

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究

陶亚^{1,2}, 袁田², 周顺桂², 袁勇², 庄莉², 王辉宪^{1*}

(1. 湖南农业大学理学院, 长沙 410128; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘要: 以不同来源的水溶性有机物(DOM)为供试材料, 采用电化学方法和荧光光谱法研究了 DOM 电子转移能力及其与荧光峰强度的关系. 采用库仑安培法测定 DOM 电子转移能力, 其中测得的电子接受能力为 $635.6 \sim 1\,049.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$, 电子供给能力为 $27.3 \sim 42.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$. 利用循环伏安法研究 DOM 电化学活性, 发现其氧化还原电位在 $-731 \sim -996 \text{ mV}$ (vs. Ag/AgCl) 之间. 经过电位跃阶法三次氧化还原循环后电子转移能力仍可维持在 $232.1 \sim 897.2 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ 之间, 电子循环率为 $36.7\% \sim 78.2\%$, 说明 DOM 具有重复利用、反复转移电子的特性. 采用荧光激发发射光谱法(EEM_s)测定 DOM 的类富里酸荧光峰强度并比较其与 DOM 电子转移能力的关系, 发现 DOM 的类富里酸荧光峰强度与 DOM 的电子循环率具有显著相关 ($r^2 = 0.92$). 实验结果为理解 DOM 在元素循环、污染物降解以及生物地球化学循环中的作用提供科学依据.

关键词: 水溶性有机物; 电子转移能力; 电子循环率; 库仑安培法; 电位跃阶法; 荧光激发-发射光谱法

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1871-07

Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter

TAO Ya^{1,2}, YUAN Tian², ZHOU Shun-gui², YUAN Yong², ZHUANG Li², WANG Hui-xian¹

(1. College of Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: This study demonstrated the relationship between redox activity and fluorescence characteristics of different dissolved organic matter (DOM) employing a combined method of electrochemistry and fluorescence spectroscopy. Chronoamperometry was used to quantitatively evaluate the electron transfer capacity (ETC) of DOM. Data showed that the electron accepting capacity of DOM ranged from $635.6 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ to $1\,049.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$, and the electron donating capacity ranged from $27.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ to $42.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$. For all DOM tested, the cyclic voltammeteries (CVs) showed an evident pair of redox peak with the redox potentials in the range from -731 mV to -996 mV (vs. Ag/AgCl), suggesting their electrochemical activity. Using the multi-potential steps method, the ETC was measured to be $232.1 \sim 897.2 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ and the electron recycling rates (ERRs) were $36.7\% \sim 78.2\%$, indicating the electron transfer of DOM has a reversible character. Using fluorescence excitation-emission spectroscopy (EEM_s), the ERRs were found to be highly correlated with the fulvic-like fluorescence intensity of DOM with a correlation coefficient of 0.92. This study can potentially provide a scientific base for understanding the roles of DOM in the elements cycles, pollutants degradation and biogeochemical cycles.

Key words: dissolved organic matter; electron transfer capacity; electron recycling rate; chronoamperometry; multi-potential steps; fluorescence excitation-emission spectroscopy

水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)是一类由不同分子量大小、结构和功能性质的异构有机混合物组成^[1]. DOM 广泛存在于自然生态系统中,并在连接陆地和水生碳库的生物地球化学碳循环中起到重要作用^[2~4]. DOM 一般情况下由低分子量的游离氨基酸、糖类、有机酸和大分子量的腐殖质、氨基糖和多酚等组成^[5,6]. 长期以来,有关 DOM 的研究主要集中于其吸附与络合属性,重点是它对重金属和有机污染物迁移扩散的影响. 例如,周立祥等研究发现 DOM 能够吸附重金属并形成 DOM-重金属络合物,从而提高重金属的生物有效性^[7,8];另外,DOM 还可与持久性有机污染物结合,增强水溶性及迁移性,降低土壤的吸附^[9,10].

近年来,研究发现 DOM 具有通过氧化还原反应介导生物地球化学反应的能力. 例如,DOM 可从微生物和化学还原剂中接受电子并转移到固相铁氧矿物和有机污染物^[11,12],也可作为电子穿梭体,在厌氧条件下穿梭于微生物表面和铁氧化物之间^[13]. DOM 的氧化还原性质对重金属和 U(VI) 等放射性核素以及有机污染物等物质的迁移、转化起着重要的作用^[14,15]. DOM 的氧化还原功能主要是因为其含

收稿日期: 2011-08-12; 修订日期: 2011-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40171157, 31070460); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001)

作者简介: 陶亚(1983~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物化学, E-mail: taoya5202005@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: Jsuvanghuixian@163.com

有的硫酰基或者酚类组分,特别是酰基组分^[16,17]. 例如,Scott 等^[18]研究阐述了当微生物将电子转移给腐殖酸时,主要是酰基组分在过程中充当着电子接受体. 同时 DOM 含有多种活性较高的发光基团,在一定条件下能发射荧光,因此可利用荧光光谱学方法进行研究. 但是,目前利用荧光光谱的研究主要集中于反映其结构、构型和各种组成以及与分子内部、分子间相互作用的动力学等信息^[19,20]. 至今未见研究 DOM 荧光光谱特征与电子转移能力相关性的报道.

本研究采用荧光激发-发射矩阵法 (excitation-emission matrixes, EEMs) 探讨不同来源 DOM 的可见区类富里酸荧光峰强度,并分析其与 DOM 电子接受能力、电子供给能力和电子循环能力的相关关系,研究大分子荧光基团在 DOM 电子转移过程中的作用,以期分析 DOM 在元素循环、污染物降解以及生物地球化学电子转移反应中的作用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品准备与 DOM 提取

本研究选取了 4 种不同物料作为提取 DOM 的来源,分别是污泥堆肥 (sewage sludge compost, SSC; 主要原料为污泥和作物秸秆; 深圳环源科技有限公司)、水稻根际土 (rice rhizosphere soil, RSS; 采自华南植物研究所水稻田)、生物有机肥 (bio-organic fertilizer, BF; 主要原料为菜籽粉、腐殖酸、豆粕、麸皮、有益微生物菌等; 东莞市奇的肥业有限公司)、多肽有机肥 (peptide organic fertilizer, POF; 主要原料为渔产品加工有机废物、木屑、活性炭等; 化州市博傲生物科技有限公司),除了水稻根际土,其他三种样品都是经过堆肥腐熟.

取一定重量污泥堆肥、水稻根际土、生物有机肥、多肽有机肥,按物料和水以 1:5 的比例浸提,超声 30 min. 4℃, 13 000 r·min⁻¹ 离心 20 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,滤液中的有机物即为 DOM. 浓度由 TOC 仪 (TOC2V CPH, 岛津) 测定,以水溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 表示,然后用超纯水将 DOM 的浓度 (以 C 计,下同) 稀释到 200 mg·L⁻¹,避光冷藏备用. 上述 4 种不同来源 DOM 采用 DOM_{SSC}、DOM_{RSS}、DOM_{BF}、DOM_{POF} 方式表示.

1.2 电化学实验测定电子转移能力和循环能力

所有电化学实验均利用 CHI660D 电化学工作站 (上海辰华仪器公司) 在 Bactron2 I 型厌氧工作

站内 (N₂: CO₂ 体积比为 80:20, 美国 Shellab) 进行测定. 测试采用传统的三电极体系,其中工作电极为石墨电极,辅助电极为铂网,参比电极为 Ag/AgCl 电极. 所有用于电化学实验的溶液均以 0.1 mol·L⁻¹ KCl 作为电解质, 0.1 mol·L⁻¹ NaH₂PO₄ 作为缓冲溶液,使用前充 N₂ 30 min.

1.2.1 库仑安培法 (CA 法) 测定电子转移能力

电子转移能力 (electron transfer capacity, ETC) 可分为电子接受能力 (electron accepting capacities, EAC) 和电子供给能力 (electron donating capacities, EDC). 电子接受 (供给) 能力是指 DOM 作为电子受体 (供体) 所能接受 (供给) 的电子数,电子转移量用 Q 表示. 库仑安培法 (chronoamperometry, CA) 测定的 DOM 电子接受能力参考了 Yuan 等^[21] 的实验方法. 采用传统三电极体系,在恒定电压条件下,待 20 mL 空白体系 (0.1 mol·L⁻¹ KCl, 0.1 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲溶液, pH = 7) 中的电流稳定之后加入 1 mL 样品 (10 mg·L⁻¹, 0.1 mol·L⁻¹ KCl, 0.1 mol·L⁻¹ NaH₂PO₄, pH = 7). 在工作电极 $E_h = -0.6$ V (V vs. Ag/AgCl) 的条件下测定电子接受能力, $E_h = 0.5$ V (V vs. Ag/AgCl) 的条件下测定电子供给能力.

1.2.2 循环伏安法测定氧化还原可逆性

在 CHI660D 电化学工作站上测定,采用三电极体系电解槽. 测试条件: 电解质为 1.0 mmol·L⁻¹ NaClO₄, 溶剂为二甲基亚砜 (dimethyl sulfoxide, DMSO), 工作电极为直径 3 mm 的 Pt 圆柱,辅助电极为 Pt 丝,参比电极为 Ag/AgCl 电极. DOM 溶液冷冻干燥后溶于 DMSO,具体步骤参考文献 [22].

1.2.3 电位跃阶法测定电子循环能力

电子循环能力是指 DOM 做为电子穿梭体可持续稳定接受和供给的电子数. 通过电位跃阶法设定还原电位 $E_h = -0.6$ V (V vs. Ag/AgCl) 和氧化电位 $E_h = 0.5$ V (V vs. Ag/AgCl), 石墨电极电位在还原电位时 DOM 被充分还原 (氧化) 后跳跃至相反的氧化 (还原) 电位,如此反复 3 次,库仑安培法计算出各阶段的电子转移量,电子转移量用 Q 表示. 电子转移率 (electron recycling rate, ERR) 由公式 (1) 计算得出.

$$ERR = \frac{Q_{\text{cycle2}} + Q_{\text{cycle3}}}{2Q_{\text{cycle1}}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3 荧光光谱扫描

荧光激发-发射光谱测定在 Hitachi F-4600 型荧光光谱分析仪上进行. 激发光源: 150 W 氙弧灯; PMT 电压: 700 V; 信噪比 > 110; 带通 $E_x = 10$ nm,

$E_m = 2 \text{ nm}$, 响应时间自动, 扫描速度 $1200 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$, 扫描光谱进行仪器自动校正, E_{ex} 为 $280 \sim 500 \text{ nm}$, E_{em} 为 $370 \sim 530 \text{ nm}$.

2 结果与讨论

2.1 电子接受能力(EAC)

在自然生态环境中, DOM 具有从微生物或其它还原性物质接受电子的能力. 据报道, 不同来源 DOM 的 EAC 处于 $10 \sim 2100 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ 范围之间^[23~26]. 图 1(a) 所示为采用 CA 法测定的 4 种 DOM 的电子接受能力, $Q_{SSC} = 1049.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ 、 $Q_{BF} = 885.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ 、 $Q_{POF} = 682.5 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$ 和 $Q_{RSS} = 635.6 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$. 其中 DOM_{SSC} 具有最强的 EAC, 说明污泥经过堆肥腐熟处理后具有较高的腐殖化程度和芳香度, 产生大量的大分子的腐殖质组分和芳香性物质, 酚醌类电活性基团含量高. DOM_{RSS} 的电子接受能力最弱, 有可能是因为水稻根际土壤中的腐殖化程度和芳香度较低, 小分子的有机酸和游离氨基酸含量较高, 而腐殖质成分、芳香性物质少, 具有接受电子能力的基团的组分含

量低^[27].

2.2 电子供给能力(EDC)

EDC 可分为初始电子供给能力(initial EDC)和潜在电子供给能力(potential EDC). 初始电子供给能力, 即 DOM 提取后将电子转移给电子受体的量; 潜在电子供给能力, 即初始 DOM 被还原后还原态 DOM 又将电子转移给电子受体所测得的量^[27,28]. 由于所有样品都是暴露在空气中, 与氧直接接触, 所测得 EDC 都为初始 EDC. 图 1(b) 为 CA 法在 $E_h = 0.5 \text{ V}$ 的条件下测定 4 种不同来源 DOM 的初始电子供给能力, 即 DOM 直接作为电子供体所测得的电子供给量. 污泥堆肥、多肽有机肥、生物有机肥和水稻根际土测得结果分别为 32.7 、 42.3 、 27.3 和 $34.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{C})^{-1}$. 说明多肽有机肥腐熟时间短, 含有较多的具有还原性的大分子蛋白质和小分子氨基酸及糖类, 具有较强的初始电子供给能力; 生物有机肥中经过长时间腐熟过程后, 还原性组分含量少, 具有较低的初始电子供给能力. 对比 EAC 的数据, 可以看出初始 EDC 数值偏低, 说明 DOM 在自然生态环境中主要以氧化态为主.

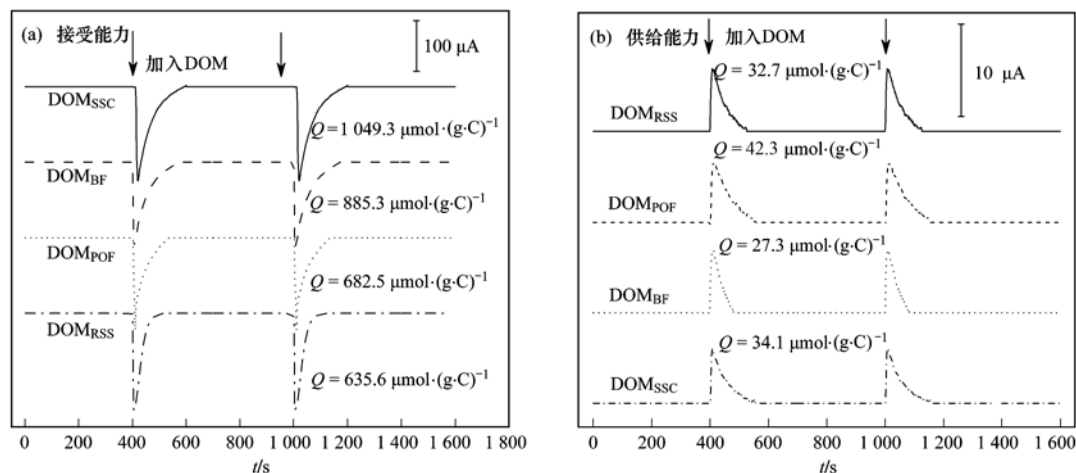


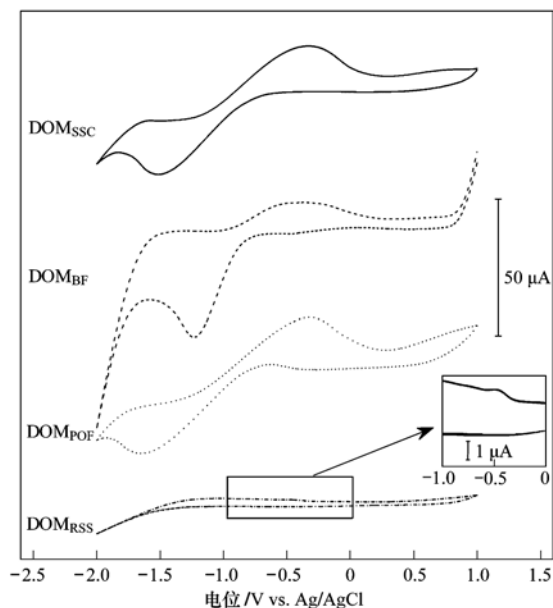
图 1 库伦安培法测定 DOM 的电子接受能力和电子供给能力

Fig. 1 Electron accepting capacity (EAC) and electron donating capacity (EDC) of DOM measured by chronoamperometry

2.3 循环伏安法分析 DOM 氧化还原可逆性

循环伏安法(CVs)是一种利用氧化还原峰电位和电流定性表征物质电化学性质的方法. 通过对峰电位和电流的分析, 可以定性描述物质氧化还原能力强弱. 2002 年, Nurmi 等^[22]首次采用了循环伏安法测定不同种类 DOM 在非水环境下的电化学性质, 发现其与醌类模型(AQDS 等)发生了类似的电子转移反应, 具有一定的氧化还原可逆性. 图 2 为 $\text{DOM}(100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 溶于有机溶剂 DMSO 在电位 $1000 \sim -2000 \text{ mV} (\text{V vs. Ag/AgCl})$ 间测得的循环

伏安图, 从中可看出 DOM_{RSS} 只有一个很小的氧化峰, 没有还原峰, 而 DOM_{SSC} 、 DOM_{BF} 和 DOM_{POF} 各具有一对氧化还原峰, 氧化还原电位分别为 -923 、 -731 和 $-996 \text{ mV} (\text{V vs. Ag/AgCl})$. DOM_{SSC} 、 DOM_{BF} 和 DOM_{POF} 的氧化峰和还原峰之间的电位差 ΔE_p 分别为 1.2 、 0.85 和 $1.4 \text{ V} (\text{V vs. Ag/AgCl})$. Nurmi 研究表明 $\Delta E_p > 0.059 \cdot (n \text{ V})^{-1}$ (n 为电子转移数) 即为可逆过程^[22], 而 DOM_{SSC} 、 DOM_{BF} 和 DOM_{POF} 电位差 ΔE_p 都远大于 $0.059 \cdot (n \text{ V})^{-1}$, 说明



放大部分为 DOM_{RSS} 氧化峰

图2 DOM 循环伏安图

Fig. 2 Cyclic voltammograms of DOM

这3种DOM的氧化还原过程是准可逆的. 循环伏安图中的峰电流强度通常与目标物的电活性基团的丰度有直接关系. DOM_{SSC} 、 DOM_{BF} 和 DOM_{POF} 都具有较强的还原峰和氧化峰电流,说明氧化还原能力强,含有大量的电活性基团,相应地具有较高的电子转移能力,如图2所示. 其中, DOM_{SSC} 和 DOM_{POF} 的氧化峰和还原峰电流比值接近于1,说明其电活性基团基本为可逆性基团. DOM_{BF} 具有较高的还原峰电流,而氧化峰电流较低,说明 DOM_{BF} 的电活性基团中存在大量的不可逆基团.

2.4 电子循环能力

图3为不同来源DOM在3次氧化还原循环过程中的电子转移量的变化. 与Cycle 1相比,Cycle 3的电子转移量分别下降21.9% (DOM_{SSC})、41.3% (DOM_{POF})、24.4% (DOM_{BF})和63.8% (DOM_{RSS}). 这可能是由于DOM在氧化还原过程中存在部分基团不可逆还原,比如电子转移给氧化酚时,发生的苯氧基自由基的聚合反应. Heitmann等^[28]研究发现腐殖质在还原过程中至少涉及到3个不同的反应位点,其中只有2个反应位点与醌基有关. 这些结果暗示,除了醌基以外,DOM中还可能还存在其他氧化还原活性基团,如多种氧化态的杂环原子结构(氮或硫)和金属有机络合基团^[28].

通过公式1计算得出DOM的ERR分别为78.2% (DOM_{SSC})、60.9% (DOM_{POF})、75.7%

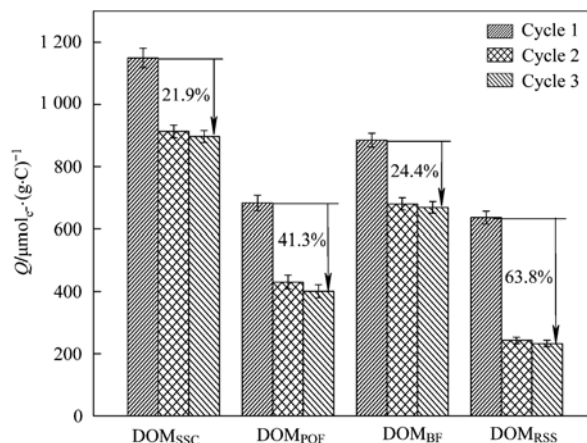


图3 DOM 电子循环能力

Fig. 3 Electron recycling rates of DOM

(DOM_{BF})和36.7% (DOM_{RSS}). 其中 DOM_{RSS} 电子循环率最低,说明其不可逆性氧化还原组分含量比较高,同理 DOM_{SSC} 电子循环率最高,说明其可逆性氧化还原组分含量比较高. 结果与2.3节得出的结论一致.

2.5 荧光激发-发射光谱(EEM_s)

DOM的荧光特性决定了荧光光谱分析技术可深入研究DOM的结构特性^[28~31]. Cory等^[20]利用荧光激发-发射光谱法(EEMs)研究多种DOM发现在类富里酸荧光区的荧光基团中醌类基团的比例占到50%左右,而DOM中的酚醌基团是其具有电子转移能力的主要因素. 由此可以推断DOM的类富里酸荧光峰与DOM电子转移能力可能存在某种相关性. 图4为不同来源的DOM在激发波长 E_{ex} 为300~350 nm和发射波长 E_{em} 为400~440 nm的范围内荧光光谱分析,此范围为可见类富里酸荧光区^[32~35]. 类富里酸荧光强度依次为 $P_{\text{SSC}} = 0.084$, $P_{\text{BF}} = 0.073$, $P_{\text{POF}} = 0.041$, $P_{\text{RSS}} = 0.022$. DOM_{SSC} 具有最高的荧光峰强度,说明 DOM_{SSC} 相对来说含有大量的可荧光性类富里酸物质,并且含有较多酚醌类基团. DOM_{RSS} 的荧光峰较低,说明含有较少的可荧光性类富里酸物质和酚醌基团. 此结论与上文的电子转移能力和CV测试结果相符合. 因此,可以断定类富里酸荧光峰强度与DOM电子转移能力存在直接关系.

如图5所示,通过考察不同来源的DOM在可见类富里酸荧光区的荧光强度与ETC及电子循环率的关系发现:尽管DOM的来源不同,电子循环率与可见区类富里酸荧光强度之间具有良好的相关关系,其相关系数达到0.92; EAC与可见区类富里酸荧光强度的相关性相对较差,相关系数仅为0.87;

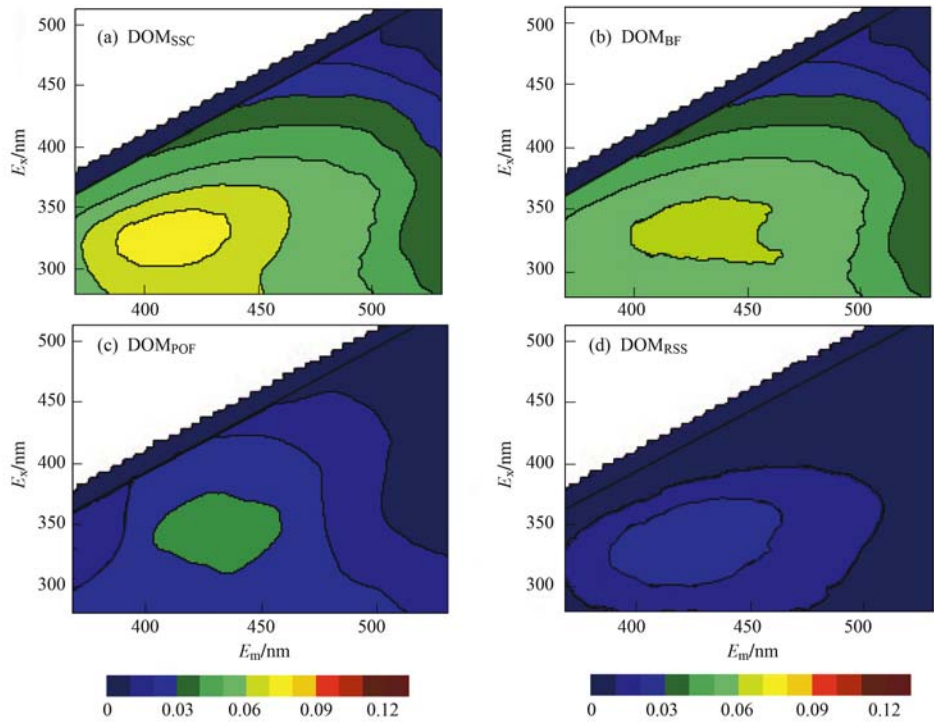


图4 不同来源 DOM 的荧光激发发射光谱 (EEM_s)

Fig. 4 Fluorescence excitation-emission spectrum of various DOM

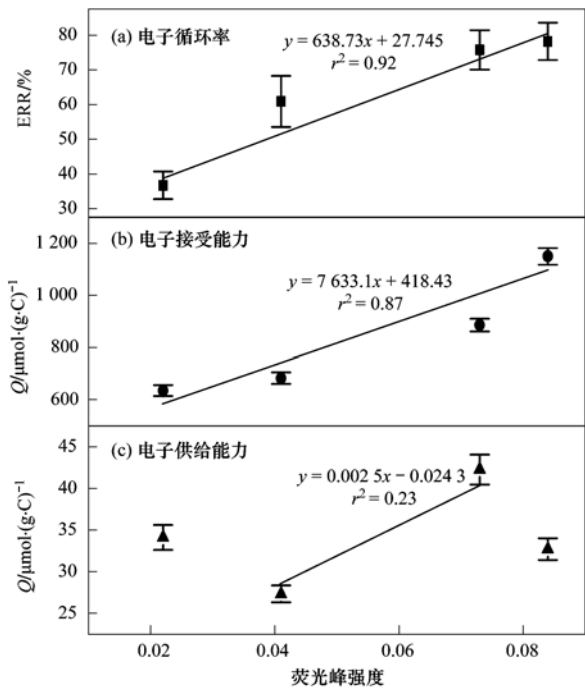


图5 类腐殖质荧光峰强度与电子循环率、电子接受能力和电子供给能力的线性相关性

Fig. 5 Linear correlation between the fulvic-like fluorescence intensity and the electron recycling rates, the electron accepting capacity and the electron donating capacity

而 EDC 与可见区类富里酸荧光强度的相关系数只有 0.23. Baker 等^[36]发现可见区类富里酸荧光是由

稳定的高分子量芳香性类富里酸物质所产生. 由此可见,高分子量类富里酸芳香性物质在 DOM 的电子循环过程中起主导作用.

3 结论

(1)采用库仑安培法定量测定 DOM 电子转移能力,结果表明 DOM 具有接受和供给电子的能力,其电子接受能力在 635.6 ~ 1 049.3 μmol·(g·C)⁻¹之间,电子供给能力在 27.3 ~ 42.3 μmol·(g·C)⁻¹之间.

(2)循环伏安法和电位跃阶法测定结果表明不同来源的 DOM 均可连续多次氧化和还原,具有反复转移电子的特性,其电子循环率与 DOM 本身的组分结构相关.

(3)采用荧光激发发射光谱法 (EEM_s)测定污泥堆肥等 4 种 DOM 的类富里酸荧光光谱特征,发现荧光峰强度与 DOM 电子循环能力显著相关 ($r^2 = 0.92$),说明类富里酸荧光峰强度可作为自然环境中 DOM 电子转移活性表征的重要指标.

参考文献:

[1] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review [J]. Soil Science, 2000, **165**(4): 277-304.

[2] Chen J, Gu B H, LeBoeuf E J, *et al.* Spectroscopic characterization of the structural and functional properties of

- natural organic matter fractions [J]. *Chemosphere*, 2002, **48** (1): 59-68.
- [3] Burgos W D, Pisutpaisal N, Tuntolavest M, *et al.* Biodegradation of 1-naphthol in the presence of humic acid [J]. *Environmental Engineering Science*, 2000, **17**(6): 343-351.
- [4] Fredrickson J K, Zachara J M, Kennedy D W, *et al.* Reduction of U (VI) in goethite (α -FeOOH) suspensions by a dissimilatory metal-reducing bacterium [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(18): 3085-3098.
- [5] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a central european norway spruce ecosystem [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, **50**(4): 579-590.
- [6] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, *et al.* The composition of dissolved organic matter in forest soil solutions: changes induced by seasons and passage through the mineral soil [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(3): 307-318.
- [7] 付美云, 周立祥. 垃圾渗滤液水溶性有机物对土壤 Pb 溶出的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(2): 243-248.
- [8] Dunnivant F M, Schwarzenbach R P, Macalady D L, *et al.* Reduction of substituted nitrobenzenes in aqueous solutions containing natural organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(11): 2133-2142.
- [9] Kappler A, Haderlein S B. Natural organic matter as reductant for chlorinated aliphatic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(12): 2714-2719.
- [10] Li X M, Li Y T, Li F B, *et al.* Interactively interfacial reaction of iron-reducing bacterium and goethite for reductive dechlorination of chlorinated organic compounds [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**(16): 2800-2804.
- [11] Lovely D R, Coates J D, Bunt-Harris E L, *et al.* Humic substances as electron acceptors for microbial respiration [J]. *Nature*, 1996, **382**(6590): 445-448.
- [12] Kappler A, Haderlein S B. Natural organic matter as reductant for chlorinated aliphatic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(12): 2714-2719.
- [13] Bauer M, Heitmann T, Macalady D L, *et al.* Electron transfer capacities and reaction kinetics of peat dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(1): 139-145.
- [14] Wittbrodt P R, Palmer C D. Effect of temperature, ionic strength, background electrolytes, and Fe (III) on the reduction of hexavalent chromium by soil humic substances [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(8): 2470-2477.
- [15] Gaberell M, Chin Y P, Hug S J, *et al.* Role of dissolved organic matter composition on the photoreduction of Cr (VI) to Cr (III) in the presence of iron [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(19): 4403-4409.
- [16] Fimmen R L, Cory R M, Chin Y P, *et al.* Probing the oxidation-reduction properties of terrestrially and microbially derived dissolved organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, **71**(12): 3003-3015.
- [17] Einsiedl F, Mayer B, Schäfer T. Evidence for incorporation of H₂S in groundwater fulvic acids from stable isotope ratios and sulfur K-edge X-ray absorption near edge structure spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(7): 2439-2444.
- [18] Scott D T, McKnight D M, Blunt-Harris E L, *et al.* Quinone moieties act as electron acceptors in the reduction of humic substances by humics-reducing microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(19): 2984-2989.
- [19] Maurer F, Christl I, Kretzschmar R. Reduction and reoxidation of humic acid: influence on spectroscopic properties and proton binding [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(15): 5787-5792.
- [20] 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.
- [21] Yuan T, Yuan Y, Zhou S G, *et al.* A rapid and simple electrochemical method for evaluating the electron transfer capacities of dissolved organic matter [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(3): 467-473.
- [22] Nurmi J T, Tratnyek P G. Electrochemical properties of natural organic matter (NOM), fractions of NOM, and model biogeochemical electron shuttles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 617-624.
- [23] Lovley D R, Fraga J L, Coates J D, *et al.* Humics as an electron donor for anaerobic respiration [J]. *Environmental Microbiology*, 1999, **1**(1): 89-98.
- [24] Struyk Z, Sposito G. Redox properties of standard humic acids [J]. *Geoderma*, 2001, **102**(3-4): 329-346.
- [25] Chen J, Gu B H, Royer R A, *et al.* The roles of natural organic matter in chemical and microbial reduction of ferric iron [J]. *Science of The Total Environment*, 2003, **307**(1-3): 167-178.
- [26] Kappler A, Benz M, Bernhard S, *et al.* Electron shuttling via humic acids in microbial iron (III) reduction in a freshwater sediment [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **47**(1): 85-92.
- [27] Huang D Y, Zhuang L, Cao W D, *et al.* Comparison of dissolved organic matter from sewage sludge and sludge compost as electron shuttles for enhancing Fe (III) bioreduction [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(4): 722-729.
- [28] Heitmann T, Goldhammer T, Beer J, *et al.* Electron transfer of dissolved organic matter and its potential significance for anaerobic respiration in a northern bog [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(8): 1771-1785.
- [29] Ratasuk N, Nanny M A. Characterization and quantification of reversible redox sites in humic substances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(22): 7844-7850.
- [30] Maurer F, Christl I, Kretzschmar R. Reduction and reoxidation of humic acid: influence on spectroscopic properties and proton binding [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(15): 5787-5792.

- [31] Mladenov N, Huntsman-Mapila P, Wolski P, *et al.* Dissolved organic matter accumulation, reactivity, and redox state in ground water of a recharge wetland [J]. *Wetlands*, 2008, **28** (3): 747-759.
- [32] Leenheer J A, Croué J P. Peer Reviewed: Characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(1): 18A-26A.
- [33] Cobe P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [34] Wu F C, Midorikawa T, Tanoue E. Fluorescence properties of organic ligands for copper (II) in Lake Biwa and its rivers [J]. *Geochemical Journal*, 2001, **35**(5): 333-346.
- [35] 鄢远, 许金钩, 陈国珍. 三维荧光光谱总体积分法 [J]. *科学通报*, 1997, **42**(7): 714-716.
- [36] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills [J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjxx@rcees.ac.cn;网址: www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行