

不同深度水体中叶绿素浓度的定量遥测研究*

舒守荣 陈健

(地质矿产部岩溶研究所)

(广州地理研究所)

1988年1月27日收稿

摘 要

在水文、海洋、环境和生态调查研究中,需要一种可以对不同深度水体中的叶绿素浓度进行遥测的新方法。传统的光学和光学遥感技术迄今难以实现这种要求。本文提出了一种可满足这种要求的精密遥测新技术,以及专门为此而设计的 SSCD 装置。水体中不同深度处的水样可用小型水泵抽入 SSCD 装置内,然后用轻便光谱辐射计遥测其叶绿素浓度。一次遥测仅需 4 min 左右。从对 29 个鱼塘的叶绿素浓度进行现场遥测的结果来看,这种方法的平均相对误差只有 3.8%。与传统的分光光度法、荧光分光光度法和色谱法相比,本方法的最大优点是无需采集水样,样品也无需预处理,测量效率可提高几十倍,很有推广价值。

一、引 言

水体的叶绿素浓度在水域初级生产力研究、渔业、水产养殖和水质监测等方面都具有十分重要的意义。近年来,叶绿素 a 在水质和大气污染评价中,起着日益重要的作用。所以,叶绿素浓度的定量探测一直是水体遥感领域中最活跃的研究课题之一。

近代的水文、海洋、环境和生态调查研究,迫切需要一种实时、快速、能够进行大规模调查叶绿素浓度的遥测方法。这种方法不仅要能探测水体表面,而且也要能探测叶绿素浓度的深度分布。当前广泛使用的分光光度法、荧光分光光度法以及近年出现的高压液相色谱分析技术,虽然能作叶绿素浓度的深度分布测量,但效率和成本远远不够理想。常规的光学遥感技术,固然能作大规模调查,但定量遥感的精度和叶绿素浓度的深度分布测量迄今仍是有待研究解决的问题。作者在 1985 年的一项研究中,利用轻便光谱辐射计(简称光谱计)和水体悬浮物浓度测定装置(简称 SSCD 装置)所构成的测量系统,成功地测定了水体悬浮泥沙含量的深度分布^[1]。该项研究为解决不同深度水体中叶绿素浓度的实时遥测奠定了原理和装置方面的基础。实现水体叶绿素浓度遥测,需要解决的问题,仅仅是寻找最佳特征光谱量(characteristic spectral quantity,简称 CSQ)和建立遥测数学模式。

* 本研究曾得到陈述彭先生的关心和鼓励。陈业超、王卫平承担了全部水样的分光光度分析;李永权、石东龙和陈爱玉协助了光谱测量工作,在此一并致谢。

二、方法原理

在作者以前的研究中^[1-3], 已详细地介绍了根据被测目标的光谱特征选择最佳 CSQ 以及利用回归分析建立数学模式的方法。叶绿素浓度遥测的最佳 CSQ 和数学模式, 与泥沙含量的遥测一样, 可通过模拟实验确定。具体的方法是用叶绿素浓度极高的鱼塘水 (约 1000 mg/m³), 在 SSCD 装置的水样容器内, 配制一系列具有不同叶绿素浓度的模拟水体, 然后用光谱计测定它们在 TM 1, 2, 3, 4 波段的反射率 $R_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。我们把 R_i 及 R_i 的各种线性组合称之为特征光谱量, 并用符号 X 表示。设 Y 为模拟水体的叶绿素浓度, 对 X 和 Y 进行回归分析, 即可选出最佳 CSQ, 并得到相应的回归方程, 即数学模式。模拟实验业已证明, 叶绿素浓度遥测的数学模式为

$$\ln Y = a + bX \quad (1)$$

式中, X 为最佳 CSQ, Y 为水体的叶绿素浓度。

若在现场测量中用光谱计测得某一自然水体的最佳 CSQ 值为 X , 代入方程 (1) 后, 可得其叶绿素浓度 Y 。

方程 (1) 中的系数 a 和 b 与下列因素有关: (1) 光谱计和光谱测量条件; (2) SSCD 装置中水样容器的几何形状和表面性质; (3) 光谱特征量 X ; (4) 叶绿素细胞的种类和光散射特性。

在本研究中, 前三个因素可认为固定不变, 只有因素 (4) 可能会随浮游植物的类别而变化。但本研究的实践证明, 浮游植物的种类和种类组成的不同对系数 a, b 并无明显影响。因此, 现场遥测中唯一需要注意的事项是光谱测量条件应与模拟实验相一致。

三、仪器和方法

(一) 仪 器

1. 光谱计

本研究使用的光谱计为手提式比值辐射计 (Hand Held Ratioing Radiometer, 简称 HHRR)^[4]。双光束, 滤光片分光。光谱范围 0.4-2.5 μm 。HHRR 既可测定目标的反射率, 又可测定反射率比值。输出方式有二种: 液晶数显或模拟输出。本研究中采用模拟输出, 利用袖珍数字万用表读数。

2. SSCD 装置^[1]

SSCD 装置的构造示意图如图 1 所示。它由下列部件构成: A. 水样容器; B. 水泵; C. 自动溢流孔; D. 水下采样器; E. 电磁排水阀; F. 电动搅拌器; G. 光谱计支臂和安装座。

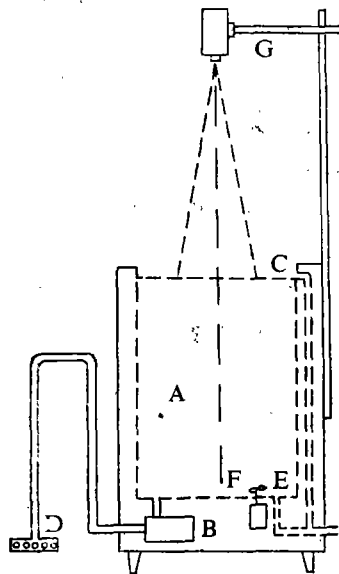


图 1 SSCD 装置

Fig. 1 SSCD Device

(二) 实验方法

1. 光谱测量条件

光谱计在野外所测得的目标的反射率 R_i , 是太阳天顶角 θ_i , 太阳方位角 ϕ_i , 光谱计倾角 θ_s 和光谱计方位角 ϕ_s 的函数^[2]。为获得准确可靠的野外光谱数据, 上述四个几何参数应尽量满足下列条件^[2]:

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

对于叶绿素浓度遥测, 由于目标的反射光谱特性与悬浮泥沙不同, 除上述条件外, 还应注意两点: (1) 由于水体在 $0.4-2.5 \mu\text{m}$ 波长范围的反射率整个都很低, 不易测准, 所以最好用灰板(例如反射率为 25% 左右的灰板)来代替白板, 以提高水样的表现反射率的数值。(2) 实践经验证明, TM 4 波段的反射率 R_i 对叶绿素浓度的遥测具有关键影响。为提高遥测精度, 每个水样 R_i 宜作二三次重复测量。

2. 叶绿素浓度的实验室分析

叶绿素浓度分析采用的方法是联合国教科文组织 (UNESCO) 于 1966 年所推荐的分光光度法^[6]。分析仪器为 721 型分光光度计。由于这一方法在样品制备技术上存在较大缺点, 故分析误差较大。第一个缺点是利用玻璃匀浆器粉碎叶绿素细胞不易达到 100% 的粉碎效果。不同的操作者或不同的操作手法, 往往会导致不同的粉碎效果。另一缺点是叶绿素萃取液的转移次数较多, 造成叶绿素含量的损失。为克服这些缺点, 本研究对 UNESCO 方法中的样品制备技术进行了彻底的改进。我们利用 CPS-1A 型超声波粉碎机(上海超声波仪器厂生产)代替玻璃匀浆器 (homoginizer), 直接对装在离心管内的截留有浮游藻类的微孔滤膜(孔径 $0.60 \mu\text{m}$) 进行粉碎。1.5 min 的超声粉碎即可达到极好的提取效果。由于萃取效率几乎是百分之百, 提取液只需转移一次, 所以显著地改善了分析的精度和再现性。

因叶绿素 a 的浓度对各种研究最重要, 所以本研究只讨论叶绿素 a 的遥测问题。其它色素浓度的遥测在原理上与叶绿素 a 完全相同。本文中凡提到叶绿素浓度的地方, 除非另有说明, 均是指叶绿素 a 而言。

3. 模拟实验

如前所述, 模拟实验的目的是确定最佳 CSQ 和数学模式。为此, 可用叶绿素浓度极高的鱼塘水, 在 SSCD 装置的水样容器内, 配制一系列具有不同叶绿素浓度的模拟水体, 然后用光谱计测定它们在 TM1, TM2, TM3 和 TM4 波段内的反射率 $R_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 。光谱测量完毕后采集水样, 用分光光度计测定每个模拟水体的叶绿素浓度 Y 。对光谱特征量 X 和 Y 进行回归分析后, 即可确定最佳的 CSQ 和数学模式。

4. 现场遥测

确定了最佳 CSQ 和数学模式后, 便可以选晴朗无云的天气对自然水体的叶绿素浓度进行现场遥测。为测量方便和节约费用, 本研究选择鱼塘作为现场遥测的目标。具体的测区选择在广东省珠海市前山区的南溪乡。共测量了 29 个鱼塘的叶绿素浓度和一个 1.8

m 深的深水鱼塘的叶绿素浓度深度分布。这些鱼塘的水色从绿、黄绿、褐绿到灰绿, 颜色差别较大。因此, 从水色可以判断, 这些鱼塘内的浮游植物在种类组成方面存在较大差别。

现场遥测时, 可预先将数学模式输入可编程计算器 (CASIO fx-180 Scientific Calculator), 测得水样的 X 后, 从计算器立即可求得鱼塘叶绿素浓度。一次叶绿素浓度遥测仅需 4 min 左右。

为估计遥测法的精度, 从每个鱼塘均采集三个水样进行分光光度测定。将两种测定结果进行比较, 即可对遥测方法的精度作出判断。

四、数据处理和分析

表 1 为 26 个模拟水体的叶绿素浓度的分光光度测定值 Y 和它们的反射率值 $R_1, R_2,$

表 1 模拟水体的叶绿素浓度和 TM 波段的反射率*
Table 1 Chlorophyll Concentration and Reflectances in Four
TM Bands of Simulated Water Bodies (SWB)*

模拟水体编号 No.	叶绿素浓度 Y (mg/m^3)	TM 波段的反射率			
		R_1 (%)	R_2 (%)	R_3 (%)	R_4 (%)
1	7.23	15.94	11.45	10.05	2.37
2	16.33	17.05	15.92	12.22	3.83
3	17.36	12.95	15.01	10.22	3.28
4	26.03	15.79	17.99	12.52	4.60
5	26.54	18.78	18.91	13.48	5.02
6	36.75	16.58	20.35	13.86	6.23
7	43.39	15.01	20.88	13.08	6.27
8	46.97	17.24	20.87	14.17	7.10
9	52.07	14.25	21.47	12.95	7.19
10	57.17	17.38	21.11	13.94	8.08
11	60.74	14.54	21.71	13.19	7.93
12	67.38	16.18	21.31	13.68	8.75
13	69.45	13.89	22.28	12.96	8.79
14	77.59	15.92	20.80	13.10	9.39
15	78.10	12.54	21.72	12.39	9.09
16	86.78	13.45	22.87	13.14	10.94
17	87.80	13.70	20.12	12.45	10.73
18	95.46	11.25	21.74	12.33	11.26
19	98.00	12.62	19.63	12.09	11.67
20	101.24	12.31	20.42	12.26	10.87
21	104.13	11.11	20.65	11.96	11.64
22	108.21	12.98	19.91	12.07	12.43
23	112.81	11.61	20.56	12.20	12.91
24	118.42	12.23	19.35	11.96	13.45
25	128.63	12.78	19.52	11.93	14.20
26	138.84	12.29	19.01	12.03	15.40

* 本文中的反射率均为相对于反射率为 25% 的标准灰板的反射率。

表 2 五种较优的特征光谱量 X 的回归分析结果
 Table 2 Results of Regression Analysis of Five Selected Characteristic Spectral Quantities X

特征光谱量	回归方程	常 数	回归系数	相关系数	平均相对误差
X		a	b	r	$\delta(\%)$
R_4	$Y = a + bX$	-22.8160	10.5244	0.9949	6.5
$(R_1 + R_2)/R_4$	$\ln Y = a + bX$	5.5505	-0.3071	-0.9985	3.0
$(R_1 + R_3)/R_4$	$\ln Y = a + bX$	5.2829	-0.3209	-0.9931	6.6
$(R_2 + R_3)/R_4$	$\ln Y = a + bX$	5.7436	-0.3889	-0.9943	5.9
$(R_1 + R_2 + R_3)/R_4$	$\ln Y = a + bX$	5.5037	-0.2251	-0.9986	3.0

表 3 鱼塘叶绿素浓度的遥测值和分光光度测定值的比较
 Table 3 CC of Fishponds Determined by Spectrophotometric Method and Remote Detection Technique

鱼塘编号 No.	Y (mg/m^3)	\hat{Y} (mg/m^3)	δ_i (%)
1	106.9	109.7	2.6
2	112.0	115.8	3.4
3	33.8	32.8	3.0
4	75.8	74.2	2.1
5	69.7	70.6	1.3
6	100.5	94.6	5.9
7	72.1	69.2	4.0
8	64.7	62.9	2.8
9	154.6	145.7	5.8
10	103.3	98.3	4.8
11	143.6	146.7	2.2
12	170.1	166.4	2.2
13	152.5	152.7	0.1
14	137.4	133.1	3.1
15	168.2	177.2	5.4
16	97.5	94.6	3.0
17	122.8	114.8	6.5
18	93.4	99.6	6.6
19	49.1	53.1	8.1
20	89.6	94.4	5.4
21	100.0	102.3	2.3
22	63.4	65.2	2.8
23	51.9	56.0	7.9
24	137.1	133.1	2.9
25	78.4	81.3	3.7
26	114.5	110.5	3.5
27	70.4	71.9	2.1
28	80.8	77.6	4.0
29	88.6	90.6	2.3

平均相对误差 $\bar{\delta} = \sum \delta_i / 29 = 3.8\%$

R_3, R_4 。为确定最佳的 CSQ, 共对 18 种 CSQ 进行了回归分析筛选。表 2 列出了 5 种与 Y 相关性最高的 CSQ 及其回归分析结果。这 5 种用符号 X 表示的特征光谱量, 其定义如表 2 所示。表中的回归方程即为利用特征光谱量 X 进行叶绿素浓度遥测的数学模式。设 \hat{Y}_i 为第 i 个模拟水体叶绿素浓度的回归估计值 (即遥测值), Y_i 为对应的分光光度法测定值, δ_i 为 \hat{Y}_i 的相对误差, 则

$$\delta_i = \frac{|\hat{Y}_i - Y_i|}{Y_i} \times 100\% \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 26) \quad (3)$$

表 2 中的 $\bar{\delta}$ 为 δ_i 的平均值, 即 $\bar{\delta} = \sum_{i=1}^{26} \delta_i / 26$ 。从表 2 不难看出, 水体叶绿素浓度遥测的最佳 CSQ 应该是 $X = (R_1 + R_2 + R_3) / R_4$, 定量遥测的最佳数学模式为

$$\ln Y = 5.5037 - 0.2251 \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_4} \quad (4)$$

表 3 是利用遥测法和分光光度法对 29 个鱼塘的叶绿素浓度进行测定的结果比较。符号 \hat{Y} 表示鱼塘叶绿素浓度的遥测值, Y 则表示分光光度测定值。 δ_i 是第 i 个鱼塘的 \hat{Y} 的相对误差, 意义与公式 (3) 中的 δ_i 相同。 $\bar{\delta}$ 是 δ_i 的平均值, 即 $\bar{\delta} = \sum_{i=1}^{29} \delta_i / 29$ 。由表 3 可见, 利用光谱计对 29 个鱼塘的叶绿素浓度进行遥测, 其结果的平均相对误差仅为 3.8%。野外遥测能获得这样高的精度, 充分地证实了遥测方法的可行性和可靠性。

表 4 是利用遥测法对某个 1.8 m 水深的深水鱼塘进行叶绿素浓度深度分布测定所获得的结果。因水深有限, 只测量了 5 个深度处的叶绿素浓度。表 3 的数据表明, 鱼塘叶绿素浓度的极大值不在表层, 而是位于 0.6—0.9 m 深度之间。由于该鱼塘的放养密度很高, 大量越冬的福寿鱼栖息在塘底, 导致接近塘底的水体比较混浊, 因此 1.5 m 深度处叶绿素浓度的遥测值反常偏高。

表 4 某深水鱼塘叶绿素浓度深度分布的遥测结果
Table 4 CC Depth Distribution of a 1.8 m-Deep Fishpond
Determined by Remote Detection Technique

深度 (m)	叶绿素浓度 (mg/m ³)	深度 (m)	叶绿素浓度 (mg/m ³)
0.05	83.1	0.9	92.2
0.3	89.2	1.2	87.2
0.6	92.5	1.5	97.5

五、结 论

本研究的主要结论可归纳如下。

(1) 轻便光谱计加 SSCD 装置测量系统可为水体叶绿素浓度测量提供一种崭新的手段。与传统的分光光度法、荧光分光光度法和色谱法相比, 新方法的主要优点是实时遥测, 无需回采水样, 更不需要水样预处理, 效率高, 成本低。一次遥测仅需 4 min 左右, 测定的精度几乎可与精密仪器分析媲美, 因此在水体叶绿素浓度的大面积调查中有推广价值。

(2) 水域初级生产力研究以及海洋、环境和生态研究中所需要的叶绿素浓度深度分布测量,利用常规的光学遥感技术目前尚难以实现。SSCD 装置不但从技术上解决了这一矛盾,而且还可以应用于水体泥沙含量的深度分布测定,因此是一种多功能的水体悬浮物浓度测量装置。

(3) 水体叶绿素浓度和泥沙含量的定量遥感中,往往需要进行水面实况调查。水面实况调查的同步程度对定量遥感的精度具有关键影响。各种传统的分析技术,由于速度慢,难以达到同步调查的要求,因而严重地限制了叶绿素和泥沙含量遥感的精度。轻便光谱计加 SSCD 装置测量系统配合以高速机动船舶可以成为一种十分理想的“准同步”水面实况调查工具。这种“准同步”调查工具的使用,将会显著地改善这两种水质参数的定量遥感精度。

(4) 一般而言,各种自然水体中的浮游植物的种类组成是不同的。即使是同一水体,在不同的局部区域种类组成亦不尽相同。水色差别往往是种类组成差异的直接反映。本研究利用同一最佳模式对 29 个不同水色、不同地理位置的鱼塘进行叶绿素浓度遥测,均获得了十分满意的结果。这一事实说明,本研究获得的最佳模式与浮游植物的种类组成无关。浮游藻类虽然种类繁多,种类组成千变万化,但它们共同的特点是都含叶绿素 a , b , c 。千变万化的种类组成反映在遥测的基本依据——色素组成方面,仅仅是相对含量的差别而已。若最佳模式中的光谱量是某种色素本身所固有的本征光谱信息,最佳模式又能精确地反映它与含量之间的定量函数关系,则浮游藻类的种类组成变化就不会对最佳模式的普遍适用性产生任何影响。

(5) 由于泥沙含量遥测和叶绿素浓度遥测具有某些相同的最佳特征光谱量(如 R_r),因此一种成分的存在必然会对另一种成分的遥测形成干扰。换言之,本研究所获得的最佳遥测模式,只适用于仅含浮游植物的水体,或泥沙含量较低的叶绿素水体。本研究中所有的鱼塘水体,泥沙含量都较低,故获得了很高的遥测精度。为获得普遍适用的水体叶绿素遥测模式,必须进一步对同时含叶绿素和悬浮泥沙的水体进行更深入地实验研究。

(6) 本研究所得出的最佳特征光谱量和数学模式,对水质定量遥感中的叶绿素浓度算法 (Algorithm) 和图像增强技术亦具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Shu Shourong and Chen Jian, A New Method To Measure Suspended Sediment Content in Different Depth Water Using Spectroradiometer: Technical Papers of the 1986 ACSM-ASPRS Spring Convention, Vol. 5, pp. 190—197, 1986.
- [2] Chen Jian and Shu Shourong, Remote Sensing Estimating of Sugarcane Yield Using Spectroradiometer: Technical Papers of the 1986 ACSM-ASPRS Spring Convention, Vol. 5, pp. 142—150, 1986.
- [3] Shu Shourong and Chen Jian, Simulation Study on the Remote Sensing of Suspended Sediment Content in Water Body: J. of eSdiment Research, No. 3, pp. 43—51, 1982.
- [4] Gladwell, D. R. and et al., Application of Spectrometry to Mineral Exploration Using portable Radiometer: Econ. Geol., Vol. 78, pp. 699—710, 1983.
- [5] Silvo, L. F., Radiation and Instrumentation in Remote Sensing: The Quantitative Approach, Swain P. H. and Davis, S. M. Ed., McGraw-Hill Inc., pp. 42—49, 1978.
- [6] Determination of Photosynthetic Pigments in Sea Water: Monogr. Oceanogr. Methdl., UNESCO, 1966.

QUANTITATIVE REMOTE DETECTION OF CHLOROPHYLL CONCENTRATION IN DIFFERENT DEPTH OF WATER

Shu Shourong

(Instit. of Karst Geology)

Chen Jian

(Guangzhou Instit. of Geography)

Abstract

In hydrological, oceanographic, environmental and ecological investigations, there is usually a great demand for a new technique to remotely detect chlorophyll concentration (CC) in different water depths. However, the conventional optical methods and optical remote sensing techniques can not meet the demand. This paper describes a new technique which can remotely detect CC in different water depths and a suspended solids concentration determination (SSCD) device specially designed for this purpose. The water samples from different depths of water can be pumped into the SSCD device, then their CC were remotely detected by a portable spectroradiometer. It only took about four minutes to finish one CC remote detection. The new technique is dozens of times more efficient than the traditional spectrophotometric, fluorometric and chromatographic methods. The results of in-situ CC remote detection of 29 fishponds showed that the average relative error of the new method was only 3.8%. Since the new technique has great advantages such as low cost, high efficiency and no need of sample collection and sample pretreatment, to which all the conventional methods are incomparable, it is well worth extending it into hydrological, oceanographic and environmental investigations.