

基于遥感反射比光谱的一种藻类识别方法

殷蕾^{1,2}, 唐军武^{1,3}, 宋庆君⁴

(1. 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 3. 国家海洋技术中心 天津 300112; 4. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要: 利用所得的甲藻门和硅藻门的 17 种藻类遥感反射比光谱, 对其进行平滑、取倒数和归一化等预处理后, 进行了四阶微分处理。根据聚类分析结果, 甲藻门各藻种分为一类, 而硅藻门的藻种分为另一类, 这说明经上述处理后, 甲藻门和硅藻门的差异性显著增大。将甲藻门和硅藻门的四阶微分光谱分别平均得到门类的特征光谱, 并在原始数据中加入泥沙进行敏感性分析, 结果表明当泥沙含量小于 50 mg/dm^3 时藻种在门类上的正确识别概率可达 90% 以上。研究表明上述处理方法可作为甲藻和硅藻的识别测定方法。

关键词: 遥感反射比; 四阶微分; 浮游植物; 识别

中图分类号: P733.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)03-0055-08

1 引言

有害藻华(harmful algae blooms, HABs)又称赤潮(red-tide), 是指海洋中某些浮游生物(尤指藻类)、原生动物或细菌等在一定环境条件下爆发性增值或聚集达到某一水平, 引起水色变化或对其他海洋生物产生危害作用的一种生态异常现象。赤潮暴发可降低水中的溶解氧或产生毒素, 对渔业、水质、旅游业以及人类健康有非常大的影响和危害^[1-2]。近年来, 赤潮灾害在我国海域频繁发生, 对海洋生态环境、水产养殖、渔业、旅游及人类的健康安全构成严重威胁, 已成为沿海地区的重要环境问题。因此若能快速测定海水中浮游植物的组成, 是监测、预报赤潮发生的先决条件。

常用的浮游植物种类鉴别方法有图像分析技术^[3-4]、色素分析技术^[5-6]、表观和固有光谱法^[1]、卫星技术^[8-12]、以及基于荧光光谱法技术^[13-14]等, 表观和固有光谱法因具有稳定性好、数据易于获得以及对物质鉴别性高等优点而备受关注。对浮游植物表观和固有光谱的处理方法主要有小波分析^[15]、

四阶微分^[16-20]、包络线去除^[21-22]、fisher 判别^[23-25]、SAM^[26-28]等方法, 其中四阶微分技术能够有效地解决谱带重叠, 消除背景干扰, 去除部分线性或接近线性的背景、噪声对目标的影响, 使得藻种间的匹配差异明显增加, 是本文运用四阶微分进行藻种特征光谱提取的理论依据。

近几年在赤潮光谱的识别方面微分方法得到越来越普遍的应用。张亭禄、杜祥之等^[18]对浮游植物吸收光谱进行四阶微分算法, 把经过四阶微分后的数据作为输入信号进行聚类分析, 实现了藻种在门类上的识别, 为建立特征光谱库进行藻种识别提供了很好的启发。崔廷伟^[19-20]借助赤潮围隔培养和现场捕获相结合的方式获取了大量赤潮高光谱数据, 对遥感数据进行一阶二阶微分处理确定光谱曲线的极值点。苏荣国、卢璐等^[27-28]对叶绿素荧光激发光谱取四阶导数, 其导数光谱的极大值相应于该波长下某色素分子的荧光峰, 利用色素荧光峰的特征可实现对色素的初步定性定量, 并对不同门类的浮游植物进行区分。

我国近海海域浮游植物群落的主要组成是甲藻

收稿日期: 2010-08-26; 修订日期: 2011-02-22。

基金项目: 国家“863”项目(2006AA09Z178)。

作者简介: 殷蕾(1985—), 女, 河北省保定市人, 在读硕士, 主要从事海洋遥感研究。E-mail: yin890@163.com

和硅藻,且多为 1 个门类藻占绝对优势。本文选用我国沿海海域常见分属甲藻和硅藻门的 17 种藻作为研究对象,对它们的遥感反射比(remote sensing reflectance)数据进行四阶微分处理,实现甲藻和硅藻在门类水平上的识别。

2 实验数据与方法介绍

2.1 实验数据

实验对象是 17 种藻的纯藻液(共 27 组样品)(表 1),其中甲藻 6 种,硅藻 11 种,利用高光谱吸收与光束衰减系数测量仪(生产地,生产厂)测量得到藻种的光谱吸收系数 a ,光谱光束衰减系数 c 数据。由于实测纯藻液遥感反射比数据会受到周边环境影响及浅盆的严重影响,因此本文中的 R_{rs} 数据是通过软件 Hydrolight^[29]转化而来。以测得的吸收系数和后向散射系数作为输入,由软件 Hydrolight 模拟产生遥感反射比光谱,共产生波长区间为 421~

700 nm、波长间距为 2 nm 的 27 组光谱。各参数点选择,从固有量计算选择基于实测,太阳天顶角选择 30° ,距离为平均日地距离,水深 10 m 均匀分布,后向散射率选择 0.01。图 1 为遥感反射比光谱。遥感反射率 R_{rs} ^[30-31]定义为:

$$R_{rs}(\lambda) = L_w(\lambda)/E(\lambda,0^+), \quad (1)$$

将 R_{rs} 与水体的总吸收系数 $a(\lambda)$ 和总的后向散射系数 $b_b(\lambda)$ 联系起来:

$$R_{rs} = \frac{ft}{Qn^2} \frac{b_b}{a + b_b}, \quad (2)$$

式中, f 为一经验参数,其值约为 0.32~0.33,是太阳天顶角的函数; Q 为光场分布函数; n 为水体的折射率; t 为水气界面的透过率。

2.2 方法

首先对原始数据进行平滑,然后对数据取倒数并归一化,在消除各数据之间量的差别的同时保证特征差异,最后进行四阶微分。

表 1 所选用的浮游藻种类

中文名称(编号)	拉丁名称	门	属	毒性	分布情况		
					黄海和渤海	东海	南海
强壮前沟藻(004)	<i>Amphidinium carterae</i>	甲藻	前沟藻属	*	+	+	+
东海原甲藻(016)	<i>Prorocentrum donghaiense</i>	Pyrrophyta	原甲藻属				+
海洋原甲藻(18,018)	<i>Prorocentrum micans</i>		原甲藻属		+	+	+
条纹环沟藻(12,012)	<i>Gyrodinium instriatum</i>		螺沟藻属				+
短凯伦藻(13-1, 13-2, 13-3, 13-4)	<i>Karenia brevis</i>		裸甲藻属	NSP		+	
米氏凯伦藻(14)	<i>Karenia mikimotoi</i>		裸甲藻属	*		+	+
旋链角毛藻(22,22b-3)	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	硅藻	角毛藻属		+	+	+
派格棍形藻(029)	<i>Bacillaria paxillifera</i>	Bacillariophyta	棍形藻科		+	+	+
旋转海链藻(31)	<i>Chaetoceros curvisetus</i>		海链藻属				
尖刺伪菱形藻(025,25-1,25-2)	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>		尖刺伪菱形藻		+	+	+
丹麦细柱藻(27)	<i>Leptocylindrus danicus</i>		细柱藻属		+	+	+
较大骨条藻(a13)			骨条藻属				
中肋骨条藻(a05)	<i>Skeletonema costatum</i>		骨条藻属		+	+	+
柔软海链藻(a04)	<i>Thalassiosira subtilis</i>		海链藻属		+	+	+
日本星杆藻(a02,a002)	<i>Asterionella japonica</i>		拟星杆藻属		+	+	+
热带骨条藻(030)	<i>Skeletonema tropicum</i>						
新月筒柱藻(028)	<i>Cylindrotheca closterium</i>						
聚生角毛藻(24)	<i>Chaetoceros socialis</i>		角毛藻属		+	+	+

注: + 代表该藻种在该海域有分布; * 代表该藻种有毒性; NSP 代表含有神经性贝毒。

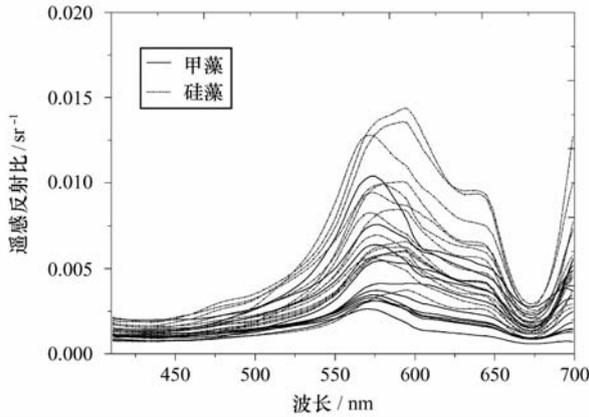


图1 藻种遥感反射比光谱

2.2.1 平滑滤波

根据前人^[33]研究结果, Savitzky-Golay 滤波方法与移动平均法和 Kawata-Minami 平滑方法相比, 不仅能较好的去除噪声, 还能保留较多的特征信息, 因此本文选用 Savitzky-Golay 滤波方法。该方法利用最小二乘法滑动拟合的平滑方法, 其窗口宽度和阶数可选, 本文窗口选为 9, 阶数为 2。具体的参数选择需要根据原始光谱的波形特征进行判断, 本文的参数选择是在不断尝试并比较平滑效果后取得。该方法的主要优势是能够保留诸如最大值、最小值和宽度等特征值。

2.2.2 倒数

由式(2)可知, 遥感反射比的波形由吸收系数波形和后向散射系数波形共同决定, 且无法确定哪个参数影响更大。通常情况下后向散射系数满足乘幂变化规律, 因此后向散射系数的变化比较单一, 而吸收系数曲线的波形变化相对复杂。因此, 取遥感反射比遥感反射比的倒数作为研究对象。遥感反射比的倒数曲线中, 由于波形变化比较简单的后向散射系数成为分母, 在形式上将吸收系数的变化进行了放大, 因此更适合进行藻种的识别。

2.2.3 归一化

光谱面积归一化是把所有峰的面积之和看作 100%, 计算每个单峰面积占总峰面积的百分数。主要原理是将光谱面积设为 1, 将光谱线性统一在一个尺度上, 尽量减小由于悬浮物浓度等因素造成的曲线量值上的差别。公式为

$$y(i, j) = x(x, j) / \overline{x(:, j)}, \quad (3)$$

式中, i 是指波段; j 是指第 j 种藻种; $x(i, j)$ 是指藻种 j 在波段 i 处的原光谱值; $y(i, j)$ 是指归一化处

理后的藻种 j 在波段 i 处的原光谱值; $\overline{x(:, j)}$ 表示藻种 j 在所有波段的平均值。

2.2.4 四阶微分

通常利用简单的“有限近似”来计算导数^[32-34]。这样计算的好处在于处理结果是基于波段间隔和波宽, 计算简单, 较少误差产生。有限近似导数如下:

$$\frac{d^n s}{d\lambda^n} \Big|_i = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{d^{n-1} s}{d\lambda^{n-1}} \right) = \dots \approx \frac{s(\lambda_i) - \dots + s(\lambda_{i+n})}{(\partial\lambda)^n} = \frac{\sum_i^{i+n} C_k s(\lambda_k)}{(\partial\lambda)^n}, \quad (4)$$

当 $(2i+n)$ 为偶数时, $j = (2i+n)/2$; 当 $(2i+n)$ 为奇数时, $j = (2i+n+1)/2$ 。系数 C_k 通过反复迭代计算得到。四阶微分公式如下:

$$\frac{d^4 y}{d\lambda^4} \Big|_j = \frac{y_{j+4} - 4y_{j+3} + 6y_{j+2} - 4y_{j+1} + y_j}{\partial\lambda^4}, \quad (5)$$

改变波谱间隔经常会抑制导数的幅度, 因此为了使导数随着 $\partial\lambda$ 的增加在视觉上更有利于比较, 我们用 $\partial\lambda$ 替换式(5)的分母 $\partial\lambda^4$, 从而“增强”了有限近似。导数算法应用于高光谱数据的关键问题是最大的减少误差和最好的匹配感兴趣的光谱特征尺度。在微分处理过程中, 如果微分时的步长太小, 那么相邻值之间的差值可能比随机噪声值还小, 得到的微分光谱也会带有更多噪声; 如果微分时步长太长, 噪声会减弱并且放大信号, 但可能会导致一些峰值特征产生偏移或丢失。Butler 和 Hopkins^[35] 提出光谱微分步长主要取决于数据噪声的水平 and 信号的光谱波段。

导数对噪声很敏感, 因此在求导前必须先最小化随机噪声, 即进行平滑处理。

2.2.5 聚类分析

为了检验上述方法处理得到的藻种特征光谱是否有效, 采用聚类分析来检验特征光谱是否能被正确的分类。

聚类分析的基本思想是在样品之间定义距离, 在变量之间定义相似系数, 距离或相似系数代表样品或变量之间的相似程度。按相似程度的大小, 将样品(或变量)逐一归类, 关系密切的类聚到一个小的分类单位, 然后逐步扩大, 使得关系疏远的聚合到一个大的分类单位, 直到所有的样品(或变量)都聚集完毕, 形成一个表示亲属关系的谱系图, 依次按照某些要求对样品(或变量)进行分类。

通过聚类分析来检验经过平滑、求倒数、归一化、四阶微分后得到的特征光谱数据是否能有效地

的对各藻种 Rrs 光谱进行分类。

3 结果与讨论

数据经平滑、取倒数和归一化处理,波形与原始数据波形有很大差异。如图 2 所示,与原始数据相比,曲线更加平滑,门类间的差异还是较小,但所有光谱值都集中到了较小的区间范围内,有利于下面四阶微分取值的正确性。

然后对数据进行四阶微分。微分波段间隔的选取直接影响到分类的准确性,而波段间隔的选择又取决于数据的噪声水平和信号的光谱波段。选择波段间隔时,依次选取了 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 nm。经仔细比较,发现波段间隔选择 18 nm 和 20 nm 时,同门类藻种间的距离更小,相似性更大,而异门类藻种间的距离更大,图 3 为波段间隔为 18 nm 时的四阶微分光谱图。对遥感反射比光谱四阶微分后,微分光谱与原始光谱相比谱带变窄,减少了两门类

光谱之间的重叠,显示多个波峰和波谷。硅藻(Bacillariophyta)四阶微分值在 440~600 nm,波段大多处于-0.01~0.01,而甲藻(Pyrrrophyta)的四阶微分值幅度更宽。它们的波峰波谷位置不完全重合,彼此有所偏移,如甲藻在 460~470 nm 间距内为明显的峰值,而硅藻则表现为波谷。

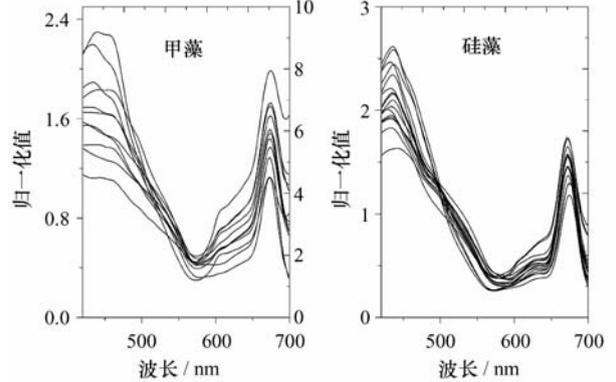


图 2 归一化后光谱图

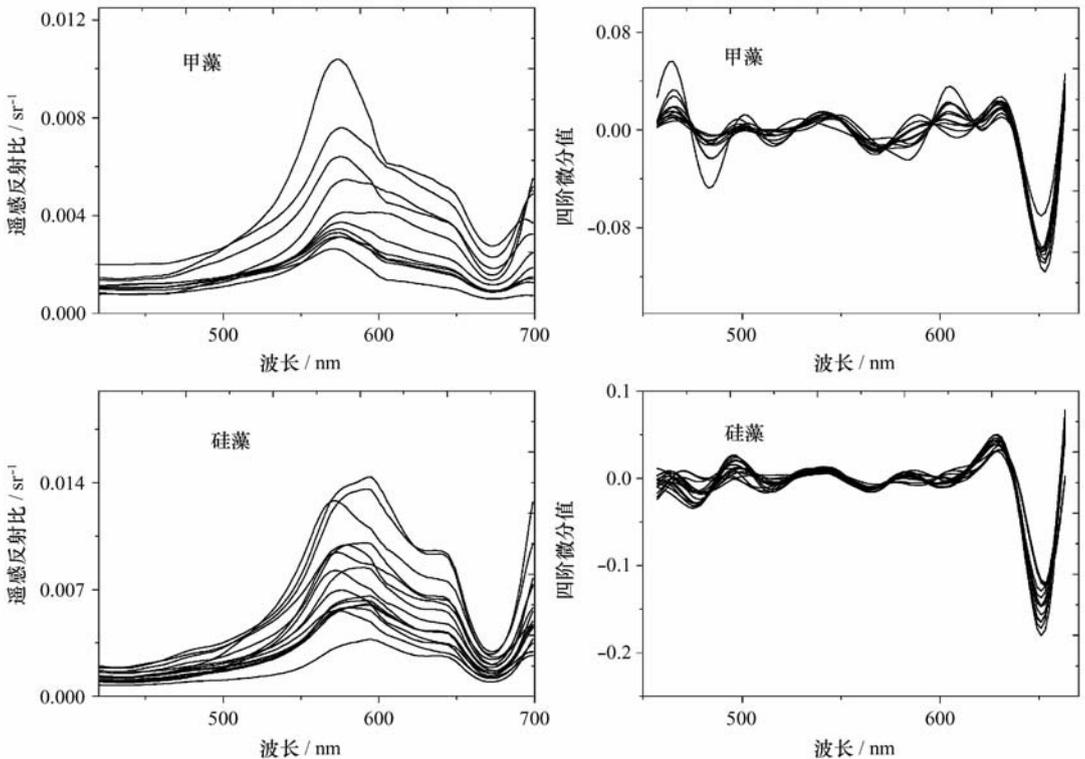


图 3 藻种遥感反射比光谱及其对应的四阶微分光谱(波段间隔为 18 nm)

为了验证上述结果是否能够作为特征光谱,把经过四阶微分后的光谱做为聚类分析的输入信号,进行聚类分析,计算距离时选用了欧氏距离,即 $d_s^2 = (x_r - x_s)(x_r - x_s)'$,生成聚类树时选择了质心距离

法,即计算两个种类质心间的欧氏距离, $d(r, s) = |\bar{x}_r - \bar{x}_s|_2$, 其中 $\bar{x}_r = \frac{1}{n_r} \sum_{i=1}^{n_r} x_{ri}$ 。图 4 为聚类分析后生成的聚类树。从图 4 中可看出,在门类水平上,

甲藻被分为一类(圆圈标示),硅藻被分为了两类(三角形标示)。细分后发现,不同浓度、不同时间采集的相同藻种被分为一类,如条纹环沟藻(12,012),尖刺伪菱形藻(025,25-1,25-2)以及日本星杆藻(a02,a002)。这说明,经过四阶微分处理后的数据,异门藻种间的差异增大,同门藻种相似性增大,凸显了两个藻类间的差异,在门类水平上,经聚类分析,基本上能够正确分类,有效区分甲藻和硅藻。

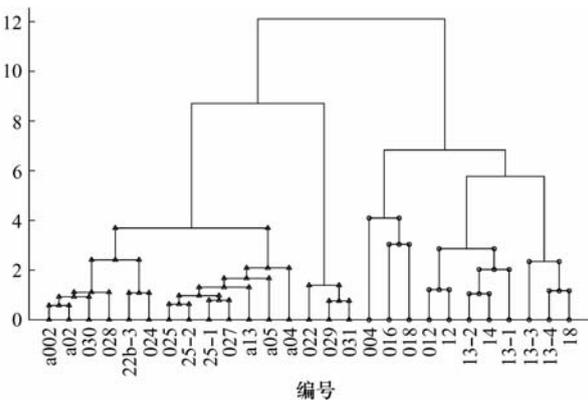


图4 聚类分析图

将甲藻门的各藻种的四阶微分光谱值取平均得到的光谱作为甲藻门的特征光谱,而将硅藻门的各藻种的四阶微分光谱值取平均所得到的光谱作为硅藻门的特征光谱,特征光谱图见图5。两个门类特征光谱之间差异明显,尤其是在470~520 nm波段和550~630 nm波段,两者波峰波谷明显错开,在610 nm附近甲藻光谱表现为波峰而硅藻光谱表现为波谷。

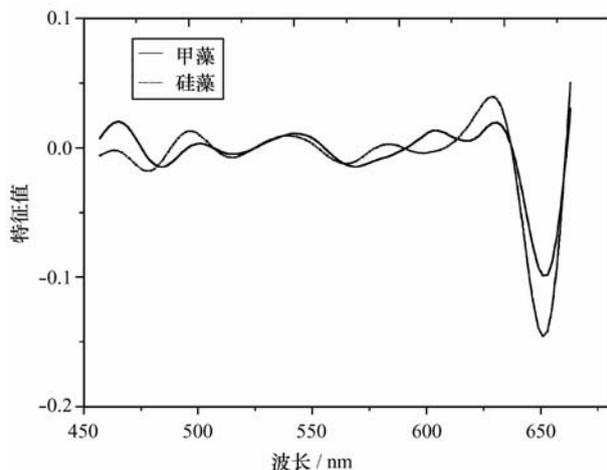


图5 甲藻门和硅藻门特征光谱

4 敏感性分析

本文简化了水体成分,只包括水和藻类,实际水体中还含有泥沙、CDOM等。本文暂只对泥沙影响进行敏感性分析。随着泥沙浓度增加,水体对入射光的后向散射越来越多,颜色浑浊,在遥感反射比光谱上表现为红波段的光谱曲线上扬,且趋于平缓。因此本文在泥沙含量分别为10,20,50,100 mg/m³的情况下对藻种识别的敏感性进行分析。假设所有值都是在相同光照条件下测得,而且主要是波形而非遥感反射比的绝对值对分析结果产生影响,因此只计算遥感反射比的相对值R_{rs}^{*}。模拟含泥沙的藻种遥感反射比数据的流程见表2。

表2 加入泥沙的藻种数据模拟过程

步骤	所求对象	数学公式	来源
0	b_w	$= b_w(500)\lambda^{-4.3}$	$b_w(500) = 0.00288 \text{ m}^{-1}$ [36]
1	b_{b_w}	$= b_w \overline{b_{b_w}}$	$b_{b_w} = 50\%$ [36]
2	b_x	$= b_x^* x$	$X = 10, 20, 50, 100 \text{ mg/dm}^3, b_x^*$ [37]
3	b_{b_x}	$= \overline{b_{b_x}} b_x$	$b_{b_x} = 1.5\%$ [42]
4	b_{b_c}	$= b_c \overline{b_{b_c}}$	$b_{b_c} = 0.5\%$ [42] b_c , 即前文所用数据
5	b_b	$= b_{b_w} + b_{b_c} + b_{b_x}$	
6	a	$= a_w + a_c + xa_x^*$	a_x^* [37], a_w [38], a_c , 即前文所用数据
7	R_{rs}^*	$= b_b / (a + b_b)$	

注: b_w, b_x, b_c 分别表示水体、泥沙、浮游植物的散射系数; $b_{b_w}, b_{b_x}, b_{b_c}$ 分别表示水体、泥沙、浮游植物的后向散射系数; X 表示所选取的泥沙浓度; b_x^* 表示单位浓度泥沙散射系数; b_x 表示泥沙散射系数; $\overline{b_{b_w}}, \overline{b_{b_x}}, \overline{b_{b_c}}$, 分别表示水体、泥沙、浮游植物的后向散射相函数; b_b 表示后向散射系数; a 表示吸收系数; a_x^* 表示泥沙的单位浓度吸收系数。

为了验证所得模拟数据能否被正确分类,本文选用相似性指数(SI)^[39-40]作为评判标准。SI 值是两个向量间角度的 cosine 值,即

$$SI = \frac{\vec{A}_b \cdot \vec{A}_c}{|\vec{A}_b| \times |\vec{A}_c|}, \quad (6)$$

式中, \vec{A}_b 是甲藻或硅藻的特征光谱向量; \vec{A}_c 是模拟所得含泥沙的光谱经平滑、归一化、取倒数和四阶微分后的光谱向量。图 6 为模拟所得的含泥沙的数据光谱,检验结果见表 3。

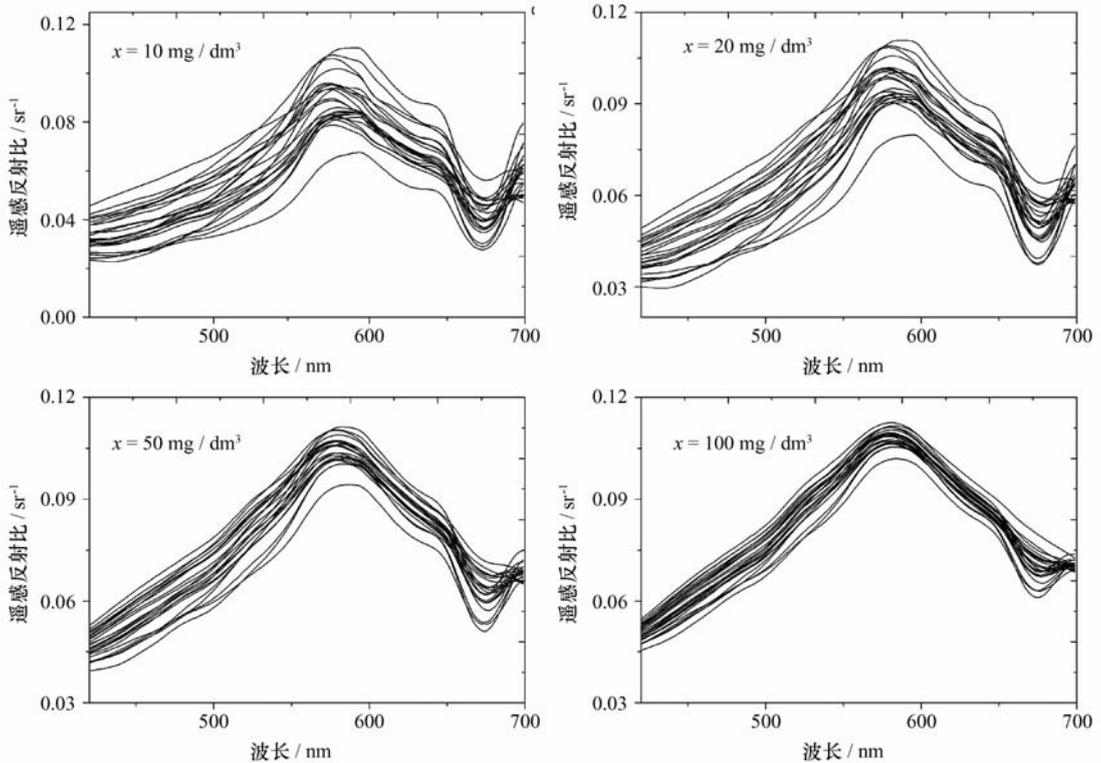


图 6 模拟含泥沙的数据,泥沙含量分别为 $x=10, 20, 50, 100 \text{ mg/dm}^3$

表 3 SI 分析结果

x / $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$	样品个数	分错个数	正确识别概率(%)
10	23	1	0.956 5
20	23	1	0.956 5
50	23	2	0.913 0
100	23	5	0.782 6

从表 3 中可看出,当泥沙含量小于 50 mg/dm^3 时,正确识别概率在 90% 以上,但随着泥沙含量的增大,正确识别概率逐渐减小,这说明泥沙含量对识别结果会造成较大的影响。

5 总结

本文以分属甲藻门和硅藻门的 17 种藻的遥感反

射比数据为研究对象,在对其进行平滑,取倒数、归一化和四阶微分等预处理后,选取恰当的波宽,实行四阶微分处理。处理后的数据凸显了两个藻类间的差异,能够实现甲藻门和硅藻门的有效识别分类。说明运用四阶微分分析方法可以有效地提取藻种在门类水平的光谱特征提取,达到识别甲藻和硅藻的效果,并且加入泥沙干扰后进行敏感度分析,其识别正确率仍然很高,当泥沙含量小于 50 mg/dm^3 时,正确识别概率高,但要能够达到真正实现种间识别的应用需要,下一步工作应对这方面继续深入研究,尝试将遥感反射比数据通过半分析模型、类分析模型^[41-46]等反演到藻种的吸收系数来识别分类。这样做的优势在于通过反演到浮游植物的吸收系数,从而剔除了泥沙、CDOM 等的影响,达到正确识别的目的。本文对遥感反射比数据取倒数的目的也在于此。

参考文献:

- [1] ANDERSON D M. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs)[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2009, 52(7): 342—347.
- [2] 齐雨藻. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] PECH-PACHECO J L, ALVAREZ-BORREGO J. Optical digital system applied to the identification of five phytoplankton species[J]. *Marine Biology*, 1998, 132: 357—365.
- [4] SIERACKI C K, SIERCK M E, YENTSCH C S. An image-in-flow system for automated analysis of marine microplankton [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 168: 285—296.
- [5] LEWITUS A J, WHITE D L, TYMOWSKIR G, et al. Adapting the CHEMTAX method for assessing phytoplankton taxonomic composition in southeastern U. S. estuaries[J]. *Estuaries*, 2005, 28: 160—172.
- [6] MACKEY M D, MACKEY D J, HIGGINS H W, et al. CHEMTAX—A program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 144: 265—283.
- [7] CANNIZZARO J P, HU C M, ENGLISH D C, et al. Detection of *Karenia brevis* bloom on the west florida shelf using in situ backscattering and fluorescence data[J]. *Harmful Algae*, 2009, 8: 898—909.
- [8] TOMLINSON M C, WYNNE T T, STUMPF R P. An evaluation of remote sensing techniques for enhanced detection of the toxic dinoflagellate *Karenia brevis*[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 598—209.
- [9] 赵冬至. 我国赤潮灾害分布规律与卫星遥感探测模型[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [10] 丛丕福, 赵冬至, 曲丽梅. 利用卫星遥感技术检测赤潮的研究[J]. *海洋技术*, 2001, 20(4): 69—72.
- [11] 毛显谋, 黄韦良. 多波段卫星遥感海洋赤潮水华的方法研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1200—1202.
- [12] 黄韦良, 肖青梅, 楼琇林. 国内外赤潮卫星遥感技术与应用进展[J]. *遥感技术与应用*, 2002, 17(1): 32—36.
- [13] YENTSCH C S, PHINNEY D A. Spectral fluorescence: an ataxonomic tool for studying the structure of phytoplankton populations[J]. *Journal of Plankton Research*, 1985, 7: 617—632.
- [14] SEPPL J, BALODE M. The use of spectral fluorescence methods to detect changes in the phytoplankton community[J]. *Hydrobiologia*, 1998, 363: 207—217.
- [15] 张亭禄, 杜详之, 徐青娜, 等. 一维小波分析在浮游植物吸收光谱有害赤潮藻类检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10): 2743—2747.
- [16] ASTORECA Rosa. Optical properties of algal blooms in an eutrophic coastal area and its relevance to remote sensing[c]. San Diego: SPIE Proceeding, 2005, 5885: 1—17.
- [17] AGUIRRE-GOMEZ R. The identification of phytoplankton pigments from absorption spectra[J]. *Remote Sensing*, 2001, 22(2/3): 315—338.
- [18] 杜祥之. 基于微分技术的吸收光谱有害赤潮藻类检测方法[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [19] 崔廷伟, 张杰. 基于地物光谱的赤潮优势种识别研究[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(3): 277—282.
- [20] 崔廷伟. 赤潮光谱数据获取与特征规律分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [21] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 李兴. 高光谱数据库及数据挖掘研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [23] 苏荣国, 梁康生, 祝陈坚, 等. 硅藻和甲藻的荧光识别测定技术研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(3): 52—55.
- [24] 苏荣国, 胡序朋, 胡序朋, 等. 基于活体荧光的藻类识别测定技术[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 24—29.
- [25] 苏荣国, 梁生康, 胡序朋, 等. 我国东海常见 6 种有毒赤潮藻的三位荧光光谱识别技术[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(3): 265—268.
- [26] 吴文瑾. 基于光谱曲线特性和波谱角分类的赤潮检测方法[J]. *遥感应用*, 2009, (4): 50—55.
- [27] 卢璐, 苏荣国, 胡序朋, 等. 高斯分解法研究浮游植物荧光激发光谱[J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1115—1119.
- [28] 卢璐, 苏荣国, 王修林, 等. 基于四阶导数的浮游植物叶绿素荧光激发光谱特征研究[J]. *光谱学光谱分析*, 2007, 27(11): 2307—2312.
- [29] CURTIS D Mobley. *Light and Water, Radiative Transfer in Natural Water*[M]. New York: Academic Press, 1994.
- [30] CARDER K L, HAWES S K, LEE Z P, et al. SeaWIFS algorithm for chlorophyll-a and CDOM in a subtropical environment[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995.
- [31] GORDON H R, MOREL A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review, Vol. 4[R]. New York: Springer, 1983.
- [32] WETTLE M. Fourth derivative analysis of red sea coral reflectance spectral[J]. *I J Remote Sensing*, 2003, 24(19): 3867—3872.
- [33] TSAI Fuan, PHIPOT William. Derivative analysis of hyperspectral data[J]. *Remote Sensing of environment*, 1998(1): 200—211.

- [34] LEE Estep, GREGORY A Carter. Derivative analysis of AVIRIS data for crop stress detection[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(12): 1417—1421.
- [35] BUTLER W, HOPKINS D. Higher derivatives analysis of comdex absorption spectra[J]. Photochemical and Photobiological Sciences, 1970, 12: 439—450.
- [36] MOREL A. Optical properties of pure water and pure sea water[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [37] BUKATA R P, JEROME J H, KONDRATYEV Ya K, et al. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters[M]. New York: CRC Press, 1995.
- [38] POPPER R M, FRY E S. Absorption spectrum (380~700 nm) of pure water: II. Integrating cavity measurements[J]. Applied Optics, 1977, 36(8): 8710—8723.
- [39] MILLIE F David. 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, Part 2): 1240—1251.
- [40] CRAIG Susanne E, LOHRENZ Steven E, LEE Zhongping. Use of hyperspectral remote sensing reflectance for detection and assessment of the harmful alga, *Karenia brevis*[J]. Applied Optics, 2006, 45(21): 5414—5425.
- [41] SATHYENDRANATH S, PRIEUR L, MOREL A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters[J]. Remote Sensing, 1989, 10(8): 1373—1394.
- [42] TASSAN S. Local algorithms using seawifs data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters[J]. Applied Optics, 1994, 33(2): 2369—2378.
- [43] LEE Zhongping. Hyperspectral remote sensing for shallow waters; 1. A semianalytical model[J]. Applied Optics, 1998, 37(27): 6329—6338.
- [44] LEE Zhongping. Hyperspectral remote sensing for shallow waters; 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization[J]. Applied Optics, 1999, 38(18): 3831—3843.
- [45] LEE Zhongping. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deepwaters [J]. Applied Optics, 2002, 41(27): 5755—5772.
- [46] SMYTH Timothy. A semi-analytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: description, implementation and performance assessment[J]. Applied Optics, 2006, 45(31): 8116—8131.

A method of classification for algal species based on remote sensing reflectance spectra

YIN Lei^{1,2}, TANG Jun-wu^{1,3}, SONG Qing-jun⁴

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Sciences, Beijing 100101, China; 2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. National Marine Technology Center, Tianjin 300112, China; 4. National Marine Satellite Application Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The remote sensing reflectance spectra measured from 17 phytoplankton species belonging to dinophyta and bacillariophyta were studied. The fourth-derivative analysis was performed on the spectra after being smoothed, reversed and normalized. According to clustering analysis, the algae were classified correctly into the two categories. The derivative spectra of dinophyta and bacillariophyta were separately averaged to obtain their characteristic spectra. And a sensitivity analysis about mineral particles was carried out, and the correct probability could up to 90% when the mineral concentration was less than 50 mg/dm³. In a word, the derivative method could be a useful tool to differentiate dinophyta and bacillariophyta.

Key words: remote sensing reflectance; fourth-derivation; phytoplankton; discrimination