基于 coif2 小波的浮游植物活体三维荧光光谱识别技术研究

宝^{1,4},苏荣国^{1*},宋志杰²,张 芳³,王修林¹ 刘

1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100

2. 中国海洋大学信息科学与工程学院,山东青岛 266100

3. 中国极地研究中心,上海 200136

4. 山东省产品质量监督检验研究院,山东济南 250103

摘 要 小波分析技术是提取不同门类以及种属水平上浮游植物的三维荧光光谱特征的有效手段,利用 coif2 小波函数对分属于 7 个门, 30 个属的 37 种我国近海常见的浮游植物的三维荧光光谱进行小波分解, 小 波分量和尺度分量作为浮游植物备选荧光特征谱,通过 Bayes 分析确定第 3 层尺度分量作为浮游植物门类 特征光谱,第3层尺度分量和第2和第3层小波分量的组合作为浮游植物属特征谱。对获得的浮游植物荧光 特征谱进行系统聚类分析,得到 37 种浮游植物门类水平上的 107 条和属水平上的 155 条浮游植物荧光标准 谱,组成浮游植物荧光标准谱库。在此标准谱库的基础上,利用非负最小二乘法解析的多元线性回归建立浮 游植物三维荧光光谱识别技术。 该技术对 1 776 个单种藻样品和 384 个混合藻样品进行识别分析,单种浮游 植物样品在门类水平上的识别正确率为 98.1%,属水平上的识别正确率为 97.0%;浮游植物混合样品中的 优势种在门水平上的识别正确率分别为 94.8%, 在属水平上的识别正确率为 92.7%。

关键词 浮游植物;识别;小波分析;三维荧光光谱 中图分类号: O657.3 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)05-1275-04

引 言

浮游植物群落的快速、实时、现场的监测对赤潮发生的 预警和降低经济损失有很重要的现实意义。 传统的浮游植物 种类的检测手段主要通过现场采样,实验室分析完成。实验 室分析手段[1]主要有显微镜计数法、图象识别技术^[2,3]、色 素分析技术[4.5]、荧光技术[6.7]。其中荧光检测技术因具有 灵敏度高,易于实现现场实时监测及具有良好的鉴别性等优 点而被广泛关注^[8]。Yentsch^[6]等根据叶绿素与辅助色素的 比例,成功地将不同海域的主要浮游植物分为4类进行鉴别 分析。Lee 等^[9]根据蓝藻的藻蛋白的荧光特征谱,初步建立 了现场监测蓝藻含量的荧光分析技术。Kolbowski 等^[10]利用 发光二极管阵列作为激发光源得到的活体叶绿素荧光激发光 谱实现了3个主要的浮游植物种群的识别测定。Beutler 等^[8] 利用浮游植物活体叶绿素荧光激发光谱将浮游植物分为4大 类[绿藻,蓝藻,隐藻,褐藻(甲藻和硅藻)]进行识别测定。 国内研究者张芳[11]等利用小波分析技术对浮游植物活体三 维荧光光谱进行了研究,结果表明通过小波分析提取的浮游 植物的三维荧光光谱特征在门、属水平上具有特异性。

本文根据我国近海浮游植物群落组成特点[12](未发生赤 潮时在一定的区域内总是以 1~2 门类的浮游植物为群落优 势种;而发生的赤潮也大多是单相赤潮),应用 coif2 小波、 聚类分析等技术建立了浮游植物群落组成荧光识别测定技 术,该技术能够在门类和属水平上对富有植物群落组成进行 识别分析。

实验部分 1

实验选取 37 种浮游植物,均来自中国海洋大学海洋污 染生态化学实验室。用过滤后的天然海水和营养液按照配方 配制培养基。培养箱的温度梯度为 20 ℃, 25 ℃光照梯度为 20 000, 12 000, 7 000, 4 000 lux。光照照射周期为 12:12 h。使用 JY Fluorolog3-11 荧光分光光度计测量荧光光谱。扫 描参数设置: 激发波长 400~650 nm, 发射波长 600~750 nm, 步长为5 nm, 狭缝宽度为5 nm。每份样品平行测定两 次。使用由 bbe moldaenke 公司生产的 BBE 荧光藻类分析仪 测量部分样品的叶绿素浓度,然后两两混合,使优势藻的叶

e-mail: 290435932@qq. com, 8784135@163. com

收稿日期: 2008-11-06,修订日期: 2009-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40706036)和国家(863 计划)项目(2006AA09Z178)资助

作者简介: 刘 宝, 1982 年生, 中国海洋大学化学化工学院研究生 * 通讯联系人 e-mail: surongguo@mail. ouc. edu. cn

绿素浓度占75%。

2 数据处理

将扫描的得到的光谱文件(*.spc 格式)转入到 matlab (ver6.5)中。利用 Delaunay 三角插值法^[13],消除三维荧光光 谱的瑞利散射和拉曼散射。图 1 为去除瑞利散射前后的中肋 骨条藻的三维荧光光谱。



Fig. 1 Original 3D spectra(a) and the 3D spectra removed of Rayleigh scatters(b) of phytoplankton

将上述得到的三维荧光光谱做最大值归一化处理。然后 以 coif2 小波基函数对其进行 4 层小波分解,对 4 层尺度分 量 4 层小波分量进行 Bayes 判别分析,选取判别能力最好的 分量作为备选荧光特征谱。对特征谱在门、属水平上进行系 统聚类分析,建立浮游植物门水平上的标准谱库和属水平上 的标准谱库。在标准谱库的基础上,以多元线性回归及非负 最小二乘法解析建立了浮游植物荧光识别测定技术。

3 结果与讨论

3.1 基于 coiflet2 小波的浮游植物三维荧光光谱的特征提取

选择具有正交性、紧支撑性的小波基函数 coif2 对浮游 植物荧光光谱进行 4 层小波分解。小波特征谱定义为原始荧 光光谱在小波空间的投影(尺度分量和小波分量)。本文采用 Bayes 判别技术进行识别特征谱的选择。

对门水平上的尺度分量进行 Bayes 判别分析发现,第3 层尺度分量的特征谱的误判率最低[图 2(a)]:硅藻门(Bac) 的判别错误率为5.48%,其他门的判别错误率都在5%以 下;对属水平上的尺度分量进行 Bayes 判别分析发现,第3 层尺度分量的特征谱的误判率最低[图 2(b)],判别错误率都 在10%以下的是圆筛藻属(40.2%)、双尾藻属(20.8%)、海 链藻属(46.9%)。对小波分量的 Bayes 分析发现,由第2、3 层小波分量联合构成的特征谱对于圆筛属的判别错误率为 33.3%,对于双尾藻属的判别错误率为11.5%,故选择第2、 3层小波分量的联合作为对第3层尺度分量特征谱的补充。

在确定浮游植物特征谱的基础上,本文采用系统聚类法

对每种浮游植物的特征谱进行聚类分析,取每一类所有特征 谱的平均作为该类的代表,即为该种浮游植物的一条标准 谱,由此得到 37 种浮游植物门类水平上的 107 条及属水平 上的 155 条荧光标准谱。



Fig. 2 Classifying results of the 3rd scale vector on the level of division(a) and the level of genus(b) by Bayes discriminate analysis

3.2 基于非负最小二乘法识别结果

以非负最小二乘法(NNLS)解析的多元线性回归法建立 浮游植物荧光识别模型。

由表1看出:利用门水平上的标准谱库对分属于7个门 37种藻的1776个单种样品组成的测试集进行识别,总体正 确率为98.1%; 384 个混合样品的总体识别正确率为 94.8%;利用门——属水平的二级标准谱库对37种藻1776 个单种藻样品识别分析,除了盒型藻属(65.6%)外,其他藻 属的识别正确率都在80%以上,总体识别正确率为97.0%; 对于384个两种藻组成的混合样品获得了92.7%的识别正 确率。

4 结 论

小波分析是浮游植物三维荧光光谱特征提取的有效手段,基于此技术建立的浮游植物荧光识别技术能够应用于浮游植物群落组成的现场、快速识别测定。

	属		种	代码	[1]	属		种	代码
硅藻 94.8%	拟菱形藻属	100%	尖刺拟菱形藻	Ps	绿藻(Chl)100%	小球藻属	100%	小球藻	Ch
	骨条藻属	89.6%	中肋骨条藻	Sk		盐藻属	100%	盐藻	Ds
	角毛藻属	100%	旋链角毛藻	Cu		四爿藻属	100%	亚心型扁藻	Pu
			柔弱角毛藻*	De		微囊藻属	100%	细小微胞藻	Мр
	盒型藻属	65.6%	盒形藻	Oc	甲藁(Din)99.5%	亚山大藻属	98.4%	塔玛亚历山大	Aì
	圆筛藻属	91.7%	圆筛藻	Cf		前沟藻属	90.6%	强壮前沟藻	Am
			圆筛藻	Cs		原甲藻属	99.5%	东海原甲藻	Pr
	双尾藻属	81.2%	布氏双尾藻	Db				微小原甲藻	Pm
	海琏藻属	97.9%	圆海链藻	Tr				海洋原甲藻	Ma
			诺氏海链藻	Tn		裸甲藻属	99.5%	简裸甲藻	Gs
	细柱藻属	96.9%	丹麦细柱藻	١.d		凯伦藻属	100%	米氏凯伦藻	Km
金藻(Chr)98.8%	棕囊藻属	99.0%	球形棕囊藥	Cg		斯比藻属	99.5%	锥状斯比藻	Sc
	等鞭金藻属	100%	球等鞭金藻	Ig	黄藻(Xan)100%	异湾藻属	100%	赤潮异湾藻	Ha
	颗石藻属	100%	颗石藻	Ks		卡盾藻属	100%	海洋卡盾藻	Cm
	定鞭金藻属	100%	小普林藻	Pp	隐藻(Cry)99.0%	隐藻属	96.9%	隐藻	Rs
	硅鞭藻属	99.5%	六异刺硅鞭藻	Se				盐沼隐藻	Ra
					蓝藻(Cya)100%	鱼腥藻属	100%	鱼腥藻	Су
						螺旋藻属	99.0%	螺旋藻	Lx
						聚球藻属	99.5%	聚球藥	Sy
						束毛藻属	100%	红海束毛藻	Te

Table 1 Phytoplantkon species selected in the test and the result

参考文献

- [1] GAO Ya-hui, YANG Jun-xia, LUO Qiao-qi(高亚辉, 杨军霞, 骆巧琦). Journal of Xiamen University(Nature Science)(厦门大学学报・ 自然版), 2006, 45: 12.
- [2] Pech-Pacheco J L, Alvarez-Borrego J. Marine Biology, 1998, 132: 357.
- [3] Sieracki C K, Sieracki M E, Marine Ecology Progress Series, 1998, 168: 285.
- [4] Lewitus A J, White D L, Tymowski R G, et al. Estuaries, 2005, 28: 160.
- [5] Mackey M D, Mackey D J, Higgins H W, et al. Marine Ecology Progress Series, 1996, 144: 265.
- [6] Yentsch C S, Phinney D A. Journal of Plankton Research, 1985, 7: 617.
- [7] Seppala J, Balode M. Hydrobiologia, 1998, 363; 207.
- [8] Beutler M, Wiltshire K H, Meyer B, et al. Photosynthesis Research, 2002, 72(1): 39.
- [9] Lee T, Tsuzuki M, Takeuchi T. Analytical Chimica Acta, 1995, 302: 81.
- [10] Kolbowski J, Schreiber U. Photosynthesis: from Light to Biosphere. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. 825.
- [11] ZHANG Fang, WANG Liang, SU Rong-guo(张 芳, 王 良, 苏荣国). Chinese Journal of Sensors and Actuators(传感技术学报), 2007, 20(10): 2143.
- [12] SU Rong-guo, HU Xu-peng, ZHANG Chuan-song(苏荣国, 胡序朋, 张传松). Environmental Science(环境科学), 2007, 28(7): 1529.
- [13] Richard G Z, Wade N S, Mary A M. Marine Chemistry, 2004, 89: 15.

Research on the 3D Fluorescence Spectra Differentiation of Phytoplankton by Coiflet2 Wavelet

LIU Bao^{1,4}, SU Rong-guo¹*, SONG Zhi-jie², ZHANG Fang³, WANG Xiu-lin¹

- 1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
- 2. College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
- 3. Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China
- 4. Shandong Supervision and Inspection Institute for Product Quality, Ji'nan 250103, China

Abstract In the present paper, the authors utilize the wavelet base function coiflet2 (coif2) to analyze the 3D fluorescence spectra of 37 phytoplankton species belonging to 30 genera of 7 divisions, and these phytoplankton species include common species frequently causing harmful algal blooms and most predominant algal species in the inshore area of China Sea. After the Rayleigh and Raman scattering peaks were removed by the Delaunay triangulation interpolation, the fluorescence spectra of those phytoplankton species were transformed with the coiflet2 wavelet, and the scale vectors and the wavelet vectors were candidate for the feature spectra. Based on the testing results by Bayesian analysis, the 3rd scale vectors were the best feature segments at the division level and picked out as the fluorescence division feature spectra of those phytoplankton species, and the group of the 3rd scale vectors, the 2nd and 3rd wavelet vectors were the best feature segments at the genus level and chosen as the fluorescent genus feature spectra of those phytoplankton species. The reference spectra by cluster analysis, respectively. The reference spectra base for 37 phytoplankton species was composed of 107 reference spectra at the division level and 155 ones at the genus level. Based on this reference spectra base, a fluorometric discriminating method for phytoplankton species, a correct discriminating rate of 97. 0% at genus level and 98. 1% at division level can be obtained; The correct discriminating rates are more than 94. 8% at the division level for 384 mixed samples from two phytoplankton species.

Keywords Phytoplankton; Identification; Wavelet analysis; 3D fluorescence speatra

(Received Nov. 6, 2008; accepted Feb. 8, 2009)

* Corresponding author