

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

**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

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 ..... 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM<sub>2.5</sub> 影响霾污染的关键尺度谱特征 ..... 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析 ..... 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 ..... 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 ..... 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 ..... 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 ..... 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 ..... 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 ..... 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 ..... 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 ..... 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 ..... 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 ..... 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 ..... 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 ..... 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 ..... 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 ..... 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 ..... 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 ..... 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 ..... 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 ..... 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 ..... 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 ..... 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 ..... 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 ..... 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 ..... 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 ..... 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 ..... 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 ..... 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 ..... 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 ..... 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 ..... 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 ..... 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 ..... 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

<sup>13</sup>C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 ..... 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 ..... 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 ..... 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 ..... 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 ..... 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 ..... 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 ..... 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 ..... 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 ..... 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 ..... 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 ..... 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 ..... 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 ..... 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 ..... 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 ..... 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 ..... 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

# 不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能

安芳娇<sup>1</sup>, 彭永臻<sup>2</sup>, 董志龙<sup>1</sup>, 邵兆伟<sup>1</sup>, 赵智超<sup>1</sup>, 黄剑明<sup>1</sup>, 陈永志<sup>1\*</sup>

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

**摘要:** 采用厌氧氨氧化反应器 (ASBR) 处理模拟生活污水, 考察低基质比、降温方式及 pH 对系统脱氮性能的影响。结果表明, 温度为 30℃ 时, 控制进水 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度为 (30 ± 0.2) mg·L<sup>-1</sup>, 基质比 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 由 0.9 升至 1.4, 系统 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 去除率均值分别从 54.4% 和 65.3% 升至 95.8% 和 92.5%; 当基质比继续升高至 1.6 时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率基本不变, 而 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 去除率降至 54.6%, 即基质比接近理论值 1.32 时, 其厌氧氨氧化脱氮性能较强。当反应温度一次性从 30℃ 降低至 15℃ 时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的去除率由 97.5% 和 98.5% 分别降至 35.2% 和 40.1%, 当采用阶梯式降温方式 (30℃ → 25℃ → 20℃ → 15℃) 时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的去除率分别由 97.7% 和 98.6% 逐渐降至 52.7% 和 62.4%。控制 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为 1.4, 逐步升高 pH 由 7.7 至 8.5 时, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的去除率先增大后减小, 当 pH 为 8.3 时系统脱氮性能最佳。

**关键词:** 厌氧氨氧化; 基质比; 降温方式; pH; 生物脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2770-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711120

## Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies

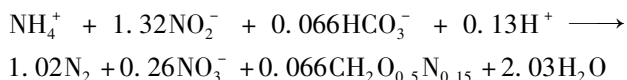
AN Fang-jiao<sup>1</sup>, PENG Yong-zhen<sup>2</sup>, DONG Zhi-long<sup>1</sup>, SHAO Zhao-wei<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-chao<sup>1</sup>, HUANG Jian-ming<sup>1</sup>, CHEN Yong-zhi<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National Engineering Laboratory of Urban Sewage Advanced Treatment and Resource Utilization Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** The effects of low substrate ratio, cooling methods, and pH on nitrogen removal performance were studied in a laboratory-scale anaerobic ammonium oxidation reactor (ASBR) while treating simulated domestic waste water. The results illustrated that the average removal efficiencies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N increased from 54.4% and 65.3% to 95.8% and 92.5%, respectively, at a temperature of 30℃ and an influent concentration of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N of (30 ± 0.2) mg·L<sup>-1</sup>. The substrate ratio (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) increased from 0.9 to 1.4. However, the removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N was affected negligibly, and the average removal efficiency of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N decreased to 54.6% when the substrate ratio was increased to 1.6, suggesting that the nitrogen removal performance of anaerobic ammonium oxidation was best when the substrate ratio was close to the theoretical value of 1.32. The average removal efficiencies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N decreased from 97.5% and 98.5% to 35.2% and 40.1%, respectively, when the temperature of the reactor dropped from 30℃ to 15℃ at one time. The average removal efficiencies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N dropped from 97.7% and 98.6% to 52.7% and 62.4%, respectively, when the ladder cooling method (30℃ → 25℃ → 20℃ → 15℃) was used. The average removal efficiencies of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N increased initially and then decreased when the pH was increased gradually from 7.7 to 8.5. The highest nitrogen removal efficiency was achieved when the pH was controlled at 8.3 with a substrate ratio of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N equal to 1.4.

**Key words:** anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX); substrate ratio; cooling methods; pH; biological nitrogen removal

目前, 氮、磷元素引起的水体富营养化日益严重, 有资料显示, 氮污染源远远大于磷污染<sup>[1]</sup>. 因此开发高效节能的脱氮技术对改善水生环境具有重要的意义. 厌氧氨氧化菌以亚硝酸盐为电子受体, 以氨氮为电子供体直接反应生成氮气, 反应过程无需外加有机碳源, 相比传统的生物脱氮工艺可节省 50% 的曝气量, 且污泥产率低等优点, 成为最有前景的工艺之一<sup>[2-4]</sup>. 化学计量式如下:



然而, 厌氧氨氧化菌对反应条件要求严苛, 在实际工程中, 实际反应掉的亚硝氮与反应掉的氨氮的比 ( $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 及产生的硝态氮量与反应掉的氨氮的比 ( $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 并不完全符合其理论值 1.32 和 0.26<sup>[5, 6]</sup>. 间刚等<sup>[7]</sup>的研究表

收稿日期: 2017-11-14; 修订日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668033); 甘肃省高等学校特色专业项目 (101004); 兰州交通大学教改重点项目; 国家级大学生科技创新项目 (1105004)

作者简介: 安芳娇 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 1171405081@qq.com

\* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

明最适进水基质比 ( $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) 为 1.34, 而 Tsushima 等<sup>[8]</sup> 的研究发现  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  为 0.8 ~ 0.87 时系统脱氮性能较高. 此外, 降温方式影响厌氧氨氧化脱氮性能的研究表明, 温度在 26 ~ 37℃ 之间变化时, 逐渐降温引起氮去除速率变化幅度为 4.35%, 而阶梯式降温导致氮去除速率变化幅度为 9.03%, 说明逐渐降温更有利于厌氧氨氧化反应器脱氮性能的稳定<sup>[9]</sup>. 李亚峰等<sup>[10]</sup> 采用 UASB 厌氧氨氧化反应器, 控制 pH 为 7.5 ~ 8.5, 系统脱氮效果达到最佳. 以上研究均采用高基质浓度且控制单因素来实现厌氧氨氧化的稳定运行, 而对于低基质浓度多因素策略实现良好脱氮性能的研究鲜见报道.

针对以上问题, 本研究以模拟低基质浓度生活污水为研究对象, 考察了基质比、降温方式及 pH 等多因素对 ASBR 脱氮性能的影响, 以期为厌氧氨氧化处理实际生活污水提供一定的借鉴和指导.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置

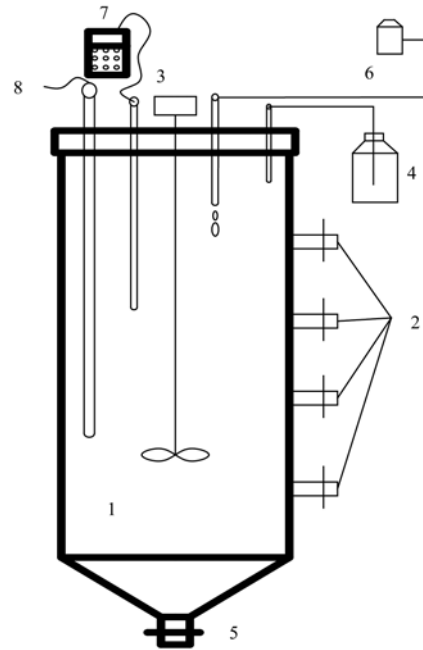
ASBR 反应器采用圆柱形有机玻璃制成 (图 1), 直径 14 cm, 高 45 cm, 有效容积 5 L. 在其侧壁的垂直方向设置取样口, 底部设有排泥口, 上部设有通气口, 反应产生的气体经水封瓶排出, 为防止光对厌氧氨氧化菌活性的影响, 反应器外侧用黑色塑料布覆盖.

### 1.2 接种污泥

试验污泥取自成功启动的厌氧氨氧化中的活性污泥, 具有良好的脱氮性能, 其 MLSS 为 3 380  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , VSS 为 2 530  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.3 试验用水水质及检测方法

试验用水采用人工模拟污水, 其组成如下:  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (按需配),  $\text{NaNO}_2$  (按需配), 微量元素参照<sup>[3]</sup>:  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  2  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{KHCO}_3$  110  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 微量元素 I 和微量元素 II 各 1.5  $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ . 微量元素浓缩液 I 组分为: EDTA 5 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{FeSO}_4$  5 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 微量元素浓缩液 II 组分为: EDTA 5 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  240  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  430  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  990  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  250  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  190  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  220  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_4$  14  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  210  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .



1. ASBR 反应器; 2. 排水口; 3. 搅拌器; 4. 水封瓶; 5. 排泥口; 6. 缓冲瓶; 7. pH、ORP 检测仪; 8. 温控仪

图 1 ASBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of ASBR reactor

水样经过 0.45  $\mu\text{m}$  滤纸过滤后根据国家标准方法<sup>[11]</sup>测定 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ .

### 1.4 运行工况

ASBR 反应器采用间歇运行, 单周期运行 280 min, 即进水 5 min → 反应 240 min → 沉淀 30 min → 排水 5 min, 排水比为 80%. 每次改变  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  或 pH 后, 运行 7 个周期.

本试验采用 3 种运行工况, 工况 1 在不同进水  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  (0.9、1.1、1.3、1.4、1.5 及 1.6) 条件下运行, 控制进水  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度为  $(30 \pm 0.2)$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、温度 30℃ 及 pH 为  $7.2 \pm 0.2$ . 工况 2 在不同降温方式 (一次性降温和阶梯式降温) 下运行, 一次性降温方式由 1 ~ 4 周期的 30℃ 到第 5 周期的 15℃; 阶梯式降温方式如下: 1 ~ 4 周期为 30℃, 5 ~ 10 周期为 25℃, 11 ~ 19 周期为 20℃, 20 ~ 40 周期为 15℃. 控制进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的浓度均分别为  $(25.0 \pm 0.5)$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(33.0 \pm 0.5)$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 为  $7.2 \pm 0.2$ . 工况 3 在不同 pH (7.7、7.9、8.1、8.3 及 8.5) 下运行, 控制进水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  浓度分别为 21.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 30.6  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 温度为 30℃.

## 2 结果与讨论

### 2.1 基质比对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

图 2 表示进水  $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$  分别为 0.9、1.1、

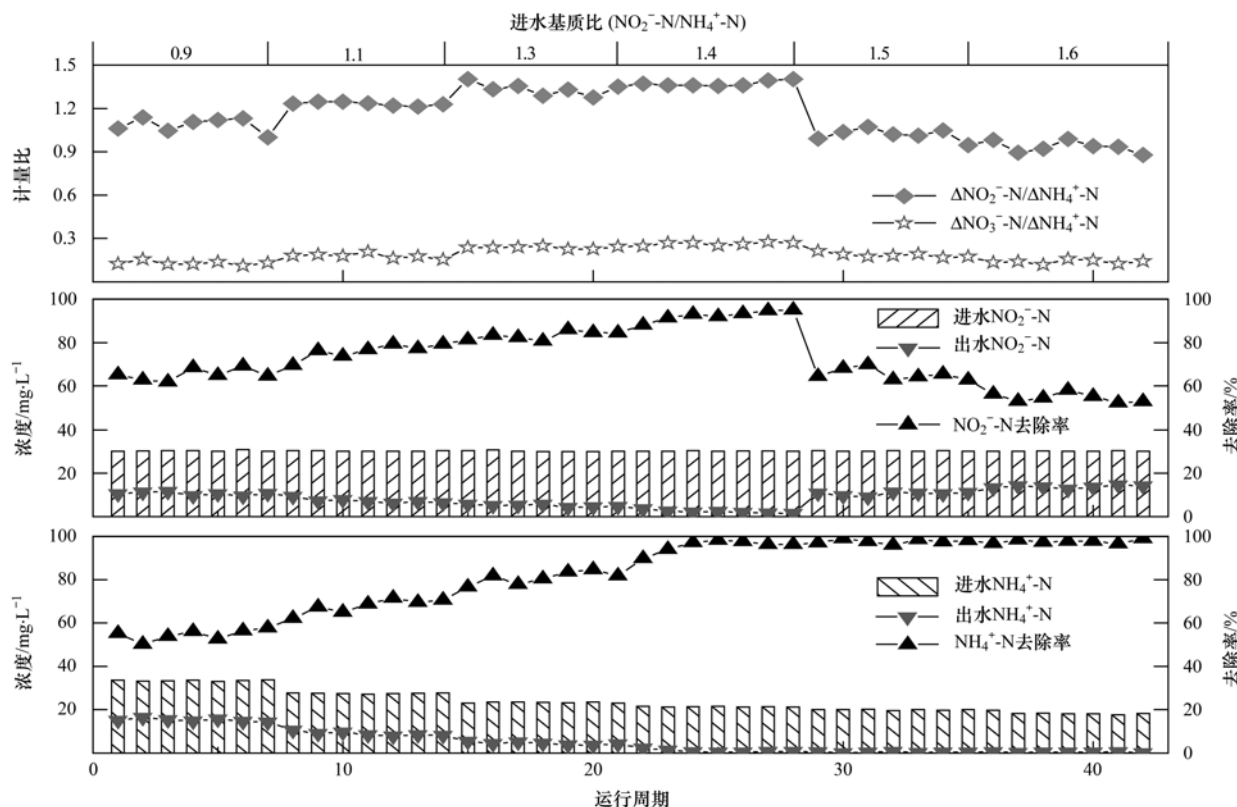


图2 基质比对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除及其反应计量比的影响

Fig. 2 Effect of substrate ratio on the removal of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  and stoichiometric ratio

1.3、1.4、1.5及1.6时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除，以及实际反应计量比。

由图2可知，反应器运行期间，当进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.9时，系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率随着运行周期的增加略有升高，基本稳定在54.4%和65.3%左右， $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在1.0到1.1之间波动， $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 稳定于0.12。进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.1时，出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均随着运行周期的增加逐渐降低，14周期时，出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别达到 $8.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ， $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增加为1.2， $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有微小的增加。进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.3时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率明显升高至82.5%， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率缓慢增加至84.4%， $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为1.28，虽接近进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ ，但是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率并未达到最高。

进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.4时，出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均降低，反应运行至28周期时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度分别为 $0.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率均值分别达95.8%和92.5%。 $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为1.35， $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/$

$\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均值为0.25，都比较接近理论值，系统脱氮性能较进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为0.9、1.1及1.3显著提高，此时厌氧氨氧化脱氮性能达到最佳。有研究报道， $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与理论值越接近，则厌氧氨氧化对氮素转化的贡献越大<sup>[12, 13]</sup>。继续提高进水 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 至1.6时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率为96.2%， $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均去除率降至54.6%，进而导致 $\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 由1.35降至0.98，去除效率明显下降，说明在此工况下厌氧氨氧化脱氮不能充分发挥其优势。

张永辉等<sup>[14]</sup>采用低基质模拟生活废水，启动厌氧氨氧化ASBR反应器，发现当 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.33时，系统脱氮性能最佳。周凌等<sup>[15]</sup>采用低基质人工配水启动厌氧氨氧化反应器时，发现最佳 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.02， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均去除率分别为94.5%和97.4%。间刚等<sup>[7]</sup>采用高基质人工配水，发现在进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.34时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率同时达到99.9%左右。而本研究采用低基质浓度的模拟生活污水时，维持稳定运行且脱氮性能较高的进水 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为1.4，该值比上述研究的基质比略高，分析原因可能是由于本试验在进行厌氧氨氧化的同时伴随着少

量反硝化作用或微生物的同化作用, 导致实际需要的 $\text{NO}_2^-$ -N量大于理论所需, 同时由于污泥浓度存在差异, 导致生物脱氮效率有所不同。

## 2.2 降温方式对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

### 2.2.1 不同降温方式下氮素的去除变化

两种降温模式下, 进水 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N的浓度均分别为 $(25.0 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(33.0 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。一次性降温方式: 1~4周期为 $30^\circ\text{C}$ , 5~40周期为 $15^\circ\text{C}$ 。阶梯式降温方式: 1~4周期为 $30^\circ\text{C}$ , 5~10周期为 $25^\circ\text{C}$ , 11~19周期为 $20^\circ\text{C}$ , 20~40周期为 $15^\circ\text{C}$ 。两种降温模式下 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的变化见图3。

由图3可知, 在 $30^\circ\text{C}$ 时出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度分别为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为97.5%和98.5%, 该温度下厌氧氨氧化活性良好。当温度一次性降温至 $15^\circ\text{C}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度分别突升至 $16.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $19.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别降至35.2%和40.1%, 温度的突然降低对厌氧氨氧化活性影响较大, 脱氮效果变差。运行周期增加至36时, 出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度分别逐渐稳定为 $13.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $16.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别升高至46.7%和51.6%, 说

明厌氧氨氧化活性随着时间的推移得到一定的恢复, 且逐渐适应低温环境达到稳定。姚俊芹等<sup>[16]</sup>研究一次性降温方式对厌氧氨氧化反应的影响, 温度由 $31^\circ\text{C}$ 降至 $17^\circ\text{C}$ 时反应器内部厌氧氨氧化活性受到明显抑制,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N平均去除率迅速从97.0%和94.1%下降为46.2%和41.8%, 与本研究结果基本一致。

阶梯式降温方式下,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N去除率随着温度的变化逐渐降低, 当温度由 $30^\circ\text{C}$ 降至 $25^\circ\text{C}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度为 $4.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为81.8%和84.6%。当温度由 $25^\circ\text{C}$ 降至 $20^\circ\text{C}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度为 $6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为76.4%和79.7%。当温度由 $20^\circ\text{C}$ 降至 $15^\circ\text{C}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度为 $11.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $12.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为53.5%和61.5%。当温度分别恒定在25、20及 $15^\circ\text{C}$ 时, 脱氮效率随着运行周期的增加而缓慢上升, 从图3可知每一次降温都会使反应器的平均脱氮效率比上一个温度梯度的平均脱氮效率降低。杨朝晖等<sup>[17]</sup>采用阶梯式降温的方式, 温度由 $31^\circ\text{C}$ 降到 $16^\circ\text{C}$ 时,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的平均去除率分别由50.2%和65.4%降至34.5%和39.8%。宋

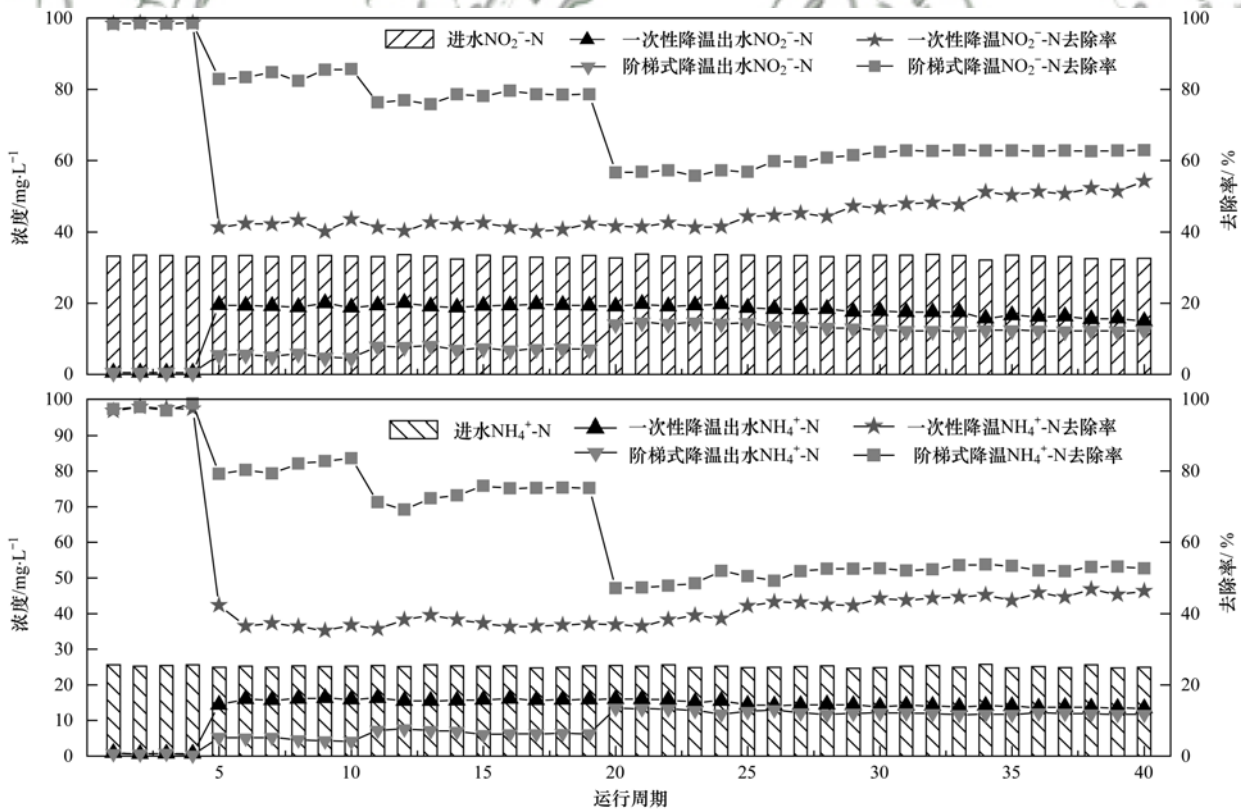


图3 不同降温方式下 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N的变化

Fig. 3 Variations of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_2^-$ -N with different cooling methods

成康等<sup>[18]</sup>研究了阶梯降温方式,发现温度从 33℃ 降到 15℃ 时,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率分别由 93.3% 和 100% 降至 50.8% 和 51.8%。而本试验不仅厌氧氨氧化脱氮效果优于他们的研究结果,而且本试验是在低基质浓度进水条件下进行的,与实际

生活污水水质更接近。

### 2.2.2 阶梯式降温反应器活性恢复

图 4 表示阶梯式降温反应器一次性从 15℃ 升温至 30℃ 过程中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的变化。

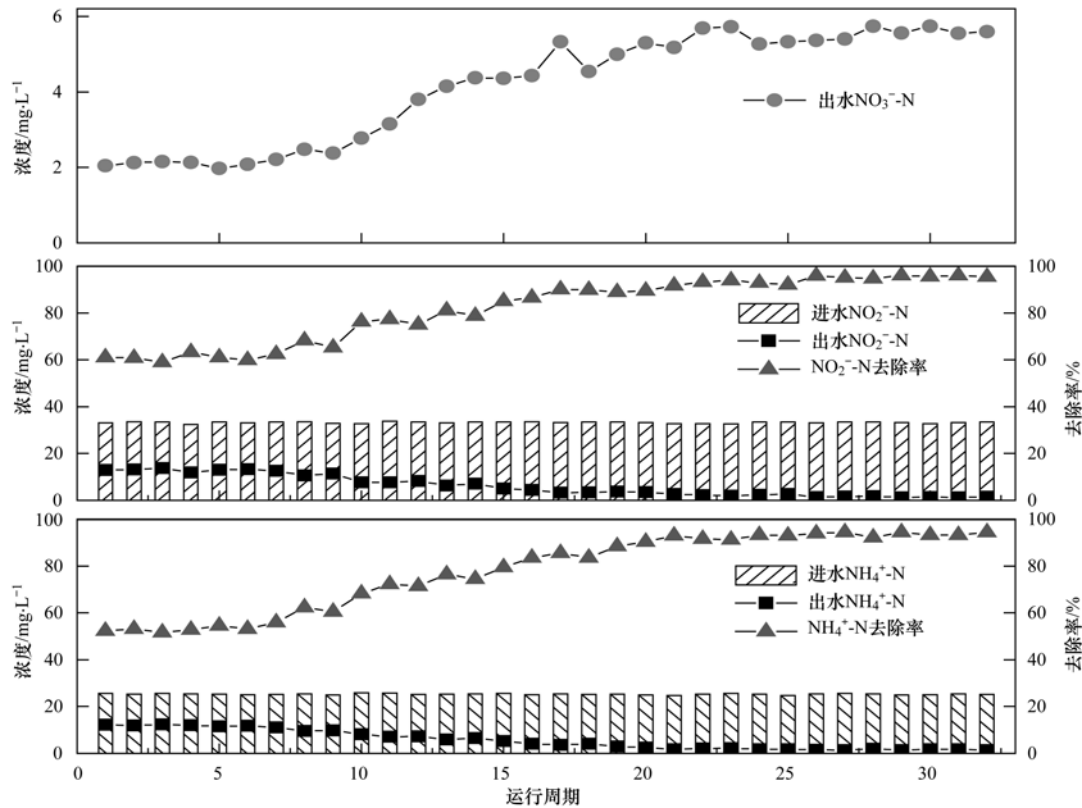


图 4 一次性升温过程中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的变化

Fig. 4 Variations of  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N, and  $\text{NO}_3^-$ -N with the temperature increase occurring all at once

1~7 周期内出水  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 平均浓度分别为  $11.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $12.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 53.5% 和 61.5%, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为  $2.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。随着周期的增加出水  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度逐渐下降, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度逐渐上升, 15 周期时, 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别下降至  $5.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 79.6% 和 85.1%, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为  $4.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。30 周期后均达到稳定, 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别为  $1.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 93.7% 和 95.5%, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为  $5.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。表明 ASBR 反应器经过阶梯式降温至 15℃ 下运行一段时间后, 再一次性升温至 30℃ 后经过 30 周期的运行, 厌氧氨氧化活性可以得到很好地恢复。姚俊芹等<sup>[16]</sup>采用厌氧氨氧化反应器使温度从 17℃ 一次性升温至 31℃ 时,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率分别

从 20.2% 和 21.3% 升至 99.4% 和 90.6%,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率升高幅度比本试验高, 主要是因为本试验在低温条件下仍然具有较高的脱氮性能, 厌氧氨氧化菌活性较强。郑宇慧<sup>[19]</sup>采用高基质浓度的模拟废水, 研究发现, 控制温度从 22℃ 一次性恢复至 32℃ 时,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率分别由 64.6% 和 69.1% 升至 84.8% 和 85.6%, 温度恢复之后与本试验相比,  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率分别低 8.9% 和 9.9%。

### 2.3 pH 对厌氧氨氧化脱氮性能的影响

图 5 表示整个反应过程中不同 pH 条件下  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的变化。在整个运行过程中进水  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的浓度分别为  $21.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $30.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

当 pH 为 7.7 时, 在 7 个周期内, 出水  $\text{NH}_4^+$ -N 及  $\text{NO}_2^-$ -N 浓度分别为  $7.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $7.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 66.6% 和 73.9%, 出水  $\text{NO}_3^-$ -N

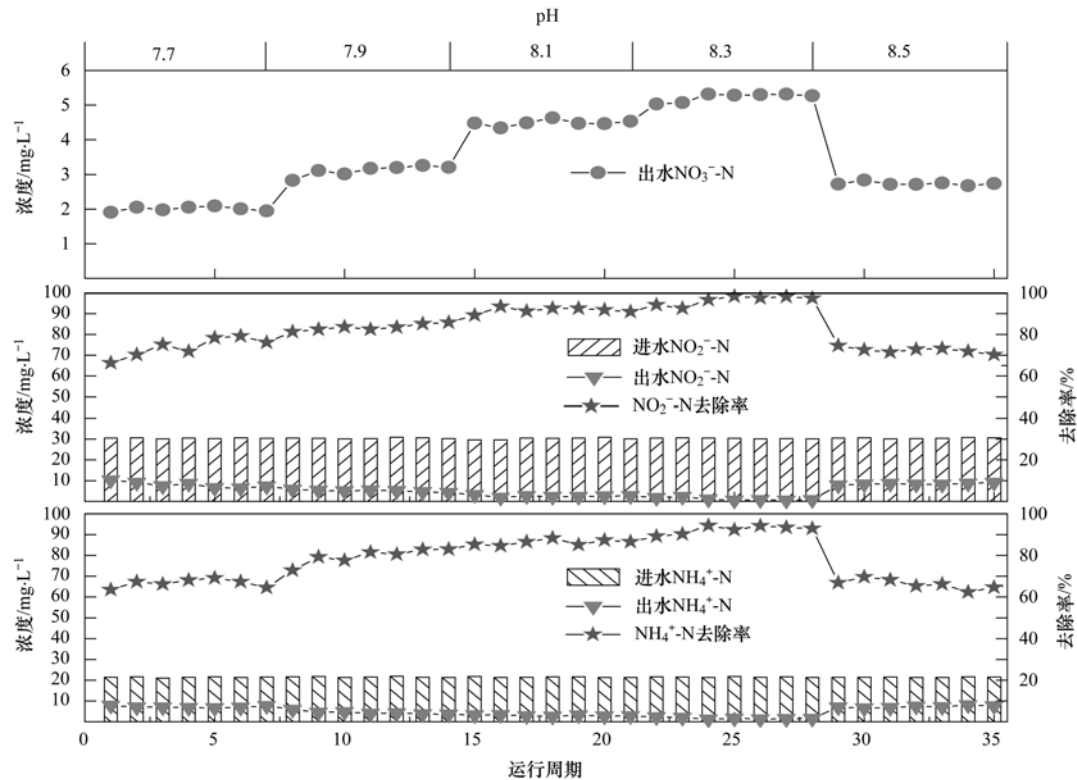


图5 不同 pH 下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的变化

Fig. 5 Variations of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , and  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  with different pH values

浓度为  $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。改变 pH 分别为 7.9、8.1 及 8.3 时, 反应过程中出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度都呈现下降的趋势, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度呈现上升趋势。当 pH 为 8.3 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  平均去除率分别高达 93.5% 和 97.6%, 出水  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度升至  $5.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均约为 0.26, 与其理论值相吻合。运行周期为 29 时, 继续改变反应 pH 为 8.5, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度分别突然增加至  $7.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $8.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度突然降为  $2.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。运行至 35 周期时, 出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度升至  $7.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率降至 64.6%, 出水  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度升至  $9.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率降至 70.3%。本试验表明, 控制 pH 为 8.3 时低基质厌氧氨氧化脱氮性能最强。鲍林林等<sup>[20]</sup>的研究表明厌氧氨氧化脱氮效果最佳时 pH 为 6.7 ~ 8.5, 总氮去除率达 80% 以上。张黎等<sup>[21]</sup>发现 pH 为 7.5 ~ 8.0 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除率分别为 90.2% 和 91.1%。杨洋等<sup>[22]</sup>通过控制 pH 为 7.5 ~ 8.3 时, 厌氧氨氧化污泥活性最强。李亚峰等<sup>[23]</sup>发现厌氧氨氧化脱氮效果最佳 pH 为 8.0 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除率最高为 84.3% 和 88.4%。陈曦等<sup>[24]</sup>发现当 pH 为 7.8 时, 总氮去除速率达最大。可见当 pH 为 6.7 ~ 8.5

时, 厌氧氨氧化菌具有较强的活性。

图 6 表示 pH 与氧化还原电位 (ORP) 的关系。可以看出, 厌氧氨氧化反应过程中控制不同 pH 时, 对应的 ORP 也发生变化。当 pH 逐渐增加时, ORP 呈现下降趋势, 两者呈现良好的负线性相关, 与文献<sup>[25, 26]</sup>报道的相吻合。因此, ORP 可以作为低基质厌氧氨氧化反应中重要的指示性参数。

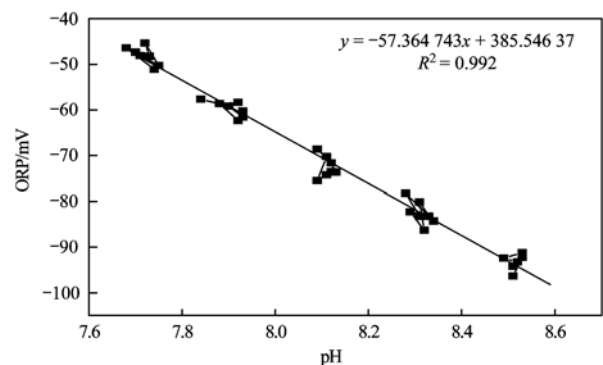


图6 ORP 与 pH 的相关性

Fig. 6 Linear relationship between ORP and pH

### 3 结论

(1) 本研究中 ASBR 厌氧氨氧化反应器处理低浓度模拟生活污水时, 脱氮性能最佳的基质比 ( $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 为 1.4 (理论值为 1.32), 出水



$\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N平均浓度分别为 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率均值分别为95.8%和92.5%.

(2)阶梯式降温方式对厌氧氨氧化脱氮性能的影响小于一次性降温方式对其的影响, 当反应温度一次性从 $30^\circ\text{C}$ 降低至 $15^\circ\text{C}$ 时,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率由97.5%和98.5%分别降至35.2%和40.1%, 当采用阶梯式降温方式时, 两者的去除率分别由97.7%和98.6%逐渐降至52.7%和62.4%. 对阶梯式降温后的反应器进行一次性升温, 厌氧氨氧化脱氮性能可恢复到降温之前的水平.

(3)pH对厌氧氨氧化系统脱氮性能具有显著影响, 最佳pH为8.3,  $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N的去除率分别为93.5%和97.6%. 同时ORP与pH呈现良好的负线性相关, 即ORP也可以作为低基质厌氧氨氧化反应的间接指示性参数.

#### 参考文献:

- [1] 王振强, 刘春广, 乔光建. 氮、磷循环特征对水体富营养化影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 82-85, 97.  
Wang Z Q, Liu C G, Qiao G J. Effect of nitrogen and phosphorus cycling characteristic on eutrophication of water body [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 82-85, 97.
- [2] Van De Graaf A A, Mulder A, De Bruijn P, et al. Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(4): 1246-1251.
- [3] Van Der Star W R L, Abma W R, Blommers D, et al. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water Research, 2007, 41(18): 4149-4163.
- [4] 陈重军, 王建芳, 张海芹, 等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 521-527.  
Chen C J, Wang J F, Zhang H Q, et al. Research progress in anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 521-527.
- [5] 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.
- [6] 安芳娇, 彭永臻, 张永辉, 等. 基质比对厌氧氨氧化脱氮性能的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 1010-1015.  
An F J, Peng Y Z, Zhang Y H, et al. Effect of substrate ratio on performance of the removal of nitrogen of anaerobic ammonia oxidation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 1010-1015.
- [7] 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 等. 基质比对ABR厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 2006-2011.  
Lü G, Xu L Z, Shen Y L, et al. Effect of substrate ratio on nitrogen removal performance of ANAMMOX in ABR [J]. Environmental Science, 2017, 38(5): 2006-2011.
- [8] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, et al. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors[J]. Water Research, 2007, 41(8): 1623-1634.
- [9] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1288-1292.  
Li X, Huang Y, Zheng Y H, et al. Effect of temperature on stability of nitrogen removal in the ANAMMOX reactor [J]. Environmental Science, 2012, 33(4): 1288-1292.
- [10] 李亚峰, 马晨曦, 张驰. UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 3044-3051.  
Li Y F, Ma C X, Zhang C. Influencing factors of sludge liquor treatment in UASBB [J]. Environmental Science, 2014, 35(8): 3044-3051.
- [11] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [12] Schmidt I, Bock E. Anaerobic ammonia oxidation with nitrogen dioxide by *Nitrosomonas europaea* [J]. Archives of Microbiology, 1997, 167(2-3): 106-111.
- [13] Schmidt I, Look C, Bock E, et al. Ammonium and hydroxylamine uptake and accumulation in *Nitrosomonas* [J]. Microbiology, 2004, 150(5): 1405-1412.
- [14] 张永辉, 彭永臻, 曾立云, 等. 常温低基质厌氧氨氧化ASBR反应器的快速启动[J]. 工业水处理, 2017, 37(2): 43-47.  
Zhang Y H, Peng Y Z, Zeng L Y, et al. Quick start-up of low-substrate anammox ASBR reactor at normal temperature [J]. Industrial Water Treatment, 2017, 37(2): 43-47.
- [15] 周凌, 操家顺, 蔡娟, 等. 低浓度氨氮条件下厌氧氨氧化反应器的启动研究[J]. 给水排水, 2006, 32(11): 34-37.  
Zhou L, Cao J S, Cai J, et al. Experimental study on startup of ANAMMOX reactor under low ammonia concentration [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(11): 34-37.
- [16] 姚俊芹, 刘志辉, 周少奇. 温度变化对厌氧氨氧化反应的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 3993-3996.  
Yao J Q, Liu Z H, Zhou S Q. Influence of temperature change on anaerobic ammonia oxidation reaction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(10): 3993-3996.
- [17] 杨朝晖, 徐峥勇, 曾光明, 等. 不同低温驯化策略下的厌氧氨氧化活性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 300-305.  
Yang Z H, Xu Z Y, Zeng G M, et al. Anaerobic ammonia oxidation activity under different low temperature domestication strategy [J]. China Environmental Science, 2007, 27(3): 300-305.
- [18] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2006-2013.  
Song C K, Wang Y Y, Han H C, et al. Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 2006-2013.
- [19] 郑宇慧. 温度对厌氧氨氧化的影响研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.  
Zheng Y H. Study of the temperature influence on ANAMMOX [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,

- 2011.
- [20] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯, 等. 常温低基质下 pH 值和有机物对厌氧氨氧化的影响[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(13): 38-42.
- Bao L L, Zhao J G, Li X K, *et al.* Influence of pH value and organic substance on anammox bioreactor at normal temperature and low substrate concentration[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(13): 38-42.
- [21] 张黎, 胡筱敏, 姜彬慧. 低基质浓度下 pH 和 DO 对厌氧氨氧化反应效能的影响[J]. 环境工程, 2015, **33**(6): 59-62.
- Zhang L, Hu X M, Jiang B H. Effect of pH and DO on ANAMMOX reaction performance under lower pollutants concentration[J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(6): 59-62.
- [22] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(4): 691-695.
- Yang Y, Zuo J E, Shen P, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [23] 李亚峰, 张文静, 马晨曦. pH 值和 DO 对厌氧氨氧化脱氮性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, **29**(4): 715-720.
- Li Y F, Zhang W J, Ma C X. The impact of pH and DO on nitrogen removal of anammox[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2013, **29**(4): 715-720.
- [24] 陈曦, 崔莉凤, 杜兵, 等. 温度和 pH 值对厌氧氨氧化微生物活性的影响分析[J]. 北京工商大学学报(自然科学版), 2006, **24**(3): 5-8.
- Chen X, Cui L F, Du B, *et al.* Study on influencing of temperature and pH to anaerobic ammonium oxidation microbial activity[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2006, **24**(3): 5-8.
- [25] 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.
- [26] Chen K C, Chen C Y, Peng J W, *et al.* Real-time control of an immobilized-cell reactor for wastewater treatment using ORP[J]. *Water Research*, 2002, **36**(1): 230-238.



## CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing .....	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM <sub>2.5</sub> Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan .....	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Panjin .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City .....	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning .....	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin .....	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China .....	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region .....	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China .....	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China .....	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province .....	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China .....	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m .....	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research .....	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain .....	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin .....	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir .....	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area .....	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir .....	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment .....	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios .....	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain .....	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China .....	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling .....	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) .....	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly( <i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network .....	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater .....	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization .....	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies .....	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion .....	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere .....	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria .....	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate .....	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain .....	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil .....	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via <sup>13</sup> C Pulse-labeling .....	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China .....	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast .....	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River .....	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation .....	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China .....	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area .....	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils .....	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil .....	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province .....	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi .....	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province .....	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires .....	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO <sub>2</sub> Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level .....	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles .....	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments .....	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)