

查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 α 响应关系研究

段洪涛^{1,2}, 张 柏¹, 刘殿伟¹, 张渊智³, 宋开山¹, 王宗明¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 赫尔辛基技术大学, 赫尔辛基, P. O. Box 3000, 芬兰)

摘要: 叶绿素 α 含量能够在一定程度上反映水质状况, 利用遥感的方法监测叶绿素 α 具有众多优势. 通过实测查干湖水体反射光谱和荧光峰特征, 分析了 2004 年 5 到 10 月查干湖水的反射谱的荧光峰特征和水质变化的关系. 结果表明: 1. 查干湖水体随着叶绿素 α 含量的增加, 荧光峰位置基本上向长波方向移动, 但是并不明显. 2. 荧光峰位置变化比较适合用于反演叶绿素 α 含量较高, 且范围跨度较大的水体. 3. 查干湖水体荧光峰高度与叶绿素 α 具有稳定的响应关系, 适合用于叶绿素 α 定量反演. 4. 荧光峰高度可以用于查干湖水体叶绿素 α 定量反演. 这些结果为今后利用高光谱遥感技术在查干湖进行叶绿素 α 含量反演提供了研究和工作基础.

关 键 词: 遥感; 荧光峰; 查干湖; 叶绿素 α ; 高光谱

中图分类号: X87 **文献标识码:** A

RELATIONSHIP BETWEEN FLUORESCENCE PEAK SPECTRAL FEATURES AND CHLOROPHYLL- α IN LAKE CHAGAN

DUAN Hong-Tao^{1,2}, ZHANG Bai¹, LIU Dian-Wei¹,
ZHANG Yuan-Zhi³, SONG Kai-Shan¹, WANG Zong-Ming¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of CAS, Beijing 100039, China;

3. Helsinki University of Technology, Helsinki, P. O. Box 3000, Finland)

Abstract: Chlorophyll- α (Chl- α) is a main parameter to determine the trophic state, which is one of the major factors affecting water environment and produces visible changes in the surface of waters. The fluorescence peak features of the reflectance spectrum of water in lake Chagan, Jilin province, and the relevant water quality constituents were studied from May to October in 2004. The peak height and peak position shift of the spectral reflectance were analyzed in detail. The results are as follows: 1. A shift of the peak position from about 690nm up to 710nm and an increase of the peak magnitude are observed when chlorophyll- α concentration increased. 2. The peak height has a steady correlation with Chl- α . 3. The peak position shift suits to inverse Chl- α with a higher concentration and a large scale water, but it does not suit to lake Chagan. 4. The peak height can be used in estimating Chl- α in lake Chagan. These results contribute significantly to increase the accuracy of the derivation of chlorophyll values from remote sensing data in lake Chagan.

Key words: remote sensing; fluorescence peak; lake Chagan; chlorophyll- α ; hyperspectra

引言

叶绿素是藻类重要的组成成分之一, 叶绿素 α (Chl- α) 存在于所有的藻类中, 其浓度的多寡是表征光能自养生物量的重要指标. 叶绿素 α 含量的高

低与水体藻类的种类、数量等密切相关, 其浓度经常用于估测浮游植物的生物量和生产力, 也是反映水体富营养化程度的一个重要参数^[1,2]. 因此, 通过测定叶绿素 α 含量能够在一定程度上反映水质状况.

遥感监测叶绿素 α 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,国内外许多学者都对此进行过研究^[3,4],并取得了较大的进展.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,所以选择受其它物质光学干扰小的波段组合及算法是叶绿素遥感的关键.前人大量的研究表明,反射率光谱的红光区对内陆和近岸水体的遥感非常重要^[5].这是因为叶绿素 α 特有的光谱特征产生在这个范围内. Nevile^[6]和 Gower^[7]最早观测到天然水体中 685nm 左右的反射峰,并进行多种尝试用以解释,这个峰通常称为太阳激发的叶绿素荧光峰(Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence; SICF).通过对不同营养水体的研究表明,随叶绿素浓度的变化,荧光峰的位置和高度等都发生相应变化^[5].

本文以吉林西部查干湖为研究对象.查干湖地处嫩江与霍林河交汇的水网地区,属内陆半咸水湖泊,是吉林省重要的渔业基地,也是松辽平原第一大湖,中国十大淡水湖之一.本文通过实测查干湖水体光谱和荧光峰特征,分析 2004 年度不同月份和夏季,不同叶绿素状况条件下荧光峰特征的变化规律,以提高和改善叶绿素 α 含量的反演精度.

1 数据获取与研究方法

1.1 数据获取

2004 年 5 月份到 10 月份,分 6 次进行水质采样,对研究区内代表点位分别用 GPS 进行定位导向,同步测量各点水体透明度(secchi disk transparency, SDT)和反射光谱,并采集水样,用以实验室分析其他水质参数.叶绿素 α 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 24h 后,采用分光光度计法测定.由于不同季节水体反射光谱影响因素及大小不同,为了保证研究的稳定性,本文首先分别分析了各个月 Chl- α 的反射光谱特征,然后选取查干湖夏季(6—9 月) Chl- α 和反射光

谱数据进行研究,尝试分析查干湖夏季 Chl- α 的光谱响应特征.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 350nm~1050nm 波长范围内进行连续测量,每间隔 1.4nm 进行一个采样,光谱分辨率 3nm,视场角 25°,共有 512 个采样值.光谱测量时间为北京时间 10:00—14:00,6 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,耀斑影响相对较小.光谱测量严格按照仪器说明书,在距水面上方 1m 处进行,光谱仪传感器探头方向基本垂直于水面,同时仪器观测面垂直太阳光入射面,可以有效较少太阳耀斑的影响.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,每个样点测定前都进行白板定标.实验室内对每条平均反射光谱选取 400—900nm 波谱范围,进行归一化处理.同时,为了减少数据的运算量,以及方便研究不同光谱分辨率下荧光峰的变化特征,每间隔 5nm 或者 10nm 取一个光谱值,作为实际研究数据.

1.2 研究方法

叶绿素荧光峰研究,目前主要集中于荧光峰波长位置及其高度与叶绿素的响应关系.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($R_{\max \text{ red}}$).荧光峰高度表征较为复杂,目前主要有两种方法:一种是叶绿素荧光高度通常采用基线荧光高度法(FLH),其通用算法依靠 3 个波长,其中之一的中心波长为叶绿素荧光的极大值,其余两个需要后向散射校正的波段用来产生荧光峰下的基线,分别位于荧光峰的两侧;另一种方法是归一化荧光高度法,即将它归一化到反射率曲线在 560nm 附近的最大值(R_{560})或反射率曲线在 675nm 附近的最小值(R_{675})^[5].本文采用第 2 种方法,通过分析查干湖水体光谱的实际特征(图 1),确定 10nm 下 560nm 附近反射率曲线最大值(R_{560})位于 580nm 处,而 675nm 附近反射率曲线最小值(R_{675})在 670nm 处,5nm 下该两处波段分别为 575nm 和 675nm.

2 分析和讨论

2.1 荧光峰位置变化与叶绿素 α 浓度的关系

查干湖水体光谱反射特征如图 1 所示.虽然查干湖叶绿素 α 浓度 2004 全年在 6—60 $\mu\text{g/l}$ 之间(表 1),但是叶绿素荧光峰位置变化并不是很大,稳定在 700nm 左右,10nm 数据比较难于区分荧光峰位

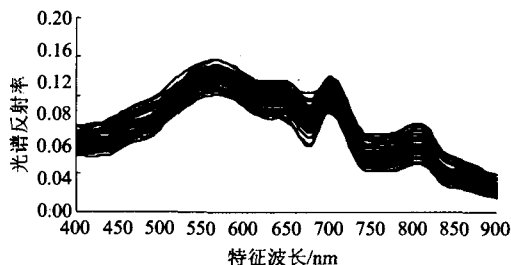


图 1 查干湖水体光谱反射率

Fig. 1 Spectral reflectance of light over the Chagan Lake

移变化,尤其在叶绿素含量较高的7—9月份.因此为了更好的研究荧光峰位置位移与叶绿素 α 浓度之间的响应关系,将原始光谱数据处理成 5nm 光谱分辨率和 10nm 光谱分辨率两种.

表 1 各期水体采样本数及叶绿素含量和透明度
Table 1 Sample number and Chl-α concentration and Secchi disk transparency in different months

	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
数量	11	6	8	9	20	20
Chl-α ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)						
min	6.34	6.40	28.14	15.15	11.24	10.68
max	19.13	14.68	58.21	37.15	47.23	28.68
mean	14.26	10.22	40.57	28.81	24.38	20.91
SDT (m)						
min	0.09	0.10	0.22	0.22	0.18	0.10
max	0.30	0.46	0.24	0.30	0.32	0.27
mean	0.14	0.25	0.23	0.25	0.25	0.14

一般研究认为,随着叶绿素 α 含量的增高,荧光峰位置会向长波方向移动^[5].图 2 显示,查干湖基本符合这个趋势,但是并不明显.查干湖荧光峰大部分位于 700nm 波长处,只有很少一部分点位于 700nm 前后.这是由于悬浮物含量的增加也可以引起反射峰位置向长波方向移动,同时也与查干湖水体叶绿素 α 含量分布相对稳定,范围较小关系十分密切.赵冬至^[8]在大连湾通过研究向不同藻类增加叶绿素发现,每增加 10 $\mu\text{g}/\text{l}$ 叶绿素,不同藻类荧光峰的移动幅度基本上位于 0.1—0.3nm 之间.该实验表明,叶绿素 α 含量的增加虽然可以导致荧光峰向长波方向移动,但是由于荧光峰位置对叶绿素 α 含量变化的敏感度有限,在一定范围叶绿素 α 含量内,荧光峰位置并不会显著移动.虽然查干湖水体为内陆湖泊水体,但叶绿素 α 浓度全年在 6—60 $\mu\text{g}/\text{l}$

之间,变化幅度较小,因此荧光峰位置并没有显著变化,甚至没有变化.如 7—9 月份,由于进入夏季,叶绿素含量普遍升高,分布范围更小,荧光峰位置在 10nm 光谱分辨率下与叶绿素 α 变化没有响应,甚至在 5nm 光谱分辨率下 8 月份仍旧没有响应(表 2).但是研究又同时表明,只要荧光峰位置敏感度能够响应叶绿素 α 含量变化,基本上都具有较好的关系;10nm 下各个月份相关系数(r)一般在 0.7 以上;5nm 下除了 9 月份外,其余各月份相关系数(r)一般在 0.59 以上.该结果表明,荧光峰位置变化适用于一定范围的水体,即:叶绿素 α 含量变化范围跨度较大的水体;由于查干湖叶绿素含量变化范围较小,因此该方法不适合用于查干湖叶绿素 α 含量反演.

2.2 荧光峰高度变化与叶绿素 α 浓度的关系

表 2 显示了荧光峰高度与叶绿素 α 在不同月份及夏季的关系.分别用两种方法计算荧光峰高度,发现除了 10 月份外,各个月份不同光谱分辨率下 $R_{\text{max red}}/R_{670}$ 和 $R_{\text{max red}}/R_{675}$ 效果较好,而 $R_{\text{max red}}/R_{580}$ 和 $R_{\text{max red}}/R_{575}$ 效果较差,这与 Gitelson 等研究结果不同^[5,8].这是由于查干湖多悬浮物、低透明度,一个高浓度的悬浮物由于其高反射,可以掩盖叶绿素的信息,况且红光/近红外波段受悬浮物影响更大,因此荧光峰高度($R_{\text{max red}}$)与反射峰(580nm 附近)差异较小,无法体现荧光峰高度与叶绿素 α 的响应关系;而 670nm 附近吸收峰由于与荧光峰位置接近,同处红光/近红外波段,受悬浮物和黄色物质影响的差异较小,因此其较好的体现了与叶绿素 α 的响应关系. Gitelson 也认为,该比值主要取决于叶绿素含量^[5].

查干湖夏季荧光峰高度($R_{\text{max red}}/R_{670}$)与叶绿素 α 含量关系如表 2 所示,两种分辨率下二者都有比

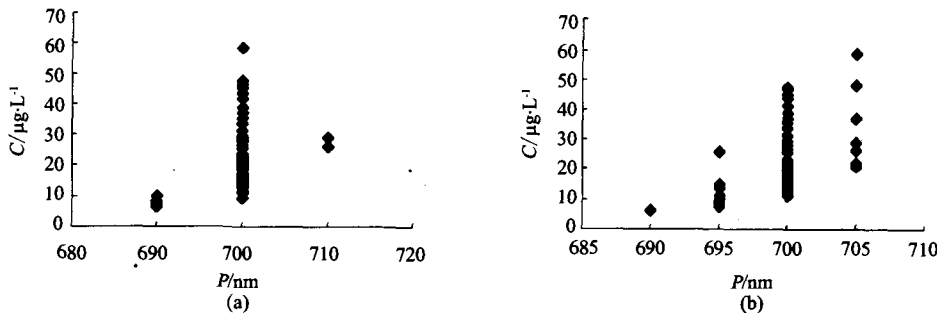


图 2 荧光峰位置 P 与叶绿素 α 含量关系 C 示意图
Fig. 2 The sketch map of fluorescence position and chlorophyll-α concentration: a) 10nm; b) 5nm

表 2 荧光峰高度及位置变化与叶绿素 α 浓度相关关系

Table 2 The correlations between fluorescence height and position shift and chlorophyll-a concentration

	$R_{\max \text{ red}}/R_{580}$	$R_{\max \text{ red}}/R_{670}$	荧光峰位置	$R_{\max \text{ red}}/R_{575}$	$R_{\max \text{ red}}/R_{675}$	荧光峰位置
	10nm			5nm		
	r	r	r	r	r	r
5 月	0.67	0.87	0.80	0.65	0.87	0.77
6 月	0.27	0.92	0.73	0.22	0.88	0.59
7 月	-0.17	0.92	-	-0.25	0.92	0.70
8 月	0.01	0.86	-	-0.05	0.83	-
9 月	0.63	0.64	-	0.66	0.62	0.31
10 月	0.96	-0.11	0.78	0.96	0.61	0.67
夏季	0.42	0.86	0.40	0.33	0.84	0.64

较好的响应关系($r \geq 0.84$). 分别用不同的函数建立其关系,发现幂函数(Power Function)关系最好,这与前人的研究结果相似^[5,8]. 本文选择相关系数最高的 10nm 下查干湖夏季荧光峰高度与叶绿素 α 含量关系建立其关系函数(图 3):

$$Y = 8.0282X^{5.186} \quad (R^2 = 0.76 \quad N = 43 \quad RMSE = 2.18)$$

其中:Y 为叶绿素 α 含量($\mu\text{g/l}$),X 为荧光峰高度($R_{\max \text{ red}}/R_{670}$).

该式确定系数(R^2)等于 0.76,且其均方根差(RMSE)为 $2.18\mu\text{g/l}$,小于查干湖夏季叶绿素 α 含量极值差($6.40\text{--}58.21\mu\text{g/l}$)(表 1),说明荧光峰高度($R_{\max \text{ red}}/R_{670}$)可以用于查干湖夏季叶绿素 α 含量反演.

2.3 不同光谱分辨率下反演模型的精度

一般理论认为,光谱分辨率越高,对荧光峰光谱特征变化更敏感,因而反演的模型应更好.但是,表 2 及图 3 表明,10nm 光谱分辨率下荧光峰特征与叶绿素 α 的相关关系及反演模型效果却好与 5nm 条件下,似于传统理论相矛盾.

图 2 表明 5nm 反射光谱确实比 10nm 更明显得

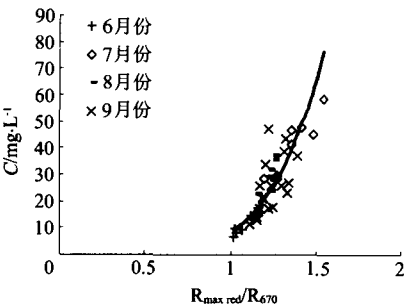


图 3 查干湖夏季荧光峰高度($R_{\max \text{ red}}/R_{670}$)与叶绿素 α 含量 C 关系
Fig. 3 The relationship between the peak height and chlorophyll-α content

区分了不同叶绿素浓度下的荧光峰位置变化,但是反演模型效果却不是最好.该结果说明,虽然水体反射光谱分辨率的提高增强了其对荧光峰位置的敏感度,但同时也增加了更多别的信息,即噪音也相应增加.荧光峰位置的敏感度与增加的噪音两者比较,孰轻孰重,却不一定;赵冬至的研究已经表明,向不同藻类增加叶绿素发现,每增加 $10\mu\text{g/l}$ 叶绿素,不同藻类荧光峰的移动幅度基本上位于 $0.1\text{--}0.3\text{nm}$ 之间^[8],而本文只是将光谱分辨率从 10nm 提高到 5nm,而查干湖叶绿素含量范围在 $6\text{--}60\mu\text{g/l}$ 之间,因此 5nm 虽然有在一定程度上对荧光峰位置变化更加敏感,但是还不足以完全反应查干湖荧光峰的位置变化情况;也就是说 5nm 还不够敏感,但这时噪音的增加,很有可能幅度大于敏感度的增加,这就导致其荧光峰特征与叶绿素含量相关关系及反演模型精度反而不如 10nm.这也说明,光谱分辨率为 10nm 有可能是一个最优的选择,当然这需要进一步验证.

3 结论

水体反射光谱荧光峰特征提供了丰富的水体信息,这为利用荧光峰特征反演叶绿素 α,提高和改进现有算法的精度提供了可能.本文通过研究查干湖水体荧光峰特征与叶绿素 α 含量的响应关系,发现查干湖水体随着叶绿素 α 含量的增加,荧光峰位置基本上向长波方向移动,但是并不明显.这主要是由于查干湖水体叶绿素 α 含量全年分布范围较小,荧光峰位置变化不够敏感造成的;同时研究表明,荧光峰位置变化适用于叶绿素 α 含量变化范围跨度较大的水体,但由于查干湖叶绿素含量变化范围较小,因此该方法不适合用于查干湖叶绿素含量反演;荧光峰高度与叶绿素 α 具有较好的响应关系,且发现荧光峰高度($R_{\max \text{ red}}/R_{670}$ 和 $R_{\max \text{ red}}/R_{675}$)与叶绿素 α

的关系好于荧光峰高度 ($R_{\max \text{ red}}/R_{580}$ 和 $R_{\max \text{ red}}/R_{575}$), 这是由于查干湖悬浮物较高, 不同波段光谱对悬浮物响应不同造成的。

REFERENCES

- [1] YIN Qiu, SU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, *et al.* Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 疏小舟, 徐兆安, 等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(6): 427—430.
- [2] Duan H T, Zhang B, Song K S *et al.* Hyperspectral monitoring model of eutrophication in Lake Nanhu, Changchun [J]. *Journal of Lake Science* (段洪涛, 张柏, 宋开山, 等. 长春市南湖富营养化程度高光谱遥感监测模型研究. *湖泊科学*), 2005, 17(3): 282—288.
- [3] YIN Qiu, GONG Cai-Lan, KUANG Ding-Bo, *et al.* Method of satellite remote sensing of lake water quality and its applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 巩彩兰, 匡定波, 等. 湖泊水质卫星遥感方法及其应用. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(3): 198—202.

(上接 344 页)

REFERENCES

- [1] HE Yong, LI Xiao-Li, SHAO Yong-Ni. Quantitative analysis of the varieties of apple using near infrared spectroscopy by principal component analysis and BP model [J]. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 2005, 3809: 1053—1056.
- [2] HE Yong, LI Xiao-Li. Discrimination of varieties of waxberry using near infrared spectra [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何勇, 李晓丽. 近红外光谱杨梅品种鉴别方法的研究. *红外与毫米波学报*), 2006, 25(3): 192—194.
- [3] JIA Dong-Yao, DING Tian-Hua. Novel method of detecting foreign fibers in lint by fiber's infrared absorption characteristic [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郑东耀, 丁天怀. 利用纤维红外吸收特性的皮棉杂质检测新方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(2): 147—150.
- [4] HE Yong, FENG Shui-Juan, DENG Xun-Fei. *et al.* Study

- [4] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, *et al.* Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 51—59.
- [5] Gitelson A. The peak near 700 nm on reflectance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1992, 13(17): 3367—3373.
- [6] Neville R A, Gower J F R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll-a fluorescence [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82: 3487—3493.
- [7] Gower J F R. Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saavich Inlet [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1980, 18: 235—248.
- [8] Zhao D Z, Zhang F S, Du F, *et al.* Interpretation of sun-induced fluorescence peak of chlorophyll a on reflectance spectrum of algal waters [J]. *Journal of Remote Sensing* (赵冬至, 张丰收, 杜飞, 等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光峰(SICF)特性研究. *遥感学报*), 2005, 9(3): 265—270.
- [9] on lossless discrimination of varieties of yogurt using the Visible/NIR-spectroscopy [J]. *Food Research International*, 2006, 39(6): 645—650.
- [5] QI Xiao-Ming, ZHANG Lu-Da, DU Xiao-Lin, *et al.* Quantitative analysis using NIR by building PLS-BP model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (齐小明, 张录达, 杜晓林等. PLS—BP 法近红外光谱定量分析研究. *光谱学与光谱分析*), 2003, 23(5): 870—872.
- [6] YIN Qiu, SU Xiao-Zhou, XU Zhao-An, *et al.* Analysis on the ultra-spectral characteristics of water environmental parameters about lake [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 疏小舟, 徐兆安, 等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(6): 427—435.
- [7] LIN Sao-Hu, ZHU Hong, ZHAO Yi-Gong. Model for sea clutter based on neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林三虎, 朱红, 赵亦工. 基于神经网络的海杂波模型. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 55—58.