

# 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 吸收和再生特性                                    | 晏水平, 陈竞翔, 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 <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sup>2+</sup> 、Cd <sup>2+</sup> 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)                                            |                                                  |

# 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

(北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100124)

**摘要:** 利用三维荧光光谱研究了磁性离子交换树脂(magnetic ion exchange resin, MIEX)对污水厂二级出水中有机物的去除特征。结果表明, 磁性树脂处理二级出水过程中, 两级反应过程和进水流量对 DOC 和  $UV_{254}$  有较显著的去除效果, 去除率分别达到 25.5% ~ 53.5% 和 27.6% ~ 52.2%, 其中  $50\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  流量条件下, 出水中 DOC 和  $UV_{254}$  浓度分别为  $3.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.057\text{ cm}^{-1}$ 。水中芳香族蛋白质或酚类物质和类腐殖酸物质荧光强度较高, 磁性树脂使二级出水中色氨酸类芳香族蛋白质、芳香族蛋白质、腐殖酸类荧光强度分别下降 38.2%、85.8% 和 85.7%, 腐殖酸和富里酸峰消失, 并露出溶解性微生物代谢产物荧光峰。不同进水流量条件下, 色氨酸类芳香族蛋白质荧光强度下降率和芳香族蛋白质或酚类物质荧光强度下降率与进水流量的负相关性最好,  $50\sim 100\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  流量条件对各类荧光物质的去除率影响最大。磁性树脂与二级出水中色氨酸类芳香族蛋白质和芳香族蛋白质或酚类物质有更好的线性置换关系( $R^2=0.8348$ ), 磁性树脂对二级出水中芳香族蛋白质或酚类物质的置换作用则最显著( $a=850.2$ )。

**关键词:** 磁性树脂; 二级出水; 有机物; 三维荧光光谱; 荧光强度

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1878-06

## 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

(Beijing Drainage Group Company Limited, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Magnetic ion exchange resin was a very good advanced treatment process to remove organic matter from municipal wastewater, and three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy was widely used to analyze the characterization of the change in DOM. The results showed that both two-stage treatment process and the rate variation of inflow affected the removal effects of DOC and  $UV_{254}$  obviously, and the removal rates were 25.5%-53.5% and 27.6%-52.2%. The concentrations of DOC and  $UV_{254}$  were  $3.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $0.057\text{ cm}^{-1}$  in T2 effluent respectively. The fluorescence intensities of aromatic protein and visible fulvic-like were high in municipal secondary effluent. MIEX made the fluorescence intensities of tryptophan protein, aromatic protein and humic-like fluorescence peaks decreasing 38.2%, 85.8% and 85.7% respectively from secondary effluent, and make humic-like and visible fulvic-like fluorescence peaks disappearing. The fluorescence peak of soluble microbial byproducts appeared. The negative correlations were strong between the declining rates of tryptophan-like fluorescence intensity and aromatic protein fluorescence intensity and the rates of inflow.  $50\sim 100\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  flow rate influenced most for the removal rate of each DOC. The linear treatment effect was higher for tryptophan-like and aromatic protein DOM by MIEX ( $R^2=0.8348$ ), and the treatment effect was the highest for aromatic protein DOM by MIEX ( $a=850.2$ ). The correlation between UV fulvic-like DOM and fluorescence intensity was worse than that between DOC and fluorescence intensity.

**Key words:** magnetic ion exchange resin; municipal secondary effluent; organic matter; 3DEEM; fluorescence intensity

我国是一个缺水严重的国家,近年来部分地区地表水体污染状况不断恶化,地表水、地下水资源日益缺乏。城市污水深度处理及回用,作为解决城市缺水、提高水资源利用率和控制水体污染的一条重要途径。由于城市生活用水主要取自地表水体和地下含水层,水中含有大量天然有机物(natural organic matter, NOM);而且人们在用水过程中,也不可避免会引入一些人工合成有机物,例如化学用品、药剂、持久性有机污染物以及自来水厂采用氯消毒而引入消毒副产物等。城市污水经污水处理厂处理,污水中

大部分合成有机化合物(synthetic organic compounds, SOC)物质可以被微生物降解或形成代谢中间产物,微生物自身新陈代谢也会产生微生物代谢产物,造成城市二级出水中有机物 EfOM (effluent organic matter)物质成分非常复杂。但是 COD、TOC、 $UV_{254}$ 等参数只能表征水处理过程中有机

收稿日期: 2011-08-25; 修订日期: 2011-10-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z338)

作者简介: 杨建(1979~),男,博士,工程师,主要研究方向为再生水深度处理及回用, E-mail: yangjian@bdc.cn

物的总体变化趋势,不能界定不同类型有机物的变化特征.实际上污水中有机物的荧光光谱因污染物种类和含量不同而各异,具有与水样一一对应的特点,称为“荧光指纹”<sup>[1]</sup>.三维荧光光谱(three-dimensional excitation/emission matrix, 3DEEM)将荧光强度以等高线方式投影在以激发光波长和发射光波长为横纵坐标的平面上获得的谱图,图像直观,所含信息丰富,已广泛用于水体有机物的研究<sup>[2,3]</sup>.

目前污水厂主要采用生物处理法,会产生大量微生物代谢产物,并形成毒性更强的物质.而磁性离子交换树脂是一种具有磁性的强碱阴离子交换树脂,主要成分是聚丙烯,含有季铵盐功能的大孔结构,其粒径比常规离子交换树脂小,具有较大的比表面积,吸附速率和再生速率都较高;而且树脂结构中结合了磁性氧化铁成分,使树脂颗粒快速絮凝成大颗粒,通过重力沉降很快从悬浮液中分离<sup>[4]</sup>.磁性树脂减少了对颗粒内部扩散的影响,而颗粒内部扩散与树脂内部活性部位相关、速度较慢,导致磁性树脂表面活性位上的氯离子能够与 NOM 快速发生交换反应<sup>[5,6]</sup>,实现对 DOC、消毒副产物等污染物较高的去除率<sup>[7]</sup>.澳大利亚南部 Hope Valley 和 Myponga 地区的饮用水源水用磁性树脂替代强化混凝处理,有机物去除率分别达到 63.8% 和 74%,UV<sub>254</sub> 去除率分别达到 81.8% 和 83.8%,三氯甲烷生成势去除率分别是 73.3% 和 78.4%<sup>[8]</sup>.法国 Brittany 地区 Villejean/Rennes 自来水厂的原水,8 mg·L<sup>-1</sup> 磁性树脂与水接触反应 3 min 可去除 63%~69% DOC,接触反应 30 min 可去除 77%~79% DOC<sup>[9]</sup>,主要去除的是不饱和键或芳香类大分子有机组分(相对分子质量 > 20 000)<sup>[10]</sup>.但是磁性树脂处理生活污水方面的研究少见报道,本研究拟通过三维荧光光谱技术研究和表征磁性树脂在处理生活污水过程中不同类型有机物的变化特征和规律.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

磁性树脂处理工艺装置包括树脂再生器、树脂存储器、T1 反应器(一级树脂反应器)和 T2 反应器(二级树脂反应器),T1 和 T2 反应器内径 15 cm、高 120 cm(其中水位高度 100 cm),器中树脂高度 35~40 cm(图 1).该处理工艺采用连续运行方式,通过调节进水流量来改变水处理过程中树脂与水接触时间.实验过程中,树脂从 T2 反应器向 T1 反应器和再生器流动,而二级出水则从 T1 反应器向 T2 反应器

流动,实现 T2 反应器中新鲜树脂对 T1 处理出水的深度处理.当树脂饱和时,采用 NaCl 溶液作为再生液进行再生<sup>[11,12]</sup>.

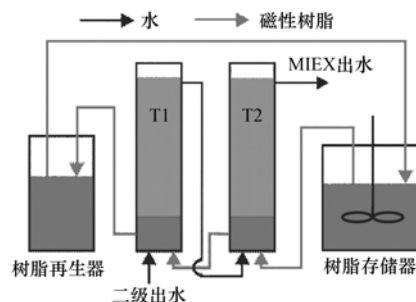


图 1 磁性树脂深度处理工艺示意

Fig. 1 Schematic of MIEX process

### 1.2 水质分析方法

溶解性有机碳的检测采用 multi N/C 2100 专家型总有机碳/总氮分析仪(德国耶拿分析仪器股份公司),水样经 0.45 μm 滤膜过滤,取滤出液检测总有机碳含量;水样置于 1 cm 规格石英皿中,采用 Evolution 60 紫外可见光度计(德国 Thermo Fisher Scientific 公司)检测 254 nm 处紫外吸收值(UV-254),同时检测空白样.

三维荧光光谱采用 HITACHI F-7000 型荧光分光光度计检测,仪器光源为 150W 汞灯,光电倍增管(PMT)电压为 400 V,激发和发射单色器均为衍射光栅,激发和发射狭缝宽度均为 10 nm,扫描速度为 1 200 nm·min<sup>-1</sup>.激发光波长范围和发射光波长范围分别为 200~400 nm 和 260~500 nm,均以 5 nm 步长递增;响应时间为自动.数据采用 Origin 软件进行处理,以等高线图表征.

## 2 结果与讨论

### 2.1 原水水质特征

本实验中磁性树脂处理工艺的原水为北京某污水处理厂二级出水.该污水处理厂采用传统活性污泥工艺,二级出水水质特征见表 1.二级出水中 pH 7.32~7.81,Salgot 等<sup>[13]</sup>对现有标准中再生水回用 pH 限值进行了总结,并提出 7.00~8.50 是各类回用的 pH 标准限值.色度范围为 23~41 度,尽管 WHO 饮用水标准中没有规定色度的健康基准值<sup>[14]</sup>,但通常认为色度低于 15 度是公众可接受的.BOD、COD、TOC 和 UV<sub>254</sub> 的浓度分别为 2.00~6.57 mg·L<sup>-1</sup>、15.20~32.00 mg·L<sup>-1</sup>、5.02~8.50 mg·L<sup>-1</sup>和 0.097~0.167 abs·cm<sup>-1</sup>,目前水中有机物含量较高,阻碍了市政废水处理后的安全回用.

表 1 污水厂二级出水水质特征

| 指标                                                 | 范围              |
|----------------------------------------------------|-----------------|
| pH                                                 | 7.32 ~ 7.81     |
| 色度                                                 | 23 ~ 41         |
| BOD/mg·L <sup>-1</sup>                             | <2.00 ~ 6.57    |
| COD/mg·L <sup>-1</sup>                             | 15.20 ~ 32.00   |
| TOC/mg·L <sup>-1</sup>                             | 5.02 ~ 8.50     |
| UV <sub>254</sub> /abs·cm <sup>-1</sup>            | 0.097 ~ 0.167   |
| SS/mg·L <sup>-1</sup>                              | 9.50 ~ 11.50    |
| Cl/mg·L <sup>-1</sup>                              | 80.16 ~ 124.03  |
| TP/mg·L <sup>-1</sup>                              | 0.09 ~ 1.00     |
| SP/mg·L <sup>-1</sup>                              | 0.02 ~ 1.06     |
| TN/mg·L <sup>-1</sup>                              | 16.92 ~ 33.06   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> | 0.17 ~ 2.09     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> | 18.44 ~ 29.44   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> | 0.05 ~ 2.04     |
| 粪大肠菌群/MPN·L <sup>-1</sup>                          | 1.0E+5 ~ 5.2E+5 |

2.2 TOC、UV<sub>254</sub>变化特征

针对不同进水流量(包括 50、100、150、200 和 250 L·h<sup>-1</sup>),研究了磁性树脂对二级出水中溶解性有机物的去除特征,如图 2 所示,二级出水中 DOC 平均浓度为 6.82 mg·L<sup>-1</sup>,不同进水流量条件下,经 T1 反应器内磁性树脂初级处理后,可去除水中 DOC 0.95 ~ 3.72 mg·L<sup>-1</sup>,去除率为 14.3% ~ 52.5%,去除率与流量关系符合  $y = 0.0014x^2 - 0.6056x + 81.122$  ( $R^2 = 0.9712$ ) 关系式; T1 出水经 T2 反应器内磁性树脂进一步处理后,最终可实现水中 DOC 25.5% ~ 53.5% 的去除,去除率与流量关系符合  $y = 0.001x^2 - 0.4541x + 75.534$  ( $R^2 = 0.9384$ ) 关系式,其中 50 L·h<sup>-1</sup> 流量时去除效果最显著,出水中 DOC 浓度为 3.29 mg·L<sup>-1</sup>; 改变进水流量实际上改变了磁性树脂与水的接触时间,50 ~ 250 L·h<sup>-1</sup> 进水量对应的接触时间为 4.2 ~ 21.3 min,7 min 后水中 DOC 去除率显著增加,所需时间要大于烧杯实验<sup>[11]</sup>,主要是由于中试实验过程中磁性树脂与水主

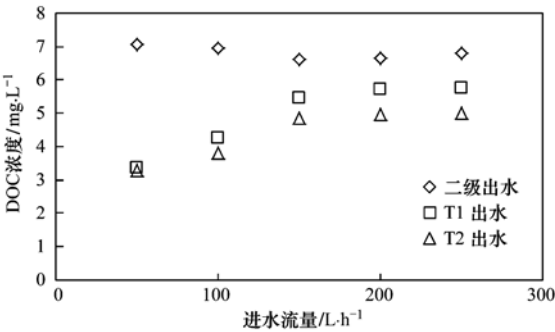


图 2 不同进水流量对二级出水中 DOC 的影响

Fig. 2 DOC concentration variations of secondary effluent with different inflow

要在反应器的下半部位接触反应,且水流作用未达到烧杯实验中磁性树脂与水充分接触的程度。

二级出水中 UV<sub>254</sub> 平均值为 0.13 cm<sup>-1</sup> (图 3),不同进水流量(50、100、150、200 和 250 L·h<sup>-1</sup>)条件下,T1 反应器对 UV<sub>254</sub> 的去除率分别为 41.6%、35.8%、25.4%、23.5% 和 22.8%,T2 反应器则使去除率进一步达到 52.2%、48.0%、39.1%、34.6% 和 27.6%,表明 50 L·h<sup>-1</sup> 流量时去除效果最显著,出水 UV<sub>254</sub> 浓度降至 0.057 cm<sup>-1</sup>。二级出水中不饱和双键或芳香性有机物的疏水性有机酸含量较低<sup>[15]</sup>[SUVA 值为 1.68 ~ 2.13 L·(m·mg)<sup>-1</sup>],经磁性树脂深度处理后,SUVA 总体呈下降趋势,说明磁性树脂可优先去除水中芳香性有机物;另外,本实验中 150 ~ 200 L·h<sup>-1</sup> 进水流量可实现对水中 SUVA 的最大降幅[0.25 ~ 0.33 L·(m·mg)<sup>-1</sup>]。

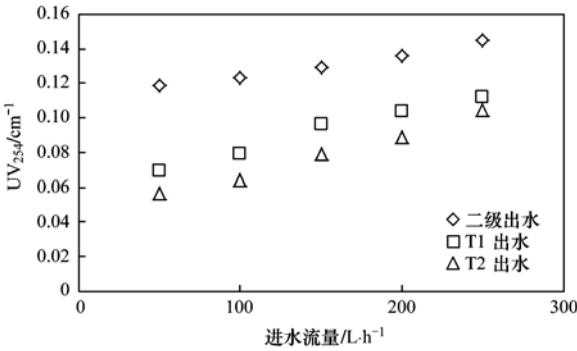


图 3 不同进水流量对二级出水中 UV<sub>254</sub> 的影响

Fig. 3 UV<sub>254</sub> variations of secondary effluent with different inflow

2.3 二级出水的 3DEEM 特征

根据已有的水中有机碳三维荧光光谱研究,该污水处理厂二级出水 DOC 荧光强度峰区可分为 4 个范围(图 4)<sup>[16,17]</sup>:A 峰(280/310 nm)表示色氨酸类芳香族蛋白质,荧光强度 (fluorescence intensity,

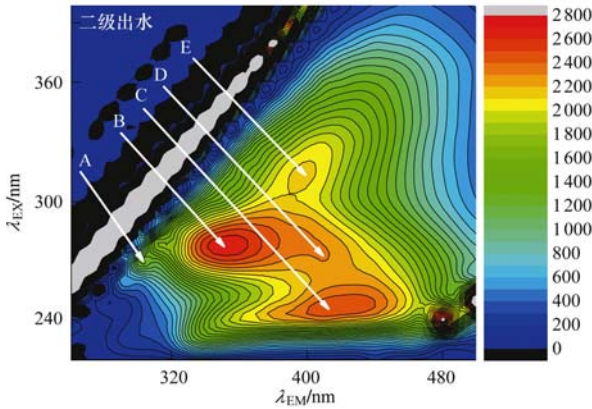


图 4 污水厂二级出水 DOC 的三维荧光光谱类型

Fig. 4 DOC 3DEEM characteristics of secondary effluent

FI) = 1 800; B 峰(280/350 nm)表示芳香族蛋白质或酚类物质, FI(B) = 2 657; C 峰(250/430 nm)和 D 峰(270/410 nm)表示类腐殖酸物质, FI(C) = 2 452和 FI(D) = 2 307; E 峰(310/400 nm)表示类富里酸物质, FI(E) = 2 125. 在饮用水和地表水的荧光光谱分析中, 芳香族蛋白质类的荧光峰比腐殖质类的荧光峰弱很多<sup>[18]</sup>, 而二级出水作为生物处理出水, 芳香族蛋白质荧光峰的强度比腐殖质类物质的荧光峰强度大, 表明芳香族蛋白质是生物处理出水的重要组成<sup>[19]</sup>.

## 2.4 T1 和 T2 出水 3DEEM 特征

以 50 L·h<sup>-1</sup> 流量为例, 污水处理厂二级出水经

T1 反应器中磁性树脂处理后, 各荧光峰强度(FI)均有下降(图 5), 其中 A、B、C 峰 FI 分别下降 18.2%、36.1% 和 36.1%, D 峰和 E 峰则已经消失, 这表明磁性树脂与二级出水在一级接触反应时, 对几类有机物都有一定程度的去除, 尤其是腐殖酸类和富里酸类腐殖质(D 峰和 E 峰). 经 T2 反应器二级处理后, A、B、C 峰 FI 又分别下降 19.9%、49.7% 和 49.6%, 出现新的荧光峰 F(FI = 761.2), 代表溶解性微生物代谢产物, 由于磁性树脂是通过树脂表面活性部位的氯离子与带有负电荷的有机酸进行置换反应, 这表明溶解性微生物代谢产物原本就存在于二级出水中.

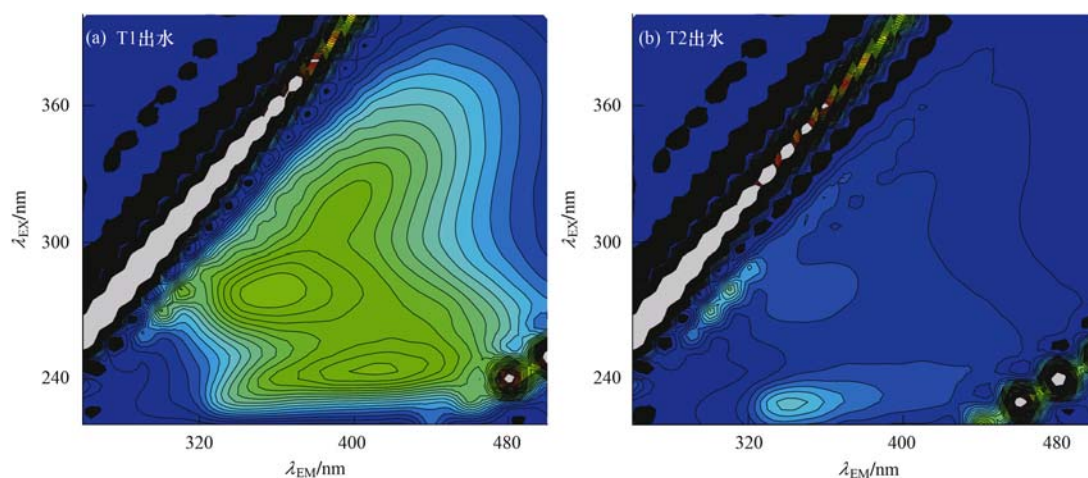


图 5 T1 和 T2 出水 DOC 的三维荧光光谱类型

Fig. 5 DOC 3DEEM characteristics of T1 and T2 effluent

## 2.5 不同流量出水的 3DEEM 特征

磁性树脂处理二级出水过程中, 不同的进水流量(50、100、150 和 200 L·h<sup>-1</sup>)条件下, 水中 DOC 处理效果差异较大(图 6). 随着进水流量的增加, 色氨酸类芳香族蛋白质(280/310 nm)荧光强度的下降率分别为 38.2%、17.8%、11.1% 和 9.7%, 进水流量与荧光强度下降率符合负相关关系  $y = -0.0018x + 0.4225 (R^2 = 0.82)$ ; 芳香族蛋白质或酚类物质荧光强度的下降率分别为 85.8%、38.8%、26.5% 和 23.0%, 进水流量与荧光强度下降率的负相关关系符合  $y = -0.004x + 0.9371 (R^2 = 0.8)$ ; 类腐殖酸物质荧光强度的下降率分别为 85.7%、40.0%、32.4% 和 32.2%, 进水流量与荧光强度下降率的负相关关系符合  $y = -0.0034x + 0.896 (R^2 = 0.71)$ ; 类富里酸物质荧光强度下降率分别为 89.8%、38.7%、32.0% 和 31.5%, 进水流量与荧光强度下降率的负相关关系符合  $y = -0.0036x + 0.9346 (R^2 = 0.7)$ . 色氨酸类芳香族蛋

白质荧光强度下降率与进水流量的负相关性最好, 表明磁性树脂与二级出水中 DOC 发生置换反应过程中, 进水流量对色氨酸类芳香族蛋白质的影响最大; 50 L·h<sup>-1</sup> 进水流量时腐殖质(腐殖酸类和富里酸类)和芳香族蛋白质荧光峰下降程度最显著; 根据进水流量增加过程中荧光强度下降率的变化特征可以看出, 50 ~ 100 L·h<sup>-1</sup> 流量条件对各类荧光物质的去除率影响最大. 实验过程中, 富里酸类腐殖质的激发和发射波长出现向长波长移动的趋势(红移), 可能与污水中腐殖质主要为生物源, 含有的芳香环结构较少有关<sup>[19]</sup>.

## 2.6 荧光强度与 DOC 的关系

磁性树脂与二级出水中 DOC 发生置换反应过程中, 水中整体 DOC 浓度与色氨酸类芳香族蛋白质和芳香族蛋白质或酚类物质具有较好的线性关系( $R^2$  分别为 0.8348 和 0.8034), 与腐殖酸类和富里酸类腐殖质相关性较差( $R^2$  分别为 0.726 和 0.7051), 表明磁性树脂与色氨酸类芳香族蛋白质

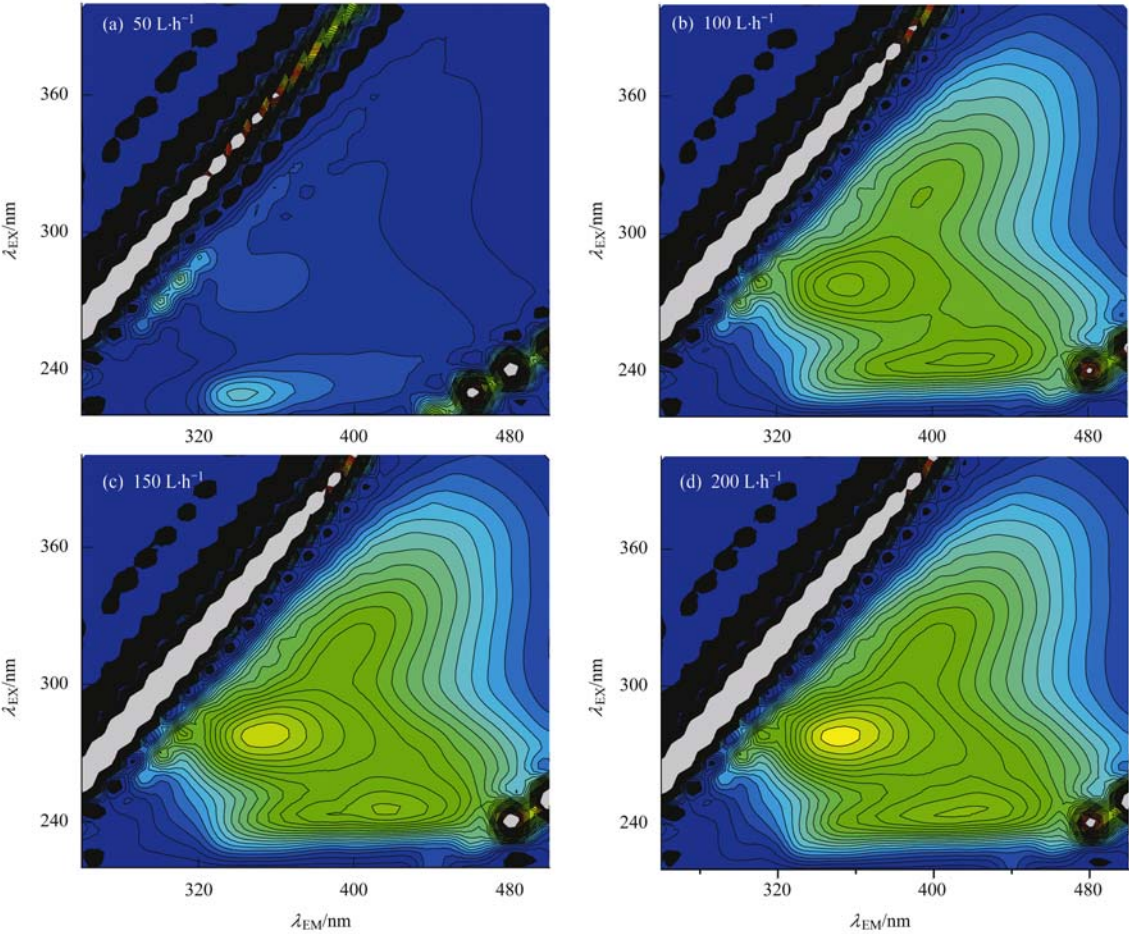


图 6 不同流量条件下 T2 出水 DOC 的三维荧光光谱类型

Fig. 6 DOC 3DEEM characteristics of T2 effluent with different inflow

和芳香族蛋白质或酚类物质有更好的线性置换关系(表 2);另外,芳香族蛋白质或酚类物质荧光强度随着 DOC 浓度变化的幅度最大( $a = 850.2$ ),表明磁性树脂对二级出水中该类有机物的置换作用最显著. 各类有机物荧光强度与  $UV_{254}$  的线性关系类似于 DOC,但相关性稍差( $R^2$  为  $0.61 \sim 0.75$ ),表明 UV 腐殖质的变化与荧光强度的对应性比整体 DOC 低.

表 2 荧光强度与 DOC、 $UV_{254}$  浓度的线性关系  
Table 2 Linear relationships between fluorescence intensity and DOC and  $UV_{254}$

| 荧光峰 | DOC                      |         | $UV_{254}$                |         |
|-----|--------------------------|---------|---------------------------|---------|
|     | 线性关系式                    | $R^2$   | 线性关系式                     | $R^2$   |
| A 峰 | $y = 266.4x + 328.54$    | 0.834 8 | $y = 14\,099x + 437.26$   | 0.753 3 |
| B 峰 | $y = 850.2x + 2\,094.3$  | 0.8034  | $y = 44\,969x - 1\,745.3$ | 0.724 1 |
| C 峰 | $y = 661.01x - 1\,508.5$ | 0.726   | $y = 34\,329x - 1\,191.5$ | 0.630 8 |
| E 峰 | $y = 617.35x - 1\,504.9$ | 0.7051  | $y = 32\,042x - 1\,207.4$ | 0.611 9 |

3 结论

(1)磁性树脂处理二级出水 DOC 过程中,不同进水流量条件下对 DOC 和  $UV_{254}$  的最终去除率分别

达到  $25.5\% \sim 53.5\%$  和  $27.6 \sim 52.2\%$ ,其中  $50\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  流量时去除效果最显著,出水中 DOC 和  $UV_{254}$  浓度分别为  $3.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.057\text{ cm}^{-1}$ .

(2)二级出水中芳香族蛋白质或酚类物质和类腐殖酸物质荧光强度较高,T1 出水中 A、B、C 峰 FI 分别下降  $18.2\%$ 、 $36.1\%$  和  $36.1\%$ ,D 峰和 E 峰消失,T2 出水中 A、B、C 峰 FI 又分别下降  $19.9\%$ 、 $49.7\%$  和  $49.6\%$ ,并使溶解性微生物代谢产物荧光峰显现.

(3)不同的进水流量条件下,色氨酸类芳香族蛋白质和芳香族蛋白质或酚类物质荧光强度下降率与进水流量的负相关性最好,分别为  $y = -0.0018x + 0.4225$  ( $R^2 = 0.82$ ) 和  $y = -0.004x + 0.9371$  ( $R^2 = 0.8$ );  $50\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  进水流量时腐殖质(腐殖酸类和富里酸类)和芳香族蛋白质去除率最高; $50 \sim 100\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  流量条件对各类荧光物质的去除率影响最大.

(4)磁性树脂与二级出水中色氨酸类芳香族蛋

白质和芳香族蛋白质或酚类物质有更好的线性置换关系( $R^2=0.8348$ ),磁性树脂对二级出水中芳香族蛋白质或酚类物质的置换作用则最显著( $a=850.2$ );另外,磁性树脂处理有机物过程中,UV 腐殖质与荧光强度的对应性比整体 DOC 低。

#### 参考文献:

- [1] Wu J, Pons M N, Potier O. Wastewater fingerprinting by UV-visible and synchronous fluorescence spectroscopy [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(4-5): 449-456.
- [2] Coble P G, Green S A, Blough N V, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in the Black sea by fluorescence spectroscopy [J]. *Nature*, 1990, **348**(6300): 432-435.
- [3] 吴静,崔硕,苏伟,等. 北京城市水体的三维荧光特征 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(6): 1562-1566.
- [4] 甘一萍,白宇. 污水处理厂深度处理与再生利用技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 413-422.
- [5] Nguyen H V, Slunjski M, Bourke M F, *et al.* DOC removal by MIEX<sup>TM</sup> process; scaling-up & other development issues [A]. In: Proc. 17<sup>th</sup> Federal Australian Water and Wastewater Association Convention [C]. Melbourne, Australia, 1997. 16-21/03.
- [6] Slunjski M, Bourke M, Nguyen H, *et al.* MIEX<sup>®</sup> DOC process-a new ion exchange process [A]. In: Proc. 18<sup>th</sup> Federal Australian Water and Wastewater Association Convention [C]. Adelaide, Australia, 1999, 11-14/04.
- [7] Allpike B P, Heitz A, Joll C A, *et al.* Size exclusion chromatography to characterize DOC removal in drinking water treatment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(7): 2334-2342.
- [8] Drikas M, Chow C W K, Cook D. The impact of recalcitrant organic character on disinfection stability, trihalomethane formation and bacterial regrowth: an evaluation of magnetic ion exchange (MIEX) and alum coagulation [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 2003, **52**(7): 475-487.
- [9] Humbert H, Gallard H, Suty H, *et al.* Performance of selected anion exchange resins for the treatment of a high DOC content surface water [J]. *Water Research*, 2005, **39**(9): 1699-1708.
- [10] Humbert H, Gallard H, Jacquemet V, *et al.* Combination of coagulation and ion exchange for the reduction of UF fouling properties of a high DOC content surface water [J]. *Water Research*, 2007, **41**(17): 3803-3811.
- [11] Singer P C, Bilyk K. Enhanced coagulation using a magnetic ion exchange resin [J]. *Water Research*, 2002, **36**(16): 4009-4022.
- [12] Kitis M, Harman B I, Yigit N O, *et al.* The removal of natural organic matter from selected Turkish source waters using magnetic ion exchange resin (MIEX<sup>®</sup>) [J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2007, **67**(12): 1495-1504.
- [13] Salgot M, Huertas E, Weber S, *et al.* Wastewater reuse and risk: definition of key objectives [J]. *Desalination*, 2006, **187**(1-3): 29-40.
- [14] World Health Organization. WHO guidelines for drinking-water quality (3th edition) [S]. vol. 1. Geneva, Switzerland, 2008.
- [15] Zhao Y. Modeling of membrane solute mass transfer in NF/RO membrane systems [D]. Orlando: University of Central Florida, 2004. 33-34.
- [16] 杨建,成徐州,常江,等. 再生水地下回灌去除溶解性有机物的三维荧光光谱分析 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, **50**(9): 1421-1424.
- [17] 朱维晃,黄廷林,张亚宁. 氧化还原条件变化对上覆水体中溶解有机质的三维荧光光谱特征影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(12): 3272-3276.
- [18] 傅平青,刘丛强,吴丰昌. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [19] 王丽莎,胡洪营,藤江幸一. 污水氯和二氧化氯消毒过程中溶解性有机物变化的三维荧光光谱解析 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1524-1528.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>x</sub> -CeO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> Catalyst .....                                       | LIU Rong, YANG Zhi-qin ( 1964 )                                       |
| CO <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱(海淀区双清路<br>18 号, 邮政编码: 100085)<br>电话: 010-62941102, 010-62849343<br>传真: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343<br>E-mail: hjkx@rcees.ac.cn<br>http://www.hjkx.ac.cn |
| 出 版     | 科学出版社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码: 100717                                                                                                                              | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话: 010-64017032<br>E-mail: journal@mail.sciencep.com                                                                                                      | Distributed      | by | Science Press<br>Tel: 010-64017032<br>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<br>(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

国内外公开发行人