

## NDCI 法 II 类水体叶绿素 a 浓度高光谱遥感数据估算\*

安 如, 刘影影, 曲春梅, Quaye-Ballard JA, 梁 欣, 徐晓峰, 王 喆, 姜丹萍  
(河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098)

**摘 要:**以太湖、巢湖为研究区,以 Hyperion 和 HJ-1A 卫星 HSI 高光谱数据以及实测水质浓度数据为实验数据,引入归一化叶绿素指数(NDCI),对 II 类水体的高光谱叶绿素 a 浓度估算进行分析研究. 首先对高光谱数据的光谱通道设置以及水体光谱特征进行分析,研究确定模型的最优波段. 然后,将确定最优波段后的 NDCI 反射率因子作为变量与实测样本点数据进行回归分析,得到 NDCI 与叶绿素 a 浓度之间的回归关系,进行叶绿素 a 浓度的估算. 与常用的比值法、一阶微分法和三波段法相比,NDCI 的性能优于这 3 种方法,表明 NDCI 是一种计算简单、估算精度高、实用性强的 II 类水体叶绿素 a 浓度估算方法.

**关键词:** 叶绿素 a; II 类水体; 高光谱遥感数据; NDCI; 太湖; 巢湖

### Estimation of chlorophyll-a concentration of case II waters from hyperspectral remote sensing data in NDCI method

AN Ru, LIU Yingying, QU Chunmei, QUAYE-BALLARD JA, LIANG Xin, XU Xiaofeng, WANG Zhe & JIANG Danping

(*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China*)

**Abstract:** A novel index, Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI), is introduced in this study to estimate the chlorophyll-a (Chl. a) concentration from Hyperspectral Hyperion data, HSI data, and measured Chl. a concentration data for Lake Taihu and Lake Chaohu in eastern China. The best bands were selected by analyzing spectral channels of the Hyperspectral data and the spectral characteristics of the water. The Chl. a concentration was estimated by considering the regression relationships between NDCI and the measured Chl. a concentrations through the analysis of the NDCI reflection factor and points data of measured samples. Comparing the results of the NDCI method to that of the normal ratio, first-order differential, and three bands methods, the NDCI method has performed better in simplicity, accuracy and applicability than the other three methods in the estimation of Chl. a concentration in case II waters.

**Keywords:** Chlorophyll-a; case II waters; hyperspectral remote sensing data; NDCI; Lake Taihu; Lake Chaohu

湖泊水资源是我国极为珍贵的水资源之一,对国民经济建设和人民生活有着重要的影响. 随着经济的高速发展和工业化程度的加剧,湖泊水污染和水体富营养化程度越来越严重. 叶绿素 a 是浮游植物生物体的重要组成成分之一,是反映内陆水体营养状况比较客观的生物学指标,可以作为水体营养状态评价的重要参数.

目前叶绿素 a 浓度的估算方法主要有 3 种:经验法、半分析法和分析法. 杨伟等<sup>[1]</sup>用经验法验证了 TM 二三四波段反演叶绿素 a 浓度效果较好,但是经验法仅对 I 类水体叶绿素 a 浓度估算相对精确,对浑浊的 II 类水体估算精度较差. 分析模型自 1975 年由 Gordon 提出后,已成为一类有代表性的机理模型. 李云梅等<sup>[2]</sup>利用 Gordon 模型对太湖的水体反射波谱进行模拟,并反演水体的叶绿素浓度,但是分析法需要大量的准同步的气象和水体固有光学特性等数据,而这些数据的获取又很困难,所以分析法在一定程度上应用较少. 目前应用最多的、最主流的方法为半分析法. Gitelson 等<sup>[3]</sup>分别用 MERIS 数据和 MODIS 数据验证了三波段法、两波段法在浑浊水体中的估算精度;Le 等<sup>[4]</sup>用四波段的半分析算法估算了太湖的叶绿素 a 浓度;周琳等<sup>[5]</sup>

\*. 2012-07-06 收稿;2012-11-28 收修改稿. 安如,女,1963 年生,教授;E-mail: anrunj@163.com.

的研究给出太湖、巢湖几种常见叶绿素 a 估算半分析模型的适用条件和判断标准; 庞博等<sup>[6]</sup>采用三波段半分析模型估算了江苏省常熟市昆承湖的叶绿素 a 的浓度; 黄耀欢等<sup>[7]</sup>用比值法和一阶微分法估算了汤逊湖叶绿素浓度。

叶绿素 a 浓度的反演方法层出不穷, 但叶绿素 a 浓度反演的数据源大多为常规的遥感数据, 如 Landsat/MSS/TM、SPOT/HRV、IRS-1C/LISS\SeaWiFS 等, 高光谱遥感在湖泊叶绿素 a 浓度反演研究方面目前也主要集中在航空高光谱遥感。常规的遥感数据由于波谱分辨率不够, 航空高光谱数据检测范围窄, 都未能在水体叶绿素 a 浓度遥感估算中得到很好的应用。

本文在已有研究的基础上, 采用了 Hyperion 及 HSI 高光谱数据, 对太湖和巢湖水体的叶绿素 a 浓度遥感估算方法进一步深入探讨, 引入一种估算精度高、简单、直观、移植性较好的叶绿素 a 浓度估算方法——归一化叶绿素指数法 (NDCI)。用该方法和两种高光谱遥感数据对太湖、巢湖的叶绿素 a 浓度进行了估算, 并对该方法的估算精度和通用性进行分析。结果表明, 对 II 类水体叶绿素 a 浓度的估算, NDCI 法不仅在估算精度上优于以往的比值法、一阶微分法和三波段法, 而且在不同的研究区也表现出一定的稳定性。另外, 本研究采用的卫星高光谱遥感数据 (Hyperion, HSI) 很大程度地降低了高光谱遥感数据的成本<sup>[8]</sup>。因此, 本研究在 II 类水体叶绿素 a 浓度估算中有良好的借鉴意义。

## 1 研究区概况

太湖 (30°5'45"~31°2'54"N, 119°3'28"~120°6'55"E) 位于江浙两省交界处、长江三角洲南部的太湖平原上, 是我国五大淡水湖之一。太湖面积 2427.8 km<sup>2</sup>, 平均水深 1.9 m, 有东太湖、青口湖、贡湖湾、梅梁湾、竺山湾 5 个湖湾, 目前这几个湖湾大都因为水流缓慢、水浅及盛行风向的作用而成为太湖污染或富营养化较为严重的地方。近些年来, 随着太湖地区经济的发展, 水体富营养化程度日益严重。

巢湖 (30°25'28"~31°43'28"N, 117°16'54"~117°51'46"E) 地处长江中下游, 安徽省境内, 位于合肥市南端, 分属合肥市、肥东、肥西、庐江、巢湖五个县市, 属长江下游左岸水系, 是安徽省第一大湖泊。巢湖东西长 54.5 km, 南北平均宽 15.1 km, 水域面积 755 km<sup>2</sup>, 平均水深 2.4 m。目前全湖均处于富营养化状态, 并且程度有加重趋势<sup>[9-11]</sup>。

## 2 实验数据及预处理

### 2.1 实验数据

2.1.1 Hyperion 数据 Hyperion 高光谱数据共有 242 个波段, 光谱范围为 400~2500 nm, 光谱分辨率达到 10 nm, 地面分辨率为 30 m, 重访周期为 16 d。本文所用 Hyperion 数据获取于 2004 年 8 月 19 日, 为 Hyperion L1G 数据。242 个波段中, 1~70 波段 (356~1058 nm) 为可见光-近红外波段 (VNIR), 71~242 波段 (852~2577 nm) 为短波红外波段 (SWIR)。其中, 198 个波段经过辐射定标处理, 定标的波段分别为 VNIR 8~57、SWIR 77~224。由于 VNIR 56~57 与 SWIR 77~78 的重叠, 实际上只有 196 个独立的波段。没有定标的波段置为 0 值。Hyperion 是目前唯一在轨的高空间分辨率与高光谱分辨率的成像仪, 可应用于地质调查与找矿、土壤退化与动态监测、精准农业和森林防护以及水资源监测等方面。

2.1.2 HJ 卫星的 HSI 高光谱数据 HSI 是我国 HJ-1A 卫星搭载的超光谱成像仪, 是我国第一个对地成像的星载高光谱相机, 也是世界上第一个基于空间调制干涉成像原理而设计成的民用高光谱成像仪。HSI 所形成的图像幅宽大于 50 km, 地面像元分辨率 100 m, 具有 ±30° 侧视能力和星上定标功能。工作谱段为 0.45~0.95 μm, 谱段数为 110~128, 平均光谱分辨率为 4.32 nm, 重访周期为 4 d 左右, 是目前为止比较先进的高光谱传感器, HJ-1A/HSI 光谱分辨率高, 能够获得更为精细的地物光谱曲线, 对目标识别和信息提取能力更强; HSI 重访周期高, 对满足溢油、赤潮等专题研究需求更有优势; 但是 HSI 空间分辨率相对较低, HJ-1A/HSI 的 100 m 空间分辨率在进行诸如植被生长状况监测、矿物识别等应用时显然较为受限。

2.1.3 野外实测数据 对于太湖研究区, 本文采用了陈军等<sup>[12]</sup>和闻建光等<sup>[13]</sup>发表的 27 个实测叶绿素 a 浓度数据。该实测数据采集于 2004 年 8 月 19 日, 包括 GPS 点位、叶绿素 a 和悬浮物浓度, 采样点主要分布在太湖富营养化最严重的梅梁湾和梅梁湾至湖心的主航道附近水域。

对于巢湖研究区,本文采用张红<sup>[14]</sup>报道的叶绿素 a 浓度观测数据,该数据采集于 2009 年 6 月 13 日,通过星地同步试验,进行了 GPS 布点,共采集了 32 个点位的水样进行实验室分析,获取各个点位的叶绿素 a 浓度和悬浮物浓度.本文共采用 27 个点进行分析.

## 2.2 数据预处理

Hyperion 影像数据 DN 值范围有别于常见的 Landsat 等传感器,可见光-近红外波长范围 400 ~ 1000 nm,辐射定标比值为 40,短波红外波长范围 900 ~ 2500 nm,辐射定标值为 80,为了获取真实的 DN 值,可见光-近红外波段和短波红外波段需要除以不同的系数,即:

$$\text{VNIR Radiance} = \text{DN}/40; \text{Radiance} = \text{DN}/80 \quad (1)$$

由于 L1G 数据已经经过辐射定标,所以 Hyperion 数据的预处理主要包括:DN 值分析、几何纠正和遥感反射比的反演. HSI 数据的处理包括几何校正、辐射定标、图像镶嵌与裁剪、大气校正. 大气校正是遥感影像辐射校正的主要内容,对定量遥感尤为重要,而且由于水体本身反射率较低,所以需要高精度的大气校正. 本文采用了 6S 大气校正模型. 6S 建立在辐射传输理论基础之上,适用于可见光到近红外的多角度数据,能模拟不同传感器、不同地面状况数据在太阳-目标-传感器的传输过程中所受到的大气影响,同时考虑了目标物的海拔、地表非均匀状态以及新的吸收气体的种类. 6S 模型具有较高的计算精度,并且有很快的运算速度,已经得到了广泛的应用.

## 3 叶绿素 a 浓度的遥感估算与精度评价

叶绿素 a 浓度遥感监测原理是叶绿素 a 含量不同的水体在一定波长范围内波段反射率显著不同,核心问题在于建立水体反射率和叶绿素 a 浓度之间的定量关系. 因此,在进行叶绿素 a 浓度反演时,常用方法是对叶绿素 a 的有效响应波段建立最佳比值或者各种组合模型.

### 3.1 归一化叶绿素指数 (NDCI)

Maisha 等<sup>[15]</sup>提出一种估算叶绿素浓度的新指数——归一化叶绿素指数,其模型公式为:

$$C_{\text{chl. a}} \propto \frac{[R_{\text{rs}}(\lambda_2) - R_{\text{rs}}(\lambda_1)]}{[R_{\text{rs}}(\lambda_2) + R_{\text{rs}}(\lambda_1)]} \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{chl. a}}$  是叶绿素 a 浓度,  $R_{\text{rs}}(\lambda_1)$ 、 $R_{\text{rs}}(\lambda_2)$  分别为波段  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  处的反射率. NDCI 指数的构建采用归一化的形式,部分消除由于太阳高度角的变化、大气辐射等因素所带来的影响.  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的选择有所限定:  $\lambda_2$  位于 700 nm 附近的反射峰,该反射峰对水体中叶绿素 a 浓度含量变化敏感;  $\lambda_1$  选在 665 ~ 675 nm 附近的吸收峰处,该处的吸收峰主要是叶绿素吸收所致;假定 CDOM 和 TSS 在这两波段处吸收近似相等,因此  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的波段距离不宜过远.  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  均选择光学特性由叶绿素 a 主导的特征光谱处,也在一定程度上减少了其他水体组分的影响.

### 3.2 其他常用估算模型

3.2.1 比值法 比值法是目前叶绿素 a 浓度遥感定量估算使用较多的模型,主要原理是分别选择近红外和红光波段的最大、最小反射率值进行比值运算,将运算结果与叶绿素 a 浓度的实测值进行回归分析,得到叶绿素 a 浓度的估算模型.

3.2.2 一阶微分法 微分光谱技术通过对反射光谱进行数学模拟,可以迅速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. 对原始数据进行一阶微分处理,可以去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响,对于离散型遥感图像数据,一阶微分法计算公式为:

$$R'_{\text{rs}}(\lambda_i) = [R_{\text{rs}}(\lambda_{i+1}) - R_{\text{rs}}(\lambda_{i-1})]/(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) \quad (3)$$

式中,  $R_{\text{rs}}(\lambda_{i+1})$  和  $R_{\text{rs}}(\lambda_{i-1})$  分别为相邻波长的遥感反射率值,  $R'_{\text{rs}}(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  处的反射光谱的一阶微分值. 将计算得到的光谱一阶微分值与实测叶绿素浓度进行回归分析,得到叶绿素 a 浓度的估算模型. 研究表明,一阶微分法的估算精度总体上高于比值法的估算精度.

3.2.3 三波段法 三波段模型是 Gitelson 等<sup>[16-20]</sup>提出并研究验证的一种对 II 类水体进行叶绿素 a 浓度估算的半分析算法, 它的概念模型为:

$$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] R_{rs}(\lambda_3) \propto Chl. a \quad (4)$$

式中,  $R_{rs}^{-1}(\lambda_1)$ 、 $R_{rs}^{-1}(\lambda_2)$  分别是  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  处的遥感反射率的倒数,  $R_{rs}(\lambda_3)$  是  $\lambda_3$  处的遥感反射率.  $\lambda_1$  应选择在对浮游植物色素吸收最敏感的区域, 通常范围为 660 ~ 690 nm. 为排除此范围黄色物质、非色素颗粒物的吸收和后向散射的干扰,  $\lambda_2$  的选择有以下限制: i,  $a_{ph}(\lambda_2) \ll a_{ph}(\lambda_1)$ ; ii,  $a_{CDOM}(\lambda_2) \approx a_{CDOM}(\lambda_1)$ ; iii,  $a_{nsp}(\lambda_2) \approx a_{nsp}(\lambda_1)$ ; iv,  $b_b(\lambda_2) \approx b_b(\lambda_1)$ . 其中,  $a_{ph}(\lambda)$ 、 $a_{CDOM}(\lambda)$ 、 $a_{nsp}(\lambda)$  分别为浮游植物、黄色物质和非色素颗粒物的吸收系数,  $b_b(\lambda)$  为后向散射系数.  $\lambda_3$  波段位置选择限制如下: 该波段处纯水吸收处于主导的近红外波段处;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  3 个波段的后向散射系数近似相等;  $\lambda_3$  波段处纯水的吸收系数远大于后向散射系数. 基于以上限制, 三波段模型可表示为:

$$[R_{rs}^{-1}(\lambda_1) - R_{rs}^{-1}(\lambda_2)] R_{rs}(\lambda_3) = [a_{chl.a}(\lambda_1) + a_w(\lambda_1) - a_w(\lambda_2)] / a_w(\lambda_3) \quad (5)$$

### 3.3 内陆水体光谱特征分析

对于内陆湖泊水体, 它们拥有一些共同的光谱反射率特征, 参考各研究中两湖的反射率曲线可以看出, 两湖遥感反射比在空间上差别都很大, 两湖样点反射率标准差高值都出现在 650 ~ 710 nm 之间, 所以我们重点考察 650 ~ 710 nm 之间的波段特征. 同时, 太湖的 Hyperion 数据和巢湖的 HSI 数据中, 671 和 711 nm 附近都有一个小小的反射峰值. 实验中发现, 671、711 nm 分别位于红外和近红外波段处, 且相距较近, 符合 NDCI 模型构建要求, 实验也证明这两处反射峰构建的 NDCI 与叶绿素 a 浓度具有良好的相关性.

### 3.4 叶绿素 a 浓度估算

3.4.1 模型参数的确定 根据太湖、巢湖水体的光谱特征及两湖已有的研究成果, 确定了几种常见的实用性较好的叶绿素 a 浓度估算模型及波段选择. 其中比值法采用近红外与红光波段的比值, 一阶微分法选用波段为 690 nm 附近的一阶微分值进行叶绿素 a 浓度反演; 三波段法引用杜聪等<sup>[19]</sup>的研究成果, 以生物光学模型为理论基础进行推导得到三波段模型, 再根据三波段模型的波段假设条件, 确定 3 个波段的取值范围, 最后根据最小二乘原理, 通过波段迭代方法确定最佳波段, 构建三波段的反射率因子后对实测数据进行拟合. 对于 NDCI 法, 本文也根据研究区的水质特点和实测光谱曲线, 结合所用遥感影像的光谱通道, 经过反复试验对比, 发现在太湖的 Hyperion 数据和巢湖的 HSI 数据中, 671 和 711 nm 附近都有一个小小的峰值, 且相距较近, 符合 NDCI 的模型构建要求, 由此确定了最佳波段的选择. 估算模型及波段选择见表 1.

表 1 太湖、巢湖叶绿素 a 浓度反演模型及波段选择

Tab. 1 Selection of Chl. a concentration estimation model and bands of Lake Taihu and Lake Chaohu

类型	模型表达	太湖/nm			巢湖/nm		
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
比值法	$R(\lambda_2)/R(\lambda_1)$	681.198	701.549		678.225	706.540	
一阶微分法	$\frac{R(\lambda_2) - R(\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}$	691.374	701.548		696.845	701.660	
三波段法	$[R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)]R(\lambda_3)$	691.374	721.900	854.180	678.225	701.660	737.330
NDCI 法	$\frac{R(\lambda_2) - R(\lambda_1)}{R(\lambda_2) + R(\lambda_1)}$	671.023	711.724		669.850	711.495	

3.4.2 浓度估算 将以上确定最优波段后的反射率因子作为变量与实测的样本点进行回归分析, 太湖和巢湖各选 20 个点建模, 得到每个遥感反射率因子与叶绿素 a 浓度之间的回归关系. 叶绿素 a 浓度与水体反射率因子之间的关系是非线性的, 回归曲线中相关性最好的是二次曲线, 而且可以看出 NDCI 与叶绿素 a 浓度实测值的相关性最好(图 1, 图 2). 对以上所有的估算结果, 对各个模型, 用未参与建模的 7 个点进行验证, 引入均方根误差作为统计标准, NDCI 法估算结果的相关性在所有模型中表现最好, 平均相对误差也较小, 基本可满足目前水质参数估算的精度要求, 因此 NDCI 法是构建所有反射率因子中表现最佳的模型(表 2).

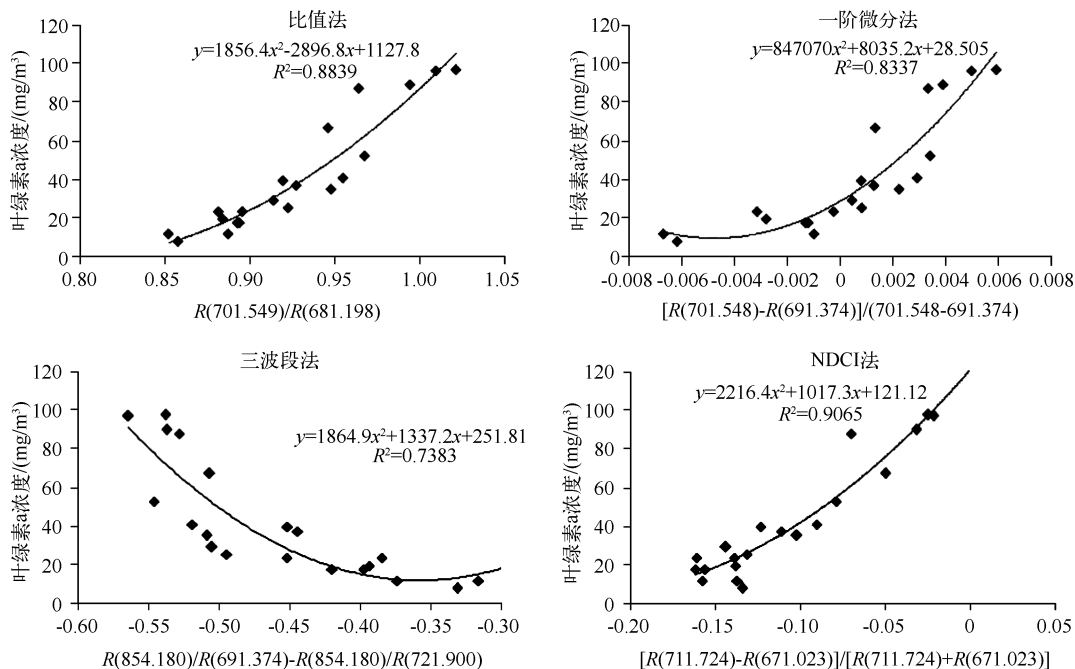


图 1 太湖 4 种方法的回归曲线图及拟合方程

Fig. 1 Regression curves of the four models and fitting equations of Lake Taihu

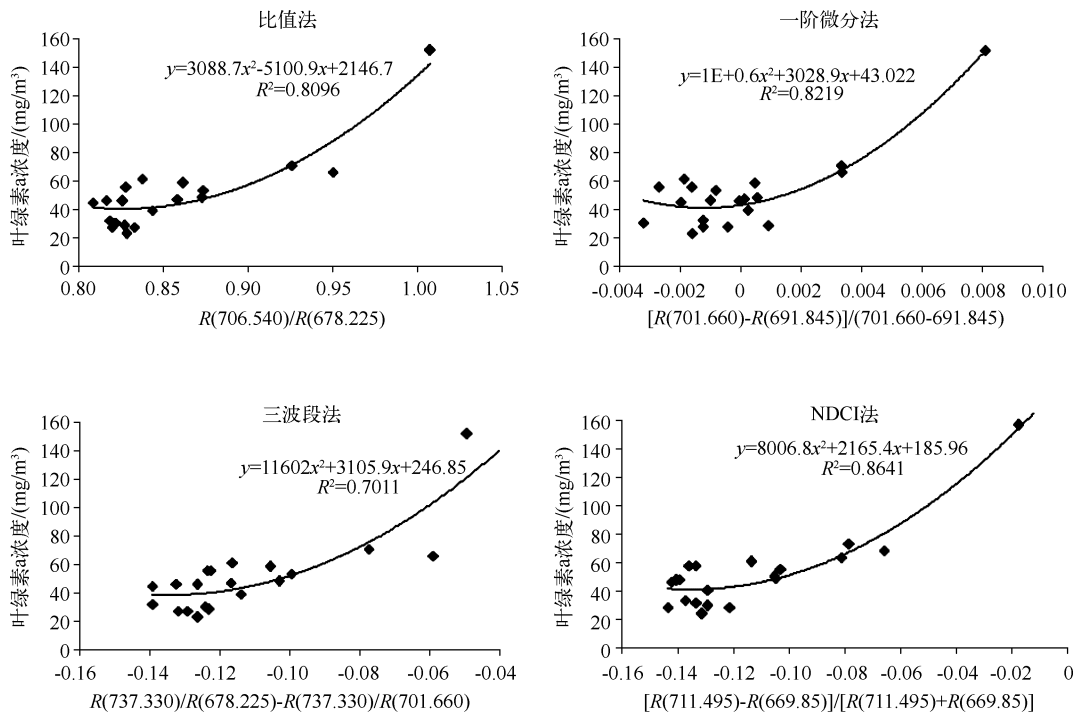


图 2 巢湖 4 种方法的回归曲线图及拟合方程

Fig. 2 Regression curves of the four models and fitting equations of Lake Chaohu

表2 模型估算结果与实测值的相对误差

Tab.2 Error between model estimation values and field measured values

模型	太湖		巢湖	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
比值法	0.8839	7.1316	0.8096	8.5577
一阶微分法	0.8337	10.5974	0.8219	8.1116
三波段法	0.7383	10.0298	0.7011	10.6399
NDCI 法	0.9065	6.1077	0.8641	7.6975

为满意(图3b)。根据 NDCI 法的估算方程,计算太湖 2004 年 8 月 19 日、巢湖 2009 年 6 月 13 日叶绿素 a 浓度分布,可以看出 2004 年 8 月 19 日当天,整景影像区域内太湖叶绿素 a 浓度较低,水质良好。浮游藻类受风浪影响,主要集中在太湖北部梅梁湾区域内,且在岸边堆积形成比较明显的近岸藻类集聚现象(图4),与闻建光等<sup>[13]</sup>的研究结果基本一致。2009 年 6 月 13 日,巢湖西部区域的北部沿岸,叶绿素 a 浓度较大。其中,在巢湖东西湖域分界处,存在大量的浮游藻类,造成叶绿素 a 浓度在影像中显示为重度水华区。此外,东、西巢湖的南部水体叶绿素 a 含量相对于当日整个湖区较低,只有个别区域出现偏高值(图5)。可见,NDCI 法较好地反映了两湖水质的分布特征。

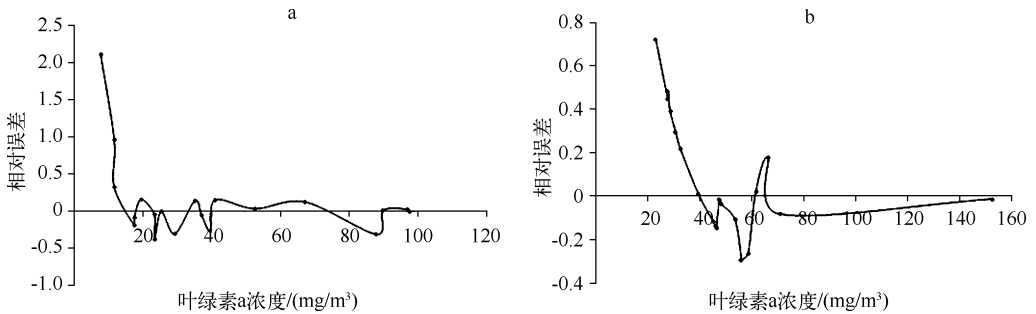


图3 NDCI 法估算太湖(a)、巢湖(b)叶绿素 a 浓度相对误差曲线

Fig. 3 RE curves of Chl. a concentration of Lake Taihu (a) and Lake Chaohu (b) by using NDCI method

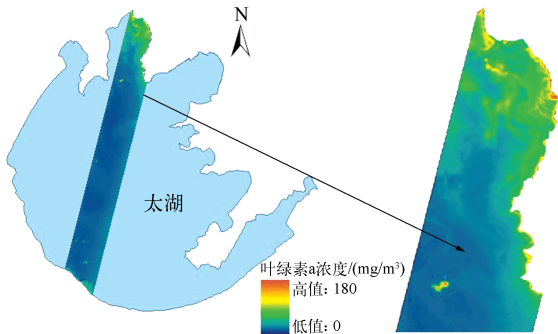


图4 2004 年 8 月 19 日 Hyperion 数据太湖 Chl. a 浓度 NDCI 分析结果

Fig. 4 NDCI result of Chl. a concentration of Lake Taihu in August 19th, 2004 by using Hyperion data

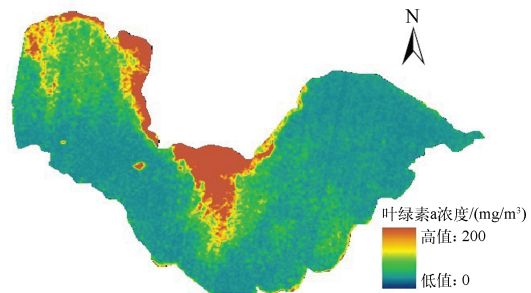


图5 2009 年 6 月 13 日 HIS 数据巢湖 Chl. a 浓度 NDCI 分析结果

Fig. 5 NDCI result of Chl. a concentration of Lake Chaohu in June 13th, 2009 by using HIS data

## 4 NDCI 普适性分析

叶绿素 a 浓度遥感估算方法的普遍适用性是遥感方法实用化的重要前提,主要表现为方法的时间、地理空间以及不同遥感数据的可移植性. 不同时间、地理空间的水体具有较大的光学差异,一种方法的可移植性强即意味着在光学差异较大的水体中皆能取得较高的估算精度. 对于不同估算方法,应用稳定的遥感波段数据进行估算也体现了方法的通用性、普适性.

### 4.1 波段选择的稳定性

在对太湖和巢湖的估算中,NDCI 反射率因子表现出了一定的优越性. 此外,在模型自身的波段选择上(表 1),NDCI 也表现出一定的稳定性. 对于太湖水体较低浓度和巢湖水体较高浓度的叶绿素 a 含量,三波段法前两个波段的选择差约为 20 nm,最后一个波段的选择相差 100 nm 左右. 比值法和一阶微分法也有不同程度的波段选择差异. 而归一化叶绿素指数法的波段选择差异最小,在太湖  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值分别是 671 和 711 nm,而巢湖的选择分别是 669 和 711 nm,他们之间的细小差别是 Hyperion 影像传感器和 HSI 影像传感器通道设置的结果,而非最优波段选择结果. 这说明 NDCI 在波段选择上具有一定的稳定性.

### 4.2 NDCI 在光学差异较大水体中的稳定性

NDCI 在太湖和巢湖两个研究区的实测数据集中表现良好,对水体光学差异进一步扩大的水体表现会如何? NDCI 法利用红外和近红外波段的遥感反射率来构建反射率因子,也属于目前叶绿素 a 浓度估算应用广泛的 NIR-red 算法中的一种,国外有研究发现 NIR-red 算法对两个不同研究区不需要对估算方程重新参数化<sup>[21-23]</sup>,那么对我国内陆湖泊,NDCI 法是否也无需重新参数化? 在两个研究区分别构建 NDCI、比值法和一阶微分法反射率因子,对两个湖区的全部数据进行拟合可知,3 种方法在对巢湖实测数据进行拟合时,精度均有不同程度的下降,比值法表现最差,基本已无法建立比值反射率因子与叶绿素 a 浓度之间的估算方程. 一阶微分法相关性也有所下降,NDCI 法具有最高的相关系数(图 6),但是比起前面 NDCI 法重新参数化的估算精度仍有所下降,在我国内陆湖泊叶绿素 a 浓度估算研究中找到一种可以不依靠野外实测数据的模型仍需努力. 虽然 3 个反射率因子拟合的精度都有所下降,但 NDCI 法仍然是几种方法中表现最好的,说明对于光学特性差异进一步扩大的太湖和巢湖水体,NDCI 法也表现出一定的稳定性.

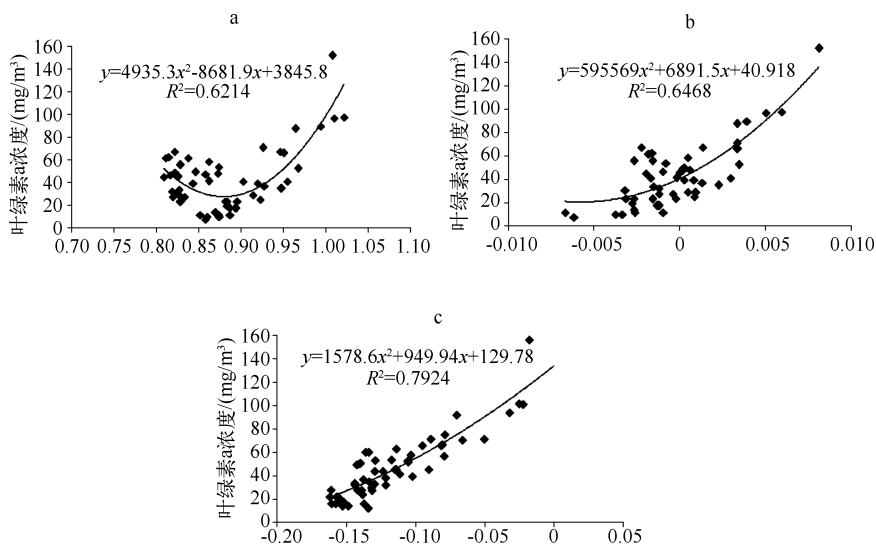


图 6 比值法(a)、一阶微分法(b)、NDCI法(c)对两个湖区叶绿素 a 浓度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of Chl. a concentration of ratio method(a), first-order differential method(b) and NDCI method(c) in Lake Taihu and Lake Chaohu

## 5 结语

本文引入了一个新的指数——NDCI, 估测了Ⅱ类水体的叶绿素 a 浓度. 通过与目前常用的比值法、一阶微分法和三波段法进行对比, NDCI 法表现出较高的估算精度, 对不同月份、地理区域有着更好的适用性, 在波段选择上比较稳定, 当水体光学差异进一步扩大时也表现出比较稳定的性能. 但是, 本文的实测数据只有叶绿素 a 的浓度数据, 忽略了其他物质的吸收和散射对不同波段的水体反射率的影响, 这对估算因子的构建有一定影响. 另外, 本文仅采用了太湖、巢湖两个研究区的数据进行对比分析, 对 NDCI 的适用性以及证明还不够充分, 还需要新的数据进行更进一步的验证, 以达到实用化的目标.

## 6 参考文献

- [ 1 ] 杨 伟, 陈 晋, 松下文经. 基于生物光学模型的水体叶绿素浓度反演算法. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(1): 38-42.
- [ 2 ] 李云梅, 黄家柱, 韦玉春等. 用分析模型方法反演水体叶绿素的浓度. 遥感学报, 2006, **10**(2): 169-175.
- [ 3 ] Gitelson AA, Dall'Omo G, Moses W *et al.* A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(9): 3582-3593.
- [ 4 ] Le CF, Li YM, Zha Y *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(6): 1175-1182.
- [ 5 ] 周 琳, 马荣华, 段洪涛等. 浑浊Ⅱ类水体叶绿素 a 浓度遥感反演(Ⅰ): 模型的选择. 红外与毫米波学报, 2011, **30**(6): 531-536.
- [ 6 ] 庞 博, 李玉霞, 童 玲. 基于半分析模型的叶绿素 a 浓度估算. 成都理工大学学报, 2011, **38**(1): 54-58.
- [ 7 ] 黄耀欢, 江 东, 庄大方等. 汤逊湖水体叶绿素浓度遥感估测研究. 自然灾害学报, 2012, **21**(2): 215-222.
- [ 8 ] 闻建光. 太湖水体叶绿素 a 遥感监测模型研究[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [ 9 ] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究. 环境科学研究, 2008, **21**(5): 173-177.
- [ 10 ] 潘邦龙, 易维宁, 王先华等. 基于环境一号卫星超光谱数据的多元回归克里格模型反演湖泊总氮浓度的研究. 光谱学与光谱分析, 2011, **31**(7): 1884-1888.
- [ 11 ] 苟尚培, 詹万志, 范 伟. MODIS 巢湖水体叶绿素 a 浓度监测研究. 中国气象学会 2006 年年会“卫星遥感技术进展及应用”分会场论文集. 成都: 气象出版社, 2006: 71-78.
- [ 12 ] 陈 军, 温珍河, 孙记红等. 基于四波段半分析算法和 Hyperion 遥感影像反演太湖叶绿素 a 浓度. 遥感技术与应用, 2010, **25**(6): 867-872.
- [ 13 ] 闻建光, 肖 青, 杨一鹏等. 基于 Hyperion 数据的太湖水体叶绿素 a 浓度遥感估算. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 327-336.
- [ 14 ] 张 红. 基于遥感反射率分类的悬浮物浓度反演模型构建[学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [ 15 ] Mishra S, Mishra DR. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 2011 (doi:10.1016/j.rse.2011.10.016).
- [ 16 ] Le CF, Li YM, Zha Y *et al.* Remote estimation of chlorophyll a in optically complex waters based on optical classification. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(2): 725-737.
- [ 17 ] 杨 煜, 李云梅, 王 桥等. 富营养化的太湖水体叶绿素 a 浓度模型反演. 地球信息科学学报, 2009, **11**(5): 597-602.
- [ 18 ] 施 坤, 李云梅, 刘忠华等. 基于不同光谱主导因子的内陆湖泊水体叶绿素浓度三波段反演模型研究. 环境科学, 2010, **31**(12): 2873-2881.
- [ 19 ] 杜 聪, 王世新, 周 艺等. 利用 Hyperion 高光谱数据的三波段法反演太湖叶绿素 a 浓度. 环境科学, 2009, **30**(10): 2904-2910.
- [ 20 ] 杨 硕, 王世新, 周 艺等. 叶绿素反演三波段模型的多时相应. 遥感信息, 2010, (5): 98-104.
- [ 21 ] Yacobi YZ, Moses WJ, Kaganovsky S *et al.* NIR-red reflectance-based algorithms for chlorophyll a estimation in mesotrophic inland and coastal waters: Lake kinneret case study. *Water Research*, 2011, **45**(7): 2428-2436.
- [ 22 ] Gilerson AA, Gitelson AA, Zhou J *et al.* Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 24109-24125.
- [ 23 ] Moses WJ, Bowles JH, Lucke RL *et al.* Impact of signal-to-noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters. *Optics Express*, 2012, **20**(4): 4309-4330.