

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明	(1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水正	(8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思	(15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳	(21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远	(27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋	(34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨	(39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜(DMSO)的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋	(45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇	(51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙	(61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁	(69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍	(77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军	(84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元	(91)
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山	(98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男	(108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟	(116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强	(121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军	(129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新	(137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦	(145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民	(150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳	(156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐	(163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直	(169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺	(177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴	(182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓	(188)
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇	(194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根	(198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文	(204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢	(209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栉,何宝燕,李跃鹏	(217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳	(226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南	(231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛	(237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福	(244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏	(251)
多效应残差法(MERA)表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾	(257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远	(263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文	(271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林	(277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国	(283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博	(288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇	(293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟	(302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少锋,贾永锋	(308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲	(315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎	(321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志	(328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易	(336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强	(347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文		
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛	(357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正	(364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强	(373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维	(379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新	(385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌	(395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌	(401)
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)
		专辑征稿通知(394)

2010 年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析

闫丽红¹, 陈学君², 苏荣国^{1*}, 韩秀荣¹, 张传松¹, 石晓勇¹

(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, 青岛 266100; 2. 山东省垦利石化集团有限公司, 东营 257500)

摘要: 利用三维荧光光谱(EEMs)并结合平行因子分析(PARAFAC)技术,研究了长江口口外海域的有色溶解有机物(CDOM)的荧光组分特征及其河口动力学行为. PARAFAC模型识别出长江口口外海域的CDOM由6个荧光组分组成,即陆源类腐殖质荧光组分C1[330 nm/390(430) nm]、C2(390 nm/480 nm)、C3(360 nm/440 nm)、海洋生物产物组分C5(300 nm/400 nm)及类蛋白质荧光组分C4(290 nm/350 nm)和C6(275 nm/300 nm). 结果表明,C1、C2和C3组分在河口混合过程中呈保守行为,特别是在长江口口外高盐度区;C1和C3组分在总组分中所占比例在整个研究区域随盐度增加呈稀释降低趋势,C2组分在总组分中所占比例在整个区域保持不变;C4组分在低盐度区呈保守行为,在高盐度区呈不保守行为,其在总组分中所占比例在整个研究区域呈上升趋势;C5和C6组分则在河口混合过程中呈非保守行为,并且它们在总组分中所占比例在高盐度区呈上升趋势. 另外,近岸区和远岸区的CDOM吸收系数 $a(355)$ 存在显著空间差异,近岸区明显大于远岸区,并且近岸区的 $a(355)$ 和光谱斜率 S 的范围小于远岸区;CDOM吸收系数 $a(355)$ 与陆源类腐殖质C1、C2和C3以及类蛋白质色氨酸C4存在较好的正相关性,而与海洋生物产物C5和类蛋白质酪氨酸C6不存在显著相关性,表明近岸区主要受河流输入影响,而远岸区由陆源和现场生物产生共同控制.

关键词: 有色溶解有机物; 三维荧光光谱; 平行因子分析; 河口行为; 长江口口外海域

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0051-10

Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010

YAN Li-hong¹, CHEN Xue-jun², SU Rong-guo¹, HAN Xiu-rong¹, ZHANG Chuan-song¹, SHI Xiao-yong¹

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Kenli Sinopec Group Co., Ltd., Dongying 257500, China)

Abstract: The distribution and estuarine behavior of fluorescent components of chromophoric dissolved organic matter in the seawater of outer Yangtze Estuary were determined by fluorescence excitation emission matrix spectra combined with parallel factor analysis. Six individual fluorescent components were identified by PARAFAC models, including three terrestrial humic-like components C1 [330 nm/390(430) nm], C2 (390 nm/480 nm), C3 (360 nm/440 nm), marine biological production component C5 (300 nm/400 nm) and protein-like components C4 (290 nm/350 nm) and C6 (275 nm/300 nm). The results indicated that C1, C2, and C3 showed a conservative mixing behavior in the whole estuarine region, especially in high-salinity region. And the fluorescence intensity proportion of C1 and C3 decreased with increase of salinity and fluorescence intensity proportion of C2 kept constant with increase of salinity in the whole estuarine region. While C4 showed conservative mixing behavior in low-salinity region and non-conservative mixing behavior in high-salinity region, and fluorescence intensity proportion of C4 increased with increase of salinity. However, C5 and C6 showed a non-conservative mixing behavior and fluorescence intensity proportion increased with increase of salinity in high-salinity region. Significantly spatial difference was recorded for CDOM absorption coefficient in the coastal region and in the open water areas with the highest value in coastal region and the lowest value in the open water areas. The scope of absorption coefficient and absorption slope was higher in coastal region than that in the open water areas. Significantly positive correlations were found between CDOM absorption coefficient and the fluorescence intensities of C1, C2, C3, and C4, but no significant correlation was found between C5 and C6, suggesting that the river inputs contributed to the coastal areas, while CDOM in the open water areas was affected by terrestrial inputs and phytoplankton degradation.

Key words: chromophoric dissolved organic matter(CDOM); excitation-emission matrix spectra; parallel factor analysis; estuarine behavior; the seawater of outer Yangtze Estuary

收稿日期: 2012-03-08; 修订日期: 2012-05-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063005); 山东省自然科学基金项目(ZR2009EM001)

作者简介: 闫丽红(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋中有色溶解有机物的生物地球化学循环,E-mail:ylh12345.good@163.com

* 通讯联系人,E-mail:surongguo@ouc.edu.cn

有色溶解有机物(CDOM)是存在于各种水体中的一类含有腐殖酸、富里酸和芳烃聚合物等物质的可溶性有机物,能够反映水体的性质组成^[1]. 海水中的有色溶解有机物有海源和陆源两类,前者主要以浮游植物和微生物等生物降解为主,后者由陆地径流输入和生物降解产物组成^[2]. CDOM 在水体的生物和化学过程中都起着重要作用,能够吸收对海洋生物有害的紫外辐射,也能通过光降解作用分解为小分子物质供给浮游生物利用,同时作为重金属和有机污染物的载体,影响重金属和有机污染物的迁移等过程. 另外,CDOM 光学性质相对稳定,可以做为水团示踪因子,反映海水的来源和变化情况^[3]. 因此,CDOM 研究对于海洋环境保护、海洋生物地球化学研究等有非常重要的意义.

三维荧光光谱是近年来研究 CDOM 的光谱指纹分析技术^[4],可有效地揭示 CDOM 的组成信息^[5,6],有助于从定性和定量 2 个角度同时探究 CDOM 在海洋中的分布特征及其控制因素和机制^[7-9],而且吸收光谱也备受研究者的关注. 近年来,Stedmon 等^[10]率先提出利用平行因子分析法对 CDOM 的 EEMs 进行解谱,鉴别其中的单一荧光组分及其浓度. 此后国外 PARAFAC 开始应用于陆地水环境 CDOM^[11,12]、大洋海水 CDOM 的生物降解和光降解等过程研究^[8,13,14]. 国内的研究对象主要集中在湖泊^[15-19]、河口区^[20-22]及部分海湾^[23-25]. EEMs-PARAFAC 已成为研究水环境中溶解有机物动力学特征的重要工具.

长江口及邻近海域受潮汐活动、陆源径流输入等因素的强烈影响^[22],加上特有的物理、化学条件使该区域的物质循环过程复杂化,研究长江口及邻近海域的物质迁移转化过程受到国内海洋科学家的重视. 本研究利用 EEMs-PARAFAC 技术对长江口口外海域的 CDOM 进行分析,并且结合其光吸收特性讨论了 CDOM 荧光组分的类型、性质和来源.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

2010 年 10 月 9~12 日采集地理位置为 30.5°~32.5°N、120°~124°E 的 11 个站位(图 1)的水体,采集表(0 m)、中(20~30 m)及底层(50~60 m)样,此海域主要受长江入海流的影响. 本次调查采用船只走航采样,在船上采集站点水样后,现场用 0.7 μm 的 GF/F 膜过滤水样并冷冻保存,所有水样带回实验室立即用孔径为 0.2 μm 的一次性聚醚砜

针头滤器过滤,滤液置于 125 cm³ 棕色玻璃瓶(预先于马弗炉中 450℃ 灼烧 5 h)中冷冻保存待测.

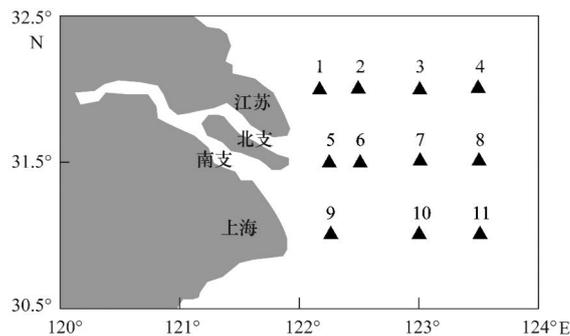


图 1 长江口采样点位置示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Yangtze Estuary

1.2 光谱测定

1.2.1 CDOM 荧光光谱测定

样品解冻到室温进行光谱测量和分析,分析仪器用 JY Fluorolog-3 荧光分光光度计,配以 1 cm 石英比色皿. 以 Milli-Q 水为空白,进行荧光扫描. 光源为 450 W 氙弧灯,PMT 电压为 700 V;激发波长 240~480 nm,发射波长 250~580 nm,步长为 5 nm,狭缝宽度为 5 nm,扫描速度为 1 200 nm·s⁻¹,扫描信号积分时间为 0.05 s.

1.2.2 CDOM 吸收光谱测定

采用岛津 UV-2500 紫外-可见分光光度计进行测定,以 Milli-Q 水为空白,用 1 cm 石英比色皿在 250~700 nm 范围内进行光吸收测定. 通过减去 680~700 nm 处的平均吸光度来去除仪器的基线漂移和散射等影响^[26]. CDOM 的光吸收系数 $a(\lambda)$ 采用非线性回归方法进行计算^[25],以 355 nm 处的吸收系数 $a(355)$ 表示 CDOM 的相对浓度,使用 Origin 软件在 290~500 nm 波段非线性拟合得到光谱斜率 S ^[27].

1.3 数据转换及去除瑞利和拉曼散射

用 Origin 7.5 软件将得到的 SPC 光谱文件转换成 TXT 形式,并运用 MATLAB 7.6 软件绘制 CDOM 的三维荧光(EEMs)谱图. 三维荧光光谱中散射峰的存在严重影响三维荧光光谱特征的表达(图 2). 以往大都采用扣除 Milli-Q 水的空白来去除散射^[28,29],效果不佳. 本研究选择 Delaunay 三角形插值法^[30]来消除三维荧光光谱的瑞利散射和拉曼散射,该技术是以散射峰邻近区域的数据为基准进行三维插值,能够有效消除散射峰的影响并保留散射区域的荧光信号.

1.4 CDOM 三维荧光光谱的平行因子分析

1.4.1 平行因子模型

平行因子算法 (PARAFAC) 是采用交替最小二乘原理的迭代类型三维数阵分解算法, 是常用的三维荧光光谱的解析方法, 可以将一个由多个 EEMs 数据构成的三维阵列 X 分解为 3 个载荷矩阵: A 、 B 和 C , 而且每个矩阵都具有实际的物理意义^[31,32]. 例如, 将 K 个样本在选取激发波长数为 I 、发射波长数为 J 条件下进行测定, 得到的激发发射光谱矩阵可构成三维响应数阵 $X(I \times J \times K)$, 它满足下面这个三线性成分模型:

$$x_{ijk} = \sum_{n=1}^N a_{in} b_{jn} c_{kn} + e_{ijk}$$

$$i = 1 \cdots I, \quad j = 1 \cdots J, \quad k = 1 \cdots K$$

式中, N 表示对体系有实际贡献的独立荧光成分数; x_{ijk} 是三维响应数阵 X 中的元素, 它表示第 k 个样本在激发波长为 i 、发射波长为 j 时的荧光强度; c_{kn} 是相对浓度阵 $C(K \times N)$ 中的元素 (k, n); a_{in} 是相对激发光谱阵 $A(I \times N)$ 中的元素 (i, n); b_{jn} 是相对发射光谱阵 $B(J \times N)$ 中的元素 (j, n); e_{ijk} 是三维残差数阵 $E(I \times J \times K)$ 中的元素 (i, j, k).

1.4.2 PARAFAC 算法

①确定体系的因子数 N ;

②初始化矩阵 A 、 B , 计算载荷矩阵 C :

$$c_{(k)}^T = (A^T A \times B^T B)^{-1} \text{diag}(A^T X_k B) I$$

③计算载荷矩阵 B :

$$B = \left[\sum_{k=1}^K X_k A \text{diag}(c_{(k)}) \right] \times \left[\sum_{k=1}^K \text{diag}(c_{(k)}) A^T A \text{diag}(c_{(k)}) \right]^{-1}$$

④计算载荷矩阵 A :

$$A = \left[\sum_{k=1}^K X_k B \text{diag}(c_{(k)}) B^T B \text{diag}(c_{(k)}) \right]^{-1}$$

⑤迭代过程中对 A 、 B 做逐列归一化处理, 重复②~④, 直到条件 $\frac{|\sigma(m) - \sigma(m-1)|}{\sigma(m-1)} \leq 10^{-6}$ 成立, 迭代停止.

1.4.3 荧光强度和荧光组分占总组分比例的计算

平行因子分析模型得出的结果仅仅是每种成分的相对荧光强度 (scores), 因为每种成分的光谱吸收和荧光量子产率都是未知的^[33]. 每种成分的荧光强度 I_n 按照以下公式计算:

$$I_n = \text{Score}_n \times E_{\lambda_n}(\lambda_{\max}) \times E_{m_n}(\lambda_{\max})$$

式中, Score_n 代表第 n 种成分的相对荧光强度, $E_{\lambda_n}(\lambda_{\max})$ 代表第 n 种成分激发负载的最大值, E_{m_n}

(λ_{\max}) 代表第 n 种成分发射负载的最大值. 总荧光强度 I_{TOT} 和荧光组分占总组分比例 P_n 按照以下公式计算:

$$I_{\text{TOT}} = \sum_1^n I_n$$

$$P_n = I_n / I_{\text{TOT}}$$

2 结果与讨论

2.1 长江口 CDOM 的荧光组分特征

利用 PARAFAC 模型对长江口口外海域 CDOM 样品的三维荧光光谱 (EEMs) 进行分解, 从图 2 可知, 成分从 $F=5$ 变为 $F=6$ 时, 残差平方和急剧变小, 而从 $F=6$ 变成 $F=7$ 时, 残差平方和反而增大, 初步确定成分 $F=6$ 最合适, 然后对 $F=6$ 时的结果经过折半分析法验证, Split1-2 与 Split3-4 吻合 (图 3), 最终确定成分 $F=6$ 最合适. 其中包括 3 个陆源类腐殖质 C1 [330 nm/390 (430) nm]、C2 (390 nm/480 nm)、C3 (360 nm/440 nm)、海洋生物产物组分 C5 (300 nm/400 nm) 及 2 个类蛋白质荧光组分 C4 (290 nm/350 nm) 和 C6 (275 nm/300 nm) (表 1, 图 3). 这些组分中, 除 C6 组分在 275 nm/570 nm 处出现了文献中没有报道过的峰 (可能是由于 C6 组分经过光降解、生物降解生成), 其它光谱特征与文献中利用 PARAFAC 鉴别的荧光组分相似, 各组分最大激发和发射波长、性质描述及与文献结果的对比见表 1.

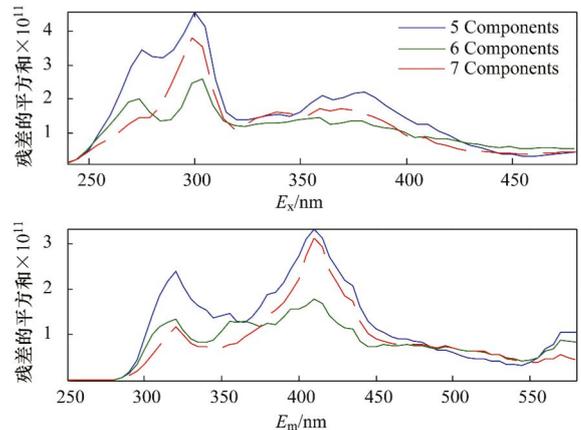


图 2 决定成分的示意

Fig. 2 Map of decided components

2.2 CDOM 各荧光组分的河口行为

在长江口口外海域, C1、C2、C3、C4 荧光组分随盐度增加呈现不断稀释的过程, 但它们的河口行为不尽相同. 陆源类腐殖质组分 C1、C2 和 C3 河口混合过程中表现为保守行为, 特别是在长江口外的

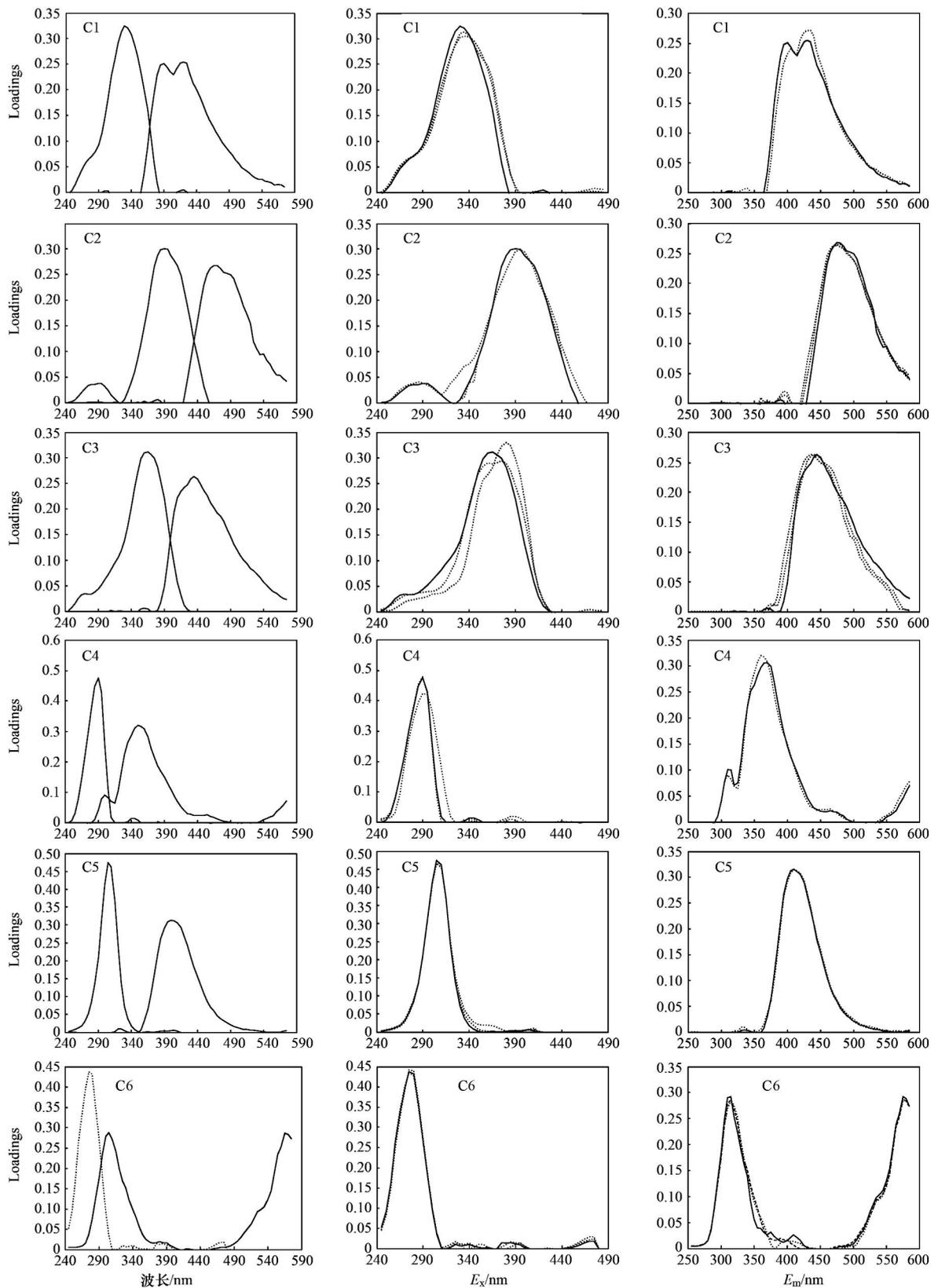


图3 PARAFAC模型鉴别出的6个荧光组分的激发发射波长位置及折半分析的结果

Fig. 3 Excitation and emission loadings of six different components identified by the PARAFAC model and validation of split-half analysis

高盐都区[图4(a)~4(c)],而类蛋白质色氨酸C4则在盐度10~31范围内呈保守行为[图4(d)],在

高盐都区呈不保守行为,在盐度32(7号和10号站位)附近出现荧光强度极值;海洋生物产物C5和类

表 1 长江口 EEMs 中各荧光团特征

Table 1 Each fluorophore component in EEMs from the Yangtze Estuary

荧光团	激发/发射/nm	类型	文献中的对应组分 E_x/E_m /nm
成分 1	330/390(430)	陆源类腐殖质	325(250)/416 ^[34] ; 345/433 ^[35]
成分 2	390/480	陆源类腐殖质	260(370)/490 ^[36] ; 390/482 ^[37]
成分 3	360/440	陆源类腐殖质	360/440 ^[38]
成分 4	290/350	类色氨酸	280/318 ^[35] ; 270 ~ 280/330 ~ 368 ^[39]
成分 5	300/400	海洋生物产物	C5:280(<240)/368 ^[34] ; PeakN: 280/370 ^[40]
成分 6	275/300(570)	类酪氨酸	275/304 ^[38]

蛋白质酪氨酸 C6 则明显表现出不同于其它荧光组分的行为[图 4(e)、4(f)], 盐度 30 以内其荧光变化不大, 但在盐度 32(3 号、7 号和 9 号站位)附近出现峰值, 之后随着盐度增加呈下降趋势。

对陆源类腐殖酸质 C1、C2 和 C3 进行相关分析时(表 2), 发现它们存在较好的线性关系($R^2 = 0.98, P < 0.001$; $R^2 = 0.93, P < 0.001$), 暗示 3 种腐殖质的来源和结构具有相似性。同样发现其他 3 种

成分相关性较差, 说明海洋生物产物和 2 个类蛋白质的特征以及来源各不相同。

根据 6 个荧光组分的河口行为(图 4)、各个组分在总荧光组分中所占的百分比(图 5)和成分之间的相关性分析(表 2), 可将其分为以下 3 种类型。

类型 1 包括陆源类腐殖质荧光组分 C1、C2 和 C3, 它们在长江口河口混合过程中表现为保守行为, 特别是在长江口外的高盐度区[图 4(a) ~ 4

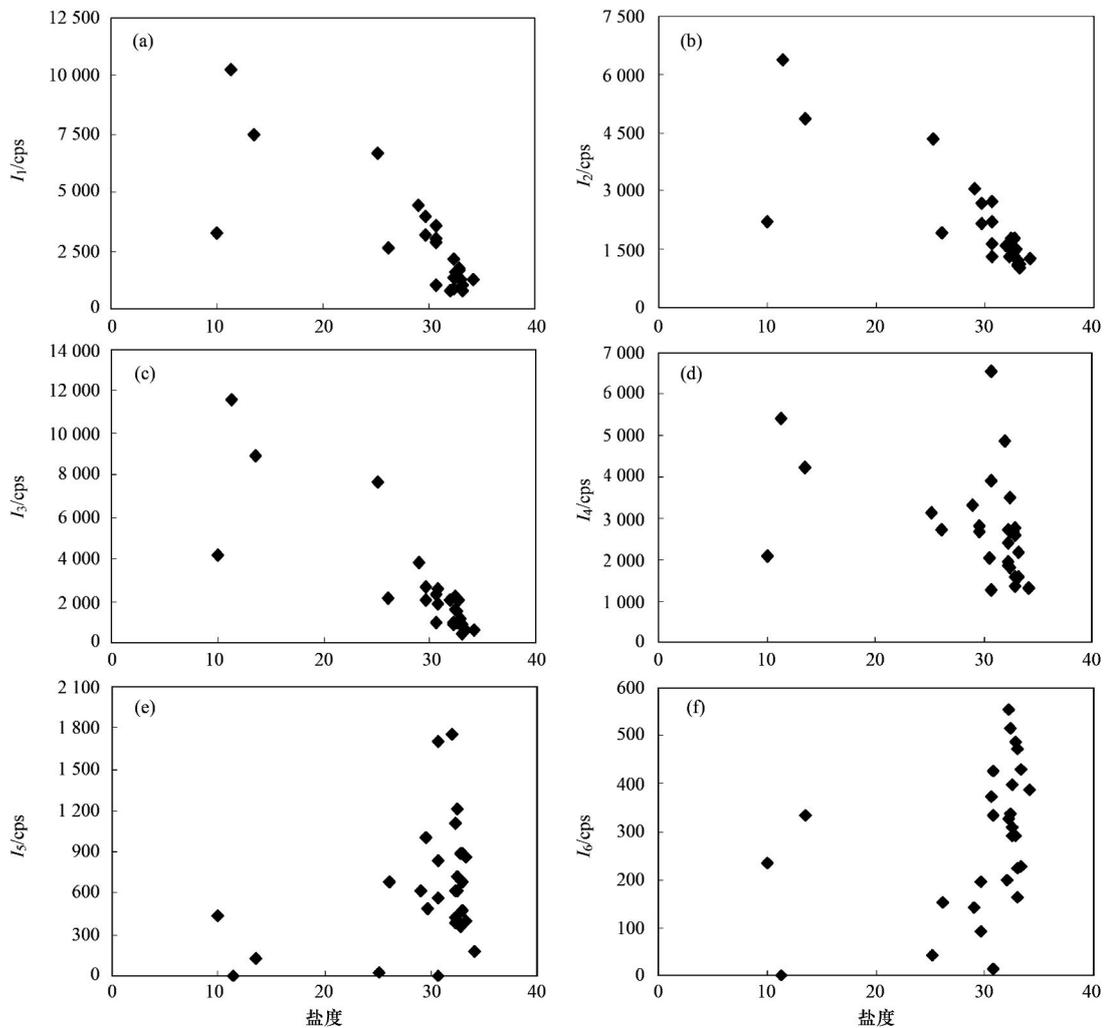


图 4 PARAFAC 识别出的 6 种荧光组分的河口行为

Fig. 4 Estuarine behavior of six fluorescence components by PARAFAC model

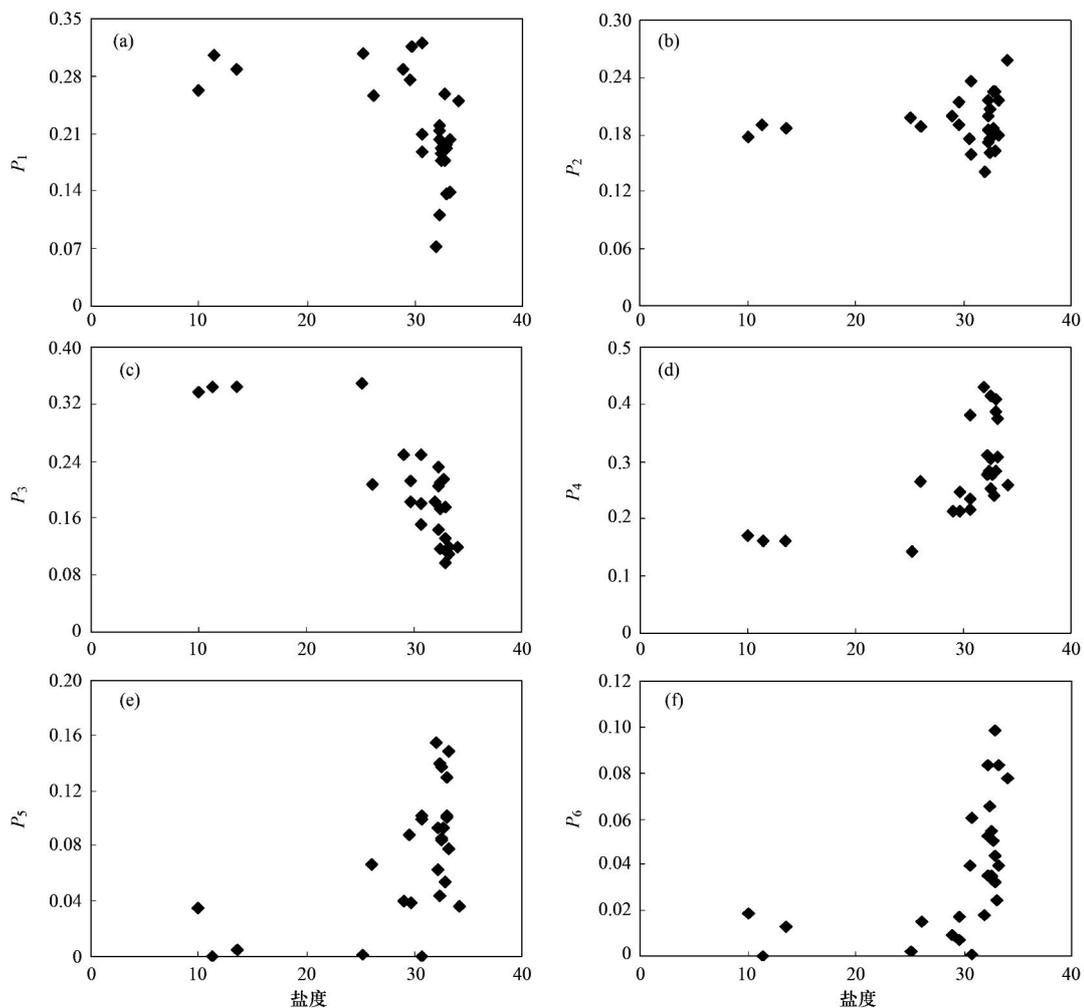


图 5 CDOM 各荧光组分占总组分的比例随盐度的变化

Fig. 5 Variation of the ratio of each fluorescent component to total components with salinity

(c)]. 其中, C1 和 C3 组分在总荧光组分中所占比例随盐度增大不断下降[图 5(a) 和 5(c)], C2 组分在总荧光组分中所占比例保持不变. 表明它们主要来源于陆源河流的输入, 由于长江水的汇入, 带入了大量的氮磷营养物, 水体中含有较高浓度的污染物, 其中许多是有色物质的来源^[41].

类型 2 指类蛋白质色氨酸 C4, 它在低、中盐度区(10~31)呈保守行为, 在高盐度区呈不保守行为, 表明 C4 组分是陆源输入和海洋生物产物共同控制; 并且其在总组分中所占比例随盐度增大不断增大[图 5(d)], 反映出在整个研究区域随着盐度增加, CDOM 荧光组分从以陆源类腐殖质为主转变为以类蛋白质组分为主, 这与韩宇超等^[42]在九龙江口及 Kowalczyk 等^[43]在南大西洋湾观测结果一致.

类型 3 包括海洋生物组分 C5 和类蛋白质酪氨酸 C6, 这 2 个荧光组分在整个研究区域呈不保守

行为[图 4(e)、4(f)], 并且随着盐度增加, 两组分在总荧光组分中所占比例都呈上升趋势[图 5(e)、5(f)], 被认为是河口混合过程中微生物来源 CDOM 的转化或生物活动直接输入的贡献^[42]. 结合类型 2 和类型 3, 得到海洋生物产物和类蛋白质在长江口口外中、高盐度区的不保守行为可能与以下因素有关: 一是强烈的潮汐活动促进了底层再悬浮作用^[22], 二是陆地输入的浮游生物衰败降解的贡献, 这些生物随着河口区盐度的升高, 因不适应盐度的变化而衰败死亡, 可降解释放出类蛋白质组分^[42], 三是现场微生物生产产物的贡献.

表 2 各成分之间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of components

类型	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>P</i>
II vs I2	0.549 5	617.52	0.98	<0.001
II vs I3	1.132 6	-459.96	0.93	<0.001
II vs I4	0.314 5	1 968.8	0.32	<0.05
I5 vs I6	0.489 6	1 263.2	0.53	<0.01

2.3 CDOM 吸收特征及空间变化

CDOM 在可见光区吸收较小, 当波长过渡到紫外区时, 吸收系数呈指数增长. 由图 6a 可知, 长江口外近岸区(1 号、2 号、5 号、6 号和 9 号站位, 盐度 ≤ 30) CDOM 吸收系数 $a(355)$ 的变化范围为 $0.80 \sim 3.09 \text{ m}^{-1}$. 而远岸区(3 号、4 号、7 号、8 号、10 号和 11 号站位, 盐度 > 30) CDOM 吸收系数 $a(355)$ 的变化范围只有 $0.01 \sim 1.58 \text{ m}^{-1}$. 结果显示近岸区和远岸区 CDOM 的光谱吸收存在显著空间差异, 近岸区 CDOM 的吸收系数明显大于远岸区, 这也反映了长江口的人海流带了大量的 CDOM 入海, 这与 2007 年 Guo 等^[25] 对九龙江口和长江口及 2006 年 Kowalczyk 等^[44] 对南波罗的海研究结果一致; 在海湾 CDOM 的研究中, 这种分布趋势更为明显^[45]. 其中 $a(355)$ 的最高值出现在 5 号和 9 号站位, 两处是长江入海的必经之地, 带入了大量的陆源腐殖质等, CDOM 浓度比较高. 从层次来看 [图

6(a)], 近岸区 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 的最高值出现在表层, 而远岸区的最高值出现在中层和底层, 这是因为近岸区较浅, 陆源输入的影响大于光漂白作用, 而远岸区主要是海源输入影响、夏末表层发生严重的光降解、底层发生再悬浮作用共同导致的结果^[42].

由图 6(b) 可知, 光谱斜率 S 随盐度没有明显变化趋势, 但是近岸区(1 号、2 号、5 号、6 号和 9 号站位, 盐度 ≤ 30) 光谱斜率 S 的变化范围较小 ($0.02 \sim 0.05 \text{ nm}^{-1}$), 而远岸区(3 号、4 号、7 号、8 号、10 号和 11 号站位, 盐度 > 30) 的光谱斜率 S 变化范围较大 ($0.01 \sim 0.06 \text{ nm}^{-1}$). 同样从垂直分布来看, 近岸区 CDOM 光谱斜率 S 的最高值出现在表层, 而远岸区光谱斜率 S 出现在中层, 此结果充分验证了近岸区主要受长江冲淡水的影响, 而远岸区 CDOM 的来源比较复杂, 除了陆源影响外, 浮游植物的降解等作用也是一个重要的控制因素^[47].

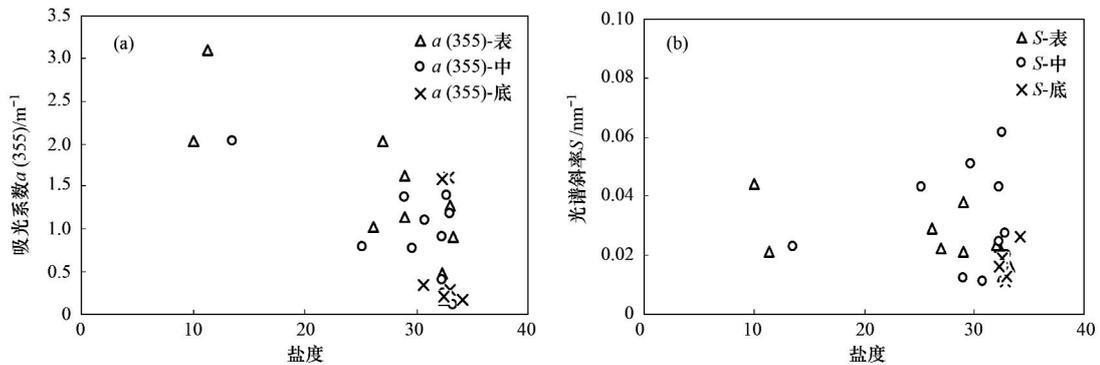


图 6 CDOM 吸收系数、光谱斜率与盐度的关系

Fig. 6 Relationship between CDOM absorption coefficient, spectra slope value and salinity

2.4 CDOM 吸收系数与各组分荧光强度的关系

对 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 与其 6 个荧光峰值进行统计相关分析发现 (图 7), $a(355)$ 与陆源类腐殖质 C1、C2 和 C3 以及类蛋白质色氨酸 C4 均存在较好的正相关, 而与海源生物产物 C5 的相关性则明显下降, 与类蛋白质酪氨酸 C6 没有显著相关.

$a(355)$ 与海洋生物产物和类蛋白质酪氨酸的弱相关性, 一方面可能是受河流输入高的类腐殖质荧光物质的影响, 另一方面与类蛋白质的复杂性有关^[43]. Wu 等^[48] 对 DOC 浓度和以外源输入为主的河流 DOM 的荧光相关分析得到, 类腐殖酸荧光与 DOC 浓度存在极显著正相关, 而类蛋白质荧光与 DOC 浓度的时空变化要离散得多. 本研究的结果虽然区分了河流输入和生物来源荧光的主导性, 但是

海源生物来源荧光中既有浮游植物降解来源的, 也有浮游动物捕食消耗后释放的、细菌分解得到的和沉积物孔隙水释放出来的, 而它们之间尚无法有效区分^[43].

此外, 从图 7 还可以发现, 陆源类腐殖质组分 C1 和 C3 荧光强度最强, 陆源类腐殖质 C2 和类蛋白质色氨酸 C4 次之, 海洋生物产物 C5 和类蛋白质酪氨酸 C6 最小. 因为长江入海带来了大量的陆源腐殖质以及土壤成分, 所以陆源类腐殖质荧光比较强, 这与 Baker^[49] 对河流中 DOM 三维荧光研究结果类似, 河流中类腐殖质荧光要显著大于类蛋白质荧光. 当然河口区由于氮磷营养盐丰富, 生物活动剧烈, 生物降解的类蛋白质应该也会有很大贡献, 导致类色氨酸的荧光强度相对比较强^[45].

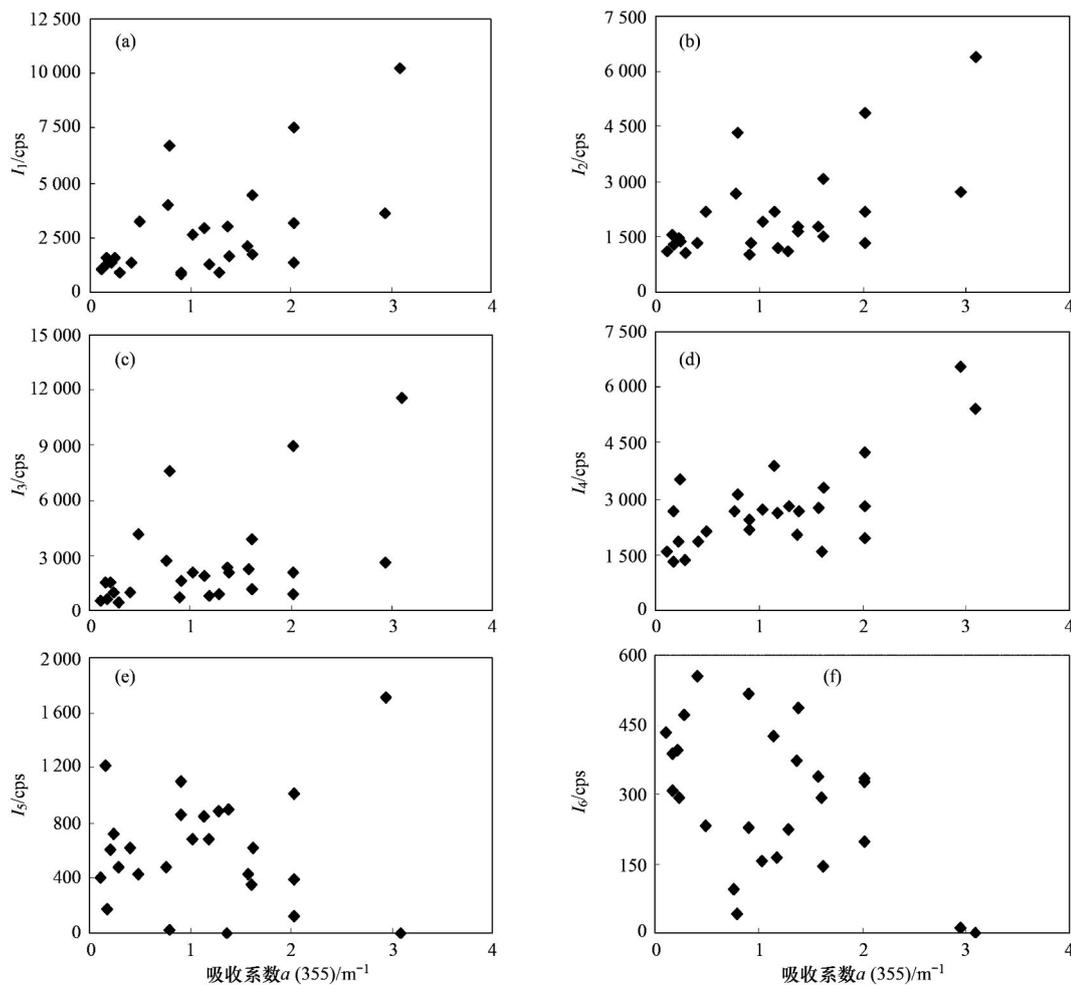


图 7 CDOM 吸收系数与各组分荧光强度之间的关系

Fig. 7 Correlations between CDOM absorption coefficient $a(355)$ and fluorescence intensity of each component

3 结论

(1) 利用 EEMs-PARAFAC 模型识别出长江口口外海域的 CDOM 由 6 个荧光组分组成, 即陆源类腐殖质 C1 [330 nm/390 (430) nm]、C2 (390 nm/480 nm)、C3 (360 nm/440 nm)、海洋生物产物组分 C5 (300 nm/400 nm) 及类蛋白质荧光组分 C4 (290 nm/350 nm) 和 C6 (275 nm/300 nm)。

(2) 长江口的荧光组分可分为 3 类, 类型 1 包括类腐殖质组分 C1、C2 和 C3, 其在整个河口混合过程中呈保守行为, 特别是在长江口口外高盐度区, 且结构和来源相似, 表明它们主要受陆源输入的影响; 类型 2 包括类蛋白质色氨酸 C4, 在低盐度区域呈保守行为, 在高盐度区呈不保守行为; 类型 3 包括海洋生物产物 C5 和类蛋白质酪氨酸 C6, 其在河口混合过程中呈不保守行为, 并且它们在总荧光组分中所占比例在高盐度区呈上升趋势, 反映出河口

混合过程中, 随着盐度增加, CDOM 荧光组分从以陆源类腐殖质为主转变为以类蛋白质组分为主。

(3) 近岸区 CDOM 的吸收系数 $a(355)$ 明显大于远岸区, 这反映了长江口的入海流带了大量的 CDOM。近岸区吸收系数 $a(355)$ 和光谱斜率 S 的变化范围较小, 而远岸区的吸收系数 $a(355)$ 和光谱斜率 S 的变化范围较大。结果表明, 近岸区主要受陆源输入的影响, 而远岸区除了陆源输入的影响, 还受到现场生产的影响。同样从垂直分布来看, 近岸区 CDOM 吸收系数 $a(355)$ 和光谱斜率 S 的最高值出现在表层, 而远岸区出现在中层, 充分证明了远岸区 CDOM 来源的复杂性。

(4) $a(355)$ 与陆源类腐殖质和类蛋白质色氨酸存在较好的正相关, 而与海洋生物产物和类蛋白质酪氨酸的相关性则明显下降, 暗示 CDOM 中河流来源输入的腐殖质比例要高于生物来源的类腐殖质和类蛋白质, 但是类蛋白质色氨酸例外, 陆源输入

的比例要高于现场生产的产物。

参考文献:

- [1] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [2] 雷惠, 潘德炉, 陶邦一, 等. 东海典型水体的黄色物质光谱吸收及分布特征[J]. *海洋学报*, 2009, **31**(2): 57-62.
- [3] Carder K L, Steward R G, Harvey G R, *et al.* Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(1): 68-81.
- [4] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [5] 王志刚, 刘文清, 李宏斌, 等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(2): 275-279.
- [6] Green S A, Blough N V. Optical absorption and fluorescence properties of chromophoric dissolved organic matter in natural waters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(8): 1903-1916.
- [7] Mopper K, Zhou X L, Kieber R J, *et al.* Photochemical degradation of dissolved organic carbon and its impact on the oceanic carbon cycle[J]. *Nature*, 1991, **353**(6339): 60-62.
- [8] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [9] Siegel D A, Maritorea S, Nelson N B, *et al.* Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107** (C12): 3228.
- [10] Stedmon C A, Markager S. Tracing the production and degradation of autochthonous fractions of dissolved organic matter using fluorescence analysis[J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(5): 1415-1426.
- [11] Ohno T, Bro R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(6): 2028-2037.
- [12] Cory R M, Mcknight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter[J]. *Environment Science Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [13] 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.
- [14] Stedmon C A, Markager S, Tranvik L, *et al.* Photochemical production of ammonium and transformation of dissolved organic matter in the Baltic Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **104**(3-4): 227-240.
- [15] 杨顶田, 陈伟民, 曹文熙. 长江下游湖泊水体中有色可溶性物质的生物光学模式[J]. *遥感学报*, 2005, **9**(4): 387-392.
- [16] 宋玲玲, 仇雁翎, 张洪恩, 等. 淀山湖有色可溶性有机物的光谱吸收特性[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(3): 250-254.
- [17] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [18] 周虹丽, 朱建华, 李铜基, 等. 青海湖水色要素吸收光谱特性分析——黄色物质、非色素颗粒和浮游植物色素[J]. *海洋技术*, 2005, **24**(2): 55-59.
- [19] 杨顶田, 陈伟民, 吴生才. 湖泊中有色可溶性物质对近紫外及蓝光衰减的影响[J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(3): 269-274.
- [20] 郭卫东, 夏恩琴, 韩宇超, 等. 九龙江口 CDOM 的荧光特性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2005, **36**(4): 349-357.
- [21] 韩宇超, 郭卫东. 河口区有色溶解有机物(CDOM)三维荧光光谱的影响因素[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1646-1653.
- [22] 朱伟健, 沈芳, 洪官林. 长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2292-2298.
- [23] 李猛, 郭卫东, 夏恩琴, 等. 厦门湾有色溶解有机物的光吸收特性研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, **25**(1): 9-14.
- [24] 陈楚群, 潘志林, 施平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, **22**(5): 33-39.
- [25] Guo W D, Stedmon C A, Han Y C, *et al.* The conservative and non-conservative behavior of chromophoric dissolved organic matter in Chinese estuarine waters[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **107**(3): 357-366.
- [26] Loiselle S A, Bracchini L, Dattilo A M, *et al.* The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 590-597.
- [27] Astoreca R, Rousseau V, Lancelot C. Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: optical characterization and possible origin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **85**(4): 633-640.
- [28] 程远月, 郭卫东, 夏恩琴, 等. 厦门湾沉积物间隙水中 CDOM 的荧光特性及其分布研究[J]. *台湾海峡*, 2008, **27**(1): 8-14.
- [29] 黄长春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 375-382.
- [30] Zeppa 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.
- [31] Olivieri A C. Computing sensitivity and selectivity in parallel factor analysis and related multiway techniques: the need for further developments in net analyte signal theory[J]. *Analytical Chemistry*, 2005, **77**(15): 4936-4946.
- [32] Christensen J H, Hansen A B, Mortensen J, *et al.* Characterization and matching of oil samples using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. *Analytical*

- Chemistry, 2005, **77**(7): 2210-2217.
- [33] Kowalczyk P, Cooper W J, Durako M J, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: relationships between fluorescence and its components, absorption coefficients and organic carbon concentrations[J]. *Marine Chemistry*, 2010, **118**(1-2): 22-36.
- [34] 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.
- [35] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al.* Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(5): 1900-1908.
- [36] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [37] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- [38] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability of dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PRAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [39] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [40] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 southwest monsoon[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1998, **45**(10-11): 2195-2223.
- [41] 潘孝辉, 吴敏, 王悦. 黄浦江水环境污染风险的模糊数学综合评价[J]. *四川环境*, 2008, **27**(6): 60-63.
- [42] 韩宇超, 郭卫东. 九龙江河口有色溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 641-647.
- [43] Kowalczyk P, Stoń-Egiert J, Cooper W J, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Baltic Sea by excitation emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 2005, **96**(3-4): 273-292.
- [44] Kowalczyk P, Stedmon C A, Markager S. Modeling absorption by CDOM in the Baltic Sea from season, salinity and chlorophyll [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **101**(1-2): 1-11.
- [45] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 234-241.
- [46] Clementson L A, Parslow J S, Turnbull A R, *et al.* Properties of light absorption in a highly coloured estuarine system in south-east Australia which is prone to blooms of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **60**(1): 101-112.
- [47] Chipman L, Podgorski D, Green S, *et al.* Decomposition of plankton-derived dissolved organic matter in permeable coastal sediments [J]. *Limnology Oceanography*, 2010, **55**(2): 857-871.
- [48] Wu F C, Kothawala D N, Evans R D, *et al.* Relationships between DOC concentration, molecular size and fluorescence properties of DOM in a stream [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(8): 1659-1667.
- [49] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environment Science Technology*, 2002, **36**(7): 1377-1382.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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

国内外公开发行人