

# 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 <sub>2.5</sub> .....                        | 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)                        |
| $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究 ..... | 岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)                     |
| 活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学 .....                                                   | 杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)                                   |
| ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究 .....                                                | 杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)                                    |
| O <sub>3</sub> -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 <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 通量比较初探 .....                | 李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)                               |
| 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素 .....                                              | 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)                        |
| 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素 .....                                            | 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)                           |
| 层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估 .....                                           | 姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)              |
| 海州湾潮滩重金属污染的历史记录 .....                                                     | 张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)                |
| 草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价 .....                                         | 张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)                            |
| 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析 .....                                                 | 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)                        |
| 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估 .....                                        | 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)                            |
| 典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估 .....                                        | 李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)                            |
| 城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究 .....                                             | 陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)                                      |
| 典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义 .....                                        | 龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)     |
| 生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究 .....                                                    | 张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)                  |
| 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究 .....                                          | 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)                                 |
| Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素 .....                                          | 钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)                            |
| 新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险 .....                                   | 马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)                     |
| 青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源 .....                                        | 何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)                        |
| 太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布 .....                                         | 马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)                    |
| 典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析 .....                                              | 刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)                                 |
| 柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性 .....                                                     | 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)                                 |
| 机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究 .....                                               | 牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)                             |
| 污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较 .....                                            | 崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)                            |
| 固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响 .....                                             | 刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)                                      |
| 铸造废砂的环境毒性研究 .....                                                         | 张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)                            |
| Cr <sup>6+</sup> 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)     |                                                         |

# 反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析

于皓<sup>1,2</sup>, 王爱杰<sup>1\*</sup>, 陈川<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000)

**摘要:** 为了研究反硝化脱硫工艺 (denitrifying sulfide removal, DSR) 中微生物群落与工艺运行的相关性, 实验提取了反应器运行不同阶段污泥样品中微生物的全基因组 DNA, 利用高通量宏基因组学技术——基因芯片来解析各阶段功能微生物群落的结构特征及其演替过程。通过对功能基因的 Simpson、Shannon 多样性指数和聚类分析表明, 微生物群落结构会随着反应器运行的阶段进行相应调整, 且变化较大。在运行的前两个阶段, 由于不适应环境, 微生物群落的多样性指数比起始时明显减少, 随着反应器的运行污泥逐渐成熟, 多样性指数迅速增加, 也标志着反应器进入稳定运行阶段。通过对反硝化脱硫过程中关键基因相对丰度的分析发现, 功能基因的丰度不仅能反映功能菌群的活性, 而且与工艺处理效果密切相关。

**关键词:** 反硝化脱硫工艺; 功能基因芯片; 微生物群落; 厌氧膨胀颗粒床反应器; 聚类分析

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1190-06

## Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process

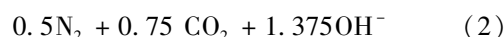
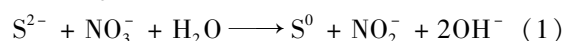
YU Hao<sup>1,2</sup>, WANG Ai-jie<sup>1</sup>, CHEN Chuan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to investigate the relationship between the structure of microbial community and the operational efficiency of the denitrifying sulfide removal (DSR) process, whole genomic DNA was extracted from sludge samples at each operational stage. Functional gene arrays (FGAs), a high throughput metagenomic technology, was employed to characterize the change of microbial community structure in DSR process. The results of diversity indices (Simpson and Shannon indices) and clustering showed that the microbial community structure changed greatly with stages according to the operational conditions. In stage I and II, diversity indices and richness decreased due to acclimation of the microbial community to the environment, whereas they increased notably according to the maturing of sludge which may indicate that the bioreactor entered the steady stage. Analysis of key functional genes showed that the abundance of genes did not only reflect the activities of functional bacteria but also had a close relationship with the reactor performance.

**Key words:** DSR process; functional gene array; microbial community; expanded granular sludge bed reactor; cluster analysis

近些年来由于制药、化工、食品等行业的迅猛发展, 导致每年产生大量的含硫含氮的有机废水。这类废水具有有机物浓度高、毒性大, 如果处理不当容易造成二次污染等特点, 因此治理含硫含氮工业废水已经成为环境保护领域研究的热点与难点。与传统的物理化学处理方法相比生物处理方法既经济又环保, 并且硫系化合物可以在微生物的作用下生成颗粒状的单质硫, 通过分离提取不仅可以彻底解决水中硫系化合物难去除的问题还可以实现硫元素的资源化回收。反硝化脱硫工艺 (denitrifying sulfide removal, DSR) 可以实现碳、氮、硫的生物同步脱除<sup>[1]</sup>。该工艺利用  $\text{NO}_3^-$  作为电子受体同时去除  $\text{S}^{2-}$  与  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ , 反应式如下<sup>[2]</sup>:



Reyes-Avila 等<sup>[3]</sup>在 2004 年采用连续流搅拌槽式反应器 (CSTR) 实现了废水中碳氮硫的同步脱除。Chen 等<sup>[4]</sup>研究了自己改造的厌氧膨胀颗粒床反应器 (EGSB) 在高负荷下碳氮硫脱除的效果。目前基于 DSR 工艺的研究工作主要侧重于反应器的设计与运行条件优化等方面, 而对反应器内的微生物群落结构以及功能的研究仍十分有限。这不仅是由于反应器内部多种功能菌群相互之间关系复杂而且也受限于研究手段, 采用传统的分子生物学方法得到的信息量非常有限, 限制了人们对微生物群落的深

收稿日期: 2012-06-01; 修订日期: 2012-08-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2011AA060904)

作者简介: 于皓 (1976 ~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为环境基因组学, E-mail: micro\_yh@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: waj0578@hit.edu.cn

入研究.

基因芯片技术是基于宏基因组学原理下发展起来的现代分子生物学技术,是研究环境微生物的有效手段<sup>[5]</sup>. 它具有高通量、快速、灵敏度高等特点,已经广泛的应用于如土壤<sup>[6~8]</sup>、油田<sup>[9~11]</sup>、水体<sup>[12,13]</sup>、海洋及其沉积物<sup>[14,15]</sup>、生物反应器系统内<sup>[16,17]</sup>的微生物群落分析.

本研究利用基因芯片技术对 DSR 工艺运行过程中不同阶段的微生物群落结构进行探讨,分析微生物群落结构与功能的变化规律,以期为提高处理效果,优化 DSR 工艺系统运行提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置与启动

本实验采用 Chen 等<sup>[1]</sup>设计的 EGSB 反应器. 该反应器直径 80 mm,高 200 cm,有效工作体积为 4 L,温度为 28℃ ± 1℃. 反应器内污泥采用一体式反硝化脱硫工艺过程形成的颗粒污泥作为接种污泥.

反应器启动阶段的进水流量  $Q = 9.6 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ , HRT = 23.9 h, 进水为自配水, 进水各物质组成为  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ : 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{S}^{2-}$ : 200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3^-$ : 350  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NaHCO}_3$ : 1 500  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ : 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ : 50  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

1.2 工艺运行及取样条件

反应器运行共分为 4 个阶段: 第一阶段, 从启动开始到第 17 d 为启动阶段; 第二阶是从第 18 d 开始, 加大进水流量至  $Q = 20.5 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$  并在以后的运行过程中保持该进水流量不变, 同时降低进水乙酸盐浓度为调整适应阶段; 第三阶段为提负强化驯化阶段, 是从运行的 23 d 开始, 同时提高进水中的硫化物、硝酸盐、乙酸盐浓度; 第四阶段为污泥成熟与稳定运行阶段, 在运行至 28 d 时继续增加进水硝酸盐浓度. 实验期间共取样 4 次, 具体取样时条件与运行效果见表 1, 出水中各项物质的浓度采用离子色谱、电极电位滴定法测定<sup>[2]</sup>.

表 1 取样时间与运行效果

| Table 1 Operational data at the sampling time |        |                                     |                 |               |                 |                 |               |                                     |                    |
|-----------------------------------------------|--------|-------------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------------------------|--------------------|
| 取样编号                                          | 运行时间/d | 进水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |                 |               | 去除率/%           |                 |               | 出水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |                    |
|                                               |        | $\text{NO}_3^-$                     | $\text{S}^{2-}$ | $\text{Ac}^-$ | $\text{NO}_3^-$ | $\text{S}^{2-}$ | $\text{Ac}^-$ | $\text{NO}_2^-$                     | $\text{SO}_4^{2-}$ |
| D1                                            | 1      | 384.40                              | 210.60          | 205.60        | 99.20           | 1.10            | 44.30         | 0.00                                | 101.50             |
| D2                                            | 20     | 370.45                              | 217.60          | 164.11        | 100.00          | 100.00          | 100.00        | 76.06                               | 86.55              |
| D3                                            | 25     | 716.00                              | 389.80          | 315.00        | 100.00          | 89.19           | 100.00        | 138.60                              | 67.80              |
| D4                                            | 32     | 799.71                              | 409.60          | 313.96        | 100.00          | 100.00          | 100.00        | 327.64                              | 57.25              |

1.3 样品 DNA 的准备

根据反应器的运行条件分别取工艺运行第 1、20、25、32 d 的新鲜污泥马上装入无菌的 5 mL Eppendorf 管中,迅速置于 -80℃ 冰箱中保存. 每次取 200  $\mu\text{L}$  反应器污泥样品加入 625  $\mu\text{L}$  的 DNA 提取液 (100  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  Tris-HCl (pH 8), 100  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDTA (pH 8), 100  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  磷酸钠 (pH 8), 1.5  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaCl, 1% CTAB) 采用 Zhou 等的<sup>[18]</sup> SDS 裂解法提取 DNA.

取 100 ng 提好的 DNA 作为模板用 Templiphi 500 试剂盒 (GE Healthcare, Piscataway, NJ) 进行放大,反应条件为 30℃ 下连续扩增 6 h,然后在 65℃ 下 10 min 来终止反应<sup>[19]</sup>. 放大后的 DNA 用 Cy5 荧光染料 (GE Healthcare) 标记<sup>[9,20]</sup>并用 QIAquick 纯化试剂盒 (Qiagen) 纯化,干燥,保存在 -20℃ 冰箱备用.

1.4 DNA 杂交与扫描

用 50  $\mu\text{L}$  的杂交缓冲液 (45% formamide, 2.5 × SSC, 0.1% SDS, 0.1  $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  Herring sperm

DNA) 将干燥后的 DNA 重新溶解. 待溶解充分后,在 98℃ 下变性 3 min,在 65℃ 下点样. 点好样品的芯片在 42℃ 下杂交 10 h. 杂交完毕后,芯片用 ScanArray 500 (PerkinElmer, Boston, MA, USA) 型芯片扫描仪扫描. 使用的芯片为美国俄克拉荷马大学周集中教授等人开发的 GeoChip 2.0. 该芯片是功能基因芯片,主要针对微生物降解以及地理化学循环相关的功能基因设计探针<sup>[21]</sup>,探针来源于该实验室克隆、测序得到的序列和 NCBI 数据库中已知的序列. 该芯片包含了 24 243 个 50 mer 的寡核苷酸基因探针,包含了碳、氮、磷、硫循环,金属还原和有机物降解等过程在内的 10 000 多个功能基因<sup>[5]</sup>.

1.5 数据处理与微生物群落结构分析

芯片杂交后得到信号值经过均一化后根据 (信号值 - 背景值)/背景值的标准偏差 ≥ 2.0 去掉噪声. 微生物群落多样性分析选用 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数. Simpson 指数<sup>[22]</sup>:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Shannon-Weaver 指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i$$

式中,  $S$  为污泥中检测到的总的功能基因数量,  $P_i$  为第  $i$  个基因的信号强度占总信号强度的比例. Hierarchical 聚类分析利用斯坦福大学 Michael Eisen 开发的 CLUSTER 和 TREEVIEW 软件.

## 2 结果与讨论

### 2.1 DSR 工艺运行各阶段微生物群落多样性分析

DSR 工艺各阶段污泥样品经过基因芯片杂交后得到的基因数和多样性指数结果见图 1, 污泥中的微生物群落发生了非常明显的变化. 而随着反应器的运行以及进水流量的改变 D2 样品检测到的基因数与多样性指数比反应器启动时 D1 的明显降低, 这是由于 DSR 工艺启动时采用的是一体式反应器的颗粒污泥, 污泥种保存在含有硫酸盐的营养液

中, 而 DSR 工艺进水中的主要物质为  $S^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $Ac^-$ , 因此在这段时间里微生物群落在逐步地发生着演替, 原有的硫酸盐还原细菌生长受到了抑制甚至死亡, 加之在 18 d 时进水流量增加了 1 倍, 对微生物群落冲击较大, 所以导致 D2 样品群落多样性较低. 在运行到 23 d 时把进水中的硫化物、硝酸盐、乙酸盐浓度增加一倍, 进一步加剧了污泥中微生物群落的演替, 在这个阶段里污泥中的微生物开始适应环境, 以反硝化脱硫为主要功能的群落初步形成, 微生物多样性快速增加. 因此 D3 样品检测到的基因数与多样性指数和 D2 样品相比迅速增加. 到了最后一个阶段, D4 样品多样性指数达到最大, 表明适应高硫氮负荷的新群落基本形成, 污泥进入成熟期.

### 2.2 工艺运行各阶段功能基因的聚类分析

为了进一步研究 DSR 工艺污泥中功能基因在不同的阶段表达情况, 对 4 个样品检测到的功能基因进行聚类分析 (cluster) 见图 2. 样品经聚类分析后分成两个组, 即 D1、D2 和 D3、D4. 这可能是由于微生物群落在反应器运行的前两阶段一直处于不稳定的状态, 内部不同的功能微生物的生态位不断地进行着调整, 而到了第三阶段群落结构和前两阶段相比发生了很大的变化并逐渐趋于稳定, 与最后的成熟阶段更加相似. 根据功能基因聚类的情况分为 4 组, 其中最明显的是第 2 组和第 3 组. 在第 2 组功能基因中主要包含碳循环、有机物降解以及硫酸盐还原基因, D1 检测到的基因的丰度明显高于其它阶段, 这是由于起始时存在着多种微生物, 随着不断的提高负荷许多微生物由于不适应环境而受到抑制甚至消失, 经过不断的驯化最后一个阶段一些能抵抗高硫氮负荷的微生物保留了下来并迅速生长繁殖. 第 3 组功能基因中主要包括与硫循环、反硝化相关的基因, 代表着 DSR 工艺中具有反硝化脱硫能力的功能微生物. 最后一阶段样品 (D4) 检测到的基因丰度高于其他阶段 2 倍以上, 此外, 本组检测到设计探针来源于被广泛报道的反硝化脱硫细菌 (nitrate-reducing sulfide-oxidizing bacteria, NR-SOB) *Thiobacillus denitrificans* 与 *Thiomicrospira denitrificans*<sup>[23]</sup> 在 D4 样品中有较高的丰度, 这些结果都表明在该阶段污泥中的反硝化脱硫功能微生物的优势地位已经确立并且有着很高的丰度, 也表明反应器运行进入稳定阶段.

### 2.3 不同运行阶段功能基因丰度分析

#### 2.3.1 反硝化基因丰度分析

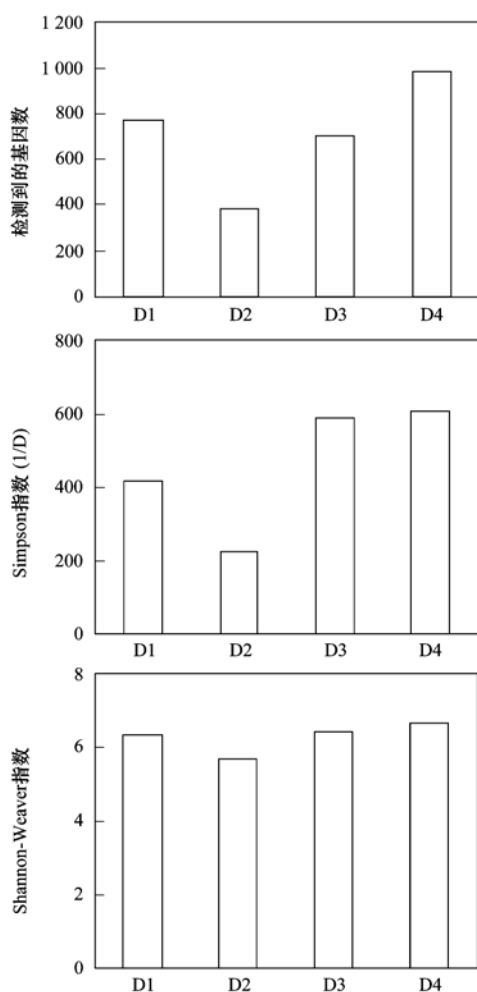


图 1 污泥样品中检测到的功能基因数与多样性指数

Fig. 1 Numbers of detected genes and diversity indexes in sludge samples

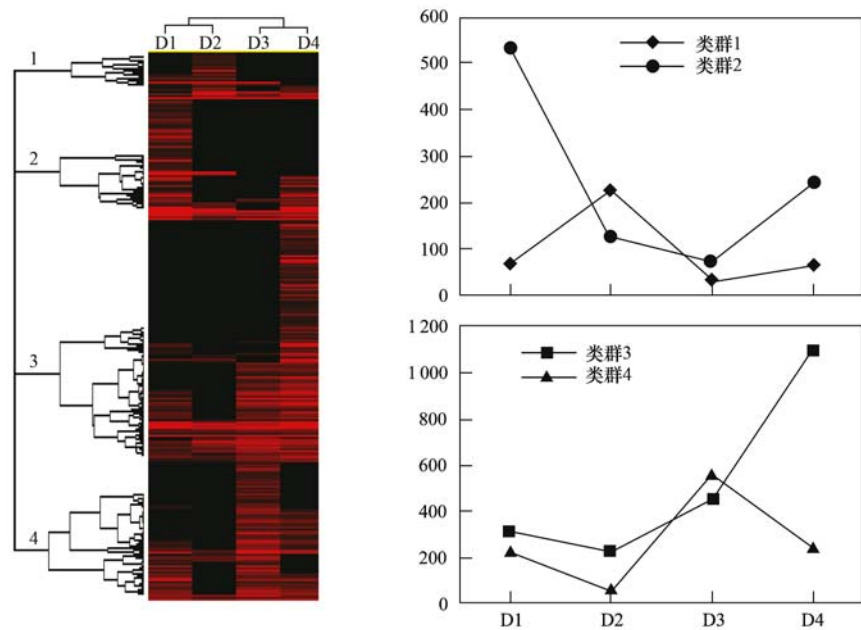


图2 Geochip 检测到功能基因的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of all functional genes detected by GeoChip

生物反硝化作用经过 4 个独立的酶过程,催化还原  $\text{NO}_3^-$  最终生成  $\text{N}_2$ . Geochip 2.0 针对这 4 个还原过程分别设计了 5 个关键基因,分别是: *narG* 基因,编码硝酸盐还原酶的催化中心,催化还原  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$ ,为反硝化过程的第一步; *nirS* 和 *nirK* 基因,分别编码两种结构不同的亚硝酸还原酶,  $\text{cd}_1$  型亚硝酸还原酶和  $\text{Cu}$  型亚硝酸还原酶,催化  $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$ ; *norB* 基因,编码一氧化氮还原酶的催化中心,催化  $\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$ ; *nosZ* 基因,编码氧化亚氮还原酶的催化中心,催化  $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$  [24,25].

在 4 个样品中均检测到以上 5 种基因的存在,其相对丰度见图 3. 与 D1、D2 样品相比,D3、D4 样品中各基因的相对丰度发生了明显的变化. 这是由于在第三、四阶段连续提高进水  $\text{NO}_3^-$  的浓度所致. 高浓度的  $\text{NO}_3^-$  刺激了反应器中反硝化微生物的生长,导致 D3、D4 样品中 *narG* 基因的相对丰度明显增加,进水中的  $\text{NO}_3^-$  全部被还原,去除率达到 100% (表 1). *nirS/K* 基因相对丰度的变化趋势与 *narG* 基因相似,经过第一步还原反应产生的大量的  $\text{NO}_2^-$  使得 D3 和 D4 样品 *nirS/K* 基因的相对丰度也有所增加,这两个阶段有着相对较强的  $\text{NO}_2^-$  还原能力. 但是由于碳源有限使得  $\text{NO}_2^-$  的生成速率大于消耗速率 [26] 造成在第三阶段  $\text{NO}_2^-$  累积,尤其在第四阶段,进水  $\text{NO}_3^-$  浓度最高  $\text{NO}_2^-$  累积现象也最为严重. 此外,反应器中自养反硝化微生物与异养反

硝化微生物共存,互相竞争 N 源,在碳源有限的情况下,异养反硝化微生物受到抑制而自养反硝化微生物迅速生长也是造成  $\text{NO}_2^-$  累积的重要原因 [27].  $\text{NO}_2^-$  大量累积导致反硝化过程产生的  $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  相对减少,受此影响 D3、D4 样品中的 *norB* 基因和 *nosZ* 基因的相对丰度明显偏低. 因此,在 DSR 工艺中要注意控制 C/N 比,才能保证异养反硝化微生物正常生长避免产生  $\text{NO}_2^-$  累积现象.

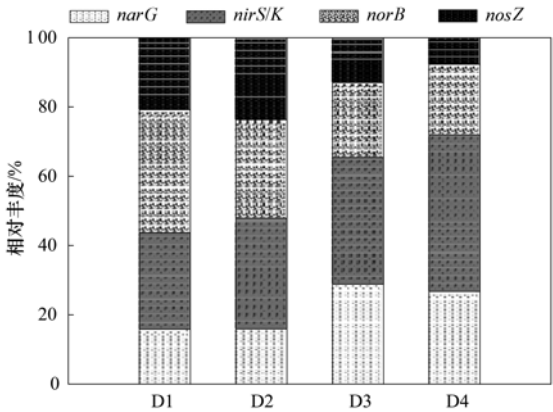


图3 反硝化过程功能基因相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of functional genes involved in the denitrification process

2.3.2 dsr 基因丰度分析

亚硫酸盐异化酶 (dissimilatory sulfite reductase, *dsr*) 是硫酸盐还原过程中非常重要的酶,它催化  $\text{SO}_3^{2-}$  还原最终生成  $\text{S}^{2-}$  [28]. *dsr* 由  $\alpha$ -和  $\beta$ -亚基组成,分别由 *dsrA* 和 *dsrB* 基因编码. 通过研究 *dsr* 基

因可以有助于了解群落中硫酸盐还原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) 的动态. 虽然本实验进水为  $S^{2-}$ , 但是  $S^{2-}$  会在硫氧化菌 (sulfur-oxidizing bacteria, SOB) 作用下氧化生成单质硫  $S^0$  以及较高价态的硫系物, 而体系中存在的 SRB 中的 *dsr* 酶会还原这些高价态的硫系物促进单质硫  $S^0$  的生成. 如图 4 所示, D1 样品中检测到的 *dsrA*、*dsrB* 基因的信号值高于 D2, 这是由于泥中保存在含有  $SO_4^{2-}$  的营养液中, 所以 SRB 的活性较高, 而随着反应器的运行, 进水物质为  $S^{2-}$  导致 SRB 生长受到抑制, 所以在 D2 样品中信号值较低. 在第三阶段开始提高进水物质的负荷, 大量的  $S^{2-}$  被氧化生成高价态的如  $SO_3^{2-}$ 、 $SO_4^{2-}$  等物质, 这些物质开始刺激 SRB 大量生长繁殖, 因此 D3、D4 样品的信号值比 D2 样品明显提高. 由此可见 SRB 在 DSR 工艺硫系物去除过程中发挥着重要作用.

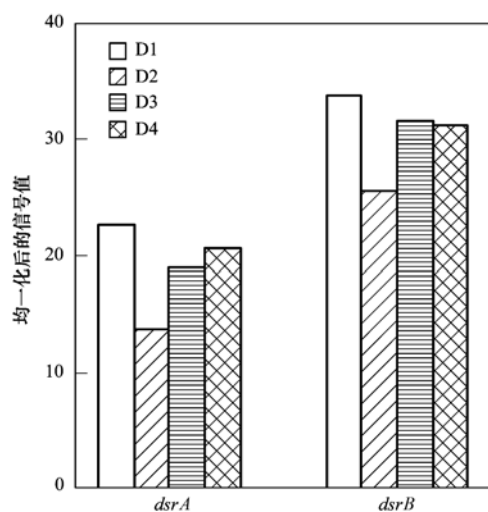


图 4 *dsr* 基因丰度

Fig. 4 Relative abundance of *dsr* gene

### 3 结论

(1) 反硝化脱硫工艺启动后微生物群落结构迅速随着外界条件发生了调整, 取得了较好的运行效果, 并且一直维持较高的去除率. 这说明 DSR 工艺有着较高的调整与适应能力.

(2) 反硝化脱硫反应器中微生物多样性比较丰富, 尤其是颗粒污泥污泥经过驯化进入成熟时期后微生物多样性指数较高, 有较强的抵抗负荷冲击能力.

(3) 反应器在运行过程中应保证充足的碳源以避免亚硝酸盐大量累积影响反硝化的效果.

(4) 群落中功能基因的丰度随着外界条件变化而改变, 通过对功能基因的研究可以快速、准确地

了解反应器在运行过程中存在的问题以及内部功能微生物的群落结构, 这对优化反应器运行参数, 提高处理效果是十分必要的.

### 参考文献:

- [1] Chen C, Ren N Q, Wang A J, *et al.* Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **78**(6): 1057-1063.
- [2] Chen C, Wang A J, Ren N Q, *et al.* High-rate denitrifying sulfide removal process in expanded granular sludge bed reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2316-2319.
- [3] Reyes-Avila J, Razo-Flores E, Gomez J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification [J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3313-3321.
- [4] Chen C, Wang A J, Ren N Q, *et al.* Biological breakdown of denitrifying sulfide removal process in high-rate expanded granular bed reactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **81**(4): 765-770.
- [5] He Z L, Gentry T J, Schadt C W, *et al.* GeoChip: a comprehensive microarray for investigating biogeochemical, ecological and environmental processes[J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(1): 67-77.
- [6] He Z L, Xu M Y, Deng Y, *et al.* Metagenomic analysis reveals a marked divergence in the structure of belowground microbial communities at elevated  $CO_2$  [J]. *Ecology Letters*, 2010, **13**(5): 564-575.
- [7] Deng Y, He Z, Xu M Y, *et al.* Elevated carbon dioxide alters the structure of soil microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, **78**(8): 2991-2995.
- [8] He Z L, Piceno Y, Deng Y, *et al.* The phylogenetic composition and structure of soil microbial communities shifts in response to elevated carbon dioxide[J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(2): 259-272.
- [9] Liang Y T, Li G H, Van Nostrand J D, *et al.* Microarray-based analysis of microbial functional diversity along an oil contamination gradient in oil field [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **70**(2): 324-333.
- [10] Liang Y T, Van Nostrand J D, Wang J, *et al.* Microarray-based functional gene analysis of soil microbial communities during ozonation and biodegradation of crude oil [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(2): 193-199.
- [11] Liang Y T, Van Nostrand J D, Deng Y, *et al.* Functional gene diversity of soil microbial communities from five oil-contaminated fields in China [J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(3): 403-413.
- [12] Van Nostrand J D, Wu W M, Wu L Y, *et al.* GeoChip-based analysis of functional microbial communities during the reoxidation of a bioreduced uranium-contaminated aquifer [J]. *Environmental Microbiology*, 2009, **11**(10): 2611-2626.
- [13] Xie J P, He Z L, Liu X X, *et al.* GeoChip-based analysis of the functional gene diversity and metabolic potential of microbial communities in acid mine drainage [J]. *Applied and*

- Environmental Microbiology, 2011, **77**(3): 991-999.
- [14] Hazen T C, Dubinsky E A, DeSantis T Z, *et al.* Deep-sea oil plume enriches indigenous oil-degrading bacteria[J]. Science, 2010, **330**(6001): 204-208.
- [15] Wu L Y, Kellogg L, Allan H D, *et al.* Microarray-based characterization of microbial community functional structure and heterogeneity in marine sediments from the gulf of mexico[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(14): 4516-4529.
- [16] Liu W Z, Wang A J, Cheng S, *et al.* Geochip-based Functional Gene analysis of anodophilic communities in microbial electrolysis cells under different operational modes [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(19): 7729-7735.
- [17] Liu W Z, Wang A J, Sun D, *et al.* Characterization of microbial communities during anode biofilm reformation in a two-chambered microbial electrolysis cell (MEC)[J]. Journal of Biotechnology, 2012, **157**(4): 628-632.
- [18] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(2): 316-322.
- [19] Wu L Y, Liu X D, Schadt C W, *et al.* Microarray-based analysis of subnanogram quantities of microbial community DNAs by using whole-Community genome amplification [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(7): 4931-4941.
- [20] Wu L Y, Liu X D, Fields M W, *et al.* Microarray-based whole-genome hybridization as a tool for determining procaryotic species relatedness[J]. The ISME Journal, 2008, **2**(6): 642-655.
- [21] 尹华群. 在铜矿矿坑水微生物群落结构与功能研究中基因芯片技术的发展和应[ D ]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [22] 钟毅, 张旭, 梁玉婷, 等. 基于基因芯片技术的石油污染土壤微生物群落结构[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, **50**(9): 1396-1399.
- [23] Garcia-de-Lomas J, Corzo A, Portillo M C, *et al.* Nitrate stimulation of indigenous nitrate-reducing, sulfide-oxidising bacterial community in wastewater anaerobic biofilms[J]. Water Research, 2007, **41**(14): 3121-3131.
- [24] 梁丽华, 左剑恶. 反硝化功能基因——检测反硝化菌种群结构的分子标记[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(4): 627-633.
- [25] Scala D J, Kerkhof L J. Nitrous oxide reductase (*nosZ*) gene-specific PCR primers for detection of denitrifiers and three *nosZ* genes from marine sediments[J]. FEMS Microbiology Letters, 1998, **162**(1): 61-68.
- [26] 谢丽, 蔡碧婧, 杨殿海, 等. 亚硝酸积累条件下反硝化脱氮过程动力学模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, **37**(2): 224-228.
- [27] Chen C, Ren N Q, Wang A J, *et al.* Microbial community of granules in expanded granular sludge bed reactor for simultaneous biological removal of sulfate, nitrate and lactate[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **79**(6): 1071-1077.
- [28] 张双月, 吴秀娟, 任洪强, 等. 垃圾渗滤液污染地下水中硫酸盐还原菌种群结构多样性分析[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13**(3): 395-400.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                      |                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network .....                                                  | GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> ( 817 )     |
| Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City .....                                                                                         | LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> ( 826 )     |
| Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta .....                                                          | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> ( 835 )      |
| Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition .....                                                                              | LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> ( 842 )           |
| Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter .....                                                                        | HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng ( 849 )                         |
| Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010 .....                                                                          | LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong ( 857 )                         |
| Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay .....                                                          | ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> ( 864 )           |
| Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau .....                                                                              | WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> ( 874 )     |
| Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices ( BMPs ) in the Zhangweinan River Basin .....                                        | XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin ( 882 )                           |
| An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control .....                                                                                          | ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> ( 892 )                 |
| Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland .....                                                                                     | LUO Zhuan-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> ( 900 ) |
| Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater .....                                                                              | ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> ( 907 )      |
| Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier .....                                                                                                           | LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> ( 914 )         |
| Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District .....                                                                                                     | LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> ( 919 )        |
| Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....                                                          | WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> ( 927 )  |
| Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses .....                                                                                          | SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> ( 933 )               |
| Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter .....                                                                              | LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> ( 943 )                   |
| Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment .....                                                      | FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> ( 950 )      |
| Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                    | 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 <sub>3</sub> -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 <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> 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 <sup>6+</sup> .....                                                        | 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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