

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾潮滩重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯 试验研究

李伟¹, 赵晶², 余健^{1*}, 任文辉¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 广西壮族自治区交通规划勘察设计研究院, 南宁 530011)

摘要: 采用陶粒滤料曝气生物滤池(BAF)处理邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)模拟废水, 考察了空床接触时间(EBCT)、温度对DEHP去除效果的影响, 运用气质联用仪(GC-MS)分析了中间降解产物并推测其可能的降解途径。结果表明, 当温度为25℃, 空床接触时间(EBCT)为8 h时, BAF对DEHP的降解效果良好, 去除率达到90.3%; BAF对DEHP的去除率随着温度的升高和EBCT的增加而增大, EBCT为去除效果的主要影响因素; BAF对DEHP的降解满足一级反应动力学方程。BAF出水中检测到邻苯二甲酸单2-乙基己基酯(MEHP)、邻苯二甲酸丁基酯2-乙基己基酯(BEHP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二甲酯(DMP)以及邻苯二甲酸(PA)等降解产物, 据此推测邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的生物降解途径可能为其长烷基支链先断裂为较短的直链, 而后断裂一个酯键形成单酯, 接着再断裂另一酯键形成邻苯二甲酸, 最终分解成二氧化碳和水。

关键词: 曝气生物滤池; 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯; 生物降解; 动力学模型; 降解产物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0943-07

Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter

LI Wei¹, ZHAO Jing², YU Jian¹, REN Wen-hui¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Guangxi Communications Planning Surveying and Designing Institute, Nanning 530011, China)

Abstract: Ceramsite medium biological aerated filter (BAF) was used to treat the sewage containing di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP). The treatment efficiency under different empty bed contact time (EBCT) and temperatures was investigated and the major intermediate products of biodegradation of DEHP were analyzed via GC-MS. Results show that the removal rate of DEHP can be highly achieved at 90.3% under the conditions of 25℃ and 8 hours of empty bed contact time. The removal efficiency will be increased after raising temperature or EBCT. The EBCT plays the main role between two influencing factors. The biodegradation of DEHP in BAF is expressed in the first-order kinetics. The major intermediate products of biodegradation of DEHP are made up of mono-2-ethylhexyl phthalate (MEHP), bisethylhexyl phthalate (BEHP), dibutyl phthalate (DBP), dimethyl phthalate (DMP) and phthalic acid (PA). It is supposed that the possible pathway of the biodegradation of di-(2-ethylhexyl) phthalate is that the long alkyl side-chain of DEHP may be cleaved into a shorter and more straight one, then PA is formed after cleaving the two ester bonds, and finally being oxidized into CO₂ and H₂O.

Key words: biological aerated filter; di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP); biodegradation; the kinetics; degradation products

邻苯二甲酸酯(PAEs)是最为重要的痕量环境激素之一,它具有致癌、致畸、致突变和生殖发育毒性等多种毒性^[1~6]。邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)是全球用量最大的PAE类增塑剂^[7],同时它还广泛应用于农药、医药、化妆品、玩具和服装等行业的生产中,甚至影响到食品安全。目前,DEHP在河流、饮用水、食品、土壤、底泥、生活垃圾以及垃圾渗滤液中已达到了普遍检出的程度^[8~15]。因此,DEHP已被美国环境保护署列为环境优先控制污染物^[16],同时美国、世界卫生组织以及我国的水源水以及饮用水的水质标准都对DEHP的限值进行了严格的规定。

众多研究表明,微生物好氧降解具有降解条件要求低,降解速率高,无二次污染产生等优点,是国内外认可的PAEs类物质分解转化的主要途径^[17~20]。目前,对于DEHP的生物降解研究主要是利用活性污泥或纯菌种进行摇瓶生物降解试验^[21~24],研究重点集中在单一高效菌的筛选、降解影响因素以及降解动力学等方面。曝气生物滤池

收稿日期: 2012-05-07; 修订日期: 2012-07-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07423-004)

作者简介: 李伟(1971~),女,硕士,讲师,主要研究方向为水质净化与水污染控制工程, E-mail: lwei6851@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: yujianpro@126.com

(BAF)是20世纪80~90年代初兴起的污水处理工艺,是集生物净化和物理过滤于一体的处理设施,具有占地面积小、耐冲击负荷、食物链长等优点,且已有研究发现BAF对难降解有机物有较好的去除效果^[25,26],然而国内外对BAF去除DEHP的研究报道较少,仅有曹相生等^[27]开展了石英砂滤料曝气生物滤池去除DEHP的研究,其结果表明BAF对DEHP的去除率达到80%以上。本试验旨在研究陶粒滤料BAF对DEHP的去除效果及其影响因素,建立BAF对DEHP的降解动力学模型;同时通过中间降解产物的检测来推测其降解途径,以期对PAEs的污染治理提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试剂和材料

DEHP:分析纯,购自美国AAC,纯度99.5%。

无机盐均为分析纯,无机盐培养基: $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ ($7\,530\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ ($2\,650\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $(NH_4)_2SO_4$ ($1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ($160\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $MnSO_4 \cdot H_2O$ ($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ($2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $CaCl_2$ ($0.84\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ($1.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ($0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ ($0.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

试验进水:由于DEHP几乎不溶于水,添加 $0.5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的甲醇助溶,配制 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的DEHP标准储备液,取一定量标准储备液加入无机盐培养基,使DEHP终浓度约为 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,调节pH为7.0左右。

1.2 试验装置

试验装置如图1所示。BAF柱体采用全不锈钢板制作,由滤池滤柱和水浴夹套两部分构成。圆柱形滤柱内径4 cm,高43 cm。滤柱内填充粒径为8 mm的球形轻质黏土陶粒滤料,滤层厚度为30 cm,滤层下装有粒径为5 mm的玻璃珠承托层。承托层以上每隔5 cm设一个取样口,共7个。

试验采用上向流的运行方式,气水同向。采用压缩空气经进水连通管进行曝气,滤柱内溶解氧(DO)浓度控制在 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。

1.3 检测内容与方法

试验分别考察了温度为7℃和25℃时,空床接触时间(EBCT)分别为1、2、4、8 h下,BAF对DEHP的去除效果。在每个工况下,至少运行3倍EBCT的时间方可取样检测。从第一次取样后每天取进、出水水样各1个,待此工况条件稳定运行4~

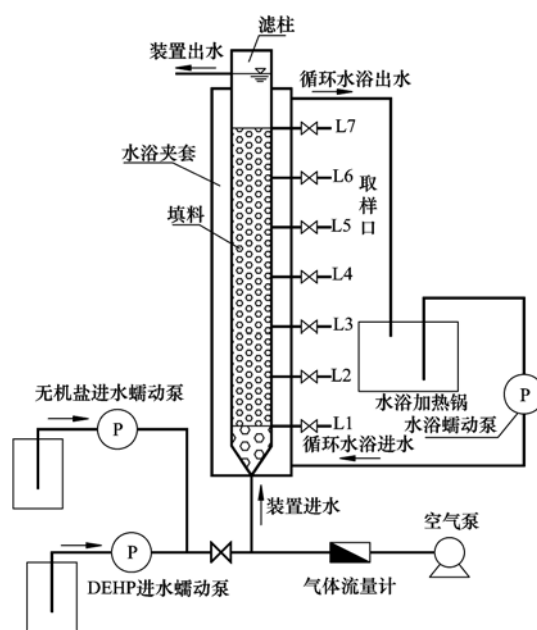


图1 BAF装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of BAF device

7 d,出水底物浓度基本稳定后,再从各分层取样口取水样1~3个。

1.3.1 气相色谱分析DEHP

在萃取瓶中加入20 mL含DEHP的待测水样和2 mL二氯甲烷萃取剂,振荡萃取10 min后以 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速离心10 min,取有机相进岛津GC-14C型气相色谱仪测定DEHP的含量。检测条件为:FID检测器、Rtx-5型毛细管色谱柱($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$),进样量 $2\text{ }\mu\text{L}$,进样口温度 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,检测器温度 $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。色谱柱升温程序为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保留2 min,以 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后保留5 min,总共运行10.6 min。加标试验表明,该方法对DEHP的回收率在98%~109%之间。

1.3.2 气质联用仪(GC-MS)分析降解产物

水样预处理方法参考文献^[29],采用固相萃取法。在温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,EBCT为8 h的试验条件下,取DEHP的降解产物出水水样500 mL,经灭菌及冷冻离心处理后,采用Supelclean LC-18固相萃取(SPE)小柱萃取,用甲醇进行过柱洗脱,收集洗脱液,以纯度为99.99%的氮气吹脱浓缩近干,用甲醇定容至0.5 mL,供仪器分析。

降解产物分析采用美国Thermo-Finnigan Polaris Q型GC-MS,其色谱柱为DB-5型($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)毛细管柱,载气为高纯氮气(纯度 $>99.999\%$),柱流速 $40\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,进样口温度为 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,不分流进样,进样量为 $1\text{ }\mu\text{L}$ 。柱升温程序为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保留5 min,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$,保留10

min. 质谱条件:离子源为电子轰击(EI)源,电离能量 70 eV,离子源温度 200℃,接口温度 280℃,检测器电压 1 000 V,扫描间隔为 0.60 s,质荷比扫描范围为 40~420 u,数据采集方式为全扫描模式。

1.3.3 扫描电镜观察陶粒表面生物膜微生物相

在装置运行后期,从滤柱底部取 2~3 颗陶粒样品,与挂膜前的陶粒一起,经干燥、喷金之后用 JSM-6700F 扫描电镜进行对比观测。

1.4 滤池启动

滤池启动采用挂膜接种方式,接种污泥取自长沙某垃圾填埋场渗滤液处理站曝气池。滤池启动运行条件为:进水 DEHP 浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度保持 25℃,溶解氧控制在大于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水 pH 在 7.12~7.05 左右,EBCT 为 8 h。连续稳定运行 3 周,发现出水中 DEHP 的剩余浓度基本稳定,则可认为滤池挂膜启动成功。

2 结果与分析

2.1 BAF 对 DEHP 的去除效果

2.1.1 不同试验条件下 DEHP 的去除率

进水 DEHP 浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,温度为 7℃ 和 25℃ 时,不同 EBCT 下,DEHP 的去除率如图 2 所示。

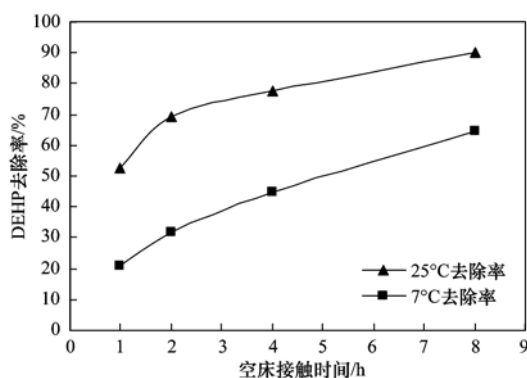


图 2 不同温度时 DEHP 去除率变化曲线

Fig. 2 Changes curve of removal ratio of DEHP in different temperatures

从图 2 可知,温度和空床接触时间(EBCT)是影响 BAF 对 DEHP 去除效果的 2 个重要因素。当进水 DEHP 浓度一定时,同一温度下,DEHP 的去除率随着 EBCT 的增加而逐渐增大;EBCT 相同时,温度越高,DEHP 的去除率越高。25℃ 下 BAF 对 DEHP 的降解去除是比较有效的,特别是在 EBCT 较长时(8 h),DEHP 的去除率达到 90.3%。低温会对 BAF 的处理效果产生不利影响,尤其在

EBCT 较短时这种影响就愈加明显。所以在实际工程中遇到低温条件时,若未采取保温措施,则可考虑在冬季采用较长的空床接触时间来提高生物滤池对 DEHP 的去除率。

BAF 对 DEHP 的去除率随温度的升高和 EBCT 的增加而增大,其主要原因为,增大空床接触时间能增加生物膜与 DEHP 的接触机会,温度升高能增强微生物的生理活动并提高 BAF 内氧与 DEHP 的传质效率。

试验期末,利用正交表 $L_8(4 \times 2^4)$ 安排试验,考察了影响 DEHP 去除效果的因素的主次关系及其最佳运行条件。结果表明,EBCT 为影响 DEHP 去除效果的主要因素,水温次之;最佳工艺条件是水温为 25℃、EBCT 为 8 h。

2.1.2 DEHP 在 BAF 中的分层降解情况

25℃ 时,从各取样口分层取样的 DEHP 浓度变化情况如图 3 所示。

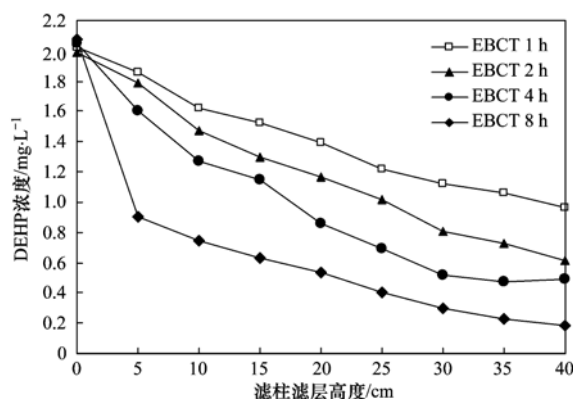


图 3 DEHP 的滤柱分层降解情况

Fig. 3 Layered degradation of DEHP in BAF

从图 3 可知,不同的 EBCT 下,BAF 对 DEHP 的降解去除都是沿滤柱由下而上逐步进行的,出水 DEHP 浓度均随着滤柱高度的增加而减小。随着 EBCT 的增大,各 DEHP 降解曲线的斜率亦由小变大,只是在较小 EBCT 下 DEHP 的降解曲线斜率变化趋势更为平缓。这说明随着 EBCT 的缩短,进水中的甲醇作为降解的初级基质的影响逐渐变弱,DEHP 的降解在各滤层也变得较为平均。

在同一 EBCT 下,靠近进水口的滤柱底层的降解速率较快,而后愈向上降解速率就愈慢。这一现象在 EBCT 为 8 h 时尤为明显,当进水通过 5 cm 高的滤层时,出水 DEHP 浓度已小于 $0.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进水中 DEHP 已降解了 60%,该层的降解曲线斜率明显高于其他各层,而滤柱中上层的降解速率变小。

分析滤柱中下层对 DEHP 的降解率较高的原因

主要是:BAF 为推流式反应器,靠近进水口滤柱中下层有机物浓度最高,此处的生物膜微生物因能够得到充足的能源和碳源而繁殖快、浓度高,所以微生物群体浓度高、活性大,对 DEHP 降解速率也就快.而滤柱中上层的微生物生长和有机污染物的降解情况则正好相反.

2.2 BAF 对 DEHP 的降解动力学模型的确定

BAF 反应器中的水流形态,在沿滤床高度方向上属于推流式.在推流式反应器中,基质的降解遵循一级反应动力学^[28],BAF 反应器的动力学方程可由式(1)表示.

$$\ln \frac{S}{S_0} = -\frac{k_0 h}{Q^n} = -\frac{k_0}{(H/T)^n} h \tag{1}$$

式中, S_0 为进水基质浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; S 为出水基质浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; h 为滤层高度,cm; Q 为水力负荷, $\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; k_0 为反应速率系数, h^{-1} ; n 为与填料性能有关的常数; H 为滤柱总高度,m; T 为空床

接触时间(EBCT),h.

由式(1)可知,在进水 DEHP 浓度一定的条件下,对于同一水力负荷或相同的 EBCT 下, $\ln(S/S_0)$ 与滤层高度 h 呈直线关系.利用 25℃ 时分层取样试验数据,计算出不同 EBCT 下的 $\ln(S/S_0)$ 值,以 $-\ln(S/S_0)-h$ 作图,并求出其拟合直线,结果如图 4 和表 1 所示.

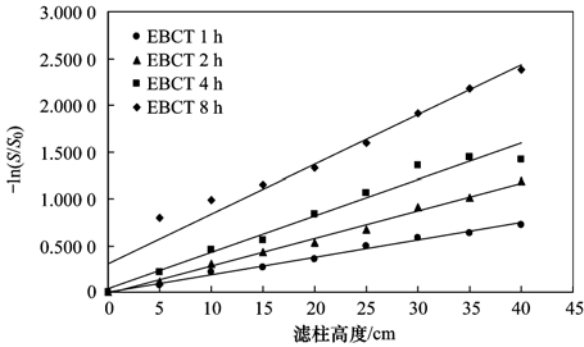


图 4 25℃ 时不同 EBCT 的拟合直线

Fig. 4 Fitting straight line of different EBCT at 25℃

表 1 不同 EBCT 的模型及相关系数

Table 1 Kinetics and related coefficient of different EBCT

EBCT/h	$Q/\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	拟合模型	K	R^2
1	0.4	$-\ln(S/S_0) = 0.0185h + 0.0019$	0.0185	0.9941
2	0.2	$-\ln(S/S_0) = 0.0296h - 0.0168$	0.0296	0.9942
4	0.1	$-\ln(S/S_0) = 0.0388h + 0.0404$	0.0388	0.9711
8	0.05	$-\ln(S/S_0) = 0.0533h + 0.3040$	0.0533	0.9608

令:

$$K = \frac{k_0}{Q^n} \tag{2}$$

对式(2)两边取对数得:

$$\ln K = -n \ln Q + \ln k_0 \tag{3}$$

从表 1 可知各个 EBCT 下的 Q 值和 K 值.以 $\ln K-\ln Q$ 作图,得到的直线斜率即为 $-n$ 值,截距为 $-\ln k_0$ 值.从图 5 可知, $-n = -0.497$, $-\ln k_0 = -4.395$ 即 $k_0 = 0.0123$, $n = 0.497$.由此得 25℃ 时 BAF 去除 DEHP 的动力学模型为:

$$\ln \frac{S}{S_0} = -\frac{0.0123h}{Q^{0.497}} \tag{4}$$

2.3 DEHP 在 BAF 中的代谢产物的研究

利用 GC-MS 对 DEHP 的降解产物进行定性,所得结果如图 6 所示.

从图 6 可看出,按出峰时间先后所对应的 DEHP 降解产物分别为:苯甲酸(BA)、邻苯二甲酸(PA)、邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸丁基酯 2-乙基己基酯(BEHP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸单 2-乙基己基酯(MEHP)以及 DEHP.

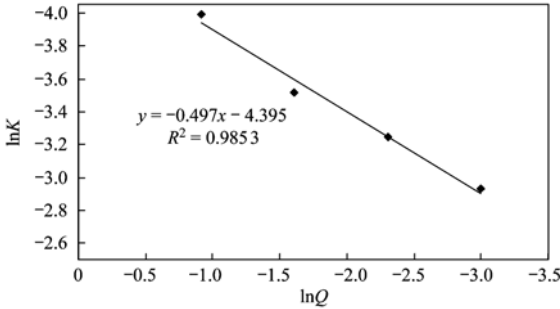


图 5 $\ln K$ 与 $\ln Q$ 的关系曲线

Fig. 5 Correlation between $\ln K$ and $\ln Q$

由此结果结合文献[7]推测 DEHP 的降解途径见图 7,一种降解途径可能为 DEHP 的侧端烷基长链首先对称断链,形成侧端烷基链较短,结构相对简单的 DBP,在微生物的脱脂化酶作用下水解断裂一个酯键,生成单酯和相应的醇;接着,再在微生物的脱脂化酶作用下水解断裂酯键生成 PA 和相应的醇,最终分解成为二氧化碳和水.另一种降解途径可能是 DEHP 的侧端烷基长链在微生物的脱脂化酶作用下水解断裂一个酯键,生成 MEHP 和相应的醇;然后再降解为 PA 和相应的醇,最终分解成为二氧化碳和水.

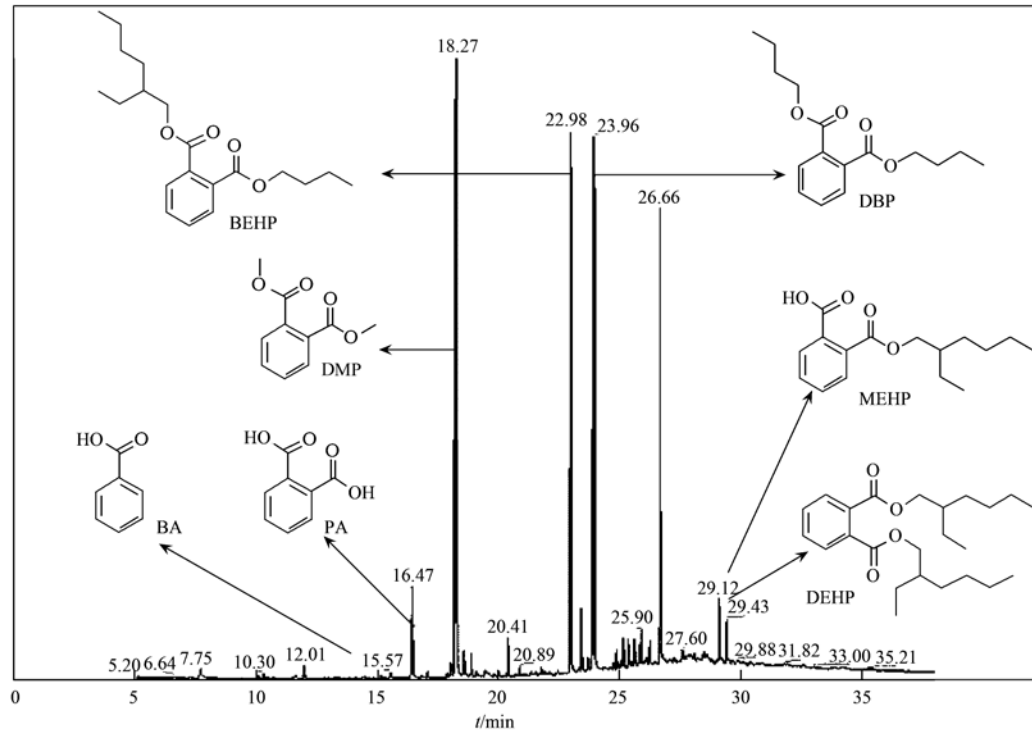


图 6 DEHP 的降解产物的 GC-MS 分析

Fig. 6 GC-MS analysis for degradation products of DEHP

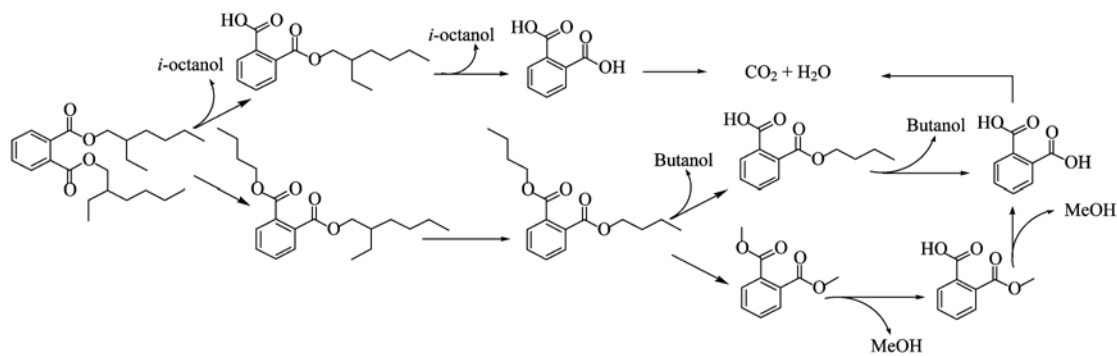


图 7 DEHP 在 BAF 中的可能生物降解途径

Fig. 7 Possible biodegradation pathway of DEHP in BAF

2.4 陶粒滤料表面的微生物相

对挂膜前的陶粒滤料表面以及挂膜后的陶粒表面(25℃下)进行 SEM 观察,结果如图 8 所示.从图 8(a)可见,滤柱挂膜前陶粒表面粗糙,具有发达的孔穴结构,有利于微生物的附着与固定,并为微生物的生长提供良好的场所.而从图 8(b)可知,挂膜后陶粒表面附着了众多微生物,在这些微生物中,以杆状菌为主,同时还有许多尺寸较小的球状菌.对挂膜后陶粒表面微生物洗脱培养后进行平板划线分离,并采用光学显微镜观察,同样发现了杆状菌和球状菌,且这两种菌的革兰氏染色结果均为阴性.

3 结论

(1)陶粒滤料曝气生物滤池对邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯具有较好的去除效果,其去除率随着温度的升高和空床接触时间的增加而增大.当温度为 25℃、EBCT 为 8 h、进水 DEHP 浓度控制在 $(2.0 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,DEHP 的出水浓度为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达到 90.3%.

(2)曝气生物滤池对 DEHP 的去除遵循一级反应动力学,25℃时其动力学模型可表示为 $\ln(S/S_0) = -(0.0123h/Q^{0.497})$.

(3)陶粒滤料曝气生物滤池对邻苯二甲酸二

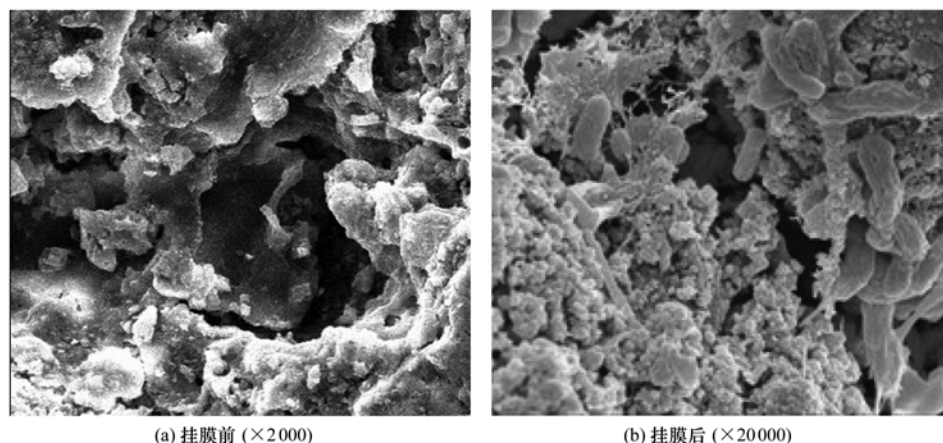


图 8 陶粒表面电镜扫描照片

Fig. 8 Scan electron micrograph of the surface of ceramsite

(2-乙基己基)酯的降解产物主要有邻苯二甲酸单2-乙基己基酯、邻苯二甲酸丁基酯2-乙基己基酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二甲酯以及邻苯二甲酸等5种。

(4)邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯在曝气生物滤池内的生物降解途径可能为:邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的较长烷基侧链先断裂为较短的直链,而后断裂一个酯键形成单酯,接着再断裂另一酯键形成邻苯二甲酸,最终分解成二氧化碳和水。

参考文献:

- [1] Gray L E Jr, Ostby J, Furr J, *et al.* Perinatal exposure to the phthalates DEHP, BBP, and DNP, but not DEP, DMP, or DOTP, alters sexual differentiation of the male rat [J]. *Toxicology Science*, 2000, **58**(2): 350-365.
- [2] Joel A, Ticker T, Guidotti T, *et al.* Health risks posed by use of di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) in PVC medical devices: a critical review [J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 2001, **39**(1): 100-111.
- [3] Higuchi T T, Palmer L, Gray L E Jr, *et al.* Effects of dibutyl phthalate in male rabbits following in Utero, adolescent, or postpubertal exposure [J]. *Toxicology Science*, 2003, **72**(2): 301-313.
- [4] 王小逸, 林兴桃, 客慧明, 等. 邻苯二甲酸酯类环境污染物健康危害研究新进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2007, **24**(9): 736-738.
- [5] Liang D W, Zhang T, Fang H H P, *et al.* Phthalates biodegradation in the environment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **80**(2): 183-198.
- [6] Högberg J, Hanberg A, Berglund M, *et al.* Phthalate diesters and their metabolites in human breast milk, blood or serum, and urine as biomarkers of exposure in vulnerable populations [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2008, **116**(3): 334-339.
- [7] 骆祝华, 黄翔玲, 叶德赞. 环境内分泌干扰物——邻苯二甲酸酯的生物降解研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2008, **14**(6): 890-897.
- [8] Zeng F, Wen J X, Cui K Y, *et al.* Seasonal distribution of phthalate esters in surface water of the urban lakes in the subtropical city, Guangzhou, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 719-725.
- [9] Fawell J K, Sheahan D, James H A, *et al.* Oestrogens and oestrogenic activity in raw and treated water in severn trent water [J]. *Water Research*, 2001, **35**(5): 1240-1244.
- [10] 邵晓玲, 马军, 文刚. 松花江流域某自来水厂中内分泌干扰物的调查 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2723-2728.
- [11] 李若愚, 徐斌, 高乃云, 等. 我国饮用水中内分泌干扰物的去除研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(20): 1-4.
- [12] Petersen J H, Breindahl T. Plasticizers in total diet samples, baby food and infant formulae [J]. *Food Additives and Contaminants*, 2000, **17**(2): 133-141.
- [13] Bauer M J, Herrmann R. Estimation of the environmental contamination by phthalic acid esters leaching from household wastes [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **208**(1-2): 49-57.
- [14] Paxéus N. Organic compounds in municipal landfill leachates [J]. *Water Science & Technology*, 2000, **42**(7): 323-332.
- [15] Liu H, Liang Y, Zhang D, *et al.* Impact of MSW landfill on the environmental contamination of phthalate esters [J]. *Waste Management*, 2010, **30**(8-9): 1569-1576.
- [16] 周文敏. 环境优先污染物 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 11-13.
- [17] Chatterjee S, Dutta T K. Metabolism of butyl benzyl phthalate by *Gordonia* sp. strain MTCC 4818 [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2003, **309**(1): 36-43.
- [18] Zeng F, Cui K Y, Fu J M, *et al.* Biodegradability of di (2-ethylhexyl) phthalate by *Pseudomonas fluorescens* FS1 [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **140**(1-4): 297-305.
- [19] Xu X R, Li H B, Gu J D. Biodegradation of an endocrine-disrupting chemical di-*n*-butyl phthalate ester by *Pseudomonas fluorescens* B-1 [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2005, **55**(1): 9-15.

- [20] 金德才, 梁任星, 王洋洋, 等. 一株 DBP 高效降解菌的筛选及其降解特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, **41**(1): 8-14.
- [21] 曹相生, 任书魁, 孟雪征. 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的微生物降解规律[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(3): 71-73.
- [22] 曾锋, 傅家谟, 盛国英, 等. 不同菌源的微生物对邻苯二甲酸二乙酯生物降解性的比较[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 62-65.
- [23] 夏凤毅, 郑平, 周琪, 等. 邻苯二甲酸酯的摇瓶生物降解规律研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(3): 379-384.
- [24] Chang B V, Yang C M, Cheng C H, *et al.* Biodegradation of phthalate esters by two bacteria strains[J]. Chemosphere, 2004, **55**(4): 533-538.
- [25] 马军, 邱立平. 曝气生物滤池及其研究进展[J]. 环境工程, 2002, **20**(3): 7-11.
- [26] Wang X J, Chen S L, Wang X Y, *et al.* Biological aerated filter treated textile washing wastewater for reuse after ozonation pretreatment[J]. Water Science and Technology, 2008, **58**(4): 919-923.
- [27] 曹相生, 吴春光, 孟雪征. 曝气生物滤池去除污水中邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的效能[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(2): 271-274.
- [28] 顾夏声. 废水生物处理数学模式[M]. (第二版) 北京: 清华大学出版社, 1993. 147-152.
- [29] 贾宁, 许恒智, 胡亚丽, 等. 固相萃取-气相色谱法测定北京市水样中的邻苯二甲酸酯[J]. 分析试验室, 2005, **24**(11): 18-21.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2012 年 12 月 7 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 11 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人