

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**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

|                                                                                           |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 基于过氧化物的消毒技术研究进展 .....                                                                     | 习海玲, 赵三平, 周文 (1645)                         |
| 环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 .....                                                                 | 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)   |
| 不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 .....                                                            | 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)           |
| 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 .....                                                       | 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)                          |
| 基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 .....                                                                | 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)          |
| 我国东北地区地表水酸化现状 .....                                                                       | 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)                     |
| 西安市对渭河水质的影响分析 .....                                                                       | 于婕, 李怀恩 (1700)                              |
| 极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 .....                                                  | 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)                     |
| 应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 .....                                                           | 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)                |
| 长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 .....                                                       | 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)                |
| 温州城市降雨径流中BOD <sub>5</sub> 和COD污染特征及其初始冲刷效应 .....                                          | 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)                     |
| 影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 .....                                                                | 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)                         |
| 香溪河库湾春季pCO <sub>2</sub> 与浮游植物生物量的关系 .....                                                 | 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)          |
| 紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 .....                                                                | 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)                  |
| 高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 .....                                                      | 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)              |
| 纳米Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 ..... | 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)                    |
| 水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 .....                                                               | 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)          |
| 酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 .....                                                             | 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)                |
| 镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 .....                                                                  | 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)               |
| 基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 .....                                                            | 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)                   |
| 不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 .....                                                                | 万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)                   |
| 壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 .....                                                            | 张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)                    |
| 城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 .....                                                                | 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)                |
| 倒置A <sup>2</sup> /O-MBR处理城市污水的中试研究 .....                                                  | 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)       |
| 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 .....                                                                 | 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)                     |
| 短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N <sub>2</sub> O释放特性 .....                                                 | 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)                    |
| 基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 .....                                                          | 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)                   |
| 多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 .....                                                             | 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)                |
| 浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 .....                                                      | 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)                   |
| 苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 .....                                                               | 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)                   |
| 四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 .....                                                              | 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)                         |
| 咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 .....                                                               | 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)                   |
| 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 .....                                                           | 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)                   |
| 内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 .....                                                      | 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)           |
| 福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 .....                                                                 | 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)               |
| 重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 .....                                                              | 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)                    |
| 丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 .....                                                          | 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)           |
| 海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 .....                                                                   | 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)          |
| 1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 .....                                                     | 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)                    |
| 1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 .....                                                               | 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)        |
| 2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 .....                                                             | 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945) |
| 养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 .....                                                          | 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)           |
| 1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 .....                                                 | 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)         |
| 黄山降水酸度及电导率特征分析 .....                                                                      | 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)           |
| 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 .....                                                              | 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)                      |
| 广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 .....                                                             | 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)         |
| 福建省三大城市冬季PM <sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征 .....                                            | 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)         |
| 上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 .....                                                                     | 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)       |
| 上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算 .....                                                                   | 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)     |
| 沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 .....                                                       | 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)                         |
| 厦门秋季近郊地面CO <sub>2</sub> 浓度变化特征研究 .....                                                    | 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)                |
| GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b .....                                                   | 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)                |
| 城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 .....                                                                  | 方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)               |
| 城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 .....                                                           | 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)           |
| 内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 .....                                                                  | 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)          |
| 义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 .....                                                                   | 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)                             |
| 基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 .....                                                    | 谢元博, 李巍 (2057)                              |
| 《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)                 |                                             |

# 短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 $\text{N}_2\text{O}$ 释放特性

梁小玲, 李平\*, 吴锦华, 王向德

(华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 污染控制与生态修复广东省普通高等学校重点实验室, 广州 510006)

**摘要:** 采用气升环流生物反应器建立全程同步硝化反硝化(SND)体系, 在此基础上, 通过提高进水 pH 值从而增加反应器中的游离氨(FA)浓度, 可以实现全程 SND 向短程 SND 的转变. 以全程 SND 过程为参照, 分析了短程 SND 过程的脱氮及  $\text{N}_2\text{O}$  释放特性. 结果表明, 短程 SND 过程的总氮平均去除率及 SND 平均效率分别为 71.9% 和 80.9%, 比全程 SND 过程分别提高了 18.0 和 16.8 个百分点, 短程 SND 过程的平均总氮去除速率为  $0.11 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ , 是全程 SND 过程的 1.4 倍. 虽然短程 SND 较全程 SND 具有更高的脱氮效率, 但该过程的  $\text{N}_2\text{O}$  平均转化率为 57.1%,  $\text{N}_2\text{O}$  平均累积释放量约为全程 SND 过程的 5 倍. 研究还发现,  $\text{N}_2\text{O}$  的释放量急剧上升与体系中  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累浓度升高密切相关.

**关键词:** 短程同步硝化反硝化;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 亚硝酸盐; 好氧颗粒污泥; 生物脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1845-06

## Nitrogen Removal and $\text{N}_2\text{O}$ Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process

LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, WANG Xiang-de

(Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Key Laboratory of Environmental Protection and Eco-Remediation of Guangdong Regular Higher Education Institutions, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Complete simultaneous nitrification and denitrification (SND) was achieved in an air lift circulation bioreactor. Based on this condition, the system could be switched to shortcut SND as the free ammonia (FA) concentration was increased with higher influent pH. The nitrogen removal and  $\text{N}_2\text{O}$  emission characteristics of the shortcut SND process were investigated and those of the complete SND process were also observed as control. In the shortcut SND process, the average total nitrogen removal and average SND efficiency reached 71.9% and 80.9%, which was 18.0 and 16.8 percents higher than those in the complete SND process, respectively. In addition, the total nitrogen removal rate in the shortcut SND process was  $0.11 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ , 1.4 times as high as that in the complete SND process. Although higher nitrogen removal efficiency was obtained in the shortcut SND process, the mean  $\text{N}_2\text{O}$  conversion rate reached 57.1% and the average  $\text{N}_2\text{O}$  accumulated emission amount was approximately 4 times higher than that in the complete SND process. The results also indicated that the increase of  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  concentration in the reactor should be responsible for the remarkable enhancement of  $\text{N}_2\text{O}$  emission.

**Key words:** shortcut simultaneous nitrification and denitrification (shortcut SND);  $\text{N}_2\text{O}$ ; nitrite; aerobic granular sludge; biological nitrogen removal

同步硝化反硝化(simultaneous nitrification and denitrification, SND)是指在同一反应器中同步进行硝化和反硝化过程的一种生物脱氮工艺; 如果将 SND 的硝化过程控制在亚硝化阶段并直接由亚硝酸盐进行反硝化, 则可以实现短程 SND<sup>[1]</sup>. 短程 SND 无需进行亚硝酸盐氧化为硝酸盐和硝酸盐还原为亚硝酸盐的反应, 理论上比全程 SND 更具有节省曝气和碳源的优势.

$\text{N}_2\text{O}$  是一种重要的温室气体, 它在大气中的停留时间约为 114 a, 致温效应约为  $\text{CO}_2$  的 298 倍, 对全球气候暖化的贡献约为 6%, 并对臭氧层有显著的破坏作用<sup>[2]</sup>. 废水生物脱氮过程是大气中  $\text{N}_2\text{O}$

的重要来源之一, 不完全的硝化和反硝化过程均能产生  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[3]</sup>. 在 SND 过程中, 硝化菌和反硝化菌均处于“胁迫”状态, 增加了  $\text{N}_2\text{O}$  释放的可能性<sup>[4]</sup>. 另一方面, 实现短程 SND 的前提是抑制亚硝酸盐氧化菌的活性, 阻止亚硝酸盐进一步氧化为硝酸盐<sup>[5]</sup>. 研究表明<sup>[6,7]</sup>, 在生物脱氮过程中, 亚硝酸盐的积累可能引起  $\text{N}_2\text{O}$  大量释放. Itokawa 等<sup>[6]</sup>指出, 在低

收稿日期: 2012-06-12; 修订日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(20477011); 广州市科技计划项目(2012Y2-00005); 广东省教育部产学研结合项目(2012B091100146)

作者简介: 梁小玲(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: xling\_l@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: pli@scut.edu.cn

C/N 的反硝化过程中,以亚硝酸盐为电子受体的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量显著高于以硝酸盐为电子受体的情况. Kim 等<sup>[7]</sup>研究发现,向硝化体系中投加亚硝酸盐会导致  $\text{N}_2\text{O}$  释放量急剧增加. 由此,短程 SND 过程的  $\text{N}_2\text{O}$  释放量可能高于全程 SND 过程. 鉴于  $\text{N}_2\text{O}$  对环境的重要影响,要使短程 SND 成为一种清洁的脱氮工艺,有必要明确短程 SND 脱氮过程对  $\text{N}_2\text{O}$  的贡献及该过程  $\text{N}_2\text{O}$  的释放规律. 迄今为止,短程 SND 过程的  $\text{N}_2\text{O}$  释放特性鲜见文献报道.

本研究以全程 SND 过程为参照,分析了短程 SND 过程的脱氮及  $\text{N}_2\text{O}$  释放特性,以期对短程 SND 运行优化提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 反应器及运行方式

实验采用的装置为序批式气升环流生物反应器. 反应器高为 0.45 m,内径为 0.14 m,有效容积为 5.3 L,顶空体积为 0.5 L,结构如图 1 所示. 空气由气泵经底部曝气头泵入反应器中,并通过转子流量计调节流量,以控制反应器中 DO 浓度;当空气流量较低时,采用补加  $\text{N}_2$  气的方式确保反应器内泥水均匀混合. 气泵、进水计量泵和出水口电磁阀由程序控制器精密控制,按如下方式运行:每天循环 3 个周期,每个周期为 480 min,其中进水 5 min、曝气 420 min、沉淀 5 min、排水 5 min,余下为闲置时间. 每周期排水 3.8 L,排水后剩余体积 1.5 L.

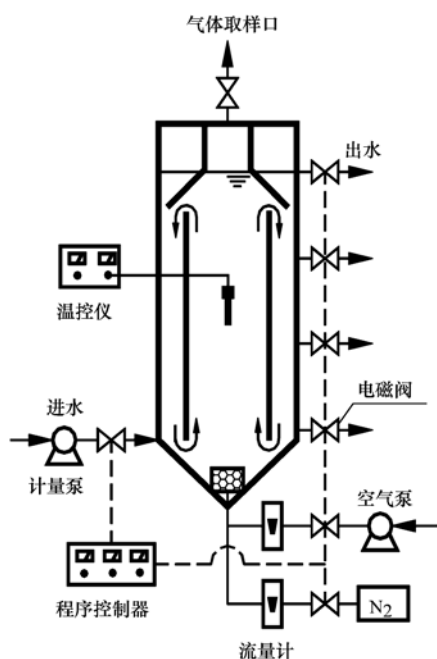


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental reactor

### 1.2 进水水质及接种污泥

实验采用模拟废水,成分如下 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ):葡萄糖 425、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  345、 $\text{NaHCO}_3$  550、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  100、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  37.5、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  100、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  15、 $\text{CaCl}_2$  50、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.1、 $\text{CoCl}_2$  0.1、 $\text{H}_3\text{BO}_3$  0.1、 $\text{MnCl}_2$  0.1、 $\text{ZnSO}_4$  0.1、 $\text{CuCl}_2$  0.1、 $\text{NiCl}_2$  0.1. 用  $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{HCl}$  或  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  调节废水的 pH 值. 接种污泥取自西塍污水处理厂二沉池回流污泥. 反应器运行过程中 SRT 约为 25 ~ 30 d, MLSS 控制在  $4\,000\sim 4\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 气体采集与分析

气体通过反应器曝气产生的压力,由反应器顶部的采气口恒压进入注射器内,每隔 15 min 或 30 min 采样一次.  $\text{N}_2\text{O}$  采用 GC-ECD(7890 II, 上海天美)分析,色谱柱、进样口和检测器工作温度分别为  $45^\circ\text{C}$ 、 $130^\circ\text{C}$  及  $280^\circ\text{C}$ ,以高纯氮气为载气,流速为  $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .  $\text{N}_2\text{O}$  释放速率、 $\text{N}_2\text{O}$  累积释放量的计算方法见文献[8].

#### 1.3.2 水质分析方法

pH 采用 pH 计 (PHS-3C, 上海雷磁)测定; DO 采用溶氧仪 (YSI-550A, 美国金泉)测定.  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、TN 和 COD 按标准方法测定<sup>[9]</sup>.

$E_{\text{SND}}(\%)$ ,即 SND 效率,通过公式(1)计算<sup>[10]</sup>.

$$E_{\text{SND}} = \frac{\Delta\text{TN}}{\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}} \times 100 \quad (1)$$

式中, $\Delta\text{TN}$  指总氮去除量, $\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 指氨氮去除量.

$\text{NAR}(\%)$ ,即亚硝酸盐积累率,通过公式(2)计算<sup>[11]</sup>.

$$\text{NAR} = \frac{\text{NO}_2^--\text{N}}{\text{NO}_3^--\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N}} \times 100 \quad (2)$$

式中, $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 指出水中亚硝酸盐氮和硝酸盐氮的浓度.

$R_{\text{N}_2\text{O}-\text{N}}(\%)$ ,即  $\text{N}_2\text{O}$  转化率,通过公式(3)计算<sup>[11]</sup>.

$$R_{\text{N}_2\text{O}-\text{N}} = \frac{Q}{\Delta\text{TN}} \times 100 \quad (3)$$

式中, $Q$  为  $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$  累积释放量, $\Delta\text{TN}$  为总氮去除量.

$\text{FA}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ ,即游离氨浓度,通过公式(4)计算<sup>[11]</sup>.

$$\text{FA} = \frac{17}{14} \times \frac{\text{NH}_4^+-\text{N} \times 10^{\text{pH}}}{e^{6.344/(273+t)} + 10^{\text{pH}}} \quad (4)$$

式中, $\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$  为废水中氨氮质量浓度, $t$  ( $^\circ\text{C}$ ) 为反应温度.

1.3.3 污泥性能分析方法

SVI、SV<sub>30</sub>、MLSS 按标准方法测定<sup>[9]</sup>. 污泥粒径采用湿筛分法测量<sup>[12]</sup>. 比耗氧呼吸速率[specific oxygen uptake rate, SOUR, O<sub>2</sub>·(MLSS·t)<sup>-1</sup>]的测试方法见文献[13].

2 结果与讨论

2.1 反应器启动及 SND 类型转变

将接种污泥按反应器体积比的 25% 移入反应器驯化,采用选择压法<sup>[14]</sup>培养好氧颗粒污泥,以实现 SND. 进水 pH 值为 7.0,DO 为 1 mg·L<sup>-1</sup>,温度为 25℃. 接种污泥为灰黑色絮状污泥,SVI 为 81 mL·g<sup>-1</sup>. 驯化 60 d 后污泥状态基本稳定,反应器中出现粒径为 500 ~ 1 000 μm 的金黄色成熟颗粒污泥,SVI 为 33 mL·g<sup>-1</sup>,沉降性能良好,其特征与 Yang 等<sup>[15]</sup>描述的成熟好氧颗粒污泥特征相似.

图 2 和表 1 分别给出了反应器的运行状况和稳定阶段的运行效率. 随着好氧颗粒污泥的形成,反应器的脱氮效率逐渐上升,驯化 60 d 后达到了稳定状态(阶段 I). 由表 1 可知,稳定阶段氨氮、总氮平均去除率和 SND 平均效率分别为 99.9%、53.9% 和 64.1%,脱氮效率与文献[16]中相似运行条件下 SND 工艺的脱氮效率相近,由此可认为反应

器实现了 SND.

反应器运行到第 77 d,将进水 pH 值由 7.0 调至 8.3,其它运行条件不变. 由图 2 可知,提高进水 pH 值后,出水 NAR、总氮去除率和 SND 效率均呈上升趋势. 运行第 93 d,反应器再次达到稳定状态(阶段 II). 阶段 II 的氨氮、总氮平均去除率和 SND 平均效率分别为 98.3%、71.9% 和 80.9% (见表 1). 与阶段 I 相比,反应器的总氮平均去除率及 SND 平均效率分别提高了 18.0 和 16.8 个百分点. 提高进水 pH 值后,出水 NAR 由零上升到 85.7%,说明反应器中的脱氮特性发生了显著变化.

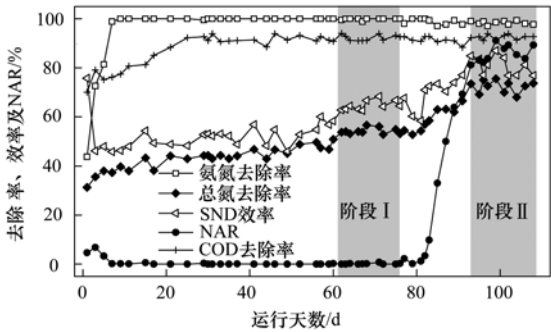


图2 反应器启动及 SND 类型转变过程的运行效率  
Fig. 2 Change in operational efficiency during set-up and SND variation

表 1 反应器在不同阶段的运行效率/%

| 阶段                 | 氨氮去除率      | 总氮去除率      | SND 效率     | NAR        | COD 去除率    |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 阶段 I (61 ~ 76 d)   | 99.9 ± 0.1 | 53.9 ± 1.6 | 64.1 ± 2.7 | 0          | 92.5 ± 1.2 |
| 阶段 II (93 ~ 108 d) | 98.3 ± 0.8 | 71.9 ± 2.9 | 80.9 ± 3.9 | 85.7 ± 3.4 | 93.4 ± 1.0 |

反应器的脱氮特性与微生物的组成和活性密切相关. 污泥的比耗氧呼吸速率与污泥中微生物的数量和活性呈正比关系<sup>[17]</sup>. 本实验利用 SOUR 来表征污泥中氨氧化菌 ( ammonia-oxidizing bacteria, AOB)和亚硝酸盐氧化菌 ( nitrite-oxidizing bacteria, NOB)活性. 阶段 I 的 AOB 和 NOB 活性分别为 0.20 ~ 0.21 mg·(g·min)<sup>-1</sup> 和 0.71 ~ 0.81 mg·(g·min)<sup>-1</sup>,阶段 II 的 AOB 和 NOB 活性分别为 0.19 ~ 0.20 mg·(g·min)<sup>-1</sup> 和 0.02 ~ 0.06 mg·(g·min)<sup>-1</sup>. 结果表明,阶段 I 的 NOB 活性较高,亚硝酸盐氧化活性强,SND 过程主要经硝酸盐途径实现,因此阶段 I 为全程 SND 脱氮过程;阶段 II 的 NOB 活性被严重抑制,亚硝酸盐氧化活性微弱,SND 过程主要经亚硝酸盐途径实现,因此阶段 II 为短程 SND 脱氮过程.

在短程 SND 阶段,NOB 活性下降是由体系 pH 值的上升引起 FA 浓度提高导致的抑制作用所造成的. AOB 的最适 pH 值为 7.0 ~ 8.0,而 NOB 的最佳 pH 值约为 6.0 ~ 7.5<sup>[18]</sup>,此外 NOB 比 AOB 对 FA 更为敏感. Chung 等<sup>[19]</sup>认为,当进水 FA 质量浓度为 5 ~ 10 mg·L<sup>-1</sup>时,可实现在不影响 AOB 活性的情况下显著抑制 NOB 活性. 本实验中,反应器进水 pH 值由 7.0 上调至 8.3 时,FA 质量浓度由 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 上升到 8 mg·L<sup>-1</sup> (反应器中的初始 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 质量浓度为 65 mg·L<sup>-1</sup>),足以抑制 NOB 活性. 因此,在全程 SND 的基础上,通过将 pH 值由 7.0 上调至 8.3 从而增加反应器中 FA 浓度,可抑制 NOB 活性,实现短程 SND.

2.2 短程 SND 的脱氮特性

实验以全程 SND 过程为参照,监测了全程 SND

和短程 SND 过程废水中氮元素随时间的变化情况,以获得短程 SND 过程的脱氮特性,结果如图 3 所示. 由实验数据求得氨氮氧化速率和总氮去除速率,结果见表 2.

表 2 不同阶段氨氮氧化速率及总氮去除速率/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$

Table 2 Ammonia nitrogen oxidation rate and total nitrogen removal rate at different stages/ $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$

| 阶段                 | 氨氮氧化速率          | 总氮去除速率          |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 全程 SND(61 ~ 76 d)  | $0.15 \pm 0.01$ | $0.08 \pm 0.01$ |
| 短程 SND(93 ~ 108 d) | $0.15 \pm 0.01$ | $0.11 \pm 0.01$ |

由图 3 可看出,反应器中存在中间产物  $\text{NO}_x^-$ -N 积累. 全程 SND 过程的主要中间产物为  $\text{NO}_3^-$ -N,其质量浓度在反应 60 min 后迅速增加;虽然进水后检测到少于  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NO}_2^-$ -N,但其质量浓度在曝气 120 min 后低于检测限. 短程 SND 过程的主要中间产物是  $\text{NO}_2^-$ -N,其质量浓度在反应 120 min 后缓慢

增加,而  $\text{NO}_3^-$ -N 质量浓度则持续低于  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 如前所述,全程 SND 阶段的 NOB 活性较高,因此,该阶段氨氧化反应生成的  $\text{NO}_2^-$ -N 能被快速氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N 从而不容易累积. 进水时检测到的  $\text{NO}_2^-$ -N 可能来源于闲置期  $\text{NO}_3^-$ -N 的反硝化反应. 短程 SND 阶段,AOB 活性显著高于 NOB 活性,因此中间产物以  $\text{NO}_2^-$ -N 为主. 但污泥中仍存在少量 NOB,因而,在 FA 浓度下降和 DO 浓度上升的曝气末期,部分  $\text{NO}_2^-$ -N 能被 NOB 进一步氧化为  $\text{NO}_3^-$ -N.

由表 2 可知,全程 SND 和短程 SND 过程的平均氨氮氧化速率均为  $0.15\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ ,二者无显著差异. 短程 SND 过程的平均总氮去除速率为  $0.11\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ ,是全程 SND 过程 [ $0.08\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$ ] 的 1.4 倍. 由于  $\text{NO}_2^-$ -N 的反硝化速率比  $\text{NO}_3^-$ -N 高<sup>[1]</sup>,所以在氨氮氧化速率相近的情况下,短程 SND 的总氮去除速率比全程 SND 高.

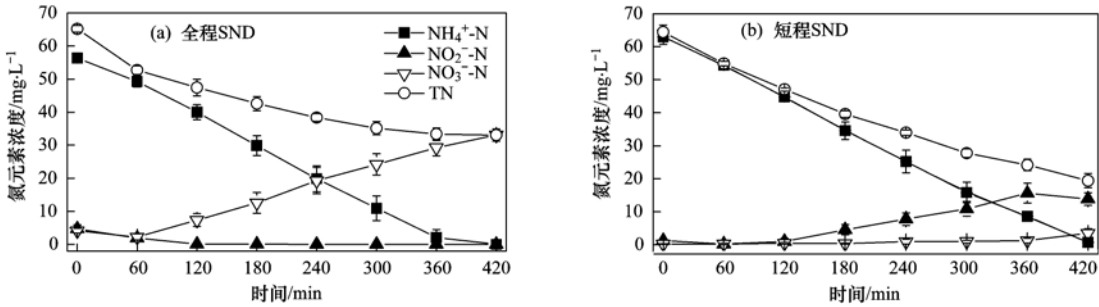


图 3 不同运行阶段氮元素变化趋势

Fig. 3 Changing patterns of nitrogen composition at different stages

2.3 短程 SND 的 N<sub>2</sub>O 释放特性

N<sub>2</sub>O 是 SND 生物脱氮过程的重要中间产物之一. 实验监测了全程 SND 和短程 SND 过程 N<sub>2</sub>O 释放速率随时间的变化情况和 N<sub>2</sub>O 累积释放量的变化,结果如图 4 和表 3 所示.

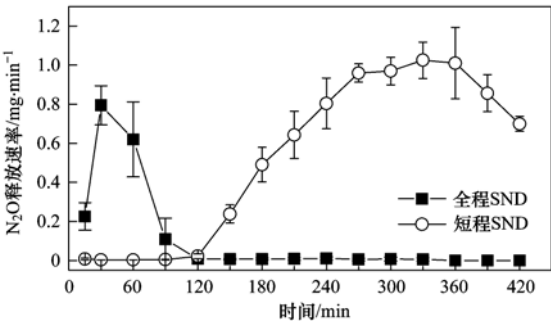


图 4 不同阶段 N<sub>2</sub>O 的释放特征

Fig. 4 N<sub>2</sub>O emission at different stages

由图 4 可知,全程 SND 过程 N<sub>2</sub>O 释放集中发生在前 120 min,最大释放速率约为  $0.79\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ ;

短程 SND 过程 N<sub>2</sub>O 释放主要发生在 120 min 以后,最大释放速率约为  $1.02\text{ mg}\cdot\text{min}^{-1}$ . 表 3 的数据显示,在短程 SND 过程,超过 50% 的氮元素以 N<sub>2</sub>O 的形式从废水中去除, N<sub>2</sub>O 的累积释放量约为  $221\text{ mg}\cdot\text{周期}^{-1}$ ,约为全程 SND 过程的 5 倍. 由此可见,两个体系的 N<sub>2</sub>O 释放特征及释放量存在显著的差异.

表 3 不同阶段 N<sub>2</sub>O 的累积释放量及转化率

Table 3 N<sub>2</sub>O accumulated emission amount and conversion rate at different stages

| 阶段                 | 累积释放量/ $\text{mg}\cdot\text{周期}^{-1}$ | 转化率/%          |
|--------------------|---------------------------------------|----------------|
| 全程 SND(61 ~ 76 d)  | $44.8 \pm 3.3$                        | $15.3 \pm 0.8$ |
| 短程 SND(93 ~ 108 d) | $221 \pm 15$                          | $57.1 \pm 2.9$ |

全程 SND 和短程 SND 两个阶段的进水 pH 值不同,分别为 7.0 和 8.3. 在影响 N<sub>2</sub>O 释放量的众多因素中,学术界普遍认为 pH 值在 7 ~ 8 范围内对 N<sub>2</sub>O 释放量的影响不大<sup>[20]</sup>. 而且,N<sub>2</sub>O 还原酶是影

响反硝化过程  $\text{N}_2\text{O}$  产生的关键酶,其活性随 pH 值升高而升高,在 pH 值为 8~9 时活性最大<sup>[21]</sup>。因此,pH 值升高并非导致短程 SND 阶段  $\text{N}_2\text{O}$  释放量高于全程 SND 阶段  $\text{N}_2\text{O}$  释放量的直接原因。

比较图 3 和图 4 可以发现,短程 SND 过程  $\text{N}_2\text{O}$  释放量的急剧上升与体系中  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累存在显著的相关性, $\text{NO}_2^-$ -N 的积累可能是导致  $\text{N}_2\text{O}$  释放显著上升的主要原因。一方面,亚硝酸具有生物毒性,相关研究证明其对  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶有抑制作用<sup>[22]</sup>。另一方面,SND 的实现要求低溶解氧环境,如果同时存在  $\text{NO}_2^-$ -N 积累则能诱导 AOB 利用  $\text{NO}_2^-$ -N 作为电子受体进行反硝化,而大部分 AOB 反硝化过程以  $\text{N}_2\text{O}$  和 NO 为反应终产物<sup>[23]</sup>, $\text{NO}_2^-$ -N 浓度越高 AOB 反硝化对  $\text{N}_2\text{O}$  释放的贡献越大<sup>[24]</sup>。Zeng 等<sup>[25]</sup>报道,当  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度大于  $1\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  即可导致  $\text{N}_2\text{O}$  产生。在全程 SND 体系,NOB 的活性较高,AOB 所产生的  $\text{NO}_2^-$ -N 即使不能及时通过反硝化还原,也可被 NOB 迅速氧化清除。但短程 SND 体系缺乏 NOB,  $\text{NO}_2^-$ -N 容易积累。因此,与全程 SND 相比,短程 SND 过程存在  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的特性可能是导致其  $\text{N}_2\text{O}$  释放量远高于前者的主要原因。

虽然短程 SND 具较高的脱氮效率和较快的反应速率,但该过程会引起  $\text{N}_2\text{O}$  的大量释放,将制约其成为清洁的脱氮工艺。鉴于  $\text{N}_2\text{O}$  释放与  $\text{NO}_2^-$ -N 积累的相关性,深入研究中间产物 ( $\text{NO}_2^-$ -N) 积累与  $\text{N}_2\text{O}$  释放的内在联系,对硝化和反硝化速率进行调控是减少中间产物的积累,实现短程 SND 体系  $\text{N}_2\text{O}$  减量化的可能途径。

### 3 结论

(1) 在全程 SND 的基础上,通过将进水 pH 值由 7.0 提高到 8.3,从而增加反应器中 FA 浓度,可以实现全程 SND 向短程 SND 转变。

(2) 短程 SND 过程的平均总氮去除率及 SND 效率分别比全程 SND 提高了 18.0 和 16.8 个百分点,短程 SND 的平均总氮去除速率是全程 SND 的 1.4 倍。

(3) 短程 SND 过程的  $\text{N}_2\text{O}$  平均转化率为 57.1%,其  $\text{N}_2\text{O}$  平均累积释放量约为全程 SND 过程的 5 倍。 $\text{N}_2\text{O}$  的释放量急剧上升与体系中  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累浓度升高密切相关。

#### 参考文献:

- [1] 叶剑峰. 废水生物脱氮处理新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 65-73.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 114-143.
- [3] Rassamee V, Sattayatewa C, Pagilla K, et al. Effect of oxic and anoxic conditions on nitrous oxide emissions from nitrification and denitrification processes[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2011, **108**(9): 2036-2045.
- [4] Wragge N, Velthof G L, Van Beusichem M L, et al. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(12-13): 1723-1732.
- [5] Zeng W, Zhang Y, Li L, et al. Simultaneous nitrification and denitrification of domestic wastewater without addition of external carbon sources at limited aeration and normal temperatures[J]. Desalination and Water Treatment, 2010, **21**(1-3): 210-219.
- [6] Itokawa H, Hanaki K, Matsuo T. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition[J]. Water Research, 2001, **35**(3): 657-664.
- [7] Kim S W, Miyahara M, Fushinobu S, et al. Nitrous oxide emission from nitrifying activated sludge dependent on denitrification by ammonia-oxidizing bacteria [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(11): 3958-3963.
- [8] 尹倩婷, 李平, 吴锦华, 等. 同步硝化反硝化(SND)过程污泥聚集状态对  $\text{N}_2\text{O}$  释放的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2056-2061.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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. 53-74.
- [10] Wang F, Lu S, Wei Y J, et al. Characteristics of aerobic granule and nitrogen and phosphorus removal in a SBR[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(2-3): 1223-1227.
- [11] Shi Y J, Wang X H, Yu H B, et al. Aerobic granulation for nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor and the emission of nitrous oxide[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2536-2541.
- [12] Laguna A, Ouattara A, Gonzalez R O, et al. A simple and low cost technique for determining the granulometry of upflow anaerobic sludge blanket reactor sludge[J]. Water Science and Technology, 1999, **40**(8): 1-8.
- [13] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. 环境科学学报, 1999, **19**(3): 225-229.
- [14] Qin L, Liu Y, Tay J H. Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor [J]. Biochemical Engineering Journal, 2004, **21**(1): 47-52.
- [15] Yang Q, Zeng G M, Li X M, et al. Rapid cultivation of aerobic granular sludge for simultaneous nitrification and denitrification in sequencing batch airlift reactor [J]. International Journal of Environment and Waste Management, 2011, **7**(1-2): 49-57.
- [16] 周丹丹, 马放, 董双石, 等. 溶解氧和有机碳源对同步硝化反硝化的影响[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(4): 25-28.
- [17] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Elemental compositions and characteristics of aerobic granules cultivated at different substrate N/C ratios[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003,

- 61**(5-6): 556-561.
- [18] Gernaey K, Verschuere L, Luyten L, *et al.* Fast and sensitive acute toxicity detection with an enrichment nitrifying culture[J]. *Water Environment Research*, 1997, **69**(6): 1163-1169.
- [19] Chung J, Shim H, Park S J, *et al.* Optimization of free ammonia concentration for nitrite accumulation in shortcut biological nitrogen removal process [ J ]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, **28**(4): 275-282.
- [20] Kampschreur M J, Temmink H, Kleerebezem R, *et al.* Nitrous oxide emission during wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2009, **43**(17): 4093-4103.
- [21] Gorelsky S I, Ghosh S, Solomon E I. Mechanism of N<sub>2</sub>O reduction by the  $\mu_4$ -S tetranuclear Cu<sub>2</sub> cluster of nitrous oxide reductase[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, **128**(1): 278-290.
- [22] Zhou Y, Pijuan M, Zeng R J, *et al.* Free nitrous acid inhibition on nitrous oxide reduction by a denitrifying-enhanced biological phosphorus removal sludge [ J ]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(22): 8260-8265.
- [23] Collier B B, Stephenson T. Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers [ J ]. *Biotechnology Advances*, 2000, **18**(3): 219-232.
- [24] Wunderlin P, Mohn J, Joss A, *et al.* Mechanisms of N<sub>2</sub>O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions [ J ]. *Water Research*, 2012, **46**(4): 1027-1037.
- [25] Zeng R J, Yuan Z G, Keller J. Enrichment of denitrifying glycogen-accumulating organisms in anaerobic/anoxic activated sludge system[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, **81**(4): 397-404.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                               |                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....                                                                                                                 | XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)                           |
| Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....                                                                                      | ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)              |
| Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....                                                | XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)           |
| Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....                                                                   | ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)                              |
| Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....                                                                                          | DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)        |
| Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....                                                                                                        | XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)             |
| Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....                                                                                                            | YU Jie, LI Huai-en (1700)                                             |
| Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 ..... | YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)              |
| Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....                        | HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)       |
| Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....                                                                                  | CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)              |
| Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....                                                                   | WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)           |
| Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....                                                                                | YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)                        |
| Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....                                                                                        | YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)       |
| Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....                                                                                 | LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)                   |
| Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....                                                              | MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)         |
| Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....                  | HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)           |
| Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....                                                        | MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)          |
| Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....                                                                                         | KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)          |
| Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....                                                                                   | LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)       |
| Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....                                                                               | JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)     |
| Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....                                                                                 | WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)          |
| Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....                                                                         | ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)       |
| Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....                                                                                      | MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)        |
| Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....                                                                             | ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)     |
| Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....                                                                                        | YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)                |
| Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....                               | LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)            |
| Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....                                                                       | ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)      |
| Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....                                                               | CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)          |
| Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....                                   | XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)         |
| Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....                                                                         | ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)        |
| Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....                                                 | SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)                           |
| QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....                                                                                                      | ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882) |
| Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....                                | FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)          |
| Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....          | GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)              |
| Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....                                                                                           | ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)            |
| Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....                                                                 | WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)       |
| Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....                                       | GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)            |
| Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....                                                       | SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)       |
| Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....                                             | LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)        |
| Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....                                                                           | CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)                   |
| Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....                                                                                               | ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)           |
| Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....                                                                  | PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)            |
| Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....                                                                                    | CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)    |
| Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....                                                                                                       | SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)           |
| Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....                                       | WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)                 |
| Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....                                                          | TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)      |
| Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....                | CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)      |
| Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....                                                                                   | YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)              |
| Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....                          | CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)           |
| Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....                                                                 | QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)                        |
| Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....                                                                                 | LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)                |
| <i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....                                                                            | GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)               |
| Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....                                                                                                 | FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)          |
| Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....                                                   | GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)          |
| Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....                                                                        | LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)        |
| Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....                                                                                                       | LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)                                     |
| Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....                             | XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)                                            |

# 《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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