

## 铜绿微囊藻和斜生栅藻生物光学模型<sup>\*</sup>

黄昌春, 李云梅<sup>\*\*</sup>, 王桥, 孙德勇, 乐成峰, 王利珍, 王鑫  
(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

**摘要:**选取太湖“水华”优势藻类即蓝藻门中的铜绿微囊藻和绿藻门中的斜生栅藻作为研究对象,利用 AC-S 分别测量两种纯藻的吸收系数和散射系数。对铜绿微囊藻和斜生栅藻的固有光学属性进行定性和定量分析,并建立其生物光学模型。结果表明:铜绿微囊藻的藻红蛋白吸收带和斜生栅藻的藻蓝蛋白吸收带的光谱吸收特性的差异性较为明显;粒径相对较小的铜绿微囊藻的包裹效应、吸收系数对散射系数的影响程度要明显小于粒径较大的斜生栅藻,铜绿微囊藻吸收系数的 P-L 模型的线性斜率和幂指数要大于斜生栅藻的吸收系数模型系数;由于散射系数受吸收系数影响程度的不同,使得散射系数光学模型变量因子具有一定的差异,受吸收系数影响较小的铜绿微囊藻的变量因子为波段比值  $\lambda_0/\lambda$ ,  $\lambda_0$  为参考波长,而受吸收系数影响较大的斜生栅藻的变量因子为吸收系数比值  $a(\lambda_0)/a(\lambda)$ ,  $a(\lambda_0)$  为参考波段吸收系数,  $a(\lambda)$  为波长为  $\lambda$  的吸收系数,两种藻类的散射模型都符合国际上通用的 S-P 模型形式。

**关键词:**铜绿微囊藻; 斜生栅藻; 固有光学属性; 生物光学模型

### Bio-optical model of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

HUANG Changchun, LI Yunmei, WANG Qiao, SUN Deyong, LE Chengfeng, WANG Lizhen & WANG Xin  
(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, P. R. China)

**Abstract:** *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*, which were the main part of algal community in Lake Taihu, were studied in this paper. Under the definite conditions of light and temperature circumstance, they were cultivated. Then their absorption and scattering coefficients were measured by AC-S (Wetlabs Inc.). *M. aeruginosa* and *S. obliquus* had similar absorption spectra characteristics, but the phycoerythrin and phycocyanin's absorption positions between *M. aeruginosa* and *S. obliquus* are different obviously. Package effect and the effect of absorption on scattering of *M. aeruginosa*, which has relatively small size, was smaller than that of *S. obliquus*, which has relatively big size, however, the linear and power slope of P-L absorption model of *M. aeruginosa* was bigger than that of *S. obliquus*. Variable factors of scattering optical model had some differences because of different effect absorption on scattering. Variable factors of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* scattering model were  $\lambda_0/\lambda$  and  $a(\lambda_0)/a(\lambda)$ , respectively. Both *M. aeruginosa* and *S. obliquus* scattering models were suit for international common form of S-P model.

**Keywords:** *Microcystis aeruginosa*; *Scenedesmus obliquus*; inherent optical property; bio-optical model

近年来,随着经济的快速发展,内陆湖泊水体富营养化越发严重,“水华”事件频频发生,使得浮游植物的监测成为目前研究的热点。众所周知,浮游植物的固有光学属性是浮游植物监测的基础光学量,而国内外对浮游植物的固有光学属性已进行了大量的研究。Loisel 等<sup>[1]</sup>基于大量的实测数据研究给出吸收系数极小条件下 660nm 波段颗粒物衰减系数  $c_p$  (约等于散射系数  $b_p$ ) 与叶绿素浓度之间非线性关系:  $c_p(660) =$

\* 国家十一五科技支撑计划项目“基于环境一号等国产卫星的大型水体环境遥感监测应用技术与软件研发”(2008BAC34B05)、国家自然科学基金项目(40971215)、江苏省 2009 年度普通高校研究生科研创新计划(CX09B-301Z)和南师大优秀博士论文培养计划项目(1243211601036)联合资助。2008-10-27 收稿; 2009-01-23 收修改稿。黄昌春,男,1982 年生,博士研究生; E-mail: huangchangchun\_aaa@163.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn.

$A[Chl]^B$ , 其中  $Chl$  为叶绿素浓度,  $A$  和  $B$  为模型参数, 受散射作用、藻类分布的影响. Bricaud 等<sup>[2-3]</sup>对藻类的比吸收系数进行了大量的研究, 认为大洋水体藻类在蓝光波段比吸收系数在  $0.01 - 0.18 \text{ m}^2/\text{mg}$  范围内, 并且在高浓度区域具有强烈的包裹效应. Morel 等<sup>[4-7]</sup>对比吸收系数和比散射系数进行了研究, 认为比吸收系数具有较好的一致性和稳定性, 而比散射系数变异性较强, 并从理论上对其进行研究和解释. 同时也有学者通过实测, 认为藻类的比吸收系数具有较强变异性<sup>[8-11]</sup>. 张前前等<sup>[12]</sup>利用东海 9 个典型浮游植物赤潮种、优势种的吸收系数的差异利用奇异值分解等数学方法得到了 7 个典型浮游植物的特征波段, 通过特征波段对藻类进行识别, 准确率达到了 80%. 然而国内外对于纯藻的固有光学属性(吸收、散射和衰减系数)研究相对较少<sup>[13-14]</sup>, 这就使得混合藻类的光学模型系数的变化难以进行定量研究.

本实验针对这一目的, 对两种纯藻的固有光学属性进行测量, 并建立其生物-光学模型, 从而为混合藻类光学模型系数的变化研究奠定基础.

## 1 材料与方法

根据历年的监测和研究<sup>[15-18]</sup>, 太湖“水华”的主体主要是蓝藻门中的铜绿微囊藻和绿藻门中的斜生栅藻, 因而直接选取铜绿微囊藻和斜生栅藻纯藻作为本实验的材料, 前期藻类的培养是采用摇床全光照周期培养, 在短期时间内获得大量的藻类, 再将获得藻类移入半光照周期, 同一温度( $20^\circ\text{C}$ )和光照条件(7000lux)下的光照培养箱中进行培养. 将铜绿微囊藻和斜生栅藻分成 9 个不同的浓度梯度, 利用 AC-S 分别测量各个浓度梯度的吸收系数和衰减系数, 利用紫外可见光光度计测量各个浓度梯度的叶绿素浓度.

### 1.1 固有光学属性的测量

将藻类溶液利用漏斗灌入 AC-S 吸收和衰减管中, 通过 Wetlabs 公司的光谱吸收和衰减仪(AC-S)获得藻类和纯水的散射系数<sup>[19]</sup>, 再利用该散射系数减去纯水散射系数得到藻类的散射系数. AC-S 在可见光波段范围共有 85 个光谱通道, 光谱分辨率为 4nm, 测量精度为  $0.01 \text{ m}^{-1}$ , 试验之前, 对仪器进行空气和纯水校准, 校准时每次获得的数值偏差在仪器出厂的要求范围  $\pm 0.005 \text{ m}^{-1}$  之内. 由 AC-S 直接获得水体吸收系数  $a(\lambda)$  和衰减系数  $c(\lambda)$ , 为了得到更为精确的吸收系数数据, 需对吸收系数作温度、盐度和散射纠正(由于测量样品是培养物, 盐度纠正可忽略), 纠正公式为:

$$a_{mts}(\lambda) = a_m(\lambda) - [\psi_t \cdot (t - t_r) + \psi_s \cdot (s - s_r)] \quad (1)$$

$$a_t(\lambda) - a_w(\lambda) = a_{mts}(\lambda) - a_{mts}(\lambda_{ref}) \quad (2)$$

式中,  $a_m$  是测量的吸收系数,  $a_{mts}(\lambda)$  代表了样品总吸收值减去光学纯水的吸收值;  $\psi_t$ 、 $\psi_s$  分别是温度和盐度纠正系数;  $t$ 、 $s$  分别是野外实测温度和盐度;  $t_r$ 、 $s_r$  分别是纠正的参考温度和盐度;  $a_{mts}$  是温度和盐度纠正后吸收系数;  $a_t(\lambda)$  是样品总吸收系数;  $a_w(\lambda)$  是纯水吸收系数;  $\lambda_{ref}$  是散射纠正的参考波长, 设为 756nm. 对衰减系数作同样的纠正, 该过程是通过 AC-S 数据处理软件实现的.

利用纠正后的吸收和衰减系数求得散射系数:

$$b_p(\lambda) = c_m(\lambda)^* - a_m(\lambda)^* \quad (3)$$

式中,  $c_m(\lambda)^*$ 、 $a_m(\lambda)^*$  分别是纠正后的衰减和吸收系数;  $b_p(\lambda)$  是水中颗粒物散射系数.

### 1.2 吸收系数和叶绿素浓度的测量

实验室内藻类比吸收系数是利用 UV-2550 型紫外可见光光度计测量, 藻类颗粒物吸收的测定采用定量滤膜法(QFT), 步骤如下:首先, 使用滤膜过滤一定量的水样, 其次, UV-2550 型紫外可见光光度计测量过滤所得到的滤膜的吸光度, 最后利用吸光度来计算吸收系数. 计算方法为:

首先进行放大因子校正:

$$OD_s(\lambda) = 0.378 OD_f(\lambda) + 0.523 OD_f^2(\lambda) \quad (4)$$

式中,  $OD_s(\lambda)$  为校正后的滤膜上藻类颗粒物的吸光度,  $OD_f(\lambda)$  为直接在仪器上得到的藻类颗粒物吸光度.

其次计算吸收系数:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \cdot \frac{S}{V} OD_s(\lambda) \quad (5)$$

式中: $a_p(\lambda)$ 为光谱吸收系数, $V$ 为被过滤水样的体积, $S$ 为沉积在滤膜上藻类颗粒物的有效面积<sup>[20]</sup>.

利用“热乙醇法”测量叶绿素浓度  $C_{ph}$ <sup>[21]</sup>. 通过

公式: $a^* = a_p/C_{ph}$ 计算比吸收系数.

### 1.3 QFT 法和 T-R 方法

尽管 QFT 方法得到了广泛的运用,但是目前放大因子校正并不能很好的解决由散射引起的路径放大效应,因而估算的吸收系数仍有较大的误差<sup>[22]</sup>. Tassan 和 Ferrari<sup>[23]</sup>等认为使用带有积分球的分光光度计通过 T-R 方法能够较好的解决散射纠正的问题,本研究分别利用这两种方法进行测量比较,发现他们之间没有显著的差异(在整个波长范围内,误差不超过 5%) (图 1). 所以利用 QFT 法测量藻类吸收系数是可靠的.

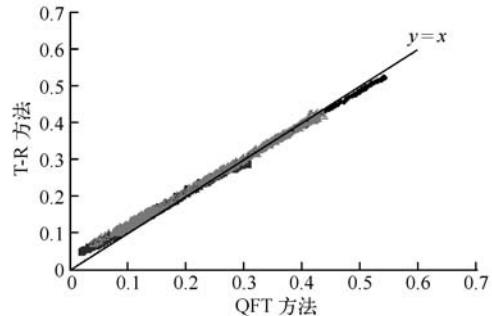


图 1 QFT 法和 T-R 方法测量结果对比

Fig. 1 Comparison of plot of QFT method and T-R method

## 2 结果分析

### 2.1 藻类颗粒物固有光学属性特征

2.1.1 吸收系数特征 铜绿微囊藻吸收系数的 430nm 和 673nm 左右为叶绿素 a 吸收峰,在 620nm 附近为藻蓝蛋白吸收带,在 725nm 以后的波长范围内吸收较低接近于 0(图 2). 斜生栅藻除了在 430 和 673nm 左右存在叶绿素 a 吸收峰外,在 480nm 区域还存在藻红蛋白的吸收带;与铜绿微囊藻相似,在 725nm 以后的波长范围内吸收也相对较小(图 2). 随着叶绿素浓度的增加吸收系数不断增大,但是不同的波段增加的速度有较大的差异,最大差异出现在 430nm 的叶绿素短波段吸收峰处,最小差异出现在 540nm 的绿光吸收区域. 铜绿微囊藻在短波波段 430nm 处的吸收峰值较为明显,670nm 处的吸收峰值相对平缓;斜生栅藻在 670nm 处的吸收峰显得异常的陡峭,430nm 吸收峰值由于受藻红蛋白 480nm 吸收带的影响,变得相对平坦,与铜绿微囊藻的 430 – 460nm 迅速衰减线相比,斜生栅藻的迅速衰减线位于 480 – 540nm, 出现了向长波方向位移的现象.

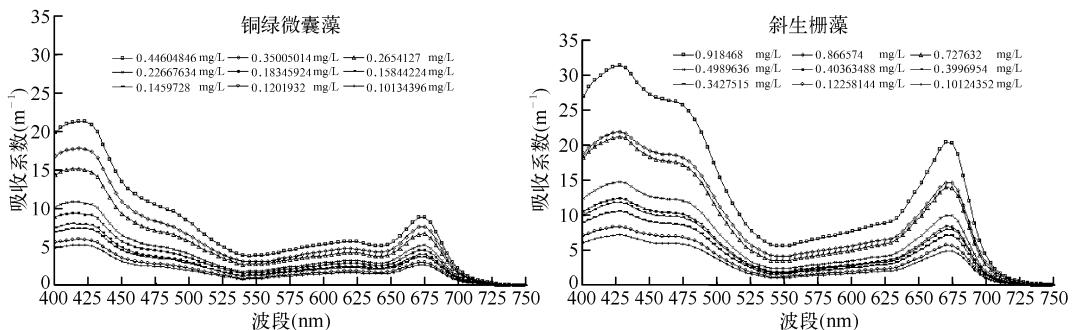


图 2 铜绿微囊藻和斜生栅藻吸收系数曲线

Fig. 2 The absorption coefficient curve of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

2.1.2 散射系数特征 铜绿微囊藻散射系数曲线(图 3)表明,在浓度相对较低区域( $101.34 - 0.226.68 \mu\text{g/L}$ ),其光谱特征比较单一,随波段的增加呈现近似线性或单调的幂函数曲线递减,在高浓度区域( $265.41 - 446.05 \text{mg/L}$ ),大于 525nm 波段范围内,铜绿微囊藻散射系数光谱与低浓度区域相似,但是由于受到吸收系数的影响,在小于 525nm 的短波波段,铜绿微囊藻散射系数随波段的增加出现递增状况,同时在 675nm 出现

一较平缓谷值。而斜生栅藻的散射系数光谱特征相对较为复杂,难以用一简单曲线进行描述,但其特征较为明显,在400~525 nm的短波波段之间受430 nm叶绿素a和480 nm藻红蛋白吸收影响,出现相应的两个散射低谷区,在675 nm出现与叶绿素a另外一吸收峰值相对应的散射谷值。

斜生栅藻在整个浓度梯度范围内受吸收系数影响较大,影响程度随吸收系数的增加而增大(图2);而铜绿微囊藻在高浓度400~525 nm范围内受吸收系数影响较大,而在大于525 nm和低浓度范围内铜绿微囊藻的散射系数的光谱受吸收系数影响较小。

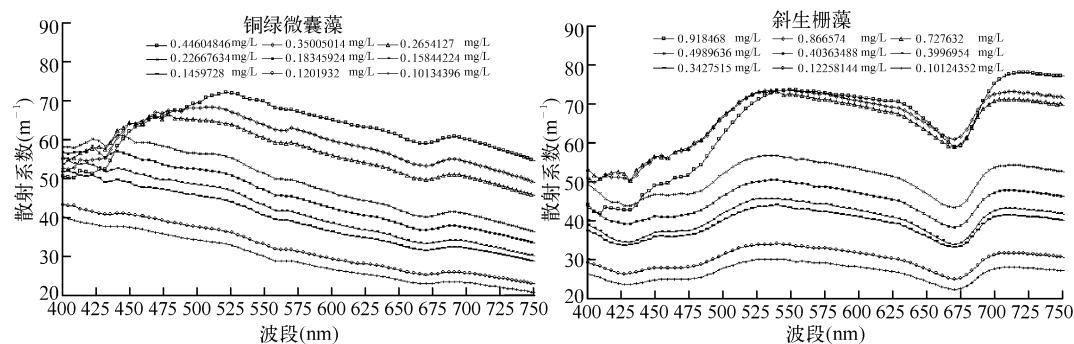


图3 铜绿微囊藻和斜生栅藻散射系数曲线

Fig. 3 The scattering coefficient curve of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

利用Mie理论计算散射系数,其散射系数受吸收系数的影响主要是体现在其输入参数折射指数虚部 $n'$ 上,其计算公式为 $n'(\lambda) = (\lambda a(\lambda)) / (4\pi n_w)$ <sup>[24]</sup>。根据Mie理论计算结果见图4,归一化散射系数 $b / \langle b \rangle$ 随折射指数的虚部 $n'$ 和粒径的等值线图见图4a,其中 $b$ 为散射系数, $\langle b \rangle$ 为同一粒径条件下散射系数的平均值。吸收系数对散射系数具有较大的影响,且该作用随粒径的增加具有强烈的波动性;但是在小粒径区域,吸收系数对散射的作用几乎没有影响(图4b),在粒径较小的条件下,散射系数随折射指数虚部的变化几乎为零。

这一结果为铜绿微囊藻与斜生栅藻散射系数受吸收系数影响的差别提供了理论依据,在铜绿微囊藻低浓度区域内藻类难以累积叠加,并且铜绿微囊藻粒径较小,因此散射系数受吸收系数影响较小,但是在高浓度区域内由于藻类的累积和叠加使得散射物粒径增加,从而受到吸收系数的影响较大;斜生栅藻粒径要远大于铜绿微囊藻,因此即使在低浓度区域内,斜生栅藻的散射系数受吸收系数的影响仍然较大,在高浓度区域该影响更加突出。

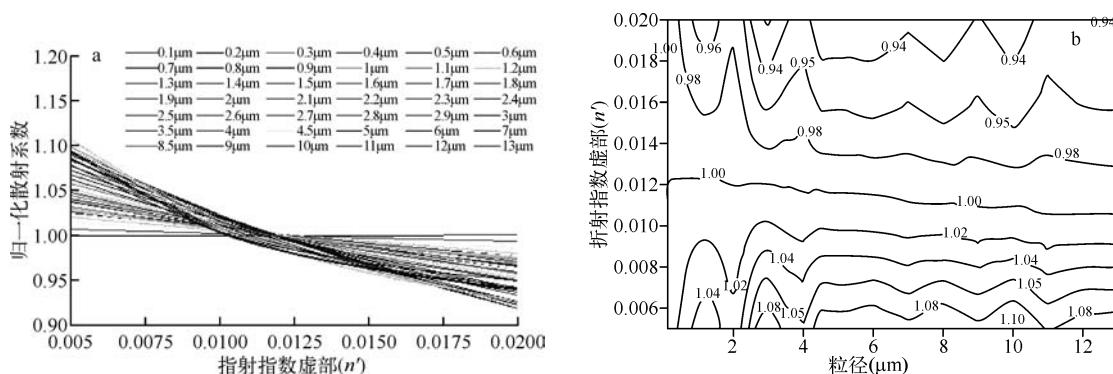


图4 归一化散射系数与折射系数虚部和粒径之间的关系

Fig. 4 Relationship between the normalize scattering coefficient and the imaginary part of refractive index, diameter of algae

## 2.2 藻类颗粒物固有光学属性模型

2.2.1 吸收系数模型 将吸收系数进行归一化处理,即将各个波段的吸收系数比上所有波段吸收系数的平均值,得到铜绿微囊藻和斜生栅藻归一化吸收系数,除高浓度范围内的归一化吸收系数有所偏离以外,其他浓度的归一化吸收系数相对较为稳定(图5),利用相对稳定的吸收系数与比吸收系数、叶绿素浓度建立光学模型.

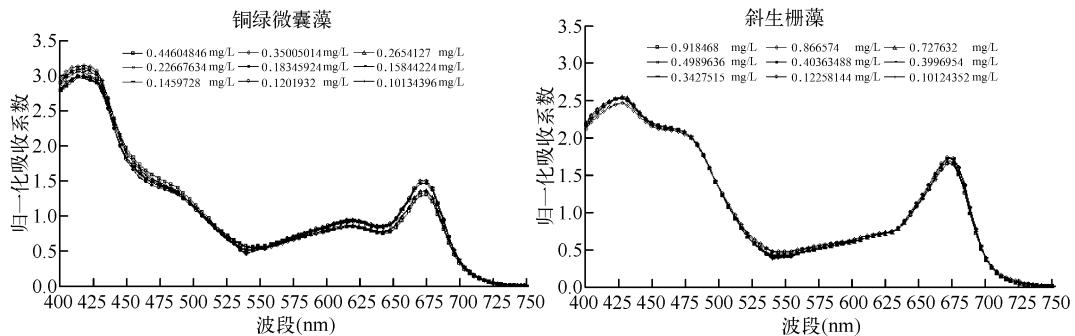


图 5 铜绿微囊藻和斜生栅藻归一化吸收系数曲线

Fig. 5 Normalize absorption coefficient curve of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

选择通用的 P-L (幂函数-线性) 模型:  $a = Aa_n^* C_{ph}^B$  其中  $a$  为吸收系数,  $A, B$  为参数,  $a_n^*$  为以 440nm 为基准归一化的比吸收系数,  $C_{ph}$  为叶绿素浓度, 来建立铜绿微囊藻和斜生栅藻吸收系数的光学模型. 首先利用吸收系数与叶绿素浓度进行幂函数回归得到回归参数  $h$  和  $B$ , 将  $h$  与归一化比吸收系数进行线性回归得到参数  $A$ .

比吸收系数是指叶绿素浓度取单位值时的吸收系数, 它表达了叶绿素对光的吸收作用的强弱, 我们一般通过吸收系数与叶绿素浓度的比值来求取<sup>[13]</sup>. 通过此方法求取不同叶绿素浓度梯度下的斜生栅藻和铜绿微囊藻的比吸收系数的平均值, 铜绿微囊藻和斜生栅藻的比吸收系数的特征与其吸收系数较相似, 凸显出了叶绿素 a、藻红和藻蓝蛋白吸收带特征(图 6a), 与 HYDROLIGHT 提供的比吸收系数有一定差异, HYDROLIGHT 提供的比吸收系数没有明显的藻红和藻蓝蛋白吸收带特征, 这可能是由于 HYDROLIGHT 提供的比吸收系数是多种藻类混合藻类的平均值的原因. 由于包裹效应的存在, 随着叶绿素浓度的增加吸收系数并不是呈现  $a = a^* C_{ph}$  线性关系上升, 其中  $a$  为吸收系数,  $a^*$  为比吸收系数,  $C_{ph}$  为叶绿素浓度, 不同浓度叶绿素梯度下的比吸收系数具有一定的差异性, 9 个浓度梯度之间各个波段比吸收系数的标准差, 该标准差曲线与比吸收系数的曲线具有强相似性(图 6b), 同时斜生栅藻的标准差要远大于铜绿微囊藻, 这主要是由于不同浓度梯度之间存在的包裹效应具有较大的差异, 根据 Morel 和 Bricaud 的研究<sup>[2-3]</sup>, 包裹效应因子为:

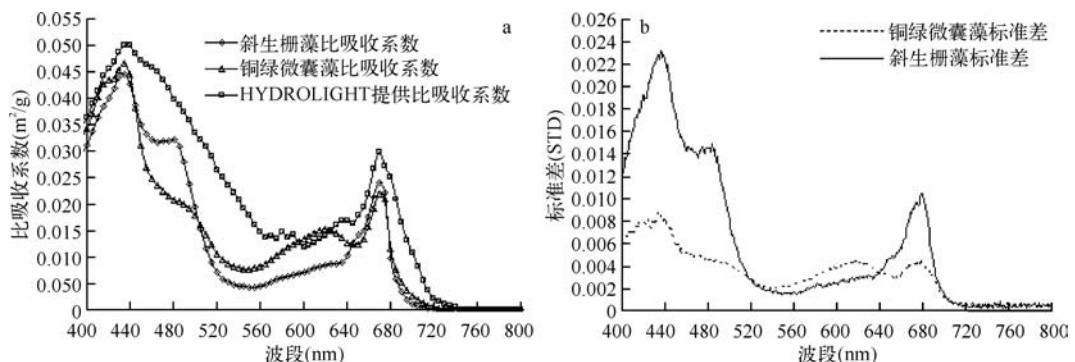


图 6 不同浓度的铜绿微囊藻和斜生栅藻平均比吸收系数(a)和标准差曲线(b)

Fig. 6 Curve of specific absorption coefficient (a) and STD (b) of different concentration *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

$$Q'_a(\lambda) = \frac{3}{2} \frac{1 + 2e^{1/(ad)} + 2(e^{-ad} - 1)/(ad)^2}{ad}$$

其中,  $a$  为藻类细胞吸收系数,  $d$  为细胞尺寸, 如果没有包裹效应,  $Q'_a(\lambda)$  应等于 1, 随着包裹效应的增强,  $Q'_a(\lambda)$  值随之减小, 最终为 0. 由于包裹效应与吸收系数和细胞尺度成正比, 吸收系数和细胞尺度越大包裹效应越强, 其不同浓度梯度下的比吸收系数的标准差将越大, 这就是斜生栅藻和铜绿微囊藻的比吸收系数较为相似, 但斜生栅藻不同浓度梯度之间的比吸收系数的标准差要比铜绿微囊藻高的原因.

利用上述方法, 首先建立铜绿微囊藻吸收系数光学模型, 结果如下:

$$\begin{aligned} a &= hC_{ph}^{0.995 \pm 0.01} & (400 - 540\text{nm}) & R^2 \geq 0.9872 \\ a &= hC_{ph}^{0.851 \pm 0.03} & (540 - 750\text{nm}) & R^2 \geq 0.9853 \\ h &= 0.046473a_n^* & (400 - 750\text{nm}) & R^2 = 0.9232 \end{aligned}$$

铜绿微囊藻的吸收系数与叶绿素浓度之间有很好的幂函数关系, 但不同波段范围的幂函数指数有一定差异(图 6), 不同波段幂函数指数的频数图可以看出, 在整个波段范围内 400–750nm 幂指数平均值为  $0.918 \pm 0.08$ (图 7a), 不同波段的幂指数主要分布在两个区域内, 即图 7b 中的 400–540nm 波段范围内的  $0.995 \pm 0.01$  和图 7c 中的 540–750nm 范围内的  $0.851 \pm 0.03$ , 回归参数与归一化比吸收系数的线性关系也较为显著, 相关性达到 0.9232.

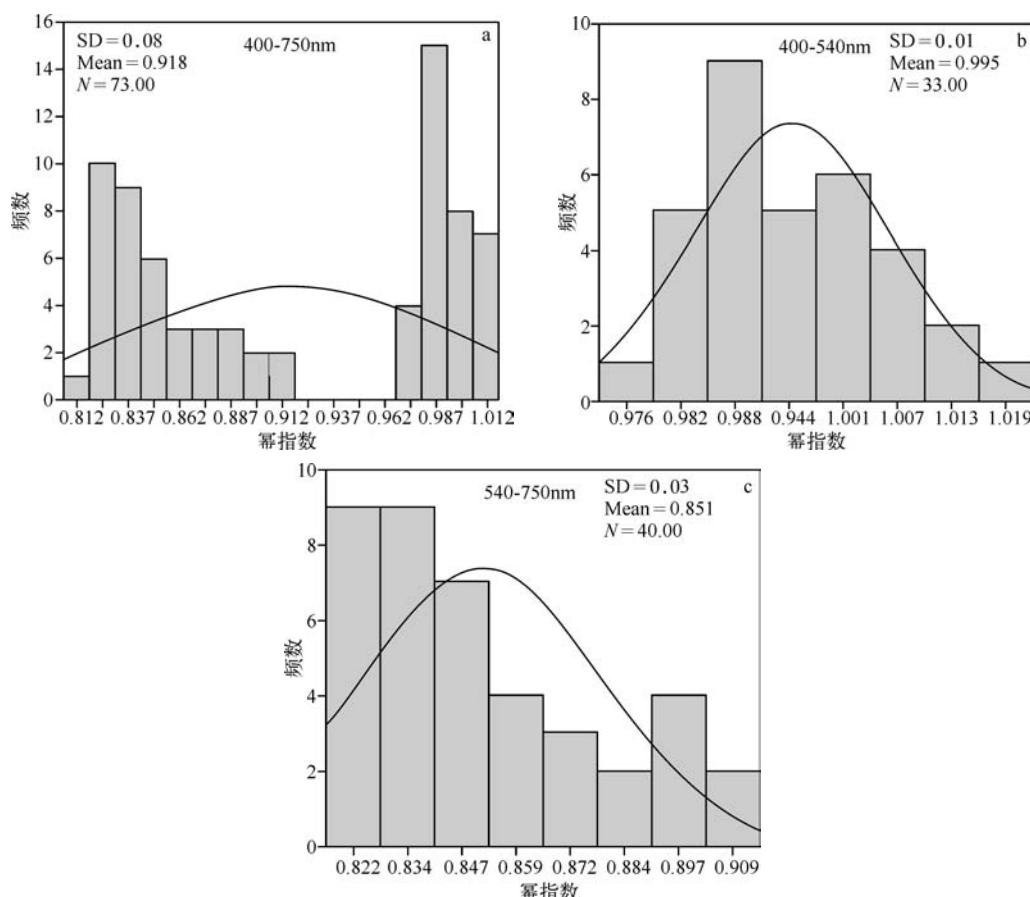


图 7 铜绿微囊藻幂指数频数分布

Fig. 7 Frequencies distribution of *Microcystis aeruginosa* power index

利用同样的建模方法得到斜生栅藻的光学模型为:

$$a = hC_{\text{ph}}^{0.505 \pm 0.01} (R^2 \geq 0.9225)$$

$$h = 0.024055a^* (R^2 = 0.9196)$$

斜生栅藻的吸收系数与叶绿素浓度在400~750nm波段范围内具有相对稳定的幂函数关系,幂指数平均值为 $0.505 \pm 0.01$ ,所有波段回归的相关性大于0.9225(图8),参数h与归一化比吸收系数具有显著的线性关系,相关性为0.9196。

**2.2.2 散射系数模型** 将散射系数进行归一化处理,即将各个波段的散射系数比上所有波段散射系数的平均值,得到铜绿微囊藻和斜生栅藻归一化散射系数(图9),表明除高浓度范围内的归一化散射系数有所偏离以外,其他浓度的归一化散射系数相对较为稳定,选取归一化散射系数较为稳定的6个低浓度值建立光学模型。由于叶绿素散射问题十分复杂,其光学模型选用目前多数人采用的S-P模型:

$$b(\lambda) = jC_{\text{ph}}^n \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^m \quad \text{和} \quad b(\lambda) = jC_{\text{ph}}^n \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^m$$

其中, $b(\lambda)$ 为波长为 $\lambda$ 的散射系数, $j, n, m$ 为模型回归参数, $\lambda_0$ 为参考波长, $a(\lambda_0)$ 为参考波段吸收系数, $a(\lambda)$ 为波长为 $\lambda$ 的吸收系数,本文分别选用550nm和660nm作为参考波段。

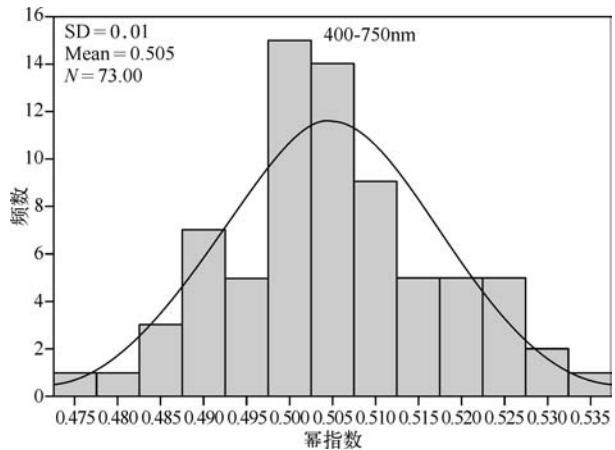


图8 斜生栅藻幂指数分布

Fig. 8 Frequencies distribution of *Scenedesmus obliquus* power index

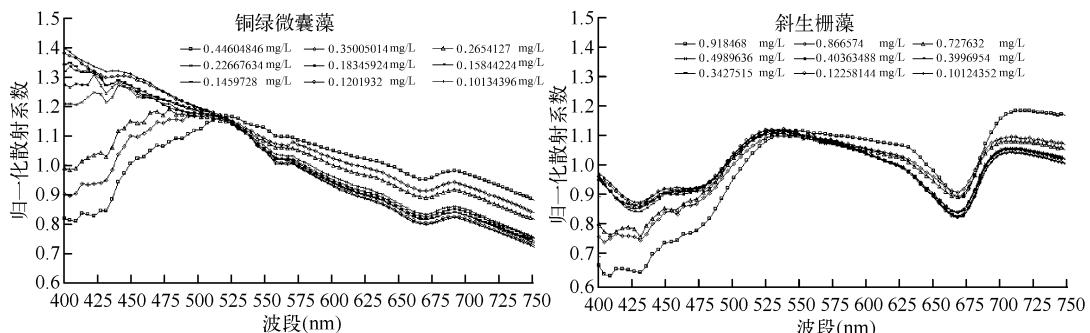


图9 铜绿微囊藻和斜生栅藻归一化散射系数曲线

Fig. 9 The normalize scattering coefficient curve of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*

首先利用参考波段 $\lambda_0$ 的散射系数与叶绿素浓度建立幂函数关系 $b(\lambda_0) = b_0 C_{\text{ph}}^n$ ,得到参数 $b_0, n$ ,其次利用参考波段 $\lambda_0$ 的散射系数与其他波段散射系数建立无常数项的线性关系 $b(\lambda) = kb(\lambda_0)$ ,得到线性方程的斜率k,再利用斜率k与 $\lambda_0/\lambda$ 建立幂函数关系 $k = l(\lambda_0/\lambda)^m$ ,得到参数l, m;最终得到 $b(\lambda) = jC_{\text{ph}}^n (\lambda_0/\lambda)^m$ ,参数j为 $b_0$ 和l的乘积。

通过上述方法得到铜绿微囊藻和斜生栅藻参考波段 $\lambda_0$ 分别为550nm和660nm的散射系数光学模型,如表1所示,给出了铜绿微囊藻的散射光学模型,第一行为参考波段 $\lambda_0$ 分别为550nm和660nm散射系数与浓度的幂函数关系,可以看出具有较高的决定系数,分别达到了0.9789和0.9714,第二行为波长为 $\lambda$ 的散射系数与参考波段散射系数无常数项线性方程斜率 $K(R^2 \geq 0.997)$ 与参数 $a(\lambda_0)/a(\lambda)$ 的幂函数关系, $R^2$ 只有

0.2802, 而与参数  $\lambda_0/\lambda$  具有很好的幂函数关系,  $R^2$  达到了 0.9756, 这主要是由于铜绿微囊藻的散射系数受吸收系数影响较小, 散射系数随波长的增加呈现降低趋势, 如图 8 中的铜绿微囊藻归一化散射系数光谱所示, 因此斜率  $K$  与  $\lambda_0/\lambda$  具有良好的关系.

表 1 铜绿微囊藻散射系数光学模型

Tab. 1 The bio-optical model of scattering coefficient of *Microcystis aeruginosa*

参数	$\lambda_0 = 550\text{nm}$	$R^2$	波段范围	$\lambda_0 = 660\text{nm}$	$R^2$	波段范围
$C_{ph}$	$b(\lambda_0) = 0.13325 C_{ph}^{0.6350}$	$R^2 = 0.9789$		$b(\lambda_0) = 0.13645 C_{ph}^{0.7757}$	$R^2 = 0.9714$	
$a(\lambda_0)/a(\lambda)$	$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.0115 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{-0.1574}$	$R^2 = 0.2802$ (400–750nm)		$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.2921 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{-0.1524}$	$R^2 = 0.3421$ (400–750nm)	
$\lambda_0/\lambda$	$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 0.9789 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.9787}$	$R^2 = 0.9756$ (400–750nm)		$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.0429 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.9781}$	$R^2 = 0.9752$ (400–750nm)	
$\lambda_0/\lambda$	$b(\lambda) = 0.1304384 C_{ph}^{0.6350} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.9787}$		(400–750nm)	$b(\lambda) = 0.1423037 C_{ph}^{0.7757} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.9781}$		(400–750nm)

参考波段  $\lambda_0$  分别为 550nm 和 660nm 的斜生栅藻散射系数光学模型, 参考波段 550nm 和 660nm 的散射系数与叶绿素浓度具有很好的幂函数关系(表 2), 分别达到 0.9446 和 0.9407, 波长为  $\lambda$  的散射系数与参考波段散射系数无常数线性方程斜率  $K$  ( $R^2 \geq 0.999$ ) 与参数  $\lambda_0/\lambda$  相关性较低,  $R^2$  只有 0.1032, 而与参数  $a(\lambda_0)/a(\lambda)$  具有很好的幂函数关系, 参考波段为 550nm 时,  $R^2$  为 0.9107 (400–540nm),  $R^2$  为 0.9864 (540–750nm); 参考波段为 660nm 时,  $R^2$  为 0.9108 (400–540nm),  $R^2$  为 0.986 (540–750nm), 这是由于斜生栅藻的散射系数受吸收系数影响较大, 因此斜生栅藻的散射系数与吸收系数具有强相关性.

表 2 斜生栅藻散射系数光学模型

Tab. 2 The bio-optical model of scattering coefficient of *Scenedesmus obliquus*

参数	$\lambda_0 = 550\text{nm}$	$R^2$	波段范围	$\lambda_0 = 660\text{nm}$	$R^2$	波段范围
$C_{ph}$	$b(\lambda_0) = 6.3367 C_{ph}^{0.3382}$	$R^2 = 0.9446$		$b(\lambda_0) = 4.5085 C_{ph}^{0.3539}$	$R^2 = 0.9407$	
$\lambda_0/\lambda$	$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 0.8914 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{-0.1379}$	$R^2 = 0.1032$ (400–750nm)		$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.1721 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{-0.1394}$	$R^2 = 0.1032$ (400–750nm)	
$a(\lambda_0)/a(\lambda)$	$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.059 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.146}$	$R^2 = 0.9107$ (400–540nm)		$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.1196 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.146}$	$R^2 = 0.9108$ (400–540nm)	
$a(\lambda_0)/a(\lambda)$	$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.0119 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.1867}$	$R^2 = 0.9864$ (541–750nm)		$\frac{b(\lambda)}{b(\lambda_0)} = 1.0141 \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.1866}$	$R^2 = 0.986$ (541–750nm)	
$a(\lambda_0)/a(\lambda)$	$b(\lambda) = 6.7105653 C_{ph}^{0.3382} \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.146}$		(400–540nm)	$b(\lambda) = 5.0477166 C_{ph}^{0.3539} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.146}$		(400–540nm)
$a(\lambda_0)/a(\lambda)$	$b(\lambda) = 6.4121067 C_{ph}^{0.3382} \left( \frac{a(\lambda_0)}{a(\lambda)} \right)^{0.1867}$		(541–750nm)	$b(\lambda) = 4.5720699 C_{ph}^{0.3539} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{0.1866}$		(541–750nm)

### 3 讨论

将铜绿微囊藻和斜生栅藻的吸收系数光学模型与 Bricaud<sup>[2]</sup> 和 HYDROLIGHT<sup>[25]</sup> 提供的光学模型参数相比较, 铜绿微囊藻吸收系数光学模型的幂指数相对最大, 在 540–750nm 达到了  $0.851 \pm 0.03$ , 在 400–540nm 达到了  $0.995 \pm 0.01$ , 斜生栅藻吸收系数光学模型的幂指数相对最小, 在 400–750nm 为  $0.505 \pm 0.01$ , Bricaud 的 0.602 和 HYDROLIGHT 提供的 0.65 介于铜绿微囊藻和斜生栅藻的幂指数之间; 铜绿微囊藻吸收系数光学模型的线性斜率为 0.046473, 斜生栅藻吸收系数光学模型的线性斜率为 0.024055, 而 HYDROLIGHT 提供的 0.06 明显要高于这两个值, Bricaud 的 0.038 介于 0.024055 和 0.046473 之间, 约为这两值的平均值(表 3).

将铜绿微囊藻和斜生栅藻的散射系数光学模型与遥感物理<sup>[26]</sup> 和 HYDROLIGHT 提供的散射光学模型相比(表 4), 参考波段为 550nm 的铜绿微囊藻散射光学模型参数与 HYDROLIGHT 提供的模型参数中的

指数较为相近,但是系数  $j$  有一定的差异, HYDROLIGHT 提供的  $j$  约为铜绿微囊藻的 2.5 倍, 这可能主要是由于 HYDROLIGHT 提供的为藻类散射模型的平均值, 而本文是纯藻类; 斜生栅藻散射系数光学模型参数无论是指数  $n$ 、 $m$  还是系数  $j$  与遥感物理提供的散射光学模型参数完全不相符, 这也许是实验藻类样品的差异所造成的。参考波段为 660nm 的铜绿微囊藻散射光学模型参数中指数参数与 HYDROLIGHT 提供的模型参数较为接近, 但是系数  $j = 0.1304384$  与表层模型系数 0.407 不相符, 但是与全部深度水体中的模型参数 0.187 较为接近, 参考波段为 660nm 的斜生栅藻的散射光学模型参数与参考波段为 550nm 模型参数一样与遥感物理提供的散射光学模型系数完全不相符<sup>[24]</sup>。这说明了藻类的种类、组成以及粒径等的差异, 使得藻类的散射系数光学模型参数具有较大的变异范围, 因而散射系数光学模型在具体应用时需要具有实测数据建立模型参数为依据, 否则计算结果将有较大的误差。

表 3 吸收系数光学模型参数比较

Tab. 3 The compare of bio-optical model's parameters of absorption coefficient

类别	A	B	$R^2$	波段范围
本研究(纯铜绿微囊藻)		$0.995 \pm 0.01$	$R^2 \geq 0.9872$	400–540nm
		$0.851 \pm 0.03$	$R^2 \geq 0.9853$	540–750nm
	0.046473		$R^2 = 0.9232$	400–750nm
本研究(纯斜生栅藻)		$0.505 \pm 0.01$	$R^2 \geq 0.9225$	400–750nm
		0.024055	$R^2 = 0.9196$	400–750nm
	Bricaud	0.038	0.602	
HYDROLIGHT	0.06	0.65		

表 4 散射系数光学模型参数比较

Tab. 4 The compare of bio-optical model's parameters of scattering coefficient

类别	参数	$\lambda_0$	$j$	$n$	$m$	备注
本研究(纯铜绿微囊藻)	$C_{ph}, \lambda_0/\lambda$	550nm	0.1304384	0.6350	0.9787	(400–750nm)
		660nm	0.1423037	0.7757	0.9781	(400–750nm)
本研究(纯斜生栅藻)	$C_{ph}, a(\lambda_0)/a(\lambda)$	550nm	6.7105653	0.3382	0.146	(400–540nm)
		660nm	5.0477166	0.3539	0.146	(400–540nm)
	$C_{ph}, a(\lambda_0)/a(\lambda)$	550nm	6.4121067	0.3382	0.1867	(541–750nm)
		660nm	4.5720699	0.3539	0.1866	(541–750nm)
遥感物理 <sup>[24]</sup>	$C_{ph}, a(\lambda_0)/a(\lambda)$	550nm	0.12	0.63	1	
		550nm	0.3	0.62	1	(Gordon-Morel)
HYDROLIGHT	$C_{ph}, \lambda_0/\lambda$	660nm	0.407	0.795	1	(Loisel-Morel 表层)
		660nm	0.187	0.751	1	(Loisel-Morel 平均)

实验同时表明大粒径、高浓度的藻类的包裹效应要远远大于小粒径、低浓度的藻类, 以实验方式佐证了 Morel 和 Bricaud 理论研究结果; 不同藻类吸收系数具有较为相似的 P-L 模型形式, 但是模型的参数具有较大的差异, 粒径相对较小的铜绿微囊藻的吸收系数模型线性斜率和幂指数都要大于粒径相对较大的斜生栅藻的吸收系数模型。

本实验给出了铜绿微囊藻和斜生栅藻的吸收系数和散射系数光学模型, 与国外研究结果相比较, 说明不同的藻类以及混合藻类具有不同的吸收系数和散射系数光学模型。在实际应用中由于藻类以及混合藻类组合的空间和时间的差异性, 使得其光学模型具有较大的时空变异性, 因而在应用不同空间和时间的光学模型时, 应该先验证该光学模型在应用区是否适用。如在应用光学辐射传输软件 HYDROLIGHT 第五模块时应该注意, 该模型中的光学模型参数应该应用实验测量数据的建模参数, 而不能应用模型的默认平均参数值, 否则将产生较大的误差。但由于本研究缺少一定数量的平行样, 实验的结果仍需进一步的验证; 同时由于本实验缺少混合藻类的吸收系数和散射系数数据, 难以建立混合藻类的吸收系数和散射系数光学模型; 若用不同藻类的吸收和散射光学模型的加权组合, 则难以确定混合藻类中不同藻类的权重值, 因此下一步

的实验研究重点将落在混合藻类吸收和散射系数光学模型方面。

#### 4 参考文献

- [1] Loisel H, Morel A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination. *Limnol & Oceanogr*, 1998, **43**(5):847-858.
- [2] Bricaud A, Marcel Babin. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **7**(100):13321-13332.
- [3] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. *Limnol & Oceanogr*, 1990, **35**(3):562-582.
- [4] Morel A, Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep Sea Research*, 1981, **28**:1375-1393.
- [5] Morel A. Chlorophyll-specific scattering coefficient of phytoplankton: A simplified theoretical approach. *Deep Sea Research*, 1987, **34**(7): 1093-1105.
- [6] Morel A, Yu-Hwan Ahn. Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: A tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells. *Journal of Marine Research*, 1991, **49**:177-202.
- [7] Morel A, Ahn YH. Optical efficiency factors of free-living marine bacteria: Influence of bacterioplankton upon the optical properties and particulate organic carbon in oceanic waters. *Journal of Marine Research*, 1990, **48**:145-175.
- [8] Berthon JF, Morel A. Validation of a spectral light-photosynthesis model and use of the model in conjunction with remotely sensed pigment observations. *Limnol & Oceanogr*, 1992, **37**(4):781-796.
- [9] Diehl P, Haardt H. Measurement of the spectral attenuation to support biological research in a "plankton tube" experiment. *Oceanologia*, 1980, **3**:89-96.
- [10] Kenneth J Voss. A spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas. *Limnol & Oceanogr*, 1992, **37**(3):501-509.
- [11] Stramski D, Morel A. Optical properties of photosynthetic picoplankton in different physiological states as affected by growth irradiance. *Deep Sea Research*, 1990, **137**(2):245-266.
- [12] 张前前, 王磊, 壴淑河等. 浮游植物吸收光谱特征分析. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(9):1676-1680.
- [13] Stramski D, Morel A, Bricaud A et al. Modeling the light attenuation and scattering by spherical phytoplanktonic cell: a retrieval of the bulk refractive index. *Applied Optical*, 1988, **27**:3954.
- [14] Gould RW. Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 water. *Applied Optical*, 1999, **48**(2):843-859.
- [15] 张晓峰, 孔繁翔, 曹焕生. 太湖梅梁湾水华蓝藻复苏过程的研究. 应用生态学报, 2005, **16**(7):1346-1350.
- [16] 江耀慈, 丁建清, 张虎军. 太湖藻类状况分析. 江苏环境科技, 2001, **14**(1):30-31.
- [17] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004:209.
- [18] <http://www.whlib.ac.cn/shuihua/xianggyj/ktz1-04.asp>.
- [19] Moore C, Barnard A, Hankins D et al. Spectral absorption and attenuation meter (ac-s) user's guide, Revision A. America: WET Labs Inc, 2004:5-20.
- [20] Mueller JL, Fargion GS, Zaneveld RV et al. Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation. Revision 4. Volume, IVNASA, 2003.
- [21] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差探讨. 湖泊科学, 2006, **18**:550-552.
- [22] Roessler C. Theoretical and experimental approaches to improve the accuracy of particulate absorption coefficients derived from the quantitative filter technique. *Limnol & Oceanogr*, 1998, **43**: 1649-1660.
- [23] Tassan S, Ferrari GM, Bricaud A et al. Variability of the amplification factor of light absorption by filter retained aquatic particles in the coastal environment. *Journal of Plankton Research*, 2000, **22**(4):659-668.
- [24] Morel A, Bricaud A. Inherent optical properties of algal cells including picoplankton: theoretical and experimental results. France: University pierre et Marie Curie-CNRS, 1991, UA 353 Bp8 F06230.
- [25] Mobley CD, Sundman LK. HYDROLIGHT4.2 Technical documentation. Second Printing, 2001.
- [26] 徐希孺. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 2005.