

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

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

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征

贾陈忠^{1,2}, 王焰新², 张彩香²

(1. 长江大学化学与环境工程学院, 荆州 434025; 2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074)

摘要: 采用凝胶色谱技术研究了光催化氧化处理过程中垃圾渗滤液 DOM 6 种组分的分子质量变化规律. 结果表明, 垃圾渗滤液 DOM 的相对分子质量大多在 10^4 以下, 平均在 10^4 以上的大分子物质主要是 HIB 和 HIN, 仅占渗滤液 DOM 总量的 20% 左右. 其余组分大多位于 $(1 \sim 10) \times 10^3$ 之间, 低于 500 的组分含量很少. 说明垃圾渗滤液 DOM 是以中等相对分子质量的黄腐酸类物质为主, 难以生物降解. 光催化处理过程中渗滤液 DOM 的相对分子质量分布范围逐渐变宽, 多分散系数 D 逐渐增大. HOB、HIB、HIA 以及 HON 组分在光催化处理后, 相对分子质量显著减小; 其中 HOB 减小最为明显, 由初始的 $(4 \sim 25) \times 10^3$, 减小为 72 h 的 $(0.4 \sim 1) \times 10^3$ 之间. 而 HOA 和 HIN 组分的相对分子质量呈增加趋势, 其中 HOA 增加最为明显, 在垃圾原液中分布于 $(2 \sim 20) \times 10^3$, 在 72 h 光催化处理液中位于 $(20 \sim 50) \times 10^3$ 之间. 随着处理时间延长, DOM 各组分的 RID 信号均降低, 说明其浓度下降. 整体上看, 渗滤液 DOM 各组分均发生了明显光催化转化.

关键词: 光催化氧化; 垃圾渗滤液; 溶解性有机物; 相对分子质量

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3495-06

Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation

JIA Chen-zhong^{1,2}, WANG Yan-xin², ZHANG Cai-xiang²

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Gel permeation chromatography was applied to analyze the variation characteristics of molecular mass of DOM six fractions during photocatalytic degradation. The results showed that most of DOM with average relative molecular mass was below 10^4 . Large molecular fractions higher than 10^4 mainly containing HIB and HIN, accounted for nearly 20% of total DOM. Relative molecular mass of other fractions was mainly from 10^3 to 10^4 . Fractions with relative molecular mass less than 500 were little. Most of DOM in leachate was yellow humic acid with moderate relative molecular mass and that is difficult to be biologically degraded. Relative molecular mass distribution of DOM fraction in different effluent broadened gradually during photocatalytic process, while polydispersity distribution coefficient (D) increased gradually. Relative molecular mass of HOB, HIB, HIA and HON decreased notably after photocatalytic treatment, especially HOB which relative molecular mass decreased from initial $(4 \sim 25) \times 10^3$ to $(0.4 \sim 1) \times 10^3$ after 72 h degradation. On the contrary, relative molecular mass of HOA and HIN tended to increase, and the more obvious is HOA which relative molecular mass increased from $(2 \sim 20) \times 10^3$ of raw leachate to $(20 \sim 50) \times 10^3$ of 72 h effluent. RID peak signal intensity of each DOM fraction decreased with the treatment time, which illustrated that the concentration decreased. As a whole, all fractions of DOM can be photocatalytically transformed efficiently.

Key words: photocatalysis degradation; landfill leachate; dissolved organic matter; relative molecular mass

垃圾渗滤液是含有多种污染物的高浓度有机废水, 其中最活跃的成分是溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM), 约占渗滤液总有机物的 85% 左右^[1]. 由于 DOM 是包含了一系列化学性质各异的化合物的混合物, 因此目前还无法获得 DOM 组分分子结构的详细和精确信息^[2]. 从分子质量的角度表征和推断有机物的理化性质, 是研究天然有机物的一种常见的方法. 尤其在研究天然有机物的氧化技术中, 分子质量分布的改变可以直观地反映出

天然有机物经氧化前后的分子质量改变, 进而表达和判断有机物结构和性质的变化^[3]. DOM 是分子质量分布广泛的有机质综合体, 其分子质量分布从几百到上百万不等. DOM 分子质量分布与其化学性质有密切关系, 是影响其环境性质的特征参数, 了

收稿日期: 2011-12-04; 修订日期: 2012-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40972156); 武汉市科技攻关计划项目 (200860423203); 中国地质大学 (武汉) 生物地质与环境地质教育部重点实验室开放项目 (BGEF200820)

作者简介: 贾陈忠 (1971 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: jiachenzhong@163.com

解 DOM 的分子质量分布可以更好地理解其在水中的迁移转化方式及对环境污染物的影响^[4]。探明渗滤液中 DOM 的分子质量分布,对于深入理解渗滤液的水质特征和 DOM 的性质具有重要意义。目前,对垃圾渗滤液中 DOM 分子质量的分布特征报道较多^[5~7],但对渗滤液 DOM 不同组分分子质量分布特征报道较少^[8,9],而对于光催化氧化处理垃圾渗滤液过程中 DOM 不同组分分子质量变化规律的研究鲜见报道。

基于以上分析,本研究采用凝胶渗透色谱技术(gel permeation chromatography, GPC),通过示差折光检测器(RID 检测器),分析了垃圾渗滤液 DOM 及其不同组分的相对分子质量分布特征,探讨了光催化氧化处理过程中渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化规律,这对于深入研究光催化氧化处理过程中有机物的转化规律和降解机制具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验样品

垃圾渗滤液取自武汉市二妃山垃圾填埋场,该填埋场位于武汉市江夏区流芳镇湖口村,垃圾主要来源于武昌地区的生活垃圾;2003 年开始启用,2008 年封场;2010 年 3 月,在填埋场集水井处采集垃圾渗滤液样品;水样用 4 L 的棕色玻璃瓶密封运回实验室,在 4℃ 保存备用。渗滤液基本理化性质如表 1 所示。

表 1 垃圾渗滤液基本理化性质¹⁾

指标	测定值	指标	测定值
pH	8.24	COD	2 440.3
电导率/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	12.2	BOD ₅	225.4
SS	164	DOC	913.8
TDS	10 856	TOC	1 004.2
色度/倍	2 400	NH ₄ ⁺	1 359.3

1) 除去 pH、色度和电导率外,其他指标单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

1.2 光催化氧化处理

光催化氧化处理操作参照文献[10]。根据先前的研究,在光催化最佳处理条件下,垃圾渗滤液 COD、DOC 以及色度的去除率分别为 60%、74% 和 97%。

1.3 渗滤液 DOM 组分的提取

参考文献[11]分离提取垃圾渗滤液 DOM 及不同时间光催化处理液的 6 种组分:疏水性碱(HOB)、疏水性酸(HOA)、疏水中性(HON)、亲水

性碱(HIB)、亲水性酸(HIA)和亲水中性(HIN)。

1.4 相对分子质量分析

相对分子质量(M_r)的分析采用凝胶色谱法。色谱条件:色谱柱 PL aquagel-OH 柱(300 mm × 7.5 mm)串联加保护柱;流动相:二次去离子水;流速:0.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;柱温:30℃;检测器温度:30℃;进样量:20 μL 。仪器型号:Agilent G1362A 1200 示差折光检测器(美国,安捷伦)。数据处理软件:GPC-Addon software。

用 M_r 分别为 2×10^4 、 1×10^4 、 4×10^3 、 1×10^3 和 400 的聚乙二醇(PEG, Merck, German)作为分子质量标准,用二次去离子水依次配制浓度为 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的以上不同分子质量标准物的标准溶液,进行 HPLC-RID 检测。以 PEG 的相对分子质量对数($\lg M_r$)为纵坐标,保留时间 t_R 为横坐标,绘制 $\lg M_r$ - t_R 的标准曲线,用 Origin 8.0 软件拟合 PEG 的 GPC 校正曲线回归方程。根据样品 GPC 谱图,利用 GPC-Addon software 计算 DOM 各组分重均分子质量 M_w 、数均分子质量 M_n 、多分散系数 D ($D = M_w/M_n$)。

垃圾渗滤液稀释 20 倍后测定,不同时间光催化处理液稀释 10 倍后测定,分离的 DOM 各组分直接测定。

2 结果与讨论

2.1 渗滤液 DOM 组分的分子质量分布特征

根据 GPC 谱图,混合物的分子质量分布特征表示通常有 4 种:①数均分子质量(M_n),按分子数目统计平均所得,一般分子质量较小时准确度较高;除特别说明外,以下均按数均分子质量进行分析;②重均分子质量(M_w),按分子重量统计平均所得,分子质量较大时准确度较高;③峰值分子质量(M_{wp}),即简单将峰顶点所对应的保留时间计算转换为分子质量来表示。④高聚物的分子质量分布,指样品中各种分子质量组分在总量中各自所占的比例,最直观表示方法是采用分子质量多分散系数(D):即重均分子质量和数均分子质量的比值。

图 1 为垃圾渗滤液 DOM 的 GPC 谱图。渗滤液及 DOM 各组分的 M_n 、 M_w 以及 D 如表 2 所示。由图 1 可以看出,垃圾渗滤液的 GPC 曲线呈双峰分布,这一结果与文献[11,12]的结论非常相似,陈少华等^[13]对渗滤液 DOM 相对分子质量的研究也有同样结论。这主要是由于垃圾渗滤液中 DOM 不同组分分子质量的差异较大、分子质量分布较广所致。

二妃山垃圾渗滤液分子质量分布于 $(4 \sim 30) \times 10^3$, 多分散系数 $D = 5.19$, 说明其分子质量分布较广. HOB 的 GPC 峰形与垃圾渗滤液非常相似且分布区域相近, 分子质量分布于 $(4 \sim 25) \times 10^3$ 之间; HON 的峰形也与垃圾渗滤液相似但范围更宽, 保留时间略长, 其分子质量主要分布于 $(1.5 \sim 5.5) \times 10^3$. HOB 和 HON 的 D 值分别高达 9.85 和 11.65, 说明这两种物质的分子质量分布较广. 在 DOM 的其它组分中, HIB 分子质量最大, 位于 $(20 \sim 80) \times 10^3$ 之间; 最小为 HIA, 位于 $(2 \sim 6) \times 10^3$ 之间; HOA 分子质量位于 $(2 \sim 25) \times 10^3$ 之间. 各组分按峰值分子质量排列依次为 $HIB > HIN > HOB > HON > HOA > HIA$, 与按数均分子质量排列依次一致; 按重均分子质量排列依次为 $HIB > HON > HOB > HIN > HIA > HOA$. 说明 HIB 组分分子质量较大, 且数目较少; 而 HOA 和 HIA 的组分分子质量较小, 但数目较多. 另外, 整体上看疏水性组分和亲水性组分的分子质量没有显著差异.

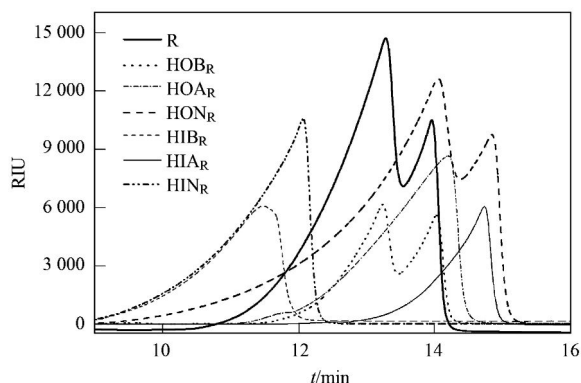


图1 渗滤液 DOM 不同组分的 GPC 谱图

Fig. 1 GPC chromatogram of different DOM fractions

有资料表明^[14], 垃圾渗滤液中的有机物主要分布在 2 个分子质量范围: 大分子组分的峰值相对分子质量在 $11\,480 \sim 13\,182$ 之间, 小分子组分的则在 $158 \sim 275$ 之间. 由表 2 可以看出, 二妃山垃圾渗滤液 DOM 的平均相对分子质量为 8 479, DOM 各组分的分子质量大多在 10^4 以下, 在 10^4 以上的大分子质量物质主要是 HIB 和 HIN, 占渗滤液 DOM 总量的 20% 左右; 其余组分分子质量大多位于 $10^3 \sim 10^4$ 之间, 低于 500 的组分含量很少. 根据 Wichitsathian 等^[15]的报道, 垃圾渗滤液中的小分子质量有机物主要由易生物降解的挥发性脂肪酸 (VFA) 和氨基酸组成; 中分子质量有机物主要为黄腐酸类物质 (相对分子质量通常位于 $500 \sim 10^4$ 之间), 其结构中含有羟基和羧基; 大分子质量有机物主要由多糖、蛋

白质和腐殖酸类物质组成, 分子质量较高, 难以被生物降解. 由此可见, 二妃山垃圾渗滤液 DOM 是以中等分子质量的黄腐酸类有机物为主, 难以生物降解. 另外, 一般认为渗滤液中难降解的大分子质量有机物主要为腐殖质、多糖和蛋白质; 新鲜垃圾渗滤液的分子质量较小, 成熟垃圾渗滤液的分子质量较大^[16]. 渗滤液中腐殖质比例随填埋时间的延长而提高, 晚期渗滤液的 BOD_5/COD 可以降到 0.1 以下, 不适宜采用生物法处理. 说明二妃山垃圾填埋场渗滤液的性质与其填埋龄一致.

表 2 垃圾渗滤液 DOM 组分的相对分子质量分布¹⁾

样品	M_w	M_n	D
R	43 973	8 479	5.19
HOB _R	35 588	3 613	9.85
HOA _R	5 993	3 877	1.55
HON _R	44 220	3 796	11.65
HIB _R	124 500	33 500	3.72
HIA _R	9 932	2 386	4.16
HIN _R	16 500	13 780	1.20

1) R 指垃圾渗滤液, 下同

2.2 光催化处理液 DOM 的分子质量分布

图 2 是不同时间光催化处理液 DOM 的 GPC 图谱, 表 3 为其 M_w 、 M_n 以及 D 值.

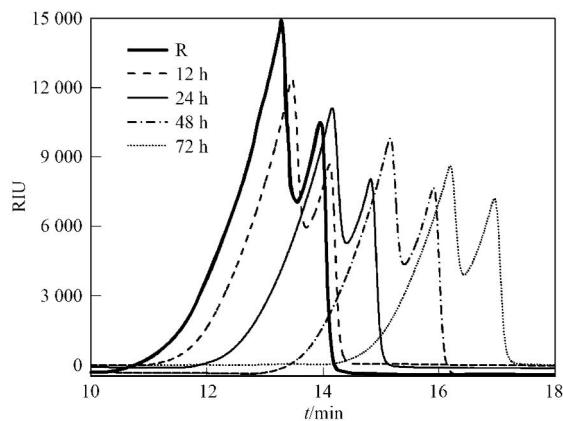


图2 不同时间光催化处理液 DOM 的 GPC 图谱

Fig. 2 GPC of DOM in different photocatalytic effluents

由图 2 可以看出, 随着光催化处理时间的增加, 各光催化处理液 DOM 的保留时间逐渐延长, 说明在光催化作用下 DOM 的高分子组分不断被破坏, 小分子质量组分持续增加. 不同处理液 GPC 图谱一直保持双峰, 而且峰高随处理时间延长不断下降, 说明光催化处理过程中 DOM 含量降低. 垃圾原液相对分子质量分布于 $(4 \sim 30) \times 10^3$, 不同时间光催化处理液的分子质量分布依次为 12 h: $(2.5 \sim 25) \times 10^3$; 24 h: $(1.3 \sim 14) \times 10^3$; 48 h: $(0.6 \sim 8) \times$

10^3 ; 72 h: $(0.3 \sim 3) \times 10^3$. 可见光催化处理能使 DOM 中高分子组分降解为低分子物质. 这与 Huang 等^[17]发现光催化能将天然大分子质量有机物氧化成小分子质量的结论一致. 同时由表 3 可以看出, 随着处理时间延长, 光催化处理液多分散系数 D 增大, 说明其分子质量分布变宽.

表 3 不同时间光催化处理液的分子质量分布

Table 3 M_w and D of different photocatalytic effluents				
项目	t/h			
	12	24	48	72
M_w	33 143	22 822	9 716	5 271
M_n	5 866	3 495	1 390	724
D	5.65	6.53	6.99	7.28

2.3 光催化处理液 DOM 不同组分的分子质量分布

图 3 表示不同时间光催化处理液 DOM 不同组分的 GPC 图谱. 整体上看, 光催化处理过程中 DOM 不同组分 GPC 谱图的保留时间 t_R 发生明显变化, 说明其分子质量大小、分布区域存在不同程度的改变. 而且处理过程中各 DOM 组分的 RIU 信号有不同程度的下降, 说明光催化降解使各 DOM 组分浓度降低.

但是 DOM 不同组分的分子质量变化特征差异较大, 具体分析如下: HOB 组分在垃圾渗滤原液中呈明显双峰, 分子质量分布在 $(4 \sim 25) \times 10^3$ 之间, 峰值分子质量集中于 20×10^3 左右; 处理 12 h 后, 分子质量分布区域没有明显变化, 但其 RID 信号大幅度减低, 表明 HOB 浓度显著减小; 处理 24 h 后, 分子质量分布于 $(1 \sim 2.5) \times 10^3$, 分子质量分布区域向小分子拓展; 48 h 时, 分子质量分布在 $(0.8 \sim 1.5) \times 10^3$ 之间; 72 h, 分子质量分布在 $(0.4 \sim 1) \times 10^3$. 可见, 光催化处理过程中, HOB 的分子质量有显著减小趋势. HIB 组分在垃圾原液中分子质量分布在 $(5 \sim 60) \times 10^3$; 处理 12 h 后, 分子质量分布变化不明显, 分布区域有轻微拓展, 并且其峰值 RID 信号升高, 表明有新的 HIB 物质生成; 处理 24 h 后, 分子质量分布在 $(4 \sim 50) \times 10^3$ 之间; 48 h, $(3 \sim 40) \times 10^3$; 72 h, $(2 \sim 12) \times 10^3$. 可见, 光催化处理前期(48 h 内), HIB 分子质量没有明显变化, 浓度变化也不明显; 光催化处理 72 h 时, HIB 的分子质量显著减小, 浓度明显降低. HOA 组分在垃圾原液中的分子质量分布在 $(2 \sim 20) \times 10^3$; 处理 12 h 后, 分子质量分布发生明显变化, 分布在 $(10 \sim 25) \times 10^3$, 浓度明显减低; 24 h, 分子质量位于 $(10 \sim 28) \times 10^3$ 之间; 48 h, $(13 \sim 50) \times 10^3$; 72 h, $(20 \sim 50)$

$\times 10^3$. 可见, 光催化处理过程中, HOA 的分子质量显著增大, 但其浓度随着处理时间延长降低明显. HIA 组分在垃圾原液中的分子质量分布在 $(2 \sim 6) \times 10^3$; 处理 12 h 后, 分子质量分布没有明显变化, 浓度变化也不明显; 24 h, 分子质量分布在 $(1 \sim 5) \times 10^3$ 之间; 48 h, $(0.6 \sim 3) \times 10^3$; 72 h, $(0.4 \sim 3) \times 10^3$. 可见, 光催化处理过程中, HIA 有逐渐减小趋势, 其浓度也随着处理时间延长而降低, 并且在处理 72 h 时出现明显 RID 双峰, 说明有新的 HIA 物质生成, 这些新生成的 HIA 保留时间较长, 说明其分子质量较小. 各光催化处理液中 HON 组分的 RID 谱图呈明显双峰; 在垃圾原液中, 分子质量分布在 $(1.5 \sim 55) \times 10^3$; 处理 12 h 后, $(2 \sim 55) \times 10^3$, 浓度有轻微下降; 24 h, $(1.5 \sim 50) \times 10^3$; 48 h, $(1.2 \sim 50) \times 10^3$; 72 h, $(0.6 \sim 15) \times 10^3$. 可见, 在光催化处理 48 h 内, HON 分子质量有减小趋势, 但变化不明显; 72 h 时, HON 分子质量明显减小. 在整个处理过程中 HON 组分的浓度随处理时间延长逐渐降低. HIN 组分在垃圾原液中的分子质量分布在 $(10 \sim 80) \times 10^3$; 12 h, $(20 \sim 85) \times 10^3$, 伴有浓度轻微下降; 24 h, $(25 \sim 90) \times 10^3$; 48 h, $(18 \sim 70) \times 10^3$; 72 h, $(30 \sim 80) \times 10^3$. 总体上看, 光催化处理使 HIN 组分分子质量分布范围更加集中, 其浓度随着处理时间延长逐渐降低, 在 72 h 处理液中浓度明显降低; 除 48 h 降低外, 光催化处理后 HIN 组分分子质量有明显增加趋势.

综合以上分析可以看出, HOB、HIB、HIA 以及 HON 组分在光催化处理后, 分子质量呈减小趋势; 其中 HOB 减小最为明显, 由起始 $(4 \sim 25) \times 10^3$, 减小为 $(0.4 \sim 1) \times 10^3$ 之间. 而 HOA 和 HIN 分子质量呈增加趋势, 其中 HOA 分子质量增加明显, 在垃圾原液中分子质量分布于 $(2 \sim 20) \times 10^3$, 72 h 光催化处理液中为 $(20 \sim 50) \times 10^3$.

表 4 为不同时间光催化处理液中 DOM 各组分的 M_w 、 M_n 以及多分散系数 D . 从中可以看出, 对于不同 DOM 组分, 多分散系数 D 和分子质量 (M_w 和 M_n) 变化各不相同. 在 72 h 光催化处理液中, HOB、HON 以及 HIA 这 3 种组分的多分散系数 D 值增大, 分子质量的分布向小分子范围拓展, 平均分子质量降低. HOA 组分多分散也在增加, 但分子质量变化却正好相反; 而 HIB 和 HIN 组分的 D 值变化没有明显规律, HIN 的分子质量变化也没有明显规律, 但 HIB 的分子质量随处理时间延长逐渐减小. 在光催化处理过程中 HOA 和 HIN 组分分子质

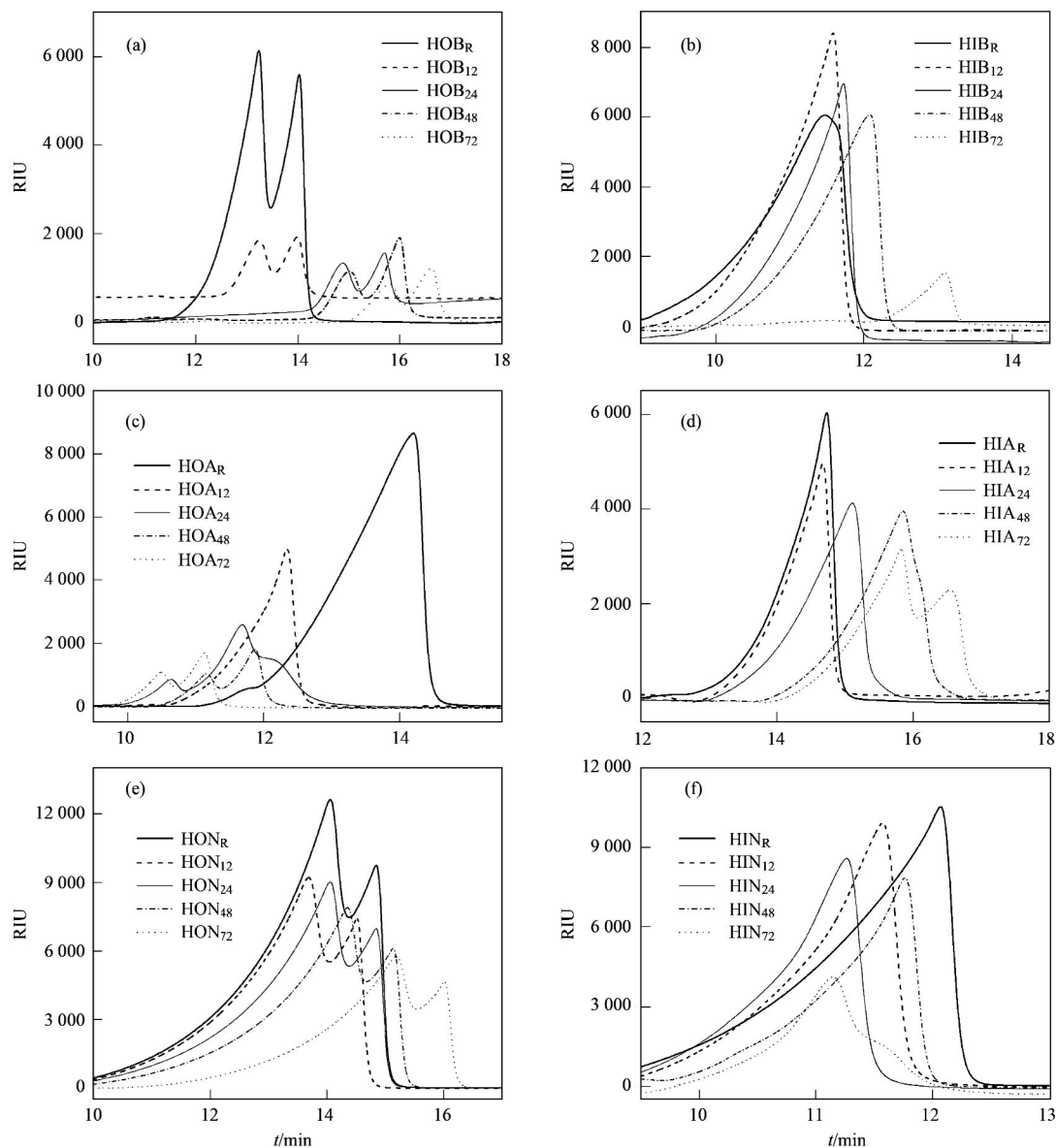


图 3 光催化降解过程中 DOM 不同组分的相对分子质量分布变化

Fig. 3 Relative molecular mass distribution change of DOM during photocatalytic process

表 4 不同时间光催化处理液中 DOM 组分的相对分子质量

Table 4 M_r and D of DOM fractions of different photocatalytic effluents								
t/h	项目	DOM	HOB	HOA	HON	HIB	HIA	HIN
12	M_w	31 992	9 917	16 650	91 275	45 610	7 683	32 587
	M_n	5 732	2 126	11 260	4 688	25 590	2 261	28 560
	D	5.59	4.66	1.48	19.47	1.78	3.40	1.14
24	M_w	15 689	3 457	72 150	83 878	44 470	8 377	88 094
	M_n	2 722	1 225	14 060	3 265	21 720	1 304	30 440
	D	5.76	2.82	5.13	25.69	2.05	6.43	2.24
48	M_w	6 803	5 368	105 478	87 701	30 937	2 460	32 910
	M_n	1 092	1 100	15 320	2 275	17 390	840	26 220
	D	6.23	4.88	6.88	38.55	1.78	2.93	1.26
72	M_w	5 699	5 021	387 600	55 487	11 060	32 910	54 652
	M_n	873	693	34 600	1104	6 376	739	34 810
	D	6.53	7.25	11.20	50.26	1.73	44.53	1.57

特殊变化可能有 2 个原因:一是这 2 种组分本身不易发生光催化降解反应;二是其他组分在光催化处理过程中转化为这 2 种组分. 有资料表明^[18],在纳米 TiO₂ 光催化作用下饱和长链羧酸能够发生类似 Photo-Kolbe 聚合反应^[19,20],通过脱羧引发烷基自由基的单体聚合,生成长链脂肪烃,这可能是导致光催化处理过程中某些组分分子质量增加的主要原因.

3 结论

(1)垃圾渗滤液 DOM 的数均分子质量大多在 10⁴ 以下,平均分子质量在 10⁴ 以上的大分子物质主要是 HIB 和 HIN,仅占渗滤液 DOM 总量的 20% 左右. 其余组分分子质量大多位于 10³ ~ 10⁴ 之间,低于 500 的组分含量很少. 说明垃圾渗滤液 DOM 是以中分子质量的黄腐酸类物质为主,难以生物降解.

(2)整体上看,光催化处理过程中 DOM 的分子质量逐渐减小,多分散系数 *D* 逐渐增大,浓度明显降低,渗滤液 DOM 发生了明显光催化降解.

(3)在光催化处理过程中,DOM 各组分的 RIU 信号不断下降,说明其浓度在降低;HOB、HON 以及 HIA 这 3 种组分的多分散系数 *D* 不断增大,分子质量的分布向小分子范围拓展,平均分子质量降低;HOA 组分多分散也在增加,但分子质量变化却正好相反;而 HIB 和 HIN 组分的 *D* 值变化没有明显规律,但 HIB 的分子质量随处理时间延长呈减小趋势,HIN 的分子质量变化也没有明显规律.

参考文献:

- [1] Huo S L, Xi B D, Yu H C, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in leachate with different landfill ages [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(4): 492-498.
- [2] 方芳, 刘国强, 郭劲松, 等. 渗滤液中 DOM 的表征及特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 834-839.
- [3] 严晓菊. 光催化-膜组合工艺去除腐殖酸的效能与机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 30-35.
- [4] Wang L Y, Wu F C, Zhang R Y, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fractions from Lake Hongfeng, Southwestern China Plateau [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(5): 581-588.
- [5] Calace N, Liberatori A, Petronio B M, *et al.* Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 331-339.
- [6] Chen S H, Liu J X. Landfill leachate treatment by MBR; Performance and molecular weight distribution of organic contaminant [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(23): 2831-2838.
- [7] 刘静, 王劭然, 闫鹏飞. 矿化垃圾处理后渗滤液中有机物的相对分子量分布[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, **30**(6): 79-82.
- [8] Guo J, Peng Y Z, Guo J H, *et al.* Dissolved organic matter in biologically treated sewage effluent (BTSE): characteristics and comparison [J]. *Desalination*, 2011, **278**(1-3): 365-372.
- [9] 赵庆良, 卜琳, 杨俊晨, 等. 腐蚀电池-Fenton 处理渗滤液降解性有机物光谱特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2378-2384.
- [10] Jia C Z, Wang Y X, Zhang C X, *et al.* UV-TiO₂ photocatalytic degradation of landfill leachate [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **217**(1-4): 375-385.
- [11] Lou Z Y, Zhao Y C, Yuan T, *et al.* Natural attenuation and characterization of contaminants composition in landfill leachate under different disposing ages [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(10): 3385-3391.
- [12] Chian E S K, de Walle F B. Characterization of soluble organic matter in leachate [J]. *Environmental Science & Technology*, 1977, **11**(2): 158-163.
- [13] 陈少华, 刘俊新. 膜生物反应器处理垃圾渗滤液的效能及有机污染物的分子量分布[J]. *科学通报*, 2006, **51**(15): 1757-1763.
- [14] Harmsen J. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip [J]. *Water Research*, 1983, **17**(6): 699-705.
- [15] Wichitsathian B, Sindhuja S, Visvanathan C, *et al.* Landfill leachate treatment by yeast and bacteria based membrane bioreactors [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2004, **39**(9): 2391-2404.
- [16] Berthe C, Redon E, Feuillade G. Fractionation of the organic matter contained in leachate resulting from two modes of landfilling; An indicator of waste degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 262-271.
- [17] Huang X H, Leal M, Li Q L. Degradation of natural organic matter by TiO₂ photocatalytic oxidation and its effect on fouling of low-pressure membranes [J]. *Water Research*, 2008, **42**(4-5): 1142-1150.
- [18] 翁臻. 纳米 TiO₂ 光催化聚合引发途径的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008. 46-55.
- [19] Langsdorf B L, MacLean B J, Halfyard J E, *et al.* Partitioning and polymerization of pyrrole into perfluorosulfonic acid (Nafion) membranes [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, **107**(11): 2480-2484.
- [20] Reece D A, Pringle J M, Ralph S F, *et al.* Autopolymerization of pyrrole in the presence of a host/guest calixarene [J]. *Macromolecules*, 2005, **38**(5): 1616-1622.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17 β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《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10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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