

用光谱数据估算水体叶绿素浓度*

田国良 倪晓东

(中国科学院遥感应用研究所)

宋福 赵蔚苓

(中国环境科学研究院生态研究所)

1987年2月4日收稿

摘 要

水体叶绿素浓度是水域研究中的重要参量。本文根据在密云水库测量的水体光谱反射比,用多元线性回归方程,估算叶绿素浓度,相关系数大于0.94。逐步回归分析也得到了相似的结果。同时还比较了估算叶绿素浓度的不同方法,讨论了利用陆地卫星 MSS, TM 和气象卫星 CZCS 波段反射比数据监测叶绿素浓度的可能性。

一、前 言

在水体富营养化研究中,叶绿素浓度是一个重要参量。它影响着水质、水色,它与水域初级生产力之间存在有密切关系。因此对水体中叶绿素的测定是水体富营养化研究中的重要环节。

常规测量水体叶绿素 a 是乘船采集水样,然后在实验室进行分离、测量,不仅费时费力,而且采样点有限,不能反映水体的全面状况。近年来迅速发展的遥感技术能迅速地获得有关水体的信息,通过对这些信息的分析,可以大面积地评价水质,估算水中悬浮物浓度(包括叶绿素浓度)。

近年来,利用遥感技术进行叶绿素浓度测量的研究取得了许多进展,并在不断发展中。Clarke 等人^[1]1970年首先用航空遥感技术测定海水叶绿素浓度,并研究了海水中叶绿素浓度与浮游植物之间的密切关系。此后,许多研究人员在总结大量实验的基础上,建立了估算叶绿素浓度的模式。费尊乐^[2]总结了一些研究者的工作和所建立的叶绿素浓度计算模式,这些计算模式都是应用某些特征波长的水体辐射量进行比值、线性组合和其它变换。但文章没有给出估算的结果和精度。Grew 等人^[3]提出了一种估算海水叶绿素浓度的光谱曲率算法。它可以消除由于入射辐照度引起的变化并增强水体的光谱特征。其估算精度优于 $1.0 \mu\text{g/L}$ 。Bukata 等人^[4,5]先后研究了湖泊水质光学模型。从水中悬浮的和未溶解的有机物和非有机物对入射光的吸收、散射出发,建立了理论模式,从而揭示了利用光谱数据估算水体悬浮物的理论基础,并从理论上分析了海岸带水色扫描仪 CZCS 探测叶绿素浓度的可行性。Smith 和 Baker^[6]用 CZCS 图像估算叶绿素浓度,得出 15

组测量值与计算值的相关系数为 0.89。

本文利用光谱辐射计测量的水体光谱数据建立了估算叶绿素浓度的模式,并通过对各种算法的比较,选择出最好的计算公式,应用于密云水库叶绿素浓度分布的计算中。

二、材料与方 法

水体是一种透明或半透明的液体。入射到水面的太阳光,一部分被水面反射,另一部分折射进入水里。折射光入水后发生选择吸收和散射。这是由于水分子和悬浮物质(包括无机的悬浮物和有机的浮游生物等)引起的。后向散射光与水底反射光一起组成水中光返回水面。通过水—气界面回到空气中,其中包括了表征水特性的光谱信息的后向散射光^[2]。对于一定的水域,水表面和水底反射可视为常数,当水较深或混浊时,水底反射到水面为零。这样唯一能反映水体特征的是后向散射光,它与水中叶绿素、悬浮物及污染物等有关。如果我们能获得水体后向散射光,就可以研究它与水体内叶绿素等悬浮物的关系。

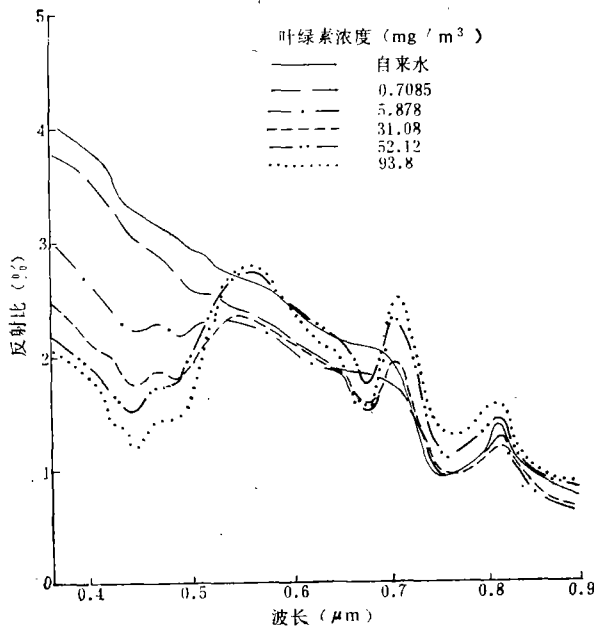


图 1 不同叶绿素浓度的水体光谱反射比

Fig. 1 Spectral Reflectance of Water with Different Chlorophyll Concentration

图 1 是我们测量的模拟不同叶绿素浓度水体的光谱反射比。由图 1 可知,不同叶绿素浓度的水体光谱反射比是有很大差别的。随着叶绿素浓度的增加,在 450 毫微米和 660 毫微米附近吸收增强,560 毫微米附近吸收减少,反射增加。而在 700 毫微米附近反射又相对地增高。由此可知,不同叶绿素浓度的水体具有不同的波谱特性。我们可以根据不同波长处的反射比来估算叶绿素浓度。

本实验区位于北京北部的密云水库。我们选择了 13—18 个测点, 分别在 1986 年 5 月、7 月和 10 月(二次)测量了水体光谱反射比(表 1)。同时采集水样, 用 UV-260 分光光度计测定叶绿素浓度。

表 1 测量情况

Table 1 Measurement Condition

测量日期	测量次数	天气情况	水面情况
5 月 19, 21 日	18	晴朗, 1—2 级风	平静
7 月 14, 15 日	15	晴间多云, 2—3 级风	小波浪
10 月 11 日	14	晴朗, 3—4 级风	波浪
10 月 23 日	13	晴间多云, 2—3 级风	小波浪

测量光谱反射比的仪器为 SE-590 光谱辐射计。这是一种高精度数据记录式光谱辐射计和光谱仪。它利用光二极管阵列器件作为探测元件, 可在很短的时间内同时通过阵列获得 256 个波段的光谱数据, 并通过以微处理机为基础的控制将数据记录在内装小型盒式磁带上。所测量的数据通过 RS 232 接口与微处理机连接, 进行数据回放、处理和分析。

仪器的光谱范围: 368—1140 毫微米

积分时间: 1/64 秒—1 秒

色散: 2.8 毫微米/每扫描元件

分辨率: 8 毫微米

视场: 10°

实验采用相对测量法。参考板选用中国科学院安徽光学精密机械研究所生产的 BaSO₄ 灰板。一般在日周无云情况下测量。为保证测量精度, 用一台照度计来监视测量时的照度变化。在船上测量时, 光谱辐射计采用垂直向下的方式, 并注意避开水面的镜面反射。仪器离水体 2 米左右。每一样点至少测量 4 次, 取其平均值代表该样点的平均反射比。共获得 303 组(每组包括 256 个)光谱数据。在微机上处理了全部数据。同时选择了特征波长的反射比, 并求出了不同波段的平均值。

三、结果和讨论

为了得到叶绿素浓度的最佳估算方法, 我们进行了多种算法比较(表 2)。同时探讨了陆地卫星多光谱扫描仪(MSS)波段和专题制图仪(TM)波段, 以及气象卫星的海岸带水色扫描仪(CZCS)波段反射比估算叶绿素浓度的可能性。

表 2 中 Clarke 算法^[1]如下:

$$C_c = \sqrt{a \left(\frac{R_{600} - R_{470}}{R_{520}} \right) + b}$$

式中 C_c 为海水叶绿素浓度, R_{600} , R_{470} 和 R_{520} 分别为波长 600, 470, 520 毫微米的海面辐射量, a 和 b 分别为函数系数。

表 2 估算叶绿素浓度的方法比较
Table 2 Comparison of Methods for Estimating
Chlorophyll Concentration

算法名称	测量日期	变量数	样本数	相关系数	剩余标准差	F 值
Clarke 算法	5 月	1	18	0.6378	3.7690	10.9738*
	7 月	1	15	0.3266	0.6829	1.5524***
	5 月+7 月	1	33	0.6563	14.3066	23.4547*
Weldon 算法	5 月	1	18	0.7125	0.5874	16.4936*
	7 月	1	15	0.3368	1.8977	1.6632***
	5 月+7 月	1	33	0.7098	1.3933	31.4745*
Grew 算法	5 月	1	18	0.5694	0.1087	7.6760**
	7 月	1	15	0.7611	0.1254	17.9018*
	5 月+7 月	1	33	0.2217	0.2109	1.6026***
七元线性回归 (海洋遥感波段)	5 月	7	18	0.899	0.4637	6.0219*
	7 月	7	15	0.740	1.8477	1.2097

* $\alpha = 0.01$ 显著, ** $\alpha = 0.05$ 显著, *** $\alpha = 0.25$ 显著(下同)

Weldon 算法^[7]如下:

$$C_c = a \left(\frac{R_{620} - R_{470}}{R_{560}} \right) + b$$

它考虑了海水悬浮物质的影响。

Grew 算法^[3]是一种光谱曲率算法,其计算公式为:

$$\log C_c = a \log G_{i,j} + b$$

其中

$$G_{i,j} = \frac{R_{490}^2}{R_{460} \cdot R_{521}}$$

Thomson 等人^[8]提出了对海洋及水资源遥感有用的波段为: 360—380, 420—480, 480—520, 500—540, 520—580, 580—640, 620—680, 690—740, 800—1100 毫微米,对于水质评价,我们选择了中间的七个波段进行了多元回归分析。

由表 2 可知,虽然多数的算法都具有统计的显著性,但相关系数较低,估算的误差较大。因此,采用上述方法都不能很好的估算叶绿素浓度。但多元线性回归却显示了较好的效果。为此,我们根据测量的水体光谱反射特性及叶绿素的吸收特性,选择了十一个特征波长的反射比,作为对水体不同叶绿素浓度的描述。这 11 个波长为 430.6, 460.9, 491.6, 519.6, 561.9, 585.0, 620.2, 655.5, 684.9, 705.5, 786.2 毫微米。考虑到实用性,我们以这些波长为中心,以 10 毫微米的带宽的反射比和叶绿素浓度建立如下回归方程:

$$\begin{aligned} C_c = & B_0 + B_1 R_{430.6} + B_2 R_{460.9} + B_3 R_{491.6} + B_4 R_{519.6} \\ & + B_5 R_{561.9} + B_6 R_{585.0} + B_7 R_{620.2} + B_8 R_{655.5} \\ & + B_9 R_{684.9} + B_{10} R_{705.5} + B_{11} R_{786.2} \end{aligned}$$

式中, C_c 为水中叶绿素浓度 (mg/m^3), 各波长下的 R 是水体反射比。 B_0 — B_{11} 为回归系数,它与水面状况,太阳高度等因素有关。

为了减少无关的参量,我们用逐步回归的方法,也得到了很好的结果。表 3 为多元线性回归和逐步回归的结果,表 4 为它们的回归系数。

表 3 多元线性回归结果

Table 3 The Results of Multi-linear Regression

算法名称	日期	变量数	样本数	复相关系数	剩余标准差	F 值
11 元线性回归分析	5 月	11	18	0.945	0.4475	4.5439**
	7 月	11	15	0.984	0.7479	8.3099*
	10 月 11 日	11	14	0.938	0.7066	1.3234
	10 月 23 日	11	13	0.976	0.3170	1.8614***
	5月+7月+10月	11	56	0.882	0.8534	13.9750*
逐步回归分析	5 月	8	18	0.944	0.3691	9.1608*
	7 月	9	15	0.984	0.5861	16.5247*
	10 月 11 日	9	14	0.934	0.5133	3.0425***
	10 月 23 日	5	13	0.785	0.3440	2.2475***
	5月+7月+10月	3	56	0.874	0.8100	55.8200*

表 4 多元线性回归系数

Table 4 Coefficient of Multi-linear Regression

B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7	B_8	B_9	B_{10}	B_{11}
0.229	10.118	-1.558	-11.058	-1.906	8.764	-0.147	-22.810	17.518	11.993	-6.763	-5.059
10.397	6.882	-12.932	2.648	-0.823	-1.932	4.864	15.961	-29.242	-13.144	34.305	-7.664
-5.744	24.938	7.985	-19.513	2.445	9.587	-9.190	7.472	-13.179	-12.403	23.649	-24.523
5.042	-11.073	20.296	7.915	-21.158	-8.562	8.128	16.668	-15.447	30.168	-30.523	5.389
2.669	-0.977	2.776	-2.405	-1.569	1.157	0.574	2.202	-1.049	-4.733	4.070	0.181
0.269	9.351	0	-12.980	0	7.467	0	-21.559	17.450	11.672	-7.900	-4.342
9.935	4.733	-8.764	0	-0.822	0	3.178	15.330	-25.965	-16.884	35.244	-7.156
-7.773	32.545	9.123	-24.810	3.140	3.575	0	0	-11.299	-8.464	20.572	-28.262
-0.418	1.278	0	0	0	11.043	-12.927	3.056	0	0	0	-1.745
1.983	0	0.740	0	-1.616	0	1.271	0	0	0	0	0

表 3 说明了采用多元线性回归和逐步回归分析方法所建立的估算水体叶绿素浓度模式,具有比表 2 所列的各种算法更高的相关系数和较低的剩余标准差。表中所列的 F 值表明,它们具有显著的统计意义。因而可以根据不同波长的反射比值用这些方程来计算水体中叶绿素浓度。我们不仅分别建立了不同测量时期的回归方程,而且也建立了统一的回归方程。不同时期的回归结果表明,它们的相关系数在 0.938 以上,回归效果相差不大。对于统一的回归方程,复相关系数降低的原因,是由于不同时期测量的条件,如水面状况、太阳高度等因素发生了变化。

图 2 是用不同时期的回归方程计算的叶绿素浓度和实测值的比较。由图 2 可以看出,这种方法是相当成功的。计算值和实测值的相关系数为 0.987。图 3 是用逐步回归方法计算的叶绿素浓度和实测值的比较,它表明这种算法可以得到与图 2 相似的结果。逐步回归的实质是它能在影响因变量的多个自变量中,挑选其中对因变量影响显著的那些

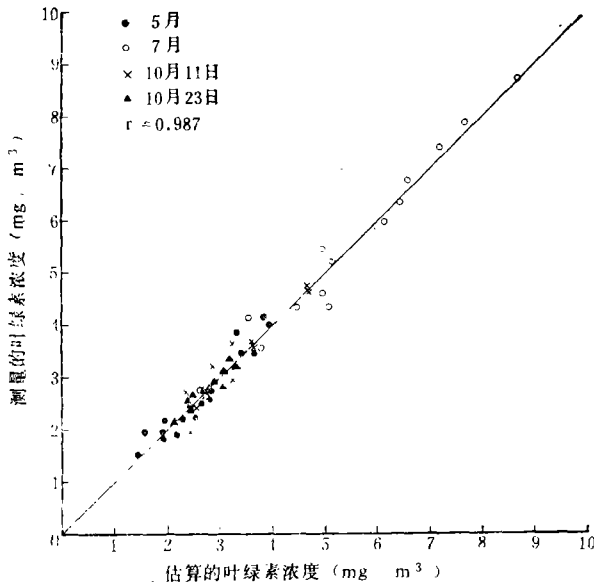


图 2 用 11 元线性回归方程计算的叶绿素浓度和实测值的比较
 Fig. 2 Comparison between Calculated Chlorophyll Concentration with Multi-linear Regression and Measured Values.

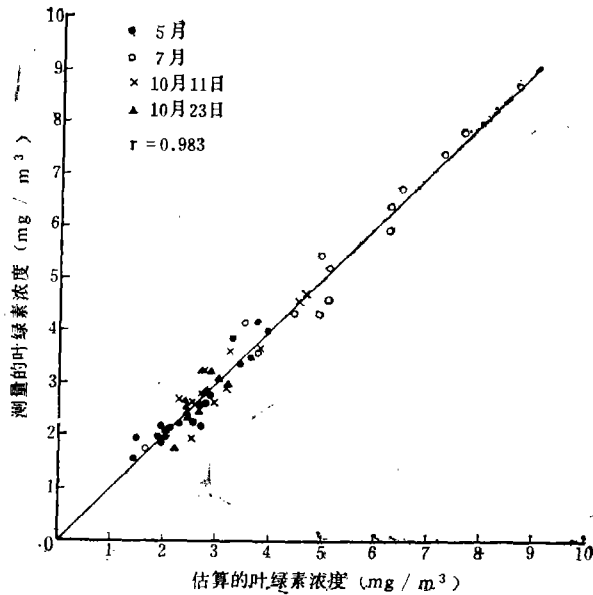


图 3 用逐步回归方程计算的叶绿素浓度和实测值的比较
 Fig. 3 Comparison between Calculated Chlorophyll Concentration with Step Regression and Measured Values

变量来建立回归方程,以便将那些与因变量关系不大的自变量逐次去掉,减少变量个数,简化算法。表 3 说明,多元逐步回归分析获得的复相关系数比多元线性回归方法略微降

低些,但却获得了较低的剩余标准差和较高的 F 值,并减少了光谱反射比变量的个数。对于各月测量值统一的逐步回归分析只用了 3 个变量,其相关系数仅降低了 0.008, 剩余标准差却减少了 0.0434, 而 F 值却提高了 30 多。因而更具有统计显著性。这些结果说明,只要我们选择的波段能反映水体中叶绿素的特征,就可以用少量的反射比值来估算叶绿素浓度,从而大大减少了测量工作量,使用的仪器也可以大大简化。

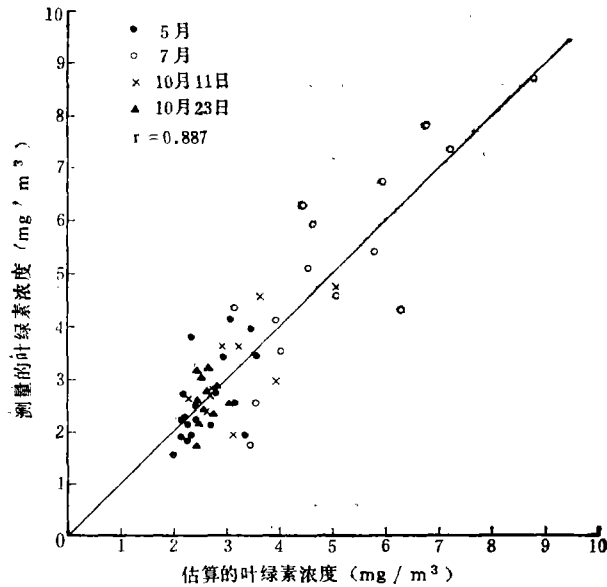


图 4 用统一的回归方程计算的叶绿素浓度与实测值的比较

Fig. 4 Comparison between Calculated Chlorophyll Concentration with a Regression Equation for Different Date and Measured Values

图 4 是用四次测量值建立的统一回归方程计算的叶绿素浓度与实测值的比较。它们要比按不同时期分别计算的结果差一些,但在统计上却是显著的。它的优点是对不同时期测量的反射比可以用统一的模式来计算叶绿素浓度。

如前所述,我们用水体光谱数据可以估算叶绿素浓度。为探讨用陆地卫星及气象卫星图像来估算叶绿素浓度的可能性,我们将测量的光谱反射比值,按陆地卫星 MSS 波段 (500—600, 600—700, 700—800, 800—1100 毫微米) 和 TM 前四个波段 (450—520, 520—600, 630—690, 760—900 毫微米) 及气象卫星 CZCS 的前四个波段 (433—453, 510—530, 540—560, 660—680, 700—800 毫微米) 积分,求这些波段的平均值,再用它们的波段组合或某种变换来建立回归方程,其结果列于表 5。

表 5 中的 MSS 和 TM 变换是指的如下方程:

$$\ln C_c = a + bx_1 - cx_2 - dx_3^2$$

式中 C_c 为叶绿素浓度 (mg/m^3); $x_1 = \text{MSS4}/\text{MSS5}$, 或 $\text{TM1}/\text{TM2}$, $x_2 = \text{MSS4} \times \text{MSS5} \times \text{MSS6}$ 或 $\text{TM1} \times \text{TM2} \times \text{TM3}$, $x_3 = \text{MSS4}/(\text{MSS5} + \text{MSS6} + \text{MSS7})$ 或 $\text{TM1}/(\text{TM2} + \text{TM3} + \text{TM4})$, a, b, c, d 为回归系数。

CZCS 波段变换为

$$\log C_c = a \log \frac{R_{443}}{R_{670}} + b$$

式中 R_{443} 和 R_{670} 分别为 433—453 及 660—680 毫微米波段内的反射比值, a , b 为回归系数。

表 5 用 MSS, TM 和 CZCS 波段反射比建立的回归方程结果

Table 5 The Results of Regression Analysis for the Reflectance of MSS, TM and CZCS bands

算法名称	测量日期	变量数	样本数	相关系数	剩余标准差	F 值
MSS 波段 变换	5 月	3	18	0.758	0.2124	6.2831*
	7 月	3	15	0.772	0.3077	5.4057**
TM 波段 变换	5 月	3	18	0.738	0.2194	5.5913**
	7 月	3	15	0.665	0.3613	2.9125***
TM 波段 线性组合	5 月	4	18	0.755	0.6095	4.2961**
	7 月	4	15	0.582	1.8692	1.2788
CZCS 波段变换	5 月	1	18	0.749	0.0904	19.1779*
	7 月	1	15	0.276	0.1859	1.0733
	5 月+7 月	1	33	0.720	0.1516	32.3483*
	5 月+7 月+10 月	1	59	0.638	0.1361	39.1065*

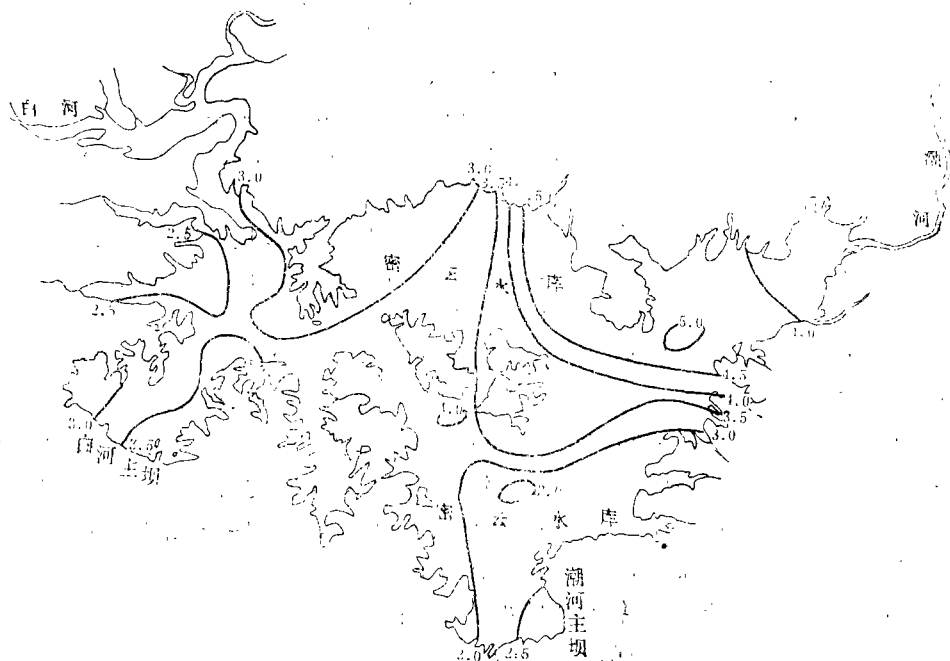


图 5 密云水库 1986 年 10 月份叶绿素浓度 (mg/m^3) 分布图

Fig. 5 Distribution of Chlorophyll Concentration in

Reservoir Miyun, in October, 1986.

表 5 说明, 这些算法在 $\alpha = 0.01$ 或 $\alpha = 0.05$ 的条件下, 多数是显著的。由于水体光谱数据和卫星图像之间有一定的关系, 这个结果表明, 用这些卫星图像有可能进行大面积叶绿素浓度估算。当然, 在使用这些图像时, 要考虑大气的影响。

图 5 是根据各测点测量的光谱数值, 利用多元线性回归计算的密云水库 10 月份的叶绿素浓度的等值线图。

四、结 论

(1) 利用水体光谱反射比数据, 建立多元线性回归方程来估算叶绿素浓度是可行的, 估算值和实测值间的相关系数在 0.98 以上。用此方法计算叶绿素浓度的优点是简单、迅速。

(2) 利用多元逐步回归分析可以减少参量、简化计算和测量, 并获得了与多元线性回归分析相似的结果。

(3) 对陆地卫星 MSS 和 TM 波段及气象卫星 CZCS 波段的光谱数据分析表明, 用这些数据估算水体叶绿素浓度具有统计上的显著性, 因此是可行的。由于这些卫星可以迅速地、大面积地获得水体不同时期的信息, 从而提供了大面积估算叶绿素浓度动态变化的可能性。

(4) 本实验方法受天气条件的影响较大, 光谱反射比的获得是采用相对测量法, 要求在测量水体和参考标准板时, 太阳辐照度不变。因此, 一般要求在晴朗无云的条件下进行, 至少日面上无云。同时, 为减少波浪引起的水体镜面反射, 一般要在风速较小的天气条件下测量, 对于遥感图像也要求无云彩覆盖。

(5) 我们只采用了统计分析方法计算叶绿素浓度, 今后应从理论上研究光在水中的传输特性, 研究悬浮物等对光的吸收和散射特性, 以期更精确地计算叶绿素及悬浮物的浓度。

参 考 文 献

- [1] G. L. Clarke, G. C. Ewing and C. J. Lorenzen, Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measurement of chlorophyll concentration, *Science*, pp167, 1970.
- [2] 费尊乐, 遥感技术应用于海水叶绿素浓度测量的初步探讨, 海洋遥感文集, 海洋出版社, 1980 年。
- [3] Gary W. Grew and Leonard S. Mayo, Ocean Colour Algorithm for Remote Sensing of Chlorophyll, NASA Technical paper 2164, 1983.
- [4] R. P. Bukata, J. H. Jerome, J. E. Bruton, S. C. Jain and H. H. Zwick, Optical Water Quality model of Lake Ontario 1: Determination of the optical cross section of organic and inorganic particulates in Lake Ontario, *Applied Optics*, Vol. 20, No. 9, pp. 1696—1703, 1981.
- [5] P. P. Bukata et al., Optical water Quality of Lake Ontario 2: Determination of chlorophyll a and suspended mineral concentration of natural waters from submersible and low altitude optical sensors, *Applied Optics*, Vol. 20, No. 9, pp. 1704—1714, 1981.
- [6] R. C. Smith and K. S. Baker, Oceanic Chlorophyll concentration as Determination by Satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner), *Marine Biology*, Vol. 66, pp. 269—279, 1982.
- [7] J. W. Weldon, Remote measurement of water colour in coastal waters, N74—16067, 1973.
- [8] F. J. Thomson, et al., A Thematic Mapper Performance Optimization Study, *Infrared Technology for Remote Sensing*, Vol. 3, pp478—491, 1978.

Estimation of Chlorophyll Concentration in Water Bodies Using Spectral Data

Tian Guoliang Ni Xiaodong

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)

Song Fu Zhao Weiling

(Institute of Ecology, Chinese Academy of Environmental Science)

Abstract

Chlorophyll concentration in water is an important parameter in water study. But conventional methods are time-consuming and strenuous. In this paper, the reflectances which characterized the nature of chlorophyll concentration in 400—1100 nm band in spectrum were used to regress with chlorophyll concentrations which were measured in Reservoir Miyun. According to multi-linear regression equation, the chlorophyll concentrations estimated with correlation coefficient more than 0.94. The similar results were obtained by using step regression analysis. The different methods for estimating chlorophyll concentration were compared and possibility of monitoring chlorophyll concentration in water using reflectance data in Landsat MSS, TM and Nimbus CZCS bands was discussed.