

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM₁ 污染特征及来源 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM_{2.5} 组分及其活性氧物质对比 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物镉等重金属空间分布特征及生态风险 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO_x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异

李文章^{1,2,3,4}, 张莉^{2,3,4*}, 王圣瑞^{1,2,3,4}, 肖尚斌¹, 钱伟斌^{2,3,4}, 席银^{1,2,3,4}, 许可宸^{2,3,4}, 史玲珑^{2,3,4}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 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; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 4. 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 昆明 650504)

摘要: 选取洱海不同季节全湖 47 个沉积物表层样品, 探讨水提取态有机氮 (WEON) 与不同来源 (上覆水、间隙水、入湖河流和湿沉降) 溶解性有机氮 (DON) 组分特征差异, 并分析其对沉积物影响。结果表明, ①洱海沉积物 WEON 含量季节性变化为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季; 空间分布规律呈北部 > 南部 > 中部。②洱海沉积物 WEON 腐殖化程度较高, 腐殖质主要以富里酸为主, 主要含有紫外区类腐殖质荧光峰 A 和高激发类色氨酸荧光峰 B, 受陆源输入和湖内生物共同影响。③洱海沉积物及其他来源 DON 均含有 2 个荧光组分, 其中组分 C1 为内源性可见紫外区腐殖质峰是生物降解形成的荧光峰; 组分 C2 为类色氨酸峰; 湿沉降样品类蛋白峰峰强最大, 生物可利用性较高; 入湖河流 DON 生物可利用性最低。④洱海上覆水 DON 荧光 C1 和 C2 组分和沉积物 WEON 含量为显著相关 ($r = -0.79, P < 0.01$; $r = -0.944, P < 0.01$), 上覆水 DON 的荧光组分特征能够很好指示沉积物 WEON 含量特征。研究洱海不同样品 DON 结构组分特征, 揭示洱海富营养化的潜在风险, 为防治规划提供依据。

关键词: 溶解性有机氮; 沉积物; 水提取态有机氮; 三维荧光光谱; 平行因子分析法

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2801-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612058

Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources

LI Wen-zhang^{1,2,3,4}, ZHANG Li^{2,3,4*}, WANG Sheng-rui^{1,2,3,4}, XIAO Shang-bin¹, QIAN Wei-bin^{2,3,4}, XI Yin^{1,2,3,4}, XU Ke-chen^{2,3,4}, SHI Ling-long^{2,3,4}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Kunming 650504, China)

Abstract: The 47 samples from Erhai Lake surface sediments were collected in different seasons. The distribution and structure characteristics of sediment water extractable organic nitrogen (WEON) were investigated by using the combined techniques of UV-Vis absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra (3DEEMs). The differences in DON of various sources (overlying water, pore water, inflow Rivers and wet deposition) were explored to analyze its effects on sediment. The results showed that: ① the temporal distribution followed the pattern of summer > spring > autumn > winter, with the spatial WEON distribution of northern > southern > central. ② The humic degree of Erhai sediment WEON was relatively high and mostly composed of fulvic acid, which mainly contained UV-like humic-like fluorescence peak A and high-excited tryptophan fluorescence peak B. This indicated that it was mainly affected by terrestrial input and microbial activity. ③ There were two fluorescent components (C1, C2) in the sediments and other sources of Erhai Lake. The component C1 was the endogenous visible ultraviolet peak formed by biodegradation, while the component C2 was the tryptophan peak. The bioavailability of wet deposition samples was comparatively high, greatly impacting Erhai Lake in heavy rainfall. The DON bioavailability in the inflow river was the lowest, which was prone to be accumulated in sediments. ④ The DON component C1 and C2 in overlying water had significant negative correlation with Erhai sediment WEON contents ($r = -0.79, P < 0.01$; $r = -0.944, P < 0.01$). This suggested that the overlying water DON components could indirectly reflect the sediment WEON content of Erhai Lake, namely the higher the fluorescence components C1 and C2 in overlying water DON were, the lower the sediment WEON content was.

Key words: dissolved organic nitrogen (DON); sediment; water extractable organic nitrogen (WEON); EEMs; EEM-PARAFAC

收稿日期: 2016-12-07; 修订日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1202235, 41503113); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07105-004); 环境基准与风险评估国家重点实验室自由探索项目 (2014-GOT-042-N-06)

作者简介: 李文章 (1992 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化过程与机制, E-mail: liwenzhang2015@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangli19821115a@163.com

水提取态有机氮(WEON)目前被定义为沉积物中能够被水或盐溶液提取出来的有机态氮^[1]。溶解性有机氮是溶解性有机质(DOM)含氮的部分^[2],其结构组分非常复杂,且大部分结构组分如蛋白质、腐殖质等存在形式及作用机理亟待解决^[3]。有研究表明 10% ~ 80% 的溶解性有机氮可被生物利用^[4,5],溶解性有机氮生物有效性的差异一定程度上取决于其结构组分。许多光谱测定手段已成为表征水溶性有机氮的结构和反应性的有效方法^[6]。有研究表明,紫外-可见吸收光谱技术能反映有机组分的芳香性和分子量等信息并评估结构的稳定性,三维荧光光谱能够很好地表征 DON 荧光组分,并识别其物质来源^[7]。沉积物 WEON 受各因素的影响,而不同来源对沉积物 WEON 有直接或间接的影响。研究沉积物 WEON 含量组分特征及与其他来源溶解性有机氮结构的差异性,综合分析各来源结构组分特征,有助于分析和评估溶解性有机氮对湖泊生态功能及水质的影响。

洱海是云贵高原第二大淡水湖泊,流域内人口密度大,在地区社会经济中起着重要作用。洱海水水质总体较好,维持在地表水国标 II ~ III 级(GB 3838-2002),但富营养化进程加剧,逐渐由中营养型湖泊向富营养型湖泊过渡^[8]。研究表明,洱海沉积物 DON 内源释放对湖泊氮代谢有重要影响^[9],且洱海沉积物 WEON 生物可利用性非常高^[6]。洱海 2006 和 2013 年都发生了较大规模的藻类水华^[10],对洱海有不同程度的影响。

本研究试图研究洱海沉积物 WEON 与其他来源溶解性有机氮含量分布规律,并利用紫外-可见光谱和三维荧光光谱手段结合平行因子分析法^[11]进行表征其结构组分特征的差异性,以期对洱海底泥阻控防治规划提供技术服务和理论支持,并为湖泊富营养化潜在威胁的预测提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洱海是云南省第二大高原淡水湖泊,位于大理白族自治州境内,其流域面积为 2 565 km² (地处 99°32' ~ 100°27' E, 25°25' ~ 26°16' N),湖泊面积为 249 km²,湖周长为 128 km,最大水深为 21.3 m (平均 10.6 m)。湖水主要来源于入湖河流,降雨和融雪。洱海沉积物质地分布差异性明显,洱海北部和南部水深较浅,有少量的植被分布,中部湖区水深较大,基本无水生植物生长,北部入湖河流流经洱海主

要的畜牧农田区。洱海沉积物表层主要以含粉砂质泥、粉砂和泥质为主,其分布受水下地形的影响和制约,近岸浅水过渡区以粉砂和粉、砂质泥为主,湖心区以泥(包括黏土矿物)为主^[12]。

1.2 样品采集与前处理

本研究在洱海选取洱海北中南四季的代表性点位分别于 2009 年 7 月、2009 年 10 月、2010 年 1 月、4 月这 4 个季节采集沉积物样品,沉积物样品在 2014 年 9 月提取测定,用于分析洱海沉积物 WEON 随时间的变化规律;利用彼得森采泥器^[10]在洱海外源输入较少同时酶活性较低的春季,采集 47 个表层样(0 ~ 10 cm),立即放入密封袋中,4℃ 下保存带回实验室,经冷冻干燥后研磨过 100 目筛,密封保存,用于分析洱海沉积物 WEON 空间分布特征。于 2010 年 10 月采集上覆水、间隙水、入湖河流和湿沉降样品,主要入湖河流为弥苴河、永安江波罗河、白石溪、中和溪和清碧溪。采用自制开放式采雨器,收集雨水样品。具体采样点位信息见图 1。

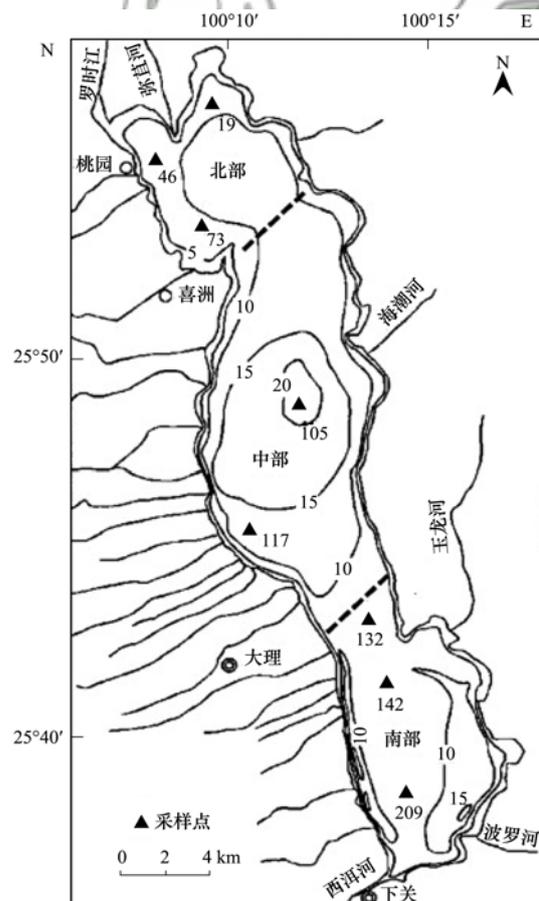


图 1 洱海采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Erhai Lake

1.3 实验测定与分析方法

采用稀盐溶液提取沉积物 WEON,按 V(水):

$m(\text{土})$ 为 10:1 的比例加入 $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液, 于 25°C 、 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下振荡 1 h 后, $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 过 GF/F $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜(提前在马弗炉中 450°C 下烘 3 h). 洱海沉积物有机质的含量采用重铬酸钾外加热法测定; DON 采用差减法进行测定, 即:

$$\omega(\text{DON}) = \omega(\text{TDN}) - \omega(\text{NH}_4^+\text{-N}) - \omega(\text{NO}_3^-\text{-N}) - \omega(\text{NO}_2^-\text{-N})$$

$\omega(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 使用纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009); $\omega(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 采用酚二磺酸分光光度法(GB 7480-87)测定; $\omega(\text{NO}_2^-\text{-N})$ 采用分光光度法(GB 7493-87)测定; $\omega(\text{DOC})$ 采用 TOC 测定仪测定(High DOC II, Elemental, 德国).

紫外可见光谱采用分光光度计测定(哈希, 美国)进行扫描, 荧光光谱采用日立 F-7000 荧光光谱分析仪(日立, 日本)进行扫描, 并结合平行因子算法分析. 平行因子算法(PARAFAC)能够将多个叠加的荧光峰区分开来, 用裂半分析和残差分析检验模型确定最优组分数^[13]. 所用数据处理及统计分析软件包括 Origin 8.0、Microsoft Excel 2010、SPASS 10.0 和 MATLAB2015.

2 结果与讨论

2.1 洱海沉积物 WEON 含量及时空分布特征

2.1.1 洱海表层沉积物 WEON 季节性变化特征

沉积物释放是湖泊上覆水 DON 的一个主要来源, 其 DON 可释放量很大程度受季节影响(图 2). 洱海表层沉积物 WEON 含量季节性变化表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季(图 2, 中部区域春季与秋季变化差异不明显). 夏季洱海表层沉积物溶解性有机氮 [$(39.07 \pm 9.71) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 明显高于其他季节, 春季均值 [$(27.70 \pm 12.91) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 与秋冬两季相差不大, 春季沉积物 WEON 含量在空间上变化较大. 冬季洱海表层沉积物 WEON 含量 [$(18.85 \pm 4.80) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 最低, 并且区域之间差别不大, 表明季节变化对表层沉积物 WEON 的影响较为明显, 这主要与外源输入和环境因素的影响有较大关系, 如温度、水量、生物量等^[14].

为了便于分析, 根据洱海地形将洱海分为 3 个湖区, 即北部、中部、南部. 各个湖区之间呈现相似季节性变化规律, 北部与南部沉积物 WEON 分布规律呈现: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 中部与南北部湖区略有差异, 表现为沉积物 WEON 含量在秋季高于春季, DOC 与沉积物 WEON 含量变化规律差异较

大, 北部湖区 DOC 含量与沉积物 WEON 含量变化规律一致, 而南部与中部呈现春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季规律. 由于洱海春季和冬季降雨较少且外源污染较少, 更能反映湖泊本身特性, 而冬季沉积物微生物活性较低, 因此本次研究选择春季样品, 进一步揭示洱海沉积物 WEON 含量组分特征.

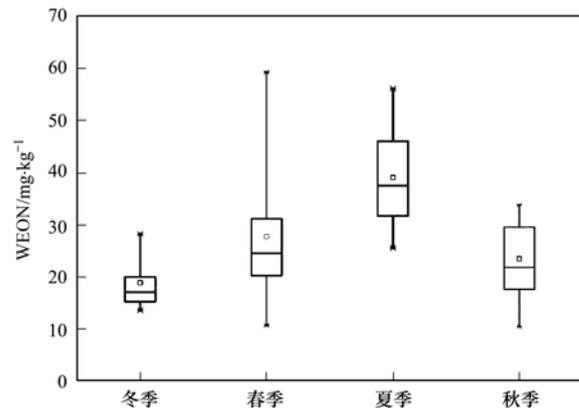


图 2 洱海沉积物 WEON 含量季节性变化特征

Fig. 2 Seasonal variation of WEON characteristics of sediments from Lake Erhai

2.1.2 洱海沉积物 WEON 含量空间分布特征

为研究洱海沉积物空间分布特征, 选取不同湖区 47 个代表点位进行分析. 洱海表层沉积物 WEON 含量在 $14.22 \sim 119.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 [$(63.69 \pm 25.05) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], 其中北部湖区沉积物 WEON 含量平均 $83.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 中部湖区平均 $54.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 南部湖区平均 $57.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 3). 北部东岸红山湾地区及中部海潮河区域, 沉积物 WEON 含量明显高于洞庭湖, 巢湖和鄱阳湖^[15], 表明洱海沉积物 WEON 含量较高, 有一定的释放风险. 各形态氮占比对沉积物 WEON 也有较大影响, 为了进一步分析 WEON 含量在洱海表层沉积物中的分布规律, 比较溶解性有机氮在 DTN 中的占比特征. 北部湖区 WEON 的平均含量为 $78 \pm 17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 DTN 的比例为 $31\% \pm 6\%$; 中部湖区 WEON 平均含量为 [$(64 \pm 15) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], 占 DTN 的比例为 $25\% \pm 7\%$; 南部湖区平均含量为 [$(54 \pm 13) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], 占 DTN 的比例为 $22\% \pm 7\%$, 高于河口和近海的 WEON 占比^[16]. 这表明洱海沉积物 WEON/DTN 相对较高, 且由北至南依次降低, 这与洱海沉积物 WEON 的含量和水流方向基本一致, 表明洱海沉积物 WEON 含量一定程度上受洱海流向的影响, 且 WEON 所占 DTN 比例越大, 沉积物 WEON 含量越高.

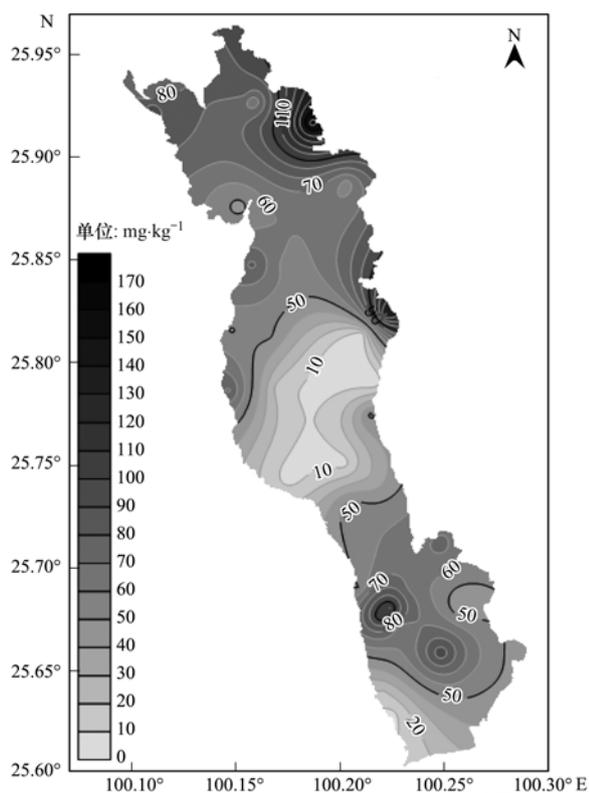


图3 洱海沉积物 WEON 表层样分布变化

Fig. 3 Spatial distribution of surface sediment WEON in Erhai

2.2 洱海沉积物 WEON 结构组分特征

2.2.1 沉积物 WEON 紫外光谱特征

有研究发现, $SUVA_{254}$ 值是单位浓度在 254 nm 波长处紫外吸收值, $SUVA_{254}$ 反映 DON 的芳香性, 该值越高, 芳香性越强^[17]. E_3/E_4 值是有机物在吸收波长为 300 nm 和 400 nm 处紫外吸收值的比值, 研究发现 $E_3/E_4 < 3.5$ 时湖泊水溶性有机物以腐殖酸为主, 当其 > 3.5 时则以富里酸为主^[18]. 紫外光谱指数 S_R 能够间接指示 DON 的分子量大小, 且 S_R 与 DON 分子量呈现负相关, 即 S_R 值越大, 表明 DON 分子量越小^[19]. 洱海沉积物 WEON 的 S_R 值在 1.21 ~ 2.00 之间, 平均值为 1.64, 呈现中部 > 北部 > 南部的趋势, 说明洱海沉积物 WEON 分子量中部最小, 南部最大, 这是由于中部湖区水深较大, 溶解氧较低, 且受外源影响较小, 沉积物受自然代谢影响较大, 更易矿化释放小分子 WEON, 而南部湖区大量水生植物在 20 世纪初期凋亡和沉降^[20], 其腐败残体可能与沉积物 WEON 分子量增加有关. 洱海沉积物 $SUVA_{254}$ 指数和 E_3/E_4 值分别为 0.89 ~ 1.34 和 3.09 ~ 4.35, 沉积物 WEON 的 $SUVA_{254}$ 值远高于山口湖 (0.24 ~ 0.37)^[21], 表明洱海沉积物 WEON 腐殖化程度高^[22], 且含有腐殖酸, 主要以富里酸为主,

$SUVA_{254}$ 指数和 E_3/E_4 的值在北部区域比中部和南部区域高, 表明洱海北部湖区 WEON 芳香性较高, 且以富里酸为主, 这是因为洱海主要入湖河流在北部湖区, 且受农业和农村面源污染影响, 造成一定程度的含氮新鲜有机质输入, 而沉积物越“新鲜”, 其芳香性越高^[17].

2.2.2 荧光光谱特征

荧光指数 $FI (E_x = 370 \text{ nm}, E_m = 450 \text{ nm}/E_m = 500 \text{ nm})$ 能表征 DON 的来源^[23], 陆源和生物来源两个端源的 FI 值分别是 1.4 和 1.9, 荧光指数 $FI \leq 1.4$ 时类富里酸荧光物质主要是由陆源输入引起, 而当 $FI \geq 1.9$ 时主要来源于生物活动^[22]. 自生源指数 (BIX) 大于 1 时, 间接表明 DON 主要来自内源代谢, 而介于 0.6 ~ 0.7 时, 表明主要为陆源输入, 即受入湖河流水质和人为活动等因素影响较大^[24]. 腐殖化指数 HIX 为激发波长为 254 nm 处, 发射波长在 435 ~ 480 nm 与 300 ~ 345 nm 波长范围内荧光强度平均值的比值, 可用于反映 DON 样品腐殖化程度^[25]. 当 HIX 小于 4 时, 表明荧光物质主要来源于内源微生物活动或细菌产生^[24]. 洱海沉积物 WEON 的 FI 指数在 1.65 ~ 1.68 之间, 该指数在各湖区间差异较小, 其中北部平均 1.65, 中部湖区平均 1.68, 南部湖区平均 1.66, 表明洱海沉积物 WEON 受陆源和微生物源的共同作用. 沉积物 WEON 的自生源指数 BIX 在 0.6 ~ 1.1 之间, 各湖区存在一定差异, 北部湖区平均 0.90, 中部湖区该值平均 1.00, 南部湖区平均 0.95, 表明洱海沉积物 WEON 同时受外源和内源的影响, 这与上述 FI 指数反应一致. HIX 在 2.00 ~ 2.33 之间, 远高于舟山渔场 (0.4 ~ 1.2)^[26], 其中南部湖区 (2.33) > 北部 (2.02) \geq 中部湖区 (2.00), 表明洱海沉积物 WEON 腐殖化程度相对较高, 且受微生物影响较大, 控制洱海水质状况, 应该更多考虑微生物活动相关的因素.

2.3 洱海沉积物 WEON 组分含量特征与其他来源差异性比较

2.3.1 洱海沉积物 WEON 含量与其他来源差异特征

洱海沉积物 WEON 含量及组分结构受各种环境因素和来源的影响, 而洱海间隙水, 上覆水, 湿沉降和入湖河流为其主要的影响因素. 本研究结果表明, 各来源 DON 含量分别为间隙水 DON 含量 0.20 ~ 1.71 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均 0.77 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 入湖河流 DON 含量 0.21 ~ 0.41 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均 0.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 湿沉降 DON 含量 0.02 ~ 0.47 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均 0.26 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 上覆水 DON 含量 0.05 ~ 0.25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平

均 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 沉积物间隙水 DON 含量远高于其他来源, 而间隙水能直接与沉积物相互交换, 沉积物 WEON 为各来源 DON 在洱海的“源”和“汇”, 高浓度的沉积物 WEON 通过间隙水向上覆水释放, 其对洱海水环境有潜在风险. 不同时期采集的湿沉降样品 DON 含量变化较大, 这与降雨量及空气污染物浓度等环境因素有较大关系, 湿沉降在洱海 DON 输入的同时, 增加了地表径流量, 致使农田农药化肥残留被冲刷, 流入洱海水体, 使得湿沉降对洱海的影响程度加大^[27]. 洱海间隙水和入湖河流 DON 均以中部区域浓度最高, 南部和北部相对较低. 北部入湖河流流速较高, 水体交换快, 含氧量较高^[28], 一方面促进湖区上覆水氮代谢, 促进 DON 的生成; 另一方面, 由于洱海水体大体流向为由北向南, 部分污染物最先沉积于北部湖区, 使得北部沉积物 WEON 含量最高. 中部入湖河流流经主要城镇区域, 城市生活污水和工业废水大量排入, 造成入湖河流 DON 浓度较高 ($0.319 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在湖泊内环流等作用下, 较多的氮素富集于该区域的上覆水中, 但中部湖区水体较深, 氧含量较少, DON 分解速率较慢, 致使其间隙水氮富集浓度较高^[29], 进一步向沉积物 WEON 转化. 同时由于中部湖区水量多, 环境容量较大, 结果呈现为中部湖区上覆水 DON 浓度最低. 金赞芳^[30]等研究表明湖泊各形态的氮既向沉积物沉积, 又从沉积物释放, 且温度和溶解氧等环境条件是影响沉积物-水界面氮迁移转化的主要因素. 各来源 DON 含量受各因素的影响, 不同点位不同时间含量差异较大, 这与洱海地理环境特征有关. 入湖河流 DON 高于上覆水 DON 含量, 同时沉积物间隙水 DON 含量远高于上覆水, 入湖河流和沉积物 WEON 由于浓度梯度均向上覆水转移.

2.3.2 各来源溶解性有机氮结构组分特征及其与沉积物 WEON 差异

各来源水样 DON 的 SUVA_{254} 和 S_R 平均值依次为入湖河流 > 上覆水 > 间隙水 > 湿沉降, 入湖河流 DON 的芳香化程度和分子量远高于其他 3 个来源及上覆水, 表明洱海上覆水 DON 的芳香性由各个来源因素的共同作用, 入湖河流是一个重要因素, 但间隙水和湿沉降也是不可忽略的两个因素. 洱海不同来源 DON 的 E_3/E_4 平均值均大于 3.5, 反映洱海不同来源水体 DON 以富里酸为主, 上覆水 DON 所含富里酸组分最高, 其次为湿沉降和入湖河流, 间隙水 DON 中富里酸最少, 而富里酸为难降解组分^[31], 表明洱海上覆水 DON 中易降解组分较少, 生物有效性

较低, 有助于维持洱海水质.

间隙水 DON 的 FI 指数平均值约 1.83, 上覆水和入湖河流的平均值分别为 1.64 和 1.66, 均在 1.4 和 1.9 之间, 表明其 DON 受陆源输入和生物活动共同作用^[22], 三者均高于富营养化的宝应湖^[32] 上覆水 DON (平均值 1.24), 说明其 DON 受微生物影响较大. 不同来源的水体及其上覆水体 DON 受微生物和外源输入共同作用, 可能是流域内植被覆盖较高, 人类活动频繁, 植被残体腐殖降解和人类生产生活产生大量富里酸, 通过径流进入入湖河流和上覆水, 并在沉积物中富集. 此外, 入湖河流 DON 样品的 HIX 指数较上覆水和间隙水的高, 三者远高于滦河 (平均值 0.61) 和乌梁素海^[33] 间隙水 (平均值 0.73), 进一步反映洱海主要来源 (入湖河流和间隙水) DON 的腐殖化程度较高, 而湿沉降 DON 腐殖化程度较低 (平均 HIX 为 0.90), 这与紫外光谱的结果相一致.

三维荧光光谱手段能检测出荧光特征峰, 表征 DON 的组分特征. 洱海主要的荧光特征峰主要有 A、B、C 和 D 峰 (图 4), 其中类富里酸峰 A 位于激发波长/发射波长 [$E_x/E_m = (315 \sim 325) \text{ nm}/(415 \sim 440) \text{ nm}$], 木质素和其它植物残体为其主要的来源; 峰 C [$E_x/E_m = (310 \sim 360) \text{ nm}/(370 \sim 450) \text{ nm}$] 为类腐殖酸物质, 与类腐殖酸物质有关; 峰 B 位于 $E_x/E_m = 225/310 \text{ nm}$, 峰 D 位于 $E_x/E_m = 275/310 \text{ nm}$, 两者均为类蛋白物质, 来源于芳香性荧光蛋白和蛋白质的相关组分^[34]. 三维荧光光谱扫描本研究沉积物样品, 结果表明沉积物 WEON 荧光光谱主要含有两类荧光峰, 即荧光峰 A 和 B, 其中峰 A 代表紫外区类腐殖质荧光峰和峰 D 代表高激发类色氨酸荧光峰^[35]. 洱海不同来源 DON 样品主要检测出 4 种荧光峰 (荧光峰 A、B、C 和 D), 其荧光峰强度在洱海样品除湿沉降样品外, 其它来源样品中均检测出峰 A, 峰强度呈间隙水 > 上覆水 \approx 入湖河流趋势, 峰 C 只出现在洱海北部上覆水样品和清碧溪样品中, 说明类富里酸荧光物质对洱海 DON 的贡献较大, 其中, 间隙水和入湖河流可能是上覆水类富里酸 DON 的重要来源. 此外, 多数样品特别是入湖河流和湿沉降样品 (除弥苴河外) 均检测出峰 D, 间隙水峰强度最高, 上覆水的最低, 说明洱海生物活动较频繁, 沉积物对洱海不同来源 DON 影响较大.

传统的“寻峰法”对多个荧光峰叠加可能造成识别不准确的情况, PARAFAC 模型能够很好地将多个荧光峰分开, PARAFAC 分析结果表明, 洱海沉

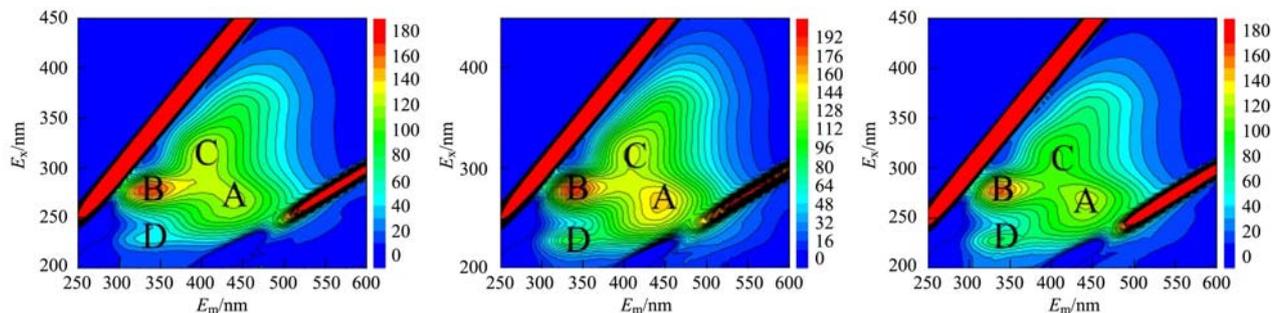


图 4 洱海溶解性有机氮典型荧光图谱(北中南)

Fig. 4 Typical fluorescence peaks of DON in Erhai Lake

积物及不同来源 DON 含有 2 个组分(图 5), C1 在激发波长为 275 nm 和发射波长为 425 nm 存在一个荧光峰,该峰为内源性可见紫外区腐殖质峰^[36],表明生物降解形成的荧光峰; C2 在发射波长为 330

nm, 激发波长分别为 225 nm 和 280 nm 处存在两个荧光峰, 该峰为类色氨酸峰, 表明主要蛋白质物质中含有游离或固定态氨基酸, 蛋白质或多肽较难降解^[37].

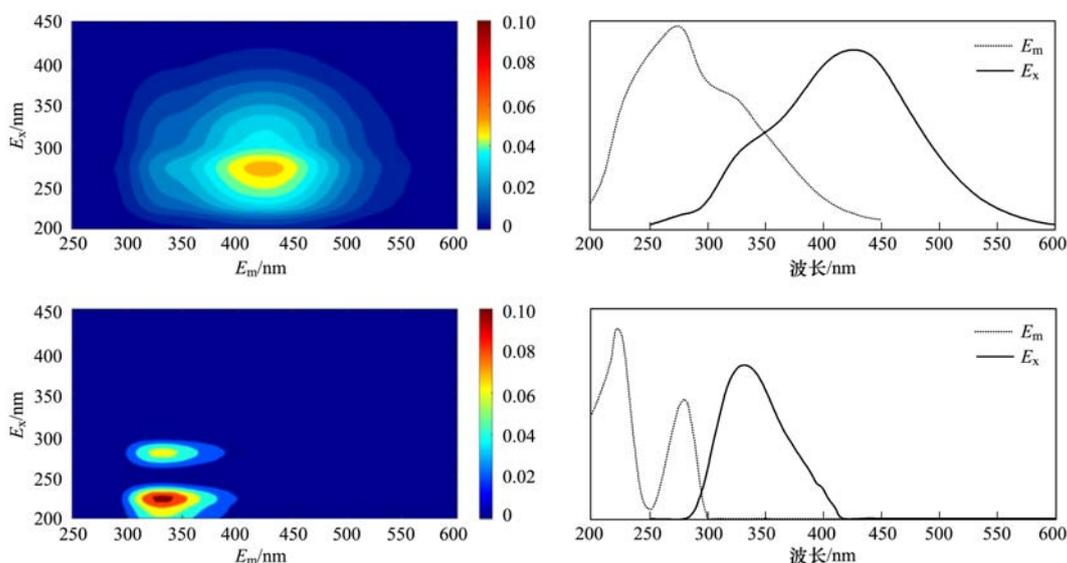


图 5 PARAFAC 模型鉴别出洱海不同来源 DON 的 2 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 5 Fluorescence spectra and excitation/emission profiles of two components from PARAFAC model

从荧光结构组分来讲, 由 PARAFAC 对各样品的荧光光谱分离解析, 得出沉积物及各水体 DON 主要含有两个荧光峰 C1 和 C2, C1 和 C2 均为沉积物 WEON 荧光强度最大, 表明沉积物 WEON 含有主要的荧光组分; 除湿沉降样品外其他样品均为 C1 组分占总组分的绝对优势, 表明其生物可利用性较低, 洱海水体富营养化风险较小, 但其各较难降解的组分在湖内可能沉降富集于沉积物中; 而湿沉降样品 C1 组分中荧光峰强非常低, 其中类蛋白组分占比 C2/C1 在所有样品中值最高(1.03 ~ 1.17), 表明其生物可利用性相对较高, 可能对洱海水体造成较大影响, 同时对沉积物 WEON 的影响最小. 在各来源中, 入湖河流 DON 组分的 C2/C1 比值最小, 表明其生物可利用性最低, 更易在洱海沉积物中富集, 对沉

积物 WEON 影响相对较大.

2.4 洱海沉积物 WEON 特征环境学意义

为揭示洱海沉积物 WEON 含量与其光谱学特征参数及各指标间关系, 分析了洱海不同来源 DON 含量与光谱参数等指标相关关系(见表 1). 研究表明, 间隙水和上覆水与沉积物 WEON 具有较好的相关性, 沉积物和间隙水呈现显著负相关($r = -0.634, P < 0.05$), 沉积物 WEON 含量和间隙水 DON 荧光组分 C1、C2 组分也存在较好的相关性(分别为 $r = -0.96, P < 0.01$; $r = -0.635, P < 0.05$), 表明沉积物和间隙水 DON 具有同源性, 间隙水 DON 和沉积物 WEON 相互转化, 即沉积物向间隙水释放 DON, 沉积物 WEON 会减少, 同时间隙水 DON 汇入沉积物时, 间隙水 DON 也会减少. 此外,

沉积物 WEON 含量和间隙水 DON 荧光组分 C1、C2 和上覆水荧光组分 C1、C2 存在不同程度的相关性. 通过相关性分析发现, 入湖河流 DON 与各参数无明显相关性, 表明入湖河流 DON 并非直接影响洱海各湖区沉积物 WEON 含量. 其中沉积物 WEON 含量与上覆水 DON 荧光 C1、C2 组分均呈现极显著相关

($r = -0.79$, $P < 0.01$; $r = -0.944$, $P < 0.01$), 表明上覆水 DON 的荧光组分特征能够很好指示沉积物 WEON 含量特征, 即上覆水中 DON 荧光组分 C1 和 C2 越大, 沉积物 WEON 含量越低, 说明洱海上覆水 DON 有一部分为沉积物释放, 沉积物 WEON 对湖泊水体有一定的贡献和影响.

表 1 不同来源 DON 含量与各荧光组分相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation between the DON content of different sources with the components of DON spectral parameter in Erhai

	沉积物	上覆水	间隙水	BIX	FI	HIX	沉积物 C1	湿沉降 C1	上覆水 C1	间隙水 C1	沉积物 C2	湿沉降 C2	上覆水 C2	间隙水 C2
沉积物	1	-0.543	-0.634*	-0.075	-0.152	0.384	0.035	-0.497	-0.79**	-0.96**	-0.249	-0.503	-0.944**	-0.635*
上覆水	-0.543	1	0.276	0.319	0.171	-0.412	-0.217	0.233	0.544	0.492	-0.003	0.229	0.395	0.077
间隙水	-0.634*	0.276	1	-0.074	0.139	0.127	0.068	0.132	0.56	0.705*	0.379	0.132	0.503	0.312

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$

3 结论

(1) 洱海沉积物 WEON 含量随季节性变化趋势为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 空间分布规律为北部 > 中部 > 南部. 洱海沉积物 WEON 腐殖化程度高, 主要以富里酸为主, 含有 A 峰和 B 峰两类荧光峰; 其分子量分布为中部最小, 南部最大; 受内源和外源共同影响, 且受微生物影响较大.

(2) 洱海不同来源 DON 腐殖化程度规律为入湖河流 > 上覆水 > 间隙水 > 湿沉降; 湿沉降生物可利用性较高, 如降雨集中可能对洱海水体造成较大影响; 入湖河流 DON 生物可利用性最低, 易在沉积物中富集. PARAFAC 分析结果表明, 洱海沉积物 WEON 及各来源 DON 含有 2 个荧光组分, 组分 1 为内源性可见紫外区腐殖质峰, 表明生物降解形成的荧光峰; 组分 C2 为类色氨酸峰.

(3) 洱海上覆水 DON 的结构组分和沉积物 WEON 含量显著相关, 上覆水 DON 荧光组分能够很好指示沉积物 WEON 含量, 即上覆水中 DON 荧光组分 C1 和 C2 越大, 沉积物 WEON 含量越低, 说明洱海上覆水 DON 部分为沉积物释放, 且沉积物 WEON 对湖泊水体有一定的贡献.

参考文献:

[1] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, *et al.* Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**(5-6): 374-387.

[2] Tyler A C, McGlathery K J, Anderson I C. Macroalgal mediation of dissolved organic nitrogen (DON) dynamics in a temperate coastal lagoon[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, **53**(2): 155-168.

[3] Pehlivanoglu-Mantas E, Sedlak D L. Wastewater-derived dissolved organic nitrogen: analytical methods, characterization, and effects—a review[J]. *Critical Reviews in Environmental*

Science and Technology, 2006, **36**(3): 261-285.

[4] Seitzinger S P, Sanders R W, Styles R. Bioavailability of DON from natural and anthropogenic sources to estuarine plankton[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(2): 353-366.

[5] Watanabe A, Tsutsuki K, Inoue Y, *et al.* Composition of dissolved organic nitrogen in rivers associated with wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 220-228.

[6] Zhang L, Wang S R, Xu Y S, *et al.* Molecular characterization of lake sediment WEON by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry and its environmental implications [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 196-203.

[7] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater using fluorescence spectrophotometry [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(2): 215-218.

[8] Zhang L, Wang S R, Imai A. Spatial and temporal variations in sediment enzyme activities and their relationship with the trophic status of Erhai Lake [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 365-369.

[9] 高悦文, 王圣瑞, 张伟华, 等. 洱海沉积物中溶解性有机氮季节性变化[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 659-665.

Gao Y W, Wang S R, Zhang W H, *et al.* Seasonal variations of dissolved organic nitrogen in sediments of lake Erhai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(6): 659-665.

[10] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 2010 年洱海全湖氮负荷时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(4): 389-395.

Zhao H C, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of nitrogen loading in Erhai Lake in 2010 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(4): 389-395.

[11] 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.

Guo W D, Huang J P, Hong H S, *et al.* Resolving excitation emission matrix spectroscopy of estuarine CDOM with parallel factor analysis and its application in organic pollution monitoring [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1419-1427.

[12] 中华人民共和国环境保护部. 2010 年中国环境状况公报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011.

- [13] 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.
- [14] Kroeger K D, Cole M L, Valiela I. Groundwater-transported dissolved organic nitrogen exports from coastal watersheds [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2248-2261.
- [15] 林素梅, 王圣瑞, 金相灿, 等. 湖泊表层沉积物可溶性有机氮含量及分布特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 623-630.
Lin S M, Wang S R, Jin X C, *et al.* Contents and distribution characteristics of soluble organic nitrogen in surface sediments of lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 623-630.
- [16] 程杰, 张莉, 王圣瑞, 等. 洱海沉积物不同分子量溶解性有机氮空间分布及光谱特征[J]. *环境化学*, 2014, **33** (11): 1848-1856.
Cheng J, Zhang L, Wang S R, *et al.* Spatial distribution and spectral characteristics of dissolved organic nitrogen with different molecular weight in Erhai sediment [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(11): 1848-1856.
- [17] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 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[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 933-941.
Li L L, Jiang T, Yan J L, *et al.* 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 [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (3): 933-941.
- [18] Abbt-Braun G, Lankes U, Frimmel F H. Structural characterization of aquatic humic substances—the need for a multiple method approach [J]. *Aquatic Sciences*, 2004, **66**(2): 151-170.
- [19] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [20] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 等. 云南洱海的生态保护及可持续利用对策[J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 38-42.
Yan C Z, Jin X C, Zhao J Z, *et al.* Ecological protection and sustainable utilization of Erhai Lake, Yunnan [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(5): 38-42.
- [21] 华飞, 赵广超, 张靖天, 等. 山口湖沉积物中溶解性有机氮的分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2015, **5**(2): 129-135.
Hua F, Zhao G C, Zhang J T, *et al.* A study on distribution characteristics of dissolved organic nitrogen (DON) in the sediments of Lake Shankou [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, **5**(2): 129-135.
- [22] 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.
- [23] Birdwell J E, Engel A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41** (3): 270-280.
- [24] 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.
- [25] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [26] 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.
- [27] 樊敏玲, 王雪梅, 王茜, 等. 珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(1): 51-56.
Fan M L, Wang X M, Wang Q, *et al.* Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus into the Hengmen of Pearl River Estuary [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, **29**(1): 51-56.
- [28] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 1952-1959.
Zhao H C, Wang S R, Zhao M, *et al.* Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in lake Erhai [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(7): 1952-1959.
- [29] Li Y P, Wang S R, Zhang L, *et al.* Composition and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from the sediment of Erhai Lake in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, **14**(9): 1599-1611.
- [30] 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1423-1430.
Jin Z F, Gong J L, Shi Y L, *et al.* Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1423-1430.
- [31] Fu J F, Ji M, Wang Z, *et al.* A new submerged membrane photocatalysis reactor (SMPR) for fulvic acid removal using a nano-structured photocatalyst [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **131**(1-3): 238-242.
- [32] 陈小锋, 揣小明, 刘涛, 等. 江苏省西部湖泊溶解性有机物质光谱学特征和来源解析[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 259-266.
Chen X F, Chuai X M, Liu T, *et al.* Characteristics and source identification of the dissolved organic matter in the lakes of west Jiangsu by spectroscopy [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, **24** (2): 259-266.
- [33] 郭旭晶, 席北斗, 谢森, 等. 乌梁素海沉积物孔隙水中溶解有机质的荧光及紫外光谱研究[J]. *环境工程学报*, 2012, **6** (2): 440-444.
Guo X J, Xi B D, Xie S, *et al.* Study on fluorescence spectra and UV-vis spectra of dissolved organic matter collected from sediment pore water in Wuliangsu Lake [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(2): 440-444.
- [34] Yeh Y L, Yeh K J, Hsu L F, *et al.* Use of fluorescence quenching method to measure sorption constants of phenolic xenoestrogens onto humic fractions from sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **277**: 27-33.
- [35] 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.
- [36] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析 [J]. *环境科学学报*, 2016, **36** (2): 475-482.
- Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, et al. The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36** (2): 475-482.
- [37] 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 & Oceanography*, 2010, **55** (6): 2452-2462.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@cees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)