

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响

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: 在市政污水处理厂进行同步厌氧氨氧化反硝化(SAD)工艺小试。以 A/O 除磷和亚硝化工艺处理后的生活污水为基质, 启动厌氧氨氧化滤柱。反应器启动成功后, 基质中分别投加葡萄糖和丙酸钠启动 SAD 工艺。结果表明, 常温条件(13~22℃)下, 进水投加 30 mg·L⁻¹ 葡萄糖, SAD 工艺耦合效果良好, 平均出水总氮浓度为 6.41 mg·L⁻¹。相较于厌氧氨氧化工艺, SAD 工艺出水总氮浓度降低了 42%; 低温环境(10~13℃)中, 投加 30 mg·L⁻¹ 葡萄糖, SAD 工艺稳定性受到破坏并向反硝化工艺转变; 常低温环境(10~22℃)中, 基质中投加 30 mg·L⁻¹ 丙酸钠, SAD 工艺均有良好的处理效果, 平均出水总氮浓度为 6.54 mg·L⁻¹, 丙酸钠对低温 SAD 工艺影响较小。

关键词: 生活污水; 厌氧氨氧化; 反硝化; 滤柱; 碳源

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0232-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706279

Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant

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: Lab-scale anaerobic ammonia oxidation and denitrification (SAD) processes were operated simultaneously in a municipal waste water treatment plant (WWTP). Sewage treated by the A/O and nitrification process was used as the substance to start up an anaerobic ammonia oxidation filter reactor. Adding glucose and sodium propionate to influent was used as the substance to start up the SAD filter reactor after the successful start-up of the ANAMMOX reactor. The SAD process performed well with an average total nitrogen concentration in the effluent of 6.41 mg·L⁻¹ when 30 mg·L⁻¹ glucose was added to the effluent sewage at ambient temperature. Compared with the ANAMMOX process, the total nitrogen concentration in the effluent from the SAD process decreased 42%. The stability of the SAD process was destroyed and the SAD process turned into a denitrification process when 30 mg·L⁻¹ glucose was added in the influent sewage in a low temperature environment. In normal and low temperature environments, the SAD process functioned well, and the average total nitrogen concentration of the effluent was 6.54 mg·L⁻¹ when 30 mg·L⁻¹ sodium propionate was added in the influent sewage. Compared with glucose, sodium propionate had little influence on the SAD process.

Key words: sewage; ANAMMOX; denitrification; filter; carbon source

与传统脱氮工艺相比,厌氧氨氧化工艺具有脱氮途径短、节省曝气量、无需外加碳源、污泥产量少等优点^[1],已成为目前最具前景的污水脱氮工艺^[2]。

厌氧氨氧化以亚硝化工艺为基础。亚硝化工艺难以控制,出水中含有较高浓度的硝氮^[3,4]。同时,厌氧氨氧化工艺将污水中的氨氮和亚硝氮转化为氮气和少量硝氮,极限脱氮效率为 89%^[5],且无法去除进水中固有的硝氮,因此在实际应用中整体工艺的出水氮素浓度偏高^[6]。随着污水排放标准日益严格,提高氮素去除率也迫在眉睫。有文献指出,采用厌氧氨氧化耦合反硝化的方法可以有效地提高反应器的总氮去除率^[7~9],但国内外对 SAD 工艺的研究

停留在配水上^[10~12],实际应用极少。

亚硝化工艺出水中,可降解有机物浓度较小,后续的 SAD 工艺往往需要外加碳源。碳源对 SAD 工艺有重要的影响^[13~15]。污水处理厂通常投加的有机碳源为甲醇、丙酸钠和葡萄糖等^[16]。甲醇会对厌氧氨氧化菌产生不可逆的抑制作用,不适合作为 SAD 工艺的有机碳源^[17]。丙酸钠和葡萄糖对厌氧氨氧化菌抑制作用较小^[18],理论上可以作为 SAD 工艺的碳源,但在实际工程应用中尚未有人研究。

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-07-06

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,博士,教授,主要研究方向为污水再生利用, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

本试验在污水处理厂进行,利用 A/O 除磷和亚硝化工艺处理后的实际生活污水为基质,分别投加葡萄糖和丙酸钠启动 SAD 工艺,研究实际工程应用中有机碳源对 SAD 工艺的影响。

1 材料方法

1.1 试验装置

试验采用 2 个完全相同的上向流生物滤柱(图 1),编号为 1 号和 2 号。反应器由有机玻璃制成,内径 20 cm,承托层高 5 cm,滤料高 50 cm,有效体积 15 L。滤柱每隔 10 cm 设置取样口,承托层采用粒径为 4~8 mm 的砾石,内部装填直径 5~10 mm 的火山岩填料,为了避免生物膜过量增殖导致滤柱堵塞的问题,在底部设曝气装置以进行气水反冲洗。整个反应器外部用黑色保温棉缠绕以避免光和保温。

1.2 接种污泥和试验水质

反应器启动时接种 5 L 厌氧氨氧化絮状污泥,污泥浓度为 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。厌氧氨氧化絮状污泥来自于稳定运行的厌氧氨氧化 SBR 反应器,SBR 反应器总氮去除率稳定在 85% 左右,总氮去除负荷为 $0.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。

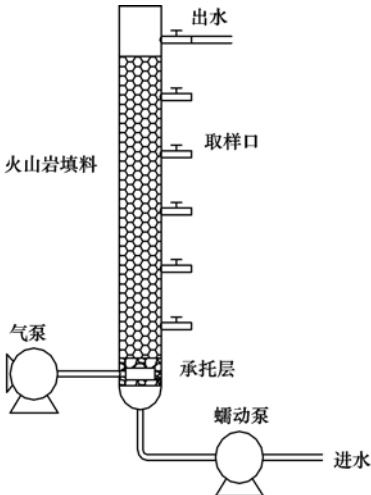


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

试验采用的基质为 A/O 除磷和亚硝化工艺处理后的实际生活污水,具体水质如表 1 所示。

1.3 试验方法

1 号反应器进水中投加葡萄糖,2 号反应器进水中投加相同浓度的丙酸钠。根据基质中投加碳源浓度的不同,反应器运行分为 4 个阶段,各阶段运行参数如表 2 所示。

表 1 亚硝化出水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Characteristics of the effluent from the nitrification process/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$					
序号	检测项目	结果	序号	检测项目	结果
1	NH_4^+-N	15~22	5	COD	20~50
2	NO_2^--N	16~24	6	pH	7.0~7.6
3	NO_3^--N	4~7	7	TP	<1.5
4	SS	<20			

表 2 各阶段反应器参数变化情况

Table 2 Parameter variations of each stage				
阶段	时间/d	有机物/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	季节	$T/^{\circ}\text{C}$
S1	1~34	—	春末	16~19
S2	35~80	10	夏	16~22
S3	81~117	20	夏、秋	14~20
S4	118~189	30	秋、冬	10~16

S1 阶段为厌氧氨氧化工艺启动阶段,基质为 A/O 除磷和亚硝化工艺处理后的生活污水。S2~S4 阶段为 SAD 工艺运行阶段,S2、S3 和 S4 阶段分别投加 10、20、30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 有机物。

1.4 检测方法

水样分析中 NH_4^+-N 测定采用纳氏试剂光度法, NO_2^--N 采用 *N*-(1-萘基)乙二胺光度法, NO_3^--N 采用紫外分光光度法,COD 采用国标法测定(对水样进行预处理排除亚硝酸盐的影响),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^[19]。

反应速率的测定:从反应器取出滤料,刮下生物膜解离并在烧杯中测定反应速率。烧杯设置机械搅拌,测定厌氧氨氧化反应速率和反硝化反应速率。测定厌氧氨氧化反应速率时,基质氨氮和亚硝氮浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,调节碱度使碱度与氨氮之比为 10,温度控制在 $24\sim 26^{\circ}\text{C}$,pH 稳定在 $7.0\sim 8.0$,DO 维

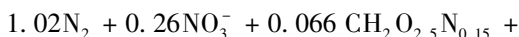
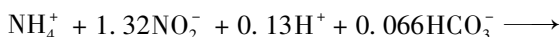
持 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 测定反硝化反应速率时, 以 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲醇作为碳源, 硝氮浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度控制在 $24 \sim 26^\circ\text{C}$, pH 稳定在 $7.0 \sim 7.8$, DO 维持 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

2 结果与讨论

2.1 反应器的启动

污水处理厂厌氧氨氧化工艺在春季末期进行启动, 水温为 $15 \sim 19^\circ\text{C}$. 启动时 1 号和 2 号反应器各接种 5 L 污泥浓度为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的厌氧氨氧化絮状污泥. 为了减少厌氧氨氧化污泥的流失, 启动初期对出水进行收集并循环进水. 运行 3 d 后, 出水中 SS 浓度均小于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 絮状污泥已稳定截留在反应器中. 此时将反应器改为连续流运行, 进入 S1 阶段.

反应器启动时采用较低的水力负荷以减小厌氧氨氧化菌的流失, 滤速定为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, HRT 约为 5 h . 进出水氮素浓度如图 2、3 所示. 从中可知, 随着反应器的运行, 出水氨氮和亚硝氮浓度逐步降低. 1 号和 2 号反应器分别用 19 d 和 25 d 时, 使氨氮亚硝氮去除率大于 90% , 完成了反应器的初步启动. 1 号和 2 号反应器均在较短的时间内完成了厌氧氨氧化工艺的启动, 相较于其他研究成果^[20, 21], 本试验反应器启动较快是由于接种了大量的厌氧氨氧化菌. 第 $25 \sim 34 \text{ d}$ 时, 反应器氨氮、亚硝氮去除率大于 95% , 1 号反应器出水总氮浓度为 $9.6 \sim 13.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 2 号反应器出水总氮浓度为 $9.8 \sim 12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均超过了北京市地方标准的 A 类排放标准. 出水中氮素浓度主要以硝氮的形式存在, 一方面, 由于亚硝化工艺难以控制, 进水中硝氮浓度为 $4 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 另一方面, 厌氧氨氧化工艺会有少量硝氮产生, 因此导致出水含有大量硝氮.



厌氧氨氧化反应方程式如式(1)所示^[5]. 从中可知, 厌氧氨氧化菌按 $1.32:1$ 的比例消耗亚硝氮和氨氮基质. 总氮去除量和出水硝氮增量之比为 8 , 该值称为特征比. 亚硝氮氨氮消耗比和特征比的大小受反硝化作用的影响, 反硝化作用增强, 亚硝氮氨氮消耗比和特征比均会上升. 反应器亚硝氮氨氮消耗比如图 4 所示.

S1 阶段末期, 1 号反应器平均亚硝氮氨氮消耗比为 1.19 , 平均特征比为 8.18 , 2 号反应器平均亚

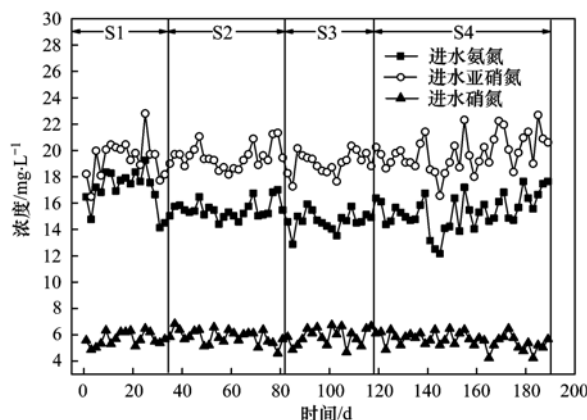


图 2 进水浓度

Fig. 2 Nitrogen variation in the influent and effluent

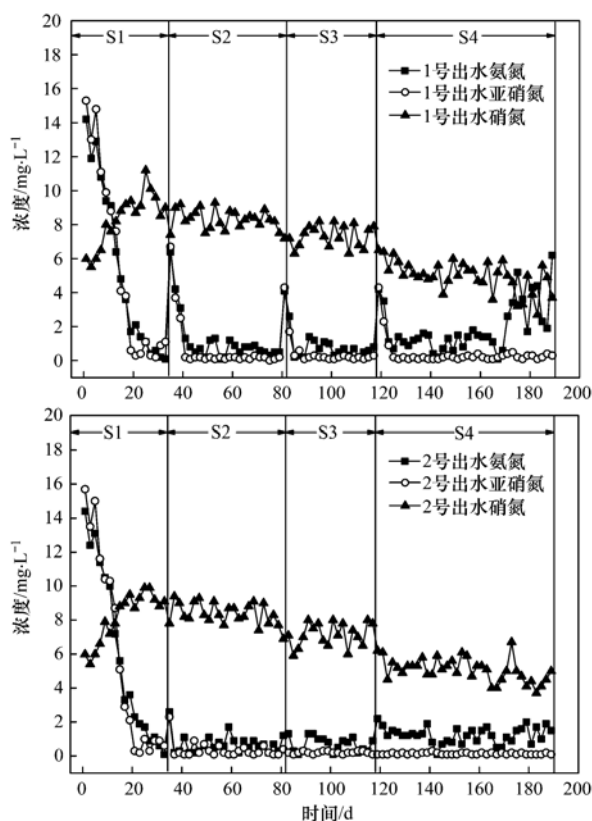


图 3 出水浓度

Fig. 3 Nitrogen variation in the influent and effluent

硝氮氨氮消耗比为 1.22 , 平均特征比为 8.76 , 表明反硝化作用较弱. Kumar 等指出^[8], 高 C/N 比会使反硝化细菌取代厌氧氨氧化菌, 成为反应器的优势菌种. 而在本试验中, S1 阶段进水中 COD 浓度为 $25 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD/NH_4^+ 为 $1.2 \sim 2$, 处于较高水平, 但未观察到明显的反硝化作用. 1 号和 2 号反应器出水 COD 维持在 $20 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 去除率仅为 $10\% \sim 25\%$. 原因是 A/O 工艺和亚硝化工艺出水中 COD 大多数为难降解的有机物^[22], 反硝化菌缺少碳源, 活性处于较低水平. 而难降解的有机物

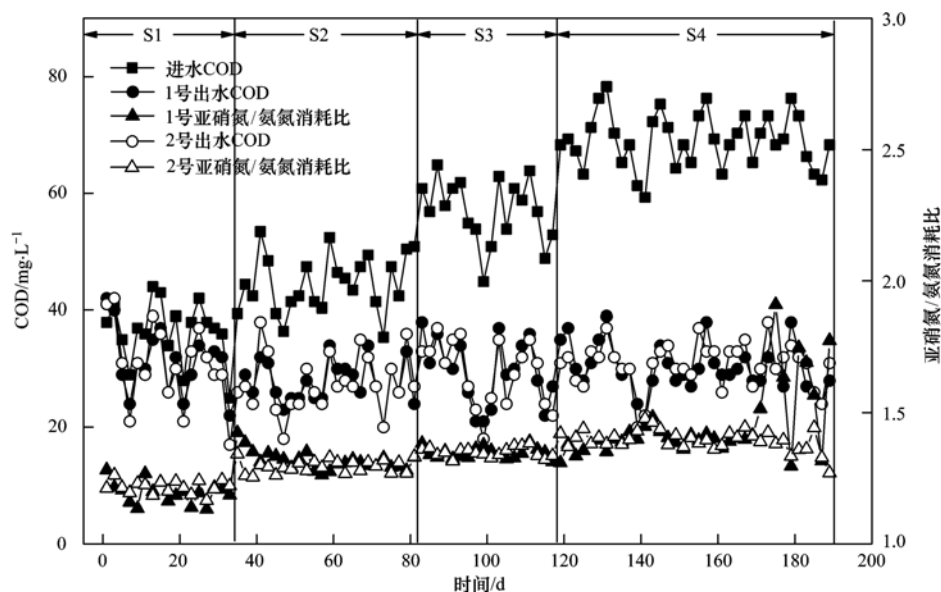


图4 COD变化及亚硝氮氨氮消耗比

Fig. 4 Variation of COD and the consumption ratio of nitrite to ammonia

对厌氧氨氧化菌影响较小^[23],因此在厌氧氨氧化菌和反硝化菌的竞争占据优势,维持了厌氧氨氧化工艺的稳定性。

2.2 SAD 工艺的运行

S2 阶段 1 号和 2 号反应器进水中分别有 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖和丙酸钠,启动 SAD 工艺。1 号反应器投加葡萄糖后,氨氮和亚硝氮去除率从 95% 降低到 60% 左右,运行 6 d 后,氨氮和亚硝氮去除率恢复至 90% 以上。2 号反应器投加丙酸钠后,氨氮和亚硝氮去除率从 95% 降低到 80%,运行 2 d 后,氨氮和亚硝氮去除率恢复至 95% 以上,丙酸钠对厌氧氨氧化菌的影响较小。第 41 ~ 80 d,1 号反应器平均出水总氮浓度为 $9.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2 号反应器平均出水总氮浓度为 $9.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。S2 阶段 1 号反应器的亚硝氮氨氮消耗比为 1.31,平均特征比为 12.60。2 号反应器的亚硝氮氨氮消耗比为 1.29,平均特征比为 12.16。S2 阶段末期,1 号和 2 号反应器处理效果几乎相同,表明常温条件下,低浓度葡萄糖和丙酸钠对于稳定运行的 SAD 工艺宏观作用效果相似。

S3 阶段基质中有机物浓度提高到 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其他参数保持不变。在 S3 阶段初期,1 号反应器氨氮去除率由 97% 降低至 78%,厌氧氨氧化菌活性受到了暂时的抑制,运行 3 d 后,氨氮和亚硝氮去除率大于 98%。2 号反应器氨氮去除率几乎没有变化。相比于 S2 阶段,反应器用较短的时间恢复了高效的氨氮和亚硝氮去除效果,抗有机物冲击负荷得到了明显的提升。第 85 ~ 117 d,1 号反应器出水总氮浓

度为 $6.5 \sim 9.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均出水总氮浓度为 $8.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2 号反应器出水总氮浓度为 $7.0 \sim 9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均出水总氮浓度为 $7.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相较于厌氧氨氧化工艺,此时 SAD 工艺将出水总氮浓度降低了 26%。

S3 阶段 1 号反应器亚硝氮氨氮消耗比上升至 1.34,特征比上升至 21.92。2 号反应器亚硝氮氨氮消耗比为 1.35,平均特征比为 25.51。亚硝氮氨氮消耗比及特征比的升高,表明硝化细菌作用进一步得到提高。反应器保持着高效厌氧氨氧化活性的同时,提高了反硝化菌的活性。根据厌氧氨氧化方程式计算^[5],厌氧氨氧化途径的氮损约为 90%,反硝化氮损约占 10%。

S4 阶段,进水中的有机物浓度提高到 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。该阶段进水温度、氨氮亚硝氮去除率如图 5 所示。第 123 ~ 170 d,水温为 $12.3 \sim 15.2^\circ\text{C}$,1 号出水总氮浓度为 $4.8 \sim 7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $6.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。与厌氧氨氧化工艺相比,SAD 工艺出水总氮浓度降低了 42%,达到了北京市地方标准的 A 类排放标准。厌氧氨氧化和反硝化途径的氮损分别为 83% 和 17%,在常温条件下,进水中投加 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖,厌氧氨氧化菌和反硝化菌耦合效果良好。第 171 d,运行进入冬季,进水温度降低至 12°C 以下。1 号反应器亚硝氮的去除几乎不受影响,氨氮去除率明显下降,且随温度变化而变化。进水温度为 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 时,出水氨氮浓度为 $1.7 \sim 6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水总氮浓度为 $7.0 \sim 10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过了排放标准。

研究表明,厌氧氨氧化菌活性受温度影响大而反硝化菌活性受温度影响小^[24]. 在本试验中,基质中投加 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖,温度为 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 时,反硝化途径的氮损提高到 30% 左右,SAD 工艺的平衡受到破坏并向反硝化工艺转变.

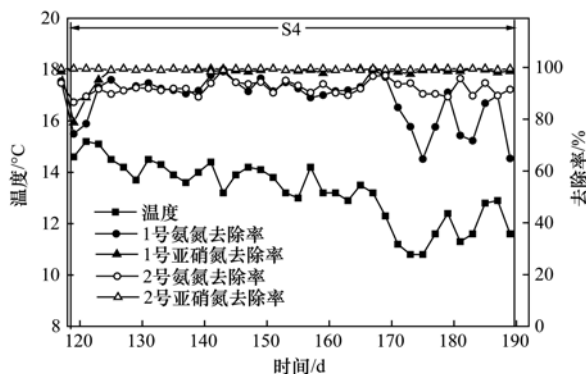


图 5 S4 阶段的温度及去除率

Fig. 5 Temperature and nitrogen removal rate in S4

S4 阶段,2 号反应器出水总氮浓度为 $4.6 \sim 8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $6.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,满足了北京市地方标准的 A 类排放标准. 即使在 $10 \sim 12^\circ\text{C}$ 的低温条件下,氨氮去除率仍保持在 90%,厌氧氨氧化途径的氮损约占 85%,SAD 工艺运行稳定. 以丙酸钠作为碳源时,低温对 SAD 工艺的冲击较小. 研究表明,厌氧氨氧化菌可以利用丙酸钠等挥发性脂肪酸,将硝酸盐还原为氨氮,且利用挥发性脂肪酸速率大于反硝化细菌^[25~27]. 丙酸钠为基质有利于厌氧氨氧化菌同反硝化菌竞争,即使在低温条件下,SAD 工艺仍能保持高效稳定运行.

2.3 生物学特性研究

为了宏观对比 1 号和 2 号反应器中微生物的活性,定期取滤料进行分析. 每次取等量距底部 10、30 和 50 cm 的滤料,测定滤料表面平均生物膜厚度以及污泥反应速率,结果如图 6 所示.

S1 阶段 1 号和 2 号反应器污泥厌氧氨氧化速率(以 MLSS 计)分别为 $7.6 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $7.0 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,两者厌氧氨氧化速率大致相同,均处于较高水平. S1 由于 A/O 除磷出水中可降解有机物较少,不利于异养菌的生长,污泥厌氧氨氧化速率较高,反硝化速率较低. S2 ~ S4 阶段,基质中投加有机碳源,有利于反硝化菌的生长,污泥反硝化速率有所提高. 反硝化菌大量增殖,厌氧氨氧化菌在生物膜中的相对比例有所下降,因此厌氧氨氧化速率逐步降低. 投加有机物的浓度对污泥反应速率影响较大,随着有机物浓度的升高,污泥厌氧氨氧化速率逐步下降,反硝化速率逐渐升高. 1 号反应器污泥

厌氧氨氧化速率明显下降,反硝化速率显著增高,2 号反应器污泥反硝化速率增幅较小,表明碳源种类对污泥反应速率有较大影响.

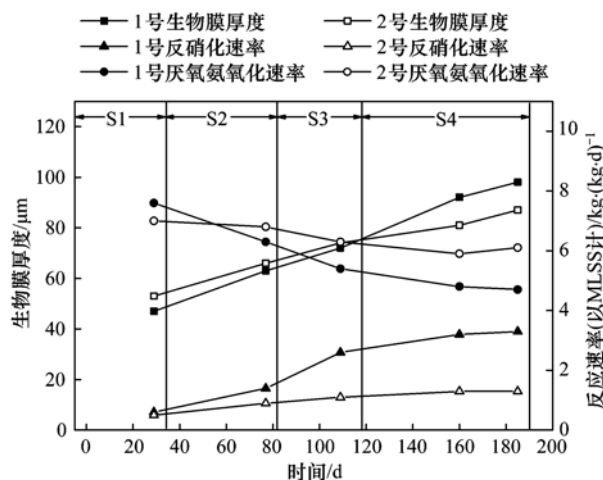


图 6 生物膜厚度及反应速率

Fig. 6 Bio-film thickness and reaction rate

在反应器运行过程中,生物膜厚度不断增加. 1 号反应器生物膜厚度增长较快,污泥厌氧氨氧化速率下降明显,反硝化速率显著升高,生物膜厚度的增长主要来源于反硝化菌的大量繁殖. 2 号反应器生物膜厚度增长较慢,厌氧氨氧化反应速率和反硝化速率变化幅度较小,表明适量投加丙酸钠不会导致反硝化菌大量增殖,2 号反应器总氮去除率的提高主要来自厌氧氨氧化菌等微生物的异养代谢.

宏观上,S2 ~ S3 阶段,1 号和 2 号反应器出水总氮浓度,特征比及亚硝氮氨氮消耗比相差不大,但污泥反应速率存在较大差距. 1 号反应器投加葡萄糖后,反硝化作用大大增强. 反硝化菌将硝氮和亚硝氮转化成氮气,因此导致亚硝氮氨氮消耗比和特征比的升高. 而 2 号反应器投加丙酸钠,厌氧氨氧化菌利用丙酸钠将硝氮还原为氨氮,去除硝氮的同时减少了氨氮消耗,亚硝氮氨氮消耗比和特征比得以提升.

在市政污水处理厂 SAD 工艺运行过程中,应根据温度选择投加碳源的种类和浓度. 水温在 12°C 以上时,可以投加 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖以降低出水总氮浓度;当水温降低至 12°C 以下时,应酌量减少葡萄糖的投加量,避免 SAD 工艺向反硝化工艺转变. 投加丙酸钠,SAD 工艺在 $10 \sim 22^\circ\text{C}$ 的环境中均能高效稳定运行.

3 结论

(1) 常温条件 (13°C 以上) 下,进水投加 30

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖, SAD 工艺耦合效果良好, 平均出水总氮浓度为 $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相较于厌氧氨氧化工艺, SAD 工艺出水总氮浓度降低了 42%。低温环境 ($10\sim 13^\circ\text{C}$) 中, 投加 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 葡萄糖, SAD 工艺稳定性受到破坏并向反硝化工艺转变。

(2) 常低温环境 ($10\sim 22^\circ\text{C}$) 中, 基质中投加 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 丙酸钠, SAD 工艺均有良好的处理效果, 平均出水总氮浓度为 $6.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 丙酸钠对低温 SAD 工艺影响较小。

(3) 投加葡萄糖后, 污泥反硝化速率大大提高。投加丙酸钠后, 污泥反硝化速率增幅较小, 总氮去除率的提高主要来自污泥中细菌异养代谢。建议污水处理厂实际应用中采用丙酸钠作为碳源, 以维持 SAD 工艺冬季高效稳定运行。

致谢: 感谢北京桑德环保集团和京禹石水务有限公司对本研究的支持。

参考文献:

- [1] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [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] Chuang H P, Ohashi A, Imachi H, *et al.* Effective partial nitrification to nitrite by down-flow hanging sponge reactor under limited oxygen condition [J]. *Water Research*, 2007, **41**(2): 295-302.
- [4] Fux C, Bohler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [5] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, **16**(3): 177-183.
- [6] 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 等. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4174-4179.
Zhang S Y, Wu P, Song Y L, *et al.* Nitrogen removal using ANAMMOX and denitrification for treatment of municipal sewage [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4174-4179.
- [7] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [8] Kumar M, Lin J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal—strategies and issues [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **178**(1-3): 1-9.
- [9] 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*, 2010, **61**(8): 1949-1955.
- [10] 周健, 黄勇, 刘忻, 等. 硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 1061-1069.
Zhou J, Huang Y, Liu X, *et al.* Element sulfur autotrophic denitrification combined anaerobic ammonia oxidation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 1061-1069.
- [11] 管勇杰, 于德爽, 李津, 等. 有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 654-664.
Guan Y J, Yu D S, Li J, *et al.* Nitrogen removal performance of ANAMMOX with different organic carbon sources [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 654-664.
- [12] 阎刚, 李田, 徐乐中, 等. 基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4324-4331.
Lü G, Li T, Xu L Z, *et al.* Quick start-up performance of combined ANAMMOX reactor based on different inoculated sludge [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4324-4331.
- [13] Zhong Y M, Jia X S. Simultaneous ANAMMOX and denitrification (SAD) process in batch tests [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2013, **29**(1): 51-61.
- [14] Li J, Qiang Z M, Yu D S, *et al.* Performance and microbial community of simultaneous Anammox and denitrification (SAD) process in a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 1064-1072.
- [15] 王凡, 刘凯, 林兴, 等. 不同 $\text{TOC}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3415-3421.
Wang F, Liu K, Lin X, *et al.* Effect of different TOC to NH_4^+-N ratios on nitrogen removal efficiency in the ANAMMOX process [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3415-3421.
- [16] 孙永利, 许光明, 游佳, 等. 城镇污水处理厂外加商业碳源的选择[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(19): 84-86.
Sun Y L, Xu G M, You J, *et al.* Selection of external carbon source for municipal wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(19): 84-86.
- [17] Jensen M M, Thamdrup B, Dalsgaard T. Effects of specific inhibitors on Anammox and denitrification in marine sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(10): 3151-3158.
- [18] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents; effect of organic matter content on process performance [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [19] 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.
- [20] Wang T, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Start-up of the Anammox process from the conventional activated sludge in a membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(9): 2501-2506.
- [21] 田智勇, 李冬, 杨宏, 等. 上向流厌氧氨氧化生物滤池的启动与脱氮性能[J]. *北京工业大学学报*, 2009, **35**(4): 509-515.
Tian Z Y, Li D, Yang H, *et al.* Start-up and nitrogen removal

- performance of anaerobic ammonium oxidation bio-filter [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, **35**(4): 509-515.
- [22] Kimura Y, Isaka K, Kazama F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (Anammox) activity [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(6): 4390-4394.
- [23] Yang J C, Zhang L, Fukuzaki Y, *et al.* High-rate nitrogen removal by the Anammox process with a sufficient inorganic carbon source [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(24): 9471-9478.
- [24] Ahn Y H, Hwang I S, Min K S. ANAMMOX and partial denitrification in anaerobic nitrogen removal from piggery waste [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(5-6): 145-153.
- [25] Kartal B, Rattray J, van Niftrik L A, *et al.* *Candidatus* "Anammoxoglobus propionicus" a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2007, **30**(1): 39-49.
- [26] Kartal B, van Niftrik L, Rattray J, *et al.* *Candidatus* 'Brocadia fulgida': an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, **63**(1): 46-55.
- [27] Kartal B, Kuypers M M M, Lavik G, *et al.* Anammox bacteria disguised as denitrifiers: nitrate reduction to dinitrogen gas via nitrite and ammonium [J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(3): 635-642.

环境科学

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)