

基于定量遥感反演的内陆水体藻类监测

宋瑜¹, 宋晓东¹, 江洪², 郭照冰³, 郭青海^{1*}

1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021
2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093
3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 叶绿素作为衡量湖泊富营养化的重要指标, 利用遥感技术对其进行实时动态监测具有重要意义。以太湖为例, 通过对水体实测光谱和水质采样数据的分析, 建立了光谱反射率比值与叶绿素 a 浓度的回归模型。结果显示, 700 nm 附近波段与 625 nm 附近波段所构建的比值模型 R^2 最高, 710 nm 以后波段与其他可见光波段所构建的比值模型的 R^2 会随可见光波长的增大而逐渐下降。在高光谱遥感估算模型的基础上, 应用同步 MODIS 卫星遥感数据进行了太湖叶绿素 a 浓度的空间分布反演, 并基于 MODIS 绿度指数建立了太湖藻华水体信息提取模型, 从叶绿素 a 浓度估算和藻华信息提取两个方面实现了太湖藻类空间分布特征的定量反演, 为太湖等大型内陆水体藻类的实时定量遥感监测提供了新的研究思路。

关键词 叶绿素 a; 藻华; 高光谱; MODIS; 太湖

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)04-1075-05

引言

叶绿素在藻类细胞中所占比例较稳定, 其浓度能反映藻类密度和生物量大小, 因此常被作为衡量水体富营养化程度的一个重要指标^[1,2]。传统的人工调查方法可精确测定水体局部叶绿素浓度, 但成本高、耗时长, 难以应对大范围突发性的水体污染事件; 利用遥感技术可实现区域乃至全球尺度上水体表层水质参数的时空动态变化的低成本监测^[3]。水质遥感监测是通过量测一定波长范围内的水体辐射值, 定量分析水体反射光谱特征与水质指标间的关系, 进而构建水质指标反演算法的一类方法体系^[4,5]。

叶绿素浓度的定量遥感反演方法大致可分为分析、经验和半经验模型 3 类。分析模型以辐射传输理论为基础, 因需要严格的理论推导和复杂模型变量的获取而较难实现^[6,7]; 经验模型一般是通过建立多光谱遥感数据与地面实测数据间的统计关系来外推水质参数值的一种方法; 而半经验模型则将高光谱遥感技术引入水质遥感监测之中, 具有一定的物理意义^[8,9]。

半经验模型自 20 世纪 90 年代以来已成为较常用的水质

监测方法。其中, 利用叶绿素反射峰和吸收峰波段建立比值模型来估算叶绿素浓度是一类最为常见的半经验模型, 该模型可在一定程度上减小悬浮物和黄色物质等因素的影响^[10,11]。此外, 利用藻类水体在 700 nm 附近反射峰位置的移动规律^[12,13]和光谱曲线的微分技术^[14]来建模也是两类重要的反演方法。但由于目前大多数传感器的光谱分辨率尚不能满足反射峰位置法和一阶微分法的应用需求, 而中等分辨率的水色传感器(如 MODIS、MERIS 等)的通道设置由于充分考虑了叶绿素反射峰和吸收峰的位置, 因此基于此类数据可将比值模型应用于藻类的卫星遥感反演研究之中。

太湖是我国第三大淡水湖, 其梅梁湖、贡湖、胥湖等湖区是无锡、苏州等城市的主要供水源地。近年来, 太湖富营养化问题日趋严重, 藻类爆发性增长加快了水环境的恶化速度^[15]。目前已有大量基于遥感影像或实测光谱的经验、半经验模型用于太湖水体叶绿素浓度的估算^[16,17]。然而, 当藻类成片漂浮、呈不均匀分布时, 采样分析的叶绿素浓度通常具有较大的随机性, 基于遥感和水质采样数据的叶绿素浓度定量反演模型难以适用于部分被藻华污染的水域。因此, 研究中应结合藻类叶绿素浓度估算和藻华信息提取模型以实现整个水域的藻类遥感监测。本文的研究目的是通过对太湖水体

收稿日期: 2009-05-18, 修订日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800148, 40671132), 科技部数据共享平台建设项目(2006DKA32308)和科技部国际合作项目(20073819)资助

作者简介: 宋瑜, 女, 1983 年生, 中国科学院城市环境研究所博士研究生 e-mail: ysong@iue.ac.cn

通讯联系人 e-mail: qhguo@iue.ac.cn

实测光谱和水质采样数据的分析, 寻求叶绿素浓度最佳比值模型和藻华信息的有效提取方法, 并利用 MODIS 数据实现太湖水域藻类的定量反演, 进而提高对于藻华爆发等恶性水环境事件的快速应急响应能力。

1 数据与方法

1.1 野外水质采样与室内分析

根据太湖多年水质监测数据中主要污染物的时空分布情况, 野外实验采样点基本沿太湖的航线分布, 即从梅梁湾向湖心方向延伸, 并兼顾贡湖口附近。采样时间为 2007 年 11 月 2 日。采样过程中, 太湖表层(水下 50 cm)水样采集与水体表层光谱测量同时进行。叶绿素 a 浓度(*Chl-a*)的室内测定采用分光光度法。

1.2 水体同步高光谱测量

水体反射光谱的测量使用美国 ASD 公司生产的便携式分光辐射光谱仪, 其波长范围为 350~2 500 和 350~1 000 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 1 000~2 500 nm 光谱分辨率为 10 nm, 采样频率为 10 次·s⁻¹, 1 m 长标准光纤探头, 25°前视场。光谱测量时天气状况良好, 风力微弱, 天空无云, 水面基本处于平静状态。测量高度距水面 1 m, 探头垂直于水面上方 1 m 左右进行测量, 借助于参考板, 仪器自动将水体向上辐射率转化为水体的反射率。

1.3 MODIS 数据获取与预处理

本研究所选用的遥感同步数据为 2007 年 11 月 2 日的 MODIS L1B 250 m 分辨率的数据。首先, 对 MODIS 影像进行辐射定标和几何校正。几何校正结合 L1B 数据中自带的经纬度信息校正^[18], 校正后的位置精度控制在 0.5 个像素以内。然后, 通过集成在 ENVI 遥感处理软件中的 FLAASH 模块进行大气校正。FLAASH 模型是在 MODTRAN 模型基础上发展起来的, 标准的 MODTRAN 大气模型和气溶胶类型可以直接使用, 其他输入参数可从 HDF 数据集中获取。最后, 采用 NASA 标准算法产品 MOD35 对研究区内数据进行云检测, 并完成数据剪裁。

1.4 叶绿素 a 浓度高光谱遥感估算模型

采用光谱反射比可在很大程度上减小数据分析和处理的难度^[10,19]。常用的波段比值模型可表示为

$$\text{Chl-a} = a \times \left(\frac{R(\lambda_i)}{R(\lambda_j)} \right)^b + c$$

式中, Chl-a 为叶绿素 a 浓度; $R(\lambda_i)$ 和 $R(\lambda_j)$ 分别为波段 i 和 j 的光谱反射率; a , b 和 c 为模型回归系数。

1.5 藻华水体卫星遥感模型

随着藻类密度的增大, 水体的近红外波段反射率相应增大, 而且高浓度的藻华水体在近红外波段具有类似植被光谱曲线特征的“陡坡效应”^[16]。MODIS 波段 1 和 2 分别位于对藻类叶绿素敏感的红光波段和近红外波段处。因此, 根据藻华水体的光谱特征, 并借鉴植被遥感中的简单比值指数 (simple ratio, SR)^[20], 提出基于 MODIS 数据的藻华提取模型

$$\text{GI} = \text{B2}/\text{B1}$$

式中, GI(green index)为水体的绿度指数; B1(620~670 nm)和 B2(841~876 nm)分别为 MODIS 红波段、近红外波段的反射率。

2 结果与分析

2.1 太湖水体的光谱特征

根据当日 16 个采样点现场调查记录, 去除 10:00am 以前和 4:00pm 以后光照条件差时的数据, 以及因藻类覆盖等原因而产生的光谱异常数据, 选定 11 个采样点的数据用于叶绿素 a 浓度估算模型的建立。具体光谱测量结果如图 1 所示。

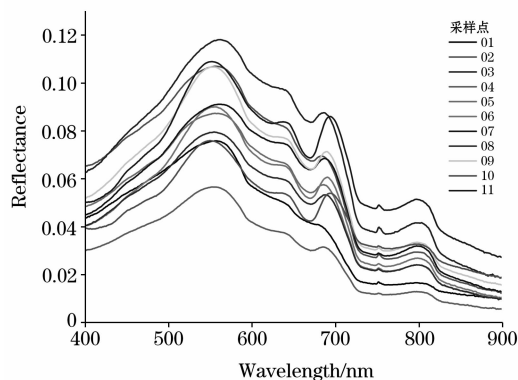


Fig. 1 Spectral reflectance curves of the sampling points in Taihu Lake

由于叶绿素吸收作用明显, 在 400~500 nm 光谱范围内的水体光谱反射率较低; 550~580 nm 的反射峰是由于藻类色素和胡萝卜素的弱吸收以及细胞壁的反射作用所形成; 藻蓝素藻清蛋白的吸收作用引起 620~630 nm 范围的光谱反射率的降低并呈现肩状特征; 而叶绿素对红光的吸收作用, 则使得水体光谱反射率在 670 nm 附近出现反射谷; 同时 687 nm 附近出现含藻类水体最显著的荧光峰, 反射峰的位置随着叶绿素浓度的增加向长波方向移动。

2.2 太湖藻类叶绿素 a 浓度的高光谱定量模型

根据实测太湖水体光谱特征, 选择绿光反射峰、红光反射谷和反射峰处的反射率分别做比值, 即 R_{687}/R_{555} 和 R_{687}/R_{670} , 然后将 Chl-a 作为因变量分别进行不同形式的回归分析, 选择 R^2 最大的线性回归方程作为最终结果(见图 2), 拟合关系式如下

$$\text{Chl-a}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = -53.12 + 62.76 \times R_{687}/R_{555}$$

$$(R^2 = 0.45, P < 0.05)$$

$$\text{Chl-a}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = -19.89 + 52.78 \times R_{687}/R_{670}$$

$$(R^2 = 0.79, P < 0.01)$$

为比较叶绿素反射峰和吸收峰附近波段所构建的比值模型的拟合效果, 定义公式如下

$$\text{Bandratio}(\lambda_i) = \{R(\lambda_{i+1})/R(\lambda_i);$$

$$R(\lambda_{i+2})/R(\lambda_i); \dots, R(\lambda_n)/R(\lambda_i)\}$$

其中, i 分别取 665, 670, 675, 680, 682, 685, 686, 687, 688, 689, 690 和 695(单位: nm), n 取 720 nm, $i < n$; Ban-

$dratio(\lambda_i)$ 为以 $R(\lambda_i)$ 为分母, $R(\lambda_{i+1}), R(\lambda_{i+2}), \dots, R(\lambda_n)$ 为分子的比值集合。

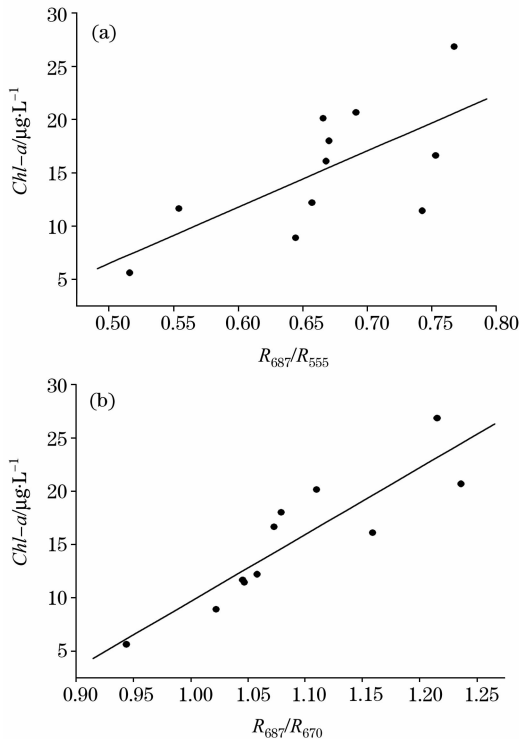


Fig. 2 Regression analysis between chlorophyll-a concentration and reflectance ratios of R_{687}/R_{555} and R_{687}/R_{670}

(a): $R^2=0.45$; (b): $R^2=0.79$

对实测光谱数据按上述公式进行 11 个波段比值集合的计算, 再分别与实测叶绿素 a 浓度值进行线性拟合, 最后得到 11 个比值模型的确定系数集合(图 3)。分析表明: (1) 叶绿素反射峰平均位置 687 nm 两侧波段的反射比 R_{688}/R_{686} 的确定系数最高($R^2=0.86$); (2) R^2 曲线经历了 695 nm 附近一较平稳的高值区后逐渐下降, 并随着 λ_i 的增大下降幅度开始加大; (3) 各比值模型在 710 nm 以后的确定系数呈现一致的规律, 即 $R_{Bandratio(\lambda_i)}^2 > R_{Bandratio(\lambda_{i+1})}^2$ 。 R^2 最高值出现在反射峰平均位置两侧波段所构建的比值模型中, 这可能与反射峰位置随叶绿素 a 浓度的增大而发生“红移”有关。

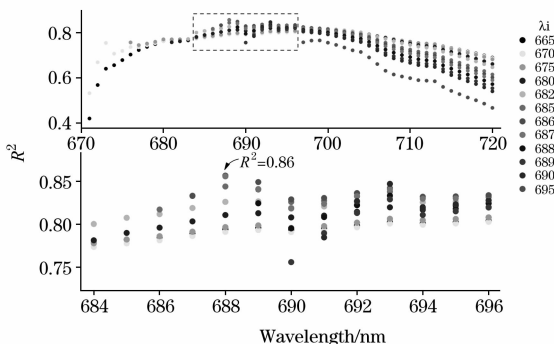


Fig. 3 Comparison of R^2 of reflectance ratio models with different band combinations I

然而, 对于 MODIS 等中等光谱分辨率的遥感数据源来说, 诸如 R_{688}/R_{686} 等利用如此临近波段构建的比值模型是无法应用的。因此, 将波段选取范围由叶绿素吸收峰和反射峰附近扩大到整个可见光和部分近红外波段, 波段选取间隔增大, 具体拟合结果见图 4。其中, MODIS 第 1 波段和第 2 波段所构建的比值模型的 R^2 在 0.50 左右。此外, $Bandratio(\lambda_i)$ 在 700 和 800 nm 附近的线性回归模型的 R^2 存在两个峰值, 且在 700~850 nm 区间保持了较高值, 其中 R_{690}/R_{625} 确定系数最高($R^2=0.89$)。分析认为, R^2 最高值出现在 625 nm 附近可能与藻蓝素藻清蛋白的吸收作用有关。

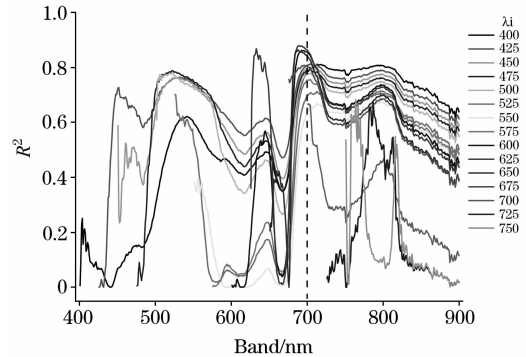


Fig. 4 Comparison of R^2 of reflectance ratio models with different band combinations II

2.3 基于 MODIS 数据的叶绿素 a 浓度的空间反演

本文以 B2/B1 作为因子构建基于 MODIS 数据的叶绿素 a 浓度的遥感反演模型, 通过回归分析建立模型(图 5)如下

$$Chl-a(\mu g \cdot L^{-1}) = -31.35 + 131.83 \times (B2/B1) \quad (R^2 = 0.54, P < 0.01)$$

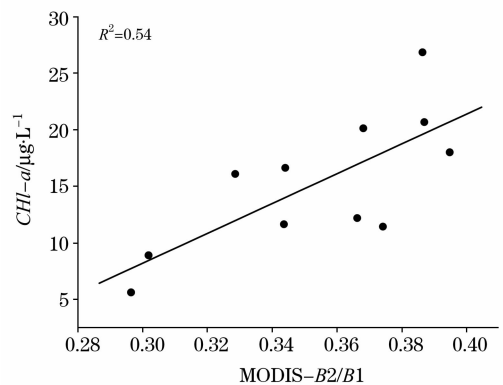


Fig. 5 Regression analysis between chlorophyll-a concentration and MODIS B2/B1 data

MODIS 数据经过预处理过程后, 基于以上回归模型计算得到太湖水体叶绿素 a 的浓度分布(图 6)。太湖水体叶绿素 a 浓度估算的高值区主要分布在西部沿岸区和梅梁湾至湖心沿线一带, 估算最高值达 $517.22 \mu g \cdot L^{-1}$ 。根据当日对梅梁湾及周边水域的调查情况, 可以得出太湖西部沿岸区和梅梁湾至湖心沿线一带有藻华的结论。

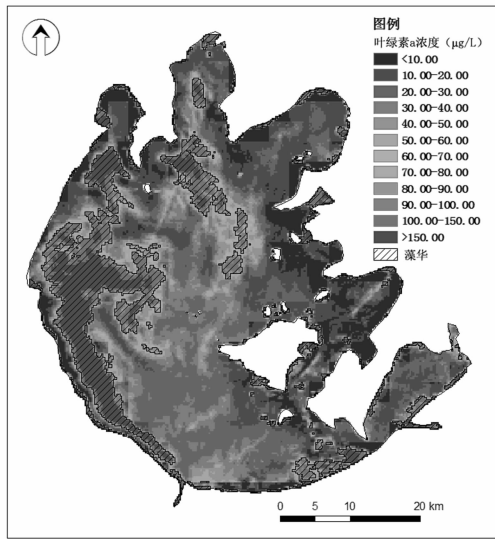


Fig. 6 Chlorophyll-a concentration and algae blooms in Taihu Lake based on MODIS B2/B1 data

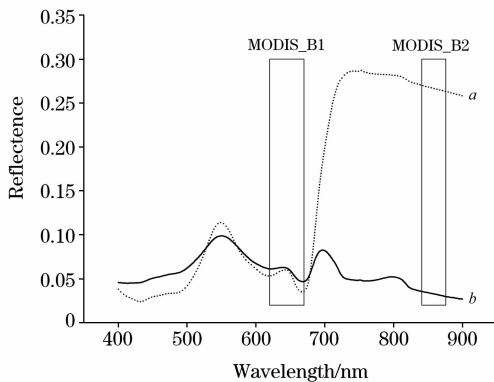


Fig. 7 Correlation between field spectral reflectance curves of cyanobacteria bloom and its comparison with MODIS bands

2.4 藻华水体的提取模型

根据 2007 年 11 月 2 日野外实验现场调查情况,一些样点如 *a* 点(图 7)水体表面几乎完全被藻类所覆盖,采样点处水体广谱反射率在近红外波段高于可见光波段,700 nm 附近的反射峰消失,出现近似于植被光谱反射率曲线的红边特征;水面有个别漂浮藻类的样点如 *b* 点(图 7),其水体近红外波段光谱反射率尚未达到可见光波段反射率的高度,且 700 nm 附近有明显的反射峰存在。本文结合实地水质采样野外调查、光谱实验数据,发现当 MODIS 绿度指数 $GI > 0.8$ 时可实现包括稀疏藻华在内的全部藻华水体的提取。藻华水体具体分布信息如图 6 所示。

3 结 论

本文结合太湖水体实测光谱和水质采样数据,基于 MODIS 数据实现了太湖藻类的定量遥感反演,得出以下主要结论:

(1) 700 nm 附近波段与可见光波段所构建的比值模型的线性拟合关系 R^2 较高,其中与 625 nm 附近波段构建的模型 R^2 最高,而并非出现在通常所认为的 700 nm 临近波段;710 nm 附近以后波段与可见光波段所构建的比值模型的 R^2 随着可见光波长的增大而下降。

(2) 在叶绿素 a 浓度高光谱遥感估算模型的基础上,综合考虑了 MODIS 数据的波段设置和空间分辨率等因素后,利用叶绿素 a 浓度模型和藻华提取模型实现了太湖藻类空间分布的定量反演。

(3) 太湖叶绿素 a 浓度高光谱比值模型最佳波段选取规律的发现具有重要意义。限于采样点数量以及采样时间等因素的影响,模型的精度和适用性尚需更多监测数据的验证和修正。

参 考 文 献

- [1] Cottingham K L, Carpenter S R. *Ecological Applications*, 1998, 8(2): 508.
- [2] Walks D J, Cyr H. *Freshwater Biology*, 2004, 49(6): 745.
- [3] SONG Yu, SONG Xiao-dong, JIANG Hong(宋 瑜, 宋晓东, 江 洪). *Remote Sensing Information(遥感信息)*, 2008, (4): 102.
- [4] Baban S J. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(7): 1247.
- [5] Pinkerton M H, Richardson K M, Boyd P W, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 382.
- [6] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. *Applied Optics*, 1975, 14(2): 417.
- [7] Gitelson A A, Dall'Olmo G, Moses W, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3582.
- [8] Frater R N. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 1579.
- [9] Randolph K, Wilson J, Tedesco L, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 4009.
- [10] Han L, Donald C, Rundquist D C. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 253.
- [11] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimob K, et al. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268: 79.
- [12] Gitelson A. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(17): 3367.
- [13] HE Jun-hua, CHENG Yong-jin, HAN Yan-ling, et al(贺俊华, 程永进, 韩艳玲, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2008, 28(8): 1870.
- [14] PU Rui-liang, GONG Peng(浦瑞良, 宫 鹏). *Hyperspectral Remote Sensing and Its Applications(高光谱遥感及其应用)*. Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2004.

- [15] Guo L. *Science*, 2007, 317: 1166.
- [16] 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.
- [17] MA Rong-hua, DAI Jin-fang(马荣华, 戴锦芳). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2005, 9(1): 78.
- [18] JIANG Geng-ming, LIU Rong-gao, NIU Zheng, et al(蒋耿明, 刘荣高, 牛 铮, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2004, 8(2): 158.
- [19] JIAO Hong-bo, ZHA Yong, LI Yun-mei, et al(焦红波, 查 勇, 李云梅, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2006, 10(2): 242.
- [20] Jensen J R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

Quantitative Remote Sensing Retrieval for Algae in Inland Waters

SONG Yu¹, SONG Xiao-dong¹, JIANG Hong², GUO Zhao-bing³, GUO Qing-hai^{1*}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China
3. School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract Chlorophyll is a very important indicator for the eutrophication status of lake water body. Using remotely sensed data to achieve real-time dynamic monitoring of the spatial distribution of chlorophyll has great importance. This paper aims to find the best band for the hyperspectral ratio model of chlorophyll-a, and take advantage of this model to implement remote sensing retrieval of algae in Taihu Lake. By the analysis of the spectral reflectance and water quality sampling data of the surface water body, the regression model between the ratio of reflectance and chlorophyll-a was built, and it was showed that the ratio model between the wavelengths around 700 and 625 nm had a relatively high coefficient value of determination (R^2), while the ratio model constructed with 710 nm and visible wavelengths showed a descended R^2 following with the increment of the visible wavelengths. Combined with in-situ water samplings analysis and spectral reflectance measurement, the results showed that it's possible to retrieve algae water body using the MODIS green index (GI). The spatial distributions of chlorophyll-a and algae in Taihu Lake were extracted successfully using MODIS data with the algorithm developed in this paper.

Keywords Chlorophyll-a; Algae blooms; Hyperspectral; MODIS; Taihu Lake

(Received May 18, 2009; accepted Aug. 20, 2009)

* Corresponding author