

叶绿素 a 浓度的动态峰反演方法*

吴传庆^{1,2}, 杨志峰¹, 王 桥², 刘晓曼², 万华伟², 王昌佐², 厉 青²

(1: 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

(2: 环境保护部环境卫星中心筹备办公室, 北京 100029)

摘 要: 叶绿素 a 是影响内陆水体光学特性的主要水色要素之一. 作为反映水体富营养化程度的重要参数指标, 国内外学者发展了大量的算法和模型进行水体中叶绿素 a 浓度的遥感反演. 这些算法均使用固定的波段位置. 叶绿素 a 的特征谱段随着其浓度的变化存在一定的位移, 尤其是 701nm 反射峰, 其存在着明显的“红移”现象, 因此使用固定波段势必带来一定的误差. 通过对不同叶绿素 a 浓度水样的光谱曲线分析, 提出动态峰反演叶绿素 a 浓度的方法. 使用反射峰范围最大值和吸收谷范围最小值, 而不是固定波长位置进行建模, 以求获得更高的反演精度.

关键词: 叶绿素 a; 反演; 动态峰

A reverse method of chlorophyll-a based on dynamic apex

WU Chuanqing^{1,2}, YANG Zhifeng¹, WANG Qiao², LIU Xiaoman², WAN Huawei², WANG Changzuo² & LI Qing²

(1: *School of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(2: *Environmental Satellite Center Preparing Office, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100029, P.R.China*)

Abstract: Chlorophyll-a is one of the main water color elements which affect inland water optical properties, and it is the important parameter reflecting water eutrophic level. In the recent years, many methods and models are developed to retrieve Chl.a concentration. These methods or models all uses immobile bands. However, characteristic bands of chlorophyll-a move with the concentration changes. Especially, phenomenon of red-shift effect occurs obviously at 701nm reflective peak. As a result, using immobile bands to retrieve Chl.a concentration must bring some errors. In order to obtain higher precision, author in this article analyzed water spectra with different Chl.a concentrations and brings forward a new method of using dynamic apex to retrieve the Chl.a concentrations.

Keywords: Chlorophyll-a; retrieval; dynamic apex

随着遥感技术的发展和水质参数光谱特征认识的不断深入, 以及反演算法的不断改进, 内陆水质遥感取得了长足的进步^[1]. 叶绿素 a、悬浮物和黄色物质是影响内陆水体光学特性最主要的水色要素^[2]. 其中的叶绿素 a 是反映水体富营养化程度的一个重要的参数指标, 因此也成为内陆水质遥感的监测重点. 几十年来, 国内外学者发展了大量的算法和模型进行水体中叶绿素 a 浓度的遥感反演, 通常可分为 3 种算法: (1)经验模型, (2)半分析模型, (3)机理模型^[3]. 这些算法在波段的使用上有一个共同的特点——波段位置固定. 而叶绿素 a 浓度变化会引起水体特征波段的“漂移”, 这一现象已被很多学者在光谱研究中所发现: 如水体中叶绿素含量显著升高, 导致水体光谱蓝、红光反射率降低; 含藻类水体的近红外波段具有明显的植被特征“陡坡效应”, 荧光峰位置向长波方向移动^[4-8]. 本文作者也在不同叶绿素 a 浓度水体获取

* 国家自然科学基金项目(40671134)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-350)联合资助. 2008-11-03 收稿; 2008-12-04 收修改稿. 吴传庆, 男, 1977 年生, 博士, 工程师; E-mail: cqwu317@sina.com.

的光谱中发现类似现象. 因此, 由于波段“漂移”的现象存在, 使用固定位置的特征波段来建模进行叶绿素 a 浓度的反演, 必然带来一定的误差. 本文利用水箱光谱实验的水体遥感反射率光谱, 尝试动态特征光谱位置来完成叶绿素 a 的反演.

1 叶绿素 a 水体光谱分析

叶绿素 a 是藻类含有的主要色素, 是藻类光合作用中的重要光合色素. 它将阳光转变成能量, 存在于细胞内的叶绿体中, 反射绿光并吸收红光和蓝光, 使藻类呈现绿色. 本实验中使用微囊藻来调节水体中叶绿素 a 浓度: 取高浓度的微囊藻水样放入水箱, 逐渐增加水样以提高水箱中叶绿素 a 的浓度, 每个浓度取水箱中的水样利用分光光度计测量叶绿素 a 的浓度. 试验水箱为玻璃缸(50cm × 50cm × 50cm); 水底和四壁都用黑布包裹, 以防止周围杂闪光的进入和水底、水壁反射. 水面光谱测量和处理采用“水面以上法”^[9], 使用 ASD 野外光谱辐射仪 FieldSpec Pro VNIR, 波长响应范围为 325–1075nm, 光谱分辨率 3nm.

1.1 特征位置

结合图1中的光谱曲线和图2中的导数曲线进行观测, 可知叶绿素 a 光谱曲线特征位置有: 440nm 吸收谷: 由于叶绿素 a 在蓝光波段的强烈吸收, 浮游植物吸收系数在该处有一个极大值^[10]; 490nm 小吸收谷: 该处类胡萝卜素吸收^[11]; 540nm 反射峰: 由于叶绿素吸收系数达到极小值, 加上无机悬浮物质和浮游植物细胞壁的散射, 形成植物光谱曲线的最大反射峰^[12]; 622nm 吸收谷: 由于藻胆素(藻青蛋白)的吸收作用,

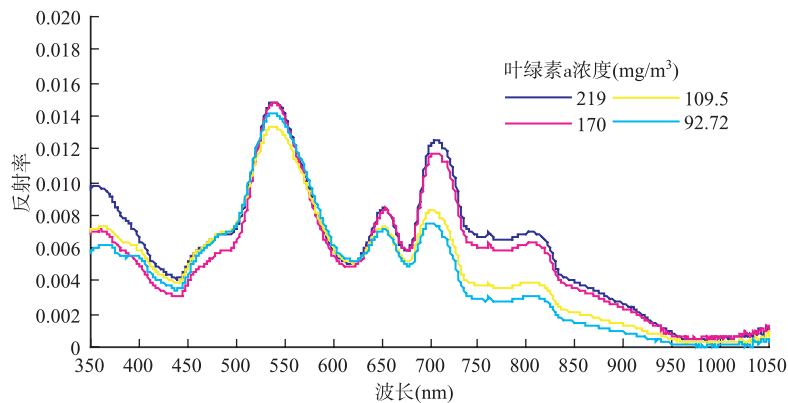


图 1 不同叶绿素 a 浓度水体的遥感反射率曲线

Fig.1 Remote sensing reflectivity curves of water with different Chl.a concentration

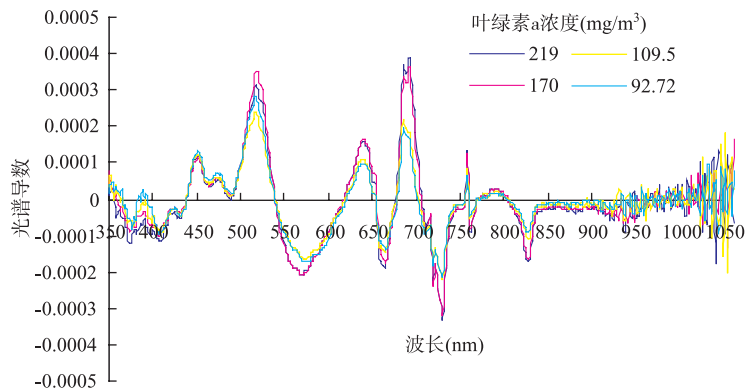


图 2 图 1 光谱相应的导数光谱曲线

Fig.2 Derivative curves of water spectra in Fig.1

吸收光谱在该波段附近出现一相对较小的吸收谷(有时是肩部), 该吸收谷是蓝藻最显著的特征^[3]; 654nm 反射峰: 由622nm和679nm两处吸收谷共同作用使此处成反射峰形状, 不具有特征显示意义; 671nm处吸收谷: 叶绿素a在该处的强烈吸收; 但由于叶绿素吸收和细胞壁散射均衡, 该处对藻类密度和叶绿素浓度的反射敏感度最低, 当叶绿素浓度到达一定程度时, 此处的反射率几乎与叶绿素无关, 主要与无机悬浮物浓度相关^[13]; 701nm处反射峰: 该处反射峰对植被遥感具有重要意义, 其左边为植被高光谱研究中常提的“红边”, 从680nm开始, 与叶绿素a浓度密切相关. 其为反射峰成因主要为: (1)浮游植物色素的荧光效应^[14]; (2)水和叶绿素a的吸收系数之和在该处最小, 可作为是否含有叶绿素的依据^[15]; 762nm处的小突起是由于大气吸收造成的^[16]; 735nm处反射率拐点: 纯水在近红外波段强吸收造成的; 815nm处反射峰: 纯水吸收系数在815nm附近有一个极小值.

1.2 浓度变化

随着叶绿素 a 浓度的增高, 在 450–950nm 波段范围内遥感反射率均匀不同程度的升高, 反射峰数值的变化大于吸收谷数值的变化(图 1). 通过各波段光谱值与叶绿素 a 浓度的相关性分析(图 3)可看出, 叶绿素 a 浓度与水体遥感反射率有着很好的相关性, 460–940nm 波长范围相关系数均超过 0.9, 540nm 和 701nm 反射峰相关系数接近 1, 表明反射峰位置高正相关. 因此使用遥感方法反演水体中的叶绿素 a 浓度具有很好的可行性.

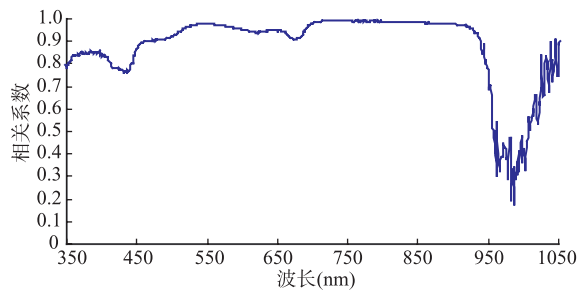


图 3 叶绿素 a 浓度与光谱反射率相关性

Fig.3 Correlative coefficient between Chl.a and reflectivity

1.3 特征位置变化分析

基于图 4、图 5 光谱导数的曲线对 7 个特征位置进行分析, 叶绿素 a 浓度的变化: 440nm, 622nm, 671nm

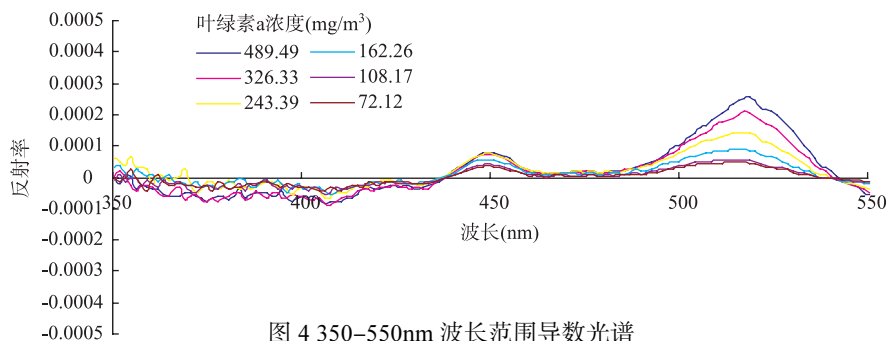


图 4 350–550nm 波长范围导数光谱

Fig.4 Spectral derivative curves in the range of 350–550nm

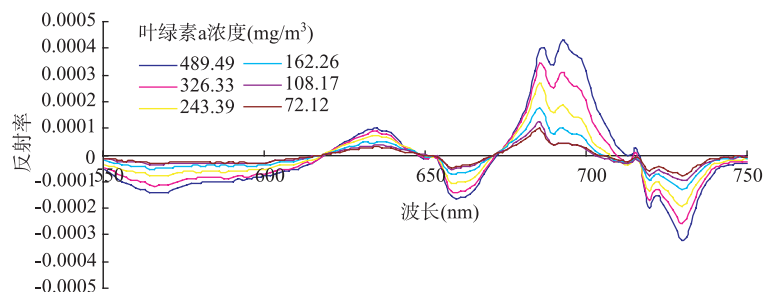


图 5 550–750nm 波长范围导数光谱

Fig.5 Spectral derivative curves in the range of 550–750nm

吸收谷和 654nm 反射峰的位置基本保持不变; 540nm 和 701nm 反射峰位置存在着一定的位移. 两个反射峰的位置随着藻类叶绿素浓度的增大向长波方向移动, 701nm 反射峰的位移幅度大于 540nm 反射峰(表 1). Gitelson^[17]首先观察到叶绿素 a 在 700nm 附近反射峰位置的红移现象, 这与实验的观测结果相符.

表 1 特征位置随叶绿素 a 浓度位置变化

Tab.1 Characteristic location changes with the Chl.a concentration vary

叶绿素 a 浓度(mg/m ³)	489.49	326.33	243.39	162.26	108.17	72.12
540nm 反射峰位置(nm)	541.6243	541.6243	540.1863	535.8723	535.8723	535.8723
701nm 反射峰位置(nm)	717.0594	708.4315	706.9935	704.1175	702.6795	702.6795
440nm 吸收谷位置(nm)	438.0881	439.5261	436.6501	436.6501	438.0881	439.5261
671nm 吸收谷位置(nm)	672.4818	671.0438	671.0438	671.0438	671.0438	671.0438

2 模型与结果

通过各波段光谱值与叶绿素 a 浓度的相关性分析得出: 基于水体遥感反射率反演叶绿素 a 浓度具有很好的可行性, 其中 540nm 和 701nm 反射峰相关系数接近 1. 因此使用半经验模型, 利用统计方法进行单参数反演, 能够实现很高的精度. 很多学者根据特征位置建立过大量的相关性模型, 这些模型有一个共同的特点, 就是特征位置固定. 在前面的分析中得知叶绿素 a 的特征谱段是有着一定的位移, 尤其是 701nm 反射峰, 其存在着明显的“红移”现象, 特征位置固定势必带来一定的误差. 为减小这种误差, 基于室内光谱的建模过程中, 我们使用反射峰范围最大值和吸收谷范围最小值(表 2), 而不是固定波长位置进行建模.

表 2 叶绿素 a 浓度动态峰位置和数值

Tab.2 Chl.a dynamic apex locations and values

叶绿素 a 浓度(mg/m ³)	489.49	326.37	243.39	162.26	108.18	72.19
波长(nm)	717.0594	708.4315	706.9935	704.1175	702.6795	702.6795
反射率	0.013519	0.01087	0.008463	0.005769	0.004193	0.003758
波长(nm)	672.4818	671.0438	671.0438	671.0438	671.0438	671.0438
反射率	0.00462	0.004436	0.004282	0.003238	0.002711	0.00243

(1) 模型 1(比值模型)

$$A: y=1370x-211.45 \quad (1)$$

式中, $x=(B_1-B_2)/(B_1+B_2)$, B_1 为 701nm 反射峰波段范围峰值, B_2 为 671nm 吸收谷波段范围极值; y 为叶绿素 a 浓度(mg/m³); $R^2=0.9736$; 叶绿素 a 浓度反演误差为 10.7738%.

$$B: y=1488.5x-239.22 \quad (2)$$

式中, $x=(B_1-B_2)/(B_1+B_2)$, B_1 为 701nm 波段值, B_2 为 671nm 波段值; y 为叶绿素 a 浓度(mg/m³); $R^2=0.9671$; 叶绿素 a 浓度反演误差为 11.0167%.

(2) 模型 2(线性模型)

$$A: y=280.7x-338.41 \quad (3)$$

式中, $x=B_1/B_2$; B_1 为 701nm 反射峰波段范围峰值, B_2 为 671nm 吸收谷波段范围极值; y 为叶绿素 a 浓度(mg/m³), $R^2=0.9834$; 叶绿素 a 浓度反演误差为 10.6495%.

$$B: y=319.8x-403.19 \quad (4)$$

式中, $x=B_1/B_2$; B_1 为 701nm 波段值, B_2 为 671nm 波段值, y 为叶绿素 a 浓度(mg/m³), $R^2=0.9813$; 叶绿素 a 浓度反演误差为 10.7536%.

通过以上 2 组 4 个模型比较可知: 使用动态峰值波长建立的 A 类模型拟合和反演精度优于固定峰值波长建立的 B 类模型。

3 结论

利用位置变化的特征谱段反射率替代固定特征谱段, 能在一定程度上提高叶绿素 a 的反演精度。即该技术能够对以前的反演模型进行优化。当前航天或者航空的高光谱传感器的光谱分辨率在 5–20nm 之间, 而峰值波段的位置漂移很小, 只有光谱分辨率在 2nm 之内的传感器才能明显分辨出峰值波段位置的细微变化。因此, 该技术目前还无法在航天传感器中使用, 只能应用到地面测量光谱中。可通过对地面光谱的测量和分析, 利用动态峰技术实现水体叶绿素 a 浓度非接触式测量。随着航空和航天高光谱传感器的发展, 上千谱段, 光谱分辨率更高的高光谱传感器也在发展中, 动态峰反演方法势必将得到实际的应用。

致谢: 感谢李俊生博士提供的部分水质光学数据, 感谢张丽娟同学在光谱水箱实验上给予我很好的协作。

4 参考文献

- [1] 周冠华. 水体光学特性模拟与内陆水质遥感反演. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007: 3-4.
- [2] Dekker AG, Brando VE, Anstee JM *et al.* Imaging spectrometry of water. In: van der Meer FD, De Jong SM eds. *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001: 307-359.
- [3] Dekker A. Detection of the optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing. Amsterdam, the Netherlands: Free University, 1993: 10-100.
- [4] Hu C, Muller-Karger FE, Taylor C *et al.* Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**: 311-321.
- [5] 段洪涛, 张 柏, 刘殿伟等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素a响应关系研究. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(5): 355-359.
- [6] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光等. 叶绿素a荧光遥感研究进展. *遥感学报*, 2007, **11**(1): 137-141.
- [7] 杨锦坤, 陈楚群, 唐世林等. 珠江口水体叶绿素荧光特性研究. *热带海洋学报*, 2007, **26**(4): 15-20.
- [8] 赵冬至, 张丰收, 杜 飞等. 基于高光谱反射率的藻类水体基线荧光峰高度与叶绿素a浓度关系研究. *高技术通讯*, 2004, **14**(5): 68-72.
- [9] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法. *遥感学报*, 2004, **8**(1): 37-44.
- [10] Hluz D, Yacobi YZ, Gitelson A. Adaptation of an algorithm for chlorophyll-a estimation by optical data in the oligotrophic Gulf of Eilat. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(5): 1157-1163.
- [11] Yacobi YZ, Gitelson A, Mayo M. Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using high spectral resolution radiometer and Landsat TM: Spectral features of reflectance and algorithm development. *J Plankton Res*, 1995, **17**: 2155-2173.
- [12] Schalles JF, Gitelson A, Yacobi YZ *et al.* Chlorophyll estimation using whole seasonal, remotely sensed high spectral-resolution data for an eutrophic lake. *J Phycol*, 1998, **34**: 383-39.
- [13] Gitelson A, Mayo M, Yacobi YZ *et al.* The use of high spectral radiometer data for detection of low chlorophyll concentrations in Lake Kinneret. *J Plankton Res*, 1994, **16**: 993-1002.
- [14] Hoge F, Swift R. Ocean color spectral variability studies using solar induced chlorophyll fluorescence. *Applied Optics*, 1987, **26**.
- [15] Gitelson AA, Kondrat'ev KY. On the mechanism of formation of maximum in the reflectance spectra near 700nm and its application for remote monitoring of water quality. *Transactions Doklady of the USSR Academy of Sciences: Earth Science Sections*, 1991, **306**: 1-4.
- [16] Murphy RJ, Tolhurst TJ, Chapman MG *et al.* Estimation of surface chlorophyll-a on an emerged mudflat using field spectrometry: accuracy of ratios and derivative-based approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, **26**: 1835-1859.
- [17] Gitelson AA. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water relationship of its magnitude and position with chlorophyll concentration. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 3367-3373.