

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283)	
《环境科学》征稿简则 (1332)	
信息 (1350, 1509, 1582, 1644)	
专辑征稿通知 (1523)	

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋

周益奇, 刘云霞

(中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 选取北京市3个污水处理厂为研究对象, 采集进厂水、二沉出水 and 出厂污泥并分析其中的邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、邻苯二甲酸二正辛酯(DOP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)浓度。进厂水水相中DMP、DEP、DBP和DEHP的平均浓度分别为 0.98 、 0.21×10^2 、 0.27×10^2 和 $0.15 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 而BBP和DOP均未检出。脱水污泥中检出了DBP和DEHP, 平均质量浓度(以干重计)分别为 $0.37 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.31 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。DMP、DEP、DBP和DEHP的去除效率分别为 68.3% ~ 82.6% 、 94.5% ~ 98.2% 、 74.7% ~ 95.0% 和 90.5% ~ 90.7% , 主要的去除机制可能是生物降解和向空气挥发。而二沉池出水和脱水污泥中高浓度的DBP和DEHP值得关注。

关键词: 污水; 邻苯二甲酸酯; 污染水平; 迁移转化; 归趋

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1357-06

Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China

ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia

(State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Three waste water treatment plants (WWTPs) in Beijing were selected as cases to study the occurrence and fate of phthalates. Contents of di-methyl phthalate (DMP), di-ethyl phthalate (DEP), di-butyl phthalate (DBP), butyl-benzyl phthalate (BBP), di-octyl phthalate (DOP) and di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in influent, effluent of secondary setting tank and excess sludge in those WWTPs were determined. The mean concentration of DMP, DEP, DBP and DEHP are 0.98 , 0.21×10^2 , 0.27×10^2 and $0.15 \times 10^2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively. BBP and DOP were not found in those WWTPs. Only DBP and DEHP were detected in dewatered sludge with mean concentration of $0.37 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.31 \times 10^3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW. The removal efficiency of DMP, DEP, DBP and DEHP varied from 68.3% - 82.6% , 94.5% - 98.2% , 74.7% - 95.0% and 90.5% - 90.7% respectively. The main removal mechanism should be biodegradation and volatilization to the air. Higher concentration of DBP and DEHP in effluent and dewatered sludge should be concerned.

Key words: wastewater; phthalates; contamination level; transformation; fate

邻苯二甲酸酯(phthalate acid esters, PAEs)是世界上生产量大、应用面广的人工合成有机化合物之一,是一类全球性的环境污染物,广泛存在于空气、水体、土壤及生物体内。该类化合物与我们的日常生活密切相关,可通过饮水、进食、皮肤接触(化妆品)和呼吸进入人体^[1]。PAEs主要用作塑料的增塑剂^[2],也可用作农药载体、驱虫剂和化妆品等的原料。目前,由PAEs引起的环境污染已经引起全球关注,美国国家环境保护署将邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、邻苯二甲酸二正辛酯(DOP)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)列为优先控制的有毒污染物^[3],我国也将邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)和邻苯二甲酸二正辛酯(DOP)确定为环

境优先控制污染物^[4]。研究发现,PAEs是一类内分泌干扰物,具有类雌激素和类甲状腺素效应^[5-7]。

因为塑料制品的广泛应用,PAEs的环境污染引起了越来越多的关注。PAEs在不同环境介质中的污染水平、环境化学行为被广泛报道^[8-10]。PAEs在饮用水源水和自来水中也被发现^[5,11],常规饮用水处理工艺很难将其去除^[5]。城市污水处理厂作为有机污染物的重要的汇,其运行效率将对环境水体水质产生重要影响,进而影响动植物及人类的健康。

收稿日期: 2012-06-18; 修订日期: 2012-08-27

基金项目: 国家高科技研究发展计划(863)项目(2002AA601120); 国家自然科学基金项目(50378089); 中国科学院仪器设备功能开发技术创新项目(yg2010051); 首都科技条件平台中国科学院研发实验服务基地测试基金项目

作者简介: 周益奇(1975~),男,博士,高级工程师,主要研究方向为持久性有机污染物检测方法、迁移转化及归趋, E-mail: yqzhou@rcees.ac.cn

本研究采用同时蒸馏萃取方法对污水厂进水、二沉池出水及脱水污泥中的 6 种 PAEs 进行检测,探讨北京市主要污水处理厂中 PAEs 的污染水平和归趋。

1 材料与方法

1.1 采样

2006 年 9 月,分别对北京市 3 个污水处理厂(A、B、C)进厂水,二沉池出水和脱水污泥进行了采集。采样时间点为 09:00、11:00、13:00、15:00 和 17:00,不同时间点采集的样品进行混合得到混合样品。A 厂采用倒置 A²/O 工艺,工艺水力停留时间(HRT)为 8~10 h,污泥停留时间(SRT)8~12 d,收集的污水中 20% 为工业废水,80% 为生活污水;B 厂采用 A/O 工艺,HRT 为 6~8 h,SRT 6~8 d,收集污水均为生活污水;C 厂采用倒置 A²/O 工艺,HRT 为 8~10 h,SRT 8~12 d,收集污水均为生活污水。

水样用洗净的玻璃瓶盛装,采集后立即加入 5% 甲醇,4℃ 保存,提取前恢复到室温。脱水泥样用铝制饭盒盛装,4℃ 保存。到实验室后,将泥样 -80℃ 速冻后 -60℃ 冷冻干燥 24 h。

1.2 仪器与试剂

GC 6890-MSD 5973 (美国 Agilent 公司);同时蒸馏萃取装置(北京玻璃厂);无水硫酸钠(Na₂SO₄),优级纯(北京刘李店化工厂),在 400℃ 焙烧 2 h 备用;盐酸(HCl)、氯化钠(NaCl)和氢氧化钠(NaOH),优级纯(北京化学品公司);二氯甲烷,残留农药级(Fisher 公司);甲醇,色谱纯(Fisher 公司);0.8~2.0 μm 孔径玻璃纤维膜(Millipore, Bedford, MA, USA);超纯水(18.0 MΩ)。

邻苯二甲酸酯类(纯度≥97%),包括邻苯二甲酸二甲酯(di-methyl phthalate, DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(di-ethyl phthalate, DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(di-butyl phthalate, DBP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(butyl-benzyl phthalate, BBP)、邻苯二甲酸二(2-己基己基)酯[di-(2-ethylhexyl) phthalate, DEHP]和邻苯二甲酸二正辛酯(di-octyl phthalate, DOP)均购自 Supelco。

1.3 气相色谱-质谱条件:

气相色谱条件:色谱柱:HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);进样口温度:250℃,载气:He;载气流量:恒流 1 mL·min⁻¹,进样量:1 μL,溶剂延迟:6 min,升温程序:100℃ 起以 25℃·min⁻¹ 速度升到

180℃,保持 15 min,然后以 20℃·min⁻¹ 速度升到 300℃,保持 5 min。

质谱条件:EI 离子源;离子源温度:230℃;电子能量:70 eV;电子倍增器电压:1 529 V;质量范围:50~500 u。

6 种邻苯二甲酸酯的质谱定性定量离子分别为 DMP 163、194(163);DEP 149、177(149);DBP 149、223(149);BBP 149、206(149);DEHP 149、167(149);DOP 149、279(149)。

1.4 样品预处理

水样:取 500 mL 水样,放入 1 000 mL 圆底烧瓶中,调节 pH 为 2.0,加入 2.5 g NaCl,连接到同时蒸馏萃取装置一端,控制温度在 100~110℃ 之间保持沸腾。另取 30 mL 二氯甲烷置于 250 mL 圆底烧瓶中,接在同时蒸馏萃取装置的另一端,以 60℃ 恒温加热烧瓶,连续萃取 2 h。二氯甲烷萃取液用 2 g 无水硫酸钠脱水,微弱氮气吹到 1 mL,定容,备分析用。为评价目标物在水相和悬浮颗粒相的分配,采用 0.8~2.0 μm 孔径玻璃纤维膜过滤水样,滤液中目标物浓度为水相浓度,未过滤样品测得的浓度为总浓度,两者的差值为悬浮颗粒上的浓度。

污泥样:取 10 g 干泥,放入 500 mL 圆底烧瓶中,加水定容到 100 mL,调节 pH 为 2.0,加入 2.5 g NaCl,连接到同时蒸馏萃取装置一端,控制温度在 100~110℃ 之间保持沸腾。另取 30 mL 二氯甲烷置于 250 mL 圆底烧瓶中,后续操作与水样相同。

1.5 分析步骤

(1)定性分析 用标准样品进样分析,通过特征碎片确定。

(2)定量分析 采用外标法定量,定量分析时采用选择离子模式采集谱图,其中邻苯二甲酸二甲酯的定量碎片为 163,其他 5 种目标物的定量碎片为 149,标准溶液质量浓度为 0~10 mg·L⁻¹。

1.6 质量控制

通过过程空白样品评价样品在运输中的污染情况,用空白加标回收和样品加标回收来评价方法回收率,用平行加标样来评价方法的精密度。

1.7 计算公式

$$\text{去除效率} = (c_{\text{进水}} - c_{\text{出水}}) / c_{\text{进水}} \times 100\%$$

$$\text{削减量} = (c_{\text{进水}} \times Q_{\text{进水}}) - (c_{\text{出水}} \times Q_{\text{出水}}) - W_{\text{污泥}}$$

2 结果与讨论

2.1 方法的准确度、精密度及检测线

用 0~10 mg·L⁻¹ 6 种 PAEs 的标准溶液所得标

准曲线相关系数 ≥ 0.99 ；水样中 6 种 PAEs 的方法检出限在 $10 \sim 40 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ，空白加标回收率 $\geq 98\%$ ，样品加标回收率 $\geq 95\%$ ，3 次重复回收率相对标准偏差 $< 5.0\%$ ；泥样中 6 种 PAEs 的方法检测限为 $0.5 \sim 2.0 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 干重，空白加标回收率 $\geq 96\%$ ，样品加标回收率 $\geq 90\%$ ，3 次重复回收率相对标准偏差 $< 5.0\%$ 。

用去离子水和无水硫酸钠作为水样和泥样的过程空白跟踪采样污染情况，过程空白和试剂空白一致，采样过程未引入污染。

2.2 污水厂中 PAEs 污染水平

由表 1 可以看出，在污水厂进水水相中 DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的平均浓度分别为 0.98 、 0.21×10^2 、 0.27×10^2 和 $0.15 \times 10^2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，而 BBP 和 DOP 的浓度低于检出限。3 个污水处理厂进水水相中检出的 4 种 PAEs 总浓度分别为 0.83×10^2 、 0.54×10^2 、 $0.57 \times 10^2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其中 A 污水处理厂浓度最高，B 和 C 污水厂浓度相当，可能是因为 A 污水处理厂收集的部分污水为化工厂废水，该化工厂的主要产品为有机硅产品，PAEs 是其重要的原料之一。在进水中悬浮颗粒上 DEP、DBP 和 DEHP 的平均浓度分别是 0.17×10^2 、 0.60×10^3 和 $0.16 \times 10^3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。考虑水相和悬浮颗粒相，DEHP 的浓度是最高的，这是因为 DEHP 的使用量最大，例如，2005 年，我国增塑剂需求总量约为 122 万 t，其中邻苯二甲酸酯占增塑剂总产量的 70%^[12]，所以进入环境的量也大。陈明等^[13]在北京的工业废水和城市污水中检出了 DBP、DEHP、DEP、BBP 和 DCHP，浓度范围在 $0.20 \times 10^3 \sim 0.84 \times 10^3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其中主要成分为 DBP 和 DEHP。林兴桃等^[14]对北京市 4 个污水处理厂进水和出水中邻苯二甲酸酯进行了分析，检测出了 DBP、DEHP、DEP、BBP 和 DCHP 这 5 种邻苯二甲酸酯，浓度在 $0.72 \sim 59.17 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。本研究结果与之前的相关研究结果相似。选取的 3 个污水厂二沉池出水中检出了 DMP、DEP、DBP 和

DEHP，其中水相中平均浓度分别为 0.27 、 0.69 、 0.57×10 和 $2.50 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，悬浮颗粒相只检出了 DEP、DBP 和 DEHP，平均浓度分别为 0.16×10 、 0.83×10 和 $1.30 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

林兴桃等^[14]在北京市 4 个污水处理厂二沉池出水中检测出的 6 种 PAEs 总浓度在 $0.72 \sim 4.20 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，如果考虑悬浮颗粒，本研究检测的污水厂出厂水中 6 种 PAEs 总浓度高于林兴桃等^[14]的研究结果。因为出厂水中悬浮颗粒的量非常少（小于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ），所以悬浮颗粒上 6 种 PAEs 的浓度（以干重计，下同）达到了几千 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，其进入环境水体将沉积到底泥中，非常值得关注。

在研究选择的 3 个污水处理厂中，脱水污泥中检测出了 DBP 和 DEHP 两种邻苯二甲酸酯化合物，平均浓度分别为 0.37×10^3 和 $0.31 \times 10^3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Cai 等^[15]研究了内地和香港的 11 个污水厂污泥中的 43 种半挥发性有机物，其中检测出 6 种 PAEs 化合物，总浓度在 $10 \sim 114 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 范围内，北京的污水处理厂污泥中 PAEs 总浓度最高。该研究的采样时间段为 1998 ~ 1999 年，与本研究采样时间 2006 年相差了 7 a 左右，本研究测定结果远高于 Cai 等^[15]的测定结果，在同一污水处理厂的测定结果，本研究也比 Cai 等^[15]的结果高出 1 倍左右。然而 Martinović 等^[16]发现不同的时间污水厂中污染物浓度是不一样的，Cai 等^[15]采集的是瞬间样，本研究采集的是混合样，两种采样方式本身就存在差异，所以测定浓度的差异也可能与不同的采样方式有关，还需要更为系统的研究来确认。郑晓英等^[17]检测出北京城市干污泥中 6 种 PAEs 的总质量分数在 $(2.08 \sim 5.82) \times 10^{-5}$ ；其中 DEHP 约占总量的 90% 以上。本研究的结果与之相当。在 3 个污水处理厂中，A、B 和 C 污水处理厂中 DEHP 质量浓度分别为 0.22×10^3 、 0.34×10^3 和 $0.38 \times 10^3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，A 污水处理厂污泥中 DEHP 浓度明显要低，可能是因为 A 厂的污泥经过了厌氧消化处理^[17]。

表 1 污水厂中 6 种邻苯二甲酸酯的污染水平¹⁾ (平均值)

Table 1 Contamination level of six phthalates in WWTPs (mean)

项目	水相/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		悬浮颗粒/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		排放污泥/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
	进厂水	二沉池出水	进厂水	二沉池出水	
DMP	0.98	0.27	nd	nd	nd
DEP	0.21×10^2	0.69	0.17×10^2	0.16×10	nd
DBP	0.27×10^2	0.57×10	0.60×10^3	0.83×10	0.37×10^3
BBP	nd	nd	nd	nd	nd
DEHP	0.15×10^2	0.25×10	0.16×10^3	0.13×10	0.31×10^3
DOP	nd	nd	nd	nd	nd

1) nd 表示未检出

2.3 PAEs 的吸附行为和去除效率

从图 1 可以看到,在选取的 3 个污水处理厂进水中,检测出的 DMP、DEP、DBP 和 DEHP 在水相中的比例呈逐渐下降的趋势. 在 A 污水处理厂, DMP、DEP、DBP 和 DEHP 在悬浮颗粒相上的比例分别为 0%、44%、49% 和 88%; 在 B 污水处理厂, DMP、DEP、DBP 和 DEHP 在悬浮颗粒相上的比例分别为 0%、45%、83% 和 88%; 在 C 污水处理厂, DMP、DEP、DBP 和 DEHP 在悬浮颗粒相上的比例分别为 0%、43%、69% 和 95%. 化合物在悬浮颗粒上的比例与其辛醇水分配系数正相关. Means 等^[19]建立了有机物固液分配常数(K_d)与辛醇/水分配系数(K_{ow})之间的函数,该模型未考虑悬浮颗粒的表面特征和有机污染物在悬浮颗粒上的转化. 本研究选取的 3 个污水处理厂进水中 4 种 PAEs 在固液两相的分配系数与化合物的辛醇/水分配系数正相关,表明其主要的作用方式是疏水性分配,这与 PAEs 的不易水解的酯类结构有关. 同时也看到,对分子量较大的 DBP 和 DEHP,在 3 个污水处理厂进水中其固液分配系数有比较大的差异,这可能与 3

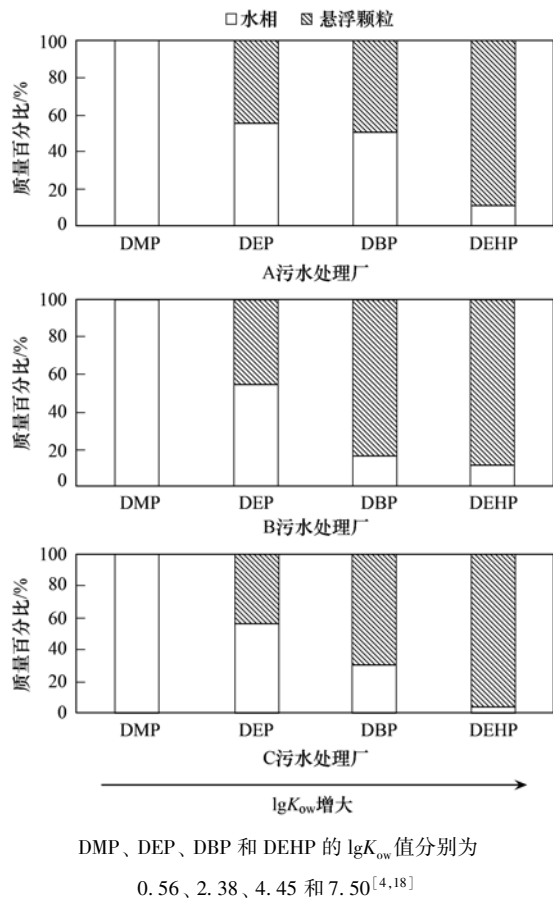


图 1 污水厂进水中六种邻苯二甲酸酯的吸附比
Fig. 1 Adsorption ratio of PAEs in influent of WWTPs

个污水处理厂进水中悬浮颗粒的表面结构和有机碳含量有关.

整体来看(表 2),在 3 个污水处理厂中,DMP 和 DBP 的去除效率略低,DEP 和 DEHP 去除效率略高. 在 A 污水处理厂,DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的去除效率分别为 68.3%、95.4%、72.7% 和 90.5%; 在 B 污水处理厂,DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的去除效率分别为 82.6%、95.4%、83.4% 和 90.5%; 在 C 污水处理厂,DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的去除效率分别为 68.6%、90.8%、94.9% 和 90.7%. 邻苯二甲酸酯类化合物在污水处理厂的去除效率取决于污水处理厂的处理工艺和运行参数等^[20,21]. 林兴桃等^[14]研究了北京的 4 个污水处理厂中 PAEs 的去除情况,DEP 和 DBP 的去除率为 100%,DEHP 的去除效率在 21%~91% 之间. 与本研究结果的差异一方面可能源于不同的采样方式、不同的采样时间,另一方面林兴桃等^[14]只考虑水中的浓度.

表 2 污水厂中 6 种邻苯二甲酸酯的去除效率/%			
Table 2 Removal efficiencies of six phthalates in WWTPs/%			
项目	A 污水处理厂	B 污水处理厂	C 污水处理厂
DMP	68.3	82.6	68.6
DEP	95.4	95.4	90.8
DBP	72.7	83.4	94.9
BBP	—	—	—
DOP	—	—	—
DEHP	90.5	90.5	90.7

2.4 污水处理厂中 PAEs 的质量平衡

从图 2 来看,A 污水处理厂 6 种 PAEs 的进水负荷为 $264\ 670\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ (100%); 通过污泥排放为 $14\ 592\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 5%; 出水排放为 $36\ 070\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 14%; 削减量为 $214\ 008\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 81%. B 污水处理厂 6 种 PAEs 的进水负荷为 $16\ 927\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ (100%); 通过污泥排放为 $433\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 2%; 出水排放为 $1\ 964\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 12%; 削减量为 $14\ 530\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 86%. C 污水处理厂 6 种 PAEs 的进水负荷为 $71\ 136\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ (100%); 通过污泥排放为 $1\ 621\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 2%; 出水排放为 $7\ 934\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 11%; 削减量为 $62\ 581\ \text{g}\cdot\text{d}^{-1}$, 占总量的 87%. 污水处理厂对 PAEs 的削减量大于 80%, 能比较有效的去除 PAEs 负荷. 然而仍然有 10%~20% 的 PAEs 负荷通过出水和污泥排放进入环境,尤其在污泥和出水悬浮颗粒上高浓度的 PAEs 的存在非常值得关注. 曾锋等^[20]研究发现邻苯二甲酸酯的水解、光解速率非

常缓慢,生物降解是其分解的重要途径,尤其是好氧生物处理技术更为有效. Rogers^[22]研究发现化合物的 H_c (蒸气压) $> 10^{-4}$, H_c/K_{ow} 大于 10^{-9} 时,化合物的挥发性差,反之则相反. DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的 $\lg K_{ow}$ 值分别为 0.56、2.38、4.45 和 7.50,

DMP、DEP、DBP 和 DEHP 的 H_c 值分别为 4.19×10^{-1} 、 1.33×10^{-1} 、 3.6×10^{-3} 和 1.33×10^{-5} ^[4,18],说明 DMP 和 DEP 比较容易挥发,向空气的挥发可能也是其削减机制之一,需进一步研究来确认挥发所占的比例,确定空气污染水平.

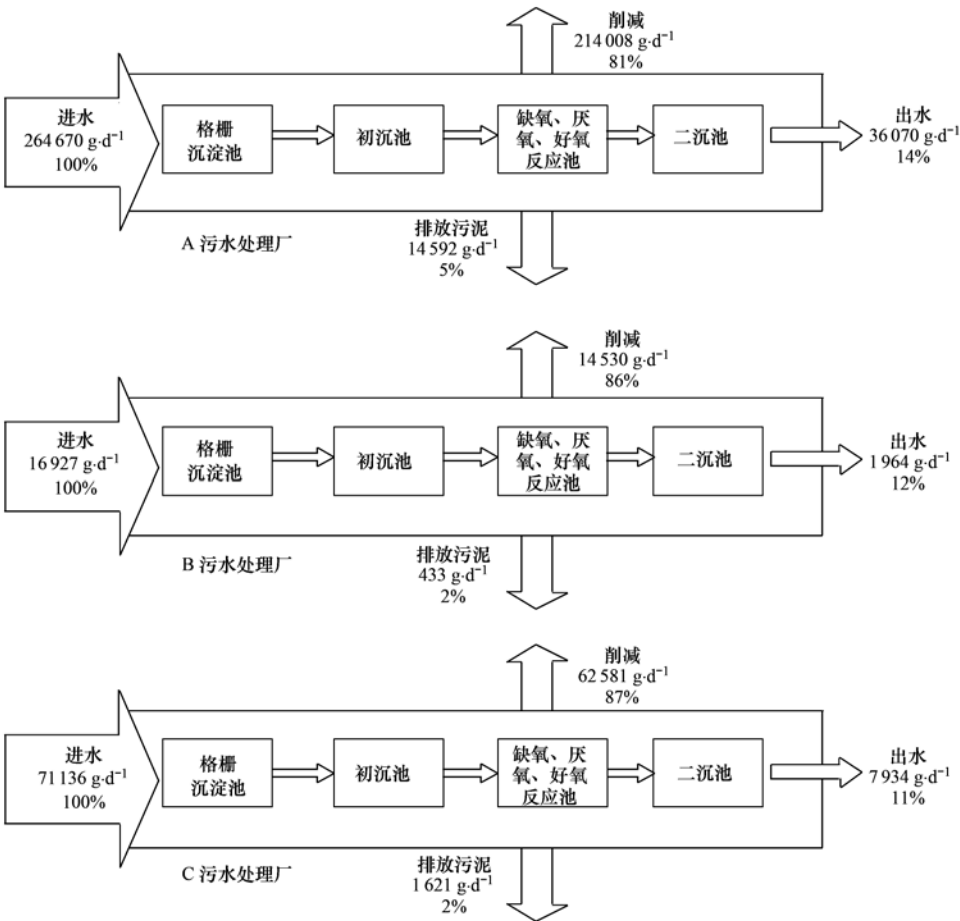


图2 污水处理厂中 PAEs 的质量平衡

Fig. 2 Mass balance of PAEs in WWTPs

3 结论

(1)污水处理厂对 PAEs 的削减率大于 80%,能比较有效的去除 PAEs 负荷,生物降解和向空气的挥发可能是其主要的去除机制. 然而仍然有 10% ~ 20% 的 PAEs 负荷通过出水 and 污泥排放进入环境,尤其在污泥和出水悬浮颗粒上高浓度的 PAEs 的存在非常值得关注. 污水厂出水进入环境水体后 PAEs 在环境水体的归趋及对饮用水水质的影响值得进一步研究; 污泥用于农田对土壤的污染和农作物的影响和污泥用于填埋导致的二次污染状况都需要深入的研究,为相关管理政策的制定提供可靠的科学依据.

(2)从目前的情况来看,北京城市污水处理率

超过了 90%,但仍有 10% 左右的污水通过直接排放的方式进入水体,以选择的 3 个污水处理厂对 PAEs 的削减情况来看,直接排放对环境水体中 PAEs 的贡献大概占到三分之一左右,进一步提高污水收集处理率是减小对环境水体排放的重要措施. 随着污水收集处理率的提高,污水厂出水将成为环境水体污染的主要的排放源. 选择的 3 个污水处理厂对 PAEs 的削减率在 80% 多一点,还有很大的潜力来提高削减率,可考虑优化工艺和运行参数来提高去除效率和增加深度处理工艺来进一步去除残留的 PAEs 污染.

参考文献:

[1] 张蕴晖,陈秉衡,郑力行,等. 人体生物样品中邻苯二甲酸酯类的含量[J]. 中华预防医学杂志, 2003, 37(6): 429-

- 434.
- [2] 郑文芝, 覃石坚, 陈殷. 环境激素邻苯二甲酸酯的研究进展[J]. 广州化工, 2006, **34**(5): 14-16.
- [3] 周文敏. 环境优先污染物[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [4] 金相灿. 有机化合物污染化学-有毒有机物污染化学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [5] Li N, Wang D H, Zhou Y Q, *et al.* Dibutyl phthalate contributes to the thyroid receptor antagonistic activity in drinking water processes[J]. *Environmental Sciences and Technology*, 2010, **44**(17): 6863-6868.
- [6] 邱志群, 舒为群. 环境内分泌干扰物浅析[J]. 重庆环境科学, 2001, **23**(5): 67-68.
- [7] 邓茂先, 陈祥贵. 环境内分泌干扰物研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 2000, **27**(2): 65-77.
- [8] 叶常明, 雷志芳, 王宏, 等. 颗粒物与天然水体痕量有机物相互作用的动态模型[J]. 水科学进展, 1995, **6**(3): 171-175.
- [9] 王建龙, 吴立波, 施汉昌, 等. 驯化活性污泥降解邻苯二甲酸酯类化合物的研究[J]. 环境科学, 1998, **19**(1): 18-20.
- [10] 胡晓宇, 张克荣, 孙俊红, 等. 中国环境中邻苯二甲酸酯类化合物污染的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, **13**(1): 9-14.
- [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] 张旭琴. 国内增塑剂的现状与发展趋势[J]. 聚合物与助剂, 2004, **211**(1): 6-8.
- [13] 陈明, 任仁, 王子健, 等. 工业废水和城市污水中邻苯二甲酸酯残留分析[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(6): 4-7.
- [14] 林兴桃, 陈明, 王小逸, 等. 污水处理厂中邻苯二甲酸酯类环境激素分析[J]. 环境科学与技术, 2004, **27**(6): 79-81.
- [15] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(9): 1751-1762.
- [16] Martinović D, Denny J S, Schmieder P K, *et al.* Temporal variation in the estrogenicity of a sewage treatment plant effluent and its biological significance[J]. *Environmental Sciences and Technology*, 2008, **42**(9): 3421-3427.
- [17] 郑晓英, 周玉文. 北京城市污泥中邻苯二甲酸酯的研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, **32**(4): 343-346.
- [18] Harris C, Henttu P, Parker M G, *et al.* The estrogenic activity of phthalate esters in vitro[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1997, **105**(8): 802-811.
- [19] Means J C, Wood S G, Hasset J J, *et al.* Sorption of amino- and carboxy-substituted polynuclear aromatic hydrocarbons by sediments and soils [J]. *Environmental Sciences and Technology*, 1982, **16**(2): 93-98.
- [20] 曾锋, 傅家漠, 盛国英, 等. 邻苯二甲酸酯类有机污染物生物降解性研究进展[J]. 环境科学进展, 1999, **7**(4): 1-13.
- [21] Stales C A, Peterson D R, Parkerton T F, *et al.* The environmental fate of phthalate esters: a literature review[J]. *Chemosphere*, 1997, **35**(4): 667-74.
- [22] Rogers H R. Sources, behaviour and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **185**(1-3): 3-26.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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