

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.11
第41卷 第11期

目次

中国工业源挥发性有机物排放清单 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 叶代启, 陈来国(4767)

中国水泥排放清单及分布特征 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 郭静, 王鹏, 翟文慧, 崔维庚, 汪寿阳, 李时蓓, 董广霞(4776)

环境空气 PM_{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例 张哲, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 郭会琴, 王红丽, 楼晟荣, 陶士康, 陈长虹(4786)

南京江北新区大气颗粒物化学组分的粒径分布特征 张毓秀, 于兴娜, 刘偲嘉, 安俊琳, 张程(4803)

郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析 张剑飞, 姜楠, 段时光, 孙有昌, 郝祺, 张瑞芹(4813)

山西大学城 PM_{2.5} 中元素特征、来源及健康风险评估 李雪梅, 牟玲, 田妹, 郑利荣, 李杨勇(4825)

2000~2019年中国 PM_{2.5} 时空演化特征 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 程先富(4832)

北京地区偏南风 and 偏东风条件下污染特征差异 尹晓梅, 乔林, 朱晓婉, 郭恒, 刘湘雪, 熊亚军(4844)

基于天气背景天津大气污染输送特征分析 蔡子颖, 杨旭, 韩素芹, 姚青, 刘敬乐(4855)

基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 朱晓婉, 董璠(4864)

基于环境空气中 VOCs 在线监测数据精准识别化工园区 VOCs 排放源 孙佳宁, 谢绍东(4874)

芜湖市大气挥发性有机物污染特征、大气反应活性及源解析 高亢, 章慧, 刘梦迪, 赵晓宇, 吴婷, 贾其娜(4885)

密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双(4895)

北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 陶蕾, 荆红卫(4905)

2009~2018年太湖湖泛强度变化及其影响因素 辛华荣, 朱广伟, 王雷松, 李骏, 陆隽(4914)

雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 陈雯, 刘怀庆(4924)

基于多环境介质氮素和同位素的滦平盆地地下水硝酸盐来源示踪 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 李健, 李霞, 殷志强(4936)

会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评估 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一(4948)

太白山自然保护区水体 CDOM 吸收与三维荧光特征 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 郝强州, 李喜梅, 高鹏程(4958)

强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海(4970)

长江流域淡水生态系统内分泌干扰物、药物和个人护理品的风险排序 苏超, 崔严(4981)

嘉兴市城市河网区多环芳烃污染源解析及生态风险评估 杨延梅, 赵航晨, 孟睿, 何连生, 赵昊, 杜士林, 丁婷婷(4989)

污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响 谢元沅, 张清科, 张漓杉, 钟山, 刘俊勇, 侯晓映, 王华, 冯静培, 梁祖鸿, 陈舞阳(4999)

村镇生活污水处理设施抗生素浓度分布规律 卢亚楠, 郭雅妮, 王坤, 陆伟东, 王拓, 柴玉峰, 柳蒙蒙, 钟慧, 陈梅雪, 魏源送(5008)

冬季小流域水体微生物多样性及影响因素 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 王宝珍, 高润霞, 郭锐利, 李武斌(5016)

水库热分层期沉积物中有机物特性及对好氧反硝化细菌脱氮的影响 王彤, 文刚, 黄廷林, 司凡, 王晨旭, 路林超, 林薇(5027)

长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析 韩文杰, 吴迪, 周家中, 何强, 阚渝姣(5037)

类群划分方法对南亚热带水库夏季浮游植物群落与环境响应关系的影响 郭芳, 顾继光, 赵剑, 余华章, 肖利娟(5050)

基于决策树的城市黑臭水体遥感分级 李玲玲, 李云梅, 吕恒, 徐杰, 杨子谦, 毕顺, 许佳峰(5060)

纳米零价铁强化微生物电催化-厌氧膜生物组合反应器抗膜污染能力及其调控机制 潘阳, 牛承鑫, 支忠祥, 王建辉, 陆雪琴, 戴金山, 甄广印, 孙彤彤, 康娜英(5073)

温度和基质浓度对厌氧氨氧化工艺中 N₂O 释放的影响 王丝可, 于恒, 左剑恶(5082)

以污泥发酵液与尾水混合液为补给碳源的 A²/O 污染物去除特性 荣懿, 邵劲博, 于优城, 石恒, 金鹏康(5089)

不同曝气比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清(5097)

中温厌氧消化与高温厌氧消化对污泥重金属风险及稳定性的影响 田中科, 王芬, 闫钊(5106)

基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 韩琳, 徐夕博(5114)

再开发利用工业场地土壤重金属含量分布及生态风险 沈城, 刘霞雯, 吴健, 黄沈发, 王敏, 黄波涛(5125)

有机改性蒙脱土对苯的吸附机制和影响因素 侯静雯, 施维林, 高娟(5133)

硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水稻系统中镉迁移的影响 李义纯, 陈勇, 唐明灯, 李林峰, 林晓扬, 王艳红, 许迪豪, 艾绍英(5143)

叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响 闫秀秀, 徐应明, 王林, 陶雪莹, 孙约兵, 梁学峰(5151)

重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应 王晓宇, 韩辉(5160)

油-稻轮作模式下修复材料对土壤铜修复的持续性影响 赵颖颖, 李虹川, 胡宏祥, 薛中俊, 刘娜, 吴孟君(5168)

氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 张薇, 倪邦, 许秀春, 杨轩, 孟凡乔(5176)

生物炭影响下土壤呼吸温度敏感性及细菌群落结构的变化 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 黄洋(5185)

铜尾矿白羊草重金属含量对叶际和根际真菌群落的影响 贾彤, 郭婷艳, 王瑞宏, 柴宝峰(5193)

典型水环境微生物源异味物研究进展 张海涵, 苗雨甜, 黄廷林, 刘凯文, 刘祥, 黄鑫, 杨尚业, 司凡, 李程遥(5201)

广告:国家微生物科学数据中心 (前插)

《环境科学》征订启事(4785) 《环境科学》征稿简则(4947) 信息(5015, 5124, 5132)

不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥运行的影响

张杰^{1,2}, 劳会妹¹, 李冬^{1*}, 魏子清¹

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 在(25~28℃)下, 接种成熟亚硝化颗粒污泥于连续流反应器, 为避免通过蠕动泵的污泥回流所造成的颗粒污泥破碎, 采用内置沉淀区进行内回流, 调整停曝比为1:1、2:1和1:2, 研究不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥系统稳定性的影响。结果表明, 控制停曝比为1:1和2:1, 亚硝化性能良好, 阶段末期亚硝酸盐积累率分别为85.2%和94.5%, 控制停曝比为1:2, 亚硝化性能逐渐恶化, 阶段末期氨氧化率和亚硝酸盐积累率下降至64.1%和58.7%。批次试验表明, 间歇曝气相对连续曝气可在一定程度上较好地抑制亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的相对活性, 停曝时间越长, 对NO_B的活性抑制越好, 但由于停曝时间过长也将导致氨氧化率降低, 故在亚硝化工艺中, 可采用1:1停曝比并协同其他控制条件的方式来实现连续流亚硝化工艺的长期稳定运行。污泥性能分析表明, 在停曝比为1:1~1:2范围内, 停曝时间越长, 颗粒污泥结构越稳定, 停曝时间越短, 反应器内选择压较小, 致使污泥沉降性能变差, 部分亚硝化颗粒污泥解体, 此外, 胞外聚合物(EPS)化学分析及三维荧光光谱分析显示, 停曝比为2:1条件下, 蛋白(PN)含量较高且蛋白/多糖(PN/PS)值也较高。

关键词: 亚硝化颗粒污泥; 连续流; 停曝比; 亚硝酸盐积累率; 蛋白/多糖(PN/PS)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)11-5097-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202003118

Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules

ZHANG Jie^{1,2}, LAO Hui-mei¹, LI Dong^{1*}, WEI Zi-qing¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: A continuous flow reactor was inoculated at 25-28℃ with mature partial nitrification granular sludge. In order to avoid the granular sludge being crushed because of the sludge backflow through the peristaltic pump, a built-in sedimentation zone was used for internal backflow. The experiment investigated the influence of the different anaerobic time to aeration time ratio (1:1, 2:1, and 1:2) on the stability of a continuous-flow partial nitrification granular sludge system. The results showed that when the controlled anaerobic time to aeration time ratio was 1:1 and 2:1, the partial nitrification performance was good and the nitrite accumulation rates were 85.2% and 94.5%, respectively. When the controlled anaerobic time to aeration time ratio was 1:2, the partial nitrification performance gradually deteriorated, and the ammonia nitrogen removal rate and nitrite accumulation rate at the end of the stage decreased to 64.1% and 58.7%, respectively. Batch test results showed that intermittent aeration and continuous aeration can better inhibit the relative activity of NO_B in the partial nitrification system to a certain extent. The longer the anaerobic time, the better the NO_B activity inhibition. However, too long an anaerobic time will also lead to ammonia nitrogen removal rate. In the process of partial nitrification, the long-term stable operation of continuous flow partial nitrification process can be realized by 1:1 and coordinated control of other control conditions. An analysis of sludge performance indicated that in the anaerobic time to aeration time ratio range of 1:1-1:2, the longer the anaerobic time, the more stable the granular sludge structure. The shorter the anaerobic time, the smaller the selection pressure in the reactor, resulting in poor sludge sedimentation performance and partial disintegration of partial nitrification granular sludge. An EPS chemical analysis and a three-dimensional fluorescence spectroscopic analysis showed that the PN content was higher and the PN/PS value was higher when the anaerobic time and aeration time ratio was 2:1.

Key words: partial nitrification granular sludge; continuous-flow; anaerobic time to aeration time ratio; nitrite accumulation rate; PN/PS

与传统脱氮工艺相比,亚硝化-厌氧氨氧化工艺具有污泥产量低、节省外加碳源和曝气量少等优点^[1-4]。作为该工艺的耦合工艺,需要为此提供稳定的亚硝态氮^[5]。亚硝化颗粒污泥工艺在水处理中的应用成为了研究热点^[6,7],连续流工艺具有操作简单、容易控制和运行稳定等优点,实际生活污水处理工艺中也大多采用连续流工艺,故实现亚硝化颗粒污泥的连续流运行是目前研究的重点。

有研究表明^[8,9],氨氧化菌(AOB)在受到缺氧干扰后会比NO_B恢复得快,在长期的缺氧好氧交替运行条件下,由于NO_B的基质利用受到限制和缺氧

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-05-27

基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019)

作者简介: 张杰(1938~),男,博士生导师,院士,主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: 1072678789@qq.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

干扰, NOB 会逐渐从系统中淘汰掉, 在此干扰后, 当环境从缺氧条件转变为好氧条件时, 则会导致亚硝酸盐的积累, 从而获得稳定的亚硝化. 对于絮状污泥而言, Ge 等^[9]接种普通活性污泥于推流式反应器中, 指出采用交替的缺氧/好氧条件可以成功实现亚硝化, 并利于 NOB 菌的淘汰. 张昭等^[10]在常温条件下通过控制 4 个隔室的曝气, 形成好氧/好氧/缺氧/好氧的环境, 成功实现亚硝化, 亚硝酸盐积累率超过 95%. 由于序批式反应器 (SBR) 可以控制较短沉降时间, 具有将沉淀性能差的污泥淘洗掉等优势^[7, 11, 12], 故目前亚硝化颗粒污泥启动的研究主要集中于 SBR 反应器, 有研究表明^[13], 在连续流反应器中接种亚硝化颗粒污泥, 可以快速实现该工艺的启动, 并且交替缺氧和好氧环境可以抑制 NOB, 维持系统良好的亚硝化性能. 在间歇曝气运行模式下, 停曝比的控制对实现亚硝化工艺的稳定运行十分重要, 而目前关于连续流的研究大多为通过多级反应器的串联, 控制各个反应器的曝气参数来实现间歇曝气, 而停曝比对于连续流亚硝化颗粒污泥系统的影响并没有系统全面地研究.

基于此, 本试验接种污泥为成熟的亚硝化颗粒污泥, 为避免通过蠕动泵的污泥回流所造成颗粒污泥的破碎, 采用内置沉淀区进行内回流, 调整停止曝气与曝气的时间比为 1:1、2:1 和 1:2, 比较了不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥工艺的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行参数

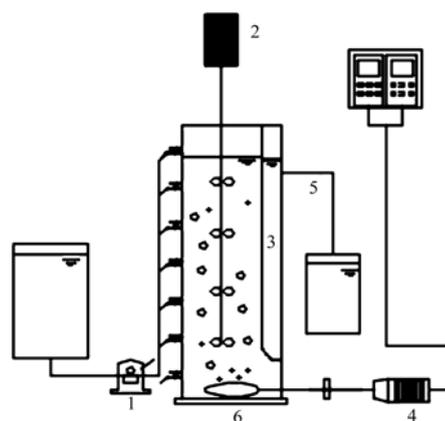
本试验采用连续流反应器, 沉淀区与反应区均处于反应器内部, 反应器高为 90 cm, 内径为 16 cm, 沉淀区体积为 1.37 L, 有效容积为 16.08 L, 好氧区底部设有曝气装置, 采用鼓风机曝气, 转子流量计控制曝气量, 试验装置如图 1 所示, 连续流反应器在 (25~28℃) 下运行培养. 运行参数见表 1.

表 1 连续流系统运行阶段的运行参数

项目	停曝比	曝气时长 /min	DO /mg·L ⁻¹	反应区 HRT /h
阶段 I	1:1	180~255	0.8~1.5	6~8.5
阶段 II	1:1	255	1.4±0.1	8.5
阶段 III	2:1	170	1.8±0.1	8.5
阶段 IV	1:2	340	0.9±0.1	8.5

1.2 接种污泥与试验用水

接种污泥为培养成熟的亚硝化颗粒污泥, 其中污泥的 SVI 为 32.9 mL·g⁻¹, MLSS 为 3 207 mg·L⁻¹. 试验进水为人工配水, 硫酸铵提供氨氮 (NH₄⁺-N 为 80~90 mg·L⁻¹), 丙酸钠为有机碳源 (COD 为 50



1. 进水蠕动泵, 2. 搅拌器, 3. 沉淀区, 4. 曝气泵, 5. 出水口, 6. 微孔曝气器

图 1 连续流亚硝化颗粒污泥反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the continuous-flow nitrosation granular reactor

mg·L⁻¹), 碳酸氢钠提供碱度, 碱度与氨氮浓度质量比为 10:1, 此外, 每升水中还含有 0.136 g KH₂PO₄、0.02 g MgSO₄·7H₂O 和 0.136 g CaCl₂ 等微生物生长必需的微量元素^[14].

1.3 分析方法

定期检测反应器内混合液 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS、MLVSS 和 SVI 等参数, 通过 WTW (pH/Oxi340i) 便携式多参数测定仪监控 pH、DO 及温度. 水样分析中 NH₄⁺-N 测定采用纳氏试剂分光光度法, NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法, MLSS、MLVSS 和 SVI 等参数采用国家规定的标准方法测定. 颗粒的粒径采用 Mastersize2000 激光粒度仪测定.

EPS 的提取与测定: 首先取 30 mL 污泥样品, 用分析天平配平, 4 000g 离心 10 min 后去掉上清液, 将缓冲溶液加入至体积恢复到 30 mL, 用分析天平配平, 4 000g 离心 15 min 后去掉上清液, 再次加入缓冲液, 恢复体积至 30 mL, 涡旋 1 min 使污泥完全散开, 随后采用 60℃ 水浴加热 30 min, 同时离心机空转, 降温至 4℃, 样品冷却至接近室温后, 用分析天平配平, 20 000g 离心 20 min 后将上清液用 0.22 μm 滤膜过滤. EPS 主要包含多糖 (PS) 和蛋白 (PN), 其中 PS 采用苯酚-硫酸比色法测定; PN 采用考马斯亮蓝法测定.

三维荧光测定: E_x (激发光谱) 扫描范围为 200~900 nm, E_m (发射光谱) 扫描范围为 200~900 nm, 扫描步长为 10 nm, 扫描速度 1 000 nm·min⁻¹, 等高线颜色深浅反映样品的荧光强度.

本试验中亚硝酸盐积累率 (NAR) 和氨氧化率分别按照式 (1) 和 (2) 计算:

中亚硝酸盐积累率 (NAR) =

$$\frac{\Delta(\text{NO}_2^- - \text{N})}{\Delta(\text{NO}_2^- - \text{N}) + \Delta(\text{NO}_3^- - \text{N})} \quad (1)$$

$$\text{氨氧化率} = \frac{\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{in}}) - \Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N})}{\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{in}})} \quad (2)$$

式中, $\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{in}})$ 为进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\Delta(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 和 $\Delta(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 分别为出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.4 批次试验

为研究不同曝气方式及间歇曝气下活性污泥中 AOB 对氨氮的利用率及 NOB 被抑制程度, 参照 Ge 等^[9] 的测定方法进行了批次试验. 设计两种运行模式: 一种为 120 min 内连续曝气, 另一种为间歇曝气, 遵循不同停曝时间比 (1:1、2:1 和 1:2). 以硫酸铵作为氮源 [氨氮浓度为: $(35 \pm 2) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 碳酸氢钠为碱度, 碱度与氨氮浓度质量比为 10:1, 污泥从反应器中取出后用去离子水洗涤 3 次, 清洗后均匀分成两份并与混合液混合, 每隔 20 min 或 5 min 取样测定氨氮、亚硝态氮及硝态氮浓度, 试验过程中 pH 维持在 7.6~8.1, 总曝气量为 6 L, 为减小误差, 进行 3 组平行试验.

2 结果与讨论

2.1 不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥性能的影响

在 25~28℃ 下, 接种培养成熟的亚硝化颗粒污泥于连续流反应器中, 连续流反应器运行期间的亚硝化性能变化如图 2 所示. 阶段 I, 采用停曝比为 1:1 的间歇曝气运行, 接种初期, 为维持亚硝化颗粒污泥的稳定性, 控制进水流量为 $2.45 \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$, HRT 为 6 h, 由图 2 可知, 运行第 1 d, 进水氨氮为 $83.3 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 35.5、42.1 和 $1.26 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由于受到运行环境及 HRT 的影响, 氨氧化率受到了较大的影响, 氨氧化率仅为 57.45%, 而亚硝酸盐积累率影响较小, 为 97.1%, 随着运行天数的增加, 逐渐调整进水流量至 $1.73 \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$, 反应器系统的 HRT 增加到 8.5 h, 亚硝化颗粒污泥逐渐适应连续流的运行环境, 氨氧化率逐渐提升, 第 14 d 出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 13.9、56.6 和 $5.5 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐积累率为 91.1%, 并在随后的运行中保持稳定, 阶段末期亚硝酸盐积累率为 90.6%, 亚硝化性能良好.

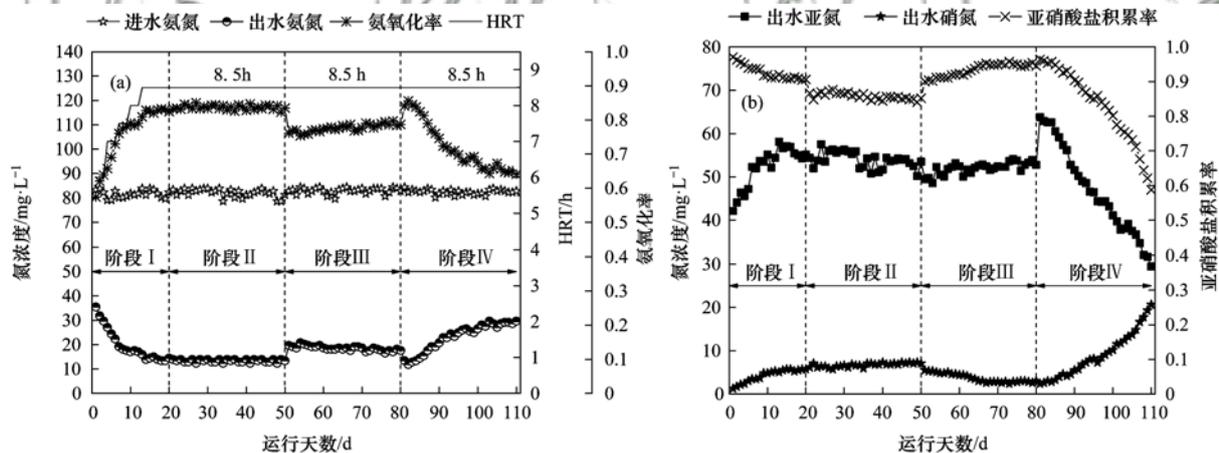


图 2 运行期间氨氮、亚氮、硝氮、氨氧化率及亚硝化率变化

Fig. 2 Variations of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, ammonia oxidation, rate, and nitrification rate

目前, 停曝比对亚硝化工艺的稳定运行十分重要, 为研究不同停曝比对连续流亚硝化颗粒污泥系统稳定性的影响, 在阶段 II、阶段 III 和阶段 IV 调整停曝与曝气时间比为 1:1、2:1 和 1:2, 比较 3 种曝气方式对连续流亚硝化系统稳定运行的影响. 由图 2 可知, 阶段 II 运行初期氨氧化率可达 83.2%, 亚硝酸盐积累率为 86.6%, 随着运行天数的增加, 在第 38 d, 出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 12.9、54.6 和 $6.83 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氧化率为 84.4%, 亚硝酸盐积累率较阶段初期有轻微下降, 为 85.7%, 阶段后期, 氨氧

化率为 83.5%, 亚硝酸盐积累率为 85.2%, 亚硝化性能相对良好. 阶段 III 在 HRT 不变的前提下调整停曝与曝气比为 2:1, 由于停止曝气的时间增加, 在阶段初期, 进水中的氨氮不能被 AOB 及时利用, 氨氮去除率仅为 76.1%, 但 NOB 的活性受到了较大地抑制, 亚硝酸盐积累率达到 89.9%. 随着运行天数的增加, 亚硝化颗粒污泥逐渐适应曝气环境, 氨氧化率逐渐上升, 至第 65 d, 出水氨氮、亚硝态氮和硝态氮为 18.2、52.6 和 $3.0 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氧化率及亚硝酸盐积累率为 78.3% 和 94.5%, 有研究表明^[15,16], AOB

可能受到间歇曝气的短曝气时间的限制,故在整个运行期间,由于受到曝气时长的限制,平均氨氧化率为 78% 左右,而 NOB 受到的影响较大,在运行期间相对活性较低,阶段 III 的亚硝酸盐积累率始终较高并保持稳定,阶段末期为 94.5%,系统的亚硝化性能良好. 阶段 IV 调整停曝比为 1:2,分析可知,运行前期,氨氧化率及亚硝酸盐积累率有小幅度的上升,第 81 d 出水氨氮为 $13.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氧化率可达到 84.1%,出水亚硝态氮及硝态氮为 63.8 和 $2.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐积累率增加至 96.4%. 但随着运行天数的增加,反应器的亚硝化性能呈现恶化的趋势,氨氧化率及亚硝酸盐积累率逐渐下降,至 101 d,出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 28.1、39.7 和 $11.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氧化率及亚硝酸盐积累率仅为 65.5% 和 77%. 分析原因,由于停曝时间的缩短,颗粒污泥呈现解体的趋势,导致污泥的沉降性能变差,且连续流反应器采用内置式沉淀管,沉淀性能较差的污泥被排出,致使连续流反应器内污泥浓度较低. 阶段运行后期,氨氧化率逐渐降低,为 64.1%,颗粒的解体以及较短的厌氧时间对 NOB 的抑制较小,NOB 逐渐增殖,并随着颗粒污泥的解体活性逐渐增强,在运行阶段末期亚硝酸盐积累率下降至 58.7%,亚硝化系统被破坏.

2.2 不同停曝比下亚硝化颗粒污泥特性

如图 3 所示,接种成熟亚硝化颗粒污泥于连续流反应器,其中 MLSS、MLVSS、SVI 及颗粒粒径分别为 $3207 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2562 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $32.9 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $736 \mu\text{m}$,由于颗粒污泥运行的环境从 SBR 转变至连续流,故运行模式的改变对反应器内的颗粒污泥产生较大的影响,颗粒粒径呈现下降的趋势,连续流反应器的内置式沉淀区则会淘洗部分沉降性能差的絮状污泥,故系统中颗粒污泥的污泥浓度呈现下降趋势,颗粒污泥的沉降性能也随之变差,SVI 值上升,在第 7 d,SVI 值上升到 $50.01 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 与此同时,系统中 MLSS 出现相应地下降,MLSS 降到 $2836 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 随着运行时间的增加,启动阶段的后期,连续流亚硝化颗粒污泥浓度与沉降性能逐渐稳定,MLSS、MLVSS 与 SVI 逐渐维持在 $2900 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $45 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,颗粒粒径稳定在 $(490 \pm 10) \mu\text{m}$ 的范围内.

硝化细菌为自养型细菌,生长速率较为缓慢,从图 3 可以看出,阶段 II 和阶段 III 的污泥浓度增加缓慢. 阶段 II 运行期间,反应器的污泥浓度和污泥沉降性能均较好,至 37 d,反应器中的污泥浓度增加到 $3030 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 值下降到 $43.64 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,阶段 II 末期反应器中的 MLSS 和 VSS 分别为 $3163 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

和 $2493 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 值为 $44.63 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 从图 3 中可以观察到阶段 III 中的 SVI 呈现下降的趋势,运行至第 79 d,反应器中的 MLSS 和 VSS 上升至 $3419 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2784 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 值下降到 $36.91 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,与前两阶段不同的是,阶段 IV 污泥浓度呈现短暂上升后下降的趋势,SVI 呈现逐渐上升的趋势,阶段末,反应器中的 MLSS 和 VSS 下降较大,下降到 $2139 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1579 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 值上升到 $62.67 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 分析原因,在阶段 IV 反应器中,停曝时间过短,反应器内选择压较小,致使污泥沉降性能变差,部分亚硝化颗粒污泥解体,并且反应器的内置式沉淀区对污泥进行了选择,导致沉降性能差的污泥随着出水排出反应器,故阶段 IV 污泥浓度呈现较大程度地下降. 有研究表明^[17,18],颗粒污泥核心的缺氧异养菌的生长速率会随着缺氧时间增加而提高,颗粒污泥结构也会随之稳定,阶段 III 的缺氧时间最长,故阶段 III 运行期间的污泥沉降性能最好.

从图 3 可以看出,阶段 II 运行期间,颗粒粒径没有较大变化,基本比较稳定,阶段末期,平均颗粒粒径为 $494 \mu\text{m}$,并从图 4(b)可以看出,阶段 II 运行期间颗粒污泥呈现不规则状,表面不光滑,密实度较好. 阶段 III 运行期间,颗粒粒径的大小有了小幅度的上升,在第 79 d,颗粒粒径为 $516 \mu\text{m}$. 从图 3 和图 4(c)分析可知,阶段 III 运行期间,颗粒污泥粒径大于阶段 II,并可以看出颗粒形状较阶段 II 规则,表面相对光滑,密实度较好. 然而阶段 IV 与前三阶段不同,在整个运行期间,颗粒粒径呈现持续下降的趋势,在第 109 d,平均颗粒粒径下降到 $325 \mu\text{m}$,结合图 3 和图 4(d)观察得到,阶段 IV 的颗粒污泥已解体,结构不密实,使其沉降性能变差,解体的污泥通过沉淀区被排出后,污泥浓度也出现了大幅度地下降.

2.3 批次试验

为研究不同曝气方式及间歇曝气下活性污泥中 AOB 对氨氮的利用率及 NOB 的被抑制程度,在不同阶段末期对不同间歇曝气条件下的亚硝化污泥进行了批次试验,通过连续曝气及间歇曝气条件下氨氮、亚硝态氮和硝态氮浓度的变化,描述了 3 个阶段的特定亚硝化性能,其中图 5(a)~5(c)分别为阶段 II、III 和 IV 间歇曝气条件下的变化,图 5(d)~5(f)分别为阶段 II、III 和 IV 连续曝气条件下的变化. 结果如图 5 所示,在试验初期,阶段 II、III 和 IV 初始氨氮浓度为 35.6 、 34.4 和 $36.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由图 5(a)和 5(b)可知,阶段 II 和阶段 III 出水硝态氮较低,分别为 $1.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而阶段 IV 出水硝态氮较高,为 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由此可以看出,阶段 II 及阶段 III 亚硝化性能较好,通过间歇曝气与连续曝气图的对

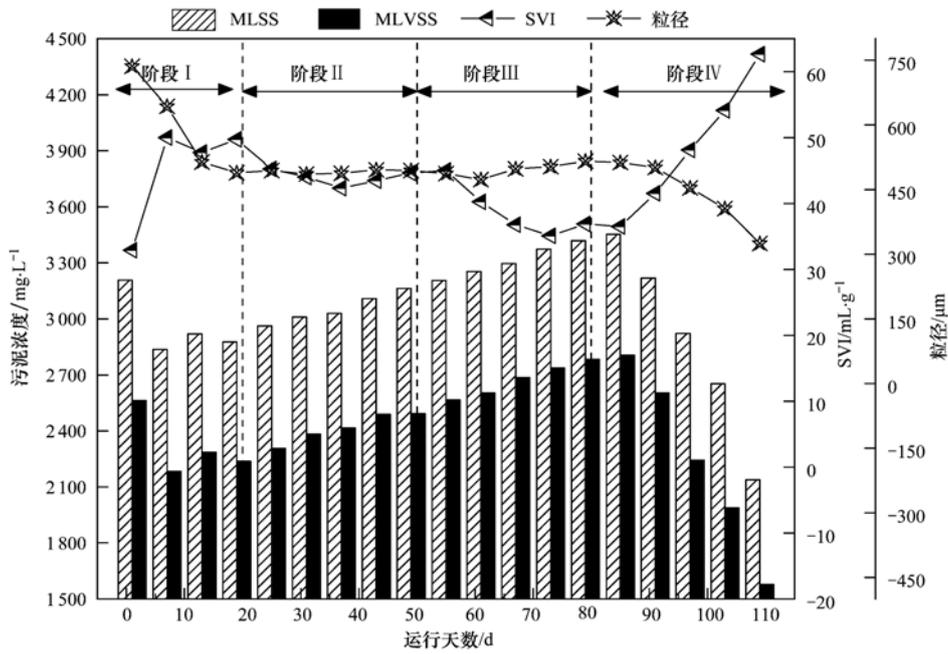


图 3 运行期间 MLSS、VSS、SVI 和平均粒径的变化

Fig. 3 Variations of MLSS, VSS, SVI, and the mean particle during operation

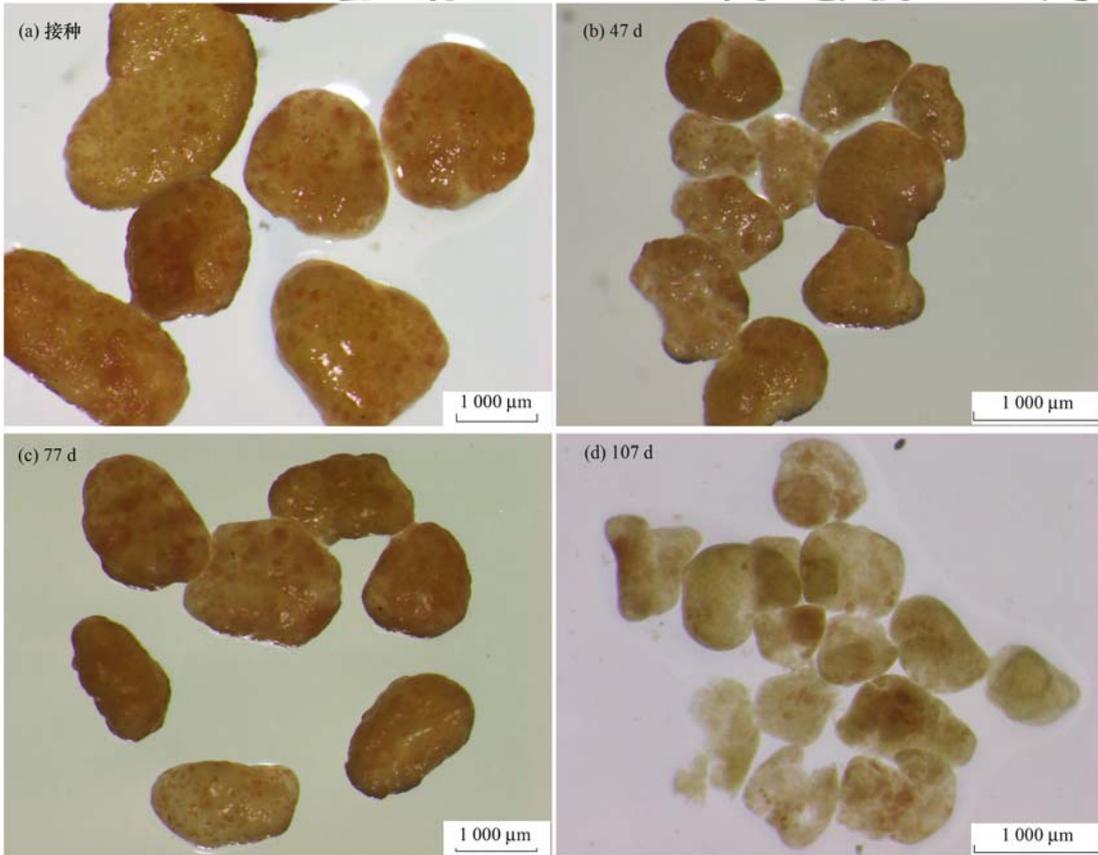
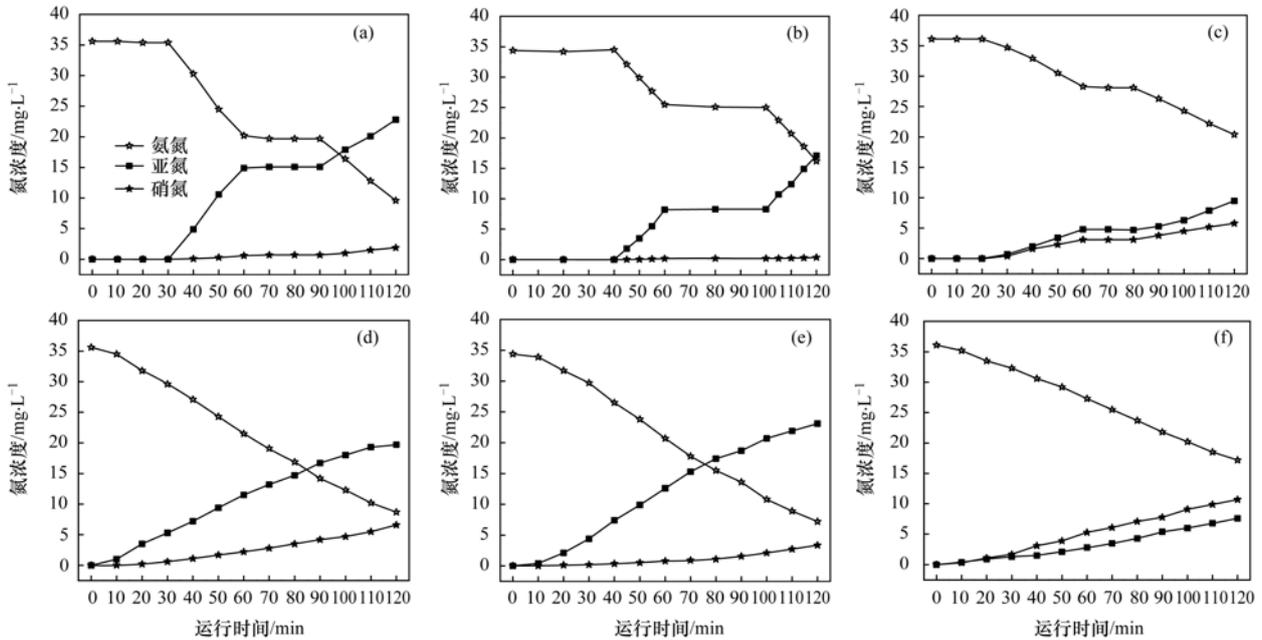


图 4 运行阶段颗粒污泥显微镜照片

Fig. 4 Microphotograph of granular sludge during operation

比可知,阶段 I 连续曝气条件下,亚硝酸盐积累率为 74.9%,间歇曝气条件下,亚硝酸盐积累率为 92.3%,故间歇曝气下亚硝化性能较好,与阶段 II 类似,阶段 III 中,间歇曝气条件下,亚硝酸盐积累率高于连续曝气为 97.9%,然而从阶段 IV 可以看出,间歇

曝气条件下亚硝酸盐积累率为 62.1%,连续曝气条件下亚硝酸盐积累率为 41.5%,虽然间歇曝气条件下亚硝酸盐积累率要高于连续曝气,但两种曝气方式下水硝态氮浓度均较高,在阶段 IV 中,亚硝化性能呈现出恶化的趋势.从批次试验的结果可以看出,



(a) ~ (c)阶段 II、III和IV间歇曝气, (d) ~ (f)阶段 II、III和IV连续曝气

图 5 氨氮、亚氮及硝氮变化

Fig. 5 Variations of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen, and nitrate nitrogen

虽然在反应初期的氨氮浓度几乎相同,但在不同阶段的间歇曝气与连续曝气下的出水硝态氮与亚硝态氮的浓度却不同,因此连续流反应器中出水的亚硝态氮及硝态氮会受到曝气方式的影响,间歇曝气相对连续曝气可以在一定程度上较好地抑制亚硝化系统中 NOB 的相对活性,有研究表明^[19,20],由于关键酶的失活,NOB 会受到抑制,缺氧干扰后的生长速度降低,抑制作用与缺氧干扰的持续时间成正比,因

此,在不同的缺氧时间干扰下,不同阶段的 NOB 抑制情况不同,且阶段 III 亚硝化性能最好,但氨氧化率相对较低。

2.4 不同停曝比下 EPS 变化及三维荧光分析

为了进一步表征连续流中的污泥性能,试验采用了化学分析方法对不同运行阶段颗粒污泥的 PN 和 PS 进行了测定.连续流反应器 PN 和 PS 变化如图 6 所示,接种污泥的 PN 和 PS 分别为 36.4

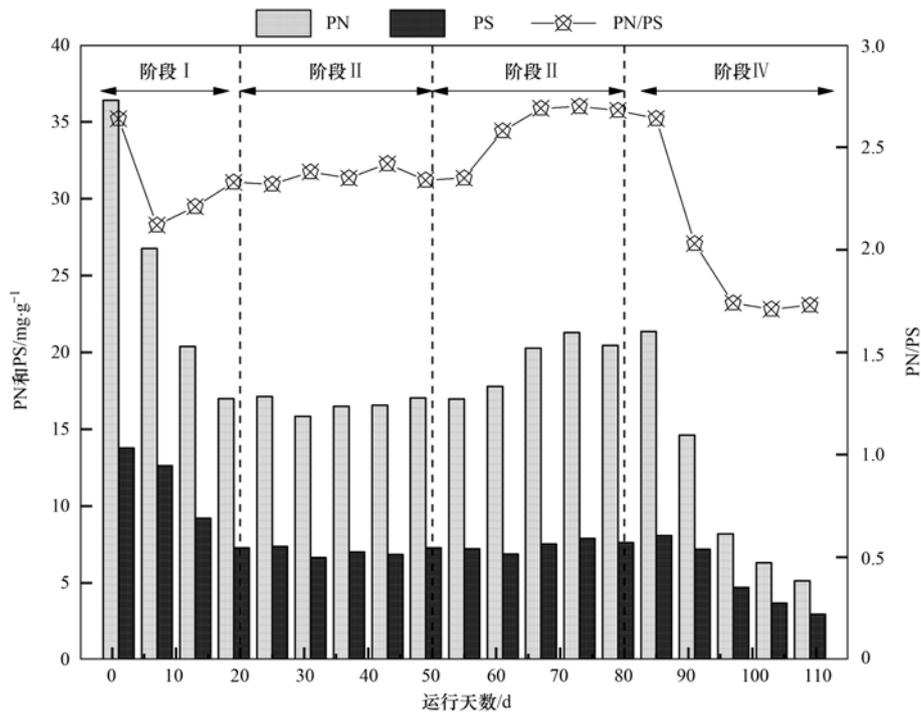


图 6 运行期间 EPS 和 PN/PS 变化

Fig. 6 Variations of EPS and PN/PS during operation

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $13.78 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 分析图 6 可知, 由于颗粒污泥运行环境的改变, 故在阶段 I 运行期间, PN 和 PS 整体呈现逐渐下降的趋势, 在第 13 d, PN 和 PS 分别下降到 $20.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $9.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 阶段 I 末期, PN 和 PS 分别为 $16.98 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $7.28 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 随后 PN 和 PS 趋于稳定. 由图 6 可知, 阶段 II 的 PN 和 PS 无较大的波动变化, 阶段 II 运行末期的 PN 和 PS 分别为 $17.02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $7.27 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 阶段 III 的 PN 含量呈现了上升的趋势, 阶段末期 PN 和 PS 分别为 $20.45 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $7.63 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 而对比阶段 II 和阶段 III, 阶段 IV 的污泥浓度大幅度降低, 颗粒解体, PN 和 PS 也处于持续下降的趋势, 阶段 IV 末期的 PN 和 PS 仅为 $5.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $2.95 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 由图 6 可知, 阶段 III 的 PN 和 PS 值较高, 阶段 IV 最差, 由此可知, 曝气量相同, 停曝与曝气比大的有利于颗粒污泥 PN 和 PS 的分泌. 分析原因, 在总曝气量相同的条件下, 曝气时间短的曝气强度高, 而曝气所产生的剪切力会刺激微生物分泌更多的 EPS^[21], 并且较长缺氧时间也会提高缺氧异养菌的生长速率, 使得缺氧异养菌分泌出更多的 EPS, 故阶段 III 的 PN 和 PS 含量最高. 有研究表明^[22-24], 在颗粒污泥的形成过程中, 污泥表面的带电性和疏水性与 PN/PS 比值有关, 较高的 PN 含量有助于降低微生物间的静电斥力, 从而增强颗粒表面疏水性, PN/PS 比值越大越有助于颗粒污泥的稳定. 由图 6 可知, 由于运行环境的变化, 阶段 I 的 PN/PS 比值呈现出了较大的下降, 接种第 1 d, PN/PS 比值为 2.64, 运行至第 7 d, PN/PS 比值下降为 2.12, 随后, 颗粒污泥逐渐适应连续流的运行环境, PN/PS 比值维持稳定, 运行至第 19 d, PN/PS 比值为 2.33; 阶段 II 的 PN/PS 比值无较大变化, 运行到第 49 d, PN/PS 比值为 2.34; 阶段 III 的 PN/PS 比值呈现了上升的趋势, 由阶段 II 的末期 2.34 增加到第 79 d 的 2.68, 但在阶段 IV 中由于颗粒污泥的解体, 污泥性能出现恶化, 阶段 IV 的 PN/PS 比值出现了下降, 阶段末期, PN/PS 比值已下降为 1.73, 据此可以看出, 阶段 II 和阶段 III 的颗粒污泥更加稳定, 而阶段 IV 污泥性能较差.

通过化学分析 EPS 中 PN 和 PS 的含量外, 本试验又结合了三维荧光光谱分析方法, 通过光谱显示出的特征荧光峰位置及荧光参数进一步解释不同阶段污泥的性能变化. 图 7 是连续流反应器阶段 II、III 和 IV 亚硝化颗粒污泥在第 43、73 和 103 d 对 EPS 样品分析的三维荧光光谱图, Chen 等^[25] 和孔赞等^[26] 的研究鉴定了荧光峰的组成, 结果显示, 连续流亚硝化颗粒污泥运行过程中主要包含两种峰, 即色氨酸蛋白类 (E_x/E_m 为 $280 \sim 300/340 \sim$

360), 类腐殖酸 (E_x/E_m 为 $300 \sim 370/400 \sim 500$). 从图 7 中可知, 在运行过程中颗粒污泥的 EPS 物质结构和组成变化较小, 但荧光强度发生了变化. 与 EPS 中 PN 含量的变化相同, 相对于阶段 II、阶段 III 中的 A 荧光值有所增强, 而阶段 IV 的 A 荧光值最低, 下降较大, 此时阶段 IV 的颗粒污泥解体, 峰值 B 为类腐殖酸, 有研究表明^[27], 腐殖酸会影响污泥的絮凝力, 不利于污泥颗粒化, 阶段 III 的类腐殖酸荧光值相对于阶段 II 弱, 故阶段 II 的颗粒性能较好.

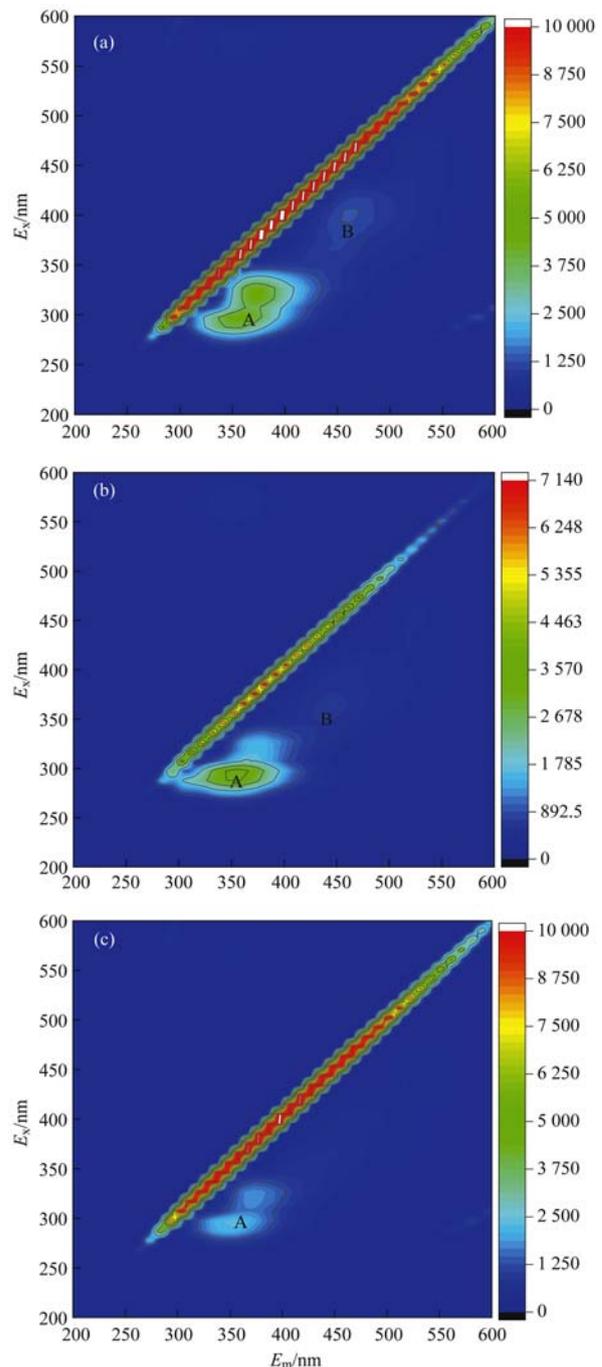


图 7 运行期间颗粒污泥三维荧光分析

Fig. 7 Analysis with 3D-EEM spectra of granular sludge during operation

3 结论

(1) 采用停曝比为 1:1 的间歇曝气模式运行连续流反应器, 可使亚硝化颗粒污泥快速适应连续流运行环境. 在停曝比为 1:1、2:1 和 1:2 的运行方式下, 控制停曝比为 1:1 和 2:1, 亚硝酸盐积累均较高, 阶段末期亚硝酸盐积累率分别为 85.2% 和 94.5%, 控制停曝比为 1:2, 阶段末期氨氧化率和亚硝酸盐积累率仅为 64.1% 和 58.7%, 亚硝化系统被破坏.

(2) 在停曝比为 1:1 ~ 2:1 范围内, 停曝时间越长, 亚硝酸盐积累率越高, 但氨氧化率会受到影响, 导致氨氧化率会降低. 批次试验结果表明, 间歇曝气相对连续曝气可以在一定程度上较好地抑制亚硝化系统中 NOB 的相对活性, 停曝时间越长, 对 NOB 的活性抑制越好, 但由于增加停曝时间将导致氨氧化率降低, 故为实现连续流亚硝化工艺的长期稳定运行, 可采用 1:1 停曝比并协同其他控制条件来实现较高的氨氮去除及亚硝酸盐积累.

(3) 污泥性能分析表明, 在停曝比为 1:1 ~ 2:1 范围内, 停曝时间越长, 颗粒污泥结构越稳定, 停曝时间越短, 反应器内选择压较小, 致使污泥沉降性能变差, 部分亚硝化颗粒污泥解体, 结构变得比较松散, 污泥浓度也出现大幅度的下降; 此外, EPS 化学分析及三维荧光光谱分析显示, 停曝比为 2:1 条件下, PN 含量较高且 PN/PS 值也较高.

参考文献:

- [1] Li X J, Sung S. Development of the combined nitrification - anammox process in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with anammox granules [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **281**: 837-843.
- [2] Vlaeminck S E, De Clippeleir H, Verstraete W. Microbial resource management of one-stage partial nitrification/anammox [J]. *Microbial Biotechnology*, 2012, **5**(3): 433-448.
- [3] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. *Water Research*, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [4] Fux C, Boehler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [5] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [6] Wang J F, Qian F Y, Liu X P, *et al.* Cultivation and characteristics of partial nitrification granular sludge in a sequencing batch reactor inoculated with heterotrophic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(21): 9381-9391.
- [7] 刘海滨, 李亚峰, 田西满. 短程硝化控制条件研究现状与应用分析 [J]. *工业安全与环保*, 2009, **35**(7): 20-21, 46.
- [8] 张昭, 李冬, 邱文新, 等. 城市污水部分亚硝化的实现与稳定运行 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, **44**(7): 3066-3071.
- [9] Zhang Z, Li D, Qiu W X, *et al.* Achievement and stable operation of partial nitrification for municipal wastewater [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, **44**(7): 3066-3071.
- [10] Kuba T, Smolders G, van Loosdrecht M C M, *et al.* Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **27**(5-6): 241-252.
- [11] Kishida N, Sacki G, Tsuneda S, *et al.* Rapid start-up of a nitrifying reactor using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2012, **65**(3): 581-588.
- [12] 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 等. 缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 369-375.
- [13] Li D, Guo Y Z, Lao H M, *et al.* Startup and stabilization of nitrosation in an anoxic-aerobic continuous-flow reactor with granules [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 369-375.
- [14] 张艳辉, 李冬, 梁瑜海, 等. 缺氧/好氧比对连续流半亚硝化稳定性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1724-1731.
- [15] Zhang Y H, Li D, Liang Y H, *et al.* Influence of anoxic/aerobic ratio on stability of partial nitrification in a continuous flow process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1724-1731.
- [16] Ma B, Bao P, Wei Y, *et al.* Suppressing nitrite-oxidizing bacteria growth to achieve nitrogen removal from domestic wastewater via anammox using intermittent aeration with low dissolved oxygen [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 13048.
- [17] Miao Y Y, Zhang L, Yang Y D, *et al.* Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength swage and its restoration from nitrate accumulation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 771-779.
- [18] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(7): 1237-1243.
- [19] Wu C Y, Zhou Y X. Effect of anaerobic/aerobic alternative operating strategy on the formation of granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(7): 1237-1243.
- [20] Wan J F, Bessière Y, Spérandio M. Alternating anoxic feast/aerobic famine condition for improving granular sludge formation in sequencing batch airlift reactor at reduced aeration rate [J]. *Water Research*, 2009, **43**(20): 5097-5108.
- [21] Bournazou M N C, Hoosiar K, Arellano-García H, *et al.* Model based optimization of the intermittent aeration profile for SBRs under partial nitrification [J]. *Water Research*, 2013, **47**(10): 3399-3410.
- [22] Komaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite

- oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44** (19): 7245-7253.
- [21] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Effects of aeration intensity on formation of phenol-fed aerobic granules and extracellular polymeric substances [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77** (1): 175-182.
- [22] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. *Water Research*, 2002, **36** (11): 2711-2720.
- [23] Zhu L, Lv M L, Dai X, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 46-54.
- [24] Xiong Y H, Liu Y. Importance of extracellular proteins in maintaining structural integrity of aerobic granules [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **112**: 435-440.
- [25] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (24): 5701-5710.
- [26] 孔赞, 朱亮, 吕梅乐, 等. 三维荧光光谱技术在水环境修复和废水处理中的应用 [J]. *生态环境学报*, 2012, **21** (9): 1647-1654.
- Kong Y, Zhu L, Lv M L, *et al.* Research advances in water environment remediation and wastewater treatment based on three dimensional fluorescence spectroscopy technology [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21** (9): 1647-1654.
- [27] 李定昌, 王琦, 高景峰, 等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性 [J]. *中国给水排水*, 2018, **34** (7): 26-31.
- Li D C, Wang Q, Gao J F, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34** (7): 26-31.



CONTENTS

Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, XU Jian-tie, <i>et al.</i> (4767)
Contribution of Emissions from Cement to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (4776)
Audit Indicators and Suggested Ranges for Data Validation of Chemical Components in Ambient PM _{2.5} : A Case Study of the Yangtze River Delta ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (4786)
Size Distribution of Particulate Chemical Components in Nanjing Jiangbei New Area	ZHANG Yu-xiu, YU Xing-na, LIU Si-jia, <i>et al.</i> (4803)
Seasonal Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhengzhou	ZHANG Jian-fei, JIANG Nan, DUAN Shi-guang, <i>et al.</i> (4813)
Characteristics, Sources, and Health Risks of Elements in PM _{2.5} in Shanxi University Town	LI Xue-mei, MU Ling, TIAN Mei, <i>et al.</i> (4825)
Spatio-temporal Evolution of PM _{2.5} Concentration During 2000-2019 in China	XIA Xiao-sheng, WANG Jun-hong, SONG Wei-dong, <i>et al.</i> (4832)
Differences in Pollution Characteristics Under the Southerly and Easterly Wind in Beijing	YIN Xiao-mei, QIAO Lin, ZHU Xiao-wan, <i>et al.</i> (4844)
Transport Characteristics of Air Pollution in Tianjin Based on Weather Background	CAI Zi-ying, YAN Xu, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4855)
Influence of Meteorological Conditions on Ozone Pollution at Shangdianzi Station Based on Weather Classification	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4864)
Accurate Identification of Ambient VOCs Emission Sources in an Industrial Park Using On-Line Monitoring Data	SUN Jia-ning, XIE Shao-dong (4874)
Characteristics, Atmospheric Reactivity, and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Wuhu	GAO Kang, ZHANG Hui, LIU Meng-di, <i>et al.</i> (4885)
Water Quality Response to Landscape Pattern at Different Spatial Scales in Baihe River in the Upper Reaches of the Miyun Reservoir	ZHANG Wei-wei, LI Xiao-na, WANG Chao, <i>et al.</i> (4895)
Concentration and Carbon Isotope Composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir Watershed in Summer	CHEN Ji-ji, GUO Jing, XU Su-shi, <i>et al.</i> (4905)
Variation and Driving Factors of Black Water Event Intensity in Lake Taihu During 2009 to 2018	XIN Hua-rong, ZHU Guang-wei, WANG Xue-song, <i>et al.</i> (4914)
Hydrogeochemical Investigations of Groundwater in the Lingbei Area, Leizhou Peninsula	ZHANG Hong-xin, WU Ya, LUO Wei-yu, <i>et al.</i> (4924)
Source of Groundwater Nitrate in Luanping Basin Based on Multi-environment Media Nitrogen Cycle and Isotopes	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, JIA Feng-chao, <i>et al.</i> (4936)
Metal Distributions and Human Health Risk Assessments on Waters in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, LIANG Yong-ping, <i>et al.</i> (4948)
Absorption and Three Dimensional Fluorescence Spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve	ZHANG Wen-hao, ZHAO Duo-lin, WANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (4958)
Effect of Heavy Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Rivers at River-net Plain	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4970)
Risk Ranking of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in the Aquatic Environment of the Yangtze River Basin	SU Chao, CUI Yan (4981)
Sources and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Jiaxing River Network	YANG Yan-mei, ZHAO Hang-chen, MENG Rui, <i>et al.</i> (4989)
Impact of a Sewage Treatment Plant on the Accumulation of Microplastics in Freshwater Organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section XIE Yuan-shan, ZHANG Qing-ke, ZHANG Li-shan, <i>et al.</i> (4999)
Distribution of Antibiotic Concentration in Domestic Wastewater Treatment Facilities in Villages and Towns	LU Ya-nan, GUO Ya-ni, WANG Kun, <i>et al.</i> (5008)
Microbial Diversity and Influencing Factors in a Small Watershed in Winter	ZHU Jin-shan, QIN Hai-lan, SUN Qi-yao, <i>et al.</i> (5016)
Characteristics of Organic Matter in Sediments During the Thermal Stratification of a Reservoir and Effects on an Aerobic Denitrifier	WANG Tong, WEN Gang, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5027)
Microbial Diversity Analysis of WWTPs Based on Hybrid-MBBR Process in a Low Temperature Season in the Yangtze River Delta	HAN Wen-jie, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (5037)
Effects of Phytoplankton Classifications on the Relationship Between Phytoplankton Community and Environment in Summer Subtropical Reservoirs, Southern China GUO Fang, GU Ji-Guang, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (5050)
Remote Sensing Classification of Urban Black-odor Water Based on Decision Tree	LI Ling-ling, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (5060)
Enhanced Membrane Anti-fouling Ability of Anaerobic Membrane Bioreactor Equipped with Bio-electrochemical System Using Nano-zero-valent Iron and Its Regulation Mechanism PAN Yang, NIU Cheng-xin, ZHI Zhong-xiang, <i>et al.</i> (5073)
Effects of Temperature and Substrate Concentration on N ₂ O Release of ANAMMOX Process	WANG Si-ke, YU Heng, ZUO Jian-e (5082)
Characteristics of Nutrient Removal in a Pilot-scale A ² /O with Mixture of Sludge Fermentation Liquor and Tail Water as External Carbon Source RONG Yi, SHAO Jin-bo, YU You-cheng, <i>et al.</i> (5089)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Operation of a Continuous-Flow Reactor with Partial Nitrification Granules ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (5097)
Effects of Mesophilic Anaerobic Digestion and Thermophilic Anaerobic Digestion on the Risk and Stability of Heavy Metals in Sludge	TIAN Zhong-ke, WANG Fen, YAN Zhao (5106)
Quantitative Evaluation of Human Health Risk of Heavy Metals in Soils Based on Positive Matrix Factorization Model and Geo-statistics	HAN Lin, XU Xi-bo (5114)
Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in the Soil of Redevelopment Industrial Sites	SHEN Cheng, LIU Fu-wen, WU Jian, <i>et al.</i> (5125)
Investigating Adsorption of Naphthalene to Organo-Modified Montmorillonites and Influencing Factors	HOU Jing-wen, SHI Wei-lin, GAO Juan (5133)
Effects of Ferrous Sulfate and Ferric Nitrate on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (5143)
Effects of Intercropping of <i>Brassica chinensis</i> L. and <i>Tagetes patula</i> L. on the Growth and Cadmium Accumulation of Plants	YAN Xiu-xiu, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (5151)
Effects of Heavy Metal-immobilizing Bacteria on Reducing Wheat Uptake Cd by Regulation Soil Iron Oxides	WANG Xiao-yu, HAN Hui (5160)
Sustained Effects of Remediation Materials on Soil Copper Remediation Under Oil-Rice Rotation	ZHAO Ying-ying, LI Hong-chuan, HU Hong-xiang, <i>et al.</i> (5168)
Impacts of Nitrogen Application on Ammonia Volatilization During Maize Season in Northern China	ZHANG Wei, NI Bang, XU Xiu-chun, <i>et al.</i> (5176)
Effect of Biochar on Changes of the Temperature Sensitivity of Soil Respiration and Bacterial Community Structure	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (5185)
Effects of Heavy Metal Contents on Phyllosphere and Rhizosphere Fungal Communities for <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings Area JIA Tong, GUO Ting-yan, WANG Rui-hong, <i>et al.</i> (5193)
Advances in Microbe-Derived Taste and Odor Compounds in Typical Aquatic Ecosystems	ZHANG Hai-han, MIAO Yu-tian, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5201)