		
		X(%)	\hat{Y} (mg/L)	δ (%)	X(%)	\hat{Y} (mg/L)	δ (%)
1	9.2	12.54	7.9	-14.1	19.22	7.2	-21.7
2	12.8	16.74	13.7	7.4	23.61	14.5	13.3
3	25.2	21.69	26.3	4.3	27.38	26.6	5.6
4	57.8	27.96	59.8	3.5	32.42	59.9	3.6
5	80.1	29.10	69.4	-13.3	34.31	81.1	1.2
6	101.8	32.45	107.7	5.8	36.38	113.2	11.2
7	141.4	35.56	161.9	14.5	38.74	165.4	17.0
8	163.2	37.26	202.3	24.0	39.37	183.0	12.1
9	183.8	37.41	206.4	12.3	40.18	208.4	13.4
10	241.4	39.01	254.5	5.4	40.82	231.0	-4.3
11	296.3	39.70	278.6	-6.0	41.85	272.6	-8.0
12	350.0	40.72	318.4	-9.0	42.38	296.8	-15.2
13	406.4	42.09	381.1	-6.2	43.80	372.9	-8.2
14	454.8	43.03	431.0	-5.2	45.28	473.0	4.0
15	510.6	43.12	436.2	14.6	44.85	441.4	-13.6
a, b, r		$a = 0.1852 \quad b = 0.0569 \quad r = 0.9961$			$a = -0.4856 \quad b = 0.0698 \quad r = 0.9953$		
$\bar{\delta}$		9.7%			10.2%		

表 2 为利用光谱辐射计法和实验室分析法,对测区 21 个测点的水体泥沙含量进行测定的结果比较。表中的符号 Y_i 为用光谱辐射计法测定的海水泥沙含量的值, Y_0 为海水泥沙含量的实验室测定值, $\delta = (Y_i - Y_0)/Y_0 \cdot 100\%$ 为 Y_i 相对于 Y_0 的百分相对误差, $\bar{\delta} = \sum_1^{21} \delta / 21$ 为光谱辐射计法的平均相对误差。

由表 2 可见,光谱辐射计法的平均相对误差仅为 10.6%。在海上能获得这样精确的实测结果,应该认为这种遥测方法是切实可行的。

表 2 不同深度海水中泥沙含量的光谱辐射计法和实验室分析法的测定值及误差计算

Table 2 Measurement Value and Error Calculation Measured by a Spectroradiometer and Analysis in Laboratory of Suspended Sediment Content in Different Depth Sea Water

测点号	采样深度 (m)	Y_s (mg/L)	Y_0 (mg/L)	δ (%)	测点号	采样深度 (m)	Y_s (mg/L)	Y_0 (mg/L)	δ (%)
1	0.1	23.4	23.4	0	12	0.5	23.9	25.4	-5.9
2	3.5	18.9	17.8	6.2	13	1.2	34.3	32.0	7.2
3	0.4	28.7	34.2	-16.1	14	0.6	153.2	160.8	-4.7
4	2.5	25.4	27.2	-6.6	15	0.5	23.6	22.6	4.4
5	1.0	32.0	28.2	+13.5	16	3.0	19.6	18.0	8.9
6	1.0	30.4	23.4	29.9	17	0.5	24.3	25.8	-5.8
7	0.7	137.9	157.6	-12.5	18	1.5	32.2	28.2	14.2
8	0.3	25.9	24.0	7.9	19	0.5	142.4	157.6	9.6
9	2.0	22.8	22.6	0.9	20	2.5	22.9	20.4	12.3
10	3.5	20.4	20.6	9.7	21	1.0	32.0	25.8	24.0
11	0.5	27.4	22.4	22.3					

光谱辐射计法的平均相对误差 $\delta = \Sigma\delta_i/21 = 10.6\%$

五、总结和讨论

本研究的主要结论可归纳讨论如下:

①轻便光谱辐射计配合 SSCD 装置可为水体泥沙含量测定提供一种新的手段。与传统的水文方法相比,新方法的最大优点是实时遥测,无需回采水样,速度快,成本低。测定一次泥沙含量只需 8 分钟左右。若提高水样的抽、排速度,则测定时间可进一步缩短。因此,应在水文、海洋和环境的大规模调查中加以推广。

②水体泥沙含量的航空和卫星遥感所要求的水面实况同步测量,以往用传统的泥沙含量测定方法一直难以实现。在理论上,“同步”测量虽然是不可能的,但是,“光谱辐射计——SSCD 装置”系统配合高速运载船舶至少是一种较理想的“准同步”水面实况测量工具。

③水文、海洋和环境调查的一项基本要求是测量不同深度水体中的泥沙含量。一般的光学遥感遥测技术迄今不能满足这种要求。SSCD 装置不但从技术上解决了这一矛盾,作者的另一项研究表明,它还可以用来测定不同深度水体中的叶绿素含量,故 SSCD 装置是一种多用途的水体悬浮物浓度测量设备。该装置的另一优点是船载使用十分方便。若用潜水泵代替清水泵,则可进一步提高 SSCD 装置的采样深度。

④水体中泥沙含量的测定是一个很复杂的问题,虽然光谱辐射计法不失为一种较好、可行的方法,而且平均相对误差仅为 10.6%,但是,水体中的悬浮物除泥沙外,还有其它成份,仅就泥沙含量而言,其散射强度与粒子的种类、形状、粒径、浓度以及入射光的波长等密切相关,其中任何一个因素有变化都会影响测量精度,因此,个别测点的误差高达 20% 以上(表 2),这就提示我们,要提高测量精度,尚需进一步探索。

⑤在 SSCD 装置的设计中,水样容器的容积偏大,所以相对而言电动搅拌器的搅拌功率略显不足。对于泥沙含量较低的测点,由于泥沙中的砂质成分有少量沉底现象,故导致少数测点的测量误差偏高。提高搅拌电机的功率,适当减少水样容器的容积(主要是高度),估计可显著改善测量精度。

参 考 文 献

- [1] 舒守荣,陈健,水体悬浮泥沙含量遥感的模拟研究,泥沙研究,3,第43—51页,1982年。
- [2] Gladwell D. R., Lett R. E. and Lawrence P., Application of spectrometry to Mineral Exploration Using Portable Radiometer, *Econ. Geol.*, Vol. 78, pp. 699—710, 1983.
- [3] Silva L. F., Radiation and Instrumentation in Remote Sensing, Remote Sensing: The Quantitative Approach, Silva L. F. and Davis S. M. Ed., pp. 38—49, 1978.
- [4] 田国良,国外地物波谱辐射特性的野外测试研究概况(地物波谱会议资料选编之二),中国科学院空间科学技术中心,第1—23页,1980年。

A New Method to Measure Suspended Sediment Content In Different Depth Water Using Spectroradiometer

Shu Shourong

(Institute of Karst Geology Guilin, Guangxi)

Chen Jian

(Guangzhou Institute of Geography, Guangdong)

Abstract

A new method to measure suspended sediment content (SSC) in different depth water and a suspended solids concentration determination (SSCD) device specially designed for this purpose are described. Water samples from different depths can be pumped into the ship-carried SSCD device and then their SSC is measured by a spectroradiometer. The optimum spectral bands for SSC remote sensing were proved to be TM3 and MSS5. The study has shown that in this two bands the optimum mathematical models for SSC remote sensing have similar form: $\text{Log}Y = a + bX$ (where $Y = \text{SSC}$, $X = \text{average reflectance within band TM3 or MSS5}$). The results of *in-situ* measurement indicated that the accuracy of the new method was satisfactory. Its average relative error of SSC determination was not more than 11%. Since the new method has advantages such as low cost, high efficiency and SSC real time measurement, to which the conventional hydrological method is incomparable, it is well worth extending it into hydrological, oceanographic and environmental investigation.