

高叶绿素水体荧光峰位置变化响应关系研究

段洪涛^{1,2}, 马荣华¹, 张渊智³, 张 柏²

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008
2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012
3. 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 中国香港

摘要 水体反射光谱红光区荧光峰是叶绿素特有的光谱特征, 研究其位置变化与叶绿素的响应关系有助于内陆水体叶绿素含量的定量反演。通过 2004~2006 年 13 次长春南湖水体反射光谱和水质参数实测数据, 分析了不同光谱分辨率下荧光峰位置变化与叶绿素 a 含量的响应关系, 结果表明, 两者呈现指数函数关系, 即 $\text{Peak position} = a(\text{Chl } a)^b$, 不同光谱分辨率下, a 在 686.11~686.29, b 在 0.0062~0.0065 间变化, 且光谱分辨率越高, 响应关系越好; 荧光峰平均波长位置与叶绿素平均含量高度相关 ($R^2 > 0.81$), 荧光峰位置变化适用于反演叶绿素含量分布较为均匀的水体。这为今后利用成像光谱仪监测内陆水体叶绿素含量提供了实验和工作基础。

关键词 叶绿素; 荧光峰位置; 光谱; 定量反演

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)01-016-04

引言

内陆水体由于浮游植物、悬浮物和黄色物质相互混合, 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^[1]。反射率光谱的红光区对内陆和近岸水体的遥感非常重要, 这是因为叶绿素 a 特有的光谱特征产生在这个范围内^[2]。Neville^[3]和 Gower^[4]最早观测到天然水体中 685 nm 左右的红光反射峰, 并进行多种尝试用以解释这个峰, (1) 浮游植物色素的荧光^[5-8]; (2) 由 675 nm 处的吸收峰引起的异常反射^[9]; (3) 高叶绿素浓度时藻类和水体混合吸收曲线的极小值^[9]。这个峰通常称为太阳激发的叶绿素荧光峰^[10]。Gitelson 通过对不同营养水体的研究结果表明, 随着叶绿素浓度的增加, 荧光峰位置会向长波方向移动^[2]。赵冬至在大连湾通过研究向不同藻类增加叶绿素发现, 每增加 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶绿素, 不同藻类荧光峰的移动幅度基本上位于 0.1~0.3 nm 之间^[10]。叶绿素 a 含量的增加虽然可以导致荧光峰向长波方向移动, 但在较小范围叶绿素 a 含量内, 荧光峰位置并不会显著移动^[11]。长春南湖 ($43^\circ 51' \text{N}$, $125^\circ 18' \text{E}$) 是一个小型半封闭式的内陆湖泊, 是长春市内唯一的水上风景区和天然浴场^[12], 由于受人类活动影响剧烈, 水体呈高富营养化状态, 叶绿素 a 含量极高, 涵盖范围较大,

十分适用于荧光峰位置变化特征及其与叶绿素 a 含量响应关系的研究。本文通过分析高叶绿素水体的荧光峰位置变化, 建立叶绿素含量与荧光峰位置变化的响应关系, 特别是在不同光谱分辨率下, 探求利用荧光峰位置变化反演叶绿素含量的可能性, 将为今后利用星载成像光谱仪反演水体叶绿素含量提供研究和工作基础。

1 数据获取及处理

为了涵盖藻类生长的不同季节, 同时获取尽可能多的样本, 在 2004 年 4 月份到 2006 年 10 月份 3 年间, 对长春南湖共进行了 13 次水质采样, 获取了 107 个样本。采样点对其分别用 GPS 进行定位导向, 同步测量反射光谱, 并采集水样, 用以实验室分析其他水质参数。叶绿素 a 浓度的测定在采样后, 立即返回实验室过滤, 然后用丙酮萃取, 蔽光 24 h 后, 采用分光光度计法测定。水体反射光谱测量光谱测试采用美国分析光谱仪器公司 (analytical spectral devices, ASD 公司) 生产的 Fieldspec FSR VNIR 野外光谱仪, 可在 350~1050 nm 波长范围内进行连续测量, 每间隔 1.4 nm 进行一个采样, 光谱分辨率 3 nm, 视场角 25° , 共有 512 个采样值。光谱测量时间为北京时 10:00~14:00, 每次采样当时天气晴朗无风, 湖面基本平静, 这时太阳高度角适合, 耀斑影响相对较

收稿日期: 2007-09-28, 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40801137, 40871168, 40671138) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2007261) 资助

作者简介: 段洪涛, 1979 年生, 中国科学院南京地理与湖泊研究所助理研究员 e-mail: htduan@niglas.ac.cn

小。光谱测量参考仪器说明书和唐君武等人提出的水体测量方法^[13]进行。在每个点位进行 20 次反射光谱测量,最后取其平均值作为该点的光谱反射值。实验室内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。同时,为了方便研究不同光谱分辨率下荧光峰的变化特征,对光谱进行重采样,每间隔 5 nm 或者 10 nm 取一个光谱值,再加上原始数据,作为实际研究数据。

2 结果与讨论

2.1 不同光谱分辨率下响应关系

叶绿素荧光峰波长位置判断较为简单,即在红光/近红外区域具有最大反射率的波长($R_{\max \text{ red}}$),如图 1 所示。一般研究认为,随着叶绿素 a 含量的增高,荧光峰位置会向长波方向移动^[2, 14]。但在段洪涛^[11]等研究查干湖水体时发现,由于查干湖水体叶绿素 a 变化范围较小($6 \sim 60 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),虽然基本符合这个趋势,但是两者响应关系并不明显,即在叶绿素含量变化范围较小的水体,荧光峰位置变化对叶绿素 a 不够敏感。长春南湖 2004~2006 年叶绿素 a 含量在 $10 \sim 320 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,跨越范围较大,十分适合用于荧光峰位置变化及其与叶绿素 a 含量响应关系的研究。

荧光峰位置及其相应叶绿素含量如图 2 所示。随着叶绿素 a 含量的增加,荧光峰位置向长波方向移动,在原始数据

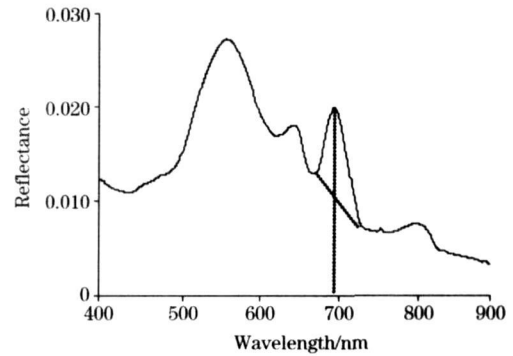


Fig 1 Fluorescence peak

下最为明显[图 2(a)]。荧光峰位置由叶绿素 a 含量最低时($10.93 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的 697 nm,逐步过渡到叶绿素 a 含量最高时($317.77 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的 713 nm,其变化梯度为 $0.05 \text{ nm} / (\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$;但同时发现,叶绿素 a 含量在 $120 \sim 180 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,荧光峰位置已经移动到 710 nm 左右,由 $180 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $317.77 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,荧光峰位置仅移动了 3 nm。这不仅说明,荧光峰位置变化与叶绿素 a 含量不是简单的线性关系,也表明如果叶绿素 a 含量集中在一定范围内,荧光峰波长位置将不会显著移动;同时,荧光峰位置变化将不能用于叶绿素 a 的定量反演。这与在查干湖的研究结论相似^[11]。

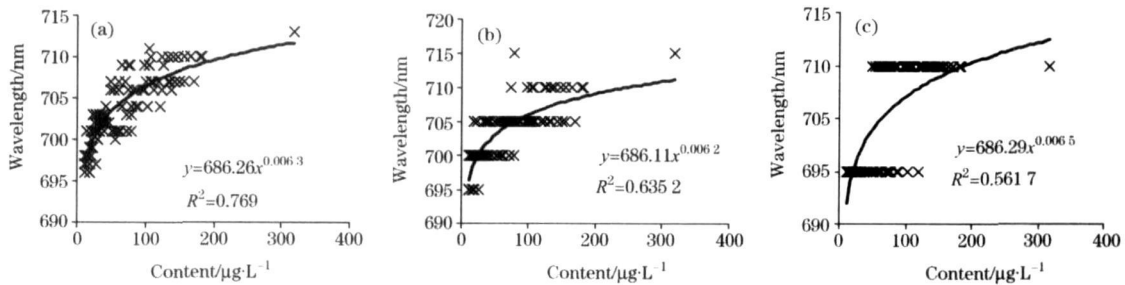


Fig 2 Relationship between fluorescence peak position and chlorophyll

(a): Raw data; (b): 5 nm; (c): 10 nm

先前的研究表明,荧光峰的位置与叶绿素 a 浓度的关系一般呈非线性关系。赵冬至^[10]等对高叶绿素浓度浮游植物藻类水体的分析表明,赤潮水体的荧光峰的位置与叶绿素 a 浓度的关系呈非线性,但不同的藻种则显示出不同的光谱行为; Vos 等^[15]对 $0 \sim 120 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 富营养水体研究表明,在此范围内,叶绿素含量的变化与荧光峰位置的移动呈指数关系。Kishino 等、Carder 和 Steward、Gitelson 等^[2]的研究也表明,二者成指数关系。本文研究结果与此类似,即 $\text{Peak position} = a(\text{Chl } a)^b$ 。同时发现,在不同的光谱分辨率下, a 在 $686.11 \sim 686.29 \text{ nm}$, b 在 $0.0062 \sim 0.0065$ 之间变化。这有别于前人的研究,可能是由于水体状况的不同造成的。

随着光谱分辨率的降低,确定系数(R^2)逐渐减小(图 2),这是由于光谱分辨率的降低,导致荧光峰位置的敏感度下降。赵冬至^[10]在大连湾通过研究向不同藻类增加叶绿素发现,每增加 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 叶绿素,不同藻类荧光峰的移动幅度在 $0.1 \sim 0.3 \text{ nm}$ 之间。光谱分辨率的逐渐降低,导致一定

范围内的叶绿素含量变化对荧光峰位置变化的驱动力不够,且由于水体反射光谱还受到悬浮物等物质的影响,因而荧光峰位置变化响应程度逐渐下降。

2.2 不同叶绿素等级下响应程度

为了更好地区分不同叶绿素 a 含量下荧光峰的位置,本文按照叶绿素 a 含量的大小对长春南湖 107 个样本数据进行分类排序,分别为: $10 \sim 20$, $20 \sim 30$, $30 \sim 40$, $40 \sim 50$, $50 \sim 60$, $60 \sim 70$, $70 \sim 80$, $80 \sim 90$, $90 \sim 100$, $100 \sim 150$ 和 $150 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,共为 11 级。荧光峰位置在不同叶绿素 a 含量下的响应程度,主要由荧光峰位置变化范围和荧光峰位置平均波长 2 个指标进行衡量,如表 1 所示。荧光峰位置变化范围,说明在特定叶绿素等级内荧光峰的变动情况,主要用于考察单个叶绿素等级内的荧光峰位置的敏感度;荧光峰位置平均波长,说明在特定叶绿素等级内的所有样点荧光峰位置平均波长,可用于对比不同叶绿素等级下,荧光峰的变化趋势。Gitelson 先前的研究表明,叶绿素接近 $3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,荧光峰

的中心波长位置在 680~ 683 nm; 到 $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰移动到 685 nm 处; 但叶绿素高于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰则移动到 715 nm 处^[2]。由于在内陆湖泊等二类水体中, 高悬浮物的出现, 增加了水体的后向散射, 反射率增加, 导致其光学特性十分复杂。长春南湖在 $10 \sim 20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰的中心位置波长已在 697~ 701 nm, 平均波长为 698 nm; 到 $20 \sim 30 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰中心位置波长并没有显著变化, 荧光峰位置的平均波长为 701 nm; 叶绿素高于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰中心波长第一次有超过 710 nm, 直到叶绿素 $317.77 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰位置达到 713 nm。随着叶绿素等

级的增加, 平均叶绿素 a 含量以约 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的速度增加, 荧光峰中心波长皆移动到 700 nm 以后, 而平均波长以 1 nm 的速度向长波方向移动。长春南湖与 Gitelson 的研究相比, 在低叶绿素含量时, 荧光峰位置向长波方向移动更大; 但在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以后, 荧光峰位置平均波长在 708~ 709 nm 之间, 小于 Gitelson 的荧光峰位置向长波方向移动范围。这是由于不同的水体环境, 不同藻类的生理特征引起的。赵冬至等研究不同藻类荧光峰位移与叶绿素 a 含量的关系时, 也表明了不同藻类荧光峰位置位移规律的不同^[10, 15]。

Table 1 Fluorescence peak positions corresponding to different chlorophyll a content

样本数	叶绿素平均值 ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	荧光峰位置变化范围/nm			荧光峰位置平均波长/nm			
		原始数据	5 nm	10 nm	原始数据	5 nm	10 nm	
10~ 20	19	15.81	697~ 701	695~ 700	700	698	698	700
20~ 30	13	24.75	697~ 703	695~ 705	700	701	700	700
30~ 40	11	34.88	700~ 703	700~ 705	700	702	701	700
40~ 50	7	44.36	702~ 707	700~ 705	700~ 710	703	702	701
50~ 60	6	54.67	700~ 707	700~ 705	700~ 710	704	703	705
60~ 70	6	64.14	701~ 709	700~ 705	700~ 710	705	703	707
70~ 80	9	75.66	701~ 709	700~ 715	700~ 710	704	705	703
80~ 90	5	86.23	704~ 706	705	700~ 710	705	705	706
90~ 100	3	97.70	706~ 709	705~ 710	710	707	707	710
100~ 150	20	121.68	704~ 711	705~ 710	700~ 710	708	707	709
> 150	8	185.00	707~ 713	705~ 715	710	709	709	710

在不同光谱分辨率下, 建立叶绿素 a 平均含量与荧光峰位置平均波长函数关系, 如图 3 所示, 两者呈现出比较高的确定指数 ($R^2 > 0.81$), 且优于传统的比值经验模型。这说

明, 如果叶绿素含量分布均匀, 其与荧光峰位置将拥有更好的响应关系。这为今后利用荧光峰位置反演叶绿素含量 a 奠定了实验基础。

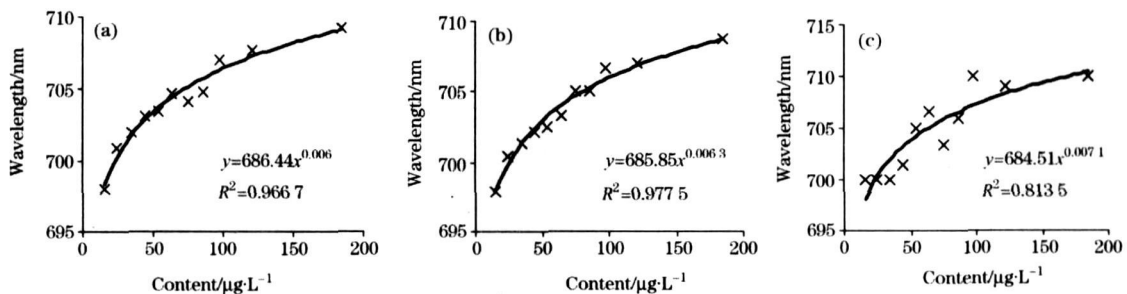


Fig 3 Average fluorescence peak positions corresponding to average chlorophyll

(a): Raw data; (b): 5 nm; (c): 10 nm

3 结论

本文通过在不同光谱分辨率下, 分析高叶绿素浓度水体荧光峰位置变化响应关系, 发现长春南湖叶绿素 a 含量与荧光峰位置呈较好的指数关系; 光谱分辨率从高到低, 确定系数 (R^2) 逐步降低, 但两者都具有较好的响应关系, 分别为 0.769, 0.635 2 和 0.561 7。而在不同叶绿素等级下, 荧光峰

与叶绿素 a 响应关系不同, 相对于前人的研究, 在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 荧光峰位置更偏向长波; 而 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 荧光峰位置波长并没有进一步的显著增加, 这与长春南湖自身的水环境及藻类生理性质有关。特别是平均叶绿素浓度与荧光峰位置平均波长两者高度相关, 函数关系稳定, 说明在叶绿素分布范围较广的区域, 可以尝试应用荧光峰位置变化来反演叶绿素 a 含量。

参 考 文 献

- [1] LI Shu ju, WU Qian, WANG Xue jun, et al(李素菊, 吴 倩, 王学军, 等). Lake Science(湖泊科学), 2002, 14(3): 228.
- [2] Gitelson A. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367.
- [3] Neville R A, Gower J F R. Journal of Geophysical Research, 1977, 82: 3487.
- [4] Gower J F R. Boundary-Layer Meteorology, 1980, 18: 235.
- [5] Morel A, Prieur L. Limnology and Oceanography, 1997, 22: 709.
- [6] Gordon H R. Applied Optics, 1979, 18: 1161.
- [7] PAN De lu, Gower J F R, LIN Shou ren(潘德炉, Gower J F G, 林寿仁). Oceanologia Et Limnologia Sinica(海洋与湖沼), 1989, 20(6): 564.
- [8] PAN De lu, Gower J F R, LIN Shou ren, et al(潘德炉, Gower J F G, 林寿仁, 等). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 1989, 11(6): 780.
- [9] Vasilkov A, Kopelevich O. Oceanology, 1982, 22: 945.
- [10] ZHAO Dong zhi, ZHANG Feng shou, DU Fei, et al(赵冬至, 张丰收, 杜 飞, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2005, 9(3): 265.
- [11] DUAN Hong tao, ZHANG Bai, LIU Dian wei, et al(段洪涛, 张 柏, 刘殿伟, 等). Chinese Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2006, 25(5): 355.
- [12] DUAN Hong tao, ZHANG Bai, SONG Kai shan, et al(段洪涛, 张 柏, 宋开山, 等). Advance in Water Science(水科学进展), 2006, 17(3): 323.
- [13] TANG Jun wu, TIAN Guo liang, WANG Xiao yong, et al(唐军武, 田国良, 汪小勇, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(1): 37.
- [14] Gitelson A A, Garbuzov G, Szilagyi F, et al. Int. J. Remote Sensing, 1993, 14(7): 1269.
- [15] TANG Xiao jing, ZHANG Qian qian, LEI Shu he, et al(唐晓静, 张前前, 类淑河, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(3): 556.

Fluorescence Peak Shift Corresponding to High Chlorophyll Concentrations in Inland Water

DUAN Hong tao^{1, 2}, MA Rong hua¹, ZHANG Yuan zhi³, ZHANG Bai²

1. State Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
2. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China
3. Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China

Abstract Hyperspectral remote sensing offers the potential to detect water quality variables such as Chl *a* by using narrow spectral channels of less than 10 nm, which could otherwise be masked by broadband satellites such as Landsat TM. Fluorescence peak of the red region is very important for the remote sensing of inland and coastal waters, which is unique to phytoplankton Chl *a* that takes place in this region. Based on *in situ* water sampling and field spectral measurement from 2004 to 2006 in Nanhu Lake, the features of the spectral reflectance were analyzed in detail with peak position shift. The results showed: An exponential fitting model, peak position = $a(\text{Chl } a)^b$, was developed between chlorophyll *a* concentration and fluorescence peak shift, where *a* varies between 686.11 and 686.29, while *b* between 0.0062 and 0.0065. It was found that the better the spectral resolution, the higher the precision of the model. Except that, the average of peak shift showed a high correlation with the average of different Chl *a* grades, and the determination coefficient (R^2) was higher than 0.81. It contributed significantly to the increase in the accuracy of the derivation of chlorophyll values from remote sensing data in Nanhu Lake. There is satisfactory correspondence between hyperspectral models and chl *a* concentration, therefore, it is possible to monitor the water quality of Nanhu lake through the hyperspectral remote sensing data.

Keywords Chlorophyll *a*; Fluorescence peak position; Field spectral; Quantitative remote sensing

(Received Sep. 28, 2007; accepted Dec. 28, 2007)