

文章编号:1001-9014(2004)01-0011-05

湖泊藻类叶绿素-*a* 和悬浮物浓度的高光 谱定量遥感模型研究

刘堂友¹, 匡定波², 尹球²

(1. 东华大学通信与电子工程系, 上海 200051;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:本文利用地物光谱仪对太湖水体进行了光谱测量和同步采样分析,对获得的数据尝试用光谱分离法进行分析,从中分离出蓝藻和悬浮物的特征波峰,建立波峰高度与同步水质采样得到的叶绿素-*a*浓度和悬浮物浓度的对应关系,得出其遥感定量反演算法,并实际应用在了 OMIS 成像光谱仪图像上。

关键词:光谱;分离法;遥感;叶绿素;悬浮物

中图分类号:P9 **文献标识码:**A

STUDY ON HYPERSPECTRAL QUANTITATIVE MODEL OF CONCENTRATIONS FOR CHLOROPHYLL-*a* OF ALGA AND SUSPENDED PARTICLES IN TAILAKE

LIU Tang-You¹, KUANG Ding-Bo², YIN Qiu²

(1. Department of Communication and Electronic Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract:The water from Tai Lake was analyzed by spectrum measurement and synchronous sampling with field portable spectroradiometer. The characteristic wave peaks of cyanobacteria and suspended particle were obtained from the spectra, and the corresponding relations between the heights of wave peaks and the concentrations of chlorophyll *a* and suspended particle were built. As a result, a quantitative retrieval algorithm is deduced, and the algorithm is applied in the image acquired by OMIS imaging spectroradiometer.

Key words:spectrum; decomposition method; remote sensing; chlorophyll; suspended particle

引言

最近十几年太湖水体的富营养化比较严重,藻类大量繁殖甚至形成水华灾害,对湖区的饮水、旅游、养殖等主体功能造成了严重的损害,为把握水质状况,国家每年都要对太湖的叶绿素-*a*和悬浮物这2个反映水质好坏的主要参数进行检测,这种通过人工采样、过滤、萃取及分光光度计分析确定浓度的监测方法比较费时费力。随着遥感技术的发展,其在水质监测中的作用越来越大,水质遥感监测是通过研究水体反射光谱特征与水质参数浓度之间的关

系,建立水质参数反演算法进行的,与常规采样水质检验相比具有监测范围广、速度快、成本低及便于长期动态监测的优势。

1 采样与分析

1998、1999和2000年3年的夏天在太湖(主要是太湖北部的梅梁湖区域)进行了5次光谱测量试验和同步水质采样,其中有2次与航空成像光谱仪同步测量,共获得了60个样本。对采样的水主要分析了3个指标——叶绿素-*a*浓度、悬浮物浓度和COD_{mn}浓度,该指标委托水利部太湖环境监测中心

收稿日期:2002-03-27,修回日期:2003-08-19

Received Date: 2002-03-27, revised Date: 2003-08-19

基金项目:国家863应用与示范项目“成像光谱仪水质监测方法研究与应用”

作者简介:刘堂友(1969—)男,浙江常山人,东华大学信息学院讲师,博士,主要从事高光谱遥感图像处理与定量反演工作。

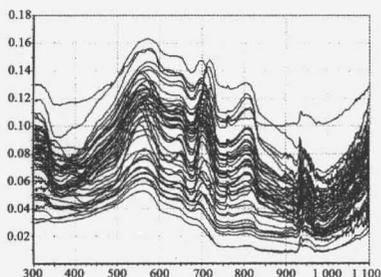


图1 太湖光谱曲线
Fig. 1 Spectra obtained from Taihu Lake

测定。根据对太湖的调查,太湖中的叶绿素-*a* 主要是存在于藻中,而微囊藻占太湖藻类的绝对优势^[1],悬浮物中最主要的是泥沙。

水体光谱使用美国 Geophysical & Environmental Research Corporation 生产的 GER1500 地物光谱仪进行测量,该光谱仪的波段范围为 303 ~ 1100nm,共 512 个波段,光谱采样间隔约为 1.5nm,光谱分辨率 3nm,数字量化 16bit。同步测量的成像光谱仪是实用型模块化成像光谱仪 (OMIS),是由中科院上海技术物理研究所航空遥感研究室研制的,它在可见/近红外/短波红外/热红外 0.46 ~ 12.5 μm 的大气窗口上设置了 128 个光谱波段,在可见/近红外 0.46 ~ 1.1 μm 范围内有 64 个波段,平均采样间隔 10nm。

2 水体的光谱特征

水质同步测量获得的 60 个样本中,剔除了 6 个飘浮藻样本,实际有效样本为 54 个,叶绿素-*a* 的浓度为 1.92 ~ 61.6 $\mu\text{g/L}$,悬浮物的浓度范围为 1 ~ 125mg/L,测得的光谱(如图 1 所示)。从图中可以发现,太湖水体光谱带有明显的叶绿素-*a* 的光谱特征^[1]和悬浮物的光谱特征^[2],即在 675nm 有叶绿素-*a* 的吸收峰和在 700nm 左右的叶绿素-*a* 的反射峰,而叶绿素-*a* 在 440nm 左右的吸收峰和在 550nm 左右的绿色反射峰由于悬浮物的影响而不是很明显。

3 光谱分离法处理光谱数据

对于定量遥感监测叶绿素-*a* 浓度,波段比值法^[2-4]经验法用的比较多,并且到底用那 2 个波段进行比值存在不同的看法,因此本文不用波段比值法,而尝试用光谱分离法^[5]分析光谱数据。

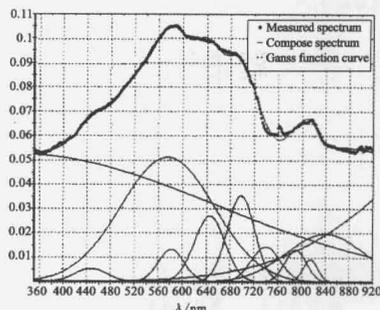


图2 泥沙光谱分离图
Fig. 2 Decomposed spectrum on sediment

太湖水体中光谱响应最大的是藻类和悬浮物,太湖藻类主要是微囊藻,其光谱的各高斯函数参数已分析得出^[5]。对于悬浮物的高斯参数,由于太湖的悬浮物主要是泥沙,故本文的悬浮物的高斯参数以泥沙的高斯参数替代。根据光谱分离法对不同泥沙浓度的多条光谱进行了分离,得出的泥沙光谱的各高斯函数参数如表 1,其中一条光谱的分离合成图如图 2 所示。

联合微囊藻和泥沙的高斯函数对太湖实测光谱进行分离,分离效果图如图 3 所示,分离出的高斯函数峰高与叶绿素-*a*、悬浮物浓度进行线必拟合,分析它们的相关系数发现,叶绿素-*a* 浓度与从微囊藻光谱中分离出的、微囊藻特有的高斯函数峰高的相关系数要高的多,而与从泥沙中分离出的泥沙光谱特有的高斯函数峰高的相关系数要低的多;同样,悬浮物浓度与从泥沙光谱中分离出的、泥沙光谱特有的高斯函数峰高的相关系数要高的多,而与从微囊藻中分离出的、微囊藻特有的高斯函数峰高的相关系数要低的多,其中与叶绿素-*a* 浓度相关系数最高的 2 个高斯函数峰高是中心波长为 703nm 和 722.5nm 的 2 个高斯函数的峰高,相关系数分别达到 0.715 和 0.751,与悬浮物浓度相关系数最高的是中心波长为 575nm 和 698nm 的 2 个高斯函数峰高,分别达到 0.827 和 0.769。

在只有微囊藻的情况下,叶绿素-*a* 浓度与从微囊藻光谱中分离出的高斯函数峰高的相关系数都应该有很好的相关性^[5],但对于太湖实测光谱,叶绿素-*a* 浓度与中心波长为 440.457nm 的高斯函数峰高的相关系数比较低,这是由于泥沙的中心波长为 575nm 的高斯函数,其峰高和半高宽都很大,在一定

表 1 悬浮泥沙光谱的高斯函数参数

Table 1 Parameters of Gauss functions of Spectra from suspended particle

Center wavelength (nm)	FWHM (nm)	Center wavelength (nm)	FWHM (nm)
324	466.3	740	34.6
447	38.3	790	25.5
575	110.2	815	17.8
580	30.6	840	92.9
648	36.0	1240	311
698	32.4		

的程度“淹没”了这些散射信息,另外,微囊藻的叶绿素在 440nm 处有吸收峰,它不但吸收太阳的入射光,也吸收了微囊藻和悬浮物的散射光,从而导致这些散射峰峰高与叶绿素浓度的相关系数的降低;在相关系数比较高的 4 个高斯函数即中心波长为 610nm、653nm、703nm、722.5nm 的高斯函数中,由于它们的峰高相对较小,虽然在近距离用 GER1500 地物光谱仪这种波段窄、信噪比高的仪器测量时有比较好的效果,但在实际的航空航天遥感中,由于距离遥远、遥感器的波段相对较宽、信噪比相对较低,这 3 个高斯函数的实用性要差一些。因此,在水质比较复杂、泥沙浓度较大湖泊中,只能用中心波长为 703nm 这个峰高较大的高斯函数,这个高斯函数峰高与叶绿素-a 的拟合公式如式(1),对应图如图 4。

$$Chl = 1342.6 \times h_{703} - 1.5. \quad (1)$$

在悬浮物特有的中心波长为 575nm、690nm、546nm 和 698nm 的高斯函数中,中心波长为 575nm、698nm 的高斯函数峰高与悬浮物浓度的相关系数较大,从图 2、图 3 看出,这 2 个高斯函数是泥沙光谱的主峰,受其它因素影响较小,因此,这 2 个高斯函数是在以泥沙为主的悬浮物遥感中很起作用的高斯函

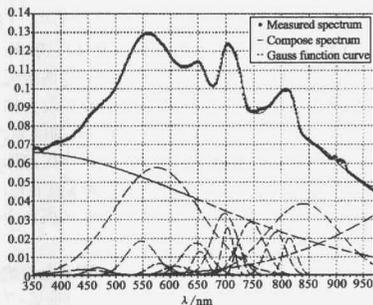


图 3 太湖水体光谱分离效果图

Fig. 3 Decomposed spectrum on water from Tai Lake

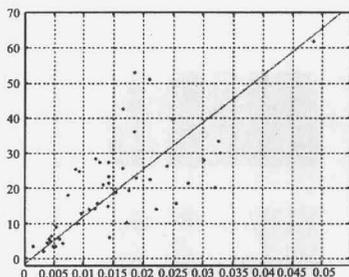


图 4 叶绿素-a 浓度与高斯峰高对应图

Fig. 4 Concentration of Chl-a vs. height of Gauss peak at 703nm

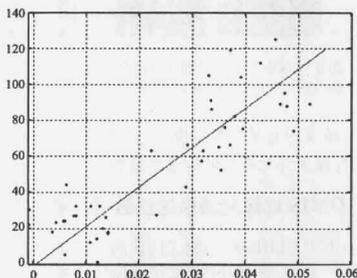


图 5 悬浮物浓度与 698nm 高斯峰高对应图

Fig. 5 Concentration of suspended particle vs. height of Gauss peak at 698nm

数,它们与悬浮物浓度的拟合公式为式(2)、(3),其中式(3)的对应关系图如图 5 所示。

$$Susp = 1486.3 \times h_{575} - 13.4. \quad (2)$$

$$Susp = 2196.2 \times h_{698} - 1.1. \quad (3)$$

从上面分析结果看,叶绿素-a 和悬浮物浓度的相关性都比较好,有较高的精度,特别是叶绿素-a 在浓度比较低的情况下,测点相对集中精度更高,这说明该方法不但能用于重富营养化、富营养化水体,还能用于中富营养化水体。在叶绿素-a 浓度较高时测点比较分散,这是由于湖泊中的藻、悬浮物不均匀,水的波动、流动以及船只的运动,使得采样的水和测量光谱的水不是同一个水体,从而造成较大的误差,并且浓度越高、流动性越大,造成的误差也越大,另外浓度测量的误差也是一个不可忽视原因,如藻和悬浮物的分离不完全,分光光度计法测量叶绿

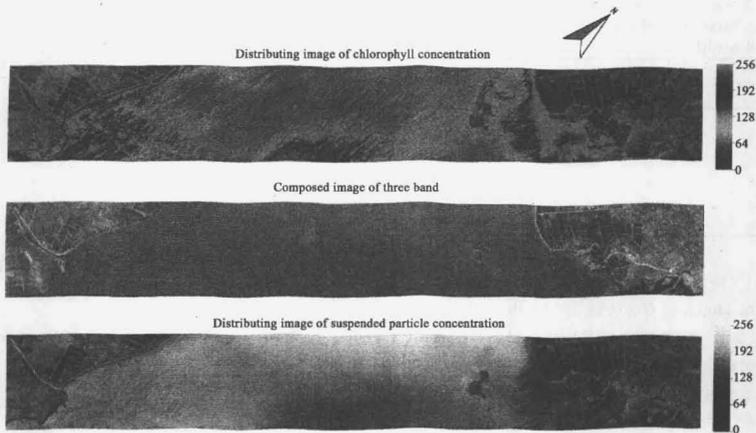


图6 OMIS 反演图像和3波段合成图像

Fig.6 Retrieval image and composed image of three band of OMIS

素- a 浓度时有悬浮物的吸收,会造成叶绿素浓度偏高,而藻上浮会造成叶绿素浓度偏低。

4 OMIS 成像光谱仪遥感数据反演

由于 GER1500 地物光谱仪的波段宽度很窄,平均达 1.5nm,而 OMIS 成像光谱仪的波段宽度较宽,平均为 10nm,接近某些高斯函数的半高宽,如果光谱分离时不考虑波段宽度,会造成较大的误差,因此要对光谱分离公式做一些相应的变化,即对地物光谱仪数据进行积分:

$$R(j) = \sum_{k=1}^M S_{ik} / \sum_{k=1}^M S_{rk} = \sum_{i=1}^N \left(\int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} h_i e^{-(\lambda_i - \lambda)^2 / \omega_i^2} d\lambda \right) + a_1 \lambda_j + a_2 \quad (4)$$

式(4)中 $R(j)$ 是 OMIS 成像光谱仪波段中的第 j 波段的反射率, $j=1, 2, \dots, K$, K 为 OMIS 的总波段数, S_i 为波长在 OMIS 第 j 波段内所有 GER1500 数据的目标光强, S_r 为参考光强, M 为在第 j 个 OMIS 波段内 GER1500 数据的个数, λ_{j1} , λ_{j2} 分别为 OMIS 第 j 波段的起止波长。式(4)写成矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1N} & \lambda & 1 \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2N} & \lambda & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \lambda & \cdots \\ E_{m1} & E_{m2} & \cdots & E_{mN} & \lambda & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_N \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中

$$E_j = \int e^{-(\lambda_i - \lambda)^2 / \omega_i^2} d\lambda \quad (6)$$

由于 OMIS 成像光谱仪的最低波长为 455.7 nm,所以只能从 455.7nm 开始分离光谱。根据公式对太湖实测的 GER1500 地物光谱仪数据按 OMIS 波段进行分离,每一条光谱数据都能求得一系列的高斯函数峰高,然后这些峰高与叶绿素浓度、悬浮物浓度拟合,可求的 OMIS 成像光谱仪数据的叶绿素浓度、悬浮物浓度反演公式。通过计算,反演公式如下:

$$Ch = 1282.3 \times h_{703} - 0.5 \quad (7)$$

$$Su = 2484.2 \times h_{575} - 50.8 \quad (8)$$

$$Su = 2182.2 \times h_{698} + 0.8 \quad (9)$$

比较式(7)和式(1)、式(8)和式(2)、式(9)和式(3)可以发现,由于增加了波段宽度,这两组公式有一定的差异,特别是式(8)回归系数有较大幅度的增大,这是由于 OMIS 成像光谱仪波段的限制,中心波长为 575nm 的高斯峰函数有一部分在成像光谱仪的波段之外,导致在分离光谱时基线值上升,中心波长为 575nm 的高斯函数峰高减小,从而产生误差。

根据式(5)对每一个扫描点的 OMIS 光谱数据进行光谱分离,求出高斯函数的峰高,根据式(7)、(9)用峰高即可求得叶绿素浓度- a 、悬浮物的浓度分布(如图6所示)。

从图 6 中的叶绿素浓度分布可以地看在北部的陆地附近叶绿素浓度成面状分布,浓度很高,而湖中间叶绿素浓度分布呈条带状,浓度要相对小一些,这是由于南风把藻吹向北部,以致北部藻的浓度很高,又由于陆地附近风浪小,藻都漂浮在水面,形成面状分布,在湖中间,由于风浪较大以及浓度相对较小,藻悬浮在水中,形成条带状。对比图 6 中的 455nm、550nm 和 650nm³ 波段合成图可以发现,对于北部的漂浮藻能看出一些,而湖中的悬浮藻基本上看不出,因此叶绿素浓度反演的效果很明显。从图 6 的悬浮物浓度分布可以清楚地看出悬浮物的浓度分布,总体上看,悬浮物浓度比较高,这是由于西太湖大部分区域无水生植物生长,风浪、船只搅动湖底泥沙,使水混浊^[1],导致悬浮物浓度偏高,本图是太湖西北部的图像,反演图较好地反映了这一情况,另外,由于本图北部陆地附近有成片的漂浮藻,射入水中的光线较少,这些地方的光谱主要呈现出藻的光谱特征,故反演出的悬浮物浓度相对较低。

5 结束语

通过本文的分析可知,用光谱分离法能较好地分离出藻类叶绿素-a 和悬浮物的特征光谱,并且由此建立的高光谱定量遥感模型在藻类叶绿素-a 和悬浮物浓度的定量遥感上取得了良好的效果,对分

辨水体中的多种物质、提高定量遥感的精度有一定的意义。

REFERENCES

- [1] Wang sumin, Dou hongshen. *Chinese Lake Catalogue*[M]. Beijing: Science Press(王苏民,窦鸿身,等. 中国湖泊志. 北京:科学出版社), 1998, 9
- [2] Kalló K, Kutser T, Hannonen T, et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons[J]. *The Science of The Total Environment*, 2001, **268**: 59—77
- [3] SHU Xiao-Zhou, YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Relationship between Algal chlorophyll concentration and spectral reflectance of inland water[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(1): 41—45
- [4] LI Su-Ju, WU Qian, WANG Xue-Jun. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in chaochu lake[J], *Journal of Lake Sciences*(李素菊,吴倩,王学军,巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系,湖泊科学), 2002, **14**(3): 328—234
- [5] LIU Tang-You, KUANG Ding-Bo, YIN Qiu. The spectrum experiments of Algae and studies on retrieval quantitative information from its spectra[J]. *Journal of infrared and millimeter waves*, 2002, **21**(3): 213
- [6] Qi Feng, Wang Xue-Jun, Application of remote sensing techniques in monitoring and assessing in land water quality [J], *Advances in Environmented Science*. (齐峰,王学军,内陆水体水质监测与评价中的遥感应用,环境科学进展), 1999, **7**(3): 90—99