

# 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓锋,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(*Crassostrea* 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)

咪唑氯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)

铝盐混凝除磷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  $\gamma$  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,杜兴庄,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,袁伊,王志伟,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 *Alcaligenes* 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 ..... 蓝舟琳,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<sub>4</sub><sup>3-</sup> 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)

# 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\*

(北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 以棉花、稻草、稻壳、玉米芯这 4 种农业废弃物作为反硝化碳源和微生物载体, 通过对静态释碳数量和质量、长期脱氮效果以及生物附着性能等方面的比较, 旨在优选出适于再生水反硝化深度脱氮生物滤池的固体纤维素碳源滤料。结果表明, 玉米芯初期可溶性有机物较多, 易于微生物的附着和繁殖生长; 且比其它 3 种碳源表现出更好的长期反硝化效果, 2.5 g 玉米芯在 46 d 累计去除了 284.544 g 的硝氮; 棉花、稻草前期处理效果较好, 但长期反硝化能力不如玉米芯; 稻壳的处理效果最差, 几乎不能被微生物有效利用。因此, 玉米芯更适用于再生水反硝化深度脱氮滤池的碳源滤料。

**关键词:** 反硝化; 碳源; 农业废弃物; 生物滤池滤料; 玉米芯

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1428-07

## Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter

LI Bin, HAO Rui-xia

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The quantity and quality of carbon released by four agriculture wastes included of cotton, rice hull, rice straw and corncob was analyzed for selecting a suitable cellulose filter medium as well as the carbon source in advanced denitrification of the reclaimed water. And the long-term denitrification efficiency and bio-attachment capability of four agriculture wastes was contrastively estimated by running denitrification experiments in laboratory scale. The results showed that DOM amount released by corncob was the highest at the beginning, and the DOM quality was also beneficial for microorganism growth and biofilm formation. The running denitrification experiments showed that corncob had better denitrification efficiency than that of other three carbon sources, and 284.544 g nitrate was removed by 2.5 g corncob within 46 days. Cotton and rice hull had better denitrification efficiency than corncob in the early time, but the long-term denitrification efficiency was lower than that of corncob. Rice straw can hardly be used by microorganism so as to have the lowest denitrification. Therefore, corncob was more suitable to be the denitrification biofilter filter medium and the carbon source in advanced denitrification of the reclaimed water.

**Key words:** denitrification; carbon source; agriculture waste; biofilter filter medium; corncob

受污水脱氮处理技术限制, 相对于磷元素的去除, 污水中氮的去除难度较高, 致使许多污水处理厂二级出水中残余总氮含量仍然偏高, 主要是硝酸盐形态的氮。过高的氮含量不利于污水的健康安全回用, 而常规混凝-过滤-消毒的再生水处理工艺对氮的去除作用不明显, 因此反硝化生物脱氮成为再生水深度脱氮的首选工艺<sup>[1]</sup>。

由于污水厂二级出水残余碳源不足以满足反硝化生物脱氮所需的碳源, 通常需要额外投加碳源。甲醇、乙酸等小分子液体碳源虽然具有反硝化利用率高、脱氮效果好的优点, 但是其投加量不易控制、运输与运行成本较高, 并且具有一定的毒性和危险<sup>[2-4]</sup>。有学者提出<sup>[5-8]</sup>采用不溶于水的可生物降解聚合物(BDPs)材料作为反硝化的碳源和生物膜载体, 但由于BDPs材料的价格较高, 阻碍了它的广泛应用。一些学者提出<sup>[9-14]</sup>, 用富含大量纤维素的

农业废弃物代替传统反硝化碳源, 这类物质在自然界中广泛存在, 不仅价格低廉, 且能被生物降解, 具有广泛的开发前景。Aslan等<sup>[15]</sup>采用麦秆作为反硝化碳源和生物膜载体去除硝酸盐的同时去除农药硫丹, 即使有硫丹毒性的影响, 在硝酸氮初始浓度为 32.9 mg·L<sup>-1</sup>和 49.4 mg·L<sup>-1</sup>的时, 硝酸氮均得到几乎完全的去除。邵留等<sup>[16]</sup>以稻草为反硝化碳源和生物膜载体, 反应器启动时间短, 能有效去除水中 16~31 mg·L<sup>-1</sup>的硝酸盐, 去除率达到 90% 以上。Rocca等<sup>[17]</sup>使用棉花作为碳源和介质去除地下水中的硝酸盐氮, 进水硝酸盐浓度为 85 mg·L<sup>-1</sup>, 反硝化最大处理负荷(以 N 计)为 24.5 g·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>时, 硝酸盐去除率为

收稿日期: 2012-08-06; 修订日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178005)

作者简介: 李斌(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为再生水深度脱氮技术, E-mail: woxianhuo@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: haoruixia@bjut.edu.cn

90%。不同类型的纤维素废弃物其物质组成和表面特征不同,溶出碳源的品质和微生物附着能力存在差异,对反硝化微生物的生长代谢和脱氮效果产生一定的影响。因此,遴选一种适宜反硝化微生物附着生长和能量代谢的固体纤维素碳源,既能较好地发挥纤维素碳源的长期释碳作用,又能获得较好的反硝化脱氮效果。也有学者<sup>[13,18,19]</sup>对这些纤维素类碳源进行比较,但他们大多数从较短周期内的反硝化速率和硝氮去除率来比较,而对几种碳源相对较长时间内的持续反硝化效果的比较鲜有报道。

本研究针对城市污水厂二级处理出水生物反硝化深度脱氮所需的碳源问题,以棉花、稻草、稻壳、玉米芯作为反硝化碳源滤料的备选材料,对 4 种固体纤维素碳源的静态释碳数量和质量、长期反硝化脱氮效果以及微生物性能等方面进行对比研究,优

选出适宜污水生物反硝化深度脱氮的碳源滤料,以期污水深度脱氮提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

以棉花、稻草、稻壳、玉米芯作为反硝化碳源和生物膜载体。其中,玉米芯经蒸煮后切成直径 1 cm 左右的粒状,稻草切成 2~3 cm 小段。实验水样由自来水、N、P 营养元素和微量元素配置而成,模拟城市污水厂二级处理出水水质,控制配水中硝酸盐氮浓度为  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,用于固体碳源遴选。接种污泥来自北京某污水处理厂剩余污泥,用加入一定浓度硝酸钾的生活污水进行富集培养反硝化菌。

### 1.2 实验仪器与方法

表 1 列出了分析指标及其所需仪器、方法。

表 1 分析仪器与方法

Table 1 Analysis apparatus and methods

项目	仪器	方法来源
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	瑞士万通 861 型离子色谱仪	文献[20]
TOC、TN	德国耶拿 multi N/C 3100 型快速测定仪	文献[20]
$\text{UV}_{254}$	德国耶拿 STECORD S 100 型紫外可见分光光度计	文献[21]
荧光光谱图	美国瓦里安 CARY Eclipse 荧光分光光度计	取水样过滤后放入石英皿中,发射波长和激发波长的范围分别为 200~800 nm 和 200~450 nm <sup>[22]</sup>
碳源表面形态	日立 s4300 型扫描电子显微镜	被微生物利用前的样品直接干燥喷金进行扫描电镜分析表面形态。被微生物利用后的样品用戊二醛、酒精等逐级脱水固定,然后低温干燥,最后喷金进行扫描电镜分析表面形态和微生物 <sup>[23]</sup>

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 静态释碳实验

每种固体碳源材料称取 2.5 g,分别加入 250 mL 锥形瓶中,加 250 mL 水浸泡。分别在第 2、5、7、10、15、17 d 取样,测定浸出液中 TOC、TN、 $\text{UV}_{254}$  值和三维荧光光谱图,每次取样后彻底换水。考察各种纤维素碳源的释碳数量和释碳质量。

#### 1.3.2 静态反硝化实验

在 4 个反应器中分别加入棉花、稻草、稻壳、玉米芯 2.5 g,并加入 20 mL 富集培养的接种污泥、200 mL 硝酸盐氮浓度为  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的实验配水,将实验装置放入恒温振荡培养箱中,转速控制在  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,温度在  $30^\circ\text{C}$  左右。第 2 d 排出上清液,补充 10 mL 富集培养的污泥;以后每 21 h 换水,测出水硝酸盐氮浓度和 TOC。每次换水前对配水进行氮气吹脱 10 min,使溶解氧小于  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

#### 1.3.3 纤维素碳源材料表面形态及生物附着情况观察

采用扫描电镜法观察生物附着前后碳源材料的表面性状变化,从碳源表面纤维素微观形态及其生物附着程度分析各种材料作为反硝化固体碳源的可行性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 固体纤维碳源材料释碳性能分析

#### 2.1.1 释碳速率和释碳量

为了考察 4 种固体纤维碳源材料的释碳量和释碳速率,分别测定了不同时间碳源浸出液的总有机碳浓度,根据浸出液体积计算出释碳总量,如图 1 所示。从中可以看出,实验期间各种材料释碳总量大小依次为:玉米芯 > 稻草 > 棉花 > 稻壳。4 种碳源前 5 d 的释碳速率明显大于 5 d 以后的释碳速率,可溶性碳在 7 d 就已经基本释放完毕。

#### 2.1.2 释碳品质分析

$\text{UV}_{254}$  值可以反映水中相对分子质量大、不饱和程度高的溶解性有机物的含量。一般地,有机物

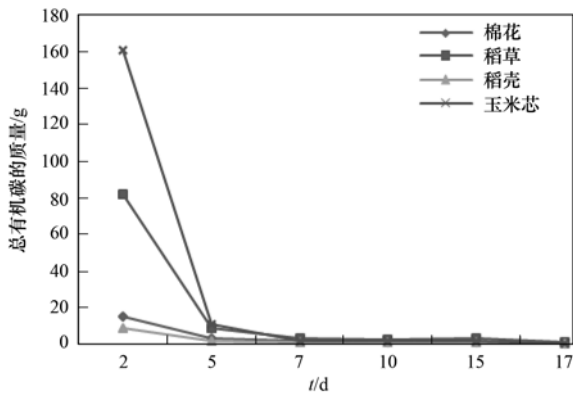


图1 各类纤维素碳源释碳量

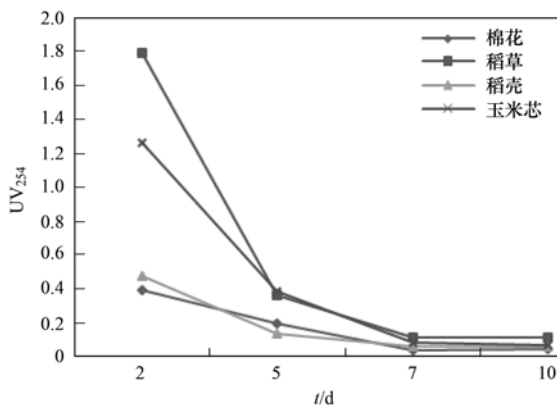
Fig. 1 Quantity of carbon released by different carbon sources

的相对分子质量越大,其  $UV_{254}$  越高,相对分子质量大于3 000的有机物是水中紫外吸收的主体,这些物质的不饱和度较高,可生化性比较差,不容易被水中反硝化菌利用。

三维荧光光谱图可以反映水中腐殖质类和类蛋白类等有机物的存在和含量。根据三维荧光光谱图中荧光峰的激发和发射波长位置能够确定有机物的种类,根据荧光峰的强度可以对有机物含量进行定量分析。腐殖质是天然水体中重要的溶解性有机物,主要产生于动植物的腐化过程,是一类芳香族多聚物,生物惰性较强;类蛋白质主要反映水体受到人为影响的程度,此类物质生物降解性较高,微生物容易利用。

因此,利用  $UV_{254}$  和三维荧光光谱图能够表征各种固体纤维碳源浸出液中溶出碳源的质量和生物降解性。各种固体纤维碳源浸出液的  $UV_{254}$  和三维荧光光谱如图2、图3所示。

由图2看出,稻草的  $UV_{254}$  值最高,其次是玉米芯,再是棉花和稻壳。其中,玉米芯释放的总有机碳高于稻草,而稻草的  $UV_{254}$  却高于玉米芯,说明稻草

图2 各类纤维素碳源浸出液的  $UV_{254}$  值Fig. 2  $UV_{254}$  of water-leach liquor from different carbon sources

前期溶出的碳源在生物惰性方面要高于玉米芯。

图3为4类碳源2~5 d浸出液以及  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  富里酸试剂溶液的三维荧光光谱图。根据荧光峰所处的激发/发射波长可以看出,稻草、稻壳不仅出现了富里酸的两个特征荧光峰  $E_x/E_m = 237 \sim 260/400 \sim 500 \text{ nm}$  和  $E_x/E_m = 300 \sim 370/400 \sim 500 \text{ nm}$ <sup>[24]</sup>,还有色氨酸类的两个特征荧光峰  $E_x/E_m = 275/340 \text{ nm}$  和  $E_x/E_m = 225 \sim 237/340 \sim 381 \text{ nm}$ <sup>[24]</sup>;而棉花、玉米芯仅出现了色氨酸类荧光峰。色氨酸是构成蛋白质的20种氨基酸之一,属于易降解物质。从荧光峰强度来看,稻壳的富里酸荧光峰较其它3种碳源强,而它溶出的碳源又最少,说明它的生物惰性较其它3种碳源强。但4种碳源浸出液的富里酸荧光峰的强度均低于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  富里酸试剂溶液的荧光强度。

总之,4类碳源释放的有机碳中,稻壳和稻草的生物惰性相对较强,玉米芯和棉花的生物惰性相对较弱,更有利于微生物利用。4种碳源浸出液中都含有生物易降解的物质色氨酸,有利于反硝化微生物利用。

## 2.2 固体纤维碳源材料氮素释放分析

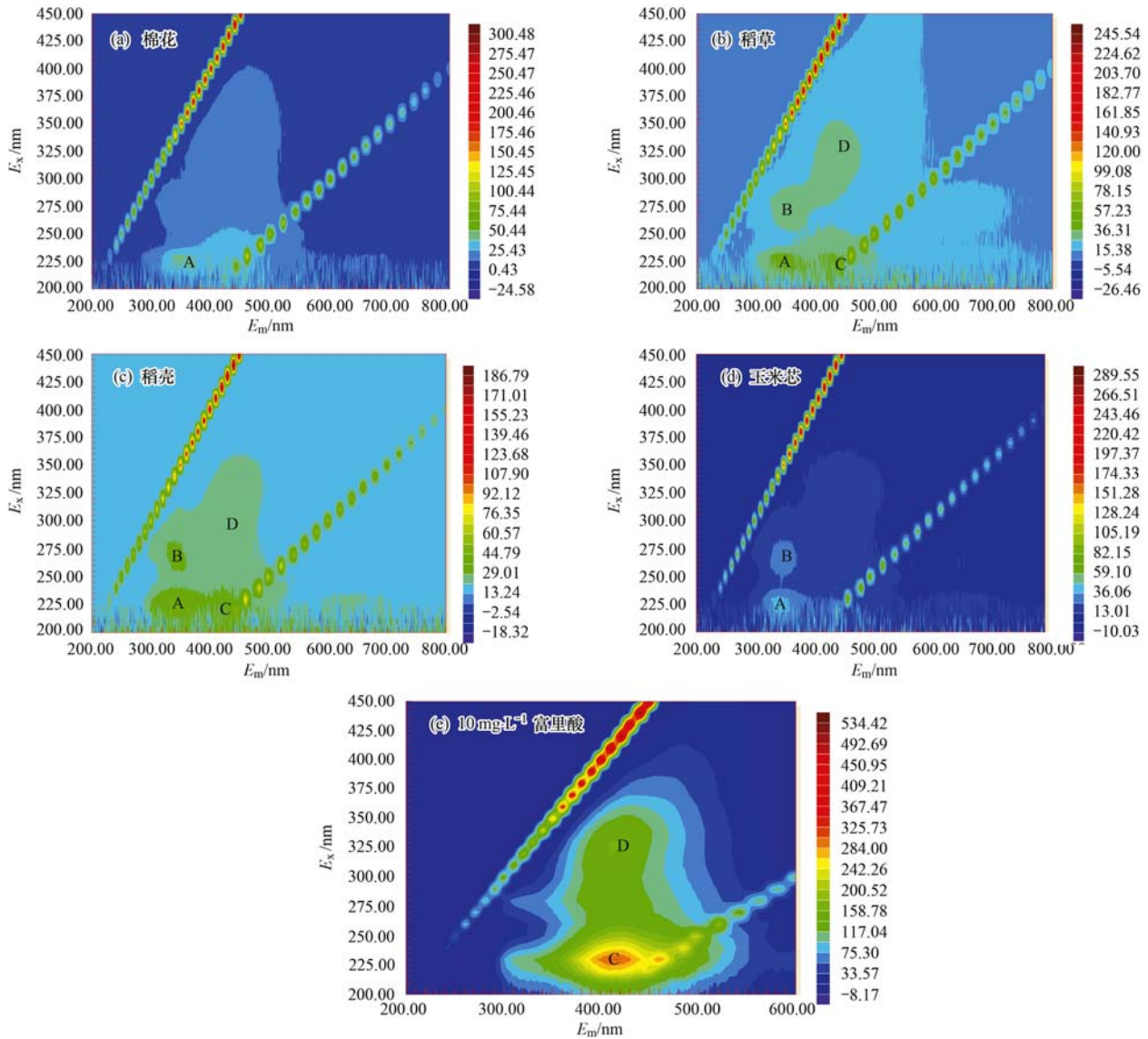
由于固体纤维碳源本身含有类蛋白质,而蛋白质中含有氮元素,因此有必要对它们浸出液中的TN进行测定,以确定它们是否会增加水中氮元素含量。

由图4可以看出,前2 d释放总氮由大到小依次为稻草 > 玉米芯 > 棉花 > 稻壳,而随后的几天,4种材料的TN几乎检测不出。前2 d各碳源浸出液C/N比分别为:11.1(棉花)、15.51(稻草)、16.59(稻壳)、107.42(玉米芯)。由此看来,4种材料长期运行并不会使水中氮元素含量升高,但投加初期,出水总氮会偏高,可以通过先浸泡一段时间再投入使用。

## 2.3 固体纤维碳源的静态生物反硝化脱氮特性

图5为4类固体纤维碳源静态反硝化脱氮效率及出水TOC运行结果。

由图5可知,4类碳源反硝化脱氮效率随运行时间呈现逐渐降低的变化趋势。在运行前5 d,可溶性碳源被微生物逐步消耗,而固相碳源还未降解释放,硝氮去除率逐渐降低;其中,玉米芯的初期硝氮去除率可以保持在90%以上。到第5~15 d,棉花、稻草、玉米芯的硝态氮去除率均达到60%以上,其中棉花、稻草的硝氮去除率几乎达到100%;出水TOC降低到  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右,表明微生物已经分解



A 和 B 为色氨酸, C 和 D 为富里酸

图 3 各类碳源浸出液的三维荧光光谱图

Fig. 3 3DEEM of water-leach liquor from different carbon sources

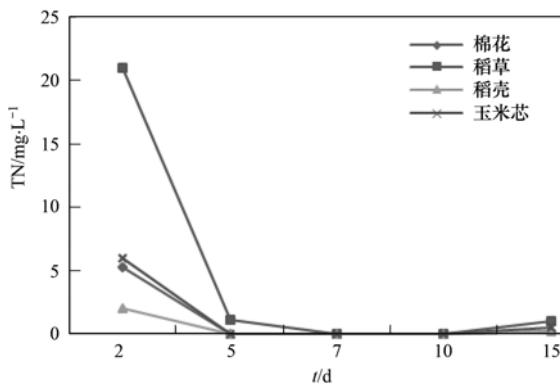


图 4 各类碳源 TN 释放量

Fig. 4 TN released by different carbon sources

固体碳源并用于反硝化脱氮需要; 由于稻壳表层有一层木质素壳, 微生物不容易分解利用, 因此硝氮去

除率仅有 10% 左右. 到第 16 d, 棉花、稻草的硝氮去除率急剧下降, 其中, 棉花在 26 d 以后硝酸盐去除率几乎为 0, 即使在第 38 d 补泥后, 硝氮去除率也只达到 10%, 而后又下降到 0, 表明棉花释放的碳源难以满足反硝化微生物的需要; 稻草与棉花具有类似的变化规律, 第 38 d 补泥后有所回升, 但到第 46 d 去除率下降到 7.6%; 玉米芯的硝氮去除率下降幅度不大, 直到第 46 d 仍有接近 20% 的硝氮去除率, 表现出比较好的持续反硝化脱氮性能.

从 46 d 累积脱氮数据计算得出, 4 种碳源累积去除的硝氮质量由大到小依次为玉米芯 (284.544 g) > 稻草 (260.8 g) > 棉花 (186.73 g) > 稻壳 (33.44 g).

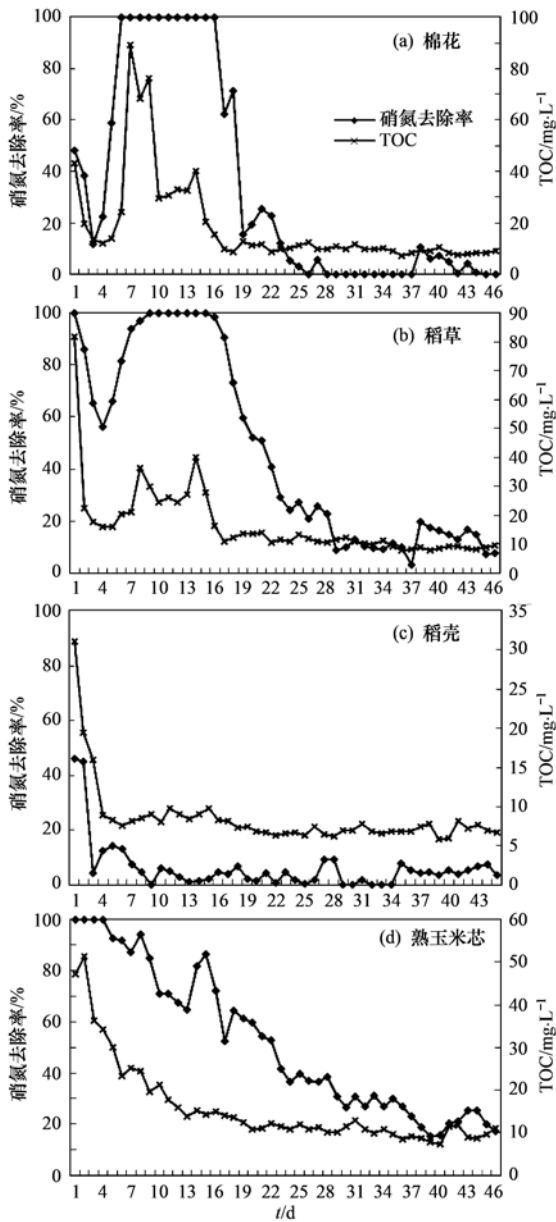


图 5 4 种固体纤维碳源的静态反硝化运行效果

Fig. 5 Operating results of four carbon sources for denitrification

各类固相纤维碳源反硝化出水 TOC 呈现出不同的变化规律:①棉花、稻草组的出水 TOC 在前 5 d 迅速降低;之后随着微生物对纤维素的分解,产生大量剩余碳源,出水 TOC 迅速回升,促进了微生物的生长繁殖,碳源消耗量增加,出水 TOC 逐渐下降,直到第 16 d 以后稳定在 10 mg·L<sup>-1</sup>左右,达到释碳和反硝化耗碳的平衡;随着微生物持续对固体碳源的分解,纤维素量逐渐减少,释碳能力降低,出水 TOC 也逐渐减少,难于满足反硝化脱氮的需要,反硝化效率降低。②玉米芯组反硝化出水 TOC 逐渐平稳下降,表现出较好的持续供碳性能。③稻壳组反硝化出水 TOC 一直很低,这是因为微生物难于附

着在稻壳表面,并且表层木质素不宜被微生物分解。

因此,从各类固相纤维碳源的生物反硝化效率和出水 TOC 来看,相对于其它 3 种材料,玉米芯具有较为持续的反硝化脱氮和供碳性能,且在反硝化效果较好的情况下可以保持 20 mg·L<sup>-1</sup>以内出水 TOC,低于棉花和稻草的出水 TOC,更适于作为反硝化滤料长期使用。

### 2.4 固相纤维碳源表面结构特征分析

为了对比静态反硝化运行前后各类碳源表面性状以及微生物附着特性,对 4 种碳源材料微生物降解前后的表面特性进行了扫描电子显微镜分析。图 6 为各类碳源静态反硝化运行前后扫描电镜图片。

图 6(a)、(c)、(e)、(g)是同样放大倍数下原

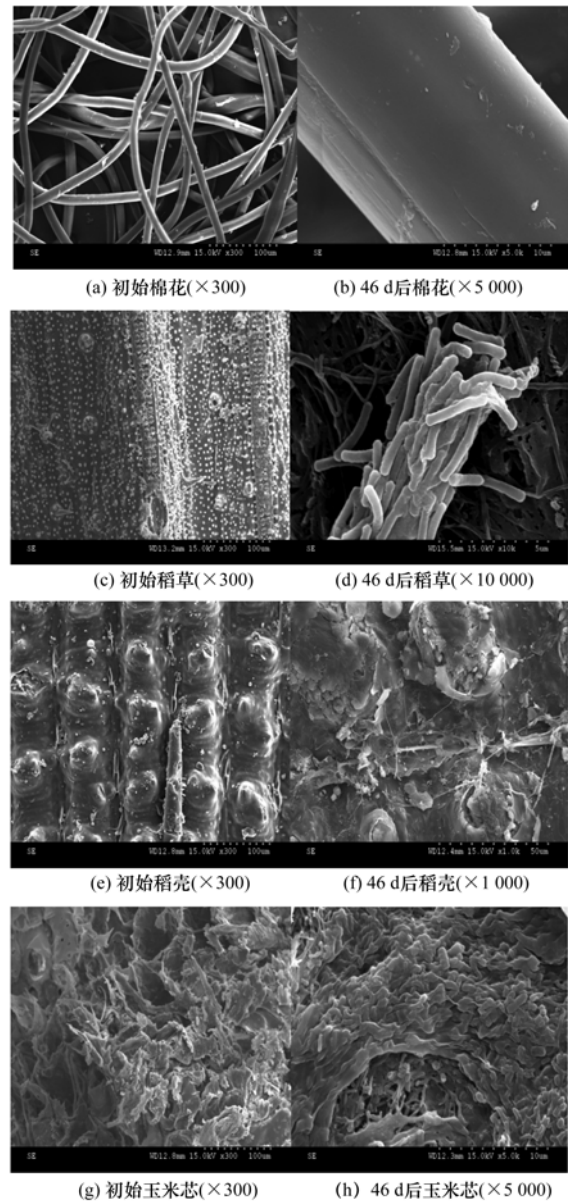


图 6 各碳源表面扫描电镜图片

Fig. 6 SEM image of different carbon source surfaces

始的固体纤维碳源扫描电子显微镜图片,可以看出,棉花由一根一根丝状物错综缠绕而成,这种特殊的结构在截留污泥方面起到了很大的作用;稻草较为光滑表面有许多微小的突起点,为微生物的附着生长提供便利,还可以看到较为明显的纤维素结构,成条状整齐排列;稻壳表面整齐分布有比较坚硬的凸状物;玉米芯表面非常粗糙,有较多的空隙,有利于微生物的附着生长。

图 6(b)、(d)、(f)、(h)图是经过反硝化脱氮运行到第 46 d 以后样品的扫描电镜图片,其中,棉花纤维表面光滑平整,微生物附着很少,在放大 5 000 倍以后仍没有发现附着微生物,这也说明了棉花在反硝化初期和中期,主要是棉花纤维表面可溶性有机物溶解和易降解纤维素部分来供应反硝化脱氮所需的碳源,而在反硝化后期几乎丧失脱氮能力的原因;在稻壳表面则略微有些破损,依稀可见少量微生物;在稻草和玉米芯表面附着很多短杆状微生物,特别是在玉米芯表面布满了短杆状微生物,有报道指出反硝化细菌为短杆状微生物<sup>[25]</sup>;同时也可以看到,经过微生物降解后的稻草和玉米芯,其表面结构与初始样品有很大不同,出现明显的空洞,特别是稻草表面纤维被消耗殆尽。

固体碳源表面粗糙有利于微生物附着和利用,从分析结果看,4 种碳源表面粗糙程度大小依次是玉米芯 > 稻草 > 稻壳 > 棉花,棉花纤维表面光滑不利于微生物附着和利用;稻壳由于表面含有木质素不易被微生物利用,因此附着生物量较少;仅有玉米芯和稻草表面有利于微生物的附着和生长。

### 3 结论

(1) 静态释碳结果表明,玉米芯、稻草和棉花的初期可溶性释碳量较高;稻草、稻壳浸出液有一定的生物惰性物质,玉米芯浸出液的碳源品质更有益于微生物利用。

(2) 静态反硝化实验表明,玉米芯体现出了长期的释碳特点和脱氮效果;而棉花和稻草虽然初期反硝化效果好,但长期脱氮效果不稳定。

(3) 玉米芯和稻草表面有利于微生物的附着和生长;棉花纤维表面光滑不利于微生物附着和利用;稻壳由于表面含有木质素不易被微生物利用,因此附着生物量较少。

(4) 玉米芯由于具有持续稳定的释碳和反硝化脱氮效率,且表面容易附着微生物,适宜作为反硝化生物滤池所需的反硝化碳源滤料;而稻壳由于表面

有木质素坚壳,不适合作为反硝化脱氮的碳源材料。

### 参考文献:

- [ 1 ] 杜兵. 北京市城市污水处理厂水质升级技术需求及筛选[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2010, (9): 12-16.
- [ 2 ] 曾薇, 李磊, 杨莹莹, 等. A<sup>2</sup>O 工艺处理生活污水短程硝化反硝化的研究[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(5): 625-632.
- [ 3 ] 李洪静, 陈银广, 顾国维. 丙酸/乙酸对低能耗生物除磷脱氮系统的影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(8): 673-678.
- [ 4 ] 邵留, 徐祖信, 尹海龙. 污染水体脱氮工艺中外加碳源的研究进展[J]. 工业水处理, 2007, **27**(12): 10-14.
- [ 5 ] 周海红, 赵璇, 王建龙. 利用可生物降解聚合物去除饮用水源水中硝酸盐[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(3): 32-35.
- [ 6 ] Chu L B, Wang J L. Nitrogen removal using biodegradable polymers as carbon source and biofilm carriers in a moving bed biofilm reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **170**(1): 220-225.
- [ 7 ] Chu L B, Wang J L. Comparison of polyurethane foam and biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio[J]. Chemosphere, 2011, **83**(1): 63-68.
- [ 8 ] 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**(8): 2315-2319.
- [ 9 ] Aslan S, Türkman A. Biological denitrification of drinking water using various natural organic solid substrates[J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(11-12): 489-495.
- [ 10 ] Su C M, Puls R W. Removal of added nitrate in the single, binary, and ternary systems of cotton burr compost, zerovalent iron, and sediment: Implications for groundwater nitrate remediation using permeable reactive barriers[J]. Chemosphere, 2007, **67**(8): 1653-1662.
- [ 11 ] Rocca C D, Belgiorno V, Meriç S. An heterotrophic/autotrophic denitrification (HAD) approach for nitrate removal from drinking water[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(5): 1022-1028.
- [ 12 ] Inês M, Soares M, Abeliovich A. Wheat straw as substrate for water denitrification [J]. Water Research, 1998, **32**(12): 3790-3794.
- [ 13 ] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 748-754.
- [ 14 ] Xu Z X, Shao L, Yin H L, et al. Biological denitrification using corncobs as a carbon source and biofilm carrier [J]. Water Environment Research, 2009, **81**(3): 242-247.
- [ 15 ] Aslan S, Türkman A. Simultaneous biological removal of endosulfan ( $\alpha + \beta$ ) and nitrates from drinking waters using wheat straw as substrate [J]. Environment International, 2004, **30**(4): 449-455.
- [ 16 ] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 以稻草为碳源和生物膜载体去除水中的硝酸盐[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1414-1419.
- [ 17 ] Rocca C D, Belgiorno V, Meriç S. Cotton-supported heterotrophic denitrification of nitrate rich drinking water with a sand filtration post-treatment [J]. Water Research, 2005, **31**(2): 229-236.



- [18] 范振兴, 赵璇, 王建龙. 利用辐照预处理麦秆作为反硝化固体碳源的研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1090-1094.
- [19] 邵留, 徐祖信, 王晟, 等. 新型反硝化固体碳源释碳性能研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2323-2327.
- [20] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 蒋绍阶, 刘宗源. UV<sub>254</sub>作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, **24**(2): 61-65.
- [22] 郝瑞霞, 曹可心, 邓亦文. 三维荧光光谱法表征污水中溶解性有机污染物[J]. 分析实验室, 2007, **26**(10): 41-44.
- [23] 李栋, 毛志怀. 稻谷自然晾晒后显微结构分析研究[J]. 农业工程学报, 2003, **19**(2): 156-159.
- [24] Hudson N, Baker A, Reynolds D. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters-a review[J]. River Research and Applications, 2007, **23**(6): 631-649.
- [25] 陈英旭, 金赞芳, 李文腾, 等. 一株反硝化菌的分离鉴定和系统发育分析[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(7): 38-44.

## 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 <sub>2.5</sub> 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-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> 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 Changde 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 Phosphorus 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 Floes .....	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 Floes .....	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 Picoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <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 <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 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