

# 基于高光谱吸收特征参数以及光谱吸收指数的藻类叶绿素 a 反演分离模型研究

张俊<sup>1</sup>, 沈亚婷<sup>2</sup>, 王学军<sup>1\*</sup>

(1.北京大学城市与环境学院地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871; 2.国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要:**利用 ASD 地物光谱仪对不同浓度下小球藻、聚球藻及其混合藻的反射光谱进行测量,得到 3 组藻类在不同叶绿素 a(Chl-a)浓度下的反射光谱,同时进行了 Chl-a 浓度测量。利用 Matlab 软件神经网络模型中的径向基函数对得到的高光谱数据进行高光谱曲线拟合,在拟合结果基础上,提取小球藻在 652 nm 处、聚球藻在 609 nm 处以及混合藻在 652 nm 和 609 nm 处的光谱吸收指数(Spectral Absorption Feature Parameter,SAFP)建立了两种单一藻类的定量模型,单一小球藻 Chl-a 最优定量模型为吸收峰深度模型  $\text{Chl-a}=10.059e^{713.97H}$ ,聚球藻的 Chl-a 最优定量模型为吸收峰斜率模型  $\text{Chl-a}=3\times 10^{12}K^2+1\times 10^7K+56.555$ 。并在对两种单一藻类的定量模型研究基础上用光谱吸收指数对该两种藻的混合藻进行了 Chl-a 浓度分离。通过对比模型计算结果的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),除吸收峰对称度模型分离结果不太理想外,吸收峰深度分离模型、吸收峰斜率分离模型、吸收峰光谱吸收指数(SAI)分离模型的分离结果都很好,分离效果最好的为 SAI 分离模型。

**关键词:**叶绿素;高光谱;光谱吸收特征参数;光谱吸收指数;小球藻;聚球藻

中图分类号:X830.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)08-1622-08

## Hyperspectral Quantitative Models for Chlorophyll-a of Algae Based on Spectral Absorption Feature Parameters and Spectral Absorption Index

ZHANG Jun<sup>1</sup>, SHEN Ya-ting<sup>2</sup>, WANG Xue-jun<sup>1\*</sup>

(1.Laboratory of Earth Surface Processes, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

**Abstract:**Based on the hyperspectral remote sensing, the hyperspectral characteristic of *Chlorella vulgaris*, *Synechococcus sp* and their mixed algae were obtained by using the ASD HandHeld Spec. The concentrations of Chl-a for the three groups of algae were measured. Radial basis function of neural network technique was used to fit the curve of algae. The fitted spectral values were used to calculate the spectral absorption feature parameter(SAFP). The SAFP of *Chlorella vulgaris* at 652 nm and *Synechococcus sp* at 609 nm were used to establish the quantitative models of Chl-a. The optimal hyperspectral model of *Chlorella vulgaris* was  $\text{Chl-a}=10.059e^{713.97H}$  using the depth of SAFP, and the optimal hyperspectral model of *Synechococcus sp* was  $\text{Chl-a}=3\times 10^{12}K^2+1\times 10^7K+56.555$  using the slope of SAFP. Based on the models of two individual algae, the SAFP separation models were created to separate the mixed algae. The results of root mean square(RMSE) demonstrated that except the absorption peak symmetry separation model, the other SAFP separation models could get good results, and the best was spectral absorption index separation model.

**Keywords:**chlorophyll-a; hyperspectral; spectral absorption feature parameters; spectral absorption index; *Chlorella vulgaris*; *Synechococcus sp*

高光谱分辨率遥感是指利用很多很窄的电磁波段从感兴趣的物体获取有关数据,包括成像光谱和

非成像光谱两类<sup>[1]</sup>。高光谱技术已被应用到如内陆湖泊叶绿素(Chl-a)检测<sup>[2-3]</sup>,湖泊、河口富营养化评价<sup>[4]</sup>,赤潮爆发预警<sup>[5]</sup>等水生生物监测中。地物光谱曲线反映了地物的吸收和反射特征,不同的地物通常有着不同的光谱波形特征。因此,从光谱曲线中提取的光谱吸收特征参数可以用来对地物进行识别和分类。现有研究中光谱特征参数和光谱吸收指数等的应用多见

收稿日期:2011-01-08

基金项目:国家杰出青年科学基金(40525003)

作者简介:张俊(1985—),男,湖北松滋人,硕士研究生,主要从事水环境科学研究。E-mail:u-zhang@163.com

\* 通讯作者:王学军 E-mail:xjwang@urban.pku.edu.cn

于矿物填图与识别的遥感应用中。Meer 等<sup>[6]</sup>通过研究美国 Cuprite 矿区的 AVIRIS 遥感数据发现, 吸收峰的位置、深度与矿物的化学成分有着很强的相关性, 研究区域的吸收特征参数分布图能够增强遥感数据对表面物质的组成分布的分析能力。王晋年等<sup>[7]</sup>利用光谱吸收指数(SAI)对哈图金矿区的 FIMS 图像、澳大利亚 Rum Jungle 铀矿区的 MAIS 航空图像、塔里木盆地阿克苏西部的 GERIS 图像的分析表明, 利用 SAI 可以从成像光谱图像中有效提取光谱吸收特征信息, 进行矿物识别与填图。阮伟利等<sup>[8]</sup>利用波深中心归一化和波深面积归一化的光谱形式, 利用统计分析的方法, 分析了叶片叶绿素与其光谱特征特征的统计关系。而光谱特征参数在水体藻类叶绿素 a 浓度反演中尚未见到应用, 本研究在此方面开展尝试性研究工作。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻类培养

在巢湖藻类生态群落中, 绿藻和蓝藻占据着相当大的比重, 分别为 42.3% 和 15.4%<sup>[9]</sup>。滇池中的浮游藻类也以蓝藻和绿藻为优势类群, 两者数量占藻类总量的 90% 以上<sup>[10]</sup>。不仅在上述容易发生水华的典型水体中蓝藻、绿藻占有绝对优势, 很多研究表明在其他水体如江苏太湖<sup>[11]</sup>、北京密云水库<sup>[12]</sup>中也主要是蓝藻和绿藻。所以根据水华的优势藻种, 本研究选择绿藻门的小球藻(*Chlorella vulgaris*)和蓝藻门的聚球藻(*Synechococcus sp*)进行研究。

两种藻类都采用 BG11 作为培养基, 取适量藻类原种接种于高温灭菌后的 50 mL 三角瓶中。置于温度为 25 ℃、光照强度为 2 000 lx 恒温光照培养箱中。持续光照 10 d 左右待藻类浓度增加后逐级扩大到 250 mL、1 L、5 L 的三角瓶中继续培养获得大量藻液。

### 1.2 室内高光谱测量和 Chl-a 浓度测量实验

#### 1.2.1 实验使用的仪器

用 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 地物光谱仪测量水体的反射光谱。光谱仪具体规格如下: 波段测量范围为 325~1 075 nm, 共 512 个波段, 光谱采样间隔为 3.5 nm, 视场角为 25°, 光谱仪配合 3.5° 视场角枪头使用。用 Chl-a 浓度来表征藻类浓度, Chl-a 浓度用 752 型紫外分光光度计, 测定波长范围为 200~800 nm。

#### 1.2.2 实验过程和实验数据

在室外进行高光谱测量时, 短时间内自然光源会发生较大的变化, 并且由于风等其他环境因素可能会影响水面的波动状态, 直接影响到光谱的测量结果,

为了得到更加稳定的高光谱数据, 避免环境中不确定因素的干扰, 选择在室内进行光谱数据的测量。

共进行了 3 次藻类反射光谱 Chl-a 浓度的测量实验, 第 1 次测小球藻, 第 2 次测聚球藻, 第 3 次测小球藻和聚球藻的混合藻。光谱仪、光源和盛放藻类容器的空间分布参照 Bale 等对悬浮颗粒物的光谱测量研究来进行设置<sup>[13]</sup>, 见图 1。藻类浓度控制见文献<sup>[14]</sup>。实验所用光源为光谱仪器套件中自带的专门用于光谱测量的直流电灯泡, 功率为 50 W。测量时尽量在实验室暗处进行, 避免实验室其他光源的干扰, 同时在实验所用桶的内壁喷上黑色哑光漆来降低桶壁反射光的影响。测单一藻的反射光谱时, 先在桶中加满清水, 再逐渐加入藻。每加一次藻搅拌均匀后测多条光谱, 并采样进行 Chl-a 浓度测量。测混合藻的方法与单一藻相同。在加入藻时, 为了使两种藻的浓度有更多的不同比例, 在装满清水的桶中先加入聚球藻, 然后多次加入小球藻, 待混合藻反射光谱形状发生明显变化时再多次加入聚球藻, 最后再多次加入小球藻。

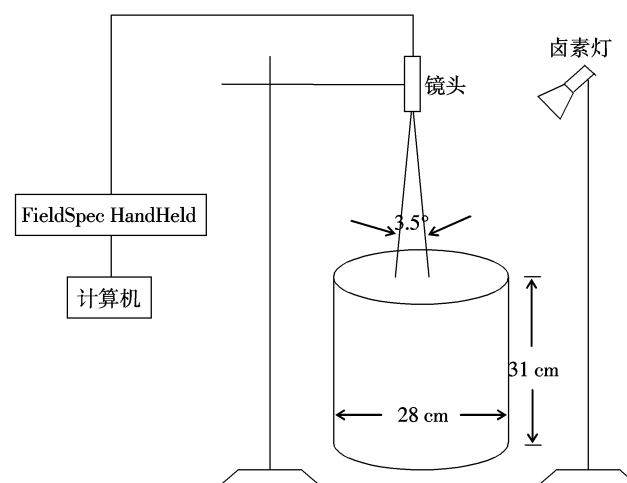


图 1 室内试验设计示意图

Figure 1 Design of experiment in lab

藻类水样采集与水体反射光谱采集同时进行, 每加一次藻搅拌均匀后测多条光谱再在距水面 20 cm 深处对水样进行采集。为提高藻类水样后处理速率, 在藻类浓度较小时取 500 mL 水样, 浓度较大时取 200 mL 水样。采样后立即用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜真空抽滤采集到的水样, 用铝箔纸包裹带有藻类的滤膜置于黑色塑料袋中。

采用林少君等提出的反复冻融—浸提法<sup>[15]</sup>浸提 Chl-a。在 -20 ℃ 和室温下将装有抽滤后水样滤膜的黑色塑料袋反复冻融 3~5 次, 然后把滤膜剪碎置于装有

10 mL 浓度为 90% 的丙酮中振摇 1 min, 置于 4 ℃ 的冰箱中浸提 20 h, 浸提期间需振摇 1~2 次。用分光光度计测量 750、663、645 nm 和 630 nm 波长处的吸光度, 用《环境监测技术规范(生物监测部分)》<sup>[16]</sup>中所推荐的三色法来计算 Chl-a 浓度( $Ca$ )。计算公式为:

$$Ca = [11.64(D_{663} - D_{750}) - 2.16(D_{645} - D_{750}) + 0.10(D_{630} - D_{750})] V_1 / V \delta$$

式中:  $D_{750}$ 、 $D_{663}$ 、 $D_{645}$  和  $D_{630}$  分别为 750、663、645 nm 和 630 nm 波长处的吸光度,  $V_1$  为浸提 Chl-a 时的定容体积(mL);  $V$  为所采水样体积(L);  $\delta$  为比色皿厚度(cm)。

### 1.3 数据处理方法

利用 Matlab 神经网络模型中的径向基函数对 3 组藻类的反射光谱数据进行光谱特征参数提取。模型拟合结果见文献<sup>[14]</sup>。通过 3 组藻类光谱测量曲线与神经网络曲线可以看出, 相对于光谱的原始测量数据, 拟合后的高光谱反射率数据保留并表现出两种藻类的光谱特征, 可更好地反映不同浓度间的光谱特征差异, 所以在本研究中直接使用拟合后的反射光谱值计算光谱吸收特征参数并进行 Chl-a 浓度反演分离的计算。

地物光谱曲线反映了地物的吸收和反射特征, 矿物在可见、近红外、短波红外光谱范围内, 由于过渡元素的电子跃迁、水分子、碳酸根、硫酸根等分子团的分子振动, 存在着精细的光谱吸收特征, 这些光谱吸收特征可用吸收峰波长位置、吸收峰深度、吸收峰宽度、吸收峰斜率和吸收峰对称度来进行定量描述。因此, 从光谱曲线中提取的光谱吸收特征参数可以用来对地物进行识别和分类。主要的光谱吸收特征参数量化如下<sup>[17]</sup>:

吸收峰的波长位置( $P$ ): 光谱最小值的对应波长位置。

吸收峰的深度( $H$ ): 光谱吸收峰的相对深度。

吸收峰的宽度( $W$ ): 吸收峰的宽度可简单定义为  $(\lambda_e - \lambda_s)$ ,  $\lambda_s$  为吸收峰起始点,  $\lambda_e$  为吸收峰终点。也有研究将吸收峰宽度定为波段深度一半处的宽度<sup>[18]</sup>。

吸收谱带斜率( $K$ ): 用角度  $\theta$  表示,  $\theta = \tan^{-1}[(R_e - R_s)/(\lambda_e - \lambda_s)]$ 。其中  $R_e$  为吸收终点的反射率值,  $R_s$  为吸收起点的反射率值。

吸收峰的对称度( $S$ ):  $S = A_L/A$ 。其中  $A_L$  为吸收峰左半端的面积。  $A$  为吸收峰的整体面积。

$SAI = [S \cdot R_s + (1 - S) \cdot R_e] / R_P$ 。式中  $R_P$  为吸收点  $P$  的反射率。

## 2 结果与讨论

从 3 组藻类的高光谱神经网络拟合曲线(图 2)中可看出, 拟合后的光谱曲线仍然表现出藻类光谱在 550、685 nm 和 820 nm 处的反射峰和 440、670 nm 处的波谷, 而聚球藻由于含有藻蓝素, 在 620 nm 附近有 1 个吸收峰。混合藻由于两种藻类光谱的叠加使得 620 nm 处吸收峰没有单一聚球藻吸收峰明显。

小球藻选择吸收波长位置( $P$ )为 652 nm 处, 波段范围为 543~686 nm, 吸收峰宽度( $W$ )为 143 nm 的吸收峰。

聚球藻选择吸收波长位置( $P$ )为 609 nm 处, 波段范围为 541~653 nm, 吸收峰宽度( $W$ )为 112 nm 的吸收峰。

### 2.1 单一藻类的光谱吸收特征参数(Spectral Absorption Feature Parameter)Chl-a 浓度反演

#### 2.1.1 吸收峰深度模型

用一次函数, 二次函数, 指数函数拟合小球藻 652 nm 处吸收峰深度与 Chl-a 浓度的模型分别为(图 3):

$$Ca = 61.198H - 56.456 \quad (R^2 = 0.863)$$

$$Ca = 2 \times 10^7 H^2 - 38.427H + 37.2 \quad (R^2 = 0.9635)$$

$$Ca = 10.059e^{713.97H} \quad (R^2 = 0.9905)$$

用一次函数, 二次函数, 指数函数拟合聚球藻 652 nm 处吸收峰深度与 Chl-a 浓度的模型分别为(图 4):

$$Ca = 347.373H - 46.452 \quad (R^2 = 0.9159)$$

$$Ca = 3 \times 10^8 H^2 - 62.825H + 47.341 \quad (R^2 = 0.9559)$$

$$Ca = 28.948e^{2496.4H} \quad (R^2 = 0.9771)$$

对于两种单一藻类的吸收峰深度模型, 指数模型反演效果最好, 其次是二次函数、一次函数。相对于两种线性函数, 指数函数的  $R^2$  值均有较大的提高。

#### 2.1.2 吸收峰斜率模型

用一次函数, 二次函数, 指数函数拟合小球藻 652 nm 处吸收峰斜率与 Chl-a 浓度的模型分别为(图 5):

$$Ca = 8 \times 10^6 K - 31.071 \quad (R^2 = 0.8472)$$

$$Ca = 4 \times 10^{11} K^2 - 4 \times 10^6 K + 25.664 \quad (R^2 = 0.964)$$

$$Ca = 13.246e^{97802K} \quad (R^2 = 0.9891)$$

用一次函数, 二次函数, 指数函数拟合聚球藻 652 nm 处吸收峰斜率与 Chl-a 浓度的模型分别为(图 6):

$$Ca = 4 \times 10^7 K + 47.86 \quad (R^2 = 0.9473)$$

$$Ca = 3 \times 10^{12} K^2 + 1 \times 10^7 K + 56.555 \quad (R^2 = 0.9896)$$

$$Ca = 57.694e^{254.574K} \quad (R^2 = 0.9838)$$

对于吸收峰斜率模型, 指数函数对小球藻反演效

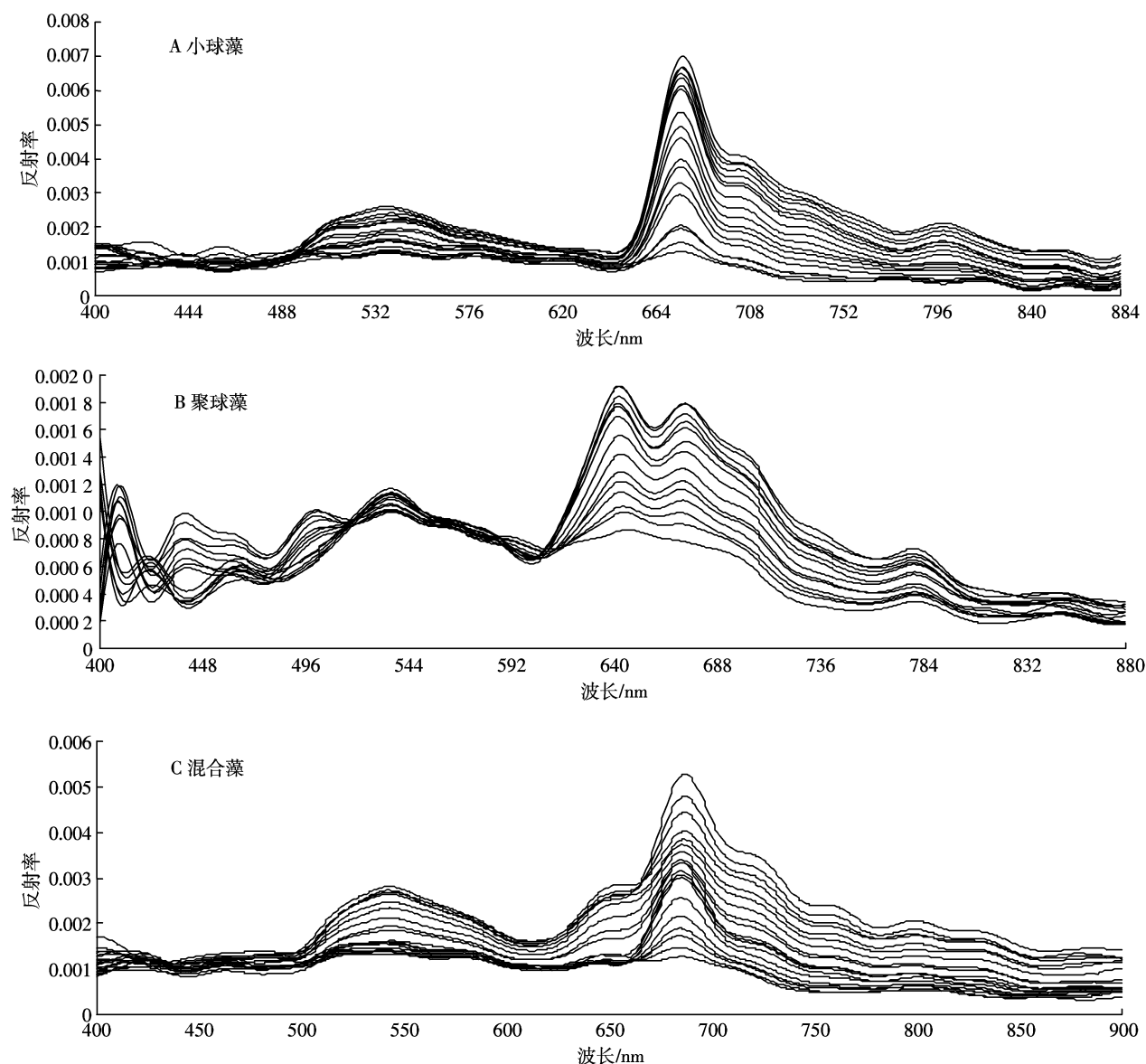


图2 小球藻、聚球藻和混合藻的高光谱神经网络拟合曲线

Figure 2 Hyperspectral curve fitting of *Chlorella vulgaris*, *Synechococcus sp* and mixed algae using neural network

果最好,其次是二次函数和一次函数。指数函数与二次函数拟合结果的  $R^2$  相差不大,但要远高于一次函数。而二次函数对聚球藻反演效果最好,其次是指数函数和一次函数。但二次函数和指数函数拟合结果的  $R^2$  值相差不大。

### 2.1.3 吸收峰对称度模型

用一次函数,二次函数,指数函数拟合小球藻 652 nm 处吸收峰对称度与 Chl-a 浓度的模型分别为 (图 7):

$$Ca=11\,173S-7\,970.7 \quad (R^2=0.454\,3)$$

$$Ca=900\,159S^2-1\times 10^6S+459\,163 \quad (R^2=0.532\,2)$$

$$Ca=9\times 10^{-48}e^{155.69S} \quad (R^2=0.739\,3)$$

用一次函数,二次函数,指数函数拟合聚球藻 652 nm 处吸收峰对称度与 Chl-a 浓度的模型分别为 (图 8):

$$Ca=3\,776.2S-1\,879.2 \quad (R^2=0.714)$$

$$Ca=32\,945S^2-31\,409S+7\,495.7 \quad (R^2=0.759\,4)$$

$$Ca=2\times 10^{-5}e^{29.037S} \quad (R^2=0.872\,1)$$

两种藻类的吸收峰对称度模型也表现出指数模型拟合效果优于二次函数和一次函数。但小球藻一次函数和二次函数拟合模型的  $R^2$  值很小,不能达到很好的反演效果,即使是指数函数,模型拟合的  $R^2$  值也不高。聚球藻 3 种函数的吸收峰深度对称度模型虽然相对较好,但  $R^2$  值仍然不高。

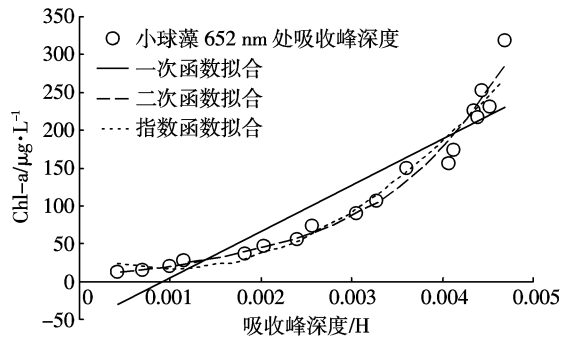


图 3 小球藻 652 nm 处吸收峰深度与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 3 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (652 nm depth)

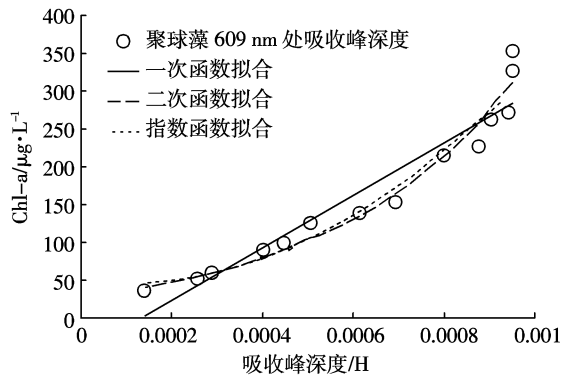


图 4 聚球藻 609 nm 处吸收峰深度与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 4 Curve fitting for Chl-a of *Synechococcus sp* (609 nm depth)

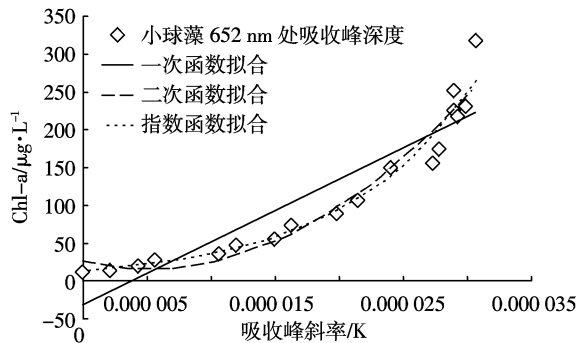


图 5 小球藻 652 nm 处吸收峰斜率与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 5 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (652 nm slope)

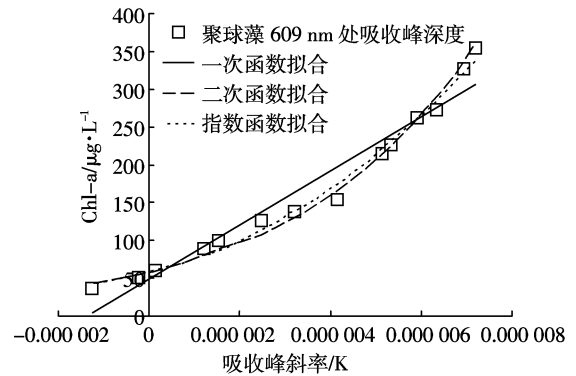


图 6 聚球藻 609 nm 处吸收峰斜率与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 6 Curve fitting for Chl-a of *Synechococcus sp* (609 nm slope)

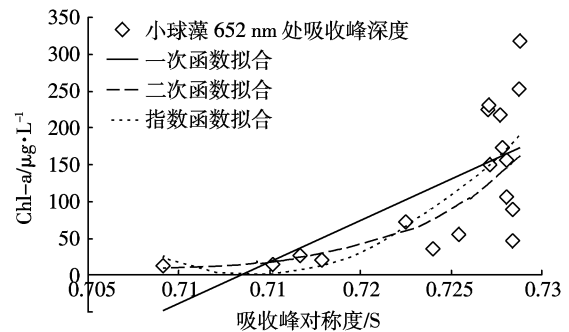


图 7 小球藻 652 nm 处吸收峰对称度与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 7 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (652 nm symmetry)

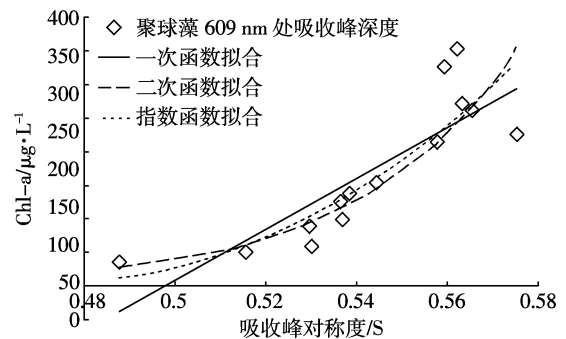


图 8 聚球藻 609 nm 处吸收峰对称度与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 8 Curve fitting for Chl-a of *Synechococcus sp* (609 nm symmetry)

#### 2.1.4 光谱吸收指数(SAI)模型

用一次函数,二次函数,指数函数拟合小球藻 652 nm 处吸收峰光谱吸收指数与 Chl-a 浓度的模型分别为(图 9):

$$Ca=143.41SAI-258.02 \quad (R^2=0.6519)$$

$$Ca=129.22SAI^2-481.17SAI+454.16 \quad (R^2=0.7577)$$

$$Ca=0.5714e^{1.8679SAI} \quad (R^2=0.9269)$$

用一次函数,二次函数,指数函数拟合聚球藻 652 nm 处吸收峰光谱吸收指数与 Chl-a 浓度的模型

分别为(图 10):

$$Ca=256.08SAI-302.17 \quad (R^2=0.9019)$$

$$Ca=147.11SAI^2-274.47SAI+155.44 \quad (R^2=0.9267)$$

$$Ca=4.5649e^{1.8454SAI} \quad (R^2=0.9675)$$

同样,光谱吸收指数模型也表现出指数函数模型反演效果优于二次函数和一次函数模型的特点。并且对于小球藻,指数函数拟合结果的  $R^2$  值要明显好于两个线性函数。

小球藻 4 种光谱吸收特征参数与 Chl-a 浓度的

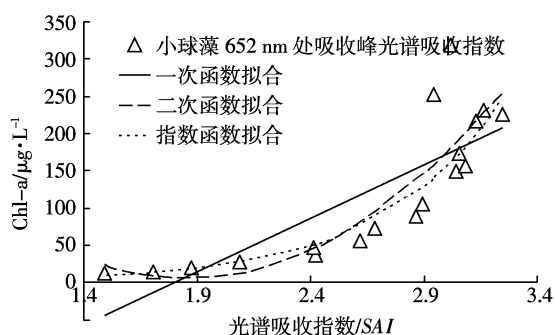


图9 小球藻 652 nm 处吸收峰 SAI 与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 9 Curve fitting for Chl-a of *Chlorella vulgaris* (652 nm SAI)

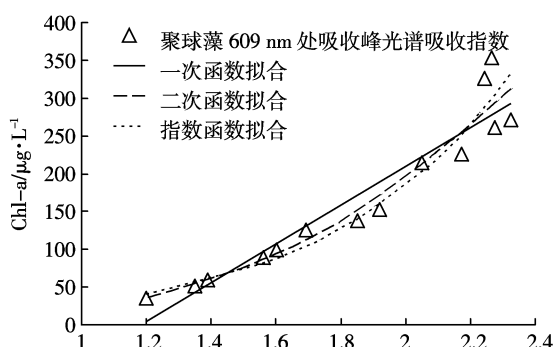


图10 聚球藻 609 nm 处吸收峰 SAI 与 Chl-a 浓度的曲线拟合  
Figure 10 Curve fitting for Chl-a of *Synechococcus sp* (609 nm SAI)

拟合模型中,利用吸收峰深度( $H$ )拟合的模型拟合度最好( $R^2=0.9905$ ),而利用对称度( $S$ )拟合的模型拟合度相对较差( $R^2=0.7393$ )。小球藻的吸收峰深度模型和吸收峰斜率模型(二次函数形式)的 $R^2$ 值也能达到0.96以上,并且拟合度更好的指数函数模型的 $R^2$ 值能达到0.99,具有更好的拟合度。利用SAI建立的指数模型也具有较好的拟合效果。

聚球藻4种光谱吸收特征参数与Chl-a浓度的拟合模型中,利用吸收峰斜率( $K$ )拟合的模型拟合度最好( $R^2=0.9896$ ),而利用对称度( $S$ )拟合的模型拟合度相对较差( $R^2=0.8721$ )。聚球藻的吸收峰深度模型、吸收峰斜率模型和SAI模型(一次函数形式)的 $R^2$ 值在0.9以上。除了利用吸收峰对称度模型外,其余的光谱吸收特征参数模型均表现出较好的拟合效果,并且二次函数和指数函数形式具有更好的拟合度。

## 2.2 利用光谱吸收特征参数的混合藻 Chl-a 分离模型

混合藻的光谱吸收特征参数参照两种单一藻类光谱吸收特征参数进行选取和计算。分别选择在652 nm处,波段范围为543~686 nm和609 nm处,波段范围为541~653 nm的吸收特征参数。

### 2.2.1 吸收峰深度分离模型

通常光谱分离处理的方法首先假定各峰成分可用特定的解析函数来表示,并且假定光谱曲线是由这些函数线性叠加而成的,反过来,可用曲线拟合的方法从光谱曲线中分离出这些解析函数,用这些解析函数的系数与物质粒子的浓度建立关系式,然后利用这个关系式求出物质粒子的浓度<sup>[19]</sup>。

由于单一小球藻652 nm处吸收峰和聚球藻609 nm处吸收峰的吸收深度拟合模型中拟合度最好的模型均为指数模型,所以设定分离模型的方程组为:

$$h_{652}=k_{c1} \cdot \ln(chl_c)+k_{s1} \cdot \ln(chl_s)+c_1$$

$$h_{609}=k_{c2} \cdot \ln(chl_c)+k_{s2} \cdot \ln(chl_s)+c_2$$

式中: $chl_c$ 和 $chl_s$ 分别为混合藻中小球藻和聚球藻的叶绿素-a浓度; $h_{652}$ 和 $h_{609}$ 分别为混合藻中652 nm和609 nm处吸收峰的吸收深度。

采用间隔取样的方法,每隔两个浓度选取1个样本建立模型,所以在建模中选取混合藻中样品号为3、6、9、12、15、18号样本,总共6个建模样本值计算出方程组的系数和常量:

$$k_{s1}=-0.00032 \quad k_{c1}=0.00088 \quad c_1=-0.00132$$

$$k_{s2}=0.00048 \quad k_{c2}=-0.000092 \quad c_2=-0.00112$$

分离结果中小球藻和聚球藻的6个建模样本的RMSE分别为25.71和7.44。全部19组验证样本的RMSE分别为43.52、9.58。

### 2.2.2 吸收峰斜率分离模型

同理,由于单一小球藻652 nm处吸收峰和聚球藻609 nm处吸收峰的斜率拟合模型中拟合度最好的模型分别为指数模型和二次函数模型,所以设定分离模型的方程组为:

$$k_{652}=k_{c1} \cdot \ln(chl_c)+k_{s1} \cdot \ln(chl_s)+c_1$$

$$k_{609}=k_{c2} \cdot \ln(chl_c)+k_{s2} \cdot \sqrt{chl_s}+c_2$$

$k_{652}$ 和 $k_{609}$ 为混合藻中652 nm和609 nm处吸收峰的斜率。采用同样的抽样方式从混合藻中部分样本值计算出方程组的系数和常量:

$$k_{s1}=-0.000000024 \quad k_{c1}=-0.0000057$$

$$c_1=-0.000016 \quad k_{s2}=0.00000049$$

$$k_{c2}=-0.0000019 \quad c_2=0.000002$$

分离结果中小球藻和聚球藻的6个建模样本的RMSE分别为13.69和37.24。全部19组验证样本的RMSE分别为30.67、36.70。

### 2.2.3 吸收峰对称度模型

由于单一小球藻652 nm处吸收峰和聚球藻609

nm 处吸收峰的对称率拟合模型中拟合度最好的模型均为指数模型,所以设定分离模型的方程组为:

$$s_{652}=k_{c1} \cdot \ln(chl_c)+k_{s1} \cdot \ln(chl_s)+c_1$$

$$s_{609}=k_{c2} \cdot \ln(chl_c)+k_{s2} \cdot \ln(chl_s)+c_2$$

$s_{652}$  和  $s_{609}$  为混合藻中 652 nm 和 609 nm 处吸收峰的对称率。采用同样的抽样方式从混合藻中部分样本值计算出方程组的系数和常量:

$$k_{s1}=0.041 \quad k_{c1}=-0.034 \quad c_1=0.76$$

$$k_{s2}=-0.0095 \quad k_{c2}=0.046 \quad c_2=0.37$$

分离结果中小球藻和聚球藻的 6 个建模样本的 RMSE 分别为 48.07 和 43.58。全部 19 组验证样本的 RMSE 分别为 110.70、82.03。

#### 2.2.4 光谱吸收指数分离模型

由于单一小球藻 652 nm 处吸收峰和聚球藻 609 nm 处吸收峰的对称率拟合模型中拟合度最好的模型均为指数模型,所以设定分离模型的方程组为:

$$s_{652}=k_{c1} \cdot \ln(chl_c)+k_{s1} \cdot \ln(chl_s)+c_1$$

$$s_{609}=k_{c2} \cdot \ln(chl_c)+k_{s2} \cdot \ln(chl_s)+c_2$$

$s_{652}$  和  $s_{609}$  为混合藻中 652 nm 和 609 nm 处吸收峰的对称率。采用同样的抽样方式从混合藻中部分样本值计算出方程组的系数和常量:

$$k_{s1}=0.041 \quad k_{c1}=-0.034 \quad c_1=0.76$$

$$k_{s2}=-0.0095 \quad k_{c2}=0.046 \quad c_2=0.37$$

分离结果中小球藻和聚球藻的 6 个建模样本的 RMSE 分别为 12.81 和 9.95。全部 19 组验证样本的 RMSE 分别为 19.94、21.79。

实测值与 4 种模型对小球藻和聚球藻分离结果计算值对应图见图 11 和图 12。

比较 4 种光谱吸收特征参数模型,除吸收峰对称度模型分离结果的 RMSE 较大外,另外 3 个模型分离结果的 RMSE 都较小,达到了较好的分离效果,分离效果最好的为 SAI 分离模型。相对于利用传统的三波段比值和两波段比值建立的 Chl-a 分离模型,利用光谱吸收特征参数建立的 Chl-a 分离模型也能较好的达到分离效果。特别是利用光谱吸收指数建立的 Chl-a 分离模型结果最好,小球藻和聚球藻的 RMSE 分别为 19.94、21.79,均小于利用三波段比值和两波段比值分离结果的 RMSE。

### 3 结论

(1)光谱吸收特征参数的单一藻类 Chl-a 反演模型结果表明,地质遥感中的光谱吸收特征参数能够较好的应用于水体藻类叶绿素 a 浓度反演模型。两种单

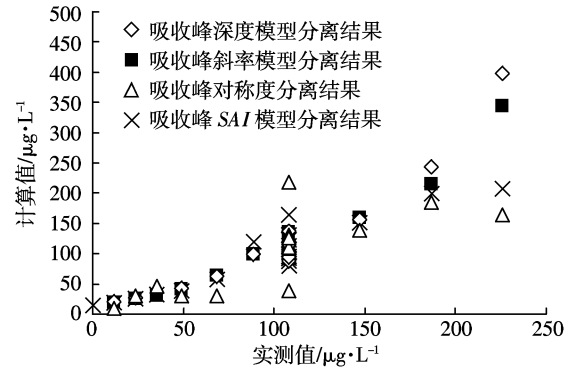


图 11 小球藻 Chl-a 浓度实测值与计算值对应图

Figure 11 Measured and calculated Chl-a concentrations of *Chlorella vulgaris*

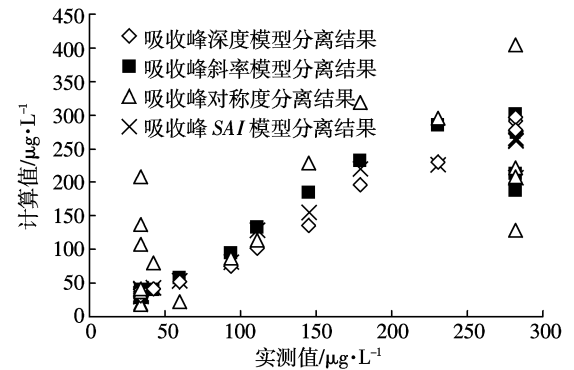


图 12 聚球藻 Chl-a 浓度实测值与计算值对应图

Figure 12 Measured and calculated Chl-a concentrations of *Synechococcus* sp

一藻类的吸收特征参数模型中,除吸收峰对称度模型外,其余 3 种模型均能较好的对叶绿素 a 浓度进行反演。小球藻吸收峰深度模型拟合度最好,聚球藻吸收峰斜率模型拟合度最好。

(2)利用地质遥感中的光谱吸收特征参数建立的分离模型中,SAI 分离模型分离效果最好,其次为吸收峰深度分离模型和吸收峰斜率分离模型,而吸收峰对称度分离模型误差较大。

#### 参考文献:

- [1] 浦瑞良, 宫 鹏, 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.  
PU Rui-liang, GONG Peng. Hyperspectral remote sensing and its application[M]. Beijing: High Education Press, 2000.
- [2] Kutser T, Arst H, Mäekivi S, et al, Estimation of the water quality of the Baltic Sea and lakes in Estonia and Finland by passive optical remote sensing measurements on board vessel[J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1998, 3(1):53-66.
- [3] Koponen S, Pulliainen J, Servomaa H, et al, Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring in Finnish

- lakes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268(1-3):95-106.
- [4] Vos R, Hakvoort J, Jordan R, et al. Multiplatform optical monitoring of eutrophication in temporally and spatially variable lakes[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 312(1-3):221-243.
- [5] Ahn Y, Shanmugam P. Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia Coastal waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(4):419-437.
- [6] Meer F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(1):55-68.
- [7] 王晋年, 郑兰芬, 童庆禧. 成像光谱图像光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(1):20-31.  
WANG Jin-nian, ZHENG Lan-fen, TONG Qingxi. The spectral absorption identification model and mapping by imaging spectrometer data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1996, 11(1):20-31.
- [8] 阮伟利, 颜春燕, 牛铮. 植物生化组分遥感探测的光谱统计参数比较[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(4):233-236.  
RUAN Wei-li, YAN Chun-yan, NIU Zheng. Comparison of spectral statistical parameters about plant biochemical concentration determination with remote sensing[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(4):233-236.
- [9] 张良璞. 巢湖藻类群落多样性分析[J]. 生物学杂志, 2007, 24(6):53-54, 72.  
ZHANG Liang-pu. Diversity analysis of algae in Chaohu Lake[J]. *Journal of Biology*, 2007, 24(6):53-54, 72.
- [10] 吴为梁. 滇池富营养化与藻类资源[J]. 云南环境科学, 2000, 19(1):35-37.  
WU Wei-liang. Eutrophication in Dianchi Lake and its algae resource[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2000, 19(1):35-37.
- [11] 陈立婧, 彭自然, 孙优佳, 等. 江苏溔湖浮游藻类群落结构特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9):1549-1556.  
CHEN Li-jing, PENG Zi-ran, KONG You-jia, et al. Characteristics of community structure of planktonic algae in Gehu Lake of Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(9):1549-1556.
- [12] 李慧敏, 孟凡艳, 杜桂森, 等. 密云水库东西库区的水质与浮游藻类分析[J]. 湖泊科学, 2007, 19(2):146-150.  
LI Hui-min, MENG Fan-yan, DU Gui-sen, et al. Analysis on the phytoplankton and water quality in eastern and Western Miyun Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(2):146-150.
- [13] Bale A, Tocher M, Weaver R, et al. Laboratory measurements of the spectral properties of estuarine suspended particles[J]. *Aquatic Ecology*, 1994, 28(3):237-244.
- [14] 张俊, 李爱民, 王学军. 混合藻类高光谱特征及其叶绿素 a 分离定量模型[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3):349-356.  
ZHANG Jun, LI Ai-min, WANG Xue-jun. Hyperspectral quantitative model for chlorophyll-a of mixed algae[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3):349-356.
- [15] 林少君, 贺立静, 黄沛生, 等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进[J]. 生态科学, 2005, 24(1):9-11.  
LIN Shao-jun, HE Li-jing, HUANG Pei-sheng, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. *Ecological Science*, 2005, 24(1):9-11.
- [16] 国家环保局. 环境监测技术规范(生物监测部分)[M]. 1986:17-18.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental monitoring technical specifications (Biological Monitoring Part)[M]. 1986:17-18.
- [17] 郑兰芬, 王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究[J]. 环境遥感, 1992, 7(1):49-58.  
ZHENG Lan-fen, WANG Jin-nian. A study on imaging spectrometry and its extraction of image spectral information[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1992, 7(1):49-58.
- [18] 苏红军, 杜培军, 盛业华. 高光谱遥感数据光谱特征提取算法与分类研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(2):390-394.  
SU Hong-jun, DU Pei-jun, SHENG Ye-hua. Study on feature extraction and experiment of hyperspectral data[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(2):390-394.
- [19] 刘堂友, 匡定波, 尹球. 藻类光谱实验及其光谱定量信息提取研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(3):213-217.  
LIU Tang-you, KUANG Ding-bo, YIN Qiu. The spectrum experiments of algae and studies on retrieval quantitative information from its spectra[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(3):213-217.