

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究

陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国*, 石晓勇

(中国海洋大学化学化工学院, 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 浮游藻荧光分析技术因其能够实现现场、快速、低成本测定而受到广泛研究和应用。本研究以浮游藻活体三维荧光光谱(EEM)为基础, 利用平行因子(PARAFAC)和CHEMTAX发展了浮游藻群落组成荧光分析技术。首先, 将PARAFAC模型应用于23种浮游藻的EEM, 通过残差分析、荧光成分谱形分析等方法确定浮游藻EEM由12个荧光成分组成; 然后, 利用Bayesian判别分析表明浮游藻12个荧光成分的组成具有明显的门类特征性; 最后, 以获得的12个荧光成分构建浮游藻“荧光成分比值矩阵”, 结合CHEMTAX建立浮游藻荧光识别分析技术。通过测试表明, 该技术对531个单种藻样品的平均识别正确率是99.1%, 其中, 绿藻的识别正确率为97.5%, 其余藻的识别正确率为100%。对于95个实验室混合样品, 优势藻和次优势藻的平均识别正确率分别为98.5%和90.5%; 测定的平均相对含量分别为69.7%和26.4%。结果表明, 本研究所建立的EEM-PARAFAC-CHEMTAX方法能够实现浮游藻群落组成的快速定性定量测定。

关键词: 浮游藻群落组成; 三维荧光光谱; 平行因子; 活体; CHEMTAX

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0924-09 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.03.016

Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis

CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, SHI Xiao-yong

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: An *in vivo* three-dimensional fluorescence method for the determination of algae community structure was developed by parallel factor (PARAFAC) analysis and CHEMTAX. The PARAFAC model was applied to fluorescence excitation-emission matrix (EEM) of 23 algae species and 12 fluorescent components were identified according to the residual sum of squares and specificity of the composition profiles of fluorescent. Based on the 12 fluorescent components, the algae species at different growth stages were correctly classified at the division level using Bayesian discriminant analysis (BDA). Then the reference fluorescent component ratio matrix was constructed for CHEMTAX, and the EEM-PARAFAC-CHEMTAX method was developed to differentiate taxonomic groups of algae. When the fluorometric method was used for 531 single-species samples, the average correct discrimination ratio (CDR) was 99.1% and the correct discrimination ratios (CDRs) were 100% at the division level except Chlorophyta, the CDR of which was 97.5%. The CDRs for 95 mixtures were above 98.5% for the dominant algae species and above 90.5% for the subdominant algae species, with average relative contents of 69.7% and 26.4%, respectively. This technique would be of great aid when low-cost and rapid analysis is needed for samples in a large batch.

Key words: algae community composition; fluorescence excitation-emission matrix; parallel factor analysis; *in vivo*; CHEMTAX

浮游藻类是普遍存在于自然水体中的一类有色素能自养生活的低等植物, 是物质代谢和能量循环的初级生产者(是湖泊水体中鱼类和其他经济动物的重要饵料), 对维持湖泊水生态系统的平衡起着重要作用^[1, 2]。浮游藻还与湖泊水的营养状况密切相关, 当水中富营养化达到一定程度, 就会产生藻华^[3]。因此, 需要建立一种快速、低成本的浮游藻群落组成识别技术, 以实现浮游藻群落组成的常规和应急监测。

目前, 常用的浮游藻群落组成分析方法有显微镜法、色素分析法和荧光法等。近年来, 随着高效

液相色谱法分析技术和CHEMTAX矩阵因子化程序的发展, 通过测定水体中光合色素的含量定量浮游藻群落组成和丰度得到广泛应用^[4]。CHEMTAX矩阵因子化程序采用“最速下降算法”, 让给定的初始特征色素比值在一定的范围内迭代, 最后给出满足设定条件的最优解, 从而确定浮游藻群落组成和丰度^[5, 6]。HPLC具有大批量样品连续分析的优势^[7]。

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41376106); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501)

作者简介: 陈小娜(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为浮游藻监测技术, E-mail: chenxiaona421@163.com

* 通讯联系人, E-mail: surongguo@ouc.edu.cn

另外,与传统分类方法相比^[8, 9],CHEMTAX 克服了不能分辨一种色素被两种以上浮游藻作为特征色素的困难,对色素特征无明确的要求,同时又限定了色素比值的变化范围而不至于得到负的或不合理的结果. HPLC-CHEMTAX 联用技术能够比较准确地给出优势浮游藻种类的色素比值和丰度值,是比较可靠的浮游藻化学分类技术^[7, 10].

然而,HPLC 色素分析存在明显缺点:化学试剂消耗量大、分析时间相对较长、需要专业人员操作. 三维荧光光谱(EEM)也称为激发发射矩阵^[11],由于其具有灵敏度高、选择性好、特征信息全面、样品无损等特点^[12, 13],在化学和生物化学领域里得到广泛应用. 平行因子(PARAFAC)是三线性分解算法^[14],能够将 EEM 分解为 3 个分矩阵:一个得分矩阵代表了组分浓度和两个载荷矩阵代表了发射光谱和激发光谱信息^[15~20],实现荧光性混合组分的同时测定.

藻类色素组成具有种类特征性,其 EEM 能够反映不同藻类的色素组成^[21, 22]. 本研究将 PARAFAC 模型应用于浮游藻 EEM,获得浮游藻 EEM 的荧光成分,构建浮游藻“荧光成分比值矩阵”,利用 CHEMTAX 程序建立了浮游藻群落组成荧光分析技术,类似技术尚未见报道.

1 材料与方法

1.1 藻种的培养

本研究选择培养了 23 种湖泊浮游藻(表 1),分属硅藻门、蓝藻门、绿藻门、裸藻门的 18 个属. 所有藻种由中国海洋大学海洋污染生态化学实验室提供. 培养藻种选择合适的培养基(蓝藻门:BG11,绿藻门:SE,硅藻门:D1,裸藻门:AF-6),采用 GXZ-3100 型光照培养箱培养藻种,设置培养箱光照分别为 80、120、160 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,温度为 20℃,光暗比为 12 h:12 h. 所有藻种在上述实验条件下经过 7 d 的预培养后扩大培养,扩大培养时要确定接种藻密度约为 $10^4 \text{ cell}\cdot\text{mL}^{-1}$,每个藻种平行培养两份,其中一份的荧光数据作为训练集,另一份作为测试集. 培养周期为 15 d,每 3 d 取一次样进行荧光测定.

选取进入指数生长期(培养的第 9 d)且长势稳定的藻种,在混合前用 BBE 藻类分析仪(德国 bbe-moldaenke)测定藻种的叶绿素浓度,按照叶绿素浓度比 1:3 和 3:1 把不同门类的浮游藻藻液两两混合,得到 98 个浮游藻混合样品,并对其进行荧光测定.

1.2 活体浮游藻三维荧光光谱的获得

仪器:Fluorolog3-11 荧光分光光度计及配套软件,1 cm 石英比色皿.

表 1 实验所选用的 23 种浮游藻

Table 1 23 Phytoplankton species selected for the experiments

门	属	种	简称
硅藻门 Bacillariophyta	小环藻属 <i>Cyclotella</i>	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghmiuna</i> Kutz	Cm
		小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	Cy
	直链藻属 <i>Melosira</i>	变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	Mv
		颗粒直链藻最窄变种 <i>Melosira granulate</i> Var <i>angustissima</i>	Mg
	针杆藻属 <i>Synedra</i>	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	Sy
	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	Fr
	异极藻属 <i>Gomphonema</i>	窄异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i>	Go
蓝藻门 Cyanophyta	微胞微囊藻属 <i>Microcystis</i>	铜绿微囊藻 <i>Microcystis aeruginosa</i>	Ma
		微囊藻 <i>Microcystis</i> sp. 7806	Mi
	束丝藻属 <i>Aphanizomenon</i>	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flosaquae</i>	Ap
	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	水华鱼腥藻 <i>Anabaena flosaquae</i>	An
	颤藻属 <i>Oscillatoria</i>	小颤藻 <i>Oscillatoria tenuis</i>	Ot
	鞘丝藻属 <i>Lyngbya</i>	库氏席藻 <i>Lyngbya kuetzingii</i>	Lk
绿藻门 Chlorophyta	栅藻属 <i>Scenedesmus</i>	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricanda</i>	Sq
		斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i>	So
	实球藻属 <i>Pandorina</i>	实球藻 <i>Pandorina morum</i>	Pm
	绿球藻属 <i>Chlorococcum</i>	绿球藻 <i>Chlorococcum</i> sp.	Ch
	空星藻属 <i>Coelastrum</i>	空星藻 <i>Coelastrum sphaericum</i>	Cs
	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	衣藻 <i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Cr
	纤维藻属 <i>Ankistrodesmus</i>	镰形纤维藻 <i>Ankistrodesmus falcatus</i>	Af
裸藻门 Euglenophyta	裸藻属 <i>Euglena</i>	纤细裸藻 <i>Euglena gracilis</i>	Eg
		中型裸藻 <i>Euglena intermedia</i>	Ei
	扁裸藻属 <i>Phacus</i>	敏捷扁裸藻 <i>Phacus agilis</i> Skuja	Pa

仪器条件设定:激发波长 400 ~ 650 nm, 发射波长 600 ~ 750 nm, 步长 5 nm, 狭缝宽度 5 nm, 扫描速度 $80 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}$, 信号积分时间 0.05 s.

1.3 数据预处理

将扫描所得到的 EEM 数据在 Origin 7.5 中转换成 ASCII Text File (*.txt) 数据格式, 得到 51 行 31 列的数据矩阵, 分别对应于激发波长(400 ~ 650 nm) 和发射波长(600 ~ 750 nm), 在矩阵内的元素代表着相应激发和发射波长下的荧光强度. 将数据矩阵在 MATLAB 中保存为 .mat 结构体.

然后, 对浮游藻 EEM 进行去散射和平滑处理. 采用 Delaunay 三角形内插值法来去除散射^[23, 24], 该方法只对确定的散射区域进行拟合, 未发生散射的区域, 信号保持不变. 去散射的数据用如下公式进行标准化:

$$x_{\max h} = (x_{\max})_{\max}; \bar{x} = x/x_{\max h}$$

式中, $\bar{x}$ 是已标准化后的数据, x 是原始样品数据, $x_{\max h}$ 是原始数据的最大值点.

采用 Daubechies7(db7) 小波对标准化的荧光光谱数据进行分解, 产生尺度分量和小波分量, 将第一层尺度分量重构得到去噪后的浮游藻 EEM 数据.

1.4 平行因子模型

PARAFAC^[25] 是基于三线性分解理论采用交替最小二乘算法实现的一种数学模型. 广泛应用于 EEM 数据的分析.

对于一个 $I \times J \times K$ 的三维数据集 X , 其中 I 为样品数目, J 和 K 分别为发射波长和激发波长数目, PARAFAC 分解模型可表示为:

$$X_{ijk} = \sum_{f=1}^F a_{if} b_{jf} c_{kf} + E_{ijk}$$

$$i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J; k = 1, \dots, K$$

式中, X_{ijk} 是第 i 个样品, 发射波长为 j , 激发波长为 k

的荧光强度; F 代表测量体系的总因子数; E_{ijk} 为模型残差, 表示变量不能被模型解释的大小; a_{if} 、 b_{jf} 、 c_{kf} 分别为负载矩阵 A 、 B 、 C 中的元素. PARAFAC 模型的有效性通常根据残差分析、荧光成分谱形分析、核一致等方式进行确定^[25]. PARAFAC 算法借助 MATLAB 软件中的“N-way toolbox”运行.

1.5 分类方法

基于矩阵因子分析的 CHEMTAX 软件可以根据浮游藻色素分析结果确定浮游藻群落的组成和各类群的丰度. 本文以荧光分析代替 HPLC 色素分析, 实现 CHEMTAX 浮游藻分类测定功能. CHEMTAX 功能的实现需要构建以下两个矩阵: ①初始荧光成分比值矩阵, 是具有浮游藻种类特征性的荧光成分组成, 是由已知类别浮游藻的 EEM 解析得到, 是 CHEMTAX 对浮游藻进行分类识别的依据; ②待测荧光成分数据矩阵, 由待测样品浮游藻 EEM 荧光成分组成, 与初始荧光成分比值矩阵相对应. CHEMTAX 根据初始荧光成分比值对待测荧光成分数据进行分析并给出结果. 分析运算需要进行多次直到收敛, 每次运算后的荧光成分比值作为下一次运算的起始值^[26], 在运算时需限定初始荧光成分比值的变化范围, 默认的最大可能变化范围是 40%, 即原值是 r , 则其可以在 $2r/5 \sim 5r/2$ 之间变动^[10].

2 结果与讨论

2.1 三维荧光光谱的平滑

小波滤波器能有效地减小噪声影响, 在改善信噪比的同时, 提高信号稳定性和分辨率^[27]. 在本研究中, 利用 db7 小波对 EEM 进行一层分解, 噪声主要存在于高频系数中, 用第一层尺度分量(低频系数)进行二维小波重构, 从而达到降低噪声突出有用信号的目的. 图 1(a) 是四尾栅藻的原始 EEM, 经

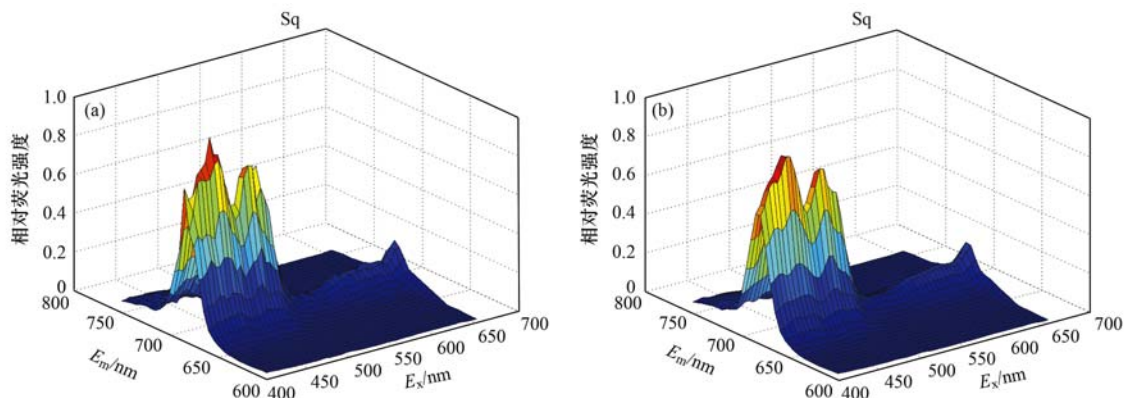


图 1 db7 小波平滑前后的 EEM(四尾栅藻)

Fig. 1 3D fluorescence spectra of Sq before and after wavelet decomposition reconstruction

db7 小波平滑后的 EEM 如图 1(b) 所示。

2.2 荧光成分选择

PARAFAC 对组分数很敏感,建模过程中选择适当的组分数对模型的效果影响较大。只有选择正确的组分数目而且信噪比合适,解析的结果才能反映真实的谱图。本研究首先利用残差平方和 (SSR)

初步确定成分数 $F = 12$ (图 2)。从图 2 中可见,从成分数 $F = 10$ 到 $F = 11$ 时,残差有所增加,但从成分数 $F = 11$ 到 $F = 12$ 时,残差大幅度减小,且残差较小;而从成分数 $F = 12$ 变为 $F = 13$ 时,残差无明显变化;然后,通过荧光成分图和残差图对 12 成分 PARAFAC 模型进行验证 (图 3 和图 4),从图 3 和图

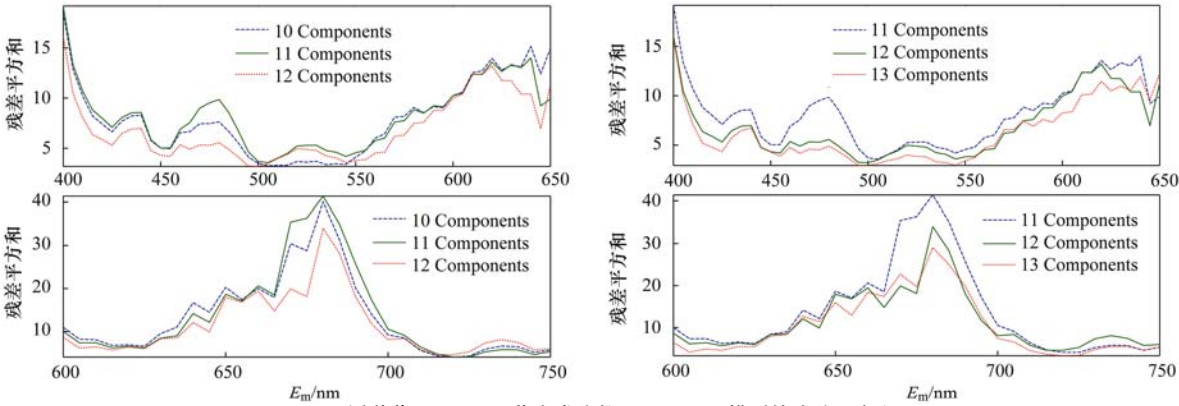
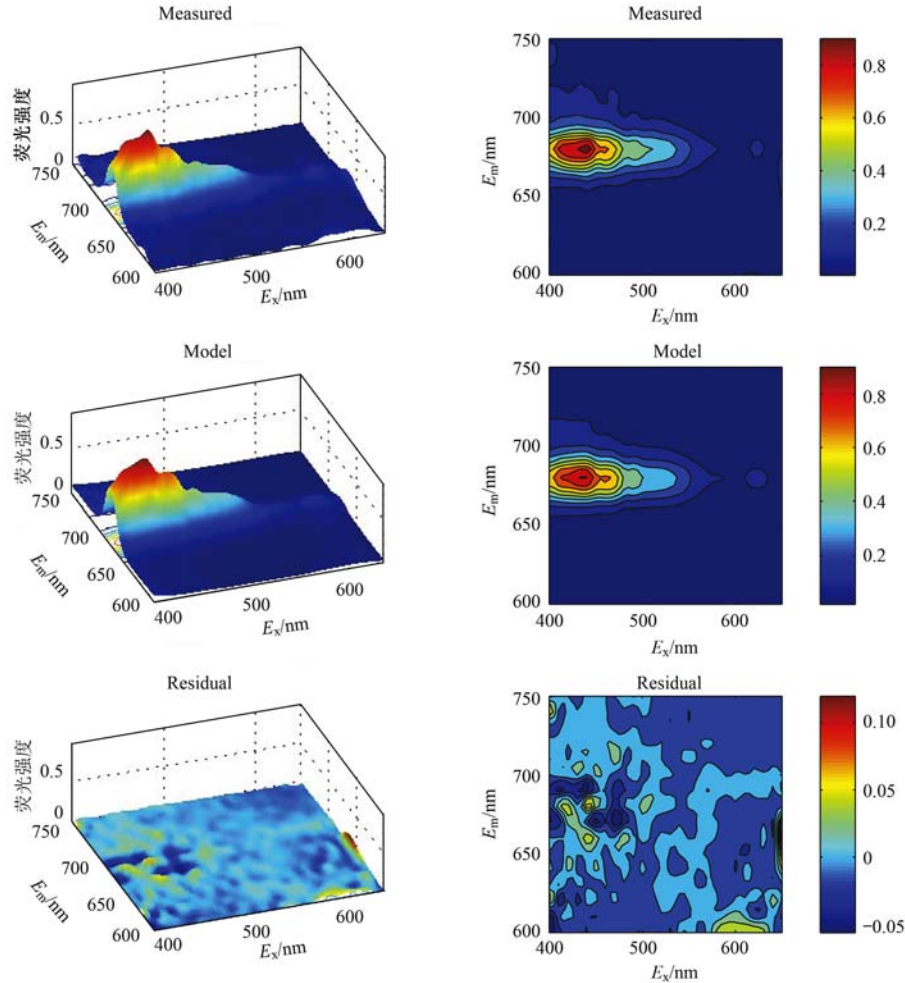


图 2 浮游藻 EEM 不同荧光成分数 PARAFAC 模型的残差平方和

Fig. 2 Analysis of the fit PARAFAC model to the measured EEM with increasing number of fluorescent components



荧光强度以 Raman 单位表示

图 3 浮游藻 EEM 以及 12 个荧光成分的重构 EEM 和残差分布

Fig. 3 Example of measured, modeled, residual EEM for twelve different components

4 中可看出,12 个荧光成分的光谱谱形符合物质光谱的一般特点,且 12 个荧光成分重构的 EEM 与 PARAFAC 分解前的 EEM 能够很好地吻合. 从图 5 中可以看出,各荧光成分的激发光谱有一个或者两个最大值,发射光谱除了 2、6、11、12 之外都只有一个最大值. 同时,从残差图可以看出,浮游藻 EEM 的荧光信号已经被完全提出.

2.3 Bayesian 判别分析

浮游藻 EEM 荧光成分组成的种类特征性是本技术的基础. 本研究通过 Bayesian 判别分析方法对浮游藻 EEM 荧光成分组成进行特征性分析. Bayesian 判别分析是根据对样品进行一定认识的先验概率的信息来确定后验分布的方法^[28, 29]. Bayesian 判别分析的结果如图 6 所示,4 个门类的浮

游藻在门水平上全部被正确分类. 表明同一门类浮游藻的 EEM 荧光成分组成相似,不同门类浮游藻的 EEM 荧光成分组成有明显差异.

2.4 初始荧光成分比值矩阵的获得及其线性独立性分析

初始荧光成分比值矩阵集中反映浮游藻 EEM 荧光成分组成的种类特征性,是进行浮游藻分类识别的依据. 本研究从 EEM-PARAFAC 模型得到浮游藻 EEM 的 12 个荧光成分,同时,为了适应 CHEMTAX 的要求,把各浮游藻的 12 个荧光成分分别求和作为其第 13 个荧光成分,并进行最大值归一化. 将各浮游藻 EEM 荧光成分组成按照浮游藻门类分别作图(图 7),从图 7 可以看出,同一门类浮游藻 EEM 荧光成分组成具有高度的相似性,而不同门

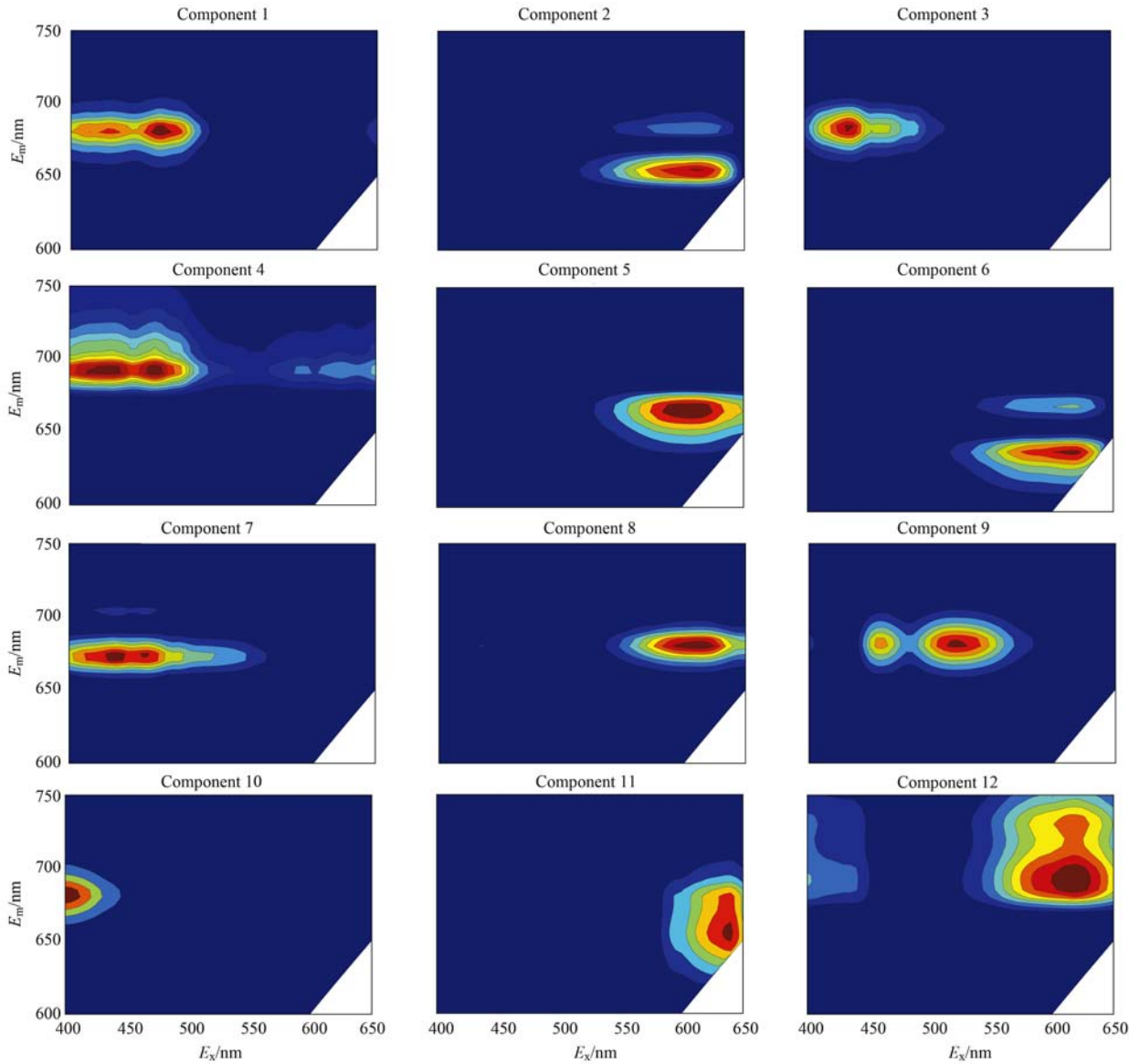


图 4 PARAFAC 解析出的 12 个荧光成分的 EEM 图谱

Fig. 4 Contour plots of the spectral characteristics of the twelve fluorescent components obtained from the PARAFAC model

类浮游藻 EEM 荧光成分组成差异明显. 这表明, 利用浮游藻 EEM 荧光成分组成来分类识别测定浮游藻群落组成是可能的. 将各门类浮游藻 EEM 荧光成分组成分别取平均值, 得到特定于 4 个门类浮游藻的荧光成分组成, 作为 CHEMTAX 程序的初始荧光成分比值矩阵(表 2).

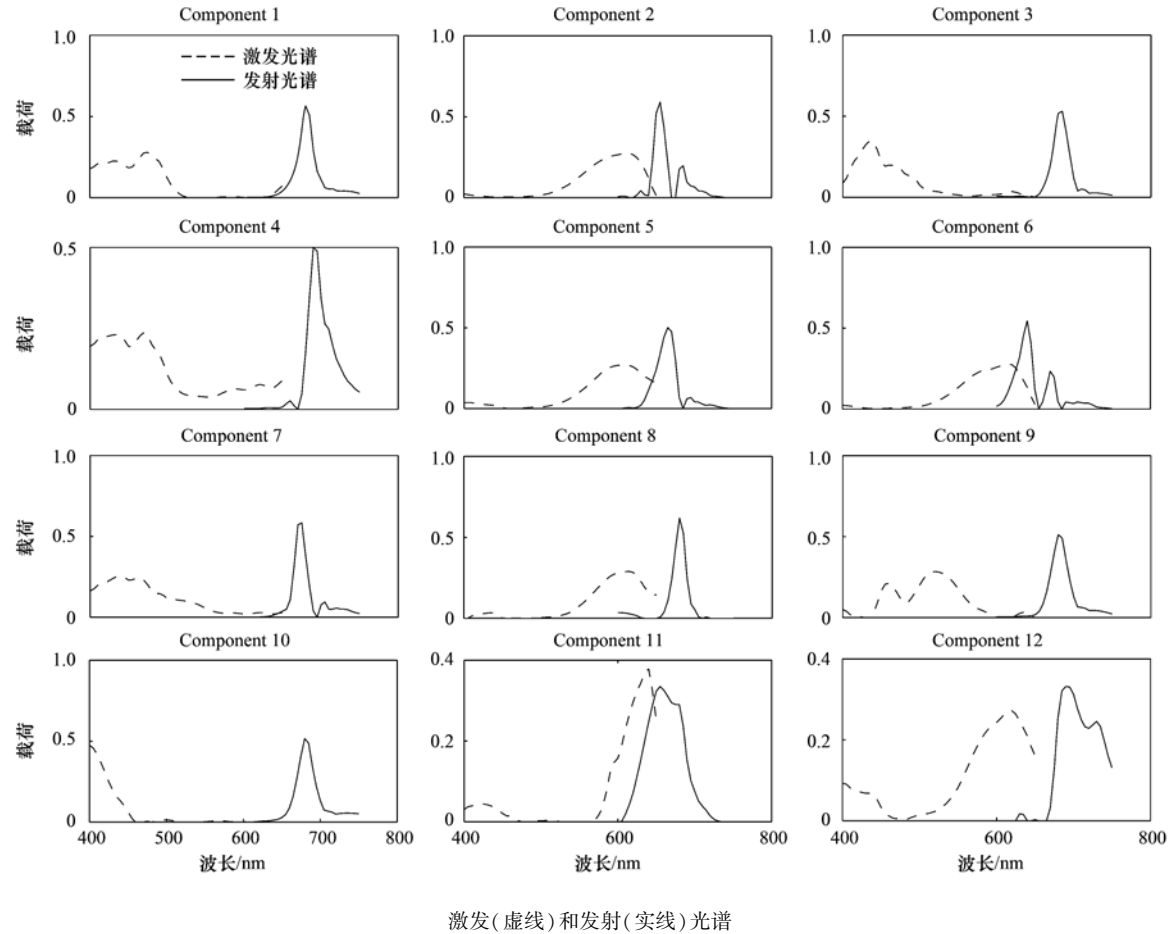


图 5 PARAFAC 模型解析出的 12 个荧光成分的激发和发射光谱

Fig. 5 Excitation and emission loadings derived from the twelve component PARAFAC model

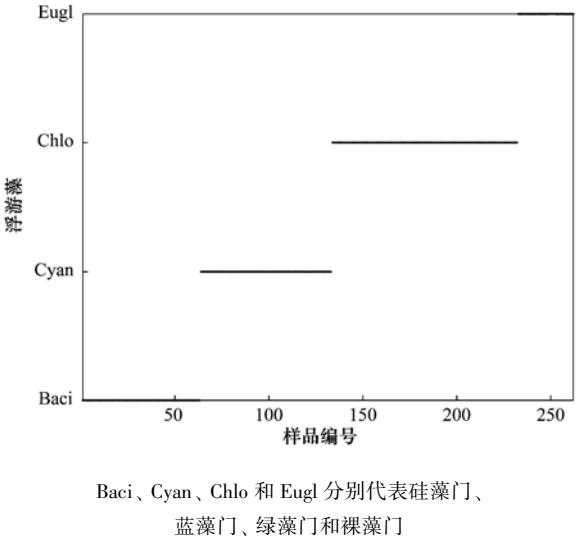


图 6 浮游藻 EEM 12 个荧光成分的 Bayesian 判别分析结果

Fig. 6 BDA of the 12 fluorescent components from the PARAFAC model

初始荧光成分比值矩阵是 CHEMTAX 程序进行浮游藻分类识别的依据, 不仅要具有浮游藻种类特征性, 而且要具有线性独立性^[10], 即任一门类浮游藻 EEM 的荧光成分组成都无法用其他门类浮游藻 EEM 的荧光成分组成线性拟合得到. 图 8 为 4 个门类浮游藻 EEM 荧光成分组成的线性独立性分析, 从中可以看出, 各门类浮游藻的 EEM 荧光成分组成均具有良好的线性独立性.

3 测试

将浮游藻初始荧光成分比值矩阵和待测荧光成分数据矩阵输入 CHEMTAX 程序中, 进行运算, 得到识别结果.

如表 3 所示, 对于实验室培养的分属于 4 个门 18 个属的 23 种浮游藻的 531 个单种藻样品, 门类水平上的平均识别正确率是 99.1%, 其中, 绿藻的识

表 2 初始荧光成分比值矩阵

Table 2 Initial fluorescent component ratios matrix/Initial ratio matrix for CHEMTAX analysis													
门	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
Baci	0.071 6	0.004 1	0.265 2	0.032 8	0.007 2	0.004 7	0.217 2	0.034 0	0.188 8	0.147 9	0.005 2	0.001 2	1.000 0
Cyan	0.005 7	0.228 9	0.006 2	0.009 3	0.171 0	0.188 2	0.010 9	0.167 8	0.006 4	0.037 3	0.097 4	0.044 8	1.000 0
Chlo	0.471 3	0.000 5	0.152 9	0.066 9	0.007 6	0.000 5	0.043 2	0.083 2	0.023 2	0.130 2	0.007 6	0.004 9	1.000 0
Eugl	0.305 8	0.001 0	0.074 8	0.302 4	0.006 1	0.000 8	0.052 4	0.089 3	0.040 0	0.072 3	0.012 3	0.006 7	1.000 0

表 3 单种藻样品在门类水平上的识别测定结果

Table 3 Discrimination results of single-algae samples at division level				
门	识别结果 (T/Total)	识别正确率/%	相对含量范围/%	平均相对含量/%
硅藻门 Bacillariophyta	129/129	100	62.0 ~ 100	92.5
蓝藻门 Cyanophyta	142/142	100	71.9 ~ 100	96.3
绿藻门 Chlorophyta	194/199	97.5	46.1 ~ 100	80.1
裸藻门 Euglenophyta	61/61	100	50.3 ~ 100	81.7

表 4 实验室混合藻样品在门类水平上的识别测定结果

Table 4 Discrimination results of laboratory mixtures at division level								
门	优势门识别结果		优势门相对含量		次优势门识别结果		次优势门相对含量	
	T/Total	正确率/%	范围/%	平均/%	T/Total	正确率/%	范围/%	平均/%
硅藻门 Bacillariophyta	17/18	94.4	58.3 ~ 96.7	80.8	17/17	100	17.0 ~ 49.3	34.2
蓝藻门 Cyanophyta	33/34	97.1	50.6 ~ 82.4	60.9	26/35	74.3	3.3 ~ 31.3	16.3
绿藻门 Chlorophyta	35/37	94.6	47.2 ~ 88.7	68.2	37/37	100	7.1 ~ 47.2	30.8
裸藻门 Euglenophyta	6/6	100	53.4 ~ 82.9	69.0	6/6	100	13.2 ~ 29.3	24.5

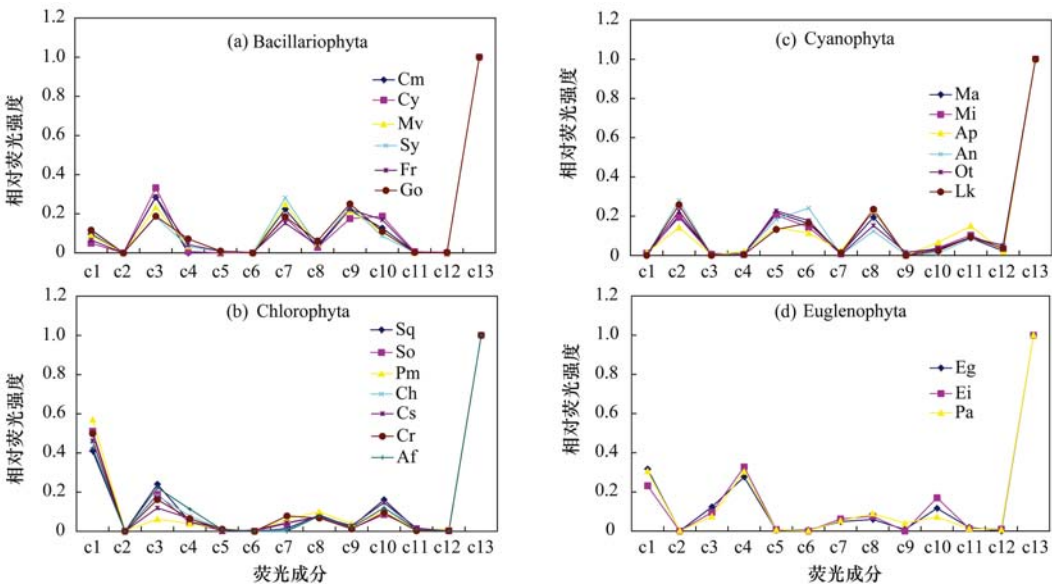


图 7 各门类浮游藻的荧光成分组成图

Fig. 7 Fluorescent component compositions of the studied algae species

别正确率为 97.5%,其余藻的识别正确率为 100%.

对于实验室混合样品(表 4),优势藻的正确识别率为 98.5%,其中,硅藻的识别正确率为 94.4%,蓝藻为 97.1%,绿藻为 94.6%,裸藻为 100%;测定

的相对含量范围为 60.9% ~ 80.8%,平均相对含量为 69.7%. 次优势藻的正确识别率为 90.5%,测定的相对含量范围为 16.3% ~ 34.2%,平均相对含量为 26.4%.

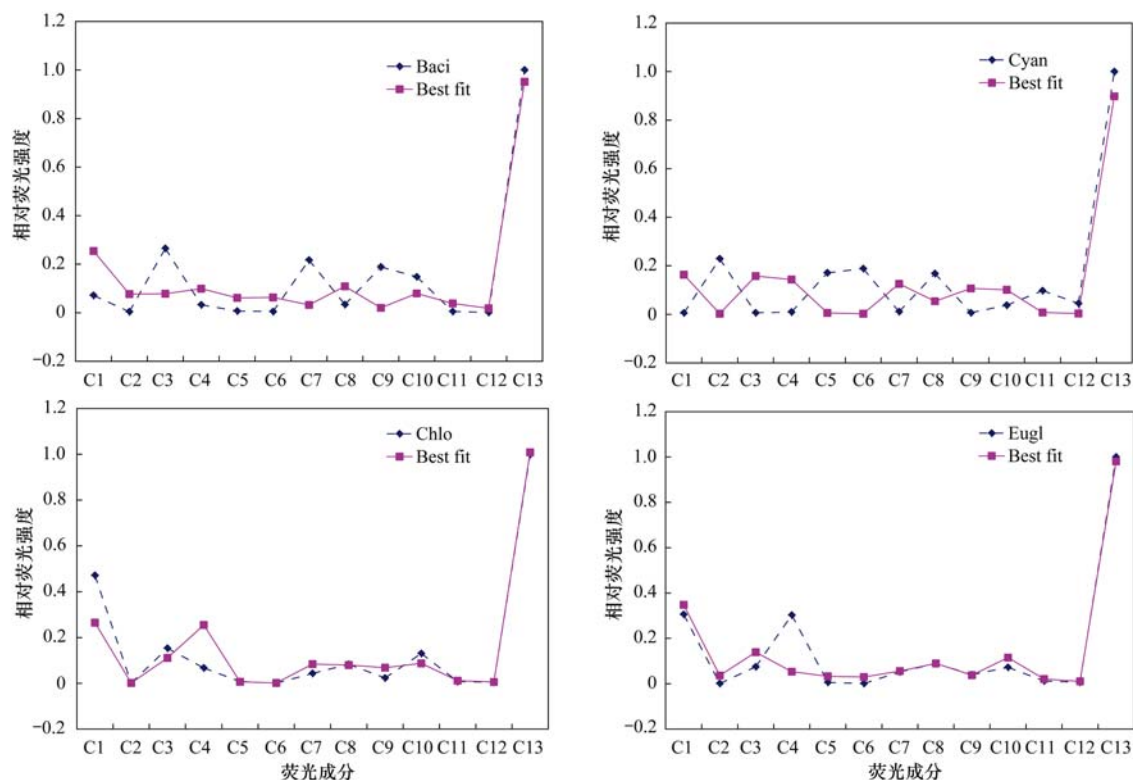


图8 浮游藻 EEM 荧光成分组成的线性独立性分析

Fig. 8 Independence analysis for fluorescent component compositions of algae

4 结论

本研究基于现有 HPLC-CHEMTAX 技术,以浮游藻 EEM 测定代替 HPLC 色素分析,建立了 EEM-PARAFAC-CHEMTAX 浮游藻群落组成荧光分析技术. 该技术能够在门类水平上(硅藻门、蓝藻门、绿藻门、裸藻门)对浮游藻群落组成进行定性、定量识别测定,将为实现现场、快速监测湖泊浮游藻群落组成提供技术支持.

参考文献:

- [1] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 等. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.
- [2] 张翠, 苏荣国, 宋志杰, 等. 小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3314-3322.
- [3] Paerl H W, Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms[J]. Environmental Microbiology Reports, 2009, 1(1): 27-37.
- [4] Rodriguez E, Varela M, Zapata M. Phytoplankton assemblages in the Gerlache and Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) determined by light microscopy and CHEMTAX analysis of HPLC pigment data[J]. Deep-Sea Research II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(4-5): 723-747.
- [5] Schlüter L, Møhlenberg F, Havskum H, et al. The use of

phytoplankton pigments for identifying and quantifying phytoplankton groups in coastal areas; testing the influence of light and nutrients on pigment/chlorophyll a ratios[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 192: 49-63.

- [6] Gameiro C, Cartaxana P, Brotas V. Environmental drivers of phytoplankton distribution and composition in Tagus Estuary, Portugal[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 75(1-2): 21-34.
- [7] Wright S W, Thomas D P, Marchant H J, et al. Analysis of phytoplankton of the Australian sector of the Southern Ocean: comparisons of microscopy and size frequency data with interpretations of pigment HPLC data using the 'CHEMTAX' matrix factorisation program[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 144(1-3): 285-298.
- [8] Havskum H, Schlüter L, Scharek R, et al. Routine quantification of phytoplankton groups-microscopy or pigment analyses[J]. Marine Ecology Progress Series, 2004, 273: 31-42.
- [9] Schlüter L, Lauridsen T L, Krogh G, et al. Identification and quantification of phytoplankton groups in lakes using new pigment ratios-a comparison between pigment analysis by HPLC and microscopy[J]. Freshwater Biology, 2006, 51(8): 1474-1485.
- [10] 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(1-3): 265-283.

- [11] Oldham P B, Zilliox E J, Walker J M. Spectral "fingerprinting" of phytoplankton populations by two-dimensional fluorescence and Fourier-transform-based pattern recognition[J]. Journal of Marine Research, 1985, **43**(4): 893-906.
- [12] Sheng G P, Yu H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2006, **40**(6): 1233-1239.
- [13] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1533-1540.
- [14] Harshman R A. Foundations of the PARAFAC procedure: Models and conditions for an "explanatory" multimodal factor analysis[J]. UCLA Working Papers in Phonetics, 1970, **16**(1): 1-84.
- [15] Bro R. PARAFAC. Tutorial and applications[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, **38**(2): 149-171.
- [16] Bro R. Exploratory study of sugar production using fluorescence spectroscopy and multi-way analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1999, **46**(2): 133-147.
- [17] Andersen C M, Bro R. Practical aspects of PARAFAC modeling of fluorescence excitation-emission data [J]. Journal of Chemometrics, 2003, **17**(4): 200-215.
- [18] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [19] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability of dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(2): 686-697.
- [20] 刘海龙, 吴希军, 田广军. 三维荧光光谱技术及平行因子分析法在绿茶分析及种类鉴别中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 685-689.
- [21] Lee T Y, Tsuzuki M, Takeuchi T, *et al.* Quantitative determination of cyanobacteria in mixed phytoplankton assemblages by an in vivo fluorimetric method [J]. Analytica Chimica Acta, 1995, **302**(1): 81-87.
- [22] Zhang F, Su R G, Wang X L, *et al.* A fluorometric method for the discrimination of harmful algal bloom species developed by wavelet analysis[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2009, **368**(1): 37-43.
- [23] Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H. The quickhull algorithm for convex hulls[J]. Mathematical Software, 1996, **22**(4): 469-483.
- [24] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. Marine Chemistry, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [25] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2008, **6**: 572-579.
- [26] Latasa M. Improving estimations of phytoplankton class abundances using CHEMTAX [J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, **329**: 13-21.
- [27] Khullar S, Michael A, Correa N, *et al.* Wavelet-based fMRI analysis: 3-D denoising, signal separation, and validation metrics [J]. NeuroImage, 2011, **54**(4): 2867-2884.
- [28] Li Y M, Anderson-Sprecher R. Facies identification from well logs: A comparison of discriminant analysis and naïve Bayes classifier[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, **53**(3-4): 149-157.
- [29] Hu Y X, Li X B. Bayes discriminant analysis method to identify risky of complicated goaf in mines and its application [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2012, **22**(2): 425-431.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Biofloculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行