

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10  
第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM<sub>2.5</sub> 垂直分布及输送 ..... 肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)

肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析 ..... 常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)

聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析 ..... 衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放因子及碳组分源谱 ..... 赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)

城市生活垃圾露天焚烧排放 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及其暴露健康风险 ..... 程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)

某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估 ..... 王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)

南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制 ..... 邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)

广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性 ..... 李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)

郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 ..... 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)

基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数 ..... 梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 ..... 方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)

民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 ..... 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)

利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性 ..... 王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)

镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能 ..... 魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)

长江源区大气降水化学特征及离子来源 ..... 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)

连续极端降雨对东江流域水质影响分析 ..... 车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)

基于湖泊与出入湖水水质关联性研究: 以鄱阳湖为例 ..... 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)

金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征 ..... 刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)

太湖不同介质电导率时空变化特征 ..... 王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析 ..... 施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)

基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析 ..... 李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)

草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价 ..... 张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)

太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律 ..... 祁闻, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)

淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系 ..... 杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)

岩溶区不同土地利用地下水碳同位素地球化学特征及生态意义 ..... 任坤, 潘晓东, 曾浩, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)

岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应 ..... 杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)

巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析 ..... 唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)

δ-MnO<sub>2</sub>/沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮 ..... 马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)

不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果 ..... 熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)

不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化 ..... 刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)

启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水 ..... 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)

聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析 ..... 孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)

典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素 ..... 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)

5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素 ..... 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)

Cu<sup>2+</sup> 和 Pb<sup>2+</sup> 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用 ..... 卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 ..... 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)

贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价 ..... 唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)

渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术 ..... 李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)

不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选 ..... 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)

小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运 ..... 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)

微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 ..... 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)

药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制 ..... 肖亮亮, 丁园 (4668)

磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征 ..... 张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)

生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征 ..... 黄福义, 周曙屹聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响 ..... 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)

灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响 ..... 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)

柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO<sub>2</sub> 排放及其效率对秸秆还田量的响应 ..... 游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)

增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响 ..... 张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)

O<sub>3</sub> 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟 ..... 徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)

2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征 ..... 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)

《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)

# 启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水

吉晓庆<sup>1</sup>, 齐泽坤<sup>1</sup>, 钱飞跃<sup>1,2,3\*</sup>, 沈耀良<sup>1,2,3</sup>, 王建芳<sup>1,2,3</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

**摘要:** 为将部分亚硝化-厌氧氨氧化技术(PN/A)应用于高浓度氨氮废水的处理, 本研究以经破碎后的全自养脱氮颗粒污泥为种污泥, 通过协同控制进水氨氮负荷(NLR)、各格室溶解氧(DO)水平和游离氨(FA)浓度等参数, 在106 d内成功启动了三级连续流反应器。结果表明, 颗粒污泥在启动初期呈现明显的亚硝化功能。反应器采用高NLR和限制曝气的控制策略, 能够有效控制亚硝酸氧化菌增殖, 并避免DO对厌氧氨氧化菌的抑制作用, 有利于颗粒密实度和脱氮活性的提升。当进水氨氮浓度升至 $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 通过调节进水pH和碱度投加量, 可以消除前端格室内高FA浓度对功能菌活性的不利影响。反应器最终实现了 $7.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的总氮去除负荷, 较传统活性污泥法高出50~100倍。模拟不同曝气强度的序批次实验也证明, 各格室污泥的脱氮活性持续增强, 且格室1中颗粒污泥的成熟度最高。期间, 胞外聚合物含量与比总氮去除速率呈现良好的线性相关( $R^2 > 0.97$ ), 这意味着颗粒密实度的改善对提升反应器性能具有积极意义。

**关键词:** 颗粒污泥; 全自养脱氮; 三级连续流反应器; 高氨氮浓度; 功能菌活性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4578-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201904248

## Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia

Ji Xiao-qing<sup>1</sup>, Qi Ze-kun<sup>1</sup>, Qian Fei-yue<sup>1,2,3\*</sup>, Shen Yao-liang<sup>1,2,3</sup>, Wang Jian-fang<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Resource Utilization Technology of Municipal Sewage, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** In order to apply partial nitrification-ANAMMOX (PN/A) technology to treat wastewater with high concentrations of ammonia, autotrophic nitrogen-removing granular sludge was crushed and inoculated into a three-stage continuous flow reactor. The nitrogen loading rate (NLR), dissolved oxygen (DO) concentration, and free ammonia (FA) levels in each compartment of the reactor were controlled over a 106-day period. Results showed that the nitrification process occurred with the inoculated granules during the initial phase. A limited aeration strategy was employed in the reactor at relatively high NLRs. Given the effective suppression of nitrite-oxidizing bacteria and the prevention of ANAMMOX bacteria from high DO conditions, the compact structure and nitrogen-removal activity of the granules could be improved. When the ammonia-nitrogen concentration was increased in the influent to  $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , the adverse impacts of high FA concentrations on the functional microbe activity in the first compartment should be eliminated. This occurs by reducing the influent pH and alkalinity dosage. This occurs by reducing the influent pH and degree of alkalinity. As a result, a total nitrogen removal rate of  $7.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  was achieved in the reactor, which is 50 to 100 times higher than that of conventional activated sludge systems. The consistent improvement in the nitrogen-removal activity of the granules was demonstrated by batch testing at different aeration intensities. This showed that activity was greatest in the first compartment, which showed the highest granular maturity. In addition, a clear linear correlation ( $R^2 > 0.97$ ) was observed between the amount of extracellular polymeric substance and the specific nitrogen removal rate. This indicated that the dense granules played a positive role in enhancing the performance of the reactor.

**Key words:** granular sludge; autotrophic nitrogen removal; three-stage continuous flow reactor; high ammonia concentration; microbial activity

当前, 开发并推广具有“能源再生、物质回收”功能的新型污水处理工艺已成为水污染控制领域的普遍共识<sup>[1]</sup>。众多研究和工程实践表明, 通过分离设置有机物捕集和营养盐去除工序, 建立以A-B法为核心的工艺系统是实现污水处理厂能源自给的重要途径<sup>[2]</sup>。在A段, 利用厌氧生物反应器或化学强化预处理技术, 最大限度地捕集水中COD并转化为甲烷等能源载体, 使B段进水呈现低C/N的特征, 再经部分亚硝化-厌氧氨氧化(PN/A)等工序去

除氮素化合物<sup>[3]</sup>。其中, PN/A工艺是以亚硝态氮( $\text{NO}_2^-$ -N)为反应中间体, 借助好氧氨氧化菌(AOB)与厌氧氨氧化菌(AMX)的协同作用, 将大

收稿日期: 2019-04-27; 修订日期: 2019-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878430, 51578353); 江苏高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象项目; 江苏高校自然科学基金项目(18KJB610019); 苏州市科技计划项目(SS201834)

作者简介: 吉晓庆(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理理论与技术, E-mail: 841295903@qq.com

\* 通信作者, E-mail: feiyuehandler@163.com

部分  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  转化为氮气, 同时产生少量硝态氮 ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ) 的全自养脱氮过程<sup>[4]</sup>. 与传统的全程硝化-反硝化生物脱氮过程相比, PN/A 工艺不依赖有机碳源, 无需设置混合液回流, 氮氧化物产量更小, 并能够在削减近 60% 的需氧量和 75% 以上的污泥产量的同时, 获得约 85% 的总氮去除率<sup>[2, 5]</sup>. 因此, PN/A 工艺已被用于处理石油化工、畜禽养殖生产废水和垃圾渗滤液等高氨氮废水 ( $> 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>.

借助颗粒污泥系统对功能菌的高效截留, PN/A 工艺可以在单个反应器内实现较大的容积负荷、较小的池体尺寸和良好的运行稳定性<sup>[7, 8]</sup>. 但受制于有限的生物量、单一的溶液环境和严苛的控制条件, 单个连续流 PN/A 反应器的脱氮效能仍难以突破  $3 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ <sup>[9~11]</sup>. 为了解决上述问题, 本文尝试在三级串联的连续流反应器中启动 PN/A 工艺. 利用多格室分级处理和差异化运行的优势, 开展多环境因素的协同控制研究, 培养具备独立脱氮功能的全自养颗粒污泥, 从而显著提升系统的整体效能. 期间, 通过序批次实验和污泥形态表征, 对颗粒污泥性能和结构演化过程进行分析, 以期建立适用于高浓度氨氮废水处理的新方法提供理论指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置及运行工况

本实验装置是由 3 个容积相同的连续流完全混

合式反应器 (CSTR) 串联组成, 每个曝气格室容积为 1.6 L, 沉淀区容积为 0.9 L, 装置结构图见图 1. 反应器通过蠕动泵连续进水, 每个格室底部装有曝气装置, 曝气量使用转子流量计进行独立控制. 三级连续流反应器置于恒温水浴缸中, 控制水温为  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

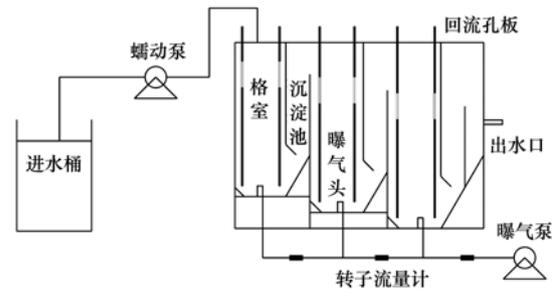


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

通过不断提升进水氨氮负荷 (NLR), 启动三级 CSTR 反应器. 依据进水氨氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 浓度分别为 200、250、300 和 350  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 将运行过程分为 I~IV 共 4 个阶段, 如表 1 所示. 在同一阶段内, 当出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度低于  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 逐级缩短反应器水力停留时间 (HRT), 同时起到提升进水负荷和淘洗絮状污泥的作用. 依据 DO 浓度、 $\text{DO}/\text{NH}_4^+\text{-N}$  比值和游离氨 (FA) 含量, 独立控制各格室的曝气强度、进水 pH 和碱度投加, 实现对 CSTR 反应器的运行调控.

表 1 反应器启动过程的主要操作参数

Table 1 Main operating parameters in the start-up of the reactor

阶段	运行天数/d	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT/h	NLR/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$
I	1~11	200	4.5/3.9/3.0	3.2/3.7/4.8
II	12~26	250	4.5/3.9/3.0	4.0/4.6/6.0
III	27~53	300	4.5/3.9/3.0	4.8/5.5/7.2
IV	54~106	350	4.5/3.9/3.0	5.6/6.5/8.4

### 1.2 接种污泥与进水水质

为保证接种污泥的均匀性, 取实验室内连续流反应器中的 PN/A 颗粒污泥<sup>[12]</sup>, 经机械破碎和筛分, 将粒径在 0.2~0.5 mm 的颗粒接种到 3 个格室中, 起始污泥浓度 (MLSS) 均为  $3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

反应器进水为人工配置的无机高氨氮废水, 模拟 A-B 工艺中经 A 段高效去除 COD 后的 B 段进水. 进水以碳酸氢钠和氯化铵充当碳、氮源, 无机碳与氨氮的质量比 ( $\text{TIC}/\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 在 1.0:1~1.4:1, 辅以少量磷酸二氢钾、硫酸镁和微量元素, 调节 pH 在 7.6~8.0<sup>[13]</sup>.

### 1.3 颗粒污泥活性的测定

为评价颗粒污泥的脱氮活性, 需定期从各格室

中取出 10 mL 颗粒污泥, 经生理盐水清洗后, 置于 150 mL 锥形瓶与 90 mL 基质溶液混合. 初始  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度控制在  $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 7.8$ . 锥形瓶用透气硅胶塞盖好, 置于  $30^\circ\text{C}$  下振荡反应. 期间, 设置两种不同转速  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 分别模拟颗粒污泥在高、低曝气强度下的脱氮过程. 依据在一定时间段内氮素含量的变化与污泥量的比值, 计算  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 比去除速率 (以  $\text{N}/\text{VSS}$  计), 即  $q(\text{NH}_4^+\text{-N})$  和  $q(\text{TN})$ , 单位  $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ <sup>[14]</sup>.

### 1.4 指标分析方法

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$  和 TN 指标分别采用纳氏试剂光度法、紫外分光光度法、*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法和过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定.

MLSS 和 MLVSS 浓度采用标准重量法测定. 溶液 pH、溶解氧 (DO) 和温度采用多功能水质分析仪 (903P 般特) 测定. 颗粒粒径分布使用筛分法确定. 重要参数的计算公式如下.

亚硝累积率:

$$\text{NAP}(\%) = \frac{\text{NO}_2^- - \text{N}}{\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}} \times 100$$

水中游离氨 (FA) 浓度<sup>[15]</sup>:

$$\text{FA}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{17}{14} \times \frac{\text{NH}_4^+ \times 10^{\text{pH}}}{\exp[6334/(237 + T)] + 10^{\text{pH}}}$$

污泥去除负荷:

$$\text{Nrs}[\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}] = \frac{\Delta \text{TN} \times 24}{\text{HRT} \times \text{MLSS}}$$

式中,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\Delta \text{TN}$  和 MLSS 单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 温度  $T$  单位为 K.

污泥形态使用 OLYMPUS CX41 型显微镜观测. 使用甲醛-NaOH 法<sup>[16]</sup> 提取污泥中胞外聚合物 (EPS). 其中, 蛋白质 (PN) 和聚多糖 (PS) 含量分别采用 Lowry 法和苯酚-硫酸法进行测定<sup>[17]</sup>, 单位  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的启动过程

在第 I 阶段 (第 1 ~ 11 d), 通过独立调节曝气强度, 控制 3 个格室内 DO 浓度分别为 1.5、1.4 和

$0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度呈现梯度递减趋势, 对应的  $\text{DO}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$  比值约为 0.01、0.02 和 0.32. 保持限制曝气状态将有助于防止亚硝酸氧化菌 (NOB) 增殖对 PN/A 反应的破坏, 这对于连续流反应器尤为重要<sup>[18, 19]</sup>. 期间, 颗粒污泥以亚硝化功能为主, 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  累积率稳定在 90% 左右. 经逐级缩短 HRT, 反应器对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率分别从 86% 和 7% 上升至 98% 和 35%, 如图 2 所示. 考虑到亚硝化反应对碱度的消耗, 进水  $\text{TIC}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$  保持在 1.4:1. 与之类似, 在第 II 和 III 阶段, 提高进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度和缩短反应器 HRT 都会导致  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率出现规律性波动, 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度持续下降. 在更高的 NLR 条件下运行, 需适当提高各格室的曝气强度, 以维持合适的  $\text{DO}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$  比值 ( $< 0.13$ ). 运行至第 53 d, 反应器对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率分别达到 99% 和 73%, 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  累积率低于 60%, 总氮去除负荷达到  $5.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 此时, 污泥去除单位 TN 产生的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ( $f$  值) 为 0.14, 接近 PN/A 反应的计量学理论值 0.11<sup>[13, 20]</sup>. 反应器表现出较强的全自养脱氮性能.

在第 IV 阶段初期 (第 54 ~ 62 d), 当进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度进一步提升至  $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 反应器对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别降至 80% 和 50% 左右, 出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度明显升高. 经过较长时间的连续运行, 更高的氨氮容积负荷使得第 1、2 格室的污泥量

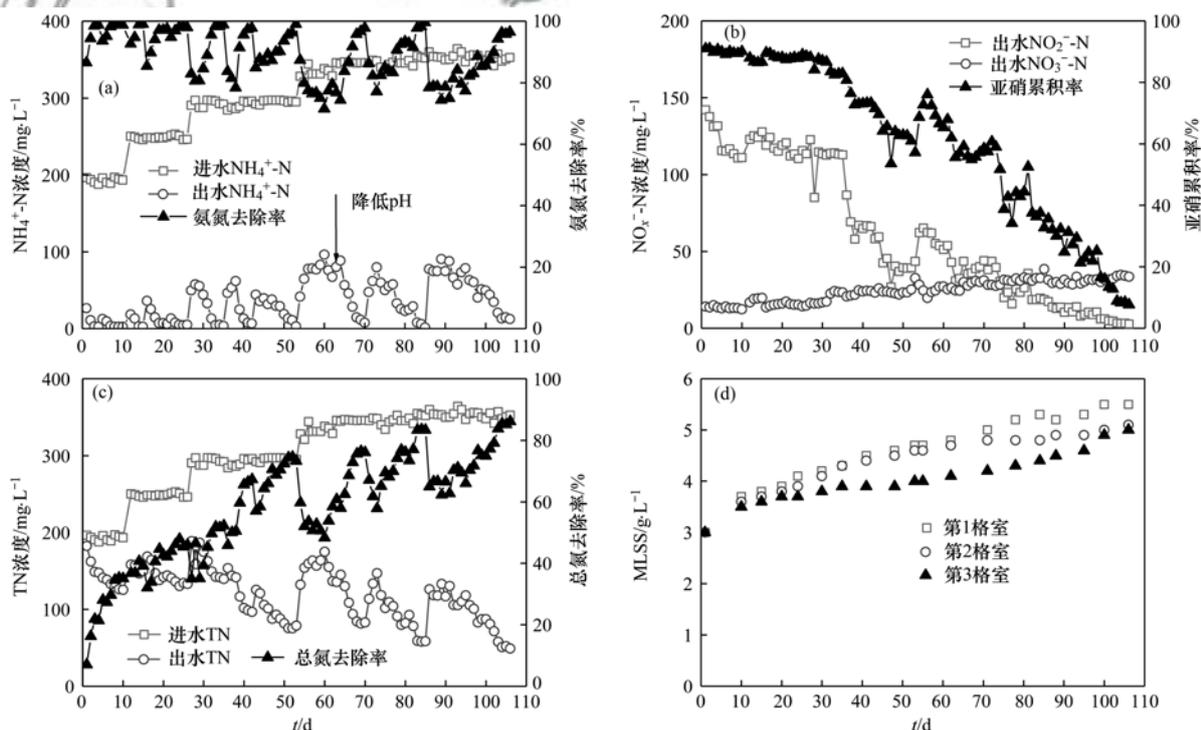


图 2 三级连续流反应器脱氮性能与各格室 MLSS 变化

Fig. 2 Variations in the nitrogen removal performance of the three-stage continuous flow reactor and MLSS concentrations in each compartment

略大于第3格室[图2(d)]. 各格室的总氮污泥去除负荷(以 N/VSS 计, 下同)遵循: 第3格室  $0.48 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  > 第2格室  $0.38 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  > 第1格室  $0.30 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . 这是因为在弱碱性 pH 条件下, 第1、2格室内的 FA 浓度 ( $33.4 \sim 35.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $20.1 \sim 22.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 要高于第3格室的水平 ( $5.4 \sim 10.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 前者对功能菌(尤其是 AMX)活性具有更强的抑制作用<sup>[21, 22]</sup>.

从第63 d起, 将进水 pH 下调至 7.7, 并削减碳酸氢盐投加量, 控制  $\text{TIC}/\text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.0:1$ , 将第1和2格室内的 FA 浓度限制在  $15.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $7.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下. 通过减小 FA 对前2个格室污泥活性的负面影响, 反应器整体脱氮性能得到了有效恢复, 第70 d的出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度已降至  $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下. 此后, 继续采用逐级缩短 HRT 和维持限制曝气的方法, 最终使反应器在 NLR 为  $8.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  的条件下, 去除了进水中超过 96% 的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和约 86% 的 TN,  $f$  值稳定在 0.11. 这意味着三级连续流

反应器的总氮去除负荷达到了  $7.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 远超以往 CANON 等自养脱氮工艺  $0.4 \sim 2.8 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  的水平, 相当于传统活性污泥法的 50 ~ 100 倍<sup>[7-9]</sup>. 同时, 各格室污泥量进一步增长, MLVSS/MLSS 值约为 0.87, 总氮污泥去除负荷遵循: 第1格室  $0.43 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  > 第2格室  $0.35 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  > 第3格室  $0.34 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . 上述结果表明, 尽管接种污泥类型相同, 但各格室的 NLR 梯度仍会导致颗粒性能出现差异化现象.

## 2.2 颗粒污泥活性的差异

前期研究表明, 不同曝气强度对 PNA 颗粒污泥脱氮性能的影响可以在一定程度上反映颗粒的结构密实度与功能成熟度<sup>[10, 23]</sup>. 由图3可知, 在第11 d, 各格室颗粒污泥的脱氮活性相差很小, 都呈现明显的亚硝化状态. 采用高曝气强度能够显著提高污泥中 AOB 对氨氮的降解速率, 获得更大的  $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$  值, 但对应的  $q(\text{TN})$  值略低于低曝气的情形. 这主要是因为接种污泥经机械破碎后结构密

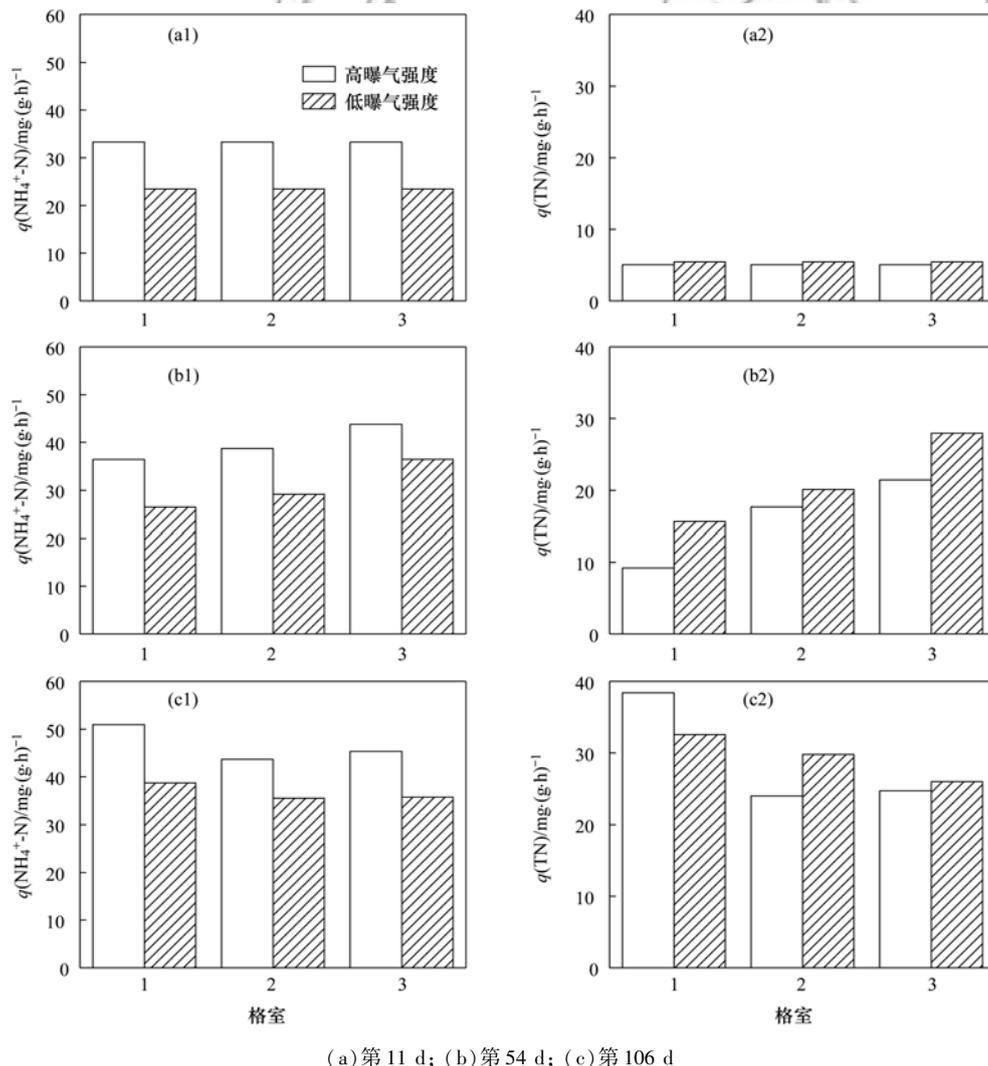


图3 不同运行阶段, 各格室颗粒污泥的脱氮活性

Fig. 3 Nitrogen removal activity of granular sludge in the different compartments of the reactor during various operating periods

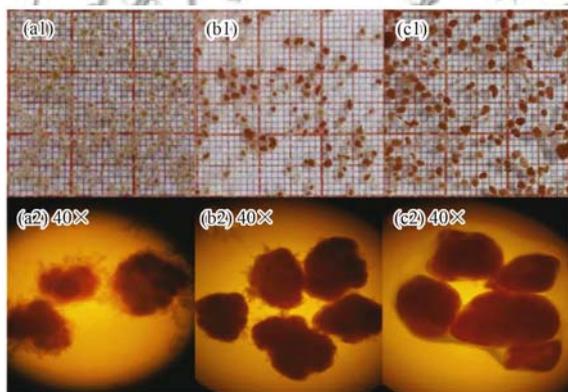
实度较低,无法有效限制 DO 在颗粒内部的渗透范围,不利于保持 AMX 的功能活性。

当反应器运行至第 54 d 时,颗粒污泥的脱氮活性从第 1~3 格室逐渐增大,这与前文针对 FA 抑制作用的分析是一致的。在高、低曝气强度下, $q(\text{TN})$  值的显著差异也说明颗粒内部的氧传质阻力仍然较低。为营造适宜 AMX 生长的微生境,对连续流反应器采用限制曝气和降低 FA 浓度的控制策略是非常必要的。

在第 106 d,各格室污泥的脱氮活性较前阶段又有明显提升。3 个污泥样品的  $q(\text{NH}_4^+-\text{N})$  值都在高曝气强度下获得了更高的测定值,且第 1 格室污泥的  $q(\text{TN})$  值也出现了类似的情况,即提高曝气强度对 PN/A 反应起到了促进作用。这表明高运行负荷使得第 1 格室的颗粒污泥结构更加密实,成熟度要优于第 2 和 3 格室。此外,在所有序批次实验中,颗粒污泥脱氮过程的  $f$  值始终低于 0.15,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  产量处于低水平,NOB 增殖得到了有效控制。

### 2.3 污泥形态结构的变化

如前所述,AMX 等功能菌活性随着反应器性能的提升而持续增强,这种变化在污泥外观形态上也有所体现,如图 4 所示。接种污泥的平均粒径为 0.3 mm,颜色呈棕黄色,大多数为不规则形态。运行期间,通过控制反应器 HRT,对污泥始终保持了



(a) 第 11 d; (b) 第 54 d; (c) 第 106 d

图 4 第 1 格室颗粒污泥形态的变化

Fig. 4 Variations in the morphology of granular sludge in the first compartment

较大的水力选择压。在第 III 阶段末期,第 1 格室污泥的平均粒径已增长至 0.8 mm,颗粒结构更加密实,棕红色内核被半透明絮体包裹,其他格室污泥形态的变化与之相似。当进水 NLR 达到  $8.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时,第 1 格室污泥呈深红棕色,颗粒密实且表面光滑,平均粒径增至 1.0 mm。

作为维持污泥形态的结构物质,胞外聚合物 (EPS) 被认为是建立 PN/A 颗粒内部差异化微生境的重要基础,其以高分子蛋白质 (PN) 和聚多糖 (PS) 物质为主<sup>[24, 25]</sup>。在本文中,将 PN 和 PS 含量相加代表颗粒污泥的 EPS 总量。有研究表明,AMX 和共生异养菌在增殖过程中都会产生大量 EPS,以实现形成基质梯度、黏附菌体细胞和抵御不良环境等功能<sup>[10, 25]</sup>。在启动期间,颗粒污泥的 EPS 含量不断累积,如表 2 所示。

其中,第 1 格室污泥的 PN 与 PS 总量增大了约 2.4 倍,并高于第 2 和 3 格室的水平。与以往报道类似<sup>[26]</sup>,PN 含量的增长速率要明显快于 PS。更大的 PN/PS 比值意味着污泥表面疏水性的增强,这与颗粒密实度和成熟度的变化是一致的<sup>[27, 28]</sup>。由图 5 可知,颗粒污泥在低曝气强度下的  $q(\text{TN})$  值与 EPS 总量呈现良好的线性相关 ( $R^2 > 0.97$ )。在工程实践中,开展污泥活性与结构参数的相关性研究将为客观评价 PN/A 颗粒污泥性能提供重要参考。

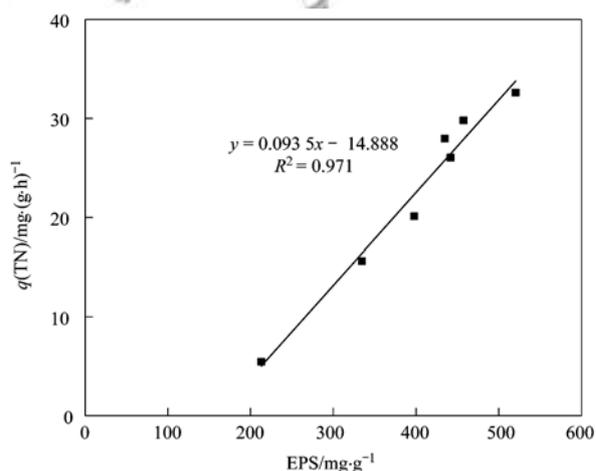


图 5 颗粒污泥脱氮活性与 EPS 含量之间的线性拟合关系

Fig. 5 Linear fitting relationship between the nitrogen removal activity and EPS contents of granular sludge

表 2 不同运行阶段,各格室内颗粒污泥的 EPS 含量

Table 2 EPS content of granular sludge in the different compartments of the reactor during various operating periods

项目	格室编号								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
运动时间	第 11 d	第 11 d	第 11 d	第 54 d	第 54 d	第 54 d	第 106 d	第 106 d	第 106 d
NLR/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	4.8	4.8	4.8	5.6	5.6	5.6	8.4	8.4	8.4
PN/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	121.98	120.95	119.92	231.94	278.64	307.45	404.47	353.42	330.78
PS/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	91.83	92.01	91.66	102.58	119.32	127.45	116.06	104.00	110.95
PN/PS 比值	1.33	1.31	1.31	2.26	2.34	2.41	3.48	3.40	2.98

### 3 结论

(1)以破碎后的 PN/A 颗粒为接种污泥, 通过调节进水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度和反应器 HRT, 在 106 d 内成功启动了三级全自养脱氮颗粒污泥反应器. 当进水  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为  $350 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 将 HRT 缩短至 3.0 h, 反应器对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除率约为 96%, 对应的 TN 去除负荷可达  $7.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 远高于以往文献报道的数值, 且出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度始终处于较低水平.

(2)启动过程中, 协同控制反应器负荷、各格室 DO 水平和 FA 浓度是持续提升污泥脱氮活性的关键方法. 采用序批次实验测定不同曝气强度下的  $q(\text{NH}_4^+$ -N) 和  $q(\text{TN})$  值, 能够反映颗粒污泥结构与功能的成熟度, 并为三级连续流反应器的调控提供理论指导.

(3)随着污泥粒径的持续增大, 颗粒结构愈加密实, 表面更加光滑, 颜色由棕黄色变为深红棕色. 期间, 颗粒污泥的  $q(\text{TN})$  值与 EPS 含量呈现良好的线性相关 ( $R^2 > 0.97$ ), 这说明颗粒污泥形态演变对反应器脱氮性能提升存在重要影响.

#### 参考文献:

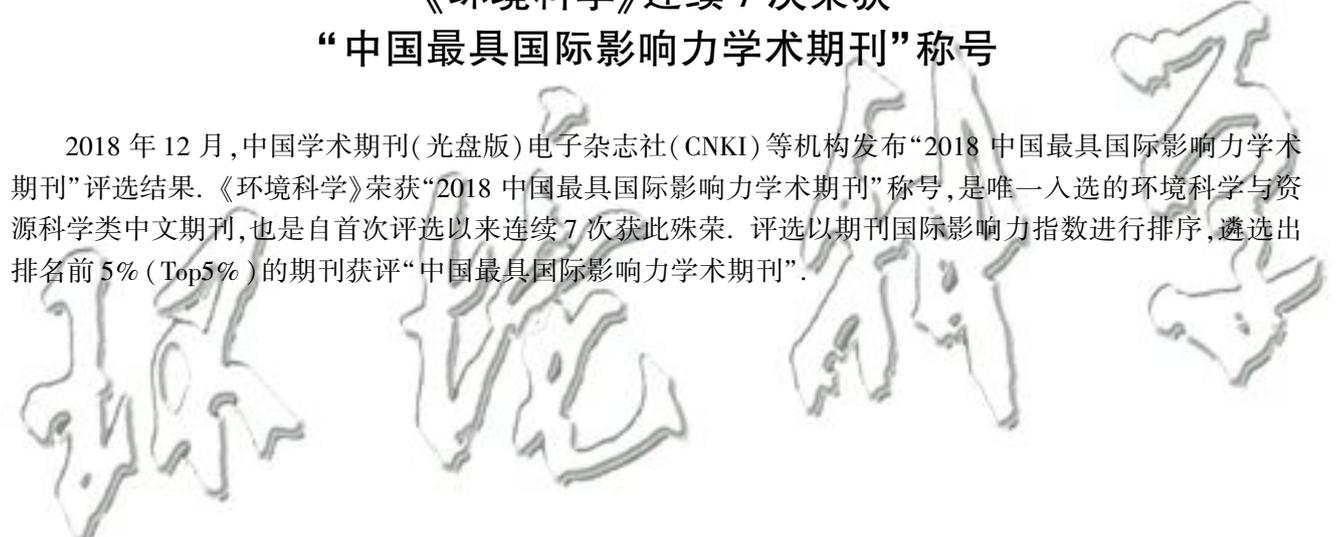
- [ 1 ] Gu Y F, Li Y, Li X Y, *et al.* Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges [ J ]. *Energy Procedia*, 2017, **105**: 3741-3751.
- [ 2 ] Gao H, Scherson Y D, Wells G F. Towards energy neutral wastewater treatment: methodology and state of the art [ J ]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2014, **16**(6): 1223-1246.
- [ 3 ] Wan J F, Gu J, Zhao Q, *et al.* COD capture: a feasible option towards energy self-sufficient domestic wastewater treatment [ J ]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 25054.
- [ 4 ] Li J L, Zhang L, Peng Y Z, *et al.* NOB suppression in partial nitrification-anammox (PNA) process by discharging aged flocs: performance and microbial community dynamics [ J ]. *Chemosphere*, 2019, **227**: 26-33.
- [ 5 ] Morales N, Val del Río Á, Vázquez-Padín J R, *et al.* Integration of the anammox process to the rejection water and main stream lines of WWTPs [ J ]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 99-105.
- [ 6 ] 何岩, 赵由才, 周恭明. 高浓度氨氮废水脱氮技术研究进展 [ J ]. *工业水处理*, 2008, **28**(1): 1-4.  
He Y, Zhao Y C, Zhou G M. Research process on the denitrogenation of highly concentrated ammonium-nitrogen wastewater [ J ]. *Industrial Water Treatment*, 2008, **28**(1): 1-4.
- [ 7 ] Wang L, Zheng P, Chen T T, *et al.* Performance of autotrophic nitrogen removal in the granular sludge bed reactor [ J ]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 78-85.
- [ 8 ] Vlaeminck S E, Cloetens L F F, Carballa M, *et al.* Granular biomass capable of partial nitrification and anammox [ J ]. *Water Science & Technology*, 2008, **58**(5): 1113-1120.
- [ 9 ] Kent T R, Bott C B, Wang Z W. State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors [ J ]. *Biotechnology Advances*, 2018, **36**(4): 1139-1166.
- [ 10 ] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitrification and anammox [ J ]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 900-909.
- [ 11 ] Hubaux N, Wells G, Morgenroth E. Impact of coexistence of flocs and biofilm on performance of combined nitrification-anammox granular sludge reactors [ J ]. *Water Research*, 2015, **68**: 127-139.
- [ 12 ] 陈希, 王建芳, 钱飞跃, 等. 连续流与序批式组合运行启动高性能 CANON 反应器 [ J ]. *化工学报*, 2018, **69**(4): 1695-1702.  
Chen X, Wang J F, Qian F Y, *et al.* Start-up of high-performance CANON reactor by alternating continuous flow and sequencing batch operation modes [ J ]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(4): 1695-1702.
- [ 13 ] Qian F Y, Wang J F, Shen Y L, *et al.* Achieving high performance completely autotrophic nitrogen removal in a continuous granular sludge reactor [ J ]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, **118**: 97-104.
- [ 14 ] 王书永, 钱飞跃, 王建芳, 等. 有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 269-275.  
Wang S Y, Qian F Y, Wang J F, *et al.* Impact of biodegradable organic matter on the functional microbe activities in partial nitrification granules [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 269-275.
- [ 15 ] Yamamoto T, Takaki K, Koyama T, *et al.* Long-term stability of partial nitrification of swine wastewater digester liquor and its subsequent treatment by anammox [ J ]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6419-6425.
- [ 16 ] Liang Z W, Li W H, Yang S Y, *et al.* Extraction and structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS), pellets in autotrophic nitrifying biofilm and activated sludge [ J ]. *Chemosphere*, 2010, **81**(5): 626-632.
- [ 17 ] 王琰, 钱飞跃, 王建芳, 等. 亚硝化颗粒污泥中 EPS 提取方法与组成特性的比较研究 [ J ]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3515-3521.  
Wang Y, Qian F Y, Wang J F. *et al.* Comparative study on extraction methods and composition of extracellular polymeric substances (EPS) in granular nitrification sludge [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3515-3521.
- [ 18 ] Bartolí A, Pérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 8930-8935.
- [ 19 ] Poot V, Hoekstra M, Geleijnse M A A, *et al.* Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge [ J ]. *Water Research*, 2016, **106**: 518-530.
- [ 20 ] Third K A, Sliemers 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.
- [ 21 ] Li S, Chen Y P, Li C, *et al.* Influence of free ammonia on completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process [ J ]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(4): 694-704.
- [ 22 ] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short- and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **95**(S1): S170-S174.

- [23] Qian F Y, Chen X, Wang J F, *et al.* Differentiation in nitrogen-converting activity and microbial community structure between granular size fractions in a continuous autotrophic nitrogen removal reactor[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2017, **27**(10): 1798-1807.
- [24] More T T, Yadav J S S, Yan S, *et al.* Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **144**: 1-25.
- [25] Hou X L, Liu S T, Zhang Z T. Role of extracellular polymeric substance in determining the high aggregation ability of anammox sludge[J]. *Water Research*, 2015, **75**: 51-62.
- [26] Yan L L, Liu Y, Wen Y, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances from granular sludge for simultaneous removal of organic matter and ammonia nitrogen [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 460-466.
- [27] Zhang H F, Yu H H, Zhang L H, *et al.* Stratification structure of polysaccharides and proteins in activated sludge with different aeration in membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 361-366.
- [28] Zhao Y P, Feng Y, Li J Q, *et al.* Insight into the aggregation capacity of anammox consortia during reactor start-up [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(6): 3685-3695.

---

## 《环境科学》连续 7 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2018 年 12 月,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2018 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2018 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 7 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.



## CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM <sub>2.5</sub> During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing .....	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Liaocheng City .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang .....	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM <sub>2.5</sub> from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks .....	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City .....	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City .....	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou .....	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou .....	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources .....	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing .....	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature .....	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations .....	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites .....	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River .....	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin .....	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake .....	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow .....	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China .....	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes .....	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images .....	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu .....	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu .....	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai .....	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas .....	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization .....	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China .....	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N by Using δ-MnO <sub>2</sub> Coated Zeolite .....	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland .....	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies .....	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PNA Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia .....	Ji Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis .....	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu .....	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System .....	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu <sup>2+</sup> and Pb <sup>2+</sup> on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites .....	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province .....	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou .....	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing .....	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars .....	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice .....	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat ( <i>Triticum aestivum</i> ) .....	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System .....	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole .....	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability .....	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil .....	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO <sub>2</sub> Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems .....	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure .....	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field .....	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015 .....	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)