

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2010.00582

基于感光色素吸收信号的太湖藻类识别

黄昌春 李云梅 孙德勇 乐成峰 王利珍

(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: 铜绿微囊藻和斜生栅藻是太湖“水华”的主要藻种, 基于室内纯铜绿微囊藻、斜生栅藻组成色素的吸收系数, 通过四阶微分、标准化系数等方法对太湖水体浮游植物中铜绿微囊藻和斜生栅藻进行识别, 并确定其组成比例。结果表明, 纯藻组成色素的吸收系数应用于其在太湖水体浮游植物中比例的确定和识别中, 能够全面考虑辅助色素的识别作用, 较好地避免非色素物质吸收信号的干扰, 具有较好的识别效果。太湖水体浮游色素中铜绿微囊藻比例最高, 斜生栅藻次之, 由夏季向冬季过度中, 铜绿微囊藻比例不断减小, 斜生栅藻的比例逐渐升高, 但铜绿微囊藻比例仍略高于斜生栅藻; 铜绿微囊藻的区域分布差异性较小, 但时间差异性相对较大, 而斜生栅藻恰恰相反, 空间分布差异性较大而时间分布差异性较小。

关键词: 四阶微分; 藻类比例; 吸收系数; 藻类识别

中图分类号: X502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2010)03-0582-09

内陆湖泊“水华”事件的发生严重威胁到工农业和城市用水安全, 使得浮游植物的监测以及准确、实时地对其进行藻类识别成为目前研究的热点。内陆湖泊“水华”爆发的机理, 监测、预测“水华”的形成, 需要了解水体中浮游植物数量及其种群结构的变化, 而浮游植物的感光色素、叶绿素 *a* 荧光、太湖水体吸收系数是用于刻画浮游藻类生物量、种群组成和生理状态的重要参数^[1-5]。荧光光谱由于其灵敏度高、受干扰小以及对物质具有良好的鉴别性能等优点使其在实验室藻类识别中得到广泛的应用^[6-14], 但在自然条件下, 藻类受太阳光线激发主要产生的是叶绿素 *a* 的荧光弱信号并且易受到悬浮泥沙影响, 较难精确获取^[15,16], 同时遥感影像设置的荧光通道主要在红、近红外波段, 易受大气、水-气界面等条件影响^[16-19], 因而利用遥感荧光信号对藻类进行监测和识别是十分困难的。张前前等^[20]利用奇异值分解等数学方法对室内培养的东海赤潮 9 个典型优势种的吸收系数进行研究得到了 7 个典型藻类的特

征波段, 通过特征波段对藻类进行识别, 准确率达到 80%; 李忠平等^[21]利用遥感数据基于半分析模型准确反演出浮游色素物质的高光谱吸收系数数据, 从而使得利用室内纯藻吸收系数结合遥感影像进行藻类识别和监测成为可能。

本文基于实验室纯藻组成色素吸收系数和太湖水体实测浮游色素物质吸收系数, 利用四阶微分、相似指数等方法将室内数据与太湖水体数据进行关联匹配, 从而达到对“水华”中藻类进行识别和监测的目的, 为利用遥感技术对“水华”的全面监测奠定基础、提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验样品的准备

纯藻组成色素吸收系数: 室内培养的太湖“水华”主体藻类-蓝藻门中的铜绿微囊藻和绿藻门中的斜生栅藻的纯藻组成色素吸收系数。

太湖水体浮游色素物质吸收系数: 太湖水体数

收稿日期: 2009-03-13; 修订日期: 2010-01-11

基金项目: 十一五国家科技支撑计划项目“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”(编号: 2008BAC34B05); 国家自然科学基金资助项目(40971215); 江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划(编号: CX09B-301Z); 南师大优秀博士论文培养计划(编号: 1243211601036)资助

作者简介: 黄昌春(1982—), 男, 江苏扬州人; 博士研究生; 主要从事环境污染遥感监测的学习和研究。

E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

通讯作者: 李云梅(1966—), E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

据采集包括 2006-08-16、2006-10-23 和 2007-11-12 三次对太湖总共 94 个样点表层水样中浮游色素物质吸收系数的测量数据。样点如图 1 所示。

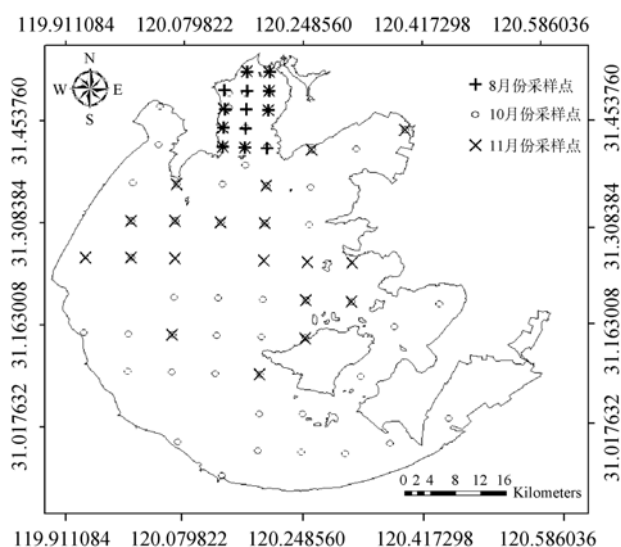


图 1 样点图

Fig. 1 Sample sites

1.2 吸收系数的测量

浮游色素物质吸收系数的测量^[22] 浮游色素物质吸收系数是通过总悬浮物的吸收系数减去非色素颗粒物的吸收系数获取。

①总悬浮物的光谱吸收系数的测量: 总悬浮物吸收系数采用 UV-240IPC 型紫外可见分光光度计测量, 具体方法如下: 首先, 使用滤膜过滤一定量的水样, 其次, 用 UV-240IPC 型紫外分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:

$$D_s(\lambda) = 0.378D_f(\lambda) + 0.523D_f^2(\lambda) \quad (1)$$

式中, $D_s(\lambda)$ 为校正后的滤膜上悬浮物颗粒的吸光度, $D_f(\lambda)$ 为直接在仪器上得到的悬浮物颗粒吸光度。

其次计算吸收系数

$$a_p(\lambda) = 2.303 \cdot \frac{S}{V} D_s(\lambda) \quad (2)$$

式中, $a_p(\lambda)$ 为光谱吸收系数, V 为被过滤水样的体积, S 为沉积在滤膜上颗粒物的有效面积。

②非色素颗粒物光谱吸收系数的测量: 首先使用 0.1% 活性的 NaClO_3 溶液进行样品的漂白处理, 去除总悬浮物中的色素成分; 其次, 对漂白过的水样进行过滤, 同样利用 UV-240IPC 型紫外分光光度

计测量过滤所得到的滤膜, 得到非色素颗粒物的吸光度。在测量时, 如果在 675 nm 处没有出现峰值说明漂白充分, 测量的数据有效, 否则说明漂白不充分, 需要再次漂白。非色素的吸收系数的计算方法与总悬浮物吸收系数的计算方法相同。

纯藻色素物质吸收系数的测量 直接选取纯铜绿微囊藻和斜生栅藻作为实验材料, 前期藻类的培养是采用摇床培养, 在短期时间内获得大量的藻类, 再将获得藻类移入全光照周期, 在同一温度 (20°C) 和光照条件 (7000 lx) 下的光照培养箱中进行培养。利用分光光度计分别测量两种纯藻组成色素吸收系数, 测量和计算与浮游色素物质吸收系数相同, 首先测量纯藻吸收系数, 再测量漂白后纯藻的吸收系数, 相减得到纯藻组成色素吸收系数。

1.3 数据分析方法

感光色素信号的提取 微分分析技术是一较强的信号识别方法, 能够十分方便地发现原始数据的形状变化, 但对数据的振幅敏感程度较低, 因而在众多领域得到广泛应用^[23-26], 而且微分分析在遥感中的应用也同样趋于成熟^[27-29]。本文在 Butler, et al.^[27]、Tsai, et al.^[28]、Millie, et al.^[29] 的研究基础之上, 利用四阶微分对色素物质吸收系数进行处理, 从而提取色素吸收信号。由于吸收系数具有一定的信号噪声, 因而在进行微分处理之前, 利用平均滤子对吸收系数进行平滑处理, 计算公式为^[28]:

$$a(\lambda_j) = \sum a(\lambda_i) / n \quad (3)$$

式中, $a(\lambda_j)$ 为平滑后的吸收系数, $a(\lambda_i)$ 为平滑前吸收系数, n 为平滑波段数, 本文吸收系数波长间隔为 1 nm, 选用 $n=10$, 对其进行 10 nm 平滑处理。处理后对其进行四阶微分处理, 公式为^[27]:

$$\begin{aligned} \frac{d^n a}{d\lambda^n} \Big|_j &= \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d^{(n-1)} a}{d\lambda^{(n-1)}} \right) = \dots \approx \frac{a(\lambda_i) - \dots + a(\lambda_{i+n})}{(\Delta\lambda)^n} \\ &= \frac{\sum_{k=i}^{i+n} C_k a(\lambda_k)}{(\Delta\lambda)^n} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda$ 为波长间隔, 本文选择 5 nm, 如果 $(2i+n)$ 是偶数, $j=(2i+n)/2$, 如果 $(2i+n)$ 是奇数, $j=(2i+n+1)/2$, C_k 为组合系数。

光谱特征的相似度匹配 太湖水体浮游色素物质吸收系数与纯藻组成色素吸收系数之间相似性表征了太湖水体浮游色素物质与纯藻之间相似程度, 其相似度的大小决定于水体中不同藻类的浓度高

低。Lay, *et al.*^[30]为了定量确定不同光谱之间的差异引入相似指数:

$$SI = \sqrt{\frac{(\sum \frac{i-i_0}{i_0} \times 100)^2}{n}} \quad (5)$$

式中, i_0 表示高强度值, i 表示低强度值, n 表示信号数目。

Katty, *et al.*^[31]运用相似性指数和向量余弦法两种方法比较了不同质谱之间的相似性, 认为向量余弦法具有一定的优越性。因此本文依据 Millie, *et al.*^[29]将相似指数定义为:

$$SI = 1 - \frac{2 \times \arccos\left(\frac{a_r \cdot a_s}{|a_r| \times |a_s|}\right)}{\pi} \quad (6)$$

式中, a_r 为参考吸收系数向量, a_s 为样品吸收系数向量, 相似指数接近于 1 说明该物质色素对混合物质色素贡献率越大, 相反越接近于 0 说明该物质色素对混合物质色素贡献率越小。去除参考吸收系数向量之间的自相似性, 得到各吸收系数向量与样品的偏相似指数, 计算公式为:

$$SI_M = \frac{SI_{MS} - SI_{SS} \times SI_{MS}}{\sqrt{(1 - SI_{SS}^2)(1 - SI_{MS}^2)}} \quad (7)$$

式中, SI_M 为铜绿微囊藻的偏相似指数, SI_{MS} 和 SI_{SS} 分别为样品与铜绿微囊藻、斜生栅藻之间的相似指数, SI_{MS} 为铜绿微囊藻与斜生栅藻之间的相似指数。

藻类比例的确定 根据比尔-朗伯定律(Beer-Lambert law): 物质的吸收系数与物质的浓度呈线性关系, 假设①单浮游色素物质的吸收系数是其组成色素的吸收系数的线性之和; ②混合浮游色素物质的吸收系数是由其各单浮游色素物质的吸收系数之和, 即:

$$a_{\text{total}} = \sum_{m=1}^k \sum_{n=1}^i (a_i \times c_i) \quad (8)$$

式中, a_{total} 为混合浮游色素物质吸收系数, k 为混合浮游色素物质的种类数目, i 为单浮游色素物质中色素的种类数目, a_i 为色素比吸收系数, c_i 为色素浓度。因此, 混合浮游色素物质的吸收系数可以由其各单浮游色素物质的吸收系数作为变量进行多元线性回归。

由于吸收系数受到浮游色素物质浓度、色素组成、光照强度等影响^[29], 将实验室吸收系数作为太湖水体数据多元回归的变量显然不妥, 为此, 在做

线性回归时需要对变量值做简单的标准化变换, 即变量除以其平均值, 由此得到的回归标准化系数^[32]。回归模型为:

$$\frac{a_s}{a_s} = A \frac{a_S}{a_S} + B \frac{a_M}{a_M} + \delta \quad (9)$$

式中, a_s 、 a_S 、 a_M ; $\bar{a}_s$ 、 $\bar{a}_S$ 、 $\bar{a}_M$ 分别为样品、斜生栅藻、铜绿微囊藻的吸收系数、平均吸收系数, δ 为误差项。A 和 B 为回归系数, 分别表示斜生栅藻和铜绿微囊藻对于混合藻类的重要性。根据历年的监测和研究^[33-36], 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, 因而假设太湖“水华”藻类仅为斜生栅藻和铜绿微囊藻, 因此 $|A|/(|A|+|B|)$ 和 $|B|/(|A|+|B|)$ 可以分别近似表示斜生栅藻和铜绿微囊藻在混合藻中的比例。

2 结 果

2.1 铜绿微囊藻与斜生栅藻的光谱可分性

平均归一化纯铜绿微囊藻、斜生栅藻组成色素吸收系数及其浓度梯度上组成色素吸收系数的四阶微分处理结果(图 2)。从图 2 中可以看出, 四阶微分几乎能够较好地将其全部组成色素的吸收特征分离出来, 当然没有被平滑掉的噪声将会被放大(图 2A 方框中的峰值), 同时部分较弱的色素吸收峰值会被平滑处理掉而在微分曲线中得不到体现(图 2B 中 635 nm 处的藻青蛋白吸收峰值), 四阶微分在可见光范围内从左到右的峰值分别为①叶绿素 a; ②叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素; ③叶绿素 b、叶绿素 c、类胡萝卜素; ④藻红蛋白; ⑤叶绿素 b; ⑥叶绿素 a。比较斜生栅藻和铜绿微囊藻四阶微分曲线可以发现, 斜生栅藻的①②③三个色素吸收峰值要小于铜绿微囊藻, 而④藻红蛋白和⑥叶绿素 a 吸收峰值要比铜绿微囊藻大得多, ⑤叶绿素 b 吸收十分微弱几乎不存在, 而铜绿微囊藻⑤吸收峰值与⑥叶绿素 a 吸收峰值接近于重合, 没有完全分离出来。由此可以利用感光色素吸收信号对太湖浮游色素物质中的斜生栅藻和铜绿微囊藻从色素组成角度上进行定性识别。

2.2 太湖水体铜绿微囊藻与斜生栅藻的识别

太湖水体色素组成特征 分别对 8 月、10 月、11 月所有样点浮游色素物质吸收系数做四阶微分处理(图 3)。根据以上分析, 结合图 3 可以清楚的发现, 8 月份浮游色素吸收系数四阶微分的③峰值与④峰

值高度相当, ②峰值要略高于⑥峰值, 表现出既非单一的铜绿微囊藻色素吸收特征, 也非单一的斜生栅藻色素吸收特征, 而是两种藻类色素混合吸收特征, 但铜绿微囊藻占有主导地位, 并且由于 8 月份浮游色素浓度较高, 信号较强, 吸收系数四阶微分的噪声相对较小(图 3A); 10 月份浮游色素物质四阶微分的噪声较 3 月份大, 蓝光波段的②峰值与红光波段的⑥峰值高度相当, 同样表现出两种藻类色素混合吸收特征, 但铜绿微囊藻的主导地位减弱, 斜生栅藻的地位增强(图 3B); 11 月份噪声相对最大, 这主要是由于 11 月份藻类大量衰亡, 数量减少, 色素

大量降解引起的, 但仍然能够清楚的显示②峰值低于⑥峰值这一特征, 这说明铜绿微囊藻的主导地位得到进一步的消弱, 而斜生栅藻的地位得到进一步增强(图 3C)。结合 8 月份、10 月份、11 月份这一时间序列, 可以得到简单的规律: 铜绿微囊藻和斜生栅藻是太湖“水华”的主要藻类, 并且铜绿微囊藻占主导地位; 随着月份的增加, 铜绿微囊藻的主导地位不断减弱, 而斜生栅藻的地位不断增强, 但铜绿微囊藻仍略强于斜生栅藻; 随着月份的增加, 铜绿微囊藻和斜生栅藻不断消亡, 但铜绿微囊藻的消亡量要高于斜生栅藻。

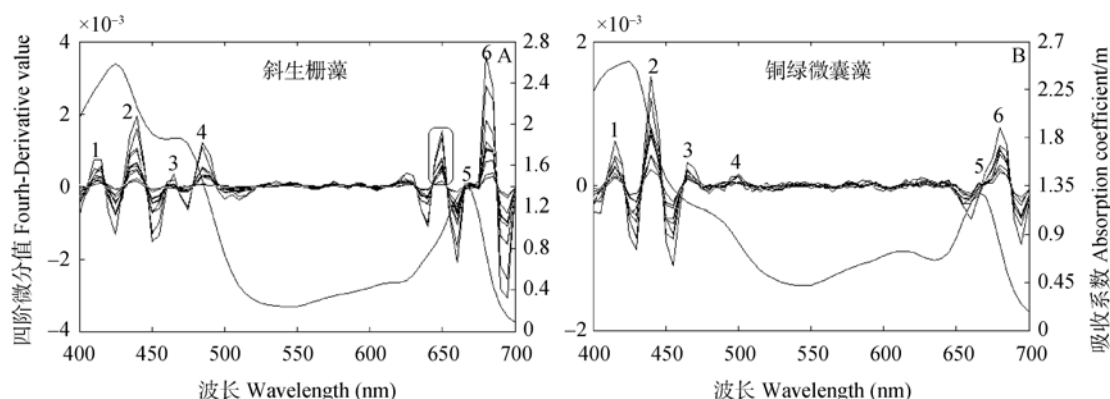


图 2 斜生栅藻和铜绿微囊藻平均吸收系数和四阶微分值

Fig. 2 Average absorption coefficient of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* and Fourth-Derivative value

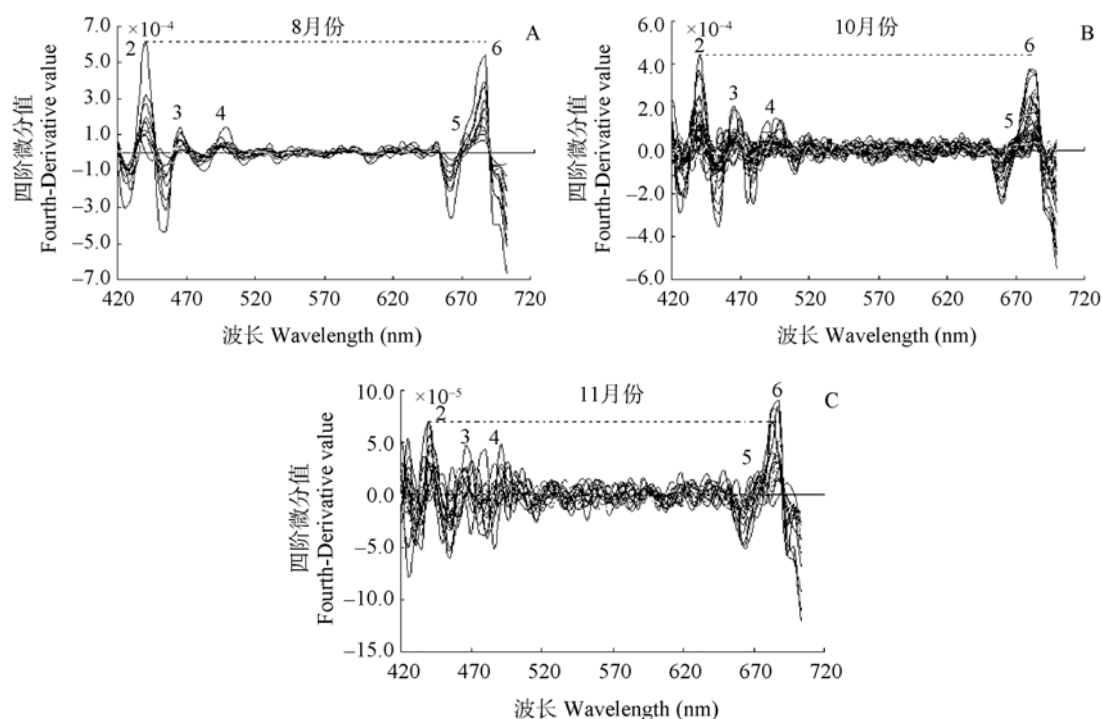


图 3 8 月份、10 月份、11 月份浮游色素物质吸收系数四阶微分值

Fig. 3 Fourth-Derivative value of Phytoplankton pigment matter's absorption coefficient at August, October and November

藻类的相似指数识别 根据公式(6)计算铜绿微囊藻、斜生栅藻和太湖水体浮游色素物质的相似指数(图 4), 3 个月份的铜绿微囊藻和斜生栅藻相似指数都较高, 说明太湖水体浮游色素物质无论在夏季的 8 月份还是秋季的 10 到 11 月份铜绿微囊藻和斜生栅藻是其主要组成部分。在图 4A 中铜绿微囊藻的相似指数普遍高于斜生栅藻, 反应出铜绿微囊藻的主体地位, 铜绿微囊藻和斜生栅藻相似指数最高值出现在 10 号样点分别为 0.8993、0.8702, 最低分别是 12 号样点的 0.8545 和 11 号样点的 0.7971; 与 8 月份相比, 10 月份较为复杂, 铜绿微囊藻和斜生栅藻相似指数高低值交错出现, 最高值分别是 5 号样点的 0.9006 和 14 号样点的 0.9088, 最低值出现在 24 号样点分别为 0.7178、0.7111; 11 月份最高值分别是 14 号样点的 0.8923 和 27 号样点的 0.8834, 最低值出现在 21 号样点分别为 0.7161、0.7382。因此无论是浮游色素物质浓度较高的 8 月份还是较低的 11 月份, 利用相似指数都能够较好的识别太湖水体浮游色素物质中藻的类别。

2.3 不同季节藻类比例及空间差异分析

利用 SPSS 多元回归得到标准化系数 A 和 B, 再利用 A 和 B 计算铜绿微囊藻和斜生栅藻 3 个月份的比例(图 5)。从图中可以看出, 8 月份浮游色素物质中铜绿微囊藻为主体, 平均百分比为 89.28%, 11 号样点达到最大值为 96.90%, 最小比例出现在 10 号样点, 百分比为 80.90%, 而斜生栅藻比例较小平均值为 10.72%; 10 月份铜绿微囊藻的比例有所下降, 但百分比量仍较高, 平均值为 73.14%, 最高百分比出现在 7 号样点为 99.33%, 最低在 36 号样点为 1.00%, 斜生栅藻百分比有所提高平均值达到

了 26.86%; 11 月份的铜绿微囊藻的百分比进一步降低, 但其平均值仍然超过了 50%达到了 59.63%, 最高百分比出现在 21 号样点为 82.61%, 最小值出现在 18 号样点为 23.35%, 斜生栅藻的百分比得到进一步的提高, 平均值为 40.37。这一结果与 2.1 中较为相似, 铜绿微囊藻的主导地位不断减弱, 而斜生栅藻的地位不断增强, 但铜绿微囊藻仍占据主导地位, 同时这一结果与秦伯强等^[35]的研究结果较接近。

同时从铜绿微囊藻和斜生栅藻百分比的变异系数上来看(表 1), 在 3 个月份中, 斜生栅藻百分比变异系数都要大于铜绿微囊藻, 这说明铜绿微囊藻在太湖的分布较斜生栅藻平均, 具有较小的空间差异性, 而斜生栅藻具有较大的空间差异性。无论是 8 月份(区域小、数据量小)还是 10 月份(区域大、数据量大)铜绿微囊藻变异系数都要大于 11 月份, 这表明铜绿微囊藻随着时间的变化, 其空间分布差异性不断增大; 而斜生栅藻与之恰恰相反, 随着时间的变化, 其空间分布差异性不断减小。

为了进一步验证该方法的可靠性和结果的真实性, 将铜绿微囊藻百分比与通过 2.1 中相似指数计算得到的偏相似指数进行比较(图 6)发现, 百分比与偏相似指数具有较为显著的线性关系(最低显著性水平 $\alpha < 0.001$), 而其中 8 月份 R^2 最高, 达到 0.9694, 其次是 10 月份的 0.9533, 11 月份相对最小。这主要是 8 月份感光色素吸收信号相对最强, 而随着藻类衰亡和色素的降解 10 月份信号相对减弱, 11 月份相对最弱, 从而使得识别精度不断降低。总体而言, 该方法具有较高的可靠性, 而感光色素信号较强的时期应用效果最佳。

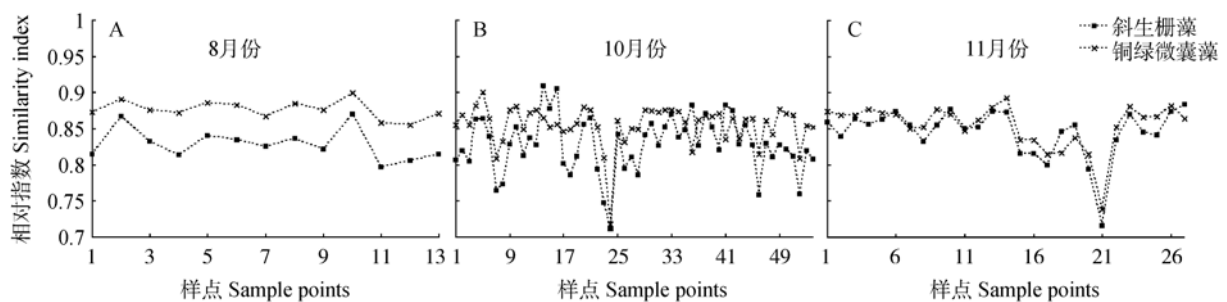


图 4 浮游色素吸收系数与铜绿微囊藻、斜生栅藻吸收系数相似指数

Fig. 4 Similarity Index between Phytoplankton pigment matter's and *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus obliquus*'s absorption coefficient

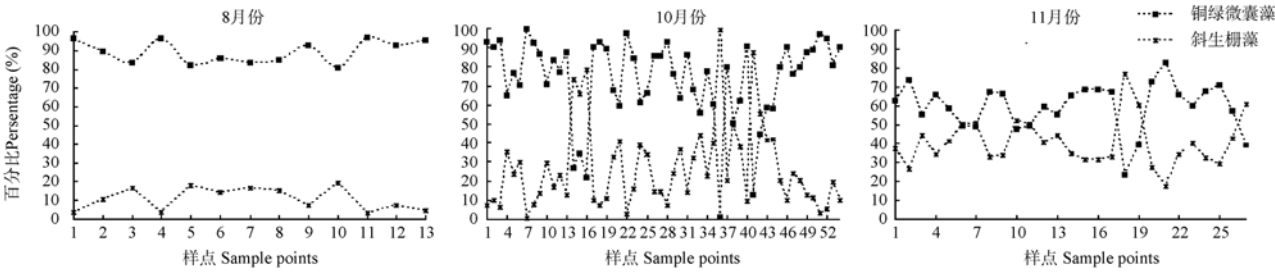


图 5 铜绿微囊藻、斜生栅藻在浮游色素中的百分比
Fig. 5 Percentage of *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus obliquus* in Phytoplankton pigment matter

表 1 三个月份百分比统计表
Tab. 1 Statistical table of algae percentage for three months

	8 月份 August		10 月份 October		11 月份 November	
	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>
均值 Mean	10.72%	89.28%	26.86%	73.14%	40.37%	59.63%
平均偏差 Mean deviation	0.0535	0.0535	0.1697	0.1697	0.0973	0.0973
极差 Range	0.1600	0.1600	0.9833	0.9833	0.5926	0.5926
标准差 Standard deviation	0.0605	0.0605	0.2212	0.2212	0.1266	0.1862
变异系数 Variation coefficient	0.5641	0.0677	0.8237	0.3025	0.4613	0.3123

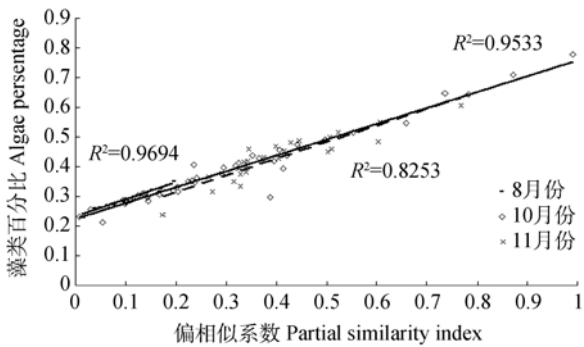


图 6 铜绿微囊藻百分比与偏相似指数散点图
Fig. 6 Scattergraph of *Microcystis aeruginosa*'s percentage and partial similarity index

3 讨 论

由于藻类体内色素物质的含量受到温度、光照等条件的影响^[29,37,38],具有一定的时空变异性,从而使得不同生长条件下的太湖水体浮游色素物质与室内培养藻类的色素组成很难进行精确比较,因而需要以室内培养条件对太湖水体浮游色素物质色素组成进行修正。但目前关于藻类体内色素组成随温度、光照的变化机理较为不明确,因而对其进行修正较为困难,有待更多学者对其进行更深入的研究。

同时由于“水华”发生时,藻类高度富集,无论是太湖水体实测还是反演的浮游色素物质其吸收系数都存在一定的“包裹”效应^[39,40],虽然归一化去除了吸收系数谱中携带的色素浓度和部分“包裹”效应^[41],但斜生栅藻与铜绿微囊藻之间的粒径、吸收系数差异使得两种藻类在可见光范围内不同波长上的“包裹”效应具有较大的不一致性,这就使得太湖水体浮游色素物质中斜生栅藻与铜绿微囊藻的吸收系数并非真实的。除上述两个影响到藻类及其比例组成的识别的精度外,藻类之间色素组成的差异也是影响识别精度的重要因素。若藻类之间色素组成相似性越高,则藻类识别精度相对要低;反之,藻类之间色素组成相似性越低,藻类识别精度相对要高。

4 结 论

- (1) 通过室内纯藻组成色素吸收系数谱能够较好地应用于太湖水体藻类及其比例的识别,从而为实现利用遥感技术监测内陆水体富营养化程度及其藻类种群变化提供了依据。
- (2) 基于室内藻类组成色素吸收信号的太湖水体藻类组成及其比例识别,能够较好地避免非色素物质吸收信号的干扰,较全面的考虑到辅助色素的

识别作用。

(3) 太湖“水华”中铜绿微囊藻比例最高, 斜生栅藻次之; 由夏季向秋季过度中, 铜绿微囊藻比例不断减小, 斜生栅藻的比例逐渐升高, 但铜绿微囊藻比例仍高于斜生栅藻。

(4) 太湖中铜绿微囊藻的分布区域差异性较小, 但时间差异性相对较大; 而斜生栅藻恰恰相反, 空间分布差异性较大而时间分布差异性较小。

参考文献:

- [1] Demers S, Roy S, Gagnon R. Rapid light-induced changes in cell fluorescence and in xanthophylls light cycle pigments of *Alexandrium excavatum* (Dinophyceae) and *Thalassiosira pseudonana* (Bacillariophyceae): A photoprotection mechanism [J]. *Marine Ecology Progress*, 1991, **76**: 185—193
- [2] Johnsen G, Sakshau E. Bio-optical characteristics and photoadaptive responses in the toxic and bloom-forming dinoflagellates *Gyrodinium aureolum*, *Gymnodinium galatheanum*, and two strains of *Prorocentrum minimum* [J]. *Phycology*, 1993, **29**: 627—642
- [3] Kroon B M, Prezelin B B, Schofield D. Chromatic regulation of quantum yields for photosystem 2 charge separation, oxygen evolution, and carbon fixation in *Heterocapsa pygmaea* (Pyrrophyta) [J]. *Phycology*, 1993, **29**: 453—462
- [4] Millie D E, Kirkpatrick G J, Vinyard B T. Relating photosynthetic pigments and in vivo optical density spectra to irradiance for the Florida red-tide dinoflagellate *Gymnodinium breve* [J]. *Marine Ecology Progress*, 1995a, **120**: 65—75
- [5] Tester I A, Geesey M E, Guo C, et al. Evaluating phytoplankton dynamics in the Newport River estuary (North Carolina) by HPLC-derived pigment profiles [J]. *Marine Ecology Progress*, 1995, **124**: 237—245
- [6] Lü H G, Zhang X H, Gong C Y. Studies on the algorithm and identification of three dimensional fluorescence spectroscopy of algae [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(5): 581—584 [吕洪刚, 张锡辉, 龚纯英. 藻类的三维荧光光谱辨别及算法研究. 中国环境科学, 2005, **25**(5): 581—584]
- [7] Zhang Q Q, Lei S H, Wang X L. Research on discrimination of 3D fluorescence spectra of phytoplanktons [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, **24**(10): 1227—1229 [张前前, 类淑河, 王修林. 浮游植物活体三维荧光光谱分类判别方法研究. 光谱学与光谱分析, 2004, **24**(10): 1227—1229]
- [8] Jin H L, Yan B, Wang Y T. Research on live alga recognition base on differential coefficient fluorescence spectrum [J]. *Journal of Yanshan University*, 2005, **29**(6): 493—496 [金海龙, 严冰, 王玉田. 基于导数荧光光谱的活体海藻识别方法研究. 燕山大学学报, 2005, **29**(6): 493—496]
- [9] Jin H L, Wang Y T. Research on recognition method of living alga based on stimulating fluorescence spectrum [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(1): 97—99 [金海龙, 王玉田. 基于荧光发射光谱的活体海藻识别方法研究. 传感技术学报, 2006, **19**(1): 97—99]
- [10] Hu X P, Su R G, Zhang C S, et al. Fluorescence discrimination technology for the red tide algae by spectra similarity index [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(1): 115—119 [胡序朋, 苏荣国, 张传松, 等. 基于光谱相似性指数的赤潮藻荧光识别技术. 中国激光, 2008, **35**(1): 115—119]
- [11] Lu L, Su R G, Wang X L, et al. Study on the characters of phytoplankton chlorophyll fluorescence excitation spectra based on fourth-derivative [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(11): 2307—2312 [卢璐, 苏荣国, 王修林. 基于四阶导数的浮游植物叶绿素荧光激发光谱特征研究. 光谱学与光谱分析, 2007, **27**(11): 2307—2312]
- [12] Su R G, Liang S K, Hu X P, et al. Identification of bacillariophyta and pyrophyta by using fluorescence spectrum and principal component analysis [J]. *Advances in Marine Science*, 2007, **25**(2): 238—246 [苏荣国, 梁生康, 胡序朋, 等. 荧光光谱结合主成分分析对硅藻和甲藻的识别测定. 海洋科学进展, 2007, **25**(2): 238—246]
- [13] Su R G, Hu X P, Zhang C S, et al. Discrimination of red tide algae by fluorescence spectra and principle component analysis [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(7): 1529—1533 [苏荣国, 胡序朋, 张传松, 等. 荧光光谱结合主成分分析对赤潮藻的识别测定. 环境科学, 2007, **28**(7): 1529—1533]
- [14] Zhang F, Wang L, Su R G, et al. Research on wavelet analysis in the characteristics extracting and identification of discrete 3D fluorescence spectra of phytoplankton [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(10): 2143—2150 [张芳, 王良, 苏荣国, 等. 小波分析在活体浮游植物离散三维荧光光谱特征提取及识别中的应用研究. 传感技术学报, 2007, **20**(10): 2143—2150]
- [15] Zhao D Z, Zhang F S, Du F, et al. Interpretation of sun-induced fluorescence peak of chlorophyll *a* on reflectance spectrum of algal waters [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(3): 265—270 [赵冬至, 张丰收, 杜飞, 等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素 *a* 荧光峰(SICF)特性研究. 遥感学报, 2005, **9**(3): 265—270]
- [16] Xing X G. Investigations on chlorophyll fluorescence remote sensing [D]. 2008 [邢小罡. 叶绿素荧光遥感研究. 中国海洋大学, 2008]
- [17] Abbott M R, Letelier R M. MODIS ATBD No. 22 Chlorophyll Fluorescence [R]. 1996
- [18] Letelier R M, Abbott M R. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 215—223
- [19] Gower J F R, Brown L, Borstad G A. Observations of chlorophyll fluorescence in west coast waters of Canada using the

- MODIS satellite sensor [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, **30**: 17—25
- [20] Zhang Q Q, Wang L, Lei S H, *et al.* Characteristics of absorption spectra of phytoplankton [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(9): 1676—1680 [张前前, 王磊, 类淑河, 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]
- [21] Lee Z P, Rhea W J, Arnone R, *et al.* Absorption coefficients of marine waters: expanding multiband information to hyperspectral data [J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, **43**(1): 118—124
- [22] Mueller J L, Fargion G S, Zaneveld R V, *et al.* Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation [S]. IVNASA, 2003, Revision 4. Volume
- [23] Bourdet D, Whittle T M, Douglas A A, *et al.* A new set of type curves simplifies well test analysis [J]. *World Oil*, 1983, 95—106
- [24] Bourdet D, Ayoub J A, Pirard Y M. Use of pressure derivative in well-test interpretation [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1989, 293—302
- [25] Spane F A, Wurster S K. DERIV: A computer program for calculating pressure derivatives for use in hydraulic test analysis [J]. *Ground Water*, 1993, **31**(5): 814—822
- [26] Bourdet D. Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models [M]. Elsevier, New York, 2002, 426
- [27] Butler W L, Hopkins D W. Higher derivative analysis of complex absorption spectra [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 1999, **12**(6): 439—450
- [28] Tsai F, Philpot W. Derivative analysis of hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Environ* 1998, **66**: 41—51
- [29] Millie D F, Schofield O M, Kirkpatrick G J. Detection of harmful algal blooms using photopigments and absorption signatures: A case study of the Florida red tide dinoflagellate, *Gymnodinium breve* [J]. *Limnol Oceanogr*, 1997, **42**(5): 1240—1251
- [30] Lay J O, Gross M L, Zwinselman J J, *et al.* A field ionization and collisionally activated dissociation/charge stripping study of some $[C_9H_{10}]^+$ ions [J]. *Org Mass Spectrom*, 1983, **18**(1): 16—21
- [31] Wan K X, Vidavsky I, Gross M L. Comparing similar spectra: from similarity index to spectral contrast angle [J]. *Am Soc Mass Spectrum*, 2002, **13**: 85—88
- [32] Wang H Y, Yang F T, Liu L. Comparison and application of standardized regressive coefficient & partial correlation coefficient [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2006, **9**: 150—155 [王海燕, 杨方廷, 刘鲁. 标准化系数与偏相关系数的比较与应用. 数量经济技术经济研究, 2006, **9**: 150—155]
- [33] Zhang X F, Kong F X, Cao H S. Recruitment dynamics of bloom-forming cyanobacteria in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(7): 1346—1350 [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]
- [34] Jiang Y C, Ding J Q, Zhang H J. Analysis of algae condition of Lake Tai [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2001, **14**(1): 30—31 [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]
- [35] Qin B Q, Hu W P, Chen W M, *et al.* the mechanism of evolution of Taihu Lake water environment [M]. Science Press. 2004, 209, 260 [秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理. 科学出版社. 2004, 209, 260]
- [36] <http://www.whlib.ac.cn/shuihua/xianggyj/ktz1-04.asp>.
- [37] Wang M, Li T, Li A F, *et al.* effect of lighting temperature and PH on photosynthetic characters of *Haematococcus pluvialis* CG-11 [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(3): 400—405 [王铭, 李涛, 李爱芬, 等. 光照、温度和 pH 对雨生红球藻光合特性的影响. 水生生物学报, 2009, **33**(3): 400—405]
- [38] Qin S, Liu G X, Hu Z Y. The accumulation of astaxanthin and the response of photosynthetic activity in *Scenedesmus obliquus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(3): 509—515 [秦山, 刘国祥, 胡征宇. 斜生栅藻中虾青素的积累过程及其光合活性变化. 水生生物学报, 2009, **33**(3): 509—515]
- [39] Bricaud A, Babin M. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **7**(100): 13321—13332
- [40] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Perupwelling area and the Sargasso Sea [J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, **35**(3): 562—582
- [41] Roesler C S, Perry M J. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectral in productive inland water [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, **34**(8): 1510—1523

IDENTIFICATION OF ALGAE USING PHOTSENSITIVE PIGMENT ABSORPTION SIGNALS IN TAIHU LAKE

HUANG Chang-Chun, LI Yun-Mei, SUN De-Yong, LE Cheng-Feng and WANG Li-Zhen

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

Abstract: *Microcystis aentginosa* and *Scenedesmus obliquus* are the main part of algae blooms in Lake Taihu. For the purpose of identify the type and percentage of algae in algae blooms, thrice courses experiment were carried out on 16th Aug., 23th Oct., 2006 and 12th Nov., 2007, additionally, photosensitive pigment absorption signals of pure *Microcystis aentginosa* and *Scenedesmus obliquus* were measured in the laboratory. The photosensitive pigments of water samples were identified by the methods of Fourth-Derivative and standardization coefficient. Then the percentage of *Microcystis aentginosa* and *Scenedesmus obliquus* in the Taihu Lake were estimated through the match-up method of absorption signals. The results indicated that photosensitive pigment absorption signals of pure algae could be well used in the algae identification; it made a full consideration to the effect of Auxiliary pigment in identification, and gave a better method to avoid the interference of non-pigment material absorption signal. *Microcystis aentginosa* had the highest percentage in the wild phytoplankton population, which followed by *Scenedesmus obliquus*. The proportion of *Microcystis aeruginosa* decreased from summer to winter, while *Scenedesmus obliquus* increased gradually, but the percentage of *Microcystis aeruginosa* still slightly higher than that of *Scenedesmus obliquus*. The spatial variation of *Microcystis aeruginosa* is very small, but the temporal difference is huge, on the contrary, *Scenedesmus obliquus* has large spatial variation and small temporal variation.

Key words: Fourth-Derivative; Algae percentage; Absorption coefficient; Algae identification