

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)
海州湾滩涂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, 亢学奎, 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)	

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

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以 5 种药品及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 包括氯贝酸、酮洛芬、萘普生、双氯芬酸和布洛芬为目标物, 初步研究了它们在上海某生活污水处理厂不同污水处理单元中的赋存特征和去除特性, 探讨了污水处理厂受纳河流中 5 种 PPCPs 的分布情况, 并对其在受纳水体中的生态风险进行了初步评估。结果表明, 5 种 PPCPs 在污水处理厂进水中均被检出, 表明生活污水是污水处理厂中 PPCPs 的来源之一。5 种 PPCPs 在整个污水处理工艺中不能全部去除, 微生物转化/降解是主要降解机制。受纳污水河流中 5 种 PPCPs 的分布特征与污水处理厂出水中的相似, 且排污口下游水体中目标物浓度普遍高于上游, 反映出污水处理厂排放可能是其受纳水体中 PPCPs 的主要来源之一。初步风险评估结果表明, 受纳水体中双氯芬酸存在高生态风险, 而酮洛芬、萘普生、氯贝酸和布洛芬的生态风险相对较低。

关键词: 药品及个人护理用品; 污水处理厂; 受纳水体; 去除特性; 风险评价

中图分类号: X820.4; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0927-06

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, CHEN Ling

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Five PPCPs, including clofibric acid (CA), diclofenac (DFC), ibuprofen (IBP), ketoprofen (KEP), and naproxen (NPX) were selected as target compounds to investigate their occurrence and removal efficiency in a wastewater treatment plant (WWTP) of Shanghai. Furthermore, their distribution and potential toxicological risk in the WWTP receiving river water were investigated. The results showed that all targets were detected in WWTP influent, suggesting that domestic sewage discharge is an important source of PPCPs to the WWTP. Lower removal efficiency of these PPCPs was found in the WWTP and the main mechanism of elimination was biodegradation. The pattern of five selected PPCPs in the river was similar to that in WWTP effluent, indicating that WWTP effluent was a main source of PPCPs to the receiving water. Risk assessment showed that diclofenac posed a high risk, while ketoprofen, naproxen, clofibric acid and ibuprofen showed low risks to biota in the receiving river.

Key words: pharmaceuticals and personal care products (PPCPs); wastewater treatment plant (WWTP); receiving water; removal; risk assessment

环境中微量药品及个人护理用品 (pharmaceuticals and personal care products, PPCPs) 对人类健康和生态环境安全存在潜在威胁, 已引起全球普遍关注。水环境中药物活性组分主要来源于城市生活污水、动物养殖场废水、医院污水、制药厂废水等。如果这些污水及废水不经有效处理而直接排出, 会加剧水环境的污染, 导致一系列水质安全问题。近年来, 污水处理厂作为环境中 PPCPs 的排放点源而受到广泛关注, 其在污水处理厂中的行为特征和去除机制已成为国外研究的热点^[1,2]。前期研究报道了美国、日本、加拿大和欧洲等国的城市污水厂出水中存在微量的药物^[3]。在我国, 有学者已初步开展了一些针对抗生素类药物去除工艺的研究, 但对非处方药的关注较少^[4], 而且这类药物在

污水处理厂处理过程中的去除效果、去除机制及其环境归趋等问题还不是很清楚。

我国是生产和消费药物的大国, 调查药物在城市污水处理厂中的分布对于评估水环境风险及污水回用安全性具有重大意义。为此, 本研究选取 5 种酸性 PPCPs 组分 (1 种脂肪调节剂氯贝酸和 4 种非甾体类抗炎药布洛芬、酮洛芬、萘普生和双氯芬酸, 化学结构详见图 1) 为目标物, 研究某典型城市污水处理厂不同工艺单元中这些物质的赋存特征及

收稿日期: 2012-05-19; 修订日期: 2012-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901251)

作者简介: 温智皓 (1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向环境新兴污染物分析及生态风险评价, E-mail: wenzhihao. happy@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xzmeng@tongji.edu.cn

其在不同介质间的分配规律,探讨各工艺单元对 5 种 PPCPs 的去除贡献,初步评价受纳河流中 PPCPs 的生态风险.

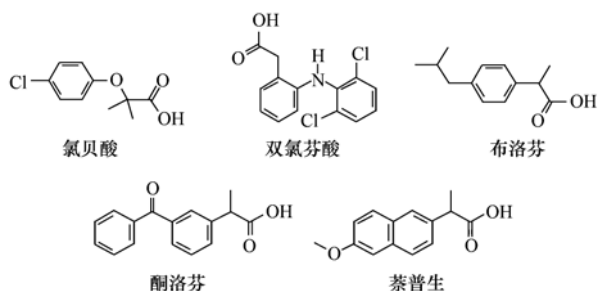


图 1 5 种目标 PPCPs 的化学结构式

Fig. 1 Chemical structures of the five pharmaceuticals

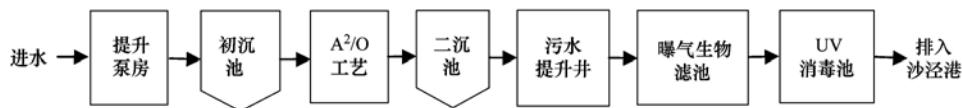


图 2 污水处理厂工艺流程示意

Fig. 2 Scheme of the municipal wastewater treatment plant

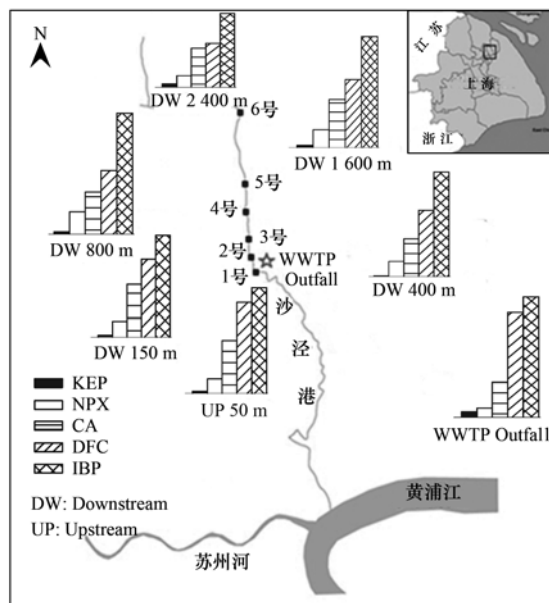


图 3 沙泾港河段各采样点水体中 5 种 PPCPs 平均浓度

Fig. 3 Mean concentrations of five PPCPs in water at different sampling points of the Shajing River

物分解,所有水样均为瞬时水样.

1.2 样品前处理

水样采集后立即运回实验室,过 $0.7 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜 (Whatman, Maidstone, England), 过滤后水样置于 4°C 冰箱保存; 滤膜截留的悬浮颗粒物用铝箔纸包裹, 用冷冻干燥机干燥 $24 \sim 48 \text{ h}$ 后, 置于 -18°C 冰箱保存, 待后续分析.

1 材料与方法

1.1 采集点设置及样品采集

2010 年 12 月 ~ 2011 年 3 月, 分别在上海某城市污水厂及其出水受纳河流采集样品, 共 3 次. 污水处理厂各工艺单元进水和出水的采样点见图 2, 分别采集: ①污水处理厂进水; ②初沉池出水; ③ A^2/O 出水; ④二沉池出水; ⑤曝气生物滤池出水; ⑥UV 消毒出水. 受纳河流水样分别设置在污水处理厂排污口上游 50 m , 排污口下游分别设置 5 个采样点 (150 、 400 、 800 、 1600 和 2400 m), 详见图 3. 用棕色瓶盛装水样以避免光解, 水样采集后立即加入 10% 的稀硫酸调节 $\text{pH} < 4$ 以避免有机物被微生

1.3 样品中 PPCPs 富集

水样: 取 500 mL 水样, 用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 调水样 pH 至 3, 并加入 250 ng 回收率指示物后上样, 控制流速 $5 \sim 10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 随后, 用 3 mL 含 5% 甲醇的水溶液洗脱杂质并弃去. 小柱抽真空 15 min 后, 再用 3 mL 的丙酮洗脱目标物, 收集洗脱液并在柔和氮气下吹干, 最后用甲醇溶解定容至 0.5 mL , 于 4°C 冰箱保存, 待仪器分析.

颗粒物样品: 取冷冻干燥后的悬浮颗粒物 (含滤膜), 加入 25 mL 甲醇和 15 mL 丙酮室温下超声萃取 (20 min), 取上清液并利用旋转蒸发器旋蒸浓缩至约 1 mL , 用去离子水稀释定容至 100 mL , 然后用固相萃取来净化样品, 步骤同上.

1.4 仪器分析

采用高效液相色谱-串联质谱 (HPLC/MS/MS API 4000, Thermo Fisher Scientific, San Jose, CA, USA) 分析样品中 5 种 PPCPs 组分. 色谱条件如下: Agilent Eclipse XDB-C18 反相柱 ($150 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, $\text{id}, 5 \mu\text{m}$); 流动相: $75\% \text{ A 相}$ (甲醇) 和 $25\% \text{ B 相}$ (含 0.1% 乙酸的水溶液), 流速: $350 \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$; 进样体积: $10 \mu\text{L}$; 质谱离子源: ESI 源, 采用外标法定量.

每次测样均对标准曲线进行校正, 当标准曲线中标样的回收率小于 80% 时, 要重新配制标准曲线溶液. 水样中氯贝酸的检测限 (LOD) 为 $2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,

其他 4 种目标药物的检测限为 $5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。颗粒物样品中,目标药物的检测限(以干重计)为 $0.2 \sim 20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。污泥样品中,以干重计氯贝酸的检测限为 $2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,其他 4 种目标药物的检测限为 $5 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。样品中未检出的目标物,浓度以 0 计算;低于检测限以 $1/2 \text{ LOD}$ 计算。

1.5 质量保证与质量控制

5 种目标药物标准品:布洛芬 (IBP, 纯度 > 99%)、萘普生 (NPX, 纯度 > 99%)、酮洛芬 (KEP, 纯度 > 99%)、双氯芬酸 (DFC, 纯度 > 97%)、氯贝酸 (CA, 纯度 > 99%),回收率指示物涕丙酸 (FEP, 纯度 > 98%) 和丙酮、甲醇等色谱纯试剂,均购买自 Sigma-aldrich 公司;其它试剂均购买自上海国药集团,实验室用水为 Millipore 去离子水。

每分析 12 个样品,同时分析方法空白、基质加标、基质加标平行样和样品平行样等样品以进行质量控制。每个分析样品中均要加入回收率指示物(涕丙酸)。水样中回收率指示物的回收率为 82.7% ~ 94.5%,5 种目标物的回收率为 96.7% ~ 104.6%。

2 结果与讨论

2.1 5 种 PPCPs 在污水不同相间的分配

如图 1 所示,5 种目标 PPCPs 化学结构中均含有羧基,具有一定的亲水性,这也决定了这些化合物易存在于水相。PPCPs 被吸附在颗粒物中的程度主要取决于颗粒物的粒径、有机碳含量以及目标 PPCPs 的固相-液相分配系数 K 。

$$K = c_{i, \text{颗粒物}} / c_{i, \text{溶解相}} \times 1000 \quad (1)$$

式中, $c_{i, \text{颗粒物}}$ 是颗粒物干重中每种物质的含量 ($\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$); $c_{i, \text{溶解相}}$ 是溶解相中每种物质的浓度 ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$); 分配系数 K 的单位是 $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

根据所测得的颗粒物和溶解相中目标污染物的浓度,由公式(1)得到污水处理厂进出水中 5 种 PPCPs 组分在颗粒物和溶解相中的分配系数 K 如下:双氯芬酸为 $124 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,酮洛芬为 $115 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,氯贝酸为 $34 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,布洛芬为 $21 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,萘普生为 $17 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。5 种酸性药物的 $\lg K$ 在 1.2 ~ 2.2 之间,表明目标药物主要分配在水相中,颗粒物的贡献只有 2% 左右。萘普生、布洛芬和氯贝酸的 $K < 50 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,其在颗粒物中的吸附量低于 2.5%,萘普生在颗粒物中吸附量的质量分数最低。双氯芬酸和酮洛芬的 $K > 100 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,其在颗粒物中的吸附量 > 5%,双氯芬酸 K 最大,可能是因为在低 pH 下其

质子化作用引起。5 种目标 PPCPs 的固相-液相分配系数普遍较低,这与其结构中存在的极性官能团密切相关^[5,6]。这表明污水中酸性药物的总量主要受水相浓度的影响,颗粒物中的浓度相对较低,其总浓度不会因颗粒物相的存在而有较大的波动。

2.2 污水处理厂不同处理单元中 5 种 PPCPs 的去除

污水处理厂进水中 5 种 PPCPs 的平均浓度在 $25 \sim 1380 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,各处理工艺出水中目标污染物的浓度分布详见图 4。布洛芬和双氯芬酸都是常见的消炎解热镇痛的处方药,在日常生活中用量较大,分析结果也发现:污水厂进水中布洛芬含量最高,平均浓度在 $1380 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$;双氯芬酸次之,平均浓度为 $320 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$;酮洛芬、氯贝酸和萘普生浓度相对较低,平均浓度分别为 25.3、81.4 和 $58.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

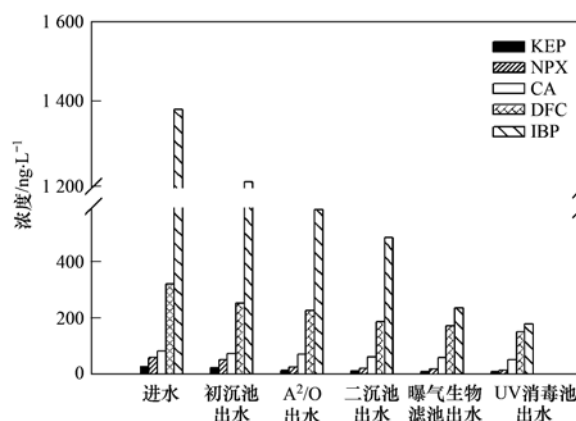


图 4 污水处理厂各工艺单元出水中 5 种 PPCPs 的浓度分布

Fig. 4 Concentrations of five PPCPs in effluent of each treatment unit

该污水处理工艺对 5 种 PPCPs 组分都有一定的去除效果,总去除率分别为:氯贝酸(37%),双氯芬酸(54%),酮洛芬(69%),萘普生(76%),布洛芬(87%),各处理单元对 5 种 PPCPs 去除率详见图 5。在沉砂池中,一部分 PPCPs 会吸附在较大颗粒物的表面,伴随颗粒物的沉降而去除,这是污水厂初级处理的主要去除机制之一,与化合物的固相-液相分配系数相关。双氯芬酸在沉砂池中的去除率超过 20%,这可能与其具有较高的 K 值有关,而其他 4 种酸性药物在该单元的去除率较低,原因可能是由于它们的酸性结构致使它们与水分子发生相互作用,而减弱了吸附到悬浮颗粒物上的几率。因此,污水厂初级沉淀处理不是酸性药物的主要去除途径。

沉砂池出水中的酸性药物随着污水及二沉池回流的部分污泥进入 A^2/O 工艺单元,酸性药物在生物处理过程中,可以作为微生物的碳源而被去除。

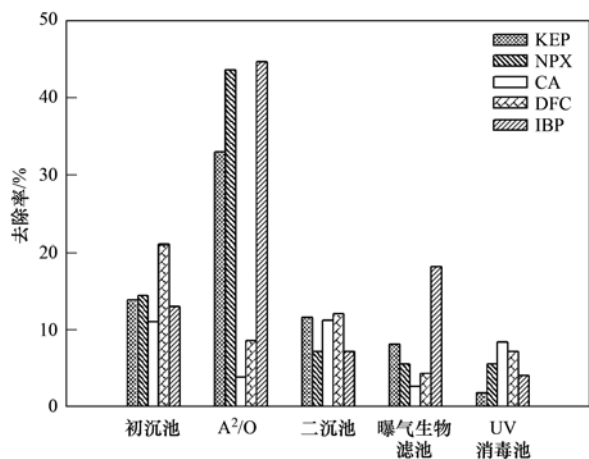


图5 污水处理厂各工艺段对5种PPCPs组分的去除率

Fig. 5 Removal of the five PPCPs during each treatment unit

萘普生、布洛芬和酮洛芬在A²/O工艺中都有较好的去除,44%的萘普生、45%的布洛芬、33%的酮洛芬在此工艺单元去除,分析认为主要有活性污泥的吸附及微生物降解作用,生物降解是它们的主要去除机制。双氯芬酸和氯贝酸的难生物降解特点可能是由于它们分子结构中含有Cl—基团的缘故。经过二沉池固液分离以后,部分被去除的化合物吸附到活性污泥上,经沉淀进入污泥浓缩池,其具体归宿还需要进一步研究。

在曝气生物滤池中,布洛芬的去除效果最好,去除率到达20%以上,而对氯贝酸的去除率不足5%。污水处理厂最后一个阶段是紫外消毒,有研究报道,根据有机物吸收光子的特征,紫外光可以有效地降解包括药物在内的有机污染物^[7-9]。但是,在本研究中,5种酸性药物的降解效果较差,可能是污水处理厂中消毒用的紫外灯的紫外剂量较低的缘故。另外,较短的水力停留时间和其它有机污染物的竞争作用也是影响目标药物降解效果差的原因。

目标酸性药物在污水处理厂去除效果的差异性,表明各种药物的去除效果不仅取决于各种药物本身的性质,还与不同的处理工艺以及各种工艺参数(如污泥停留时间、水力停留时间)有密切关系。因此,为了提高这些酸性药物(尤其是双氯芬酸和氯贝酸)的去除效果,进一步深度处理是非常有必要的。

3 河流中典型PPCPs的潜在风险评价

3.1 受纳水体中PPCPs浓度水平

沙泾港作为污水厂出水受纳水体,5种PPCPs在河水的浓度水平见图3。其中布洛芬浓度最高,平

均浓度58.2 ng·L⁻¹;双氯芬酸次之,平均浓度为42.6 ng·L⁻¹;氯贝酸的浓度为29.3 ng·L⁻¹;萘普生和酮洛芬浓度较低,依次为11.4 ng·L⁻¹和2.93 ng·L⁻¹。在排污口上游50 m处均检测到5种目标药物,可能是由污水处理厂出水中残留药物排放后经水流扩散所致;排污口处,5种目标药物浓度明显增加,且在所有采样点浓度最高;排污口下游药物浓度普遍比上游浓度高,表明污水处理厂出水是沙泾港河流中目标药物的主要来源。在所有河流样品中,布洛芬、双氯芬酸和氯贝酸检出率最高,酸性药物的分布规律与污水厂出水中的分布相似,这表明,在河流中5种酸性药物没有发生明显的降解。

前期研究在欧洲远离点源的地表水中发现了氯贝酸浓度达到10 ng·L⁻¹^[8],在加拿大大湖区域也发现较低浓度的氯贝酸和酮洛芬^[9],在英国地表水中布洛芬浓度达到5.0 μg·L⁻¹^[10],在我国的黄河、海河和辽河水体中也分别检测到萘普生、氯贝酸、双氯芬酸和布洛芬,其中萘普生的浓度为ND~40.7 ng·L⁻¹,氯贝酸和布洛芬的浓度分别为ND~717 ng·L⁻¹和ND~416 ng·L⁻¹^[11]。这表明,这类酸性药物因传统污水处理工艺去除效率不高而排放进入了环境水体,需要进一步关注其环境生态安全。

3.2 潜在风险分析

根据污水处理厂日平均排放污水量(6.0万m³·d⁻¹)和出水中目标PPCPs的浓度,经计算,该污水处理厂每日向沙泾港排放的5种目标PPCPs的负荷量,依次是布洛芬(10.7 g·d⁻¹),双氯芬酸(8.94 g·d⁻¹),氯贝酸(3.08 g·d⁻¹),萘普生(0.83 g·d⁻¹),酮洛芬(0.47 g·d⁻¹)。虽然这几种药物都不具有较强的持久性,但由于其被大量、频繁使用,致使其被源源不断地输入到环境受纳水体,因此这些药物通常被认为是“伪持久性污染物”。值得关注的是,这几种PPCPs组分主要分布在水相中,具有一定的生物有效性,可能对生物体带来潜在的风险^[12-14]。

对于河流中典型PPCPs的风险评估,本研究采用风险熵(risk quotient, RQ)为评价方法^[15,16]。RQ的计算方法为检测环境浓度(measured environmental concentration, MEC)与预测无效应浓度(predicted no effect concentration, PNEC)的比值。当RQ<0.1时,表明存在较低风险;当0.1<RQ<1.0时,表明存在中度风险,需要对相关环境进行观察;当RQ>1.0时,表明存在高度风险,需要采取

相应的风险消减措施. 各目标 PPCPs 的 PNEC 可通过文献[17~21]获得,根据风险评价中“最坏情况”原则,使用目标物的最大检出浓度计算出的 5 种 PPCPs 的 RQ 值如表 1 所示. 双氯芬酸的 RQ 为 1.03,存在高度风险; 酮洛芬、萘普生、氯贝酸和布洛芬的 RQ 值均小于 0.1,表明处于较低风险程度. 因此,5 种酸性药物对水环境存在潜在的风险,有必要通过改进城市污水处理工艺来降低药物残留带来的风险.

表 1 受纳污水河流中 5 种 PPCPs 组分的预测无效应浓度、最大检测环境浓度及其风险熵

Table 1 PNEC, maximum MEC and RQ of the five PPCPs in the wastewater receiving river

目标药物	预测无效应浓度 /ng·L ⁻¹	最大检测浓度 /ng·L ⁻¹	风险熵
酮洛芬	15 600	7.55	0.000 5
萘普生	20 000	13.7	0.000 7
氯贝酸	1 000	27.8	0.027 8
双氯芬酸	100	103.8	1.03
布洛芬	2 000	113.4	0.056 7

4 结论

(1)5 种 PPCPs 组分在污水处理厂进水中均被检出,且其浓度有明显差异,布洛芬含量最高,酮洛芬最低. 污水处理厂接纳废水主要是生活污水,表明生活污水排放是污水处理厂药物的主要来源.

(2)污水处理厂主要采用传统活性污泥法,对布洛芬的去除率高达 90%,氯贝酸去除率低于 40%. 进入污水厂的 PPCPs,除了少部分因吸附到颗粒物上而进入污泥外,微生物转化/降解在整个污水处理工艺中对酸性药物去除作用较为显著.

(3)污水处理的 A²/O 工艺对目标药物不能有效地去除,导致这些常用药物源源不断向沙泾港排放. 根据风险熵评价中“最坏情况”原则评价结果表明:双氯芬酸存在高度风险,氯贝酸、酮洛芬、萘普生和布洛芬对环境水体存在一定风险. 因此,有必要通过改进城市污水处理工艺来降低药物残留带来的风险.

参考文献:

[1] Ternes T A, Meisenheimer M, McDowell D, *et al.* Removal of pharmaceuticals during drinking water treatment [J]. Environmental Science and Technology, 2002, **36** (17): 3855-3863.

[2] Vieno N M, Härkki H, Tuhkanen T, *et al.* Occurrence of pharmaceuticals in river water and their elimination in a pilot-scale drinking water treatment plant [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41** (14): 5077-5084.

[3] Sui Q, Huang J, Deng S B, *et al.* Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and DEET in wastewater treatment plants of Beijing, China [J]. Water Research, 2010, **44** (2): 417-426.

[4] 乔铁军, 张锡辉, 欧慧婷. 饮用水中药品和个人护理用品的研究进展 [J]. 给水排水, 2010, **4** (36): 118-125.

[5] 周海东, 黄霞, 文湘华. 城市污水中有关新型微污染物 PPCPs 归趋研究的进展 [J]. 环境工程学报, 2007, **1** (12): 1-9.

[6] Ternes T A, Kreckel P, Mueuer J. Behaviour and occurrence of estrogens in municipal sewage treatment plants- II . Aerobic batch experiments with activated sludge [J]. Science of the Total Environment, 1999, **225** (1-2): 91-99.

[7] Carballa M, Omil F, Ternes T, *et al.* Fate of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) during anaerobic digestion of sewage sludge [J]. Water Research, 2007, **41** (10): 2139-2150.

[8] Buser H R, Poiger T, Müller M D. Occurrence and fate of the pharmaceutical drug diclofenac in surface waters: rapid photodegradation in a lake [J]. Environmental Science and Technology, 1998, **32** (22): 3449-3456.

[9] Metcalfe C D, Koenig B G, Bennie D T, *et al.* Occurrence of neutral and acidic drugs in the effluents of Canadian sewage treatment plants [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2003, **22** (12): 2872-2880.

[10] Madureira T V, Barreiro J C, Rocha M J, *et al.* Spatiotemporal distribution of pharmaceuticals in the Douro River estuary (Portugal) [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408** (22): 5513-5520.

[11] Wang L, Ying G G, Zhao J L, *et al.* Occurrence and risk assessment of acidic pharmaceuticals in the Yellow River, Hai River and Liao River of north China [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408** (16): 3139-3147.

[12] Quinn B, Gagné F, Blaise C. An investigation into the acute and chronic toxicity of eleven pharmaceuticals (and their solvents) found in wastewater effluent on the cnidarian, *Hydra attenuata* [J]. Science of the Total Environment, 2008, **389** (2-3): 306-314.

[13] Carlsson C, Johansson A K, Alvan G, *et al.* Are pharmaceuticals potent environmental pollutants?: Part I : Environmental risk assessments of selected active pharmaceutical ingredients [J]. Science of the Total Environment, 2006, **364** (1-3): 67-87.

[14] Carlsson C, Johansson A K, Alvan G, *et al.* Are pharmaceuticals potent environmental pollutants?: Part II : Environmental risk assessments of selected pharmaceutical excipients [J]. Science of the Total Environment, 2006, **364** (1-3): 88-95.

[15] Küster A, Bachmann J, Brandt U, *et al.* Regulatory demands on data quality for the environmental risk assessment of pharmaceuticals [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2009, **55** (3): 276-280.

- [16] Straub J O. Environmental risk assessment for new human pharmaceuticals in the European Union according to the draft guideline/discussion paper of January 2001 [J]. *Toxicology Letters*, 2002, **131**(1-2): 137-143.
- [17] Lee Y J, Lee S E, Lee D S, *et al.* Risk assessment of human antibiotics in Korean aquatic environment [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, **26**(2): 216-221.
- [18] Van Wezel A P, Jager T. Comparison of two screening level risk assessment approaches for six disinfectants and pharmaceuticals [J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(10): 1113-1128.
- [19] Santos L H M L M, Araújo A N, Fachini A, *et al.* Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **175**(1-3): 45-95.
- [20] Cunningham V L, Binks S P, Olson M J. Human health risk assessment from the presence of human pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2009, **53**(1): 39-45.
- [21] Ågerstrand M, Rudén C. Evaluation of the accuracy and consistency of the Swedish Environmental Classification and Information System for pharmaceuticals [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(11): 2327-2339.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2012 年 12 月 7 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2011 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示 2011 年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术、安全科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分 81.2,排名第一,总被引频次 5 359,影响因子 0.956.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评价,计算出每个期刊的综合评价总分. 这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较. 根据发布的统计结果,2011 年度《环境科学》综合评价总分 81.2,在被统计的 1998 种核心期刊中名列第 41 位,在被统计的 37 种环境科学技术、安全科学技术类期刊中名列第一.

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 Zhuang-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