

巢湖浮游植物叶绿素含量 与反射光谱特征的关系*

李素菊 吴倩 王学军 朴秀英 戴永宁

(地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学系, 北京 100871)

提 要 利用高光谱地物光谱仪在巢湖进行了反射光谱测量和同步水质采样分析. 在分析巢湖水体反射光谱特征的基础上, 通过研究水体光谱反射率与叶绿素浓度之间的关系, 利用反射率比值法和一阶微分法分别建立了叶绿素 a 的遥感定量模型. 结果表明反射率比值 R_{705nm}/R_{680nm} 和 690nm 反射率的一阶微分均与叶绿素 a 浓度有较好的相关性, 且用反射率比值法估算叶绿素 a 效果较好.

关键词 叶绿素 反射光谱 遥感 巢湖

分类号 P343.3

叶绿素 a 存在于所有的藻类中, 其浓度经常用于估测浮游植物的生物量和生产力, 也是反映水体营养化程度的一个重要参数. 遥感监测叶绿素 a 具有监测范围广、速度快、成本低和便于进行长期动态监测的优势, 北美和欧洲的一些国家早已开展了利用航空遥感监测湖泊叶绿素分布的研究^[1~4], 近年来, 随着高光谱技术的发展, 许多学者进行了利用成像光谱仪监测内陆水体叶绿素 a 浓度的研究^[5~9], 并取得较大的进展.

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, 内陆水体由于浮游植物、黄色物质和非色素悬浮物相互混合, 光学特征复杂, 所以选择受其他物质光学干扰小的波段组合及算法是叶绿素遥感的关键. 利用遥感器测量得到的光谱辐射率或反射率估算水质参数通常有三种方法^[1], 即经验方法、半经验方法和分析方法. 经验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水质参数值之间的统计关系外推水质参数值; 半经验方法是将已知的水质参数光谱特征与统计分析相结合, 选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水质参数值的方法; 分析方法是利用遥感反射率计算水中实际吸收系数与后向散射系数的比值, 与水中各组分的特征吸收系数、后向散射系数相联系, 反演水质组分含量. 其中半经验法最为常用, 本研究的目的是利用地物光谱仪测定巢湖水体的光谱反射率, 并在分析光谱反射率与同步水质检验叶绿素 a 浓度之间关系的基础上, 利用半经验方法选择最佳波段组合, 建立巢湖叶绿素算法, 并为将来利用成像光谱仪数据估算内陆水体叶绿素 a 含量提供参考.

1 采样与分析

研究区域是处于富营养化状态的安徽巢湖. 巢湖形态呈鸟巢状, 东西长 54.5km, 南北

* 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和国家自然科学基金委员会创新群体科学基金(40024101)联合资助.
收稿日期: 2002-02-04; 收到修改稿日期: 2002-04-03. 李素菊, 女, 1974 年生, 博士研究生.

平均宽度 15.1 km, 平均水深 2.4 m, 总悬浮固体含量高, 透明度低, 由于周围城市特别是合肥市污染物的大量注入, 水质污染严重。从生物群落的数量组成看, 蓝藻门在时间和空间上占绝对优势。9~11 月为巢湖蓝藻增殖最旺盛的时期, 其数量占藻类总量的 99% 以上^[10]。为研究巢湖藻类的光谱特征, 采样于 2001 年 11 月 15~16 日进行, 沿巢湖整个水域东西方向的中心轴线均匀布置了 10 个采样点, 进行水面反射光谱测量和同步水质采样。每个采样点待水面平静后先进行光谱测量, 之后立即在同一地点进行水质采样。水质采样使用标准采样器, 从水面至水下 20 cm 处采集水样, 现场进行风力、风向及水体透明度 SD 的测量, 实验室内分析项目包括叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度及浮游植物的种类鉴定, 由合肥市环境监测中心站在采样当天进行分析。叶绿素 a 浓度采用丙酮萃取及分光光度计分析的方法进行测定; 悬浮物浓度测定和浮游植物的种类鉴别分别采用重量法和显微镜法。

水体的反射光谱使用 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 地物光谱仪进行测量, 该光谱仪的波段范围为 325~1075 nm, 共 512 个波段, 光谱采样间隔为 1.6 nm, 光谱分辨率为 3.5 nm, 视场角为 25 度。为减小太阳高度角变化对光谱测量结果的影响, 测量时间集中在 10:00~14:00, 测量时间内天空晴朗无云, 风力 1~2 级, 水面平静, 所以受水面波动变化影响小。水体辐射数据由仪器在距离水面 1.5 m 处, 垂直于水面测量得到, 借助于反射率为 60% 的 F4 漫反射参考板, 仪器自动将水体的向上辐射率转化为水体的反射率, 每次光谱测量扫描 5 次, 每个采样点至少测量 5 次光谱。在所有的采样点, 水体的透明度均较低, SD 最大为 30 cm, 所以不必考虑水底反射的影响。最终的反射率 $R(\lambda)(\%)$ 按公式 $R(\lambda) = \rho(\lambda) \times 60\%$ 计算, 其中 $\rho(\lambda)$ 为测量得到的反射率, 60% 为参考板反射率。

2 结果

2.1 水体光谱反射率特征

同步水质采样分析结果显示, 悬浮物浓度变化较大, 从 9.2~72.8 mg/L, 叶绿素 a 浓度较高, 最高达 94.6 $\mu\text{g/L}$, 藻类优势种为蓝藻门的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae*), 该水体呈典型的蓝藻富营养化状态, 因此水体反射光谱是由黄色物质的吸收、悬浮物的吸收和散射、浮游植物的吸收和散射及水的吸收和散射共同作用的结果。图 1 为 2001 年 11 月在巢湖所取 10 个采样点的光谱反射率, 每个采样点的光谱为五次光谱的平均。

图中的光谱反射率呈现典型的内陆水体光谱特征。在 400~500 nm 范围内, 由于叶绿素 a 在蓝紫光波段的吸收峰及黄色物质在该范围的强烈吸收作用, 水体的反射率较低, 670 nm 附近是叶绿素 a 的又一吸收峰, 因此当藻类密度较高时水体光谱反射率曲线在该处出现谷值; 550~580 nm 范围的反射峰是由于叶绿素和胡萝卜素弱吸收和细胞的散射作用形成的, 该反射峰值与色素组成有关, 可以作为叶绿素定量标志; 因为藻蓝素的吸收峰在 624 nm 处, 所以 630 nm 附近出现反射率谷值或呈肩状; 685~715 nm 范围反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征, 其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据, 反射峰的位置和数值是叶绿素 a 浓度的指示, 其出现原因是由于水和叶绿素 a 的吸收系数之和在该处达到最小^[11], 其中一采样点位置蓝藻密度高, 聚集形成“水华”漂浮于水面, 所以反射光谱表现出类似于植被的特征, 在叶绿素 a 采样分析时具有较大的偶然性^[12], 在下面建立叶绿素 a 反演算法时予以剔除。

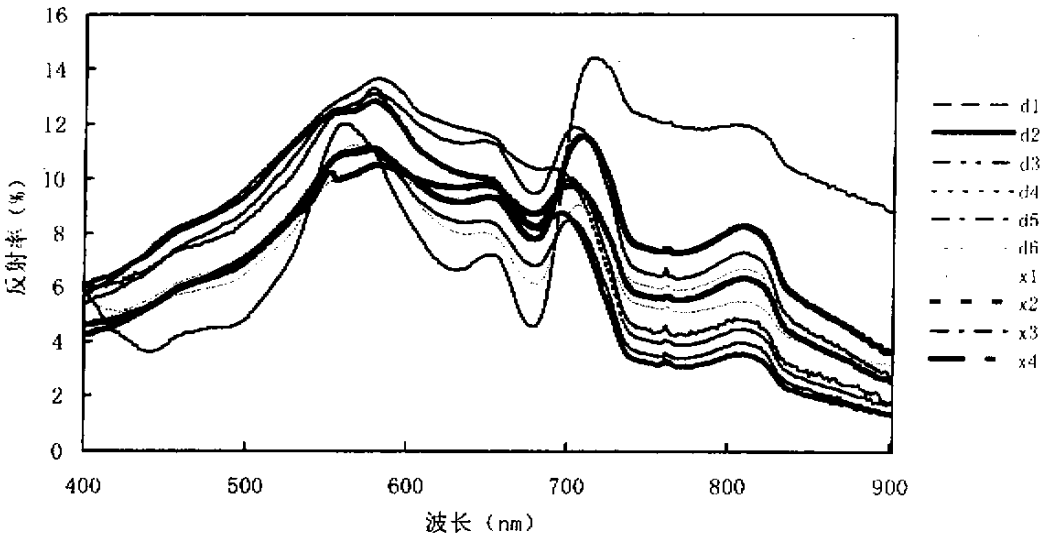


图 1 巢湖光谱反射率

Fig. 1 The spectral reflectance of light over the Chaohu Lake

2.2 叶绿素 a 定量遥感模型

2.2.1 单波段相关分析 由于在湖面进行光谱测量时,天气条件的变化、周围环境的影响及测量角度的变化都会影响反射率数值的大小. 为了便于不同采样点光谱值之间的比较,对每条反射光谱利用其在可见光范围(450~750nm)的波段反射率平均值进行归一化. 归一化后各波段反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数如图 2.

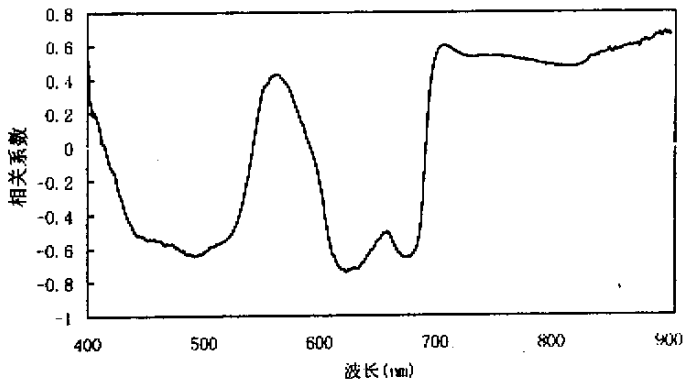


图 2 归一化反射率与叶绿素 a 浓度的相关性

Fig. 2 The correlation between chlorophyll-a concentration and normalized reflectance

在 620nm、680nm 及 705nm 附近相关系数绝对值相对较高,说明在这些波段附近的光谱反射率受浮游植物浓度变化的影响较大,其中前三波段附近为负相关,700nm 附近为正相

关,这三个波段位置分别对应藻蓝素的吸收峰、叶绿素 a 的吸收峰及反射峰的位置。需要指出的是在 500nm 附近反射率与叶绿素 a 浓度呈负相关,且绝对值相对较高,这可能与叶绿素 a 在蓝光波段的吸收峰有关,但总体上单波段反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数较小(最大值为 0.72),说明非色素悬浮物与黄色物质对反射光谱的影响较大,所以本研究中不适宜选择单波段估算叶绿素 a,这与以往对富营养化水体的研究结果相似。

2.2.2 波段比值估算叶绿素 a 利用近红外反射率最大值和红外的反射率极小值附近两个波段的反射率比值,可以定量估算叶绿素 a 浓度。本文在分析巢湖水体反射光谱特征的基础上,选择 705nm 和 680nm 两个波段反射率的比值作为自变量,叶绿素 a 浓度作为因变量进行回归分析,得到回归方程:

$$\text{Chla}(\mu\text{g/L}) = -41.4 + 56.4 \frac{R_{705\text{nm}}}{R_{680\text{nm}}}$$

叶绿素 a 浓度与 $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ 的关系及拟合曲线如图 3 所示,结果表明 $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ 比值与叶绿素 a 浓度有很好的相关性, r^2 达 0.70。波段比值中的 705nm 波段位于高反射率位置,保证了较高的信噪比,680nm 附近叶绿素 a 的吸收特征是唯一的,且两个波段之间彼此靠近,受非色素悬浮物及黄色物质的影响相似,保持了较低的噪声,所以该模型可以用来估算巢湖表面水体的叶绿素 a 浓度。

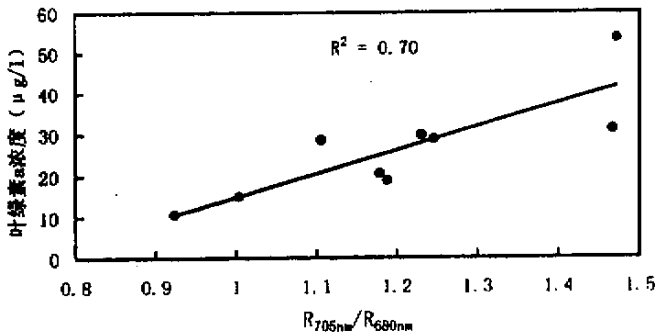


图 3 反射比 $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ 与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 3 Relationship between chlorophyll-a concentrations and reflectance ratios $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$

2.2.3 光谱微分估算叶绿素浓度 对光谱的一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响^[13], Rundquist 等^[14,15]通过大量的现场数据研究证明 690nm 附近反射率的一阶微分值与叶绿素 a 浓度相关系数大,而与浊度变化相关系数小,适合于在其他水质组分存在时用来估算叶绿素 a 浓度,当叶绿素 a 浓度较高时,利用 690nm 处反射率微分估算叶绿素 a 浓度效果最佳,且一阶微分算法的估算精度总体上要高于比值法的估算精度。FieldSpec HandHeld 光谱仪采集的是离散型数据,因此光谱数据的一阶微分可以用以下公式近似计算:

$$R(\lambda_i)' = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

其中, $\lambda_{i-1}, \lambda_i, \lambda_{i+1}$ 为相邻波长, $R(\lambda_i)'$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱. 计算得到的一阶微分光谱如图 4 所示.

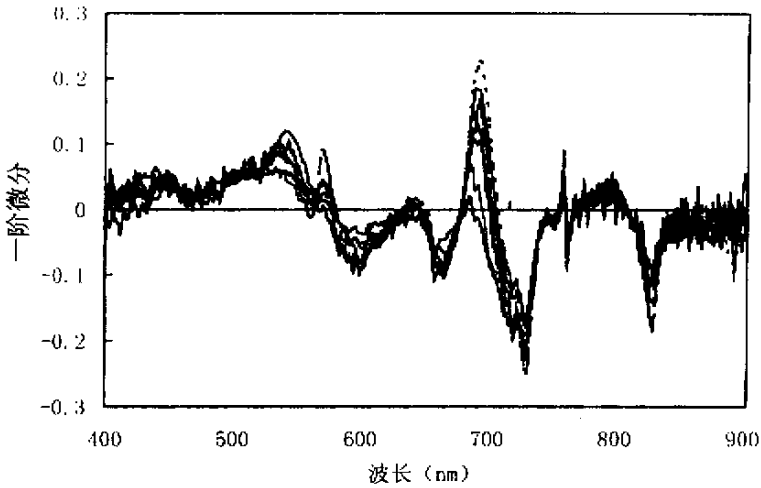


图 4 巢湖水体光谱反射率一阶微分

Fig. 4 First-derivative spectral reflectance spectra over Chaohu Lake

处于近红外反射峰与叶绿素的红光吸收峰之间的 690nm 附近, 反射率的一阶微分值变化幅度最大, 选取反射率一阶微分变化最大的波段 689nm, 分析该波段反射率的一阶微分与叶绿素 a 浓度的线性相关关系(图 5), 从图中可以看出二者有明显的相关性, r^2 为 0.66, 但与前面的比值法相比, r^2 较小. 该结果与 Luoheng^[14] 的研究结论有所差异, 分析原因一方面巢湖叶绿素 a 浓度比 Luoheng 研究湖泊的叶绿素 a 浓度要小得多, 水体的营养化状态不同; 另一方面由于数据量太小, 所以不能进行充分比较, 需要在加大数据量和采样范围后再进行进一步比较.

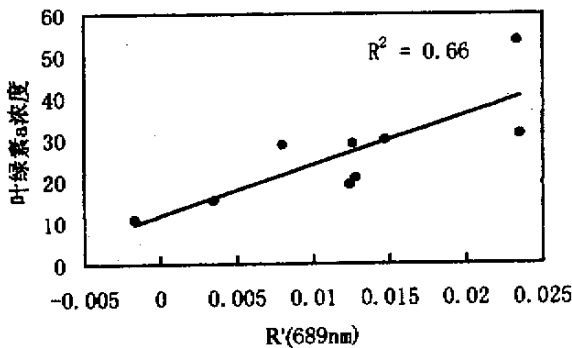


图 5 689nm 光谱反射率一阶微分与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 5 Relationship between chlorophyll-a concentrations and the first-derivative reflectance of 689nm

3 结语

本文在分析巢湖水体反射光谱特征的基础上,通过对光谱反射率与叶绿素 a 的浓度之间的关系进行分析研究,结果表明,单波段光谱反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数较小,不宜用于估算叶绿素 a 浓度. 光谱反射率比值 $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ 和 690nm 反射率的一阶微分均与叶绿素 a 浓度有较好的线性相关性(r^2 分别为 0.70 和 0.66),可以用来估算叶绿素 a 浓度,且 $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ 与叶绿素 a 浓度的拟合度要比与叶绿素 a 拟合度高,所以,遥感估算巢湖叶绿素 a 浓度,采用比值法效果较好.

本实验由于采样点较少,对模型的估算效果没有检验,与已有的研究结果相比, r^2 偏低. 为了对各种算法的估算效果进行实地检验和客观比较,建立估算内陆水体叶绿素 a 的最佳算法,进一步的工作需要加大采样点数量和范围,对多个季节的数据进行分析比较,同时为提高叶绿素 a 算法的估算精度,必须增加对浮游植物、悬浮物及黄色物质固有光学特性的测量和研究.

参 考 文 献

- 1 Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. Doctorate Thesis, Vrije University, Amsterdam. 10—13
- 2 Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi, *et al.* Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. *Int J Remote Sensing*, 1993, **14**(7): 1269—1295
- 3 Fraser R N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes. *Int J Remote Sensing*, 1998, **19**(8): 1579—1589
- 4 Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg Lake District, Germany. *Remote Sens Environ*, 2000, **73**: 227—235
- 5 Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis I J A. Simulaion of AVIRIS Sensitivity for detecting chlorophyll over coastal and inland waters. *Remote Sens Environ*, 1998, **65**: 333—340
- 6 Flink P, Lindell T, stlund C. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 155—169
- 7 Geprge D G, Malthus T J. Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 215—226
- 8 Pulliainen J, Kallio K, Eloheino K, *et al.* A semi-operative approach to lake water quality retrieval form remote sensing data. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 79—93
- 9 疏小舟,汪骏发,沈鸣明等. 航空成像光谱水质遥感研究. *红外与毫米波学报*, 2000, **19**(4): 273—276
- 10 金相灿. 中国湖泊环境(二). 北京: 海洋出版社, 1995: 180—182
- 11 Gitelson A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll. *Int J Remote Sensing*, 1993, **13**(17): 3367—3373
- 12 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. *遥感学报*, 2000, **4**(1): 41—45
- 13 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000: 53
- 14 Luoheng H, Donald C, Rundquilst D C. Comparison of NIR/RED ratio and first Derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir. *Remote Sens Environ*, 1997, **62**: 253—261
- 15 Rundquilst D C, Han L, Schalles J F, *et al.* Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm. *Photogramm, Eng Remote Sens*, 1996, **62**: 195—200

Correlations Between Reflectance Spectra and Contents of Chlorophyll-a in Chaohu Lake

LI Suju WU Qian WANG Xuejun PIAO Xiuying DAI Yongning

(Key Laboratory for Surface Processes, Ministry of Education;

Department of Urban and Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871, P. R. China)

Abstract

Chaohu Lake is one of the biggest freshwater lakes of China. This study was conducted to establish correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu Lake, which was in eutrophic status. Reflectance spectra were measured during November, 2001 by using ASD FieldSpec HandHeld radiometer. Water samples for chlorophyll-a measurements and dominant algal species determination were collected at the same time. The features of the spectral reflectance of the lake were discussed. The correlation between the spectral reflectance of single band and the content of chlorophyll-a was low. The reflectance ratio of $R_{705\text{nm}}/R_{680\text{nm}}$ and the reflectance first-derivative of 690nm were found to be significantly correlated with the contents of chlorophyll-a, and the r^2 gained using the reflectance ratio was higher than gained from the reflectance first-derivative of 690nm's.

Keywords: Chaohu Lake; chlorophyll-a; spectral reflectance; remote sensing