查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究

段洪涛[1,2], 张柏[1*], 宋开山[1], 王宗明[1], 张树清[1]
(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 叶绿素 a 含量能够在一定程度上反映水质状况, 利用高光谱遥感可获得叶绿素 a 的诊断性光谱特性, 较好解决了常规遥感中出现的问题. 利用野外高光谱仪在查干湖进行了反射光谱测量和同步水质采样分析, 通过分析水体叶绿素 a 浓度与其高光谱反射特征之间的相关关系, 尝试采用多种半经验算法建立叶绿素 a 高光谱定量模型. 结果表明: 单波段光谱反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数较小, 不宜用于估算叶绿素 a 浓度, 反射率比值法和一阶微分法与叶绿素 a 线性相关程度都比较高, 决定系数分别为 0.71 和 0.48, 而且其显著水平 $p < 0.01$, 皆可以用于叶绿素 a 的定量遥感, 但反射率比值算法模拟效果好于一阶微分算法. 这为今后利用星载高光谱传感器在查干湖进行叶绿素 a 浓度大面积遥感反演提供了研究基础.

关键词: 查干湖; 叶绿素 a; 高光谱; 定量模型; 遥感
中图分类号: X87 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2006)03-0503-05

Hyperspectral Remote Sensing of Chlorophyll-a in the Chagan Lake, China

DUAN Hong-tao[1,2], ZHANG Bai[1], SONG Kai-shan[1], WANG Zong-ming[1], ZHANG Shu-qing[1]
(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An approach for the determination of chlorophyll-a from field reflectance spectra was presented in the Chagan Lake, China. Reflectance spectra were measured from May to September in 2004 with ASD FieldSpec spectrometer. Concurrently, water samples were collected directly from the lake to be analyzed in laboratory. Using correlations between the ground-truth data and combinations of spectral bands from the field spectral data, spectral indices including single band, spectral ratio, and reflectance first-derivative were developed which could be used to estimate chlorophyll-a. The latter two (spectral ratio and reflectance first-derivative) give better results with higher determination coefficient $r^2 = 0.71$ and $r^2 = 0.48$ with significance level $p < 0.01$, and are applied to estimate chlorophyll-a concentration. There is a satisfactory correspondence between the two spectral indices and chlorophyll-a concentration, and these algorithms may prove to be useful tools to detect potential water quality problems of the Chagan Lake using remote sensing data.

Key words: Chagan Lake; chlorophyll-a; hyperspectral; model; remote sensing

叶绿素是藻类重要的组成成分之一, 其浓度的高低是表征光能自养生物量的重要指标. 叶绿素 a 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, 也是反映水体营养化程度的一个重要参数. 因此, 通过测定叶绿素 a 含量能够在一定程度上反映水质状况[1,2]. 遥感监测叶绿素 a 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[1,3~5,6], 并取得较大的进展.

叶绿素遥感一般是通过实验研究水体反射光谱特征与叶绿素浓度之间的关系建立叶绿素算法[7]. 对于内陆水体, 其困难在于水体中其它物质, 如无机悬浮物质和有机溶解性物质(黄色物质) 光学效应的干扰, 以及藻类及其它污染物质特性的地域性、甚至季节性的差异. 各种信息重叠干扰, 造成各种目标物成分的反射模型及其光谱曲线不同, 呈现随机性. 在提取光谱特征时, 既不可能逐个定量地考虑这些因素, 也无法为其产生的综合效果建立整体分析模型, 因此如何确定水体光谱信息中不同成分的贡献率就显得尤其重要. 近年来, 高光谱传感器技术发展迅速, 相对于传统多光谱传感器较低的光谱分辨率, 由于其达 nm 级的光谱分辨率, 可以获得目标物的诊断性光谱特性, 实现遥感信息模型参数或条件约束的确定, 很好的解决了常规遥感中出现的问题[8].

本文利用野外高光谱仪测定查干湖水体的光谱反射率, 通过分析研究水体反射光谱特征与叶绿素 a 浓度之间的关系, 运用多种半经验算法模型, 定量获取叶绿素 a 浓度, 取得了较好的效果, 并为今后利用星载高光谱传感器对查干湖叶绿素 a 浓度进行大

收稿日期: 2005-03-29; **修订日期**: 2005-06-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(40401003, 40371082); 中国科学院创新领域前沿课题
作者简介: 段洪涛(1979~), 男, 博士研究生, 主要从事地理信息系统和高光谱遥感应用研究, E-mail: htduan@neigae.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: zhangbai@neigae.ac.cn

面积反演提供了基础.

1 研究方法

1.1 研究区概况

查干湖大部位于吉林省前郭县境内,其水域在大安市和乾安县各一部分.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.

查干湖湖区地处大陆性季风型半干旱气候区,年均气温 4.5 ℃, ≥14 ℃的水温日数 145d;日照时数 2 880h,年均辐射量4 429MJ/m^2,5~ 9 月辐射量为 2 319MJ/m^2;年均降雨量为 450.8mm,蒸发量为 1 063.5mm;春季多大风,其中风速 ≥17m/s 的日数年均 29d;冰封期 130d 左右,结冰期日数 150d 左右,冰厚 0.8m~ 1.1m.该湖正常运行水位 130m 时,水域面积 3.72×10^4hm^2,平均水深 2.52m,水体容积 5.98×10^8m^3;集水区内均为盐碱化农田和牧场;湖底平坦,粉沙质土壤,周围土壤为白钙碱土;湖泊水质为苏打型盐碱水,多泥沙悬浮,透明度在 0.2~ 0.4m 之间,叶绿素 a 浓度 7 月份较高,在 40μg/L 左右,其它月份一般在 10~ 30μg/L 左右(表 1),属富营养型湖泊.查干湖主要补给来源为引松花江水源,同时还有霍林河、洮儿河、嫩江、天然降水和地下水等补给[9,10].

表 1 各期水体采样点样本数及平均叶绿素和透明度

Table 1 Sample number and average Chl_a contents and secchi disk depth in different months

项目	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
样本数	11	6	8	9	20
平均叶绿素/μg·L^{-1}	14.26	10.22	40.57	28.81	24.38
平均透明度/m	0.24	0.34	0.23	0.3	0.32

1.2 数据获取及预处理

为研究查干湖水质,2004-05~ 2004-09,每月 1 次,共计 5 次,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和反射光谱,并采集水样,用以实验室分析其他水质参数.5 次采样共计 53 点,随机选取其中 38 个作为建模数据,其余用以模型验证.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,避光 24h 后,采用分光光度计法测定.反射光谱测量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~ 1 050nm 波长范围内进行连续测量,采样间隔为 1.4nm,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(太阳高度角大于 45°),5 次采样当时天气晴朗无风,湖面基本平静.光谱测量在距水面上方 1m 处进行,光谱仪传感器探头方向基本垂直于水面.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利用其在 350~ 1 000nm 范围内的波段反射率进行归一化处理,选取 400~ 900nm 波谱范围,每间隔 10nm,取一个值,作为研究数据.

2 水体光谱反射特征

查干湖水体光谱反射率呈现典型的内陆水体光谱特征,如图 1 所示.400~ 500nm 范围内,由于叶绿素 a 在蓝光波段的吸收峰及黄色物质在该范围的强烈吸收作用,水体的反射率较低[11],但由于悬浮物的影响,叶绿素 a 在 440nm 的吸收峰不是很明显;510~ 620nm 范围的反射峰是由于叶绿素、胡萝卜素弱吸收,细胞和悬浮颗粒的散射作用形成的[7],该反射峰值与色素组成有关,而且水体叶绿素浓度越高,该辐射峰值也越高,可以作为叶绿素定量标志[12];630、675nm 附近出现反射率低谷,630nm 低谷是由于藻青蛋白吸收引起[7],675nm 是叶绿素 a 的又一吸收峰,因此当藻类密度较高时水体光谱反射率曲线在该处出现谷值[1];685~ 715nm 存在一个明显的反射峰,一般认为是叶绿素 a 的荧光峰[4,7,13],且会随着叶绿素 a 浓度的增加而向长波方向移动[7],该反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据,反射峰的位置和数值是叶绿素 a 浓度的指示[3].

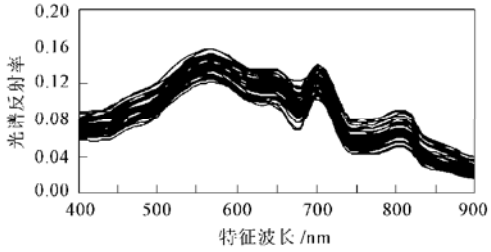

图 1 查干湖水体光谱反射率

Fig.1 Spectral reflectance of light over the Changan Lake

3 叶绿素 a 浓度信息高光谱定量提取

3.1 单波段

各波段光谱反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数如图 2 所示, 相关系数普遍较低. 这是由于查干湖多悬浮物, 其高反射率掩盖了水体中的叶绿素信息[14], 因此不适合选择单波段建立定量模型, 估算叶绿素 a 浓度. 这与以往针对富营养化水体进行研究的结果相似[1].

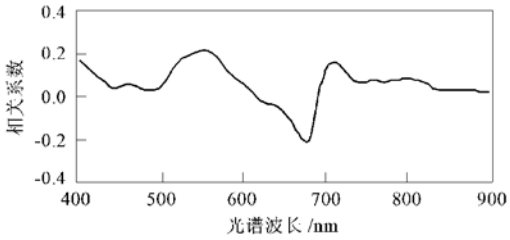

图 2　光谱反射率和叶绿素 a 浓度相关系数示意

Fig. 2　Correlation between chlorophyll_a concentration and spectral reflectance

3.2　波段比值

采用反射比可以部分地消除水表面光滑度和微波随时间和空间变化的干扰, 并在一定程度上减小其它污染物的影响[1,5,6,15,16]. 在叶绿素遥感中, 通常利用叶绿素浓度与光谱响应间的明显特征, 采用不同波段比值法或比值回归法等, 以扩大叶绿素吸收峰与叶绿素反射峰或荧光峰间的差异, 提取叶绿素浓度信息[1,5,17]. Koponen 等人发现[16,18], 通过对光谱反射率值进行对数转换, 有助于对叶绿素 a 含量进行定量遥感.

采用叶绿素荧光峰(700nm) 和叶绿素吸收峰(670nm) 2 个波段的反射率比值求对数, 作为自变量, ln(chl-a) 作为因变量, 建立回归方程, 确认 $\ln(R_{700}/R_{670})$ 和 ln(chl-a) 具有较好的确定性系数, $r^2 = 0.71$, 最终决定选取其建立叶绿素 a 估测模型(图 3):

$$y = 5.3434x + 2.0115$$
$$(r^2 = 0.71,\ n = 38,\ p < 0.01) \qquad (1)$$

式中: y 为 ln(chl-a); x 为 $\ln(R_{700}/R_{670})$ 数值.

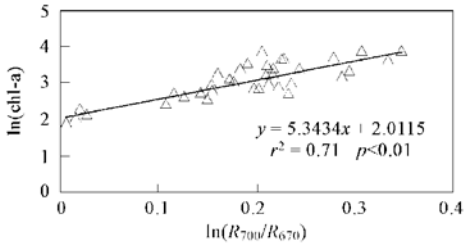

图 3　叶绿素 a 估测模型

Fig. 3　Estimate model of chlorophyll-a

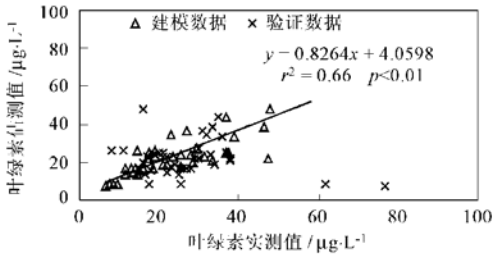

图 4　叶绿素 a 模型验证

Fig. 4　Result of chlorophyll_a model

3.3　一阶微分

微分光谱技术通过对反射光谱进行数学模拟, 可以迅速地确定光谱弯曲点及最大最小反射率的波长位置, 微分技术对光谱信噪比非常敏感. 研究表明, 光谱的低阶微分处理对噪声影响敏感性较低, 因而在实际应用中较有效[19]. 一般认为, 可用一阶微分处理取出部分线形或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱(必须为非线性的) 的影响[20]. 由于光谱仪采集的是离散型数据, 因此光谱数据的一阶微分可以用以下公式近似计算:

$$R(\lambda_i)' = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

其中, λ_{i+1}, λ_i, λ_{i-1} 为相邻波长, $R(\lambda_i)'$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱. 计算得到的一阶微分光谱如图 5 所示.

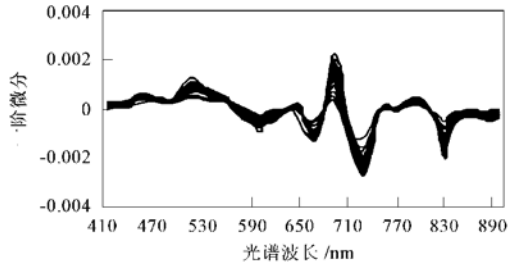

图 5　查干湖水体光谱反谢率一阶微分

Fig. 5　First_derivative spectral reflectance over Chagan Lake

分别求取各波段微分值与叶绿素 a 浓度的相关系数, 如图 6 所示. Rundquist[21,22] 等曾通过大量的实测数据研究证明 690nm 附近反射率的一阶微分值与叶绿素 a 浓度相关系数大, 而与浑浊度变化相关系数小, 适合于在其他水质组分存在时用来估算叶绿素 a 浓度, 当叶绿素 a 浓度较高时, 利用 690nm 处反射率微分估算叶绿素 a 浓度效果最佳. 本研究发现查干湖水体光谱反射波段 700nm 具有类似的

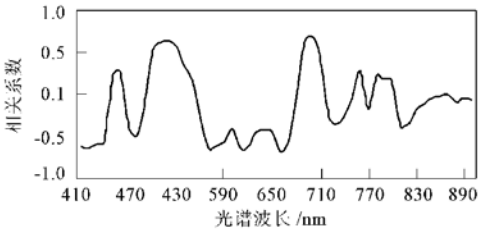

图 6 光谱反射率一阶微分与叶绿素 a 浓度相关系数示意图

Fig. 6 Correlation between chlorophyll_a concentrations and first_derivative spectral reflectance

效果,这与李素菊等人的研究结果类似[1]. 因此选用该波段建立叶绿素 a 估测模型(图 7):

$$y = 15\,343x + 9.709$$

$$(r^2 = 0.48,\ n = 38,\ p < 0.01) \qquad (2)$$

式中: y 为叶绿素含量($\mu g \cdot L^{-1}$); x 为 700nm 反射率的一阶微分值.

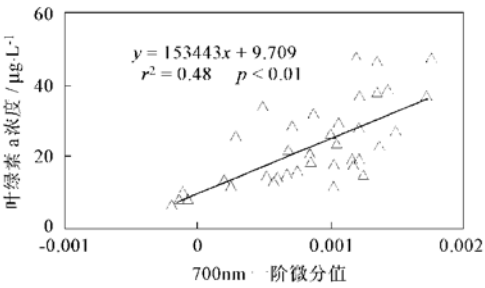

图 7 叶绿素 a 估测模型

Fig. 7 Estimate model of chlorophyll-a

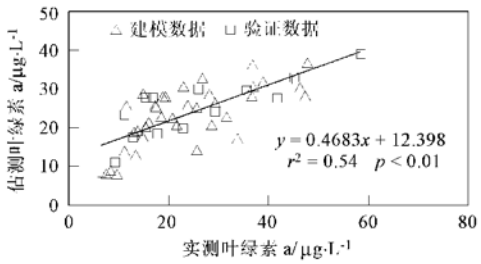

图 8 叶绿素 a 模型验证

Fig. 8 The result of chlorophyll_a model

3.4 模型验证

为了分析模型实际应用的适用性以及由模型模拟而造成的误差,选用所有采样点($n = 53$)实测数据和模型模拟数据作线性相关,对叶绿素 a 浓度波段比值和一阶微分估测模型分别进行验证(图 4、8). 模型验证结果显示,比值估测模型确定系数(r^2)较高,达到 0.66,一阶微分估测模型稍低,也有 0.54,都达到极显著相关($p < 0.01$),相对来说,效果比较理想.

3.5 讨论

本研究对查干湖水体叶绿素 a 估测模型的研究,总体上效果比较理想,这为今后利用高光谱传感器在查干湖进行叶绿素 a 浓度大面积遥感反演研究提供了基础. 同时由于缺乏浮游植物、悬浮物及黄色物质固有光学特性等实测数据,无法准确分析其对水体光谱反射率的影响,导致难于更准确的解释和分析叶绿素 a 水体反射光谱特征. 另外,研究过程中没有考虑到季节变化对模型构建和精度的影响,将在下一步的工作中进行补充分析.

4 结论

单波段光谱反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数较小,不宜用于估算叶绿素 a 浓度. 光谱反射率比值 R_{700}/R_{670} 与叶绿素 a 浓度分别求对数后,两者线性相关性较好,确定性系数 r^2 为 0.71; 700nm 反射率的一阶微分与叶绿素 a 浓度有较好的线性相关性,确定性系数 r^2 为 0.48; 且两者显著性水平 $p < 0.01$,模型验证也呈极显著水平 $p < 0.01$,可以用来估算叶绿素 a 浓度,但比值模型与叶绿素 a 浓度的拟合度要比一阶微分模型与叶绿素 a 拟合度高,所以,高光谱定量估算查干湖叶绿素 a 浓度,采用比值法效果较好.

参考文献:

[1] 李素菊,吴情,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 228~234.

[2] 刘冬燕,宋永昌,陈德辉. 苏州河叶绿素 a 动态特征及其与环境因子的关联分析[J]. 上海环境科学, 2003, **23**(2): 261~264.

[3] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, **73**: 227~235.

[4] Gitelson A A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water relationship of its magnitude and position with chlorophyll concentration[J]. Int. J. Remote Sensing, 1992, **13**: 3367~3373.

[5] 疏小舟,尹球,匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系[J]. 遥感学报, 2000, **4**(1): 41~45.

[6] 刘英,王珂,周斌,等. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, **29**(6): 621~626.

[7] Gitelson A A, Garbuzov G, Szilagyi F, *et al*. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality[J]. Int. J. Remote Sensing, 1993, **14**(7): 1269~1295.

[8] 韩震, 陈西庆, 恽才兴. 海洋高光谱遥感研究进展[J]. 海洋科学, 2003, **27**(1): 22~25.

[9] 杨富亿. 查干湖的综合开发与利用[J]. 资源开发与市场, 1998, **14**(6): 247~249, 254.

[10] 于明荣, 沈时德, 朱明玉. 查干湖水体生态环境变迁及保护利用探讨[J]. 水文水资源, 1993, **5**: 22~24, 33.

[11] 刘堂友, 匡定波, 尹球. 湖泊藻类叶绿素 a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, **23**(1): 11~15.

[12] 周艺, 周伟奇, 王世新, 等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. 水科学进展, 2004, **15**(3): 312~317.

[13] Gordon H R. Diffusive reflectance of the ocean: the theory of its augmentation by chlorophyll-a fluorescence at 685nm[J]. Applied Optics, 1979, **18**: 1161~1166.

[14] Bhargava D S, Mariam D W. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationship and models[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1991, **46**(4): 217~230.

[15] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K, *et al*. A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data[J]. The Science of the Total Environment, 2001, **268**: 79~93.

[16] 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**: 51~59.

[17] Mittenzwey H G, Gitelson A A. Determination of chlorophyll a of inland waters on the basis of spectral reflectance[J]. Limnol Oceanogr, 1992, **37**: 147~149.

[18] Harma P, Vepsalainena J, Hannonena T, *et al*. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland[J]. The Science of the Total Environment, 2001, **268**: 107~121.

[19] Cloutis E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques[J]. Int. J. Remote Sensing, 1996, **17**(12): 2215~2242.

[20] 蒲瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 53.

[21] Rundquist D C, Han L, Schalles J F, *et al*. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm[J]. Photogram, Eng. Remote Sens., 1996, **62**: 195~200.

[22] Luoheng H, Donald C, Rundquitst D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir[J]. Remote sensing of Environment, 1997, **62**: 253~261.