

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) - 臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12)	《环境科学》征订启事 (194)
信息 (21, 51)	

蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征

陈俊伊¹, 王书航¹, 姜霞^{1*}, 黄晓峰², 赵丽¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 无锡市太湖湖泊治理有限责任公司, 无锡 214023)

摘要: 应用三维荧光光谱技术 (EEMS), 研究了蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 光谱特征, 并探讨了沉积物中 FDOM 来源及与有机氮 (SON)、无机氮 (SIN) 之间的相关性。结果表明, 蠡湖表层沉积物 FDOM 由 2 类 3 个荧光组分组成, 即类腐殖质荧光组分 C1 (240, 310/420 nm)、C2 (260, 360/460 nm) 和类色氨酸荧光组分 C3 (225, 275/340 nm)。总荧光强度变化范围为: 49.97 ~ 159.19 R. U. · g⁻¹, 在空间上呈自东向西依次递减, 且沿岸区高于湖心区的趋势, C1、C2 和 C3 相对比例分别为 33.63%、26.87%、39.49%。荧光指数 (FI)、生物源指数 (BIX) 和腐殖化指数 (HIX) 的变化范围分别为: 1.96 ~ 2.22、0.69 ~ 0.94、2.62 ~ 4.39, 显示蠡湖表层沉积物 FDOM 的来源具有自生源特性, 主要为自生微生物、藻类等新近自生源。相关性分析表明, 表层沉积物 FDOM 各组分与 SON 和 SIN 均呈显著正相关 ($P < 0.01$), 且与 SIN 的相关性较高。

关键词: 蠡湖; 荧光溶解性有机质; 光谱特征; 相关性分析; 表层沉积物

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0070-08 DOI: 10.13227/j.hjx.201605148

Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake

CHEN Jun-yi¹, WANG Shu-hang¹, JIANG Xia^{1*}, HUANG Xiao-feng², ZHAO Li¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Wuxi Taihu Lake Restoration CO., Ltd., Wuxi 214023, China)

Abstract: This study investigated the spectral characteristics of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in sediments of Lihu Lake using three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy (EEMS), and discussed the correlation between source of FDOM and organic or inorganic nitrogen. The results indicated that the surface sediments in Lihu Lake consisted of three fluorescence fractions (II), humic-like C1 (240, 310/420 nm), C2 (260, 360/460 nm), and tryptophan-like C3 (225, 275/340 nm). The total fluorescence intensity ranged from 49.97 to 159.19 R. U. · g⁻¹, and decreased from east to west with higher values in coast district than in lake center. The relative proportions of C1, C2, and C3 were 33.63%, 26.87% and 39.49%, respectively. The fluorescence index (FI), biological origin index (BIX), and humification index (HIX) ranged from 1.96 to 2.22, 0.69 to 0.94, and 2.62 to 4.39. It indicated that the main source of FDOM in Lihu Lake was from endogenesis, and mainly derived from microbes, algae and other newly autochthonous sources. The results illustrated, the fluorescence intensity had significant correlation with organic and inorganic nitrogen ($P < 0.01$), and had higher correlation with inorganic nitrogen.

Key words: Lihu Lake; fluorescent dissolved organic matter (FDOM); fluorescence spectrum; correlation analysis; surface sediment

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是湖泊生态系统的重要组成部分之一, 一般包括类蛋白质、类氨基酸物质、类腐殖质以及碳水化合物等, 是土壤、沉积物、水体中化学组成和结构十分复杂的有机混合物, 主要源于沉积物与水体中动物与植物及微生物的降解^[1,2]。湖泊沉积物 DOM 中重金属、有毒有机化合物等污染物及 C、N、P 等营养元素成为湖泊汇合释放源, 这些污染物和营养元素通过复杂的物理化学过程与水体中的颗粒物及污染物迁移转化进入水体, 在湖泊各种物理、化学和生物反应以及蓝藻水华暴发过程中都扮演了非常重要的角色^[3,4]。

荧光溶解性有机质 (fluorescent dissolved organic matter, FDOM) 是水体及沉积物 DOM 储库中主组分之一^[5]。近年针对 FDOM 的提取方法、来源、组成、结构和生物有效性以及 FDOM 的环境意义等方面开展了广泛研究^[6]。研究人员利用三维荧光高灵敏度、高选择性、高信息量、快速准确的光谱指纹技术分析沉积物及水体中溶解性有机质组分、结构及

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-08-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-013)

作者简介: 陈俊伊 (1990 ~), 男, 主要研究方向为湖泊水环境, E-mail: beyond8090@163.com

* 通信作者, E-mail: jiangxia@craes.org.cn

污染物迁移转化规律,并解析溶解性有机质的来源、分布特征及生物活动^[7]. Coble^[8]较早将三维荧光光谱技术应用于 FDOM 的研究,其研究结果证明了 FDOM 在水体和陆地中具有显著的不同,并对其进行了分类. 傅平青等^[9]研究了洱海沉积物荧光峰强度在沉积物-水界面的变化规律. 蔡文良等^[10]利用该技术,结合湖泊沉积物溶解性有机质荧光特征及其生物有效性进行成分分析及平行因子分析,探讨了长江重庆段 DOM 荧光特性及污染来源,并分析溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)与荧光强度之间的相关性. 沈烁等^[11]采用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱分析研究南淝河不同排污口表层沉积物 DOM 光谱特征. 刘明亮等^[12]利用三维荧光光谱分析手段,结合吸收光谱以及 DOC 的测定,分析了中国华南地区河口近海沉积物间隙水中 FDOM 的光学特性及光谱特征. 通过分析沉积物 FDOM 组成结构及化学行为有助于解决湖泊富营养化和蓝藻水华暴发等环境问题,因此,湖泊沉积物 FDOM 成为当今研究热点问题之一.

近年蠡湖经过底泥疏浚、生态重建、环湖截污等治理工程控制水体污染,但是蠡湖水质未得到根本的改善,这可能与沉积物内源污染物持续高强度释放有关^[13]. 本研究利用三维荧光光谱分析法与平行因子法相结合对蠡湖表层沉积物中 FDOM 荧光组分的类型和来源进行解析,揭示蠡湖表层沉积物 FDOM 的化学组成及分布规律,以期为蠡湖生态环境保护提供理论基础和科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

蠡湖位于江苏省无锡市西南部地区,东经 $119^{\circ}13'12'' \sim 119^{\circ}17'11''$ 、北纬 $31^{\circ}29'54'' \sim 31^{\circ}32'50''$,是太湖延伸到无锡市地区的一个内湖. 蠡湖南北长约 0.3 ~ 1.8 km,东西长约 6 km,湖岸线约 21 km,湖面积约 8.6 km². 蠡湖水域四周另与少许断头浜及溪河相通,形成了一个相对独立的、与太湖水域相连的城市淡水景观湖泊.

本研究将蠡湖水域分为 4 个区域 A、B、C、D,蠡湖三条分界线分别为宝界桥、蠡湖大桥和蠡堤,如图 1 所示. 其中蠡湖 A 区进行过湖体清淤、水生植被重建工程; B 区曾经展开过底泥环保疏浚治理工程,水生植被整治工程; C 区沿岸实施了整治工程,例如长广溪湿地的建设; D 区周围居民楼比较集中,富营养化问题严重.

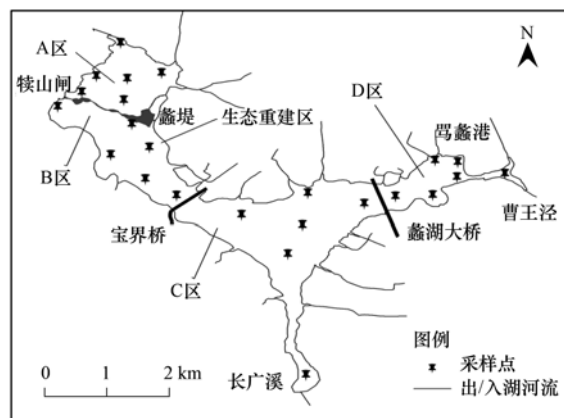


图 1 蠡湖采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Lihu Lake

1.2 样品采集及处理

于 2014 年 10 月 1 日,在江苏省无锡市蠡湖及出入湖河口进行 24 个样品采集(均采用 GPS 定位),用柱状采样器(04.23 BEEKER, Eijkelkamp, NL, $\phi = 12$ cm)采集 2 cm 深的表层沉积物样品,所采集鲜样经过粗筛去掉杂质后装入自封袋后编号,沉积物鲜样经过冷冻干燥研磨过 100 目筛,准确称取 $2 \text{ g} \pm 0.0005 \text{ g}$ 沉积物干燥样品于 100 mL 离心管中,注入去离子水 40 mL,振荡时间 2 h ($220 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 25°C),离心 10 min ($5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),取上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜(Whatman GF/F, 马弗炉 450°C 灼烧 3 h),取滤液测三维荧光光谱.

1.3 沉积物溶解性有机碳(DOC)测定

沉积物 FDOM 提取液另用于测定 DOC 的含量. DOC 测定利用高温催化氧化法,实验仪器为 TOC-VCPH 型总有机碳分析仪,每个样品均重复 3 次测定,保证其测定结果变异系数 $< 2\%$.

1.4 三维荧光光谱测定

采用(HitachiF-7000)进行 FDOM 荧光光谱测定,扫描速度为 $2400 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$,激发光源为 150 W 氙弧灯, PMT 电压为 400 V,信噪比 > 110 ,响应时间为自动,扫描光谱波长范围为 E_x 200 ~ 450 nm, E_m 250 ~ 600 nm,狭缝跨度均为 10 nm;以 Milli-Q 超纯水进行空白样测定,所有样品三维荧光光谱扣除空白样品的光谱信号,然后在 Matlab12.0 软件中进行平行因子模型分析,采用残差分析得出组分数,并通过裂半分析对分离出的组分进行验证,最后确定最优的 FDOM 组分数目^[14].

1.5 FDOM 荧光光谱的空白校正

为保证荧光光谱特性可比性,所得到的光谱均经过扣除超纯水空白后的校正结果,以减少仪器条

件和拉曼散射对荧光光谱的影响. 通过扣除 $\lambda(E_m) < \lambda(E_m) + 20$ nm 的区域消除一级瑞利散射对三维荧光光谱的影响, 通过扣除 $\lambda(E_m) > 2\lambda(E_m) - 20$ nm 的区域消除二级瑞利散射对三维荧光光谱的影响, 扣除部分均用零替换.

1.6 数据处理

数据处理主要软件 SPSS 19.0、ArcMap 10.2、Matlab 12.0、OriginPro 9.0、Surfer10.0、Excel 2010 等进行绘图及数据分析. 采样点布点图利用 ArcMap 10.2 绘制; 三维荧光光谱和平行因子模型模拟均在 Matlab12.0 中进行分析处理.

2 结果与分析

2.1 沉积物氮、碳元素空间分布特征

沉积物氮、碳元素空间分布特征如图 2 所示. 蠡湖表层沉积物 DOC、SON、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量变化范围分别在 230.6 ~ 1376.2、13.39 ~ 118.72、4.99 ~ 85.45、13.61 ~ 227.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值分别为 643.275、42.44、21.49、78.89 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 从空间分布来看, 不同区域含量差异明显, 除 NO_3^- -N 外, 均呈现 A 区 < B 区 < C 区 < D 区的分布趋势, 这可能是因为 2003 年以来, 无锡市对蠡湖实施了“重

污染水体底泥环保疏浚与生态重建工程”, 对 A 区和 B 区进行过底泥疏浚、水生植被重建工程, 外源污染基本得到控制, 现阶段该区域水质较好, 基本达到地表水 III ~ IV 类水标准; C 区河口较多, 虽然大部分河口已经封堵但仍有部分污染较严重断头浜 (劣 V 类) 水体流入湖区, 此外还有部分生活污水排入该区, 势必引起沉积物氮、碳含量的增加; D 区氮、碳含量最高, 因为该区处于人口密集区, 邻近建筑工地, 受人类干扰较大, 富营养化污染较严重. 通过沉积物不同形态氮、碳元素空间分布特征可以看出, 表层沉积物氮、碳含量与湖泊的区域特点及人类活动密切相关.

2.2 FDOM 荧光组分特征

利用 PARAFAC 模型对蠡湖沉积物中 FDOM 的三维荧光光谱矩阵数据进行分析, 蠡湖表层沉积物 FDOM 中主要解析出 3 个荧光组分, 并通过裂半分析, 残差分析检验, 结果证明该 PARAFAC 模型有效, 沉积物中 FDOM 各荧光组分的荧光光谱及组分最大激发、发射波长分布如图 3 和表 1 所示.

蠡湖表层沉积物组分图谱中主要存在 2 个类腐殖质组分 (C1, C2) 和 1 个类蛋白组分 (C3), 其中, C1 组分在 240 nm 和 310 nm 处存在两个明显激发

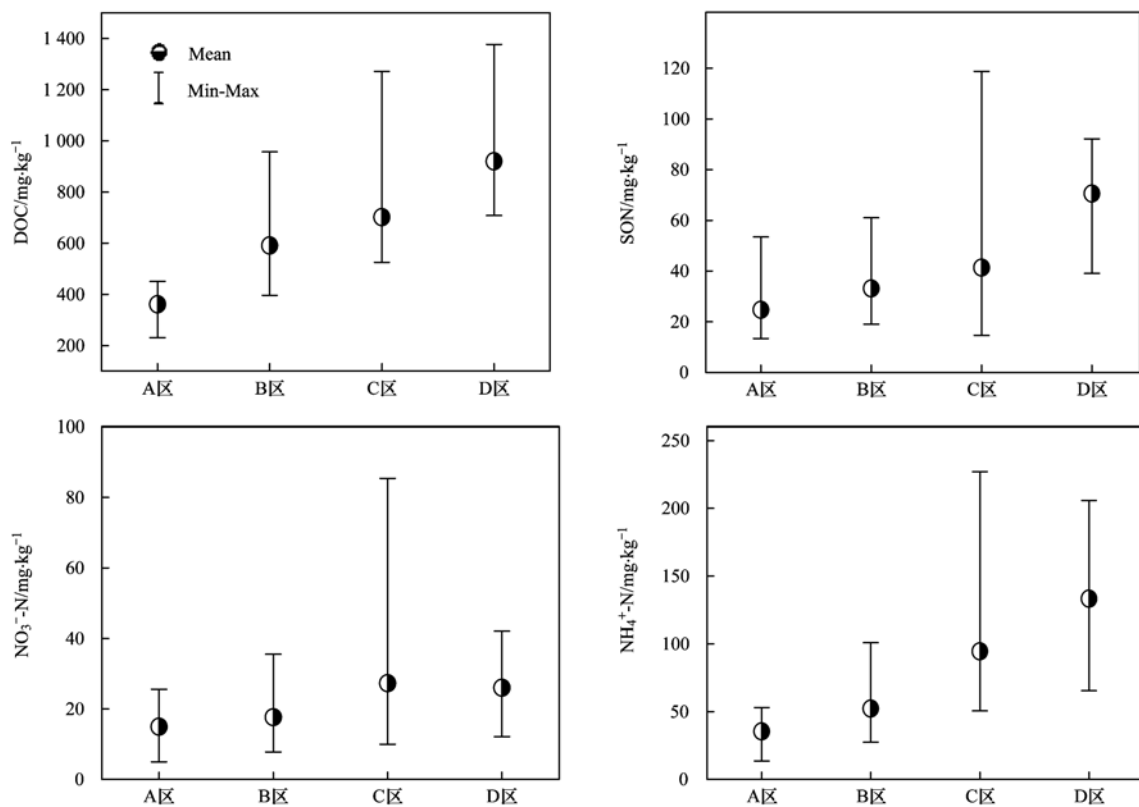


图 2 沉积物中不同参数含量比较

Fig. 2 Different parameters of the content in the sediment

波长,最大发射波长在 420 nm,主要来源于腐殖质中的富里酸物质,被认为自生源类腐殖质^[15,16]; C2 组分在 260 nm 和 360 nm 处存在两个明显激发波长,最大发射波长在 460 nm,主要成分为胡敏酸,通常认为是陆源类腐殖质,一般通过陆源植物降解以及人类活动影响产生^[17], C3 组分在 225 nm 和 275

nm 处也存在两个明显激发波长,发射波长在 340 nm,主要成分为类色氨酸,来源于水中微生物和浮游植物等残体分解^[18]. 本研究中荧光峰值出现的位置和强度不同,自生源类中类腐殖质峰和类蛋白质峰较为显著,说明蠡湖表层沉积物中 FDOM 的来源主要是自生源贡献.

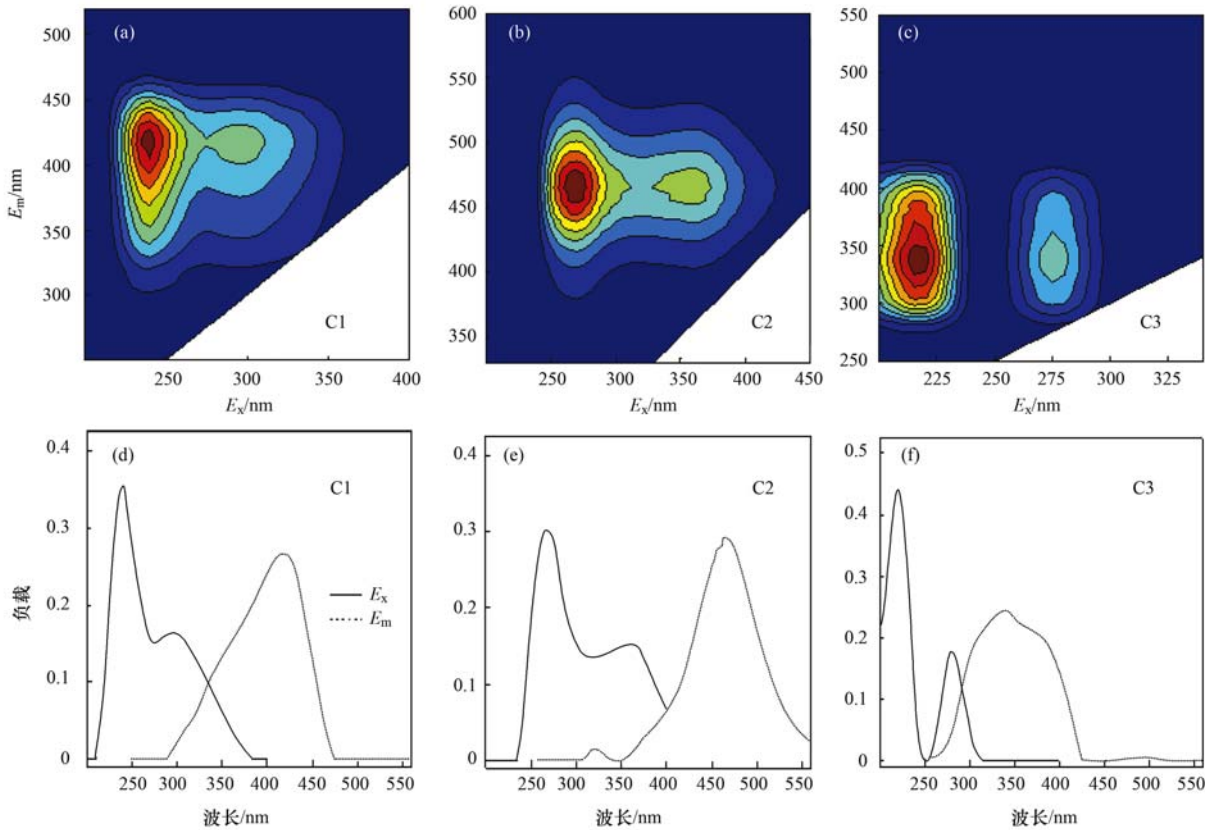


图3 蠡湖沉积物 FDOM 的 3 个组分的 EEMS 及最大激发/发射波长分布

Fig. 3 EEMS and the maximum excitation/emission wavelength distribution of three components of FDOM in sediments of Lihu Lake

表 1 沉积物中 3 个荧光组分特征及来源分析

Table 1 Fluorescence characteristics and source analysis of the three fluorophores in sediments

组分	$\lambda(E_x)/\lambda(E_m)/\text{nm}$	类型	主要来源	同类研究比较/nm
C1	240, 310/420	类腐殖质(富里酸)	自生源类,生物降解	240~270/375~445 ^[19]
C2	260, 360/460	类腐殖质(胡敏酸)	陆源植物,土壤有机质	260/380~460 ^[20]
C3	225, 275/340	类蛋白质(色氨酸)	自生源类,生物降解,陆生植物	270~280/320~350 ^[21] 270~280(<240)/330~370 ^[22]

2.3 FDOM 荧光组分空间分布特征

蠡湖表层沉积物荧光强度的空间分布如图 4 所示,各组分荧光强度与总荧光强度空间分布趋势一致,呈现东蠡湖高于西蠡湖,入湖河口高于湖区的趋势. 表层沉积物中 C1、C2、C3 组分荧光强度变化范围分别为:17.24~52.94、13.48~37.69、16.54~68.55 R. U. ·g⁻¹,平均值分别为:30.52、23.96、36.39 R. U. ·g⁻¹. 从荧光强度值来看,低值主要集中在 A 区和 B 区,可能是因为该区域水质较好且经

过底泥疏浚及生态修复,内源污染较小; 荧光强度高值主要集中在 C 区长广溪和 D 区金城湾,均处在周围居民楼比较多,富营养化问题严重的区域,这可能是由于外源污染物的输入和水体中微生物及植物腐解造成表层沉积物中 FDOM 的浓度较高. 从组成比例来看,C1、C2、C3 组分占总组分比例分别为 33.63%、26.87%、39.49%,相比较而言,类蛋白 C3 组分(色氨酸)占比例最大,腐殖质 C1 组分(富里酸)次之,腐殖质 C2 组分(胡敏酸)最弱. 较高组

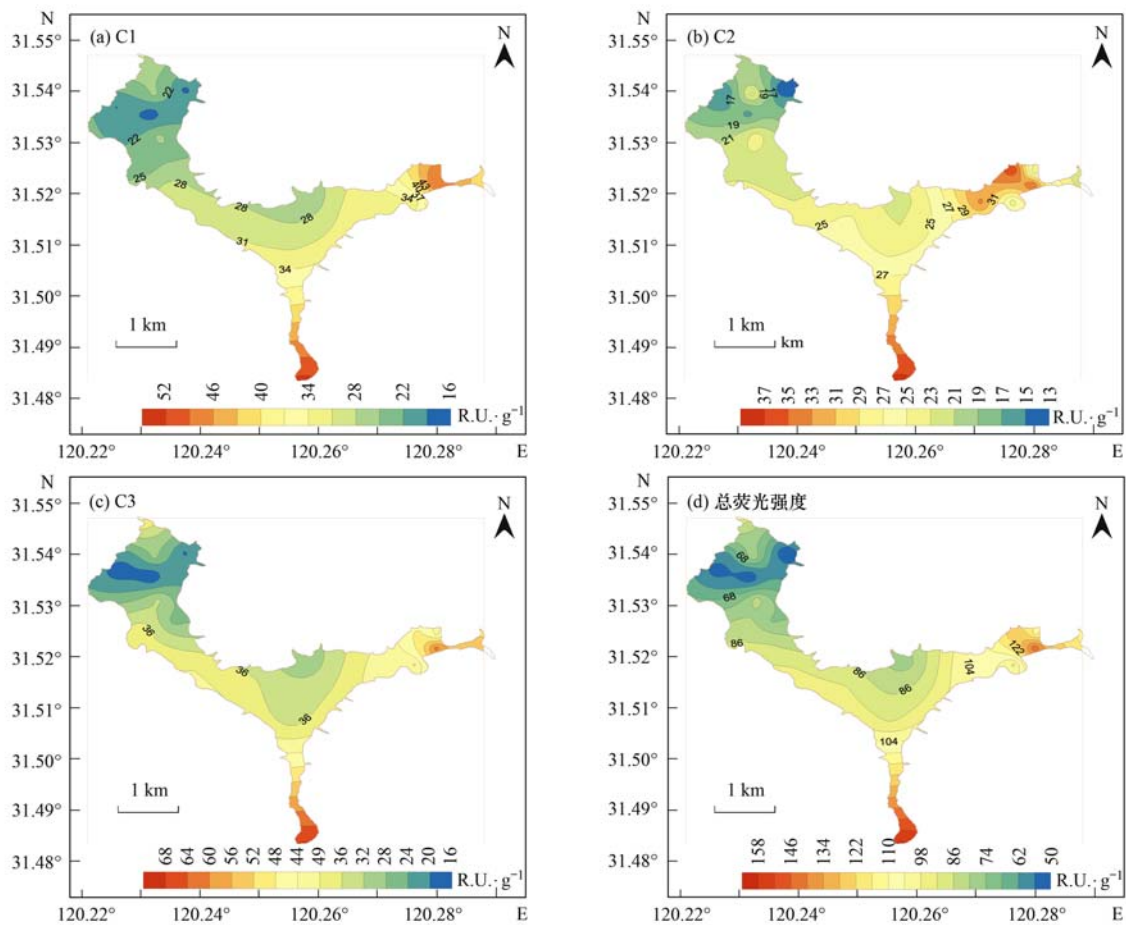


图4 蠡湖3个荧光组分及总荧光强度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of fluorescence intensities for the three components in Lihu Lake

分C1、C3是由于自生源产生的荧光峰,这与其他研究蠡湖污染主要受内源影响基本一致^[23]。

3 讨论

3.1 来源分析

沉积物FDOM的来源主要分为陆源和生物源两种^[24]。陆源产生的类腐殖质成分由细菌和真菌降解或是土壤中动植物残体腐烂形成;生物源产生的类蛋白成分由水体中浮游生物、水生细菌、藻类等生物活动形成。荧光光谱特性可有效表征沉积物中FDOM的组分,通过光谱分析可以确定FDOM的来源,一般用荧光指数(FI、BIX、HIX)来判断。

FI指数是 $E_x = 370 \text{ nm}$ 时, E_m 在470 nm和520 nm处的荧光强度比值,被用于表征FDOM中腐殖质组分的来源,FI > 1.9时主要是水体和自身微生物来源,自生源特征相对明显,FI < 1.3时主要为陆地和土壤输入为主,水体和自生源贡献较少^[25]。本研究中FI指数范围在1.96 ~ 2.22之间,平均值2.05,说明沉积物FDOM来源主要是水体和自身微

生物,且自生源特征明显。

BIX指数是 $E_x = 310 \text{ nm}$ 时, E_m 在380 nm和430 nm处荧光强度比值,可以作为沉积物FDOM溯源的一个指标,BIX值越高,说明新近自生源组分的比例越高,BIX值越低表示主要来自陆源输入,有研究认为BIX在0.8 ~ 1.0之间,表示样本中存在新生的自生源FDOM较多;而0.6 ~ 0.8之间表示自生源贡献较少^[26]。蠡湖沉积物BIX指数0.69 ~ 0.94,平均值0.77,表明其FDOM为中度新近自生源特征,部分区域为较强新生自生源特征。

HIX指数 $E_x = 255 \text{ nm}$ 时, E_m 在435 ~ 480 nm荧光强度积分值和300 ~ 345 nm荧光强度积分值之比,是评价FDOM腐殖化程度的重要指标,HIX值越高,表明FDOM腐殖化程度越高^[27]。有研究表明,当HIX小于4表示以自生源为主,当HIX值在4 ~ 6之间时,FDOM属于较弱腐殖质特征和较强自生源特征;HIX值大于6,属于强腐殖质特征,陆源贡献较大^[28]。蠡湖表层沉积物FDOM的HIX值在2.62 ~ 4.39之间,平均为3.41,其中HIX小于4的

点位占 92%, 说明沉积物 FDOM 属于微弱腐殖质特征, 且以自生源为主。

总体来说, 蠡湖沉积物中荧光强度分布差异性显著是由于污染物来源不同, 沉积物 FDOM 来源具有陆源及内源的双重特征; 内源主要源自水体中微生物分泌和动植物降解, 外源主要是土壤有机质输入和周围污水的汇入, 这也是受人类活动影响大的城市景观湖泊的显著特点之一。通过本研究发现 A 区和 B 区荧光强度值均较低, 说明该区域含有的类蛋白物质及腐殖质都较少, 这与目前该区域外来污染相对较少, 水质较好有关。自生源类富里酸以及类蛋白组分集中在 C 区, 是因为该区周围有国家湿地公园、森林腐殖土丰富, 而水源补给主要为降水以及由降水产生的地表径流和渗流, 因此使得较多

陆源腐殖物质输入到水体中。相比之下, D 区沉积物 FDOM 来源除了沿岸输入之外, 还受周边居民生活污水以及氮磷输入的影响, 是该区域 FDOM 浓度值高的主要原因。

3.2 沉积物各形态氮与荧光强度的相关分析

FDOM 与 N、P 元素的迁移转化密切相关, 可通过微生物降解和光降解过程释放出氮、磷等浮游植物和细菌可直接吸收利用的营养要素。该研究沉积物中生物可利用较高的无机氮(SIN)在可交换态氮中占绝对优势, 含量在 $19.53 \sim 321.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 占可交换态总氮比例的 70.28%, 而有机氮含量在 $13.39 \sim 118.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占可交换态总氮比例的 29.7%。进一步通过沉积物 FDOM 荧光组分与可交换态氮形态做回归分析, 如图 5 所示。

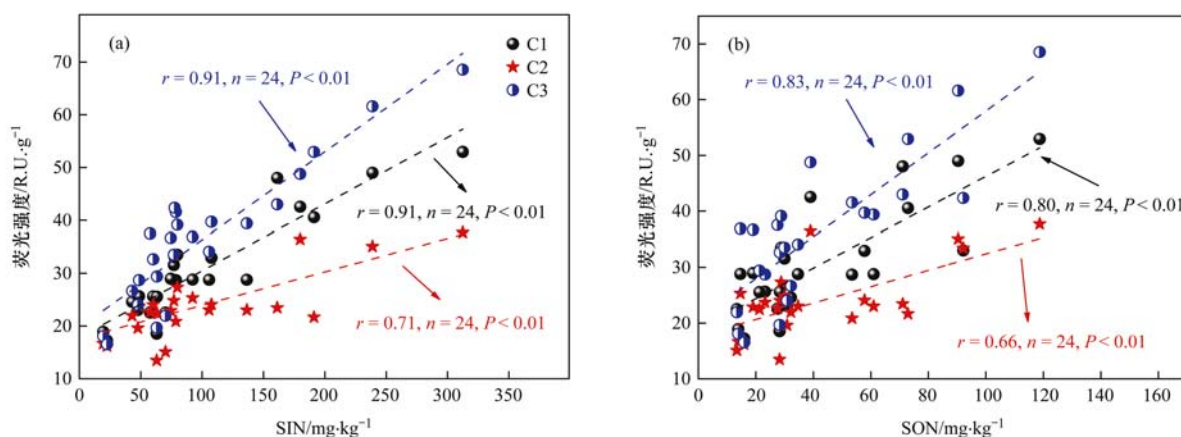


图 5 沉积物荧光强度与 SIN 和 SON 含量的相关性

Fig. 5 Correlation between sediment fluorescence intensity and SIN and SON contents

沉积物 FDOM 的 3 个荧光组分的荧光强度与 SIN 和 SON 都呈显著正相关 ($P < 0.01$), 说明沉积物 FDOM 与氮元素的迁移转化密切相关。并且相对于 SON, 各组分与 SIN 的相关性较高, 表明沉积物中无机氮可能直接来源于 FDOM 的降解, 尤其是来源于 C1 和 C3 的降解。

DOM 中具有光学效应的组分——荧光溶解性有机质(FDOM), 能够作为标志物用以研究 DOM 的迁移转化过程。荧光光谱的出现为传统鉴定方法提供了新的思路, 为水体生态系统 DOM 的鉴别提供了新的方法。先前的研究对 FDOM 荧光强度与 DOC 做过很多相关性分析, Zhang 等^[29]的研究表明处于富营养化状态的浅水湖泊上覆水中 FDOM 的荧光强度与 DOC 的含量存在显著正相关, 但 Vignudelli 等^[30]研究却发现伊特鲁里亚海北部的沿海水域上覆水 FDOM 的荧光强度与 DOC 之间的相关性不明

显, 可能由于 FDOM 中存在一定量的不吸收光的天然有机物, 进而导致荧光强度和 DOC 之间并不总是相关的。

本研究发现, 沉积物中 FDOM 总荧光强度与 DOC 的空间变化趋势非常一致, 均表现出 A 区 < B 区 < C 区 < D 区的分布趋势, 相关性分析表明, 蠡湖沉积物 FDOM 的总荧光强度与 DOC 呈极显著正相关 ($y_{\text{DOC}} = 7.78x_{\text{总}} - 63.83$, $P < 0.01$), 说明荧光光谱均可以用来反映沉积物中有机物含量, 进一步表明可以利用 FDOM 的荧光强度来定量表征蠡湖沉积物中 DOM 的含量, 以开展 DOM 在水-沉积物界面的迁移转化研究。

4 结论

(1) 蠡湖表层沉积物 FDOM 有 3 个荧光组分: C1 自生源类腐殖质物质(类富里酸)、C2 陆源源类

腐殖质(类胡敏酸)、C3 自生源类蛋白(类色氨酸),荧光强度均值分别为:30.52、23.96、36.39 R. U. $\cdot g^{-1}$.

(2) 荧光强度指数(FI)、生物源指数(BIX)和腐殖化指数(HIX)的变化范围分别为:1.96~2.22、0.69~0.94、2.62~4.39. 蠡湖沉积物 FDOM 的来源具有陆源及自生源的双重特征,新近自生源为主.

(3) 表层沉积物中 FDOM 组分含量与沉积物中无机氮(SIN)的相关性较高,可能是因为沉积物无机氮(SIN)直接来源于 FDOM 的降解.

参考文献:

- [1] Singh S, D'Sa E J, Swenson E M. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) variability in Barataria Basin using excitation-emission matrix (EEM) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3211-3222.
- [2] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in Dissolved Organic Matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [3] 易文利, 王圣瑞, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖沉积物中有机质及其组分的赋存特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, **36**(5): 141-148.
Yi W L, Wang S R, Jin X C, *et al.* Distribution of total organic matter and the forms on the sediments from shallow lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2008, **36**(5): 141-148.
- [4] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 151-162.
Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162.
- [5] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 163-171.
Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Zhoushan Fishery Using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [6] Zhao J, Cao W X, Wang G F, *et al.* The variations in optical properties of CDOM throughout an algal bloom event [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **82**(2): 225-232.
- [7] 刘瑞霞, 李斌, 刘娜娜, 等. 辽河流域与英国中部河湖水体中溶解有机质的荧光特性[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2321-2328.
Liu R X, Li B, Liu N N, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in freshwaters from Liaohe Basin and Midland of UK [J]. *Acta Science Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2321-2328.
- [8] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [9] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌, 等. 洱海沉积物孔隙水中溶解有机质的三维荧光光谱特征[J]. *第四纪研究*, 2004, **24**(6): 695-700.
Fu P Q, Liu C Q, Wu F C, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of dissolved organic matter in sediment pore water in Lake Erhai [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(6): 695-700.
- [10] 蔡文良, 许晓毅, 罗固源, 等. 长江重庆段溶解性有机物的荧光特性分析[J]. *环境化学*, 2012, **31**(7): 1003-1008.
Cai W L, Xu X Y, Luo G Y, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the Chongqing section of Yangtze River [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- [11] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2351-2361.
Shen S, Wang Y L, Yang C M, *et al.* Spectral characteristic of dissolved organic matter (DOM) in the surface sediments from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2351-2361.
- [12] 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.
Lu M L, Zhang Y L, Qin B Q. Characterization of absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra of chromophoric dissolved organic matter at the river inflow and the open area in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 234-241.
- [13] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1268-1276.
Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Spatial-temporal dynamic changes of nitrogen and phosphorus and difference analysis in water body of Lihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1268-1276.
- [14] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis; a tutorial [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**(11): 572-579.
- [15] Mesfioui R, Abdulla H A N, Hatcher P G. Photochemical alterations of natural and anthropogenic dissolved organic nitrogen in the York River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 159-167.
- [16] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [17] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50.
- [18] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16):

- 5110-5122.
- [19] 冯伟莹, 焦立新, 张生, 等. 乌梁素海沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 1068-1074.
- Feng W Y, Jiao L X, Zhang S, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in the sediments of Wuliangsuhai Lake [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(6): 1068-1074.
- [20] 黄昌春, 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.
- Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(3): 375-382.
- [21] Brogi S R, Connelly M, Vestri S, *et al.* Biophysical processes affecting DOM dynamics at the Arno river mouth (Tyrrhenian Sea)[J]. Biophysical Chemistry, 2015, **197**: 1-9.
- [22] 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.
- [23] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析技术的蠡湖 CDOM 分布特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 517-524.
- Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al.* Distribution of chromophoric dissolved organic matter in Lihu Lake using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 517-524.
- [24] Miller M P, McKnight D M. Comparison of seasonal changes in fluorescent dissolved organic matter among aquatic lake and stream sites in the Green Lakes Valley [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2010, **115** (G1): G00F12.
- [25] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(1): 38-48.
- [26] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.
- [27] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties[J]. Geoderma, 2007, **140**(1-2): 176-187.
- [28] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.
- [29] Zhang Y L, van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence [J]. Water Research, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [30] Vignudelli S, Santinelli C, Murru E, *et al.* Distributions of dissolved organic carbon (DOC) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in coastal waters of the northern Tyrrhenian Sea (Italy) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, **60**(1): 133-149.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172