

水体红波段反射光谱对叶绿素浓度变化的响应

马万栋^{1,2,3}, 邢前国^{1,4*}, 张渊智⁵, 施平¹, 刘亚龙¹

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003
2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049
4. 法国国家科学研究院(CNRS), 海洋与地球科学实验室, Wimereux, 法国
5. 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 中国 香港

摘要 在不考虑叶绿素荧光效应的前提下, 基于水体光学活性因子藻类叶绿素、有色可溶性有机物及非藻类颗粒物的吸收和后向散射系数, 根据前向辐射传输模型模拟水面以上遥感反射率, 分析了藻类叶绿素红光峰强度和波长位置随浓度的变化规律。结果发现: 叶绿素浓度为 $1 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 红光峰强度和叶绿素浓度呈较好的线性关系, 随叶绿素浓度的增加, 线性关系越来越不明显。当叶绿素浓度为 $1 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 则呈现较好的对数关系; 随叶绿素浓度的增加, 红波段反射峰波长位置按对数规律逐渐向长波方向移动, 不同水色组分的水体, 其叶绿素在红波段的光谱反射特性随浓度的变化规律是一致的; 此外, 对比研究显示红波段反射峰特征不同于荧光光谱。

关键词 叶绿素-a; 反射光谱; 红波段反射峰; 荧光峰; 光谱模拟

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)02-0313-05

引言

叶绿素是二类水体水色反演的主要水质参数之一。水体组分中叶绿素浓度的遥感反演取决于叶绿素、有色可溶性有机物及非藻类颗粒物的吸收和后向散射特性。经典的表层水体叶绿素浓度反演采用蓝绿波段比值算法^[1,2], 但是对于光学属性复杂的海岸带及内陆二类水体, 由于非色素悬浮物 (Tripton) 及有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter: CDOM) 的吸收和散射的影响^[3], 蓝绿波段比值算法对于叶绿素浓度的反演精度较低^[4,5]。对于二类水体叶绿素浓度的反演, 许多较为成功的算法都与藻类颗粒在 700 nm 左右的光谱反射峰属性有关^[6,7], 如红波段比值算法、荧光峰算法、及导数光谱算法^[8]。Ruddick 等^[9]分析了近红外和红波段比值算法中波长的选择对反演误差的影响, 发现叶绿素的反演精度取决于近红外波段的波长位置, 因此近红外和红波段比值算法的一个应用前提就是 700 ~ 740 nm 之间足够的光谱分辨率和精确的近红外波段位置。在利用红波段及近红外波段遥感反射率反演叶绿素浓度时, 常利用叶绿素在 700 nm 左右的反射峰特征, 包括叶绿素的荧光峰和由藻类

颗粒光学弹性散射形成的红波段反射峰。

目前, 许多学者尝试对水体藻类叶绿素在红波段的荧光峰 (非弹性散射) 特性进行研究, 但对藻类颗粒由于弹性散射而引起的 700 nm 左右的红光反射峰特征研究相对较少, 水体弹性反射峰在该波段与荧光峰的部分重叠, 导致了目前荧光峰和红波段弹性反射峰的识别不清, 也对利用红波段反射峰特征的叶绿素反演算法带来误差和不确定性。本文通过分析叶绿素在红波段的固有光学属性, 研究了叶绿素在红波段的遥感反射率响应特性, 即水体在红波段反射峰强度和反射峰波长随叶绿素浓度的变化规律。本研究结果有助于识别水体红波段光谱本质特征、改进利用红波段的叶绿素遥感反演算法, 为区分藻类叶绿素的红光反射峰和荧光峰奠定基础。

1 实验方法

1.1 遥感反射率的计算

水体组分浓度的遥感反演依赖于遥感反射率 (R_{rs}) 和水体及其组分的固有光学属性 (即总吸收系数和总后向散射系数) 之间的关系^[10-12]

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1)$$

收稿日期: 2009-01-16, 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 山东省科技计划项目 (2007GG2Q T06019) 和中国科学院知识创新项目 (KZCX2-YW, 04) 资助

作者简介: 马万栋, 1977 年生, 中国科学院烟台海岸带所博士研究生 *通讯联系人 e-mail: qgxing@yic.ac.cn

其中, λ 是波长; K_d 是依赖于不同水体的几何光场的常数; $b_b(\lambda)$ 是水体的总后向散射系数; $a(\lambda)$ 是水体的总吸收系数, 包括叶绿素 (chlorophyll-a: Chl-a)、非色素悬浮物 (Tripton)、有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM) 和纯水的吸收^[13], 即

$$a(\lambda) = a_{\text{chl-a}} + a_{\text{tripton}} + a_{\text{CDOM}} + a_{\text{water}} \quad (2)$$

要利用遥感反射率反演叶绿素浓度需要从总吸收系数和总后向散射系数中分离出叶绿素的吸收和后向散射分量。本研究利用实测的 CDOM, tripton 及叶绿素的光谱特征吸收和后向散射系数, 然后根据前向辐射传输模型^[14, 15]及 Gordon 等的算法模型^[10], 分别计算不同叶绿素浓度水体在 400 ~ 750 nm (波谱分辨率为 2 nm) 的水面以下遥感反射率, 根据水气界面的光场分布函数计算水面以上遥感反射率^[16, 17], 同时还模拟了不同浓度水色组分 (CDOM 为 6 m^{-1} 及 tripton 浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的水体, 其叶绿素在红波段的反射特性随浓度的变化规律。

1.2 叶绿素红光波段反射特征

通过实验室测量一定浓度水色组分的水体, 基于纯水、非色素悬浮物、叶绿素及有色可溶性有机物在不同波长处的吸收和后向散射系数, 在不考虑叶绿素荧光效应的前提下, 根据生物光学模型计算不同叶绿素浓度的后向散射强度及水面以上遥感反射率, 得到了不同叶绿素浓度的水体其遥感反射率随波长的变化规律。本研究选取波长范围在 660 ~ 750 nm 的遥感反射率 (如图 1) 分析叶绿素在红波段的反射特性。

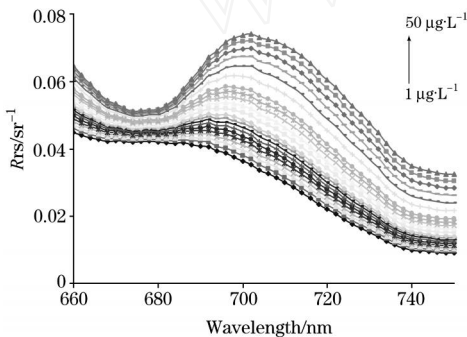


Fig 1 Reflectance curves of different chlorophyll-a concentration in red region

叶绿素在红光波段区域, 随着叶绿素浓度的增加, 从 674 nm 处的红光吸收谷随波长增加其遥感反射率逐渐增加, 达到峰值后又逐渐减小。当叶绿素浓度从 $1 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增加时, 其红波段反射峰逐渐向长波方向移动。

2 讨论

2.1 叶绿素红波段反射峰强度随浓度的变化规律

由于叶绿素本身的结构和组成特性, 使叶绿素在可见光的蓝光 (470 nm) 和红光波段 (670 nm) 有较强的吸收, 在红光波段受藻类叶绿素弹性散射的影响, 光谱反射率逐渐增加, 在 700 nm 左右达到峰值, 随波长的增加受水分子强吸收的影响, 反射率逐渐下降。在红光波段, 随叶绿素浓度的增加,

反射峰强度逐渐增加, 图 2 表明了随叶绿素浓度的增加其反射峰强度在红光波段的变化规律。

由图 2(a) 可知, 叶绿素在红波段的反射峰强度同浓度有较好的线性相关性, 其决定系数达 0.982, 利用叶绿素浓度同反射峰强度的相关关系, 进行叶绿素浓度的反演, 有较好的反演效果, 其 RMSE 为 $1.944 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但是当叶绿素浓度达到 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 这种线性相关关系逐渐减弱 [图 2(b)], 当叶绿素浓度达到 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 红波段反射峰强度和叶绿素浓度则呈现较好的对数关系 [图 2(c)], 决定系数达 0.965。

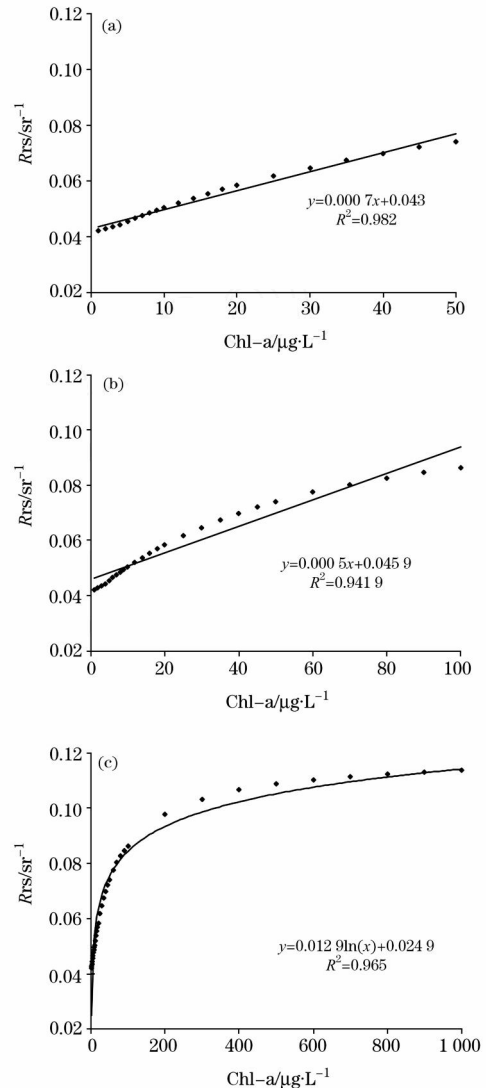


Fig 2 Relationship between the reflectance peak intensity in red region and chlorophyll-a concentration

(a) : $1 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; (b) : $1 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;

(c) : $1 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

2.2 叶绿素红波段反射峰波长随浓度的变化规律

在红光波段区域, 水体反射光谱受叶绿素强吸收的影响。由图 1 可知, 随着叶绿素浓度的增加, 反射峰强度逐渐增加, 而且反射峰波长逐渐向长波方向移动, 这种变化规律可以用

对数关系描述(见图 3)。

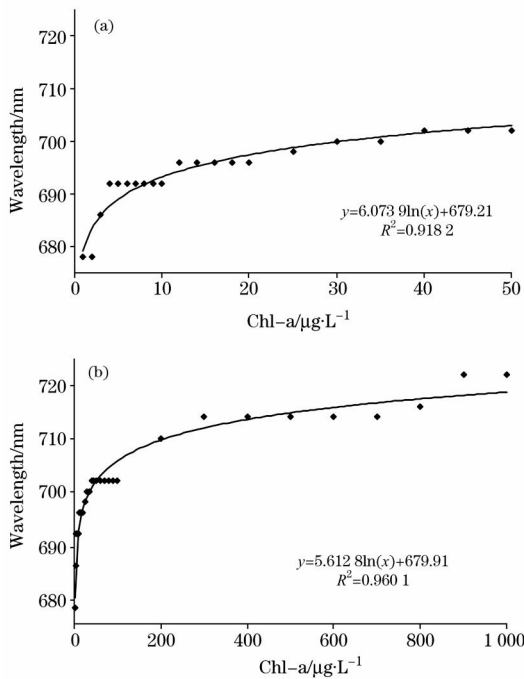


Fig 3 Relationship between the wavelength of reflectance peak in red region and chlorophyll-a concentration
(a) : 1 ~ 50 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; (b) : 1 ~ 1000 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

从图 3(a)可以看出, 叶绿素红波段反射峰波长位置同叶绿素浓度有较好的对数关系, 其决定系数达 0.9182, RMSE 为 1.8753 nm。当叶绿素浓度增加时, 这种对数关系也日趋明显[见图 3(b)]。利用叶绿素浓度同红波段反射峰波长位置的关系反演叶绿素浓度, 其 RMSE 为 4.258 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 误差较大。

2.3 水体其他组分浓度变化对叶绿素红波段反射特性的影响

富含叶绿素的水体在红光波段的光学特性还受水体组分浓度(有色可溶性有机物及非色素悬浮物)的影响^[18, 19], 本文还模拟了不同水色组分浓度(CDOM 为 6 m^{-1} , Tripton 为 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的水体其叶绿素红波段反射特性随浓度的变化规律(图 4 和图 5)。

通过研究不同水色组分的水体, 其叶绿素红波段反射峰强度和反射峰波长同叶绿素浓度的变化规律, 发现不同水色组分的水体其叶绿素在红波段反射峰强度同叶绿素浓度有较好的线性关系(决定系数为 0.9835), 其反射峰波长同叶绿素浓度存在较好的对数关系(决定系数为 0.9196), 利用红波段反射峰强度和反射峰波长位置进行叶绿素浓度的反演其 RMSE 分别为 1.86 和 8.51 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 红波段反射峰与荧光峰的对比

水体中叶绿素受太阳光的激发产生荧光效应^[20], 除叶绿素在红波段的强吸收和部分弱反射之外还会出现不同程度的荧光现象, 荧光峰峰值波长在 683 nm 左右, 而且随叶绿素浓度的增加其荧光峰强度逐渐增强。根据 GOWER 的研究

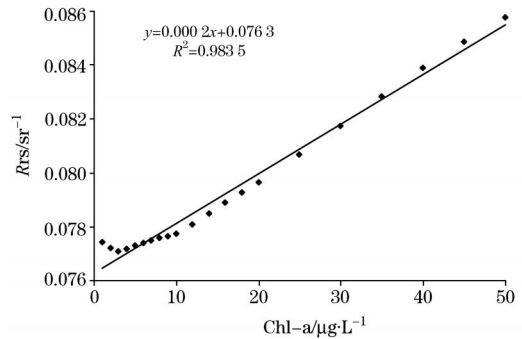


Fig 4 Relationship between reflectance peak intensity in red region and chlorophyll-a concentration within different in-water constituents

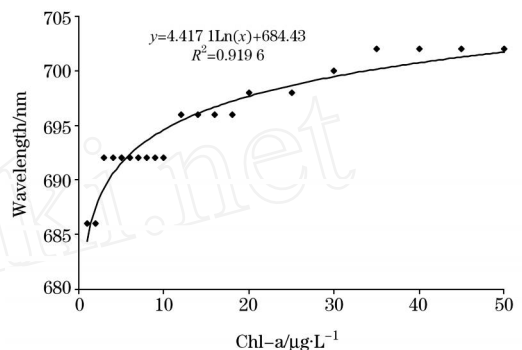


Fig 5 Relationship between the wavelength of reflectance peak and chlorophyll-a concentration within different in-water constituents

证明^[6], 荧光峰波长位置和红波段反射峰波长位置非常接近, 导致许多学者常常忽略了红波段荧光峰和弹性反射峰的区别。通过荧光峰和红波段反射峰对比研究发现, 荧光峰和红波段反射峰在强度和反射峰值位置上都存在较大差异: 当叶绿素浓度在 15.3 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 荧光峰波长为 685 nm^[6]; 而模拟的红波段反射峰波长为 696 nm; 随波长增加, 荧光峰强度达到峰值后迅速下降, 而红波段反射峰则下降比较平缓, 到 740 nm 由于水分子的强吸收藻类叶绿素的红波段反射信号极低。藻类水体红波段反射峰是由弹性散射所引起的, 是藻类水体的固有光学属性所决定的, 其反射峰波长随叶绿素浓度的增加逐渐向长波方向移动, 而荧光峰则是由藻类水体叶绿素的非弹性散射所引起的, 其荧光峰强度随叶绿素浓度的增加逐渐增加, 但是其峰值波长随叶绿素浓度增加是否向长波方向移动需要在今后的研究中进一步证明。

3 结论

在不考虑叶绿素荧光效应的前提下, 通过对叶绿素红波段光谱反射强度和反射峰波长位置随浓度的变化规律研究发现: 叶绿素浓度在 1 ~ 50 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其在红波段的反射峰强度与叶绿素浓度有较好的线性相关关系; 当叶绿素浓度逐

渐增加时,叶绿素红波段反射峰强度和浓度的线性关系越不明显,当叶绿素浓度达到 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,则呈现较好的对数关系;随叶绿素浓度的增加,红波段反射峰波长位置按对数规律逐渐向长波方向移动,浓度愈大,这种对数关系愈明显;在不同水色组分的水体中,其叶绿素在红光波段的反射

峰强度和反射峰波长随叶绿素浓度的变化也遵循同样的变化规律。此外,通过对比荧光光谱和红波段反射光谱发现,红波段反射光谱在强度和峰值波长位置上的变化都不同于荧光光谱。

参 考 文 献

- [1] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C11): 24937.
- [2] McClain C R, Feldman G C, Hooker S B. *Deep-Sea Research Part*, 2004, 51(1-3): 5.
- [3] Stramski D, Bricaud A, Morel A. *Applied Optics*, 2001, 40(18): 2929.
- [4] Dall'Olmo G, Gitelson A A, Rundquist D C. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1938.
- [5] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(4): 464.
- [6] Gower J F R, Doerffer R, Borstad G A. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1771.
- [7] Vasilkov A, Kopelevich O. *Oceanology*, 1982, 22: 697.
- [8] Xing Q, Chen C, Shi H, et al. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(4): 22.
- [9] Ruddick K G, Gons H J, Rijkeboer M, et al. *Applied Optics*, 2001, 40(21): 3575.
- [10] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(D9): 10909.
- [11] Gordon H R, Brown O, Jacobs M M. *Applied Optics*, 1975, 14(2): 417.
- [12] Morel A, Gentili B. *Applied Optics*, 1993, 32(33): 6864.
- [13] Garver S A, Siegel D A. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C2): 18607.
- [14] Zaneveld J R V, Twardowski M J, Barbard A, et al. In *Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments*. Dordrecht: Springer. 2005.
- [15] Zaneveld J R, Barnard A, Boss E. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9052.
- [16] Aas E, Hojerslev N K. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C4): 8015.
- [17] Devred E, Fuentes-Yaco C, Sathyendranath S, et al. *Indian Journal of Marine Science*, 2005, 34(4): 356.
- [18] Morel A, Prieur L. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(4): 709.
- [19] YANG Wei, CHEN Jin, Mausushita Bunki (杨伟, 陈晋, 松下文经). *Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析)*, 2009, 29(1): 38.
- [20] Neville R A, Gower J F R. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(24): 3487.

Quantitative Analysis of Chlorophyll-a Reflectance Spectrum in Red Spectral Region of Water

MA Wan-dong^{1,2,3}, XING Qian-guo^{1,4*}, ZHANG Yuan-zhi⁵, SHI Ping¹, LIU Ya-long¹

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China
2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. CNRS UMR 8187 LOG, 28 avenue Foch, BP 80, F-62930, Wimereux, France
5. Institute of Space and Earth Information Science, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China

Abstract The chlorophyll-a concentration in waters is one of the main parameters of water color remote sensing in case waters. There is a reflectance peak in red band region because of inherent optical properties. Based on the coefficients of absorption and backscattering of waters, colored dissolved organic matter (CDOM), tripton and chlorophyll-a, the reflectance of remote sensing was simulated according to the forward radiation transfer model without the consideration of fluorescence peak. The reflectance peak intensity and reflectance peak position at different wavelengths in red band region were analyzed with different chlorophyll-a concentration. There is a good linear relationship between the red reflectance peak intensity and chlorophyll-a concentration when the chlorophyll-a concentration is $1\text{--}50\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. But the linear relationship between the reflectance peak intensity and chlorophyll-a concentration will decrease with the increasing chlorophyll-a concentration. When chlorophyll-a concentration is up to $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, the logarithm relationship between the reflectance peak intensity and chlorophyll-a concentration is better than linear relationship. The wavelength position of reflectance peak in red band region will shift towards larger wave-

length at logarithmic growth rate with increasing chlorophyll-a concentration, and the logarithm relationship will be more apparent with the increasing chlorophyll-a concentration. The same trend happens to the reflectance peak intensity and the wavelength position of peak in red region with different in-water constituents, such as CDOM, tripton and so on. Furthermore, according to the comparison with fluorescence peak, the authors also found that the reflectance peak intensity and the wavelength position of peak in red region are different from those of the fluorescence peak.

Keywords Chlorophyll-a; Reflectance spectrum; Reflectance peak in red spectral region; Fluorescence peak; Spectrum simulation

(Received Jan. 16, 2009; accepted Apr. 20, 2009)

* Corresponding author

www.cnki.net