

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM₁₀ 中元素浓度特征和来源分析 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM_{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO₃⁻/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO₂、CH₄ 排放通量的短期影响 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 石将求, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 邱磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则(4662) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

污水处理厂 CANON 工艺小试

李冬¹, 赵世勋¹, 王俊安², 朱金凤¹, 关宏伟¹, 张杰^{1,3}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 北京桑德环保集团技术研发中心, 北京 101102; 3. 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)

摘要: 在污水处理厂进行 CANON 工艺小试. 试验以污水处理厂 A/O 除磷工艺出水为基质, 启动并运行 CANON 生物滤柱. 第 48 d 时, 反应器氨氮去除率连续 10 d 大于 90%, 总氮去除率在 70% 以上, CANON 生物滤柱启动成功. 第 49 ~ 129 d, 反应器内部 DO 控制在较低水平 (0.2 ~ 0.5 mg·L⁻¹), 出水几乎不含氨氮. 最大出水总氮浓度为 15.6 mg·L⁻¹, 超过一级 A 排放标准, 硝化细菌 (NOB) 出现了过量增殖的现象. 第 129、169 和 213 d 对滤柱进行反冲洗, 使得反应器长期总氮去除率大于 70%, 出水总氮浓度小于 12 mg·L⁻¹. 出水氨氮和总氮浓度达到了一级 A 标准, 硝化细菌得到了有效抑制. 结果表明, 反冲洗几乎不会影响滤层结构, 对滤料生物膜厚度和功能微生物活性影响较小, 对硝化细菌抑制作用较大. 在实际工程应用中可以通过定期反冲洗维持 CANON 工艺稳定运行.

关键词: 生活污水; 滤柱; 全程自养脱氮; 反冲洗; 硝化细菌

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4673-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201705064

Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants

LI Dong¹, ZHAO Shi-xun¹, WANG Jun-an², ZHU Jin-feng¹, GUAN Hong-wei¹, ZHANG Jie^{1,3}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Technology Research and Development Center, Beijing Sander Environmental Group, Beijing 101102, China; 3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: A laboratory-scale completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process was operated in a municipal wastewater treatment plant (WWTP). Sewage effluent treated by the anaerobic/oxic (A/O) process and was used to operate a WWTP to obtain the initial substance for the start-up of a CANON filter reactor. On the 48th day, the ammonia removal rate was measured at greater than 90% in successive 10 d samples and the nitrogen removal rate was greater than 70%. The CANON filter was successful at start up. From the 49th to the 129th day, the dissolved oxygen in the reactor was maintained at fairly low concentration of 0.2-0.5 mg·L⁻¹. The effluent contained nearly no ammonia and the maximum total nitrogen (TN) concentration was 15.6 mg·L⁻¹, which exceeded the national Class 1A Discharge Standards for pollutants from municipal wastewater treatment plants. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) proliferated excessively in the reactor. Backwash was implemented on 129th, 169th and 213th days. The nitrogen removal rate was more than 70% for a long time and TN concentration in effluent was below 12 mg·L⁻¹. The nitrogen concentration in effluent fitted the national Class 1A Discharge Standards and the NOB were effectively inhibited. These results show that backwash has negligible on the structure of filter and its impact on the thickness of the bio-membrane and its functional bacteria was small, however, it is capable of effectively inhibiting the activity of the NOB. Periodically backwashing can be utilized as an engineering application to maintain stable operation of the CANON process.

Key words: domestic wastewater; filter; CANON; backwash; nitrite oxidizing bacteria

CANON 工艺具有脱氮途径短、节省曝气量、无需外加碳源、温室气体产量少等优点^[1], 成为了目前最具前景的污水脱氮工艺^[2].

CANON 工艺适合处理高温、高氨氮污水^[3,4], 而生活污水是常温、低氨氮水质. 如何将 CANON 工艺推广到市政污水处理厂中是长久以来的难点^[5]. 目前, 国外 CANON 工艺的研究主要以高氨氮废水处理为主^[3,6,7], 国内虽然有常温低氨氮环境中运行 CANON 工艺的报道^[8-12], 也仅局限于人工配水和短期运行, 实际污水处理厂中长期运行 CANON 工艺的研究极少.

常温低氨氮环境中, CANON 工艺的难点在于硝化细菌的抑制^[8,13]. 如果硝化细菌过量增殖, 将会出现总氮去除率下降、出水总氮超标的现象. 在常温、低氨氮条件下, 只调节 DO 从而抑制 NOB 活性已被证明难以实现^[14]. 因此, 在工程应用中, 需要通过其他策略抑制硝化细菌的活性. 有研究表明, 在 CANON 生物膜反应器中, NOB 主要分布在生物

收稿日期: 2017-05-08; 修订日期: 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51222807)

作者简介: 李冬(1976~), 女, 教授, 主要研究方向为污水再生利用, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

膜的外层^[15]. 对生物膜进行冲洗,理论上洗脱生物膜表面的 NOB,但在实践中研究较少.

基于此,本研究在污水处理厂中,以污水处理厂 A/O 工艺出水为基质,启动 CANON 生物滤柱小试试验,分析反冲洗对 CANON 滤柱中硝化细菌的影响.

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验采用上向流生物滤柱反应器(图 1). 装置由有机玻璃制成,内径 8 cm,承托层装填 5 cm,滤料装填 80 cm,反应器有效容积为 5 L. 承托层采用粒径为 4~8 mm 的砾石填料,滤料为直径 5~10 mm 的黑色火山岩. 滤柱由下向上每 10 cm 设置一个取样口以方便沿程取样. 反应器底部设曝气装置,外部缠绕黑色保温棉以避免光和保温.

1.2 试验用水和接种污泥

试验基质为污水处理厂 A/O 除磷出水,具体水质指标如表 1 所示.

反应器装填厌氧氨氧化填料后,接种亚硝化絮状污泥启动 CANON 工艺.

表 1 A/O 除磷出水水质

Table 1 Characteristics of the effluent from A/O process

| 序号 | 检测项目 | 单位 | 结果 | 序号 | 检测项目 | 单位 | 结果 |
|----|---------------------------------|--------------------|-------|----|------|--------------------|---------|
| 1 | NH ₄ ⁺ -N | mg·L ⁻¹ | 35~60 | 5 | COD | mg·L ⁻¹ | 20~50 |
| 2 | NO ₂ ⁻ -N | mg·L ⁻¹ | 40~55 | 6 | pH | — | 7.3~7.9 |
| 3 | NO ₃ ⁻ -N | mg·L ⁻¹ | <2 | 7 | TP | mg·L ⁻¹ | <1.5 |
| 4 | SS | mg·L ⁻¹ | <20 | 8 | 温度 | ℃ | 11~21 |

1.3 试验方法

反应器的运行分为 5 个阶段,如表 2 所示.

S1 为 CANON 生物滤柱的启动阶段. S2 阶段的水力停留时间缩短至 2 h, DO 由 0.3~0.8 mg·L⁻¹ 降低为 0.3~0.5 mg·L⁻¹, S2 为高负荷运行阶段. S3~S5 为稳定运行阶段,每个阶段开始时对滤柱进行反冲洗,其他运行参数保持不变.

表 2 各阶段反应器参数变化情况

Table 2 Parameter variations of each stage

| 阶段 | 进水氨氮负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹ | HRT/h | DO/mg·L ⁻¹ | 季节 | 水温/℃ |
|---------------|---|-------|-----------------------|------|-------|
| S1(1~48 d) | 0.187~0.312 | 4 | 0.3~0.8 | 春 | 14~19 |
| S2(49~128 d) | 0.428~0.587 | 2 | 0.3~0.5 | 春末、夏 | 15~20 |
| S3(129~178 d) | 0.428~0.587 | 2 | 0.3~0.5 | 夏末、秋 | 15~21 |
| S4(169~212 d) | 0.428~0.587 | 2 | 0.3~0.5 | 秋 | 13~18 |
| S5(213~241 d) | 0.428~0.587 | 2 | 0.3~0.5 | 冬 | 11~14 |

反应速率的测定:从反应器中取滤料,刮下生物

膜解离,放入 1 L 烧杯中. 烧杯底部设曝气装置,设

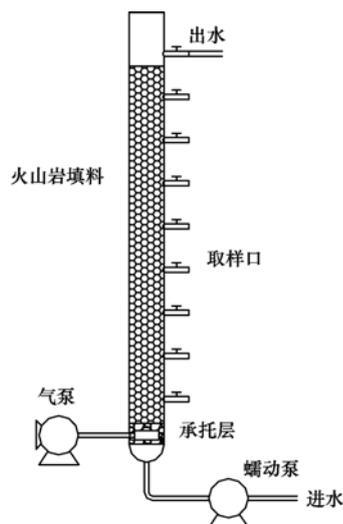


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

厌氧氨氧化填料来自运行稳定的上向流火山岩填料厌氧氨氧化反应器,总氮去除率稳定在 85% 左右,总氮去除负荷大于 1.0 kg·(m³·d)⁻¹.

亚硝化絮状污泥来自于亚硝化推流式反应器. 该反应器高温高氨氮运行,亚硝化率大于 90%,污泥浓度为 1 200 mg·L⁻¹ 左右.

1.4 试验方法

水样分析中 NH₄⁺-N 测定采用纳氏试剂光度法,NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法,COD 采用快速测定仪,DO、pH 和水温通过 WTW 便携测定仪测定,其余水质指标的分析方法均采用国标方法. 滤料表面生物膜厚度通过电子显微镜来精确测量^[16].

置机械搅拌. 分别测定亚硝化、硝化、厌氧氨氧化反应速率, 代表 AOB、NOB 和 ANAMMOX 菌活性. 测定厌氧氨氧化速率时, 调节基质碱度使得碱度与氨氮之比为 5, pH 控制在 7.6 ~ 8.0, 氨氮和亚硝氮浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水中 DO 维持在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 测定短程硝化和硝化反应速率时曝气, 调节基质碱度使得碱度与氨氮之比为 10, pH 控制在 7.7 ~ 8.0, 氨氮和亚硝氮浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水中 DO 维持在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上. 亚硝化、厌氧氨氧化、硝化速率计算方法如式(1) ~ (3) 所示.

$$V_{\text{亚硝化}} = \frac{[\text{NH}_4^+]_{\text{始}} - [\text{NH}_4^+]_{\text{末}}}{t \cdot \text{MLSS}} \quad (1)$$

$$V_{\text{亚硝化}} = \frac{[\text{NH}_4^+]_{\text{始}} - [\text{NH}_4^+]_{\text{末}}}{t \cdot \text{MLSS}} \quad (2)$$

$$V_{\text{硝化}} = \frac{[\text{NO}_3^-]_{\text{末}} - [\text{NO}_3^-]_{\text{始}}}{t \cdot \text{MLSS}} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 CANON 滤柱的启动及运行

反应器装填厌氧氨氧化填料后, 接种 3 L 污泥浓度为 $1200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的亚硝化絮状污泥, 启动 CANON 生物滤柱. 在启动阶段, 为了减少 DO 对厌氧氨氧化菌的抑制作用以及避免硝化细菌过量增殖, 反应器在低 DO 环境中运行. 有研究表明, AOB 和 NOB 的氧饱和常数分别为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.2 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [17], DO 对厌氧氨氧化菌抑制的空气饱和度为 0.5% [18]. 因此在启动阶段, 实时控制曝气量, 使得滤柱中部 DO 为 $0.3 \sim 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

启动初期采用较小的水力负荷以降低亚硝化絮状污泥的流失. 滤速为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 出水收集并循环进水. 循环进水 3 d 后, 保持其他参数不变, 反应器改为连续流, 进入 S1 阶段. S1 阶段的第一 d, R1 和 R2 反应器出水清澈, SS 小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 几乎没有污泥的流失.

反应器氨氮、亚硝氮和硝氮变化如图 2 所示, 氨氮及总氮去除率如图 3 所示. 从中可见, S1 阶段反应器氮素去除效果逐渐提高. 第 37 d 时, 反应器氨氮去除率大于 90%, 总氮去除率大于 70%. 第 48 d 时, 反应器氨氮去除率连续 10 d 大于 90%, 总氮去除率在 70% 以上, 总氮去除负荷大于 $0.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 表明 CANON 生物滤柱已初步启动成功.

为了提高 CANON 生物滤柱的处理负荷, S2 (49 ~ 127 d) 阶段将水力停留时间从 4 h 缩短至 2 h, 此

时滤速为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 由于水力负荷的提高, 进水氨氮负荷也随之增加. 在 S2 阶段, 为了抑制硝化细菌的活性, 调节曝气量, 维持滤柱中部 DO 浓度在 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间.

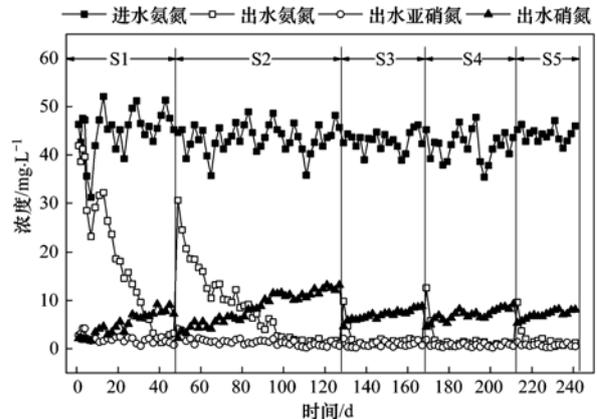


图 2 氨氮、亚硝氮和硝氮浓度的变化

Fig. 2 Concentration variation of ammonia, nitrite and nitrate

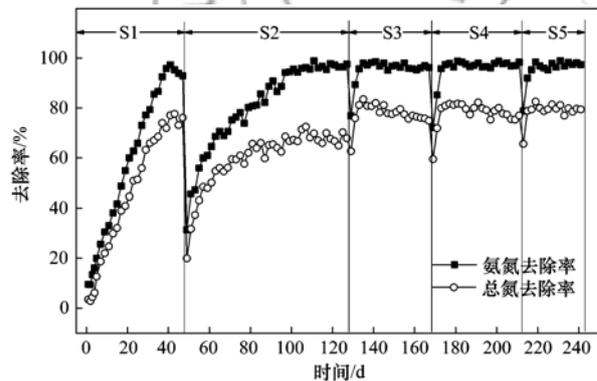
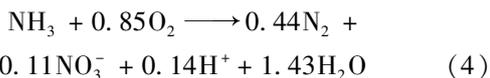


图 3 氨氮浓度和总氮去除率

Fig. 3 Concentration of ammonia and the TN removal rate

由图 2 和图 3 可见, S2 阶段突然缩短水力停留时间, 反应器氮素去除效果下降明显. 随着反应器的运行, 微生物逐渐适应高水力负荷的环境, 出水中氨氮和亚硝氮浓度逐渐降低. 第 97 d 之后, 出水几乎不含氨氮和亚硝氮. 第 97 ~ 128 d, 反应器氨氮和亚硝氮去除率大于 90%, 但最大出水总氮浓度为 $15.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过了一级 A 排放标准. 此时反应器总氮去除率为 60% ~ 70%, 远远低于理论值 89%. CANON 工艺生化反应方程式如式(4)所示 [19], 由式可得, CANON 工艺将氨氮转化为 89% 的氮气和 11% 硝氮. 本试验氨氮去除量为 $35 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 理论出水硝氮为 $3.85 \sim 4.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 实际出水硝氮浓度为 $10 \sim 14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远大于理论值. 出水硝氮大量增加导致总氮去除率降低, 而大量增加的硝氮是硝化细菌过量增殖所致.



为了具体研究硝化细菌的活性,引入特征比这一参数.由式(4)可得,总氮去除量与硝氮增加量之比应为8,该比值称为特征比.特征比可以有效地反映硝化细菌活性,NOB 过量增殖会导致特征比降低^[20,21].本试验的特征比及出水总氮浓度如图4所示.从中可见,S2 阶段初期特征比突然升高.一方面,S2 阶段的进水氨氮负荷提高为 S1 阶段的二倍,高氨氮负荷对 NOB 有一定的抑制作用^[5];另一方面,S2 阶段反应器内部的 DO 较低,低 DO 一定程度上抑制了 NOB 的过量增殖. S2 阶段特征比逐渐降低,第 117 ~ 127 d,反应器特征比维持在 2.5 ~ 3.3 之间,远远小于理论值 8,出水总氮浓度大于 13.5 mg·L⁻¹,表明 NOB 已经过量增殖.与前人的研究结果相似,在进水低氨氮低温环境中,仅通过低 DO 难以抑制 NOB^[22,23].在污水处理厂中,可采用如定期反冲洗的策略来抑制硝化细菌的活性,将 CANON 工艺出水总氮浓度维持在较低水平.

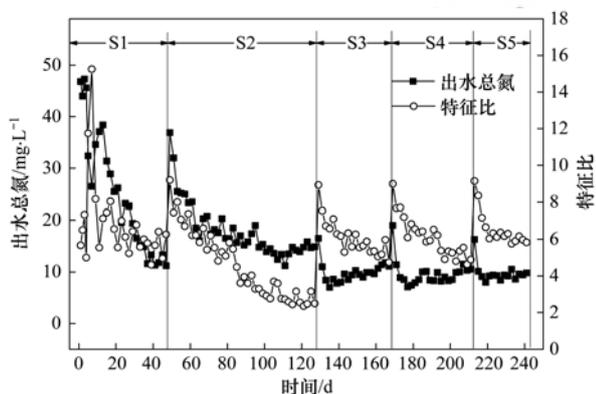


图 4 出水总氮及特征比

Fig. 4 TN concentration of the effluent and the characteristic ratio

2.2 反冲洗对 CANON 滤柱的影响

CANON 滤柱中,由于生物膜的传质作用,滤料表面形成外部好氧、内部厌氧的微环境,氧饱和常数高的 NOB 分布在生物膜的最外层^[15].为了有效地洗脱生物膜表面的 NOB,减小对内层厌氧氨氧化菌的影响,采用低强度的反冲洗策略.以气水联合的方式进行反冲洗,气水比为 2,水冲强度为 1.5 L·(s·m²)⁻¹,反冲洗时间为 2 min.

第 129 d 对 CANON 生物滤柱进行反冲洗,其他参数保持不变,进入 S3 阶段.反冲洗后滤柱氨氮去除率从 97.5% 降低到 76.9%,特征比由 2.50 上升到 8.94.氨氮去除率下降明显,是反冲洗后微生物尚未适应新环境的表现;特征比的升高,表明硝化

细菌活性降低,反冲洗可以在一定程度上洗脱滤柱中的 NOB.第 133 d,氨氮去除率回升到 95.7%,反冲洗后仅用 4 d 就可以恢复高效的氮素去除效果,AOB 和厌氧氨氧化菌适应能力强.第 133 ~ 167 d,滤柱氨氮去除率大于 95%,总氮去除率大于 75%,最大出水总氮浓度为 11.8 mg·L⁻¹,满足了一级 A 排放标准.反冲洗后特征比为 6.5 ~ 8,随着滤柱继续运行,特征比逐渐降低,到 S3 阶段末期时,特征比降低到 5 左右.反冲洗一定程度上洗脱了 NOB,但难以全部去除.低温低氨氮环境对 NOB 的抑制作用有限^[24],因此随着反应器的运行,NOB 逐渐增殖,须进行下一次反冲洗.

第 169 d 对滤柱进行同样强度的反冲洗,进入 S4 阶段.第 213 d 再次反冲洗,进入 S5 阶段.由图 2、3 可见,反冲洗会暂时降低氨氮去除率,但 2 ~ 4 d 之后,氨氮回升至 95% 以上.反冲洗后特征比及滤柱总氮去除率上升明显,出水总氮浓度大大降低.第 173 ~ 212 d 以及第 215 ~ 241 d,反应器出水几乎不含氨氮,最大出水总氮浓度为 11.5 mg·L⁻¹,满足一级 A 氮素排放标准.通过对滤柱进行定期的反冲洗,使得污水处理厂 CANON 工艺长期处理达标.

为了研究反冲洗对滤层结构的影响,S2 ~ S5 阶段测定滤柱沿程变化,结果如图 5 所示.从中可以看出,反冲洗前后滤柱沿程变化的几乎相同,表明低强度的反冲洗不会破坏滤层结构,CANON 滤柱抗冲击负荷能力强.

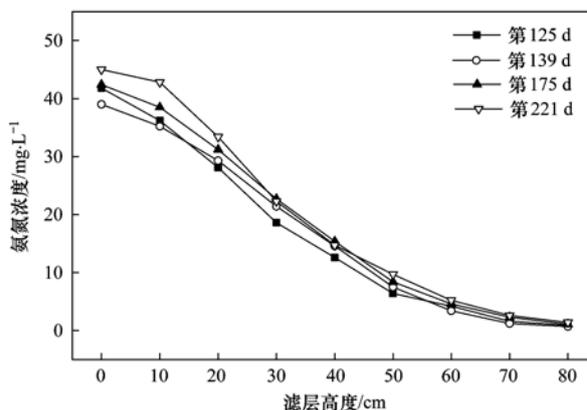


图 5 滤柱氨氮沿程变化

Fig. 5 Variation of ammonia along the filter

2.3 生物学特性研究

S1 ~ S5 阶段,从反应器中取出滤料,测定生物膜厚度及反应速率,结果如图 6 所示.

由图 6 可见,S1 ~ S2 阶段,滤料生物膜厚度持续增加.到 121 d 时,生物膜厚度为 98 μm,生物量(以 VSS 计,下同)为 120 mg·g⁻¹.孙婷等^[25]采用生

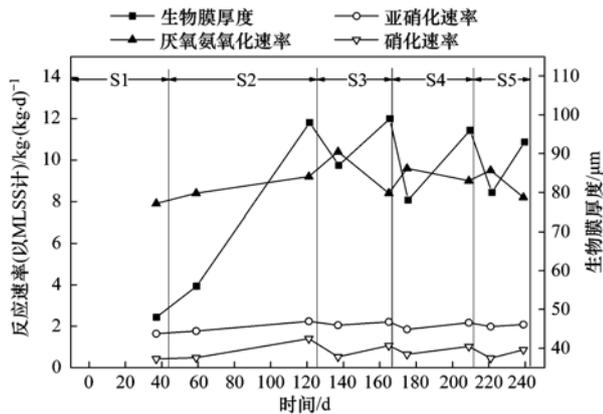


图6 生物膜厚度及反应速率

Fig. 6 Thickness of bio-film and the reaction rate

物膜反应器使厌氧氨氧化生物膜厚度达到了 20 μm , 杨庆等^[26]测定厌氧氨氧化反应器滤料表面生物量为 $84 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 杨青等^[27]认为一般好氧生物膜厚度通常维持在 100 μm 以下. 与其他研究成果相比, 本试验中生物膜厚度达到了较高水平. S3 阶段, 由于受反冲洗的影响, 生物膜厚度降低到 87 μm . 反冲洗后生物膜厚度降幅较小, 表明反冲洗对生物膜的影响主要作用于表层. S3 阶段末期, 生物膜厚度增长到 100 μm , 恢复到了反冲洗前的水平. S4、S5 阶段, 反冲洗暂时降低了生物膜厚度, 运行一定时间以后, 生物膜厚度得以恢复. 整体上看, 生物膜厚度处于相对稳定的状态, 定期反冲洗不会破坏这种平衡.

由于每次反应速率测定时的温度、基质浓度均相同, 因此反应速率的升降代表了微生物在生物膜中比例的变化. S2 阶段中, 亚硝化和硝化速率均有上升, 硝化速率增幅明显, 与出水总氮浓度升高、特征比降低相符. 在常温低氨氮条件下, 通过低 DO 难以抑制 NOB, 因此导致生物膜中硝化细菌的比例上升. S3 阶段反冲洗后, 亚硝化速率和硝化速率均有下降, 硝化速率下降明显. 反冲洗可以有效地洗脱 NOB, 对 AOB 影响较小. 由于微生物需氧量的不同, 生物膜从里到外大致呈厌氧氨氧化菌, AOB 和 NOB 分布, 反冲洗时滤料的摩擦会导致外层生物膜的脱落, 因此硝化细菌所受影响要大于亚硝化细菌. S3 ~ S5 阶段, 硝化速率处于相对较低的水平, 表明定期反冲洗可以有效地将生物膜中硝化细菌的含量长期维持在较低水平, 完成对硝化细菌长期的抑制.

S1、S2 阶段厌氧氨氧化速率变化较小, S3 ~ S5 阶段反冲洗后厌氧氨氧化速率上升明显. 由于反冲洗对外层生物膜的影响较大, 因此反冲洗后厌氧氨氧化细菌在生物膜中所占比例上升. 反冲洗后, 由

于 AOB 和 NOB 生长相对较快^[28], 厌氧氨氧化菌在生物膜中的比例下降. S1 ~ S5 阶段, 厌氧氨氧化速率处于相对稳定的状态, 定期反冲洗对厌氧氨氧化细菌的影响极小.

3 结论

(1) 以污水处理厂 A/O 除磷工艺出水为基质, 48 d 成功启动 CANON 生物滤柱. 反应器启动成功后, DO 控制在较低水平 ($0.2 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 最大出水总氮浓度为 $15.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 超过一级 A 排放标准, 硝化细菌出现了过量增殖的现象.

(2) 第 129、169 和 213 d 对滤柱进行反冲洗, 2 ~ 4 d 内滤柱可恢复高效的氮素去除效果. 反冲洗后的稳定运行期内, 氨氮去除率大于 95%, 总氮去除率大于 70%, 出水总氮浓度小于 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 氮素排放达到了一级 A 标准, 硝化细菌得到长期有效的抑制.

(3) 定期反冲洗后几乎不会影响滤层结构, 对滤料生物膜厚度和功能微生物活性影响较小, 对硝化细菌抑制作用较大. 在实际工程应用中可以通过定期反冲洗维持 CANON 工艺稳定运行.

致谢: 感谢桑德集团、北京京禹石水务有限公司对本研究的支持.

参考文献:

- [1] Third K A, Slikkers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(4): 588-596.
- [2] 贾方旭, 彭永臻, 杨庆. 厌氧氨氧化菌与其他细菌之间的协同竞争关系[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1351-1361. Jia F X, Peng Y Z, Yang Q. Competition and synergism between anammox bacteria and other bacteria [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1351-1361.
- [3] Daverey A, Hung N T, Dutta K, *et al.* Ambient temperature SNAD process treating anaerobic digester liquor of swine wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **141**: 191-198.
- [4] Keluskar R, Nerurkar A, Desai A. Development of a simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonia oxidation and denitrification (SNAD) bench scale process for removal of ammonia from effluent of a fertilizer industry [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 390-397.
- [5] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Performance and microbial community of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process in two membrane bioreactors (MBR) fed with different substrate levels [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **152**: 185-191.
- [6] Malovany A, Plaza E, Trela J, *et al.* Ammonium removal by partial nitrification and Anammox processes from wastewater with increased salinity [J]. *Environmental Technology*, 2015, **36**

- (5): 595-604.
- [7] Ganigué R, Gabarró J, López H, *et al.* Combining partial nitrification and heterotrophic denitrification for the treatment of landfill leachate previous to an anammox reactor [J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2010, **61**(8): 1949-1955.
- [8] 刘涛, 李冬, 曾辉平, 等. 氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 773-780.
- Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Assessment of the effect of influent NH_4^+ -N concentration on the abundance and community structure of functional bacteria in CANON process [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 773-780.
- [9] 张肖静, 李冬, 梁瑜海, 等. 氨氮浓度对 CANON 工艺性能及微生物特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1715-1721.
- Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Effect of ammonia concentration on the performance and microbial characteristics of CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1715-1721.
- [10] 李冬, 何永平, 张肖静, 等. MBR 系统 CANON 工艺的快速启动及微生物种群特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2788-2795.
- Li D, He Y P, Zhang X J, *et al.* The fast start-up of CANON process in MBR system and the characterization of microbes [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2788-2795.
- [11] 顾书军, 方芳, 李凯, 等. 低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3120-3127.
- Gu S J, Fang F, Li K, *et al.* Rapid start-up of one-stage autotrophic nitrogen removal process in EGSB reactor for wastewater with low concentration of ammonia [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3120-3127.
- [12] 袁砚, 朱亮. 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4289-4295.
- Yuan Y, Zhu L. Effect of moderate and room temperature on nitrogen removal in PN-ANAMMOX process [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4289-4295.
- [13] 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 等. 一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1122-1129.
- Wanyan D Q, Yuan Y, Li X, *et al.* A new model for the treatment of low ammonia nitrogen wastewater by CANON process [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1122-1129.
- [14] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [15] Liang Y H, Li D, Zhang X J, *et al.* Nitrogen removal and microbial characteristics in CANON biofilters fed with different ammonia levels [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 168-174.
- [16] 张成林, 倪琦, 徐皓, 等. 导流式移动床生物膜反应器流速选择及流态分析[J]. *水产学报*, 2011, **35**(2): 283-290.
- Zhang C L, Ni Q, Xu H, *et al.* Flow rate selection and flow analysis for the diversion moving bed biofilm reactor [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, **35**(2): 283-290.
- [17] 郭海娟, 马放, 沈耀良. DO 和 pH 值在短程硝化中的作用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(1): 37-40, 63.
- Guo H J, Ma F, Shen Y L. Effects of DO and pH on nitrosification [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, **7**(1): 37-40, 63.
- [18] Broda E. Two kinds of lithotrophs missing in nature [J]. *Zeitschrift fur Allgemeine Mikrobiologie*, 1977, **17**(6): 491-493.
- [19] Sliemers A O, Derwort N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [20] 郑照明, 李泽兵, 刘常敬, 等. 城市生活污水 SNAD 工艺的启动研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1072-1081.
- Zheng Z M, Li Z B, Liu C J, *et al.* The study of SNAD process start-up on domestic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1072-1081.
- [21] 张肖静. 基于 MBR 的全程自养脱氮工艺 (CANON) 性能及微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. 68-74.
- Zhang X J. Performance and microbial characteristics of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) in membrane bioreactor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. 68-74.
- [22] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 610-616.
- Zhang G L, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 610-616.
- [23] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review [J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [24] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 无机碳对 SNAD 工艺硝氮积累问题恢复的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, **48**(8): 17-23.
- Li D, Tian H C, Liang Y H, *et al.* Effect of inorganic carbon for sewage SNAD process nitrate accumulation restore problems [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, **48**(8): 17-23.
- [25] 孙婷, 王继斌, 吕永涛. 分段进水对生物转盘厌氧氨氧化性能影响研究[J]. *甘肃科技*, 2016, **32**(9): 29-30.
- [26] 杨庆, 谷鹏超, 刘秀红, 等. 两种典型滤料厌氧氨氧化效果与工艺运行优化[J]. *化工学报*, 2015, **66**(1): 455-463.
- Yang Q, Gu P C, Liu X H, *et al.* Comparison of performance and optimizing process for two typical filter medias of ANAMMOX biofilters [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(1): 455-46.
- [27] 杨青, 赵玉华, 周晴, 等. 曝气生物滤池快速启动性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2005, **21**(4): 371-376.
- Yang Q, Zhao Y H, Zhou Q, *et al.* The characteristic of quickly setup measure for biological aerated filter [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2005, **21**(4): 371-376.
- [28] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin | ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447) |
| Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China | PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454) |
| Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province | ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463) |
| Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou | YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469) |
| Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou | FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478) |
| Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China | LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486) |
| Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China | LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494) |
| Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn | TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501) |
| Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China | ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513) |
| Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics | LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525) |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin | ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537) |
| Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer | YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546) |
| Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China | ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553) |
| Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu | HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562) |
| Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China | ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570) |
| Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region | XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580) |
| Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China | TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589) |
| Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios | LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598) |
| Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances | CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607) |
| Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water | WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617) |
| Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions | ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623) |
| Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites | JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632) |
| Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation | YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641) |
| Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) | SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648) |
| Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor | LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656) |
| Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns | MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664) |
| Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants | LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673) |
| Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System | XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679) |
| Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature | HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687) |
| Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System | GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696) |
| Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO ₃ ⁻ /Fe(III) EDTA | ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706) |
| Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) | GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715) |
| Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province | DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725) |
| Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area | YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733) |
| Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment | WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747) |
| Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil | LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756) |
| Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 | MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763) |
| Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing | YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774) |
| Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary | LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782) |
| Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation | SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790) |
| Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China | ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800) |
| Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert | DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809) |
| Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields | JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819) |
| Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems | LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828) |
| Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock | DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836) |
| Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil | YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844) |
| Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features | YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850) |
| Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex | WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860) |
| Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products | YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868) |
| Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste | CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874) |
| Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste | LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882) |
| Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models | CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889) |