

基于半分析模型的滇池藻蓝蛋白浓度反演

尹斌¹, 吕恒^{1*}, 李云梅¹, 吴传庆², 朱利², 王彦飞¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046; 2. 环境保护部卫星应用中心, 北京 100094)

摘要:藻蓝蛋白色素 (phycocyanin, PC) 存在于蓝藻中, 由于这种色素在 620 nm 处有较强的吸收, 可以用来作为检测蓝藻含量的指标. 利用 2009 年 9 月 19 ~ 20 日在滇池实地采样获得的实测光谱数据和水质参数数据, 结合前人提出的半分析嵌套模型, 建立了适用于滇池的藻蓝蛋白色素浓度反演的半分析模型; 建立了 620 nm 波长处的藻蓝蛋白比吸收系数 [$a_{PC}^*(620)$] 和 620 nm 波段的藻蓝蛋白色素吸收系数 [$a_{PC}(620)$] 之间的经验关系, 降低了 Simis 模型中 620 nm 处藻蓝蛋白色素比吸收系数易变性的影响. 利用 2009 年 12 月 1 日的实测光谱数据和水质参数数据对本研究建立的半分析模型进行验证, 结果表明本研究提出的半分析算法能较好地反演滇池藻蓝蛋白色素的浓度, 藻蓝蛋白浓度反演值的平均相对误差为 21.63%; 对模型误差进行分析后发现, 由于季节差异导致的不同生长期的蓝藻细胞内色素浓度和组分的变化是造成误差的主要原因.

关键词:滇池; 藻蓝蛋白色素; 半分析模型; 反演; 比吸收系数

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)02-0472-07

Retrieve Phycocyanin Concentrations Based on Semi-analytical Model in the Dianchi Lake, China

YIN Bin¹, LÜ Heng¹, LI Yun-mei¹, WU Chuan-qing², ZHU Li², WANG Yan-fei¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

Abstract: Phycocyanin (PC) in the blue-green algae is usually used to detect the quantity of the blue-green algae, because of its special absorption at band 620 nm. A semi-analytical model retrieving phycocyanin concentrations is been built, based on a nested semi-empirical band ratio algorithm, using the data sets collected in September 19 and September 20, 2009 from Dianchi Lake. The empirical relationship between the specific absorption coefficient at band 620 nm [$a_{PC}^*(620)$] and the absorption coefficient at band 620 nm [$a_{PC}(620)$] reduces the impact of the variability of $a_{PC}^*(620)$ in the model built by Simis. The new semi-analytical model is proved well done in retrieving phycocyanin concentrations and has a mean relative error (MRE) 21.63% by the dataset collected on December 1, 2009 from Dianchi Lake. The model error analysis prove that the main reason of the error is caused by the component and concentrations of pigments changing seasonally in the blue-green algae.

Key words: Dianchi Lake; phycocyanin (PC); semi-analytical model; retrieve; specific absorption coefficient

湖泊富营养化和蓝藻水华暴发是当前我国湖泊面临的最重要的环境问题之一, 特别是蓝藻水华已成为全世界关注的湖泊富营养化控制的焦点^[1]. 国外早在 1987 年, Dwivedi 等^[2]就开始利用 Landsat TM 数据监测浮游植物, Stumpf 等^[3]利用 AVRRHR 和 CZCS 数据监测 Chesapeake 海湾的蓝藻水华暴发及其分布状况, Ekstrand^[4]利用比值法和 TM 数据定量的提取了蓝藻水华暴发时近海岸水体的叶绿素 a 浓度, Richardson^[5]详细分析了 Oneida 湖蓝藻暴发时的藻类组成及其光谱特征以及遥感监测的可行性. 但这些研究多采用经验模型或半经验模型, 主要是通过建立光学测量值与地面监测的叶绿素 a 浓度之间的统计关系来达到监测蓝藻水华暴发的目的. 引起蓝藻水华暴发的藻类主要是蓝藻, 当水体中蓝藻数量没有变化而其他水生植被发生变化时, 同样会引起叶绿素 a 浓度的波动, 因此, 通过叶绿素 a 的

浓度变化监测蓝藻水华, 可能对蓝藻水华的发生情况做出错误的判断. 蓝藻在 620 nm 附近有一个吸收峰, 该吸收峰是蓝藻所含有的藻蓝蛋白 (phycocyanin) 色素产生的^[6,7], 而在一般情况下, 其他水生植被中不含藻蓝蛋白色素, 因此, 藻蓝蛋白色素的浓度可以作为表征蓝藻含量的指标. 这为探测蓝藻水华奠定了理论基础. 但是, 在 620 nm 附近, 叶绿素 a 等其他色素也存在吸收; 同时, Simis 等^[8]认为, 620 nm 附近的藻蓝蛋白色素的比吸收系数 [$a_{PC}^*(620)$] 具有易变性. 因此, 如何准确分离出藻蓝蛋白在 620 nm 附近的吸收系数和确定 $a_{PC}^*(620)$,

收稿日期: 2010-03-30; 修订日期: 2010-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701136, 40971215); 国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05)

作者简介: 尹斌 (1984 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感, E-mail: yinbins@163.com

* 通讯联系人, E-mail: HengLu@njnu.edu.cn

成为能否准确反演藻蓝蛋白的关键。

近年来,一些研究者对藻蓝蛋白色素浓度的遥感反演进行了研究。Ruiz-Verd 等^[9]分析了 3 种主要藻蓝蛋白浓度的反演算法:单一反射比算法^[10]、半经验基线算法^[6]和半分析嵌套算法^[8]等,指出 Simis 建立的半分析嵌套算法能够较好地提取蓝藻中的藻蓝蛋白色素浓度并具有较好的物理意义;但该模型滇池水体是否适用?如果适用,滇池水体中的该模型的经验参数又是多少?怎样确定 $a_{pc}^*(620)$?

本研究利用 2009 年 9 月 19~20 日滇池实测遥感反射率、吸收系数和藻蓝蛋白色素浓度等数据,对 Simis 模型进行了优化,建立了适合滇池水体的藻蓝蛋白色素浓度反演模型;并利用 2009 年 12 月 1 日的实测数据对本研究建立的模型进行验证,反演平均相对误差为 21.63%。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及点位分布

研究区域处于富营养化状态的滇池。滇池,又称昆明湖、昆明海等,位于 $N24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02'$, $E102^{\circ}36' \sim 102^{\circ}47'$,在昆明市西南郊,东南临呈贡、晋宁两县,西北近西山、官渡两区。水位 1886.35 m,长 41.20 km,最大宽 13.00 km,面积 197.90 km²,最大水深 5.87 m,平均水深 2.93 m。滇池虽是下游湖泊和盆地汇水中心,但水资源并不丰富,出水口又受到人工控制,使湖泊换水周期达 2.7 a,造成水质污染,自净能力弱。随着昆明市经济发展,湖水已受到严重污染,水体富营养化现象严重^[11]。

分别在 2009 年 9 月 19~20 日(20 个点)和 2009 年 12 月 1 日(8 个点)按照点位图(如图 1 所示)分 2 次对滇池进行水面反射率光谱测量和水样采集。采集的样品放入存储箱内保存,当天带回实验室进行过滤处理,测定各种水质参数。实验室内测定的参数包括:藻蓝蛋白色素浓度、叶绿素浓度、悬浮物浓度、颗粒物吸收系数、CDOM 吸收系数等。

1.2 数据的采集

光谱数据的采样和水体取样同步进行。其中,室外光谱测试使用由美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices) 制造的 ASD 野外光谱辐射计 (ASD Field Spec)。光谱采集和处理的方法采用文献[12]中提出的水面以上测量法。为了避免太阳直射反射的影响,设置仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^{\circ} \leq \Phi_v \leq 135^{\circ}$ (背向太阳方向),仪器与法线方向的夹角 $30^{\circ} \leq \theta_v \leq 45^{\circ}$ 。在仪器面向水体

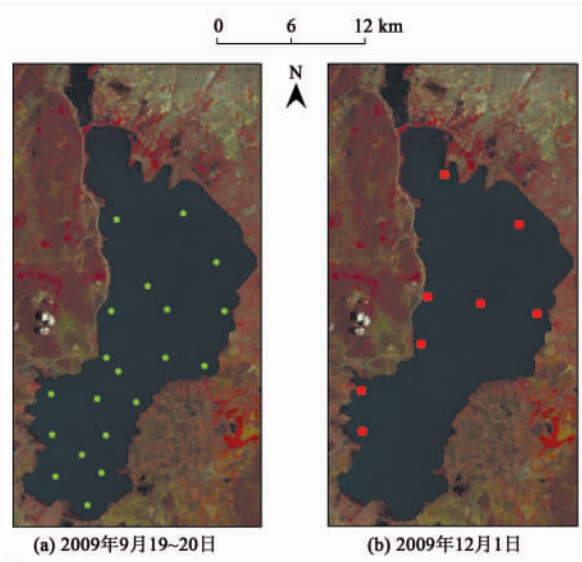


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling stations

进行测量后,将仪器在观测平面内向上旋转一个角度,使得天空光辐亮度 L_{sky} 的观测方向的天顶角等于测量时的观测角 Φ_v 。每个采样点测量 10 条光谱。进行遥感反射比计算之前,先对测得的光谱数据进行异常数据剔除,去除数值异常的光谱曲线后,对剩余的光谱曲线进行平均。然后将平均处理后的数据代入公式(1)~(3),得到水体的离水辐亮度和遥感反射比。

由光谱仪实测数据提取遥感反射率,具体算法如下:

离水辐亮度的计算:

$$L_w = L_{sw} - r \times L_{sky} \quad (1)$$

式中 L_w 为水体辐亮度 L_{sw} 为总的水体信息 r 为气-水界面反射比 L_{sky} 天空漫反射光。

水体表面入射总辐照度 $E_d(0^+)$ 为:

$$E_d(0^+) = L_p \times \pi / \rho_p \quad (2)$$

式中 L_p 为标准灰板测量值; ρ_p 为标准灰板的反射率。

遥感反射率 R 的计算公式为:

$$R = L_w / E_d(0^+) \quad (3)$$

在计算遥感反射率时,根据测量时的天气状况,气-水界面对天空光的反射比 r 取 0.025,选用经过严格定标的 30% 的灰板。 π 取 3.1415926。

室内分析中,使用 0.05 mol/L 的磷酸缓冲液提取藻蓝蛋白色素,用荧光法测定藻蓝蛋白的浓度^[13];CDOM 的吸收系数采用比色皿测量,悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜 QFT 技术测定,叶绿素浓

度测定采用“热乙醇法”,悬浮物浓度采用“称重法”测定^[14]。

2 结果与分析

2.1 滇池水体的光学特性分析

从图2中滇池的遥感反射率曲线可以看到,在620 nm附近有一个反射率的谷值;图3中可以看到,在620 nm附近有一个由于藻蓝蛋白色素吸收产生的吸收峰,这与杨顶田等^[15]对铜绿微囊藻的离水辐量度和吸收检测的结果是一致的。图2和图3中显示的结果为本研究利用高光谱定量反演藻蓝蛋白色素浓度提供了理论依据。但是,在620 nm附近还有其他色素的影响,如叶绿素a、叶绿素b、叶绿素c^[16]等。

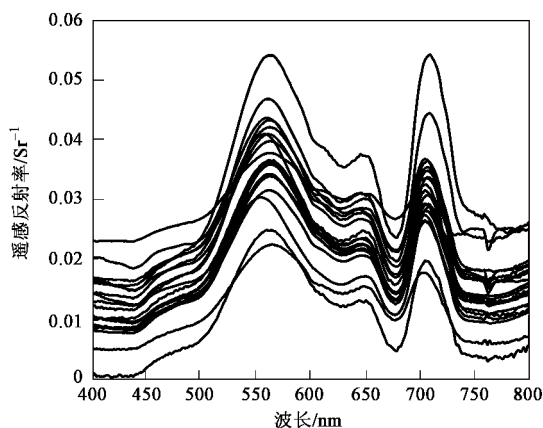


图2 滇池遥感反射率曲线

Fig. 2 Remote sensing reflectance spectra of Dianchi Lake

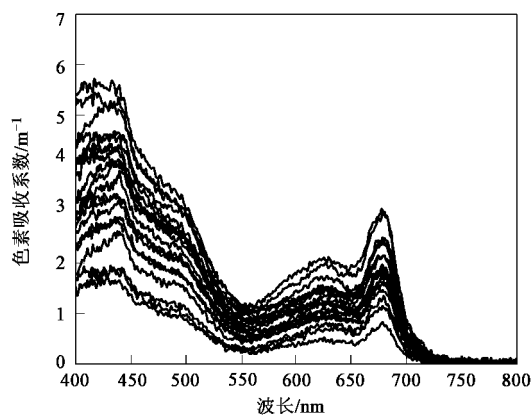


图3 滇池色素吸收曲线

Fig. 3 Absorption curve of Dianchi Lake pigment

在 Simis 模型中,一个前提是认为在620~709 nm 湖泊水体的总的后向散射值大致相等。为了研究

滇池水体是否满足这个假设,本研究结合 Lee 等^[17]提出基于生物光学模型的半分析方法和 Tzortziou 等^[18]的光学闭合原理,通过对半分析模型中经验参数的调整和利用光学闭合进行误差控制^[19],得到了滇池水体的后向散射系数。图4为使用该方法模拟的滇池水体的后向散射系数光谱曲线。

水体总后向散射系数是水体中悬浮物、浮游藻类以及纯水后向散射系数的总和。由于纯水的后向散射非常小,因此,本研究认为纯水引起的后向散射系数可以忽略。为了研究水体中不同组分对后向散射系数的影响,将后向散射系数与无机悬浮物浓度、有机悬浮物浓度及色素含量进行相关性分析发现,滇池水体与这几个参数的相关关系都不大,相关系数都在0.5以下,这与乐成峰等^[19]对太湖后向散射的研究结果不同。产生这种现象的原因可能是由于滇池水体中无机悬浮物在总悬浮物中所占的比例较小有关(14%~58%),而乐成峰等对太湖进行研究时发现在太湖水体中无机悬浮物在总悬浮物中占主导地位(无机悬浮物所占最大比例为89.16%,最小比例为16.14%,平均值为63%)导致了模拟后向散射系数和无机悬浮物具有很好的线性关系,拟合系数 R^2 达到了0.9。同时,通过图4可以看到,采样点后向散射系数具有相同的光谱特征,随着波长的增加后向散射系数呈指数递减;由于不同采样点水体各组分的浓度差异,造成不同点位的后向散射系数的大小的差异。该结论与太湖的研究结果^[19]一致。同时,由图4可以看到,在600 nm以后的波段,同一采样点后向散射系数的变化趋于平缓,从数值上看变化不大,可以近似认为600 nm以后的后向散射系数基本不发生变化。

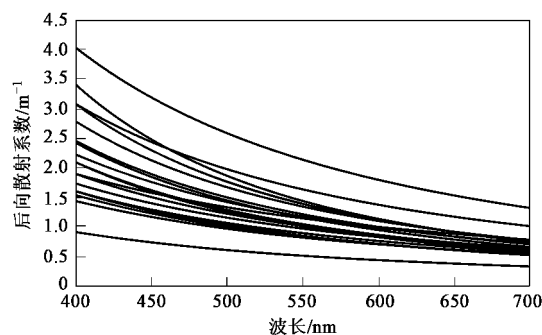


图4 滇池后向散射系数模拟值

Fig. 4 Stimulated backscattering efficient curve of Dianchi Lake

2.2 算法原理及各个参数的确定

2.2.1 算法原理

Simis 等^[8]根据 Gordon 等^[20]的遥感反射率和吸收系数 $a(\lambda)$ 和后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 之间的关系 [公式(4)] 和藻蓝蛋白在 620 nm 的吸收特征,通过建立 665 nm 处叶绿素 a 的吸收和 620 nm 处叶绿素 a 吸收的关系,反演出藻蓝蛋白色素在 620 nm 处的吸收系数,具体过程如下:

$$R(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (4)$$

第一步:为了消除式(4)中的 f ,采用 λ_1 和 λ_2 遥感反射率的波段比值算法,得到公式(5):

$$a(\lambda_1) = \left\{ \frac{R(\lambda_2)}{R(\lambda_1)} \times [a_w(709) + b_b] \right\} - b_b \quad (5)$$

$$a_{chl}(665) = \frac{\left\{ \frac{R(709)}{R(665)} \times [a_w(709) + b_b] \right\} - b_b - a_w(665)}{\gamma} \quad (6)$$

$$a_{PC}(620) = \frac{\left\{ \frac{R(709)}{R(620)} \times [a_w(709) + b_b] \right\} - b_b - a_w(620)}{\delta} - a_{chl}(620) \quad (7)$$

从 2.1 节中对滇池水体的后向散射系数模拟结果中可以看到,600 nm 以后的波段,后向散射的数值变化不大,因此,可以做出如下假设: $b_b = b_b(620) = b_b(665) = b_b(709) = b_b(778)$. 由于上文中后向散射系数模拟值是通过与实测数据的对比通过误差控制的方法得到的,而在实际的计算中无法通过上述方法得到后向散射系数,因此,在实际计算 b_b 时使用了经验公式(8)^[21].

$$b_b = b_b(778) = \frac{\alpha \times a_w(778) \times R(778)}{\gamma' - \alpha \times R(778)} \quad (8)$$

第三步,为了分离出藻蓝蛋白色素和叶绿素 a 的 620 nm 波长处的吸收系数,引入 ε 值. ε 值表示叶绿素 a 在 620 nm 和 665 nm 处吸收系数的比值. 这样就得到了藻蓝蛋白色素在 620 nm 处的吸收系数,如公式(10).

$$a_{chl}(620) = \varepsilon \times a_{chl}(665) \quad (9)$$

$$a_{PC}(620) = \frac{\left\{ \frac{R(709)}{R(620)} \times [a_w(709) + b_b] \right\} - b_b - a_w(620)}{\delta} - \varepsilon \times a_{chl}(665) \quad (10)$$

第四步,由公式(10)中反演出的藻蓝蛋白色素在 620 nm 处的吸收系数的值 $[a_{PC}(620)]$ 和 620 nm 处藻蓝蛋白的比吸收系数 $[a'_{PC}(620)]$ 就可以得到藻蓝蛋白的浓度 [PC].

$$[PC] = \frac{a_{PC}(620)}{a'_{PC}(620)} \quad (11)$$

以上公式中, $R(\lambda)$ 为波长 λ 处的遥感反射率, $b_b(\lambda)$ 为波长 λ 处的后向散射系数, $a(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数;下标 PC、chl 和 w 分别代表藻蓝蛋白色素、叶绿素 a 和纯水. $a_w(620) = 0.281 \text{ m}^{-1}$, $a_w(665) = 0.401 \text{ m}^{-1}$, $a_w(709) = 0.727 \text{ m}^{-1}$, $a_w(778) = 2.710 \text{ m}^{-1}$, $\alpha = 0.600$, $\gamma' = 0.082$.

2.2.2 经验系数 γ 、 δ 和 ε 的确定

由 2.2.1 节中的介绍可知,上述模型中需要确定的经验系数有 γ 、 δ 和 ε . 按照 Simis 介绍的方法,

第二步:使用 $R(665)$ 与 $R(709)$ 的比值和 $R(620)$ 与 $R(709)$ 的比值反演浑浊水体吸收系数的方法,得到叶绿素 a 在 665 nm 处的吸收系数 [公式(6)] 和 620 nm 处叶绿素 a 和藻蓝蛋白色素吸收系数的和 [公式(7)]. 同时,对公式(6)和(7)中的吸收系数做了如下简化:在公式(6)中,认为 $a(665) = a_{chl}(665) + a_w(665)$;公式(7)中,认为 $a(620) = a_{chl}(620) + a_w(620) + a_{PC}(620)$. 公式(6)和公式(7)中分别引入 2 个系数 γ 和 δ 是为了通过实测的吸收数据对初步反演的数据进行校正.

使用滇池的实测吸收数据和未校正的使用遥感反射率反演出吸收数据建立关系(如图 5),通过图中的直线斜率可以得出 $\gamma = 0.536$, $\delta = 0.434$.

在 Simis 的半分析算法中, ε 值是一个定值;同时指出由于在不同的营养情况下,藻蓝色素会随着营养条件的变化发生变化,造成藻蓝蛋白 620 nm 处的比吸收系数是一个易变的值. 如: Simis 等^[8]和 Randolph 等^[22]采用此半分析模型分别对荷兰、西班牙和美国的湖泊进行研究, Simis 等^[8]取 $\varepsilon = 0.24$, $a'_{PC}(620) = 0.0095 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$; Randolph 等^[22]取 $\varepsilon = 0.24$, $a'_{PC}(620) = 0.0070 \text{ m}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 对藻蓝蛋白色素浓度进行遥感提取,都取得了较好的效果. 这说明了 ε 值的相对稳定性和 $a'_{PC}(620)$ 的易变性. 因此,本研究取 $\varepsilon = 0.24$.

2.2.3 $a'_{PC}(620)$ 的确定

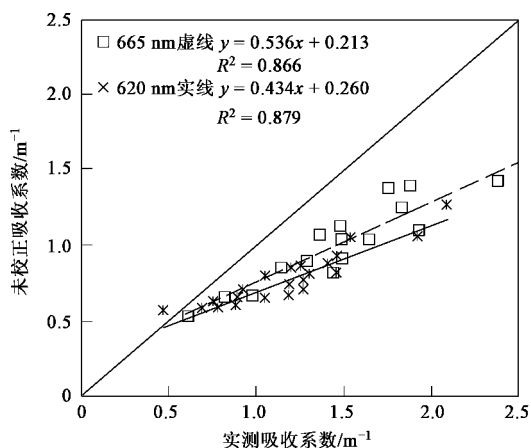
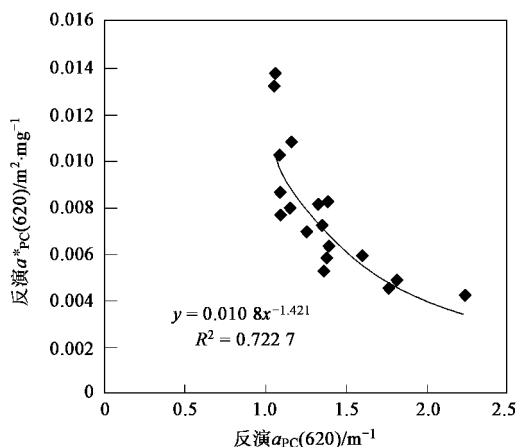


图5 吸收系数的校正

Fig. 5 Correction of absorption

由于 $a'_{PC}(620)$ 的易变,同时,由于藻蓝蛋白色素 620 nm 波段的吸收系数的获取比较困难,使得获取 $a'_{PC}(620)$ 的值比较困难.因此,为了获得适合滇池水体的 620 nm 处藻蓝蛋白色素的比吸收系数,本研究利用 Simis 模型反演出的 620 nm 波段藻蓝蛋白吸收系数与实测藻蓝蛋白浓度之比获得 $a^*_{PC}(620)$,但是,发现该值并不是一个定值,而是与 Simis 模型反演出的 $a_{PC}(620)$ 之间存在较好的关系(如图 6).由图 6 可以看出,滇池的藻蓝蛋白色素 620 nm 波段的比吸收系数 $a^*_{PC}(620)$ 随着 Simis 模型反演出的藻蓝蛋白 620 nm 吸收系数 $a_{PC}(620)$ 的增加呈现指数递减趋势.理论上色素的比吸收系数是个常数,但是此处模型中藻蓝蛋白色素的比吸收系数却是随着吸收系数的增加而降低的值.造成这种现象的原因可能有以下 3 种:一是由于色素是以分子的形式溶于水,当藻类的密度增加时,藻类的细胞之间具有相互

图6 $a^*_{PC}(620)$ 与反演 $a_{PC}(620)$ 的关系Fig. 6 Relationship between $a^*_{PC}(620)$ and retrieved $a_{PC}(620)$

遮挡效应,由此引起的“包裹效应”致使细胞对光的吸收减小,进而导致了比吸收系数的变化;第二种原因是反演藻蓝蛋白色素 620 nm 波段吸收系数时,其它干扰因子(如其它色素、悬浮物等)的影响没有完全去除;第三可能是由于 $a^*_{PC}(620)$ 的不稳定性引起.但是各种影响因素的贡献比例难以划分,本研究认为这是这 3 种因素的共同起作用.

因此,不应该再把 620 nm 波段藻蓝蛋白的比吸收系数看成一个定值,本研究把它看成一个随着 Simis 模型反演出 $a_{PC}(620)$ 变动的值(如图 6),建立了 $a^*_{PC}(620)$ 与藻蓝蛋白色素 620 nm 吸收系数之间的关系:

$$a^*_{PC}(620) = 0.0108 \times a_{PC}(620)^{-1.421} \quad (12)$$

因此,藻蓝蛋白色素浓度的反演值 [PC]:

$$[PC] = \frac{a_{PC}(620)}{a^*_{PC}(620)} = \frac{a_{PC}(620)}{0.0108 \times a_{PC}(620)^{-1.421}} \quad (13)$$

2.3 算法精度的检验

利用 2009 年 12 月 1 日在滇池获得的实测数据对上述模型的精度进行检验(如图 7、图 8),反演值与实测值相比,平均相对误差为 21.63%.在该模型中,由于叶绿素 b 和叶绿素 c 等色素的影响并未去除,从理论上讲,反演结果的值应该大于实测结果;但是,从图 7 中可以看出,应用改进的模型反演出的藻蓝蛋白色素浓度与实测值相比存在偏小的情况.

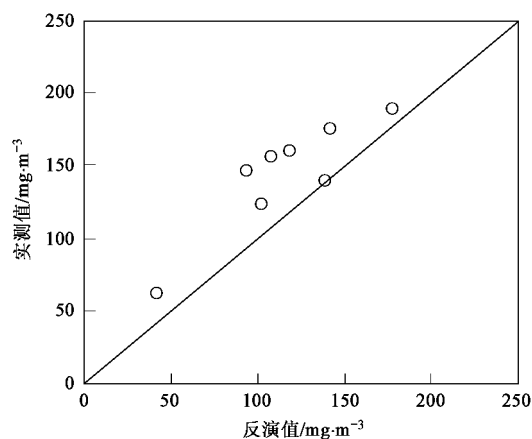


图7 反演值与实测值的对比

Fig. 7 Comparison between retrieving value and measured value

同一水体不同季节,由于其气候差异和水动力环境的不同,使得水体中各组分浓度及成分都具有较大的差异^[23,24],从而导致其吸收特性具有随季节变化的特征^[25].同时,本研究分析了 2009 年 9 月 19 ~ 20 日和 2009 年 12 月 1 日滇池采样中获得的水体

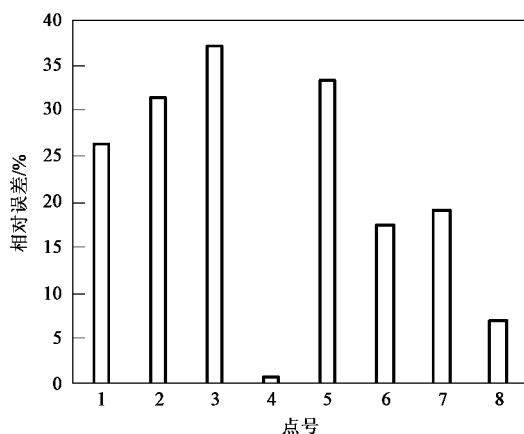


图8 验证点的相对误差

Fig.8 Relative error of the testing dataset

中总颗粒物平均吸收系数曲线(如图9),可以看到:在400~550 nm和700~800 nm波段2次采样的获得的总颗粒物的平均吸收系数相差不大;但是,在550~700 nm之间的波段2009年12月水体的总颗粒物平均吸收系数低于2009年9月水体的总颗粒物平均吸收系数.产生这种现象的原因可能是由于在蓝藻不同生长周期(季节)内,藻类色素浓度和色素组分不同^[26].综合以上因素,可以推测,由于不同季节的藻类中所含色素浓度和色素组分的不同,导致了模型中 ε 值取值可能会有变化,进而造成了图7中应用改进的模型反演出的藻蓝蛋白色素浓度与实测值相比偏小的情况.

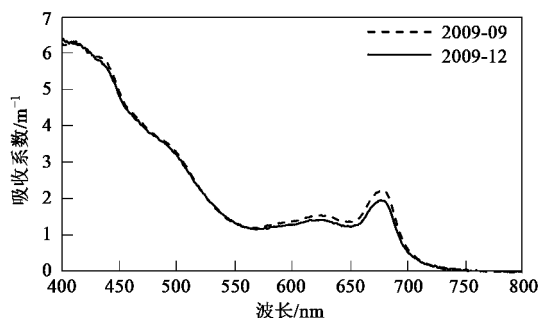


图9 滇池不同季节总颗粒物平均吸收系数

Fig.9 Absorption curve of phytoplankton in different season of Dianchi Lake

3 结论

(1) 根据 Simis 反演藻蓝蛋白色素的半分析模型,经过对比吸收系数 a_{PC}^* (620)取值方法的改变,改进了 Simis 半分析模型,并且反演结果取得了较高的精度,从而较好地解决了原模型中涉及的

a_{PC}^* (620)的易变性的问题.

(2) 通过对反演结果和实测结果的误差进行的分析,发现应用改进模型反演出的藻蓝蛋白色素浓度与实测值相比偏小.在对不同季节滇池水体的总悬浮颗粒物的平均吸收系数进行分析后发现,产生这种情况的原因是由于不同季节的蓝藻中所含色素浓度和色素组分的不同.

(3) 由于本研究的采样点数量相对较少,并且是一种半分析的方法,因此,本研究结果的普适性和推广性还需大量的数据进行验证;对于滇池这样富营养化严重水体,对水体光学特性特别是藻类的光学特性的季节差异,还需要进行更深入地研究;同时对 ε 值的稳定性和取值的合理性还需要进一步加以探讨.

致谢:感谢南京师范大学乐成峰博士在论文写作方面给予的指导,感谢南京师范大学王国祥老师和中国科学院地理与湖泊研究所吴晓东博士在数据测量方面给予的帮助,感谢一起参加滇池野外实验的水质遥感组的老师和同学们.

参考文献:

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [2] Dwivedi R M, Narain A. Remote sensing of phytoplankton: An attempt from the Landsat Thematic Mapper [J]. International Journal of Remote Sensing, 1987, 8: 1563-1569.
- [3] Stumpf R P, Tyler M A. Satellite Detection of Bloom and pigment distributions in estuaries [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24: 385-404.
- [4] Ekstrand S. Landsat TM based quantification of chlorophyll-a during algae blooms in coastal [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 10: 1913-1926.
- [5] Richardson L L. Remote sensing of algal bloom dynamics [J]. Bioscience, 1996, 7: 492-501.
- [6] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [D]. Amsterdam: Vrije University, 1993.
- [7] Jupp D L, Kirk J T O, Harris G P. Detection, Identification and mapping of cyanobacteria-using remote sensing to measure the optical quality of turbid inland waters [J]. Australian Journal of Freshwater Research, 1994, 45: 801-828.
- [8] Simis S G H, Peters S W M, Gons H J. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water [J]. Limnology and Oceanography, 2005, 50(1): 381-392.
- [9] Ruiz-Verd A, Simis S G H, Hoyos C. An evaluation of algorithms for the remote sensing of cyanobacterial biomass [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 3996-4008.
- [10] Schalles J F, Yacobi Y Z. Remote detection and seasonal patterns of phycocyanin, carotenoid and chlorophyll pigments in eutrophic waters [J]. Archiv fur Hydrobiologie Special Issues

- Advances in Limnology, 2000, **55**:153-168.
- [11] 王苏民, 袁鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 368-371.
- [12] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [13] 阎荣, 孔繁翔, 韩小波. 太湖底泥表层越冬藻类群落动态的荧光分析法初步研究 [J]. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 163-167.
- [14] Zhang Y L, Zhang B, Wang X, *et al.* A study of absorption characteristics of chromophoric dissolved organic matter and particles in Lake Taihu, China [J]. Hydrobiologia, 2007, **592**: 105-120.
- [15] 杨顶田, 潘德炉. 二类水体中藻蓝蛋白的高光谱提取模式 [J]. 科学通报, 2006, **51**(增 II): 125-128.
- [16] Simis S G H, Ruiz-Verdú A, Domínguez-Gómez J A, *et al.* Influence of phytoplankton pigment composition on remote sensing of cyanobacterial biomass [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, **106**: 414-427.
- [17] Lee Z P, Carder K L, Arnone R A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. Applied Optical, 2002, **41**(27): 5755-5772.
- [18] Tzortziou M, Herman J R, Gallegos C L, *et al.* Bio-optics of the Chesapeake Bay from measurements and radiative transfer closure [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **68**: 348-362.
- [19] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖水体后向散射特性模拟 [J]. 水科学进展, 2009, **20**(5): 707-712.
- [20] Gordon H, Brown O, Jacobs M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. Journal of Applied Optics, 1975, **14**: 417-427.
- [21] Gordon H, Brown O, Evans R, *et al.* A semi analytic radiance model of ocean color [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, **93**: 10909-10924.
- [22] Randolph K, Wilson J, Tedesco L, *et al.* Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, **112**: 4009-4019.
- [23] Tempomeras M, Kristiansen J, Moutsaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. Hydrobiologia, 2000, **424**: 109-122.
- [24] Carlos E, Castillo D, Coble P G. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea [J]. Deep-Sea Research II, 2000, **47**: 1563-1579.
- [25] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2448-2455.
- [26] 乐成峰. 基于实测光谱的太湖蓝藻识别与定量估算研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2010.