

## 太湖不同叶绿素 a 浓度水体荧光特征分析

李莉<sup>1</sup>, 尹球<sup>1,2</sup>, 巩彩兰<sup>3</sup>, 许华<sup>1</sup>, 陈利雄<sup>3</sup>

1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101
2. 上海市卫星遥感与测量应用中心, 上海 201100
3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

**摘要** 利用 2008 年太湖蓝藻爆发的 5—8 月实测的 27 个站点水体光谱反射率和水质参数, 分析了不同叶绿素 a 浓度等级下太湖水体光谱的荧光特征。结果表明, 荧光峰位置和荧光峰高度都与叶绿素浓度呈显著正相关, 且荧光峰峰值位置和半宽度与叶绿素 a 浓度的拟合度要高于基线荧光峰高度和归一化荧光峰高度。荧光峰特性用于二类水体中高浓度叶绿素探测较传统的蓝绿光波段比值有很大的改进, 而宽通道卫星遥感所采用的叶绿素浓度近红外红光波段比值法本质上与归一化荧光峰高度一致。这为今后进一步利用荧光特征提高太湖叶绿素 a 浓度反演精度提供了研究基础。

**关键词** 荧光特征; 叶绿素 a 浓度; 太湖; 波段比值

**中图分类号:** O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0136-05

### 引言

叶绿素荧光特性是水体叶绿素浓度、初级生产力和浮游植物生理状态测量的有效指标<sup>[1,2]</sup>。浮游植物在 400~700 nm 太阳光的激发下, 在 683 nm 附近产生明显的峰值, 通常被称为太阳激发的叶绿素荧光峰。1966 年, Tyler 和 Smith<sup>[3]</sup>对自然水体上行辐射的早期测量发现了这个荧光峰的存在, 之后的几十年中, 国外已有众多学者开展相关研究, 表明荧光峰高度和荧光峰位置与叶绿素 a 浓度有关<sup>[4]</sup>。国内对水体叶绿素荧光特征的研究起步较晚, 赵冬至等<sup>[4,5]</sup>分析了渤海叉角藻赤潮反射光谱荧光峰的变化, 又进一步阐述了多种赤潮和非赤潮藻类由于生理状态的差异, 水体荧光高度与叶绿素 a 浓度的响应关系不一致; 2006 年, 段洪涛等<sup>[6]</sup>分析了由于吉林查干湖水体叶绿素 a 含量全年分布范围较小, 水体光谱荧光峰位置变化不够敏感。

太湖是我国第三大淡水湖, 20 世纪 80 年代以来, 太湖水体富营养化日趋严重, 频繁暴发蓝藻水华, 是非常典型的二类水体。太湖水体叶绿素 a 浓度随季节变化幅度很大<sup>[7]</sup>, 夏季特别是蓝藻水华暴发时叶绿素 a 浓度分布直接影响到水体的光学特性。本文以太湖为研究区, 通过实测蓝藻爆发严重的 5—8 月份的水体反射光谱数据, 分析太湖不同叶绿素 a 浓度等级下水体光谱的荧光峰高度和位置变化特征, 以提高

太湖叶绿素 a 浓度反演的精度。

### 1 数据获取与分析方法

#### 1.1 数据获取

2008 年 5 月至 8 月, 每月对太湖中均匀分布的用 GPS 定位的 27 个固定经纬度点进行水质采样, 同步测量水面反射光谱。其中采集的水样由实验室按照国家标准(GB3838—2002)分析叶绿素 a 浓度、透明度等相关水质参数。光谱测量采用美国 SVC 公司生产的 GER1500 型地物光谱测量仪, 测量光谱范围为 350~1050 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 采样带宽 1.5 nm, 视场角为 0.3°。选择晴朗天气, 待船停稳水面较平静时测量, 光谱测量仪距离水面 1 m 左右垂直向下观测, 避开太阳耀斑以及船体、测量者和仪器阴影的影响, 每个采样点至少测量 10 次, 剔除受毛细波的太阳直射反射等因素影响的数值异常的曲线后取光谱的平均值。由于湖面反射光谱测量过程中, 太阳光照条件、环境影响以及观测角度的变化都会对反射率的值产生影响, 为了便于对不同测量结果进行比较, 对每条平均反射光谱选取 400~900 nm 波谱范围进行归一化处理作为该点的光谱反射值。归一化反射率计算公式为<sup>[7]</sup>

$$R_w(\lambda_i) = \frac{L_w(\lambda_i)/L_R(\lambda_i)}{\int_{400}^{900} L_w(\lambda) d\lambda / \int_{400}^{900} L_R(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-12-22, 修订日期: 2010-03-29

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX07527-006-2)和国防科技工业民用专项科研技术研究项目(07K00100KJ-A01A12)资助

作者简介: 李莉, 女, 1983 年生, 中国科学院遥感应用研究所研究实习员 e-mail: liligis@163.com

其中  $L_w(\lambda)$  为波长  $\lambda$  处的水体辐亮度,  $L_R(\lambda)$  为相应波长处的标准参考板辐亮度。

### 1.2 分析方法

太湖 27 个采样点的实验数据中叶绿素 a 浓度变化范围较大, 故进行分级分析, 分别探讨不同浓度等级下太湖蓝藻水华的叶绿素荧光峰特征。本文参考太湖多年的叶绿素 a 浓度测量结果将叶绿素 a 浓度划分为 4 个等级, 其中第一级为  $0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 第二级为  $21 \sim 55 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 第三级为  $56 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 第四级大于  $80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。实测数据中叶绿素 a 浓度为一级的采样点有 20 个, 二级的采样点有 21 个, 由于三级和四级的采样点较少, 故合并在一起分析, 共有 10 个。

对叶绿素荧光峰特征的研究主要分析水体光谱曲线叶绿素荧光峰位置和荧光峰高度与叶绿素 a 浓度的响应关系。叶绿素荧光峰位置采用曲线的波峰峰值位置、波峰半宽度等特征值描述。其中荧光峰峰值位置由红光到近红外波段具有最大光谱反射率对应的波长确定, 如图 1 中  $\lambda_M$  所示。荧光峰半宽度由波峰对应波段到红光区域波谷对应波段的差值表示, 即  $\lambda_M - \lambda_L$ 。而叶绿素荧光峰高度的计算采用基线荧光高度 (fluorescence line height, FLH) 法和归一化荧光高度 (normalized fluorescence height, NFH) 法。其中基线荧光峰高度法基本原理<sup>[1, 5]</sup>是使用荧光峰左右两侧需要后向散射校正的波段来产生荧光峰下的基线, 计算叶绿素荧光峰的极大值到基线之间的距离 (如图 1 所示)。公式如下

$$FLH = R_M - \left[ R_R + \frac{\lambda_R - \lambda_M}{\lambda_R - \lambda_L} (R_L - R_R) \right] \quad (2)$$

归一化荧光高度法<sup>[4]</sup>将荧光峰的反射率最大值归一化到反射率曲线在 675 nm 处的最小值。公式为

$$NFH = R_M / R_L \quad (3)$$

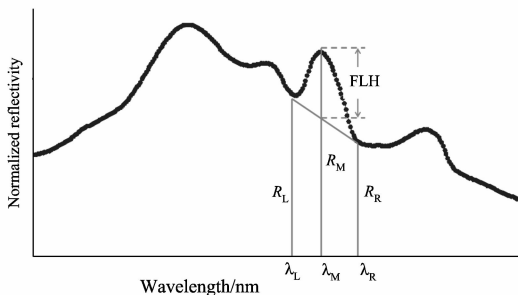


Fig. 1 Schematic diagram of fluorescence peak

其中荧光峰反射率最大值和左右两侧反射率最小值的中心波长位置通过归一化水体光谱曲线的一阶微分来确定。

本文分别分析了荧光峰中心波长位置、荧光峰半宽度、FLH、NFH 四个特征值与叶绿素 a 浓度的相关性, 并与水体叶绿素反演常用的波段比值法比较, 讨论了基于水体光谱荧光峰特征反演叶绿素 a 浓度的可行性和优越性。

## 2 结果分析

### 2.1 典型太湖水体叶绿素荧光光谱特征

太湖不同叶绿素 a 浓度下的归一化水体光谱反射率变化

如图 2 所示。在 683 nm 附近产生荧光峰, 随着叶绿素 a 浓度增大, 荧光峰逐渐增高并伴随荧光峰位置向红外方向移动。

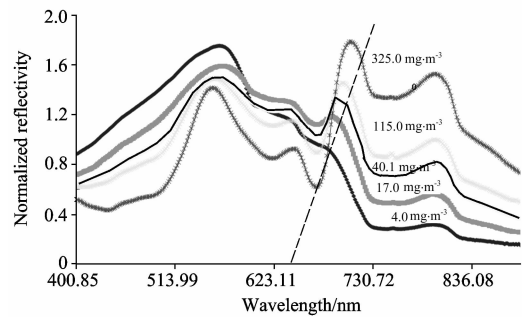


Fig. 2 Normalized reflectivity curve of different chlorophyll a concentration of lake water

当叶绿素 a 浓度 (下简称浓度) 为  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 荧光峰不明显, 峰值位置在 686 nm。这与文献[3]得到的浓度为  $10.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时荧光峰在 685 nm 处的结果相比, 更偏向长波方向。当浓度增加到  $115.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 峰值位置向红外方向移动到 706 nm, 文献[3]中浓度达  $100.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 荧光峰在 700 nm 处, 而浓度达到  $300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 荧光峰到达 705 nm 甚至更远的结果相比, 峰值位置也更明显偏向红外方向。而当浓度达到  $325.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 峰值位置已达 715 nm 处 (详见表 1)。可见, 太湖水体的叶绿素 a 荧光峰位置更偏向红外方向, 且随叶绿素浓度增大而“红移”的趋势也更显著。

Table 1 Positions and heights of fluorescence peak corresponding to different chlorophyll a concentration

叶绿素 a 浓度 / ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	荧光峰位置 / nm	FLH	NFH
4.0	686	0.048 816	0.978 234
17.0	694	0.195 300	1.055 145
40.1	702	0.385 997	1.268 286
115.0	706	0.574 611	1.627 413
325.0	715	0.820 233	2.892 186

### 2.2 荧光峰位置与叶绿素 a 浓度的关系

从图 3 可见, 荧光峰峰值位置变化与叶绿素 a 浓度并不是简单的线性关系, 而具有很好的对数关系, 这与文献得到叶绿素含量的变化与荧光峰位置移动呈指数关系的结果一

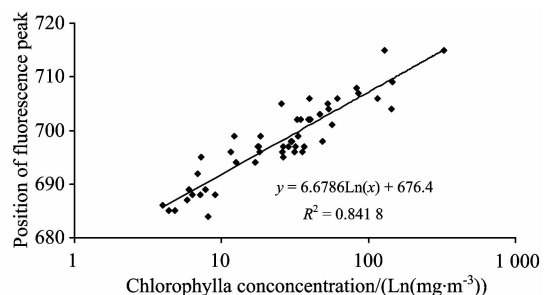


Fig. 3 Relationship between position of fluorescence peak and chlorophyll a concentration (logarithm coordinate)

致, 拟合度  $R^2$  达到 0.841 8。

图 4 中的分级分析表明: 当叶绿素 a 浓度为一级时, 峰值位置对叶绿素 a 浓度变化的响应关系明显, 从浓度  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时的  $686 \text{ nm}$ , 变化到浓度为  $18.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时的  $699 \text{ nm}$ , 变化梯度约为  $0.91 \text{ nm} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ; 而当叶绿素 a 浓度为二级时, 随浓度增加, 峰值位置总体上向红外移动, 但变化梯度仅为  $0.36 \text{ nm} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ; 当叶绿素 a 浓度达到三四级时, 从  $61.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  增加到  $325.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 峰值位置只移动了  $9 \text{ nm}$ 。总的来看, 当荧光峰位置达到  $705 \text{ nm}$  以后(图 4 中细线所示), 对叶绿素 a 浓度的响应关系不明显。

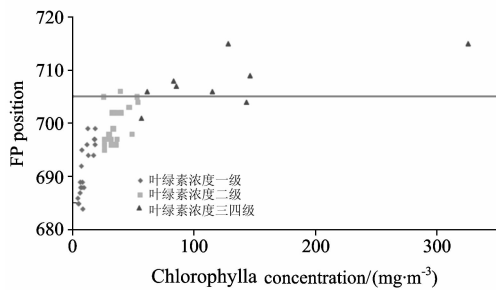


Fig. 4 Position of fluorescence peak of different chlorophyll a concentration scale

而图 5 表明: 随叶绿素 a 浓度的增加, 半宽度也呈对数函数关系增大, 拟合度  $R^2$  为 0.837 9。可见, 太湖水体荧光峰位置和荧光峰半宽度的变化都与叶绿素浓度具有很好的响应关系, 这两个信息可用于叶绿素 a 定量反演。

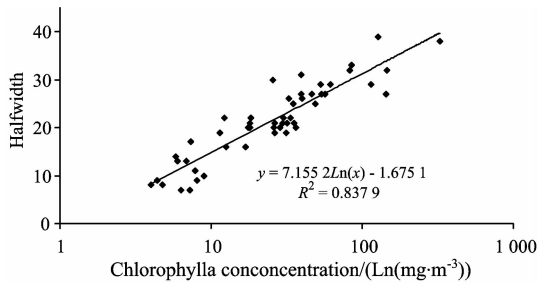


Fig. 5 Relationship between half width of fluorescence peak and chlorophyll a concentration (logarithm coordinate)

### 2.3 荧光峰高度与叶绿素 a 浓度的关系

从图 6 可见, 随叶绿素 a 浓度的增加, 荧光峰高度都增大, FLH 与叶绿素 a 浓度的回归分析结果有良好的对数关系, 拟合度超过 0.75; 而 NFH 则与叶绿素 a 浓度基本呈正相关, 线性拟合度  $R^2$  为 0.684 7。

从图 7 和图 8 可以看出, 当浓度较低的一级时, FLH 对叶绿素 a 较敏感, 从  $4.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时的 0.05, 逐步增加到  $18.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时的 0.28, 而 NFH 随叶绿素 a 的变化不显著, 此时 NFH 不适合于叶绿素 a 的定量反演。当浓度为二级时, 相同叶绿素 a 浓度下 FLH 差异较大, 两者的关系具有较大的不确定性; 而 NFH 大体呈现随叶绿素 a 增大的趋势。当叶绿素浓度为三四级时, FLH 和 NFH 整体上都随叶绿素 a 浓度增加而增大, 但趋势也不明显。因此, 对于不同叶绿

素 a 浓度的太湖水体, 虽然基线荧光峰高度和归一化荧光峰高度与叶绿素 a 浓度具有一定的响应关系, 但都不如荧光峰位置信息与之响应关系更显著。

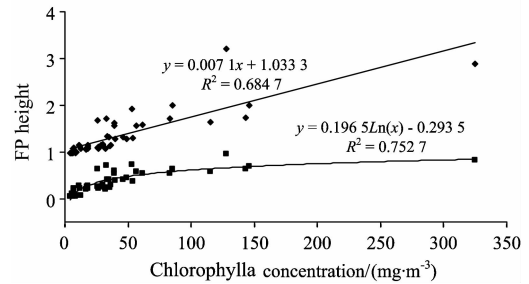


Fig. 6 Relationship between the height of fluorescence peak and chlorophyll a concentration

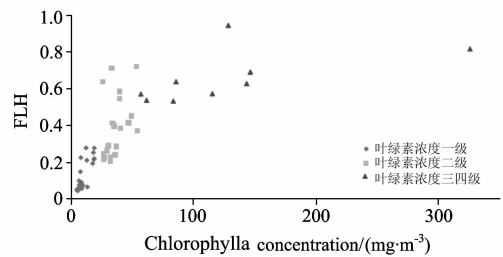


Fig. 7 Height of fluorescence peak above the reference baseline of different chlorophyll a concentration scale

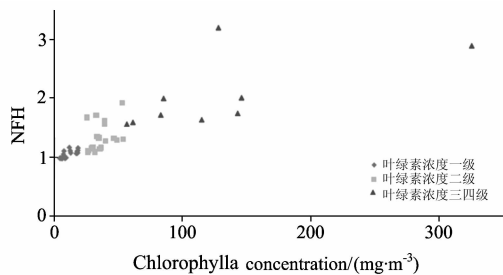


Fig. 8 Normalized height of fluorescence of different chlorophyll a concentration scale

### 2.4 荧光特征反演叶绿素浓度与波段比值法的比较

水体叶绿素浓度反演常用的波段比值法, 是利用反射率最大值和最小值两个波段的比值与叶绿素 a 做相关分析, 其中一类水体多采用的蓝绿波段比值法是基于光谱曲线在  $0.44 \mu\text{m}$  处出现明显的吸收, 在  $0.56 \mu\text{m}$  附近普遍出现辐射峰值, 而且水体叶绿素浓度越高, 其辐射峰值也越高。二类水体常采用近红外与红光通道比值法<sup>[8]</sup>, 是利用  $705 \text{ nm}$  高反射率可以保证有较高的信噪比, 而  $680 \text{ nm}$  处是高吸收率, 并且二者相互靠近, 受非色素悬浮物和黄色物质影响相似, 比值后可以去除它们的影响, 突出叶绿素 a 信息。下面进一步对基于荧光特性的叶绿素浓度反演方法与传统的波段比值法进行比较。

从图 9 可见, 蓝绿波段比值大致随叶绿素 a 浓度的增加线性减小, 拟合度仅为 0.404 4; 近红外红光波段比值与叶绿素 a 浓度的相关系数超过 0.77, 但都比荧光峰位置的拟合度

低得多,这验证了前人认为叶绿素荧光特性更有利于对复杂的二类水体及富营养化水体的叶绿素 a 浓度反演的观点<sup>[3]</sup>。

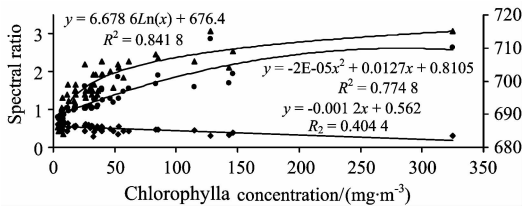


Fig. 9 Comparison of fluorescence peak method and spectral ratio methods

而从图 10 可见, NFH 计算所采用的荧光峰的反射率最大值与反射率曲线在 675 nm 处的最小值的比值和二类水体叶绿素反演中常采用的高反射的近红外通道与高吸收的红光通道的比值两者是一致的,通常宽通道卫星遥感器所采用的叶绿素浓度近红外红光比值反演方法利用的就是叶绿素荧光峰的特性。

### 3 结 论

通过对 2008 年 5—8 月实测数据分析表明,太湖水体光

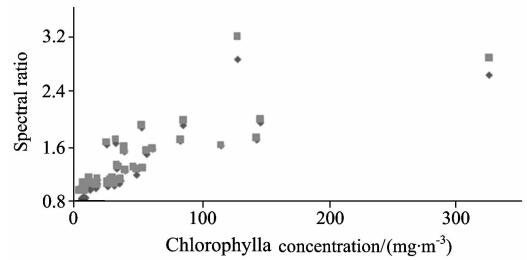


Fig. 10 Comparison of normalized height of fluorescence method and near infrared band to red band ratio methods

谱具有典型的叶绿素荧光特性,随着叶绿素 a 浓度的增大,荧光峰逐渐增高,荧光峰位置向红外方向移动。荧光峰位置和荧光峰高度都与叶绿素浓度呈显著正相关,且荧光峰峰值位置和半宽度与叶绿素 a 浓度的拟合度要高于基线荧光峰高度和归一化荧光峰高度。特别是当叶绿素 a 浓度较低时,归一化荧光峰高度不适合于叶绿素 a 的定量反演。

荧光峰特性用于二类水体中高浓度叶绿素探测较传统的蓝绿波段比值有很大的改进,而近红外红光波段比值本质上与归一化荧光峰高度一致,利用的叶绿素荧光峰特性。

### References

- [1] LIU Yu-jie, YANG Zhong-dong, et al(刘玉洁, 杨忠东, 等). Treatment Principle and Algorithm of MODIS Remote Sensing Information (MODIS 遥感信息处理原理与算法). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2001. 298.
- [2] Behrenfeld M J, Westberry T K, Boss E S, et al. Biogeosciences, 2009, 6(5): 779.
- [3] XING Xiao-gang, ZHAO Dong-zhi, LIU Yu-guang, et al(邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2007, 11(1): 137.
- [4] ZHAO Dong-zhi, ZHANG Feng-shou, YANG Jian-hong, et al(赵冬至, 张丰收, 杨建洪, 等). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 2005, 27(6): 146.
- [5] ZHAO Dong-zhi, ZHANG Feng-shou, DU Fei, et al(赵冬至, 张丰收, 杜飞, 等). High Technology Letters(高技术通讯), 2004, 14(5): 68.
- [6] DUAN Hong-tao, ZHANG Bai, LIU Dian-wei, et al(段洪涛, 张柏, 刘殿伟, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2006, 25(5): 355.
- [7] SHU Xiao-zhou, YIN Qiu, KUANG Ding-bo(疏小舟, 尹球, 匡定波). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2000, 4(1): 41.
- [8] ZHANG Bo, ZHANG Bai, HONG Mei, et al(张博, 张柏, 洪梅, 等). Advances in Water Science(水科学进展), 2007, 18(2): 301.

## Fluorescence Characteristics of Different Chlorophyll a Concentration in Lake Taihu

LI Li<sup>1</sup>, YIN Qiu<sup>1,2</sup>, GONG Cai-lan<sup>3</sup>, XU Hua<sup>1</sup>, CHEN Li-xiong<sup>3</sup>

1. Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Shanghai Center for Satellite Remote-Sensing and Application, Shanghai 201100, China

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

**Abstract** The spectral reflectance and water qualities of 27 stations were acquired in the lake Taihu during the months from May to August, 2008 when blue algal bloomed. Based on the fluorescence characteristics analysis of different chlorophyll a concentration, it was obvious that the position and height of fluorescence peak both have a positive correlation with chlorophyll a concentration, and the correlation coefficients between chlorophyll a concentration and position and half width of fluorescence peak are larger than those of the reference baseline and the normalized height of fluorescence. Estimating of chlorophyll a concentration in case 2 water using fluorescence characteristics is obviously better than the empirical algorithm based on blue to green ratio. Moreover, the common algorithm based on near infrared band to red band ratio is essentially consistent with the normalized height method.

**Keywords** Fluorescence characteristics; Chlorophyll a concentration; Lake Taihu; Spectral ratio

(Received Dec. 22, 2009; Accepted Mar. 29, 2010)