

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤料滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

缓释碳源滤料滤池用于二级出水的深度脱氮

唐蕾^{1,2}, 李彭², 左剑恶^{2*}, 袁琳³, 李再兴¹

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄 050018; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 3. 浦华环保有限公司, 北京 100020)

摘要:以聚己内酯(PCL)为反硝化电子供体和生物载体, 开发出具有脱氮和过滤功能的缓释碳源滤料滤池, 并以城市污水处理厂二级出水为原水进行深度脱氮试验, 结果表明, 在 20.1~22.0℃ 的条件下, 进水总氮(TN)质量浓度 30.0 mg·L⁻¹, HRT 为 0.5 h, 反硝化负荷达 54.0 mg·(L·h)⁻¹ 时, TN 的去除率最高可达 98.9%; 出水总有机碳(TOC)为 6.5~8.4 mg·L⁻¹, 比进水增加了 2.0~3.0 mg·L⁻¹; 出水 SS 低于 4.0 mg·L⁻¹; 反硝化过程所需有机碳主要是在微生物作用下缓慢释放, 其占到有机碳总释放量的 84.2%; 对碳源滤料进行扫描电镜观察, 发现在其表面形成了致密的生物膜, 其中微生物以杆菌和丝状菌为主。

关键词:缓释碳源; 反硝化滤池; 深度脱氮; 聚己内酯; 有机物残留

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3526-06

Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material

TANG Lei^{1,2}, LI Peng², ZUO Jian-e², YUAN Lin³, LI Zai-xing¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control (ESPC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. THUNIP Holdings Co., Ltd., Beijing 100020, China)

Abstract: An innovative denitrification biofilter was developed with polycaprolactone (PCL) as the carbon source and biofilm carrier. The performance of nitrogen removal was investigated with biologically treated effluent from secondary clarifier, and the results indicated that a maximum TN removal efficiency of 98.9% was achieved under the following conditions: influent total nitrogen (TN) concentration 30.0 mg·L⁻¹, denitrification load 54.0 mg·(L·h)⁻¹, operating temperature 20.1-22.0℃, hydraulic retention time 0.5 h; the total organic carbon (TOC) in effluent was 6.5-8.4 mg·L⁻¹, which was increased by 2.0-3.0 mg·L⁻¹ compared with that in the influent; the suspended solids (SS) concentration was less than 4.0 mg·L⁻¹ during operation; nearly 84.2% of the total released organic carbon which was used as electron donor in the denitrification process, was derived in the presence of microbes. The surface of the PCL pellets was observed by scanning electron microscope (SEM), it was shown that thick biofilm was formed on the surface of pellets, and the main microbial species were bacillus and trichobacteria.

Key words: sustained-release carbon source; denitrification biofilter; advanced nitrogen removal; polycaprolactone (PCL); organic residue

为实现城镇污水的高质量排放和再生利用,我国各级排放标准要求日益严格。城镇污水处理厂中总氮(TN)的达标排放相对于其他污染指标最为困难。2012年7月北京市开始实施的《城镇污水处理厂污染物排放标准》地方标准(DB 11/890-2012)将TN的A级排放限值规定为小于10 mg·L⁻¹。我国生活污水的C/N较低,碳源不足导致污水二级处理中的TN去除率偏低。一般采用投加甲醇^[1]、乙酸钠^[1,2]、葡萄糖^[3]等液体碳源的反硝化滤池强化污水的深度脱氮。在实际运行中液体碳源的投加量难以控制,易影响出水水质,且运行维护困难。以可生物降解高聚物为缓释碳源材料(sustained-release carbon source, SRCS)和微生物附着生长的载体,在微生物作用下缓慢水解释放出有机物,为反硝化过

程提供电子供体,可减少出水有机物残留。采用缓释碳源材料和石英砂的双层滤料反硝化滤池,可实现同步去除TN和SS,具有较好的开发应用前景。

本研究采用聚己内酯(polycaprolactone, PCL)为缓释碳源滤料,开发出同时具有脱氮和过滤功能的缓释碳源滤料滤池,对城镇污水处理厂二级出水进行深度处理,验证了PCL在城镇污水深度处理中作为反硝化缓释碳源的可行性,考察了其连续运行的效果,以期工艺实施和运行提供理论依据和技术参数。

收稿日期: 2012-12-06; 修订日期: 2013-02-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA063805)

作者简介: 唐蕾(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: tanglei.0312@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jiane.zuo@tsinghua.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料与进水

试验采用聚己内酯(PCL)作为反硝化的缓释碳源材料,所用颗粒为白色蜡状圆球体,分子式为 $(C_6H_{10}O_2)_n$,不溶于水,购于深圳意可曼生物科技有限公司。材料的主要性能参数见表 1。接种污泥取自北京市肖家河污水处理厂曝气池。

表 1 缓释碳源材料 PCL 的主要性能参数
Table 1 Characteristics of PCL as sustained-release carbon source material

carbon source material				
相对分子质量	熔点 /℃	粒径 /mm	堆积密度 / $kg \cdot m^{-3}$	真密度 / $kg \cdot m^{-3}$
6 000	60 ~ 63	3.36 ~ 4.27	700	1 100

试验进水为北京市肖家河污水处理厂二沉池出水。试验期间的水质: COD、 NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$ 、 $NO_2^- -N$ 、SS、DO 分别为 25.0 ~ 30.0、0.5 ~ 1.0、10.0 ~ 15.0、0.05 ~ 0.10、10.2 ~ 11.2、6.18 ~ 7.61 $mg \cdot L^{-1}$ 。为研究实际中更广泛的 TN 浓度范围内缓释碳源滤料滤池的脱氮特性,试验后期在进水中补充适量 KNO_3 ,将进水 $NO_3^- -N$ 浓度提高至 25.0 ~ 30.0 $mg \cdot L^{-1}$ 。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示,主体为内径 100 mm 的有机玻璃柱,高 3.0 m,有效容积为 9.42 L;过滤介质采用双层滤料:上层为粒径 3.36 ~ 4.27 mm 的 PCL 颗粒,滤层高度 1.2 m,下层为 0.5 ~ 1.0 mm 的

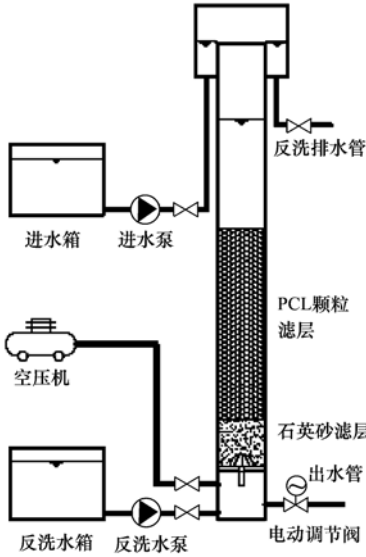


图 1 缓释碳源滤料滤池装置示意
Fig. 1 Diagram of denitrification biofilter with SRCS material

石英砂,滤层高度 0.3 m;装置以下向流方式运行,由出水管上的电动调节阀控制滤速;当阀门全开时,柱内液位超过设定最高液位时即启动反洗,反冲洗采用“气水联合+水洗”的方式。

1.3 试验方法

1.3.1 滤池的启动与运行

滤池启动时一次性接种活性污泥,接种浓度 650 $mg \cdot L^{-1}$ (按滤池有效容积计算),初期滤速为 1.5 $m \cdot h^{-1}$,待出水 TN 稳定后逐渐提高进水 TN 浓度和进水流量,系统共运行约 128 d,期间水温为 20.1 ~ 22.0℃,具体运行情况见表 2。

表 2 滤池的运行阶段与运行参数

Table 2 Operational phases and parameters of the filter					
运行阶段	起止时间 /d	平均进水 TN 浓度 / $mg \cdot L^{-1}$	滤速 / $m \cdot h^{-1}$	HRT /h	容积负荷(TN) / $kg \cdot (m^3 \cdot d)^{-1}$
I	1 ~ 35	10	1.5	0.8	16.8
II	36 ~ 51	15	1.5	0.8	16.8
III	52 ~ 84	25	1.5	0.8	31.8
IV	85 ~ 105	30	1.8	0.6	44.8
V	106 ~ 128	30	2.3	0.5	54.0

1.3.2 滤料在清水中有机碳的释放试验

在 250 mL 的三角瓶中加入 10.0 g PCL 颗粒,100 mL 去离子水,瓶口密封,置于 25℃ 摇床恒温。每 5 d 取样测定 TOC,并更换去离子水,连续试验 50 d。

1.3.3 PCL 颗粒粒径变化

反硝化滤池运行 128 d 后,从不同高度的取样口分别取得 PCL 滤层顶部、中部和底部位置的颗粒。超声波振荡剥离表面生物膜后,置于室温下干燥 12 h,每个样品选取 3 组颗粒称重,按照理想球体

计算颗粒的平均直径。

1.4 分析方法

$NO_3^- -N$ 、 $NO_2^- -N$ 、 $NH_4^+ -N$ 、TN 的测定分别采用紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、水杨酸-次氯酸盐光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(Hach, DR5000); TOC 测定采用燃烧氧化-非分散红外吸收法(岛津, TOC-VCPH)。

pH 测定使用 pH 计(Mettler, DELTA320), DO 测定使用溶解氧测定仪(Hach, HQ30d),材料表面

观察使用电子扫描显微镜(FEI,QUANTA200).

2 结果与讨论

2.1 缓释碳源滤料滤池的反硝化效果

试验连续运行期间分为 5 个阶段. 过滤速度控制在 $1.5 \sim 2.3 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内,HRT 为 $0.5 \sim 0.8 \text{ h}$,脱氮效果如图 2 所示,可见该工艺对进水 TN 有明显的去除效果.

第 I 阶段为启动阶段($1 \sim 35 \text{ d}$),进水 TN 浓度为 $10.0 \sim 15.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,滤速为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. 在启动运行初期(6 d),反应器出水 TN 迅速降到 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,这可能是由于反应初期,PCL 材料表面未被聚合的小分子有机物溶出,反硝化微生物迅速利用这些有机物进行反硝化,TN 的去除率高达

95% 以上. 当表面小分子有机物逐渐被利用,导致了随后系统反硝化速率的下降.

第 II 阶段为稳定运行阶段($36 \sim 51 \text{ d}$),进水 TN 浓度在 $13.0 \sim 16.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,滤速为 $1.5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$,附着在材料表面生长的微生物增加,出水 TN 逐步稳定在 $2.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内,TN 平均去除率达到 95.6%,平均反硝化速率为 $16.8 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$,反应器实现稳定运行.

第 III ~ V 阶段为提负荷阶段($52 \sim 84 \text{ d}$ 、 $85 \sim 105 \text{ d}$ 、 $106 \sim 128 \text{ d}$),将进水 TN 浓度提高到 $22.0 \sim 30.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,HRT 分别为 0.8 、 0.6 、 0.5 h . 最初几天,出水 TN 较高,最终出水 TN 稳定在 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内,TN 去除率在 96% 以上,平均反硝化速率分别为 31.8 、 44.8 、 $54.0 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$.

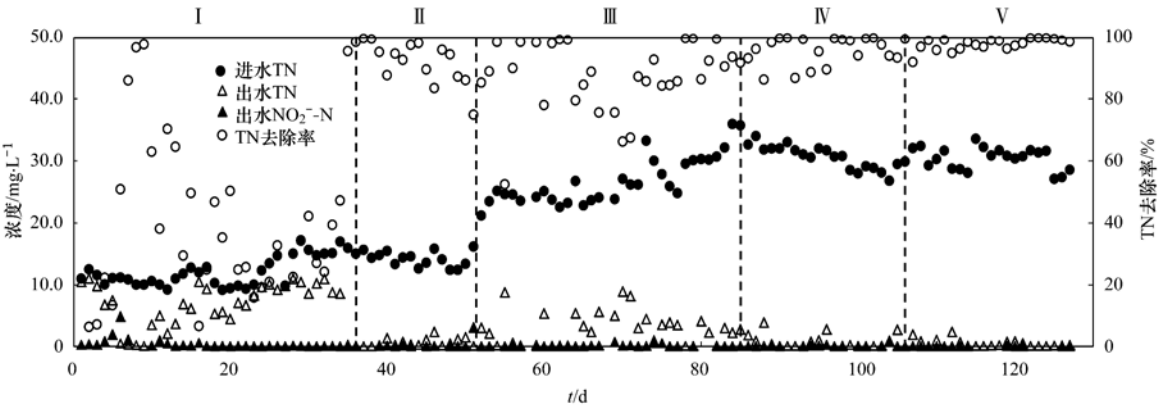


图 2 缓释碳源滤料滤池对城镇污水二级出水的深度脱氮效果

Fig. 2 Nitrogen removal performance of SRCS denitrification biofilter fed by the biology treated effluent from secondary clarification

从图 2 可看出,在后期运行 40 d 期间内,反应器出水 TN 浓度均在 $3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,满足北京市城镇污水排放 TN 小于 $10.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的新标准,最大反硝化速率为 $54.0 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$. 表 3 为文献中关

于不同缓释碳源反硝化速率的报道,可看出,PCL 作为反硝化碳源和微生物附着生长的载体,其反硝化速率远高于麦秆、腐朽木等天然有机质,与乙醇、乙酸等液体碳源的反硝化速率相当.

表 3 不同缓释碳源的反硝化效果(以 N 计)

Table 3 Denitrification performances with various substrates as carbon source

碳源种类	反硝化速率 $/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$	平均进水浓度 $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	处理对象	温度/ $^{\circ}\text{C}$	文献
PCL	54.01	30	生活污水	22	本研究
麦秆	2.21	22.6	地下水	25	[4]
腐朽木	2.94	30	模拟水	25	[5]
乙醇	50.00	50	生活污水	25	[6]
乙酸	63.75	45	模拟地下水	25	[7]
PLA/PHBV	40.53	100	地下水	29	[8]
PBS	13.55	15	模拟水	30	[9]
淀粉/PCL	26.86	50	模拟地下水	25	[10]

在整个运行过程中,出水 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 浓度几乎全部小于 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,只是在进水初期($6 \sim 9 \text{ d}$)出现少量增加,最高为 $4.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从第 10 d 开始,反应

器内的微生物量开始增加,加速有机碳的溶解,因此后期出水 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 未再出现积累,其浓度基本维持在 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内.

而传统的投加液体碳源的深度反硝化工艺中,如果投加量不足,则会出现明显的 NO_2^- -N 积累现象. 文献[11]以甲醇为碳源去除城镇污水中的硝酸盐,投加量不足会导致稳定的 NO_2^- -N 积累. 葛勇涛等^[2]的研究也表明,乙酸钠作为反硝化碳源时,投加量不足不能有效去除水中的 TN,而且 NO_2^- -N 积累量明显,最大为 $6.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Her 等^[12]、胡和平等^[13]也观察到 NO_2^- -N 积累的现象. 采用 PCL 作为反硝化缓释碳源可解决碳源投加量不足产生的一系列问题.

试验中也没有观察到 NH_4^+ -N 的产生,滤池出水的 NH_4^+ -N 浓度保持在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下.

2.2 滤料在清水中的释碳性能

PCL 材料在清水条件下的有机碳释放情况如图 3 所示.

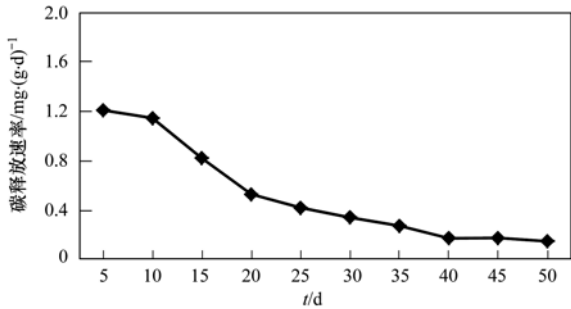


图 3 PCL 材料在清水中的有机碳释放速率

Fig. 3 Organic carbon release rate in deionized water

0~15 d 溶出的 TOC 较多,之后逐渐趋于稳定,分析其原因是材料表面未被聚合的小分子有机物溶解使得水中 TOC 浓度增加. 稳定后的有机碳释放速率为 $0.3 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,理论 COD 释放速率约 $1.0 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 孙雅丽等^[5]对腐朽木、玉米芯和刨花的研究表明,这 3 种物质 COD 平均释放率分别为 5.87 、 8.51 、 $2.11 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,可见 PCL 材料的碳释放速率要小于以上天然有机质.

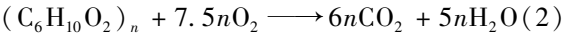
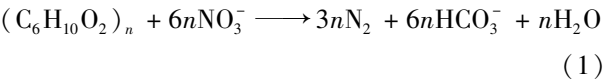
2.3 有机碳残留及质量平衡

试验过程中进水 TOC 约为 $5.2\sim7.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 TOC 则基本保持在 $6.5\sim8.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,与进水相比增加了 $2.0\sim3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 有机物的增

加可能有两种原因:①微生物自身代谢产生的胞外多聚物^[14];②由于碳源材料自身被微生物水解,释放出的一定量有机物. 但增加的 TOC 量并不多,说明 PCL 作为反硝化碳源和生物附着的载体,较为稳定可靠,反硝化过程中没有过多的有机物溶出,可以保证出水水质.

缓释碳源材料的碳释放包括物理溶解和微生物水解作用. 释放出的有机碳消耗量有 3 种:①为反硝化过程提供电子供体;②与水中的溶解氧反应而消耗;③未参与反应而随出水流失. 为考察反硝化过程中有机碳主要的释放途径和消耗方式,对反应体系第 111~120 d 进出水指标做反硝化过程 TOC 消耗量和材料 TOC 溶出量的衡算,这 10 d 内出水稳定,反应器出水 NO_2^- -N 很低($<0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),衡算时忽略 NO_2^- -N 的积累,同时也忽略细胞合成的消耗量. 1 g PCL 的理论 TOC 值为 0.63 g. 根据进水流量以及各项指标的进出水浓度计算得到有机碳平衡表. 衡算结果见表 4.

以 PCL 为碳源的反硝化计量方程如式(1);与 DO 反应消耗的有机碳量按照式(2)计算;反硝化过程有机碳消耗量和溶出量的衡算按照式(3)计算.



$$C_e = C_d + C_o + C_r - C_p \quad (3)$$

式(3)中, C_e 为反硝化过程中材料在微生物作用下的有机碳溶出量, $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$; C_d 、 C_o 、 C_r 、 C_p 分别为反硝化过程中去除 NO_3^- -N 的有机碳消耗量、去除溶解氧的有机碳消耗量、出水残留量以及材料物理性有机碳溶出量[按照清水中碳释放试验结果,以碳释放速率为 $0.3 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 计算], $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$. 根据这 10 d 中有机碳释放量和消耗量的衡算,得出材料在微生物作用下的有机碳释放量占总释放量的 84.2%,反硝化过程中的有机碳消耗量为碳源溶出总量的 88.3%,说明 PCL 颗粒中有机物溶出主要是微生物的作用,其有机物的消耗途径主要是反硝化过程.

表 4 缓释碳源滤料滤池中 TOC 衡算表

Table 4 Mass balance table of TOC in SRCS denitrification biofilter

平均进出水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						计算结果/ $\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$				
进水 TN	出水 TN	进水 DO	出水 DO	进水 TOC	出水 TOC	反硝化消耗量 C_d	DO 消耗量 C_o	出水残留量 C_r	物理溶出量 C_p	生物溶出量 C_e
30.6	0.8	6.9	2.3	5.6	7.6	11 021.8	585.6	872.6	1 978.2	10 501.8

2.4 缓释碳源滤料滤池的过滤性能

反应器进水 SS 为 $10.2 \sim 11.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在石英砂滤料层前后有明显的降低, 出水 SS 为 $3.0 \sim 3.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 满足北京市地方标准《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 11/890-2012) 中一级 A 排放的限值标准 ($\text{SS} < 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 说明以 PCL 为缓释碳源、以石英砂为过滤层的双层滤料滤池在有脱氮效果的同时, 对水中悬浮物有较好的过滤作用.

2.5 材料粒径和滤床厚度变化

反应器运行 128 d 之后, PCL 粒径 (以平均直径计) 为 3.36 mm , 而初始材料平均粒径为 3.64 mm , 反应前后粒径有一定减小, 材料平均粒径减少 7.7% , 体积减少量为 21.4% . 说明材料被生物膜内的微生物分解利用, 充当了反硝化过程的碳源, 为反硝化过程提供电子. 试验过程中反冲洗对材料没有造成明显影响, 反硝化过程也没有出现材料内部空洞、滤料下部塌陷等, 说明 PCL 颗粒有足够的机械强度.

2.6 PCL 颗粒反应前后表面形态和生物附着情况

利用电子扫描显微镜 (SEM) 观察初始 PCL 颗粒、材料表面生物膜以及剥离生物膜后的 PCL 颗粒, 结果如图 4 所示. 初始 PCL 表面光滑, 基本没有孔隙, 有少量的突起颗粒. 图 4(c) 显示由于微生物的作用, 颗粒表面被腐蚀形成大量孔洞, 这些孔洞会增大反硝化菌的附着面积, 使得微生物更容易附着. 这也证实了 PCL 能够作为反硝化碳源被微生物利用, 而且适宜作为反硝化菌的生物膜载体. 从图 4(b) 可以看出, PCL 表面形成致密、结构良好的生物膜, 微生物以杆菌和丝状菌为主, 此外还有球菌、螺旋菌等. 这与封羽涛等^[9] 观察到的结果类似, 但具体菌种需要进一步鉴定.

而孙雅丽等^[5] 以腐朽木为反硝化碳源时, 所观察到的材料表面的生物膜则有所不同, 以丝状菌和球菌为主; 范振兴等^[15] 以 PLA 作为反硝化碳源颗粒, 以球菌为主, 且生物膜相对较薄, 说明虽然都是反硝化反应, 但碳源不同导致了微生物组成和生物膜厚度不同.

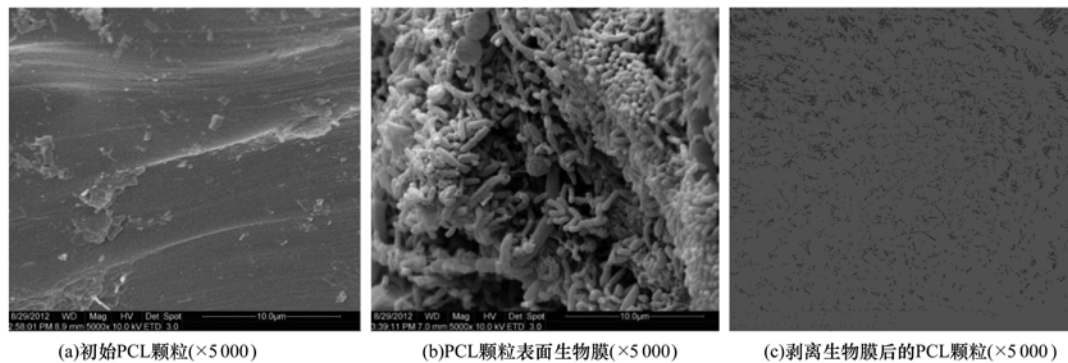


图 4 反应前后 PCL 颗粒及生物膜成熟后表面形态

Fig. 4 Surface morphology of the PCL pellets before and after reaction and the mature biofilm

3 结论

(1) 以 PCL 为缓释碳源滤料的反硝化滤池对城镇污水二级出水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 有很好的去除效果, 在进水 TN 浓度 $30.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 $20.1 \sim 22.0^\circ\text{C}$, HRT 为 0.5 h , TN 的去除率最高可达 98.9% , 反硝化速率最高为 $54.0 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.

(2) 缓释碳源滤料滤池可有效去除水中的悬浮物, 出水 SS 在 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 出水 TOC 为 $6.5 \sim 8.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比进水中 TOC 浓度增加量约为 $2.0 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 有机物残留较少, 出水稳定达标.

(3) 缓释碳源滤料滤池中作为反硝化碳源的有机物主要在微生物作用下释放, 其碳释放量占有机碳总释放量的 84.2% , PCL 在微生物作用下的碳释

放速率要高于无微生物作用下的碳释放速率; 用于反硝化的有机碳消耗量为碳源溶出总量的 88.3% , 有机物的消耗途径主要是反硝化过程.

(4) PCL 可被微生物利用, 并能作为载体在其表面形成以杆菌和丝状菌为主的生物膜.

参考文献:

- [1] 殷芳芳, 王淑莹, 昂雪野, 等. 碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 108-113.
- [2] 葛勇涛, 焦阳, 李军, 等. 乙酸钠碳源强化生物滤池对二沉池出水的脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(7): 98-100.
- [3] 杨巧林, 奚小英, 陈娜, 等. 外加碳源对污水厂异常进水时的强化脱氮效果[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(3): 106-108.
- [4] Soares M I M, Abeliovich A. Wheat straw as substrate for water denitrification[J]. Water Research, 1998, **32**(12): 3790-3794.

- [5] 孙雅丽, 张国臣, 阎中, 等. 以腐朽木为碳源去除废水中硝酸盐氮的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1494-1498.
- [6] Rogalla F, Ravarini P, De Laminat G, *et al.* Large-scale biological nitrate and ammonia removal [J]. Water and Environment Journal, 1990, **4**(4): 319-328.
- [7] Kesseru P, Kiss I, Bihari Z, *et al.* Investigation of the denitrification activity of immobilized *Pseudomonas butanovora* cells in the presence of different organic substrates [J]. Water Research, 2002, **36**(6): 1565-1571.
- [8] 李军, 徐影, 王秀玲, 等. 固体碳源填充床反应器反硝化性能的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(6): 1230-1235.
- [9] 封羽涛, 吴为中. 可降解聚合物 PCL、PBS 在低有机污染水中固相反硝化脱氮效果比较 [J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6-7): 1127-1132.
- [10] Shen Z Q, Wang J L. Biological denitrification using cross-linked starch/PCL blends as solid carbon source and biofilm carrier [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(19): 8835-8838.
- [11] 曹相生, 付昆明, 钱栋, 等. 甲醇为碳源时 C/N 对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响 [J]. 化工学报, 2010, **61**(11): 2938-2943.
- [12] Her J J, Huang J S. Influences of carbon source and C/N ratio on nitrate/nitrite denitrification and carbon breakthrough [J]. Bioresource Technology, 1995, **54**(1): 45-51.
- [13] 胡和平, 黄少斌, 王宝沂. 生物滴滤池反硝化脱氮试验研究 [J]. 环境工程, 2005, **23**(3): 7-9.
- [14] Frlund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. Water Research, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [15] 范振兴, 王建龙. 利用聚乳酸作为反硝化固体碳源的研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2315-2319.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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