

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染概况和预报结果评估 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 ..... 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM<sub>2.5</sub> 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 ..... 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 ..... 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 ..... 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 ..... 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 ..... 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 ..... 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 ..... 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 ..... 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 ..... 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 ..... 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 ..... 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 ..... 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 ..... 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 ..... 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 ..... 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 ..... 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 ..... 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 ..... 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 ..... 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 ..... 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 ..... 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 ..... 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 ..... 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 ..... 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 ..... 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 ..... 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 ..... 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 ..... 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响 ..... 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH<sub>4</sub> 排放特征及其影响因素 ..... 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 ..... 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 ..... 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 ..... 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 ..... 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 ..... 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 ..... 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 ..... 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 ..... 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 ..... 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 ..... 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 ..... 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 ..... 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 ..... 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 ..... 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 ..... (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)



## 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响

李冬<sup>1</sup>, 刘志诚<sup>1</sup>, 徐贵达<sup>1</sup>, 李帅<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 本实验在室温(20℃ ± 3℃)下用2组反应器 R1 和 R2 接种厌氧氨氧化污泥, 分别采用间歇恒定曝气和间歇梯度曝气方式启动 SNAD 工艺, 研究了两种不同间歇曝气方式对 SNAD 工艺启动的影响。结果表明, 启动过程中, R2 在各阶段恢复稳定所需的时间更短, SNAD 的实际启动速度更快; 启动成功后 R1 和 R2 的特征值  $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  分别达到 6.46 和 10.34, R2 的 NOB 抑制效果更好; 通过周期监测, 发现 R2 的周期 DO 波动稳定, R1 的周期 DO 整体逐渐提高、周期末达到 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 以上, 分析认为 R2 中稳定的低 DO 环境促进了 NOB 抑制; 启动成功后 R1 和 R2 反应器内 PN/PS 值分别达到 2.745 和 2.823, 颗粒粒径分别达到 365.8 μm 和 402.1 μm, R2 的颗粒稳定性和沉降性更强, 粒径增长更快。

**关键词:** 同步短程硝化、厌氧氨氧化耦合反硝化(SNAD); 间歇恒定曝气; 间歇梯度曝气; 亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5438-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201906005

## Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process

LI Dong<sup>1</sup>, LIU Zhi-cheng<sup>1</sup>, XU Gui-da<sup>1</sup>, LI Shuai<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In this experiment, two reactors, R1 and R2, were inoculated with anaerobic ammonium oxide sludge at room temperature (20℃ ± 3℃). R1 employed intermittent constant aeration while R2 employed intermittent gradient aeration to start up the SNAD granular sludge process, to study the effects of different intermittent aeration ways. The results showed that the time for R2 to stabilize the performance in each stage was shorter, and the actual start-up speed was faster; after successful startup, the eigenvalues of R1 and R2 were 6.46 and 10.34, respectively. The suppression effect for NOB is better in R2; the DO fluctuation in a typical cycle was stable in R2 while the DO in R1 gradually rose overall and reached over 0.5 mg·L<sup>-1</sup> by the end of the cycle. R2 can maintain low DO more stably and inhibit NOB proliferation; after successful startup, the PN/PS values in the R1 and R2 reached 2.745 and 2.823, respectively, and the particle size reached 365.8 μm and 402.1 μm, respectively. The stability and sedimentation of the particles in R2 were stronger and the particle size increased faster.

**Key words:** simultaneous partial nitrification, ANAMMOX, and denitrification (SNAD); intermittent constant aeration; intermittent gradient aeration; nitrite oxidizing bacteria (NOB)

同步短程硝化、厌氧氨氧化耦合反硝化(simultaneous partial nitrification, ANAMMOX, and denitrification, SNAD)工艺是将亚硝化、厌氧氨氧化和反硝化结合起来的新型脱氮工艺,既解决了传统脱氮工艺能耗高、污泥产量高等问题,也解决了全程自养脱氮工艺出水硝酸盐氮含量高的弊端<sup>[1]</sup>,是近年来生物脱氮研究的重点。但该工艺面临的主要问题之一是亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)易增殖、亚硝化不稳定。

SNAD 工艺常采用间歇曝气运行,其原因是 AOB 能很好地承受溶解氧波动,而 NOB 对溶解氧波动的适应力较差,间歇曝气中每当从厌氧段变为好氧段时, AOB 比 NOB 能更快恢复活性,从而实现 NOB 的抑制<sup>[2]</sup>。另外,低 DO 也是抑制 NOB 的一个基本因素,研究表明, DO 在 0.3 ~ 0.5 mg·L<sup>-1</sup> 时,亚硝化效果较好<sup>[3~5]</sup>,因此在间歇曝气中要设定合

适的曝气量使 DO 在合适范围内变化。目前采用的间歇曝气策略均为间歇恒定曝气,即每个曝气阶段的曝气量相同,这种方式运行下,周期 DO 呈现有规律的波动,但 DO 波动范围逐渐升高甚至在后期超出 NOB 的抑制范围。Blum 等<sup>[6]</sup>、Qiu 等<sup>[7]</sup>和李冬等<sup>[8]</sup>的研究均出现该现象,分析原因存在于 SBR 系统中周期前期 AOB 底物充足,活性较好,随着反应进行,可利用的基质不断减少, AOB 活性下降,耗氧量随之减少,但由于曝气量(即供氧量)恒定,所以系统内溶解氧积累,含量上升。然而这种周期 DO 变化趋势不利于 NOB 的稳定抑制,且会造成后期 DO 利用率低下。因此对间歇曝气中的曝气量进行调

收稿日期: 2019-06-01; 修订日期: 2019-06-25

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

作者简介: 李冬(1976~),女,博士,教授,主要研究方向为污水再生利用, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

控、使其更贴合耗氧量变化是十分重要的,但目前这方面的研究仍无报道。

本研究针对 SBR 周期中耗氧量逐渐减少这一特性,提出了间歇梯度曝气策略,即调整间歇曝气中的曝气速率,使其随反应进行梯度下降。本实验采用两组序批式反应器(SBR),对比在间歇恒定曝气和间歇梯度曝气下 SNAD 工艺的启动情况,探讨更合理的曝气方式。

1 材料与方法

1.1 接种污泥

R1 和 R2 反应器各接种 0.8 L 厌氧氨氧化污泥。厌氧氨氧化污泥来自实验室内稳定运行的 SBR 反应器,污泥浓度为 5 000 ~ 6 000  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,总氮去除率在 80% 左右。

1.2 实验用水

本实验启动阶段采用人工配水,在进水中添加  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和 丙酸钠 提供氨氮和 COD,投加  $\text{NaHCO}_3$  提供无机碳源及调整碱度,保持 pH 在 7.0 ~ 8.0。  $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  40

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  30  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 微量元素浓缩液 I、II 1.0  $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。微量元素浓缩液 I 的组成 ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): EDTA 5,  $\text{FeSO}_4$  5;微量元素浓缩液 II 的组成 ( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): EDTA 15,  $\text{H}_3\text{BO}_4$  0.014,  $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.99,  $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.25,  $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.43,  $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  0.21,  $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.22,  $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.24,  $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.19。

1.3 实验装置

本实验采用 2 个相同规格的 SBR 反应器 R1 和 R2,反应器由有机玻璃制成,有效容积为 2L。采用机械搅拌,反应器底部安装曝气盘进行微孔曝气,通过气体流量计控制曝气量。反应器的运行通过时控开关进行控制,容积交换率为 75%。

1.4 运行策略

本实验设有两个 SBR 反应器 R1 和 R2,每个周期均包括进水(3 min)、反应(根据处理效率调节)、沉淀(10 min)、排水(3 min),温度为室温。R1 和 R2 反应器分别采用间歇恒定曝气和间歇梯度曝气方式,其启动均包括 4 个阶段,各阶段的进水水质及运行参数如表 1 所示。

表 1 各阶段进水水质及运行参数

Table 1 Influent substrate and operating parameters of each stage

| 阶段             | $\text{NH}_4^+-\text{N}$<br>/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 反应时间/min | 曝气速率/ $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ |          |
|----------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|
|                |                                                             |                                    |          | R1                                    | R2       |
| S1 (0 ~ 10 d)  | 70                                                          | 0                                  | 540      | 20                                    | 30→20→10 |
| S2 (11 ~ 40 d) | 70                                                          | 0                                  | 540      | 30                                    | 40→30→20 |
| S3 (41 ~ 60 d) | 70                                                          | 100                                | 540      | 30                                    | 40→30→20 |
| S4 (61 ~ 85 d) | 70                                                          | 100                                | 360      | 30                                    | 40→30→20 |

阶段 S1 为 CANON 启动初期,对厌氧氨氧化污泥进行曝气、富集亚硝化菌,实验初期曝气速率较低。如图 1 所示分别为 R1 和 R2 的周期运行情况,两者均采用 30 min 曝气-30 min 停曝的间歇曝气方式,但在各个曝气阶段 R1 采用的是 20  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的恒定曝气速率,R2 采用的是三级梯度曝气速率,即在 0 ~ 180 min 内的曝气段采用 30  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的曝气速率,在 180 ~ 360 min 内的曝气段采用 20

$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的曝气速率,在 360 ~ 540 min 内的曝气段采用 10  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的曝气速率。阶段 S2 为 CANON 启动后期,随着系统处理性能提升,对 R1 和 R2 的曝气速率均进行了提升,R1 在曝气段的恒定曝气速率由 20  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  提升至 30  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,R2 在曝气段的曝气速率梯度由 (30→20→10)  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$  转变为 (40→30→20)  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。阶段 S3 为 SNAD 启动阶段,在进水中添加了 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 COD 引入反硝

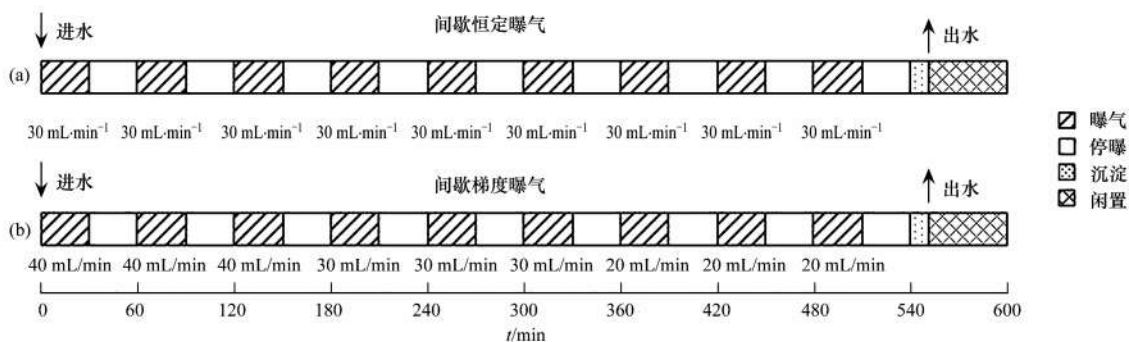


图 1 S1 阶段周期运行示意

Fig. 1 Schematic diagram of operational process of each cycle during period S1



化,去除厌氧氨氧化过程产生的硝氮,进一步提高总氮去除率. 阶段 S4 为 SNAD 处理效率提升阶段,在该阶段将水力停留时间从 540 min 缩短至 360 min,提高了总氮去除负荷,SNAD 处理能力得到提高.

### 1.5 分析方法

DO、温度、pH 值均采用 WTW 在线测定仪测定;水样分析中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的测定采用纳氏试剂光度法,  $\text{NO}_2^--\text{N}$  采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  采用紫外分光光度法, COD 采用有机物快速测定仪测定;粒径采用 Mastersize2000 型激光粒度仪测定;胞外聚合物(EPS)中蛋白质(PN)采用考马斯亮蓝法测定,多糖(PS)采用苯酚-硫酸比色法测定;混合液悬浮固体浓度(MLSS)、挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)采用标准重量法测定;其余水质指标的分析方法均采用国标方法<sup>[9]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 SNAD 工艺脱氮性能

R1 和 R2 反应器接种了等量厌氧氨氧化污泥,分别在间歇恒定曝气与间歇梯度曝气策略下启动 SNAD 工艺. 启动过程中 R1 和 R2 反应器进出水氨氮浓度及总氮去除率变化分别如图 2 和 3 所示. 在 S1 ~ S2 阶段,主要通过曝气逐步富集 AOB,启动 CANON 工艺. 而在 S1 阶段, R1 和 R2 均采用了较低的曝气速率,原因在于实验初期 AOB 含量较少,消耗氧气的能力较弱,防止溶解氧积累对 ANAMMOX 菌产生较大冲击,使其活性下降. 在该阶段 R1 和 R2 的出水氨氮含量整体呈逐步下降的趋势,几乎没有亚氮积累,说明该阶段 AOB 含量逐渐增多,且产生的亚氮能被厌氧氨氧化过程全部利用,因此该阶段的主要限速步骤为亚硝化过程. 在 S1 阶段末,出水氨氮含量的下降速率减慢,运行至第 7 d 时 R1 和 R2 的出水氨氮含量基本达到稳定,分析原因在于经过前期增殖,系统内积累了一定的 AOB 含量,耗氧能力提升,但低曝气速率限制了亚硝化活性的进一步增长.

在 S2 阶段, R1 和 R2 反应器的曝气速率提高,如图 2 和 3 所示,在 S2 初期两反应器均产生了亚氮积累,可能是由于虽然曝气速率提高,但 AOB 菌群增殖需要一定世代时间,系统耗氧速率的提升有一定滞后性,从而使反应器内 DO 含量上升,抑制了 ANAMMOX 菌活性,系统利用亚氮的能力减弱,出现亚氮积累的现象. R1 和 R2 中亚氮积累的现象分别出现在 11 ~ 25 d 及 11 ~ 17 d, R2 的持续时间更短,这表明间歇梯度曝气运行下 ANAMMOX 菌受到的氧冲击更小,活性恢复更快. 随着系统运行, AOB

增殖缓解了氧毒,厌氧氨氧化活性恢复,亚氮积累现象消失,亚硝化和厌氧氨氧化逐渐实现良好的耦合,在第 40 d 时 R1 和 R2 的总氮去除率分别增长至 75.56% 和 82.66%. 另外,在 S2 阶段, R2 的出水硝氮含量普遍低于 R1, 第 40 d 时 R1 和 R2 的出水硝氮含量分别为  $14.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $10.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 这表明 R2 系统中的 NOB 含量更少,间歇梯度曝气方式更有利于亚硝化稳定.

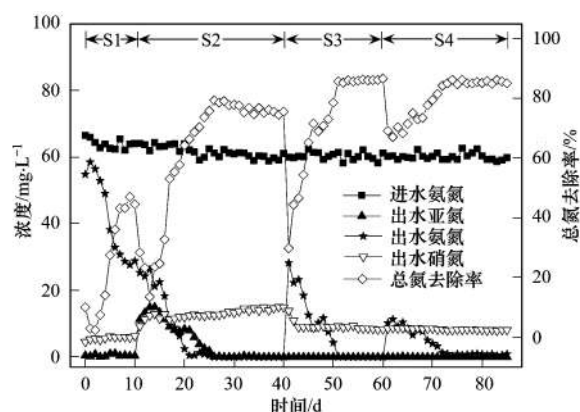


图 2 R1 反应器进出水氮素及总氮去除率  
Fig. 2 Nitrogen variations and total nitrogen removal rate of the R1

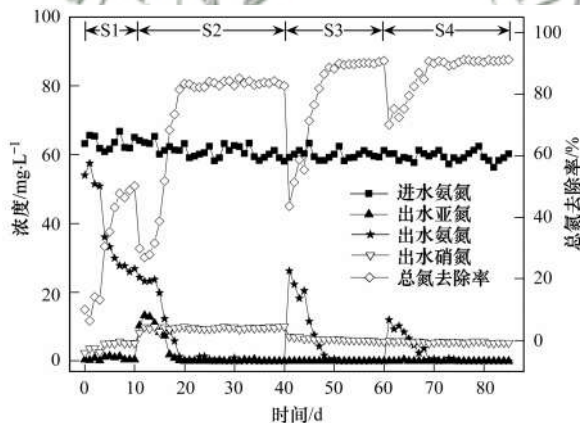


图 3 R2 反应器进出水氮素及总氮去除率  
Fig. 3 Nitrogen variations and total nitrogen removal rate of the R2

在 S3 阶段,向配水中添加了  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的 COD,富集反硝化菌,去除厌氧氨氧化过程产生的硝氮,启动 SNAD 工艺. 如图 4 所示,加入有机碳源后反硝化活性迅速恢复,在第 45 d 时 R1 和 R2 的出水 COD 浓度小于  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , COD 去除率达 90% 左右. 另外,由于反硝化作用,出水硝氮含量迅速下降,在第 43 d, R1 的出水硝氮浓度由上阶段末的  $14.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $8.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , R2 的出水硝氮浓度由上阶段末的  $10.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $7.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 但在 S3 阶段初期,两反应器的出水氨氮含量大幅提高,使 R1 和 R2 的总氮去除率反而显著下降,在第 41 d 由上阶段末的 75.56% 和 82.66% 降至 29.80% 和 43.66%,分析其原因是 COD 的存在影响了自养

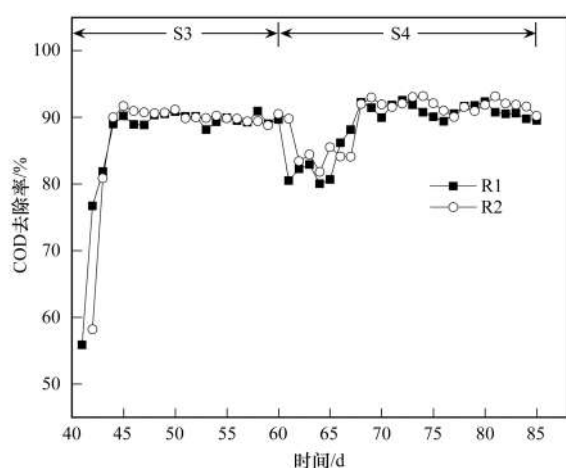


图4 R1和R2反应器COD去除率

Fig. 4 COD removal rate of the two reactors

菌的活性,这与 Wang 等<sup>[10]</sup>的研究一致,迅速生长的异养菌与 AOB 竞争溶解氧<sup>[11]</sup>,抑制 AOB 活性,而反硝化菌也会与 ANAMMOX 菌竞争亚硝酸盐(电子受体)和生存空间,显著抑制 ANAMMOX 菌的生长和活性<sup>[12]</sup>. 但由于 ANAMMOX 菌比反硝化菌具有更强的亚氮亲和力<sup>[13]</sup>,经过一段适应期后,ANAMMOX 菌活性逐渐恢复,R1 和 R2 的出水氨氮含量分别在第 53 d 和第 49 d 重新下降至  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,且由于反硝化作用的引入使 S3 阶段出水硝氮含量明显下降,因此 R1 和 R2 的总氮去除率分别在第 53 d 和第 49 d 重新上升至 86.12% 和 88.65%,明显高于 S2 阶段末的总氮去除率,因此在 S3 阶段通过引入反硝化作用进一步提高了系统的总氮去除率,启动了 SNAD 工艺. 随后两反应器继续运行,在处理效果达到稳定后,进入下一阶段.

在 S4 阶段,将每个周期的反应时间由 9 h 降低至 6 h,阶段初期由于处理时间缩短,出水性能下降,出水氨氮含量增加,但随着系统运行,功能菌的处理效率逐渐提高,总氮去除负荷相应提高,出水氨氮含量重新降至  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下. 在第 85 d 时 R1 和 R2 出水总氮含量分别达到  $8.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $5.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,满足污水排放 1 级 A 标准,R1 和 R2 的总氮去除率分别达到 85.11% 和 90.10%,R1 和 R2 的总氮去除负荷相应达到  $0.203 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.217 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,R2 的处理效果优于 R1. 为了利于比较,两反应器控制了同样的启动天数,但对比图 2 和图 3 可知,R2 的实际启动速度比 R1 更快,主要表现在进入新阶段时,R2 重新达到稳定所需要的时间更短,这表明间歇梯度曝气下 ANAMMOX 菌抵抗 DO 冲击和碳负荷冲击的能力更强,SNAD 启动速度更快. 另外,比较出水硝氮可知,R1 的出水硝氮含量普遍高于 R2,表明 R2 中 NOB 抑制效果更好,

下面通过特征比来进行更直观地表现.

根据 CANON 工艺反应式,总氮去除量  $[\Delta\rho(\text{TN})]$  和硝态氮产生量  $[\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})]$  的理论比值为 8<sup>[14]</sup>, $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  小于 8,反映了 NOB 有活性, $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  越小,说明 NOB 活性越高;若  $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$  大于 8,表明出水硝氮减少,反应器内发生反硝化反应<sup>[15]</sup>. 如图 5 所示,S1 阶段,随着 AOB 增殖,AOB 与 ANAMMOX 菌耦合性能逐渐提高,R1 和 R2 的特征值也迅速提高,在第 10 d 时 R1 和 R2 的特征值分别达到 4.51 和 6.37. 在 S2 阶段初期,曝气速率提高,AOB 活性提高的同时,NOB 迅速增殖,出水硝氮含量增加,又由于厌氧氨氧化活性受到抑制,总氮去除率降低,因此特征值出现较大幅度的下降. 随着反应器运行,硝化菌增殖解除了氧毒,ANAMMOX 菌活性逐渐恢复,特征值重新上升,在第 40 d 时 R1 和 R2 的特征值分别达到了 3.10 和 4.77. 综上可知,S1 ~ S2 阶段,总氮去除率整体是上升的,但由于曝气速率增大,出水硝氮含量增长较快,特征值反而略有下降.

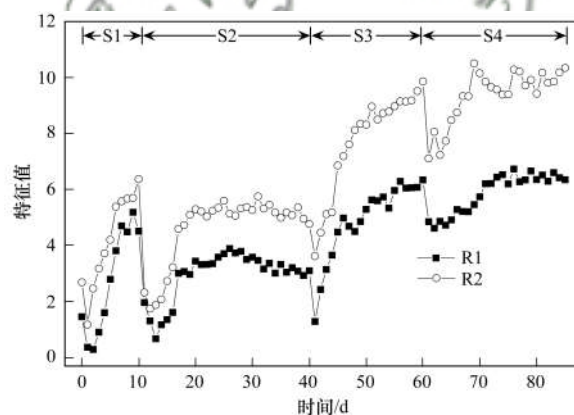


图5 R1和R2反应器特征值变化

Fig. 5 Characteristic ratio of the two reactors

在 S3 阶段初期,由于添加了有机物对系统内自养菌产生了抑制,总氮去除率下降,但反硝化菌迅速生长,去除部分硝氮,使得特征值只出现小幅下降,且随着系统运行,自养菌活性恢复,特征值逐渐回升,在第 60 d 时 R1 和 R2 的特征值分别达到了 6.52 和 8.91. 在 S4 阶段初期,缩短了反应时间,导致处理不彻底,总氮去除率下降,特征值随之下降,但随着功能菌活性和处理效率的提高,出水水质重新满足标准,特征值随之上升,在 S4 阶段末期,R1 和 R2 的特征值分别达到 6.46 和 10.34,这表明在两反应器均已成功启动 SNAD 工艺的情况下,R1 中 NOB 活性较高,影响了亚硝化的稳定性,特征值低于理论值,R2 中 NOB 抑制效果较好,且实现了 CANON 和反硝化的良好耦合,使得特征值高于理



论值。

## 2.2 典型周期的参数变化

图 6 和 7 分别反映了 R1 和 R2 启动成功后(S4 阶段末)一个典型周期的 pH 及 DO 变化。R1 反应器在第一个曝气阶段(0~30 min)溶解氧浓度较低,在  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,而从第二个曝气阶段开始溶解氧含量明显提高,最后两个曝气阶段(240~270 min 和 300~330 min)中溶解氧含量超过了  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,分析原因主要有以下两点:①周期初期除碳反应和硝化反应都需要消耗氧气,但大部分有机碳源在初期快速消耗,后续曝气阶段中基本只有硝化反应利用氧气,氧气利用率降低,反应器中溶解氧含量上升;②前期氨氮浓度高,基质充足,AOB 活性较好,但随着反应进行基质浓度降低,AOB 由于缺少底物活性下降,耗氧能力下降,系统中溶解氧积累,溶解氧浓度升高。

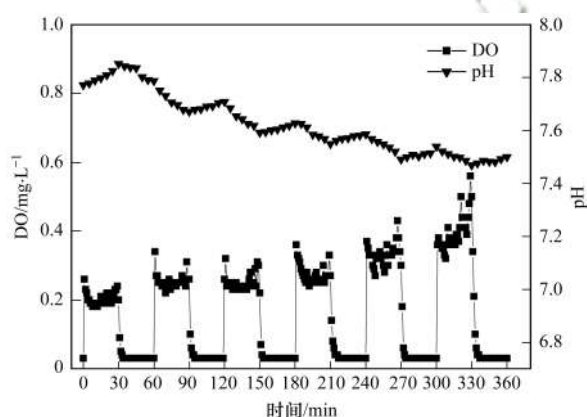


图 6 R1 典型周期的 pH 及 DO 变化

Fig. 6 Variations of pH and DO during a typical cycle of the R1

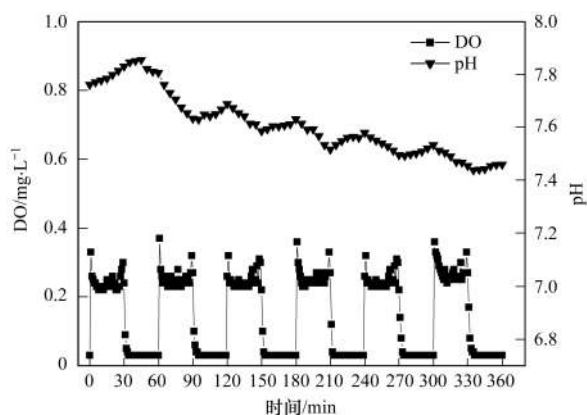


图 7 R2 典型周期的 pH 及 DO 变化

Fig. 7 Variations of pH and DO during a typical cycle of the R2

pH 值的变化也印证了上述分析。由图 6 可知,R1 在首个曝气阶段(0~30 min)pH 值升高,分析其原因在于 SBR 系统开始曝气时先进行除碳反应,异养微生物对有机底物分解代谢和合成代谢形成的  $\text{CO}_2$  被吹脱,pH 值不断上升<sup>[16]</sup>。在随后的曝气阶段

pH 值均出现下降,停曝阶段则触底上升,由下降转为上升的拐点即为“氨谷点”<sup>[17]</sup>,分析其原因在于此时除碳反应基本结束,曝气过程中以产  $\text{H}^+$ 、消耗碱度的亚硝化过程为主,停曝过程中以消耗  $\text{H}^+$ 、产生碱度的厌氧氨氧化和反硝化过程为主。R1 反应器中,周期第 2~6 个曝气阶段的 pH 下降量分别为 0.116、0.116、0.095、0.078 和 0.070,pH 降幅的大小反映了系统中 AOB 活性的变化<sup>[8]</sup>,因此该结果表明 AOB 活性在周期运行中逐渐下降,验证了前文的分析。

与 R1 相比,R2 的溶解氧变化趋势更加规律,各曝气阶段溶解氧含量比较相近,且稳定维持在  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下,分析其原因在于 R2 反应器采用了三级阶梯间歇曝气,在前期提供  $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的高曝气速率,既能满足除碳反应所需,也能充分发挥亚硝化活性,在中期调整曝气速率为  $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,仅供亚硝化过程所需,在后期提供  $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  的低曝气速率,满足了由于底物限制而活性降低的 AOB 菌群的低需氧量,从而控制反应器整个周期的溶解氧含量在一定阈值内,防止 NOB 利用高溶解氧条件迅速增殖。

R2 反应器中,周期第 2~6 个曝气阶段中的 pH 下降量分别为 0.173、0.102、0.115、0.084 和 0.079,pH 降幅同样逐渐减小,但各阶段 pH 下降量普遍高于 R1,这表明 R2 反应器中亚硝化活性更高,另外,R2 在停曝阶段的 pH 上升量也基本高于 R1,可能是由于亚硝化产物是厌氧氨氧化过程的基质,而 R2 反应器充分发挥了亚硝化活性、产生  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,使厌氧氨氧化速率不受底物限制,厌氧氨氧化活性随之提高。因此与间歇恒定曝气相比,间歇梯度曝气使供氧量更贴近 SNAD 系统的需氧量,更加充分地发挥了亚硝化和厌氧氨氧化活性。

## 2.3 不同阶段 EPS 及颗粒粒径变化

胞外聚合物(EPS)主要由蛋白(PN)和多糖(PS)组成,是微生物在其生长过程中分泌的黏性物质,存在于微生物细胞外和生物聚集体内,在促使细胞“凝聚”和“粘合”方面发挥着重要功能<sup>[18,19]</sup>。其中,PN 的电负性和疏水性可以促进颗粒的形成和稳定性<sup>[20,21]</sup>;PS 交联结构所产生的凝胶性能可以促进细胞聚集<sup>[18,22]</sup>。有研究表明,PN/PS 可以反映颗粒污泥的稳定性,PN/PS 越高,意味着颗粒污泥沉降性能和稳定性越好<sup>[23]</sup>。对厌氧氨氧化系统而言,影响聚集能力的 EPS 是十分重要的参数,其原因在于:①厌氧氨氧化菌生长缓慢是厌氧氨氧化工艺应用的关键限制因素。而研究表明,ANAMMOX 菌的活性明显依赖于细菌密度,细菌密度越高,生长速度

越快<sup>[24,25]</sup>;②固相分离是活性污泥系统的关键问题,特别对于生长缓慢的 ANAMMOX 菌,有效滞留反应器内原有微生物是十分重要的,这要求污泥具有良好的聚集性和沉降性;③有研究表明,细菌密度越高,对环境的耐受能力也会增强,这有利于克服厌氧氨氧化工艺应用的另一个限制因素——对环境变化敏感<sup>[20]</sup>. 本研究对 SNAD 颗粒启动期间的 EPS 及颗粒粒径的变化规律进行了研究.

如图 8 和 9 所示分别为 R1 和 R2 反应器 PN、PS 及 PN/PS 的变化趋势. 在 S1 和 S2 阶段,随 R1 和 R2 反应器运行,微生物活性逐渐提高,PN 及 PS 含量随之逐渐增长,但 PN/PS 值整体呈现下降趋势,分析认为是由于初始接种污泥为厌氧氨氧化污泥,决定其聚集能力的关键成分为 PN<sup>[20,26,27]</sup>,在 S1~S2 阶段通过曝气在系统中富集 AOB,而决定 AOB 菌群聚集能力的关键成分是 PS<sup>[28]</sup>,其中 PS 含量通常高于 PN 含量<sup>[29,30]</sup>,因此 PN/PS 值随着硝化速率增加而降低,这与 Sheng 等<sup>[19]</sup>的研究结果一致.

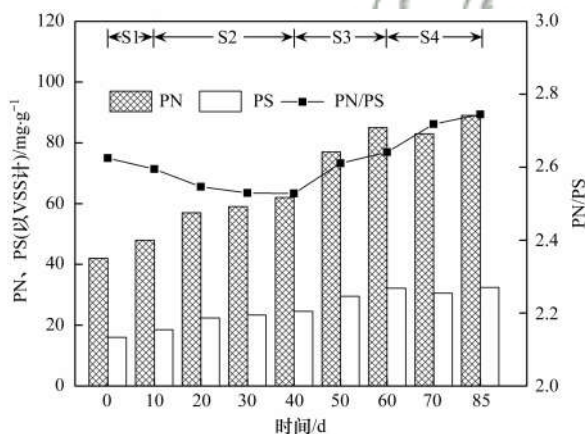


图 8 R1 反应器中 EPS 含量变化

Fig. 8 Variations of the EPS contents in the R1

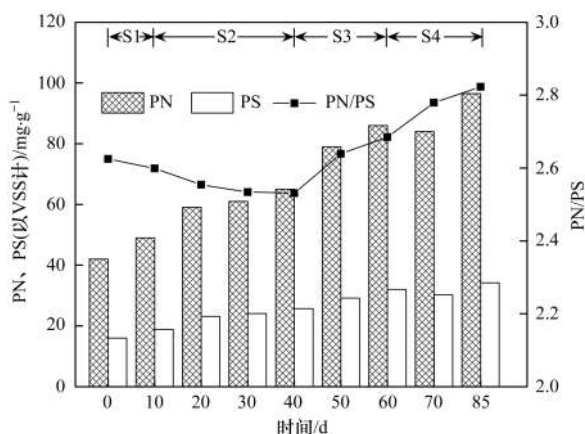


图 9 R2 反应器中 EPS 含量变化

Fig. 9 Variations of the EPS contents in the R2

在 S3 阶段 R1 和 R2 反应器中 PN 和 PS 含量增长较快,PN/PS 值也有较大幅度增长,可能是由于有

机物可以促进 EPS 分泌<sup>[31]</sup>,且反硝化菌的 EPS 可以提高厌氧氨氧化菌活性,促进厌氧氨氧化菌分泌更多的 PN<sup>[32]</sup>. 在 S4 阶段前期 (60~70 d),PN 和 PS 的含量略有下降,分析原因是该阶段缩短了反应时间,每天运行的周期数增多,对污泥淘洗的次数随之增加,因此在此期间,污泥浓度略有下降,相应地 EPS 含量也有所降低. 在 S4 阶段后期 (70~85 d),由于前期沉淀性能不好的污泥已基本已排出系统, EPS 含量不再下降,且由于该阶段水力停留时间缩短,污泥的基质负荷提高,底物更加充足,各主要功能菌活性进一步增加, EPS 含量也有较大提高,这与 Chen 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致,其发现随着基质容积负荷增加, EPS 产生速率得到提高. 在 SNAD 工艺稳定运行后, R1 和 R2 的 EPS 含量 (以 VSS 计) 分别达到 121.45 mg·g<sup>-1</sup> 和 130.67 mg·g<sup>-1</sup>, PN/PS 值则分别达到 2.745 和 2.823. 通过间歇梯度曝气启动 SNAD 工艺, EPS 含量和 PN/PS 相对处于较高水平,厌氧氨氧化菌活性更高,颗粒稳定性和沉淀性能更强.

如图 10 所示为 R1 和 R2 启动过程中的颗粒粒径变化. R1 和 R2 起始接种的厌氧氨氧化污泥粒径分别为 213.7 μm 和 210.2 μm,基本处于相同水平. 在 S1 阶段两反应器的颗粒粒径均有所下降,分析原因在于 S1 阶段提供了曝气,污泥颗粒经过曝气吹脱粒径下降. S2 阶段前期 (10~20 d) 由于曝气量的提高,颗粒粒径继续下降,且下降速度更快. 但 S2 阶段后期 (20~40 d) 两者的颗粒粒径开始上升,可能是由于经过前期吹脱污泥粒径变小,但是颗粒污泥更加密实,有利于减少较高 DO 对 ANAMMOX 菌的冲击<sup>[34]</sup>,ANAMMOX 菌逐渐恢复活性,另外由于吹脱下来的絮状污泥的存在,提高了系统内菌种对 DO 的利用率<sup>[8]</sup>,进一步促进了 AOB 的增殖,系统内生物量增加, EPS 分泌量也随功能菌活性提升而增加,因此污泥颗粒粒径开始上升. 在第 40 d 时 R1

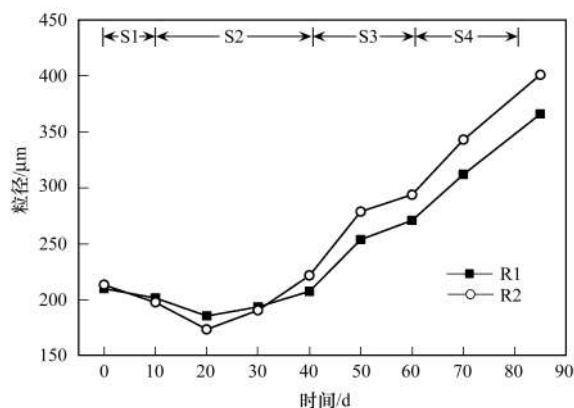


图 10 R1 和 R2 反应器中污泥平均颗粒粒径

Fig. 10 Mean particle size of the sludge of the two reactors



和 R2 的颗粒粒径分别达到 208.4  $\mu\text{m}$  和 221.7  $\mu\text{m}$ , 这表明间歇梯度曝气运行更有利于功能菌发挥活性, 促进粒径增长. 在 S3 阶段前期, 污泥粒径有较大幅度的提升, 可能是由于进水中添加了有机物, 有研究表明<sup>[20]</sup>, 适量有机物可以为细菌提供生长所需的营养物质, 促进细胞分泌胞外聚合物, 加快污泥颗粒化. 在 S4 阶段, 颗粒粒径同样显著增长, 可能是由于缩短了水力停留时间, 系统淘洗次数增加, 排除了更多沉降性能差的絮状污泥和小颗粒, 因此污泥的平均粒径增加. 启动成功后 R1 和 R2 的颗粒粒径分别达到 365.8  $\mu\text{m}$  和 402.1  $\mu\text{m}$ , 通过间歇梯度曝气启动 SNAD 工艺时粒径增长速率更快, 颗粒粒径更大.

### 3 结论

(1) 同样的运行天数下, R2 在各个阶段恢复稳定所需的时间更短, 表明间歇梯度曝气下 ANAMMOX 菌抵抗 DO 冲击和碳负荷冲击的能力更强, SNAD 启动速度更快.

(2) 启动过程中 R2 的特征值  $\Delta\rho(\text{TN})/\Delta\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$  普遍高于 R1, 且成功启动后 R1 和 R2 的特征值分别达到 6.46 和 10.34, 表明 R1 中 NOB 活性较高, 使特征值低于理论值, R2 中 NOB 抑制效果较好, 且实现了 CANON 和反硝化的良好耦合, 使特征值高于理论值.

(3) R2 的周期 DO 波动稳定, 而 R1 的周期 DO 整体逐渐提高, 周期末达到 0.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以上, 表明间歇梯度曝气有利于控制稳定的低 DO 环境, 抑制 NOB.

(4) SNAD 成功启动后 R1 和 R2 反应器内 PN/PS 值分别达到 2.745 和 2.823, 颗粒粒径分别达到 365.8  $\mu\text{m}$  和 402.1  $\mu\text{m}$ , 表明间歇梯度曝气下颗粒的稳定性和沉降性更强, 粒径增长更快.

### 参考文献:

- [1] Chen H H, Liu S T, Yang F L, *et al.* The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(4): 1548-1554.
- [2] Peng D C, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Effects of oxygen supply methods on the performance of a sequencing batch reactor for high ammonium nitrification [J]. *Water Environment Research*, 2000, **72**(2): 195-200.
- [3] 李冬, 陶晓晓, 李占, 等. 常温 SBR 亚硝化快速启动及优化试验研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1653-1659.
- [4] Li D, Tao X X, Li Z, *et al.* Research on the rapid start-up and optimization of parameters for nitrosation at room temperature [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(6): 1653-1659.
- [5] Li X M, Xiao Y, Liao D X, *et al.* Granulation of simultaneous partial nitrification and anammox biomass in one single SBR system [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, **163**(8): 1053-1065.
- [6] Hanaki K, Wantawin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in a suspended-growth reactor [J]. *Water Research*, 1990, **24**(3): 297-302.
- [7] Blum J M, Jensen M M, Smets B F. Nitrous oxide production in intermittently aerated Partial Nitritation-Anammox reactor: oxic  $\text{N}_2\text{O}$  production dominates and relates with ammonia removal rate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **335**: 458-466.
- [8] Qiu S K, Hu Y S, Liu R, *et al.* Start up of partial nitritation-anammox process using intermittently aerated sequencing batch reactor: Performance and microbial community dynamics [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 1188-1198.
- [9] 李冬, 高雪健, 张杰, 等. 不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 829-836.
- [10] Li D, Gao X J, Zhang J, *et al.* Effect of aeration density on start-up of CANON process [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 829-836.
- [11] 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.
- [12] Wang D, Wang G W, Yang F L, *et al.* Treatment of municipal sewage with low carbon-to-nitrogen ratio via simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonia oxidation, and denitrification (SNAD) in a non-woven rotating biological contactor [J]. *Chemosphere*, 2018, **208**: 854-861.
- [13] Jenni S, Vlaeminck S E, Morgenroth E, *et al.* Successful application of nitritation anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios [J]. *Water Research*, 2014, **49**: 316-326.
- [14] Wang G, Xu X C, Gong Z, *et al.* Study of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in an intermittent aeration membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(5): 632-641.
- [15] Ahn Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(8): 1709-1721.
- [16] Third K A, Sliekers 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.
- [17] 胡石, 甘一萍, 张树军, 等. 一体化全程自养脱氮 (CANON) 工艺的效能及污泥特性 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 111-117.
- [18] Hu S, Gan Y P, Zhang S J, *et al.* Performance and sludge characteristics of the CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 111-117.
- [19] 张敏, 姜滢, 温婧玉, 等. 环境温度下 SBR 实现稳定部分亚硝化研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(12): 4509-4515.
- [20] Zhang M, Jiang Y, Wen J Y, *et al.* Achieving stable partial nitrification in SBR at ambient temperature [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(12): 4509-4515.
- [21] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 95-100.
- [22] Sun H W, You Y J, Zhao H L, *et al.* Inhibitory effect of free ammonia on the activity of nitrifying bacteria and recoverability [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 95-100.
- [23] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(9): 623-633.
- [24] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 1089-1099.

- 882-894.
- [20] 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**(15): 51-62.
- [21] 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.
- [22] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The role of cellular polysaccharides in the formation and stability of aerobic granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2001, **33**(3): 222-226.
- [23] Sanin S L, Sanin F D, Bryers J D. Effect of starvation on the adhesive properties of xenobiotic degrading bacteria [J]. *Process Biochemistry*, 2003, **38**(6): 909-914.
- [24] Lu H F, Zheng P, Ji Q X, *et al.* The structure, density and settlability of anammox granular sludge in high-rate reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 312-317.
- [25] Ni S Q, Lee P H, Fessehaie A, *et al.* Enrichment and biofilm formation of anammox bacteria in a non-woven membrane reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(6): 1792-1799.
- [26] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [27] Jiang T, Zhang H, Qiang H, *et al.* Start-up of the anammox process and membrane fouling analysis in a novel rotating membrane bioreactor [J]. *Desalination*, 2013, **311**: 46-53.
- [28] Jemaat Z, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Partial nitrification and *o*-cresol removal with aerobic granular biomass in a continuous airlift reactor [J]. *Water Research*, 2014, **48**: 354-362.
- [29] Shen L W, Yao Y, Meng F G. Reactor performance and microbial ecology of a nitrification membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **462**: 139-146.
- [30] Zhang Z J, Chen S H, Wang S M, *et al.* Characterization of extracellular polymeric substances from biofilm in the process of starting-up a partial nitrification process under salt stress [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **89**(5): 1563-1571.
- [31] Miao L, Zhang Q, Wang S Y, *et al.* Characterization of EPS compositions and microbial community in an Anammox SBBR system treating landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 108-116.
- [32] 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 等. ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2931-2940.
- Li H J, Peng D C, Chen G Y, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX and the spatial distribution of EPS in ANAMMOX granules [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2931-2940.
- [33] Chen T T, Zheng P, Li D S. Growth and metabolism characteristics of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria aggregates [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(12): 5575-5583.
- [34] 李冬, 崔少明, 梁瑜海, 等. 溶解氧对序批式全程自养脱氮工艺运行的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1131-1138.
- Li D, Cui S M, Liang Y H, *et al.* The effect of dissolved oxygen on running CANON process in sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1131-1138.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                             |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM <sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....                                                 | ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)         |
| Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain .....                                | ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)             |
| Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze .....                                                                                             | WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)           |
| Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM <sub>2.5</sub> in Housewives in Rural Shanghai .....                                                                             | LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)      |
| Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source .....                                                                                                                                    | JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)     |
| Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment .....                                                            | ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)   |
| VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises .....                                                                                                                         | ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)           |
| Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang .....                                                                                  | LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)             |
| Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu .....                                                                                             | FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)    |
| Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains .....                                                                 | ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)        |
| Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River .....                                                                               | FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)     |
| Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn .....                                                       | CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)       |
| Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province .....                                                                                       | LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)     |
| Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization .....                                                     | CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)                                     |
| Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau .....                                                                                          | LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)              |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                                    | CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)          |
| Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....                                                                                           | HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)      |
| Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland .....                                                                                                         | FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)         |
| Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake .....                                                                                      | GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)       |
| Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake .....                                                                           | FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)        |
| Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed .....                                                        | LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)   |
| Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area .....                                                                                | WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)             |
| Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i> .....                                                                                              | WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)         |
| Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability .....                                                                                                   | LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)         |
| Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments .....                                            | LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)         |
| Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen .....                                                                                                                         | CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)             |
| Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems .....                                                                                                          | WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)           |
| Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process .....                                                                                                                 | LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)            |
| Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode .....                                                                              | WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)           |
| Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System .....                                                                                                                          | LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)            |
| Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances .....                                                                        | YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)           |
| Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018 .....                                                                            | LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)       |
| Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model .....                                                                                                          | XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)            |
| Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China ..... | LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)             |
| Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds .....                                                                                                                   | WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)          |
| Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field .....                                                                                                        | YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)                      |
| Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas .....                                                                                                                                     | WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)           |
| Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil .....                                                                                                            | CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)   |
| Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils .....                                                                                            | WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)          |
| Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area .....                                                                                                     | HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)               |
| Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China .....                  | WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)                   |
| Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                                         | CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570) |
| Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                                                                                  | ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)       |
| Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                      | MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)       |
| Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China .....                                       | HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)          |
| Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....                                                                     | DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)     |
| Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil .....                                                                                                                   | LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)        |
| Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China .....                                                                         | CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)        |
| Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection .....                                                                                                       | LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)                   |
| INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40 .....                                                                                                                                                           | (5659)                                                             |