

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



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618) 《环境科学》征稿简则 (1635) 信息 (1724, 1769, 1800)	

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征

朱琳¹, 程诚¹, 宋家俊¹, 郭凯成¹, 汪倩¹, 刘文如^{1,2,3,4}, 沈耀良^{1,2,3,4*}

(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. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 4. 苏州科技大学水污染治理与资源化研究所, 苏州 215009)

摘要: 在 CSTR 反应器中接种硝化颗粒污泥处理低氨氮浓度废水, 研究其亚硝化的实现过程, 并基于对颗粒污泥理化性质、功能菌群的空间分布规律及活性的分析, 系统阐述了影响亚硝化稳定的关键因素. 结果表明, 通过协同调控进水氨氮负荷 (NLR) 和溶解氧 (DO) 水平等参数, 亚硝化成功实现并可维持稳定, 亚硝积累率达 80% 以上. 所得亚硝化颗粒污泥为棕黄色, 呈现出光滑、饱满的椭球形或球形, 颗粒表面微生物以球菌为主; 颗粒平均粒径 1.3 mm, 平均沉降速率为 $71.3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 批次试验显示, 颗粒污泥 (粒径 $>0.8 \text{ mm}$) 中存在明显的成层分布结构, 氨氧化细菌 (AOB) 主要占据颗粒表层空间, 而亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 主要分布在颗粒内部; 絮体或小粒径污泥 (粒径 $<0.8 \text{ mm}$) 与颗粒污泥 (粒径 $>0.8 \text{ mm}$) 呈现出不同的微生物空间分布特征. 在颗粒污泥反应器中, 良好的硝化菌群分层结构、较高的出水氨氮浓度 ($15 \sim 33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 或较低的 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ ($0.08 \sim 0.15$) 是亚硝化实现过程中的关键影响因素.

关键词: 颗粒污泥; 亚硝化; 低氨氮浓度; 连续流; 污泥特征

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1801-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910164

Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment

ZHU Lin¹, CHENG Cheng¹, SONG Jia-jun¹, GUO Kai-cheng¹, WANG Qian¹, LIU Wen-ru^{1,2,3,4}, SHEN Yao-liang^{1,2,3,4*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China; 4. Institute of Water Pollution Control and Resource Recovery, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The realization process of nitrification was studied in a CSTR reactor seeding with nitrification granular sludge to treat low ammonia sewage. During the operation period, the physical and chemical properties, the spatial distribution of functional microbes, and the activity of the granular sludge were also investigated to elaborate the main factors for the stability of nitrification. The results showed that nitrification can be successfully achieved and maintained by the cooperative controlling of nitrogen loading rate (NLR) and dissolved oxygen (DO) levels, and the nitrite accumulation rate was over 80%. The obtained nitrification granular sludge was brownish yellow, showing a smooth, full ellipsoid or sphere, and the microorganisms on the surface of the particles were mainly cocci; the average particle size was 1.3 mm, and the average sedimentation rate was $71.3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Batch tests showed that there was a significant stratified distribution structure in granular sludge (particle size $>0.8 \text{ mm}$), the ammonia-oxidizing bacteria (AOB) mainly occupied the surface space of the particles, and the nitrite-oxidizing bacteria (NOB) were mainly distributed inside the particles. Flocs or small-size sludge (particle size $<0.8 \text{ mm}$) and granular sludge (particle size $>0.8 \text{ mm}$) exhibit different spatial distribution characteristics of microorganisms. In the granular sludge reactor, well stratification of the nitrifier guilds, high level of residual ammonia concentrations in effluent ($15 \sim 33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), or low ratio between DO and NH_4^+-N concentrations ($0.08 \sim 0.15$) should be key influencing factors in the process of achieving nitrification.

Key words: granular sludge; nitrification; low ammonia concentration; continuous flow; sludge characteristics

与传统的脱氮工艺相比,以亚硝化为基础的短程硝化-反硝化、部分亚硝化-厌氧氨氧化等新型生物脱氮技术具有降低能源消耗、节约碳源用量和减少污泥产量等优点,被认为是可持续、高效的城市污水脱氮替代工艺^[1~3]. 而上述工艺均依赖于亚硝化的实现,即有效地选择 AOB 而抑制 NOB. 尽管已经建立了一些可行的抑制 NOB 的策略,如缺氧抑

制^[4]、好氧饥饿^[5]、污泥龄 (SRT) 控制^[6,7]、游离氨 (FA) 和游离亚硝酸 (FNA) 抑制^[8,9] 及超声处理^[10] 等,然而亚硝化很难快速实现并长期维持稳定,特别

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2019-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353)

作者简介: 朱琳 (1996 ~), 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: 545897756@ qq.com

* 通信作者, E-mail: ylshe@mail.usts.edu.cn

是在低强度污水处理的连续流工艺中. 低强度城市污水中氨氮浓度较低, FA 和 FNA 浓度难以达到抑制 NOB 的水平; 且主流温度下, NOB 可能比 AOB 表现出更高的最大生长速率. 此外, 由于上述策略在抑制 NOB 的同时可能会对 AOB 产生不利影响, 反应器生物量浓度较低, 从而使工艺获得的氮容积负荷被限制^[11].

颗粒污泥由于其具有良好的沉降性能、较强的抗冲击能力和对功能微生物的高效截留而备受关注^[12]. 目前, 基于 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 控制的颗粒污泥亚硝化技术的优势和有效性日益彰显, 该策略是通过保持反应器中 DO 与剩余氨氮浓度的适当比值来实现亚硝化^[13,14]. 运用该策略不仅能快速实现亚硝化, 而且即使在低温低氨氮的污水中, 也能保持亚硝化的长期稳定和获得较高的容积负荷^[15,16], 从而为两级自养脱氮过程中实现高效率的脱氮提供可能. 然而, 以往的研究主要集中在颗粒污泥亚硝化工艺的长期稳定运行, 对于实现亚硝化过程中的功能菌群空间结构及关键影响因素的短期效应的评价较少.

本研究在实验室规模的完全混合式反应器中接种硝化颗粒污泥处理低强度污水 (约 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 以 NH_4^+-N 计), 以进水氨氮负荷 (NLR) 作为推动力, 获得高效且长期稳定的颗粒污泥亚硝化工艺. 期间, 对反应器性能、颗粒污泥理化性质进行了系统分析; 并通过批次试验来研究 DO、剩余 NH_4^+-N 浓度、颗粒污泥中硝化菌群的分层和反应器中存在的极少数量的絮凝体对 NOB 抑制的影响, 以期为进一步推进颗粒污泥亚硝化技术的工程化应用提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行

本试验所用装置为连续流完全混合式反应器 (CSTR), 如图 1 所示, 由有机玻璃制成, 分为曝气区和沉淀区两部分, 其有效容积分别为 4.0 L 和 0.5 L. 曝气区底部设有曝气盘, 为反应器提供溶解氧和循环动力, 曝气量根据运行情况通过气体流量计进

行调控. 沉淀区设有斜板, 以强化反应器微生物截留能力. 本研究保持进水氨氮浓度 (约 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 不变, 通过不断缩短反应器水力停留时间 (HRT) 来提升进水氨氮负荷 (NLR), 同时淘洗絮状污泥, 启动高性能亚硝化反应器. 运行期间, 反应器置于恒温水浴缸中, 控制温度为 $28 \sim 30^\circ\text{C}$.

1.2 接种污泥与试验用水

接种污泥来自于实验室 -4°C 下长期储存的硝化颗粒污泥, 颜色呈黑色, 平均粒径约 1.0 mm , 平均沉降速率 $32.2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. 储存前, 颗粒污泥在 DO 浓度为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NLR 为 $0.5 \sim 1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的连续流完全硝化反应器中运行. 接种后污泥浓度 MLSS 为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

本试验用水为人工配制无机含氮废水, 以氯化铵作为氮源, 投加碳酸氢钠提供碳源和碱度, 调节 pH 在 $7.5 \sim 8.0$, 同时配水中还包括 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ K}_2\text{HPO}_4$, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 及适量微量元素^[17].

1.3 批次试验

在试验连续运行过程中, 随着反应器性能的提高, 定期从反应器中取出一定量的污泥样品, 用去离子水清洗数次后通过孔径为 0.8 mm 的分样筛, 获得粒径 $>0.8 \text{ mm}$ 的颗粒污泥和 $<0.8 \text{ mm}$ 的絮体或小粒径污泥, 置于 150 mL 锥形瓶中于 30°C 下振荡反应. 初始 NH_4^+-N 浓度控制在 $30 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 期间, 设置 3 种不同转速 140 、 220 和 $240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 使 DO 在 0.5 、 2 和 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 考察不同 DO 浓度对硝化生物活性的影响. 所有批次试验进行 3 次重复, pH 值保持在 $7.5 \sim 8$ 之间. 反应过程中梯度时间检测混合液的氮素含量变化, 根据公式 (1)、(2) 计算不同条件下的比 NH_4^+-N 氧化速率 (SAOR) 和比 NO_3^--N 产生速率 (SNAR), 单位 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 SS 计)^[18].

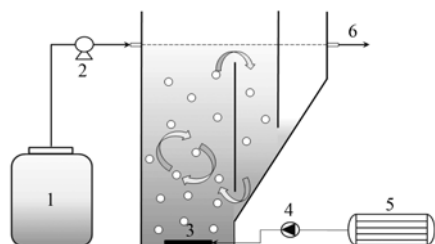
$$\text{SAOR} = \frac{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_0 - [\text{NH}_4^+-\text{N}]_t}{\text{MLSS} \times t} \quad (1)$$

$$\text{SNAR} = \frac{[\text{NO}_3^--\text{N}]_t - [\text{NO}_3^--\text{N}]_0}{\text{MLSS} \times t} \quad (2)$$

式中: t 为时间, d; $[\text{NH}_4^+-\text{N}]_0$ 和 $[\text{NO}_3^--\text{N}]_0$ 为氨氮和硝态氮初始浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $[\text{NH}_4^+-\text{N}]_t$ 和 $[\text{NO}_3^--\text{N}]_t$ 为反应 t 时间后氨氮和硝态氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; MLSS 为污泥浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.4 分析方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 TN 浓度以及混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 均采用国家标准分析方法测定^[19]; 温度、pH 和 DO 分别采用雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计和哈希便携式溶解氧测定仪 (HQ30d) 测定;



1. 模拟污水; 2. 进水泵; 3. 曝气砂头;
4. 气体流量计; 5. 空气泵; 6. 出水口

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

颗粒污泥粒径分布和沉降速率分别采用筛分法和清水静沉法测定;污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜、扫描电镜及数码相机观察。

2 结果与讨论

2.1 反应器运行效能

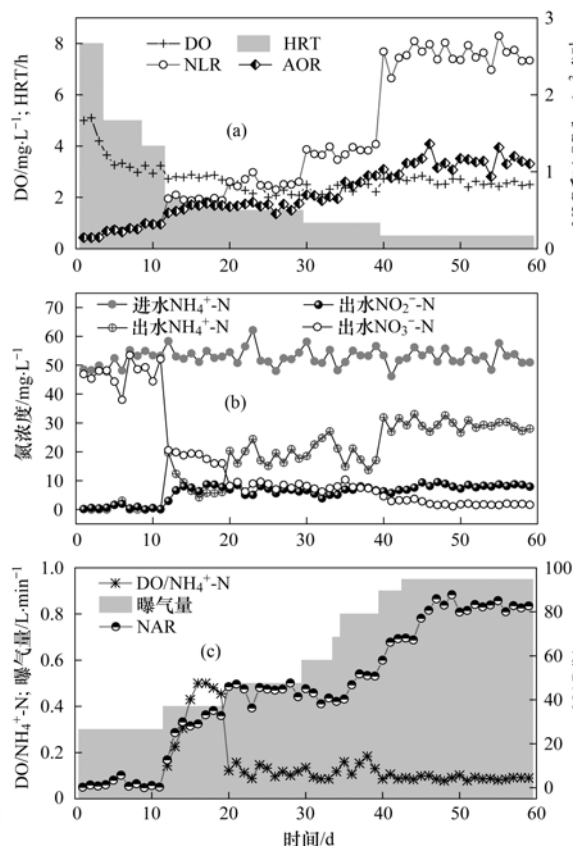
图 2 所示为整个研究过程中反应器的运行状况。在第 1~11 d 期间, HRT 从初始的 8 h 逐渐缩短至 4 h, 相应地, NLR 从 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 逐渐上升至 $0.32 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$; 在此过程中, 曝气量维持在 $0.3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 而反应器中 DO 浓度从 1 d 时的 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 迅速降至第 5 d 时的 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右[图 2(a)]。NLR 的上升和 DO 浓度的下降表明硝化颗粒污泥的活性逐渐增强。该阶段进水中氨氮几乎全部被转化为硝态氮, 即该阶段为稳定的全程硝化阶段。

第 12 d 时进一步缩短反应器 HRT 至 2 h, 此时 NLR 为 $0.65 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 同时提高曝气量至 $0.4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。可以发现出水中开始有氨氮剩余且亚硝态氮开始累积, 亚硝积累率逐步上升, 并在第 14 d 达到 30% 左右, 而硝态氮浓度迅速降至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 2(b)] 以下, 即反应器中硝化反应逐步向短程硝化转变。

在第 20~59 d, HRT 从 1.5 h 逐渐降至 0.5 h。此过程中, 反应器出水氨氮浓度从 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝态氮浓度维持在 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 而硝态氮浓度逐渐降至 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 并在第 46 d 时降至 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 出水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积率达到 80% 以上。此外, 尽管该阶段曝气量从第 20 d 时的 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高至第 43 d 时的 $0.95 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 而反应器中 DO 浓度却在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右基本维持不变[图 2(a)], 表明硝化微生物的耗氧速率随着进水氨氮负荷的升高进一步增强, 本研究末期, 反应器氨氧化速率(AOR)达到 $1.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右。

控制反应器中 $\text{DO}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在较低水平(即营造强限氧条件)是连续流颗粒污泥或生物膜反应器实现亚硝化的一种有效策略^[16,20,21]。本研究亚硝化的实现正是基于此控制策略。可以发现, 在逐渐缩短 HRT 和提升 NLR 的过程中, 仅当出水中氨氮剩余时(HRT = 2 h), 亚硝态氮开始出现累积, 同时硝态氮浓度开始降低, 此时的 $\text{DO}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在 0.14~0.5 之间; 在后续的运行中, 出水氨氮浓度保持在 15~33 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{DO}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 保持在 0.08~0.15 之间, 亚硝累积率逐渐上升至 80% 以上[图 2(c)]。需要指出的是, 整个运行过程中反应器中 DO 浓度在 2~5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 正是高浓度剩余 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 才是保持低 $\text{DO}/$

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值的主要原因。富余 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 使 AOB 的生长速率高于 NOB, 同时颗粒污泥中 AOB 和 NOB 的成层分布规律导致 AOB 比 NOB 具有更高的氧亲和力(即 $K_{O, \text{AOB}} < K_{O, \text{NOB}}$), 使得 NOB 的活性得到有效抑制, 反应器成功地维持了稳定的亚硝化作用。



(a) 溶解氧(DO)浓度、水力停留时间(HRT)、进水氨氮负荷(NLR)及氨氧化速率(AOR); (b) 进、出水含氮物质浓度; (c) $\text{DO}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、曝气量及亚硝累积率(NAR)

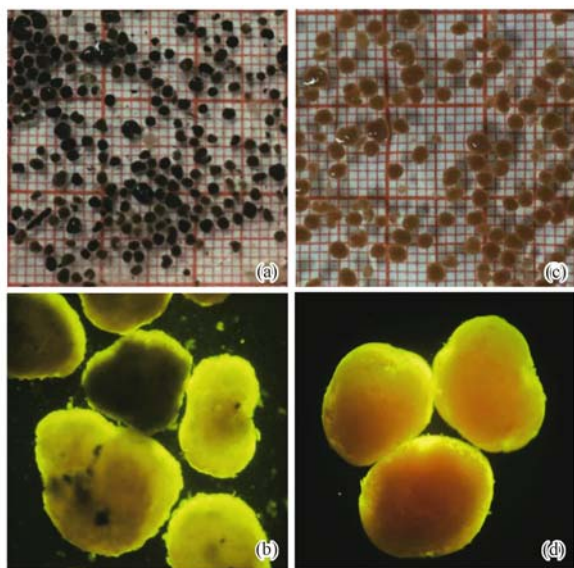
图 2 反应器运行状况

Fig. 2 Performance of the reactor

2.2 颗粒污泥理化特征

反应器运行期间颗粒污泥的颜色及形态变化如图 3 所示。接种污泥为实验室储存的硝化颗粒污泥, 外观为黑色, 大多数为不规则形态, 边缘较模糊[图 3(a)和 3(b)]。经过 2 个月的连续运行, 污泥颜色逐渐转为棕黄色, 表明颗粒最外层存在活跃的 AOB 细菌^[22]。颗粒表面的絮状物消失, 结构更加密实, 呈现出光滑、饱满的椭球形或球形[图 3(c)和 3(d)]。

如图 4 所示, 随着 NLR 的逐渐升高, 反应器的生物量浓度呈递增趋势, 从第 1 d 的 $1.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到第 55 d 的 $6.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上。与此同时, 颗粒的平均沉降速率从 $32.2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高到 $71.3 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 表明颗粒具有优异的沉降性能。颗粒污泥良好的沉降性导致反应器内高浓度生物质的积累, 因此针对进水基质浓度较低的情况, 采用较短的 HRT 获得了较高的氮容积负荷。



(a) ~ (b) 接种污泥; (c) ~ (d) 第 55 d

图 3 颗粒污泥形态变化

Fig. 3 Changes in granular sludge morphology

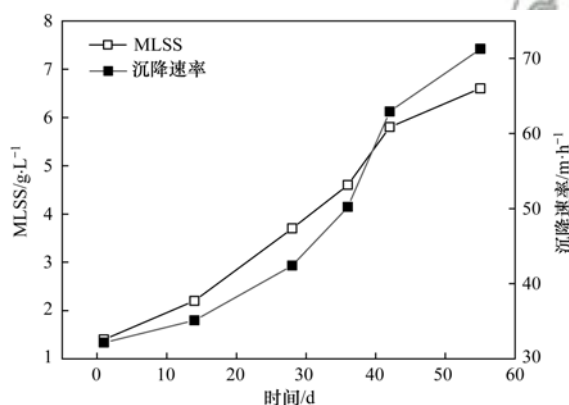


图 4 颗粒污泥 MLSS 及平均沉降速率变化

Fig. 4 Variation in MLSS and settling velocity of granular sludge

图 5 所示为反应器运行过程中颗粒污泥平均粒径及粒径分布的变化情况. 可以看出, 接种污泥的粒径主要集中在 0.8 ~ 1.25 mm, 占总污泥质量分数的 70% 左右. 启动初期, 污泥不适应环境变化, 部分大颗粒可能会发生破碎, 生成更小的颗粒或者絮体. 通过逐渐缩短 HRT, 大量絮体及沉降性能较差的污泥

随出水排出, 污泥平均粒径逐渐增大, 由接种时的 1.0 mm 变为第 55 d 时的 1.3 mm. 粒径 > 1.25 mm 的污泥由接种时的 15% 增加到第 28 d 的 32% 再到第 55 d 时的 69%, 粒径 > 1.6 mm 的部分由接种时的 8% 升至第 55 d 时的 16%. 此外, 在第 55 d 时, 超过 76% 的颗粒的尺寸均分布在 0.8 ~ 1.6 mm 这一相对较窄的范围, 说明反应器内颗粒的粒径分布基本上是均匀的. 颗粒的致密性、良好的沉降性和粒径分布的均匀性都与反应器中高气流速度、短 HRT 等运行条件密不可分.

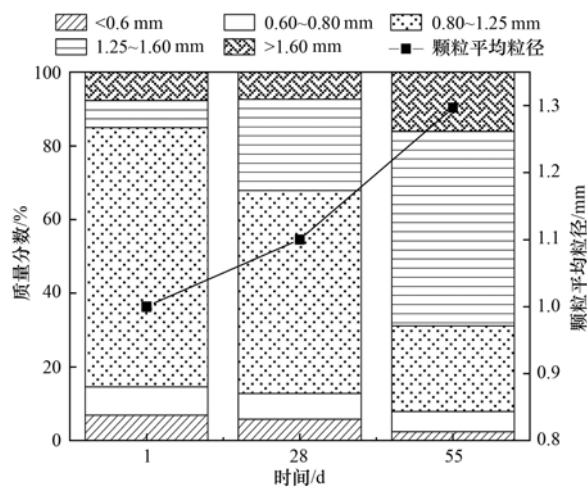


图 5 颗粒污泥平均粒径及粒径分布变化

Fig. 5 Changes in the average particle size and distribution of sludge

关于生物学特性, 图 6 显示了颗粒表面的 SEM 图像. 在污水生物脱氮处理中, AOB 菌属主要为亚硝化球菌属 (*Nitrosococcus*) 和亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*), 对应形态分别为球状和短杆状. 由图可知, 颗粒污泥具有紧密的菌群结构, 以球菌为主, 并伴有极少量的杆菌及短杆菌, 属于典型的 AOB 微观形态. 说明控制策略的优越性不仅体现在表观的运行效能上, 也体现在微观上对功能菌群的驯化. 随着 HRT 的逐渐缩短, 颗粒污泥致密的空间结构是反应器获得较高的 NLR 和 AOR 的内在原因.

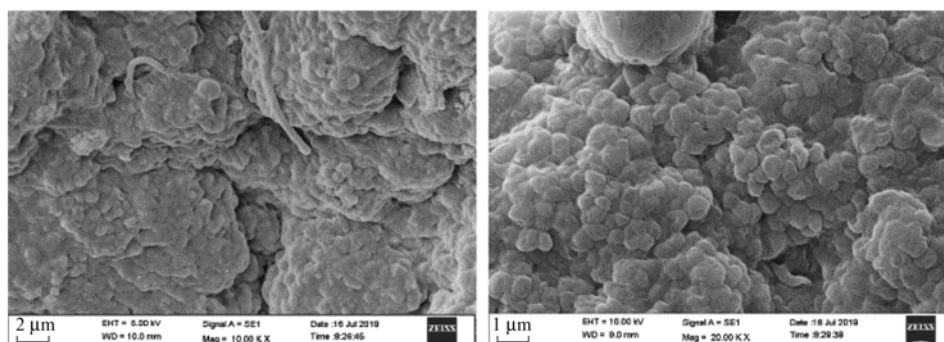


图 6 第 55 d 时颗粒污泥的 SEM 图像

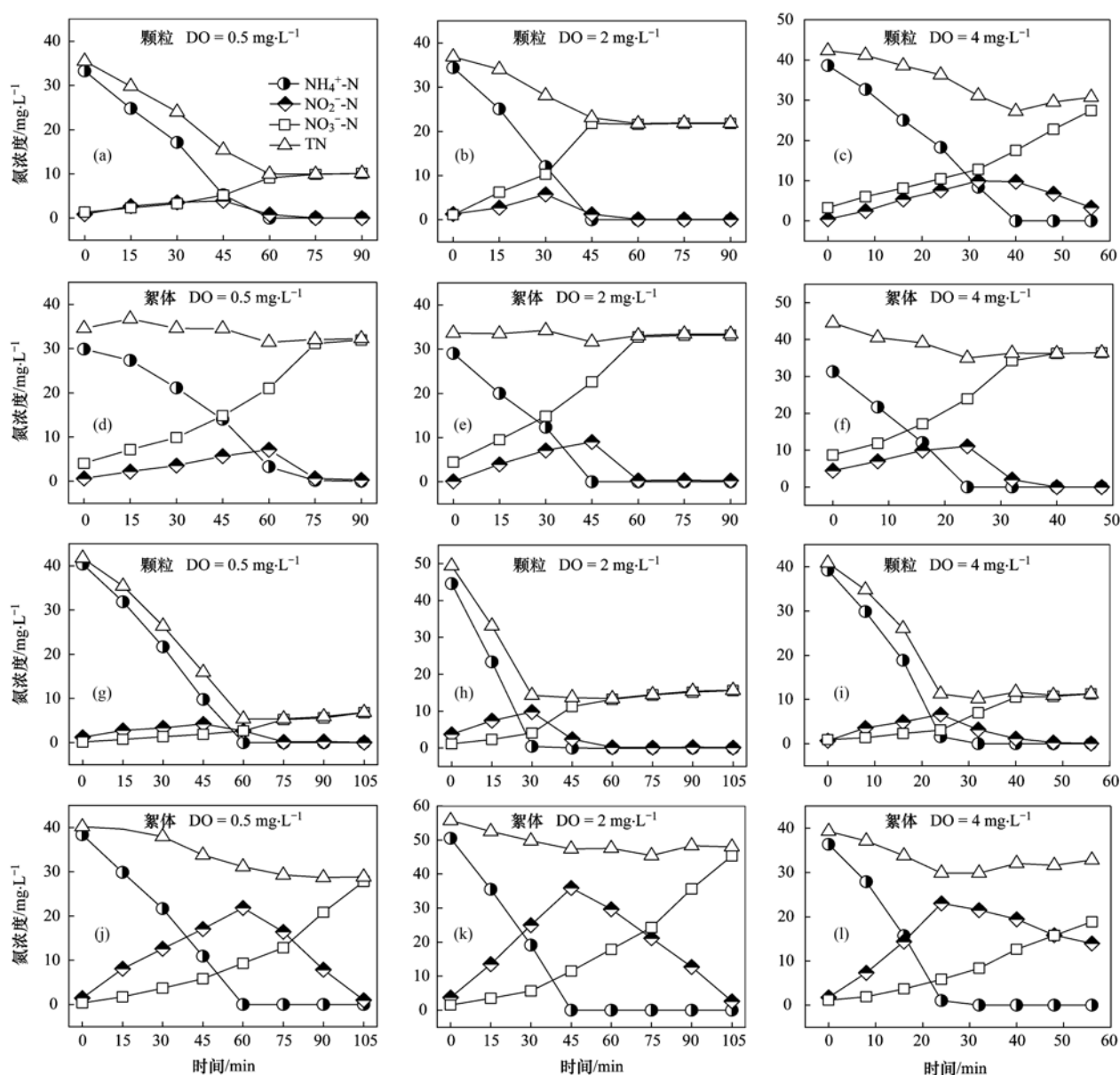
Fig. 6 SEM image of the granule sludge on day 55

2.3 颗粒污泥中硝化菌群空间分布规律及活性变化

有研究表明,颗粒污泥中硝化菌群的成层分布与亚硝化实现或 NOB 的抑制密切相关^[22~25]. 批式试验可以代替耗时且昂贵的荧光原位杂交(FISH), 很容易诊断出颗粒污泥中硝化菌群的分层情况^[25]. 以第 28 d、DO = 0.5 mg·L⁻¹ 的颗粒为例, 如图 7(a) 所示, 含 N 化合物的转化过程可以分为两个阶段, 在 0~45 min 时段内, 随着 NH₄⁺-N 的氧化, NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的浓度均逐渐上升, 两者的上升速率基本相同, 此时段的 SNAR (以 SS 计, 下同) 为 0.7 mg·(g·h)⁻¹; 当液相中剩余 NH₄⁺-N 浓度小于 5 mg·L⁻¹ 后, NO₂⁻-N 的浓度开始逐渐下降, 而 NO₃⁻-N 的浓度持续上升, 且上升速率明显快于上一时段

的上升速率, 此时段的 SNAR 为 2.2 mg·(g·h)⁻¹ (表 1). 这清楚地表明硝化菌群在颗粒中的分层结构. 具体来说, AOB 主要分布在颗粒污泥表层, 而 NOB 主要分布在颗粒污泥内部. 在氨浓度过剩时段, 占据了表层空间的活性较高的 AOB 建立了一道完整的耗氧屏障, 致使氧气供给内层的 NOB 有限. 直到氨氮耗尽, AOB 耗氧屏障解除, 氧气到达颗粒的 NOB 内层, 此时可以观察到硝态氮生产速率向高产率阶段的转变.

然而絮体中硝酸盐的时间历程浓度是不同的 [图 7(d)], 即使在氨富余的条件下, 絮体污泥的硝酸盐产率也相对较高. 整个过程中的硝态氮生产速率基本一致, SNAR 约为 8.0 mg·(g·h)⁻¹. 因为在絮



(a) ~ (f) 第 28 d; (g) ~ (l) 第 55 d

图 7 第 28 d 及第 55 d 时颗粒与絮体在不同 DO (0.5、2 和 4 mg·L⁻¹) 条件下 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和 TN 浓度的变化

Fig. 7 Changes in concentrations of NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, and TN under different DO conditions

(0.5, 2, and 4 mg·L⁻¹) of particles and flocs on day 28 and day 55

体污泥中,普遍认为 AOB 和 NOB 均呈现微小团簇的形态,与其他微生物一起较为均匀地分布于污泥絮体中,缺乏空间竞争且氧梯度较低,所以在微生物空间分布规律上无法和颗粒一样呈现出明显的分层,这同样也是在连续流絮体污泥工艺中运用 DO/ NH_4^+ -N 控制策略无法实现亚硝化的原因^[16, 26].

当反应器运行至第 55 d 时,颗粒污泥的活性较前一阶段有了明显的提升[图 7(g)~7(i)],例如在 DO = 2 mg·L⁻¹ 的条件下,颗粒污泥的 SAOR 由第 28 d 时的 8.4 mg·(g·h)⁻¹ 上升至第 55 d 时的 16.7 mg·(g·h)⁻¹,约为前一阶段的 2 倍(表 1). 在此阶段含 N 化合物的转化过程中,随着 NH_4^+ -N 的氧化, NO_2^- -N 浓度的上升速率明显快于 NO_3^- -N 浓度的上升

速率,说明 NOB 的活性得到了有效抑制,这与反应器连续运行时的性能是一致的. 同时,在氨浓度过剩时,颗粒污泥 NO_3^- -N 浓度的上升速率与上一阶段相比明显减小,仅在氨氮完全耗尽时硝酸盐产量才大幅升高,这说明随着 DO/ NH_4^+ -N 控制策略的持续作用,颗粒污泥中硝化菌群的分层程度更高,结构更加密实,更加有效地限制了颗粒中 DO 的渗透范围. 但也说明虽然本研究在第 55 d 时已经获得了良好的亚硝化效果,硝酸盐的生产受到了明显的抑制,但颗粒中仍然存在一定数量的 NOB,一旦遇到适宜的条件(如氨耗尽或供氧过量),NOB 就可趁机恢复活性,产生大量的硝酸盐. NOB 的洗脱速度要远远慢于亚硝化作用的实现.

表 1 批式试验的运行条件及结果

Table 1 Batch test operating conditions and results						
天数/d	DO/mg·L ⁻¹	SAOR/mg·(g·h) ⁻¹		颗粒 SNAR/mg·(g·h) ⁻¹		絮体 SNAR/mg·(g·h) ⁻¹
		颗粒	絮体	剩余 NH_4^+ -N > 10 mg·L ⁻¹	剩余 NH_4^+ -N < 1 mg·L ⁻¹	
28	0.5	6.8	8.3	0.7	2.2	8.0
	2	8.4	11.8	2.5	6.7	8.7
	4	11.5	16.8	3.7	7.1	9.0
55	0.5	7.7	8.4	0.4	1.9	4.2
	2	16.7	16.8	0.9	4.5	5.3
	4	20.0	21.1	1.1	5.2	4.7

此外,为了研究不同的 DO 浓度对 NOB 抑制的影响,在两个不同阶段分别进行了 DO 为 0.5、2 和 4 mg·L⁻¹ 条件下的批式试验. 结果表明,DO 浓度会影响氧的穿透深度,对于含有分层结构的颗粒污泥,DO 浓度的升高会导致氨氮耗尽前的硝酸盐产量的升高(即亚硝酸盐产量的降低). 而对于 AOB 和 NOB 的生长没有完全分离的絮体来说,DO 浓度的改变几乎不会对硝酸盐的产量造成影响. 虽然絮体污泥中较高的 NO_2^- -N 浓度累积速率表明絮体中可能存在较多的 AOB[图 7(j)~7(l)],这可能与生长较快的微生物倾向在悬浮态中生长有关^[27, 28]. 但无论是在低 DO 还是在高 DO 条件下,絮体始终能保持较高的 SNAR,所以在运行过程中把絮体从颗粒污泥中淘洗出去是非常必要的. 值得注意的是,降低 DO 浓度虽然会导致硝酸盐产量的降低,但也会对 AOB 的活动造成负面影响,从而降低整个工艺的性能. 通过在不同 DO 浓度的条件下进行批式试验,可以确定在促进高 SAOR 的同时有效抑制 NOB 的最佳操作条件. 总的来说,在颗粒污泥反应器中,抑制 NOB 活性的策略应该结合 DO 浓度的优化和保证足够多的氨来增强和维持硝化菌群的适当分层,并定期淘洗絮状或小粒径污泥.

除了以上所述的颗粒和絮体表现出的不同特征之外,两者在 TN 浓度的变化上亦呈现出不同的趋

势. 颗粒污泥中存在明显的 TN 去除现象,且第 55 d 时的 TN 去除速率较第 28 d 时明显提高,说明在具有良好亚硝化功能的颗粒污泥内部,厌氧氨氧化菌(AMX)或反硝化菌正在逐渐富集. 与 NOB 的抑制机理一样,在氨浓度较高时,致密的颗粒中氧扩散受限,在颗粒内部形成缺氧区,适宜 AMX 的生长, TN 浓度出现下降趋势,当氨氮耗尽后,AMX 的活性受到抑制, TN 的浓度则基本维持不变. 而絮体则是直接暴露在体氧条件下,AMX 很难发挥作用, TN 的去除可忽略不计.

3 结论

(1) 在低进水 NH_4^+ -N 浓度(50 mg·L⁻¹) 的连续流颗粒反应器中,通过缩短反应器 HRT(8 h→0.5 h) 来提升氨氮负荷[0.15 kg·(m³·d)⁻¹→2.70 kg·(m³·d)⁻¹],亚硝化成功实现并可长期维持稳定. 稳定运行期间,出水 NO_3^- -N 浓度在 2 mg·L⁻¹ 以下,亚硝积累率达 80% 以上.

(2) 所得亚硝化颗粒污泥呈棕黄色,结构致密,轮廓光滑清晰,颗粒表面以球菌为优势菌群;颗粒平均粒径 1.3 mm,平均沉降速率 71.3 m·h⁻¹.

(3) 颗粒污泥中存在明显的成层分布结构(表层 AOB 内部 NOB),且随着负荷的提升分层程度更高, AOB 的活性持续增强. 絮体或小粒径污泥与颗

粒呈现出不同的特征,不同溶解氧条件下絮体的高SNAR证明了运行期间淘洗絮体的必要性。

(4) 控制较高的出水氨氮浓度 ($15 \sim 33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 或较低的 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ ($0.08 \sim 0.15$) 是本研究实现亚硝化的主要原因。

参考文献:

- [1] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 981-990.
- [2] Cao Y S, van Loosdrecht M C M, Daigger G T. Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, **101**(4): 1365-1383.
- [3] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 15-26.
- [4] Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 95-105.
- [5] Liu W L, Yang Q, Ma B, *et al.* Rapid achievement of nitrification using aerobic starvation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 4001-4008.
- [6] Regmi P, Miller M W, Holgate B, *et al.* Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitrification/denitrification [J]. *Water Research*, 2014, **57**: 162-171.
- [7] Wang H, Xu G J, Qiu Z, *et al.* NOB suppression in pilot-scale mainstream nitrification-denitrification system coupled with MBR for municipal wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2019, **216**: 633-639.
- [8] Wang D B, Wang Q L, Laloo A, *et al.* Achieving stable nitrification for mainstream deammonification by combining free nitrous acid-based sludge treatment and oxygen limitation [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 25547, doi: 10.1038/srep25547.
- [9] Duan H R, Ye L, Lu X Y, *et al.* Overcoming nitrite oxidizing bacteria adaptation through alternating sludge treatment with free nitrous acid and free ammonia [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(4): 1937-1946.
- [10] Zheng M, Liu Y C, Xin J, *et al.* Ultrasonic treatment enhanced Ammonia-Oxidizing Bacterial (AOB) activity for nitrification process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **50**(2): 864-871.
- [11] Kouba V, Vejmelkova D, Proksova E, *et al.* High-rate partial nitrification of municipal wastewater after psychrophilic anaerobic pretreatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(19): 11029-11038.
- [12] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.
- Wang J L, Zhang Z J, Wu W W. Research advances in aerobic granular sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [13] 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 等. 不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1713-1719.
- Liang D B, Bian W, Kan R Z, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous-flow aerobic granular sludge reactor at different temperatures through ratio control [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1713-1719.
- [14] 赵青, 卞伟, 李军, 等. $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 调控实现 MBBR 工艺生
- 活污水短程硝化 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4511-4517.
- Zhao Q, Bian W, Li J, *et al.* $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ control to achieve partial nitrification of municipal wastewater in MBBR process [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4511-4517.
- [15] Reino C, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Kinetic and microbiological characterization of aerobic granules performing partial nitrification of a low-strength wastewater at 10°C [J]. *Water Research*, 2016, **101**: 147-156.
- [16] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al.* Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor [J]. *Water Research*, 2015, **80**: 149-158.
- [17] Gilbert E M, Agrawal S, Karst S M, *et al.* Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(15): 8784-8792.
- [18] 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.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] 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.
- [21] Bian W, Zhang S Y, Zhang Y Z, *et al.* Achieving nitrification in a continuous moving bed biofilm reactor at different temperatures through ratio control [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **226**: 73-79.
- [22] 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.
- [23] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [24] Picioreanu C, Pérez J, van Loosdrecht M C M. Impact of cell cluster size on apparent half-saturation coefficients for oxygen in nitrifying sludge and biofilms [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 371-382.
- [25] Soler-Jofra A, Wang R, Kleerebezem R, *et al.* Stratification of nitrifier guilds in granular sludge in relation to nitrification [J]. *Water Research*, 2019, **148**: 479-491.
- [26] Liu W R, Yang D H. Evaluating the feasibility of ratio control strategy for achieving partial nitrification in a continuous floccular sludge reactor: experimental demonstration [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **224**: 94-100.
- [27] Carvalho G, Meyer R L, Yuan Z G, *et al.* Differential distribution of ammonia- and nitrite-oxidising bacteria in flocs and granules from a nitrifying/denitrifying sequencing batch reactor [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, **39**(7): 1392-1398.
- [28] Laurenzi M, Weissbrodt D G, Vilchez K, *et al.* Biomass segregation between biofilm and flocs improves the control of nitrite-oxidizing bacteria in mainstream partial nitrification and anammox processes [J]. *Water Research*, 2019, **154**: 104-116.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)