

文章编号: 0253-2239(2010)11-3090-07

太湖水体浮游藻类吸收系数分离方法研究

乐成峰 李云梅 查勇 尹斌 张红

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要 利用太湖实测水色因子吸收系数数据,根据非藻类颗粒物与有色可溶性有机物(CDOM)吸收相似的特性,采用两者合并参数化方案,并结合浮游藻类吸收系数在580 nm与692 nm波长处比值恒定的特点,提出了适合于太湖的基于水体总吸收的浮游藻类吸收系数分离方法,并从数值和光谱曲线特征等方面对分离效果进行了评价。结果表明,浮游藻类吸收能够较好地在水体的总吸收中分离出来,在440,550和675 nm波段处,吸收系数的分离效果都较好,其中在675 nm波段分离平均相对误差在10%以内;分离得到的浮游藻类吸收光谱整体上保持了其原有的特征,与实测光谱具有很好的相似性,平均相似度在0.97以上。

关键词 信号处理;太湖;浮游藻类;吸收系数;分离方法

中图分类号 P733.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3090

Study on Partitioning of Phytoplankton Absorption Coefficient from Total Spectral Absorption in Taihu Lake

Le Chengfeng Li Yunmei Zha Yong Yin Bin Zhang Hong

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract A method for partitioning phytoplankton absorption coefficient is developed in this study using in situ sampling dataset collected from Taihu Lake. Because the absorption of non-algal particles and colored dissolved organic matter(CDOM) has similar optical properties, their absorption coefficients are combined to parameterize by the method. The ratio of phytoplankton absorption coefficient at 580 nm and 692 nm is also used in the method because of its consistence. The performance of the method is assessed both in magnitude and spectral characteristic. The results indicate that the absorption of phytoplankton can be well divided from the total absorption. The method has good performance at band 440, 550 and 675 nm in phytoplankton absorption partition, and the mean relative error is less than 10% at band 675 nm. The phytoplankton absorption spectra partitioned from total spectral absorption keeps its inherent character, and fits with measured ones perfectly, the mean similarity coefficient (SC) of them can reach 0.97.

Key words signal processing; Taihu Lake; phytoplankton; absorption coefficient; partitioning method

1 引言

光在水体中传输主要受到浮游藻类、非藻类颗粒物和有色可溶性有机物(CDOM)的吸收和散射的影响。浮游藻类的吸收系数是水体重要固有生物光学特性之一,其吸收光谱特征决定水体中光场分布^[1],也是水体生态系统能量的主要来源,对水体的

生态环境的评价具有重要的作用。浮游藻类的吸收主要是由其细胞内所含的色素引起的,不同藻类由于其细胞体内所含色素的不同,使得可以利用浮游藻类的吸收光谱特征进行水体中藻类种群的分析^[2~4]。Millie等^[5]利用浮游藻类吸收光谱特性对Florida海峡的有害藻种进行识别和监测;Marra

收稿日期: 2009-10-10; 收到修改稿日期: 2010-03-14

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2008BAC34B05)、国家自然科学基金(40971215)、国家科技重大专项(20083050)、江苏省研究生创新计划(CX08B_014Z)和南京师范大学优秀博士论文(18120000223)资助课题。

作者简介: 乐成峰(1982—),男,博士研究生,主要从事水环境遥感方面的研究。E-mail: lcf320@126.com

导师简介: 李云梅(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事水环境遥感方面的研究。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

等^[6]研究得出浮游藻类的吸收系数大小与水体中的初级生产力具有很好的关系。因此,对水体中浮游藻类吸收系数及其光谱特征的研究具有重要的意义。

目前,浮游藻类吸收系数获取方法主要有三种: 1) 定量滤膜法^[7],该方法间接测量水体中浮游藻类吸收系数,能够较好的反应活体吸收的吸收特征,是国际上通用的标准方法。但该方法由于实验操作较为复杂,在色素溶解和漂白过程中受到人为因素影响较大,使得该方法在获取大面积水体浮游藻类吸收系数上具有一定的局限性。2) 光谱重构法^[8,9],即在高效液相色谱法(HPLC)测定浮游藻类中所有色素的基础上进行光谱重组。由于该方法假定各个色素的单位吸收系数恒定,且其能识别的色素信息有限,使得该方法获取浮游藻类吸收系数具有一定不足。3) 基于生物光学特性的分离法^[10~13],即利用统计的方法将浮游藻类吸收光谱和非藻类颗粒物吸收分离。该方法操作相对较为简单,且能够较好地分离出浮游藻类的吸收系数及其光谱特征。但利用该方法对特定水体中浮游藻类吸收系数进行分离时,需要对水体中非藻类颗粒物的吸收特性进行分析。

以上浮游藻类吸收系数获取方法都是基于实验室条件下获取的,对于大面积水域而言,利用以上方法获取浮游藻类吸收系数费时耗力,都存在一定的局限性。随着高光谱遥感技术的发展和在水体辐射传输机理研究的深入,众多研究者已实现了利用遥感的方法获取水体的总吸收系数^[14~17]。若能从水体的总吸收中分离出浮游藻类的吸收系数,便可实现基于遥感方法的浮游藻类吸收系数的间接提取。国外已有部分研究者利用非藻类颗粒物与 CDOM 吸收特性的相似性,针对特定水体建立了基于水体总吸收系数的浮游藻类吸收系数分离方法^[10,14,19]。本文利用太湖 2007 年 10 月和 2008 年 11 月实测各水色因子吸收系数数据,根据太湖水体中浮游藻类吸收系数、非藻类颗粒物和 CDOM 吸收系数的特性,建立适合于太湖水体的基于水体总吸收的浮游藻类吸收系数分离方法,从而为利用遥感方法间接获取浮游藻类吸收系数及其光谱特征提供很好方法参考和技术支撑。

2 材料与方 法

2.1 点位分布与水样采集

2007 年 11 月 8~22 日对太湖 43 个点与 2008

年 11 月 10~20 日对太湖 52 个点位分别进行水样采集。采集的样品放入放有冰块的存储箱内保存,当天送回实验室进行过滤处理,并测定水体中的悬浮物浓度和叶绿素浓度。同时利用定量滤膜法和岛津 UV-2550 分光光度计测定水体中 CDOM、非色素颗粒物和浮游藻类的吸收系数。

2.2 吸收系数测定

测定的吸收系数参数包括:CDOM 吸收系数、总悬浮物吸收系数、非藻类颗粒物吸收系数和浮游植物吸收系数。CDOM 吸收系数的测定是使用 0.22 μm 的 millipore 滤膜过滤已经过滤过总悬浮物的水样得到 CDOM,将黄质水样放入比色皿中,利用分光光度计测量黄质的吸光度,然后利用下式计算各波长的吸收系数,并做散射校正:

$$a(\lambda') = 2.303D(\lambda)/r, \quad (1)$$

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750, \quad (2)$$

式中 $D(\lambda)$ 为光学密度, r 为光程路径(m), $a(\lambda')$ 为波长 λ 未校正的吸收系数(m^{-1}), $a(\lambda)$ 为波长 λ 的吸收系数(m^{-1})。

悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜技术(QFT)测定,用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200~400 ml 水样,在分光光度计下测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参照,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,总悬浮物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 按下式计算得到:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{S}{V} D_s(\lambda). \quad (3)$$

式中 $D_s(\lambda)$ 为校正后的总悬浮物光学密度, V 为被过滤水样的体积, S 为滤膜上总悬浮物的有效面积。

量取相同体积的水样,用一定体积的次氯酸钠漂白水体中的藻类,漂白 15 min 后用 GF/F 过滤膜过滤漂白过的水样,滤膜上剩下的是非藻类颗粒物。用同样的方法测定非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$ 。根据水体中各类物质吸收光谱的线性叠加原理,通过总悬浮物和非藻类颗粒物的光谱吸收系数计算浮游植物的光谱吸收系数为

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda). \quad (4)$$

2.3 指数函数斜率的计算

非藻类颗粒物和 CDOM 吸收光谱随波长的增加基本上呈现指数衰减的规律,可表示为

$$a_x(\lambda) = A \exp(-\lambda S_x), \quad (x = d, g). \quad (5)$$

式中下标 x 用 d 和 g 代替时,分别表示非藻类颗粒物和 CDOM, A 为 λ 波长下的吸收系数, λ 为波长, λ_0 为参照波长,一般取 400 nm 或 440 nm。 $a_x(\lambda)$ 为

参考波长下的吸收系数, S_x 是指数函数的斜率, 利用最小二乘法拟合得到 S_x 值。

2.4 浮游藻类吸收系数分离原理与方法

Bricaud 等^[11] 利用浮游藻类吸收系数中存在特定波段之间的比值恒定且接近于 1 的特性, 认为总颗粒物的吸收随波长的增加而逐渐减小主要是由于非藻类颗粒物吸收引起的, 并结合非藻类颗粒物吸收光谱特性较好地总颗粒物吸收系数中分离出浮游藻类吸收系数。他们选定波长作为输入参数:

$$a_{ph}(505) : a_{ph}(380) = 0.99, \quad (6)$$

$$a_{ph}(580) : a_{ph}(692) = 0.92. \quad (7)$$

利用上式, 并结合(4)、(5)式可得

$$0.99A \exp(-380S) - A \exp(-505S) = 0.99a_p(380) - a_p(505), \quad (8)$$

$$A \exp(-580S) - 0.92A \exp(-692S) = a_p(580) - a_p(692). \quad (9)$$

对于(8)、(9)式, 可通过二分法确定 A 和 S 的值, 然后计算出非藻类颗粒在各个波长的吸收系数, 从而分离出浮游藻类吸收系数。

水体总吸收是水体各水色因子对光线吸收效益的总和, 可以通过以下公式表达:

$$a_t(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda), \quad (10)$$

式中 $a_t(\lambda)$ 为水体的总吸收系数, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数, 在特定波段其吸收为恒定常数, 其值参照参考文献[18]; $a_{ph}(\lambda)$ 为浮游藻类的吸收系数, $a_d(\lambda)$ 为非藻类颗粒物的吸收系数, $a_{CDOM}(\lambda)$ 为 CDOM 的吸收系数。而非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收系数具有相似的光谱特征, 均随波长的增加呈指数递减, 且具有相同的参数化方法, 故两者的吸收可以看作一种物质的吸收系数, (6)式可进一步表达为

$$a_t(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{CDM}(\lambda), \quad (11)$$

式中 $a_{CDM}(\lambda)$ 为非藻类颗粒与 CDOM 的吸收之和 (以下称为非藻类物质 CDM), 可用类似于(5)式的指数函数进行表达:

$$a_{CDM}(\lambda) = a_{CDM}(\lambda_0) \exp[-S(\lambda_0 - \lambda)]. \quad (12)$$

利用(11)、(12)式, 并结合(6)、(7)式, 可以得到类似于(8)、(9)式的方程, 从而实现从水体总吸收中分离出浮游藻类吸收系数。

然而, 对于(6)、(7)式, 由于浮游藻类吸收系数受到水体富营养化程度、水体中浮游藻类种群结构以及细胞内所含色素等因素的影响, 以上两式的比值对于不同的水体而言具有一定的差异性, 特别是对于受辅助色素影响较大的 380 nm 处吸收系数,

需要利用特定水体的实测浮游藻类吸收系数数据对其进行修正。

3 结果与分析

3.1 经验参数的确定

根据太湖水体中的非色素颗粒物、CDOM 和浮游藻类的吸收系数的实测数据, 对(6)、(7)式中的比例关系进行了验证。图 1 给出了浮游藻类吸收系数在 505 nm 和 380 nm 处吸收系数的比值和在 580 nm 和 692 nm 波段处的吸收系数比值关系。从图中可以看出, 浮游藻类吸收系数在 380 nm 和 505 nm 波段处吸收系数的比值变化很大, 且极不稳定。在 580 nm 和 692 nm 处, 其吸收系数的比值变化较小, 平均值为 0.91, 且在两次采样中其值较为稳定。导致 380 nm 和 505 nm 两波段处吸收系数与 Bricaud 等^[11] 的结果差别较大, 主要是与浮游藻类系数吸收系数提取方法有关。本文的浮游藻类吸收系数测量主要是利用次氯酸钠漂白色素, 得到非藻类颗粒物的吸收系数从而间接获得浮游藻类吸收系数, 而次氯酸钠在小于 400 nm 波段处对非藻类颗粒物的吸收系数具有较大的影响; 浮游藻类辅助色素的影响也是导致吸收系数在这两个波段处的比值不稳定的一个重要因素。在 580 nm 和 692 nm 波段处, 次氯酸钠对非藻类颗粒物的吸收影响较小, 使得浮游藻类的吸收系数测量较为准确, 且在这两个波段辅助色素的影响较小, 因而其比值相对较为稳定。因此, 对于太湖水体而言, 380 nm 和 505 nm 波段处的吸收系数的比值不能用于浮游藻类吸收系数分离。

根据 Bricaud 等^[11] 浮游藻类吸收系数分离的原理, 若能确定 CDM 吸收系数随波段指数递减的斜率 S 值, 便可从水体总吸收中分离出浮游藻类的吸收系数。根据太湖水体 CDOM 和非藻类颗粒物吸收系数光学特性变化较小的特点, 对太湖水体中 CDM 的 S 值进行了分析。图 2 给出了 2007 年和 2008 年采样中 CDM 的 S 值的变化和分布图。从图中可以看出, CDM 的 S 值的变化较小, 两次采样的 S 值主要集中在 0.010~0.014 之间变化, 平均值为 0.012。因此, 在进行浮游藻类吸收系数分离时, 取 S 值的平均值作为 CDM 的指数递减斜率。

根据对太湖水体浮游藻类吸收系数特性的研究, 可以得到以下公式:

$$a_{ph}(580) : a_{ph}(692) = 0.91, \quad (13)$$

$$a_{CDM}(\lambda) = a_{CDM}(\lambda_0) \exp[-0.012(\lambda_0 - \lambda)]. \quad (14)$$

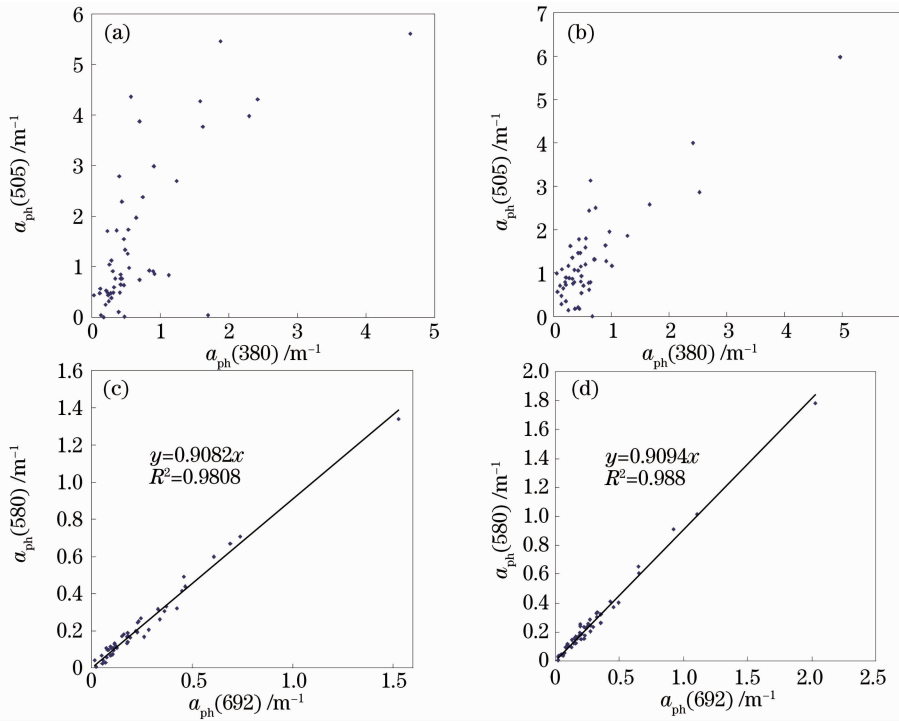


图 1 浮游藻类(a)380 nm 和(b)505 nm 处吸收与(c)580 nm 和(d)692 nm 波段吸收的比值图

Fig. 1 Ratio of absorption coefficient of phytoplankton at (a) 380 nm and (b) 505 nm, and (c) 580nm and (d) 692nm

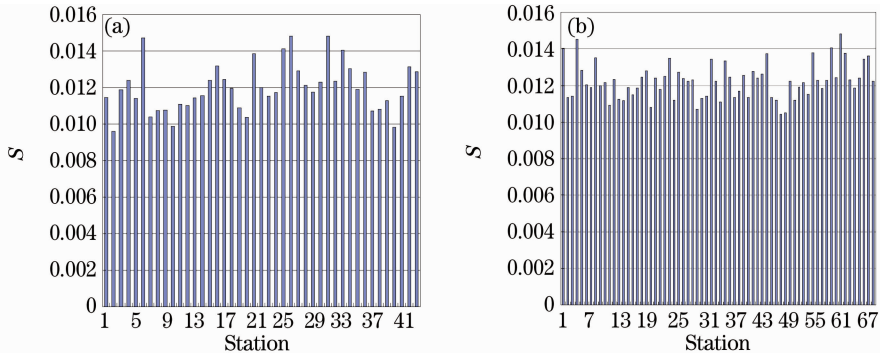


图 2 CDM 吸收系数的指数递减斜率 S 值分布

Fig. 2 Distribution of exponentially decreasing slope S of CDM absorption coefficient

结合(11)、(13)、(14)式可计算得到 $a_{CDM}(\lambda_0)$ 的值,从而计算得到非色素物质的吸收系数,进一步从水体总吸收中分离出浮游藻类的吸收系数。

利用上述方法,以 440 nm 作为参考波段,首先计算得到非色素物质在 440 nm 处的吸收系数,再利用(5)式得出非色素物质的吸收光谱,从而分离出浮游藻类吸收系数。为了分析该分离方法的效果,从计算得到的非色素物质吸收系数的精度、分离出的浮游藻类吸收系数数值大小和光谱特征三个方面对该方法进行评价。

3.2 非色素物质吸收系数计算精度分析

图 3 给出了非色素物质在 440 nm 处吸收系数实测值与计算值关系图。图 3(a)为 2007 年两者之

间的对比图,图 3(b)给出了 2008 年两者之间的对比关系。从图中可以看出,利用上述方法计算得到的吸收系数与实测值具有很好的一致性,两者之间都具有很好的线性关系,两者之间的拟合方程斜率分别为 0.99 和 1.01,拟合效果的相关系数 R^2 均在 0.95 以上。计算得到的非色素物质吸收系数的相对误差均在 10% 以内。其中,2007 年实测值与计算值之间的相对误差在 0.17%~37.8% 之间变化,平均相对误差为 9.1%;2008 年实测值与计算值之间的相对误差的变化范围为 0.03%~47.7%,平均相对误差为 9.6%。由此可见,利用上述方法和参数能够较好地计算出太湖水体中非色素物质的吸收系数。

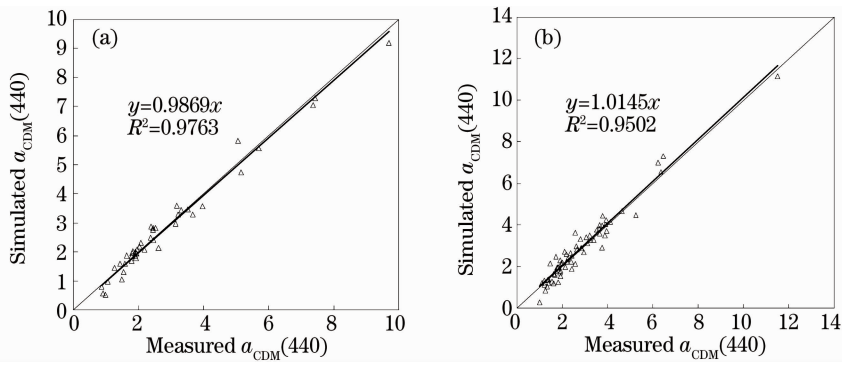


图 3 非色素物质在 440 nm 处吸收系数实测值与计算值散点图

Fig. 3 Comparison of measured and calculated non-pigment matter absorption coefficient at wavelength 440 nm

3.3 浮游藻类吸收系数数值分离效果分析

图 4 给出了实测浮游藻类吸收系数在波段 440, 550 和 675 nm 处实测值与分离值之间的关系。从图中可以看出, 分离出来的藻类在以上三个波段的吸收系数与实测值具有很好的关系。其中在 675 nm 波段处分离效果最好, 两个之间的拟合方程斜率均接近于 1, 且拟合效果的相关系数 R^2 均在 0.98 以上。在该波段的分离精度均在 20% 以内, 其中 2007 年的分离值与实测值之间的平均相对误差为 13.2%, 2008 年平均相对误差为 15.1%; 在 550 nm 处, 分离的浮游藻类吸收与实测值的关系相对较差, 两者之间的拟合斜率均在 0.9 以下, 且拟合效果的相关系数 R^2 值低于 440 nm 和 675 nm 的拟合效果的相关系数, 在该波段处分离精度也相对较差, 2007 年和 2008 年分离值与实测值之间的平均相对误差分别为 24.3% 和 30.1%; 440 nm 处分离效果要好于 550 nm, 但比 675 nm 处分离效果稍差, 2007 年和 2008 年两组数据分离的平均相对误差为 20.1% 和 24.7%。

综合上述, 可以看出本文采用的分离方法虽能较好地分离出浮游藻类吸收系数, 但在不同波段范围分离效果存在一定的差异, 这主要是由浮游藻类在不同波段对水体总吸收的贡献率的差异导致的。赵巧华等^[12]在从总颗粒物中分离浮游藻类吸收系数的研究中认为, 浮游藻类吸收系数分离值与实测值之间的差别与浮游藻类对总颗粒物吸收的贡献率具有一定的关系, 在浮游藻类吸收占主导地位的波段, 分离值与实测值的差别较小, 反之两者之间的差别较大。水体的总吸收在 675 nm 处主要是由于浮游藻类中的叶绿素导致的, 非色素物质以及纯水在该波段的吸收相对较小, 使得在该波段处分离效果较好; 而在 550 nm 处, 由于浮游藻类吸收在该波段有一谷值, 水体总吸收在该波段主要是由非色素物质引起的, 导致在该波段处浮游藻类吸收分离效果较差。Oubelkheir 等^[19]在利用与本文类似的方法从水体总吸收中分离浮游藻类吸收系数时得出同样的结论, 认为浮游藻类对总吸收的贡献率变化是影响分离效果的重要因素。

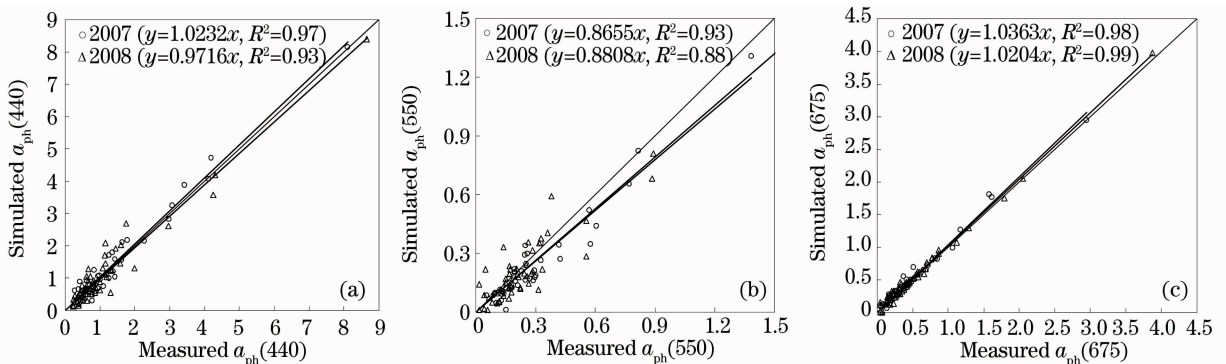


图 4 浮游藻类吸收系数大小实测值与分离值对比图

Fig. 4 Comparison of measured and partitioned phytoplankton absorption coefficient

3.4 浮游藻类吸收系数光谱特征分离效果分析

为了进一步分析浮游藻类吸收系数分离效果,

本文利用光谱相似系数(SC)作为评价指标来衡量浮游藻类吸收系数实测光谱与分离光谱特征的相似

程度。光谱相似系数可通过以下公式计算^[13]：

$$f_{SC} = \frac{\sum_{\lambda=400}^{700} a_{ph}(\lambda)_{mea} \cdot a_{ph}(\lambda)_{mod}}{\sqrt{\sum_{\lambda=400}^{700} a_{ph}(\lambda)_{mea}^2 \cdot \sum_{\lambda=400}^{700} a_{ph}(\lambda)_{mod}^2}} \quad (15)$$

式中 $a_{ph}(\lambda)_{mea}$ 为实测浮游藻类吸收光谱, $a_{ph}(\lambda)_{mod}$ 为分离浮游藻类吸收光谱。SC 的值 f_{SC} 在 $1 \sim -1$ 之间变化, 当值为 1 时, 表示两条光谱曲线形状完全相同; 当值为 -1 时, 表示两条光谱曲线形状完全相反。

利用上述公式计算浮游藻类吸收系数实测光谱与分离光谱的相似系数, 得出分离得到的光谱曲线与实测曲线具有很好的相似性。其中对于 2007 年数据, 光谱相似系数在 $0.88 \sim 0.99$ 之间变化, 平均相似系数为 0.98; 对于 2008 年实测数据, 光谱相似系数在 $0.87 \sim 0.99$ 之间变化, 平均相似系数为 0.97。图 5 给出 2007 年 [图 5(a)] 和 2008 年 [图 5(b)] 两组数据分离出的浮游藻类吸收系数实测平均值的光谱曲线与分离平均值的光谱曲线对比图。从图中可以看出, 分离出来的浮游藻类吸收系数基本上保持了原有的光谱特征, 在 630 nm 和 675 nm 处具有明显的吸收峰, 在 550 nm 处具有明显的吸收谷。其中, 630 nm 处的吸收峰主要是由于蓝藻中藻清蛋白的吸收导致的, 该波段处的吸收峰往往也是水体中含有蓝藻的重要判定标准, 675 nm 处的吸收峰主要是由于叶绿素浓度的吸收导致的, 550 nm 处吸收谷是浮游藻类中各个色素的吸收均较小引起的。

分离的浮游藻类吸收系数与实测浮游藻类吸收系数的主要差异表现在在 400~440 nm 波段范围

内, 分离的吸收系数在该波段范围内要大于实测吸收系数。分析其原因, 主要是由于非色素物质吸收系数指数递减斜率 S 值的变化导致的。在计算非色素物质在波段 440 nm 处的吸收系数时, 其 S 值采用全部采样点的平均值, 使得部分采样在该波段处的吸收系数计算偏小, 从而导致非色素物质在 400~440 nm 波段范围内模拟的吸收系数要小于实测数据, 进而导致藻类颗粒物在该波段范围内的吸收增大。 S 值的变化对计算短波段 CDM 吸收系数的影响要远远大于对长波段的影响。在 400~440 nm 波段范围内, S 值的微小变化可能会导致计算的 CDM 吸收系数的较大差异。 S 值的差异主要是由于 CDOM 的吸收与非色颗粒物吸收系数对非色素物质吸收的贡献率的差异引起的。在短波波段, 特别是紫外波段, CDOM 具有强烈的吸收特性^[20], 到可见光波段范围内其吸收系数急剧递减, 不同的波段范围内其递减程度存在一定的差异性^[21]。对于非藻类颗粒物吸收系数而言, 其吸收特性在整个可见光波段范围内递减程度变化较小。在 440~700 nm 范围内, CDOM 吸收系数变化斜率相对较为稳定, 且对非色素物质的贡献率相对较小, 使得 CDM 的吸收能够较好的进行参数化表达; 而在 400~440 nm 范围内的短波波段, CDOM 对 CDM 的贡献率有所增加, 且其吸收系数的变化斜率与非藻类颗粒物吸收的变化斜率差别较大, 使得在该波段范围内对 CDM 的吸收系数利用同一参数化方法进行表达相对较为困难, 从而导致在该波段范围内浮游藻类吸收系数分离效果相对较差。

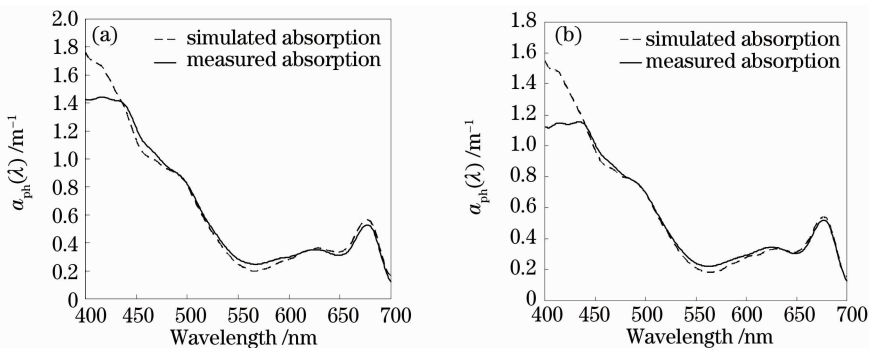


图 5 浮游藻类吸收系数光谱特征实测曲线与分离曲线对比图。(a)2007,(b)2008

Fig. 5 Comparison of measured and partitioned phytoplankton absorption coefficient spectra. (a) 2007, (b) 2008

4 结 论

利用实测各水色因子吸收系数, 根据太湖水体浮游藻类吸收系数、非藻类颗粒物和 CDOM 吸收系

数的特性, 建立了适合于太湖水体的基于水体总吸收的浮游藻类吸收系数分离方法, 并将分离得到的浮游藻类吸收系数数值和光谱特征与实测数据进行

了对比,发现利用本文的方法和参数能够较好的从水体的总吸收中分离出浮游藻类吸收系数。在440 nm和675 nm波段处均具有较好地分离效果。分离得到的浮游藻类吸收系数光谱特征基本上保持了浮游藻类原有的吸收光谱特征,且与实测光谱具有很好的相似性,平均相似度在0.97以上。因此,该方法较好地在水体的总吸收中分离出浮游藻类吸收系数,对太湖水体具有一定的适用性。

由于本文采用的数据采集时间相近,而对于太湖水体而言,其水质参数和光学特性都存在一定的季节差异性,本文的参数对其他季节的适用性还需要更多的数据进行进一步验证和修正。该方法在将CDOM吸收系数和非藻类颗粒吸收系数进行合并参数化时没有充分考虑到CDOM吸收光学特性波段的差异性,使得在短波段范围内分离效果相对较差,因此需要对CDOM吸收特性的波段差异性进行更加深入的研究,从而改善非色素物质参数化方案和提高浮游藻类吸收系数在短波波段的分离精度。

参 考 文 献

- H. R. Gordon, O. B. Brown, R. H. Evans *et al.*. A semianalytic radiance model of ocean color[J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(D9): 10909~10924
- Zhao Qiaohua, Qin Boqiang. Spectral absorption characteristic of algae and discrimination of the absorption spectrum of mixed algae[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 313~318
赵巧华, 秦伯强. 藻类的光谱吸收特征及其混合藻吸收系数的分离[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 313~318
- R. Martínez-Guijarro, I. Romero, M. Pachés *et al.*. Determination of phytoplankton composition using absorption spectra[J]. *Talanta*, 2009, **78**(3): 814~819
- Zhang Qianqian, Wang Lei, Lei Shuhua *et al.*. Characteristics of absorption spectral of phytoplankton[J]. *Spectrosc. Spectral Anal.*, 2006, **26**(9): 1676~1680
张前前, 王磊, 类淑华等. 浮游植物吸收光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(9): 1676~1680
- D. F. Millie, O. S. Schofield, G. J. Kirkpatrick *et al.*. Detection of harmful algal blooms using phytopigments and absorption signatures: a case study of the Florida red tide dinoflagellate, *gymnodinium breve*[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, **42**(5, part2): 1240~1251
- J. Marra, C. C. Trees, J. E. O'Reilly. Phytoplankton pigment absorption: a strong predictor of primary productivity in the surface ocean[J]. *Deep-Sea Res. pt. I*, 2007, **54**(2): 155~163
- B. G. Mitchell. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT)[C]. *SPIE*, 1990, **1302**: 137~148
- R. R. Bidigare, M. E. Ondrusek. In vivo absorption of algal pigments[C]. *SPIE*, 1990, **1302**: 290~302
- D. Ficek, S. Kaczmarek, J. Stoń-Egiert *et al.*. Spectra of light absorption by phytoplankton pigments in the Baltic; conclusions to be drawn from a Gaussian analysis of empirical data[J]. *Oceanologia*, 2004, **46**(4): 533~555
- C. Roesler, M. J. Perry. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1989, **34**(8): 1510~1523
- A. Bricaud, D. Stramski. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: a comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1990, **35**(3): 562~582
- Zhao Qiaohua, Zhang Yunlin, Qin Boqiang. Partitioning spectral absorption of particulate matter in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. *J. Lake Sci.*, 2006, **18**(4): 356~362
赵巧华, 张运林, 秦伯强. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数分离[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 356~362
- Y. L. Zhang, M. L. Liu, M. A. V. Dijk *et al.*. Measured and numerically partitioned phytoplankton spectral absorption coefficients in inland waters[J]. *J. Plankton Res.*, 2009, **31**(3): 311~323
- Z. P. Lee, K. L. Carder, R. A. Arnone. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- C. F. Le, Y. M. Li, Y. Zha *et al.*. Validation of a quasi-analytical algorithm for highly turbid eutrophic water of Meiliang Bay in Taihu Lake, China[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, **47**(8): 2492~2500
- H. Loisel, D. Stramski. Estimation of the inherent optical properties of natural waters from the irradiance attenuation coefficient and reflectance in the presence of Raman scattering[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3001~3011
- Zhan Haigang, Shi Ping, Chen Chuqun. A Bayesian based quasi-analytical algorithm for retrieved of inherent optical properties from ocean color[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2005, **50**(23): 2770~2777
- R. M. Pope, E. S. Fry. Absorption spectrum (380~700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 8710~8723
- K. Oubelkheir, H. Claustre, A. Bricaud *et al.*. Partitioning total spectral absorption in phytoplankton and colored detrital material contributions[J]. *Limnol. Oceanogr.: Meth.*, 2007, **5**: 384~395
- Zhang Yunlin, Wu Shengcai, Qin Boqiang *et al.*. Absorption of light by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *China Environ. Sci.*, 2004, **24**(4): 405~409
张运林, 吴生才, 秦伯强等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(4): 405~409
- Sun Deyong, Li Yunmei, Huang Jiazhu *et al.*. Spectral absorption characteristics and slope coefficients analysis of in-water constituents in Meiliang Bay of Lake Taihu in the summer season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(2): 749~760
孙德勇, 李云梅, 黄家柱等. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 749~760