

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0041-05

# 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系

疏小舟, 尹 球, 匡定波

(中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 通过研究内陆水体反射光谱特征与藻类叶绿素浓度之间的关系, 建立藻类叶绿素高光谱定量遥感模型。在实验地太湖地区, 采用高分辨率地物光谱仪实地测量了湖水在可见光和近红外波段(300—1100nm)的反射光谱曲线, 并且同时采样分析叶绿素、总悬浮固体物质浓度等水质参数。研究发现在叶绿素浓度较高时( $>5\mu\text{g/L}$ ), 水体光谱反射比  $R_{705\text{nm}}/R_{675\text{nm}}$ 、叶绿素在 700nm 附近反射峰的位置等与叶绿素浓度有较好的相关性。

**关键词:** 叶绿素; 高光谱; 遥感

**中图分类号:** TP79/Q949.2 **文献标识码:** A

## 1 引 言

内陆湖泊由于有机污染物质的注入, 水体易趋于营养化。富营养化水体的一个重要特征是藻类物质大量繁殖。叶绿素在藻类物质中所占的比例比较稳定, 并且易于在实验室测量, 因此叶绿素浓度常作为反映水体营养化程度的一个重要参数。常规的水质监测是通过采集水样、过滤、萃取以及分光光度计分析, 以确定叶绿素浓度。因而大区域的水环境监测是一项极费人力物力和时间的工作, 采样方法也不可能对大型湖泊内的藻类分布作全面的调查。遥感技术作为一种区域性水环境调查和监测手段, 日益受到重视, 北美和欧洲的一些国家早已开展了利用航空遥感数据监测湖泊群内叶绿素分布的研究<sup>[1,2]</sup>。叶绿素遥感一般是通过实验研究水体反射光谱特征与叶绿素浓度之间的关系建立叶绿素算法<sup>[3]</sup>。对于内陆水体, 其困难在于, 水体中其它污染物质, 如无机悬浮物质和有机溶解性物质(黄色物质)光学效应的干扰, 以及藻类及其它污染物质特性的地域性、甚至季节性的差异。近年来, 成像光谱仪技术发展迅速, 利用高光谱分辨率有可能大大提高叶绿素遥感的精度。

本文目的是研究中国湖泊中含藻类水体的高光谱反射率特性及其与藻类叶绿素浓度之间的关系,

在此基础上建立适合中国湖泊特点的叶绿素高光谱定量遥感模型。

## 2 基本原理

纯净水体在可见光波段的反射率曲线是接近线性的, 随着波长增大, 反射率逐渐减小。在近红外波段, 由于水的吸收系数很大, 水面反射率非常小。自然水体中污染物质的吸收和散射作用使水体的光谱反射率曲线出现峰值和谷值, 这些污染物质主要包括藻类、无机悬浮物质以及黄色物质等。

叶绿素存在于藻类物质中, 在蓝紫光波段(420—500nm)和 675nm 处都有吸收峰, 因此在藻类浓度较度时, 水体反射率曲线在这两个波段出现谷值。含藻类水体最显著的光谱特征是在 700nm 附近常出现反射峰, 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。关于叶绿素反射峰出现的原因并没有定论, 多数研究者认为应归因于叶绿素的荧光效应<sup>[4]</sup>。藻类浓度很低时, 这些光谱特征变得不明显, 甚至消失。如果藻类物质浓度极高, 出现大量漂浮甚至覆盖水面的情况时, 由于藻类细胞在近红外波段的强反射, 水面反射率急剧增大。除了叶绿素的影响外, 藻类物质对反射率曲线的另一个比较显著的影响是由于藻青蛋白在 642nm 处的较大吸收系数, 该波长处出现反射率谷值或肩状。

收稿日期: 1998-11-16; 修订日期: 1999-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 疏小舟(1968—), 男, 1998年在中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位并留所工作, 从事遥感应用技术研究。

悬浮物质的散射作用使水体的反射率在全谱可见光和近红外波段都有所增大,影响最为显著的是在可见光波段。在不同的浓度下,悬浮物质对水体反射光谱特征的影响程度有相当大的差异,L. Han 等对此进行了非常细致的实验研究<sup>[5,6]</sup>。黄色物质的吸收系数在短波长区较大,随着波长的增大,吸收系数呈指数规律衰减,因此其对水体光谱特征的影响主要在短波长区。可以用如下的简单模型近似描述各种污染物质对水体反射率的影响:

$$R_w \approx \frac{b_w + b_s + b_p}{a_w + a_s + a_p + a_y} \quad (1)$$

其中  $R_w$  为水面反射率,  $b_w$ 、 $b_s$  和  $b_p$  分别为水、无机悬浮物质和藻类物质的后向散射系数,  $a_w$ 、 $a_s$ 、 $a_p$  和  $a_y$  分别为水、无机悬浮物质、藻类物质和黄色物质的吸收系数。

### 3 实 验

研究区域是藻类污染严重的太湖地区。太湖地区的气候季节差异性显著,水体中藻类叶绿素浓度在不同季节变化很大。为研究各种不同叶绿素浓度时的情况,分别于 1997 年 11 月和 1998 年 8 月两个典型季节,在太湖水域选择了近 40 个采样点,进行了水面光谱反射率测量和水质采样分析。水质采样使用标准采样器,从水面至水下约 50cm 处采集水样。在夏季实验中,为了防止高温下水样变质,采集的水样立即用冰块加以保存。实验室分析的水质指标主要包括藻类叶绿素浓度、悬浮物质浓度和化学耗氧量(COD),后两个参数只用参考。叶绿素浓度确定采用丙酮萃取和分光光度法,叶绿素-a 是最重要的叶绿素,本文所提到的叶绿素浓度数据都是指叶绿素-a 的浓度。采用烘干称重法确定总悬浮固体物质浓度,化学耗氧量是指高锰酸盐指数( $COD_{Mn}$ ),化学耗氧量反映了水体中有机质的浓度。两次实验所涵盖的水面及水质特性变化范围很大,叶绿素浓度从不能检出变化到  $478\mu\text{g/L}$  悬浮物质浓度为  $0-198\text{mg/L}$ ,  $COD_{Mn}$  为  $2.40-30.2\text{mg/L}$ 。在叶绿素浓度高于  $120\mu\text{g/L}$  时,大多数情况下蓝藻成片漂浮、不均匀分布,采样分析的叶绿素浓度有较大的偶然性。

水体反射光谱测量在距离水面约 1m 处进行,测量方向基本垂直于水面。所使用的仪器为 GER-1500 型便携式地物光谱仪,工作波长范围为  $300-1100\text{nm}$ ,有 512 个波段,波段宽度约为  $1.6\text{nm}$ 。借助对标准余弦反射板的测量,可以将水面反射强度转

化为反射率。相对光谱反射强度曲线而言,水面的光谱反射率曲线能更清楚地反映藻类叶绿素的光谱特征。在所有采样点,水体都比较浑浊,均不可见底,不必考虑水底反射的影响。在每个采样点,至少进行 3 次反射光谱测量。图 1 是在各采样点测量的水面光谱反射率曲线。由于在湖面进行反射光谱测量时,环境遮挡、测量角度的变化都会影响反射率绝对数值的大小,为了便于对不同测量结果进行比较,每条反射率曲线都利用其在  $420-750\text{nm}$  波段的平均反射率进行归一化,归一化反射率计算式为:

$$R_w(\lambda_i) = \frac{L_w(\lambda_i)/L_R(\lambda_i)}{\int_{420\text{nm}}^{750\text{nm}} L_w(\lambda)d\lambda / \int_{420\text{nm}}^{750\text{nm}} L_R(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

其中  $L_w(\lambda)$  和  $L_R(\lambda)$  分别为对应于某一波长  $\lambda$  的水面和标准板的反射强度。

水体反射光谱曲线最显著的特征是由于水在近红外波段的吸收系数迅速增大,因而反射率迅速降低,图 1 中的大多数反射率曲线符合这一规律。但在一些采样点,由于漂浮性的蓝藻浓度高,以至完全地覆盖了水面,因此一些反射率曲线表现出类似于植被的光谱特征,在近红外波段的反射率甚至高于在可见光波段的反射率。对于这样的水域,叶绿素浓度极高,作为水质参数,并没有实际的意义,但是足以说明藻类污染的严重程度。

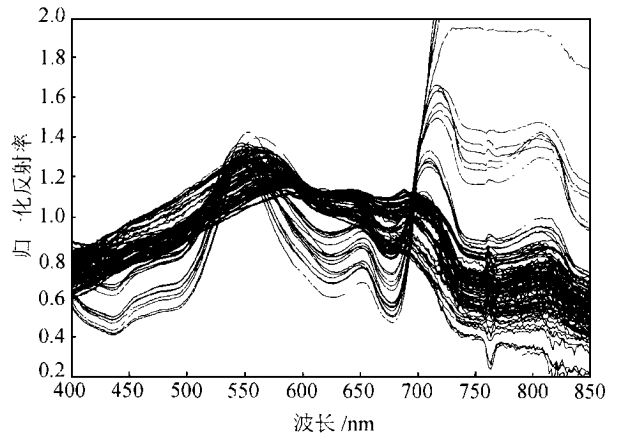


图 1 用  $420-750\text{nm}$  波段平均反射率进行归一化后的反射率曲线

Fig. 1 Spectral reflectance normalized by average reflectance in the range of  $420-750\text{nm}$

### 4 结 果

图 1 中的反射率曲线显著地反映了藻类叶绿素的吸收和反射特征,部分波段的相对反射率与叶绿

素浓度密切相关。利用线性回归分析得到各波段反射率(用 420—750nm 波段平均反射率归一化)与叶绿素浓度的相关系数如图 2。在 700nm、620nm 及 675nm 等波长附近的相关系数都比较大,并且在 700nm 附近为正相关,在 620nm 和 675nm 附近为负相关。事实上,700nm 附近为叶绿素的反射峰,675nm 为叶绿素的吸收峰,620nm 附近为藻青蛋白的吸收峰。由于藻青蛋白同样是藻类的重要成分,其吸收系数与叶绿素浓度存在间接的相关性。

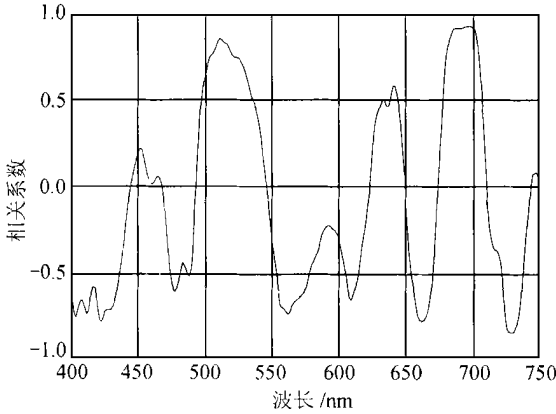


图 2 归一化反射率与叶绿素浓度的相关性

Fig. 2 Correlation between chlorophyll concentration and normalized reflectance

采用反射比可以大大减小数据处理的难度,在叶绿素遥感中,通常是研究波段反射比与叶绿素浓度的相关性。本文采用叶绿素吸收峰和反射峰所在波段的反射比  $\frac{R_{705nm}}{R_{675nm}}$ ,其与叶绿素浓度的线性相关系数超过 0.9。对采样测量的叶绿素浓度与反射比  $\frac{R_{705nm}}{R_{675nm}}$  数据进行二次多项式拟合。考虑到藻类密集漂浮时,水体采样的偶然性,在拟合时这些数据点予以剔除。多项式拟合度约 0.92,拟合关系式为:

$$Chl(\mu g/L) = -27.46 - 42.672 \frac{R_{705nm}}{R_{675nm}} + 75.906 \left( \frac{R_{705nm}}{R_{675nm}} \right)^2 \quad (3)$$

叶绿素浓度与反射比  $\frac{R_{705nm}}{R_{675nm}}$  的关系及其拟合曲线如图 3,在图 3 中也显示了藻类密集漂浮区的数据(实圆点),部分数据符合(3)式,但有些数据与拟合结果明显相差比较大。

进一步的分析发现,如果光谱分辨率有所降低(如波段宽度增大到 20nm),但能分辨出叶绿素在 675nm 处的吸收特征和在 700nm 附近的反射峰特

征,这两个波段的反射比也同样与叶绿素浓度有比较好的相关性,但拟合关系式与(3)式有一定的差异。采用反射比估算叶绿素浓度的优点还包括比较容易测量,以及在一定程度上减小其它污染物质的影响。在 675nm 和 705nm 这两个相近的波长处,悬浮物质和黄色物质对水体反射光谱的影响也是相似的。

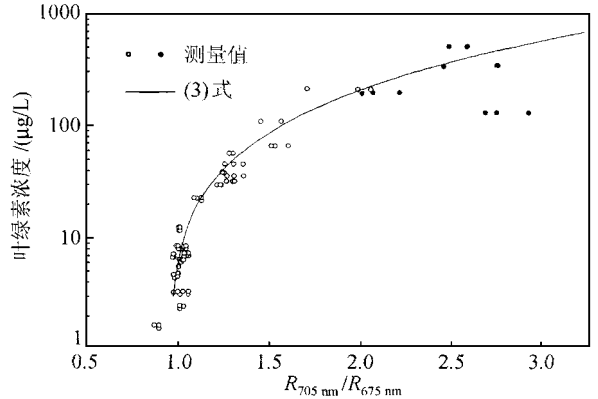


图 3 反射比  $R_{705nm}/R_{675nm}$  与叶绿素浓度的关系

Fig. 3 Relationship between chlorophyll concentrations and reflectance ratios  $R_{705nm}/R_{675nm}$

Gitelson<sup>[7]</sup>首先观察到叶绿素在 700nm 附近的反射峰的位置是随着藻类叶绿素浓度的增大向长波方向移动的,并且提出可以用下式描述(单位为 nm):

$$\lambda_{max700} = 683.51 + (0.268 \pm 0.0075) C_{chl} \quad (4)$$

在本文实验数据中,叶绿素浓度很低时,观察不到明显的反射峰;在藻类密集覆盖水面时,近红外波段的反射光谱曲线走平,没有明显的峰值出现。对于其它采样点,叶绿素反射峰的位置从低叶绿素浓度时的约 685nm 变化到高浓度时的约 720nm。图 4 中是叶绿素在红光波段反射峰的位置随叶绿素浓度变化的情况,但变化关系不能采用(4)式中的线性拟合。对于大部分采样点,测量的叶绿素大大低于利用(4)式估算的值,这可能是由于在不同地域藻类特性的差异,在太湖水域,漂浮性的蓝藻为优势种,常浮在表层水中,与沉水性的硅藻相比,能更显著地影响水体光谱特征。

考虑到低叶绿素浓度时,叶绿素在 700nm 附近反射峰不明显,或者不尖锐,其位置很难确定,本文利用叶绿素浓度超过 5 $\mu g/L$  时的数据进行拟合(其中藻类密集覆盖水面时的数据也被剔除),叶绿素浓度与该峰值的位置是一种非常好的指数关系,拟合度  $R^2$  达到 0.89,拟合关系式为:

$$\log_{10}(Chl) = -34.512 + 0.0513 \lambda_{max700} \quad (5)$$

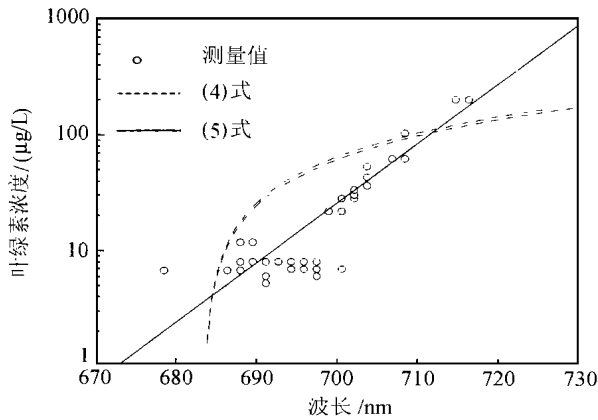


图 4 叶绿素浓度与 700nm 附近反射峰位置的关系

Fig. 4 Chlorophyll concentration via position of reflectance peak near 700nm

其中  $Chl$  为叶绿素浓度, 单位为  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,  $\lambda_{\max 700}$  为叶绿素反射峰位置, 单位为  $\text{nm}$ 。拟合曲线及其与(4)式的比较如图 4。

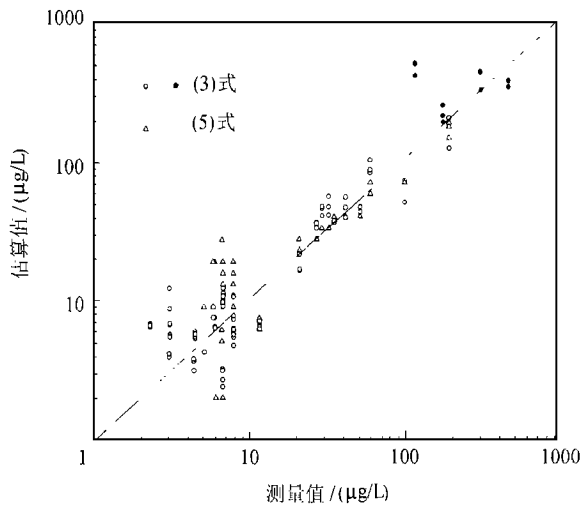


图 5 根据(3)式和(5)式估算的叶绿素浓度与测量值的比较

Fig. 5 A comparison of the predicted and observed chlorophyll concentration

在图 5 中将由(3)式和(5)式得到的估算值与叶绿素浓度的实际测量值进行了比较。可以发现, 在叶绿素浓度较高时, (5)式的估算结果要优于(3)式, 但当叶绿素浓度低于  $10\mu\text{g}/\text{L}$  时, 两种算法的估算精度都很差。

## 5 讨论

对于本文的实验数据, 测量的叶绿素浓度与反射率之比  $R_{705\text{nm}}/R_{675\text{nm}}$  有很好的相关性。但在(5)式的模型中, 未考虑悬浮物质及黄色物质的干扰效应。虽然采用反射比可以在一定程度上减小其影响, 但由(2)式不难推导出, 当悬浮物质的散射系数或者黄色物质的吸收系数很大时, 也可能显著减小反射比。对于内陆水体, 悬浮物质或者黄色物质浓度很高是常见的水质情况, 必须有进一步的实验数据改善模型。

叶绿素反射峰值的位置不受地表辐照度、光谱测量角度等变化的影响, 受悬浮物质及黄色物质的影响也很小, 有利于提高叶绿素遥感的精度。但由于反射峰位置随叶绿素浓度变化缓慢, 因此遥感器必须有很高的光谱分辨率以测定反射峰位置的移动。根据(5)式, 如果在确定反射峰位置时误差为  $1\text{nm}$ , 则估算的叶绿素浓度偏差超过  $10\%$ 。

## 参考文献 (References)

- [1] George, D. G. The airborne remote sensing of phytoplankton chlorophyll in the lakes and tarns of the English lakes district [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1997, **18**: 1961—1975.
- [2] Fraser, R. N. Hyperspectral remote sensing of turbidity and chlorophyll-a among Nebraska Sand Hill lakes [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**: 1579—1589.
- [3] Gitelson, A., et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring inland waters quality [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1993, **14**: 1269—1295.
- [4] Gordon, H. R. Diffusive reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at  $685\text{nm}$  [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(8): 1161—1166.
- [5] Han, L., et al. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediments [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1994, **15**: 3707—3718.
- [6] Han, L., et al. The response of both surface reflectance and the underwater light field to various levels of suspended sediments: preliminary results [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1994, **60**(12): 1463—1471.
- [7] Gitelson, A., et al. The peak near  $700\text{nm}$  on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1992, **13**: 3367—3373.

## Relationship between Algal Chlorophyll Concentration and Spectral Reflectance of Inland Water

SHU Xiao-zhou, YIN Qiu, KUANG Ding-bo

(Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Algal chlorophyll measurement is usually used to assess trophic status of lakes. The development of hyperspectral imaging enable it possible to detect spectral features of algal chlorophyll with high spectral resolution and to map the spatial distribution of algae in large lakes with great precision. This study was conducted to establish correlation between hyperspectral reflectance and algal chlorophyll concentration. The problem is complicated by the numerous suspensions and dissolved organic matters in inland water because optical effects of these pollutant substances often overwhelm spectral features of algae. The area studied in this paper is the Lake Taihu in the Yantze river delta, which becomes enriched quickly in nutrients and supports excessive growths of blue alga in summer. Reflectance spectrum of water in the range of 350 to 1050nm was measured by a GER-1500 radiometer with a bandwidth of 1.6nm. The water was also sampled simultaneously to determine algal chlorophyll concentration and other water quality parameters in the laboratory. The position of reflectance peak near 700nm and reflectance ratio of  $R_{705\text{nm}}/R_{675\text{nm}}$  were found to be significantly correlated with algal chlorophyll concentration. Chlorophyll algorithms based on these spectral features are presented.

**Key words:** chlorophyll; hyperspectral; remote sensing